

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

### 冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期  
Vol.42 No.7

目次

|                                                              |                                                            |
|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素 .....                                       | 李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)                         |
| 新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM <sub>2.5</sub> 的影响 .....               | 逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)                               |
| 基于网格的长三角 PM <sub>2.5</sub> 分布影响因素及交互效应 .....                 | 黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)                                       |
| ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用 .....                           | 李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)            |
| 中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析 .....                                | 赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 李志健, 王格慧 (3127)       |
| 四川盆地 PM <sub>2.5</sub> 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析 .....             | 李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)                     |
| 河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用 .....                           | 邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)                              |
| 九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应 .....                              | 黄亚玲, 黄金良 (3156)                                            |
| 滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性 .....                                   | 袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)                               |
| 白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析 .....                          | 张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)            |
| 镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价 .....                     | 原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)           |
| 洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险 .....                                | 刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)                |
| 苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价 .....                              | 白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)                   |
| 武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价 .....                          | 朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)                              |
| 升金湖湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析 .....                                | 崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝洸, 高祥 (3223)                                |
| 青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析 .....                                      | 寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)                |
| 三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析 .....                                | 何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨安琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)                    |
| 哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子 .....                              | 路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)                           |
| 湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应 .....                                 | 居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)                                |
| 补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征 .....                                | 赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海森, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)              |
| 蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征 .....                                   | 李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)                |
| 长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例 .....                          | 马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)                         |
| 长江下游居民区降水地表径流的污染特征 .....                                     | 郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)                              |
| 潮河流域降雨径流事件污染物输出特征 .....                                      | 包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)                                         |
| 不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响 .....                               | 单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)              |
| 基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估 .....                                | 秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)                          |
| 蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性 .....                                   | 李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸣 (3348)                                  |
| 污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布 .....                              | 王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)                                        |
| 基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因 .....                             | 杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)                   |
| 石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析 .....                           | 唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月, 陈怡雯, 周帅 (3375)                 |
| 一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水 .....                           | 吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)                          |
| 外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能 .....                                   | 唐义, 马懿文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)                                |
| 臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响 .....                             | 吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)                 |
| 间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷 .....                              | 张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张富国, 张杰 (3405)                               |
| 提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响 .....                             | 古铂铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)                         |
| 低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析 .....                            | 钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)                                  |
| 矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化 .....                                      | 张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)                                  |
| 2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氮排放的影响 .....                      | 王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)                   |
| 麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氮挥发排放的影响 .....                            | 韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)                          |
| 水肥管理对热带地区双季稻田 CH <sub>4</sub> 和 N <sub>2</sub> O 排放的影响 ..... | 李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458) |
| 耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径 .....                                  | 杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)                |
| 铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响 .....                                  | 赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)                        |
| 农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价 .....                          | 陈莹, 刘汉燚, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)                               |
| 亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例 .....                   | 刘旭, 王训, 王定勇 (3507)                                         |
| 深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征 .....                                | 林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)                       |
| 同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选 .....                                   | 周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)                |
| 两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复 .....                                | 袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)                              |
| 青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征 .....                                    | 刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)               |
| 成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析 .....                                | 刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)                     |
| 土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异 .....                                  | 席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)                     |
| 《环境科学》征订启事 (3315)                                            |                                                            |
| 《环境科学》征稿简则 (3357)                                            |                                                            |
| 信息 (3391, 3441, 3564)                                        |                                                            |

# 成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析

刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权\*

(四川农业大学资源学院, 成都 611130)

**摘要:** 掌握化肥施用强度的空间分布及影响因素, 对施肥的精准管理和污染防治意义重大. 以往研究多限于人为因素的探讨而缺乏自然地理因素对化肥施用强度空间分布的影响分析. 基于成都平原23 492个点点位的化肥调研数据, 结合地统计学方法和地理信息系统(GIS)技术, 探究该区域2010~2015年均氮和磷化肥施用强度的空间分布特征及影响因素. 结果表明: ①研究区2010~2015年均氮和磷化肥施用强度总体处于120~360 kg·hm<sup>-2</sup>和60~180 kg·hm<sup>-2</sup>的中低风险强度. 高风险强度主要分布在郫都、彭州、什邡、龙泉驿和金堂等粮(果)蔬种植区, 相对低值区多分布在南部和东北部; ②氮和磷化肥施用强度的块金系数为66.17%和41.60%, 其空间分布受结构性和随机性因素共同作用决定, 呈中等空间自相关性; ③人为和自然因素均对氮和磷化肥施用强度的空间分布影响显著. 种植作物类型(细分类)能独立解释12.90%和25.10%的施氮和施磷空间变异, 是影响氮和磷施用强度空间分布的主控因子; 成土母质的重要性仅次于种植作物类型, 且对于施磷强度独立解释能力约是施氮强度的3.6倍. 在种植作物类型起主要决定作用时, 成土母质仍深刻制约和影响研究区氮和磷化肥施用强度的空间分布. 因此, 进行化肥施用管理和环境风险分析时需重点考虑种植作物类型和成土母质的综合作用, 在磷肥施用方面更应关注成土母质的影响.

**关键词:** 成都平原; 化肥施用强度; 种植作物类型; 成土母质; 空间分布; 影响因素

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3555-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007288

## Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain

LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, ZHAO Hai-lan, FANG Hong-yan, DENG Xi, LI Qi-quan\*

(College of Resources, Sichuan Agriculture University, Chengdu 611130, China)

**Abstract:** The spatial distribution of fertilization intensity and its influencing factors are significant for the accurate management of fertilization and pollution prevention and control. Previous studies are mostly limited to the discussion of human factors that influences the spatial distribution of fertilization intensity while ignoring natural geographical factors. Based on the chemical fertilizer survey data collected from 23 492 sites in Chengdu Plain and combined with Geostatistics analysis and Geographic Information System (GIS) technology, the spatial distribution characteristics and influencing factors of average nitrogen and phosphorus fertilizer application intensity from 2010 to 2015 in this region were explored. The results show that: ① the average annual application intensity of nitrogen and phosphorus fertilizer in the study area from 2010 to 2015 is generally in the low and medium risk intensity of 120-360 kg·hm<sup>-2</sup> and 60-180 kg·hm<sup>-2</sup>. The high risk intensity is mainly distributed in the grain (fruit) and vegetable growing areas such as Pidu, Pengzhou, Shifang, Longquanyi and Jintang, while the relatively low value areas are mostly distributed in the south and northeast. ② the nugget coefficients of nitrogen and phosphorus fertilizer application intensities are 66.17% and 41.60%. Their spatial distribution is determined by structural and random factors, showing a moderate spatial autocorrelation. ③ both human and natural factors have significant effects on the application intensity of nitrogen and phosphorus fertilizer. The crop type (fine classification) can explain the spatial variation of nitrogen fertilizer and phosphorus fertilizer respectively by 12.90% and 25.10%, which is the main controlling factor affecting the spatial distribution of nitrogen and phosphorus application intensity; the importance of soil parent material is second only to the planting crop type, and the independent explanation ability of phosphorus application intensity is about 3.6 times higher than that of nitrogen application intensity. When the type of planting crop plays a decisive role, the soil parent material still deeply restricts and affects the spatial distribution of nitrogen and phosphorus fertilizer application intensity in the study area. Therefore, the comprehensive effects of planting crop types and soil parent materials should be considered in fertilization management and environmental risk analysis, and the effects of soil parent material should also be taken into account in the application of phosphate fertilizer.

**Key words:** Chengdu Plain; fertilization intensity; crop type; soil parent material; spatial distribution; influencing factors

氮(N)和磷(P)是植物生长的基本元素, 对植物生长和作物产量高低具有决定性作用<sup>[1-4]</sup>. 随着社会经济的发展和农业生产集约化程度的提高, 为保障和提高作物产量, 氮和磷化肥被大量增施, 其中一部分通过地表径流和土壤侵蚀等途径, 引起水体富营养化和土壤污染等问题<sup>[5-7]</sup>. 化肥施用强度增

加是引起我国农业化肥施用量增长的主要原因<sup>[8]</sup>, 近年来, 大量氮和磷化肥施用所带来的农业面源污

收稿日期: 2020-07-29; 修订日期: 2020-12-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800605); 四川省科技厅应用基础重大前沿项目(2018JY0002)

作者简介: 刘奇鑫(1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农业面源污染识别与防控, E-mail: liuqixin996@163.com

\* 通信作者, E-mail: liqq@reis.ac.cn

染风险不断增加,引起了学术界的广泛关注<sup>[9~12]</sup>. 因此,探究区域化肥施用中氮和磷施用强度的空间分布及影响因素,对于农田化肥施用管理以及区域农业面源污染的识别和防控具有重要意义.

当前已有许多学者在县域、市域、省域和国家尺度上对我国化肥施用强度的空间分布特征及影响因素进行了大量研究<sup>[13~15]</sup>,区域差异、农业纯收入、农业生产结构、农业受教育程度、种植规模、施肥技术和城镇化率等被认为是影响化肥施用强度空间分布的重要因素<sup>[16,17]</sup>. 究其原因,该类研究主要通过统计年鉴获取施肥相关数据,进而根据特定行政区域内的化肥施用总量和种植总面积求取不同尺度行政单元内的平均化肥施用强度进行分析研究,易忽视行政单元内部化肥施用强度的差异,故而对施肥强度空间分布特征的研究多限于人为因素方面的探讨,缺乏自然地理因素和人为因素对于化肥施用强度的综合影响分析. 因此,本文选择城市化进程发展迅猛和农业集约化程度较高的成都平原作为研究区,综合探究氮和磷化肥施用强度空间分布特征及影响因素,具有新的启发和参考.

成都平原作为一个经历了快速城市化的重要粮食生产区<sup>[18]</sup>,为研究自然和人为交错影响下农田氮和磷化肥施用强度的空间分布提供了理想区域. 以往对于该地区氮和磷的空间分布研究多集中于土壤氮磷的时空分异特征和影响因素分析<sup>[19,20]</sup>. 在氮和磷化肥施用方面,以施肥与种植作物的耦合关系、施肥与栽培技术、土壤养分与施肥关系等微观层面研究居多<sup>[21~23]</sup>. 仅有少数学者对成都平原区的主要作物的施肥量状况、化肥施用平均强度及化肥施用环境风险在空间分布上做了统计和预测<sup>[17, 24, 25]</sup>,但综合自然和人为因素进一步分析氮和磷化肥施用强度空间分布特征的研究鲜见报道. 鉴于此,本文以成都平原这一较大尺度的自然环境单元作为研究区域,结合地统计学方法和 GIS 技术,模拟区域内氮和磷化肥施用强度空间分布,通过量化土地利用类型、种植作物类型、土壤类型、成土母质、高程、河流距离和城镇距离对其影响的相对重要性,进一步探究区域内氮和磷化肥施用强度在重要环境因素综合作用下的空间分布特征,以期在成都平原农田化肥施用管理、种植结构优化以及农业面源污染识别防控提供有效参考,在一定程度上弥补化肥施用强度空间分布和影响因素研究的不足.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于中国四川盆地西部的成都平原,地

理坐标介于 103°25' ~ 104°26'E, 30°19' ~ 31°31'N 之间,全区面积约为 7 554.36 km<sup>2</sup> [图 1(a) 和图 1(b)]. 区内地势总体平缓,海拔在 415 ~ 766 m 之间 [图 1(b)]. 该区地属亚热带湿润季风气候,年均气温约为 16℃,年平均降水量在 1 000 mm 左右. 区域内河网密布,主要有金马河、西河和江安河、府河四条岷江水系和沱江水系毗河、青白江、湔江和石亭江流经境内 [图 1(c)]. 成土母质以岷江冲积物为主,包括灰色冲积物、灰棕冲积物、紫色岩风化物和中下更新统老冲积物等. 在长期水耕熟化过程中,区内土壤多发育形成成为水稻土. 由于经济的快速发展和城市化进程的加快,城市附近的农业用地强度越来越高<sup>[26,27]</sup>. 研究区内最终形成了耕地为主,园地和农林为辅的多种农业用地方式. 其中,稻-麦轮作和稻-油(菜)轮作是成都平原主要的作物轮作方式<sup>[28]</sup>.

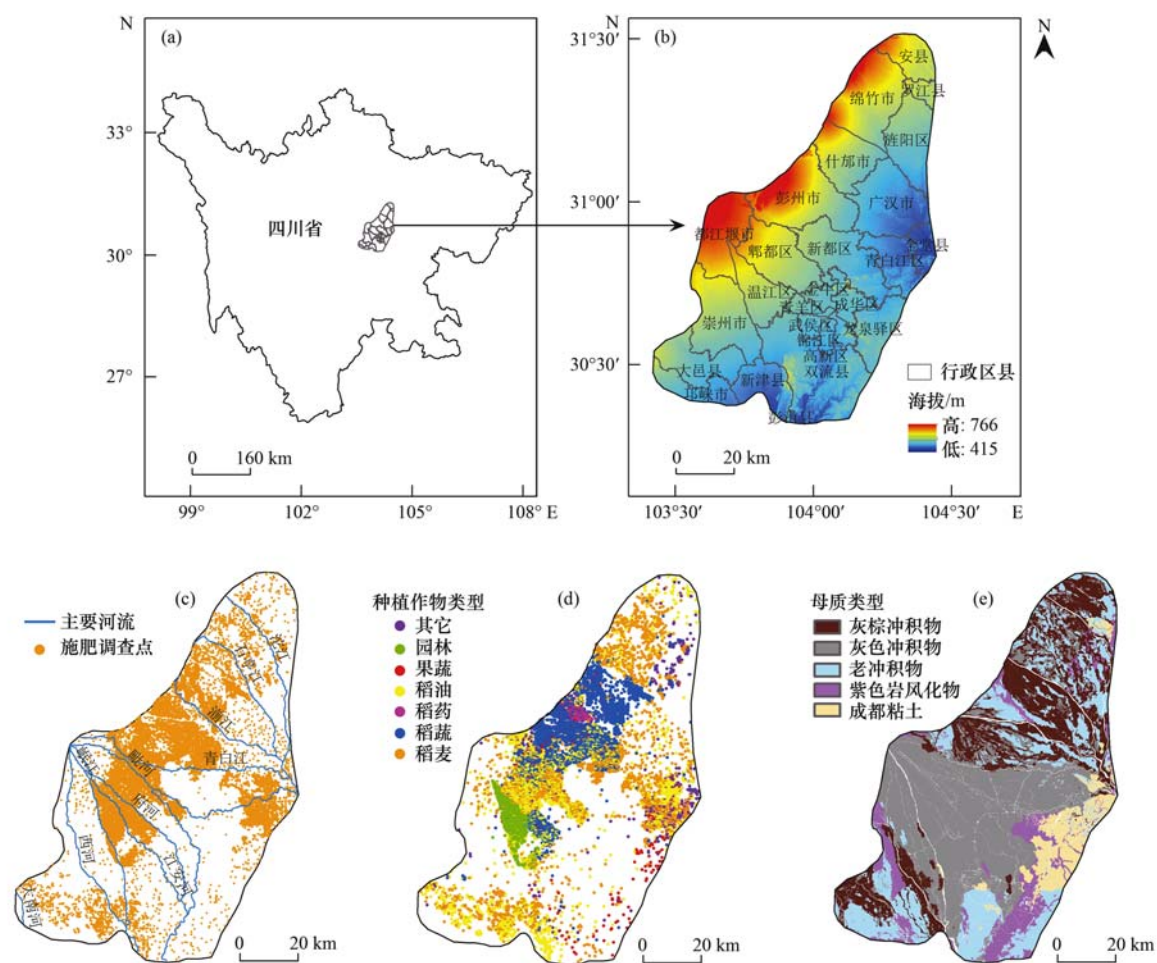
### 1.2 数据来源与处理

#### 1.2.1 施肥数据处理

本文数据来源于 2010 ~ 2015 年的四川省测土配方施肥项目县的农户施肥情况调查,在兼顾空间分布均匀性和样点代表性的基础上,共取得研究区范围内 23 492 个点点位的施肥调查样点数据 [图 1(c)]. 施肥调查方法主要按照农业部测土配方施肥技术规范中提出的样本抽取方法,采用随机取点结合测土配方施肥项目中土壤骨干样或农化样采集和田间试验示范来选择农户. 农户施肥情况调查采用面访式调查. 由于邻近田块,可获得直观的信息和一定的校验,所以采用该方法能较好地保证回答率和数据的可靠性. 调查时详细记录了点位地块上的化肥年施折纯量、地块面积、种植作物类型、种植制度、成土母质和土壤类型等信息. 本研究对化肥施用强度的定义为:地块化肥年施折纯总量/地块面积,即单位地块面积的化肥年施折纯量. 最终,计算求得研究区内调研地块 2010 ~ 2015 年均氮和磷化肥施用强度,单位是 kg·hm<sup>-2</sup>.

#### 1.2.2 影响因素处理

鉴于氮和磷化肥施用与土壤氮磷含量的密切关系,参考影响化肥施用强度空间分布的因素<sup>[16,17]</sup>和土壤氮磷空间分布的自然影响因素<sup>[19,20]</sup>,综合选择成土母质、土壤类型、土地利用类型、种植作物类型、高程、河流距离和城镇距离共 7 个因子,探究其对氮和磷化肥施用强度空间分布特征的影响. 根据调研点位上的种植作物可分成果蔬、粮油和园林这 3 大类,并对粮油作物进一步分类. 土地利用类型参考地上种植作物的类型和土地利用分类的国家标准,根据实际情况分为旱地、水田、果园地和其它园林共 4 类. 河流距离因子的计算是利用分辨率为 30 m 的成



(a) 研究区位置；(b) 海拔(DEM)和行政区分布；(c) 施肥调查点位分布；(d) 种植作物类型点位分布；(e) 成土母质类型分布

图1 研究区位置示意及相关信息

Fig. 1 Location of the study area and related information

都平原数值高程模型(DEM)数据进行水文分析,提取研究区河流后结合区域实际水系分布进行校正,再通过 ArcGIS 空间分析模块中的欧氏距离工具生成河流距离栅格数据,具体方法参考文献[29~31].城镇距离是从成都平原2015年土地利用现状数据中提取出二级地类中的城镇建设用地,然后采用 ArcGIS 空间分析模块中的欧氏距离工具生成研究区内城镇距离的栅格数据.以上所有选用因子的栅格数据空间分辨率统一为30 m,坐标系统一为Krasovsky\_1940\_Albers 投影坐标系.最后根据施肥样点从相应的栅格地图中提取出各点位的河流距离和城镇距离信息.

### 1.3 统计分析方法

基于2010~2015年均氮和磷化肥施用强度数据,利用GS+9.0建立半变异函数,分析氮和磷化肥施用强度的空间结构.根据决定校正系数 $R^2$ 最大、残差最小原则确定最优理论插值模型,生成2类施肥指标的空间分布趋势.再根据半方差拟合模型和参数,在ArcGIS 10.5中利用普通克里格法进行

空间插值,探究氮和磷化肥施用强度空间分布格局.利用一般线性模型的决定校正系数 $R^2$ 揭示各影响因素的相对重要性.在回归模型构建中,采用哑变量法<sup>[32]</sup>对土地利用类型、种植作物类型、成土母质和土壤类型这4个分类变量进行赋值,评价各影响因素的相对重要性.在SPSS 25.0软件中利用方差分析进一步探究重要因素对氮和磷化肥施用强度差异的综合影响.

## 2 结果与分析

### 2.1 施肥强度基本统计特征

如表1所示,参考田若衡等<sup>[24]</sup>的研究中关于四川省氮和磷化肥施用强度的环境风险等级分类方法,将研究区氮和磷化肥施用强度分为安全、低风险、中风险和高风险强度这4个强度风险等级.统计发现,研究区2010~2015年均氮和磷化肥施用强度总体集中在 $120\sim360\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $60\sim180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的中低风险水平,施氮强度和施磷强度的平均值分别为 $262.11\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $146.83\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,绝大部分

区域超过四川省氮和磷化肥的生态安全阈值. 氮和磷化肥施用强度的变异系数分别为 36.70% 和 69.68%, 具有中等程度变异性, 且施磷强度的变异程度明显高于施氮. 正态分布的检验结果显示, 施磷

原始数据呈正偏斜趋势, 有明显的正峰值, 施氮强度的原始数据偏度和峰度相对较小, 在  $-1 \sim 1$  范围内, 施氮原始数据和对数转换后的施磷数据都可满足后续数据分析.

表 1 研究区农田氮和磷化肥施用强度统计特征<sup>1)</sup>

| Table 1 Statistical characteristics of nitrogen and phosphorus fertilization intensity in farmland in the study area |           |                                  |            |        |        |      |            |       |       |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|----------------------------------|------------|--------|--------|------|------------|-------|-------|-------|
| 指标                                                                                                                   | 样本量<br>/个 | 均值 ± 标准差<br>/kg·hm <sup>-2</sup> | 变异系数<br>/% | 偏度     | 峰度     | 数据类型 | 样本风险等级占比/% |       |       |       |
|                                                                                                                      |           |                                  |            |        |        |      | 安全         | 低风险   | 中风险   | 高风险   |
| 施氮强度                                                                                                                 | 23 492    | 262.11 ± 96.18                   | 36.70      | 0.66   | 0.84   | 正态   | 5.09       | 38.63 | 42.01 | 14.28 |
| 施磷强度                                                                                                                 | 23 492    | 146.83 ± 102.31                  | 69.68      | 0.11 * | 0.03 * | 对数正态 | 12.77      | 40.01 | 24.34 | 22.88 |

1) \* 表示对数转换后的结果; 安全、低风险、中风险和高风险对应的施氮强度范围依次为  $\leq 120$ 、 $120 \sim 240$ 、 $240 \sim 360$  和  $> 360$  kg·hm<sup>-2</sup>, 施磷强度范围依次为  $\leq 60$ 、 $60 \sim 120$ 、 $120 \sim 180$  和  $> 180$  kg·hm<sup>-2</sup>

2.2 影响因素分析

2.2.1 影响因素的相对重要性

如表 2 所示, 土地利用类型、种植作物类型、成土母质、土壤类型、高程、河流距离和城镇距离对研究区氮和磷化肥施用强度的空间变异均有显著影响 ( $P < 0.01$ ), 但各因素的影响程度有所差异. 细分类的种植作物类型能独立解释 12.9% 和 25.1% 的施氮和施磷强度空间变异, 是所有影响因素中的主控因子. 其中, 成土母质对于施氮强度的独立解释能力为 3.9%, 除主控因子外, 仅低于

独立解释能力为 4.1% 的土地利用类型, 而在对于施磷强度空间变异的独立解释能力上, 成土母质仅次于主控因子达到了 14.0%, 明显高于其它影响因素. 总体而言, 种植作物类型等人为因素(随机性因素)对于氮和磷化肥施用强度的影响仍占主要地位, 这与当前化肥施用强度影响因素的主要研究趋势和结果相一致<sup>[16,33,34]</sup>, 但自然因素尤其是成土母质对于氮和磷化肥施用强度仍具有重要影响, 且对于施磷强度空间分异的影响高于施氮强度.

表 2 不同因素与氮和磷施用强度间的回归分析

| Table 2 Regression analysis between different factors and application intensity of nitrogen and phosphorus |           |                |                               |       |           |                |                               |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|----------------|-------------------------------|-------|-----------|----------------|-------------------------------|-------|
| 影响因素                                                                                                       | 施氮强度      |                |                               |       | 施磷强度      |                |                               |       |
|                                                                                                            | F         | R <sup>2</sup> | R <sup>2</sup> <sub>adj</sub> | Sig.  | F         | R <sup>2</sup> | R <sup>2</sup> <sub>adj</sub> | Sig.  |
| 土地利用类型                                                                                                     | 1 006.306 | 0.041          | 0.041                         | <0.01 | 455.777   | 0.019          | 0.019                         | <0.01 |
| 种植作物粗分类                                                                                                    | 923.745   | 0.038          | 0.038                         | <0.01 | 369.308   | 0.015          | 0.015                         | <0.01 |
| 种植作物细分类                                                                                                    | 3 484.310 | 0.129          | 0.129                         | <0.01 | 7 878.473 | 0.251          | 0.251                         | <0.01 |
| 成土母质                                                                                                       | 963.705   | 0.039          | 0.039                         | <0.01 | 3 826.782 | 0.140          | 0.140                         | <0.01 |
| 土壤类型                                                                                                       | 159.202   | 0.007          | 0.007                         | <0.01 | 75.991    | 0.003          | 0.003                         | <0.01 |
| 高程                                                                                                         | 483.138   | 0.020          | 0.020                         | <0.01 | 389.176   | 0.016          | 0.016                         | <0.01 |
| 河流距离                                                                                                       | 83.001    | 0.004          | 0.003                         | <0.01 | 548.892   | 0.023          | 0.023                         | <0.01 |
| 城镇距离                                                                                                       | 136.260   | 0.006          | 0.006                         | <0.01 | 335.928   | 0.014          | 0.014                         | <0.01 |

2.2.2 自然和人为重要影响因素综合分析

如表 3 所示, 种植作物类型和成土母质均对氮和磷化肥施用强度具有显著影响, 这与前文的回归分析结果一致(表 2). 在种植作物粗分类中, 果蔬类的氮和磷平均施用强度最高, 分别为 313.17 kg·hm<sup>-2</sup> 和 204.67 kg·hm<sup>-2</sup>. 在细分类中, 施氮强度最高和最低的类型分别是果蔬和园林, 而施磷强度最高和最低的种植作物分别是稻蔬和稻麦. 其中, 氮和磷施用强度最高和最低的粮油类种植作物分别是稻蔬和稻麦. 不同母质类型条件下, 由灰棕冲积物发育而来的土壤施氮强度显著高于其它 4 种母质类型, 平均值为 296.17 kg·hm<sup>-2</sup>. 紫色岩风化物条件下的施磷强度显著高于其它 4 种母质类型, 平均值

为 254.02 kg·hm<sup>-2</sup>, 且不同母质类型间施磷强度均差异显著. 从变异系数来看, 不同种植作物类型和成土母质所对应的农田施氮强度变异系数范围分别处于 19.03%~48.36% 和 33.78%~41.00%, 施磷强度变异系数范围分别处于 28.02%~70.97% 和 54.95%~73.20%, 均表现为中等程度的变异性, 且同母质或同种植作物类型条件下的施磷强度的变异系数均高于施氮强度.

为了进一步探究自然因素对施肥强度空间变异的影响程度, 分别对果蔬、稻蔬、稻油、稻麦、稻药、其它粮油和园林条件下的成土母质与氮和磷化肥施用强度进行方差分析. 由表 4 可知, 园林类种植作物在不同母质类型上的氮和磷化肥施用强度不显著, 其

表 3 不同种植作物类型和母质类型上氮和磷施用强度统计特征<sup>1)</sup>

| Table 3 Statistical characteristics of nitrogen and phosphorus application intensity in different crop and parent material types |        |      |           |                             |                             |            |                             |                             |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|------|-----------|-----------------------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|-----------------------------|------------|
| 重要影响因素                                                                                                                           | 类别     |      | 样本量<br>/个 | 施氮强度                        |                             |            | 施磷强度                        |                             |            |
|                                                                                                                                  | 粗分类    | 细分类  |           | 平均值<br>/kg·hm <sup>-2</sup> | 标准差<br>/kg·hm <sup>-2</sup> | 变异系数<br>/% | 平均值<br>/kg·hm <sup>-2</sup> | 标准差<br>/kg·hm <sup>-2</sup> | 变异系数<br>/% |
| 种植作物类型                                                                                                                           | 粮油     | 稻蔬   | 8 472     | 304.17a                     | 98.38                       | 32.34      | 212.20a                     | 126.62                      | 59.67      |
|                                                                                                                                  |        | 稻油   | 6 558     | 247.13b                     | 79.63                       | 32.22      | 109.18c                     | 52.94                       | 48.49      |
|                                                                                                                                  |        | 稻麦   | 4 824     | 235.61c                     | 84.34                       | 35.80      | 97.78d                      | 52.81                       | 54.01      |
|                                                                                                                                  |        | 稻药   | 393       | 248.77b                     | 47.34                       | 19.03      | 174.58b                     | 48.91                       | 28.02      |
|                                                                                                                                  |        | 其它粮油 | 823       | 238.43bc                    | 105.26                      | 44.15      | 117.59c                     | 83.45                       | 70.97      |
|                                                                                                                                  |        | 合计   | 21 070    | 267.12B                     | 94.39                       | 35.34      | 149.54B                     | 105.00                      | 70.21      |
|                                                                                                                                  | 果蔬     |      | 303       | 313.17Aa                    | 151.45                      | 48.36      | 204.67Aa                    | 118.78                      | 58.03      |
| 成土母质                                                                                                                             | 园林     |      | 2 119     | 205.03Cd                    | 82.62                       | 40.30      | 111.55Cc                    | 51.29                       | 45.98      |
|                                                                                                                                  | 灰棕冲积物  |      | 4 648     | 296.17A                     | 100.06                      | 33.78      | 207.22B                     | 132.89                      | 64.13      |
|                                                                                                                                  | 灰色冲积物  |      | 14 124    | 253.89C                     | 90.95                       | 35.82      | 123.14D                     | 67.67                       | 54.95      |
|                                                                                                                                  | 老冲积物   |      | 3 173     | 257.74C                     | 97.35                       | 37.77      | 162.73C                     | 119.11                      | 73.20      |
|                                                                                                                                  | 紫色岩风化物 |      | 525       | 289.11B                     | 115.57                      | 39.98      | 254.02A                     | 172.57                      | 67.94      |
|                                                                                                                                  | 成都黏土   |      | 1 022     | 220.44D                     | 90.38                       | 41.00      | 95.08E                      | 63.49                       | 66.77      |

1) 同一施肥指标具有大写字母表示各粗分类种植作物或不同母质类型间平均值的差异显著性,小写字母表示各细分类种植作物间平均值的差异显著性,相同大写或小写字母表示该平均值无显著差异( $P>0.05$ )

表 4 同种植作物类型下不同母质类型间氮和磷施用强度的方差分析<sup>1)</sup>

| Table 4 Analysis of variance of nitrogen and phosphorus application intensity among different parent material types for the same crop type |      |      |       |                 |               |         |          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|-------|-----------------|---------------|---------|----------|
| 种植作物类型                                                                                                                                     | 指标   | 方差来源 | 自由度   | 平方和             | 平均方差          | F 值     | P 值      |
| 果蔬                                                                                                                                         | 施氮强度 | 组间方差 | 4     | 1 090 885.109   | 272 721.277   | 13.926  | 0.000 ** |
|                                                                                                                                            |      | 组内方差 | 298   | 5 835 919.662   | 19 583.623    |         |          |
|                                                                                                                                            |      | 总方差  | 302   | 6 926 804.772   |               |         |          |
|                                                                                                                                            | 施磷强度 | 组间方差 | 4     | 548 673.925     | 137 168.481   | 11.012  | 0.000 ** |
|                                                                                                                                            |      | 组内方差 | 298   | 3 711 911.900   | 12 456.080    |         |          |
|                                                                                                                                            |      | 总方差  | 302   | 4 260 585.825   |               |         |          |
| 稻蔬                                                                                                                                         | 施氮强度 | 组间方差 | 4     | 2 258 602.416   | 564 650.604   | 59.969  | 0.000 ** |
|                                                                                                                                            |      | 组内方差 | 8 467 | 79 722 891.100  | 9 415.719     |         |          |
|                                                                                                                                            |      | 总方差  | 8 471 | 81 981 493.520  |               |         |          |
|                                                                                                                                            | 施磷强度 | 组间方差 | 4     | 20 499 378.700  | 5 124 844.676 | 376.267 | 0.000 ** |
|                                                                                                                                            |      | 组内方差 | 8 467 | 115 322 665.000 | 13 620.251    |         |          |
|                                                                                                                                            |      | 总方差  | 8 471 | 135 822 043.700 |               |         |          |
| 稻油                                                                                                                                         | 施氮强度 | 组间方差 | 4     | 442 787.527     | 110 696.882   | 15.754  | 0.000 ** |
|                                                                                                                                            |      | 组内方差 | 4 819 | 33 861 759.150  | 7 026.719     |         |          |
|                                                                                                                                            |      | 总方差  | 4823  | 34 304 546.680  |               |         |          |
|                                                                                                                                            | 施磷强度 | 组间方差 | 4     | 97 504.543      | 24 376.136    | 8.798   | 0.000 ** |
|                                                                                                                                            |      | 组内方差 | 4 819 | 13 352 221.770  | 2 770.745     |         |          |
|                                                                                                                                            |      | 总方差  | 4823  | 13 449 726.320  |               |         |          |
| 稻麦                                                                                                                                         | 施氮强度 | 组间方差 | 4     | 442 787.527     | 110 696.882   | 15.754  | 0.000 ** |
|                                                                                                                                            |      | 组内方差 | 4819  | 33 861 759.150  | 7 026.719     |         |          |
|                                                                                                                                            |      | 总方差  | 4 823 | 34 304 546.680  |               |         |          |
|                                                                                                                                            | 施磷强度 | 组间方差 | 4     | 97 504.543      | 24 376.136    | 8.798   | 0.000 ** |
|                                                                                                                                            |      | 组内方差 | 4 819 | 13 352 221.770  | 2 770.745     |         |          |
|                                                                                                                                            |      | 总方差  | 4 823 | 13 449 726.320  |               |         |          |
| 稻药                                                                                                                                         | 施氮强度 | 组间方差 | 3     | 21 214.511      | 7 071.504     | 3.209   | 0.023 *  |
|                                                                                                                                            |      | 组内方差 | 389   | 857 166.784     | 2 203.514     |         |          |
|                                                                                                                                            |      | 总方差  | 392   | 878 381.295     |               |         |          |
|                                                                                                                                            | 施磷强度 | 组间方差 | 3     | 26 134.937      | 8 711.646     | 3.717   | 0.012 *  |
|                                                                                                                                            |      | 组内方差 | 389   | 911 765.246     | 2 343.870     |         |          |
|                                                                                                                                            |      | 总方差  | 392   | 937 900.183     |               |         |          |
| 其它粮油                                                                                                                                       | 施氮强度 | 组间方差 | 4     | 253 894.449     | 63 473.612    | 5.865   | 0.000 ** |
|                                                                                                                                            |      | 组内方差 | 818   | 8 853 112.199   | 10 822.876    |         |          |
|                                                                                                                                            |      | 总方差  | 822   | 9 107 006.648   |               |         |          |
|                                                                                                                                            | 施磷强度 | 组间方差 | 4     | 766 682.901     | 191 670.725   | 31.625  | 0.000 ** |
|                                                                                                                                            |      | 组内方差 | 818   | 4 957 706.896   | 6 060.766     |         |          |
|                                                                                                                                            |      | 总方差  | 822   | 5 724 389.796   |               |         |          |
| 园林                                                                                                                                         | 施氮强度 | 组间方差 | 1     | 11 567.773      | 11 567.773    | 1.695   | 0.193    |
|                                                                                                                                            |      | 组内方差 | 2 117 | 14 446 475.050  | 6 824.032     |         |          |
|                                                                                                                                            |      | 总方差  | 2 118 | 14 458 042.820  |               |         |          |
|                                                                                                                                            | 施磷强度 | 组间方差 | 1     | 71.445          | 71.445        | 0.027   | 0.869    |
|                                                                                                                                            |      | 组内方差 | 2117  | 5 572 278.291   | 2 632.158     |         |          |
|                                                                                                                                            |      | 总方差  | 2 118 | 5 572 349.736   |               |         |          |

1) \* 表示  $P<0.05$ , \*\* 表示  $P<0.01$

余种植作物类型条件下的成土母质对氮和磷施用强度差异均影响显著或极显著.由此可见,在相同种植作物类型条件下,成土母质仍深刻制约和影响区域氮和磷化肥施用强度的空间分布.

2.3 空间结构性特征

由表 5 和图 2 可知,研究区氮和磷施用强度采用高斯模型时两者拟合效果最佳, $R^2$  分别为 0.91 和

0.98.氮和磷化肥施用强度的块金系数分别为 66.17% 和 41.60%,均在 25%~75%之间,显示出中等程度的空间自相关性,说明其空间变异受到了结构性因素(成土母质、土壤类型、地形和水文等)和随机性因素(经济因素、技术因素和农户行为特征因素等)的共同影响.从变程来看,研究区施氮强度和施磷强度的距离分别为 65 km 和 53 km,其空间自相关范围较大.

表 5 施磷强度对数值和施氮强度的半方差函数及其拟合参数

| Table 5 Semi-variance function and fitting parameters for logarithm of phosphorus application intensity and nitrogen application intensity |      |          |           |        |       |              |          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------|-----------|--------|-------|--------------|----------|
| 指标                                                                                                                                         | 模型   | 块金值      | 基台值       | 块金系数/% | 变程/km | 决定校正系数 $R^2$ | 偏基台值     |
| 施氮强度                                                                                                                                       | 高斯模型 | 7 313.83 | 11 052.97 | 66.17  | 65.00 | 0.91         | 3 739.14 |
| 施磷强度                                                                                                                                       | 高斯模型 | 0.21     | 0.51      | 41.60  | 53.00 | 0.98         | 0.30     |

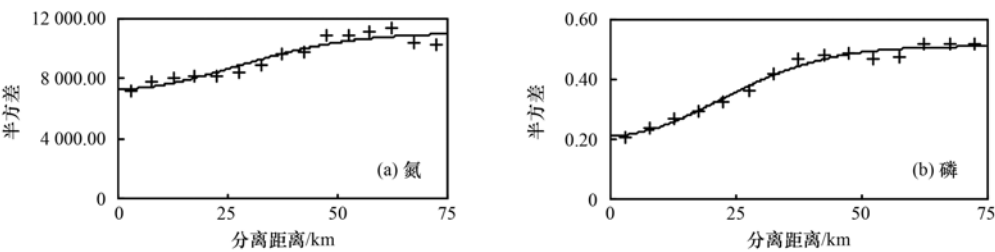


图 2 施磷强度对数值和施氮强度的半方差

Fig. 2 Semi-variance diagram of logarithms of phosphorus application intensity and nitrogen application intensity

2.4 空间分布特征

参考田若蓓等<sup>[24]</sup>关于四川省氮和磷化肥施用强度的风险分级标准,将研究区氮和磷施用强度划分 4 种风险等级(表 1).如图 3 所示,施氮强度介于 120~360 kg·hm<sup>-2</sup> 的区域面积占研究区总面积 97.02%,介于 60~180 kg·hm<sup>-2</sup> 施磷强度的区域面积占比为 86.20%,研究区总体氮和磷化肥施用强度呈中低风险水平.其中,研究区施氮强度高值区

(>300 kg·hm<sup>-2</sup>) 主要分布在都江堰-什邡一带和东部的龙泉驿、金堂区域,相对低值区(≤150 kg·hm<sup>-2</sup>) 主要分布在南部和东北部.研究区施磷强度的空间分布与施氮强度相似,但其相对高值区(>150 kg·hm<sup>-2</sup>) 在空间分布上表现出明显的聚集特征,集中分布在彭州、什邡、龙泉驿和金堂区域,相对低值区(≤90 kg·hm<sup>-2</sup>) 多分布在东南部和东北部.

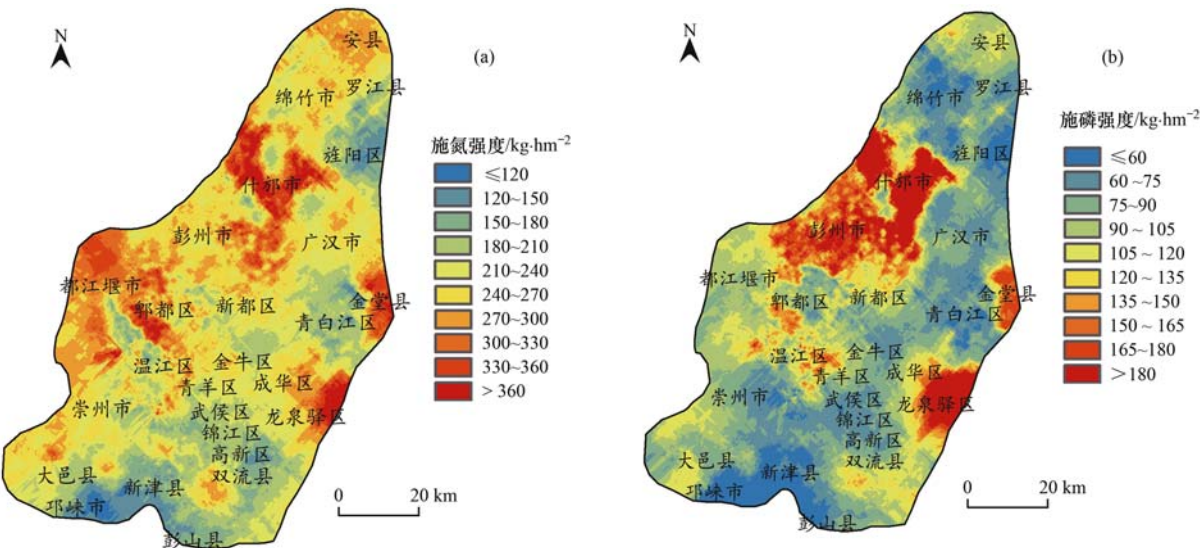


图 3 研究区氮和磷化肥施用强度空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of nitrogen and phosphorus fertilization intensities in the study area

### 3 讨论

#### 3.1 成都平原氮和磷化肥施用强度的空间分布特征

本研究结果显示,成都平原氮和磷化肥施用强度的空间分布表现出相似的规律(图3),氮和磷施用强度分别为  $120 \sim 360 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $60 \sim 180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  的区域占研究区总面积的 97.02% 和 86.20%,总体呈中低风险强度.这与田若衡等<sup>[24]</sup>基于行政区域尺度研究得出的成都平原经济区化肥施用环境风险评价较为一致.南部的新都、邛崃和东北部区域氮和磷施用强度相对较低,什邡、龙泉驿和金堂区域均显示为高风险氮和磷施用强度.受城市化进程的影响,种植结构中经济作物比重上升导致氮和磷化肥施用强度增大,在进行成都平原农田氮和磷面源污染识别和防控时需要重点关注以什邡、龙泉驿和金堂为代表的粮(果)蔬种植区[图1(d)和图3].蔬菜一般对于磷肥的需求量高于其它农作物,且一年多熟进一步增加了磷肥投入<sup>[22]</sup>,故多种植稻蔬类作物的彭州以高风险施磷强度为主.但该区域内的母质类型主要以全氮含量丰富的灰棕冲积物为主,又因为其土壤颗粒组成较细,质地黏重,导致其土壤氮素易出现明显表聚<sup>[19]</sup>,有助于提高表层土壤氮和磷对于地上作物的有效供给能力,在一定程度上减少了对氮肥的需求,故施氮强度多表现为中风险强度.以稻蔬类作物为主的温江东部区域多分布全磷含量丰富的灰色冲积物<sup>[20]</sup>,故区内施磷强度明显低于彭州和什邡.都江堰和郫都西部区域以中高风险施氮强度为主,而施磷强度总体显示为低风险强度,说明灰色冲积物对于氮和磷施用强度空间分布差异影响显著.同时,地势较高的都江堰地区年均降水日数较多,年降雨总量较大且夏季多暴雨<sup>[35]</sup>,在农业生产中应改进氮和磷施用方法(采用缓控释肥技术和测土配方施肥等方法),减少农田氮磷流失.

#### 3.2 环境因素对氮和磷化肥施用强度空间分布形成的影响

在农业生产中,经济因素、技术因素和农户特征因素对化肥施用强度具有显著影响<sup>[16, 33, 34]</sup>,但自然地理因素也会直接决定一个地区是否适合从事农业生产活动<sup>[36]</sup>,客观上制约和影响施肥强度空间分布特征的形成.本文通过分析拟合氮和磷化肥施用强度的空间结构特征及施肥强度与环境因素的关系,进而揭示人为和自然因素对研究区氮和磷施用强度空间分布特征的综合影响.半方差结果显示(表5),氮和磷施用强度块金系数在 25%~75% 之间,空间相关距离分别为 65 km 和 53 km.表明氮和磷化肥

施用强度空间分布由结构性因素和随机性因素的共同作用决定,具有中等程度的空间相关性,这与于元赫等<sup>[16]</sup>和张军伟等<sup>[37]</sup>的研究结果类似.

综合人为和自然角度选择的 7 个因子对氮和磷化肥施用强度空间变异均有显著影响,但影响程度有所差异(表2).种植作物类型(细分类)能独立解释 12.90% 和 25.10% 的氮和磷施用强度空间变异,是影响研究区氮和磷施用强度因素中的主控因子,这与王道芸等<sup>[38]</sup>的研究结果一致.金书秦等<sup>[39]</sup>的研究指出,果蔬类经济作物的化肥施用强度较粮食作物高,蔬菜对化肥施用增量在一般农作物中贡献最大.故本研究中不同粗分类的种植作物间,氮和磷施用平均强度具体表现为果蔬 > 粮油 > 园林(表3).有研究指出<sup>[22]</sup>,稻-蔬土壤全磷均值含量高于果园、农林、园林和稻-油/麦等土地利用方式,其中磷肥的过量投入是其主要原因,与本研究的结果一致.本研究中稻蔬类作物的氮和磷施用强度显著高于其它 6 种作物类型,空间上具体表现为,稻蔬类作物集中分布的彭州和什邡区内氮和磷施用强度总体较高(图3).

整体上,成土母质对研究区氮和磷施用强度空间分布的影响仅次于种植作物类型(细分类),尤其是对于施磷强度空间变异的独立解释能力达到 14.0%,明显高于除主控因子外的其它因素(表2).主要原因是成都平原母质来源复杂,不同成土母质发育而来的土壤在养分含量和土壤结构等理化性质方面均存在较大差异<sup>[40]</sup>,在一定程度上制约和影响土壤氮磷对地上作物的供给能力,这与表3分析结果一致.土壤对于施入磷素的固持能力强于氮素<sup>[41]</sup>,因而磷肥施用量在不同母质类型上的差异也更明显,故研究区成土母质对于施磷强度空间变异的独立解释能力明显更高,约是施氮强度的 3.6 倍.

为了进一步探究自然因素对施肥强度空间分布特征的影响程度,选择本研究中人为和自然影响因素中最重要的种植作物类型和成土母质,分别对 7 种作物类型条件下的成土母质与施肥强度进行方差分析(表4).园林类种植作物条件下的母质类型对于氮和磷施用强度影响不显著,主要因为其集中分布在温江区内较为单一的灰色冲积物上,该类母质土壤颗粒组成相对较粗,多为泥质沙土,养分易随水分向下层土壤迁移,可为园林类植物较深的根系提供适量的氮和磷<sup>[19]</sup>.再加上地上较多的枯落物被分解转化为有机质,可以促进铵态氮( $\text{NH}_4^+$ )的固定,并有效减少土壤中的氮素硝化流失<sup>[42]</sup>,故该区域内氮和磷化肥施用强度相对较低[图1(e)和图3].而其余 6 种作物类型条件下成土母质对于施肥强度仍

具有显著或极显著影响. 结果进一步揭示了种植作物类型对研究区氮和磷化肥施用强度空间分布特征的形成起主要决定作用的同时, 仍受到成土母质等自然因素的深刻制约和影响.

#### 4 结论

(1) 成都平原氮和磷化肥施用强度总体处于  $120 \sim 360 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $60 \sim 180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  的中低风险强度. 高、低氮和磷施用强度的空间分布表现出相似的规律, 氮和磷施用高风险强度主要分布在郫都、彭州、什邡、龙泉驿和金堂等粮(果)蔬种植区, 相对低值区主要分布在南部和东北部.

(2) 研究区氮和磷化肥施用强度的空间分布是人为和自然因素共同作用的结果. 其中, 种植作物类型和成土母质是人为和自然影响因素中最重要的因子, 土壤类型、土地利用类型、高程、河流距离和城镇距离的作用也不可忽视.

(3) 种植作物类型对研究区氮和磷化肥施用强度空间分布起主要决定作用, 但相同种植作物类型下, 成土母质仍深刻制约和影响其空间分布特征的形成, 且对于施磷强度空间分布的影响明显高于施氮. 进行成都平原精准农业施肥管理和化肥面源污染识别防控时, 需重点关注灰棕冲积物区域内果蔬和稻蔬类作物的氮和磷化肥施用强度; 灰色冲积物区域内施氮强度的风险等级明显高于施磷, 可采用测土配方施肥等技术实现氮肥的减量增效.

#### 参考文献:

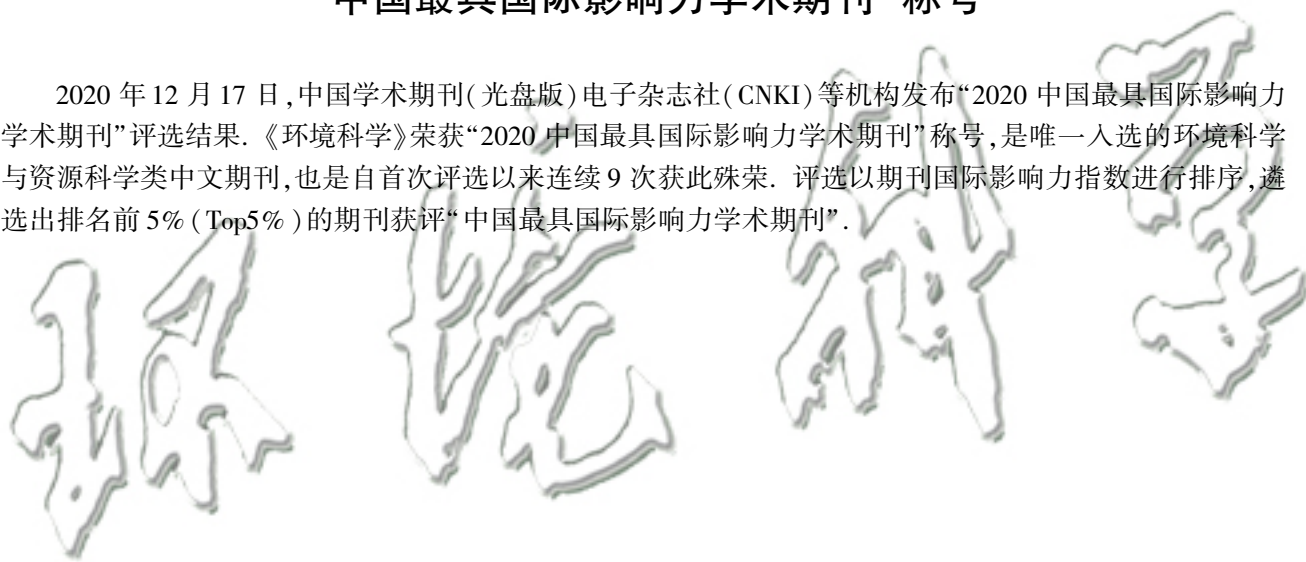
- [1] Liu Y, Jiang M, Lu X G, *et al.* Carbon, nitrogen and phosphorus contents of wetland soils in relation to environment factors in northeast China[J]. *Wetlands*, 2017, **37**(1): 153-161.
- [2] Szogi A A, Bauer P J, Vanotti M B. Vertical distribution of phosphorus in a sandy soil fertilized with recovered manure phosphates[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, **12**(3): 334-340.
- [3] Cameron K C, Di H J, Moir J L. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review[J]. *Annals of Applied Biology*, 2013, **162**(2): 145-173.
- [4] Stevens C J, Dise N B, Mountford J O, *et al.* Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands[J]. *Science*, 2004, **303**(5665): 1876-1879.
- [5] 武淑霞, 刘宏斌, 刘申, 等. 农业面源污染现状及防控技术[J]. *中国工程科学*, 2018, **20**(5): 23-30.  
Wu S X, Liu H B, Liu S, *et al.* Review of current situation of agricultural non-point source pollution and its prevention and control technologies[J]. *Strategic Study of CAE*, 2018, **20**(5): 23-30.
- [6] Wang A, Tang L H, Yang D W, *et al.* Spatio-temporal variation of net anthropogenic nitrogen inputs in the upper Yangtze River basin from 1990 to 2012[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, **59**(11): 2189-2201.
- [7] 严坤, 王玉宽, 刘勤, 等. 三峡库区规模化顺坡沟壑果园氮、磷输出过程及流失负荷[J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3646-3656.
- [8] Yan K, Wang Y K, Liu Q, *et al.* Dynamic process of nitrogen and phosphorus export and loss load in an intensive orchard with ridge and furrow plantation in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3646-3656.
- [8] 王善高, 田旭, 周应恒. 中国农业化肥施用量增长原因分解及其削减潜力分析[J]. *生态经济*, 2019, **35**(3): 115-121.  
Wang S G, Tian X, Zhou Y H. Analysis on the reasons for increase of agricultural chemical fertilizer in China and the potential of reducing it[J]. *Ecological Economy*, 2019, **35**(3): 115-121.
- [9] 谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 等. 汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1760-1769.  
Xie J C, Zhao X L, He B H, *et al.* Analysis of the characteristics of nitrogen and phosphorus emissions from agricultural non-point sources on Hanfeng lake basin[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1760-1769.
- [10] 俞映惊, 杨林章, 李红娜, 等. 种植业面源污染防治技术发展历程分析及趋势预测[J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3870-3878.  
Yu Y L, Yang L Z, Li H N, *et al.* Situation analysis and trend prediction of the prevention and control technologies for planting non-point source pollution[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3870-3878.
- [11] 雷俊华, 苏时鹏, 余文梦, 等. 中国省域化肥面源污染时空格局演变与分组预测[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, **28**(7): 1079-1092.  
Lei J H, Su S P, Yu W M, *et al.* Temporal and spatial pattern evolution and grouping prediction of non-point source pollution of chemical fertilizers in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, **28**(7): 1079-1092.
- [12] 孙铖, 周华真, 陈磊, 等. 农田化肥氮磷地表径流污染风险评估[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(7): 1266-1273.  
Sun C, Zhou H Z, Chen L, *et al.* The pollution risk assessment of nitrogen and phosphorus loss in surface runoff from farmland fertilizer[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(7): 1266-1273.
- [13] 刘钦普. 中国化肥施用强度及环境安全阈值时空变化[J]. *农业工程学报*, 2017, **33**(6): 214-221.  
Liu Q P. Spatio-temporal changes of fertilization intensity and environmental safety threshold in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, **33**(6): 214-221.
- [14] 吴凌云, 张世昌, 黄功标. 福建省化肥施用强度时空分布及影响因素分析[J]. *中国农技推广*, 2020, **36**(3): 45-48.
- [15] 赵雪雁, 刘江华, 王蓉, 等. 基于市域尺度的中国化肥施用与粮食产量的时空耦合关系[J]. *自然资源学报*, 2019, **34**(7): 1471-1482.  
Zhao X Y, Liu J H, Wang R, *et al.* Spatial-temporal coupling relationship between chemical fertilizer application and grain yield in China at city scale[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, **34**(7): 1471-1482.
- [16] 于元赫, 李子君, 姜爱霞, 等. 山东省农业化肥施用强度时空格局演变及驱动力分析[J]. *中国农业大学学报*, 2019, **24**(4): 176-186.  
Yu Y H, Li Z J, Jiang A X, *et al.* Spatial-temporal patterns change and driving forces analysis of agricultural chemical fertilization intensity in Shandong province[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, **24**(4): 176-186.
- [17] 王启, 张辉, 廖桂堂, 等. 四川省主要农业投入品时空变化

- 特征及影响因素[J]. 生态与农村环境学报, 2018, **34**(8): 717-725.
- Wang Q, Zhang H, Liao G T, *et al.* Spatial and temporal variation characteristics of the main agricultural inputs in Sichuan province and the influencing factors[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, **34**(8): 717-725.
- [18] Luo Y L, Li Q Q, Shen J, *et al.* Effects of agricultural land use change on organic carbon and its labile fractions in the soil profile in an urban agricultural area [J]. Land Degradation & Development, 2019, **30**(15): 1875-1885.
- [19] 张浩, 李启权, 唐嘉玲, 等. 成都平原西部土壤氮素空间变异特征及影响因素[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(2): 295-302.
- Zhang H, Li Q Q, Tang J L, *et al.* Spatial variability and its influential factors of soil nitrogen in the western Chengdu plain [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(2): 295-302.
- [20] 李珊, 李启权, 王昌全, 等. 成都平原西部土壤全磷的剖面分布及主控因素[J]. 资源科学, 2018, **40**(7): 1397-1406.
- Li S, Li Q Q, Wang C Q, *et al.* Profile distribution of soil total phosphorus and controlling factors on the west Chengdu plain [J]. Resources Science, 2018, **40**(7): 1397-1406.
- [21] 易茜, 任丹华, 朱从桦, 等. 施肥方式和施氮量对川西平原机插稻产量和氮肥利用的影响[J]. 中国农学通报, 2019, **35**(22): 1-5.
- Yi Q, Ren D H, Zhu C H, *et al.* Fertilization method and nitrogen rate affect yield and nitrogen utilization of machine-transplanted rice in West Sichuan plain[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, **35**(22): 1-5.
- [22] 郑盛华, 陈红琳, 陈雨芝, 等. 川西平原不同基础地力和施肥对水稻生长及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2017, **33**(23): 63-67.
- Zheng S H, Chen H L, Chen Y Z, *et al.* Effect of soil fertility and fertilization on rice growth and yield in West Sichuan plain [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, **33**(23): 63-67.
- [23] 梁涛, 陈轩敬, 赵亚南, 等. 四川盆地水稻产量对基础地力与施肥的响应[J]. 中国农业科学, 2015, **48**(23): 4759-4768.
- Liang T, Chen X J, Zhao Y N, *et al.* Response of rice yield to inherent soil productivity of paddies and fertilization in Sichuan basin[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, **48**(23): 4759-4768.
- [24] 田若衡, 黄成毅, 邓良基, 等. 四川省化肥面源污染环境风险评估及趋势模拟[J]. 中国生态农业学报, 2018, **26**(11): 1739-1751.
- Tian R H, Huang C Y, Deng L J, *et al.* Environmental risk assessment and trend simulation of non-point source pollution of chemical fertilization in Sichuan Province, China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, **26**(11): 1739-1751.
- [25] 张文婧, 王昌全, 袁大刚, 等. 四川省主要作物施肥现状、问题与对策[J]. 土壤通报, 2014, **45**(3): 697-703.
- Zhang W J, Wang C Q, Yuan D G, *et al.* Status, problems and countermeasures of main crops' fertilizer application in Sichuan province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, **45**(3): 697-703.
- [26] Jiang L, Deng X Z, Seto K C. Multi-level modeling of urban expansion and cultivated land conversion for urban hotspot counties in China[J]. Landscape and Urban Planning, 2012, **108**(2-4): 131-139.
- [27] Song W, Pijanowski B C. The effects of China's cultivated land balance program on potential land productivity at a national scale [J]. Applied Geography, 2014, **46**: 158-170.
- [28] Li Q Q, Yue T X, Wang C Q, *et al.* Spatially distributed modeling of soil organic matter across China: an application of artificial neural network approach[J]. CATENA, 2013, **104**: 210-218.
- [29] Li Q Q, Li A W, Dai T F, *et al.* Depth-dependent soil organic carbon dynamics of croplands across the Chengdu plain of China from the 1980s to the 2010s[J]. Global Change Biology, 2020, **26**(7): 4134-4146.
- [30] Zhang S W, Huang Y F, Shen C Y, *et al.* Spatial prediction of soil organic matter using terrain indices and categorical variables as auxiliary information[J]. Geoderma, 2012, **171-172**: 35-43.
- [31] Adhikari K, Hartemink A E, Minasny B, *et al.* Digital mapping of soil organic carbon contents and stocks in Denmark[J]. PLoS One, 2014, **9**(8): e105519.
- [32] 李丽霞, 郜艳晖, 张瑛. 哑变量在统计分析中的应用[J]. 数理医药学杂志, 2006, **19**(1): 51-53.
- Li L X, Gao Y H, Zhang Y. The application of dummy variable in statistics analysis [J]. Journal of Mathematical Medicine, 2006, **19**(1): 51-53.
- [33] 刘钦普, 孙景荣, 濮励杰. 中国及欧美主要国家化肥施用强度与综合效率比较研究[J]. 农业工程学报, 2020, **36**(14): 9-16.
- Liu Q P, Sun J R, Pu L J. Comparative study on fertilization intensity and integrated efficiency in China and Euro-American major countries [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, **36**(14): 9-16.
- [34] 郑鑫. 丹江口库区农户氮肥施用强度的影响因素分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, **20**(5): 75-79.
- Zheng X. Influencing factors on the farmers' nitrogenous fertilizer use in Danjiangkou reservoir area [J]. China Population, Resources and Environment, 2010, **20**(5): 75-79.
- [35] 任小玢, 董治宝, 周正朝. 近50年来四川盆地降水日数的时空变化特征[J]. 水土保持通报, 2012, **32**(4): 65-70.
- Ren X B, Dong Z B, Zhou Z C. Spatio-temporal variation of precipitation days of Sichuan basin in nearly 50 years [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, **32**(4): 65-70.
- [36] 潘晓东. 2000~2015年中国地级市化肥使用量的时空变化特征[D]. 昆明: 云南大学, 2019. 35-38.
- Pan X D. Spatial and temporal variations of fertilizer usage across prefecture-level cities in China from 2000 to 2015 [D]. Kunming: Yunnan University, 2019. 35-38.
- [37] 张军伟, 张锦华, 吴方卫. 粮食生产中化肥投入的影响因素研究——基于Durbin模型的分析[J]. 经济地理, 2018, **38**(11): 174-182.
- Zhang J W, Zhang J H, Wu F W. The influencing factors of fertilizer input in grain production: based on the Durbin model [J]. Economic Geography, 2018, **38**(11): 174-182.
- [38] 王道芸, 胡海棠, 李存军, 等. 基于GIS的海河流域农田氮磷肥施用环境风险评价[J]. 山西农业科学, 2019, **47**(3): 405-412.
- Wang D Y, Hu H T, Li C J, *et al.* Environmental risk assessment of nitrogen and phosphorus fertilizer application in farmland of Haihe river basin based on GIS [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2019, **47**(3): 405-412.
- [39] 金书秦, 周芳, 沈贵银. 农业发展与面源污染治理双重目标下的化肥减量路径探析[J]. 环境保护, 2015, **43**(8): 50-53.
- Jin S Q, Zhou F, Shen G Y. Feasible routes for reducing

- chemical fertilizer use with dual goals of agricultural development and non-point source pollution prevention [J]. *Environmental Protection*, 2015, **43**(8): 50-53.
- [40] 李珊, 李启权, 王昌全, 等. 成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3365-3372.
- Li S, Li Q Q, Wang C Q, *et al.* Profile distribution of paddy soil organic carbon and its influencing factors in Chengdu plain[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3365-3372.
- [41] 韦高玲, 卓慕宁, 廖义善, 等. 不同施肥水平下菜地耕层土壤中氮磷淋溶损失特征[J]. *生态环境学报*, 2016, **25**(6): 1023-1031.
- Wei G N, Zhuo M N, Liao Y S, *et al.* Leaching characteristics of nitrogen and phosphorus in vegetable soils under different fertilization levels [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(6): 1023-1031.
- [42] Wang J, Zhu B, Zhang J B, *et al.* Mechanisms of soil N dynamics following long-term application of organic fertilizers to subtropical rain-fed purple soil in China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **91**: 222-231.

## 《环境科学》连续 9 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2020 年 12 月 17 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2020 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2020 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 9 次获此殊荣.评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.



## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                       |                                                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission .....                                                                          | LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091)          |
| Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM <sub>2.5</sub> Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period .....                                        | LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099)             |
| Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM <sub>2.5</sub> in the Yangtze River Delta Based on Grids .....                                                        | HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)                   |
| Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration .....                                                                                            | LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118)       |
| Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China .....                                    | ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127)                  |
| Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM <sub>2.5</sub> Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China ..... | LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136)       |
| Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides .....                                   | XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147)         |
| Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed .....                                                                | HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)                                |
| Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake .....                                                                         | YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166)           |
| Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer .....                                           | ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176)    |
| Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City .....          | YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186)              |
| Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland .....                                           | LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198)          |
| Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou .....                                                        | BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206)          |
| Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan .....                                     | ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215)          |
| Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface .....                                                  | CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223)             |
| Identifying the Sources of Groundwater NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N in Agricultural Region of Qingdao .....                                                                        | KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232)         |
| Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir .....                                                              | HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242)               |
| Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season .....                                                 | LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253)                  |
| Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments .....                                                                                               | JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263)                 |
| Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland .....                                                                           | ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272)          |
| Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay .....                                                                                         | LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281)               |
| Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment .....                       | MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291)           |
| Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China .....                                                                   | GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304)    |
| Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed .....                                                                                | BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)                                |
| Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles .....                                                                       | SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328)        |
| Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents .....                                                                            | QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338)                |
| Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants .....                              | LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348)       |
| Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant .....                                          | WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)                          |
| Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge .....                                                                                                            | DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366)        |
| Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants .....                                          | TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375)          |
| Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR .....                                                                                     | LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385)         |
| Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source .....                                                                                             | TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392)             |
| Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System .....                                                                                    | LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400)     |
| First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration .....                                         | ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405)            |
| Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors .....                                                           | GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413)             |
| Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure .....                                           | QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422)       |
| Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent .....                                                                                            | ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430)     |
| Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018 .....                                                  | WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442)          |
| Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields .....                                                            | HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451)             |
| Effects of Water and Fertilization Management on CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions .....                                 | LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458)       |
| Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil .....                                                                                   | YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472)               |
| Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands .....                                                                                | ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482)     |
| Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil .....                                                                       | CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494)                  |
| Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province .....             | LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)                              |
| Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen .....                                                                   | LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518)            |
| Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil .....                                                                                                       | ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527) |
| Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials .....                                                                         | YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535)             |
| Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau .....                                                                 | LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549)         |
| Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain .....                                           | LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555)           |
| Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost .....                                                                                              | XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565)             |