

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

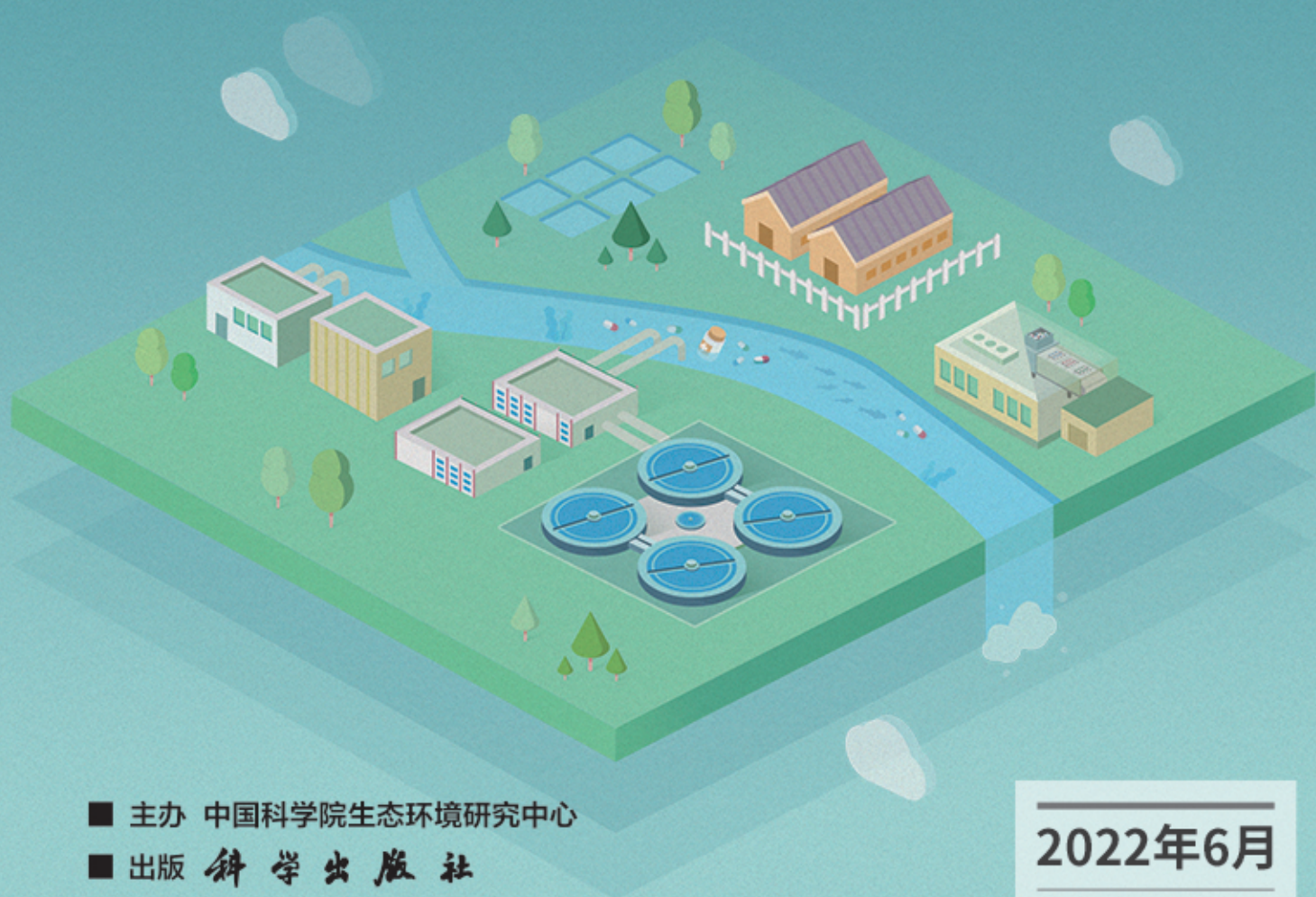
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期
Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM _{2.5} 浓度影响	邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)
新冠疫情管控措施对郑州市 PM _{2.5} 浓度、粒径分布、组分和来源的影响	黄兵役, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)
COVID-19 管控期间苏州市 PM _{2.5} 中金属元素浓度变化及来源解析	缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)
2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化	谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜棋, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)
基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM _{2.5} 来源	彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)
保定市冬季 PM _{2.5} 的氧化潜势特征及其影响来源分析	吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)
南京江北新区 PM _{2.5} 中水溶性有机氮的污染特征及其来源	关璐, 丁铨, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)
广西十万大山背景点 PM _{2.5} 中非极性有机气溶胶组成及来源解析	邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)
大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例	张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)
基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因	唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)
天津市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染特征及气象影响分析	肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)
2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析	周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)
河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化	晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)
热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响	赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)
武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源	苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)
运城市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)
我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁	范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)
长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价	武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)
内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险	张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思瑞, 孙兴滨, 王山军 (3005)
不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制	宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)
高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素	李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 陈安强, 张丹 (3027)
青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析	张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)
东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价	赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)
湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险	刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)
长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价	张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)
香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析	陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)
城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应	陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)
2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子	屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)
嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系	王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)
近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析	葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)
长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制	谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)
高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法	顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋云钟, 曹引, 赵红莉 (3140)
不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化	陈旭东, 高良敏 (3149)
生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染	石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)
不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响	吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)
北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析	席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐露, 荆红卫, 刘保献 (3177)
不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征	章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)
可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制	曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)
4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性	唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)
农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制	龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)
腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析	李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征	徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)
黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态学特征	孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)
青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析	温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)
西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响	刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴磊, 刘双燕 (3262)
贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价	张倩, 韩贵琳 (3269)
南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析	董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)
神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价	严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)
石灰泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复	许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)
水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响	谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)
改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应	罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)
土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应	罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)
小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响	靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)
重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征	廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)
长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征	廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)
基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应	梁建设, 白永平, 杨雪蕊, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)
《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)	

长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制

谭少军^{1,2}, 刘洋³, 朱小婕², 刘荷², 邵景安^{2*}, 邓华³

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400700; 2. 重庆师范大学地理和旅游学院, 重庆 401331; 3. 重庆青年职业技术学院, 重庆 400712)

摘要: 农村非点源污染格局和机制研究对于区域生态环境治理意义重大. 以长江上游平原丘陵区为研究区, 借助多元数据, 提出一种基于空间距离修正的污染物测算方法, 利用克里金 (Kriging) 插值和逻辑回归 (LR) 方法研究农村非点源污染物的排放格局和影响机制. 结果表明, 2005 ~ 2015 年间 COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TN 和 TP 排放总量分别增加 15.46 × 10⁴、25.66 × 10⁴、3.49 × 10⁴、1.26 × 10⁴ 和 0.38 × 10⁴ t. 成都平原、川中丘陵和川东平行岭谷耕作区是排放量高值区, 而城镇城区和三峡库区腹地是低值区. COD、BOD₅ 和 NH₄⁺-N 整体风险等级有所增加, TN 整体排放风险等级有所增加, TP 整体排放风险偏高且有继续恶化的趋势. 综合风险等级呈“中部高, 四周低”的空间格局, 极高和次高风险等级呈镶嵌分布, 成都平原和川东平行岭谷区为高风险集聚区. 2005 ~ 2010 年间非点源污染主要驱动因素为粮食产量、畜禽产量和乡村人口数, 表现为“生产驱动型”, 而 2010 ~ 2015 年间农民人均纯收入、粮食产量、畜禽产量、国民生产总值和年均降水量是主要驱动因素, 表现为“生产和生活协同驱动型”. 研究成果可为分析长江上游平原丘陵区非点源污染驱动机制和防控提供一定依据.

关键词: 农业非点源; 输出特征; 驱动机制; 长江上游; 平原丘陵区

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)06-3128-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202108130

Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China

TAN Shao-jun^{1,2}, LIU Yang³, ZHU Xiao-jie², LIU He², SHAO Jing-an^{2*}, DENG Hua³

(1. College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400700, China; 2. College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 3. Chongqing Youth Vocational and Technical College, Chongqing 400712, China)

Abstract: Research on the pattern and mechanism of agricultural non-point source (AGNPS) pollution in rural areas is of great significance to the governance of the regional ecological environment. This study took the plain and hilly area of the upper Yangtze River as the research area, relied on multivariate data, and used a pollutant measurement method based on spatial distance correction, and Kriging interpolation and logistic regression methods (LR) were used to study the emission pattern and impact mechanism of AGNPS pollutants. The results showed that the total emissions of COD, BOD₅, NH₄⁺-N, TN, and TP increased by 15.46 × 10⁴, 25.66 × 10⁴, 3.49 × 10⁴, 1.26 × 10⁴, and 0.38 × 10⁴ t, respectively, and the emissions of these five pollutants had strong spatial regularity from 2005 to 2015. The Chengdu Plain, the hills in central Sichuan, and the parallel ridge valley farming areas in eastern Sichuan were the high-value areas, whereas urban areas and hinterland of the Three Gorges Reservoir (TGRA) were low-value areas. The risk levels of COD, BOD₅, and NH₄⁺-N increased; TN pollution was more serious; and the emission risk level was gradually increasing. The emission risk of TP was high and had a tendency to continue to deteriorate. The overall risk level was in a spatial pattern of “high in the middle and low in the surrounding area,” with extremely high and second-highest risk levels in a mosaic distribution. The Chengdu Plain and the Parallel Ridge and Valley areas in eastern Sichuan were high-risk clusters. The main driving factors of non-point source pollution from 2005 to 2010 were grain output, livestock and poultry production, and the number of rural populations, which were categorized as “production-driven” GDP and annual average precipitation were the main driving factors, which were categorized as “production and life synergy-driven.” These results can provide a basis for analyzing the driving mechanism and prevention and control of NPS in the hilly area of the upper Yangtze River.

Key words: agricultural non-point source (AGNPS); output characteristics; driving mechanism; upper Yangtze River; plain and hilly area

同点源污染相比, 非点源污染具有时空上的随机性和分散性特征. 伴随工业点源污染逐步得到控制, 农村非点源污染则表现得日益突出. 2019 年我国耕地化肥施用量达 5 403.59 × 10⁴ t, 施用强度为 0.79 t·hm⁻²[1]. 全国 8 大重点流域的 TN 和 TP 的总负荷分别为 149.74 × 10⁴ t 和 14.80 × 10⁴ t[2], 排放强度为 1.18 kg·hm⁻² 和 0.13 kg·hm⁻². 其中长江上游平原丘陵区 TN 和 TP 排放量分别位于第四和第三位. 长江上游平原丘陵区是长江流域人口和农业发展的重要地区之一. 近年来长江上游流域及其支

流岷江、沱江、嘉陵江和三峡库区的水质呈现出明显的季节性特征和总体恶化的趋势[3~6], 然而, 考虑到国家对流域生态环境的重视程度和投入的逐渐增加, 现有关于水环境质量的说法是否正确以及为何

收稿日期: 2021-08-12; 修订日期: 2021-11-15

基金项目: 重庆市基础科学与前沿技术研究专项 (cstc2017jcyjBX0024); 重庆市技术创新与应用发展专项 (cstc2019jcsx-gksbX0060); 2018 年院士牵头科技创新引导专项; 重庆市教委科技项目 (KJZD-K20180410); 重庆市教委科技项目 (KJZD-K202004101)

作者简介: 谭少军 (1987 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为农业面源污染过程, E-mail: tsj2015@126.com

* 通信作者, E-mail: shao_ja2003@sohu.com

会产生这种认识? 仍需通过科学和严谨的数据来加以佐证. 因此, 有针对性开展区域非点源污染输出特征和机制研究具有重要的理论和现实意义.

从 20 世纪 50 年代开始, 国外主要通过对通用方程 (USLE) 运用^[7~9] 研究非点源污染输出特征; 20 世纪 90 年代至 21 世纪初, 开始注重探索 AGNPS 等分布式非点源污染物输出模型^[10~13], 与此同时探究小尺度下非点源污染现状以及防控^[14]; 2010 年以来, 随着非点源污染输出研究的进一步深化, SWAT^[15]、GWL^[16] 和高分辨遥感^[17] 等技术运用, 研究尺度更具立体性. 目前国内研究主要集中于源头解析^[18,19]、负荷^[20,21]、风险识别^[22,23] 和“源”-“汇”过程模拟^[24,25] 等方面. 而排放量核算与驱动机制研究则有助于进一步摸清区域非点源污染时空分布特征和影响因子.

长江上游平原丘陵区是长江上游生态屏障的重要组成部分^[26], 更是长江上游非点源污染物的主要源地^[27], 揭示该区污染物输出特征不仅关系到区域水环境质量, 而且对长江中下游乃至整个流域的生态安全都具有重要意义. 目前涉及该区域的研究主要立足于整个长江流域^[28,29] 或部分支流流域尺度进行探索^[30~33], 而专门选择类似于长江上游平原丘陵区这样的大尺度区域开展相关研究的文献相对较少.

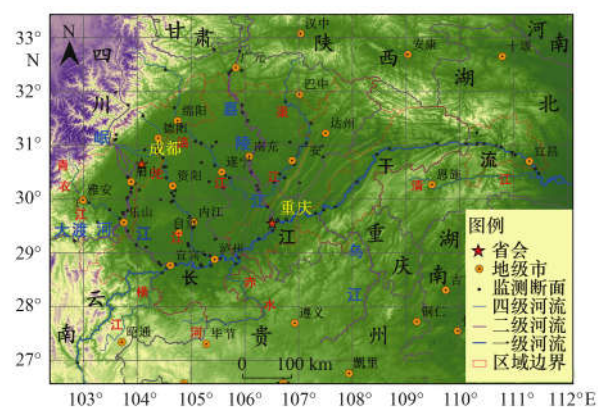
基于此, 本文以长江上游平原丘陵区所涵盖的 159 个区 (县) 为研究区, 采用基于空间距离修正的输出系数法测算区域 COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TN 和 TP 污染实物排放量, 借助克里金 (Kriging) 插值方法探究其污染格局演变趋势, 利用 Logistic 回归模型 (LR) 探究非点源污染驱动机制, 以期为长江上游平原丘陵区农村非点源污染治理提供科学依据.

1 材料和方法

1.1 区域概况

长江上游平原丘陵区 (102°48′19.378″~110°02′30.411″E; 27°39′51.287″~32°11′12.267″N, 图 1), 幅员面积 20.48 × 10⁴ km², 包括三峡库区及上游平原丘陵区, 龙泉山和华蓥山将本区地貌大致划分为成都平原、川中丘陵和川东平行岭谷这 3 个大地貌单元, 同时包括三峡库区腹地, 海拔主要介于 200~600 m 之间; 气候属亚热带湿润季风气候, 年均温 16~18℃, 年均降水量 907.21 mm, 夏季降水量大, 冬春季节偏少. 气温和降水的空间差异性明显, 大部分地区年均温 13~17℃, 但年降水量较大; 紫色土和水稻土广泛发育, 部分地区有棕壤、黄棕壤和暗棕壤分布; 河流水系发达, 河网密度 0.58 km·km⁻², 长江干流自西向东流经四川盆地, 岷江、

沱江、嘉陵江、大宁河和乌江、綦江等支流, 呈南北不对称展布. 2016 年耕地、建设用地、林地、水域、草地和未利用地面积分别为 12.61 × 10⁴、0.40 × 10⁴、5.70 × 10⁴、0.28 × 10⁴、1.47 × 10⁴ 和 0.02 × 10⁴ km², 分别占 61.60%、1.97%、27.83%、1.36%、7.16% 和 0.08%. 该区是全国重要的水稻、小麦、玉米、生猪和家禽生产基地, 但由于农村人口的集聚, 化肥农药的使用不当, 加之畜禽粪便及生活污水、生活垃圾排放没有得到有效处理或资源化利用, 使得该区成为长江上游非点源污染发生较为严重的地区之一.



区域边界从左到右分别为成都平原、川中丘陵、川东平行岭谷和三峡库区腹地
图 1 长江上游平原丘陵区主要河流和行政区划示意

Fig. 1 Major rivers and administration of the plain and valley area in upper Yangtze River

1.2 数据来源

本文数据来源分为图形、统计和调研这 3 个部分.

(1) 图形数据主要包括从国家基础地理信息中心网站 (<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>) 获取全国 1:100 万. shp 格式矢量数据 (包括行政区划、河流和道路等); 通过中国科学院成都山地灾害与环境研究所获取土壤侵蚀和水土流失数据; 通过地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/>) 获取 90 m 分辨率 DEM 数据和归一化植被指数; 通过气象数据共享平台 (<http://data.cma.cn/site/index.html>) 获取川渝地区国家气象站点降水量数据.

(2) 统计数据主要包括从四川、重庆和湖北统计局网站获取及区 (县) 水资源公报获取区域内作物种植量 (水稻、小麦、玉米、红薯、油菜、甘蔗、棉花)、畜禽养殖量 (牛、猪、羊、鸡、鸭)、乡村 (常住) 人口、化肥施用量 (折纯量)、水产养殖量和地表水资源拥有量等资料.

(3) 调研数据主要来源于课题组于 2011~2014 年间针对三峡库区开展的农村非点源污染入户调研及取得的成果, 从中获取农作物、畜禽、生活和水产

排放系数,并进行相关的参数修正处理.另外,从169个水文观测站点获取2005~2015年的5种污染物的监测数据.

1.3 数据处理过程

在Excel 2017上统一对原始数据汇总,测算各区(县)污染物排放量和农村非点源污染等级;在ArcGIS 10.2上对测算数据进行克里金插值;利用SPSS 17.0进行Logistic回归分析;利用Origin 2021b绘制统计图.

1.4 数据分析方法

1.4.1 排放量测算过程

本文提出一种基于空间距离加权修正入河系数的非点源污染实物排放量计算方法,其原理是利用

已获取的数据测算污染物量,借助空间距离修正的入河系数测算污染物排放量.计算公式和过程参数(表1),其中入河系数 λ_i 采用空间阻力修正标准值的方法予以计算,公式如下:

$$\lambda_{ni} = \lambda_{si} \times (1/d'_n) \tag{1}$$

$$d'_n = (1/m) \times (d_{nm}/d_{nm\max}) \tag{2}$$

式中, λ_{ni} 为第*i*(*i*=1,2,3,⋯,8)个污染物来源的入河系数, λ_{si} 为第*i*种污染来源的标准入河系数,非点源污染源不同,其污染物入河系数亦具有较大差异, d'_n 为第*n*个区(县)到干流的空间距离标准化值, m 为区(县)所在流域区(县)个数, d_{nm} 为第*n*个区(县)到最近河道的空间距离, $d_{nm\max}$ 为流域内到达干流距离的最大值.

表 1 农业非点源污染物排放量测算方法

Table 1 Calculation method of agricultural non-point source pollution

指标	公式	变量解释
C1:化肥	$P_1 = a \times \lambda_1$	式中, P_1 为化肥污染物排放量(t), a 为化肥施用量(t), λ_1 为入河系数(无量纲).TN和TP入河系数分别为0.100 2和0.008
C2:有机肥	$P_2 = b \times (1 - \alpha_1) \times \beta \times \lambda_2$	式中, P_2 为有机肥污染物排放量(t), α_1 为有机肥利用率(无量纲),结合实地调研,取平均值为0.6, β 为污染物含量 ^[34] , λ_2 为入河系数(无量纲),其标准值为0.01
C3:秸秆	$P_3 = c \times m_1 \times (1 - \alpha_2) \times \beta_2 \times \lambda_3$	式中, P_3 为秸秆污染物排放量(t), c 为某种作物产量(t),选取水稻、小麦、玉米、红薯、油菜、棉花和甘蔗这7种作物, m_1 为作物秸秆产出系数 ^[35] , α_2 为秸秆利用率(无量纲), β_2 为秸秆养分含量, λ_3 为入河系数(无量纲),标准值为0.01 ^[36]
C4:畜禽	$P_4 = c \times m_2 \times \beta_3 \times \lambda_4$	式中, P_4 为畜禽污染物排放量(t), c 为某种畜禽产量(头或只),主要考虑猪、牛、羊、鸡和鸭的产量, m_2 为某种畜禽产出系数 ^[1] , β_3 为污染物含量 ^[37] , λ_4 为入河系数 ^[1] ,标准值为0.23
C5:水产养殖	$P_5 = d \times m_3$	式中, P_5 为水产养殖污染物排放量, d 为淡水养殖产量, m_3 为污染物产出系数;参考文献 ^[38] ,测算四大家鱼(青、草、鲢、鳊)、泥鳅、黄鳝和青虾养殖水体中污染物含量
C6:生活污水	$P_6 = e \times m_4 \times \beta_4 \times \lambda_6$	式中, P_6 为生活污水污染排放量, e 为乡村人口数, m_4 为生活污水排放系数, β_4 为污染物平均含量(每人0.72 L·d ⁻¹ ,折算1 a生活污水产出量,5种污染物含量分别为292.69、138.33、26.36、44.14和4.49 mg·L ⁻¹), λ_6 为入河系数,标准值为0.30 ^[37]
C7:生活垃圾	$P_7 = e \times m_5 \times \beta_5 \times \lambda_7$	式中, P_7 为生活垃圾污染物排放量, e 为乡村人口数, m_5 为生活垃圾产出系数(每人0.72 kg·d ⁻¹), β_5 为污染物平均含量(50.00、5.00、0.35、1.00和0.2 mg·kg ⁻¹), λ_7 为入河系数,标准值为0.20 ^[37]
C8:地表径流	$P_8 = S_i \times DA \times C_i \times 10^{-6}$	式中, P_8 为地表径流污染物排放量,DA为泥沙运移比,取0.046, S_i 为年侵蚀量(水土流失面积和土壤侵蚀模数乘积), C_i 为土壤污染物背景值 ^[38]

1.4.2 污染风险等级

采用综合风险等级指数方法评估非点源污染风险等级,公式如下:

$$G_j = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^{159} G_{ij} \times w_i \tag{3}$$

式中, G_j 为第*j*个区(县)非点源污染物排放综合风险等级指数, G_{ij} 为第*j*个区(县)第*i*种污染物风险等级指数(极低、次低、次高和极高,表2), w_i 为第*i*种污染权重.并按25、50、75和100分进行分等赋分.

表 2 农业非点源污染物排放量等级划分标准/(t·a⁻¹)

Table 2 Standard of agricultural non-point source pollutant emission grade/(t·a⁻¹)

污染物	极低	次低	次高	极高
COD	0~5 000	5 000~10 000	10 000~15 000	>15 000
BOD ₅	0~2 500	2 500~5 000	5 000~7 500	>7 500
NH ₄ ⁺ -N	0~800	800~1 500	1 500~3 000	>3 000
TN	0~2 000	2 000~4 000	4 000~6 000	>6 000
TP	0~300	300~500	500~800	>800

构建层次分析和熵权耦合的综合赋权法对 5 种污染物进行赋权修正^[39], 公式如下:

$$w_i = w_i^1 \times w_i^2 / \left(\sum_j^{159} w_i^1 \times w_i^2 \right) \quad (4)$$

式中, w_i^1 为专家打分的平均权重, 邀请了四川省环境科学研究院、中国科学院成都山地灾害与环境研究所、西南大学、重庆师范大学和中国农业科学院环境和可持续发展研究所等单位的 10 位长期从事水环境和农业非点源污染研究的知名专家, 对 5 种污染物进行赋权, 计算 5 种污染物的专家赋权均值分别为 0.37、0.16、0.07、0.21 和 0.19, w_i^2 为熵权权重, 计算过程参照文献[40]使用的改进熵权 TOPSIS 模型, 权重分别为 0.19、0.13、0.15、0.31 和 0.22, w_i 为综合权重, 分别为 0.34、0.10、0.05、0.31 和 0.20。

1.4.3 克里金插值模型

克里金插值属于地统计 (geostatistics) 方法, 最早由法国统计学家 Matheron 提出, 其原理是基于区域化变量, 借助空间变异函数研究地理事物的空间相关性和依赖性^[41], 该方法被广泛应用于土壤和水质评估^[42,43] 和城市可持续发展^[44] 等领域, 是一种利用原始数据和半方差函数的结构性, 对未知区域进行无偏估计的一种方法^[45]。优点在于不仅可以预测结果, 还可对误差进行预测, 评价预测结果的不确定性。本文采用普通克里金插值方法对 5 种污染物排放量展开空间化分析, 公式如下:

$$Z(X_o) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(X_i) \quad (5)$$

式中, $Z(X_o)$ 为未知区域污染物排放量值, $Z(X_i)$ 为未知区域周围的已知污染物排放量值, λ_i 为第 i 个采样点的权重, N 为区 (县) 个数。利用球状 (spheroidal) 模型、指数 (exponential) 模型和高斯 (gaussian) 模型进行插值结果拟合, 并借助标准平均值、均方根预测误差、平均标准误差和标准均方根

预测误差等 4 个参数进行误差交叉验证, 验证结果以前 2 者最接近 0, 平均标准误差最接近均方根预测误差, 且标准误差均方根最接近 1 为最佳。在 ArcGIS 10.2 的 geostatistical 模块中进行插值。

1.4.4 Logistic 回归模型

采用 Logistic 回归模型分析非点源污染机制, 目前该方法已被广泛应用于灌木生长^[46]、灾情^[47]、景观格局^[48] 和生物种群分布模拟^[49] 等驱动力研究过程中, 取得了较好的模拟效果。其建模原理为: 假定 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 是一组和因变量 Y 相关的变量, P 是某事件发生的概率, 没有发生的概率是 $1 - P$, 对 P 进行 Logistic 变换, 公式如下:

$$\ln[P/(1 - P)] = a + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i \quad (6)$$

$$P = \frac{\exp(\alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + L + \beta_n X_n)}{1 + \exp(\alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + L + \beta_n X_n)} \quad (7)$$

式中, P 为非点源污染物增加或减少事件的概率, $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ 为事件 P 发生的驱动因子, α 为回归常数, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 为偏回归系数, 代表自变量对 Y 或回归方程的影响, 运用回归系数、标准误差、Wald 统计量、显著性水平和发生比率进行拟合评判。其中, 偏回归系数表征随自变量增加, 因变量发生的概率, 当偏回归系数 > 0 时, 二者呈正相关关系, 反之亦然。Wald 统计量表示自变量的相对权重, 值越大其贡献度越大。HL 统计量用于拟合优度检验, 当 HL 对应显著性水平 $P < 0.05$ 时, 拟合效果较好, 应保留在原方程中, 反之剔除。在 SPSS 17.0 中进行处理, 用偏最大似然法进行模型筛选, 评价各因子对污染物排放等级的影响。

综上, 以 2005 ~ 2010 年和 2010 ~ 2015 年 2 个阶段分等得分之差为因变量, 同时考虑到和自然条件和人类活动有密切联系^[50, 51], 从自然和社会 2 个维度进行指标确定, 借助共线性诊断方法筛选 10 个变量 (表 3), 以 3 个年份变化量作为 2 个阶段的自变量。

表 3 农业非点源污染影响要素自变量体系

Table 3 Independent variable system of agricultural non-point source pollution influence factors

要素	变量名称	依据	处理方法
自然条件	X_1 : 高程/m	衡量区域海拔	区域统计分析
	X_2 : 坡度/(°)	衡量区域地表起伏度	坡度提取和区域统计分析
	X_3 : 年降水量/mm	衡量降雨侵蚀力强度	空间插值和区域统计分析
	X_4 : 归一化植被指数 (无量纲)	衡量污染物净化条件	栅格计算和区域统计分析
	X_5 : 地表粗糙度 (无量纲)	衡量污染物阻滞条件	王金亮等 ^[52] 的研究成果和区域统计分析
人类活动	X_6 : 国内生产总值/万元	衡量经济发展水平	2006 ~ 2016 年四川、重庆和湖北统计年鉴 ^[53 ~ 55]
	X_7 : 农民人均纯收入/元	衡量农民收入状况	2006 ~ 2016 年四川、重庆和湖北统计年鉴 ^[53 ~ 55]
	X_8 : 粮食产量 $\times 10^4$ /t	衡量农业生产能力	2006 ~ 2016 年四川、重庆和湖北统计年鉴 ^[53 ~ 55]
	X_9 : 畜禽产量/万头	衡量畜禽养殖能力	2006 ~ 2016 年四川、重庆和湖北统计年鉴 ^[53 ~ 55]
	X_{10} : 乡村人口数/万人	衡量乡村人口规模	2006 ~ 2016 年四川、重庆和湖北统计年鉴 ^[53 ~ 55]

2 结果与分析

2.1 排放量变化和构成特征

2.1.1 验证结果

借助文献[56]提出的水质浓度计算方法,测算长江上游平原丘陵区各流域区(县)水质浓度均值,将其和岷江、沱江、嘉陵江和长江干流的169个重要河口断面近10年平均水质监测数据进行对比(表4).发现测算值和监测值间误差率较小,说明该

方法较为合理. COD、BOD₅、NH₄⁺-N和TP测算值的大小排序均为:长江干流>嘉陵江>沱江>岷江流域,TN测算值长江干流最高,而岷江最低;COD和BOD₅的断面监测值均以嘉陵江流域浓度最大,其次是长江干流,NH₄⁺-N和TN以沱江流域浓度最大,其次分别是嘉陵江和长江干流,TP以长江干流浓度最大,其次为嘉陵江. 尽管不同流域5种污染物浓度总体均介于Ⅰ和Ⅱ类水质之间,但长江干流和嘉陵江流域水质相对劣于其他流域.

表4 长江上游平原丘陵区多年平均测算值和监测断面值对比/mg·L⁻¹

Table 4 Comparison of major year estimated data with measured data in upper Yangtze River/mg·L⁻¹

流域	COD		BOD ₅		NH ₄ ⁺ -N		TN		TP	
	测算	监测	测算	监测	测算	监测	测算	监测	测算	监测
长江干流	8.21	7.53	4.12	3.76	0.37	0.29	0.73	0.64	2.74	3.01
岷江流域	6.51	7.27	3.37	3.48	0.21	0.25	0.52	0.47	2.18	2.63
沱江流域	6.86	7.59	3.52	3.35	0.26	0.40	0.62	0.66	2.39	2.78
嘉陵江流域	7.98	8.30	3.61	3.79	0.32	0.31	0.58	0.52	2.61	2.94

2.1.2 时序特征

5种污染物排放总量总体呈波动上升趋势,仅个别年份存在突变[图2(a)]. ①2005~2015年COD排放量从135.57×10⁴t增至151.03×10⁴t,年均增长1.41×10⁴t,呈线性增长趋势. ②2005~2015年BOD₅排放量从68.34×10⁴t增至94.00×10⁴t,线性增长趋势明显. ③2005~2015年NH₄⁺-N排放量从30.68×10⁴t增至34.17×10⁴t,年均增长0.34×10⁴t,表现为持续增长后的回落态势. ④2005~2015年TN排放量从93.46×10⁴t增至94.72×10⁴t,年均增长量为1145t,同COD和BOD₅相比其增长趋势最弱. ⑤2005~2015年TP排放量从8.03×10⁴t增至8.41×10⁴t,年均增长量为349t,增长趋势亦有一定波动性. 土地利用变化是长江上游平原丘陵区TN污染的重要影响因素,耕地、建设用地、林草地的增减很大程度上影响区域TN负荷^[27]. 其中,成都平原、川中丘陵、川东平行岭谷与三峡库区腹地COD占比平均值分别为35.17%、40.58%、21.25%和3.19%[图2(b)]; BOD₅占比平均值分别为29.70%、35.10%、26.48%和8.72%[(图2(c)]; NH₄⁺-N占比平均值分别为28.5%、33.46%、27.69%和10.34%[图2(d)]; TN占比平均值分别为32.20%、29.22%、26.49%和12.09%[图2(e)]; TP占比平均值分别为32.25%、27.49%、21.91%和18.35%[图2(f)]. 综合来看,成都平原、川中丘陵和川东平行岭谷排放量相对较大,而三峡库区腹地排放量较低.

2.1.3 空间特征

COD排放量高值区集中于绵阳和广元一带,资

阳和眉山一带和达州、合川和江津一带,低值区位于川西的雅安和乐山,川中的内江和宜宾,重庆市区周边及渝东北等地. 2010年呈片状分布,2015年继续增大,但高值区的空间范围相对稳定; BOD₅排放量的高值区分布的连片性更大,且2015年随排放量的继续增加,高值区也有所增加; NH₄⁺-N高值区分布大体同前两者基本一致,不同的是其主要呈零星分布,且空间范围有较大幅度增加; TN高值区集中在德阳、成都市区附近及眉山等地和重庆西部一带,而低值区分布范围较广; TP范围较小,集中在绵阳、眉山和自贡一带,内江、达州和渝西一带,而低值区集中在三峡库区腹地、川中丘陵大部分地区和成都、眉山和乐山一带. 可以发现,成都平原、川中丘陵和川东平行岭谷是污染物排放高值区,而城市附近和三峡库区腹地是低值区(图3). 这主要是因为平原及丘陵区农业活动频繁和乡村人口相对集中^[53].

2.2 风险等级时空特征

2.2.1 污染物风险等级

COD风险等级在区(县)尺度上体现为:极低(49个)>次低(51个)>极高(35个)>次高(23个),极低和次低等级的区(县)数量大体相当. 风险等级在部分地区提升的同时,亦在某些地区呈降低趋势; BOD₅风险等级的区(县)数量体现为:极低(49个)>次低(48个)>极高(36)>次高(24个),和COD基本一致; NH₄⁺-N风险等级数量表现为:极低(47个)>次高(44个)>极高(42个)>次低(21个),其风险等级高于COD和BOD₅; TN风险等级数量排序表现为:极高(58个)>极低(38个)>次低(37个)>次高(25个),极高风险等级的区(县)占总数36.5%,明显高于其他风险等级; TP风险等

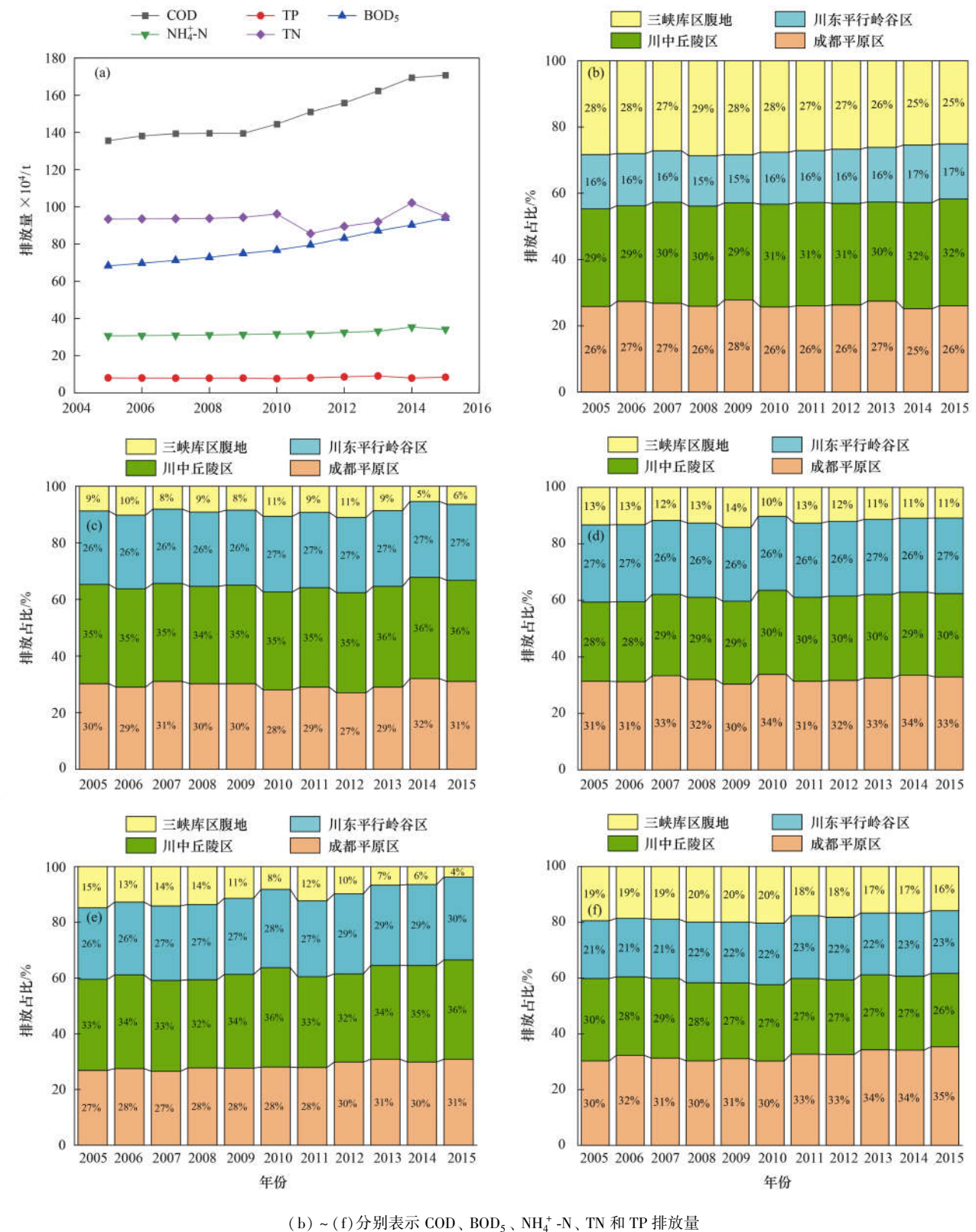


图2 2005~2015年长江上游平原丘陵区与各区污染物质排放量

Fig. 2 Pollutant emissions of plain and valley area in upper Yangtze River from 2005 to 2015

级表现为:极高(60个)>次低(41个)>次高(31个)>极低(27个)等级,排放风险等级偏高,且有继续恶化的趋势[图4(a)].

2.2.2 综合风险等级

综合风险等级总体呈“中部高,四周低”空间分

布格局,极高和次高风险等级伴生性较强,成都、绵阳、资阳、泸州、达州和长垫梁(长寿、垫江和梁平)及周边地区为高风险集聚区,而其他如城镇周边、山地丘陵区为低风险分布区.2010年极高风险等级分布区和2005年基本一致,集中在成都和绵阳

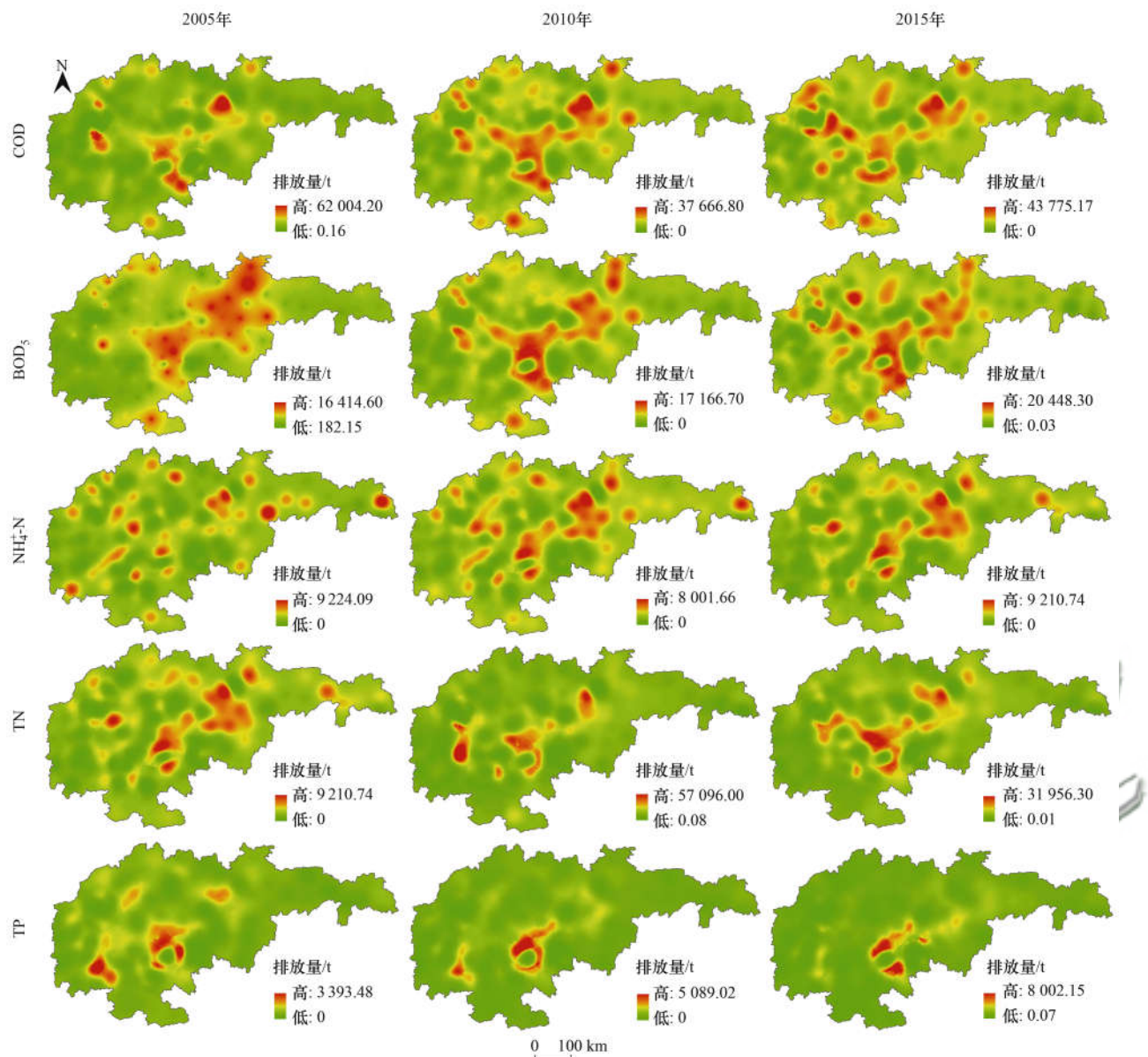


图3 2005~2015年污染物排放量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of pollutant emission volume from 2005 to 2015

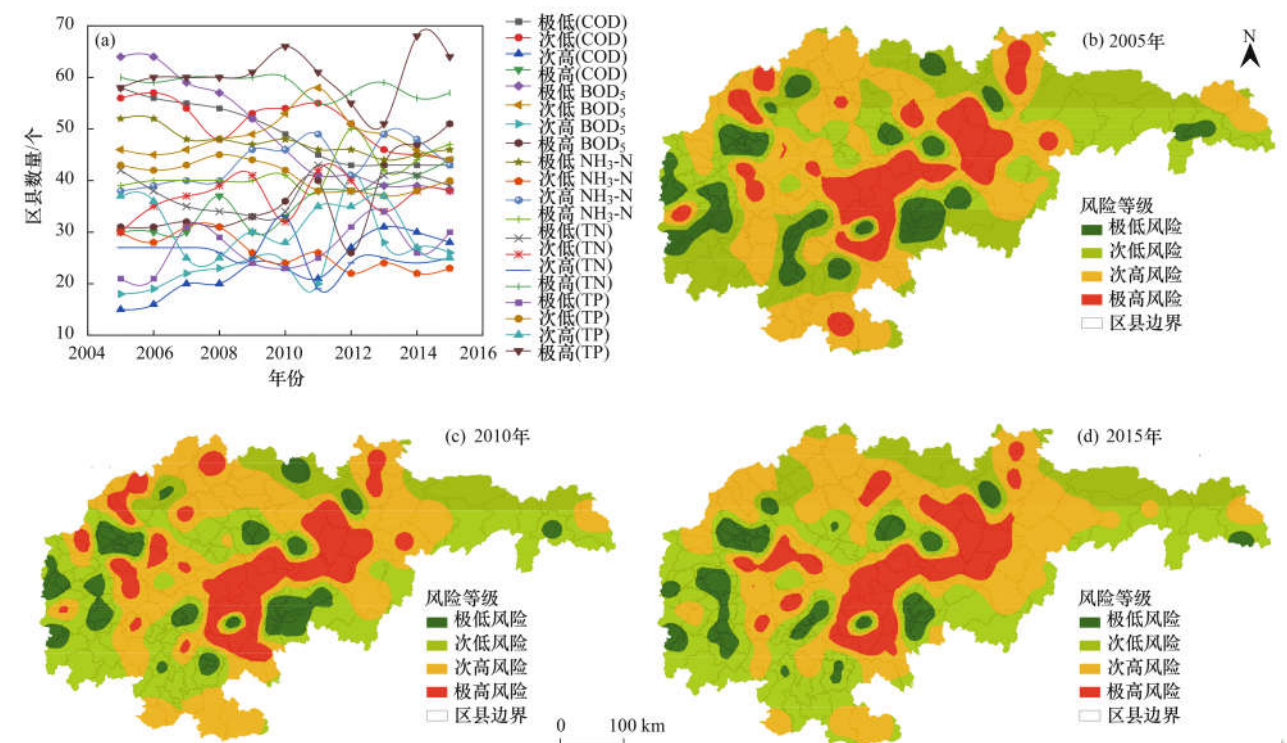
一带,达州和重庆西部部分地区,次高风险等级范围较2005年有所增加,表现为向重庆东北扩展的趋势.较低风险等级基本保持在2005年的状态,极低风险等级除湖北部分缩小外,基本不变;2015年极高风险等级的范围显著增加,尤其简阳和乐至地区、南部和蓬安及资中和荣县等地扩展较为迅速.次高风险等级范围由原来云阳和开县一带向东扩展至巫山等地.相反地,较低风险等级区略微缩小,主要转变为次高等级,而极低风险等级基本维持在2005年的水平[图4(b)~4(d)].与三峡库区腹地相比,成都平原、川中丘陵与川东平行岭谷地区是我国重要粮油基地,种植历史较长,化肥施用量较大,该区域是我国重要生猪生产基地,畜禽粪便产生量较大,加之乡村人口较为集聚,农村生活污水产生量较大.而三峡库区腹地除万州和开州以外,其他多为山区,

种植业相对分散,因多山区乡村人口聚集度不高,其污染物产生量相对较小,加之水土活动相对频繁,有利于降低污染物的分散消纳和过程拦截.但高风险等级区扩展且呈连片状,而低风险等级区胁迫度较大,极低风险等级分布区呈零星状趋势.特别是原来风险较低的三峡库区腹地,其次高风险等级区域有增加的趋势.

3 讨论

3.1 主要驱动因子

模型结果显示,2005~2010年 $HL=8.42$,对应 $P=0.214$ (大于0.05),整体拟合效果较好.粮食产量、畜禽产量和乡村人口数是这一阶段非点源污染产生的主要驱动因素(尤其粮食产量和非点源污染发生的关系最为显著),其回归系数分别为2.32、



(a) 表示 5 种污染物风险等级区县数量, (b) ~ (d) 表示综合风险等级
图 4 2005 ~ 2015 年农业非点源污染物排放风险等级

Fig. 4 Emission risk level of agricultural non-point source pollutants from 2005 to 2015

1.65 和 0.74, 贡献率分别为 34.56%、13.19% 和 5.22%。而 2010 ~ 2015 年 $HL = 7.36$, 对应 $P = 0.362$ (大于 0.05), 拟合效果较好。农民人均纯收入、粮食产量、畜禽产量、国民生产总值和年均降水量是这一阶段非点源污染发生主要驱动因子, 其回归系数分别为: 3.59、2.62、-1.33、0.19 和 -0.34, 贡献率分别为 21.58%、12.82%、7.12%、4.59% 和 1.03% (表 5)。

表 5 2005 ~ 2015 年主要驱动因素 Logistic 回归结果

Table 5 Main driving factors of Logistic regression from 2005 to 2015							
年份	自变量	回归系数 (β)	标准误差 (S. E)	Wald 统计量 (Wald χ^2)/%	自由度 (df)	显著水平 (Sig.)	发生比 [exp(β)]
2005 ~ 2010	粮食产量	2.32	0.36	34.56	1	0.00	12.31
	畜禽产量	1.65	0.29	13.19	1	0.01	0.31
	乡村人口数	0.74	0.44	5.22	1	0.02	0.57
	常量	0.29	0.51	0.48	1	0.04	0.55
2010 ~ 2015	农民人均纯收入	3.59	0.32	21.58	1	0.00	22.63
	粮食产量	2.62	0.57	12.82	1	0.01	0.65
	畜禽产量	-1.33	0.36	7.12	1	0.01	0.47
	国民生产总值	0.19	0.22	4.59	1	0.02	0.38
	年均降水量	-0.34	0.34	1.03	1	0.02	0.12
	常量	0.65	0.81	0.46	1	0.03	7.63

粮食产量和畜禽产量始终是影响研究区非点源污染发生的重要动力因素. 这是因为长江上游平原丘陵区作为我国粮食、生猪和家禽的重要产地, 从而使化肥、有机肥、秸秆以及畜禽粪便成为该区域非点源污染的重要污染源头. 不同的是, 2005 ~ 2010 年间影响研究区非点源污染发生的主要驱动因素为粮食产量、畜禽产量和乡村人口数, 体现为“生产驱动型”, 而 2010 ~ 2015 年间农民人均纯收

入、粮食产量、畜禽产量、国民生产总值和年均降水量则成为主要驱动因素, 体现为“生产和生活驱动型”. 2 个阶段驱动类型的差异主要是因为区域产业结构调整, 生活水平提高和城镇化等综合要素作用的结果. 而年均降水量作为第 2 阶段重要的驱动因素之一, 并不是降水因素本身对非点源污染物的运移过程产生影响, 同时也会影响区域农业生产中秸秆产出量、化肥和有机肥施用量, 从而影响非点

源污染物的类型和负荷。

3.2 驱动机制

2005~2010 年间研究区粮食产量上升较快,年均增长 151.21×10^4 t,增长率为 4.53%。2004 年开始,中央一号文件把农业特别是实现粮食增产放在重要位置。高标准基本农田、沃土工程和中小型农田水利工程等整体推进,很大程度上助推区域粮食生产能力的提升。与此同时,作为成渝城乡统筹改革和三峡水利工程移民的关键时期,土地流转及权属制度的改革也在一定程度上成为促进粮食增产的重要因素。同上一阶段相比,2010~2015 年研究区粮食产量增加相对减缓,但作为我国水稻和玉米等作物的重要产地,对化肥、农药和农膜等的需求量仍居高不下。

2005~2010 年研究区畜禽产量整体变动较大,其中生猪、大型牲畜(牛和马)、羊和家禽出栏数年均增加量分别为 40.93×10^4 头、 3.28×10^4 头、 8.42×10^4 头和减少量为 873.59×10^4 只。平原丘陵区本身就是我国生猪的主要产地之一,在川渝经济一体化发展、产业结构升级、城镇化快速提升等要素的推动下,城乡居民对畜禽的需求量整体呈增加趋势,从而促进规模化养殖场以及农户散养畜禽量迅速增加。2010~2015 年研究区畜禽产量总体呈减少趋势,但波动较上一阶段小。除羊年均增加 16.89×10^4 头以外,生猪、大型牲畜和家禽分别呈 131.437×10^4 头、 2.603×10^4 头和 346.81×10^4 只的下降趋势。畜禽产量的降低在很大程度上减少畜禽粪便的产出量,同时降低对饲料粮的需求,缩小饲料粮种植规模和投入程度,从而降低由畜禽产量所产生非点源污染发生的可能。

2010~2015 年间研究区农民人均纯收入较前一阶段增加迅速,年均增长 1 032.353 元,增长率为 133.93%。伴随农民生活水平的提高,对吃、穿、住、用、行等的投入明显增加,生活污水、粪便以及生活垃圾排放量增加,进而增加水体和土壤中污染物含量。同农民人均纯收入一样,2010 年以后研究区国民生产总值年均增长 3 820.954 亿元,增长率为 12.643%。伴随研究区宏观经济的快速发展,农村地区加大了对生产、生活基础设施的投入,如农田水利和农村道路等,从而加大了对农村地区的生态环境扰动,加之,部分地区污水、垃圾等收集和处理点覆盖不够,由基础设施建设所导致的非点源污染程度加重。

2010~2015 年研究区年均降水量波动较为显著。流域尺度上,年均降水量的显著波动都会导致土壤中的养分元素(N、P)、坑塘和小型水库富集的污

染物以及畜禽粪便、生活污水和垃圾等污染物通过地表径流汇入江河和湖泊,从而增加非点源污染发生的可能^[57]。

2005~2015 年乡村人口数总体呈快速增加趋势,年均增长 112.21 万人,增长率为 2.55%。尽管伴随城镇化的快速提升大量乡村人口进城居住或务工,从而转化为实际意义上的城镇人口,但是研究区优越的地理条件和为确保城乡人口日益增长的“米袋子,菜篮子”需求不受影响,仍有大量人口留在农村从事农业生产(种养殖)。在这种情况下,城乡人口规模及其生活需求的变化,在很大程度上改变所在区域的土地利用方式和结构,如在耕地后备资源不充足的情况下,农业生产过程中必定会加大化肥、农药和农膜等的投入,加之,城乡居民膳食结构的改变,肉蛋奶需求量的增加也促使畜禽养殖数量的提升,进而导致畜禽粪便排放的增加,这些都在很大程度上增加非点源污染物来源和排放可能。这里是我国传统农业生产的重要区域之一,种植业生产过程中化肥、农药等施用过多,且养殖业又是我国重要的畜禽产品生产地之一,由农村人口数量变化促使的种养殖规模和投入的变化,大大增加了非点源污染物来源和污染发生的可能。

不同的是,成都平原由于更具粮食生产优势,对秸秆、有机肥和化肥等污染源贡献度更大^[35]。川中丘陵与川东平行岭谷腹地畜禽养殖量更大,且以散养为主,对畜禽养殖污染源贡献度更大^[58]。三峡库区腹地农民人均收入对农业非点源污染贡献度更大。三峡库区因地形起伏较大,因降雨而造成的土壤侵蚀作用比其他地区都强^[28]。同时,三峡库区腹地乡村人口总数远不及其他 3 个地区,但是农业生产较其他地区落后,三峡库区腹地乡村人口对农业非点源污染物的贡献度反而较大^[36]。

4 结论

(1)2005~2015 年 5 种污染物排放量分别增加 15.46×10^4 、 25.66×10^4 、 3.49×10^4 、 1.26×10^4 和 0.38×10^4 t。高值区主要集中于成都平原、川中丘陵与川东平行岭谷,而低值区主要出现在城镇城区和地形较为复杂的三峡库区腹地。

(2)COD 风险等级相对较轻,但存在较大的由低风险区向高风险区转换的可能;BOD₅ 风险等级增加较为显著;NH₄⁺-N 风险等级显著高于 COD 和 BOD₅,且风险等级的增加趋势也较显著;TN 风险等级在逐渐提高,高风险范围有所扩大;TP 风险等级偏高且有继续恶化的趋势。

(3)综合风险等级总体呈“中部高,四周低”的

空间格局, 极高和次高风险等级伴生性较强, 成都平原、川中丘陵与川东平行岭谷区综合风险等级较高, 而城镇周边和三峡库区腹地大部分地区风险等级较低。

(4) 2005 ~ 2010 年间粮食产量、畜禽产量和乡村人口数是主要驱动因子, 体现为“生产驱动型”, 而 2010 ~ 2015 年间农民人均纯收入、粮食产量、畜禽产量、国民生产总值和年均降水量是主要驱动因子, 体现为“生产和生活协同驱动型”。成都平原受粮食生产驱动较大, 川中丘陵和川东平行岭谷受畜禽养殖驱动较大, 三峡库区腹地受农民人均纯收入、降雨和乡村人口驱动较大。

(5) 本文的研究结果有助于认识近 10 年来长江上游平原丘陵区农业非点源污染特征和驱动机制。后续区域内农业非点源污染防控应该推广诸如测土配方施肥、畜禽粪便发酵与污水集中处理等技术, 控制污染源头。采取一系列工程措施(如种植植物篱等), 阻控非点源污染发生过程。同时, 还需要构建生态湿地提升消纳污染物能力。

参考文献:

- [1] 国家环境保护总局自然生态保护司. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [2] 周早弘. 农业面源污染实证分析与政策选择[M]. 北京: 气象出版社, 2010.
- [3] 娄保锋, 卓海华, 周正, 等. 近 18 年长江干流水质和污染物通量变化趋势分析[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(5): 1150-1162.
Lou B F, Zhuo H H, Zhou Z, *et al.* Analysis on alteration of water quality and pollutant fluxes in the Yangtze Mainstem during recently 18 years [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(5): 1150-1162.
- [4] Liu D D, Bai L, Qiao Q, *et al.* Anthropogenic total phosphorus emissions to the Tuojiang River Basin, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, **294**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126325.
- [5] Hou X N, Xu Z, Tang C H, *et al.* Spatial distributions of nitrogen and phosphorus losses in a basin and responses to best management practices—Jialing River Basin case study [J]. Agricultural Water Management, 2021, **255**, doi: 10.1016/j.agwat.2021.107048.
- [6] Ding X W, Dong X S, Hou B D, *et al.* Visual platform for water quality prediction and pre-warning of drinking water source area in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, **309**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127398.
- [7] Kaffas K, Pinaras V, Al Sayah M J, *et al.* A USLE-based model with modified LS-factor combined with sediment delivery module for Alpine basins [J]. CATENA, 2021, **207**, doi: 10.1016/j.catena.2021.105655.
- [8] Zhang K L, Yu Y, Dong J Z, *et al.* Adapting & testing use of USLE K factor for agricultural soils in China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, **269**: 148-155.
- [9] Mancino G, Nolè A, Salvati L, *et al.* In-between forest expansion and cropland decline: a revised USLE model for soil erosion risk under land-use change in a Mediterranean region [J]. Ecological Indicators, 2016, **71**: 544-550.
- [10] Schilling K E, Wolter C F. Contribution of base flow to nonpoint source pollution loads in an agricultural watershed [J]. Groundwater, 2001, **39**(1): 49-58.
- [11] Tim U S, Jolly R. Evaluating agricultural nonpoint-source pollution using integrated geographic information systems and hydrologic/water quality model [J]. Journal of Environmental Quality, 1994, **23**(1): 25-35.
- [12] Borah D K, Bera M. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: review of mathematical bases [J]. Transactions of the ASAE, 2003, **46**(6): 1553-1566.
- [13] Arnold J G, Moriasi D N, Gassman P W, *et al.* SWAT: model use, calibration, and validation [J]. Transactions of the ASABE, 2012, **55**(4): 1491-1508.
- [14] Schneiderman E, Järvinen M, Jennings E, *et al.* Modeling the effects of climate change on catchment hydrology with the GWLF model [A]. In: George G (Ed.). The Impact of Climate Change on European Lakes [M]. Dordrecht: Springer, 2010. 33-50.
- [15] Zeiger S J, Owen M R, Pavlowsky R T. Simulating nonpoint source pollutant loading in a Karst Basin: a SWAT modeling application [J]. Science of the Total Environment, 2021, **785**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147295.
- [16] Shrestha N K, Rudra R P, Daggupati P, *et al.* A comparative evaluation of the continuous and event-based modelling approaches for identifying critical source areas for sediment and phosphorus losses [J]. Journal of Environmental Management, 2021, **277**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111427.
- [17] Giri S. Water quality prospective in Twenty First Century: status of water quality in major river basins, contemporary strategies and impediments: a review [J]. Environmental Pollution, 2021, **271**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.116332.
- [18] Ma Y K, Hao S N, Zhao H T, *et al.* Pollutant transport analysis and source apportionment of the entire non-point source pollution process in separate sewer systems [J]. Chemosphere, 2018, **211**: 557-565.
- [19] Wang Y D, Yang J, Liang J P, *et al.* Analysis of the environmental behavior of farmers for non-point source pollution control and management in a water source protection area in China [J]. Science of the Total Environment, 2018, **633**: 1126-1135.
- [20] 李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 等. 三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析 [J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1839-1846.
Li M L, Jia M D, Sun T C, *et al.* Spatiotemporal change and source apportionment of non-point source nitrogen and phosphorus pollution loads in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1839-1846.
- [21] 席浩郡, 刘贝贝, 黄雅娟, 等. 北京市北沙河小流域非点源氮、磷负荷估算与源解析 [J]. 环境工程技术学报, 2021, **11**(2): 258-266.
Xi H J, Liu B B, Huang Y J, *et al.* Estimation and sources apportionment of non-point source nitrogen and phosphorus loads in Beishahe sub-catchment of Beijing [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, **11**(2): 258-266.
- [22] 李华林, 张建军, 张耀方, 等. 基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析 [J]. 环境科学, 2021, **42**(6): 2796-2809.
Li H L, Zhang J J, Zhang Y F, *et al.* Analysis of spatial-

- temporal variation characteristics of potential non-point source pollution risks in the Upper Beiyun River Basin using different weighting methods[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(6): 2796-2809.
- [23] 高晓曦, 左德鹏, 马广文, 等. 降水空间异质性对非点源关键源区识别面积变化的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4564-4571.
- Gao X X, Zuo D P, Ma G W, *et al.* Impact of spatial heterogeneity of precipitation on the area change in critical source area of non-point sources pollution[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4564-4571.
- [24] 贾玉雪, 帅红, 韩龙飞. 基于“源-汇”理论的资江下游地区非点源污染风险区划[J]. *应用生态学报*, 2020, **31**(10): 3518-3528.
- Jia Y X, Shuai H, Han L F. Zonation on non-point source pollution risk in the lower reaches of Zijiang River based on the “source-sink” theory[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(10): 3518-3528.
- [25] 邓华, 高明, 龙翼, 等. 石盘丘小流域不同土地利用方式下土壤氮磷流失形态及通量[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 251-262.
- Deng H, Gao M, Long Y, *et al.* Characteristics of soil nitrogen and phosphorus losses under different land-use schemes in the Shipanqiu Watershed [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 251-262.
- [26] Qian Y, Sun L, Chen D K, *et al.* The response of the migration of non-point source pollution to land use change in a typical small watershed in a semi-urbanized area [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **785**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147387.
- [27] Xue L H, Hou P F, Zhang Z Y, *et al.* Application of systematic strategy for agricultural non-point source pollution control in Yangtze River basin, China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, **304**, doi: 10.1016/j.agee.2020.107148.
- [28] Li M J, Liu Z W, Yu Q, *et al.* Exploratory analysis on spatio-seasonal variation patterns of hydro-chemistry in the upper Yangtze River basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, **597**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126217.
- [29] Tian Z B, Wang L J, Li Y J, *et al.* Changes of phosphorus delivery from Yangtze River to Dongting Lake under new water and sediment conditions [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **316**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128248.
- [30] Wang W Z, Chen L, Shen Z Y. Dynamic export coefficient model for evaluating the effects of environmental changes on non-point source pollution [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **747**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141164.
- [31] Hua L L, Li W C, Zhai L M, *et al.* An innovative approach to identifying agricultural pollution sources and loads by using nutrient export coefficients in watershed modeling[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, **571**: 322-331.
- [32] Wang K, Wang P X, Zhang R D, *et al.* Determination of spatiotemporal characteristics of agricultural non-point source pollution of river basins using the dynamic time warping distance [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, **583**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124303.
- [33] 钟建兵, 邵景安, 杨玉竹. 生计多样化背景下种植业非点源污染负荷演变[J]. *地理学报*, 2016, **71**(7): 1201-1214.
- Zhong J B, Shao J A, Yang Y Z. Characteristics of non-point source pollution load of crop farming undergoing the background of livelihood diversification[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, **71**(7): 1201-1214.
- [34] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分数据集 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1999.
- [35] 丛宏斌, 姚宗路, 赵立欣, 等. 中国农作物秸秆资源分布及其产业体系与利用路径[J]. *农业工程学报*, 2019, **35**(22): 132-140.
- Cong H B, Yao Z L, Zhao L X, *et al.* Distribution of crop straw resources and its industrial system and utilization path in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, **35**(22): 132-140.
- [36] 张广纳, 邵景安, 王金亮, 等. 三峡库区重庆段农村面源污染时空格局演变特征[J]. *自然资源学报*, 2015, **30**(7): 1197-1209.
- Zhang G N, Shao J A, Wang J L, *et al.* Spatial and temporal variations of agricultural non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir Area of Chongqing [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, **30**(7): 1197-1209.
- [37] 李杰霞, 杨志敏, 陈庆华, 等. 重庆市农业面源污染负荷的空间分布特征研究[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2008, **30**(7): 145-151.
- Li J X, Yang Z M, Chen Q H, *et al.* Spatial distribution of agricultural non-point source pollution in Chongqing [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2008, **30**(7): 145-151.
- [38] 徐丽萍, 杨其军, 王玲, 等. 新疆地区农业面源污染空间分异研究[J]. *水土保持通报*, 2011, **31**(4): 150-153, 158.
- Xu L P, Yang Q J, Wang L, *et al.* Spatial variation of agricultural non-point pollution in Xinjiang Area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, **31**(4): 150-153, 158.
- [39] 曾吉彬, 邵景安, 魏朝富, 等. 西南山地丘陵区永久性基本农田的多目标决策划定方法[J]. *农业工程学报*, 2014, **30**(16): 263-274.
- Zeng J B, Shao J A, Wei C F, *et al.* Delimitation of permanent basic farmland in mountain and hill areas in southwest China based on multiple-objective decision model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, **30**(16): 263-274.
- [40] 杨兆青, 陆兆华, 刘丹, 等. 煤炭资源型城市生态安全评价——以锡林浩特市为例[J]. *生态学报*, 2021, **41**(1): 280-289.
- Yang Z Q, Lu Z H, Liu D, *et al.* Ecological security evaluation on the coal resource-based city: a case of Xilinhot City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(1): 280-289.
- [41] Ismail H Y, Fayyad S, Ahmad M N, *et al.* Modelling of yields in torrefaction of olive stones using artificial intelligence coupled with kriging interpolation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **326**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129020.
- [42] 顾振飞, 曹见飞, 王翠秀, 等. 考虑人为因素影响的重金属含量分析用土壤样品采集方法研究——以龙口为例[J]. *土壤通报*, 2021, **52**(3): 670-678.
- Gu Z F, Cao J F, Wang C X, *et al.* Study on the Method of soil sample collection for heavy metal content analysis considering the influence of human factors—taking Longkou as an example [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, **52**(3): 670-678.
- [43] 谭少军, 谢贤健, 王历, 等. 基于 GIS 的城市镉元素空间分布特征及其污染评价[J]. *水土保持研究*, 2016, **23**(3): 333-337.
- Tan S J, Xie X J, Wang L, *et al.* Spatial distribution characteristics of Cd and evaluation on Cd pollution situation in urban area based on GIS [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, **23**(3): 333-337.
- [44] Wang H Y, Qin F, Xu C D, *et al.* Evaluating the suitability of

- urban development land with a Geodetector [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **123**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107339.
- [45] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [46] Ma J M, Yuan C, Zhou J Y, *et al.* Logistic model outperforms allometric regression to estimate biomass of xerophytic shrubs [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **132**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108278.
- [47] 蒋宁, 苏凤环, 徐京华, 等. 尼泊尔地震重灾区同震滑坡的分形特征及其原因分析[J]. *山地学报*, 2020, **38**(5): 699-709.
- Jiang N, Su F H, Xu J H, *et al.* Fractal Characteristics and causes of co-seismic landslides in the Nepal Earthquake Extremely Stricken Areas [J]. *Mountain Research*, 2020, **38**(5): 699-709.
- [48] 唐利, 邵景安, 郭跃, 等. 社区水平森林景观格局动态特征与驱动因素[J]. *生态学报*, 2017, **37**(6): 2101-2117.
- Tang L, Shao J A, Guo Y, *et al.* Forest landscape pattern dynamic and its driving factors at the community level [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(6): 2101-2117.
- [49] 杨薇, 李晓晓, 李铭, 等. 基于 Logistic 回归模型的黄河三角洲淡水恢复湿地大型底栖生物种群分布模拟[J]. *生态学报*, 2017, **37**(22): 7750-7759.
- Yang W, Li X X, Li M, *et al.* Macrobenthic species distribution modeling based on a binary Logistic regression: a case study of freshwater restoration wetlands in the Yellow River Delta of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(22): 7750-7759.
- [50] 王浩, 贾仰文, 杨贵羽, 等. 海河流域二元水循环及其伴生过程综合模拟[J]. *科学通报*, 2013, **58**(12): 1064-1077.
- Wang H, Jia Y W, Yang G Y, *et al.* Integrated simulation of the dualistic water cycle and its associated processes in the Haihe River Basin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(27): 3297-3311.
- [51] 王浩, 贾仰文. 变化中的流域“自然-社会”二元水循环理论与研究方法[J]. *水利学报*, 2016, **47**(10): 1219-1226.
- Wang H, Jia Y W. Theory and study methodology of dualistic water cycle in river basins under changing conditions [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, **47**(10): 1219-1226.
- [52] 王金亮, 谢德体, 邵景安, 等. 基于最小累积阻力模型的三峡库区耕地地面污染源-汇风险识别[J]. *农业工程学报*, 2016, **32**(16): 206-215.
- Wang J L, Xie D T, Shao J A, *et al.* Identification of source-sink risk pattern of agricultural non-point source pollution in cultivated land in Three Gorge Reservoir Area based on accumulative minimum resistance model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(16): 206-215.
- [53] 四川省统计局, 国家统计局四川调查总队. 四川统计年鉴 2006-2016 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2006-2016.
- Sichuan Provincial Bureau of Statistics, Sichuan Investigation Team of National Bureau of Statistics. *Sichuan statistical yearbook 2006-2016* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2006-2016.
- [54] 湖北省统计局, 国家统计局湖北调查总队. 湖北统计年鉴 2006-2016 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2006-2016.
- Hubei Provincial Statistics Bureau, Hubei Investigation Team of National Bureau of Statistics. *Hubei statistical yearbook 2006-2016* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2006-2016.
- [55] 重庆市统计局, 国家统计局重庆调查总队. 重庆统计年鉴 2006-2016 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2006-2016.
- Chongqing Municipal Bureau of Statistics, Chongqing Survey Team of National Bureau of Statistics. *Chongqing statistical yearbook 2006-2016* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2006-2016.
- [56] 张广纳, 邵景安, 王金亮. 基于农业面源污染的三峡库区重庆段水质时空格局演变特征[J]. *自然资源学报*, 2015, **30**(11): 1872-1884.
- Zhang G N, Shao J A, Wang J L. Spatial and temporal variations of water resource security level in the Three Gorges Reservoir Area of Chongqing based on agricultural non-point source pollutant [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, **30**(11): 1872-1884.
- [57] Wang A, Yang D W, Tang L H. Spatiotemporal variation in nitrogen loads and their impacts on river water quality in the upper Yangtze River basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, **590**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125487.
- [58] Fan D, Mao Y X, Xu L H, *et al.* Effects of livestock and poultry breeding pollution on health risks: evidence from a hog breeding case in rural China [J]. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 2020, **18**(4): 342-349.

CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM _{2.5} Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM _{2.5} Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China	 HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} During COVID-19 Control in Suzhou	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM _{2.5} Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM _{2.5} in Baoding City in Winter	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM _{2.5} in Jiangbei New Area, Nanjing	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transportation and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River	 WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia	 ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area	 ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-jen, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water	 CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City	 WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years	 GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China	 TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland	 SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau	 WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China	 LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province	 ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (<i>Rhinopithecus roxellana</i>) Habitat in Shennongjia Mountains	 YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation	 XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)