

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.6
第41卷 第6期

目次

基于SPAMS的天津市夏季环境受体中颗粒物的混合状态及来源	林秋菊, 徐娇, 李梅, 王伟, 史国良, 冯银厂 (2505)
南京北郊降水无机离子和有机酸的化学特征及来源分析	杨笑影, 曹芳, 林煜棋, 章炎麟 (2519)
西安市PM _{2.5} 中水溶性离子的季节变化特征	黄含含, 王羽琴, 李升苹, 陈庆彩 (2528)
新疆石化工业区颗粒物含水量和酸度对二次无机组分形成的影响	刘会斌, 迪丽努尔·塔力甫, 王新明, 张潇潇, 王威, 阿布力克木·阿不力孜, 买里克扎提·买合木提, 刘伟 (2536)
长秋季生物质燃烧对PM _{2.5} 中WSOC吸光性的影响	孟德友, 曹芳, 翟晓瑶, 张世春, 章炎麟 (2547)
2019年5月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源	王倩 (2555)
南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	曹梦瑶, 林煜棋, 章炎麟 (2565)
郑州市春季大气污染过程VOCs特征、臭氧生成潜势及源解析	任义君, 马双良, 王思维, 于世杰, 李一丹, 张瑞芹, 尹沙沙 (2577)
上甸子区域背景站VOCs污染特征及其对臭氧生成贡献	韩婷婷, 李颖若, 邱雨露, 何迪, 王焱, 马志强 (2586)
北京市餐饮业大气污染物排放特征	孙成一, 白画画, 陈雪, 翟翼飞, 高启天, 何万清, 聂磊, 石爱军, 李国傲 (2596)
北京市农业机械排放因子与排放清单	王凯, 樊守彬, 亓浩云 (2602)
北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化	李贝贝, 黄玉虎, 毕晓辉, 刘李阳, 秦建平 (2609)
基于MODIS_C061的长三角地区AOD与Angström指数时空变化分析	张颖蕾, 崔希民 (2617)
环渤海地区2,4,4'-三氯联苯的多介质归趋模拟	张毅, 马艳飞, 宋帅, 吕永龙, 张盛, 吴强 (2625)
岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析	周石磊, 孙悦, 苑世超, 彭瑞哲, 刘世崇, 岳奇丞, 张航, 王周强, 李再兴, 罗晓 (2635)
“河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析	李悦昭, 陈海洋, 孙文超 (2646)
伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价	姜时欣, 翟付杰, 张超, 王蒙蒙, 单保庆 (2653)
典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析	赵然, 韩志伟, 申春华, 张水, 涂汉, 郭永丽 (2664)
沉积物参与氮磷脉冲式输入对太湖水体营养盐浓度和藻类生长的影响	陈洁, 许海, 詹旭, 许笛, 朱广伟, 朱梦圆, 李鹏飞, 康丽娟 (2671)
丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因素	李胜男, 陈豪宇, 彭华, 李芸君, 朱坚, 简燕, 纪雄辉 (2679)
胶网藻对水体中恩诺沙星的毒性响应及去除作用	王振方, 韩子玉, 王梦雪, 马逸驰, 王婷, 王丽卿, 张玮 (2688)
不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较	桑雨璇, 杨珈乐, 熊怡, 尹文博, 汪华, 王和云 (2698)
过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用	张帅, 李大鹏, 丁玉琴, 徐楚天, 许鑫澎, 孙培荣, 赵哲豪, 黄勇 (2706)
基于区域DNDC的稻田轮作氮素空间分异与驱动分析:以晋江流域为例	王亚楠, 祝伟, 祁新华, 范水生 (2714)
不同铁锰浓度的低温铁锰氨地下水净化中氨氮去除途径	张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (2727)
高晶度Mn-Fe LDH催化剂活化过一硫酸盐降解偶氮染料RBK5	李立, 吴丽颖, 董正玉, 王霖, 张倩, 洪俊明 (2736)
Fe-cyclam/H ₂ O ₂ 体系催化降解罗丹明B机制	余雨清, 陈翔宇, 蔡荣华, 黄歆珏, 陈曼 (2746)
微生物光电化学池去除硝酸盐氮:以PANl/TiO ₂ -NTs为光阳极	卢忆, 周海珊, 彭瑞建, 叶杰旭, 陈建孟, 宋爽, 张士汉 (2754)
缺氧MBR-MMR处理海水养殖废水性能及膜污染特性	陈凡雨, 徐仲, 尤宏, 柳锋, 李之鹏, 陈其伟, 韩红卫 (2762)
HRT对改良式A ² /O-BAF反硝化除磷脱氮的影响	赵凯亮, 刘安迪, 南彦斌, 梁利民, 王云霞, 陈永志 (2771)
重金属Ni(II)对厌氧氨氧化脱氮性能的影响及其动力学特征变化	孙琪, 赵白航, 范飒, 周邦磊, 李玉璋 (2779)
异养硝化-好氧反硝化混合菌对尿素的去除及重金属和盐度的影响	王萌萌, 曹刚, 张迪, 冯乃亮, 潘涌璋 (2787)
火山岩填料曝气生物滤池的SNAD工艺启动特性及功能菌丰度演替	薛嘉俊, 张绍青, 张立秋, 李淑更, 姚海楠, 耿忠轩, 李鸿, 刘晓玲 (2796)
游离羟胺对两种典型亚硝态氮氧化菌活性的影响	沈琛, 张树军, 彭永臻 (2805)
死菌DNA对厌氧消化污泥中抗生素抗性基因及微生物群落分析的干扰	苏宇傲, 刘宏波, 毛秋燕, 张慧旻, 张衍, 刘和 (2812)
中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价	陈文轩, 李茜, 王珍, 孙兆军 (2822)
土壤环境质量预警体系构建与应用	李笑诺, 丁寿康, 陈卫平, 王夏晖, 吕斯丹, 刘睿 (2834)
不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系	毛霞丽, 邱志腾, 张爽, 沈倩, 章明奎 (2842)
长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征	宁玉菲, 魏亮, 魏晓梦, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 吴金水 (2852)
生物质炭对磷富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响	黄洋, 郭晓, 胡学玉 (2861)
基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评价	肖冰, 薛培英, 韦亮, 刘成程, 高培培, 樊利敏, 杜佳燕, 刘文菊 (2869)
重构土壤垂直剖面重金属Cd赋存形态及影响因素	胡青青, 沈强, 陈飞, 尹炳, 邹宏光, 庄红娟, 张世文 (2878)
新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果	陈兆进, 李英军, 邵洋, 林立安, 徐鸽, 陈彦, 田伟, 姚伦广, 韩辉 (2889)
三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征	李丽娟, 李昌晓, 陈春桦, 杨治华, 陈雪梅 (2898)
滇池水中细菌和古菌氮代谢功能基因的空间分布	张宇, 左剑恶, 王丝可, Alisa Salimova, 李爱军, 李玲玲 (2908)
模拟升温对冰川前缘地微生物种群的影响	王愉琬, 马安周, 种国双, 谢飞, 周汉昌, 刘国华, 庄国强 (2918)
水肥气耦合对温室番茄土壤N ₂ O排放及番茄产量的影响	商子惠, 蔡焕杰, 陈慧, 孙亚楠, 李亮, 朱艳, 王晓云 (2924)
矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦的毒性作用	尚誉, 杨丰隆, 宁夏, 董铁茹, 桑楠 (2936)
海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价	汪慧娟, 旷泽行, 周贤, 覃晓青, 黄洪辉 (2942)
春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因素分析	贺玉晓, 李珂, 任玉芬, 王思琪, 方文颖 (2951)
热解温度和时间对香蒲生物炭性质的影响及生态风险评估	蔡朝卉, 楚沉静, 郑浩, 罗先香, 李锋民 (2963)
长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年)	蒋自然, 金环环, 王成金, 叶士琳, 黄艳豪 (2972)
《环境科学》征订启事(2595) 《环境科学》征稿简则(2687) 信息(2697, 2713, 2811)	

基于区域 DNDC 的稻田轮作氮素空间分异与驱动分析:以晋江流域为例

王亚楠¹, 税伟^{1*}, 祁新华², 范水生³

(1. 福州大学环境与资源学院, 福州 350116; 2. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 3. 福建农林大学安溪茶学院, 安溪 362400)

摘要: 稻田轮作氮素动态循环对于保障居民食物需求, 实现区域生态可持续发展等目标具有重要现实意义. 从区域尺度视角分析各氮素指标空间分异状态, 及其驱动影响因素, 可为农田管理措施的实施提供宏观决策依据. 选取晋江流域内的稻田轮作区作为研究对象, 运用反硝化分解 (denitrification decomposition, DNDC) 模型、热点分析以及地理加权回归 (geographical weighted regression, GWR) 建模等技术, 模拟了稻田生态系统内氮素循环, 分析了各氮素指标空间分异特征与驱动归因. 结果表明: ①经过参数率定与结果验证的 DNDC 模型体现出较好的区域适应性; ②不同轮作模式间对比发现, 稻-蔬轮作模式表现为最大氮肥输入量、最高作物氮素吸收效率以及最大氮素损失量, 其次为稻-稻轮作模式, 最后为稻-空闲轮作模式; ③在各氮素指标空间分布方面, 除作物氮素吸收量呈随机分布, NH_3 排放量、 N_2O 排放量和氮素淋失表现为空间聚类分布, 基于标准差椭圆的集约主趋势线主要以“感德镇—长坑乡”一线为主; ④由各氮素指标空间影响因素分析发现, 土壤属性因子具有最强影响效果, NH_3 排放量和 N_2O 排放量中 $\text{SOC}_{\max}$ 为最强影响因子, 空间分布呈现“西高东低”, 氮素淋失损失量中 $\text{pH}_{\min}$ 表现为最强影响因子, 空间分布呈“南北高东西低”.

关键词: 区域 DNDC; 稻田轮作; 地理加权回归 (GWR); 氮素模拟; 晋江流域

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)06-2714-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.201910007

Spatial Differentiation and Driving Analysis of Nitrogen in Rice Rotation Based on Regional DNDC: Case Study of Jinjiang River Watershed

WANG Ya-nan¹, SHUI Wei^{1*}, QI Xin-hua², FAN Shui-sheng³

(1. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 2. College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 3. Anxi College of Tea Science, Fujian Agriculture and Forest University, Anxi 362400, China)

Abstract: Cycling dynamics of nitrogen in paddy rotation areas have a practical significance for ensuring food supply and realizing sustainable development of the regional ecology in the Min delta urban agglomeration. However, with rapid urbanization, the negative externalities of paddy rotation areas have been gradually increased because of unreasonable utilization behavior, and the environmental costs are increasing. Therefore, the spatial differentiation of nitrogen indicators and its driving factors were analyzed, which provides a macro-decision making basis for the implementation of farmland management measures. In this study, the paddy rotation area in Jinjiang River watershed was selected as the research object. The denitrification decomposition (DNDC) model was used to simulate the nitrogen cycle in the paddy rotation area. The hot spot analysis and geographical weight regression (GWR) model were used to analyze the spatial otherness characteristics and driving attribution of various nitrogen indices. The main results showed that: ① The DNDC model was validated by parameters, and the results showed preferably regional adaptability. ② Based on the comparison of different rotation patterns, the rice-vegetable rotation pattern not only established the maximum input of nitrogen fertilizer but also revealed the highest nitrogen absorption efficiency and the maximum values of nitrogen loss, followed by the rice-rice rotation pattern and rice-fallow rotation pattern. ③ In the spatial distribution of nitrogen indicators, except for the crop nitrogen absorption, the NH_3 emission, N_2O emission and nitrogen leaching showed a spatial clustering distribution, and the main trend line based on the standard deviation ellipse was mainly “Gande-Changkeng” township. ④ According to the analysis of spatial influence factors for various nitrogen indices, soil attribute factors had the strongest effect; the $\text{SOC}_{\max}$ was the strongest influential factor for both NH_3 and N_2O emissions, and the spatial distribution was “west high, east low”. The $\text{pH}_{\min}$ was the strongest influential factor in nitrogen leaching, and the spatial distribution was “north and south high, east and west low”.

Key words: regional DNDC; paddy rotation; geographically weighted regression (GWR); nitrogen simulation; Jinjiang River watershed

稻田作为我国南方主要的作物类型, 一直以来备受关[1]. 氮素作为作物生长需求量最大的物质元素, 在作物吸收、转化、利用和排出的过程中, 不断在土壤和大气等环境介质中, 进行着氮素的循环、传递和多样的化学生物反应. 生态系统的物流理论指

收稿日期: 2019-10-04; 修订日期: 2020-01-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502905)

作者简介: 王亚楠(1993~), 女, 硕士, 主要研究方向为土地利用/覆被变化与生态环境效应响应, E-mail: yananwang2016@163.com

* 通信作者, E-mail: shuiweiman@163.com

出,系统内的物质在流动的过程中不会消失,多只发生形态的改变,氮素在稻田随氮素循环过程进行着氮素形态的转变和再分配,该过程常常受到自然环境和人类活动的影响^[2]. 以 N_2 的形式稳定存在于大气中的氮素,可通过豆科植物等将 N_2 转化为硝态氮,或是闪电作用使得 N_2 和 O_2 生成 NO ,并进一步化合反应,最后被土壤吸附. 在土壤中的氮素 95.98% 以上是呈有机态存在,利于被植物吸收,吸收效率受到气温、土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)和土壤容重等因素的影响. 无机氮主要包括硝态氮和铵态氮. 其中,铵态氮经硝化作用可转变为硝态氮,但淹水程度、pH 值和土壤温度等条件都可能使硝化作用被抑制,使土壤中的铵态氮浓度显著增加,并释放出 NH_3 和 N_2O 气体,如廖千家骅等^[3]的研究分析中指出,pH 和土壤中全氮含量交互作用与 N_2O 排放通量呈显著正相关,当 $pH > 8$ 或是平均气温在 $10 \sim 20^\circ C$ 时,多促进 N_2O 排放. 除气体损失形态外,无机氮在大气压强、地形、降雨、淋失水分和泥沙输移作用等影响下,氮素下渗和径流速率等表现出显著增强. 可发现,氮素指标的多寡,不仅是单一因素影响作用的结果,常表现为多指标的综合作用. 因此,明确各驱动因子对稻田生态系统内各氮素指标的驱动差异,对于在稻田土壤减少氮素损失,进一步促进作物氮素吸收等方面具有重要参考价值.

借助可基于区域尺度能定量描述各氮素指标动态分布的模拟工具,对比评估多种氮素循环模拟模型后^[4],选择符合本研究区位且具有较高模拟精度的反硝化分解(denitrification decomposition, DNDC)模型^[5]. DNDC 最早由 Li 等^[6]于 1992 年提出,一度被评选为亚太地区最适宜推广应用的“植物-土壤-环境”间碳氮循环模拟模型. 模型最初包含土壤气候水文模块、土壤有机碳分解模块和反硝化模块,随后添加了基于经验方程的植物生长模块,为了优化植物生长的碳氮循环过程模块,在其中加入了“光合作用-土壤水分蒸发蒸腾”模块. 在过去 20 多年的应用过程中,已有包括中国在内的多个国家的农业、草原和森林等研究领域得到了应用和验证^[7,8]. 不同于 DNDC 模型站点尺度下仅能关注于指定区域的氮素循环过程的特点,区域尺度能为宏观决策提供具有空间性和整体性的数据. 目前 DNDC 在区域尺度应用广泛且具有较高模拟精度,在不经内部参数调整的情况下,模型模拟结果也可在数量和动态变化方面较为接近实测数据,如王效科等^[9]在不经 DNDC 模型内部参数调整的情况下,对中国农田土壤 N_2O 年排放量分布格局进行

研究,选择江苏吴县农科所的水稻田作为实验验证站点,结果表明该站点的 N_2O 排放量实测结果,始终处于模拟值范围之内. 在获取模型满足区域本地化模拟的要求后,进一步探讨了各研究变量在种植模式^[10]、耕作方式^[11]、气候条件^[12]和土壤类型^[13]差异下的动态变化. 但是目前研究多关注目标变量在单一因素影响下的动态变化,对多氮素指标空间动态变化描述以及各指标之间影响作用强度差异分析相对较少. 在生物地球化学模型的基础上,综合考虑水稻田内氮素循环在地形、土壤属性以及多种农耕管理措施下的空间驱动响应研究亦是缺乏的.

因此,本文选择 DNDC 模型的区域尺度对研究区域内氮素循环进行模拟,再运用 GIS 技术,对各氮素指标进行空间展示;运用空间自相关、热点分析和标准差椭圆分析等空间统计方法对各氮素指标的空间分布特征进行描述;对比分析多种地统计回归模型构建方法^[14],如普通最小二乘法(ordinary least squares method, OLS)和地理加权回归模型(geographical weighted regression, GWR),通过逐层深化的方式,探讨各解释因子对目标变量的影响作用效果差异,明晰各解释因子对目标变量在空间尺度的作用强弱. 运用空间回归模型探讨各因素对于各氮素指标空间分布的影响强度,以期为区域稻田轮作区的氮素空间管理、资源环境定量化和精准农业管理等提供重要决策依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

晋江流域位于福建省泉州市境内,处于 $117^\circ 44' \sim 118^\circ 47' E$, $24^\circ 31' \sim 25^\circ 32' N$,水系全长 404.8 公里,占据泉州市面积的 53.8%. 基于数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据,运用 ArcGIS 水文分析模块,选取石碇水文站以上流域范围作为研究区域(图 1). 晋江水系是泉州市的母亲河,是厦门市和泉州市主要的饮用水源地,是两市重要的生态水源供水区和工农业生产及生活用水的关键来源. 晋江流域在供给上述两市的同时,已于 2018 年 8 月实现向金门市供水,为缓解金门市用水短缺,发挥重要作用^[15]. 为突出稻田生态系统内作物类型不同所带来的农学与生态环境效应等方面的差异性,将晋江流域稻田生态系统内主要的轮作种植模式进行筛选、简化与突出显示,最终确定稻-稻、稻-蔬和稻-空闲这 3 种轮作种植模式(图 2),3 种轮作模式的物候时历也表现出区域适宜性(表 1).

表 1 研究区内主要农作物物候时历

Table 1 Phenology of main crops in the study area

项目	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月
早稻	播种	播种	移栽	分蘖	抽穗	成熟	成熟			
双季晚稻				播种	移栽	分蘖	孕穗	抽穗	成熟	成熟
晚季蔬菜						播种	播种	出苗	成熟	成熟

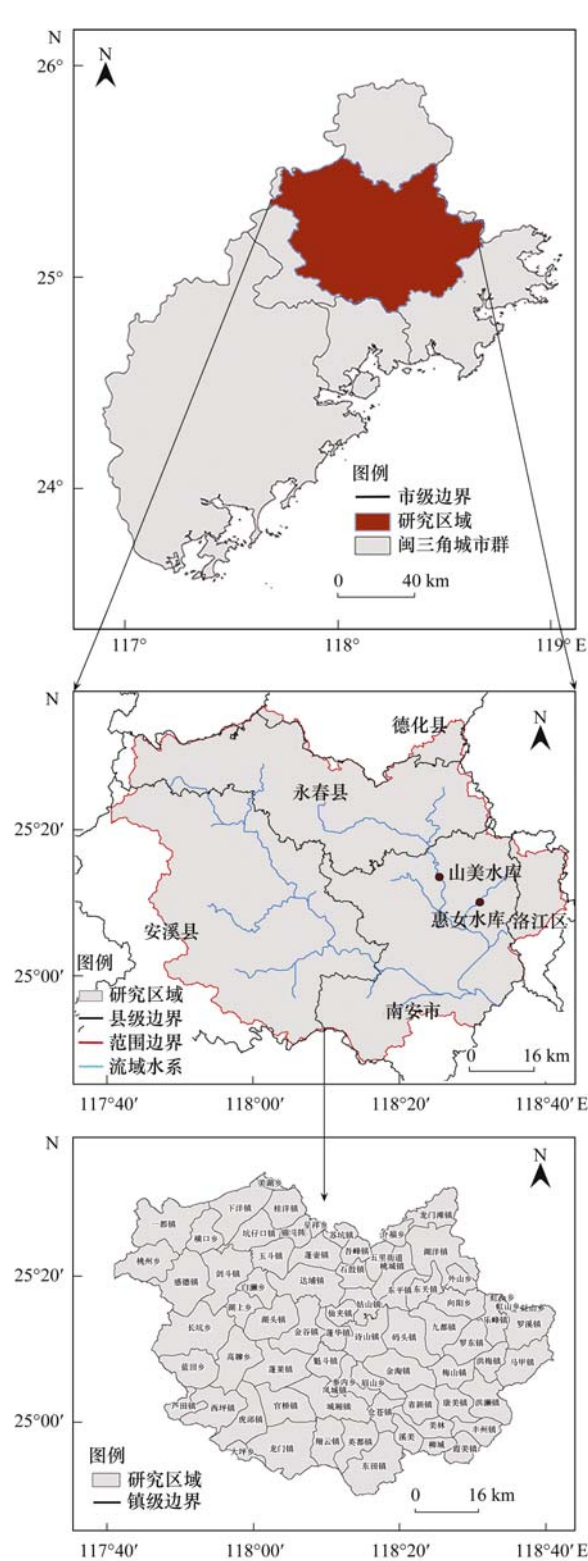


图 1 晋江流域区位

Fig. 1 Location of Jinjiang River watershed

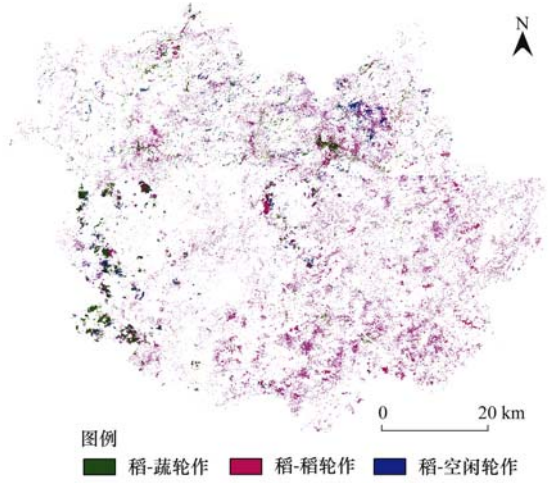


图 2 各水稻轮作模式空间分布

Fig. 2 Distribution of soil types in Jinjiang River watershed

1.2 数据获取

构建 DNDC 区域尺度信息数据详情具体如下, DNDC 所需气象输入数据为 2017 年邻近研究区的气象观测站数据, 通过反距离加权法 (inverse distance weighted) 差值计算, 划定各气象站点的影响区域, 数据主要来源于中国气象数据共享网. 在研究区域内土壤类型按照分布面积由高至低, 依此为红壤、水稻土、黄壤和岩性土等土壤类型, 该数据主要开源于中国土壤数据库和资源环境数据云平台. 作物参数参考 Li 等^[16] 研究中的作物谷粒最大生物量数据, 以及研究区内各县级行政区划单元的作物亩产数据^[17]. 农田管理数据中主要描述无机氮肥输入量数据和有机氮肥输入量数据. 其中, 无机氮肥施用量的核算是以县级行政区划单元的各氮肥输入量为依据. 有机肥数据以研究区域内同年的猪、牛、羊和禽类等年末存栏头数为基准, 核算其 1a 内粪便和尿液的含氮总量, 折算系数主要参考文献^[12]. 模型结果验证数据来源于福建农业信息服务网.

1.3 DNDC 模拟

DNDC 模型以日为时间步长, 可获得 NH_3 、 N_2O 等气态的氮素排放数据, 也可以获得氮素淋湿损失量^[6]. 将研究区域划分为具有均一属性的若干模拟单元, 不同的划分标准体现着运用 DNDC 模型模拟关注点差异^[18]. 本文参考田展等^[19] 对于全国水稻田温室气体排放的研究, 采用气候数据、土壤数据和作物轮作模式分布数据进行匹配的划分方法, 最终

获得 357 个有效模拟单元. 本研究主要观察作物氮素吸收量、N₂O 排放量、NH₃ 排放量和氮素淋失量的变化规律.

1.4 模型验证

均方根误差 (root mean square error, RMSE) 描述两组数据在均值水平上的波动状况, RMSE 指标越小, 模拟结果越准确. 归一化均方根误差 (normalized RMSE, nRMSE) 是 RMSE 与测量值均值的比值, 可表示平均偏差的相对大小, 取值范围在 0 ~ 100%, 当 nRMSE ≤ 10% 时, 表示模型模拟性能优秀, 当 10% < nRMSE ≤ 20%, 表示模拟性能较好; 当 20% < nRMSE ≤ 30%, 表示模拟性能中等; 当 nRMSE > 30%, 表示模拟性能较差. 回归方程拟合优度可决系数 R², 一般认为 R² 越大表明模型模拟结果更优.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X_{obs} - X_{mod})^2}{n}}$$
$$nRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{mod} - X_{obs})^2 / n}{\bar{X}_{obs}}} \times 100\%$$
$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y - \hat{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2}$$

式中, X_{mod} 为模拟值数据, X_{obs} 为实测值数据, $\bar{X}_{obs}$ 表示为实测值数据均值, n 表示为样本个数, y 为模拟值, $\hat{y}$ 为拟合模拟值, $\bar{y}$ 为模拟值均值.

1.5 地理统计分析

空间自相关一般采用 Moran's I 指数进行描述. 该值绝对值反映出目标变量与空间分布距离远近的作用强度^[20]. 该值方向表示目标变量在空间上的作用方向, 小于 0 值表示负相关, 大于 0 值表示正相关.

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

式中, n 为空间数据个数, x_i 和 x_j 分别是 i 和 j 位置的目标变量属性值, $\bar{x}$ 是目标变量的均值, w_{ij} 是空间权重矩阵元素.

在地理关系建模中, GWR 模型基于 OLS 模型进行扩展, 将空间位置差异化所引起的空间关系, 嵌入到回归系数中, 具体表现为拟合方程的回归系数随空间位置变化^[21]. GWR 模型的参数设置对模型模拟效果至关重要, 需设置参数主要包括权函数的选择与带宽设计, 参照模型拟合优度检验指标, 包括更正后的 Akaike 准则 (akaike information criterion corrected, AICc) 和 R²_{adj} 等, 通常选择最优参数设置方案构建拟合方程.

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i$$
$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

式中, (u_i, v_i) 是第 i 个样本点的空间坐标, β_k(u_i, v_i) 是样本点 i 的第 k 个自变量的回归系数, 与空间位置 (u_i, v_i) 有关, ε_i 是样本点 i 的误差项, 服从正态分布, 空间自相关表现为随机性.

2 结果与分析

2.1 模型率定与验证

基于模型反复测试, 对选定原模型作物库中水稻和蔬菜的默认参数进行修正 (表 2). 率定参数的确定参考了李强等^[22] 在试验田内测定的作物参数数据以及 Li 等^[16] 的关于中国作物的参数属性数据库研究. 本文中模型运行时间为 2017 年 1 月 1 日至

表 2 模型率定参数

Table 2 Model calibration parameters

项目	水稻		蔬菜	
	原参数	修正参数	原参数	修正参数
最大生物量/kg·hm ⁻²	8 443.95	14 000	5 999.5	9 950
到成熟期所需积温/℃	2 000	3 800	1 400	1 200
固氮系数	1.05	1.2	1	1

12 月 31 日. 选取每种轮作模式且具有不同土壤类型的图斑共计 36 个作为率定样点, 剩余 321 个图斑作为验证样点.

DNDC 模型对于农田土壤氮素的估算已经先后于多个国家或地区的野外实验数据进行对比, 表明了模型具有较高的可信度^[23]. 本研究中模型验证的实测数据来源于福建省测土配方数据. 借助于 DNDC 模型站点尺度分别输入区域图斑单元属性的

最大值和最小值, 获取研究区域内各站点在 10 ~ 20 cm 土壤层中硝态氮与铵态氮之和的区间值和均值. 验证点空间分布如图 3 所示.

利用模型获得晋江流域稻田生态系统内土壤氮素含量范围值, 进行精度评价, 该模拟范围值为 16.15 ~ 273.10 mg·kg⁻¹, 实测值中 94.67% 的土壤氮素含量处于模拟范围值之间. 利用实测数据与模拟结果的均值进行精度评价. 稻田生态系统内土壤

氮素模拟值与检验样点的实测值间 RMSE 值为 $16.81\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, nRMSE 值为 16.40%, 且获得线性拟合方程为 $y=1.1x-18$, R^2 为 0.81, 表明模型模拟效果较好(图 4).



图 3 模型验证点分布

Fig. 3 Distribution of model verification point

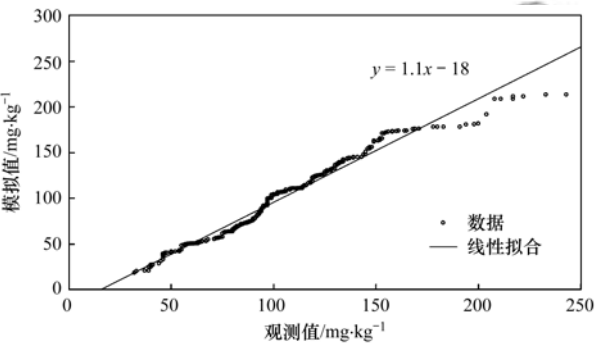


图 4 DNDC 模拟值与观测值线性拟合

Fig. 4 Linear fit of DNDC simulated with observed values

2.2 不同轮作模式下各氮素指标差异

在作物氮素吸收方面, 稻-蔬、稻-稻和稻-空闲轮作模式的单位面积作物氮素吸收均值量分别为 200.13 、 154.56 和 $79.26\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 作物吸收氮素量的利用效率分别为 40.43%、35.55% 和 25.98% (表 3). 在每日作物氮素吸收量数据中, 蔬菜作物吸收氮素呈现单峰式增长, 水稻在抽穗期呈现出“平台

期”(图 5). 在氮素损失指标方面, 稻-蔬轮作模式表现出在 NH_3 排放量、 N_2O 排放量和氮素淋失损失量的最高值,

在 NH_3 排放量和氮素淋失损失量中均表现出稻-稻轮作模式大于稻-空闲轮作模式, 上述损失量分布符合“高输入高损耗”的特征. 在 N_2O 排放量中, 表现出稻-空闲轮作模式高于稻-稻轮作模式, 分析其中原因是稻田漫水状态提供的厌氧环境, 不利于 N_2O 气体的排放. 稻-蔬轮作的根固氮量值低于稻-稻轮作, 但稻-蔬轮作的人为氮素输入量高于稻-稻轮作, 该数据结果与董守坤等^[24]的研究结论中关于人为氮素的输入会抑制作物的根固氮量的观点相吻合(表 4).

表 3 3 种轮作模式作物氮素吸收分异

Table 3 Nitrogen uptake differentiation in three cropping patterns			
项目	稻-蔬	稻-稻	稻-空闲
作物氮素吸收量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	200.13	154.56	79.29
氮素输入合计/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	494.97	434.69	305.16
吸收利用率/%	40.43	35.43	25.98

表 4 3 种轮作种植模式分异下各氮素指标/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

Table 4 Nitrogen indices in three rotation patterns/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$			
项目	稻-蔬	稻-稻	稻-空闲
N_2O	9.26	3.05	3.40
NO	4.66	0.93	0.72
N_2	31.92	28.88	28.89
氮素支出 NH_3	132.08	111.31	54.59
作物吸收量	200.13	154.56	79.29
氮素淋失	46.74	28.62	21.21
径流氮素	1.57	0.94	0.82
湿沉降氮量	5.90	4.58	6.72
根固氮量	4.11	7.54	3.83
土壤矿化氮量	134.95	155.84	163.26
氮素输入 无机氮肥施用量	327.41	266.73	131.35
有机氮肥施用量	22.60	0.00	0.00
输入氮素合计	494.97	434.69	305.16
氮素盈余	68.61	106.40	116.24

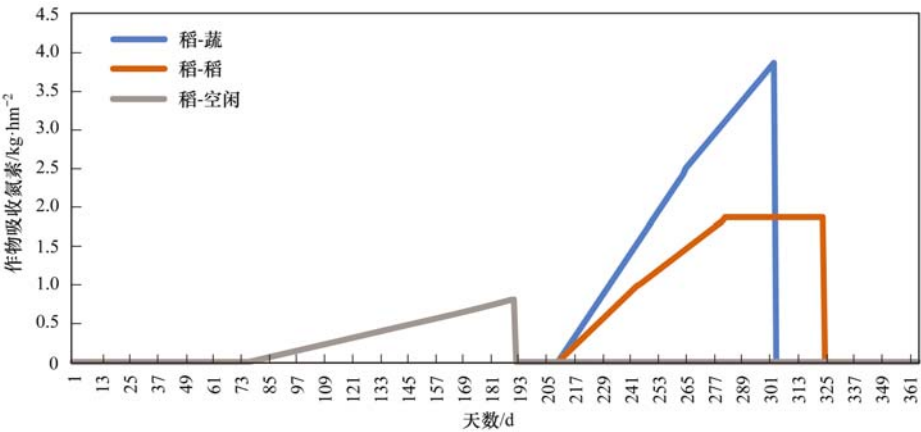


图 5 基于日时间尺度的 3 种轮作种植模式作物氮素吸收量

Fig. 5 Crop nitrogen uptake in three rotation patterns based on daily time scale

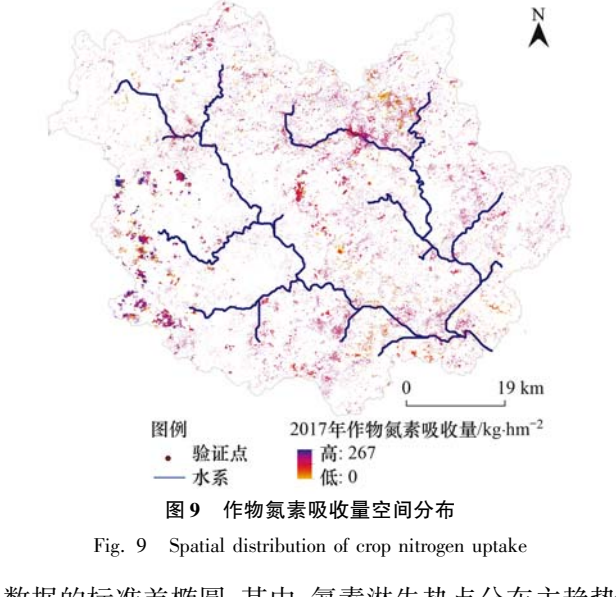
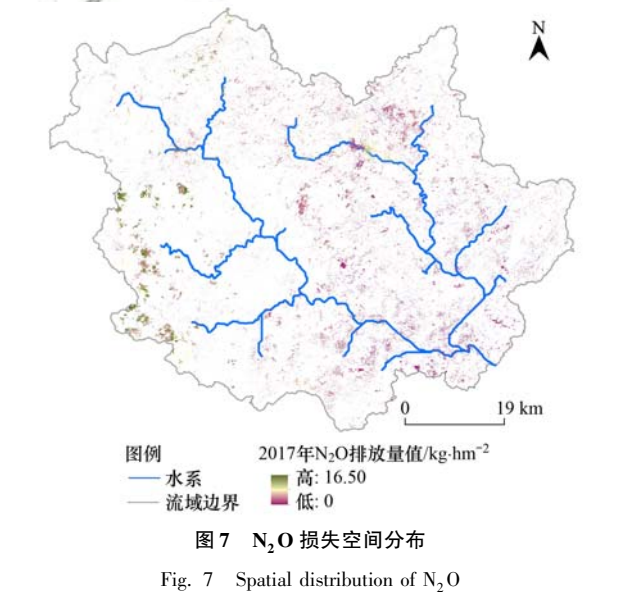
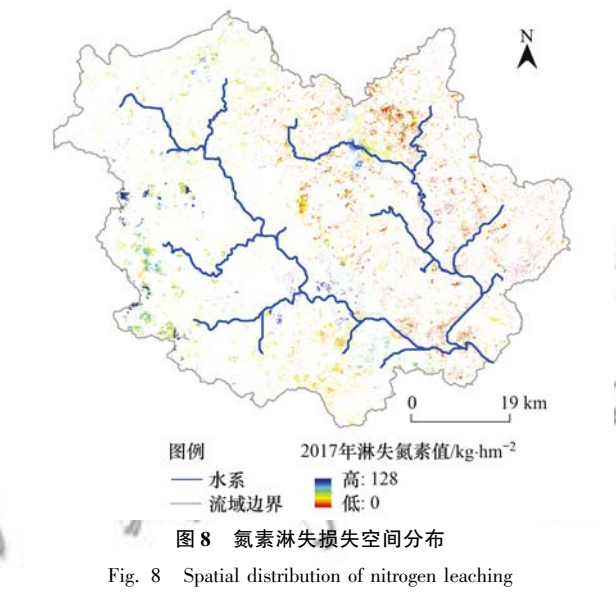
2.3 各氮素指标空间分异

在轮作模式差异和环境因素等综合作用下,各氮素指标的空间分布亦表现出差异性.将各氮素指标进行空间自相关分析(表 5),结果显示 NH_3 排放量、

N_2O 排放量和氮素淋失等指标的空间分布具有空间自相关性和空间聚集特征,受地理学第一定律的支配(图 6~8).而作物氮素吸收量空间自相关分析表现为随机分布,该氮素指标不具备空间依赖性(图 9).

表 5 各氮素指标描述性统计

项目	最小值 /kg·hm ⁻²	最大值 /kg·hm ⁻²	平均值 /kg·hm ⁻²	标准差 /kg·hm ⁻²	空间自相关			状态
					Moran's I 指数	Z 值	P 值	
氮素淋失	0.45	127.64	31.11	21.93	0.33	7.12	0.00	聚集
NH_3	0.47	636.53	123.50	112.99	0.25	5.49	0.00	聚集
N_2O	0	16.48	4.57	4.16	0.32	6.90	0.00	聚集
作物氮素吸收	36.2	266.43	161.81	43.84	-0.001	0.04	0.97	随机



为突出显示各氮素指标的空间分布,将表现为空间聚类分布的指标进行热点分析和方向分析(图 10~12).各氮素指标空间分布的冷热点区域存在明显空间规律性分布,多表现出“西南热、东北冷”的分布特征.进一步借助方向分析,获得各热点分布

数据的标准差椭圆.其中,氮素淋失热点分布主趋势线主要表现在“感德镇—长坑乡—尚卿乡”一线; N_2O 排放量热点分布的主趋势线为“坑仔口镇—剑斗镇—长坑乡一线和锦斗镇—蓬壶镇—达金谷镇”一线; NH_3 排放量热点分布的主趋势线,由左至右依次为“下洋镇—横口乡—长坑乡”一线、“桂洋镇—

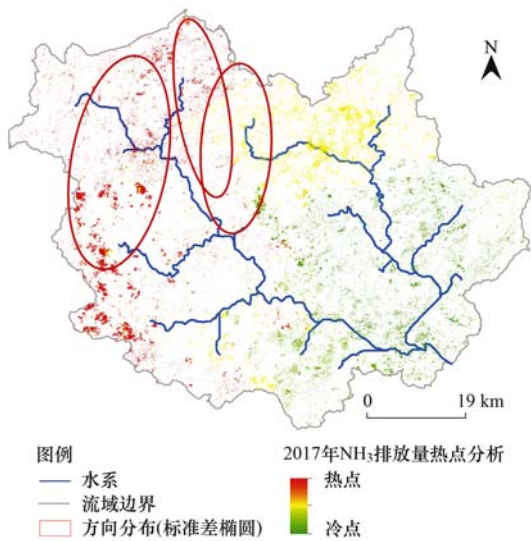


图 10 NH₃ 排放空间分布的热点分析
Fig. 10 Hotspot analysis of NH₃

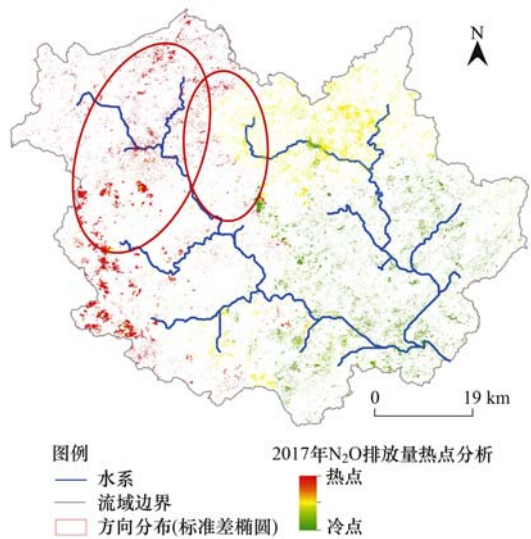


图 11 N₂O 排放空间分布的热点分析
Fig. 11 Hotspot analysis of N₂O

坑仔口镇—达埔镇”一线和“呈祥乡—蓬壶镇—金谷镇”一线。

2.4 基于 GWR 的氮素空间分异影响

参照前人研究的成果,发现地形因子^[25]、土壤属性因子^[26]和氮素输入指标^[27]等与 NH₃ 排放量、N₂O 排放量和氮素淋失损失量之间存在显著相关性。结合晋江流域特征,本研究选择地形因子中的经度、纬度和坡度等变量,土壤属性因子中 SOC、pH 和黏粒含量等属性变量以及氮素输入指标中湿沉降氮量、生物固氮量和有机氮肥量等变量,总计 16 个解释变量进行相关性分析,再运用 OLS 进行线性拟合分析,将经过 *t* 检验的解释变量与目标变量再进行 GWR 分析。

各氮素目标变量的 GWR 建模结果显示所有回归拟合方程残差均通过空间自相关性分析且表现为

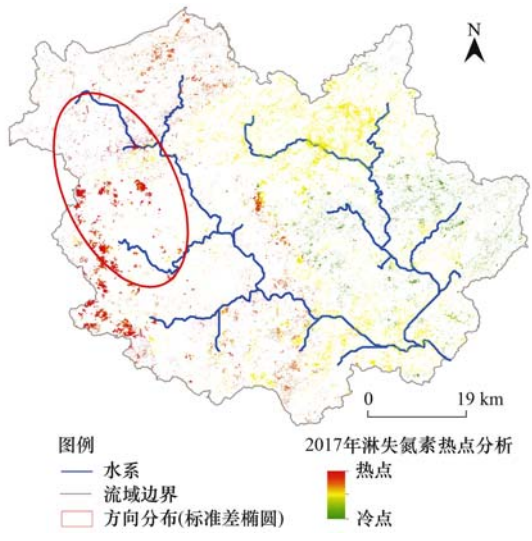


图 12 氮素淋失的热点分布
Fig. 12 Hotspot analysis of nitrogen leaching

随机分布,利用 AICc 信息准则法,得到 NH₃、N₂O 和氮素淋湿的 *R*² 分别为 0.98、0.96 和 0.87, *R*_{adj}² 分别为 0.97、0.96 和 0.84,表明 GWR 模型能够较好模拟各解释变量对目标变量的影响。

NH₃ 排放量回归系数空间分布中作用影响强度,按照均值的绝对值由高至低依次为 SOC_{max}、黏粒含量_{max}、SOC_{min}、根固氮量、有机氮肥量和无机氮肥量(表 6)。其中,根固氮量表现出唯一的负向驱动效果,而有机氮肥和无机氮肥的正向驱动均值小于 1。在驱动效果的空间分布上,具有一定的相似性,如 SOC_{max}、SOC_{min} 和根固氮量间呈现出“西高东低”,而黏粒含量_{max}、无机氮量和有机氮量都呈现出“东高西低”(图 13)。

表 6 基于 GWR 模型的 NH₃ 排放量参数估计与诊断

Table 6 Parameter estimation and diagnostics of NH₃ emissions based on GWR

项目	参数估计	
	范围	均值
SOC _{max}	1 092.86 ~ 1 593.75	1 327.10
SOC _{min}	-764.46 ~ 1 001.03	24.27
黏粒含量 _{max}	-58.21 ~ 229.37	98.11
根固氮量	-5.36 ~ 2.04	-2.26
无机氮肥量	0.35 ~ 0.57	0.47
有机氮肥量	-0.06 ~ 1.39	0.64
标准残差	-4.02 ~ 13.64	0.43

N₂O 排放量回归系数空间分布中作用影响强度,按照均值的绝对值由高至低依次为 SOC_{max}、根固氮量、湿沉降氮量、pH_{max}、有机氮肥量和无机氮肥量(表 7)。其中,除 SOC_{max} 指标外,其余因素的影响强度均小于 1,根固氮量表现为唯一负向作用效果。在空间分布上, SOC_{max}、pH_{max} 和无机氮肥量表现出“西高东低”,根固氮量表现为“西低东高”,湿沉降氮量

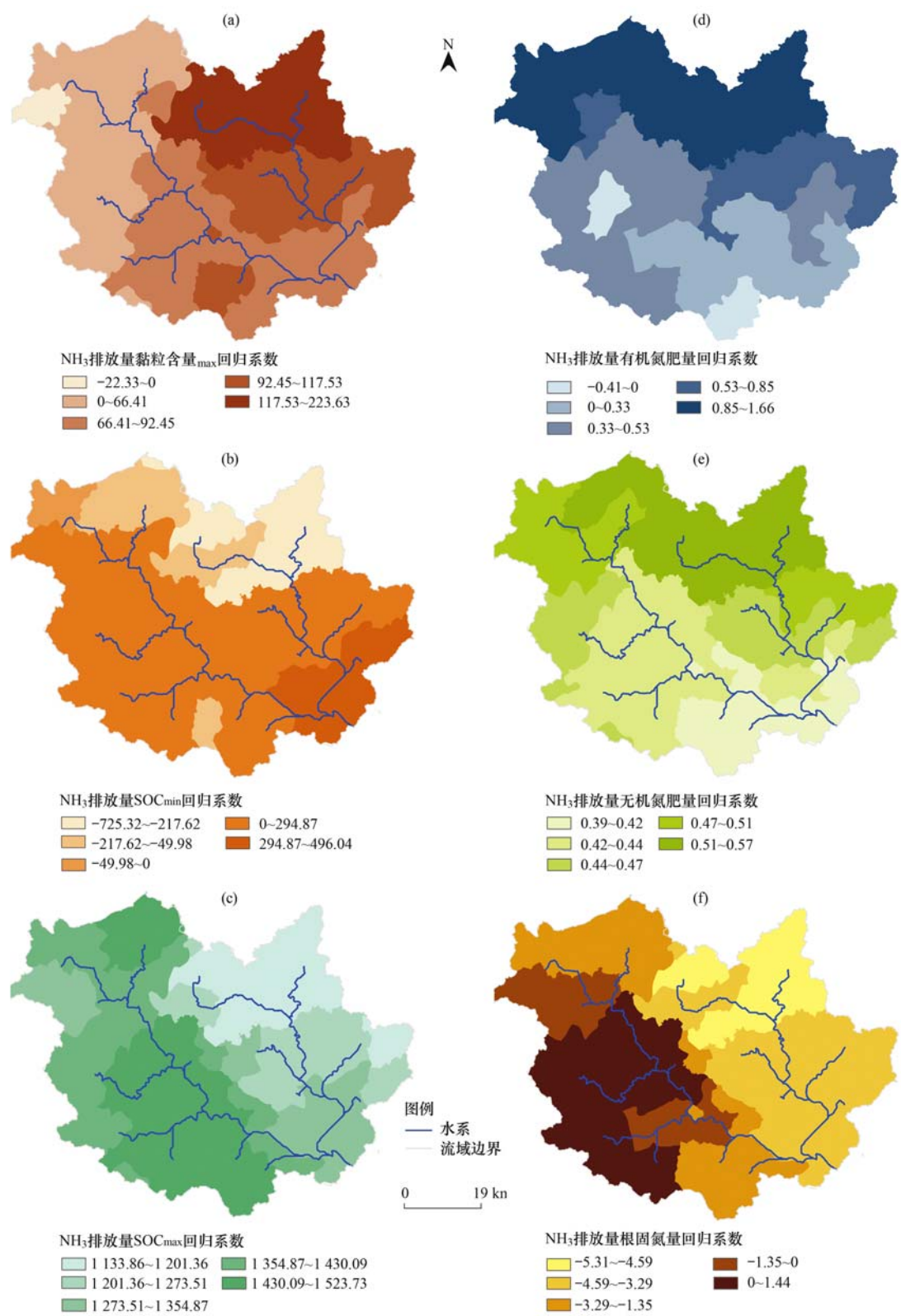


图 13 基于 GWR 分析的 NH_3 排放量回归系数空间分布

Fig. 13 Spatial distribution of regression coefficients for NH_3 based on GWR analysis

表现为“中间高,东西低”,有机氮肥量表现为“内陆高于沿海”(图 14).

氮素淋湿量回归系数空间分布中作用影响强度,按照均值的绝对值由高至低依次为 pH_{min} 、 pH_{max} 、湿沉降氮量、有机氮肥量、坡度和无机氮肥量

(表 8). 其中, pH_{max} 表现为唯一负向影响效果,有机氮肥量、坡度和无机氮肥量因子的作用强度小于 1. pH_{min} 和 pH_{max} 的空间分布表现为“中间高,东西两端低”,湿沉降氮量和无机氮肥量表现为“西北低东南高”,有机氮肥空间分布表现为“内陆高于沿海”,坡

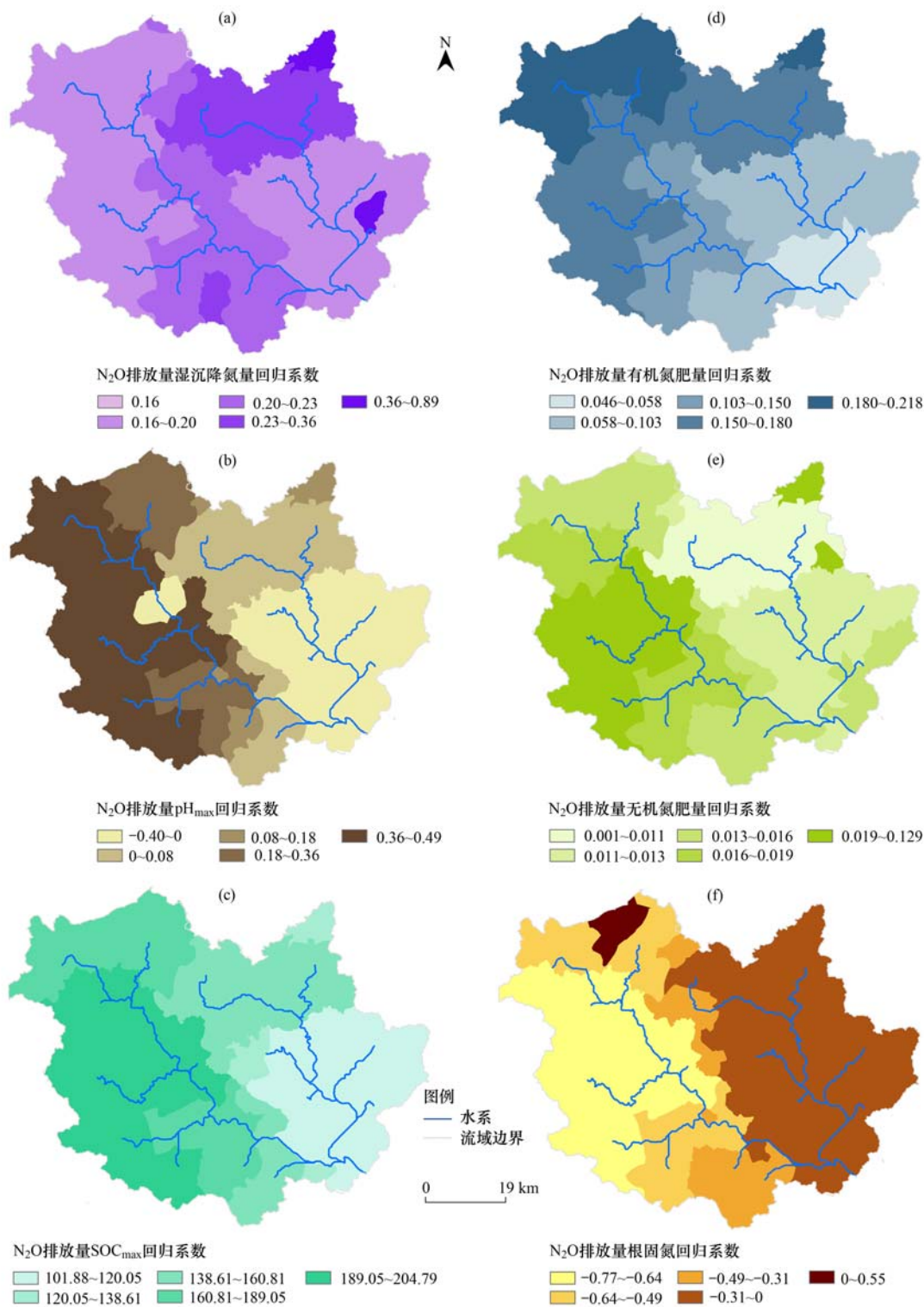


图 14 基于 GWR 分析的 N_2O 排放量回归系数空间分布

Fig. 14 Spatial distribution of regression coefficients for N_2O based on GWR analysis

度表现为“西低东高”(图 15).

3 讨论

3.1 不同轮作模式对各氮素指标的影响

不同轮作模式的生理特征、营养和水分利用率不同,会造成稻田轮作区内土壤有机质的积累、分解速率和氮素循环规律的多样性,是影响稻田轮作区

内氮素动态变化的重要因素. 本研究中蔬菜的作物氮素吸收量呈现单峰式增长,与张贵龙^[28]的研究中蔬菜对氮素吸收曲线的描述相吻合,符合蔬菜种植生长周期短,高效施肥见效快等生理特征. 水稻的作物氮素吸收量呈现出“平台期”,该结果与江立庚等^[29]的研究中指出水稻产量与氮素供应量呈现出二次曲线关系相吻合. 同时,区域内的水稻作物平均

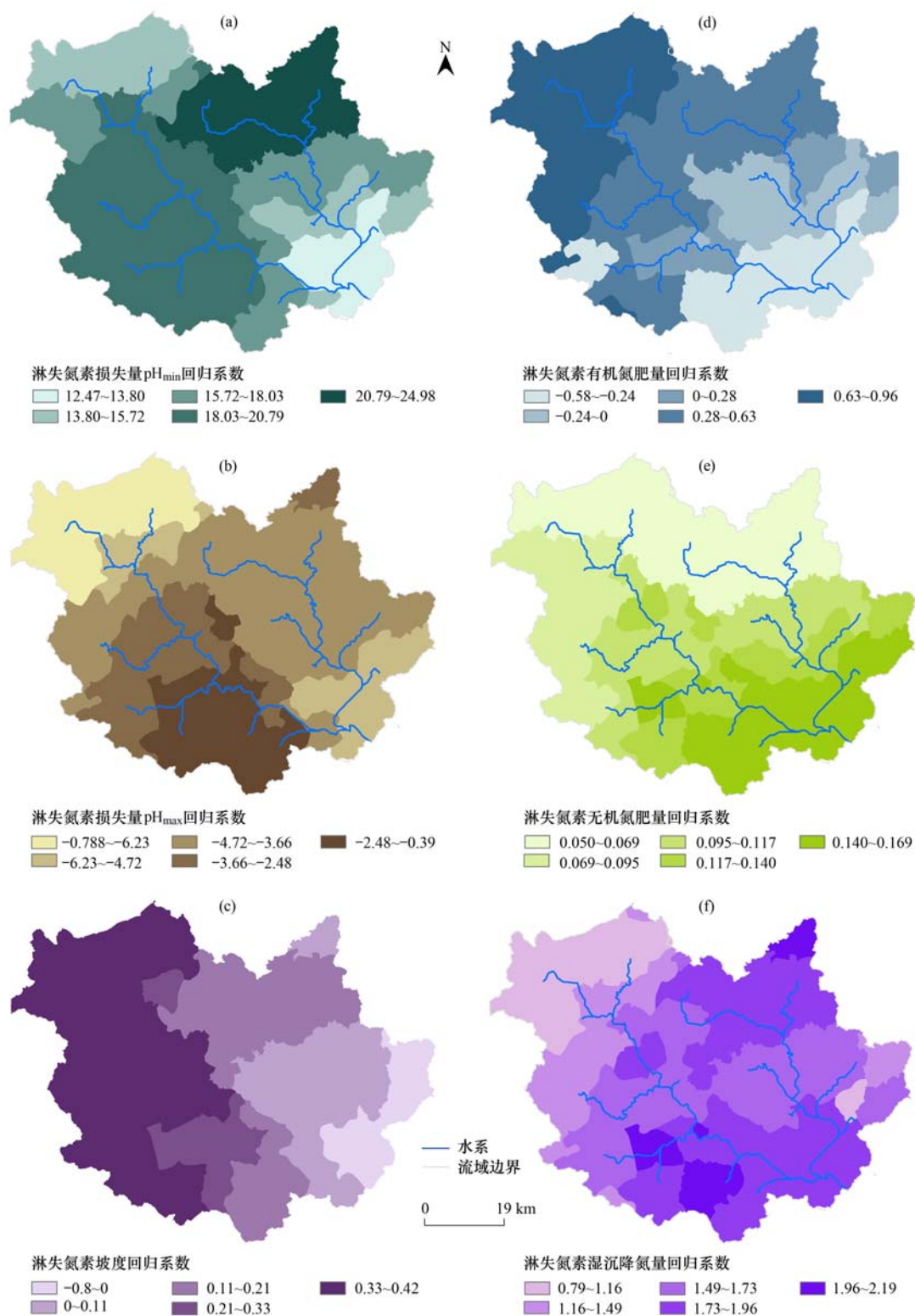


图 15 基于 GWR 分析的氮素淋失损失量回归系数空间分布

Fig. 15 Spatial distribution of regression coefficients for nitrogen leaching based on GWR analysis

氮素吸收量后期表现出增长趋势减缓,推测区域内氮素输入量已超过作物最适宜氮肥施用量,过量的氮肥不能有效促进作物产量增加,更容易造成氮素损失.而在氮素损失指标的对比中,休耕模式下,氮素的损失指标显著下降,该结果与张岳芳等^[30]通过控制实验获得不同水旱轮作模式下的 N_2O 的排放

量都大于对照组(稻-空闲)模式下的排放量的结论相契合.适当的休耕制度对于缓解稻田 N_2O 气体的排放具有积极影响.

3.2 各因子对氮素的综合影响分析

在多个驱动变量的综合分析中,土壤属性因子表现为较强的影响效果,其中 SOC 是同时影响 NH_3

表 7 基于 GWR 模型的 N₂O 排放量参数估计与诊断

Table 7 Parameter estimation and diagnostics
of N₂O emissions based on GWR

项目	参数估计	
	范围	均值
SOC _{max}	94.50 ~ 208.88	160.51
pH _{max}	-0.09 ~ 0.53	0.16
湿沉降氮量	0.15 ~ 0.39	0.22
根固氮量	-0.82 ~ -0.14	-0.43
无机氮肥量	0.007 ~ 0.20	0.014
有机氮肥量	0.01 ~ 0.23	0.135
标准残差	-4.02 ~ 13.58	0.43

表 8 基于 GWR 模型的氮素淋失损失量参数估计与诊断

Table 8 Parameter estimation and diagnostics
of nitrogen leaching based on GWR

项目	参数估计	
	范围	均值
坡度	-0.11 ~ 0.46	0.22
pH _{max}	-9.32 ~ 1.40	-4.11
pH _{min}	10.09 ~ 25.76	18.48
湿沉降氮量	0.81 ~ 2.76	1.63
无机氮肥量	0.05 ~ 0.23	0.12
有机氮肥量	-0.77 ~ 1.11	0.31
标准残差	-7.73 ~ 4.85	-0.21

和 N₂O 排放的最强作用因子. 该研究结果与梁坤伦等^[31]基于实验站点研究结果相吻合,在实际作物生长过程中,土壤内部结构中碳、氮元素常相互影响, SOC 分布常伴随着丰富的微生物活动,利于将土壤中的有机氮转化为无机氮,促进氮素最终以气体形式损失排出. 而其空间分布特征可能是由于区域南部因临近厦门市,多发展为新鲜蔬菜供应地,大量氮肥输入,带来高 SOC 含量,进而导致大量的 NH₃ 和 N₂O 气体排放量. 根固氮量与氮素损失指标均表现为负向作用效果,推测为被吸附的氮素不易被转化流失.

pH_{min} 表现为氮素淋湿量的最强作用效果. 氮素淋湿量受到土壤累积氮素含量的影响,而 pH 值约束着氮素硝化与反硝化进程,进而影响到氮素淋湿量. 但前人研究中指出^[32],氮素淋湿量的驱动因素并不主要是 pH 值,潜在的主要驱动因素可能是降水或地表径流量,可在后续的研究中进一步补充.

在多因子的对比下,无机氮肥和有机氮肥的驱动影响效果均小于土壤有机碳的强度且值均小于 1. 虽然在不同耕作模式的对比中,无机氮肥的输入量与目标变量之间存在显著相关性,但基于地理空间的分析中,同一空间单元下的土壤属性因子的作用强度高于人为氮源输入对其的影响效果. 分析其中原因可能是 SOC 数据是基于土壤类型数据进行空间化,而氮肥输入数据是基于县域行政单元,从数

据的分辨率对比来看,土壤类型数据与目标氮素的空间分布数据契合度较高.

但对于稻田轮作氮素的控制包含但不仅限于上述因子. 降雨^[33]、温度^[34]以及农田管理措施中的灌溉^[35]、排水时间^[36]和秸秆还田比例^[37]等,均对 NH₃、N₂O 和氮素淋湿量产生影响. 但因为受到方法适用性的限值,未能对所有有影响的因素进行考虑. 因此,为实现更加精准化的农业信息管理,需要在全面的考虑农作物基本特性、农田土壤基本属性、周围气候环境以及农田管理措施信息的基础上^[38],进一步分析各因素的驱动强度,再差异性制定农田管理措施,最终实现区域的可持续发展.

4 结论

经过参数率定与精度验证, DNDC 模型的区域尺度在氮素动态模拟中表现出较好的区域适用性. 稻-蔬轮作模式具有最高氮素输入量,同时也表现出最高作物氮素吸收率和最大氮素损失量. NH₃ 排放量、N₂O 排放量和氮素淋失表现为空间聚类分布,作物氮素吸收量为随机分布. 各氮素损失指标热点分布的趋势线间虽有差异,但主要以“感德镇—长坑乡”一线为主. 在 GWR 分析中,土壤属性因子表现为最强影响作用效果. 其中, NH₃ 排放量和 N₂O 排放量中 SOC_{max} 为第一强度影响因子,空间分布“西南高,东北低”;在氮素淋失损失量中 pH_{min} 表现为第一强度影响因子,空间分布呈现“南北高,东西低”.

参考文献:

[1] 张鲜鲜,周胜,孙会峰,等. DNDC 模型在稻田生态系统中的研究进展及应用[J]. 上海农业学报, 2019, 35(1): 109-117.
Zhang X X, Zhou S, Sun H F, et al. Advance and application of DNDC model in paddy ecosystem [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2019, 35(1): 109-117.
[2] 王亚楠,税伟,杨海峰,等. 21 世纪以来闽三角城市群人类景观开发强度的时空演变——基于能值-GIS 方法[J]. 生态学报, 2019, 39(5): 1688-1700.
Wang Y N, Shui W, Yang H F, et al. Temporal and spatial evolution of human landscape development in the Fujian delta urban agglomeration in the 21st Century: based on emergy-GIS approach [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): 1688-1700.
[3] 廖千家骅,颜晓元. 亚洲地区稻田 N₂O 排放影响因子统计模拟分析[J]. 环境科学, 2011, 32(1): 38-45.
Liao Q J H, Yan X Y. Statistical analysis of factors influencing N₂O emission from paddy fields in Asia [J]. Environmental Science, 2011, 32(1): 38-45.
[4] 韩宁,陈维梁,高扬,等. 基于 SWAT 与 DNDC 模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程[J]. 环境科学, 2017, 38(6): 2317-2325.
Han N, Chen W L, Gao Y, et al. Comparative study of SWAT and DNDC applied to N leach and export from subtropical watershed [J]. Environmental Science, 2017, 38(6): 2317-

- 2325.
- [5] 谢海宽, 江雨倩, 李虎, 等. DNDC 模型在中国的改进及其应用进展[J]. 应用生态学报, 2017, **28**(8): 2760-2770.
Xie H K, Jiang Y Q, Li H, *et al.* Modification and application of the DNDC model in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, **28**(8): 2760-2770.
- [6] Li C S, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 2. Model applications[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, **97**(D9): 9777-9783.
- [7] Giltrap D L, Ausseil A G E, Thakur K P, *et al.* Investigating a method for estimating direct nitrous oxide emissions from grazed pasture soils in New Zealand using NZ-DNDC[J]. Science of the Total Environment, 2013, **465**: 7-16.
- [8] Gillespy S L, Anthony S, Cardenas L, *et al.* First 20 years of DNDC (DeNitrification DeComposition): model evolution[J]. Ecological Modelling, 2014, **292**: 51-62.
- [9] 王效科, 庄亚辉, 李长生. 中国农田土壤 N₂O 排放通量分布格局研究[J]. 生态学报, 2001, **21**(8): 1225-1232.
Wang X K, Zhuang Y H, Li C S. The distribution pattern of N₂O emission from agricultural soil in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, **21**(8): 1225-1232.
- [10] 邹凤亮. 江汉平原稻田温室气体排放特征研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018. 11-12.
- [11] 牛逸龙. 基于 DNDC 模型模拟气候变化情景下中国稻田温室气体排放的研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2016. 33-43.
- [12] 高懋芳, 邱建军, 李长生, 等. 应用 Manure-DNDC 模型模拟畜禽养殖氮素污染[J]. 农业工程学报, 2012, **28**(9): 183-189.
Gao M F, Qiu J J, Li C S, *et al.* Modelling nitrogen pollution from livestock breeding using Manure-DNDC model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, **28**(9): 183-189.
- [13] 王光翔, 张黎明, 李晓迪, 等. 基于高精度土壤数据库的苏北旱地固碳速率和潜力研究[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(3): 422-431.
Wang G X, Zhang L M, Li X D, *et al.* Study of soil organic carbon sequestration rate and potential of upland in northern Jiangsu Province based on high-resolution soil database[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, **25**(3): 422-431.
- [14] 税伟, 杜勇, 陈毅萍, 等. 基于地理加权回归的茶叶种植专业化空间格局及影响因素——以福建省安溪县为例[J]. 应用生态学报, 2017, **28**(4): 1298-1308.
Shui W, Du Y, Chen Y P, *et al.* Spatial patterns and influence factors of specialization in tea cultivation based on geographically weighted regression model: a case study of Anxi County of Fujian Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, **28**(4): 1298-1308.
- [15] 马岚, 滕彦国, 林学钰, 等. 河流型饮用水源地保护区划分敏感水质指标确定——以晋江流域为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, **49**(2-3): 193-198.
Ma L, Teng Y G, Lin X Y, *et al.* Identification of sensitive water quality index for protection area classification of river-style drinking water source area: case of Jinjiang River basin[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2013, **49**(2-3): 193-198.
- [16] Li H, Wang L G, Li J Z, *et al.* The development of China-DNDC and review of its applications for sustaining Chinese agriculture[J]. Ecological Modelling, 2017, **348**: 1-13.
- [17] 泉州市统计局, 国家统计局泉州调查队. 泉州统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [18] Smith W N, Grant B B, Desjardins R L, *et al.* A tool to link agricultural activity data with the DNDC model to estimate GHG emission factors in Canada[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, **136**(3-4): 301-309.
- [19] 田展, 牛逸龙, 孙来祥, 等. 基于 DNDC 模型模拟气候变化影响下的中国水稻田温室气体排放[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(3): 793-799.
Tian Z, Niu Y L, Sun L X, *et al.* China's rice field greenhouse gas emission under climate change based on DNDC model simulation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, **26**(3): 793-799.
- [20] Yuan Y M, Cave M, Zhang C S. Using local Moran's I to identify contamination hotspots of rare earth elements in urban soils of London[J]. Applied Geochemistry, 2018, **88**: 167-178.
- [21] 孙爽, 李令军, 赵文吉, 等. 京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1585-1593.
Sun S, Li L J, Zhao W J, *et al.* Variation in pollutant concentrations and correlation analysis with the vegetation index in Beijing-Tianjin-Hebei[J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1585-1593.
- [22] 李强, 李建国, 张忠启. 滨海盐渍土地区水稻田 C、N 及生物量动态变化的模拟与应用[J]. 生态科学, 2018, **37**(3): 148-158.
Li Q, Li J G, Zhang Z Q. Simulation of C, N and biomass dynamic change in coastal saline soil region paddy field[J]. Ecological Science, 2018, **37**(3): 148-158.
- [23] Katayanagi N, Fumoto T, Hayano M, *et al.* Development of a method for estimating total CH₄ emission from rice paddies in Japan using the DNDC-Rice model[J]. Science of the Total Environment, 2016, **547**: 429-440.
- [24] 董守坤, 刘丽君, 孙聪姝, 等. 利用¹⁵N 标记研究氮素水平对大豆根瘤生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, **17**(4): 985-988.
Dong S K, Liu L J, Sun C S, *et al.* Effects of nitrogen levels on nodule growth of soybean using ¹⁵N tracing method[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, **17**(4): 985-988.
- [25] 王丽, 王力, 王全九. PAM 对不同坡度坡地产流产沙及氮磷流失的影响[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(12): 3956-3964.
Wang L, Wang L, Wang Q J. Impacts of PAM on runoff, sediment, nitrogen, and phosphorus loss under the different slope lands[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(12): 3956-3964.
- [26] Weber A, Khalil M I, Schraml M, *et al.* Soil-atmosphere exchange of NH₃ and NO_x in differently managed vegetation types of southern Germany[J]. Journal of Soil and Plant Biology, 2018, (1): 1-15.
- [27] 石敏, 肖伟华, 王春梅, 等. 施肥与灌溉对黑土区稻田氮素渗漏淋溶的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2016, **14**(1): 42-49.
Shi M, Xiao W H, Wang C M, *et al.* Influence of fertilization and irrigation on nitrogen percolation leaching in black soil region[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, **14**(1): 42-49.
- [28] 张贵龙. 蔬菜保护地氮素利用与去向研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009. 23-30.
- [29] 江立庚, 曹卫星. 水稻高效利用氮素的生理机制及有效途径[J]. 中国水稻科学, 2002, **16**(3): 261-264.
Jiang L G, Cao W X. Physiological mechanism and approaches for efficient nitrogen utilization in rice[J]. Chinese Journal of

- Rice Science, 2002, **16**(3): 261-264.
- [30] 张岳芳, 周炜, 陈留根, 等. 太湖地区不同水旱轮作方式下稻季甲烷和氧化亚氮排放研究[J]. 中国生态农业学报, 2013, **21**(3): 290-296.
- Zhang Y F, Zhou W, Chen L G, *et al.* Methane and nitrous oxide emission under different paddy-upland crop rotation systems during rice growth season in Taihu Lake Region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, **21**(3): 290-296.
- [31] 梁坤伦, 周志宇, 姜文清, 等. 西藏草地开垦后土壤表层氮素及有机碳特征研究[J]. 草业科学, 2010, **27**(9): 25-30.
- Liang K L, Zhou Z Y, Jiang W Q, *et al.* Study on the dynamics of nitrogen and organic carbon in soil of cultivated grassland in Tibet[J]. Pratacultural Science, 2010, **27**(9): 25-30.
- [32] 卜洪龙, 任秀文, 陆俊卿, 等. 人工降雨条件下华南红壤氮素流失规律研究[J]. 环境科学与技术, 2016, **39**(8): 27-34.
- Bu H L, Ren X W, Lu J Q, *et al.* Nitrogen loss on red soil in south China under artificial rainfall conditions [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **39**(8): 27-34.
- [33] Diamond S, Andeer P F, Li Z, *et al.* Mediterranean grassland soil C-N compound turnover is dependent on rainfall and depth, and is mediated by genomically divergent microorganisms [J]. Nature Microbiology, 2019, **4**(8): 1356-1367.
- [34] Xie W M, Li S J, Shi W M, *et al.* Quantitatively ranking the influencing factors of ammonia volatilization from paddy soils by grey relational entropy [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**: 2319-2327.
- [35] Liao B, Wu X, Yu Y F, *et al.* Effects of mild alternate wetting and drying irrigation and mid-season drainage on CH₄ and N₂O emissions in rice cultivation [J]. Science of the Total Environment, 2020, **698**: 134212.
- [36] Xu J Z, Peng S Z, Yang S H, *et al.* Ammonia volatilization losses from a rice paddy with different irrigation and nitrogen managements[J]. Agricultural Water Management, 2012, **104**: 184-192.
- [37] 徐学池, 苏以荣, 王桂红, 等. 秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2912-2919.
- Xu X C, Su Y R, Wang G H, *et al.* Straw returning plus nitrogen fertilizer affects the soil microbial community and organic carbon mineralization in Karst farmland [J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2912-2919.
- [38] 鲁斯唯, 胡清华, 吴水平, 等. 海峡西岸经济区大气污染物排放清单的初步估算[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(10): 2624-2634.
- Lu S W, Hu Q H, Wu S P, *et al.* Establishment of air pollutant emission inventory in the West Coast of Taiwan Strait[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(10): 2624-2634.

CONTENTS

Mixed State and Sources of Fine Particulate Matter in the Summer in Tianjin City Based on Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	LIN Qiu-ju, XU Jiao, LI Mei, <i>et al.</i> (2505)
Characteristics and Sources of Inorganic Ions and Organic Acids in Precipitation in the Northern Suburb of Nanjing, China	YANG Xiao-ying, CAO Fang, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (2519)
Seasonal Variation of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xi'an	HUANG Han-han, WANG Yu-qin, LI Sheng-ping, <i>et al.</i> (2528)
Effect of Liquid Water Content of Particles and Acidity of Particulate Matter on the Formation of Secondary Inorganic Components in Xinjiang Petrochemical Industrial Area	LIU Hui-bin, Dilinuer-Talifu, WANG Xin-ming, <i>et al.</i> (2536)
Effect of Biomass Burning on the Light Absorption Properties of Water Soluble Organic Carbon in Atmospheric Particulate Matter in Changchun	MENG De-you, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (2547)
Chemical Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Shanghai During an Ozone and Particulate Pollution Episode in May 2019	WANG Qian (2555)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in the Nanjing Industrial Area in Autumn	CAO Meng-yao, LIN Yu-chi, ZHANG Yan-lin (2565)
Ambient VOCs Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of Air Pollution in Spring in Zhengzhou	REN Yi-jun, MA Shuang-liang, WANG Si-wei, <i>et al.</i> (2577)
Characteristics of VOCs and Their Roles in Ozone Formation at a Regional Background Site in Beijing, China	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, QIU Yu-lu, <i>et al.</i> (2586)
Emission Characteristics of the Catering Industry in Beijing	SUN Cheng-yi, BAI Hua-hua, CHEN Xue, <i>et al.</i> (2596)
Emission Factors and Emission Inventory of Agricultural Machinery in Beijing Under Real-world Operation	WANG Kai, FAN Shou-bin, QI Hao-yun (2602)
Localization of Soil Wind Erosion Dust Emission Factor in Beijing	LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (2609)
Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Angström Exponent in the Yangtze River Delta Based on MODIS_C061	ZHANG Ying-lei, CUI Xi-min (2617)
Fate Simulation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl in the Bohai Rim Using the Multimedia Model	ZHANG Yi, MA Yan-fei, SONG Shuai, <i>et al.</i> (2625)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Sediment Interstitial Water from Gangnan Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUAN Shi-chao, <i>et al.</i> (2635)
Environmental Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in the Sediments of a River-Lake System	LI Yue-zhao, CHEN Hai-yang, SUN Wen-chao (2646)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Yitong River City Area	JIANG Shi-xin, ZHAI Fu-jie, ZHANG Chang, <i>et al.</i> (2653)
Identifying Nitrate Sources in a Typical Karst Underground River Basin	ZHAO Ran, HAN Zhi-wei, SHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2664)
Influence of Nutrient Pulse Input on Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Algal Growth in the Sediment-Water System of Lake Taihu	CHEN Jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2671)
Temporal and Spatial Variation Patterns of Picophytoplankton and Their Correlations with Environmental Factors During the Wet Season in East Lake Dongting	LI Sheng-nan, CHEN Hao-yu, PENG Hua, <i>et al.</i> (2679)
Toxicological Effects of Enrofloxacin and Its Removal by Freshwater Micro-Green Algae <i>Dictyosphaerium</i> sp.	WANG Zhen-fang, HAN Zi-yu, WANG Meng-xue, <i>et al.</i> (2688)
Comparative Phosphorus Accumulation and Ca-P Content of Two Submerged Plants in Response to Light Intensity and Phosphorus Levels	SANG Yu-xuan, YANG Jia-le, XIONG Yi, <i>et al.</i> (2698)
Effect of Calcium Peroxide Composite Tablets on Water Remediation and Phosphorus Control in Sediment	ZHANG Shuai, LI Da-peng, DING Yu-qin, <i>et al.</i> (2706)
Spatial Differentiation and Driving Analysis of Nitrogen in Rice Rotation Based on Regional DNDC: Case Study of Jinjiang River Watershed	WANG Ya-nan, SHUI Wei, QI Xin-hua, <i>et al.</i> (2714)
Low Temperature Ammonia Nitrogen Removal from an Iron, Manganese, and Ammonia Groundwater Purification Process with Different Concentrations of Iron and Manganese	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i> (2727)
Degradation of RBKS by High Crystallinity Mn-Fe LDH Catalyst Activating Peroxymonosulfate	LI Li, WU Li-ying, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (2736)
Mechanisms of Fe-cyclam/H ₂ O ₂ System Catalyzing the Degradation of Rhodamine B	YU Yu-qing, CHEN Xiang-yu, CAI Quan-hua, <i>et al.</i> (2746)
Removal of Nitrate Nitrogen by Microbial Photoelectrochemical Cell; PANI/TiO ₂ -NTs as a Photoanode	LU Yi, ZHOU Hai-shan, PENG Rui-jian, <i>et al.</i> (2754)
Performance and Membrane Fouling Characteristics of Mariculture Wastewater Treated by Anoxic MBR-MMR	CHEN Fan-yu, XU Zhong, YOU Hong, <i>et al.</i> (2762)
Effect of HRT on Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal in Modified A ² /O-BAF	ZHAO Kai-liang, LIU An-di, NAN Yan-bin, <i>et al.</i> (2771)
Effect of Ni(II) on Anaerobic Ammonium Oxidation and Changes in Kinetics	SUN Qi, ZHAO Bai-hang, FAN Sa, <i>et al.</i> (2779)
Removal of Urea by Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Mixed Strains and Effects of Heavy Metals and Salinity	WANG Meng-meng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (2787)
Start-up Characteristics of SNAD Process and Functional Abundance Succession of Volcanic Rock Biological Aerated Filter	XUE Jia-jun, ZHANG Shao-qing, ZHANG Li-qiu, <i>et al.</i> (2796)
Effect of Free Hydroxylamine on the Activity of Two Typical Nitrite-oxidizing Bacteria	SHEN Chen, ZHANG Shu-jun, PENG Yong-zhen (2805)
Interference of Dead Cell DNA on the Analysis of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in Anaerobic Digestion Sludge	SU Yu-ao, LIU Hong-bo, MAO Qiu-yan, <i>et al.</i> (2812)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Arable Land Soil of China	CHEN Wen-xuan, LI Qian, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2822)
Construction and Application of Early Warning System for Soil Environmental Quality	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2834)
Response of Aggregate Distribution to Input Straw and Their Linkages to Organic Carbon Mineralization in Soils Developed from Five Different Parent Materials	MAO Xia-li, QIU Zhi-teng, ZHANG Shuang, <i>et al.</i> (2842)
Response of Extracellular Enzyme Activities to Substrate Availability in Paddy Soil with Long-term Fertilizer Management	NING Yu-fei, WEI Liang, WEI Xiao-meng, <i>et al.</i> (2852)
Effects of Biochar on Bioavailability of Two Elements in Phosphorus and Cadmium-Enriched Soil and Accumulation of Cadmium in Crops	HUANG Yang, GUO Xiao, HU Xue-yu (2861)
Characteristics of Cd, As, and Pb in Soil and Wheat Grains and Health Risk Assessment of Grain-Cd/As/Pb on the Field Scale	XIAO Bing, XUE Pei-ying, WEI Liang, <i>et al.</i> (2869)
Reconstructed Soil Vertical Profile Heavy Metal Cd Occurrence and Its Influencing Factors	HU Qing-qing, SHEN Qiang, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2878)
Bacterial Community Composition in Cadmium-Contaminated Soils in Xinxiang City and Its Ability to Reduce Cadmium Bioaccumulation in Pak Choi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	CHEN Zhao-jin, LI Ying-jun, SHAO Yang, <i>et al.</i> (2889)
Root Activities of Re-Vegetated Plant Species Regulate Soil Nutrients and Bacterial Diversity in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Li-juan, LI Chang-xiao, CHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2898)
Spatial Distribution of Nitrogen Metabolism Functional Genes of Eubacteria and Archaeobacteria in Dianchi Lake	ZHANG Yu, ZUO Jian-e, WANG Si-ke, <i>et al.</i> (2908)
Effect of Simulated Warming on Microbial Community in Glacier Forefield	WANG Yu-wan, MA An-zhou, CHONG Guo-shuang, <i>et al.</i> (2918)
Effect of Water-Fertilizer-Gas Coupling on Soil N ₂ O Emission and Yield in Greenhouse Tomato	SHANG Zi-hui, CAI Huan-jie, CHEN Hui, <i>et al.</i> (2924)
Toxicity of Soil Leachate from Coal Gangue and Its Surrounding Village of Barley (<i>Hordeum vulgare</i>)	SHANG Yu, YANG Feng-long, NING Xia, <i>et al.</i> (2936)
Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution in Marine Organisms from Estuaries of Changhua River in Hainan Province	WANG Hui-juan, KUANG Ze-xing, ZHOU Xian, <i>et al.</i> (2942)
Characteristics of Macrobenthos Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Rivers of Beijing in Spring	HE Yu-xiao, LI Ke, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2951)
Effect of Pyrolytic Temperature and Time on Characteristics of <i>Typha angustifolia</i> Derived Biochar and Preliminary Assessment of the Ecological Risk	CAI Zhao-hui, CHU Chen-jing, ZHENG Hao, <i>et al.</i> (2963)
Measurement of Traffic Carbon Emissions and Pattern of Efficiency in the Yangtze River Economic Belt (1985-2016)	JIANG Zi-ran, JIN Huan-huan, WANG Cheng-jin, <i>et al.</i> (2972)