

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期

Vol.42 No.12

目次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力 李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培(5563)

汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策 王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平(5574)

西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单 高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益(5585)

新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析 陈军辉, 冯小球, 李媛, 王书肖(5594)

基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM_{2.5} 浓度估算 吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖迪(5602)

《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM_{2.5} 中水溶性无机离子特征 李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思(5616)

洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析 孙佳侯, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹(5624)

北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素 曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭(5633)

天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析 王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂(5644)

沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性 杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜(5656)

典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析 葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正(5663)

南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估 张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟(5673)

基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征:以郑州市高新区为例 任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄(5687)

我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响 高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小拴(5698)

VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析 王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿(5713)

山东省 O₃ 时空分布及影响因素分析 张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨(5723)

2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性 钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政(5736)

基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建 郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇(5747)

三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析 张凯, 吴凤平, 成长春(5757)

长江流域总氮排放量预测 丁肇慰, 郑华(5768)

1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征 姚梦雅, 胡敏娟, 陈丁江(5777)

黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布 韩语, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明(5786)

基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源 邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅(5796)

水源水库真核微生物种群结构季相演替特征 张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容(5804)

达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异 李文宝, 郭鑫, 张博亮, 杜蕾, 田雅楠(5814)

尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制 王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞(5826)

武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估 张坤锋, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军(5836)

上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系 徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮(5848)

曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素 李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇(5857)

水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除 赵伟, 范增增, 杨新萍(5865)

木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响 孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报(5876)

黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮 魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英(5884)

玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响 南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒(5896)

饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径 周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉(5905)

污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势 曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高(5912)

阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应 高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕(5921)

典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析 李强, 曹莹, 何连生, 王耀锋, 龚成, 何书涵(5930)

我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价 王耀锋, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健(5938)

浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险 王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜霓雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军(5949)

北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探 管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华(5958)

典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价 强瑛, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫(5967)

雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应 周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌(5977)

铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划 朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波(5988)

干湿交替对铈锰改性生物炭固定红壤 As 的影响 黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧(5997)

铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除 王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郜红建, 叶新新(6006)

稻田灌溉河流 CH₄ 和 N₂O 排放特征及影响因素 吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文(6014)

节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房(6025)

有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N₂O 的排放特征及微生物特性 王楷, 史雷, 马龙, 王书婷, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年(6038)

不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响 孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖(6047)

氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响 杨建强, 刁华杰, 胡姝娅, 陈晓鹏, 王常慧(6058)

化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响 向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明(6067)

浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量 王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛(6078)

《环境科学》第42卷(2021年)总目录 (6091)

《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)

长江流域总氮排放量预测

丁肇慰^{1,2}, 郑华^{1*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 水环境污染是长江流域突出的环境问题之一, 预测污染物排放特征可为流域水污染防治提供科学基础. 本研究综合采用灰色理论预测模型、Conversion of land use and its effects at small region extent (CLUE-S) 模型以及 Integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs (InVEST) 模型, 预测 2025 年长江流域非点源以及点源总氮排放趋势. 结果表明: ①非点源总氮排放呈减少趋势, 2015~2025 年区域非点源总氮排放量减少 23.96%, 中下游农业区总氮排放骤减, 而上游局部地区呈增加趋势; ②点源总氮排放总体呈现增加趋势, 2015~2025 年区域点源总氮排放量增加 1.79%, 主要是由于城镇废水排放的增加以及中下游沿江城市群生活污水排放显著增加, 而中下游丘陵地区点源总氮排放呈现减少趋势; ③长江流域总氮排放量呈现减少趋势, 2015~2025 年减少 2.67%, 但仍有 37.64% 区域呈现总氮排放增加的趋势. 长江流域未来应加强对上游面源污染治理以及中下游工业、城镇废水排放的管控. 采用多模型结合的手段可以精细揭示了长江流域总氮排放空间格局及未来趋势, 可为明确流域总氮排放控制目标提供科学基础, 也可为实现高效的水环境治理提供科学依据.

关键词: 总氮排放量预测; 长江流域; 人类活动; 环境保护政策; 高效流域水污染治理

中图分类号: X522; X826 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-5768-09 DOI: 10.13227/j.hjck.202103228

Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin

DING Zhao-wei^{1,2}, ZHENG Hua^{1*}

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Water pollution is one of the serious environmental problems in the Yangtze River Basin. Predicting the trend of pollutant load can provide a scientific foundation for watershed ecological management. In this study, we used CLUE-S, InVEST, and grey system prediction models to predict the nonpoint and point total nitrogen (TN) pollution load under future ecological management and economic development scenario in the Yangtze River Basin and analyze the change in TN pollution load from 2015-2025. The results showed that, during 2015 to 2025, the nonpoint TN loads had been reduced by 23.96%. Nonpoint TN load decreased sharply in the middle and downstream watershed, whereas it increased in some upstream watersheds. The point TN load increased by 1.79%, which was mainly attributed to the increase in domestic wastewater. The municipal TN load in urban agglomerations increased significantly, whereas the point TN load decreased in some hilly areas of middle and downstream watershed. Overall, the TN load is predicted to decrease by 2.67% in 2025 but it still increases in 37.64% area of Yangtze River basin. Furthermore, more effective measures should be taken to control the nonpoint pollution in upper stream and point pollution from industrial and municipal areas in middle and downstream reaches. This approach based on multiple ecological models can accurately illustrate the future TN load spatial pattern and evolutionary trend, which can provide more detailed information on watershed TN control targets and improve the efficiency of watershed pollution control management.

Key words: total nitrogen load prediction; Yangtze River basin; human activities; environmental management; effective water pollution management

长江流域是我国经济发展最为发达的地区之一, 随着人类经济发展活动的不断开展, 城市、工业和农业等废水排放量陡增, 随之带来了严重的水环境污染问题. 长江流域的大中小湖泊基本呈现富营养化状态, 洞庭湖和鄱阳湖等重要湖泊富营养化严重^[1,2]. 然而, 尽管我国已经开展一些针对污染源控制的生态保护与修复措施, 但在生态管理的成效依旧有限, 水质污染问题依旧存在^[3,4]. 治理流域水环境污染是一个极为困难的工作, 因为受污染地区的修复工作可能需要数十年的时间, 在此期间, 污染物排放可能由于人类活动而发生了巨大变化. 因此, 分析未来发展和环境保护情景下的污染物排放的变化对于高效流域生态管理是非常必要的^[5].

预测社会发展以及生态保护情境下污染物排放的主要挑战是如何量化多种社会生态因子对污染物排放的影响, 例如土地利用、国民生产总值 (gross

domestic production, GDP) 和生态保护政策^[6]. 以往的研究常常基于假设的污染源管控情景, 讨论社会发展与生态保护情景下污染物排放的变化趋势^[7,8]. 但是由于这些研究多基于假设的情景, 这种模拟的风险源不能反映复杂的社会生态因素影响的真实情景^[9~11], 难以精准而全面地指导流域水污染治理. 因此亟需研究生态-社会过程对污染物排放变化的影响, 为流域水污染管理提供更准确且实用的信息.

由于水体污染源可以分为点源和面源, 点源污染主要是工业以及生活污水直接排放进入水体, 而面源污染主要是经地表径流等途径进入水体^[12]. 针

收稿日期: 2021-03-26; 修订日期: 2021-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41925005)

作者简介: 丁肇慰 (1991~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为区域生态恢复, E-mail: zwding_st@cees.ac.cn

* 通信作者, E-mail: zhenghua@cees.ac.cn

对点源污染预测,灰色理论预测模型(grey system prediction model, GSPM)能够基于历史资料,根据统计学原理,实现未来工业以及城镇废水排放趋势的预测^[13].相比于其他机制模型,灰色理论模型可以针对变量信息少、信息不确定性强的数据,进行较为精准的预测,已被广泛应用于点源污染预测^[14~16].针对面源污染预测,相关研究表明土地利用是影响面源污染的主要因素^[8],相关研究常结合土地利用预测模型以及面源污染物传输模型预测污染的变化趋势^[17,18].CLUE-S(Conversion of land use and its effects at small region extent)模型是广泛应用的模拟未来土地利用变化的模型^[19],模型能够根据土地利用与驱动因子之间的关系,动态模拟土地利用变化.相比其他土地利用模拟模型,CLUE-S模型能够充分考虑不同土地利用类型之间的竞争性,而从提升模拟结果精度.InVEST(Integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs)模型中的营养物截留模块能够基于土地利用营养盐的输出系数以及截留效率确定面源污染物排放量.相比其他污染物模拟机制模型,InVEST模型所需系数少,模型率定过程简单,在大尺度污染物排放模拟上具有很好地适用性^[20].综合应用上述模型,可为预测流域点源和面源污染物排放提供有效方法.

本研究利用生态模型(如CLUE-S、InVEST和Grey System Prediction Model),模拟未来经济发展以及生态保护情景下点源以及非点源总氮排放量变化,揭示长江流域社会-生态过程对总氮排放的影响,预测总氮排放变化以及污染源变化特征,以期为高效的流域水环境管理提供科学依据.

1 研究区域概况

长江流域总面积约为 $180 \times 10^4 \text{ km}^2$,基于地形地貌以及水文特征,长江流域分为上、中和下游这3个部分(图1),其中上游为宜昌以上流域,中游为宜昌至湖口部分,湖口以下区域为下游.流域主要水系有岷江、雅砻江、嘉陵江、乌江、汉江、湘江和赣江等,主要湖泊有滇池、洞庭湖、鄱阳湖和太湖等.长江流域具有丰富的自然资源,水资源占全国河流径流总量的36%,生物多样性丰富,是世界自然基金会(WWF)评定的全球35个重点生态区域之一^[21].长江流域也是人类开发建设活动最为剧烈的地区,区域内农业、工矿业和航运活动密集,贡献了全国近40%的国民生态总值(GDP)和粮产量,50%的矿业储量与轻工业产量以及具有世界内河水系第一的航运规模^[22].长江流域也是重要的城镇人口聚集区,城市群分布密集,呈现沿江分布的态势,其中上游主要分布成渝城市群、滇中城市群和黔中城市群,中游主要分布武汉城市群、长株潭城市群和昌九城市群,下游主要分布上海市、南京都市圈、杭州都市圈和皖江城市带.

水质污染是长江流域主要的环境问题之一,农业面源污染以及工业城镇污染严重.长江中下游农田面积大,农业施肥导致中游地区水体中的氮增加^[23].黔东南和岷沱江流域等区域矿业开发强度大,汉江平原重化工业聚集,长三角区工业园区密集,同时长江城市群呈现沿江分布趋势,进一步增加了流域水质污染的风险^[24].为保护长江水环境,长江流域实施了退耕还林和生态保护红线等一系列生态工程和污染物减排政策.

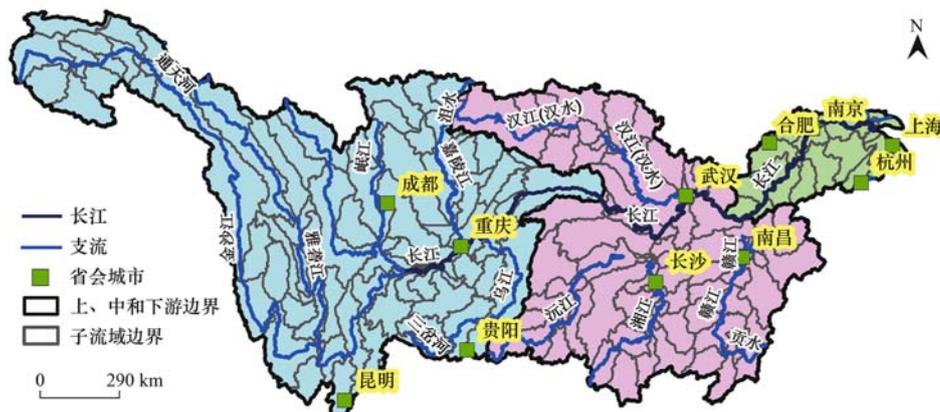


图1 长江流域位置空间分布示意

Fig. 1 Location of Yangtze River basin

2 材料与方法

本研究拟揭示未来经济发展以及生态系统管理

对长江流域总氮排放的影响.由于总氮污染源主要分为点源污染和非点源污染两类^[19],本研究在子流域尺度上预测这两类风险源的变化趋势.针对面源

污染预测,本研究首先用 CLUE-S 模型预测在社会发展以及生态系统管理趋势下土地利用变化,在土地利用预测基础上利用 InVEST 模型模拟未来面源

污染排放量.针对点源污染,本研究利用 GSPM 模型模拟社会发展以及生态系统管理趋势下城镇以及工业污染排放量,具体技术路线如图 2.

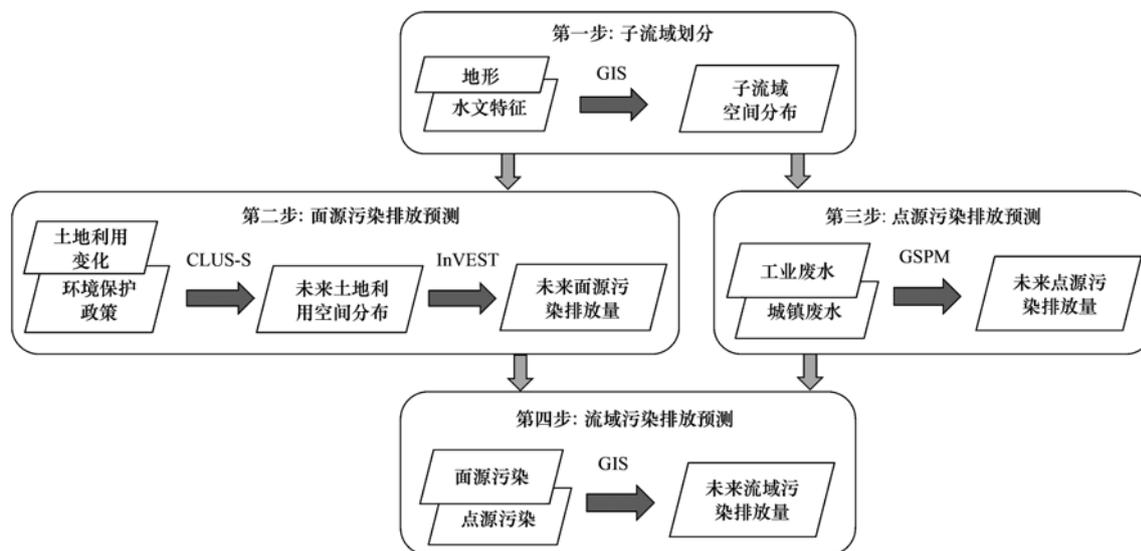


图 2 本研究技术路线

Fig. 2 Technology roadmap of this study

2.1 子流域划分

根据地形以及水文特征,在 ArcGIS 10.6 中设定集水区面积大于等于 6 250 km²,共划分 180 个子流域(图 1).其中上游分布 96 个子流域,主要位于青海、云南、贵州、四川和重庆;中游分布 72 个子流域,主要位于湖南、湖北和江西;下游分布 12 个子流域,主要位于安徽、江苏、浙江和上海.在子流域基础上,分析各区域未来经济发展以及环境保护管理对生态风险源总氮排放的影响.

2.2 非点源总氮排放预测方法

由于土地利用是影响非点源污染产生过程的主要因素,因此本研究根据未来土地利用的发展趋势确定非点源污染的规划^[25~27].在本研究中,首先利用 CLUE-S 模型模拟未来经济发展以及环境保护情景下土地利用的变化.在此基础上,用 InVEST 模型中的营养物截留模块子模块计算流域非点源总氮污染排放量的变化值.

2.2.1 基于 CLUE-S 模型的土地利用模拟以及验证

CLUE-S 可以根据土地利用演变趋势以及土地管理政策进行土地利用模拟.模型输入主要分为 4 个部分,分别为土地利用需求模块,空间分布适宜性模块,空间政策与限制模块,土地利用转移模块: ① 土地利用需求模块是根据以往土地利用趋势,评估未来总体土地利用变化需求总量.在本研究中,用 2000~2015 年土地利用变化趋势,通过模型线性插值计算得到 2015~2025 年土地利用总面积预测; ② 空间适宜性是根据土地利用分布与驱动因子建

立 Logistic 回归模型,评估每个栅格中出现某种土地利用类型的概率.本研究中,选取了 8 种社会经济以及生物物理属性指标作为土地利用变化的驱动因子,分别为数字高程模型(digital elevation model, DEM)、坡度、坡向、距道路距离、距城镇距离、距河流距离、GDP 和人口,并用受试者工作特征值(relative operating characteristics, ROC)对回归结果进行验证; ③ 空间政策与限制模块主要是根据土地管理政策确定区域限制转换的土地.本研究中,由于我国目前设置了生态红线政策,在生态红线区禁止开发建设活动,因此根据孔令桥等^[28]长江流域生态红线的研究结果,将这些红线区设置为空间约束区,实际计算中约束区赋值为 -999,其他区域赋值为 0; ④ 土地利用转移模块主要是确定各类土地利用直接发生转化的概率,包括土地利用的转移系数设置以及可转移性设置.土地利用转移弹性系数(elasticity of the actual land-use types, ELAS)取值范围为 0~1,数值越大表示土地利用改变越困难.本文首先结合长江流域 2000~2015 年土地利用类型转换概率^[29],比较各类用地转换弹性系数的相对大小发现,土地利用弹性系数由小到大依次为建设用地、未利用地、农田、森林、草地和湿地,并结合模型经验参数,最终确定建设用地、未利用地、农田、森林、草地和湿地 ELAS 参数分别赋值为:0.2、0.4、0.6、0.8、0.8 和 1.而根据 2000~2015 年土地利用类型转换结果,发现各类土地利用类型之间均可以发生转换,因此可转移性矩阵设置均为 1,即土地利

用可以转为另一种土地利用。

土地利用模拟结果精度可以用 Kappa 指数评价模型来进行验证^[30]。该指数评价模型主要是通过真实土地利用与模拟土地利用之间的一致性比例来评价模拟精度,指数取值范围在 0~1 之间,值越大说明精度越高^[31]。

本研究用了 2010 年和 2015 年的实际土地利用数据对模型模拟数据进行验证。首先,选取上述 8 种社会经济以及生物物理属性指标作为土地利用变化的驱动因子,对土地利用变化趋势进行 Logistic 回归拟合(逐步向后),并对各个土地利用类型模拟结果进行 ROC 检验,回归检验结果如表 1 所示。一般认为 ROC 值大于 0.7,表明选取的驱动因子能够较为

准确地表征土地利用的空间分布。本研究中,所有土地利用类型(农田、建设用地、湿地、森林、草地和未利用地)ROC 值均高于 0.8,说明所选的驱动因子与各个土地利用类型之间均具有较好的相关性,能够用于模拟研究区土地利用空间分布格局。在合理选择驱动因子基础上,用 CLUE-S 模型模拟 2010 年和 2015 年长江流域的土地利用,将模拟结果与 2015 年实际土地利用数据进行 Kappa 指数检验,结果显示 Kappa 指数为 0.85 和 0.81,说明模型能够精准模拟土地利用变化。在此基础上,笔者认为 CLUE-S 模拟长江流域土地利用具有较强的可信性,因此选用该模型模拟 2025 年土地利用结果,用于未来非点源总氮排放预测评价中。

表 1 长江流域各土地利用类型回归数据与 ROC 检验结果¹⁾

Table 1 Regression results and ROC of land use in Yangtze River basin

	模型系数					
	农田	建设用地	湿地	森林	草地	未利用地
常量	0.782	-0.962	-1.864	0.346	-3.873	-11.36
高程	-0.001	-0.0006	0.0004	-0.001	0.001	0.002
坡度	-0.078	-0.252	-0.245	0.139	-0.025	0.042
坡向	0.0008	0.0003	-0.002	—	-0.0007	0.0008
距道路距离	-0.016	-0.043	0.002	—	-0.008	0.001
距城市距离	-0.002	-0.007	-0.006	-0.002	0.0003	0.0007
距河流距离	-0.014	-0.013	0.006	—	-0.001	0.004
GDP	-0.463	0.224	0.0208	-0.321	-0.21	—
人口	-0.547	2.144	-0.546	-24.814	-1.717	2.044
ROC	0.91	0.95	0.815	0.90	0.875	0.869

1) “—”表示各类土地利用为驱动力之间没有显著相关性

2.2.2 非点源污染排放预测

本研究用 InVEST 模型的营养物截留模块计算流域非点源总氮排放变化。营养物截留模块主要是基于各个土地利用类型的总氮负荷量进行计算。该模型在长江流域已经很好地应用,能够准确评估非点源总氮排放。本研究参考以前研究的长江流域总氮负荷参数^[26],结合 CLUE-S 与 InVEST 模型进行非点源污染预测。

2.3 点源总氮排放预测方法

由于点源污染物排放受经济增长速度、人口、废水处理系统的能力和有效性等许多社会生态因素的影响,因此在数据采集中存在着很大的不确定性^[15]。灰色系统预测模型(GSPM)可以通过提供一种方法在关系不明确、机制不确定和信息不足的情况下,量化社会生态过程之间的关系,从而实现点源污染物排放的预测。在本研究首先使用 GSPM 来模拟未来发展情景下的工业废水中总氮排放量。由于城镇废水排放中总氮排放量数据较难获取,参考之前的研究^[32],发现第二次全国污染源普查中,各个城市的废水排放系数均充分考虑了地理环境因素、

社会经济发展水平、气候特点和给排水特征等,能够用于城市废水排放的预测。因此笔者使用 GSPM 来模拟未来发展情景下的人口数量,根据全国第二次污染源普查结果,用区域人口乘以城市废水排放系数得到区域城市总氮排放量。本研究根据 2010~2015 年的工业废水总氮排放以及人口数据进行模拟分析,先用了 2010~2015 年实测的工业废水总氮排放以及人口数据对模型模拟数据进行验证,在模型模拟结果合理的基础上,预测 2025 年非点源污染总氮排放量。

灰色系统预测模型主要是通过微分方程为表达形式,模拟统计数据的连续变化过程。模型为一阶单变量微积分方程模型,其主要表达式如下:

$$x^{(0)}(k) + ay^{(1)}(k) = b \quad (1)$$

式中, a 和 b 为待定参数, $x^{(0)}$ 为原始序列, $y^{(1)}$ 为原始序列的一阶累计序列, k 为样本量。模型通过对原始数据累加,最小二乘估计参数计算,预测方程推导以及模型预测结果诊断 4 个步骤,确定模拟结果,同时可以选取平均相对误差 $\bar{\Delta}$ 以及灰色关联度 η 来对模拟结果精度进行验证,平均相对误差越小,说明模

型模拟效果越好,而灰色关联度取值在 0~1 之间,越接近于 1,模型模拟效果越好^[33]. 平均相对误差 Δ 以及灰色关联度 η 计算与精度检验方法在大尺度评估中广泛应用,具体计算方法以及精度等级检验对照表详见以往的研究^[34].

本研究通过基于区域人口以及工业废水排放量的历史值(2010~2015 年数据),利用 GSPM 模型模拟长江流域的人口与工业废水排放量,模拟结果与实际 2010~2015 年的人口与工业废水排放量数据进行对比,拟合平均相对误差以及灰色相关度两个指标用来验证. 模拟结果显示,2010~2015 年人口与工业废水排放量模拟的平均相对误差 Δ 分别为 0.02 和 0.019,灰色相关度 η 分别为 0.96 和 0.99,这说明模型模拟效果良好,准确度高,具有很高的可信性. 因此可以选用该模型模拟 2025 年人口以及工业废水排放量用于 2025 年点源总氮排放预测评价中.

2.4 数据来源

(1) 土地利用数据 长江流域土地分为 6 类:建设用地(包括交通以及建设用地等人工建设用地)、未利用地(包括交通以及建设用地等人工建设用地)、农田、森林、草地和湿地. 该数据来源为国产环境灾害卫星(HJ-1A/B)和美国陆地卫星(Landsat OLI)数据,数据精度为 30 m×30 m.

(2) 数字高程模型 长江流域 DEM 数据来自地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn>),数据精度为 250 m×250 m. DEM、坡度、坡向、距道路距离、距城镇距离、距河流距离、GDP 和人口

(3) 道路数据 公路数据来源于中国高速公路

地图集.

(4) 河流数据 河流数据来源于中国 1:100 万河流地图.

(5) 社会数据 GDP 数据可以通过资源环境数据云平台获取,数据精度为 1km×1km;人口数据可以通过中国统计年鉴(2010~2015 年)获得;工业废水总氮排放量可以通过中国城市统计年鉴(2010~2015 年)获得.

3 结果与分析

3.1 非点源总氮排放预测

本研究用 CLUE-S 模型预测了 2025 年经济发展以及环境保护政策下的情景下长江流域土地利用[图 3(a)]. 相比 2015 年[图 3(b)], 2025 年变化较大的土地利用类型为农田与建设用地,全流域范围内建设用地的面积增加了 50.64%,农田面积减少了 15.32%. 土地利用变化趋势与 2000~2015 年长江流域土地利用变化趋势相同,未来城镇化以及退耕还林等生态工程,依旧是影响流域土地利用变化的主要原因^[29]. 农田面积的减少会大大减少非点源总氮的排放,而建设用地的增加会大大增加非点源总氮的排放. 对 180 个子流域非点源污染变化情况进行分析[图 4(a)],发现流域总体点源污染呈现减少趋势,与 2015 年相比减少了 23.96%. 88.07% 的区域出现非点源总氮排放减少的趋势,主要集中在长江流域中下游区域,其中中游总氮污染排放显著减少. 11.93% 的子流域出现非点源总氮排放增加的趋势,主要集中在流域上游地区,特别是上游三江源区域.

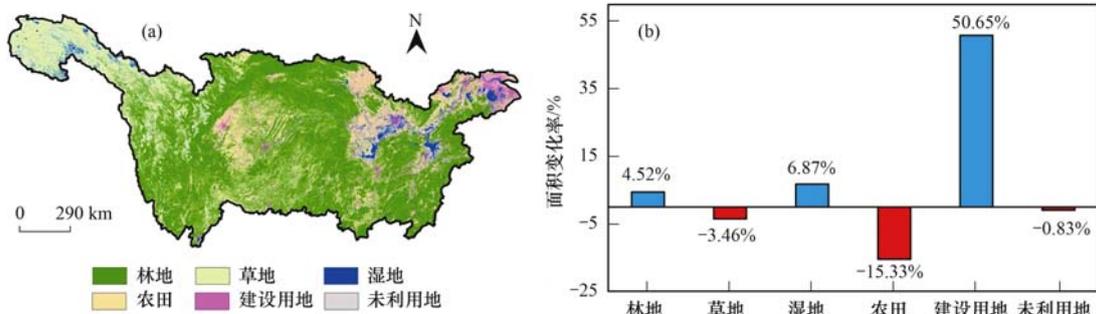


图 3 长江流域 2025 年土地利用预测以及 2015~2025 年面积变化

Fig. 3 Predicted land use of Yangtze River basin in 2025 and its area change rate from 2015 to 2025

3.2 点源总氮排放预测

本研究基于 GSPM 模型预测了 2015~2025 年经济发展以及环境保护政策下的情景,长江流域工业以及城镇废水中总氮排放量变化. 相比 2015 年,未来 2025 年工业废水中总氮排放量总体呈现减少趋势,总氮排放量总体减少了 0.47%. 在子流

域尺度[图 4(b)],笔者发现 43.28% 的区域出现工业总氮排放增加的趋势,主要分布在岷江、嘉陵江、湘江、赣江以及中下游长江干流区域. 56.72% 的区域出现工业总氮排放减少的趋势,主要分布在流域上游以及中游山地丘陵区. 相比 2015 年,2025 年城镇总氮总体呈现增加趋势,总体增加了

8.06%, 在子流域尺度[图 4(c)], 85.65% 的区域出现城镇总氮排放增加的趋势, 其中中下游城市群(如成渝城市群、武汉城市群、长株潭城市群、昌九城市群以及长三角城市群), 总氮排放增长剧烈. 14.35% 的区域出现城镇总氮排放减少的趋势, 主要分布在中下游丘陵地区. 总体而言, 在子流域尺度发现[图 4(d)], 未来点源污染与 2015 年相比增加了 1.79%, 64.53% 的区域出现点源总氮排放减少的趋势, 主要分布在中下游丘陵地区, 35.47% 的区域出现点源总氮排放增加的趋势, 长江沿江城市群点源总氮排放增加剧烈.

3.3 流域总氮排放预测

将各个子流域非点源与点源污染物排放量相加, 分析未来经济发展以及生态保护政策情景下流域总氮排放情况. 相比 2015 年, 2025 年流域总氮排放量呈减少趋势, 减少了 2.67%. 在子流域尺度[图 4(e)], 37.64% 的区域出现总氮排放增加的趋势, 主要集中在中下游干流沿江区域以及成渝城市群、武汉城市群、长株潭城市群、昌九城市群等中下游城市群. 62.36% 的区域出现总氮排放减少的趋势, 主要集中在上游以及中游丘陵区域, 工业废水以及非点源污染排放的减少是导致这些区域总氮排放减少的主要原因.

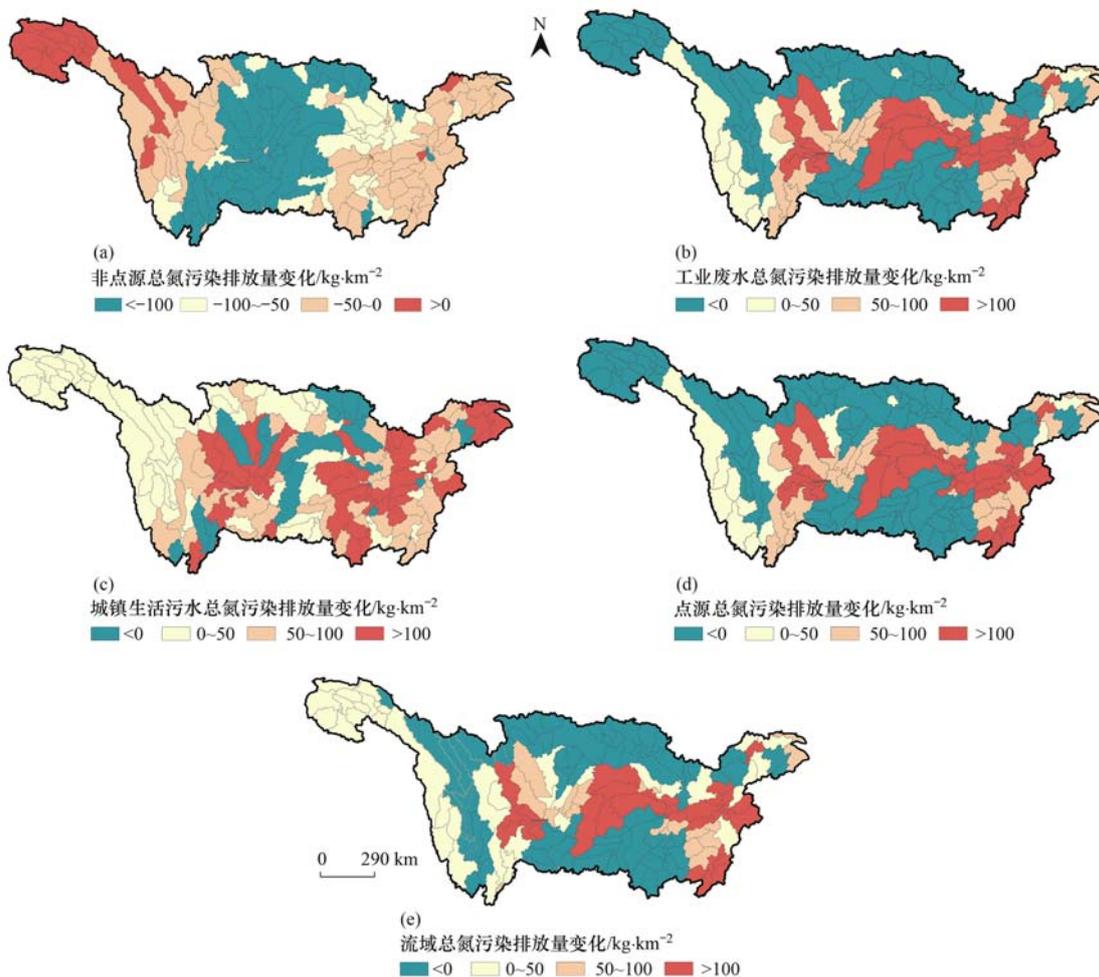


图 4 长江流域 2025 年非点源、工业废水、城镇生活废水、点源和流域总体总氮排放量

Fig. 4 TN load from nonpoint sources, industrial sources, municipal sources, point sources, and all sources of Yangtze River basin in 2025

4 讨论

由于社会经济建设与生态环境保护是同时进行的, 因此未来生态恢复管理既要要对现有生态风险进行管控, 同时又需要依据未来经济发展趋势, 对未来可能出现的生态风险进行预防^[5]. 本研究系统分析了长江流域未来社会发展以及生态红线保护政策下总氮排放的变化趋势, 为流域水质污染的高效管理提供科学建议.

本研究提供了一个系统的方法来预测在未来发展趋势下总氮排放量. 尽管以往的研究中已经研究了在假定情景下, 如土地利用变化或者污染源管控等, 污染物排放的变化趋势, 但是实际的社会经济以及生态因素, 如 GDP、人口变化、生态保护政策等如何共同影响污染源产生污染物的过程却很少被系统讨论^[35]. 揭示经济发展以及环境保护对污染物产生的影响有一个关键的难点就是如何确定社会经济以及生态过程与污染物形成的关系. 由于总氮的排放

分为点源与非点源排放两种途径,因此可以基于这两种途径量化社会生态过程对于总氮排放的影响。

对于非点源污染物来说,已经有很多研究证实土地利用格局与污染物的产生存在显著关系,同时一些模型如 InVEST 等,已经基于土地利用参数进行总氮排放的模拟^[20]。因此,基于社会经济发展以及生态保护政策情景下未来土地利用模拟可以作为一个媒介,从而实现非点源污染排放的预测。但是,点源污染主要受排放点自身属性的影响,有研究表明点源污染减弱了污染物排放与土地利用之间的关系^[36],因此无法基于土地利用模拟推测出未来点源污染的变化。统计预测法能够利用历史数据进行统计概率模拟,为未来经济发展以及生态保护情景下点源污染的预测提供一种途径。因此,基于目前社会发展以及生态保护政策下点源污染的变化趋势,通过统计预测模型能够实现点源污染排放的预测。在本研究中结合 CLUE-S 土地利用预测模型以及 GMPS 灰色系统预测模型,系统地探讨了社会与生态过程,如工业排放、人口和土地利用变化对总氮排放的影响,量化未来经济发展以及生态保护情景下污染物的变化。笔者对长江流域 2010~2015 年的点源与非点源总氮排放量进行模拟并将模拟结果与实测数据进行验证,发现两者的模拟结果与实测数据拟合程度高,说明提供的污染物预测方法具有很高的可信度,因此本研究能为评估未来经济发展以及生态保护情景下污染物的变化提供一种可行的途径。

基于长江流域 2025 年的总氮排放预测结果(图 4),未来经济发展以及环境管理政策下,总体上总氮排放呈现减少趋势,但总氮排放呈现出空间异质性,说明目前的生态保护政策在一定程度上降低了流域水环境污染的风险,但是在一些地区依旧面临水环境污染风险。这一结果与之前研究结论一致^[37]。点源污染在研究区的中下游沿江区域急剧增加,而在上游区域总体增加较少,部分区域呈现减少趋势。而非点源污染在长江流域中游急剧减少,在上游减少较缓,且部分区域出现增加趋势。这一现象说明了探究社会以及生态过程对污染源管控的重要性,缺乏系统分析的污染源管控可能低估社会因素或者生态因素对污染排放的作用,导致难以实现预测的水质净化效果。因此为了提升流域生态污染管控效率,量化社会发展与环境保护等活动对污染源的共同影响是必须的。

本研究能够提供实时且详细的总氮排放变化趋势和驱动力分析,为长江流域水环境污染动态管理提供科学依据。首先,本研究能够为未来水质污染管

控提供方向,现在流域内有 37.64% 的区域总体总氮排放呈现出增加的趋势(图 4),这意味着现有生态保护或者污染源管控措施在这些区域存在局限性。因此,根据总氮排放的动态分析结果,可以识别出未来总氮排放可能增加的区域,因此应加强对这些区域的生态保护与修复,以及在在这些区域制定更为谨慎的经济开发计划。其实,本研究通过系统地分析点源与非点源污染的变化,揭示未来污染排放的驱动力,为精确管控污染源提供科学依据。基于长江流的分析结果,本研究发现未来长江流域上游局部地区依旧呈现非点源污染增加的情况,同时城镇的扩张进一步增加了非点源污染的排放,因此减少上游农业开发以及城镇化对非点源污染的影响是未来水环境管理需要讨论的问题。针对点源污染,本研究发现未来沿江流域点源污染排放增加,中游工业污染急剧增加同时中下游城市群的扩张导致生活污水的排放增加,这与之前相关研究结果一致^[38,39]。因此管控中下游工业以及城镇污染排放是未来水环境管控的重点。

5 结论

(1) 长江流域未来非点源总氮污染呈现减少的趋势,与 2015 年相比减少了 23.96%,农田面积减少是非点源污染减少的主要原因。其中长江流域中下游农业区非点源总氮排放显著减少,而上游三江源局部区域非点源污染呈现增加趋势。

(2) 长江流域未来点源总氮污染呈现增加的趋势,与 2015 年相比增加了 1.79%,主要是由于城镇废水排放的增加导致。其中长江中下游城市群(如成渝城市群,武汉城市群、长株潭城市群、昌九城市群以及长三角城市群)城镇废水显著增加,而中下游丘陵地区点源总氮排放呈现减少趋势。

(3) 总体而言,未来长江流域出现总氮排放减少的趋势,相比 2015 年减少了 2.67%。但总氮排放呈现明显的空间异质性,未来长江流域仍需加强对上游农业面源污染治理以及中下游工业、城镇废水的管控。

参考文献:

- [1] 王超俊,吕顶产. 长江水资源保护面临的问题与对策[J]. 水利发展研究, 2001, 1(2): 8-12.
- [2] 季鹏飞,许海,詹旭,等. 长江中下游湖泊水体氮磷比时空变化特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4030-4041.
Ji P F, Xu H, Zhan X, et al. Spatial-temporal variations and driving of nitrogen and phosphorus ratios in lakes in the middle and lower reaches of Yangtze river[J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 4030-4041.
- [3] Duan W L, He B, Chen Y N, et al. Identification of long-term

- trends and seasonality in high-frequency water quality data from the Yangtze River basin, China[J]. *PLoS One*, 2018, **13**(2), doi: 10.1371/journal.pone.0188889.
- [4] Yu C Q, Huang X, Chen H, *et al.* Managing nitrogen to restore water quality in China[J]. *Nature*, 2019, **567**(7749): 516-520.
- [5] Landis W G, Markiewicz A J, Ayre K K, *et al.* A general risk-based adaptive management scheme incorporating the Bayesian network relative risk model with the South River, Virginia, as case study [J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2017, **13**(1): 115-126.
- [6] Zhang W S, Swaney D P, Hong B, *et al.* Anthropogenic phosphorus inputs to a river basin and their impacts on phosphorus fluxes along its upstream-downstream continuum[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, **122**(12): 3273-3287.
- [7] Kapustka L A, Bowers K, Isanhart J, *et al.* Coordinating ecological restoration options analysis and risk assessment to improve environmental outcomes [J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2016, **12**(2): 253-263.
- [8] Zhou P, Huang J L, Hong H S. Modeling nutrient sources, transport and management strategies in a coastal watershed, Southeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **610-611**: 1298-1309.
- [9] Miller M P, Capel P D, García A M, *et al.* Response of nitrogen loading to the Chesapeake Bay to source reduction and land use change scenarios: A SPARROW-informed analysis[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2020, **56**(1): 100-112.
- [10] Johns A F, Graham S E, Harris M J, *et al.* Using the Bayesian network relative risk model risk assessment process to evaluate management alternatives for the South River and upper Shenandoah River, Virginia [J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2017, **13**(1): 100-114.
- [11] Tang C H, Yi Y J, Yang Z F, *et al.* Risk forecasting of pollution accidents based on an integrated Bayesian Network and water quality model for the South to North Water Transfer Project[J]. *Ecological Engineering*, 2016, **96**: 109-116.
- [12] Chen H W, Yu R F, Ning S K, *et al.* Forecasting effluent quality of an industry wastewater treatment plant by evolutionary grey dynamic model [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, **54**(4): 235-241.
- [13] 李翠梅, 张绍广, 姚文平, 等. 太湖流域苏州片区农业面源污染负荷研究[J]. *水土保持研究*, 2016, **23**(3): 354-359.
- Li C M, Zhang S G, Yao W P, *et al.* Study on agricultural nonpoint source pollution load of Taihu Lake basin in Suzhou [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, **23**(3): 354-359.
- [14] Meng X M, Fan F F, Wu L F. Prediction of major pollutants discharge from wastewater in 31 cities of China[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2021, **26**: 54-64.
- [15] Yuan D, Lin B, Falconer R A, *et al.* Development of an integrated model for assessing the impact of diffuse and point source pollution on coastal waters[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2007, **22**(6): 871-879.
- [16] Zhang F, Xue H F, Ma X M, *et al.* Grey prediction model for the chemical oxygen demand emissions in industrial waste water: an empirical analysis of China[J]. *Procedia Engineering*, 2017, **174**: 827-834.
- [17] Feng M, Shen Z Y. Assessment of the impacts of land use change on non-point source loading under future climate scenarios using the SWAT model [J]. *Water*, 2021, **13**(6), doi: 10.3390/w13060874.
- [18] Wang Q R, Liu R M, Men C, *et al.* Application of genetic algorithm to land use optimization for non-point source pollution control based on CLUE-S and SWAT[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, **560**: 86-96.
- [19] Zhang P, Liu Y H, Pan Y, *et al.* Land use pattern optimization based on CLUE-S and SWAT models for agricultural non-point source pollution control [J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2013, **58**(3-4): 588-595.
- [20] 刘怡娜, 孔令桥, 肖懿, 等. 长江流域景观格局与生态系统水质净化服务的关系 [J]. *生态学报*, 2019, **39**(3): 844-852.
- Liu Y N, Kong L Q, Xiao Y, *et al.* Relationships between landscape pattern and ecosystem water purification service in the Yangtze River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(3): 844-852.
- [21] 李琴, 陈家宽. 长江大保护事业呼吁重视植物遗传多样性的保护和可持续利用 [J]. *生物多样性*, 2018, **26**(4): 327-332.
- Li Q, Chen J K. The primary task of watershed-scale comprehensive conservation of Yangtze River Basin: conservation and sustainable utilization of plant genetic diversity [J]. *Biodiversity Science*, 2018, **26**(4): 327-332.
- [22] 卢金友. 长江泥沙调控及干流河道演变与治理技术研究 [J]. *中国环境管理*, 2017, **9**(6): 116-117.
- [23] Wang L J, Zheng H, Zhao H, *et al.* Nitrogen balance dynamics during 2000-2010 in the Yangtze River Basin croplands, with special reference to the relative contributions of cropland area and synthetic fertilizer N application rate changes [J]. *PLoS One*, 2017, **12**(7), doi: 10.1371/journal.pone.0180613.
- [24] 刘磊, 张永, 王永红, 等. 长三角地区产业园区环境管理存在的主要问题及对策建议 [J]. *安徽师范大学学报(自然科学版)*, 2019, **42**(2): 135-140.
- Liu L, Zhang Y, Wang Y H, *et al.* Problems and countermeasures for environmental management of Yangtze River Delta industrial parks [J]. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 2019, **42**(2): 135-140.
- [25] Banadda E N, Kansime F, Kigobe M, *et al.* Landuse-based nonpoint source pollution: a threat to water quality in Murchison Bay, Uganda [J]. *Water Policy*, 2009, **11**(S1): 94-105.
- [26] Shen Z Y, Hong Q, Yu H, *et al.* Parameter uncertainty analysis of non-point source pollution from different land use types [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(8): 1971-1978.
- [27] 王晶萍, 李兆富, 刘红玉, 等. 中田河流域景观异质性对水体总氮浓度影响研究 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 527-533.
- Wang J P, Li Z F, Liu H Y, *et al.* Influence of landscape heterogeneity on total nitrogen concentration in Zhongtian River Watershed [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 527-533.
- [28] 孔令桥, 王雅晴, 郑华, 等. 流域生态空间与生态保护红线规划方法——以长江流域为例 [J]. *生态学报*, 2019, **39**(3): 835-843.
- Kong L Q, Wang Y Q, Zheng H, *et al.* A method for evaluating ecological space and ecological conservation redlines in river basins: a case of the Yangtze River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(3): 835-843.
- [29] 孔令桥, 张路, 郑华, 等. 长江流域生态系统格局演变及驱动力 [J]. *生态学报*, 2018, **38**(3): 741-749.
- Kong L Q, Zhang L, Zheng H, *et al.* Driving forces behind

- ecosystem spatial changes in the Yangtze River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(3): 741-749.
- [30] Pontius Jr R G, Schneider L C. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2001, **85**(1-3): 239-248.
- [31] 叶高斌, 苏伟忠, 孙小祥. 基于 Dyna-CLUE 模型的太湖流域建设用地空间扩张模拟[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, **27**(4): 725-734.
Ye G B, Su W Z, Sun X X. Simulation of the construction land expansion based on the dyna-CLUE model in Taihu Basin[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, **27**(4): 725-734.
- [32] 吴华安, 曾波, 彭友, 等. 基于多维灰色系统模型的城市人口密度预测[J]. *统计与信息论坛*, 2018, **33**(8): 60-67.
Wu H A, Zeng B, Peng Y, *et al.* Forecasting urban population density using a multi-variable grey system model[J]. *Statistics & Information Forum*, 2018, **33**(8): 60-67.
- [33] Kayacan E, Ulutas B, Kaynak O. Grey system theory-based models in time series prediction [J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, **37**(2): 1784-1789.
- [34] 李颖慧. 基于灰色系统模型的三峡库区水污染预测与治理对策研究[J]. *重庆理工大学学报(社会科学)*, 2020, **34**(3): 46-55.
Li Y H. Prediction and control of water pollution in three gorges reservoir area based on grey system model [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Social Science)*, 2020, **34**(3): 46-55.
- [35] Hua L Z, Shao G F, Zhao J Z. A concise review of ecological risk assessment for urban ecosystem application associated with rapid urbanization processes [J]. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2017, **24**(3): 248-261.
- [36] Zhou P, Huang J L, Pontius Jr R G, *et al.* New insight into the correlations between land use and water quality in a coastal watershed of China: does point source pollution weaken it? [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **543**: 591-600.
- [37] Chen F, Hou L J, Liu M, *et al.* Net anthropogenic nitrogen inputs (NANI) into the Yangtze River basin and the relationship with riverine nitrogen export [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, **121**(2): 451-465.
- [38] 冯兴华, 钟业喜, 李建新, 等. 长江中游城市群县域城镇化水平空间格局演变及驱动因子分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, **24**(6): 899-908.
Feng X H, Zhong Y X, Li J X, *et al.* Spatial distribution of the comprehensive level of county urbanization and its driving factors in urban agglomeration in the middle reaches of Yangtze River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(6): 899-908.
- [39] 陈昆仑, 郭宇琪, 刘小琼, 等. 长江经济带工业废水排放的时空格局演化及驱动因素[J]. *地理科学*, 2017, **37**(11): 1668-1677.
Chen K L, Guo Y Q, Liu X Q, *et al.* Spatial-temporal pattern and driving factors of industrial wastewater discharge in the Yangtze River economic zone[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, **37**(11): 1668-1677.

CONTENTS

Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios	LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, <i>et al.</i> (5563)
Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China; Emission, Management, Purification, and Policy	WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, <i>et al.</i> (5574)
Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City	GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, <i>et al.</i> (5585)
Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak	CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, <i>et al.</i> (5594)
Estimation of PM _{2.5} Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest	WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (5602)
Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM _{2.5} in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan	LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, <i>et al.</i> (5616)
Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang	SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, <i>et al.</i> (5624)
Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing	CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (5633)
Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer	WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (5644)
Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang	DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, <i>et al.</i> (5656)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones	GE Xiang, WU Jian, GAO Song, <i>et al.</i> (5663)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter	ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, <i>et al.</i> (5673)
Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone	REN He, LU Xuan, LIU Yang, <i>et al.</i> (5687)
VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China	GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, <i>et al.</i> (5698)
WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies	WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, <i>et al.</i> (5713)
Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province	ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, <i>et al.</i> (5723)
Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020	QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (5736)
Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement	HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, <i>et al.</i> (5747)
Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity	ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757)
Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin	DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768)
Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015	YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777)
Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River	HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5786)
Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values	XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, <i>et al.</i> (5796)
Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir	ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5804)
Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake	LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (5814)
Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River	WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, <i>et al.</i> (5826)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan	ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, <i>et al.</i> (5836)
Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquaculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China	XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, <i>et al.</i> (5848)
Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland	LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, <i>et al.</i> (5857)
Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands	ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865)
Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, <i>et al.</i> (5876)
Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers	WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, <i>et al.</i> (5884)
Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sizozem	NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, <i>et al.</i> (5896)
Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants	ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (5905)
Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis	CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, <i>et al.</i> (5912)
Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge	GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, <i>et al.</i> (5921)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites	LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (5930)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China	WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, <i>et al.</i> (5938)
Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main <i>Torreya grandis</i> Plantation Region in Zhejiang Province	WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, <i>et al.</i> (5949)
Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China	GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, <i>et al.</i> (5958)
Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area	QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, <i>et al.</i> (5967)
Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, <i>et al.</i> (5977)
Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren	ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (5988)
Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar	HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5997)
Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by <i>Tagetes patula</i> L.	WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, <i>et al.</i> (6006)
Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China	WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, <i>et al.</i> (6014)
Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH ₄ and N ₂ O Emission in Single Cropping Paddy Field	WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, <i>et al.</i> (6025)
Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N ₂ O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid	WANG Kai, SHI Lei, MA Long, <i>et al.</i> (6038)
Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil	KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, <i>et al.</i> (6047)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland	YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, <i>et al.</i> (6058)
Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils	XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i> (6067)
Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, <i>et al.</i> (6078)