

目 次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势	杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)
交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测	郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)
基于扩展 STIRPAT 模型 LMDI 分解的碳排放脱钩因素	张江艳 (1888)
基于 LEAP 模型的工业园区碳达峰路径: 以南京某国家级开发区为例	李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)
高校碳排放核算与分析: 以北京 A 高校为例	曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)
北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素	俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)
碳排放权交易价格与全要素生产率: 来自中国的证据	吴雪萍 (1926)
中国城市 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 时空分布特征和影响因素分析	李江苏, 段良荣, 张天娇 (1938)
2017~2021 年苏皖鲁豫交界区域 PM _{2.5} 和 O ₃ 时空变化特征及影响因素	陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)
疫情管控期西安 PM _{2.5} 和 O ₃ 污染特征及成因分析	原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)
苏南五市秋冬季 PM _{2.5} 化学组成特征和空间差异	冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)
湖北咸宁细颗粒物 PM _{2.5} 来源	罗怡, 朱宽广, 陈璞琰, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)
邢台氨减排对京津冀 PM _{2.5} 改善的溢出效益	边泽君, 闻超玉, 郎建奎, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)
聊城市冬季 PM _{2.5} 载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析	张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)
高原城市拉萨典型 VOCs 排放源成分谱特征	郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)
北京市工业园区 VOCs 污染特征及健康风险评估案例: 高新技术产业的环境影响	王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海林, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)
高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析	雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)
水环境中抗病毒药物的存在、行为与风险	葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)
黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险	王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤峰 (2054)
藏东多曲河流域锑富集水化学特征及控制因素	李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)
西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源	张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)
基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程	孟令华 (2096)
丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素	张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)
金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素	王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴玺, 安永会 (2118)
德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价	刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王橹橹 (2129)
典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征	许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)
抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析	王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)
过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能	曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲予, 李大鹏, 黄勇 (2160)
矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应	刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张勇 (2171)
生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展	孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)
微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制	练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠华, 陈波 (2195)
紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制	马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)
土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应	郭善嵩, 胡恩, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)
鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度	喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)
典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系	刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琮, 周瑞娟, 李霖 (2233)
污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响	郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)
宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能	胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)
大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制	郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)
基于连续小波变换、SHAP 和 XGBoost 的土壤有机质含量高光谱反演	叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)
秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响	叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林权 (2292)
长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响	王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)
土壤盐分变化对 N ₂ O 排放影响: 基于 Meta 分析	黄艺华, 余冬立, 史祺琦, 胡磊, 潘永春 (2313)
基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测	郑慧玲, 郑辉峰 (2321)
基于 InVEST 模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟	张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)
防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系	徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)
长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力	赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)
冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和 AMF 多样性的影响	鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)
辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应	周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)
高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征	张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)
生物炭与不同类型氮肥配施对菜地土壤反硝化细菌群落的影响	柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)
太岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征	马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)
基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法	张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 邹允兵 (2417)
基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析	李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)
西南不同类型紫色土 pH 变化、重金属累积与潜在生态风险评估	张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)
重庆某铁矿区周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析	廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)
金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)
赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果	刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)
施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响	张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

抚仙湖子流域尺度氮排放清单构建及关键源解析

王延杰¹, 梁启斌¹, 王艳霞¹, 侯磊¹, 陈奇伯¹, 王伟², 李晓琳^{*}, 高俊淑¹

(1. 西南林业大学生态与环境学院, 昆明 650224; 2. 云南蓝态环境工程有限公司, 昆明 650051)

摘要: 对高原湖泊流域总氮(TN)污染的精准调控是预防湖泊水体富营养化的重要环节. 但过去基于全流域尺度具体时点建立的流域TN排放清单, 因忽略TN污染的时空异质性, 导致关键因子识别不清, 控源减排措施针对性不强等问题. 以典型高原深水湖泊抚仙湖为例, 通过资料收集和现场调查, 根据上中下游子流域特征, 建立子流域尺度TN污染负荷模型; 结合GIS空间分析功能, 构建抚仙湖流域1990~2020年25个子流域的TN排放清单, 分析TN污染负荷时空分布特征及关键污染源. 结果表明: ①1990、1995、2000、2005、2010、2015和2020年的抚仙湖流域TN污染负荷分别为933.43、1 012.90、1 090.25、1 096.93、1 075.69、996.27和514.80 t, 点源污染负荷逐年递增, 但面源污染负荷仍是其主要来源. TN面源污染负荷主要来自化肥施用, 点源污染负荷主要来自于农村生活; ②TN污染负荷在空间上呈放射状递减的特点, 流域整体单位面积负荷为65~6 877 kg·km⁻², 下游子流域单位面积TN污染负荷(1 009~6 877 kg·km⁻²)远远高于上中游子流域(65~1 167 kg·km⁻²); ③污染源在子流域上存在较强的空间异质性, 其中化肥施用、农业面源和农村生活污染主要来自于北岸河外直沟、抚澄河和山涧河子流域; 畜禽散养污染主要来自于东岸大提坎箐河、大箐河和石股箐河子流域. 研究结果可为抚仙湖流域TN控源减排措施的实施、子流域差异化管理措施的制定和湖泊水质恶化预警提供一定的科学依据及技术支持.

关键词: 总氮(TN); 排放清单; 子流域; 关键源; 高原深水湖泊

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-2150-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202305038

Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed

WANG Yan-jie¹, LIANG Qi-bin¹, WANG Yan-xia¹, HOU Lei¹, CHEN Qi-bo¹, WANG Wei², LI Xiao-lin^{*}, GAO Jun-shu¹

(1. College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Yunnan Blue Environment Engineering Co., Kunming 650051, China)

Abstract: It is essential to control lake eutrophication to reduce total nitrogen (TN) emission from lake watersheds. However, owing to the lack of a TN emission list at the sub-basin scale and over a long period, the key factor of water degradation cannot be identified, and effective measures cannot be taken. Thus, in our study, taking Fuxian Lake, a typical deep lake, as an example and based on the characteristics of the sub-basins, a TN emission list at the sub-basin scale was constructed through the GIS platform to quantify the temporal-spatial distribution of TN pollution loading, and the main source of TN from 25 sub-basins during the period 1990-2020 was identified. The results showed: ① the TN pollution loading in 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, and 2020 was 933.43, 1 012.90, 1 090.25, 1 096.93, 1 075.69, 996.27, and 514.80 t, respectively. Non-point source pollution was the dominant source, which mainly came from synthetic fertilizer. Point pollution increased over time, and rural residential pollution was an important source. ② The overall TN pollution that manifested in this basin decreased radially, with the highest load per unit area mainly found between 65 and 6 877 kg·km⁻². Additionally, the downstream sub-basin (1 009-6 877 kg·km⁻²) had a much higher TN pollution load per unit area than the upstream (65-1 167 kg·km⁻²) sub-basin. ③ The pollution sources showed clear spatial heterogeneity among sub-basins. Fertilizer application and rural residential pollution mainly came from the Zhigou River, Fucheng River, and Shanjie River sub-basins located in the northern watershed. On the other hand, TN pollution in the Datikanjing River, Dajing River, and Shigujing River sub-basins in the eastern watershed came from animal manure applied to crop land. This study can provide scientific evidence and technical support for the implementation of TN source control and emission reduction measures, formulate differentiated sub-basin management measures, and improve water quality at the Fuxian Lake watershed.

Key words: total nitrogen (TN); emission inventory; sub-watershed; key source; plateau deep water lake

氮是维持湖泊水生生态系统结构和功能的关键营养元素, 而随着湖泊流域人类活动的加剧, 产生过量的氮输入湖泊, 导致湖泊水质恶化、水生生态系统退化及水体富营养化等诸多问题^[1-5]. 抚仙湖作为重要战略水资源储备库以及全国第二深水湖, 由于换水周期长及生态结构相对复杂的特点, 具有较高的污染负荷能力, 能长期保持较好的水质. 但是近年来随着流域城镇化进程加快, 农业生产活动的不断加剧, 总氮(total nitrogen, TN)排放量日益增加, 抚仙湖水质出现一定程度的下降, 年均水质已从1990年的Ⅰ类水质降至2022年的Ⅱ类水^[6]. 不同于

浅水湖泊对污染物的高度敏感性, 抚仙湖作为典型深水湖泊, 对污染响应较慢, 一旦进入富营养化状态, 恢复生境稳态的周期和成本将会大大增加^[7]. 因此, 意识到水质较好湖泊优先保护的重要性, 以“良好湖泊, 优先保护”为思路^[8], 精准定量抚仙湖流域TN污染时空变化规律及关键来源, 对实现高

收稿日期: 2023-05-05; 修订日期: 2023-07-17

基金项目: 云南省科技厅农业联合专项(202101BD070001-111); 云南省应用基础研究计划项目(202201AT070051); 西南林业大学科研启动基金项目(112115)

作者简介: 王延杰(1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高原湖泊养分资源综合调控, E-mail: wyj19980803@126.com

* 通信作者, E-mail: swfclxl@163.com

原深水湖泊生态环境保护与预防水环境恶化有着重要的现实意义。

TN 排放清单可以有效识别区域 TN 排放的时空分布特征, 是流域控源减排的重要基础。目前我国诸多湖泊均建立了 TN 污染排放清单, 包括太湖^[9]、白洋淀^[10]、洱海^[11]、程海^[12]和滇池^[13], 研究尺度多集中于整个湖泊流域, 能够有效定量污染负荷总量及结构组成。但是全流域尺度均质化的结果, 忽略了 TN 排放在各子流域的空间异质性, 导致控源减排措施针对性不强。尽管也有基于子流域尺度的污染负荷模型研究, 例如 SWAT、HSPF 和 AGNPS 模型等^[14-19], 但这些模型参数复杂, 获取难度高, 限制了其在抚仙湖等高原湖泊流域的应用。此外, 研究发现随着流域内农村和城镇人口的上升以及污水管网的大量铺设, 导致农村和城镇生活点源污染存量开始上升, 进入湖体的污染总量也随之增加^[20,21]。抚仙湖近几年人口增加迅速, 流域内人类活动程度增加, 对流域内污染源的干扰性增强, 但现有研究多对抚仙湖流域农业面源污染进行源解析^[22-24], 忽略了流域城镇化过程中增加的农村和城镇生活污染, 导致对关键源解析度不足。因此建立子流域尺度排放清单, 分析污染负荷时空分布特征及结构组成, 识别高污染风险区域, 对于高原深水湖泊流域 TN 污染控制具有重要意义。

综上所述, 本研究通过资料收集和现场调查, 根据上中下游子流域特征, 建立子流域尺度 TN 污

染负荷模型; 结合 GIS 空间分析功能, 构建了长时间序列(1990~2020 年)和子流域尺度(25 个子流域)的 TN 排放清单, 分析 TN 污染负荷时空分布特征及关键污染来源, 并采用纳什效率系数验证了结果的合理性。本研究结果不仅可为抚仙湖流域水环境保护提供科学依据和实践参考, 更可应用于解决高原深水湖泊流域水环境治理所面临的共性问题。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

抚仙湖(24°21'~24°38'N, 102°49'~102°57'E)位于云南省玉溪市境内, 居滇中盆地中心, 跨江川、华宁和澄江三县, 流域总面积 674.69 km²。基于分辨率为 30 m 的云南省 DEM 数据, 利用 ArcGIS 10.8 的流域分析工具, 将抚仙湖流域划分 25 个子流域(包括上、中和下游这 3 种类型)。利用地理空间数据云平台获取 1990、1995、2000、2005、2010、2015 和 2020 年 7 景 Landsat 卫星影像, 基于 ENVI 5.3 软件通过最大似然法和目视解译手段, 按照《土地利用现状分类标准》^[25]将土地利用类型划分为林地、草地、耕地、建设用地、未利用地和水域这 6 大类。抚仙湖流域土地利用整体以林地和耕地为主, 两者占比(除湖泊)分别为 42.72% 和 15.47%, 种植业是当地主要产业。此外, 5、6、8 和 22 子流域是流域内城镇化水平较高的区域, 建设用地面积较大(图 1)。

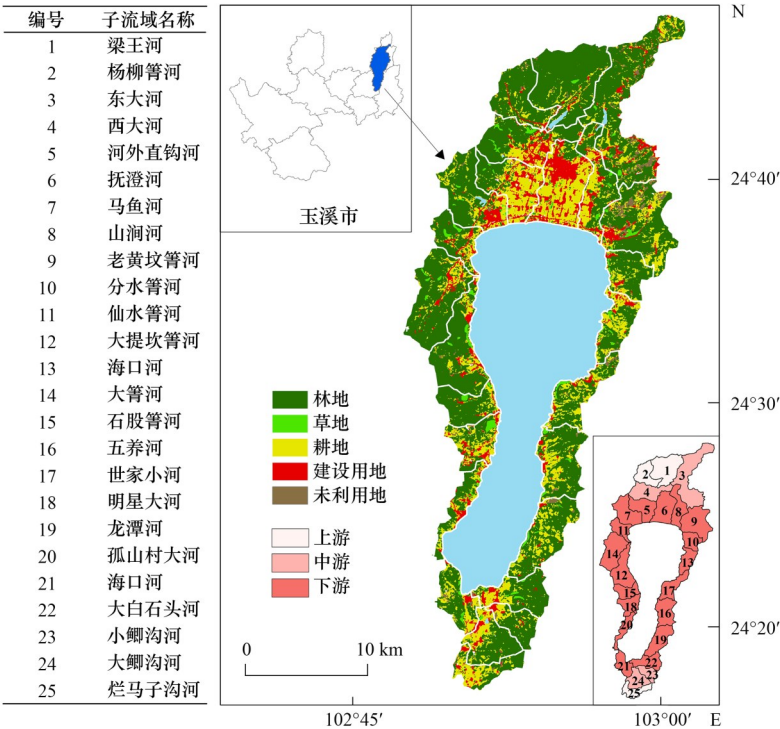


图 1 流域位置及土地利用示意
Fig. 1 Location and land use of basin

1.2 子流域尺度 TN 污染负荷模型建立

根据 TN 污染排放方式不同, 可将其分为面源污染和点源污染这两种类型. 面源污染包括化肥施用、农村畜禽散养、农村面源(由农村人口废弃物还田导致)、土地利用和大气沉降. 点源污染包括农村生活污水排放、畜禽规模化养殖、城镇生活污水排放和旅游污染.

输出系数模型是基于多元线性回归分析的数学模型, 常用于模拟流域面源污染情况. 其原理是根据污染来源和排放方式差异得到不同的源强系数, 结合土地类型面积和畜禽养殖数量等数据, 估算流域所产生的面源污染负荷, 用以解释土地利用类型、畜禽养殖类型与入湖污染负荷量间的关系^[26,27]. 改进的输出系数模型较传统的模型率定了降雨与土地利用所产生的污染负荷, 使得总体精度提高^[28].

根据抚仙湖流域特点及前人研究, 将传统输出系数模型加以改进, 其计算公式如下所示:

$$L_{ji} = \sum_{i=1}^n E \left[A_i (I_0 \cdot I_1 \cdot I_2) \right] + P \quad (1)$$

式中, L_{ji} 为流域某一污染源 TN 污染负荷, t ; j 为不同的子流域编号; i 为子流域中的土地利用类型或畜禽类型; E 为 TN 污染在不同土地类型($t \cdot km^{-2}$), 或不同畜禽类型($t \cdot 只^{-1}$), 或农村人口($t \cdot 人^{-1}$)的输出系数; A_i 为子流域中土地类型的面积(km^2), 或者畜禽养殖数量(头), 或农村人口数量(人); I_0 为不同污染源的入河系数; I_1 和 I_2 分别为上游流域和中游流域的入湖系数. 传统研究中的入湖系数仅关注污染物进入湖体的比值, 而本研究在此基础上还考虑了不同类型子流域位置对 TN 污染削减作用的差异, 因此 I_1 和 I_2 取值参考相关研究中关于 TN 负荷在河网运移过程中的削减规律^[29]: 上游流域污染物入湖的最终比例为: $I_0 \times I_1 \times I_2$; 中游流域污染物入湖的最终比例为: $I_0 \times I_2$; 下游流域污染物入湖的最终比例为: I_0 ; P 为来自降水输入的 TN 污染(t), 降雨的污染负荷与研究区单位面积的沉降率有关^[30], 计算公式如下:

$$P = c \cdot A \cdot R \quad (2)$$

式中, c 为氮的降雨沉降率($t \cdot km^{-2}$), 该值参考文献^[31]; A 为流域面积, km^2 ; R 为径流系数, 该值由降雨和多年平均径流量的比值来确定, 其中多年平

均径流量来自文献^[32].

此外, 本研究利用排污系数法估算 TN 点源污染负荷, 其中生活污水排污系数来源于第二次全国污染源普查生活污染源产排污系数手册, 畜禽规模化养殖排污系数来源于文献^[33], 具体计算流程参考文献^[34].

1.3 数据来源与参数设置

1.3.1 数据来源

本研究数据主要包括统计数据 and 自然地理数据两大类. 其中统计数据主要来源于 1990~2020 年玉溪市统计年鉴和地方年鉴、2015~2020 年玉溪市国民经济与社会发展统计公报^[35]、中国经济社会大数据研究平台^[36]与抚仙湖流域水污染防治规划^[37,38]和实地调研, 涉及的数据包括氮肥施用量、农村人口数量、猪、牛、羊、大牲畜及家禽等畜禽养殖数量、粮食和经济作物播种面积、产量等. 由于统计数据多以行政单位为单元, 本研究通过面积加权方法, 实现统计数据空间化以子流域为基本单元. 自然地理数据主要来源于地理空间数据云服务平台、自然资源部国土卫星遥感应用平台和国家气象科学数据中心等. 涉及的数据包括: 数字高程模型数据(DEM)、遥感数据、气象和水文数据等.

1.3.2 模型参数设置

输出系数是衡量单位土地利用类型面积、单位畜禽养殖数量和单位人口数量在一定时间内所产生的 TN 污染量^[39]. 入河系数表征污染源产生的污染物向流域出口输入与迁移过程中, 由于植被拦截、地下渗漏等原因造成损失后^[40], 最终进入流域出口的比例. 入湖系数表示上一个子流域出口的污染物向下一个流域出口输入与迁移过程中, 由于植被拦截、地下渗漏等原因造成损失后, 最终进入下一个子流域出口的比例. 由于研究区监测数据不足, 本文输出系数采用文献查阅方法确定, 入河系数和入湖系数依据文献获取并根据流域特征修正. 入湖系数参考文献^[29], $I_1 = 0.26$, $I_2 = 0.26$; 此外输出系数和入河系数具体取值见表 1.

1.3.3 模型验证

本研究利用纳什效率系数 (nash-sutcliffe efficiency, NSE) 对 TN 污染负荷模型结果精度加以验证, 具体公式如下:

表 1 模型参数设置

Table 1 Value of each parameter

污染来源	农村面源	农村生活	农村畜禽散养	规模化养殖	化肥	城镇生活	旅游	土地利用
输出系数	9.80 kg·(人·a) ⁻¹ [41]		0.28~61.10 kg·(只·a) ⁻¹ [33]		11.71~6.41 t·km ⁻² [42]	4.31 kg·人 ⁻¹ [43]	0.09 g·人 ⁻¹ [43]	0.31~1.35 t·km ⁻² [43]
入河系数	0.30~0.15 ^[44]	0.32~0.16 ^[45]	0.30~0.15 ^[44]	0.12~0.08 ^[46]	0.25~0.10 ^[47]	0.40~0.10 ^[45]	1.00 ^[43]	0.55 ^[43]

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q'_o - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q'_o - \overline{Q_o})^2} \quad (3)$$

式中, Q'_o 为 TN 污染负荷的观测值, 本研究观测值均为模拟值, 数据来自文献[37,38,48], Q_m^t 为模型估算的模拟值, 表示第 t 时刻的 TN 污染负荷值, $\overline{Q_o}$ 表示观测平均值. 当 $0 < NSE < 0.4$, 表示模拟结果接近观测值的平均值水平, 即总体结果可信, 但过程模拟误差大; 当 $0.4 \leq NSE < 1$ 说明模拟的结果较好, 且越接近 1 表示模型质量越好, 模型可信度越高[49,50]; $NSE < 0$, 则模型是不可信的. 本研究中 NSE 值为 0.80, 说明所构建的 TN 污染负荷模型模拟效果好, 结果可信.

2 结果与分析

2.1 长时间序列 TN 排放特征分析

抚仙湖流域在 1990、1995、2000、2005、2010、2015 和 2020 年的 TN 污染负荷分别为 933.43、1 012.90、1 090.25、1 096.93、1 075.69、998.95 和 514.80 t, 呈现先增加后减少的趋势(图 2). 其中 TN 面源污染负荷 1990~2005 年呈现递增趋势, 2010 年后明显下降, 2015~2020 年降幅最大, 达到 55.53%. 化肥、畜禽散养和农村面源产生的 TN 污染下降幅度较大, 分别从 2005 年的 231.81、267.59 和 240.82 t, 下降至 2020 年的 55.64、39.06 和 40.07 t [图 2(a)]. 点源污染负荷在 2005~2010 年呈现明显上升, 5 年间 TN 污染负荷增加 115.46 t. 农村生活污染和畜禽规模化养殖一直是抚仙湖点源污染负荷的主要来源, 二者对点源污染负荷的贡献常年达 85% 以上, 其中农村生活污染在 2010~2020 年间下降幅度最大, 从 2010 年的 132.44 t 下降至 2020 年的 67.18 t, 降幅为 49.28%, 点源污染负荷中城镇生活和旅游污染的占比逐年增大, 从 1990 的 11.53% 上升至 2020 的 30.35% [图 2(b)].

2.2 子流域尺度 TN 排放特征分析

根据 GIS 的自然间断法原则, 对 TN 污染负荷进

行分级表达(图 3). 1990~2020 年抚仙湖流域单位面积 TN 污染负荷的空间异质性显著, 呈放射状分布, 高值区主要集中于下游子流域. 北岸污染负荷量占流域总污染的 40% 以上, 其中 5、6、7、8 和 9 号子流域 TN 污染负荷较高, 至 2005 年排放量均大于 $2\,500\text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}$, 这 5 个子流域的面源污染负荷分别为 63.20、129.64、55.24、58.27 和 72.76 t, 远远高于其点源污染负荷(6.39、23.95、4.49、9.12 和 5.49 t). 西岸的 18 和 20 号子流域单位面积 TN 污染负荷变化较大, 2005 排放量均大于 $3\,700\text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}$, 但到 2020 年均降至 $1\,800\text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}$ 以下, 其中 18 号子流域面源污染负荷从 2005 年的 35.88 t 降至 2020 年的 12.70 t; 东岸 13、16、17、21 和 22 号子流域的 TN 污染变化不大, 1990~2020 年期间常年保持在 $2\,500\text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}$ 左右, 但到 2020 年有明显下降, 各子流域单位面积 TN 污染负荷均小于 $1\,500\text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}$.

2.3 TN 污染负荷来源结构分析

北岸 6 号子流域是面源污染负荷和点源污染负荷均严重的区域, 面源污染负荷程度最高时(2000 年)达 $5\,744.55\text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}$, 点源污染负荷程度最高时(2010 年)达 $1\,120.89\text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}$ (图 4 和图 5). 9、12、14 和 17 号子流域在 2005 年时单位面积负荷达到最大值, 均在 $1\,800\text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}$ 以上; 8、18 和 20 号子流域在 2010 年时单位面积负荷达到最大值, 均在 $1\,700\text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}$ 以上. 至 2020 年, 面源和点源污染负荷均明显减少, 单位面积 TN 面源污染负荷在 $1\,400\text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}$ 以下, 点源在 $600\text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}$ 以下.

抚仙湖流域面源污染的主要贡献来自化肥施用、畜禽散养和农村面源(图 4). 化肥污染是 5、6 和 17 号子流域面源污染负荷的主要来源, 其中 2005 年化肥贡献程度最高, 达到 31.69%, 但 2015~2020 年化肥贡献明显下降, 最终 2020 年该来源仅占 16%. 5、6 和 8 号子流域 TN 污染负荷以农村面源为主, 1990 年 3 个子流域该来源占比最大, 分别为 39.03%、49.94% 和 45.92%, 而至 2020 年该占比减少为 18.27%、29.67% 和 17.11%. 农村畜禽散养是西岸 12、14 和 15 号子流域面源污染负荷的主要来源,

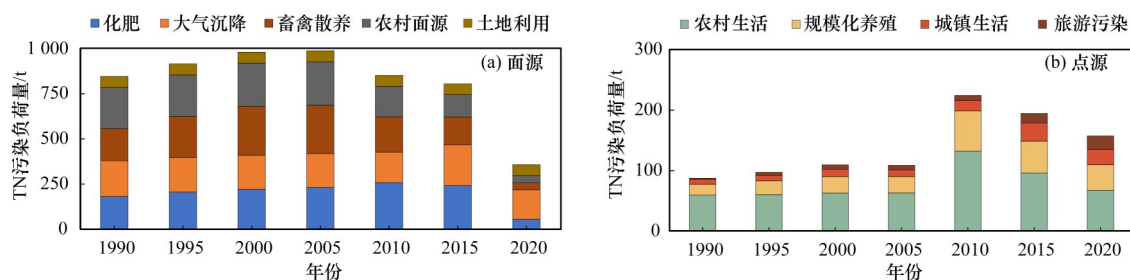


图 2 1990~2020 年 TN 污染负荷总量及来源结构

Fig. 2 TN pollution load and source structure from 1990 to 2020

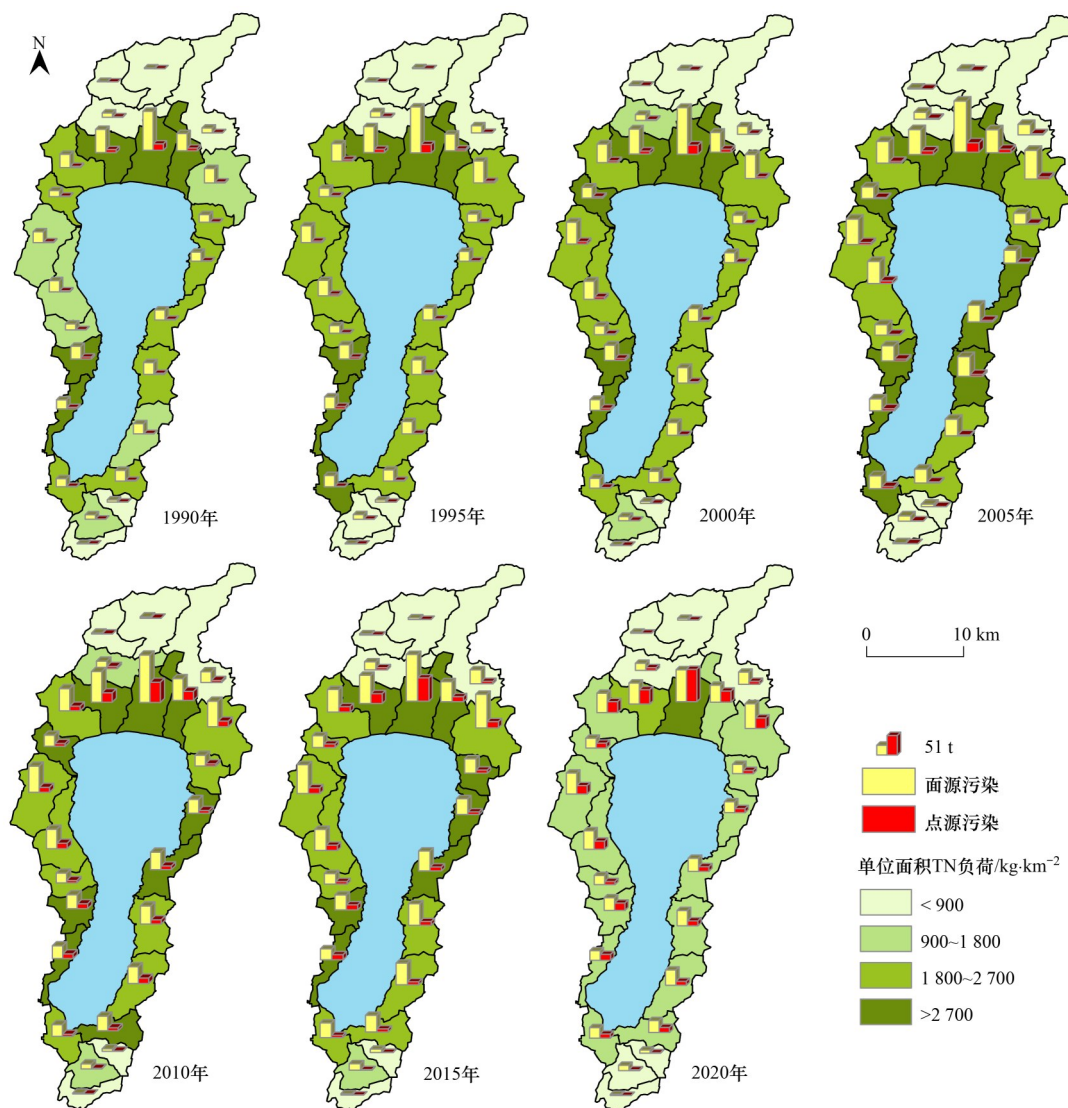


图3 1990~2020年抚仙湖25个子流域TN污染负荷分布

Fig. 3 TN pollution distribution in 25 sub-basins of Fuxian Lake from 1990 to 2020

尤其是1990~2005年间贡献率最高,各年占比均高于30%。但随着畜禽养殖模式从农户散养向规模化的集中养殖转变,2010年开始畜禽散养的贡献显著降低,至2020年各子流域内该项占比低于15%;此外,由自然因素引起的大气沉降和土地利用污染呈先减后增的趋势,两者对于总污染的贡献从1990年的23.32%下降至2010年的19.80%,其后至2020年增长至45.23%。

抚仙湖流域点源污染负荷的主要贡献来自农村生活和规模化养殖污染(图5)。农村生活污染主要来自于北岸的5、6号和西南岸18、20号子流域。1990年时4个子流域的农村生活来源占比最大,分别为77.38%、81.16%、74.72%和72.27%,而至2020年该占比均降至50%以下。畜禽规模化养殖是西岸12、14和15号子流域点源污染负荷的主要来源,贡献率同样呈现先增后减的趋势,在2010年占比达到最大

值,分别为39.26%、51.30%和46.66%,但2015年开始该来源贡献显著降低,至2020年各项占比均小于30.00%;城镇污染和旅游污染对于点源污染负荷的贡献一直处于上升趋势,其中18和20号子流域的城镇污染和旅游污染的占比上升最大最快,从1990年的12.62%和12.30%上升至2020年的32.35%和32.71%。

3 讨论

3.1 抚仙湖流域TN污染负荷时间变化特征

1990~2020抚仙湖流域TN污染负荷呈现先增后减的“凸型”变化,可分为3个阶段:第一阶段(1990~2000年)表现为TN污染负荷明显上升,负荷增加主要驱动力来自流域内种植业的快速发展。该时间段内,种植业面积从1990年的77.78 km²增加至2000年的118.66 km²,种植的作物类型也从需肥量

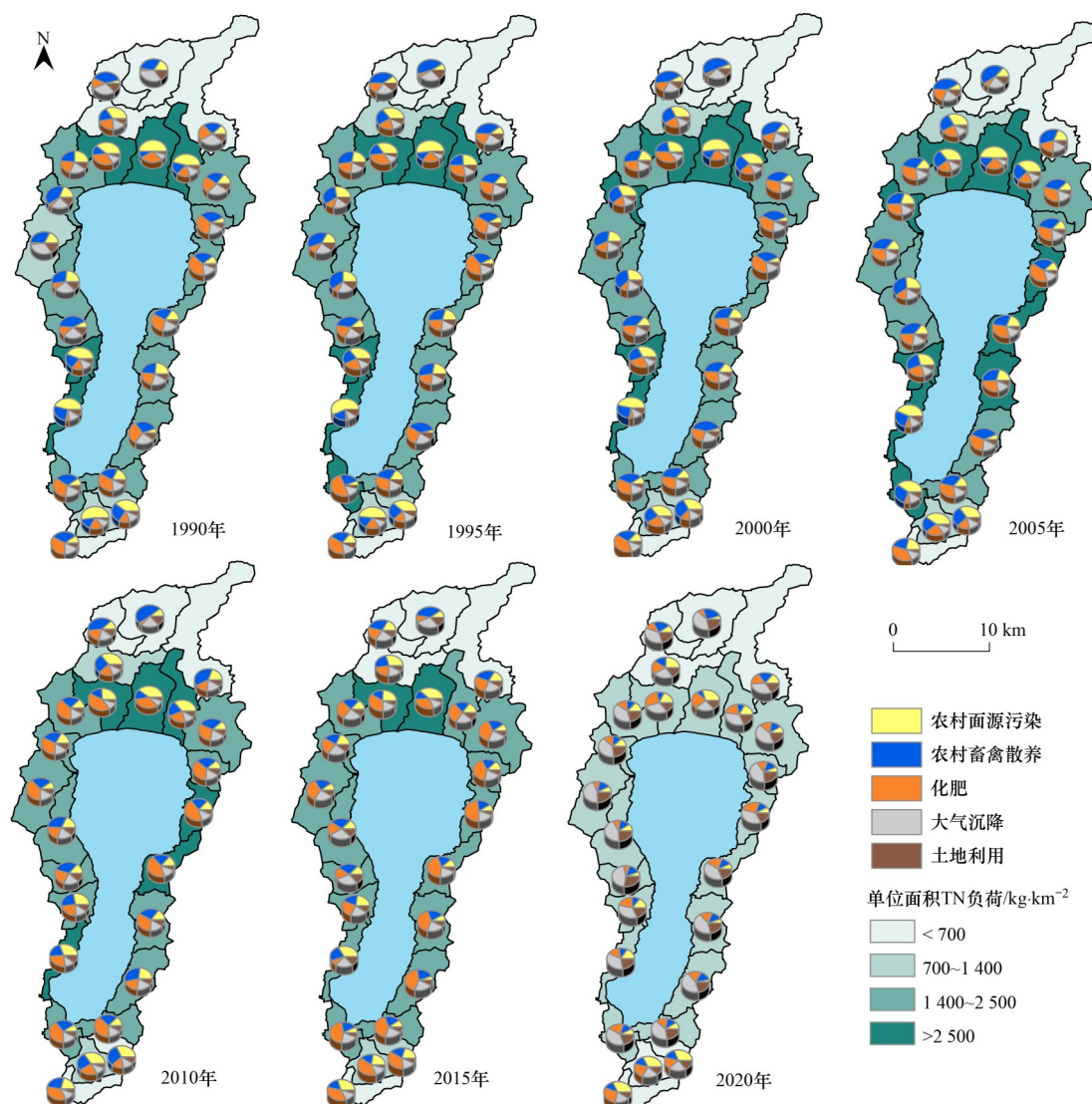


图 4 1990~2020 年抚仙湖 25 个子流域 TN 面源污染负荷分布及其组成结构

Fig. 4 Distribution and structure of TN non-point pollution in 25 sub-basins of Fuxian Lake from 1990 to 2020

较低的白菜和芹菜等作物调整为需肥量高的蒜苗及豆科作物. 种植业快速发展使得氮肥平均使用强度明显增加, 从 1990 年的 $1\,229.52\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增至 2010 年的 $1\,472.47\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 仅次于洱海 ($1\,800\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 和滇池 ($1\,548\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 等流域, 但却远高于阳宗海 ($875\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 和程海 ($600\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 等区域^[34, 51-53]. 除了化肥施用量增加, 在这一时间段内畜禽散养过程中产生的粪污多作为有机肥还田, 使农田土壤中的氮含量上升, 在降水和地表径流的作用下, 氮流失系数增加, 导致流域内农田面源 TN 污染负荷进一步增加.

第二阶段(2000~2010 年)TN 污染负荷值达到历史峰值并趋于平稳. 这一阶段 TN 负荷量保持在 $1\,100\text{ t}$ 左右, 高负荷条件下抚仙湖水质开始出现下降, 2002 年抚仙湖水质从 I 类水降为 II 类水, 甚至出现 3 km^2 范围的蓝藻暴发^[54]. 2000~2005 年间抚仙湖流域降水量较多, 年均降水量超 800 mm , 导致该时

期内地表径流量明显增加, 加之这一时间段内农业 TN 污染排放量的明显提高, 导致 2005 年 TN 面源污染负荷达到最大值 $1\,096.93\text{ t}$. 化肥和有机肥的大量施用导致该时期的 TN 面源污染负荷依然居高不下, 并于 2005 年达到峰值 499.40 t . 此外农村人口的增加, 同时农村污水处理设施建设不足, 污水收集率及处理效率低下, 导致流域内 TN 点源污染负荷于 2010 年达到峰值 (224.28 t).

第三阶段(2010~2020 年)TN 污染负荷呈现明显的下降趋势, 尤其是 2015~2020 年期间, TN 污染负荷从 $1\,075.69\text{ t}$ 降至 514.80 t , 降幅高达 52.14% . 这与该时间段内实施的一系列污染治理措施密切相关. 从 2011 年抚仙湖被列入中国第一批生态环境保护试点湖泊^[38]开始, 当地政府开始对其流域内的产业结构进行了一系列的规划调整, 例如通过禁止养殖和养殖场搬迁等政策, 减少流域内畜禽养殖数量; 进一步优化农业种植结构, 大力推广蓝莓等经

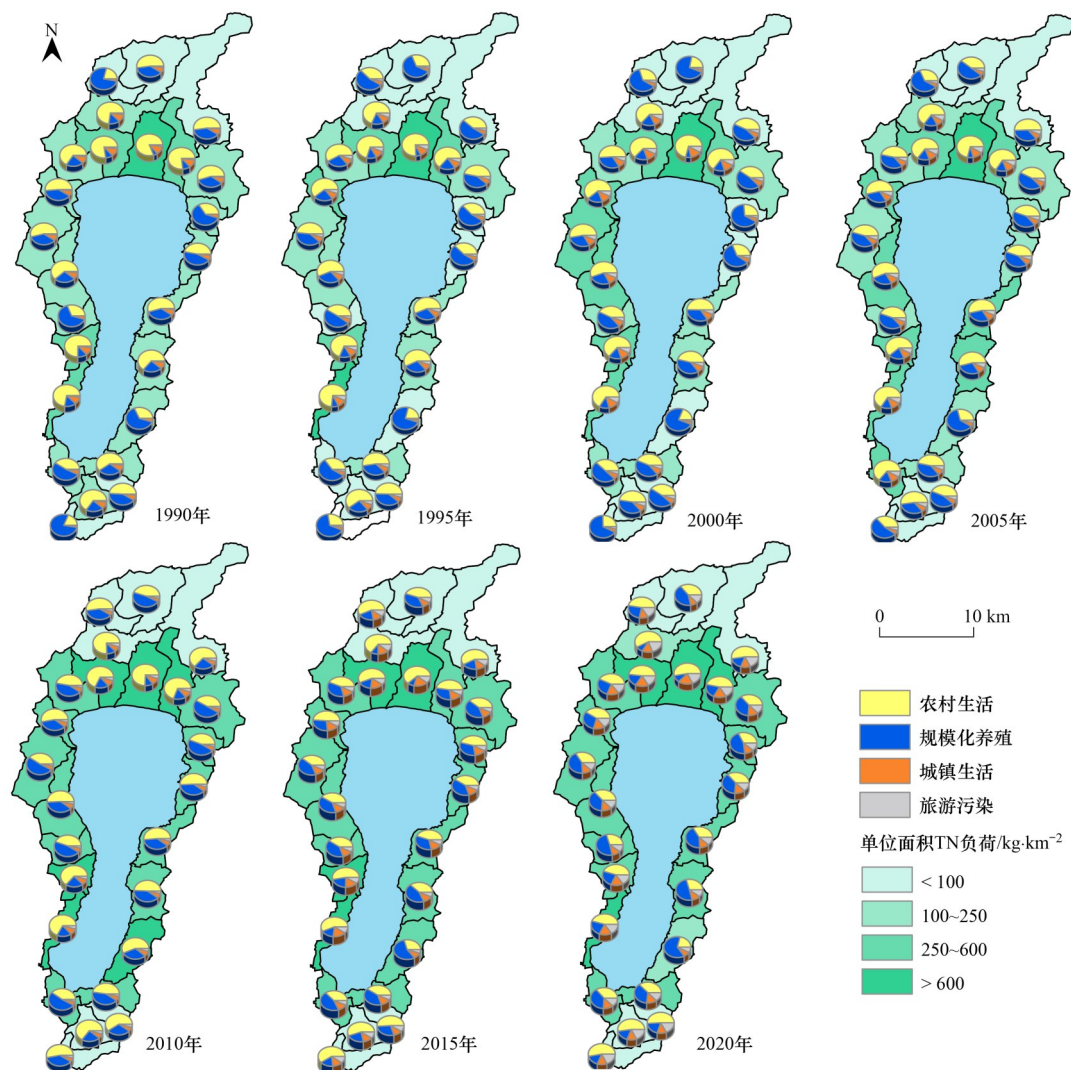


图5 1990~2020年抚仙湖25个子流域TN点源污染负荷分布及其组成结构

Fig. 5 Distribution and structure of TN point pollution in 25 sub-catchments of Fuxian Lake from 1990 to 2020

济果树种植,有效减少单位面积氮肥施用量.此外,随着农村环境整治项目的开展,污水管网覆盖率及污水处理效率的提高,2015~2020年间农村生活污水产生的TN污染负荷出现明显下降,5年内降低65.26 t.尽管政策和措施的实施,使得该阶段大多数来源的TN污染负荷明显下降,但是城镇污染和旅游污染却未减少.

3.2 抚仙湖流域TN污染负荷空间变化特征

抚仙湖TN污染负荷在空间上呈放射状递减的特点,流域整体单位面积负荷范围为65~6 813 $\text{kg}\cdot\text{km}^{-2}$,下游子流域单位面积负荷(1 009~6 813 $\text{kg}\cdot\text{km}^{-2}$)远远高于上中游子流域单位面积负荷(65~1 167 $\text{kg}\cdot\text{km}^{-2}$).尽管1、2和25号子流域TN产生量均高于 $30 \times 10^5 \text{ kg}$,但由于3个子流域均位于上游,产生的TN污染经过中、下游河网的输移过程,最终入湖的污染负荷量被大量削减.与之相反,5、6、21和22号子流域位于下游区域,农业生产和人们生活过程产生TN污染经过较短的河网运输进入河道,

消减量少入湖负荷量高.有研究发现^[29,55,56],污染物在迁移的过程中会受到生物和环境的吸收、吸附、固定、沉积、硝化和反硝化的影响而削减,并且削减的大小与污染物到湖泊的距离成正比,得到了上游子流域的“滞留效应”显著高于下游子流域,而下游污染负荷程度远高于上游流域的结论,该结论与本研究相互印证.

流域北岸是TN污染排放的重点区域,该区域TN面源和点源污染负荷均远远高于其他子流域,尤其是5、6、7和8号子流域TN污染负荷占整个流域总污染的40%以上.一方面北岸是流域人口最为稠密的区域,集中了42%以上的流域人口,人口密度为1 687.26人 $\cdot\text{km}^{-2}$,大量农村生活产生的废弃物还田,导致面源污染负荷较大;另一方面北岸拥有区域耕地面积达到31.58 km^2 ,远高于流域其他区域,化肥的施用量占到整个流域化肥使用量的30%,常年由化肥施用产生的污染达 $70 \times 10^5 \text{ kg}$ 以上,这也导致了面源污染负荷成为该区域TN污染的又一重

要来源. 东岸的 17 和 13 号子流域单位面积 TN 污染负荷变化较大, 这是由于 2005 年之后退耕还林政策的实施, 使得区域内林地面积增加 5.16 km^2 , 耕地减少 5.39 km^2 , 进而这些子流域内化肥施用量明显下降.

3.3 抚仙湖流域 TN 污染负荷来源结构解析

化肥施用、农村畜禽散养和农村面源是 TN 面源污染的主要来源. 在 5、6 和 17 号子流域, 化肥施用导致的 TN 面源污染负荷较高, 1990~2020 年间呈现出先增后减的趋势. 5、6 和 17 号子流域内耕地面积高达 26.64 km^2 , 占流域总耕地面积的 56.48%. 前期大水大肥的种植模式, 使得该区域化肥施用过程中未考虑作物养分需求状况, 而导致氮肥过量施用, 后期随着测土配方施肥项目实施及《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》^[57] 落实, 子流域 TN 污染逐渐降低; 农村人口废弃物还田引起的农村面源是 5、6 和 8 号子流域 TN 面源污染负荷的主要来源, 2010 年以前该区域农村人口持续增加, 从 4.35 万人增至 5.07 万人, 而农村废弃物收集及处理设施覆盖率低, 设施数量不足且建设滞后, 导致该时期增加的农村人口排泄物及农村生活污水无法充分处理, 只能就近还田或直接排放入沟渠. 2010 年以后随着这些子流域城镇化率的上升, 农村人口减少, 废弃物收集率提升, 农村面源污染负荷明显下降. 农村畜禽散养对 TN 面源污染负荷的贡献同样呈现先增后减的趋势, 主要集中在 9、12 和 14 号子流域, 原因是 1990~2005 年间家庭畜禽养殖规模提高, 每户养殖猪数量从 4.32 头增至 6.69 头, 家禽从 7 只增至 12 只. 因缺乏畜禽粪污收集和处理设施, 粪污只能就近还田, 导致 TN 供应远超农田消纳能力, 盈余的部分通过径流、降水冲刷等方式进入湖泊; 2005 年后传统散养模式逐渐过渡为规模化集中养殖, 同时划定抚仙湖流域周边禁养和限养区^[58], 此后畜禽散养数量开始减小.

农村生活和规模化养殖是抚仙湖流域 TN 点源污染的主要来源. 农村生活污染主要发生于北岸的 5、6 号和西南岸 18、20 号子流域. 5、6、18 和 20 号子流域是建设用地集中分布的区域, 建设用地面积达 16.62 km^2 , 占整个流域建设用地面积 35% 以上, 也是农村人口集中分布的区域, 农村人口数量占流域总人口的 36.77%. 西岸 12、14 和 15 号子流域是规模化畜禽养殖企业集中分布的区域, 截至 2015 年, 共有大型养殖场数量为 4 个, 以生猪和家禽养殖为主, 养殖数量分别为 1.57 万头和 13 万只. 过去由于规模养殖过程中未充分考虑畜禽粪污的资源化利用, 使富含 TN 的粪污未经处理直接排入地表沟渠,

导致规模化养殖成为重要的 TN 污染来源. 但随着《畜禽粪污资源化利用行动方案(2017—2020 年)》实施^[59]及企业环保意识的增强, 规模化养殖场配置有畜禽粪污收集和处理设施, 有效减少畜禽生产过程的污染. 此外, 随着城镇和旅游人口的增加, 城镇生活和旅游污染逐渐成为 6、18 和 20 号流域的主要 TN 污染来源. 该区域城镇化率从 1990 年的 8.00% 增至 2020 年 53.00%, 城镇人口增加 7.27 倍, 同样的旅游人口从 6.98 万人增至 80.50 万人, 人口增加的同时城镇管网设施的不足日益凸显. 目前流域内主要有污水处理厂 5 座, 分布在 6、14、20 和 22 号子流域, 未来将无法满足不同日益增长的人口需求.

综上所述, 本研究通过构建抚仙湖 25 个子流域 TN 排放清单, 结合 TN 污染时空分布特征及关键源识别, 提出子流域差异化管理措施: ①高污染风险区域: 5、6 号子流域 TN 污染负荷高且来源多样, 该区域未来需要重点监测, 同时采取综合性的措施, 例如减少化肥施用、优化作物种植结构、完善污水管网体系建设、提高污水处理效率等措施协调控制; ②畜禽养殖重点区域: 12、14 和 15 号子流域农村畜禽散养和规模化养殖污染较为严重, 同时未来可通过种养结合模式污水收集和处理设施, 提高处理效率, 有效减少畜禽生产过程的污染; ③城镇发展区域: 7 和 8 号流域处于建设用地快速扩展阶段, 城镇人口增加剧烈; 18 和 20 号子流域是旅游人口重点集中区域, 在这些区域内需增加城镇专业化运营污水处理厂数量, 完善污水管网覆盖, 提高污水中 TN 的去除效率.

4 结论

(1) 通过构建抚仙湖子流域尺度 TN 排放清单, 分析了 1990~2020 年间 TN 总量负荷上的时间变化特征. 1990~2020 年抚仙湖流域 TN 污染负荷呈先增后减的“凸型”变化, 虽然点源污染负荷占比呈增加趋势, 但面源污染负荷仍是流域的主要污染源, 常年占流域总污染的 70% 以上. 流域 TN 面源污染负荷贡献由大到小依次是: 化肥>大气沉降>畜禽散养>农村面源污染. 点源污染负荷贡献依次为: 农村生活>畜禽规模化>城镇污染>旅游污染.

(2) 基于 GIS 的空间等功能, 分析 1990~2020 年间 TN 污染负荷的空间分布特征. 抚仙湖 TN 污染负荷在空间上呈放射状递减的特点, 流域整体单位面积负荷范围为 $65\sim 6\,877 \text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}$, 下游子流域单位面积负荷 ($1\,009\sim 6\,877 \text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}$) 远远高于上中游子流域单位面积负荷 ($65\sim 1\,167 \text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}$), 其中抚澄河子流域的单位面积负荷最大, 常年在 $5\,000 \text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}$ 以上.

(3)通过对抚仙湖 25 个子流域 TN 污染负荷关键源解析,发现北岸的河外直沟、抚澄河和东岸的世家小河子流域是化肥污染产生的主要区域;西岸的大提坎箐河、大箐河和石股箐河子流域是畜禽散养污染产生的主要区域,北岸的河外直沟、抚澄河和山涧河子流域是农村面源污染产生的主要流域;北岸的河外直沟和抚澄河、西南岸的明星大河和孤山村大河子流域是农村生活污染产生的主要流域;因此北岸的河外直沟和抚澄河子流域是抚仙湖流域 TN 污染排放的关键区域。

参考文献:

- [1] Mahmud K, Panday D, Mergoum A, *et al.* Nitrogen losses and potential mitigation strategies for a sustainable agroecosystem [J]. Sustainability, 2021, **13**(4), doi: 10.3390/su13042400.
- [2] Bijay-Singh, Craswell E. Fertilizers and nitrate pollution of surface and ground water: an increasingly pervasive global problem [J]. SN Applied Sciences, 2021, **3**(4), doi: 10.1007/s42452-021-04521-8.
- [3] Liu Y, Jiang Q S, Sun Y X, *et al.* Decline in nitrogen concentrations of eutrophic lake Dianchi associated with policy interventions during 2002-2018 [J]. Environmental Pollution, 2021, **288**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117826.
- [4] Zou L L, Liu Y S, Wang Y S, *et al.* Assessment and analysis of agricultural non-point source pollution loads in China: 1978-2017 [J]. Journal of Environmental Management, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110400.
- [5] Subbarao G V, Searchinger T D. A "more ammonium solution" to mitigate nitrogen pollution and boost crop yields [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2021, **118**(22), doi: 10.1073/pnas.2107576118.
- [6] 玉溪市人民政府. 生态环境部翟青副部长调研抚仙湖保护治理工作指出存在的 5 方面主要问题并提出 5 条要求 [EB/OL]. <http://www.yuxi.gov.cn/yxszfxxgk/xxgkzndml7628/20230215/1423276.html>, 2023-02-15.
- [7] 王琳杰, 余辉, 牛勇, 等. 抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征 [J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1384-1392.
- [8] 郑丙辉, 曹晶, 王坤, 等. 水质较好湖泊环境保护的理论基础及中国实践 [J]. 湖泊科学, 2022, **34**(3): 699-710.
- [9] Zheng B H, Cao J, Wang K, *et al.* Theoretical basis and Chinese practice for environmental protection of lakes with better water quality [J]. Journal of Lake Sciences, 2022, **34**(3): 699-710.
- [10] Hou L, Zhou Z Y, Wang R Y, *et al.* Research on the non-point source pollution characteristics of important drinking water sources [J]. Water, 2022, **14**(2), doi: 10.3390/w14020211.
- [11] Tao Y, Liu J, Guan X Y, *et al.* Estimation of potential agricultural non-point source pollution for Baiyangdian Basin, China, under different environment protection policies [J]. PLoS One, 2020, **15**(9), doi: 10.1371/journal.pone.0239006.
- [12] Lin S S, Shen S L, Zhou A N, *et al.* Assessment and management of lake eutrophication: A case study in Lake Erhai, China [J]. Science of the Total Environment, 2021, **751**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141618.
- [13] Chen X K, Liu X B, Peng W Q, *et al.* Non-point source nitrogen and phosphorus assessment and management plan with an improved method in data-poor regions [J]. Water, 2017, **10**(1), doi: 10.3390/w10010017.
- [14] Cong W C, Sun X Y, Guo H W, *et al.* Comparison of the SWAT and InVEST models to determine hydrological ecosystem service spatial patterns, priorities and trade-offs in a complex basin [J]. Ecological Indicators, 2020, **112**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106089.
- [15] Bai X Y, Shen W, Wang P, *et al.* Response of non-point source pollution loads to land use change under different precipitation scenarios from a future perspective [J]. Water Resources Management, 2020, **34**(13): 3987-4002.
- [16] Volk M, Bosch D, Nangia V, *et al.* SWAT: Agricultural water and nonpoint source pollution management at a watershed scale [J]. Agricultural Water Management, 2016, **175**: 1-3.
- [17] 荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 等. 基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析 [J]. 环境科学, 2021, **42**(6): 2769-2777.
- [18] Rong Y, Qin C X, Du P F, *et al.* Characteristic analysis of SWAT model parameter values based on assessment of model research quality [J]. Environmental Science, 2021, **42**(6): 2769-2777.
- [19] 庞树江, 王晓燕, 马文静. 多时间尺度 HSPF 模型参数不确定性研究 [J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2030-2038.
- [20] Pang S J, Wang X Y, Ma W J. Research of parameter uncertainty for the HSPF model under different temporal Scales [J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2030-2038.
- [21] 谭少军, 刘洋, 朱小婕, 等. 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 [J]. 环境科学, 2022, **43**(6): 3128-3139.
- [22] Tan S J, Liu Y, Zhu X J, *et al.* Output characteristics and driving mechanism of agricultural non-point source (AGNPS) pollutant in plain and valley region of upper Yangtze River, China [J]. Environmental Science, 2022, **43**(6): 3128-3139.
- [23] 王超, 叶秋, 贾伯阳, 等. 典型山地城市河流营养元素空间分布特征及影响因素分析: 以重庆市清水溪为例 [J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1346-1355.
- [24] Wang C, Ye Q, Jia B Y, *et al.* Spatial distribution and Influential factors of nutrients in rivers of a typical mountainous city: a case study of the Qingshuixi River in Chongqing [J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1346-1355.
- [25] 丁肇慰, 郑华. 长江流域总氮排放量预测 [J]. 环境科学, 2021, **42**(12): 5768-5776.
- [26] Ding Z W, Zheng H. Prediction of total nitrogen load in Yangtze River Basin [J]. Environmental Science, 2021, **42**(12): 5768-5776.
- [27] Yuan X D, Jun Z. Water resource risk assessment based on non-point source pollution [J]. Water, 2021, **13**(14), doi: 10.3390/w13141907.
- [28] 杨恩秀. 抚仙湖流域非点源污染风险评价研究 [D]. 昆明: 云南大学, 2019.
- [29] Xu J, Lo S L, Gong R, *et al.* Control of agricultural non-point source pollution in Fuxian Lake with riparian wetlands [J]. Desalination and Water Treatment, 2016, **57**(59): 28570-28580.
- [30] GB/T 21010-2017, 土地利用现状分类 [S].
- [31] Zong M, Hu Y M, Liu M, *et al.* Quantifying the contribution of agricultural and urban non-point source pollutant loads in watershed with urban agglomeration [J]. Water, 2021, **13**(10), doi: 10.3390/w13101385.
- [32] Cho J H, Lee J H. Multiple linear regression models for predicting nonpoint-source pollutant discharge from a highland agricultural region [J]. Water, 2018, **10**(9), doi: 10.3390/w10091156.
- [33] Li S H, Peng S Y, Jin B X, *et al.* Multi-scale relationship between land use/land cover types and water quality in different pollution source areas in Fuxian Lake basin [J]. PeerJ, 2019, **7**, doi: 10.

- 7717/peerj.7283.
- [29] Strokal M, Kroeze C, Wang M R, *et al.* The MARINA model (model to assess river inputs of nutrients to seas): Model description and results for China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **562**: 869-888.
- [30] Cheng X, Chen L D, Sun R H, *et al.* An improved export coefficient model to estimate non-point source phosphorus pollution risks under complex precipitation and terrain conditions [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(21): 20946-20955.
- [31] 高蓉, 韩焕豪, 崔远来, 等. 降雨量对洱海流域稻季氮磷湿沉降通量及浓度的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, **34**(22): 191-198.
- Gao R, Han H H, Cui Y L, *et al.* Effect of precipitation on wet deposition flux and content of nitrogen and phosphorus in Erhai Lake basin in rice season[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, **34**(22): 191-198.
- [32] 金星, 靳澍清, 等. 抚仙湖、星云湖周边磷化工对湖面大气干、湿沉降总磷入湖量影响的调查研究[J]. *环境科学导刊*, 2010, **29**(6): 39-42.
- Jin X, Lu Y, Jin S Q, *et al.* Research on amount of total phosphorus entering into Fuxian Lake and Xingyun Lake through dry and wet deposition caused by surrounding phosphorus chemical factories[J]. *Environmental Science Survey*, 2010, **29**(6): 39-42.
- [33] 中华人民共和国生态环境部. 关于发布计算污染物排放量的排污系数和物料衡算方法的公告[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201712/20171229_428887.htm, 2017-12-28.
- [34] 李晓琳, 帅永芳, 张翼, 等. 基于 GIS 的洱海流域氮素时空分异特征及源结构解析[J]. *湖泊科学*, 2022, **34**(3): 816-827.
- Li X L, Shuai Y F, Zhang Y, *et al.* GIS-based analysis on the temporal and spatial variation characteristics of nitrogen and its sources in lake Erhai basin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, **34**(3): 816-827.
- [35] 玉溪市人民政府. 玉溪市 2020 年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. <http://www.yuxi.gov.cn/yxs/fxxgk/tjgb/20210315/1236722.html>, 2021-03-15.
- [36] 清华大学. 中国经济社会大数据研究平台 [EB/OL]. <https://data.cnki.net/>, 2023-03-17.
- [37] 玉溪市人民政府. 抚仙湖水污染综合防治“十二五”规划[R]. 北京: 中国环境科学学会, 2012.
- [38] 玉溪市人民政府. 抚仙湖生态环境保护试点实施方案[R]. 玉溪: 玉溪市人民政府实施方案编制组, 2011.
- [39] Yuan L F, Sinshaw T, Forshay K J. Review of watershed-scale water quality and nonpoint source pollution models [J]. *Geosciences*, 2020, **10**(1), doi: 10.3390/geosciences10010025.
- [40] 谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 等. 汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1760-1769.
- Xie J Z, Zhao X L, He B H, *et al.* Analysis of the characteristics of nitrogen and phosphorus emissions from agricultural non-point sources on Hanfeng Lake basin [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1760-1769.
- [41] Rose C, Parker A, Jefferson B, *et al.* The characterization of feces and urine: a review of the literature to inform advanced treatment technology [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2015, **45**(17): 1827-1879.
- [42] 杨旺义. 我国农田氮损失影响因素及损失量初步估算[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- [43] 董利民. 洱海流域水环境承载力计算与社会经济结构优化布局研究[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [44] 朱梅. 海河流域农业非点源污染负荷估算与评价研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- [45] 王俊能, 赵学涛, 蔡楠, 等. 我国农村生活污水污染排放及环境治理效率[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(12): 2665-2674.
- Wang J N, Zhao X T, Cai N, *et al.* Pollution discharge and environmental treatment efficiency of rural domestic sewage in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(12): 2665-2674.
- [46] 张靖雨, 汪邦稳, 夏小林, 等. 农村规模化畜禽养殖污染生态综合治理技术研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2020, **48**(19): 9-14, 29.
- Zhang J Y, Wang B W, Xia X L, *et al.* Research progress on ecological treatment technology of large scale livestock and poultry manure pollution [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, **48**(19): 9-14, 29.
- [47] 杨立梦. 茫溪河流域(井研段)农业非点源污染研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [48] Cheng H L, Yang J R, Liu Y X, *et al.* Investigation and analysis of the main pollution sources in Fuxian Lake [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, **714**, doi: 10.1088/1755-1315/714/2/022053.
- [49] 梁浩, 黄生志, 孟二浩, 等. 基于多种混合模型的径流预测研究[J]. *水利学报*, 2020, **51**(1): 112-125.
- Liang H, Huang S Z, Meng E H, *et al.* Runoff prediction based on multiple hybrid models [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, **51**(1): 112-125.
- [50] Kuwayama Y, Olmstead S M, Wietelman D C, *et al.* Trends in nutrient-related pollution as a source of potential water quality damages: a case study of Texas, USA [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **724**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137962.
- [51] 和兰娣, 毕金, 杨超. 滇池流域典型小流域农业种植情况调查[J]. *环境科学导刊*, 2012, **31**(5): 38-41.
- He L D, Bi J, Yang Z. A survey on agricultural cultivation in the typical river basins of Dianchi Lake catchment [J]. *Environmental Science Survey*, 2012, **31**(5): 38-41.
- [52] 玉溪市环境保护局, 玉溪市发展和改革委员会. 阳宗海流域(玉溪)水污染综合防治[R]. 玉溪: 玉溪市发展和改革委员会, 2006.
- [53] 陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 等. 程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策[J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 77-88.
- Chen X K, Liu X B, Peng W Q, *et al.* Estimation of and control strategies for pollution loads from non-point sources in the Chenghai watershed [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 77-88.
- [54] 玉溪市人民政府. 玉溪市人民政府关于环境保护举报案件办理情况公告 [EB/OL]. <http://www.yuxi.gov.cn/yxs/gg/20170312/39003.html>, 2017-03-12.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] 中华人民共和国农业农村部. 农业部办公厅关于印发《<到 2020 年化肥使用量零增长行动方案>推进落实方案》的通知 [EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201505/t20150525_4614695.htm, 2015-05-25.
- [58] 玉溪市人民政府. 关于印发抚仙湖近面山禁止放牧和径流区控制畜禽规模养殖污染治理工作方案的通知 [EB/OL]. <http://www.yuxi.gov.cn/yxs/fxxgk/tzgg/1772/20141111/58184.html>, 2014-11-11.
- [59] 中华人民共和国农业农村部. 农业部关于印发《畜禽粪污资源化利用行动方案(2017—2020 年)》的通知 [EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/nybg/2017/dbq/201801/20180103_6134011.htm, 2017-08-20.

CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and PM ₁₀ in Chinese Cities	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shangdong, and Henan from 2017 to 2021	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM _{2.5} and O ₃ Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM _{2.5} Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiang, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N ₂ O Emission: A Meta-analysis	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity	LU Ze-rang, CHEN Jia-yu, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seeding Systems	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)