

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

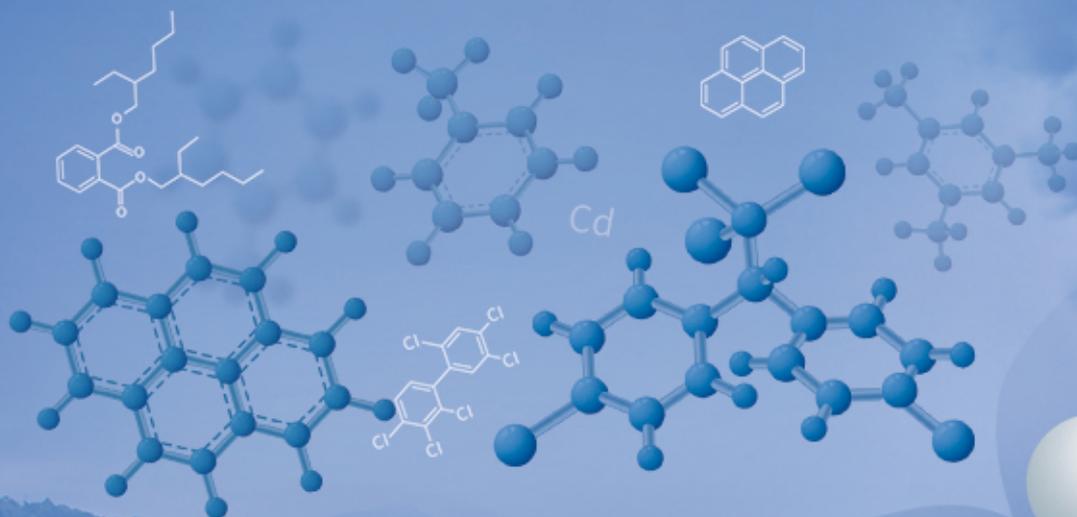
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价

龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华



PAHs

VOCs

HMs

PCBs

OCPs

PAEs

ANTs

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年10月

第42卷 第10期

Vol.42 No.10

目次

PM_{2.5}化学组分连续观测在污染事件源解析中的应用 蔡凡涛, 尚玥, 戴维, 谢鸣捷 (4575)

汾渭平原 PM_{2.5}空间分布的地形效应 黄小刚, 赵景波, 孙从建, 汤慧玲, 梁旭琦 (4582)

华中地区冬季灰霾天气下 PM_{2.5}中重金属污染特征及健康风险评价: 以湖北黄冈为例
..... 李星谕, 毛瑶, 陈展乐, 刘威杰, 程铖, 石明明, 许安, 苏业旺, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (4593)

华北区域大气中羰基化合物体积分数水平及化学反应活性 黄禹, 陈曦, 王迎红, 刘子锐, 唐贵谦, 李杏茹 (4602)

成都市春季 O₃ 污染特征及关键前体物识别 韩丽, 陈军辉, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波, 钱骏, 刘政 (4611)

基于边界观测的长三角某工业区 O₃ 来源特征 黄晴, 黄银芝, 张珊, 金丹, 高松, 修光利 (4621)

廊坊开发区 8~9月 O₃ 污染过程 VOCs 污染特征及来源分析 张敬巧, 王宏亮, 方小云, 刘锐泽, 丁文文, 凌德印, 王淑兰 (4632)

广东省家具行业基于涂料类型的 VOCs 排放特征及其环境影响
..... 曾春玲, 邵霞, 刘锐源, 姚懿娟, 李银松, 侯墨, 刘洋, 范丽雅, 叶代启 (4641)

厦门湾空气质量对新冠疫情管控的响应 徐超, 吴水平, 刘怡婧, 钟雪芬 (4650)

北京平原和延庆地区山谷风异同及对污染的影响 吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 韩婷婷, 邱雨露, 马小会, 李颖芳, 朱晓婉 (4660)

两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响
..... 朱燕, 赵天良, 白永清, 徐家平, 孙晓芸, 胡未央, 常嘉成, 杨婕, 朱从祯 (4669)

燃煤电厂颗粒物中硫酸根与硝酸根离子的转化规律 杨柳, 何晴, 盛重义 (4678)

长江流域主要干/支流化学特征及外源酸的影响 王琪, 于爽, 蒋萍萍, 孙平安 (4687)

土地利用对太湖入流河道营养盐的影响 连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 康丽娟, 朱梦圆, 许海 (4698)

基于 eDNA 技术的渭河浮游动物多样性及关键种生态位特征
..... 梁东, 夏军, 宋进喜, 常剑波, 吴琼, 程丹东, 张怡暄, 孔飞鹤, 任源鑫 (4708)

三亚市水体中 PPCPs 的污染水平、分布特征及生态风险评价 任丙南, 耿静 (4717)

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价 龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华 (4727)

天目湖沙河水库水生态安全状况长期变化及影响因素 杨文斌, 段文秀, 崔扬, 朱广伟, 吴天浩, 许海, 朱梦圆 (4739)

华中地区供水水库抗生素抗性基因的季节变化及影响因素 张凯, 辛蕊, 李观家, 王倩, 王亚南, 许智恒, 崔向超, 魏巍 (4753)

快速城镇化进程中珠江三角洲硝酸型地下水赋存特征及驱动因素 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 张玉玺 (4761)

盐城地区地表水化学空间特征及控制因素分析 王建, 张华兵, 许君利, 彭俊 (4772)

基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度
..... 周亚婷, 陈兴宏, 李立青, 张伟军, 张美一, 王东升, 王洪杰 (4781)

硼酸和磷酸对 PMS/Co²⁺ 均相催化氧化有机物的影响因素与机制 万琪琪, 陈铸昊, 曹瑞华, 王静怡, 李刚 (4789)

磁性生物炭负载 α-MnO₂ 活化过一硫酸盐降解 2,2',4,4'-四溴联苯醚 李鑫, 尹华, 罗昊昱, 欧阳晓芳, 刘航, 祝铭韩 (4798)

紫外活化过硫酸钠灭活水中噬菌体 MS2 的特性及机制 张崇森, 杨昊明, 王真 (4807)

铈改性水葫芦生物炭对磷酸盐的吸附特性 王光泽, 曾薇, 李帅帅 (4815)

低温地下水净化工艺中氨氮去除性能及机制 李冬, 刘孟浩, 张瑞苗, 曾辉平, 张杰 (4826)

我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评价 耿源濛, 张传兵, 张勇, 黄豆豆, 闫姝晓, 孙腾飞, 程柳, 王静, 毛宇翔 (4834)

不同气候类型下污水厂活性污泥中微生物群落比较 杨思航, 秦泽生, 梁漫春 (4844)

部分亚硝化-厌氧氨氧化协同反硝化处理生活污水脱氮除碳 秦彦荣, 袁忠玲, 张明, 张民安, 刘安迪, 付雪, 马娟, 陈永志 (4853)

同步短程硝化-厌氧氨氧化-短程反硝化颗粒污泥培育过程及其性能 周峰, 刘勇弟, 厉巍 (4864)

多种微塑料提取方法在中国典型土壤中的应用 赵小丽, 刘子涵, 从辰宇, 韩剑桥 (4872)

柴达木盆地土壤重金属污染与来源分析 陈亮, 张西营, 唐启亮, 耿盛, 王二龙, 李姜瑶 (4880)

快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险 李梦婷, 沈城, 吴健, 黄沈发, 李大雁, 王敏 (4889)

广西都安县典型水田晒地球化学特征及影响因素 刘飞, 杨柯, 徐仁廷, 唐世琪 (4897)

炭化苹果枝通过减少土壤 DTPA-Cd 降低苹果砷木镉积累和镉伤害 邓波, 荀咪, 张玮玮, 杨洪强 (4908)

海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险
..... 杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 严慧, 胡树起, 唐世新, 龚晶晶 (4916)

环境中抗生素抗性基因丰度与抗生素和重金属含量的相关性分析: 基于 Web of Science 数据库检索 苗荪, 陈磊, 左剑恶 (4925)

银川市农田土壤中四环素类抗生素的污染特征及生态风险评估 张小红, 陶红, 王亚娟, 马志义, 周泽英 (4933)

施用不同来源粪肥对土壤中抗生素淋溶的影响 李斌绪, 朱昌雄, 宋婷婷, 马金莲, 张治国, 李红娜 (4942)

我国典型森林土壤微生物驱动的氮代谢途径特征解析 吕雪丽, 赵永鹏, 林清火, 彭显龙, 尹云锋, 蒋先军 (4951)

青藏高原高寒湿地春夏两季根际与非根际土壤反硝化速率及 nirS 型反硝化细菌群落特征分析
..... 李玉倩, 马俊伟, 高超, 霍守亮, 夏星辉 (4959)

松嫩平原芦苇湿地退化与修复过程中土壤细菌和甲烷代谢微生物的群落结构
..... 王秋颖, 王娜, 刘颖, 陈功, 何辉, 高婕, 庄绪亮, 庄国强 (4968)

不同轮作休耕下潮土细菌群落结构特征 南镇武, 刘柱, 代红翠, 张磊, 王娜, 徐杰, 刘开昌, 孟维伟, 王旭清 (4977)

稻田土壤光合细菌群落对镉污染的响应 罗路云, 金德才, 王殿东, 陈昂, 张德咏, 曾军, 匡炜, 张卓, 刘勇 (4988)

铁尾矿芦苇根际微生物和根内生菌群落分布及其限制性因子解析 曹曼曼, 王飞, 周北海, 陈辉伦, 袁蓉芳 (4998)

有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响 周慧, 史海滨, 张文聪, 王维刚, 苏永德, 闫妍 (5010)

水稻产量、稻田 CH₄ 和 N₂O 排放对长期大气 CO₂ 浓度升高的响应 于海洋, 宋开付, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (5021)

原料和热解温度对生物炭中可溶性有机质的影响 闫代红, 马亚培, 宋凯悦, 马红亮, 高人, 尹云锋 (5030)

中国 84 个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因子 李宇, 周德成, 闫章美 (5037)

室内建筑装饰装修材料气味物质及其释放研究进展 张万众, 张彭义 (5046)

《环境科学》征订启事 (4814) 《环境科学》征稿简则 (4871) 信息 (4907, 5009, 5029)

土地利用对太湖入流河道营养盐的影响

连心桥^{1,2}, 朱广伟^{1*}, 杨文斌², 康丽娟¹, 朱梦圆¹, 许海¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 安徽师范大学生态与环境学院, 芜湖 241002)

摘要: 土地利用类型是影响面源营养盐负荷的重要因素。为定量揭示不同土地类型对太湖流域入湖河流营养盐浓度的影响, 本文以太湖西岸乌溪港流域为例, 基于流域土地利用类型的遥感解译, 结合河道水质监测数据, 分析了流域土地利用对太湖入流河道营养盐浓度的影响。结果发现, 河道水质与土地利用类型联系紧密: 旱地农田和建筑用地占比对河道氮、磷、有机碳及浮游植物叶绿素 a 等营养盐相关水质指标影响巨大, 果园用地占比也与河道营养盐浓度正相关, 而林地占比则与营养盐浓度负相关; 流域水域的利用情况及其面积占比也显著影响河道营养盐: 河流及水库等的水体面积占比与河道溶解性总氮及硝态氮浓度负相关, 自然坑塘及鱼塘等水域面积占比则与河道硝态氮和氨氮浓度负相关, 而河流及鱼塘面积占比与河道溶解性总磷、溶解性有机碳和高锰酸盐指数等浓度呈正相关, 自然坑塘面积占比与河道颗粒态磷和浮游植物叶绿素 a 浓度呈正相关。土地利用类型对河道水质的影响程度还受其距河远近的影响。上述结果表明在太湖等平原河网地区营养盐的面源污染控制中应当将土地与湿地的利用管控作为重点实施管理, 将湿地水域的自净能力提升纳入流域营养盐控制方案, 并特别重视下游河道两岸旱地及建筑用地的面源污染削减。

关键词: 太湖流域; 平原河网; 营养盐; 面源污染; 土地利用

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)10-4698-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202101065

Effects of Land Use on Nutrient Concentrations in the Inflow River of Lake Taihu, China

LIAN Xin-qiao^{1,2}, ZHU Guang-wei^{1*}, YANG Wen-bin², KANG Li-juan¹, ZHU Meng-yuan¹, XU Hai¹

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. School of Ecology and Environment, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China)

Abstract: Land use is an important factor affecting non-point nutrient loading. Here, the Wuxi River basin was selected to analyze the influence of sub-basin land use on nutrient concentrations using remotely sensed land use data and monthly river water quality variables from October 2019 to September 2020. The results showed that the water quality of the river was closely related to land-use type. Specifically, dryland farmland, villages, and building land have a strong promoting influence on nitrogen, phosphorus, organic carbon, and phytoplankton chlorophyll a. The proportion of orchard land was also positively correlated with river nutrient concentrations. A negative correlation was observed between the proportion of forest land and nutrient concentrations. Moreover, the proportion of the water area in rivers and reservoirs was negatively correlated with the total dissolved nitrogen and nitrate concentrations in the river, and the proportion of the water area in natural pits and fishponds was negatively correlated with river nitrate and ammonia concentrations. Furthermore, the proportion of river and fishpond areas was positively correlated with the concentration of dissolved total phosphorus, dissolved organic carbon, and the permanganate index, while the proportion of the natural pond area was positively correlated with the concentration of particulate phosphorus and phytoplankton chlorophyll a. The influence of land-use types on water quality was also affected by distance from the river. This research indicates that the appropriate utilization of land and wetlands is key to controlling non-point nutrient loading in the river network, including Lake Taihu. Specifically, the self-purification capacity of wetland waters should be incorporated into nutrient control schemes, and special attention should be paid to the reduction of non-point source pollution in the drylands along the downstream riverbanks and urbanized areas.

Key words: Lake Taihu basin; river-net plain; nutrient; non-point source pollution; land use

“治湖先治河, 治河先治污”是湖泊富营养化治理的基本思路^[1]。通过河流入湖的营养盐过量输入是造成湖泊富营养化及生态系统受到破坏的重要原因^[2]。然而, 在十余年的高强度流域水污染治理背景下, 我国太湖、巢湖和滇池等重要湖泊的蓝藻水华问题依然严重^[3, 4], 对于这些大型湖泊的流域营养盐控制途径和策略方面, 仍需加强科学基础研究, 使得治理的措施更加精准和有力。其中, 分析流域土地利用对河道水质的影响, 可为精准实施湖泊生态修复与水环境保护提供决策依据, 这使得河流水环境变化的驱动因素研究成为近年来的

热点^[5-9]。

流域土地利用与河道水环境质量之间联系紧密, 土地利用方式可以显著影响河流水质。田皓予等在探究泰国蒙河水质的影响因素时, 发现农业用地、城镇建设用地是河道中营养盐的“源”, 而林地则起到截留和吸附营养盐的作用^[10]。Zhang 等^[11]在研究三峡库区水质的影响因素时, 发现库区水质退化

收稿日期: 2021-01-08; 修订日期: 2021-03-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41830757, 41621002); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA23040201)

作者简介: 连心桥(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为河湖面源污染机制与控制, E-mail: lianxinqiao28@163.com

* 通信作者, E-mail: gwzhu@niglas.ac.cn

与流域人类生产生活用地、农田和城市用地的比例关系密切。太湖地处土地肥沃、社会经济发达的长江三角洲平原中心,有 219 条河道与湖泊连通,河道中的营养盐浓度较高^[12~14],对太湖水体营养盐的贡献甚至高达 80%,成为湖体蓝藻水华频繁暴发的物质基础^[15,16]。因此探究土地利用对河流水质的过程与机制,对科学实施太湖富营养化治理意义重大。

在分析太湖流域土地利用类型与接纳水体关系的技术方面,目前应用较多的是基于缓冲区尺度来分析与河流水质的关系。如於梦秋等采用河流上游半圆形缓冲区提取土地利用^[17],高斌等采用圆形缓冲区提取站点周边土地利用类型来分析其对水质的影响^[18]。子流域尺度下的土地类型能更好地反映污染物产、汇、集的完整过程^[19],更充分地解释与预测土地利用对河流水质的影响^[5,20]。因此,基于子流域尺度下土地利用与水质之间的关系构建更精准,也能进一步完善土地利用类型对水质影响的科学认知体系。土地类型的精准分类也十分重要。太湖平原河网区不同于典型的山区流域,人类对水体的利用率高,完全自然状态的湿地极少,多数情况下湿地成为了人类生活所产生污染物的“储存池”。如一些高污染的支流水系汇成的河流,依傍居民区存在的闭塞坑塘^[21],过度饲养或废弃的鱼塘等湿地,污染往往十分严重^[22]。

不同土地类型面积占比之间的相互关联会扭曲统计分析并产生潜在的误导性结果,导致污染物与土地类型间的多元回归的性能较差^[23]。偏最小二乘回归分析方法融合了主成分分析和多元线性回归优点^[24],可以更直观有效地定量分析流域污染的来源。采用该方法,本文选择太湖西岸乌溪港流域为研究对象,利用遥感影像解译了流域土地利用类型,结合河道水质监测,分析了河道营养盐及其相关水质指标与子流域土地利用的关系,探究了河流水质对土地利用的响应机制,以期平原河网区水污染控制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

乌溪港流域位于宜兴市南部(119°41'~119°53'E, 31°09'~31°17'N),属于北亚热带季风区气候,四季分明、温和湿润且雨量充沛^[17]。流域面积为 180.44 km²,有着发达的工业与旅游业,土地开发利用强度高,工农业及生活污染物排放量大,环境污染和生态退化现象突出^[17],是太湖湖西重污染控制区^[25]。乌溪港河是宜兴市境内重要的入太湖河流^[26],河段长 22.77 km,发源于丘陵山区,流经油车

水库、居民区,汇入西太湖(图 1)。

1.2 数据来源

1.2.1 水质监测数据

本研究区共设 9 个水质监测点(图 1),其中 R 代表设置在河段的监测点,Y 代表设置在水库的监测点。上游山区共设 5 个监测点,记为 R1、R2、R3、Y 和 R4。下游平原河网区设置 4 个监测点,记为 R5、R6、R7 和 R8。其中 R5 处河段两岸是水泥厂,R6 处河段两岸是集中分布的居民住宅区,R7 处河段在莲花荡湿地下游,R8 则靠近太湖。下游平原河网区河段均有通航。

2019 年 10 月至 2020 年 9 月,对 9 个监测点进行了为期 1 a 的逐月水质监测。测定指标包括总氮(TN)、溶解性总氮(DTN)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、亚硝态氮(NO₂⁻-N)、总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)、溶解性反应活性磷(DRP)、溶解性有机碳(DOC)、高锰酸盐指数、浮游植物叶绿素 a(Chl-a)和浊度(Turb)。

TN 和 DTN 采用碱性过硫酸钾消解和紫外分光光度法测定^[27],测定波长为 210 nm;TP 和 DTP 采用碱性过硫酸钾消解和钼锑抗显色分光光度法测定^[27],测定波长为 700 nm,测定仪器均为津岛 UV-

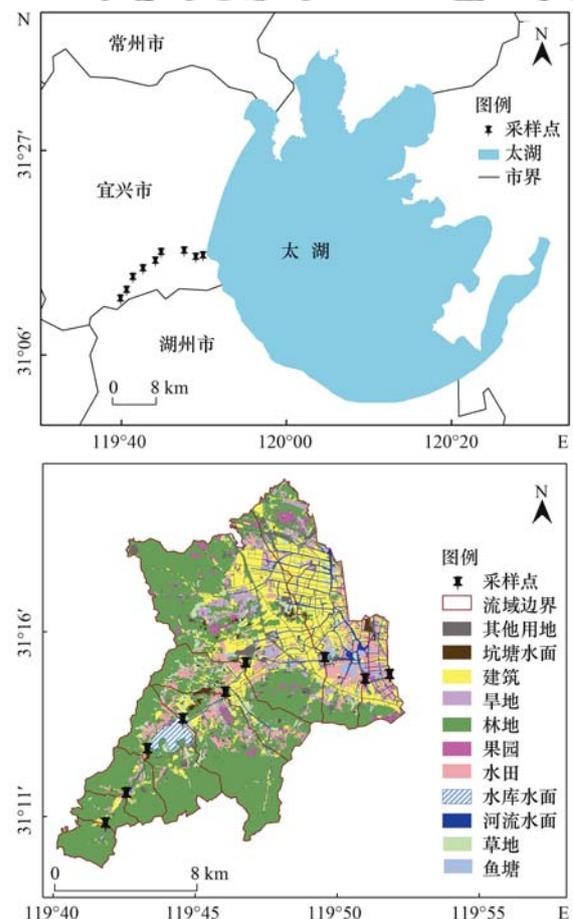


图 1 乌溪港流域及子流域土地利用情况示意

Fig. 1 Land use in sub-basins and Wuxi River basin

2600 型分光光度计. NH_4^+-N 、 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- -\text{N}$ 和 DRP 浓度采用荷兰 Skalar 公司的 SAN⁺⁺ 流动分析仪光度法测定. DOC 浓度采用岛津 TOC 仪测定. 高锰酸盐指数采用高锰酸钾氧化还原滴定法测定. Chl-a 采用热乙醇提取、分光光度法测定^[28]. 其中 TN 与 DTN 之差定义为颗粒态氮(PN), TP 与 DTP 之差则定义为颗粒态磷(PP). Turb 采用 YSI 公司的 EXO 多参数水质仪现场测定.

1.2.2 土地利用类型数据

利用 2019 年研究区的遥感影像,解译得到该区域的土地利用类型. 土地利用类型共分为 11 种,分别为林地、建筑用地、水田、旱地、果园、河流、水库、坑塘、鱼塘、草地和其他用地(图 1). 其中,水田、旱地和果园均属于农业用地;河流、水库、坑塘和鱼塘用地均属于水域用地.

1.2.3 子流域数据

基于 30 m 精度的 DEM 数据,利用 ArcGIS 10.4 软件的水文分析模块以 9 个监测站点为基准,进行提取得到 9 个子流域(图 1).

1.3 统计分析

采用单样本 Shapiro-Wilk 检验所有水质参数的正态性. 若满足正态分布,则采用单因素方差法(ANVOA)分析各监测点水质在 $P=0.05$ 显著性水平上的季节与空间变化差异;若不满足正态分布,则采用 Kruskal-Wallis 法分析.

采用偏最小二乘回归分析(PLS)法,克服传统回归方法中数据共线性影响的缺点. 以各土地类型

的面积占比作为自变量,水质参数作为因变量,根据交叉有效性系数 $Q^2 > 0.0975$ 来确定提取的主成分,建立水质参数与各土地类型间的定量关系. 当 R_{Xcum}^2 (主成分对自变量的累积解释能力)、 R_{Ycum}^2 (主成分对因变量的累积解释能力)和 Q_{cum}^2 (累积交叉验证平方系数)的值大于 0.5,并通过 200 次置换检验时,表明回归结果是可靠的^[29]. 回归结果中的回归系数(RC)的正、负代表了自变量与因变量的正、负相关性;变量投影重要性指标(VIP)用来描述自变量对因变量的解释能力,值越大自变量对因变量的解释能力越强,一般认为 $VIP > 1$ 的变量具有统计学意义^[30,31].

数据处理采用 Microsoft Excel 2016、SPSS 25.0、Origin 9.1 以及 Simca 14.1 完成.

2 结果与分析

2.1 土地利用类型结构

图 2 为乌溪港流域子流域不同土地利用类型的面积占比情况. 从中可知,林地是乌溪港流域最主要的土地利用类型,占流域总面积的 55% 以上. 农业用地次之,占流域总面积的 17.82% 以上. 第三位是建筑用地,占流域总面积的 12.90%. 水域用地、草地和其他用地面积较少,分别占流域总面积的 4.40%、3.52% 和 6.60%.

土地利用类型在空间分布上存在显著差异. 上游 R1、R2 和 R3 对应的子流域中仅有少量错落分布的农村居民用地,R2 对应子流域首次出现少

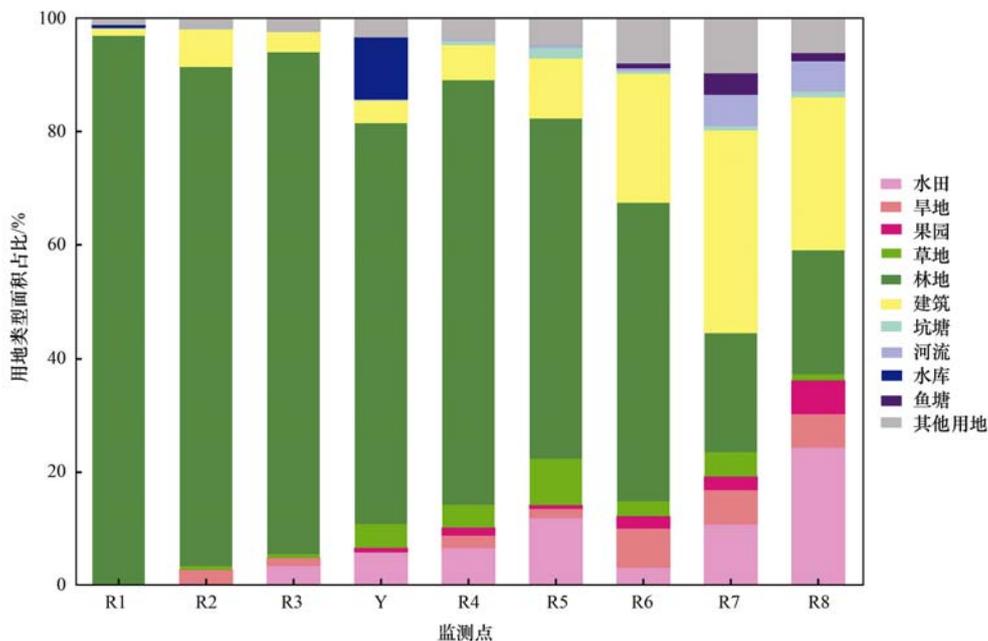


图 2 乌溪港流域子流域不同土地利用类型的面积占比情况

Fig. 2 Proportion of land use area in each sub-basin in the Wuxi River basin

量旱地, R3 对应子流域首次出现少量水田, 除林地外其他类型的土地面积占比之和最大不足 13%, 土地类型组成简单. 到 Y 对应的子流域中, 主要表现为水库用地的面积占比增加 10% 和林地的面积占比减少 8%, 其他土地类型面积占比变幅不足 4%; R4 对应的子流域中, 人类活动较频繁的建筑用地和农业用地^[18, 32]分别增加了仅 2.27% 和 3.58%, 除林地外其他类型的土地面积占比不足 15%, 人为干扰程度相对较小. 到下游平原河网区, 各子流域基本包含了所有土地类型. 随着林地面积占比的减少, 人为干扰较大的农业用地与建筑用地面积占比大幅增多, 其中建筑用地由上游稀疏分布的民房转变为集中分布的成片居民区. 自 R5 对应的子流域开始, 建筑与水田用地面积占比均超过 10%; R6 对应子流域开始出现鱼塘用地; R7 和 R8 子流域的建筑用地面积超过林地, 成为占比最大的土地利用类型, 其面积占比分别为 35.74% 和 26.98%.

土地利用类型的空间分布特征总体表现为上游山区以林地为主(其面积占上游区域的 83.86%), 土地类型组成简单; 下游平原河网区农业、建筑和水域用地大幅增多, 土地类型组成复杂. 这与已有学者利用 2009 年遥感影像解译出的该流域土地类型结构的分析结果差异不大^[17], 说明 10 年间土地利用类型在空间分布上变化不显著.

2.2 水质特征分析

如图 3 所示, 乌溪港水体的各项水质指标(TN、DTN、TP、DTP、DOC、高锰酸盐指数和 Chl-a)浓度在空间分布上存在显著差异($P < 0.05$). 在上游 R1、R2、R3、Y 和 R4 监测点处的 TN、DTN、TP、DTP、DOC、高锰酸盐指数和 Chl-a 浓度波动不大, 均处于较低水平, 年均值分别为 1.47、1.37、0.029、0.016、1.49、1.47 和 $5.35 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 在下游平原河网区各河段水体的 TN、DTN、TP、DTP、DOC、高锰酸盐指数和 Chl-a 浓度均处于较高水平, 年均值分别为 3.18、2.66、0.309、0.067、3.20、3.95 和 $1.90 \times 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 其中各项水质指标浓度从下游从 R5 监测点处开始大幅升高, R6 处基本达到最大, 到莲花荡下游的 R7 和入湖口附近 R8 处其浓度稍有降低. R6 处水体 TN、DTN、TP、DTP、DOC、高锰酸盐指数和 Chl-a 浓度的年均值分别为 4.12、3.30、0.469、0.080、3.62、4.16 和 $3.61 \times 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 与土地类型空间分布特征一样, 上下游水体各项水质指标浓度分布也存在明显的分界. 下游平原河网区各项水质指标浓度均显著高于上游, 以 TP 和 Chl-a 浓度的差异最为显著.

水质的季节变化在空间分布上也存在显著差异($P < 0.05$, 图 4). 从空间上看, 下游平原河网区水体的 TN 和 TP 浓度在 4 个季节都显著高于上游. 从变化规律上看, 上游与下游水质的季节变化存在一定差

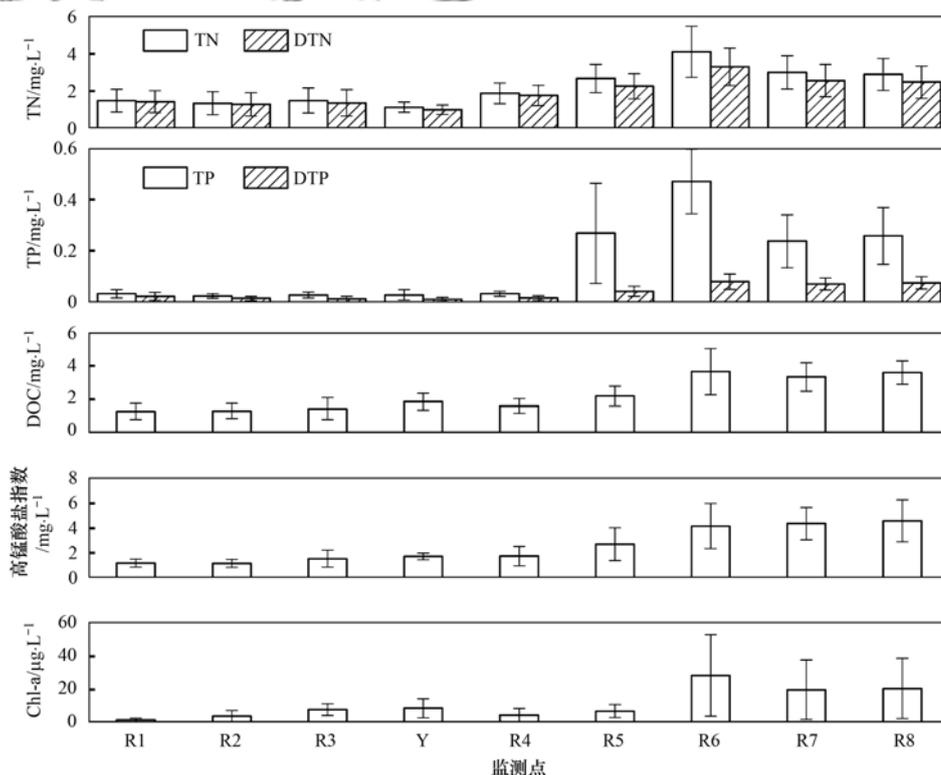


图 3 乌溪港各断面水质指标年均浓度空间变化

Fig. 3 Spatial variations in the average annual water quality measures in the Wuxi River basin

异,下游水体与太湖湖区水体的季节变化^[33]更具有一致性.对 TP 来说,上游季节差异不明显,下游则表现出冬春高、夏秋低的特征.而对 TN 浓度来说,上游

水体表现出冬夏高、春秋低的特征,下游表现出的冬春高、夏秋低的特征,下游与太湖及太湖上游大浦河与殷村港水体 TN 的季节变化规律一致^[34,35].

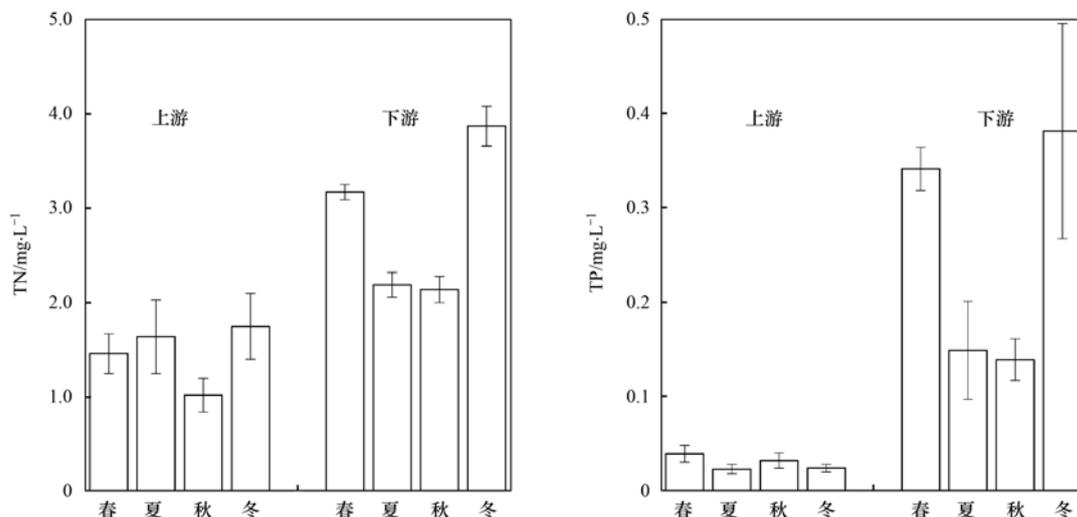


图4 乌溪港上下游水体 TN 和 TP 浓度季节变化

Fig. 4 Seasonal changes in TN and TP concentrations in the Wuxi River basin

2.3 土地类型与水质指标关系分析

由表1不同土地利用类型与水质指标的偏最小二乘回归结果可知,旱地、建筑用地和林地的面积占比与各形态的氮、磷和有机质浓度的变量投影重要性值(VIP值)均大于1,表明其土地利用类型是影响河流水质变化的重要因素.其中旱地和建筑用地的面积占比与各形态氮、磷和有机质浓度的回归系数(RC)为正值,表示随着他们面积占比的增加,河道相应水质指标的浓度会随着升高,说明旱地和

建筑用地是导致河道相应水质指标升高的主要原因.林地的面积占比与各形态氮、磷和有机质浓度回归系数为负值,表示林地的面积占比越大,河道相应水质指标浓度越低,说明林地面积占比的增大能显著降低河道相应水质指标的浓度.果园NH₄⁺-N、DTP、DRP、DOC、高锰酸盐指数和Chl-a的变量投影重要性值大于1,其相应的回归系数也是正值,表明果园面积占比的增加也会导致河道营养盐浓度升高.

表1 变量投影重要性(VIP)及模型拟合效果¹⁾

Table 1 Variable influence on projection(VIP)and model fitting effects

项目	旱地	建筑	林地	果园	鱼塘	坑塘	河流	水库	水田	草地	R^2_{Xcum}	R^2_{Ycum}	Q^2_{cum}
TN	1.48	1.36	1.23^a	0.99	0.92	0.88	0.78	0.73 ^a	0.70	0.47	0.59	0.61	0.50
DTN	1.43	1.16	1.06^a	0.90	0.88	0.81	1.10^a	0.96 ^a	0.75 ^a	0.45	0.69	0.86	0.54
PN	1.55	1.41	1.30^a	0.97	0.89	0.84	0.68	0.47 ^a	0.66	0.60	0.59	0.50	0.37
NO ₃ ⁻ -N	1.20	1.02	1.01^a	0.82	0.84	1.04	1.07^a	1.40^a	0.77 ^a	0.56	0.70	0.90	0.63
NH ₄ ⁺ -N	1.46	1.41	1.31^a	1.09	1.02	0.62	0.9	0.36 ^a	0.74	0.30	0.59	0.62	0.55
NO ₂ ⁻ -N	1.67	1.41	1.25^a	0.95	0.79	0.90	0.54	0.62 ^a	0.54	0.59	0.58	0.42	0.23
TP	1.49	1.36	1.27^a	0.99	0.83	0.97	0.70	0.57 ^a	0.73	0.59	0.69	0.52	0.41
DTP	1.33	1.34	1.26^a	1.10	1.04	0.68	1.03	0.54 ^a	0.84	0.20	0.59	0.80	0.75
PP	1.52	1.36	1.26^a	0.95	0.76	1.05	0.59	0.58 ^a	0.69	0.71	0.58	0.46	0.36
DRP	1.36	1.36	1.27^a	1.11	1.04	0.64	1.01	0.48 ^a	0.82	0.18	0.59	0.75	0.69
DOC	1.30	1.33	1.32^a	1.18	1.02	0.58	1.04	0.23 ^a	0.92	0.25	0.59	0.81	0.78
高锰酸盐指数	1.22	1.30	1.30^a	1.13	1.04	0.68	1.08	0.34 ^a	0.96	0.31	0.59	0.90	0.88
Chl-a	1.50	1.41	1.31^a	1.15	1.05	0.31	0.96	0.22 ^a	0.72	0.08	0.59	0.63	0.56

1) 黑体字表示VIP>1; a表示识别回归系数(RC)为负值

其他土地类型中能显著影响河流水质的均来自水域用地,水域用地中不同类型的水体对水质的影响存在差异(表1).对于氮来说,河流与水库面积占比的增加能明显降低水体中DTN和NO₃⁻-N浓度;坑塘与鱼塘面积占比的增加则分别导致水体中

NO₃⁻-N和NH₄⁺-N浓度升高.对磷来说,河流与鱼塘面积占比的增加会导致水体中DTP和DRP浓度的升高;坑塘面积占比的增加则导致水体中PP浓度的升高.对于碳(DOC)与高锰酸盐指数来说,鱼塘和河流用地面积占比的增加均会导致其浓度升高.

此外,鱼塘面积占比的增加也会导致水体 Chl-a 浓度的升高。

3 讨论

3.1 水域用地对河流水质的影响

在水域用地对河流水质影响研究中,大多数学者将河流、水库、坑塘和鱼塘等水体均归为水域用地,将其作为整体进行分析对河道水质的影响情况,其结果常常存在差异或者没能得到充分重视。如王竹等^[36]在研究秦皇岛水质时空分布特征及归因分析时发现,水域用地与水质污染指标(TP、 NH_4^+ -N和高锰酸盐指数)呈负相关关系,曹芳芳等^[37]在研究新安江流域土地利用结构对水质的影响时则发现水域用地对水质污染指标(TN、TP、 NH_4^+ -N和高锰酸盐指数)起到“源”的作用,也有部分学者经研究后发现水域用地对水质并无显著影响或者因水域用地面积占比太小不足以影响水质而不予考虑^[38, 39]。太湖平原河网区临近太湖,地势平坦和水网交错,河网密度高达 $3.2 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$ ^[40],水域用地十分重要,水资源开发利用率高^[41],不同用途的水体性质存在不同,所以细化水域用地类型,探究每种水域用地对河道水质的影响,是精准管控水污染治理的前提条件。

本研究通过细化水域用地后分析发现,湿地型的水域用地显著影响河流水质(表1)。不同性质的湿地水体对河道水质的影响程度与方向存在差异。河流与水库面积占比的增加能显著降低水体中DTN和 NO_3^- -N浓度,坑塘与鱼塘面积占比的增加则分别导致水体中 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N浓度升高(表1)。对磷来说,河流与鱼塘面积占比的增加会导致水体中DTP和DRP浓度的升高,坑塘面积占比的增加则导致水体中PP浓度的升高(表1)。

整体上,湿地型水域用地面积占比的增加与河道营养盐增高成正比,表现出恶化水质的作用(表1)。这与高斌等^[18]在研究太湖平原地区不同土地利用类型对水质影响时,发现水域用地(整体)对河道水质影响不大的结果不同。其结果与曾远等在调查中发现平原河网区的水塘和沟汊等水域用地对氮磷有较强的截留、净化及缓冲能力的结果也不同^[42]。湿地型水域利用方式,像坑塘和河流等,对磷而言,较少起到湿地净化的作用。这主要与太湖平原河网区存在了高密度的人口与工业,土地的开发利用率极高有关^[43]。在这种地区,丰富的水产养殖、依傍居民区存在的坑塘以及企业的沿河分布等使得湿地型水体受人为干扰非常强,外源污染严重,营养盐含量很高。从对居民门口坑塘的一周年水质监测结果

可知,坑塘TN浓度范围 $0.59 \sim 3.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,均值为 $1.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,TP浓度范围 $0.037 \sim 0.402 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,均值为 $0.099 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,坑塘水体氮、磷浓度污染相对较高。这些水体流动更新慢和水力滞留时间长,营养盐进入水体后,大多沉积到底泥中无法排出,会在水体内不断蓄积^[44]。像坑塘这种较浅的水深会导致底泥易受到风力扰动等的影响,使得水-沉积物之间物质交换较为充分,内源磷不断释放到水体中,加剧水体污染。此外,水体中蓝藻水华的腐烂分解也会加剧内源磷释放。蓝藻水华降解一方面自身释放大量磷,另一方面刺激污染重的底泥向水体释放内源磷,加快水体磷的补给,使其水质一直维持在高污染状态^[45]。这些污染较重的湿地型水体中又几乎没有沉水植物等能净化水质能力强的大型植物,故很难起到湿地的净化作用。

在管理层面上,水域用地保护和监管难度大是其成为高污染的主要原因。在太湖流域鱼塘用地总面积高达 $230\,000 \text{ hm}^2$ ^[46],但其养殖的规范管理难以统一管控,高密度和高强度等不合理的养殖模式,造成水体污染比较严重^[47, 48]。太湖流域存在着较多以个体方式经营的鱼塘^[22],一旦经营不善或者其他原因,鱼塘极易被弃之不管,加剧水体污染,对河道以及太湖水质污染带来巨大的风险。如图5为鱼塘水体TN和TP为期1a的逐月监测数据。可知,自然状态下鱼塘(F1)的氮、磷浓度均不高。人工饲养状态下的鱼塘(F2)、虾塘(F3前半段)的氮、磷浓度较高,比2014年太湖健康状况报告显示的TN($1.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和TP($0.068 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)浓度也高很多。当鱼塘废弃时(F3后半段),TN浓度最高可达 $10.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,TP为 $1.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,是养殖状态下浓度的2~3倍,鱼塘成了高污染物存储区,即水域用地不再发挥湿地的净化作用。

考虑到平原河网区丰富的水网密度、开发程度强以及靠近太湖入湖口的关键位置,湿地型水域用地必须作为营养盐面源污染管控的重点区域。应以细化分类湿地型水域用地为前提,区别管理监督不同性质的水体,提升其自净能力,降低营养盐蓄积,才能够逐步降低平原河网地区河道营养盐居高不下的局面。

3.2 平原河网区的土地利用对水质的影响

平原河网区的土地管控与修复是河流水质面源污染控制核心。河流上下游水质状况存在明显的分界(图3),下游平原河网区的水体污染情况十分严峻,其碳、氮和磷等营养盐浓度远远高于上游,相对于太湖管控的水质来说,更是质的增高。平原河网区成了河水重污染的巨大缓冲库,使得在上游无论实

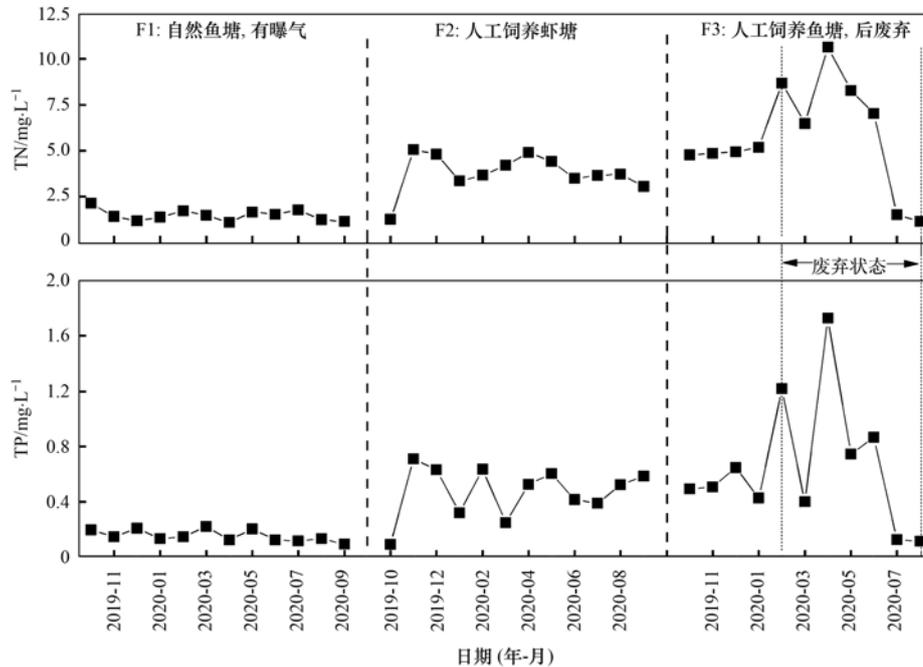


图 5 不同用途的鱼塘 TN 和 TP 浓度月变化

Fig. 5 Monthly changes in TN and TP concentrations in fishponds with different management

施怎样严格的保护与治理措施,一旦河道流经平原河网区后,河道营养盐浓度等水质都处于相对严重污染的状态。此时,仅仅采用源头保护的治理方案,对入湖水质的提升贡献不大。加之下游水体与太湖湖区水体更为一致的季节变化(图 4),充分表明,平原河网区河道治理应是太湖流域面源治理关注的重点。

一个子流域中同样的土地利用类型比例,污染高的土地类型距离河岸越近,影响越大。表 2 为各监

测点水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ 情况。可知在 R6 处的 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的比值最大,为 0.35,表明此处水体受人类生活污染影响最强^[49]。虽然在 R6 对应的子流域处,与人为活动密切相关的建筑用地面积占比不是最大(图 2),但其两岸是集中分布的居民住宅,建筑用地区域靠河更近,生活污染物直接排入水体,使得 R6 处污染最严重。由此说明,紧邻河岸的土地类型对河流水质的影响更大。

表 2 各监测点水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ 情况Table 2 Conditions of $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ in water at each monitoring point

项目	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
$\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$	0.07	0.03	0.06	0.03	0.14	0.35	0.26	0.26

平原河网区沿河分布了高强度与高密度农业与建筑用地^[50],而能起到净化水质的林地面积又偏少,平原河网区的主干河道成了高污染水体。支流水系的污染会增加干流水体污染的风险,进而导致干流高污染水体陷入难以自净的恶性循环中。水系越发达、支流越多,河水污染越严重。若要从根本上阻断污染源,净化河流水质,则需要从严格控制滨河建筑用地发展、提高滨河城镇的营养盐自净能力,改善人-河污染矛盾的角度考虑管控策略与生态保护途径。

相关研究表明,太湖流域在 2000~2005 年经历了以建筑用地急剧扩张、农业用地锐减和林地小幅减少为特征的土地利用结构重大变化,形成了以建设用地、农田与林地为优势的景观类型特征^[51],这

可能会使得太湖入湖河道的营养盐污染负荷急剧增大。本研究利用乌溪港流域 2019 年遥感影像解译出的土地利用分布状况与已有研究利用 2009 年遥感影像解译出的该流域土地利用结构的结果基本一致^[17],表明太湖流域土地利用类型变化不显著。即在太湖流域特别是下游平原河网区对河流水质污染起决定性作用的建筑用地和农业用地变幅不大仍为主要用地类型,流域面源污染得不到根本的改善^[52],河道水质污染问题依旧突出。又随着社会与经济的快速发展,给太湖流域带来了较大的企业聚集度和人口密度^[41],单位面积上的面源污染加剧,入湖河道营养盐负荷难以显著下降。

3.3 平原河网区的河道通航对水质的可能影响

在高污染源强的背景下,平原河网区河道的通

航也会加剧水体污染. 表 3 为各监测点的浊度与颗粒态氮、磷的占比情况, R5 处经常看到货船. 从中可知, 一旦通航, 水体浊度与颗粒态氮、磷的占比就变得非常高, 尤其是下游水体中的磷 70% 以上都是以颗粒态存在. 河道这种长期不稳定的高浑浊状态, 既会削弱河流本身的自净能力, 又会导致底泥的再

悬浮, 从而增加内源释放^[45], 导致水质恶化, 入湖负荷很难下降. 尤其对于磷这种相对保守的元素, 在浅水湖泊的滞留系数高, 一旦进入太湖, 极易在湖泊中累积, 极大增加对太湖的富营养化的潜在危险^[13]. 这也是平原河网区水质污染严重且难以降低的主要原因.

表 3 各监测点浊度与颗粒态氮、磷占比情况

Table 3 Turbidity and the proportion of nitrogen and phosphorus in particles at each monitoring point

项目	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
浊度/NTU	2.50	1.10	2.58	4.49	59.01	53.35	35.33	47.11
PN/TN	0.03	0.05	0.08	0.06	0.15	0.20	0.20	0.14
PP/TP	0.30	0.40	0.55	0.49	0.84	0.81	0.70	0.71

对河道通航的问题, 应设法控制其污染物扩散. 对于污染严重的河道来说尤其是西部的入湖河道, 要严格控制航运的规模、船只航运时间及载重等. 通过优化航线, 保留部分河道作为集中航运的地方, 而对于支流或小河流来说, 则应对重载船只管控. 在通航河段, 可以通过一些水利工程, 如疏浚、深挖河道等来削减悬浮物浓度, 进而降低航运给平原河网区河道营养盐居高不下带来的贡献.

4 结论

(1) 平原河网地区, 不同土地类型的占比情况与河流水质联系紧密. 旱地及建筑用地占比高低是影响河道氮、磷、有机碳及 Chl-a 等水质指标最主要的用地类型, 果园也会增高河道的水质指标, 林地则能起到净化水质的作用.

(2) 平原河网地区湿地型水域用地的不同利用和管理状况对其营养盐效应影响很大. 对氮来说, 河流与水库面积占比的增加能显著降低水体中 DTN 和 NO_3^- -N 浓度, 坑塘与鱼塘面积占比的增加则分别导致水体中 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 浓度的升高; 对磷来说, 河流与鱼塘面积占比的增加会导致 DTP 浓度的升高, 坑塘面积占比的增加则导致水体中 PP 浓度的升高; 鱼塘面积占比的增加也会导致水体 Chl-a 浓度的升高.

参考文献:

[1] 陈洁, 朱广伟, 许海, 等. 不同雨强对太湖河网区河道入湖营养盐负荷影响[J]. 环境科学, 2019, 40(11): 4924-4931. Chen J, Zhu G W, Xu H, et al. Influence of rainfall intensity on the nutrient loading from an inflowing river in the plain river network of the Taihu catchment [J]. Environmental Science, 2019, 40(11): 4924-4931.

[2] 朱金格, 刘鑫, 邓建才, 等. 太湖西部环湖河道污染物输移速率变化特征[J]. 湖泊科学, 2018, 30(6): 1509-1517. Zhu J G, Liu X, Deng J C, et al. Pollutant transport rates in the rivers around western Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(6): 1509-1517.

[3] Qin B Q, Paerl H W, Brookes J D, et al. Why Lake Taihu

continues to be plagued with cyanobacterial blooms through 10 years (2007-2017) efforts [J]. Science Bulletin, 2019, 64(6): 354-356.

[4] 张民, 阳振, 史小丽. 太湖蓝藻水华的扩张与驱动因素[J]. 湖泊科学, 2019, 31(2): 336-344. Zhang M, Yang Z, Shi X L. Expansion and drivers of cyanobacterial blooms in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(2): 336-344.

[5] de Mello K, Valente R A, Randhir T O, et al. Effects of land use and land cover on water quality of low-order streams in Southeastern Brazil: watershed versus riparian zone [J]. CATENA, 2018, 167: 130-138.

[6] You Q H, Fang N, Liu L L, et al. Effects of land use, topography, climate and socio-economic factors on geographical variation pattern of inland surface water quality in China [J]. PLoS One, 2019, 14(6), doi: 10.1371/journal.pone.0217840.

[7] Mirhosseini M, Farshchi P, Noroozi A A, et al. Changing land use a threat to surface water quality: a vulnerability assessment approach in Zanjanroud Watershed, Central Iran [J]. Water Resources, 2018, 45(2): 268-279.

[8] Rimer A E, Nissen J A, Reynolds D E. Characterization and impact of stormwater runoff from various land cover types [J]. Journal WPCF, 1978, 50(2): 252-264.

[9] Mwaijengo G N, Msigwa A, Njau K N, et al. Where does land use matter most? Contrasting land use effects on river quality at different spatial scales [J]. Science of the Total Environment, 2020, 715, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134825.

[10] 田皓予, 佟玲, 余国安, 等. 不同空间尺度河流水质与土地利用关系分析——以泰国蒙河流域为例[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(9): 2036-2047. Tian H Y, Tong L, Yu G A, et al. Relationship between water quality and land use at different spatial scales: a case study of the Mun River basin, Thailand [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(9): 2036-2047.

[11] Zhang J, Li S Y, Jiang C S. Effects of land use on water quality in a River Basin (Daning) of the Three Gorges Reservoir Area, China: watershed versus riparian zone [J]. Ecological Indicators, 2020, 113, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106226.

[12] 许朋柱, 秦伯强. 2001-2002 水文年环太湖河道的水量及污染物通量[J]. 湖泊科学, 2005, 17(3): 213-218. Xu P Z, Qin B Q. Water quantity and pollutant fluxes of the surrounding rivers of Lake Taihu during the hydrological year of 2001-2002 [J]. Journal of Lake Sciences, 2005, 17(3): 213-218.

- [13] 翟淑华, 张红举. 环太湖河流进出湖水量及污染负荷(2000-2002年)[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(3): 225-230.
Zhai S H, Zhang H J. Water quantity and waste load variation of rivers around Lake Taihu from 2000 to 2002[J]. Journal of Lake Sciences, 2006, **18**(3): 225-230.
- [14] 燕姝雯, 余辉, 张璐璐, 等. 2009年环太湖入湖河流水量及污染负荷通量[J]. 湖泊科学, 2011, **23**(6): 855-862.
Yan S W, Yu H, Zhang L L, *et al.* Water quantity and pollutant fluxes of inflow and outflow rivers of Lake Taihu, 2009 [J]. Journal of Lake Sciences, 2011, **23**(6): 855-862.
- [15] 赵林林, 朱广伟, 许海. 太湖梅梁湾理化指标分层的空间分布特征[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(7): 721-727.
Zhao L L, Zhu G W, Xu H. Spatial distribution of the physicochemical parameter stratification in Meiliang Bay, Lake Taihu, China[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, **26**(7): 721-727.
- [16] 辛华荣, 朱广伟, 王雪松, 等. 2009~2018年太湖湖泛强度变化及其影响因素[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4914-4923.
Xin H R, Zhu G W, Wang X S, *et al.* Variation and driving factors of black water event intensity in Lake Taihu during 2009 to 2018 [J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 4914-4923.
- [17] 於梦秋, 蔡颖, 刘华, 等. 太湖流域入湖河流土地利用类型对水质的影响——以乌溪港、武进港为例[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(5): 1024-1032.
Yu M Q, Cai Y, Liu H, *et al.* Impact of land use on water quality along inflow rivers in Taihu basin[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(5): 1024-1032.
- [18] 高斌, 许有鹏, 王强, 等. 太湖平原地区不同土地利用类型对水质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(6): 1186-1191.
Gao B, Xu Y P, Wang Q, *et al.* Effects of land use changes on water quality of the plain area in Taihu Basin [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(6): 1186-1191.
- [19] 李恒鹏, 刘晓玫, 黄文钰. 太湖流域浙西区不同土地类型的面源污染产出[J]. 地理学报, 2004, **59**(3): 401-408.
Li H P, Liu X M, Huang W Y. The non-point output of different landuse types in Zhexi hydraulic region of Taihu Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, **59**(3): 401-408.
- [20] Ding J, Jiang Y, Liu Q, *et al.* Influences of the land use pattern on water quality in low-order streams of the Dongjiang River basin, China: a multi-scale analysis[J]. Science of the Total Environment, 2016, **551-552**: 205-216.
- [21] 徐烨, 杨帆, 颜昌富. 基于景观格局分析的雄安新区湿地生态健康评价[J]. 生态学报, 2020, **40**(20): 7132-7142.
Xu Y, Yang F, Yan C Z. Ecological health assessment of urban wetland in Xiong'an based on landscape pattern [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(20): 7132-7142.
- [22] 彭凌云, 遆超普, 李恒鹏, 等. 太湖流域池塘养殖污染排放估算及其空间分布特征[J]. 湖泊科学, 2020, **32**(1): 70-78.
Peng L Y, Ti C P, Li H P, *et al.* Estimates and characteristics of pollutant discharge from pond cultures in the Taihu Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, **32**(1): 70-78.
- [23] Ai L, Shi Z H, Yin W, *et al.* Spatial and seasonal patterns in stream water contamination across mountainous watersheds: linkage with landscape characteristics[J]. Journal of Hydrology, 2015, **523**: 398-408.
- [24] Alabri Z K, Hussain J, Mabood F, *et al.* Fluorescence spectroscopy-partial least square regression method for the quantification of quercetin in *Euphorbia masirahensis* [J]. Measurement, 2018, **121**: 355-359.
- [25] 连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 等. 典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 5047-5055.
Lian H S, Liu H B, Li X D, *et al.* Characteristics of Nitrogen variation and its response to rainfall: a case study in Wuxi port at Taihu Lake basin[J]. Environmental Science, 2017, **38**(12): 5047-5055.
- [26] 徐洪斌, 吕锡武, 李先宁, 等. 太湖流域农村生活污水污染现状调查研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(S2): 375-378.
Xu H B, Lu X W, Li X N, *et al.* A survey on village sewage pollution in a zone of Tai Lake[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, **26**(S2): 375-378.
- [27] 钱君龙, 府灵敏. 用过硫酸盐氧化法同时测定水中的总氮和总磷[J]. 环境科学, 1987, **8**(1): 81-84.
- [28] 陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(5): 550-552.
Chen Y W, Chen K N, Hu Y H. Discussion on possible error for phytoplankton chlorophyll-a concentration analysis using hot-ethanol extraction method [J]. Journal of Lake Sciences, 2006, **18**(5): 550-552.
- [29] 赵天娇, 王鹏, 徐幸莲. 消费者喜好度与市售冷鲜鸡品质关系的偏最小二乘回归分析[J]. 南京农业大学学报, 2020, **43**(5): 950-958.
Zhao T J, Wang P, Xu X L. Partial least squares regression analysis of the relationship between consumer preference and the quality of chilled chicken on sale [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2020, **43**(5): 950-958.
- [30] 卞振华, 胡敏敏, 袁晓航, 等. 基于偏最小二乘回归法分析五味子抑菌活性部位谱效关系[J]. 中成药, 2019, **41**(11): 2788-2791.
- [31] 申鸽, 景大山, 杨飞, 等. 珍珠透骨草 HPLC 指纹图谱及抗炎活性的谱效关系[J]. 中国实验方剂学杂志, 2019, **25**(12): 174-180.
Shen G, Jing D S, Yang F, *et al.* Correlation analysis between HPLC fingerprint and anti-inflammatory activity of speranskiae tuberculatae herba [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2019, **25**(12): 174-180.
- [32] 张殷俊, 陈爽, 相昌景. 河流近域土地利用格局与水质相关性分析——以巢湖流域为例[J]. 长江流域资源与环境, 2011, **20**(9): 1054-1061.
Zhang Y J, Chen S, Xiang J C. Correlation between the water quality and land use composition in the river side area—a case of Chaohu Lake Basin in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, **20**(9): 1054-1061.
- [33] 查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 等. 太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 1102-1112.
Zha H M, Zhu M Y, Zhu G W, *et al.* Seasonal difference in water quality between lake and inflow/outflow rivers of Lake Taihu, China[J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 1102-1112.
- [34] Xu H, Paerl H W, Qin B Q, *et al.* Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China[J]. Limnology and Oceanography, 2010, **55**(1): 420-432.
- [35] 连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 等. 强降雨对平原河网区入湖河道氮、磷影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4970-4980.
Lian X Q, Zhu G W, Yang W B, *et al.* Effect of heavy rainfall

- on nitrogen and phosphorus concentrations in rivers at river-net plain[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4970-4980.
- [36] 王竹, 刘扬, 王芳, 等. 秦皇岛水质时空分布特征及归因分析[J]. *中国农村水利水电*, 2020, (6): 63-71.
Wang Z, Liu Y, Wang F, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics and evaluation analysis of surface water quality in Qinhuangdao city [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020, (6): 63-71.
- [37] 曹芳芳, 李雪, 王东, 等. 新安江流域土地利用结构对水质的影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(7): 2582-2587.
Cao F F, Li X, Wang D, *et al.* Effects of land use structure on water quality in Xin'anjiang river [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(7): 2582-2587.
- [38] 孙金华, 曹晓峰, 黄艺. 滇池流域土地利用对入湖河流水质的影响[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(12): 2052-2057.
Sun J H, Cao X F, Huang Y. Effect of land use on inflow rivers water quality in lake Dianchi watershed [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(12): 2052-2057.
- [39] 张福平, 赵沙, 周正朝, 等. 沔河流域土地利用格局与水质变化的关系[J]. *水土保持通报*, 2014, **34**(4): 308-312.
Zhang F P, Zhao S, Zhou Z C, *et al.* Relationship between changes of land use pattern and water quality in Fenghe River basin [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, **34**(4): 308-312.
- [40] 卢少勇, 远野, 金相灿, 等. 7条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1497-1502.
Lu S Y, Yuan Y, Jin X C, *et al.* Speciation distribution of nitrogen in sediments of 7 rivers around Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(5): 1497-1502.
- [41] 祖国峰. 环太湖区域水环境现状与问题分析[J]. *科学咨询(科技·管理)*, 2020, (45): 31-32.
- [42] 曾远, 张永春, 范学平. 太湖流域典型平原河网区降雨径流氮磷流失特征分析[J]. *水资源保护*, 2007, **23**(1): 25-27.
Zeng Y, Zhang Y C, Fan X P. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss of rainfall runoff in typical plain river-net area of Taihu Lake Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2007, **23**(1): 25-27.
- [43] 蔡梅, 王元元, 龚李莉, 等. 新一轮太湖流域水环境综合治理的思考和设计[J]. *水利规划与设计*, 2021, (2): 4-6, 45.
Cai M, Wang Y Y, Gong L L, *et al.* Reflections and suggestions on the new round of comprehensive water environment management in Taihu Lake basin [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2021, (2): 4-6, 45.
- [44] 黄道军, 薛睿康, 李凯, 等. 浅层滞缓流水体富营养化成因与防控策略[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2020, **52**(4): 514-519.
Huang D J, Xue R K, Li K, *et al.* Eutrophication and algae bloom in shallow stagnant water bodies: causes and control strategies [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2020, **52**(4): 514-519.
- [45] Zhu M Y, Zhu G W, Zhao L L, *et al.* Influence of algal bloom degradation on nutrient release at the sediment-water interface in Lake Taihu, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(3): 1803-1811.
- [46] 罗永霞. 太湖流域农业源氮排放及其空间特征[D]. 南京: 南京农业大学, 2016. 25-26.
Luo Y X. Nitrogen load of agricultural sources and spatial variations in the Taihu Lake Basin [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. 25-26.
- [47] 李静. 太湖流域农业污染压力评估——以常州市、宜兴市和湖州市为例[D]. 济南: 山东师范大学, 2012. 33-37.
Li J. The pressure evaluation of agricultural pollution in Taihu Lake basin——take Changzhou city, Yixing city and Huzhou city for example [D]. Ji'nan: Shandong Normal University, 2012. 33-37.
- [48] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 太湖流域水污染控制与生态修复的研究与战略思考[J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(3): 193-198.
Nanjing Institute of Geography and Lakes, Chinese Academy of Sciences. Research and strategic thinking for water pollution control and ecological restoration in Taihu Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, **18**(3): 193-198.
- [49] 焦峰. 宜溧河流域水环境分析及污染物输出模拟[D]. 南京: 中国科学院大学, 2003. 20-43.
Jiao F. The analysis on water environment in Yi-Li watershed and simulation of output of pollutants [D]. Nanjing: University of Chinese Academy of Science, 2003. 20-43.
- [50] 高斌. 太湖西苕溪流域土地利用变化对水量水质模拟研究[D]. 南京: 南京大学, 2018. 23-27.
Gao B. Study on the simulation water volume and quality while land use change in Xitiaoxi river basin, Taihu Lake Basin [D]. Nanjing: Nanjing University, 2018. 23-27.
- [51] 万伟华. 土地利用变化对PM_{2.5}浓度的影响及空间效应研究——以长三角核心区为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2019. 24-29.
Wan W H. Effects of land use change on PM_{2.5} concentration and its spatial effects: a case study of the core area of Yangtze River delta [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. 24-29.
- [52] 金洋, 李恒鹏, 李金莲. 太湖流域土地利用变化对非点源污染负荷量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(4): 1214-1218.
Jin Y, Li H P, Li J L. The impact of non-point pollutant load of land-use changes in Taihu basin [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, **26**(4): 1214-1218.

CONTENTS

Continuous PM _{2.5} Composition Measurements for Source Apportionment During Air Pollution Events	CAI Fan-tao, SHANG Yue, DAI Wei, <i>et al.</i> (4575)
Orographic Influences on the Spatial Distribution of PM _{2.5} on the Fen-Wei Plain	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, SUN Cong-jian, <i>et al.</i> (4582)
Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Under Winter Haze Conditions in Central China: A Case Study of Huanggang, Hubei Province	LI Xing-yu, MAO Yao, CHEN Zhan-le, <i>et al.</i> (4593)
Concentration and Reactivity of Carbonyl Compounds in the Atmosphere of North China	HUANG Yu, CHEN Xi, WANG Ying-hong, <i>et al.</i> (4602)
Characteristics of O ₃ Pollution and Key Precursors in Chengdu During Spring	HAN Li, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (4611)
O ₃ Source Characteristics of an Industrial Area in the Yangtze River Delta Based on Boundary Observations	HUANG Qing, HUANG Yin-zhi, ZHANG Shan, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics and Source of VOCs During O ₃ Pollution Between August to September, Langfang Development Zones	ZHANG Jing-qiao, WANG Hong-liang, FANG Xiao-yun, <i>et al.</i> (4632)
Coating-derived VOCs Emission Characteristics and Environmental Impacts from the Furniture Industry in Guangdong Province	ZENG Chun-ling, SHAO Xia, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (4641)
Response of Air Quality to COVID-19 Lockdown in Xiamen Bay	XU Chao, WU Shui-ping, LIU Yi-jing, <i>et al.</i> (4650)
Similarities and Differences of Valley Winds in the Beijing Plain and Yanqing Areas and Its Impact on Pollution	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4660)
Characteristics of Atmospheric Particulate Matter Pollution and the Unique Wind and Underlying Surface Impact in the Twain-Hu Basin in Winter	ZHU Yan, ZHAO Tian-liang, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (4669)
Conversion Characterizations of Sulfate Ion and Nitrate Ion in Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	YANG Liu, HE Qing, SHENG Zhong-yi (4678)
Water Chemical Characteristics and Influence of Exogenous Acids in the Yangtze River Basin	WANG Qi, YU Shi, JIANG Ping-ping, <i>et al.</i> (4687)
Effects of Land Use on Nutrient Concentrations in the Inflow River of Lake Taihu, China	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4698)
Diversity of Zooplankton and Niche Characteristics of Keystone Species in the Weihe River Based on eDNA	LIANG Dong, XIA Jun, SONG Jin-xi, <i>et al.</i> (4708)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical and Personal Care Products in the Aquatic Environment of Sanya City, China	REN Bing-nan, GENG Jing (4717)
Screening of Priority Pollutants and Risk Assessment for Surface Water from Shengjin Lake	GONG Xiong-hu, DING Qi-qi, JIN Miao, <i>et al.</i> (4727)
Long-term Changes and Drivers of Ecological Security in Shahe Reservoir, China	YANG Wen-bin, DUAN Wen-xiu, CUI Yang, <i>et al.</i> (4739)
Seasonal Variation and Influencing Factor Analysis of Antibiotic Resistance Genes in Water Supply Reservoirs of Central China	ZHANG Kai, XIN Rui, LI Kuang-jia, <i>et al.</i> (4753)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of NO ₃ -Type Groundwater in the Rapidly Urbanizing Pearl River Delta	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4761)
Spatial Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water in the Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i> (4772)
Identification of Dredging Depths Based on Sediment Vertical Distribution Profiles of Total Nitrogen and Total Phosphorus and Their Adsorption-desorption Equilibria	ZHOU Ya-ting, CHEN Xing-hong, LI Li-qing, <i>et al.</i> (4781)
Role of Borate and Phosphate Buffers in the Degradation of Organic Compounds in a PMS/Co ²⁺ System; Influencing Factors and Mechanisms	WAN Qi-qi, CHEN Zhu-hao, CAO Rui-hua, <i>et al.</i> (4789)
Degradation 2,2',4,4'-Tetrabromodiphenyl Ether by Activated Peroxymonosulfate Using Magnetic Biochar Supported α -MnO ₂	LI Xin, YIN Hua, LUO Hao-yu, <i>et al.</i> (4798)
Characteristics and Mechanisms of Bacteriophage MS2 Inactivation in Water by UV Activated Sodium Persulfate	ZHANG Chong-miao, YANG Hao-ming, WANG Zhen (4807)
Adsorption Characteristics of Phosphate on Cerium Modified Water Hyacinth Biochar	WANG Guang-ze, ZENG Wei, LI Shuai-shuai (4815)
Removal Efficiency and Mechanism of Ammonia Nitrogen in a Low Temperature Groundwater Purification Process	LI Dong, LIU Meng-hao, ZHANG Rui-miao, <i>et al.</i> (4826)
Speciation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal(loid)s in the Municipal Sewage Sludge of China	GENG Yuan-meng, ZHANG Chuan-bing, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (4834)
Meta-analysis of Microbial Communities in the Activated Sludge of Wastewater Treatment Plants Under Different Climate Types	YANG Si-hang, QIN Ze-sheng, LIANG Man-chun (4844)
Partial Nitrification and Anaerobic Ammonia Oxidation Synergistic Denitrification to Remove Nitrogen and Carbon from Domestic Sewage	QIN Yan-rong, YUAN Zhong-ling, ZHANG Ming, <i>et al.</i> (4853)
Cultivation and Performance Analysis of Simultaneous Partial Nitrification, ANAMMOX, and Denitrification Granular Sludge	ZHOU Feng, LIU Yong-di, LI Wei (4864)
Application of Various Methods to Extract Microplastic from Typical Soils in China	ZHAO Xiao-li, LIU Zi-han, CONG Chen-yu, <i>et al.</i> (4872)
Evaluation and Sources of Heavy Metal Pollution in the Surface Soil of the Qaidam Basin	CHEN Liang, ZHANG Xi-ying, TANG Qi-liang, <i>et al.</i> (4880)
Content and Ecological Risks of Heavy Metals in Soil with Different Land Uses in a Rapidly Urbanizing Area	LI Meng-ting, SHEN Cheng, WU Jian, <i>et al.</i> (4889)
Selenium Geochemical Characteristics and Influencing Factors of Paddy Fields in Du'an County, Guangxi	LIU Fei, YANG Ke, XU Ren-ting, <i>et al.</i> (4897)
Carbonized Apple Branches Decrease the Accumulation and Damage of Cadmium on Apple Rootstock by Reducing DTPA-Cd in Soil	DENG Bo, XUN Mi, ZHANG Wei-wei, <i>et al.</i> (4908)
Accumulation and Health Risk of Heavy Metals in Cereals, Vegetables, and Fruits of Intensive Plantations in Hainan Province	YANG Jian-zhou, WANG Zhen-liang, GAO Jian-weng, <i>et al.</i> (4916)
Correlation Analysis among Environmental Antibiotic Resistance Genes Abundance, Antibiotics Concentrations, and Heavy Metals Concentrations Based on Web of Science Searches	MIAO Sun, CHEN Lei, ZUO Jian-e (4925)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Farmland Soil in Yinchuan	ZHANG Xiao-hong, TAO Hong, WANG Ya-juan, <i>et al.</i> (4933)
Effect of Manure from Different Sources on the Leaching of Antibiotics in Soil	LI Bin-xu, ZHU Chang-xiong, SONG Ting-ting, <i>et al.</i> (4942)
Analysis of the Traits of Nitrogen Metabolism Pathways for Several Forest Soils in Eastern China	LÜ Xue-li, ZHAO Yong-peng, LIN Qing-huo, <i>et al.</i> (4951)
Denitrification Rates and <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria Community Structure Characteristics of Bulk and Rhizosphere Soil in Spring and Summer in the Alpine Wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau	LI Yu-qian, MA Jun-wei, GAO Chao, <i>et al.</i> (4959)
Microbial Community Structure of Soil Methanogens and Methanotrophs During Degradation and Restoration of Reed Wetlands in the Songnen Plain	WANG Qiu-ying, WANG Na, LIU Ying, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Fluvo-aquic Soil Under Different Rotation Fallow	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, DAI Hong-cui, <i>et al.</i> (4977)
Response of Photosynthetic Bacterial Community to Cadmium Contamination in Paddy Soil	LUO Lu-yun, JIN De-cai, WANG Dian-dong, <i>et al.</i> (4988)
Community Distribution of the Rhizospheric and Endophytic Bacteria of <i>Phragmites australis</i> and Their Limiting Factors in Iron Tailings	CAO Man-man, WANG Fei, ZHOU Bei-hai, <i>et al.</i> (4998)
Effects of Combination of Organic and Inorganic Nitrogen on Nitrification and Denitrification in Two Salinized Soils	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, ZHANG Wen-cong, <i>et al.</i> (5010)
Response of Yield, CH ₄ , and N ₂ O Emissions from Paddy Fields to Long-term Elevated CO ₂ Concentrations	YU Hai-yang, SONG Kai-fu, HUANG Qiong, <i>et al.</i> (5021)
Effects of Feedstock Material and Pyrolysis Temperature on Dissolved Organic Matter in Biochars	YAN Dai-hong, MA Ya-pei, SONG Kai-yue, <i>et al.</i> (5030)
Spatiotemporal Variations in Atmospheric Urban Heat Island Effects and Their Driving Factors in 84 Major Chinese Cities	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei (5037)
Research Progress in the Odorants and Their Emissions from Indoor Building Decoration Materials	ZHANG Wan-zhong, ZHANG Peng-yi (5046)