

目次

疫情期间人为源减排对城市大气氧化性的影响 .....朱剑蓝, 秦墨梅, 朱嫣红, 胡建林 (617)

不同天气形势对南京地区双高污染的输送及潜在源区分析 .....秦阳, 胡建林, 孔海江 (626)

不同方法判定南京臭氧生成敏感区的差异 .....陈柑羽, 李勋, 李琳, 秦墨梅, 谢鸣捷, 王鸣, 李婧楠, 胡建林 (635)

2006~2021年夏半年上海臭氧浓度特征及其大气环流背景分析 .....郑庆锋, 梁萍, 段玉森, 林燕芬, 张宋嘉, 徐卫忠 (645)

基于大气成分观测网的山西省近地面O<sub>3</sub>体积分数分布特征 .....李莹, 王淑敏, 裴坤宁, 闫世明, 孙鸿博, 张逢生, 高兴艾 (655)

伊宁市夏季大气臭氧生成机制及减排策略 .....王文婷, 谷超, 李丽明, 李新琪, 郑镇森, 耿春梅, 王晓丽, 杨文 (668)

运城市四季VOCs特征、来源及臭氧形成敏感物种 .....阴世杰, 刘新罡, 刘亚非, 李晨露, 张晨, 张欢, 王正, 程强 (678)

郑州市冬夏季污染过程中大气VOCs污染特征、来源解析及活性分析 .....赖梦洁, 张栋, 于世杰, 宋鑫帅, 李晓, 张瑞芹 (689)

郑州市PM<sub>2.5</sub>中有机酸的污染特征、来源解析及二次生成 .....李子涵, 董喆, 尚璐琪, 孔梓涵, 李晓, 张瑞芹 (700)

中国三大城市群PM<sub>2.5</sub>浓度非线性变化分析 .....吴舒祺, 顾杨阳, 张天岳, 赵文吉 (709)

基于LEAP模型的临港新片区中长期碳排放预测及减排潜力分析 .....吴琼, 马昊, 任洪波, 郭明星, 陈鹏, 李琦芬 (721)

碳交易背景下中国华北地区碳代谢格局变化 .....郑宏媚, 沈方, 许光耀, 关欣 (732)

考虑区域特点和车型差异的氢燃料电池汽车全生命周期减碳预测分析 .....马菁, 蔡旭, 张春梅, 兰利波, 陈轶嵩, 付佩 (744)

我国主要河流水系硝态氮污染特征及定量源解析 .....韦英怀, 胡敏鹏, 陈丁江 (755)

不同时空尺度下土地利用结构与空间格局对苏州水质的影响 .....谭娟, 熊丽君, 王卿, 任志文, 朱丹丹, 王敏 (768)

深圳市2015~2021年雨源型河流水质时空变化及其对降雨的响应 .....韦必颖, 成建梅, 苏晓煜, 程天舜 (780)

河南黄河改道区浅层地下水化学特征与主控污染源解析 .....王帅, 任宇, 郭红, 曹文庚, 李祥志, 肖舜禹 (792)

北京西山岩溶地下水化学特征及成因分析 .....郭高轩, 代垠东, 许亮, 朱琳, 欧志亮, 戚琦, 辛宝东 (802)

店埠河流域地表水-地下水化学特征及其成因分析 .....郑涛, 秦先燕, 吴剑雄 (813)

张家口地区枯水期地下水化学特征及其成因机制分析 .....金爱芳, 殷秀兰, 李长青, 李文娟, 庞菊梅, 金晓媚 (826)

黄河中下游典型抗性细菌及抗性基因污染分布 .....闵威, 高明昌, 孙绍芳, 宋茜茜, 邱立平 (837)

制药废水中抗生素抗性的污染特征、检测手段和控制方法 .....彭安萍, 高虎, 张新波 (844)

水体组分对聚苯乙烯纳米颗粒聚沉行为的影响 .....汤端阳, 郑文丽, 陈关潼一, 陈思莉, 陈尧, 赵晓丽, 汪浩 (854)

富磷废弃钙基生物炭对水体中铅的去除 .....刘天, 吕思璐, 杜兴国, 程敏, 谢燕华 (862)

壳聚糖改性生物炭的制备及其对水溶液中Cd<sup>2+</sup>的吸附机制 .....姜凌, 安靖玥, 岳小琼, 李亚雄, 夏秋乐, 祝婷文佳, 柴丽红 (873)

硼掺杂介孔炭吸附四环素的效能与机制 .....邹震, 许路, 乔伟, 唐茂森, 金鹏康 (885)

磁性含磷油茶壳生物炭对水中磺胺甲噁唑的吸附特性 .....韩帅鹏, 唐李文, 刘勤, 林家亮, 李晓慢, 程建华, 胡勇有 (898)

广东省高分辨率温室气体排放清单及特征 .....卢清, 唐明双, 廖彤, 黄志烟, 钟庄敏, 宋佩珊, 沈劲, 张智胜, 梁小明, 孙家仁, 陈来国 (909)

辽河口“退塘还湿”修复区生态系统CO<sub>2</sub>交换及其环境调控 .....刘思琪, 陈虹, 邢庆会, 程浩, 韩建波, 徐雪梅 (920)

生物炭施用两年后对热带地区稻菜轮作土壤N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>排放的影响 .....胡煜杰, 唐瑞杰, 胡天怡, 陈琦琦, 汤水荣, 阮延正, 孟磊 (929)

生物炭改良盐碱地研究与应用进展 .....魏盈, 焦乐, 张鹏, 刘福德, 肖辉, 董辰辰, 孙红文 (940)

免耕对农田土壤团聚体的影响研究: Meta分析 .....徐芝萍, 饶越悦, 孟艳, 温媛, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (952)

黔中喀斯特地区典型县域碳储量时空演变及多情景模拟预测: 以普定县为例 .....李月, 罗红芬 (961)

不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响 .....李越, 徐曼, 谢永红, 王颖, 黄容, 谢军, 王子芳, 高明 (974)

Ca改性生物炭对土壤磷赋存形态影响及稳定化机制 .....张超, 翟付杰, 单保庆 (983)

秦岭中段不同恢复阶段弃耕农田植物多样性变化及其驱动因素 .....闫成龙, 薛悦, 王艺菲, 康海斌, 王得祥 (992)

我国典型制药厂污染场地中抗生素的污染特征及生态风险 .....杨炳彬, 黄争, 赵建亮, 何良英, 刘有胜, 胡立新, 石义静, 应光国 (1004)

广州市土壤多环芳烃污染特征及风险评估 .....邹子航, 陈莲, 张培珍, 王雨茜, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 (1015)

基于源导向的土壤重金属风险评价及管控因子分析 .....潘泳兴, 陈盟, 王楠楠 (1026)

基于Monte-Carlo模拟的湖南省典型工厂周边农田土壤重金属区域潜在生态风险特征及来源解析 .....罗豪杰, 潘俊, 陈小霞, 张敏, 沈良辰, 李歆, 丁平, 蔡丹, 蔡立梅, 胡国成 (1038)

基于参数优化和蒙特卡罗模拟的砷污染地块健康风险评估 .....袁贝, 刘虎鹏, 杜平, 陈娟, 张云慧, 张昊 (1049)

基于APCS-MLR和PMF模型的赤泥堆场周边耕地土壤重金属污染源解析 .....沈智杰, 李杰芹, 李彩霞, 廖泽源, 梅楠, 罗程钟, 王定勇, 张成 (1058)

PE-Cd复合污染土壤中Cd释放迁移特征及机制 .....王迪, 徐绍辉, 邵明艳, 林青 (1069)

氯代乙烯的厌氧微生物还原脱氯特性 .....李伟, 刘贵平, 刘峻, 吕良华, 乔文静, 余欣, 张晓琦, 蒋建东 (1080)

昭通市农田土壤和蔬菜重金属污染评价及相关性分析 .....张好, 董春雨, 杨海婵, 孙思静, 韩宇, 黄祖志, 张乃明, 包立 (1090)

钝化剂对轻中度镉污染农田的安全利用效果 .....王晓晶, 张东明, 曹阳, 吕家琰, 代允超 (1098)

氧化石墨烯负载铁锰复合材料对镉污染土壤的钝化修复 .....袁婧, 吴骥子, 连斌, 袁峰, 孙淇, 田欣, 赵科理 (1107)

关键生育期施加外源灌溉水对水稻镉吸收转运的影响 .....周霞, 胡雨丹, 周航, 陈琼, 谭文韬, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (1118)

外源锌对镉胁迫下玉米幼苗生长及根系构型分级的影响 .....张辉红, 魏畅, 柳海静, 张静静, 刘芳, 赵颖, 张雪海, 李鸽子, 姜瑛 (1128)

稀土元素铈对镉胁迫下小麦幼苗生长的缓解效应 .....张静静, 徐正阳, 焦秋娟, 范丽娜, 刘芳, 赵颖, 宋佳, 化党领, 李鸽子, 柳海静 (1141)

根施伯克氏菌对小麦镉吸收转运的两段式阻控作用 .....郭佳佳, 王常荣, 刘仲齐, 黄青青, 张长波, 黄永春, 薛卫杰, 孙约兵 (1150)

高密度聚乙烯微塑料与氯嘧磺隆对大豆生长和根际细菌群落的复合胁迫效应 .....胡晓玥, 滑紫微, 姚伦广, 杜丽, 牛秋红, 李玉英, 闫路, 陈兆进, 张浩 (1161)

微塑料的人体富集及毒性机制研究进展 .....包亚博, 王成尘, 彭吾光, 依代倩, 向萍 (1173)

机器学习在微塑料识别与环境风险评估中的应用研究进展 .....白润昊, 范瑞琪, 刘琪, 刘勤, 严昌荣, 崔吉晓, 何文清 (1185)

微塑料与农田土壤中典型污染物的复合污染研究进展 .....侯宇晴, 李冰, 王金花, 宋文慧, 王兰君, 王军, 朱鲁生 (1196)

水中微/纳塑料电化学检测及去除的研究进展 .....郑伟康, 刘振中, 项晓方 (1210)

基于分布式认知理论的农户面源污染治理支付意愿影响因素 .....郭晨浩, 李林霏, 夏显力 (1222)

《环境科学》征订启事(825) 《环境科学》征稿简则(836) 信息(897, 1106, 1149)

# 不同时空尺度下土地利用结构与空间格局对苏州河水质的影响

谭娟<sup>1,2</sup>, 熊丽君<sup>1</sup>, 王卿<sup>1</sup>, 任志文<sup>1</sup>, 朱丹丹<sup>1,3</sup>, 王敏<sup>1\*</sup>

(1. 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 2. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306; 3. 上海师范大学环境与地理科学学院, 上海 200233)

**摘要:** 土地利用与河湖水质的关系存在时空异质性. 以上海苏州河为研究对象, 基于 2001、2005、2010、2015 和 2020 年水质监测和土地利用数据, 提取 5 种空间尺度(200、500、1 000、2 000 和 5 000 m 河段缓冲区)的景观格局指数, 采用相关分析和冗余分析, 研究了多时空尺度下苏州河水质与缓冲带土地利用构成和空间格局特征的响应关系. 结果表明: ①苏州河水质近 20 年呈逐步改善趋势, TN 是当前水体主要污染物. ②不同尺度缓冲带土地利用均以建设用地为主, 绿地林地占比呈小幅增长趋势. ③缓冲带土地利用景观特征与水质存在关联性, 并表现出时间和空间尺度效应. 时间尺度上, 建设用地、农业用地、景观优势度、聚集度和多样性指数与各项水质参数呈现出显著的相关性. 就  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 和 TN 而言, 2010 年呈现出与其他年份相反的相关关系. 2001 年土地利用景观特征对水质的总解释率最高, 为 93.65%. 近 10 年来, 绿地林地对水质的调控作用凸显. ④空间尺度上, 绿地林地、斑块数量、景观形状和多样性指数与大部分水质指标呈现出显著的相关性. 绿地林地对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 和 TN 的正调控效应均以 2 000 m 尺度最强. 斑块数量和景观形状指数在较大空间尺度上对水质的调控作用相对较强, 而香农多样性指数则在小尺度上对水质起到较好的正调控作用. 2 000 m 尺度下土地利用景观特征对水质总解释率最高, 为 68.47%. 研究表明, 增加 2 000 m 缓冲区内绿地林地的面积并优化其景观配置将对苏州河水质保护具有积极作用.

**关键词:** 水质; 土地利用; 景观格局; 空间尺度; 苏州河

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)02-0768-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202303032

## Effects of Land Use Structure and Spatial Pattern at Different Temporal and Spatial Scales on Water Quality in Suzhou Creek

TAN Juan<sup>1,2</sup>, XIONG Li-jun<sup>1</sup>, WANG Qing<sup>1</sup>, REN Zhi-wen<sup>1</sup>, ZHU Dan-dan<sup>1,3</sup>, WANG Min<sup>1\*</sup>

(1. Shanghai Academy of Environmental Science, Shanghai 200233, China; 2. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. School of Environmental and Geographic Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** Relationships between land use and water quality of rivers and lakes vary spatially and temporally. These variations were analyzed using spatial analysis and mathematical statistical methods for the Suzhou Creek in Shanghai. Based on the data of water quality and land use in 2001, 2005, 2010, 2015, and 2020, five spatial scales (200, 500, 1 000, 2 000, and 5 000 m reach buffer) of the landscape pattern were extracted using correlation and redundancy analysis to explore the impact of land use composition and spatial pattern on water quality at different spatial and temporal scales. The results showed that: ① the water quality of Suzhou Creek has gradually improved in the past 20 years; other indicators were between Class II to Class IV in 2020 except TN, and TN was the main pollutant. ② The main land use type of the buffer zone was construction land, and the proportion of greenland and woodland showed a small growth trend. ③ The water quality was closely related to landscape pattern, showing temporal and spatial scale effects. On the time scale, indicators such as construction land, agricultural land, landscape dominance, aggregation, and diversity had significant correlations with various water quality parameters, and there was an inverse correlation in 2010 compared with that in other years for  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , TP, and TN. The landscape pattern in 2001 had the greatest explanation for water quality, with an explanation rate of 93.65%. The impact of greenland and woodland on water quality has begun to emerge in the past 10 years. ④ On the spatial scale, there were significant correlations between greenland and woodland, patch number, landscape shape index, diversity index, and water quality. There was a strong positive regulatory effect of greenland and woodland on  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , TP, and TN at the scale of 2 000 m. The patch number and landscape shape index had relatively strong regulatory effects on water quality on a larger spatial scale, whereas the Shannon diversity index had a better positive regulatory effect on water quality on a small scale. The landscape pattern within a buffer of 2 000 m had the highest interpretation degree for all factors, with an explanation rate of 68.47%. The study showed that rationally planning the proportion of greenland and woodland within the 2 000 m buffer zone and optimizing its landscape configuration is an important measure to purify the surface water quality of Suzhou Creek.

**Key words:** water quality; land use; landscape pattern; spatial scale; Suzhou Creek

水生生态系统退化是当前全球性环境问题<sup>[1]</sup>. 城市扩张导致的土地利用变化往往通过影响地表径

流、水文循环和生态过程等对水生生态系统产生影响<sup>[2-6]</sup>. 近几十年来, 中国的河流面临着城市化快速

收稿日期: 2023-03-03; 修订日期: 2023-05-04

基金项目: 上海市自然科学基金项目(22ZR1453300); 国家自然科学基金项目(51979168); 上海市“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目(22dz1202100); 上海市生态环境局科研项目(沪环科[2021]第11号)

作者简介: 谭娟(1987~), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为土地利用变化的河湖水生生态效应, E-mail: ygy871014@163.com

\* 通信作者, E-mail: wangm@saes.sh.cn

发展导致的严重水质受损问题<sup>[7]</sup>。因此,探讨土地利用对水质的影响,对城市规划管理及水环境保护具有重要意义。

自 20 世纪 70 年代以来,土地利用变化对水质的影响一直备受关注<sup>[7,8]</sup>,研究内容从土地利用构成与水质的关联<sup>[9,10]</sup>逐步发展到景观配置(斑块大小、形状、连通性和多样性等)对水质的影响<sup>[11,12]</sup>。前者侧重于组成单元的多样性,后者侧重于空间构型特征,如何准确评估二者对水质的影响是当前研究热点<sup>[13]</sup>。已有研究发现建设用地、林地、耕地和草地与水质相关性较强,普遍表现为建设用地对水质具有负面影响,绿地对水质具有正调控效应,而耕地对水质的影响往往具有复杂性<sup>[14-16]</sup>。景观格局特征中,代表破碎度、聚集度及多样性特征的景观指数与水质关系显著。Ouyang 等<sup>[17]</sup>研究发现斑块密度和边缘密度对水质影响相对较大,崔丹等<sup>[18]</sup>的研究发现连通性指数、聚集度指数对水质的贡献率较高。此外,土地利用景观特征对水质的影响存在空间尺度效应<sup>[19]</sup>,扰动空间尺度包括流域、子流域、河岸带和局部区域。一般认为,高阶河流的水质主要受上游地区土地利用的影响,而低阶河流的水质主要取决于局部的土地利用模式<sup>[20]</sup>。例如, Mello 等<sup>[21]</sup>研究发现 Sarapuí River 流域的土地利用对水质的影响以子流域尺度大于河岸带尺度。曹灿等<sup>[22]</sup>研究发现 300 m 缓冲区尺度景观格局对艾比湖水质的影响最为显著。综上,土地利用对地表水环境调控的最优空间尺度通常受到研究区域独特的地理特征及人类干扰强度等多方面影响,目前尚未形成共识。因此,探讨更多典型区域空间尺度土地利用对水质的影响对区域水环境保护和土地合理开发规划具有重要意义。

随着人口增长和城市化加剧,水资源污染引起的水质型缺水逐渐成为影响上海社会、经济和环境可持续发展的制约因素<sup>[23]</sup>。上海高度城市化地区下垫面复杂,平原河网水系密布使得水质对土地利用模式的响应更为敏感复杂<sup>[24]</sup>,响应结果可能与其他区域截然不同<sup>[25]</sup>。苏州河是上海城市文明发展的中心,被誉为上海的“母亲河”,其水质状况一直是关注重点,但现有研究多集中在治理修复关键技术<sup>[26]</sup>及效果评价<sup>[27]</sup>方面。关于城市化过程伴随着整治工程实施而带来的土地利用模式改变对水质时空动态变化的影响研究鲜见报道。因此,选取苏州河为研究对象,基于航空遥感影像提取土地利用类型并分析景观格局指数,结合水质监测数据,分析近 20 年来多时空尺度下土地利用及景观配置对苏州河水环境的影响,以期对苏州河水质提升及水生态功能恢复提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

苏州河是黄浦江的最大支流,全长 125 km,其中,上海市境内河长约 53 km,西起于北新泾东至外白渡桥东侧(E121.187°~121.497°,N31.249°~31.281°),汇入黄浦江(图 1)。区域属北亚热带季风性气候,四季分明,日照充分,雨量充沛。年平均气温 17.5℃,日照 1 534.7 h,降水量 1 512.8 mm。全年 70% 左右的雨量集中在 5~9 月的汛期。水文资料显示,苏州河口平均高潮位为 3.12 m,平均低潮位为 1.29 m,平均潮位为 2.21 m。河面宽度平均 50~80 m,河口段最宽达 130 m。20 世纪初民族工业沿河蓬勃发展,苏州河沿岸成为上海乃至中国近现代工业文明的重要发源地,开始出现季节性水质恶化,1949 年以后,苏州河沿岸工业厂房密集且人口集中,水质污染加重,至 70 年代末严重污染,全线黑臭,上海市政府于 1998 年开始持续实施大规模苏州河环境综合整治工程,经过 4 期整治,干流水质逐步好转<sup>[28]</sup>。

### 1.2 数据来源

遥感影像数据为 2001、2005、2010、2015 和 2020 年这 5 个时相的航空遥感影像,该影像由上海市航测大队采用机载对地遥感观测设备获得,并由上海市测绘院统一进行地理配准、拼接与正射校正后生成空间分辨率为 0.2 m 的真彩色影像,再经过重采样生成空间分辨率为 1 m 影像后下发。

水质数据为 2001、2005、2010、2015 和 2020 年苏州河 5 个年份 5 个点位的水质监测数据,数据来源于《上海市生态环境质量报告书》,水质监测频次为每月 1 次,取年度平均值进行分析,监测点位如图 1 所示,采样和分析方法参照国家标准<sup>[29]</sup>,选取溶解氧(DO)、高锰酸盐指数、五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、总磷(TP)和总氮(TN)这 6 个代表性水质指标。

### 1.3 分析方法

#### 1.3.1 空间分析

在 ArcGIS 10.2 平台下,参照《城市生态系统中土地利用/土地覆盖》<sup>[30]</sup>标准,通过人机交互式进行判读解译,按工业仓储用地、交通用地、公共建筑用地、居住用地、绿化用地、市政公用设施用地、农业用地、水域用地和其它用地这 9 个大类进行解译。解译后的土地利用采用随机抽样检查方式开展精度验证,分别于 5 个时相在全市选择平均约 1 000 个左右的地面核查点开展地面核查,经检验,总体分类精度达 98% 以上。其中,研究区域其它用地占比极低,在分析中不作研究。进一步将工业仓储用地、交通用

地、公共建筑用地、居住用地和市政公用设施用地合并为建设用地,最终研究区域土地利用分类为:建设用地(JSYD)、农业用地(NYYD)、绿地林地(LDLD)和水体(ST)这4类。

考虑到网状河流流向不定且无法确定明显的上下游关系,因此,采用以监测断面为圆心的圆形缓冲区作为分析单元<sup>[31]</sup>,根据已有水质与土地利用的尺度效应的相关研究为依据确定缓冲区半径<sup>[32,33]</sup>,分别为200、500、1 000、2 000和5 000 m(图1),按照土地利用解译结果提取缓冲区内各土地利用类型面积。

同时,参考已有研究<sup>[34-36]</sup>,从表征景观破碎度、聚集度、优势度和多样性等景观指标中选取6个景

观指数,分别为:斑块数量(NP)、景观形状指数(landscape shape index, LSI)、蔓延度指数(contagion index, CONTAG)、最大斑块占比(largest patch index, LPI)、香农多样性指数(Shannon's diversity index, SHDI)和香农均匀度指数(Shannon's evenness index, SHEI)。其中, NP和 LSI 分别表示景观中斑块的数量和形状,用来表征景观破碎化的程度;CONTAG反映景观不同斑块类型的团聚程度和延展趋势,表征景观类型的聚散性程度;LPI表征优势景观类型;SHDI表示景观类型的丰富度水平;SHEI反映斑块类型分布的均匀程度。上述景观指数由Fragstats 4.2软件在景观水平计算获得。

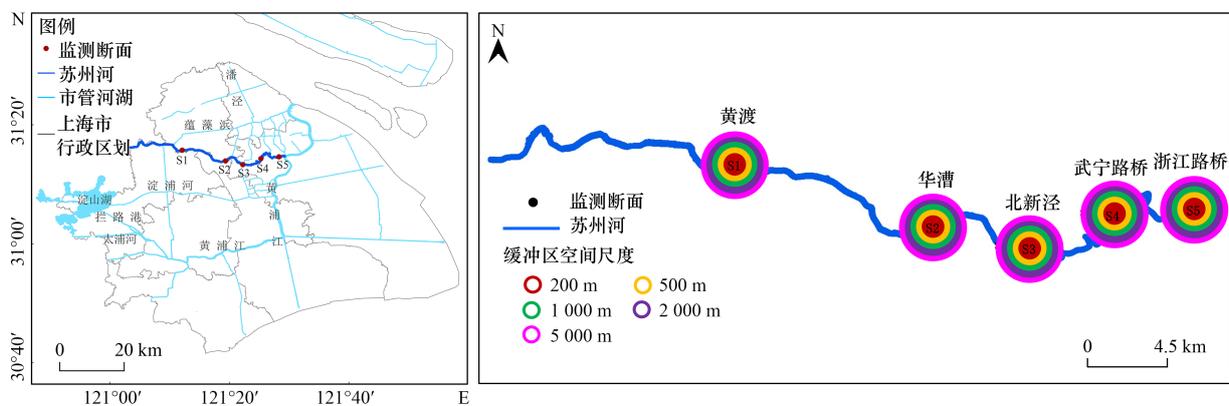


图1 研究区概况、监测断面分布及缓冲区示意  
Fig. 1 Map of the study area, the sampling sites, and the buffer diagram

### 1.3.2 统计分析

利用OriginPro 2021软件开展苏州河水质及景观格局指数变化特征分析,首先对所有变量数据进行K-S检验,符合正态分布,采用Pearson相关系数分析不同时空尺度下土地利用景观特征与水质的相关性。

为进一步反映多个土地利用景观特征指数对水质参数变异的解释能力,以及单个指数对水质变化的方差贡献率,以水质指标为响应变量,以不同年份和不同缓冲区尺度的土地利用构成和景观格局指数为解释变量,运用Canoco 5.0软件进行约束排序分析。首先,采用去趋势对应分析(decoupled correspondence analysis, DCA)确定排序模型,排序轴最大梯度值均小于3,因此,选择冗余分析(redundancy analysis, RDA)探讨不同时空尺度下土地利用景观特征对水质的影响。箭头长度反映土地利用指数对水质指标的解释力度,长度越长表示土地利用指数解释度越强。土地利用指数箭头方向与水质指标箭头方向夹角小于 $90^\circ$ 时,表示两者呈正相关,夹角大于 $90^\circ$ 时,则呈负相关,若夹角接近或等于 $90^\circ$ ,说明两者不存在任何关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 水质变化特征

近20年苏州河水质变化如图2所示,其中, $\rho(\text{DO})$ 在 $1.67\sim 6.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间变化,呈现先降后增趋势;高锰酸盐指数波动范围为 $3.92\sim 7.30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,2001~2015年呈大幅下降趋势,2020年浓度略有回升; $\rho(\text{BOD}_5)$ 波动范围为 $2.20\sim 6.38\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,2001~2010年呈升高趋势,随后大幅下降; $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 波动范围为 $0.53\sim 7.18\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,2001~2005年呈升高趋势,随后逐步下降; $\rho(\text{TP})$ 在 $0.12\sim 0.69\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间变化,2001~2015年呈现往复波动趋势,2020年下降明显; $\rho(\text{TN})$ 波动范围为 $3.08\sim 8.68\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,2001~2015年仅呈小幅下降趋势,至2020年下降明显。至2020年,DO、高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 和TP均达到Ⅲ类水标准, $\text{BOD}_5$ 达到Ⅰ类水标准,TN仍处于劣Ⅴ类。总体而言, $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TP和TN是近20年来苏州河水体主要污染物,随着整治工程实施, $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 和TP改善效果明显,但TN浓度仍偏高,为当前苏州河水体的主要污染物。

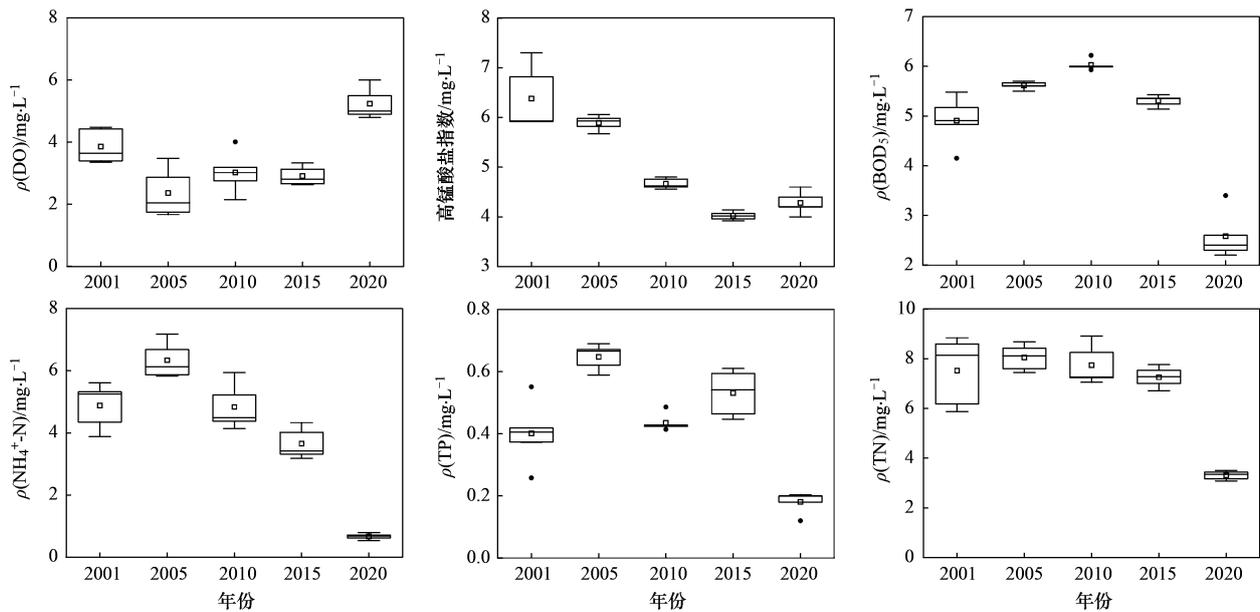


图2 苏州河水质指标动态变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of water quality parameters in Suzhou Creek

## 2.2 土地利用构成和景观格局指数变化特征分析

### 2.2.1 土地利用构成变化特征

不同点位不同缓冲区尺度土地利用构成如图3所示. 随着缓冲区尺度扩大, 建设用地占比呈现先增加后下降趋势, 以500 m缓冲区尺度各点位不同年份建设用地占比均值最高, 为83.47%, 农业用地和绿地林地占比均呈逐步升高趋势, 水体占比呈现逐步降低趋势.

建设用地2001~2010年呈增长趋势, 2010~2020年呈下降趋势, 以2000~2005年增幅最大, 为13.11%; 农业用地2001~2015年呈下降趋势, 以2001~2005年降幅最大, 为61.69%, 2015~2020年有所回升, 增幅为36.44%; 2001~2020年绿地林地呈逐步增长趋势, 以2005~2010年增幅最大, 为109.87%; 水体相对稳定, 占比在8.39%~8.91%之间. 总体上, 建设用地是苏州河缓冲带主要的土地利用类型.

### 2.2.2 景观格局指数变化特征

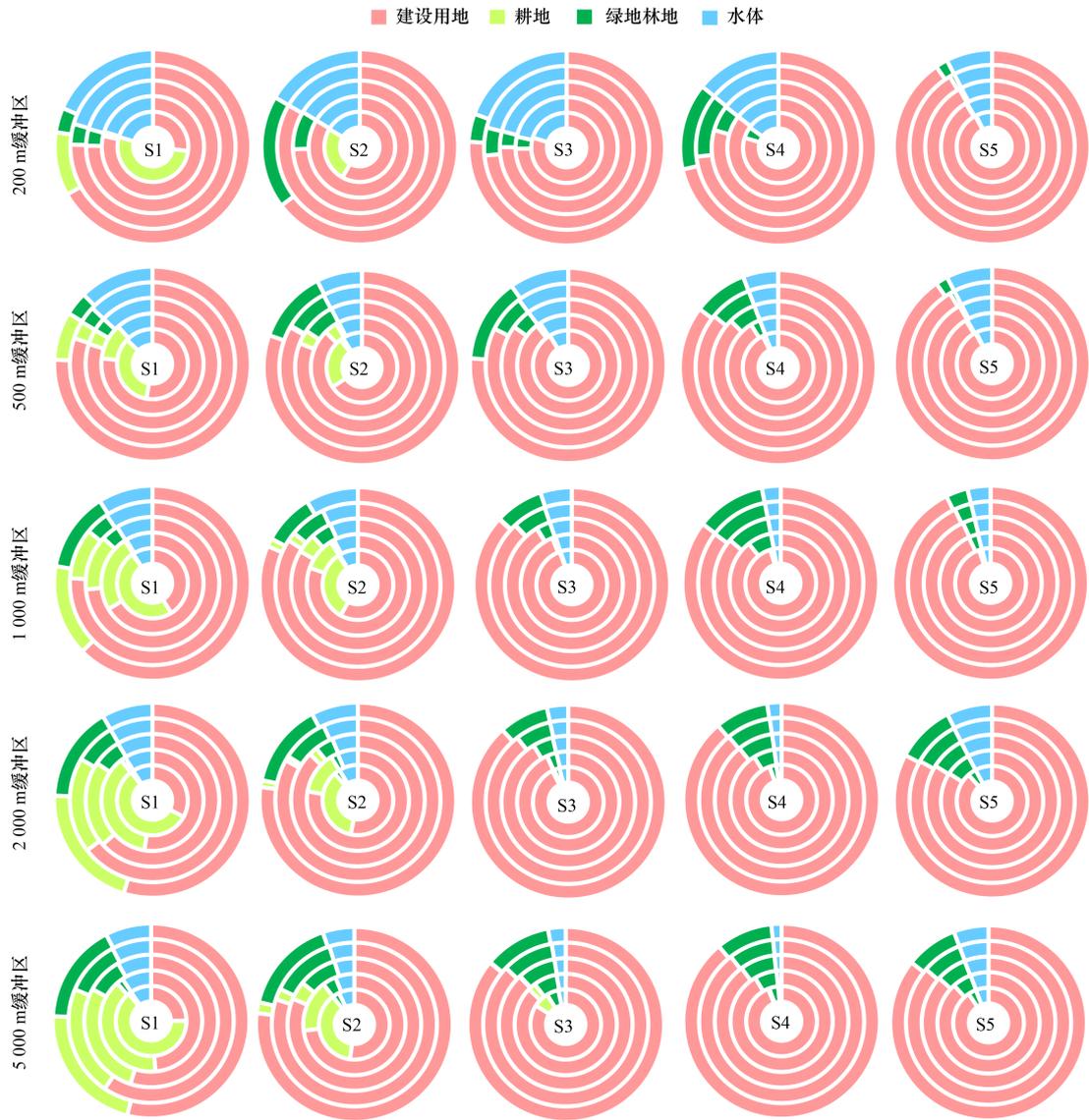
不同时空尺度景观格局指数动态变化如图4所示. 从空间尺度来看, NP和LSI均随着缓冲区尺度扩大而大幅增加, 表明大尺度缓冲区内景观破碎化程度高, 人类干扰活动强; 不同缓冲区尺度LPI相对稳定, 以1000 m缓冲区均值最高; CONTAG在200~1000 m缓冲区内呈增长趋势, 而在2000和5000 m缓冲区尺度其值略有下降, 表明1000 m缓冲区尺度建设用地优势斑块形成了较好的连通性; SHDI和SHEI随着缓冲区尺度增大呈先降后增趋势, 均以200 m缓冲区均值最高, 分别为0.65和0.62, 以1000 m缓冲区尺度均值最低, 分别为0.53和0.41, 表明

200 m缓冲区尺度景观类型丰富且分布相对均匀, 1000 m缓冲区景观异质性相对较低.

从时间尺度来看, NP随时间推移呈增加趋势, 5个年份均值分别为532、578、766、843和934个; LSI呈先降后增趋势, 以2020年值最大, 为9.96; LPI在2001~2010年呈增加趋势, 随后保持相对稳定水平; CONTAG呈先增后降趋势, 2005年值最大, 为69.84, 2020年值最小, 为63.41; SHDI和SHEI均呈先降后增趋势, 均以2020年值最大, 分别为0.66和0.53. 总体而言, 随着时间推移, 人类活动干扰增强, 各缓冲区尺度景观破碎化程度增加.

### 2.3 土地利用构成和景观格局指数与水质的相关性分析

不同时间尺度土地利用构成和景观格局指数与水质的相关性分析如图5所示. DO在不同年份均与JSYD、LPI和CONTAG呈极显著或显著负相关, 与NYVD、SHDI和SHEI呈极显著或显著正相关. 高锰酸盐指数在2001和2010年与JSYD、CONTAG呈极显著负相关, 与NYVD、SHDI和SHEI呈极显著或显著正相关, 2005和2015年则呈相反的相关规律, 2020年, 与JSYD和LPI呈显著正相关, 与SHDI呈显著负相关. BOD<sub>5</sub>仅在2001和2010年与土地利用呈现较强的相关性, 且相关性规律相反. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N在2010年与土地利用景观特征之间的相关性与2001、2005和2015年相反, 2020年未呈现出显著的相关性. TP在2001、2010和2015年与土地利用景观特征呈现较强的相关性, 且2010年与2001和2015年相关关系相反, 2020年仅与LDLD呈极显著正相关. TN呈现出与NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N



各圆环由内至外依次表示 2001、2005、2010、2015 和 2020 年土地利用构成

图 3 苏州河不同点位不同缓冲区尺度土地利用类型占比

Fig. 3 Percentages of land use types in different scale buffer zones at different sampling sites in Suzhou Creek

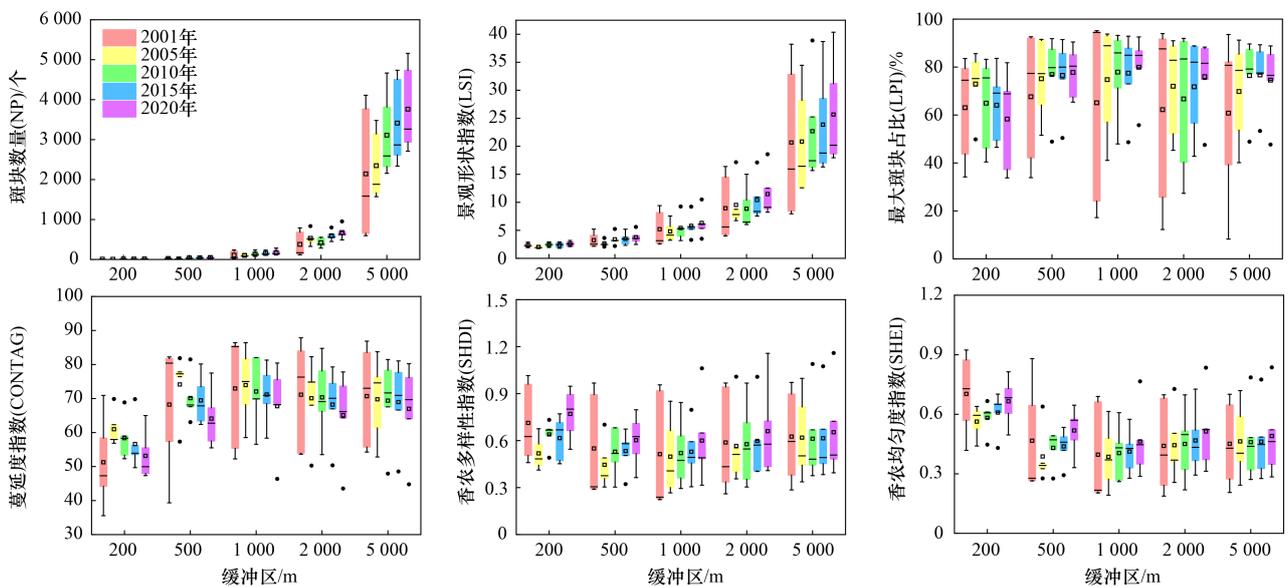


图 4 不同时空尺度景观格局指数动态变化

Fig. 4 Temporal and spatial variation characteristics of landscape pattern metrics

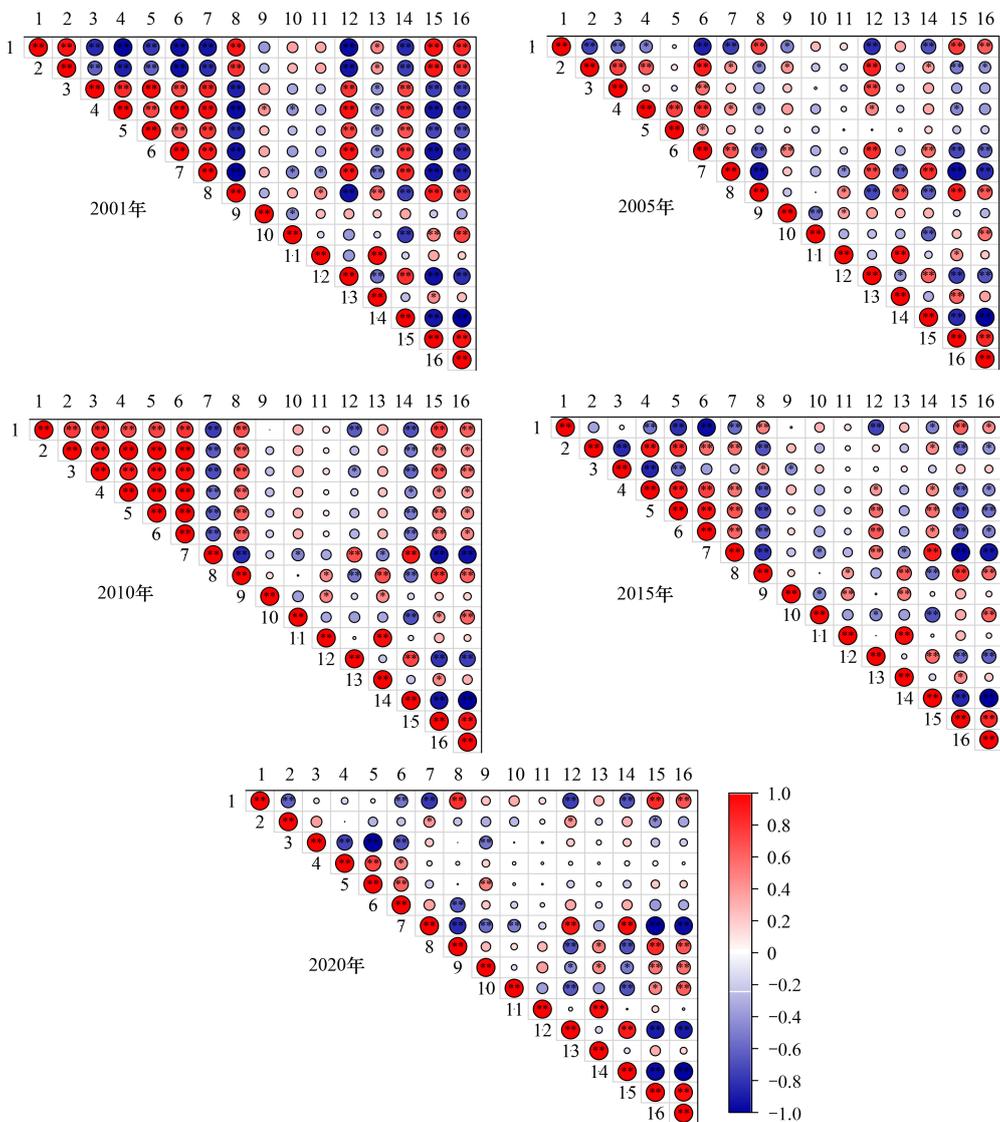
一致的相关性规律。总体而言,不同年份各项水质参数与土地利用构成和景观指数的相关性强度呈现波动趋势,且就  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 和 TN 而言,2010 年呈现出同其它年份相反的相关性。

不同空间尺度土地利用构成和景观指数与水质的相关性分析如图 6 所示。DO 在不同缓冲区尺度均与 JSYD 和 CONTAG 呈极显著或显著负相关,与 LSI、SHDI 和 SHEI 呈极显著或显著正相关,相关性强度随缓冲区尺度扩大呈波动趋势,以 500 m 缓冲区相关性最强。高锰酸盐指数在不同缓冲区尺度均与 NYXD 呈极显著或显著正相关,同样以 500 m 缓冲区相关性最强,与 LDLD 呈极显著负相关,且随着缓冲区尺度扩大相关性增强,与其他景观指数相关性不显著。BOD<sub>5</sub> 在不同缓冲区尺度均与 LDLD 呈极显著或显著负相关,同样以 500 m 缓冲区负相关性最强,在 200 m

缓冲区尺度与 CONTAG 呈显著正相关,与 SHDI 和 SHEI 呈显著负相关。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 和 TN 在不同缓冲区尺度均与 LDLD、NP 呈极显著或显著负相关,其中,LDLD 均以 2 000 m 尺度相关性最强。总体而言,LDLD、NP、LSI 和 SHDI 是在各缓冲区尺度对水质产生普遍影响的因子。就当前水体主要污染物 TN 而言,LDLD、NP 和 LSI 均在 2 000 m 尺度对其影响更大。

### 2.4 土地利用构成和景观格局指数与水质的冗余分析

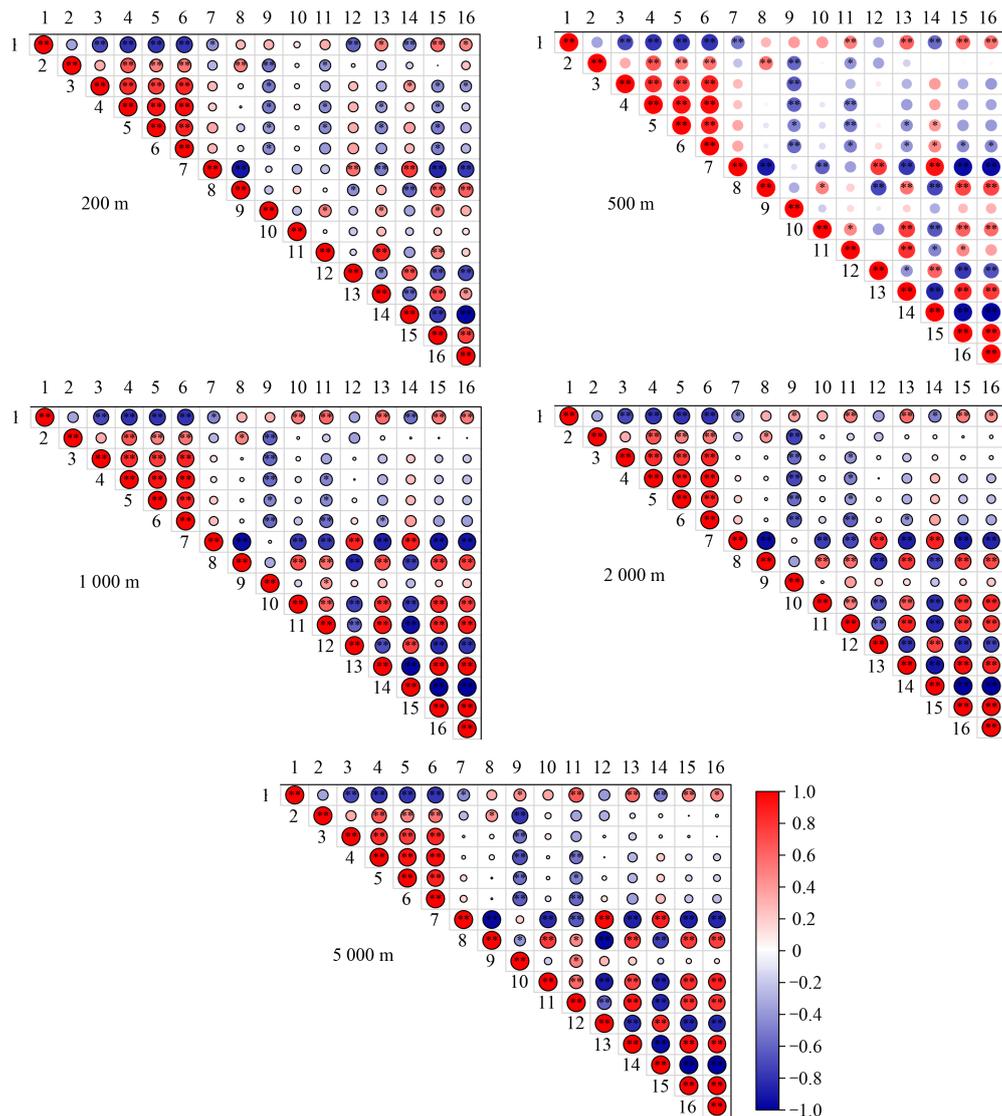
不同年份土地利用构成和景观指数对水质变化的解释能力如表 1 所示。2001、2005、2010、2015 和 2020 年的总解释率分别为 93.65%、75.18%、78.46%、76.21% 和 73.39%。对水质影响较大的解释变量在 2001 和 2010 年均 NYXD(84.1% 和 54.8%)



1. DO, 2. 高锰酸盐指数, 3. BOD<sub>5</sub>, 4.  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , 5. TP, 6. TN, 7. JSYD, 8. NYXD, 9. LDLD, 10. ST, 11. NP, 12. LPI, 13. LSI, 14. CONTAG, 15. SHDI, 16. SHEI; \*表示  $P < 0.05$ , \*\*表示  $P < 0.01$ ; 色柱对应  $P$  值分布范围

图 5 不同年份水质指标与土地利用构成/景观指数的相关性

Fig. 5 Correlation between water quality index and land use structure/landscape indexes in different years



1. DO, 2. 高锰酸盐指数, 3.  $BOD_5$ , 4.  $NH_4^+-N$ , 5. TP, 6. TN, 7. JSYD, 8. NYXD, 9. LDLD, 10. ST, 11. NP, 12. LPI, 13. LSI, 14. CONTAG, 15. SHDI, 16. SHEI; \*表示  $P \leq 0.05$ , \*\*表示  $P \leq 0.01$ , 色柱对应  $P$  值分布范围

图6 不同缓冲区尺度水质指标与土地利用构成/景观指数的相关性

Fig. 6 Correlation between water quality index and land use structure/landscape indexes in different scale buffer zones

和SHDI(5.6%和13.7%),在2005年为LPI和JSYD,贡献率分别为64.2%和8.7%,在2020年为SHDI和LDLD,贡献率分别为26.3%和18.3%。总体而言,近10年来,LDLD对水质的调控效应开始显现。

不同年份土地利用构成和景观指数与水质指标的RDA排序如图7所示。2001年,DO和高锰酸盐指数与JSYD、LPI和CONTAG呈负相关,与NYXD、LSI、SHDI和SHEI呈正相关,而其它水质参数则与JSYD、LPI和CONTAG呈正相关,与NYXD、LSI、SHDI和SHEI呈负相关。2005年,DO与JSYD、LPI和CONTAG呈负相关,与NYXD、SHDI和SHEI呈正相关,其它水质指标则呈现出与DO完全相反的相关性。2010年,所有水质指标均与JSYD和CONTAG呈负相关,与NYXD、SHDI和SHEI呈正相关。2015年,大部分水质参数与JSYD、NYXD、LPI、CONTAG、

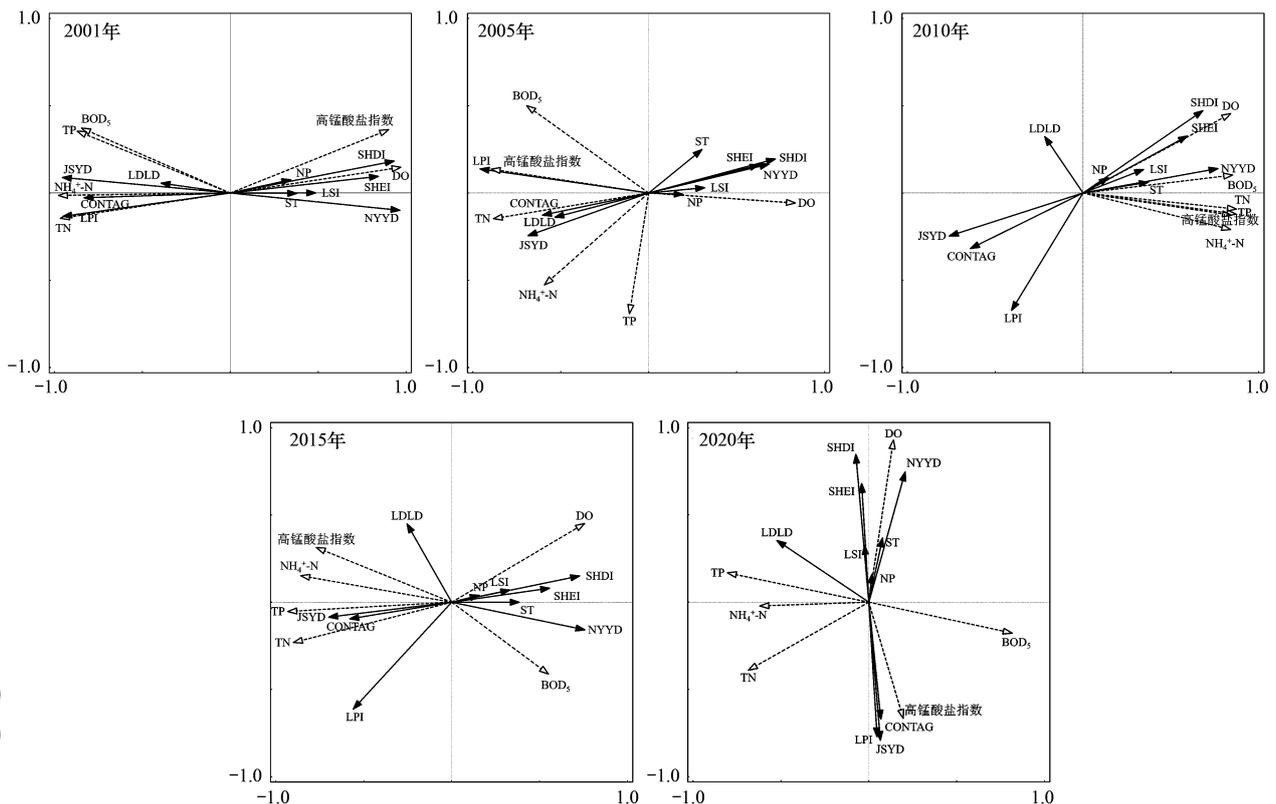
SHDI和SHEI呈现出一定的相关性。2020年,仅DO与土地利用构成和景观指数呈现较好的相关性。这与不同时间尺度下景观特征与水质指标的相关性分析(图5)的结果一致。

不同空间尺度土地利用构成和景观指数对水质变化的解释能力如表2所示。200、500、1000、2000和5000 m尺度的总解释率分别为47.36%、60.68%、62.76%、68.47%和67.04%,随着缓冲区尺度扩大,总解释率升高,以2000 m尺度最高。LDLD在所有缓冲区尺度均是对水质影响最大的解释变量(41.8%~54.7%)。此外,在200 m尺度,SHDI贡献率仅次于LDLD,为21.6%。500 m和1000 m尺度NP对水质的贡献率仅次于LDLD,分别为23.3%和31.6%。而2000和5000 m尺度,NYYD是仅次于LDLD的解释变量,贡献率分别为12.4%和13.1%。

表 1 不同年份冗余分析的各排序轴的解释率

Table 1 Redundancy analysis results of the interpretation rate of each sorting axis in different years

年份	解释率/%			Pseudo-F	P 值	解释变量(贡献率/%)
	第 1 轴	第 2 轴	所有轴			
2001	85.32	7.31	93.65	24.6	0.002	NYVD(84.1)和 SHDI(5.6)
2005	52.06	17.50	75.18	5.0	0.002	LPI(64.2)和 JSYD(8.7)
2010	72.82	5.02	78.46	6.1	0.004	NYVD(54.8)和 SHDI(13.7)
2015	64.74	90.18	76.21	5.3	0.002	NYVD(48.3)和 LDLD(16.2)
2020	37.07	25.32	73.39	4.6	0.002	SHDI(26.3)和 LDLD(18.3)



实线实心箭头为解释变量,包括JSYD(建设用地占比)、NYVD(农业用地占比)、LDLD(绿地林地占比)、ST(水体占比)、NP(斑块数量)、LPI(最大斑块面积占比)、LSI(景观形状指数)、CONTAG(聚集度指数)、SHDI(香农多样性指数)和SHEI(香农均匀度指数);虚线空心箭头为响应变量,包括DO(溶解氧)、高锰酸盐指数、 $BOD_5$ (生化需氧量)、 $NH_4^+-N$ (氨氮)、TP(总磷)和TN(总氮),下同

图 7 不同年份冗余分析结果排序

Fig. 7 Ordination obtained from redundancy analysis (RDA) results in different years

总体而言,较大缓冲区尺度土地利用构成与景观指数对水质的影响更大,且LDLD是主要影响因素。

不同空间尺度土地利用构成和景观指数与水质指标的RDA排序如图8所示。200 m尺度,DO与JSYD、LPI和CONTAG呈负相关,与LSI、SHDI和SHEI呈正相关,其它水质参数与LDLD、NP和SHDI呈负相关。500 m和1000 m尺度,DO与JSYD和CONTAG呈负相关,与ST、NP、LSI、SHDI和SHEI呈正相关,其它水质参数与LDLD和NP呈负相关。2000 m和5000 m尺度,DO与JSYD和CONTAG呈负相关,与LDLD、NP、LSI、SHDI和SHEI呈正相关,其它水质参数与LDLD和NP呈负相关。这与不同缓冲区尺度下景观特征与水质指标的相关性分析

(图6)的结果一致。

### 3 讨论

#### 3.1 土地利用结构和空间格局对水质影响的时间尺度效应

已有研究表明,土地利用结构通过调控产汇流过程直接影响河流水质,在径流入河网的过程中,林地和草地等自然景观类型可以有效拦截污染物,而农业用地和建设用地则更多体现出对水质的负面作用<sup>[37-39]</sup>。这与本研究的结果存在差异,本研究中,JSYD和NYVD在不同年份均是对水质产生普遍影响的用地类型,但是并未呈现出完全的负调控效应。其中,JSYD以2010年最为突出,除DO外,JSYD对其它

表 2 不同缓冲区尺度冗余分析的各排序轴的解释率

Table 2 Redundancy analysis results of the interpretation rate of each sorting axis in different scale buffer zones

缓冲区/m	解释率/%			Pseudo-F	P 值	解释变量(贡献率/%)
	第 1 轴	第 2 轴	所有轴			
200	36.67	7.37	47.36	1.5	0.136	LDLD(41.8)和 SHDI(21.6)
500	49.87	6.77	60.68	2.6	0.014	LDLD(46.7)和 NP(23.3)
1 000	50.10	7.97	62.76	2.9	0.012	LDLD(43.5)和 NP(31.6)
2 000	56.78	6.84	68.47	3.7	0.002	LDLD(53.6)和 NYVD(12.4)
5 000	53.83	8.17	67.04	3.6	0.006	LDLD(54.7)和 NYVD(13.1)

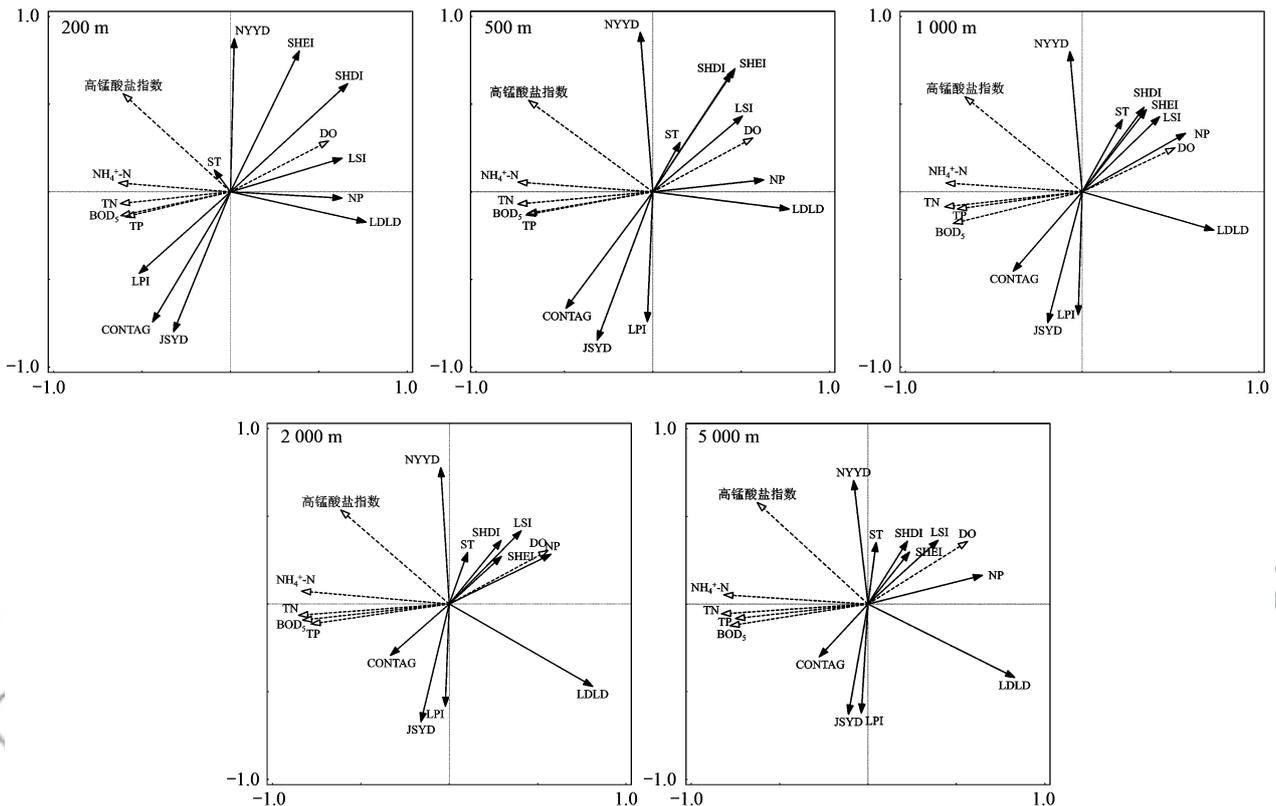


图 8 不同缓冲区尺度冗余分析结果排序

Fig. 8 Ordination obtained from redundancy analysis (RDA) results in different scale buffer zones

水质参数均起到正调控作用. 而 NYVD 则是在 2010 年对各项水质表现出负调控作用, 在其它年份则对水质主要表现出正调控作用. 从景观格局指数来看, LPI、CONTAG、SHDI 和 SHEI 是对水质产生普遍影响的景观指数, 同样以 2010 年对水质的调控作用与其他年份存在较大差异. 因此, 2010 年是土地利用特征对水质调控作用较为不同的年份, 这可能与苏州河前三期整治工程的实施有关, 苏州河前三期整治工程分别于 1999~2002 年、2003~2005 年, 以及 2006~2011 年开展, 重点工程包括污水处理厂、雨水调蓄池、污水管道泵站、支流建闸和公共绿地建设等<sup>[29]</sup>, 这些旨在控源截污的 JSYD 在整治工程实施后, 体现出了对水质的正向调控作用, 而后, 在总体 JSYD 相对稳定的情况下, 其不透水地面加快了污染物的径流的负调控作用又凸显出来. 而 NYVD 尽管在研究区

域占比相对较小, 但对水质具有较强的调控作用, 且除了 2010 年, 其他年份均以正向调控为主, 分析原因, 可能是相对较小的占比使得其作为“源”的作用并不显著, 反而是作为植被覆盖起到了对污染物的拦截作用. 此外, 从冗余分析结果来看, LDLD 在 2015 年和 2020 年对水质的解释贡献率逐步开始凸显, 表明整治工程实施带来的绿地林地面积的增加对水质的调控效应具有一定的滞后性.

### 3.2 土地利用构成和空间格局对水质影响的空间尺度效应.

就空间尺度而言, LDLD 是本研究中对水质产生主要影响的因子, 且对各项水质参数均起到正调控作用. LDLD 占比随着缓冲区尺度扩大而增加, 但对水质的影响并未完全呈现最大尺度缓冲区影响作用最强, 且不同水质指标受 LDLD 影响的空间尺度效应

存在差异,DO和高锰酸盐指数以5 000 m尺度相关性最强,BOD<sub>5</sub>以500 m尺度相关性最强,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP和TN则均以2 000 m尺度相关效应最强。而JSYD作为不同尺度缓冲区内优势用地类型(74.82%~83.47%),它对水质的影响远不及LDLD,仅体现为对DO的负调控作用。这与项颂等<sup>[40]</sup>的研究结论不一致,其研究认为某一尺度下优势地类突出且单一时,该地类对水质的影响更为显著。作为主导用地类型,近20年JSYD变化幅度较小,2000~2020年增幅仅为8.18%,这种基本维持稳定的分布格局使得其在空间尺度上对水质的影响相对较小。而LDLD近20年占比增幅高达470.35%,且建设过程中对景观斑块及廊道连通作用的重视,使得其成为在空间尺度上对水质影响最大的地类。本研究中,NP和LSI是对大部分水质参数产生正调控效应的指标,且随缓冲区尺度扩大调控效应增强。但前人研究认为表征景观破碎度和复杂程度的NP和LSI指标会增加径流过程中污染物的输出,从而导致水质较差<sup>[37,41,42]</sup>。造成这种不一致的原因可能是研究区域建设用地高度集中,使得整体破碎度保持在相对较低的水平,而LDLD斑块数量的增加反而突出了其作为“汇”对污染物的拦截作用<sup>[43,44]</sup>。此外,已有研究表明,水质变化高度依赖于汇流过程中流经的景观类型的多样程度<sup>[39,45,46]</sup>。本研究中,反映景观类型多样性的SHDI指标,在小尺度表现出对水质参数较好的正调控作用,RDA分析结果表明,随着缓冲区尺度扩大,土地利用构成和景观格局指数对水质指标的总解释率增加,以2 000 m尺度最高,说明土地利用特征在大缓冲区尺度对苏州河水质的调控作用更为明显。

#### 4 结论

(1)近20年,苏州河水质总体呈改善趋势,但TN浓度仍偏高,处于劣V类水平。建设用地是苏州河缓冲带主导土地利用类型,占比保持相对稳定,绿地林地呈小幅增长趋势。不同空间尺度,各项景观格局指数变化规律不一致,而时间尺度上的变化表明景观破碎化程度随时间推移而加剧。

(2)不同时间尺度上,JSYD和NYD是对水质产生普遍影响的用地类型,LPI、CONTAG、SHDI和SHEI是对水质产生普遍影响的景观指数。2010年,土地利用景观特征对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP和TN的影响呈现出与其它年份完全相反的规律。2001年,土地利用景观特征对水质的总解释率最高,达93.65%,其它年份总解释率在73.39%~78.46%之间。LDLD对水质的调控作用在近10年逐步显现。

(3)不同空间尺度上,LDLD是对水质产生主要

影响的用地类型,NP、LSI和SHDI是对水质产生普遍影响的景观指数。LDLD对各项水质参数的正调控效应在空间尺度上存在差异。NP和LSI随着缓冲区尺度扩大对大部分水质参数的正调控效应增强。SHDI则在小尺度上对大部分水质参数具有较好的正调控作用。随着缓冲区尺度扩大,土地利用景观特征对水质的总解释率增强,以2 000 m尺度总解释率最高,为68.47%。

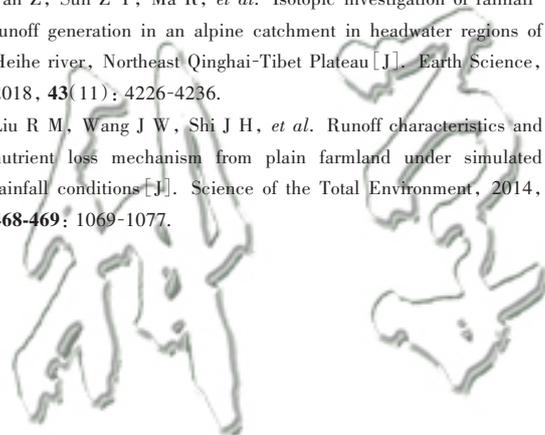
(4)不同缓冲区尺度LDLD占比均较小,但是对水质的影响却是关键的,且近10年来调控作用凸显。因此,应重点关注苏州河缓冲区内绿地林地的景观规划与配置,且以2 000 m缓冲区为最佳尺度,通过增加斑块数量提高LDLD覆盖率,且进一步加强LDLD斑块之间的连通性,以期达到LDLD对水质调控效益最大化。

#### 参考文献:

- [1] Liao H H, Sarver E, Krometis L A H. Interactive effects of water quality, physical habitat, and watershed anthropogenic activities on stream ecosystem health [J]. *Water Research*, 2018, **130**: 69-78.
- [2] Huang J C, Zhang Y J, Bing H J, *et al.* Characterizing the river water quality in China: recent progress and on-going challenges [J]. *Water Research*, 2021, **201**, doi: 10.1016/j.watres.2021.117309.
- [3] Wilson C O. Land use/land cover water quality nexus: quantifying anthropogenic influences on surface water quality [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**(7), doi: 10.1007/s10661-015-4666-4.
- [4] Wu J H, Lu J. Spatial scale effects of landscape metrics on stream water quality and their seasonal changes [J]. *Water Research*, 2021, **191**, doi: 10.1016/j.watres.2021.116811.
- [5] Zhou P, Huang J L, Pontius 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.
- [6] Rimer A E, Nissen J A, Reynolds D E. Characterization and impact of stormwater runoff from various land cover types [J]. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 1978, **50**(2): 252-264.
- [7] Chen X, Strokal M, Van Vliet M T H, *et al.* Multi-scale modeling of nutrient pollution in the rivers of China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(16): 9614-9625.
- [8] White C S. Factors influencing natural water quality and changes resulting from land-use practices [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1976, **6**(1): 53-69.
- [9] 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.
- [10] 宋静雯,张学霞,姜东旸,等.不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的驱动机制[J]. *环境科学*, 2022, **43**(6): 3016-3026.  
Song J W, Zhang X X, Jiang D Y, *et al.* Impact of land use types at different scales on surface water environment quality and its

- driving mechanism [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 3016-3026.
- [11] 张微微, 李晓娜, 王超, 等. 密云水库上游白河地表水质对不同空间尺度景观格局特征的响应[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 4895-4904.
- Zhang W W, Li X N, Wang C, *et al.* Water quality response to landscape pattern at different spatial scales in Baihe river in the upper reaches of the Miyun reservoir [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4895-4904.
- [12] Bu H M, Meng W, Zhang Y, *et al.* Relationships between land use patterns and water quality in the Taizi River basin, China [J]. *Ecological Indicators*, 2014, **41**: 187-197.
- [13] Xiao R, Wang G F, Zhang Q W, *et al.* Multi-scale analysis of relationship between landscape pattern and urban river water quality in different seasons [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**(1), doi: 10.1038/srep25250.
- [14] 李好好, 黄懿梅, 郭威, 等. 河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响[J]. *环境科学*, 2022, **43**(8): 4042-4053.
- Li H H, Huang Y M, Guo W, *et al.* Influence of land use and land cover patterns on water quality at different spatio-temporal scales in Hehuang valley [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(8): 4042-4053.
- [15] 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.
- [16] 郝振纯, 苏振宽. 土地利用变化对海河流域典型区域的径流影响[J]. *水科学进展*, 2015, **26**(4): 491-499.
- Hao Z C, Su Z K. Effects of land use change on runoff in the typical areas in Haihe river basin [J]. *Advances in Water Science*, 2015, **26**(4): 491-499.
- [17] Ouyang W, Song K Y, Wang X L, *et al.* Non-point source pollution dynamics under long-term agricultural development and relationship with landscape dynamics [J]. *Ecological Indicators*, 2014, **45**: 579-589.
- [18] 崔丹, 陈岩, 马冰然, 等. 土地利用/景观格局对水环境质量的影 响[J]. *水科学进展*, 2019, **30**(3): 423-433.
- Cui D, Chen Y, Ma B R, *et al.* Effects of land use /landscape patterns on the water quality [J]. *Advances in Water Science*, 2019, **30**(3): 423-433.
- [19] Shehab Z N, Jamil N R, Aris A Z, *et al.* Spatial variation impact of landscape patterns and land use on water quality across an urbanized watershed in Bentong, Malaysia [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **122**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.107254.
- [20] Song Y, Song X D, Shao G F, *et al.* Effects of land use on stream water quality in the rapidly urbanized areas: a multiscale analysis [J]. *Water*, 2020, **12**(4), doi: 10.3390/w12041123.
- [21] 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.
- [22] 曹灿, 张飞, 阿依尼格·亚力坤, 等. 艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1568-1577.
- Cao C, Zhang F, Ayinigeer·Yalikun, *et al.* Relationship between landscape pattern and water quality in the Ebinur Lake region [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1568-1577.
- [23] Putro B, Kjeldsen T R, Hutchins M G, *et al.* An empirical investigation of climate and land-use effects on water quantity and quality in two urbanising catchments in the southern United Kingdom [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **548-549**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.12.132.
- [24] 刘俊国, 赵丹丹. “量-质-生”三维水资源短缺评价: 评述及展望[J]. *科学通报*, 2020, **65**(36): 4251-4261.
- Liu J G, Zhao D D. Three-dimensional water scarcity assessment by considering water quantity, water quality, and environmental flow requirements: review and prospect [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, **65**(36): 4251-4261.
- [25] Zhao J, Lin L Q, Yang K, *et al.* Influences of land use on water quality in a reticular river network area: a case study in Shanghai, China [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2015, **137**: 20-29.
- [26] Che Y, Yang K, Wu E N, *et al.* Assessing the health of an urban stream: a case study of Suzhou Creek in Shanghai, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, **184**(12): 7425-7438.
- [27] Jiang Y F, Shi T M, Gu X X. Healthy urban streams: the ecological continuity study of the Suzhou Creek corridor in Shanghai [J]. *Cities*, 2016, **59**: 80-94.
- [28] 季永兴, 刘水芹. 苏州河水环境治理20年回顾与展望[J]. *水资源保护*, 2020, **36**(1): 25-30, 51.
- Ji Y X, Liu S Q. Review and prospect of Suzhou Creek water environment treatment in 20 years [J]. *Water Resources Protection*, 2020, **36**(1): 25-30, 51.
- [29] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [30] DB31/T 314-2004, 城市生态系统中土地利用/土地覆盖[S].
- [31] 杨洁, 许有鹏, 高斌, 等. 城镇化下河流水质变化及其与景观格局关系分析——以太湖流域苏州市为例[J]. *湖泊科学*, 2017, **29**(4): 827-835.
- Yang J, Xu Y P, Gao B, *et al.* River water quality change and its relationship with landscape pattern under the urbanization: a case study of Suzhou city in Taihu basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(4): 827-835.
- [32] 温嘉伟, 王鹏, 黄高翔, 等. 土地利用结构与空间格局对鄱阳湖流域中小河流水质的影响[J]. *环境科学*, 2023, **44**(12): 6728-6743.
- Wen J W, Wang P, Huang G X, *et al.* Influence of land use structure and spatial pattern on water quality of small and medium-sized rivers in Poyang Lake basin [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(12): 6728-6743.
- [33] 张志敏, 杜景龙, 陈德超, 等. 典型网状河网区域土地利用和景观格局特征对地表季节水质的影响——以江苏省溧阳市为例[J]. *湖泊科学*, 2022, **34**(5): 1524-1539.
- Zhang Z M, Du J L, Chen D C, *et al.* Effects of land use and landscape pattern characteristics on seasonal surface water quality in a typical reticulated river network area—A case study of Liyang city, Jiangsu Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, **34**(5): 1524-1539.
- [34] 方娜, 刘玲玲, 游清徽, 等. 不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5348-5357.
- Fang N, Liu L L, You Q H, *et al.* Effects of land use types at different spatial scales on water quality in Poyang Lake wetland [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5348-5357.
- [35] Cheng P X, Meng F S, Wang Y Y, *et al.* The impacts of land use patterns on water quality in a Trans-boundary river basin in Northeast China based on eco-functional regionalization [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, **15**(9), doi: 10.3390/ijerph15091872.
- [36] 季香, 刘红玉, 李玉凤, 等. 不同雨强条件下河流水质对流域

- 土地利用类型与格局空间响应[J]. 环境科学, 2016, **37**(6): 2101-2112.
- Ji X, Liu H Y, Li Y F, *et al.* Spatial response of river water quality to watershed land use type and pattern under different rainfall intensities [J]. *Environmental Science*, 2016, **37** (6) : 2101-2112.
- [37] 陈优良, 邹文敏, 刘星根, 等. 东江源流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(11): 5053-5063.
- Chen Y L, Zou W M, Liu X G, *et al.* Scale effects of landscape pattern on water quality in Dongjiang River source watershed [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(11): 5053-5063.
- [38] 徐启渝, 王鹏, 王涛, 等. 土地利用结构与景观格局对鄱阳湖流域赣江水质的影响[J]. 湖泊科学, 2020, **32**(4): 1008-1019.
- Xu Q Y, Wang P, Wang T, *et al.* Investigation of the impacts of land use structure and landscape pattern on water quality in the Ganjiang River, Lake Poyang basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(4): 1008-1019.
- [39] Zhang X Y, Luo Y Z, Goh K S. Modeling spray drift and runoff-related inputs of pesticides to receiving water [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **234**: 48-58.
- [40] 项颂, 庞燕, 窦嘉顺, 等. 不同时空尺度下土地利用对洱海入湖河流水质的影响[J]. 生态学报, 2018, **38**(3): 876-885.
- Xiang S, Pang Y, Dou J S, *et al.* Impact of land use on the water quality of inflow river to Erhai Lake at different temporal and spatial scales [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(3): 876-885.
- [41] Tudesque L, Tisseuil C, Lek S. Scale-dependent effects of land cover on water physico-chemistry and diatom-based metrics in a major river system, the Adour-Garonne basin (South Western France) [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **466-467**: 47-55.
- [42] Yu X B, Hawley-Howard J, Pitt A L, *et al.* Water quality of small seasonal wetlands in the Piedmont ecoregion, South Carolina, USA: Effects of land use and hydrological connectivity [J]. *Water Research*, 2015, **73**: 98-108.
- [43] 杨强强, 徐光来, 杨先成, 等. 青弋江流域土地利用/景观格局对水质的影响[J]. 生态学报, 2020, **40**(24): 9048-9058.
- Yang Q Q, Xu G L, Yang X C, *et al.* Responses of water quality to land use & landscape pattern in the Qingyijiang River watershed [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(24): 9048-9058.
- [44] Li C W, Zhang Y J, Kharel G, *et al.* Impact of climate variability and landscape patterns on water budget and nutrient loads in a peri-urban watershed: A coupled analysis using process-based hydrological model and landscape indices [J]. *Environmental Management*, 2018, **61**(6): 954-967.
- [45] 潘钊, 孙自永, 马瑞, 等. 黑河上游高寒山区降雨-径流形成过程的同位素示踪[J]. 地球科学, 2018, **43**(11): 4226-4236.
- Pan Z, Sun Z Y, Ma R, *et al.* Isotopic investigation of rainfall-runoff generation in an alpine catchment in headwater regions of Heihe river, Northeast Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Earth Science*, 2018, **43**(11): 4226-4236.
- [46] Liu R M, Wang J W, Shi J H, *et al.* Runoff characteristics and nutrient loss mechanism from plain farmland under simulated rainfall conditions [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **468-469**: 1069-1077.



## CONTENTS

Impacts of Anthropogenic Emission Reduction on Urban Atmospheric Oxidizing Capacity During the COVID-19 Lockdown	ZHU Jian-lan, QIN Mo-mei, ZHU Yan-hong, <i>et al.</i>	( 617 )
Transport and Potential Sources Regions of Double High Pollution in Nanjing by Different Synoptic Situations	QIN Yang, HU Jian-lin, KONG Hai-jiang	( 626 )
Differences of Three Methods in Determining Ozone Sensitivity in Nanjing	CHEN Gan-yu, LI Xun, LI Lin, <i>et al.</i>	( 635 )
Characteristics of Ozone Concentration in Shanghai and Its Associated Atmospheric Circulation Background During Summer Half-years from 2006 to 2021	ZHENG Qing-feng, LIANG Ping, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i>	( 645 )
Distribution Characteristics of Near Surface Ozone Volume Fraction in Shanxi Province Based on Atmospheric Composition Observation Network	LI Ying, WANG Shu-min, PEI Kun-ning, <i>et al.</i>	( 655 )
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in Yining City	WANG Wen-ting, GU Chao, LI Li-ming, <i>et al.</i>	( 668 )
Characteristics, Sources, and Ozone-sensitive Species of VOCs in Four Seasons in Yuncheng	YIN Shi-jie, LIU Xin-gang, LIU Ya-fei, <i>et al.</i>	( 678 )
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Activity Analysis of Atmospheric VOCs During Winter and Summer Pollution in Zhengzhou	LAI Meng-jie, ZHANG Dong, YU Shi-jie, <i>et al.</i>	( 689 )
Pollution Characteristics, Sources, and Secondary Generation of Organic Acids in PM <sub>2.5</sub> in Zhengzhou	LI Zi-han, DONG Zhe, SHANG Lu-qi, <i>et al.</i>	( 700 )
Nonlinear Variations in PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Three Major Urban Agglomerations in China	WU Shu-qi, GU Yang-yang, ZHANG Tian-yue, <i>et al.</i>	( 709 )
Medium and Long-term Carbon Emission Projections and Emission Reduction Potential Analysis of the Lingang Special Area Based on the LEAP Model	WU Qiong, MA Hao, REN Hong-bo, <i>et al.</i>	( 721 )
Dynamic Analysis on Carbon Metabolism of the Northern Region of China Under the Background of Carbon Emission Trading Policy	ZHENG Hong-mei, SHEN Fang, XU Guang-yao, <i>et al.</i>	( 732 )
Carbon Reduction Analysis of Life Cycle Prediction Assessment of Hydrogen Fuel Cell Vehicles: Considering Regional Features and Vehicle Type Differences	MA Jing, CAI Xu, ZHANG Chun-mei, <i>et al.</i>	( 744 )
Nitrate Pollution Characteristics and Its Quantitative Source Identification of Major River Systems in China	WEI Ying-huai, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang	( 755 )
Effects of Land Use Structure and Spatial Pattern at Different Temporal and Spatial Scales on Water Quality in Suzhou Creek	TAN Juan, XIONG Li-jun, WANG Qing, <i>et al.</i>	( 768 )
Spatial-temporal Variation in Water Quality of Rain-source Rivers in Shenzhen from 2015 to 2021 and Its Response to Rainfall	WEI Bi-ying, CHENG Jian-mei, SU Xiao-yu, <i>et al.</i>	( 780 )
Chemical Characteristics of Shallow Groundwater in the Yellow River Diversion Area of Henan Province and Identification of Main Control Pollution Sources	WANG Shuai, REN Yu, GUO Hong, <i>et al.</i>	( 792 )
Chemical Characteristics and Genetic Analysis of Karst Groundwater in the Beijing Xishan Area	GUO Gao-xuan, DAI Yin-dong, XU Liang, <i>et al.</i>	( 802 )
Hydrochemical Characteristics and Its Origin of Surface Water and Groundwater in Dianbu River Basin	ZHENG Tao, QIN Xian-yan, WU Jian-xiong	( 813 )
Hydrochemical Characteristics and Genesis Mechanism of Groundwater in the Dry Period in the Zhangjiakou Area	JIN Ai-fang, YIN Xiu-lan, LI Chang-qing, <i>et al.</i>	( 826 )
Distribution of Typical Resistant Bacteria and Resistance Genes in Source Water of the Middle and Lower Reaches of the Yellow River	MIN Wei, GAO Ming-chang, SUN Shao-fang, <i>et al.</i>	( 837 )
Contamination Characteristics, Detection Methods, and Control Methods of Antibiotic Resistance in Pharmaceutical Wastewater	PENG An-ping, GAO Hu, ZHANG Xin-bo	( 844 )
Effect of Water Components on Aggregation and Sedimentation of Polystyrene Nano-plastics	TANG Duan-yang, ZHENG Wen-li, CHEN Guan-tong-yi, <i>et al.</i>	( 854 )
Lead Removal from Water by Calcium-containing Biochar with Saturated Phosphate	LIU Tian, LÜ Si-lu, DU Xing-guo, <i>et al.</i>	( 862 )
Preparation of Chitosan-modified Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd <sup>2+</sup> in Aqueous Solution	JIANG Ling, AN Jing-yue, YUE Xiao-qiong, <i>et al.</i>	( 873 )
Efficacy and Mechanism of Tetracycline Adsorption by Boron-doped Mesoporous Carbon	ZOU Zhen, XU Lu, QIAO Wei, <i>et al.</i>	( 885 )
Adsorption Properties of Magnetic Phosphorous Camellia Oleifera Shells Biochar to Sulfamethoxazole in Water	HAN Shuai-peng, TANG Li-wen, LIU Qin, <i>et al.</i>	( 898 )
High Resolution Emission Inventory of Greenhouse Gas and Its Characteristics in Guangdong, China	LU Qing, TANG Ming-shuang, LIAO Tong, <i>et al.</i>	( 909 )
Ecosystem CO <sub>2</sub> Exchange and Its Environmental Regulation of a Restored Wetland in the Liaohe River Estuary	LIU Si-qi, CHEN Hong, XING Qing-hui, <i>et al.</i>	( 920 )
Effects of Biochar Application Two Years Later on N <sub>2</sub> O and CH <sub>4</sub> Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region of China	HU Yu-jie, TANG Rui-jie, HU Tian-yi, <i>et al.</i>	( 929 )
Research and Application Progress of Biochar in Amelioration of Saline-Alkali Soil	WEI Ying, JIAO Le, ZHANG Peng, <i>et al.</i>	( 940 )
Effect of No-tillage on Soil Aggregates in Farmland: A Meta Analysis	XU Yi-ping, RAO Yue-yue, MENG Yan, <i>et al.</i>	( 952 )
Spatio-temporal Evolution and Multi-scenario Simulation of Carbon Storage in Karst Regions of Central Guizhou Province: Taking Puding County as an Example	LI Yue, LUO Hong-fen	( 961 )
Effects of Different Modifiers on Aggregates and Organic Carbon in Acidic Purple Soil	LI Yue, XU Man, XIE Yong-hong, <i>et al.</i>	( 974 )
Effect of Ca Modified Biochar on the Chemical Speciation of Soil Phosphorus and Its Stabilization Mechanism	ZHANG Chao, ZHAI Fu-jie, SHAN Bao-qing	( 983 )
Plant Diversity Changes and Its Driving Factors of Abandoned Land at Different Restoration Stages in the Middle of the Qinling Mountains	YAN Cheng-long, XUE Yue, WANG Yi-fei, <i>et al.</i>	( 992 )
Contamination Characteristics and Ecological Risk of Antibiotics in Contaminated Sites of Typical Pharmaceutical Factories in China	YANG Jiong-bin, HUANG Zheng, ZHAO Jian-liang, <i>et al.</i>	( 1004 )
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Guangzhou	ZOU Zi-hang, CHEN Lian, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i>	( 1015 )
Quantifying the Contribution of Soil Heavy Metals to Ecological and Health Risk Sources	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong	( 1026 )
Potential Ecological Risk Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils around Typical Factories in Hunan Province Based on Monte-Carlo Simulation	LUO Hao-jie, PAN Jun, CHEN Xiao-xia, <i>et al.</i>	( 1038 )
Health Risk Assessment for an Arsenic-contaminated Site Based on Monte Carlo Simulation and Parameters Optimization	YUAN Bei, LIU Hu-peng, DU Ping, <i>et al.</i>	( 1049 )
Pollution Source Apportionment of Heavy Metals in Cultivated Soil Around a Red Mud Yard Based on APCS-MLR and PMF Models	SHEN Zhi-jie, LI Jie-qin, LI Cai-xia, <i>et al.</i>	( 1058 )
Characteristics and Mechanism of Cd Release and Transport in Soil Contaminated with PE-Cd	WANG Di, XU Shao-hui, SHAO Ming-yan, <i>et al.</i>	( 1069 )
Characterization of Reductive Dechlorination of Chlorinated Ethylenes by Anaerobic Consortium	LI Wei, LIU Gui-ping, LIU Jun, <i>et al.</i>	( 1080 )
Analysis of Heavy Metal Pollution Evaluation and Correlation of Farmland Soil and Vegetables in Zhaotong City	ZHANG Hao, DONG Chun-yu, YANG Hai-chan, <i>et al.</i>	( 1090 )
Safe Utilization Effect of Passivator on Mild to Moderate Cadmium Contaminated Farmland	WANG Xiao-jing, ZHANG Dong-ming, CAO Yang, <i>et al.</i>	( 1098 )
Simultaneous Immobilization of Cadmium and Arsenic in Paddy Soils with Novel Fe-Mn Combined Graphene Oxide	YUAN Jing, WU Ji-zi, LIAN Bin, <i>et al.</i>	( 1107 )
Effects of the Application of Irrigation Water Containing Zn at the Key Growth Period on the Uptake and Transport of Cd in Rice	ZHOU Xia, HU Yu-dan, ZHOU Hang, <i>et al.</i>	( 1118 )
Effects of Exogenous Zinc on Growth and Root Architecture Classification of Maize Seedlings Under Cadmium Stress	ZHANG Hui-hong, WEI Chang, LIU Hai-tao, <i>et al.</i>	( 1128 )
Mitigative Effect of Rare Earth Element Cerium on the Growth of Zinc-stressed Wheat ( <i>Triticum aestivum</i> L.) Seedlings	ZHANG Jing-jing, XU Zheng-yang, JIAO Qiu-juan, <i>et al.</i>	( 1141 )
Two-stage Inhibition Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 Application on Cadmium Uptake and Transport in Wheat	GUO Jia-jia, WANG Chang-rong, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i>	( 1150 )
Effects of Combined Stress of High Density Polyethylene Microplastics and Chlorimuron-ethyl on Soybean Growth and Rhizosphere Bacterial Community	HU Xiao-yue, HUA Zi-wei, YAO Lun-guang, <i>et al.</i>	( 1161 )
Human Accumulation and Toxic Effects of Microplastics: A Critical Review	BAO Ya-bo, WANG Cheng-chen, PENG Wu-guang, <i>et al.</i>	( 1173 )
Overview of the Application of Machine Learning for Identification and Environmental Risk Assessment of Microplastics	BAI Run-hao, FAN Rui-qi, LIU Qi, <i>et al.</i>	( 1185 )
Research Process on the Combined Pollution of Microplastics and Typical Pollutants in Agricultural Soils	HOU Yu-qing, LI Bing, WANG Jin-hua, <i>et al.</i>	( 1196 )
Research Progress in Electrochemical Detection and Removal of Micro/Nano Plastics in Water	ZHENG Wei-kang, LIU Zhen-zhong, XIANG Xiao-fang	( 1210 )
Factors Influencing Willingness of Farmers to Pay for Agricultural Non-point Source Pollution Control Based on Distributed Cognitive Theory	GUO Chen-hao, LI Lin-fei, XIA Xian-li	( 1222 )