#### DOI: 10.5846/stxb202106011448

张柳柳,刘睿,张静,肖作林,冀琴.长江上游坡地景观特征对河流水质的影响.生态学报,2022,42(16):6704-6717. Zhang L L, Liu R, Zhang J, Xiao Z L, Ji Q.The influence of sloping landscape features on riverine water quality in upper Yangtze River. Acta Ecologica Sinica,2022,42(16):6704-6717.

# 长江上游坡地景观特征对河流水质的影响

张柳柳<sup>1,2</sup>,刘 寄<sup>1,2</sup>,张 静<sup>1,2,\*</sup>,肖作林<sup>1,2</sup>,冀 琴<sup>1,2</sup>

1 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331

2 重庆师范大学 GIS 应用研究重庆市重点实验室, 重庆 401331

摘要:景观组成及景观格局特征决定了污染物的来源和地表景观的拦截消纳潜力,地表坡降会加剧土壤侵蚀,坡地景观特征是 影响河流水质的重要因素。研究基于长江上游重庆段 2015 年水质监测数据和 30 m 空间分辨率土地利用数据,提取河岸带 100 m、200 m、300 m、500 m、1000 m 和子流域 6 种空间尺度上景观格局和景观组成,并进一步将景观组成分为总地类、缓坡地类和 陡坡地类三种不同坡度尺度,再采用相关分析和冗余分析(RDA)等方法定量探讨了坡地景观结征(坡地景观组成、景观格局) 对河流水质的多时空尺度影响。结果表明:坡地景观特征对 2015 年长江上游重庆段河流水质的影响具有空间尺度效应;坡地 景观特征对河流水质的影响在河岸带尺度强于子流域尺度,其中关键尺度为河岸带 100 m 至 300 m,最有效尺度为河岸带 200 m。坡地景观特征影响水质的季节差异随空间尺度不同而变化,在河岸带 100 m 至 300 m,最有效尺度为河岸带 200 m。坡地景观特征影响水质的季节差异随空间尺度不同而变化,在河岸带 100 m 至 300 m,足为汛期强于非汛期,在河岸带 1000 m 尺度相反,在子流域尺度无季节差异。建设用地面积比与溶解氧(DO)和高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)正相关,耕地面积百分 比与氦氮(NH<sub>4</sub><sup>4</sup>-N)参数正相关,两者为水质污染"源景观",且缓坡耕地对水质的解释率高于总地类耕地;林地与水质参数呈负 相关,对缓解水质恶化具有积极作用;集聚度(COHESION)、聚合度(AI)指标与 NH<sub>4</sub><sup>4</sup>-N 参数及斑块密度(PD)、边缘密度(ED) 与 DO、COD<sub>Mn</sub>参数均呈正相关。在集水区尤其是河岸带 300 m 范围内,严格把控建设用地污水收集与处理,种植河岸带防护 林,采取横坡耕种方式,并通过优化景观结构(如种植植物鷟)以增强景观拦截力以减少污染物的集中输出,从而改善河流 水质。

关键词:水质;坡地景观特征;多时空尺度;冗余分析;长江上游

# The influence of sloping landscape features on riverine water quality in upper Yangtze River

ZHANG Liuliu<sup>1,2</sup>, LIU Rui<sup>1,2</sup>, ZHANG Jing<sup>1,2,\*</sup>, XIAO Zuolin<sup>1,2</sup>, JI Qin<sup>1,2</sup>
1 School of geography and tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China
2 The Key Laboratory of GIS Application Research, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China

**Abstract**: Landscape compositions and patterns determine the sources of pollutants and the potential in interception and absorption of the surface landscape. Meanwhile, the surface slope will aggravate soil erosion. Therefore, the sloping landscape characteristics are important factors affecting riverine water quality. Based on the water quality monitoring data of the Chongqing section of the upper Yangtze River in 2015 and land use data with a spatial resolution of 30 m, this study firstly extracted landscape patterns and compositions at six scales: 100, 200, 300, 500 and 1000 m river buffers and subwatershed. We further classified the landscape compositions into three different slope scales (i.e., total land class, gently sloping land class and steep sloping land class). Furthermore, correlation analysis and redundancy analysis (RDA) were used to quantitatively explore the multiple spatial and temporal impacts of sloping landscape features. The results showed

**基金项目**:重庆市自然科学基金面上项目(cstc2020jcyj-msxmX0549);重庆市教委科学技术研究计划项目(KJQN201900548);重庆师范大学基 金项目(20XLB022)

收稿日期:2021-06-01; 网络出版日期:2022-04-21

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhangjing@ cqnu.edu.cn

http://www.ecologica.cn

that: (1) the influence of sloping landscape features on riverine water quality exhibited a spatial scale effect. The influence was stronger at the riparian scale than the sub-basin scale with the conditions of key scale ranging from 100 m to 300 m in the riparian zone, and the most effective scale of 200 m riparian. (2) The seasonal differences in riverine water quality affected by sloping landscape features varied with the spatial scale. The flood season was stronger at the 100 m to 300 m riparian scales than the non-flood season, and the opposite in the 1000 m riparian scale, whilst, there was no seasonal difference at the sub-basin scale. (3) The ratio of construction was positively correlated with dissolved oxygen (DO), permanganate ( $COD_{M_{0}}$ ) parameters, and the percentage of cultivated field was positively correlated with ammonia nitrogen  $(NH_{4}^{*}-N)$ , both of which were "source landscapes" of water quality pollution. The explanation rate of sloping cultivated land on water quality was higher than that of total land type cultivated land. Forest was negatively correlated with water quality parameters, which had a positive effect on mitigating water quality deterioration. (4) The patch cohesion index (COHESION) and aggregation index (AI) were positively correlated with  $NH_4^+$ -N, while patch density (PD) and edge density (ED) indicators were also positively correlated with DO and COD<sub>Mn</sub>. In summary, strengthening sewage treatment technologies for urban, planting protective forests in the riparian zone, adopting cross-slope farming and optimizing the landscape structure can enhance the absorption of pollutants and effectively prevent the concentrated output of pollutants within the watershed (especially within 300 m riparian zones), which is of great significance to the prevention and control of water pollution in rivers.

Key Words: water quality; sloping landscape features; multiple spatial and temporal scales; redundancy analysis; the upper reaches of the Yangtze River

河流水质是流域生态环境高水平保护和经济高质量发展的关键因素,河流水质优劣对流域内人类生活、 生产用水安全具有重要意义<sup>[1]</sup>。目前,我国各类点源污染已得到有效治理,面源污染已成为决定河流水质的 主导因素<sup>[2]</sup>。流域景观结构、景观格局影响着径流中污染物质的迁徙转换<sup>[3-6]</sup>。合理调控景观特征对减少面源 污染具有显著作用,故探讨景观特征与河流水质的关系对恢复流域生态安全、降低污染风险具有重要意义<sup>[7]</sup>。

景观特征与河流水质关联研究已成为国内外研究热点<sup>[6,8–16]</sup>。景观特征与河流水质的关联研究在内容 上主要从自然属性角度(景观类型)或空间分布角度(景观格局)进行研究。如 Dai 等<sup>[8]</sup>研究证实建设用地和 农田能对水环境产生显著负面影响,植被能显著减少向河流排放的养分,从而缓解水质恶化。Shehab 等<sup>[6]</sup>研 究表明景观高度分散能加剧水质恶化。朱珍香等<sup>[9]</sup>发现斑块密度、香农多样性指数与水质指标为负相关,得 出减少景观破碎化能改善水质的结论。也有部分研究探讨景观特征—水质关联的空间尺度效应<sup>[10–13]</sup>,但由 于各流域土地利用具有独特性,对水质影响最强的空间尺度存在争议<sup>[11]</sup>。Zhang 等<sup>[12]</sup>在大宁河流域的研究 结果显示流域尺度下的土地利用对整体水质的影响无论在早、雨季都最强。而 Dai 等<sup>[8]</sup>发现河岸 200 m 以内 的区域是影响河流水质的重点区域。方娜等<sup>[13]</sup>的研究却表明土地利用对河流水质的解释率在缓冲区尺度先 加强后减弱,在 1000 m 河岸缓冲区尺度处达到最大值。此外,景观特征对河流水质的影响存在季节差异。 Huang 等<sup>[14]</sup>发现九龙江流域的土地—水质关联在丰水年强于枯水年,而彭勃等<sup>[15]</sup>却在清源河流域研究中得 出相反结论。但由于景观特征的复杂性和异质性,景观特征对水质影响的共性规律仍待进一步研究<sup>[16]</sup>。此 外,坡度因子是水土保持的重要地形因子<sup>[17–18]</sup>。山地丘陵地区的地表坡降大,地表径流携带污染物迁至河流 的能力加强,却鲜见研究探讨坡度因子对景观特征-水质关联的影响<sup>[3]</sup>。因此需要在更广泛的区域开展研究, 并充分考虑地形因素的影响,更深入探讨坡地景观特征对河流水质的影响机制。

长江是我国最大的河流,对我国人文、社会、经济发展具有重要意义<sup>[19]</sup>。本研究以位于长江上游、覆盖三 峡库区约 80%的重庆市为研究区<sup>[20]</sup>,分析长江上游坡地景观特征与河流水质的关联关系,研究目的为:(1) 建立坡地景观特征-水质的关联,确定影响水质的主要坡地景观特征指标;(2)定量探讨坡地景观特征影响水 质的多时空尺度差异;(3)探究坡度因子如何影响景观特征与河流水质的关联。本研究通过定量分析坡地景 观特征影响河流水质的方式及其时空尺度差异,以期为长江上游水资源保护、山地丘陵区的景观特征优化提 供理论支撑。

## 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

重庆市是长江上游经济重心城市、西南地区交通枢纽<sup>[21]</sup>,境内三峡库区的建设加速经济发展同时也加剧 了污染物排放,建设用地、农业用地生产排放的污水成为恶化河流水质的主要因素<sup>[22]</sup>。重庆市地跨东经105° 11′—110°11′、北纬28°10′—32°13′,位于青藏高原与长江中下游平原的结合地带,幅员面积8.24×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>。地 貌以丘陵、山地为主<sup>[23]</sup>,地形呈现为南北向长江河谷倾斜,属亚热带季风性湿润气候,年均降水量约为1200 mm,降雨量呈单峰型,峰值集中在5—9月,因此将5—9月划定为汛期,其余时间为非汛期<sup>[24]</sup>。境内水资源 丰富,长江干流境内流程长达683.8 km,自西向东横贯全境,与嘉陵江、乌江、涪江、綦江等一级支流形成不对 称网状水系格局<sup>[25]</sup>。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 水质数据来源与处理

水质数据源于国家地表水水质自动监测实时数据发布系统(http://106.37.208.243:8068/GJZ/Business/Publish/),监测时间为2014年12月—2015年12月,监测频次为每周一次。酸碱度(pH)指标、溶解氧(DO)指标为水质数据基础指标,与水体中浮游植物的光合作用和有机物有氧分解密切相关<sup>[26]</sup>。以往研究结果显示<sup>[27]</sup>,研究区主要污染物为氨氮(NH<sup>\*</sup><sub>4</sub>-N)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)等指标,故本研究水质指标为 pH、DO、NH<sup>\*</sup><sub>4</sub>-N和 COD<sub>Mn</sub>。结合水环境污染风险评价研究结果<sup>[22]</sup>,本研究选取典型的12个监测站点用以表征研究区内河流水质状况(图1)。在2014年12月至2015年12月时间范围内,各个监测站点都有52期以周为统计单位的水质数据,结合研究区降雨季节性差异状况,将5—9月划分为汛期,其余时间归为非汛期。

1.2.2 地表景观数据来源与处理

首先,基于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)发布的 Landsat 8 OLI 遥感影像数据(2015年,30 m 空间分辨率),根据土地利用一级分类标准,结合人工目视解译和 随机森林法将研究区土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地,其中未利用地包含盐碱 地、沼泽地、沙地和裸地(图1)。分类结果经混淆矩阵精度验证,总精度为 84.763%, Kappa 系数为 0.82,满足 精度要求。其次,基于地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn/)发布的 ASTER GDEM 数据(30 m 空间 分辨率),利用 ArcGIS(ESRI Company, USA)表面分析模块计算地形坡度,并参考坡耕地的定义及坡面侵蚀临 界值<sup>[3]</sup>,划分平地(<6°)、缓坡(6°—25°,含6°)和陡坡(≥25°),研究区内 6°及以上的坡地占比 83.25%,其中 缓坡占比 57.17%。

1.3 研究方法

#### 1.3.1 空间尺度的创建

结合以往研究,本文选取河岸带 100 m、200 m、300 m、500 m、1000 m 和子流域尺度来研究坡地景观特征-水质关联<sup>[11, 28-29]</sup>。首先,以高程数据为基础,基于 ArcGIS 水文分析模块进行水系提取并以监测站点为出水 口提取子流域;再参考中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)发布的研究区二级流域数 据<sup>[30]</sup>划分出研究区 12 个监测点的子流域范围(图 1)。其次,以子流域为边界截取河流,并向左右两岸延伸 100 m、200 m、300 m、500 m、1000 m 生成对应的河岸带缓冲区(图 1)。

#### 1.3.2 景观特征参数的计算

景观组成是决定河流水质的重要因素。基于 ArcGIS 掩膜工具,将地表景观数据划分至总地类、缓坡地 类、陡坡地类三种坡度尺度并导入 FRAGSTAT 4.2 软件<sup>[16]</sup>计算各景观类型的面积百分比,其中总地类包含平 地类、缓坡地类和陡坡地类。

景观格局对河流水质具有重要影响。本文选择以往研究中对河流水质影响较大的景观格局指数<sup>[31-32]</sup>进行分析,包括斑块密度(PD)、边缘密度(ED)、最大斑块指数(LPI)、景观形状指数(LSI)、蔓延度(CONTAG)、聚集



站点 1—12 分别为北温泉、大溪沟、丰收坝、和尚山、金子、李渡、梁沱、码头、扇沱、万木、玉溪、朱沱站点

度(COHESION)、聚合度(AI)、Shannon 多样性指数(SHDI)、Shannon 均匀度指数(SHEI)。PD 和 ED 指标常用来 描述景观的破碎化程度,LPI 指标反映景观内部优势种的丰度,LSI 指标表征景观形状的复杂程度,CONTAG、 COHESION 和 AI 指标代表景观物理连接度和聚集程度,SHDI、SHEI 表征景观异质性和均匀度<sup>[10, 33]</sup>。 **1.3.3** 统计分析

以 SPSS 24.0 软件为平台,首先基于 K-S 方法检验数据分布正态性,结果表明 pH、DO 和 COD<sub>Mn</sub>水质参数 的双尾渐进概率 P 值大于给定的显著性水平 0.05,服从正态分布。其次采用独立样本 T 检验计算 pH、DO 和

16 期

COD<sub>Mn</sub>水质参数在时间上的显著性差异,并通过单因素方差分析计算 pH、DO 和 COD<sub>Mn</sub>水质参数在空间上的 显著性差异。应用 Spearman 相关分析方法计算坡地景观特征与水质指标相关系数,以显著性概率 P>0.05 作 为指标筛选标准<sup>[34]</sup>,筛选结果为:总地类耕地(AGRL)、总地类林地(FRST)、总地类建设用地(URBN)、缓坡 类耕地(G\_AGRL)、缓坡类草地(G\_PAST)、陡坡类草地(S\_PAST)及景观格局指数 PD、ED、COHESION 和 AI。 以 Canoco 5.0 软件为平台,以水质指标作为物种变量,以相关分析选择后的坡地景观特征为环境变量,首先对 水质参数进行降趋势对应分析(DCA),发现排序轴第 1 轴长度小于 3,因此选择冗余分析(RDA)方法定量探 究坡地类景观特征对河流水质的多时空尺度影响。RDA 结果排序图中,指标夹角<90°,两者为正相关,夹角> 90°为负相关,夹角的余弦值和指标向量的相对长度表示相关强度大小。

#### 2 结果与分析

2.1 坡地景观空间特征分析

研究区地形以山地丘陵为主, 坡地分布较广, 缓坡占比从河岸带 100 m 尺度的 52.3% 缓慢增长至子流域 尺度的 60.7%, 陡坡占比则维持在 8.23%—9.92% 之间(图 2)。缓坡类的景观类型占比情况和总地类保持一





致,河岸带 100 m 尺度下:总地类/缓坡类的耕地面积比>总地类/缓坡类的建设用地面积比>总地类/缓坡类的林地面积比。河岸带 200 m 至 1000 m 尺度下:总地类/缓坡类的耕地面积比>总地类/缓坡类的林地面积比>总地类/缓坡类的建设用地面积比。子流域尺度下:总地类/缓坡类的林地面积比>总地类/缓坡类的建设用地面积比。子流域尺度下:总地类/缓坡类的林地面积比>总地类/缓坡类的建设用地面积比。而总地类和缓坡地类的草地和未利用地面积占比始终最小。即在 子流域尺度下,面积最广的优势地物为林地,而在靠近水源的河岸带尺度下,人造地物(耕地、建设用地)成为 优势地物,且在最小的河岸带 100 m 尺度下,建设用地面积超过林地面积,说明人类活动更集中在河岸带附 近,尤其是最靠近水源的河岸 100 m 尺度下,建设用地面积超过林地面积,说明人类活动更集中在河岸带附 近,尤其是最靠近水源的河岸 100 m 尺度。陡坡地形坡度≥25°,人类活动受限,使其景观类型占比与总地类 和缓坡地类差异较大,表现为:陡坡类林地>陡坡类耕地>陡坡类草地>陡坡类建设用地>陡坡类未利用地。同 时,陡坡地类分布情况在站点 10 处出现"突变",这是因为站点 10 位于研究区东南部武夷山中低山区,陡坡 面积占比本身较大,同时人类活动较少,景观类型主要为林地。

景观格局指数统计结果如表 1 所示。景观格局指标在河岸带缓冲区尺度上随空间尺度增大,景观破碎度 增加,优势斑块丰度降低,形状复杂程度增大,景观异质性增强。具体表现为:PD、ED、LSI、SHDI和 SHEI 指标 值在河岸带缓冲区尺度上随空间尺度增大而增大,LPI、CONTAG和 AI 指标值在河岸带缓冲区尺度上随空间 尺度增大而减小,COHESION 指标值在河岸带先逐渐减小,随后增大,在河岸带 300 m 尺度值最小。除 LSI 指 标值在子流域尺度明显高于河岸带尺度外,其余指标在两种类型的空间尺度中无明显差异。

	Table 1 Descript	ive statistical of la	ndscape pattern in	multi-spatial scale(	(Mean±SD)	
空间尺度 Spatial scale	河岸带 100 m 100 m buffer	河岸带 200 m 200 m buffer	河岸带 300 m 300 m buffer	河岸带 500 m 500 m buffer	河岸带 1000 m 1000 m buffer	子流域 Sub-watershed
$PD/(\uparrow/hm^2)$	41.88±14.18	42.94±14.51	43.72±14.57	44.43±15.09	45.34±15.10	42.72±12.14
$ED/(m/hm^2)$	$101.29 \pm 29.35$	116.61±27.02	124.70±26.26	$133.97 \pm 25.60$	$143.36 \pm 23.75$	$141.82 \pm 18.43$
LPI/%	$56.05 \pm 17.62$	43.92±15.82	36.19±14.15	27.03±11.54	21.07±7.69	29.48±11.04
LSI	$15.69 \pm 3.50$	18.62±3.59	$21.03 \pm 3.90$	$25.00 \pm 4.58$	$32.33 \pm 5.59$	74.41±20.88
CONTAG/%	$59.45 \pm 8.65$	53.96±3.59	52.51±5.14	$51.25 \pm 4.46$	$51.46 \pm 4.76$	56.91±5.70
COHESION/%	97.30±0.84	96.80±0.87	96.72±0.78	96.78±0.87	$97.43 \pm 0.93$	99.22±0.31
AI/%	86.61±4.41	83.26±3.85	82.53±3.64	81.67±3.48	80.75±3.15	81.15±2.43
SHDI	$1.10 \pm 0.21$	$1.26 \pm 0.15$	$1.33 \pm 0.12$	1.36±0.11	$1.34 \pm 0.12$	$1.16 \pm 0.18$
SHEI	$0.56 \pm 0.11$	$0.64 \pm 0.07$	$0.66 \pm 0.05$	$0.67 \pm 0.05$	$0.66 \pm 0.06$	$0.57 \pm 0.08$

表 1	<b>多空间尺度下景观格局描述性统计</b> (均值±标注差)

PD:斑块密度 Patch density;ED:边缘密度 Edge density;LPI:最大斑块指数 Largest patch index;LSI:景观形状指数 Landscape shape index; CONTAG:蔓延度 Contagion index;COHESION:聚集度 Patch cohesion index;AI:聚合度 Aggregation index;SHDI:Shannon 多样性指数 Shannon's diversity index;SHEI:Shannon 均匀度指数 Shannon's evenness index

# 2.2 河流水质的时空格局分析

水质参数的季节差异统计情况如表 2 所示。研究参照《地表水环境质量标准》进行水质评价(图 3)。水质指标 pH、DO、COD<sub>Mn</sub>有显著的季节差异(P<0.05)(表 2)。总体上,pH 值在 7.40—8.39 之间变化,非汛期均 值为 7.83,汛期均值为 7.79。DO 含量波动范围为 7.02—10.13 mg/L,其均值在汛期(8.04 mg/L)低于非汛期(8.87 mg/L),时间上表现出极显著差异(P<0.01),空间上也体现出显著差异(P<0.05)(表 2)。DO 指标值在 非汛期时多符合 I 类水质标准,在汛期时多符合 II 类水质标准,部分符合 II 类水质标准。NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N 浓度范围在 0.13—0.57 mg/L 之间变化(表 2),NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N 指标符合 II 类水质标准的占比高于符合 I 类水质标准的占比,且在 站点 11(涪江入境断面)处符合 II 类水质标准的占比较大。COD<sub>Mn</sub>的值波动范围为 1.33—2.85 mg/L,其浓度 具有极显著的季节差异性(P<0.01),汛期均值(2.21 mg/L)高于非汛期均值(1.73 mg/L)(表 2),水质在非汛 期优于汛期。非汛期时,COD<sub>Mn</sub>指标符合 I 类水质标准的占比高于符合 II 类水质标准的占比高于符合 II 类水质标准的占比。

	Table 2         Seasonal table of water quality parameters(Mean±SD)						
季节 Season	点位 Site	pH	D0/(mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/(mg/L)	COD <sub>Mn</sub> /(mg/L)		
非汛期	1	8.05±0.26f	9.21±1.21bc	0.16±0.04	1.62±0.52cd		
Non-flood season	2	$7.93 \pm 0.30 de$	$9.50{\pm}0.83{\rm cd}$	$0.17 \pm 0.06$	2.28±0.45f		
	3	$7.70 \pm 0.70 \mathrm{b}$	$8.75 \pm 0.62 \mathrm{abc}$	$0.15 \pm 0.03$	$1.78 \pm 0.35 de$		
	4	7.48±0.03a	$8.83 \pm 0.59 \mathrm{abc}$	$0.18 \pm 0.06$	1.39±0.19ab		
	5	$8.03 \pm 0.12 \text{ef}$	$10.13 \pm 1.48 d$	$0.14 \pm 0.03$	$1.84 \pm 0.36e$		
	6	$8.06 \pm 0.26 f$	$8.74 \pm 0.84 \mathrm{abc}$	$0.15 \pm 0.03$	$1.75{\pm}0.28{\rm cde}$		
	7	$7.81{\pm}0.17{\rm bc}$	$9.28{\pm}1.42{\rm bcd}$	$0.16 \pm 0.04$	2.35±0.27f		
	8	$7.72 \pm 0.32 \mathrm{b}$	8.54±1.58ab	$0.15 \pm 0.06$	$1.57 \pm 0.27 \mathrm{bc}$		
	9	8.13±0.18f	$8.60 \pm 1.02$ ab	$0.26 \pm 0.07$	$1.82 \pm 0.40 e$		
	10	$7.84 \pm 0.06$ cd	$8.64 \pm 0.50 \mathrm{abc}$	$0.14 \pm 0.06$	$1.56 \pm 0.26 \mathrm{bc}$		
	11	$7.93{\pm}0.25{\rm de}$	8.01±1.19a	$0.48 \pm 0.06$	1.33±0.38a		
	12	8.14±0.13f	$9.04 \pm 0.45 \mathrm{bc}$	0.21±0.06	$1.74 \pm 0.34$ cde		
	均值	7.83±0.77 *	8.87±1.41 **	$0.20 \pm 0.11$	1.73±0.48 **		
汛期	1	$7.56{\pm}0.24{\rm b}$	$7.90{\pm}0.85{\rm bc}$	0.13±0.04	1.65±0.72a		
Flood season	2	$7.92 \pm 0.22 \text{ef}$	$10.08 \pm 1.22 e$	$0.14 \pm 0.04$	$2.74 \pm 0.81 \mathrm{cd}$		
	3	$7.61{\pm}0.09{\rm bc}$	7.61±0.67ab	$0.18 \pm 0.04$	$2.46{\pm}0.69{\rm cd}$		
	4	$7.40 \pm 0.05 a$	$7.89{\pm}0.49{\rm bc}$	$0.16 \pm 0.04$	$1.97 \pm 0.50$ ab		
	5	$7.97 \pm 0.80 f$	$7.70 \pm 0.50$ ab	$0.14 \pm 0.05$	$2.85{\pm}0.96{\rm d}$		
	6	$8.39 \pm 0.14 h$	$8.84{\pm}0.52{\rm d}$	$0.19 \pm 0.05$	$2.56{\pm}0.52{\rm cd}$		
	7	$7.63{\pm}0.08{\rm bc}$	$8.47{\pm}0.94{\rm cd}$	$0.19 \pm 0.05$	$2.61{\pm}0.52{\rm cd}$		
	8	$7.81{\pm}0.26{\rm de}$	$7.55 \pm 1.19$ ab	$0.14 \pm 0.03$	1.71±0.87a		
	9	8.12±0.21g	$8.03{\pm}0.47{\rm bc}$	$0.22 \pm 0.04$	$2.36{\pm}0.65{\rm bc}$		
	10	$7.74{\pm}0.06{\rm cd}$	7.72±0.49ab	$0.17 \pm 0.08$	1.54±0.62a		
	11	$7.50 \pm 0.54$ ab	7.02±0.67a	$0.57 \pm 0.10$	1.53±0.58a		
	12	$7.86{\pm}0.18{\rm def}$	7.64±0.52ab	$0.28 \pm 0.05$	$2.52 \pm 0.65$ cd		
	均值	7.79±0.35*	8.04±1.06**	0.21±0.13	2.21±0.83 **		

表2 水质参数季节性统计表(均值±标注差)

DO:溶解氧 Dissolved oxygen; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N:氨氮 ammonia nitrogen; COD<sub>Mn</sub>:高锰酸盐指数 Permanganate index; 每一列不同小写字母表示同一水质指 标在不同监测点位下的存在 P<0.05 水平的显著差异,以表征水质参数空间差异性;非汛期、汛期的最后一行 \* 表示 P<0.05 水平的显著差异; \*\* 表示 P<0.01 水平的极显著差异,以表征水质参数的季节差异性

#### 2.3 坡地景观特征对河流水质的多时空尺度影响

多时空尺度下坡地景观特征对水质的冗余分析结果如表3所示。坡地景观特征对水质指标的解释率≥ 63.21%,表明坡地景观特征对河流的水质优劣具有重要影响。坡地景观特征对水质的影响具有空间尺度效 应, 坡地景观特征对水质的影响程度随空间尺度增大先增强后减弱(表3)。河岸带 100 m 至 300 m 尺度下坡 地景观特征对水质的总解释率均>90%(表3),即河岸带100 m 至 300 m 范围内的坡地景观特征是影响河流 水质的关键尺度。其中以河岸带 200 m 尺度下坡地景观特征对水质的总解释率最高(非汛期:99.63%;汛期: 99.87%)(表3),说明研究区河岸带 200 m 尺度是影响河流水质的最有效空间尺度。空间尺度超过河岸带 300 m 后,研究区坡地景观特征对水质的影响程度随距离增大显著下降(表 3),当尺度从河岸带 300 m 增大 至 500 m 时, 总解释率减少至非汛期时的 84.99% 和汛期时的 87.35%, 总解释率下降幅度超过 10%; 当尺度从 河岸带 500 m 增大至 1000 m 时,总解释率在非汛期为 77.63%,下降幅度为 7.36%;在汛期时为 72.74%,下降 幅度为 14.61%;当空间尺度进一步增大至子流域尺度时,总解释率减少至非汛期时的 63.21%,汛期时的 63. 22%,下降幅度大于9.52%。坡景观特征与水质的关系具有季节差异,但季节差异不显著(表3)。研究区坡 地景观特征对水质的影响程度在河岸带 100 m 至 500 m 尺度下均汛期强于非汛期,季节差异低于 2.36%;

		Percenta	COD <sub>Mn</sub> 值∮ ige of COD <sub>h</sub>	佟别百分比 <sup>An</sup> value categ	ory/%	1	Percent	NH₄ <sup>+</sup> -N值类 age of NH₄ <sup>+</sup> -N	别百分比 value catego	ry/%		L Percentag	OO值类别百 e of DO valu	í分比 ue category/9	<b>,</b> 0
	0	20	40	60	80	100	20	40	60	80	0	20	40	60	80
1															H
2	1														1
3	3														
4						8									
5 非	5														
6 :汛!	6								XXXXX						
7 朝	7							XXXIIII	XXXXXX	XXXXXXXX					
8	8					8			XXXXXX	XXXXXXXX					XXXX
9	0						XXXXXX	XXXXXXX	XXXXXX	XXXXXXXXX					XXXX
10	10								XXXXX	XXXXXXXXX					
11 1							XXXXXXX	XXXXXXX	XXXXXX	×					XXXX
12 站点	12				XXI		XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXXXXX					
<sup>1</sup> Sit					XXXV//					XXXXXXXXX					
2 e	2		XXXXXX							XXXXXXXXX		XXX			
3	3	XIIII	XXXXX												
4															
5	5	N N N N N N N N N N N N N N N N N N N													
6 汛期	6														
7 ¶	7						MILIN								
8	8													XXIIII	
9	0									XXXXXXX			XXXXXX	XXXXXXX	
10	10			X I I I I I				MILLI	XXXXXXX	XXXXXXXX				XXIIII	
11							XXXXXXX	XXXXX						MILII	
12	12			XXXXXXX			XXXXXXX	XXXXXXX	XXXXXX	XXXXXXXX			XXXXXX	XXXXXX	XXXX



DO:溶解氧 Dissolved oxygen; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N:氨氮 ammonia nitrogen; COD<sub>Mn</sub>:高锰酸盐指数 Permanganate index; 分类标准参考地表水环境质量标准 (GB 3838-2002) http://www.ecologica.cn

16 期

在河岸带 1000 m 尺度下为非汛期强于汛期,季节差异为 4.89%;在子流域尺度下无明显季节差异。就单一坡 地景观特征指标而言,以缓坡耕地和景观格局指标对水质参数的贡献率最高(表 3)。在河岸带 100 m 和子流 域尺度下,缓坡耕地对水质的整体贡献率最大,在河岸带 100 m 尺度下大于 23%,在子流域尺度下大于 46%, 表明缓坡耕地是在距河流最近的河岸带 100 m 尺度和子流域尺度中,对水质影响最大的关键指标。在河岸带 缓冲区尺度中,除缓坡耕地外,对水质影响最大景观指标多为 PD、ED、COHESION 和 AI 景观格局指标(表 3), 说明在河岸带缓冲区尺度,景观格局指标对水质的影响程度高于除缓坡耕地外的其余景观类型指标。

Table 3	Redundancy analysis res	lysis results of percentage change in total water quality explained by explanatory variables					
禾苦	六间日亩/m	解释率	Explanation	rate/%	Pseudo-F		解释变量(贡献率)
Season	Spatial scale	轴 1 Axis 1	轴 2 Axis 2	所有轴 All axis		Р	Explanatory variables ( contribution/% )
非汛期	河岸带 100	71.29	20.31	93.76	5.6	0.018	G_AGRL (23), PD (22.7)
Non-flood season	河岸带 200	76.19	21.40	99.63	7.7	0.01	PD (29.8), ED (24.9)
	河岸带 300	73.05	21.39	96.28	3.9	0.024	ED (29), PD (16.1)
	河岸带 500	61.92	21.51	84.99	3.8	0.042	ED (32.2), G_AGRL (11.9)
	河岸带 1000	55.05	21.04	77.63	3.5	0.07	ED (33.2), FRST (15.5)
	子流域	51.06	10.44	63.21	3.7	0.052	G_AGRL (42.9), AGRL (29.6)
汛期	河岸带 100	61.78	30.53	95.10	4.3	0.048	G_AGRL (25.5), PD (19.9)
Flood season	河岸带 200	65.64	30.53	99.87	4.3	0.05	AI (17.7), PD (17.4)
	河岸带 300	64.95	28.81	97.52	9.6	0.014	PD (28.9), COHESION (20.8)
	河岸带 500	59.16	24.53	87.35	2.9	0.046	COHESION (25.7), AGRL (16.1)
	河岸带 1000	47.97	21.08	72.74	2.7	0.072	G_AGRL (29.5), ED (17.9)
	子流域	50.86	8.80	63.22	4.2	0.026	G_AGRL (46.9), G_PAST (14.7)

表 3 解释变量解释总体水质变化百分比的冗余分析结果

每一行最后一列解释变量(贡献率)为各个尺度下对河流水质整体贡献度最大的前两个解释变量指标及其贡献率;G\_AGRL:缓坡耕地 Gentle slope agriculture;AGRL:总地类耕地 Agriculture;FRST:总地类林地 Forest;G\_PAST:缓坡草地 Gentle slope pasture

多时空尺度下坡地景观特征对水质的冗余分析结果排序图如图4所示。在水质参数中,NH<sub>4</sub>-N和COD<sub>Mo</sub> 参数的线长明显长于 pH 和 DO 参数(图 4),说明相较 DO 和 pH 而言, NH4-N 和 COD<sub>Mo</sub>参数更能反映坡地景 观对水质的影响状况。水质参数的线长也在子流域尺度明显低于缓冲区尺度,与表3结果相符,表示坡地景 观特征对水质参数的影响程度在子流域尺度低于缓冲区尺度。非汛期时,建设用地与 DO、COD<sub>M</sub>参数为显著 正相关;汛期时,建设用地在较大的河岸带 500 m 至子流域尺度与 DO、COD<sub>M</sub>参数呈正相关,相关程度随尺度 增大而增强(图4)。COD<sub>Mn</sub>参数常用以反映水体中有机污染物,表明建设用地的面积占比越大,向河流水体 输送的有机污染物质越多,且建设用地与 COD<sub>Mn</sub>参数的关联程度在非汛期更强。总地类耕地与 NH<sub>4</sub>-N 参数 呈正相关,缓坡类耕地与 NH<sub>4</sub>-N 参数正相关,与 COD<sub>Mu</sub>, pH 参数在河岸带尺度上正相关(图 4),缓坡耕地除 了与 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 参数,与 COD<sub>Mn</sub>、pH 参数同样也具有相关性,即缓坡耕地对河流水质的影响比总地类耕地更为复 杂。林地与水质参数均为负相关,林地在5个河岸带尺度的线长基本一致,在子流域尺度的线长明显变短 (图 4),说明林地在河岸带尺度上对水质恶化的缓解作用强于子流域尺度,表明河岸带防护林是缓解水质恶 化的有效措施。缓坡草地和陡坡草地与NH4-N参数呈负相关,与DO和COD<sub>Mn</sub>参数的关系受季节影响差异较 大(图 4)。缓坡草地与 DO 和 COD<sub>M</sub>参数在非汛期为正相关,在汛期为不相关或微弱的负相关;陡坡草地与 DO 和 COD<sub>Ma</sub>参数在非汛期为不相关或微弱的正相关,在汛期为显著负相关。COHESION、AI 参数表征景观连 接和聚集程度,与NH<sub>4</sub>-N参数正相关。PD、ED反映景观破碎程度,与DO、COD<sub>Mn</sub>参数在非汛期呈正相关,在 汛期为不相关或微弱的正相关。

# 3 讨论

## 3.1 坡地景观特征对水质的影响

耕地与 NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N 参数呈正相关,建设用地与 COD<sub>Mn</sub>、DO 指标呈正相关(图 4),耕地和建设用地是污染河流 的主要景观类型,为"源"景观。耕地耕种活动较多、土壤侵蚀风险强,又常过量施肥,肥料和农药等污染物质 在汛期易随地表径流、壤中流、浅层地下水等方式进入河流,导致河流水体富营养化、水质恶化<sup>[35-36]</sup>。缓坡耕 地对水质的整体贡献率大于总地类耕地,汪涛等<sup>[37]</sup>在三峡库区典型小流域的研究指出坡耕地对面源污染的 贡献负荷高于其所占面积比,是面源污染的重要"源"景观。这归因于坡地具有倾斜特征,径流在重力作用和



http://www.ecologica.cn





Fig.4 Sequence diagram of redundancy analysis results of sloping landscape features and water quality

AGRL:总地类耕地 Agriculture;G\_AGRL:缓坡耕地 Gentle slope agriculture;URBN:总地类建设用地 Urban; G\_PAST:缓坡草地 Gentle slope pasture,S\_PAST:陡坡草地 Steep slope pasture;FRST:林地 Forest;PD:斑块密度 Patch density;ED:边缘密度 Edge density;COHESION:聚集度 Patch cohesion index;AI:聚合度 Aggregation index

地势帮助下侵蚀能力加强,更容易发生细沟侵蚀和溯流侵蚀,加剧水土流失,使地表污染物质加倍迁入河流<sup>[38]</sup>。以往研究多直接探讨各级坡景观特征与水质污染物指标的关系<sup>[3]</sup>,并没有在此基础上进一步分析各

级坡景观特征对水质影响的空间尺度效应。本文发现缓坡耕地是河岸带 100 m 尺度下对水质参数贡献率最 大的指标(表3),是河岸带 100 m 范围内决定河流水质的关键因素。姜世伟等<sup>[39]</sup>、Wang 等<sup>[40]</sup>的研究解释道 这是因为长江上游重庆段受三峡库区大坝回水影响,水面升降规律受人为调控"冬升夏降",夏季河岸带内 "消落带"出露,暴露大量缓坡耕地,因此常有"抢种抢收"农作物的现象,非汛期时水面上升,近河岸带耕地沉 入水面,向河流输送大量污染物质。研究区位于山地丘陵地区,坡耕地的占比较大,建议采用横坡方式耕作, 使用复合肥,并利用田埂保护、等高篱等生物措施增加土壤水分侵入率,防止水土流失[41]。建设用地与 COD<sub>Me</sub>参数呈正相关<sup>[42]</sup>,建设用地是人类生活和工作的密集区域,具备工业点源污染、城镇/农村面源污染等 多种方式,不透水面的铺设、管道排污的设计引起污染物聚集排放,使其成为河流水质的主要污染源地,这一 结论已在相关研究中得到证实[43-45],对于城市水体污染的治理除了控制和净化点源生活生产污水外,更重要 的是加快海绵型城市建设,对面源污染进行治理<sup>[46-47]</sup>。建设用地与 DO 参数呈正相关,与乔郭亮等的研究结 果一致<sup>[48]</sup>,而朱珍香等<sup>[9]</sup>的研究发现建设用地与 DO 参数的关系随季节发生变化。这是因为水体 DO 含量还 受到水体物理、化学过程及微生物活动影响<sup>[49-50]</sup>。研究区林地与水质指标呈负相关,即林地对缓解水质恶化 有积极作用,为"汇"景观。这与吕乐婷等[51]、唐廉等[52]学者的观点一致,林地能拦截地表径流、捕获沉积物、 消纳污染物、从而显著减少径流中污染物负荷<sup>[53]</sup>。草地与 NH<sup>+</sup>-N 参数负相关,李昆等<sup>[11]</sup>认为草地,尤其是大 面积分布的草地能减小径流中的 NH4-N 含量。本文中草地与 DO、COD<sub>Mn</sub>参数的关系随时间变化,在汛期时 与 DO 和 COD<sub>Mn</sub>参数负相关,能有效缓解水污染,但在非汛期时与 DO 和 COD<sub>Mn</sub>参数呈正相关。草地对水质对 影响方式存在争议,有待深入研究,段少琼等[54]、官宝红等[55]、孙金华等[53]认为草地能有效减缓水污染,而 欧洋等<sup>[56]</sup>发现草地面积的增加会导致水质恶化, de Mello 等<sup>[57]</sup>则认为草地对水质优劣没有影响。

### 3.2 景观格局对河流水质的影响

PD 和 ED 指标常用于表征景观的破碎程度和边缘密度,与 DO、COD<sub>Mn</sub>参数在非汛期呈正相关,在汛期为 不相关或微弱的正相关。斑块的边缘调控着斑块之间的物质能量流动,较高的 PD、ED 意味着区域内景观人 类活动强,斑块空间分布趋于离散,流域水质恶化风险较大<sup>[S8]</sup>。吉冬青等<sup>[59]</sup>也指出景观破碎程度高,林地等 "汇"景观被切割成较小斑块,对邻近"源"斑块输出的污染物质的截留能力下降,水质恶化风险增加。本文 中,COHESION 和 AI 指标均与 NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N 参数呈正相关,COHESION 和 AI 指标反映区域内斑块的物理连通性和 聚集程度,从而反映物质在斑块之间的传播扩散能力<sup>[60]</sup>。因此,研究区斑块越聚集连片分布,水体中氨氮的 浓度也就越高。但也有研究表明景观越聚集,水质受人类活动的影响程度也就越小<sup>[61]</sup>。胡和兵等<sup>[58]</sup>对出现 不同结论的原因进行了解释,"源"景观斑块越规整、越聚集,污染物质越容易集中生产和排放,对水质的污染 作用也就越强;而"汇"景观斑块越规整,净化地表径流携带的污染物质的能力也就越强。研究区耕地沿岸广 泛分布,为河岸带尺度下面积占比最大的土地利用类型(图 2),连片分布的耕地使含氮污染物集中产生和输 出,从而使 AI 和 COHESION 与氨氮浓度呈正相关。

# 3.3 坡地景观特征对水质的时空差异性影响

研究结果表明,坡地景观特征对水质的影响程度在河岸带缓冲区大于子流域,随空间尺度增大先增强后 减弱(表3);其中河岸带 100 m 至 300 m 为坡地景观影响河流水质的关键空间尺度,并以河岸带 200 m 尺度 下坡地景观对水质影响最大。有研究认为,相较于子流域尺度,河岸带尺度下的土地利用强烈影响河流水 质<sup>[56,62]</sup>。方娜等<sup>[13]</sup>的研究解释道可能是因为子流域面积相对较大,而研究区地形又较为复杂,污染物质在 输送至河流的途径中被土壤存储转换、被植被截留吸收。洪超等<sup>[29]</sup>的研究结果表明河流两侧 0—0.3 km 范 围内的土地利用对水质的影响程度较大,是水污染防治的关键尺度。Dai 等<sup>[8]</sup>的研究同样认为土地利用类型 对入河水质的影响在缓冲区 200 m 尺度达到峰值,因为该区域内的生活生产污水、化肥和农药等污染物往往 直接输送到河流,被稀释、转化、截留的途径较少。因此建设和保护河岸森林防护带可以有效地保护非点源污 染物和营养盐的输入,起到促进水质净化等重要作用<sup>[28]</sup>。

坡地景观对河流水质的影响具有季节差异,且季节差异随坡地景观的空间尺度发生变化。河岸带 100 m

至 500 m 尺度下, 坡地景观特征对水质的影响程度在汛期强于非汛期, 季节差异低于 2.36%; 在河岸带 1000 m 尺度下为非汛期强于汛期, 季节差异为 4.89%。研究区地表坡降大, 汛期降雨增多, 水土流失加剧, 径流携带污染物质在坡地地形的帮助下加速汇入河流, 使得污染源地对水质的污染程度进一步加强<sup>[3]</sup>。但坡地景观与水质的关联程度在河岸带 1000 m 尺度下却为非汛期高于汛期, 而在子流域尺度下基本无季节差异。这种坡地景观对河流水质的季节差异影响随空间尺度变化的原因尚不清楚, 具体的变化方式和机制有待继续深入挖掘。

#### 4 结论

(1) 坡地景观对 2015 年长江上游重庆段河流水质的影响存有空间尺度效应。研究区坡地景观与水质的 关联程度在缓冲区尺度高于子流域尺度。河岸带 100 m 至 300 m 尺度下坡地景观对水质参数的总解释率大 于 90%,是坡地景观影响河流水质的关键尺度,其中以河岸带 200 m 尺度下总解释率最大,为影响河流水质的 最有效尺度。

(2) 坡地景观对 2015 年长江上游重庆段河流水质的影响具有季节差异,且季节差异随观测尺度发生变化。坡地景观特征对河流水质的影响程度在河岸带 100 m 至 500 m 尺度下为汛期强于非汛期;在河岸带 1000 m 尺度下相反,坡地景观对水质的总解释率在非汛期比汛期高 4.89%;在子流域尺度无明显季节差异。

(3) 耕地和建设用地为污染 2015 年长江上游重庆段河流水质的"源景观",研究区耕地占比与 NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N 参数呈正相关,建设用地占比与 COD<sub>Mn</sub>、DO 指标呈正相关,其中缓坡耕地对水质的整体贡献率大于总地类耕地。林地与水质参数呈负相关,是有效缓解水污染的"汇景观"。草地与 NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N 参数呈负相关,与 DO、COD<sub>Mn</sub> 参数的关系随季节发生变化。

(4)除缓坡耕地外,对2015年长江上游重庆段河流水质的整体贡献率较高的关键指标均为景观格局指标。COHESION、AI指标均与NH<sup>+</sup><sub>4</sub>-N参数呈正相关;PD、ED指标与DO、COD<sub>Mn</sub>参数的关系在非汛期呈正相关,在汛期呈不相关或微弱的正相关。

研究通过分析不同时空尺度下坡地景观特征与河流水质的关系,确定了水污染防治的关键时空尺度和重要景观特征。研究在常规的景观特征-水质关联分析基础上,充分考虑了地形坡度的影响,结果更贴合山地丘陵区的真实状况,可为山地丘陵区的水环境保护提供参考。

#### 参考文献(References):

- [1] 刘敏,赵良元,李青云,邹靖怡,胡园,张屹哲,徐平,吴志广,邓玮,陶晶祥.长江源区主要河流水化学特征、主要离子来源.中国环境 科学,2021,41(3):1243-1254.
- [2] 李俊然,陈利顶,郭旭东,傅伯杰.土地利用结构对非点源污染的影响.中国环境科学,2000,20(6):506-510.
- [3] 蔡宏,林国敏,康文华.赤水河流域中上游坡地景观特征对河流水质的影响.地理研究,2018,37(4):704-716.
- [4] 王飞,陶宇,欧维新.景观格局变化的水质净化服务响应关系研究进展.地球科学进展, 2021, 36(1):17-28.
- [5] 徐启渝,王鹏,舒旺,张华,丁明军.不同空间划分方式下袁河流域景观结构对水质的影响.环境科学学报,2020,40(12):4325-4337.
- [6] Shehab Z N, Jamil N R, Aris A Z, Shafie N S. Spatial variation impact of landscape patterns and land use on water quality across an urbanized watershed in Bentong, Malaysia. Ecological Indicators, 2021, 122: 107254.
- [7] 张建, 雷刚, 漆良华. 南水北调中线水源区丹江口市域景观格局变化及氮磷净化能力. 生态学报, 2021, 41(6): 2261-2271.
- [8] Dai X Y, Zhou Y Q, Ma W C, Zhou L G. Influence of spatial variation in land-use patterns and topography on water quality of the rivers inflowing to fuxian lake, a large deep lake in the plateau of southwestern China. Ecological Engineering, 2017, 99: 417-428.
- [9] 朱珍香,高肖飞,彭凤,陈辉煌,唐立娜,杨军. 厦门后溪水质与流域景观特征沿城乡梯度的变化分析. 生态学报, 2019, 39(6): 2021-2033.
- [10] Song Y, Song X D, Shao G F, Hu T G. Effects of land use on stream water quality in the rapidly urbanized areas: a multiscale analysis. Water, 2020, 12(4): 1123.
- [11] 李昆,谢玉静,孙伟,王祥荣,李兆华,王玲.农业主产区湖泊水质对湖滨带多尺度景观格局的空间响应.应用生态学报,2020,31(6): 2057-2066.
- [12] 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. Ecological Indicators, 2020, 113: 106226.
- [13] 方娜,刘玲玲,游清徽,田娜,吴燕平,阳文静.不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响.环境科学,2019,40(12):5348-5357.
- [14] Huang J L, Li Q S, Pontius R G Jr, Klemas V, Hong H S. Detecting the dynamic linkage between landscape characteristics and water quality in a subtropical coastal watershed, Southeast China. Environmental Management, 2013, 51(1): 32-44.
- [15] 彭勃,付永胜,赵君凤,周高峰.小流域土地利用景观格局对水质的影响.生态科学,2019,38(3):90-99.
- [16] 李雪,张婧,于婉晴,范雅双,李小玉.京杭运河杭州段城市景观格局对河网水环境的影响. 生态学报, 2021, 41(13): 5242-5253.

- [17] Wen X, Deng X Z, Zhang F. Scale effects of vegetation restoration on soil and water conservation in a semi-arid region in China: resources conservation and sustainable management. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 151: 104474.
- [18] 林国敏,蔡宏,康文华,吴愈锋,王跃跃.赤水河中上游坡景观特征动态变化研究.生态科学,2019,38(5):151-159.
- [19] 黄宇云, 佘明辉, 陆晶, 孙昭华, 田浩永. 三峡建库后东洞庭湖适宜生态水位需求分析. 湖泊科学, 2020, 32(2): 417-427.
- [20] 李月臣,刘春霞,赵纯勇,黄建辉.三峡库区重庆段水土流失的时空格局特征.地理学报,2008,63(5):502-513.
- [21] 王成,李颢颖,何焱洲,马小苏,周明茗.重庆直辖以来乡村人居环境可持续发展力及其时空分异研究.地理科学进展,2019,38(4): 556-566.
- [22] 朱惇,徐芸,贾海燕,雷俊山,陈炼钢,杨叶涛.三峡库区江段潜在水环境污染风险评价研究.长江流域资源与环境,2021,30(1): 180-190.
- [23] 汪言在, 苟诗薇. 重庆市降雨侵蚀力空间格局及其变化. 地理科学, 2013, 33(1): 116-122.
- [24] 方德贤,董新宁,邓承之,吴钲,海川,高松,黄安宁. 2008—2016年重庆地区降水时空分布特征. 大气科学, 2020, 44(2): 327-340.
- [25] 王金亮,黄志霖,邵景安,李阳兵.林地景观点格局的样带梯度分布与空间聚集特征——以重庆三峡库区生态屏障区为例.地理科学进展,2013,32(2):308-317.
- [26] 赵紫涵, 宋贵生, 赵亮. 秦皇岛外海夏季溶解氧与 pH 的变化特征分析. 海洋学报, 2020, 42(10): 144-154.
- [27] 王佳宁,徐顺青,武娟妮,卢静,张筝,程亮.长江流域主要污染物总量减排及水质响应的时空特征.安全与环境学报,2019,19(3): 1065-1074.
- [28] 张殷俊, 陈爽, 相景昌. 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. 长江流域资源与环境, 2011, 20(9): 1054-1061.
- [29] 洪超, 刘茂松, 徐驰, 杨雪姣, 池婷, 田颖. 河流干支流水质与土地利用的相关关系. 生态学报, 2014, 34(24): 7271-7279.
- [30] 徐新良, 庄大方, 贾绍凤, 胡云峰. GIS 环境下基于 DEM 的中国流域自动提取方法. 长江流域资源与环境, 2004, 13(4): 343-348.
- [31] 杨洁,许有鹏,高斌,王跃峰,徐羽,马倩.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.湖泊科学, 2017,29(4):827-835.
- [32] 王杰,李鹏,高海东,时鹏,张秦岭,杨倩楠,马勇勇.丹江上游土地利用/景观指数与水质关系初探.水土保持研究,2018,25(6): 383-389.
- [33] 杨强强, 徐光来, 杨先成, 李爱娟, 陈晨. 青弋江流域土地利用/景观格局对水质的影响. 生态学报, 2020, 40(24): 9048-9058.
- [34] 赵鹏, 夏北成, 秦建桥, 赵华荣. 流域景观格局与河流水质的多变量相关分析. 生态学报, 2012, 32(8): 2331-2341.
- [35] Hashemi F, Olesen J E, Dalgaard T, Børgesen C D. Review of scenario analyses to reduce agricultural nitrogen and phosphorus loading to the aquatic environment. Science of the Total Environment, 2016, 573: 608-626.
- [36] Zhang J, Li S Y, Dong R Z, Jiang C S, Ni M F. Influences of land use metrics at multi-spatial scales on seasonal water quality: a case study of river systems in the Three Gorges Reservoir Area, China. Journal of Cleaner Production, 2019, 206: 76-85.
- [37] 汪涛,朱波,罗专溪,张剑.紫色土坡耕地硝酸盐流失过程与特征研究.土壤学报,2010,47(5):962-970.
- [38] 蔡强国, 吴淑安. 紫色土陡坡地不同土地利用对水土流失过程的影响. 水土保持通报, 1998, 18(2): 1-8, 35-35.
- [39] 姜世伟,何太蓉,汪涛,唐家良,朱波.三峡库区消落带农用坡地氮素流失特征及其环境效应.长江流域资源与环境,2017,26(8): 1159-1168.
- [40] Wang T, Zhu B, Zhou M H, Hu L, Jiang S W, Wang Z. Nutrient loss from slope cropland to water in the riparian zone of the three gorges reservoir: process, pathway, and flux. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 302: 107108.
- [41] 闫腾云,王克勤,赵洋毅,冷鹏,陈宇,张洋.等高反坡台阶整地对坡耕地农田耗水及水量平衡的影响.水土保持研究,2020,27(4): 93-98,104-104.
- [42] 张敏,李令军,赵文慧,许金浩,赵文吉.密云水库上游河流水质空间异质性及其成因分析.环境科学学报,2019,39(6):1852-1859.
- [43] Carstens D, Amer R. Spatio-temporal analysis of urban changes and surface water quality. Journal of Hydrology, 2019, 569: 720-734.
- [44] 汪昱昆,程锐辉,曾鹏,车越.上海地区河网水质空间分异及对河岸带土地利用的响应.生态与农村环境学报,2019,35(7):925-932.
- [45] Yazdi M N, Sample D J, Scott D, Wang X X, Ketabchy M. The effects of land use characteristics on urban stormwater quality and watershed pollutant loads. Science of the Total Environment, 2021, 773; 145358.
- [46] 俞孔坚,李迪华,袁弘,傅微,乔青,王思思."海绵城市"理论与实践.城市规划,2015,39(6):26-36.
- [47] 董新宇,张静慧,袁鹏,宋永会.基于多目标优化的低影响开发设施布局方法.环境科学学报,2021,41(7):2933-2941.
- [48] 乔郭亮,周寅康,顾铮鸣,何杰.苏南地区景观格局特征与坑塘水质关联关系.农业工程学报,2021,37(10):224-234.
- [49] 张莹莹, 张经, 吴莹, 朱卓毅. 长江口溶解氧的分布特征及影响因素研究. 环境科学, 2007, 28(8): 1649-1654.
- [50] 池连宝, 宋秀贤, 袁涌铨, 周鹏, 曹西华, 俞志明. 夏、冬季黄东海溶解氧的分布特征研究. 海洋与湖沼, 2017, 48(6): 1337-1345.
- [51] 吕乐婷, 高晓琴, 刘琦, 江源. 东江流域景观格局对氮、磷输出的影响. 生态学报, 2021, 41(5): 1758-1765.
- [52] 唐廉, 胡晓辉, 权冠中, 谢世友, 陈春秀. 潭江流域水质时空分布特征及其与土地利用的相关性分析. 地球与环境, 2018, 46(4): 364-372.
- [53] 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. 中国环境科学, 2011, 31(12): 2052-2057.
- [54] 段少琼,安艳玲,苏孝良,吴起鑫,金桃,侯祎亮,吴旌滔.三岔河流域不同尺度土地利用对水质的影响.环境污染与防治,2017,39 (5):525-529,533-533.
- [55] 官宝红,李君,曾爱斌,邓劲松,张军.杭州市城市土地利用对河流水质的影响.资源科学,2008,30(6):857-863.
- 「56] 欧洋, 王晓燕, 耿润哲. 密云水库上游流域不同尺度景观特征对水质的影响. 环境科学学报, 2012, 32(5): 1219-1226.
- [57] de Mello K, Valente R A, Randhir T O, dos Santos A C A, Vettorazzi C A. Effects of land use and land cover on water quality of low-order streams in southeastern brazil: watershed versus riparian zone. CATENA, 2018, 167: 130-138.
- [58] 胡和兵,刘红玉,郝敬锋,安静.南京市九乡河流域景观格局空间分异对河流水质的影响.环境科学,2012,33(3):794-801.
- [59] 吉冬青, 文雅, 魏建兵, 吴志峰, 刘庆, 程炯. 流溪河流域景观空间特征与河流水质的关联分析. 生态学报, 2015, 35(2): 246-253.
- [60] Ding J, Jiang Y, Liu Q, Hou Z J, Liao J Y, Fu L, Peng Q Z. Influences of the land use pattern on water quality in low-order streams of the Dongjiang River basin, China; a multi-scale analysis. Science of the Total Environment, 2016, 551-552; 205-216.
- [61] 焦胜,杨娜,彭楷,郭谌达,李振民,周怀宇. 沩水流域土地景观格局对河流水质的影响. 地理研究, 2014, 33(12): 2263-2274.
- [62] 黄金良,李青生,洪华生,林杰,曲盟超.九龙江流域土地利用/景观格局-水质的初步关联分析.环境科学,2011,32(1):64-72.