

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2024.02.06

三峡库区多时空尺度土地利用和景观格局对水质的影响

赵灿¹, 李毅¹, 吴雷祥², 黄伟², 关荣浩¹

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国水利水电科学研究院水生态环境研究所, 北京 100038)

摘要: 为了探究三峡库区水质对不同尺度的土地利用和景观格局的响应, 基于三峡库区 2019—2021 年 7 个断面的水文与水质数据和 2020 年土地利用数据, 分析了水质时空异质性、多尺度河岸带缓冲区内土地利用和景观格局特征, 同时利用相关性分析和冗余分析(RDA)确定了土地利用和景观格局对水质指标的影响及最佳影响尺度, 并采用偏最小二乘回归(PLSR)探究了最佳影响尺度下的关键影响因子。结果表明: 三峡库区水质状况整体稳定, 枯水期的水质优于丰水期, 水质状况主要受到面源污染、支流汇入、磷矿产业和城镇化的影响; 小尺度缓冲区内景观斑块破碎化较严重, 但多样性较高, 耕地是库区的优势景观类型, 其破碎化程度的增加有利于水环境的改善; 林地和草地在枯水期对水环境的净化作用优于丰水期, 而水域是河流氮磷污染物的主要来源; 整体上土地利用和景观格局对水质指标的解释能力在丰水期高于枯水期, 且在 300 m 缓冲区尺度下解释能力最强, 其中耕地、草地、水域和斑块密度(PD)是影响水质指标的关键变量。

关键词: 水质; 时空尺度; 景观格局; 土地利用; 偏最小二乘回归(PLSR); 三峡库区

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2024)02-0048-12

Impact of land use and landscape pattern on water quality on multiple temporal and spatial scales in the Three Gorges Reservoir area

ZHAO Can¹, LI Yi¹, WU Leixiang², HUANG Wei², GUAN Ronghao¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Department of Water Ecology and Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: To investigate the response of water quality to land use and landscape pattern of different scales, this study analyzed the spatial and temporal heterogeneity of water quality and the characteristics of land use and landscape patterns in multi-scale riparian buffer zones based on the hydrological and water quality data of seven transects in the Three Gorges Reservoir area from 2019 to 2021 and the land use data in 2020. Correlation analysis and redundancy analysis (RDA) were also used to determine the effects of land use and landscape patterns on water quality indicators and the optimal scale of influence. Then, partial least squares regression (PLSR) was used to explore the key influencing factors under the optimal scale of influence. The results show that the overall water quality condition in the Three Gorges Reservoir area was stable, the water quality in the dry water period was better than that in the wet period, and the water quality condition was mainly affected by non-point source pollution, tributary confluence, the phosphorus industry and urbanization. Furthermore, the landscape patches in the small-scale buffer zone were severely fragmented, but more diversified; cultivated land was the dominant landscape type in the reservoir area, and its increased fragmentation was conducive to improving the aquatic environment; forest and grassland had a better purifying effect on the water environment in the dry period than in the wet period,

收稿日期: 2023-08-08; 修回日期: 2023-11-24

基金项目: 三峡水库幸福河湖建设研究项目(WE1222B112022); 三峡工程运行安全综合监测系统, 库区维护和管理基金项目(2136703)

作者简介: 赵灿(1999—), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事水环境研究。

通讯作者: 李毅(1974—), 女, 陕西武功人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水文与水资源研究。

whereas waters were the main source of nitrogen and phosphorus pollutants in the river. Generally, the explanatory ability of land use and landscape patterns on water quality indicators was higher in the wet period than in the dry period, and was strongest on the 300 m buffer scale, where cultivated land, grassland, waters and patch density (PD) were the key variables influencing the water quality indicators.

Key words: water quality; temporal and spatial scale; landscape pattern; land use; partial least squares regression (PLSR); Three Gorges Reservoir area

1 研究背景

三峡工程作为我国的一项重大水利枢纽工程,对长江经济带的可持续发展起着重要的战略作用。然而,三峡工程的建设对其周围环境产生了深远的影响,尤其是对库区水质的影响,引起了社会的广泛关注^[1]。自2010年首次实现175 m 试验性蓄水目标以来,库区江段的水体流态发生了变化,水位出现了反季节的涨落现象,同时库区的工农业发展和人口分布也发生了显著的变化^[2-4]。土地利用类型和景观格局作为人类活动和自然变化的综合体现,对流域水质和水文过程有着深刻的影响^[5-6]。因此分析水质指标与土地利用类型面积占比、景观格局指数之间的关系,对于水环境保护和土地的合理规划具有重大的意义。

土地利用和景观格局对水质的影响因空间尺度而异。目前,常用的缓冲区有河岸带缓冲区、河段缓冲区和子流域等3种。Zhong等^[7]的研究表明,在滇池流域,1 000 m 河岸带缓冲区的景观格局对水质的影响最为显著。温嘉伟等^[8]的研究则揭示了子流域与河岸100 m 是土地利用类型与景观格局影响鄱阳湖水质的关键尺度。尽管不少研究都显示了水质受到土地利用类型和景观格局的显著影响,但由于区域异质性的存在,关于对水质指标解释能力最强的空间尺度尚未形成一致的观点^[9-10]。

目前,多元统计模型被广泛用于量化水质与土地利用类型、景观格局的关系,比如逐步多元线性回归、地理加权回归和最小二乘回归等方法。然而,这些方法无法解决共线性、解释变量数量大于样本数量的问题^[11-12],相比之下,偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)能够克服这些问题^[13]。张志敏等^[14]使用PLSR分析了河网区域景观因子对不同季节水质的影响,并证明了使用PLSR识别重要因子的可行性。项颂等^[15]采用PLSR分析了海拉尔河流域土地利用和水质的耦合关系,发现能够显著影响水质的土地利用指标为农田面积占比和蔓延度指数等。

不少学者对三峡库区的水质与土地利用类型之

间的关系进行了分析研究,例如,Huang等^[16]利用冗余分析(redundancy analysis, RDA)对三峡库区黑河沟流域的土地利用与水质的关系进行了探讨,研究表明,水质下降与城镇、农业和森林用地密切相关;Zhang等^[17]利用冗余分析(RDA)探究了三峡库区在多空间尺度下不同土地利用指标对水质的效应。然而,水质的变化不仅取决于土地利用类型,还依赖于各种景观格局特征。因此,定量分析二者对库区水质的影响对水环境管理更为有益。

鉴于此,本文利用三峡库区2019—2021年7个代表断面的水质数据,结合2020年土地利用数据,分析库区水质时空变化特征及土地利用和景观格局现状,并采用相关性分析、RDA和PLSR方法,探讨不同时空尺度下的三峡库区水质指标对土地利用类型和景观格局的响应关系,旨在找出最佳影响尺度及影响水质的关键变量,以期对三峡库区水质管理和土地利用规划提供理论依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

三峡库区位于长江上游末端(北纬 $28^{\circ}56'$ ~ $31^{\circ}44'$,东经 $106^{\circ}16'$ ~ $111^{\circ}28'$),上至重庆市江津区,下达湖北省宜昌市,涵盖渝鄂的26个区(县),长约760 km,面积约为1 084 km²,为狭谷型库区^[18]。库区地貌以山地、丘陵为主,地形起伏剧烈^[19]。截止2021年,三峡库区常住人口约为 $2\ 231 \times 10^4$,耕地面积大约有 95.73×10^4 hm²,库区中土壤侵蚀强度在轻度以下的土地占据了总土地面积的59%。库区各个区(县)自然条件等有差异,经济发展水平也不同,位于库尾的重庆主城区及其周边的区(县)城镇化水平较高,经济条件较好,人口密度较大,其中江津区等地有重要的禽畜养殖基地;位于库中的区(县)包括云阳县和忠县等农业大县,其耕地面积约占库区总耕地面积的50%,农业种植方式多为下坡栽培,经济作物以柑橘和脐橙等为主;库首区包括夷陵区、秭归县和巴东县等区(县),地形以山地、丘陵为主,耕地多为坡耕地和梯田。

库区的气候为亚热带季风气候,多年平均气温

为 17~19℃, 年降水量为 1 000~1 800 mm, 且有明显的季节性变化, 雨热同期。库区枯水期为 12 月至次年 3 月, 丰水期为 6—9 月, 其余月份为平水期。2021 年三峡水库 175 m 蓄水工作正式启动, 总库容达到约 $393 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。三峡工程的建设截留了湍急的长江水流, 改变了河段流态和水文泥沙特性^[20]。

2.2 数据来源

选取 2019—2021 年长江干流上的朱沱、铜罐驿、寸滩、清溪场、万县、官渡口和南津关等 7 个断面(图 1) 每月的水质指标以及流量数据, 其中水质数据来源于国家地表水环境质量监测网(<http://www.cnemc.cn/>), 流量数据由《三峡工程公报》获得。监测水质指标包括 pH 值、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、化学需氧量(COD)、五日生化需氧量(BOD₅)、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)和总氮(TN)等

8 个指标, 其中 2020 年 2—3 月和 2021 年 2 月的数据缺失。

三峡库区 DEM 数据由地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn>) 获取, 分辨率为 30 m。2020 年土地利用数据来源于国家基础地理信息中心开发的 30 m 空间分辨率全球地表覆盖数据 GlobeLand30(<http://globeland30.org/>), 该数据以美国陆地资源卫星 Landsat 和中国环境减灾卫星 HJ-1 等遥感影像数据作为信息源, 总体精度达到 85.72%, 可以满足需求。GlobeLand30 数据包括耕地、森林和草地等 10 个一级地类, 根据研究目的及三峡库区实际土地利用状况, 运用 ArcGIS10.6 中的重分类工具, 将土地利用分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地等 6 类, 并向河流两岸水平延伸 300~2 500 m 建立河岸带缓冲区, 详见图 1。

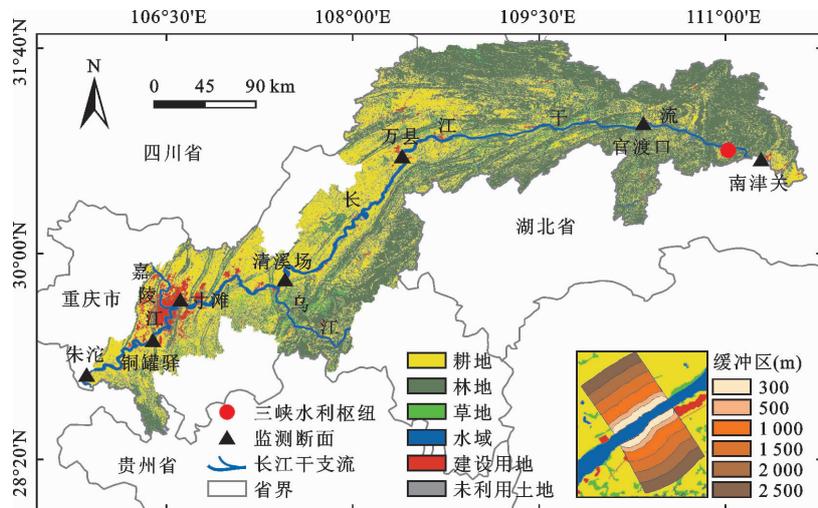


图 1 研究区概况及缓冲区划分

2.3 研究方法

2.3.1 水质评价方法 本研究采用改进内梅罗污染指数法进行水质评价, 该方法是对传统内梅罗污染指数法的修正, 其计算简便、物理概念清晰, 且考虑了一些浓度小但危害较大的因子, 并引入了权重。三峡库区不同水质指标浓度差异较大, 与传统内梅罗污染指数相比, 改进内梅罗污染指数计算的结果更加准确和全面^[21-22]。采用公式(1)~(5)计算改进内梅罗污染指数。

$$P_{\text{改}} = \sqrt{\frac{F'_{\text{max}} + F'^2}{2}} \quad (1)$$

$$F'_{\text{max}} = \left(F_{\text{max}} + \frac{\sum_{i=1}^m F_i}{m} \right) / 2 \quad (2)$$

$$\bar{F}' = \sum_{i=1}^n F_i (r_i / \sum_{i=1}^n r_i) \quad (3)$$

$$F_i = \frac{c_i}{s_i} \quad (4)$$

$$r_i = \frac{s_{i \text{max}}}{s_i} \quad (5)$$

式中: s_i 、 c_i 、 $s_{i \text{max}}$ 分别为水质指标 i 的标准值(Ⅲ类水质标准)浓度、实测值浓度、标准值的最大值浓度, mg/L; r_i 为相关性比值; F_i 为水质指标 i 的污染指数; n 为水质指标个数; m 为前 n 项中 $F_i \geq 1$ 的项数; \bar{F}' 为经权重修正的污染指数; F_{max} 为 F_i 的最大值; F'_{max} 为经权重修正的污染指数的最大值; $P_{\text{改}}$ 为改进内梅罗污染指数。

本研究根据《地表水环境质量标准》(GB 2828—2002)^[23] 中的Ⅲ类水质标准, 计算各水质等级对应的改进内梅罗污染指数值, 计算结果见表 1。

表 1 各水质等级对应的改进内梅罗污染指数值

水质等级	I	II	III	IV	V
$P_{改}$	<0.59	[0.59,0.75)	[0.75,1.00)	[1.00,3.96)	≥ 3.96

2.3.2 统计分析 采用 3 种统计分析方法。

斯皮尔曼(Spearman)相关性分析用于分析水质指标与土地利用类型面积占比、景观格局指数之间的相关程度,使用 SPSS (statistical product and service solutions) 软件计算相关性。

冗余分析(RDA)是一种回归分析结合主成分分析的排序方法,本文选用 RDA 定量探讨三峡库区不同尺度下的土地利用类型和景观格局对水质指标的影响,并通过比较解释度的大小得到最佳缓冲区尺度,使用 Canoco 5.4 软件进行 RDA 计算。

偏最小二乘回归分析(PLSR)用于定量计算土地利用类型和景观格局指数对水质的影响程度。由于自变量共线性诊断的结果显示多个自变量间存在多重共线性,且样本数较少,故本研究适用偏最小二乘回归分析。偏最小二乘回归分析首先使用交叉验证确定因子数,然后计算回归系数(regression coefficient, RC),回归系数表示自变量对因变量的影响方向和强度,同时计算出变量投影重要性(variable importance in projection, VIP),对于 VIP 大于 1 的自变量,认为对因变量有较大的影响^[14]。运用 Python 中的 sklearn 包完成 PLSR 的计算。

2.3.3 缓冲区及景观格局指数分析 三峡库区地形多为山地丘陵,河流汇水作用明显,且河岸边界较

为清晰可辨,因此在水质监测断面建立河岸带状缓冲区,即以监测点断面为中心,沿河岸线向上游和下游分别延伸 1 500 和 500 m 建立缓冲长度,再由左右两岸向陆地方向水平延伸不同的宽度。多项研究已证实,在河流岸边 300~2 000 m 的缓冲区内土地利用格局对河流水质有着决定性的影响^[24-25]。鉴于三峡库区流域内土地利用的变化幅度相对较小,本研究针对性地选取了 6 个递增的缓冲区宽度值(300、500、1 000、1 500、2 000 和 2 500 m),并利用 ArcGIS 10.6 软件构建了对应空间尺度的河岸带状缓冲区(如图 1 所示)。

计算景观格局指数是最普遍的景观格局量化研究方法,景观格局指数既能反映景观空间分布特征,又能反映空间格局复杂程度变化,从而精准总结景观格局信息^[26]。

本文从景观破碎度、聚集度、斑块形状复杂度和景观类型多样性考虑,选取了斑块密度(patch density, PD)、最大斑块指数(largest patch index, LPI)、蔓延度指数(contagion, CONTAG)和香农多样性指数(Shannon's diversity index, SHDI)4 个景观水平上的景观指数,各个景观指数的含义见表 2。基于不同尺度缓冲区的土地利用数据,运用 Fragstats 4.2 软件计算景观格局指数。

表 2 本研究选取的各景观指数及其含义

景观指数	含义
斑块密度(PD)	反映对景观的人为干扰程度,PD 越大,说明破碎化程度越高,空间异质性程度也越大
最大斑块指数(LPI)	反映人类活动的方向和强弱,通过 LPI 可以确定景观的优势种类
蔓延度指数(CONTAG)	反映景观里不同斑块的聚集程度或延展趋势,CONTAG 越大说明优势斑块类型的连接性越强,破碎化程度越低
香农多样性指数(SHDI)	反映景观斑块类型的多样性,SHDI 增大说明斑块类型增多或各斑块在景观中分布均衡

3 结果与分析

3.1 水质时空变化特征

3.1.1 水质时间变化特征 图 2 为 2019—2021 年三峡库区的月流量和部分代表性水质指标的变化特征箱形图。

由图 2(a)可以看出,月流量表现出一定的季节性,从春季到夏季逐渐增加,在夏季达到顶峰,随后

逐渐减小,到冬季时,流量较低。由图 2(b)可以看出,DO 浓度在 6~12 mg/L 之间变化,也呈现出明显的季节性,但与流量变化趋势相反,表现为夏季低、冬季高的特征,DO 反映了生化污染水平,并与水温有较大的关系,随着水温的升高,水中好氧微生物的呼吸作用加强,消耗的 DO 增多,当耗氧速率大于复氧速率时,水中的 DO 浓度降低^[2]。COD_{Mn}、TP 表现出相似的季节性变化,如图 2(c)、2(e)所示,COD_{Mn}

和 TP 的浓度均表现出夏季高、冬季低的特征,且在 8 和 9 月达到峰值,原因可能是夏季降雨充沛,导致农业种植中化肥农药残留物和农村生活污水等随地表径流进入水体,进而使得 COD_{Mn} 等水质指标浓度升高。如图 2(d) 所示, BOD_5 的变化特征没有明显的规律,仅在 2019 年春季、2020 年夏季和 2021 年春季, BOD_5 的浓度相对较高,这种变化特征可能与冬季水位上升造成的消落带被淹没有关,复杂的综合效应导致 BOD_5 浓度在季节之间没有显著差

异^[27]。如图 2(f) 所示,改进内梅罗污染指数从春季开始逐渐增加,到夏季时达到峰值,秋冬季逐渐下降,在 2019 年 8 月和 2021 年 9 月出现峰值,此时水质状况最差,为 IV 类水,原因可能是冬季河流流速缓慢,污染物质易沉积于河底,因此冬季水质相对较好,而夏季降雨驱动了面源污染的增加,导致 8 和 9 月的水质状况较差。从整体上看,2020 年的改进内梅罗污染指数低于 2019 和 2021 年,说明 2020 年的水质状况优于 2019 和 2021 年。

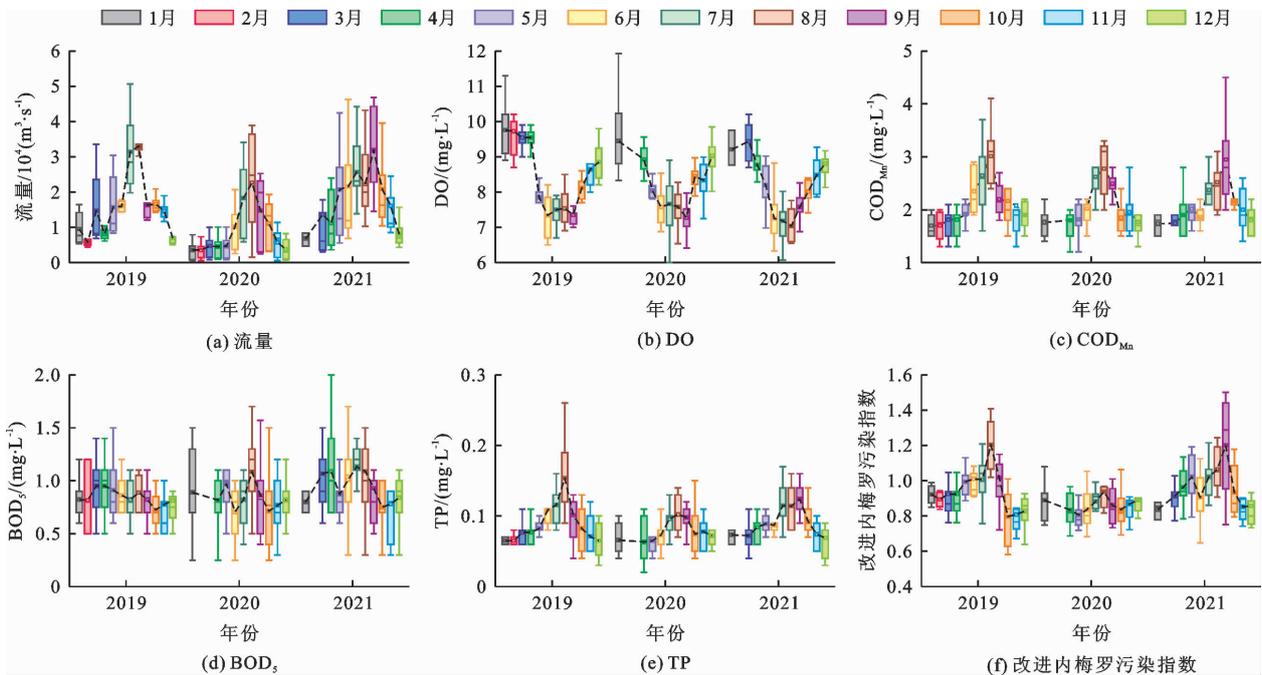


图 2 2019—2021 年三峡库区月流量及主要水质指标的月变化

3.1.2 水质空间变化特征 将库区 2019—2021 年丰水期和枯水期的水质指标数据及改进内梅罗污染指数进行平均化计算,得到的枯水期和丰水期的水质指标和改进内梅罗污染指数的空间分布见图 3。

从图 3 可以看出,各个监测断面的 pH 值总体差异不大。DO 浓度在丰水期和枯水期均表现出库首区略低于库尾区和库中区,其中最低的监测断面是官渡口。 COD_{Mn} 浓度在丰水期表现为库尾区 > 库首区 > 库中区,最高浓度出现在寸滩监测断面,而在枯水期则是库首区的 COD_{Mn} 浓度较高。 COD 浓度在丰水期和枯水期均表现出了库中区 > 库尾区 > 库首区,其中浓度最高的是万县监测断面。 BOD_5 浓度在库尾区的铜罐驿和寸滩监测断面较高,并且铜罐驿、寸滩、万县等监测断面的 BOD_5 浓度呈现出枯水期高于丰水期的特征。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度的空间分布特征显示为库首区和库中区的浓度高于库尾区,反映出下游的水质状况较差,三峡库区的库中区和库

首区耕作面积分布广,特别是在丰水期,化肥农药流失较为严重,导致 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度升高。TN 浓度在不同断面差异并不显著,但整体而言,库首区和库中区的水质状况略好。丰水期的 TP 浓度相较于枯水期显著升高,而且总体上 TP 在库首区和库尾区的浓度较高,其原因是官渡口和南津关之间的香溪河流域有磷化工企业,清溪场上游的乌江也有较发达的磷矿产业^[28],这些因素导致清溪场断面和南津关断面 TP 的浓度较高。各监测断面的改进内梅罗污染指数差异并不明显,铜罐驿和寸滩断面的改进内梅罗污染指数略高,可能与周围人口密度较大有关。河流水质受到人类活动、季节变化、污染源分布以及支流来水汇入等多种因素的共同影响,加之河流本身具有一定的自净和稀释能力,使得各水质指标的空间变化特征呈现出不同的特点^[29]。

3.2 土地利用结构和空间格局分析

图 4 为 2020 年三峡库区各断面不同尺度缓冲

区的土地利用类型面积占比变化情况。由图 4 可以看出,缓冲区的土地利用类型主要为耕地、林地、草地、水域和建设用地,并且不同断面的土地利用结构差异较大。位于上游的朱沱、铜罐驿、寸滩和清溪场的土地利用类型主要以耕地和建设用地为主,且耕地面积随空间尺度的增大而增加。万县周边的土地

利用类型主要是建设用地,随着空间尺度的增大,建设用地面积占比逐渐减少。官渡口周边的土地以耕地、建设用地和林地为主,并且随着空间尺度的增大,建设用地面积占比逐渐减少,耕地和林地面积占比逐渐增加。南津关周边土地以林地为主,随着空间尺度的增大,林地面积占比逐渐减少。

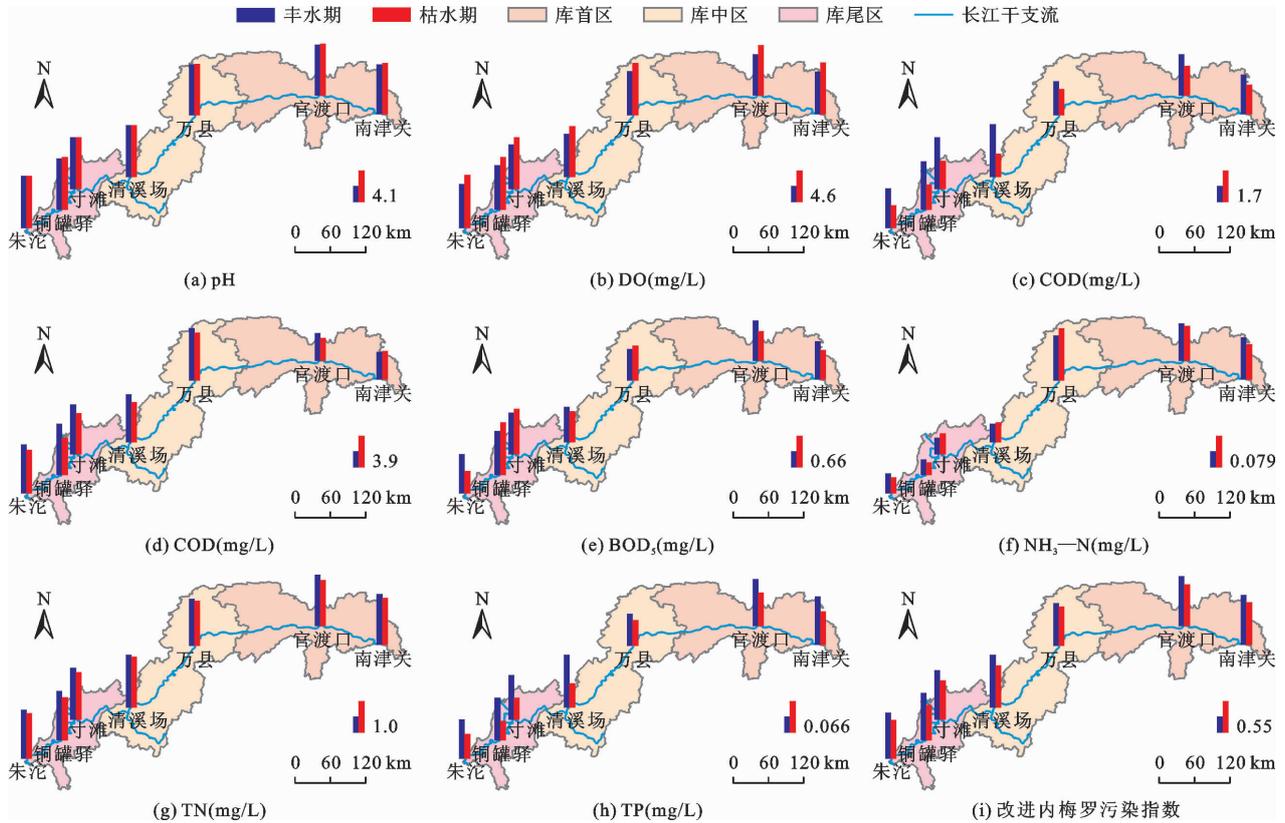


图 3 2019—2021 年丰水期和枯水期三峡库区水质指标空间变化特征

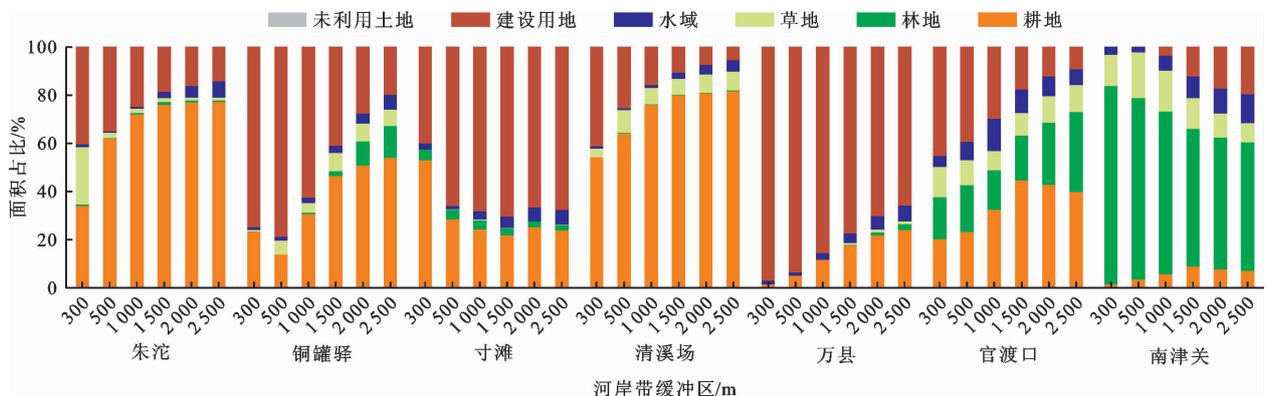


图 4 2020 年三峡库区各断面不同尺度缓冲区土地利用类型占比

图 5 为 2020 年库区不同尺度缓冲区景观格局指数 PD、LPI、CONTAG 和 SHDI 的变化情况。由图 5 可以看出,PD 值随着空间尺度的增大而减少,表明小尺度内景观斑块破碎化较为严重。LPI 在 1 000 ~ 2 000 m 缓冲区内出现较小值,说明在该空间尺度下,景观优势相对减弱,同时人类活动的干扰作用加强。

CONTAG 值在 300 ~ 2 000 m 缓冲区内随尺度的增大而增加,超过 2 000 m 后 CONTAG 值呈下降趋势,CONTAG 值越大说明景观斑块的连通性越好。SHDI 值在 300 ~ 1 000 m 缓冲区内有明显的减少趋势,而在 1 500 ~ 2 500 m 缓冲区内没有显著的变化,这说明较大尺度缓冲区内景观多样性较低。

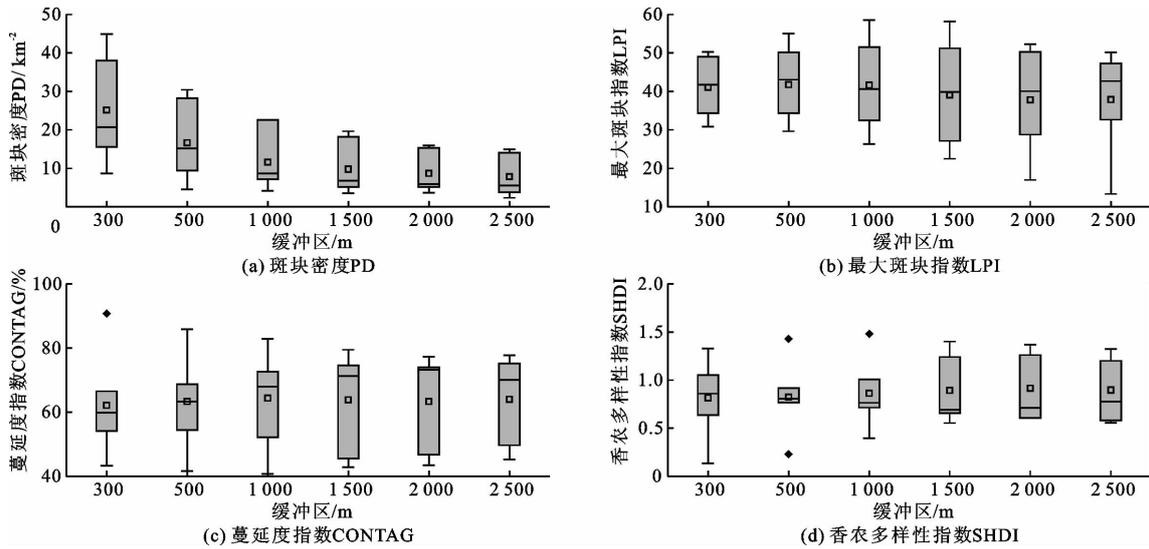
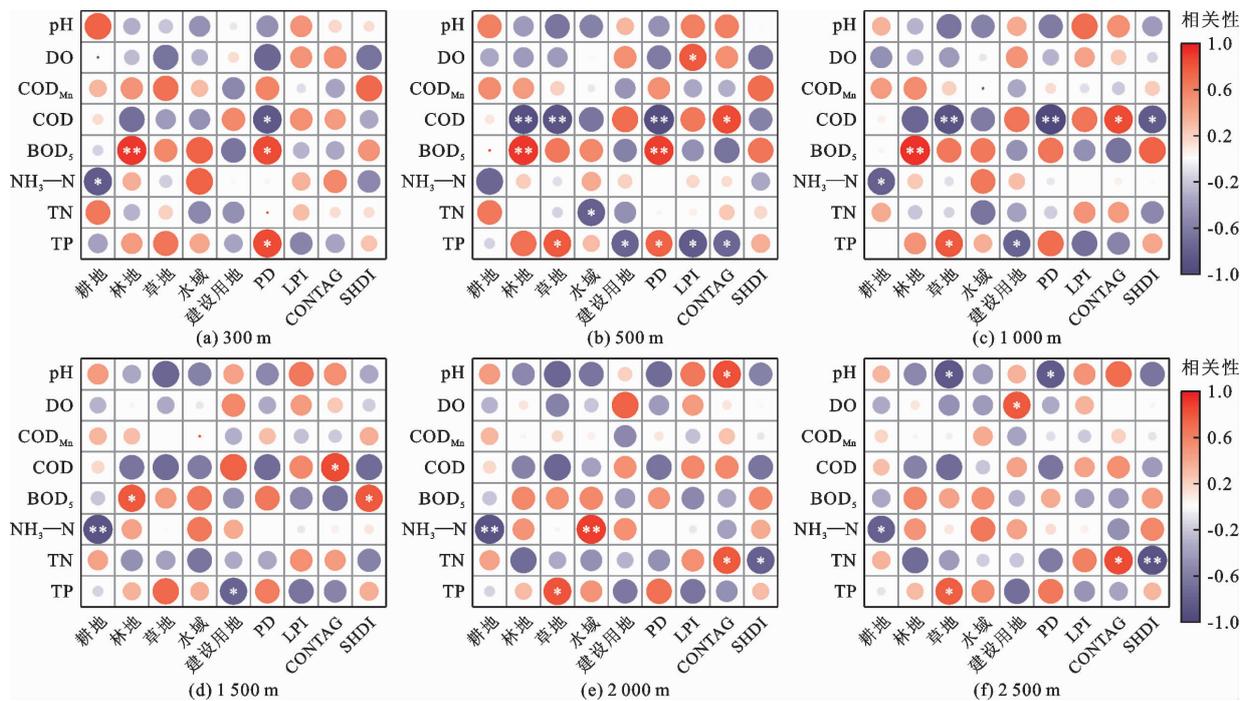


图5 不同尺度缓冲区景观水平指数特征

3.3 土地利用和景观格局对水质的影响

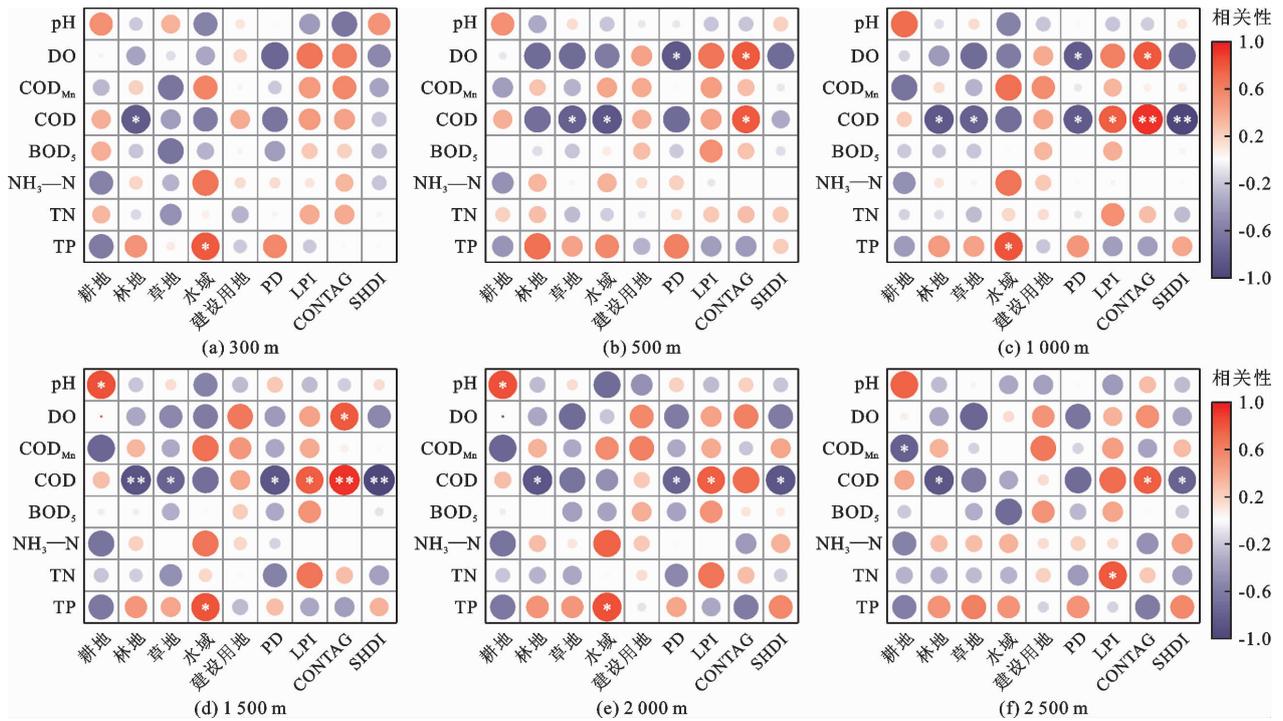
图6、7分别为丰水期、枯水期的不同尺度缓冲区土地利用方式和景观指数与水质指标之间的 Spearman 相关性分析。由图6可以看出,在丰水期,不同缓冲区耕地与NH₃-N呈显著负相关;林地在300~1500 m缓冲区与BOD₅呈极显著或显著正相关,在500 m缓冲区与COD呈极显著负相关;在500和1000 m缓冲区草地与COD呈极显著负相关,而在500、1000、2000和2500 m缓冲区草地与TP呈显著正相关;水域在500 m缓冲区与TN呈显著负相关、在2000 m缓冲区与NH₃-N呈极显著

正相关;建设用地在500~1500 m缓冲区与TP呈显著负相关,在2500 m缓冲区与DO呈显著正相关;PD在300和500 m缓冲区与BOD₅和TP呈显著正相关,在300~1000 m缓冲区与COD呈极显著负相关;LPI在500 m缓冲区与DO呈显著正相关,而与TP呈显著负相关;CONTAG在500~1500 m缓冲区与COD呈显著正相关,在2000和2500 m缓冲区与TN呈显著正相关;SHDI在1000 m缓冲区与COD呈显著负相关,在1500 m缓冲区与BOD₅呈显著正相关,在2000和2500 m缓冲区与TN呈极显著或显著负相关。



注:图中“**”表示 $p < 0.01$,呈极显著相关;“*”表示 $p < 0.05$,呈显著相关。

图6 丰水期不同尺度土地利用方式和景观指数与水质指标之间的 Spearman 相关分析



注:图中“*”表示 $p < 0.01$,呈极显著相关;“*”表示 $p < 0.05$,呈显著相关。

图 7 枯水期不同尺度土地利用方式和景观指数与水质指标之间的 Spearman 相关分析

由图 7 可以看出,在枯水期,耕地在 1 500 和 2 000 m 缓冲区与 pH 呈显著正相关,在 2 500 m 缓冲区与 COD_{Mn}呈显著负相关;除 500 m 缓冲区外,林地不同尺度缓冲区都与 COD 呈显著负相关;草地在 500 ~ 1 500 m 缓冲区范围与 COD 呈显著负相关;水域在 300、1 000、1 500 和 2 000 m 缓冲区与 TP 呈显著正相关,在 500 m 缓冲区与 COD 呈显著负相关;建设用地与水质指标相关性均未达到显著水平;PD 在 500 和 1 000 m 缓冲区与 DO 呈显著负相关,在 1 000 ~ 2 000 m 缓冲区与 COD 呈显著负相关;LPI 在 1 000 ~ 2 000 m 缓冲区与 COD 呈显著正相关;CONTAG 在 500 ~ 1 500 m 缓冲区与 DO、COD 呈极显著或显著正相关;SHDI 在 1 000 ~ 2 500 m 缓冲区与 COD 呈极显著或显著负相关。

3.4 最佳影响缓冲区尺度的识别

表 3 为利用冗余分析 (RDA) 计算的不同时空尺度下土地利用类型和景观格局指数对水质指标的解释率。由表 3 可以看出,整体上丰水期的总解释率高于枯水期。在丰水期,土地利用类型和景观格局指数均在 300 m 缓冲区的总解释率最高,并且总解释率随着缓冲区尺度的增大而降低。在枯水期,土地利用类型在 2 000 m 缓冲区对水质的总解释率最高,达到 83.2%,略高于 300 m 缓冲区的总解释率 77.1%,景观格局指数在 300 m 缓冲区总解释率

最高,并且土地利用类型和景观指数的总解释率均随空间尺度的变化呈现出了不规律的变化特征。结果表明,三峡库区土地利用类型和景观格局指数在较小的空间尺度上的解释率较高,即 300 m 缓冲区是实施水质管理的最有效缓冲区。

3.5 影响 300 m 缓冲区水质的关键变量

为了进一步探究最佳影响尺度下土地利用类型和景观格局指数对水质的影响,本研究选取 300 m 作为最佳缓冲区尺度,并通过 PLSR 分析,获得回归系数 (RC) 和关键变量 (VIP 值 > 1),如表 4 所示。

由表 4 可以看出,VIP 值最大的土地利用类型和景观格局指数为水质指标的关键影响变量,丰水期和枯水期水质指标的关键影响变量存在着差异,但无论在丰水期还是在枯水期,土地利用类型对水质指标的贡献较大。在丰水期,耕地是 pH、NH₃-N 和 TN 的关键变量;水域是 DO 的最重要变量;草地对 COD_{Mn}的贡献最大;建设用地是 BOD₅ 的关键变量;而 COD 和 TP 的关键变量是 PD;相对而言,林地和 LPI 在丰水期对水质指标的影响并不明显。在枯水期,耕地是 NH₃-N 和 TN 的最重要变量;草地是 DO 和 BOD₅ 的关键变量;水域对 COD_{Mn}和 TP 的贡献最大;而 pH 和 COD 的关键变量分别是 SHDI 和 CONTAG;同样地,林地和 LPI 在枯水期也没有对任何水质指标表现出重要的影响。

表 3 多尺度土地利用类型和景观格局指数对水质指标的解释率

季节	缓冲区/m	土地利用类型					景观格局指数				
		解释率/%			伪 <i>F</i> 统计量	显著性水平	解释率/%			伪 <i>F</i> 统计量	显著性水平
		第一轴	第二轴	所有轴			第一轴	第二轴	所有轴		
丰水期	300	57.97	26.04	86.40	3.2	0.13	58.70	27.63	89.00	4.1	0.04
	500	61.32	19.69	83.80	2.6	0.16	58.45	17.11	79.50	1.9	0.17
	1 000	61.32	18.35	82.70	2.4	0.17	59.60	12.83	77.50	1.7	0.24
	1 500	60.04	16.70	80.70	2.1	0.18	57.87	6.64	68.20	1.1	0.50
	2 000	59.80	17.91	79.70	2.0	0.21	54.78	14.85	75.60	1.5	0.30
	2 500	53.71	18.22	76.00	1.6	0.33	48.25	10.42	64.30	0.9	0.60
枯水期	300	57.14	12.11	77.10	1.7	0.26	61.30	18.31	81.00	2.1	0.14
	500	53.01	7.97	65.40	0.9	0.56	44.61	19.62	68.80	1.1	0.47
	1 000	53.19	9.01	66.20	1.0	0.53	45.03	16.21	71.40	1.2	0.41
	1 500	52.99	10.65	70.90	1.2	0.44	37.94	12.65	62.00	0.8	0.65
	2 000	60.06	13.41	83.20	2.5	0.14	49.84	13.84	75.90	1.6	0.29
	2 500	48.32	14.84	66.10	1.0	0.53	34.76	12.20	52.20	0.5	0.81

表 4 300 m 缓冲区的土地利用类型和景观格局指数与水质指标的 PLSR 回归系数

季节	水质指标	耕地	林地	草地	水域	建设用地	PD	LPI	CONTAG	SHDI
丰水期	pH	0.033 *	-0.017	0.008	-0.017	-0.008	-0.098	0.091	-0.084	0.067
	DO	-0.112	0.133	-0.126	-0.100 *	-0.011	-0.258	0.139	-0.239	0.093
	COD _{Mn}	0.016	-0.063	0.254 *	0.045	-0.026	-0.140	0.179	-0.163	0.146
	COD	0.271	-0.589	0.237	-0.603	0.348	-0.391 *	0.099	0.358	-0.237
	BOD ₅	-0.001	0.033	0.016	0.050	-0.039 *	-0.032	0.068	-0.081	0.064
	NH ₃ -N	-0.004 *	-0.004	0.003	0.011	0.005	0.013	-0.004	0.020	-0.012
	TN	0.124 *	-0.024	0.030	-0.076	-0.070	0.094	-0.054	0.106	-0.059
TP	0.000	0.002	0.003	0.004	-0.003	0.015 *	-0.010	0.009	-0.006	
枯水期	pH	-0.020	0.011	-0.004	-0.046	0.006	-0.116	0.034	-0.157	0.098 *
	DO	-0.092	0.008	0.114 *	-0.053	0.026	-0.210	0.161	-0.118	0.046
	COD _{Mn}	0.028	0.005	-0.104	0.171 *	-0.001	0.076	0.067	0.089	-0.024
	COD	0.993	-0.942	0.436	-0.031	0.101	1.172	-0.481	1.952 *	-1.012
	BOD ₅	0.028	0.072	-0.233 *	0.063	-0.025	-0.075	0.111	-0.091	0.068
	NH ₃ -N	-0.022 *	-0.010	0.002	0.029	0.008	0.047	-0.021	0.053	-0.030
	TN	0.156 *	-0.045	-0.047	0.030	-0.053	0.158	-0.043	0.170	-0.071
TP	0.000	0.002	0.001	0.012 *	-0.002	0.016	-0.006	0.011	-0.005	

注:粗体字表示关键变量(VIP 值 > 1),“*”表示 VIP 值最大的关键变量。

4 讨论

4.1 影响水质时空变化的因素

三峡库区在不同季节的水质状况有所不同,但总体来说,枯水期的水质要优于丰水期。习文祥

等^[30]对三峡库区的水质进行时空变化研究,发现污染物浓度在汛期较高,与本文结论一致。有相关研究指出,在旱季,污染物主要来源于工业等点源污染;但在雨季,污染物主要来源于生活污水和面源污染^[31]。有研究表明,目前面源污染是造成三峡库区

水质下降的主要原因^[32]。三峡库区的农业种植面积较大且多为陡坡垦殖,还有较为发达的禽畜养殖产业,在夏季强降雨的作用下,面源污染物通过地表径流等方式迁移到三峡库区干支流中,对库区水质造成了影响。同时由丰水期到枯水期,库水位的剧烈变动会形成 30 m 落差的消落区,引起两岸的土壤侵蚀。在三峡库区上游流域集中着许多包括磷矿、磷化工和磷石膏库的“三磷”产业,在库区段汇入长江干流的乌江、香溪河等支流流域以及湖北省的巴东县和兴山县也存在“三磷”产业^[33],这些产业多集中于河流沿岸,对库区的水环境造成了一定程度的影响。

4.2 水质对土地利用和景观格局的响应

各水质指标对不同土地利用类型和景观格局指数的响应因时空尺度差异而存在不同。丰水期耕地与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在大部分缓冲区尺度内呈显著负相关,这与部分研究结果一致^[34-35],原因可能是近年来随着库区退耕还林还草等生态建设政策的实施,耕地面积减少,导致农业集约化程度和复种指数越来越高;同时农业生产越来越依赖于化肥和农药的投入以提升作物产量,然而,这种做法导致了更多的污染物进入水体,对水环境造成了不利影响。郑达燕等^[1]的研究结果表明,同属于耕地的水田和旱地对水质的影响存在着差异,水田更易向河流中输入污染物质,而本文并未将耕地细化,可能会对结果产生一定的影响。林地和草地与部分水质指标在枯水期呈显著负相关,而在丰水期表现出正相关的特性,说明在枯水期林地和草地对入河污染物有一定的滞留和吸附作用,但在丰水期,由于强降雨的影响,林地和草地截留和吸附污染物的作用相对减弱。李刚浩等^[36]通过对长坪流域的土地利用与水质的关系研究发现,林地对水质的负面影响在汛期高于非汛期。水域与氮磷类指标呈显著正相关,这与黄益平等^[37]的研究结果一致,可能与当地的水产养殖有关。建设用地与水质指标没有显著的关系,可能是由于部分监测断面附近的建设用地面积占比较少,导致建设用地对水质的影响并不明显。PD 和 SHDI 与水质指标呈显著负相关,PD 值越大,三峡库区的耕地和建设用地的破碎度越大,对水质的影响越小,而 SHDI 值越大,景观多样性越丰富,说明林地和草地等景观会对水质的净化作用越强。朱爱萍等^[38]的研究结果也表明,SHDI 指数越高,林地结构越丰富,对污染物的净化效果越明显。CONTAG 和 LPI 与部分水质指标呈显著正相关,LPI 反映的是最大斑块

面积占比,是优势度的表征,三峡库区的优势景观类型是耕地,表明耕地对水质状况有负面影响,并且较高的 CONTAG 值意味着耕地等优势景观类型之间具有较好的连通性,导致污染物的产生和输出相对集中,进而对水质产生了一定的影响,这与项颂等^[15]得出的在海拉尔河流域连通性较高的牧草地有助于养殖业污染物的迁移,造成水质下降的研究结果一致。而陈优良等^[39]的研究结论表明,林地作为优势景观类型对河流水质有净化作用。所以库区应适当增加草地和林地的面积,合理调整种植结构,并进行科学施肥和灌溉。

4.3 土地利用和景观格局对水质影响的尺度效应

冗余分析(RDA)结果表明,在大部分空间尺度下,枯水期的土地利用类型和景观格局指数对水质的解释率低于丰水期,原因是丰水期降雨侵蚀导致较多污染物通过地表径流等排入河流。这与郭羽羽等^[26]研究指出的在黄河流域夏季土地利用对水质影响最显著的结论一致。在 300 m 河岸带缓冲区尺度上,土地利用类型和景观格局指数对水质的解释率较高。Zhang 等^[40]的研究也表明在三峡库区大宁河流域雨季 300 和 500 m 河岸带缓冲区的解释率要高于其他尺度。而易帆等^[25]的研究结果显示大渡河流域 2 000 m 缓冲区的土地利用结构与水质有更显著的相关性。这种现象的产生,主要归因于各地区地形、土壤及土地利用特征等条件的差异^[41],以及水文迁移过程的不同^[42]。

本研究对最佳影响尺度 300 m 缓冲区内的土地利用类型、景观格局指数与水质指标进行了 PLSR 分析,以进一步探究它们之间的关系,结果表明,耕地、草地、水域和 PD 是影响水质指标的关键变量。张微微等^[24]在白河流域的研究结果表明,河岸缓冲区 300 m 内的耕地、林地和草地的景观格局对水质影响程度最大,与本文结论一致。300 m 河岸带缓冲区内景观斑块破碎化和多样性程度较高,水质受人类活动的干扰最为严重,因此为了实现有效的水环境管理,改善河流水质,应优化 300 m 缓冲区的土地利用空间格局,合理安排耕地种植面积及结构,降低复种指数,减少化肥农药施用量,适当增加河岸周围林地和草地的种植密度,提高连通性,增强对污染物的截留,加强对工业废水、生活污水和水产养殖产业污染物的排放和处理管理,减少进入水体的污染物。

5 结 论

(1) 三峡库区水质在时间上呈现出明显的季节

性变化特征,枯水期的水质优于丰水期,其原因主要是受到农业面源污染的影响。不同水质指标在空间上呈现出不一致的变化特征,主要受到地区特征和上游长江干流及支流来水的影响。

(2)集约化农业生产和复种指数较高的耕地对水质产生了较大的负面影响;在枯水期,林地和草地能截留和吸附污染物,但在丰水期强降雨的冲刷下,这种作用效果会降低;景观格局指数 PD 和 SHDI 与水质指标呈显著的负相关,加强景观斑块破碎化和多样化程度会降低水体中的污染物浓度,有利于改善水质。

(3)水质指标与土地利用类型、景观格局指数的相关性在丰水期高于枯水期。在 300 m 河岸带缓冲区尺度上,土地利用和景观格局对水质指标的解释率最高,其中耕地、草地、水域和 PD 是影响水质指标的关键变量,应重视 300 m 缓冲区内的土地利用格局规划,合理配置耕地、林地和草地的空间格局,控制化肥农药的施用和岸边点源污染物的排放,提高库区水质。

参考文献:

- [1] 郑达燕,刘睿,张柳柳,等.三峡库区土地利用对河流溶解性有机质的多时空尺度影响[J].湖泊科学,2023,35(4):1343-1360.
- [2] XIA Jingjing, XU Gaohong, GUO Ping, et al. Tempo-spatial analysis of water quality in the Three Gorges Reservoir, China, after its 175 m experimental impoundment[J]. Water Resources Management, 2018, 32: 2937-2954.
- [3] LI Zhe, MA Jianrong, GUO Jinsong, et al. Water quality trends in the Three Gorges Reservoir region before and after impoundment (1992 - 2016) [J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2019, 19(3): 317-327.
- [4] DENG Lele, CHEN Keping, LIU Zhangjun, et al. Spatio-temporal variation evaluation of water quality in middle and lower Han River, China[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 14125.
- [5] 王子铭,杨丽虎,宋献方. 雄安建设初期白洋淀水质时空差异及其对降雨和土地利用的响应[J]. 环境科学, 2023,44(7):3820-3834.
- [6] 蒋聘凤,童思陈,黄国鲜,等. 气候变化和人类活动对河流营养盐通量过程影响研究综述[J]. 水资源与水工程学报,2023,34(4):23-34+44.
- [7] ZHONG Xincheng, XU Quanli, YI Junhua, et al. Study on the threshold relationship between landscape pattern and water quality considering spatial scale effect: a case study of Dianchi Lake Basin in China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(29): 44103-44118.
- [8] 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.
- [9] 纪仁婧,洪大林,和玉璞,等. 南方低山丘陵区小流域不同土地利用方式下面源污染分布特征[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(4):181-185+192.
- [10] 党晋华,赵颖,马晓勇,等. 汾河水库上游流域土地利用类型变化特征及其水环境效应研究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(1):62-68.
- [11] 李琳琳,张依章,唐常源,等. 基于偏最小二乘模型的河流水质对土地利用的响应[J]. 环境科学,2017,38(4):1376-1383.
- [12] WANG Meihui, WANG Yi, LI Yong, et al. Natural and anthropogenic determinants of riverine phosphorus concentration and loading variability in subtropical agricultural catchments[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 287: 106713.
- [13] LUO Zengliang, SHAO Quanxi, ZOU Qiting, et al. Impact of land use and urbanization on river water quality and ecology in a dam dominated basin[J]. Journal of Hydrology, 2020, 584: 124655.
- [14] 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):1524-1540.
- [15] 项颂,庞燕,杨天学,等. 内蒙古典型草原区土地利用动态变化及其对水质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022,41(4):857-867.
- [16] HUANG Zhilin, HAN Liyang, ZENG Lixiong, et al. Effects of land use patterns on stream water quality: a case study of a small-scale watershed in the Three Gorges Reservoir area, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(4): 3943-3955.
- [17] ZHANG Jing, LI Siyue, DONG Ruozhu, et al. 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[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 206: 76-85.
- [18] 唐青青,赵刚,余勇,等. 三峡库区不同蓄水阶段下江心洲的时空演变分析[J]. 西南大学学报(自然科学版),2022,44(8):135-145.
- [19] 张广纳,邵景安,王金亮. 基于农业面源污染的三峡库区重庆段水质时空格局演变特征[J]. 自然资源学报, 2015,30(11):1872-1884.
- [20] 刘雁慧,李阳兵,梁鑫源,等. 三峡水库出入库水质评价及其与社会经济耦合关系研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),2019,36(1):62-71.
- [21] SU Kai, WANG Qin, LI Linxiao, et al. Water quality assessment of Lugu Lake based on Nemerow pollution index

- method[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 13613.
- [22] 李小丽,黎小东,敖天其.改进内梅罗指数法在西充河水水质评价中的应用[J].*人民黄河*,2016,38(8):65-68.
- [23] 国家环境保护总局.地表水环境质量标准:GB3838—2002[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [24] 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.
- [25] 易帆,陈旻,何晓枫,等.流域土地利用分析中空间尺度差异对水质的影响[J].*中国环境科学*,2023,43(8):4280-4291.
- [26] 郭羽羽,李思悦,刘睿,等.黄河流域多时空尺度土地利用与水质的关系[J].*湖泊科学*,2021,33(3):737-748.
- [27] YAO Zhihong, LIU Zhuangzhuang, LEI Junshan, et al. Identification and evaluation of water pollution risk in the Chongqing section of the Three Gorges Reservoir area in China[J]. *Sustainability*, 2022, 14(10): 6245.
- [28] 申璐,刘伟玲,邓陈宁,等.长江流域总磷污染治理相关政策、问题与对策[J].*环境保护*,2022,50(17):37-40
- [29] OUYANG Wei, HAO Xin, WANG Li, et al. Watershed diffuse pollution dynamics and response to land development assessment with riverine sediments[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 659: 283-292.
- [30] 习文祥,祝贤彬,潘红忠,等.三峡库区水质空间特征及影响机制研究[J/OL].*人民长江*,1-16[2023-11-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1202.TV.20230801.1650.006.html>.
- [31] BAI Hui, CHEN Yan, WANG Yonggui, et al. Contribution rates analysis for sources apportionment to special river sections in Yangtze River Basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 600: 126519.
- [32] HAN Dongmei, CURRELL M J, CAO Guoliang. Deep challenges for China's war on water pollution[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 218: 1222-1233.
- [33] 吴琼慧,刘志学,陈业阳,等.长江经济带“三磷”行业环境管理现状及对策建议[J].*环境科学研究*,2020,33(5):1233-1240.
- [34] 陈清飞,陈安强,叶远行,等.滇池流域土地利用变化对地下水水质的影响[J].*中国环境科学*,2023,43(1):301-310.
- [35] 黄孟勤,李阳兵,冉彩虹,等.三峡库区腹地山区农业景观格局动态变化与转型[J].*地理学报*,2021,76(11):2749-2764.
- [36] 李刚浩,范先鹏,夏颖,等.三峡库区典型流域水质时空特征及污染防控策略[J].*农业工程学报*,2022,38(17):118-126.
- [37] 黄益平,王鹏,徐启渝,等.袁河流域土地利用方式对河流水体碳、氮、磷的影响[J].*环境科学研究*,2021,34(9):2132-2142.
- [38] 朱爱萍,原升艳,温姗姗,等.不同空间尺度的景观格局对溪流河水质的影响[J].*生态学报*,2023,43(4):1485-1495.
- [39] 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.
- [40] ZHANG Jing, LI Siyue, JIANG Changsheng. 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: 106226.
- [41] 杨妮娟,王晓云,李建柱,等.桃林口水库流域氮磷污染负荷对土地利用的响应分析[J].*水资源与水工程学报*,2023,34(5):61-69+79.
- [42] 聂启阳,吕继强,孙夏利,等.土地利用变化影响的瀾河流域潜在非点源污染风险时空变化特征[J].*水资源与水工程学报*,2019,30(5):80-88.

(上接第47页)

- in Beijing – Tianjin – Hebei region from a symbiotic perspective and analysis of influencing factors[J]. *Sustainability*, 2023, 15(6): 5138.
- [27] WANG Yong, XIE Yanjing, QI Lin, et al. Synergies evaluation and influencing factors analysis of the water – energy – food nexus from symbiosis perspective: a case study in the Beijing – Tianjin – Hebei region[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 818: 151731.
- [28] LOANNOU A E, LASPIDOU C S. Resilience analysis framework for a water – energy – food nexus system under climate change[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022(10): 820125.
- [29] 李玉婷,王议寒,刘自敏.中国城市“水-能源-粮食”纽带系统耦合协调度及其影响因素研究[J].*工业技术经济*,2023,42(6):97-105.