

流域景观格局演变对河流水质的影响 ——以巢湖流域南淝河为例^{*}

顾 洋^{1,2}, 张平究², 秦风约¹, 蔡永久¹, 王晓龙^{1**}

(1:中国科学院南京地理与湖泊研究所,南京 210008)

(2:安徽师范大学地理与旅游学院,芜湖 241002)

摘要: 景观格局由景观组成、地理特征和景观配置等方面共同组成,流域景观格局演变是河流水质时空变化的重要驱动因素。为探讨景观格局演变对城市地区典型河流水质的定量影响与作用机制,本研究基于巢湖流域南淝河 2013 年与 2023 年水质数据和土地利用数据,采用单因素 ANOVA 检验、层次聚类法探究水质时空变化,通过 Bioenv 分析、VPA 分析等多元统计方法探究在不同时空尺度下景观格局中的各个部分对水质综合营养状态指数(*TLI*)的解释率以及影响 *TLI* 的关键因子。结果表明:2023 年南淝河水质优于 2013 年,总氮、总磷和 *TLI* 在 2013 年显著高于 2023 年,但不同年份水质的季节差异并不一致。不同时期的调查结果均发现,非汛期景观格局对 *TLI* 的解释率高于汛期,1000 m 河岸带缓冲区和子流域尺度下景观格局对 *TLI* 影响较大。景观组成、地理特征对 *TLI* 的独立解释率大于景观配置;景观配置对 *TLI* 的影响主要集中在与景观组成、地理特征的联合作用中。在景观组成中,建设用地面积占比、园地面积占比与 *TLI* 呈显著正相关,水域面积占比与 *TLI* 呈显著负相关。在地理特征中,面积高程积分、地形湿度指数与 *TLI* 呈显著负相关。研究认为,未来南淝河流域要限制“源”景观的无序扩张,不可忽视地理特征对河流水质的优化作用,并从景观配置中的“复杂度、破碎度和连通性”等方面着手对城市进行合理规划以辅助改善水质。

关键词: 景观格局演变;水质;综合营养状态指数;非点源污染;南淝河;巢湖流域

Impact of the evolution of watershed landscape pattern on river water quality—The example of the Nanfei River, Lake Chaohu Basin^{*}

Gu Yang^{1,2}, Zhang Pingjiu², Qin Fengyue¹, Cai Yongjiu¹ & Wang Xiaolong^{1**}

(1: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(2: School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241002, P.R.China)

Abstract: Landscape pattern consists of landscape composition, geographic features, and landscape configuration. The evolution of landscape pattern in watersheds plays a pivotal role in shaping spatial and temporal variations in river water quality. In order to quantitatively explore the impact and mechanism of landscape pattern evolution on water quality of typical rivers in the plains river network area, this study was based on the water quality data and land use data of the Nanfei River, Lake Chaohu Basin in 2013 and 2023 and used the one-way ANOVA test and hierarchical clustering method to analyze the spatiotemporal changes of water quality. Multivariate statistical methods such as the Bioenv analysis and the VPA analysis were utilized to examine the interpretation rate of various components of landscape pattern on the comprehensive trophic level index (*TLI*) of water quality and identify the key factors influencing *TLI* at different spatiotemporal scales. The results showed that the water quality of the Nanfei River in 2023 was better than that in 2013, and total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and *TLI* were significantly higher in 2013 than in 2023, but the seasonal differences in water quality were not consistent across years. The results of the survey in different periods showed that the landscape pattern in the non-flood season explained the *TLI* more than the flood season, and the landscape pattern

* 2024-01-23 收稿;2024-03-14 收修改稿。

国家自然科学基金项目(41971147)、巢湖流域山水林田湖草监测体系建设项目(调查评估部分)(2022BFAWZ02436)和江西省“双千计划”长期项目(JXSQ2023101034)联合资助。

** 通信作者;E-mail: wangxl@niglas.ac.cn。

at the 1000m buffer and sub-basin scales had a greater influence on the *TLI*. The independent explanation rate of landscape composition and geographic features on *TLI* was higher than that of landscape configuration; the influence of landscape configuration on *TLI* mainly concentrated in its joint effect with landscape composition and geographic features. In landscape composition, the proportion of building and garden plot area was significantly positively correlated with *TLI*, while the proportion of water area was significantly negatively correlated with *TLI*. Among the geographic features, the area hypsometric integral (HI) and topographic wetness index (TWI) were significantly negatively correlated with *TLI*. The study concluded that in the future, the restoration of Nanfei River Basin should limit the uncontrolled expansion of the “source” landscape, and should not ignore the optimization of geographic features on the water quality of the river. The landscape configuration of the “complexity, fragmentation, and connectivity” and other aspects of the rational planning of the city will be important to assist in the improvement of water quality.

Keywords: Landscape pattern evolution; water quality; integrated trophic level index; nonpoint source pollution; Nanfei River; Lake Chaohu Basin

河流是流域的重要组成部分,也是人类社会经济发展极为重要的自然资源保障。近年来由于人类大规模的开发改造以及自然过程的持续变化,水质问题日益显著^[1],越来越多的学者开始从景观格局角度研究河流水质变化^[2-3]。于景观格局而言,“格局—尺度—过程”这个三位一体问题对水质的影响需要同时考虑。在“格局”方面,景观格局是生态过程的载体^[4],也是整体景观在不同时空尺度下异质性的体现^[5],刘凯等^[6]认为探究景观格局演变对流域水质保护具有重要意义。在“尺度”方面,时间尺度和空间尺度是研究水质变化的关键因素,时间尺度主要反映年份、季节、降水等对水质的影响^[7],而空间尺度则通过空间距离的不同改变水文过程、物质能量转换,继而对水质产生重要影响^[8],但尚无定论何种尺度对水质的影响最为显著。在“过程”方面,景观过程指的是景观内部在一定时期物质、能量、信息的变化,并主要表现在景观组成与景观配置的转变上^[9],尤其是在不同时期下三生空间中的不同土地利用类型可能会产生较大变化^[10]。与此同时,景观在“过程”中的复杂相互作用也加剧了水质污染程度^[11]。由此可见,“格局—尺度—过程”三者呈密不可分的关系,探究景观格局的演变可以较好地将三者有机结合。目前,关于景观格局对水质的研究往往只局限于“格局—尺度”或“尺度—过程”等方面,而未能综合考虑“格局—尺度—过程”3方面对水质的影响^[12],这使得研究往往仅局限于当下状态,而无法解释景观格局对水质的长远影响。

南淝河作为合肥市的重要水源地与交通航道,其水质富营养化水平与城市发展高度相关^[13]。近年来,合肥市社会经济的快速发展和老城区的建设改造产生了大量的污染物,尽管开展了生态工程进行修复,且对河流生态系统的恢复取得了一定成效^[14],但这些因素仍对河流生态系统产生了较大的压力。因此,本研究旨在从景观格局演变角度出发,分析不同时期南淝河水质的变化,探究不同尺度下影响水质变化的驱动因子,并量化各类因子对河流富营养化水平的贡献,以期为南淝河水质的改善提供依据以及为管理部门的决策提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

南淝河是巢湖的一条入湖河流,它流经合肥市区,并受之影响已成为巢湖水系水质问题最严重的河流之一^[15]。研究区位于巢湖湖区西北部($31^{\circ}42' \sim 32^{\circ}08'N$, $117^{\circ}02' \sim 117^{\circ}37'E$),海拔 $0 \sim 275\text{ m}$,年降水量达 964 mm ,年均温达 $14 \sim 17^{\circ}\text{C}$,属亚热带季风气候^[16]。南淝河流域主要土地类型为建设用地、耕地和林地,在2013—2023年近10年发展中流域各景观类型面积占比和分布状态已发生了重要转变。

1.2 研究方法

1.2.1 空间尺度的划分与景观格局的量化 根据前人研究成果^[17-20],研究运用DEM数据基于ArcGIS 10.2平台的水文分析工具提取河流水系并得到河流所属的子流域及垂直河道100、500和1000m宽度的河岸带缓冲区来划分空间尺度。景观格局包括景观组成、地理特征和景观配置等方面^[8]。在景观组成中,选择南淝河流域2013年与2023年两期Landsat 8 OLI遥感影像并基于ENVI 5.3平台以支持向量机法进行监督分类,通过目视解译修正,显示两期景观组成分布的Kappa值均大于0.8,较好地反映了南淝河流域的土地利用状况,景观组成包括园地、水域、建设用地、耕地、林地和未利用地6种土地利用类型的面积占比构成(图1)。

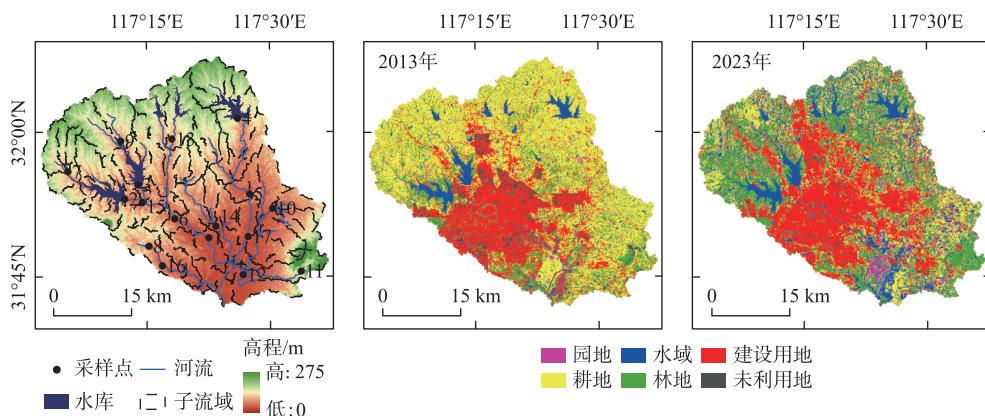


图 1 南淝河流域水样采样点与不同时期的景观组成

Fig.1 Sampling points of Nanfei River Basin water and landscape composition at different periods

在地理特征中,运用 ArcGIS 栅格计算器来计算不同空间尺度上的面积高程积分(HI)、流道长度(FPL)、地形湿度指数(TWI)。HI 反映了地貌的发育情况,其值越大,代表地貌发育越趋近于初期阶段^[21]。FPL 反映了河流某点流入其他河流的距离^[22]。TWI 代表区域土壤的持水能力^[23],TWI 越大表明发生径流的可能性越大。在景观配置方面,景观配置既是对景观格局分布特征的定量反映,也能在一定程度上表征人类活动对景观的利用与改造^[24]。由于景观配置之间存在共线性^[25],研究基于 Fragstats 4.2 软件从景观斑块的密度、面积、形状、连通性、延伸性、多样性多个层面上分别选择斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)、景观形状指数(LSI)、聚集度(COHE)、蔓延度指数(CONTAG)和香农多样性指数(SHDI)进行计算,来探究不同年份景观配置对水质的影响,详见表 1。

表 1 研究所选取的景观配置指标

Tab.1 The landscape configuration indicators selected for the study

类别	景观指标(缩写)	描述
景观配置	斑块密度(PD)	反映景观的破碎度,即景观单位面积的斑块量
	最大斑块指数(LPI)	反映景观优势度,即某种斑块类型的最大斑块占总景观面积的比例
	景观形状指数(LSI)	反映景观的复杂度,即景观斑块的周长和面积的比值
	聚集度(COHE)	反映景观的物理连通性与聚集分散状态
	蔓延度指数(CONTAG)	反映景观的延伸趋势,即表征板块的空间分布状态
	香农多样性指数(SHDI)	反映景观的异质性,即土地利用的丰富与破碎程度

1.2.2 样品采集与综合营养状态指数的计算 为保证采集的样品具有代表性,样点的选择参考了国家、市级地表水考核断面的选址并结合《国家水质采样技术指导》(HJ 494—2009)在南淝河共设置 17 个水质采样点,于 2023 年 3 月(非汛期)与 7 月(汛期)在无降水天气进行实地采集水样。水质测定标准参考《湖泊富营养化调查规范(第二版)》^[26],共测定 5 个水质指标:高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素 a(Chl.a)与透明度(SD)。 COD_{Mn} 采用滴定法测定;TN、TP 浓度采用过硫酸盐氧化法同时测定;Chl.a 浓度采用热乙醇分光光度法测定;SD 用圆盘法人工测定。2013 年非汛期与汛期水质数据由中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊-流域科学数据中心提供。

综合营养状态指数($TLI(\Sigma)$)常用于评价河流与湖泊的水质^[27],能将众多水质污染指标转换为表征水质水平的单一值,以简单、高效的方式直接反映水质信息,计算公式如下:

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^n W_j \cdot TLI(j) \quad (1)$$

式中, $TLI(\Sigma)$ 为综合营养状态指数, W_j 为第 j 种指标所占的权重, $TLI(j)$ 为第 j 种指标的营养状态指数。采用 0~100 的连续数字来比较水质的营养状态, 0~30 为贫营养, 30~50 为中营养, 50~60 为轻度富营养, 60~70 为中度富营养, 70~100 为重度富营养。

1.3 数据处理

借助 SPSS 软件进行 Shapiro-Wilk 检验水质数据是否满足正态分布, 如满足则使用单因素 ANOVA 检验, 不满足则使用 Kruskal-Wallis 检验确定水质的季节性差异, 并使用层次聚类法确定水质的空间异质性, 聚类方式为组间连接, 距离测试方式为平方欧式距离。运用 R 语言进行 Bioenv 函数来划分影响 TLI 相关性最高的因子组合, 通过 Spearman 相关分析来探究不同时空尺度下各组合中的因子与 TLI 的关系。运用方差分解分析(VPA)可以确定景观格局中各个部分对不同时期水质变化的解释比例, 最终使用逐步多元回归分析筛选影响 TLI 的关键指标。

2 结果与分析

2.1 景观格局的变化特征

2013、2023 年南淝河流域的景观组成有较大变化。在 2013 年景观组成中, 不同空间尺度下的耕地、建设用地为南淝河流域最大的土地利用类型, 平均面积占比分别达 40.3%、27.4%, 园地和未利用地在不同空间尺度上占地面积较小, 水域面积占比随距离的增加而不断减少, 林地面积占比变化波动则较小(图 2a)。在 2023 年景观组成中, 建设用地和林地是流域内面积最大的土地利用类型, 耕地面积占比在子流域尺度高于其他空间尺度, 水域面积占比则在子流域尺度最低, 园地和未利用地在不同空间尺度下平均面积占比分

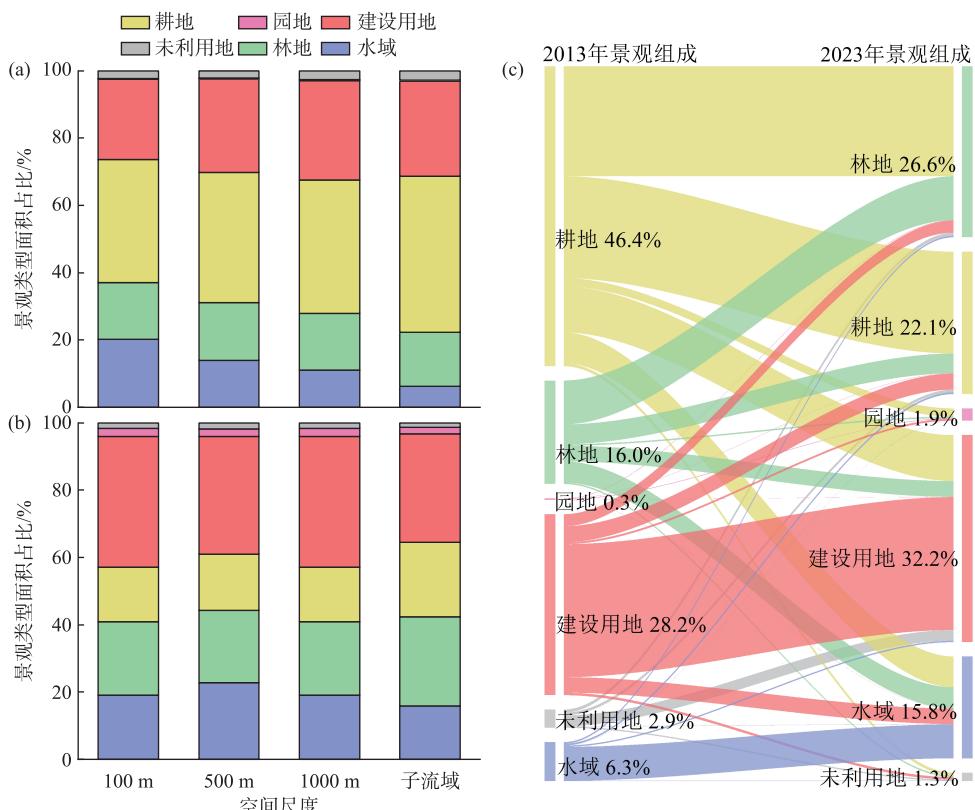


图 2 2013 年(a) 和 2023 年(b) 不同空间尺度下的景观组成; 2013、2023 年土地利用转移桑基图(c)

Fig.2 Landscape composition at different spatial scales in 2013 (a) and 2023 (b);
Sankey map of land use shifts in 2013 and 2023 (c)

别达到 2.2% 和 1.6% (图 2b)。从土地利用转移桑基图来看,耕地是景观组成中变化最大的景观类型,其面积占比从 46.4% 下降至 22.1%,并主要转移为建设用地、林地。水域、园地面积占比呈上升趋势,二者面积占比分别从 6.3%、0.3% 提高至 15.8%、1.9%,未利用地面积占比则不断下降(图 2c)。

2013、2023 年不同空间尺度下景观配置存在一定差异(表 2),但 PD、LPI、COHE 和 CONTAG 在不同空间尺度下的分布趋势趋于一致。PD 在 2013、2023 年 100 m 空间尺度下均明显高于其他尺度,LPI、COHE 和 CONTAG 在 2013、2023 年均随空间尺度的增大呈上升趋势。在地理特征中,HI 随空间尺度的增大而递减,TWI 呈先增大后减小趋势,在 500 m 河岸带缓冲区最高。

表 2 多时空尺度下的景观格局特征(均值±标准差)^{*}

Tab.2 Landscape pattern features at multiple temporal and spatial scales (mean ± SD)

影响因子	时期	100 m 河岸带缓冲区	500 m 河岸带缓冲区	1000 m 河岸带缓冲区	子流域
PD/(n/km ²)	2013 年	54.96±17.92	25.64±8.02	23.06±6.05	20.44±5.44
	2023 年	85.05±115.19	27.48±9.03	24.27±7.28	21.92±6.67
LPI/%	2013 年	25.21±11.16	38.20±21.86	41.90±18.18	49.47±23.02
	2023 年	31.35±26.78	31.83±22.92	36.21±18.45	36.36±22.61
LSI	2013 年	8.73±2.99	11.53±4.77	14.27±5.56	19.00±7.67
	2023 年	10.98±9.82	10.24±4.11	12.48±4.59	19.22±8.94
COHE/%	2013 年	95.13±1.48	97.90±0.93	98.41±0.71	98.92±0.67
	2023 年	94.38±3.81	97.28±1.00	97.90±0.86	98.35±0.79
CONTAG/%	2013 年	48.41±8.95	51.37±9.68	51.78±8.85	54.70±8.89
	2023 年	50.05±14.31	51.99±10.55	53.23±8.58	54.98±10.08
SHDI	2013 年	1.13±0.22	1.12±0.24	1.12±0.23	1.05±0.22
	2023 年	1.19±0.36	1.25±0.27	1.24±0.22	1.21±0.27
HI	/	0.45±0.16	0.37±0.13	0.36±0.11	0.28±0.13
FPL	/	9605.21±5821.46	9605.21±5821.46	9605.21±5821.46	9605.21±5821.46
TWI	/	6.60±0.64	9.48±1.49	7.87±1.30	7.20±1.04

* HI、FPL 和 TWI 3 个影响因子的时期为 DEM 数据获取时期。

2.2 水质富营养化的时空分布特征

2013 年南淝河 TN、TP 浓度在非汛期显著高于其他时期,TLI 在非汛期、汛期均高于 2023 年的同期值。2023 年 TP、Chl.a 和 TLI 在汛期显著高于非汛期。总体来看,2023 年水质优于 2013 年,但水质季节差异并不一致(图 3)。根据层次聚类分析结果(图 4),可将南淝河水质采样点分为 3 大类。第 1 类为 14 号采样点所对应的二十埠河,平均 TLI 为 76.4,水质富营养化水平最高。第 2 类为 1、5、6、8、12、15、16、17 号采样点对应的南淝河干流、十五里河、店埠河与长乐河等,平均 TLI 为 67.1,水质为中度富营养化水平。其余采样点为第 3 类,平均 TLI 为 51.1,水质为轻度富营养化水平。由此可见,南淝河水质富营养化水平存在明显空间分异,水质富营养化水平较高的河段主要处于流域中下游地区且分布在建设用地和耕地附近。

2.3 景观格局与综合营养状态指数的相关性分析

基于 Bioenv 函数,研究发现南淝河 TLI 在 2013 年非汛期与水域面积占比、建设用地面积占比、林地面积占比、TWI、LSI、LPI 相关性较高,而水域面积占比、林地面积占比、HI、TWI、PD 和 CONTAG 是影响 2013 年汛期 TLI 的最佳组合(表 3)。2023 年影响 TLI 的最佳组合较 2013 年存在部分差异,TLI 在 2023 年非汛期与建设用地面积占比、水域面积占比、园地面积占比、HI、FPL 和 SHDI 相关性较高,而水域面积占比、耕地面积占比、HI、TWI、PD 和 SHDI 是影响 2023 年汛期 TLI 的最佳组合。综上可见,水域面积占比、建设用地面积占比、TWI、HI、PD 对 TLI 有长期影响,且南淝河流域景观配置对 TLI 的影响在不同时空尺度下有较大差异。

分别将 2013、2023 年非汛期与汛期筛选好的最佳组合中的因子与对应时期的 TLI 进行相关性分析(图 5)。结果表明,2013 年非汛期 TLI 与各个空间尺度下的建设用地面积占比呈极显著正相关,与水域面积占比、TWI 呈负相关,而与 LSI 呈正相关。2013 年汛期 TLI 与 500 m 河岸带缓冲区尺度下的水域面积占比呈显

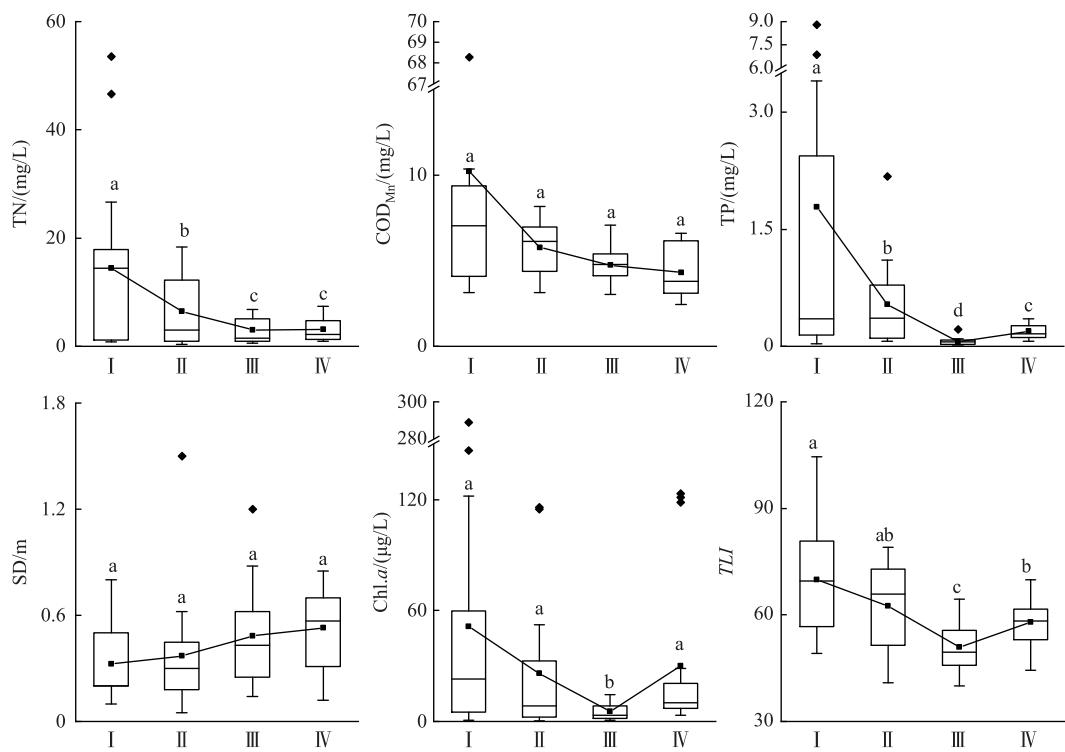


图 3 南淝河流域不同时期水质的变化 (I 、 II 分别代表 2013 年非汛期与汛期; III 、 IV 分别代表 2023 年非汛期与汛期; 不同字母表示不同时期的水质指标差异显著, $P<0.05$)

Fig.3 Variations in water quality of the Nanfei River Basin at different periods (I and II represent the non-flood and flood seasons in 2013; III and IV represent the non-flood and flood seasons in 2023, respectively; different letters denote significant differences in water quality indicators at different periods, $P<0.05$)

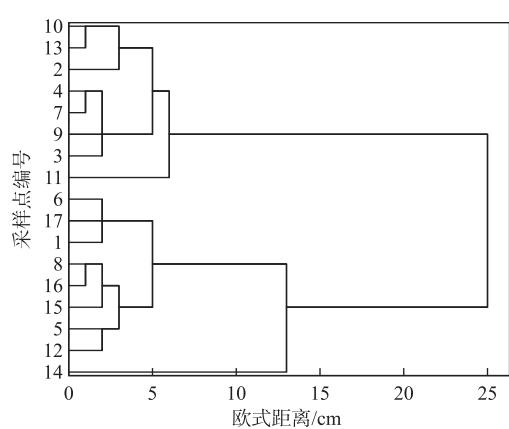


图 4 南淝河流域空间聚类分析结果

Fig.4 Results of spatial clustering analysis of the Nanfei River Basin

著负相关,与各个空间尺度下的 TWI 、 HI 、 CONTAG 呈负相关,与 PD 呈正相关。2023 年非汛期 TLI 与 100 、 1000 m 河岸带缓冲区尺度下的 HI 分别呈显著、极显著负相关,而与 500 、 1000 m 河岸带缓冲区尺度下的建设用地面积占比呈显著正相关,与各个空间尺度下的水域面积占比呈负相关,与园地面积占比、 SHDI 呈正相关。2023 年汛期 TLI 与 TWI 在子流域、 500 m 河岸带缓冲区尺度下分别呈显著、极显著负相关,与 HI 在各个空间尺度下呈显著负相关,与耕地面积占比和 SHDI 呈正相关,而与水域面积占比呈负相关。

为了解各个最佳组合中的地理特征、景观组成和景观配置 3 个部分对 TLI 的影响,通过 VPA 分析以 Bioenv 函数得出的不同时期的最佳组合作为解释变量; TLI 作为响应变量来探究地理特征、景观组成和景观配置及三者间的耦合作用对 TLI 的解释率。VPA 结果显示, 2013 、 2023 年非汛期景观格局对 TLI 的总解释率高于汛期。子流域尺度是景观格局影响 2013 年非

表 3 景观格局在不同时空尺度下影响水质的最佳组合

Tab.3 The optimal combination of landscape pattern affecting water quality at different temporal and spatial scales

时期	空间尺度	景观组成最佳组合	相关系数	地理特征最佳组合	相关系数	景观配置最佳组合	相关系数
2013 年 非汛期	100 m	建设用地+林地+水域	0.309	TWI	0.184	LPI+LSI	0.254
	500 m	水域	0.480	TWI+FPL	0.269	PD+COHE	0.366
	1000 m	建设用地+林地	0.289	TWI	0.158	LPI+LSI	0.355
	子流域	水域	0.544	HI	0.368	LPI	0.337
2013 年 汛期	100 m	水域+林地	0.427	HI	0.298	CONTAG+PD	0.221
	500 m	水域	0.295	HI+TWI	0.339	COHE +CONTAG	0.568
	1000 m	耕地+水域	0.409	HI	0.442	PD	0.260
	子流域	林地+水域+未利用地	0.312	TWI+FPL	0.210	LSI	0.395
2023 年 非汛期	100 m	建设用地+园地	0.397	HI+FPL	0.276	SHDI	0.348
	500 m	林地+水域	0.457	TWI+FPL	0.166	LPI+CONTAG	0.263
	1000 m	水域	0.345	HI+FPL	0.301	SHDI	0.288
	子流域	建设用地+林地+园地	0.300	HI+FPL	0.180	COHE	0.246
2023 年 汛期	100 m	水域+未利用地	0.421	HI	0.361	PD+LSI+CONTAG+SHDI	0.608
	500 m	水域+耕地	0.410	HI	0.300	PD+SHDI	0.366
	1000 m	耕地+水域	0.389	TWI+FPL	0.240	SHDI	0.374
	子流域	园地	0.510	TWI	0.314	PD+COHE	0.334

汛期与汛期 TLI 的关键尺度,其对不同时期 TLI 的解释率达 45.2%,而 1000 m 河岸带缓冲区尺度的景观格局则对 2023 年非汛期和汛期的水质有重要影响,其对不同时期 TLI 的解释率达 49.8%。不同时期景观格局各部分因子对 TLI 的解释也有较大差异。景观组成在 2013 年非汛期和汛期在南淝河流域各个空间尺度下对 TLI 的独立解释最大,景观配置和地理特征对其影响次之。在 2023 年非汛期和汛期,景观组成和地理特征及二者之间的共同作用部分对 TLI 的解释率较大,景观配置对 TLI 的解释主要分布于其与景观组成和地理特征对水质影响的交互作用中。

VPA 检验表明,不同空间尺度下各部分影响因子对 TLI 的解释率存在差异,因此选择每个时期对 TLI 解释率较大的空间尺度中的影响因子与 TLI 建立多元线性逐步回归分析,结果表明各类因子在不同时期对 TLI 的影响趋势趋于一致,但影响程度存在差异。在 2013 年非汛期、汛期,建设用地、水域面积占比主导着 TLI 的变化,分别与 TLI 呈正、负相关。2023 年非汛期筛选出 3 个影响 TLI 的关键因子,其中建设用地、园地面积占比与 TLI 呈正相关,HI 与 TLI 则呈负相关。2023 年汛期筛选出 2 个影响 TLI 的关键因子,TWI、HI 与 TLI 均呈负相关。总体来看,景观组成和地理特征是影响 TLI 的主体部分,这与 VPA 分析(图 6)的研究结论相同,不同因子与 TLI 的相关性也与 Spearman 相关性分析(图 5)研究结果一致。

3 讨论

3.1 流域景观格局演变对河流综合营养状态指数的多时空尺度影响

尺度效应是随着时空变化,研究对象在不同时空尺度下表现出的不同模式或特征^[7]。由于不同时空尺度下的景观格局可能会存在异质性,因此探究影响河流水质的最佳空间尺度是景观生态学研究的重点问题^[28]。本研究发现,TLI 在不同空间尺度下对景观格局的敏感性存在复杂的尺度效应。子流域尺度是景观格局对南淝河 2013 年非汛期、汛期 TLI 解释率最大的空间尺度,而 1000 m 河岸带缓冲区尺度是景观格局影响 2023 年非汛期、汛期 TLI 的关键尺度。这一结果与温嘉伟等^[29]的研究结论相似,揭示了不同时期影响 TLI 的关键空间尺度存在差异。1000 m 河岸带缓冲区和子流域尺度均为大范围的空间尺度,Ding 等^[30]的研究认为 COD_{Mn} 与 TP 在大范围尺度下受地表侵蚀影响已成为大规模的非点源污染物,因而水质管理不能局限于离河流较近的河岸缓冲区,也要从区域整体角度入手来规划与实施。但方娜等^[31]持相反意见,其认为

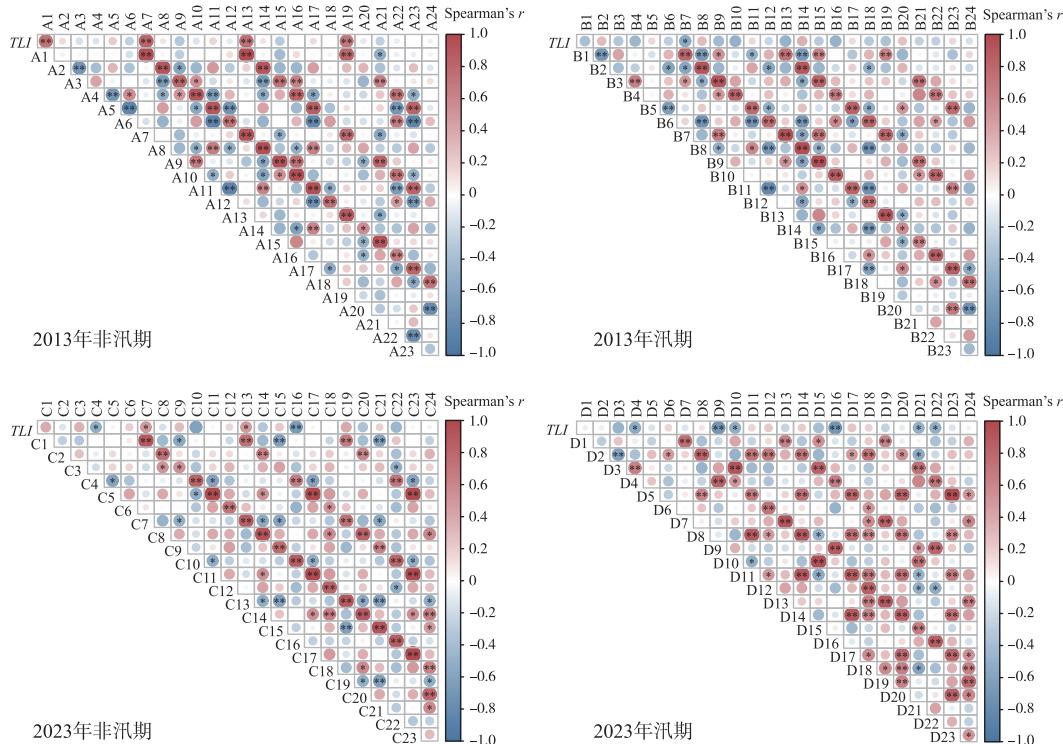


图5 不同时期综合营养状态指数与其最佳组合因子的相关性分析(A1~A6、A7~A12、A13~A18 和 A19~A24 分别为 2013 年非汛期 100、500、1000 m 河岸带缓冲区和子流域尺度下的水域面积占比、建设用地面积占比和林地面积占比、TWI、LSI、LPI; B1~B6、B7~B12、B13~B18 和 B19~B24 分别为 2013 年汛期 100、500、1000 m 河岸带缓冲区和子流域尺度下的水域面积占比、林地面积占比、HI、TWI、PD 和 CONTAG; C1~C6、C7~C12、C13~C18 和 C19~C24 分别为 2023 年非汛期 100、500、1000 m 缓冲区和子流域尺度下的建设用地面积占比、水域面积占比、园地面积占比、HI、FPL 和 SHDI; D1~D6、D7~D12、D13~D18 和 D19~D24 分别为 2023 年汛期 100、500、1000 m 河岸带缓冲区和子流域尺度下的水域面积占比、耕地面积占比、HI、TWI、PD 和 SHDI;

* 表示相关性显著, $P < 0.05$; ** 表示相关性极显著, $P < 0.01$)

Fig.5 Correlation analyses between comprehensive trophic level indices and their optimal combination factors in different periods (A1-A6, A7-A12, A13-A18 and A19-A24 represent the proportions of water area, construction land, forestland, as well as TWI, LSI, and LPI, respectively, in non-flood season in 2013 at 100 m, 500 m, 1000 m riparian buffer zones, and sub-basin scales; B1-B6, B7-B12, B13-B18 and B19-B24 represent the proportions of water area and forestland, as well as HI, TWI, PD and CONTAG, respectively, in flood season in 2013 at 100 m, 500 m, 1000 m riparian buffer zones, and sub-basin scales; C1-C6, C7-C12, C13-C18, and C19-C24 represent the proportions of construction land, water area, and garden plot, as well as HI, FPL, and SHDI, respectively, in non-flood season in 2023 at 100 m, 500 m, 1000 m buffer zones and sub-basin scales; D1-D6, D7-D12, D13-D18, and D19-D24 represent the proportions of water area and farmland, as well as HI, TWI, PD, and SHDI, respectively, in flood season in 2023 at 100 m, 500 m, 1000 m riparian buffer zones, and sub-basin scales. * indicates significant correlation, $P < 0.05$; ** indicates highly significant correlation, $P < 0.01$)

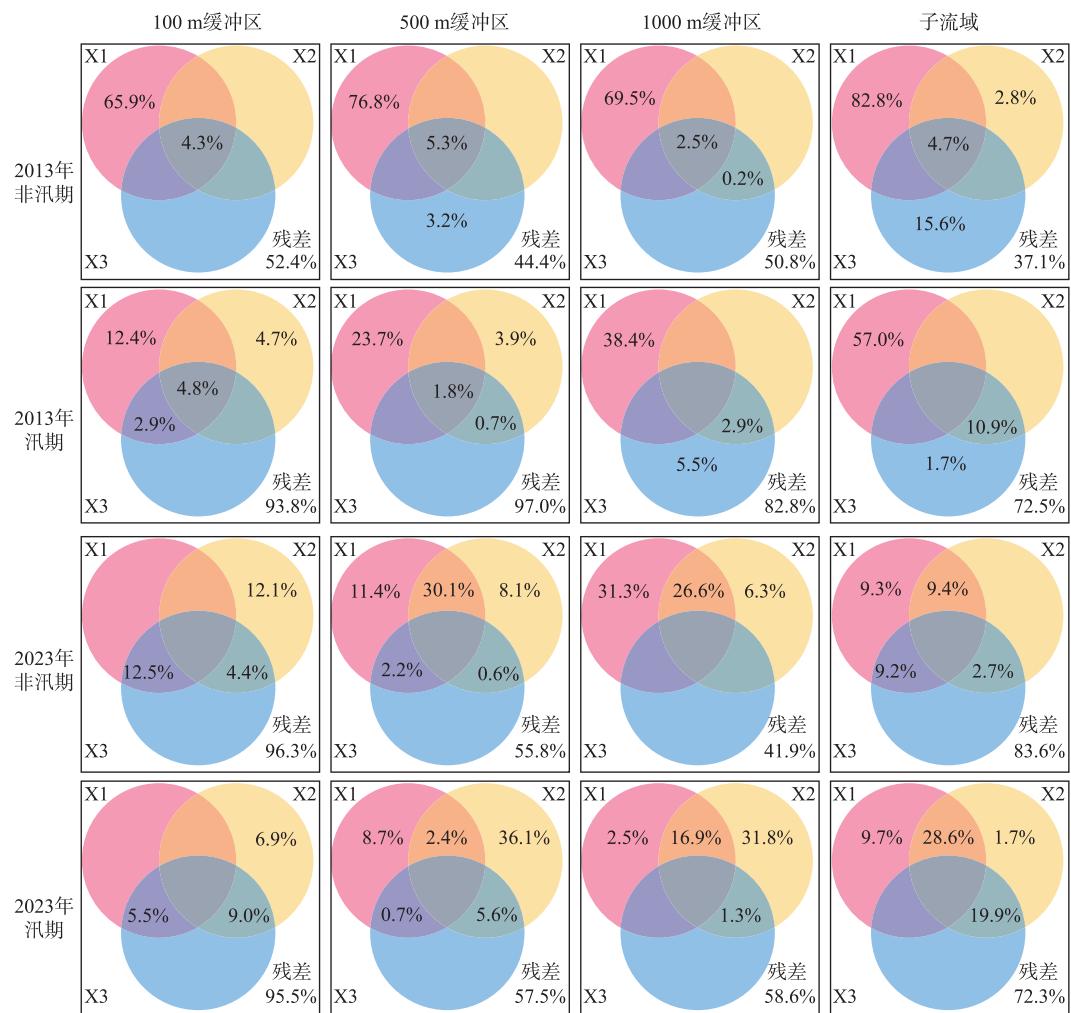


图 6 基于 Bioenv 函数的最佳组合中各部分对水质的解释
(X1、X2 和 X3 分别代表景观组成、地理特征和景观配置)

Fig.6 The contribution of each component in the optimal combination based on Bioenv function to water quality (X1, X2 and X3 represent landscape composition, geographic features and landscape configuration, respectively)

子流域等大范围的空间尺度由于面积较大、地形复杂,非点源污染在传输过程中易被截留吸收。尽管在不同空间尺度下景观格局对 TLI 的解释率存在差异,但在本研究中 TLI 与景观因子在不同空间尺度上的相关性高度一致,因而改善水质的具体措施可能在各个空间尺度均可适用,这也与 Wang 等^[32]的研究结果一致。

季节差异导致水质的变化主要体现在降水和径流中^[19]。已有研究认为,水质管理应考虑到季节因素对水质的影响,且建设用地面积占比的增加会导致水质的季节变化更加显著^[33]。在本研究中,建设用地面积占比在 2013—2023 年上升了 4% (图 2),TLI 在 2023 年非汛期与汛期间的变化差异也大于 2013 年(图 3)。值得注意的是,2013 年不同季节对 TLI 解释率的差异明显高于 2023 年,产生这种差异的原因可能是 2013 年南淝河水质仍受点源污染的影响较大,使得非汛期对 TLI 的变化更加敏感,而目前非点源污染已成为影响水质的关键因素^[34],故季节因素对水质的影响进一步缩小。南淝河流域 2023 年林地面积占比已超过耕地面积占比,林地作为典型的“汇景观”对污染源的长期截留净化作用可能间接弱化了景观格局对 TLI 影响的时间尺度效应。

表 4 不同时空尺度下 TLI 与影响因子的回归方程

Tab.4 Regression equations of TLI and impact factors at different spatial and temporal scales

时期	空间尺度	多元线性逐步回归方程	r	F	P
2013 年非汛期	子流域	$TLI = 0.411 \text{ 建设用地面积占比} + 54.607$	0.729	17.028	<0.01
2013 年汛期	子流域	$TLI = -1.003 \text{ 水域面积占比} + 68.680$	0.519	5.543	0.033
2023 年非汛期	1000 m	$TLI = 0.225 \text{ 建设用地面积占比} + 1.283 \text{ 园地}$ 面积占比 $-18.991HI + 46.729$	0.844	10.769	<0.01
2023 年汛期	1000 m	$TLI = -3.149TWI - 29.943HI + 91.373$	0.728	7.905	0.005

3.2 影响综合营养状态指数的关键因子

景观组成是景观格局中的重要组成部分,过往研究鲜有在不同年份景观组成已发生明显变化情况下与同期水质进行对比的研究,这导致以往研究只能局限于当下而不能观察景观演变对河流水质的影响。众多研究发现^[25,28],建设用地作为典型的“源景观”会形成大量的不透水面,这使得地表径流中的营养物质难以被植被、土壤吸收而直接排入河流中。Cheng 等^[35]认为,当建设用地面积占比超过 19.0% 时,水质受其影响程度明显加剧。建设用地面积占比的演变也与人口、经济增长密切关联^[36],南淝河流经合肥市区,合肥市人口在 2013—2023 年增加了 202.3 万人^[37-38],在经济高速发展情况下必然也对用水、排水的需求增加,由此建设用地对 TLI 的变化将具有长期影响。耕地、园地面积占比与 TLI 呈正相关,尤其是园地面积占比更是在 2023 年非汛期成为影响 TLI 的关键指标(表 4)。耕地、园地中的作物在种植过程中会施用大量化肥和农药,向河流输出大量营养物质。水域、林地面积占比均与 TLI 呈负相关关系,从遥感影像上来看,2023 年水域面积增长的部分主要由耕地转变为鱼塘,而刘超等^[39]对洪泽湖水质的相关研究认为,围网和围圩养殖面积与氮、磷浓度呈显著正相关。本研究结果与之不同的原因可能是,洪泽湖的养殖集中在湖体本身,水质受鱼、虾、蟹粪便影响较大,而南淝河流域的鱼塘距河流较远且呈碎片化分布于耕地附近,使得南淝河水质受养殖排泄物影响较小。鱼塘可以充当“容器”作用,截留“源景观”产生的营养物质。郭羽羽等^[40]认为林地是主导河流富营养化水平的重要土地类型,在南淝河流域 TLI 值较低的点位中,多数点位也分布于林地附近。

景观格局对水质的影响是多方面的,其中自然过程对水质的作用易被忽视^[8]。在 2023 年非汛期和汛期,地理特征对 TLI 的独立解释最大达 36.1%,而其与景观组成对 TLI 的联合解释最大达 30.1%,TWI 与 HI 是影响 TLI 的重要地理特征指标,二者均与 TLI 呈显著负相关,这表明地理特征也是影响水质的重要因素。Wang 等^[41]的研究认为,流量的下降会增加水质富营养化的风险,在本研究中较高的 HI 通过提升河流流量作用于水质,TWI 的提高也可以减少土壤冲刷到河流中以降低水质的富营养水平,这与 Xu 等^[42]的研究结果一致。但 Ricart 等^[43]认为:快速且大量的水文流量可能会促进和加剧景观斑块间氮、磷的交换,产生这种差异可能是由于研究地区的景观异质性所致。值得注意的是,2023 年非汛期和汛期不同尺度下地理特征与景观组成的耦合作用对 TLI 的解释率达 2.4%~30.1%,而与景观配置的耦合作用对 TLI 的解释率达 0.6%~19.9%,定量反映了地理特征可以约束景观组成或景观配置来共同影响水质。

景观配置可以反映景观的空间结构特征^[44],景观配置在之前的研究中被认为是影响水质的主导因素^[45]。在本研究中,LSI、LPI、PD、CONTAG 和 SHDI 对 TLI 的影响较大,其中 LSI、PD 和 SHDI 与 TLI 呈正相关,LPI、CONTAG 与 TLI 呈负相关。LSI 主要用于反映景观形状的复杂度,PD 反映景观的破碎度,说明景观越复杂,破碎度越高,受人类活动影响越大,水质富营养化水平也就越高。CONTAG 与 TLI 呈负相关,表明景观的连通度越高越有利于水质的改善,SHDI 对水质的影响目前存在争议。杨强强等^[18]认为:LPI、SHDI 在考虑与水质的关系时应注意优势景观的类型以及整体景观分布特征,而不能简单比较其与水质的相关性。VPA 分析结果表明,在 2023 年非汛期、汛期各个空间尺度下景观配置与景观组成共同解释了 TLI 变化的 0.7%~12.5%,与地理特征共同解释了 0.6%~19.9%,尽管景观配置对 TLI 的独立解释率较小,但其与景观组成、地理特征对 TLI 的潜在作用不可忽视。

综上所述,景观格局演变对南淝河水质影响主要体现在以下 3 个方面:①景观格局对 TLI 的调控具有尺

度差异性。子流域尺度、1000 m 河岸带缓冲区尺度的景观格局对 TLI 解释率较高, 非汛期其对 TLI 的解释率高于汛期。②景观格局对 TLI 的作用具有选择性, 景观组成、地理特征解释水质的能力较强, 而景观配置对水质的影响更多体现在其与景观组成、地理特征的耦合作用中。③未来对水质富营养化的优化治理需要合理规划景观组成, 降低“源”景观面积占比; 不可忽视地理特征对水质的影响, 减少人类对自然过程的破坏; 在景观配置上降低景观复杂度和破碎度, 提升景观的连通度, 使水质保持长期健康与稳定状态。

4 结论

本文以巢湖流域南淝河的水质数据和土地利用分类结果为基础, 计算流域不同时期各条河流的综合营养状态指数并提取其不同时空尺度下的景观格局, 研究了景观格局演变对河流水质的影响, 最终得出以下结论:

- 1) 南淝河 TLI 有显著的时空分异, 2023 年水质优于 2013 年同期水质。在南淝河众多干支流中, 二十埠河水富营养化水平最高, 平均 TLI 达 76.4, 其次为南淝河干流、十五里河、店埠河与长乐河等。
- 2) 南淝河流域的景观组成在 2013—2023 年变化较大, 其中变化的主要部分为耕地, 耕地面积占比从 46.4% 下降至 22.1%, 并主要转移至建设用地、林地中, 景观配置在不同时空尺度下也存在一定差异。
- 3) 非汛期景观格局对 TLI 的解释率较高, 1000 m 河岸带缓冲区与子流域尺度下的景观格局对 TLI 影响较大。景观组成、地理特征是景观格局中影响南淝河水质的主要部分, 景观配置对水质的影响主要体现在其与景观组成、地理特征对水质的共同作用中。
- 4) 流域内河流水质富营养化的治理重点要减少建设用地面积占比, 重视自然地理特征 TWI、HI 对水质的作用, 同时综合考虑景观配置表征的“复杂度、破碎度和连通性”与景观组成、地理特征对水质的综合影响。

5 参考文献

- [1] Chen X, Zhou WQ, Pickett STA *et al.* Spatial-temporal variations of water quality and its relationship to land use and land cover in Beijing, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, **13**(5): 449. DOI: 10.3390/ijerph13050449.
- [2] Amiri BJ, Nakane K. Modeling the linkage between river water quality and landscape metrics in the chugoku district of Japan. *Water Resources Management*, 2009, **23**(5): 931-956. DOI: 10.1007/s11269-008-9307-z.
- [3] Fernandes ACP, Sanches Fernandes LF, Cortes RMV *et al.* The role of landscape configuration, season, and distance from contaminant sources on the degradation of stream water quality in urban catchments. *Water*, 2019, **11**(10): 2025. DOI: 10.3390/w11102025.
- [4] Xu YD, Fu BJ, Lv YH. Research on landscape pattern and ecological processes based on landscape models. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(1): 212-220. [徐延达, 傅伯杰, 吕一河. 基于模型的景观格局与生态过程研究. 生态学报, 2010, **30**(1): 212-220.]
- [5] Li GD, Qi W. Impacts of construction land expansion on landscape pattern evolution in China. *Acta Geographica Sinica*, 2019, **74**(12): 2572-2591. DOI: 10.11821/dlx201912011. [李广东, 戚伟. 中国建设用地扩张对景观格局演化的影响. 地理学报, 2019, **74**(12): 2572-2591.]
- [6] Liu K, Yang YY, Shi RG *et al.* Spatiotemporal changes and driving forces of landscape patterns in the Yuqiao Reservoir watershed during 1990–2020. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, **40**(1): 154-164. DOI: 10.13254/j.jare.2021.0760. [刘凯, 杨琰瑛, 师荣光等. 1990—2020 年于桥水库流域景观格局时空演变及驱动力. 农业资源与环境学报, 2023, **40**(1): 154-164.]
- [7] Wang YC, Du JJ, Zhang Y *et al.* Scale effects of landscape pattern on impacts of river water quality: A Meta-analysis. *Environmental Science*, 2024, **45**(5): 2631-2639. DOI: 10.13227/j.hjkx.202306180. [王玉仓, 杜晶晶, 张禹等. 景观格局对河流水质影响的尺度效应 Meta 分析. 环境科学, 2024, **45**(5): 2631-2639.]
- [8] Wu JH, Lu J. Spatial scale effects of landscape metrics on stream water quality and their seasonal changes. *Water Research*, 2021, **191**: 116811. DOI: 10.1016/j.watres.2021.116811.
- [9] Ongley ED, Zhang XL, Yu T. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(5): 1159-1168. DOI: 10.1016/j.envpol.2009.10.047.
- [10] He LH, Li JS, Liu QY *et al.* Spatial and temporal evolution of production, living and ecological space in the core water source area of Danjiangkou (Hubei section) and its landscape pattern analysis. *Journal of Geomatics*, 2023, **48**(2): 55-59. DOI: 10.14188/j.2095-6045.2022758. [何丽华, 李建松, 刘权毅等. 丹江口核心水源区(湖北段)三生空间时空演变及景观格局分析. 测绘地理信息, 2023, **48**(2): 55-59.]
- [11] Xia P, Song SX, Liu ZF *et al.* Research progress of evaluation on the impacts of urban landscape dynamics on water-related ecosystem serv-

- ices in inland river basin, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(17) : 5884-5893. DOI: 10.5846/stxb201908101677. [夏沛, 宋世雄, 刘志峰等. 中国内陆河流域城市景观过程对涉水生态系统服务的影响评价研究进展. 生态学报, 2020, **40**(17) : 5884-5893.]
- [12] Xu QY, Guo SF, Zhai LM et al. Guiding the landscape patterns evolution is the key to mitigating river water quality degradation. *Science of the Total Environment*, 2023, **901**: 165869. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165869.
- [13] Wang XK, Ma XL, Wu TC et al. Construction of two-dimensional water quality model based on GIS and its applicability of wide-area plain river system. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, **43**(4) : 377-390. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2022.0304. [王潇凯, 马昕立, 武田诚等. 基于GIS的平面二维水质模型构建及其对广域平原河网水系数值模拟的适用性分析. 环境科学学报, 2023, **43**(4) : 377-390.]
- [14] Lu WW, Xu C, Wu J et al. Ecological effect assessment based on the DPSIR model of a polluted urban river during restoration: A case study of the Nanfei River, China. *Ecological Indicators*, 2019, **96**: 146-152. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.08.054.
- [15] Zhang D, Tian X, Wu S. Analysis of pollution flux in the Nanfeihe River and its treatment. *Water Resources Protection*, 2020, **36**(5) : 99-103, 112. [张笛, 田鑫, 吴师. 南淝河污染通量解析与治理. 水资源保护, 2020, **36**(5) : 99-103, 112.]
- [16] 秦晓栋. 南淝河流域环境雌激素迁移转化规律研究及其干扰风险评价[学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [17] Shen ZY, Hou XS, Li W et al. Impact of landscape pattern at multiple spatial scales on water quality: A case study in a typical urbanised watershed in China. *Ecological Indicators*, 2015, **48**: 417-427. DOI: 10.1016/j.ecolind.2014.08.019.
- [18] Yang QQ, Xu GL, Yang XC et al. Responses of water quality to land use & landscape pattern in the Qingyijiang River watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(24) : 9048-9058. DOI: 10.5846/stxb202003090448. [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. 生态学报, 2020, **40**(24) : 9048-9058.]
- [19] Shi P, Zhang Y, Li ZB et al. Influence of land use and land cover patterns on seasonal water quality at multi-spatial scales. *CATENA*, 2017, **151**: 182-190. DOI: 10.1016/j.catena.2016.12.017.
- [20] Zhang J, Li SY, Dong RZ 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. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **206**: 76-85. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.09.179.
- [21] Qin C, Li JB, Zheng LL et al. Study on tectonic geomorphology of area-elevation integral in Lianfeng and Zhaotong-Ludian fault zone. *Geological Review*, 2023, **69**(5) : 1649-1660. DOI: 10.16509/j.georeview.2023.05.051. [秦川, 李敬波, 郑立龙等. 云南莲峰、昭通—鲁甸断裂带面积—高程积分的构造地貌研究. 地质论评, 2023, **69**(5) : 1649-1660.]
- [22] 邓俊. 三峡库区典型小流域氮磷输出特征及其影响因素研究[学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- [23] Wang J, Yin W, Wang LX et al. Unraveling the effects of hydrological connectivity and landscape characteristics on reservoir water quality. *Journal of Hydrology*, 2022, **613**: 128410. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128410.
- [24] Bu HM, Meng W, Zhang Y et al. Relationships between land use patterns and water quality in the Taizi River Basin, China. *Ecological Indicators*, 2014, **41**: 187-197. DOI: 10.1016/j.ecolind.2014.02.003.
- [25] Xu QY, 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 Lake Sci*, 2020, **32**(4) : 1008-1019. DOI: 10.18307/2020.0410. [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. 湖泊科学, 2020, **32**(4) : 1008-1019.]
- [26] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范(第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [27] He LC, Wang DW, Zhang MY et al. Spatial and temporal distribution of chlorophyll-a and eutrophication evaluation in the middle reaches of Huaihe River. *Journal of Dalian Ocean University*, 2024, **39**(1) : 114-123. [何利聪, 王东伟, 张敏莹等. 淮河中游叶绿素a的时空分布特征及富营养化评价. 大连海洋大学学报, 2024, **39**(1) : 114-123.]
- [28] Zhu AP, Yuan SY, Wen SS et al. Effects of landscape pattern on water quality at multi-spatial scales in the Liuxi River. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(4) : 1485-1495. DOI: 10.5846/stxb202204110949. [朱爱萍, 原升艳, 温姗姗等. 不同空间尺度的景观格局对流溪河水水质的影响. 生态学报, 2023, **43**(4) : 1485-1495.]
- [29] Wen JW, Wang P, Huang GX et al. Influence of land use structure and spatial pattern on water quality of small and medium-sized rivers in Poyang Lake Basin. *Environmental Science*, 2023, **44**(12) : 6728-6743. DOI: 10.13227/j.hjkx.202212093. [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. 环境科学, 2023, **44**(12) : 6728-6743.]
- [30] 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. *Science of the Total Environment*, 2016, **551/552**: 205-216. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.162.
- [31] Fang N, Liu LL, You QH et al. Effects of land use types at different spatial scales on water quality in Poyang Lake Wetland. *Environmental Science*, 2019, **40**(12) : 5348-5357. DOI: 10.13227/j.hjkx.201903267. [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. 环境科学, 2019, **40**(12) : 5348-5357.]
- [32] Wang WY, Yang P, Xia J et al. Impact of land use on water quality in buffer zones at different scales in the Poyang Lake, middle reaches of the Yangtze River Basin. *Science of the Total Environment*, 2023, **896**: 165161. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165161.
- [33] Xu GC, Li P, Lu KX et al. Seasonal changes in water quality and its main influencing factors in the Dan River Basin. *CATENA*, 2019, **173**: 131-140. DOI: 10.1016/j.catena.2018.10.014.
- [34] Lou HZ, Wu XJ, Hao FH et al. Research progress of non-point source pollution in China over the past 30 years and discussion of the future

- direction development. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(5) : 1535-1549. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2020.0069. [娄和震, 吴习锦, 郝芳华等. 近三十年中国非点源污染研究现状与未来发展方向探讨. 环境科学学报, 2020, **40**(5) : 1535-1549.]
- [35] Cheng X, Song JP, Yan JZ. Influences of landscape pattern on water quality at multiple scales in an agricultural basin of Western China. *Environmental Pollution*, 2023, **319**: 120986. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.120986.
- [36] Zhao ZJ, Fan BL, Zhou QB et al. Simulating the coupling of rural settlement expansion and population growth in Deqing, Zhejiang Province, based on MCCA modeling. *Land*, 2022, **11**(11) : 1975. DOI: 10.3390/land11111975.
- [37] 合肥市统计局. 2014 年合肥市常住人口统计年鉴. 合肥:合肥市统计局, 2014.
- [38] 合肥市统计局. 2022 年合肥市常住人口发展现状分析. 合肥:合肥市统计局, 2023.
- [39] Liu C, Wang ZY, Zhang JH et al. Effects of landscape types and landscape pattern evolution water quality of Hongze Lake. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(8) : 3302-3311. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2021.0247. [刘超, 王智源, 张建华等. 景观类型与景观格局演变对洪泽湖水质的影响. 环境科学学报, 2021, **41**(8) : 3302-3311.]
- [40] Guo YY, Li SY, Liu R et al. Relationship between landscape pattern and water quality of the multi-scale effects in the Yellow River Basin. *J Lake Sci*, 2021, **33**(3) : 737-748. DOI: 10.18307/2021.0310. [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. 湖泊科学, 2021, **33**(3) : 737-748.]
- [41] Wang LQ, Liang T. Distribution characteristics of phosphorus in the sediments and overlying water of Poyang Lake. *PLoS One*, 2015, **10**(5) : e0125859. DOI: 10.1371/journal.pone.0125859.
- [42] Xu JY, Bai Y, You HL et al. Water quality assessment and the influence of landscape metrics at multiple scales in Poyang Lake Basin. *Ecological Indicators*, 2022, **141**: 109096. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109096.
- [43] Ricart AM, Dalmau A, Pérez M et al. Effects of landscape configuration on the exchange of materials in seagrass ecosystems. *Marine Ecology Progress Series*, 2015, **532**: 89-100. DOI: 10.3354/meps11384.
- [44] Huang ZL, Han LY, Zeng LX 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. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(4) : 3943-3955. DOI: 10.1007/s11356-015-5874-8.
- [45] Mitchell MGE, Bennett EM, Gonzalez A. Linking landscape connectivity and ecosystem service provision: Current knowledge and research gaps. *Ecosystems*, 2013, **16**(5) : 894-908. DOI: 10.1007/s10021-013-9647-2.