

流域“源-汇”景观格局对水质的影响——以千岛湖上梧溪流域为例*

张西兑^{1,2}, 王裕成³, 刘明亮⁴, 蒋男凯⁵, 李恒鹏², 张汪寿^{2**}

(1: 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与流域水安全重点实验室, 南京 211135)

(3: 浙江省杭州市淳安生态环境监测站, 311700)

(4: 浙江省杭州市生态环境科学研究院, 杭州市城区生态环境监测站, 杭州 310014)

(5: 浙江省淳安千岛湖建设集团有限公司, 杭州 311700)

摘要: 流域土地利用及“源-汇”景观格局通过影响污染物的产生、输移和消纳过程, 从而对水质产生复杂影响。认识河流水质对流域土地利用及“源-汇”格局的响应关系, 是优化流域景观配置的前提和关键。本文以千岛湖上梧溪流域为研究对象, 分析了河流总氮(TN)、总磷(TP)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)、磷酸盐(PO₄³⁻-P)和高锰酸盐指数(COD)等水质指标时空变化特征, 解析了子流域尺度土地利用及“源-汇”景观格局及其对河流水质的影响。结果表明, 上梧溪流域主要河流水质指标浓度呈现出由上游到下游、由支流到主河道逐渐上升的空间特征。非汛期31个点位的月度水质监测数据中, 有46%的数据TN浓度处于V~劣V类标准, 且其平均浓度显著高于汛期, 而TP和COD浓度多低于II类标准, 且总体略低于汛期。为进一步探究水质时空差异的原因, 本研究引入景观格局指数和源汇景观空间负荷比指数(LWLI), 发现LWLI与汛期和非汛期TN、NO₃⁻-N和TP等水质指标显著正相关(p<0.05), 说明当子流域中“源”景观面积比例越高、距离流域集水口越近、所处坡度越陡时, LWLI值也越大, 其造成的氮磷流失也更高。对于汛期, 茶园、水田、旱地等土地利用面积占比、景观格局指数如散布与并列指数(IJI)以及LWLI等可分别解释46%、27%和58%的河流TN、TP和COD浓度的空间变异, 而对于非汛期则分别能解释其25%、46%和62%的空间变异。从“源-汇”景观格局的角度来看, 上梧溪流域存在“源-汇”景观空间失调现象, “源”景观集中于中下游的河道附近, “汇”景观则多分布于距离河道较远的坡地上, 这导致“汇”景观难以发挥截流净化的作用, 建议通过调整土地利用结构和优化景观配置, 具体如改善“源”景观的管理方式(如精准施肥与污水处理)并在关键源区设置植被缓冲带或湿地等“汇”景观来促进污染物的拦截。本研究通过引入源汇景观空间负荷比指数, 深化了对“源-汇”景观格局与水质响应关系的理解, 为千岛湖流域水环境质量改善提供了科学依据。

关键词: 非点源污染; 土地利用; 源汇景观空间负荷比指数; 氮磷浓度

The influence of “source-sink” landscape pattern on water quality: A case study of ShangWuxi Basin of Lake Qiandao

Zhang Xidui^{1,2}, Wang Yucheng³, Liu Mingliang⁴, Jiang Nankai⁵, Li Hengpeng², Zhang Wangshou^{2**}

(1: School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, P. R. China)

(2: Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P. R. China)

(3: Chun'an Ecological Environment Monitoring Station, Zhejiang Province, Hangzhou 311700, P. R. China)

* 2024-10-21 收稿; 2025-01-16 收修改稿

国家自然科学基金项目(42071143)、中国科学院青促会项目(2023330)和中国科学院“一四五”自主部署项目(NIGLAS2022TJ16)联合资助。

** 通信作者; E-mail: wszhang@niglas.ac.cn

(4: Hangzhou Institute of Environmental Science, Urban Ecological Environment Monitoring Station of Hangzhou, Zhejiang Province, , Hangzhou 310014, P. R. China)

(5: Chun'an Lake Qiandao Construction Group Co., Ltd., Zhejiang Province, , Hangzhou 311700, P. R. China)

Abstract: The land use and "source-sink" landscape pattern of watershed have complex effects on water quality by influencing the production, transport and absorption of pollutants. Understanding the response relationship of river water quality to watershed land use and source-sink pattern is the prerequisite and key to optimize watershed landscape allocation. Based on the Shangwuxi Basin of Qiandao Lake, this paper analyzed the temporal and spatial changes of river water quality indicators such as total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), nitrate nitrogen (NO₃-N), phosphate (PO₄³⁻-P), and permanganate index (COD). The sub-catchment scale land use and source-sink landscape pattern were analyzed and their effects on river water quality were studied. The results show that the concentration of water quality index of main rivers in Shangwuxi Basin presents a spatial feature of gradual increase from upstream to downstream and from tributaries to main river. In the monthly water quality monitoring data of 31 points in non-flood season, 46% of the data TN concentration is in the V~ inferior V standard, and its average concentration is significantly higher than that in flood season, while the concentration of TP and COD is mostly lower than that in class II standard, and the overall is slightly lower than that in flood season. In order to further explore the causes of spatial-temporal differences in water quality, this study introduced landscape pattern index and source-sink landscape spatial load ratio index (LWLI), and found that LWLI was significantly positively correlated with water quality indexes such as TN, NO₃-N and TP in flood season and non-flood season ($p < 0.05$). This indicates that the higher the proportion of the "source" landscape area in the sub-watershed, the closer to the catchment and the steeper the slope, the greater the LWLI value and the higher the nitrogen and phosphorus loss caused by it. For the flood season, the land use area proportion of tea garden, paddy field and dry land, and landscape pattern indices such as dispersal and juxtaposition index (IJI) and LWLI can explain 46%, 27% and 58% of the spatial variation of TN, TP and COD concentration in rivers, respectively, while for the non-flood season, they can explain 25%, 46% and 62% of the spatial variation, respectively. From the perspective of "source-sink" landscape pattern, the spatial imbalance of "source-sink" landscape exists in Shangwuxi Basin. The "source" landscape is concentrated near the middle and lower reaches of the river course, while the "sink" landscape is mostly distributed on the slopes far away from the river course, which makes it difficult for the "sink" landscape to play the role of stream intercept and purification. It is suggested to adjust the land use structure and optimize the landscape configuration. For example, improve the management of "source" landscapes (such as precise fertilization and sewage treatment) and set up "sink" landscapes such as vegetation buffer zones or wetlands in key source areas to promote the interception of pollutants. By introducing the source-sink landscape spatial load ratio index, this study deepened the understanding of the relationship between source-sink landscape pattern and water quality response, and provided a scientific basis for the improvement of water environment quality in Lake Qiandao Basin.

Keyword: Non-point source pollution; Land use; Source-sink landscape spatial load ratio index; Nitrogen and phosphorus concentration

近年来，随着经济的快速发展和城市化进程的加速，土地利用格局不断发生改变，面源污染日趋严峻，已成为全球普遍性环境问题。因此，有效控制面源污染已成为许多国家和地区水环境治理的关键^[1]。从景观生态学视角看，面源氮磷等污染物输送入水的过程受输送路径中“源”、“汇”等异质斑块的影响和控制。因此，“源”、“汇”景观的数量比例及其空间格局，直接决定面源氮磷的负荷量，并对河流水质产生显著影响^[2]。在当前人类活动不断增大，土地利用组成及结构不断发生变化的背景下，优化流域土地利用结构与“源-汇”景观空间配置是减少面源污染对水体危害的最重要途径之一。

流域的“源-汇”景观格局对水质的影响是指在流域尺度上，不同景观类型对污染物的产生、输送及截留所发挥的综合作用^[3]。一般而言，农田、村庄等“源”景观为污染物的主要来源，而林地、草地等“汇”景观则通过截留和吸收污染物发挥缓冲作用^[4]。以往的研究表明，流域“源-汇”景观的空间配置对氮、磷等污染物的输移过程及入水负荷量有重要影响^[5]。例如，李颖等^[6]在三江平原的研究表明，沼泽湿地的大面积农业开垦使得“源-汇”景观格局剧烈变化，直接导致生物多样性受损、水土流失和面源污染的加剧；李崇巍等^[7]选择低山丘陵和平原交错地貌的天津市桥水库为研究区，发现随着“源”景观比例的增加，流域磷负荷量显著上升；倪珂等^[8]在三峡库区内丘陵区流域中使用“源-汇”景观空间负荷比

指数对传统农业集水区和农林复合型集水区进行对比研究,探讨了“源-汇”景观格局对溶解态养分输移的影响,相关研究为土地利用规划和景观格局优化提供了重要依据。早期研究主要采用遥感影像解译和传统统计方法分析,重点分析流域单一或多个土地利用组成、景观格局指数与水质的关系。近年来,随着景观格局指数(如 LWLI、SHDI(景观多样性指数))的引入以及对面源污染“源-汇”过程的机制认知,研究开始从量化、空间化角度深入分析流域“源-汇”景观格局对水质的影响,不断丰富和发展了流域景观格局的水环境效应研究。然而,当前研究多集中于平原或丘陵地带的农业流域^[6-8],而针对以自然植被为主、兼具农田与经济作物种植的上游源头流域,由于其景观类型多样、空间配置复杂,“源-汇”景观格局对水质影响的解析研究仍存在不足。因此,深入揭示东南丘陵区“源-汇”景观格局对水质的影响机制,探索其景观格局优化路径,显得尤为迫切。

千岛湖是我国东部地区水质良好的重要湖库,是国家战略水源地,水环境保护极其重要^[9]。然而,水库水环境保护正在面临丘陵山区开发强度持续增加、流域生态退化等问题,氮、磷污染及水库富营养化趋势严峻,引起国家和地方的广泛关注^[10]。地方政府近年来加大污染治理力度,通过关停高污染企业、关闭矿山、“五水共治”等有效措施,工业污染已大幅削减,城乡生活污水处理率达到 90%以上,点源污染得到有效遏制。但由于面源污染未能得到同步有效治理,库区氮、磷污染依旧在持续加重^[11]。由于面源污染不仅与土地开发有关,也与流域“源-汇”景观格局相关,因此,探索千岛湖入湖流域水质变化特征及其与景观格局的关系,对于制定有效的水质管理和污染控制策略具有重要意义^[12,13]。本研究选择千岛湖流域典型入湖小流域为研究对象,采用景观生态学方法分析流域“源-汇”景观格局对水质的影响,以期揭示景观格局对氮磷污染的时空分布及其调控机制。本研究旨在为流域水质管理和生态环境保护提供科学依据,并为其他类似流域的相关研究提供参考。

1 材料与方方法

1.1 研究区概况

上梧溪流域位于杭州市淳安县安阳乡内,地理坐标介于东经 118.83°至 118.91°和北纬 29.32°至 29.45°之间。上梧溪为千岛湖南部入湖支流,发源于千里岗山脉的三井尖,由南向北于安阳乡陈家村汇入千岛湖。干流长度 13.1 km,集水区面积 69.3 km²。流域地形南高北低,海拔高度分布在 94 米至 1280 米之间。上梧溪流域地处亚热带季风气候区北缘,年均气温介于 16-18 °C,年降雨量在 1400-1800 mm 之间,年均降雨天数为 156 d,每年 6-9 月为雨季,河流流量较大。根据淳安县多年月平均降雨量变化情况将^[14]6-9 月划分为汛期,其余月份为非汛期。流域土地利用以自然林地为主,包括灌木林、混交林和竹林,面积占比达到 82.7%;其次为农业开发用地,包括水田、茶园和旱地,总面积比例为 15% (图 1)。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与分析 本研究选择上梧溪流域 31 个河流水质断面进行水质样品的采集,采样时段为 2023 年 1-12 月,采样频率为每月 1-2 次,其中 1 月-2 月及 10 月-12 月期间,每月月中旬采集 1 次样品;3 月至 9 月期间,每月上旬和下旬各采集 1 次进行数学平均,以均值作为当月水质,随后将汛期所有月份的均值进行平均得到汛期均值,非汛期所有月份同样进行平均得到非汛期均值。采样期间,使用清洗后的聚乙烯瓶进行样品采集,样品采集后并放入 4°C 的恒温箱中保存运输,并于 1 周内完成实验室化验分析。分析的主要指标包括:总氮(TN)、总磷(TP)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)、磷酸盐(PO₄³⁻-P)和高锰酸盐指数(COD),按照《水和废水监测分析方法》(第四版,2022)中的标准方法进行检测。

1.2.2 源汇景观格局指数的计算 本研究采用陈利顶等人^[15]提出的方法来计算源汇景观空间负荷比指数,该指数综合考虑了主要景观单元与子流域出水口之间的相对距离、高度以及坡度等因素,可综合评估“源-汇”景观空间分布格局。LWLI 的计算方法如下:

$$LWLI=LWLI.D \times LWLI.E / LWLI.S \quad (式 1)$$

$$LWLI(D, E, S) = \frac{\sum_{i=1}^M (p_i \cdot w_i \cdot s_i)}{\sum_{i=1}^M (p_i \cdot w_i \cdot s_i) + \sum_{j=1}^N (p_j \cdot w_j \cdot s_j)} \quad (式 2)$$

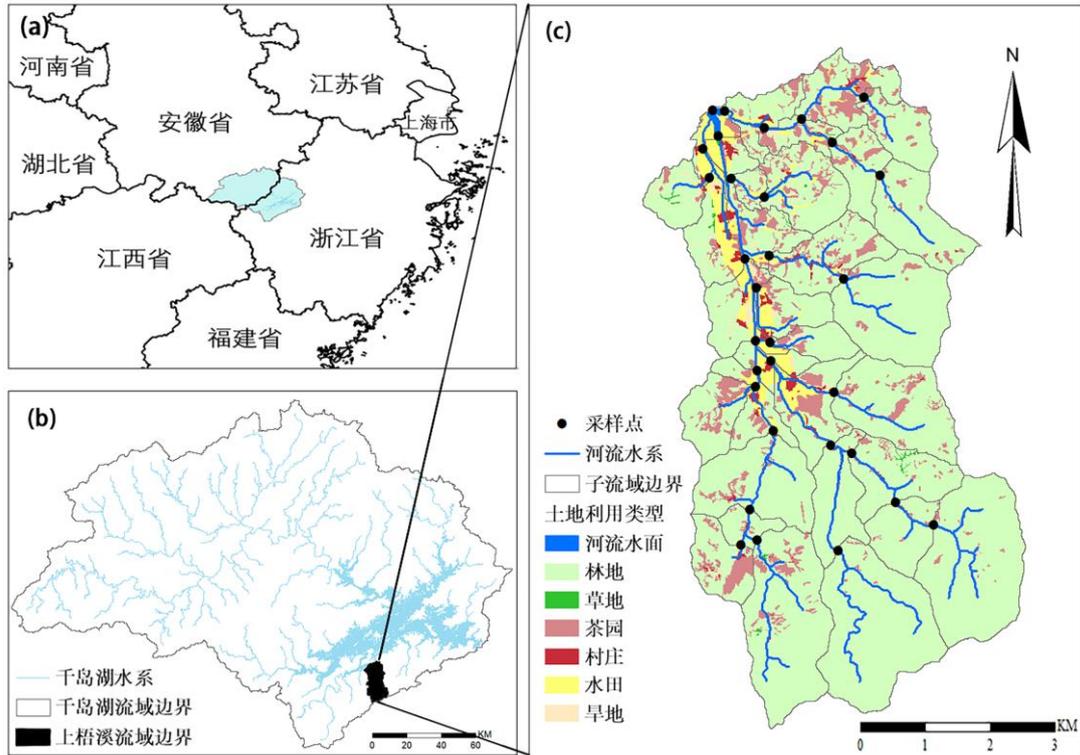


图1 上梧溪流域位置及采样点分布图

Fig.1 Location and distribution map of sampling points in Shangwuxi basin

式中，LWLI 指景观空间负荷比指数，LWLI.D、LWLI.E 和 LWLI.S 分别指相对距离、相对高程和坡度建立的“源-汇”景观负荷分指数，M、N 分别指“源”“汇”景观的类型数目， P_i 和 P_j 指“源”景观 i 和“汇”景观 j 在子流域内的面积比例， W_i 和 W_j 分别指“源”景观和“汇”景观的权重， S_i 和 S_j 分别指“源”景观和“汇”景观对距离、高程或坡度基于洛伦兹曲线的累计面积比例。

流域高精度土地利用数据的获取是精确计算 LWLI 的关键，本文采用吉林一号高分遥感数据（0.8 米分辨率）对流域 2023 年土地利用进行目视解译，解译时参照地方政府提供的第三次土地调查数据（2021 年），并结合遥感影像的目视解析结果进行土地利用修正，进而生成 2023 年土地利用数据集。依据研究区特点，将土地利用类型划分为七类：水面、旱地、村庄、水田、茶园、林地、草地。

本研究中，将可能促进养分流失的旱地、水田、村庄、茶园划分为“源”景观，对地表径流具有良好的滞留效果的林地和草地划分为“汇”景观。在计算“源”和“汇”景观权重时，本研究基于归一化植被指数（NDVI）与植被覆盖与管理因子 C 值的关系^[16]，首先计算并获取上梧溪流域的 C 值^[17]，作为权重因子之一用于反映不同景观类型的植被覆盖状况及其对土壤侵蚀的影响。同时，通过农业种植、施肥、田间管理等实地问卷调查，并结合不同景观单元氮磷流失系数的文献调研^[5,18]，对初步计算的 C 值权重进行调整和修正，最终得出千岛湖流域不同“源”、“汇”景观的权重，具体权重为：(1)源景观：茶园(0.4)，水田(1.0)，旱地(0.7)和村庄(1.0)。(2)汇景观——林地(0.3)和草地(0.5)。

此外，本文还选取了 3 个与面源污染过程关联密切的景观格局指数来综合表征上梧溪流域的景观格局特征，其中 CONTAG（聚集度指数）用于评估景观聚集性对污染物迁移路径的影响；IJI（散布与并列指数）用于表征“源-汇”景观边界分布的均匀性及其调节功能；SHDI（景观多样性指数）用于衡量景观多样性对流域整体污染的影响，各指数均由 Fragstats4.0 软件，其生态学意义及计算方法如表 1 所示^[19]。

表 1 景观格局指数及其生态学意义¹⁾

Tab.1 Landscape pattern index and its ecological significance

景观指数	公式	生态学意义
聚集度指数 Contagion Index (CONTAG)	$\left[1 + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left[p_i \cdot \frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right] \cdot \left[\ln \left(p_i \cdot \frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right]}{2 \ln(m)} \right] \cdot 100$	衡量景观中不同斑块类型的空间聚集程度。值越大表示景观的聚集程度高，斑块类型更趋向于成团分布
散布与并列指数 Interspersion and Juxtaposition Index(IJI)	$\frac{-\sum_{i=1}^m \sum_{k=i+1}^m \left[\frac{e_{ik}}{E} \cdot \ln \left(\frac{e_{ik}}{E} \right) \right]}{\ln(0.5[m(m-1)])} \cdot 100$	衡量景观中不同斑块类型的相互交错程度。值越高表示不同斑块类型的空间交错和接触程度越高
景观多样性指数 Shannon's Diversity Index (SHDI)	$-\sum_{i=1}^m (p_i \ln p_i)$	衡量景观中斑块类型的多样性和均匀度。值越高表示景观中的斑块类型越多，且各类型的分布越均匀

1) p_i 为 i 类景观占总面积的比例; p_{ij} 为 i 类土地利用类型第 j 块斑块的周长; g_{ik} 为重复计数的 i 和 k 类土地利用类型像素之间的邻接数; m 为景观中斑块类型的数量; e_{ik} 为景观中不同类型斑块之间的边界长度。

1.3 数据分析方法

本研究采用 Pearson 相关性分析、冗余分析 (RDA) 和多元逐步回归分析^[20]来探究流域水质对景观格局特征的响应规律, 其中 Pearson 相关性分析用于识别变量之间的线性关系, RDA 用于综合分析多个指标对水质的关系, 而逐步回归分析用于建立多元回归方程, 并筛选出对水质影响较大的主要指标。本研究在 R 4.3.0 软件中, 采用 corplot 和 mass 语言包中的 cor 和 sterAIC 函数分别开展 Pearson 和多元逐步回归分析, 并利用 Canoco 5 软件进行冗余分析。为确保数据适合线性分析, 在进行冗余分析前首先进行了去趋势对应分析 (DCA)。DCA 分析可评估数据的非线性程度, 从而判断 RDA 的适用性^[21,22]。本研究中, 汛期和非汛期的 DCA 第一轴长度分别为 0.3 和 1.2, 均小于 3, 表明数据呈现线性关系, 适合采用 RDA 分析。RDA 排序图中箭头间的夹角表示变量之间的相关性, 当变量的箭头之间夹角越小, 说明这两个变量的正相关性越强。若夹角接近 90 度, 表示这两个变量之间的相关性很弱或接近无关; 如果夹角大于 90 度, 则表示这两个变量之间存在负相关关系。

2 结果

2.1 水质时空变化规律

研究区不同时期氮磷浓度的空间分布如图 2 所示。从整体上来看, 流域氮污染较为严重, 所有点位 TN 均超出地表水 III 类标准, 中下游部分点位达到 V 类甚至劣 V 类, TP 和 COD 浓度则相对较低, 所有点位均为 I 类或 II 类; 从季节上来看, 非汛期 TN 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的最大值分别达到 2.65 mg/L 和 2.20mg/L, 明显高于汛期; TP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 COD 则是在汛期浓度略高于非汛期。通过对两个时期不同水质指标的单因素方差检验 (ANOVA) 得出, TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 COD 的检验结果 p 值小于 0.05, 说明这几个水质指标浓度在汛期和非汛期存在显著的差异。同时, 还发现污染指标浓度分布展现出鲜明的空间特征, 具体表现为由上游到下游、由外侧支流到主河道, 其浓度逐渐上升的特点。

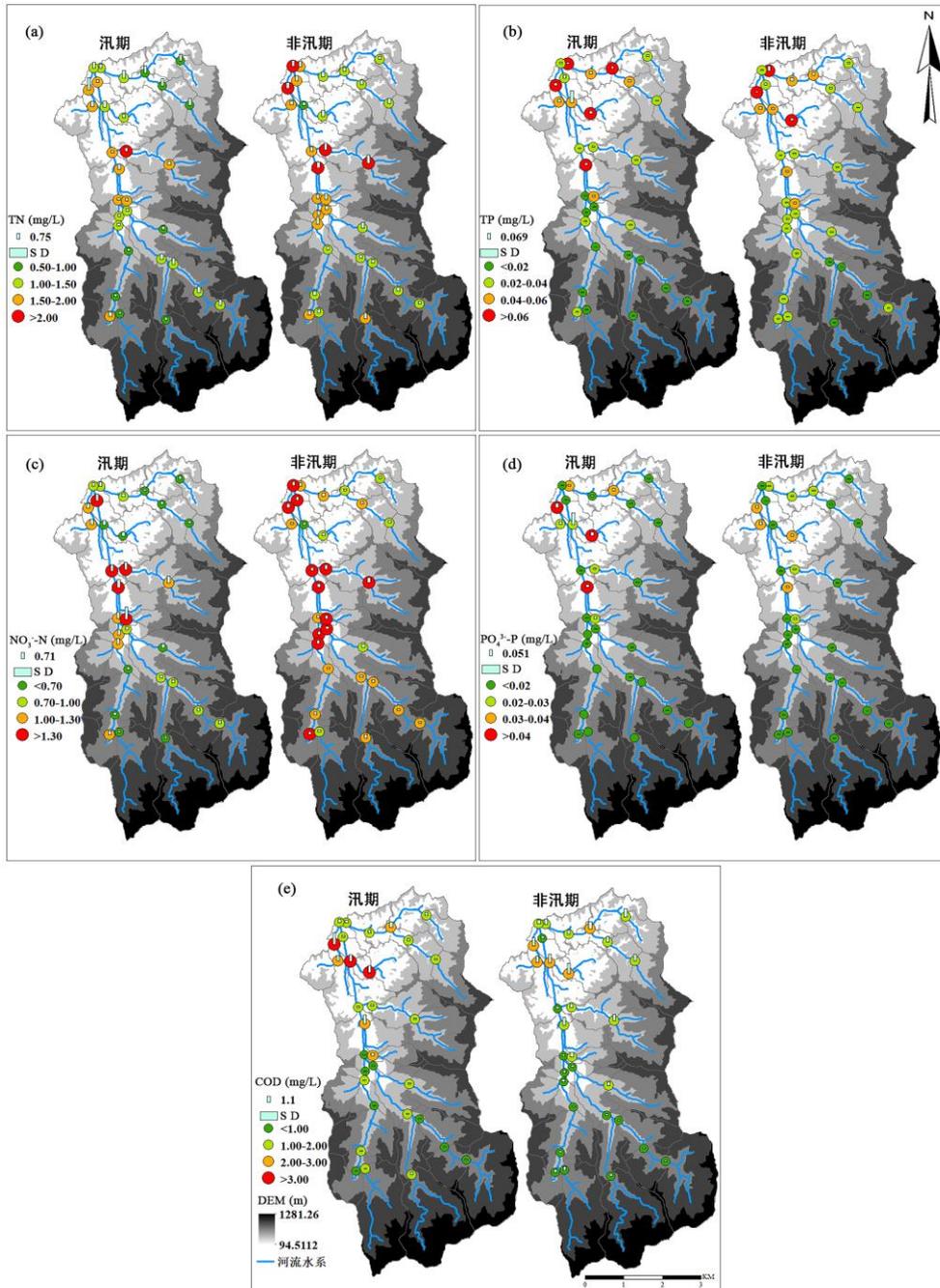


图 2 汛期（6 月-9 月）和非汛期（1 月-五月及 10 月-12 月）氮磷平均浓度空间分布图

Fig.2 Patial distribution of average concentrations of nitrogen and phosphorus in different periods, flood season (June-September) and non-flood season (October-May)

2.2 流域土地利用组成及“源-汇”景观格局变化特征

土地利用分析结果表明（图 3），研究区整体以“汇”景观为主，“源”和“汇”景观分别占据 17%和 83%。对于“源”景观，其空间分布呈现出从上游到下游逐渐增加的趋势，同时从流域外向内部近河道区域也表现出逐渐集中的特征。上游子流域 1 的茶园面积较大，占其总面积的 25%。在中下游地区，

村庄、农田和茶园的面积显著增加，特别是在流域 12、29 和 31 中，“源”景观的比例分别达到 49%、51%和 66%，这些区域以农田和茶园为主。

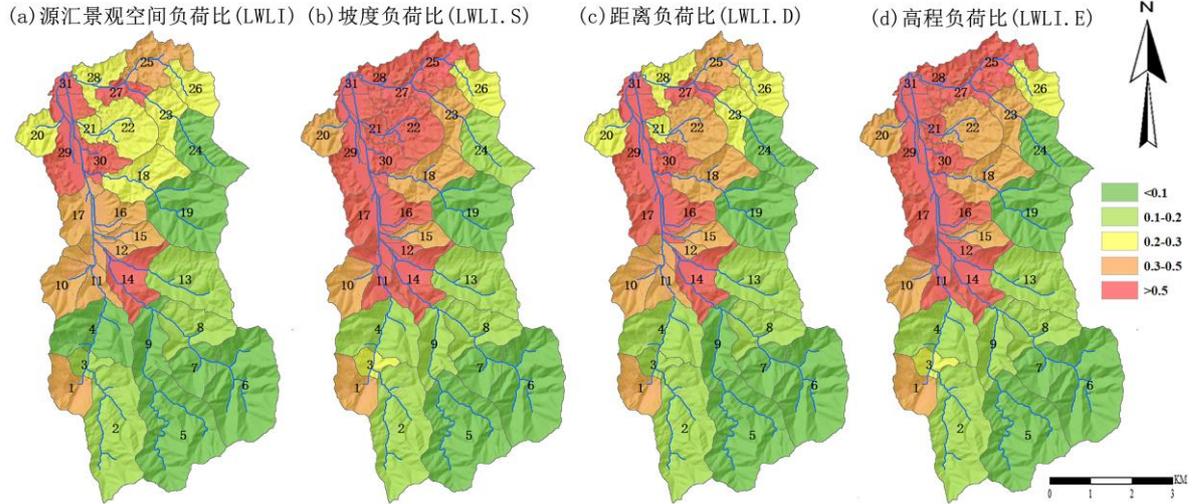


图 3 子流域源汇景观空间负荷比指数和三种源汇景观负荷分指数的空间分布

Fig.3 The spatial distribution of the spatial load ratio index of source-sink landscape and the three source-sink landscape load sub-indices in the sub-basin

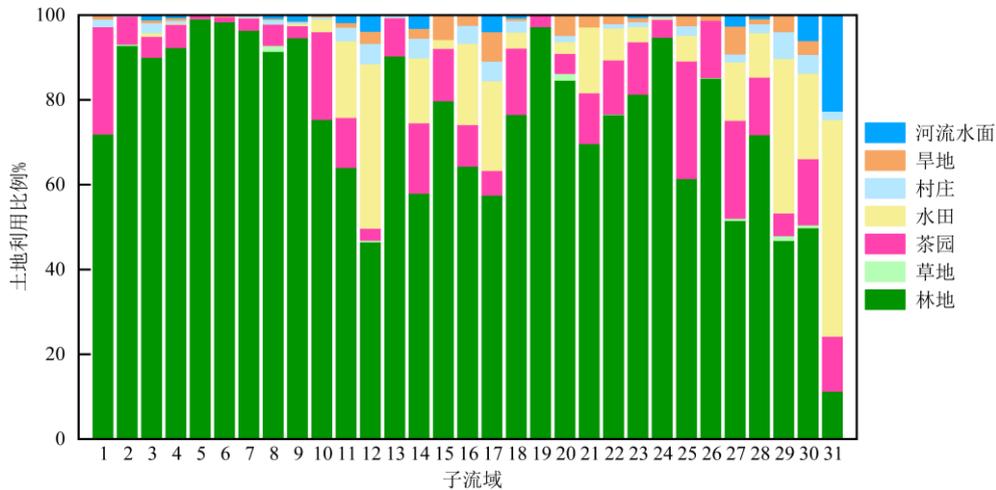


图 4 上梧流域土地利用组成

Fig.4 Land use composition in Shangwuxi Basin

根据公式 (2) 计算得出 31 个流域的源汇景观空间负荷比指数如图 4 所示。不同流域的源汇景观空间负荷比指数差异较大，其中上游子流域 1 以及除去流域 13、19 和 24 的中下游流域的源汇景观空间负荷比指数都相对较高。由于从上游到下游“源”景观的面积比例逐渐增加，而“汇”景观的面积比例逐渐减少，使得源汇景观空间负荷比指数也相应地增大。源汇景观空间负荷比指数越大，氮磷流失的可能性就越高。比如，流域 1 内存在大面积茶园，且多为坡地种植，加剧了氮磷等养分的流失，使得流域 1 的源汇景观空间负荷比指数相对较大。同样，中下游地区的“源”景观面积较大且集中分布在河道两侧及流域集水口附近，氮磷等营养元素更容易在主干河流中富集，而“汇”景观分布在流域外围，无法有效拦截氮磷的流失。另外，LWLI.D、LWLI.E 和 LWLI.S 从空间位置、高程和坡度三个维度反映了“源”景观

与“汇”景观在地理空间上的布局。LWLI.D 值越大,表示“源”景观距离流域出口越近,污染物在传输过程中路径较短,这使得污染物更容易被冲刷进入河流;LWLI.E 值高表明“源”景观位于低坡位,而“汇”景观处于高坡位,由于“源”景观位于低坡位,污染物更容易顺水流向下游传播,而“汇”景观难以充分发挥截流净化作用,从而增加了水体污染风险。因此,中下游地势平坦、低洼的流域 LWLI.E 值较高;此外,LWLI.S 值越高,表明“源”景观所在位置坡度较平缓,水流减缓有助于污染物在流动过程中被沉降和降解,进而降低对水质的影响。因此,地势平坦的中下游流域 LWLI.S 值也相对较高。

2.3 源汇景观格局与水质的相关性

由上梧溪 31 个子流域各土地利用面积比例、源汇景观负荷比指数与水质指标的相关性分析可得(图 5),汛期 TN 与水田、旱地和村庄的面积占比显著正相关,且与村庄的相关系数达到 0.51,TP 与茶园和旱地的面积占比也呈显著正相关,而林地面积占比与 TN 和 TP 呈负相关;从景观格局指数方面来看,LWLI.D、LWLI.E、LWLI.S、LWLI 和 SHDI 均与多个水质指标呈显著正相关,而 CONTAG 与水质指标呈显著负相关,其中与 TN 的相关系数最高。非汛期除 TP 外的水质指标与景观特征之间的相关性均有所下降,而源汇景观空间负荷比指数水质指标的相关性在两个时期都高于土地利用面积占比,表明综合考量了相对高程、相对距离和坡度的源汇景观空间负荷比指数可更为准确全面地解释水质的时空变异。

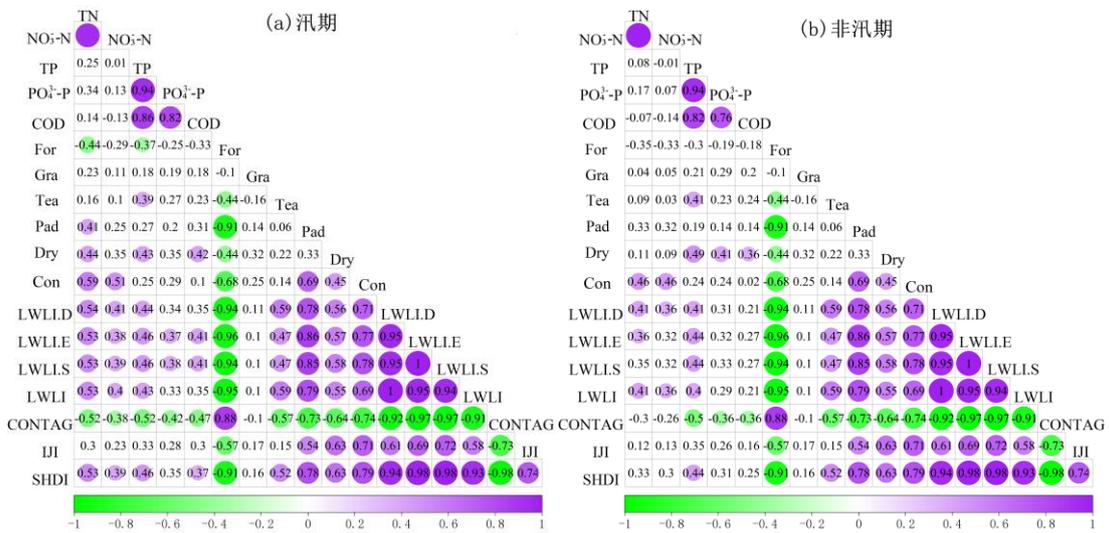


图 5 不同时期水质指标与景观特征的相关性分析 (For:林地;Gra:草地;Tea:茶园;Pad:水田;Dry:旱地;Con:村庄)

Fig.5 Correlation analysis of water quality indicators and landscape characteristics in different periods (For: forest land; Gra: grassland; Tea: tea garden; Pad: paddy field; Dry: dry land; Con: construction land)

2.4 水质变化的主导因子解析

图 6 展示了不同时期土地利用对各水质参数影响的 RDA 排序结果,其中汛期轴 1 和轴 2 的解释度分别为 54.65%和 15.68%,非汛期轴 1 和轴 2 的解释度分别为 53.42%和 5.13%,并且两个时期总拟合度都达到 99.8%。汛期中,林地和 CONTAG 箭头与所有水质指标箭头之间的夹角均大于 90°,表明 CONTAG 和林地与各水质指标之间存在显著的负向影响。相反,村庄、旱地和水田对 TN 和 NO₃-N 浓度具有正向影响,其中村庄与 TN 的夹角接近 0°,说明汛期村庄占比是解释 TN 浓度空间变异的最有效指标。此外,LWLI、LWLI.D、LWLI.E 和 LWLI.S 与大多数水质指标呈正相关,表明在汛期,综合表征“源”景观与“汇”景观在地理空间上的分布及其污染传递关系的源汇景观空间负荷比指数增加,可能会导致水质恶化。茶园对 TP 和 PO₄³⁻-P 的正向影响进一步表明,茶园在汛期可能是重要的污染源。

在非汛期,林地与 PO₄³⁻-P 之间存在负相关关系,尽管其影响程度在非汛期有所减弱,但仍然有助于改善水质;村庄对 TN 和 NO₃-N 的正向影响依然显著,表明村庄面积占比的增加将导致这些污染指标的

浓度上升；草地和旱地对 TP 的影响在非汛期更为显著，表明这些土地类型在非汛期可能增加水体中的有机物和总磷含量；CONTAG 对 TP 和 COD 仍是显著的负向影响，夹角接近 180°。对于 LWLI、LWLI.D、LWLI.E 和 LWLI.S 等指数，尽管其对水质指标的整体影响有所减弱，但它们与 NO₃-N 和 PO₄³⁻-P 仍有显著的正向关系，表明源汇景观空间负荷比指数在非汛期对这些特定污染物仍存在影响。

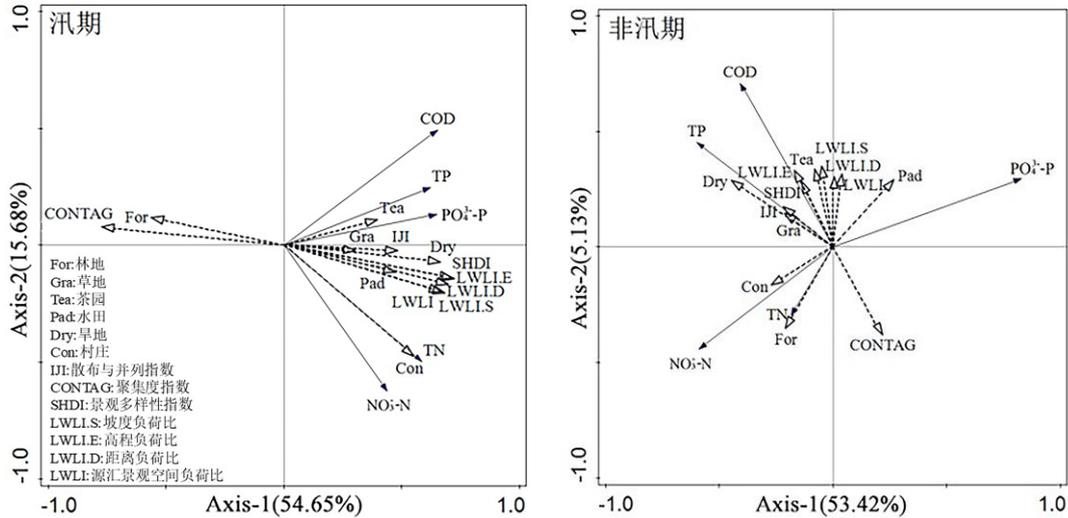


图 6 水质指标与景观特征的 RDA 排序图

Fig.6 RDA ordination plot of water quality indicators and landscape characteristics

表 2 土地利用与景观指数与水质指标的多元逐步回归

Tab.2 Multiple stepwise regression of land use and landscape index and water quality index

水质指标	时期	多元逐步回归方程	R ²	Adj-R ²	Max(VIF)*
TN	汛期	$y=1.40-5.15Tea-4.34Pad+2.13LWLI.S-0.02IJI$	0.57	0.46	6.69
	非汛期	$y=1.79+16.42Con-0.01IJI$	0.30	0.25	2.02
NO ₃ -N	汛期	$y=1.12-5.49Tea-4.81Pad+1.98LWLI.S+1.92LWLI-0.01IJI$	0.54	0.42	3.61
	非汛期	$y=4.73+13.89Con-0.01IJI$	0.35	0.22	2.80
TP	汛期	$y=0.34-0.01CONTAG-0.02SHDI$	0.47	0.27	3.62
	非汛期	$y=0.02+1.61Gra+0.19Tea+0.42Dry+0.22LWLI.E-0.57LWLI-0.12SHDI$	0.59	0.46	2.53
PO ₄ ³⁻ -P	汛期	$y=-0.06+0.07For+0.99Gra+0.59Tea+0.13LWLI.S-0.06SHDI$	0.43	0.31	9.55
	非汛期	$y=0.01+0.92Gra+0.06Te+0.17Dry-0.17LWLI.E+0.25LWLI.S-0.07SHDI$	0.48	0.35	2.01
COD	汛期	$y=23.53+62.99Gra+9.55Tea+9.98Pad+22.62Dry-23.92LWLI-0.23CONTAG-8.82SHDI$	0.69	0.58	8.54
	非汛期	$y=19.99+48.56Gra+5.98Tea+6.87Pad+12.81Dry-0.19CONTAG-6.22SHDI$	0.72	0.62	9.03

*当回归变量的最大方差膨胀因子小于 10 (即 Max(VIF)<10) 时，一般认为建立的多元线性回归模型变量间多重共线性问题不严重^[23]。

由多元逐步回归分析可知（表 2），氮浓度在汛期主要受茶园、水田、LWLS 和 IJI 的影响，而在非汛期则主要受村庄和 IJI 的影响。对于 TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ，汛期与非汛期的影响因素有所差异，汛期中 TP 与 CONTAG 和 SHDI 呈负相关，而 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 则受林地、草地、茶园、LWLS 和 SHDI 的共同影响。从整体回归效果上看，COD 的回归系数最高，非汛期 R^2 达到了 0.72，TN 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 在汛期 R^2 均大于非汛期 R^2 ，而 TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 在汛期的 R^2 均小于非汛期 R^2 ，整体趋势与 RDA 分析具有一致性。

3 讨论

3.1 汛期和非汛期水质变化特征

研究区水质存在鲜明的汛期和非汛期变异特征，总体上，非汛期 TN 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度较高，而 TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 COD 浓度则在汛期较高，这与韩黎阳等人^[24]在三峡库区的研究结果有所差异。这种季节性水质的差异与研究区的地貌特征、土地利用组成及施肥灌溉等活动有关，这是由于上梧溪流域茶果园种植是主要的农业开发类型，茶果园每年 3-5 月份施肥强度大且多为深施或埋施^[25]，土壤底层养分含量要高于土壤表层；茶园的定期翻土增加根系透气性，导致土壤松散且粗化严重，表土一般粒径较大，水分易沿土壤孔隙下渗^[26]。在底土养分高富集和表土水分强入渗的交互下，养分更倾向于潜流运动，促使氮等养分以壤中流的形式流失^[27]，这直接导致非汛期 TN 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度显著升高；对于磷而言，由于非汛期降雨强度低，地表冲刷能力和搬运有限，因此非汛期河流 TP 浓度较低。当汛期来临后，地表冲刷能力显著增强，大量的磷以颗粒态形式进入水体，使得其汛期浓度显著上升。尽管汛期氮的流失量也会增强，但由于汛期月份（6-9 月份）温度高，反硝化等微生物脱氮作用活跃，使得大量的氮被快速去除。

3.2 景观格局与水质的关系

本研究发现上梧溪流域主要的“源”景观如农田、村庄和茶园从上游到下游的面积占比逐渐增加，而“汇”景观的面积占比逐渐减少，“源-汇”景观格局指数呈现出上游到下游增大的特点。由于下游靠近入湖口附近“汇”型景观占比低、而“源”型景观占比高，在高强度的降雨冲刷影响下，可能对入湖口水质产生不利影响。

根据相关性分析结果，村庄和水田是流域汛期氮污染的主要来源，这与 SLIVAL^[28]和夏品华等^[29]的研究结论一致。村庄面积占比虽然较小，但由于生产生活污染物排放量大且多临近河道分布，对水体的直接污染也更为突出；而水田的分布相对集中，施肥强度大加上周期性农业排水和灌溉等活动的影响，使得氮更容易从水田流失而进入河流。相比之下，茶园和旱地无论是在汛期还是非汛期，都与磷污染显著相关。这主要是由于这些农业用地多为坡地种植，在降雨径流的驱动下，含磷污染物更容易以颗粒态的形式冲刷流失^[30]。对于林地，研究发现在汛期，林地占比与水质指标呈负相关，这表明林地对水质改善起到了关键作用。相关研究表明，林地植被不仅能够有效拦截并吸收地表径流中的污染物，其丰富的微生物群落还参与了污染物的分解和封存，提升了对污染物的截留和净化能力^[31]。因此，林地是流域“汇”景观的重要组成部分，在减少污染物传输方面发挥了重要作用。

通过 RDA 和逐步回归分析，本研究明确了上梧溪流域氮磷等水质指标变化的主导因素。散布与并列指数（IJI）是氮污染的主要影响因素。高 IJI 值表明景观斑块边界交错更多，导致水流路径更复杂，从而增加了氮的截留与转化机率，减少了氮的径流流失；对于磷浓度，汛期的主要影响因素是坡度景观空间负荷比指数（LWLS）和景观多样性指数（SHDI）。当降雨量大时，地表径流强烈，坡度较大的“源”景观容易加速磷的迁移，导致磷流失量增加，而较高的 SHDI 值表明景观分布更均匀、多样性更高，有助于减少磷的迁移和流失。

已有研究表明，“源-汇”景观格局对水质的影响显著且复杂。例如，Qiu 等人^[32]在鄱阳湖流域的研究中发现，“源”景观（如农田和城区）与氮磷污染显著正相关，而“汇”景观（如森林和草地）对污染物具有显著的缓冲作用。本研究进一步揭示，上梧溪流域的茶园和旱地对磷污染的贡献尤为显著。这主要是因为该区域内茶园和旱地多为农户分散种植，面积较大，且施肥和耕作管理方式不统一，导致了更为复杂的污染源。通过引入源汇景观空间负荷比指数可更好解释水质变异，比如 Wang 等人^[33]的研究表明，

LWLI 在农业活动和城市化较为集中的地区是能够反映水质变化的关键驱动因素，尤其在非点源污染的影响评估中具有显著作用。在本研究中，LWLI 同样表现出与水质变化的强相关性。尽管本研究通过将地形、距离和坡度等空间因素纳入考虑，使得源汇景观空间负荷比指数与多项水质指标均呈现显著正相关性，虽然相关性尚未达到极显著水平，但仍表明 LWLI 在衡量水质影响方面具有较好的适用性。然而，这种相关性在不同流域的表现可能存在差异。例如，岳隽等人^[34]的研究区子流域相互独立，避免了上下游间复杂水文联系的干扰，因此其 LWLI 与水体污染程度的相关性表现更为清晰。而本研究所聚焦的上梧溪流域，由于各子流域间存在上下游嵌套关系，污染物的上下游传递可能导致相关性结果的不确定性，这也可能是相关性未达到极显著水平的重要原因。

3.3 上梧溪流域“源-汇”景观格局优化建议

LWLI 的空间分布分析结果显示，上梧溪流域存在“源-汇”景观空间失衡现象。对于地势相对平坦的流域中下游区域，“源”景观面积占比高，大部分村庄和农田集中在这一区域，且上梧溪主河道贯穿而过，使得污染物更易流失。此外，全流域内经济性作物（如茶园）多分布于山坡底部，这类作物需肥量较大，施肥过程中易造成氮磷的流失，而林地和草地主要分布在坡中和坡顶，难以有效发挥“汇”景观的截流作用，导致氮磷等营养物质容易流失并富集于河流中。合理的景观格局有助于降低 LWLI 值，减少流域水体污染。例如，尽管 22 号子流域与 10 号和 15 号子流域的“源-汇”景观占比相似，但 22 号子流域的 LWLI 值显著低于 10 号和 15 号子流域。这是因为 22 号子流域内的“源-汇”景观错落有致，使“汇”景观得以充分发挥截流和净化作用，进而水质也显著优于其他子流域。

为了改善上梧溪流域水质状况，建议对流域景观结构和格局进行优化调整。比如，可在流域的中下游地区人类活动强度较大的地带增加林地和草地的比例，通过在河流与农田、村庄等“源”景观的入水体路径之间设置防护林，将有助于拦截地表径流、减少养分流失。对于农田和茶园的施肥管理，建议推广精准农业技术，优化施肥方式和施肥量，并合理安排施肥时间，有望显著降低非点源污染流失的风险。同时，应规范村镇居民区的生活垃圾和污水处理与排放，这不仅可改善生态环境，也能大幅削减污染入水体的量。

需要指出，尽管本研究覆盖了 2023 年全年的数据，但对于不同的水文年，LWLI 与水质的关系可能存在较大差异。受限于研究时间跨度，未来研究应开展多年时序监测，以涵盖丰、平、枯等不同水文年型，并深入探索不同水文条件下源汇景观格局与水质之间的长期动态关系，以期为流域综合管理提供更全面的科学依据。

4 结论

本研究以千岛湖上梧溪流域为研究对象，运用景观生态学方法，研究了该流域土地利用及“源-汇”景观格局对水质的影响，重点解析了氮磷等污染物的时空变化特征及其与景观结构的关系，得到了如下结论：

(1) 上梧溪流域主要水质指标呈现鲜明的时空变化特征。对于总氮，非汛期的浓度显著高于汛期；对于总磷，汛期的浓度略高于非汛期。上梧溪流域下游干流及部分上游支流氮磷浓度较高。

(2) 上梧溪流域“汇”景观以林草地为主，占流域总面积的 83%，集中分布于上游；“源”景观则主要位于中下游河道两侧，农业生产密集。这种上游以“汇”、下游以“源”的流域源汇景观空间错配的格局，使得污染物产排量大而未得到充分拦截，显著加大了上梧溪污染入湖的风险。

(3) LWLI、IJI、SHDI 等指数对水质的影响显著，表明“源-汇”景观的比例均衡性及其空间分布的复杂程度对流域氮磷流失有重要影响，随着“源”景观面积比例的增加、其距离集水口越近、以及所在坡度越陡，氮磷流失的风险显著增加。

根据上述结果并结合各子流域特点，建议因地制宜调整子流域源汇景观格局，以实现“源”景观与“汇”景观的交替分布，这不仅有助于延长污染物的景观滞留时间，也将充分发挥汇景观的拦截与消纳功能；此外，在全域尺度上，还应统筹优化上下游源汇格局，比如通过加强上游坡地农业管理与水土保持

持, 中游优化近河防护林带与生活污水处理, 下游强化人工湿地建设和土地利用调整, 以更大限度减少污染入河量。

5 参考文献

- [1] Wang JL, Tan SJ, Li MB *et al.* Research progress in source-sink landscape pattern analysis based on non-point source pollution processes in watersheds. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*. 2023, 31(10): 1657-1667. DOI: 10.12357/cjea.20221001. [王金亮, 谭少军, 李梦冰等. 基于流域面源污染过程的“源-汇”景观格局分析研究进展. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(10): 1657-1667.]
- [2] Chen LD, Fu BJ, Zhao WW *et al.* Source-sink landscape theory and its ecological significance. *Acta Ecologica Sinica*. 2006, 26(5): 1444-1449. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2006.05.020. [陈利顶, 傅伯杰, 赵文武等. “源”“汇”景观理论及其生态学意义. *生态学报*, 2006, 26(5): 1444-1449.]
- [3] Cook EA. Landscape structure indices for assessing urban ecological networks. *Landscape and Urban Planning*, 2002, 58(2-4): 269-280. DOI: 10.1016/S0169-2046(01)00226-2.
- [4] Mello KD, Valente RA, Randhir TO *et al.* 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. DOI: 10.1016/j.catena.2018.04.027.
- [5] Lv HC, Xue SG, Fang ZF *et al.* Influence of different land use patterns upon nitrogen and phosphorus loss in the Qiangdaohu drainage area. *Geology in China*. 2004, 31(zk): 112-117. DOI:10.3969/j.issn.1000-3657.2004.z1.018. [吕唤春, 薛生国, 方志发等. 千岛湖流域不同土地利用方式对氮和磷流失的影响. *中国地质*, 2004, 31(zk): 112-117.]
- [6] Li Y, Zhang YZ, Zhang S W. The landscape pattern and ecologic effect of the march changes in the sanjiang plain. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(6): 677-682. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0690.2002.06.007. [李颖, 张养贞, 张树文. 三江平原沼泽湿地景观格局变化及其生态效应. *地理科学*, 2002, 22(6): 677-682.]
- [7] Li CW, Wang YM, Wang S *et al.* The source-sink landscape pattern change and its effect on phosphorus pollution in Yuqiao watershed. *Acta Ecologica Sinica*. 2011, 32(8): 2430-2438. DOI: 105846/stxb201112151924. [李崇巍, 王宇明, 王飒等. 流域“源-汇”景观格局变化及其对磷污染负荷的影响——以天津于桥水库流域为例. *生态学报*, 2011, 32(8): 2430-2438.]
- [8] Ni K, Wang XY, Yang L *et al.* Response of Dissolved Nutrient Transport to “Source” and “Sink” Landscape Pattern in Typical Agricultural Small Watersheds in the Three Gorges Reservoir Area. *Acta Pedologica Sinica*. 2024, 61(2): 408-423. DOI: 10.11766/trxb202205190263. [倪珂, 王小燕, 杨澜等. 三峡库区典型农业小流域溶解态养分输移对“源—汇”景观格局的响应. *土壤学报*, 2024, 61(2): 408-423.]
- [9] Zhu GW, Cheng XL, Wu ZX *et al.* Spatio-Temporal Variation of Nutrient Concentrations and Environmental Challenges of Qiandaohu Reservoir, China. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(4): 852-863. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2022.02.08. [朱广伟, 程新良, 吴志旭等. 千岛湖水体营养盐时空变化及水环境挑战. *环境科学研究*, 2022, 35(4): 852-863.]
- [10] Li Y, Shi K, Zhang Y *et al.* Analysis of water clarity decrease in Xin'anjiang Reservoir, China, from 30-Year Landsat TM, ETM+, and OLI observations. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125476. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125476.
- [11] 周立刚. 千岛湖水环境质量评价与生态保护补偿对策研究[学位论文]. 中国水利水电科学研究院, 2021.
- [12] Lin XN, Li WJ, Yin YF *et al.* Nitrogen and phosphorus loss with surface runoff from slope land of Qiandao Lake and their control with ecological interception project. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, 44(3): 150-156. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2023.0369. [蔺星娜, 李婉瑾, 尹园丰等. 千岛湖坡地地表径流氮磷流失及生态拦截控制. *环境科学学报*, 2024, 44(3): 150-156.]
- [13] Jin Z, Cen J, Hu Y *et al.* Quantifying nitrate sources in a large reservoir for drinking water by using stable isotopes and a Bayesian isotope mixing model. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(20): 20364-20376. DOI: 10.1007/s11356-019-05296-7.
- [13] Wang JL, Tan SJ, Li MB *et al.* Research progress in source-sink landscape pattern analysis based on non-point source pollution processes in watersheds. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*. 2023, 31(10): 1657-1667. DOI: 10.12357/cjea.20221001. [王金亮, 谭少军, 李梦冰等. 基于流域面源污染过程的“源-汇”景观格局分析研究进展. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(10): 1657-1667.]
- [14] 张倚铭. 不同降雨强度条件下新安江对千岛湖水质影响的定量评估[学位论文]. 西华师范大学, 2019.
- [15] Cheng LD, Fu BJ, Xu JY *et al.* Location-weighted landscape contrast index: a scale independent approach for landscape pattern evaluation based on “Source-Sink” ecological processes. *Acta Ecologica Sinica*. 2003, 23(11): 2406-2413. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.

- 2003.11.025. [陈利项, 傅伯杰, 徐建英等. 基于"源-汇"生态过程的景观格局识别方法-景观空间负荷对比指数. 生态学报, 2003, 23(11): 2406-2413.]
- [16] Li JL, Sun RH, Xiong MQ *et al.* Estimation of soil erosion based on the RUSLE model in China. *Acta Ecologica Sinica*. 2020, 40(10): 3473-3485. DOI: 10.5846/stxb201903290610. [李佳蕾, 孙然好, 熊木齐等. 基于 RUSLE 模型的中国土壤水蚀时空规律研究. 生态学报, 2020, 40(10): 3473-3485.]
- [17] Feng Q, Zhao WW. The study on cover-management factor in USLE and RUSLE: a review. *Acta Ecologica Sinica*. 2014, 34(16): 4461-4472. DOI: 10.5846/stxb201306151710. [冯强, 赵文武. USLE/RUSLE 中植被覆盖与管理因子研究进展. 生态学报, 2014, 34(16): 4461-4472.]
- [18] Han YC, Li HP, Liu ML *et al.* Nitrogen budget balance characteristics of main land use types in Qiandao Lake Basin. *Environmental Pollution & Control*. 2022, 44(5): 682-686. DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2022.05.022. [韩轶才, 李恒鹏, 刘明亮等. 千岛湖流域主要土地利用方式氮收支平衡特征. 环境污染与防治, 2022, 44(5): 682-686.]
- [19] Xu QY, Wang P, Shu W *et al.* Impacts of landscape structure on water quality under different spatial scales in the Yuan River Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*. 2020, 40(12): 4325-4337. DOI: 10.13671/j.hjkxb.2020.0347. [徐启渝, 王鹏, 舒旺等. 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.]
- [20] Peng S, Li S. Scale relationship between landscape pattern and water quality in different pollution source areas: A case study of the Fuxian Lake watershed, China. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107136. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.107136.
- [21] 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, 徐光米, 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.]
- [22] Pak HY, Chuah CJ, Yong EL *et al.* Effects of land use configuration, seasonality and point source on water quality in a tropical watershed: A case study of the Johor River Basin. *Science of The Total Environment*, 2021, 780: 146661. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146661.
- [23] Zhang WS, Li HP, Steven G. Direct measurements of dissolved N₂ and N₂O highlight the strong nitrogen (N) removal potential of riverine wetlands in a headwater stream. *Science of the Total Environment*, 2022, 848: 157538. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157538.
- [24] Han LY, Hang ZL, Xiao WF *et al.* Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China. *Environmental Science*. 2014, 35(3): 1091-1097. DOI: 10.13227/j.hjkx.2014.03.038. [韩黎阳, 黄志霖, 肖文发等. 三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响. 环境科学, 2014, 35(3): 1091-1097.]
- [25] Zhou HM, Zheng SH. Effect of different fertilization treatments on tea growth. *Journal of Tea*. 2015, 41(1): 12-14. DOI: 10.3969/j.issn.0577-8921.2015.01.004. [周慧敏, 郑生宏. 不同施肥方式茶园试验初报. 茶叶, 2015, 41(1): 12-14.]
- [26] Nie XF, Li HP, Huang QB *et al.* Characteristics of nitrogen loss via runoff from typical land uses in hilly area of Tianmuhu Reservoir watershed. *Journal of Lake Sciences*. 2013, 25(6): 827-835. DOI: 10.18307/2013.0606 [聂小飞, 李恒鹏, 黄群彬, 等. 天目湖流域丘陵山区典型土地利用类型氮流失特征. 湖泊科学, 2013, 25(6): 827-835.]
- [27] Liao KH, Lv LG, Yang GS *et al.* Sensitivity of simulated hillslope subsurface flow to rainfall patterns, soil texture and land use. *Soil Use & Management*, 2015, 32(3): 422-432. DOI: 10.1111/sum.12282.
- [28] Sliva L, Dudley Williams D. Buffer Zone versus Whole Catchment Approaches to Studying Land Use Impact on River Water Quality. *Water Research*, 2001, 35(14): 3462-3472. DOI: 10.1016/S0043-1354(01)00062-8.
- [29] Xia PH, Kong XL, Yu LF *et al.* Effects of land-use and landscape pattern on nitrogen and phosphorus exports in Caohai wetland watershed. *Acta Scientiae Circumstantiae*. 2016, 36(8): 2983-2989. DOI: 10.13671/j.hjkxb.2015.0681. [夏品华, 孔祥量, 喻理飞. 草海湿地小流域土地利用与景观格局对氮、磷输出的影响. 环境科学学报, 2016, 36(8): 2983-2989.]
- [30] Zhang MK, Zhang HM, Qian ZL. Use of the spatial matching of source and sink landscapes to control agricultural non-point source pollution. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*. 2007, 19(3): 192-196. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1524.2007.03.012. [章明奎, 张慧敏, 钱忠龙. 源汇型景观组合控制农业面源污染的研究. 浙江农业学报, 2007, 19(3): 192-196.]
- [31] Hu J, Liu MS, Zhou W *et al.* Correlations between water quality and land use pattern in Taihu Lake basin. *Chinese Journal of Ecology*. 2011, 30(6): 1190-1197. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2011.0213. [胡建, 刘茂松, 周文等. 太湖流域水质状况与土地利用格局的相

关性. 生态学杂志, 2011, 30(6): 1190-1197.]

[32] Wang JL, Qiu CH, Qin SY *et al.* Effects of “source-sink” landscape on spatiotemporal differentiation of phosphorus output in multiple watersheds in mountainous areas based on the modified location-weighted landscape index. *Ecological Indicators*, 2024, 158: 111397.

DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.111397.

[33] Wang R, Wang Y, Sun S *et al.* Discussing on “source-sink” landscape theory and phytoremediation for non-point source pollution control in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(36): 44797-44806. DOI: 10.1007/s11356-020-10952-4.

[34] Yue J, Wang YL, Li GC *et al.* The Influence of Landscape Spatial Difference on Water Quality at Differing Scales: A Case Study of Xili Reservoir Watershed in Shenzhen City. *Acta Ecologica Sinica*. 2007, 27(12): 5271-5281. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2007.12.038.

[岳隽, 王仰麟, 李贵才等. 不同尺度景观空间分异特征对水体质量的影响——以深圳市西丽水库流域为例. *生态学报*, 2007, 27(12): 5271-5281.]