

## 考虑空间尺度效应的云南异龙湖流域主要入湖河流污染源解析\*

袁梦祥<sup>1,2</sup>, 赵洛琪<sup>1,2</sup>, 高雨晗<sup>1,2</sup>, 黄 律<sup>1,2</sup>, 马旭东<sup>1,2</sup>, 沈春节<sup>1,2</sup>, 刘嫦娥<sup>1,2</sup>, 付登高<sup>1,2</sup>, 段昌群<sup>1,2\*\*</sup>

(1: 云南省高原山地生态与退化环境修复重点实验室, 云南大学生态学与环境学院, 昆明 650091)

(2: 云南省高原湖泊生态修复及流域管理国际联合研究中心暨云南省生态文明建设智库, 昆明 650091)

**摘要:** 定量解析污染源对水质影响的贡献是水环境精细化管理的重要基础。目前多通过水质和土地利用类型的关系以解析水体污染源的研究, 忽略了空间尺度的差异性, 引发景观配置不合理的后果。为此, 本研究依据考虑空间尺度效应的污染源解析方法, 基于异龙湖流域 3 条主要入湖河流的入湖口监测断面对雨季和旱季的水质数据进行研究。同时利用绝对主成分—多元线性回归模型 (APCS-MLR) 和 bioenv 分析揭示河道不同尺度缓冲区的土地利用变化对水质的影响并解析河流主要污染源。研究结果表明: (1) 异龙湖主要入湖河流水质表现出季节性差异, 旱季期间 3 条主要入湖河流的浊度、化学需氧量 (COD<sub>Cr</sub>)、氨氮 (NH<sub>3</sub>-N)、总磷 (TP) 和总氮 (TN) 浓度平均值相比于雨季减幅分别为 39.53%、39.93%、94.48%、38.29% 和 1.72%。其中, 入湖河流水体中的 TN 在旱季和雨季的超标率分别为 58% 和 74%, 成为首要污染物; (2) 在旱季, 20 m 缓冲区尺度内河流水质受耕地和裸地占比影响较大, 随着空间尺度的扩大, 至 50~300 m 缓冲区尺度时建设用地、林地及水体占比对水质的影响增加; 在雨季, COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP 和 TN 受 20~300 m 缓冲区尺度下建设用地占比及 200~300 m 缓冲区尺度下的水体占比影响, 溶解氧受 20 m 缓冲区尺度内建设用地占比及 50~300 m 缓冲区尺度下耕地占比影响; (3) 异龙湖流域主要入湖河流在旱季的主要污染源是 20 m 缓冲区尺度内的裸地、20~100 m 缓冲区尺度下的耕地、50~300 m 缓冲区尺度下的建设用地以及 100~300 m 缓冲区尺度下的基塘—水库水体; 雨季的主要污染源是 20~300 m 缓冲区尺度下的建设用地、200~300 m 缓冲区尺度下的水库—基塘以及 50~300 m 缓冲区尺度下的耕地。本研究在污染源解析过程中提出考虑不同河道缓冲区的空间尺度, 在一定程度上可以克服受体模型的主观性, 提高污染源识别和分配的准确性。研究结果可以帮助管理者明确在不同空间尺度下污染防治的重点, 为水环境管理工作提供新的参考。

**关键词:** 绝对主成分—多元线性回归; 水质分异特征; 土地利用; “源”“汇”景观理论; 异龙湖

## Pollution sources of main rivers inflowing into Lake Yilong in Yunnan Province considering spatial scale effect\*

Yuan Mengxiang<sup>1,2</sup>, Zhao Luoqi<sup>1,2</sup>, Gao Yuhan<sup>1,2</sup>, Huang Lv<sup>1,2</sup>, Ma Xudong<sup>1,2</sup>, Shen Chunjie<sup>1,2</sup>, Liu Chang'e<sup>1,2</sup>, Fu Denggao<sup>1,2</sup> & Duan Changqun<sup>1,2\*\*</sup>

(1: Yunnan Key Laboratory for Plateau Mountain Ecology and Restoration of Degraded Environments, School of Ecology and Environmental Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, P.R.China)

(2: Yunnan International Joint Research Center of Plateau Lake Ecological Restoration and Watershed Management, Yunnan Think Tank for Ecological Civilization Construction, Kunming 650091, P.R.China)

**Abstract:** Quantitative analysis on influence of pollution sources on water quality is an important basis for fine management of water environment. Currently, the pollution sources of water body are mostly studied through the relationship between water quality and land-use type, which ignores the differentiation of spatial scales and results in the consequence of inappropriate landscape configuration. For this reason, this work surveyed the water quality of three main rivers inflowing into Lake Yilong at the entrance monito-

\* 2023-07-14 收稿; 2023-11-21 收修改稿。

云南省科技重点研发计划项目 (202203AC100002)、云南省科技基础研究计划项目 (202201BF070001-002) 和云南省基础研究计划重点项目 (202301AS070038) 联合资助。

\*\* 通信作者; E-mail: chqduan@ynu.edu.cn。

ring section in rainy season and dry season with the pollution source analysis method considering spatial scale effect. Besides, this work studied the influence of land use change in buffer areas of different scales of river way on water quality with absolute principal component-multivariate linear regression (APCS-MLR) and bioenv and analyzes the main pollution sources of river. The research results showed that: (1) The water quality of main rivers inflow into Lake Yilong showed a seasonal difference. The average values of turbidity, chemical oxygen demand ( $COD_{Cr}$ ) as well as the concentration of ammonia nitrogen ( $NH_3-N$ ), total phosphorus (TP) and total nitrogen (TN) in dry season decrease by 39.53%, 39.93%, 94.48%, 38.29% and 1.72% respectively compared with that in rainy season. The over standard rate of TN in rivers inflow into Lake Yilong in dry season and rainy season were 58% and 74% respectively, so TN was the primary pollutant; (2) In dry season, the proportion of farmland and bare land had a great influence on the water quality of rivers in 20 m buffer area scale. As the spatial scale increased to 50–300 m buffer area scale, the influence of proportion of construction land, forest and water body on water quality increased; in rainy season,  $COD_{Cr}$ ,  $NH_3-N$ , TP and TN were influenced by construction land proportion in 20–300 m buffer area scale and water body proportion in 200–300 m buffer area scale. DO was influenced by construction land proportion in 20 m buffer area scale and farmland proportion in 50–300 m buffer area scale; (3) The main pollution sources of main rivers inflow into Lake Yilong in dry season included bare land in 20 m buffer area scale, farmland in 20–100 m buffer area scale, construction land in 50–300 m buffer area scale and dike pond-reservoir water body in 100–300 m buffer area scale; the main pollution sources in rainy season included construction land in 20–300 m buffer area scale, reservoir-dike pond water body in 200–300 m buffer area scale and farmland in 50–300 m buffer area scale. In the process of analyzing pollution sources, this study proposed the spatial scale considering different buffer areas of river way, which overcame the subjectivity of receptor model to some extent and improved the accuracy of pollution source identification and allocation. The research results will help the managers decide the pollution prevention and control priority in different spatial scales and provide a new reference for water environment management.

**Keywords:** APCS-MLR; differential characteristics of water quality; land-use; source-sink landscape theory; Lake Yilong

湖泊污染治理是一项系统工程,问题出在湖泊中,根源是在流域内<sup>[1]</sup>。流域是人类生产和生活的主要聚集地,景观配置不合理导致陆域污染物输入负荷升高,进而促使我国湖泊水环境退化<sup>[2,4]</sup>。研究表明,定量解析污染源对水体的贡献是流域水环境精细化管理的重要基础<sup>[5]</sup>。因此,流域河流源解析是治理湖泊污染的一个核心问题。

流域内的土地利用模式是影响河流水质的重要因素。不同的土地利用模式会导致流域水文特征和水质参数的变化<sup>[6-8]</sup>。在过去的几十年中,出现了大量关于不同土地利用类型下土壤功能的研究。结果表明:土地利用类型的改变往往会改变地表植被和土地管理方式,对下垫面土壤性质和环境特征产生长期影响,进而影响河流的水质<sup>[6,8-11]</sup>。此外,徐启渝等<sup>[12]</sup>和刘然等<sup>[13]</sup>的研究发现土地利用特征对水质的影响存在空间尺度效应,不同空间尺度下土地利用对水质的影响具有不确定性。因此,尺度效应成为研究重点,通过分析土地利用在不同空间尺度与水质之间的关系,能够更好地了解到土地利用对水质产生的影响,以便为及时采取措施恢复河流水质提供理论基础<sup>[12-14]</sup>。目前,探讨不同空间尺度下土地利用类型与水质之间关系的方法已经较为完善<sup>[12,14]</sup>。然而,水质和土地利用类型在不同空间尺度下的响应机制对污染源解析的影响尚不清楚。

水质的影响因素较为复杂,通过对水环境中的污染物进行解析,可以获知水体污染物的来源并定量分析其污染负荷的相对贡献量,从而有针对性地对水环境进行治理<sup>[15]</sup>。基于水质与污染源排放响应关系的源解析是当前流域污染源解析的主要研究方法。当前的水体污染源解析技术主要分为3类:清单分析法<sup>[16]</sup>、扩散模型<sup>[17-18]</sup>和受体模型<sup>[19-20]</sup>。其中,受体模型是指对受到污染源影响的局部环境介质(即受体)使用一系列手段进行追踪溯源的模型<sup>[5]</sup>。近年来随着自动水质监测站的布设,监测手段、方法和技术的不断进步,管理部门可以较为快速高效地获取大量精准的水质监测数据,应用统计技术在源解析方面逐渐广泛。由于绝对主成分—多元线性回归模型(APCS-MLR模型)可以得出不同因子对水质变化的定量贡献<sup>[21]</sup>,近年在水环境污染源解析研究中得到了广泛的应用<sup>[5,22]</sup>。然而,APCS-MLR模型仍具有一定的局限性,该模型的源因子必须根据先前的知识进行定义,导致源解析具有不同程度的主观性。为了克服受体模型的局限性,本研究基于bioenv分析解释不同尺度下水质和环境因子之间的复杂关系,并为污染源识别提供参考<sup>[23]</sup>。

云南高原湖泊流域随着城镇化和工农业的快速发展,入湖河流营养盐输入增加,部分湖泊出现了明显的富营养化特征<sup>[4]</sup>。鉴于入湖河流水质影响因素复杂,常规的污染源解析方法难以有效识别关键污染源及

其贡献<sup>[5]</sup>。因此大量学者利用 APCS-MLR 模型对流域水体的污染源进行识别,但都忽略了空间尺度对水质的影响<sup>[5,19,22]</sup>。从而无法有效针对流域入湖河流空间尺度内的具体范围和相对应的土地利用方式展开水环境的保护措施,导致治理效率低成本高。异龙湖是云南九大高原湖泊中污染程度高的代表性浅水湖泊,入湖河流污染源复杂,且缺乏污染源定量识别<sup>[24-26]</sup>。因此,本研究选择异龙湖流域城区河流作为研究对象,通过探讨异龙湖流域城区河流水质特征及不同空间尺度土地利用方式对水质的影响,结合 APCS-MLR 模型分析污染源贡献,可将异龙湖流域管理聚焦到河岸缓冲区的特定区域,从而使水资源管理者和政策制定者可以最大限度地提高项目效率并降低成本,同时为异龙湖流域水环境管理工作提供更加精细的参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地点

异龙湖 (23°38'37"~23°42'05"N, 102°29'52"~102°37'49"E, 图 1) 位于云南省红河哈尼族彝族自治州石屏县,整个湖区呈东西向条带状,为一断陷溶湖积盆地,湖盆长 30 km,宽 2~6 km。异龙湖所在区域属于亚热带高原湿润季风气候,年均温度为 18.0℃,7 月平均气温为 22.2℃,极端最高气温为 34.0℃,1 月平均气温 11.5℃,极端最低气温-2.4℃。多年平均降水 928 mm,5—10 月降水量约占年降水量的 81.3%。异龙湖流域集水面积约 326 km<sup>2</sup>,年入湖水量约 0.84×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,主要入湖径流包括城河、城南河和城北河,3 条河流约贡献了入湖径流量的 85%<sup>[25,27]</sup>。

异龙湖流域主要土地利用类型为经济林地与耕地,覆盖率分别为 29.24% 和 17.95%,经济林地以杨梅林为主,大量分布在流域西部和临湖南岸,耕地和建成区集中于流域东部和西部。异龙湖流域受人类活动长期影响,特别是 1960 年以来大规模围垦成田致使大量化肥进入水体,导致湖泊富营养程度加剧,生态系统退化<sup>[25-26]</sup>。

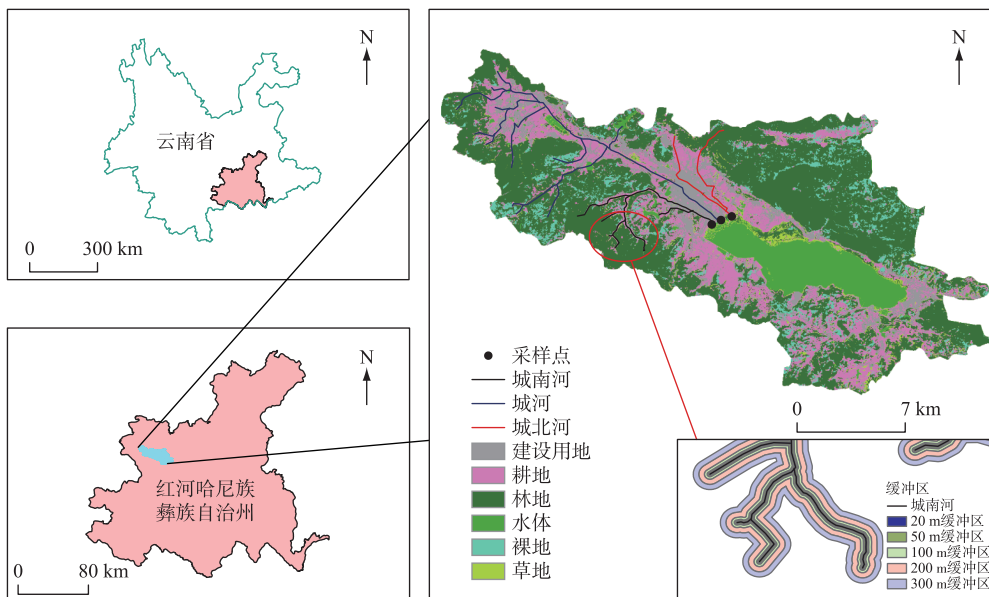


图 1 异龙湖流域区位图  
Fig.1 Bitmap of Lake Yilong Basin

### 1.2 数据来源

本研究于 2022 年在异龙湖流域 3 条主要入湖河流布设 3 个监测断面,分析 8 个水质指标。取样断面分别设置于城河、城南河、城北河的入湖口,从 2022 年 1 月—2022 年 8 月,每天收集一次,测定水体溶解氧 (DO)、电导率 (EC)、浊度、化学需氧量 (COD<sub>Cr</sub>)、氨氮 (NH<sub>3</sub>-N)、总磷 (TP) 和总氮 (TN)。采用 Pro

Professional Plus 多参数水质测量仪测定水体温度、DO 和 EC;采用 LH-NTU2M(V11)型便携式浊度测定仪测定浊度;采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定 TN;采用钼酸铵分光光度法测定 TP;采用水杨酸分光光度法测定  $\text{NH}_3\text{-N}$ ;采用重铬酸盐回流法测定  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 。1—4 月的水质数据作为旱季数据,有效样本共 233 个,5—8 月的水质数据作为雨季数据,有效样本共 336 个。

### 1.3 数据分析

1.3.1 不同空间尺度的划分 基于 ArcGIS 10.2 平台,结合数字高程数据(DEM)对异龙湖流域河流水系进行提取。DEM 数据下载于地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn>),分辨率为 30 m。为了揭示不同尺度的土地利用对流域水质的影响,通过 ArcGIS 10.2 对河流沿岸进行缓冲区分析及叠加分析。缓冲区分析可确定不同地理要素的空间邻近性或接近程度,以识别要素对邻近对象的影响范围或影响程度,从而为某项分析或决策提供依据。一般而言,边界较明显的流域,则多沿水质监测点建立缓冲长度,并在河岸两侧划定不同宽度的带状缓冲区。异龙湖主要入湖河流域的界限清晰,因此针对该流域选用带状缓冲区法。本研究基于河流现状和《异龙湖保护管理条例实施办法》划定的保护区范围,并结合实地调研的结果发现,异龙湖入湖河道两岸外侧沿地表向外水平延伸 20 m 以内的区域为一级保护范围,且异龙湖河流的汇水面积小。因此,将河流沿岸向两侧分别划分 20、50、100、200 和 300 m 这 5 种尺度的带状范围作为缓冲宽度。300 m 用作最大,缓冲区再大会影响另一条河流<sup>[14,28-29]</sup>。

1.3.2 “源”“汇”景观分类 通过美国地质调查局网站(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)下载 2022 年研究区域的 30 m 空间分辨率且云量覆盖度小于 2% 的 Landsat-8 系列遥感影像。利用 ENVI 5.3 采用监督分类和人工解译相结合的方式,将遥感影像解译为林地、建设用地、耕地、水体、裸地、草地 6 种土地利用类型。根据“源—汇理论”和异龙湖流域土地发展现状,发现河道 300 m 缓冲区内的林地都已改造成经济林地,水库改造成鱼塘且富营养化严重。因此,将林地、耕地、建设用地、水体及裸地划分为“源”景观,将草地划分为“汇”景观<sup>[30-31]</sup>。

1.3.3 bioenv 分析 bioenv 分析通过计算样本距离矩阵和环境因子的距离矩阵,计算两个距离之间的相关系数,挑选出对水质解释最佳的环境因子组合。因此,确定与水化学指标变化相关性最佳的变量组合。本研究通过 R 语言“vegan”包中的“Bioenv”函数,得到水质指标与不同尺度土地利用类型的最佳组合,并通过“Mantel”函数来检验土地利用类型与水质相关性的显著水平<sup>[14]</sup>。

1.3.4 APCS-MLR 源解析模型 (1) 基于绝对主成分的污染源识别。APCS-MLR 模型的第一步是提取水质指标的主成分作为污染源判别和量化的依据。提取的主成分得分计算公式为:

$$(A_z)_{jk} = \sum_{j=1}^p w_j \cdot z_k \quad (1)$$

$$z_k = \frac{c_k - \bar{c}}{\sigma} \quad (2)$$

式中, $z_k$  为  $k$  监测点标准化的污染物浓度(mg/L,下同), $j$  为主成分分析(PCA)过程中得到的主成分序号, $(A_z)_{jk}$  为主成分的得分值, $w_j$  为第  $j$  主成分的因子系数, $c_k$  为  $k$  处的污染物浓度, $\bar{c}$  为污染物浓度的算术平均值, $\sigma$  是污染物浓度的标准差。

由于  $(A_z)_{jk}$  是标准化的值,不能直接用于计算主成分(PCs)的原始贡献,必须把标准化的因子得分转化为非标准的绝对主成分(APCS)才能用于 PCs 对污染物的贡献分析。APCS 的计算方法如公式(3)~(5)所示:

$$\text{APCS}_{jk} = (A_z)_{jk} - (A_0)_j \quad (3)$$

$$(A_0)_j = \sum_{i=1}^i S_{ij} \cdot (Z_0)_i \quad (4)$$

$$(Z_0)_i = \frac{0 - \bar{c}}{\sigma} \quad (5)$$

式中, $(A_z)_{jk}$  与式(1)中的  $(A_z)_{jk}$  相同, $i$  为水化学因子序号, $(A_0)_j$  为 0 值下的主成分得分值, $S_{ij}$  为因子得分系数, $(Z_0)_i$  为观测点零值标准化的污染物浓度, $\bar{c}$  为污染物浓度的算术平均值, $\sigma$  是其标准差<sup>[32]</sup>。

(2) 基于多元线性回归的污染源贡献计算。以实测水质浓度为因变量,以 APCS 为自变量与污染物浓

度之间进行多元线性回归分析,获得回归系数。对于污染物 $j$ 的实测浓度 $C_j$ ,其与污染源 $k$ (APCS)的线性关系见式(6):

$$C_j = \sum_k a_{kj} \cdot APCS_{kj} + b_j \quad (6)$$

式中, $a_{kj}$ 表示污染源 $k$ 对污染物 $j$ 的回归系数, $a_{kj} \cdot APCS_{kj}$ 表示污染源 $k$ 对污染指标浓度 $C_j$ 的贡献, $b_j$ 为多元线性回归的常数项。

所有样本的平均值代表污染源的贡献率,其中,回归方程的常数项 $b_j$ 一般认为是未被识别源项的贡献值。污染源 $k$ 对污染物 $j$ 的贡献比例可用式(7)计算:

$$PC_{kj} = \frac{a_{kj} \overline{APCS_{kj}}}{b_j + \sum_k a_{kj} \overline{APCS_{kj}}} \quad (7)$$

未识别源的贡献为:

$$PC_{kj} = \frac{b_j}{b_j + \sum_k a_{kj} \overline{APCS_{kj}}} \quad (8)$$

式中, $\overline{APCS_{kj}}$ 为污染物 $j$ 的所有样本绝对主成分因子得分均值<sup>[33-34]</sup>。

## 2 研究结果

### 2.1 异龙湖流域土地利用模式

研究区不同空间尺度下的土地利用组成具有差异性(图2)。在不同缓冲区距离范围都是以建设用地、耕地和林地为主。且随着缓冲区范围增加,林地以及水体的占比不断增大,耕地面积和建设用地减少。其中,城北河从20 m缓冲区范围到300 m缓冲区范围林地和水体的占比分别增加了58.31%和86.35%,耕地和建设用地占比分别减少了34.85%和17.95%;城河从20 m缓冲区范围到300 m缓冲区范围林地以及水体的占比分别增加了49.66%和32.63%,耕地和建设用地占比分别减少了33.35%和14.75%;城南河从20 m缓冲区范围到300 m缓冲区范围林地和水体的占比分别增加了74.29%和96.70%,耕地和建设用地占比分别减少了60.22%和57.36%。

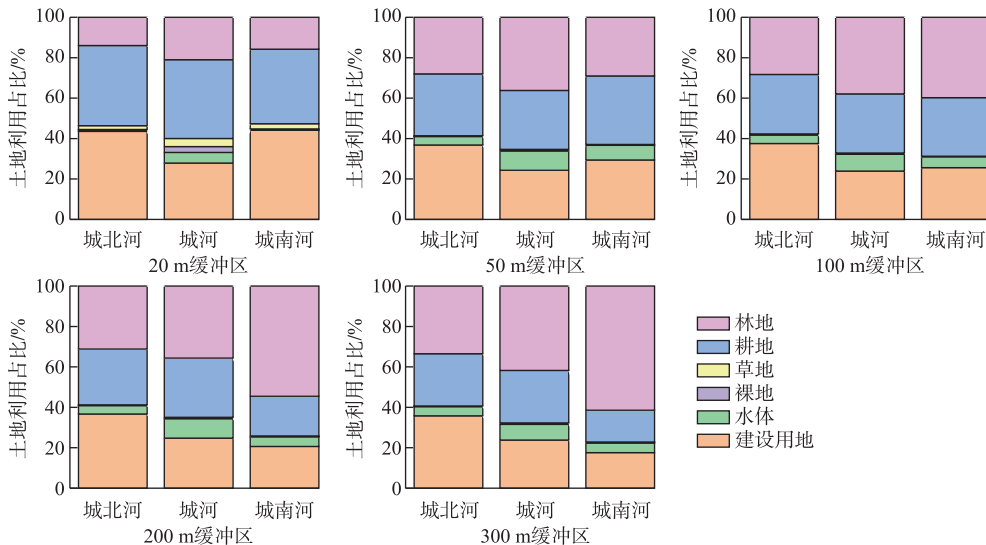


图2 研究区域土地利用模式

Fig.2 Land use patterns in the study area

## 2.2 异龙湖城区河流水质特征

旱雨季异龙湖流域主要入湖河流水质指标变化总体情况如表 1 所示,异龙湖流域主要入湖河流的  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 和 TN 的最大值分别为 50.4、6.44、0.45、7.80 mg/L,且均出现在旱季,DO、EC、浊度的最大值分别为 11.82 mg/L、703.60  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、151.3 NTU,且均出现在雨季。针对各监测断面水质指标的平均值,各监测断面浊度、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 和 TN 的最大平均值均出现在雨季,分别为 16.78 NTU、18.00 mg/L、0.29 mg/L、0.09 mg/L、1.79 mg/L,DO 和 EC 的最大平均值均出现在旱季,分别为 7.15 mg/L 和 511.66  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。针对各监测断面水质指标的超标率,发现河流水质超标主要是总氮超标,其中旱季的 TN 超标率为 58%,雨季的 TN 超标率为 74%。

表 1 旱雨季异龙湖主要入湖河流水质总体监测情况\*

Tab.1 Overall monitoring of water quality of main rivers inflowing into Lake Yilong in dry and rainy seasons

阶段	统计量	水温/ $^{\circ}\text{C}$	DO/ (mg/L)	EC/ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	浊度/ NTU	$\text{COD}_{\text{Cr}}/(\text{mg}/\text{L})$	$\text{NH}_3\text{-N}/(\text{mg}/\text{L})$	TP/ (mg/L)	TN/ (mg/L)
旱季	最大值	35.20	11.76	688.30	125.92	50.40	6.44	0.45	7.80
	最小值	10.50	0.02	373.10	2.00	0.10	0.03	0.01	0.05
	均值	18.43	7.15	511.66	12.02	12.86	0.15	0.07	1.76
	超标率	—	41%	—	—	24%	25%	14%	58%
雨季	最大值	29.60	11.82	703.60	151.30	48.32	2.83	0.38	5.74
	最小值	20.10	1.01	287.10	0	7.59	0.03	0.01	0.07
	均值	25.83	4.85	471.03	16.78	18.00	0.29	0.09	1.79
	超标率	—	55%	—	—	29%	6%	8%	74%
旱雨季变化率/%		-40.09	32.12	7.93	-39.53	-39.93	-94.48	-38.29	-1.72

\* 旱雨季变化率=(旱季水质指标均值-雨季水质指标均值)/旱季水质指标均值;超标率=(超标个数/监测总个数) $\times$ 100% 河流水质的浓度限制选用中华人民共和国《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中的Ⅲ类水质标准。

## 2.3 土地利用和水质化学指标的相关性

将旱雨季的水化学指标作为响应变量,土地利用结构作为解释变量,用 bioenv 分析确定了土地利用对水质影响的优化组合(表 2)。

在异龙湖流域旱季期间,20 m 缓冲区范围内,水质指标主要受耕地和裸地占比的影响;50 和 100 m 缓冲区范围内,TN 和 TP 主要受耕地和建设用地占比的影响, $\text{NH}_3\text{-N}$  和  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  主要受耕地占比的影响,DO 在 50 m 缓冲区范围下受耕地占比影响,但在 100 m 缓冲区范围下受水体占比影响;200 和 300 m 河岸缓冲区范围下,水体 TN 和 TP 主要受建设用地占比的影响,而  $\text{NH}_3\text{-N}$  和  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  主要受林地占比的影响,DO 受水体面积占比影响。

在雨季期间,20 m 缓冲区范围内,入湖河流的水质指标全部主要受建设用地面积占比的影响。此外,当尺度扩大至 20 m 缓冲区范围外时,入湖河流的 TP、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$  在 50 和 100 m 缓冲区范围下主要受建设用地占比的影响,而在 200 和 300 m 河岸缓冲区范围下主要受建设用地和水体面积占比的影响; $\text{COD}_{\text{Cr}}$  在 50~300 m 河岸缓冲区范围下受建设用地面积占比影响,50 m 缓冲区范围下受到耕地占比影响;DO 在 50~300 m 缓冲区范围下主要受到耕地面积占比的影响。

## 2.4 污染源解析

根据 KMO(Kaiser-Meyer-Olkin) 检验分析可知,旱雨季 KMO 值分别为 0.68 和 0.56,其 Bartlett 球度检验给出的相伴概率为 0.00 且小于显著性水平 0.05,则认为旱雨季水质指标数据系列适合做主成分分析<sup>[32,35]</sup>。通过对旱雨季水质指标数据系列进行主成分分析,得到旱雨季异龙湖主要入湖河流水质指标主成分的特征值和其方差的贡献率(附表 I),根据相关研究将特征值大于 1 的成分确定为主成分<sup>[35]</sup>,因此旱雨季分别提取了 3 个主成分,其累积方差的贡献率分别达到了 75.15% 和 62.81%。

根据旱雨季主要入湖河流水质指标旋转因子荷载情况(图 3),异龙湖主要入湖河流在旱季提取到的第一主成分特征值为 3.34,方差贡献率高达 41.76%,主要荷载变量为 TN 和 TP;第二主成分的贡献率为 20.05%,

表 2 土地利用与水质相关性的最佳组合  
Tab.2 Optimal combination of correlation between land use and water quality

水质指标	河道缓冲区范围/m	土地最佳组合	
		旱季	雨季
TN	20	耕地+裸地**	建设用地**
	50	建设用地+耕地**	建设用地**
	100	建设用地+耕地**	建设用地**
	200	建设用地**	建设用地+水体**
	300	建设用地**	建设用地+水体**
TP	20	耕地+裸地**	建设用地**
	50	建设用地+耕地**	建设用地**
	100	建设用地+耕地**	建设用地**
	200	建设用地**	建设用地+水体**
NH <sub>3</sub> -N	300	建设用地**	建设用地+水体**
	20	耕地+裸地**	建设用地**
	50	耕地**	建设用地**
	100	耕地**	建设用地**
COD <sub>Cr</sub>	200	林地**	建设用地+水体**
	300	林地**	建设用地+水体**
	20	耕地+裸地**	建设用地**
	50	耕地**	建设用地+耕地**
	100	耕地**	建设用地**
DO	200	林地**	建设用地**
	300	林地**	建设用地**
	20	耕地+裸地**	建设用地**
	50	耕地**	耕地**
	100	水体**	耕地**
	200	水体**	耕地**
	300	水体**	耕地**

\*\* 表示在 0.01 水平上极显著相关, \* 表示在 0.05 水平上显著相关。

主要载荷变量是水温;第三主成分的贡献率为 13.34%,主要载荷变量为浊度和 DO。异龙湖主要入湖河流在雨季提取到的 3 个主成分的累计贡献率为 62.81%,第一主成分贡献率为 28.05%,主要载荷变量为 NH<sub>3</sub>-N 和 TN;第二主成分的贡献率为 21.80%,主要载荷变量为 DO 和浊度;第三主成分的贡献率为 12.94%,主要载荷变量为 EC。

在 PCA 分析确定研究区各主要污染源的组成和空间分布特征的基础上,利用 APCS-MLR 模型建立了各污染源与水质指标浓度的函数关系。基于该函数关系,预测了各指标浓度,并将预测结果与实测结果进行了比较。根据附图 I 和 II 可知,研究区内各个水质指标的多元线性回归模型的预测浓度与实测浓度线性拟合的  $R^2$  在 0.6023~0.9989 之间,表明二者具有很好的一致性。此外,各监测点位的预测浓度与实测浓度比值接近于 1,说明 APCS-MLR 受体模型对于异龙湖主要入湖河流污染源的分配计算具有很好的适用性,计算结果较为可靠。

根据构建的 APCS-MLR 模型和污染源贡献模型,各污染源对旱、雨季异龙湖主要入湖河流水质指标的贡献结果如表 3 所示。从中可知,旱、雨季的 COD<sub>Cr</sub> 污染主要来自于未知污染源,绝对贡献率分别高达 77.59% 及 65.08%。此外,旱季期间的异龙湖主要入湖河流未知污染源对 EC、COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP 的贡献较大,而河流中的浊度和 DO 由第三污染源贡献较大;雨季期间的异龙湖主要入湖河流主要是第二污染源对河流 DO 贡献较大,而第三污染源对河流的 EC 及 TN 贡献较大,其余因子主要由未知污染贡献较大。

### 3 讨论

#### 3.1 水质变化特征分析

大量研究表明,河流的温度、营养参数等表现出季节性差异<sup>[34-36]</sup>。本研究发现,异龙湖流域主要入湖河流的浊度、COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP 和 TN 的平均值最大值均出现在雨季,DO 和 EC 的平均值最大值均出现在旱季。该研究结果与滇池主要入湖河道水体氮、磷污染物浓度变化的研究结果相反,但是与星云湖入湖河道的污染物浓度变化一致<sup>[36-37]</sup>。这是由于滇池入湖河道流经昆明市,受到点源污染较为严重,而异龙湖流域和星云湖流域的入湖河道大部分流经农村农业和城镇地区,受到面源污染较为严重<sup>[38]</sup>。异龙湖流域属亚热带高原湿润季风气候,干湿季分明,雨季降雨量增加,降雨发生时地表受到冲刷作用,大量生活垃圾、泥沙颗粒及农业污染物等随着地表径流汇入河流,大量颗粒态物质流入河流,在一定时间内不仅消耗水中的氧气同时增加了河流的污染物浓度<sup>[39-41]</sup>。另外,雨季河流速度的增加促进了离子的扩散,使得离子分布更加均匀,这也会导致 EC 较旱季低<sup>[42-43]</sup>。值得注意的是,异龙湖流域旱季极其干旱,由于蒸发作用和浓缩效应,河流水体 COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP 和 TN 的最大值均出现在旱季,说明污染物浓度会在旱季达到峰值,水体处于非常危险的水平<sup>[44-46]</sup>。因此,应特别注意旱季时异龙湖主要入湖河流的水质。

表 3 旱雨季异龙湖主要入湖河流水质指标的绝对贡献率

Tab.3 Absolute contribution rate of water quality indicators of main rivers inflowing into Lake Yilong in dry and rainy seasons

水质指标	旱季绝对贡献率/%				雨季绝对贡献率/%			
	F1	F2	F3	其他	F1	F2	F3	其他
水温	0.40	9.75	5.91	83.93	0.27	1.59	15.74	82.40
DO	9.35	0.54	78.60	11.51	1.67	51.20	20.70	26.44
EC	1.13	6.23	13.58	79.06	0.58	2.67	52.02	44.74
浊度	0.76	1.17	58.53	39.53	0.87	21.08	22.04	56.01
COD <sub>Cr</sub>	6.83	13.57	2.02	77.59	1.49	6.68	26.75	65.08
NH <sub>3</sub> -N	28.06	3.88	5.35	62.71	11.45	12.41	29.71	46.43
TP	10.69	1.79	23.69	63.82	5.51	18.66	37.01	38.82
TN	20.26	5.81	0.59	73.33	17.43	20.51	57.85	4.21

#### 3.2 基于空间尺度的源解析

通过对旱季水质指标数据系列进行主成分分析,从旱季提取了 3 个主成分,其累积方差的贡献率达到了 75.15%。第一主成分的贡献率高达 42.34%,主要载荷变量为 TN 和 TP。TN 和 TP 通常来自农业活动和人为活动产生的废水<sup>[47-48]</sup>。由 bioenv 分析可知,TN 和 TP 在 20 m 缓冲区范围内受耕地和裸地占比影响较大,50 和 100 m 缓冲区范围内受建设用地和耕地占比影响较大,在 200 和 300 m 缓冲范围内受建设用地占比影响较大。由此可以得出,随着空间尺度的不断增大,耕地对 TP 和 TN 的影响不断减弱,而建设用地对 TP 和 TN 的影响不断增强。原因主要因为耕地和裸地作为“源”景观,旱季期间,靠近河岸的农田依赖于河流水源灌溉,导致耕地中的化肥等污染物进入水体,而裸地受到河流的冲刷,大量土壤进入水体,进而综合

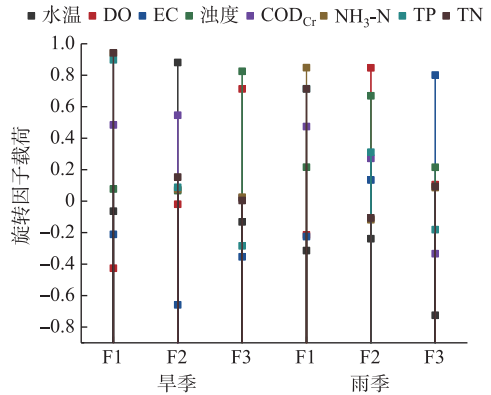


图 3 旱雨季异龙湖主要入湖河流水质指标旋转因子荷载 (F1~F3:基于水质提取的主成分 1~3,下同)  
Fig.3 Rotation factor load of water quality index of main river inflowing into Lake Yilong in dry and rainy seasons



影响水体的 TN 和 TP<sup>[49]</sup>。伴随着缓冲区范围的扩大,耕地和裸地对河流水质的影响减小,而位于河流下游的建设用地作为另外一个重要的“源”景观,其产生的生活污水和垃圾等造成的污染对河流水质的影响增加。因此,可以认定第一主成分为城镇生活污水和近河道农业—裸地产生的污染。第二主成分的贡献率为 19.32%,主要载荷变量是水温,水体温度随季节更替而变化,水温可以通过影响底物释放等来影响水质,可以认定第二主成分为季节性因素<sup>[50]</sup>。第三主成分的贡献率为 12.99%,主要载荷变量为 DO,水体 DO 与水动力因素和冲刷进河流的杂物含量有关<sup>[49,51]</sup>。根据 bioenv 分析可知,DO 与 20~50 m 缓冲区范围内的耕地和裸地以及 100~300 m 缓冲区范围内的水体相关性较大。这是因为旱季期间,靠近河岸的农田依赖于河流水源灌溉,杂物随着灌溉的水流进入河流,而裸地受到河流的冲刷,大量土壤冲刷进水体,杂物和土壤进入水体会消耗大量 DO。此外,广泛分布于 100~300 m 缓冲区范围内的水库由于水位下降和水动力不足,水体 DO 浓度降低。而旱季异龙湖河流依靠补水水库补给水量。因此,水体占比会影响河流 DO 浓度<sup>[51-52]</sup>。因此,本研究可认定第三主成分为近河道农业和裸地以及基塘—水库水体排放造成的污染。同时,未知污染源对 TP、COD<sub>Cr</sub> 的绝对贡献率较大。研究表明,异龙湖流域沉积物中有机质及总磷含量极高且河流总磷和有机污染大多来源于沉积物释放<sup>[53]</sup>。因此,可以将未知污染源识别为底泥释放的内源污染。

通过对雨季水质指标数据系列进行主成分分析,提取了 3 个主成分,其累积方差的贡献率达到了 62.81%。第一主成分贡献率为 27.55%,主要载荷变量为 NH<sub>3</sub>-N 和 TN, NH<sub>3</sub>-N 和 TN 通常来自施肥、水产养殖废物和人为活动产生的废水<sup>[48,54]</sup>。由 bioenv 分析可知, NH<sub>3</sub>-N 和 TN 受建设用地和占比解释度较高,因此认定其为生活污水及水库—基塘排放造成的污染。雨季是异龙湖流域的旅游旺季,位于河流下游的建设用地产生的生活污水、生活垃圾等造成的污染增加<sup>[35,49]</sup>。此外,在雨季降雨增多的条件下,水产养殖的水库和水田会大量向河道排放多余的水,使含有 NH<sub>3</sub>-N 和 TN 的污染物冲刷入下游河流<sup>[52]</sup>。因此,在雨季期间,异龙湖流域河流的建设用地和占比严重影响着 TN、NH<sub>3</sub>-N 等水质指标。第二主成分的贡献率为 17.96%,主要载荷变量为 DO,水体 DO 在雨季主要与冲刷进河流的杂物含量有关<sup>[49,51]</sup>。由 bioenv 分析可知,20 m 缓冲区范围内的建设用地,以及 50~300 m 范围内的耕地对 DO 的解释度较高。这是因为近河岸的建设用地开发可能导致河岸坡面的崩塌和河岸植被的破坏,在雨量增加的情况下,大量土壤和有机物冲刷入河流,导致有机物分解消耗更多的 DO。此外,异龙湖流域雨季降雨量大,更大范围的农田污染物受降雨冲刷进入河道,导致水体中氧气的消耗加剧<sup>[49]</sup>。因此,可以认定为近河岸建设用地—农业造成的污染。第三主成分的贡献率为 17.30%,主要载荷变量为 EC。该变量为物理因素,在自然条件下主要受到气象条件影响<sup>[32,35]</sup>。因此,可以认定为气象条件因子。此外,雨季的未知污染源对 COD<sub>Cr</sub> 污染和浊度的绝对贡献率较大。研究表明,雨季使得河流水体流速波动较大,增强了对河流底泥的冲刷作用,造成有机质含量极高的底泥悬浮并释放<sup>[35,53]</sup>。因此可以将未知污染源识别为底泥释放的内源污染。

综上所述,本研究利用 APCS-MLR 源解析模型成功识别了异龙湖流域主要入湖河流的污染源是建设用地、农业产生、基塘—水库水体排放、裸地、气象因子以及内源污染。该研究结果和前人对污染源解析的结果相同<sup>[25-26,31]</sup>。因此,bioenv 分析为污染源识别结果提供了更多的物理可信度。基于空间尺度的源解析是具有可靠性的。

### 3.3 考虑空间尺度对源解析的影响

在 APCS-MLR 源解析过程中,水质参数可以指示多个潜在来源,仅仅依靠经验和主观判断是不合理的。例如,在 Salim 等<sup>[55]</sup>关于城市集水区雨水径流的研究中,TP 被认为与生活废水高度相关,而 Liu 等<sup>[48]</sup>将 TP 的增加归因于浮游植物的爆炸性增长。显然,每个研究区域的土地利用和污染物差异很大,仅通过分析水化学数据无法准确确定污染源。于是有学者提出将土地利用方式考虑进去,可以为来源识别提供更客观的证据。Ren 等<sup>[50]</sup>将土地利用和 APCS-MLR 相结合,为污染物的识别提供了物理可信度。此外,国内外学者研究发现土地利用类型在各自空间格局对旱雨季水质变化的解释力存在差异<sup>[14,28]</sup>。例如:Wang 等<sup>[56]</sup>发现随着缓冲区从 500 m 变为 1500 m,城市地区对水质的影响显著减少,而农业用地和水域对水质的影响迅速增加。本研究发现,在异龙湖流域旱季期间,20 m 缓冲区尺度内河流水质受耕地和裸地影响较大,随着空间尺度的扩大,建设用地、林地及水体对水质的影响增加;在雨季,COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP 和 TN 受 20~300 m 缓冲区尺度下的建设用地及 200 和 300 m 缓冲区尺度下的水体影响,DO 受 20 m 缓冲区尺度内的建设用地及

50~300 m 缓冲区尺度下的耕地影响。所以,相同研究区域的不同空间尺度对应不同的污染物产生情况不同。然而,目前很少有学者将不同空间尺度土地利用类型和源解析结合起来进行研究。因此,本研究提出将空间尺度考虑进去,不仅可以深化异龙湖流域多空间尺度下土地利用类型对水质指标的影响关系问题的认知,还可以为污染源来源比较复杂的河流提供一种更为精确的污染源解析方法。

## 4 结论

1) 异龙湖入湖河流水体的浊度、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 和 TN 季节变化明显,雨季浓度比旱季浓度高。其中 TN 作为首要污染物,旱、雨季河流 TN 超标率分别高达 58% 和 74%。

2) 旱季期间,异龙湖流域 20 m 河岸缓冲区范围内污染源主要是耕地和裸地,当缓冲区扩大至 50 m 范围时耕地成为主要污染源,100~300 m 缓冲区水体和建设用对污染源做出主要贡献。

3) 在异龙湖流域雨季期间,20 m 缓冲区范围内污染源主要来自建设用地,当缓冲区扩大 50 m 范围时耕地对水质的影响增加,缓冲区扩大至 200 和 300 m 时建设用地、水体及耕地共同影响水质。

综上,本研究将不同空间尺度土地利用类型和 APCS-MLR 源解析结合起来,不仅克服受体模型的主观性,还确定了随着空间尺度的变化,污染源也发生了变化。研究结果可为水资源管理者根据需要调整污染控制工作提供技术支撑,以实现水质目标。

## 5 附录

附表 I 和附图 I、II 见电子版(DOI: 10.18307/2024.0324)。

## 6 参考文献

- [1] Duan CQ. Grasping the “bull’s nose” precise policy of non-point source pollution control in Yunnan plateau lakes. *Democracy & Science*, 2018, (5): 25-27. [段昌群. 抓住云南高原湖泊治理中面源污染的“牛鼻子”精准施策. 民主与科学, 2018, (5): 25-27.]
- [2] Vörösmarty CJ, McIntyre PB, Gessner MO *et al.* Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 2010, **467**(7315): 555-561. DOI: 10.1038/nature09440.
- [3] 段昌群. 滇池流域面源污染负荷综合削减与区域生态格局优化. 北京: 科学出版社, 2021.
- [4] Yuan MX, Huang L, Gao YH *et al.* Progress of non-point source pollution control in Yunnan Plateau lakes. *Environmental Ecology*, 2022, **4**(7): 15-23. [袁梦祥, 黄律, 高雨晗等. 云南高原湖泊面源污染治理进展. 环境生态学, 2022, **4**(7): 15-23.]
- [5] Du ZP, Wang MJ, Yan CA *et al.* Pollution sources apportionment of Lake Dianchi based on absolute principal component score-multiple linear regression. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(3): 1130-1137. DOI: 10.13671/j.hjkxb.2019.0358. [杜展鹏, 王明净, 严长安等. 基于绝对主成分-多元线性回归的滇池污染源解析. 环境科学学报, 2020, **40**(3): 1130-1137.]
- [6] Wang H, Xiong X, Wang K *et al.* The effects of land use on water quality of alpine rivers: A case study in Qilian Mountain, China. *Science of the Total Environment*, 2023, **875**: 162696. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162696.
- [7] Rashid A, Ayub M, Ullah Z *et al.* Groundwater quality, health risk assessment, and source distribution of heavy metals contamination around chromite mines: Application of GIS, sustainable groundwater management, geostatistics, PCA-MLR, and PMF receptor model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, **20**(3): 2113-2113. DOI: 10.3390/ijerph20032113.
- [8] Xu QY, Wang P, Shu W *et al.* Influence of landscape structures on river water quality at multiple spatial scales: A case study of the Yuan River watershed, China. *Ecological Indicators*, 2021, **121**: 107226. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.107226.
- [9] Lee G, Lee S, Hong J *et al.* Applicability evaluation of agricultural Best Management Practices to estimate reduction efficiency of suspended solids. *CATENA*, 2023, **225**: 107028. DOI: 10.1016/j.catena.2023.107028.
- [10] 段昌群. 滇池流域农业面源污染防控技术体系研究. 北京: 科学出版社, 2021.
- [11] Wang ZM, Yang LH, Song XF. Spatial-temporal variation in water quality and its response to precipitation and land use in Baiyangdian Lake in the early stage of the construction of Xiong’an New Area. *Environmental Science*, 2023, **44**(7): 3820-3834. DOI: 10.13227/j.hjkx.202206146. [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. 环境科学, 2023, **44**(7): 3820-3834.]
- [12] Xu QY, Wang P, Shu W *et al.* Investigation of the impacts of land use structure and spatial pattern on water quality in the Yuan River. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(7): 2611-2620. DOI: 10.13671/j.hjkxb.2020.0035. [徐启渝, 王鹏, 舒旺等. 土地利用结构与空间格局对袁河水质的影响. 环境科学学报, 2020, **40**(7): 2611-2620.]
- [13] Liu R, Xu GC, Li ZB *et al.* Impact of land use structure on river water quality during dry season in Dali River Basin of Shaanxi, China. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022, **44**(2): 327-337. DOI: 10.19814/j.jese.2021.07004. [刘然, 徐国策, 李占斌等. 陕西大理河流域枯水期土地利用结构对河流水质的影响. 地球科学与环境学报, 2022, **44**(2): 327-337.]

- [14] 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质的影响. 生态学报, 2023, **43**(4): 1485-1495.]
- [15] 邬剑宇. 安吉县西苕流域小微水体污染源解析及生态修复模式研究[学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [16] Qian XY, Shen GX, Guo CX *et al.* Source apportionment and spatial heterogeneity of agricultural non-point source pollution based on water environmental function zoning. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, **27**(2): 103-108. [钱晓雍, 沈根祥, 郭春霞等. 基于水环境功能区划的农业面源污染源解析及其空间异质性. 农业工程学报, 2011, **27**(2): 103-108.]
- [17] Yang L, Wei JA, Qi J *et al.* Effect of sewage treatment plant effluent on water quality of Zhangze Reservoir based on EFDC model. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, **10**: 874502. DOI: 10.3389/fenvs.2022.874502.
- [18] Wang ZQ, Ren HX, Ma ZL *et al.* The release of endogenous nitrogen and phosphorus in the Danjiangkou Reservoir: A double-membrane diffusion model analysis. *Journal of Sensors*, 2021; 1-11. DOI: 10.1155/2021/6610178.
- [19] Chen K, Liu Q, Jiang QL *et al.* Source apportionment of surface water pollution in North Anhui Plain, Eastern China, using APCS-MLR model combined with GIS approach and socioeconomic parameters. *Ecological Indicators*, 2022, **143**: 109324. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109324.
- [20] Wang X, Zhang M, Liu LL *et al.* Using EEM-PARAFAC to identify and trace the pollution sources of surface water with receptor models in Taihu Lake Basin, China. *Journal of Environmental Management*, 2022, **321**: 115925. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115925.
- [21] Thurston GD, Spengler JD. A quantitative assessment of source contributions to inhalable particulate matter pollution in metropolitan Boston. *Atmospheric Environment*; 1967, 1985, **19**(1): 9-25. DOI: 10.1016/0004-6981(85)90132-5.
- [22] Xie D, Li X, Zhou TT *et al.* Estimating the contribution of environmental variables to water quality in the post restoration littoral zones of Taihu Lake using the APCS-MLR model. *Science of the Total Environment*, 2023, **857**(3): 159678. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159678.
- [23] 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.]
- [24] Wu H, Chang FQ, Zhang HC *et al.* Changes of organic C and N stable isotope and their environmental implication during the past 100 years of Lake Yilong. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(8): 2478-2487. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202008.010. [吴汉, 常凤琴, 张虎才等. 异龙湖近百年来湖泊沉积物有机碳、氮稳定同位素变化及其环境指示意义. 生态学杂志, 2020, **39**(8): 2478-2487.]
- [25] 薛辉. 异龙湖流域农业面源污染治理问题探究. 中共云南省委党校学报, 2020, **21**(5): 117-122.
- [26] Wei X, Tang GM. Changes of nutrients and aquatic ecosystem of Yilong Lake in recent twenty decades. *Environmental Science Survey*, 2014, **33**(2): 9-14. [魏翔, 唐光明. 异龙湖近 20 年来营养盐与水生生态系统变化. 环境科学导刊, 2014, **33**(2): 9-14.]
- [27] Li P, Chen GJ, Kong LY *et al.* Synergistic changes of organic and inorganic carbon burial in response to eutrophication in Yilong Lake over the past 100 years. *China Environmental Science*, 2023, **43**(10): 5389-5402. [李平, 陈光杰, 孔令阳等. 近百年异龙湖有机碳和无机碳埋藏响应水体富营养化的协同变化特征. 中国环境科学, 2023, **43**(10): 5389-5402.]
- [28] 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.]
- [29] Ma GQ, Xiao JP, Wu HZ *et al.* Temporal and spatial changes of Yilong Lake landscape and its driving factors. *Journal of West China Forestry Science*, 2022, **51**(1): 9-15, 28. [马国强, 肖剑平, 吴鸿章等. 云南异龙湖景观格局时空变化及驱动因素研究. 西部林业科学, 2022, **51**(1): 9-15, 28.]
- [30] Chen LD, Fu BJ, Zhao WW. Source-sink landscape theory and its ecological significance. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(5): 1444-1449. [陈利顶, 傅伯杰, 赵文武.“源”“汇”景观理论及其生态学意义. 生态学报, 2006, **26**(5): 1444-1449.]
- [31] Wang X, Guo W, Wang MG *et al.* Pattern in changes of carbon and nitrogen stable isotopes of phytoplankton in Yilong Lake under the influence of human activities. *China Environmental Science*, 2023, **43**(6): 3087-3099. [王旭, 郭雯, 王明果等. 人类活动影响下异龙湖浮游植物碳氮稳定同位素变化特征. 中国环境科学, 2023, **43**(6): 3087-3099.]
- [32] Hou XK, Zhang K, Duan PZ *et al.* Pollution source apportionment of Tuohet River based on absolute principal component score-multiple linear regression. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(10): 2350-2357. [后希康, 张凯, 段平洲等. 基于 APCS-MLR 模型的沱河流域污染来源解析. 环境科学研究, 2021, **34**(10): 2350-2357.]
- [33] Zhang H, Cheng SQ, Li HF *et al.* Groundwater pollution source identification and apportionment using PMF and PCA-APCA-MLR receptor models in a typical mixed land-use area in Southwestern China. *Science of the Total Environment*, 2020, **741**: 140383. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140383.
- [34] Zhang W, Gao ZR, Tai YY *et al.* Source analysis of the heavy metals in paddy field soils in Karst mining areas of Guizhou using APCS-MLR receptor model. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, **38**(3): 212-219. [张旺, 高珍冉, 邵粤鹰等. 基于 APCS-MLR 受体模型的贵州喀斯特矿区水田土壤重金属源解析. 农业工程学报, 2022, **38**(3): 212-219.]
- [35] Zhang Y, Zou L, Liang ZJ *et al.* Differential characteristics and source identification of water quality of the rivers in Northern Henan before and after rainstorm. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2537-2547. DOI: 10.13227/j.hjks.202109010. [张彦, 邹磊, 梁志杰等. 暴雨

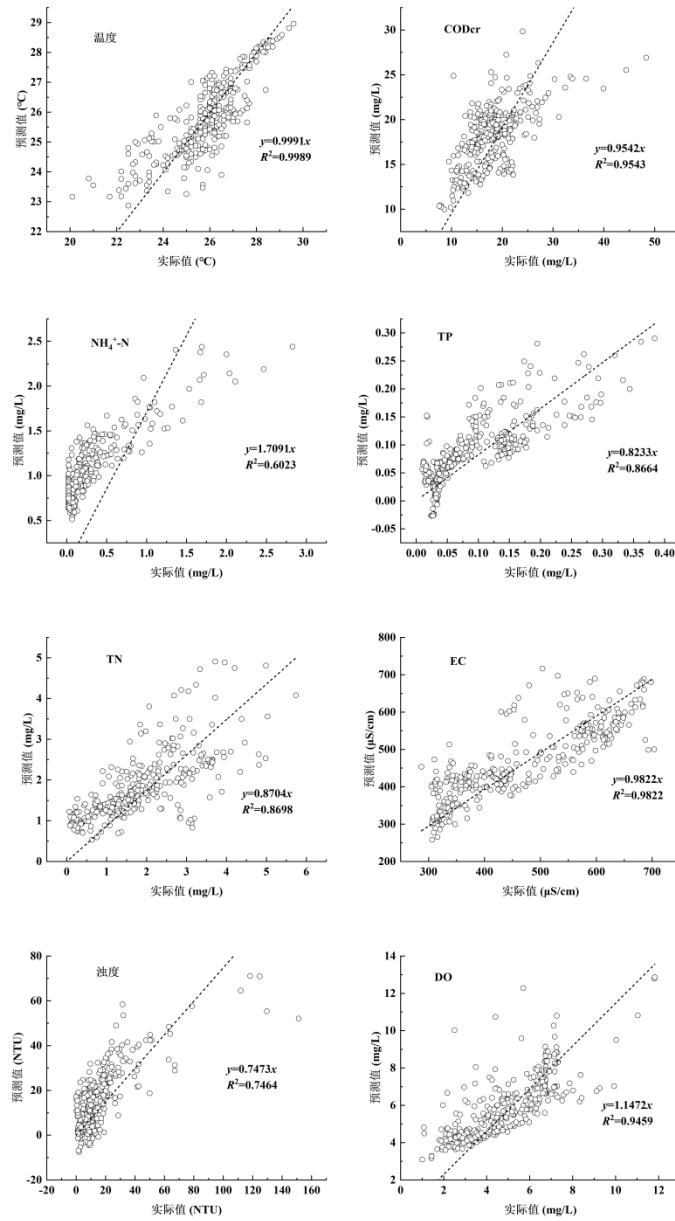
- 前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析. 环境科学, 2022, **43**(5): 2537-2547.]
- [36] Wang HG, Liu BB, Li XP *et al.* Seasonal variation of water quality of Xinyunliang River, Dianchi Basin and the impact of the riparian ecological restoration. *J Lake Sci*, 2012, **24**(3): 334-340. DOI: 10.18307/2012.0302. [王华光, 刘碧波, 李小平等. 滇池新运粮河水水质季节变化及河岸带生态修复的影响. 湖泊科学, 2012, **24**(3): 334-340.]
- [37] Zheng TT, Zhao ZJ, Zhao XQ *et al.* Water quality change and humanities driving force in Lake Xingyun, Yunnan Province. *J Lake Sci*, 2018, **30**(1): 79-90. DOI: 10.18307/2018.0108. [郑田甜, 赵祖军, 赵筱青等. 云南星云湖水水质变化及其人文因素驱动力分析. 湖泊科学, 2018, **30**(1): 79-90.]
- [38] 段昌群. 滇池流域面源污染系统调查与综合解析. 北京: 科学出版社, 2021.
- [39] Tan SJ, Zhao GY, Peng C *et al.* Multi-scale effects of landscape on nitrogen (N) and phosphorus (P) in a subtropical agricultural watershed: A case of Qi river basin (QRB), China. *Ecological Indicators*, 2023, **147**: 110017. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110017.
- [40] Wang W, Li ZB, Shi P *et al.* Vegetation restoration and agricultural management to mitigate nitrogen pollution in the surface waters of the Dan River, China. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, **28**(34): 47136-47148. DOI: 10.1007/s11356-021-13905-7.
- [41] Xin Y, Li P, Wu JF *et al.* Impacts of heavy rainfall on the water quality of Shahe Reservoir in the North Canal Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(1): 199-208. DOI: 10.13671/j.hjkxb.2020.0525. [辛苑, 李萍, 吴晋峰等. 强降雨对北运河流域沙河水库水质的影响. 环境科学学报, 2021, **41**(1): 199-208.]
- [42] Xu C, Liu GZ, Chen XH. Spatiotemporal variations and influencing factors of river dissolved oxygen in Dongguan section of Dongjiang River, Pearl River Basin. *J Lake Sci*, 2022, **34**(5): 1540-1549. DOI: 10.18307/2022.0510. [徐闯, 刘广州, 陈晓宏. 珠江流域东江(东莞段)溶解氧时空变化及其影响因素. 湖泊科学, 2022, **34**(5): 1540-1549.]
- [43] Zhang MF, Wu Y, Li W *et al.* Water quality evolution analysis of the Mishan Reservoir based on electrical conductivity. *Journal of University of Jinan: Science and Technology*, 2021, **35**(5): 480-486. [张明芳, 吴英, 李玮等. 基于电导率的米山水库水质演变分析. 济南大学学报: 自然科学版, 2021, **35**(5): 480-486.]
- [44] Che R, Lin S, Fan ZY *et al.* Effects of continuous extreme rainfall on water quality of the Dongjiang River Basin. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4440-4449. DOI: 10.13227/j.hjkk.201902042. [车蕊, 林澍, 范中亚等. 连续极端降雨对东江流域水质影响分析. 环境科学, 2019, **40**(10): 4440-4449.]
- [45] Pan LY, Xie XL, Dai JF *et al.* Effects of land use types on nitrogen and phosphorus in rivers of the Huixian Karst wetland in the Lijiang River Basin. *China Rural Water and Hydropower*, 2022, (10): 20-26. DOI: 10.12396/znsd.212183. [潘林艳, 谢晓琳, 代俊峰等. 土地利用类型对漓江流域会仙岩溶湿地水系氮磷的影响. 中国农村水利水电, 2022, (10): 20-26.]
- [46] Wen CJ, Wang CY, Chen MY. Study on spatiotemporal variation characteristics of ammonia nitrogen in Baoxiang River of Dianchi Lake. *Yangtze River*, 2018, **49**(10): 16-20, 29. [文朝菊, 王崇应, 陈明义. 滇池宝象河水体氨氮时空变化特征研究. 人民长江, 2018, **49**(10): 16-20, 29.]
- [47] Gao CK, Zhang MH, Song KH *et al.* Spatiotemporal analysis of anthropogenic phosphorus fluxes in China. *Science of the Total Environment*, 2020, **721**: 137588. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137588.
- [48] Liu LL, Dong YC, Kong M *et al.* Insights into the long-term pollution trends and sources contributions in Lake Taihu, China using multi-statistic analyses models. *Chemosphere*, 2020, **242**: 125272. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.125272.
- [49] Fu ST, Zhen ZL, Liu X *et al.* Identification of non-point source pollution in Taiyuan section of Fenhe River based on the "source-sink" theory. *Water Saving Irrigation*, 2023, (1): 116-121, 127. DOI: 10.12396/jsjg.2022154. [付绍桐, 甄志磊, 刘旭等. 基于“源-汇”理论的汾河太原段非点源污染识别. 节水灌溉, 2023, (1): 116-121, 127.]
- [50] Ren XN, Zhang H, Xie GQ *et al.* New insights into pollution source analysis using receptor models in the Upper Yangtze River Basin: Effects of land use on source identification and apportionment. *Chemosphere*, 2023, **334**: 138967. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.138967.
- [51] He QY, Huang ZG, Deng SB *et al.* Study on SWAT model simulation of agriculture non-point source pollution load in a small watershed of south subtropics. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, **51**(2): 225-231. [何卿姮, 黄智刚, 邓淑冰等. 南亚热带小流域农业面源污染负荷的 SWAT 模型模拟研究. 江苏农业科学, 2023, **51**(2): 225-231.]
- [52] Zhou C. Application of constructed wetland engineering technology in non-point source pollution control of plateau reservoir in Yunnan Province. *Journal of Green Science and Technology*, 2021, **23**(20): 84-87. [周铨. 云南高原水库面源污染防治中人工湿地工程技术应用探讨. 绿色科技, 2021, **23**(20): 84-87.]
- [53] 郭舒琨. 异龙湖沉积物营养盐特征及环境影响[学位论文]. 宜昌: 三峡大学, 2019.
- [54] Fan CZ, Liu YB, Liu CH *et al.* Water quality characteristics, sources, and assessment of surface water in an industrial mining city, southwest of China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2022, **194**(4): 259. DOI: 10.1007/s10661-022-09908-7.
- [55] Salim I, Sajjad RU, Paule-Mercado MC *et al.* Comparison of two receptor models PCA-MLR and PMF for source identification and apportionment of pollution carried by runoff from catchment and sub-watershed areas with mixed land cover in South Korea. *Science of the Total Environment*, 2019, **663**: 764-775. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.377.
- [56] Wang D, Huang GP, Ding HZ *et al.* Effects of hydrological season on the relationship between land use and surface water quality. *Water*, 2023, **15**(13): 2351. DOI: 10.3390/w15132351.

附表I 旱雨季异龙湖主要入湖河流水质指标主成分解释总方差\*

Attached Tab.I Total variance explained by principal component of water quality index of main rivers inflowing into Lake Yilong during dry and rainy seasons

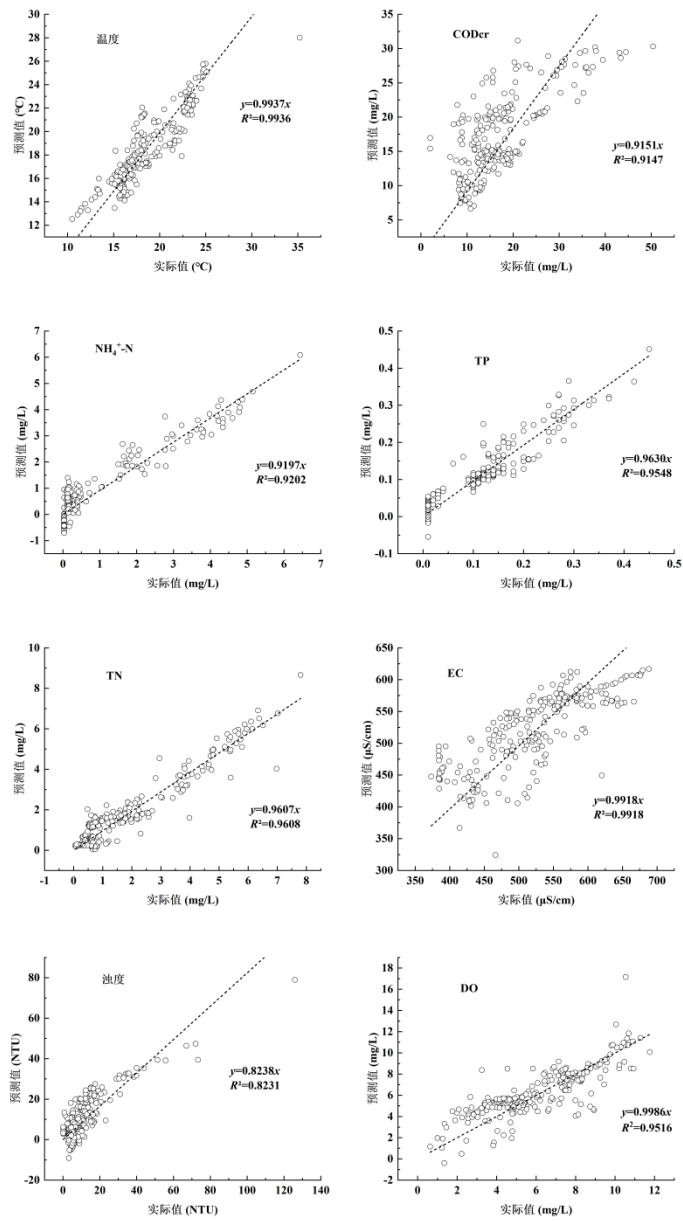
成分	初始特征值			提取载荷平方和			旋转载荷平方和			
	总计	方差 百分比	累积 百分比	总计	方差 百分比	累积 百分比	总计	方差 百分比	累积 百分比	
旱季	F1	3.34	41.76	41.76	3.34	41.76	41.76	3.05	38.11	38.11
	F2	1.60	20.05	61.81	1.60	20.05	61.81	1.55	19.38	57.49
	F3	1.07	13.34	75.15	1.07	13.34	75.15	1.41	17.67	75.15
雨季	F1	2.24	28.05	28.05	2.24	28.05	28.05	2.20	27.55	27.55
	F2	1.75	21.80	49.86	1.74	21.8	49.86	1.44	17.80	45.51
	F3	1.04	12.94	62.81	1.04	12.94	62.81	1.38	17.30	62.81

\* F1: 基于水质提取的主成分 1, F2: 基于水质提取的主成分 2, F3: 基于水质提取的主成分 3。



附图I 雨季异龙湖主要入湖河流主要污染指标实测值与预测值对比

Attached Fig.I Comparison of the measured and predicted values of the main pollution indexes of the main rivers inflowing into Lake Yilong in rainy season



附图II 旱季异龙湖主要入湖河流主要污染指标实测值与预测值对比

Attached fig.II Comparison of the measured and predicted values of the main pollution indexes of the main rivers inflowing into Lake Yilong in dry season