

# 滇池流域捞鱼河湿地水质评价与时空变化特征\*

周泽仪<sup>1,2</sup>, 蒋少璐<sup>2</sup>, 赵义勇<sup>2</sup>, 董建超<sup>2</sup>, 李伦斌<sup>2</sup>, 赛冰蝉<sup>2</sup>, 周小华<sup>2\*\*</sup>

(1. 昆明理工大学 生命科学与技术学院, 云南 昆明 650500; 2. 昆明学院 化学化工学院, 云南 昆明 650214)

**[摘要]** 对滇池流域捞鱼河湿地的水质现状进行分析与评价, 为改善湿地水环境状况提供数据支撑. 分析了2022年1月至12月份捞鱼河湿地中12个监测位点的水体TN、TP、COD、Chla、NH<sub>3</sub>-N、pH、DO、T和S共9个指标, 采用主成分分析法对捞鱼河湿地主要污染指标进行筛选和评价. 结果表明: 12月份水质最好, 6月份水质最差; 水体流经捞鱼河湿地净化后, 以湿地入水口11号位点为参照点, 其他位点水体的TP和TN削减率分别为10.73%~61.22%和2.20%~34.04%, 湿地净化效果较好, 但湿地水体水质为劣V类. 氮磷是捞鱼河湿地水体的限制性营养元素, 磷是水体富营养化的最主要限制因子, 农业面源污染和未收集的点源是影响湿地水质的主要因素.

**[关键词]** 捞鱼河湿地; 水质指标; Pearson相关性; 主成分分析

**[中图分类号]** X524 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1674-5639(2024)03-0068-08

**DOI:** 10.14091/j.cnki.kmxyxb.2024.03.009

我国水环境形势依然严峻, 存在包括水资源供需矛盾突出、水环境风险隐患多以及水生态受损严重等问题. 滇池流域是云南省的文化、经济、政治中心和交通枢纽, 流域面积2920 km<sup>2</sup><sup>[1]</sup>, 长期以来, 流域普遍存在农业生产施肥量大、土壤肥力下降、氮磷钾比例不平衡、重施氮肥、有机肥施用量少等系列问题, 由此导致农田土壤板结退化, 肥料养分大量流失. 加上城市不断扩建和人口的快速增长, 滇池水体富营养化严重<sup>[2]</sup>. 随着昆明“南下”发展, 呈贡区发展加快, 而捞鱼河湿地即临近呈贡区南端. 滇池有35条主要入湖河流, 其水质会影响滇池水体. 捞鱼河是其中一条入湖河流, 它流经呈贡区大学城片区和周边农村及农田. 其整体水质受到沿途市民生活和农业生产的影响较大, 自2010年水质开始变差, 基本为劣V类水质<sup>[3,4]</sup>. 近年来, 滇池周边兴建了16个湿地公园, 发挥湿地修复和净化水体的生态系统功能, 改善滇池的富营养化状态, 也为城市提供休闲娱乐和生态游览的场所<sup>[5]</sup>. 目前, 有关滇池周边湿地公园的研究主要集中于它们的生态修复功能、生态定位和植被群落特征等<sup>[6-8]</sup>. 而关于湿地公园水质的相关研究较少, 王紫媛等<sup>[9]</sup>采用单因子指数法和改进的内梅罗指数法评价了南滇池湿地公园、西华湿地公园和捞鱼河湿地公园的水质, 水体均为劣V类, 应加大对农业面源及部分未收集的点源污染的治理力度, 研究数据采集于2020年. 捞鱼河国家湿地公园是一个集滇池治理示范、生境保护与恢复、公众湿地生态体验于一体的城市近郊公益型国家级湿地公园, 也是昆明开展湿地科普教育的理想场所, 每日客流量较大<sup>[10]</sup>, 开展捞鱼河湿地水体的水质评价对了解水体的潜在污染源和水质改善情况非常有必要. 因此, 本文以捞鱼河湿地公园为研究区, 采用主成分分析法分析水质指标的变化特征并对其进行综合评价, 识别了水体的潜在污染源, 为其水环境的不断改善提供参考.

## 1 研究区概况

昆明捞鱼河国家湿地公园位于滇池东岸, 地理坐标为(108°48'52"~108°52'09")E, (22°57'21"~23°0'55")N. 捞鱼河湿地公园是由捞鱼河、滇池湖滨林带、沼泽及部分滇池水体组成的一个相对独立的湿地生态

\* [收稿日期] 2023-09-22

[作者简介] 周泽仪, 女, 江西九江人, 昆明理工大学在读硕士研究生, 研究方向为环境资源循环与利用.

\*\* [通信作者] 周小华, 男, 江西湖口人, 昆明学院副教授, 博士, 研究方向为资源循环与利用, E-mail: zhx200008@126.com.

[基金项目] 昆明学院人才引进基金项目(YJL18009), 云南省大学生创新创业训练计划项目(S202211393051).

系统, 既是滇池的重要入湖口湿地和滇池周边仅存的少量自然湖滨湿地, 也是入滇河流以及滇池近岸退化湿地恢复的典型代表和高原湿地受损恢复重建的典范, 现有面积约 734.31 hm<sup>2</sup>, 其中湿地保育区、湿地恢复重建区、宣教展示区、合理利用区和管理服务区分别占整个湿地公园总面积的 58.44%, 34.20%, 2.24%, 4.80%, 0.28%。植被覆盖率约为 81%, 湿地面积约为 537.01 hm<sup>2</sup>, 湿地率为 72.74%。

## 2 水质指标及分析方法

捞鱼河湿地公园水源主要为呈贡区南片生活污水经捞鱼河污水处理厂处理后的尾水以及季节性汇合流至湿地公园的河水。根据湿地水系径流方向, 在湿地区域内设置了 12 个采样位点, 其中 11 号位点是湿地入水口位点, 具体采样位点示意图如图 1 所示。本研究选择水质的总氮 (TN)、总磷 (TP)、化学需氧量 (COD)、氨氮 (NH<sub>3</sub>-N)、叶绿素 a (Chla)、pH、溶解氧 (DO)、电导率 (S)、水温 (T) 9 个指标作为主要分析对象。其中现场测定指标: T 和 pH (PHBJ-260 型-便携式 pH 计, 青岛溯源环保设备有限公司)、DO (JPB-608 型便携式水质溶氧仪, 上海仪电科学仪器股份有限公司)、S (DDB-11A 型便携式电导率仪, 青岛溯源环保设备有限公司)。实验室测定指标: TP 的测定参照文献 [11]、TN 的测定参照文献 [12]、NH<sub>3</sub>-N 的测定参照文献 [13]、COD 的测定参照文献 [14] 和 Chla 的测定参照文献 [15]。采用 SPSS 21 和 Excel 2007 进行数据分析和处理。

在对具有众多变量及不同指标问题的实际研究过程中, 由于变量之间可能具有一定的关联性, 容易造成数据信息的叠加。主成分分析可避免评价因子计量单位对评价的影响, 以及指标因子选择的随意性, 其评价结果具有较好的准确性和客观性<sup>[16]</sup>。水质评价中涵盖大量指标数据和多样化的变量, 导致其评价具有复杂性。而主成分分析浓缩了数据信息, 并简化了数据结构, 从而提高了评价的客观性和直观性, 是水质评价的常用方法<sup>[17]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 湿地水质空间变化特征

#### 3.1.1 不同位点水质指标的含量分析

每月中旬 08:30—12:30 分别采集 12 个位点的水样, 其中 11 号位点为湿地入水口取样位点。不同位点年平均水体 Chla、TP 和 TN 含量变化见表 1。Chla 含量变化范围为 0.009 4~0.028 0 mg/L, 所有位点的 Chla 含量均高于入水口 11 号位点, 其中 6 号位点水体 Chla 含量最大, 可能因为它位于堰塘出口, 水体的交换量较小, 水中植物少, 植物净化效率低。11 号位点因入口处水体的流动性好而 Chla 含量最小; TP 含量变化范围为 0.16~0.42 mg/L, 其他位点的 TP 含量均低于 11 号位点。根据地表水环境质量标准 (GB 3838—2002), 12 号位点的 TP 处于 V 类水标准范围, 11 号位点的 TP 超过 V 类水标准范围, 其余各位点水体的 TP 基本处于 IV 类水标准范围。TN 浓度变化范围为 5.84~8.84 mg/L, 所有位点的 TN 均超过 V 类水标准范围, 湿地入水口 11 号位点的 TN 含量最高, 其余各位点均低于 11 号位点, 8 号位点的 TN 含量最低。由表 2 数据分析可知, 入水口 11 号位点水体的 Chla 含量最低, TN 和 TP 含量最高, 8 号位点的 TN 和 TP 含量最低。

表 1 捞鱼河湿地公园不同位点的年平均水质指标

表 1 捞鱼河湿地公园不同位点的年平均水质指标				mg/L			
取样位点	Chla	TP	TN	取样位点	Chla	TP	TN
1	0.022	0.20	7.17	7	0.021	0.22	6.17
2	0.021	0.18	6.86	8	0.018	0.16	5.84
3	0.016	0.23	7.40	9	0.016	0.20	7.22
4	0.015	0.26	7.58	10	0.010	0.28	8.65
5	0.010	0.26	7.74	11	0.009	0.41	8.84
6	0.028	0.27	7.90	12	0.200	0.37	8.42

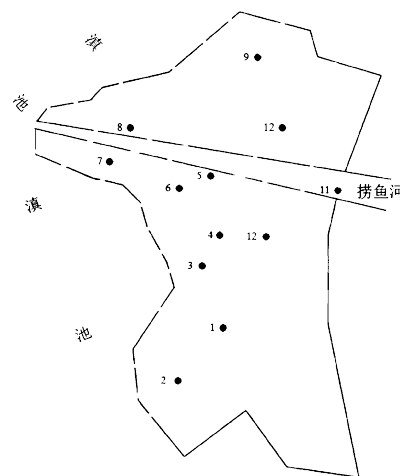
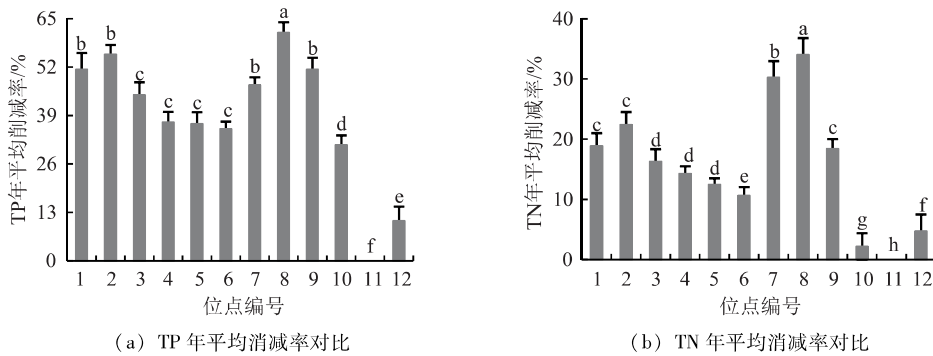


图 1 采样位点示意

### 3.1.2 湿地对不同位点的水体 TP 和 TN 的净化效果

以湿地进水口 11 号位点为参照点, 其他位点 TP 年平均削减率结果如图 2 (a) 所示, TP 削减率范围为 10.73% ~ 61.22%, 其中 12 号位点 TP 削减率相对较低, 为 10.73%, 8 号位点的 TP 削减率较高, 可达到 61.22%. TN 年平均削减率结果如图 2 (b), 不同位点 TN 削减率范围为 2.20% ~ 34.04%, 其中 10 号位点 TN 削减率最低, 只有 2.20%, 8 号位点的 TN 削减率最高, 可达到 34.04%. 由图 1 数据分析可得出, 入湖河流水体经过湿地植物等自然净化后, 各位点水体的 TP 和 TN 的削减效果均较好, 水体净化效果明显.



注: 不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ).

图 2 湿地不同位点 TP 和 TN 的年平均削减率对比

### 3.2 水质时间变化特征

#### 3.2.1 不同月份水质指标测定结果

每月中旬上午 08:30—12:30 分别采集水样, 不同月份水质指标如表 2 所示, Chla 年平均含量为 0.017 mg/L. 其中 1 月至 6 月份的 Chla 含量高于 7 月至 12 月份, 1 月份 Chla 含量最大, 12 月份 Chla 含量最小. TP 年平均含量为 0.25 mg/L, 根据地表水环境质量标准 (GB 3838—2002), 水体 TP 超过 V 类标准限值. 2 月份的 TP 含量最大, 2, 3, 4 月份水质 TP 含量超过 V 类标准限值, 10 月份水体 TP 含量处于水质 V 类标准限值范围, 只有 12 月份的 TP 值处于 II 类水质标准限值范围内. TN 年平均含量为 7.48 mg/L, 全年 TN 含量均超过水质 V 类标准限值, 其中 7 月至 12 月份 TN 含量整体高于 1 月至 6 月份, 12 月份 TN 含量最高, 达到 12.85 mg/L, 1 月份 TN 含量最低, 也达到 3.81 mg/L.  $\text{NH}_3\text{-N}$  年平均含量为 0.61 mg/L, 水质整体达到 III 类要求, 12 月份  $\text{NH}_3\text{-N}$  含量最高, 达到 2.40 mg/L, 超过水质 V 类标准限值, 9 月份  $\text{NH}_3\text{-N}$  含量达到水质 IV 类的范围, 5 月份  $\text{NH}_3\text{-N}$  含量最低, 在水质 I 类的范围内, 2 月至 8 月份、10 月份的  $\text{NH}_3\text{-N}$  含量到水质 II 类的范围. COD 年平均含量为 14.98 mg/L, 6 月份 COD 含量最高, 处于 IV 类水质范围, 2, 4, 5 月份 COD 含量处于 III 类水质范围, 其他月份 COD 含量均小于 II 类水质范围. TN 和 TP 是指示水体的富营养化程度, 水质越差, 其值越大<sup>[18]</sup>, 表 2 数据表明本研究区域的水体 TN 和 TP 值都较高, 且 TN 值均超过水质 V 类标准限值, 故水质为劣 V 类, 与王紫媛等<sup>[9]</sup>研究水质为劣 V 类的结果一致, 表明湿地入水水体的富营养化程度较高, 湿地水质主控因素为 TN 和 TP.

表 2 捞鱼河湿地公园不同月份的水质指标变化

月份	Chla/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TN/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TP/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	COD/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\text{NH}_3\text{-N}/$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	T/ $^{\circ}\text{C}$	pH	S/ ( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	DO/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
1	0.071	3.81	0.11	12.25	0.89	16.39	7.18	462.17	5.61
2	0.014	7.96	0.58	19.33	0.22	16.68	7.14	454.67	6.02
3	0.009	7.89	0.45	13.83	0.22	17.18	7.30	440.25	7.77
4	0.013	5.51	0.43	19.00	0.35	18.58	7.17	485.58	6.83
5	0.014	4.70	0.18	17.75	0.05	22.01	7.56	524.25	6.63
6	0.040	4.68	0.21	26.75	0.43	24.01	7.90	582.58	6.46
7	0.007	9.48	0.25	14.92	0.26	22.67	7.16	568.92	4.70
8	0.007	4.42	0.11	9.42	0.40	22.38	7.16	540.92	5.28

续表 2

月份	Chla/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TN/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TP/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	COD/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	NH <sub>3</sub> -N/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	T/ $^{\circ}\text{C}$	pH	S/ ( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	DO/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
9	0.005	11.98	0.31	12.67	1.19	21.38	7.22	536.67	5.52
10	0.004	4.66	0.22	10.42	0.24	20.18	7.15	516.08	5.68
11	0.007	11.82	0.13	11.42	0.72	17.46	7.30	534.08	6.92
12	0.002	12.85	0.04	12.00	2.40	10.77	7.30	420.25	5.71

### 3.2.2 不同月份水质指标间的相关性分析

对 9 个水质指标进行双变量相关分析, 结果如表 3 所示. TN 与 NH<sub>3</sub>-N 变化间呈显著的正相关, Pearson 相关系数为 0.623, COD 与 pH 变化间呈显著的正相关, Pearson 相关系数为 0.700, NH<sub>3</sub>-N 与 T 变化间呈显著的负相关, Pearson 相关系数分别为 -0.660, T 与 S 变化间呈极显著的正相关, Pearson 相关系数分别为 0.892. 这些信息表示多个水质指标之间存在较强的关联性, 存在一定程度的水质信息重叠, 可采用主成分分析法评价水质.

表 3 水质各指标双变量相关分析

指标	指标相关系数								
	Chla	TN	TP	COD	NH <sub>3</sub> -N	T	pH	S	DO
Chla	1	-0.527	-0.170	0.299	-0.054	0.023	0.272	-0.030	-0.016
TN		1	-0.020	-0.271	0.623*	-0.442	-0.170	-0.170	-0.056
TP			1	0.385	-0.476	0.037	-0.217	-0.230	0.349
COD				1	-0.309	0.321	0.700*	0.241	0.300
NH <sub>3</sub> -N					1	-0.660*	-0.067	-0.404	-0.236
T						1	0.351	0.892**	-0.180
pH							1	0.386	0.361
S								1	-0.295
DO									1

说明: “\*”表示显著相关 ( $P < 0.05$ ), “\*\*”表示极显著相关 ( $P < 0.01$ ).

### 3.2.3 不同月份水质指标间的主成分分析

利用软件 SPSS 21 对不同月份水质指标数据均进行 KMO 和 Bartlett 检验, 判定主成分分析能否用于分析数据, 结果 KMO 值为 0.546, 大于 0.5, Bartlett 检验的显著性为 0.002, 小于 0.05, 说明原始数据可以用主成分分析法<sup>[19]</sup>. 从表 4 看出, 前 4 个主成分的特征值都大于 1, 方差贡献率分别为 35.23%、20.98%、17.37% 和 14.15%, 其方差贡献率的总和为总方差的 87.74%, 大于 85%. 表明这 4 个主成分可以反映出 87.74% 的原始变量信息, 可以用前 4 个主成分代表原来的 9 个指标变量对水质的品质进行评价<sup>[20]</sup>. 第 1 主成分的方差

表 4 主成分的初始特征值及累积贡献率

成分	初始特征值	方差贡献率/%	累积贡献率/%
1	3.171	35.232	35.232
2	1.888	20.981	56.213
3	1.563	17.372	73.585
4	1.274	14.150	87.735
5	0.678	7.536	95.271
6	0.273	3.032	98.303
7	0.088	0.973	99.276
8	0.055	0.616	99.892
9	0.010	0.108	100.000

贡献率远大于其他主成分的方差贡献率, 表明水质的好坏主要由第 1 主成分决定.

主成分与水质指标因子之间的关联性强弱由主成分的载荷矩阵系数的绝对值大小决定, 一般载荷矩阵系数的绝对值越大, 表示该主成分与水质指标因子的关联性就越强<sup>[21]</sup>. 主成分的载荷矩阵反映了多个指标因子对该主成分负荷的相对贡献及作用方向, 即表示该指标因子对主成分的贡献率<sup>[22]</sup>. 由表 5 可知, 第 1 主成分中载荷较大的指标为原始变量中的 T、NH<sub>3</sub>-N、COD、pH、TN 和 S, 反映了水体的物理环境情况、有机物及氮营养盐污染程度. 说明它们对第 1 主成分的贡献作用大, 可代表这原始变量中的这 5 个指标因子的信息. 其中, T 有

最大载荷,相关性最高,与TN、NH<sub>3</sub>-N负相关,而与COD、pH和S正相关.可能是温度升高,水中NH<sub>3</sub>-N挥发作用增强而含量减少,从而也导致了TN含量减少,而水体盐离子活性增加,植物的呼吸作用增加而导致COD、pH和S增加.第2主成分与原始变量中的DO、TP、TDS相关性高,且均为正相关,反映了水体的物理环境状况和磷营养盐污染水平.其中DO有最大载荷,相关性最高(DO表示水体的净化能力,一般水质越好,其值越大<sup>[23]</sup>).原始变量中的pH、Chla、TP和NH<sub>3</sub>-N在第3主成分中的载荷较大,且均为正相关,主要反映了水体的浮游植物(藻类)的生长情况、酸碱环境和氮磷营养盐污染水平.其中,pH有最大载荷,相关性最高.原始变量中的Chla和TN在第4主成分中的载荷较大,反映了水体的浮游植物(藻类)的生长情况和氮营养盐污染水平,也即反映了水体的富营养化状况.其中,TN有最大载荷,相关性最高,第4主成分与TN正相关,与Chla负相关.本研究提取的主成分反映的信息与实际水质指标分析结果基本一致(表2),水体污染可能受多种指标的共同作用与影响,使得水质的影响因素较为复杂,但氮和磷为主要污染指标,水体趋于富营养化状态.

为了避免不同指标单位及数据对评价的影响,需要标准化处理水质指标的原始数据,转化成均值为0、标准差为1的无量纲数据( $Z_{x_1} \sim Z_{x_9}$ ).用各指标变量的主成分载荷值(表5)除以主成分对应的初始特征值的平方根<sup>[24,25]</sup>,可得到4个主成分中每个因子的系数即特征向量,以特征向量为权重构建4个主成分的表达式:

$$F_1 = 0.189 \times Z_{x_1} - 0.375 \times Z_{x_2} + 0.097 \times Z_{x_3} + 0.384 \times Z_{x_4} - 0.422 \times Z_{x_5} + 0.469 \times Z_{x_6} + 0.343 \times Z_{x_7} + 0.089 \times Z_{x_8} + 0.089 \times Z_{x_9}; \quad (1)$$

$$F_2 = 0.049 \times Z_{x_1} - 0.034 \times Z_{x_2} + 0.506 \times Z_{x_3} + 0.302 \times Z_{x_4} - 0.128 \times Z_{x_5} - 0.304 \times Z_{x_6} + 0.063 \times Z_{x_7} - 0.063 \times Z_{x_8} + 0.574 \times Z_{x_9}; \quad (2)$$

$$F_3 = 0.492 \times Z_{x_1} - 0.049 \times Z_{x_2} - 0.465 \times Z_{x_3} + 0.217 \times Z_{x_4} + 0.423 \times Z_{x_5} - 0.230 \times Z_{x_6} + 0.493 \times Z_{x_7} - 0.105 \times Z_{x_8} + 0.086 \times Z_{x_9}; \quad (3)$$

$$F_4 = -0.533 \times Z_{x_1} + 0.577 \times Z_{x_2} + 0.019 \times Z_{x_3} + 0.245 \times Z_{x_4} + 0.198 \times Z_{x_5} + 0.098 \times Z_{x_6} + 0.398 \times Z_{x_7} + 0.272 \times Z_{x_8} + 0.203 \times Z_{x_9}. \quad (4)$$

表5 主成分在各水质指标的因子载荷矩阵

水质指标	主成分1	主成分2	主成分3	主成分4
Chla( $x_1$ )	0.336	0.068	0.615	-0.602
TN( $x_2$ )	-0.667	-0.047	-0.061	0.651
TP( $x_3$ )	0.173	0.696	-0.581	0.021
COD( $x_4$ )	0.684	0.415	0.271	0.277
NH <sub>3</sub> -N( $x_5$ )	-0.751	-0.176	0.529	0.223
T( $x_6$ )	0.835	-0.418	-0.288	0.111
pH( $x_7$ )	0.611	0.086	0.616	0.449
S( $x_8$ )	0.675	-0.624	-0.131	0.307
DO( $x_9$ )	0.159	0.789	0.107	0.229

### 3.2.4 不同月份水质的综合性评价

以各主成分的特征值占所提取主成分的特征值之和的比例为权重,可得主成分综合得分 $F$ (表达式如下).

$$F = \sum (F_1 \times 3.171 + F_2 \times 1.888 + F_3 \times 1.563 + F_4 \times 1.274) / 7.896. \quad (5)$$

各主成分的综合得分以 $F_n$ 表示,列于表6. $F_n$ 的数值越小,水质越健康; $F_n$ 的综合排名越靠后,水质越好.由表6可见,水质较差的月份(综合排名为1~3)分别是6,5,4月,水质较好的月份(综合排名为12~10)分别是12,8,9月.综合得分及排序与主成分 $F_1$ 的得分及排序基本吻合,表明第1主成分是影响湿地水质的最主要因素.从TN、COD、NH<sub>3</sub>-N、pH、S和T这6个原始变量来看,水质最差的6月份,水体的COD、pH、S和T这4个指标的含量较高,TN、NH<sub>3</sub>-N这2个指标的含量较低;12月份水质最好,水体的COD、pH、S和T这4个指标的含量相对较低,而TN、NH<sub>3</sub>-N这2个指标的含量较高,与水质指标含量(表2)基本一致.

表 6 主成分分析综合得分及排名

月份	$F_1$	$F_1$ 排名	$F_2$	$F_2$ 排名	$F_3$	$F_3$ 排名	$F_4$	$F_4$ 排名	$F$ 综合得分	综合排名
6	3.69	1	0.04	5	2.08	1	1.09	3	2.08	1
5	1.79	2	0.12	4	0.37	4	0.30	6	0.87	2
4	0.46	3	1.55	3	-0.68	7	-0.27	8	0.38	3
3	-0.36	8	2.47	1	-0.62	6	0.12	7	0.34	4
2	-0.21	7	1.90	2	-1.15	10	-0.37	9	0.08	5
11	-0.90	11	-0.24	7	0.12	5	1.14	1	-0.21	6
1	-0.44	9	-0.24	7	1.82	3	-2.78	12	-0.32	7
7	0.47	4	-1.80	10	-1.27	11	0.33	5	-0.44	8
10	0.02	6	-0.80	8	-1.05	9	-0.79	10	-0.52	9
9	-0.80	10	-1.01	9	-0.68	7	1.10	2	-0.52	10
8	0.26	5	-1.90	11	-0.79	8	-0.80	11	-0.64	11
12	-3.97	12	-0.11	6	1.85	2	0.93	4	-1.10	12

### 3.3 限制湿地水质的营养元素

当水体 TN 浓度高于 0.20 mg/L 且 TP 浓度高于 0.02 mg/L 时, 容易引起水体富营养化<sup>[26]</sup>. 由于湿地入水水质营养较高, 导致氮磷始终处于较高水平, 且氮磷含量基本呈正相关系, 湿地水体的 TN、TP 远远超过湖泊的富营养化标准. 水体 TN、TP 含量及氮磷比 (N/P) 的大小可影响浮游植物的生长. 当  $TN/TP < 7$  时, TN 是水体富营养化的限制因子;  $7 < TN/TP < 30$  时, TN、TP 是水体富营养化的限制因子;  $TN/TP > 30$  时, TP 是水体富营养化的限制因子<sup>[27]</sup>. 由湿地不同月份的水质 TN/TP (图 3) 可知, 4 月份水体 TN/TP 值最小为 12.8, 11 月份水体 TN/TP 值最大为 90.9, TN/TP 年平均值为 31.2. 在 2, 3, 4, 6, 10 月中, 水体  $7 < TN/TP < 30$ , 故 TN、TP 是水体富营养化的限制因子; 其余月份的 TN/TP 均大于 30, 故 TP 是水体富营养化的限制因子. 上述分析表明 TP 是湿地营养化的最主要限制因子, 这与王紫媛等<sup>[9]</sup>研究分析结果一致. 环境中营养盐比例低于或高于特定比例, 将直接影响藻类的种群结构, 氮磷浓度升高会导致蓝藻暴发, 甚至形成“水华”<sup>[28,29]</sup>, 水体浮游植物的群落结构随 TN/TP 变化而改变<sup>[30]</sup>. Wang 等<sup>[31]</sup>研究表明, 当  $TN/TP < 25$  时, 蓝藻可能成为优势藻类, 当  $TN/TP > 25$  时, 有利于绿藻和硅藻生长, 这与董静等<sup>[32]</sup>和 Lin 等<sup>[33]</sup>研究表明滇池主要藻类是绿藻、蓝藻和硅藻的结果基本一致.

徐晓梅等<sup>[34]</sup>研究表明 TP 主要来自农业面源和未收集的点源. 磷是影响水体中藻类种群结构与密度的最主要限制性营养元素, 而 Chla 是浮游植物现存量的重要指标, Chla 水平在一定程度上反映浮游藻类的数量, 表征浮游植物的现存量<sup>[35]</sup>. Chla/TP 可表示浮游藻类对其关键生源要素磷的利用效率. 课题组的研究结果表明 Chla 与 TP 呈正相关系 (表 2), 与程文娟等<sup>[36]</sup>研究的 Chla 水平与水体 TP 含量呈正相关系一致. 图 4 表明, 1 月份 Chla/TP 值最高, 说明浮游藻类对磷有较高的利用效率, 9 月份 Chla/TP 值最低, 说明浮游藻类对磷有相对较低的利用效率, 一定程度上抑制了浮游藻类生长, Chla 含量较低, 与本研究的水质指标分析结果基本一致.

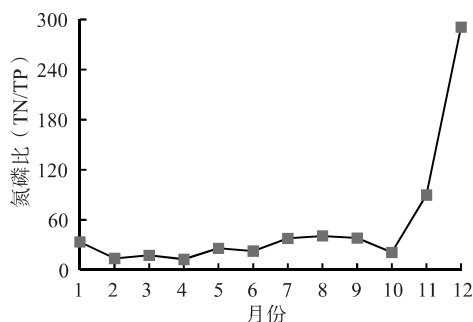


图 3 不同月份水质的氮磷比变化

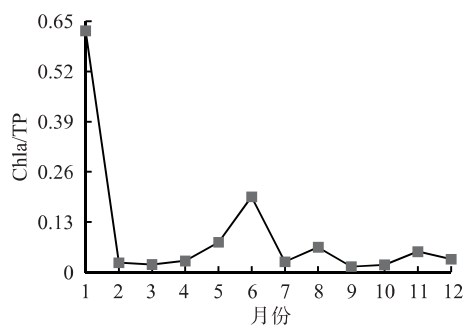


图 4 不同月份水质 Chla/TP 值变化

#### 4 结论

1) 捞鱼河湿地水质的主控因素为TN和TP, 水体TN超过V类水质范围, 2, 3, 4月份水体TP超过V类水质范围, 水质为劣V类, 表明湿地入水的水质富营养化程度较高; 以湿地进水口11号位点为参照点, 其他位点水体的TP和TN浓度均有减少, 其削减率分别为10.73%~61.22%和2.20%~34.04%, 表明湿地的水质净化效果良好。

2) 6月份(综合排名第1)的水质综合性评价最差, 12月份(综合排名第12)水质最好; 不同月份的水质综合得分及综合排名均与其主成分 $F_1$ 的得分及综合排名一致, 表明第1主成分是影响湿地水质的决定性因素。

3) 磷是捞鱼河湿地水体的最主要限制性营养元素。2, 3, 4, 6, 10月这5个月水体的 $7 < \text{TN}/\text{TP} < 30$ , 故TN、TP是水体富营养化的限制因子; 1, 5, 7, 8, 9, 11, 12月这7个月水体的 $\text{TN}/\text{TP}$ 均大于30, TP是水体富营养化的限制因子; 1月份水体中的 $\text{Chla}/\text{TP}$ 最高, 表明浮游藻类对其关键生源要素磷的利用效率较高, 9月份水体中的 $\text{Chla}/\text{TP}$ 最低, 浮游藻类生长受到一定的限制。

#### [参考文献]

- [1] 和兰娣, 毕金, 杨赵. 滇池流域典型小流域农业种植情况调查 [J]. 环境科学导刊, 2012, 31 (5): 38-41.
- [2] 谭海燕, 罗聪, 任建青, 等. 滇池流域化肥施用及化肥减量增效技术应用效果调查研究 [J]. 安徽农业科学, 2022, 50 (15): 132-136.
- [3] 张石文, 杨发昌, 孔德平, 等. 捞鱼河水质研究 [J]. 环境科学导刊, 2015, 34 (1): 4-8.
- [4] 高路, 潘珉. 昆明呈贡新区入滇池主要河流水质分析 [J]. 云南民族大学学报(自然科学版), 2011, 20 (3): 225-228.
- [5] 南月慧, 赵庆玲, 谭秀梅. 滇池流域湿地公园研究缺口探析 [J]. 智能城市, 2021, 7 (3): 25-26.
- [6] 王志秀. 滇池湖滨带湿地植被格局与功能研究 [D]. 北京: 中国科学院大学博士学位论文, 2017.
- [7] 马竞一. 昆明捞鱼河国家湿地公园景观生态规划研究 [D]. 昆明: 西南林业大学硕士学位论文, 2018.
- [8] 王亚萍. 环滇池生态带典型湿地公园生态系统服务与游客感知评估 [D]. 昆明: 昆明理工大学硕士学位论文, 2023.
- [9] 王紫媛, 刘星月, 王伟超, 等. 典型滇池湿地公园的水质评价与污染源分析 [J]. 灌溉排水学报, 2022, 41 (增刊1): 1672-3317.
- [10] 付健梅, 周品, 龚相瀚, 等. 滇池湖滨湿地公园的旅客人数估算 [J]. 湿地科学, 2021, 19 (4): 501-506.
- [11] 国家环境保护局. 水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法: GB 11893—89 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1990: 1-4.
- [12] 环境保护部. 水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法: HJ 636—2012 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012: 1-12.
- [13] 环境保护部. 水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法: HJ 535—2009 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010: 1-10.
- [14] 环境保护部. 水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法: HJ 828—2017 [S]. 北京: 中国环境出版社, 2017: 1-21.
- [15] 国家环境保护总局, 水和废水水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法 [M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 670-671.
- [16] NGUYEN B T, NGUYEN T M T, BACH Q V. Assessment of groundwater quality based on principal component analysis and pollution source-based examination: a case study in Ho Chi Minh City, Vietnam [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192 (6): 395-399.
- [17] KALE A, BANDELA N, KULKARNI J, et al. Factor analysis and spatial distribution of water quality parameters of Aurangabad District, India [EB/OL]. (2020-02-06) [2023-09-01]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352801X19303273?via%3Dihub>.
- [18] 邹伟, 朱广伟, 蔡永久, 等. 综合营养状态指数(TLI)在夏季长江中下游湖库评价中的局限及改进意见 [J]. 湖泊科学, 2020, 32 (1): 36-47.
- [19] 张勇荣, 周忠发, 李韶慧, 等. 喀斯特地区深水型湖泊水质时空变异性分析: 以平寨水库为例 [J]. 环境科学与技术, 2019, 42 (11): 52-60.
- [20] 张翔, 李慷. 基于主成分分析的北洛河水质时空分布特征及污染源解析 [J]. 水土保持通报, 2022, 42 (4): 153-160.

- [21] 邢洁, 宋男哲, 陈祥伟, 等. 基于主成分分析的松花江流域黑龙江段水质评价 [J]. 中国给水排水, 2021, 37 (1): 89-94.
- [22] 王辉, 牟琴, 聂廷, 等. 基于相关性与主成分分析法综合评价不同品种甘薯脆片加工适宜性 [J]. 江苏农业科学, 2020, 48 (6): 173-179.
- [23] 田野, 李畅游, 赵胜男, 等. 基于模糊数学的黄河内蒙古段水环境质量评价 [J]. 水土保持通报, 2016, 36 (5): 162-166.
- [24] 刘星, 范楷, 杨俊花, 等. 基于主要营养成分含量的大小颗粒薏仁米判别 [J]. 食品与机械, 2019, 35 (2): 77-81.
- [25] 白晓丽, 张建勇, 江和源, 等. 普洱熟茶化学成分与品质特性相关性分析 [J]. 食品与机械, 2017, 33 (5): 50-53.
- [26] 叶许春, 孟元可, 张永生, 等. 三峡库区香溪河回水区营养状态变化特征与驱动因子 [J]. 水资源保护, 2018, 34 (4): 80-85.
- [27] 武俐, 王祖恒, 王亮, 等. 基于主成分分析和模糊数学的黄河小浪底水质监测与评价 [J]. 水土保持通报, 2020, 40 (5): 118-124.
- [28] 尹心安, 李浩. 流速和营养状态对藻类种间竞争的影响研究 [J]. 人民长江, 2023, 54 (1): 62-68.
- [29] 陆志华, 王元元, 蔡梅, 等. 太湖浅层底泥营养盐污染特征评价 [J]. 人民长江, 2022, 53 (12): 23-29.
- [30] SONG J, HOU C Y, LIU Q, et al. Spatial and temporal variations in the plankton community because of water and sediment regulation in the lower reaches of Yellow River [EB/OL]. (2020-07-10) [2023-09-01]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620310192?via%3Dihub>.
- [31] WANG Y J, CAI Y P, YIN X N, et al. Succession of phytoplankton functional groups in Macau's two shallow urban border reservoirs under multiple changing factors [EB/OL]. (2020-08-10) [2023-09-01]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620316000?via%3Dihub>.
- [32] 董静, 李根保, 宋立荣. 抚仙湖、洱海、滇池浮游藻类功能群 1960s 以来演变特征 [J]. 湖泊科学, 2014, 26 (5): 735-742.
- [33] LIN Y Y, ZHONG W J, ZHANG X W, et al. Environmental DNA metabarcoding revealed the impacts of anthropogenic activities on phytoplankton diversity in Dianchi Lake and its three inflow rivers [J]. Ecology and Evolution, 2023, 13 (5): 10088.
- [34] 徐晓梅, 吴雪, 何佳, 等. 滇池流域水污染特征 (1988—2014 年) 及防治对策 [J]. 湖泊科学, 2016, 28 (3): 476-484.
- [35] BOWES M J, HOUSE W A, HODGKINSON R A, et al. Phosphorus-discharge hysteresis during storm events along a river catchment: the River Swale, UK [J]. Water Research, 2005, 39 (5): 751-762.
- [36] 程文娟, 包立, 罗雄鑫, 等. 滇池水体沉积物磷素特征及其对藻类的影响 [J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36 (6): 822-828.

### Water Quality Evaluation and Variation Characteristics of Temporal-spatial in Laoyu River Wetland

ZHOU Zeyi<sup>1,2</sup>, JIANG Shaolu<sup>2</sup>, ZHAO Yiyong<sup>2</sup>, DONG Jianchao<sup>2</sup>, LI Lunbin<sup>2</sup>, SAI Bingchan<sup>2</sup>, ZHOU Xiaohua<sup>2</sup>

(1. Faculty of Life Science and Technology, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan, China 650500;

2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Kunming University, Kunming, Yunnan, China 650214)

**Abstract:** The water quality status of Laoyu River wetland in Kunming was monitored and evaluated in order to provide data support for improving the water environment of the wetland. In this paper, nine indexes including TN, TP, COD, Chla, NH<sub>3</sub>-N, pH, DO, T and S of 12 monitoring sections in Laoyu River wetland were analyzed in very month in 2022, and screened the main pollution indexes and evaluated the water quality of Laoyu River wetland by the principal component analysis. The results showed that the principal component analysis comprehensively evaluated that the water quality in December was the best and the worst in June. After the water flowed through Laoyu River wetland purification, other sampling sites relative to the inlet site 11, TP and TN reduction rate ranged from 10.73% to 61.22% and 2.20% to 34.04% in different space, wetland purification effect was better, the water quality of Laoyu River wetland was inferior to class V. Nitrogen and phosphorus were the limiting nutrient element in Laoyu River wetland, phosphorus was the most important limiting factor of water eutrophication, and agricultural surface source and point source but without the pollutant collection were the main factor affecting the wetland water quality.

**Key words:** Laoyu River wetland; water quality index; Pearson correlation; principal component analysis

(责任编辑: 陈伟超)