

异龙湖沉水植物分布格局与水环境 因子相关性研究

方馨¹ 赵风斌² 柴晓利² 王丽卿³¹

(1. 中国海洋大学 海洋与大气学院, 山东 青岛 251200;

2. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200080;

3. 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 200090)

【摘要】: 异龙湖为中国云南九大高原湖泊之一, 是处于草型向藻型湖泊转化节点上的典型高原湖泊, 因历史原因, 异龙湖东西湖区水环境条件差异较大, 可较好的代表云南高原草型及藻型湖泊类型, 因此研究异龙湖的沉水植物时空分布与水环境因子关系, 对于我国高原湖泊的保护具有重要意义, 且自 1980 年以来异龙湖沉水植物相关研究成果较少, 因此, 本研究在异龙湖开展为期一周年的水环境因子及沉水植物调查, 对沉水植物分布格局及其与水环境因子之间相互关系进行了研究, 以期为异龙湖的沉水植物研究留下珍贵的历史资料, 并探索异龙湖沉水植物分布格局及其影响因子, 为沉水植物恢复提供数据及技术支持。结果表明: 东西湖区沉水植物的群落结构具有显著差异, 西湖区小茨藻、狸藻、轮叶黑藻等为优势种, 东湖区篦齿眼子菜、狐尾藻为优势种, 且西湖区沉水植物的生物量及物种丰度显著高于东湖区。通过相关性分析看出水深、透明度、溶解氧是影响异龙湖沉水植物分布的主要环境因子, 总氮、总磷、氨氮及 pH 是次要影响因子, 异龙湖在现状条件下恢复沉水植物应针对不同湖区恢复采用不同的恢复策略, 选择不同的沉水植物种类开展恢复工作。

【关键词】: 异龙湖 沉水植物 分布格局 环境因子 相关性

【中图分类号】: Q948.11 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)03-0636-08

异龙湖位于云南省红河州石屏县境内(102° 28' E~102° 38' E, 23° 28' N~23° 42' N), 是云南省第九大湖泊, 平均海拔 1407.11m, 湖泊水域面积 28.4km², 流域面积 360.4km², 是典型的高原浅水湖泊^[1]。在 20 世纪 80 年代是水草丰盛的草型湖泊, 群落结构以苦草及海菜花为主要优势种群^[2]。近年来随着异龙湖周边经济发展, 污染负荷入湖量不断加大, 加上湖区网箱养殖等因素的影响, 全湖沉水植物较历史状态出现较大的群落演替, 原生优势沉水植物群落逐步消亡。现状的异龙湖受周边经济圈不对称发展的影响, 湖区水生植物群落结构差异性较大, 以小过细村—仁寿村连线为界(湖对岸的两个村庄), 把异龙湖分为东西两个湖区, 水环境具有明显的差异性。西湖区水深较浅、透明度高、沉水植物物种丰富且生物量较大, 东湖区水深较深、透明度较低, 沉水植物覆盖度低且群落类型单一。自 2010 年以来, 异龙湖管理部门在水环境保护方面做了大量的工作, 但由于经济落后、技

作者简介: 方馨(1990~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为湿地保护与管理. E-mail: fang.xin@hotmail.com

赵风斌, E-mail: saeezhaofb@163.com

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX07202002); 长江口水源保护区富营养化防治关键影响因子控制对策研究(18DZ1206505)

术水平相对较低、居民环保意识不高等原因,异龙湖在水环境因子调查及沉水植物保护与恢复方面积累的成果不足以支撑湖区保护工作的需要,因此,开展异龙湖现状环境因子及沉水植物保护方面的研究需求迫切。此外,异龙湖处于草型湖泊向藻型湖泊转化的重要节点上^[3],整个湖区的生态现状介于云南省已经破坏与未破坏的湖泊中间状态,是中国高原富营养化湖泊的湖泊过渡阶段的典型代表,因此,研究异龙湖沉水植物的现状分布及其与环境因子的相互关系对中国类似高原湖泊的科学管理、水质提升及沉水植物的保护与恢复具有重要意义。

沉水植物整株都生活在水中,是水体中最重要的初级生产者,其生命活动对于水体富营养化防治、提升水质、改善水体生物多样性均具有重要作用^[4~6]。沉水植物的生长繁殖与水环境因子的关系密不可分,已有研究表明影响沉水植物的群落结构与空间分布与诸多环境因子密切相关,如溶解氧、透明度、营养盐含量、温度、水深等^[7~10]均可对沉水植物的生长造成影响,但异龙湖作为特殊高原湖泊,作为我国湿地资源的重要组成部分,到目前为止关于沉水植物群落与环境因子的研究成果几乎为空白,对异龙湖的科学管理和沉水植物的保护工作造成了较大的阻力,因此为研究异龙湖现状沉水植物群落结构特征、空间分布及其与环境因子的关系,本研究开展了周年的水环境因子及沉水植物群落调查,以期明确异龙湖现状的水环境因子及沉水植物群落的时空分布特征,探索影响异龙湖沉水植物群落结构特征的主要环境因子,为异龙湖的科学管理、水质提升及沉水植物群落保护与恢复提供理论依据及数据支撑。此外,自1980年以来,关于异龙湖的水质及沉水植物群落的研究资料较少,本研究可有效的补充这一基础研究内容,供其他研究人员参阅。

1 材料与方法

1.1 采样点设计

由于近年来的云南气候干旱,异龙湖水位逐年下降^[11],湖区中部地势较高,把异龙湖分成东西两个湖区,为了便于描述和数据分析,我们称为东湖区、西湖区。此外,为研究异龙湖的水环境因子现状及沉水植物群落结构,在异龙湖的主要入湖河道城河(St1)、城南河(St2)各设置一个采样站点,在西湖区设置7个采样点(St3~St9),东侧湖区设置7个采样点(St10~St16)。

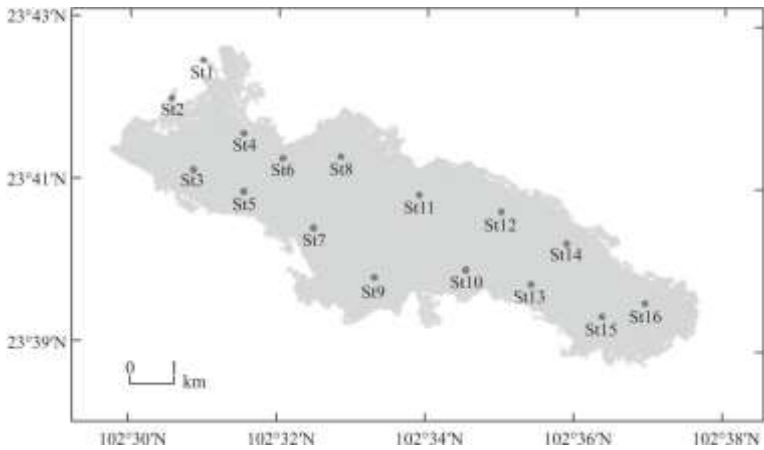


图1 异龙湖水环境因子与沉水植物调查采样站点

1.2 采样方法

1.2.1 水环境因子采样

现场采用便携式水质仪(Multi340i)测定各站点溶解氧、电导率、pH。使用赛氏透明度盘测定水体透明度,使用重锤刻度尺

测定水深。使用 5L 桶状采水器,于上述水域采样点进行采样。采样时,分取 0.5m 表层水和 1.5m 深层水(不足 1m 区域仅采集 0.5m 水层),将二者混合均匀后,保存于 5L 水样瓶中,并置于低温环境中,在实验室内测定水体中的总磷、总氮、氨氮含量。总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,铵氮采用纳氏试剂比色法测定,水体总磷采用钼酸铵分光光度法测定^[12]。采样监测从 2013 年 8 月~2014 年 7 月维持一周年,每月采样一次。

1.2.2 沉水植物的调查

沉水植物的采样站点与水质采样站点一致,在采样站点周边随机采集 10 个样方,每个样方采用自制 1m²样框固定后连根拔起,对沉水植物种类鉴定并作好记录,做好数据统计并计算沉水植物的频度。沉水植物采集后用清水洗净后称取鲜重,10 次采集数据的平均值作为该站点的数据。

1.3 数据处理与分析

水生植物和环境因子的关系分析采用对频度<5%的物种剔除后利用重要值进行典范对应分析(CANOCO4.5)^[13]。数据处理利用 SPSS19.0 进行相关分析和单因素方差分析,显著性水平为 $p<0.05$ 。异龙湖处于草藻型湖泊转化节点上^[14],东西湖区差异较大,再加上目前对于异龙湖的研究数据较少,本研究把东西湖区的一周年的水质变化做了统计分析,以便准确了解异龙湖主要污染来源的水质对湖区水质及沉水植物群落的影响,为异龙湖后续研究提供数据参考。

2 结果与分析

2.1 异龙湖水环境因子现状

从监测数据看,东西湖的水深变化趋势一致,但差异性显著($p<0.01$),东湖区年平均水深 102.5cm,西湖区年平均水深 208.5cm。城河属季节性河流水量不稳定,城南河终年水深较浅。受周边城镇生活污水的影响,城河、城南河透明度均不高,东湖区受风浪及人类活动影响年均透明度仅有 32.75cm,最高值出现在 2014 年 2 月,仅为 52.6cm,与西湖区透明度有显著差异($p<0.01$)。在水体营养盐含量方面,异龙湖主要的两条入湖河流 TN 含量显著($p<0.01$)高于湖区,东西湖区总氮含量也具有显著差异($p<0.05$),其中东湖区年均值 2.86mg/L,西湖区为 1.03mg/L。从总磷的监测结果来看,城河、城南河的入湖来水仍是异龙湖总磷超标的重要原因之一,东湖区年平均总磷含量显著高于西湖区($p<0.01$),东湖区为 0.078mg/L,西湖区为 0.016mg/L。两条入湖河流受污染较为严重,pH 不稳定,东湖区 pH 高于西湖区,但差异不显著($p>0.05$)。溶解氧是衡量水体健康的重要指标,湖区溶解氧显著高于河道($p<0.01$),东西湖区溶解氧相对稳定,但差异性显著($p<0.01$),西湖区年均值 8.03mg/L,东湖区为 5.93mg/L。

2.2 异龙湖沉水植物群落分布格局

通过对异龙湖沉水植物的调查分析,在全湖范围内,篳齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus* L)是出现次数最多、频度最大的沉水植物种类,出现频度达到 83.6%,其次是狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum* L),达到 76.9%,两种植物为沉水植物的优势物种。小茨藻(*Najas minor* All.)、大茨藻(*Najas marina* L)及轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)出现的频度及次数居中,狸藻(*Utricularia vulgaris* L)及亮叶眼子菜(*Potamogeton lucens*)仅在西湖区南侧滨水区小范围出现。

不同站点间的沉水植物物种及生物量差异性较大,各站点的生物量从西到东依序减少且差异性显著($p<0.01$),其中生物量最大的 7 号站点达到 9.93kg/m²,而生物量最少的 13 号站点仅有 2.36kg/m²(图 4)。可见,3~9 号站点,属于西湖区,水深较浅,透明度高,沉水植物覆盖率较大,且物种数多为 3~5 种,东湖区水深较大,透明度低,沉水植物物种数一般为 1~2 种,因环境因子不同,西湖区优势物种为小茨藻、轮叶黑藻、狸藻、亮叶眼子菜,部分区域少量分布篳齿眼子菜及狐尾藻。东湖区优势物种为篳齿眼子菜及狐尾藻,浅水区域有少量小茨藻分布,大茨藻主要分布于东西湖区过渡带 1.5~2.0m 的深水区。

2.3 沉水植物群落与环境因子的关系

沉水植物与环境因子关系典范对应分析排序结果显示, 前两个排序轴的特征值分别为 0.432、0.158, 物种-环境因子相关性分别达到 0.823、0.831, 排序轴对物种-环境因子关系累积贡献率达到 96.1%, 说明物种与环境因子具有较好的相关性, 环境因子可以较好的解释沉水植物群落的结构及空间分布。

对异龙湖沉水植物 14 个采样站点进行排序, 并根据排序结果做出二维图。图中带箭头的线段表示环境因子, 向量的长短表示对主轴的作用, 箭头所在的象限表示相关性的正负。夹角的大小表示环境因子与排序轴的相关性大小, 夹角越大, 表明相关性越小, 反之亦然。采样站点与环境因子越近, 说明关系越密切, 同理, 物种与环境因子越近, 说明关系越密切。

从图 5 可以看出, 各采样站点间的水环境质量差距较大, 位于西湖区的 3、4、5、6、7 号站点水深较浅, 透明度较高, 营养盐总氮、总磷及氨氮的含量较低。位于东湖区的 13、14、15、16 号站点水深较深, 水体透明度低, 总氮、总磷、氨氮含量高。8、9、10、11、12 号站点位于东西湖区的过渡带, 各环境因子处于中间水平。可见, 异龙湖的水环境从西湖区向东湖区逐渐变差, 西湖区营养盐显著低于东湖区, 西湖区处于地表水Ⅲ类水平, 而东湖区为劣Ⅴ类水质, 呈现重度富营养化状态。

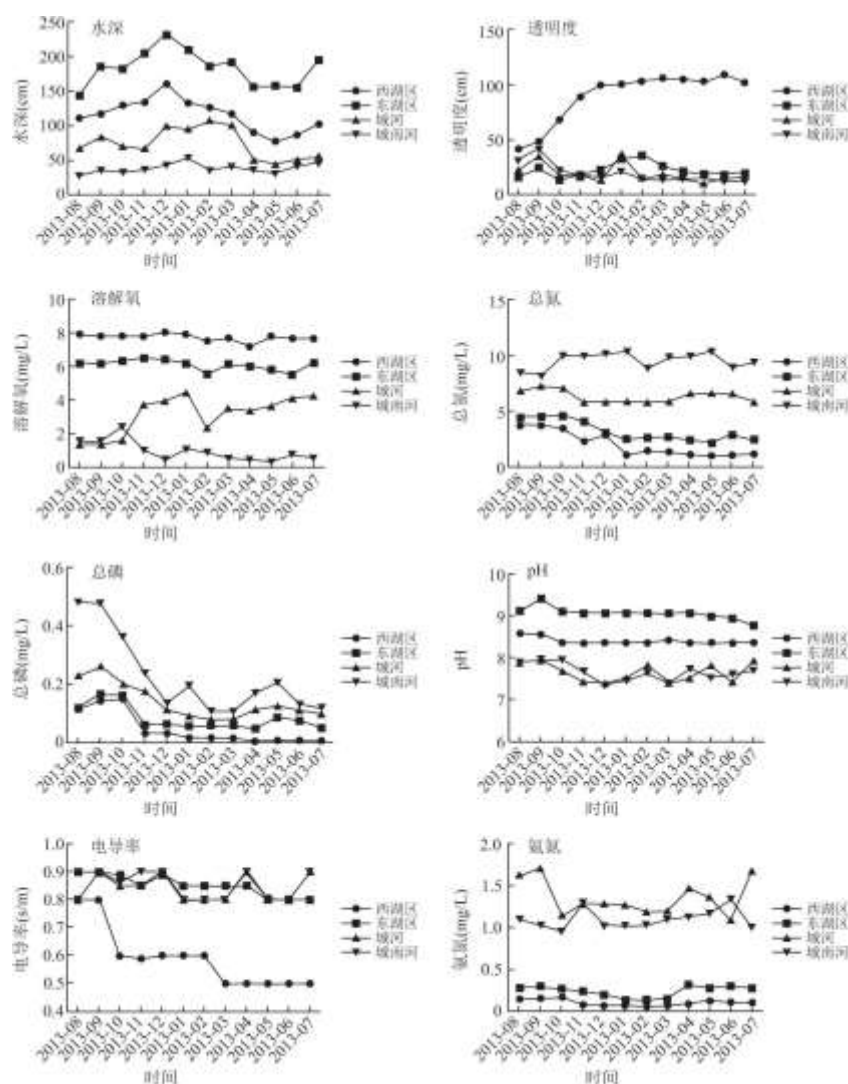


图 2 异龙湖各采样站点水环境因子时空分布

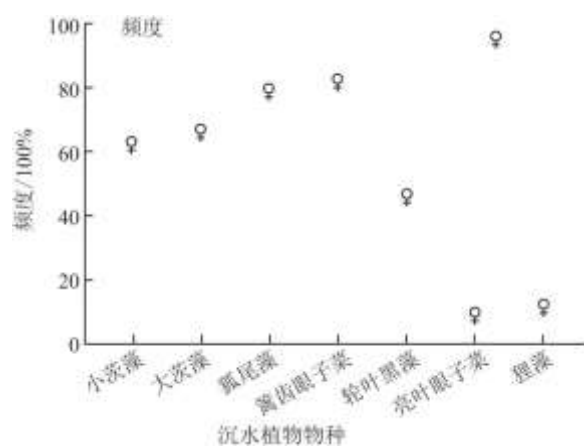


图 3 异龙湖不同沉水植物的频度分析

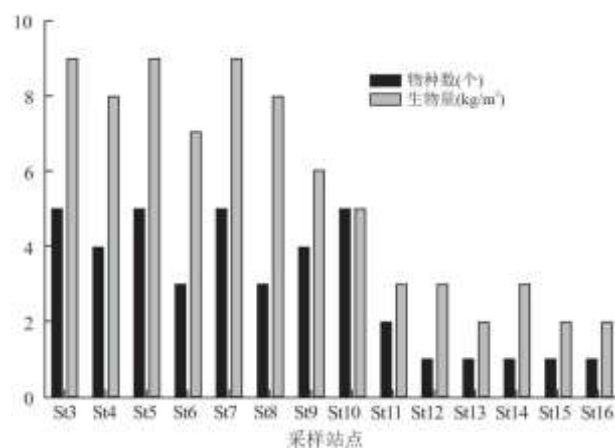


图 4 异龙湖不同站点的沉水植物物种数及生物量

表 1 沉水植物群落典范对应分析排序结果

轴	1	2	3	4
特征值	0.432	0.158	0.12	0.057
物种-环境因子相关性	0.823**	0.831**	0.581**	0.432**
物种数据变量累计比率(%)	22.9	32.5	38.3	41.6
排序轴对物种-环境关系的累积贡献率(%)	54.3	74.2	86.7	96.1

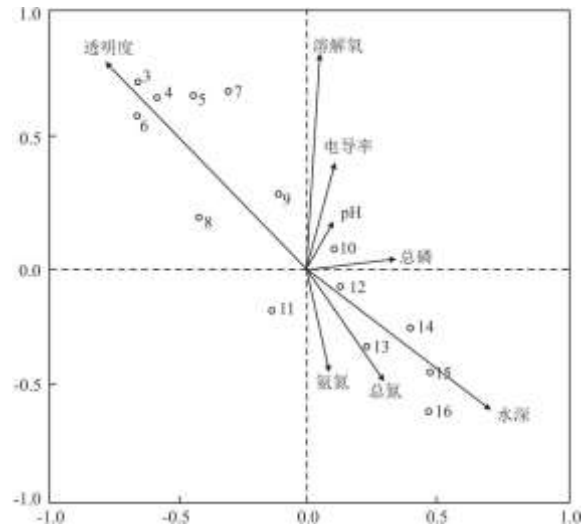


图 5 水环境因子与站点间的典型对应分析 (CCA) 排序

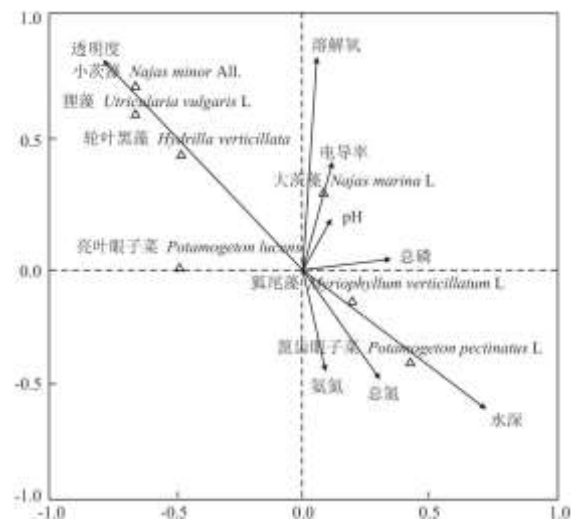


图 6 水环境因子与物种间的典型对应分析 (CCA) 排序

物种的排序主要是用来比较不同沉水植物对环境的适应特点^[15], 本研究中小茨藻、狸藻、轮叶黑藻距离透明度轴较近, 距离水深、总氮、总磷、氨氮较远, 表明这 3 种沉水植物喜欢生活在清澈、营养盐含量相对较低的浅水中, 篦齿眼子菜、狐尾藻距离水深、总氮、总磷、氨氮轴较近, 表明这两种沉水植物喜欢生长在水深较深、营养盐丰富的水体中。大茨藻及亮叶眼子菜处于两个反差条件的中段, 表明这两种沉水植物在异龙湖水体中较其他种类更适宜变化较为频繁的水环境条件。

3 讨论

水环境因子是影响沉水植物生长发育、群落结构及空间分布的重要因子, 已有众多研究表明营养盐含量、水深及透明度等与沉水植物的生长发育密切相关^[16~18], 但异龙湖作为我国重要的湿地资源, 沉水植物与水环境因子的研究成果不足, 难以支撑湖泊管理单位制定水质与沉水植物保护的科学策略, 此外作为高原湖泊, 沉水植物与环境因子的相关性是否与常见淡水湖泊研究结果一直仍值得探讨。通过调查发现异龙湖水环境因子的空间差异性较大, 两条入湖河流的营养盐含量较高, 是异龙湖主要的

污染来源，西湖区水环境质量显著优于东湖区。Wang 等^[19]在安徽小枞河调查中发现，水质与水位对沉水植物具有重要影响，水质恶化会降低沉水植物的生物多样性，本研究在营养盐含量较高的东湖区与水深相似但营养盐含量较低的西湖区相比，沉水植物的物种数及生物量显著降低，表明透明度、总氮、总磷、氨氮等环境因子对沉水植物群落结构具有显著影响。氮磷等营养物质是沉水植物生长所必需的生命元素，适当的营养盐浓度对沉水植物的生长具有促进作用，过高的营养盐浓度可以促进藻类的生长与繁殖，间接的降低水体透明度，造成沉水植物的生长胁迫现象，致使部分营清水型生长的沉水植物不能生存，只有少数耐污种类存活，推动了沉水植物群落的演替，张萌等^[20]等人在太湖流域研究结果表明富营养化严重的区域沉水植物群落结构单一，生物量显著降低，这与本研究中的东湖区富营养化程度较高，沉水植物基本以篦齿眼子菜或狐尾藻组成的单一群落的调查结果高度一致，因此，降低东湖区的营养盐含量提高水体透明度是恢复沉水植物的重要技术措施。

电导率是水体中离子浓度的综合反映指标，袁婧等^[21]在北京湿地沉水植物群落研究中发现电导率是影响沉水植物分布的主要因子之一，但本文的 CCA 排序中并未发现相似结果，在异龙湖内沉水植物的空间分布与电导率相关性不大，究其原因可能是异龙湖水质处于相对稳态，各种价态的物质转化不活跃，沉水植物易吸收的硝酸盐氮并未出现较大的波动有关^[22]。pH 是沉水植物生存与繁衍的重要环境因子，过酸或过碱性水体通常会导致沉水植物是细胞失水，出现生长抑制甚至死亡的现象。研究表明其通过影响水体中无机碳源的存在形式，影响到沉水植物的生长发育，一般情况下，沉水植物容易利用的碳源为 CO_2 ，但随着 pH 的升高，水体中的碳源多转化为 HCO_3^- 或者 CO_3^{2-} ，从而使沉水植物的光合作用受阻^[23]。一般沉水植物适宜水环境约为 pH7~8 的弱碱性水体中，高于 9 的水体中，通常仅有有限物种存在。刘玲玲等^[24]实验结果表明，在高 pH 条件下，穗花狐尾藻和篦齿眼子菜都表现出较强的 HCO_3^- 利用能力，从而使其适应于高 pH 的水环境，结合本研究的数据分析，我们可以推测东湖区狐尾藻、篦齿眼子菜相对于小茨藻、轮叶黑藻等物种具有更好的高 pH 耐受性。CCA 排序表明，溶解氧对沉水植物的物种空间分布有重要影响，小茨藻、狸藻、轮叶黑藻及大茨藻分布在溶解氧较高的西湖区，篦齿眼子菜、狐尾藻分布在溶解氧较低的东湖区。芦娇娇等^[25]研究表明低溶解氧对可显著抑制沉水植物的呼吸作用，影响沉水植物的 C、N 循环，可见，在低溶氧环境下的东湖区篦齿眼子菜、狐尾藻、大茨藻因生长形态及发达根系等因素可抵抗一定的低溶氧环境，因此溶解氧也成为了东湖区恢复根系不发达的小茨藻、狸藻等沉水植物的主要限制因子之一。在异龙湖现状环境下，透明度、溶解氧及水深是影响沉水植物分布的主要环境因子，总氮、总磷、氨氮、pH 是影响沉水植物分布的次要环境因子，电导率对沉水植物的分布影响不大，鉴于东西湖水环境因子差距较大，不同湖区应采用不同的恢复策略、选取不同的恢复物种来制定沉水植物的恢复方案。西湖区溶解氧、营养盐、透明度等指标空间分布上差异不大，水深成为西湖区沉水植物分布的决定性因子。东湖区各站点间、营养盐等变化不明显，溶解氧、透明度及水深是限制其沉水植物恢复的主要影响因子，但在当下透明度短时间内较难改善的情况下，需要依靠溶解氧及适宜的水深条件为沉水植物恢复区划定的基本条件。从恢复物种方面来看，西湖区恢复异龙湖土著或现有的沉水植物种类均可获得较大的成功率，东湖区受水深、透明度及溶解氧的影响，选择以恢复篦齿眼子菜、狐尾藻、大茨藻为先锋物种较容易获得成功。

4 结论

(1) 通过水质调查发现，东西湖区水质具有显著差异，西湖区优于东湖区。城河及城南河的总氮、总磷、氨氮均高于东西湖区，为入湖污染来源之一，需要采取一定的治理措施保障避免对异龙湖造成持续污染。

(2) 东西湖区沉水植物的空间分布具有显著差异，西湖区以小茨藻、狸藻、轮叶黑藻为优势种，东湖区篦齿眼子菜、狐尾藻为优势种，且西湖区沉水植物的生物量及物种丰度显著高于东湖区。

(3) 异龙湖沉水植物的群落结构特征受水环境因子的影响显著，水深、透明度、溶解氧是主要影响因子，总氮、总磷、氨氮及 pH 是次要影响因子，电导率未发现显著相关性。

参考文献:

-
- [1]周虹霞,刘卫云,孔德平,等.异龙湖湿地大型水生植物群落特征分析[J].环境科学与技术,2016,39(9):199-203.
- [2]李恒.云南高原湖泊水生植被的研究.云南植物研究[J],1980(2):113-141.
- [3]刘薇,宁平,孙鑫,等.异龙湖水质及水生生态系统演变趋势[J].环境科学与技术,2018,41:281-287.
- [4]TIAN C,WANG C,TIAN Y,et al.Root radial oxygen loss and the effects on rhizosphere microarea of two submerged plants[J].Polish Journal of Environmental Studies,2015(24):1795-1802.
- [5]XING X,DING S,LIU L,et al.Direct evidence for the enhanced acquisition of phosphorus in the rhizosphere of aquatic plants:A case study on Vallisneria spiralis. [J].Science of the Total Environment,2018,661-667:386-396.
- [6]VILA-COSTA M,PULIDO C,CHAPPUIS E,et al.Macrophyte landscape modulates lake ecosystem-level nitrogen losses through tightly coupled plant-microbe interactions[J].Limnology and Oceanography,2016,61(1):78-88.
- [7]ISHIKAWA K,HAGA H,INOUE E,et al.Determining suitable submerged macrophyte biomass in terms of dissolved oxygen concentration and biodiversity in the South Basin of Lake Biwa,Japan[J].Limnology,2018,20(5).
- [8]龚震,夏峰,吴学灿.滇池大型水生植物群落恢复示范工程研究[M].昆明:云南科技出版社,2003.
- [9]任久长,周红.滇池光照强度的垂直分布与沉水植物的光补偿深度[J].北京大学学报:自然科学版,1997(2):211-214.
- [10]李根保,李林,潘珉,等.滇池生态系统退化成因、格局特征与分区分布恢复策略[J].湖泊科学,2014,26(4):485-496.
- [11]严锦屏.石屏县异龙湖水资源现状探析[J].红河探索,2013(3):47-49.
- [12]国家环境保护总局.水和废水监测分析方法(第四版)[M].北京:中国环境科学出版社,2002:649-671.
- [13]覃红燕,李景德,邹冬生,等.涡河水生植被特征及分布成因[J].生态学杂志,2012,31(11):75-81.
- [14]侯长胜.基于最大流原理的湖泊富营养化机制研究[D].2014.
- [15]曹同,郭水良,高谦.应用排序分析藓类植物分类群分布与气候因素的关系[J].应用生态学报,2000(5):680-686.
- [16]田翠翠,郭传波,吴幸强.高邮湖沉水植物分布格局及其与水环境因子的关系[J].水生生物学报,2019,43(2):195-202.
- [17]王琦,高晓奇,肖能文,等.滇池沉水植物的分布格局及其水环境影响因子识别[J].湖泊科学,2018,30(1):157-170.
- [18]赵风斌,徐后涛,刘艳红,等.不同水深下异龙湖苦草的生长特性[J].湿地科学,2017,15(2):214-220.
- [19]WANG Y,HUANG Y L,HUANG Y L,et al.Survey and diversity analysis of aquatic plants in Xiaozhegao River of Chaohu Lake[J].Journal of Applied Ecology,2012,18(6):889-896.

-
- [20]张萌,倪乐意,徐军,等.鄱阳湖草滩湿地植物群落响应水位变化的周年动态特征分析[J].环境科学研究,2013,26(10):1057-1063.
- [21]袁婧,崔国发,雷霆.影响北京地区湿地沉水植物群落组成的主要水环境因子[J].生态学杂志,2009(11):2189-2196.
- [22]张建华.太湖犊山口站水体电导率与三氮关系的探求[J].江苏水利,1992(4):59-60.
- [23]任南,严国安,马剑敏,等.环境因子对东湖几种沉水植物生理的影响研究[J].武汉大学学报(自然科学版),1996(2):213-218.
- [24]刘玲玲.三种沉水植物无机碳利用机制研究[D].华中师范大学,2011.
- [25]卢姣姣,张萌,全水清,等.低氧、高铵和低光对沉水植物苦草(*Vallisneria natans*)生长与C-N代谢生理指标的影响特征[J].湖泊科学,30(4).