

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.04.004

水体高 pH 值对滇池生态修复的潜在影响

王寿兵, 隗琪, 陈浩, 姜钊茹

(复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433)

摘要:针对滇池存在 pH 值和蓝藻浓度双高的生态问题,利用自动监测周报数据,分析了 2004—2018 年滇池最有代表性的观音山断面 pH 值及其变化趋势,发现在该时段内, pH 值超标率普遍较高,极端 pH 值高达 10.4。结合相关文献,分析了高 pH 值对滇池生态修复中有重要作用的沉水植物、浮游动物和鱼类的限制作用以及对铜绿微囊藻和水华鱼腥藻的潜在促进作用。为更好地保障滇池生态治理成效和促进生态修复进程,建议加强滇池高 pH 值形成机制研究,加强入湖河流和牛栏江引水工程对滇池高 pH 值的减缓作用,加强滇池 pH 值内源污染治理研究和工程建设。

关键词:高 pH 值;生态修复;蓝藻;水华;内源污染;滇池

中图分类号:X32 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)04-0026-06

Potential influence of high pH value on ecological restoration of Dianchi Lake//WANG Shoubing, WEI Qi, CHEN Hao, JIANG Yiru(*Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China*)

Abstract: In response to the ecological problem of high pH and blue-green algae concentration in Dianchi Lake, using automatic monitoring weekly report data, the pH value and its change trend of the most representative Guanyinshan Section in Dianchi Lake from 2004 to 2018 were analyzed. It was found that during this period, the rate of pH exceeding the standard was generally high, with an extreme pH value as high as 10.38. Combined with relevant literature, the restrictive effect of high pH values on submerged plants, zooplankton, and fish that play an important role in ecological restoration of Dianchi Lake were analyzed, as well as their potential promoting influence on *Microcystis aeruginosa* and *Anabaena flos-aquae*. In order to better promote the effectiveness of ecological governance and ecological restoration process in Dianchi Lake, it is recommended to strengthen the research on the mechanism of high pH formation in Dianchi Lake, strengthen the alleviation effect of water diversion projects from rivers entering the lake and Niulan River on high pH in Dianchi Lake, and strengthen the research and engineering construction of endogenous pollution control of pH in Dianchi Lake.

Key words: high pH value; ecological restoration; blue-green algae; cyanobacterial bloom; endogenous pollution; Dianchi Lake

水体 pH 值作为一项重要的水质指标,不但直接影响水生动植物的生理机能,还会影响水体中各种生源要素和沉积物重金属组分^[1],从而间接影响动植物群落的生境适宜性。GB3838—2002《地表水环境质量标准》中规定 I ~ V 类水的 pH 限值均为 6~9,没有区分出不同水质类型间的差异,按此标准我国绝大部分自然湖泊的 pH 值都没有超标,因此湖泊中 pH 值的污染和治理问题在过去生态治理和修复中并未引起太多关注。

在我国的中大型富营养化湖泊中,滇池具有两个鲜明的特点:一是水体 pH 本底值高,对蓝藻水华

生长特别有利;二是蓝藻浓度特别高,其光合作用会进一步推升水体 pH 值。水体 pH 值过高和由此带来的生态问题是滇池不同于其他富营养化湖泊的明显特征之一。自 1996 年以来,尤其是在国家水体污染控制与治理科技重大专项(以下简称“水专项”)实施以来,围绕滇池生态恢复目标,开展了大量以外源和内源污染物治理、蓝藻打捞分离和外排、引水换水等为目的的试验研究和治理工程^[2-3],这些工作虽然在 N、P 等富营养化物质的削减和藻华控制方面取得了一些成效,但未从根本上改变滇池生态退化的问题^[4-5],并且针对降低 pH 值促进滇池生态修

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项资金资助项目(2012ZX07102-004)

作者简介:王寿兵(1970—),男,教授,博士,主要从事湖泊蓝藻水华控制和生态修复研究。E-mail:bswang@fudan.edu.cn

复的研究较少。鉴于此,本文以滇池最具代表性的外海观音山国控断面自动监测周报数据为基础,分析2004—2018年滇池pH值变化情况,并进一步研究滇池的高pH值对生态修复中重要的沉水植物、浮游动物和鱼类的潜在生态影响以及其对蓝藻水华的潜在促进作用,以期为滇池生态修复提供参考。

1 滇池 pH 值现状

从20世纪50年代和80年代公开出版的文献资料来看,尽管可能因监测季节或监测点位的不同而有所差异,但滇池在当时pH值均未超过9.0的GB3838—2002《地表水环境质量标准》标准上限值。如1957年9月26日(夏季)调查滇池pH值为8.3~8.5^[6];1978年4月6日(春季)上午10:10在外海观音山采集站测得pH值为6.0~6.7;1978年4月22日测得观音山采集站pH值为6.0~6.4^[7]。也有资料记录外海湖水的pH值一般在8.5左右,草海pH值比外海稍低,为7.5~8.0^[8]。由此可见,即使是在浮游藻类光合作用旺盛的夏季,滇池pH值在20世纪80年代之前也未发现超标现象。

根据中国环境监测总站公布的2004—2018年滇池各年的水质自动监测周报数据(简称“周报数据”),可得到该时段内滇池外海观音山国控断面各年pH最大、最小值和每周平均值的变化情况(图1)。由图1可见,观音山断面年均pH值较高,为8.4~9.1,各年周报中出现的pH最大值均超过9.0,尤其是2009年和2010年出现了两个历史上最高的pH周平均值,分别为10.4和10.0。各年pH最小值为7.2~8.3,也全部呈碱性,说明滇池本底pH值水平较高。从2004—2018年变化看,pH平均值从2010年之后开始呈现波动下降趋势,最大值从2009年开始呈现更为明显的波动下降趋势,水质略有好转的迹象;而每年pH最低值仍呈现无规律的波动,尚未出现明显的下降趋势。

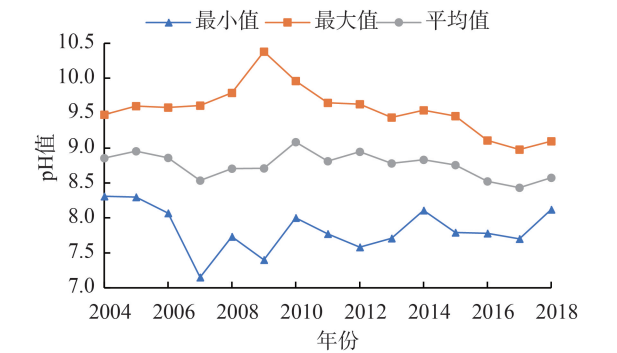


图1 2004—2018年观音山断面pH值变化

Fig.1 Changes of pH values of Guanyinshan Section from 2004 to 2018

图2为2004—2018年不同pH值范围出现周数占当年总监测周数的比例情况。从pH值在9.0以上的超标周数比例来看,除2017年未出现超标周外,其余各年均出现了程度不同的超标周,其中超标最为严重的是2012年,pH周均值超标率高达51.02%。其次是2005年、2006年、2014年和2009年,pH周均值超标率分别为39.22%、37.74%、36.54%和36.36%。从严重超标(pH值大于9.5)的年份比例看,2004—2018年中有10个年份出现了严重超标现象,占66.7%;尤其是2009年,严重超标的周数比例达到了全年的22.73%。可见,滇池pH值超标的情况较为严重,高pH值污染的治理不容忽视。

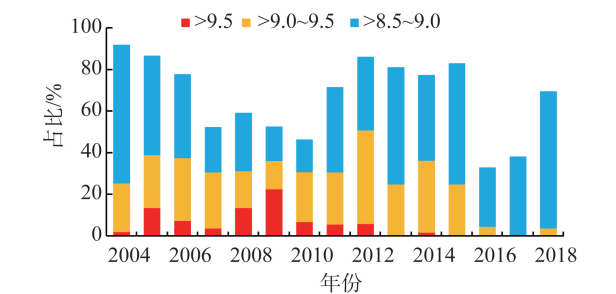


图2 2004—2018年不同pH值范围占比

Fig.2 Proportion of different pH ranges from 2004 to 2018

2 滇池高pH值对生物群落的潜在影响

2.1 对沉水植物恢复的影响

湖泊生态修复成功的标志之一就是沉水植物的恢复,滇池沉水植物无论从分布面积还是物种数方面都存在严重退化。仅高等沉水植物物种数已从20世纪50年代的19种锐减到2010年的7种^[9]。2000年以来,在水专项的支持下滇池在沉水植物恢复方面开展了不少技术研发和工程示范工作,但总体而言尚未见到好的推广成效。

沉水植物的生长除了需要光照外,最为重要的是水体pH值的生态适宜度。研究发现,除狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)和苦草(*Vallisneria spiralis*)因其可利用较低水平的CO₂,并在高pH值水体中对HCO₃⁻的利用能力大大加强,从而具有较强的水体高pH值耐受能力(9.0以上之处)^[10],其余如菹草(*Potamogeton crispus*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)、伊乐藻(*Elodea nuttallii*)、大茨藻(*Najas major* All.)等多种重要的沉水植物均难以适应滇池水体的高pH值条件。高pH值对菹草生长的抑制作用已得到多项研究的验证,如金送笛等^[11-12]研究表明,水体pH值为7.8~11.2时,平均产氧率随pH值的上升而降

低,对菹草光合抑制作用愈发严重,而在低光照和高 pH 值条件下缺乏有效碳源会使菹草的氮、磷代谢受阻而导致衰败死亡^[12];苏胜齐等^[13]研究发现 pH 值为 5.0~11.0 时,菹草顶枝的净产氧量、毛产氧量与 pH 值呈线性负相关,当 pH 值达 9.6 时,其净产氧量即为 0。由图 1 和图 2 可见,2004—2018 年,滇池有些年份的 pH 均值超过 9.5 以上的时间有数周之多,显然,滇池的高 pH 值会对菹草的生存和恢复造成一定的制约。针对金鱼藻的研究结果虽然稍有差异,但总体上也表明其并不能适应滇池的高 pH 值环境,如陈刚等^[14-15]研究表明金鱼藻最适 pH 值为 7.0~8.0,当 pH 值为 8.5 时,其净光合速率开始下降,当 pH 值为 9.0 时,净光合速率相对最高值有较大幅度的下降,在 pH 值为 7.0~9.0 的范围内金鱼藻的叶绿素含量和光合速率较高,pH 值高于 10.0 时其叶绿素含量和光合速率即下降;任南等^[10]研究表明金鱼藻净产氧量在 pH 值达到 9.0 之后快速下降,到 pH 值为 10.0 时,下降到接近 0 的水平。因此,对金鱼藻而言,滇池的高 pH 值环境同样不利于其生长和生存。另外,针对轮叶黑藻、伊乐藻和大茨藻的研究结果也不容乐观,如张浏等^[16]研究表明,当水体 pH 值达到 9.0 时,在中等和富营养化两种水质状态下,轮叶黑藻生长均受到胁迫,而在 pH 值达到 10.0 时,富营养化水体中轮叶黑藻已不能生长;陈灿等^[17]研究表明伊乐藻在弱碱性 (pH 值为 8.0) 水环境中光合生理机能处于较佳的状态,但湖泊中 pH 值长期高于 9.0 将对其造成胁迫,导致光合色素含量下降,正常的光合生理过程受阻,不利于种群生存和扩张。与菹草相似,大茨藻也是在 pH 值达到 9.0 之后净产氧量快速下降,到 pH 值为 10.0 时下降到接近 0 的水平^[10]。显然,滇池的高 pH 值环境难以满足上述 3 种沉水植物健康生存的需要。

以上分析可以看出,高 pH 值不但是造成滇池原有沉水植物逐渐退化直至消亡的重要因素之一,也是目前限制其生态恢复的重要制约因子之一。在滇池全年 pH 均值没有达标之前,即使投入大量的植株进行种植和恢复也可能难以成功。

2.2 对水生动物群落恢复的影响

健康的水生动物群落物种多样性水平高,既有单细胞的原生动物、多细胞的浮游动物,又有高级的底栖动物、爬行动物以及各种鱼类。水生动物群落恢复是一个湖泊生态系统真正恢复健康的标志,在生物群落中存在的复杂食物链、网关系是维系生物群落存在、发育和正常演替的重要机制。因此,关键环节物种的缺失将对整个生物群落的恢复形成严重制约。

原生动物最适宜的 pH 值为 6.5~8.0^[7]。富营

养化湖泊中因光合作用造成 pH 值升高,从而增加浮游动物死亡的现象早在 1972 年就被关注^[18]。而作为淡水鱼类良好天然饵料和自然水体食物链重要成员的萼花臂尾轮虫 (*Brachionus calyciflorus*),其适宜 pH 值为 6.5~8.5,最适值为 8.5,萼花臂尾轮虫繁殖的上限 pH 值为 9.5,超过此值其繁殖率几乎为 0^[19]。显然,滇池的高 pH 值是制约滇池浮游动物生存的重要原因。滇池土著鱼类消失严重,物种数曾由 20 世纪 60 年代的 26 种减少到 2000 年的 11 种,其中仅有鲫鱼 (*Carassius auratus*)、银白鱼 (*Anabarilius alburnops*)、泥鳅 (*Misgurnus anguillicaudatus*) 和黄鳝 (*Monopterus albus*) 生活于滇池湖体中,其余 7 种均生活于滇池湖周一些溪流的上游或溶洞中^[20]。

高 pH 值对鱼类等高等水生动物的影响在很久以前就已开始被关注,如张礼善^[21]的研究表明,在 25.1~27.5℃ 的水温下,平均体重分别为 0.87、2.17、2.11、6.30、7.52 g 的青鱼、草鱼、鲢鱼、鳙鱼和鲤鱼在 pH 值为 10.2 的条件下,72 h 内均未见死亡,说明在短期内高 pH 值不会对这些幼鱼产生生命威胁;但当 pH 值上升到 10.4 之后,除鲤鱼没有出现死亡外,青鱼、草鱼、鲢鱼、鳙鱼的死亡率分别达到了 20%、23%、54% 和 89%。由此可见,青鱼、草鱼、鲢鱼、鳙鱼在短期内能耐受的 pH 值不能超过 10.4,尤其是鳙鱼和鲢鱼受影响更大。在实际生产中,当 pH 值大于 9.0 时,即出现了草鱼大量死亡的现象^[22]。对滇池湖体内已消失的土著鱼昆明裂腹鱼 (*Schizothorax grahami*) 的研究表明,其幼鱼生存的最适 pH 值为 4.7~9.6,而 pH 值为 10.3 时,48 h 内存活率仅为 18.5%^[23]。同样为云南野生土著鱼类的光唇裂腹鱼 (*Schizothorax lissolabiatu*),当 pH 值为 10.1 和 10.3 时,持续 96 h 死亡率可分别达 30% 和 50%^[24]。2009 年滇池观音山监测点的 pH 周平均值中,最大值一度高达 10.4,对青鱼、草鱼、鲢鱼、鳙鱼、昆明裂腹鱼和光唇裂腹鱼而言均已达到致死水平。

2.3 对有害蓝藻繁殖的影响

有研究表明,蓝藻在碱性条件下生长更好^[25]。对于滇池最为常见的水华蓝藻——铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 来说,其最适 pH 值虽然因为生长条件或菌株不同而有一定差异,但其适宜的 pH 值几乎都集中在 8.0~10.0 范围内,而最佳 pH 值则多在 9.0~10.0 之间。如陈建中等^[26]的研究表明最适宜铜绿微囊藻生长的初始 pH 值为 8.0~9.0;许海等^[27-28]研究发现铜绿微囊藻最适 pH 值为 9.0;Wei 等^[29]研究发现初始 pH 值为 9.0 和 10.0 的

培养组,其铜绿微囊藻密度的增长状况基本一致,其最适 pH 值约为 9.6;Gerloef 等^[30-31]的研究表明菌株 1036 的铜绿微囊藻最适 pH 值为 10.0,菌株 NRC-1 在 pH 值为 8.0~11.0 的培养基中获得了最大产量;Chandra 等^[32]在研究了 pH 值对多种蓝藻生长的影响之后发现,虽然总体上蓝藻更喜欢 pH 值为 7.5~8.0 的微碱性条件,但铜绿微囊藻在 pH 值为 9.0~10.0 的条件下生长良好。除了铜绿微囊藻外,水华鱼腥藻(*Anabaena flos-aquae*)也同样喜欢偏碱性的环境,如陈家长等^[33]的研究表明,在试验所设 pH 值条件下,无论在单种培养体系还是共同培养体系中,水华鱼腥藻的最大现存量都随着 pH 值的升高而增加,其最适 pH 值均为 9.0;许海等^[27]也发现水华鱼腥藻适宜的 pH 值为 8.0~9.0。

由上可见,无论是常见的铜绿微囊藻还是水华鱼腥藻,喜好的 pH 值均为 8.0 以上的碱性环境,尤其以 9.0 左右为最佳。而滇池的 pH 值无论是全年,还是冬季低温季节,其平均值均在 8.0 以上,尤其在温暖季节,大多数时间都在 9.0 以上,因此特别适合这两类水华蓝藻的繁殖。而蓝藻水华暴发带来的水体透明度下降、溶解氧急剧波动、pH 值升高、非离子氨浓度升高、二氧化碳浓度下降等又会进一步影响沉水植物和水生动物的生存,阻遏水体生态恢复进程。

3 对策建议

滇池的高 pH 值主要与其碳酸盐岩发育的地质背景和高密度浮游藻类的光合作用有关。总体而言,在低温季节,浮游藻类密度更低,光合作用强度更弱,对水体 CO₂ 吸收较少,从而对水体中 H₂CO₃ 浓度影响较小,此时水体 pH 值主要是由地质背景因素决定的,因而在全年中处于相对较低水平。而随着水温的升高,浮游藻类尤其是蓝藻水华暴发,藻密度大幅上升,光合作用吸收 CO₂ 较多,在地质背景因素的叠加作用下,出现了 pH 值超高的现象。鉴于此,提出以下几点建议:

a. 进一步加强滇池高 pH 值形成机制研究。造成滇池高 pH 值的因素有很多,既有理化因素又有生物因素,但每种因素的贡献大小及随时间和空间的变化特征,尤其是基底碳酸盐储量及释放规律、牛栏江引水工程对滇池 pH 值的影响等都尚未有系统和深入的研究。另外,理化因素和水华蓝藻之间的相互作用如何综合影响滇池 pH 值及其动态等都需要进一步研究。

b. 进一步加强入湖河流对滇池高 pH 值的减缓作用。滇池主要入湖河流的 pH 值为 6.5~7.8,宝象河的 pH 值最高,均值为 7.3,其次是盘龙江和

柴河,均值分别为 7.1 和 7.0,最低的是捞鱼河,均值为 6.8^[34]。pH 值相对较低的入湖河流为降低滇池 pH 值发挥了重要的作用。未来需要更加密切监控各入湖河流 pH 值的变化,减少沿途碳酸盐等碱性物质的输入量,争取有更多 pH 值更低的河水进入滇池进行交换和缓冲。

c. 加强牛栏江引水工程对滇池高 pH 值的减缓作用。牛栏江引水工程对滇池 N、P 等富营养物质浓度的减缓作用已得到较多关注,但对滇池高 pH 值的减缓作用尚未得到很好的研究和认知。牛栏江调水水源的 pH 值在 2012 年和 2013 年监测时高达 8.3 和 8.5^[35],虽然比滇池 pH 全年周平均值略低,但比其最低值高,同时也远高于其他入湖河流的 pH 值,显然,在不同季节牛栏江引水入滇对 pH 值的影响是不同的。因此必须加强牛栏江引水对滇池 pH 值的作用规律研究,做到更加科学地引水。

d. 加强滇池 pH 内源污染治理研究和工程建设。目前在滇池 N、P、COD、水华蓝藻以及底泥等内源污染的治理方面已开展了大量研究和工程建设,但针对 pH 污染治理的研究和工程建设还十分鲜见。即使在冬季浮游植物密度大幅降低,光合作用吸收二氧化碳大幅减少的情况下,滇池 pH 值仍然远高于入湖河流,说明其内源污染的持续作用和累积作用十分强烈,必须加强这方面的科学认知,研发直接针对内源 pH 污染的治理技术,加强相关污染治理工程建设。

4 结 语

本文分析了 2004—2018 年滇池最有代表性的观音山断面 pH 值及其变化趋势,发现滇池全年 pH 值明显高于其他大中型富营养化湖泊。在温暖季节,在高密度水华蓝藻的作用下,滇池 pH 值大幅升高,周报监测值在 9.0 以上的比例较高,最高值一度达到大型湖泊中极为罕见的 10.4。高 pH 值将对滇池植物群落生态恢复所需要的重要沉水植物(如菹草、金鱼藻、轮叶黑藻、大茨藻等)产生严重的制约作用,同时对水生动物群落生态恢复所需要的浮游动物(如萼花臂尾轮虫)和鱼类(如可摄食蓝藻的鲢鳙鱼以及土著种昆明裂腹鱼、光唇裂腹鱼等)造成严重的危害。高 pH 值将对水华蓝藻的增殖产生促进作用,从而进一步恶化其他有益生物生境,阻遏生态恢复进程。为更好地促进滇池生态治理成效和生态恢复进程,建议进一步加强滇池高 pH 值形成机制研究、加强入湖河流和牛栏江引水工程对滇池高 pH 值的减缓作用,同时加强滇池 pH 内源污染治理研究和工程建设。

参考文献:

- [1] NUR R, BATES M H. The effects of pH on the aluminum, iron and calcium phosphate fraction of lake sediments [J]. Water Research, 1979(13): 813-815.
- [2] 毛建忠,孙燕利,贺克雕,等. 牛栏江-滇池补水工程对滇池外海的水环境改善效果研究[J]. 水资源保护, 2017,33(2):47-51. (MAO Jianzhong, SUN Yanli, HE Kediao, et al. Study of water environment improvement effect by Niulan River-Dianchi Lake Water Supplement Project in Waihai area of Dianchi Lake [J]. Water Resource Protection, 2017, 33 (2): 47-51. (in Chinese))
- [3] 王琦,刘高慧,肖能文,等. 不同生物联合对滇池草海水质的净化作用[J]. 水资源保护, 2020,36(3):89-97. (WANG Qi, LIU Gaohui, XIAO Nengwen, et al. Purification effect of combination of different organisms on water quality of Caohai of Dianchi Lake [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (3): 89-97. (in Chinese))
- [4] 汤茵琪,任心欣,孔露霆,等. 城市河流系统治理策略在鹅颈水生态修复中的应用[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 88-93. (TANG Yinqi, REN Xinxin, KONG Luting, et al. Application of integrated urban river management strategy in Ejingshui River ecological restoration [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (6): 88-93. (in Chinese))
- [5] 张列宇,祝秋恒,李晓光,等. 磁化诱导技术在水生态修复中的应用与研究展望[J]. 水资源保护, 2021,37(1): 132-139. (ZHANG Lieyu, ZHU Qiuhe, LI Xiaoguang, et al. Application and prospect of magnetization induction technology in water ecological restoration [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (1):132-139. (in Chinese))
- [6] 黎尚豪,俞敏娟,李光正,等. 云南高原湖泊调查[J]. 海洋与湖沼, 1963,5(2):87-114. (LI Shanghao, YU Minjuan, LI Guangzheng, et al. Limnological survey of the lakes of Yunnan plateau [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1963, 5(2): 87-114. (in Chinese))
- [7] 程量. 云南滇池水系的原生动物及其与水污染的关系 [A]. 见:《滇池污染与水生生物》研究课题协作组编著. 滇池污染与水生生物. 昆明:云南人民出版社, 1983:16-29.
- [8] 段金书,何纪昌,刘振华. 滇池的自然概况 [C]//《滇池污染与水生生物》研究课题协作组. 滇池污染与水生生物. 昆明:云南人民出版社, 1983:1-6.
- [9] 王寿兵,徐紫然,张洁. 滇池高等沉水植物 50 年变迁状况对生态修复的启示[J]. 水资源保护, 2016,32(6): 1-5. (WANG Shoubing, XU Ziran, ZHANG Jie. Dynamic changes of higher submerged macrophytes in Dianchi lake in recent 50 years and implication for ecological restoration [J]. Water Resource Protection, 2016,32(6):1-5. (in Chinese))
- [10] 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), 1996,42(2):213-218. (REN Nan, YAN Guoan, MA Jianmin, et al. The study on the influence of environmental factors of the submerged macrophytes in the east lake [J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 1996, 42 (2): 213-218. (in Chinese))
- [11] 金送笛,李永函,王永利. 几种生态因子对菹草光合作用的影响[J]. 水生生物学报, 1991,15(4):295-302. (JIN Songdi, LI Yonghan, WANG Yongli. Effects of ecological factors on photosynthesis of *Potamogeton crispus* [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1991, 15 (4): 295-302. (in Chinese))
- [12] 金送笛,李永函,陶永明. 有效碳对菹草光合作用及吸收氮、磷的影响[J]. 大连水产学院学报, 1994,9(1/2):6-11. (JIN Songdi, LI Yonghan, TAO Yongming. Effects of available carbons on nitrogen and phosphorus uptaking and the photosynthesis by *Potamogeton crispus* [J]. Journal of Dalian Fisheries College, 1994, 9 (1/2): 6-11. (in Chinese))
- [13] 苏胜齐,沈益绿,唐洪玉,等. 温度、光照和 pH 对菹草光合作用的影响[J]. 西南农业大学学报, 2001,23(6):532-535. (SU Shengqi, SHEN Anglu, TANG Hongyu, et al. Effects of temperature, light intensity and pH on photosynthesis in *Potamogeton crispus* [J]. Journal of Southwest Agricultural University, 2001, 23 (6): 532-535. (in Chinese))
- [14] 陈刚,谢田,莫非. 光照、NaHCO₃ 和 pH 值对金鱼藻光合作用的影响[J]. 贵州环保科技, 2004,10(4):16-19. (CHEN Gang, XIE Tian, MO Fei. Effects of light, NaHCO₃ and pH on photosynthesis of *Ceratophyllum demersum* [J]. Guizhou Environmental Protection Science and Technology, 2004,10(4):16-19. (in Chinese))
- [15] 陈刚,龙茜,李谢颖,等. 不同 pH 值对金鱼藻光合作用及叶绿素荧光特性的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2015,36(1):65-71. (CHEN Gang, LONG Xi, LI Xieying, et al. Effects of pH on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characters in *Ceratophyllum demersum* [J]. Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition), 2015, 36(1): 65-71. (in Chinese))
- [16] 张浏,陈灿,高倩,等. 两种营养状态下 pH 对轮叶黑藻 (*Hydrilla verticillata*) 生长和抗氧化酶活性的影响[J]. 生态环境, 2007,16(3):748-752. (ZHANG Liu, CHEN Can, GAO Qian, et al. Effects of pH on the growth of *Hydrilla verticillata* and its antioxidative enzyme activities under two nutritional conditions [J]. Ecology and Environment, 2007, 16(3): 748-752. (in Chinese))
- [17] 陈灿,龚艳,李研. 不同光强下 pH 对伊乐藻光合机能的影响[J]. 湖南林业科技, 2009, 36(1):15-18.

- (CHEN Can, GONG Yan, LI Yan. Effect of pH on *Elodea mutallii* under different light conditions [J]. Hunan Forestry Science and Technology, 2009, 36(1): 15-18. (in Chinese))
- [18] O'BRIEN W J, DENOYELLES J R F. Photosynthetically elevated pH as a factor in zooplankton mortality in nutrient enriched ponds [J]. Ecology, 1972, 53(4): 605-614.
- [19] 王金秋, 李德尚, 罗一兵, 等. pH 值对蓴花臂尾轮虫种群增长及繁殖的影响 [J]. 应用生态学报, 1997, 8(4): 435-438. (WANG Jingui, LI Deshang, LUO Yibing, et al. Influence of medium pH on population growth and reproduction of *Brachionus calyciflorus* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1997, 8(4): 435-438. (in Chinese))
- [20] 陈自明, 杨君兴, 苏瑞凤, 等. 滇池土著鱼类现状 [J]. 生物多样性, 2001, 9(4): 407-413. (CHEN Ziming, YANG Junxing, SU Ruifeng, et al. Present status of the indigenous fishes in Dianchi lake, Yunnan [J]. Biodiversity Science, 2001, 9(4): 407-413. (in Chinese))
- [21] 张礼善. 青、草、鲢、鳙、鲤对氢离子浓度的生存适应性 [J]. 水生生物学集刊, 1960(2): 134-144. (ZHANG Lishan. The survival adaptability to hydrogen ion concentration of *Mylopharyngodon piceus*, *Ctenopharyngodon idellus*, *Hypophthalmichthys molitrix*, *Aristichthys nobilis* and *Cyprinus carpio* [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1960(2): 134-144. (in Chinese))
- [22] 程星红. 由水体 pH 值过高引起的草鱼鱼种死亡案例分析 [J]. 科学养鱼, 2011(6): 60. (CHENG Xinghong. Case analysis of grass carp species death caused by high water pH value [J]. Scientific Fish Farming, 2011(6): 60. (in Chinese))
- [23] 胡思玉, 蔡江燕, 赵海涛, 等. pH 对昆明裂腹鱼幼鱼生存的影响 [J]. 湖北农业科学, 2014, 53(2): 389-391. (HU Siyu, CAI Jiangyan, ZHAO Haitao, et al. Effects of pH on Growth of Juveniles of *Schizothorax graham* [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2014, 53(2): 389-391. (in Chinese))
- [24] 金方彭, 李光华, 高海涛, 等. 光唇裂腹鱼幼鱼对温度、盐度、pH 的耐受性试验 [J]. 水产科技情报, 2016, 43(6): 303-307. (JIN Fangpeng, LI Guanghua, GAO Haitao, et al. Tolerance test of temperature, salinity and pH of juvenile *Schizothorax lissolabiatu*s [J]. Aquatic Science and Technology Information, 2016, 43(6): 303-307. (in Chinese))
- [25] FOGG G E. The comparative physiology and biochemistry of the blue-green algae [J]. Bacteriological Reviews, 1956, 20: 148-165.
- [26] 陈建中, 刘志礼, 李晓明, 等. 温度、pH 和氮、磷含量对铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 生长的影响 [J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(5): 714-718. (CHEN Jianzhong, LIU Zhili, LI Xiaoming, et al. Effects of temperature, pH, nitrogen and phosphorus on growth of *Microcystis aeruginosa* [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2010, 41(5): 714-718. (in Chinese))
- [27] 许海, 刘兆普, 袁兰, 等. pH 对几种淡水藻类生长的影响 [J]. 环境科学与技术, 2009, 32(1): 27-30. (XU Hai, LIU Zhaopu, YUAN Lan, et al. Effect of pH on growth of several freshwater algae [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 32(1): 27-30. (in Chinese))
- [28] 薛凌展, 黄种持, 林泽, 等. 铜绿微囊藻和普通小球藻在不同 pH 下生长特性及竞争参数计算 [J]. 福建农业学报, 2010, 25(2): 142-148. (XUE Lingzhan, HUANG Zhongchi, LIN Ze, et al. Growth and competitiveness of *Microcystis aeruginosa* and *Chlorella vulgaris* at varying pH [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2010, 25(2): 142-148. (in Chinese))
- [29] WEI S J, ZHUANG G J, CHENG L R J, et al. The proliferation rule of *Microcystis aeruginosa* under different initial pH conditions and its influence on the pH value of the environment [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29: 13835-13844.
- [30] GERLOEF G C, FITZGERALD G P, SKOOG F. The mineral nutrition of *Microcystis aeruginosa* [J]. American Journal of Botany, 1952, 39: 26-32.
- [31] ZEHNDER A, GORHAM P R. Factors influencing the growth of *Microcystis aeruginosa* Kütz, Emend, Elenkin [J]. Canadian Journal of Microbiology, 1960, 6: 645-660.
- [32] CHANDRA S K, RAJASHEKHAR M. Effect of pH on freshwater cyanobacteria isolated from different habitats of southern Karnataka [J]. International Journal of Life Sciences and Technology, 2016, 9(7): 56-64.
- [33] 陈家长, 王菁, 裘丽萍, 等. pH 对鱼腥藻和普通小球藻生长竞争的影响 [J]. 生态环境学报, 2014, 23(2): 289-294. (CHEN Jiazhang, WANG Jing, QIU Liping, et al. Effect of pH on growth and competition of *Chlorella vulga* and *Anabaena sp.* strain PCC [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(2): 289-294. (in Chinese))
- [34] 岑言霸, 苏斌, 冯泽波, 等. 滇池入湖河流 pH 时空分异特征及其变化机理 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(26): 11432-11442. (CEN Yanba, SU Bin, FENG Zebo, et al. Temporal and spatial variation characteristics and change mechanism of pH value of the rivers flowing into Dianchi Lake [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(26): 11432-11442. (in Chinese))
- [35] 李发荣, 陈云进, 李晓铭, 等. 牛栏江调水对滇池湖泊水质影响的分析研究 [C]//中国环境科学学会学术年会论文集, 成都: 2014.

(收稿日期: 2022-05-28 编辑: 王芳)