

大冶湖水体光学特性的季节变化及其影响因子

任伟祥, 吴晓东, 葛绪广, 罗楚玉, 龙紫洁, 廖泽勇

(湖北师范大学城市与环境学院, 湖北黄石 435002)

摘要: 基于 2018 年对大冶湖全湖四季的野外调查与水质监测, 结合大冶湖的形态, 将研究范围划分为西区和东区两大部分, 均匀设置 15 个采样点, 在 1、4、8、10 月对各点位进行水样采集; 通过分析水体光学衰减系数(K_d)、真光层深度(Z_{eu})及其他水体光学特性重要参数, 得到大冶湖周年的光合有效辐射(PAR)衰减特性, 可为大冶湖流域生态管理及沉水植物恢复提供参考。结果显示: (1) 大冶湖的 K_d 在季节上以冬季最低, 夏季最高, 平均值为 3.17 /m, 由春至秋的季节变化不明显; (2) 大冶湖水体光学特性最主要的影响因子为叶绿素 a(Chl-a)、悬浮物(SS)和溶解性有机物(DOM), 相关系数最高分别达到 0.606、0.445 和 0.419, 是限制水体 K_d 的主要因子, 关系式为: $K_d = 0.019\text{Chl-a} + 0.011\text{SS} - 0.029\text{DOM} + 2.364$, 降低水体 Chl-a、SS 和 DOM 浓度成为改善大冶湖水体光学特性的重要内容; (3) 大冶湖适宜进行沉水植物恢复的季节为春季, 全湖其他季节的光学阈值(真光层深度/水深, Z_{eu}/D_w)均小于 1, 不利于沉水植物的萌发生长, 恢复区域以磊山、蚌壳岭以东湖区、南部湖区沿岸浅水地带以及湖西侧的河道浅滩为宜。

关键词: 大冶湖; 光合有效辐射; 透明度; 沉水植物; 真光层深度

中图分类号: X171.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2021)03-0079-07

大冶湖位于湖北黄石境内(29°52' ~ 30°12' N, 114°39' ~ 115°24' E), 界跨黄石市、大冶市、阳新县, 流域面积 1 106 km², 水域面积 63.4 km²; 湖区呈西北、东南走向, 长约 30 km, 湖岸线长 139.8 km, 是典型的浅水型湖泊, 蓄水量 0.5 亿~2.0 亿 m³ (尹发能和陆俊, 2015)。由于流域内蕴藏着丰富的矿产资源, 从 20 世纪初开始, 大冶的采矿与金属冶炼行业盛行, 大量的工业废水排入湖内, 水生态环境遭受到严重破坏。近年来, 大冶市城镇化加快, 养殖业也发展迅速, 但环保设施建设相对滞后, 使大冶湖不仅受重金属污染严重, 还出现了水体富营养化(鲁珍等, 2012)。

水体中的光合有效辐射(photosynthetically active radiation, PAR)对湖泊生态系统有很大的影响(王华等, 2008; Karlsson et al, 2009; 吴明丽和李叙勇, 2012), 其能够直观反映水体的浑浊程度, 描述水下光场的分布特点, 是影响沉水植物生长的重要因

子之一(张运林等, 2003; 摆晓虎等, 2016)。有研究表明, 水体悬浮物、浮游植物、有色可溶性有机物(chromophoric dissolved organic matter, CDOM)是影响一般浅水湖泊水体 PAR 的主要因素。不同类型的湖泊在不同的季节, 影响其 PAR 衰减特性的主要因子也不尽相同。例如: 尚盈辛等(2018)对青藏高原的 13 个典型湖库光合吸收特性进行研究, 认为该地区湖库的光合有效辐射衰减系数受 CDOM 的影响最大, 叶绿素 a(Chl-a)浓度次之; 何尚卫等(2014)发现漏湖水体光学特性的主要影响因子为 Chl-a 和悬浮物(SS); 张运林等(2005)对龙感湖的水体光学特性研究表明, 其 PAR 衰减主要影响因子为 SS, 其次为溶解性有机碳(DOC)和浮游植物; 夏季太湖的光学衰减系数增加, 可归结于浮游植物的大量繁殖和风生沉积物再悬浮(Shi et al, 2014)。若湖泊水体的 PAR 衰减过于剧烈, 则可能无法使沉水植物获得生长所需要的足够光照, 进而使沉水植物出现衰亡(邹丽莎等, 2013)。因此, 若要对某一湖泊进行沉水植物恢复, 就有必要对水体 PAR 特性及其主要环境影响因子进行基础性调查, 否则, 盲目地对沉水植物进行修复很容易失败, 并导致不必要的人力和资金浪费(何尚卫等, 2014)。本文通过探究大冶湖水体的光学特性及其季节变化规律, 旨在为沉水植物的修复和管理提供参考。

收稿日期: 2019-07-01 修回日期: 2020-12-29

基金项目: 湖北省教育厅项目(Q20182502, D20152503); 湖北师范大学湖泊流域重金属污染机理与生态修复创新团队项目。

作者简介: 任伟祥, 1998 年生, 男, 本科生, 专业方向为水环境生态修复。E-mail: 1571431265@qq.com

通信作者: 吴晓东, 1985 年生, 男, 博士, 讲师, 主要从事水污染控制与生态修复教研工作。E-mail: wuxd03@163.com

1 材料与方法

1.1 样点设置与采样时间

结合大冶湖的形态,均匀设置了15个采样点(图1)。若以4号与12号为界,可将研究范围划分为西区和东区两大部分。分别于2018年1月、4月、8月和10月对各点位进行水样采集,采样时间集中在9:00~15:00;其中,2018年1月由于冬季水位降低,部分湖区水样无法采集,仅有1~7号和13~15号水样。

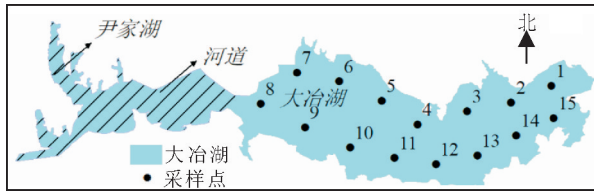


图1 大冶湖采样点分布

Fig.1 Location of sampling stations in Daye Lake

1.2 采样方法与指标测定

在大冶湖采样过程中,现场测定各设定点位的水深(D_w)、透明度(SD)、光合有效辐射(PAR)。其中,SD采用直径30 cm的黑白塞氏盘测定;PAR采用上海嘉定学联仪表厂生产的ZDS-10W型照度计测定。春季和夏季水深较深,测定时由水面开始向下每隔0.2 m设一层测定一组数据,每组有3个数据,取其平均值为本层PAR强度;冬季枯水期由于水深较浅,仪器下降梯度改为0.1 m,其他方法相同。

使用2.5 L聚乙烯瓶采集混合水样至室内分析,测定指标包括浊度(Turb)、总磷(TP)、总氮(TN)、悬浮物(SS)、有机悬浮物(OSS)、无机悬浮物(ISS)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、溶解性有机物(DOM)和叶绿素a(Chl-a)。水样通过0.45 μm的滤膜过滤后,滤液用来检测溶解性有机碳(DOC)与DOM,其中Turb采用EXO₂(YSI,美国)便携式水质监测仪测定。

SS采用GF/F滤膜(550℃下煅烧过)抽滤之后,在105℃下烘干30 min后称重测定,之后在550℃下煅烧3 h去除有机成分以测得ISS,二者之差为OSS(谌沁祎等,2014)。TP采用钼锑抗分光光度法,TN采用过硫酸钾氧化、紫外分光光度法,COD_{Mn}采用酸性法,Chl-a采用90%丙酮法,其方法均按照《水和废水监测分析方法》(第四版)进行测定(国家环境保护总局,2002)。DOM采用紫外分光

光度法进行测定,将盛有滤液的比色皿置于紫外-可见分光光度计(UV2700,岛津)中,以超纯水做参比,扫描其在200~800 nm、每隔1 nm处的吸光度值(Chen et al,2018)。

1.3 指标处理与计算

吸收系数计算公式如下:

$$a'(\lambda) = \frac{2.303A(\lambda)}{L} \quad (1)$$

为了避免部分细小的颗粒物通过滤膜,并对吸光度的测定产生干扰,采用式②对其进行校正(张欢等,2019):

$$a(\lambda) = a'(\lambda) - \frac{a(700)}{700} \quad (2)$$

式中: $a'(\lambda)$ 表示未经校正的在波长为 λ 处的吸收系数(/m); $A(\lambda)$ 为在波长 λ 处的样品的吸光度值; L 为比色皿的光程路径(m); $a(\lambda)$ 为校正之后的在波长为 λ 处的吸收系数(/m); $a(700)$ 为700 nm处的吸收系数(/m)。

在水体光学性质均一的条件下,PAR的衰减满足以下规律:

$$K_d = \frac{1}{z} \ln \frac{E_z}{E_0} \quad (3)$$

式中: z 表示从湖面到测量处的深度; E_z 和 E_0 分别表示在深度为 z 处和水表面下的PAR强度值; K_d 表示光学衰减系数,通过对不同深度水下PAR强度进行回归得到,其中回归系数 $R^2 \geq 0.95$,拟合深度个数 $N \geq 3$ 时, K_d 值才被接受(张运林等,2005)。

真光层深度(Z_{eu})一般是指辐照度为水体表面1%时的深度,通常采用下式进行计算(何尚卫等,2014):

$$Z_{eu} = \frac{\ln 100}{K_d} = \frac{4.605}{K_d} \quad (4)$$

1.4 数据统计与分析

由于不同季度的样本数不同,故对各指标各季度之间先进行了方差齐性检验。对于方差不齐的指标,将根据Welch检验和Brown-Forsythe检验的结果比较均值。

依据经纬度数据,利用ArcGIS 10.1软件作出大冶湖采样点分布图。利用Excel 2016和SPSS 21.0进行方差齐性检验、Welch检验、Brown-Forsythe检验、平均值、 K_d 值的拟合、线性回归与相关系数的统计分析,设定 $P < 0.01$ 为极显著, $P < 0.05$ 为显著, $P > 0.05$ 为不显著。

2 结果与分析

2.1 水质理化指标

大冶湖夏季为丰水期,水深可达 4.0 m 以上;冬季为枯水期,平均水深仅 1.4 m;周年平均水深为 2.7 m,水位变化较为显著。TN 除春季较低外,其余季节均较高,以秋季最大,年均浓度为 1.29 mg/L;TP 春秋较低,夏冬较高,年均浓度为 0.089 mg/L;水质总体呈现中度富营养化(表 1)。

表 1 大冶湖理化指标测定结果

Tab.1 Water physiochemical parameters of Daye Lake

指 标	季节与年度均值				
	春季	夏季	秋季	冬季	周年
水深/m	2.3	4.0	3.3	1.4	2.7
总氮/mg·L ⁻¹	0.30	0.75	1.29	0.89	0.76
总磷/mg·L ⁻¹	0.056	0.090	0.046	0.164	0.089
高锰酸盐指数/mg·L ⁻¹	5.05	5.13	3.46	3.43	4.27
叶绿素 a/μg·L ⁻¹	25.59	57.69	44.94	7.78	34.00
悬浮物/mg·L ⁻¹	22.13	54.93	24.47	20.53	30.52

2.2 光学衰减特性

时间上,大冶湖光学衰减系数(K_d)表现为:冬季<春季<秋季<夏季,且冬季的 K_d 显著低于夏季和秋季($P<0.05$),变化范围在 1.02~4.18 /m,平均值约为 2.47 /m(图 2-a)。 K_d 最大值出现在夏季,变化范围为 2.69~5.59 /m,平均值为 3.69 /m;春季的 K_d 显著低于秋季($P<0.05$),夏季与秋季以及春季、冬季与全年之间并无显著差异($P>0.05$)。全年来看, K_d 值变化较大,最小值为 1.02 /m,最大值为 5.59 /m,平均为 3.17 /m。空间上,大冶湖的 K_d 整体呈现出由西向东逐渐递减的趋势,此趋势在春季和秋季尤为明显。

2.3 透明度

大冶湖透明度(SD)的季节变化规律表现为:秋季<夏季<春季<冬季,秋季在 28~42 cm,平均值约为 36 cm,显著低于冬季($P<0.05$);而其他各季,包括季度与年际之间均没有显著差异($P>0.05$) (图 2-b)。冬季最高,在 24~81 cm,均值为 43 cm。从时间变化上来看,全年的 SD 变化并不大,虽然出现了个别较大的异常值(冬季 4 号 81 cm),但整体在 40 cm 附近波动。空间上,春夏两季东区的 SD 要极显著高于西区($P<0.01$)。

2.4 叶绿素 a

季节上,大冶湖叶绿素 a(Chl-a)的浓度变化表现为:冬季<春季<秋季<夏季(图 2-c)。冬季浓度为 3.67~12.50 μg/L,平均浓度为 7.78 μg/L,极显著低于春季、夏季、秋季和全年($P<0.01$);浓度

最高出现在夏季,为 38.25~94.32 μg/L,平均值为 57.69 μg/L,极显著高于春冬季和全年($P<0.01$)。全年的变化很大,最小为 3.67 μg/L,最大为 94.32 μg/L。空间上,由西向东逐渐递减,春夏两季均保持这一趋势,到了秋季便不甚明显;在冬季,Chl-a 浓度在递减之末出现反增。

2.5 浊度

大冶湖的浊度(Turb)表现为:冬季<夏季<春季<秋季,冬季的 Turb 显著低于秋季($P<0.05$),为 3.94~39.54 mg/L,均值为 18.30 mg/L(图 2-d)。秋季最高,为 21.16~31.15 mg/L,平均值为 30.05 mg/L,显著高于冬季($P<0.05$)。季节变化不明显,除冬季外,其他季节基本较为稳定,最高浓度为 42.76 mg/L,最低浓度为 3.94 mg/L,平均值为 25.93 mg/L。从空间上看,大冶湖在春季由西向东呈逐渐增高趋势,而在其他季度均表现为西区高于东区,尤以冬季极为显著($P<0.01$)。

2.6 溶解性有机物

水体中的溶解性有机物(DOM)成分组成十分复杂,是包括了腐殖酸、富里酸等一系列物质的复杂混合物,本文采用水样在 350 nm 波长处的吸收系数表征其浓度(Coble,1996;Zhang et al,2010;刘笑菡等,2012;吴晓东等,2020)(图 2-e)。季节上,大冶湖 DOM 冬季吸收系数最小,为 1.84~4.26 /m,平均值为 2.58 /m,显著低于秋季($P<0.05$)、极显著低于夏季和全年($P<0.01$)。夏季 DOM 吸收系数最大,为 9.90~10.94 /m,平均值为 10.35 /m,极显著高于春季、秋季、冬季和全年($P<0.01$)。从全年来看,大冶湖的 DOM 变化明显,季节特性强,最大吸收系数为 10.94 /m,最小吸收系数为 1.84 /m。空间格局上看,大冶湖的 DOM 在春夏两季呈现由西向东逐渐减少的分布规律,而在秋冬两季分布比较均匀。

2.7 悬浮物

大冶湖冬季的悬浮物(SS)浓度值最小,在 10.20~35.04 mg/L,平均值为 20.53 mg/L,极显著低于夏季($P<0.01$)、春季和全年($P<0.05$)(图 2-f)。最大值出现在夏季,为 43.87~62.20 mg/L,平均值为 54.93 mg/L,极显著高于春季、秋季、冬季和全年($P<0.01$)。SS 全年变化很大,最小浓度仅 10.20 mg/L,最大浓度为 62.20 mg/L,平均值为 30.52 mg/L。空间上,冬春两季西区的 SS 要显著高于东区($P<0.05$),而在夏秋两季没有明显的空间分布规律。

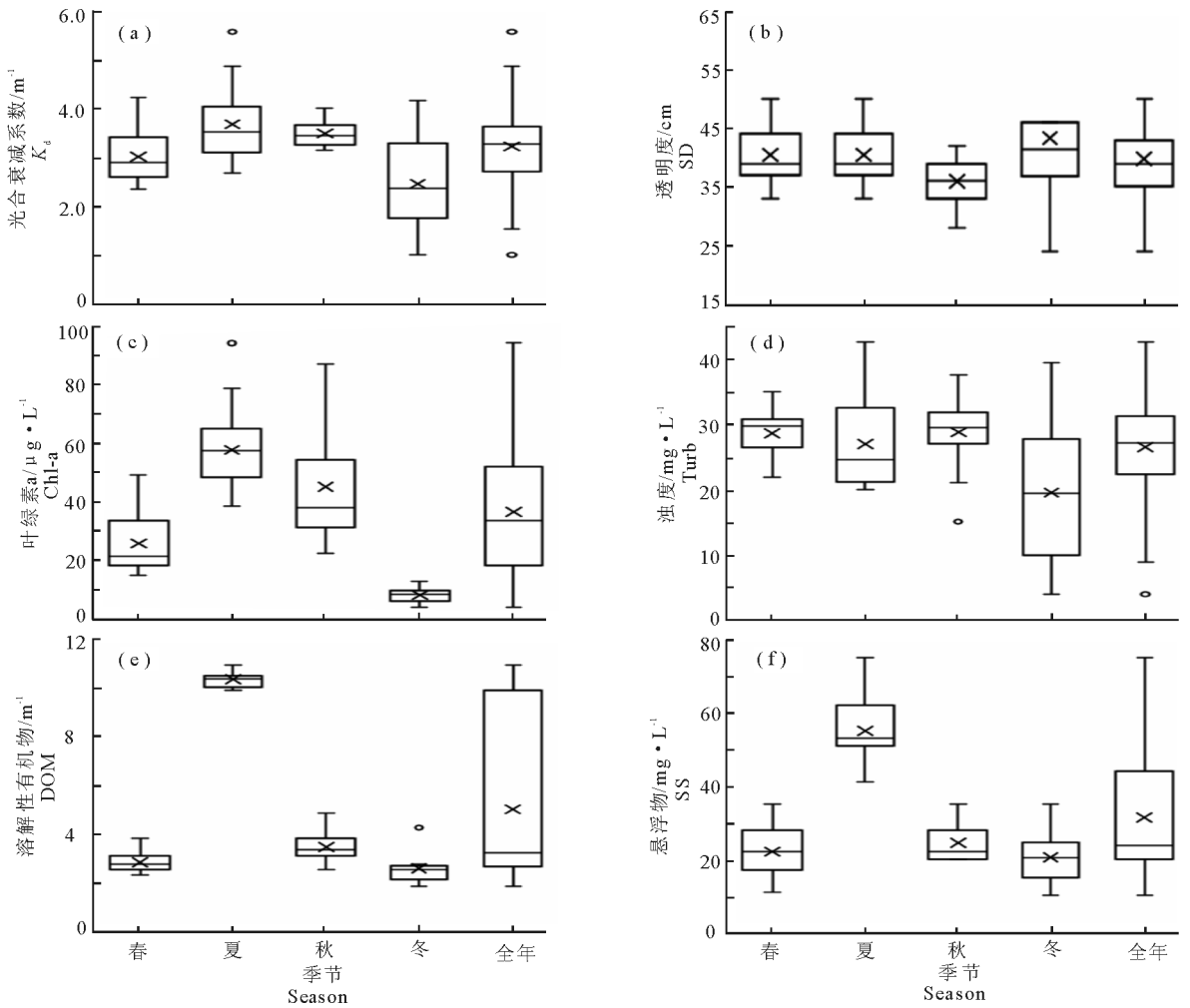


图2 大冶湖各季度的光学特性指标变化

Fig.2 Seasonal variations in characteristic optical indices of water in Daye Lake

2.8 光学参数与水质因子的相关性

通过对大冶湖光学衰减系数及其他影响因子的相关性分析,得到各参数之间的相关系数与双尾检验结果(表2)。已有研究表明, K_d 值与SD之间存在着负相关的经验关系(卡尔夫,2011;余丽凡等,2012;余柔柔等,2019)。本次研究结果显示, K_d 与

Chl-a、SS和DOM极显著相关($P < 0.01$),相关系数分别达到了0.606、0.445和0.419,但与 $1/SD$ 的相关性并不高且不显著。 $1/SD$ 与Turb极显著相关($P < 0.01$),相关系数为0.564。Turb与Chl-a显著相关($P < 0.05$),相关系数为0.330。Chl-a与DOM和SS之间均极显著相关($P < 0.01$),相关系

表2 大冶湖光学衰减系数及水质因子的 Pearson 相关系数

Tab.2 Pearson correlation coefficients of light attenuation coefficient and influencing factors in Daye Lake

指标	K_d	$1/SD$	Turb	Chl-a	DOM	SS	OSS	ISS
K_d	1							
$1/SD$	0.235	1						
Turb	0.245	0.564 **	1					
Chl-a	0.606 **	0.257	0.330 *	1				
DOM	0.419 **	-0.066	0.064	0.625 **	1			
SS	0.445 **	0.077	0.149	0.600 **	0.888 **	1		
OSS	0.100	-0.430 *	-0.212	0.343	0.711 **	0.797 **	1	
ISS	0.217	-0.324	-0.305	0.306	0.844 **	0.966 **	0.614 **	1

注: * 表示在 $P < 0.05$ 水平(双侧)上显著相关; ** 表示在 $P < 0.01$ 水平(双侧)极显著相关。

Note: * denotes a significant correlation at the level of 0.05 (two-tailed); ** denotes a highly significant correlation at the level of 0.01 (two-tailed).

数分别为 0.625 和 0.600。DOM、SS、OSS 和 ISS 之间也两两极显著相关($P < 0.01$)。

由此得到大冶湖水体光学衰减系数的主要影响因素为 Chl-a、SS 和 DOM。对 K_d 、Chl-a、SS 和 DOM 进行多元回归,可得到其关系为:

$$K_d = 0.019\text{Chl-a} + 0.011\text{SS} - 0.029\text{DOM} + 2.364 \quad (R^2 = 0.392, N = 55, P < 0.001)$$

3 讨论

3.1 大冶湖光学衰减系数的环境影响因素

大冶湖水深较浅,沉水植物基本消亡,水体富营养化程度较高,部分地区生长有大片凤眼莲(*Eichhornia crassipes*),属于藻型浅水湖泊。浮游藻类在水中聚集,使叶绿素(Chl-a)成为影响其水体光学特性的主要因素,这与何尚卫等(2014)对溇湖的研究结果类似;同时,藻类死亡又释放出大量溶解性有机物(DOM)(Zhang et al, 2009),这一方面验证了 DOM 与 Chl-a 之间极显著的相关特性($P < 0.01$),另一方面也指示了大冶湖水中 DOM 的部分来源。

悬浮物(SS)和浊度(Turb)也是水体光学衰减特性的重要影响因素(林绍迎, 2007; 王鲁宁等, 2014),但只有 SS 对大冶湖的光学衰减特性贡献较高。通过进一步分析各个季度的光学衰减系数(K_d)与 SS 的相关性,发现春季二者也存在显著的相关性($P < 0.05$),相关系数为 0.625;而夏季和冬季两者的相关性不显著,相关系数均在 0.1 左右。

3.2 沉水植物生长条件及大冶湖潜在恢复区域

恢复沉水植物是当下治理富营养化湖泊的主要方法(邱佩璜等, 2018)。不过,湖泊生态系统的恢复需要一定条件,光学特性就是其中十分重要的生态因子(秦伯强等, 2014)。

Z_{eu} 指的是辐照强度为水体表面 1% 的水下深度,这是沉水植物生存所能达到的极限深度,超过此深度,沉水植物便不能正常生长(吴明丽和李叙勇, 2012; Zhou et al, 2018; 李凯迪等, 2019)。据此,本文引入真光层深度和水深比值(Z_{eu}/D_w)作为光学阈值(表 3),判断在全湖内适合沉水植物生长的区域(刘笑菡, 2016)。

由大冶湖水体的 Z_{eu}/D_w 值可知,夏秋季全湖各区域均不适宜沉水植物的恢复,适宜恢复的时间集中在冬季和早春,然而冬季温度较低,不适宜大部分沉水植物生长,故对大冶湖的水生植被进行恢复的时间宜选择在初春。恢复区域以磊山、蚌壳岭以东湖区沿岸浅水地带为宜。位置越靠西, Z_{eu}/D_w 值减

表 3 大冶湖不同季节的光学阈值

Tab.3 Z_{eu}/D_w at each sampling station in Daye Lake by season

样点 编号	不同季节的光学阈值			
	春	夏	秋	冬
1	1.05	0.52	0.47	1.30
2	1.03	0.33	0.43	2.06
3	0.95	0.36	0.41	3.76
4	0.97	0.42	0.40	2.29
5	0.82	0.42	0.41	0.79
6	0.87	0.49	0.35	1.94
7	0.81	0.49	0.35	1.08
8	0.72	0.21	0.30	/
9	0.85	0.24	0.36	/
10	0.80	0.36	0.30	/
11	0.79	0.33	0.61	/
12	0.71	0.34	0.36	/
13	0.90	0.30	0.38	1.15
14	0.99	0.33	0.37	1.20
15	1.13	0.46	0.39	1.04

小的趋势越明显,超过磊山往西,暂不适宜进行沉水植物的恢复;另外,在实地调查过程中,发现大冶湖南部湖区沿岸带以及在研究范围以西的河道地区,均有不规则的浅水滩地分布,这些也是恢复大型沉水植物的首选区域。

4 小结

(1)大冶湖水体为中度富营养,透明度全年均值在 40 cm 左右,夏季 Chl-a 浓度、DOM 吸收系数和 SS 浓度均远远高于其他季节。

(2)大冶湖水体 K_d 季节变化不明显,仅冬季显著低于其他季节,夏季最高,全年平均为 3.17 /m。

(3)大冶湖水体光学特性的主要影响因素为 Chl-a、SS 和 DOM,相关系数最高达到了 0.606、0.445 和 0.419,有针对性的治理对大冶湖水体光学特性的改善有重要意义。

(4)大冶湖适宜进行沉水植物恢复的时间为春季,区域以磊山和蚌壳岭以东湖区、南部湖区沿岸带以及湖体西部河道的浅水地带为宜。

参考文献

- 摆晓虎,曹特,倪乐意,等, 2016. 洱海水体光学特性的季节变化及其影响因素分析[J]. 水生态学杂志, 37(2): 10-16.
- 湛沁祎,申茜,李俊生,等, 2014. 基于烧失量分析的水体悬浮物浓度测量方法改进[J]. 海洋技术学报, 33(2): 14-23.
- 国家环境保护总局, 2002. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社.

- 何尚卫,李勇,赵海光,等,2014. 溇湖水体光学性质初步研究[J]. 湖泊科学, 26(5): 707-712.
- 卡尔夫,2011. 湖沼学:内陆水生态系统[M]//古滨河,刘正文,李宽意,等译. 北京:高等教育出版社:135-152.
- 李凯迪,周远洋,周起超,等,2019. 云南程海真光层深度的时空分布及其影响因子[J]. 湖泊科学, 31(1): 256-267.
- 林绍迎,2007. 中国近海高浊度水体中光传输特征的数值模拟研究[D]. 青岛:中国海洋大学:111-112.
- 刘笑菡,张运林,殷燕,等,2012. 三维荧光光谱及平行因子分析法在CDOM研究中的应用[J]. 海洋湖沼通报, 134(3): 135-147.
- 刘笑菡,2016. 太湖水生植被时空变化及对水下光场和富营养化的响应[D]. 北京:中国科学院大学:73-94.
- 鲁珍,李晔,马啸,等,2012. 大冶湖2000-2009年地表水质评价及污染趋势预测[J]. 环境科学与技术, 35(5): 180-184.
- 秦伯强,张运林,高光,等,2014. 湖泊生态恢复的关键因子分析[J]. 地理科学进展, 33(7): 918-924.
- 邱佩璜,范华,徐玉裕,等,2018. 杭州城市河道生态治理实践及成效[J]. 水生态学杂志, 39(2): 34-40.
- 尚盈辛,宋开山,蒋盼,等,2018. 青藏高原典型湖库光学吸收特性与光合有效辐射衰减系数初步研究[J]. 湖泊科学, 30(3): 802-811.
- 王华,逢勇,刘申宝,等,2008. 沉水植物生长影响因子研究进展[J]. 生态学报, 28(8): 3958-3968.
- 王鲁宁,魏皓,赵亮,2014. 光衰减系数与悬浮颗粒物浓度的关系[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 44(4): 8-14.
- 吴明丽,李叙勇,2012. 光衰减及其相关环境因子对沉水植物生长影响研究进展[J]. 生态学报, 32(22): 7202-7212.
- 吴晓东,马晓婵,蒋北寒,等,2020. 城市富营养湖泊水体溶解性有机物的时空分布特征—以湖北省磁湖为例[J]. 生态与农村环境学报, 36(10): 1276-1284.
- 尹发能,陆俊,2015. 大冶湖流域景观生态动态变化及空间异质性研究[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 37(4): 351-358.
- 余丽凡,施渺筱,达良俊,等,2012. 上海公园绿地景观水体透明度影响因子研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 57(4): 112-119.
- 余柔柔,钱佳欢,朱宜平,等,2019. 两种生态净化措施对水源水库光学环境的影响[J]. 中国环境科学, 39(2): 785-791.
- 张欢,崔康平,张强,等,2019. 派河水体中DOM的光谱分析及其来源解析[J]. 环境科学研究, 32(2): 227-234.
- 张运林,秦伯强,陈伟民,等,2003. 太湖水体光学衰减系数的分布及其变化特征[J]. 水科学进展, 14(4): 347-353.
- 张运林,秦伯强,陈伟民,等,2005. 龙感湖水体光学特性的观测[J]. 湖泊科学, 17(2): 114-119.
- 邹丽莎,聂泽宇,姚笑颜,等,2013. 富营养化水体中光照对沉水植物的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 24(7): 2073-2080.
- Chen B F, Huang W, Ma S Z, et al, 2018. Characterization of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Littoral Zones of Eutrophic Lakes Taihu and Hongze during the Algal Bloom Season[J]. Water, 10(7): 861-879.
- Coble P G, 1996. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy[J]. Marine Chemistry, 51(4): 325-346.
- Karlsson J, Bystrom P, Ask J, et al, 2009. Light limitation of nutrient-poor lake ecosystems[J]. Nature, 460: 506-509.
- Shi K, Zhang Y L, Liu X H, et al, 2014. Remote sensing of diffuse attenuation coefficient of photosynthetically active radiation in Lake Taihu using MERIS data[J]. Remote Sensing of Environment, 140(44): 365-377.
- Zhang Y L, Dijk M V, Liu M L, et al, 2009. The Contribution of Phytoplankton Degradation to Chromophoric Dissolved Organic Matter (cdom) in Eutrophic Shallow Lakes: Field and Experimental Evidence[J]. Water Research, 43(18): 4685-4697.
- Zhang Y L, Zhang E L, Yan Y, et al, 2010. Characteristics and Sources of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lakes of the Yungui Plateau, China, Differing in Trophic State and Altitude[J]. Limnology & Oceanography, 55(6): 2645.
- Zhou Q C, Zhang Y L, Li K D, et al, 2018. Seasonal and Spatial Distributions of Euphotic Zone and Longterm Variations in Water Transparency in a Clear Oligotrophic Lake Fuxian, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 72(10): 185-197.

(责任编辑 万月华)

Seasonal Variation in Daye Lake Optical Properties and Influencing Factors

REN Wei-xiang, WU Xiao-dong, GE Xu-guang, LUO Chu-yu, LONG Zi-jie, LIAO Ze-yong

(College of Urban and Environmental Sciences, Hubei Normal University,
Huangshi 435002, P.R.China)

Abstract: The photosynthetically active radiation (PAR) available in water bodies is the most important factor for the growth of submerged plants. In this study, we characterized the annual fluctuation of PAR in Daye Lake by determining the light attenuation coefficient (K_d), euphotic depth (Z_{eu}) and other important optical parameters. The factors influencing seasonal variation in optical properties were also identified. The objectives were to provide basic information for the ecological management of Daye Lake basin and a reference for restoring submerged macrophytes. The study was based on a seasonal (January, April, August, October) field investigation and water quality monitoring at 15 sampling sites in Daye Lake during 2018. The K_d of Daye Lake was lowest in winter (2.47 /m) and highest in summer (3.69 /m), with an average of 3.17 /m. The seasonal variation from spring to autumn was not significant. Spatially, K_d decreased from west to east. The water of Daye Lake was moderately eutrophic, with an annual average Secchi depth (SD) of 40 cm, and the chlorophyll a (Chl-a), dissolved organic matter (DOM) and suspended solids (SS) in summer were significantly higher than in other seasons. Chl-a, DOM and SS were the primary factors affecting the optical properties, with respective correlation coefficients up to 0.606, 0.445 and 0.419. The primary factors were related to K_d according to the following equation: $K_d = 0.019\text{Chl-a} + 0.011\text{SS} - 0.029\text{DOM} + 2.364$. Thus, decreasing Chl-a, SS and DOM is important for improving water transparency in Daye Lake. The appropriate season for restoring submerged macrophytes in Daye Lake is spring, because the light threshold (the ratio of euphotic depth to water depth, Z_{eu}/D_w) of the lake in other seasons is less than 1, and is not sufficient for germination and growth of submerged macrophytes. Restoration of macrophytes is suitable in lake areas east of Leishan Mountain and Bangkeling Mountain, the coastal shallow water on the southern margin and the river shoal in western Daye Lake.

Key words: Daye Lake; photosynthetically active radiation (PAR); Secchi depth; submerged macrophytes; euphotic depth