

鄂东南 5 个典型湖泊的水体光学特性研究

吴超¹, 吴晓东^{1,2}, 葛绪广^{1,2}, 任伟祥³, 冯恋¹, 杨久芸¹, 谭亚¹

(1. 湖北师范大学城市与环境学院, 湖北黄石 435002;

2. 黄石市土壤污染防治重点实验室, 湖北黄石 435002;

3. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘要: 为了探究水体光学特性的时空变化特征及影响因素, 于 2018—2019 年对鄂东南 5 个典型湖泊(仙岛湖、梁子湖、网湖、策湖和青山湖 1 号)进行了周年调查; 通过分析光学衰减系数(K_d)等重要水体光学参数, 得到了各湖泊光合有效辐射衰减特征及影响因子, 可为该地区富营养化湖泊的水生植被修复提供参考。结果表明: (1) 鄂东南 5 个典型湖泊之间的透明度、悬浮物、叶绿素 a 差异极显著($P < 0.01$)。 (2) 仙岛湖和梁子湖的溶解性有机物浓度较低, 年均值分别为 (1.38 ± 0.39) 、 $(2.36 \pm 0.92) \text{ m}^{-1}$, 与其他湖泊差异极显著($P < 0.01$)。 (3) 年均光学衰减系数的空间分布规律为: 仙岛湖 $[(0.36 \pm 0.21) \text{ m}^{-1}] <$ 梁子湖 $[(1.81 \pm 0.89) \text{ m}^{-1}] <$ 青山湖 1 号 $[(3.77 \pm 1.89) \text{ m}^{-1}] <$ 策湖 $[(4.40 \pm 1.90) \text{ m}^{-1}] <$ 网湖 $[(4.70 \pm 2.54) \text{ m}^{-1}]$, 各湖泊之间存在极显著差异($P < 0.01$)。 (4) 仙岛湖光学衰减系数的主要影响因子是溶解性有机物, 梁子湖和网湖则主要受悬浮物影响, 溶解性有机物和叶绿素 a 是造成策湖和青山湖 1 号水体光学衰减系数较高的重要原因, 其中以溶解性有机物为主。 (5) 各湖泊的真光层深度与透明度均呈现出极显著相关性($P < 0.01$), 透明度在一定程度上可以反演真光层深度, 也可为沉水植物恢复区域划分提供依据。

关键词: 鄂东南; 典型湖泊; 光合有效辐射; 光学衰减系数; 真光层深度

中图分类号: X171.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2022)03-0096-09

湖泊光学主要通过研究水体的表观和固有光学特性, 以揭示太阳辐射在水体中的衰减规律(张运林, 2011)。当太阳辐射进入水体之后, 会由于纯水、溶解性有机物(DOM)、浮游植物和非藻类颗粒物的影响而发生衰减, 进而影响水生生态系统中生物的生命过程(余柔柔等, 2019)。湖泊光学与沉水植被修复联系紧密, 通过研究湖泊水体的光学性质, 有助于了解沉水植物的生长机理及其恢复区域的划分与适宜性评价。

透明度(SD)能直观反映水体的浑浊程度, 与其他光学参数之间有着密切的关系(刘建康, 2000; 刘延龙等, 2018; 李欣等, 2019)。光合有效辐射(PAR)是水生生态系统中沉水植物和浮游植物重要的基础能量来源, 一般通过测定光学衰减系数(K_d)来反映其衰减程度(黄昌春等, 2009; Wang et al, 2020)。已有众多国内外学者对水体光学特性

参数展开了研究, 水体悬浮物(SS)、浊度(Turb)、DOM、叶绿素 a(Chl-a)等指标被广泛证实能在不同条件下对水体光学特性产生显著影响(Zhou et al, 2018)。Spencer 等(2012)研究了美国 30 条河流, 发现在大多数河流中, 有色溶解性有机物(CDOM)在 254、350、440 nm 波长处的吸收系数与溶解性有机碳(DOC)呈正相关关系; Havens(2003)研究发现, 在美国 Okeechobee 湖中, 非挥发性悬浮固体对光衰减有较大的贡献率。在长江中下游浅水湖泊中, 水下光场强度多受制于风浪引起的无机悬浮物浓度增加(Zhang et al, 2006)。Shi 等(2014)研究发现, 风速在太湖 K_d 变化中起着关键作用。悬浮颗粒物会降低太湖的水下 PAR 强度(Zhang et al, 2007)。浮游植物和 DOM 对龙感湖光衰减虽然有一定的贡献率, 但在无水生植物的开阔地带, 悬浮物对光的衰减仍占主导地位(张运林等, 2005a); 涌湖夏季光衰减的主要影响因子也是悬浮物(何尚卫等, 2014)。与低海拔地区不同, 高海拔地区的水体光学性质可能因地域差异而呈现出不同的特征, 尚盈辛等(2018)研究发现, 青藏高原地区湖库水体 K_d 整体较低, 且与 CDOM 的相关性最强; 云贵高原湖泊的 K_d 为 $0.19 \sim 2.88 \text{ m}^{-1}$, 显著低于长江中下游地区湖泊 ($0.55 \sim 4.52 \text{ m}^{-1}$) (Zhang et al, 2011); 洱海 K_d 的显著影响因子是浊度(摆晓虎等, 2016); 抚仙湖

收稿日期: 2020-10-09 修回日期: 2022-02-16

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究计划项目(Q20182502, D20152503); 湖北省大学生创新创业计划训练项目(201819010318)。

作者简介: 吴超, 1999 年生, 男, 本科在读, 专业方向为水环境生态修复。E-mail: 1652675861@qq.com

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

水体透明度下降的直接原因是藻类增加(潘继征等,2008)。从上述研究可以看出,不同地区的湖泊水体PAR呈现出了不同的衰减特性。若水体的PAR受悬浮颗粒物、浮游植物、DOM的影响而衰减得过于强烈,则可能会对沉水植物生长、繁殖和生理代谢等活动产生不利影响,造成沉水植物衰亡(李凯迪等,2019)。

沉水植被在湖泊生态修复与治理中具有关键作用,水体光学特性是影响富营养化水体沉水植被修复的主要因素,但目前针对湖泊光学特性的研究大多集中在单个天然湖泊,对流域内多个不同营养水平湖泊的组合比较分析较少(王芳侠等,2020)。近年来,由于工农业和生活污水的污染,鄂东南地区的部分湖泊富营养化程度严重,亟需开展湖泊生态修复,但有关该地区的湖泊水体光学特性鲜见报道,更没有针对性地开展沉水植被恢复的研究。因此,本文拟研究鄂东南地区5个典型湖泊水体光学特性的季节变化特征及影响因素,以期为不同类型湖泊沉水植被恢复提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

鄂东南地区(113.53°~116.13°E、29.03°~30.89°N)河网密布,其湖库数量接近湖北省总数的2/3,在长江大保护战略中占有重要地位。本研究选取了鄂东南5个典型湖泊,分别为仙岛湖(X)、梁子湖(L)、网湖(W)、策湖(C)、和青山湖1号(Q)(表1)。仙岛湖生态系统较健全,综合营养指数为30.57;梁子湖综合营养指数为50.40;网湖受农业污染较严重,综合营养指数为61.26;策湖和青山湖1号营养水平接近,但前者为养殖型湖泊,后者为城市湖泊,均具有代表性。

表1 鄂东南5个典型湖泊基本信息

Tab.1 Basic information on the five typical lakes in southeastern Hubei Province

湖泊名称 (代码)	面积 /km ²	平均水深 /m	样点数 /个	营养指数综合
仙岛湖(X)	31.00	25.7	8	30.57
梁子湖(L)	227.96	3.0	12	50.40
网湖(W)	42.30	3.0	10	61.26
策湖(C)	9.00	2.1	6	68.25
青山湖1号(Q)	0.17	1.2	9	69.39

1.2 样品采集与指标测定

分别在2018年秋、冬季和2019年春、夏季对

各湖泊进行采样(图1)。使用GPS导航以保证各季度采样点位置相同,同时用装有冰块的恒温箱保存水样,尽快完成其他各项指标的测定。透明度和水深均在现场测定。采样操作参考《湖泊调查技术规程》(中国科学院南京地理与湖泊研究所,2015)。

使用ZDS-10W-1D型自动换档数字式水下照度计原位采集不同水深处的光合有效辐射;根据实际需要,设置不同的梯度(仙岛湖水较深,每隔0.2 m设置一个梯度;梁子湖、网湖、策湖和青山湖1号水深较浅,每隔0.1 m为一个梯度),同时包含水面光合有效辐射测定,即0 m处。

悬浮物采用称重法测定,水样经Whatman GF/C滤膜抽滤后,于105℃下烘干测试总悬浮物,然后将滤膜在550℃下煅烧,留下的为无机悬浮物(ISS),煅烧前后质量之差即为有机悬浮物(OSS)(谌沁祎等,2014);其他指标的测定方法均参考《水和废水监测分析方法》(国家环境保护总局,2002)。

1.3 溶解性有机物吸收系数测量

水样经0.45 μm的玻璃纤维滤膜抽滤之后,滤液用来测定溶解性有机物(DOM)。用紫外-可见分光光度计(UV2700,岛津),以纯水做参照,扫描其在200~800 nm、间隔为1 nm的吸光度,按照下式计算吸收系数(Chen et al,2018)。

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

式中: $a(\lambda')$ 表示波长在 λ 处未校正的吸收系数(m^{-1}), $A(\lambda)$ 表示波长在 λ 处的吸光度(Abs), r 为比色皿的光程(m),2.303是系数。

为避免滤液中残留的细小颗粒物干扰吸光度,采用下式对吸收系数进行校正(张欢等,2019):

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

式中: $a(\lambda)$ 表示波长在 λ 处的校正过后的吸收系数(m^{-1}), λ 为波长(nm)。

1.4 光学衰减系数与真光层深度计算

光学衰减系数(K_d)采用下式计算(Kirk,1994):

$$K_d = -\frac{1}{Z} \ln \frac{E(Z)}{E(0)} \quad (3)$$

式中: Z 表示测量处距水面的深度(m), $E(Z)$ 和 $E(0)$ 分别表示距水面距离为 Z 、0 m处的PAR(Ix), K_d 表示水体光学衰减系数(m^{-1}), K_d 通过非线性拟合得到;其中当 $R^2 \geq 0.95$ 、深度数 $N \geq 3$ 时, K_d 值才被接受,否则视为无效。

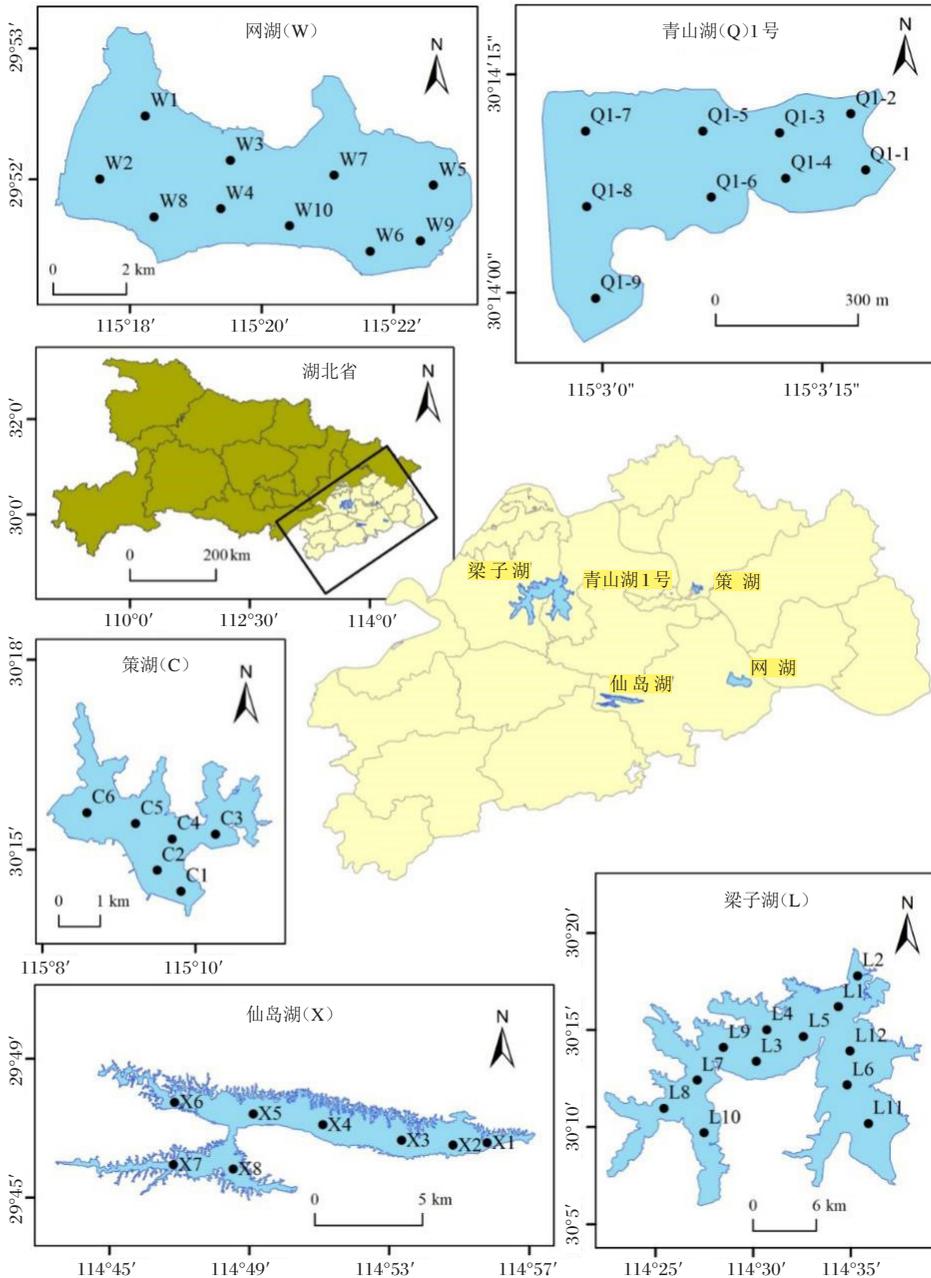


图1 鄂东南5个典型湖泊位置及采样点设置

Fig.1 Location of the five typical lakes in southeastern Hubei Province and sample site locations

Z_{eu} 可由下式计算得到(Zhang et al, 2011):

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

式中: Z_{eu} 表示真光层深度(m), 4.605为ln100值, K_d 表示光学衰减系数(m^{-1})。

1.5 数据处理与统计

采用 ArcGIS 10.7 绘制鄂东南典型湖泊采样点图, SPSS 21 软件进行相关性分析, Excel 2016 绘制箱线图、折线图和柱状图。显著性水平中, $P < 0.01$ 为极显著, $0.01 \leq P < 0.05$ 为显著, $P \geq 0.05$ 为不显著。

2 结果与分析

2.1 透明度

鄂东南不同湖泊水体的透明度(SD)存在极显著差异($P < 0.01$)。仙岛湖(图2-a)水体全年较清澈, SD年均值为(4.92 ± 1.18)m, 与梁子湖、网湖、策湖和青山湖1号差异极显著($P < 0.01$)。梁子湖和网湖(图2-b,c)的SD季节变化规律相似, 且各季度之间存在极显著变化($P < 0.01$)。策湖SD年平均值为(0.34 ± 0.14)m, 变幅为0.15~0.62 m(图2-d)。青山湖1号(图2-e)的SD波动范围较大, 年均

值为 $(0.45\pm 0.17)\text{m}$,且各季度之间存在极显著变化($P<0.01$),最大值出现在冬季,变幅为 $0.60\sim 0.75\text{m}$ 。

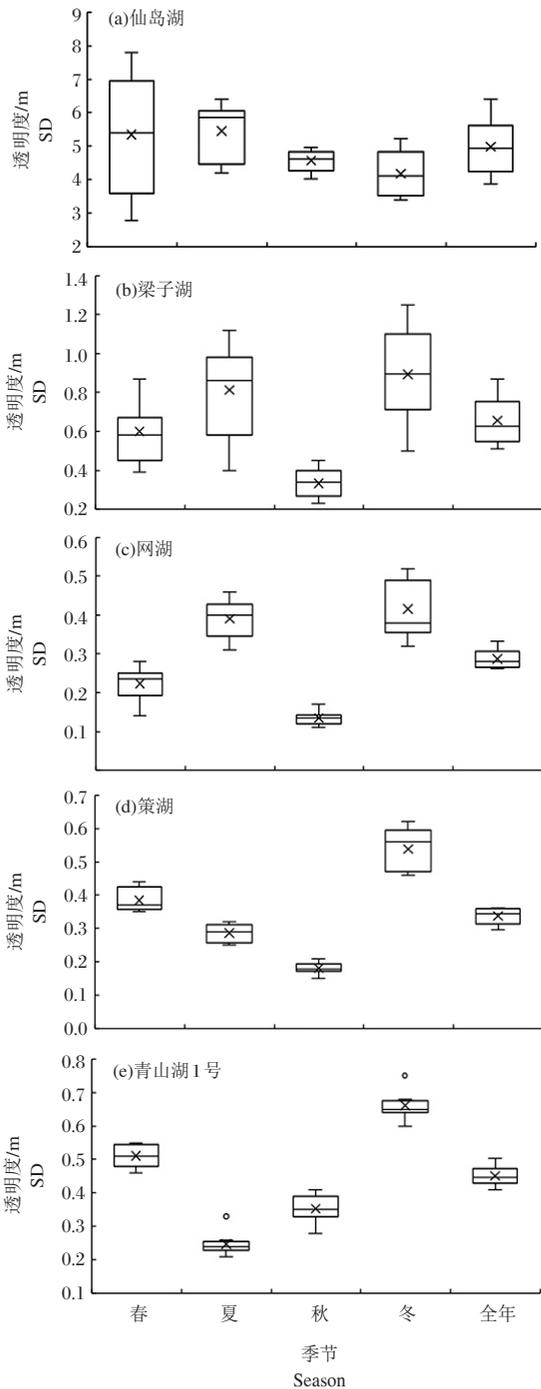


图2 鄂东南5个典型湖泊透明度的季节变化

Fig.2 Seasonal variation of Secchi depth in the five typical lakes in southeastern Hubei Province

2.2 悬浮物

调查的5个湖泊中,悬浮物(SS)存在极显著差异($P<0.01$),SS年均浓度变化规律表现为:网湖>策湖>青山湖1号>梁子湖>仙岛湖(图3)。其中,网湖ISS在春季、夏季、秋季、冬季分别为 (39.40 ± 12.41) 、

(32.90 ± 10.24) 、 (66.70 ± 25.68) 、 $(8.78\pm 3.67)\text{mg/L}$,占SS的比例分别为58.98%、58.54%、63.95%、60.77%。网湖、梁子湖和策湖的SS均在秋季取得最大值,分别为 (104.30 ± 31.61) 、 (19.64 ± 6.62) 、 $(57.00\pm 5.59)\text{mg/L}$ 。仙岛湖SS年均浓度最低,为 $(10.72\pm 4.98)\text{mg/L}$,极显著低于其他湖泊($P<0.01$)。梁子湖OSS值较小,年均浓度为 $(5.00\pm 3.30)\text{mg/L}$,变幅为 $1.00\sim 14.00\text{mg/L}$,在秋季取得最大值,为 $(8.64\pm 3.23)\text{mg/L}$,显著高于夏季和冬季($P<0.05$)。青山湖1号的SS年均浓度为 $(22.41\pm 7.13)\text{mg/L}$,极显著高于仙岛湖和梁子湖($P<0.01$)。

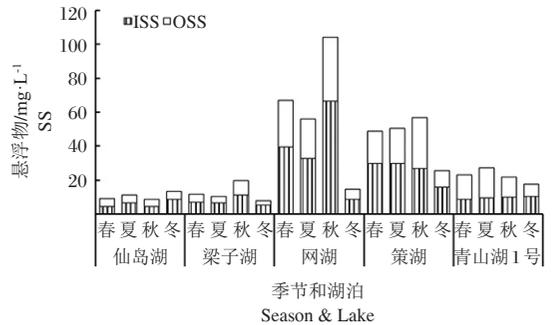


图3 鄂东南5个典型湖泊悬浮物的季节变化

Fig.3 Seasonal variation of suspended solid in the five typical lakes in southeastern Hubei Province

2.3 溶解性有机物

溶解性有机物(DOM)是存在于水中的一类结构与成分都十分复杂的混合物,通常以 $a(350)$ 表征其浓度(王青等,2018)。研究结果显示,DOM浓度较低的为仙岛湖和梁子湖,吸收系数 $a(350)$ 年均值分别为 (1.38 ± 0.39) 、 $(2.36\pm 0.92)\text{m}^{-1}$,极显著低于其他湖泊($P<0.01$)(图4)。策湖吸收系数 $a(350)$ 较高,年平均值为 $(6.42\pm 3.05)\text{m}^{-1}$,在秋季取得最大值,且随着时间的变化, $a(350)$ 在发生了极显著变化($P<0.01$)。青山湖1号吸收系数 $a(350)$ 在夏季最大,为 $(9.01\pm 4.41)\text{m}^{-1}$,显著高于仙岛湖、梁子湖和网湖($P<0.05$)。青山湖1号的 $a(350)$ 波动最为剧烈,这可能与湖泊内分散的多处排污口有关。

2.4 叶绿素a

鄂东南典型湖泊水体叶绿素a(Chl-a)的空间分布存在极显著差异($P<0.01$),年均浓度的空间分布规律为:青山湖1号 $[(92.19\pm 40.30)\mu\text{g/L}]>$ 策湖 $[(69.51\pm 28.44)\mu\text{g/L}]>$ 网湖 $[(27.31\pm 12.02)\mu\text{g/L}]>$ 梁子湖 $[(12.80\pm 10.90)\mu\text{g/L}]>$ 仙岛湖 $[(4.90\pm 3.64)\mu\text{g/L}]$ (图5)。仙岛湖Chl-a浓度以夏季最高,也仅有 $(8.91\pm 2.63)\mu\text{g/L}$,显著低于其他湖泊($P<0.01$)。随着时间的变化,梁子湖、网湖、策湖和青山湖1号各季度的Chl-a浓度均发生了极显著变化($P<0.01$)。青山湖1号的Chl-a在夏季取得最大值,达 $(126.91\pm 39.40)\mu\text{g/L}$,显著高于春季和冬季($P<0.05$)。

2.5 光学衰减系数

鄂东南典型湖泊的光学衰减系数(K_d)存在极显著差异($P<0.01$) (图6)。网湖年均 K_d 最大,为 $(4.70\pm 2.54) \text{ m}^{-1}$, 季节变化规律为: 秋季 $[(8.14\pm 1.28) \text{ m}^{-1}] >$ 春季 $[(5.32\pm 1.19) \text{ m}^{-1}] >$ 夏季 $[(2.98\pm 0.51) \text{ m}^{-1}] >$ 冬季 $[(2.09\pm 0.47) \text{ m}^{-1}]$, 与前文所述悬浮物季节变化规律相似。青山湖1号的 K_d 在夏季最高, 变幅为 $3.93\sim 8.22 \text{ m}^{-1}$, 均值为 $(6.42\pm 1.42) \text{ m}^{-1}$ 。与其他湖泊相比, 仙岛湖各季度的 K_d 较小, 年均值仅为 $(0.36\pm 0.21) \text{ m}^{-1}$, K_d 在各季度之间没有显著差异($P>0.05$)。

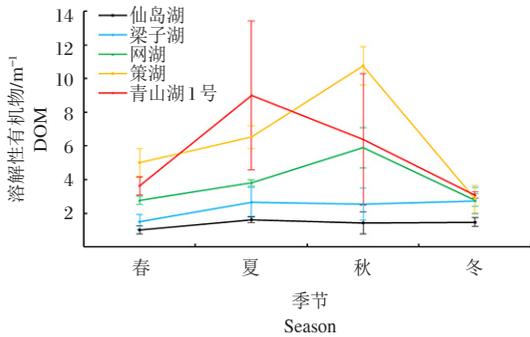


图4 鄂东南5个典型湖泊溶解性有机物的季节变化

Fig.4 Seasonal variation of DOM in the five typical lakes in southeastern Hubei Province

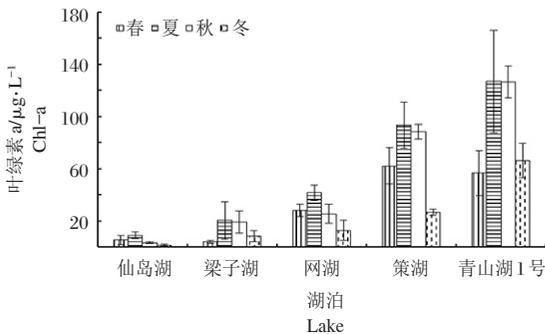


图5 鄂东南5个典型湖泊叶绿素a的季节变化

Fig.5 Seasonal variation of Chl-a in the five typical lakes in southeastern Hubei Province

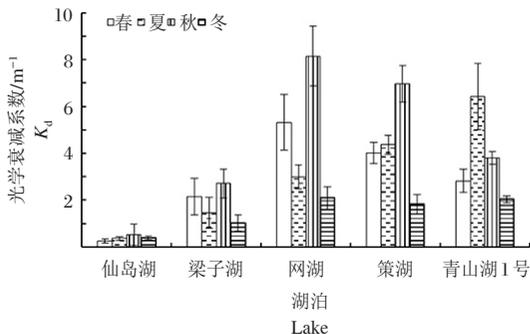


图6 鄂东南5个典型湖泊光学衰减系数的季节变化

Fig.6 Seasonal variation of K_d in the five typical lakes in southeastern Hubei Province

3 讨论

3.1 不同湖泊水体光学衰减参数的相关性

对鄂东南地区5个典型湖泊水体的 K_d 、SD、Chl-a、DOM、SS、OSS、ISS进行相关性分析, 其结果如表2所示。

Mladenov等(2011)在对全球受人为影响较小的86个高山湖泊的研究中发现, DOM是影响水中光渗透的主要因素。与之相类似的, 仙岛湖受污染程度相对较小, K_d 与Chl-a、DOM、SS的Pearson相关系数分别为0.067、0.695、0.087, 仅与DOM呈现出极显著相关关系($P<0.01$), 表明DOM是影响仙岛湖水体 K_d 的最主要因子。梁子湖是浅水草型湖泊, 水生植被生物量较大且种类较多, 由于水位较浅, 在风浪和船只的扰动下, 水中悬浮物含量增加, 使得梁子湖PAR衰减的主要影响因子是SS, 同时还受制于浮游植物和DOM。这与杭州西湖和龙感湖的情况相似(张运林等, 2005a; 余雪芳等, 2008)。网湖也是浅水型湖泊, 但不同于梁子湖的是, 其沉水植物覆盖率低, 底泥在风浪作用下更易悬浮, SS是造成网湖水体 K_d 衰减的主要原因, 这与太湖的研究类似(Zhang et al, 2007; Shi et al, 2014)。太湖属于大型浅水湖泊, 且大部分湖区沉水植被消亡, 易于沉积物再悬浮。在网湖的相关性分析中, SS、OSS、ISS与 K_d 均具有极显著相关关系($P<0.01$), Pearson相关系数分别达到了0.861、0.838、0.841。策湖和青山湖1号的污染程度相似, K_d 与Chl-a、DOM均呈极显著相关, 表明策湖和青山湖1号水下光学特性主要与Chl-a与DOM有关, 这与2个湖泊均属于浅水藻型湖泊有一定关系。近年来, 由于人类活动的影响, 策湖和青山湖1号经常发生大面积水华, Chl-a年平均浓度分别高达 $69.51 \mu\text{g/L}$ 和 $92.19 \mu\text{g/L}$, 由蓝藻腐烂产生的有机物贡献出了一定的DOM组分, 导致水中DOM浓度增大, 成为影响水体光学特性的关键因素。

在此之前, 已有众多学者对 K_d 与SD的关系进行了研究(张运林等, 2005b; 余丽凡等, 2012)。本研究中, 鄂东南典型湖泊水体的 K_d 与SD均表现出负相关关系, 其中在梁子湖、网湖、策湖和青山湖1号中呈极显著相关($P<0.01$)。在富营养化湖泊中, Chl-a可以直接指示水体中的浮游植物, 是影响水体光学性质的重要指标(张壹萱等, 2018)。在策湖和青山湖1号中, SD与Chl-a的Pearson相关系数分别为-0.836和-0.732, 且两者呈现极显著相关关系($P<0.01$), 表明浮

表2 鄂东南5个典型湖泊水体光学参数的相关性分析

Tab.2 Correlation of optical parameters in the five typical lakes in southeastern Hubei Province

参数	K_d	SD	Chl-a	DOM	SS	OSS	ISS
仙岛湖	K_d	1					
	SD	-0.389*	1				
	Chl-a	0.067	-0.039	1			
	DOM	0.695**	-0.221	0.187	1		
	SS	0.087	-0.279	0.123	0.173	1	
	OSS	0.056	-0.011	0.137	0.097	0.713**	1
	ISS	0.085	-0.346	0.096	0.177	0.955**	0.473*
梁子湖	K_d	1					
	SD	-0.847**	1				
	Chl-a	0.358*	-0.373*	1			
	DOM	0.087	-0.043	0.415**	1		
	SS	0.736**	-0.581**	0.318*	0.152	1	
	OSS	0.749**	-0.587**	0.323*	0.118	0.973**	1
	ISS	0.684**	-0.527**	0.303*	0.157	0.983**	0.923**
网湖	K_d	1					
	SD	-0.907**	1				
	Chl-a	0.110	-0.040	1			
	DOM	0.693**	-0.557**	0.208	1		
	SS	0.861**	-0.774**	0.405*	0.722**	1	
	OSS	0.838**	-0.791**	0.470**	0.683**	0.951**	1
	ISS	0.841**	-0.737**	0.358*	0.714**	0.988**	0.892**
策湖	K_d	1					
	SD	-0.930**	1				
	Chl-a	0.739**	-0.836**	1			
	DOM	0.935**	-0.922**	0.745**	1		
	SS	0.781**	-0.789**	0.781**	0.759**	1	
	OSS	0.898**	-0.854**	0.770**	0.907**	0.915**	1
	ISS	0.476*	-0.542**	0.624**	0.423*	0.883**	0.618**
青山湖1号	K_d	1					
	SD	-0.873**	1				
	Chl-a	0.646**	-0.732**	1			
	DOM	0.679**	-0.683**	0.528**	1		
	SS	0.547**	-0.530**	0.333	0.482**	1	
	OSS	0.543**	-0.552**	0.255	0.453**	0.876**	1
	ISS	0.123	-0.069	0.204	0.160	0.438**	-0.048

注:**在 0.01 水平(双侧)上极显著相关;*在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

Note:**highly significant correlation ($P < 0.01$, two-tailed); * significant correlation ($P < 0.05$, two-tailed).

游植物是限制其透明度增加的主要因素。Walsby (1997)在对波罗的海的研究中也发现,浮游植物的活动对光合辐照度及透光度有很大影响,这与杨威等(2012)在洱海的研究结果类似。悬浮物能减弱光线在水中的传播,是造成水体透明度降低的一个重要原因。李欣等(2019)研究发现,SS是影响太湖水域三山岛湿地、太湖贡山岛湿地透明度的主要因

子;在三峡小江回水区,由于河道输沙量增加,使得无机悬浮颗粒物成为影响水体透明度的主要指标(张呈等,2010)。梁子湖和网湖的SD与SS均呈极显著负相关($P < 0.01$),Pearson相关系数分别为-0.581和-0.774,SS是影响2个湖泊水体透明度的主要因子。仙岛湖中,SS对透明度也有一定影响,但其作用相对较弱。

3.2 以透明度推算真光层深度可指导沉水植被恢复

通过建立真光层深度(Z_{cu})和透明度(SD)的经验回归方程,可以方便地推算真光层深度(李国胜等,2003;方芳等,2010)。鄂东南各湖泊的 Z_{cu} 与SD的一元线性回归分析如图7所示。

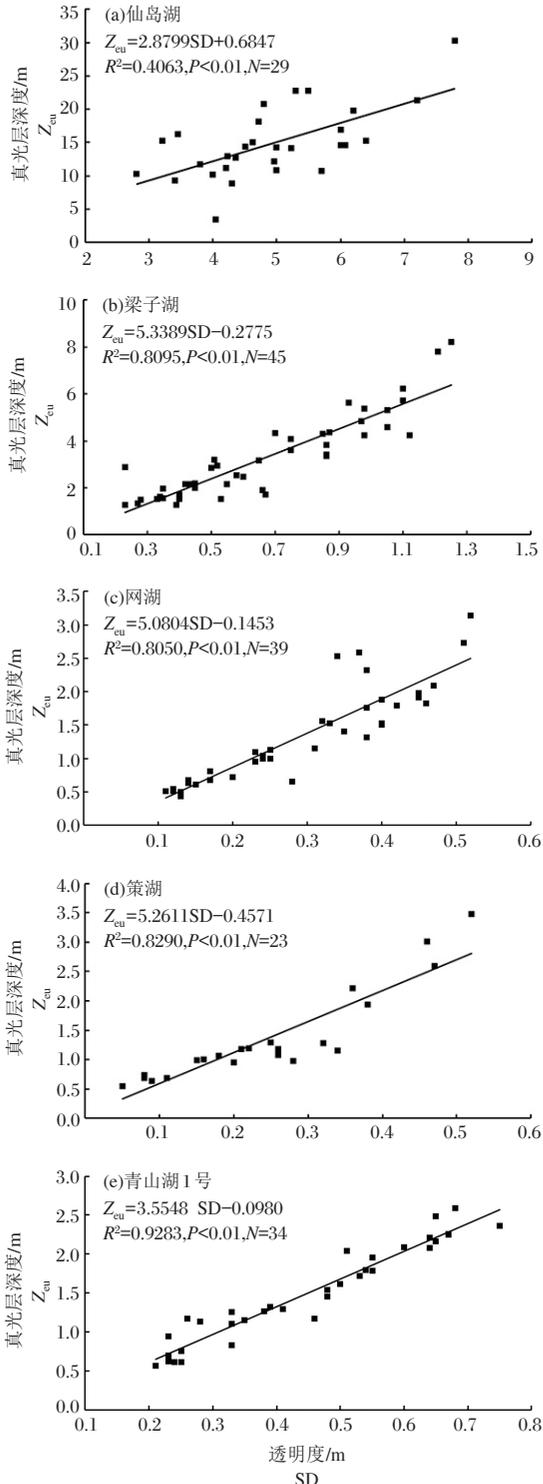


图7 鄂东南典型湖泊水体真光层深度与透明度的回归分析

Fig.7 Regression analysis of Z_{cu} and SD in typical lakes of southeastern Hubei Province

仙岛湖生态系统比较健康,湖中心水深可达40 m, Z_{cu} 年均值可达(14.87±5.33)m,显著高于其他湖泊($P<0.01$),且与SD呈现极显著正相关关系($P<0.01$)。梁子湖 Z_{cu} 和SD的相关性较强, R^2 达到了0.8095,且两者关系呈极显著正相关($P<0.01$)。梁子湖春季和夏季 Z_{cu} 均值分别为(2.45±0.93)m和(3.65±1.26)m,均大于水深,因此梁子湖在春夏季适宜进行沉水植被修复。网湖、策湖和青山湖1号的 Z_{cu} 较小,年均值分别为(1.32±0.72)、(1.33±0.78)、(1.50±0.61)m,且与SD的相关性较强,均呈极显著正相关($P<0.01$)。网湖、策湖和青山湖1号的PAR受SS、Chl-a、DOM影响,衰减较为强烈, Z_{cu} 较低,在现有条件下,暂不适宜大面积进行沉水植被恢复,需要施以水位调控等辅助工程措施改善水下光照条件,才适宜进行沉水植被恢复。以上研究表明,在鄂东南地区,SD在一定程度上能反演 Z_{cu} 。在实际进行沉水植被恢复过程中,当测得某水域的实际透明度,就可以通过真光层深度与透明度之间的回归方程推算得到真光层深度,作为沉水植物恢复区域划分的依据,对鄂东南地区湖泊生态修复具有重要指导意义。

4 结论

(1)仙岛湖水体SD年平均值为(4.92±1.18)m,与梁子湖、网湖、策湖和青山湖1号差异极显著($P<0.01$)。

(2)SS年均浓度是:网湖>策湖>青山湖1号>梁子湖>仙岛湖。DOM浓度较低的为仙岛湖和梁子湖,极显著($P<0.01$)低于其他湖泊。Chl-a年均浓度为:青山湖1号>策湖>网湖>梁子湖>仙岛湖。

(3)鄂东南不同营养水平湖泊的 K_d 存在极显著差异($P<0.01$),网湖年均 K_d 最大,仙岛湖最小,各湖泊的 Z_{cu} 与SD均呈现极显著相关性。

(4)仙岛湖 K_d 的主要影响因子是DOM,梁子湖和网湖则主要受SS影响。DOM和Chl-a是造成策湖和青山湖1号水体 K_d 较高的重要原因,其中以DOM为主。

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.
- 方芳,周红,李哲,等,2010. 三峡小江回水区真光层深度及其影响因素分析[J]. 水科学进展, 21(1): 113-119.
- 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:100-672.

- 何尚卫,李勇,赵海光,等,2014. 漏湖水体光学性质初步研究[J]. 湖泊科学,26(5):707-712.
- 黄昌春,李青梅,孙德勇,等,2009. 秋季太湖水下光场结构及其对水生生态系统的影响[J]. 湖泊科学,21(3):420-428.
- 李国胜,梁强,李柏良,2003. 东海真光层深度的遥感反演与影响机理研究[J]. 自然科学进展,13(1):90-94.
- 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.
- 李欣,周婷婷,张影宏,等,2019. 苏州湿地水体透明度的动态变化及其与悬浮颗粒物的关系[J]. 江苏林业科技,46(2):10-12.
- 刘建康,2000. 高级水生生物学[M]. 北京:科学出版社:9-10.
- 刘延龙,张保华,姚昕,等,2018. 东平湖水体透明度的遥感反演研究[J]. 测绘科学,43(7):72-78.
- 潘继征,熊飞,李文朝,等,2008. 云南抚仙湖透明度的时空变化及影响因子分析[J]. 湖泊科学,20(5):681-686.
- 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.
- 王芳侠,祝国荣,刘晓峰,等,2020. 淇河河南段的水生植物区系及沉水植物群落特征[J]. 应用与环境生物学报,26(4):985-999.
- 王青,潘继征,吴晓东,等,2018. 太湖流域湖荡湿地有色溶解有机物特征分布与来源解析[J]. 江苏农业科学,46(21):279-285.
- 杨威,邓道贵,张赛,等,2012. 洱海叶绿素a浓度的季节动态和空间分布[J]. 湖泊科学,24(6):858-864.
- 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),4(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.
- 余雪芳,胡江琴,毛成贵,等,2008. 杭州西湖冬、春季水体光学特性比较[J]. 环境科学研究,21(4):119-125.
- 张呈,郭劲松,李哲,等,2010. 三峡小江回水区透明度季节变化及其影响因子分析[J]. 湖泊科学,22(2):189-194.
- 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.
- 张壹萱,张玉超,周雯,等,2018. 富营养化湖泊典型水华蓝藻的固有光学特性[J]. 湖泊科学,30(6):1681-1692.
- 张运林,秦伯强,陈伟民,等,2005a. 龙感湖水体光学特性的观测[J]. 湖泊科学,17(2):114-119.
- 张运林,秦伯强,陈伟民,等,2005b. 不同风浪条件下太湖梅梁湾光合有效辐射的衰减[J]. 应用生态学报,16(6):1133-1137.
- 张运林,2011. 湖泊光学研究进展及其展望[J]. 湖泊科学,23(4):483-497.
- 中国科学院南京地理与湖泊研究所,2015. 湖泊调查技术规范[M]. 北京:科学出版社:1-11.
- 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.
- Havens K E, 2003. Submerged aquatic vegetation correlations with depth and light attenuating materials in a shallow subtropical lake[J]. Hydrobiologia, 493:173-186.
- Kirk J T O, 1994. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems[M]. Cambridge:Cambridge University Press:47-144.
- Mladenov N, Sommaruga R, Morales-Baquero R, et al, 2011. Dust inputs and bacteria influence dissolved organic matter in clear alpine lakes[J]. Nature Communications, 2:405.
- 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: 365-377.
- Spencer R G M, Butler K D, Aiken G R, 2012. Dissolved organic carbon and chromophoric dissolved organic matter properties of rivers in the USA[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 17:1-14.
- Walsby A E, 1997. Numerical integration of phytoplankton photosynthesis through time and depth in a water column[J]. New Phytologist, 136(2):189-209.
- Wang W, Yang X, Huang L, et al, 2020. Attenuation of ultraviolet radiation and photosynthetically active radiation in six Yunnan Plateau lakes of China based on seasonal field investigations[J]. Journal of Limnology, 79(2):151-163.
- Zhang Y L, Qin B Q, Zhu G W, et al, 2006. Effect of sediment resuspension on underwater light field in shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River:A case study in Longgan Lake and Taihu Lake[J]. Science in China:Series D Earth Sciences, 49:114-125.
- Zhang Y L, Zhang B, Ma R H, et al, 2007. Optically active substances and their contributions to the underwater light climate in Lake Taihu, a large shallow lake in China[J]. Fundamental and Applied Limnology, 170(1):11-19.
- Zhang Y L, Yin Y, Zhang E, et al, 2011. Spectral attenuation of ultraviolet and visible radiation in lakes in the Yunnan Plateau, and the middle and lower reaches of the Yangtze River, China[J]. Photochemical and Photobiological Sciences, 10:462-482.
- 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, 2(10):185-197.

Optical Properties of Five Typical Lakes in Southeastern Hubei Province

WU Chao¹, WU Xiao-dong^{1,2}, GE Xu-guang^{1,2}, REN Wei-xiang³, FENG Lian¹, YANG Jiu-yun¹, TAN Ya¹

1. College of Urban and Environmental Sciences, Hubei Normal University, Huangshi 435002, P.R. China;
2. Huangshi Prevention and Control of Soil Pollution Key Laboratory, Huangshi 435002, P.R. China;
3. China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, P.R. China)

Abstract: In recent years, eutrophication of some lakes in southeast Hubei Province has intensified due to industrial and agricultural production and pollution from domestic sewage, and the need for ecological restoration is urgent. In this study, five typical lakes (Xiandao, Liangzi, Wanghu, Cehu and Qingshan Lakes) in southeast Hubei Province were selected for study, and we explored the temporal and spatial variation of optical properties in the five lakes by analyzing the light attenuation coefficient (K_d), euphotic zone depth (Z_{eu}), photosynthetically active radiation (PAR) and other optical parameters. The factors influencing the variation in optical properties were also identified. The objectives were to provide a reference for aquatic vegetation restoration of the eutrophic lakes in this area. The study was based on a seasonal field investigation and water quality monitoring in the five lakes during autumn and winter of 2018, and spring and summer of 2019. Results show that: (1) The Secchi depth (SD), suspended solids (SS) and chlorophyll-a (Chl-a) of the five lakes were all significantly different ($P < 0.01$). (2) The concentrations of dissolved organic matter (DOM) in Xiandao Lake and Liangzi Lake were relatively low, with annual mean values of (1.38 ± 0.39) and $(2.36 \pm 0.92) \text{ m}^{-1}$, respectively, significantly different from those in other lakes ($P < 0.01$). (3) The spatial distribution of K_d among lakes also varied significantly ($P < 0.01$), with the following annual averages: Xiandao Lake $[(0.36 \pm 0.21) \text{ m}^{-1}] < \text{Liangzi Lake} [(1.81 \pm 0.89) \text{ m}^{-1}] < \text{Qingshan Lake} [(3.77 \pm 1.89) \text{ m}^{-1}] < \text{Cehu Lake} [(4.40 \pm 1.90) \text{ m}^{-1}] < \text{Wanghu Lake} [(4.70 \pm 2.54) \text{ m}^{-1}]$. (4) The primary influencing factor of K_d in Xiandao Lake was DOM, while K_d in Liangzi Lake and Wanghu Lake was primarily affected by the SS, DOM and Chl-a were the important factors resulting in the high K_d in Cehu Lake and Qingshan Lake, particularly the DOM. (5) The Z_{eu} of each lake correlated significantly with SD ($P < 0.01$), and Z_{eu} can thus be estimated from the Secchi depth, providing a reference for selecting areas for submerged plant restoration.

Key words: southeastern Hubei Province; typical lakes; photosynthetically active radiation (PAR); optical attenuation coefficient (K_d); euphotic depth (Z_{eu})