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. CHENG Wen-juan, BAO Li, LUO Xiong-xin, et al. Characteristics of phosphorus in the sediment of Dianchi Lake and its effects on algae[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(6): 822-828.

滇池水体沉积物磷素特征及其对藻类的影响

程文娟^{1,2},包 立^{2,3*},罗雄鑫²,张乃明^{2,3}

(1.天津市农业资源与环境研究所,天津 300192; 2.云南省土壤培肥与污染修复工程实验室,昆明 650201; 3.云南农业大学资源与环境学院,昆明 650201)

摘 要:为揭示在外源磷得到控制的情况下,滇池沉积物磷在适宜条件下释放特征及其对藻类的影响,采用室外模拟方法,研究 滇池沉积物与上覆水中的磷素特征,探索沉积物磷释放对藻类的影响。结果表明:上覆水下层水中各形态磷(总磷、可溶性磷、正 磷酸盐)含量高于上层水;沉积物中磷素形态以钙结合态磷和有机磷为主,向水体释放贡献最大的是铁铝结合态磷和有机磷;水 中正磷酸盐与水中叶绿素a含量呈正相关关系,正磷酸盐含量升高显著加剧水体富营养化;沉积物中可交换态磷含量与水体叶绿 素a呈极显著正相关,沉积物磷释放是藻类生长的最主要内源负荷。研究表明,控制水体中的正磷酸盐和沉积物中铁铝结合态磷 的浓度以及限制有机磷的转化和矿化是控制藻类的有效措施。

关键词:滇池;沉积物;磷素;藻类

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2019)06-0822-07 doi: 10.13254/j.jare.2018.0310

Characteristics of phosphorus in the sediment of Dianchi Lake and its effects on algae

CHENG Wen-juan^{1,2}, BAO Li^{2,3*}, LUO Xiong-xin², ZHANG Nai-ming^{2,3}

(1.Tianjin Institute of Agricultural Resources and Environment, Tianjin 300192, China; 2. Yunnan Soil Fertility and Pollution Remediation Engineering Laboratory, Kunming 650201, China; 3. College of Resource and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: In order to determine the release characteristics of phosphorus in Dianchi Lake, Yunnan, China under suitable conditions and evaluate its effects on algae in the presence of exogenous phosphorus, an outdoor simulation method was used to study the characteristics of phosphorus in the sediment and overlying water of Dianchi Lake and to explore the effects of phosphorus release from sediments on algae. The results showed that the phosphorus content(total phosphorus, dissolved phosphorus, and orthophosphate) in the lower layer of the overlying water was higher than that of the upper layer. Phosphorus was mainly present in the sediment as calcium-bound phosphorus and organic phosphorus. The most important contributions to phosphorus content in water were from iron-aluminum-bound phosphorus and organic phosphorus. There was a positive correlation between orthophosphate and chlorophyll content in water. The increase in orthophosphate content significantly aggravated the eutrophication of water. The exchangeable phosphorus content in the sediment was significantly positively correlated with chlorophyll in water. The release of phosphorus from the sediment was the most important endogenous load for algae growth. Therefore, controlling the concentration of iron-aluminum-bound phosphorus in orthophosphates and in sediment in water bodies, as well as limiting the conversion and mineralization of organic phosphorus, could be an effective control measure.

Keywords: Dianchi Lake; sediment; phosphorus; algae

*通信作者:包 立 E-mail:bbllty@163.com

收稿日期:2018-11-09 录用日期:2019-04-08

作者简介:程文娟(1982—),女,山西太原人,研究员,从事植物营养与农业环境保护研究。E-mail:13116119063@163.com

基金项目:云南省对外科技合作计划(2015IC022);国家水污染控制科技重大专项(2012ZX01702-003)

Project supported: The Yunnan Foreign Science and Technology Cooperation Program (2015IC022); The National Water Pollution Control Science and Technology Major Projects(2012ZX01702-003)

2019年11月

水体富营养化及有害藻类"水华"是一个全球性 的水环境问题。水体中过高氮、磷浓度是引起水体富 营养化和有害藻类"水华"的主要原因^[1-3]。磷被公认 为是水体中藻类种群和密度的第一限制性营养元 素^[4]。不同形态磷源的生物可利用度是不同的,无机 磷因为能被藻类所直接吸收利用,被认为是藻类最重 要的磷源。然而藻类在缺乏无机磷的情况下也能通 过碱性磷酸酶的作用利用有机磷来促进藻类的生 长^[5-7]。大量研究表明,水体磷浓度与藻类生物量之 间呈显著正相关^[8]。

沉积物具有很强的磷滞留能力,大量磷输入水体 后很多会被截留在沉积物中,沉积物即成为水体的磷 库。即使外源污染得到有效控制后,沉积物中释放的 磷也可以延长富营养化进程,甚至加剧富营养化程 度^[9]。因此,沉积物中磷的释放对水体富营养化及藻 类爆发具有重要作用。

内源磷有多种赋存形态,不同形态的磷其释放特 性、生物有效性和对湖泊富营养化的影响有很大差 别。影响沉积物内源磷释放的因素有物理、化学和生 物因素¹¹⁰¹,如水体温度、pH、溶解氧、扰动等。滇池沉 积物具有较强的磷释放能力,沉积物磷释放是滇池水 体中磷负荷的重要来源,尤其是在外源得到控制后, 沉积物内源磷的释放问题更为突出^{111]}。目前对滇池 沉积物的研究主要集中在沉积物磷的水平分布特 征^[12-14]、沉积物磷的形态^[15-16]、沉积物的释放通量^[17]、 影响沉积物磷释放的因素^{118]}等,而有关沉积物磷释放 过程与有害藻类"水华"之间的关系研究鲜有报道。

本文通过研究滇池上覆水和沉积物中不同形态 磷含量及其与水中叶绿素 a 含量的关系,分析了滇池 水体和沉积物中各形态磷与藻类生长的关系,探讨水 体和沉积物各形态磷对藻类生长的影响,理清了滇池 磷在沉积物与上覆水之间的迁移转化特征并查明其 与有害藻类"水华"的关系。

1 材料与方法

1.1 供试材料

上覆水和沉积物采用2017年6月30日在滇池龙 门生态公园码头(24°57′N,102°38′E)采集的样品。 利用采水器舀入塑料桶中,立即带回实验室备用。沉 积物用沉积物采集器(wi24605)采集表层沉积物(0~ 30 cm),搅匀后用于试验。

1.2 模拟试验

模型装置为长×宽×高=20 cm×30 cm×50 cm的玻

璃缸。将沉积物放于玻璃缸内(沉积物厚度10 cm), 用滇池原覆水作为上覆水(上覆水厚度30 cm),上覆 水中0~15 cm为上层水,15~30 cm为下层水。将整套 装置放于室外,且保证6个玻璃缸受到相同强度的光 照。每日观察玻璃缸中藻类的生长情况,并对蒸发水 进行及时补给。每周同一时间采水样进行各种形态 磷和叶绿素 a 的测定,总测定时间为7周。每次采样 之后,放入相同体积的蒸馏水。每15 d采集沉积物样 品,风干并对其不同形态的磷含量进行测定,总测定 时间为90 d。

1.3 分析项目与方法

水样由 0.45 μm 滤膜过滤后用 90% 乙醇萃取,萃 取液用紫外分光光度计进行比色测定细胞叶绿素 a 含量。经过 0.45 μm 滤膜过滤后的滤液消解后,用钼 锑抗分光光度法测定可溶性磷(DP);正磷酸盐用钼 锑抗分光光度法直接测定。

可交换态磷、铁铝结合态磷、钙结合态磷用欧洲 标准测试委员会制定的SMT法(标准测试方法)对沉 积物中各种形态磷进行分级提取和测定。

(1)可交换态磷(Ex-P):准确称取沉积物样 0.5 g 于 50 mL 离心管中,加入 1.0 mol·L⁻¹ MgCl₂溶液 20 mL,置于恒温水浴振荡器中振荡 2 h,离心提取可交 换态磷。

(2)铁铝结合态磷(Fe/Al-P):浸提过Ex-P的剩 余残渣中加入20mL1mol·L⁻¹的NaOH溶液,加盖摇 匀,振荡12h,离心提取铁铝结合态磷。

(3)钙结合态磷(Ca-P):浸提过铁铝结合态磷的 残渣用饱和NaCl溶液洗涤2次,每次离心5min,弃上 清液,加入20mL1mol·L⁻¹盐酸,加盖摇匀,振荡12 h,离心提取钙结合态磷。

(4)总磷(TP):分别准确称取不同目数的沉积物 土样 0.5g于干燥的坩埚中,放入马弗炉中,450℃煅烧3h;冷却后,移至离心管,加入20mL 3.5mol·L⁻¹盐酸,加盖摇匀,振荡16h,离心提取总磷。总磷的测定 采用钼锑抗分光光度法^[18]。

2 结果与讨论

2.1 上覆水中磷形态及变化特征

2.1.1 上覆水中磷形态特征

天然水体中磷的物理状态主要分为溶解态、悬浮态及胶体三种状态¹¹⁹¹,为了调查生物可利用的磷含量,主要分析了总磷、可溶性磷和正磷酸盐含量(表1)。结果显示:上层水中总磷含量为0.158 mg·L⁻¹,下

	表1 水中不同形态磷的含量(mg·L ⁻¹)	
Table 1	The different forms of phosphorus content in water(mg·L ⁻	1)

项目 Items	总磷TP		可溶性磷 DP		正磷酸盐Orthophosphate		
	上层 Upper layer	下层 Lower layer	上层 Upper layer	下层 Lower layer	上层 Upper layer	下层 Lower layer	
平均值	0.158	0.193	0.114	0.147	0.036	0.063	
标准差	0.045	0.031	0.034	0.034	0.006	0.009	

层水中总磷含量为0.193 mg·L⁻¹;水体中可溶性磷所 占的比例较大,上层水中的含量为总磷的72.2%,下 层水中的含量为总磷的76.2%;水中正磷酸盐含量较 少,其在上层水中的含量为总磷的22.8%,下层水中 的含量为总磷的32.6%。下层水中不同形态磷含量 均比上层水高,一是由于附着在悬浮颗粒物上的磷随 着颗粒物的沉积而下沉,二是由于沉积物磷释放过程 是一个从高浓度扩散到低浓度的过程,导致距离沉积 物近的下层水中磷含量明显比上层水高^[20-22]。 2.1.2 上覆水中不同形态磷动态变化

由于浮游植物的趋光性,藻类等一般生长在水体 表层,因此上覆水中一部分的磷会被藻类等浮游植物 直接利用。上覆水中磷浓度的减少,加剧了上覆水与 沉积物间隙水之间磷浓度的梯度差,从而加速了沉积 物磷向上覆水释放^[23]。与此同时,温度、pH、溶解氧 等条件的变化也会影响沉积物磷向上覆水释放的强 度和频度^[24]。因此,研究上覆水中不同形态磷动态变 化可以很好地反映磷从沉积物到上覆水之后的行为 过程。如图1A显示,下层水中的总磷含量在0.14~ 0.32 mg·L⁻¹之间,上层水的总磷含量在0.11~0.28 mg· L⁻¹之间。总磷含量在0~7 d明显增加、7~14 d明显下 降。在14~35 d基本不变化,处于较低值(0.14 mg· L⁻¹)。35~42 d又明显上升,42~49 d明显下降至0.13 mg·L⁻¹。

如图 1B 所示上下两层水中可溶性磷的变化趋势 基本相同,即在 0~7 d 明显增加,含量分别从 0.11 mg· L⁻¹和 0.12 mg·L⁻¹增加至 0.19 mg·L⁻¹和 0.26 mg·L⁻¹, 7~14 d 明显下降,含量分别降至 0.09 mg·L⁻¹和 0.14 mg·L⁻¹。在 14~35 d 保持平稳,而在试验 35 d 以后又 有一个略微上升的过程,在试验第 42 d 时又有所下 降,49 d 时分别降至 0.08 mg·L⁻¹和 0.10 mg·L⁻¹。总 体而言,上层水的可溶性磷值在 0.08~0.19 mg·L⁻¹之 间,下层水中的可溶性磷值在 0.10~0.26 mg·L⁻¹之 间。

以上数据分析发现,水中总磷和可溶性磷的变化

趋势基本一致。在试验初期,由于人为扰动使沉积物 中的磷大量释放出来,促使水体中磷浓度增加。后期 由于藻类生长消耗了水中的生物可利用态磷,导致水 体中磷浓度略微减小。到后期沉积物中的磷从间隙 水扩散到上覆水中使总磷和可溶性磷又有所升高。 内源磷的释放是先通过泥水临界表面再释放到水里, 间隙水中溶解磷的浓度约是上覆水的103倍,扩散作 用导致磷酸盐从高浓度到低浓度^[55]。因此下层水中 总磷比上层水中高。水中的正磷酸盐可直接被生物 利用,有研究结果显示其含量往往不足湖水总磷的



Figure 1 Different forms of phosphorus content changes with time in overlying water

http://www.aed.org.cn

5%^[26],因此正磷酸盐在水中的含量较低。

如图 1C 所示,上层水的正磷酸盐含量在 0.01~ 0.07 mg·L⁻¹之间,下层水中的正磷酸盐的含量在 0.02~0.08 mg·L⁻¹之间。在试验的第 0~7 d上下两层 正磷酸盐浓度下降,分别从 0.05 mg·L⁻¹和 0.08 mg·L⁻¹ 降至 0.01 mg·L⁻¹和 0.05 mg·L⁻¹,随后上升,14 d时升 至 0.07 mg·L⁻¹和 0.07 mg·L⁻¹。之后又开始下降,至 35 d时均降到 0.02 mg·L⁻¹,后期下层水中的正磷酸盐 上升至 0.06 mg·L⁻¹。试验初期由于藻类的生长,水体 变绿,导致正磷酸盐含量减少,后期下层的正磷酸盐 略微升高,因为在高磷条件下,藻类可以吸收过量的 磷,以聚磷酸盐的形式积蓄在体内,帮助藻类在磷缺 乏时期生长¹²⁷⁻²⁸¹。之后,由于部分藻类的凋亡,水体 变混浊,藻类残体又向水体释放磷。

2.2 沉积物中磷形态及变化特征

2.2.1 沉积物中磷形态特征

沉积物内源磷有多种赋存形态,总体分为有机磷和无机磷。本研究测定了沉积物中可交换态磷、铁铝结合态磷、有机磷以及总磷。由图2可知,在滇池沉积物中,磷以钙结合态磷为主,达到了总磷含量的49.7%~53.3%;其次是有机磷,达到了总磷含量的28.5%~32.1%;铁铝结合态磷的含量占总磷含量的14.2%~16.4%;可交换态磷含量最少,只占总磷含量的2.0%~2.7%。



图2 不同时期沉积物中不同磷形态占总磷百分数

Figure 2 Different forms percentage of total phosphorus in the sediments at different periods

2.2.2 沉积物中不同形态磷动态变化

图 3A 显示,沉积物中总磷含量在 1625~1765 μg· g⁻¹。试验过程中沉积物中总磷呈下降趋势,结束时比 试验初期的总磷含量减少了 8%。不同形态磷的变化 特征如下。 2019年11月

(1)可交换态磷主要是那些通过物理吸附作用吸 附到沉积物固体表面的磷,沉积物中可交换态磷是进 入水体中磷的主要形式。图3B显示可交换态磷含量 较少,为32.4~44.9 μg·g⁻¹。试验过程中可交换态磷变 化不大,多数时间保持在35 μg·g⁻¹左右,但在试验进 行到30 d时达到了一个较高的异常值,为44.9 μg· g⁻¹。可交换态磷主要通过物理吸附将磷吸附到沉积 物固体表面,因此外界的环境变化容易影响其含量。 试验初期的搅动作用,导致沉积物与水的临界表面不 稳定,使沉积物间隙水与上覆水之间的可交换态磷有 所增加。后期由于扩散作用磷进入水中,可交换态磷 的量处于平衡的状态。

(2)铁铝结合态磷(Al/Fe-P)受外界条件影响较 大,当氧化还原电位或pH值发生改变时,均可能由沉 积物转移至上覆水,增加水体中的磷浓度,为藻类的 生长提供磷源,因此具有向上覆水释放的潜能^[13]。由 图 3C可知,铁铝结合态磷含量为236~285 µg·g⁻¹。随 着试验时间的推移,铁铝结合态磷含量呈下降趋势, 从试验初期的最高值 285 µg·g⁻¹到试验 75 d的最低 值 236 µg·g⁻¹,减少了 18.2%。浅水湖泊沉积物中,不 稳定态磷、铝磷和铁磷是最主要、最容易释放的磷形 态^[29]。说明试验期间沉积物中有很大一部分铁铝结 合态磷释放到了水中,铁铝结合态磷是沉积物与上覆 水磷交换的主要形式之一。

(3)钙结合态磷(Ca-P)是沉积物中较惰性的磷 组分,被认为是生物难利用磷,通常被看作是永久性 磷汇,在弱酸性条件下会有少量的释放。由图 3D 可 知钙结合态磷含量最多,在 868~878 µg·g⁻¹之间。随 着试验时间的推移,钙结合态磷含量有下降趋势,从 试验初期的最高值 878 µg·g⁻¹到试验 45 d 时的最低 值 868 µg·g⁻¹,减少了 1.1%。由于钙结合态磷难溶于 水,且滇池沉积物呈弱碱性,因此在试验过程中钙结 合态磷的释放非常少。

(4)有机磷即有机物中含有的磷,部分有机磷可 被生物利用。由图 3E 可知,有机磷含量为463~567 μg·g⁻¹。随着试验时间的推移,有机磷含量有明显的 下降趋势,45 d时相对于试验开始时减少了18%。由 于沉积物有机磷源自沉积物中各种动植物残体、腐殖 质类有机物,因此可以推断,在试验期间有机磷正在 矿化,矿化作用导致有机磷向无机磷转化,可能部分 源自矿化作用的无机磷实现了向上覆水体释放。

2.3 水中正磷酸盐与藻类之间的关系

叶绿素a浓度和藻类密度在藻类爆发期间存在





Figure 3 Different forms of phosphorus content changes with time in the sediments

显著相关,且叶绿素 a浓度和藻类密度的自然对数比 值也与藻类发生和兴衰存在着规律性联系^[30]。如图4 所示,浮游植物的生长(叶绿素 a水平)与上层水中的 正磷酸盐含量呈正相关关系,在一定浓度范围内营养 盐对浮游植物的生长有促进作用,过低的营养盐会限 制浮游植物的数量^[31],过高的营养盐不仅能导致赤 潮,还会使浮游植物种类组成发生变化,使优势种明 显减少^[32]。

2.4 沉积物磷与水体磷和叶绿素 a 的相关分析

沉积物是水体的磷库,对水体富营养化起着重要的作用。沉积物中磷释放到水中供给藻类生长,藻类就会大量爆发。由表2可见,水中叶绿素a与沉积物

中可交换态磷呈极显著的正相关性。可交换态磷容 易进入水中,并容易被浮游植物利用,促进水中浮游 植物的生长。因此,当水中的磷浓度处于一定范围 时,沉积物中的可交换态磷含量与浮游植物的数量呈 正相关,即沉积物中可交换态磷增加时,水中浮游植 物的量随之增加。沉积物中可交换态磷与水体可溶 性磷呈极显著正相关,相关系数为0.92。

3 结论

(1) 滇池水中总磷的含量为:上层水 0.11~0.28 mg·L⁻¹,以可溶性磷为主,下层水 0.14~0.32 mg·L⁻¹,下 层水磷素各形态含量均高于上层水。

Table 2 The correlation matrix between P forms in the sediments and DP, chlorophyll a in water										
项目 Items	总磷 TP	可交换态磷 Ex-P	铁铝结合态磷 Fe/Al-P	钙结合态磷 Ca-P	有机磷 Organic-P	水体可溶性磷 DP	水体叶绿素 a Chlorophyll a			
 总磷	1.00		10/111	Guli	organic 1	DI	emorophyn u			
可交换态磷	0.03	1.00								
铁铝结合态磷	0.77*	0.04	1.00							
钙结合态磷	0.97**	0.01	0.76*	1.00						
有机磷	0.94**	-0.10	0.52	0.91**	1.00					
水体可溶性磷	0.06	0.92**	0.24	0.10	-0.16	1.00				
水体叶绿素a	0.07	0.90**	0.32	0.05	-0.17	0.93**	1.00			

表2 沉积物磷形态与水中可溶性磷、叶绿素a的相关性矩阵

注:*P<0.05,**P<0.01。



content in overlying water

(2) 滇池沉积物的总磷含量为1625~1765 μg·g⁻¹, 以钙结合态磷为主,约占总磷的50%,其次是有机 磷,约占总磷的30%,余下为铁铝结合态磷和可交换 态磷。

(3)水中正磷酸盐与水中叶绿素 a呈正相关,水 中正磷酸盐含量的升高会导致水体富营化的加剧。 沉积物中可交换态磷与水体叶绿素 a呈极显著正 相关。

参考文献:

- Howdah R W, Marino R. Nitrogen as the limiting nutrient for eutrophication in coastal marine ecosystems: Evolving views over three decades limnology[J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(1):364-376.
- [2] Carpenter S R. Phosphorus control is critical to mitigating eutrophication[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008, 105 (32):11039–11040.
- [3] Hastier Y, Niklaus P A, Hector A. Competition for light causes plant biodiversity loss after eutrophication[J]. Science, 2009, 324 (5927): 636-638.
- [4] Bowes M J, House W A, Hodgkinson R A, et al. Phosphorus-discharge

hysteretic during storm events along a river catchment: The River Swale, UK[J]. *Water Research*, 2005, 39(5):751-762.

- [5] 王明殊, 张运林, 刘笑菡, 等. 不同营养水平湖泊浮游植物吸收和比吸收系数变化特征[J]. 湖泊科学, 2013, 25(4):505-513.
 WANG Ming-shu, ZHANG Yun-lin, LIU Xiao-han, et al. Phytoplankton absorption and chlorophyll-specific absorption coefficients characteristics of different trophic level lakes[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, 25(4):505-513.
- [6] Conter J B, Wetzel R G. Uptake of dissolved inorganic and organic phosphors compounds by phytoplankton and bacterioplankton[J]. *Lim*nology and Oceanography, 1992, 37(2):232-243.
- [7] Hong H S, Wang H L, Huang B Q. The availability of dissolved organic phosphorus compounds to marine phytoplankton[J]. *Chinese Journal of Oceanography Limnology*, 1995, 13(2):169–179.
- [8] Hockey R E, Kilham P. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment[J]. *Limnology and Oceanography*, 1988, 33 (4): 796-822.
- [9] 琚泽文, 蔚枝沁, 邓 泓.水生植被恢复对城市景观水体磷浓度及 沉积物磷形态的影响[J]. 湖泊科学, 2015, 27(2):234-242.
 JU Ze-wen, WEI Zhi-qin, DENG Hong. Effects of aquatic vegetation rehabilitation on phosphorus in water and sediments of urban land-
- scape waters[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(2):234-242.
 [10] 孟顺龙, 瞿建宏, 裘丽萍, 等. 富营养化水体降磷对浮游植物群落 结构特征的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(9):1578-1582.
 - MENG Shun-long, QU Jian-hong, QIU Li-ping, et al. Effect of decreasing phosphorus in eutrophic water on the community structure of phytoplankton[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(9): 1578–1582.
- [11] 黎 睿, 王圣瑞, 肖尚斌, 等. 长江中下游与云南高原湖泊沉积物 磷形态及内源磷负荷[J]. 中国环境科学, 2015, 35(6):1831-1839. LI Rui, WANG Sheng-rui, XIAO Shang-bin, et al. Sediments phosphorus forms and loading in the lakes of the mid-lower reaches of the Yangtze River and Yunnan Plateau, China[J]. China Environmental Science, 2015, 35(6):1831-1839
- [12] 王心宇,周 丰,伊 旋,等. 滇池沉积物中主要污染物含量时间 分异特征研究[J]. 环境科学, 2014, 35(1):194-201.

WANG Xin-yu, ZHOU Feng, YI xuan, et al. Study on the stages of major sediments in Dianchi Lake[J]. *Environmental Science*, 2014, 35 (1):194–201.

- [13] 何 佳, 陈春瑜, 邓伟明, 等. 滇池水-沉积物界面磷形态分布及潜 在释放特征[J]. 湖泊科学, 2015, 27(5):799-810.
 HE Jia, CHEN Chun-yu, DENG Wei-ming, et al. Distribution and release characteristics of phosphorus in water - sediment interface of Lake Dianchi[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(5):799-810.
- [14] 陈永川,汤 利,张德刚,等. 滇池沉积物总磷的时空分布特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1):51-57.
 CHEN Yong-chuan, TANG Li, ZHANG De-gang, et al. The spatially and temporally dynamic variation of total phosphorus in sediment of Dianchi Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1): 51-57.
- [15] 李 乐,王圣瑞,王海芳,等. 滇池入湖河流磷负荷时空变化及形态组成贡献[J]. 湖泊科学, 2016, 28(5):951-960.
 LI Le, WANG Sheng-rui, WANG Hai-fang, et al. Temporal and spa-

tial variations of phosphorus loading and the forms, compositions and contributions in inlet of Lake Dianchi[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(5):951–960.

- [16] 高 丽,杨 浩,周建民,等. 滇池沉积物磷内负荷及对水体贡献的研究[J]. 环境科学学报, 2004, 24(5):776-781.
 GAO Li, YANG Hao, ZHOU Jian-min, et al. Sediment burden and release potential of phosphorus to water in Dianchi Lake, China[J]. Acta Science Circumstantiae, 2004, 24(5):776-781.
- [17] 杨逢乐, 吴文卫, 陈建中, 等. 滇池沉积物中磷的释放行为研究[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(12):48-52.
 YANG Feng-le, WU Wen-wei, CHEN Jian-zhong, et al. Release behavior of phosphate in Dianchi sediments[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 32(12):48-52.
- [18] 国家环保局.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科 学出版社,2002:246-248.

The State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring and analysis method[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002:246–248.

[19]高 丽,杨 浩,周建民.环境条件变化对滇池沉积物磷释放的影响[J].土壤,2005,37(2):216-219.

GAO Li, YANG Hao, ZHOU Jian-min. Phosphorus release from sediments in Dianchi Lake under different environmental conditions[J]. Soils, 2005, 37(2):216-219.

- [20] Patterson K. Phosphorus characteristics of settling and suspended particles in Lake Erken[J]. Science of the Total Environment, 2001, 266(1/ 2/3):79–86.
- [21] Fitzsimons M F, Lohan M C, Tappin A D, et al. The role of suspended particles in estuarine and coastal biogeochemistry[J]. *Treatise on Estuarine and Coastal Science*, 2011, 4:71–114.

- [22] Hill C R, Robinson J S. Phosphorus flux from wetland ditch sediments[J]. Science of the Total Environment, 2012, 437:315–322.
- [23] Lv J, Wu H, Chen M. Effects of nitrogen and phosphorus on phytoplankton composition and biomass in 15 subtropical, urban shallow lakes in Wuhan, China[J]. *Limnologica*, 2011, 41(1):48-56.
- [24] Jin X, Wang S, Pang Y, et al. Phosphorus fractions and the effect of pH on the phosphorus release of the sediments from different trophic areas in Taihu Lake, China[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 139 (2):288–295.
- [25] 李 慧, 余能智. 富营养化浅水湖泊沉积物磷释放机理研究综述
 [J]. 水资源开发与管理, 2016(4):56-58.
 LI Hui, YU Neng-zhi. Review of studying eutrophication shallow water lake sediment phosphorus release mechanism[J]. Water Resources Development and Management, 2016(4):56-58.
- [26]章婷曦,王晓蓉,金相灿.太湖沉积物中碱性磷酸酶活力(APA)和 磷形态的垂向特征及相关性[J].农业环境科学学报,2007,26(1): 36-40.

ZHANG Ting-xi, WANG Xiao-rong, JIN Xiang-can. Vertical variation of alkaline phosphatase activity and phosphorus forms in the Taihu Lake sediment and the relationship between them[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1):36-40.

- [27] Bental M, Oren-Shamir M, Avron M, et al. ³¹P and ¹³C-NMR studies of the phosphorus and carbon metabolites in the halo tolerant alga, *Dunaliella salina*[J]. *Plant Physiology*, 1988, 87(2): 320-324.
- [28] Kulaev I S, Vagabov U M. Polyphosphate metabolism in micro-organisms[J]. Advances in Microbial Physiology, 1983, 24:83-171.
- [29] Wang S, Jin X, Zhao H, et al. Phosphorus fractions and its release in the sediments from the shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River area in China[J]. *Colloids and Surfaces A*: *Physicochemical and Engineering Aspects*, 2006, 273(1/2/3):109–116.
- [30] 于海燕,周 斌,胡尊英,等.生物监测中叶绿素 a浓度与藻类密度的关联性研究[J].中国环境监测,2009(6):40-43.
 YU Hai-yan, ZHOU Bin, HU Zun-ying, et al. Study on correlation between chlorophyll a and algal density of biological monitoring[J]. Environmental Monitoring in China, 2009(6):40-43.
- [31] 王 岩,姜 霞,李永峰,等.洞庭湖氮磷时空分布与水体营养状态特征[J].环境科学研究,2014,27(5):484-491.
 WANG Yan, JIANG Xia, LI Yong-feng, et al. Spatial and temporal distribution of nitrogen and phosphorus and nutritional characteristics

distribution of nitrogen and phosphorus and nutritional characteristics of water in Dongting Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(5):484-491.

[32] 郭怀成, 王心宇, 伊 璇. 基于滇池水生态系统演替的富营养化控制策略[J]. 地理研究, 2013, 32(6):998-1006.
GUO Huai-cheng, WANG Xin-yu, YI Xuan. Study on eutrophication control strategy based on the succession of water ecosystem in the Dianchi Lake[J]. *Geographical Research*, 2013, 32(6):998-1006.