

沉积物扰动下太湖月亮湾中生物有效磷的变化规律

李大鹏, 王 晶, 黄 勇

(苏州科技学院环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215011)

摘 要:采用藻类吸收的方法,研究了太湖月亮湾沉积物在高强度扰动下,上覆水和悬浮物上生物有效磷(BAP)的变化规律,并分析了溶解性总磷(DTP)的生物有效性。结果表明,沉积物扰动导致上覆水中 BAP 含量增加,但其却低于 DTP,说明 DTP 中含有生物无效的磷。沉积物扰动下,悬浮物上 BAP 呈降低趋势。通过悬浮物上 BAP 含量来计算上覆水中可被生物利用颗粒态磷(BAPP),发现 DTP 中具有生物有效性的磷占 77%左右。与化学方法相比,采用藻类吸收测得的上覆水和悬浮物上 BAP 均较低,并且扰动过程中 BAP 的变化趋势也明显不同。从而说明,以往研究可能过高地估计了内源磷释放对浅水湖泊富营养化的贡献。

关键词:藻类;生物有效磷;沉积物;月亮湾

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2013)04-0792-06 doi:10.11654/jaes.2013.04.020

Variation of Bioavailable Phosphorus in Yueliang Bay of Tai Lake Under Sediment Disturbance Conditions

LI Da-peng, WANG Jing, HUANG Yong

(School of Environmental Science and Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: By using algae to determine the bioavailable phosphorus (BAP), the variations of BAP in overlying water and on the suspended solids were investigated and the bioavailability of dissolved total phosphorus (DTP) was analyzed under repeated disturbance with high intensity, with the sediments and overlying water from Yueliang Bay in Tai Lake. The results showed that the concentrations of BAP in the overlying water increased due to sediment disturbance, but it was lower than DTP, indicating that part of DTP was not bioavailable. On the contrary, the concentrations of BAP on the suspended solids decreased under sediment disturbance, indicating that sediment disturbance could improve transformation of phosphorus from bioavailable forms to nonbioavailable forms on the suspended solids. Therefore, the bioavailability of particulate phosphorus decreased from 7% (7 d) to 2.5% (21 d) with the experiment time extending. It was calculated that the percentage of bio-DTP to DTP was 77%, using the concentrations of BAP on the suspended solids to determine the bioavailable particulate phosphorus (BAPP) in the overlying water. The BAP in the overlying water and on the suspended solids was lower marked using algae, compared with chemistry methods. Moreover, the trends of both BAP using algae were different from those using chemistry methods. It is suggested that the previous studies may overestimate the contribution of internal phosphorus release to eutrophication in shallow lakes.

Keywords: algae; bioavailable phosphorus; sediment; Yueliang Bay

太湖位于长江中下游平原,是我国著名的浅水湖泊,由于其风浪频繁,导致沉积物极易受到扰动而悬浮。近年来,有关沉积物扰动下内源磷变化的研究颇多^[1-2],这些研究的最终目的是探讨沉积物扰动对水体富营养化发展进程的影响。然而,这些研究主要是从内源磷形态的迁移活性或生物有效性或者特定环境因子条件下内源磷释放量入手,对沉积物扰动在水体富营养化发展进程中的作用进行评估。实际上,这种评估

仅是体现了水体富营养化的潜在风险^[3]。因为藻类在生长过程中是否可以充分利用这些磷值得探讨^[4],并且沉积物扰动不仅会改变上覆水中不同形态磷的数量分布^[5],也会改变悬浮物上内源磷的数量分布^[6-7],这会对内源磷的迁移活性和生物有效性产生影响。另外,李大鹏等^[8]研究表明,扰动下新形成的形态磷的性质与原形态磷有所不同。因此,基于内源磷性质的评估可能过高地估计了水体富营养化的风险。

近年来,已有一些研究采用微生物培养的方式来测定水里或沉积物中生物可利用磷含量^[9-10],这种方法的测定结果较为真实地反映了生物可利用磷(BAP)含量^[11]。对于太湖而言,水体富营养化以蓝藻的大量生长繁殖为主要特征^[12],因此本文选择了在我国研究

收稿日期:2012-10-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51178284, 50938005, 51278523);江苏省“青蓝工程”中青年学术带头人项目(2012)

作者简介:李大鹏(1975—),博士,研究方向为城市水体修复。

E-mail:ustsldp@163.com

较多,同时也是太湖优势种的铜绿微囊藻作为培养藻类,研究了反复扰动下上覆水、悬浮物中生物有效磷的变化规律,并与其他被认为生物有效磷(如上覆水中溶解性总磷,悬浮物上藻类可利用磷等)进行对比分析,同时分析了溶解性总磷的生物有效性。为揭示沉积物扰动与水体富营养化之间的关系提供理论依据和数据支持。

1 材料与方法

1.1 沉积物与上覆水的采集

试验用的沉积物于 2012 年 3 月采自太湖月亮湾(N 31°24'38.8", E 120°6'4.57")。利用进口大口径柱状采样器(Rigo Co.直径 110 mm,高 500 mm)采集无扰动柱状样,并现场切得表层 1 cm 的沉积物样品,用冰盒保存(4℃)送至实验室。同时取采样点上覆水 100 L。当天将沉积物与上覆水带回实验室,并开始沉积物扰动实验。沉积物和上覆水理化性质见表 1。

1.2 试验方法

取 2 个 5 L 圆形容容器作为试验装置($d=17$ cm, $h=25$ cm)。分别加入取自月亮湾的湿沉积物 200 g 和月亮湾上覆水 2.5 L。采用恒速搅拌机(IKA RW20 digital)对沉积物进行扰动,每日扰动 1 h($200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$),随后沉积物自然沉降。

试验开始后间隔一定时间取样测定上覆水中溶解性总磷(DTP)、溶解性磷酸盐(DIP)浓度,同时监测溶解氧(DO)、pH 值的变化。于第 7、14、21 d 取上覆水、悬浮物用于生物可利用磷(BAP)的测定,同时取沉积物用于分析藻类可利用磷(AAP)。试验于第 21 d 结束。采样位置为水面以下 10 cm 处,采样量为 100 mL。每次采完水样,立即向容器中补充等量上覆水。

1.3 分析方法

将水样消解后测定总磷(TP);将水样经过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜过滤后的滤液消解后测定溶解性总磷(DTP);将水样经过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜过滤后直接测定溶解性磷酸盐(DIP)。溶解性有机磷(DOP)为 DTP 与 DIP 差值;颗粒态磷(PP)为 TP 与 DTP 差值。

上覆水和悬浮物上 BAP 的测定参照 Ellison 等^[9]总结的方法,试验所用藻类为铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)。上覆水中叶绿素 a 的测定采用 Water Pam s/n edee 0225 叶绿素仪。

AAP 参照 Zhou 等^[13]总结的方法,悬浮物和沉积物中不同形态磷的分析参照文献[14]的方法。

可被生物利用颗粒态磷(BAPP)的计算采用两种方法:方法一是根据吴重华^[4]和 Peters^[15]等研究成果,认为 DTP 中 67.5%是生物有效的,即 $\text{BAPP}=\text{BAP}-67.5\%\text{DTP}$;方法二是仅将 DIP 认定为生物有效,即 $\text{BAPP}=\text{BAP}-\text{DIP}$ 。

上覆水中溶解氧(DO)和 pH 值分别通过便携式溶解氧测定仪(HACH HQ30d,美国)和数显 pH 计(pHs-3TC,武汉)测定。

沉积物粒径采用激光粒度分析仪(ZetaPALS, USA)测定。将 0.50 g 干沉积物放置在烧杯中,加入 50 mL 蒸馏水,用手摇晃 5 min,使得沉积物充分混匀,然后用激光粒度分析仪测定。

沉积物含水率的定义为 105℃烘干 12 h 的质量损失,有机质含量的定义为 550℃灼烧 2.5 h 的质量损失。

2 结果与讨论

2.1 反复扰动对上覆水 BAP 的影响

沉积物扰动会通过促进间隙水中磷释放,水动力作用、颗粒物质间摩擦力作用等促使悬浮物上形态磷释放等,进入水体的颗粒物质会吸附溶解性磷等,从而改变上覆水中不同形态磷的数量分布,进而导致上覆水中生物可利用态磷(BAP)发生变化(图 1)。

图 1 显示,月亮湾沉积物扰动后,上覆水中 BAP 呈先增高后降低的趋势。其在第 14 d 达到最高值($38.62\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),第 21 d 时下降至 $31.66\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,依然高于初始状态($20.39\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),但与第 7 d 和第 21 d 相比则有所降低。从实验结果来看,沉积物扰动导致上覆水中可被生物利用态磷含量升高。这主要是源于 3 个原因:一是扰动致使间隙水中溶解性磷酸盐的释放^[16];二是水动力作用下,进入水体的颗粒物质表面吸附的弱

表 1 月亮湾沉积物和上覆水的理化性质

Table 1 Physics-chemical properties of sediments and overlying water from Yueliang Bay

项目	DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	pH	含水率/%	有机质/%	DTP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Tot-P/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	叶绿素 a/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	粒径/ μm		
								<5	5~50	50~250
沉积物		7.33	39.01	2.9	0.065	0.82		25.5%	52.3%	22.1%
上覆水	8.9	8.31					12.15			

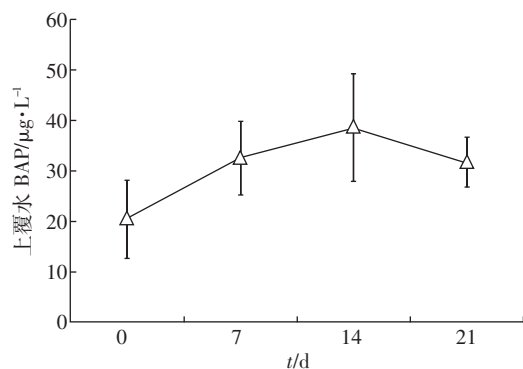


图1 上覆水中 BAP 的变化规律

Figure 1 Variation of BAP in the overlying water

吸附态磷及其他易释放态磷向溶解性磷酸盐的转化^[17],而由于月亮湾的中小粒径颗粒物质含量较高(77.8%),在水动力作用下,颗粒物质间相互摩擦,致使悬浮物上磷发生释放;三是扰动过程中导致溶解氧融入,致使中小分子有机物被氧化,导致有机磷矿化释放^[18]。

Ellison 等^[9]认为,水体中 BAP 是由溶解性总磷(DTP)和可被生物利用颗粒态磷(BAPP)组成。但 DTP 并不能完全被生物利用,其中,DIP 均可以被利用,而 DOP 则仅部分可以被利用,特别是其与腐植酸等结合,生物有效性大幅度降低^[19]。本研究证明了这一点,如图 2 显示,DTP 测定值高于 BAP($P<0.01$),说明 DTP 中确实含有部分磷是不能被生物利用的。吴重华^[4]和 Peters^[15]等研究也证明了这一点。因此,我们综合吴重华^[4]和 Peters^[15]等研究成果,认为 DTP 中 67.5%是生物有效的,从而得到 DTP 计算值,从图 2 可以看出,扰动后水体中 BAP 含量高于 DTP 计算值($P<0.05$)。然而,在初始状态,计算后的 DTP 含量仍明显高于 BAP。这说明沉积物扰动后,导致 DTP 中生物有效磷(DIP)含量及其所占比例增加,从图 3 可以看出,第 14 d 时 DIP 占 DTP 的百分比达到最高

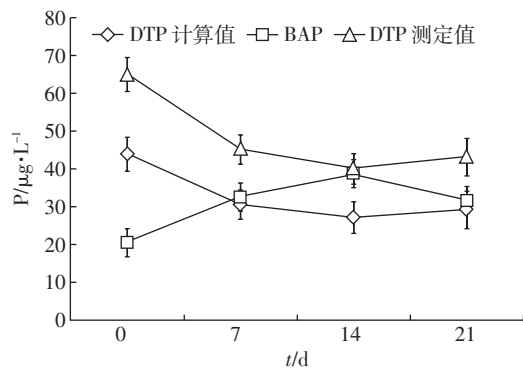


图2 上覆水中 BAP 与 DTP 的对比

Figure 2 Comparison of BAP and DTP in the overlying water

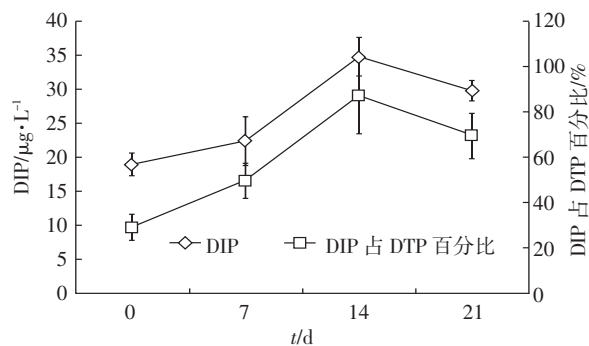


图3 上覆水中 DIP 含量及其占 DTP 百分比

Figure 3 Concentration of DIP and its percentage of DTP in the overlying water

(87.5%)。由此可见,如果认定 67.5%DTP 为生物有效,则必定将部分 DIP 误算为生物无效,这与以往研究相悖。因此,本研究在计算 BAPP 时也采用了另一种方法,即仅认定 DIP 为生物有效,而认定 DOP 为生物无效。BAPP 计算结果见表 2。

表2 扰动作用下 BAPP 含量及其占 PP 的百分比

Table 2 Concentration of BAPP and its percentage of PP under sediment disturbance

计算方法	t/d	BAPP/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	PP/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	BAPP/PP
方法一	7	2.17 ± 1.01	22.5 ± 3.5	9.64%
	14	11.62 ± 9.04	27.8 ± 9.8	41.80%
	21	2.64 ± 2.09	14.0 ± 3.6	18.86%
方法二	7	10.04 ± 2.12	22.5 ± 3.5	44.62%
	14	27.8 ± 9.8	5.03 ± 3.97	18.24%
	21	3.01 ± 1.13	14.0 ± 3.6	21.50%

表 2 显示,沉积物扰动期间,BAPP 在第 14 d 达到最大值。由于高强度的反复扰动,在促使 DIP 释放的同时,也促使颗粒态磷生物有效性增加(第 14 d,颗粒态磷生物有效性达到最高,41.8%)。这与高强度的水动力作用及其产生颗粒物质之间的摩擦力作用有关。野外观测实验也表明^[20],大风浪会导致水体中 DIP 含量增加,同时导致颗粒态磷中藻类可利用态磷含量增加。

由于本研究中未探讨 DTP 中究竟有多少磷可以被铜绿微囊藻利用,而是参考相关文献^[4,15]按所计算的 DTP 中有 67.5%的磷是生物有效的来计算 BAPP 中溶解性磷的含量,但该方法计算的 BAPP 误差很大(46.5%~79.2%)。而采用方法二来计算 BAPP,则误差低于方法一($P>0.05$)。与方法一不同的是,颗粒态磷生物有效性在扰动过程中逐渐降低,而这与以往研究^[2,6]是一致的。

因为我们无法衡量哪种方法更为科学,更为接近实际,所以我们希望从悬浮物的角度来探讨 BAP 的

变化。但是,我们的试验是在扰动 1 h 后自然沉淀 23 h, 采集上覆水来测定其中不同形态磷(DTP、DIP、BAP),此时上覆水中悬浮物含量非常低,无法满足藻类培养要求。因此,我们在沉积物扰动 1 h 后立即采集悬浮物,即认为沉积物在沉降过程中颗粒态磷生物有效性并没有明显改变。

2.2 反复扰动对悬浮物 BAP 的影响

沉积物在高强度扰动下,大量颗粒物质进入水体,导致间隙水中磷、悬浮物上磷与水体磷充分交换^[16],使得悬浮物上不同形态磷发生释放以 DIP 形式进入水体,抑或颗粒物质通过对水体中磷(DIP、DOP)的捕捉,或以物理吸附形式附着于颗粒物质表面,或与铁、锰、铝、钙等金属离子以化学键形式结合^[21-22]。这均会改变悬浮物上内源磷的形态分布,从而对颗粒态磷生物有效性产生影响,进而使得扰动过程中悬浮物上 BAP 含量发生变化(图 4)。

图 4 显示,沉积物扰动过程中,悬浮物上 BAP 发生明显变化。随着扰动时间延长,BAP 明显降低,第 7 d 明显高于第 14 d 和第 21 d ($P<0.001$)。但是第 14 d 略高于第 21 d ($P=0.188$)。这说明,沉积物反复扰动导致颗粒态磷生物有效性明显降低。这种降低可能来源于悬浮物上易释放形态磷,如 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、 Fe/Al-P 的释放导致颗粒态磷生物有效性的物理性降低,或是悬浮物上易释放形态磷向难释放形态磷转化,从而导致颗粒态磷生物有效性的化学性降低,抑或两者皆有。李大鹏等^[23]在以往研究中倾向于后者。本研究中,水体 DTP 呈降低趋势,但 DIP 确有所升高。从悬浮物上不同形态磷的数量分布(图 5)分析,易释放态磷($\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、 Fe/Al-P)均有所增加,说明扰动强化了颗粒物质对水体中 DIP 的捕捉和吸附,并将其转化成不同形态磷。这与图 3 中 DIP 的明显升高有所不同,其原因在于,悬浮物是在扰动结束时立即采集,而用来分析 DIP 的上覆水则是在扰动停止后自然沉淀 23 h

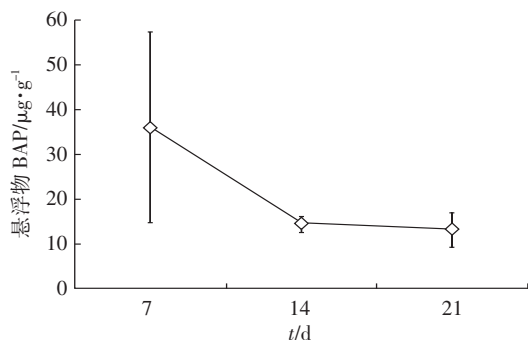


图 4 悬浮物上 BAP 的变化

Figure 4 Variation of BAP on the suspended solids

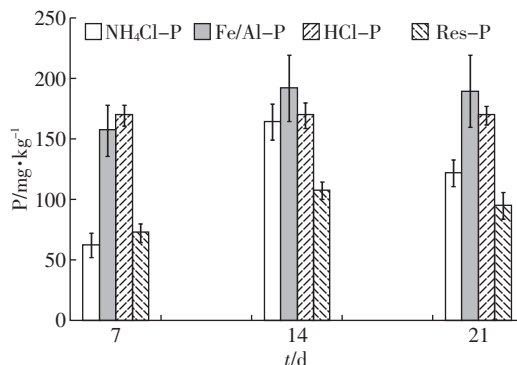


图 5 悬浮物上不同形态磷的变化

Figure 5 Variation of different phosphorus forms on the suspended solids

采集。悬浮物在沉淀过程中,以物理吸附和较弱化学键键力结合的形态磷如 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和非闭蓄态 Fe/Al-P 会发生释放,导致上覆水中 DIP 升高。因此,在较高强度扰动下,颗粒态磷生物有效性的降低既包括物理性降低也包括了化学性降低。从实验结果分析,这与采用 DIP(方法二)作为 DTP 中的生物有效磷来计算 BAPP 的结果接近。该结果也进一步间接表明,DTP 并非完全可以被浮游生物利用,但 DTP 中究竟有多少可以被浮游生物利用,暂时仍无法解决。

根据以往研究^[24],人们认为 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 Fe/Al-P 可以表示悬浮物或者沉积物中内源磷的释放潜力,并以此来评估水体富营养化的潜力。李大鹏等^[9]根据以往研究,认为采用 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和非闭蓄态 Fe/Al-P (AAP)来评估内源磷的释放潜力更为科学。本研究将这两者和藻类培养提取的生物有效磷进行了对比,图 6 显示采用 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 Fe/Al-P 之和或者 AAP 来评估内源磷的生物有效性,在扰动过程中均呈升高的趋势。这与藻类培养结果完全不同。而且两者均明显高于藻类培养结果 ($P<0.001$),其原因是化学试剂对磷的提取能力明显强于藻类^[25]。因此,采用前两种方法来评估内源磷释放潜力,不仅会导致过高的评估结果,而且会导致扰动对内源磷的生物有效性的影响产生相反的判断。这对水体富营养化防治策略的制定可能产生负面影响。

2.3 反复扰动下 DTP 的生物有效性

Ellison 等^[9]认为 DTP 是生物有效的,但有研究^[4,19]表明,DTP 中仅有一部分是生物有效的,并认为 60% 或者更多可以被浮游生物利用。本研究中,为了探讨 BAP 的组成,分别采用了假定 67.5% 的 DTP 为生物有效和假定 DIP 为完全生物有效两种方法。分析其结果(表 2)可知,通过这两种方法计算的 BAPP 的误差

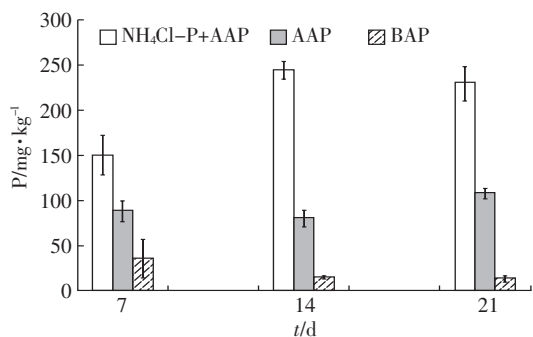


图 6 悬浮物上不同方法计算的生物有效磷的变化
Figure 6 Variation of BAP by different methods on the suspended solids

极大。虽然后者误差达到极大改善,但仍不令人满意,这也可能暗示了 DOP 中存在一定的生物有效磷。为了探索这一问题,我们将悬浮物上的 BAP 和上覆水中的 BAP 综合考虑,希望能揭示反复扰动下 DTP 的生物有效性。

由于采集悬浮物较上覆水提前了 23 h,我们假定悬浮物在沉降过程中,颗粒态磷生物有效性没有改变(采集上覆水分析 BAP 时,上覆水中含有扰动后自然沉淀了 23 h 的悬浮物)。因此,根据悬浮物上 BAP 含量(图 4)可以推测采集悬浮物时上覆水中 BAPP 含量,从而计算 BAPP 占 PP 的百分比,并将此百分比应用到采集上覆水测定 BAP(图 1)时的 BAPP 含量,从而获得上覆水中 DTP 含量,我们将这部分 DTP 作为生物可利用的(bio-DTP)。具体的算法是,分别采用第 7 d 的 BAPP/PP、第 7 d 和第 14 d BAPP/PP 的平均值、第 14 d 和第 21 d BAPP/PP 的平均值来计算上覆水中(图 1)的 BAPP。另外,由于采集悬浮物时没有测定 PP 含量,我们参考了朱广伟等^[20]对太湖的野外观测实验结果,即认为采集悬浮物时上覆水的 PP 含量为 255 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。结果见表 3。

从表 3 可以看出,沉积物反复扰动下,颗粒态磷生物有效性随着时间延长逐渐降低。说明反复扰动强化了沉积物对内源磷的固定作用。尽管本研究中无法确定颗粒态磷生物有效性是物理性降低还是化学性降低,但后者的作用不容忽视。基于以往研究,这充分说明沉积物扰动将加快形态磷间的化学转化,特别是由生物有效磷向生物无效磷的转化。与实际测定的 DTP 相比,经过计算得到的 bio-DTP 含量明显较低($P\leq 0.001$),说明 DTP 中确实存在生物无效的磷。沉积物扰动对 bio-DTP 的影响趋势为升高再降低,并且,bio-DTP 占 DTP 的百分比也呈同样的趋势。如果将 3 次的 bio-DTP 占 DTP 的百分比平均

表 3 反复扰动下 DTP 的生物有效性
Table 3 Bioavailability of DTP under repeated sediment disturbance

项目	t/d		
	7	14	21
BAPP/PP	7.01%±4.19%	2.76%±0.37%	2.51%±0.75%
BAPP/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	1.58±0.94	1.36±0.57	0.37±0.04
bio-DTP/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	30.96±7.48	35.94±10.95	31.71±4.98
bio-DTP/DTP	68.80%±16.62%	89.84%±27.38%	73.76%±11.59%

(76.93%±21.09%),这一数值与吴重华等^[4]研究结果(75%)相类似,而高于 Peters^[15]的研究结果(60%)。然而,因为采用的藻种不同^[11],所以只能质疑 Ellison 等^[9]的研究结果的可靠性,但其研究也指出,DOP 中确实存在一部分生物无效磷,由于无法定量表征或衡量这一部分磷,其假定 DOP 均可以被利用。按此推测,其研究所得出的有关河流的颗粒态磷生物有效性应该更高。

Ellison 等^[9]主要研究了河流在洪水期和平水期颗粒态磷生物有效性,结果表明,BAPP/PP 的百分比在 12%~73%之间,更多是位于 12%~26%之间。考虑与本研究的相比性,我们选择了洪水期的 BAPP/PP,其平均值为 18.4%±5.94%。该值高于本研究结果(表 3)。其原因主要在于,对于浅水湖泊而言,颗粒物质在沉积物与上覆水之间的交换次数较为频繁,而对于河流而言,这种交换很少,甚至仅有 1 次(即在洪水期)。因此,导致两者之间存在明显差异。

3 结论

(1)沉积物反复扰动导致上覆水中生物有效磷含量增加,随后有所降低,主要源于扰动促进了溶解性总磷的释放,其中,由于高强度的扰动导致溶解性磷酸盐释放明显。对于本研究所用的藻类而言,DTP 并非完全可以利用。通过计算后发现,反复扰动下可生物利用的 DTP(DIP 和部分 DOP 之和)占 DTP 百分比为 77%左右。扰动对 DTP 有活化的趋势,也说明月亮湾沉积物在高强度扰动作用下,具有较高发生富营养化的风险。

(2)悬浮物上生物有效磷含量呈逐渐降低趋势,充分说明扰动对悬浮物上内源磷由生物有效向生物无效转化的促进作用。

(3)与利用化学试剂提取生物有效磷相比,采用铜绿微囊藻培养的方式提取的磷明显较低,并且扰动作用下生物有效磷的变化趋势也明显不同。

参考文献:

- [1] Smith D R, Warnemuende E A, Haggard B E, et al. Changes in sediment-water column phosphorus interactions following sediment disturbance[J]. *Ecological Engineering*, 2006, 27: 71-78.
- [2] Li D P, Huang Y, Fan C X, et al. Contributions of phosphorus on sedimentary phosphorus bioavailability under sediment resuspension conditions[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 168: 1049-1054.
- [3] 李大鹏, 黄 勇. 底泥间歇扰动-沉降过程对静止水体中生物有效磷的影响[J]. *环境科学*, 2010, 31(8): 97-102.
LI Da-peng, HUANG Yong. Influence of intermittent sediment disturbance-sedimentation process on the bioavailable phosphorus in standing water[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(8): 97-102.
- [4] 吴重华, 王晓蓉, 孙 昊. 羊角月芽藻的生长与湖水中几种磷形态关系模型的建立[J]. *环境化学*, 1997, 16(4): 341-347.
WU Chong-hua, WANG Xiao-rong, SUN Hao. Establishment of models between the growth of *Selenastrum capricornutum* and several phosphorus fractions in the lake water[J]. *Environmental Chemistry*, 1997, 16(4): 341-347.
- [5] 李大鹏, 黄 勇, 李伟光. 底泥扰动对上覆水中磷形态分布的影响[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(2): 279-284.
LI Da-peng, HUANG Yong, LI Wei-guang. Effect of sediment disturbance on the distribution of phosphorus forms in the overlying water[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(2): 279-284.
- [6] Li D P, Huang Y. Sedimentary phosphorus fractions and bioavailability as influenced by repeated sediment resuspension[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 33(7): 958-962.
- [7] 李大鹏, 黄 勇, 李 勇, 等. 沉积物扰动持续时间对悬浮物中磷形态数量分布的影响[J]. *环境科学*, 2012, 33(2): 379-384.
LI Da-peng, HUANG Yong, LI Yong, et al. Impacts of sediment disturbance time on the distribution of phosphorus forms in suspended solids[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(2): 379-384.
- [8] 李大鹏, 黄 勇, 李伟光. 底泥再悬浮状态下生物有效磷形成机制研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(7): 1824-1830.
LI Da-peng, HUANG Yong, LI Wei-guang. Formation mechanism of bioavailable phosphorus in sediments under the conditions of sediment re-suspension[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(7): 1824-1830.
- [9] Ellison E T, Brett M T. Particulate phosphorus bioavailability as a function of stream flow and land cover[J]. *Water Research*, 2006, 40: 1258-1268.
- [10] Li B, Brett M T. The impact of alum based advanced nutrient removal processes on phosphorus bioavailability[J]. *Water Research*, 2012, 46: 837-844.
- [11] 黄清辉, 王子健. 淡水环境磷的生物有效性评估方法的发展动态[J]. *安全与环境学报*, 2006, 6(3): 132-136.
HUANG Qing-hui, WANG Zi-jian. Review on the development trend of the methods assessing phosphorus bioavailability in freshwater environment[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006, 6(3): 132-136.
- [12] 高月香, 张毅敏, 张永春. 流速对太湖铜绿微囊藻生长的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2007, 23(2): 57-60, 88.
GAO Yue-xiang, ZHANG Yi-min, ZHANG Yong-chun. Effects of flow velocity on growth of *Microcystis aeruginosa* in Taihu Lake[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, 23(2): 57-60, 88.
- [13] Zhou Q X, Gibson C E, Zhu Y M. Evaluation of phosphorus bioavailability in sediments of three contrasting lakes in China and the UK[J]. *Chemosphere*, 2001, 42(2): 221-225.
- [14] Hieltjes A H, Lijklema L. Fractionation of inorganic phosphate in calcareous sediments[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1980, 9(6): 405-407.
- [15] Peters R H. Phosphorus availability in Lake Memphremagog and its tributaries[J]. *Limnology and Oceanography*, 1981, 26(6): 1150-1161.
- [16] Selig U. Particle size-related phosphate binding and P-release at the sediment-water interface in a shallow German Lake[J]. *Hydrobiologia*, 2003, 492(1-3): 107-118.
- [17] 范成新, 张 路, 秦伯强, 等. 风浪作用下太湖悬浮态颗粒物中磷的动态释放估算[J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(8): 760-768.
FAN Cheng-xin, ZHANG Lu, QIN Bo-qiang, et al. Evaluation of phosphorus release on suspended solids in Tai Lake under wind and wave conditions[J]. *Science China(D)*, 2003, 33(8): 760-768.
- [18] 范成新, 张 路, 包先明, 等. 太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及量化: 2. 磷释放的热力学机制及源-汇转换[J]. *湖泊科学*, 2006, 18(3): 207-217.
FAN Cheng-xin, ZHANG Lu, BAO Xian-ming, et al. Migration mechanism of biogenic elements and their quantification on the sediment-water interface of Lake Taihu: II. Chemical thermodynamic mechanism of phosphorus release and its source-sink transition[J]. *Journal of Lake Science*, 2006, 18(3): 207-217.
- [19] Reynolds C S, Davies P S. Sources and bioavailability of phosphorus fractions in freshwaters: A British perspective[J]. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2001, 76: 27-64.
- [20] 朱广伟, 秦伯强, 高 光, 等. 风浪扰动引起大型浅水湖泊内源磷暴发性释放的直接证据[J]. *科学通报*, 2005, 50(1): 66-71.
ZHU Guang-wei, QIN Bo-qiang, GAO Guang, et al. Direct evidence for phosphorus flux from the sediments in big, shallow lake by wind disturbance[J]. *Science Bulletin*, 2005, 50(1): 66-71.
- [21] Sun S J, Huang S L, Sun X N, et al. Phosphorus fractions and its release in the sediments of Haihe River, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21: 291-295.
- [22] Spears B M, Carvalho L, Perkins R, et al. Sediment phosphorus cycling in a large shallow lake: Spatio-temporal variation in phosphorus pools and release[J]. *Hydrobiologia*, 2007, 584: 37-48.
- [23] 李大鹏, 黄 勇, 范成新. 沉积物悬浮频率对水体颗粒态磷生物有效性的影响[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(10): 2217-2222.
LI Da-peng, HUANG Yong, FAN Cheng-xin. Effect of sediment resuspension frequency on bioavailability of particulate phosphorus in overlying water[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(10): 2217-2222.
- [24] Zhou A M, Wang D S, Tang H X. Phosphorus fractionation and bioavailability in Taihu Lake (China) sediments[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, 17(3): 384-388.
- [25] 卜玉山, Magdof F R. 十种土壤有效磷测定方法的比较[J]. *土壤学报*, 2003, 40(1): 140-146.
BU Yu-shan, Magdof F R. A comparison of ten methods for determination of available phosphorus in soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(1): 140-146.