

持续水动力作用下湖泊底泥胶体态氮、磷的释放

孙小静^{1,2}, 秦伯强², 朱广伟², 张战平³, 高永霞⁴

(1. 华东师范大学资源与环境科学学院, 上海 200062; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 3. 华北水利水电学院资源与环境学院, 郑州 450008; 4. 河海大学环境科学与工程学院, 南京 210098)

摘要: 为揭示水动力扰动及其后续沉淀效应对湖泊内源氮、磷营养盐释放的作用, 通过室内试验模拟了水体在受到持续扰动后又长时间静置沉淀的整个过程. 结果表明, 水动力扰动初期可引起底泥颗粒态和胶体态氮、磷向水体大量释放. 在连续扰动0.5 d时, 水体总氮(TN)和总磷(TP)浓度分别达最高值2.106 mg/L和0.272 mg/L; 连续扰动1 d时, 水体中胶体态氮(CN)和胶体态磷(CP)含量分别达最高值0.452 mg/L和0.052 mg/L; 之后虽继续扰动, 因颗粒物和胶体物质的凝聚沉淀作用超过了其悬浮量, TN、TP、CN、CP的含量却转而降低. 在停止扰动后的静置过程中, 大颗粒悬浮物迅速沉淀, 而胶体物质沉降缓慢, 静置时间超过1 d后, CN和CP含量才开始因絮凝沉淀而降低. 真溶解态氮(UDN)和真溶解态磷(UDP)含量在扰动阶段升高较少而在静置1 d之后有持续大幅度升高, 说明胶体的吸附作用在扰动阶段限制了水体溶解态氮磷含量的升高, 且延长了其悬浮后在水柱中的停留时间, 在扰动后的静置阶段, 胶体又会将吸附的氮磷解吸释放到水体中, 从而延缓了营养盐去除和水质的改善.

关键词: 水动力; 氮; 磷; 胶体; 湖泊

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)06-1223-07

Release of Colloidal N and P from Sediment of Lake Caused by Continuing Hydrodynamic Disturbance

SUN Xiao-jing^{1,2}, QIN Bo-qiang², ZHU Guang-wei², ZHANG Zhan-ping³, GAO Yong-xia⁴

(1. College of Resources and Environmental Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. School of Resource and Environment, North China Institute of Water Conservancy and Hydropower, Zhengzhou 450008, China; 4. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The course of continuing hydrodynamic disturbance and succeeding long time settlement of lake water was simulated to study the release of nitrogen(N) and phosphorus(P) from lake sediment. It was showed in the experiment that the hydrodynamic disturbance caused abundant release of particulate and colloidal phosphorus and nitrogen. The concentration of total nitrogen(TN) and total phosphorus(TP) in water reached the highest values of 2.106 mg/L and 0.272 mg/L, respectively, when the water was disturbed for 0.5 d, and the concentration of colloidal nitrogen(CN) and colloidal phosphorus(CP) in water reached the highest values of 0.452 mg/L and 0.052 mg/L, respectively, when the water was disturbed for 1 day. Then, the concentration of TN, TP, CN and CP turned to decrease despite the continuing disturbance, for the particles and colloid deposited exceeded that suspended. During the settling phase after disturbance, the bigger suspended particles deposited quickly while the tiny colloid deposited much slower, and the concentration of CN and CP did not decrease until the water was settled for 1 day. The concentration of ultra-filtrated dissolved nitrogen(UDN) and ultra-filtrated dissolved phosphorus(UDP) increased much more in the settling phase than in the disturbing phase. It can be drawn that the adsorption of colloid limited the increase of dissolved N and P in lake water in the disturbing phase and prolonged the time of suspended N and P stayed in water. And the N and P adsorbed by colloid could also be released into water in the settling phase after disturbance, which delayed the elimination of nutrition and improvement of water quality.

Key words: hydrodynamic; nitrogen; phosphorus; colloid; lake

湖泊营养盐内源释放问题引起了越来越多环境工作者的关注^[1-6]. 对于太湖这样的大型湖泊而言, 因其水体较浅、受风浪扰动剧烈、底泥频繁再悬浮, 风浪扰动可将表层底泥中的营养盐释放出来, 这种动态内源释放对水质影响很大^[6-9]. 前期的水槽试验研究发现, 波浪扰动可使水体中总磷含量显著升高, 而且随着波浪扰动作用持续, 悬浮物中细颗粒胶体组分含量明显增加, 使得悬浮物对水体磷的吸附能力增强, 成为了限制水体溶解性磷浓度升高的

一个重要原因^[5]. 然而由于当时试验条件限制, 水槽试验中水动力扰动持续时间较短, 对长时间持续扰动和扰动后的静置过程中溶解态营养盐含量变化情况未能监测, 对水体中胶体组分的含量变化以及

收稿日期: 2006-08-24; 修订日期: 2006-10-16

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-12); 国家自然科学基金项目(40571006); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2002AA601011)

作者简介: 孙小静(1977~), 女, 博士, 主要研究方向为湖泊水环境和土壤污染控制, E-mail: sxjkerry@sohu.com

胶体吸附营养盐的情况也未能加以研究. 关于胶体对元素的吸附作用,对土壤胶体的研究较多,如胶体物质比普通土壤颗粒物的吸附能力高很多,紫色水稻土有机无机复合胶体对磷的吸附能力比土壤高 0.4~6.69 倍^[10];土壤对 P 的吸附既包括可逆的快速表面吸附,又包括缓慢地引起 P 与铁铝氧化物共沉淀的络合反应^[11]. 相比而言,关于湖泊底泥悬浮物及其中的胶体成分对水体 N、P 的吸附作用过程和规律的研究鲜见报道.

为了系统地研究持续扰动和扰动后静置过程中水体的胶体态、颗粒态和溶解态营养盐含量变化情况,揭示水动力扰动及其后续静置过程对内源营养盐的释放作用,本研究通过室内试验模拟了水体在受到长时间持续扰动后又长时间静置沉淀的过程,定时观测了该过程中悬浮固体和胶体态及溶解态氮磷营养盐含量变化情况,探讨了胶体在湖泊营养盐循环中的作用,以期为进一步认识湖泊营养盐内源释放规律提供试验依据.

1 材料与方法

试验用的底泥于 2005-12-27 采自梅梁湾北部三山岛附近,底泥平均含水率为 53.05%,总磷(TP)含量为 515 mg/kg,烧失量(LOI)占底泥干重的百分比为 3.88%. 本试验所用容器为底面直径 50 cm,高 60 cm 的圆桶型有机玻璃容器(见图 1). 将底泥均匀铺于容器底部,泥厚约 6 cm. 底泥铺好后,用虹吸管沿器壁向容器缓缓注入纯净水,注水时非常谨慎以免扰动底泥. 注水至深度约 50 cm,然后静置 2 d 使泥水达到物质交换平衡.

扰动试验前先采集背景水样. 然后开启搅拌器,由小到大缓慢提高转速,至表层底泥受到普遍扰

动并大量悬浮为止,此时搅拌器转速为 170 r/min,转动子与底泥上表面间距为 10 cm,然后保持此转速持续扰动. 连续扰动 2 h 时采第 1 次水样. 之后每隔 0.5 d 采 1 次水样,当连续扰动 2 d 后,停止搅拌,使水体静置,并按照一定的时间间隔采集水样. 由于试验容器的容积有限,为保持一定的水量,在扰动期间,每次采完水样,立即向容器缓缓补充入等量的去离子水,由于扰动充分并且每次采样的时间间隔足够长,足以使水体充分混合并使泥水界面的物质交换达到平衡. 静置期间采过水样后不再补充去离子水.

每次采样位置为水体表面以下 10 cm,采样量为 8 L,其中约 1 L 用于测定悬浮固体含量(SS)和悬浮固体粒度,其余立即进行预过滤和切向流超滤,以收集胶体浓缩液和超滤液. 水样首先通过装 1 μm 滤芯(Millipore 公司生产,型号 CR0171006,聚丙烯材料)的预过滤系统(10inch Millipore prefilter),得到的预滤液用于切向流超滤. 超滤系统为 Millipore Standard Pellicon System. 膜为孔径 1 000(相对分子质量)的 Millipore PLAC 超滤膜堆. 因此本研究中的胶体是能透过 1 μm 滤膜且被 1 000(相对分子质量)超滤膜阻止的微粒. 水样的超滤和超滤系统清洗流程参见文献[12,13]. 本研究中的总氮(TN)、总磷(TP)是指水样中总的氮、磷含量;胶体氮(CN)、胶体磷(CP)是指水样中能通过 1 μm 预滤膜且被 1 000(相对分子质量)超滤膜截留的胶体物质中的氮、磷含量;真溶解态氮(UDN)、真溶解态磷(UDP)是指水样经 1 000(相对分子质量)超滤膜超滤后透过液中总的氮、磷含量.

SS 的测定采用 Whatman GF/C 玻璃纤维滤膜抽滤后 105℃烘干称重法^[14]. 悬浮物中有机物的含量指将烘干的悬浮物在 550℃下灼烧 5 h 后的重量损失,即用悬浮固体烧失量 SSLOI 表征^[15]. 悬浮物粒度用 Malvern Instruments Ltd(UK)公司生产的 Mastersizer 2000 激光光透式粒度仪测定. 水样中 TN、TP 和 UDN 含量采用过硫酸钾消解后钼锑抗分光光度法测定^[14]. UDP 是将水样经 1 000(相对分子质量)膜超滤后的超滤液消解后用 SKALAR 连续流动分析仪测定,磷酸根磷($\text{PO}_4\text{-P}$)则是将超滤液直接用 SKALAR 连续流动分析仪测定. CN、CP 含量的计算方法同文献[12,13]. 相关分析采用 SPSS 统计软件完成.

2 结果与分析

2.1 试验中 SS 和 SSLOI 含量变化

试验中 SS 和 SSLOI 含量的变化情况如图 2(a)

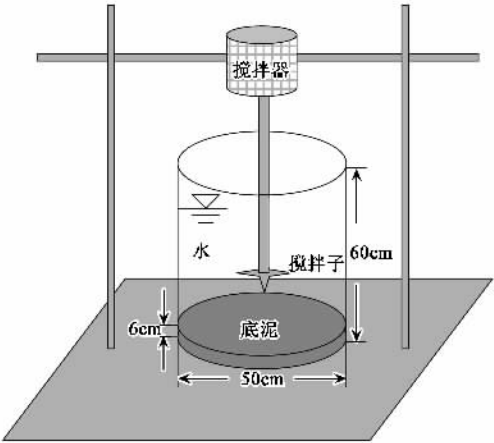


图 1 水动力扰动试验装置示意

Fig.1 Sketch map of the equipment for experiment

所示.由图 2(a)可知,SS 含量首先在扰动作用下迅速升高,在开始扰动的2 h里升高最快,由扰动前的 28.0 mg/L迅速升高到 506.6 mg/L,在连续扰动 0.5 d 时达最大值 647.0 mg/L,之后一直到搅拌停止却转而降低,在连续扰动 2d 时已经降到 254.7 mg/L. 停止扰动后 SS 含量继续降低,静置的前2 h降低最快,由 254.7 mg/L降到了 101.8 mg/L,之后直到静置 10 d 试验结束 SS 基本呈缓慢降低趋势,在静置 10 d 时

降到了 35.6 mg/L. 这说明当水动力扰动持续时间超过某一长度后,悬浮固体含量会随扰动的持续而降低,也就是一部分悬浮固体会又沉淀进入底泥. 朱广伟等^[7]在太湖的实地观测发现,当风速增至 12 m/s时,水体 SS 含量可增至 507 mg/L,这一值和本研究中扰动 2 h 时的 SS(506.6 mg/L)非常接近,因此本试验中的扰动作用情况大致相当于野外风速 12 m/s 时风浪对太湖底泥的作用情况.

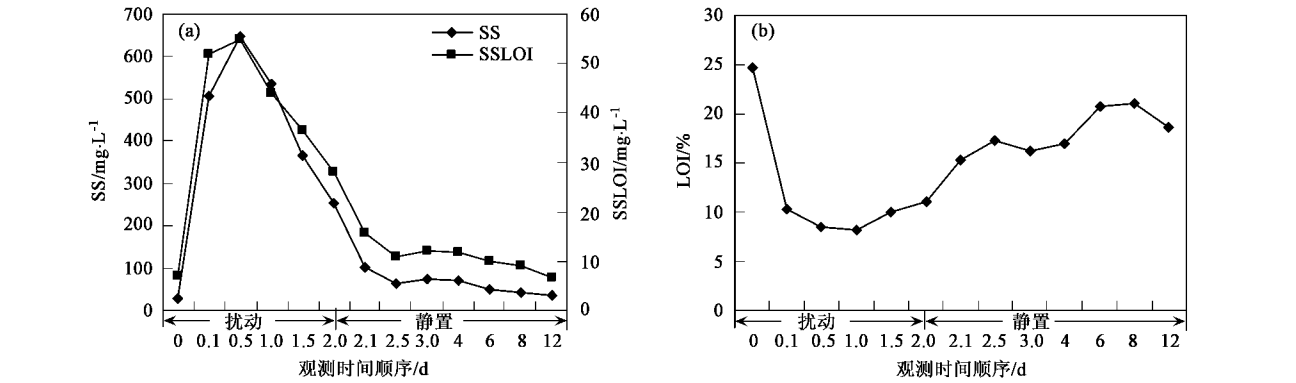


图 2 试验中 SS、SSLOI 含量变化(a)和 LOI 百分含量变化情况(b)
Fig.2 Variation of SS and SSLOI(a) and percentage of LOI in SS(b)

表征悬浮物中有机物含量的 SSLOI 与 SS 含量的变化趋势非常一致,相关分析结果也表明两者呈显著正相关,相关系数达 0.991($p \leq 0.01$, $n = 13$). 说明悬浮物中有机质含量会随悬浮固体含量的变化而发生相应变化. 悬浮物中 LOI 所占百分比的变化情况如图 2(b)所示,与图 2(a)对比发现,LOI(%)的变化趋势与 SS 和 SSLOI 含量的变化趋势基本相反. 由相关分析知,LOI(%)与 SS 和 SSLOI 均呈显著负相关,相关系数分别为 $-0.883(p \leq 0.01, n = 13)$ 和 $-0.891(p \leq 0.01, n = 13)$. 结合图 3 中悬浮物粒度的分析结果,发现 SS 含量越高,悬浮物中粗颗粒成分越多; SS 含量越低,悬浮物中细颗粒占的百分比越大. 当 SS 含量越高即粗颗粒成分越多时,悬浮物中有机质的百分比越小;当 SS 含量越低即悬浮物中胶体为主的细颗粒成分含量越高时,有机质所占的比例越大. 所以粗颗粒悬浮物中有机质百分含量小于包含胶体物质在内的细颗粒悬浮物中有机质的百分含量.

2.2 悬浮物粒度变化

图 3 为试验中悬浮颗粒中值粒径和胶体占总悬浮物百分比的变化曲线. 由图 3 可知,扰动使得悬浮物中值粒径显著增大,在开始扰动的前2 h增大速度最快,当连续扰动1 d后达最大值 10.506 μm ; 之

后中值粒径基本保持稳定;在连续扰动1.5 d之后悬浮物中值粒径开始减小;扰动停止后继续减小,当静置1 d时中值粒径达最小值 1.935,然后又开始增大.

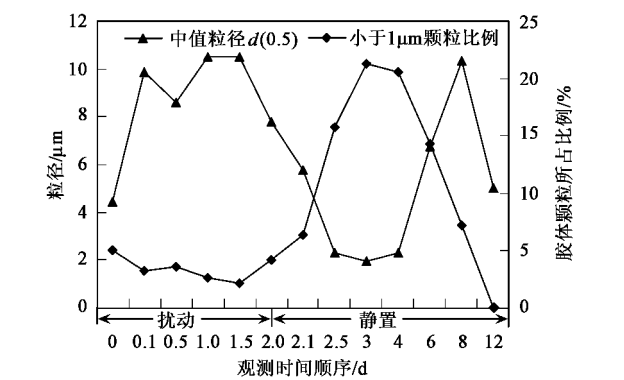


图 3 扰动试验中悬浮颗粒中值粒径和小于 1 μm 的胶体颗粒占总悬浮固体百分比的变化
Fig.3 Variation of median diameter of SS and percentage of colloidal particles with diameter under 1 μm in SS

粒径 $< 1 \mu\text{m}$ 的胶体颗粒占总悬浮固体的百分比与悬浮物中值粒径的变化趋势恰恰相反. 扰动前为 4.99%,在开始扰动时呈减小趋势,当连续扰动 1.5 d 时达最小值 2.22%,之后虽继续扰动却转而呈现上升

趋势,当连续扰动2 d时达 4.20% . 停止扰动后该比例迅速升高,当静置 1d 时达最高值 21.31% . 之后到静置的第 10 d 试验结束,该比例一直在下降.

2.3 水体中各形态氮含量变化

图 4 为 TN、CN 和 UDN 含量及 CN 占 TN 百分比的变化情况. 由图 4(a)可知,扰动开始阶段 TN 迅速升高,在连续扰动 0.5 d 时 TN 达到最高值 2.106 mg/L,然后又随部分悬浮物的沉淀而降低; CN 含量在连续扰动1 d时 CN 达最高值 0.452 mg/L,之后也

转而降低,在静置的第 1 d 略微升高之后,CN 又继续降低,直至试验结束,CN 降到了 0.229 mg/L. CN 占 TN 的百分比在试验过程中出现了几次波动,并在静置1 d后达到最高值 35.8%,见图 4(b). 真溶解态氮 UDN 在扰动开始的第 1 d 有所升高,由扰动前的 0.065 mg/L升高到了连续扰动1 d时的 0.279 mg/L,之后又有所降低;在静置阶段 UDN 含量呈阶梯式升高,至连续静置 10 d 试验结束前,UDN 达最高值 0.653 mg/L.

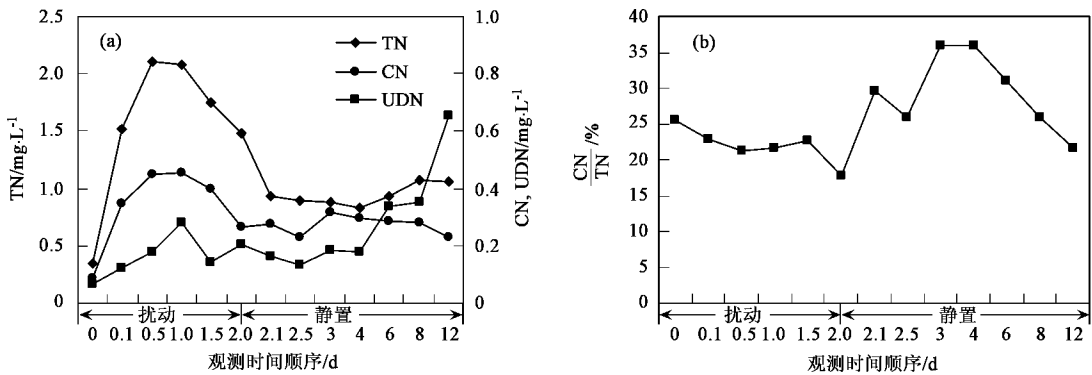


图 4 扰动试验中各形态氮(a)含量和 CN 占 TN 百分比(b)的变化情况

Fig.4 Concentration of TN, CN and UDN(a) and percentage of CN in TN(b) in the experiment

2.4 水体中各形态磷含量变化

试验中磷含量的变化见图 5. 由图 5(a)和图 2 (a)知,TP 变化曲线与 SS 变化曲线非常一致,其含量在扰动的开始阶段迅速升高,在连续扰动 0.5 d 时 TP 达最高值 0.272 mg/L,之后又开始降低,至连续扰动2 d停止搅拌前,已经降到 0.151 mg/L. 扰动期间,CP 含量与 TP 含量密切相关,在扰动开始阶段,CP 含量也迅速升高,不过其变化要滞后于 TP,连续扰动1 d才达到最高值 0.052 mg/L,之后又有所降低; CP 占 TP 的百分比仅略微上升,见图 5(b),最初为 16.4%,到连续扰动 1.5 d 时达扰动期间的最

高值 21.2% . 但在停止扰动后,因 TP 显著降低而 CP 降低很小,使得 CP 占 TP 的百分比升高并维持较高的水平,停止扰动前 CP 占 TP 的百分比为 17.2%,在静置1 d后其达到最高值 54.9% . 之后由于胶体絮凝聚集形成较大颗粒而使胶体含量降低,因为颗粒态磷(PP)在静置 1 ~ 4 d 期间呈上升趋势,所以此时 CP 占 TP 的百分比是下降的;静置4 d 之后 PP 又转而降低,说明大颗粒凝聚物发生了沉淀,这又使胶体百分含量升高. 这种“絮凝-沉淀”作用过程使得 CP 占 TP 的百分比出现了几次升降的交替变化.

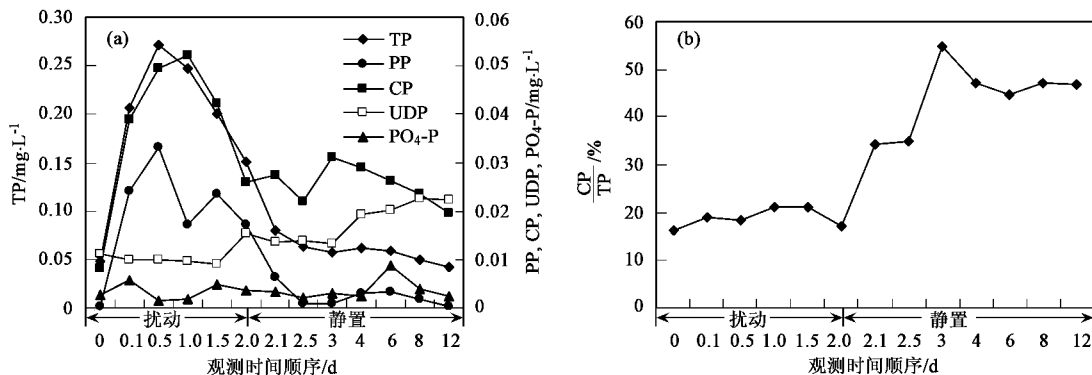


图 5 扰动试验中各形态磷(a)含量和 CP 占 TP 百分比(b)的变化情况

Fig.5 Concentration of TP, PP, CP, UDP and PO4-P (a) and percentage of CP in TP (b) in the experiment

超滤液中真溶解态磷(UDP)含量的变化与 TP 和 CP 的变化趋势基本相反。在扰动的起始阶段 UDP 呈略微降低趋势,由扰动前的 0.011 mg/L 降到扰动 1.5 d 时的 0.009 mg/L,扰动阶段后期又有所上升,静置的第 1 d UDP 含量基本保持稳定,静置 1 d 之后一直到静置第 10 d 试验结束 UDP 又显著升高,由 0.013 mg/L 升高到 0.022 mg/L。PO₄-P 基本在 0.002 ~ 0.006 mg/L 之间波动,因含量一直较低,其变化没有呈现显著的规律性,分析认为是“扰动释放”和“胶体吸附”共同作用的结果。UDP 含量在底泥悬浮阶段降低、在底泥沉降阶段反而升高,说明除了底泥及其间隙水向水体的释放作用之外,还存在影响 UDP 含量更强的因素,胶体及其它颗粒物对 UDP 的吸附作用超过了底泥悬浮释放和沉淀对它的影响。而且,由于静置的第 1d 颗粒物大量沉淀而 UDP 基本保持稳定,但在静置的第 2 ~ 10 d 胶体含量降低时 UDP 显著升高,说明胶体含量变化引起的吸附能力变化对 UDP 的影响最大。因此,当胶体含量增加时,其对水体溶解态磷的吸附作用大于底泥向水体的释放作用,“吸附-释放”平衡向“吸附”方向移动,UDP 被大量吸附而含量降低;当胶体含量因凝聚沉降作用而降低时,胶体的吸附作用降低,一部分被吸附的 UDP 释放出来,加上底泥向水体的静态释放作用,“吸附-释放”平衡向“释放”方向移动,使 UDP 的释放通量超过了吸附通量,引起 UDP 的升高。在扰动的起始阶段,UDP 含量降低而 UDN 则显著升高,其原因是扰动引起的 UDN 释放量远大于 UDP 释放量,也超过了同期胶体和颗粒物对 UDN 的吸附容量,“释放-吸附”平衡向释放倾斜,因此该阶段 UDN 与 UDP 的变化情况不同。

3 讨论

试验中悬浮物沉降的情况可用溶胶的沉降原理来解释^[16]。分散于气体或液体介质中的微粒,都受到 2 种方向相反的作用力,一是重力,二是由布朗运动引起的扩散力。如微粒的密度比介质的,微粒就会因重力下沉,这种现象称为沉降;与沉降作用相反,扩散力能促进体系中粒子浓度趋于均匀。当这 2 种作用力相等时,就达到平衡状态,谓之“沉降平衡”。根据文献[16]中球形质点在液体中的沉降公式:

$$\nu = 2 r^2 (\rho - \rho_0) g / 9 \eta \tag{1}$$

式中,ν 为沉降速度,r 为质点半径,ρ 为质点密度,ρ₀ 为液体密度,η 为液体粘度,g 为重力加速度。

在其它条件相同时,沉降速度 ν 和质点半径的平方 r² 成正比,即颗粒半径越大时,沉降速度会越快,颗粒越小,则沉降速度越慢。

在扰动的开始阶段,底泥被大量掀起进入水体,使水体中大颗粒悬浮物迅速增多,而粒径较小的胶体物质占总悬浮物的百分比有所减小;当扰动持续一定时间(本研究中为 1.5 d)之后,由于较大悬浮颗粒物相互碰撞的几率大,易于聚集形成更大颗粒而沉淀,经过这种粒度和比重的分选^[17,18],悬浮物总量降低(SS 由连续扰动 0.5 d 时的最大值 647.0 mg/L 降低到连续扰动 2 d 时的 254.7 mg/L),而小型悬浮颗粒因沉降速度慢,仍然停留在水体中,使得悬浮物中值粒径减小,小型胶体颗粒占悬浮物的百分比升高;在停止扰动之后,大型颗粒物迅速沉淀,而较小的悬浮颗粒还未及沉淀,使得悬浮物中值粒径显著降低,粒径小于 1 μm 的胶体颗粒占总悬浮物的百分比上升;在静置时间超过 1 d 之后,大部分大型悬浮颗粒物已经沉淀入底泥(SS 由停止扰动前的 254.7 mg/L 下降到 75.1 mg/L),粒径较小的胶体颗粒也逐渐开始絮凝聚集成较大颗粒,使得悬浮物粒径又有所增大,而小型胶体颗粒占总悬浮物的百分比相应降低,当这些较大聚集体也逐渐沉淀时,SS 含量就会继续降低。

关于连续扰动 0.5 d 之后 SS 以及 TN、TP、PP、CN、CP 含量下降的原因,除了悬浮物碰撞、粒度分选引起沉降之外,每次采样后补充纯净水引起的稀释作用可能也有一定影响。从连续扰动 0.5 d 时 SS 达到最高值到连续扰动 2 d,在此期间一共补水 3 次,以试验容器总水量 100 L、每次补水 8 L 计,3 次补水对 SS 的稀释倍数为 [(100 - 8)/100]³ = 0.78 倍,而在此期间 SS 由连续扰动 0.5 d 时的最大值 647.0 mg/L 降低到连续扰动 2 d 时的 254.7 mg/L,在此期间 SS 降到了最高值的 0.39 倍,因此,即使扣除补水的稀释作用,SS 仍呈降低趋势,TN、TP、PP、CN、CP 含量变化也一样,虽然它们降低的幅度没有那么大,但试验结果反映出的变化趋势是一样的。

胶体具有强大吸附能力的原因在于其比表面积大,许多元素在胶体态和真溶解态中的分布系数大于在颗粒态和真溶解态中的分布系数^[19],即胶体在元素迁移过程中发挥着“胶体泵”的作用^[20],使得天然水中胶体不仅是物质的重要存在形态,也是元素迁移过程的重要载体^[21,22]。一些对湖泊和河流的研究发现,当溶液中含有较高浓度的磷时,沉积物吸附一定量的磷;当溶液中磷浓度低于一定值后,沉积物

则开始释放磷.当沉积物原有磷酸盐的解吸量等于吸附实验中被吸附的磷酸盐量时,沉积物对磷酸盐的吸附量为 0,此时溶液的磷酸盐浓度为吸附-解吸平衡浓度^[23~25].因此,本研究中 UDP 和 UDN 含量的变化应是胶体对溶解态氮磷吸附-解吸作用的综合表现,受胶体含量变化影响,胶体对溶解态氮磷的作用在吸附-解吸平衡之间转化.尤其是静置阶段后期,由于颗粒态和胶体态氮磷的大量沉降,使得水体中总氮和总磷含量降低,但是原来吸附态的 UDP 和 UDN 开始被释放出来,表现为 CP 和 CN 含量降低,而 UDP 和 UDN 含量却在显著升高.这样一来,胶体对营养盐的吸附作用延长了营养盐悬浮后在水柱中的停留时间,增加了藻类可利用态营养盐含量,从而延缓了营养盐的去除和水质改善.

由研究结果可以看出,扰动后经过 10 d 的静置直到试验结束,水体的 SS、TN、TP、PP、CN、CP、UDN、UDP 等的含量仍高于扰动前的初始状态,说明扰动作用下由底泥释放到水体中的氮、磷营养盐会长时间停留在水体,使得水质改善非常缓慢.自然湖泊一直受到不同程度的扰动,很少处于完全静置的理想状态,因此底泥中的营养盐也在持续不断地向水体释放,从而为浮游植物提供着源源不断的营养补充,影响着湖泊水质.

4 结论

(1) 剧烈的水动力扰动会引起底泥 CN 和 CP 向水体大量释放.连续扰动 1d 时 CN 达到最高值 0.452 mg/L,CP 达到最高值 0.052 mg/L,之后虽继续扰动却转而降低;在停止扰动后的静置过程中,由于大颗粒悬浮物迅速沉淀而胶体物质因沉降缓慢大部分还停留在水体中,使得 TN 和 TP 含量显著降低而 CN 和 CP 降低很小,引起 CN 占 TN 的百分比和 CP 占 TP 的百分比升高并维持较高水平,在静置 1 d 后 CN 占 TN 的百分比达最高值 35.8%,CP 占 TP 的百分比达最高值 54.9%.

(2) 水体中 UDN 和 UDP 含量在扰动阶段有一定升高,但是不如在扰动后的静置阶段升高显著.静置的第 1 d UDP 含量基本保持稳定,静置 1d 之后一直到静置 10 d 试验结束 UDN 和 UDP 均有显著升高,UDN 升至 0.653 mg/L,UDP 则升至 0.022 mg/L.

(3) 胶体对营养盐的吸附作用延长了溶解态营养盐悬浮后在水柱中的停留时间,增加了藻类可利用态营养盐含量,从而延缓了营养盐的去除和水质的改善.

致谢:感谢张路博士在本文的撰写过程中提出了宝贵意见.

参考文献:

- [1] Granéli W. Internal phosphorus loading in Lake Ringsjön[J]. *Hydrobiologia*, 1999, (404): 19 ~ 26.
- [2] Canfield DE J, Hoyer M V. The eutrophication of Lake Okeechobee[J]. *Lake and Reservoir Management*, 1988, 4(2): 91 ~ 99.
- [3] Steinman A, Rediske R. Internal phosphorus loading in Spring Lake: Year 1[R]. Report for Spring Lake-Lake Board. 2003. MR-2003-115.
- [4] Wang H, Appan A, Gulliver J S. Modeling of phosphorus dynamics in aquatic sediments: I -model development[J]. *Water Research*, 2003, 37(16): 3928 ~ 3938.
- [5] McManus J, Berelson W, Coale K H. Phosphorus regeneration in continental margin sediment[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1997, 61(14): 2891 ~ 2907.
- [6] 孙小静,朱广伟,罗澈慈,等.浅水湖泊沉积物磷释放的波浪水槽试验研究[J]. *中国科学(D 辑)*, 2005, 35(增刊 II): 81 ~ 89.
- [7] 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.
- [8] Laenen A, Le Toumeau A P. Upper Klamath Basin nutrient-load study/Estimate of Wind-Induced Resuspension of Bed Sediment During Periods of Low Lake Elevation[R]. Geological Survey Open-File Report. 1996. 95 ~ 414.
- [9] 秦伯强,胡维平,高光,等.太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式[J]. *科学通报*, 2003, 48(17): 1822 ~ 1831.
- [10] Zhou B T, Gao M, Wei C F. Study on kinetics of phosphorus adsorption on the surface of organo-mineral colloidal complex in purple paddy soil[J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science)*, 2000, 25(5): 553 ~ 560.
- [11] Mcgechan M B. Sorption of phosphorus by soil, Part 2: Measurement methods, results and model parameter values[R]. Environment Division, SAC. 2002.
- [12] 王江涛.黄河、长江和钱塘江水体中的胶体有机碳[J]. *科学通报*, 1998, 43(8): 840 ~ 843.
- [13] 孙小静,张战平,朱广伟,等.太湖水体中胶体磷含量初探[J]. *湖泊科学*, 2006, 18(3): 225 ~ 231.
- [14] 国家环境保护总局,水和废水监测分析方法编委会.水和废水监测分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,2002. 243 ~ 248.
- [15] 朱广伟,秦伯强,高光,等.灼烧对沉积物烧失量及铁、磷测定的影响[J]. *分析实验室*, 2004, 23(8): 72 ~ 76.
- [16] 沈钟,王果庭.胶体与表面化学[M].(第二版).北京:化学工业出版社,1997. 32 ~ 40.
- [17] 张瑞瑾.河流泥沙动力学[M].北京:中国水利水电出版社,1998. 63 ~ 147.
- [18] 胡春宏,惠遇甲.明渠挟沙水流运动的力学和统计规律[M].北京:科学出版社,1995. 181 ~ 220.

[19] 许伯全.利用交错流动过滤系统进行高屏溪河口地区重金属物种之研究[D]. 中国台湾: 国立中山大学海洋资源研究所, 2001.

[20] Dai M H, Martin J M, Cauwet G. The significant role of colloids in the transport and transformation of organic carbon and associated trace metals (Cd, Cu and Ni) in the Rhône delta (France) [J]. Marine Chemistry, 1995, (51): 159 ~ 175.

[21] 赵新淮,张正斌,韩喜江. 海水胶体与 PO_4^{3-} 、 Cu^{2+} 的作用及对微藻生长的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(6): 776 ~ 779.

[22] Gustafsson O, Gschwend P M. Aquatic colloids: concepts, definitions and current challenges[J]. Limnology & Oceanography, 1997, 42(3): 519 ~ 528.

[23] 冯海艳,李文霞,杨忠芳. 苏州城市河道底泥对磷酸盐的吸附与释放特征[J]. 地学前缘,2006,13(1): 113 ~ 118.

[24] Froelich P N. Kinetic control of dissolved phosphate in natural river and estuaries: A primer on the phosphate buffer mechanism [J]. Limnological Oceanography, 1988, 33 (4): 649 ~ 668.

[25] 王圣瑞,金相灿,赵海超,等. 长江中下游浅水湖泊沉积物对磷的吸附特征[J]. 环境科学,2005,26 (3): 38 ~ 43.

2005 年环境科学技术类期刊总被引频次和影响因子排序表¹⁾

代码	期刊名称	总被引频次	学科内排名	影响因子	学科内排名
Z027	JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES	239	28	0.341	24
Z549	安全与环境学报	429	21	0.723	10
Z029	长江流域资源与环境	540	15	0.715	11
Z024	城市环境与城市生态	539	16	0.395	18
Z015	电镀与环保	332	26	0.479	15
Z013	工业水处理	786	9	0.348	23
Z032	工业用水与废水	179	30	0.171	29
Z010	海洋环境科学	472	18	0.474	16
Z009	化工环保	355	24	0.385	20
Z017	环境保护科学	233	29	0.160	31
Z005	环境工程	446	20	0.280	26
Z004	环境科学 ²⁾	2 270	1	1.342	2
Z003	环境科学学报	1 932	2	1.138	3
Z002	环境科学研究	887	7	0.776	7
Z025	环境科学与技术	459	19	0.354	21
Z019	环境污染与防治	571	13	0.389	19
Z021	环境污染治理技术与设备	1 141	6	0.536	14
Z023	农村生态环境	521	17	0.772	8
Z008	农业环境科学学报	1 273	5	0.726	9
Z011	上海环境科学	880	8	0.538	13
H784	生态环境	697	11	0.889	6
Z016	水处理技术	558	14	0.351	22
Z007	四川环境	243	27	0.209	28
T953	消防科学与技术	147	31	0.164	30
Z551	植物资源与环境学报	394	22	0.397	17
G129	中国安全科学学报	589	12	0.598	12
Z030	中国环境监测	340	25	0.274	27
Z001	中国环境科学	1 714	3	0.978	4
Z546	中国人口资源与环境	373	23	0.302	25
Z022	资源科学	763	10	0.974	5
Z012	自然资源学报	1 496	4	1.771	1

1)数据源于:中国科学技术信息研究所.2006 年版中国科技期刊引证报告(核心版)[M].北京:科学技术文献出版社.2006.202.

2)《环境科学》2002、2003、2004、2005、2006 年连续 5 届荣获“百种中国杰出学术期刊”称号