

模拟扰动条件下太湖表层 沉积物磷行为的研究

张 路 范成新 秦伯强 杨龙元

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

提 要 利用恒温震荡器构筑的模拟扰动环境,研究了太湖水-沉积物界面的磷释放和吸附行为。结果表明:表层沉积物的磷酸盐释放作用在模拟扰动条件下并不十分明显,在低强度的扰动条件下未观察到释放现象,模拟高强度扰动后,出现一个相对较强的释放过程。最大释放时沉积物上覆水浓度约为低强度扰动时的3倍。最大释放时间(T_{max})可能受磷酸盐形态分布的不同而有所差异。相比较而言,磷酸盐的吸附作用表现得十分明显且迅速,沉积物上覆水磷酸盐浓度在0.5h后分别由0.229mg/L和0.215mg/L下降为0.05mg/L和0.013mg/L。可以看出当上覆水磷酸盐浓度较高时,吸附作用的强度远大于释放作用。在25℃,模拟中等强度(100rpm)的模拟扰动条件下,当初始磷酸盐浓度为1.01mg/L时,梅梁湾和五里湖的表层沉积物吸附容量分别为每克干重吸附0.042mg和0.050mg磷酸盐。这种较高的吸附能力对浅水湖泊的磷酸盐缓冲作用能起到积极作用。

关键词 沉积物再悬浮 磷 释放和吸附 太湖

分类号 P512.3

太湖位于长江三角洲经济发达地区,面积2338km²,平均水深为2.0m左右,属典型的浅水湖泊。近年来,全湖平均营养程度上升明显,已由十年前的中营养-中富营养转变成现在的中富营养-富营养。部分湖区,如五里湖湖区及梅梁湾的北部湖区出现过极富营养状况,大量蓝藻曾导致无锡市自来水厂滤池堵塞^[1]。全湖平均氮磷比为35:1^[2],生物营养限制因子为磷^[3]。因此,开展磷元素行为的研究对太湖富营养化形成机理及制定湖泊生态恢复对策具有重大意义。

湖泊沉积物-水界面是水体和沉积物之间物质交换和输送的重要途径。对太湖这样的大型浅水湖泊而言,营养盐一旦进入湖泊,就会在沉积物和水体之间反复多次循环。在较长一段时间内,沉积物一般充当营养盐的吸收剂,导致营养盐在沉积物中的蓄积。由于风力和湖流引起湖泊底部沉积物的扰动使沉积物处于再悬浮状态,这种再悬浮状态会强烈地影响磷在沉积物-水界面间的再分配,并有助于营养盐的释放或再生^[4]。因此,为研究再悬浮状态下磷酸盐在沉积物-水界面间的释放和吸附能够比较真实地反映湖泊底泥中磷酸盐的归宿,即了解磷酸盐在沉积物中是被保留还是被释放,并了解自然条件下沉积物对水体磷酸盐的贡献,本实验将利用恒温震荡仪模拟再悬浮条件进行这方面的探讨。

对于沉积物营养元素释放作用的研究,国内通常采用静态释放法。吴根福^[5]等人研究了杭州西湖底泥的释磷情况。尹大强^[6]等通过改变环境因子对五里湖沉积物进行了磷释放研

• 中国科学院资源与环境“九五”重点课题(KZ-952-J1-212)以及江苏省自然科学基金(BK99204-2)资助。
收稿日期:2000-09-10;收到修改稿日期:2000-10-10。张路,男,1975年生,硕士。

究. 这些方法未考虑因扰动造成的再悬浮状况对沉积物磷行为的影响. 由于静止状态在自然条件下几乎不可能存在, 因此不能真实反映浅水湖泊底泥在自然条件下的磷酸盐释放的实际情况. 本实验在这方面进行了改进.

1 材料和方法

1.1 材料

1.1.1 沉积物 根据太湖梅梁湾湖区及五里湖湖区沉积物分布的特点及富营养化现状, 利用全球卫星定位系统(GPS)定位, 分别在太湖梅梁湾区 I (31°28'31"N, 120°11'39"E) 及五里湖东部湖区 II (31°30'55"N, 120°15'04"E) 选取了两个采样点(图 1). 用彼得生采泥器采集样点表层沉积物大约 1000g(厚度约为 5cm), 匀化后装入清洁的聚乙烯保鲜袋中备用.

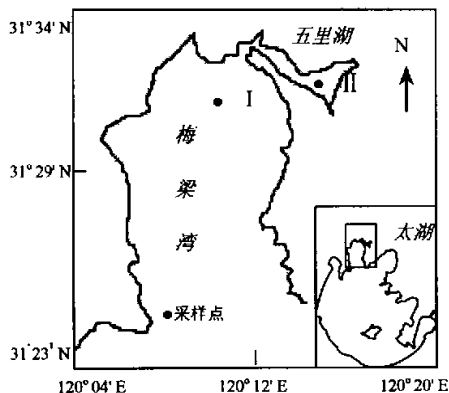


图 1 梅梁湾及五里湖采样点示意图

Fig. 1. Sampling locations in the Meiliang Bay and Wuli Lake

1.1.2 水样 用有机玻璃采样器采集样点沉积物上覆水约 2 升, 装入清洁的聚乙烯瓶中并使不留气泡. 回实验室后立即经孔径为 0.45 μ m 的玻璃纤维滤膜(Whatman GF/C)过滤. 过滤后的上覆水样置于冰箱内 4 $^{\circ}$ C 保存备用. 两采样点上覆水体磷酸盐浓度分别为 0.035、0.037mg/L.

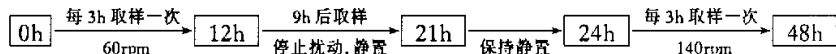
1.1.3 实验仪器 生化恒温振荡培养器(恒温 0-50 $^{\circ}$ C (\pm 1 $^{\circ}$ C), 转速: 0-250rpm); 低速离心机(0-4000rpm); 7210 紫外-可见分光光度计(上海分析仪器厂).

1.2 实验方法

1.2.1 磷形态分析 对两个点沉积物样品的磷形态按照溶解态磷(DP)、铝磷(AlP)、铁磷(FeP)、钙磷(CaP)、闭蓄态铁磷(OFeP)、闭蓄态铝磷(OAlP)及有机磷(orgP)分类, 以了解太湖表层沉积物磷元

素的形态组成. 分析方法按《湖泊富营养化调查规范》^[7]进行.

1.2.2 磷释放 分别称取两个样点各 5.00g(湿重, 并另取鲜泥样进行含水率测定)表层沉积物于 10 个 250mL 锥形瓶中, 各加入 100mL 过滤后的上覆水样, 放入恒温振荡培养箱内, 在 25 $^{\circ}$ C 条件下, 敞口蔽光培养. 扰动强度的变化通过调节恒温振荡培养箱转速(rpm)来达到. 实验条件及实验流程为:



其中, 培养时间为 0h 的样品为过滤后的原上覆水水样.

1.2.3 磷吸附 太湖整体在不同时空上的水体磷酸盐浓度分布有较大差异, 1998 年水体磷

酸盐浓度为 $0.001 - 0.146 \text{ mg/L}$ ^①。由于点源排放的极端情况,梅梁湾湖区曾检测到 0.29 mg/L 的峰值浓度^[2]。为了提高实验的准确度,将吸附前的初始浓度设置在实际情况下的浓度最大值附近,另外考虑到吸附后浓度的明显下降以及保证用钼-锑-抗分光光度法比色测定所得结果的相对误差较小,故采用 0.2 mg/L 作为吸附实验的水体磷酸盐起始浓度。

用 50 mg/L 的磷酸二氢钠溶液和样点上覆水配制吸附水样,使磷酸盐浓度在 0.2 mg/L 左右。同样称取各 5.00 g (湿重) 表层沉积物于 10 个 250 mL 锥形瓶中,加 100 mL 此水样至锥形瓶中。在 100 rpm 的中等转速条件下,恒温 25°C , 敞口、蔽光培养。取样流程同上。此处吸附量为表观吸附量,由上覆水磷酸盐浓度变化差值求得。

1.2.4 吸附容量实验 由于污染物的排放,可能使局部湖区的磷酸盐浓度突然增大。通过容量实验可以了解太湖沉积物对磷酸盐浓度峰值的削减能力。选取了四组浓度:组 I (0.1 mg/L), 组 II (0.2 mg/L), 组 III (0.5 mg/L), 组 IV (1.0 mg/L) 进行吸附容量实验。在恒温振荡培养箱内以 100 rpm 的转速使沉积物处于悬浮状态,培养 24 h 。通过培养前后磷酸盐浓度的对比来计算表层沉积物在再悬浮状态下对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的吸附容量。

1.3 分析方法

经预定时间培养后的水样,取出 50 mL 置于离心管中,在低速离心机中以 3500 rpm 的转速离心 20 min ,再将上层清液经 $0.45 \mu \text{m}$ 的玻璃纤维滤膜过滤后测定 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的浓度。 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的分析方法参照《湖泊富营养化调查规范》^[7],采用钼-锑-抗分光光度法进行。

2 结果与讨论

2.1 模拟扰动条件下表层沉积物的磷酸盐释放

自然条件下,沉积物对磷酸盐既有吸附作用,又有解吸作用,两者同时发生。在风力、生物扰动引起的磷酸盐释放强度超过湖泊底泥的吸附力时,沉积物的磷酸盐表观释放量为释放和吸附量的差值。

如图 2 所示,梅梁湾湖心和五里湖湖心表层沉积在 60 rpm 的轻微扰动条件下,沉积物的释放作用并不十分明显,甚至观察到有轻微的吸附作用。在 12 h 和 24 h 间的静止期,释放曲线呈一平台。 24 h 后,当扰动强度增大到 140 rpm 时,两个样点均出现了一个明显的释放过程,最大释放浓度约为 60 rpm 条件下的 3 倍。在本实验中,虽然不能确定实验室条件下的模拟扰动强度与自然条件下的风力、湖流及生物扰动的绝对强度间的定量关系,但这种相对性并不妨碍作者就沉积物中磷酸盐在扰动条件下的总体行为作一探索。

图 2 中两样点的表层沉积物再悬浮释放曲线在达到峰值后均呈下降趋势,这与漏湖^[8]沉积物柱状样品磷酸盐的释放研究中发现的情况类似。原因可能是再悬浮沉积物在动力扰动下向水体释磷过程达到一定程度后,磷释放进入一种“枯竭”状态,此时沉积物中磷向水体的释放过程与水体中的磷向沉积物上沉积和吸附过程达到一种动态平衡所致。

样点 I 与样点 II 沉积物在到达最大释放的时间 (T_{max}) 上并不一致。 $T_{\text{max, I}} > T_{\text{max, II}}$,可能是由于沉积物中磷的形态分布不同所致(表 1)。

溶解态磷(DP)能够迅速地溶解进入上覆水体,而且在湖泊沉积物中含量往往很少,对释

① 中国科学院太湖湖泊生态系统研究站 1998 年报

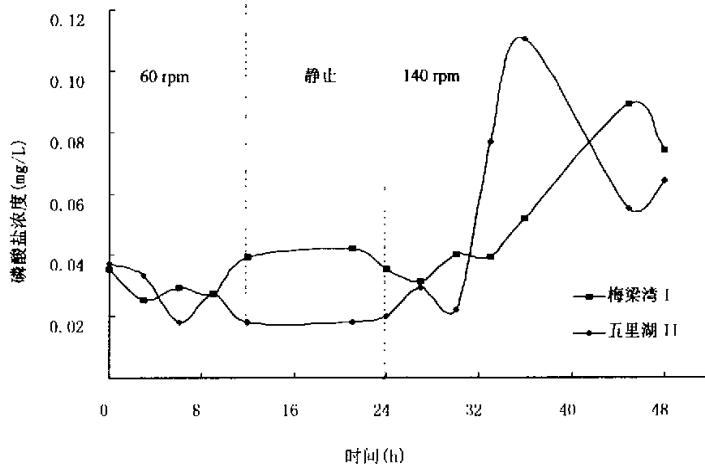


图2 梅梁湾和五里湖沉积物在模拟扰动条件下的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 释放

Fig.2 Sediment release curves of phosphorus at the Meiliang Bay and the Wulihu Lake under simulative dsiturbing conditions

放平衡时间的影响不大.其余形态为结合态磷,可能通过天然水体中生物和化学的水解作用转化为溶解态无机磷^[9].其中,铝磷(AIP)可以通过化学水解作用转化为溶解态磷,但在样点沉积物中含量甚微(分别只占总量的0.012%和0.015%),因此不是影响磷酸盐释放平衡的主要因素.

表1 沉积物中磷形态分布($\mu\text{g/g}$)

Tab.1 Distribution of the phosphorus conformation in sediments

样点	样品名称	DP	AIP	FeP	CaP	OFeP	OAlP	orgP
I	梅梁湾	1.91	0.65	204.79	180.13	2263.46	2.11	2589.9
II	五里湖	2.63	0.64	300.74	181.58	2042.44	5.98	1652.1

有机态磷可在水中溶解态磷酸酶的催化作用下转化为可溶性磷酸盐,随着水体中磷酸盐浓度的增加,其转化速度会由于竞争性抑制作用而进一步变慢^[10],而且有机态磷在本实验的沉积物中其含量是主要的,因此是影响磷酸盐平衡的主要因素之一.而其他形态的磷,如闭蓄态磷、钙磷(CaP)等在扰动条件下很难水解进入上覆水体,故亦不是释磷平衡的主要因素.由于 $(\text{orgP})_{\text{I}} > (\text{orgP})_{\text{II}}$,故样点I磷释放平衡所需时间要大于样点II,表现为释放曲线到达最大释放的时间要滞后.

2.2 模拟扰动条件下表层沉积物对磷酸盐的吸附作用

沉积物对磷酸盐的吸附作用和释放作用对于计算湖泊内源磷负荷非常重要.国内的研究较偏重沉积物的磷释放问题.现在,越来越多的证据表明,湖泊沉积物对于磷酸盐有较强的吸附作用,特别是在磷酸盐含量普遍较高的富营养化湖泊中,沉积物对于磷酸盐在更大程度上是“汇”,而非“源”.

如图 3 所示,在中等强度的扰动条件,即 100rpm 恒定转速模拟下,水体磷酸盐浓度在实验开始后的 30min 内迅速下降,五里湖样点由 0.229mg/L 降至 0.05mg/L,降低 78%;梅梁湾样点由 0.215mg/L 降至 0.013mg/L,降低 94%。此后磷酸盐浓度下降速度明显趋缓,4h 后趋于稳定浓度。可以看出,梅梁湖和五里湖两个样点在模拟扰动条件下均呈现出强烈的吸附作用,从吸附后上覆水磷酸盐浓度看,两个样点的沉积物在相同扰动强度的模拟条件下均趋于 0.02mg/L。

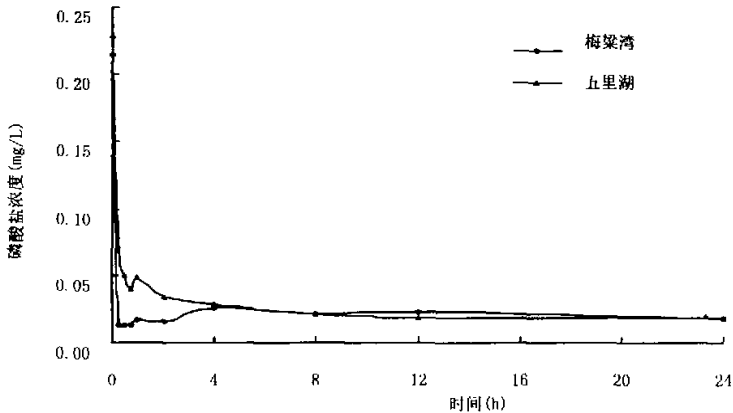


图 3 梅梁湾及五里湖沉积物模拟扰动条件下 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 吸附曲线

Fig. 3 Sediment absorption curves of the Meiliang Bay and the Wuli Lake under simulative disturbing condition

自然条件下,湖泊水体的磷酸盐浓度削减是由底泥吸附、生物吸收、微生物分解等多种化学生物过程共同作用造成的。但在本实验中,观察到吸附作用在 30min 内即基本达到平衡,而如此短的时间内生物作用是微乎其微的,且实验水样已经过 $0.45\mu\text{m}$ 的滤膜过滤,水体中的藻类等微生物已被除去。所以吸附作用是造成磷酸盐浓度削减最主要的因素,此处把磷酸盐浓度的表观削减量近似等同于吸附作用量,但并不是说在此过程中就没有释放了,释放与吸附是可逆的过程,将同时发生在一个体系中,表观削减量实际上是两个过程的综合结果。

2.3 吸附容量实验

模拟扰动条件下,本实验观察到太湖沉积物有明显的吸附作用。这种吸附作用对水体磷酸盐具有显著的缓冲能力。当由入湖河流点源污染的输入造成局部湖泊水体的磷酸盐浓度突然增大时,湖泊沉积物的吸附缓冲作用将迅速减轻磷酸盐对局部湖泊水体的环境压力。这种缓冲作用在短时间内比磷酸盐的自然稀释和生物吸收作用更明显。通过吸附容量实验可以了解沉积物对磷酸盐的缓冲作用的大小。

吸附容量实验表明(图 4):在初始磷酸盐浓度相同时,梅梁湖和五里湖两样点吸附后上覆水样磷酸盐浓度非常相近,说明两个样点沉积物对磷酸盐的吸附能力差异不显著。

表层沉积物(干重)模拟扰动条件下的吸附容量 $Q(10^{-3}\text{mg/g})$ 按下式计算(表 2)。

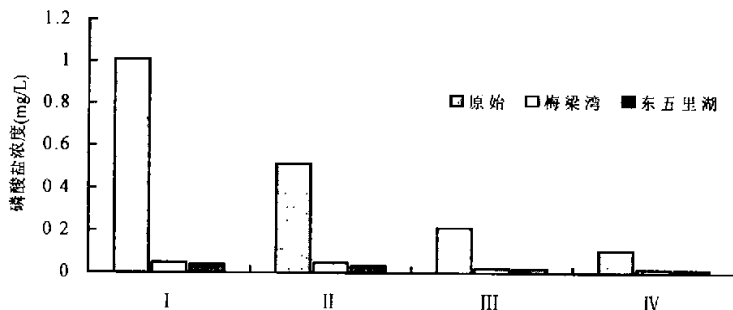


图4 表层沉积物模拟扰动24h后水体磷酸盐浓度

Fig. 4 Phosphorus concentrations under simulative disturbing condition

表2 不同外部负荷模拟扰动条件下的磷吸附容量*

Tab. 2 Absorption capacity of phosphorus under simulative disturbing condition at different external loadings

湖区	梅梁湾				五里湖			
初始浓度(mg/L)	1.01	0.514	0.213	0.104	1.01	0.514	0.213	0.104
结束浓度(mg/L)	0.048	0.046	0.021	0.017	0.041	0.032	0.019	0.016
吸附容量 $Q(10^{-3} \text{ mg/g})$	42.2 ± 0.4	20.9 ± 0.3	8.44 ± 0.2	3.78 ± 0.1	50.0 ± 0.5	25.3 ± 0.3	10.3 ± 0.2	4.74 ± 0.1

* 梅梁湾湖区及五里湖东湖区表层沉积物含水率分别为55%和62%。

$$Q = \frac{(C_0 - C_t) \times V}{W \times (1 - \mu)}$$

式中, C_0 为上覆水样磷酸盐初始浓度(mg/L); C_t 为模拟扰动24h后水样磷酸盐浓度(mg/L); V 为样品上覆水样体积(0.1L); W 为沉积物湿重(g); μ 为沉积物含水率(%)。

2.4 扰动条件对藻类生物量的影响

以1998年为例,太湖水体磷酸盐的峰值期为12月—次年1月,平均浓度为0.045mg/L。低值期在4—5月,平均浓度为0.012mg/L。在7—9月的藻华易发期,磷酸盐平均浓度为0.015mg/L。应该可以这么说,在蓝藻大量繁殖期间,水体磷酸盐处于较低水平。相反,在磷酸盐水平相对较高时,藻类生物量的表征值——叶绿素a含量却很低。

1998年太湖14个测点的叶绿素a含量与溶解性活性磷酸盐(SRP)浓度的关系如图5、图6所示。

发现除了高含量叶绿素a,高 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度的情况未出现外,其他情况都有出现。冬季叶绿素a平均含量较低时,磷酸盐在高低浓度均有分布,但平均浓度较高。由于温度条件的限制,藻类生物量较低,造成磷酸盐在生物利用率减低而使磷酸盐浓度处于较高水平。夏季叶绿素a平均含量约比冬天高5—10倍,藻类生长吸收了大量溶解性磷酸盐,使其保持较低水平。同时,由于夏季强风过境频频,湖流波浪使沉积物处于扰动状态,再悬浮强烈,沉积物释磷作用显著,这些释放的磷酸盐对藻类的持续暴发了一个后续营养库的作用。因此扰动条件下的释磷作用可能是藻类生物量在夏季能居高不下的主要原因之一。

3 结论

在模拟扰动条件下,表层沉积物的磷酸盐释放作用受扰动强度的影响十分明显.在低扰动强度下几乎观察不到释放现象,当扰动超过一定的强度后,释放作用才会明显发生.在模拟强扰动强度下,两样点最大释放浓度分别为 0.110mg/L 和 0.089mg/L,约为低强度扰动条件下的 3 倍.说明自然条件下风力、湖流和生物的扰动变化对磷酸盐释放的影响较大.在进行湖泊底泥疏浚时,应考虑疏浚扰动引起的磷酸盐释放及可能造成的不利环境影响.

沉积物在模拟扰动条件下,对磷酸盐的吸附作用表现得十分明显.开始的 0.5h 内吸附作用最为强烈,后逐渐趋缓.并在 4h 后趋于稳定,且吸附强度远大于释放.说明:在扰动条件下,上覆水磷酸盐浓度较高时,沉积物在更大程度上是磷酸盐的“汇”,而非“源”.

由此看来,沉积物的磷释放和吸附作用是同时存在的,何种作用为主取决于上覆水体中磷酸盐的浓度及扰动强度等因素的综合作用.扰动强度增大、上覆水磷酸盐浓度较低有利于磷的释放,反之当外部磷酸盐浓度较高时,则吸附作用是主要的.沉积物-水构成了湖泊磷酸盐的天然缓冲体系;当水体磷酸盐负荷较低时,沉积物处于释磷状态,释磷强度随扰动强度的加大而增加;反之当水体磷负荷较高时,沉积物则充当磷吸收剂.释磷过程相对较缓慢,故夏季湖泊水体磷释放峰值往往滞后于一次风情过程,而吸附过程则较为迅速.

沉积物在扰动条件下的释磷作用对夏季藻类的持续暴发起了一个推波助澜的作用.同时由于藻类的大量繁殖又反过来控制了水体溶解性磷酸盐的浓度处于一个相对较低的水平.

在 25℃、100rpm 的中等扰动强度下,磷酸盐初始浓度为 1.01mg/L 时,两样点每克干泥各能吸附 42.2×10^{-3} mg 及 50.0×10^{-3} mg 磷酸盐.考虑到太湖底泥总蓄积量的可观性,太湖整个对磷酸盐的吸附缓冲容量相当可观.在制定湖泊疏浚、生态保护计划时,应针对不同湖泊的实际情况,按照环境、经济效益最大化原则,避免既破坏环境、又浪费资金的盲目疏浚清淤.

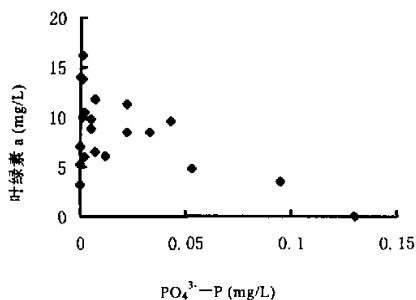


图 5 太湖 1-2 月叶绿素 a - $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 关系

Fig. 5 Relationship between chlorophyll-a and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ of Taihu Lake from Jan. to Feb.

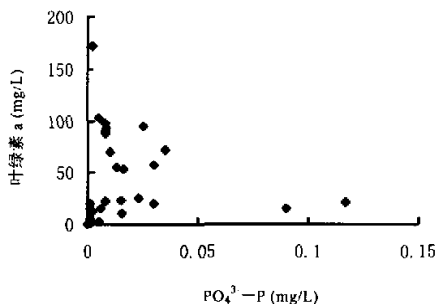


图 6 太湖 7-9 月叶绿素 a - $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 关系

Fig. 6 Relationship between chlorophyll-a and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ of Taihu Lake from Jul. to Sep.

参 考 文 献

- 1 舒金华. 我国主要湖泊富营养化程度的评价. 海洋与湖沼, 1993, 24(6): 616 - 620
- 2 孙顺才, 黄滨平主编. 太湖. 北京: 海洋出版社, 1993
- 3 黄滨平, 范成新等. 太湖水质现状及变化趋势. 中国科学院南京地理与湖泊研究所集刊(第9号). 北京: 科学出版社, 1993. 27 - 35
- 4 Sven. Olof Ryding, Water Rast 编. 湖泊与水库富营养化控制. 北京: 中国环境科学出版社, 1992
- 5 吴根福, 吴秀昌等. 杭州西湖底泥释磷的初步研究. 中国环境科学, 1998, 18(2): 107 - 110
- 6 尹大强, 谭秋荣. 环境因子对五里湖沉积物磷释放的影响. 湖泊科学, 1994, 6(3): 240 - 244
- 7 金相灿, 屠清瑛主编. 湖泊富营养化调查规范. 第二版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990
- 8 范成新. 湖泊沉积物理化特性及磷释放模拟. 湖泊科学, 1995, 7(4): 341 - 350
- 9 晏维金, 亢 宇, 章 申等. 磷在土壤中的解吸动力学. 中国环境科学, 2000, 20(2): 97 - 101
- 10 周易勇, 付永清. 水体磷酸酶. 来源. 特征及其生态学意义. 湖泊科学, 1999, 11(3): 274 - 282

Phosphorus Release and Absorption of Surficial Sediments in Taihu Lake under Simulative Disturbing Conditions

ZHANG Lu FAN Chengxin QIN Boqiang YANG Longyuan

(Nanjing Institute of Geography & Linnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, 210008, P. R. China)

Abstract

The phosphorus release and absorption of surficial sediments in Taihu Lake was studied under simulative disturbing conditions. The results showed that the sediment release effects of the Wuli-hu Lake and the Meiliang Bay were not as remarkable as expected. Under lower disturbing intensities, the release processes were not obvious. As the disturbing intensity became greater, an obvious release process was observed. The time needed in getting maximal release was distinct because of the different phosphorus constitutions.

The phosphorus absorption was obvious under simulative condition. The phosphorus concentrations of upper water of surficial sediments in Taihu Lake were reduced from 0.229mg/L and 0.215mg/L to 0.05mg/L and 0.013mg/L under disturbing condition of 100rpm and 25℃, respectively. The experiment showed that the absorption intensity was much greater than the release intensity in higher phosphorus concentration of upper water of surficial sediment. Under 25℃ and moderate disturbing intensity (100rpm), when the initial phosphorous concentration was 1.01mg/L, the absorption capacity of surficial sediments of the Meiliang Bay and the Wuli-hu Lake could be up to 0.042mg and 0.050mg phosphorus per gram dry sediment. This huge absorption capability of surficial sediment may play a positive role in phosphorus buffering in shallow lakes.

Key Words Resuspension, sediment, release and absorption, Taihu Lake