

于桥水库沉积物内源污染特性研究

丛海兵^{1,2}, 黄廷林¹, 李创宇¹, 何文杰³, 韩宏大³

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055 ;2. 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225009 ;
3. 天津自来水集团公司, 天津 300040)

摘要 通过对天津市于桥水库沉积物中污染物的释放实验研究, 找出了于桥水库底泥中磷、有机质、氮、铁、锰等污染物释放的影响因素, 得出了溶解氧、pH 值、水温等影响因素对底泥污染物释放的影响程度, 并对各污染物的释放机理进行了探讨。磷的释放条件: pH 值 ≥ 8 时, 好氧条件下会缓慢释放, 当 $\rho(\text{DO}) < 2 \text{ mg/L}$ 时快速释放; 在中酸性条件下, 当 $\rho(\text{DO}) < 1 \text{ mg/L}$ 时发生较快速释放; 低溶解氧和高 pH 值协同作用强烈。有机物和氮的释放主要受溶解氧浓度影响, 与 pH 值关系不大, 在 $\rho(\text{DO}) < 2 \text{ mg/L}$ 时发生了快速释放。溶解性铁、锰的释放取决于水体 pH 值, 在酸性条件下, $\rho(\text{DO}) < 1 \text{ mg/L}$ 时释放。

关键词 底泥; 溶解氧; pH 值; 水温; 水库

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2006)04-0020-04

Study on internal pollution of sediments in Yuqiao Reservoir

CONG Hai-bing^{1,2}, HUANG Ting-lin¹, LI Chuang-yu¹, HE Wen-jie³, HAN Hong-da³

(1. College of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China ;2. School of Environmental science & Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China ;
3. The group of Tianjin Water Company, Tianjin 300040, China)

Abstract Factors affecting the release of phosphorus, organic matters, nitrogen, iron and manganese from sediment at Yuqiao Reservoir in Tianjin City were found out through experiment. The influence of DO, pH value, and water temperature on the release of pollutants was studied, and the mechanisms of pollutant release were discussed. Phosphorus was released slowly under the condition that $\text{pH} \geq 8$ and dissolved oxygen was abundant; under the condition of $\text{pH} \geq 8$ and $\rho(\text{DO}) < 2 \text{ mg/L}$, or $\text{pH} \leq 7$ and $\rho(\text{DO}) < 1 \text{ mg/L}$, phosphorus was released quickly. The synergistic reaction of low DO and high pH was intensive. Instead of pH, the release of organic matters and nitrogen was mainly affected by DO, and they were released quickly if $\rho(\text{DO}) < 2 \text{ mg/L}$. Dissolved iron and Manganese were released if $\rho(\text{DO}) < 1 \text{ mg/L}$ and $\text{pH} < 7$.

Key words sediment; dissolved oxygen; pH value; water temperature; reservoir

于桥水库位于天津市北部蓟县境内,始建于 1959 年,总库容 15.6 亿 m^3 ,流域面积 2060 km^2 ,平均水深 4.6 m,最大水深 12 m,目前是天津市人民生活饮用水和工农业用水水源地。自 20 世纪 90 年代后期以来,于桥水库内藻类大量繁殖,富营养化问题严重,增加了城市水处理难度和成本,影响了出水水质。湖泊水库底泥是氮、磷营养盐的重要贮蓄库,是湖泊水库内源污染的主要来源。不少湖泊调查资料表明,当入湖营养盐减少或完全截流后,底泥营养盐释放作用仍会使水质处于富营养化水平,甚至出现藻

类“水华”现象^[1-2]。于桥水库在 6~8 月份出现水体分层现象,下层水体溶解氧质量浓度小于 1 mg/L ^[3],在该条件下,有可能产生底泥氮、磷的释放^[4]。本研究以于桥水库底泥为研究对象,进行实验室模拟释放实验,探明底泥污染物释放特性,评价内源污染源对于桥水库富营养化的作用。

1 研究方法

1.1 泥样准备

用自制的柱状取样器,于 2004 年 9 月,自于桥

作者简介: 国家高技术研究发展计划“863”资助项目(2002AA601140)
作者简介: 丛海兵(1968—),男,江苏如东人,副教授,博士研究生,研究方向为水处理、水污染控制。E-mail: chb9903@126.com

水库大坝放水口前方约 500 m 处的主河槽中取得表层 30 cm 柱状泥样。新鲜泥样经均化处理后放入实验筒中,同时取一份泥样经风干、筛分,进行组分测定。泥样组分测定结果见表 1。

表 1 实验泥样中各组分含量

$u(\text{有机质})/\%$	$u(\text{TN})/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$u(\text{TP})/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	$u(\text{Fe})/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$u(\text{Mn})/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$
2.23	4.09	439.90	55.57	1.37

1.2 水样准备

取同期于桥水库水,经 0.45 μm 孔径的滤膜过滤,滤去藻类等浮游生物,以消除其对实验的影响。实验水样的水质特征见表 2。

表 2 实验水样水质

$\rho(\text{TDP})$	$\rho(\text{PO}_4^{3-}-\text{P})$	$\rho(\text{TN})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	$\rho(\text{TOC})$	$\rho(\text{Fe})$	$\rho(\text{Mn})$
0.011	0.006	0.694	0.044	4.7	未检测到	未检测到

1.3 实验装置

实验装置如图 1 所示,为 7 个密闭的有机玻璃圆筒,直径和高度均为 300 mm,置于恒温水槽中。圆筒顶盖上开有取样孔,平时用橡胶塞封闭。一气管伸入筒内,并在气管末端连接有环形气体微孔释放器,气管的另一端与氧气瓶和氮气瓶相连。

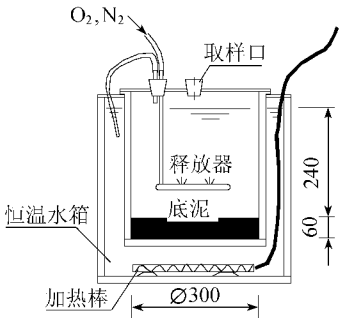


图 1 底泥释放实验装置(单位:mm)

1.4 实验方法

将水样沿筒壁缓缓注入 7 个实验筒中,并不要搅动底部的泥样。泥样和水样的高度分别为 60 mm 和 240 mm。加入水样后静沉平衡 24 h 后调节控制实验条件。用带温控的加热棒控制恒温水槽的温度。向实验筒中通入氧气或氮气,以调节上覆水中溶解氧浓度,溶解氧浓度用 HI9141 型溶解氧分析仪测定。用 NaOH 和 HCl 调节上覆水中的 pH 值。

调节上覆水中的 pH 值、溶解氧和水温,监测上覆水质变化情况。水质测定项目包括:总溶解性磷(TDP)、溶解性正磷($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)、总氮(TN)、总有机碳(TOC)、铁(Fe)和锰(Mn)。每两天测定一次氮、磷,其他物质的监测频率适当减小。测定前,上覆水样需经 0.45 μm 孔径的滤膜过滤,消除悬浮颗粒的影响。

2 实验结果分析

2.1 底泥磷释放特性

主要考察了溶解氧、pH 值、水温对底泥磷释放的影响,分述如下。

2.1.1 溶解氧对磷释放的影响

在水温为 30℃,pH 值分别为 6.5、8 和 9.1 的条件下,释放实验经历了 4 个不同的溶解氧阶段,依次为:好氧($\rho(\text{DO}) > 4 \text{ mg/L}$)、缺氧($\rho(\text{DO}) = 1 \sim 2 \text{ mg/L}$)、厌氧($\rho(\text{DO}) < 1 \text{ mg/L}$)和再好氧阶段($\rho(\text{DO}) > 4 \text{ mg/L}$)。实验共进行了 50 d,上覆水中 TDP 的测定结果见图 2。

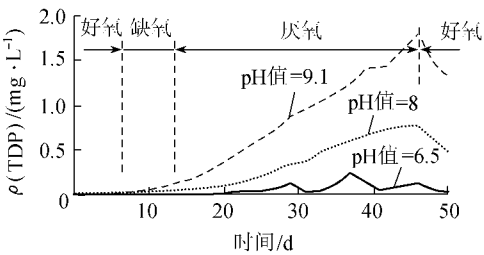


图 2 溶解氧、pH 值对 TDP 释放的影响

从图 2 可以看出,溶解氧浓度对底泥磷的释放有较大的影响,但在不同的 pH 值条件下,这种影响的程度不同。pH 值为 9.1 时,好氧条件下有轻微的磷释放,缺氧条件下发生了明显的磷释放,厌氧条件下释放速度进一步加快,平均速度达到了 $12.23 \text{ mg}/(\text{d}\cdot\text{m}^2)$ 。pH 值为 6.5 时,好氧和缺氧阶段没有磷的释放,从厌氧阶段的第 8 天开始有轻微的释放,释放速度较慢,只有 $2.39 \text{ mg}/(\text{d}\cdot\text{m}^2)$ 。pH 值 = 8 的情况介于上述两种情况之间,厌氧稳定释放速度 $5.62 \text{ mg}/(\text{d}\cdot\text{m}^2)$ 。总之,溶解氧浓度越低,磷的释放速度越快。

目前研究认为厌氧条件是底泥磷释放的关键条件,但对于多低的溶解氧条件能引起磷大量释放尚无定论。已有的模拟研究都是在绝对厌氧条件下进行的。为了进一步探明溶解氧对磷释放的影响程度,进行了不同溶解氧条件下的对比实验。在水温为 18 ~ 20℃,pH 值为 9.1, $\rho(\text{DO}) > 4 \text{ mg/L}$ 、 $1 \sim 2 \text{ mg/L}$ 、 $< 1 \text{ mg/L}$ 的条件下进行对比实验。实验共进行了 26 d,上覆水中 TDP 浓度变化见图 3。

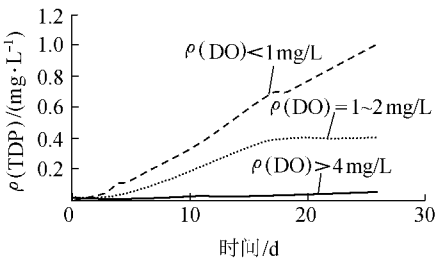


图 3 不同溶解氧对 TDP 释放的影响

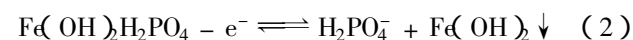
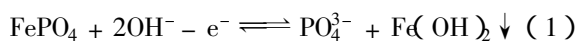
从图 3 可计算出, pH 值为 9.1 时, 在好氧、缺氧、厌氧 3 种条件下磷释放速度分别为 0.32、5.85、9.55 mg/(d·m²)。只要 $\rho(\text{DO})$ 达到小于 2 mg/L 的缺氧条件, 磷就发生了快速释放, 其释放速率达到了厌氧条件的 61%。结合图 2 的结果可以得出, 在 pH 值 ≥ 8 的碱性条件下, $\rho(\text{DO})$ 小于 2 mg/L 时, 底泥中的磷就会发生明显的释放, 在 pH 值为中酸性条件下, $\rho(\text{DO})$ 小于 1 mg/L 时才会发生底泥磷的释放。实验还发现, TDP 的主要成分为 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, 占 95% 以上。

2.1.2 pH 值对底泥磷释放的影响

从图 2、图 3 可以看出, 在自然水体可能的 pH 值范围内, pH 值越高, 磷的释放越强烈。当 pH 值为中酸性时, 只在厌氧条件下发生磷释放, 且释放速度较慢。当 pH 值 ≥ 8 时, 无论在好氧还是缺氧和厌氧条件下, 都会发生磷的释放。

从图 2、图 3 可以看出, 低溶解氧浓度和高 pH 值产生了很强的协同作用效果。可以解释如下: 底泥中铁铝磷的结合形态分为磷酸铁铝 [FePO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{HPO}_4)_3$ 、 AlPO_4 、 $\text{Al}_2(\text{HPO}_4)_3$]、氢氧化物配位吸附磷 [$\text{Fe}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})\text{HPO}_4$]、金属氧化膜包裹的闭蓄态磷。从理论上讲, 厌氧条件下能将 Fe^{3+} 被还原成可溶性的 Fe^{2+} , 使所有与铁结合的磷释放。还原产物 Fe^{2+} 、磷酸根需经过土层间隙扩散传质向水体释放, 由于受到扩散阻力的控制, 土层颗粒周围积累了较高的 Fe^{2+} 、磷酸根浓度, 阻碍了还原溶解的进行, 限制了磷释放速度。而高 pH 值条件下, 会发生 OH^- 对磷酸根的置换作用, 使得除闭蓄态以外的所有铁铝磷释放。这种置换是基于溶度积原理, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的溶度积(分别为 2.64×10^{-39} 和 1.1×10^{-33})远低于 FePO_4 和 AlPO_4 的溶度积(分别为 9.92×10^{-29} 、 9.83×10^{-21}), 从而发生了 OH^- 对 PO_4^{3-} 的置换, 使磷酸根释放。但这一过程受到磷酸铁铝溶解速度的控制, 因而速度很慢。

在低溶解氧浓度和高 pH 值共同作用下, 由低溶解氧浓度引起的铁结合磷的还原溶解解决了溶解速度问题。而高 pH 值条件则提供了较高的 OH^- 离子浓度, 在浓度差作用下, 水体中 OH^- 离子主动向间隙水中侵入, OH^- 离子与 Fe^{2+} 结合成 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 沉淀, 使土壤颗粒周围 Fe^{2+} 浓度降低, 使还原溶解得以顺利进行。因此发生了低溶解氧浓度和高 pH 值协同作用效果。两者的协同作用过程可用如下反应方程式表示:



$\text{Fe}(\text{OH})_2$ 是微溶物质, 且溶解度受 pH 值的影响

很大, 因此, 在不同的 pH 值条件下, 低溶解氧浓度和高 pH 值协同作用效果不同。 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 在 25℃ 时的溶度积等于 4.87×10^{-17} , 当 pH 值等于 9.1、8、6.5 时, 水中 Fe^{2+} 离子的平衡质量浓度分别为 0.017 mg/L、2.72 mg/L、2720 mg/L。由此可以看出, 只有在高 pH 值时, 水中 Fe^{2+} 离子的溶解度才较低, 反应式 (1) 和 (2) 能顺利进行, 协同作用强烈。

于桥水库在 6~8 月份出现水体分层现象, 下层水体溶解氧质量浓度小于 1 mg/L。多年实测资料显示, 于桥水库水源的 pH 值介于 7.01~9.48 之间, 平均为 8.34, 夏秋季高于冬季, 这必然引起底泥磷的大量释放。于桥水库 8~9 月份藻类大量繁殖, 这与 6~8 月间的磷释放存在着这必然的联系, 前期磷的释放为藻类繁殖做了充分的营养准备。

2.1.3 水温对底泥磷释放的影响

在 pH 值为 9.1 的条件下, 进行了水温为 30℃ 和 19℃ 的对比释放实验。两种温度下的释放速率分别为 12.2 mg/(d·m²) 和 9.6 mg/(d·m²)。温度下降 11℃, 释放速率下降了 21%, 说明温度对底泥磷释放影响明显。水温升高, 加快了还原溶解和置换反应速度。同时, 水温升高增加了底栖生物的活动, 扰动了间隙水, 加强了间隙水与上覆水的交换, 有利于释放物质向上覆水迁移, 减小了底泥界面生成物质的浓度, 促进了反应的进行。

2.2 底泥有机物释放特性

在测定磷释放过程的同时, 测定上覆水中的 TOC 浓度, 依此判断 pH 值、溶解氧、水温对底泥有机物释放的影响。测定共进行了 4 次, 依次是实验开始、好氧末期、缺氧末期、厌氧末期。测定结果如图 4 所示。

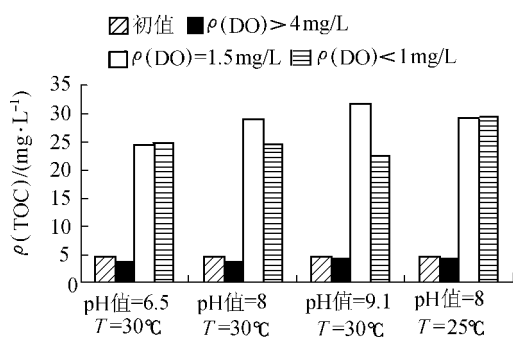


图 4 底泥有机物释放特性

从图 4 可以看出, 在好氧阶段, 各实验筒中的 TOC 浓度没有增加, 还有轻微的减少, 这说明好氧阶段底泥没有向上覆水释放有机物, 而上覆水中的有机物在好氧条件下发生了好氧分解, 使有机物浓度降低。

在 $\rho(\text{DO}) = 1 \sim 2 \text{ mg/L}$ 的缺氧阶段, 底泥有机物

大量释放。在该阶段的 6 天时间里,各实验筒中的 TOC 质量浓度大幅度增加,从 4.3 mg/L 增加到 31.6 mg/L。这说明在 $\rho(\text{DO}) = 1 \sim 2 \text{ mg/L}$ 的缺氧条件下,厌氧产酸菌开始大量繁殖,将底泥中的不溶性有机物降解为可溶性的有机酸,并向上覆水中迁移释放。完全厌氧后 ($\rho(\text{DO}) < 1 \text{ mg/L}$),上覆水中 TOC 浓度并没有进一步上升,而是有所回落,这是因为产甲烷菌开始繁殖,将有机酸进一步分解成甲烷,释放到空气中。

在缺氧期间,高 pH 值更有利于底泥有机物的释放。其原因可能是因为高 pH 值中和了来自底泥孔隙中的有机酸,加速了有机酸向水体迁移的速度,改善了孔隙中的酸度,有利于产酸菌的生长。

2.3 底泥氮释放特性

在测定磷释放过程的同时,测定上覆水中的总氮(TN)浓度,依此判断 pH 值、溶解氧、水温对底泥 TN 释放的影响。TN 的监测结果如图 5 所示。

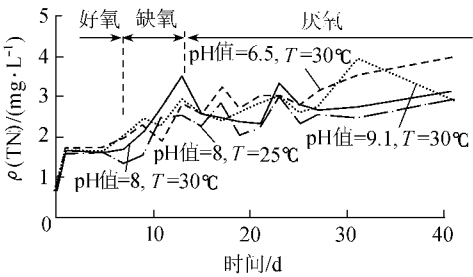


图 5 底泥氮释放特性

从图 5 可以看出,在实验的第 1 天,氮出现了短暂的释放,这是因为实验泥样经均化后,孔隙中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 瞬时大量释放的结果。在接下来的好氧阶段基本没有氮的释放,而在缺氧阶段,氮出现了快速释放。随着溶解氧的进一步减少, TN 的浓度并没有继续增加,而是在一定的范围内波动,这种波动可能主要是测试原因引起的。因此,氮的释放与有机物的释放类似,主要发生在缺氧阶段,而在厌氧阶段趋于平衡, pH 值对氮释放影响不大。这种相似性是因为氮的释放主要来源于含氮有机物的释放。

2.4 底泥铁、锰释放特性

上覆水中 Fe 离子浓度测定结果见图 6(水温 30°C)。从图 6 可以看出,好氧阶段各实验筒均没有 Fe 离子的释放。缺氧条件下,各实验筒均出现了轻微的 Fe 离子释放,说明铁的还原溶解开始进行,但速度较慢。进入厌氧阶段后, pH 值为 6.5 的实验筒中的 Fe 离子浓度在第 8 天后急剧增加,这是因为从底泥上释放下来的 Fe^{2+} 需要一段时间向水体迁移释放,且 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 在水中增加的时刻与图 1 所示的 $\rho(\text{TDP})$ 增加的时刻是同步的,这反映了释放物质向水体迁移阻力的存在。 pH 值为 8 的实验筒中的 Fe

离子浓度在厌氧阶段开始后十几天才增加,这是因为发生了 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 沉淀反应,迟滞了 Fe^{2+} 离子浓度的增加,同时也说明,该 pH 值具备了 Fe 离子释放的条件。 pH 值为 9.1 的实验筒中的 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 一直保持在低水平,这是因为 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 沉淀反应进行得彻底, Fe^{2+} 的平衡浓度只有 0.017 mg/L 的缘故,因而高 pH 值不具备 Fe 离子存在的条件。

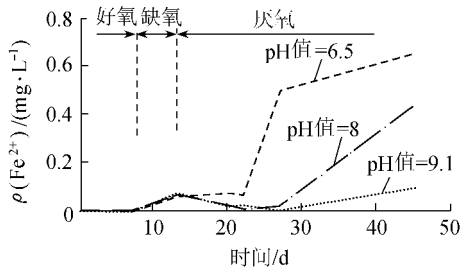


图 6 底泥中 Fe^{2+} 释放特性 ($T = 30^\circ\text{C}$)

上覆水中 Mn 离子浓度测定结果见图 7(水温 30°C)。从图 7 可以看出,当 pH 值为 6.5 时,在好氧和缺氧条件下就发生了锰离子的释放,厌氧状态时释放作用急剧加快,直到最终趋于稳定,达到 3 mg/L 的高浓度。当 pH 值为 8 时,在好氧和厌氧条件下基本没有锰离子的释放,而在厌氧状态时发生了锰离子的释放。当 pH 值为 9.1 时,不管是好氧、缺氧还是厌氧,都没有出现锰离子的释放。

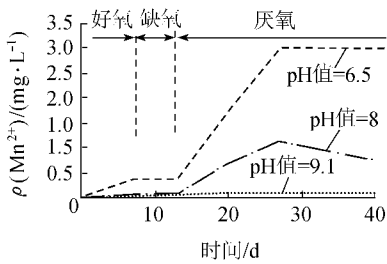


图 7 底泥 Mn^{2+} 释放特性 ($T = 30^\circ\text{C}$)

出现上述现象的原因是,锰在自然界主要以 $\text{MnO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 的形式存在,在酸性条件下, MnO_2 能被还原成可溶性的二价锰 Mn^{2+} ,如图 7 中 pH 值 = 6.5 时好氧、缺氧状态的情况。另外,在厌氧等还原条件下, Mn^{4+} 可以被还原成可溶性的 Mn^{2+} 而释放到水中,如图 7 中 pH 值为 6.5 和 8 时厌氧状态的情况。 pH 值为 9.1 时的厌氧状态又没有出现锰离子释放的原因是 $\text{Mn}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2$ 均难溶于水,易产生沉淀,而在 pH 值为 9.1 的实验筒中, OH^- 和 PO_4^{3-} 的浓度均较高,使得厌氧还原产生的 Mn^{2+} 转而生成了沉淀,因而在上覆水中测不到锰离子。

3 结 论

a. 在 pH 值为 6.5 的酸性条件下,当溶解氧质量浓度小于 1 mg/L 时,由于 FePO_4 等(下转第 61 页)



图5 欧阳海水电站 2004 年各项预报结果

其预报模型为

$$y = 211.982 - 1.438714x_1 - 0.6952046x_2 \quad (2)$$

式中: y 为湘南雨季结束日期; x_1 为 HE 的 195 点高度; x_2 为 HE 的 156 点高度。

预测结果说明 影响湘南雨季结束日期的主要因子是 HE, 也就是 500 hPa 等压面(H5)东半部的高度。

4 分析与讨论

4.1 湖南省雨季结束的天气形势

雨季结束的天气形势一般采用大范围的天气标准。对湖南来说, 雨季结束的天气标准是伸向大陆的西太平洋副高脊线北跳至 $24^{\circ} \sim 27^{\circ}N$, 并稳定控制 5 d 以上。雨季期间, 中纬度东亚大陆沿岸附近是个槽区, 西太平洋副高位置偏南偏东, 主体在太平洋中部。雨季结束后, 东亚沿海等压面可上升 50 位势米, 西太平洋副高脊线西伸北进, 脊线达到 $23^{\circ} \sim 25^{\circ}N^{[1]}$ 。根据上述研究可知, 副高脊线位置和东亚大陆沿岸的等压面高度变化是雨季结束的一个重要标志。这也说明这一地区 500 hPa 等压面高度是判定雨季结束的一个关键因素。

4.2 讨论

根据计算分析结果, 得到影响湘南雨季结束的

(上接第 23 页)铁磷中的 Fe^{3+} 被还原成可溶性 Fe^{2+} , 引起了底泥中磷释放。

b. 在 pH 值 ≥ 8 的碱性条件下, 好氧状态时, 由于 OH^- 对 PO_4^{3-} 的置换作用, 引起了底泥磷的缓慢释放, 当溶解氧质量浓度小于 2 mg/L 时, 发生了置换作用与还原作用的协同作用, 底泥磷的释放速度大大加快。

c. 水温对底泥磷释放的影响明显, 温度越高, 磷释放越快。

d. 底泥中有机物和氮的释放取决于溶解氧浓度, 而与 pH 值关系不大。当溶解氧浓度小于 2 mg/L 时, 有机物和氮释放。

e. 在溶解氧浓度小于 1 mg/L 时, 由于 Fe^{3+} 被还原成可溶性 Fe^{2+} , 引起了底泥中铁离子的释放, 但铁离子在水中存在浓度取决于水中的 pH 值, pH 值越高, Fe 离子的浓度越低。

f. 在酸性或溶解氧质量浓度小于 1 mg/L 的厌

主要预报因子是 HE 高度, 也就是 500 hPa 等压面的东半部的高度。从上述预报模型来看, 195 和 156 这两点是在 $120^{\circ} \sim 140^{\circ}E$ 、 $35^{\circ} \sim 45^{\circ}N$ 的范围内, 这一地区就在东亚大陆沿岸附近, 这与上面所讨论的雨季结束的天气形势是吻合的。因此可以认为计算所得的 HE 预报因子是有一定物理意义的, 它反映了副高位置和强度的变化对雨季结束日期的影响。

5 结 论

本文在逐步回归方法和因子优选方法的基础上, 研究并建立了湘南雨季结束日期的长期水文预报模型。经过 10 年预报的检验, 得出 HE 是影响湘南地区雨季结束的主要因子。又从湘南雨季结束的天气形势分析来对照, 发现两者是吻合的。根据 2004 年的预报和实况检验, 可以认为文中所述的长期预报方法对预报湘南雨季结束日期是行之有效的, 且具有一定的物理意义。

参考文献:

- [1] 程庚福, 曾申江, 张伯熙, 等. 湖南天气及其预报 [M]. 北京: 气象出版社, 1987: 289-298.
- [2] 郑金陵, 林镜榆. 水库水情的长期预报方法研究 [J]. 水科学进展, 2004, 15(5): 665-669.
- [3] 郑金陵, 林镜榆. 湖南南部两水电站水情的长期预报方法研究 [J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(6): 32-34.
- [4] 《数学手册》编写组. 数学手册 [M]. 北京: 人民出版社, 1979: 836-853.
- [5] 施能. 气象统计预报中的多元分析方法 [M]. 北京: 气象出版社, 1992: 116-138.

(收稿日期 2005-01-06 编辑: 傅伟群)

氧条件下, 由于还原作用, 底泥中的锰离子释放, 且酸性条件和厌氧条件产生了协同作用效果。但锰离子的存在浓度受水中 pH 值的影响, 当 pH 值为 9.1 时, 即使在厌氧状态, 锰离子的浓度也很低。

g. 于桥水库存在厌氧和高 pH 值条件, 具备了底泥氮磷释放的条件, 是藻类繁殖的重要原因。

参考文献:

- [1] SONDERGARD M, JENSEN J P, JORGEN W. Internal phosphorous loading in shallow Danish lakes [J]. Hydrobiologia, 1999, 408/409: 145-152.
- [2] LI W, YIN C, MING Z, et al. Discussion on phosphorous release from lake sediment [J]. Journal of Lake Sciences, 1999, 11(11): 2013-2018.
- [3] 金相灿, 刘树坤, 张宗涉, 等. 中国湖泊环境 [M]. 北京: 海洋出版社, 1995: 349-350.
- [4] 高丽, 杨浩, 周建民. 湖泊沉积物中磷释放的研究进展 [J]. 土壤, 2004, 36(1): 12-15.

(收稿日期 2005-05-25 编辑: 傅伟群)