

某城市湖泊中磷的循环特征及富营养化发生潜势

周启星¹, 俞洁², 陈 剑³, 林海芳³

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所陆地生态过程重点实验室, 沈阳 110016, E-mail: Zhouqixing2003@yahoo.com; 2. 浙江省环境监测中心站, 杭州 310012; 3. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310029)

摘要:通过对浙江省临海市东湖水体磷元素的输入与输出途径与通量、磷元素在湖泊环境中的循环特征以及磷循环对水温上升的响应分析,并基于对该水体从 2000 年开始隔年进行各参数的观测,表明 2000 年以来磷输入年平均增量为 $0.007 \sim 0.009 \text{ mg/L}$,水中叶绿素 *a* 平均年增 $0.14 \sim 0.56 \mu\text{g/L}$,透明度年平均下降 $0.38 \sim 0.49 \text{ m}$,溶解氧年平均下降 $0.21 \sim 0.71 \text{ mg/L}$,并依此建立了反映湖泊富营养化发生潜势的这些主要代表性参数与湖水中总磷含量之间的相关关系,揭示了可以通过从磷物质单因子的变化预测所引起的其它因子变化之间的关系来综合判断湖泊的营养状态,从而为减少湖泊富营养化的发生、提高湖泊水质提供科学依据。

关键词:磷循环;富营养化;湖泊;水质;营养物污染

中图分类号:X524 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2004)05-0138-05

Cycling Characteristics of Phosphorus in a Urban Lake and Its Eutrophication Potentiality

ZHOU Qi-xing¹, YU Jie², CHEN Jian³, LIN Hai-fang³

(1. Key Laboratory of Terrestrial Ecological Process, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China E-mail: Zhouqixing2003@yahoo.com; 2. Zhejiang Central Station of Environmental Monitoring, Hangzhou 310012, China; 3. College of Natural Resources and Environmental Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract: Input and output pathway, fluxes, characteristics and temperature-increasing responses of phosphorus cycling in the East Lake located at the centre of Linhai City, Zhejiang Province, China were analyzed. On the basis of the annual field observation on the lake, it was indicated that chlorophyll *a* in water was being increased at the average rate of $0.14 \sim 0.56 \mu\text{g/L}$, the transparency in water was being decreased at the average rate of $0.38 \sim 0.49 \text{ m}$, and dissolved oxygen in water was being reduced at the average rate of $0.21 \sim 0.71 \text{ mg/L}$. Relationships between the representative measurable parameters which can reflect the eutrophication potentiality of a lake and total phosphorus (TP) in water were set up, thus revealing that a change of phosphorus in lake water can be used to comprehensively judge the nutrition situation of a lake through forecasting changes in other factors and their relationships. This work can thus provide a scientific basis for decreasing eutrophication and improving water quality of lakes.

Key words: phosphorus cycling; eutrophication; lake; water quality; nutrient contamination

一个城市湖泊的水质状况与富营养化潜势,可以指示该城市的环境质量好坏与演化趋势,体现该城市人类活动的强度与保护环境之间的关系^[1]。特别是城市湖泊中磷的循环,可以表征湖泊富营养化及水质恶化的全部过程^[2,3]。因为,湖泊由生产力较低的贫营养状态向生产力较高的富营养状态转变的现象,这是一个连续的营养状态发展的生态过程。实质上是湖水中自养型生物(主要是浮游植物)在水中建立优势的过程,由于大量藻类的过度繁殖,使水中总磷和叶绿素 *a* 等明显增加,进而引起湖水透明度降低、下层水中的氧消耗过程加剧。而湖泊富营养化的发生,在大多数情况下,是由于湖水中磷的负荷量增加的原因所致^[3~8]。本文以浙江省临海市东湖为例,对其磷的循环及其特征进行分析,并通过湖水叶绿素 *a* 浓度、透明度和深层溶解氧与湖水总磷浓

度之间相互关系的建立,探讨该湖泊富营养化发生的潜势,为有效地控制、防止湖泊富营养化发生及其导致的危害提供实验数据积累与理论基础^[8~13]。

1 材料与方法

1.1 采样

对东湖整个水体按照面积平均划分原则进行布点采样,1号点为东湖前湖右侧,2号点为东湖前湖左侧,3号点为东湖后湖右侧,4号点为东湖后湖左侧,5号点为儿童乐园前,6号点为儿童乐园后。分别采于 2000、2001、2002 和 2003 年 4 月 15 日,采样时

收稿日期:2003-09-10;修订日期:2004-03-06

基金项目:国家杰出青年科学基金项目(20225722)

作者简介:周启星(1963~),男,研究员,博士生导师,主要研究方向为污染生态化学、毒理生态学和城镇环境工程等。

间均相隔 1 a.各采样点采样量为水样 500 mL,取回实验室于冰箱冷藏保存,备用.

1.2 分析方法

水样总磷含量,先以二硫酸钾 + 30 %(体积分数)硫酸消化样品后,然后采用酸性钼蓝比色法进行测定^[3,10];水样中的藻类经过滤后用 90 %丙酮溶液提取叶绿素 a,测定吸光度,计算含量^[3~15];采用塞氏盘法,测定透明度;采用碘量法,测定水样溶解氧(DO)^[3,15].

2 结果与讨论

2.1 磷循环特征

2.1.1 输入途径

对东湖水进行年际间系统分析表明,从 2000 年到 2003 年,湖水中总磷平均含量逐年上升(表 1),隔年增量分别为 0.009、0.007 和 0.009 mg/L.2003 年与 2000 年相比,表明总磷有所提高,平均来说,相当于每 L 水总磷增加了 0.025 mg,年递增率为 0.0083 mg.从各采样点来看,除 3 号样点呈波动略有下降外,其余各点均逐年有所增加.

调查表明,这部分增加的磷,主要在于:①周围及公园内居民生活污水排入;②降水或降尘输入的磷;③水生植物死亡腐烂释放的磷.由于东湖系人工开凿的小型湖泊,没有大量新鲜水替换,加上地处市中心,周围及公园内居民大量生活污水排入,成了该湖泊中磷的主要人为污染源.分析表明,周围及公园内居民生活污水中总磷含量达到 6.7~11.2 mg/L,为 2003 年湖水总磷平均值的 20.1~33.5 倍;而降水中总磷含量为 0.017~0.036 mg/L,大大低于湖水中总磷含量.可见,降水有利于湖水中磷的稀释.

表 1 浙江省临海市东湖水中总磷浓度/ mg·L⁻¹
Table 1 Total phosphorus in water of the East Lake in Linhai City, Zhejiang Province / mg·L⁻¹

采样年份	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	平均
2000	0.313	0.298	0.303	0.321	0.299	0.317	0.309
2001	0.329	0.301	0.313	0.342	0.298	0.324	0.318
2002	0.333	0.312	0.307	0.353	0.303	0.343	0.325
2003	0.345	0.326	0.298	0.367	0.312	0.354	0.334

2.1.2 输出途径

东湖并非是一个封闭系统,有磷的输入,自然也有磷的输出.调查表明,在东湖,磷的输出途径主要有:①排水或地下渗漏;②底泥吸附或沉积;③鱼类

吸收;④水生植物吸收等.进入东湖的磷,其中在水中溶解的无机态和有机态的磷被第一营养级的生产者所摄入,包括浮游生物以磷酸态的磷作为营养盐加以吸收利用,以及鞭毛藻类等摄取有机态磷^[2].浮游生物把这些可摄取的磷吸入体内,成为湖水临时的输出途径.由于排水主要发生于大量降水季节,降水不仅有利于湖水中磷的稀释,还使一部分磷从湖泊内部得以向外迁移.

2.1.3 循环

湖泊中磷的循环是一个非常复杂的生态过程.除上述输出、输入途径外,新产生的各级营养者以分泌物、排泄物等形式放出磷,并产生死骸和分解产物,在细菌分解它们的同时,磷又回复到水中及堆积物中.这样,从底泥到水中,磷物质再溶出到系统中^[2].

根据一些大致的估算和相关测定获得的一些基础数据,对该湖泊磷的输出和输入通量^[2,3,10,16]进行了大致推算,具体为:①根据湖泊中藻类植物每年的生物量估算值及其总磷浓度实测平均值,推算了藻类对磷的吸收通量;②根据藻类死亡残体生物量估算值及其总磷浓度实测平均值,推算了藻类死亡残体磷的通量;③根据底泥每年产生量估算值及其总磷浓度实测平均值,推算了湖泊中磷的沉积通量;④根据底泥每年产生量估算值和底泥中藻类有效磷 AAP^[10]含量,推算了底泥磷的释放通量;⑤根据鱼类年排泄量估算值及排泄物中总磷实测值,推算了排泄通量;⑥根据死亡鱼类生物量估算值及其总磷实测值,推算了因鱼类死亡进入湖泊中磷的通量;⑦根据地下水下渗量估算值及其总磷实测值,推算了因渗漏从湖泊中输出的磷通量;⑧根据湖泊外排水量的估算值及其总磷实测值,推算了因排水输出的磷通量.基于这些大致的估算,可得图 1 比较完整的该湖泊生态系统磷循环的基本模式.其中,降水的输入小于排水的输出,向底泥中的沉积大于底泥的释放,生物的摄取与排出大致相平衡.因此,如果排除污水的输入通量,该湖泊生态系统中磷的循环基本呈亏缺的状态.也就是说,从理论上讲,如果该湖泊没有污水的输入,就不会发生湖泊的富营养化现象.因此,控制污水排入该湖泊对于该湖泊的“生命”维持与可持续发展具有重要意义.

2.1.4 磷循环对水温上升的响应

湖泊水温对磷循环的影响包括化学、生物和物理 3 个方面的作用,通过改变底泥与湖水之间的磷平衡关系得以实现.具体地说,当湖泊水温升高时,

藻类等生物繁殖加快,增加了对磷的需求.同时,水生生物活动加剧,也促进了底泥磷的释放.

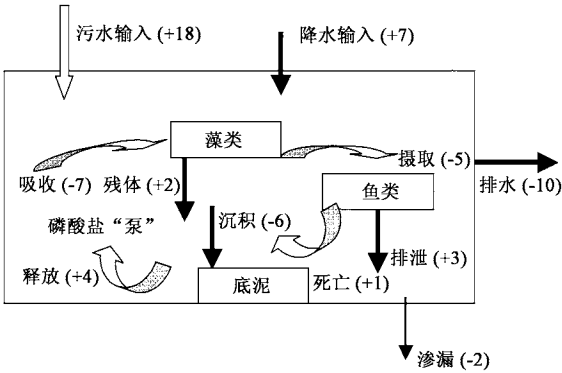


图1 磷在临海市东湖水生生态系统中的循环
(括号中的数值为各通量之间的相对比值)

Fig.1 Cycling mode of phosphorus in the East-Lake aquatic ecosystem of Linhai City(values in parenthesis are relative ratios between cycling fluxes of phosphorus in the lake)

2.2 富营养化发生潜势分析

2.2.1 叶绿素 a 与总磷

表2为临海市东湖水中叶绿素a浓度近4年变化,总的趋势是呈逐年增加.其中,2000年含量范围为0.134~0.149 $\mu\text{g/L}$,2003年含量范围为0.138~0.183 $\mu\text{g/L}$,两者相比,下限增幅不大,上限增幅较多.2003年与2000年相比,平均每升水中叶绿素a浓度增加了0.015 μg .

表2 临海市东湖水中叶绿素a浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

采样年份	1号	2号	3号	4号	5号	6号	平均
2000	0.143	0.134	0.139	0.149	0.135	0.146	0.141
2001	0.149	0.137	0.148	0.156	0.136	0.151	0.146
2002	0.151	0.144	0.141	0.167	0.141	0.159	0.151
2003	0.157	0.151	0.138	0.183	0.144	0.165	0.156

由于湖水中藻类等浮游植物大量繁殖,是湖泊富营养化污染的重要指标之一^[5,10].在以磷为限制因子的湖泊中,湖水中的磷对藻类能否大量繁殖起到关键的作用.因此,一般来说,随着湖泊磷负荷量的增加,藻类的数量也随之增加,两者呈正相关关系.对湖水中叶绿素a(表2)与总磷含量(表1)之间进行一一对应相关分析,表明这两者之间呈显著直线正相关关系(图2),其方程式表示如(1)式:

$$\text{Chla} = 0.553[\text{TP}] - 0.0293$$

$(n = 24, R^2 = 0.938, p < 0.005)$

其中,Chla为湖水中叶绿素a浓度($\mu\text{g/L}$),[TP]为湖水中总磷含量(mg/L).2000~2003年各不同年份水中叶绿素a与总磷之间分别呈显著直线相关关系(表3):当水中总磷含量越高,其叶绿素a含量也随之增加.这就是说,水中叶绿素a含量变化直接受到总磷的控制.

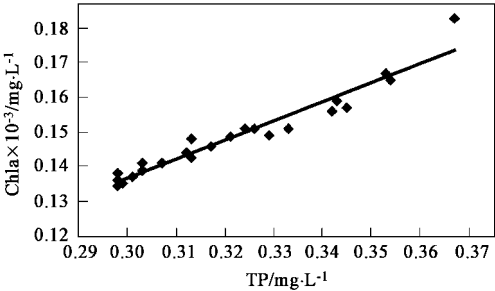


图2 临海市东湖水中叶绿素a含量与总磷之间的总体相关关系

Fig.2 General correlation relationship between chlorophyll a and total phosphorus in the East Lake water of Linhai City

表3 临海市东湖水中叶绿素a含量与总磷之间的
年相关关系

年份	相关关系	<i>n</i>	<i>R</i> ²	<i>p</i>
2000	Chla = 0.584[TP] - 0.0393	6	0.984	< 0.005
2001	Chla = 0.447[TP] + 0.0042	6	0.905	< 0.005
2002	Chla = 0.504[TP] + 0.0135	6	0.963	< 0.005
2003	Chla = 0.589[TP] + 0.0403	6	0.920	< 0.005

2.2.2 透明度与总磷

水的透明度是湖水水质的重要指标^[17].湖水中浮游植物增殖,叶绿素a增加,会造成透明度的下降.表4为临海市东湖水的透明度变化.其中,2000年的透明度范围值为0.40~0.60m,2003年的透明度范围值为0.28~0.51m.与2000年相比,2003年的平均透明度下降了0.11m,表明在这4年当中,该湖泊水质正在向变坏方向发展.除3号和4号样点透明度变化有所波动外,其余各点均呈逐渐下降趋势,从而导致平均透明度的下降.

由于叶绿素量随湖水总磷量的增加而增加,故不难推断总磷与透明度之间存在负相关关系.通过表4和表1回归分析,进一步证实了这一负相关关系的成立(图3),其关系式如(2)式:

$$\text{Sec} = - 3.91[\text{TP}] + 1.69$$
$$(n = 24 , R^2 = 0.801 , p < 0.005)$$

(2)

式中,Sec 为透明度(m),[TP]同上.该关系式表明这 4 年间隔中透明度与总磷之间的负相关关系,其原因应该为湖水中浮游植物增殖,叶绿素 a 增加,造成透明度的下降.对 2000 ~ 2003 年按照各不同年份水中透明度与总磷之间进行回归也表明:当水中总磷含量越高,其透明度则随之下降,它们分别呈显著直线负相关关系(表 5).可见,湖水透明度变化也受到总磷的控制.

表 4 临海市东湖水的透明度变化/ m
Table 4 Changes in the transparence of the East Lake water in Linhai City/ m

采样年份	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	平均
2000	0.45	0.60	0.50	0.40	0.57	0.42	0.49
2001	0.39	0.53	0.46	0.41	0.54	0.39	0.45
2002	0.31	0.47	0.53	0.36	0.51	0.37	0.43
2003	0.28	0.37	0.51	0.32	0.48	0.31	0.38

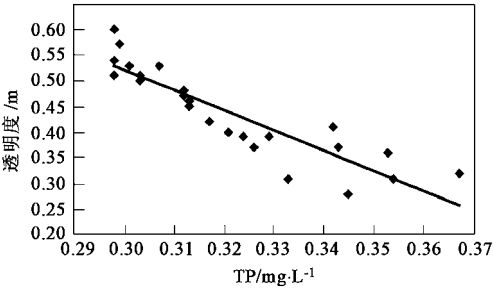


图 3 临海市东湖水透明度与总磷的负相关关系
Fig.3 General negative correlation relationship between the ansparence and total phosphorus in the East Lake water of Linhai City

表 5 近 4 年来临海市东湖水透明度与总磷之间的相关关系
Table 5 Annual relationships between the transparence and total phosphorus in the East Lake water of Linhai City in the recent 4 years

年份	相关关系	n	R ²	p
2000	Sec = - 8.07[TP] + 2.98	6	0.941	< 0.005
2001	Sec = - 3.58[TP] + 1.59	6	0.797	< 0.005
2002	Sec = - 3.76[TP] + 1.65	6	0.745	0.01
2003	Sec = - 3.27[TP] + 1.47	6	0.811	< 0.005

2.2.3 深层溶解氧的缺少与总磷

表 6 为 2001 ~ 2003 年东湖水中溶解氧的变化,表明近 3 年来呈逐年下降的趋势.其中,各点不同年份变幅范围分别为 7.01 ~ 9.11、6.05 ~ 8.87 和 5.35 ~ 8.54 mg/ L.由于富营养化湖泊中的浮游植

物,特别是在夏季,不仅有极高的生长率,且不断地死亡;死亡的浮游植物落入水底后分解并消耗大量的溶解氧,造成深水层溶解氧缺少^[2,18,19].表 7 为 1995 ~ 1999 年东湖总磷浓度与溶解氧的对应关系;在这期间,溶解氧呈增加趋势.由表 7 中的数据以及表 6 中的 3 个溶解氧与表 1 中 3 个总磷平均值进行回归分析,可得如(3)式关系:

$$[\text{DO}] = - 2.78[\text{TP}] + 8.34$$
$$(n = 8 , R^2 = 0.808 , p < 0.005)$$

(3)

式中,[DO]为溶解氧浓度(mg/ L).该式表明,深层溶解氧的耗竭,与总磷含量的增加有显著直线相关关系.由于湖水表面总磷等元素直接支配着生产层中浮游植物的生产量,故水表层的总磷量与深水层溶解氧缺少量之间存在这种负相关关系.

表 6 临海市东湖水中溶解氧变化/ mg· L⁻¹
Table 6 Changes of dissolved oxygen in the East Lake water of Linhai City / mg· L⁻¹

采样年份	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	平均
2001	8.23	8.46	7.98	7.01	9.11	7.54	8.06
2002	7.69	7.98	7.29	6.05	8.87	6.23	7.35
2003	7.53	7.98	8.54	5.35	7.45	5.98	7.14

表 7 临海市 1995 ~ 1999 年东湖总磷浓度与溶解氧的变化/ mg· L⁻¹
Table 7 Relationships between dissolved oxygen and total phosphorus in the East Lake water of Linhai City in 1995 ~ 1999 / mg· L⁻¹

年份	1995	1996	1997	1998	1999
TP	1.59	1.13	0.998	0.427	0.313
DO	4.64	4.57	5.13	6.33	8.42

3 结论

该湖泊水体中磷的循环以导致近年来水体中磷的逐年略有增加为特点,其主要的磷输入为周围及公园内居民生活污水的排放.通过该湖泊富营养化发生潜势的分析,表明其水中叶绿素 a、透明度和溶解氧的变化,都与水体中磷的负荷量的增加有直接关系.磷与这些参数之间相关关系的确定,不仅揭示了湖泊富营养化过程中主要代表性参数之间的内在联系,还提供了从磷物质单因子的变化预测所引起的其它因子变化之间的关系来综合判断湖泊的营养状态.

参考文献:

[1] 王如松,周启星,胡聃.城市生态调控方法[M].北京:气象出版社,2000.
[2] 周启星,黄国宏.环境生物地球化学及全球环境变化[M].北京:科学出版社,2001.

- [3] Zhou Qixing, Gibson C E, Foy R H. Long-term changes of nitrogen and phosphorus loadings to a large lake in north-west Ireland [J]. *Water Research*, 2000, **34**(3) : 922 ~ 926 .
- [4] 段水旺, 章申, 陈喜保. 长江下游氮、磷含量变化及输送量的估计 [J]. *环境科学*, 2000, **21**(1) : 53 ~ 56 .
- [5] 况琪军, 张家玉. 汉江中下游江段藻类现状调查及水华成因分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2000, **9**(1) : 65 ~ 69 .
- [6] 陈利顶, 傅伯杰. 农田生态系统管理与非点源污染控制 [J]. *环境科学*, 2000, **21**(3) : 98 ~ 100 .
- [7] 张国勋, 傅建华, 吴意跃. 杭州西湖富营养化防治最佳运行方式探讨 [J]. *环境污染与防治*, 2000, **22**(1) : 35 ~ 36 .
- [8] 张志剑, 阮俊华, 朱荫湄, 等. 稻田层间流活性磷素的动态变化 [J]. *环境科学*, 2003, **24**(2) : 46 ~ 49 .
- [9] 吴为梁. 滇池富营养化与藻类资源 [J]. *云南环境科学*, 2000, **19**(1) : 35 ~ 37 .
- [10] Zhou Qixing, Gibson C E, Zhu Yinmei. Evaluation of phosphorus bioavailability in sediments of three contrasting lakes in China and the UK [J]. *Chemosphere*, 2001, **42**(2) : 221 ~ 225 .
- [11] Livingston R L. *Eutrophication Processes in Coastal Systems: Origin and Succession of Plankton Blooms and Effects on Secondary Production* [M]. Boca Raton: Lewis Publishers, Inc., 2000. 352 .
- [12] Arhonditsis G, Eleftheriadou M, Karydis M, Tsirtsis G. Eutrophication risk assessment in coastal embayments using simple statistical models [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, **46**(9) : 1174 ~ 1178 .
- [13] Strom T E, Klaveness D. Hunnebotn: a seawater basin transformed by natural and anthropogenic processes [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, **56**(5) : 1177 ~ 1185 .
- [14] 孙铁珩, 周启星, 李培军. *污染生态学* [M]. 北京: 科学出版社, 2001 .
- [15] Christian G D. *Analytical Chemistry* [M]. New York: John Wiley & Sons, 2003. 848 .
- [16] Zhou Qixing, Zhu Yinmei. Potential pollution and recommended critical levels of phosphorus in paddy soils of the southern Lake Tai area, China [J]. *Geoderma*, 2003, **115**(1 ~ 2) : 45 ~ 54 .
- [17] Squires M M, Lesack L F W. The relation between sediment nutrient content and macrophyte biomass and community structure along a water transparency gradient among lakes of the Mackenzie Delta [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2003, **60**(3) : 333 ~ 343 .
- [18] 周启星, 朱荫湄. 西湖底泥不同供氧条件下有机质降解及 CO₂ 与 CH₄ 释放速率的模拟研究 [J]. *环境科学学报*, 1999, **19**(1) : 11 ~ 15 .
- [19] National Research Council. *Clean Coastal Waters: Understanding and Reducing the Effects of Nutrient Pollution* [M]. New York: National Academy Press, 2000 .