

# 白洋淀水体铁含量与其他水质因子的关系

梁淑轩<sup>①</sup>, 王云晓, 吕佳佩 (河北大学化学与环境科学学院, 河北保定 071002)

**摘要:** 于2009年5月—2010年3月,选择代表性月份对白洋淀水体水质进行监测,探讨水体中铁含量、形态及其与其他水质因子的相互关系。结果表明,白洋淀水体总铁含量范围为0.03~2.90 mg·L<sup>-1</sup>,各监测点位平均超标率为61.11%。从时间上来看,水体铁含量表现为夏季>秋季>春季>冬季;从空间上来看,清洁对照点总铁含量最低,污水排放口、养鱼区次之,养鸭区和垃圾堆放点含量均较高。相关分析表明,水体总铁含量与总磷含量、叶绿素a含量、水体富营养化指数之间均呈显著相关性,与总氮含量未表现出显著相关性。

**关键词:** 水体; 铁含量; 水质因子; 富营养化; 白洋淀

**中图分类号:** X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2011)05-0013-05

**Iron Content in Lake Baiyangdian and Its Relations With Other Water Quality Factors.** LIANG Shu-xuan, WANG Yun-xiao, LÜ Jia-pei (College of Chemistry and Environment Science, Hebei University, Baoding 071002, China)

**Abstract:** Water quality of Lake Baiyangdian was monitored from May 2009 to March 2010 to explore content and forms of iron in the waterbody, and their relations with other water quality factors. Results show that total Fe in the water ranged between 0.03 and 2.90 mg·L<sup>-1</sup>, and on average 61.11% of the samples from various monitoring sites exceeded the standard limit. Temporally iron content in the water varied in the order of summer > autumn > spring > winter, and spatially, in the order of CK < wastewater outlet and fish-rearing zone < duck rearing zone and garbage dumping site. Correlation analysis shows that total iron in the waterbody is significantly and positively related to total phosphorus, chlorophyll a and other water eutrophication indices, but not to total nitrogen.

**Key words:** waterbody; iron concentration; water quality factor; eutrophication; Baiyangdian

铁是水体中重要的微量元素,有多种存在形态,根据氧化还原状态可以分为单质铁、二价铁离子和三价铁离子,根据铁的物理形态又可分为溶解性总铁和颗粒态铁<sup>[1]</sup>。铁的存在形态可影响水体中磷的存在形态、底泥沉积物中磷向上覆水的释放以及浮游植物吸收磷的速率,从而影响水体中磷含量<sup>[2-4]</sup>;铁还可以通过影响水体中氮的固定以及硝酸盐和亚硝酸盐的氧化还原过程进而影响水体中氮含量<sup>[5-6]</sup>;铁是浮游植物生长所必需的微量元素,能影响藻类的生长繁殖<sup>[7]</sup>;铁还可影响水体的富营养化状况,早在20世纪30年代,就有人提出铁是水体富营养化的限制因子<sup>[8]</sup>。然而现有研究多集中在海水,对于含铁量相对丰富的淡水水域研究较少<sup>[9]</sup>。笔者以华北平原最大的淡水湖泊——白洋淀为研究对象,根据2009年5月—2010年3月代表性月份的水质监测结果,探讨水体中铁含量及其形态与其他水质因子的相互关系。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区域概况

研究区域位于白洋淀东田庄村周边,该村为典

型的淀中村,区域人口密度大,土地资源稀少。在面积有限的水体内全方位、多层次地开展人工养殖、水生植物种植、旅游等,致使水体负担过重,加剧了自然生态环境的恶化,已经威胁到淀区及流域内群众的生产生活。水体的污染来源主要为淀内污染源,包括生活污染、水产养殖污染、水生植物污染、沉积物营养盐的释放等<sup>[10]</sup>。

### 1.2 采样点位布设与采样时间

共设5个采样点,分别为污水排放口(38°50.293' N, 115°59.239' E)、垃圾堆放点(38°50.371' N, 115°59.253' E)、养鱼区(38°50.698' N, 115°59.329' E)、养鸭区(38°50.396' N, 115°59.156' E)和后塘(38°50.178' N, 115°59.931' E),后塘样点受人为影响较少,作为对照。各采样点位置如图1所示。以2009年5、8、10月和2010年3月分别代表春、夏、秋、冬4季进行采样调查。

收稿日期: 2011-05-25

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07209-008); 河北省科技支撑计划(10276710D)

① 通信作者 E-mail: liangsx168@yahoo.com.cn

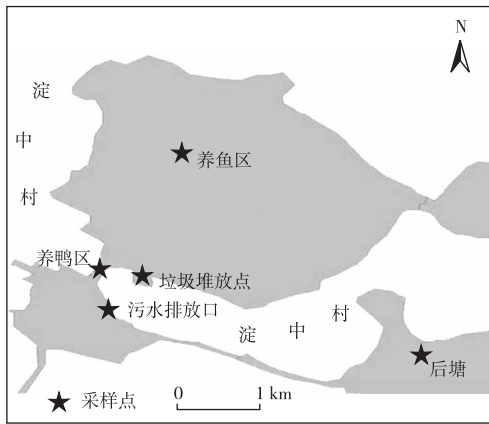


图1 采样点位置示意

Fig. 1 Sketch map of sampling sites

### 1.3 样品采集与测定方法

用有机玻璃分层采水器采集水样,对于水深大于1 m的样点,取水面下0.5 m和距河底0.5 m处水样分别作为表层和底层水样;对于水深小于1 m的点位,只取水面下0.5 m处表层水样。

现场分别利用pH计和赛氏盘测定水体pH值和透明度(SD)。样品在现场按不同测定指标的要

表1 白洋淀水质指标测定结果

Table 1 Water quality indices of Lake Baiyangdian

样点	pH值	透明度/ m	$\rho/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$						$\rho(\text{Chl-a})/$ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	$I_{\text{TL}}$	
			DO	COD <sub>Mn</sub>	TN	TP	总铁	亚铁			溶解性铁
X1	7.04~8.93	0.73~1.70	2.89~11.66	6.36~12.20	0.90~2.88	0.02~0.11	0.03~0.34	ND	ND~0.06	4.37~17.37	44.83~60.25
		1.03±0.45	6.18±4.12	8.33±2.22	1.61±0.60	0.06±0.03	0.15±0.11	ND	0.05±0.01	10.73±4.44	53.07±5.32
X2	7.00~8.10	0.50~0.70	4.43~6.56	6.36~14.20	1.16~3.05	0.02~0.15	0.14~1.53	ND~0.10	0.01~0.25	14.72~81.11	52.76~67.04
		0.60±0.09	5.36±0.79	8.12±2.66	2.22±0.77	0.10±0.05	0.54±0.49	0.05±0.07	0.12±0.10	29.01±22.15	59.35±4.70
X3	6.99~8.27	0.22~0.96	7.86~9.57	5.82~10.13	1.39~3.74	0~0.15	0.40~2.76	ND~0.19	0.14~0.45	10.81~47.34	44.07~67.35
		0.43±0.36	8.60±0.88	7.31±1.96	2.27±1.11	0.10±0.07	1.31±1.02	0.13±0.05	0.34±0.14	25.44±15.59	58.80±10.18
X4	7.04~8.33	0.16~0.57	7.26~10.49	5.83~13.73	0.90~2.70	0.03~0.22	0.20~2.83	ND~0.18	0.09~0.48	9.67~93.20	53.61~70.61
		0.31±0.18	8.22±1.29	7.82±2.86	1.95±0.54	0.14±0.07	1.08±0.92	0.14±0.04	0.31±0.16	46.11±37.41	63.41±7.11
X5	7.03~8.22	0.12~0.73	6.34~8.42	5.88~11.33	1.07~2.47	0.02~0.29	0.15~2.90	ND~0.66	0.09~0.97	8.78~39.21	56.39~70.68
		0.39±0.31	7.36±0.70	7.43±2.27	1.75±0.49	0.14±0.11	1.31±1.05	0.25±0.23	0.44±0.31	23.90±10.47	61.42±5.78

$I_{\text{TL}}$ 为富营养化指数。X1、X2、X3、X4、X5分别表示后塘(对照)、污水排放口、垃圾堆放点、养鱼区、养鸭区采样点。ND表示未检出。

## 2.2 白洋淀水体铁含量评价

### 2.2.1 白洋淀水体总铁含量水平

根据GB 3838—2002《地表水环境质量标准》,水体中铁限量值为 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。由表1可见,白洋淀水体中总铁含量范围为 $0.03 \sim 2.90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。总铁含量的平均超标率为61.11%。就各采样点来看,后塘超标率为12.50%,超标程度最低,污水排放口超标率为50%,垃圾堆放点超标率为100%,养鱼区为87.50%,养鸭区为75.00%,且养鸭区超标程度最严重。

通过查阅资料<sup>[16-18]</sup>得到我国其他河流、湖泊的铁含量(表2)。由表2可知,白洋淀水体铁含量明

求保存后,带回实验室尽快测定水样中溶解氧、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素a(Chl-a)、总铁、溶解性铁、亚铁含量。水样的保存和测定参考《水和废水监测分析方法》<sup>[11]</sup>进行。由于亚铁易氧化,故总铁、溶解性总铁、亚铁含量均在样品采集后8 h内测定,而其余指标在样品采集后48 h内测定。

### 1.4 数据分析与处理

利用SPSS数据统计分析软件对数据进行相关性分析,计算不同形态铁含量和水质指标之间的Spearman相关系数。一般认为,如果相关系数绝对值大于0.8,则两个变量之间具有较强的线性相关关系;如果小于0.3,则两个变量之间的线性相关关系较弱<sup>[12]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水质测定结果

水质测定结果如表1所示。运用综合营养状态指数法<sup>[13-15]</sup>,以水体透明度、高锰酸盐指数、总氮、总磷、叶绿素a 5个指标的测定结果来计算水体的富营养化指数( $I_{\text{TL}}$ ),表征水体的富营养化水平。

显高于其他水域。

### 2.2.2 白洋淀水体铁含量时空变化规律

白洋淀水体各采样点不同时间的总铁含量变化如图2所示。由图2可见,在各采样点中,后塘年平均总铁含量最低,其次为污水排放口和养鱼区,养鸭点和垃圾堆放点均较高。

从同一采样时间各采样点总铁含量的平均值来看,5、8、10和3月各采样点的平均总铁含量分别为 $0.54$ 、 $1.90$ 、 $0.83$ 和 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,即夏季>秋季>春季>冬季。夏季水体总铁含量最高,这是因为此时水体呈现弱酸性以及还原性,底质中难溶于水的铁在此条件下可转变为溶解态进入水体。

表2 白洋淀水体与其他水体中铁含量的比较

Table 2 Comparison of Lake Baiyangdian with other waterbodies in total iron content

地点	$\rho(\text{总铁})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	参考文献
太湖	0.26 ~ 0.91	[16]
巢湖	0.01 ~ 0.49	[17]
黑龙江	0.10 ~ 0.62	[18]
松花江	0.11 ~ 0.73	[18]
白洋淀	0.03 ~ 2.90	

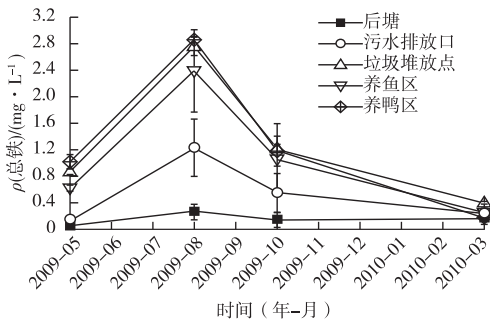


图2 白洋淀水体总铁含量随时间的变化  
Fig. 2 Temporal variation of total iron in the water of Lake Baiyangdian

2.3 水体铁含量与其他水质因子的相关性

2.3.1 水体铁与磷含量的相关性

图3为白洋淀水体总磷含量随时间的变化,图4为白洋淀水体总磷含量与不同形态铁含量之间的相关性。相关性分析结果表明,总磷分别与亚铁、总铁、溶解性总铁含量之间呈显著线性相关关系,且相关性依次升高,相关系数分别为0.636 ( $P < 0.05$ )、0.707 ( $P < 0.01$ )和0.770 ( $P < 0.01$ )。

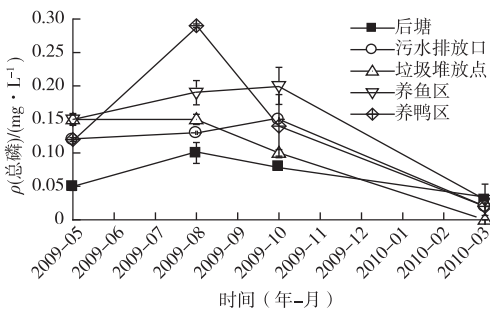


图3 白洋淀水体磷含量随时间的变化  
Fig. 3 Temporal variation of total phosphorus in the water of Lake Baiyangdian

在湖泊的富营养化过程中,水体中磷含量与铁的循环有关,铁的沉积导致磷被束缚,铁的溶解又使磷返回水中<sup>[3]</sup>,所以水体溶解性铁与总磷含量呈显著正相关。亚铁对于总磷的限制作用则主要通过影

响底泥沉积物中磷的释放实现。在水体中,三价铁离子可以与磷酸根结合成不溶性磷酸铁沉积在底泥中,水中可溶性磷也可被氢氧化铁吸附而沉淀,而当三价铁被还原成二价铁时,被结合的磷随之溶解释放到水中<sup>[4]</sup>。所以,当水体呈现还原状态时,水体亚铁和总磷含量同时升高;当处于氧化状态时,亚铁被氧化为三价铁,并与磷酸盐结合后沉淀,水体亚铁和总磷含量同时降低。此外,铁还可影响水体中浮游植物种类及其对磷的吸收,进而影响水体总磷含量。

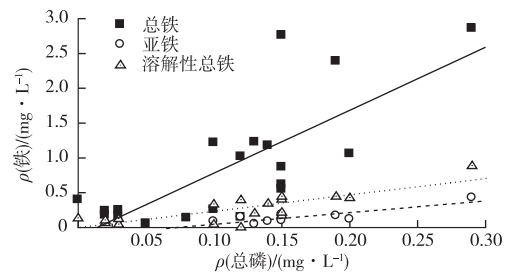


图4 白洋淀水体总磷与不同形态铁含量间的相关关系  
Fig. 4 Correlations between total P and contents of various forms of Fe in the water of Lake Baiyangdian

2.3.2 水体铁与总氮含量的相关性

图5为白洋淀水体总氮含量随时间的变化,图6为白洋淀水体总氮含量与不同形态铁含量之间的相关性。

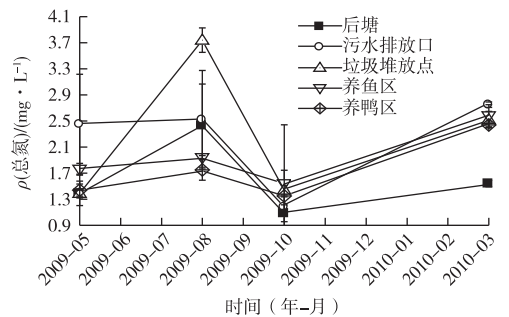


图5 白洋淀水体总氮含量随时间的变化  
Fig. 5 Temporal variation of total nitrogen in the water of Lake Baiyangdian

相关性分析结果表明,白洋淀水体总氮与各形态铁含量之间均未表现出显著相关性,其与溶解性总铁的相关系数最大,但也仅为0.282。这可能是因为白洋淀作为典型的浅水湖泊,其氮营养盐和铁含量都比较丰富<sup>[4,19]</sup>,两者之间的限制关系较弱<sup>[20-21]</sup>。

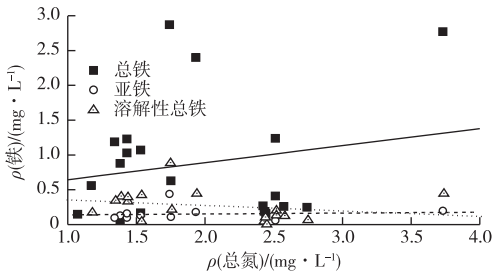


图6 白洋淀水体总氮与不同形态铁含量间的相关关系  
Fig.6 Correlations between total N and contents of various forms of Fe in the water of Lake Baiyangdian

### 2.3.3 水体铁与叶绿素 a 含量的关系

图7为白洋淀水体叶绿素 a 含量随时间的变化,图8为白洋淀水体叶绿素 a 含量与不同形态铁含量之间的相关关系。相关性分析结果表明,白洋淀水体叶绿素 a 分别与总铁、溶解性铁含量之间呈显著相关关系 ( $P < 0.01$ ), 相关系数分别为 0.811 和 0.684。水体叶绿素 a 与亚铁含量则未表现出显著相关性。

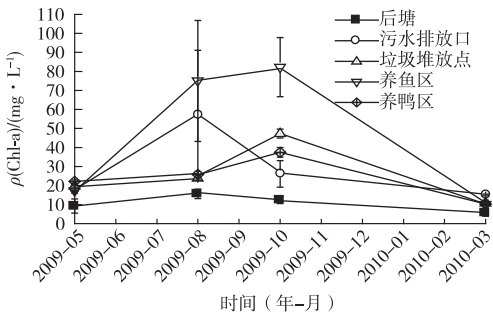


图7 白洋淀水体叶绿素 a 含量随时间的变化  
Fig.7 Temporal variation of Chl-a content in the water of Lake Baiyangdian

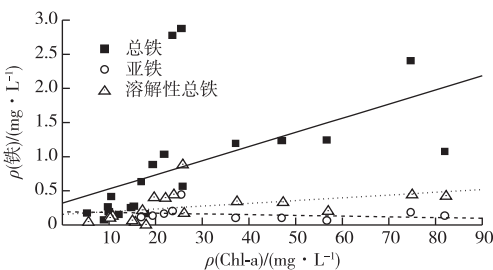


图8 白洋淀水体叶绿素 a 与不同形态铁含量间的相关关系  
Fig.8 Correlations between Chl-a content and contents of various forms of Fe in the water of Lake Baiyangdian

研究表明,铁能控制叶绿素 a 的生物合成,当受到铁限制时,浮游植物会呈现出典型的黄化现象,细胞体积减少,细胞内叶绿素 a 含量随之减少<sup>[22]</sup>。另

外,铁还通过影响浮游植物对氮、磷营养盐的吸收比例和速率,进而影响浮游植物的生长。所以总铁和叶绿素 a 含量之间呈显著相关性。

可溶解性铁可被藻类植物直接吸收利用<sup>[23]</sup>。在浮游植物的生长过程中,当溶解性铁被大量消耗时,其他形态的铁(如颗粒态铁和胶体态铁等)就向溶解性铁转化<sup>[24]</sup>,所以溶解性铁与叶绿素 a 含量也呈显著相关,但相比总铁与叶绿素 a 间的相关性较弱。

水体中的亚铁含量较低,且通常为未检出。浮游植物生长过程中所需要的亚铁大部分来自其他形态铁的转化<sup>[8]</sup>,所以两者之间未表现出相关性。

### 2.3.4 水体铁含量对水质富营养化的影响

图9为白洋淀水体富营养化指数随时间的变化,图10为白洋淀水体富营养化指数与不同形态铁含量之间的相关关系。

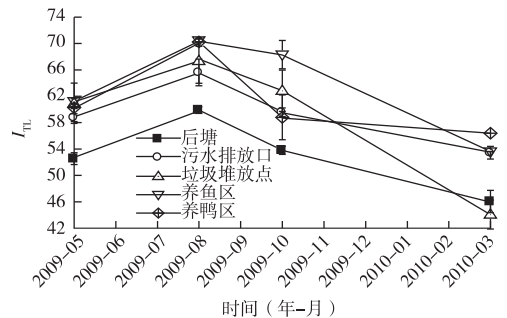


图9 白洋淀水体富营养化指数 ( $I_{TL}$ ) 随时间的变化  
Fig.9 Temporal variation of water eutrophication indices ( $I_{TL}$ ) in Lake Baiyangdian

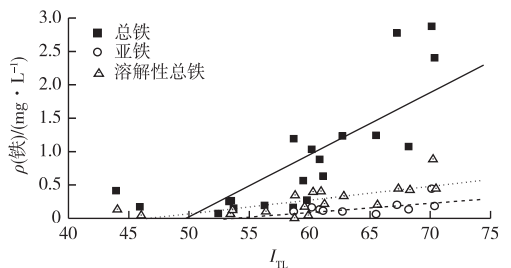


图10 白洋淀水体富营养化指数 ( $I_{TL}$ ) 与不同形态铁含量间的相关关系  
Fig.10 Correlations between  $I_{TL}$  and contents of various forms of Fe in the water of Lake Baiyangdian

相关分析表明,白洋淀水体富营养化指数分别与总铁和溶解性铁之间呈显著相关 ( $P < 0.01$ ), 相关系数分别为 0.844 和 0.803;与亚铁之间相关系数为 0.512,未达显著水平。

### 3 结论

白洋淀水体铁含量时空分布特征表现为:从空间上来看,生活污水排放、垃圾堆放、养鱼、养鸭等人类活动均导致水体铁含量明显高于清洁对照点,其中养鸭区及垃圾堆放点水体总铁质量浓度最高,年平均值为  $1.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;从时间上来看,水体总铁含量表现为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季。总铁含量与总磷、叶绿素 a、水体富营养化指数之间均呈显著相关性,与总氮含量未表现出显著相关性。

#### 参考文献:

- [1] ANNE J, FRED G. Role of Iron Chemistry in Controlling the Release of Pollutants From Resuspended Sediments[J]. *Water Pollution*, 2005, 5(3): 467-475.
- [2] RYDIN E. Potentially Mobile Phosphorus in Lake Erken Sediment[J]. *Water Research*, 2000, 34(7): 2037-2042.
- [3] 贾国东, 钟佐桑. 铁的环境地球化学综述[J]. *环境科学进展*, 1999, 7(5): 74-84.
- [4] 姚波, 席北斗, 胡春明, 等. 铁限制对浮游植物生长和群落组成的影响研究综述[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(2): 459-465.
- [5] 唐建军, 王永锐, 傅家瑞. 植物铁素营养的生理生态观[J]. *生态科学*, 1995, 14(1): 40-47.
- [6] MARTIN J H, COALE K H, JOHNSON K S, *et al.* Testing the Iron Hypothesis in the Equatorial Pacific Ocean[J]. *Nature*, 1994, 371(6493): 123-129.
- [7] GEIDER R J, ROCHE J L. The Role of Iron in Phytoplankton Photosynthesis, and the Potential for Iron-Limitation of Primary Productivity in the Sea[J]. *Photosynthesis Research*, 1994, 39(3): 275-301.
- [8] 曹勇, 李道季, 张经. 海洋浮游植物铁限制的研究进展[J]. *海洋通报*, 2002, 21(6): 83-89.
- [9] 宋国栋, 石晓勇, 侯继灵, 等. 铁对浮游植物吸收营养盐的围隔实验初步研究[J]. *海洋与湖沼*, 2008, 39(3): 209-216.
- [10] 张笑归, 刘树庆, 窦铁岭, 等. 白洋淀水环境污染防治对策[J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(2): 27-31.
- [11] 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]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002:

- 88-671.
- [12] 薛薇. 统计分析与 SPSS 的应用[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2002: 185-190.
- [13] CARLSON R E. A Trophic State Index for Lakes[J]. *Limnology and Oceanography*, 1977, 22(2): 361-369.
- [14] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. *中国环境监测*, 2002, 18(5): 47-49.
- [15] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 291-295.
- [16] 孙士权, 马军, 黄晓东, 等. 高锰酸盐预氧化去除太湖原水中稳定性铁、锰[J]. *中国给水排水*, 2006, 22(21): 6-13.
- [17] 德菊件, 岳永德, 黄祥明, 等. 巢湖水体 Pb, Cu, Fe 污染的环境质量评价[J]. *中国环境科学*, 2004, 24(4): 509-512.
- [18] 崔长俊, 阎百兴, 潘晓峰. 松花江、黑龙江水中可溶性铁与有机质含量的相关性[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(4): 350-355.
- [19] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. *生态学报*, 2005, 25(3): 589-595.
- [20] RAVEN J A. Predictions of Mn and Fe Use Efficiencies of Phototrophic Growth as a Function of Light Availability for Growth and of C Assimilation Pathway[J]. *New Phytologist*, 1990, 116(2): 1-18.
- [21] 侯继灵. 不同氮源和铁对浮游植物生长影响的围隔实验研究[D]. 北京: 中国海洋大学海洋环境学院, 2006.
- [22] VARSANO T, KAFTAN D, PICK U. Effects of Iron Deficiency on Thylakoid Membrane Structure and Composition in the Alga *Dunaliella Salina*[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2003, 26(10/11): 2197-2210.
- [23] 邢伟, 李敦海, 沈银武, 等. 滇池试验围隔内不同形态铁浓度的变化与物化因子的关系[J]. *水生生物学报*, 2006, 30(2): 146-151.
- [24] JUN K, TAKEDA S, WONG C S. Change in the Concentrations of Iron in Different Size Fractions During a Phytoplankton Bloom in Controlled Ecosystem Enclosures[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2001, 258(1): 237-255.

**作者简介:** 梁淑轩(1967—), 女, 河北定州人, 教授, 主要研究方向为环境分析与评价。E-mail: liangsx168@yahoo.com.cn

### 敬告读者·作者

为适应我国信息化建设需要, 扩大作者学术交流渠道, 本刊已被“CNKI 中国期刊全文数据库”、CEPS、CA、BA、BI-OSIS、CABI 等多家文摘和数据库收录, 其作者文章著作权使用费与本刊稿酬一次性给付, 不再另付。本刊发表文章的著作权归作者所有, 编辑版权属本刊所有。本刊有权将其编辑的刊物制成光盘或供其他正式出版的光盘收录。如作者不同意文章被收录, 请在来稿时向本刊声明, 本刊将作适当处理, 否则视为同意。

本刊编辑部  
2011年9月18日