

# 丰水期环太湖河流与湖区水质比较研究

高永霞<sup>1</sup>, 蔡琳琳<sup>2</sup>, 赵林林<sup>3</sup>, 朱广伟<sup>2\*</sup>

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 3. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

**摘要:** 鉴于环湖河流水质在汛期对太湖的关键性影响, 以藻类对不同形态营养盐的利用程度为标准, 2008 年丰水期对太湖周边 32 条主要河流的水质进行了细化研究, 旨在为太湖的外源河流综合整治提供依据. 结果表明, 采样河流中望虞河水体的营养盐和悬浮物(SS)浓度都居于最高, 水质为劣 V 类; 太湖北部河流水体除了营养盐浓度为劣 V 类外, 有机质污染在环湖河流中最为严重, 北部河流水体可酶解磷(EHP)的平均浓度达到了 0.240 mg/L, 占总磷的 62.4%, 位居首位; 太湖西部河流显著的特点是亚硝酸盐( $\text{NO}_2^-$ -N)浓度异常高, 平均浓度达到了 0.270 mg/L, 是环湖其它河流的 2~3 倍. 太湖北部入湖河流的氮、磷、有机质浓度都明显高于北部湖区, 太湖西部入湖河流主要是氮浓度明显高于对应湖区. 河流与湖区的氮磷比(TN/TP)表明藻类和沉积物再悬浮对水体的磷含量影响很大.

**关键词:** 太湖; 河流; 丰水期; 营养盐; 水质

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)10-2840-09

## Water Quality Comparison Between Lake Taihu and Contribute River During High Water-level Period

GAO Yong-xia<sup>1</sup>, CAI Lin-lin<sup>2</sup>, ZHAO Lin-lin<sup>3</sup>, ZHU Guang-wei<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Thirty-two main rivers around Lake Taihu were sampled during high water period in 2008 to investigate river's vital impact on Lake water quality. Different forms of nitrogen and phosphorus were analyzed for the 32 river water samples according to nutrients function to algae. The aim of this study is to provide the basic information for river rehabilitation. Based on the results, the nutrients and suspended substance(SS) concentrations of Wangyu River were the highest, its water quality was below the V grade (Chinese water quality criterion). Water quality of northern rivers was also below the V grade, organic matter and enzymatically hydrolysable phosphate(EHP) concentration were the highest. The EHP concentration was 0.240 mg/L, and accounted for 62.4% of total phosphorus(TP). Nitrite nitrogen( $\text{NO}_2^-$ -N) concentration was exceptionally high in western rivers and the average concentration was 0.270 mg/L, it was 2-3 times higher than that of other rivers. The northern rivers' nitrogen, phosphorus and organic concentration were markedly higher than those in the north Lake region, while the western rivers' nitrogen was markedly higher than that in the west Lake region. It can also be concluded that algae and suspended sediment were able to bring more phosphorus to water by comparing the ratio of total nitrogen(TN) and TP in these rivers and Lake Taihu.

**Key words:** Lake Taihu; rivers; high water period; nutrient; water quality

太湖水质近年来急剧恶化<sup>[1, 2]</sup>, 其原因在于人类活动产生大量的营养物质输入湖泊, 使水体富营养化加重, 水中浮游植物过量生长, 导致水质恶化<sup>[3]</sup>. 太湖的主要特点是环太湖河流数量多<sup>[4]</sup>, 太湖的营养盐外源负荷主要来自环太湖河流<sup>[5, 6]</sup>, 其中北部、西部和南部为主要入湖河流, 东太湖为主要出水区<sup>[7]</sup>. “治湖先治水, 治水先治河”, 控制源头污染是太湖水环境治理的关键, 只有入湖河流水质不断得到改善, 治理太湖的目标才能实现<sup>[8]</sup>. 可见环太湖河流水质对太湖的富营养化进程影响很大.

水体营养盐的生物有效性与其形态密切相关, 氮磷的总量分析不足以反映生物可利用性<sup>[9]</sup>, 目前

对环太湖河流的研究多集中在输入太湖的营养盐总量上<sup>[10-12]</sup>, 没有将河流中营养盐形态进行细化分类, 也没有涉及到潜在可利用磷形态的问题<sup>[13, 14]</sup>, 在进行蓝藻水华与外源污染贡献方面的分析缺乏依据.

丰水期(汛期)尽管河流的氮磷浓度不如枯水

收稿日期: 2010-11-11; 修订日期: 2011-03-07

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大交叉项目(KZCX1-YW-14); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07101-013); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-419); 南京信息工程大学科研基金项目

作者简介: 高永霞(1980~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为湖泊环境化学与生态修复, E-mail: gyx0813@tom.com

\* 通讯联系人, E-mail: gwzhu@niglas.ac.cn

期高,但入湖总量却非常高<sup>[11]</sup>,对太湖湖体氮磷负荷起着重要的作用.本研究选择太湖典型的丰水期,对太湖周边主要河流中营养盐的含量及形态都进行了细致调查,并将河流之间水质以及河流与太湖水华严重区域水质进行了比较,以期对太湖周边河流水质丰水期现状有一个清晰的认识,为环太湖河流的综合整治提供依据.

## 1 材料与方 法

### 1.1 样品采集

2008 年太湖的平均水位如图 1 所示,全年太湖平均最高水位在 6 月 28 日为 3.96 m,鉴于河流水质尤其是汛期对太湖水质的关键性影响<sup>[11]</sup>,在 7 月 2~3 日丰水期对环太湖 32 条主要河流采集水样进行了分析研究,并按照它们相对于太湖的位置将之划归为太湖北部(N)、太湖西部(W)、望虞河、太湖东部(E)、太湖南部(S)这 5 个研究区域(如图 2).所有河流按照采样先后顺序进行编号,见图 2.

每条河流在距入太湖约 5 km 处采集 1 个水样,采样深度在表层 50 cm 处,共采集 32 个水样.

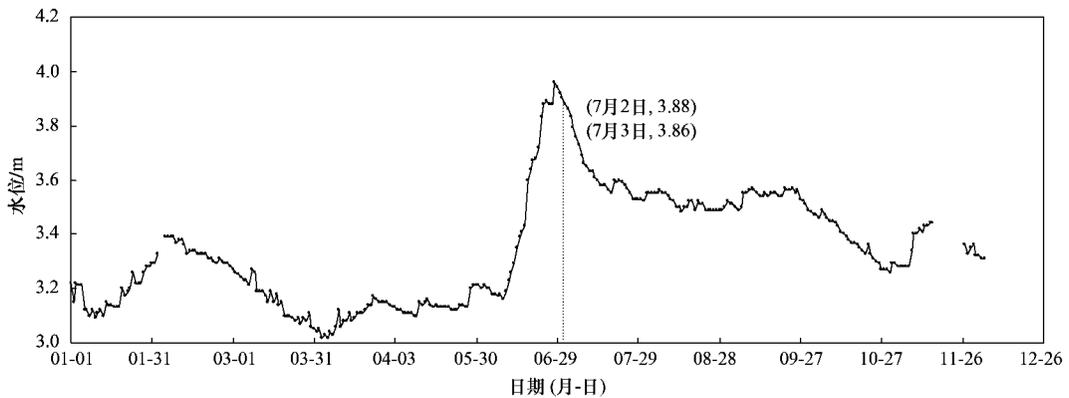


图 1 2008 年太湖平均水位示意

Fig. 1 Average water level of Lake Taihu in 2008

### 1.2 调查与分析方法

野外现场用 Yellow Springs Instruments 公司 YSI6600V2 型水质仪测定的指标包括:水温、pH 值、溶解氧(DO)、浊度、叶绿素 a(Chl-a)、蓝绿藻(PC).现场用 Whatman GF/F 膜(孔径 0.45  $\mu\text{m}$ )过滤 100 mL 水样用于测定溶解性总氮(DTN)、溶解性总磷(DTP)、铵态氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )、磷酸根( $\text{PO}_4^{3-}$ )、硝态氮( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ )和亚硝态氮( $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ).实验室分析指标为 TP、DTP、 $\text{PO}_4^{3-}$ 、可酶解磷(EHP)、总氮(TN)、DTN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、高锰酸盐指数、悬浮物(SS)以及悬浮物灰分(LOI)(反映有机质含量).

实验室分析指标中,TN、TP 采用原水样加碱性过硫酸钾高温消解后紫外分光光度法和钼酸铵分光光度法测定<sup>[15]</sup>;DTN、DTP 为现场过滤后的水样加碱性过硫酸钾高温消解,其余步骤同 TN、TP;  $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$  采用 System SAN<sup>++</sup> 型 Skalar 流动分析仪测定;EHP 的测定方法为取原水样 100 mL(每个水样取 3 个平行),放入具塞、灭菌的三角瓶中,加入 1 mL 1.0 mmol/L Tris(三硝基甲烷)缓冲液及 5 mL 氯仿,在 30 $^\circ\text{C}$  条件下培养 4~6 d,培养结束后将水样经 Whatman GF/F 滤膜过

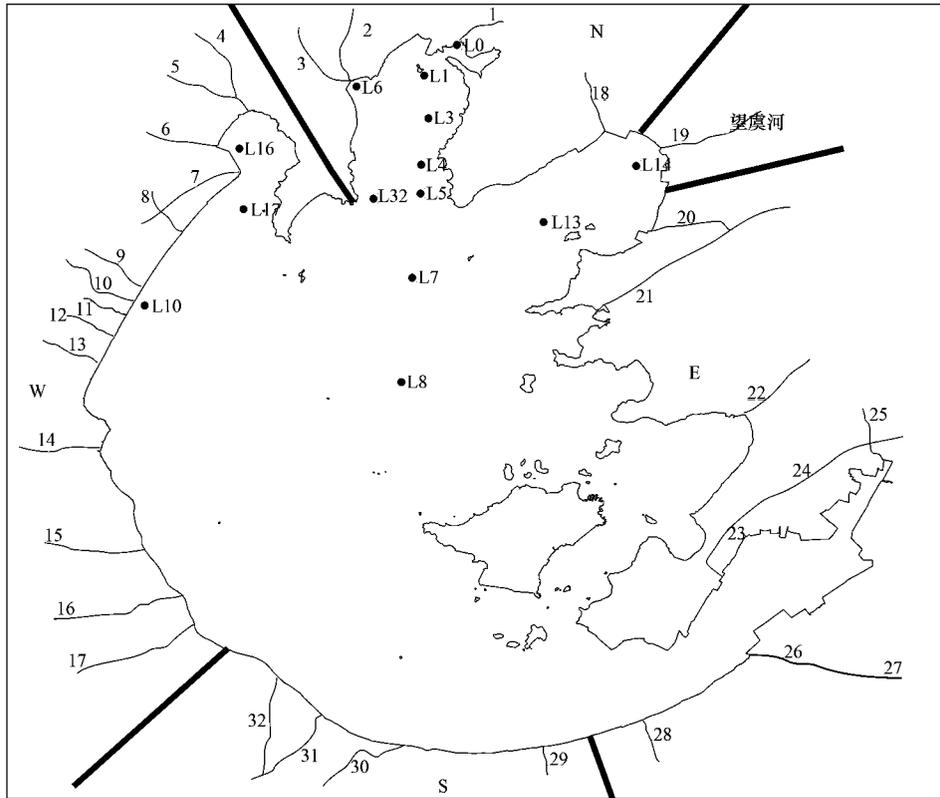
滤,然后用 Skalar 测定酶解后的  $\text{PO}_4^{3-}$ ,并将之与原水样的  $\text{PO}_4^{3-}$  作差值,即可计算出 EHP 的浓度<sup>[16]</sup>.SS 为一定体积水样过 Whatman GF/F 滤膜后将滤膜在 105 $^\circ\text{C}$  烘干 4 h 至恒重后的质量<sup>[15]</sup>,称重后的滤膜放入马弗炉在 550 $^\circ\text{C}$  下灼烧 3 h 至恒重后再次称重,2 次质量之差即为悬浮物灰分含量(LOI).高锰酸盐指数的测定方法参见文献[15].数据处理与统计分析采用统计分析软件 SPSS 13.0 进行,利用独立样品 *t* 检验方法来检验河流与湖泊水质之间的差异性.

## 2 结果与讨论

### 2.1 丰水期环太湖不同区域河流之间水质比较

#### 2.1.1 望虞河水质

将所采集的河流水质进行比较,结果见图 3.由图 3(a)~3(f)可以看出,丰水期环太湖河流中望虞河水体的 TN、TP、DTN、DTP、TIN、 $\text{PO}_4^{3-}$  的浓度最高,分别为 7.96、0.430、6.05、0.140、5.94、0.063 mg/L.由于望虞河的水利设施和闸控,改变了自然水生态系统循环和平衡,河网水流不畅,环境容量很小,污染物容易累积.张利民等<sup>[17]</sup>曾对望虞河区域



1. 梁溪河、2. 直湖港、3. 武进港、4. 太滬运河、5. 漕桥河、6. 殷村港、7. 沙塘港、8. 芳桥桥、9. 官渎港、10. 陈东港、11. 大浦港、12. 洋渚港、13. 黄渎港、14. 大港桥、15. 夹浦港、16. 合溪港、17. 长兴港、18. 蠡河、19. 望虞河、20. 金墅港、21. 浒光运河、22. 胥江、23. 横泾塘、24. 横泾塘二、25. 瓜泾港、26. 太浦河、27. 太浦河二、28. 吴淞港、29. 濮漕、30. 大钱港、31. 长兜港、32. 小梅港

图2 2008年丰水期环太湖各研究区域采样河流及湖中采样点分布示意

Fig.2 Sampled rivers in different regions around Lake Taihu and sampled sites in Lake Taihu during high water period in 2008

水体中 2007 年氮磷来源进行解析,认为氮磷污染主要来自区域的工业、生活、农业发展. 本研究结果显示 2008 年丰水期此区域的营养盐浓度相对于太湖周边地区来讲,仍然是最高的,因此对望虞河的综合整治中仍然要限制工业、农业、生活污水带入的营养盐,加大污水处理力度. 图 3(i) 和 3(j) 显示,望虞河除了各形态的营养盐浓度最高以外,水体中悬浮物浓度 SS 也是最高的,同时悬浮物中的有机质浓度 LOI 却是最低的,推测其原因在于望虞河繁忙的航运输移引起了底泥再悬浮的发生.

### 2.1.2 太湖北部(N)区域河流水质

图 3(k) 显示太湖北部河流水体中有机物浓度最高,高锰酸盐指数的平均浓度达到了 11.60 mg/L,除此之外北部河流水体中 TN、TP 的平均浓度也很高,分别达到了 7.28 mg/L 和 0.370 mg/L,仅次于望虞河区域.

当水体中可被生物直接吸收利用的无机磷浓度低于  $2 \mu\text{mol/L}$  时,浮游植物、细菌体中的酶被诱导大量产生,通过这类酶的作用,水体中的有机磷化合

物被酶解而释放出无机磷以维持水体中藻类、细菌等的持续生长<sup>[18,19]</sup>,这部分被酶解出来的无机磷称为可酶解磷(EHP). 图 3(h) 为河流水体中 EHP 的浓度,可以看出北部河流水体中 EHP 平均浓度最高,为 0.240 mg/L,占总磷的 62.4%. 32 条河流水体中 EHP/TP 的平均值为 46.6%,高光等<sup>[20]</sup>的研究指出太湖水体中 EHP/TP 为 58.2%,可见在太湖的富营养化机制研究中有必要增加入湖河流水体中的可酶解磷指标,并研究其转化为无机磷的速率.

### 2.1.3 太湖东部(E)区域河流水质

图 3 数据显示,太湖东部河流水质相对最好, TN 平均浓度为 2.48 mg/L、TP 平均浓度为 0.110 mg/L、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  平均浓度为 0.29 mg/L、高锰酸盐指数平均为 4.42 mg/L、SS 平均浓度为 24.1 mg/L,除了 TN 外的其它指标均满足地表水环境质量的 II ~ III 类水质. 尽管东边河流的水质较好,但由于东边河流大部分为出湖河流,因此对太湖水质的改善作用有限.

### 2.1.4 太湖南部(S)区域河流水质

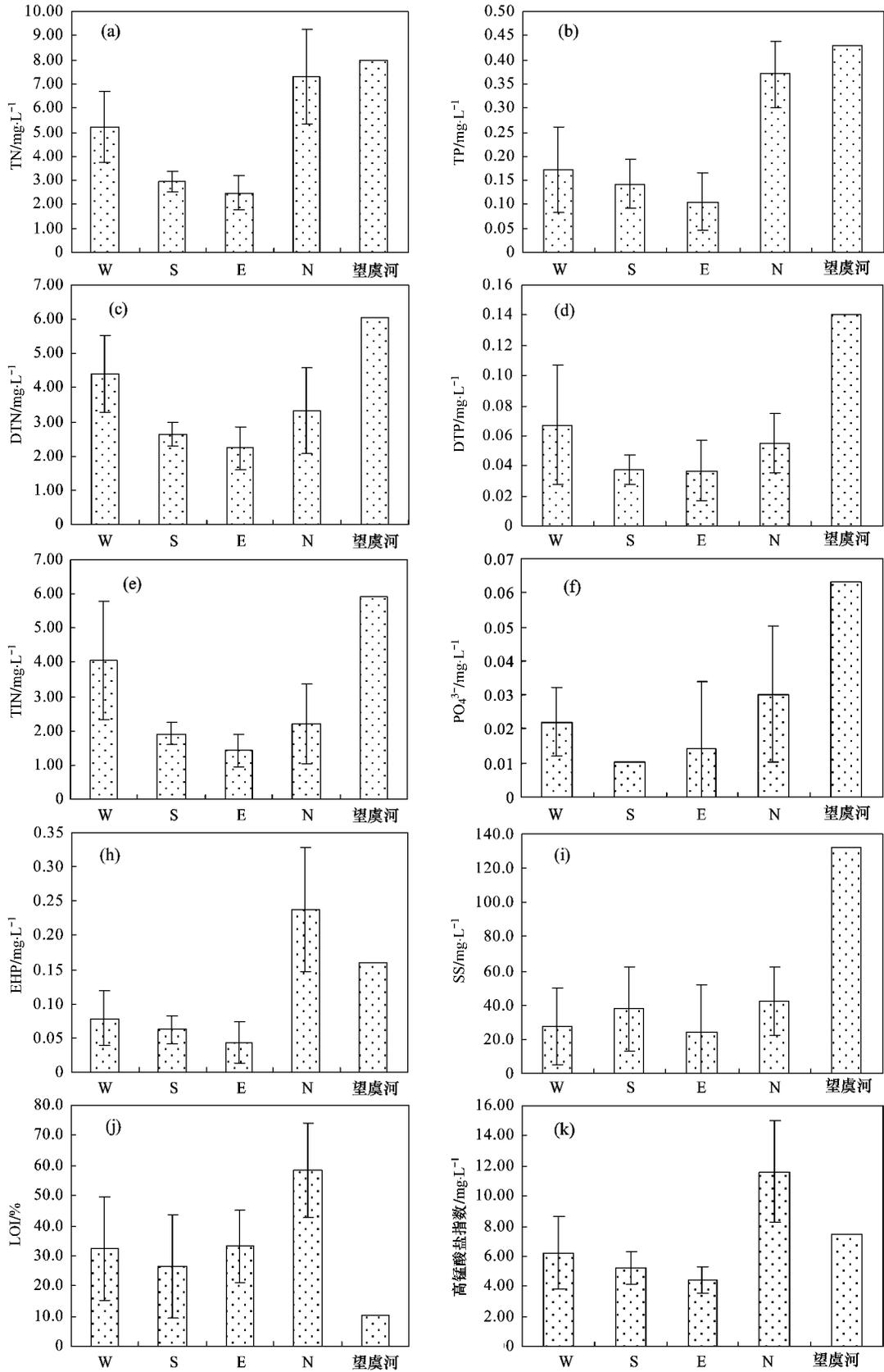


图3 2008年丰水期环太湖不同区域河流水质比较

Fig.3 River water quality comparison in different regions around Lake Taihu during high water period in 2008

太湖南部河流水质仅次于东边,其 TN 平均浓度为 2.94 mg/L、TP 平均浓度为 0.140 mg/L、 $\text{NH}_4^+$ -N 平均浓度为 0.16 mg/L、高锰酸盐指数平均为 5.18 mg/L,除 TN 之外的其它指标也基本满足 II~III 类.2007 年太湖水危机事件发生时,湖州市环保部门在新塘港、小梅港和大钱港的入湖口监测数据显示除小梅口的水质为 III 类外,其它 2 处入湖口水质均为 II 类.但南部河水比较浑浊,SS 浓度较西部和东部河流都高,而水面上的藻并不多.一方面由于这些河流多为通航河流,水面宽、流速大,另一方面该区河流多发源于山上,水土流失可能也是这些河流比较浑浊的原因.

### 2.1.5 太湖西部(W)区域河流水质

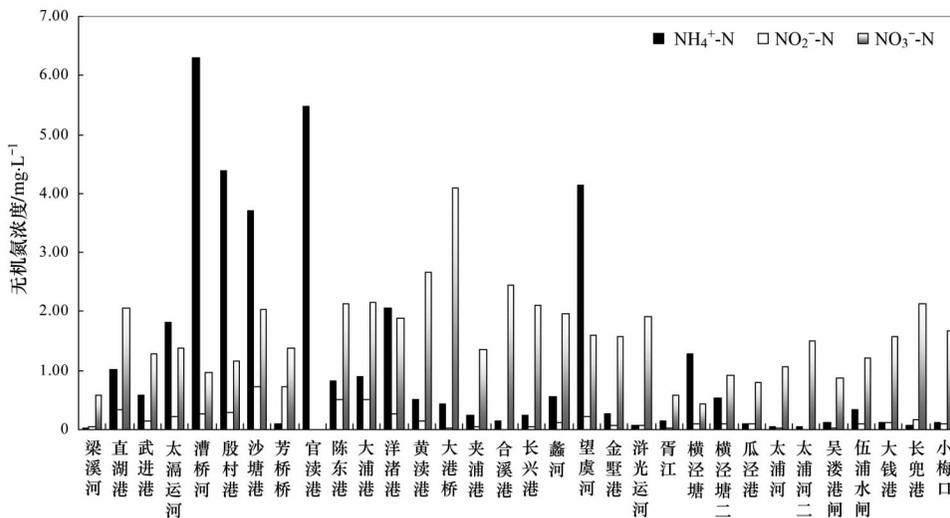


图 4 2008 年丰水期环太湖河流水体中无机氮浓度

Fig. 4 Inorganic nitrogen concentration in rivers around Lake Taihu during high water period in 2008

西部河流中的 4 太漏运河西起漏湖,东接漕桥河,是连接太湖的重要河流,水质的优劣直接影响太湖西北部水域水质.本次测定结果显示丰水期太漏运河 TN 平均浓度为 5.25 mg/L、TP 平均浓度为 0.250 mg/L、 $\text{NH}_4^+$ -N 平均浓度为 1.82 mg/L、高锰酸盐指数平均为 7.81 mg/L、SS 平均浓度为 22.3 mg/L,水质劣于西部采样河流的平均水质.

西部河流水体  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度异常高与当地发达的化工、印染等工业有关. Singh 等<sup>[21]</sup>在印度的恒河冲积平原地下水系所做的研究表明工业废水排放使水体中硝酸盐类浓度非常高; Jordão 等<sup>[22]</sup>的研究也指出经过工业区的河流水体中亚硝酸盐浓度较高达到了 0.333 mg/L,而受生活污水影响的河流水体中亚硝酸盐的浓度为 0.0515 mg/L,与本研究结果较为一致.

太湖西部河流水质稍好于北部河流,但劣于东部和南部河流.西部河流水体 TN 平均浓度为 5.23 mg/L、TP 平均浓度为 0.170 mg/L、 $\text{NH}_4^+$ -N 平均浓度为 1.94 mg/L、高锰酸盐指数平均为 6.23 mg/L、SS 平均浓度为 27.5 mg/L.

由图 4 可以看出太湖西部河流水体的  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N 浓度较高,除 TN 外  $\text{NH}_4^+$ -N 也为劣 V 类.西部的宜兴地区很多河流水体中  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度异常高,例如:7 沙塘港  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度为 0.730 mg/L、8 芳桥桥  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度为 0.730 mg/L、10 陈东港  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度为 0.510 mg/L、11 大浦港水体中  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度为 0.500 mg/L.西部河流水体中  $\text{NO}_2^-$ -N 平均浓度为 0.270 mg/L 是环湖其它河流的 2~3 倍.

### 2.2 太湖水华严重区与对应入湖河流水质比较

太湖湖泊生态系统研究站(太湖站)同期也在太湖湖体的西部湖区(W)和北部湖区(N)采样监测,具体点位见图 2.其中属于湖中西部的采样点为 L10、L16、L17,属于湖中北部的采样点为 L0、L1、L3、L4、L5、L6、L13、L14 和 L32.将太湖西部和北部湖水水质与相应湖区入湖河流水质进行比较,结果见表 1.

与西部湖中常规采样点 L10 对应的入湖河流有陈东港、大浦港,这 2 条河流的 TN、DTN、TIN 浓度约为湖中 L10 的 1.9 倍、2.7 倍和 4.2 倍;2 条河流的 TP、DTP、 $\text{PO}_4^{3-}$  浓度以及高锰酸盐指数与对应湖区差异不是很大.将处于竺山湾的采样点 L16 与对应西部湖区的太漏运河、漕桥河、殷村港比较可知,这 3 条河流的 TN、DTN、TIN 浓度约为湖中 L16 的

表 1 丰水期不同区河流与对应湖区水质比较/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Table 1 Water quality comparison between rivers and the corresponding lake areas during high water period/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 

湖中点或河流 (所属区)	TN	DTN	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{NO}_2^- - \text{N}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	TIN	TP	DTP	$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	TN/TP	高锰酸盐指数
L10	2.66	1.69	0.25	0.115	0.45	0.82	0.155	0.063	0.016	17	5.54
陈东港(W)	5.07	4.53	0.83	0.510	2.14	3.48	0.170	0.040	0.026	30	6.75
大浦港(W)	5.15	4.66	0.91	0.500	2.15	3.56	0.160	0.060	0.014	32	6.29
L16	4.19	2.03	0.83	0.155	0.50	1.49	0.350	0.127	0.078	12	11.09
太滂运河(W)	5.25	4.16	1.82	0.230	1.38	3.43	0.250	0.120	0.053	21	7.81
漕桥河(W)	6.73	5.46	6.29	0.270	0.98	7.54	0.240	0.110	0.049	28	8.42
殷村港(W)	6.33	4.89	4.38	0.290	1.17	5.84	0.230	0.110	0.012	28	7.81
L17	2.98	1.90	0.32	0.119	0.80	1.24	0.186	0.095	0.028	16	6.33
沙塘港(W)	7.77	6.53	3.70	0.730	2.03	6.46	0.260	0.110	0.010	30	8.57
芳桥桥(W)	4.92	3.30	0.10	0.730	1.38	2.21	0.290	0.080	0.038	17	10.09
L0	3.02	1.14	0.39	0.046	0.21	0.65	0.226	0.051	0.014	13	6.88
L1	2.33	0.67	0.44	0.010	0.13	0.58	0.168	0.050	0.005	14	6.38
L3	2.88	0.78	0.23	0.008	0.20	0.44	0.176	0.033	0.005	16	6.72
L4	1.71	0.90	0.15	0.009	0.16	0.32	0.101	0.030	0.003	17	5.50
L5	1.67	1.20	0.30	0.014	0.45	0.76	0.068	0.033	0.005	25	4.15
L32	1.90	1.65	0.30	0.013	0.87	1.18	0.043	0.026	0.007	44	2.82
梁溪河(N)	9.69	1.65	0.04	0.040	0.57	0.65	0.430	0.040	0.025	23	15.85
L6	3.56	1.60	0.24	0.086	0.78	1.11	0.233	0.051	0.008	15	6.99
直湖港(N)	7.71	4.66	1.02	0.330	2.07	3.42	0.340	0.050	0.016	23	10.69
武进港(N)	6.77	3.54	0.59	0.160	1.30	2.05	0.430	0.050	0.018	16	12.21
L13	1.77	1.50	0.46	0.012	0.50	0.97	0.041	0.031	0.004	43	3.15
L14	1.63	1.22	0.32	0.014	0.19	0.52	0.067	0.043	0.007	24	3.53
蠡河(N)	4.95	3.47	0.55	0.130	1.97	2.65	0.280	0.080	0.062	18	7.66
望虞河	7.96	6.05	4.14	0.210	1.59	5.94	0.430	0.140	0.063	19	7.51

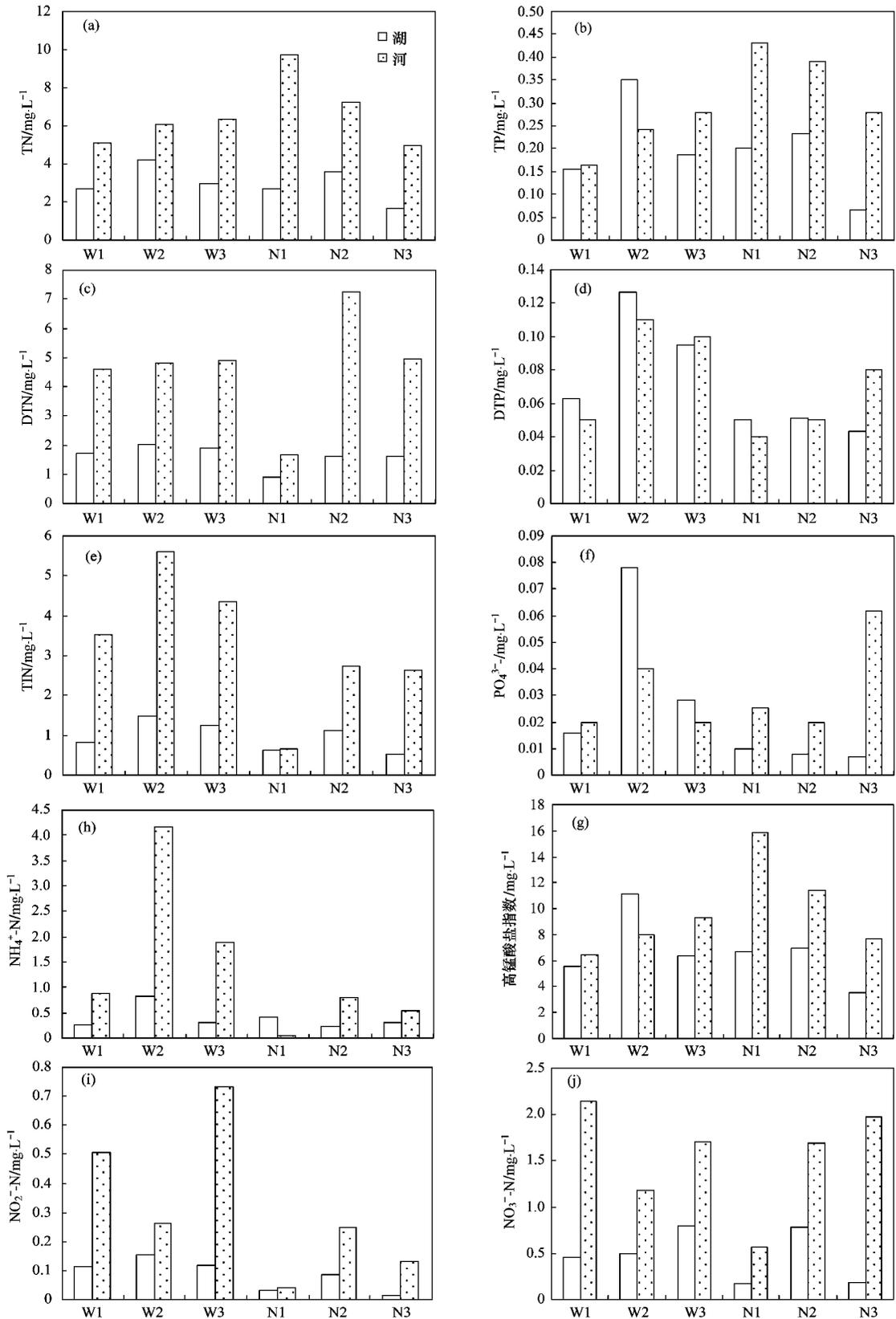
1.5 倍、2.4 倍和 3.8 倍。湖中 L16 的 TP、DTP、 $\text{PO}_4^{3-}$  浓度明显高于这 3 条河流,高锰酸盐指数比这 3 条河流高了将近 1.4 倍。入湖河流沙塘港水体的 TN、DTN、TIN 浓度是对应湖区采样点 L17 的 2.6 倍、3.4 倍和 5.2 倍。沙塘港水体的 TP、DTP 和高锰酸盐指数都比湖中点 L17 稍高, $\text{PO}_4^{3-}$  反而低于 L17 的。可以看出太湖西部河流的氮含量对太湖的影响比磷严重。

太湖北部湖区采样点从河口至湖心依次有 L0、L1、L3、L4、L5、L32,由表 1 可以看出这 6 个点的 TP、DTP、高锰酸盐指数逐渐降低,而 DTN、TIN、 $\text{PO}_4^{3-}$  则呈先减后增的趋势,TN/TP 逐渐升高。北部湖区的入湖河流 1 梁溪河水中 TN、TP、 $\text{PO}_4^{3-}$ 、高锰酸盐指数分别为 9.69、0.430、0.025、15.85  $\text{mg/L}$ ,是对应湖中采样点 L0 的 3.2 倍、1.9 倍、1.8 倍和 2.3 倍。湖中采样点 L6 除了水体 DTP 浓度与该处入湖河流 3 武进港和 2 直湖港相等外,其余几项指标均明显低于河流的,2 条河流的 TN、DTN、TP、高锰酸盐指数分别为湖中 L6 的 2.0 倍、2.6 倍、1.7 倍和 1.6 倍。北部入湖河流 18 蠡河的水质指标(包括 DTP)均明显高于对应湖区采样点 L13 和 L14,蠡河水体

的 TN、DTN、TP、 $\text{PO}_4^{3-}$ 、高锰酸盐指数分别为 L14 的 3.0 倍、2.8 倍、4.2 倍、4.4 倍和 2.2 倍。

可见丰水期太湖北部河流与西部河流情况明显不同之处在于:西部河流氮污染比较突出,体现在河流水体中 TP、DTP 或  $\text{PO}_4^{3-}$  与对应湖区的差异不明显甚至低于对应湖区水体,西部河流的 TP 处于 III ~ IV 类之间。而北部河流水中除了氮污染严重外,TP 和  $\text{PO}_4^{3-}$  的浓度均明显高于对应湖区,河流 TP 处于 IV ~ V 类之间。

太湖西、北部湖区水质与对应入湖河流水质比较结果见图 5,由图 5(a) ~ 5(j) 可以看出,西部、北部河流水体中 TN、DTN、TIN、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  都明显高于对应湖区。图 5(h) 说明西部河流水体中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  也明显高于对应湖区,北部河流的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  与湖区差异不大( $P = 0.262$ )。图 5(h)、5(i) 可以看出西部河流水体中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$  高于北部河流。图 5(b)、5(g) 显示西部河流的 TP、高锰酸盐指数与对应湖区差异不大( $P = 0.806$ ,  $P = 0.972$ ),北部河流的 TP、高锰酸盐指数明显高于对应湖区( $P = 0.017$ ,  $P = 0.028$ )。图 5(d)、5(f) 显示西部河流的 DTP、 $\text{PO}_4^{3-}$  较湖泊低,而北部河流的  $\text{PO}_4^{3-}$  高



W1 代表湖中采样点(L10)与河流(10 陈东港和 11 大浦港)的比照;W2 代表湖中采样点(L16)与河流(4 太滪运河、5 漕桥河、6 殷村港)的比照;W3 代表湖中采样点(L17)与河流(7 沙塘港和 8 芳桥桥)的比照;N1 代表湖中采样点(L0、L1、L3、L4、L5、L32)与河流(1 梁溪河)的比照;N2 代表湖中采样点(L6)与河流(2 直湖港和 3 武进港)的比照;N3 代表湖中采样点(L13、L14)与河流(18 蠡河)的比照

图 5 太湖西部、北部河流与对应湖区水质比较

Fig. 5 Water quality comparison between rivers (the western and the northern) and the corresponding lake areas

于对应湖区、DTP 与对应湖区差异不大 ( $P = 0.525$ ). 因此西部河水质的治理要注重对氮的限制, 北部河流水体中氮、磷以及有机物质都远高于湖泊, 对湖泊的富营养化产生重要影响, 故对北部河流要对氮、磷同时限制.

表 1 显示河流的 TN/TP 较高, 湖中河口 L10、L16、L0、L6 处 TN/TP 明显低于对应入湖河流的 TN/TP, 由湖中河口至湖心 (L0→L1→L3→L4→L5→L32→L7→L8) TN/TP 又逐渐升高, L7 号点 TN/TP 为 42, L8 号点 TN/TP 为 57. 由表 1 中数据可得 DTN/TN 平均值为 64%, DTP/TP 平均值为 36%, 这与 Zhu 等<sup>[23]</sup>的研究结果一致, 即太湖水体营养物质中氮主要以溶解态为主, 而磷主要以颗粒态为主. 其研究中 DTN/TN 的平均值为 68%, DTP/TP 平均值为 19%, 认为水中 TP 升高是 Chl-a 以及底泥释放磷产生的结果. 本研究中 TN/TP 在空间上的变化印证了 Zhu 等<sup>[23]</sup>的推论: 河流流速较大, 相对于湖泊来讲, 不太适宜藻类的生长, 所以河流的 Chl-a 浓度较湖泊低, 加之太湖较浅, 风浪扰动可能引起底泥释放磷, 从而使得湖泊水体 TN/TP 比河流水体低. 由于湖心处比较开阔, 风浪大, 藻类的生长环境恶劣, 并且此处几乎没有沉积物, 因此由湖滨向湖心方向 TN/TP 又逐渐升高. 可见藻类的含量和沉积物再悬浮对水体磷浓度影响较大.

### 3 结论

(1) 2008 年丰水期环太湖河流中望虞河水体的营养盐和悬浮物浓度都居于最高, 水质为劣 V 类. 太湖北部河流水体除了营养盐浓度为劣 V 类外, 有机质污染在环湖河流中最为严重, 北部河流中可酶解磷的平均浓度达到了 0.240 mg/L, 占总磷的 62.4%, 对太湖的潜在磷污染最为严重. 太湖西部河流较为显著的特点是亚硝态氮含量异常高, 其平均浓度为 0.270 mg/L, 是环湖其它河流的 2~3 倍, 给该区居民的健康带来隐患.

(2) 将太湖水华严重的北部湖区和西部湖区水质分别与对应的入湖河流水质比较得知: 太湖北部入湖河流的氮、磷、有机质含量都明显高于西部湖区, 而太湖西部入湖河流主要是氮含量明显高于西部湖区. 所以在治理太湖富营养化时, 北部地区的河流应着重控制污染源的截流, 西部地区在控源的同时, 还应开展化工产业的结构调整.

(3) 由河流向湖泊延伸所得到的一系列采样点处水体 TN/TP 的变化趋势表明藻类含量和沉积物

再悬浮对水体磷含量影响很大.

### 参考文献:

- [1] 秦伯强, 罗澈葱. 太湖生态环境演化及其原因分析[J]. 第四纪研究, 2004, **24**(5): 561-568.
- [2] 成小英, 李世杰. 长江中下游典型湖泊富营养化演变过程及其特征分析[J]. 科学通报, 2006, **51**(7): 848-855.
- [3] Smith V H, Schindler D W. Eutrophication science: where do we go from here? [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2009, **24**(4): 201-207.
- [4] 孙顺才, 黄漪平. 太湖[M]. 北京: 海洋出版社, 1993. 19-21.
- [5] 黄漪平. 太湖水环境及其污染控制[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 231-241.
- [6] 金相灿. 中国湖泊环境[M]. (第二册). 北京: 海洋出版社, 1995.
- [7] 袁和忠, 沈吉, 刘恩峰, 等. 太湖水体及表面沉积物磷空间分布特征及差异性分析[J]. 环境科学, 2010, **31**(4): 954-960.
- [8] 张大伟, 李杨帆, 孙翔, 等. 入太湖河流武进港的区域景观格局与河流水质相关性分析[J]. 环境科学, 2010, **31**(8): 1775-1783.
- [9] 王东红, 黄清辉, 王春霞, 等. 长江中下游浅水湖泊中总氮及其形态的时空分布[J]. 环境科学, 2004, **25**(增刊): 27-30.
- [10] 许朋柱, 秦伯强. 2001-2002 水文年环太湖河道的水量及污染物通量[J]. 湖泊科学, 2005, **17**(3): 213-218.
- [11] 马倩, 刘俊杰, 高明远. 江苏省入太湖污染量分析(1998-2007)[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(1): 29-34.
- [12] 许朋柱, 秦伯强, Behrendt H, 等. 太湖西南部河流流域的营养盐排放[J]. 湖泊科学, 2007, **19**(5): 544-551.
- [13] Kozerski H P, Behrendt H, Köhler J. The N and P budget of the shallow, flushed lake Müggelsee: retention, external and internal load [J]. Hydrobiologia, 1999, **408/409**: 159-166.
- [14] An K G, Kim D S. Response of reservoir water quality to nutrient inputs from streams and in-lake fishfarms [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2003, **149**(1-4): 27-49.
- [15] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 162-163, 143, 203.
- [16] Chróst R J, Siuda W, Albrecht D, et al. A method for determining enzymatically hydrolysable phosphate (EHP) in natural waters [J]. Limnology and Oceanography, 1986, **31**(3): 662-667.
- [17] 张利民, 王水, 韩敏, 等. 太湖流域望虞河西岸地区氮磷污染源解析及控制对策[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(3): 315-320.
- [18] Reichardt W. Catalytic mobilization of phosphate in Lake water and by Cyanophyta [J]. Hydrobiologia, 1971, **38**(3-4): 377-394.
- [19] Wynne D, Kaplan B, Berman T. Phosphatase activities in Lake Kinneret phytoplankton [A]. In: Chróst R J. Microbial enzymes in aquatic environments [M]. New York: Springer-Verlag, 1991. 220-226.

- [20] 高光, 朱广伟, 秦伯强, 等. 太湖水体中碱性磷酸酶的活性及磷的矿化速率[J]. 中国科学 D 辑, 2005, **35**(增刊 II): 157-165.
- [21] Singh K P, Singh V K, Malik A, *et al.* Distribution of nitrogen species in groundwater aquifers of an industrial area in alluvial Indo- Gangetic Plains- a case study [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2006, **28**(5): 473-485.
- [22] Jordão C P, Pereira M G, Bellato C R, *et al.* Assessment of water systems for contaminants from domestic and industrial sewages [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2002, **79**(1): 75-100.
- [23] Zhu G W, Wang F, Gao G, *et al.* Variability of phosphorus concentration in large, shallow and eutrophic Lake Taihu, China [J]. Water Environment Research, 2008, **80**(9): 832-839.