ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第4期

Vol.37 No.4

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 37 卷 第 4 期
2016 年 4 月 15 日

目 次

2013 年 12 月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响 …… 周敏,乔利平,朱书慧,李莉,楼晟荣,王红丽,陶士康,黄成,陈长虹(1179)
利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态 …… 黄子龙,曾立民,董华斌,李梅,朱彤(1188)
南京大气气溶胶混合态与云凝结核活化特征研究 …… 朱麟,马嫣,郑军,李时政,王利朋(1199)
北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究 …… 苏捷,赵普生,陈一娜(1208)
重庆市主城区 $PM_{2.5}$ 时空分布特征 …… 刘永林, 孙启民, 钟明洋, 钟部卿, 雒昆利(1219)
大气细颗粒物中有机碳和元素碳监测方法对比 …… 庞博,吉东生, 刘子锐,朱彬,王跃思(1230)
深圳市大气中全氟化合物的残留特征 …… 何鹏飞,张鸿,李静,何龙, 罗骥 ,刘国卿,沈金灿,杨波,崔晓宇 (1240)
北京上甸子站大气 CO_2 及 $\delta^{13}C(CO_2)$ 本底变化 …… 夏玲君, 周凌晞, 刘立新, 张根(1248)
梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布 …… 刘婷,李露,张家泉,占长林,刘红霞,郑敬茹,姚瑞珍,曹军骥(1256)
城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险 …… 刘建福,陈敬雄,辜时有(1264)
北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估 …… 曹治国,余刚,吕香英,王梦蕾,李琦路,冯精兰,闫广轩,余浩,孙剑辉(1272)
西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析 …… 王丽,王利军,史兴民,卢新卫(1279)
PDMS 基涂层活性炭对甲苯、苯和丙酮吸附研究 …… 刘寒冰,姜鑫,王新,杨兵,薛南冬,张石磊(1287)
海南东北部滨海湿地沉积物微量元素分布特征、来源及污染评价 …… 张卫坤,甘华阳,闭向阳,王家生(1295)
曹妃甸围填海土壤重金属积累的磁化率指示研究 …… 薛勇, 周倩,李远,章海波,胡雪峰,骆永明(1306)
滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源 …… 李广,章新平,许有鹏,宋松,王跃峰,季晓敏,项捷,杨洁(1313)
江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价 …… 李莹杰,张列宇,吴易雯,李曹乐,杨天学,唐军(1321)
城市景观水体甲基汞的形成机制及微宇宙模拟研究 …… 刘小红,司友斌,郭子薇,杜成竹,朱聪聪(1330)
我国北方温带水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性 …… 曾明正, 黄廷林,邱晓鹏,王亚平,史建超,周石磊,刘飞(1337)
额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征 …… 韦虹,吴锦奎,沈永平,张伟,刘世伟,周嘉欣(1345)
太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析 … 冯佳,郭宇宁,王飞,吕俊平,刘琪,谢树莲,程革,张建民(1353)
铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征 …… 程建华,窦智勇,孙庆业(1362)
基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究 …… 马秋梅,李玮,王毅,刘新亮,李勇,吴金水(1371)
重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算 …… 张远瞩,贺秋芳,蒋勇军,李勇 (1379)
山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价 …… 邱祖凯,胡小贞,姚程,张文慧,许秋瑾,黄天寅(1389)
伊乐藻-固定化脱氮微生物技术对入贡湖河道脱氮机制的影响 …… 韩华杨,李正魁,王浩,朱倩 (1397)
环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征 …… 高永霞,宋玉芝,于江华,朱广伟(1404)
藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律 …… 陈俊, 李勇, 李大鹏, 黄勇, 朱培颖(1413)
扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响 …… 郭俊锐,李大鹏,刘焱见(1422)
锆改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响 …… 章喆, 林建伟, 詹艳慧, 王虹(1427)
电化学还原-氧化工艺降解 4-氯酚的毒性研究 …… 王岩,施钦,王辉,卞兆勇(1437)
水合氧化铝负载的磁性核/壳结构 $Fe_3O_4@SiO_2$ 纳米颗粒对水中磷的去除及再利用 …… 赖立,谢强,方文侃,邢明超,吴德意(1444)
多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除 …… 乔梦,齐维晓,赵旭,刘会娟,曲久辉(1451)
污水处理厂污泥水溶解性有机物的光谱特性分析 …… 牛天浩,周振,胡大龙,魏海娟,李晶,窦微笑,葛红花 (1460)
高含氟的光伏废水反硝化可行性及经济性分析 …… 李祥,朱亮,黄勇,杨朋兵,崔剑虹,马航(1467)
连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制 …… 吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良(1472)
反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复 …… 王翻翻,钱飞跃,沈耀良,王建芳,张月茹,刘郭洵(1478)
低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响 …… 何势,顾超超,魏欣,黄圣琳,刘振鸿,薛罡,高品(1485)
低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究 …… 杨伟强,王冬波,李小明,杨麒,徐秋翔,张志贝,李志军,向海弘,王亚利,孙剑(1492)
短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响 … 谢燕,陈曦,胡正华,陈书涛,张寒,凌慧,申双和(1499)
不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子 …… 崔海,张亚红(1507)
塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性 …… 贡璐,朱美玲,刘曾媛,张雪妮,解丽娜(1516)
小分子有机酸对紫色土及其溶液中 Pb 的赋存影响 …… 刘江,江韬,黄容,张进忠,陈宏(1523)
鸢尾对石油烃污染土壤的修复以及根系代谢分析 …… 王亚男,程立娟,周启星(1531)
水锰矿氧化水溶性硫化物过程及其影响因素 …… 罗瑶,李珊,谭文峰,刘凡,蔡崇法,邱国红(1539)
高温纤维素降解菌群筛选及产酶特性 …… 冯红梅,秦永胜,李筱帆,周金星,彭霞薇(1546)
基于固相萃取及高效液相色谱-荧光检测分析的污泥中氟喹诺酮类抗生素研究方法的开发 …… 戴晓虎,薛勇刚,刘华杰,戴翎翎,严寒,李宁(1553)
养殖场周边土壤-蔬菜系统磺胺类药物残留及风险评价 …… 金彩霞,司晓薇,王子英,张琴文(1562)
4 种典型 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响 …… 王兰君,王金花,朱鲁生,王军,赵祥(1568)
新型污染物卤代咔唑的环境行为及生态毒理效应 …… 林坤德,陈艳秋,袁东星(1576)
水源地土壤环境保护优先区划分方法与实例研究 …… 李蕾,王铁宇,王晓军,肖荣波,李奇锋,彭驰,韩存亮(1584)
《环境科学》征订启事(1218) 《环境科学》征稿简则(1370) 信息(1352, 1412, 1498)

环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征

高永霞[1,2],宋玉芝[2,3],于江华[1,2],朱广伟[4]

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院,南京 210044; 2. 大气环境与装备技术协同创新中心,南京 210044; 3. 南京信息工程大学应用气象学院,南京 210044; 4. 中国科学院南京地理与湖泊研究所国家重点实验室,南京 210008)

摘要: 为了解不同性质河流对太湖水体富营养化的影响,于2009 年2 月(枯水期)、2009 年5 月(平水期)、2009 年8 月(丰水期)对环太湖三类9 条河流中不同形态磷的沿程和时间变化特征进行了研究. 结果表明,总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)和溶解性反应磷(SRP)质量浓度随枯、平、丰水期而呈降低趋势,可酶解磷(EHP)质量浓度随着枯、平、丰水期藻类生物量的升高而升高. 受生活污水影响的河流水体中各形态磷的质量浓度都是最高的,但由于此类河流从上游到下游水体自净能力很好,其对太湖富营养化的影响最小. 受工业废水影响河流在与太湖交界处各形态磷的质量浓度最大,对太湖富营养化的影响也最大. 入湖河流的 EHP 质量浓度多数情况下远远高于 SRP 质量浓度,EHP 对太湖蓝藻的暴发起关键性作用.

关键词:太湖; 河流; 形态磷; 时空分布; 枯水期; 平水期; 丰水期

中图分类号: X522 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2016)04-1404-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2016.04.027

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Different Forms of Phosphorus in Three Sorts of Rivers around Lake Taihu

GAO Yong-xia[1,2], SONG Yu-zhi[2,3], YU Jiang-hua[1,2], ZHU Guang-wei[4]

(1. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044, China; 3. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 4. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Different forms of phosphorus from the upper reaches of river to lower reaches of river in nine rivers were analyzed to clarify the pollution characteristics of industrial effluent, agriculture effluent and sanitary wastewater to Lake Taihu in February (low water period), May (average water period) and August (abundant water period) of 2009. The results showed that total phosphorus (TP), dissolved total phosphorus (DTP) and soluble reactive phosphorus (SRP) mass concentration all showed decreasing trend while enzymatic phosphorus (EHP) mass concentration increased with the increase of algal biomass from low water period to abundant water period. Mass concentrations of several forms of phosphorus were all the highest in the rivers impacted by sanitary wastewater, but sanitary wastewater's self-purification capacity from the upper reaches of river to lower reaches of river was the best, and the pollution to Lake Taihu was the lowest. Pollution from rivers impacted by industrial effluent was the highest. Mass concentration of EHP was higher than that of SRP in most cases, so EHP played an important role in Cyanbacterial harmful algal blooms events in Lake Taihu.

Key words: Lake Taihu; rivers; different forms of phosphorus; spatial and temporal distribution; low water period; average water period; abundant water period

有害蓝藻水华的发生正在成为一个愈演愈烈的世界性环境问题[1],也是当前我国湖泊尤其是浅水湖泊所面临的最主要的问题[2]. 湖泊富营养化及随之而发生的有害蓝藻水华严重影响了湖泊与河流的水质和生态功能[3]. 近年来,随着经济的发展、污染的加重,太湖的水环境问题日益突出,蓝藻暴发逐渐频繁[4]. 2007 年5 月底,太湖蓝藻水华的暴发导致无锡市水源地水质污染,严重影响了当地近百万群众的正常生活,引起了党中央、国务院的高度重视和社会各界的广泛关注. 8 年来,经过各方共同努力,太湖治理初见成效,太湖水环境稳中趋好,但仍然存在一些问题. 例如: 随着太湖流域工业点源和城乡污水治理逐步到位,农业面源污染占污染负荷的比重逐步提高,已成为太湖治理的主要矛盾. 工业上,纺织、化工、冶金等重污染行业的污染物排放量仍然偏高,实施污染物减排的工业企业数量较少,用于工业污染治理投资偏低,企业治污积极性不高,经济发展与环境保护的矛盾依然尖锐[5]. 当外部水文、气象条件具备,太湖周边的工业、农业、生活污水随入湖河流带入湖中的氮、磷营养盐不断积累就有可能引起太湖蓝藻大规模的暴发,从而加大防控难度. 因此很有必要对太湖周边工业、农业、生活

收稿日期: 2015-09-28; **修订日期**: 2015-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471446); 江苏高校优势学科建设工程项目

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:gaoyx0813@163.com

污水带入湖的营养盐进行研究.

在对太湖蓝藻生长的营养盐限制研究中发现，不同湖区的蓝藻生长潜力都受到磷的限制[6]. 不同形态磷对藻类的贡献不同：磷酸根磷(PO_4^{3-}-P)能被藻类和细菌直接利用，称为生物可直接利用的溶解性反应磷(SRP)，SRP 浓度的增加会导致水体富营养化程度的增加[7]，但 SRP 仅占总磷(TP)的一小部分. 有机磷(DOP)在总磷中所占比例较大且能通过酶解转化为 SRP[8]，DOP 分子量较大，通常不能直接通过生物细胞膜，因而不能被藻类等生物直接利用[9]. DOP 和颗粒磷(PP)虽不能被藻类直接利用，但它们在总磷中所占比例可观，且约有 70% 左右可以在胞外酶的作用下降解转化为 SRP 以供藻类利用[10]，这部分磷被称为可酶解磷(EHP)，EHP 对湖泊蓝藻水华的暴发具有重要意义.

对环太湖河流水体中营养盐的研究[11~17]为数不少，但鲜有对多种磷形态进行细化研究的报道. 鉴于工业、农业、生活污水对太湖富营养化的长期影响，本研究在太湖周边选取了有代表性的三类河流进行了分析. 目的在于了解不同类型河流水体的水质特征以及受工业、农业、生活污水影响的三类入湖河流水体中不同形态磷从上游到下游的时空变化规律，以期能为监测预警太湖蓝藻暴发提供依据.

1　材料与方法

1.1　样品采集

经环太湖调研后，在太湖周边选取了受工业、农业、生活污水影响的三类共 9 条河流作为研究对象. 每条河流按照距离太湖由远到近布设上、中、下游 3 个采样点，其中下游采样点在太湖入湖处，这样共布设 27 个采样点. 2009 年太湖年初水位 3.08 m，年末水位 3.25 m；最高水位 4.23 m，出现在 8 月；最低水位 2.87 m，出现在 2 月；全年平均水位 3.31 m，接近 5 月的水位. 因此采样时间 2009 年 2 月、5 月、8 月分别是一年的枯、平、丰水期，采样河流名称及对应采样点见图 1.

1.2　调查与分析方法

河流水样均采自表层 50 cm，野外现场用美国 Rob Ellison 公司生产的 YSI 水质仪测定的水体指标包括：透明度、水温、溶解氧(DO)、叶绿素 a(Chla). 现场用 0.45 μm 滤膜过滤 100 mL 水样用于测定溶解性总磷(DTP)、氨氮(NH_4^+-N)、PO_4^{3-}-P. 实验室分析指标为 TP、DTP、NH_4^+-N、PO_4^{3-}-P、高锰酸盐指数以及 EHP. 其中 TP、DTP 采用钼酸铵分光光度法测定[18]，NH_4^+-N、PO_4^{3-}-P 采用 System SAN^{++}型 Skalar 流动分析仪测定，高锰酸盐指数的测定方法参见文献[18].

(一)~(九)为河流编号；·采样点

图 1　2009 年枯、平、丰水期环太湖采样河流及采样点

Fig. 1　Sampled rivers and points around Lake Taihu during low, average and abundant water periods of 2009

EHP 的测定方法[19]：将所采集的原水样 100 mL(每个水样 3 个平行)，放入具塞、灭菌的三角烧瓶中，加入 1 mL 1.0 mol·L^{-1} Tris 缓冲溶液(pH = 8.2)及 5 mL 氯仿，在 30℃ 条件下培养 5 d. 培养结束后，水样经 0.45 μm 滤膜过滤后，用 Skalar 流动分析仪测定水体中 PO_4^{3-}-P 的质量浓度，酶解前后 PO_4^{3-}-P 质量浓度之差即为水体中 EHP 的质量浓度.

酶活(APA)、酶的最大反应速率(V_{max})及米氏常数(K_m)的测定方法[20]：以对硝基苯磷酸二钠(P-NPP)为反应底物，将影响酶促反应试验的条件设定为：pH 值 8.4，温度 30℃、反应物体积 5 mL、反应时间 6 h、波长 410 nm，用岛津 UV-2401 分光光度计比色测定. 测定 V_{max} 和 K_m 时，在 0.01 ~ 3 mmol·L^{-1}的范围内，取 8 个不同的底物浓度，每个底物浓度下 3 个平行样，分别测定其 APA. 将测定结果代入米氏方程 $v = V_{max}[s]/(K_m + [s])$，可求出 V_{max}、K_m. 分别将 V_{max}和 K_m 和 EHP 的值代入米氏方程，求出反应速率，根据水体中 EHP 的质量浓度以及求出的酶分解速率，即可得出磷的周转时间.

2　结果与讨论

2.1　不同性质河流水体 TP 的时空变化特征

三类采样河流在枯、平、丰水期从上游到下游水体中 TP 质量浓度的变化情况如图 2 所示. 图 2

(a)显示枯水期三类河流的 TP 质量浓度从上游到下游都没有空间规律性可言,但受生活污水影响河流水体的 TP 平均质量浓度最高,其次是受工业影响河流,受农业影响河流水体中的 TP 平均质量浓度在枯水期最低. 枯水期 9 条河流水体 TP 的平均质量浓度及其所属水质类别见表 1,数据显示相同类型的河流水质情况不尽相同,例如第三条河流(望虞河)与第一、第二条河流的水质相差 1 ~ 3 个类别,第四条河流(胥江)与第五、第六条河流的水质相差 1 ~ 2 个类别.

望虞河是引江济太的通水廊道,2008 年国务院批复的《太湖流域水环境综合治理总体方案》明确将引江济太作为太湖流域水环境综合治理的措施之一,以此为节点,望虞河干流水质改善了 1 ~ 3 个类别[21]. 因此不难理解受工业影响类河流中第三条河流(望虞河)TP 平均质量浓度较第一、第二条河流低 1 ~ 3 个类别的结果. 受生活污水影响河流中的第五条河流沿程经过东山镇,第六条河流沿程经过吴江市老生活区,这些地方都属于"闹市",对河流环境要求稍高,专有打捞船打捞河中的漂浮物. 第四条河流胥江河面较第五条、第六条河流宽. 河中有运输船只经过, 沿途一侧有一些居民楼,另一侧是一些重工业,河流两岸可见多个排放口正在出流. 可能因其河面宽且通航不易维护,3 次采样中均未见胥江中有打捞船只打捞河中漂浮物. 因此推测这些可能是第四条河流 TP 平均质量浓度较第五、第六条河流高 1 ~ 2 个类别的原因.

由图 2(b)和图 2(c)可以看出平水期和丰水期受生活污水影响河流的 TP 质量浓度从上游到下游呈现很好的递减规律. 受工业影响河流的 TP 质量浓度从上游到下游差别不大. 受农业影响河流的 TP 质量浓度在某些采样点处呈现异常高的特征,特别是第九条河流. 第九条河流上游(29 号点)位于浙江省湖州市长兴县的徽州庄,平水期和丰水期 29 号点河水均清澈见底,DO 分别为 11.36 $mg\cdot L^{-1}$ 和 9.27 $mg\cdot L^{-1}$; Chla 分别为 1.2 $\mu g\cdot L^{-1}$ 和 0.6 $\mu g\cdot L^{-1}$; NH_4^+-N 分别为 0.05 $mg\cdot L^{-1}$ 和 0.03 $mg\cdot L^{-1}$; TP 质量浓度分别为 0.02 $mg\cdot L^{-1}$ 和 0.01 $mg\cdot L^{-1}$,这 4 个影响水体富营养化的常规检测指标均达到地表水环境标准的Ⅰ类标准. 中游(28 号点)平水期 TP 质量浓度为 0.03 $mg\cdot L^{-1}$,丰水期 TP 质量浓度为 0.03 $mg\cdot L^{-1}$. 从中游采样点经过农田区到达下游(27 号点), 27 号点平水期的 TP 质量浓度为 0.14 $mg\cdot L^{-1}$(Ⅱ ~ Ⅲ类),丰水期的 TP 质量浓度为 0.28 $mg\cdot L^{-1}$(Ⅲ ~ Ⅳ类). 这种变化很明显是由农业生产活动引起,可见农业对河流水体的总磷质量浓度影响较大,可以使同一条河流上下游水质相差两个类别.

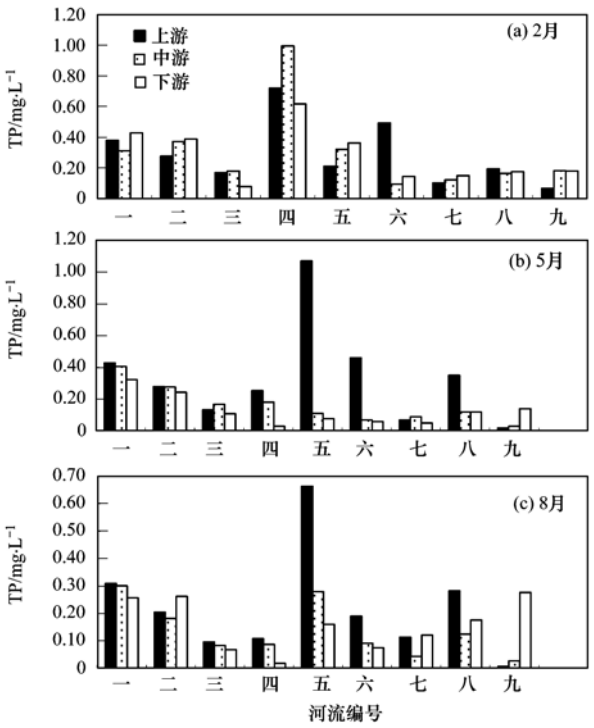

图 2 枯、平、丰水期河流上下游 TP 的变化情况

Fig. 2 TP's mass concentration change from the upper reaches to the lower reaches of river during low, average and abundant periods

表 1 枯水期 9 条河流水体中 TP 的平均质量浓度及其水质类别

Table 1 TP's average mass concentration of the nine river water and their water quality levels during low water period

河流类型	河流编号	TP 平均质量浓度 /$mg\cdot L^{-1}$	水质类别 (GB 3838-2002)
工业	一	0.37	Ⅳ ~ Ⅴ类
	二	0.35	Ⅳ ~ Ⅴ类
	三	0.14	Ⅱ ~ Ⅲ类
生活	四	0.78	劣Ⅴ类
	五	0.30	Ⅳ类
	六	0.24	Ⅲ ~ Ⅳ类
农业	七	0.12	Ⅱ ~ Ⅲ
	八	0.18	Ⅱ ~ Ⅲ
	九	0.14	Ⅱ ~ Ⅲ

结合这些河流各自所处的环境特征以及图 2 所反映的结果,可以推论:枯水期河流各采样点的水质状况更多体现了附近区域对该河流水质的影响,而平水期和丰水期河流的自净能力能够在上下游之间得到很好的体现. 有居民生活的地方就有生活污水,所以生活污水是大背景,而工业、农业是特殊情况. 受工业或农业影响的河流会呈现因被污染而导致的

水体营养盐增加的特征，这些河流的自净过程会被工农业污染所掩盖.

谈到河流对太湖的影响时，河湖交界处（入湖处）的水质可以作为参考. 将平水期和丰水期 3 种性质河流在入湖处（下游采样点）的 TP 质量浓度比较可知，受工业影响河流在入湖处的 TP 质量浓度最高，其次是受农业影响河流. 尽管受生活污水影响河流水体中 TP 平均质量浓度最高，但受生活污水影响河流在入湖处的 TP 质量浓度最低，说明这类河水的自净能力比较好. 综上可知，三类河水对太湖水体 TP 质量浓度的影响程度：工业 > 农业 > 生活.

2.2　不同性质河流水体 DTP 的时空变化特征

三类河流水体中溶解性总磷质量浓度在时间上随枯、平、丰水期逐渐下降（见图 3）. 从分类上看受生活污水影响河流水体的 DTP 质量浓度最高，其次是受工业废水影响河流，受农业尾水影响河流水体的 DTP 质量浓度最低.

受工业影响河流水体的 DTP 质量浓度在上下游差别不大，与 TP 的空间变化情况相似. 受生活污水影响河流水体的 DTP 质量浓度在平水期和丰水期从上游到下游呈递减趋势. 枯水期第四条河流（胥江）中游（12 号点，木渎镇）的 DTP 质量浓度为 0.62 $mg\cdot L^{-1}$，占总磷的 63%，第六条河流的上游（17 号点，吴江市老生活区）的 DTP 质量浓度为 0.40 $mg\cdot L^{-1}$，占总磷的 82%. 结合前文的推论：枯水期河流水质更多体现了采样区域特征，可以看出生活污水中磷主要以 DTP 形态存在.

由图 3 可以看出受农业影响河流水体的 DTP 质量浓度比较低，上下游的差异不大. 受农业影响显著的第九条河流，其上游（29 号点）水体的 DTP 质量浓度在平水期、丰水期分别为 0.01 $mg\cdot L^{-1}$ 和 0 $mg\cdot L^{-1}$，中游（28 号点）水体的 DTP 质量浓度在平水期、丰水期分别为 0.02 $mg\cdot L^{-1}$ 和 0.01 $mg\cdot L^{-1}$，下游（27 号点）水体的 DTP 质量浓度在平水期、丰水期分别为 0.02 $mg\cdot L^{-1}$ 和 0.02 $mg\cdot L^{-1}$. 尽管从中游到下游经过了农田区，但中游和下游水体的 DTP 质量浓度变化不大，而此河流的 TP 质量浓度在上下游水体之间变化很大. 上游（29 号点）水体的 TP 质量浓度在平水期和丰水期分别为 0.02 $mg\cdot L^{-1}$ 和 0.01 $mg\cdot L^{-1}$，中游（28 号点）水体的 TP 质量浓度在平水期和丰水期分别为 0.03 $mg\cdot L^{-1}$ 和 0.03 $mg\cdot L^{-1}$，经过农田区之后，下游（27 号点）水体的 TP 质量浓度在平水期和丰水期分别为 0.14 $mg\cdot L^{-1}$ 和 0.28 $mg\cdot L^{-1}$. 通过比较受农业影响河流上下游水体中总磷与溶解性总磷质量浓度的变化特征可知，受农业影响河流水体的磷主要以颗粒态输移. 李高明[22]对湖南农业面源污染中氮、磷损失的影响因素研究以及苏静君[23]对加拿大东部农田流域颗粒态磷的输出及藻类有效性研究也都得出磷素基本以颗粒态损失的结论. 由此认为抑制农业对太湖富营养化的影响或许可以通过控制受农业影响河流中颗粒物质的入湖量来实现.

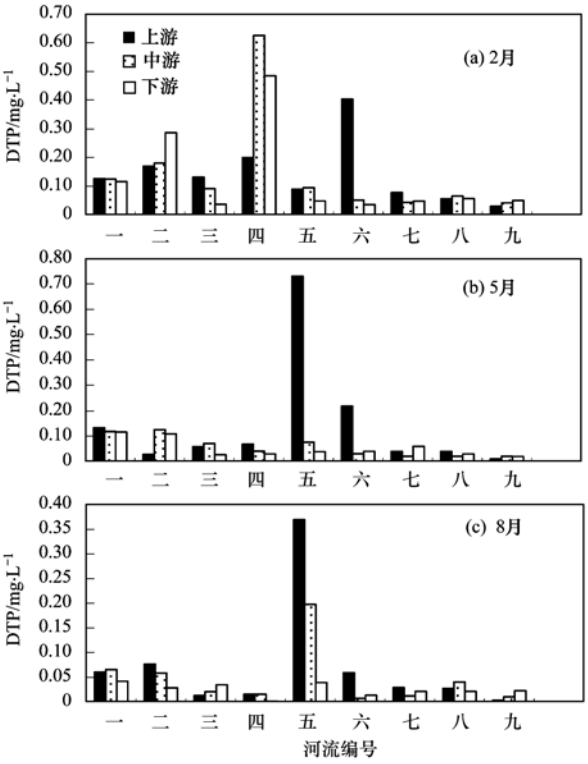

图 3　枯、平、丰水期河流上下游 DTP 的变化情况

Fig. 3　DTP's mass concentration change from the upper reaches to the lower reaches of river during low, average and abundant periods

2.3　不同性质河流水体 SRP 的时空变化特征

SRP 是能够直接被藻类吸收利用的磷形态[9]，尽管有机磷也能够被藻类利用，但藻类利用有机磷的能力明显地依赖于磷酸酶的活动能力，这是一种在环境磷酸盐浓度很低时诱发合成的酶. 由于并不是任何藻类在磷酸盐不足时都能诱发合成磷酸酶，所以有机磷源促使蓝藻水华发生的即时性要次于 SRP.

通过分析受生活污水影响河流水体的 TP、DTP 质量浓度特征，可知枯水期各采样点的水质情况基本代表该采样点附近区域对该河流水质的影响情况. 由 4（a）可以看出，受工业影响的第一条河流直湖港在枯水期上下游水体 SRP 质量浓度差别不大，TP、DTP 质量浓度也有此特征，说明这条河从上游

到下游沿程接纳的废水情况大致相当. 直湖港上游(2 号点)在无锡刘家头村的电镀厂附近,水体的 SRP 质量浓度为 0.055 mg·L^{-1}; 中游(3 号点)在无锡胡埭大桥下,水体的 SRP 质量浓度为 0.055 mg·L^{-1}; 下游(4 号点)在直湖港入湖口处的直湖港水利枢纽处,水体 SRP 质量浓度为 0.053 mg·L^{-1},此处航运比较繁忙,对水质影响很大. 直湖港水体中 SRP 的平均质量浓度为 0.054 mg·L^{-1}. 通往竺山湾的第二条河流横塘河上游(6 号点)在周铁附近的工业园区,河流两侧分别是煤场和水泥管厂,此处的 SRP 质量浓度为 0.022 mg·L^{-1}. 通往贡湖湾的第三条河流望虞河在枯水期从上游到下游水体中 SRP 质量浓度逐渐降低,说明望虞河沿途区域工业发展差别较大. 望虞河上游(9 号点)在红杉镇坊桥染料厂附近,水体 SRP 质量浓度为 0.077 mg·L^{-1}; 中游(8 号点)在望虞河水利枢纽管理处,水体 SRP 质量浓度为 0.043 mg·L^{-1}; 下游(10 号点)望虞河入湖处水体 SRP 质量浓度为 0.015 mg·L^{-1}. 分析这几种工业废水的特征可知,印染工业中印花程序后的皂洗、水洗废水常常含有氮、磷化合物,尿素也常用于印染各道工序,这些都会使废水中氮、磷营养物的质量浓度增高[24]. 电子废水处理的重点关注在重金属离子的去除和高浓度有机物的降解,而对其中

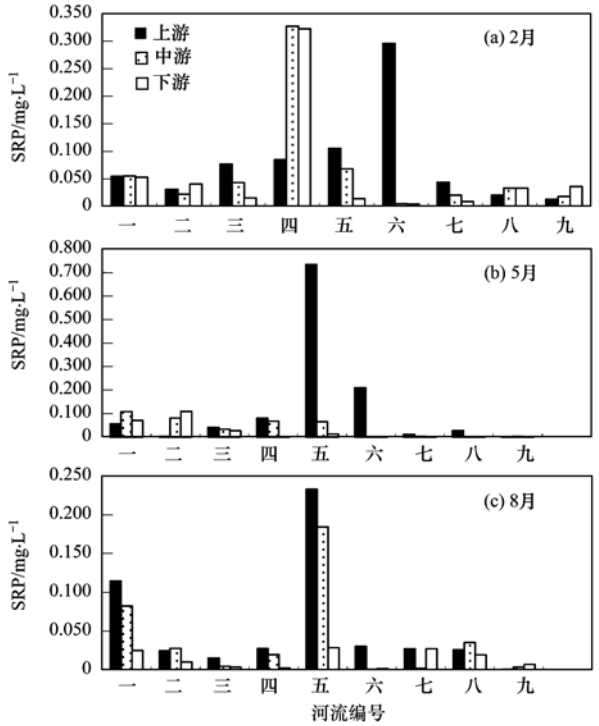

图 4 枯、平、丰水期河流上下游 SRP 的变化情况

Fig. 4 SRP's mass concentration change from the upper reaches to the lower reaches of river during low, average and abundant periods

氮磷的关注不够,实际电子废水处理工艺中的脱氮除磷单元效率低而且成本高,部分电镀厂的氮、磷排放往往不能达标[25]. 本区域内的电镀厂废水处理也存在类似问题,接收本区电镀厂废水的水处理公司进水 TP 质量浓度为 5 mg·L^{-1},氨氮质量浓度为 15 mg·L^{-1}. 水处理公司出水 TP 质量浓度为 0.5 mg·L^{-1},TN 质量浓度为 15 mg·L^{-1},氨氮质量浓度为 5 mg·L^{-1}. 水处理公司出水中金属离子可以达到《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值》(DB 21/1072-2007)中标准,但氮、磷尚不能达到 DB 21/1072-2007 中的标准,主要是由于废水处理工艺对氮、磷的去除效果不好. 煤场水泥厂对环境的污染主要是粉尘对空气的污染. 结合本研究的数据可以得出结论:染料厂附近水体的 SRP 质量浓度要高于电镀厂附近水体. 河流水利枢纽处的 SRP 质量浓度也比较高,可能是由于航运将上游水体的营养物质带入或是航运船只本身排入水中的生活废弃物所致. 煤场水泥厂附近水体的 SRP 质量浓度较染料厂、电镀厂和水利枢纽处水体低.

受生活污水影响的 3 条河流在平水期和丰水期从上游到下游水体 SRP 质量浓度呈明显的递减趋势,这类水体的自净能力好再一次得到了证实. 枯水期第四条河流胥江的中游(12 号点)水体 SRP 质量浓度为 0.327 mg·L^{-1},下游(13 号点,在胥江入太湖口的胥口湾水利枢纽处)水体 SRP 质量浓度为 0.323 mg·L^{-1}. 对照前面分析的直湖港水利枢纽和望虞河水利枢纽处的 SRP 质量浓度,可知水利枢纽处水体中 SRP 质量浓度高在很大程度上是由航运输移导致. 第五条河流的上游(14 号点,东山镇)枯水期 SRP 质量浓度为 0.105 mg·L^{-1},占总磷的 43.7%. 第六条河流的上游(17 号点,吴江市老生活区)枯水期 SRP 质量浓度为 0.296 mg·L^{-1},占总磷的 60%,占溶解性总磷的 74%. 这与刘志刚等[26]、苏少坤[27]的研究结论一致,即"生活污水中的磷主要以磷酸盐形式存在". 徐伟勇[28]对太湖流域某城镇污水处理厂尾水的形态磷分析结果也得出总体规律为:溶解性总磷酸盐含量 > 溶解性正磷酸盐含量 > 颗粒态磷含量 > 其他溶解磷含量,且其中溶解性正磷酸盐含量占总磷含量的 76.82%,与本研究结果高度契合. 可见生活污水中磷主要以溶解态磷存在,且溶解态磷中正磷酸盐又是主要形态.

第八条河流的下游(26 号点)在长兴新港桥下,枯水期此处水体 SRP 质量浓度为 0.033 mg·L^{-1},中

游(25 号点)水体中 SRP 质量浓度也为 0.033 mg·L^{-1},这种情况也与前文分析的直湖港水利枢纽、望虞河水利枢纽以及胥口水利枢纽情况一致.再次证明,河流水利枢纽处水体中 SRP 质量浓度高往往是由航运输移其上游物质导致.

将三类河流水体中 SRP 平均质量浓度比较可知,受生活污水影响河流水体的 SRP 质量浓度最高,受农业影响河流水体的 SRP 质量浓度最低,受工业影响河流水体的 SRP 质量浓度居于中间(见图 5).将不同性质河流在入湖处的 SRP 质量浓度比较可知,平水期和丰水期三类河水在向湖泊输入能即刻被藻类利用的磷时,受生活污水影响河流输入的 SRP 质量浓度最低,受工业影响河流输入的 SRP 质量浓度最高(见图 6).这个结果也印证了上文的说法:受生活污水影响河流从上游到下游的自净能力好,受农业影响河流主要以颗粒态磷向湖泊输移,而受工业影响河流水质直接与工业种类相关,对太湖污染严重.

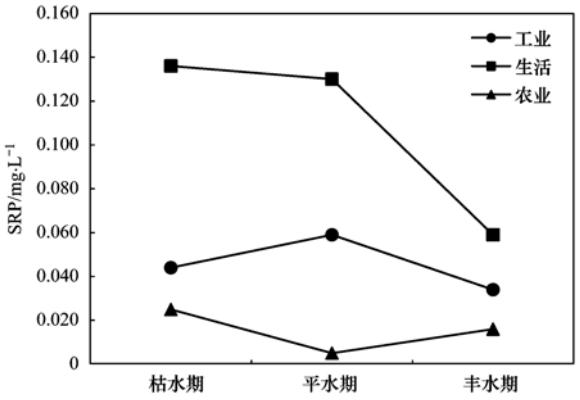

图 5　三类河流丰、平、枯水期 SRP 平均质量浓度比较

Fig. 5　Comparison of SRP's average mass concentration of the rivers during low, average and abundant water periods

2.4　不同性质河流水体 EHP 的时空变化特征

EHP 是指可以被磷酸酶水解为生物可直接利用的磷酸盐的那部分有机磷. 藻类同化作用的磷源主要是磷酸盐,而能够被藻类利用的有机磷源则提供其代谢和生长的需要,如甘油磷酸脂、植酸盐等有机磷. 在 2008 年丰水期对环太湖 32 条河流的研究中发现河流水体中[EHP]/[TP]达到了 46.6%[29],高光在 2003 年 4 月 ~2004 年 10 月在太湖不同类型湖区的研究结果显示湖泊水体中[EHP]/[TP]达到 58.2%[30],可见在研究水体磷形态时,EHP 是很重要的一个部分,它对藻类的生长起到了储备库的作用. 本研究结果显示,受工业影响河流水体中 EHP 质量浓度在枯、平、丰水期的平均

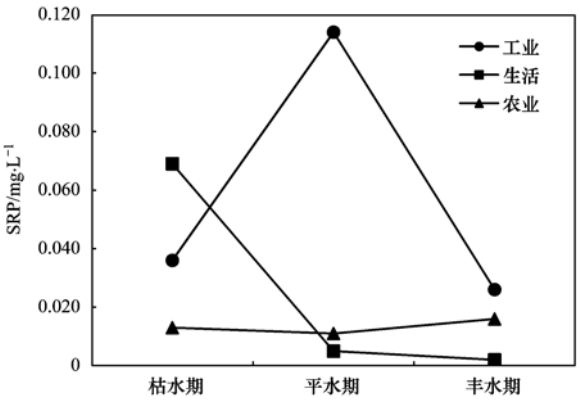

图 6　三类河流入湖处丰、平、枯水期 SRP 质量浓度比较

Fig. 6　Comparison of SRP's mass concentration in the boundary between Lake Taihu and the rivers during low, average and abundant water periods

值分别为 0.029、0.059、0.070 mg·L^{-1}; 受生活影响河流水体中 EHP 质量浓度在枯、平、丰水期平均值分别为 0.024、0.040、0.060 mg·L^{-1}; 受农业影响河流水体中 EHP 质量浓度在枯、平、丰水期平均值分别为 0.025、0.030、0.043 mg·L^{-1}, 受工业影响河流水体的 EHP 高于受生活影响河流水体的 EHP,农业水体的 EHP 质量浓度相对较低. 这些河流水体的 EHP 随枯、平、丰水期逐渐升高,该趋势与 TP、DTP 以及 SRP 随水期的变化趋势正好相反. 将 EHP 与 Chla 作线性相关分析可得枯、平、丰水期两者的相关系数 r 分别为 0.55、0.81 和 0.82. 蓝藻的最适宜生长温度为 25 ~35℃,因此平水期、丰水期是藻类暴发的高峰期,也是藻类利用水体中 SRP 的高峰期. 当水体中 SRP 的含量不足以维持藻类生长时,有机磷及无机多聚磷在酶的作用下会被分解成 SRP,这部分被转化的磷即为 EHP. 可见 EHP 随藻类生物量的增加而升高,与水温间接相关.

将不同性质河流在入湖采样点处的 EHP 质量浓度比较可知,平水期和丰水期三类河水在向湖泊输入储备磷 EHP 时,受生活污水影响河流输入的 EHP 质量浓度最低,受工业影响河流输入的 EHP 质量浓度最高(见图 7).

图 8 是枯、平、丰水期三类河流水体中 EHP 和 SRP 在总磷中所占比例的对比情况,枯水期河流水体中溶解性反应磷所占比例明显高于可酶解磷,平水期除了受农业影响河流外两者在总磷中的比例大致相当,丰水期则可酶解磷所占比例明显高于溶解性反应磷. SRP 是藻类可以直接利用的磷形态,但由于有机磷在酶的作用下可逐渐释放出大量的溶解性

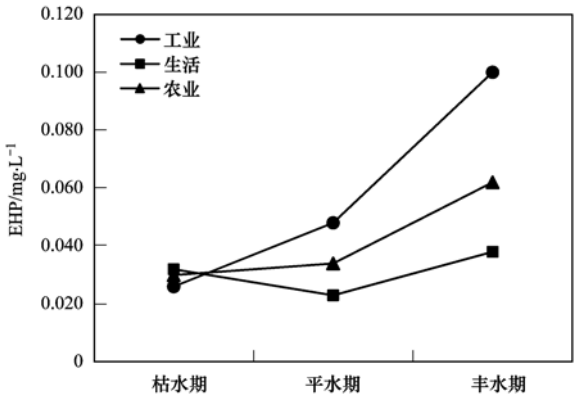

图 7 三类河流入湖处丰、平、枯水期 EHP 质量浓度比较

Fig. 7 Comparison of EHP's mass concentration in the boundary between Lake Taihu and the rivers during low, average and abundant water periods

反应磷,所以仅由磷酸盐的浓度不能预测水华暴发的程度,而应该结合磷酸盐的储备库可酶解磷进行研究. 如果说 SRP 决定水华的发生,那么 EHP 决定水华暴发的规模. 图 8 显示,一年周期内河流水体中可酶解磷和反应性活性磷在总磷中的比例大致相当,它们被藻类所利用的主要区别是时间上的先后顺序.

河流入湖处水体中 SRP 与 EHP 的质量浓度见表 2,数据显示在河湖交接处受工业影响河流有半数水体的 EHP 质量浓度超过了 SRP,受生活影响河流水体中 EHP 质量浓度几乎都比 SRP 高,受农业影响河流中大部分情况也是水体中 EHP 质量浓度大于 SRP. 多数情况下 EHP 质量浓度为 SRP 质量浓度的 20、30 倍,高时能达到 50、60 倍. 磷周转时间的测定结果表明,三类河流水体中 EHP 完全转化为 SRP 的时间大约为:受农业影响类河流需 4.7 d,受生活影响类河流需 6.0 d,受工业影响类河流需 6.9 d. 可以想象在不超过一周的时间内,在合适的条件下,如果可酶解磷这个潜在的磷储备库完全转化为藻类可直接利用磷,势必导致蓝藻水华暴发. 所以降低水体中 EHP 浓度以及破坏有机磷酶解转化的条件或许是控制蓝藻水华暴发的一种方法.

3 结论

(1)入湖河流的 TP、DTP 和 SRP 质量浓度随枯、平、丰水期而呈降低趋势,EHP 质量浓度却随枯、平、丰水期藻类生物量的升高而升高. 作为 SRP 的储备库,EHP 对太湖蓝藻的暴发起关键性作用.

(2)尽管受生活污水影响河流水体中各形态磷的质量浓度都是最高的,但由于这类河流从上游到下游的水体自净能力好,其在入湖处的磷质量浓度是最小的,即对太湖富营养化的影响最小. 受工业废水影响河流在入湖处各形态磷的质量浓度最大,对太湖富营养化的影响最大,因此大力推进太湖流域产业结构的调整和升级,严格执行各工业行业的排

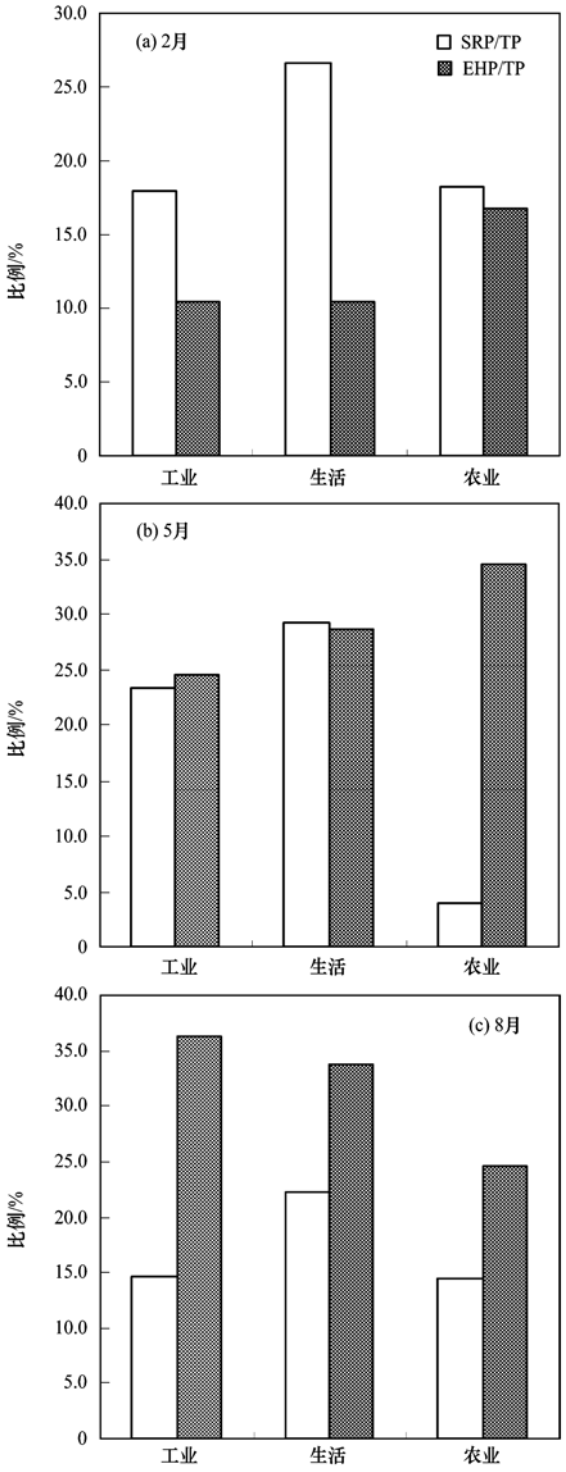

图 8 三类河流水体中 SRP 与 EHP 在总磷中的比例

Fig. 8 SRP/TP and EHP/TP of the rivers during low, average and abundant water periods

表 2　河流入湖处水体中 SRP 与 EHP 质量浓度比较/mg·L^{-1}

Table 2　Comparison of SRP and EHP's mass concentration in the boundary between Lake Taihu and the rivers/mg·L^{-1}

阶段	类型	河流编号								
		一	二	三	四	五	六	七	八	九
枯水期	SRP	0.053	0.041	0.015	0.323	0.014	0.004	0.008	0.033	0.036
	EHP	0.031	0.034	0.014	0.011	0.027	0.057	0.022	0.027	0.040
平水期	SRP	0.070	0.109	0.027	0.001	0.013	0.001	0.001	0.001	0.002
	EHP	0.045	0.062	0.035	0.015	0.025	0.028	0.021	0.059	0.038
丰水期	SRP	0.025	0.010	0.004	0.003	0.029	0.002	0.027	0.020	0.007
	EHP	0.089	0.176	0.034	0.007	0.070	0.038	0.034	0.023	0.187

放标准或许可以缓解太湖的富营养化进程.

(3)受工业影响河流枯水期水体 SRP 的质量浓度表明,染料厂附近水体 SRP 质量浓度高于电镀厂附近水体,河流水利枢纽处水体 SRP 质量浓度高往往是因航运输移其上游物质导致,煤场、水泥厂附近水体 SRP 质量浓度较前几种低.

(4)受生活污水影响的河流水体中磷主要以溶解态存在,而受农业影响河流水体中磷主要以颗粒态存在,是否可以在受农业影响河流的入湖处采取措施以降低颗粒态磷的入湖量尚需进一步地研究.

参考文献:

[1] Qu M Z, Lefebvre D D, Wang Y X, *et al*. Algal blooms: proactive strategy[J]. Science, 2014, **346**(6206): 175-176.

[2] Qin B Q, Li W, Zhu G W, *et al*. Cyanobacterial bloom management through integrated monitoring and forecasting in large shallow eutrophic Lake Taihu (China)[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, **287**: 356-363.

[3] Qin B Q, Gao G, Zhu G W, *et al*. Lake eutrophication and its ecosystem response[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58**(9): 961-970.

[4] 陆桂华, 张建华. 太湖水环境综合治理的现状、问题及对策[J]. 水资源保护, 2014, **30**(2): 67-69, 94.

[5] 发改地区 2684 号. 国家发展改革委等部门关于印发太湖流域水环境综合治理总体方案(2013 年修编)的通知[Z]. 2013.

[6] 许海, 秦伯强, 朱广伟. 太湖不同湖区夏季蓝藻生长的营养盐限制研究[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(12): 2230-2236.

[7] Zieliński P, Jekatierynczuk-Rudczyk E. Comparison of mineral and organic phosphorus forms in regulated and restored section of a small lowland river (NE Poland)[J]. Ecohydrology Hydrobiology, 2015, **15**(3): 125-135.

[8] Trojanowska A A, Izydorczyk K. Phosphorus fractions transformation in sediments before and after cyanobacterial bloom: implications for reduction of eutrophication symptoms in dam reservoir[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2010, **211**(1-4): 287-298.

[9] Li B, Brett M T. The influence of dissolved phosphorus molecular form on recalcitrance and bioavailability[J]. Environmental Pollution, 2013, **182**: 37-44.

[10] Qin C, Liu H Z, Liu L, *et al*. Bioavailability and characterization of dissolved organic nitrogen and dissolved organic phosphorus in wastewater effluents[J]. Science of the Total Environment, 2015, **511**: 47-53.

[11] 张清, 孔明, 唐婉莹, 等. 太湖及主要入湖河流平水期水环境质量评价[J]. 长江流域资源与环境, 2014, **23**(S1): 73-80.

[12] 钟晶晶, 刘茂松, 王玉, 等. 太湖流域河流与湖泊间主要水质指标的空间关联特征[J]. 生态学杂志, 2014, **33**(8): 2176-2182.

[13] 马倩, 田威, 吴朝明. 望虞河引长江水入太湖水体的总磷、总氮分析[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(2): 207-212.

[14] 王强, 卢少勇, 黄国忠, 等. 14 条环太湖河流水质与茭草、水花生氮磷含量[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(6): 1189-1194.

[15] 何锡君, 王贝, 刘光裕, 等. 2010-2011 水文年浙江省环太湖河道水质水量及污染物通量[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(5): 658-662.

[16] 张红举, 甘升伟, 袁洪州, 等. 环太湖河流入湖水质控制浓度分析[J]. 水资源保护, 2012, **28**(6): 8-11, 54.

[17] 燕姝雯, 余辉, 张璐璐, 等. 2009 年环太湖入出湖河流水量及污染负荷通量[J]. 湖泊科学, 2011, **23**(6): 855-862.

[18] 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, 203.

[19] Chróst R J, Siuda W, Albrecht D, *et al*. A method for determining enzymatically hydrolyzable phosphate (EHP) in natural waters[J]. Limnology and Oceanography, 1986, **31**(3): 662-667.

[20] Berman T. Alkaline phosphatases and phosphorus availability in Lake Kinneret[J]. Limnology and Oceanography, 1970, **15**(5): 663-674.

[21] 梅青, 冯大蔚. 引江济太对保障太湖流域供水安全的作用分析[EB/OL]. http://www.tba.gov.cn/tba/content/YJJT/zyzt/jsyjzt/0000000000007540.html, 2015-07-17.

[22] 李高明. 湖南农业面源污染中氮、磷损失的影响因素研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2009. 32-39.

[23] 苏静君. 加拿大东部农田流域颗粒态磷的输出及藻类有效性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011. 19-36.

[24] 邓瑞. 含磷印染废水脱色除磷实验探究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014. 1-9.

[25] 李婷, 董文艺, 王宏杰, 等. 电镀废水中共存阳离子对 Fe

(Ⅱ)/O_2 去除无机磷的影响[J]. 化工学报, 2013, **64**(10): 3782-3789.
[26] 刘志刚, 虞静静, 李轶, 等. 城市污水处理厂磷的形态变化规律研究[J]. 给水排水, 2011, **37**(2): 50-53.
[27] 苏少坤. 生活污水厂中磷的形态变化规律探讨[J/OL]. 城市建设理论研究(电子版), http://d. wanfangdata. com. cn/Periodical/csjsllyj2012041432, 2012-04-14.
[28] 徐伟勇. 城市污水处理厂尾水中磷的形态分析及除磷研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009. 23-26.
[29] 高永霞, 蔡琳琳, 赵林林, 等. 丰水期环太湖河流与湖区水质比较研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(10): 2840-2848.
[30] 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: 地球科学, 2005, **35**(增刊Ⅱ): 157-165.

《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统的公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址:http://www. hjkx. ac. cn). 该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能,欢迎广大作者、读者和审稿专家使用. 目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行. 作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面上给出的提示投稿即可. 如果您在使用过程中有问题,请及时与我刊编辑部联系.

邮政地址:北京市海淀区双清路 18 号《环境科学》编辑部
邮　　编:100085
电　　话:010-62941102,010-62849343
传　　真:010-62849343
E-mail:hjkx@ rcees. ac. cn
网　　址:www. hjkx. ac. cn

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 37 No. 4

Apr. 15, 2016

CONTENTS

Chemical Characteristics of Particulate Matters and Trajectory Influence on Air Quality in Shanghai During the Heavy Haze Episode in December, 2013 ····· ZHOU Min, QIAO Li-ping, ZHU Shu-hui, *et al.* (1179)

Analysis of Single Particle Aging and Mixing State at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer ····· HUANG Zi-long, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, *et al.* (1188)

Investigation of Aerosol Mixed State and CCN Activity in Nanjing ····· ZHU Lin, MA Yan, ZHENG Jun, *et al.* (1199)

Characteristics of Number Concentration Size Distributions of Aerosols Under Different Weather Processes in Beijing ····· SU Jie, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (1208)

Temporal and Spatial Distribution Characteristics of $PM_{2.5}$ in Chongqing Urban Areas ····· LIU Yong-lin, SUN Qi-min, ZHONG Ming-yang, *et al.* (1219)

Comparison of Monitoring Methods of Organic Carbon and Element Carbon in Atmospheric Fine Particles ····· PANG Bo, JI Dong-sheng, LIU Zi-rui, *et al.* (1230)

Residue Characteristics of Perfluorinated Compounds in the Atmosphere of Shenzhen ····· HE Peng-fei, ZHANG Hong, LI Jing, *et al.* (1240)

Monitoring Atmospheric CO_2 and $\delta^{13}C(CO_2)$ Background Levels at Shangdianzi Station in Beijing, China ····· XIA Ling-jun, ZHOU Ling-xi, LIU Li-xin, *et al.* (1248)

Concentration and Size Distribution of Bioaerosols in Indoor Environment of University Dormitory During the Plum Rain Period ····· LIU Ting, LI Lu, ZHANG Jia-quan, *et al.* (1256)

Air Microbial Pollution and Health Risk of Urban Black Odorous Water ····· LIU Jian-fu, CHEN Jing-xiong, GU Shi-you (1264)

Particle Size Distribution, Seasonal Variation Characteristics and Human Exposure Assessment of Heavy Metals in Typical Settled Dust from Beijing ····· CAO Zhi-guo, YU Gang, LÜ Xiang-ying, *et al.* (1272)

Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dust of Xi'an City, China ····· WANG Li, WANG Li-jun, SHI Xing-min, *et al.* (1279)

Toluene, Benzene and Acetone Adsorption by Activated Carbon Coated with PDMS ····· LIU Han-bing, JIANG Xin, WANG Xin, *et al.* (1287)

Distribution Characteristics, Sources and Pollution Assessment of Trace Elements in Surficial Sediments of the Coastal Wetlands, Northeastern Hainan Island ····· ZHANG Wei-kun, GAN Hua-yang, BI Xiang-yang, *et al.* (1295)

Heavy Metals Accumulation in the Caofeidian Reclamation Soils: Indicated by Soil Magnetic Susceptibility ····· XUE Yong, ZHOU Qian, LI Yuan, *et al.* (1306)

Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan ····· LI Guang, ZHANG Xin-ping, XU You-peng, *et al.* (1313)

GIS Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province ····· LI Ying-jie, ZHANG Lie-yu, WU Yi-wen, *et al.* (1321)

Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City ····· LIU Xiao-hong, SI You-bin, GUO Zi-wei, *et al.* (1330)

Seasonal Stratification and the Response of Water Quality of a Temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China ····· ZENG Ming-zheng, HUANG Ting-lin, QIU Xiao-peng, *et al.* (1337)

Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River, Xinjiang ····· WEI Hong, WU Jin-kui, SHEN Yong-ping, *et al.* (1345)

Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan ····· FENG Jia, GUO Yu-ning, WANG Fei, *et al.* (1353)

Distribution Characteristics of Nitrifiers and Denitrifiers in the River Sediments of Tongling City ····· CHENG Jian-hua, DOU Zhi-yong, SUN Qing-ye (1362)

Contribution of Base Flow to Total Nitrogen Loading in Subtropical Agricultural Catchments ····· MA Qiu-mei, LI Wei, WANG Yi, *et al.* (1371)

Characteristics and Transport Patterns of Ammonia, Nitrites, Nitrates and Inorganic Nitrogen Flux at Epikarst Springs and a Subterranean Stream in Nanshan, Chongqing ····· ZHANG Yuan-zhu, HE Qiu-fang, JIANG Yong-jun, *et al.* (1379)

Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China ····· QIU Zu-kai, HU Xiao-zhen, YAO Cheng, *et al.* (1389)

Effect of *Elodea nuttallii*-immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay ····· HAN Hua-yang, LI Zheng-kui, WANG Hao, *et al.* (1397)

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Different Forms of Phosphorus in Three Sorts of Rivers around Lake Taihu ····· GAO Yong-xia, SONG Yu-zhi, YU Jiang-hua, *et al.* (1404)

Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae ····· CHEN Jun, LI Yong, LI Da-peng, *et al.* (1413)

Impacts of Sediment Disturbance on the Distribution of Suspended Particle Size and Phosphorus ····· GUO Jun-rui, LI Da-peng, LIU Yan-jian (1422)

Effect of Zirconium Modified Kaolin-Based Cap on Migration and Transformation of Phosphorus Between Sediment and Overlying Water ····· ZHANG Zhe, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, *et al.* (1427)

Toxicity of 4-Chlorophenol Solution Under Electrochemical Reduction-oxidation Process ····· WANG Yan, SHI Qin, WANG Hui, *et al.* (1437)

Removal and Recycle of Phosphor from Water Using Magnetic Core/Shell Structured $Fe_3O_4@SiO_2$ Nanoparticles Functionalized with Hydrous Aluminum Oxide ····· LAI Li, XIE Qiang, FANG Wen-kan, *et al.* (1444)

Occurrence and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Typical Wastewater Treatment Plants in Beijing ····· QIAO Meng, QI Wei-xiao, ZHAO Xu, *et al.* (1451)

Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants ····· NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, *et al.* (1460)

Feasibility and Economic Analysis of Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine ····· LI Xiang, ZHU Liang, HUANG Yong, *et al.* (1467)

Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor ····· WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, *et al.* (1472)

Performance Recoverability of Denitrifying Granular Sludge Under the Stressing Effect of Nanoscale Zero-valent Iron ····· WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, SHEN Yao-liang, *et al.* (1478)

Effect of Low-concentration Ciprofloxacin on the Nitrification and Nitrifying Microorganisms of Biofilms in Biological Aerated Filter ····· HE Shi, GU Chao-chao, WEI Xin, *et al.* (1485)

Optimization Study on the Nitrogen and Phosphorus Removal of Modified Two-sludge System Under the Condition of Low Carbon Source ····· YANG Wei-qiang, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, *et al.* (1492)

Effects of Short-time Conservation Tillage Managements on Greenhouse Gases Emissions from Soybean-Winter Wheat Rotation System ····· XIE Yan, CHEN Xi, HU Zheng-hua, *et al.* (1499)

Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppec ····· CUI Hai, ZHANG Ya-hong (1507)

Correlation Among Soil Organic Carbon, Soil Inorganic Carbon and the Environmental Factors in a Typical Oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin ····· GONG Lu, ZHU Mei-ling, LIU Zeng-yuan, *et al.* (1516)

Effects of Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Speciation of Pb in Purple Soil and Soil Solution ····· LIU Jiang, JIANG Tao, HUANG Rong, *et al.* (1523)

Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils with *Iris pseudacorus* L. and the Metabolic Analysis in Roots ····· WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1531)

Oxidation Process of Dissolvable Sulfide by Manganite and Its Influencing Factors ····· LUO Yao, LI Shan, TAN Wen-feng, *et al.* (1539)

Screening and Enzyme Production Characteristics of Thermophilic Cellulase-producing Strains ····· FENG Hong-mei, QIN Yong-sheng, LI Xiao-fan, *et al.* (1546)

Development of Determination Method of Fluoroquinolone Antibiotics in Sludge Based on Solid Phase Extraction and HPLC-Fluorescence Detection Analysis ····· DAI Xiao-hu, XUE Yong-gang, LIU Hua-jie, *et al.* (1553)

Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Feedlot Livestock ····· JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Zi-ying, *et al.* (1562)

Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of *Vicia-faba* and Garlic ····· WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, *et al.* (1568)

Environmental Behaviors and Ecotoxicology of the Emerging Contaminants Polyhalogenated Carbazoles ····· LIN Kun-de, CHEN Yan-qiu, YUAN Dong-xing (1576)

Classification of Priority Area for Soil Environmental Protection Around Water Sources: Method Proposed and Case Demonstration ····· LI Lei, WANG Tie-yu, WANG Xiao-jun, *et al.* (1584)

《环境科学》第 6 届编辑委员会

主　编：欧阳自远

副主编：赵景柱　郝吉明　田　刚

编　委：（按姓氏笔画排序）

万国江　王华聪　王凯军　王绪绪　田　刚　田　静　史培军

朱永官　刘志培　刘　毅　汤鸿霄　孟　伟　周宗灿　林金明

欧阳自远　赵景柱　姜　林　郝郑平　郝吉明　聂永丰　黄　霞

黄　耀　鲍　强　潘　纲　潘　涛　魏复盛

环 境 科 学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976 年 8 月创刊）

2016 年 4 月 15 日　第 37 卷　第 4 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 37　No. 4　Apr. 15, 2016

主　　管	中国科学院	**Superintended** by	Chinese Academy of Sciences
主　　办	中国科学院生态环境研究中心	**Sponsored** by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协　　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	**Co-Sponsored** by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　　编	欧 阳 自 远	**Editor-in -Chief**	OUYANG Zi-yuan
编　　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	**Edited** by	The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE） P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel：010-62941102, 010-62849343; Fax：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出　　版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717	**Published** by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	**Printed** by	Beijing Bei Lin Printing House
发　　行	科 学 出 版 社 电话：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com	**Distributed** by	Science Press Tel：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com
订　购　处	全国各地邮电局	**Domestic**	All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 （北京 399 信箱）	**Foreign**	China International Book Trading Corporation（Guoji Shudian）, P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN 0250-3301 / CN 11-1895/X　　国内邮发代号：2-821

国 内 定 价：120.00 元　　国外发行代号：M 205

国 内 外 公 开 发 行