

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第7期

Vol.35 No.7

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

区域污染对本底地区气溶胶光学特性及辐射强迫影响的地基和卫星遥感观测研究 张小玲, 夏祥鳌, 车慧正, 汤洁, 唐宜西, 孟伟, 董璠 (2439)

北京上甸子区域大气本底站甲基氯仿在线观测研究 姚波, 周凌晔, 刘钊, 张根, 夏玲君 (2449)

浙江临安大气本底站 CO 浓度及变化特征 方双喜, 周凌晔, 栾天, 马千里, 王红阳 (2454)

南京北郊夏季大气颗粒物中有机碳和元素碳的污染特征 段卿, 安俊琳, 王红磊, 缪青 (2460)

西安冬季非灰霾天与灰霾天 PM_{2.5} 中水溶性有机氮污染特征比较 程玉婷, 王格慧, 孙涛, 成春雷, 孟静静, 任艳芹, 李建军 (2468)

沙尘天气对兰州市 PM₁₀ 中主要水溶性离子的影响 王芳, 陈强, 张文煜, 郭勇涛, 赵连彪 (2477)

上海大气降水中细菌气溶胶的多样性研究 梁宗敏, 杜睿, 杜鹏瑞, 王亚玲, 李梓铭 (2483)

重庆主城区降水中重金属的分布特征及其沉降量 彭玉龙, 王永敏, 覃蔡清, 王定勇 (2490)

宁波人为源 VOC 清单及重点工业行业贡献分析 李璇, 王雪松, 刘中, 吴梁, 翁燕波, 胡杰 (2497)

包装印刷行业挥发性有机物控制技术评估与筛选 王海林, 王俊慧, 祝春蕾, 聂磊, 郝郑平 (2503)

氨水混合吸收剂脱除 CO₂ 实验研究 夏芝香, 项群扬, 周旭萍, 方梦祥 (2508)

焦炉烟气中二噁英类物质排放水平研究 孙鹏程, 李晓璐, 成钢, 陆勇, 吴昌敏, 罗锦洪 (2515)

2012 年夏季长江口颗粒有机碳、氮分布特征及其来源 邢建伟, 钱薇微, 绳秀珍 (2520)

千岛湖水体悬浮颗粒物吸收特性及其典型季节差异 王明珠, 张运林, 施坤, 高贲, 刘刚, 蒋浩 (2528)

千岛湖溶解氧的动态分布特征及其影响因素分析 殷燕, 吴志旭, 刘明亮, 何剑波, 虞左明 (2539)

太湖夏季水体中尿素的来源探析 韩晓霞, 朱广伟, 许海, Steven W. Wilhelm, 秦伯强, 李兆富 (2547)

鄱阳湖阻隔湖泊浮游植物群落结构演化特征: 以军山湖为例 刘霞, 钱奎梅, 谭国良, 邢久生, 李梅, 陈宇炜 (2557)

不同营养湖泊沉积物中²¹⁰Pb_{ex} 和营养盐垂向分布特征及相关性分析 王小雷, 杨浩, 顾祝军, 张明礼 (2565)

地下水硝酸盐污染抽出处理优化方法模拟研究 姜烈, 何江涛, 姜永海, 刘菲 (2572)

预压力混凝沉淀除藻工艺中 DOC 变化规律研究 陈雯婧, 丛海兵, 徐亚军, 王巍, 蒋新跃, 刘玉娇 (2579)

类水滑石 Mg/Zn/Al 焙烧产物对高氯酸盐的吸附 王红宇, 刘艳 (2585)

粉煤灰对阴离子水溶性混合染料的吸附动力学 孙德帅, 郑强强, 张晓东, 方龙 (2590)

SDS 对两性修饰膨润土吸附 Cd²⁺ 的影响 王建涛, 孟昭福, 杨亚提, 杨淑英, 李彬, 马麟莉, 许绍娥 (2596)

老化的生物质炭性质变化及对非吸持的影响 唐伟, 郭悦, 吴景贵, 黄兆琴, 代静玉 (2604)

TiO₂ 光催化降解 PFOA 的反应动力学及机制研究 李明洁, 喻泽斌, 陈颖, 王莉, 刘晴, 刘钰鑫, 何丽丽 (2612)

荧光猝灭法研究洛克沙肺与腐殖酸的相互作用 朱江鹏, 梅婷, 彭云, 葛思怡, 李时银, 王国祥 (2620)

改性活性炭纤维电芬顿降解苯酚废水性能研究 马楠, 田耀金, 杨广平, 谢鑫源 (2627)

催化铁强化低碳废水生物反硝化过程的探讨 王梦月, 马鲁梅 (2633)

聚丁二酸丁二醇酯(PBS)为反硝化固体碳源的脱氮特性研究 刘佳, 沈志强, 周岳溪, 曹蓉, 李元志 (2639)

某造纸厂废水中二噁英含量及其电子束辐照降解 青亮, 黄锦琼, 余小巍, 张素坤, 杨艳艳, 任明忠, 温玉龙 (2645)

嘉兴市规模化养猪场沼液水质调查研究 卫丹, 万梅, 刘锐, 王根荣, 张讯达, 文晓刚, 赵远, 陈吕军 (2650)

提高污泥碱性发酵挥发酸积累的新方法 李晓玲, 彭永臻, 柴同志, 朱建平, 王淑莹 (2658)

滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 的分布及生态风险评价 郭雪, 毕春娟, 陈振楼, 王薛平 (2664)

舟山近海水体和沉积物中多环芳烃分布特征 江敏, Le Huy Tuan, 梅卫平, 阮慧慧, 吴昊 (2672)

青藏高原湖泊流域土壤与牧草中多环芳烃和有机氯农药的污染特征与来源解析 谢婷, 张淑娟, 杨瑞强 (2680)

福建鹭峰山脉土壤有机氯农药分布特征及健康风险评估 黄焕芳, 祁士华, 瞿程凯, 李绘, 陈文文, 张莉, 胡婷, 石燎 (2691)

不同功能区表层土壤中全氟化合物污染指纹及其来源解析 张鸿, 赵亮, 何龙, 柴之芳, 沈金灿, 杨波 (2698)

桑沟湾溶解态无机砷的分布、季节变化及影响因素 李磊, 任景玲, 刘素美, 蒋增杰, 杜金洲, 方建光 (2705)

引黄灌区不同尺度农田土壤重金属空间分布及污染评价: 以银川市兴庆区为例 王幼奇, 白一茹, 王建宇 (2714)

三峡水库消落区土壤、植物汞释放及其在斑马鱼体的富集特征 李楚娴, 孙荣国, 王定勇, 赵铮, 张金洋, 马明, 张成 (2721)

广东典型海水养殖区沉积物及鱼体中磺胺类药物的残留及其对人体的健康风险评估 何秀婷, 王奇, 聂湘平, 杨永涛, 程章 (2728)

青岛市区大气降尘重金属对人体健康风险的评价 张春荣, 吴正龙, 姚春卉, 高宗军 (2736)

焦炉排放多环芳烃与人体健康风险评估研究 伯鑫, 王刚, 温柔, 赵春丽, 吴铁, 李时蓓 (2742)

Cd、Cu 和 Pb 复合污染对蚯蚓抗氧化酶活性的影响 王辉, 谢鑫源 (2748)

3 种氯酚对嗜热四膜虫的毒性效应 李雅洁, 崔益斌, 蒋丽娟, 窦静, 李梅 (2755)

施硅方式对稻米镉阻隔潜力研究 陈喆, 铁柏清, 雷鸣, 刘孝利, 叶长城, 罗梅梅, 毛懿德 (2762)

保护性耕作对后茬冬小麦土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响 潘莹, 胡正华, 吴杨周, 孙银银, 盛露, 陈书涛, 肖启涛 (2771)

渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系 贾曼莉, 郭宏, 李会科 (2777)

蒸汽-空气混合注射修复 TCE 污染的二维土箱实验研究 王宁, 彭胜, 陈家军 (2785)

铜离子对双室微生物燃料电池电能输出的影响研究 牟姝君, 李秀芬, 任月萍, 王新华 (2791)

连续流强制通风槽式污泥堆肥工艺的温室气体和氨气排放特征 赵晨阳, 魏源送, 葛振, 钟佳, 才兴, 张媛丽, 李洪枚 (2798)

冬季猪粪固体堆放过程中 NH₃、N₂O 和 NO 排放特征研究 丁钢强, 韩圣慧, 袁玉玲, 罗琳, 王立刚, 李虎, 李萍 (2807)

填埋场渗滤液腐殖酸随填埋龄的变化特性及模型研究 黄友福, 许心雅, 范良鑫, 方艺民 (2816)

渗滤液反渗透浓缩液回灌出水水质变化规律的研究 王东梅, 刘丹, 刘庆梅, 陶丽霞, 刘颖 (2822)

中国铅流变化的定量分析 马兰, 毛建素 (2829)

半短程亚硝化与厌氧氨氧化联合脱氮工艺微生物特征研究进展 赵志瑞, 侯彦林 (2834)

《环境科学》征稿简则(2679) 《环境科学》征订启事(2735) 信息(2476, 2556, 2713, 2770)

太湖夏季水体中尿素的来源探析

韩晓霞^{1,2}, 朱广伟^{1*}, 许海¹, Steven W. Wilhelm³, 秦伯强¹, 李兆富²

(1. 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; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 3. 田纳西大学微生物系, 诺克斯维尔 37996, 美国)

摘要: 为研究尿素氮在太湖生态系统中的作用, 于夏季采集湖体及环湖河道水样进行尿素及不同形态氮素含量分析. 通过河道及湖体的 82 个调查点位生态指标的同步分析, 得出以下结果: ①太湖尿素氮含量变化范围为 0.011 ~ 0.161 mg·L⁻¹, 总体呈现出西北高, 东南低的变化趋势, 与流域主要污染源分布有关; ②太湖水体溶解性氮以无机氮库为主, 铵硝比为 5:1, 其中尿素氮占总氮、溶解性总氮、溶解性有机氮和生物可利用氮的平均质量分数分别为 2.28%、5.91%、15.86%、6.22%, 生态作用不容忽视; ③环湖河道的尿素氮含量比湖体高出一倍, 出湖河道尿素氮含量还略高于入湖河道; ④太湖尿素氮与其他形式氮之间可能存在彼此转换关系, 尿素氮含量与高锰酸盐指数、不同形态氮含量均呈显著正相关关系, 与溶解氧呈显著负相关关系; 湖体的尿素氮含量与叶绿素 a 含量呈弱正相关, 与底栖生物、浮游动物种群的空间分布有密切联系. 本研究表明太湖水体中尿素氮可能是湖体有机、无机态氮转化的桥梁, 是湖体自身氮素循环快慢的标志, 氮的循环速率控制尿素氮含量, 高氮(特别是有机态氮)含量及低溶解氧条件是尿素升高的前提. 太湖湖体尿素含量受外源输入和内源转化的双重影响.

关键词: 太湖; 尿素; 氮循环; 空间分布; 入湖河道

中图分类号: X131.2; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)07-2547-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.07.016

Source Analysis of Urea-N in Lake Taihu During Summer

HAN Xiao-xia^{1,2}, ZHU Guang-wei¹, XU Hai¹, Steven W. Wilhelm³, QIN Bo-qiang¹, LI Zhao-fu²

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. Department of Microbiology, The University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, United States)

Abstract: To study the effect of urea nitrogen on the ecosystem of Lake Taihu, we conducted urea and various nitrogen analysis for the water samples collected from the lake and surrounding rivers during summer. The ecological index analysis of 82 sites in rivers and lake yielded the following results: ① The urea nitrogen contents in Taihu ranged from 0.011 to 0.161 mg·L⁻¹, which was high in the northwest and low in the southeast, related to the main pollution sources distribution of its drainage basin. ② The dissolved nitrogen was dominated by inorganic nitrogen and the ratio between ammonia nitrogen and nitrate nitrogen was 5:1. The average percentage of urea nitrogen in total nitrogen, dissolved nitrogen, dissolved organic nitrogen and bioavailable nitrogen was respectively 2.28%, 5.91%, 15.86%, and 6.22%, which showed a significant ecological function in Taihu. ③ Urea nitrogen concentration in river was more than twice that in lake, and the lake river concentration was slightly higher than the river into the lake. ④ In Taihu, there was a transformation relationship between urea nitrogen and the nitrogen in other forms. It showed that urea nitrogen had a significant positive correlation with permanganate index and the other forms of nitrogen, and a significant negative correlation with dissolved oxygen. In addition, urea nitrogen was weakly and positively correlated with chlorophyll a, while closely related to the spatial distribution of benthos and zooplankton species. All the results above showed that urea nitrogen was the bridge of organic and inorganic nitrogen transformation, and was the sign of nitrogen cycle of Lake Taihu, which was controlled by the circulating rate. High nitrogen content (especially the organic nitrogen) and low dissolved oxygen content were the key contributors to the increased urea nitrogen content. In Taihu, the urea nitrogen content was affected by both exogenous input and endogenous release.

Key words: Lake Taihu; urea nitrogen; nitrogen cycle; spatial distribution; input rivers

尿素普遍存在于环境中且具有广泛的用途, 可用于医学、农业(肥料、除草剂、杀虫剂)、工业、商业、养殖业等多个领域. 尿素作为肥料比硝铵氮肥稳定、易贮存, 且使用形式多样, 颗粒尿素的生产使其应用更加广泛. 尿素含氮量约为 46.67%, 是固体氮肥中含氮量最高的, 应用于几乎所有农作物, 很受大众欢迎^[1]. 据统计, 75% 的尿素被用来为了粮食生产和高效农业, 尿素使用量大幅上升, 在过去的

几十年全球尿素作为氮肥和饲料添加剂的使用量增加了 100 多倍; 目前, 尿素占全球氮肥使用量的

收稿日期: 2013-11-21; 修订日期: 2014-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171368, 41230744); 中国科学院南京地理与湖泊研究所“一三五”战略发展规划项目(NIGLAS2012135002); 美国自然科学基金项目(NSF Award# 1230543, 1240870)

作者简介: 韩晓霞(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水体富营养化控制, E-mail: hxx1129@126.com

* 通讯联系人, E-mail: gwzhu@niglas.ac.cn

50%, 预计到 2020 年将增加到 70%, 并呈持续增长趋势^[1,2]. 统计表明中国和印度的尿素使用量约占全球使用量的 50%^[1]. 中国是农业大国, 化肥使用量平均每年以 21% 的速度递增^[3,4], 其中农业尿素使用量和普及率都相当高, 远超过硝铵氮肥, 2012 年全国尿素产量达 3 003.8 万 t^[5].

众所周知, 水质恶化与氮污染密切相关. 随着城市化进程的加快, 工农业废水的大量排放, 特别是农业施用的化肥和农药已成为水体的重要污染源. 肥料、农药的大量施用是引起农业面源污染的重要原因^[6,7]. 一般认为, 施入土壤中的尿素将会很快硝化或转化为氨(水中氮素的主要来源), 但不能排除尿素直接径流入湖对当地水生态系统造成影响; 尿素在转化前为分子态, 不能被土壤吸附, 易随水流失, 特别是脲酶抑制剂的使用, 延迟了尿素水解时间, 从而增加了尿素径流的可能性^[1]. 此外, 生活废水也是重要的氮污染源, 且氮素主要以尿素形式存在^[8]. 大气干湿沉降也是尿素进入水体的一种途径^[2]. 当然, 湖体尿素含量还受内源因素的影响, 水生动物的排泄物、藻类降解、有机氮的矿化分解(浮游植物和细菌)都能产生尿素^[1,9,10]. 已有研究表明尿素具有高生物利用性^[1], 尿素浓度大于 $1 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 即可成为某些浮游植物的重要氮源. 尿素是许多藻类特别是有害藻类优先选择和利用的氮源, 尽管湖水中尿素含量很低, 在总氮中所占比例很小, 但它对溶解性有机氮的相对贡献很大^[11-14]. 此外, 大量研究表明尿素能不同程度地刺激某些藻类的生长^[1,2,15-17], 影响浮游植物生长速率、丰度及群落组成, 甚至在一定条件下能促进藻类释放有毒物质, 研究湖体尿素的生物地球化学作用非常必要.

目前, 国内外有关氮肥具体形态变化特征的研究不多, 对尿素的研究更是稀少, 且对尿素的研究多集中在尿素对浮游植物的影响即尿素的生态效应, 然而对河湖水体尿素的含量变化及其调控机制的研究几乎没有. 本研究选取适合藻类生长的夏季, 通过对太湖及其环湖河道尿素、各形态氮及相关水质的同步调查, 对比分析湖体与环湖河道尿素与各形态氮含量的关系, 并结合湖体生态因子, 探讨太湖尿素的主要来源和影响因素, 以期了解尿素在河湖生态系统中的变化规律及湖泊氮污染控制提供依据.

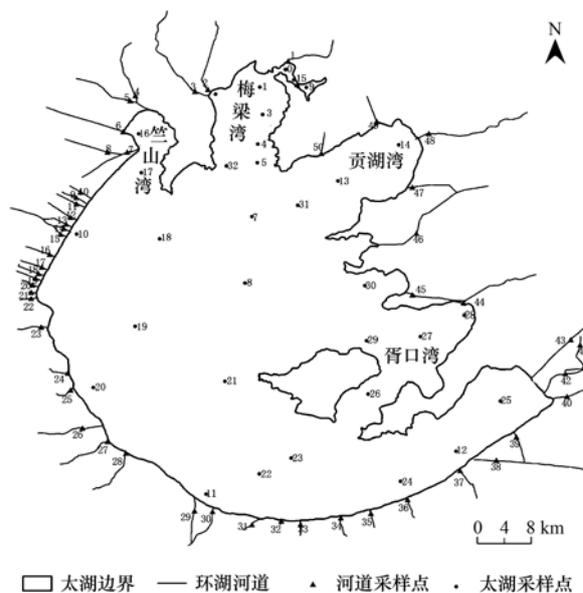
1 材料与方法

1.1 研究区概况

太湖位于长江三角洲南缘, 是中国第三大淡水

湖泊, 水面面积 2 338 km², 平均水深 1.9 m, 最大水深 2.6 m, 是一个大型宽浅湖泊; 湖盆呈浅碟形, 南北平均长 69 km, 东西平均宽 34 km, 湖岸线总长 405 km^[18]. 太湖周边有工业区、居民生活区和农业区分布, 入湖河道是湖泊污染物的主要输送通道. 太湖各湖区中, 西北部湖区水质较差, 东部湖区水质相对较好, 在空间分布上呈现出由北向南、由西向东水质逐渐变好的状态^[19,20].

太湖环湖地区主要包括江苏省的无锡、常州、苏州 3 市及浙江省的湖州、长兴 2 市(县). 与湖体相通的河(港)达 224 条, 湖之北以梁溪河口为界, 湖之南以吴淞为界, 分界点以西为入湖水系, 以东为出湖水系, 其中陈东港入湖水量最大, 而太浦河则是湖水最主要的出湖通道^[21-23]. 本文选择环太湖流量较大的 36 条入湖河道和 14 条出湖河道的河口点位进行研究, 具体入湖河道及点位布设情况如图 1 所示.



1. 梁溪河, 2. 直湖港, 3. 武进港, 4. 太滆运河, 5. 漕桥河, 6. 殷村港, 7. 沙塘港, 8. 烧香港, 9. 茭浜港, 10. 新浜港, 11. 社浜港, 12. 官浜港, 13. 洪巷港, 14. 陈东港, 15. 大浦港, 16. 邗浜港, 17. 黄浜港, 18. 庙浜港, 19. 双桥港, 20. 八房港, 21. 定化港, 22. 乌溪港, 23. 大港口, 24. 长丰港, 25. 夹浦港, 26. 合溪新港, 27. 长兴港, 28. 杨家浦港, 29. 小梅港, 30. 长兜港, 31. 大钱港, 32. 罗淞, 33. 幻淞, 34. 濮淞, 35. 汤淞, 36. 吴淞, 37. 庙港, 38. 太浦河, 39. 钱港, 40. 大浦河, 41. 三船路河, 42. 外苏州河, 43. 瓜泾口, 44. 胥江, 45. 吕浦港, 46. 浒光运河, 47. 金墅港, 48. 望虞河, 49. 蠡河, 50. 壬子港

图 1 环湖河道及湖区采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampled sites in Lake Taihu and rivers around the Lake

1.2 采样点布设

湖体样点为中国科学院太湖湖泊生态系统研究站(TLLER)对太湖生态环境进行常规监测的32个点,监测点位分布见图1。按照空间地理差异及污染程度把湖体划分为梅梁湾(1号、3号、4号、5号、6号、32号、0号、9号、15号)、西北湖区(10号、16号、17号、18号)、西太湖(19号、20号)、南太湖(11号、22号、23号)、东太湖(12号、24号、25号、26号、27号、28号、29号、30号)、贡湖湾(13号、14号、31号)和湖心区(7号、8号、21号)7个湖区。此外,根据河道的入湖口所在的湖区将河道划分为梅梁湾河道(1~3号)、西北太湖河道(4~15号)、西太湖河道(16~28号)、南太湖河道(29~35号)、东太湖河道(36~46号)、贡湖湾河道(47~50号),其中前4条为入湖河道,后2条为出湖河道。

1.3 样品采集与分析

2013年8月中旬,采集湖体与环湖河道共82个样,样品采自表层约50 cm水样。采样的同时,现场用YSI6600型多参数水质监测仪测定其温度(T)、pH值、浊度、溶解氧(DO)等指标、用赛氏黑白盘测定透明度(SD)。水样带回实验室后立即进行总氮(TN)、硝态氮(NO_3^- -N)、亚硝态氮(NO_2^- -N)、铵态氮(NH_4^+ -N)、尿素氮(Urea-N)、

高锰酸盐指数、叶绿素(Chl-a)等生态指标的分析。其中,尿素氮测定方法为室温条件下采用下乙酰一肟-硫脲分光光度法,详见文献[24],其他指标均按照文献[25]进行监测分析。将硝态氮、铵态氮和尿素氮三者的含量相加作为生物可利用氮(BAN)。湖体32个监测点同步的底栖生物和浮游动物数据来自中国科学院太湖湖泊生态系统研究站。

2 结果与分析

2.1 湖体各生态指标空间变化特征

2.1.1 湖体尿素氮的空间分布特征

太湖中尿素氮普遍存在($0.011 \sim 0.128 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),且其含量与水体受污染程度密切相关,富营养化越严重的水体中尿素氮的含量越高。如图2所示,不同湖区采样点平均尿素氮含量西北湖区为 $0.078 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、梅梁湾为 $0.045 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、西太湖为 $0.026 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、湖心为 $0.029 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、南太湖为 $0.022 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、东太湖为 $0.023 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、贡湖湾为 $0.015 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。湖体尿素氮空间差异显著,水体富营养化严重的梅梁湾和西北太湖尿素氮含量明显高于其他湖区,除贡湖湾外的其他湖区的尿素氮含量相差不大。其中西北湖区16号的尿素氮含量最高,10号次之,贡湖湾13号的尿素氮含量最低。

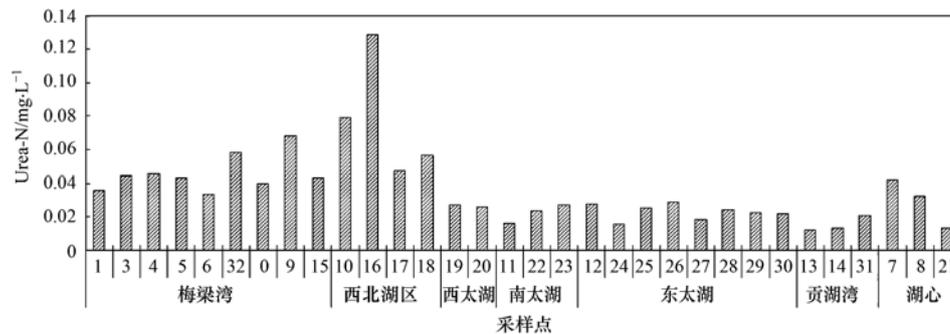


图2 2013年8月太湖不同湖区采样点的尿素氮含量

Fig. 2 Urea-N content of sampled sites in different regions of Lake Taihu in August, 2013

氮是浮游植物生长所必需的营养元素,生物可利用的氮素形态多样。图3是太湖尿素氮含量与叶绿素a含量的空间变化情况。可以看出,虽然二者变化情况不完全同步,但二者的空间变化趋势一致,尿素氮含量高的湖区叶绿素a含量相对也高。

2.1.2 湖体其他形态氮空间分布特征

太湖湖体氮素存在形式多样,不同湖区溶解性氮素与颗粒态氮素比值相近约为2:3,且溶解性氮素均以铵态氮为主,硝态氮次之,溶解性有机氮最

少。溶解性有机氮占溶解性总氮比例最高的为西北太湖,贡湖湾次之,湖心和东太湖最低。全湖溶解性总氮占总氮的百分数(质量分数,下同)为42.37%,其中铵态氮在溶解性总氮所占比例为78.82%,硝态氮在溶解性总氮所占比例为15.84%。全湖平均,总氮含量为 $1.781 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,溶解性总氮含量为 $0.780 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,铵态氮含量为 $0.488 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,硝态氮含量为 $0.111 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,溶解性有机氮为 $0.176 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,不同形态氮的空间的变化不同,如图4所

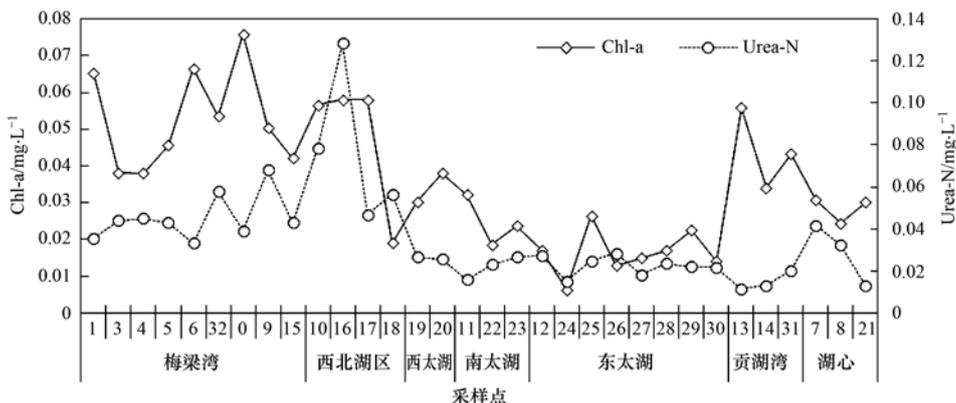


图3 2013年8月太湖不同湖区采样点的Urea-N与Chl-a变化情况

Fig. 3 Concentration variation of Urea-N and Chl-a in different regions of Lake Taihu in August, 2013

示,西北太湖的总氮含量最高达 $3.927 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,西太湖、梅梁湾、贡湖湾次之,然后为湖心和南太湖,东太湖含量最低为 $0.880 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 溶解性总氮的空间变化为西北太湖 > 贡湖湾、西太湖 > 梅梁湾、南太湖 > 东太湖、湖心,变化范围为 $0.407 \sim 1.946 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 铵态氮的空间变化为西北太湖和西太湖含量较高,湖心最低,其他湖区含量相当,变化范围为 $0.367 \sim 0.813 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 硝态氮含量最高的仍为西北太湖,为 $0.191 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,贡湖湾次之为 $0.176 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,东太湖最低为 $0.069 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其他湖区都在 $0.080 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右. 与硝态氮的空间变化一致,溶解性有机氮含量为西北太湖最高,贡湖湾次之,东太湖最低. 亚硝态氮空间变化为西北太湖 > 贡湖湾 > 梅梁湾 > 西太湖 > 南太湖、湖心、东太湖,变化范围为 $0.002 \sim 0.159 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

2.1.3 湖体尿素氮在氮营养上的贡献

如图5所示,太湖中尿素氮占总氮、溶解性总氮的平均比例分别为 2.28%、5.91%,其中梅梁湾尿素氮所占比例最高分别为 2.82%、8.73%,湖心

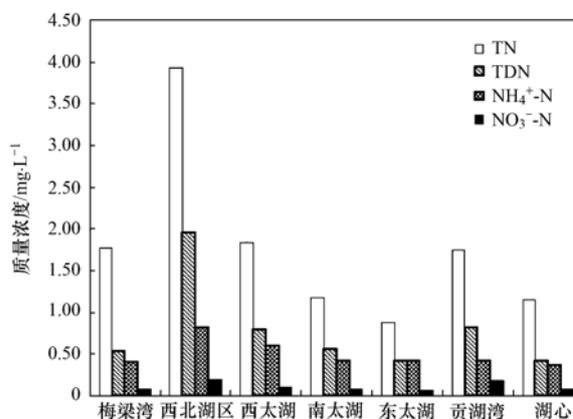


图4 2013年8月太湖不同湖区不同形态氮素的含量

Fig. 4 Spatial distribution of nitrogen in different forms in Lake Taihu in August, 2013

和东太湖次之 ($2.59\% \sim 2.64\%$ 、 $5.48\% \sim 6.92\%$),随后为西北太湖、南太湖和西太湖 ($1.44\% \sim 1.96\%$ 、 $3.46 \sim 4.37\%$),而贡湖湾尿素氮所占比例最低分别为 0.92% 、 3.00% . 略不同于尿素氮在总氮、溶解性总氮中的比值情况,尿素氮

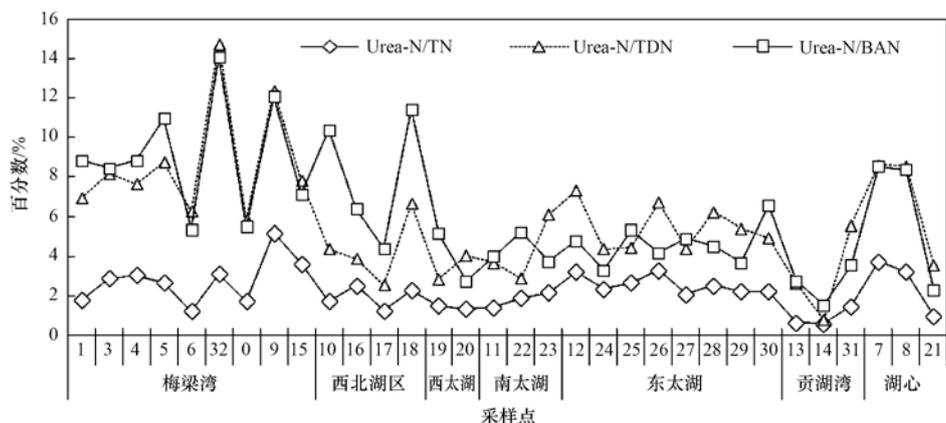


图5 2013年8月太湖不同湖区Urea-N占TN、DTN和BAN的比例

Fig. 5 Percentages of Urea-N in TN, DTN and BAN in different regions of Lake Taihu in August, 2013

在生物可利用氮中所占百分比呈现出梅梁湾 > 西北湖区 > 湖心 > 东太湖、南太湖、西太湖 > 贡湖湾, 其中梅梁湾所占比例最高为 9.02%, 西北湖区次之为 8.15%, 贡湖湾最低为 2.63%。而尿素氮在溶解性有机氮中所占比例表现为, 湖心 > 贡湖湾、西北太湖、南太湖 > 东太湖、西太湖、梅梁湾, 其中湖心区的溶解性有机氮以尿素氮为主, 所占比例高达 90.15%, 其他湖区所占百分比含量只有 10% 左右, 而梅梁湾的尿素氮在溶解性有机氮中所占比例最小, 几乎可以忽略不计。

2.2 环湖河道尿素及各形态氮分布特征

太湖周边河道中均存在丰富的尿素氮。如图 6 和图 7 所示, 不同湖区入湖河道平均尿素氮含量依次为贡湖湾河道 $0.089 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、西北太湖河道 $0.083 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、梅梁湾河道 $0.076 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、东太湖河道 $0.068 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、南太湖河道 $0.054 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、西太湖河道 $0.051 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 东太湖入湖河道 45 号点 (吕浦港) 的尿素氮含量最高为 $0.161 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 同时其 38 号点 (太浦河) 的尿素氮含量最低为 $0.021 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。与一般指标出入湖的变化不同, 尿素氮在湖中的滞留效果并不明显, 出湖河道尿素氮含量为 $0.074 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 高于入湖河道 $0.064 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。环湖河道其他氮素空间变化情况相似, 均表现为入湖河

道含量高于出湖河道, 具体不同形态氮素在不同河道的分布情况又存在不同程度的差别。其中总氮含量最高的为西北太湖河道, 达 $3.405 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 然后为梅梁湾河道 > 西太湖河道、贡湖湾河道 > 东太湖河道, 南太湖河道总氮含量最低, 仅 $0.890 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 溶解性总氮含量为西北太湖河道 > 梅梁湾河道 > 贡湖湾河道 > 东太湖河道 > 西太湖河道 > 南太湖河道, 其中西北太湖河道为 $2.703 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 南太湖河道为 $0.684 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 硝态氮含量为梅梁湾河道最高达 $1.891 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 西北太湖河道次之为 $1.429 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 这 2 条河道的硝态氮含量远高于贡湖湾河道和东太湖河道, 含量最低的仍为南太湖河道, 仅 $0.093 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 铵态氮含量的空间变化不大, 仍为西北太湖河道最高为 $0.827 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 南太湖河道最低为 $0.236 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 溶解性有机氮含量的空间差异最小, 表现为梅梁湾河道最低仅 $0.187 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其他河道含量相当, 变化范围在 $0.356 \sim 0.447 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 其中西太湖河道和西北太湖河道稍高于东太湖河道和南太湖河道。生物可利用氮以溶解性无机氮为主, 其空间变化同硝态氮变化一致, 梅梁湾河道和西北太湖河道含量远高于其他河道, 为 $(2.408 \pm 0.069) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 然后为贡湖湾河道、东太湖河道和西太湖河道, 南太湖河道最低为 $0.382 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

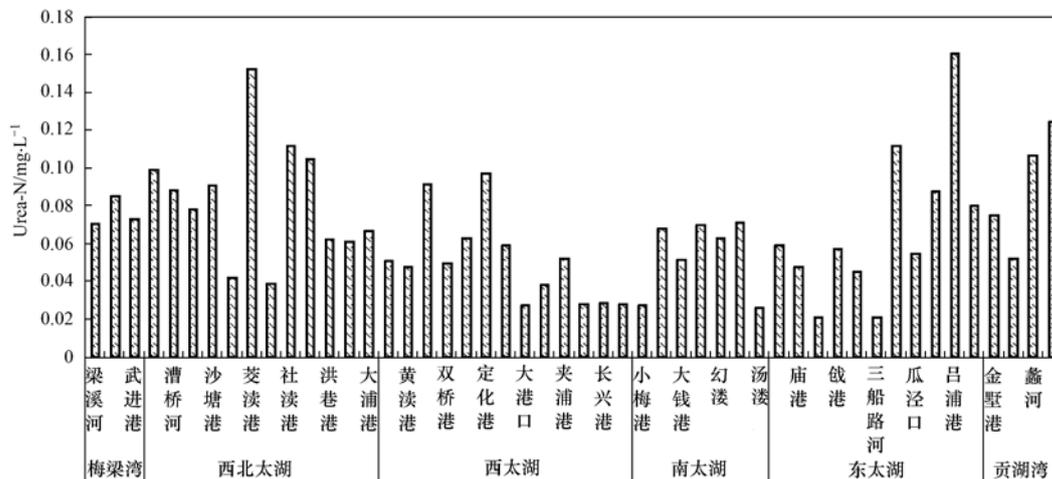


图 6 2013 年 8 月太湖环湖河道的 Urea-N 含量

Fig. 6 Concent of Urea-N in rivers around Lake Taihu in August, 2013

不同湖区对应河道尿素氮占不同类型氮素比例的变化如图 8 所示, 尿素氮占总氮、溶解性总氮和溶解性有机氮的比例分别为 2.343% ~ 7.954%、2.905% ~ 13.252% 和 15.691% ~ 43.113%, 其中南太湖河道尿素氮占总氮和溶解性总氮的比例最高, 西北太湖河道比例最低, 而尿素氮占溶解性有机氮

比例最高的是梅梁湾河道, 最低的是南太湖河道。

2.3 尿素氮与其他生态指标的相关性分析

尿素可为初级生产力提供氮源、碳源, 同时尿素在生态系统中是循环再生的, 是一种可以一直检测到的氮素。将湖体和河道的检测指标一起做相关分析, 如图 9 所示, 尿素氮与不同形态氮素之间均呈显

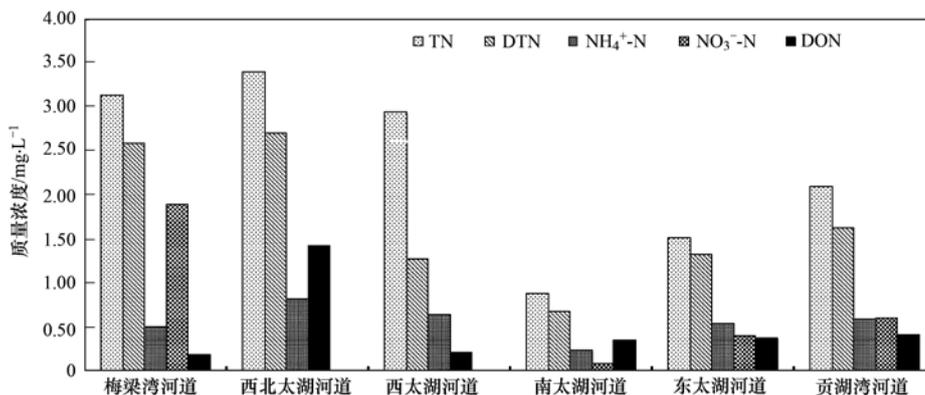


图7 2013年8月不同形态氮素在不同湖区对应河道的平均含量

Fig. 7 Average content of different forms of nitrogen in the rivers corresponding to different regions of Lake Taihu in August, 2013

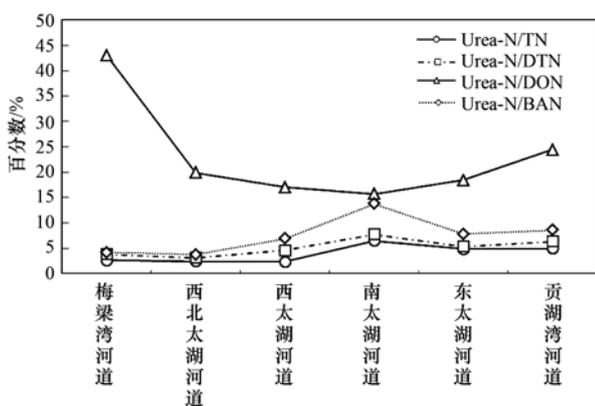


图8 2013年8月不同湖区对应河道 Urea-N 占不同类型氮素的比例

Fig. 8 Percentages of Urea-N in various nitrogen forms in rivers corresponding to different regions of Lake Taihu in August, 2013

著正相关,其中尿素氮与无机态氮较好的相关性表明,有机形态的尿素氮对铵态氮和硝态氮含量均有影响(特别是铵态氮),极有可能是水体无机态氮的另一种重要来源。尿素氮与高锰酸盐指数及除尿素外的其他有机态氮的相关分析表明,有机质和有机态氮素在一定条件下可以转化成尿素。尿素氮与溶解氧之间呈显著负相关关系,这与 Bogard 等^[2]的研究结果相一致,低氧或缺氧环境有利于细菌对有机物的矿化分解,还可以影响微生物对尿素的吸收利用及脲酶对尿素的催化分解作用。另外,对湖体尿素氮与亚硝态氮进行相关分析得出,二者呈显著正相关关系($r = 0.679, P < 0.001$),且相关性要高于其与硝态氮($r = 0.425, P < 0.001$),这说明尿素硝化反硝化作用可能是湖体亚硝态氮的主要来源之一。然而,尿素氮与叶绿素 a 的相关系数很低($r = 0.003, P \gg 0.05$),若只对湖体 32 组数据进行相关分析则得出,湖体尿素氮与叶绿素 a 之间存在显著

正相关关系($y = 4.7393x + 1.3267, r = 0.441, P < 0.05$)。这是由于相对于湖泊来说,河道河流流速较大,不太适宜藻类的生长,因此河道尿素氮含量主要受周边环境及人类活动等多方面的综合影响。

2.4 浮游动物和底栖生物对尿素氮的影响

为进一步探讨尿素与浮游动物和底栖动物的可能关系,根据水体营养水平、底质状况、水草分布及地理位置等将湖体划分为 A、B、C 三区,其中 A 区位于太湖西北部,包含点位 0 号、1 号、3 号、4 号、5 号、6 号、9 号、10 号、15 号、16 号、17 号、32 号,C 区位于太湖东部,包含点位 12 号、22 号、23 号、24 号、25 号、26 号、27 号、28 号、29 号、30 号,其余点位均归为 B 区。

表 1 显示浮游动物和底栖生物与湖体尿素氮含量具有一定一致性,特别是个体较大的枝角类浮游动物和底栖河蚬,它们在 A、B、C 三区的分布与尿素氮含量的分布一致,均为 A 区 > B 区 > C 区。说明浮游动物和底栖生物与尿素氮含量有一定关系,生物的代谢强度决定其尿素分泌的多少,个体较大、蛋白质含量较高水生生物在尿素氮内源上的贡献较大。

3 讨论

3.1 太湖湖体尿素氮的来源分析

尿素的水污染研究始于对海洋赤潮的研究,业已证实尿素是支持赤潮发生的主要氮形态,群落结构组成的改变特别是有害藻类的增加与沿海水域尿素的富集有关。尿素在海洋环境中分布广泛,在开放海域尿素氮浓度一般低于 $0.7 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,占溶解性有机氮的 5%,但在浮游植物吸收利用的氮营养中尿素占 56%,由此可见尿素在生物可利用氮中的

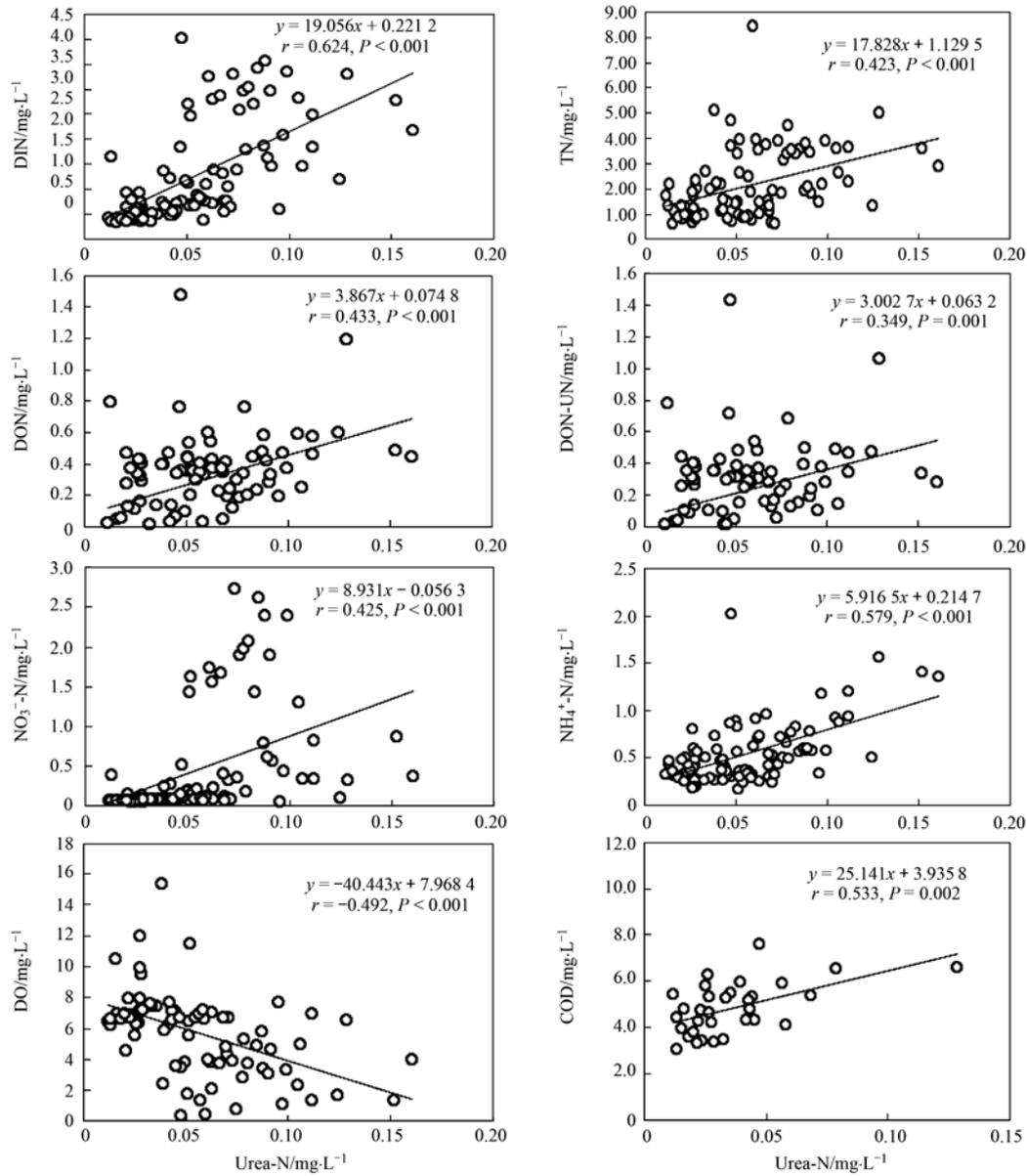


图9 Urea-N与其他生态指标相关性分析

Fig. 9 Correlation analysis between Urea-N and other ecological indices

表1 对应于A、B、C三区的尿素氮的含量及浮游动物和底栖生物的密度、生物量情况

Table 1 Urea-N content, density and biomass of zooplankton and benthos in A, B, C areas

项目	A区 (平均值 ± 标准差)	B区 (平均值 ± 标准差)	C区 (平均值 ± 标准差)
尿素氮/mg·L ⁻¹	0.055 ± 0.027	0.026 ± 0.015	0.023 ± 0.004
轮虫密度/ind·L ⁻¹	136 ± 150	64 ± 41	169 ± 70
轮虫生物量/mg·L ⁻¹	0.22 ± 0.31	0.13 ± 0.12	0.18 ± 0.16
枝角类密度/ind·L ⁻¹	241 ± 276	191 ± 119	117 ± 144
枝角类生物量/mg·L ⁻¹	2.46 ± 2.74	2.17 ± 1.36	1.53 ± 1.58
桡足类密度/ind·L ⁻¹	111 ± 77	132 ± 97	191 ± 95
桡足类生物量/mg·L ⁻¹	1.12 ± 1.04	2.06 ± 2.25	1.32 ± 0.76
霍甫水丝蚓密度/ind·m ⁻²	713 ± 1 097	44 ± 76	54 ± 92
霍甫水丝蚓生物量/g·m ⁻²	0.49 ± 0.53	0.02 ± 0.03	0.03 ± 0.05
河蚬密度/ind·m ⁻²	305 ± 580	130 ± 183	24 ± 34
河蚬生物量/g·m ⁻²	177.06 ± 328.35	148.99 ± 221.29	62.20 ± 124.43
铜锈环棱螺密度/ind·m ⁻²	12 ± 28	2 ± 6	46 ± 67
铜锈环棱螺生物量/g·m ⁻²	12.16 ± 29.61	5.93 ± 18.76	64.79 ± 80.20

贡献率很高^[1,26]。有研究表明海洋中的尿素来源于自然和人为的富集^[1,26,27],其中自然富集即系统内源释放,其速率较低不足以维持高水平的尿素含量,因此人为富集为其主要来源。

对河湖水体来讲,其尿素来源也可分为内源和外源,内源同海洋系统相似,外源则主要受人为活动的影响,包括农业地表径流和淋溶地下水、生活污水和工业废水排放、大气沉降。其中相对其他来源大气沉降可以忽略,而农业活动对水体尿素的影响则主要受水文活动的控制,一般情况下 30%~50% 的尿素会被作物吸收转化,而通过陆运径流进入当地水体的估计 3%~5% 会在径流中损失,剩余部分则在运移时就被脲酶分解为铵态氮,或挥发、硝化、反硝化。如果在水文活动较强时施用尿素,40% 以上的尿素会随之进入当地水域系统,因此,农业活动对水体尿素贡献的大小取决于施肥时的气候条件^[1,2]。家畜、家禽和人类粪便中含有丰富的尿素,它们能通过生活污水直接进入河湖水体。胡章喜等^[28]对广州地区淡水水体尿素的研究发现,人工湖和大多数水库尿素污染较轻,而人口居住较密集地区和农田附近的河涌和河流污染较严重。

对太湖来讲,其尿素含量也受内源和外源双重调控,但从本调查结果推断,其主要来源为内源释放。太湖河道尿素氮含量明显高于湖体(湖体平均为 $0.036 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,环湖河道平均为 $0.068 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),在溶解性有机氮中所占比例比湖体高出一倍多(河道 20.56%,湖体 9.17%),这说明外源对湖体具有较高的影响能力。同时,湖体尿素氮空间差异显著,富营养化程度高的地区尿素氮含量也高。将湖区与对应河道尿素氮进行比较,尿素氮含量高的西北太湖和梅梁湾其对应的入湖河道的含量也明显高于其他湖区,由此说明湖体尿素氮的来源受河道输入的影响。

Bogard 等^[2]对北美中部 7 个不同富营养化程度湖泊的尿素含量及分布规律进行了研究,表明生活污水对水体尿素的贡献是农业径流的两倍之多,生活污水对尿素含量具有重要贡献。太湖西北部为宜兴、武进和无锡市区,这些地区经济发达,工业分布密集,农业集约化程度较高,所以这可能是导致西北湖区尿素氮含量高于东南湖区的主要原因。

而对其他湖区及其河道而言,与其他形态氮素空间变化不同,湖体尿素氮含量变化并不像其对应河道的含量变化那样差异显著,西太湖、南太湖、东太湖尿素氮含量相当,湖心稍高,这说明尿素的内

源,也即湖体氮素的迁移转化过程、释放分解过程也对水体尿素水平有很大的影响。有研究表明,死水中尿素含量很高^[2],说明内源释放对水体尿素氮含量具有重要贡献。所以除了污染严重的西北部湖区,对其他湖区而言影响尿素氮含量变化的主要因子可能为内源释放。贡湖湾一方面因为其为出湖区,另一方面则可能是受望虞河引江济太的影响,使其出现高氮营养低尿素氮水平的特殊情况。

外源河道入湖后氮的停留时间可能很短。通过入湖河道口点位与对应河道的尿素氮含量比较,只有西北太湖的 16 号尿素氮 ($0.128 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 高于对应河道(太滙运河、漕桥河、殷村港均小于 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),而其他河口的尿素氮含量均在入湖后迅速下降 2~3 倍,甚至更多。因此,初步得出河流尿素在下游湖泊不会累积,或迅速被稀释或被生物利用。16 号点的各种生态指标含量均很高,特别是其总氮、溶解性总氮、溶解性有机氮及除尿素外的有机氮含量均为湖体最高值,因此该点位由河到湖尿素氮含量变化异于其他点位的原因可能是其严重的富营养化程度及大量藻类的存在,从而使得尿素氮表现出一定的内源积累。

Bogard 等^[2]研究发现溶解氧是预测尿素含量高低的最佳指标 ($r^2 = 0.91$, $P = 0.002$),同时尿素浓度还与透明度、硝态氮、溶解性无机碳和除尿素外的溶解性有机氮显著相关,本研究也得到类似的结果。尿素氮与不同形态氮、高锰酸盐指数的正相关关系及与溶解氧的负相关关系表明微生物矿化分解有机氮是尿素氮的另一来源。凡是影响微生物(特别是异养微生物)活动及有机物含量的因子均可能是引起湖体尿素变化的原因。

3.2 尿素氮在太湖氮循环系统中的作用

尿素是植物极易利用的氮源。在水域生态系统氮素研究中,有机氮库在水体初级生产力中的重要性已逐渐受到学术界的重视,大量研究表明尿素氮是浮游植物生长的重要有机氮源,是氮素循环的重要组成部分^[17]。Donald 等^[29]对 144 种藻类进行不同形态氮刺激研究,结果表明不同藻类对某种存在形式的氮素利用情况可能不一样,同一藻类对不同存在形式的氮素利用情况也不一致,如硅藻偏好硝态氮,蓝藻则偏好还原态的铵态氮和尿素氮。但对大多数藻类来说,尿素是潜在动态生物有效氮,有着与铵态氮类似的生态效应,在光充足条件下,提供尿素或铵态氮,会使光合速率大大提高,非固氮浮游植物生物量增加。尿素是一种可再生有机氮,其含

量受细菌、藻类、浮游动植物、辐照度和其他生物地球化学过程多因子的综合调控。Bogard 等^[2]研究发现湖体尿素季节变化不明显,即尿素供给和消耗存在一个平衡状态。Mitamura 等^[9]研究发现在水体透光层浮游植物光合速率与尿素分解速率同步,水体尿素的消耗与供应(内源)存在一个准恒动态平衡,这种动态平衡在湖泊尿素循环中发挥着重要作用。

杨柳等^[13]在对太湖浮游植物群落对不同形态氮吸收的研究中发现各点对尿素的吸收速率要高于硝氮,在胥口湾甚至高于氨氮成为优先利用氮源。说明尿素是太湖中生物可利用氮的一种重要形式,是氮素的重要组成部分。本研究结果表明,太湖有机氮库在溶解性氮库中约占 20% 左右,尿素氮在溶解性氮库中约占 5% 左右,尿素氮浓度远低于铵态氮浓度,其在生物可利用氮中所占百分含量仅为 1.56% ~ 17.35%。尽管尿素含量不高,对浮游植物也无明确促进作用,但其在太湖氮素循环中占据着非常重要的地位。本文相关分析表明,尿素氮含量都与不同形态氮(总氮、溶解性总氮、溶解性有机氮、铵态氮、硝态氮、亚硝态氮)含量及高锰酸盐指数均存在不同程度的正相关。尿素氮与无机态氮较高的相关性表明,有机形态的尿素氮对铵态氮、硝态氮和亚硝态氮的含量均有影响,极有可能是水体不同形态无机态氮的另一种重要来源。有机质矿化分解可以产生尿素,尿素又可转化成各种无机氮;生物可以利用尿素和其他氮素合成有机质,经有机体直接排泄和死亡降解又可释放出尿素。这样尿素氮在有机无机氮素转化中起着关键性作用,是氮素循环的重要组成部分,其含量的高低受湖体自身氮素循环快慢的影响。

4 结论

(1) 太湖水体尿素氮含量为 0.011 ~ 0.161 mg·L⁻¹ 之间,平均值为 0.036 mg·L⁻¹。尿素氮空间分布与水体富营养化程度基本一致,呈现出由北向南、由西向东逐步降低的变化趋势。

(2) 太湖尿素氮受内源和外源的双重控制,除污染严重的西北湖区,其他湖区内源释放占主导地位。

致谢:南京信息工程大学王伟协助环湖河道水样采集,中国科学院太湖湖泊生态系统研究站龚志军、沈睿杰等协助湖体水样采集并提供同步的水质、浮游动物、底栖生物数据,薛静琛、吴攀协助了水质分析,一并表示感谢。

参考文献:

- [1] Glibert P M, Harrison J, Heil C, *et al.* Escalating worldwide use of urea—a global change contributing to coastal eutrophication[J]. *Biogeochemistry*, 2006, **77**(3): 441-463.
- [2] Bogard M J, Donald D B, Finlay K, *et al.* Distribution and regulation of urea in lakes of central North America [J]. *Freshwater Biology*, 2012, **57**(6): 1277-1292.
- [3] 王海, 席运官, 陈瑞冰, 等. 太湖地区肥料、农药过量施用调查研究[J]. *农业环境与发展*, 2009, (3): 10-15.
- [4] 鲍先琬. 化肥、环境与中国农业的可持续发展[J]. *统计与决策*, 2007, (1): 73-74.
- [5] 2012年中国尿素产量达 3003.8 万吨[EB/OL]. [http://www. askci. com/news/201303/21/2113383867018. shtml](http://www.askci.com/news/201303/21/2113383867018.shtml), 2013-3-21.
- [6] Howarth R W, Sharpley A, Walker D. Sources of nutrient pollution to coastal waters in the United States: implications for achieving coastal water quality goals [J]. *Estuaries*, 2002, **25**(4): 656-676.
- [7] Nosengo N. Fertilized to death[J]. *Nature*, 2003, **425**(6961): 894-895.
- [8] 许振成, 王俊能, 庄晓诚, 等. 人体粪尿氮排放及模型研究 [J]. *安徽农业科学*, 2009, **37**(33): 16510-16512.
- [9] Mitamura O, Ishida N, Seike Y, *et al.* Diel variation in urea decomposing activity in the euphotic zone of brackish Lake Nakaumi[J]. *Limnology*, 2000, **1**(3): 151-157.
- [10] Berman T, Bechemin C, Maestrini S Y. Release of ammonium and urea from dissolved organic nitrogen in aquatic ecosystems [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 1999, **16**(3): 295-302.
- [11] 隋健, 韦桂峰, 范春雷, 等. 海水养殖区溶解有机氮对有害藻水华的作用[J]. *海洋环境科学*, 2007, **26**(4): 321-324.
- [12] 隋健. 大亚湾澳头养殖区环境因子的变化特征与浮游植物的生态学研究[D]. 广州:暨南大学, 2006. 44-45.
- [13] 杨柳, 章铭, 刘正文. 太湖春季浮游植物群落对不同形态氮的吸收[J]. *湖泊科学*, 2011, **23**(4): 605-611.
- [14] 陈园, 徐宁, 段舜山. 有机氮比例和光强对赤潮藻球形棕囊藻生长和光合作用的影响[J]. *生态环境学报*, 2011, **20**(3): 499-504.
- [15] 徐立, 吴瑜端. 有机氮化合物对海洋浮游植物生长的影响 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 1995, **34**(5): 824-828.
- [16] 胡章喜, 徐宁, 段舜山. 不同氮源对 4 种海洋微藻生长的影响[J]. *生态环境学报*, 2010, **19**(10): 2452-2457.
- [17] 胡章喜, 徐宁, 段舜山, 等. 尿素对中国近海 3 种典型赤潮藻生长的影响 [J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(6): 1265-1270.
- [18] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民, 等. 太湖水环境演化过程与机理 [M]. 北京: 科学出版社, 2004. 1.
- [19] 张红举, 甘升伟, 袁洪州, 等. 环太湖河流入湖水水质控制浓度分析[J]. *水资源保护*, 2012, **28**(6): 8-11.
- [20] 袁旭音, 单丽丽, 陈颖, 等. 人类扰动下太湖入湖河道的稀土元素及环境指示意义[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2008, **36**(4): 438-442.
- [21] 郑一, 王学军, 江耀慈, 等. 环太湖河道水质分析与入湖污染

- 物负荷量估算[J]. 地理学与国土研究, 2001, 17(1): 40-44.
- [22] 陈小锋, 揣小明, 曾巾, 等. 太湖氮素出入湖通量与自净能力研究[J]. 环境科学, 2012, 33(7): 2309-2314.
- [23] 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.
- [24] Revilla M, Alexander J, Glibert P M. Urea analysis in coastal waters: comparison of enzymatic and direct methods [J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2005, 3: 290-299.
- [25] 陈伟民, 黄祥飞, 周万平. 湖泊生态系统观测方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
- [26] Crandall J B, Teece M A. Urea is a dynamic pool of bioavailable nitrogen in coral reefs[J]. *Coral Reefs*, 2012, 31(1): 207-214.
- [27] Altman J C, Paerl H W. Composition of inorganic and organic nutrient sources influences phytoplankton community structure in the New River Estuary, North Carolina[J]. *Aquatic Ecology*, 2012, 46(3): 269-282.
- [28] 胡章喜, 徐宁, 李爱芬, 等. 广州地区淡水水体尿素的分布特征[J]. 生态科学, 2008, 27(5): 418-420.
- [29] Donald D B, Bogard M J, Finlay K, *et al.* Phytoplankton-Specific Response to Enrichment of Phosphorus-Rich Surface Waters with Ammonium, Nitrate, and Urea[EB/OL]. <http://www.plosone.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0053277#pone-0053277-g006>.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2013年9月27日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2012年度中国科技论文统计结果.统计结果显示2012年度《环境科学》多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.

《环境科学》综合评价总分77.8,排名第一,总被引频次6489,影响因子1.156.

综合评价总分是根据中国科技期刊综合评价指标体系,计算多项科学计量指标(总被引频次、影响因子、他引率、基金论文比、引文率等),采用层次分析法确定重要指标的权重,分学科对每种期刊进行综合评定,计算出每个期刊的综合评价总分.这项指标屏蔽了各个学科之间总体指标背景值的差异,使科技期刊可以进行跨学科比较.根据发布的统计结果,2012年度《环境科学》综合评价总分77.8,在被统计的30种环境科学技术及资源科学技术类期刊中名列第一.

CONTENTS

Observation Study on Aerosol Optical Properties and Radiative Forcing Using the Ground-based and Satellite Remote Sensing at Background Station During the Regional Pollution Episodes	ZHANG Xiao-ling, XIA Xiang-ao, CHE Hui-zheng, <i>et al.</i>	(2439)
<i>In-situ</i> Measurement of Atmospheric Methyl Chloroform at the Shangdianzi GAW Regional Background Station	YAO Bo, ZHOU Ling-xi, LIU Zhao, <i>et al.</i>	(2449)
Distribution of CO at Lin'an Station in Zhejiang Province	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, LUAN Tian, <i>et al.</i>	(2454)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in Atmospheric Particles in Nanjing Northern Suburb in Summer	DUAN Qing, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(2460)
Characteristics of Water-soluble Organic Nitrogen of PM _{2.5} in Xi'an During Wintertime Non-haze and Haze Periods	CHENG Yu-ting, WANG Ge-hui, SUN Tao, <i>et al.</i>	(2468)
Effect of Sand Dust Weather on Major Water-soluble Ions in PM ₁₀ in Lanzhou, China	WANG Fang, CHEN Qiang, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i>	(2477)
Diversity of Bacterial Areasols in Precipitation of Shanghai Area	LIANG Zong-min, DU Rui, DU Peng-rui, <i>et al.</i>	(2483)
Concentrations and Deposition Fluxes of Heavy Metals in Precipitation in Core Urban Areas, Chongqing	PENG Yu-long, WANG Yong-min, QIN Cai-qing, <i>et al.</i>	(2490)
Anthropogenic VOC Emission Inventory and Contribution from Industrial Sources in Ningbo	LI Xuan, WANG Xue-song, LIU Zhong, <i>et al.</i>	(2497)
Evaluation and Selection of VOCs Treatment Technologies in Packaging and Printing Industry	WANG Hai-lin, WANG Jun-hui, ZHU Chun-lei, <i>et al.</i>	(2503)
Experimental Study on CO ₂ Absorption by Aqueous Ammonia-based Blended Absorbent	XIA Zhi-xiang, XIANG Qun-yang, ZHOU Xu-ping, <i>et al.</i>	(2508)
Preliminary Investigation on Emission of PCDD/Fs and DL-PCBs Through Flue Gas from Coke Plants in China	SUN Peng-cheng, LI Xiao-lu, CHENG Gang, <i>et al.</i>	(2515)
Distribution and Source of Particulate Organic Carbon and Particulate Nitrogen in the Yangtze River Estuary in Summer 2012	XING Jian-wei, XIAN Wei-wei, SHENG Xiu-zhen	(2520)
Characteristics of Optical Absorption Coefficients and Their Differences in Typical Seasons in Lake Qiandaohu	WANG Ming-zhu, ZHANG Yun-lin, SHI Kun, <i>et al.</i>	(2528)
Dynamic Distributions of Dissolved Oxygen in Lake Qiandaohu and Its Environmental Influence Factors	YIN Yan, WU Zhi-xu, LIU Ming-liang, <i>et al.</i>	(2539)
Source Analysis of Urea-N in Lake Taihu During Summer	HAN Xiao-xia, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i>	(2547)
Phytoplankton Community Structure and Its Succession in Isolated Lakes of Poyang-Junshan Lake	LIU Xia, QIAN Kui-mei, TAN Guo-liang, <i>et al.</i>	(2557)
Vertical Distribution and Relationship Between ²¹⁰ Pb _{ex} Activities and Nutrients in Sediment Cores of Two Different Eutrophication Level Lakes	WANG Xiao-lei, YANG Hao, GU Zhu-jun, <i>et al.</i>	(2565)
Simulation of Nitrate Pollution in Groundwater Using Pump-and-treat Optimization Method	JIANG Lie, HE Jiang-tao, JIANG Yong-hai, <i>et al.</i>	(2572)
Variation of Water DOC During the Process of Pre-pressure and Coagulation Sedimentation Treatment	CHEN Wen-jing, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i>	(2579)
Adsorption of Perchlorate by Calcined Mg/Zn/Al Layered Double Hydroxides	WANG Hong-yu, LIU Yan	(2585)
Adsorption Kinetic Mechanism of Ionic Soluble Dye Mixture on Fly Ash	SUN De-shuai, ZHENG Qiang-qiang, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i>	(2590)
Effect of SDS on the Adsorption of Cd ²⁺ onto Amphoteric Modified Bentonites	WANG Jian-tao, MENG Zhao-fu, YANG Ya-ti, <i>et al.</i>	(2596)
Structural Changes of Aged Biochar and the Influence on Phenanthrene Adsorption	TANG Wei, GUO Yue, WU Jing-gui, <i>et al.</i>	(2604)
Photocatalytic Degradation Kinetics of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) in TiO ₂ Dispersion and Its Mechanism	LI Ming-jie, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i>	(2612)
Characterizing the Interaction Between Roxarsone and Humic Acid by Fluorescence Quenching Experiment	ZHU Jiang-peng, MEI Ting, PENG Yun, <i>et al.</i>	(2620)
Modification of Activated Carbon Fiber for Electro-Fenton Degradation of Phenol	MA Nan, TIAN Yao-jin, YANG Guang-ping, <i>et al.</i>	(2627)
Investigation of Enhanced Low Carbon Wastewater Denitrification by Catalytic Iron	WANG Meng-yue, MA Lu-ming	(2633)
Denitrification Performance of PBS as a Solid Carbon Source of Denitrification	LIU Jia, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i>	(2639)
Concentrations, Distribution Characteristics and Electron Beam Radiolysis Degradation of PCDD/Fs in Waste Water from a Paper Mill	QING Xian, HUANG Jin-qiong, YU Xiao-wei, <i>et al.</i>	(2645)
Study on the Quality of Digested Piggery Wastewater in Large-Scale Farms in Jiaying	WEI Dan, WAN Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(2650)
New Ways to Improve Volatile Fatty Acids Accumulation in Sludge Alkaline Fermentation System	LI Xiao-ling, PENG Yong-zhen, CHAI Tong-zhi, <i>et al.</i>	(2658)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments and Soils from Dishui Lake and Its Water Exchange Areas	GUO Xue, BI Chun-tuan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i>	(2664)
Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and Sediment from Zhoushan Coastal Area, China	JIANG Min, Le Huy Tuan, MEI Wei-ping, <i>et al.</i>	(2672)
Contamination Levels and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Soils and Grasses from Lake Catchments in the Tibetan Plateau	XIE Ting, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang	(2680)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Soil from Jiufeng Mountain Range in Fujian, China	HUANG Huan-fang, QI Shi-hua, QU Cheng-kai, <i>et al.</i>	(2691)
Pollution Fingerprints and Sources of Perfluorinated Compounds in Surface Soil of Different Functional Areas	ZHANG Hong, ZHAO Liang, HE Long, <i>et al.</i>	(2698)
Distribution, Seasonal Variation and Influence Factors of Dissolved Inorganic Arsenic in the Sanggou Bay	LI Lei, REN Jing-ling, LIU Su-mei, <i>et al.</i>	(2705)
Distribution of Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation on the Different Sampling Scales in Farmland on Yellow River Irrigation Area of Ningxia; A Case Study in Xingqing County of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu	(2714)
Release of Mercury from Soil and Plant in Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area and Its Accumulation in Zebrafish	LI Chu-xian, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i>	(2721)
Residues and Health Risk Assessment of Sulfonamides in Sediment and Fish from Typical Marine Aquaculture Regions of Guangdong Province, China	HE Xiu-ting, WANG Qi, NIE Xiang-ping, <i>et al.</i>	(2728)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Dust of Qingdao City	ZHANG Chun-rong, WU Zheng-long, YAO Chun-hui, <i>et al.</i>	(2736)
Health Risk Assessment of Coke Oven PAHs Emissions	BO Xin, WANG Gang, WEN Rou, <i>et al.</i>	(2742)
Effects of Combined Pollution of Cd, Cu and Pb on Antioxidant Enzyme Activities of Earthworm in Soils	WANG Hui, XIE Xin-yuan	(2748)
Toxicity of Three Chlorophenols to Protozoa <i>Tetrahymena thermophila</i>	LI Ya-jie, CUI Yi-Bin, JIANG Li-juan, <i>et al.</i>	(2755)
Phytoexclusion Potential Studies of Si Fertilization Modes on Rice Cadmium	CHEN Zhe, TIE Bo-qing, LEI Ming, <i>et al.</i>	(2762)
Effects of Conservation Tillage on Soil CO ₂ and N ₂ O Emission During the Following Winter-Wheat Season	PAN Ying, HU Zheng-hua, WU Yang-zhou, <i>et al.</i>	(2771)
Mineralization of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Soil Enzyme Activities in Apple Orchard in Weibei	JIA Man-li, GUO Hong, LI Hui-ke	(2777)
Steam and Air Co-injection in Removing TCE in 2D-Sand Box	WANG Ning, PENG Sheng, CHEN Jia-jun	(2785)
Effect of Cu ²⁺ on the Power Output of Dual-chamber Microbial Fuel Cell	MU Shu-jun, LI Xin-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i>	(2791)
Emissions of Greenhouse Gas and Ammonia from Sewage Sludge Composting by Continuous Aerated Turning Pile	ZHAO Chen-yang, WEI Yuan-song, GE Zhen, <i>et al.</i>	(2798)
Emissions of NH ₃ , N ₂ O, and NO from Swine Manure Solid Storage in Winter	DING Gang-qiang, HAN Sheng-hui, YUAN Yu-ling, <i>et al.</i>	(2807)
Variation Characteristics and Mathematical Model of Humic Substances in Landfill Leachates with Different Landfill Ages	HUANG You-fu, XU Xin-ya, FAN Liang-xin, <i>et al.</i>	(2816)
Research on the Variation Regularity of Effluent from the Leachate Reverse Osmosis Concentrate Recirculation	WANG Dong-mei, LIU Dan, LIU Qing-mei, <i>et al.</i>	(2822)
Quantitative Analysis on the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China	MA Lan, MAO Jian-su	(2829)
Research Progress in Microbiological Characteristics in Combined N ₂ Removal Process by Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	ZHAO Zhi-ru, HOU Yan-lin	(2834)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2014年7月15日 第35卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 7 Jul. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行