ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 36 卷 第 9 期
2015 年 9 月 15 日

目 次

长江三角洲 $PM_{2.5}$ 质量浓度遥感估算与时空分布特征 …… 徐建辉,江洪(3119)
宁波市 $PM_{2.5}$ 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算 …… 杜博涵,黄晓锋,何凌燕,胡敏,王川,任宇超,应红梅,周军,汪伟峰,许丹丹(3128)
青岛大气中酸碱气体及 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系 …… 周佳佳,石金辉,李丽平,姚小红,高会旺(3135)
北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征 …… 胡凌飞,张柯,王洪宝,李娜,王洁,杨文慧,殷喆,焦周光,温占波,李劲松(3144)
2015 年春节北京市空气质量分析 …… 程念亮,陈添,张大伟,李云婷,孙峰,魏强,刘嘉林,刘保献,孙瑞雯(3150)
上海市大气挥发性有机物化学消耗与臭氧生成的关系 …… 王红丽(3159)
生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究 …… 陈东之,缪孝平,欧阳杜娟,叶杰旭,陈建孟(3168)
一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型 …… 郭宇龙,李云梅,李渊,吕恒,刘阁,王旭东,张思敏(3175)
巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素 …… 叶琳琳,吴晓东,刘波,闫德智,张玫琪,周阳(3186)
河北洨河溶解性有机物光谱学特性 …… 虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰(3194)
东山岛地下水“三氮”空间分布特征 …… 吴海燕,傅世锋,蔡晓琼,汤坤贤,曹超,陈庆辉,梁修雨(3203)
重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化 …… 梁作兵,孙玉川,王尊波,师阳,江泽利,张媚,谢正兰,廖昱(3212)
硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 $\delta^{13}C_{DIC}$ 的影响 …… 黄奇波,覃小群,刘朋雨,张连凯,苏春田(3220)
阆中市思依镇水化学特征及其成因分析 …… 张艳,吴勇,杨军,孙厚云(3230)
东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动 …… 陈聪聪,饶拉,黄金良,白敏冬(3238)
水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响 …… 胡珍珍,崔益斌,李梅,余静(3248)
溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟 …… 杨秋婵,赵玲,尹平河,谭烁,舒万姣,侯少玲(3255)
坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果 …… 李怀正,陈珂莉,危忠,王卫刚(3262)
典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估 …… 李敦柱,管运涛, 刘安, 李思远(3269)
南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比 …… 张民盛,徐斌,张天阳,程拓,夏圣骥,楚文海(3278)
臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响 …… 刘海龙,郭雪峰,王敏慧,焦茹媛,石健(3285)
含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响 …… 吴悦,吴纯德,刘吕刚,袁博杰(3292)
厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究 …… 王莹,许丽英,王少锋,肖翻,贾永锋(3298)
印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究 …… 申洋洋,刘锐,徐灿灿,舒小铭,许江军,兰亚琼,陈吕军(3304)
螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征 …… 覃彩霞,佟娟,申佩弘,魏源送(3311)
两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究 …… 税勇,川岸朋树,宋小燕,刘锐,陈吕军(3319)
农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析 …… 孔晓,崔丙健,金德才,吴尚华,杨波,邓晔,庄国强,庄绪亮(3329)
四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析 …… 张岩,孙凤侠,谢杭冀,陈敬,眭稀,甘志明,王修平,史扬(3339)
从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化 …… 刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶(3345)
提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响 …… 刘小朋,王建芳,钱飞跃,王琰,陈重军,沈耀良(3352)
常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究:以长江中下游地区夏玉米季为例 …… 桑蒙蒙,范会,姜珊珊,蒋静艳(3358)
水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响 …… 傅志强,龙攀,刘依依,钟娟,龙文飞(3365)
厌氧条件下砂壤水稻土 N_2、N_2O、NO、CO_2 和 CH_4 排放特征 …… 曹娜,王睿,廖婷婷,陈诺,郑循华,姚志生,张海,Klaus Butterbach-Bahl(3373)
黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征 …… 陈盖, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 樊会敏, 王闪闪(3383)
生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响 …… 郭艳亮,王丹丹,郑纪勇,赵世伟,张兴昌(3393)
宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征 …… 倪银霞,黄懿梅,牛丹,赵彤,闫浩,蒋跃利(3401)
石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究 …… 胡宁, 马志敏,蓝家程,伍宇春,陈高起, 傅瓦利,文志林,王文净(3411)
江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点:以潜江市为例 …… 王玉竹,肖和艾,周萍,童成立,葛体达,曾冠军,吴金水(3422)
缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征 …… 李睿,江长胜,郝庆菊(3429)
西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应 …… 聂燕,王新,王博,许淑婧,高福元, 余晔,夏敦胜,夏昕鸣(3438)
电镀厂周边环境中重金属分布特征及人体健康暴露风险评价 …… 郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钏(3447)
典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性 …… 刘洁,李晓东,赵中华,祁志福,陈彤,严建华(3457)
紫色土对硫丹的吸附与解吸特征 …… 赵炎,郑国灿,朱恒,张进忠,朱秀英,胡淑春,吴娅林(3464)
紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响 …… 焦海华,崔丙健,吴尚华,白志辉,黄占斌(3471)
4 株外生菌根真菌对 Al^{3+} 吸收与吸附的研究 …… 王明霞,袁玲,黄建国,周志峰(3479)
长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评价 …… 于锐,刘景双,王其存,刘强,王洋(3486)
北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律 …… 宋立娜,王磊,夏孟婧,苏月,李振山(3493)
城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响 …… 吕文洲,乔宇祥,余宁,史荣华,王光明(3501)
V_2O_5-WO_3/TiO_2 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英 …… 任咏,纪莎莎,俞明锋,李晓东,严建华(3508)
基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析 …… 林晓丹,田良,吕彬,杨建新(3515)
我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨 …… 江梅,邹兰,李晓倩,车飞,赵国华,李刚,张国宁(3522)
异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响 …… 司友斌,王娟(3533)
《环境科学》征订启事(3297) 《环境科学》征稿简则(3303) 信息(3127, 3202, 3277, 3318)

巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素

叶琳琳[1,2], 吴晓东[3], 刘波[1], 闫德智[1], 张玫琪[1], 周阳[1]

(1. 南通大学地理科学学院, 南通 226000; 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. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 冰冻圈科学国家重点实验室, 青藏高原冰冻圈观测研究站, 兰州 730000)

摘要: 为研究巢湖溶解性有机物(dissolved organic matter, DOM)的时空分布规律及其影响因素, 于 2013 年 4 月至 2014 年 4 月每月在巢湖 3 个不同湖区 17 个点位采集表层水样, 测定了水体溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)和溶解性有机氮(dissolved organic nitrogen, DON)浓度. 结果表明, 东部、中部和西部这 3 个湖区 DON 浓度具有显著差异($P < 0.01$, $n = 13$), 这可能与西湖区入湖河流的外源输入以及 DON 的可利用性有关. 水华期间, 水体总氮总磷比、总溶解性氮磷比以及溶解性无机氮(dissolved inorganic nitrogen, DIN)与溶解性活性磷(soluble reactive phosphorus, SRP)比值迅速降低, 其中西湖区 DIN/SRP 在 2013 年 8 月降至 5 ± 7, 表明水体出现氮限制. 此外, DON 浓度迅速降低, 西部湖区叶绿素浓度与 DON 显著负相关($r = -0.265$, $P < 0.05$, $n = 91$), 表明在氮限制条件下, DON 具有一定生物可利用性. DOC 浓度不存在显著空间差异, 水温是控制这 3 个湖区 DOC 浓度变化的重要因素. 东部和中部湖区 DOC 浓度还受叶绿素和硝态氮浓度的影响. 此外, 巢湖 DOC/DON 变幅较大, 由于含氮化合物更易降解, 因此 DON 是影响碳氮比值的主导因子, 是表征 DOM 可利用性的重要组分.

关键词: 巢湖; 时空分布; 影响因素; 溶解性有机碳; 溶解性有机氮

中图分类号: X524 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2015)09-3186-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2015.09.009

Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu

YE Lin-lin[1,2], WU Xiao-dong[3], LIU Bo[1], YAN De-zhi[1], ZHANG Mei-qi[1], ZHOU Yang[1]

(1. School of Geographical Sciences, Nantong University, Nantong 226000, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Cryosphere Research Station on the Qinghai-Tibetan Plateau, State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To study the temporal and spatial distribution of dissolved organic matter (DOM) and the related influencing factors of Lake Chaohu, surface water samples were collected at seventeen sites in three different regions of the Lake from April 2013 to April 2014. The concentration of dissolved organic carbon (DOC) and dissolved organic nitrogen (DON) were then analyzed. A significance difference in DON concentration was observed among the sampling sites ($P < 0.01$, $n = 13$), which was caused by the terrestrial input from the western rivers and the bioavailability of DON. The ratio of total nitrogen to total phosphorus, total dissolved nitrogen to total dissolved phosphorus, and dissolved inorganic nitrogen to soluble reactive phosphorus (DIN/SRP) declined gradually during the phytoplankton bloom period, especially the ratio of DIN/SRP dropped to 5 ± 7 in August 2013, indicating the nitrogen was limited in lake water. Moreover, the concentration of DON was decreased and a significant negative correlation was observed between DON and Chl-a ($r = -0.265$, $P < 0.05$, $n = 91$), suggesting that DON is bioavailable, and can be utilized by phytoplankton directly or indirectly during nitrogen limitation. No significant difference in DOC concentration was observed and water temperature was the major factor related to the variation of DOC. Chl-a and nitrate concentrations can also affect the dynamics of DOC. In addition, the ratio of DOC/DON was considerably varied, the concentration of DON contributed to the variation of DOC/DON, and DON was the major component contributed to the bioavailability of DOM.

Key words: Lake Chaohu; temporal and spatial distribution; influencing factors; dissolved organic carbon; dissolved organic nitrogen

溶解性有机物(dissolved organic matter, DOM)普遍存在于海洋和湖泊水体. 按元素组成可分为溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)和溶解性有机氮(dissolved organic nitrogen, DON). 有研究表明, DOM 具有一定的生物可以利用性[1], 通过参与水生生态系统中微食物网循环对生态系统的结构和功能产生重要影响[2]. 因此, DOM 在水生生态系统生源要素循环研究中日益受到重视[3].

目前关于海洋、河口中 DOM 的时空分布特征、

收稿日期: 2015-03-19; **修订日期**: 2015-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201076, 41001032); 湖泊与环境国家重点实验室开放基金项目(2012SKL006); 河口海岸学国家重点实验室开放基金项目(SKLEC-KF201310)

作者简介: 叶琳琳(1981 ~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为富营养化湖泊碳素循环, E-mail: yelinlin8164@163.com

影响因素[4~6]和生物可利用性[7,8]已开展了大量研究，而对富营养化浅水湖泊中 DOM 时空分布规律的报道很少. Aoki 等[9]在日本 Biwa 湖研究发现，铜绿微囊藻释放的 DOM 是湖水中 DOM 的重要来源. Ye 等[10]在太湖研究发现，蓝藻水华过后，水体 DOM 碳氮比值迅速降低，表明 DOM 从富含含碳化合物向富含含氮化合物发生转变. 近年来，巢湖蓝藻水华频发，微囊藻和鱼腥藻是其优势种. 因此，本文以巢湖 3 个不同营养水平湖区为研究对象，分析了 DOC 和 DON 的时空分布特征及相关环境因素的变化，以期能为深入研究富营养化湖泊 DOM 的生物地球化学循环规律提供重要参考依据.

1　材料与方法

1.1　样品采集

巢湖是我国第五大淡水湖泊，位于安徽省合肥市，东西长约 61.7 km，南北宽约 12.5 km，平均水深 2.7 m，换水周期 127 d[11]. 巢湖湖区面积 760 km^2[12]，流域总面积13 350 km^2，主要环湖河流有 9 条，分别为南淝河、十五里河、派河、杭埠河、白石山河、兆河、裕溪河、双桥河和柘皋河，其中杭埠河、南淝河和兆河年平均流量居前 3 位，分别为 47.6、14.3 和 14.0 $m^3 \cdot s^{-1}$[13]. 从 2013 年 4 月至 2014 年 4 月每月采集表层水体样品，在全湖共设置 17 个采样点，其中 1 ~ 5 位于东湖区，6 ~ 10 点位于中部湖区，11 ~ 17 点位于西部湖区(图 1).

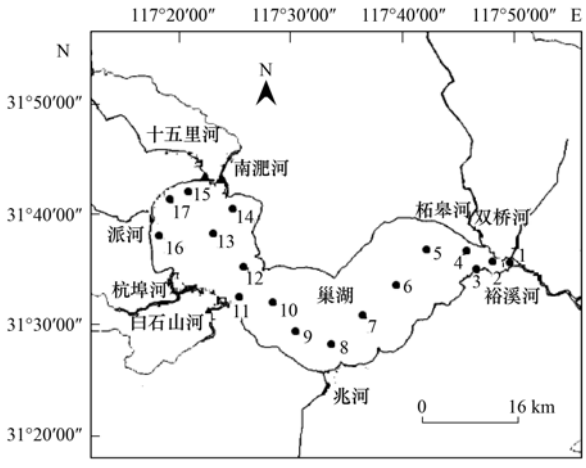

图 1　巢湖采样点设置示意

Fig. 1　Location of sampling sites in Lake Chaohu

1.2　分析方法

按照文献[14]测定叶绿素 (Chl-a)、总氮(total nitrogen, TN)、总溶解性氮(total dissolved nitrogen, TDN)、总磷(total phosphorus, TP)、总溶解性磷(total dissolved phosphorus, TDP)、溶解性活性磷(soluble reactive phosphorus, SRP)，溶解性无机氮(dissolved inorganic nitrogen, DIN)包括铵态氮(NH_4^+)、硝态氮(NO_3^-)、亚硝态氮(NO_2^-)，溶解性有机氮[DON] = [TDN] − [DIN]. 水样用 GF/F 滤膜(450℃, 5 h)过滤后用总有机碳分析仪(Shimadzu TOC-V CPN, 岛津)测定溶解性有机碳(DOC).

2　结果与分析

2.1　巢湖水温和叶绿素浓度变化

2013 年 4 月至 2014 年 4 月期间，巢湖 3 个湖区水温没有显著差异，都呈现季节变化规律，最高和最低温度分别出现在 2013 年 8 月和 2014 年 2 月，变幅为(5.7 ± 0.56) ~ (29.13 ± 0.22)℃[图 2(a)].

2013 年 4 月至 2013 年 7 月期间，3 个湖区 Chl-a 浓度显著增加，随后产生波动，中部和西部湖区 Chl-a 浓度都在 2013 年 10 月达到最大值，分别为(95.6 ± 144) μg·L^{-1}和(88.5 ± 110) μg·L^{-1}. 此外，西部湖区在 2014 年 2 月也出现 Chl-a 高值，为(56.8 ± 21.6) μg·L^{-1} [图 2(b)]. 3 个湖区 Chl-a 具有显著差异($P < 0.05$, Kruskal-Wallis ANOVA, $n = 13$).

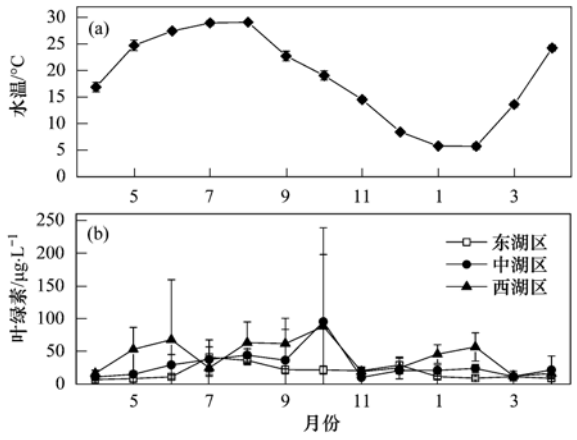

图 2　巢湖水温和叶绿素浓度变化

Fig. 2　Variation of water temperature and Chl-a concentration in Lake Chaohu

2.2　巢湖铵态氮、硝态氮浓度变化和氮磷比(TN/TP、TDN/TDP 和 DIN/SRP)

东部、中部和西部这 3 个湖区 NH_4^+ 浓度变幅分别为(0.19 ± 0.13) ~ (0.93 ± 1.33)、(0.16 ± 0.06) ~ (0.50 ± 0.27)和(0.37 ± 0.53) ~ (1.86 ± 1.13) mg·L^{-1}，在 DIN 中所占比例分别为 57%、26%和 53%. NH_4^+ 浓度具有显著差异，中部湖区最

低($P < 0.01$, Kruskal-Wallis ANOVA, $n = 13$). 在2013年4月至8月期间,东部和西部湖区 NH_4^+ 浓度迅速降低 [图3(a)].

东部、中部和西部这3个湖区 NO_3^- 浓度变幅分别为(0.075 ± 0.023) ~ (0.49 ± 0.13)、(0.07 ± 0.01) ~ (0.47 ± 0.16)和(0.13 ± 0.09) ~ (1.23 ± 0.41) mg·L^{-1},在溶解性无机氮(dissolved inorganic nitrogen, DIN)中所占比例分别为41%、64%和42%. NO_3^- 浓度具有显著差异,东部湖区最低($P < 0.01$, Kruskal-Wallis ANOVA, $n = 13$). 在2013年4月至9月期间,东部和中部湖区 NO_3^- 浓度迅速降低. 西部湖区 NO_3^- 浓度在2013年10月至2014年2月期间,显著升高[图3(b)].

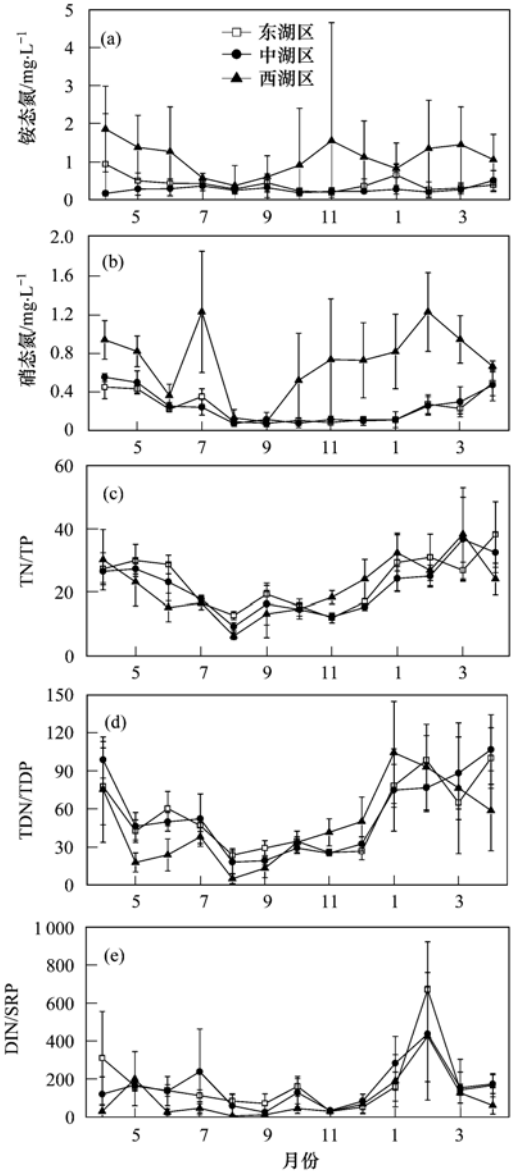

图3 巢湖铵态氮、硝态氮浓度和氮磷比的时空分布

Fig. 3 Variation of NH_4^+, NO_3^- concentrations and ratio of nitrogen to phosphorus in Lake Chaohu

TN/TP质量比的变化趋势是先减小再增大,东部、中部和西部湖区TN/TP比都在2013年8月出现最低值,分别为13 ± 1、9 ± 1和6 ± 1 [图3(c)]. TDN/TDP质量比的变化趋势与TN/TP基本一致,东部、中部和西部湖区TDN/TDP比都在2013年8月出现最低值,分别为23 ± 5、18 ± 9和5 ± 1 [图3(d)]. 东部、中部和西部3个湖区DIN/SRP变幅较大,分别为(31 ± 7) ~ (671 ± 253)、(24 ± 14) ~ (438 ± 251)和(5 ± 7) ~ (425 ± 336). 东部湖区DIN/SRP在2013年4月到9月期间迅速降低,西湖区DIN/SRP在2013年8月降至最小值 [图3(e)].

2.3 巢湖DOC、DON浓度变化和DOC/DON比值

东部、中部和西部湖区DOC浓度变幅分别为(2.85 ± 0.44) ~ (9.61 ± 2.42)、(2.62 ± 0.45) ~ (7.21 ± 1.92)和(3.74 ± 0.70) ~ (8.60 ± 3.44) mg·L^{-1},3个湖区DOC浓度没有显著差异. 3个湖区DOC浓度在2013年4月至10月期间产生波动,在2013年10月达到最大值,然后逐渐降低 [图4(a)].

巢湖东部、中部和西部湖区DON浓度变幅分别为(0.16 ± 0.034) ~ (0.83 ± 0.12)、(0.16 ± 0.08) ~ (0.92 ± 0.21)和(0.20 ± 0.13) ~ (1.61 ± 0.35) mg·L^{-1},3个湖区DON浓度具有显著差异($P < 0.01$, Kruskal-Wallis ANOVA, $n = 13$). 2013年4月至2013年9月期间,3个湖区DON浓度逐渐降低,2013年10月至2014年4月期间,呈逐渐增加趋势[图4(b)]. 东部、中部和西部3个湖区DON在TDN中所占比例分别为37%、46%和32%.

东部、中部和西部这3个湖区DOC/DON比值没有显著差异但变幅较大,分别为(4.38 ± 0.87) ~ (66.77 ± 101.92)、(4.67 ± 0.93) ~ (50.05 ± 43.91)和(2.80 ± 0.56) ~ (68.16 ± 114.90),其中西湖区DOC/DON比值在2013年8月至11月期间逐渐降低[图4(c)].

2.4 不同湖区水环境因子与DOC和DON相关分析

3个湖区DOC与DON、DIN/SRP显著负相关,水温与DOC显著正相关,叶绿素与TN/TP显著负相关. 东部和西部湖区叶绿素与硝态氮显著负相关,西部湖区叶绿素与DON显著负相关. 东部和中部湖区叶绿素与DOC显著正相关. 东部湖区叶绿素与DIN/SRP显著负相关,见表1~3.

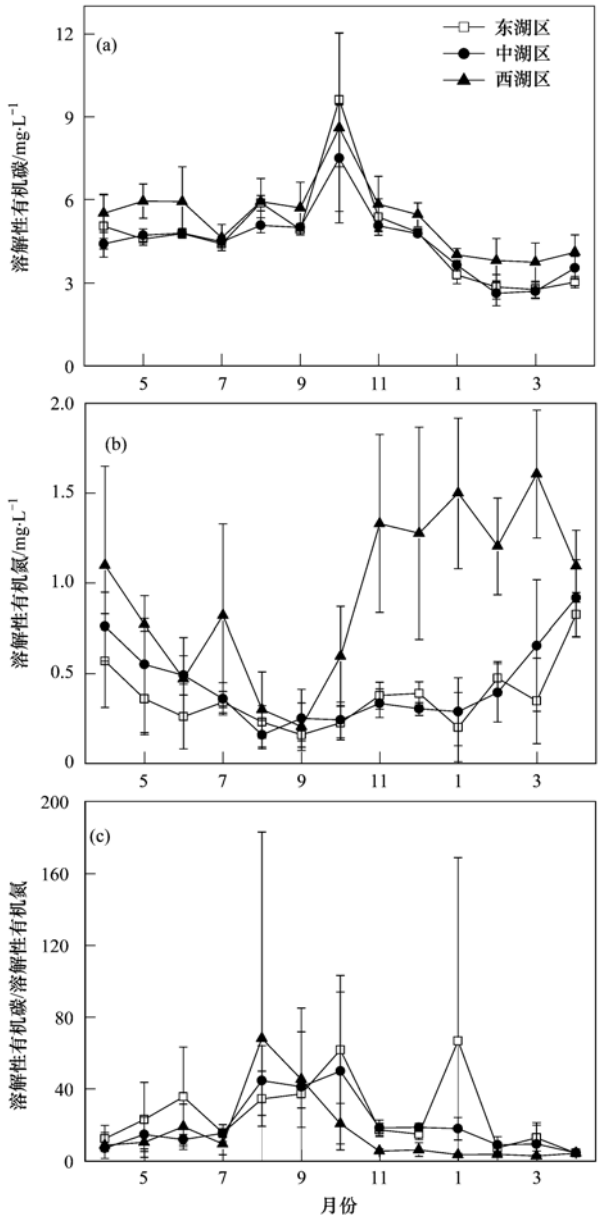

图 4　巢湖溶解性碳、总溶解性氮和溶解性碳氮比

Fig. 4　Variation of dissolved organic carbon and nitrogen and DOC/DON in Lake Chaohu

3　讨论

3.1　DON 的时空变化及影响因素

在水生生态系统中，DON 是总溶解性氮（TDN）的主要存在形式[15, 16]. 太湖水体 DON 在 TDN 中所占比例为 43% ~70%[16]. 本文研究发现巢湖东部、中部和西部这 3 个湖区 DON 在 TDN 中所占比例低于太湖水体比值，这可能与太湖流域湿地面积较大有关[17]，有研究表明，流域内湿地面积的增大会引起 DON 在 TDN 中所占比例的升高[18]. Ducklow 等[19]在黑海研究发现外源输入是影响 DON 空间分布规律的重要因素. 巢湖西部入湖河流年平均流量较大[13]，因此受外源输入影响，Zhang 等[20]在巢湖研究发现，西湖区氮素浓度较高，本文研究结果也表明西部湖区 DON 浓度显著高于东部和中部湖区.

以往研究资料表明[21]，巢湖蓝藻细胞密度从 4 月开始逐渐升高，在 6 月达到最大值后逐渐降低，自 11 月到次年 3 月维持在一个较低的水平上，结合本研究叶绿素浓度的季节变化规律，将 2013 年 4 月至 2013 年 10 月划分为水华期，2013 年 11 月至 2014 年 4 月划分为非水华期. 本文研究结果表明，巢湖中部和西部湖区 DON/TDN 在水华期间要高于非水华期间，这与在以色列富营养化湖泊 Kinneret 湖[22]和英格兰河口中[23]的研究结果相一致，表明巢湖 DON 的分布呈现季节性差异，藻类水华过程可能是影响 DON 季节变化的重要因素. 有研究发现濑户内海 DON 浓度从 2006 年 5 月开始增加，在 7 月达到最大值后开始减少[24]，但巢湖 DON 浓度季节变化规律与此相反，DON 浓度在水华期间迅速降低，而后逐渐升高，引起这种变化的可能因素是浮游植物和细菌对 DON 的吸收利用.

以往研究认为DON生物可利用性较低[25]，但

表 1　东湖区水环境因子与 DOC，DON 相关分析[1)]（$n=65$）

Table 1　Correlation between DOC, DON and environmental factors in Easter region ($n=65$)

	Chl-a	NH_4^+	NO_3^-	DON	DOC	WT	TN/TP	TDN/TDP	DIN/SRP
Chl-a	1								
NH_4^+	−0.152	1							
NO_3^-	−0.307 *	0.129	1						
DON	−0.237	0.239	0.552 * *	1					
DOC	0.253 *	−0.09	−0.352 * *	−0.309 *	1				
WT	0.295 *	−0.005	0.226	−0.052	0.275 *	1			
TN/TP	−0.576 * *	0.081	0.584 * *	0.435 * *	−0.503 * *	−0.137	1		
TDN/TDP	−0.477 * *	−0.045	0.602 * *	0.498 * *	0.512 * *	−0.293 *	0.757 * *	1	
DIN/SRP	−0.324 * *	0.306 *	0.288 *	0.297 *	−0.264 *	−0.352 * *	0.344 * *	0.538 * *	1

1）* 表示显著相关 $P<0.05$，* * 表示极显著相关 $P<0.01$，下同

表 2 中湖区水环境因子与 DOC,DON 相关分析(n =65)

Table 2 Correlation between DOC, DON and environmental factors in Central region (n =65)

	Chl-a	NH_4^+	NO_3^-	DON	DOC	WT	TN/TP	TDN/TDP	DIN/SRP
Chl-a	1								
NH_4^+	0.039	1							
NO_3^-	−0.209	0.282*	1						
DON	−0.195	0.179	0.778**	1					
DOC	0.427**	−0.074	−0.297*	−0.326**	1				
WT	0.135	0.323**	0.169	0.065	0.353**	1			
TN/TP	−0.276*	0.211	0.625**	0.663**	−0.537**	−0.150	1		
TDN/TDP	−0.197	−0.249*	0.706**	0.743**	−0.532**	−0.223	0.799**	1	
DIN/SRP	−0.055	−0.108	−0.029	−0.050	−0.275*	−0.276*	0.157	0.128	1

表 3 西湖区水环境因子与 DOC,DON 相关分析(n =91)

Table 3 Correlation between DOC, DON and environmental factors in Western region (n =91)

	Chl-a	NH_4^+	NO_3^-	DON	DOC	WT	TN/TP	TDN/TDP	DIN/SRP
Chl-a	1								
NH_4^+	−0.073	1							
NO_3^-	−0.266*	0.476**	1						
DON	−0.265*	0.394**	0.634**	1					
DOC	0.177	0.207*	−0.174	−0.231*	1				
WT	0.101	−0.105	−0.305**	−0.572**	0.246*	1			
TN/TP	−0.302**	0.068	0.453**	0.604*	−0.367**	−0.547**	1		
TDN/TDP	−0.148	−0.145	0.329**	0.480*	−0.420**	−0.629**	0.805**	1	
DIN/SRP	0.061	−0.169	0.185	0.088	−0.336**	−0.422**	0.451**	0.569**	1

近来有研究表明, DON 与某些有害藻类水华的发生密切相关[26, 27]. 尤其是当水环境处于氮限制条件下,DON 可以直接或间接通过细菌分解作用被浮游植物所吸收利用[28]. Matthews 等[29]研究发现美国 Whatcom 湖水体 TN/TP 低于 20 时水体出现氮限制; Lapointe 等[30]研究发现水体 DIN/SRP 低于 16 时水体出现氮限制. 近年来大量研究表明在水生生态系统中,蓝藻生长会受到氮素限制作用[31~33]. 本研究发现,巢湖春夏季水体 TN/TP 迅速降低,冬春季比值升高,这与太湖氮磷比变化规律一致[34, 35],表明水体春夏季出现氮限制,与王书航等[36]在巢湖的研究结论一致. 此外,2013 年 8 月这 3 个湖区 TN/TP 和 TDN/TDP 出现最低值,尤其是西湖区,由于叶绿素浓度显著高于东部和中部湖区,藻类在生长过程中对营养盐的需求量大,氮磷比值在这 3 个湖区中最低,DIN/SRP 降至 5,并且 Chl-a 浓度和 DON 显著负相关,表明西湖区 DON 是蓝藻生长的重要氮源,这与 Kinneret 湖研究结果一致[37]. 综上所述,巢湖水体氮限制条件下蓝藻对 DON 的利用是影响 DON 时空分布规律的重要因素.

3.2 DOC 的时空变化及影响因素

本文研究发现,DOC 浓度在水华期间升高, 在水华过后逐渐降低,这与北海 DOC 的季节变化规律一致[8],但 DOC 的时空变化规律与 DON 完全相反,表明影响巢湖 DON 和 DOC 时空分布的主要驱动因子以及两者的循环转化规律存在显著差异. 有研究发现水温、叶绿素和无机氮浓度是影响 DOC 浓度的重要因素[38~41]. 在日本海[40]研究发现 DOC 与水温显著负相关,而在日本 Otsuchi 湾研究发现,DOC 与水温显著正相关[39]. 本研究发现,这 3 个湖区水温与 DOC 之间都具有显著正相关性,表明水温是控制 DOC 浓度变化的主导因素,这与 Evans 等在英国湖泊及河流中的研究结果相一致[42]. 一方面,温度升高可以促进藻类光合作用产物的释放增加内源性 DOC; 另一方面,温度升高可以促进土壤 DOC 的释放增加外源性 DOC 的输入[43].

此外,浮游植物在生长或消亡过程中会释放大量 DOC,但已有的研究表明[44,45],DOC 与叶绿素的相关性较为复杂. 在 2010 年春夏季,仅在太湖贡湖湾[45]研究发现 DOC 与叶绿素具有显著正相关性,而本研究发现,虽然这 3 个湖区叶绿素浓度具有显著差异,但 DOC 浓度的空间分布并不存在显著差异性,DOC 与叶绿素之间的显著相关性仅存在巢湖东部和中部湖区,表明浮游植物是影响东部和中部湖区 DOC 浓度的重要因素. 已有研究资料表明[46],化学需氧量(高锰酸盐指数)与 DOC 浓度之间具有显

著的正相关性，而位于西湖区的入湖河流南淝河和杭埠河年平均流量较大，水质污染严重，化学需氧量（高锰酸盐指数）最大可达 10.65 mg·L^{-1}[13, 47, 48]，因此大量外源性 DOC 的输入导致叶绿素浓度与 DOC 的相关性较差. 此外，有研究表明，当生长过程中出现氮限制，浮游植物会释放 60% 的初级生产力到水体中[49]，本研究发现在 2013 年 4 月至 9 月期间，东部和中部湖区 NO_3^- 浓度迅速降低，并且东部和中部湖区 DOC 与 NO_3^- 显著负相关，表明在氮限制条件下，水体中硝态氮浓度也是影响 DOC 浓度的重要因素. 而在西湖区，相对于较高的外源性 DOC 输入通量，氮限制条件下产生的内源性 DOC 可能较低，因此硝态氮浓度与 DOC 之间不具有显著负相关性. 而其它环境影响因素如径流输入、浮游动物摄食以及沉积物的再悬浮可能也会影响 DOC 的时空变化规律[50].

3.3　DOC/DON 变化

湖泊生态系统中 DOM 的来源包括外源和内源. 有研究发现日本 Otsuchi 湾[39]，中国西南部高原湖泊[51]以及河流[52]中 DOC 与 DON 显著正相关，表明两者具有共同来源. 但本研究发现这 3 个湖区两者变化规律都相反，DOC 与 DON 显著负相关，表明两者具有不同来源，或者外源与内源输入所占比例存在差异. 有研究发现，藻类水华过程对 DOC/DON 有重要影响[53~55]，在 Chesapeake Bay 褐潮藻水华发生期间，DOC/DON 大于 10[54]. 而陆源输入有机物碳氮比值较高[56]，在 Virginia 河流中研究发现 DOC/DON 比值达到 45[57]. Sawtooth Mountain 湖区出入河流中 DOC/DON 变化范围为 24 ~ 75.1[52]. 此外，有研究表明，藻类水华期间会释放大量高分子溶解性有机物，由于富含碳水化合物，因此具有较高碳氮比值[53]. 本研究中 DOC/DON 变化范围较大，因此，水华期间碳氮比值的增加可能是外源输入、浮游植物释放碳水化合物和高分子量溶解性有机物共同作用所引起. 而水华过后，DOC 被细菌分解利用，导致碳氮比值迅速降低. 此外，DOC/DON 可以用来表征 DOM 的生物可利用性，与 DOM 的可利用性显著负相关[58, 59]. 在南大洋研究发现 DON 浓度是影响 DOC/DON 的重要因素，DON 浓度与碳氮比值显著负相关，而与 DOC 之间不具有相关性[60]，本研究也发现相同规律，由于 DOM 中含氮化合物更容易降解[61, 62]，因此巢湖 DON 对碳氮比值变化具有主导作用，是影响 DOM 生物可利用性的重要组分.

4　结论

（1）3 个湖区 TN/TP 春夏季降低秋冬季升高，东湖区 DIN/SRP 在 2013 年 4 月到 9 月期间迅速降低，西湖区 DIN/SRP 在 2013 年 8 月降至最小值，表明水华期间巢湖水体出现氮限制.

（2）3 个湖区 DON 浓度具有显著差异，西部湖区 DON 浓度显著高于东部和中部湖区. 此外，DON 浓度在春夏季逐渐降低，并且西湖区叶绿素浓度与 DON 显著负相关，表明氮限制条件下，DON 是浮游植物生长的重要氮源补充.

（3）DOC 与 DON 季节变化规律相反，3 个湖区 DOC 浓度没有显著空间差异. 水温、叶绿素浓度和硝态氮浓度是影响 DOC 时空变化的重要因素.

（4）由于含氮化合物更易降解，巢湖 DON 浓度对碳氮比值具有主导作用，是影响 DOM 生物可利用性的主要组分.

参考文献：

[1] Kang P G, Mitchell M J. Bioavailability and size-fraction of dissolved organic carbon, nitrogen, and sulfur at the Arbutus Lake watershed, Adirondack Mountains, NY [J]. Biogeochemistry, 2013, **115**(1-3): 213-234.

[2] Sinsabaugh R L, Findlay S. Dissolved organic matter: Out of the black box into the mainstream [A]. In: Findlay S E G, Sinabaugh R L (Eds.). Aquatic Ecosystems: Interactivity of Dissolved Organic Matter [M]. Amsterdam: Academic Press, 2003. 479-498.

[3] 黎文, 吴丰昌, 傅平青, 等. 贵州红枫湖水体溶解性有机质的坡面特征和季节变化[J]. 环境科学, 2006, **27**(10): 1979-1985.

[4] 张述伟, 王江涛, 李宁, 等. 2010 年春季长江口邻近海区水体中溶解性有机碳、氮的分布特征及其影响因素[J]. 海洋环境科学, 2013, **32**(1): 33-38.

[5] 王腾, 刘广鹏, 朱礼鑫, 等. 长江口邻近海域冬、夏季溶解性有机碳分布特征及影响因子研究[J]. 海洋通报, 2014, **33**(5): 533-540.

[6] 邢建伟, 线薇微, 绳秀珍. 2012 年长江口水域溶解性有机碳分布特征及其与环境因子的关系[J]. 中国海洋大学学报, 2014, **44**(8): 74-82.

[7] Glibert P M, Heil C A, Hollander D, *et al*. Evidence for dissolved organic nitrogen and phosphorus uptake during a cyanobacterial bloom in Florida Bay[J]. Marine Ecology Progress Series, 2004, **280**: 73-83.

[8] Sintes E, Stoderegger K, Parada V, *et al*. Seasonal dynamics of dissolved organic matter and microbial activity in the coastal North Sea[J]. Aquatic Microbial Ecology, 2010, **60**(1): 85-95.

[9] Aoki S, Ohara S, Kimur K, *et al*. Characterization of dissolved organic matter released from *Microcystis aeruginosa* [J].

Analytical Sciences, 2008, **24**(3): 389-394.

[10] Ye L L, Shi X, Wu X D, *et al*. Dynamics of dissolved organic carbon after a cyanobacterial bloom in hypereutrophic Lake Taihu (China)[J]. Limnologica, 2011, **41**(4): 382-388.

[11] 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. 4-5.

[12] 孙睿. 巢湖西半湖主要入湖河流污染构成分析及防治对策研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013. 12-13.

[13] 王书航, 姜霞, 金相灿. 巢湖入湖河流分类及其污染特征分析[J]. 环境科学, 2011, **32**(10): 2834-2839.

[14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 243-279.

[15] De Galan S, Elskens M, Goeyens L, *et al*. Spatial and temporal trends in nutrient concentrations in the Belgian Continental area of the North Sea during the period 1993-2000[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, **61**(3): 517-528.

[16] 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.

[17] 陈荷生. 太湖流域湿地及保护措施[J]. 水资源研究, 2003, **24**(3): 27-29.

[18] Pellerin B A, Wollheim W M, Hopkinson C S, *et al*. Role of wetlands and developed land use on dissolved organic nitrogen concentrations and DON/TDN in northeastern U. S. rivers and streams[J]. Limnology and Oceanography, 2004, **49**(4): 910-918.

[19] Ducklow H W, Hansell D A, Morgan J A. Dissolved organic carbon and nitrogen in the Western Black Sea[J]. Marine Chemistry, 2007, **105**(1-2): 140-150.

[20] Zhang M, Xu J, Xie P. Nitrogen dynamics in large shallow eutrophic Lake Chaohu, China[J]. Environmental Geology, 2008, **55**(1): 1-8.

[21] 贾晓会, 施定基, 史绵红, 等. 巢湖蓝藻水华形成原因探索及"优势种光合假说"[J]. 生态学报, 2011, **31**(11): 2968-2977.

[22] Berman T, Bronk D A. Dissolved organic nitrogen: a dynamic participant in aquatic ecosystems[J]. Aquatic Microbial Ecology, 2003, **31**(3): 279-305.

[23] Badr E S A, Tappin A D, Achterberg E P. Distributions and seasonal variability of dissolved organic nitrogen in two estuaries in SW England[J]. Marine Chemistry, 2008, **110**(3-4): 153-164.

[24] Suksomjit M, Nagao S, Ichimi K, *et al*. Variation of dissolved organic matter and fluorescence characteristics before, during and after phytoplankton bloom[J]. Journal of Oceanography 2009, **65**(6): 835-846.

[25] Bronk D A, See J H, Bradley P, *et al*. DON as a source of bioavailable nitrogen for phytoplankton[J]. Biogeosciences, 2007, **4**: 283-296.

[26] Mulholland M R, Boneillo G, Minor E C. A comparison of N and C uptake during brown tide (*Aureococcus anophagefferens*) blooms from two coastal bays on the east coast of the USA[J]. Harmful Algae, 2004, **3**(4): 361-376.

[27] Monchamp M E, Pick F R, Beisner B E, *et al*. Nitrogen forms influence Microcystin concentration and composition via changes in cyanobacterial community structure[J]. PLoS One, 2014, **9**(1): e85573.

[28] Stepanauskas R, Laudon H, Jørgensen N O G. High DON bioavailability in boreal streams during a spring flood[J]. Limnology and Oceanography, 2000, **45**(6): 1298-1307.

[29] Matthews R, Hilles M, Pelletier G. Determining trophic state in Lake Whatcom, Washington (USA), a soft water lake exhibiting seasonal nitrogen limitation[J]. Hydrobiologia, 2002, **468**(1-3): 107-121.

[30] Lapointe B E, Barile P J, Littler M M, *et al*. Macroalgal blooms on southeast Florida coral reefs I. nutrient stoichiometry of the invasive green alga *Codium isthmocladum* in the wider Caribbean indicates nutrient enrichment[J]. Harmful Algae, 2005, **4**(6): 1092-1105.

[31] Tsukada H, Tsujimura S, Nakahara H. Effect of the nutrient availability on the C, N, and P elemental ratios in the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*[J]. Limnology, 2006, **7**(3): 185-192.

[32] Moisander P H, Ochiai M, Lincoff A. Nutrient limitation of *Microcystis aeruginosa* in northern California Klamath River reservoirs[J]. Harmful Algae, 2009, **8**(6): 889-897.

[33] Kagami M, Hirose Y, Ogura H. Phosphorus and nitrogen limitation of phytoplankton growth in eutrophic Lake Inba, Japan[J]. Limnology, 2013, **14**(1): 51-58.

[34] McCarthy M J, James R T, Chen Y W, *et al*. Nutrient ratios and phytoplankton community structure in the large, shallow, eutrophic, subtropical Lakes Okeechobee (Florida, USA) and Taihu (China)[J]. Limnology, 2009, **10**(3): 215-227.

[35] Xu H, Paerl H W, Qin B Q, *et al*. Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China[J]. Limnology and Oceanography, 2010, **55**(1): 420-432.

[36] 王书航, 姜霞, 金相灿. 巢湖水环境因子的时空变化及对水华发生的影响[J]. 湖泊科学, 2011, **23**(6): 873-880.

[37] Berman T. Dissolved organic nitrogen utilization by an *Aphanizomenon* bloom in Lake Kinneret[J]. Journal of Plankton Research, 1997, **19**(5): 577-586.

[38] Nakatsuka T, Toda M, Kawamura K, *et al*. Dissolved and particulate organic carbon in the Sea of Okhotsk: transport from continental shelf to ocean interior[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, **109**(C9): C09S14.

[39] Fukuda H, Ogawa H, Sohrin R, *et al*. Sources of dissolved organic carbon and nitrogen in Otsuchi Bay on the Sanriku ria coast of Japan in the spring[J]. Coastal Marine Science, 2007, **31**(1): 19-29.

[40] Kim T H, Kim G. Factors controlling the C: N: P stoichiometry of dissolved organic matter in the N-limited, cyanobacteria-dominated East/Japan Sea[J]. Journal of Marine Systems, 2013, **115-116**: 1-9.

[41] Raimbault P, Garcia N, Cerutti F. Distribution of inorganic and

organic nutrients in the South Pacific Ocean-evidence for long-term accumulation of organic matter in nitrogen-depleted waters [J]. Biogeosciences, 2008, **5**: 281-298.

[42] Evans C D, Monteith D T, Cooper D M. Long-term increase in surface water dissolved organic carbon: observations, possible causes and environmental impacts[J]. Environmental Pollution, 2005, **137**(1): 55-71.

[43] Moore T R, Dalva M. Some controls on the release of dissolved organic carbon by plant tissues and soils [J]. Soil Science, 2001, **166**(1): 38-47.

[44] Minor E C, Simjouw J P, Mulhooland M R. Seasonal variations in dissolved organic carbon concentrations and characteristics in a shallow coastal bay[J]. Marine Chemistry, 2006, **101**(3-4): 166-179.

[45] Ye L L, Shi X L, Wu X D, *et al*. Nitrate limitation and accumulation of dissolved organic carbon during a spring-summer cyanobacterial bloom in Lake Taihu (China) [J]. Journal of Limnology, 2012, **71**(1): 67-71.

[46] 张运林, 杨龙元, 秦伯强, 等. 太湖北部湖区 COD 浓度空间分布及与其它要素的相关性研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(6): 1457-1462.

[47] 储茵, 潮洪武, 马友华, 等. 巢湖流域丰乐河洪水事件营养盐输出动态研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013, **22**(8): 1072-1080.

[48] Yang L B, Lei K, Meng W, *et al*. Temporal and spatial changes in nutrients and chlorophyll-a in a shallow lake, Lake Chaohu, China: An 11-year investigation[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, **25**(6): 1117-1123.

[49] Den Meersche K V, Middelburg J J, Soetaert K, *et al*. Carbon-nitrogen coupling and algal-bacterial interactions during an experimental bloom: Modeling a 13C tracer experiment [J]. Limnology and Oceanography, 2004, **49**(3): 862-878.

[50] Koelmans A A, Prevo L. Production of dissolved organic carbon in aquatic sediment suspensions[J]. Water Research, 2003, **37**(9): 2217-2222.

[51] Li W, Wu F C, Liu C Q, *et al*. Temporal and spatial distributions of dissolved organic carbon and nitrogen in two small lakes on the Southwestern China Plateau[J]. Limnology, 2008, **9**(2): 163-171.

[52] Goodman K J, Baker M A, Wurtsbaugh W A. Lakes as buffers of stream dissolved organic matter (DOM) variability: temporal patterns of DOM characteristics in mountain stream-lake systems [J]. Journal of Geophysical Research, 2011, **116**(G4): G00N02.

[53] Kepkay P E, Jellett J F, Niven S E H. Respiration and the carbon-to-nitrogen ratio of a phytoplankton bloom [J]. Marine Ecology Progress Series, 1997, **150**: 249-261.

[54] Lomas M W, Glibert P M, Clougherty D A, *et al*. Elevated organic nutrient ratios associated with brown tide algal blooms of *Aureococcus anophagefferens* (Pelagophyceae) [J]. Journal of Plankton Research, 2001, **23**(12): 1339-1344.

[55] Gobler G J, Sañudo-Wilhelmy S A. Cycling of colloidal organic carbon and nitrogen during an estuarine phytoplankton bloom [J]. Limnology and Oceanography, 2003, **48**(6): 2314-2320.

[56] Meyers P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter [J]. Chemical Geology, 1994, **114**(3-4): 289-302.

[57] Buffam I, Galloway J N, Blum L K, *et al*. A stromfow/baseflow comparison of dissolved organic matter concentrations and bioavailability in an Appalachian stream[J]. Biogeochemistry, 2001, **53**(3): 269-306.

[58] Hood E, Scott D. Riverine organic matter and nutrients in southeast Alaska affected by glacial coverage [J]. Nature Geoscience, 2008, **1**(9): 583-587.

[59] Hunt A P, Parry J D, Hamilton-Taylor J. Further evidence of elemental composition as an indicator of the bioavailability of humic substances to bacteria[J]. Limnology and Oceanography, 2000, **45**(1): 237-241.

[60] Ogawa H, Fukuda R, Koike I. Vertical distributions of dissolved organic carbon and nitrogen in the Southern Ocean[J]. Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 1999, **46**(10): 1809-1826.

[61] Lønborg C, Søndergaard M. Microbial availability and degradation of dissolved organic carbon and nitrogen in two coastal areas[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2009, **81**(4): 513-520.

[62] Lutz B D, Bernhardt E S, Roberts B J, *et al*. Examining the coupling of carbon and nitrogen cycles in Appalachian streams: the role of dissolved organic nitrogen[J]. Ecology, 2011, **92**(3): 720-732.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 36 No. 9

Sep. 15, 2015

CONTENTS

Estimation of $PM_{2.5}$ Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations ····· XU Jian-hui, JIANG Hong (3119)

Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in $PM_{2.5}$ in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon ····· DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, *et al.* (3128)

Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in $PM_{2.5}$ and Gas-Particle Partitioning in Qingdao ····· ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, *et al.* (3135)

Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing ····· HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, *et al.* (3144)

Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015 ····· CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, *et al.* (3150)

Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai ····· WANG Hong-li (3159)

Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter ····· CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, *et al.* (3168)

A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery ····· GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, *et al.* (3175)

Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu ····· YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, *et al.* (3186)

Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei ····· YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, *et al.* (3194)

Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island ····· WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, *et al.* (3203)

Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area ····· LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, *et al.* (3212)

Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}C_{DIC}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River ····· HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, *et al.* (3220)

Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City ····· ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, *et al.* (3230)

Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China ····· CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, *et al.* (3238)

Physiological Effect of *Vallisneria natans* Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol ····· HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, *et al.* (3248)

Effects of Algicidal Substance on *Phaeocystis globosa* and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment ····· YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, *et al.* (3255)

Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions ····· LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, *et al.* (3262)

Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts ····· LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, *et al.* (3269)

Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes ····· ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, *et al.* (3278)

Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results ····· LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, *et al.* (3285)

Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water ····· WU Yue, WU Chun-de, LIU Lü-gang, *et al.* (3292)

XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment ····· WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, *et al.* (3298)

AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries ····· SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, *et al.* (3304)

Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production ····· QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, *et al.* (3311)

A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggery Wastewater ····· SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, *et al.* (3319)

Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System ····· KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, *et al.* (3329)

Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community ····· ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, *et al.* (3339)

Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducting Anaerobic Ammonium Oxidation ····· LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, *et al.* (3345)

Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge ····· LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, *et al.* (3352)

Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An *In-situ* Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River ····· SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, *et al.* (3358)

Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH_4 and N_2O Emission from Double-Season Rice Paddy Field ····· FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, *et al.* (3365)

Characteristics of N_2, N_2O, NO, CO_2 and CH_4 Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil ····· CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, *et al.* (3373)

Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau ····· CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, *et al.* (3383)

Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region ····· GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, *et al.* (3393)

Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During *In-situ* Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia ····· NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, *et al.* (3401)

Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification ····· HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, *et al.* (3411)

Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jianghan Plain: A Case Study of Qianjiang City ····· WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, *et al.* (3422)

Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain ····· LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (3429)

Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China ····· NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, *et al.* (3438)

Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment ····· GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, *et al.* (3447)

Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil ····· LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, *et al.* (3457)

Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil ····· ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, *et al.* (3464)

Influence of *Mirabilis jalapa* Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil ····· JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, *et al.* (3471)

Al^{3+} Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi ····· WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, *et al.* (3479)

Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China ····· YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, *et al.* (3486)

Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing ····· SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, *et al.* (3493)

Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables ····· LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, *et al.* (3501)

Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V_2O_5-WO_3/TiO_2 Catalyst and Activated Carbon ····· REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, *et al.* (3508)

Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services ····· LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, *et al.* (3515)

Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China ····· JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, *et al.* (3522)

Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil ····· SI You-bin, WANG Juan (3533)

《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）

2015 年 9 月 15 日　第 36 卷　第 9 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 36　No. 9　Sep. 15, 2015

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