

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中PM_{2.5}的源贡献分析..... 李莉, 安静宇, 严茹莎 (3543)

华北地区乡村站点(曲周)夏季PM_{2.5}中二次无机组分的生成机制与来源解析 陈仕意, 曾立民, 董华斌, 朱彤 (3554)

成都市大气PM_{2.5}中有机磷阻燃剂的污染水平及来源 印红玲, 李世平, 叶芝祥, 杨迎春, 梁金凤, 游俊杰 (3566)

不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究 黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 胡清华, 陈晓秋 (3573)

北京地区大气消光特征及参数化研究 陈一娜, 赵普生, 何迪, 董璠, 赵秀娟, 张小玲 (3582)

光助芬顿反应催化降解气体中甲苯 郑思灿, 陈天虎, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬 (3590)

遗体火化二噁英类排放水平及影响因素 尹文华, 于晓巍, 韩静磊, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤 (3596)

我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析 张妍, 王元刚, 卢志强, 韩萌, 商彬彬, 曹阳, 张君 (3603)

太湖湖表反照率时空特征及影响因子 曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 肖薇, 肖启涛, 徐家平 (3611)

基于GOCI影像的太湖水体漫衰减系数遥感反演 王珊珊, 李云梅, 王桥, 吕恒 (3620)

河口盐度梯度下短叶茳苳沼泽湿地土壤孔隙水溶解性甲烷时空特征 杨平, 张子川, 杜威宁, 黄佳芳, 全川 (3633)

石家庄市区土壤水分运移的稳定同位素特征分析 陈同同, 陈辉, 韩璐, 邢星, 付阳阳 (3641)

长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素 白薇扬, 张成, 唐振亚, 赵铮, 王定勇 (3649)

三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态 王晓锋, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生 (3662)

湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系 王伟颖, 吕昌伟, 何江, 左乐, 颜道浩 (3674)

水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移 李邵龙, 陈道毅 (3683)

城市道路径流的排污特征 武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 王效科, 陈利顶, 刘刚才 (3691)

杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征 段圣辉, 赵钰, 单保庆, 唐文忠, 张文强, 张淑珍, 郎超 (3697)

海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律 杨哲, 孙迎雪, 石娜, 胡洪管 (3706)

天然有机物和电解质对水中C₆₀凝聚行为的影响 方华, 荆洁, 于江华, 王钰葶 (3715)

钆改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果 王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入 (3720)

污水管网中无机氮类营养盐迁变规律 金鹏康, 焦丁, 任武昂 (3730)

微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究 朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 伏小勇, 陈学民, 邱延波, 吴晓峰 (3738)

倒置A²/O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性 王旭东, 马亚斌, 王磊, 杨怡婷, 黄丹曦, 夏四清 (3743)

高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响 李祥, 崔剑虹, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 刘忻 (3749)

苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性 李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平 (3756)

驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径 宋佳秀, 李玲, 盛凡凡, 郭翠香, 张永明, 李祖元, 王天丽 (3764)

苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响 杨朋兵, 李祥, 黄勇, 朱亮, 崔剑虹, 徐彬彬 (3771)

连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化 鲁磊, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇 (3778)

FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化 马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志 (3786)

污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究 刘吉宝, 李亚明, 吕镗, 魏源送, 杨敏, 郁达伟 (3794)

残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响 贾瑞来, 刘吉宝, 魏源送, 才兴 (3801)

大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征 丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦 (3809)

缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响 祁心, 江长胜, 郝庆菊, 李鉴霖 (3816)

三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制 吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄 (3825)

坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响 冯书珍, 苏以荣, 张伟, 陈香碧, 何寻阳 (3832)

不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响 沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 王久荣, 陈明利, 吴晓英, 吴金水 (3839)

有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险 纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静 (3845)

改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响 陈永华, 张富运, 吴晓英, 梁希, 袁斯文 (3852)

菹草乙酸酯组分抑藻活性物质的分离纯化和鉴定 孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 肖辉, 王长海 (3860)

血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险 李昆, 赵高峰, 周怀东, 赵健, 张盼伟, 刘巧娜, 王兴勋, 刘晓茹 (3866)

生物传感细胞ADP1_pWHlux在水环境急性毒性检测中的应用 唐慧, 宋一之, 姜博, 陈光玉, 贾建丽, 张旭, 李广贺 (3872)

虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况 高锴, 闫佩, 檀翠玲, 罗彦鹤, 孙静, Maria E. Jönsson, Ingvar Brandt, 唐运平 (3878)

纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应 刘林, 赵群芬, 金凯星, 朱帅旗, 王小飞, 吕佳昀 (3884)

黄连根茎浸提物对隆线蚤的急性毒性作用 陈亚楠, 袁玲 (3892)

发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性 谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣 (3896)

搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯 高晨晨, 李锋民, 卢伦, 孙玥 (3906)

COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析 李志华, 张银, 韩杏, 余科, 李汝佳 (3913)

养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用 丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (3918)

土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展 邓欢, 薛洪婧, 姜允斌, 钟文辉 (3926)

《环境科学》征订启事 (3553) 《环境科学》征稿简则 (3589) 信息 (3705, 3755, 3763, 3800)

湖泊水-沉积物界面 DIC 和 DOC 交换通量及耦合关系

王伟颖¹, 吕昌伟^{1,2*}, 何江^{1,2}, 左乐¹, 颜道浩¹

(1. 内蒙古大学环境与资源学院, 呼和浩特 010021; 2. 内蒙古大学环境地质研究所, 呼和浩特 010021)

摘要: 以乌梁素海和岱海为研究对象, 采用柱状芯样模拟法, 开展了2个湖泊水-沉积物界面 DIC 和 DOC 交换通量及耦合关系研究. 结果表明, 在夏季 90 d 的时间内, 乌梁素海明水区沉积物表现为上覆水中 DIC 和 DOC 的碳源, DIC 和 DOC 的平均释放速率分别为 $71.07 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $185.09 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; 岱海浅、深水区沉积物整体上表现为上覆水中 DIC 和 DOC 的碳汇, 浅水区 DIC 和 DOC 的平均释放速率分别为 $155.75 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $-1478.08 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 深水区 DIC 和 DOC 的平均释放速率分别为 $-486.53 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $-1274.02 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; 岱海浅水区和乌梁素海水-沉积物界面 DIC 与 DOC 耦合作用(含量、释放速率、总量变化量的同步变化)主要受微生物摄取、微生物或非生物降解及水生植物的影响; 岱海深水区水-沉积物界面 DIC 与 DOC 耦合作用则主要与 CaCO_3 共沉淀作用及沉积物中无机碳形态分布特征等有关. 总体上, 不同类型湖泊或同一湖泊不同湖区的 DIC 或 DOC 源/汇功能差异是湖泊类型、离岸距离、湖泊水文地球化学及无机碳形态分布等多种因素综合作用的结果.

关键词: DIC; DOC; 耦合关系; 水-沉积物界面; 交换通量

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)10-3674-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.10.015

Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes

WANG Wei-ying¹, LÜ Chang-wei^{1,2*}, HE Jiang^{1,2}, ZUO Le¹, YAN Dao-hao¹

(1. College of Environment and Resources, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China; 2. Institute of Environmental Geology, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China)

Abstract: In this work, the exchange fluxes and coupling relationship of dissolved inorganic carbon (DIC) and dissolved organic carbon (DOC) were investigated across the water-sediment interface in Lake Wuliangsu Hai and Dai Hai by employing columnar simulation method. The results showed that the sediments in non-*Phragmites communis* area from Lake Wuliangsu Hai functioned as the sources of DIC and DOC for overlying water, whereas the sediments from Lake Dai Hai as the sinks during the period of summer (90 days). In the experimental period, the average exchange rates of DIC and DOC were $71.07 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ and $185.09 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ in non-*Phragmites communis* area from Lake Wuliangsu Hai, respectively; while in Lake Dai Hai, they were $155.75 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ and $-1478.08 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ in shoal water zone, and $-486.53 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ and $-1274.02 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ in deep water zone, respectively. The coupling effects between DIC and DOC were governed by hydrobios, microbial uptake, abiotic and microbiological degradation in Lake Wuliangsu Hai and in shoal water zone of Lake Dai Hai; while they were closely related to the coprecipitation process of CaCO_3 and the fraction distribution of inorganic carbon in sediments in deep water zone of Lake Dai Hai. In summary, the sink or source functions of sediments could be considered as the results of synthetic action of lake types, offshore distance, geochemistry and the fraction distribution of inorganic carbon.

Key words: dissolved inorganic carbon; dissolved organic carbon; coupling relationships; water-sediment interface; exchange fluxes

碳是构成生命的基本元素,是整个生物圈物质和能量循环的主体,几乎所有的生物地球化学循环过程都与其有关,因而碳循环研究是目前全球变化研究的焦点与热点^[1,2]. 内陆水体(如河流和湖泊等)在全球碳循环中起着非常重要的作用. 据估计内陆沉积物中碳的埋藏量可以与海洋中碳的埋藏量相当^[3,4]. 溶解性有机质作为全球碳循环的重要组成部分,对于全球气候变化具有重要意义^[5-7]. 在湖泊水生生态系统中,溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)和溶解性无机碳(dissolved inorganic carbon, DIC)是碳的两种主要存在形

式^[8], DOC 可通过微生物摄取或非生物降解转化为 DIC^[9], DIC 可通过初级生产者的光合作用转化为 DOC^[10], 两者的耦合关系对碳的生物地球化学循环具有重要意义. 此外, DOC 作为异养微生物的主要营养源,不但与其他养分(氮、磷和硅)之间存在耦合关系,还通过与 DIC 之间的转化影响

收稿日期: 2015-01-28; 修订日期: 2015-05-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41003049, 40863003, 41163006); 内蒙古自然科学基金项目(2009BS0601)

作者简介: 王伟颖(1990~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境地球化学, E-mail: 156740324@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: lcw2008@imu.edu.cn

着环境污染物质的迁移和降解. 水-沉积物界面作为营养物质地球化学循环的重要环节和场所, 它的碳通量和碳过程及其变化直接影响沉积物的碳源汇功能. 目前关于水-沉积物界面的研究多集中于营养盐交换通量及其生物地球化学循环特征^[11~18], 但有关水-沉积物界面 DIC 和 DOC 交换通量和交换过程, 尤其是 DIC 和 DOC 的耦合关系等方面还鲜见报道.

本文以乌梁素海和岱海 2 个类型不同且富营养化表征不同的湖泊为研究对象, 采用柱状芯样模拟法对 2 个湖泊水-沉积物界面上 DIC 和 DOC 的交换特征和交换通量进行了系统分析, 探讨了 2 个湖泊 DIC 和 DOC 之间的耦合关系, 并初步估算了乌梁素海和岱海水-沉积物界面的 DIC 和 DOC 交换通量, 对进一步研究水-沉积物界面碳过程及探讨不同类型湖泊的碳循环和估算中高纬地区湖泊沉积物碳源/汇功能具有重要意义, 为评价我国内陆水体生态系统碳源/汇的时空分布格局提供了科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

乌梁素海(40°47' ~ 41°03' N, 108°43' ~ 108°57' E)位于内蒙古巴彦淖尔市乌拉特前旗境内, 河套平原的东端, 是黄河流域最大的淡水湖之一, 也是全球范围内荒漠半荒漠地区极为少见的具有多种生态功能与效益的大型浅水草型湖泊. 现有水域面积 333.48 km², 湖面程高 1 018.5 m, 库容量(2.5 ~ 3) × 10⁸ m³, 80% 水域水深 0.8 ~ 1.0 m^[19]. 农田退水是该湖最主要的补给水源, 蒸发和排入黄河为其主要支出途径. 近年来富营养化进程加剧, 湖中以芦

苇为优势种的挺水植物和以龙须眼子菜、穗花狐尾藻为优势种的沉水植物生长繁茂, 遍布全湖^[20]. 目前, 腐烂水草以每年 9 ~ 13 mm 的速度在湖底堆积, 成为世界上沼泽化速度最快的湖泊之一^[21].

岱海(40°29'27" ~ 40°37'6"N, 112°33'31" ~ 112°46'40"E)位于内蒙古乌兰察布市凉城县境内, 是内蒙古高原中西部干旱半干旱区典型的地堑式深水藻型湖泊. 现有水域面积 80.72 km², 湖面程高 1 223 m, 最大水深 16.05 m, 平均水深 7.41 m^[19]. 湖中有草、鲢、鲤、鲫等 29 种鱼类和 76 属藻类. 大气降水及地表径流是岱海的主要补给水源, 湖面蒸发是湖水的主要支出途径. 近年来, 湖泊水位逐年下降, 面积不断缩小, 富营养化程度日益加剧.

1.2 研究方法与实验材料

1.2.1 样品采集与分析

于 2007 年 8 月对乌梁素海(WLSH)和岱海(DH)进行了样品采集, 沉积物用瑞典 Swedaq 公司产 KC mod B 型无扰动采样器和荷兰 Eijkelkamp 公司产 SA Beeker 型沉积物原状采样器采集. 根据乌梁素海水生植物的分布情况, 分别于湖泊北部和南部沉水植物区(不包括芦苇区)各采集 1 个沉积物柱芯(WLSH-2 和 WLSH-9); 依据岱海水深分布, 分别于浅水区和深水区采集了 1 个(DH-2)和 2 个(DH-5 和 DH-10)沉积物柱芯(图 1). 沉积物柱芯采集后, 为避免水-沉积物界面扰动, 现场用橡皮塞将采样管上下两端密封, 保持水-沉积物界面清晰, 垂直放置于垫有塑料泡沫的搁架中, 于 6 h 内带回实验室.

在采集沉积物柱芯的同时, 于同一站位采集上覆水样, 回实验室后立即用 0.45 μm 的玻璃纤维滤膜(Whatman GF/F)过滤, 水样过滤后于 4℃ 下蔽光

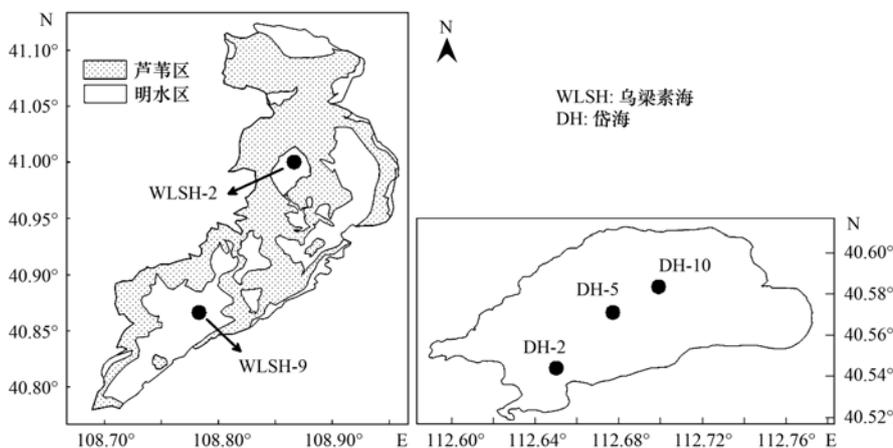


图 1 乌梁素海和岱海采样点位示意

Fig. 1 Location of sampling sites in Wuliangsu Lake and Daihai Lake

保存,用于交换通量模拟实验。

碳酸过饱和是天然水体中碳酸盐沉淀的必要条件,常用离子活度积(ionic activity product, IAP)与平衡常数 K_{sp} 的关系作为判断湖水碳酸过饱和性的依据,以饱和系数 IAP/K_{sp} 表示。

$$IAP = (Ca^{2+})(CO_3^{2-}) = \{r_{Ca^{2+}} \times [Ca^{2+}] \times r_{HCO_3^-} \times K_2 + ALK\} / (H^+) \quad (1)$$

式中, (Ca^{2+}) 和 (CO_3^{2-}) 分别是 Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} 的离子活度; $r_{Ca^{2+}}$ 和 $r_{HCO_3^-}$ 分别是 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的活度系数; $[Ca^{2+}]$ 为湖水 Ca^{2+} 的浓度; K_2 是 H_2CO_3 的二级解离常数; ALK 是湖水碱度; (H^+) 为 H^+ 的活度 [$pH = -\lg(H^+)$]。若 $IAP/K_{sp} > 1$, 则湖水碳酸钙达过饱和。

Ca^{2+} 使用原子吸收分光光度法(GB 11905-89)测定,矿化度使用手提式多参数计 Multi350i (德国)测定,碱度的测定采用酸碱指示剂滴定法(HZHJSZ0130),水样中 DIC 和 DOC 使用 TOC-V_{CPII} (Shimadzu, 日本)分析仪测定,重复测量相对标准偏差 $< 5\%$ 。

1.2.2 水-沉积物界面 DOC 和 DIC 交换通量模拟实验

本研究在不破坏沉积物性状及水-沉积物界面的基础上,采用柱状芯样模拟法估算 2 个湖泊水-沉积物界面的 DIC 和 DOC 交换通量。采用本小组前期工作的实验设计和计算方法来估算模拟实验的释放速率和交换通量^[22]。具体操作如下:实验室内将沉积柱状样中的上层水体用虹吸法抽去,再用虹吸法沿管壁小心滴注已过滤的原采样点水样,至液面高度距沉积物表面 60 ~ 80 cm 处停止,标注刻度。同时,为减小或避免光照、微生物因子等对水-沉积物界面 DIC 和 DOC 扩散通量及 DIC 和 DOC 间转化的影响,于采样管外壁用黑色塑料薄膜对沉积物部分进行包裹处理。另取一无沉积物的洗净采样管,下端用皮塞塞紧,水样加注操作及所有要求同上,作为对照样。于室温下,将所有采样管均垂直放于实验台。从加完过滤水样开始计时,在指定时刻用虹吸法于水-沉积物界面以上 10 cm 处取样,每次取样体积为 100 mL,同时用原样点初始过滤水样补充至刻度,每次取完样立即分析测试水样中的 DIC 和 DOC 含量。模拟实验于所取水样中 DIC 和 DOC 的含量趋于稳定时结束。所有模拟实验均在长度为 1 m,内径为 5.6 cm 的聚丙烯采样管中完成。

依据本小组前期研究,乌梁素海明水区面

积约为 110 km²,岱海浅水区面积约为 50 km²,深水区面积约为 30 km²,分别取乌梁素海 2 个柱芯的平均释放速率作为明水区水-沉积物界面夏季的释放速率, DH-2 柱芯的释放速率作为浅水区水-沉积物界面夏季的释放速率,取 DH-5 和 DH-10 柱芯释放速率的均值作为深水区水-沉积物界面夏季的释放速率,并以此分别来估算乌梁素海夏季明水区、岱海浅水区和深水区水-沉积物界面的 DIC 和 DOC 交换通量。

2 结果与讨论

2.1 DIC 和 DOC 的含量与释放速率

结果表明,岱海湖水中的 DIC 含量显著高于乌梁素海(图 2)。本小组前期研究表明,2 个湖泊水质化学类型虽均为蒸发浓缩控制类型^[20],但在水量收支方面存在较大差别。WLSH 系黄河改道后形成的牛轭湖,主要补给水源为河套灌区的农田退水(占入湖补水的 96%),主要支出方式为蒸发和排入黄河,换水周期为 160 ~ 200 d; 而岱海则为典型内陆封闭湖泊,湖水主要支出方式为湖面蒸发,蒸发量高达 1 938 mm^[20],水位逐年下降,湖泊的盐碱化程度不断提高,湖水中的 DIC 趋于浓缩,属重碳酸盐类水^[23],湖水中碳酸根、碳酸氢根、矿化度、碱度及碳酸盐过饱和系数等水化学指标均显著高于乌梁素海(表 1),导致岱海上覆水中 DIC 含量明显高于乌梁素海。此外,乌梁素海属重度草型富营养化湖泊,湖泊初级生产力显著高于岱海(藻型富营养化)。乌梁素海湖中大量水生植物,尤其是沉水植物的光合作用可强烈吸收和利用上覆水中的 DIC,引起乌梁素海上覆水中 DIC 含量明显降低。因此,湖泊水文特征、生态类型^[24]和水质化学是影响湖泊上覆水中 DIC 含量水平与无机碳循环的主要因素。同时,有研究指出,藻的死细胞会释放高分子量溶解性有机碳,而活细胞释放低分子量溶解性有机碳^[25]。本小组前期研究表明,岱海表层沉积物中的微生物量比乌梁素海高^[26],夏季高温不仅有利于微生物活动,且促进了岱海湖中大量藻类的分解和生产,其排泄物和分泌物形成了上覆水中大部分的 DOC^[27],故岱海上覆水中 DOC 含量略高于乌梁素海(表 1)。

实验结果表明,乌梁素海 2 个沉积柱芯 DOC 释放速率变化趋势相近,而 DIC 释放速率变化不尽相同。就 WLSH-2 而言, DIC 的释放速率在 0 ~ 12 d 内为负且波动幅度较大, 12 d 后为正且逐渐稳定, DOC 的释放速率始终为正并渐趋稳定; 而 WLSH-9 柱芯

表 1 乌梁素海和岱海的水化学组成^[28]

Table 1 Hydrogeochemical composition of the water in lakes(WLSH and DH)

湖泊	Ca ²⁺ /mg·L ⁻¹	CO ₃ ²⁻ /mg·L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	矿化度 /mg·L ⁻¹	ALK /mmol·L ⁻¹	饱和系数 (IAP/K _{sp})	pH	DOC × 10 ⁴ /μmol·L ⁻¹
WLSH	93.31	28.71	151.45	3 529.73	6.43	27.89	7.9~9.0	0.21
DH	59.94	42.60	260.40	6 326.28	10.81	30.83	8.5~9.0	0.71

DOC 和 DIC 的释放速率变化趋势相似,两者的释放速率始终为正并于 14 d 后逐渐趋于稳定(图 3). 在释放达到平衡后,DIC 和 DOC 在 2 个柱芯释放速率的矢量方向都指向上覆水,表明乌梁素海沉积物在夏季表现为上覆水中 DIC 和 DOC 的源. 岱海的 3 个沉积柱芯 DOC 释放速率变化趋势相似,而 DIC 的释放速率曲线存在明显差异(图 3). DH-2 柱芯的 DIC 释放速率始终为正值而 DOC 始终为负值,柱芯

为上覆水 DIC 的源 DOC 的汇; DH-5 柱芯在部分时段内为上覆水 DIC 的源,大部分时间为上覆水 DIC 的汇,而释放时段内始终表现为上覆水 DOC 的汇; DH-10 柱芯的 DIC 及 DOC 释放速率都为负值,柱芯为上覆水 DIC 和 DOC 的汇. 从整体上来看,岱海深、浅水区沉积物在夏季都表现为上覆水中 DOC 的汇,深水区沉积物为深水湖区 DIC 的汇,而浅水区沉积物为浅水湖区 DIC 的源.

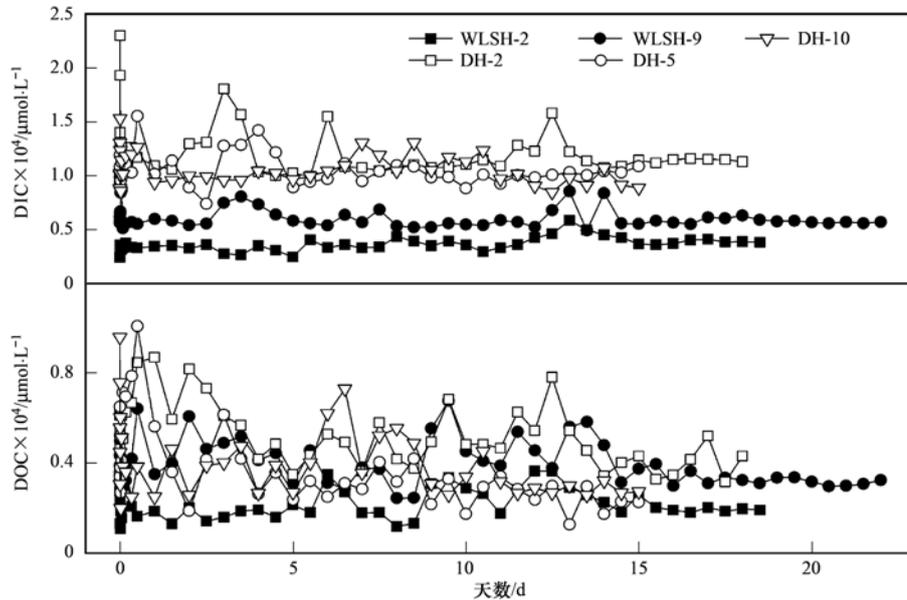


图 2 乌梁素海和岱海模拟实验上覆水柱中 DIC 和 DOC 浓度变化

Fig. 2 Variation of DIC and DOC in the overlying water of core samples (WLSH and DH)

总体上,乌梁素海水-沉积物界面 DIC 和 DOC 交换通量模拟实验约在 15 d 后渐趋稳定,可选取 15 d 后的平均释放速率估算其水-沉积物界面的 DIC 和 DOC 交换通量(图 2 和图 3). 与乌梁素海相比,岱海上覆水中 DIC 和 DOC 含量差异较为明显(图 2). 释放实验中,DH-5 和 DH-10 柱芯上覆水中 DIC 和 DOC 于 10 d 后渐趋稳定,DH-2 柱芯上覆水中 DIC 和 DOC 则于 15 d 后渐趋稳定,可选取 15 d 后和 10 d 后的平均释放速率分别估算岱海浅水区和深水区水-沉积物界面 DIC 和 DOC 的交换通量(图 2 和图 3).

2.2 DIC 和 DOC 的耦合关系

从 DIC 和 DOC 含量的同步变化关系来看,DIC

和 DOC 分别在 2 个湖泊上覆水中表现出显著正相关关系(图 4). 随着实验时间的推移,一方面,体系中的微生物量逐渐增多,其代谢产物 DOC 相应增多,同时微生物的呼吸作用及其对有机碳的降解作用^[6, 9, 29, 30]均会导致 DIC 含量升高;另一方面,有机质的非生物降解^[31]如光化学降解^[32, 33]和水解^[34]等也会使沉积物中的 DIC 和 DOC 向上覆水扩散,导致二者含量的同步升高.

从 DIC 和 DOC 释放速率的同步变化关系来看,DIC 和 DOC 分别在 WLSH 上覆水中表现出显著负相关关系,DH-2 柱芯上覆水中表现出负相关关系,DH-10 柱芯上覆水中表现出显著正相关关系(图 5). 一般而言,影响湖泊中 DOC 的主要因素有河流

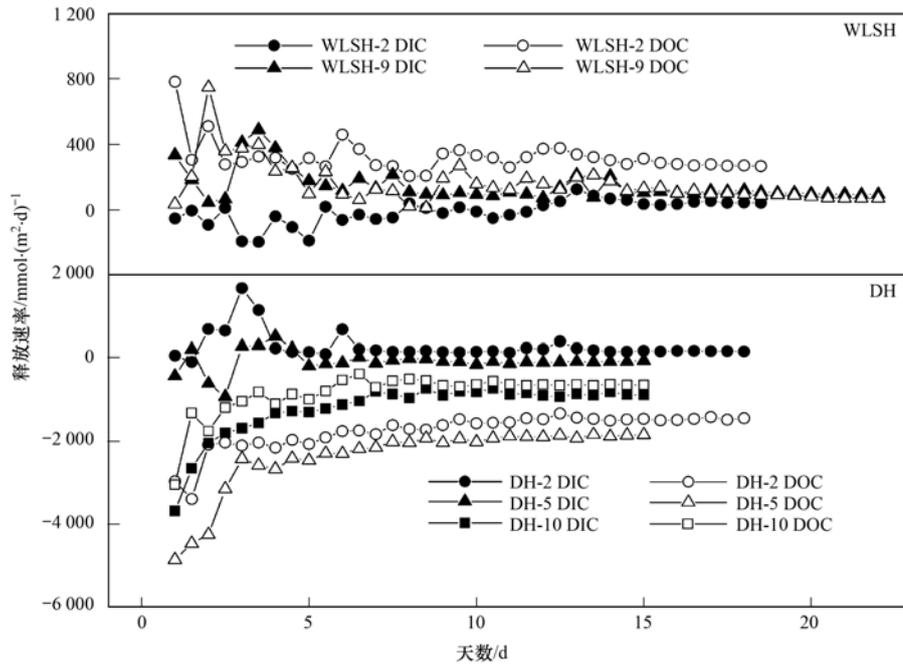


图3 乌梁素海和岱海模拟实验中 DIC 和 DOC 释放速率变化
Fig. 3 DIC and DOC release rates from WLSH and DH sediment cores

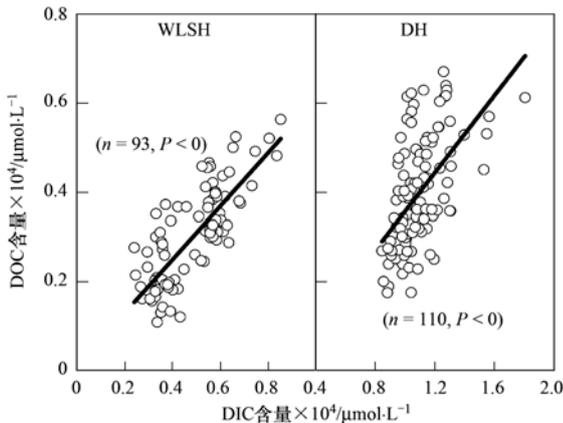


图4 乌梁素海和岱海模拟实验中 DIC 和 DOC 含量的相关关系
Fig. 4 Correlations between DIC and DOC concentration
in core samples (WLSH and DH)

对流作用、微生物摄取、非生物降解及 CaCO_3 的共沉淀作用^[9]。乌梁素海挺水、沉水植物巨大的根际微生态系统和岱海南岸 DH-2 柱芯近岸沉积物颗粒的物理性质都有助于 DIC 和 DOC 从沉积物到上覆水的释放,而随着实验时间的推移,浮游植物的代谢产物和有机质的降解产物 DOC 不断增多,基本满足了微生物摄取^[35]和非生物降解的需求,因此,随着 DIC 释放速率加快,WLSH 沉积物中 DOC 释放速率减慢,DH-2 上覆水中 DOC 转移到沉积物的速率加快。DH-10 柱芯位于深水区,有机碳沉积后受到氧

化还原条件的限制^[23],分解速率较低,保存较好;此外,一方面由于 CaCO_3 共沉淀^[6, 36]对 DOC 沉积的促进作用,另一方面 DOC 可作为生物成因碳酸盐的碳源^[37, 38],在有利于碳酸盐沉积的岱海碱性环境中^[39],随 DIC 向沉积物迁移速率的加快,DOC 的迁移速率也随之加快。

从 DIC 和 DOC 总量变化量的同步变化关系来看(图6),WLSH 上覆水中 DIC 和 DOC 总量变化量表现出显著负相关关系,DH 上覆水中 DIC 和 DOC 总量变化量表现出显著正相关关系。乌梁素海属重度草型富营养化湖泊,湖泊初级生产力显著高于岱海(藻型富营养化),湖中大量水生植物,尤其是沉水植物的光合作用可强烈吸收和利用上覆水中的 DIC,将上覆水中的 DIC 不断转化为 DOC,补给到上覆水中,所以上覆水中 DIC 总量变化量越大,而 DOC 的总量变化量越小。岱海水质属于重碳酸盐类水^[23],沉积物主要表现为上覆水 DIC 和 DOC 的汇,在前文所述的 CaCO_3 共沉淀及 DOC 充当生物成因碳酸盐碳源的作用下,随上覆水中 DIC 总量变化量的增大,DOC 总量变化量亦表现出相同的趋势。

2.3 DIC 和 DOC 在水-沉积物界面的过程与机制分析

近年来,随着乌梁素海和岱海富营养化水平的逐渐提高,湖泊初级生产力逐渐升高,浮游植物对溶解性碳的利用所形成的水-沉积物界面浓度梯度有

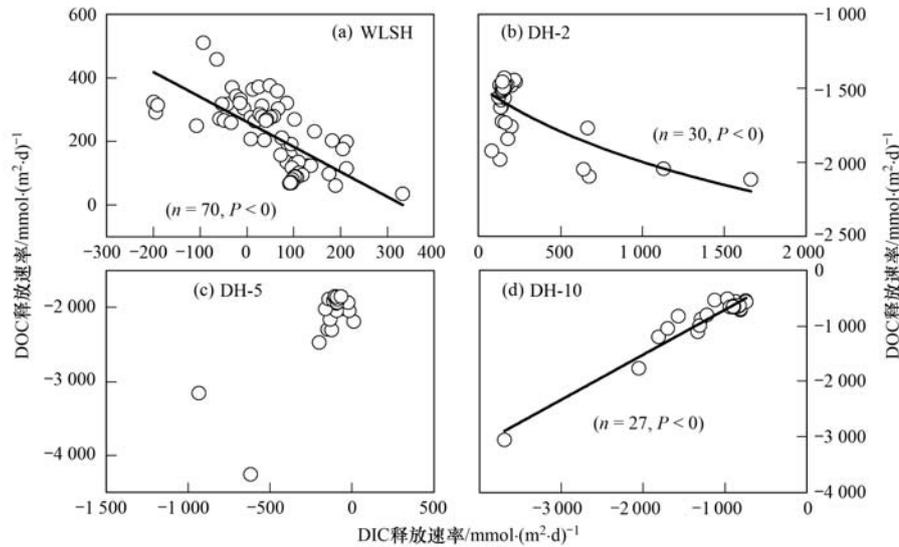


图5 乌梁素海和岱海模拟实验中 DIC 和 DOC 释放速率的相关关系

Fig. 5 Correlations between DIC and DOC release rates from WLSH and DH sediment cores

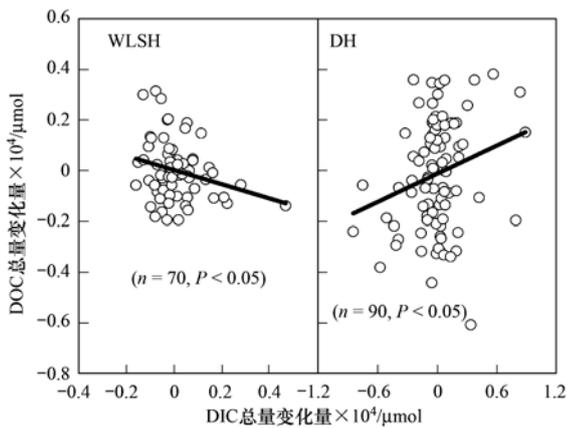


图6 乌梁素海和岱海模拟实验中 DIC 和 DOC 总量变化量的相关关系

Fig. 6 Correlations between DIC and total change of DOC from WLSH and DH sediment cores

利于 DIC 和 DOC 向上覆水释放. 在湖泊的自然形成过程中,来自周边的颗粒物进入湖泊后随水深的加深在重力作用下产生水平分异,由湖周向湖心颗粒物粒度越来越细,离岸越近,不稳定的有机质越多,相对的离岸越远,稳定的有机质越多^[40]. 从柱芯的离岸距离看,5 个柱芯离岸的距离不同,WLSH-2、WLSH-9 和 DH-2 柱芯离岸近,表现为上覆水源的可能性更大,而 DH-5 和 DH-10 柱芯离岸远,表现为上覆水汇的可能性更大,实验结果与上述推断基本吻合,表明柱芯的离岸距离是造成不同柱芯源汇功能差异的原因之一. 从地球化学角度看,乌梁素海的 IAP/ K_{sp} 值不断增高,岱海的 IAP/ K_{sp} 值呈波浪式增长(表 2). 理论上,乌梁素海和岱海都具备了

天然水体碳酸盐沉淀的必要条件和微生物诱导碳酸盐类矿物晶体形成的两个必备条件^[41]. 事实上,乌梁素海(平均水深为 0.8 ~ 1.0 m)沉积物受氧化还原条件和生态系统初级生产力的影响,DIC 和 DOC 易于释放到上覆水中被生物利用,使得乌梁素海沉积物整体上表现为上覆水 DIC 和 DOC 的源;岱海的水位逐年下降,水面逐年缩小,湖泊的盐碱化程度不断提高,水质属于重碳酸盐类水^[23]且藻类等浮游生物较 WLSH 丰富, HCO_3^- 是 DIC 的主要存在形态^[42],浮游生物的代谢产物是内源性 DOC 的主要来源^[43],故 DH 上覆水中 DIC 和 DOC 含量都高于 WLSH,此外,岱海为深水藻型湖泊(平均水深为 7.41 m),水下沉积物不易受水生动植物影响,有机碳沉积后受到氧化还原条件的限制,分解速率较低,保存较好,且岱海的碱性环境有利于碳酸盐沉积,DIC 和 DOC 从上覆水向沉积物转移,岱海沉积物整体上表现为上覆水 DIC 和 DOC 的汇. 同时本小组研究表明,各形态无机碳在沉积物中的结合能力不同,其相应的溶解能力也不同,对水体中的 DIC 的贡献大小也存在差异. 从无机碳的形态特征来看,乌梁素海和岱海表层沉积物中无机碳的形态存在明显差异^[19, 23], $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl-C}$ 相无机碳为岱海表层沉积物中无机碳的主导形态(占总无机碳的 60%),而 $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl-C}$ 相无机碳在岱海弱碱性环境中不易溶出; $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl-C}$ 相和 HCl-C 相无机碳为乌梁素海表层沉积物中无机碳的主导形态,分别占总无机碳的 50% 和 42%,乌梁素海沉积物中含有大量挺水和沉水植物根系分泌物,利于 $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl-C}$

相和 HCl-C 相无机碳溶出,进而有利于沉积物中 DIC 的释放. 无机碳形态是 2 个湖泊碳源汇功能差别的又一原因. 因此,不同类型湖泊或同一湖泊不同湖区的 DIC 或 DOC 源/汇功能差异是湖泊类型、离岸距离、湖泊水文地球化学及无机碳形态分布等多种因素综合作用的结果.

表 2 乌梁素海和岱海湖水中碳酸钙的饱和系数^[28]

Table 2 Supersaturation indexes of calcium carbonate of different years in the water of lakes

湖泊	年份	IAP	饱和系数(IAP/ K_{sp})
WLSH	1981	4.22×10^{-8}	8.82
WLSH	1994	2.96×10^{-9}	6.19
WLSH	2011	1.33×10^{-7}	27.89
DH	1985	3.26×10^{-8}	6.81
DH	1995	1.84×10^{-7}	38.35
DH	2004	9.07×10^{-8}	18.95
DH	2011	1.48×10^{-7}	30.83

2.4 水-沉积物界面 DIC 和 DOC 的交换通量

估算结果表明,在夏季 90 d 的时间内,乌梁素海明水区沉积物表现为上覆水中 DIC 和 DOC 的碳源,约向上覆水体释放了 8.40×10^9 g 的 DIC, 2.20×10^{10} g 的 DOC, DIC 和 DOC 的平均释放速率分别为 $71.07 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $185.09 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; 而岱海的浅、深水区沉积物整体

上表现为上覆水中 DIC 和 DOC 的碳汇,上覆水向沉积物中转入约 0.76×10^{10} g 的 DIC, 12.10×10^{10} g 的 DOC, 其中,浅水区约向上覆水体释放了 8.40×10^9 g 的 DIC, 向沉积物转移了 8.00×10^{10} g 的 DOC, DIC 和 DOC 的平均释放速率分别为 $155.75 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $-1478.08 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 深水区约向沉积物转移了 1.6×10^{10} g 的 DIC, 4.10×10^{10} g 的 DOC, DIC 和 DOC 的平均释放速率分别为 $-486.53 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $-1274.02 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ (表 3). 相较而言,乌梁素海和岱海 DOC 的释放量分别为 DIC 释放量的 2.62 倍和 15.92 倍,表明 DOC 是实验模拟条件下 2 个湖泊水-沉积物界面交换的主要方式,与实验模拟条件为夏季,湖泊浮游生物代谢活动较强,其代谢产物是湖泊内源性 DOC 的主要来源有关. 目前对湖泊沉积物 DIC 和 DOC 释放速率的研究鲜见报道. Argyrou 等^[44]在对庞恰特雷恩湖河口 DOC 的迁移和归宿的研究中指出,DOC 释放速率变化范围为 $4.8 \sim 46.5 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 水底 DOC 交换通量为 $8.8 \times 10^{10} \text{ g} \cdot \text{a}^{-1}$. 对比 Argyrou 等^[44]的研究结果,夏季 90 d 内本研究 DH 的 DOC 交换通量为 $-12.1 \times 10^{10} \text{ g}$, WLSH 的 DOC 交换通量为 $2.2 \times 10^{10} \text{ g}$. 夏季 90 d 内岱海和乌梁素海 DOC 的交换通量,与庞恰特雷恩湖河口 DOC 的交换通量相接近.

表 3 夏季(90 d)乌梁素海和岱海水-沉积物界面 DIC 和 DOC 交换通量

Table 3 DIC and DOC fluxes at the water-sediment interface of WLSH and DH in summer

项目	湖区	平均释放速率/ $\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	面积/ km^2	交换通量/g	合计/g
WLSH-DIC	明水区	71.07	110.00	8.40×10^9	8.40×10^9
WLSH-DOC	明水区	185.09	110.00	2.20×10^{10}	2.20×10^{10}
DH-DIC	浅水区	155.75	50.00	8.40×10^9	-0.76×10^{10}
	深水区	-486.53	30.00	-1.60×10^{10}	
DH-DOC	浅水区	-1478.08	50.00	-8.00×10^{10}	-12.10×10^{10}
	深水区	-1274.02	30.00	-4.10×10^{10}	

3 结论

(1) 模拟实验表明,乌梁素海明水区沉积物在夏季(90 d)表现为上覆水中 DIC 和 DOC 的碳源,平均释放速率分别为 $71.07 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $185.09 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 交换通量分别约为 8.40×10^9 g 和 2.20×10^{10} g. 岱海深、浅水区沉积物分别表现为上覆水中 DIC 的汇和源,交换通量分别为 1.6×10^{10} g 和 8.40×10^9 g, 深、浅水区沉积物均表现为上覆水中 DOC 的汇,交换通量分别为 4.10×10^{10} g 和 8.00×10^{10} g; 总体上,岱海沉积物均表现为上覆水中

DIC 和 DOC 的汇,交换通量分别约为 0.76×10^{10} g 和 12.10×10^{10} g.

(2) 岱海浅水区和乌梁素海水-沉积物界面 DIC 与 DOC 耦合作用(含量、释放速率、总量变化量的同步变化)主要受微生物摄取、微生物或非生物降解及水生植物的影响; 岱海深水区水-沉积物界面 DIC 与 DOC 耦合作用则主要与 CaCO_3 共沉淀作用及沉积物中无机碳形态分布特征等有关. 不同类型湖泊或同一湖泊不同湖区的 DIC 或 DOC 源/汇功能差异是湖泊类型、离岸距离、湖泊水文地球化学及无机碳形态分布等多种因素综合作用的结果.

参考文献:

- [1] Myrbo D A. Carbon cycle in lakes [A]. In: Bengtsson L, Herschy R W, Fairbridge R W (Eds.). *Encyclopedia of Lakes and Reservoirs*[M]. Netherlands: Springer, 2012. 121-125.
- [2] Berger A, Mesinger F, Šijački D. *Climate change* [M]. Netherlands: Springer, 2012.
- [3] Cole J J, Prairie Y T, Caraco N F, *et al.* Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget[J]. *Ecosystems*, 2007, **10**(1): 172-185.
- [4] Tranvik L J, Downing J A, Cotner J B, *et al.* Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate [J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, **54**(6part2): 2298-2314.
- [5] 吴丰昌, 王立英, 黎文, 等. 天然有机质及其在地表环境中的重要性[J]. *湖泊科学*, 2008, **20**(1): 1-12.
- [6] Wetzel R G. Gradient-dominated ecosystems: sources and regulatory functions of dissolved organic matter in freshwater ecosystems[J]. *Hydrobiologia*, 1992, **229**(1): 181-198.
- [7] Balcarczyk K L, Jones J B Jr, Jaffé R, *et al.* Stream dissolved organic matter bioavailability and composition in watersheds underlain with discontinuous permafrost [J]. *Biogeochemistry*, 2009, **94**(3): 255-270.
- [8] Vlahos P. Dynamics of dissolved organic and inorganic carbon in the Mid-Atlantic Bight [D]. Boston: University of Massachusetts Boston, 2001.
- [9] Fukushima T, Park J C, Imai A, *et al.* Dissolved organic carbon in a eutrophic lake; dynamics, biodegradability and origin [J]. *Aquatic Sciences*, 1996, **58**(2): 139-157.
- [10] Fujii M, Ikeda M, Yamanaka Y. Roles of biogeochemical processes in the oceanic carbon cycle described with a simple coupled physical-biogeochemical model [J]. *Journal of Oceanography*, 2005, **61**(5): 803-815.
- [11] 范成新, 秦伯强, 孙越. 梅梁湖和五里湖水-沉积物界面的物质交换[J]. *湖泊科学*, 1998, **10**(1): 73-78.
- [12] Vreča P. Carbon cycling at the sediment-water interface in a eutrophic mountain lake (Jezero na Planini pri Jezeru, Slovenia) [J]. *Organic Geochemistry*, 2003, **34**(5): 671-680.
- [13] Soto-Jimenez M F, Paez-Osuna F, Bojorquez-Leyva H. Nutrient cycling at the sediment-water interface and in sediments at Chiricahueto marsh: a subtropical ecosystem associated with agricultural land uses [J]. *Water Research*, 2003, **37**(4): 719-728.
- [14] Seiki T, Izawa H, Date E. Benthic nutrient remineralization and oxygen consumption in the coastal area of Hiroshima Bay [J]. *Water Research*, 1989, **23**(2): 219-228.
- [15] McDuff R E, Ellis R A. Determining diffusion coefficients in marine sediments; a laboratory study of the validity of resistivity techniques [J]. *American Journal of Science*, 1979, **279**(6): 666-675.
- [16] Liikanen A, Martikainen P J. Effect of ammonium and oxygen on methane and nitrous oxide fluxes across sediment-water interface in a eutrophic lake [J]. *Chemosphere*, 2003, **52**(8): 1287-1293.
- [17] Jin X C, Jiang X, Yao Y, *et al.* Effects of light and oxygen on the uptake and distribution of phosphorus at the sediment-water interface [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **357**(1-3): 231-236.
- [18] Boers P C M, Hese O V. Phosphorus release from the peaty sediments of the Loosdrecht Lakes (The Netherlands) [J]. *Water Research*, 1988, **22**(3): 355-363.
- [19] 吕昌伟. 内蒙古高原湖泊碳(氮、磷、硅)的地球化学特征 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2008.
- [20] 吕昌伟, 何江, 梁英, 等. 乌梁素海和岱海上覆水中碳的形态分布及其制约机制 [J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(2): 330-338.
- [21] 孙惠民, 何江, 吕昌伟, 等. 乌梁素海氮污染及其空间分布格局 [J]. *地理研究*, 2006, **25**(6): 1003-1012.
- [22] 关瑞, 吕昌伟, 何江, 等. 不同类型湖泊水-沉积物界面 DIC 交换通量研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(9): 1841-1847.
- [23] 梁英. 岱海碳、硅地球化学特征及环境信息研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2008.
- [24] 陈洋勤, 黄耀, 于贵瑞. *地球系统碳循环* [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [25] 叶琳琳, 史小丽, 吴晓东, 等. 西太湖秋季蓝藻水华过后细胞裂解对溶解性有机碳影响 [J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(1): 131-136.
- [26] 毛海芳. 乌梁素海、岱海有机碳的地球化学特征 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2009.
- [27] Wetzel R G. *Limnology: lake and river ecosystems* [M]. (3rd ed.). San Diego: Academic Press, 2002.
- [28] 孙园园. 达里诺尔湖沉积物中无机碳的形态分布及对比研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2012.
- [29] Levi Cammack W K, Kalff J, Prairie Y T, *et al.* Fluorescent dissolved organic matter in lakes: Relationships with heterotrophic metabolism [J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, **49**(6): 2034-2045.
- [30] 叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 等. 太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 914-921.
- [31] Benner R, Opsahl S. Molecular indicators of the sources and transformations of dissolved organic matter in the Mississippi river plume [J]. *Organic Geochemistry*, 2001, **32**(4): 597-611.
- [32] 高洁, 江韬, 闫金龙, 等. 天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程: 以涪江-嘉陵江为例 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3397-3407.
- [33] Hernes P J, Benner R. Photochemical and microbial degradation of dissolved lignin phenols: Implications for the fate of terrigenous dissolved organic matter in marine environments [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2003, **108**(C9): 7-1-7-9.
- [34] Stevenson F J. *Humus chemistry: genesis, composition, reactants* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1982.
- [35] Nalewajko C, Lean D R S. Growth and excretion in planktonic algae and bacteria [J]. *Journal of Phycology*, 1972, **8**(4): 361-366.

- [36] Otsuki A, Wetzel R G. Interaction of yellow organic acids with calcium carbonate in freshwater [J]. *Limnology and Oceanography*, 1973, **18**(3): 490-493.
- [37] Santomauro G, Baier J, Huang W J, *et al.* Formation of calcium carbonate polymorphs induced by living microalgae[J]. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, 2012, **3**(4): 413-420.
- [38] Braissant O, Decho A W, Dupraz C, *et al.* Exopolymeric substances of sulfate-reducing bacteria: Interactions with calcium at alkaline pH and implication for formation of carbonate minerals [J]. *Geobiology*, 2007, **5**(4): 401-411.
- [39] 何江, 孙英, 吕昌伟, 等. 岱海表层沉积物中内源磷的释放 [J]. *生态学报*, 2010, **30**(2): 389-398.
- [40] 赵海超, 王圣瑞, 焦立新, 等. 洱海沉积物有机质及其组分空间分布特征[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(3): 243-249.
- [41] 王红梅, 吴晓萍, 邱轩, 等. 微生物成因的碳酸盐矿物研究进展[J]. *微生物学通报*, 2013, **40**(1): 180-189.
- [42] Drever J I. *The geochemistry of natural waters: surface and groundwater environments* [M]. (3rd ed.). New Jersey: Prentice Hall, 1997.
- [43] Bertilsson S, Jones J, Findlay S, *et al.* Supply of dissolved organic matter to aquatic ecosystems: autochthonous sources [A]. In: Findlay S E G, Sinsabaugh R L (Eds.). *Aquatic Ecosystems: Interactivity of Dissolved Organic Matter* [M]. San Diego, CA: Academic Press, 2003. 3-24.
- [44] Argyrou M E, Bianchi T S, Lambert C D. Transport and fate of dissolved organic carbon in the Lake Pontchartrain estuary, Louisiana, U. S. A. [J]. *Biogeochemistry*, 1997, **38**(2): 207-226.

CONTENTS

Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology	LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)
Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in PM _{2.5} at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer	CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (3554)
Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM _{2.5} in Chengdu City	YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (3566)
Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning	HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (3573)
Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing	CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, <i>et al.</i> (3582)
Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction	ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (3590)
Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors	YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, <i>et al.</i> (3596)
Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kitchen Waste in China	ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3603)
Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3611)
Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images	WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3620)
Porewater Dissolved Methane in <i>Cyperus malaccensis</i> Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary	YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, <i>et al.</i> (3633)
Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City	CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, <i>et al.</i> (3641)
Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservoir	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, <i>et al.</i> (3649)
Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, <i>et al.</i> (3662)
Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes	WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (3674)
Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance	LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)
Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater	WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (3691)
Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou	DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (3697)
Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination	YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, <i>et al.</i> (3706)
Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (3715)
Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers	WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (3720)
Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network	JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)
Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater	ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3738)
Efficacy of A ² /O- <i>MBR</i> Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling	WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, <i>et al.</i> (3743)
Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System	LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, <i>et al.</i> (3749)
Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures	LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, <i>et al.</i> (3756)
2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway	SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, <i>et al.</i> (3764)
Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3771)
Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage	LU Lei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (3778)
Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3786)
Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes	LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, <i>et al.</i> (3794)
Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H ₂ O ₂ -Alkaline Process	JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3801)
Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain	DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, <i>et al.</i> (3809)
Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain	QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (3816)
Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3825)
Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China	FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3832)
Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils	SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (3839)
Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment	Ji Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, <i>et al.</i> (3845)
Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants	CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, <i>et al.</i> (3852)
Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes <i>Potamogeton crispus</i>	SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, <i>et al.</i> (3860)
Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3866)
Application of Whole-cell Biosensor ADP1_pWHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment	TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, <i>et al.</i> (3872)
Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring	GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, <i>et al.</i> (3878)
Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish	LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, <i>et al.</i> (3884)
Acute Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to <i>Daphnia carinata</i>	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)
Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions	XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, <i>et al.</i> (3896)
Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater	GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, <i>et al.</i> (3906)
Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components	LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, <i>et al.</i> (3913)
Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (3918)
Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications	DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (3926)

《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10月15日 第36卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 10 Oct. 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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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

国内外公开发行人