

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估	张玉欣, 安俊琳, 林旭, 王俊秀, 师远哲, 刘静达 (1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布	蒋磊, 汤莉莉, 潘良宝, 刘丹彤, 花艳, 张运江, 周宏仓, 崔玉航 (13)
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM _{2.5} 浓度变化的影响	贺祥, 林振山 (22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散	李双德, 徐俊波, 莫胜鹏, 李文辉, 高佳佳, 曹亚裙, 陈运法 (33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量	赵佳玉, 张弥, 肖薇, 王伟, 吴红艳, 张圳, 肖启涛, 胡诚, 于洲, 曹正达, 徐敬争, 刘寿东, 李旭辉 (41)
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH ₄ 与 CO ₂ 浓度日动态	谭立山, 杨平, 何露露, 黄佳芳, 胡智强, 全川 (52)
河南鸡冠洞 CO ₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较	张萍, 杨琰, 孙喆, 梁沙, 张娜, 田宁, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质 (FDOM) 荧光光谱特征	陈俊伊, 王书航, 姜霞, 黄晓峰, 赵丽 (70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析	韩秀秀, 黄晓虎, 余丽燕, 杨浩, 黄昌春, 黄涛, 余艳红, 罗玉 (78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化	张维, 唐翔宇, 鲜青松 (87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应	祁闯, 王国祥, 吴馨婷, 许晓光, 韩睿明, 吴松峻 (95)
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性: 以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例	杨朝辉, 苏群, 陈志辉, 白俊武, 钱新强, 张志敏 (104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水温的响应特征	陈小华, 李小平, 钱晓雍, 胡双庆 (113)
深水型水库藻形态功能组 (MBFG) 的季节演替特征	杨毓, 卢金锁, 张颖 (121)
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素	范志伟, 郝庆菊, 黄哲, 柴雪思, 江长胜 (129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征	华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 崔超, 刘宏斌, 任天志, 张富林, 雷秋良 (138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析: 以羊圈沟为例	贾璐杰, 高扬, 陈维梁, 郝卓, 汪亚峰, 陈利顶 (147)
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较	金树权, 周金波, 包薇红, 陈君, 李丹丹, 李洋 (156)
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估	张芹, 张圣虎, 汪贞, 郭敏, 刘济宁, 石利利, 古文 (162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价	张家泉, 胡天鹏, 邢新丽, 郑煌, 张丽, 占长林, 刘红霞, 肖文胜, 祁士华 (170)
pH 和络合剂对五价砷在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响	王华伟, 李晓月, 李卫华, 孙英杰 (180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制	王文东, 王昌鑫, 刘荟, 韩雨 (188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响	艾扬, 孔东东, 于畅, 沈扬, 李剑 (195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证	高婷婷, 杜鹏, 徐泽琼, 杨军, 张华方, 李喜青 (201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯	赵纯, 张帅, 周宇, 李琨, 周炜, 黎鹏宇, 杨广, 孙志华, 郑怀礼 (212)
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究	王利颖, 石洁, 王凯伦, 关羽琪, 郭瑾 (220)
曝气生物滤池 (Fe ²⁺) -臭氧组合工艺强化处理石化二级出水	徐敏, 吴昌永, 周岳溪, 郭明昆, 王翼 (229)
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整梯烷脂的特异性	王晗, 方芳, 李凯, 邢晖, 郭劲松, 陈猷鹏, 曾前松 (238)
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析	张超, 陶华强, 宋圆圆, 逯彩彩, 郭延凯, 廉静, 郭建博 (247)
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征	刘竹寒, 岳秀, 于广平, 金腊华, 唐嘉丽, 吉世明 (253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制	季民, 刘灵婕, 翟洪艳, 刘京, 苏晓 (260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响	王书永, 钱飞跃, 王建芳, 沈耀良 (269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程	郑莹, 潘杨, 周晓华, 廖炬弘, 孟璇, 夏健伟 (276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制: 基于增强回归树分析	吴雁雯, 张金池, 郭晓平, 刘鑫 (283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响	史广宇, 程媛媛, 施维林 (294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响	石小霞, 赵诣, 张琳, 吴文良, 孟凡乔 (301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸 (PLFAs) 及酶活性的季节变化特征	李南洁, 曾清苹, 何丙辉, 周飞 (309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性	刘晋仙, 李鑫, 景炬辉, 贾彤, 刘兴港, 王小云, 柴宝峰 (318)
安徽省部分城市土壤中全氯化物空间分布及来源解析	李法松, 倪卉, 黄涵宇, 徐志兵, 张倩, 李长霞, 黄文秀, 金陶胜 (327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤活性有机碳的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 刘丹, 王旭东, 张阿凤 (333)
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响	田桃, 曾敏, 周航, 徐璐, 杨文强, 辜娇峰, 邹佳玲, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (343)
砒、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制	陈欣瑶, 杨惠子, 李敏, 牛晓丛, 苏雨轩, 张园 (352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响	高瑞丽, 唐茂, 付庆灵, 郭光光, 李晚, 胡红青 (361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测	李培中, 吕晓健, 王海见, 杨苏才, 魏文侠, 宋云 (368)
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力	黄辉, 宁西翠, 郭瞻宇, 郭堤, 张增强, 李荣华, 王力, Ali Amjad (374)
卤系阻燃剂在东江鱼体中的生物富集	何明靖, 杨婷, 李琦, 王登祥, 赵佳渊 (382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价	陈志良, 黄玲, 周存宇, 钟松雄, 王欣, 戴玉, 蒋晓璐 (389)
蔬菜镉 (Cd) 富集因子变化特征及其影响因素	杨阳, 李艳玲, 陈卫平, 王美娥, 彭驰 (399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响	余亚伟, 杨雨洽, 张成, 易建婷, 安思危, 王定勇 (405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局	赵辉, 郑有飞, 曹嘉晨, 徐静馨, 黄积庆, 袁月 (412)
《环境科学》征稿简则 (12) 《环境科学》征订启事 (194) 信息 (21, 51)	

滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析

韩秀秀^{1,2,3}, 黄晓虎³, 余丽燕³, 杨浩³, 黄昌春^{1,2,3*}, 黄涛^{1,2,3*}, 余艳红⁴, 罗玉⁴

(1. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023; 2. 江苏省物质循环与污染控制重点实验室, 南京 210023; 3. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 4. 云南省环境科学研究院, 中国昆明高原湖泊国际研究中心, 昆明 650000)

摘要: 以滇池湖泊东南部和东部沉积柱为研究对象, 对沉积柱中不同层的沉积物样品使用²¹⁰Pb定年, 分析不同年代沉积物中总有机碳 (TOC) 和正构烷烃的含量及沉积通量, 利用正构烷烃相关指标示踪有机质来源。结果表明: ① 两采样点沉积物中 TOC 含量和沉积通量随时间增长均表现为总体上升的变化趋势; 正构烷烃沉积通量随沉积年代的变化, 分为上升期、下降期与再次上升期这 3 个阶段。② 正构烷烃与 TOC 沉积通量均增大时, 两者来源具有一致性, 均来自于湖泊内部和入湖河流携带的泥沙物质之中; 20 世纪 80 年代至 20 世纪末, 正构烷烃沉积通量在减小, TOC 沉积通量在增大, 说明该时期两者来源存在较大差异, 湖泊内的细菌、藻类对正构烷烃的贡献较大, 而 TOC 受湖泊内部与入湖泥沙的影响较大。③ 两采样点检测到的正构烷烃碳数范围为 C₁₂ ~ C₃₅, 由正构烷烃基本特征与源解析指标分析得出: 挺水植物对滇池湖泊沉积物中有机质来源贡献较大, 浅层深度, 细菌和藻类的贡献突出。

关键词: TOC; 正构烷烃; 沉积物; 沉积通量; 来源解析

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0078-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201606051

Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake

HAN Xiu-xiu^{1,2,3}, HUANG Xiao-hu³, YU Li-yan³, YANG Hao³, HUANG Chang-chun^{1,2,3*}, HUANG Tao^{1,2,3*}, YU Yan-hong⁴, LUO Yu⁴

(1. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Materials Cycling and Pollution Control, Nanjing 210023, China; 3. College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 4. Yunnan Institute of Environmental Science, Kunming China International Research Center for Plateau Lake, Kunming 650000, China)

Abstract: Sediment columns in the southeast and east of Dianchi Lake were taken as the object of the study to determine ages by ²¹⁰Pb dating method. The contents and sediment fluxes of total organic carbon (TOC) and *n*-alkanes of the sediments were investigated, and organic sources were tracked according to the relevant indexes of *n*-alkanes. The results indicated that TOC contents and sediment fluxes of two sampling sediments both presented an increasing trend on the whole; Sediment fluxes of *n*-alkanes varied as three stages: increasing period, decreasing period and re-increasing period. When the sediment fluxes of *n*-alkanes and TOC both went up, it showed that they had the same sources: sediments in the lake and carried by the rivers; From 1980s to the end of 20th century, sediment fluxes of *n*-alkanes were going down while those of TOC were going up. This result means there was a big difference in the sources of *n*-alkanes and TOC. The bacteria and algae in the lake made a great contribution to *n*-alkanes while TOC was mainly influenced by sediments in the lake and carried by the rivers. *n*-alkanes of the two sampling sites both ranged from C₁₂ to C₃₅. Based on the basic features and relevant indexes of *n*-alkanes, we proposed that emergent plants made big contributions to the sources of organic matter in the sediments of Dianchi Lake, simultaneously, bacteria and algae had significant contributions to the sources of organic matter in shallow depth of Dianchi Lake.

Key words: TOC; *n*-alkanes; sediments; sediment fluxes; source apportion

湖泊是流域内物质的主要汇集场所,越来越多的研究表明湖泊是一个不容忽视的碳汇^[1~4]。沉积物是湖泊生态系统的重要组成部分,有机质沉积通量较高,其中有机碳沉积通量甚至大于海洋^[5],是流域侵蚀和环境污染物的重要载体^[6]。湖泊沉积物具有连续性好、完整性佳和信息量大的特点^[7~12],能够指示湖泊及其流域环境演变过程中蕴含的生

物、物理、化学信息等,结合沉积物中不同组分的含量及其沉积通量,能够记录流域及周围人类活动

收稿日期: 2016-06-08; 修订日期: 2016-08-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571324, 41673108); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41503075); 中国博士后科学基金项目(2015M581826); 云南省环境科学研究院(中国昆明高原湖泊国际研究中心)开放基金项目

作者简介: 韩秀秀(1992~),女,硕士研究生,主要研究方向为地表径流与湖泊污染防治, E-mail: 18021419609@163.com

* 通信作者, E-mail: huangchangchun@njnu.edu.cn

信息、湖泊水体营养化程度和湖泊生态环境的演化过程等^[13~16]。

正构烷烃广泛存在于湖泊及流域内的沉积物等地质载体中^[17],结构稳定,抵制周围微生物作用的能力极强,一般不易发生降解,是一种常见的稳定生物标志物^[18~20]。在河流运输及湖泊沉积的过程中,正构烷烃因其稳定的理化性质特征和来源,既能够指示湖泊环境演化的过程,又能够解析有机质的来源^[21~26]。

利用湖泊沉积记录重建地球历史时期古生态和古环境,一直以来都是学者们研究的重点之一^[27]。近年来,湖泊沉积物中分子有机化学记录,以及沉积物中不同组分沉积通量与环境变化过程已成为科学界的研究热点。目前学者们对湖泊沉积物中分子有机化学^[28~30]以及沉积通量^[31~33]的单向研究较多,将两者相结合来分析湖泊沉积物有机质的沉积与来源的研究较为缺乏。

基于此,本研究对滇池两采样点沉积物样品进行了定年分析,测定不同年代沉积物样品中 TOC 和正构烷烃的含量,并进一步估算其沉积通量,探讨滇池沉积物中不同组分沉积特征及影响因素;同时,结合沉积物样品中正构烷烃的基本特征和源解析指标对滇池沉积物中有机质的来源进行了分析。本研究期望通过以上分析,揭示滇池湖泊污染来源、环境变化趋势以及人类活动在环境变化中的作用,以期对滇池及周边环境的治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

滇池(24°40'~25°02'N,102°36'~102°47'E),位于云南省昆明市西南部,属于长江流域金沙江水系,古称滇南泽,亦称昆明池、昆明湖。滇池属于地震断层陷落型湖泊,位于由多组斜滑断层构成的康滇深大断裂带最洼处,湖体为南北走向,南北长 39.0 km,东西平均宽度约为 7.0 km,最大宽度为 13.0 km,湖岸线长 163.2 km,湖面面积 306.3 km²,平均水深 4.4 km,最大水深 10.9 km,湖底较为浅平,集水面积 2 886.0 km²,容水量可达 15.7 亿 m³,是云南省面积最大的湖泊,也是我国第六大淡水湖^[34]。滇池入湖河流多达 29 条,大都发源于北部、东部和南部的山地以及滇池上游的水库等,呈向心状经乡村、城镇以及工业区最终流入滇池。

1.2 样品采集与处理

2014 年 7 月 20 日,采用重力采样器(内经约

8.3 cm)于云南省滇池东南部(24°46'3.4"N,102°42'18.6"E)和东部(24°52'41"N,102°46'0"E)(见图 1)采集了滇池湖泊沉积柱样品,分别标记为 DC-1 和 DC-2。样品运回实验室后,存放于 -50℃ 的超低温冰箱中待用。2015 年 7 月 16 日,以 1 cm 为间隔对样品进行分层切割,DC-1 柱子总长 40 cm,没有上覆水,被切割分为 1~40 号共 40 个样;DC-2 柱子总长 45 cm,除去 16 cm 的上覆水,沉积柱土样被分成 17~45 号共 29 个样。切割好的样品分别盛放在写好编号的培养皿中,冷冻干燥后,称取重量,再将样品研磨以备之后各项指标的测定。

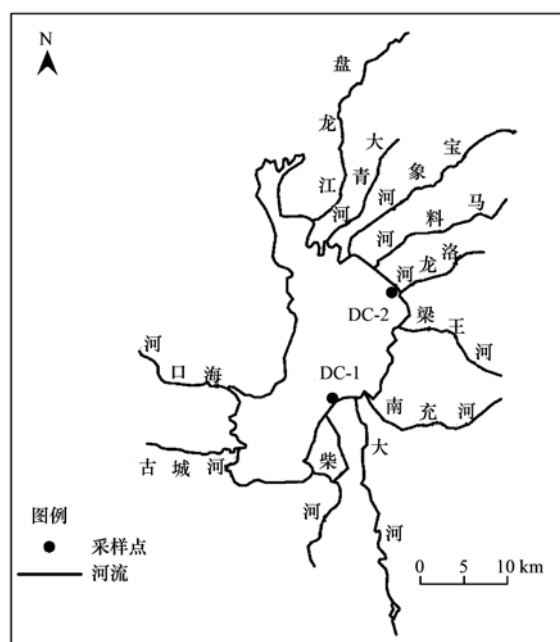


图 1 滇池采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of the sampling sites in the Dianchi Lake

1.3 实验方法

样品定年是在南京师范大学地理科学学院 γ 能谱仪重点实验室进行的,使用的仪器是美国 EG&GORTEC 高纯锗 γ 能谱仪 (GWL-120-15, USA)。称取 5 g 左右的土样于专用的定年塑料罐内密封一个月,使 ²²⁶Ra 和 ²¹⁰Pb 处于永久衰变的平衡体系,之后上机测量^[12,35]。

为得到沉积物的沉积年代,需要对样品 ²¹⁰Pb_{ex} 的比活度进行分析。本研究采用的是 CRS(稳恒沉积通量)模式^[36], h 深度处沉积物年代 t 可用公式(1)求得:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{A_h}{A_0} \quad (1)$$

式中, A_h 表示 h 深度以下各层沉积物中 ²¹⁰Pb_{ex} 的总活度

($\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$); A_0 表示沉积物中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的总活度 ($\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$); λ 表示 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的衰变常数 ($0.03114 \cdot \text{a}^{-1}$).

TOC 含量是由测得的 TC 和 IC 含量之差求出的,利用 SSM-5000A 与 TOC-L 分析仪相结合,采用常规方法测得^[37].

正构烷烃的提取:称取 2 g 冷冻干燥后的土样,用二氯甲烷和甲醇的混合溶剂(体积比,93:7)进行微波萃取(100°C , 10 min),再经 3 次离心,将上层清液合并后旋蒸至 1 mL,加入正己烷替换溶剂(3 次, $10 \text{ mL} \cdot \text{次}^{-1}$),之后用 45 mL 正己烷净化过柱,层析柱自下而上依次为 4 cm 氧化铝、8 cm 硅胶和 1 cm 无水硫酸钠,过柱后的溶液浓缩至 1 mL 移入进样瓶,等待上机测定. 其中,中性氧化铝和硅胶使用前需放入马弗炉内 450°C 灼烧 6 h,无水硫酸钠 650°C 灼烧 10 h.

正构烷烃的测定使用的是气相色谱质谱联用仪(GCMS-PQ2010Plus),色谱柱为安捷伦公司的 HP-5 毛细管气相色谱柱 ($30 \text{ m} \times 0.32 \text{ mm} \times 0.25 \mu\text{m}$). 初始温度为 50°C ,保持 1 min,进样口温度 300°C ,保持 15 min,程序升温通量为 $10^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$. 载气为高

纯氮气,流速为 $1.5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$.

正构烷烃示踪有机质来源的相关指标:

(1) CPI(碳优势指数),是指一定碳链长度范围内奇、偶碳正构烷烃的比值,计算公式是:

$$\text{CPI} = \frac{\sum \text{奇碳数}}{\sum \text{偶碳数}}$$

(2) Paq 是指示沉水、浮水与挺水植物、陆源高等植物相对量的指标,计算公式^[18]:

$$\text{Paq} = \frac{n\text{C}_{21} + n\text{C}_{23}}{n\text{C}_{21} + n\text{C}_{23} + n\text{C}_{29} + n\text{C}_{31}}$$

2 结果与分析

2.1 沉积物计年结果

根据美国 EG&GORTEC 高纯锗 γ 能谱仪的测量结果,得到两采样点沉积物中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的比活度,如图 2 所示. 结合 CRS 模式,利用公式(1)算得的两采样点沉积物的沉积年代如图 3 所示. DC-1 沉积物定年深度为 1 ~ 40 cm,年代跨度是 1899 ~ 2014 年; DC-2 沉积物定年深度为 17 ~ 45 cm,年代跨度是 1896 ~ 2014 年.

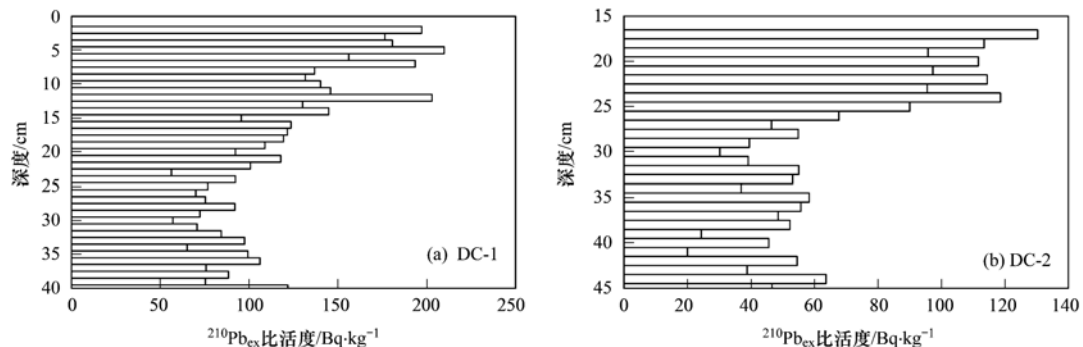


图 2 沉积物中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 垂直分布特征

Fig. 2 Vertical distribution characteristics of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ in sediments

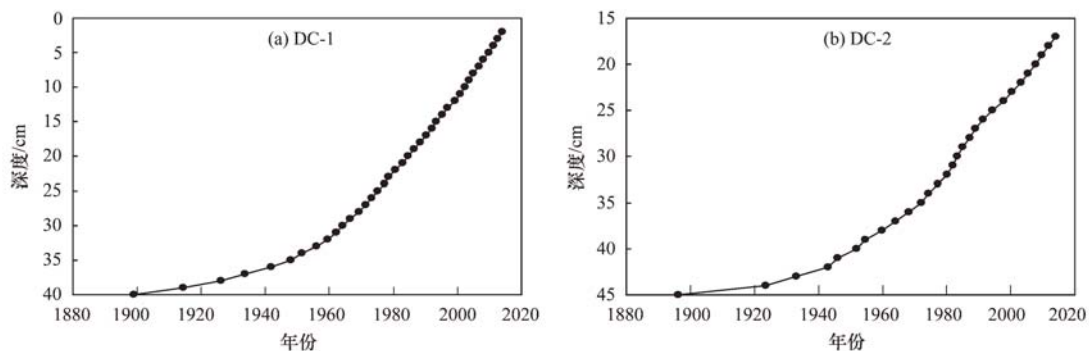


图 3 沉积物深度与沉积年代对应

Fig. 3 Corresponding graphs of sediment depth and sedimentary time

2.2 TOC 垂直变化与沉积通量

图 4(a) 为两采样点沉积物中 TOC 含量随沉积

年代的垂直变化特征,从中可知:DC-1 TOC 含量范围是 $10.67 \sim 53.04 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均含量是 25.37

$\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$; DC-2 TOC 含量范围是 $4.21 \sim 36.34 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均含量是 $11.50 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$; DC-1 TOC 含量明显高于 DC-2. 另外, 两采样点 TOC 含量随沉积年代的变化具有类似的变化特征: 总体上呈现出上升的变化趋势, 20 世纪 90 年代以前上升缓慢, 20 世纪 90 年代之后快速上升, 且均在 2010 年前后, TOC 含量明显减少.

TOC 沉积通量被定义为单位时间、单位面积沉

积物中总有机碳的含量, 单位是 $\text{mg}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{a})^{-1}$. 图 4(b) 是两采样点 TOC 沉积通量随沉积年代的变化特征, 两采样点沉积物中 TOC 沉积通量随沉积年代变化的趋势相一致: 总体呈现上升趋势, 20 世纪 90 年代以前上升缓慢, 自 20 世纪 90 年代起, 上升速度均明显提高; 且 DC-1 采样点沉积物中 TOC 沉积通量明显高于 DC-2. 这一变化特征与两采样点沉积物中 TOC 含量变化特征相一致.

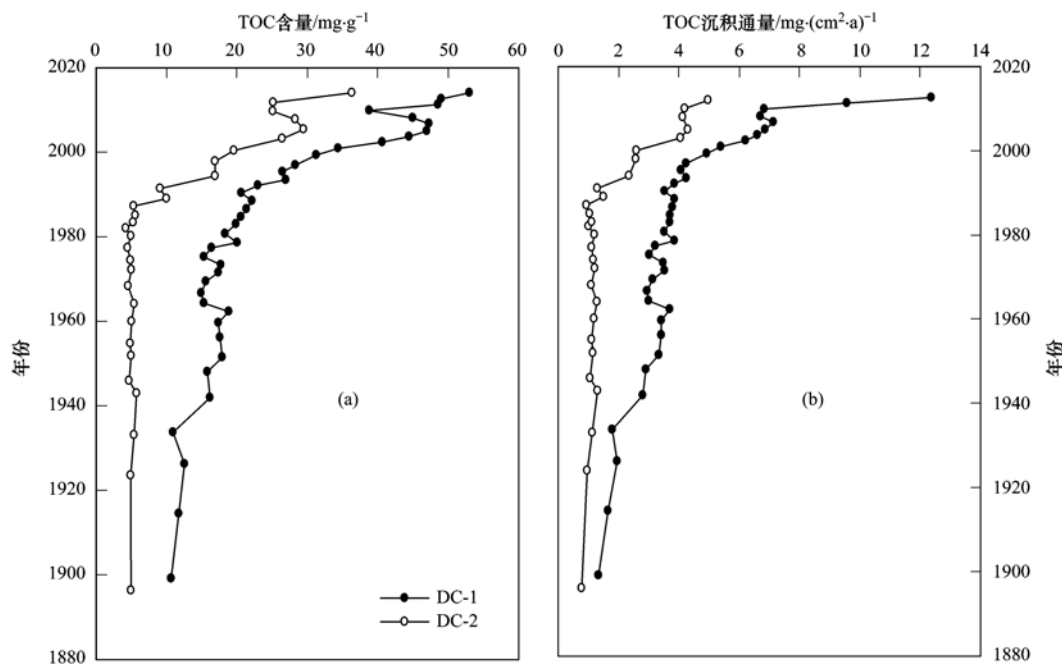


图 4 TOC 含量及沉积通量随沉积年代变化

Fig. 4 Changes of TOC content and deposition fluxes with the sedimentary time

2.3 TOC 中稳定成分正构烷烃的沉积特征

2.3.1 正构烷烃垂直变化与沉积通量

正构烷烃在沉积物中含量相对较低, 但结构稳定, 不易发生改变. 本研究中, DC-1 和 DC-2 沉积物样品中检测到的正构烷烃总浓度的变化范围分别是 $5.30 \sim 27.95 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $6.92 \sim 29.67 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均浓度分别为 $12.88 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $16.23 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. 如图 5 (a) 所示: DC-1 采样点沉积物中正构烷烃占 TOC 含量的质量分数变化范围为 $0.018\% \sim 0.401\%$, 均值为 0.073% ; DC-2 采样点沉积物中正构烷烃含量高于 DC-1, 但占 TOC 含量的质量分数也很低, 变化范围是 $0.084\% \sim 0.644\%$, 均值为 0.240% . TOC 相比于正构烷烃易被分解, 20 世纪 90 年代之后, 随沉积年代的临近, TOC 还未被分解彻底, 同时环境污染也加大了沉积物中 TOC 的含量, 所以沉积物中正构烷烃占 TOC 含量的质量分数表现出明显降低的变化趋势.

由图 5(b) 所示: 沉积物中正构烷烃沉积通量整体上呈现出 DC-2 高于 DC-1 的特征, 且变化趋势可大致分为 3 个阶段: 上升期、下降期与再次上升期. 20 世纪 70 年代之前, 正构烷烃沉积通量较低且增长较为缓慢, 而 DC-2 在该阶段的后期上升较为快速; 20 世纪 70 到 80、90 年代, 呈现明显的下降趋势; 20 世纪 90 年代至 2014 年, 两采样点又呈现出再次上升的变化趋势.

2.3.2 正构烷烃基本特征

来源于不同有机质的正构烷烃表现为不同的碳数范围、主峰碳、奇偶优势和分布类型等, 基于此, 可大致判断沉积物中有机质的来源. 源于细菌、藻类的正构烷烃属于短链正构烷烃, 主要分布在低碳数部分 ($n\text{C}_{14} \sim n\text{C}_{20}$), 主峰碳一般为 C_{17} , 奇偶优势不明显; 沉水维管束和水生浮游植物中的正构烷烃, 属于中等碳链长度 ($n\text{C}_{21} \sim n\text{C}_{25}$), 主峰碳通常为 C_{21} 、 C_{23} 或 C_{25} ; 源于陆源高等植物中的正构烷烃很

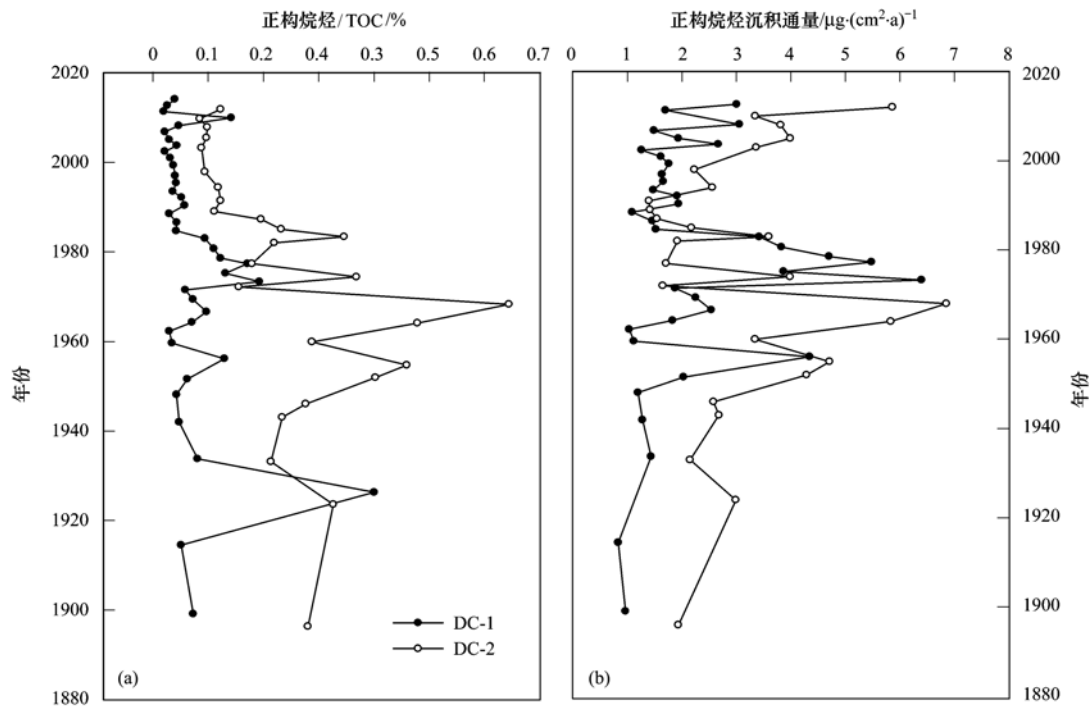


图5 正构烷烃/TOC、正构烷烃沉积通量随沉积年代变化

Fig. 5 Changes of *n*-alkanes/TOC, deposition fluxes of *n*-alkanes with the sedimentary time

大比例上属于长链正构烷烃,主要分布在高碳数部分($nC_{25} \sim nC_{35}$),通常以 C_{27} 、 C_{29} 或 C_{31} 为主峰碳,奇偶优势明显^[38~40]。

本实验中,GC-MS 检测到的两采样点沉积物样品中正构烷烃的碳数范围均在 $C_{12} \sim C_{35}$ 之间,图6、图7分别为DC-1和DC-2两采样点有代表性深度的沉积物样品中正构烷烃的分布图。两采样点均呈现出明显的双峰态后峰型的分布特征,主峰碳为 C_{27} 、 C_{29} 或 C_{31} ,且高数碳部分表现为明显的奇偶优势;低数碳部分,两采样点浅层沉积物样品,以 C_{17} 为次峰碳,奇偶优势不明显,但DC-1从9 cm往下,DC-2从29 cm往下,以 C_{16} 或 C_{18} 为次峰碳,偶数碳略占优势。由此可以判断,两采样点沉积物中正构烷烃示踪的有机质来源随沉积深度的变化表现为不同的混合源,各种源贡献的比例也在发生着变化,主要来源于陆源高等植物或部分挺水植物,在浅层深度,细菌和藻类的贡献突出。

3 讨论

滇池湖泊有29条河流汇入,河流携带的泥沙等物质汇入滇池,与湖泊中的细菌、藻类、植物、动物等产生的物质一起沉积下来,形成沉积物,记录着湖泊的演化过程。沉积物中不同组分的沉积通量,一定程度上能够反映湖泊的自然环境、人类活动和演

化过程等信息。较其他有机质而言,正构烷烃作为一种相对稳定的环境指示物质,广泛存在于细菌、藻类以及水体和陆地上的高等植物等生物体中,结合不同指标,能够指示沉积物中有机质的来源,对研究区域具有更加具体的环境指示意义^[38~41]。

3.1 TOC 沉积变化的原因分析

滇池两采样点沉积物中TOC沉积通量随沉积年代的变化一直处于上升状态,自20世纪90年代起,增长速度均明显提高。另外,DC-1采样点沉积物中TOC沉积通量明显高于DC-2。根据昆明市环境监测中心相关数据显示,自上世纪60年代至今,滇池水质一直处于恶化状况,从Ⅱ类水质变化为Ⅲ类,继而恶化为劣Ⅴ类,2001年起在Ⅴ类与劣Ⅴ类之间波动变化。滇池水质恶化之后,水华现象时常发生,占绝对优势的蓝藻恶性繁殖和积累,造成滇池水体景观的恶化,使得滇池水体发黑发臭,有机污染加剧,TOC沉积通量不断增大。沉积柱表层沉积物中浮游生物的生物沉积及外源泥沙中的有机质尚未矿化,含有较高的有机碳,也是TOC沉积通量明显提高一个显著原因。滇池东岸主要受农业面源的污染,洛龙河、梁王河等入滇河流主要用于农田灌溉,流量较小,其水质虽早已受到污染,但较其他入滇河流而言污染较轻;滇池东南岸入湖河流一般属于排灌兼用的河道,流量较大,对河道的冲刷、有机

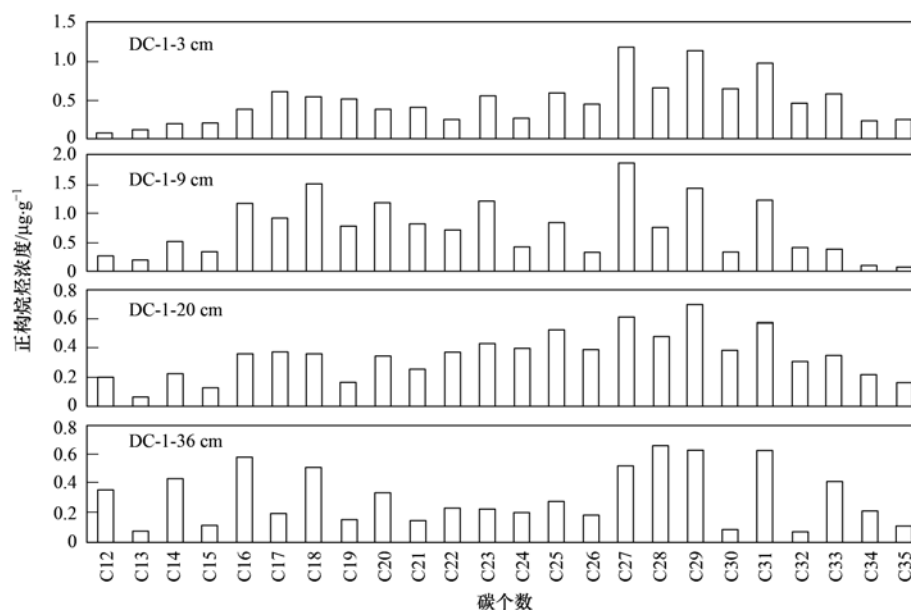


图 6 DC-1 代表性深度沉积物样品中正构烷烃分布

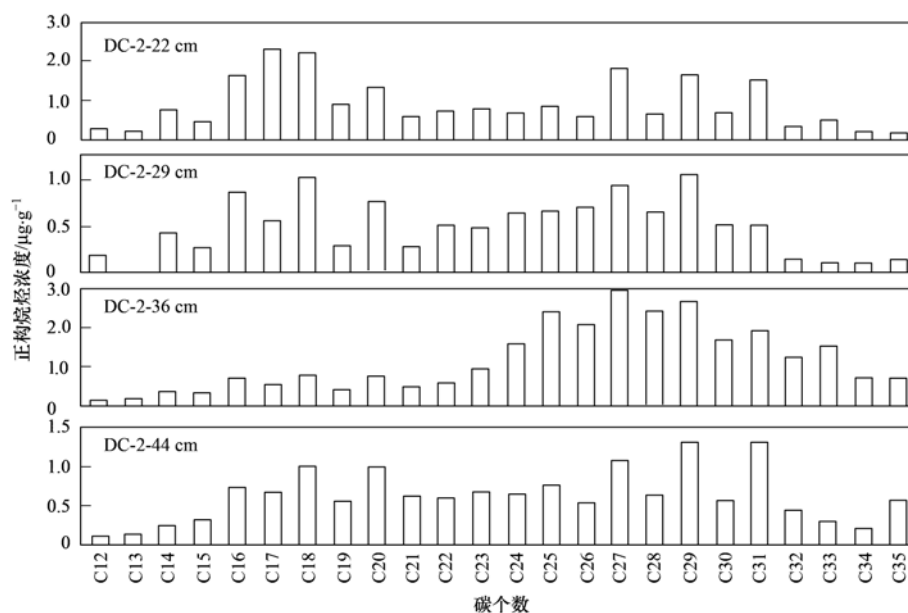
Fig. 6 Distribution profiles of *n*-alkanes in several representative samples with different depth in DC-1

图 7 DC-2 代表性深度沉积物样品中正构烷烃分布

Fig. 7 Distribution profiles of *n*-alkanes in several representative samples with different depth in DC-2

质的携带入湖有较大作用。所以两采样点间沉积物中 TOC 沉积通量的比较结果是 DC-1 明显高于 DC-2。

3.2 TOC 与正构烷烃沉积变化的对比分析

湖泊沉积物中正构烷烃主要来源于细菌、藻类、水体和陆地上的高等植物等生物体中, 结构稳定, 一般很难发生变化; 而 TOC 含量是由沉积物中有机质的输入和沉积环境对有机质的保存能力共同决定的。19 世纪末至 20 世纪 70、80 年代, 滇池湖

泊沉积物中的正构烷烃及 TOC 沉积通量均呈现出上升的变化趋势, 这说明, 该阶段沉积物中正构烷烃及 TOC 来源具有一致性, 均来自于湖泊内部和入湖河流携带的泥沙物质之中。20 世纪 80 年代至 20 世纪末, 湖泊沉积物中正构烷烃沉积通量在降低, TOC 沉积通量依然在上升, 这说明该时期沉积物中正构烷烃和 TOC 来源存在较大差异, 结合文中 CPI 值和正构烷烃基本特征可判断, 该时期湖泊内的细菌、藻类对沉积物中正构烷烃的贡献在增大, 而 TOC 主

要来源于湖泊内部和入湖河流携带的泥沙物质之中,并且沉积物中的生物沉积及外源泥沙中的有机质尚未矿化完全,含有较高的有机碳,也使得 TOC 沉积通量明显提高。

3.3 正构烷烃示踪湖泊有机质来源

由正构烷烃基本特征已经得出:两采样点沉积物中有机质来源随沉积深度的变化表现为不同的混合源,各种源贡献的比例也在发生着变化,主要来源于陆源高等植物或部分挺水植物。由于陆源高等植物与部分水生挺水植物具有相类似的正构烷烃分布特征,所以单从正构烷烃基本特征的角度很难将其区分清楚,而 CPI 和 Paq 指标可有效地解决这一问题。

CPI 和 Paq 是判断有机物质来源的重要指标。陆源高等植物 nC_{27} 、 nC_{29} 和 nC_{31} 含量较高,有明显的奇偶优势,CPI 值通常较大;细菌、藻类产生的正构烷烃奇偶优势不明显,CPI 值较低^[42]。Paq 能够

指示沉水、浮水与挺水植物、陆源高等植物输入的烷烃在高碳数正构烷烃中的比例。根据 Paq 值的大小,可判断有机物质的来源。0.4 < Paq < 1 时,主要来源于沉水和浮水植物;0.1 < Paq < 0.4 时,主要来源于挺水植物;Paq < 0.1 时,主要来源于陆源高等植物^[40]。

由图 8 可知:两采样点 CPI 值均较低,都小于 1.6,Paq 值亦均在 0.1 以上,这说明陆源高等植物对两采样点沉积物样品中有机质来源的贡献并不明显。20 世纪 70 年代起,部分 Paq 值大于 0.4,其余值介于 0.1 ~ 0.4 之间,这说明沉水和浮水植物、挺水植物对滇池东南部和东部沉积物中有机质来源的贡献较大,并且自 20 世纪 70 年代起,挺水植物输入的烷烃在高碳数正构烷烃中的比例明显增加。这一现象符合随沉积年代的临近,滇池流域水体水质富营养化程度变高的事实。

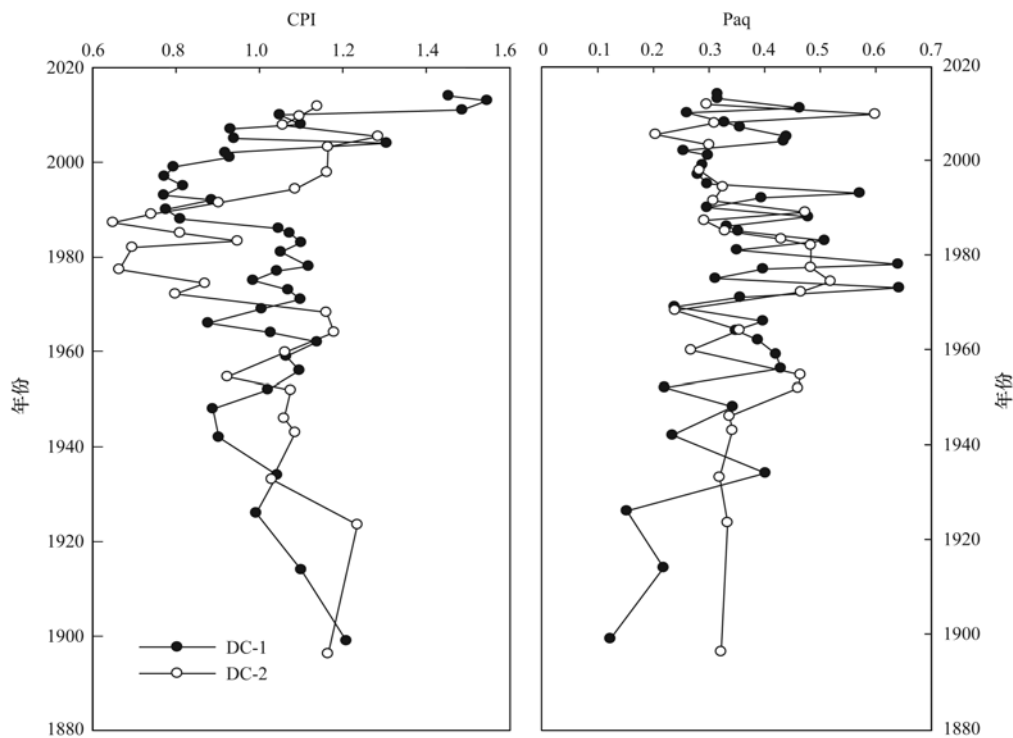


图 8 CPI、Paq 值随沉积年代变化特征

Fig. 8 Changes of CPI, Paq with the sedimentary time

4 结论

(1) DC-1 和 DC-2 沉积物定年年代跨度分别是 1899 ~ 2014 年和 1896 ~ 2014 年。

(2) 两采样点沉积物中 TOC 沉积通量随沉积年代变化的趋势均是总体上升,自 20 世纪 90 年代起,上升速度均明显提高;正构烷烃沉积通量按沉积年代可分为上升期、下降期与再次上升期 3 个阶段。

两采样点 TOC 沉积通量总体上是 DC-1 大于 DC-2,正构烷烃沉积通量总体上是 DC-2 大于 DC-1。

(3) DC-1 和 DC-2 两采样点均呈现明显的双峰态后峰型的分布特征,主峰碳为 C_{27} 、 C_{29} 或 C_{31} ,高数碳部分表现出明显的奇偶优势。这说明滇池东南部和东部沉积物有机质主要来源于陆源高等植物或部分挺水植物。而结合两采样点 CPI 和 Paq 两项指标,表明挺水植物对滇池东南部和东部沉积物有机

质中正构烷烃有较大贡献,且自 20 世纪 70 年代起,挺水植物输入的烷烃在高碳数正构烷烃中的比例明显增加。

参考文献:

- [1] 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): 172-184.
- [2] Downing J A, Cole J J, Middelburg J J, *et al.* Sediment organic carbon burial in agriculturally eutrophic impoundments over the last century[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, **22**(1), doi: 10.1029/2006GB002854.
- [3] Anderson N J, D'andrea W, Fritz S C. Holocene carbon burial by lakes in SW Greenland[J]. *Global Change Biology*, 2009, **15**(11): 2590-2598.
- [4] 于志同,王秀君,赵成义,等. 基于多指标分析的博斯腾湖表层沉积物有机碳来源[J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(5): 983-990.
- Yu Z T, Wang X J, Zhao C Y, *et al.* Source characterization of organic carbon using elemental, isotopic and *n*-alkanes proxies in surface sediment from Lake Bosten, Xinjiang[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(5): 983-990.
- [5] Downing J A. Plenary lecture global limnology: up-scaling aquatic services and processes to planet Earth [J]. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie*, 2009, **30**: 1149-1166.
- [6] 霍坎松,杨松著. 湖泊沉积学原理[M]. 郑光膺,译. 北京: 科学出版社, 1992.
- Hakanson L, Jansson M. Principles of lake sedimentology[M]. Zheng G Y, Trans. Beijing: Science Press, 1992.
- [7] 张振克,王苏民. 中国湖泊沉积记录的环境演变: 研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 1999, **14**(4): 417-422.
- Zhang Z K, Wang S M. Advance and prospects of lake sediments and environmental changes study in China[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1999, **14**(4): 417-422.
- [8] 罗明科,田学达,余辉,等. 长江中游湖泊柱状沉积物的垂直污染特征[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(5): 955-962.
- Luo M K, Tian X D, Yu H, *et al.* Vertical pollution characteristics of sediments from lakes in middle reaches of Yangtze River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(5): 955-962.
- [9] Xu L B, Wu F C, Zheng J, *et al.* Sediment records of Sb and Pb stable isotopic ratios in Lake Qinghai [J]. *Microchemical Journal*, 2011, **97**(1): 25-29.
- [10] Xu L B, Wu F C, Wan G J, *et al.* Relationship between $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ activity and sedimentary organic carbon in sediments of 3 Chinese lakes[J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(12): 3462-3467.
- [11] Zheng J, Yamada M, Wu F C, *et al.* Characterization of Pu concentration and its isotopic composition in soils of Gansu in northwestern China[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2009, **100**(1): 71-75.
- [12] 郭文景,王延华,杨浩,等. 滇池流域双龙水库径流区人类活动的沉积物记录[J]. *土壤*, 2015, **47**(4): 773-780.
- Guo W J, Wang Y H, Yang H, *et al.* Records of human activities in sediments from Shuanglong Reservoir runoff field in Dianchi Watershed[J]. *Soils*, 2015, **47**(4): 773-780.
- [13] 宓莹,黄昌春,杨浩,等. 太湖梅梁湾地区人类活动对湖泊沉积环境的影响[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2014, **9**(4): 26-35.
- Mi Y, Huang C C, Yang H, *et al.* Effects of human activities on sedimentary records in the Meiliang Bay of Taihu[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2014, **9**(4): 26-35.
- [14] Anderson D, Goudie A, Parker A. Global environments through the quaternary: exploring environmental change [M]. Oxford: Oxford University Press, 2013.
- [15] 苏文辉,于晓菲,王国平,等. 沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1431-1436.
- Su W H, Yu X F, Wang G P, *et al.* Effects of canalization on the Iron deposition in Sanjiang Plain [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1431-1436.
- [16] 贾铁飞,张卫国,俞立中,等. 近 800 年来巢湖沉积物营养元素富集特点及其环境演变意义[J]. *地理科学*, 2009, **29**(6): 893-899.
- Jia T F, Zhang W G, Yu L Z, *et al.* Characteristics of nutrient elements enrichment in deposits of Chaohu Lake and its indication for environmental change during last 800 years [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, **29**(6): 893-899.
- [17] Schefuß E, Ratmeyer V, Stuut J B W, *et al.* Carbon isotope analyses of *n*-alkanes in dust from the lower atmosphere over the central eastern Atlantic[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, **67**(10): 1757-1767.
- [18] 张成艳,成小英,董海良,等. 库赛湖沉积物中正构烷烃的分布特征及古环境意义[J]. *地质科技情报*, 2015, **34**(1): 72-77.
- Zhang C Y, Cheng X Y, Dong H L, *et al.* Distribution of *n*-alkanes in sediment core and implications of paleoenvironments of Kusai Lake[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2015, **34**(1): 72-77.
- [19] 郑艳红,程鹏,周卫建. 正构烷烃及单体碳同位素的古植被与古气候意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, **25**(1): 99-104.
- Zheng Y H, Cheng P, Zhou W J. Paleo-vegetation and paleo-climate *n*-alkanes and compound-specific carbon isotopic compositions[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, **25**(1): 99-104.
- [20] 欧杰,王延华,杨浩,等. 正构烷烃及单体碳同位素记录的石臼湖生态环境演变研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 484-493.
- Ou J, Wang Y H, Yang H, *et al.* Eco-environmental evolution inferred from *n*-alkanes and $\delta^{13}\text{C}$ records in the sediments of Shijiu Lake[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 484-493.
- [21] 朱纯,潘建明,卢冰,等. 长江、老黄河口及东海陆架沉积有机质物源指标及有机碳的沉积环境[J]. *海洋学研究*, 2005, **23**(3): 36-46.
- Zhu C, Pan J M, Lu B, *et al.* Source indication and accumulative effect of sedimentary organic matter in the Changjiang Estuary, the old Huanghe River subaqueous delta and the East China Sea shelf[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2005, **23**(3): 36-46.
- [22] 毛登,范德江,郭志刚,等. 长江、黄河河口沉积物中生物

- 标志化合物组成的初步研究[J]. 青岛海洋大学学报, 2001, **31**(5): 747-754.
- Mao D, Fan D H, Guo Z G, *et al.* Preliminary study on biomarker in surface sediments from mouths of the Changjiang River and Huanghe River[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2001, **31**(5): 747-754.
- [23] 丁雅秋. 关于我国东部某些现代沉积物正构烷特征与物质来源的讨论[J]. 石油与天然气地质, 1985, **6**(1): 96-103.
- Ding Y Q. On the characteristics of normal alkane and its provenance from modern sediments in eastern China[J]. Oil & Gas Geology, 1985, **6**(1): 96-103.
- [24] Marr A G, Ingraham J L. Effect of temperature on the composition of fatty acids in *Escherichia coli* [J]. Journal of Bacteriology, 1962, **84**(6): 1260-1267.
- [25] Kawamura K, Ishiwatari R. Polyunsaturated fatty acids in a lacustrine sediment as a possible indicator of paleoclimate[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1981, **45**(2): 149-155.
- [26] Nishimoto S. A chemotaxonomic study of *n*-alkanes in aquatic plants[J]. Journal of Science of the Hiroshima University, 1974, **38**(1): 159-163.
- [27] 房吉敦, 吴丰昌, 熊永强, 等. 滇池湖泊沉积物中游离类脂物的有机地球化学特征[J]. 地球化学, 2009, **38**(1): 96-104.
- Fang J D, Wu F C, Xiong Y Q, *et al.* Organic geochemical characteristics of free lipids in Lake Dianchi sediments [J]. Geochimica, 2009, **38**(1): 96-104.
- [28] 王自翔, 王永莉, 孟培, 等. 泸沽湖沉积物中的铁元素和有机分子记录及其古气候/环境意义[J]. 第四纪研究, 2015, **35**(1): 131-142.
- Wang Z X, Wang Y L, Meng P, *et al.* Iron and *n*-alkanes records and their environmental significance of Lugu Lake, southeastern Tibetan Plateau[J]. Quaternary Sciences, 2015, **35**(1): 131-142.
- [29] Zhang G, Sheng G Y, Peng P A, *et al.* Molecular organic geochemical peculiarities of lacustrine core sediments in Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, **45**(S1): 67-70.
- [30] Zhang G, Sheng G Y, Fu J M, *et al.* Molecular organic geochemical evidence for paleoenvironmental changes at 11.87-12.28 m in GS-1 sedimentary core, Gucheng Lake, East China [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, **44**(15): 1407-1411.
- [31] 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 等. 三江平原典型沼泽湿地养分累积与沉积特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(8): 2928-2936.
- Li R L, Chai M W, Qiu G Y, *et al.* Profile nutrient distribution and sedimentary characteristics in typical marshes of Sanjiang Plain[J]. Environmental Science, 2014, **35**(8): 2928-2936.
- [32] 赵锁志, 孔凡吉, 王喜宽, 等. 内蒙古乌梁素海²¹⁰Pb和¹³⁷Cs测年与现代沉积速率[J]. 现代地质, 2008, **22**(6): 909-914.
- Zhao S Z, Kong F J, Wang X K, *et al.* ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs dating and modern sedimentation rate on the Wuliangsu Lake of Inner Mongolia[J]. Geoscience, 2008, **22**(6): 909-914.
- [33] 张瑞, 潘少明, 汪亚平, 等. 长江河口水下三角洲²¹⁰Pb分布特征及其沉积速率[J]. 沉积学报, 2009, **27**(4): 704-713.
- Zhang R, Pan S M, Wang Y P, *et al.* Sedimentation rates and characteristics of radionuclide ²¹⁰Pb at the subaqueous delta in Changjiang Estuary[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, **27**(4): 704-713.
- [34] 包立, 张乃明, 农明英. 滇池东大河流域土壤磷素累积规律及空间分布特征研究[J]. 土壤, 2014, **46**(3): 470-474.
- Bao L, Zhang N M, Nong M Y. Soil phosphorus variation, accumulation and spatial distribution in Dongda River Basin, Dianchi Lake[J]. Soils, 2014, **46**(3): 470-474.
- [35] 王小雷, 杨浩, 赵其国, 等. 云南滇池近现代沉积速率及气候干湿变化的粒度记录[J]. 地理研究, 2011, **30**(1): 161-171.
- Wang X L, Yang H, Zhao Q G, *et al.* Modern sedimentation rates and dry-humid change inferred from grain size records in Dianchi Lake, Yunnan Province [J]. Geographical Research, 2011, **30**(1): 161-171.
- [36] 王小雷, 杨浩, 赵其国, 等. 利用²¹⁰Pb、¹³⁷Cs和²⁴¹Am计年法研究云南抚仙湖现代沉积速率[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(1): 136-142.
- Wang X L, Yang H, Zhao Q G, *et al.* Radionuclide dating (²¹⁰Pb, ¹³⁷Cs, ²⁴¹Am) and modern sedimentation rate in Lake Fuxian [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(1): 136-142.
- [37] 刘勇, 朱元荣, 弓晓峰, 等. 滇池近代富营养化加剧过程的沉积记录[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(11): 1236-1242.
- Liu Y, Zhu Y R, Gong X F, *et al.* Sedimentary records of accelerated eutrophication in Dianchi Lake over the recent decades [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, **25**(11): 1236-1242.
- [38] Xiang S Y, Zeng F M, Wang G C, *et al.* Environmental evolution of the south margin of Qaidam Basin reconstructed from the Holocene loess deposit by *n*-alkane and pollen records [J]. Journal of Earth Science, 2013, **24**(2): 170-178.
- [39] Ficken K J, Li B, Swain D L, *et al.* An *n*-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes [J]. Organic Geochemistry, 2000, **31**(7-8): 745-749.
- [40] Han J, Calvin M. Hydrocarbon distribution of algae and bacteria, and microbiological activity in sediments [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1969, **64**(2): 436-443.
- [41] 李凤, 徐刚, 贺行良, 等. 东海近岸表层沉积物中正构烷烃的组成、分布及来源分析[J]. 海洋环境科学, 2016, **35**(3): 398-403.
- Li F, Xu G, He X L, *et al.* Composition, distribution and source of *n*-alkanes in surface sediments from the coast of East China Sea [J]. Marine Environmental Science, 2016, **35**(3): 398-403.
- [42] 孙丰瑞, 李玉梅, 陈践发, 等. 高原植物正构烷烃的奇偶优势及其环境指示意义[J]. 世界地质, 2011, **30**(3): 469-473.
- Sun F R, Li Y M, Chen J F, *et al.* Odd-even preference of *n*-alkanes in plateau plants and its environmental indication significance [J]. Global Geology, 2011, **30**(3): 469-473.

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibaohe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Jun-hui, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172