

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次(卷终)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估	罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)
南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析	秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)
南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征	师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)
苏州市 PM _{2.5} 中水溶性离子的季节变化及来源分析	王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沐,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)
成都西南郊区春季 PM _{2.5} 中元素特征及重金属潜在生态风险评价	杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)
泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析	张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)
青奥会期间基于δ ¹³ C观测的大气 CO ₂ 来源解析	徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)
民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析	韩博,黄佳敏,魏志强(4524)
畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究	张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)
有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物	邢奕,王骥,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)
基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性	楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)
亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征	龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎晨,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)
浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析	马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)
太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应	高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)
利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性	黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)
三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估	杨兵,何丙辉,王德宝(4586)
太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价	武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)
滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义	余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)
洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性	王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)
蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化	赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)
三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究	卓海华,孙志伟,谭凌智,吴云丽,兰静(4633)
模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险	刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)
有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验	张思,何江涛,朱晓婧(4651)
无机型城市景观水体表面污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例	李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)
清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应	吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)
南方典型农田区浅层地下水污染特征	郭卉,虞敏达,何小松,罗岳平(4680)
水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用	马燕华,苏春利,刘伟江,朱亚鹏,李俊霞(4690)
粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果	沈庆然,侯娟,李田(4700)
超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝	赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4706)
QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO ₂ 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制	姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)
群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能	赵畅,王文昭,徐期勇(4720)
水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性	王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)
外加微量 N ₂ H ₄ 下 SBR 中硝化微生物特性	肖凡颖,张代钧,卢培利(4734)
部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析	鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)
典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响	姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)
生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析	张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)
开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析	吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)
全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性	李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)
水肥用量对玉米季土壤 CO ₂ 排放的综合影响	杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)
福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性	姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)
基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估	杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)
北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系	柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)
准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征	刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)
河北平原潮土中微生物对氮降解特征	张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)
砷-非对蜈蚣草根不同碳基团的影响	廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)
碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力	蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净, Mukesh Kumar Awasthi(4848)
不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响	孙航,蒋煜峰,石磊平,慕仲峰,展惠英(4857)
南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征	田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李黎,宋波(4867)
Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 复合氧化物制备及其除氟性能	汪爱河,周康根,刘行,陈泉州,刘芳(4874)
铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂	付军,范芳,李海宁,张高生(4882)
不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性	王春峰,陈冠飞,朱艳臣,姚丹,皇晓晨,王连军(4891)
《环境科学》第 37 卷(2016 年)总目录	(4899)
《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)	

滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义

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

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 2. 云南省环境科学研究院, 昆明 650032; 3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023)

摘要: 为探明滇池沉积物中有机质的组成特征及其环境意义, 2014 年 7 月采集滇池北部和南部各一根柱状沉积物样品, 分析了 TOC(总有机碳)、TN(总氮)、正构烷烃含量剖面变化规律。结果表明: ①滇池沉积物中 TOC 与 TN 自 20 世纪 70 年代以后增加显著, 说明了滇池初级生产力不断提高; ②滇池沉积物正构烷烃代用指标 $n\text{-C}_{27}/n\text{-C}_{31}$ 比值及 P_{aq} 和 CPI 表明, 滇池沉积物从下往上草本植物与木本植物交替变化, 且沉积物中的高碳数有机质主要来自滇池内源的沉水和漂浮大型植物; ③C/N 比值及正构烷烃分布特征表明, 滇池不同湖区沉积物有机质来源存在差异: 滇池北部沉积物中有机质主要来源于内源植物和陆源有机物的人为源; 滇池南部沉积物中有机质主要来源于内源大型水生植物和陆源高等植物混源。为此, 在今后滇池沉积物有机质的研究中, 应加强对滇池不同湖区有机质的深入分析。

关键词: 滇池; 正构烷烃; 不同湖区

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4605-10 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201605151

Distribution Characteristics of *n*-alkanes in Sediment Core and Implication of Environment in Different Lakes of Dianchi

YU Li-yan¹, HAN Xiu-xiu¹, HUANG Xiao-hu¹, WU Ya-lin¹, YANG Hao¹, HUANG Tao^{1*}, YU Yan-hong², HUANG Chang-chun^{1,3*}

(1. School of Geographic Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Environmental Science Research Institute of Yunnan Province, Kunming 650032, China; 3. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to study the composition and environment significance of the organic matter in Lake Dianchi, samples from two sediment cores from the northern and southern parts of the lake were collected in July, 2014. Meanwhile, the vertical distributions of total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), *n*-alkanes fractions were investigated. The results showed that ① the concentrations of TOC and TN had been clearly increasing since the 1970s, which implied that the primary productivity of Lake Dianchi was continuously enhanced; ② The values of the parameter $n\text{-C}_{27}/n\text{-C}_{31}$, P_{aq} and CPI indicated the alternation between herbs and woody plants from the bottom up in Lake Dianchi sediments. Besides, the high carbon number of organic matter in sediments mainly originated from endogenous submerged floating and large plants; ③ The index of C/N and distribution characteristics of *n*-alkanes suggested differences in the various sources of organic matter in different lakes. In detail, organic matter came from terrigenous organic matter of anthropogenic sources and endogenous bacteria in the sediments of northern Dianchi, while organic matter was derived from endogenous aquatic and terrestrial higher plants mixed source in the sediments of southern Dianchi. Finally, it is worthwhile to emphasize further research on organic matter in different lakes of Lake Dianchi.

Key words: Lake Dianchi; *n*-alkanes; different lakes

正构烷烃是无支链的饱和烃, 是石油烃的重要组成部分之一, 其组成符合 C_nH_{2n+2} , 结构稳定, 广泛存在于海洋沉积物、陆地和海洋生物中。正构烷烃在湖泊、海洋沉积物、黄土等地质载体中含量丰富, 并能很好地反映环境与气候的变化^[1]。不同生物来源的正构烷烃其组成与分布特征存在差异, 并且湖泊及其流域气候和环境的变化也会导致正构烷烃分布特征发生变化^[2]。正构烷烃广泛存在于细菌、水体中的藻类、沉水、挺水和漂浮植物、陆地高等植物及化石燃料或生物质的不完全燃烧。其中, 细菌和藻类的正构烷烃碳数分布范围为 $n\text{-C}_{15} \sim n\text{-C}_{20}$ ^[3];

大型水生植物^[4]或来源于原油、汽车尾气和化石燃料不完全燃烧, 且不具明显奇偶优势^[5]。正构烷烃的碳数分布范围为 $n\text{-C}_{21} \sim n\text{-C}_{25}$, 陆地高等植物正构烷烃的碳数分布范围为 $n\text{-C}_{25} \sim n\text{-C}_{33}$ ^[6]。正构烷烃作

收稿日期: 2016-05-22; 修订日期: 2016-07-20

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41503075); 国家自然科学基金项目(41571324, 41673108); 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: 余丽燕(1990~), 女, 硕士, 主要研究方向为沉积物有机质、湖泊水体富营养化, E-mail: 1606695310@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: 09392@njnu.edu.cn;
huangchangchun@njnu.edu.cn

为一种常见的分子标志物,其组成和分布特征可指示区域有机质来源与气候、环境变化趋势。为此,全面了解滇池沉积物中正构烷烃分布特征,将有助于推测区域内的气候、环境变化。

云南省是我国湖泊最多的省份之一,而滇池是其众多湖泊中面积最大的。湖泊经历了较长的地质历史时期,其水体中有机质来源、含量可直接记录于沉积物中,且沉积物保存了丰富的气候、环境演变以及区域人类活动等信息,成为研究不同历史时期环境演变的良好载体,通过沉积物中相关指标的剖面变化来判断不同历史时期湖泊及区域环境状况。为此,相关研究以滇池及其周边湖泊的沉积物为载体,主要分析了沉积物中化学性质稳定的生物标志物,因其可以记录历史时期环境演变状况,明确相关年代序列,便可了解滇池环境演变的过程。自1980年以来,有关滇池及其流域沉积物有机质的研究逐渐深入,房吉敦等^[7]研究了滇池沉积物有机质的地球化学特征,揭示了滇池从一个贫营养的湖泊演变成富营养化湖泊的过程,且滇池内源有机物和陆源有机质的输入都呈现快速增长的趋势。Xiong等^[8]通过有机地球化学元素研究了滇池环境变化,结果表明滇池富营养化是受自然和人为活动的双重影响。Qu等^[9]定性、定量地研究了滇池水中8种主要的大型植物中溶解有机质,表明水中大型植物C/N含量最高。目前的研究主要集中在滇池沉积物时间尺度上有机物的变化特征,或者局限于滇池中部沉积物中有机质的类型分析,而缺少滇池北部、南部沉积物的空间变化特征及其对比分析。为此,有必要综合分析滇池北部、南部沉积物中正构烷烃的时、空分布特征。

环境变化成为全球关注的热点,湖泊沉积物逐渐成为全球气候和环境变化研究的重要载体之一。为了分析滇池环境演变的过程及环境恶化原因,本研究通过对滇池北部和南部沉积有机质来源的探索,重建该区域150多年来的环境演变过程,探讨了滇池北部和滇池南部沉积有机质的时空变化特征,以期相关部门治理滇池及其周边区域环境提供科学的依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

滇池位于云贵高原中部,是云南省境内最大的断陷构造而形成的淡水湖,流域面积2 920 km²。位于昆明市南端,承载了昆明市近79%的人口;南端

至晋宁县内,距市区5 km。滇池东、南、北三面有盘龙江等20余条河流汇入,湖水由西面海口流出,经普渡河而入金沙江,形似弦月,南北长39 km,东西宽13.5 km,平均宽度约8 km。

1.2 样品采集和分析

滇池湖体沉积物样品的研究分布点,充分考虑到不同湖区影响作用的差别及滇池周边不同的功能区域分布状况。2014年7月,用重力采样器在环滇池北部、中部和南部总共采集了7个沉积物样芯,沉积物样芯保持完好,悬浮层未受扰动。滇池北部湖区靠近昆明市市区,有多条入湖河流的汇入;滇池南部湖区周边是农业生产区域,且也有多条河流输入。为此,本文分析了滇池北部和南部(图1)采集的26 cm和35 cm沉积物样芯,实验室按照1 cm间隔对沉积物样芯进行分样,滇池北部沉积物样芯DCB(从上至下编号为0~25),滇池南部沉积物样芯DCN(从上至下编号为0~34)。分好的样品迅速装入培养皿中,然后采用冷冻干燥仪对样品进行干燥处理。

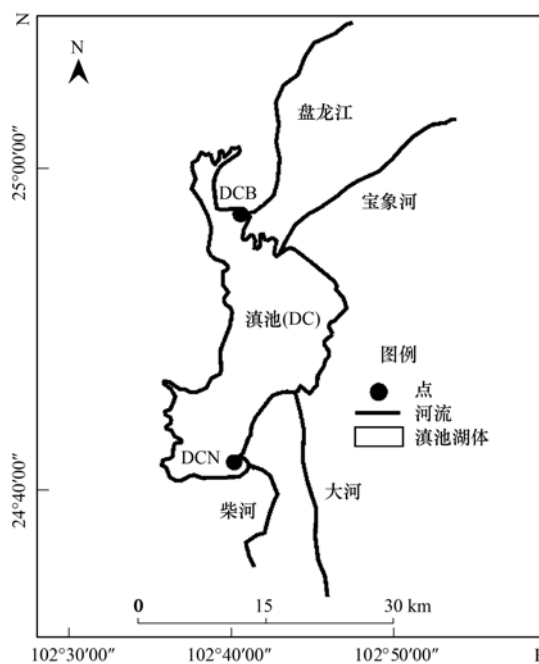


图1 滇池沉积物采样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites of sediment in Dianchi

1.3 测试分析

样品经冷冻干燥后,研磨成100目的粉末,采用日本岛津 Shimadzu 公司 TOC-L 系列总有机碳分析仪进行总有机碳(TOC)测定,和日本岛津 Shimadzu 公司的 UV3600 紫外分光光度计进行总氮(TN)测定。

正构烷烃分析:用二氯甲烷:甲醇(体积比 93:7)混合溶剂浸泡一段时间,再用微波萃取.萃取结束后将样品及溶剂转移至 50 mL 具塞离心管中,离心 3 次,每次 15 min ($5\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$),分离上清液在旋转蒸发器中浓缩约 1 mL 后进行固相萃取柱分离净化,使用正己烷进行洗脱,收集洗脱液,使用旋转蒸发器浓缩到 1 mL 待测. 色谱条件为 Rtx[®] ~5MS (30 m × 0.25 mm × 0.25); 离子源为电子轰击源(EI),采用不分流进样方式,载气为 99.99% 的氢气. 进样口温度 300℃,程序升温:50℃ 恒温 1 min 后,10℃·min⁻¹ 升至 300℃,恒温 10 min. 质谱条件:离子源温度 200℃,接口温度 300℃. 正构烷烃的鉴定依据出峰时间得出,测定前使用正构烷烃标准溶液混标在气相色谱质谱仪(GCMS-QP2010 Ultra,日本)上的保留时间确定色谱条件,使用峰面积外标法测定标准曲线并进行样品定性、定量分析.

样品定年分析:称取冷冻干燥后,经研磨过 100 目筛的土样装满同一规格的白色离心管中,蜡封 20 d 左右以使²²⁶Ra和²¹⁰Pb处于衰变平衡,然后使用美国的 EG & GORTEC 高纯锗 γ 谱仪(GWL ~ 120 ~ 15, USA)测定放射性核素²²⁶Ra和²¹⁰Pb的含量,样品的测量时间均大于 25 000 s. 过剩²¹⁰Pb比活度(用²¹⁰Pb_{ex}表示)为²¹⁰Pb的比活度与²²⁶Ra比活度的差值. 其中,²¹⁰Pb、²²⁶Ra的比活度分别由 46.5 keV、351.9 keV 处的 γ 射线谱峰面积求算^[10],其中标准样品¹³⁷Cs、²²⁶Ra和²¹⁰Pb分别由中国原子能科学研究所和英国利物浦大学提供.

1.4 正构烷烃分子代用指标分析

(1) C/N 比值: 4 ~ 10 之间来自内源藻类; > 12

来自陆地高等植物, > 20 来自陆源维管束植物^[11].

(2) $P_{aq} = (C_{23} + C_{25}) / (C_{23} + C_{25} + C_{29} + C_{31})$, $P_{aq} < 0.1$ 表明陆源高等植物输入; $0.1 < P_{aq} < 0.4$, 表明挺水植物和陆源高等植物混合来源输入; $0.4 < P_{aq} < 1$ 表明沉水植物和漂浮大型植物输入^[12].

(3) $CPI = 1/2 \times [(\text{odd} \sum (C_{23} - C_{33}) / \text{even} \sum (C_{22} - C_{32}) + \text{odd} \sum (C_{23} - C_{33}) / \text{even} \sum (C_{24} - C_{34}))]$, 趋于 1 时,表明有机质成熟度高,其中正构烷烃的来源以原油及人为活动为主; 远大于 1 时,表明有机质成熟度较低; 当 $CPI > 4$ 时,代表具有较高的陆源高等植物输入^[13].

2 结果与分析

2.1 沉积年代序列的建立及各个柱芯²¹⁰Pb剖面分布特征

滇池沉积物年代序列的建立使用稳定初始放射性通量(constant rate of supply, CRS)模式^[14]计算沉积物年代,该模式不要求²¹⁰Pb_{ex}的比活度随深度分布呈指数分布,且可以计算出不同质量深度区间的沉积速率(沉积通量). 沉积物质量深度($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)是指某一深度以上单位面积的沉积物的累计质量,由孔隙度校正而得,能提高定年结果的精确性,为此本研究统一用质量深度($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)来描述沉积状况. 通过²¹⁰PbCRS 模式进行定年计算,分析 DCB 和 DCN 沉积物中²¹⁰Pb_{ex}比活度随质量深度变化数据(图 2),可得沉积物年代. 本研究中 DCB 沉积物定年深度为 0 ~ 25 cm,年代跨度 1877 ~ 2014 年,平均沉积速率为 $0.09\text{ g}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{a})^{-1}$. DCN 沉积物中定年深度为 0 ~ 34 cm,年代跨度 1860 ~ 2014 年,平均沉积速率为 $0.11\text{ g}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{a})^{-1}$. 从图 2 可知,滇池北部和南

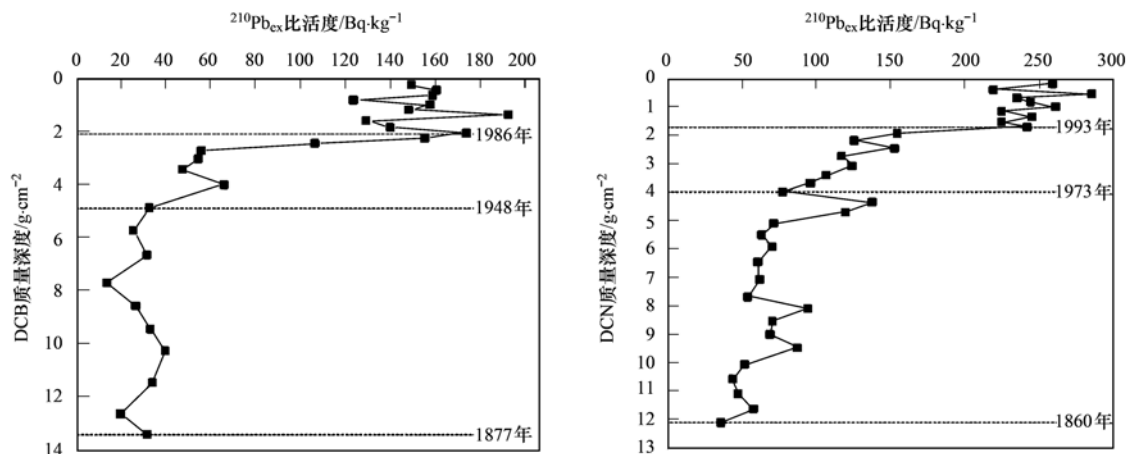


图 2 滇池沉积物中²¹⁰Pb_{ex}比活度的剖面分布

Fig. 2 Distribution of vertical section ²¹⁰Pb_{ex} in sediments of Lake Dianchi

部沉积物样芯中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的比活度总体上从表层到底层呈现不规则的波动分布模式,且最大比活度并没有出现在最表层,这种变化可能与近期的扰动有关,滇池北部毗邻人口集中的昆明城区,滇池南部以村镇区为主,后期的人类活动对其具有一定的干扰作用^[15,16]. 滇池北部和南部沉积样芯的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 垂直剖面都可将其变化划分为3个阶段,DCB沉积物样芯:①表层至质量深度为 $2.08\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 处,其 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的比活度呈波动变化且变化趋势较大;②质量深度为 $2.08\sim 4.89\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 之间,其 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的比活度呈明显的减小趋势,其范围在 $33\sim 174\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$;③质量深度为 $4.89\sim 13.41\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 之间,其 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的比活度呈现微弱波浪形变化,整体变化趋势不大,其范围在 $14\sim 33\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$; DCN沉积物样芯:①表层至质量深度为 $1.73\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 处,其 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的比活度波动变化,其范围在 $219\sim 285\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$;②质量深度为 $1.73\sim 4.00\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 之间,其 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的比活度呈明显的减小趋势,其范围在 $78\sim 242\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$;③质量深度为 $4.00\sim 12.10\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 之间,其 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的比活度波动变化,整体变化趋势不大,其范围在 $36\sim 138\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.

2.2 沉积物污染代用 TOC、TN 指标及其分析

湖泊沉积物中的 TOC、TN 主要来自内源水生生物及陆源植物,反映湖泊初级生产力,因此,较高含量的 TOC、TN 表明陆源有机物输入增加及湖泊初级生产力的提高^[17]. 随着人类活动对环境的影响程度逐渐增强,较高含量的 TOC 和 TN 能反映人类活动的方式与强度^[18]. 总体而言,沉积物中氮来源是从内外混源逐渐转变为工农业废水、生活污水输入为主的过程^[19,20]. 为此,湖泊沉积物中 TOC、TN 可以有效地记录湖泊环境演变过程. 滇池沉积物中 TOC 与 TN 呈显著相关(见图 3),表明滇池沉积物

中的氮主要为有机氮或与有机物来源、分解等密切相关^[21]. 如图 4 所示,沉积物中 TOC、TN 含量总体上从底层至表层呈增加的趋势,且 TOC 和 TN 有同步变化的趋势. 其中 TOC、TN 含量在 1948 年开始出现突增的变化趋势,再者,自 1986 年以来滇池沉积物中 TOC、TN 在递增的基础上波动变化较为明显. DCB 沉积物中 TOC 和 TN 含量范围分别是: $0.03\%\sim 9.96\%$ 、 $0.01\%\sim 0.49\%$,平均值分别是: 4.65% 、 0.23% ,DCN 沉积物中 TOC 和 TN 含量范围分别是: $0.83\%\sim 10.29\%$ 、 $0.08\%\sim 0.63\%$,平均值分别是: 3.41% 、 0.28% . 沉积物两个剖面大致都可分为 3 个不同阶段,DCB 沉积物:1877~1944 年,TOC、TN 含量较低,且呈缓慢增长趋势,湖泊沉积延续原有自然演化轨迹;1944~1970 年,TOC、TN 含量明显增加,呈快速增长趋势;湖泊初级生产力提高;1970 年至今,TOC 和 TN 含量分别骤增至 7.06 和 0.49,这一阶段 TOC、TN 含量的值较高. DCN 沉积物:1860~1948 年,TOC、TN 含量较低且变化趋势平缓,湖泊初级生产力较低;1948~1988 年,TOC、TN 含量快速增长,湖泊初级生产力有所提高;1988 年至今,这一阶段 TOC、TN 含量值处于一个较高的水平且波动变化明显. 滇池沉积物中的 TOC、TN 含量随时间年代不断增加,这主要与滇池不同历史时期 TOC、TN 的来源、输入量关系密切.

2.3 沉积物中 碳、氮比例关系分析

湖泊在地质大循环、生态小循环中扮演着重要的角色,湖泊与各圈层进行物质交换和能量传递,其中沉积物有机质主要来源于内源的水生生物和陆源有机物. 湖泊沉积物经过不同历史时期的理化反应,导致有机质主要以有机碳、有机氮形式存在,因此,TOC、TN 含量在一定程度上反映了湖泊及其流

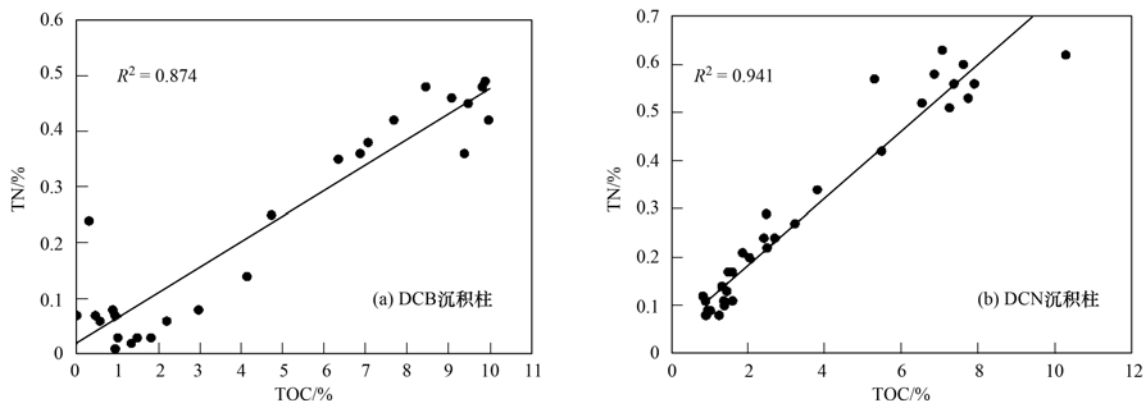


图 3 滇池沉积物中 TOC% 与 TN% 的相关性

Fig. 3 Correlation between contents of TOC% and TN% in the Lake Dianchi sediments

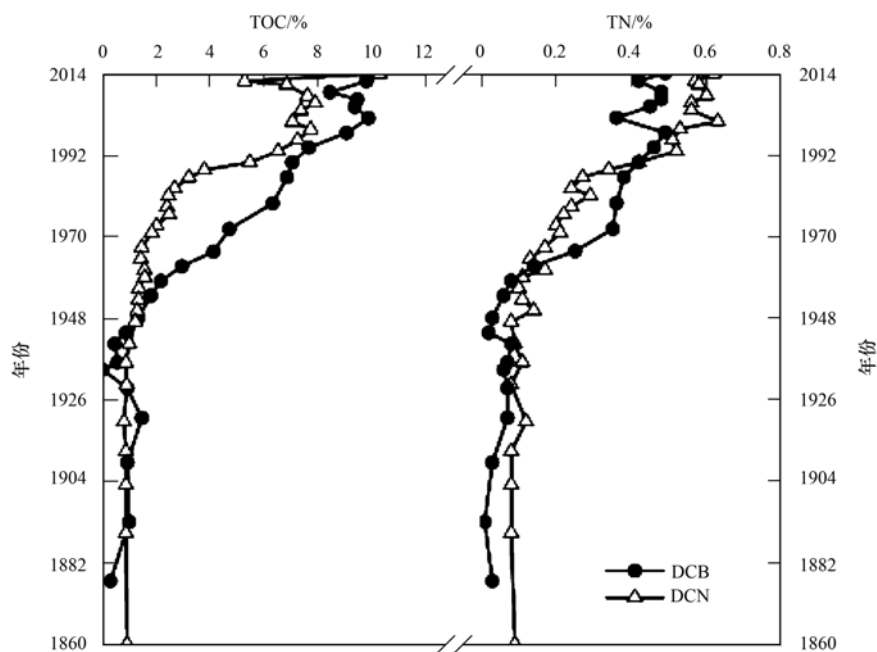


图4 滇池沉积物中 TOC、TN 含量的剖面变化

Fig. 4 Profile changes of TOC and TN concentrations in sediment of Lake Dianchi

域的初级生产力状况^[22]. 沉积物中 C/N 比值的剖面变化可以指示湖泊不同历史时期有机质来源的变化,有研究表明:在 4~10^[23]之间的 C/N,一般指示内源藻类的来源;来自陆源高等植物的 C/N 值一般大于 12,而陆源维管束植物的 C/N 一般高于 20^[24]. 从图 5 可见 DCB 沉积物 C/N 比值剖面变化范围为 0.47~94.40,均值为 25.93;0~15 cm 的 C/N 比值剖面波动相对较小,基本上维持在 20 左

右,15~25 cm 的 C/N 比值剖面波动相对较大,除了 18 cm、19 cm、20 cm 的 C/N 比值为 6.07、8.11、0.47 外,其他沉积深度的 C/N 比值都大于 10,说明 DCB 沉积物中有机质主要来自陆源有机质的输入. DCN 沉积物剖面 C/N 比值变化范围为 6.95~16.50,均值为 11.4,在剖面中的变化并不显著,说明 DCN 沉积物中有机质主要来源于内源水生生物和陆源高等植物混源.

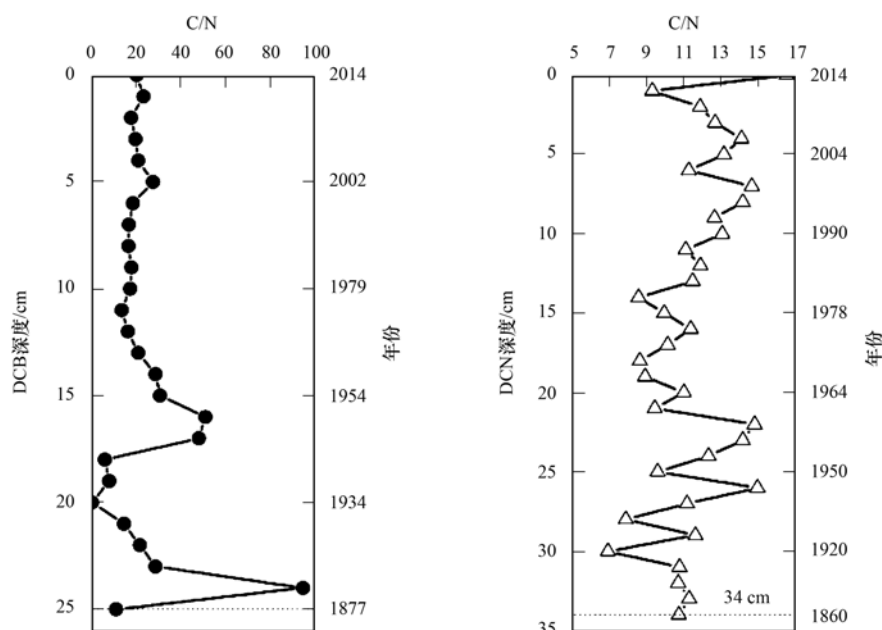


图5 滇池沉积物中 C/N 比值随年代变化分布

Fig. 5 Distribution and changes of C/N ratios in sediment of Lake Dianchi

2.4 正构烷烃分布特征

2.4.1 沉积物中正构烷烃碳分子的组成特征分析

图6显示了几个典型表层深度的沉积物样品中各碳数正构烷烃含量的变化。从中可知滇池湖泊沉积物中正构烷烃的碳数范围在 $C_{12} \sim C_{34}$ 之间, $n-C_{14}$

$\sim n-C_{22}$ 具有明显的偶碳优势。DCB 沉积物的正构烷烃总体呈现以低中碳数为主。DCN 沉积物正构烷烃的主峰碳(C_{max})是 C_{26} 和 C_{27} , 高碳数的正构烷烃占主要部分, 其中表层沉积物样品中高碳数部分具有显著的奇碳优势。

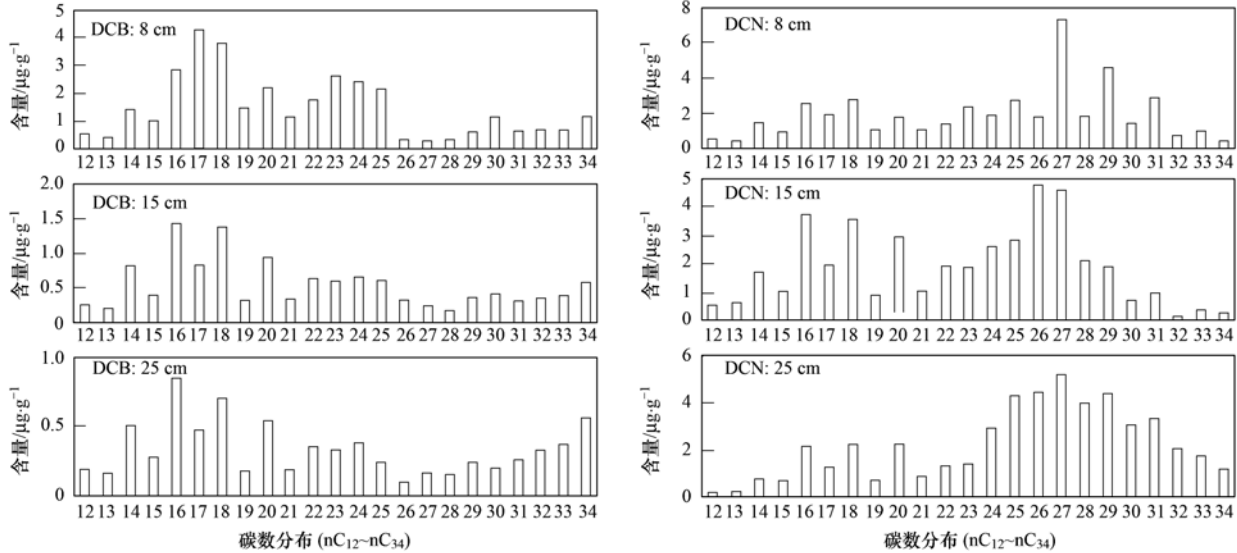


图6 滇池沉积物正构烷烃分布特征

Fig. 6 Distribution of *n*-alkanes in Lake Dianchi

2.4.2 沉积物中总正构烷烃含量的变化特征分析

正构烷烃是一种常见的分子标志有机污染物, 因其化学性质稳定, 通常用其反映沉积物中有机质来源和区域环境演化过程^[25], 通过研究沉积物中总正构烷烃分布特征, 可了解不同历史时期有机污染物的输入特征。本研究的总正构烷烃含量为每层碳

链 $C_{12} \sim C_{33}$ 的含量总和, 图7表明 DCB 和 DCN 沉积物的总正构烷烃(TNA)含量随深度逐渐递减。DCB 沉积物的总正构烷烃含量在 $8.66 \sim 88.67 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 均值含量是 $27.52 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; DCN 沉积物的总正构烷烃含量在 $16.29 \sim 103.71 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 均值含量是 $36.31 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。逐深度分析总正构烷烃含量,

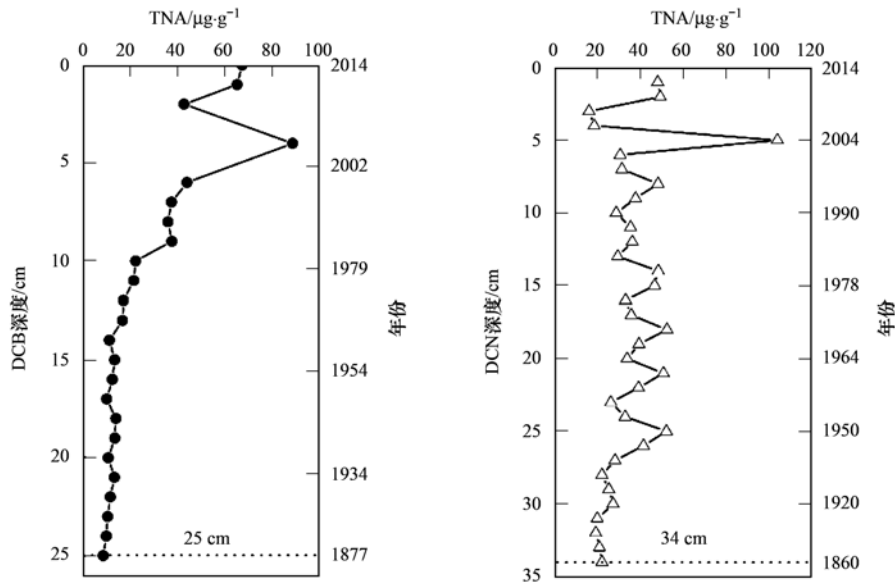


图7 滇池沉积物中总正构烷烃含量随深度变化

Fig. 7 Change of the *n*-alkanes concentration with depth in sediment of Lake Dianchi

DCB 沉积物的总正构烷烃含量在 0 ~ 15 cm (1978 ~ 2014 年) 之间变化幅度较大, 15 ~ 25 cm (1954 ~ 1978 年) 总正构烷烃含量变化趋势相对平缓, 含量最大值出现在 5 cm (2002 年); DCN 沉积物的总正构烷烃含量在 1 ~ 31 cm (1912 ~ 2012 年) 之间变化幅度较大, 31 ~ 34 cm (1860 ~ 1912 年) 之间总正构烷烃含量变化趋势相对平缓, 含量最大值出现在 5 cm (2004 年)。

2.4.3 沉积物中正构烷烃分子代用指标特征分析

C_{27} 是木本植物的主峰, 而 C_{31} 表示草本植物的

主峰, 因此, 正构烷烃 C_{27}/C_{31} 比值能反映木本和草本植物相对含量的变化^[26]。DCB 沉积物样品中 C_{27}/C_{31} 变化范围在 0.46 ~ 3.66 之间, 平均值为 1.35。DCN 沉积物样品中 C_{27}/C_{31} 变化范围在 0.67 ~ 9.78 之间, 平均值为 2.98。从图 8 可见, DCB 和 DCN 沉积物样品中 C_{27}/C_{31} 随深度的变化可以看出滇池沉积样芯从下到上草本植物与木本植物交替变化, 而在表层 0 ~ 3 cm 范围内草本植物比例增加, 这可能与滇池区域工农业的不断发展, 建筑物面积不断增长, 导致区域森林覆盖率的下降有关。

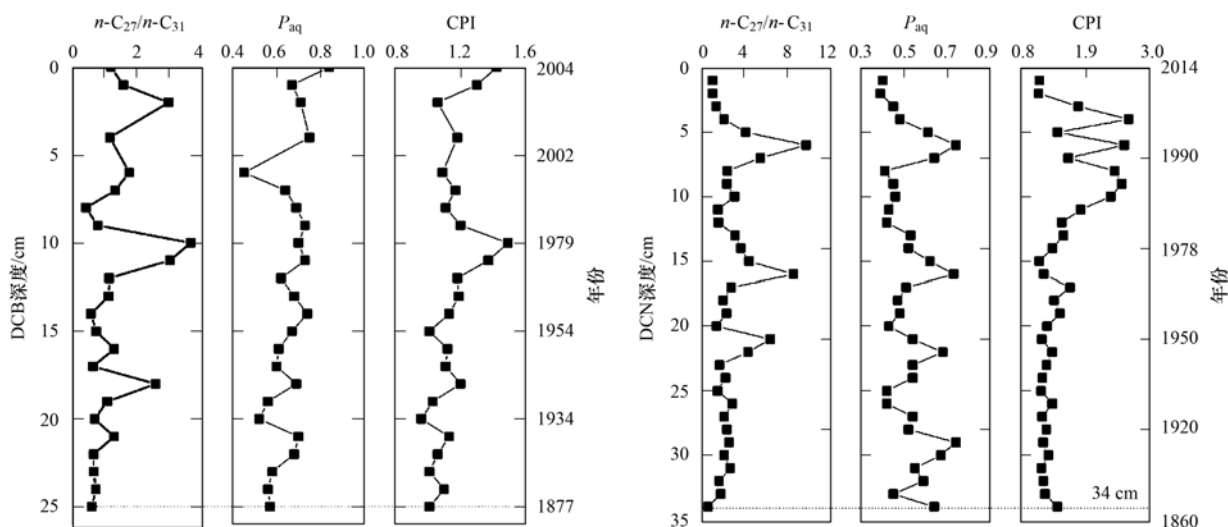


图 8 滇池沉积物中正构烷烃参数变化

Fig. 8 Index changes of *n*-alkanes in sediment of Lake Dianchi

湖泊沉积物中 P_{aq} 表示沉水植物输入的烷烃在中长烷烃中的比例, 可用 P_{aq} 来指示挺水植物和陆源高等植物、沉水和漂浮大型植物的相对量^[27]。从图 8 可见, 沉积物 DCB 样品中 P_{aq} 在 0.45 ~ 0.84 之间, 平均值为 0.65, 沉积物 DCN 样品中 P_{aq} 在 0.39 ~ 0.74 之间, 平均值为 0.53, 绝大部分样品 $P_{aq} > 0.4$, 表明滇池沉积物中的高碳数有机物主要来自滇池内源的沉水和漂浮大型植物。

用正构烷烃碳优势指数 CPI 来判断正构烷烃的来源^[28]。从图 8 可见, DCB 沉积物中 CPI 值变化范围在 0.96 ~ 1.42 之间, 平均值为 1.15, DCB 沉积物的 CPI 整体变化趋势不大, 在 0 ~ 3 cm (2007 ~ 2014 年) 和 10 ~ 15 cm (1954 ~ 1979 年) 之间呈上升趋势, 且在 10 cm (1979 年) 达到最大值, 说明有机质成熟度有所降低, 陆源高等植物在有机物中所占的比例增加。沉积物 DCN 样品中 CPI 值变化范围在 1.10 ~ 2.56 之间, 平均值为 1.49, DCN 沉积物的 CPI 在 15 ~ 35 cm 之间变化趋势平缓, 在 0 ~ 15 之

间变化趋势较大, 在 4 cm (2006 年) 达到最大值, 在 10 ~ 15 cm (1978 ~ 1990 年)、6 ~ 7 cm (1999 ~ 2001 年)、4 ~ 5 cm (2004 ~ 2006 年) 之间呈上升趋势, 表明陆源高等植物在有机物中所占的比例增加。而在 0 ~ 4 cm (2006 ~ 2014 年) 之间呈下降趋势, 说明有机质成熟度有所增加, 陆源高等植物在有机物中所占的比例减少。

3 讨论

3.1 滇池不同湖区沉积有机质组成及来源差异分析

湖泊沉积物中的有机质成分非常复杂, 包括了脂类化合物、碳水化合物、蛋白质等, 而这些有机质根据来源可划分为湖泊内源有机质与陆源有机质, 湖泊内源有机质主要来源于细菌生物、藻类与大型水生植物和湖区周围流域其他污染物^[29~31]。由图 5、6、8 分析可知, 滇池北部沉积有机质主要来自陆源有机质的人为源和内源植物; 滇池南部沉积有机质主要来源于内源水生生物和陆源高等植物混源。

而 Fang 等^[32]运用正构烷烃分子和稳定碳同位素组成特征来研究滇池中部沉积有机质来源;程庆霖^[33]研究滇池了滇池沉积物有机碳、氮来源,结果表明:滇池中部的 C/N 比值为 9.5 ~ 12.54,总正构烷烃和 TOC 含量比值为 0.1 ~ 0.78 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,且滇池中部沉积有机质以菌藻类来源为主.可知,滇池不同湖区其沉积有机质来源存在差异,这主要与不同湖区区域性质有关.由上述分析可知:DCN 沉积物总正构烷烃和 TOC 含量比值为 0.90 ~ 10.29,DCB 总正构烷烃和 TOC 含量比值为 0.32 ~ 1.83,就总正构烷烃和 TOC 含量比值而言,滇池南部 > 滇池北部 > 滇池中部;滇池北部沉积物总正构烷烃均值含量 (27.52 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 明显低于滇池南部沉积物总正构烷烃均值含量 (36.31 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$),这与滇池北部、南部的 TOC% 均值含量差异相反,可能与正构烷烃分解有关,正构烷烃运移的过程中会被分解,每 100 m 的沉降过程中,至少有 60% 的烷烃会被分解^[34].从图 6 分析可知,滇池沉积物样中存在 $n\text{-C}_{14} \sim n\text{-C}_{22}$ 偶碳优势,这种正构烷烃分布特征一般认为是咸水环境有机质的分布特征^[35],而滇池是淡水湖泊,说明滇池北部和南部区域受到外源污染物污染;滇池北部沉积物 DCB 的正构烷烃总体呈现以低中碳数为主,说明滇池北部沉积物正构烷烃主要来源于内源植物和人为源的化石燃料或生物质的不完全燃烧.滇池南部沉积物 DCN 的高碳数正构烷烃占主要部分,说明滇池南部沉积物正构烷烃主要来自于陆源高等植物.这与本研究中滇池北部和南部 C/N 比值及 P_{aq} 所反映的沉积有机质来源结果很好地对应.

3.2 影响滇池有机质时空变化的主要原因

由上述及图 9 分析可知,滇池不同湖区其沉积有机质来源存在差异,且滇池北部和南部的有机质沉积速率均是不稳定的,不但有长期缓慢的变化,还有短期的急剧变化,这主要是相应历史时期人类活动和湖区异质性导致的.沉积有机质的总有机碳 (TOC) 和总正构烷烃 (TNA) 沉积速率变化趋势一致,随时间先增加后减小,但不同湖区其具体波动变化存在差异.沉积速率均值含量排序为 DCN [0.11 $\text{g}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{a})^{-1}$] > DCB [0.09 $\text{g}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{a})^{-1}$]; TOC 沉积速率均值含量排序为 DCN (2.84 $\text{mg}\cdot\text{a}^{-1}$) > DCB (2.35 $\text{mg}\cdot\text{a}^{-1}$); TNA 沉积速率均值含量排序为 DCN (2.55 $\mu\text{g}\cdot\text{a}^{-1}$) > DCB (1.55 $\mu\text{g}\cdot\text{a}^{-1}$),说明滇池南部沉积速率及有机质沉积速率大于滇池北部,可能与上述分析的滇池不同湖区其有机质来源差异性有关.根据滇池沉积有机质沉积速率变化特征,

可将滇池近 150 多年来的环境变化特征大致划分成 3 个阶段:1860 ~ 1920 年左右,TOC 和 TNA 沉积速率缓慢增加,该段时期滇池湖水清洁,反映湖泊环境未发生较大变化,湖泊初级生产力水平较低,流域人口较少,人类活动对湖泊扰动较小,湖泊生态处于自然演化状态.1920 ~ 1990 年左右,TOC 和 TNA 沉积速率极不稳定且呈大幅度波动,是有机质沉积速率高值段,湖区人口增加,人类活动对湖区环境产生较大的扰动.1990 ~ 2014 年,TOC 和 TNA 沉积速率出现先降低后缓慢上升的趋势,这可能是湖泊处于被改造阶段.但滇池北部和南部 TOC 和 TNA 沉积速率具体波动变化存在差异,这主要是湖区异质性导致的:由图 1 可知 DCB 沉积物代表了滇池北部的湖区,毗邻人口集中的昆明城区,且滇池常年盛行西南风,城区大量营养物质不断输入滇池北部湖区.因此,滇池北部湖区沉积物中有机质主要来源于湖内大量繁殖的藻类和城市生产、生活污染带来的有机物^[36].随着滇池北部流域社会经济的快速发展和人口的不断增加,北部湖区有机污染物不断增加.在滇池北部入滇河流中,大多数的河流流程比较短,且自然降水较少,流经城区、乡镇河流不断接纳工、农业污染物,给滇池带来大量有机污染物.其中,在 1934 年有机质沉积速率达到最大,说明滇池北部湖区该年份受到扰动最小.北部湖区自 1960 年,滇池流域内进入到了“大跃进”生产阶段,所造成的水土流失比较严重,通过地表径流给滇池带来了大量的有机质.到 1980 年,云南昆明市城市化水平不断提高、人口不断增加,有机污染物输入不断增加.但在 1979 ~ 1986 年左右,有机质沉积速率处于较低的平缓变化状况,这与昆明市在滇池流域开展了防治工业点源及有害物质污染和江河污染防治措施的实施有一定关系^[37].至 1990 年,开始开展产业转型,引进外贸加工等劳动密集型企业,吸引了大量的劳动力,而因此带来了更多的污染物,其有机质沉积速率 1990 ~ 2007 年之间又有所上升.在 2007 ~ 2014 年,有机质沉积速率有所降低,可能区域人口大量增加,对湖泊区域扰动较大有关.DCN 沉积物代表了滇池南部的湖区,南部以村镇区为主,具有传统农作物和养殖区广布的地理特征^[38],该农业区受人为活动相对北部湖区干扰小,故在 1947 ~ 1988 年,其有机质沉积速率大部分都大于北部湖区.何鹏等^[39]深入分析了滇池污染源,表明滇池南部有机碳、氮主要来自周边的农业面源.1960 年以后,化肥农药的大量使用和禽畜养殖物的废弃物直接排放造成水体中有机污染物更多

增加. 从 1970 年滇池南部区域有机物主要来自外源农业面源以及内源的水生生物.

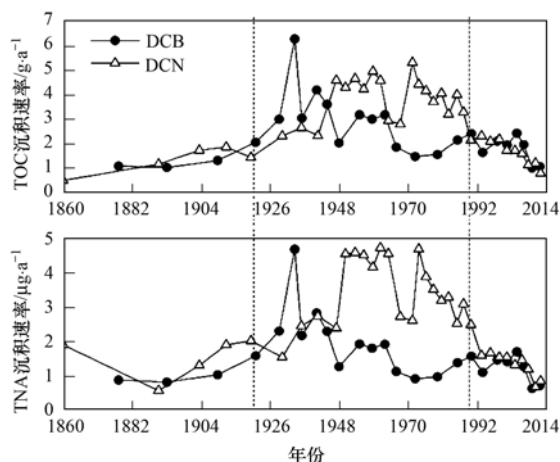


图9 沉积物柱芯有机质沉积速率变化

Fig. 9 Change of organic deposition rate of sediment column core

4 结论

(1) 滇池沉积物中 TOC 与 TN 自 20 世纪 70 年代以来增加显著, 说明滇池湖泊初级生产力不断提高.

(2) 正构烷烃代用指标 $n\text{-C}_{27}/n\text{-C}_{31}$ 比值及 P_{aq} 和 CPI 表明, 滇池沉积物从下往上草本植物与木本植物交替变化, 且滇池沉积物中高碳数的有机质主要来自内源的沉水和漂浮大型植物.

(3) C/N 比值及正构烷烃分布特征表明, 滇池北部沉积中有机质主要来自陆源有机质的人为源和內源植物的混合源; 滇池南部沉积物中有机质主要来源于內源大型水生植物和陆源高等植物混源.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 林晓, 朱立平, 王君波, 等. 西藏纳木错表层沉积物中正构烷烃的来源与空间分布特征[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(5): 654-662.
Lin X, Zhu L P, Wang J B, *et al.* Sources and spatial distribution character of *n*-alkanes in surface sediments of Nam Co on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, **21**(5): 654-662.
- [3] 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.
- [4] Meyers P A. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: a summary of examples from the Laurentian Great Lakes[J]. *Organic Geochemistry*, 2003, **34**(2): 261-289.
- [5] 张枝焕, 陶澍, 吴水平, 等. 天津地区表层土壤和河流沉积物中正构烷烃化合物的成因分析[J]. *地球与环境*, 2005, **33**(1): 15-22.
- [6] Zhang Z H, Tao S, Wu S P, *et al.* Genetic analysis of normal alkane contaminants in the surface soils and fluvial sediments from Tianjin region[J]. *Earth and Environment*, 2005, **33**(1): 15-22.
- [7] Eglinton G, Hamilton R J. Leaf epicuticular waxes[J]. *Science*, 1967, **156**(3780): 1322-1335.
- [8] 房吉敦, 吴永昌, 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.
- [9] 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.
- [10] Xiong Y Q, Wu F C, Fang J D, *et al.* Organic geochemical record of environmental changes in Lake Dianchi, China[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2010, **44**(1): 217-231.
- [11] Qu X X, Li X, Lin Y, *et al.* Quantitative and qualitative characteristics of dissolved organic matter from eight dominant aquatic macrophytes in Lake Dianchi, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(10): 7413-7423.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 朱立平, 陈玲, 李炳元, 等. 西昆仑山南红山湖沉积反映的过去 150 年湖区环境变化[J]. *中国科学(D 辑)*, 2001, **31**(7): 601-607.
- [15] Zhu L P, Chen L, Li B Y, *et al.* Environmental changes reflected by the lake sediments of the South Hongshan Lake, Northwest Tibet[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2002, **45**(5): 430-439.
- [16] 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.
- [17] 卜庆伟, 张枝焕, 王亮, 等. 天津地区典型土壤剖面饱和烃分布特征及环境意义[J]. *地理科学进展*, 2007, **26**(6): 21-32.
- [18] Bu Q W, Zhang Z H, Wang L, *et al.* Vertical distribution and environmental significance of saturated hydrocarbons in soil samples collected from Tianjin [J]. *Progress in Geography*, 2007, **26**(6): 21-32.
- [19] 高文静. 滇池东大河流域有机质来源的正构烷烃示踪研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2014.
- [20] 唐国莉. 清代滇池东南缘人口、聚落与土地利用研究[D]. 昆明: 云南大学, 2010.
- [21] 孟雅南. 清代滇池北岸六河区域水利研究[D]. 昆明: 云南大学, 2010.
- [22] 田志强, 李畅游, 史小红, 等. 乌梁素海沉积物中有机碳的空间分布与储量特征[J]. *节水灌溉*, 2011, (3): 23-25.
- [23] Tian Z Q, Li C Y, Shi X H, *et al.* Spatial distribution and storage characteristic of organic carbon in sediments of Wuliangsuhai Lake[J]. *Water Saving Irrigation*, 2011, (3): 23-25.

- [18] Rosenmeier M F, Hodell D A, Brenner M, *et al.* A 4000-year lacustrine record of environmental change in the southern Maya lowlands, Petén, Guatemala[J]. *Quaternary Research*, 2002, **57**(2): 183-190.
- [19] 陈建军, 黄民生, 卢少勇, 等. 北京六湖水体和表层沉积物中氮污染特征与评价[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2011, (1): 12-20.
Chen J J, Huang M S, Lu S Y, *et al.* Characters and evaluation of nitrogen pollution in the water and surface sediment from six urban lakes in Beijing [J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2011, (1): 12-20.
- [20] 张明亮, 姜美洁, 付翔, 等. 莱州湾沉积物有机质来源[J]. *海洋与湖沼*, 2014, **45**(4): 741-746.
Zhang M L, Jiang M J, Fu X, *et al.* The source of organic matter in the sediment of Laizhou Bay [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2014, **45**(4): 741-746.
- [21] Worsfold P J, Monbet P, Tappin A D, *et al.* Characterisation and quantification of organic phosphorus and organic nitrogen components in aquatic systems: a review[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2008, **624**(1): 37-58.
- [22] 饶志国. 中国东部表土总有机质碳同位素和正构烷烃碳、氢同位素空间变化特征及其古环境意义[D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2007.
- [23] Meyers P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter [J]. *Chemical Geology*, 1994, **114**(3-4): 289-302.
- [24] Prahl F G, Bennett J T, Carpenter R. The early diagenesis of aliphatic hydrocarbons and organic matter in sedimentary particulates from Dabob Bay, Washington [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, **44**(12): 1967-1976.
- [25] 吕晓霞, 翟世奎. 长江口沉积物中正构烷烃的分布特征及其环境指示意义[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(6): 1221-1226.
Lü X X, Zhai S K. The distribution and environmental significance of n-alkanes in the Changjiang River estuary sediment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(6): 1221-1226.
- [26] 谢树成, Evershed R P. 泥炭分子化石记录气候变迁和生物演替的信息[J]. *科学通报*, 2001, **46**(10): 863-866.
Xie S C, Evershed R P. Peat molecular fossils recording paleoclimatic change and organism replacement [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, **46**: 1749.
- [27] 匡欢传, 周浩达, 胡建芳, 等. 末次盛冰期和全新世大暖期湖光岩玛珥湖沉积记录的正构烷烃和单体稳定碳同位素分布特征及其古植被意义[J]. *第四纪研究*, 2013, **33**(6): 1222-1233.
Kuang H C, Zhou H D, Hu J F, *et al.* Variations of n-alkanes and compound-specific carbon isotopes in sediment from Huguangyan Maar Lake during the last glacial maximum and Holocene optimum: implications for paleovegetation [J]. *Quaternary Sciences*, 2013, **33**(6): 1222-1233.
- [28] 孟培, 王永莉, 王自翔, 等. 东北地区向海湖泊沉积物正构烷烃单体碳同位素特征及其古环境意义[J]. *地球科学与环境学报*, 2014, **36**(2): 110-120.
Meng P, Wang Y L, Wang Z X, *et al.* Compound-specific carbon isotopic characteristics of n-alkanes in Xianghai Lake sediments of northeast China and their paleoenvironmental implications[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2014, **36**(2): 110-120.
- [29] Herczeg A L, Smith A K, Dighton J C. A 120 year record of changes in nitrogen and carbon cycling in Lake Alexandrina, South Australia: C, N, $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ in sediments[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, **16**(1): 73-84.
- [30] Meyers P A, Teranes J L. Sediment organic matter[A]. In: Last W M, Smol J P (Eds.). *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments*[M]. Netherlands: Springer, 2002. 239-269.
- [31] 杨明生, 张虎才, 邹长伟, 等. 鄱阳湖沉积物正构烷烃特征及其生物源[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2014, **30**(3): 111-118.
Yang M S, Zhang H C, Zou C W, *et al.* Characteristics of n-alkanes in modern sediments of Poyang Lake and its biological origins[J]. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, **30**(3): 111-118.
- [32] Fang J D, Wu F C, Xiong Y Q, *et al.* Source characterization of sedimentary organic matter using molecular and stable carbon isotopic composition of n-alkanes and fatty acids in sediment core from Lake Dianchi, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **473-474**: 410-421.
- [33] 程庆霖. 高原湖泊沉积物有机碳、氮来源与表征[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- [34] Meyers P A, Eadie B J. Sources, degradation and recycling of organic matter associated with sinking particles in Lake Michigan [J]. *Organic Geochemistry*, 1993, **20**(1): 47-56.
- [35] 张枝焕, 杨藩, 李东明, 等. 中国新生界咸水湖相烃源岩和原油生物标志物组合特征[J]. *沉积学报*, 1998, **16**(3): 119-123.
Zhang Z H, Yang F, Li D M, *et al.* Biomarker assemblage characteristics of source rocks and associated crude oils in Saline Lake facies of cenozoic in China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, **16**(3): 119-123.
- [36] 陈乐尧. 从昆明盆地滇池北缘第四纪孢粉组合讨论古气候特征[J]. *中国地质科学院成都地质矿产研究所所刊*, 1984, (5): 93-107.
Chen L Y. On the characteristic of paleoclimate by spore-pollen assemblages from the north edge of Dianchi Lake of Kunming basin in quaternary [J]. *Bulletin of the Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences*, 1984, (5): 93-107.
- [37] 吴波. 滇池治理工程支付意愿实证研究——以盘龙江为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [38] 朱晓琦, 胡正义, 王惠惠, 等. 滇池柴河流域蔬菜地土壤施用控释尿素与普通尿素的氮损失比较[J]. *中国农业科技导报*, 2014, **16**(6): 109-116.
Zhu X Q, Hu Z Y, Wang H H, *et al.* Comparison of nitrogen loss between controlled release urea and common urea in vegetable soils at Chaihe catchment of Dianchi Lake[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2014, **16**(6): 109-116.
- [39] 何鹏, 肖伟华, 李彦军, 等. 变化环境下滇池水污染综合治理与对策研究[J]. *水科学与工程技术*, 2011, (1): 5-8.
He P, Xiao W H, Li Y J, *et al.* Comprehensive management mode and countermeasures of Dianchi Lake water pollution in changing environment [J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2011, (1): 5-8.

CONTENTS

Transport Loss Estimation of Fine Particulate Matter in Sampling Tube Based on Numerical Computation	LUO Li-na, CHENG Zhen, ZHU Wen-fei, <i>et al.</i> (4457)
Sources Analysis of Heavy Metal Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing	QIN Xin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (4467)
Distribution Characteristics of Water Soluble Ions Under Different Weather Conditions During the Youth Olympic Games in Nanjing	SHI Yuan-zhe, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4475)
Seasonal Variation and Source Analysis of the Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Suzhou	WANG Nian-fei, CHEN Yang, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4482)
Characteristics of Elements and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} at the Southwest Suburb of Chengdu in Spring	 YANG Huai-jin, YANG De-rong, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (4490)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Rare Earth Elements in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4504)
¹³ C-based Sources Partitioning of Atmospheric CO ₂ During Youth Olympic Games, Nanjing	XU Jia-ping, LI Xu-hui, XIAO Wei, <i>et al.</i> (4514)
Gaseous Emission Characterization of Civil Aviation Aircraft During Takeoff	HAN Bo, HUANG Jia-min, WEI Zhi-qiang (4524)
Pollution Characteristics of Antibiotic Resistant Bacteria from Atmospheric Environment of Animal Feeding Operations	ZHANG Lan-he, HE Yu-wei, CHEN Mo, <i>et al.</i> (4531)
Removing Nano Particles by Filtration Using Materials with Ordered Mesoporous Structure	XING Yi, WANG Cong, LU Pei, <i>et al.</i> (4538)
Emission Characteristics of Gaseous Pollutants from City Bus Fueled with Biodiesel Based on DOC + CDPF Technology in Real Road Conditions	 LOU Di-ming, ZHANG Yun-hua, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4545)
Characteristics of Methane Flux Across the Water-air Interface in Subtropical Shallow Ponds	LONG Li, XIAO Shang-bin, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4552)
Succession of Phytoplankton Assemblages and Its Influencing Factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province	MA Pei-ming, SHI Lian-dong, ZHANG Jun-fang, <i>et al.</i> (4560)
Responses of Physiological Indices of Typical Submerged Macrophytes to Water Quality in Taihu Lake	GAO Min, HU Wei-ping, DENG Jian-cai, <i>et al.</i> (4570)
Optical Characteristics of Dissolved Organic Matter from Two Different Full Mixed Reservoirs in Winter Based on UV-vis and EEMs	 HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (4577)
Hanfeng Pre-dam Commissioning Eutrophication Status and Control Evaluation in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (4586)
Occurrence, Distribution and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water of the Gonghu Bay, Taihu Lake	WU Xu-yue, ZOU Hua, ZHU Rong, <i>et al.</i> (4596)
Distribution Characteristics of <i>n</i> -alkanes in Sediment Core and Implication of Environment in Different Lakes of Dianchi	YU Li-yan, HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, <i>et al.</i> (4605)
Vertical Distribution and Pollution Risk Assessment of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in Sediment of Inflowing Rivers of Erhai Lake Estuarine Wetland in Wet and Dry Seasons	 WANG Shu-jin, LIU Yun-gen, WANG Yan, <i>et al.</i> (4615)
Variation of Nitrogen Forms in Sediments of Lihu Lake During Mineralization	 ZHAO Li, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (4626)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of the Heavy Metals Content in the Surface Sediment and the Potential Ecological Risk Trends in the Three Gorges Reservoir Area	 ZHUO Hai-hua, SUN Zhi-wei, TAN Ling-zhi, <i>et al.</i> (4633)
Modeling the Environmental Behaviors and Ecological Risks of Permethrin in Chaohu Lake	LIU Ya-li, WANG Ji-zhong, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (4644)
Simulation Experiment; Effect of Organic Colloid on Carbamazepine Transport in Porous Media	ZHANG Si, HE Jiang-tao, ZHU Xiao-jing (4651)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Inorganic Type Urban Landscape Water: Taking the Canal of Suzhou Section as Example	LI Qian-qian, PAN Yang, GONG Dan-yan, <i>et al.</i> (4662)
Rock Weathering Characteristics and the Atmospheric Carbon Sink in the Chemical Weathering Processes of Qingshuijiang River Basin	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (4671)
Pollution Characteristics Analysis in Shallow Groundwater of Typical Farmland Area, Southern China	GUO Hui, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4680)
Identification of Sulfate Sources in the Groundwater System of Zaozhuang; Evidences from Isotopic and Hydrochemical Characteristics	MA Yan-hua, SU Chun-li, LIU Wei-jiang, <i>et al.</i> (4690)
Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Extensive Green Roofs	SHEN Qing-ran, HOU Juan, LI Tian (4700)
Comparative Study on Pretreatment Process of Ultrafiltration; Chemical Coagulation and Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4706)
Adsorption Mechanisms Analysis of EOM on PVDF Ultrafiltration Membranes Modified by SiO ₂ Using QCM-D and AFM	JIANG Jia-liang, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (4712)
Isolation of Quorum Quenching Bacteria and Their Function for Controlling Membrane Biofouling	ZHAO Chang, WANG Wen-zhao, XU Qi-yong (4720)
Effects of Hydraulic Loading Rate on the Removal of Pollutants from an Integrated Biological Settling Tank	WANG Wen-dong, MA Cui, LIU Hui, <i>et al.</i> (4727)
Characteristics of Nitrobacteria in SBR with Trace N ₂ H ₄ Addition	XIAO Peng-ying, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li (4734)
Start-up of Partial Nitrification AGS-SBR and Analysis of Its Microbial Community Composition	LU Hang, XIN Xin, GUAN Lei, <i>et al.</i> (4741)
Effects of PAHs Pollution on the Community Structure of Denitrifiers in a Typical Oilfield	YAO Yan-hong, WANG Ming-xia, ZUO Xiao-hu, <i>et al.</i> (4750)
Performance and Microbial Community Analysis of Bioaugmented Treatment of Diethyl Phthalate (DEP) in Membrane Bioreactor	ZHANG Ke, GUAN Yun, LUO Hong-bing, <i>et al.</i> (4760)
Comparative Analysis of the Bacterial Community on Anodic Biofilms in Sediment Microbial Fuel Cell Under Open and Closed Circuits	 WU Yi-cheng, DENG Quan-xin, WANG Ze-jie, <i>et al.</i> (4768)
Anaerobic Biodegradability of Perfluorooctanoic Acid (PFOA)	LI Fei, CHEN Yi-dan, ZHOU Zhen-ming, <i>et al.</i> (4773)
Comprehensive Effects of the Application of Water and Fertilizer Amount on CO ₂ Emission from Soils of Summer-maize Field	YANG Shuo-huan, ZHANG Bao-cheng, WANG Li, <i>et al.</i> (4780)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in the Soil Erosion Area of West Mountains in Fujian Province, China	YAO Xiong, YU Kun-yong, ZENG Qi, <i>et al.</i> (4789)
Comprehensive Risk Evaluation of Cadmium in Soil-rice System Based on Uncertainty Analysis	YANG Yang, CHEN Wei-ping, LI Yan-ling, <i>et al.</i> (4800)
Fluorescence Properties of Glomalin and Its Relationship with Soil Physicochemical Characteristics in Different Regions of Beijing City	 CHAI Li-wei, LIU Meng-jiao, JIANG Da-lin, <i>et al.</i> (4806)
Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metal Pollution and Health Risk in Soil Around the Coal Industrial Area of East Junggar Basin	 LIU Fang, Tashpolat Tiyp, Ilyas Nurmamat, <i>et al.</i> (4815)
Characteristics of Microbial Nitrogen Degradation in Fluvio-aquic Soil of Hebei Plain	ZHANG Can-can, PANG Hui-cong, GAO Tai-zhong, <i>et al.</i> (4830)
Influence of Arsenate and Phenanthrene on Carbon-groups of <i>Pteris vittata</i> L. Roots	LIAO Xiao-yong, GONG Xue-gang, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4841)
Effect of Alkali Solids Amendment on Sewage Sludge Aerobic Composting and the Potential of Related Products on Infertile Soil Amelioration	 CAI Han-zhen, NING Xi-cui, WANG Quan, <i>et al.</i> (4848)
Adsorption and Influential Factors of Diuron on the Loess Soil by Adding Different Biochar Prepared at Varying Temperatures	SUN Hang, JIANG Yu-feng, SHI Lei-ping, <i>et al.</i> (4857)
Characteristics of Heavy Metal Contents in Human Hairs of Mine Contaminated Areas in Nandan County	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, XIA De-shang, <i>et al.</i> (4867)
Preparation of Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) Composite Oxides for Efficient Fluoride Uptake	WANG Ai-he, ZHOU Kang-gen, LIU Xing, <i>et al.</i> (4874)
Fe-Mn Binary Oxide Impregnated Chitosan Bead (FMCB): An Environmental Friendly Sorbent for Phosphate Removal	FU Jun, FAN Fang, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4882)
Leaching Toxicity and Bioaccessibility of Heavy Metals in MSWI Fly Ash with Various Particle Sizes	WANG Chun-feng, CHEN Guan-fei, ZHU Yan-chen, <i>et al.</i> (4891)

《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)

2016年12月15日 第37卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 12 Dec. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行