

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

**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

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化 ..... 薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐璐,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)

北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源 ..... 周雪明,仝雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)

利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布 ..... 刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)

兰州城区大气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及来源解析 ..... 王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)

成都市西南郊区春季大气 PM<sub>2.5</sub> 的污染水平及来源解析 ..... 林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晓芬(1629)

中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征 ..... 刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)

固定源排放污染物健康风险评价方法的建立 ..... 陈强,吴焕波(1646)

北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试 ..... 胡月琪,邬晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)

南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价 ..... 王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金花(1662)

CoCuMnO<sub>2</sub> 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学 ..... 孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)

大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化 ..... 张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)

典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征 ..... 史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)

利用 $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$  和  $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$  示踪北京城区河流硝酸盐来源 ..... 赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)

柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析 ..... 王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)

三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响 ..... 陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)

亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究 ..... 王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)

平原河网典型污染物生物降解系数的研究 ..... 冯帅,李叙勇,邓建才(1724)

沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例 ..... 张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)

苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素 ..... 任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)

河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价 ..... 王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)

顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价 ..... 蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)

台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险 ..... 陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)

乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素 ..... 黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芙宁,张连凯,苏春田(1779)

岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例 ..... 王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)

广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素 ..... 黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)

基于 PCR-DGGE 和拟杆菌(*Bacteroides*) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例 ..... 张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)

典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征 ..... 梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)

钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成 ..... 刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)

天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究 ..... 丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)

臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素 ..... 董秉直,张佳丽,何畅(1837)

污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析 ..... 程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)

HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学 ..... 郭俊元,王彬(1852)

放射性废水处理中吸附剂的势优势筛选 ..... 李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)

微米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究 ..... 钱旭,王毅力,赵丽(1864)

间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能 ..... 宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)

不同灌溉方式对华北平原冬小麦土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放通量的影响 ..... 郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)

卫河新乡市区段春季溶解 CH<sub>4</sub> 与 N<sub>2</sub>O 浓度特征 ..... 侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)

模拟气沉降对内蒙古克氏针茅草原 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)

土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制 ..... 曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)

黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局 ..... 高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)

耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响 ..... 史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)

北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险 ..... 赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)

准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析 ..... 刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)

纳米 TiO<sub>2</sub> 对土壤重金属释放及形态变化的影响 ..... 张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)

纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学 ..... 马少云,祝方,商执峰(1953)

低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响 ..... 宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)

粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响 ..... 黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)

萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析 ..... 王亚男,程立娟,周启星(1978)

高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响 ..... 郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓暘,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)

磺胺抗性消长与堆肥进程的交互特征 ..... 林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)

《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)

# 典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征

梁作兵<sup>1</sup>, 孙玉川<sup>1,2\*</sup>, 李建鸿<sup>1,2</sup>, 王尊波<sup>1</sup>, 谢正兰<sup>1</sup>, 张媚<sup>1</sup>, 廖昱<sup>1</sup>, 江泽利<sup>1</sup>

(1. 西南大学地理科学学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 国土资源部岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004)

**摘要:** 利用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)测定了青木关地下河中溶解态类脂物的含量。研究了其在地下河中的来源、组成及迁移特征。结果表明, 7~11月, 各溶解态类脂物的平均含量随着青木关地下河运移距离的增加呈降低趋势, 其中以溶解态饱和直链脂肪酸的下降最为显著, 即由最初的5 704 ng·L<sup>-1</sup>下降到1 043 ng·L<sup>-1</sup>, 减少了约81.71%。正构烷烃能够较为详尽地指征地下河中溶解性有机质来源, 而饱和直链脂肪酸、脂肪醇则对藻类和细菌等微生物有较好的指示意义。随着地下河运移距离增加, 有机质输入类型呈现多样化, 可能与岩溶地表不均一性有关。正构烷烃三端元图解中, 水生植物的输入为地下河中溶解性有机质的主要来源, 其次分别为陆地高等植物和藻类、细菌等微生物, 但随着地下河运移距离的增加水生植物的相对贡献量逐渐减少。青木关地下河中正构烷烃 TAR 值对降雨有一定的指示意义, 而饱和直链脂肪酸 CPI、L/H 值则指示细菌降解活动。

**关键词:** 溶解性有机质; 生物标志物; 正构烷烃; 脂肪酸; 脂肪醇; 地下河

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1814-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.05.027

## Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River

LIANG Zuo-bing<sup>1</sup>, SUN Yu-chuan<sup>1,2\*</sup>, LI Jian-hong<sup>1,2</sup>, WANG Zun-bo<sup>1</sup>, XIE Zheng-lan<sup>1</sup>, ZHANG Mei<sup>1</sup>, LIAO Yu<sup>1</sup>, JIANG Ze-li<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Eco-Environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resources, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

**Abstract:** Water samples in Qingmuguan underground river were collected to determine the concentration of dissolved lipids, and their sources, composition and migration characteristics in underground river were studied. The results were obtained as follows. ① The average content of various dissolved lipids decreased with increasing distance of migration in Qingmuguan underground river, and the most distinctive was dissolved saturated straight chain fatty acids with its content decreasing by about 81.71%, from the initial 5 704 ng·L<sup>-1</sup> to 1 043 ng·L<sup>-1</sup>. ② N-alkane could indicate the sources of dissolved organic matter in underground river, but saturated straight chain fatty acid and fatty alcohol had the advantage in indicating algae, bacteria and other microorganisms. ③ With the increasing migration distance of Qingmuguan underground river, the input type of dissolved organic matter in underground river was different, which might be resulted from the heterogeneity of karst surface. ④ In ternary plot of alkane sources, aquatic plants constituted the major contribution of dissolved organic matter in Qingmuguan underground river, followed by higher plant, algae/bacteria. Unlike higher plants and algae/bacteria, the contribution from aquatic plants decreased with increasing migration distance of underground river. ⑤ To a certain extent, TAR(alkane) values could reflect the rainfall, and the values of CPI, L/H in saturated straight chain fatty acids might indicate the degradation activities of bacteria.

**Key words:** dissolved organic matter (DOM); biomarker; alkane; fatty acid; fatty alcohol; underground river

溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)是陆地生态系统的重要组成部分<sup>[1]</sup>, 广泛地存在于自然界中<sup>[2]</sup>, 在陆地与水生态系统中的许多重要过程中发挥着重要作用, 其组成和行为特征能够影响不同的淡水过程<sup>[3]</sup>。同时, DOM不仅是陆地向水生生态系统输送营养物质的重要载体物质<sup>[4]</sup>, 而且对重金属元素和有机污染物在水环境中的迁移行为也有重要影响<sup>[5]</sup>。另外, DOM也是全球碳循环的重要

组成部分, 它既是CO<sub>2</sub>的一个潜在源也是底层土壤的稳定碳<sup>[6]</sup>。因此, DOM在联系陆地与水生态系统

收稿日期: 2015-09-29; 修订日期: 2015-12-15

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2013B021); 西南大学博士基金项目(SWU110258); 应对全球气候变化地质调查综合研究项目(12120113006700); 重庆市科委院士专项(cstc2013jcyj20001)

作者简介: 梁作兵(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为全球变化、岩溶生态环境, E-mail: brucelung@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: sunyc@swu.edu.cn

中起着重要作用,而 DOM 从陆地向水生态系统的迁移过程中,示踪其在迁移过程的特性对于直观理解 DOM 的驱动机制具有极大意义. 所以,弄清 DOM 在生态系统迁移过程中动力学的先决条件是示踪 DOM 在生态环境中的来源及迁移变化特点<sup>[7]</sup>. 目前,国内外对于 DOM 在生态环境中的来源及迁移变化特点的研究已经做了大量工作,且研究区主要集中于河口、海岸及大型湖泊、河流等区域<sup>[8-12]</sup>,研究手段则主要依靠三维荧光光谱<sup>[13]</sup>傅立叶变换离子回旋共振质谱<sup>[14]</sup>等技术.

脂类生物标志物中,正构烷烃、脂肪酸和甾醇等因其结构不同<sup>[15]</sup>、降解程度各异<sup>[16,17]</sup>,并且能够相对精确地指示有机质来源<sup>[18]</sup>等特点,使之在示踪有机质在生态环境中来源及迁移、变化的研究中发挥了重要作用<sup>[19-22]</sup>. 我国西南岩区岩溶面积广阔,且地位作用显著. 一方面,西南岩溶区独特的“二元结构”使得水土流失<sup>[23,24]</sup>与水资源安全问题较为突出<sup>[25-27]</sup>. 另一方面,碳酸盐岩风化产生的碳汇效应正受到国际社会的关注<sup>[28,31]</sup>. 而最近研究发现,岩溶区水生植物也能通过光合作用吸收水中的  $\text{HCO}_3^-$ ,从而使得一部分溶解于水中的  $\text{CO}_2$  被水生植物吸收,最终以有机质的形式储存在植物体中,从而起到固碳的作用<sup>[32,33]</sup>. 当有机质发生降解时,一部分会以 DOM 或 POM 的形式存在于水体中. 因此,研究岩溶地下河中 DOM 的来源及迁移、变化特点显得极为重要. 基于以上原因,本研究试以重庆典型岩溶区青木关地下河为例,利用类脂物示踪 DOM 在地下河中的来源及迁移、变化特征,以期 DOM 在岩溶区地下河系统中迁移过程中的动力学机制及岩溶碳循环过程中的作用提供借鉴意义.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

青木关岩溶流域位于重庆市北碚区、沙坪坝区和璧山县的交界处,属于川东平行岭谷华蓥山山系缙云山区,地理坐标为  $106^{\circ}16'48'' \sim 106^{\circ}20'10''\text{E}$ ,  $29^{\circ}40'40'' \sim 29^{\circ}47'N$ ,研究区内背斜成山,向斜成谷,呈“一山二岭一槽”式的典型岩溶槽谷景观. 地下河系统北部岩口为青木关地下河的主要入口,地下河系统南部姜家泉则为青木关地下河系统的主要出口,在姜家龙洞(天窗, karst window)出露. 该地气候属于亚热带季风气候,冬暖夏热,降水丰富、多云雾. 多年平均气温为  $16.5^{\circ}\text{C}$ ,多年平均降水量为  $1\ 000\ \text{mm}$ ,降雨主要集中于 4 月至 10 月. 植被类型

主要为亚热带常绿阔叶林、暖性针叶林、竹林及常绿阔叶灌丛. 土地利用类型以林地、旱地、水田为主.

### 1.2 样品的采集

根据青木关地下河的分布特点,2013 年 7 月开始,分别在地下河的主要入口处(岩口:落水洞)、地下河出露处(姜家龙洞:天窗)和出口处(姜家泉)设置了共 3 个采样点(图 1). 期间,8 月因地下河断流没有进行采样. 采样时,用事先清洗干净(用去离子水清洗 3 遍,然后放入  $450^{\circ}\text{C}$  烘箱灼烧 6 h)并现场润洗多次的 4 L 棕色玻璃瓶收集水样,加入 1 mL 饱和  $\text{HgCl}_2$ ,抑制水中微生物的生长;然后密封迅速运回实验室,用  $0.7\ \mu\text{m}$  的玻璃纤维膜(事先在马弗炉内灼烧 4 h)将水样分为溶解相和颗粒相两部分.

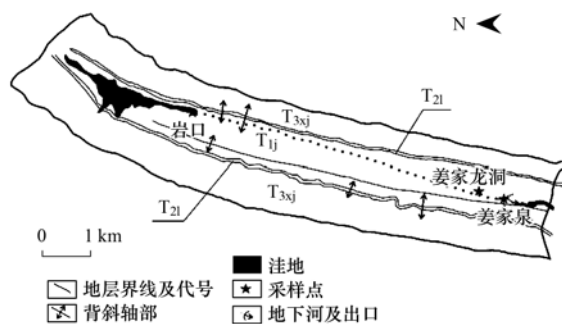


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Location of the sampling sites

### 1.3 试剂和材料

样品分析所用的正己烷、二氯甲烷、甲醇、乙酸乙酯均为农残级,购自美国 Fisher 公司. 玻璃纤维膜(Whatman GF/F,有效孔径  $0.7\ \mu\text{m}$ )于  $450^{\circ}\text{C}$  马弗炉中灼烧 6 h,无水硫酸钠(分析纯)于  $550^{\circ}\text{C}$  马弗炉中灼烧 8 h,分别置于干燥器中冷却密封备用;脱脂棉经二氯甲烷抽提 72 h 后风干,密封干燥备用. 盐酸用二氯甲烷萃取 6 次后备用.

### 1.4 样品处理与分析

#### 1.4.1 水样中类脂物的提取

取经过玻璃纤维滤膜(Whatman GF/F,有效孔径  $0.7\ \mu\text{m}$ )过滤的水样 4 L,装入棕色瓶中,用净化后的盐酸酸化至  $\text{pH} < 2$ ,摇匀,使用全自动固相萃取系统(美国 Horizon 公司, SPE-DEX 4790)萃取(C18 膜,直径 47 mm, 3M 公司),提取液用 50 mL 鸡心瓶收集,提取液依次经过皂化、甲基化后,用正己烷萃取其中的正构烷烃、脂肪酸和脂肪醇,然后经干燥、浓缩后,氮吹至  $0.2\ \text{mL}$ ,加入内标物(氘代正二十四烷( $\text{C}_{24}\text{D}_{50}$ ),购自美国 Supelco 公司),放入  $-26^{\circ}\text{C}$  冰

箱中待测。

#### 1.4.2 类脂物的分析

类脂物的检测采用 GC-MS 分析 (Agilent, 7890A/5975C), 色谱柱为 HP-5MS 毛细管柱 (30.0 m × 0.32 mm × 0.25 μm)。载气为高纯氮气, 流速为 1 mL·min<sup>-1</sup>, 进样口温度 280℃, 升温程序为初始温度 50℃, 保持 1min 后以 20℃·min<sup>-1</sup> 升温至 200℃, 然后再以 10℃·min<sup>-1</sup> 的速度升温至 290℃, 保持 15 min。无分流进样, 进样量 1 μL。EI 电离源 70 eV, 离子源温度 230℃。采集全扫描数据。实验分析过程中利用回收率指示物氘代十六烷酸 (购自德国 Dr. Ehrmstorfer 公司) 进行分析方法质量控制, 利用 NIST2011 进行目标化合物的定性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 地下河中类脂物含量分布特征

图 2 为不同溶解态类脂物含量在青木关地下河中的分布特征。从中可知, 各类脂物含量中以饱和直链脂肪酸含量最高, 平均含量为 3 570 ng·L<sup>-1</sup>, 最高值、最低值分别为出现在岩口 (5 704 ng·L<sup>-1</sup>)、姜家泉 (1 043 ng·L<sup>-1</sup>) 处, 下降了约 81.71%; 其次分别为脂肪醇、正构烷烃, 平均值分别为 938 ng·L<sup>-1</sup>、805 ng·L<sup>-1</sup>。此外, 在地下河入口 (岩口) 至下游地下河出露处 (姜家龙洞), 各类脂物含量均呈下降趋势, 分别下降了约 30.48%、55.42% 和 63.7%。姜家龙洞至地下河出口 (姜家泉) 处, 除饱和直链脂肪酸含量呈下降趋势外, 脂肪醇和正构烷烃的含量较姜家龙洞采样点又有所增加, 分别增加了约 38.5%、19.5%。总体来看, 各溶解态类脂物的平均含量在地下河运移过程中大致呈下降的趋势。

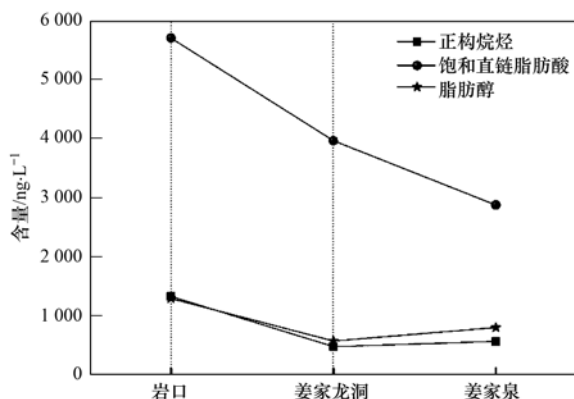


图 2 青木关地下河中各溶解态类脂物含量分布

Fig. 2 Distribution of dissolved lipids contents in Qingmuguan underground river

### 2.2 正构烷烃

#### 2.2.1 来源解析

正构烷烃广泛分布于细菌、藻类和高等植物的生物体中, 其奇碳数分布优势主要和有机质来源相关<sup>[34]</sup>, 结合主峰碳数与峰型的类型能够判断有机质的相对输入类型<sup>[35~37]</sup>。青木关地下河中溶解态正构烷烃的碳数分布范围为 C<sub>14</sub> ~ C<sub>32</sub>, 但各采样点峰型差异较大。岩口采样点中, 7、9、10 月为双峰型, 主峰碳数为 C<sub>20</sub>、C<sub>23</sub> 或 C<sub>24</sub>, 代表两种输入来源占主导。11 月为三峰型, 代表 3 种输入来源占主导; 姜家龙洞采样点除 7 月为双峰型外, 10、11 月均为三峰型; 姜家泉采样点在 7、9 月为双峰型, 10、11 月为三峰型。根据表 1, 除 7 月青木关地下河各采样点中正构烷烃均以双峰型为主外, 其它各月正构烷烃峰型随着地下河运移距离的增加均呈多样化的趋势, 即随着地下河运移距离的增加有机质输入类型增多。

本研究在 7 月采样期间, 重庆正处于炎热干旱时期, 青木关地下河受制于降雨补给缺少的影响, 地表有机质难以直接通过裂隙、溶洞、竖井等进入地下河, 地下河入口落水洞因连接地表湖泊使得湖泊水直接通过落水洞进入地下河中而成为青木关地下水的主要补给来源, 湖泊中的溶解性有机质则成为地下河中溶解态正构烷烃的主要来源。进入 9 月以后, 重庆逐渐进入雨季, 地表有机质在降雨的冲刷下通过岩溶裂隙、溶洞、竖井等进入地下河, 青木关地下水在运移过程中, 一方接受来自地表上游湖泊中的溶解性有机质, 另一方面又接受来自地下河上覆地表中的溶解性有机质, 从而使得青木关地下河中溶解态正构烷烃随着地下河运移距离的增加其有溶解性机质来源多样。

CPI (碳优势指数)、OEP (奇偶优势指数) 是判断正构烷烃来源的两个重要参数。研究表明, CPI 值 ≥ 4 时指示高等植物来源<sup>[38]</sup>。相反, 低的 CPI 值 (接近 1) 指示石油来源。也有研究指出, 当 1 < CPI < 3 时, 可能指示高等植物、细菌等现代生物的双重来源<sup>[39]</sup>; 一般情况下, 来源于高等植物的正构烷烃具有明显的奇偶优势, 其 OEP 值通常在 8 ~ 10 之间, 而低的 OEP 值则指示石油源的输入、强的细菌活动或者是陆源维管束植物残骸的输入<sup>[40]</sup>。根据表 1, 岩口采样点 CPI<sup>1</sup>、OEP<sup>1</sup> 值的变化范围分别为 1.06 ~ 3.49 和 0.83 ~ 1.03, 平均值分别约为 2.35 和 0.95。CPI<sup>1</sup> 和 OEP<sup>1</sup> 在 7 ~ 11 月随月份的增加大致呈递增的趋势, 结合峰型分布特点表明岩口采样



点溶解态正构烷烃主要以混合来源为主,但随着月份的增加陆地高等植物的相对贡献增大,而生物活动可能是造成上述现象的主要原因. 7月研究区正处于高温、炎热时期使得水温较高,水中藻类和细菌等微生物活动旺盛,而水生植物和陆地高等植物因受高温的影响活动相对较弱,但随月份的增加气温逐渐下降,水中藻类和细菌等微生物活动较弱,特别是在10月之后水生植物已经开始凋落、腐烂,高等植物的相对贡献逐渐增大. 姜家龙洞采样点  $CPI^I$ 、 $OEP^I$  值的变化范围分别为 2.52 ~ 8.28 和 1.16 ~ 5.35, 平均值分别约为 4.64 和 2.58, 结合峰型分布特点表明陆地高等植物的输入为主要来源并有少量藻类、细菌等微生物的输入. 姜家泉采样点  $CPI^I$ 、 $OEP^I$  值的变化范围分别为 0.57 ~ 2.54 和 0.78 ~ 1.29, 平均值分别约为 1.47 和 1.03, 结合峰型分布特点表明姜家泉中正构烷烃主要来源于细菌,藻类等低等生物的输入,并伴有少量高等植物的输入.

图3为青木关地下河各采样点溶解态正构烷烃  $OEP^I$ 、 $CPI^I$  在7~11月的分布特征. 从中可知,在9~11月期间, $OEP^I$  的值主要集中于2~7之间, $CPI^I$  的值则主要集中于1~4之间. 表明青木关地下河中正构烷烃主要以藻类、细菌等低等生物和高等植物的双重来源为主. 岩溶地区因其特殊性而缺少天然防渗或过滤层,地表有机质等物质很容易通过落水洞、竖井、裂隙等岩溶形态直接进入岩溶含水层或地下河<sup>[41]</sup>,在降雨时期表现得尤为明显<sup>[42~44]</sup>. 一方面,青木关地下河接受来自地表上游湖泊中经落水洞进入地下河的DOM,另一方面,又在地下河运移过程中不断接受来自上覆地表经雨水冲刷进入地下河的DOM,以上两者可能是造成青木关地下河中DOM双重来源的原因.

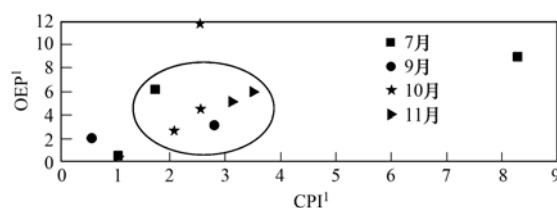


图3 不同月份采样点正构烷烃  $OEP^I$ 、 $CPI^I$  的分布

Fig. 3 Distribution of n-alkanes indices  $OEP^I$ ,  $CPI^I$  in the three sample sites in different months

### 2.2.2 来源构成及迁移变化

一般认为,主峰为  $C_{15}$ 、 $C_{17}$  和  $C_{19}$  的短链正构烷烃主要来源于细菌、浮游和底栖藻类衍生脂类的输入<sup>[45]</sup>,沉水和漂浮大型植物等非外源维管束植物在  $C_{21}$ 、 $C_{23}$  和  $C_{25}$  中有最大的正构烷烃丰度,陆生高等植物中表皮蜡质层则含有较多的  $C_{27}$ 、 $C_{29}$ 、 $C_{31}$ <sup>[45]</sup>. 因此基于数据特征,本研究定义细菌/藻类 =  $C_{15} + C_{17}$ ,水生植物 =  $C_{23} + C_{25}$  和陆源植物 =  $C_{27} + C_{29} + C_{31}$  来指代溶解态正构烷烃的3种不同来源,通过计算每种来源有机质的含量与3种来源含量之和的百分比,得到三端元图解(如图4). 岩口、姜家龙洞和姜家泉采样点中细菌/藻类来源相对贡献量的变化范围分别为:7.57% ~ 30.22%、18.39% ~ 33.71% 和 2.50% ~ 47.21%, 平均值分别约为:15.39%、24.74% 和 29.72%; 水生植物源的相对贡献量变化范围分别为:38.54% ~ 67.74%、33.69% ~ 49.18% 和 28.48% ~ 47.27%, 平均值分别为:54.59%、43.24% 和 34.88%; 陆源植物相对贡献量的变化范围分别为:24.69% ~ 36.87%、28.69% ~ 34.75% 和 15.54% ~ 50.23%, 平均值变化分别约为:30.02%、32.01% 和 35.40%. 可以看出,从岩口至姜家泉,细菌/藻类和陆源植物的相对贡献量均呈增加的趋势,而水生植物源的相对贡献量则呈降低趋势.

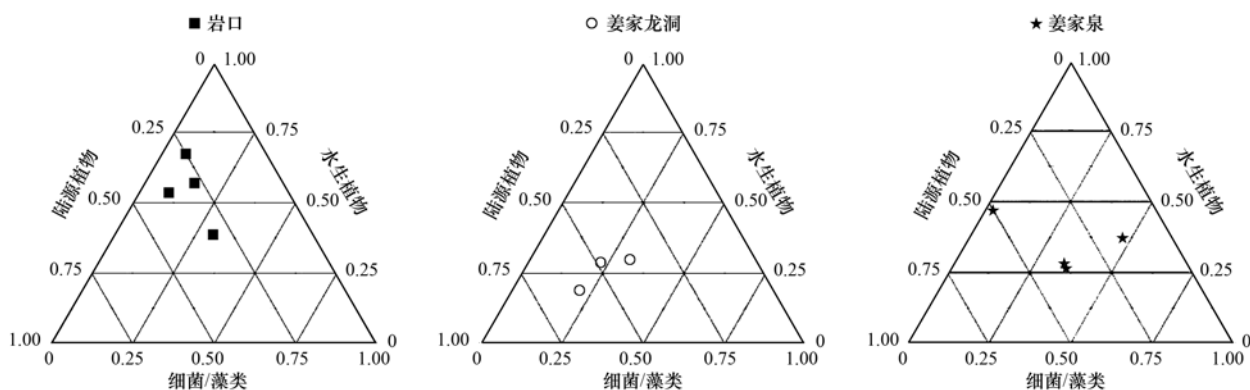


图4 采样点中不同来源正构烷烃的三端元图解

Fig. 4 Ternary plot of alkane sources at different sites

L/H(低碳烃/高碳烃)常被用作反映低等生物与高等植物相对变化的代用指标. 一般认为 L/H < 1 指示高等植物的输入为主,相反 L/H > 1 则指示细菌、藻类等低等生物的输入占优势,而其比接近于 1 则有可能来源于石油和浮游生物<sup>[46]</sup>. 但也有研究表明,L/H 的值不仅与不同生物输入的相对变化有关,也有可能与水洗作用<sup>[47]</sup>和细菌活动相关<sup>[48]</sup>.

根据表 1,在 7~11 月期间岩口、姜家龙洞、姜家泉采样点 L/H 值的变化范围分别为:0.35~1.2、0.46~1.6 和 0.81~1.28; 平均值分别约为:0.69、0.71 和 1.00,即随着地下河运移距离的增加 L/H 值呈增加的趋势,这与上述研究中细菌/藻类的相对贡献量随着地下河运移距离的增加而增大的研究相一致. 降雨时期,降水主要通过落水洞集中补给青木关地下河,成为青木关地下河的主要补给来源,并最终通过地下河出口集中排出. 7~11 月,雨水充足时上游地表湖泊的水直接通过岩口落水洞进入地下河,其中来自湖泊的水生植物产生的 DOM 便通过岩口进入地下河,从而成为地下河中水生植物来源 DOM 的主要来源,而在地下河运移过程中可能因稀释效应<sup>[49]</sup>、周围黏土矿物的吸附<sup>[50]</sup>或细菌等微生物降解作用<sup>[51]</sup>等多种因素的影响下,使得其相对贡

献量呈下降趋势.

TAR(陆生/水生类脂物比值)被用来区分沉积物有机质中内源和外源的相对贡献<sup>[52]</sup>,当陆地植物输入占优势时 TAR > 1,反之 TAR < 1 时指示正常水体中内源有机质的输入占优势<sup>[53]</sup>. 根据表 1,7~11 月期间岩口 TAR<sup>1</sup> 值的变化范围为 1.03~8.30,最大值和最小值分别出现在 9 月和 11 月,除 9 月最大值(2.04)外,其它 3 个月的平均值约为 2.04; 姜家龙洞 TAR<sup>1</sup> 值的变化范围为 0.97~1.89,平均值约为 1.39,其中最小值出现在 11 月; 姜家泉 TAR 值的变化范围为 0.33~20.11,最大值和最小值分别出现在 9 月和 11 月,除 9 月最大值(20.11)外,其它 3 个月的平均值约为 0.81,最高值和最低值分别集中于 9 月和 11 月,这可能与当时的天气条件关系密切. 总体来看,在 7~11 月期间,TAR<sup>1</sup> 的平均值从岩口到姜家泉呈下降的趋势,而这与上述研究中陆源植物输入的变化趋势相反.

有研究者发现长链正构烷烃不仅产生于陆源高等植物<sup>[54]</sup>,也有可能来自一些大型浮水植物,如灯芯草(*Juncus effusus* L.)、香蒲(*Typha latifolia*)、芦苇(*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud)等也能产生和陆源高等植物类似的长链正构烷烃(>

表 1 青木关地下河中脂类生物标志物的含量及组成分布<sup>1)</sup>/ng·L<sup>-1</sup>

Table 1 Concentrations and compositional distributions of lipid biomarkers in the Qingmuguan underground river/ng·L<sup>-1</sup>

项目	岩口				姜家龙洞			姜家泉			
	7月	9月	10月	11月	7月	10月	11月	7月	9月	10月	11月
碳数范围	C <sub>14</sub> ~C <sub>32</sub>	C <sub>14</sub> ~C <sub>32</sub>	C <sub>14</sub> ~C <sub>32</sub>	C <sub>14</sub> ~C <sub>32</sub>	C <sub>14</sub> ~C <sub>32</sub>	C <sub>14</sub> ~C <sub>32</sub>	C <sub>14</sub> ~C <sub>32</sub>	C <sub>14</sub> ~C <sub>32</sub>	C <sub>14</sub> ~C <sub>32</sub>	C <sub>14</sub> ~C <sub>32</sub>	C <sub>14</sub> ~C <sub>32</sub>
主峰碳	C <sub>20</sub> ,C <sub>24</sub>	C <sub>16</sub> ,C <sub>25</sub>	C <sub>20</sub> ≈C <sub>24</sub> ,C <sub>27</sub>	C <sub>20</sub> ,C <sub>25</sub> ,C <sub>29</sub>	C <sub>20</sub> ,C <sub>25</sub> ,C <sub>29</sub>	C <sub>20</sub> ,C <sub>25</sub> ,C <sub>29</sub>	C <sub>17</sub> ,C <sub>25</sub> ≈C <sub>27</sub>	C <sub>20</sub> ,C <sub>29</sub>	C <sub>20</sub> ,C <sub>26</sub>	C <sub>20</sub> ,C <sub>27</sub>	C <sub>17</sub> ,C <sub>25</sub> ≈C <sub>30</sub>
含量	2 454	963	1 457	453	832	264	354	775	744	282	487
CPI <sup>1</sup>	1.06	2.78	2.06	3.49	8.28	2.52	3.11	1.73	0.57	2.54	1.05
L/H	0.58	0.64	0.35	1.20	1.06	0.46	0.63	1.03	1.28	0.89	0.81
OEP <sup>1</sup>	0.83	0.93	1.00	1.30	5.35	1.16	1.24	1.07	0.98	0.78	1.29
P <sub>aq</sub>	0.99	0.82	0.88	0.63	0.78	0.30	0.74	0.55	0.62	0.66	0.84
TAR <sup>1</sup>	1.83	8.3	3.26	1.03	1.30	1.89	0.97	1.09	20.11	1.01	0.33
碳数范围	C <sub>12</sub> ~C <sub>24</sub>	C <sub>12</sub> ~C <sub>24</sub>	C <sub>12</sub> ~C <sub>24</sub>	C <sub>12</sub> ~C <sub>24</sub>	C <sub>12</sub> ~C <sub>24</sub>	C <sub>12</sub> ~C <sub>24</sub>	C <sub>12</sub> ~C <sub>24</sub>	C <sub>12</sub> ~C <sub>24</sub>	C <sub>12</sub> ~C <sub>24</sub>	C <sub>12</sub> ~C <sub>24</sub>	C <sub>12</sub> ~C <sub>24</sub>
主峰碳	C <sub>16</sub>	C <sub>16</sub>	C <sub>16</sub>	C <sub>16</sub>	C <sub>16</sub>	C <sub>16</sub>	C <sub>16</sub>	C <sub>16</sub>	C <sub>16</sub>	C <sub>16</sub>	C <sub>16</sub>
含量	10 657	5 606	4 970	1 582	9 730	1 222	943	4 824	4 225	1 425	1 044
CPI <sup>2</sup>	0.72	0.32	0.28	0.21	0.38	0.65	0.81	0.28	0.30	0.38	0.50
L/H	11.98	10.83	13.17	11.34	29.03	7.21	4.72	14.21	12.1	16.03	4.51
OEP <sup>2</sup>	0.6	0.39	0.45	0.38	0.44	0.57	1.15	0.49	0.42	0.36	0.64
CPI <sup>3</sup>	0.72	0.30	0.21	0.28	0.38	0.61	0.81	0.28	0.30	0.38	0.50
TAR <sup>2</sup>	0.01	0.03	0.04	0.01	0.0	0.03	0.05	0.01	0.02	0.02	0.10
碳数范围	C <sub>10</sub> ~C <sub>28</sub>	C <sub>10</sub> ~C <sub>28</sub>	C <sub>10</sub> ~C <sub>28</sub>	C <sub>10</sub> ~C <sub>28</sub>	C <sub>10</sub> ~C <sub>28</sub>	C <sub>10</sub> ~C <sub>28</sub>	C <sub>10</sub> ~C <sub>28</sub>	C <sub>10</sub> ~C <sub>28</sub>	C <sub>10</sub> ~C <sub>28</sub>	C <sub>10</sub> ~C <sub>28</sub>	C <sub>10</sub> ~C <sub>28</sub>
主峰碳	C <sub>22</sub>	C <sub>22</sub>	C <sub>22</sub>	C <sub>18</sub>	C <sub>22</sub>	C <sub>22</sub>	C <sub>18</sub>	C <sub>22</sub>	C <sub>22</sub>	C <sub>22</sub>	C <sub>18</sub>
含量	2 315	1 217	1 194	461	1 068	307	359	1 251	1 388	180	410
L/H	2.59	2.13	2.18	4.47	1.15	0.80	2.84	1.74	2.12	2.11	3.64

$$1) CPI^1 = 1/2 [ \sum (C_{25} \sim C_{31})_{\text{奇数}} / \sum (C_{24} \sim C_{30})_{\text{偶数}} + \sum (C_{25} \sim C_{31})_{\text{奇数}} / \sum (C_{26} \sim C_{32})_{\text{偶数}} ]; CPI^2 = \sum (C_{10} \sim C_{20})_{\text{奇数}} / \sum (C_{10} \sim C_{20})_{\text{偶数}}; CPI^3 = \sum (C_{23} \sim C_{27})_{\text{奇数}} / \sum (C_{22} \sim C_{28})_{\text{偶数}}; L/H = \sum C_{20} / \sum C_{21}; OEP^1 = (C_{27} + 6C_{29} + C_{31}) / 4(C_{28} + C_{30}); OEP^2 = (C_{21} + 6C_{23} + C_{25}) / 4(C_{22} + C_{24}); P_{aq} = (C_{23} + C_{25}) / (C_{23} + C_{25} + C_{29} + C_{31}); TAR^1 = (C_{27} + C_{29} + C_{31}) / (C_{15} + C_{17} + C_{19}); TAR^2 = (C_{24} + C_{26} + C_{28}) / (C_{12} + C_{14} + C_{16})$$

$C_{27}$ ), 基于以上原因 Ficken 等<sup>[55]</sup> 提出用  $P_{aq}$  指示陆源高等植物、挺水植物、沉水植物和漂浮大型植物的输入, 即当  $P_{aq} < 0.1$  时指示陆源高等植物的输入,  $0.1 < P_{aq} < 0.4$  时指示挺水植物的输入, 而沉水和漂浮大型植物输入的有机物为  $0.4 < P_{aq} < 1$ . 根据表 1, 除姜家龙洞采样点在 10 月指示挺水植物的输入 ( $P_{aq} = 0.3$ ) 外, 其余采样点在各月的  $P_{aq}$  均大于 0.4, 指示沉水和漂浮大型植物的输入. 另外, 从岩口至姜家泉  $P_{aq}$  的平均值分别约为 0.83、0.74 和 0.67, 呈下降的趋势, 说明上游湖泊中水生植物产生的 DOM 为青木关地下河中水生植物源的主要贡献者. 综合分析认为, 上游湖泊水体向青木关地下河的输入是控制青木关地下河水中 DOM 输入类型的决定性因素, 并受降雨和岩溶地表结构的影响, 使得青木关地下河在运移过程中一方面直接接收来自上游湖泊的输入, 另一方面又不断接收来自地表经雨水冲刷下渗的 DOM, 而后者可能是导致陆源植物输入的相对贡献量随着地下河运移距离的增加而增大的原因.

## 2.3 饱和直链脂肪酸

### 2.3.1 来源解析

图 5 为典型月份中样品中不同碳数脂肪酸的相对变化. 从中可知, 其碳数分布范围为  $C_{10,0} \sim C_{28,0}$ , 以  $C_{16,0}$  和  $C_{18,0}$  低碳数饱和直链脂肪酸为主, 且均以  $C_{16,0}$  为主峰, 在  $C_{10,0} \sim C_{20,0}$  以偶数碳占优势. 据研究, 高含量的  $C_{10,0} \sim C_{20,0}$  短链脂肪酸一般来源于浮游动物和细菌<sup>[56]</sup>, 而以  $C_{16,0}$  和  $C_{18,0}$  为主峰的组分则被认为主要来源于淡水和湖泊的藻类表层叶蜡<sup>[57]</sup>. 根据表 1, 岩口采样点饱和直链脂肪酸  $CPI^2$  和  $CPI^3$  [ $CPI^3 = (C_{23} \sim C_{27})_{\text{奇数}} / (C_{22} \sim C_{28})_{\text{偶数}}$ ] 值的变化范围分别为 0.10 ~ 0.16 和 0.21 ~ 0.72, 平均值分别约为 0.12 和 0.38; 姜家龙洞采样点饱和直链脂肪酸

$CPI^2$  和  $CPI^3$  值的变化范围分别为: 0.08 ~ 0.11 和 0.38 ~ 0.81, 平均值分别约为 0.1 和 0.61; 姜家泉采样点饱和直链脂肪酸  $CPI^2$  和  $CPI^3$  值的变化范围分别为 0.07 ~ 0.12 和 0.28 ~ 0.50, 平均值分别约为: 0.11 和 0.37. 各采样点  $CPI^2$  值的月变化不大, 集中分布在 0.11 左右, 且  $CPI^3$  的值均小于 1, 表明青木关地下河中饱和直链脂肪酸主要来自细菌和水体中藻类的输入.

### 2.3.2 迁移及转化

研究认为, 直链脂肪烃的  $CPI$  (碳优势指数)、 $L/H$  (低碳/高碳) 不仅反映生物源输入的变化<sup>[15]</sup>, 还与微生物活动<sup>[58]</sup>、降水息息相关<sup>[47]</sup>. 如 Xie 等<sup>[59]</sup> 指出, 当处于寒冷气候条件下, 细菌活动和有机质的矿化作用减弱, 从而使得  $CPI$  值增大. 因此,  $CPI$ 、 $L/H$  值也可以作为反映细菌活动、降水或气温变化的指标. 根据表 1, 岩口、姜家龙洞和姜家泉饱和直链脂肪酸  $CPI^3$  值分别为 0.38、0.61 和 0.37;  $L/H$  值分别为 11.83、13.65 和 11.71. 图 6 为饱和直链脂肪酸分子指数  $CPI^3$ 、 $L/H$  在青木关地下河各采样点的分布特征, 从中可以看出,  $CPI^3$ 、 $L/H$  均在姜家龙洞处有最大值, 高于岩口和姜家泉, 岩口和姜家泉两点的  $CPI^3$ 、 $L/H$  值相差并不大. 然而, 岩口作为青木关地下河的主要出口与其地下河出露处姜家龙洞的距离并不远, 但是其  $CPI^3$ 、 $L/H$  值却有较大变化. 这说明  $CPI^3$ 、 $L/H$  在这里并不是反映饱和直链脂肪酸来源的指标, 可能与细菌活动或温度有关. 当地表水体进入地下河时, 由于没有受到阳光的照射或缺氧的影响, 进入地下河中的溶解性有机质便不会发生光解反应, 或细菌活动相对较弱,  $CPI$  值则相对增加, 当地下河水体通过出口重新进入地表时, 水体中 DOM 则会因氧气、光照的影响, 细菌活动增大、降解活动增强, 从而使得  $CPI$  值

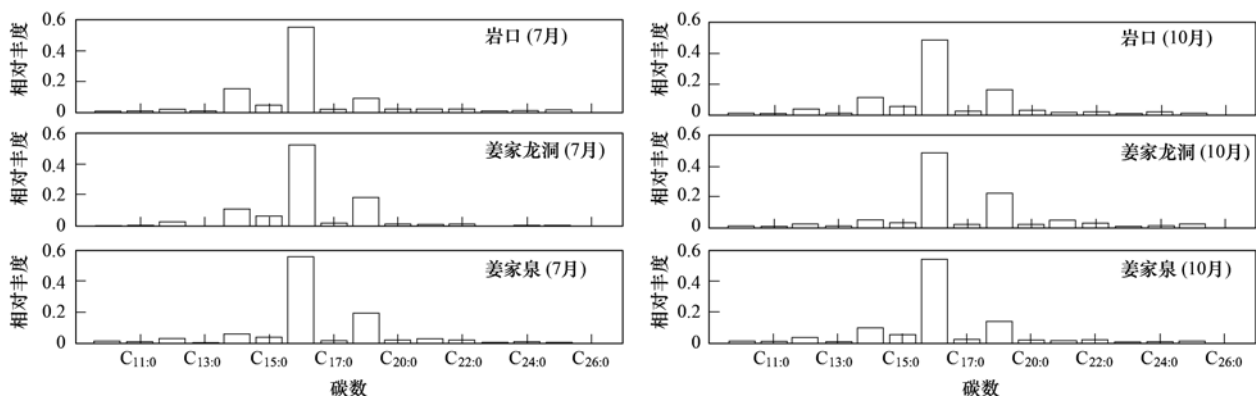


图 5 典型月份样品中不同碳数脂肪酸的相对变化

Fig. 5 Changes of relative abundances of fatty acids with different carbon numbers in a typical month sample



重新降低. 姜家龙洞是一个天窗(karst window), 青木关地下河流经其中, 因外部无阳光直射, 所以在一定程度上能够反映地下河内部水体中 DOM 的状况, 这可能是导致姜家龙洞 CPI<sup>3</sup>、L/H 值在姜家龙洞较高的原因. 根据表 1, 岩口、姜家泉和姜家龙洞饱和直链脂肪酸的 TAR<sup>2</sup> 值分别为 0.02、0.03 和 0.04, 3 个采样点 TAR<sup>2</sup> 值均小于 1, 表明整个青木关地下河水体中饱和直链脂肪酸的输入以内源输入为主, 但随着青木关地下河运移距离的增加, 陆源有机质的输入逐渐增大.

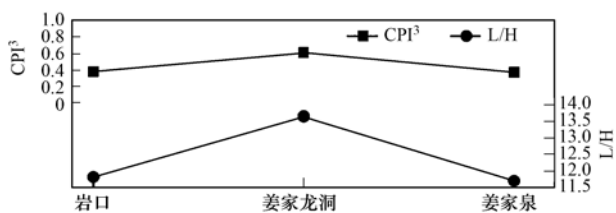


图 6 青木关地下河中饱和直链脂肪酸分子指数 CPI<sup>3</sup>、L/H 分布示意

Fig. 6 Distribution of saturated straight fatty acids molecular indices CPI<sup>3</sup>, L/H in underground river

## 2.4 脂肪醇

根据表 1, 样品中脂肪醇碳数分布范围为 C<sub>10,0</sub> ~ C<sub>24,0</sub>, 各采样点除在 11 月以 C<sub>18,0</sub> 为主峰外, 其它各月均以 C<sub>22,0</sub> 为主峰. 有研究表明<sup>[15]</sup>, 碳数小于 C<sub>22,0</sub> 的脂肪醇主要来源于藻类和微生物, 藻类来源的正构脂肪醇多以 C<sub>16,0</sub> 和 C<sub>18,0</sub> 为主峰碳, C<sub>18,0</sub> 脂肪醇还可能来源于浮游动物; C<sub>22,0</sub>、C<sub>24,0</sub> 主要来自于水中大型沉水植物和浮游植物, 而碳数大于 C<sub>22,0</sub> 的脂肪醇则往往由高等植物产生. 本研究基于数据特征利用  $(C_{16,0} + C_{18,0}) / (C_{22,0} + C_{24,0})$  来反映低等生物与水生植物的相对变化特征, 根据表 1, 样品中 11 月的  $(C_{16,0} + C_{18,0}) / (C_{22,0} + C_{24,0})$  值变化范围为 1.52 ~ 2.49, 平均值约为 2.02, 指示低等生物源占主导, 这与 11 月以 C<sub>18,0</sub> 为主峰碳数的分布特征相对应. 在 7 ~ 10 月岩口采样点  $(C_{16,0} + C_{18,0}) / (C_{22,0} + C_{24,0})$  值的变化范围为 1.04 ~ 1.27, 平均值约为 1.15; 姜家龙洞变化范围为 0.34 ~ 0.37, 平均值约为 0.41; 姜家泉的变化范围为 0.60 ~ 0.81, 平均值约为 0.72. 表明在 7 ~ 10 月随着青木关地下河运移距离的增加, 水生植物的相对贡献量呈增加的趋势, 但这种变化趋势与上述研究中水生植物对溶解态正构烷烃的相对贡献量变化趋势不同. 有研究指出生物体经微生物降解后也可形成 C<sub>22,0</sub> 为主峰的脂肪醇分布<sup>[60]</sup>, 而这可能是造成上述现象的原因.

## 3 结论

(1) 青木关地下河中各溶解态类脂物含量以饱和直链脂肪酸占优势, 其次分别为脂肪醇、正构烷烃. 随着地下河运移距离的增加各溶解态脂类生物标志物平均含量均呈下降的趋势, 其中以饱和直链脂肪酸最为显著.

(2) 样品中正构烷烃能够较为详尽地反映青木关地下河中 DOM 的来源类型. 受制于岩溶地表不均一性和其它因素的制约, 自地下河入口至出口, 各采样点中有机质来源类型各异, 但输入类型总体呈多样化趋势; 水生植物的输入为青木关地下河中溶解态正构烷烃的主要来源, 其次分别为陆地高等植物、藻类和细菌等微生物, 且除水生植物外, 其它两者的相对贡献量随着地下河运移距离的增加呈上升的趋势; 正构烷烃 L/H、P<sub>aq</sub> 值能够指示有机质的输入类型, 而 TAR 值则对降雨有一定的指示意义.

(3) 饱和直链脂肪酸对青木关地下河中的细菌和藻类的指示意义明显. 其 CPI、L/H 值指示其降解活动, TAR 值则指示饱和直链脂肪酸主要以内源(水中)来源为主.

(4) 基于脂肪醇数据特征所反映的低等生物与水生生物输入的相对变化的特征与上述研究中水生生物输入的相对贡献量特征存在不同, 但造成上述现象的原因仍不清楚.

### 参考文献:

- [1] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains[J]. *Limnology and Oceanography*, 1981, **26**(1): 43-53.
- [2] Al-Reasi H A, Wood C M, Smith D S. Characterization of freshwater natural dissolved organic matter (DOM): mechanistic explanations for protective effects against metal toxicity and direct effects on organisms[J]. *Environment International*, 2013, **59**: 201-207.
- [3] Baker A. Thermal fluorescence quenching properties of dissolved organic matter[J]. *Water Research*, 2005, **39**(18): 4405-4412.
- [4] Wang X J, Goual L, Colberg P J S. Characterization and treatment of dissolved organic matter from oilfield produced waters[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **217-218**: 164-170.
- [5] Xu H C, Yu G H, Yang L Y, et al. Combination of two-dimensional correlation spectroscopy and parallel factor analysis to characterize the binding of heavy metals with DOM in lake sediments[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **263**: 412-421.
- [6] Kalbitz K, Kaiser K. Contribution of dissolved organic matter to

- carbon storage in forest mineral soils [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, **171**(1): 52-60.
- [7] Jansen B, Kalbitz K, McDowell W H. Dissolved organic matter: linking soils and aquatic systems [J]. *Vadose Zone Journal*, 2014, **13**(7), doi:10.2136/vzj2014.05.0051.
- [8] Ya C, Anderson W, Jaffé R. Assessing dissolved organic matter dynamics and source strengths in a subtropical estuary: application of stable carbon isotopes and optical properties [J]. *Continental Shelf Research*, 2015, **92**: 98-107.
- [9] Callahan J, Dai M H, Chen R F, *et al.* Distribution of dissolved organic matter in the Pearl River Estuary, China [J]. *Marine Chemistry*, 2004, **89**(1-4): 211-224.
- [10] Goni M A, Monacci N, Gisewhite R, *et al.* Distribution and sources of particulate organic matter in the water column and sediments of the Fly River Delta, Gulf of Papua (Papua New Guinea) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, **69**(1-2): 225-245.
- [11] Amon R M W, Rinehart A J, Duan S, *et al.* Dissolved organic matter sources in large Arctic rivers [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, **94**: 217-237.
- [12] Yamashita Y, McCallister S L, Koch B P, *et al.* Dynamics of dissolved organic matter in fjord ecosystems: contributions of terrestrial dissolved organic matter in the deep layer [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, **159**: 37-49.
- [13] Liu R X, Lead J R, Baker A. Fluorescence characterization of cross flow ultrafiltration derived freshwater colloidal and dissolved organic matter [J]. *Chemosphere*, 2007, **68**(7): 1304-1311.
- [14] Gonsior M, Peake B M, Cooper W T, *et al.* Characterization of dissolved organic matter across the Subtropical Convergence off the South Island, New Zealand [J]. *Marine Chemistry*, 2011, **123**(1-4): 99-110.
- [15] Zhang S Y, Li S L, Dong H P, *et al.* An analysis of organic matter sources for surface sediments in the central South Yellow Sea, China: evidence based on macroelements and *n*-alkanes [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **88**(1-2): 389-397.
- [16] Blyth A J, Asrat A, Baker A, *et al.* A new approach to detecting vegetation and land-use change using high-resolution lipid biomarker records in stalagmites [J]. *Quaternary Research*, 2007, **68**(3): 314-324.
- [17] Xing L, Zhao M X, Gao W X, *et al.* Multiple proxy estimates of source and spatial variation in organic matter in surface sediments from the southern Yellow Sea [J]. *Organic Geochemistry*, 2014, **76**: 72-81.
- [18] Sojinu S O, Sonibare O O, Ekundayo O, *et al.* Assessing anthropogenic contamination in surface sediments of Niger Delta, Nigeria with fecal sterols and *n*-alkanes as indicators [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **441**: 89-96.
- [19] Wakeham S G, Pease T K, Benner R. Hydroxy fatty acids in marine dissolved organic matter as indicators of bacterial membrane material [J]. *Organic Geochemistry*, 2003, **34**(6): 857-868.
- [20] Woszczyk M, Bechtel A, Gratzner R, *et al.* Composition and origin of organic matter in surface sediments of Lake Sarbsko: a highly eutrophic and shallow coastal lake (northern Poland) [J]. *Organic Geochemistry*, 2011, **42**(9): 1025-1038.
- [21] Lafon A, Silva N, Vargas C A. Contribution of allochthonous organic carbon across the Serrano River Basin and the adjacent fjord system in Southern Chilean Patagonia: insights from the combined use of stable isotope and fatty acid biomarkers [J]. *Progress in Oceanography*, 2014, **129**: 98-113.
- [22] Giri S J, Diefendorf A F, Lowell T V. Origin and sedimentary fate of plant-derived terpenoids in a small river catchment and implications for terpenoids as quantitative paleovegetation proxies [J]. *Organic Geochemistry*, 2015, **82**: 22-32.
- [23] Liu S J, Zhang W, Wang K L, *et al.* Factors controlling accumulation of soil organic carbon along vegetation succession in a typical karst region in Southwest China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **521-522**: 52-58.
- [24] Peng T, Wang S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China [J]. *CATENA*, 2012, **90**: 53-62.
- [25] Lu H P, Zhao C H, Liu Q Q, *et al.* Characteristics and reasons for groundwater pollution of the Qingshuiquan Underground River system [J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2013, **7**: 525-528.
- [26] Hu Y, Qi S H, Zhang J P, *et al.* Assessment of organochlorine pesticides contamination in underground rivers in Chongqing, Southwest China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, **111**(1-2): 47-55.
- [27] Jiang Y J. Sources of sulfur in the Nandong underground river system, southwest China: a chemical and isotopic reconnaissance [J]. *Applied Geochemistry*, 2012, **27**(8): 1463-1470.
- [28] 刘再华. 岩石风化碳汇研究的最新进展和展望 [J]. *科学通报*, 2012, **57**(2-3): 95-102.
- [29] 章程. 不同土地利用下的岩溶作用强度及其碳汇效应 [J]. *科学通报*, 2011, **56**(26): 2174-2180.
- [30] Cheng J Z, Lee X, Theng B K G, *et al.* Biomass accumulation and carbon sequestration in an age-sequence of *Zanthoxylum bungeanum* plantations under the Grain for Green Program in karst regions, Guizhou province [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, **203**: 88-95.
- [31] Khadka M B, Martin J B, Jin J. Transport of dissolved carbon and CO<sub>2</sub> degassing from a river system in a mixed silicate and carbonate catchment [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, **513**: 391-402.
- [32] Liu Z H, Dreybrodt W. Significance of the carbon sink produced by H<sub>2</sub>O-carbonate-CO<sub>2</sub>-aquatic phototroph interaction on land [J]. *Science Bulletin*, 2015, **60**(2): 182-191.
- [33] Jiang Y J, Hu Y J, Schirmer M. Biogeochemical controls on daily cycling of hydrochemistry and  $\delta^{13}\text{C}$  of dissolved inorganic carbon in a karst spring-fed pool [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, **478**: 157-168.
- [34] 巩俊成, 张菟漪, 张成君, 等. 青藏高原可可西里地区湖泊沉积物中有机质正构烷烃分布特征 [J]. *地质论评*, 2012,

- 58(4): 636-642.
- [35] 朱纯, 潘建明, 卢冰, 等. 长江口及邻近海域现代沉积物中正构烷烃分子组合特征及其对有机碳运移分布的指示[J]. 海洋学报, 2005, 27(4): 59-67.
- [36] Chevalier N, Savoye N, Dubois S, *et al.* Precise indices based on *n*-alkane distribution for quantifying sources of sedimentary organic matter in coastal systems [J]. *Organic Geochemistry*, 2015, 88: 69-77.
- [37] Yunker M B, Macdonald R W, Cretney W J, *et al.* Alkane, terpene and polycyclic aromatic hydrocarbon geochemistry of the Mackenzie River and Mackenzie shelf: riverine contributions to Beaufort Sea coastal sediment [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(13): 3041-3061.
- [38] Saliot A, Tronczynski J, Scribe P, *et al.* The application of isotopic and biogeochemical markers to the study of the biochemistry of organic matter in a macrotidal estuary, the Loire, France [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1988, 27(6): 645-669.
- [39] 李杏茹, 杜熙强, 王英锋, 等. 保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 441-447.
- [40] Meyers P A, Ishiwatari R. Lacustrine organic geochemistry—an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments [J]. *Organic Geochemistry*, 1993, 20(7): 867-900.
- [41] 杨平恒, 罗鉴银, 袁道先, 等. 降雨条件下岩溶槽谷泉水的水文地球化学特征[J]. 水利学报, 2009, 40(1): 67-74.
- [42] 杨平恒, 旷颖仑, 袁文昊, 等. 降雨条件下典型岩溶流域地下水中的物质运移[J]. 环境科学, 2009, 30(11): 3249-3255.
- [43] 杨平恒, 袁道先, 任幼蓉, 等. 川东平行岭谷区典型岩溶含水系统中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的存储和运移[J]. 环境科学, 2012, 33(9): 3124-3131.
- [44] 杨平恒, 袁道先, 叶许春, 等. 降雨期间岩溶地下水化学组分的来源及运移路径[J]. 科学通报, 2013, 58(18): 1755-1763.
- [45] Sáñez J, Froehner S, Falcão F. Use of biomarkers indices in a sediment core to evaluate potential pollution sources in a subtropical reservoir in Brazil [J]. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 2013, 73(4): 555-563.
- [46] Commendatore M G, Esteves J L, Colombo J C. Hydrocarbons in coastal sediments of Patagonia, Argentina: levels and probable sources [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 40(11): 989-998.
- [47] 王志远, 刘占红, 易轶, 等. 不同气候和植被区现代土壤类脂物分子特征及其意义[J]. 土壤学报, 2003, 40(6): 967-970.
- [48] Xie S C, Yi Y, Liu Y Y, *et al.* The Pleistocene vermicular red earth in South China signaling the global climatic change: the molecular fossil record [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2003, 46(11): 1113-1120.
- [49] 梁波, 张凯, 沈汝浪, 等. 珠江三角洲外围水体中正构烷烃的来源分析和通量估算: 加强珠江上游区域生态环境保护的必要性[J]. 地球化学, 2012, 41(1): 55-62.
- [50] 孔祥胜, 祁士华, Oramah I T, 等. 广西大石围天坑群地下水中多环芳烃的污染特征[J]. 环境科学, 2011, 32(4): 1081-1087.
- [51] Wentzel A, Ellingsen T E, Kotlar H K, *et al.* Bacterial metabolism of long-chain *n*-alkanes [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2007, 76(6): 1209-1221.
- [52] Bourbonniere R A, Meyers P A. Sedimentary geolipid records of historical changes in the watersheds and productivities of Lakes Ontario and Erie [J]. *Limnology and Oceanography*, 1996, 41(2): 352-359.
- [53] Wang N, Zong Y Q, Brodie C R, *et al.* An examination of the fidelity of *n*-alkanes as a palaeoclimate proxy from sediments of Palaeolake Tianyang, South China [J]. *Quaternary International*, 2014, 333: 100-109.
- [54] Cranwell P A. Lipid geochemistry of sediments from Upton Broad, a small productive lake [J]. *Organic Geochemistry*, 1984, 7(1): 25-37.
- [55] 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.
- [56] De las Heras X, Grimalt J O, Albaigés J, *et al.* Origin and diagenesis of the organic matter in Miocene freshwater lacustrine phosphates (Cerdanya Basin, Eastern Pyrenees) [J]. *Organic Geochemistry*, 1989, 14(6): 667-677.
- [57] 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.
- [58] 罗攀, 彭平安, 吕厚远, 等. 表土长链正构烷烃 CPI 值的纬向变化: CPI 作为气候干旱程度替代指标的证据 [J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 42(11): 1729-1741.
- [59] Xie S C, Nott C J, Avsejs L A, *et al.* Molecular and isotopic stratigraphy in an ombrotrophic mire for paleoclimate reconstruction [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(13): 2849-2862.
- [60] 李凤, 刘亚娟, 王江涛, 等. 东海赤潮高发区沉积物柱状样中正构烷烃和脂肪醇的分布与来源 [J]. 沉积学报, 2014, 32(5): 988-995.

## CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015; Pollution Process and Emissions Variation .....	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC .....	ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry .....	LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Lanzhou City .....	WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM <sub>2.5</sub> in Southwest Suburb of Chengdu in Spring .....	LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region .....	LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources .....	CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing .....	HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing .....	WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)
CoCuMnO <sub>2</sub> Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis .....	MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication .....	ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region .....	SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)
$\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers .....	ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin .....	WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region .....	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China .....	WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network .....	FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake .....	ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors .....	REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province .....	WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China .....	CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou .....	CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River .....	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing .....	WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojingong Cave in Guangdong Province .....	HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example .....	ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River .....	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co <sup>2+</sup> Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process .....	LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile .....	DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process .....	DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System .....	CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters .....	GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment .....	LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)
Magnetic Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge .....	QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor .....	SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO <sub>2</sub> and N <sub>2</sub> O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain .....	GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)
Characteristics of Dissolved CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring .....	HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N <sub>2</sub> O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China .....	YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism .....	CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China .....	GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates .....	SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing .....	ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang .....	LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)
Effect of Nano-TiO <sub>2</sub> on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil .....	ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)
Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic .....	MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil .....	SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i> .....	HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)
Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorfii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems .....	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source .....	ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting .....	LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)

# 《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)

2016年5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 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	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@reces. 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@reces. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行