

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲 PM _{2.5} 质量浓度遥感估算与时空分布特征	徐建辉, 江洪 (3119)
宁波市 PM _{2.5} 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算	杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 胡敏, 王川, 任宇超, 应红梅, 周军, 汪伟峰, 许丹丹 (3128)
青岛大气中酸碱气体及 PM _{2.5} 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系	周佳佳, 石金辉, 李丽平, 姚小红, 高会旺 (3135)
北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征	胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松 (3144)
2015 年春节北京市空气质量分析	程念亮, 陈添, 张大伟, 李云婷, 孙峰, 魏强, 刘嘉林, 刘保献, 孙瑞雯 (3150)
上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系	王红丽 (3159)
生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究	陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭, 陈建孟 (3168)
一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型	郭宇龙, 李云梅, 李渊, 吕恒, 刘阁, 王旭东, 张思敏 (3175)
巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素	叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 闫德智, 张玫琪, 周阳 (3186)
河北洺河溶解性有机物光谱学特性	虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰 (3194)
东山岛地下水“三氮”空间分布特征	吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 汤坤贤, 曹超, 陈庆辉, 梁修雨 (3203)
重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 师阳, 江泽利, 张媚, 谢正兰, 廖昱 (3212)
硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响	黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田 (3220)
阆中市思依镇水化学特征及其成因分析	张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云 (3230)
东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动	陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 白敏冬 (3238)
水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响	胡珍珍, 崔益斌, 李梅, 余静 (3248)
溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟	杨秋婵, 赵玲, 尹平河, 谭烁, 舒万姣, 侯少玲 (3255)
坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果	李怀正, 陈珂莉, 危忠, 王卫刚 (3262)
典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估	李敦柱, 管运涛, 刘安, 李思远 (3269)
南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比	张民盛, 徐斌, 张天阳, 程拓, 夏圣骥, 楚文海 (3278)
臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响	刘海龙, 郭雪峰, 王敏慧, 焦茹媛, 石健 (3285)
含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响	吴悦, 吴纯德, 刘吕刚, 袁博杰 (3292)
厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究	王莹, 许丽英, 王少锋, 肖翻, 贾永峰 (3298)
印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究	申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 舒小铭, 许江军, 兰亚琼, 陈吕军 (3304)
螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征	覃彩霞, 佟娟, 申佩弘, 魏源送 (3311)
两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究	税勇, 川岸朋树, 宋小燕, 刘锐, 陈吕军 (3319)
农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析	孔晓, 崔丙健, 金德才, 吴尚华, 杨波, 邓晔, 庄国强, 庄绪亮 (3329)
四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析	张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 陈敬, 睦稀, 甘志明, 王修平, 史扬 (3339)
从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化	刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶 (3345)
提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响	刘小鹏, 王建芳, 钱飞跃, 王琰, 陈重军, 沈耀良 (3352)
常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究: 以长江中下游地区夏玉米季为例	桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳 (3358)
水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响	傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞 (3365)
厌氧条件下砂壤水稻土 N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和 CH ₄ 排放特征	曹娜, 王睿, 廖婷婷, 陈诺, 郑循华, 姚志生, 张海, Klaus Butterbach-Bahl (3373)
黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征	陈盖, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 樊会敏, 王闪闪 (3383)
生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响	郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 赵世伟, 张兴昌 (3393)
宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征	倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利 (3401)
石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究	胡宁, 马志敏, 蓝家程, 伍宇春, 陈高起, 傅瓦利, 文志林, 王文净 (3411)
江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例	王玉竹, 肖和艾, 周萍, 童成立, 葛体达, 曾冠军, 吴金水 (3422)
缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征	李睿, 江长胜, 郝庆菊 (3429)
西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应	聂燕, 王新, 王博, 许淑婧, 高福元, 余晔, 夏敦胜, 夏听鸣 (3438)
电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评价	郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钊 (3447)
典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性	刘洁, 李晓东, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华 (3457)
紫色土对硫丹的吸附与解吸特征	赵炎, 郑国灿, 朱恒, 张进忠, 朱秀英, 胡淑春, 吴娅林 (3464)
紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响	焦海华, 崔丙健, 吴尚华, 白志辉, 黄占斌 (3471)
4 株外生菌根真菌对 Al ³⁺ 吸收与吸附的研究	王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰 (3479)
长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评价	于锐, 刘景双, 王其存, 刘强, 王洋 (3486)
北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律	宋立娜, 王磊, 夏孟婧, 苏月, 李振山 (3493)
城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响	吕文洲, 乔宇祥, 余宁, 史荣华, 王光明 (3501)
V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英	任咏, 纪莎莎, 俞明峰, 李晓东, 严建华 (3508)
基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析	林晓丹, 田良, 吕彬, 杨建新 (3515)
我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨	江梅, 邹兰, 李晓倩, 车飞, 赵国华, 李刚, 张国宁 (3522)
异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响	司友斌, 王娟 (3533)
《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)	

重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化

梁作兵¹, 孙玉川^{1,2*}, 王尊波¹, 师阳¹, 江泽利¹, 张媚¹, 谢正兰¹, 廖昱¹

(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/广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 为阐述青木关地下河中溶解态正构烷烃和脂肪酸的来源、迁移及转化研究, 2013 年 7 月 31 日、10 月 25 日分别在青木关地下河入口、天窗和出口处进行采样, 并利用气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS) 对样品中溶解态正构烷烃、脂肪酸的组分进行定量分析. 结果表明, 7 月和 10 月样品中溶解态正构烷烃、脂肪酸的平均含量分别为 $1\,354$ 、 $667\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $24\,203$ 、 $2\,526\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 溶解态正构烷烃和脂肪酸的含量随地下河运移距离的增加均呈降低的趋势; 基于正构烷烃分子特征参数 CPI、OEP、Paq 和 R ($\sum C \leq 20$ 含量与总量的百分比) 发现 7 月青木关地下河中溶解态正构烷烃主要来源于细菌等微生物和藻类. 10 月主要来源于地表水生植物, 但随着地下河运移距离的增加, 藻类和细菌等微生物的贡献逐渐增大; 溶解态脂肪酸 C16:0 比例最高, 结合碳峰分布特征显示 7 月和 10 月水样中, 藻类和细菌等微生物为地下河中溶解态脂肪酸的主要来源.

关键词: 地下河; 溶解性有机质; 正构烷烃; 脂肪酸; 生物标志化合物

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3212-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.09.012

Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area

LIANG Zuo-bing¹, SUN Yu-chuan^{1,2*}, WANG Zun-bo¹, SHI Yang¹, JIANG Ze-li¹, ZHANG Mei¹, XIE Zheng-lan¹, LIAO Yu¹

(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 & Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

Abstract: Dissolved alkanes and dissolved fatty acids were collected from Qingmuguan underground river in July, October 2013. By gas chromatography-mass spectrometer (GC-MS), alkanes and fatty acids were quantitatively analyzed. The results showed that average contents of alkanes and fatty acids were $1\,354\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, $24\,203\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ in July, and $667\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, $2\,526\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ in October respectively. With the increasing migration distance of dissolved alkanes and dissolved fatty acids in underground river, their contents decreased. Based on the molecular characteristic indices of alkanes, like CPI, OEP, Paq and R , dissolved alkanes were mainly originated from microorganisms in July, and aquatic plants in October. Saturated straight-chain fatty acid had the highest contents in all samples with the dominant peak in C16:0, combined with the characteristics of carbon peak, algae or bacteria might be the dominant source of dissolved fatty acids.

Key words: underground river; dissolved organic matter; dissolved alkanes; dissolved fatty acids; biomarker

溶解性有机质是不均匀、复杂混合物, 广泛存在于土壤、沉积物、雨水、海洋等环境中^[1], 是地球上最大的有机碳库^[2], 在联系陆地与水生环境, 全球碳循环中起着重要作用^[3]. 据相关报道^[4], 如果水中溶解性有机质在一年中矿化其总量的 1%, 它所释放的二氧化碳的量将远大于地球上每年化石燃料燃烧所产生的二氧化碳的量. 虽然, 全球每年产生的溶解性有机质大多数被迅速矿化, 但仍有一部分溶解性有机质能够不被分解, 从而充当长期碳汇^[5,6]. 所以, 要提高对全球碳循环过程的认识, 就必须更好地了解水中溶解性有机质 (DOM) 的来源、

迁移以及转化特征. 但是, 由于溶解性有机质的来源与组成成分复杂^[7], 基于现行的技术和条件也很难对其组成成分进行详细的分析与研究^[8~11]. 目前能够检测出来的溶解性有机质主要包括碳水化合物、蛋白质、类脂物、木质素、氨基酸等有限的物

收稿日期: 2015-01-15; 修订日期: 2015-03-27

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 (cstc2013jcyjys20001)

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、有机地球化学, E-mail: bruce lung@163.com

* 通讯联系人, E-mail: sunyc@swu.edu.cn

质^[12~16]。基于以上原因,研究者们利用生物标志物(biomarker)实现人们对有机质的来源、迁移和转化过程的认识成为了可能并取得了显著地成就^[17~19]。其中,正构烷烃和脂肪酸是作为两种常见的生物标志物,在环境中分布十分广泛,不同的来源具有不同的组合特征,而且稳定性较高,能够用来示踪溶解性有机质的来源、迁移特征^[20,21]。

国内外对于利用正构烷烃、脂肪酸等类脂物示踪溶解性有机质的研究开始较早且发展迅速,研究区域主要集中于河口及海湾地带^[22~25]。但对于岩溶区地下河中的研究未见报道。在我国,南方岩溶地区,大约有2836条地下河,总流量达 $1482 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ^[26]。因此,基于类脂物特别是正构烷烃、脂肪酸示踪地下河中溶解性有机质的来源、迁移及转化过程,不仅能够有助于弄清岩溶水系统中溶质的形成、运移及其影响因素,更能够深化对岩溶地质作用碳汇的认识。本研究试以西南典型岩溶区青木关地下河为例,基于正构烷烃、脂肪酸示踪溶解性有机质在地下河中的来源、迁移特征,以期为溶解性有机质在地下河系统的中来源、迁移特征提供借鉴意义。

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。研究区内地势北高南低,碳酸盐岩地层内发育一条自NNE向SSW流动的地下河,直线距离长约7.4 km,最北端入口为岩口落水洞,沿途不断接受两侧地表水通过落水洞集中流补给,以及非饱和带的裂隙、空隙、裂隙水的扩散流补给,流域面积约 13.4 km^2 。地下河主要在流域最南端的姜家泉出露。研究区多年平均降水量为1250 mm,多年气温为 16.5°C ,降雨主要集中于4~10月。植被主要为亚热带常绿针叶林(如马尾松、杉木和竹子等)和阔叶林(大量为灌木丛,具有旱生,喜钙等特点),土壤类型主要为石灰土,洼地中有水稻。区内人类活动以农业生产为主,耕地面积约占流域面积的30%。

1.2 样品的采集

根据青木关地下河的分布特点,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)。采样时间为2013年7月31日和10月25日,7月采样期间以晴天为主,没有降雨;而10月采样期间以雨天为主。用事先清洗干净(用去离子水清洗3遍,然后放入 450°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 ($5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)的 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(事先用马弗炉内灼烧4 h)将水样分为溶解相和颗粒相两部分。

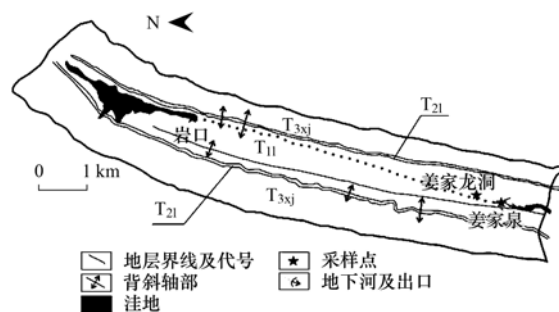


图1 采样点分布示意

Fig. 1 Location of 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°C 马弗炉中灼烧6 h,无水硫酸钠(分析纯)于 550°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 水样中溶解态正构烷烃和脂肪酸提取

取经过玻璃纤维滤膜(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和脂肪酸,然后经干燥、浓缩后,氮吹至 0.2 mL ,加入内标物,放入 -26°C 冰箱中待测。

1.4.2 正构烷烃和脂肪酸分析

正构烷烃和脂肪酸的检测采用GC-MS分析(Agilent,7890A/5975C),色谱柱为HP-5MS毛细管柱($30.0 \text{ m} \times 0.32 \text{ mm} \times 0.25 \mu\text{m}$)。载气为高纯氮气,流速为 $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,进样口温度 280°C ,升温程序为初始温度 50°C ,保持1 min后以 $20^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升

温至 200℃,然后再以 10℃·min⁻¹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. 使用内标法进行定量分析.

2 结果与讨论

2.1 溶解态正构烷烃、脂肪酸的分布特征

表 1 为青木地下河样品中溶解态正构烷烃组分及含量. 从中可知,青木关地下河样品中溶解态正构烷烃碳数分布范围为 14~32. 7、10 月样品中溶解态正构烷烃的浓度范围分别为:775~2 454 ng·L⁻¹和 264~1 457 ng·L⁻¹,平均值分别为 1 354 ng·L⁻¹和 667 ng·L⁻¹. 7 月样品中溶解态正构烷烃的平均含量较 10 月高. 据图 2,7 月样品中溶解态正构烷烃含量大于 10 月份样品中溶解态正构烷烃含量,最高值均出现在在岩口处,除 10 月份姜家泉采样点的值较姜家龙洞采样点高(高约 7%)外,样品中溶解态正构烷烃浓度随着地下河运移距离的增加总体呈下降趋势. 表 2 为样品中溶解态脂肪酸的浓度分布. 7 月和月 10 样品中溶解态脂肪酸的浓度变化范围分别为 12 897~45 254 ng·L⁻¹,3 186~

11 322 ng·L⁻¹,平均值分别为 242 032 ng·L⁻¹和 2 526 ng·L⁻¹. 与上述溶解态正构烷烃的含量变化相似,7 月样品中溶解态脂肪酸含量较 10 月溶解态脂肪酸含量高. 图 3 为溶解态脂肪酸含量在地下河的分布状态. 可以看出样品中溶解态脂肪酸的含量随着地下河运移距离的增加呈下降趋势,这与前边研究中溶解态正构烷烃含量在地下河中的变化趋势类似. 出现以上现象的原因可能是由于生物活动和地下河水力条件造成的. 夏季生物活动旺盛,生产力高,特别是水中的藻类和细菌等微生物产生大量的溶解性有机质,对溶解性正构烷烃、脂肪酸的贡献很大. 研究区域内 7 月气温高、降雨少,地下河水量减小,对水中的溶解态正构烷烃、脂肪酸浓度的稀释作用较弱. 10 月降雨增多,地下河水量增大,对水中溶解态正构烷烃、脂肪酸浓度的稀释作用较大. 以上原因可能是导致 7 月样品中溶解态正构烷烃浓度、脂肪酸比 10 月高的原因. 而地下河中周围黏土矿物对溶解性有机质的吸附和细菌等微生物对溶解性有机质的降解^[27]则可能是导致两者含量在地下河运移过程中下降的原因.

表 1 正构烷烃浓度和分子特征指数¹⁾/ng·L⁻¹

Table 1 Contents and characteristic of molecular indexes of alkanes/ng·L⁻¹

项目	岩口		姜家龙洞		姜家泉	
	7 月	10 月	7 月	10 月	7 月	10 月
C14	32.0	36.3	30.2	8.70	30.7	2.34
C15	43.7	17.8	28.2	5.12	19.2	20.4
C16	67.4	26.3	52.6	7.11	26.9	7.99
C17	78.5	29.8	71.1	21.9	102	30.8
C18	221	37.3	17.1	14.8	80.2	29.3
C20	459	227	229	26.0	134	41.5
C22	243	156	15.6	6.18	31.7	6.81
C23	270	222	55.3	11.7	63.4	21.4
C24	307	228	7.67	21.2	63.9	25.1
C25	205	204	165	57.3	28.5	21.5
C26	206	67.5	19.4	26.5	40.9	8.22
C27	220	94.9	65.8	5.93	58.8	34.5
C28	82.7	31.2	12.2	5.92	20.4	7.31
C29	n. d	60.2	61.6	45.2	74.3	21.8
C30	11.5	11.8	n. d	n. d	n. d	2.00
C31	4.38	n. d	1.32	n. d	n. d	n. d
C32	3.37	6.66	n. d	n. d	n. d	0.52
T-ALK	2 454	1 457	832	264	775	282
CPI	1.06	2.06	8.28	2.52	1.73	2.54
R/%	36.77	25.73	51.46	31.72	50.73	47.02
OEP	0.83	1.00	5.35	1.16	1.07	0.78
Paq	0.99	0.88	0.78	0.30	0.55	0.66

1) “n. d”表示未检出; T-ALK (ng·L⁻¹)表示“溶解态正构烷烃浓度总量”; CPI = 1/2[∑ (C25 ~ C31)_{奇数} / ∑ (C24 ~ C30)_{偶数} + ∑ (C25 ~ C31)_{奇数} / ∑ (C26 ~ C32)_{偶数}]; R 表示“ ∑ ≤ C20 与浓度总量的百分比”; OEP = (C21 + 6C23 + C25)/4(C22 + C24); Paq = (C23 + C25)/(C23 + C25 + C29 + C31)

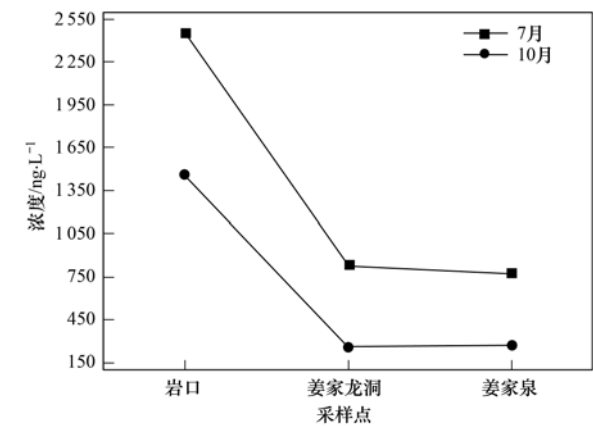


图2 溶解态正构烷烃质量浓度总量分布
Fig. 2 Distribution of total dissolved alkane contents

表2为各种脂肪酸在地下河中的T-FA含量。通过对7、10月各脂肪酸的含量特征进行分析,发现样品中溶解态脂肪酸均以SSFA(饱和直链脂肪酸)含量所占比重最高,约占总溶解态脂肪酸含量

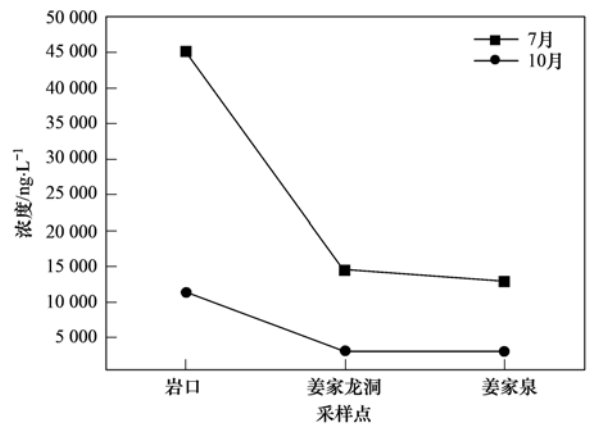


图3 溶解态脂肪酸含量分布
Fig. 3 Distribution of total dissolved fatty acid contents

的32.90%~68.91%。除7月姜家龙洞和姜家泉中BSFA(饱和支链脂肪酸)的含量比PUFA(多不饱和脂肪酸)高外,各种脂肪酸在地下河中的含量大小依次是SSFA>MUFA(单不饱和脂肪酸)>PUFA>

表2 各脂肪酸含量及部分参数指标¹⁾/ng·L⁻¹

项目	岩口		姜家龙洞		姜家泉	
	7月	10月	7月	10月	7月	10月
BSFA	2 465	449	760	55.1	159	75.2
MUFA	14 528	2 910	3 763	818	4 480	807.20
PUFA	13 804	482	670	126	1 261	132
SSFA	14 457	7 481	9 115	2 247	6 954	2 159
T-FA	45 254	11 322	14 459	3 259	12 897	3 186
UFA/SFA	1.67	0.43	0.92	0.41	0.81	0.42

1)BSFA表示“饱和支链脂肪酸”;MUFA表示“单不饱和脂肪酸”;PUFA表示“多不饱和脂肪酸”;SSFA表示“饱和直链脂肪酸”;T-FA (ng·L⁻¹)表示“脂肪酸含量总量”;UFA/SFA表示“不饱和脂肪酸与饱和脂肪酸的比值”

BSFA(饱和支链脂肪酸)。

如表2所示,各种脂肪酸在地下河的运移过程中其含量均发生了不同程度的降低。7、10月BSFA和SSFA的浓度随着地下河运移距离的增加均呈下降的趋势,7月其含量分别由原来的2 465、14 457 ng·L⁻¹减少到75、2 159 ng·L⁻¹,分别减少了约96.95%、85.07%;10月则由原来的7 481、2 910 ng·L⁻¹下降到2 159、807 ng·L⁻¹,分别下降了约71.13%、72.26%。BSFA和PUFA的含量先地下河出露处下降后,在姜家泉处又有所增加,但总体仍处于降低的趋势。不饱和脂肪酸(unsaturated fatty acid, UFA)在环境中稳定性差,很容易被降解,而饱和脂肪酸(saturated fatty acid, SFA)在环境中则相对稳定,所以利用UFA/SFA的值可以指示脂肪酸的降解程度^[29]。7月样品中UFA/SFA值随着地下河运移距离的增加而减小,比值由1.67下降到

0.81,显示出地下河中溶解性脂肪酸在地下河的运移过程中发生了显著地降解。10月脂肪酸在地下河中的降解程度(0.41~0.43)不大,但总体降解程度要高于7月。一方面,溶解态脂肪酸在经过地下河之前就已经发生了显著地降解,另一方面,则是10月的阴雨天气造成的。在2013年10月采样期间,天气以降雨为主,连续的降雨使得地下河中的“老水”逐渐被“新水”替代^[30],而雨水作为“新水”的主要来源,在进入地下河之前,携带了大量地表有机质,通过岩溶裂隙、溶缝、落水洞等直接进入地下河,从而造成了溶解态脂肪酸在地下河的运移过程中没有发生显著降解。

2.2 溶解态正构烷烃、脂肪酸的来源解析

碳优势指数(CPI)被认为是判断正构烷烃来源的一个重要参数,已经被广泛地应用于判定正构烷烃的来源。一般认为高的CPI值(6~10)能够代表

陆地高等植物的输入占优势^[31]. 但正构烷烃 CPI 值不仅与机有质的类型相联系,也和外部地理环境有关. 研究发现^[32],当处于寒冷气候条件下,沉积物中正构烷烃的高 CPI 值与寒冷的气候相对应,并指出是由于微生物降解和有机质的矿化作用受到限制造成的. 奇偶优势指数(OEP)是判断正构烷烃来源的另外一个重要指标,一般高的 OEP 值通常指示高等有机质来源,而低的 OEP 值一般指示低等生物的来源^[33],但也有人指出 OEP 也能够反映细菌的活动,低的 OEP 值反映了细菌活动强烈或高等植物贡献^[34],因此,在进行正构烷烃来源判断时必须把 CPI 和 OEP 等参数结合在一起,进行综合分析.

图 4 为样品中正构烷烃各分子特征参数在地下河中的分布特征. 从中可知,CPI 值和 OEP 值在地下河中的分布趋势趋同,说明两者能够很好的对正构烷烃的来源进行判别. 由表 1 可得,7 月样品中的 CPI 值介于 1.06 ~ 8.28 之间,平均值为 3.69,最高值(8.28)位于姜家龙洞采样点(天窗). OEP 值介于 0.83 ~ 5.35 之间,平均值为 2.42; 10 月 CPI 和 OEP 的值变化不大,变化范围分别为 2.06 ~ 2.54 和 0.78 ~ 1.07,平均值分别为 2.37 和 0.95. 一般认为短链正构烷烃($C \leq 20$)来源于细菌、藻类^[35],本研究利用 R 来反映地下河中低等生物的相对贡献量. 表 1 中,7、10 月样品中 R 值分别为岩口:36.77%、25.73%,姜家龙洞:51.46%、31.72%,姜家泉:50.73%、47.02%. 随着地下河运移距离的增加 R 值呈增加的趋势,并与 CPI、OEP 值变化趋同. 对比 CPI 值、OEP 值发现,其最高值均出现在 7 月姜家

龙洞采样点,即当 CPI、OEP 值为 8.28、5.35 时,对应的 R 值为 51.46%. 这说明,CPI 和 OEP 在这里不能作为反映正构烷烃来源的指标,而是反映细菌降解活动的指标. 7 月研究区域内炎热干旱,采样期间发现地下河水位下降严重且几近干涸. 姜家龙洞采样点作为一个天窗,空间广阔,无外部阳光直射. 在地下河水流不大的情况下,流经姜家龙洞处的地下水能与外部空气长期接触,又因温度较低(相对于外部)且无阳光照射,细菌活动降低,于是对短链正构烷烃的降解减弱,从而使得 R 值相应增大,另一方面,天窗里面的洞穴滴水从土壤中携带了大量的微生物,直接进入地下河中也可能使得低碳数正构烷烃的贡献增加. 10 月降雨较充沛,上游洼地中的水通过落水洞直接进入地下河中,短时间内成为地下河水的最大补给来源,而洼地中生长着大量的以空心莲子草 [*Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb] 为主的浮游/挺水植物早已开始腐烂、降解,这些有机质溶于水中通过落水洞进入地下河中.

Paq 指数是用来判断水生植物对正构烷烃的相对贡献量,如果 $\text{Paq} < 0.1$,表示主要来源于陆地高等植物, $0.1 < \text{Paq} < 0.4$ 时表明大型潜水植物为主要来源, $0.4 < \text{Paq} < 1$ 时,主要来源于浮水/挺水大型植物^[35]. 7 月 Paq 值介于 0.55 ~ 0.99 之间,平均值为 0.77. 表明样品中正构烷烃中高等植物主要来源于上游中的浮水/挺水植物,且在岩口采样点处为溶解态正构烷烃的主要来源,随着地下河运移距离的增加,浮水/挺水植物的相对贡献量下降,细菌等

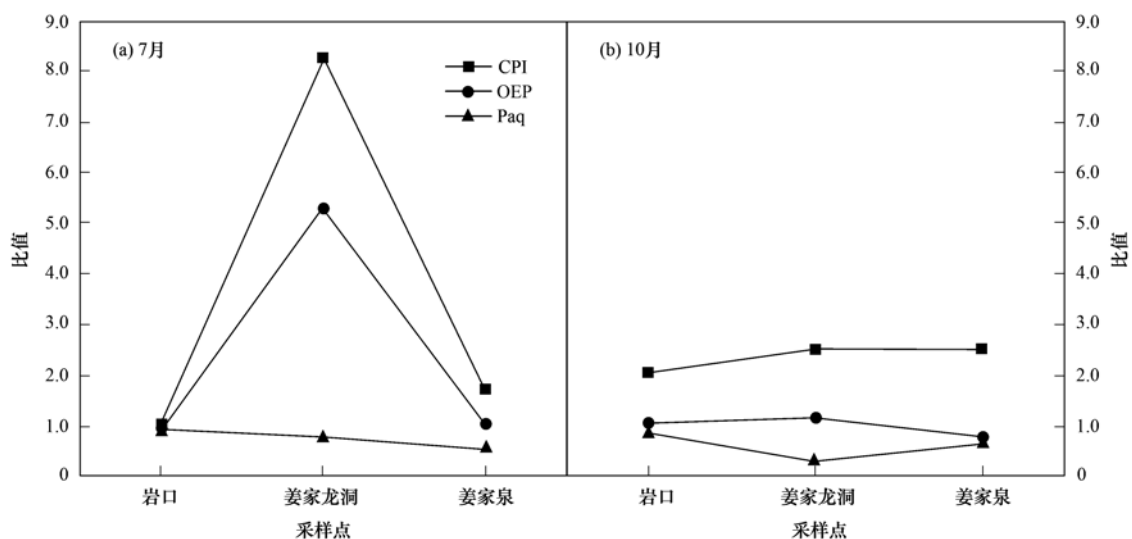


图 4 正构烷烃分子特征参数

Fig. 4 Characteristic of molecular indices of alkanes

微生物的相对贡献量增大. 10 月 Paq 值介于 0.33 ~0.88 之间,平均值为 0.72,显示浮水/挺水植物为主要高等植物的贡献者,结合 *R* 值表明,溶解态正构烷烃主要以浮水/挺水植物为贡献者,但细菌等微生物的相对贡献量逐渐加大.

表 3 为样品中溶解态脂肪酸的组成特征. 从中可知,样品中饱和直链脂肪酸(SSFA)以 C16:0 所占比重最高,占总脂肪酸含量的 18.08% ~40.50%,其次为 C16:0 和 C14:0,呈单峰模式,主峰碳数为 C16:0,在 C10 到 C24 之间以偶碳数占优势. 表明样品中的脂肪酸主要来源于浮游生物、细菌和藻类等有机质^[36]. 另外,在 C23 到 C28 之间也有少量的分布,表明有一定量的陆地高等植物贡献. BSFA 在样品中所占的比重较小,大部分小于总脂肪酸含量的 1%,以 MeC14:0、3MeC16:0、MeC17:0 为代表,

多指示细菌来源^[37,38]. 不饱和脂肪酸一般被认为是真核藻和细菌输入的标志,如 C16:1 ω 9 被认为是真核藻输入的标志^[39],C16:1 ω 7 和 C18:1 ω 7 则被认为是来源于细菌^[40],C18:1 ω 9 则是浮游动物产生的标志^[41]. 样品中 MUFA 占总脂肪酸含量的 25.34% ~36.39%,其中以 C18:1 ω 9t 和 C16:1 ω 9c 所占比重最大,分别约占总脂肪酸含量的 9.65%、7.13%. 另外,C18:1 ω 5t、C18:1 ω 7c 和 C16:1 ω 9t 等单不饱和脂肪酸也有少量的检出. PUFA 以 C18:2 ω 6,9c 所占比重最高,另外 C16:2 ω 6,9、C18:2 ω 5,8、C18:3 ω 3,6,9 也有少量的检出. C18:2 ω 6,9c 被认为是真菌输入的标志^[42],C18:2 ω 6,9c 可能是由于地表物质在降雨的冲刷下,随着岩溶缝隙、漏斗等进入地下河中的. 综合分析,青木关地下河中溶解态正脂肪酸主要来源于细菌等微生物.

表 3 样品中溶解态脂肪酸组成及其在总脂肪酸中比例¹⁾/%

Table 3 Variations of dissolved fatty acid compositions and its percentage in total fatty acids/%

项目	岩口		姜家龙洞		姜家泉	
	7 月	10 月	7 月	10 月	7 月	10 月
饱和直链脂肪酸						
C12:0	0.45	1.65	1.27	0.96	1.19	1.63
C14:0	4.11	6.92	5.97	3.20	4.50	5.35
C15:0	1.65	3.92	3.63	1.99	1.81	3.53
C16:0	18.08	35.84	34.97	37.14	30.98	40.50
C17:0	0.51	1.10	0.77	0.80	0.54	1.08
C18:0	3.96	10.90	13.05	17.97	10.21	10.60
C20:0	0.59	1.27	0.76	0.82	0.81	0.90
C21:0	0.42	0.80	0.53	1.80	1.16	0.65
C22:0	0.94	1.40	0.75	1.82	1.25	1.36
饱和支链脂肪酸						
MeC14:0	1.27	0.98	0.38	0.23	0.33	0.40
6MeC14:0	0.69	0.97	1.48	0.00	0.00	0.00
MeC15:0	0.22	1.23	0.95	0.35	0.44	0.57
3MeC16:0	0.16	0.34	1.22	0.52	0.13	1.02
MeC17:0	1.74	0.34	0.24	0.24	0.20	0.21
单不饱和脂肪酸						
C14:1 ω 5	0.39	0.86	1.04	0.42	0.54	0.85
C16:1 ω 9t	0.69	1.31	1.37	0.53	0.77	8.23
C16:1 ω 9c	6.88	7.49	10.38	4.63	5.16	8.23
C16:1 ω 7c	5.37	0.00	0.00	0.00	6.94	0.00
C17:1 ω 7c	1.02	2.01	0.00	0.05	1.04	0.10
C18:1 ω 9t	13.50	6.48	8.23	7.66	14.23	7.79
C18:1 ω 7t	0.58	1.22	0.64	1.71	0.48	1.27
C18:1 ω 7c	1.12	1.68	0.65	0.91	1.92	0.76
C18:1 ω 5t	1.43	2.88	3.82	5.55	2.18	4.10
C22:1 ω 9c	0.44	1.30	0.53	3.82	0.84	1.09
多不饱和脂肪酸						
C16:2 ω 6,9	2.36	0.00	0.04	0.04	0.60	0.02
C18:2 ω 6,9c	13.24	3.03	3.15	61.37	5.56	2.87
C18:2 ω 5,8	0.12	0.00	1.06	0.87	2.40	0.79
C18:3 ω 3,6,9	13.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

1) “比例表示与总脂肪酸含量的比值大于 1% 的单体脂肪酸”

3 结论

(1)7、10 月样品中溶解态正构烷烃、脂肪酸的含量差异较大,随地下河运移距离的增加其含量均有下降. 青木关地下河对溶解态正构烷烃、脂肪酸的含量均存在明显的削弱作用.

(2)7 月地下河中溶解态正构烷烃主要来源于细菌等微生物,10 月溶解态正构烷烃主要来源于上游的水生植物,但在流经地下河过程中细菌等微生物的相对贡献量逐渐增大.

(3)各溶解态脂肪酸在地下河运移过程中均发生不同程度的变化,7 月不饱和脂肪酸在地下河运移过程中降解过程明显,10 月降解过程不明显但降解程度较 7 月高.

参考文献:

- [1] Lam B, Baer A, Alaee M, *et al.* Major structural components in freshwater dissolved organic matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(24): 8240-8247.
- [2] Gonnelli M, Vestri S, Santinelli C. Chromophoric dissolved organic matter and microbial enzymatic activity. A biophysical approach to understand the marine carbon cycle[J]. *Biophysical Chemistry*, 2013, **182**: 79-85.
- [3] Zeri C, Beşiktepe Ş, Giannakourou A, *et al.* Chemical properties and fluorescence of DOM in relation to biodegradation in the interconnected Marmara-North Aegean Seas during August 2008[J]. *Journal of Marine Systems*, 2014, **135**: 124-136.
- [4] Hansell D A, Carlson C A. *Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter* [M]. New York: Academic Press, 2002. 1-33.
- [5] Brogi S R, Gonnelli M, Vestri S, *et al.* Biophysical processes affecting DOM dynamics at the Arno river mouth (Tyrrhenian Sea) [J]. *Biophysical Chemistry*, 2015, **197**: 1-9.
- [6] Cole J J, Prairie Y T, Caraco N F, *et al.* Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget[J]. *Ecosystems*, 2007, **10**(1): 172-185.
- [7] Chen W B, Smith D S, Guéguen C. Influence of water chemistry and dissolved organic matter (DOM) molecular size on copper and mercury binding determined by multiresponse fluorescence quenching[J]. *Chemosphere*, 2013, **92**(4): 351-359.
- [8] 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.
- [9] Norwood M J, Louchouart P, Kuo L J, *et al.* Characterization and biodegradation of water-soluble biomarkers and organic carbon extracted from low temperature chars [J]. *Organic Geochemistry*, 2013, **56**: 111-119.
- [10] Yao X, Zhang Y L, Zhu G W, *et al.* Resolving the variability of CDOM fluorescence to differentiate the sources and fate of DOM in Lake Taihu and its tributaries[J]. *Chemosphere*, 2011, **82**(2): 145-155.
- [11] Landry C, Tremblay L. Compositional differences between size classes of dissolved organic matter from freshwater and seawater revealed by an HPLC-FTIR system [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(3): 1700-1707.
- [12] Hur J, Lee B M, Shin H S. Microbial degradation of dissolved organic matter (DOM) and its influence on phenanthrene-DOM interactions[J]. *Chemosphere*, 2011, **85**(8): 1360-1367.
- [13] Greenwood P F, Berwick L J, Croué J P. Molecular characterisation of the dissolved organic matter of wastewater effluents by MSSV pyrolysis GC-MS and search for source markers [J]. *Chemosphere*, 2012, **87**(5): 504-512.
- [14] 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.
- [15] Abdulla H A N, Minor E C, Dias R F, *et al.* Transformations of the chemical compositions of high molecular weight DOM along a salinity transect: using two dimensional correlation spectroscopy and principal component analysis approaches[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, **118**: 231-246.
- [16] Nebbioso A, Piccolo A. Molecular characterization of dissolved organic matter (DOM): a critical review [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2013, **405**(1): 109-124.
- [17] 姚鹏, 尹红珍, 姚庆祯, 等. 黄河口湿地土壤中正构烷烃分子指标及物源指示意义[J]. *环境科学*, 2012, **33**(10): 3457-3465.
- [18] He D, Mead R N, Belicka L, *et al.* Assessing source contributions to particulate organic matter in a subtropical estuary: A biomarker approach [J]. *Organic Geochemistry*, 2014, **75**: 129-139.
- [19] Jung B J, Jeanneau L, Alewell C, *et al.* Downstream alteration of the composition and biodegradability of particulate organic carbon in a mountainous, mixed land-use watershed [J]. *Biogeochemistry*, 2015, **122**(1): 79-99.
- [20] Wang Y, Yang H, Zhang J X, *et al.* Characterization of n-alkanes and their carbon isotopic composition in sediments from a small catchment of the Dianchi watershed [J]. *Chemosphere*, 2015, **119**: 1346-1352.
- [21] Lu Y H, Canuel E A, Bauer J E, *et al.* Effects of watershed land use on sources and nutritional value of particulate organic matter in temperate headwater streams [J]. *Aquatic Sciences*, 2014, **76**(3): 419-436.
- [22] Meyers-Schulte K J, Hedges J I. Molecular evidence for a terrestrial component of organic matter dissolved in ocean water [J]. *Nature*, 1986, **321**(6065): 61-63.
- [23] Peresyarkin V I, Smurov A V, Shulga N A, *et al.* Composition of the organic matter of the water, suspended matter, and bottom sediments in Nha Trang Bay in Vietnam in the South China Sea [J]. *Oceanology*, 2011, **51**(6): 959-968.
- [24] Lazzara R, Fernandes D, Faria M, *et al.* Changes in lipid content and fatty acid composition along the reproductive cycle of the freshwater mussel *Dreissena polymorpha*: Its modulation by clofibrate exposure[J]. *Science of the Total Environment*, 2012,

- 432: 195-201.
- [25] Carreira R S, Cordeiro L G M S, Oliveira D R P, *et al.* Source and distribution of organic matter in sediments in the SE Brazilian continental shelf influenced by river discharges: An approach using stable isotopes and molecular markers [J]. *Journal of Marine Systems*, 2015, **141**: 80-89.
- [26] 杨力铮. 中国南方地下河分布特征[J]. *中国岩溶*, 1985, (1-2): 92-100.
- [27] 蓝家程, 孙玉川, 田萍, 等. 岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2014, (10): 3722-3730.
- [28] 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.
- [29] Marzi R, Torkelson B E, Olson R K. A revised carbon preference index [J]. *Organic Geochemistry*, 1993, **20**(8): 1303-1306.
- [30] 杨平恒. 重庆青木关地下河系统的水文地球化学特征及悬浮颗粒物运移规律[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [31] Guo N, Gao J H, He Y J, *et al.* Variations in leaf epicuticular *n*-alkanes in some *Broussonetia*, *Ficus* and *Humulus* species[J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2014, **54**: 150-156.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 李全莲, 王宁练, 武小波, 等. 祁连山“七一”冰川及其周边地区粉尘中脂肪酸的组成及其来源[J]. *环境化学*, 2008, **27**(4): 485-489.
- [37] 卢鸿, 孙永革, 彭平安. 单甲基支链烷烃的单体碳同位素研究[J]. *沉积学报*, 2003, **21**(2): 360-365.
- [38] 杨欢, 丁伟华, 谢树成. 海南尖峰岭不同海拔土壤中微生物脂肪酸和脂肪醇分布特征及对古海拔、古温度重建的启示[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, **44**(6): 1229-1243.
- [39] 王大志, 彭兴跃, 李少菁, 等. 海水小球藻脂肪酸组成研究[J]. *海洋科学*, 1999, (4): 68-70.
- [40] Camacho-Ibar V F, Aveytua-Alcázar L, Carriquiry J D. Fatty acid reactivities in sediment cores from the northern Gulf of California[J]. *Organic Geochemistry*, 2003, **34**(3): 425-439.
- [41] Sargent J R. The structure, metabolism and function of lipids in marine organisms[A]. In: Malins D C, Sargent J R (Eds.). *Biochemical and Biophysical Perspectives in Marine Biology* [M]. London: Academic Press, 1976. 149-212.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations	XU Jian-hui, JIANG Hong (3119)
Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon	DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, <i>et al.</i> (3128)
Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM _{2.5} and Gas-Particle Partitioning in Qingdao	ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, <i>et al.</i> (3135)
Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing	HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, <i>et al.</i> (3144)
Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015	CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (3150)
Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai	WANG Hong-li (3159)
Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter	CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3168)
A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery	GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, <i>et al.</i> (3175)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, <i>et al.</i> (3186)
Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei	YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (3194)
Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island	WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3203)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3212)
Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (3220)
Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City	ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, <i>et al.</i> (3230)
Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China	CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (3238)
Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol	HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, <i>et al.</i> (3248)
Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment	YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, <i>et al.</i> (3255)
Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions	LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts	LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, <i>et al.</i> (3269)
Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes	ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (3278)
Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results	LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, <i>et al.</i> (3285)
Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water	WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, <i>et al.</i> (3292)
XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment	WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, <i>et al.</i> (3298)
AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries	SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, <i>et al.</i> (3304)
Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production	QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, <i>et al.</i> (3311)
A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggery Wastewater	SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System	KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, <i>et al.</i> (3329)
Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community	ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, <i>et al.</i> (3339)
Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation	LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, <i>et al.</i> (3345)
Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge	LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (3352)
Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, <i>et al.</i> (3358)
Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH ₄ and N ₂ O Emission from Double-Season Rice Paddy Field	FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, <i>et al.</i> (3365)
Characteristics of N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil	CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (3373)
Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau	CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (3383)
Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region	GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, <i>et al.</i> (3393)
Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia	NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, <i>et al.</i> (3401)
Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification	HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (3411)
Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City	WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (3422)
Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (3429)
Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China	NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, <i>et al.</i> (3438)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, <i>et al.</i> (3447)
Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil	LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (3457)
Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil	ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, <i>et al.</i> (3464)
Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil	JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, <i>et al.</i> (3471)
Al ³⁺ Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi	WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, <i>et al.</i> (3479)
Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China	YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, <i>et al.</i> (3486)
Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing	SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, <i>et al.</i> (3493)
Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables	LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, <i>et al.</i> (3501)
Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ Catalyst and Activated Carbon	REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, <i>et al.</i> (3508)
Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services	LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, <i>et al.</i> (3515)
Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China	JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, <i>et al.</i> (3522)
Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil	SI You-bin, WANG Juan (3533)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行