ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第37卷 第10期
2016年10月15日

目 次

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 $PM_{2.5}$ 清除作用 …… 孙兆彬,廖晓农,王占山,李梓铭,赵秀娟,花丛(3679)
降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力 …… 董群,赵普生,陈一娜(3686)
北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价 …… 刘丹,解强,张鑫,王海林,闫志勇,杨宏伟,郝郑平(3693)
浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数 …… 徐志荣,姚轶,蔡卫丹,李嫣,许明珠,王浙明(3702)
2014 年 APEC 期间北京市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 氧化性损伤能力研究 … 郭茜,邵龙义,王文华,侯聪,赵承美,幸娇萍,马施民(3708)
武汉市洪山区夏季 $PM_{2.5}$ 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析 …… 孙焰,祁士华,张莉,邢新丽,杨丹,胡天鹏,瞿程凯(3714)
基于快速聚类方法分析常州市区 $PM_{2.5}$ 的统计特性 …… 王振,余益军,徐圃青,李艳萍,夏京,殷磊(3723)
$PM_{2.5}$ 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析 …… 杨懂艳,刘保献,石爱军,张大伟,丁萌萌,周健楠,富佳明,景宽(3730)
树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成 …… 刘刚,黄柯,李久海,徐慧(3737)
轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征 …… 樊筱筱,蒋靖坤,张强,李振华,何立强,吴烨,胡京南,郝吉明(3743)
基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子 …… 邢辉,段树林,黄连忠,韩志涛,刘勤安(3750)
西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露 …… 张文娟,王利军,王丽,史兴民,卢新卫(3758)
生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究 …… 段振亚,苏海涛,王凤阳,李智坚,李韶璞,王书肖(3766)
三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响 …… 陈瑞,陈华,王定勇,向玉萍,申鸿(3774)
城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响 …… 廖昱,孙玉川,沈立成,梁作兵,王尊波(3781)
基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价 …… 王成龙,邹欣庆,赵一飞,李宝杰(3789)
贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价 …… 何晓丽,吴艳宏,周俊,邴海健(3798)
多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征 …… 钱锋,吴婕赟,于会彬,宋永会,张美,孔令昊,何孟常(3806)
地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因 …… 何小松,张慧,黄彩红,李敏,高如泰,李丹,席北斗(3813)
昆明市不同功能区排水管道沉积物性质 …… 常海东,金鹏康,付博文,李雪兵,贾锐珂(3821)
滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响 …… 丁帅,王圣瑞,张蕊,肖焱波,焦立新,李乐,王忠诚,尹诗诗(3828)
紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制 …… 黄雪娇,石纹豪,倪九派,李振轮(3835)
排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征 …… 焦平金,许迪,朱建强,于颖多(3842)
快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料 …… 李洁,肖琳(3850)
一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能 …… 王文东,刘荟,马翠,韩雨,常妮妮(3858)
生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中嗅味物质的去除效能及其微生物特性 …… 宣雍祺,周丽,邓慧萍,蔡宙,李大鹏,刘刚(3864)
聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响 …… 赵园园,张玥,李素英,石宝友,李贵伟,孙改清(3870)
典型南方水源氨基酸浓度变化与去除 …… 刘伟,蔡广强,卢小艳,刘丽君,张金松,刘嘉祺,曲莹(3877)
O_3/UV 降解含氮杂环化合物喹啉 …… 陈傲蕾,常凤民,汪翠萍,徐恒,吴静,左剑恶,王凯军(3884)
蒽醌-2-磺酸钠促进 *Klebsiella oxytoca* GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析 …… 胡金梅,虞磊,黄天寅(3891)
2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析 …… 孙秀梅,宋广清,席宏波,周岳溪,牛远方(3899)
不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢 …… 王晓玲,员东丹,白莉,李紫棋,余勇,秦旭东,张晓旭,赵可(3906)
长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究 …… 付璐璐,甄毓,贺惠,张玉,米铁柱(3914)
焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析 …… 蒙小俊,李海波,曹宏斌,盛宇星(3923)
黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究 …… 刘洋,黄懿梅,曾全超(3931)
苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响 …… 胡小兵,饶强,唐素兰,姜晶,谢瑞桃,郝文静,钟梅英(3939)
城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究 …… 黄福义,李虎,安新丽,欧阳纬莹,苏建强(3949)
菌株 *Desulfovibrio* sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素 …… 谢柄柯,张玉,王晓伟,孙超越,周集体(3955)
生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响 …… 徐珊珊,侯朋福,范立慧,薛利红,杨林章,王绍华,李刚华(3963)
模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响 …… 曾清苹,何丙辉,李源,夏力文,杨龙龙,邓雪梅,李川(3971)
生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响 …… 张文娟,佘冬立,Gamareldawla H. D. Agbna,夏永秋(3979)
土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响 …… 王群艳,吴小红,祝贞科,袁红朝,隋方功,葛体达,吴金水(3987)
土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟 …… 施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩(3996)
组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控 …… 王英杰,邹佳玲,杨文弢,周航,廖柏寒(4004)
几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响 …… 周贵宇,姜慧敏,杨俊诚,张建峰,张水勤,梁雷(4011)
蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响 …… 宋贤威,赵秀兰,张进忠,胡梦坤,徐艳昭,王明禹(4020)
不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响 …… 秦余丽,熊仕娟,徐卫红,赵婉伊,王卫中,陈永勤,迟荪琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(4030)
黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究 …… 董冰冰,陈友媛,惠红霞,陆维佳,杨秀卿,刘逸凡(4044)
挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为 …… 黎敏丹,郑国贸,万祎,胡建英(4054)
中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能 …… 宿程远,郑鹏,阮祁华,覃菁菁,卢宇翔,李俊兵(4062)
《环境科学》征订启事(3827) 《环境科学》征稿简则(4053) 信息(3736, 3930, 4043)

城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响

廖昱[1],孙玉川[1,2*],沈立成[1],梁作兵[1],王尊波[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: 为了探明城市化进程影响下地下河溶解态正构烷烃(D-ALK)的组分特征,于 2014 年 11 月至 2015 年 4 月,分别对受不同程度城市化进程影响的老龙洞与青木关两条地下河出口(老龙洞口、姜家泉)进行采样,利用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)对样品中的 D-ALK 进行定量分析. 结果表明,两地 D-ALK 碳数分布均为 nC_{14} ~ nC_{35}. 其中,姜家泉中的溶解态正构烷烃总量(DT-ALK)为 102 ~ 356 ng·L^{-1},平均值为 230 ng·L^{-1}. 2014 年 12 月、2015 年 1 月和 4 月,其正构烷烃碳数分布的峰型均为"单峰-前锋"型; LMH/HMH(nC_{21}^{-}/nC_{22}^{+})为 2.0 ~ 10; 在 nC_{14} ~ nC_{25} 内碳优势指数($CPI_{14\sim25}$)为 0.19 ~ 0.57,主碳峰均为 C_{16} ($C_{max}16$). 2014 年 11 月、2015 年 2 月与 3 月,其碳数分布呈"双峰"形态,LMH/HMH 与 $CPI_{14\sim25}$ 均小于 1 且 $C_{max}16$; $CPI_{24\sim35}$ 为 1.2 ~ 23,$C_{max}31$ 或 $C_{max}33$; Paq 分别为 0.2、0.7 和 0.1. 其中,2014 年 11 月与 2015 年 3 月的烷烃指数(AI)分别为 0.95 和 0.98. 老龙洞出口中的 DT-ALK 为 110 ~ 697 ng·L^{-1},平均值为 310 ng·L^{-1}; 各月碳数分布均呈现"单峰-前峰"峰型且 $C_{max}16$, $CPI_{14\sim25}$ 小于 1. 在旱季,由于受到不同人为活动的综合影响,以微生物输入为主的老龙洞中的溶解态正构烷烃在含量和组分的稳定性方面均大于以微生物和微生物、植物混合输入为主的姜家泉.

关键词:岩溶地下河; 生物标志化合物; 正构烷烃; 溶解态; 城市化进程

中图分类号: X131; X523 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2016)10-3781-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2016.10.015

Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved *n*-alkane in Underground River

LIAO Yu[1], SUN Yu-chuan[1,2*], SHEN Li-cheng[1], LIANG Zuo-bing[1], WANG Zun-bo[1]

(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: To investigate the influence of urbanization on the component features of dissolved *n*-alkanes (D-ALK) in the underground river in the dry season, water samples were collected respectively at the outlet of the two underground rivers. Components of D-ALK in these samples were quantitatively analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The results showed that the distribution of D-ALK carbon number at the two sites ranged from nC_{14} to nC_{35} in dry season. The total concentration of D-ALK (DT-ALK) in Jiangjia spring ranged from 102 to 356 ng·L^{-1}, with an average of 230 ng·L^{-1}. The low-number carbons were predominant in December 2014, January and April 2015. The ratios of LMH/HMH (nC_{21}^{-}/nC_{22}^{+}) ranged from 2.0 to 10. The carbon preference index (CPI) between nC_{14} and nC_{25} ranged from 0.19 to 0.57, with a maximum of C_{16} ($C_{max}16$). However, in November 2014, February and March 2015, these samples had a bimodal distribution in *n*-alkane. All of the $CPI_{14\text{-}25}$ and the ratios of LMH/HMH were less than 1. The $CPI_{24\text{-}35}$ ranged from 1.2 to 23 with the C_{max} 31 or $C_{max}33$. During the three months, the values of Paq were 0.2, 0.7 and 0.1, respectively. The alkane indexes (AI) in November 2014 and March 2015 were 0.95 and 0.98, respectively. The values of DT-ALK in Laolongdong ranged from 110 to 697 ng·L^{-1} with an average of 310 ng·L^{-1}. The carbon number distribution of each month had a low predominance, and the $CPI_{14\text{-}25}$ was less than 1. In the dry season, under the influence of different human activities, the content and component of D-AKL in Laolongdong which originated mainly from microorganisms was more stable than that in Jiangjia spring, which was mainly derived from microorganisms and a mixture of microorganisms and plants.

Key words: karst underground river; biomarkers; *n*-alkane; dissolved; urbanization

在水生及陆地生态系统中,溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)作为重要的反应界面或者载体,在全球碳循环、生态系统营养盐平衡、以及有机污染物运移中都发挥了重要作用,直接影响着生态系统的物质与能量的转换[1~3]. DOM 在水环境中来源广泛、成分复杂,已探明的成分主要包括碳水化合物、蛋白质、类脂物、氨基酸、木质素等[4]. 利用生物标志物化合物可实现对 DOM 来

收稿日期: 2016-04-08; **修订日期**: 2016-05-09

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(XDJK2013B021, XDJK5015D003); 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); 岩溶动力学重点实验室开放基金项目(KDL2011-04, kdl201303)

作者简介: 廖昱(1989~),女,硕士研究生,主要研究方向为有机地球化学、水文地质学,E-mail:liao_yu_999@163.com

* 通讯联系人,E-mail:sunyc@swu.edu.cn

源、迁移和循环过程的认识[5]. 正构烷烃(*n*-alkanes)是一类直链的饱和烃(其结构通式为C_nH_{2n+2}),因其碳数分布范围具有自然的连续性,结构简单、分布广泛且不易降解的特性,故为最常用的生物标志物之一[5,6].

中国岩溶地下水资源达2 069.67亿$m^3 \cdot a^{-1}$,约占全国地下水资源量的1/4,而我国西南岩溶地区是国内水系最发育的地区之一,其地下水资源丰富且为当地百姓的主要饮用水源[7~9]. 岩溶区地下水资源丰富的同时,却面临着因人类不合理开发利用而造成污染的局面. 重庆市作为重要的岩溶区,地广人多,尤其是在1997年直辖之后,城市规模迅速膨胀,人口居住密度也随之急剧增大. 居民生产生活与土地利用的复杂化显著地改变着整个城市的生态与环境. 加之城市所在的岩溶地区独特的二元结构,落水洞、漏斗、竖井、塌陷和溶蚀裂隙发育与地表土被不连续、渗透性强以及地表地下相连通的结构特性,使得污染物极易通过落水洞等直接进入含水层或地下河,导致地下河逐渐成为了名副其实的下水道[10,11],从而严重威胁居民的健康和生活. 前人对正构烷烃的研究主要集中于追溯海洋、大气等环境中有机质的来源,而关于城市化进程对岩溶地下河正构烷烃影响的研究相对较少. 由于地下河补给方式繁多、DOM来源复杂,综合探讨该地区不同程度城市进程下的人为活动对岩溶地下水系统中DOM组成与来源特征,以期为岩溶区地下河水资源的管理与保护、水土流失的预防与治理提供依据和参考,从而改善岩溶区地下河环境,实现生态系统的良性循环.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选取重庆市青木关地下河与老龙洞地下河为研究点. 这两个研究点均属于亚热带湿润性季风气候,年均气温18.7℃,年均降雨量1 125.3 mm且集中于每年4~9月间,植被均以亚热带常绿阔叶林为主,每年10月~次年3月为旱季[11]. 区域内背斜成山、向斜成谷,呈现出"一山、二岭、一槽"式的典型岩溶槽谷景观. 青木关位于重庆市北碚区、沙坪坝区与璧山区的交界处,属于川东平行岭谷华蓥山山系、缙云山区,流域面积17 km^2,地下河全长约8 km,区域内土地利用类型主要为旱地和林地,人类活动主要为农业生产且耕地面积约占流域面积的30%,城市化程度相对较低. 南山老龙洞地下河位于城市化程度相对较高的重庆市南岸区黄桷垭镇,采样点位于南山南温泉背斜,流域面积约12.6 km^2,地下河全长约6 km. 其中,居民建设用地约4.5 km^2,厂矿用地约2.5 km^2,农业用地约2 km^2,其余为林地及在建地.

1.2 样品的采集

图1(a)与图1(b)为姜家泉和老龙洞两个采样点,其分别为青木关地下河与老龙洞地下河的出口,且均受管道流水控制. 2014年11月至2015年4月,用事先消毒并烘干的、配有聚四氟乙烯衬垫的螺旋盖、容量为4 L的棕色玻璃瓶,手动采集采样点中心位置处距水体表面-10 cm深的水样(在采样过程中,需避免瓶中引入气泡). 当水样装满至瓶口上有一弯月面时旋紧瓶盖,经检查无误尽快避光送至实验室过滤分析.

1.3 试剂和材料

分析样品时所用的正己烷、二氯甲烷、甲醇均为色谱纯,购自美国Fisher公司;玻璃纤维膜(Whatman GF/F,有效孔径0.7 μm)于450℃马弗炉中灼烧6 h、无水硫酸钠(分析纯)于550℃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;盐酸经二氯甲烷萃取6次后备用.

1.4 样品前处理

1.4.1 溶解态正构烷烃的提取

水样经玻璃纤维滤膜过滤后装入棕色瓶中,用净化后的盐酸酸化至pH<2,摇匀,使用全自动固相萃取系统(Horizon公司,SPE-DEX 4790)萃取(C18膜,直径47 mm,3M公司),提取液用50 mL的鸡心瓶收集,提取的萃取液并经浓缩、皂化、甲基化后,再用正己烷萃取,经进一步干燥、浓缩、氮吹至0.2 mL后,加入内标物,放入-26℃的冰箱中待测.

1.4.2 正构烷烃的检测

样品采用GC-MS(Agilent公司,7890A/5975C)分析,色谱柱为HP-5MS毛细管柱(30.0 m×0.32 mm×0.25 μm). 载气为高纯氦气,流速1 $mL \cdot min^{-1}$,进样口温度280℃. 升温程序为:初始温度50℃,保持1 min后,以20 ℃·min^{-1}升温至200℃,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℃. 采集全扫描数据并用内标法进行定量分析.

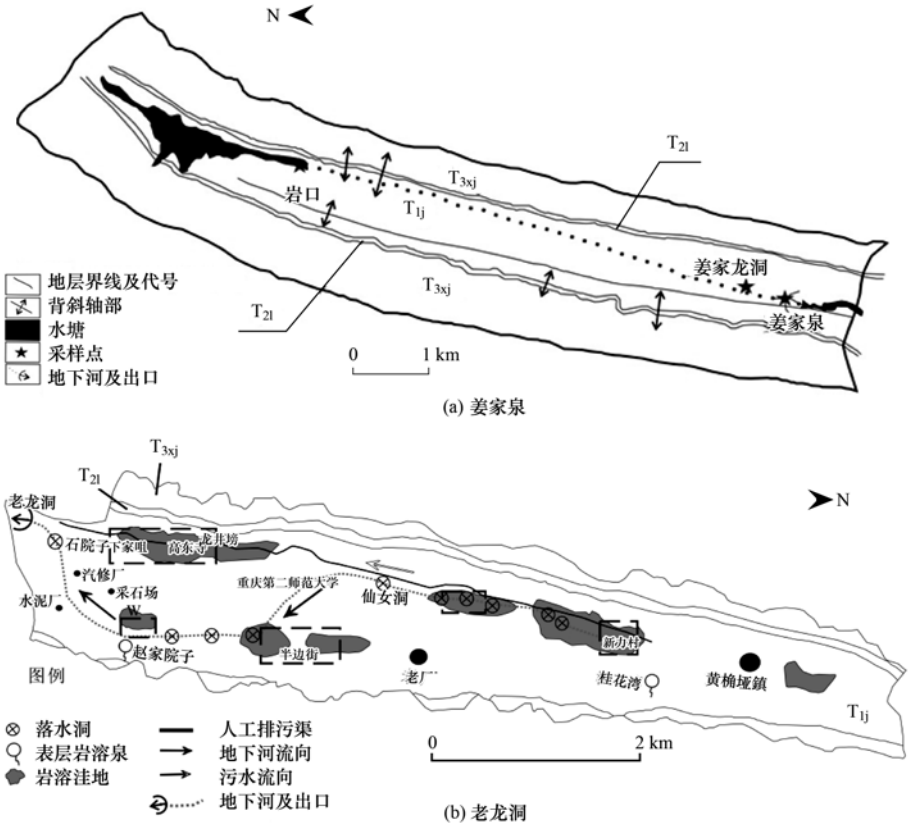

图 1　采样点分布示意

Fig. 1　Location of the sampling sites

2　结果与讨论

2.1　正构烷烃含量及组成特征

正构烷烃的含量如表 1 所示. 从中可知,姜家泉中的溶解态正构烷烃总含量(DT-ALK)为 102 ~ 356 $ng\cdot L^{-1}$,平均值为 230 $ng\cdot L^{-1}$; 老龙洞出口中的 DT-ALK 量为 110 ~ 697 $ng\cdot L^{-1}$, 平均值为 310 $ng\cdot L^{-1}$. 总体来看,除 12 月和 2 月外,老龙洞出口中其它各月的 DT-ALK 量均较姜家泉高. 另外,相同点位的 DT-ALK 含量也随着时间的不同而存在一定的差异. 例如,在 2014 年 11 月 ~2015 年 1 月,姜家泉与老龙洞口中的 DT-ALK 平均值分别为 207 $ng\cdot L^{-1}$和 191 $ng\cdot L^{-1}$,而在 2015 年 2 ~4 月则分别为 253 $ng\cdot L^{-1}$和 389 $ng\cdot L^{-1}$,每个采样点均呈现出 2015 年 2 ~4 月高于 2014 年 11 月 ~2015 年 1 月的现象.

由表 1 知,姜家泉和老龙洞口中的溶解态正构烷烃碳数分布均为 nC_{14} ~ nC_{35}. 按照时间的不同,取各碳数正构烷烃质量浓度的平均值,可知 2014 年 11 月 ~2015 年 1 月,姜家泉溶解态正构烷烃平均质量浓度最高的 3 种成分分别为 nC_{16}(86 $ng\cdot L^{-1}$)、nC_{17}(27 $ng\cdot L^{-1}$)和 nC_{31}(22 $ng\cdot L^{-1}$),而 2015 年 2 ~ 4 月则分别为 nC_{16}(96 $ng\cdot L^{-1}$)、nC_{33}(46 $ng\cdot L^{-1}$)和 nC_{31}(34 $ng\cdot L^{-1}$). 老龙洞 2014 年 11 月 ~2015 年 1 月平均含量最高的 3 种成分依次为 nC_{16}(105 $ng\cdot L^{-1}$)、nC_{21}(19 $ng\cdot L^{-1}$)和 nC_{14}(16 $ng\cdot L^{-1}$); 2015 年 2 ~ 4 月则依次为 nC_{16}(274 $ng\cdot L^{-1}$)、nC_{17}(225 $ng\cdot L^{-1}$)和 nC_{23}(79 $ng\cdot L^{-1}$). 这些差异说明姜家泉和老龙洞正构烷烃输入不同,并且相同地点在不同时间段的有机质输入也不尽相同.

采用低碳数正构烷烃(nC_{21}^{-})与高碳数正构烷烃(nC_{22}^{+})的比值(LMH/HMH)可以清晰反映出各月正构烷烃组分的差异. 表 2 为正构烷烃的各项指标,可知姜家泉 11 月、2 月的 LMH/HMH 值均小于 1,指示这两个月的正构烷烃以高碳数组分为主; 3 月的该比值约为 1,表明高低碳数的正构烷烃输入基本持平; 而其他月份的值均大于 1,说明其间均以低碳数正构烷烃输入为主. 老龙洞各月的 LMH/HMH 值均大于 1,指示各月均以低碳数正构烷烃占主导.

表 1 溶解态正构烷烃含量[1)]/ng·L^{-1}

Table 1 Content of dissolved alkanes/ng·L^{-1}

项目	姜家泉						老龙洞				
	2014 年		2015 年				2014 年		2015 年		
	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	11 月	12 月	2 月	3 月	4 月
C_{14}	4.2	11.4	6.2	7.7	6.9	10.5	24.6	6.9	8.8	12.1	14.8
C_{15}	9.0	26.2	0.0	11.1	18.7	5.3	10.0	0.0	9.8	0.0	46.6
C_{16}	49.1	145	63.7	72.1	153	64.0	114	96.5	59.4	118	274
C_{17}	6.8	54.4	19.4	15.1	2.3	7.7	5.7	15.3	7.6	93.1	225
C_{18}	N.d	N.d	11.1	N.d	N.d	N.d	N.d	3.6	N.d	87.2	N.d
C_{21}	2.1	1.5	0.1	N.d	N.d	N.d	37.0	N.d	0.7	5.4	10.7
C_{22}	2.1	1.5	N.d	18.2	11.2	4.6	N.d	12.0	N.d	19.9	N.d
C_{23}	5.6	4.5	8.1	11.9	10.6	1.1	3.5	7.9	7.6	0.5	79.3
C_{25}	16.0	0.7	2.6	2.4	1.9	0.4	1.6	2.8	1.9	1.9	9.5
C_{26}	N.d	N.d	4.6	2.4	N.d	N.d	3.9	2.8	3.5	1.3	1.9
C_{27}	0.7	0.4	3.5	0.2	3.1	0.8	1.1	1.0	2.5	4.1	2.5
C_{28}	1.1	2.4	2.4	5.9	1.4	1.3	3.4	0.5	N.d	2.8	1.8
C_{29}	3.1	3.7	0.3	5.0	2.0	1.0	1.9	1.7	1.5	0.3	2.7
C_{30}	N.d	1.7	5.2	3.7	N.d	N.d	2.8	3.9	N.d	4.7	2.5
C_{31}	64.5	N.d	2.6	2.1	100	N.d	1.9	1.9	1.3	0.0	5.2
C_{32}	2.6	N.d	4.5	1.7	40.4	0.9	6.0	0.8	1.5	2.8	4.6
C_{33}	39.9	N.d	2.2	138	N.d	0.1	1.0	N.d	N.d	N.d	6.4
C_{34}	1.8	2.0	2.5	2.1	1.2	0.4	0.2	1.8	0.8	0.4	2.8
C_{35}	2.2	5.5	11.9	2.0	3.5	4.0	2.7	N.d	3.5	6.3	7.0
DT-ALK	211	261	151	302	356	102	222	160	110	361	697
季节平均		207			253			191		389	
总平均				230					310		

1)“N.d”表示低于检测限,DT-ALK 表示“溶解态正构烷烃浓度总量”

表 2 分子特征指标[1)]

Table 2 Characteristics of molecular indexes

项目	姜家泉						老龙洞				
	2014 年		2015 年				2014 年		2015 年		
	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	11 月	12 月	2 月	3 月	4 月
LMH/HMH	0.5	10.0	2.0	0.5	1.0	6.0	2.3	3.3	3.5	6.1	4.1
$CPI_{15\sim25}$	0.4	0.6	0.4	0.4	0.2	0.2	0.4	0.2	0.4	0.4	1.3
$CPI_{25\sim35}$	23.1	1.7	1.2	9.5	2.6	2.4	0.6	0.8	1.9	1.1	2.4
Paq	0.2	0.6	0.8	0.7	0.1	0.6	0.6	0.7	0.8	0.9	0.9
AI	1.0	0.0	0.9	0.3	1.0	0.0	0.5	0.5	0.5	0.0	0.7
Temp	13.4	8.0	9.0	11.2	15.8	20.3	13.4	8.0	11.2	15.8	20.3

1) LMH/HMH = nC_{21}^{-}/nC_{22}^{+}; $CPI_{m\sim n} = 1/2[\sum(C_m \sim C_n)_{奇数}/\sum(C_{m-1} \sim C_{n-1})_{偶数} + \sum(C_m \sim C_n)_{奇数}/\sum(C_{m+1} \sim C_{n+1})_{偶数}]$($m$ 和 n 均为正整数且 $n > m > 1$); Paq = $(C_{23} + C_{25})/(C_{23} + C_{25} + C_{29} + C_{31})$; AI = $C_{31}/(C_{31} + C_{29})$

2.2 正构烷烃来源分析及分子指标

利用正构烷烃碳数分布的峰型、主碳峰(C_{max})和碳优势指数可综合判定其主要来源[12~14]. 在通常情况下,陆源高等植物的碳数分布呈后峰型,即以 nC_{27} ~ nC_{35} 峰群为主,呈显著奇偶优势; 细菌与浮游藻类等微生物的碳数分布呈现前峰型,即以 nC_{14} ~ nC_{20} 峰群为主; 沉水、漂浮与大型挺水植物的碳数分布为 nC_{21} ~ nC_{25},且在该区间出现最大丰度[15~17]. 若正构烷烃为双峰型且后峰呈现明显奇偶优势,则认为是微生物与高等植物混合输入的结果[18~21].

碳优势指数(carbon preference index,CPI)常被用来评估一定范围内奇数与偶数碳的优势. 若 CPI <1,则具有偶碳数优势; 若 CPI >1,则有奇碳数优势[22,23]. 按照各月峰型的差异,可将姜家泉峰型的分布分为 2 类. 其中,图 2(a)为 2014 年 12 月、2015 年 1 月和 4 月 3 个月的正构烷烃碳数分布. 结合表 2 可知,这 3 个月姜家泉的正构烷烃碳数分布均呈现“单峰-前锋”型,C_{max}16,其 CPI 值在 nC_{21} ~ nC_{25} 范围($CPI_{14\sim25}$)内均小于 1,具有明显的偶碳优

势，指示有机质来源于藻类、细菌、真菌等微生物输入[24~26]. 图 2(b)为 2014 年 11 月、2015 年 2 月与 3 月的正构烷烃碳数分布，结合表 2 可知其碳数分布呈现“双峰”形态，前峰 C_{max}16 且 CPI_{14-25}均小于 1，具有偶碳优势，指示微生物输入；后峰 C_{max}31 或 C_{max}33 且 $CPI_{24~35}$为 1.2 ~ 23，具有明显奇偶优势，指示出高等植物正构烷烃的输入[27,28]. 这 3 个月，姜家泉的正构烷烃输入呈现出微生物与高等植物混合输入的态势.

图 3 为 2014 年 11 月 ~ 2015 年 1 月和 2015 年 2 ~ 4 月老龙洞口的正构烷烃碳数分布. 结合表 2，与姜家泉不同，老龙洞口的溶解态正构烷烃碳数分布在各月均呈现“单峰-前峰”峰型，$CPI_{14~25}$小于 1，具有偶碳优势且 C_{max}16，表明在采样期内，老龙洞的正构烷烃均以微生物输入为主.

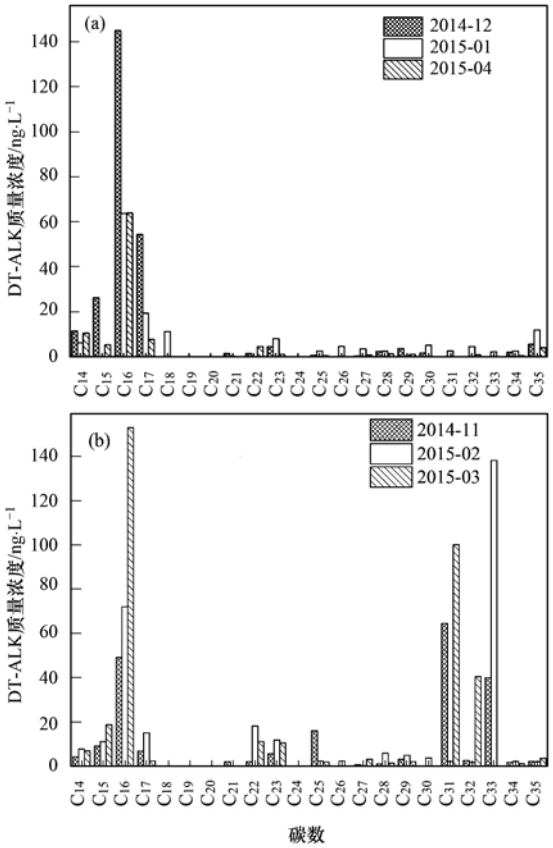

图 2　姜家泉中正构烷烃浓度丰度分布

Fig. 2　Abundance distribution of alkanes in Jiangjia spring

采用 LMH/HMH 值亦可指示不同来源正构烷烃的贡献. 通常认为高碳数正构烷烃来自植物，而低碳数来自微生物[29~31]. 由表 2 知，老龙洞每月的 LMH/HMH 均大于 2，以低碳数正构烷烃为主，即各月均以微生物输入占优势；2014 年 11 月 ~ 2015 年 1 月与 2015 年 2 ~ 4 月的 LMH/HMH 值分别为 2.3 ~ 3.3、3.4 ~ 6.1，平均值分别为 2.8 和 4.6，指示 2015 年 2 ~ 4 月的微生物输入量大于 2014 年 11 月 ~ 2015 年 1 月. 姜家泉 11 月与 2 月的值均小于 1，说明这两个月主要以高等植输入为主；3 月的值接近于 1，指示微生物与植物输入量相差不大；而其他月份比值均大于 1，表示均以微生物输入为主；2014 年 11 月 ~ 2015 年 1 月与 2015 年 2 ~ 4 月比值分别为 0.49 ~ 10 和 0.54 ~ 6.04，平均值分别为 4.15 和 2.54，指示姜家泉 2014 年 11 月 ~ 2015 年 1 月微生物输入量大于 2015 年 2 ~ 4 月. 在整个采样期间内，老龙洞溶解态正构烷烃来源结构的稳定性大于较姜家泉；时间因素对老龙洞地下河水中溶解态正构烷烃的影响要小于姜家泉.

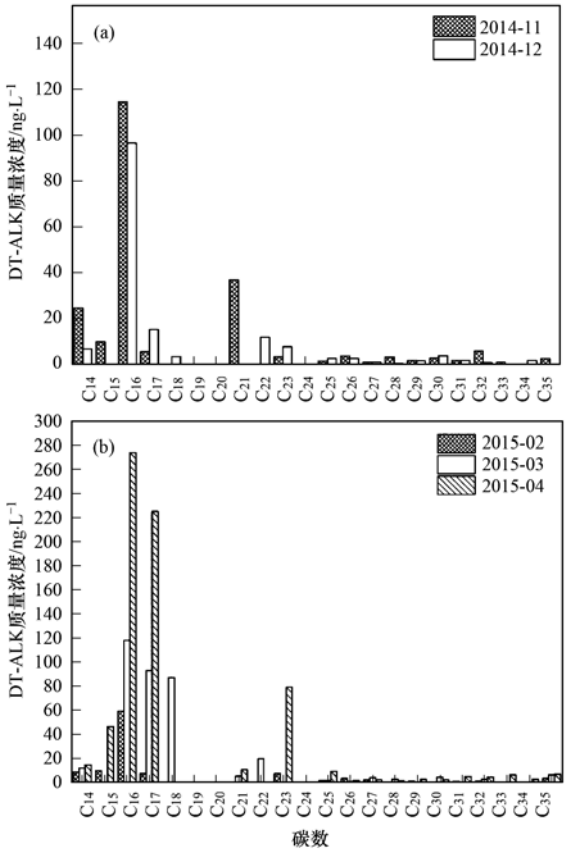

图 3　老龙洞中正构烷烃浓度丰度分布

Fig. 3　Abundance distribution of alkanes in Laolongdong

由表 2 可知，2 月、3 月和 4 月 LMH/HMH 值与温度均逐渐增加，说明 2015 年 2 ~ 4 月两地的微生物贡献均在上升，这是由于气温回升使微生物的活力增加[32]. 除 12 月和 4 月，老龙洞的微生物源正构烷烃输入普遍高于姜家泉. 由表 2 知，老龙洞口 4 月的 DT-ALK 达到最大值，而姜家泉则减少至最低值. 姜家泉在旱季主要受自然环境影响，2015 年 2 ~ 4 月，重庆气温与降雨均逐渐增加，地下河受到雨

水稀释作用,使得各种成分的质量浓度降低,DTALK 质量浓度亦随降雨增加而减少[33,34]. 而老龙洞却受到人类活动的严重影响,地下河水常年处于富营养状态[11,32],水中存在大量微生物生长所需的营养物质,这些物质在达到一定浓度之后反而会抑制微生物的生长[35,36]. 随着 2015 年 2 ~4 月气温升高与降雨量的增大,雨水稀释了老龙洞河水中的物质,微生物大量生长繁殖使得微生物源正构烷烃质量浓度持续增加,并在 4 月达到最高值.

Paq 可用来区分不同植物类型的正构烷烃输入[37]. 若 Paq 为 0.01 ~0.25,指示以陆生植物输入为主; 若 Paq 为 0.4 ~0.6,则指示其以挺水植物输入为主; 若 Paq >0.6,则指示以淡水(或海洋)大型植物(水生植物和水生大型藻类)输入为主[38]. 由上文已知,2014 年 11 月与 2015 年 2 月,姜家泉的溶解态正构烷烃以高等植物输入为主; 2015 年 3 月的高等植物与微生物输入持平. 而在以高等植物输入为主的 2014 年 11 月、2015 年 2 月和 3 月,姜家泉的 Paq 分别为 0.2、0.7 和 0.1,指示姜家泉 11 月、3 月以陆源植物输入为主,2 月以大型水生植物输入为主. 烷烃指数(alkane index, AI)可用来指示草本植物和木本植物的相对输入贡献,若 AI >0.5 指示以草本植物占优势,若 AI <0.5 则说明以木本植物占优势[39,40]. 11 月与 3 月的 AI 值分别为 0.95 和 0.98,说明青木关在这两个月以草本植物输入为主. 通过多项指标综合分析,姜家泉 12 月、1 月和 4 月以微生物输入为主; 11 月以陆源高等输入为主并伴有一定比例的微生物源输入; 2 月以水生大型植物输入为主同时伴有一定比例的微生物输入; 3 月微生物与陆源植物以同比例混合输入; 并且 2014 年 11 月与 2015 年 3 月的陆源高等植物主要为草本植物. 在采样期内,老龙洞地下河的正构烷烃则均以微生物输入为主.

3 结论

(1) 整个青木关地下河流域范围内主要受到自然环境与农业活动的双重影响,尤其是当旱季农业活动停止后,该地下河主要受自然环境的控制. 而位于城市化进程较深、人口密度大且土地利用类型复杂多样区域的老龙洞地下河,则受到了人为活动的严重影响. 显然,人为活动的差异,是导致青木关与老龙洞地下河的溶解态正构烷烃输入类型呈现显著差异的主要因素.

(2) 虽然青木关、老龙洞两条岩溶地下河的地理位置临近、自然环境相似,但在旱季期间,老龙洞地下河河水中的溶解态正构烷烃的含量大于青木关地下河. 同时,青木关相较于老龙洞更易受到时间因素的影响,其具体表现为不同时间段中的溶解态正构烷烃来源的差异,即随着时间的变化,青木关地下河受高等植物和微生物交替或混合控制,且整个采样期间内的正构烷烃来源复杂而又广泛; 老龙洞地下河则受到自然与人为活动的双重影响,河水中溶解态正构烷烃含量总体较高且来源相对专一.

参考文献:

[1] Sanchez N P, Skeriotis A T, Miller C M. A PARAFAC-based long-term assessment of DOM in a multi-coagulant drinking water treatment scheme[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(3): 1582-1591.

[2] Mendoza W G, Zika R G. On the temporal variation of DOM fluorescence on the southwest Florida continental shelf[J]. Progress in Oceanography, 2014, **120**: 189-204.

[3] Aiken G R, Hsu-Kim H, Ryan J N. Influence of dissolved organic matter on the environmental fate of metals, nanoparticles, and colloids[J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(8): 3196-3201.

[4] Bianchi T S, Canuel E A. Chemical biomarkers in aquatic ecosystems[M]. Princeton: Princeton University Press, 2011. 502.

[5] Ernst N, Peterse F, Breitenbach S F M, *et al*. Biomarkers record environmental changes along an altitudinal transect in the wettest place on Earth[J]. Organic Geochemistry, 2013, **60**: 93-99.

[6] Jemec A, Drobne D, Tišler T, *et al*. Biochemical biomarkers in environmental studies-lessons learnt from enzymes catalase, glutathione *S*-transferase and cholinesterase in two crustacean species[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2010, **17**(3): 571-581.

[7] 袁道先. 对南方岩溶石山地区地下水资源及生态环境地质调查的一些意见[J]. 中国岩溶, 2000, **19**(2): 103-108.
Yuan D X. Aspects on the new round land and resources survey in Karst rock desertification Areas of South China[J]. Carsologica Sinica, 2000, **19**(2): 103-108.

[8] 袁道先. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社, 1994. 207.

[9] 孙玉川, 沈立成, 袁道先. 表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2091-2098.
Sun Y C, Shen L C, Yuan D X. Contamination and source of polycyclic aromatic hydrocarbons in Epikarst spring water[J]. Environmental Science, 2014, **35**(6): 2091-2098.

[10] 任坤, 梁作兵, 于正良, 等. 重庆南山老龙洞地下河系统重金属分布、迁移及自净能力[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 4095-4102.
Ren K, Liang Z B, Yu Z L, *et al*. Distribution and transportation characteristics of heavy metals in Nanshan Laolongdong subterranean river system and its capacity of self-purification in Chongqing[J]. Environmental Science, 2015, **36**(11): 4095-4102.

[11] 蓝家程, 杨平恒, 任坤, 等. 重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1297-1303.

Lan J C, Yang P H, Ren K, *et al*. Investigation of nitrogen, phosphorus and microbial contamination in Laolongdong underground river system of Chongqing [J]. Environmental Science, 2014, **35**(4): 1297-1303.

[12] Colombo J C, Pelletier E, Brochu C, *et al*. Determination of hydrocarbon sources using *n*-alkane and polyaromatic hydrocarbon distribution indexes. Case study: Rio de la Plata Estuary, Argentina[J]. Environmental Science & Technology, 1989, **23**(7): 888-894.

[13] Moossen H, Bendle J, Seki O, *et al*. North Atlantic Holocene climate evolution recorded by high-resolution terrestrial and marine biomarker records [J]. Quaternary Science Reviews, 2015, **129**: 111-127.

[14] Andersson R A, Kuhry P, Meyers P, *et al*. Impacts of paleohydrological changes on *n*-alkane biomarker compositions of a Holocene peat sequence in the eastern European Russian Arctic [J]. Organic Geochemistry, 2011, **42**(9): 1065-1075.

[15] Volkman J K, Holdsworth D G, Neill G P, *et al*. Identification of natural, anthropogenic and petroleum hydrocarbons in aquatic sediments[J]. Science of the Total Environment, 1992, **112**(2-3): 203-219.

[16] 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.
Yao P, Yin H Z, Yao Q Z, *et al*. Composition of *n*-alkanes in soils of the Yellow River estuary wetlands and their potential as organic matter source indicators [J]. Environmental Science, 2012, **33**(10): 3457-3465.

[17] Nott C J, Xie S C, Avsejs L A, *et al*. *n*-Alkane distributions in ombrotrophic mires as indicators of vegetation change related to climatic variation[J]. Organic Geochemistry, 2000, **31**(2-3): 231-235.

[18] Blumer M, Guillard R R L, Chase T. Hydrocarbons of marine phytoplankton[J]. Marine Biology, 1971, **8**(3): 183-189.

[19] Robinson N, Cranwell P A, Eglinton G. Sources of the lipids in the bottom sediments of an English oligo-mesotrophic lake[J]. Freshwater Biology, 1987, **17**(1): 15-33.

[20] 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.

[21] de Souza D B, Machado K S, Froehner S, *et al*. Distribution of *n*-alkanes in lacustrine sediments from subtropical lake in Brazil [J]. Chemie der Erde-Geochemistry, 2011, **71**(2): 171-176.

[22] Bray E E, Evans E D. Distribution of *n*-paraffins as a clue to recognition of source beds [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1961, **22**(1): 2-15.

[23] Scalan E S, Smith J E. An improved measure of the odd-even predominance in the normal alkanes of sediment extracts and petroleum[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1970, **34**(5): 611-620.

[24] Elias V O, Simoneit B R T, Cardoso J N. Even n-alkane predominances on the amazon shelf and a Northeast Pacific hydrothermal system[J]. Naturwissenschaften, 1997, **84**(9): 415-420.

[25] Jones J G. Studies on lipids of soil micro-organisms with particular reference to hydrocarbons [J]. Journal of General Microbiology, 1969, **59**(2): 145-152.

[26] Wang Y L, Fang X M, Zhang T W, *et al*. Predominance of even carbon-numbered *n*-alkanes from lacustrine sediments in Linxia Basin, NE Tibetan Plateau: implications for climate change[J]. Applied Geochemistry, 2010, **25**(10): 1478-1486.

[27] Vogts A, Schefuß E, Badewien T, *et al*. *n*-Alkane parameters from a deep sea sediment transect off southwest Africa reflect continental vegetation and climate conditions [J]. Organic Geochemistry, 2012, **47**: 109-119.

[28] Bush R T, Mcinerney F A. Leaf wax *n*-alkane distributions in and across modern plants: implications for paleoecology and chemotaxonomy[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2013, **117**: 161-179.

[29] 王永莉, 方小敏, 白艳, 等. 中国气候(水热)连续变化区域现代土壤中类脂物分子分布特征及其气候意义[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, **37**(3): 386-396.
Wang Y L, Fang X M, Bai Y, *et al*. Distribution of lipids in modern soils from various regions with continuous climate (moisture-heat) change in China and their climate significance [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, **50**(4): 600-612.

[30] 李凤. 东海赤潮高发区与舟山群岛沉积物中脂类物质的生物地球化学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
Li F. Research on lipid biomarkers biogeochemistry of sedimentary matters in the red tide-frequent-occurrence area in the East China Sea and Zhou Shan Islands[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.

[31] 姚昕, 邹胜章, 夏日元, 等. 典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 1766-1772.
Yao X, Zou S Z, Xia R Y, *et al*. Dissolved organic matter (DOM) dynamics in Karst aquifer systems[J]. Environmental Science, 2014, **35**(5): 1766-1772.

[32] 王凤康. 岩溶地下河水微生物分布特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
Wang F K. Study on the distribution characteristics of microorganism in karst underground river [D]. Chongqing: Southwest University, 2015.

[33] 梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 等. 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[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3212-3219.
Liang Z B, Sun Y C, Wang Z B, *et al*. Migration and conversion of dissolved alkanes, dissolved fatty acids in a karst underground River Water, in Chongqing Area[J]. Environmental Science, 2015, **36**(9): 3212-3219.

[34] 戚艳平. 长江及其邻近海域中颗粒态及溶解态正构烷烃的分布[D]. 上海: 华东师范大学, 2006.
Qi Y P. Distribution of particulate and dissolved n-alkanes in the Changjiang and its adjacent sea [D]. Shanghai: East China Normal University, 2006.

[35] 姚书春, 李世杰. 巢湖富营养化过程的沉积记录[J]. 沉积学报, 2004, **22**(2): 343-347.
Yao S C, Li S J. Sedimentary records of eutrophication for the last 100 years in Caohu Lake[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, **22**(2): 343-347.

[36] Yamamoto S, Kawamura K, Seki O, *et al*. Environmental influences over the last 16 ka on compound-specific $\delta^{13}C$ variations of leaf wax *n*-alkanes in the Hani peat deposit from

northeast China[J]. Chemical Geology, 2010, **277**(3-4): 261-268.

[37] Xing L, Zhang H L, Yuan Z N, *et al*. Terrestrial and marine biomarker estimates of organic matter sources and distributions in surface sediments from the East China Sea shelf[J]. Continental Shelf Research, 2011, **31**(10): 1106-1115.

[38] Sikes E L, Uhle M E, Nodder S D, *et al*. Sources of organic matter in a coastal marine environment: evidence from *n*-alkanes and their $\delta^{13}C$ distributions in the Hauraki Gulf, New Zealand [J]. Marine Chemistry, 2009, **113**(3-4): 149-163.

[39] 刘建华, 祁士华, 张干, 等. 湖北梁子湖沉积物正构烷烃与多环芳烃对环境变迁的记录[J]. 地球化学, 2004, **33**(5): 501-506.
Liu J H, Qi S H, Zhang G, *et al*. Response of the n-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons records in sediments from lake Liangzi to the environmental change[J]. Geochimica, 2004, **33**(5): 501-506.

[40] 贺娟, 赵美训, 李丽, 等. 南海北部 MD05-2904 沉积柱状样 26 万年以来表层海水温度及陆源生物标记物记录[J]. 科学通报, 2008, **53**(11): 1324-1331.
He J, Zhao M X, Li L, *et al*. Sea surface temperature and terrestrial biomarker records of the last 260 ka of core MD05-2904 from the northern South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, **53**(15): 2376-2384.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 37 No. 10

Oct. 15, 2016

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on $PM_{2.5}$ Under Air Heavy Pollution in Beijing ····· SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, *et al.* (3679)

Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes ····· DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)

Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing ····· LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, *et al.* (3693)

Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province ····· XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, *et al.* (3702)

Oxidative Capacity of the PM_{10} and $PM_{2.5}$ in Beijing During 2014 APEC ····· GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, *et al.* (3708)

Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of $PM_{2.5}$ During Summer in Hongshan District, Wuhan ····· SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, *et al.* (3714)

Statistical Characteristics of Urban Changzhou $PM_{2.5}$ Based on *k*-means Analysis ····· WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, *et al.* (3723)

Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for $PM_{2.5}$ ····· YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, *et al.* (3730)

Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion ····· LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, *et al.* (3737)

Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles ····· FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, *et al.* (3743)

Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China ····· XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, *et al.* (3750)

Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China ····· ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, *et al.* (3758)

Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants ····· DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, *et al.* (3766)

Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area ····· CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, *et al.* (3774)

Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved *n*-alkane in Underground River ····· LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, *et al.* (3781)

Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China: Based on PMF Model ····· WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, *et al.* (3789)

Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region ····· HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, *et al.* (3798)

UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis ····· QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, *et al.* (3806)

Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause ····· HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, *et al.* (3813)

Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming ····· CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, *et al.* (3821)

Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake ····· DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, *et al.* (3828)

Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments ····· HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, *et al.* (3835)

Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water ····· JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, *et al.* (3842)

GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of *M. Aeruginosa* ····· LI Jie, XIAO Lin (3850)

Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies ····· WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, *et al.* (3858)

Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process ····· XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, *et al.* (3864)

Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species ····· ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, *et al.* (3870)

Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China ····· LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, *et al.* (3877)

Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O_3/UV ····· CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, *et al.* (3884)

Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of *Klebsiella oxytoca* GS-4-08 with Sucrose ····· HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)

Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater ····· SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, *et al.* (3899)

Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow ····· WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, *et al.* (3906)

Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary ····· FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, *et al.* (3914)

Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater ····· MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, *et al.* (3923)

Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau ····· LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)

Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge ····· HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, *et al.* (3939)

Comparative Investigation of Antibotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate ····· HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, *et al.* (3949)

Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain *Desulfovibrio* sp. CMX ····· XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, *et al.* (3955)

Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields ····· XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, *et al.* (3963)

Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China ····· ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, *et al.* (3971)

Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields ····· ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, *et al.* (3979)

Effects of Soil Texture on Autotrophic CO_2 Fixation Bacterial Communities and Their CO_2 Assimilation Contents ····· WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, *et al.* (3987)

Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System ····· SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, *et al.* (3996)

Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments ····· WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, *et al.* (4004)

Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil ····· ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, *et al.* (4011)

Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer ····· SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, *et al.* (4020)

Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels ····· QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, *et al.* (4030)

Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in *Lolium perenne* L. and *Pharibitis purpurea* (L.) Voigt ····· DONG Bing-bing, CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, *et al.* (4044)

In vitro Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes ····· LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, *et al.* (4054)

Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues ····· SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, *et al.* (4062)

《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 10 月 15 日　第 37 卷　第 10 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 37　No. 10　Oct. 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