

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

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

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析 陈卓,刘峻峰,陶玮,陶澍 (2815)

中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单 刘海彪,孔少飞,王伟,严沁 (2823)

基于长时间序列的北京 PM_{2.5}浓度日变化及气象条件影响分析 苗蕾,廖晓农,王迎春 (2836)

2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,魏强,孙彤卉,王步英,富佳明,何乐为,程兵芬,皮帅,马立光,崔继宪,孟凡 (2847)

抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析 周静博,李治国,路娜,徐曼,杨鹏,高康宁,王建国,靳伟 (2855)

成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征 蒋燕,贺光艳,罗彬,陈建文,王斌,杜云松,杜明 (2863)

嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析 沈利娟,王红磊,李莉,吕升,袁婧,张孝寒,章国骏,王翡 (2871)

泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析 张棕巍,胡恭任,于瑞莲,刘贤荣,胡起超,王晓明 (2881)

城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险:以贵阳市为例 李晓燕,汪浪,张舒婷 (2889)

桂林市酸雨变化特征及来源分析 郭雅思,于爽,黎泳珊,孙平安,何若雪 (2897)

农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH₃和N₂O)减排效果比较:以夏玉米季为例 范会,姜姗姗,魏茨,蒋静艳 (2906)

青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤CO₂、CH₄和N₂O通量的观测 吴建国,周巧富 (2914)

三峡库区香溪河秋末至中冬CO₂和CH₄分压特征分析 张军伟,雷丹,肖尚斌,张成,穆晓辉,刘佳,李迎晨 (2924)

气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析 张晨,刘汉安,高学平,张文娜 (2932)

三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例 吴东,黄志霖,肖文发,曾立雄,韩黎阳 (2940)

入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究:以洱海北部流域为例 项颂,庞燕,储昭升,胡小贞,孙莉,薛力强 (2947)

库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响:以草堂河为例 王晓彤,罗光富,操满,王雨春,汪福顺,邓兵 (2957)

农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析 李如忠,黄青飞,钱靖,殷晓曦,韦林 (2964)

农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究 李强坤,胡亚伟,宋常吉,彭聪 (2973)

三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨 柴雪思,雷利国,江长胜,黄哲,范志伟,郝庆菊 (2979)

重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究 刘静,郑丙辉,刘录三,马迎群,林岗璇,汪星,夏阳 (2989)

深圳地区全氟辛酸磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究 崔晓宇,张鸿,罗骥,张若冰 (3001)

柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价 卫亚宁,潘佳钊,宋玉梅,郭鹏然,王毅 (3007)

北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析 陈永娟,胡玮璇,庞树江,王晓燕 (3017)

昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义 王启栋,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁,曹磊 (3026)

甬醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示 廖昱,孙玉川,王尊波,梁作兵,张远瞩 (3034)

漳沱河冲洪积扇地下水中酞酸酯的污染现状与分布特征 昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,乔翠琴 (3041)

雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析 张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,赵瑞一,梁作兵 (3049)

Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制 张翔凌,黄华玲,郭露,陈巧珍,阮聪颖,冷玉洁 (3058)

Ce³⁺与Cu²⁺协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究 张剑桥,迟惠中,宋阳,罗从伟,江进,马军 (3067)

Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究 丁文川,向星光,曾晓岚,厉晓宇,梁国强, M. M. Mian (3073)

石墨烯-TiO₂光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解 徐琪,周泽宇,王洪涛 (3079)

单偶氮染料AY17的光催化降解动力学及机制 阳海,魏宏庆,胡乐天,胡倩,阳立平,刘华杰,易翔,易兵 (3086)

硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性 马航,朱强,朱亮,李祥,黄勇,魏凡凯,杨朋兵 (3094)

膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能 刘春,于长富,张静,陈晓轩,张磊,杨景亮 (3101)

ABR工艺ANAMMOX耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水 吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良,张婷 (3108)

活性污泥厌氧Fe(III)还原氨氧化现象初探 李祥,林兴,杨朋兵,黄勇,刘恒蔚 (3114)

低浓度氨氮废水单级自养脱氮EGSB反应器的快速启动 顾书军,方芳,李凯,刘勇,郭劲松,陈猷鹏,蒋甫阳 (3120)

超低溶解氧条件下的EBPR系统除磷性能 马娟,宋璐,俞小军,李璐,孙雷军,孙洪伟,李光银 (3128)

活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响 何志江,赵媛,张源凯,王洪臣,齐鲁,尹训飞,张晓军 (3135)

山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估 王菲,吴泉源,吕建树,董玉龙,曹文涛,康日斐,曹见飞 (3144)

电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征 赵科理,傅伟军,叶正钱,戴巍 (3151)

我国18种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究 冯璞阳,李哲,者渝芸,黄杰,梁东丽 (3160)

流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征 李鑫,杨军,饶伟,王代长,杜光辉,化党领,刘世亮,刘红恩 (3169)

聚羧基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu²⁺、Zn²⁺的吸附特性 朱健,雷明婧,王平,张伟丽,陈仰 (3177)

新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价 王文东,刘荟,张银婷,杨生炯 (3186)

纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附 朱倩,李正魁,张一品,韩华杨,王浩 (3192)

鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中PAHs的生物有效性 张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,王芳,王代长,蒋新 (3201)

不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响 景新新,苏志忠,邢红恩,王发园,石兆勇,刘雪琴 (3208)

中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究 王晓南,闫振广,余若祯,王婉华,陈丽红,刘征涛 (3216)

贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响 林文芳,陈胜,万堃,王春明,林惠荣,于鑫 (3224)

不同氨水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响 吕玉,周龙,龙光强,汤利 (3229)

《环境科学》征订启事(3025) 《环境科学》征稿简则(3057) 信息(3072, 3085, 3143)

雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析

张媚¹, 孙玉川^{1,2*}, 谢正兰¹, 余琴¹, 赵瑞一¹, 梁作兵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, 国土资源部岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 为阐述南川表层岩溶泉中溶解性有机质的来源, 采用气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS) 对采自南川柏树湾 (BQ)、兰花沟 (LQ)、后沟 (HQ) 表层岩溶泉水中的脂肪酸进行定量分析. 结果表明, BQ、LQ 和 HQ 中 5~7 月泉水脂肪酸平均含量分别为 14 870、12 912 和 8 801 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 脂肪酸组成均表现为饱和直链脂肪酸 > 单不饱和脂肪酸 > 支链脂肪酸 > 多不饱和脂肪酸, 在检测到的脂肪酸中, 单体脂肪酸以 C16:0、C18:0 含量最高, BQ、LQ、HQ 中 5~7 月脂肪酸总浓度随时间推移呈升高趋势. 各泉域植被覆盖和基岩裸露率不同, 以及降雨带来的稀释作用与土壤迁移增大效应相互作用引起脂肪酸含量和组分变化. 通过分析 3 口表层岩溶泉水中的脂肪酸分布特征和特征参数 H/L、CPI_h、TAR_{FA}, 及细菌源、浮游植物源、陆源高等植物源脂肪酸含量发现, 兰花沟泉脂肪酸 5 月以高等植物源为主, 7 月后沟泉脂肪酸以藻类来源为主, 其他月的兰花沟、后沟泉、柏树湾泉的 5~7 月脂肪酸主要来自于细菌.

关键词: 表层岩溶泉; 土地利用; 微生物; 脂肪酸; 生物标志化合物

中图分类号: X131.2; X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-3049-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.08.028

Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season

ZHANG Mei¹, SUN Yu-chuan^{1,2*}, XIE Zheng-lan¹, YU Qin¹, ZHAO Rui-yi¹, LIANG Zuo-bing¹

(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: Fatty acids were quantitatively analyzed by gas chromatography-mass spectrometer (GC-MS). Dissolved fatty acids were collected from Nanchuan epikarst spring. The results of BQ, LQ, HQ showed that the average contents of fatty acids were 14 870, 12 912 and 8 801 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ from May to July, respectively, and followed the order of SFA > MUFA > BrFA > PUFA. The monomers with highest content were C16:0 and C18:0. From May to July, the fatty acid content increased in BQ, LQ, HQ. The differences in vegetation coverage and bedrock bare rate, as well as the interaction of the dilution effect and soil transfer increase, led to the changes in content and the composition of the fatty acids. Based on the molecular characteristic indices of fatty acids, like H/L, CPI_h, TAR_{FA} about BQ, LQ, HQ, and contents of fatty acids which were mainly originated from bacteria, phytoplankton or terrigenous higher plant, it was indicated that fatty acids were mainly originated from higher plant in LQ in May, from phytoplankton input in HQ in July, while from bacteria in the other months in LQ, HQ and from May to July in BQ.

Key words: epikarst spring; land use; microorganism; fatty acid; biomarker

溶解性有机质 (dissolved organic matter, DOM) 是一种结构和组分十分复杂, 且物理上不均匀的有机混合物, 具有重要的生态和环境意义^[1,2]. DOM 广泛存在于各种环境介质中^[1], 它是全球碳循环的重要组成部分^[2], 陆地水生植物光合作用能将溶解无机碳转化为有机质 (内源有机碳), 埋藏后形成稳定碳汇^[3]. DOM 是水环境中重要的配位体和吸附载体, 对重金属元素和有机污染物在水环境中的迁移行为具有重要影响^[4]. 通常用物理化学程序分离 DOM 判断来源, 然而 DOM 结构多样^[5~8], 很难在分子水平上进行划分^[9,10], 所以对溶解态有机碳的研究和认识相对较少和薄弱, 而在人类活动日益加剧

和全球气候变背景下, 溶解态有机碳的研究尤为重要.

生物标志物 (biomarker) 是指具有特定生物来源的物质. 各种生物标志物被广泛地应用在有机质来源分析上. 生物标志化合物的研究已经覆盖了主要的 4 种生物化学组分: 蛋白质 (包括核酸)^[11]、碳

收稿日期: 2015-12-29; 修订日期: 2016-03-08

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项 (XDJK2013B021, XDJK2015D022); 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: 张媚 (1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为全球变化、有机地球化学, E-mail: zm10023@163.com

* 通讯联系人, E-mail: sunyc@swu.edu.cn

水化合物^[12]、类脂物^[13]和木质素^[14]。研究者们利用生物标志物实现人们对有机质的来源、迁移过程的认识成为了可能并取得了显著的成就^[11~15]。目前,脂类化合物是被用的较多的生物标志物。能够追溯 DOM 来源及迁移、转化特征。脂肪酸是脂类化合物的一种,是常见的生物标志物。具有来源的广泛性、良好的指示性和更好地抵御微生物和化学作用的能力,能够达到示踪 DOM 的作用^[16,17]。国内现对脂肪酸的研究主要集中在利用脂肪酸的环境指示意义探讨全球和区域的古气候和古环境变化^[18~20],以及指示有机质来源和环境变化,而且研究点多集中于大江大河、海岸^[21~23]。相比而言,对岩溶区脂类物质来源的研究则少得多。

南川是典型的岩溶区,由于特殊的“土在楼上,水在楼下”的地表地下双层结构,土层覆盖较薄,溶解性有机质可直接通过落水洞、天窗及土壤渗透等进入地下岩溶系统的物质循环和能量流动中^[24]。因此,基于脂肪酸示踪岩溶动力系统 DOM 的来源,不仅能够有助于弄清岩溶水系统中 DOM 的来源及其影响因素,更能够深化对岩溶地质作用碳汇的认识。本研究以重庆市南川区表层岩溶泉为对象,测定泉水中脂肪酸的含量和组成变化,探讨不同土地利用方式下表层岩溶泉水中脂肪酸的来源,以期对岩溶区溶解性有机质的来源提供借鉴意义,同时,也为岩溶区表层岩溶泉水的合理开发、利用与保护提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选取位于重庆市南川区地处大娄山脉西北侧的后沟泉(HQ)、兰花沟泉(LQ)、柏树湾泉(BQ)这3个典型表层岩溶泉为研究对象,该区地理坐标为N28°46′~29°30′和E106°54′~107°27′,属于亚热带季风气候,雨量充沛,热量丰富,年降雨量1185 mm,年均气温16.6℃,年日照量为1273 h,经济相对落后,以农业活动为第一产业,工业为第二产业。石漠化严重,研究区碳酸盐岩面积占总面积的37.5%^[25,26]。

柏树湾泉域为台地低山地貌,主要为山地,泉水出露地海拔783 m,泉域面积0.04 km²,泉域的基岩裸露率为0.67%,泉域已退耕还林20 a,基本无农业活动干扰。后沟、兰花沟泉域位于南平镇木渡河流域,以山坡地块为主。兰花沟泉水出露于兰花沟近EW向复合谷底南、北坡中下段,海拔736 m,泉

域面积0.08 km²,基岩裸露率为18.13%,土地利用类型主要为金银花地和部分旱地和稀释的马尾松林地,泉域内有一定强度的农业活动影响。后沟泉水出露于SN向和近EW向断裂裂隙交汇处的复合叠置谷底,海拔563 m,泉域面积0.52 km²,土地利用类型主要为耕地,基岩裸露率为25.3%。

1.2 泉域主要土地利用类型

柏树湾的主要植被类型是马尾松林地;兰花沟、后沟的土地利用类型主要为农业用地,后沟以旱地为主,有少量草地,旱地采用玉米和油菜轮作的耕种方式,同时,采样期间旱地种植的农作物进入快速生长期,玉米从5月幼苗期进入到7月成熟期;兰花沟主要植被类型除了玉米-油菜轮作外,还有少量的马尾松林地、金银花地,采样期间主要种植水稻、蔬菜、玉米。农业活动强烈。影响3个表层岩溶泉补给的主要因素是降雨和泉域生态调蓄能力的大小。柏树湾泉、兰花沟泉为常流泉,后沟泉旱季干涸是季节泉。柏树湾泉、兰花沟泉采样点在泉水出露点,柏树湾泉流出后形成柏枝溪,兰花沟泉出露点在避光档板下。后沟采样在出露点修砌的露天水池中,柏树湾泉、兰花沟泉是流动的,后沟泉水储存在水池中,当降雨较多后沟泉水溢出进入沟渠排泄。柏树湾泉、兰花沟泉采样期间未见藻类,后沟泉7月有大量浮游植物漂浮于水面上。

1.3 样品的采集

泉水按月取样,用4 L棕色玻璃瓶(带聚四氟乙烯衬垫的螺旋盖)直接在泉口采集,加入1 mL饱和HgCl₂抑制微生物生长,将水样置于便携式冰箱中避光冷藏运输,尽快送达实验室,放入冰箱于3℃冷藏保存,并在一周之内完成前处理。其中,后沟泉、柏树湾泉和兰花沟泉分别于2015年5月27日、6月22日、7月17日采集样品,样点位置见图1。

1.4 样品处理与分析

1.4.1 试剂与材料

样品分析所用的正己烷、二氯甲烷、甲醇、乙酸乙酯购自美国Fisher公司,均为农残级。玻璃纤维膜(Whatman GF/F,有效孔径0.7 μm)在马弗炉中以450℃灼烧6 h,无水硫酸钠(分析纯)在马弗炉中以550℃灼烧8 h,置于干燥器中冷却密封备用;脱脂棉经二氯甲烷抽提72 h风干后,密封干燥备用。盐酸用二氯甲烷萃取6次后备用。回收率指示物氘代十六烷酸购自德国Dr. Ehrnstorfer公司;内标物氘代正二十四烷(C₂₄D₅₀)购自美国Supelco公司。

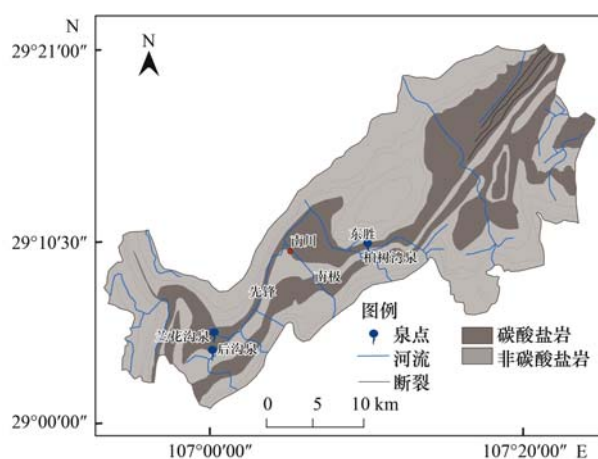


图1 研究区概况示意

Fig. 1 Location of the sampling sites

1.4.2 样品前处理

采回的样品于 7 d 内完成提取,水样首先经有效孔径为 0.7 μm 的玻璃纤维膜过滤,取过滤后的水样 4 L 装入棕色瓶,用净化过的盐酸酸化至 $\text{pH} < 2$,加入回收率指示物,摇匀后使用全自动固相萃取系统(美国 Horizon 公司, SPE-DEX4790)萃取(C18 膜,直径 47 mm,3M 公司),提取液用 100 mL 鸡心瓶收集,收集的提取液依次经过皂化、甲基化后,用正己烷萃取其中的脂肪酸甲酯^[27],纯化后经干燥浓缩后,氮吹至 200 μL ,加入内标物,放入 -26°C 冰箱中待测。

1.4.3 脂肪酸的测定

脂肪酸的定量分析采用 GC-MS 分析(Agilent, 7890A/5975C),色谱柱为 HP-5MS 毛细管柱(30.0 m \times 0.32 mm \times 0.25 μm)。载气为高纯氮气,流速为 1 mL \cdot min⁻¹,进样口温度 280 $^\circ\text{C}$,升温程序为初始温度 50 $^\circ\text{C}$,保持 1 min 后以 20 $^\circ\text{C} \cdot$ min⁻¹ 升温至 200 $^\circ\text{C}$,然后再以 10 $^\circ\text{C} \cdot$ min⁻¹ 的速度上升至 290 $^\circ\text{C}$,保持 15 min。不分流进样,进样量 1 μL 。EI 电离源 70 eV,离子源温度 230 $^\circ\text{C}$ 。采集全扫描数据。利用 NIST2011 进行目标化合物的定性,使用内标法进行定量。

1.4.4 质量控制

水样的前处理和分析过程采取严格的质量控制和质量保证。每分析 10 个样品同时做空白样品、加标样品、加标平行样品和样品平行样。每个样品在提取前加入回收率指示物(氘代正十六烷),用于检测实验过程中的损失情况,空白样用于确认实验结果的再现性。氘代正十六烷的回收率介于 85% ~ 105% 之间,且平行样品的相对标准偏差均小于

11%。

2 结果与讨论

2.1 泉水中溶解态脂肪酸的组成特征

本研究检测的脂肪酸碳数范围为 C10:0 ~ C28:0(见表 1),脂肪酸种类包括饱和直链脂肪酸(SFA)、饱和支链脂肪酸(BrFA)、单不饱和脂肪酸(MUFA)、多不饱和脂肪酸(PUFA)共计 41 种,3 泉水中总脂肪酸的含量范围为 1 862 ~ 25 560 ng \cdot L⁻¹。其中,柏树湾泉 5 ~ 7 月脂肪酸总含量分别为 11 640、12 864、20 108 ng \cdot L⁻¹,兰花沟泉 5 ~ 7 月脂肪酸总含量分别为 3 230、9 946、25 559 ng \cdot L⁻¹,后沟泉 5 ~ 7 月脂肪酸总含量分别为 1 861、5 582、18 960 ng \cdot L⁻¹,每口泉 3 个月的平均含量分别为 14 871、12 912、8 801 ng \cdot L⁻¹。柏树湾泉、兰花沟和后沟泉中脂肪酸总含量最高值出现在 7 月。表层岩溶泉中的溶解态脂肪酸平均含量呈现为柏树湾 > 兰花沟 > 后沟。

各脂肪酸种类占总脂肪酸的质量分数见表 2,饱和直链脂肪酸是最主要的脂肪酸类型,占总脂肪酸的 49% ~ 93%,;其次是单不饱和脂肪酸,其比例占 2.8% ~ 49%;支链脂肪酸和多不饱和脂肪酸的含量较少,分别占 1.1% ~ 7.0%、0.45% ~ 15%。3 个表层岩溶泉中脂肪酸均表现为: SFA > MUFA > BrFA > PUFA,样品中含量较高的前 10 种化合物为 C12:0、C14:0、C15:0、C16:0、C18:0、C28:0、C16:1 ω 9(c)、C16:1 ω 7(c)、C18:1 ω 9(t)、C18:1 ω 5(c)。

2.2 泉水中溶解态脂肪酸时间变化特征

图 2 为 2015 年 5 ~ 7 月 3 口泉中溶解态脂肪酸含量的动态变化特征,从 5 ~ 7 月 3 口泉水中脂肪酸总量呈上升趋势,其中,柏树湾的上升幅度要低于兰花沟泉和后沟泉。泉水中脂肪酸含量的变化受降雨量和泉域生态调蓄能力等因素的影响。5 ~ 7 月是重庆雨季时段,由图 3 可知,南川 5 ~ 7 月的降雨总量分别为 133、222、187 mm。已有研究表明^[28],3 个表层岩溶泉的生态调蓄能力从小到大依次为后沟 < 兰花沟 < 柏树湾。柏树湾泉域相对较强的生态调蓄能力使柏树湾泉水中脂肪酸含量的上涨幅度小于兰花沟泉、后沟泉。

2.3 泉水中溶解态脂肪酸组成变化特征

图 4 为 5 ~ 7 月 3 口泉中溶解态脂肪酸组成变化特征,5 ~ 7 月 BQ 中 SCFA 的质量分数呈先升高后降低的趋势,而 BrFA、MUFA、PUFA 质量分数之

表 1 样品中溶解态脂肪酸组成及其在总脂肪酸中比例¹⁾/%

Table 1 Composition of dissolved fatty acids in the samples and their proportions in total fatty acids/%

组分	柏树湾泉			兰花沟泉			后沟泉		
	5月	6月	7月	5月	6月	7月	5月	6月	7月
饱和直链脂肪酸(SFA)									
C10:0	0.27	0.73	0.32	0.49	0.45	1.02	1.37	0.33	0.62
C11:0	0.05	0.44	2.56	0.49	0.06	0.11	0.92	0.06	0.07
C12:0	0.55	1.23	0.77	1.58	1.34	1.87	3.57	0.65	1.94
C14:0	2.68	4.62	3.24	3.52	5.28	4.67	6.8	2.98	17.76
C15:0	1.21	1.64	1.45	1.58	1.1	2.39	2.33	0.78	2.58
C16:0	38.13	52.44	42.46	44.33	35.67	41.41	43.22	38.76	17.14
C17:0	0.51	0.69	1.83	0.44	0.68	0.71	0.51	0.12	0.16
C18:0	37.88	28.68	9.74	32.58	4.23	36.11	17.48	3.81	5.25
C20:0	0.71	0.41	0.57	0.67	0.31	0.68	0.35	0.29	5.95
C21:0	0.31	0.51	1.21	0.44	0.29	0.12	0.33	0.21	0.2
C24:0	0.13	0.46	1.02	0.51	0.1	0.19	0	0.12	0.11
C25:0	0.19	0	1.11	0.48	0.15	0.05	0	0.07	0
C26:0	0.12	0.37	3.23	0.31	0.12	0.1	0.96	0.07	0.02
C28:0	0	0	9.69	1.5	0.39	0.17	2.99	0.09	0.1
饱和支链脂肪酸(BrFA)									
MeC14:0	0.08	0.43	1.38	0.11	0.32	0.17	3.27	0.1	0.23
MeC17:0	0.47	0.83	1.03	0	0.15	0.1	0	0.07	0.97
MeC21:0	1.68	1.34	1.03	0.4	0.15	0.14	0.67	0.17	0.12
单不饱和脂肪酸(MUFA)									
C16:1 ω 9(t)	0.22	0	1.5	0.38	0.47	0.13	0.67	0.23	0.19
C16:1 ω 9(c)	1.1	0.53	1.2	1.12	0	0	2.64	0	9.54
C16:1 ω 7(c)	3.72	0	0	0.79	36.31	4.27	1.9	45.59	11.45
C18:1 ω 9(t)	1.94	0	1.53	1.91	2.2	1.45	2.65	1.08	5.42
C18:1 ω 7(t)	1.93	0	1.47	0	3.13	0.61	0.5	1.03	0.81
C18:1 ω 5(t)	2.43	1.03	4.6	2.93	0.69	0.23	1.02	0.46	0.35
多不饱和脂肪酸(PUFA)									
C16:2 ω 6,9	0.04	0	0	0	1.79	0.02	0	0.71	9.99
C18:2 ω 6,9(c)	1.23	0	0	0.57	0.75	0.73	0.74	0.21	1.66
C20:5 ω 3,6,9,12,15	0.24	0.45	1.45	0.35	0.57	0.02	0	0.12	3.6
C18:3 ω 5,7,9	0.03	0	1.45	0	0.12	0.04	0.56	0.05	0.12

1) 比例表示与总脂肪酸含量的比值大于1%的单体脂肪酸; 脂肪酸分子式通常表示为: $C_n:p\omega x$, 式中, n 表示 C 原子数; p 表示脂肪酸分子式中的双键数; 从甲基端开始的第一个碳原子称为 ω 碳; 从 ω 碳开始计数, x 是第一个发生双键的碳原子数

表 2 表层岩溶泉中溶解态脂肪酸组分的质量分数/%

Table 2 Percentages of dissolved fatty acid components in the epikarst spring/%

组份 ¹⁾	柏树湾泉			兰花沟泉			后沟泉		
	5月	6月	7月	5月	6月	7月	5月	6月	7月
SCFA	82.03	91.02	62.93	85.68	49.38	89.19	76.93	47.91	51.86
LCFA	1.09	1.81	17.09	4.01	1.19	0.88	4.28	0.78	0.50
BrFA	2.85	3.92	4.05	1.54	1.97	1.75	7.01	1.11	3.17
MUFA	12.49	2.81	13.02	7.85	44.23	7.36	10.48	49.12	29.11
PUFA	1.53	0.45	2.90	0.92	3.22	0.82	1.30	1.08	15.37

1) SCFA 表示 C10:0 ~ C20:0 短饱和直链脂肪酸; LCFA 表示 C21:0 ~ C28:0 长饱和直链脂肪酸; BrFA 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

和 LCFA 增加. LQ 中 BrFA、MUFA、PUFA 的质量分数之和、SCFA 质量分数呈先降低后升高的趋势, 而 LCFA 减少. HQ 中的 BrFA、MUFA、PUFA 质量分数之和呈先升高后降低的趋势, 而 LCFA、SCFA 减少(见表 2). 不同组分的脂肪酸来源不同, 采样

期间重庆高温多雨, 有利于细菌、植物的生长繁殖; 其次, 采样期间降雨带来的稀释作用和土壤迁移增大效应都能够影响脂肪酸含量、组分变化. BQ 与 LQ、HQ 中脂肪酸组成有明显差异, BQ 中 SFA 高于 LQ、HQ, 而 BrFA、MUFA、PUFA 的质量分数之和

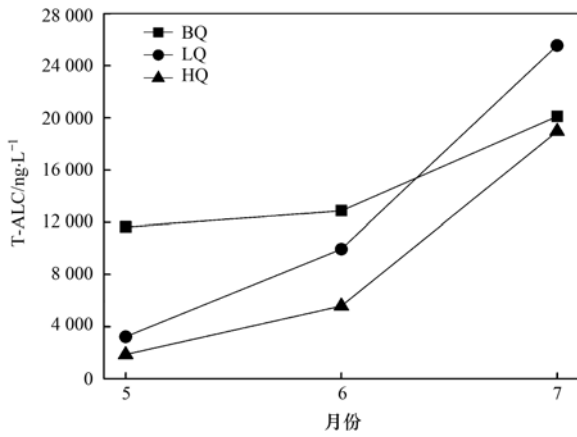


图 2 溶解态脂肪酸总含量分布

Fig. 2 Total content of dissolved fatty acids

低于另外两口泉,可能是由兰花沟、后沟泉域因农业活动导致的土地利用变化引起的。

2.4 脂肪酸来源分析

20 世纪初已从各种环境介质中检出脂肪酸^[29]。脂肪酸是生物体内重要的化合物,它的来源主要有细菌、微藻、高等植物和浮游动物,不同来源的脂肪酸均有其显著特征,但也有部分脂肪酸如棕榈酸和硬脂酸是普遍存在的^[30]。

饱和短链脂肪酸(C12:0 ~ C18:0)在水体中普遍存在,其可能来源包括维管植物、藻类细菌及其他来源^[31]。一般以细菌源为主的脂肪酸碳数范围的分布特征为 C8:0 ~ C11:0^[31]; C12:0、C14:0、C16:0、C18:0 脂肪酸在所有生物体中均存在,包括

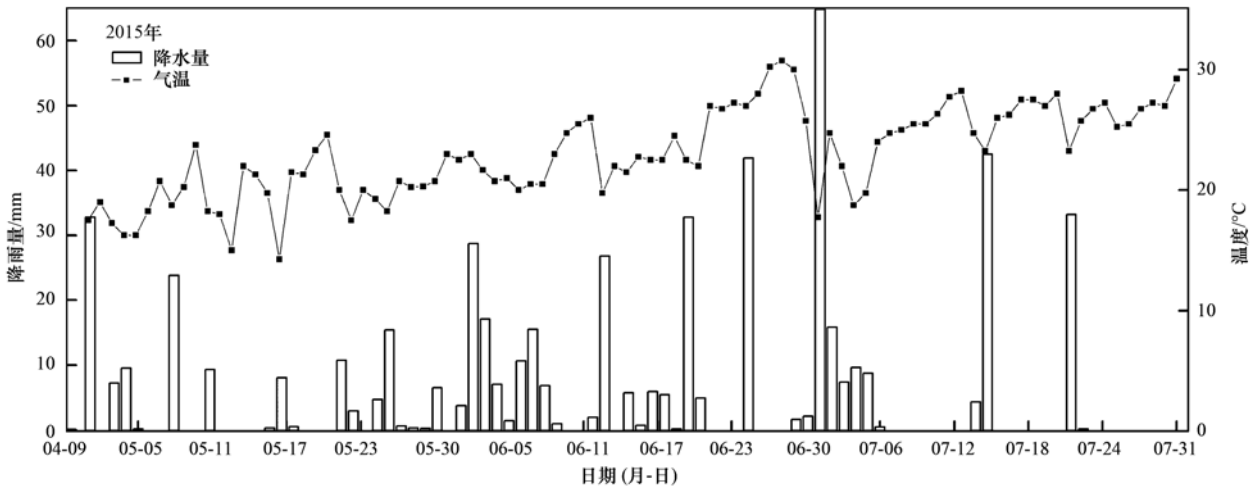


图 3 气温与降水量

Fig. 3 Temperature and rainfall

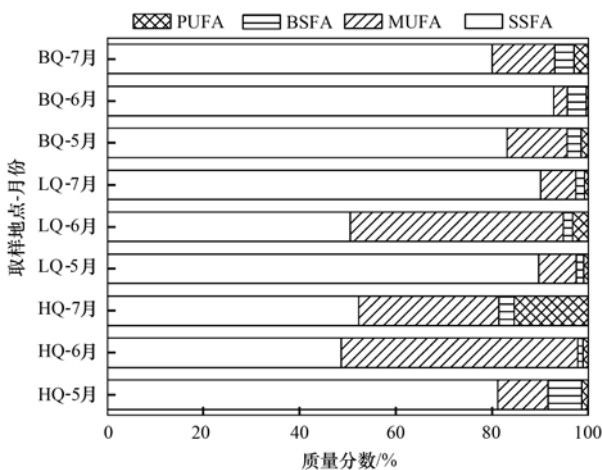


图 4 脂肪酸组成的动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of the fatty acid composition

藻类、高等植物、细菌、真菌等生物体;长链脂肪酸主要来源于陆源高等植物,也可能来自硅藻或者

细菌^[32,33]。碳链长度 ≥ 24 的正脂肪酸来自于高等植物^[32]。本研究表明 3 口泉均以直链饱和脂肪酸为主,尤其是 C16:0、C18:0 和 C14:0 脂肪酸,呈单峰型分布以 C16:0 为主峰,C18:0 为次峰,不同的是,后沟泉 7 月以 C14:0 为主峰,C16:0 为次峰(见图 5)。低碳数化合物(C10:0 ~ C20:0)的含量要远高于高碳数化合物(C20:0 ~ C28:0),两者比值的最高值达 104.7,最低值为 3.68,直链脂肪酸具有明显的奇偶优势。3 口泉水中高碳数部分均以偶碳数 C28:0、C26:0 占优势。饱和直链脂肪酸主峰在前峰区,表明脂肪酸主要来源于浮游生物、细菌。另外,C24:0 ~ C28:0 之间,饱和直链脂肪酸也有一定分布,表示有一定量的高等植物输入。

饱和直链脂肪酸的特征参数 H/L(轻重烃比值)、CPI(碳优势指数)、CPI_h(高碳数碳优势指数)、CAR(脂肪酸比率)、TAR_{FA}是判断脂肪酸来

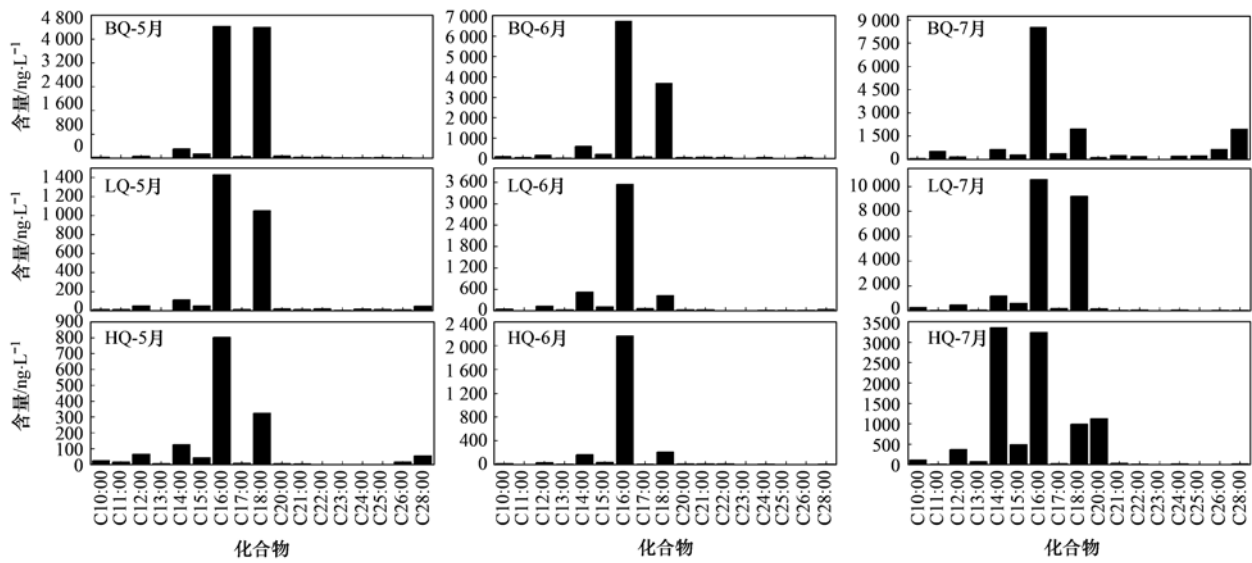


图5 表层岩溶泉中月脂肪酸的相对丰度分布

Fig. 5 Relative abundance distribution of fatty acids in epikarst spring

源的重要指标^[34]. 由表3可知,3个表层岩溶泉中H/L、CPI和CPI_h的变化范围分别为3.68~105、8.83~34.9和1.94~31.0,表明H/L、CPI和CPI_h均大于1,说明5~7月表层岩溶泉中均有高等植物的输入. TAR_{FA}能够反映总的脂肪酸组成中高等植物输入和水生低等生物的贡献,样品中分布为0.01~0.30,表明陆源高等植物的输入较

少,浮游生物和细菌的贡献量较大. CAR能够指示C3、C4植被的输入,CAR值越大,C4植被输入越多^[35]. 5~7月柏树湾和兰花沟泉CAR值均未有明显变化,后沟泉CAR由0上升至1.24,推测可能与后沟植被覆盖变化有关,5月采样发现后沟大面积种植的农作物玉米处于单株幼苗期,生长迅速,7月进入成熟期.

表3 脂肪酸特征参数¹⁾

Table 3 Characteristic indices of fatty acids

组分	柏树湾泉			兰花沟泉			后沟泉		
	5月	6月	7月	5月	6月	7月	5月	6月	7月
H/L	74.9	50.4	3.68	21.4	41.4	101.0	18.0	61.5	105
CPI	33.9	26.0	8.83	24.4	18.3	23.7	17.2	34.9	14.4
CPI _h	2.14	3.31	6.64	3.55	1.94	6.28	13.2	2.9	31.0
TAR _{FA}	0.01	0.01	0.30	0.05	0.01	0.01	0.07	0.01	0.01
CAR	0.35	0.56	0.25	0.52	0.52	0.64	0.00	0.43	1.24

1) H/L = $\sum C_{20^-} / \sum C_{20^+}$; CPI = CPI = $\sum C_{10-28(偶)} / \sum C_{11-27(奇)}$; CPI_h = $\sum (C_{22} + C_{24} + C_{26} + C_{28}) / (C_{21} + C_{23} + C_{25} + C_{27})$; TAR_{FA} = $(C_{24} + C_{26} + C_{28}) / (C_{12} + C_{14} + C_{16})$; CAR = $C_{24} / (C_{22} + C_{26})$

不饱和脂肪酸和支链脂肪酸主要来自于微生物活动和藻类生长^[36]. 细菌是支链脂肪酸的主要来源^[37]. 支链脂肪酸 MeC14:0、MeC15:0、MeC17:0、MeC21:0 常作为细菌源的特征指示化合物^[38]. 本研究中支链脂肪酸含量不高,多数脂肪酸占总量的1%以下,其中含量最多的是 MeC14:0、MeC21:0、MeC17:0. 其次,MeC13:0、Me16:0、Me15:0 也有少量检出. 样品中单不饱和脂肪酸含量较高,总含量仅次于饱和直链脂肪酸,其中以 C16:1、C18:1 所占比重最大,还检测出 C14:1、C17:1、C22:1. 不饱

和脂肪酸一般被认为是真核藻和细菌输入的标志,C16:1 ω 7 和 C18:1 ω 7 的主要来源于细菌^[39]. C16:1 ω 9 被认为是真核藻输入的标志,C18:1 ω 9 则是浮游植物产生的标志^[40]. 有些微藻含有大量长链多不饱和脂肪酸,碳数为16、20和22的多元不饱和脂肪酸被认为是藻类和浮游植物的生物标志物^[39]. 样品中多不饱和脂肪酸含量最低,仅检出 C16:2 ω 6,9、C18:2 ω 6,9(c)、C20:5 ω 3,6,9、C18:3 ω 5,7,9,其中 C16:2 ω 6,9 含量最高,C16:2 ω 6,9、C20:5 ω 3,6,9 在柏树湾泉和兰花沟泉中无明显变化,在后沟

泉中 5 月未检出, 7 月分别高达 $1894 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $683 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 7 月后沟采样点水池水面上发现大量绿藻生长, C16:2 ω 6,9、C20:5 ω 3,6,9 含量变化可能来源于藻类的生长。

综上所述, 本研究中定义的细菌源脂肪酸 = MeC14:0 + MeC15:0 + MeC17:0 + MeC21:0 + C16:1 ω 7 + C18:1 ω 7; 浮游植物源脂肪酸 = C18:1 ω 9 + C16:2 ω 6,9 + C20:5 ω 3,6,9。BQ、LQ、HQ 来源于浮游植物的脂肪酸含量分别为 $57.4 \sim 599$ 、 $72.8 \sim 454$ 、 $49.0 \sim 3604 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$; BQ、LQ、HQ 来源于细菌的脂肪酸含量分别为 $278 \sim 908$ 、 $38.6 \sim 3952$ 、 $57.1 \sim 2616 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。由图 6 对比发现 LQ-5 月、

HQ-7 月直接指示浮游植物脂肪酸多于细菌, BQ 以及 LQ、HQ 的其他月份均以细菌源脂肪酸为主。LQ-5 月的浮游植物源、细菌源、高等植物源脂肪酸含量分别为 72.8 、 65.1 、 $90.2 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 以陆源高等植物源脂肪酸为主。HQ-7 月的脂肪酸主要来源于浮游植物, 这与采样点 7 月水池水面上发现大量绿藻生长相一致。LQ、HQ 的其他月以及 BQ 的 5~7 月以细菌源脂肪酸为主。C18:2 ω 6,9c 被认为是真菌输入的标志^[41], 暴雨时期, 冲刷作用会将土壤中的 C18:2 ω 6,9c 带到水体中, 兰花沟、后沟泉含量升高, 这与暴雨效应导致的土壤迁移增大效应引起的脂肪酸含量动态变化的趋势相一致。

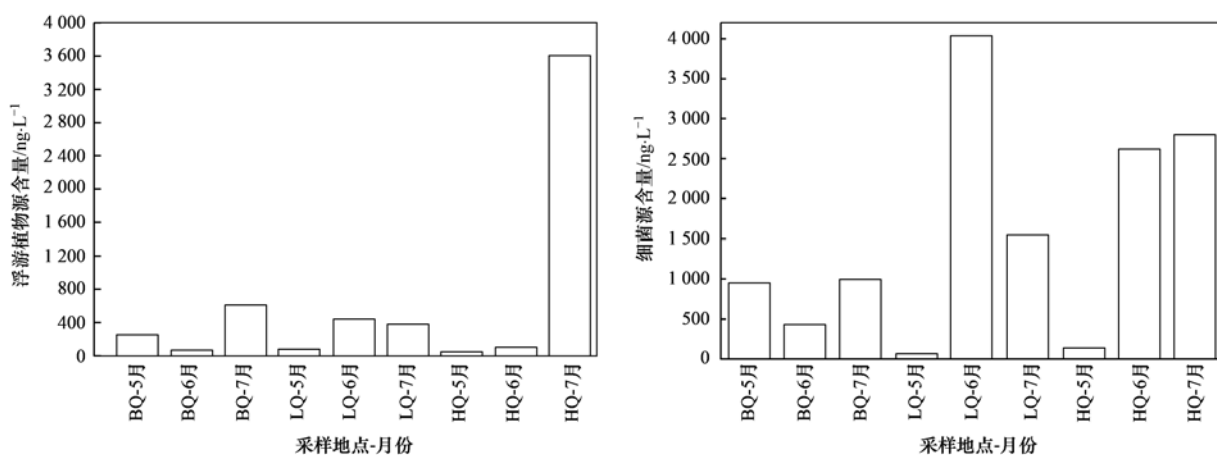


图 6 表层岩溶泉中细菌源、浮游生物源脂肪酸含量

Fig. 6 Contents of fatty acids from bacteria and plankton in epikarst spring

3 结论

(1) 3 口泉共检出脂肪酸 41 种。5~7 月中 3 个表层岩溶泉脂肪酸的含量相对变化值呈现的是兰花沟泉 > 后沟泉 > 柏树泉, 均表现为 SFA > MUFA > BrFA > PUFA。单体脂肪酸中含量最高的是 C16:0、C18:0。

(2) 植被覆盖以及基岩裸露率不同, 降雨期间岩溶地区的淋溶作用和稀释效应不同, 导致了泉水脂肪酸含量和组成变化。

(3) 兰花沟泉脂肪酸 5 月以高等植物源为主, 后沟泉的 7 月以藻类来源为主。兰花沟、后沟泉的其他月、柏树湾泉 5~7 月以细菌源脂肪酸为主。

参考文献:

[1] 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.

[2] Srinivasan R, Kumar V A, Kumar D, et al. Effect of dissolved

inorganic carbon on β -carotene and fatty acid production in *Dunaliella* sp. [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2015, 175(6): 2895-2906.

[3] 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.

[4] Dawson H J, Ugolini F C, Hrutford B F, et al. Role of soluble organics in the soil processes of a podzol, Central Cascades, Washington[J]. Soil Science, 1978, 126(5): 290-296.

[5] 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.

[6] Feng X J, Xu Y P, Jaffé R, et al. Turnover rates of hydrolysable aliphatic lipids in Duke Forest soils determined by compound specific ¹³C isotopic analysis[J]. Organic Geochemistry, 2010, 41(6): 573-579.

[7] Mendez-Millan M, Dignac M F, Rumpel C, et al. Molecular dynamics of shoot vs. root biomarkers in an agricultural soil estimated by natural abundance ¹³C labelling[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(2): 169-177.

[8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [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] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Wang Y H, 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.
- [17] 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.
- [18] 何伟, 白泽琳, 李一龙, 等. 溶解性有机质特性分析与来源解析的研究进展[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(2): 359-372.
- [19] 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.
- [20] 张永东, 苏雅玲, 刘正文, 等. 抚仙湖近现代沉积物中长链支链烷烃和环烷烃的检出及可能的环境意义[J]. *科学通报*, 2014, **59**(8): 656-667.
- [21] 陶舒琴, 赵美训, Eglinton T I, *et al.* 黄河悬浮颗粒物中类脂生物标志物的组成和稳定碳同位素分布特征及来源研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2015, **45**(7): 73-79.
- [22] 邓伟. 南黄海、东海表层沉积物中脂肪烃与多环芳烃的分布特征及来源初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013. 1-85.
- [23] Zhou S, Gonzalez L, Leithead A, *et al.* Formation of gas-phase carbonyls from heterogeneous oxidation of polyunsaturated fatty acids at the air-water interface and of the sea surface microlayer [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(3): 1371-1384.
- [24] 袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988. 23-126.
- [25] 郑红雷, 谢世友. 重庆市典型石漠化地区可持续发展对策——以重庆南川区为例[J]. *生态经济*, 2009, (7): 78-81.
- [26] 赵瑞一, 梁作兵, 王尊波, 等. 旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异[J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1598-1604.
- [27] 周莉娜, 苏润华, 马思佳, 等. 基于 PLFA 法分析亚硝氮、硝氮和氨氮对厌氧微生物细菌群落的影响[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(2): 499-505.
- [28] 刘正堂, 戴全厚, 倪九派, 等. 喀斯特地区裸坡面土壤侵蚀的人工模拟降雨试验研究[J]. *水土保持学报*, 2013, **27**(5): 12-16.
- [29] Berge J P, Gouygou J P, Dubacq J P, *et al.* Reassessment of lipid composition of the diatom, *Skeletonema costatum* [J]. *Phytochemistry*, 1995, **39**(5): 1017-1021.
- [30] Śednicka-Tober D, Barański M, Seal C J, *et al.* Higher PUFA and *n*-3 PUFA, conjugated linoleic acid, α -tocopherol and iron, but lower iodine and selenium concentrations in organic milk: a systematic literature review and meta-and redundancy analyses [J]. *British Journal of Nutrition*, 2016, **115**(6): 1043-1060.
- [31] McIntosh H A, McNichol A P, Xu L, *et al.* Source-age dynamics of estuarine particulate organic matter using fatty acid $\delta^{13}\text{C}$ and $\Delta^{14}\text{C}$ composition [J]. *Limnology and Oceanography*, 2015, **60**(2): 611-628.
- [32] 王娜. 脂肪酸等生物标志物在海洋食物网研究中的应用[D]. 上海: 华东师范大学, 2008. 9-11.
- [33] Tahir N M, Pang S Y, Simoneit B R T. Distribution and sources of lipid compound series in sediment cores of the southern South China Sea [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(10): 7557-7568.
- [34] Ho K F, Huang R J, Kawamura K, *et al.* Dicarboxylic acids, ketocarboxylic acids, α -dicarbonyls, fatty acids and benzoic acid in PM_{2.5} aerosol collected during CAREBeijing-2007: an effect of traffic restriction on air quality [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(6): 3111-3123.
- [35] Wiesenberg G L B, Schneckengerber K, Schwark L, *et al.* Use of molecular ratios to identify changes in fatty acid composition of *Miscanthus × giganteus* (Greef et Deu.) plant tissue, rhizosphere and root-free soil during a laboratory experiment [J]. *Organic Geochemistry*, 2012, **46**: 1-11.
- [36] 王启栋, 宋金明, 李学刚. 黄河口湿地有机碳来源及其对碳埋藏提升策略的启示[J]. *生态学报*, 2015, **35**(2): 568-576.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 李佳俊, 沈萍萍, 谭焯辉, 等. 南海东北部浮游植物对氮、磷加富的响应及与不同水团的关系[J]. *海洋学报*, 2015, **37**(10): 88-99.
- [41] De Vries F T, Thébault E, Liiri M, *et al.* Soil food web properties explain ecosystem services across European land use systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, **110**(35): 14296-14301.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性, 论点明确, 文字精炼, 数据可靠. 全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjcx.ac.cn)进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面给出的提示信息投稿即可.
2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为: 题目; 作者姓名; 作者工作单位、地址、邮政编码; 中文摘要; 关键词; 中图分类号; 英文题目; 作者姓名及单位的英译名; 英文摘要; 关键词; 正文; 致谢; 参考文献.
3. 论文题目应简练并准确反映论文内容, 一般不超过 20 字, 少用副标题.
4. 中文摘要不少于 300 字, 以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论, 重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应, 注意人称、时态和语言习惯, 以便准确表达内容.
5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.
6. 文中图表应力求精简, 同一内容不得用图表重复表达, 要有中英文对照题目. 图应大小一致, 曲线粗于图框, 图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.
7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示, 如 mg(毫克), m(米), h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法, 作者译的新名词术语, 文中第一次出现时需注明原文.
8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式, 左起顶格书写, 3 级以下标题可用 (1), (2)……表示, 后缩 2 格书写.
9. 文中外文字母、符号应标明其大小写, 正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称, 括号内给出英文全称和缩略语.
10. 未公开发表资料不列入参考文献, 可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:
期刊: 作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名, 年, 卷(期): 起页-止页.
图书: 作者. 书名[M]. 出版地: 出版社, 年. 起页-止页.
会议文集: 作者. 论文名[A]. 见(In): 编者. 文集名[C]. 出版地: 出版社(单位), 年. 起页-止页.
学位论文: 作者. 论文名[D]. 保存地: 保存单位, 年份.
报告: 作者. 论文名[R]. 出版地: 出版单位, 出版年.
专利: 专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.
11. 来稿文责自负, 切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知, 可来电询问.
12. 投稿请附作者单位详细地址, 邮编, 电话号码, 电子邮箱等. 编辑部邮政地址: 北京市 2871 信箱; 邮编: 100085; 电话: 010-62941102, 010-62849343; 传真: 010-62849343; E-mail: hjcx@rcees.ac.cn; 网址: www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China	CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)
Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China	LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)
Diurnal Variation of PM _{2.5} Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date	MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)
Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)
Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang	ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)
Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain	JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)
Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)
Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)
Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case	LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)
Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin	GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)
Assessment of Gaseous Nitrogen (NH ₃ and N ₂ O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)
Soil CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons	WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)
Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)
Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir	ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)
Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)
Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai	XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)
Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River	WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)
Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream	LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)
Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)
Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area	LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)
Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region	CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River	CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)
Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland	WANG Qi-dong, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)
Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)
Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)
Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)
Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)
Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce ³⁺ and Cu ²⁺ Ions	ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)
Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor	DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073)
Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol	XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)
Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO ₂ in Aqueous Solution	YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)
Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)
Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater	LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)
Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)
Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment	LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)
Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia	GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)
Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)
Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid	HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)
Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province	WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics	ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)
Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties	FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)
Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method	LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)
Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu ²⁺ , Zn ²⁺ Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)
Preparation and NH ₄ ⁺ -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges	WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)
Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions	ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)
Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)
Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization	JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)
Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance	LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)
Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils	LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)

《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8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 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