ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第11期

Vol.36 No.11

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第36卷 第11期
2015年11月15日

目 次

北京市大气气溶胶中糖类化合物的组成及来源 …… 梁林林,Guenter Engling,段凤魁,马永亮,程远,杜祯宇,贺克斌(3935)
北京大气 $PM_{2.5}$ 与惰性 SiO_2 的生物毒性比较 …… 刘梦娇,黄艺,文航,邱国玉(3943)
APEC 期间北京及周边城市 AQI 区域特征及天气背景分析 …… 高庆先,刘俊蓉,王宁,李文涛,高文康,苏布达(3952)
2000~2014 年北京市 SO_2 时空分布及一次污染过程分析 …… 程念亮,张大伟,李云婷,陈添,李金香,董欣,孙瑞雯,孟凡(3961)
利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因 …… 周静博,任毅斌,洪纲,路娜,李治国,李雷,李会来,靳伟(3972)
长江三角洲夏季一次典型臭氧污染过程的模拟 …… 张亮,朱彬,高晋徽,康汉青,杨鹏,王红磊,李月娥,邵平(3981)
珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征 …… 刘建,吴兑,范绍佳(3989)
春季黄渤海海水中尿素分布特征及溶解态氮的组成 …… 李志林,石晓勇,张传松(3999)
洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究 …… 庞燕,项颂,储昭升,薛力强,叶碧碧(4005)
大辽河主要污染源营养盐输入特征 …… 马迎群,张雷,赵艳民,秦延文,潘晓雪,曹伟,刘志超,杨晨晨(4013)
三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析 …… 张永生,李海英,任家盈,卢佳(4021)
不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究 …… 李建鸿,蒲俊兵,孙平安,袁道先,刘文,张陶,莫雪(4032)
周丛生物存在下不同水层氧化还原带的分布及其与微生物的关联 …… 王逢武,刘玮,万娟娟,杨嘉利,刘雪梅,向速林,吴永红(4043)
华北低平原区地下水中氟分布特征及形成原因:以南皮县为例 …… 孔晓乐,王仕琴,赵焕,袁瑞强(4051)
某市典型地段地表水及地下水中氟喹诺酮类抗生素分布特征 …… 崔亚丰,何江涛,苏思慧,杨蕾,乔肖翠(4060)
乳山湾邻近海域沉积物中好氧氨氧化微生物分布特征 …… 贺惠,甄毓,米铁柱,张玉,付璐璐,于志刚(4068)
青木关地下河中溶解态甾醇来源及迁移、转化特征 …… 梁作兵,沈立成,孙玉川,王尊波,江泽利,张媚,廖昱,谢正兰,张远瞩(4074)
多环芳烃在岩溶地下河表层沉积物-水相的分配 …… 蓝家程,孙玉川,肖时珍(4081)
降雨期间岩溶地下河溶解态多环芳烃变化特征及来源解析 …… 江泽利,孙玉川,王尊波,梁作兵,任坤,谢正兰,张媚,廖昱(4088)
重庆南山老龙洞地下河系统重金属分布、迁移及自净能力 …… 任坤,梁作兵,于正良,张宇,王蓉,袁道先(4095)
三峡水库消落带植物汞的分布特征 …… 梁丽,王永敏,李先源,唐振亚,张翔,张成,王定勇(4103)
物理和生物组合扰动对底泥微界面过程的影响 …… 王忍,李大鹏,黄勇,刘焱见,陈俊(4112)
超声、过硫酸钾协同去除水中诺氟沙星的效果 …… 魏红,史京转,李佳霖,李克斌,赵琳,韩凯(4121)
载银活性炭活化过硫酸钠降解酸性橙 7 …… 王忠明,黄天寅,陈家斌,李文卫,张黎明(4127)
TiO_2 降解迪美唑的动力学及活性物质分析 …… 陈冬梅,喻泽斌,孙蕾,黄俊,高丽红,李明洁(4135)
单宁酸铁吸附去除水中无机氮的性能与机制研究 …… 张瑞娜,李琳,刘俊新(4141)
间歇曝气式膜生物反应器对养猪沼液中兽用抗生素的去除特性 …… 丁佳丽,刘锐,郑炜,宋小燕,余卫娟,叶朝霞,陈吕军,张永明(4148)
单级和两级串联臭氧-生物活性炭深度处理垃圾渗滤液的比较研究 …… 杜安静,范举红,刘锐,邱松凯,文晓刚,陈吕军(4154)
水力停留时间和溶解氧对陶粒 CANON 反应器的影响 …… 王会芳,付昆明,左早荣,仇付国(4161)
氨氮对 AOB 抑制的形态及规律 …… 崔剑虹,李祥,黄勇,朱亮,杨朋兵(4168)
厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水 …… 张诗颖,吴鹏,宋吟玲,沈耀良,张婷(4174)
同步硝化反硝化耦合除磷工艺的快速启动及其运行特征 …… 冷璐,信欣,鲁航,唐雅男,万利华,郭俊元,程庆锋(4180)
HCO_3^- 对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺脱氮效能的影响 …… 李祥,陈宗姮,黄勇,袁怡,刘忻,张大林(4189)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥亚硝化性能调控及稳态研究 …… 巫恺澄,吴鹏,沈耀良,李月寒,王建芳,徐乐中(4195)
活化过硫酸盐对市政污泥调理效果的影响 … 徐鑫,濮文虹,时亚飞,虞文波,张诗楠,宋健,张昊,何姝,杨昌柱,杨家宽(4202)
温度分化对 APBR 反应器性能及产甲烷菌群落的影响 …… 谢海迎,汪鑫,李牧原,阎叙酉,五十岚泰夫,罗锋(4208)
污染场地修复技术筛选方法及应用 …… 白利平,罗云,刘俐,周友亚,颜增光,李发生(4218)
基于 Monte Carlo 模拟的土壤重金属综合风险评价与案例分析 …… 杨阳,代丹,蔡怡敏,陈卫平,侯瑜,杨锋(4225)
大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价 …… 张倩,陈宗娟,彭昌盛,李发生,谷庆宝(4232)
缙云山不同土地利用方式对土壤团聚体微生物量碳氮的影响 …… 李增全,江长胜,郝庆菊(4241)
不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响 …… 兰木羚,高明(4252)
生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征 …… 杜毅飞,方凯凯,王志康,李会科,毛鹏娟,张向旭,王婧(4260)
不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响 …… 姚桂华,徐海舟,朱林刚,马嘉伟,柳丹,叶正钱(4268)
组配改良剂对土壤-蔬菜系统铅镉转运调控的场地研究 …… 朱维,刘丽,吴燕明,周航,邓贵友,杨文弢,彭佩钦,曾敏,廖柏寒(4277)
水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响 …… 王美娥,彭驰,陈卫平(4283)
大庆湖泊群水体和淡水鱼中多环芳烃污染特征及生态风险评估 …… 王晓迪,臧淑英,张玉红,王凡,杨兴,左一龙(4291)
覆盖层甲烷氧化动力学和甲烷氧化菌群落结构 …… 邢志林,赵天涛,高艳辉,何芝,杨旭,彭绪亚(4302)
阳极内添加阳离子交换树脂提升辊压"三合一"膜电极 MFC 性能 …… 梅卓,张哲,王鑫(4311)
应用基于单克隆抗体的免疫传感器检测环境中的芘和苯并芘 …… 李鑫,乔琰,钟国祯(4319)
《环境科学》征订启事(4224) 《环境科学》征稿简则(4318) 信息(4080,4173,4290,4301)

青木关地下河中溶解态甾醇来源及迁移、转化特征

梁作兵[1], 沈立成[1,2*], 孙玉川[1,2], 王尊波[1], 江泽利[1], 张媚[1], 廖昱[1], 谢正兰[1], 张远瞩[1,2]

(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: 为阐述溶解态甾醇在地下河中的来源及迁移、转化过程和对水质状况评价, 2013 年 7 ~ 11 月在青木关地下河入口处、出露处和出口处进行定期采样, 并利用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)对样品中溶解态甾醇的组分进行定量分析. 结果表明, 7 ~ 11 月溶解态甾醇的平均含量变化为 415 ~ 629 ng·L^{-1}, 随月份的增加地下河中溶解态甾醇的含量呈下降的趋势; 从地下河入口至地下河出口溶解态甾醇的平均含量变化为 724 ~ 374 ng·L^{-1}; 豆甾醇/胆固醇的平均比值变化为 0.29 ~ 0.12, 随地下河运移距离的增加二者的值均呈下降的趋势. 成分组成上以胆固醇含量占优势, 约占总含量的 37.30% ~ 94.85%, 但各月组成变化较大. 粪醇/胆固醇、粪醇/甾醇总量的比值均小于 0.2, 表明没有受到生活污水的污染, 但随月份的增加二者比值大致呈增加的趋势.

关键词: 土壤固碳; 溶解性有机质; 生物标志物; 甾醇; 青木关地下河

中图分类号: X142; X523 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2015)11-4074-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2015.11.017

Sources, Migration and Conversion of Dissolved Sterols in Qingmuguan Underground River

LIANG Zuo-bing[1], SHEN Li-cheng[1,2*], SUN Yu-chuan[1,2], WANG Zun-bo[1], JIANG Ze-li[1], ZHANG Mei[1], LIAO Yu[1], XIE Zheng-lan[1], ZHANG Yuan-zhu[1,2]

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

Abstract: Water samples were collected from the Qinmuguan underground river from July to November in 2013. By gas chromatography-mass spectrometer (GC-MS), dissolved sterols were quantitatively analyzed. The results show that the average variation content of dissolved sterols ranges from 415 to 629 ng·L^{-1}, with the increasing migration distance of dissolved sterols in underground river, its contents are decreased. Between the inlet and outlet of Qingmuguan underground river, the average variation contents of dissolved sterol are between 724 and 374 ng·L^{-1}, and the average variation ratios of the content of stigmasterol with cholesterol range from 0.29 to 0.12. In short, their values are decreased accompanied by the increasing migration distance of underground river. The composing component in dissolved sterols varied differently between July to December, and the main component of dissolved sterols is cholesterin, the ratios of the content of dissolved sterols with cholesterin to the total dissolved sterols range from 37.30% to 94.85%. In addition, the ratios of the content of dissolved sterols with coprostanol to cholesterin, coprostanol to cholesterin are below 0.2 respectively, indicating the water quality of underground river is not contaminated by domestic sewage, but with the passage of time water quality tends to deterioration.

Key words: carbon sequestration; dissolved organic matter; biomarker; sterol; Qingmuguan underground river

溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)是土壤中最活跃的有机碳库, 也是地球上最大的有机碳库, 在全球碳循环中起着关键作用[1], 其含量与土壤 CO_2、CH_4、N_2O 的排放显著正相关[2], DOM 的矿化成为土壤有机碳损失的重要途径. 因此, DOM 在全球碳循环和土壤固碳中的作用受到普遍关注. 陆地特别是土壤中的溶解性有机质(DOM)通过降雨的冲刷进入河流、湖泊等水域中[3], 据统计, 全球大约每年有 0.4×10^{15} g 有机质通过河流输送到海洋当中[4], 而河流中有机质更多来自于土壤和植物组织中, 只有少量来源于浮游植物, 河流中溶解性有机质能够反映土壤中有机质特性[5]. 因此, 加强对河流中 DOM 来源及迁移、转化研究, 对于加强流域系统内土壤固碳容量与赋存状态的研究提供

收稿日期: 2015-04-04; **修订日期**: 2015-06-09

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2013B021, XDJK2015D003); 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); 岩溶动力学重点实验室开放基金项目(KDL2011-04, KDL201303); 重庆市研究生科研创新项目(CYS14056)

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: brucelung@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xqimei@swu.edu.cn

理论支撑. 但是 DOM 来源复杂,结构多样[6]. 基于以上原因,研究者们利用生物标志物(biomarker)实现了对 DOM 在河流中的来源及迁移、转化过程的认识[7~10]. 其中甾醇作为生物标志物的一种,因其生物来源广泛使得分子结构多样[11],已经被广泛地应用到示踪有机质的迁移、转化[12~14]和判别污水来源等研究中[15~17].

我国是岩溶大国,碳酸盐岩分布面积达 344 万 km^2,占国土面积的 1/3 以上[18],由于可溶性岩石以化学风化为主,留下成土物质极少,加之土壤层较薄,导致其渗透性增强[19],土壤中 DOM 或地表污染物特别是在降雨冲刷下[20],随落水洞、竖井、裂隙等通道直接进入岩溶含水层或地下河中[21,22]. 当土壤中 DOM 进入岩溶亚表层环境中,由于缺乏阳光,陆地碳循环的两个重要过程(光合作用,光降解作用)不能直接影响 DOM[23]; 而进入地下河中的 DOM 随着地下河的运移最终以地表岩溶泉或地下河出口的形式重新出露地表,在这一过程中 DOM 的迁移、转化过程值得关注. 本研究试以重庆典型岩溶区青木关地下河为例,分析甾醇在地下河中的来源及迁移、转化过程,以期为土壤中 DOM 在岩溶地下河系统内迁移、转化提供新的依据,并对地下河中水污染状况进行评价.

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°16′48″ ~ 106°20′10″E, 29°40′40″ ~ 29°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. 多年平均气温为 18℃,冬季月平均气温为 5℃,夏季月平均气温为 27℃. 青木关年降水约为1 000 mm,主要集中在 4 ~ 10 月,11 月到次年 3 月降雨量较少,区域内土地利用类型以旱地和林地为主. 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 ~ 11 月,其中,采样期间 8 月因地下河断流没有进行采样,9 月由于操作失误使得姜家龙洞采样点样品缺失. 用事先清洗干净(用去离子水清洗 3 遍,然后放入 450℃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 $g \cdot L^{-1}$)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 μm 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.

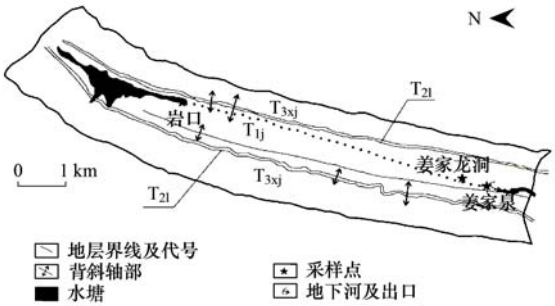

图 1　采样点分布示意[24]

Fig. 1　Location of the sampling sites

1.3　试剂和材料

样品分析所用的正己烷、二氯甲烷、甲醇、乙酸乙酯均为农残级,购自美国 Fisher 公司. 玻璃纤维膜(Whatman GF/F,有效孔径 0.7 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($C_{24}D_{50}$),购自美国 Supelco 公司.

1.4　样品处理与分析

1.4.1　水样中溶解态甾醇提取

取经过玻璃纤维滤膜(有效孔径 0.7 μm)过滤的水样 4 L,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(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,用正己烷萃取其中的甾醇,然后经干燥、浓缩后,进行硅烷化,氮吹至 0.2 mL,加入内标物,放入 -26℃冰箱中待测.

1.4.2　甾醇分析

甾醇的检测采用 GC-MS 分析(Agilent,7890A/5975C),色谱柱为 HP-5MS 毛细管柱(30.0 m × 0.32 mm × 0.25 μm). 载气为高纯氦气,流速为 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 $℃ \cdot min^{-1}$升温至 200℃,然后再以 10$℃ \cdot min^{-1}$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 甾醇含量与时空分布特征

表 1 为青木关地下河水体中溶解态甾醇的含量. 从中可知,地下河水体中溶解态甾醇含量的变化范围为 266 ~ 1 161 ng·L^{-1},平均值为 512 ng·L^{-1}. 最高值和最低值分别出现在 2013 年 7 月岩口采样点和 2013 年 10 月姜家龙洞采样点. 图 2 为青木关地下河不同采样点水体中溶解态甾醇含量的月变化. 从中可知,2013 年 7 ~ 11 月(9 月姜家龙洞除外),青木关地下河中溶解态甾醇的月平均含量分别为: 629、582、444、415 ng·L^{-1}; 在 2013 年 7 ~ 11 月,岩口、姜家龙洞、姜家泉中溶解态甾醇的平均含量分别为: 724、412、374 ng·L^{-1}. 从中可以看出,青木关地下河中溶解态甾醇含量在 2013 年 7 ~ 11 月之间具有较明显的时空分布特征,即随着月份的增加和地下河运移距离的增加,溶解态甾醇的含量均呈降低的趋势.

表 1 青木关地下河水体中溶解态甾醇含量[1)]/ng·L^{-1}

Table 1 Content of dissolved sterols in waters of Qingmuguan underground river/ng·L^{-1}

项目	岩口				姜家龙洞			姜家泉			
	7 月	9 月	10 月	11 月	7 月	10 月	11 月	7 月	9 月	10 月	11 月
粪甾醇	0.50	1.31	7.01	ND	0.81	0.02	6.24	0.56	0.81	0.79	6.01
胆固醇	583	328	614	274	416	185	197	269	390	233	233
差向异构-粪醇	15.5	16.4	13.0	4.05	3.69	3.47	9.38	6.02	18.6	2.89	9.46
菜油甾醇	42.0	0.47	17.3	3.35	0.99	1.49	0.08	1.33	5.35	0.62	4.13
豆甾醇	404	108	55.9	8.72	5.93	46.7	114	1.47	76.8	14.7	52.0
β-谷甾醇	116	170	83.1	31.5	14.1	29.09	202	5.20	49.7	24.2	90.0
TAL	1 161	624	791	321	442	266	529	283	541	276	395

1) ND 表示未检出; TAL 表示溶解态甾醇浓度总量

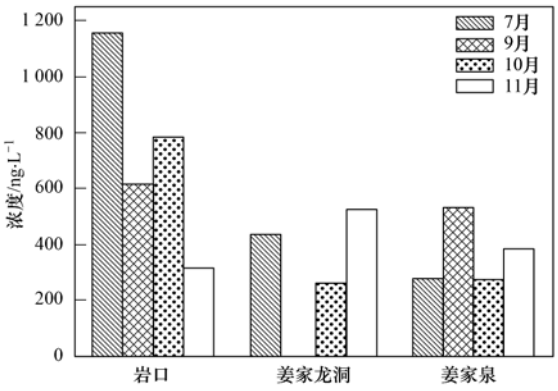

图 2 不同采样点中水体溶解态甾醇含量月变化

Fig. 2 Month variations of dissolved sterols contents in the water of underground river between July and November

初步认为,降雨条件可能是导致青木关地下河水体中溶解态甾醇含量随月份增加而减少的主要原因,生物活动也可能对地下河水体中甾醇的含量产生影响[25]. 另外,粪醇是非离子化、非极性的亲脂疏水的有机化合物,在水环境中容易和颗粒物质结合在一起[26,27],而且地下河环境介质(沉积物、碳酸盐岩、黏土矿物)对水中的有机质也具有吸附作用[28]. 青木关地下河水体中溶解态甾醇在地下河运移的过程中,一方面溶解态甾醇容易和水中的颗粒有机质结合在一起,另一方面地下河周围的沉积物、碳酸盐岩和黏土等矿物对水体中溶解态甾醇有一定的吸附. 二者可能是造成青木关地下河水体中溶解态甾醇含量随地下河运移距离的增加而减少的原因.

2.2 甾醇组成变化特征及来源分析

图 3 为地下河中溶解态甾醇的组成特征. 从中可知,地下河中溶解态甾醇主要以胆固醇为主,约占总含量的 37.30% ~ 94.85%,另外,豆甾醇和 β-谷甾醇也占有相当高的比重. 研究发现,自然界中胆固醇来源广泛,不仅来自人和动物的粪便[29],也来源于浮游生物(特别是浮游动物)和生活污水的排放[30]. 另外,大型植物和浮游植物也能产生胆固醇[31]. 青木关地下河水体中胆固醇含量所占比重最高的原因主要是当地的独特地理环境和居民的生产活动造成的. 青木关地下河流域主要以农业活动为主,周围居民主要以种植业和养殖业为主,且种植业主要集中于岩溶洼地之中,多施用农家肥. 居民生产生活污水不经过处理直接排入地表水塘中. 在降雨条件下,随岩溶裂隙、容缝和落水洞直接进入地下河. 从而造成了地下河水体中胆固醇所占比重最高. 而豆甾醇、β-谷甾醇和菜油甾醇广泛存在于植物的根、茎、叶和果实之中,是植物细胞膜的重要组成部分[32]. 主要代表陆地高等植物的贡

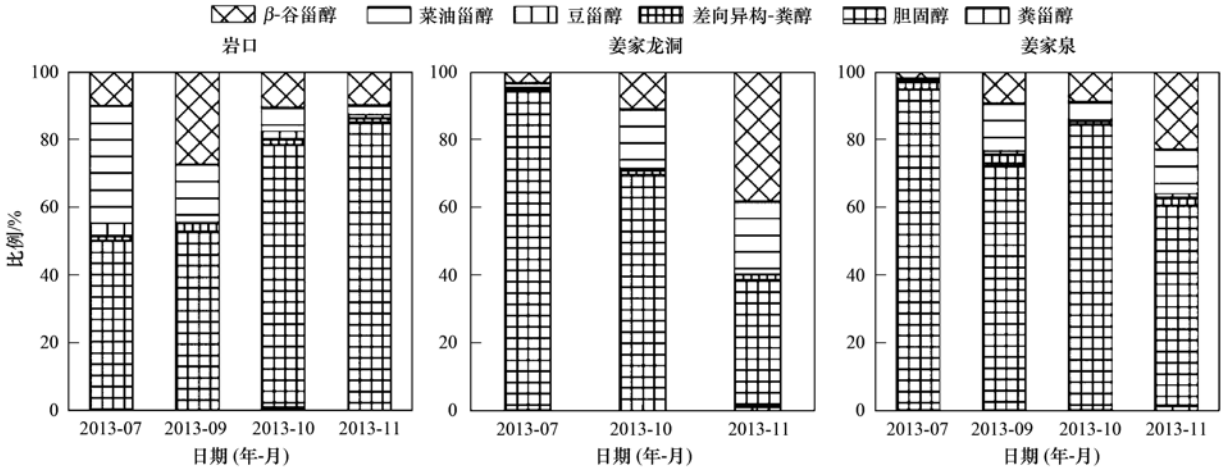

图 3　地下河水体溶解态甾醇组成变化

Fig. 3　Variation of dissolved sterol composition in the water of Qingmuguan underground river

献[33~35]，所以青木关地下河水中的豆甾醇、β-谷甾醇和菜油甾醇主要来源于上游和地下河上部表层高等植物的输入.

2013 年 7 ~ 11 月，岩口采样点水体中胆固醇占总甾醇含量的百分比由 50.24% 增加到 85.17%，呈增加的趋势；代表高等植物来源甾醇（豆甾醇 + β-谷甾醇 + 菜油甾醇）含量的百分比则由最初的 48.38% 下降到 13.57%. 而在地下河的出露处（姜家龙洞），胆固醇含量的百分比则由 7 月的 94.23% 下降到 11 月的 37.30%；相反（豆甾醇 + β-谷甾醇 + 菜油甾醇）含量的百分比则由 7 月的 47.51% 增加到 11 月的 59.75%. 除 9 月外，姜家泉采样点水体中胆固醇和代表高等植物来源甾醇（豆甾醇 + β-谷甾醇 + 菜油甾醇）的相对含量变化与姜家龙洞变化类似，姜家泉采样点中各月份胆固醇的相对含量较姜家龙洞采样点高. 总体来看，各月份甾醇含量及组成变化差异较大，但仍以胆固醇所占比重最高. Mudge 等[36]提出用豆甾醇和胆固醇的比值判断陆源有机质向水环境的输入特征，比值越大表明陆地有机质的贡献越大. 本文采用此比值探讨青木关地下河水体中有机质的来源及变化特征.

图 4 为青木关地下河水体中豆甾醇和胆固醇的比值分布. 从中可知，在 7 ~ 11 月期间，豆甾醇/胆固醇在岩口的变化范围为 0.03 ~ 0.69，平均值为 0.29；姜家龙洞的变化范围为 0.01 ~ 0.58，平均值为 0.28；姜家泉的变化范围为 0.01 ~ 0.22，平均值为 0.12. 总体来看，从地下河入口到地下河出口豆甾醇/胆固醇值呈减小的趋势. 即随着地下河运移距离的增加陆地有机质对水中有机质的贡献逐渐减

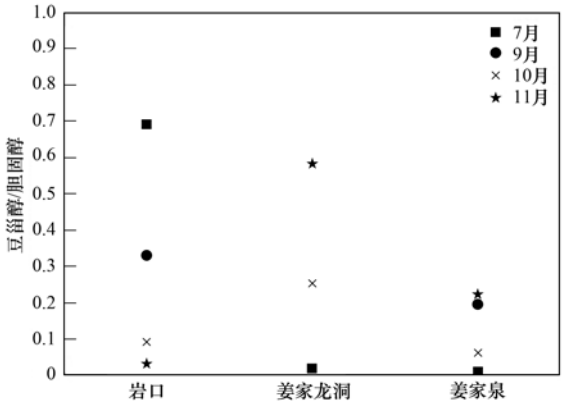

图 4　地下河水体中豆甾醇与胆固醇比值

Fig. 4　Ratios between stigmasterol and cholesterol in water samples of underground river

小. 而这种变化趋势与长江口、黄河口及邻近海域有机质的变化趋势类似[7,37,38]. 这说明，地下河上游是地下河水体中陆地有机质的主要来源. 根据图 4，豆甾醇/胆固醇值在青木关地下河中月变化较大. 7、9 月（姜家龙洞因数据缺失除外），豆甾醇/胆固醇值随着地下河运移距离的增加均呈降低的趋势，最大值和最小值分别出现在岩口、姜家泉采样点，即分别由最初的 0.69 和 0.33 下降到 0.69 和 0.20. 而在 10 月、11 月，豆甾醇与胆固醇的比值均在姜家龙洞采样点处有最大值，即 0.25、0.58，并在姜家泉采样点中有最小值，即 0.06、0.22. 姜家龙洞是一个天窗（karst window），具有冬暖夏凉的特点，受人类活动影响较大. 本研究在野外采样时发现，在 10 月和 11 月两次采样过程中发现姜家龙洞里面有大量的灰烬，通过燃烧残余物质发现主要是玉米等农作物秸秆. 另外，地下河水位下降，水流缓慢，且洞

穴上部有多处滴水点,滴水直接进入地下河中. 初步认为,姜家龙洞豆甾醇与胆固醇的比值异常高的主要原因是由于洞穴内燃烧农作物秸秆造成的. 有研究发现[39,40],豆甾醇、β-谷甾醇等植物甾醇可以被认为是植物燃烧的示踪物质,可以用来判断大气污染的来源. 当姜家龙洞内进行秸秆燃烧时,产生的豆甾醇、β-谷甾醇等植物甾醇会随着烟尘颗粒物质进行扩散,由于周围环境的限制,烟尘颗粒物质只能沉降到地下河中或附着于洞内的岩壁上,而岩壁上的滴水又会把颗粒物质带入到地下河中. 由于地下河水位较低且流量缓慢,水力条件较稳定,最终使得姜家龙洞采样点中豆甾醇、β-谷甾醇的含量增大.

2.3 地下河水体中甾醇污染水平

粪醇是人类粪便中的主要成分,可在一定程度上指示人和其他动物的粪便污染. 但当粪醇含量较低时,只测粪醇可能对未受污染的系统推断出受到污染的结论. 基于以上原因,有研究者利用粪醇和其他甾醇的比率标准来判断系统受污染的状况[41,42]. 如 Hatcher 等[43]提出用粪醇和总甾醇的比值来评价生活污水的影响,比值越高表明受生活污水的影响越大. Mudge 等[44]提出用粪(甾)醇与胆固醇的比值来评价水体污染的指标,当比值大于 0.2 时表明水体受到污染,大于 1 时表明受到严重污染. 另外,有研究者还利用粪醇 + 胆甾烷醇即 5β(5β + α)[45]、粪甾烷酮/(胆甾烷酮 + 粪甾烷酮)[46]等比值来判别水体受污染状况. 本研究基于数据特征,采用粪醇/胆固醇、粪醇/甾醇总量两种指标对青木关地下河水体污染状况进行评价. 图 5 为 7 ~ 11 月青木关地下河不同采样点水体污染指标的分布特征. 从中可知,所有采样点中粪醇/胆固醇的比值均小于 0.2,表明姜家龙洞地下河水体没有受到流域内生活污水的污染. 但在 7 ~ 11 月粪醇/胆固醇、粪醇/甾醇总量的比值均呈增大趋势,表明青木关地下河水体受生活污水的影响逐渐增大,这可能与当地农业活动和降雨条件有关. 本研究在 2013 年 9 月采样时,天气以阴雨天为主,且在采样时及前一周存在明显的降雨过程,降雨使得地下河水位上升,流量增大,稀释效应明显,使得 9 月粪醇与胆固醇的比值有所降低.

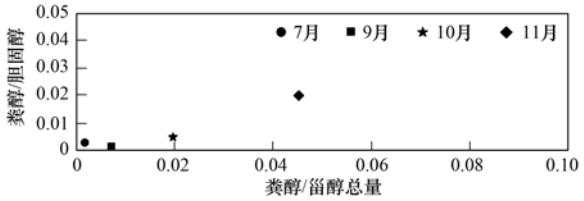

图 5 判断水体污染指标分布

Fig. 5 Distribution of selected ratios for identification of contamination

3 结论

(1)青木关地下河水体中溶解态甾醇的组成均以胆固醇为主,受季节及降雨条件的影响,在 7 ~ 11 月之间,水中溶解态甾醇的含量呈现出不同的变化特征,总体呈下降趋势; 受地下河周围介质的吸附作用和甾醇自身的吸附性特征的影响,溶解态甾醇的含量在流经地下河的过程中存在明显的下降.

(2)受岩溶地表的不均性和降水条件的影响,各月份地下河接受地表有机质的贡献量不同,但地下河入口仍是地表有机质输入的主要途径.

(3)在 7 ~ 11 月之间,青木关地下河水体没有受到生活污水的污染,但随着月份的增加,水体受地表生活污水的影响逐渐增大.

参考文献:

[1] 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.

[2] 周江敏, 陈华林, 代静玉. 溶解性有机质在土壤固碳中的意义[J]. 土壤通报, 2011, **42**(6): 1508-1514.

[3] Schwalm M, Zeitz J. Concentrations of dissolved organic carbon in peat soils as influenced by land use and site characteristics—A lysimeter study[J]. CATENA, 2015, **127**: 72-79.

[4] Ittekkot V, Laane R. Fate of riverine particulate organic matter [A]. In: Degens E T, Kempe S, Richey J E, (eds.). Biogeochemistry of Major World Rivers[M]. New York: John Wiley, 1991. 233-242.

[5] Lobbes J M, Fitznar H P, Kattner G. Biogeochemical characteristics of dissolved and particulate organic matter in Russian rivers entering the Arctic Ocean[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, **64**(17): 2973-2983.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] Schoon P L, Heilmann-Clausen C, Schultz B P, *et al*. Warming and environmental changes in the eastern North Sea Basin during the Palaeocene-Eocene Thermal Maximum as revealed by biomarker lipids[J]. Organic Geochemistry, 2015, **78**: 79-88.

[11] Volkman J K. A review of sterol markers for marine and terrigenous organic matter[J]. Organic Geochemistry, 1986, **9**(2): 83-99.

[12] Shah V G, Dunstan R H, Geary P M, *et al*. Bacterial source tracking from diverse land use catchments by sterol ratios[J]. Water Research, 2007, **41**(16): 3667-3674.

[13] Rontani J F, Charrière B, Sempéré R, *et al*. Degradation of sterols and terrigenous organic matter in waters of the Mackenzie Shelf, Canadian Arctic[J]. Organic Geochemistry, 2014, **75**: 61-73.

[14] 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.

[15] Lyons B P, Devlin M J, Hamid S A A, *et al*. Microbial water quality and sedimentary faecal sterols as markers of sewage contamination in Kuwait[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015. http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.07.043.

[16] Tyagi P, Edwards D R, Coyne M S. Fecal sterol and bile acid biomarkers: runoff concentrations in animal waste-amended pastures[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2009, **198**(1-4): 45-54.

[17] Carreira R S, Albergaria-Barbosa A C R, Arguelho M L P M, *et al*. Evidence of sewage input to inner shelf sediments in the NE coast of Brazil obtained by molecular markers distribution[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, **90**(1-2): 312-316.

[18] 袁道先. 碳循环与全球岩溶[J]. 第四纪研究, 1993, (1): 1-6.

[19] 刘从强. 生物地球化学过程与地表物质循环：西南喀斯特流域侵蚀与生源要素循环[M]. 北京：科学出版社, 2007.

[20] 杨平恒, 旷颖仑, 袁文昊, 等. 降雨条件下典型岩溶流域地下水中的物质运移[J]. 环境科学, 2009, **30**(11): 3249-3255.

[21] 何守阳, 朱立军, 董志芬, 等. 典型岩溶地下水系统地球化学敏感性研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(5): 1176-1182.

[22] 蒲俊兵, 袁道先, 扈志勇, 等. 高分辨率监测岩溶地下水 NO_3^- 的动态变化及对外界环境的响应[J]. 环境科学, 2011, **32**(3): 680-686.

[23] Birdwell J E, Engel A S. Variability in terrestrial and microbial contributions to dissolved organic matter fluorescence in the Edwards Aquifer, Central Texas[J]. Journal of Cave and Karst Studies, 2009, **71**(2): 144-156.

[24] 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.

[25] 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, **35**(10): 3722-3730.

[26] Liu S, Chen H, Xu X R, *et al*. Steroids in marine aquaculture farms surrounding Hailing Island, South China: Occurrence, bioconcentration, and human dietary exposure[J]. Science of the Total Environment, 2015, **502**: 400-407.

[27] 徐恒振, 詹叶敬, 马新东, 等. 粗胡敏素对粪固醇的吸附及其影响因素[J]. 海洋环境科学, 2012, **31**(5): 692-696.

[28] 孔祥胜, 祁士华, Oramah I T, 等. 广西大石围天坑群地下河水中多环芳烃的污染特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 1081-1087.

[29] Elhmmali M M, Roberts D J, Evershed R P. Bile acids as a new class of sewage pollution indicator[J]. Environmental Science & Technology, 1997, **31**(12): 3663-3668.

[30] 冀平, 赵元凤, 徐恒振, 等. 大连湾表层沉积物中甾醇的分布特征[J]. 海洋环境科学, 2013, **32**(4): 502-505.

[31] Peng X Z, Zhang G, Mai B X, *et al*. Tracing anthropogenic contamination in the Pearl River estuarine and marine environment of South China Sea using sterols and other organic molecular markers[J]. Marine Pollution Bulletin, 2005, **50**(8): 856-865.

[32] 程鹏. 北黄海细颗粒物质的沉积特征与输运过程[D]. 青岛：中国科学院海洋研究所, 2000. 155-160.

[33] 吕晓霞, 翟世奎. 长江口柱状沉积物中甾醇的组成特征及其地球化学意义[J]. 海洋学报, 2006, **28**(4): 96-101.

[34] Volkman J K, Revill A T, Bonham P I, *et al*. Sources of organic matter in sediments from the Ord River in tropical northern Australia[J]. Organic Geochemistry, 2007, **38**(7): 1039-1060.

[35] Ronkainen T, McClymont E L, Väliranta M, *et al*. The *n*-alkane and sterol composition of living fen plants as a potential tool for palaeoecological studies[J]. Organic Geochemistry, 2013, **59**: 1-9.

[36] Mudge S M, Norris C E. Lipid biomarkers in the Conwy estuary (North Wales, U.K.): a comparison between fatty alcohols and sterols[J]. Marine Chemistry, 1997, **57**(1-2): 61-84.

[37] 朱纯, 潘建明, 卢冰, 等. 长江口及邻近海域现代沉积物中正构烷烃分子组合特征及其对有机碳运移分布的指示[J]. 海洋学报, 2005, **27**(4): 59-67.

[38] 戚艳平, 吴莹, 张经, 等. 夏季长江口中颗粒态及溶解态正构烷烃组成和迁移[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(8): 1354-1361.

[39] 何凌燕, 胡敏, 黄晓锋, 等. 北京大气气溶胶 $PM_{2.5}$ 中的有机示踪化合物 [J]. 环境科学学报, 2005, **25**(1): 23-29.

[40] Huang W, Baumgartner J, Zhang Y X, *et al*. Source apportionment of air pollution exposures of rural Chinese women cooking with biomass fuels [J]. Atmospheric Environment, 2015, **104**: 79-87.

[41] Gilli G, Rovere R, Traversi D, *et al*. Faecal sterols determination in wastewater and surface water[J]. Journal of Chromatography B, 2006, **843**(1): 120-124.

[42] Alsalahi M A, Latif M T, Ali M M, *et al*. Sterols as biomarkers in the surface microlayer of the estuarine areas[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, **93**(1): 278-283.

[43] Hatcher P G, Keister L E, McGillivary P A. Steroids as sewage specific indicators in New York Bight sediments[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1977, **17**(5): 491-498.

[44] Mudge S M, Bebianno M J. Sewage contamination following an accidental spillage in the Ria Formosa, Portugal [J]. Marine Pollution Bulletin, 1997, **34**(3): 163-170.

[45] Adnan N H, Zakaria M P, Juahir H, *et al*. Faecal sterols as sewage markers in the Langat River, Malaysia: Integration of biomarker and multivariate statistical approaches[J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, **24**(9): 1600-1608.

[46] Froehner S, Martins R F, Errera M R. Assessment of fecal sterols in Barigui River sediments in Curitiba, Brazil [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, **157**(1-4): 591-600.

《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统的公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址:http://www.hjkx.ac.cn).该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能,欢迎广大作者、读者和审稿专家使用.目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行.作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面上给出的提示投稿即可.如果您在使用过程中有问题,请及时与我刊编辑部联系.

邮政地址:北京市海淀区双清路18号《环境科学》编辑部
邮　　编:100085
电　　话:010-62941102,010-62849343
传　　真:010-62849343
E-mail:hjkx@rcees.ac.cn
网　　址:www.hjkx.ac.cn

HUANJING KEXUE Vol. 36 No. 11
Environmental Science (monthly) Nov. 15, 2015

CONTENTS

Composition and Source Apportionments of Saccharides in Atmospheric Particulate Matter in Beijing ····· LIANG Lin-lin, Guenter Engling, DUAN Feng-kui, *et al.* (3935)
Comparing Cell Toxicity of *Schizosaccharomyces pombe* Exposure to Airborne $PM_{2.5}$ from Beijing and Inert Particle SiO_2 ····· LIU Meng-jiao, HUANG Yi, WEN Hang, *et al.* (3943)
Analysis on Regional Characteristics of Air Quality Index and Weather Situation in Beijing and Its Surrounding Cities During the APEC ··· GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, WANG Ning, *et al.* (3952)
Analysis About Spatial and Temporal Distribution of SO_2 and An Ambient SO_2 Pollution Process in Beijing During 2000-2014 ····· CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, *et al.* (3961)
Characteristics and Formation Mechanism of a Multi-Day Haze in the Winter of Shijiazhuang Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer(SPAMS) ····· ZHOU Jing-bo, REN Yi-bin, HONG Gang, *et al.* (3972)
Modeling Study of A Typical Summer Ozone Pollution Event over Yangtze River Delta ····· ZHANG Liang, ZHU Bin, GAO Jin-hui, *et al.* (3981)
Distribution of Regional Pollution and the Characteristics of Vertical Wind Field in the Pearl River Delta ····· LIU Jian, WU Dui, FAN Shao-jia (3989)
Distribution Characteristics of Urea and Constitution of Dissolved Nitrogen in the Bohai Sea and the Huanghai Sea in Spring ····· LI Zhi-lin, SHI Xiao-yong, ZHANG Chuang-song (3999)
Relationship Between Agricultural Land and Water Quality of Inflow River in Erhai Lake Basin ····· PANG Yan, XIANG Song, CHU Zhao-sheng, *et al.* (4005)
Input Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients Pollution in the Primary Pollution Source of the Daliao River ····· MA Ying-qun, ZHANG Lei, ZHAO Yan-min, *et al.* (4013)
Temporal and Spatial Distribution of Nutrients in Daning River Sediments and Their Correlations with Chlorophyll in the Three Gorges Reservoir Area ····· ZHANG Yong-sheng, LI Hai-ying, REN Jia-ying, *et al.* (4021)
Summer Greenhouse Gases Exchange Flux across Water-air Interface in Three Water Reservoirs Located in Different Geologic Setting in Guangxi, China ····· LI Jian-hong, PU Jun-bing, SUN Ping-an, *et al.* (4032)
Distribution of Redox Zone at Different Water Layers in the Presence of Periphyton and the Responsible Microorganisms ····· WANG Feng-wu, LIU Wei, WAN Juan-juan, *et al.* (4043)
Distribution Characteristics and Source of Fluoride in Groundwater in Lower Plain Area of North China Plain: A Case Study in Nanpi County ····· KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, ZHAO Huan, *et al.* (4051)
Distribution Characteristics of Fluoroquinolones Antibiotics in Surface Water and Groundwater from Typical Areas in A City ····· CUI Ya-feng, HE Jiang-tao, SU Si-hui, *et al.* (4060)
Distribution of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Sediments from Adjacent Waters of Rushan Bay ····· HE Hui, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, *et al.* (4068)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Sterols in Qingmuguan Underground River ····· LIANG Zuo-bing, SHEN Li-cheng, SUN Yu-chuan, *et al.* (4074)
Water-Sediment Partition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Underground River ····· LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, XIAO Shi-zhen (4081)
Variation Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Subterranean River During Rainfall Events ····· JIANG Ze-li, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, *et al.* (4088)
Distribution and Transportation Characteristics of Heavy Metals in Nanshan Laolongdong Subterranean River System and Its Capacity of Self-Purification in Chongqing ····· REN Kun, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, *et al.* (4095)
Distribution of Mercury in Plants at Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir ····· LIANG Li, WANG Yong-min, LI Xian-yuan, *et al.* (4103)
Development of Sediment Micro-Interface Under Physical and *Chironomus plumosus* Combination Disturbance ····· WANG Ren, LI Da-peng, HUANG Yong, *et al.* (4112)
Norfloxacin Solution Degradation Under Ultrasound, Potassium Persulfate Collaborative System ····· WEI Hong, SHI Jing-zhuan, LI Jia-lin, *et al.* (4121)
Degradation of Acid Orange 7 with Persulfate Activated by Silver Loaded Granular Activated Carbon ····· WANG Zhong-ming, HUANG Tian-yin, CHEN Jia-bin, *et al.* (4127)
Kinetics and Reactive Species Analysis of Dimetridazole Degradation by TiO_2 ····· CHEN Dong-mei, YU Ze-bin, SUN Lei, *et al.* (4135)
Performance and Mechanism of Ferric Tannate in the Removal of Inorganic Nitrogen from Wastewater ····· ZHANG Rui-na, LI Lin, LIU Jun-xin (4141)
Performance of an Intermittent Aeration Membrane Bioreactor for Removal of Veterinary Antibiotics from Piggery Wastewater ····· DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, *et al.* (4148)
Advanced Treatment of Incineration Leachate with O_3-BAC and Double O_3-BAC ····· DU An-jing, FAN Ju-hong, LIU Rui, *et al.* (4154)
Effects of Hydraulic Retention Time and Dissolved Oxygen on a CANON Reactor with Haydite as Carrier ····· WANG Hui-fang, FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, *et al.* (4161)
Inhibiting Form of Ammonium to AOB and Inhibiting Rule ····· CUI Jian-hong, LI Xiang, HUANG Yong, *et al.* (4168)
Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Denitrification for Treatment of Municipal Sewage ····· ZHANG Shi-ying, WU Peng, SONG Yin-ling, *et al.* (4174)
Rapid Start-up of Simultaneous Nitrification and Denitrification Coupled Phosphorus Removal Process and Its Performing Characteristics ····· LENG Lu, XIN Xin, LU Hang, *et al.* (4180)
Effect of HCO_3^- on Nitrogen Removal Efficiency in Partial Nitritation-ANAMMOX Process ····· LI Xiang, CHENG Zong-heng, HUANG Yong, *et al.* (4189)
Research on Cultivation and Stability of Nitritation Granular Sludge in Integrated ABR-CSTR Reactor ····· WU Kai-cheng, WU Peng, SHEN Yao-liang, *et al.* (4195)
Influence of the Application of Activated Persulfate on Municipal Sludge Conditioning ····· XU Xin, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, *et al.* (4202)
Influence of Temperature on the Anaerobic Packed Bed Reactor Performance and Methanogenic Community ····· XIE Hai-ying, WANG Xin, LI Mu-yuan, *et al.* (4208)
Research on the Screening Method of Soil Remediation Technology at Contaminated Sites and Its Application ····· BAI Li-ping, LUO Yun, LIU Li, *et al.* (4218)
Comprehensive Risk Assessment of Soil Heavy Metals Based on Monte Carlo Simulation and Case Study ····· YANG Yang, DAI Dan, CAI Yi-min, *et al.* (4225)
Heavy Metals Pollution in Topsoil from Dagang Industry Area and Its Ecological Risk Assessment ····· ZHANG Qian, CHEN Zong-juan, PENG Chang-sheng, *et al.* (4232)
Effects of Land Use Type on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Water-Stable Aggregates in Jinyun Mountain ····· LI Zeng-quan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4241)
Influence of Different Straws Returning with Landfill on Soil Microbial Community Structure Under Dry and Water Farming ····· LAN Mu-ling, GAO Ming (4252)
Carbon Source Utilization Characteristics of Soil Microbial Community for Apple Orchard with Interplanting Herbage ····· DU Yi-fei, FANG Kai-kai, WANG Zhi-kang, *et al.* (4260)
Effects of Different Kinds of Organic Materials on Soil Heavy Metal Phytoremediation Efficiency by *Sedum alfredii* Hance ····· YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, *et al.* (4268)
In-situ Study on Effects of Combined Amendment on Translocation Control of Pb and Cd in Soil-Vegetable System ····· ZHU Wei, LIU Li, WU Yan-ming, *et al.* (4277)
Effects of Rice Cultivar and Typical Soil Improvement Measures on the Uptake of Cd in Rice Grains ····· WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (4283)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of PAHs in Water and Fishes from Daqing Lakes ····· WANG Xiao-di, ZANG Shu-ying, ZHANG Yu-hong, *et al.* (4291)
Depth Profiles of Methane Oxidation Kinetics and the Related Methanotrophic Community in a Simulated Landfill Cover ····· XING Zhi-lin, ZHAO Tian-tao, GAO Yan-hui, *et al.* (4302)
Enhanced Performance of Rolled Membrane Electrode Assembly by Adding Cation Exchange Resin to Anode in Microbial Fuel Cells ····· MEI Zhuo, ZHANG Zhe, WANG Xin (4311)
Development of a Monoclonal Antibody-Based Sensor for Environmental Pyrene and Benzo(a)pyrene Detection ····· LI Xin, QIAO Yan, ZHONG Guo-zhen (4319)

《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 11 月 15 日　第 36 卷　第 11 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 36　No. 11　Nov. 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