

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 细菌群落特征	王步英, 郎继东, 张丽娜, 方剑火, 曹晨, 郝吉明, 朱昕, 田埂, 蒋靖坤 (2727)
北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析	熊秋林, 赵文吉, 郭道宇, 陈凡涛, 束同同, 郑晓霞, 赵文慧 (2735)
北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征	程婧晨, 崔彤, 何万清, 聂磊, 王军玲, 潘涛 (2743)
基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2750)
夏季珠江三角洲地区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响	杨毅红, 瞿群, 刘随心, 李雄, 钟佩仪, 陶俊 (2758)
隧道工人的 PM ₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价	向华丽, 杨俊, 仇珍珍, 雷万雄, 曾婷婷, 兰志财 (2768)
基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征	张英杰, 孔少飞, 汤莉莉, 赵天良, 韩永翔, 于红霞 (2775)
柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源	朱建佳, 陈辉, 巩国丽 (2784)
长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义	李栋, 姚鹏, 赵彬, 王金鹏, 潘慧慧 (2791)
“引江济太”过程中长江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究	潘晓雪, 马迎群, 秦延文, 邹华 (2800)
重庆市典型城镇区地表径流污染特征	王龙涛, 段丙政, 赵建伟, 华玉妹, 朱端卫 (2809)
调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响	张婷婷, 姚鹏, 王金鹏, 潘慧慧, 高立蒙, 赵彬, 李栋 (2817)
青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究	严芳萍, 康世昌, 陈鹏飞, 柏建坤, 李洋, 胡召富, 李潮流 (2827)
岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素	李建鸿, 蒲俊兵, 袁道先, 刘文, 肖琼, 于爽, 张陶, 莫雪, 孙平安, 潘谋成 (2833)
室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响	赵瑞一, 吕现福, 段逸凡 (2843)
新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价	冯精兰, 余浩, 刘书卉, 刘梦琳, 孙剑辉 (2849)
青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 廖昱, 谢正兰, 张媚 (2857)
三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征	白薇扬, 张成, 赵锋, 唐振亚, 王定勇 (2863)
燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响	梁鹏, 王远娜, 尤琼智, 高雪飞, 何杉杉 (2870)
运用硫同位素、氮氧同位素示踪厘清湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源	李瑞, 肖琼, 刘文, 郭芳, 潘谋成, 于爽 (2877)
藻华聚集的生态效应: 对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响	刘国锋, 何俊, 杨轶中, 韩士群 (2887)
DOM 对被动采样技术的影响与应用	于尚云, 周岩梅 (2895)
蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析	王旭东, 周森, 孟晓荣, 王磊, 黄丹曦, 夏四清 (2900)
水环境中碳纳米管对沙丁胺醇降解的影响	汪祺, 韩佳芮, 魏博凡, 周磊, 张亚, 杨曦 (2906)
β -In ₂ S ₃ 的制备及其太阳光下降解土霉素	艾翠玲, 周丹丹, 张嵘嵘, 邵享文, 雷英杰 (2911)
排水管道沉淀物氮释放特性的研究	陈红, 卓琼芳, 许振成, 王劲松, 魏清伟 (2918)
生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析	付昆明, 王会芳, 左早荣, 仇付国 (2926)
ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 刘捷, 沈耀良 (2934)
两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究	高景峰, 李婷, 张树军, 樊晓燕, 潘凯玲, 马谦, 袁亚林 (2939)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究	巫恺澄, 吴鹏, 徐乐中, 李月寒, 沈耀良 (2947)
珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价	窦磊, 杨国义 (2954)
广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价	吴洋, 杨军, 周小勇, 雷梅, 高定, 乔鹏伟, 杜国栋 (2964)
开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险	段海静, 蔡晓强, 阮心玲, 全致琦, 马建华 (2972)
我国西南地区氮饱和马尾松林土壤和植物 ¹⁵ N 自然丰度对长期氮施加的响应	刘文静, 康荣华, 张婷, 朱婧, 段雷 (2981)
黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征	李婷, 邓强, 袁志友, 焦峰 (2988)
开顶式气室原位研究水稻根系对大气汞浓度升高的响应	陈剑, 王章玮, 张晓山, 秦普丰, 陆海军 (2997)
接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响	郑文君, 王明元 (3004)
水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响	赵志瑞, 崔丙健, 侯彦林, 刘上千, 王岩 (3011)
固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中苈解吸的影响	全冬丽, 双生晴, 李晓军, 邓万荣, 赵然然, 贾春云, 巩宗强 (3018)
零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究	陈忠林, 李金春子, 王斌远, 樊磊涛, 沈吉敏 (3026)
Fe ³⁺ 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究	杨蓉, 李鸿博, 周永莉, 陈静, 王琳玲, 陆晓华 (3032)
原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农作安全性	焦海华, 潘建刚, 徐圣君, 白志辉, 王栋, 黄占斌 (3038)
镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力	张杏丽, 邹威, 周启星 (3045)
不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响	刘秋辛, 阎秀兰, 廖晓勇, 林龙勇, 杨静 (3056)
磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化	汤帆, 胡红青, 苏小娟, 付庆灵, 朱俊 (3062)
洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性	邵婷, 姚春霞, 沈源源, 张玉洁, 苏楠楠, 周守标 (3068)
3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价	杨扬, 李雅洁, 崔益斌, 李梅 (3074)
石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应	孟瑶, 付玉彬, 梁生康, 陈伟, 柳昭慧 (3080)
Cu-Mn-Ce/ 分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究	虎雪姣, 卜龙利, 梁欣欣, 孟海龙 (3086)
热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响	胡玉瑛, 吴静, 王士峰, 曹知平, 王凯军, 左剑恶 (3094)
磷石膏对麦田 CO ₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析	李季, 吴洪生, 高志球, 尚小厦, 郑培慧, 印进, Kakpa Didier, 任迁琪, Ogou Katchele Faustin, 陈素云, 徐亚, 姚童言, 李炜, 钱景珊, 马世杰 (3099)
全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析	郝薛文, 李力, 王杰, 曹燕, 刘建国 (3106)
《环境科学》征订启事 (2757)	
《环境科学》征稿简则 (2767)	
信息 (2734, 2783, 3073, 3079)	

室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响

赵瑞一, 吕现福, 段逸凡

(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)

摘要: 为分析岩溶作用及岩溶碳循环的影响因素, 设计了6个不同的处理以进行模拟实验. 结果表明 H_2SO_4 含量、水动力条件以及土壤厚度对岩溶作用及岩溶碳循环具有重要影响. 具有相同土壤厚度的3个处理, 其 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度与 SO_4^{2-} 浓度均表现为: B20-2 > B20-1 > B20-3, B50-2 > B50-1 > B50-3, 说明 H_2SO_4 的输入导致了岩溶作用增强, 并且下渗水水量增加对水化学性质产生了明显的稀释作用. 在煤铁残渣输入量及水动力条件相同而土壤厚度不同的条件下, $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度与 SO_4^{2-} 浓度表现为: B50-1 > B20-1, B50-2 > B20-2, B50-3 > B20-3. 这说明较厚的土壤更有利于岩溶作用的进行. 另外, 由于实验中 H_2CO_3 对碳酸盐岩的溶解量贡献较小, 岩溶作用对 CO_2 的净消耗量主要取决于 H_2SO_4 含量. 但 B50-2 的 SO_4^{2-} 浓度最大, CO_2 的净消耗量却最高. 这可能是由于煤铁残渣向土壤中输入了有机质或其它养分促进了土壤深部 CO_2 的形成, 并且 B50-2 上部较厚的土壤也导致了 H_2CO_3 对碳酸盐岩溶解量的贡献增加, 因此 B50-2 的 CO_2 净消耗量也比较高.

关键词: 模拟实验; 岩溶作用; 碳循环; 煤铁残渣; 土壤; 水动力条件

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-2843-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.08.015

Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory

ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan

(Key Laboratory of Eco-Environments in Three Gorges Reservoir, Ministry of Education, School of Geography Sciences, Southwest University Chongqing 400715, China)

Abstract: To analyze the influencing factors of karstification and karst carbon cycle, a simulation experiment was carried out and 6 soil columns were designed. The results showed that the content of H_2SO_4 , hydrodynamic condition and thickness of the soil had important influence on karstification and karst carbon cycle. For the soil columns which were covered by the same thickness of soil, the concentrations of $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ and SO_4^{2-} followed the order of B20-2 > B20-1 > B20-3, B50-2 > B50-1 > B50-3. This meant that input of H_2SO_4 enhanced the karstification and increasing infiltration water had significant dilution effect on the chemical properties. For the soil columns with different thickness of soil but with the same slag pile and hydrodynamic conditions, the concentrations of $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ and SO_4^{2-} followed the order of B50-1 > B20-1, B50-2 > B20-2, B50-3 > B20-3. It was demonstrated that more carbonate rock was dissolved under the thick soil columns. In addition, the net consumption of CO_2 mainly depended on the content of H_2SO_4 in this experiment due to slight contribution of H_2CO_3 to carbonate rock dissolution. More content of H_2SO_4 brought about less net consumption of CO_2 , but B50-2 was an exception. Organic matter and other nutrients might be input into deep soil with the slag pile, and they promoted the production of soil CO_2 . Therefore, more CO_2 was consumed due to the increased contribution of H_2CO_3 to karstification.

Key words: simulation experiment; karstification; carbon cycle; slag pile; soil; hydrodynamic condition

岩溶作用对大气 CO_2 浓度具有重要的调节作用^[1-3], 其对全球碳循环带来的影响逐渐受到人们的重视, 并且对岩溶作用以及岩溶碳循环影响因素的研究也更加深入. 如土壤 CO_2 浓度^[4,5]、气候条件^[6]、土壤性质^[7,8]、土地利用类型^[9-12] 以及 HNO_3 与 H_2SO_4 ^[13,14] 等因素对岩溶作用以及岩溶碳循环的影响都有记载. 各个影响因素之间往往相互联系, 共同影响岩溶作用以及岩溶碳循环. 而且在不同的条件下, 同一因素所产生的影响也会有所差异. 例如土壤温湿度增加会刺激土壤微生物活性, 从而提高土壤 CO_2 浓度并增强土下溶蚀速率. 但曹建华等^[15] 发现, 在土壤湿度较低时, 即使温度保持

较高水平, 微生物活性也会减弱, 导致土壤呼吸排放的 CO_2 速率处于较低水平, 进而限制了其参与岩溶作用的程度. 而章程等^[16] 则认为在温度较低的情况下, 下渗水不能得到充足的 CO_2 补充, 岩溶作用强度同样受到限制. 因此在自然条件下很难针对某一特定因素进行分析. 而在实验室特定的环境下进行模拟实验, 则可以排除其它因素的干扰^[17-19]. 本研究通过室内模拟实验对不同条件下的岩溶作用及

收稿日期: 2015-02-02; 修订日期: 2015-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41072192, 41103068); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2015D022)

作者简介: 赵瑞一(1987~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为岩溶环境与地质生态, E-mail: swu506@163.com

碳循环进行对比,以期更加深入了解岩溶作用及岩溶碳循环的影响因素.

1 材料与方法

1.1 样品来源

用于模拟实验的土壤样品采集地点位于重庆市南川区柏树湾泉域. 该泉域上覆植被发育良好,主要为马尾松林,受亚热带气候和出露地层的控制,其

上覆土壤为黄壤,自下而上具有基岩-溶滤层-黄色黏土层,其土壤质地见表 1. 随机选取 5 个采样点,根据不同深度采集并混合土样. 土样带回实验室并剔除土壤中的植物残体及岩石颗粒. 基岩样品为三叠纪嘉陵江组白云质灰岩(T_{1j}),破碎成直径约为 2 cm 左右的颗粒状,用超纯水洗净风干后待用. 煤铁残渣来自于后沟泉域,此处曾为一个煤铁残渣堆放地.

表 1 土壤质地^[20]

Table 1 Soil texture

发生层	土壤不同粒径的百分比/%					
	1 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.05 mm	0.05 ~ 0.01 mm	0.01 ~ 0.005 mm	0.005 ~ 0.001 mm	< 0.001 mm
A	2.76	7.24	26	20	26	18
AB	0.74	10.26	34	15	26	14
B	0.3	5.7	26	14	24	30

1.2 模拟实验装置及实验方法

实验样品的配置为 6 个处理,编号分别为 B20-1、B20-2、B20-3、B50-1、B50-2 和 B50-3. 将土壤样品分别放入底部装有 10 cm 厚基岩颗粒的 PVC 管中(直径为 75 mm),其中 B20-1、B20-2 和 B20-3 为一组,上覆 20 cm 厚的土壤,土壤样品取自于野外土壤剖面 0 ~ 20 cm 处; B50-1、B50-2 和 B50-3 为另一组,上覆 50 cm 厚的土壤,土壤样品取自于野外土壤剖面 0 ~ 50 cm 处. B20-2、B20-3、B50-2 和 B50-3 在土壤上部覆盖 3 cm 厚的煤铁残渣. 每个 PVC 管底部用盖子密封,并开有一个 1 cm 的出水口,用于收集下渗水. 在实验开始后的第 1、2、3、4、5、12、43 及 74 d 向 PVC 管中注入超纯水并收集下渗水进行测试,其中 B20-1、B20-2、B50-1 和 B50-2 每天注入 5 次超纯水,每次 50 mL; B20-3 和 B50-3 每天注入 5 次超纯水,每次 100 mL.

1.3 样品测试

用于测试阳离子浓度的水样加入 1:1 优级纯硝酸酸化至 pH < 2,以防止阳离子附着在瓶壁上,其测试工作在西南大学地理科学学院地球化学与同位素实验室完成,使用仪器为美国 Perkin-Elmer 公司生产的 Optima-2100DV 电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-OES),测量相对误差 < 5%. 阴离子浓度测试在西南大学地理科学学院水化学分析室和有机污染分析室进行,使用的仪器为日本岛津公司生产的 UV2450 紫外分光光度计,检测精度优于 0.01 mg·L⁻¹. HCO_3^- 浓度使用德国产 Merck 碱度计测定,精度为 0.1 mmol·L⁻¹.

2 结果与讨论

2.1 下渗水水化学性质及变化特征

6 个处理的阳离子均以 Ca^{2+} 为主,其浓度为 0.79 ~ 2.53 mmol·L⁻¹,其次为 Mg^{2+} ,其浓度为 0.12 ~ 0.72 mmol·L⁻¹; 阴离子以 HCO_3^- 为主,浓度为 0.54 ~ 3.7 mmol·L⁻¹,其次为 SO_4^{2-} ,浓度为 0.21 ~ 1.26 mmol·L⁻¹; K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 和 PO_4^{3-} 等浓度比较低. 所有水样的 $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ 浓度在前期均呈现出下降趋势,随后又逐渐上升[图 1(a)、图 1(b)]. 在土壤厚度为 50cm 的处理中, $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ 浓度为 B50-2 > B50-1 > B50-3,并且 3 个处理之间差异明显,其差值在 0.5 mmol·L⁻¹ 左右;而在土壤厚度为 20 cm 的处理中,虽然大部分下渗水中 $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ 浓度也具有相同的现象,即 B20-2 > B20-1 > B20-3,但它们之间的差异没有前者明显.

土壤厚度为 50 cm 的 3 个处理,除第 43 d B50-3 的 HCO_3^- 浓度略大于 B50-1 外,其它样品 HCO_3^- 浓度都表现出 B50-2 > B50-1 > B50-3,但土壤厚度为 20 cm 的 3 个处理之间的关系并不明显且差异较小[图 1(c)、图 1(d)]. 同 $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ 浓度一样, SO_4^{2-} 浓度的变化趋势也表现为先下降后升高,这可能是由于后期注水间隔时间增加,硫化物氧化时间也随之增加造成的. 并且 B20-2 > B20-1 > B20-3[图 1(e)], B50-2 > B50-1 > B50-3[图 1(f)], B50-1、B50-2、B50-3 之间的差异比 B20-1、B20-2、B20-3 之间的差异明显.

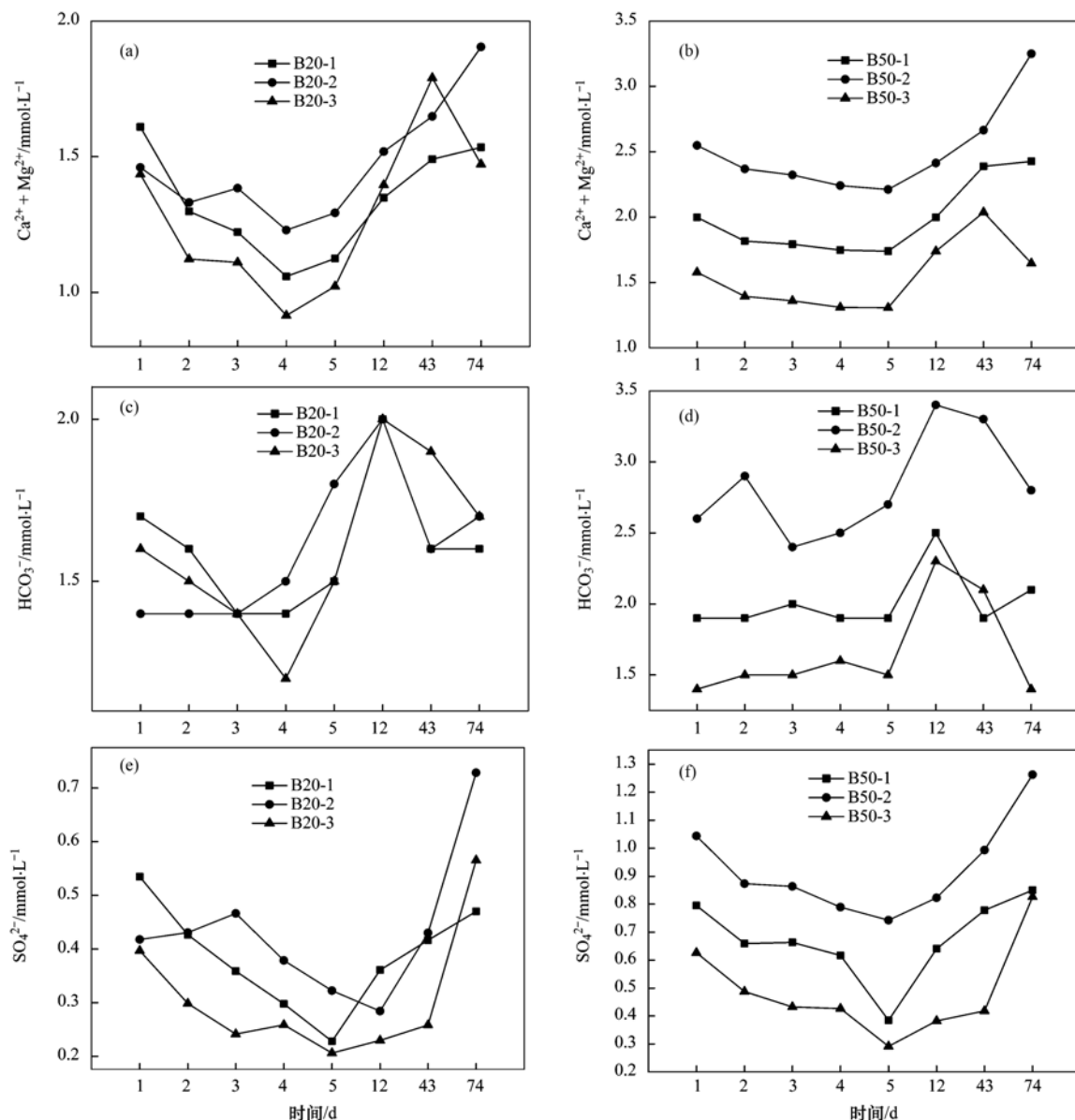


图1 水化学性质变化

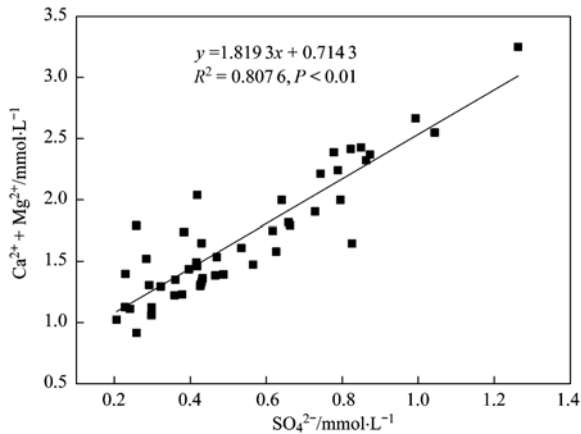
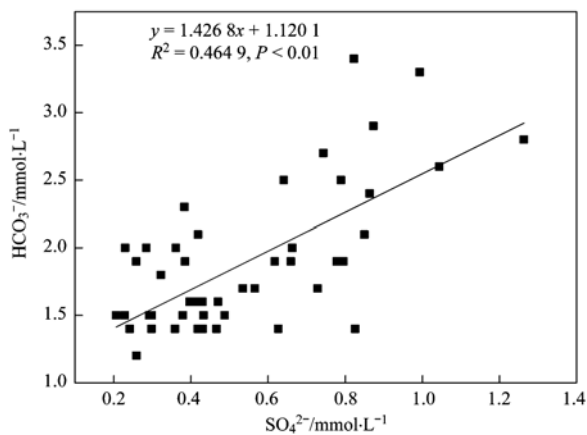
Fig. 1 Change of hydrochemistry

2.2 岩溶作用及碳循环的差异

H_2SO_4 等强酸通过土壤水下渗溶蚀碳酸盐岩, 其对岩溶碳汇的干扰已受到人们的重视. 我国西南地区酸雨严重且以硫酸型酸雨为主^[21~23], 土壤中富集的含硫化合物以及煤铁残渣输入的硫化物氧化是本次模拟实验中硫酸形成的两个重要来源. H_2SO_4 参与到岩溶系统中会增强岩溶作用, 导致 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度以及 HCO_3^- 浓度增加. 图2和图3显示 SO_4^{2-} 浓度与 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度以及 HCO_3^- 浓度之间呈现出了明显的正相关性, 这与刘丛强等^[24] 研究结果一致. 但柏树湾泉、兰花沟泉以及后沟泉的野外监测数据却显示, 由于 HNO_3 与 H_2SO_4 释放的 H^+

会与 HCO_3^- 结合, 最终导致水中 HCO_3^- 以 CO_2 的形式脱离水体, 因此 $\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$ 浓度与 HCO_3^- 浓度呈现明显的负相关性^[25]. 室内模拟实验与野外监测结果之间出现的差异很可能是土壤以及基岩条件发生改变造成的. 模拟实验中所采用的土壤经过扰动后, 其土壤孔隙度等性质发生较大变化, 而模拟实验中的基岩与自然状态下的基岩差异更加明显. 这些因素可能导致土壤水下渗速率以及水岩接触时间发生较大变化, 因此其水化学性质也具有明显的差异.

由于 H_2SO_4 溶蚀碳酸盐岩, 水中的 HCO_3^- 全部来自于碳酸盐岩, 从而导致 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度与

图2 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 SO_4^{2-} 相关性Fig. 2 Relationship between $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ and $\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 图3 HCO_3^- 与 SO_4^{2-} 相关性Fig. 3 Relationship between HCO_3^- and SO_4^{2-}

HCO_3^- 浓度的摩尔比为 1:1. 而 CO_2 溶于水后形成的 H_2CO_3 溶蚀碳酸盐岩,其产生的 HCO_3^- 一半来自碳酸盐岩,另一半来自大气或土壤中的 CO_2 ,从而导致水中 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度与 HCO_3^- 浓度的摩尔比为 0.5:1^[24]. 因此运用水化学分析法可以区分出 H_2CO_3 与 H_2SO_4 各自对碳酸盐岩溶蚀的贡献量,并计算出岩溶作用对 CO_2 的净消耗量. Perrin 等^[26]用 ΔHCO_3^- 来表示除 H_2CO_3 外其它酸溶蚀碳酸盐岩产生 HCO_3^- 的量[公式(1)],其中 HCO_3^- 理论值为 HCO_3^- 全部来自于 H_2CO_3 溶蚀碳酸盐岩时 HCO_3^- 的浓度,其值为 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度的 2 倍, HCO_3^- 测量值为野外滴定的 HCO_3^- 浓度,所以公式(1)也可换算成公式(2). HCO_3^- 的总量减去 ΔHCO_3^- 则为 H_2CO_3 溶蚀碳酸盐岩产生的 HCO_3^- 量. 由于 H_2CO_3 溶蚀碳酸盐岩生成的 HCO_3^- 一半来自于碳酸盐岩,而另一半来自于 CO_2 ,因此利用公式(3)可计算出岩溶作用

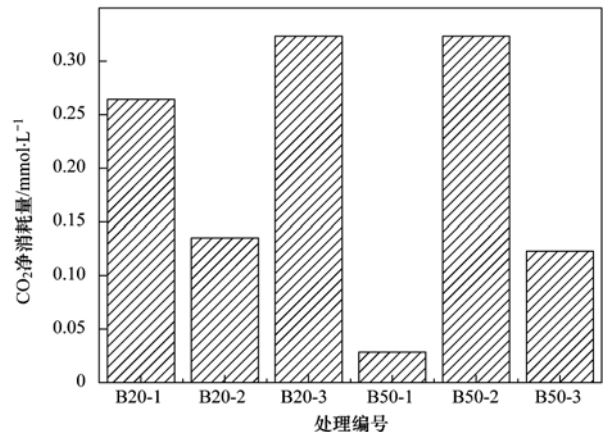
对 CO_2 的净消耗量.

$$\Delta\text{HCO}_3^- = \text{HCO}_3^-_{\text{理论值}} - \text{HCO}_3^-_{\text{测量值}} \quad (1)$$

$$\Delta\text{HCO}_3^- = 2(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - \text{HCO}_3^-_{\text{测量值}} \quad (2)$$

$$\text{CO}_2 \text{ 净消耗量} = \frac{1}{2}(\text{HCO}_3^-_{\text{测量值}} - \Delta\text{HCO}_3^-) \quad (3)$$

B20-1 的 CO_2 的净消耗量为 0.07 ~ 0.65 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 0.26 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; B20-2 为 -0.2 ~ 0.51 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 0.16 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; B20-3 为 0.11 ~ 0.6 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 0.32 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; B50-1 为 -0.49 ~ 0.48 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 0.03 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; B50-2 为 -0.15 ~ 0.99 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 0.32 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; B50-3 为 -0.25 ~ 0.56 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 0.12 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (图4). 土壤厚度为 20 cm 的 3 个处理,其 CO_2 净消耗量表现为 B20-3 > B20-1 > B20-2. 然而土壤厚度为 50 cm 的 3 个处理,其 CO_2 净消耗量却表现为 B50-2 > B50-3 > B50-1, B50-2 的 SO_4^{2-} 浓度最大, CO_2 净消耗量反而最高. 不同处理方法下,水化学性质以及 CO_2 净消耗量的变化特征都表现出了差异性,因此需分别讨论煤铁残渣、土壤性质以及水动力条件对岩溶作用及岩溶碳循环的影响.

图4 不同处理下 CO_2 净消耗量平均值Fig. 4 Average values of net CO_2 consumption under different soil columns

2.3 岩溶作用及碳循环影响因素

2.3.1 煤铁残渣与水动力条件

Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 主要来自于碳酸盐岩的溶解,因此 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度可以反映出岩溶作用的强弱. 土壤厚度为 20 cm 的 3 个处理中, B20-2 的 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度最高, B20-3 最低; 同样, 土壤厚度为 50 cm 的处理中, B50-2 的 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度也最大, B50-3 最低. B20-2 和 B50-2 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度最高与土壤上

部的煤铁残渣有关. 煤铁残渣中的硫化物氧化后增加了土壤中 H_2SO_4 的含量, H_2SO_4 随下渗水向下运移并参与到岩溶作用中, 从而导致 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度增加. 并且 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度与 SO_4^{2-} 浓度呈现出了明显的正相关性, 这也说明煤铁残渣输入后形成的 H_2SO_4 增强了岩溶作用. 然而, B20-3 和 B50-3 土壤上部也覆盖了相同厚度的煤铁残渣, 但 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度与 SO_4^{2-} 浓度却最低. 这是由于 B20-3 和 B50-3 每次的注水量为其它 4 个处理的 2 倍, 水量增加导致水化学性质受到了稀释作用的影响^[27]. 在实验前期, 由于每天都要注水, $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度与 SO_4^{2-} 浓度呈现出了逐渐下降的趋势, 之后随着注水间隔时间的增加, $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度与 SO_4^{2-} 浓度呈现了增加的趋势, 这也体现了水动力条件变化对岩溶作用产生了重要影响.

2.3.2 土壤厚度

对比不同土壤厚度时下渗水的水化学性质, $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度均表现出 $\text{B50-1} > \text{B20-1}$ 、 $\text{B50-2} > \text{B20-2}$ 、 $\text{B50-3} > \text{B20-3}$, 说明在加入煤铁残渣和水动力条件相同的情况下, 50 cm 土壤下的岩溶作用要强于 20 cm 的土壤. 由于模拟实验是在室内进行, 并且模拟降水条件所采用的为超纯水, 通过大气输入的硫化物可以忽略不计, H_2SO_4 主要来源于土壤之前富集的硫化物以及土壤上部的煤铁残渣. 相对于 B20-1、B20-2 和 B20-3, B50-1、B50-2 和 B50-3 具有更大的土壤厚度, 同时也提供了更多的 H_2SO_4 对碳酸盐岩进行溶蚀, 因此 B50-1、B50-2 和 B50-3 的 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度与 SO_4^{2-} 浓度都要分别大于 B20-1、B20-2 和 B20-3.

在土壤厚度较大的情况下, 土壤中有机质含量高, 其矿化产生的 CO_2 量也相对较多. 并且由于土壤深部孔隙度减小, 土壤 CO_2 的扩散受到限制^[28], 因此深部土壤 CO_2 很难通过地-气界面返回到大气中, 反而更容易溶于下渗水而向下运移^[29,30]. 但图 4 显示, 除 B50-2 的 CO_2 净消耗量大于 B20-2 外, B50-1 和 B50-3 的 CO_2 净消耗量则分别小于 B20-1 和 B20-3. 根据公式(3)可知, 岩溶作用对 CO_2 的净消耗量并不仅仅取决于土壤 CO_2 浓度. 由于 H_2SO_4 溶蚀碳酸盐岩是大气 CO_2 一个重要的碳源, 岩溶动力系统中 H_2SO_4 含量的增加会减少岩溶作用对 CO_2 的净消耗量. Liu 等^[31]对重庆涪陵区 6 条地下河水化学性质进行分析时也发现, 随着岩溶系统中 H_2SO_4 与 HNO_3 的输入量不断增加, 岩溶作用消耗

的 CO_2 量呈现出不断减少的趋势. B50-1 和 B50-3 的 CO_2 的净消耗量小于 B20-1 和 B20-3, 并不是由于土壤 CO_2 浓度引起的, 而是因为 B50-1 和 B50-3 具有较高的 H_2SO_4 含量.

然而 B50-2 的 CO_2 净消耗量不仅大于 B20-2, 而且也大于 B50-1 和 B50-3, 这可能与煤铁残渣的输入有关. 尽管实验中所用的煤铁残渣已将植物残体去除, 但是煤铁残渣取自于农田表层, 农业活动中施加的肥料或者其它有机质可能混杂在煤铁残渣中. 这些元素通过下渗水进入到土壤深部后会促进土壤深部有机质的分解^[32], 土壤深部 CO_2 浓度的增加可能是导致 B50-2 具有较高 CO_2 净消耗量的原因. 虽然 B50-3 土壤上部覆盖了相同厚度的煤铁残渣, 但水量增加使土壤水快速下渗, 水岩接触时间减少, 从而导致 H_2CO_3 对碳酸盐岩的溶蚀量小于 B50-2. 对于 B20-1、B20-2 和 B20-3 而言, CO_2 净消耗量可能主要受控于 H_2SO_4 浓度而不是土壤 CO_2 浓度. 因为 B20-1、B20-2 和 B20-3 土壤厚度较薄, 土壤中有机质含量较低. 另外, 土壤取自于上部 20cm 处, 土壤空隙较大使土壤 CO_2 更容易以土壤呼吸的形式返回到大气中. 因此, B20-1、B20-2 和 B20-3 的 SO_4^{2-} 浓度表现为 $\text{B20-2} > \text{B20-1} > \text{B20-3}$, 而 CO_2 净消耗量却表现为 $\text{B20-3} > \text{B20-1} > \text{B20-2}$.

3 结论

(1) 煤铁残渣使更多的 H_2SO_4 进入到岩溶系统中, H_2SO_4 不仅增强了岩溶作用的强度而且也减少了岩溶作用对 CO_2 的净消耗量, 从而对岩溶碳循环起重要影响; 水量增加对下渗水水化学性质产生了明显的稀释作用, 从而导致 B20-3 与 B50-3 的 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度及 SO_4^{2-} 浓度均低于本组中的其它处理; 在缺少上覆植被的情况下, 由于 H_2CO_3 对碳酸盐岩的贡献量较低, CO_2 净消耗量主要受控于 H_2SO_4 含量; 与土壤厚度为 20 cm 的 3 个处理相比, 土壤厚度为 50cm 的 3 个处理 H_2SO_4 含量较高, 土下岩溶作用虽然较强, 但岩溶作用对 CO_2 的净消耗量却并不高.

(2) 尽管室内模拟实验中的结果可能会与野外监测数据有所差异, 但其为单独分析某一特定影响因素提供了条件. 本研究只对 H_2SO_4 含量、水动力条件以及土壤厚度这 3 个因素进行了分析, 今后还应对土壤碳通量、土壤性质、有机质分解等因素进行监测和模拟, 从而更加深入了解岩溶作用及岩溶碳循环的影响因子.

参考文献:

- [1] Yuan D X. Carbon cycle and global karst [J]. Quaternary Sciences, 1993, **1**: 1-6.
- [2] Yuan D X. Sensitivity of karst process to environmental change along the PEP II transect [J]. Quaternary International, 1997, **37**: 105-113.
- [3] Cao J H, Yuan D X, Groves C, *et al.* Carbon fluxes and sinks: the consumption of atmospheric and soil CO₂ by carbonate rock dissolution [J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 2012, **86**(4): 963-972.
- [4] 章程. 不同土地利用下的岩溶作用强度及其碳汇效应 [J]. 科学通报, 2011, **56**(26): 2174-2180.
- [5] Xu S Y, He S Y. The CO₂ regime in soil profile and its drive to dissolution in carbonate rock area [J]. Carsologica Sinica, 1996, **15**(1-2): 50-57.
- [6] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Carbon cycle in the epikarst systems and its ecological effects in South China [J]. Environmental Earth Sciences, 2013, **68**(1): 151-158.
- [7] 蓝家程, 傅瓦利, 彭景涛, 等. 不同土地利用方式下岩溶溶蚀速率及影响因素 [J]. 生态学报, 2013, **33**(10): 3205-3212.
- [8] 李阳兵, 王世杰, 周德全. 茂兰岩溶森林的生态服务研究 [J]. 地球与环境, 2005, **33**(2): 39-44.
- [9] 曹建华, 袁道先, 潘根兴, 等. 不同植被下土壤碳转移对岩溶动力系统中碳循环的影响 [J]. 地球与环境, 2004, **32**(1): 90-96.
- [10] 章程. 不同土地利用下岩溶溶蚀速率季节差异及其影响因素——以重庆金佛山为例 [J]. 地质论评, 2010, **56**(1): 136-140.
- [11] 赵敏, 曾成, 刘再华. 土地利用变化对岩溶地下水溶解无机碳及其稳定同位素组成的影响 [J]. 地球化学, 2009, **38**(6): 565-572.
- [12] Zhao M, Zeng C, Liu Z H, *et al.* Effect of different land use/land cover on karst hydrogeochemistry: a paired catchment study of Chenqi and Dengzhanhe, Puding, Guizhou, SW China [J]. Journal of Hydrology, 2010, **388**(1-2): 121-130.
- [13] Li S L, Calmels D, Han G L, *et al.* Sulfuric acid as an agent of carbonate weathering constrained by $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$: examples from Southwest China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, **270**: 189-199.
- [14] Brunet F, Potot C, Probst A, *et al.* Stable carbon isotope evidence for nitrogenous fertilizer impact on carbonate weathering in a small agricultural watershed [J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2011, **25**(19): 2682-2690.
- [15] 曹建华, 周莉, 杨慧, 等. 桂林毛村岩溶区与碎屑岩区林下土壤碳迁移对比及岩溶碳汇效应研究 [J]. 第四纪研究, 2011, **31**(3): 431-437.
- [16] 章程, 蒋忠诚, 何师意, 等. 垂直气候带岩溶动力系统特征研究——以重庆金佛山国家级自然保护区为例 [J]. 地球学报, 2006, **27**(5): 510-514.
- [17] Fonyuy E W, Atekwana E A. Dissolved inorganic carbon evolution and stable carbon isotope fractionation in acid mine drainage contaminated streams: Insights from a laboratory study [J]. Applied Geochemistry, 2008, **23**(9): 2634-2648.
- [18] Song C, Liu C L, Wang J K, *et al.* Impact of the addition of a compound fertilizer on the dissolution of carbonate rock tablets: A column experiment [J]. Applied Geochemistry, 2011, **26**: S170-S173.
- [19] Tamir G, Shenker M, Heller H, *et al.* Can soil carbonate dissolution lead to overestimation of soil respiration? [J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, **75**(4): 1414-1422.
- [20] 张笑微. 煤铁残渣对表层岩溶泉水化学特征及其溶解无机碳的影响研究——以重庆市南川区柏树湾泉和后沟泉为例 [D]. 重庆: 西南大学, 2014. 25-26.
- [21] 沈济, 汪安璞, 陈宗良, 等. 西南地区酸雨形成大气化学过程 [J]. 环境科学, 1991, **12**(4): 24-28, 9.
- [22] 何泽能, 高阳华, 谭炳全, 等. 重庆市主城区 15 年来酸雨变化趋势分析 [J]. 高原山地气象研究, 2009, **29**(1): 59-62.
- [23] 鲁群岷, 赵亮, 李莉, 等. 三峡库区降水化学组成及时空变化特征 [J]. 环境科学学报, 2013, **33**(6): 1682-1689.
- [24] 刘丛强, 蒋颖魁, 陶发祥, 等. 西南喀斯特流域碳酸盐岩的硫酸侵蚀与碳循环 [J]. 地球化学, 2008, **37**(4): 404-414.
- [25] 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.
- [26] Perrin A S, Probst A, Probst J L. Impact of nitrogenous fertilizers on carbonate dissolution in small agricultural catchments: Implications for weathering CO₂ uptake at regional and global scales [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, **72**(13): 3105-3123.
- [27] 杨平恒, 卢丙清, 贺秋芳, 等. 重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究 [J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1920-1296.
- [28] Weisskopf P, Reiser R, Rek J, *et al.* Effect of different compaction impacts and varying subsequent management practices on soil structure, air regime and microbiological parameters [J]. Soil and Tillage Research, 2010, **111**(1): 65-74.
- [29] Tsypin M, Macpherson G L. The effect of precipitation events on inorganic carbon in soil and shallow groundwater, Konza Prairie LTER Site, NE Kansas, USA [J]. Applied Geochemistry, 2012, **27**(12): 2356-2369.
- [30] Yang R, Liu Z H, Zeng C, *et al.* Response of epikarst hydrochemical changes to soil CO₂ and weather conditions at Chenqi, Puding, SW China [J]. Journal of Hydrology, 2012, **468**: 151-158.
- [31] Liu C L, Chao S, Hou H B, *et al.* The impact of human activities on CO₂ intake by carbonate weathering: A case study of conglin Karst ridge-trough at Fuling Town, Chongqing, China [A]. In: 2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection (ISWREP) [C]. Xi'an: IEEE, 2011: 2282-2287.
- [32] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology [J]. European Journal of Soil Science, 1996, **47**(4): 425-437.

CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM _{2.5} and PM ₁₀ Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM ₁₀	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wangyu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River"	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China	Li Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster: The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment	WANG Qi, HAN Jia-rui, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant ^{15}N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carriers on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L.	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L.	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO ₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

《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8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 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