

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第10期

Vol.35 No.10

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于虚拟撞击原理的固定源 PM₁₀/PM_{2.5} 采样器的研制 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 张强, 李振, 陈小彤, 李兴华, 郝吉明 (3639)

1992~2012年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素 郑秋萍, 王宏, 陈彬彬, 隋平, 林文 (3644)

青岛近海不同天气状况下大气气溶胶中金属元素浓度分布特征研究 陈晓静, 祁建华, 刘宁, 张翔宇, 申恒青, 刘明旭 (3651)

化学合成类制药行业工艺废气 VOCs 排放特征与危害评估分析 李嫣, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 许明珠, 徐威力 (3663)

烧结过程 NO_x 和 SO₂ 形成规律及烧结料组成对 NO_x 排放的影响 任重培, 朱天乐, 朱廷钰, 吕栋 (3669)

废茶活性炭脱硫脱硝性能的应用研究 宋磊, 张彬, 邓文 (3674)

黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响 苏永中, 杨晓, 杨荣 (3683)

海河流域河流生态系统健康评价 郝利霞, 孙然好, 陈利顶 (3692)

台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析 刘树元, 郑晨, 袁琪, 王先兵, 王稀炎 (3702)

山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究 包静玥, 鲍建国, 李立青 (3709)

岩溶地下水水文地球化学对降雨的响应: 以重庆雪玉洞地下河系统为例 王凤康, 梁作兵, 于正良, 江泽丽 (3716)

岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价 蓝家程, 孙玉川, 田萍, 卢丙清, 师阳, 徐昕, 梁作兵, 杨平恒 (3722)

废旧电器拆解区河流沉积物中多溴联苯醚 (PBDEs) 的污染特征与生态风险 陈宣宇, 薛南冬, 张石磊, 李发生, 龚道新, 刘博, 孟磊 (3731)

海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价 王瑞霖, 程先, 孙然好 (3740)

大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素 杨福霞, 简慧敏, 田琳, 姚庆祯 (3748)

辽河下游 CDOM 吸收与荧光特性的季节变化研究 邵田田, 赵莹, 宋开山, 杜嘉, 丁智 (3755)

伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响 刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 张万广 (3764)

地表水体放线菌分离鉴定与致嗅能力研究 陈娇, 白晓慧, 卢宁, 王先云, 章永辉, 吴潘成, 郭心驰 (3769)

地下水循环井技术修复硝基苯污染含水层效果模拟 白静, 赵勇胜, 孙超, 秦传玉, 于凌 (3775)

茶叶基水合氧化铁吸附水体中 Pb(II) 的性能 万顺利, 薛瑶, 马钊钊, 刘国斌, 余艳霞, 马明海 (3782)

紫外辐射对小分子有机酸化学凝聚性作用途径探讨 王文东, 王亚博, 范庆海, 丁真真, 王文, 宋珊, 张银婷 (3789)

水中普萘洛尔的紫外光降解机制及其产物毒性 彭娜, 王开峰, 刘国光, 曾令泽, 姚锟, 吕文英 (3794)

二氧化钛 (P25) 光催化降解二苯砷酸的研究 王阿楠, 滕应, 骆永明 (3800)

碳氮比对聚氨基酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响 谭冲, 刘颖杰, 王薇, 邱珊, 马放 (3807)

城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究 佟娟, 王元月, 魏源送 (3814)

快速城市化区域表层土壤中杀虫剂的空间分布及风险评估 韦燕莉, 鲍志君, 巫承洲, 曾永平 (3821)

重庆铁山坪马尾松林土壤汞排放特征的现场测试 杜宝玉, 王琼, 罗遥, 段雷 (3830)

应用 X 射线吸收近边结构谱研究东北农耕地土壤中的氯种态及含量 李晶, 郎春燕, 马玲玲, 徐殿斗, 郑雷, 路雨楠, 崔丽瑞, 张晓萌 (3836)

植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化 李俊超, 党廷辉, 郭胜利, 薛江, 唐骏 (3842)

硫素对氧化还原条件下水稻土氧化铁和砷形态影响 唐冰培, 杨世杰, 王代长, 饶伟, 张亚楠, 王丹, 朱云集 (3851)

外生菌根真菌对 Al³⁺ 胁迫和低钾土壤的响应 张薇, 黄建国, 袁玲, 李阳波, 何林卫 (3862)

长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究 黄福义, 李虎, 韦蓓, 欧阳纬莹, 苏建强 (3869)

外源添加磷和有机酸模拟铅污染土壤钝化效果及产物的稳定性研究 左继超, 高婷婷, 苏小娟, 万田英, 胡红青 (3874)

污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究 郑家传, 张建荣, 刘希雯, 许倩, 施维林 (3882)

热强化气相抽提对不同质地土壤中苯去除的影响 李鹏, 廖晓勇, 阎秀兰, 崔骁勇, 马栋 (3888)

O₃ 浓度升高对南方城市绿化树种氮素的影响 杨田田, 张巍巍, 胡恩柱, 王效科, 田媛, 冯兆忠 (3896)

施氮强度对不同土壤有机碳水平按树林温室气体通量的影响 李睿达, 张凯, 苏丹, 逯非, 万五星, 王效科, 郑华 (3903)

¹³C₂O₂ 示踪臭氧胁迫对水稻土壤微生物的影响 陈展, 王效科, 尚鹤 (3911)

表面活性剂 *Burkholderia xenovorans* LB400 体系对低氯代 PCBs 的好氧强化降解 陈少毅, 张静, 汪涵, 任源 (3918)

耐高氨氮异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能 信欣, 姚力, 鲁磊, 冷璐, 周迎芹, 郭俊元 (3926)

微氧环境中电化学活性微生物的分离与鉴定 吴松, 肖勇, 郑志勇, 郑越, 杨朝晖, 赵峰 (3933)

电极活性菌分离过程中微生物群落结构动态特征解析 王敏, 赵阳国, 卢珊珊 (3940)

铜对草鱼及花鲢的毒性预测: 基于生物配体模型 王万宾, 陈莎, 吴敏, 赵婧 (3947)

天鹅洲故道底栖动物群落特征及水质生物学评价 马秀娟, 沈建忠, 王腾, 王海生, 黄丹, 孙广文, 龚成 (3952)

水生生物基准推导中物种选择方法研究 张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3959)

生产源区人血清中六溴环十二烷水平与甲状腺激素相关性研究 李鹏, 杨从巧, 金军, 王英, 刘伟志, 丁问微 (3970)

金属氧化物-Laponite 黏土复合材料负载氧化钴催化剂的制备及对苯的催化消除性能 牟真, 麻春艳, 程杰, 李进军 (3977)

CuO(-CeO₂)/Al₂O₃ 催化剂对苯催化氧化性能研究 查键, 周宏仓, 何都良, 单龙, 张露, 谢婕 (3984)

生物毒性检测在水质安全评价中的应用 徐建英, 赵春桃, 魏东斌 (3991)

某城市城镇污水处理厂 COD 排放现状评价分析 周羽化, 卢延娜, 张虞, 朱静, 雷晶, 申晨, 武雪芳 (3998)

北京市再生水利用生态环境效益评估 范育鹏, 陈卫平 (4003)

我国持久性有机污染物污染事故预警指标体系构建 王琳, 吕永龙, 贺桂珍, 王铁宇 (4009)

环境损害评估: 构建中国制度框架 张红振, 王金南, 牛坤玉, 董璟琦, 曹东, 张天柱, 骆永明 (4015)

《环境科学》征稿简则 (3887) 《环境科学》征订启事 (4008) 信息 (3730, 3739, 3774, 3895)

岩溶地下河水文地球化学对降雨的响应：以重庆雪玉洞地下河系统为例

王凤康, 梁作兵, 于正良, 江泽丽

(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: 通过对降雨条件下重庆雪玉洞地下河水文地球化学指标的监测, 发现各种指标对降雨响应迅速, 且存在相关性. 采用主成分分析对各指标数据进行处理, 提取能代表 82.761% 信息量的 3 个主成分, 来分析降雨条件下岩溶地下河水文地球化学的特征及其成因. 结果表明, 以全 Fe、全 Mn、 Al^{3+} 等浓度升高为代表的土壤淋失和以 K^+ 、 Na^+ 、 Sr^{2+} 浓度降低、EC 下降为代表的稀释效应, 对水文地球化学特征变化的贡献率为 41.718%, 降雨加剧了岩溶区土壤的侵蚀, 同时危及饮用水的安全, 应引起相关部门的足够重视; 岩溶水对白云岩的溶解和补给区农业活动、洞穴生物对水文地球化学特征变化的贡献率为 29.958%; 以 Ca^{2+} 浓度升高为代表的岩溶水对灰岩的溶蚀作用对水文地球化学特征的贡献率为 11.084%.

关键词: 降雨; 岩溶地下河; 主成分分析; 稀释作用; 土壤淋溶; 重庆雪玉洞

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)10-3716-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.10.011

Formation of Geochemistry in Underground River Under Rainfall Conditions: An Example for Underground River at Xueyu Cave, Chongqing

WANG Feng-kang, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, JIANG Ze-li

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

Abstract: Through the monitoring of geochemical indexes in underground river of Xueyu Cave in Chongqing under rainfall conditions, we found that all indexes responded quickly to rainfall, and there was a correlation among them. Each index was analyzed with the principal component analysis, three main components were extracted which can represent 82.761% of the information to reflect the formation of geochemistry in underground river under rainfall conditions. The results showed that the contribution rates of soil leaching represented as increased concentration of total Fe, total Mn and Al^{3+} , and dilution effect represented as reduced concentration of K^+ , Na^+ and Sr^{2+} to the change of geochemical characteristics were 41.718%, which should be paid more attentions for its great damage to karst soil and safety of drinking water. Karst water dissolution of dolomite and recharge area of agricultural activities, caverns were 29.958%, as for karst water on limestone dissolution represented as increased concentration of Ca^{2+} the contribution rate was 11.084%.

Key words: rainfall; Karst underground river; principal component analysis; dilute effect; soil leaching; Xueyu Cave in Chongqing

我国南方岩溶区(包括云南、贵州、广西、重庆、湖北、湖南、四川、广东 8 省、市、自治区)的岩溶总面积有 $60 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[1]. 岩溶地下水是这些地区农业、工业和生活用水的重要水源. 但岩溶区溶蚀作用强烈, 岩溶含水介质溶蚀裂隙、管道高度发育, 形成岩溶区特有的地表、地下“双层空间结构体系”^[2]; 此外, 岩溶区基岩大片裸露, 土层薄且分布不连续, 土壤层的天然保护和过滤作用基本丧失, 降雨、地表水极易通过落水洞、竖井等将大气和地表的各种污染物带入岩溶地下水文系统, 影响其水质. 因此, 与非岩溶地下水系统相比, 岩溶地下水系统更具开放性、敏感性^[3~6]和脆弱性^[7~9]. 由于岩溶地下水系统的开放性和含水介质的不均匀性, 降雨可加速雨水、地表水与地下水之间的转化^[10], 使

得岩溶地下水系统呈现灌入式补给、径流畅通、排泄集中、水位动态变化强烈等显著特征. 降雨尤其是暴雨后的岩溶地下水的水文地球化学指标会对外界环境做出灵敏的响应, 因而降雨期是研究和了解岩溶地下水系统的重要时段.

关于岩溶区地下水水文地球化学变化的研究^[14~16]、水文地球化学对降雨响应的研究^[17~21]已有较多报道. 但是影响岩溶区地下水水文地球化学指标的因子众多(如植被、基岩、土地利用方式等), 已有研究很少对众多因子一一进行分析. 因

收稿日期: 2014-02-26; 修订日期: 2014-05-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41072192, 41103068); 重庆市院士专项(cstc2013jcyjys20001)

作者简介: 王凤康(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为岩溶水文地质, E-mail: wangfengkang1234@163.com

此,运用主成分分析,利用降维思想,探讨降雨条件下岩溶地下河水文地球化学指标变化的主控因素十分必要. 本研究利用主成分分析法分析了2010年11月14~23日降雨后雪玉洞地下河水文地球化学指标的变化,对于深化对岩溶地下水水文地球化学过程的理解,促进岩溶区地下河、土壤的合理开发利用和保护有着积极的意义.

1 研究区概况

雪玉洞位于重庆市丰都县长江南岸的龙河下游峡谷内,距丰都新县城12 km(图1). 地理坐标 $29^{\circ}47'00''N, 107^{\circ}47'13''E$,洞口海拔233 m,高出龙河水平面55.5 m^[22]. 雪玉洞因洞内次生沉积物种类丰富且色泽雪白如玉而得名. 研究区内多年平均气温 $16.5^{\circ}C$,多年平均降水量1 072 mm,属典型亚热带湿润季风气候^[23]. 雪玉洞发育在川东平行岭谷方斗山背斜北西翼的三叠系飞仙关组(T_1f)薄至中厚层

灰岩中,岩层产状为 $310^{\circ}\angle 43^{\circ}$. 洞穴顶板岩层厚150~250 m,上覆植被以常绿阔叶林和灌丛为主,土壤厚度0~50 cm^[24]. 大气降水是洞内地下河唯一补给源,受西南季风和东南季风的双重影响,降水主要集中在每年的4~10月.

雪玉洞属峡谷型洞穴,洞道狭窄,没有发育大的洞厅,空间较小,其中下层发育地下河,使得洞内相对湿度较高(一般 $\geq 100\%$). 洞内气温较稳定,但受灯光和游客的影响,各层略有差异,上层 $17.7\sim 18.3^{\circ}C$,中层 $17.4\sim 18.1^{\circ}C$,下层 $16.6\sim 17.6^{\circ}C$,地下河水温 $16.3\sim 16.7^{\circ}C$. 洞口采用双开门封闭,地下河出口被约束在较小的空间内,洞口附近也接近无风,洞内外气流的交换不明显^[23]. 为使研究数据客观准确,此次研究自洞内地下河最上游到洞口选取5个监测点(NO1~NO5)对地下河水的水文地球化学指标进行测试(图1),在分析时用5个点的平均值进行分析.

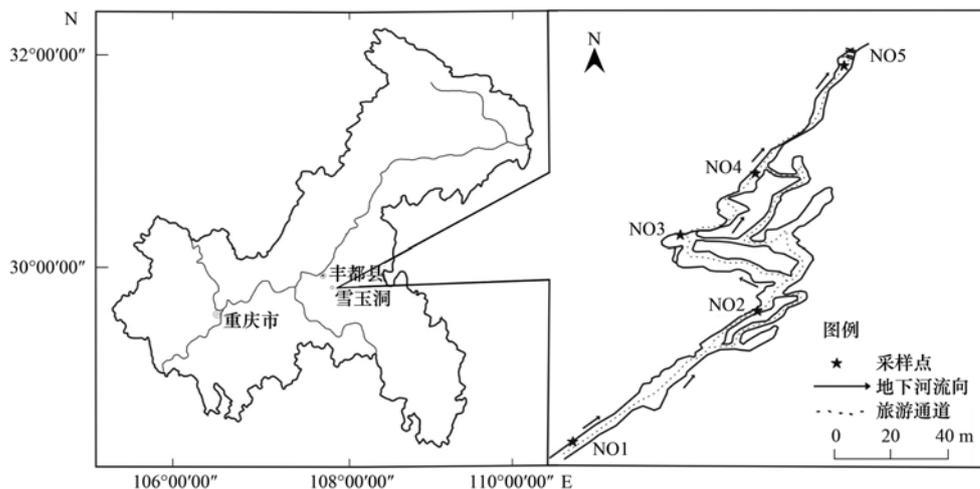


图1 雪玉洞地理位置及监测点位置示意

Fig. 1 Location of Xueyu Cave and sampling sites

2 材料与方法

此次暴雨监测于2010年11月14~23日进行,14日晚研究区有明显降雨. 野外监测采用澳大利亚 Greenspan 公司产的 CDTP300 自动测定和记录水位、水温、pH 值和电导率,测量精度分别为 0.001 m 、 $0.01^{\circ}C$ 、 0.01 和 $0.1\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. 在降雨前后根据水位变化取阳离子水样,一般每天2~3个样品,用去离子水清洗过的50 mL 高密度聚乙烯塑料瓶采集,现场加入1:1的 HNO_3 酸化,用美国 Perkin-Elmer 公司产 Optima-2100DV 全谱直读型 ICP-OES 测定,检测精度 $0.001\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (相对标准偏差 $< 2\%$). 主

成分分析的具体原理和分析方法参见文献[25],主成分分析计算、相关性分析计算在 SPASS 16.0 软件中运行完成.

3 结果与分析

3.1 地下河水位的变化

根据图2可知,降雨前后地下河水位发生了明显的变化. 变化趋势为先快速增高然后缓慢回落,由14日凌晨的 0.09 m 升高到15日14:30的 0.131 m ,变幅达 45.56% . 水位的迅速升高反映了岩溶区特殊的水文地质条件下,地下河水位对降雨响应迅速.

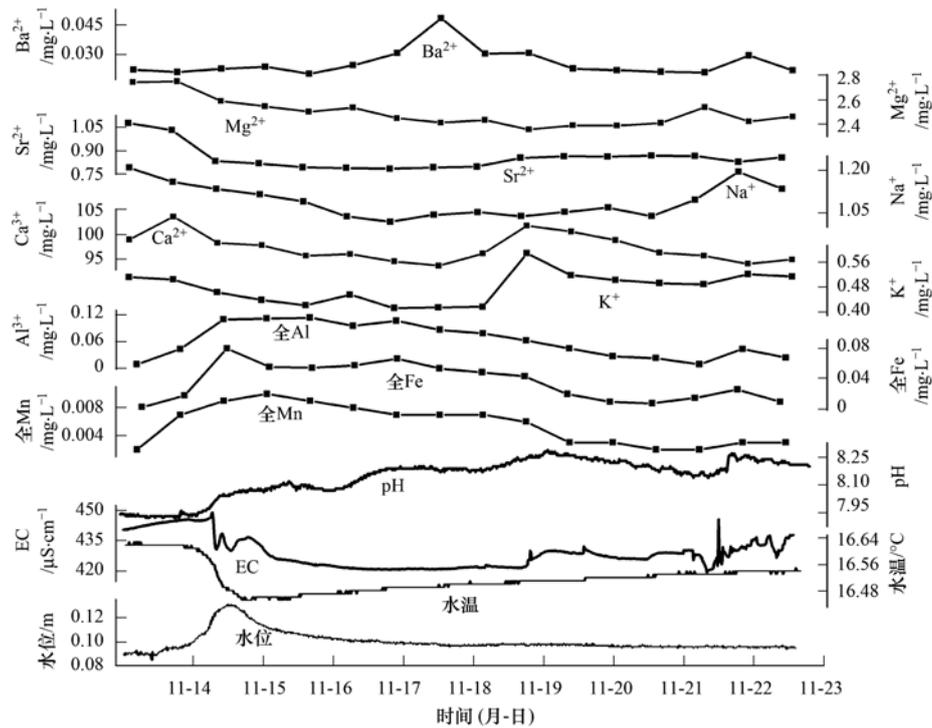


图2 研究区水文地球化学指标的变化趋势

Fig. 2 Cureves of hydrogeochemical index in the study area

3.2 水文地球化学指标对降雨的响应

pH 值的变化趋势为先缓慢升高然后又有所回落,由 14 日凌晨的 7.92 缓慢升高到 20 日 04:30 的 8.29,变幅为 4.67%。已有研究指出^[21,26,27],降雨过程地下水水化学的变化,受雨水的稀释作用控制,且研究区处在我国著名的酸雨区^[28],酸性雨水的混入会使地下水 pH 值在降雨后呈明显的下降趋势。然而,本研究 pH 值的变化情况相反,分析其原因可能是,首先研究时段为秋季,气候干燥,空气中碳酸盐岩粉尘较多,粉尘对雨水的中和降低了雨水的酸度;其次,降雨形成 pH 值高、电导率低的坡面流通过落水洞、管道等很快补给地下河,没有充分溶解土壤中的 CO₂,导致地下水 pH 值升高,电导率下降^[29],同时土壤的缓冲作用也是地下河的 pH 升高的一个因素。地下水水温与电导率(EC)的变化趋势为先快速降低然后又有缓慢回升,水温由 14 日凌晨的 16.63℃ 快速下降到 15 日 17:15 的 16.45℃,变幅为 1.14%;电导率由 14 日凌晨的 449.05 μS·cm⁻¹ 降至 22 日 16:45 的 419.31 μS·cm⁻¹,变幅为 6.62%。其原因为降雨的温度较地下水水温低,且大量降雨渗入地下,对各种离子浓度起到稀释作用。

随着水位的变化,地下水水文地球化学指标也有明显的变化(图 2)。监测期间 K⁺、Na⁺、Mg²⁺、

Ca²⁺、Sr²⁺ 离子总体变化趋势为随着水位的升高离子浓度降低,但随着水位的缓慢回落,各离子浓度有不同程度的回升。K⁺、Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、Sr²⁺ 离子由 14 日的 0.511、1.210、2.742、99.030、1.080 mg·L⁻¹ 下降到 16 日 04:00 的 0.412、1.019、2.413、93.800、0.783 mg·L⁻¹,降幅分别为 19.34%、16.03%、12.00%、5.28%、27.5%。随着水位的回落 K⁺、Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、Sr²⁺ 离子浓度不同程度地回升,分别回升至 0.586 mg·L⁻¹ (16 日晚)、1.195 mg·L⁻¹ (22 日)、2.538 mg·L⁻¹ (21 日)、101.800 mg·L⁻¹ (16 日晚)、0.868 mg·L⁻¹ (20 日)。其原因为降雨前期随着水位的升高雨水的稀释作用占主导地位,随着水位的回落稀释作用逐渐减弱,水-岩-气作用占据主导地位^[30]。但全 Fe、全 Mn、Al³⁺、Ba²⁺ 的变化趋势与这些离子相反,即随着水位的升高而升高,随着水位的回落而降低。全 Fe、全 Mn、Al³⁺、Ba²⁺ 浓度由 14 日的 0.003、0.002、0.01、0.022 mg·L⁻¹ 升高到 0.079 mg·L⁻¹ (15 日 20:00)、0.01 mg·L⁻¹ (15 日 22:00)、0.114 mg·L⁻¹ (16 日凌晨)、0.048 mg·L⁻¹ (16 日 06:00),升幅分别为 25.33%、400%、1040%、118.18%。但随着水位的回落各离子浓度又有所回落(图 2)。上述变化主要由降水强度变化导致土壤受侵程度不

同所引起,土壤颗粒被强降雨击碎、分解,并被降雨形成的坡面流通过落水洞、竖井等连接地表地下的通道携带入地下河,使地下河水的全 Fe、全 Mn、 Al^{3+} 、 Ba^{2+} 等的含量迅速增加,可见,土壤侵蚀和产沙不仅是分散、剥离和搬运泥沙的过程,同时也伴随大量营养元素的搬运和流失^[30]。

对研究区水文地球化学指标进行相关性分析(表 1)。水位与水温、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 呈显著负相关,相关系数分别为 -0.529、-0.570、-0.524、

-0.503,电导率与 pH、 Mg^{2+} 、全 Fe、全 Mn、 Al^{3+} 呈显著地负相关,相关系数分别为 -0.653、-0.706、-0.537、-0.568, Al^{3+} 与全 Fe、全 Mn 呈极显著的正相关性,相关系数分别为 0.952、0.993,全 Mn 与全 Fe 也为极显著的正相关性,相关系数为 0.872, Sr^{2+} 与 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 呈较显著地正相关性,相关系数分别为 0.629、0.711、0.614,而与全 Fe、 Al^{3+} 呈显著的负相关性,相关系数为 -0.638、-0.626。

表 1 雪玉洞地下河水文地球化学指标的相关性¹⁾

Table 1 Correlation of hydrogeochemical index in Xueyu cave underground river

	水位	水温	电导率	pH	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Ba^{2+}	Sr^{2+}	全 Fe	全 Mn	Al^{3+}
水位	1												
水温	-0.529**	1											
电导率	0.047	0.747**	1										
pH	-0.254**	-0.445**	-0.653**	1									
K^+	0.032	0.087	0.415	-0.383	1								
Na^+	-0.140	-0.190	-0.163	0.207	0.291	1							
Ca^{2+}	-0.570*	-0.268	-0.266	-0.055	0.557*	0.150	1						
Mg^{2+}	-0.524*	-0.110	-0.706**	0.588*	-0.056	0.652**	0.351	1					
Ba^{2+}	0.271	-0.229	0.038	-0.444	-0.298	-0.327	-0.374	-0.381	1				
Sr^{2+}	-0.503*	-0.114	-0.234	0.088	0.490	0.629**	0.614*	0.711**	-0.376	1			
全 Fe	0.155	-0.213	-0.537*	0.327	-0.597*	-0.342	-0.227	-0.086	0.376	-0.638**	1		
全 Mn	0.111	-0.203	-0.691**	0.364	-0.583*	-0.198	0.022	0.157	0.210	-0.417	0.872**	1	
Al^{3+}	0.036	-0.182	-0.568*	0.279	-0.660	-0.335	-0.198	-0.074	-0.304	-0.626**	0.952**	0.993**	1

1) * 表示在 0.01 水平上显著相关, ** 表示在 0.05 水平上显著相关

3.3 主成分分析揭示水文地球化学的形成

由表 1 可知,很多水文地球化学指标之间存在直接的相关性,说明它们之间存在大量的信息重复,增加了分析问题的复杂性。如果对每个指标一一进行分析,可能使得研究孤立,如果盲目地去掉一些指标有可能导致重要信息的损失^[30]。因此,利用降维的思想对数据进行主成分分析,显得非常必要。

主成分分析也称主分量分析,是揭示大样本、多变量数据或样本之间内在关系的一种方法,旨在利用降维的思想,把多指标转化为少数几个综合指标,降低观测空间的维数,以获取最主要的信息^[25]。其中包括载荷、方差贡献率、累计方差贡献率等。载荷是指某指标在该影响因素中所占的比重,方差贡献率指示某一影响因素对该事件的影响大小,累计方差贡献率为多个方差贡献率之和。

对重庆雪玉洞地下河水文地球化学指标进行主成分分析,经 KMO 及球形检验认为该数据符合要求。选取特征根大于 1 的 3 个主成分(因素 1、因素 2、因素 3),其载荷、方差贡献率、累计方差贡献率见表 2。其中,3 个主成分的方差贡献率分别为

41.718%、29.958%、11.084%,累计贡献率为 82.761%,包含了地下河水文地球化学指标的大部分信息。下面对这 3 个主成分进行进一步分析。

表 2 地下水水文地球化学指标的载荷、特征根及方差贡献率

Table 2 Component loadings of the hydrogeochemical parameters

指标	因素 1	因素 2	因素 3
K^+	-0.789	-0.111	0.406
Na^+	-0.477	0.555	-0.253
Ca^{2+}	-0.411	0.434	0.750
Mg^{2+}	-0.183	0.934	-0.113
Sr^{2+}	-0.742	0.576	0.132
Ba^{2+}	0.457	-0.459	0.213
全 Fe	0.939	0.133	0.148
全 Mn	0.848	0.376	0.268
Al^{3+}	0.948	0.162	0.168
EC	-0.449	-0.324	-0.187
pH	0.276	0.712	-0.442
特征根	4.589	3.295	1.219
方差贡献率/%	41.718	29.958	11.084
累计方差贡献率/%	41.718	71.677	82.761

3.3.1 因素 1

与因素 1 呈极显著正相关的有 Al^{3+} 、全 Fe、全 Mn, 载荷分别为 0.948、0.939、0.848. 这表明因素 1 反映了地下河补给区内的土壤淋失. 在亚热带湿润气候条件下, 研究区成土母质中的碳酸钙大量淋失, 残留于土体中的主要是母岩中的副成分——铁锰铝以及黏土矿物^[30]. 降雨时, 快速的坡面流将土壤中难以溶解的物质(如 Fe、Mn、Al 等)通过落水洞、竖井等带入到地下河中, 使得地下河水中的全 Fe、全 Mn、 Al^{3+} 等含量迅速增加(图 2). 可见, 降雨会加速岩溶区的土壤淋失, 并影响岩溶地下水的水质.

与因素 1 呈显著负相关的是 K^+ 、 Sr^{2+} 离子, 载荷分别为 -0.789、-0.742, Na^+ 、EC、 Ca^{2+} 与因素 1 也存在负相关关系, 载荷分别为 -0.477、-0.449、-0.411. 表明因素 1 还反映了降雨对有关离子的稀释效应. K^+ 、 Na^+ 主要源于碳酸盐岩和土壤中酸不溶物的风化, 同时也受人类活动影响(如农业施肥、牲畜粪便等)^[31]; Ca^{2+} 、 Sr^{2+} 是灰岩溶解的产物; 电导率则反映了地下河水中的离子含量. 但由于岩溶区特殊的水文地质条件, 降雨、地表水、地下水转换迅速^[32,33], 降雨后地下河流量急剧增加, 使地下河水的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Sr^{2+} 等浓度下降, 电导率也相应降低, 表现为稀释效应. 这与国外很多学者在岩溶区的研究结果^[17,34,35]一致, 而与贵州茂兰表层岩溶泉^[36]、桂林实验场的 CF1 钻孔^[37]在暴雨后的变化恰恰相反, 主要缘于岩溶含水系统结构及水动力条件的差别. 当然, 整个降雨过程中研究区地下水中 Ca^{2+} 、 Sr^{2+} 等离子的溶解通量比常规天气下大得多.

3.3.2 因素 2

因素 2 与 Mg^{2+} 、pH 显著正相关, 载荷分别为 0.934、0.712, 与 Na^+ 也存在较为显著地正相关关系, 载荷为 0.555. 在图 2 中表现在 22 日该指标有所升高. 表明因素 2 与降雨后期岩溶水对白云岩的溶解和补给区农业活动、洞穴生物粪便有关. 在降雨后期随着雨强的减弱, 雨水的稀释效应影响逐渐减弱, 降雨溶解土壤中的 CO_2 对碳酸盐岩的溶蚀作用逐渐占据主导地位^[16,19,21]. 因素 2 反映了岩溶水对白云岩的溶蚀, 使得地下河水中 Mg^{2+} 浓度、pH 值有所回升. 因素 2 与 Na^+ 存在较为显著地正相关关系, 分析其原因可能为: ①雪玉洞地下河补给区分布有零散的农田, 农田中残留的化肥可能对地下河 Na^+ 产生影响; ②在雪玉洞

内有老鼠和蝙蝠的粪便, 降雨后地下河水位升高, 将动物粪便带走, 影响到地下河水中 Na^+ 离子的含量. 在降雨前期雨水的稀释作用占据主导地位, 掩盖了白云岩溶解、农业活动和洞穴动物粪便的影响, 降雨后期随着水位的回落, 这些信息得以显现.

3.3.3 因素 3

与因素 3 呈显著正相关的是 Ca^{2+} , 其载荷为 0.750. 表明因素 3 反映了降雨后期岩溶水对灰岩的溶解. 雪玉洞地下河基岩以三叠系飞仙关组(T₁f)中厚层质纯灰岩为主. 在降雨条件下, 雨水的稀释作用与岩溶水对碳酸盐岩的溶蚀作用是影响岩溶区水化学动态变化的重要因素^[29,38]. 在降雨前期雨水在管道中快速流动, 雨水的稀释效应占主导地位; 在降雨后期, 随着降雨强度的减小, 水流速逐渐变缓, 稀释作用减弱, 溶解土壤 CO_2 的水对灰岩的溶蚀作用逐渐占据主导地位^[29]. 使地下河中的 Ca^{2+} 离子浓度增加.

4 结论

(1) 雪玉洞地下河水各水文地球化学指标对降雨响应极为敏感, 在整个监测时段, pH 值先缓慢升高然后又有所回落; EC 和水温则呈快速降低, 然后又缓慢回升的趋势; K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Sr^{2+} 浓度随着水位的变化呈先降低后回升的趋势; 全 Fe、全 Mn、 Al^{3+} 、 Ba^{2+} 的变化趋势则相反, 随着水位的升高而升高, 并随着水位的回落而降低. 此外, 许多水文地球化学指标之间存在不同程度的相关性, 其中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 随水位的上升浓度降低; 全 Fe、全 Mn、 Al^{3+} 、 Ba^{2+} 随水位的上升浓度增加.

(2) 采用主成分分析, 提取能代表 82.761% 信息量的 3 个主成分, 来反映岩溶地下水的水文地球化学形成. 3 个主成分的方差贡献率分别为 41.718%、29.958% 和 11.084%. 第一主成分反映降雨造成的地下河流域土壤淋失(全 Fe、全 Mn、 Al^{3+} 、 Ba^{2+} 浓度的增加)和稀释效应(K^+ 、 Na^+ 、 Sr^{2+} 、EC 的降低); 第二主成分反映了岩溶水对白云岩的溶解和补给区农业活动、洞穴生物粪便对地下河水的影响; 第三主成分反映了岩溶水对灰岩的溶蚀作用.

(3) 降雨对岩溶区的土壤淋失和地下河的水质产生较大影响, 应引起相关部门的重视, 加强对岩溶区水土资源的保护.

参考文献:

- [1] 袁道先, 朱德浩, 翁金桃, 等. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社, 1994. 1-13.
- [2] 袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988. 3-27.
- [3] 袁道先, 刘再华, 林玉石, 等. 中国岩溶动力系统[M]. 北京: 地质出版社, 2002. 6-10.
- [4] 袁道先. 岩溶作用对环境变化的敏感性及其记录[J]. 科学通报, 1995, **40**(13): 1210-1213.
- [5] Yuan D X. Sensitivity of karst process to environmental change along the PEP II transect[J]. *Quaternary International*, 1997, **37**: 105-113.
- [6] 刘再华. 桂林岩溶水文地质试验场岩溶水文地球化学的研究[J]. 中国岩溶, 1992, **11**(3): 209-217.
- [7] Witkowski A J, Rubin K, Kowalczyk A, *et al.* Groundwater vulnerability map of the Chrzanów karst-fissured Triassic aquifer (Poland) [J]. *Environmental Geology*, 2003, **44**(1): 59-67.
- [8] Trček B, Veselič M, Pezdlič J. The vulnerability of karst springs—a case study of the Hubelj spring (SW Slovenia) [J]. *Environmental Geology*, 2006, **49**(6): 865-874.
- [9] Bakalowicz M. Karst groundwater: a challenge for new resources [J]. *Hydrogeology Journal*, 2005, **13**(1): 148-160.
- [10] Long A J. Hydrograph separation for karst watersheds using a two-domain rainfall-discharge model [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, **364**(3-4): 249-256.
- [11] Smart P L, Friederich H. Water movement and storage in the unsaturated zone of a maturely karstified carbonate aquifer, Mendip Hills, England [A]. In: National Water Well Association, Ohio. Proceedings of the Conference on Environmental Problems of Karst Terrains and their Solutions [C]. Dublin: National Water Well Association, 1986. 59-87.
- [12] Ford D C, Williams P W. Karst geomorphology and hydrogeology [M]. Chichester, U. K.: Wiley, 2007. 4-12.
- [13] White W B. Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains [M]. New York: Oxford University, 1988. 1-34.
- [14] 刘再华, 袁道先, 何师意. 岩溶动力系统水化学动态变化规律分析[J]. 中国岩溶, 1999, **18**(2): 103-108.
- [15] Yuan D X. Contribution of IGCP379 “karst process and carbon cycle” to global change[J]. *Episodes*, 1998, **21**(3): 198.
- [16] 刘再华, 袁道先. 中国典型表层岩溶系统的地球化学动态特征及其环境意义[J]. 地质论评, 2000, **46**(3): 324-327.
- [17] Hess J W, White W B. Storm response of the karstic carbonate aquifer of southcentral Kentucky [J]. *Journal of Hydrology*, 1988, **99**(3-4): 235-252.
- [18] 杨平恒, 旷颖仑, 袁文浩, 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.
- [19] 章程, 袁道先, 曹建华, 等. 典型表层岩溶泉短时间尺度动态变化规律研究[J]. 地球学报, 2004, **25**(4): 467-471.
- [20] 杨平恒, 罗鉴银, 袁道先, 等. 降雨条件下岩溶槽谷泉水的水文地球化学特征[J]. 水利学报, 2009, **40**(1): 67-74.
- [21] 苟鹏飞, 蒋勇军, 扈志勇, 等. 典型岩溶地下河系统暴雨条件下水文水化学动态变化研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, **37**(5): 20-25, 37.
- [22] 朱学稳, 张远海, 韩道山, 等. 重庆丰都雪玉洞群的洞穴特征和洞穴沉积物[J]. 中国岩溶, 2004, **23**(2): 85-90, 164-168.
- [23] 王翱宇. 洞穴岩溶动力系统运行规律与环境信息保存的研究—以重庆雪玉洞为例[D]. 重庆: 西南大学, 2010. 1-12.
- [24] 蒲俊兵, 沈立成, 王翱宇, 等. 重庆丰都雪玉洞水文地球化学指标的时空变化研究[J]. 中国岩溶, 2009, **28**(1): 49-54.
- [25] 张文霖. 主成分分析在 SPSS 中的操作应用[J]. 市场研究, 2005, (12): 31-34.
- [26] 韩军, 刘再华, 李强. 广西弄拉兰电堂岩溶泉水化学动态变化[J]. 世界地质, 2009, (1): 75-81.
- [27] 李林立, 况明生, 张远瞩, 等. 典型表层岩溶泉水短时间尺度动态变化规律[J]. 水科学进展, 2006, **17**(2): 222-226.
- [28] 曹云松, 罗祥康, 黄德辉. 试论重庆酸雨对地下水水质变异的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1995, **6**(3): 43-48.
- [29] 刘再华, Groves C, 袁道先, 等. 水-岩-气相互作用引起的水化学动态变化研究——以桂林岩溶试验场为例[J]. 水文地质工程地质, 2003, (4): 13-18.
- [30] 杨平恒, 袁道先, 袁文昊, 等. 以 PCA 揭示降雨期间岩溶地下水文地球化学的形成[J]. 科学通报, 2010, **55**(9): 787-796.
- [31] Négrel P, Pauwels H. Interaction between different groundwaters in Brittany catchments (France): characterizing multiple sources through strontium-and Sulphur isotope tracing[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2004, **151**(1-4): 261-285.
- [32] 谢运球, 袁道先. 地下河系统水土资源关系[J]. 水土保持学报, 2001, **16**(6): 50-53.
- [33] 袁道先. 岩溶水不均匀性程度差异的产生条件[A]. 见: 中国地质学会第二届岩溶学术会议论文选集编辑组. 中国地质学会第二届岩溶学术会议论文选集[C]. 北京: 科学出版社, 1982. 77-85.
- [34] Vesper D J, White W B. Metal transport to karst springs during storm flow: an example from Fort Campbell, Kentucky/Tennessee, USA[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, **276**(1-4): 20-36.
- [35] Ashton K. The analysis of flow data from karst drainage systems [J]. *Transactions of the Cave Research Group of Great Britain*, 1966, **7**(2): 161-204.
- [36] 刘再华, Dreybrodt W, 王海静. 一种由全球水循环产生的可能重要 CO₂ 汇[J]. 科学通报, 2007, **52**(20): 2418-2422.
- [37] 刘再华, 李强, 汪进良, 等. 桂林岩溶试验场钻孔水化学暴雨动态和垂向变化解译[J]. 中国岩溶, 2004, **23**(3): 169-176.
- [38] Brusca L, Aiuppa A, D'Alessandro W, *et al.* Geochemical mapping of magmatic gas-water-rock interactions in the aquifer of Mount Etna volcano[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2001, **108**(1-4): 199-218.

CONTENTS

Development of a Two Stage Virtual Impactor for Stationary Source PM ₁₀ and PM _{2.5} Sampling	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, DUAN Lei, <i>et al.</i> (3639)
Characteristics and the Impact Factors of Acid Rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012	ZHENG Qiu-ping, WANG Hong, CHEN Bin-bin, <i>et al.</i> (3644)
Concentration Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosol Under Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	CHEN Xiao-jing, QI Jian-hua, LIU Ning, <i>et al.</i> (3651)
Emission Characteristics and Hazard Assessment Analysis of Volatile Organic Compounds from Chemical Synthesis Pharmaceutical Industry	LI Yan, WANG Zhe-ming, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3663)
NO _x and SO ₂ Formation in the Sintering Process and Influence of Sintering Material Composition on NO _x Emissions	REN Zhong-pei, ZHU Tian-le, ZHU Ting-yu, <i>et al.</i> (3669)
Application of Activated Carbon from Waste Tea in Desulfurization and Denitrification	SONG Lei, ZHANG Bin, DENG Wen (3674)
Effect of Soil Texture in Unsaturated Zone on Soil Nitrate Accumulation and Groundwater Nitrate Contamination in a Marginal Oasis in the Middle of Heihe River Basin	SU Yong-zhong, YANG Xiao, YANG Rong (3683)
Health Assessment of River Ecosystem in Haihe River Basin, China	HAO Li-xia, SUN Ran-hao, CHEN Li-ding (3692)
Analysis on the Variation Characteristics of Iron and Manganese Concentration and Its Genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province	LIU Shu-yuan, ZHENG Chen, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3702)
Spatiotemporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Mountainous Urban Lake	BAO Jing-yue, BAO Jian-guo, LI Li-qing (3709)
Formation of Geochemistry in Underground River Under Rainfall Conditions: An Example for Underground River at Xueyu Cave, Chongqing	WANG Feng-kang, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (3716)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and in Karst Underground River Catchment	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, TIAN Ping, <i>et al.</i> (3722)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediments from an Electrical Equipment Dismantling Area	CHEN Xuan-yu, XUE Nan-dong, ZHANG Shi-lei, <i>et al.</i> (3731)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in the Southern and Central Haihe River Basin	WANG Rui-lin, CHENG Xian, SUN Ran-hao (3740)
Distribution Characteristics of COD and DO and Its Influencing Factors in the Daliaohe Estuary	YANG Fu-xia, JIAN Hui-min, TIAN Lin, <i>et al.</i> (3748)
Seasonal Variation in the Absorption and Fluorescence Characteristics of CDOM in Downstream of Liaohe River	SHAO Tian-tian, ZHAO Ying, SONG Kai-shan, <i>et al.</i> (3755)
Nitrogen Uptake and Denitrification Study on the Joint Treatment of Aquatic Vegetation and Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria in Taihu Lake	LIU Dan-dan, LI Zheng-kui, YE Zhong-xiang, <i>et al.</i> (3764)
Actinobacteria and Their Odor-producing Capacities in a Surface Water in Shanghai	CHEN Jiao, BAI Xiao-hui, LU Ning, <i>et al.</i> (3769)
Laboratory Evaluation of Remediation of Nitrobenzene Contaminated Aquifer by Using Groundwater Circulation Well	BAI Jing, ZHAO Yong-sheng, SUN Chao, <i>et al.</i> (3775)
Sorption Characteristics of Tea Waste Modified by Hydrated Ferric Oxide Toward Pb(II) in Water	WAN Shun-li, XUE Yao, MA Zhao-zhao, <i>et al.</i> (3782)
Effects of UV Radiation on the Aggregation Performance of Small Molecular Organic Acids	WANG Wen-dong, WANG Ya-bo, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (3789)
UV Photolysis of Propranolol in Aqueous Solution: Mechanism and Toxicity of Photoproducts	PENG Na, WANG Kai-feng, LIU Guo-guang, <i>et al.</i> (3794)
Photo-catalytic Degradation of Diphenylarsinic Acid by TiO ₂ (P25)	WANG A-nan, TENG Ying, LUO Yong-ming (3800)
Effect of Carbon/Nitrogen Ratio on Short-Cut Nitrification and Denitrification of Polyurethane Biofilm Reactor	TAN Chong, LIU Ying-jie, WANG Wei, <i>et al.</i> (3807)
Distribution and Removal of Anaerobic Antibiotic Resistant Bacteria During Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge	TONG Juan, WANG Yuan-yue, WEI Yuan-song (3814)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Insecticides in Surface Soil from a Rapidly Urbanizing Region	WEI Yan-li, BAO Lian-jun, WU Cheng-zhou, <i>et al.</i> (3821)
Field Measurement of Soil Mercury Emission in a Masson Pine Forest in Tieshanping, Chongqing in Southwestern China	DU Bao-yu, WANG Qiong, LUO Yao, <i>et al.</i> (3830)
Chlorine Speciation and Concentration in Cultivated Soil in the Northeastern China Studied by X-Ray Absorption Near Edge Structure	LI Jing, LANG Chun-yan, MA Ling-ling, <i>et al.</i> (3836)
Soil Organic Carbon Storage Changes with Land Reclamation Under Vegetation Reconstruction on Opencast Coal Mine Dump	LI Jun-chao, DANG Ting-hui, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (3842)
Effect of Sulfur on the Species of Fe and As Under Redox Condition in Paddy Soil	TANG Bing-pei, YANG Shi-jie, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (3851)
Response of Ectomycorrhizal Fungi to Aluminum Stress and Low Potassium Soil	ZHANG Wei, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3862)
Long-Term Manure Application Induced Shift of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Paddy Soil	HUANG Fu-yi, LI Hu, WEI Bei, <i>et al.</i> (3869)
Effect of Phosphate and Organic Acid Addition on Passivation of Simulated Pb Contaminated Soil and the Stability of the Product	ZUO Ji-chao, GAO Ting-ting, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3874)
Bioremediation of Chromium(VI) Contaminated Site by Reduction and Microbial Stabilization of Chromium	ZHENG Jia-chuan, ZHANG Jian-rong, LIU Xi-wen, <i>et al.</i> (3882)
Effect of Thermal Enhanced Soil Vapor Extraction on Benzene Removal in Different Soil Textures	LI Peng, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (3888)
Effects of Elevated O ₃ Concentration on Nitrogen in Greening Tree Species in Southern China	YANG Tian-tian, ZHANG Wei-wei, HU En-zhu, <i>et al.</i> (3896)
Effects of Nitrogen Application on Soil Greenhouse Gas Fluxes in <i>Eucalyptus</i> Plantations with Different Soil Organic Carbon Content	LI Rui-da, ZHANG Kai, SU Dan, <i>et al.</i> (3903)
Ozone Effects on Soil Microbial Community of Rice Investigated by ¹³ C Isotope Labeling	CHEN Zhan, WANG Xiao-ke, SHANG He (3911)
Enhanced Aerobic Degradation of Low Chlorinated Biphenyls by Constructing Surfactants <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 Based System	CHEN Shao-yi, ZHANG Jing, WANG Han, <i>et al.</i> (3918)
Identification of a High Ammonia Nitrogen Tolerant and Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterial Strain TN-14 and Its Nitrogen Removal Capabilities	XIN Xin, YAO Li, LU Lei, <i>et al.</i> (3926)
Isolation and Identification of Electrochemically Active Microorganism from Micro-Aerobic Environment	WU Song, XIAO Yong, ZHENG Zhi-yong, <i>et al.</i> (3933)
Characteristics of Microbial Community Structure During Isolation of Electrical Active Bacteria	WANG Min, ZHAO Yang-guo, LU Shan-shan (3940)
Predicting Copper Toxicity to <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> and <i>Ctenopharyngodon idellus</i> Based on Biotic Ligand Model	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (3947)
Macrozoobenthos Community Structure and Water Quality Evaluation of Tian'e Zhou Oxbows	MA Xiu-juan, SHEN Jian-zhong, WANG Teng, <i>et al.</i> (3952)
Species Selection Methods in Deriving Water Quality Criteria for Aquatic Life	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3959)
Correlations Between HBCD and Thyroid Hormone Concentrations in Human Serum from Production Source Area	LI Peng, YANG Cong-qiao, JIN Jun, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Cobalt Oxide Mesoporous Metallic Oxide-Clay Composites and Their Catalytic Performance in the Oxidation of Benzene	MU Zhen, MA Chun-yan, CHENG Jie, <i>et al.</i> (3977)
Catalytic Degradation of Naphthalene by CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃	ZHA Jian, ZHOU Hong-cang, HE Du-liang, <i>et al.</i> (3984)
Toxicity Tests and Their Application in Safety Assessment of Water Quality	XU Jian-ying, ZHAO Chun-tao, WEI Dong-bin (3991)
Assessment on the COD Discharge Status of Municipal Wastewater Treatment Plant in a City of China	ZHOU Yu-hua, LU Yan-na, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3998)
Assessment of Ecological Environment Benefits of Reclaimed Water Reuse in Beijing	FAN Yu-peng, CHEN Wei-ping (4003)
Construction of Index System for Early Warning of Persistent Organic Pollutants (POPs) Pollution Incidents in China	WANG Lin, LU Yong-long, HE Gui-zhen, <i>et al.</i> (4009)
Environmental Damages Assessment: Establishment of System Framework in China	ZHANG Hong-zhen, WANG Jin-nan, NIU Kun-yu, <i>et al.</i> (4015)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2014年10月15日 第35卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 10 Oct. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行