

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

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

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示	高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康(1141)
2013年1月北京市PM _{2.5} 区域来源解析	李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松(1148)
2013年1月北京市一次空气重污染成因分析	程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅(1154)
上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征	常燕,冯冲,瞿建国,张经(1164)
厦门春季PM ₁₀ 中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析	张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成(1173)
硫氧同位素示踪南京北郊大气PM _{2.5} 中硫酸盐来源	魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝(1182)
结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程	包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠(1187)
春季华东高山背景区域PM _{2.5} 和PM _{2.5-10} 中水溶性无机离子特征	苏彬彬,张智胜,陶俊,许梹洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇(1195)
落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究	杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹(1202)
四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征	何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪(1208)
深圳市船舶排放清单与时空特征研究	杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏(1217)
超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性	孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗(1227)
空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征	张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹(1234)
基于氢氧稳定同位素的黄土高原下二次蒸发效应	靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽(1241)
黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响	张永领,王明仕,董玉龙(1249)
调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响	王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远(1256)
春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响	于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚(1263)
降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析	任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春(1270)
北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价	钟惠舟,韦朝海(1277)
丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析	李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏(1285)
三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例	操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺(1293)
营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响	王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖雪(1301)
一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究	杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏(1309)
昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析	梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明(1317)
河道曝气提升河流水质的WASP模型研究	朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽(1326)
γ辐射降解水中的盐酸丙沙星的研究	祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静(1332)
电化学氢化物发生法处理含锑废水及对锑的回收	陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼(1338)
Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水	孙文静,王亚旻,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳(1345)
生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素	孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪(1352)
308 nm光作用下α-Fe ₂ O ₃ 表面HNO ₃ 的光解	陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强(1359)
L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚	何家洪,徐强,丁武泉,李强(1365)
酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究	许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博(1374)
枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性	马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用(1379)
嗜碱降解菌筛选及其对焦化废水强化处理	李静,李文英(1385)
Fe ³⁺ 对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N ₂ O释放的影响	李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建(1392)
内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究	赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉(1399)
利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻	王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东(1406)
进水渗滤液总氮和BOD ₅ /TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响	杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰(1412)
重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析	师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先(1417)
湖南攸县典型煤矿和工矿区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析	张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰(1425)
沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响	苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春(1431)
施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响	王秀丽,梁成华,马子惠,韩月(1437)
不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复	邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提(1445)
陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价	齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞(1453)
有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响	王菲,袁婷,谷守宽,王正银(1461)
玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究	程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云(1468)
硼锑交互作用对水稻吸收积累锑和硼的影响	向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐(1474)
丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响	郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新(1481)
滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究	陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁(1489)
不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系	吴静,陈书涛,胡正华,张旭(1497)
工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析	王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮(1507)
《环境科学》征订启事(1216)	
《环境科学》征稿简则(1248)	
信息(1163,1194,1248,1424)	

春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响

于正良^{1,2}, 杨平恒^{1,2*}, 赵瑞一^{1,2}, 李林立^{1,2}, 张琳¹, 童小容¹, 罗刚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. 国土资源部岩溶生态环境-重庆南川野外基地, 重庆 408435)

摘要: 岩溶水文系统对外界环境变化敏感, 使得岩溶区水质存在昼夜、小时甚至分钟等尺度的变化。许多地表水体都会经历 pH 值、溶解性气体、微量元素以及其他水化学指标的昼夜变化。重庆金佛山水房泉及受其补给的水池地处海拔 2 050 m 的山地岩溶区, 具有温带气候特征。通过对水房泉水(以下简称泉水)及水池进行为期 3 d 的昼夜监测, 以期探究春季生物作用对岩溶池水地球化学的影响。研究发现, 在昼夜时间尺度上, 泉水地球化学指标基本稳定, 未表现出昼夜变化, 池水地球化学指标化学表现出了昼夜波动, 但水温、溶解氧、pH 值、电导率等物理化学指标昼夜变化幅度较小。在不同的天气条件下, 水温、溶解氧、Cl⁻ 等昼夜变化幅度存在差别; 池水二氧化碳分压($p\text{CO}_2$)、Ca²⁺、DIC 白天降低、晚上升高, 方解石饱和指数(SIc)相反; 这些指标的变化受控于温度、碳酸盐岩矿物的溶解与沉淀、水生植物光合作用与呼吸作用; 通过亨利常数的计算, 发现水温变化对 $p\text{CO}_2$ 变化的影响仅占 0.79% ~ 10.01%, 水温、碳酸盐岩沉淀等物理因素对 DIC 损失量的贡献率为 39%, 水生植物光合作用的贡献率为 61%。

关键词: 生物作用; 春季; 山地; 岩溶池水; 地球化学; 昼夜尺度; 金佛山

中图分类号: X142; X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1263-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.04.017

Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season

YU Zheng-liang^{1,2}, YANG Ping-heng^{1,2*}, ZHAO Rui-yi^{1,2}, LI Lin-li^{1,2}, ZHANG Lin¹, TONG Xiao-rong¹, LUO Gang¹

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Field Scientific Observation & Research Base of Karst Eco-environments at Nanchuan in Chongqing, Ministry of Land and Resources, Chongqing 408435, China)

Abstract: Karst hydrologic system is quite sensitive to the surrounding environment, which leads to changes in the quality of karst water within diel, hours even minutes. Many surface water undergoes changes of pH value, dissolved gas, trace elements, nutrition and other hydrochemical parameters in a daily timescale. The Shuifang spring and its draining pool are located in Jinfo Mountain in Chongqing, the middle karst mountain belonging to temperate climate with an elevation of about 2 050 m a. s. l. Diel cycles of geochemistry were measured for three days and nights to investigate the influence of biological processes on the geochemistry of the karst pool. Results showed that the geochemistry of Shuifang spring didn't exhibit diel variations, while the pool water appeared diurnal change, even if the variation amplitudes of water temperature, pH value, dissolved oxygen and specific conductance were slight. Under different weather conditions, variation amplitude of the geochemical parameters in the pool appeared discriminatory. $p\text{CO}_2$ and concentrations of Ca²⁺, dissolved inorganic carbon (DIC) decreased during the day time and increased in night, while calcite saturation index (SIc) showed an inverse trend. Those phenomena might be attributed to water temperature change, calcite precipitation or dissolution and the process of metabolism by the aquatic plants in the pool. It was found that the influence of water temperature change on $p\text{CO}_2$ accounted for only 0.79% to 10.01% by means of calculation of Henry constants. DIC loss contributed by physical factors, such as temperature and calcite precipitation, accounted for 39%, whereas the metabolism of aquatic plants accounted for 61%.

Key words: biological processes; spring; mountain; karst pool water; geochemistry; diel timescale; Jinfo Mountain

受岩溶区特殊地质环境条件的影响, 岩溶水文系统是一种高度开放而又脆弱的系统, 对环境变化高度敏感, 存在季节变化, 还有昼夜、小时甚至分钟的变化^[1~3]。在岩溶水水质变化监测及其驱动因素探讨方面, 前人做了大量的研究工作, 关于土地利用方式改变对水质的影响, 以及年际、水文年等中长时间尺度的研究成果丰富^[4~6]。在短时间尺度研究

上, 降雨(暴雨)期间水质变化研究得较多^[1,7,8]。随

收稿日期: 2014-09-15; 修订日期: 2014-11-28

基金项目: 重庆市研究生科研创新项目(CYS14056); 重庆市国土房管科技项目(CQGT-KJ-2014056); 国家自然科学基金项目(41103068); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2014A016)

作者简介: 于正良(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为岩溶环境与水化学, E-mail: swuyzl@163.com

* 通讯联系人, E-mail: balance@swu.edu.cn

着监测技术的进步,人们对水文地质的认识在不断地深化. 国外学者们早在 19 世纪 50 年代便开始注意到陆地水生植物对水体化学的昼夜变化存在影响,即生物地球化学作用. 但直到 20 世纪 90 年代,水体中的生物地球化学循环研究才得以广泛地进行^[9],越来越多的学者开始关注昼夜时间尺度上的水质变化及其驱动因素,并普遍认为生物作用对地表水体水质变化存在一定的驱动作用^[9~11].

在开展过的昼夜时间尺度生物地球化学循环的研究中,有些水体中的水化学参数的变化可以在一年中的任何季节发生,而且其变化幅度可以与年际变幅相当^[10]. 因此,进行地表水体昼夜时间尺度水质变化的研究对于加深水质变化驱动因素的理解,以及解译水文、水质数据都具有较为重要的意义.

在前人进行的广泛研究中,所选取的研究区域以热带、亚热带等雨热充足的地区为主^[12~16],这里气温较高,水体中藻类丰富,生物代谢能力强,而关于海拔较高的山区岩溶池水中的生物地球化学循环较少有人涉及. 在研究时间段的选取上,有学者做过 4 个季节的水化学变化幅度的对比^[10],但大部分研究都在夏季进行,春季的研究并不多见. 同样,在监测天气的选择上,一般都是在晴朗的天气条件进行,很少有人进行过晴天与阴雨天气条件下生物地球化学指标变化的对比研究. 因此,本文以受表层岩溶泉补给的水房泉池水为研究对象,将泉水作为

对照,探究其地球化学指标在春季昼夜时间尺度上的变化幅度及形成机制,划分物理因素及生物因素对池水地球化学昼夜变化的贡献比例.

1 研究区概况

金佛山自然保护区(28°50′~29°20′N,107°00′~107°20′E)位于四川盆地东南缘的渝黔交接地带,属于大娄山东段. 总面积约 1 300 km²,主峰风吹岭,海拔 2 251.1 m. 山势高峻,切割强烈,陡崖峡谷较多. 在地质构造上,金佛山属于一个宽缓的向斜,轴部为二叠系碳酸盐岩地层,形成了海拔 2 000 m 左右的较大面积的缓坡和平台,发育有大型的岩溶洼地、落水洞、洞穴系统等岩溶形态. 受山体较大相对高差的影响,金佛山产生了垂直气候分带,山体下部为亚热带湿润季风气候,多年平均气温、降水量分别为 16.6℃、1 286.5 mm;山体上部具有温带湿润气候的某些特征,云雾多、日照少、雨量丰沛,空气湿度大,多年平均气温、降水量分别为 8.2℃、1 434.5 mm,降水集中分布于 4~10 月^[17].

水房泉及相邻的水池位于金佛山西坡的断崖上,海拔标高 2 050 m;出露地层为二叠系长兴组(P₂c),下覆地层为二叠系龙潭组粉砂、页岩质灰岩(P₂l),构成相对隔水层(图 1). 流域范围内生态环境良好,植被覆盖率高. 水房泉泉水流量基本在 0.5~38 L·s⁻¹ 范围内,年平均流量为 6.5 L·s⁻¹^[18]. 受泉水补给的水池长 10 m,宽 4 m,深约 1.5 m,池水

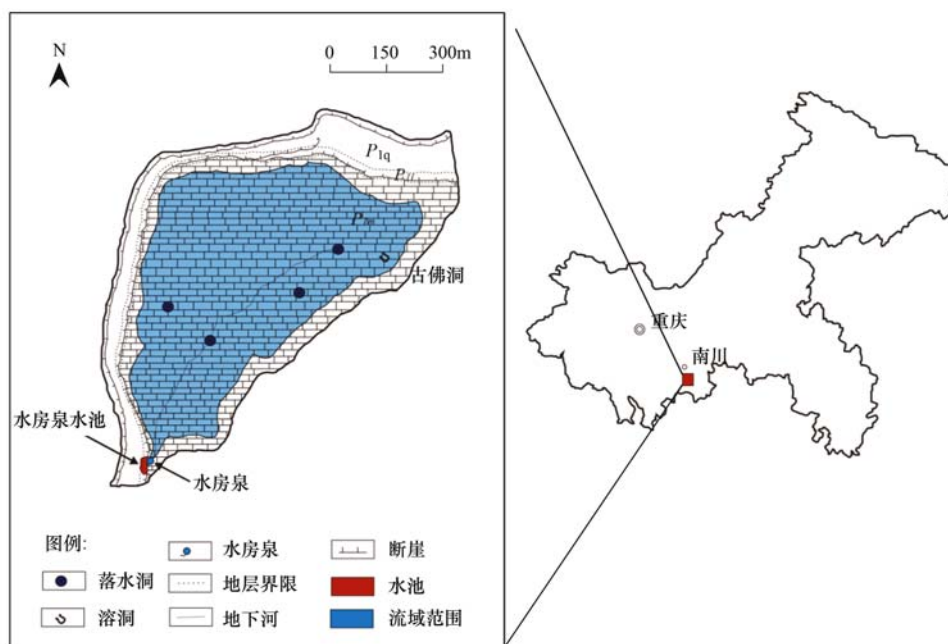


图 1 水房泉位置及流域地质平面示意

Fig. 1 Location and geologic map of Shuifang spring basin

中的植物以沉水植物为主, 主要为水绵属绿藻类^[11].

2 材料与方法

2.1 现场指标监测

本次昼夜监测时间为 2014-04-30T06:30 至 2014-05-03T11:00, 历时 76.5 h, 其中 4 月 30 日与 5 月 1 日是晴天, 太阳辐射较强, 5 月 2 日白天多云转小雨(日降水量为 3.3 mm), 太阳辐射变弱, 夜间至 5 月 3 日上午出现了阵雨(日降水量 16.6 mm), 监测期间水房泉水水位并未出现明显上升. 在此期间, 对泉水及池水进行同步监测.

利用 Manta2 多参数水质分析仪(美国 Eureka 公司)现场在线测定泉水及池水部分水化学指标的昼夜变化, 测试指标包括水位、水温、pH 值、电导率、溶解氧、盐度、TDS、浊度、 NO_3^- 、 Cl^- 等 10 项指标, 测试精度分别为 0.01 m、0.01℃、0.01、0.1 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、0.01 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.1 PSS、0.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.1 NTU、0.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 测试时间间隔为 5 min. 为了验证 Manta2 多参数水质分析仪的工作情况, 在泉水和水池中各安置一台 Multi3430 便携式多参数水质分析仪(德国 WTW 公司), 现场测定水温、pH 值、电导率、溶解氧 4 项指标, 测量精度分别达到 0.1℃、0.001、1 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、0.01 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 时间间隔设定为 5 min.

同时, 在水池护栏上安装了 GLZ-A 型光合有效辐射记录仪(浙江托普公司)以测试光合有效辐射强度, 测试时间间隔设定为 1 min, 测试精度 1 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$.

2.2 人工取样

在利用多参数水质分析仪自动监测的同时, 还进行了人工取样, 取样密度为 2~3 h 一组. 第一天晴好天气时进行了 2 h 间隔的加密采样, 之后的取样间隔放宽到白天 3 h 一组, 晚上 20:30 和 23:30 各取样一次.

利用德国 Merck 公司生产的碱度计和硬度计现场测试水体 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 浓度, 精度分别为 0.1 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 用 1:3 硝酸提前浸泡 48 h 并用超纯水润洗过的 60 mL 聚乙烯瓶取阳离子样品, 现场加入 3 滴 1:1 优级纯硝酸, 以保持金属离子活性. 用 500 mL 聚乙烯瓶获取阴离子样品, 取样前用取样水润洗 3 遍.

2.3 实验室分析

SO_4^{2-} 测试采用硫酸钡比浊法, 测试仪器为

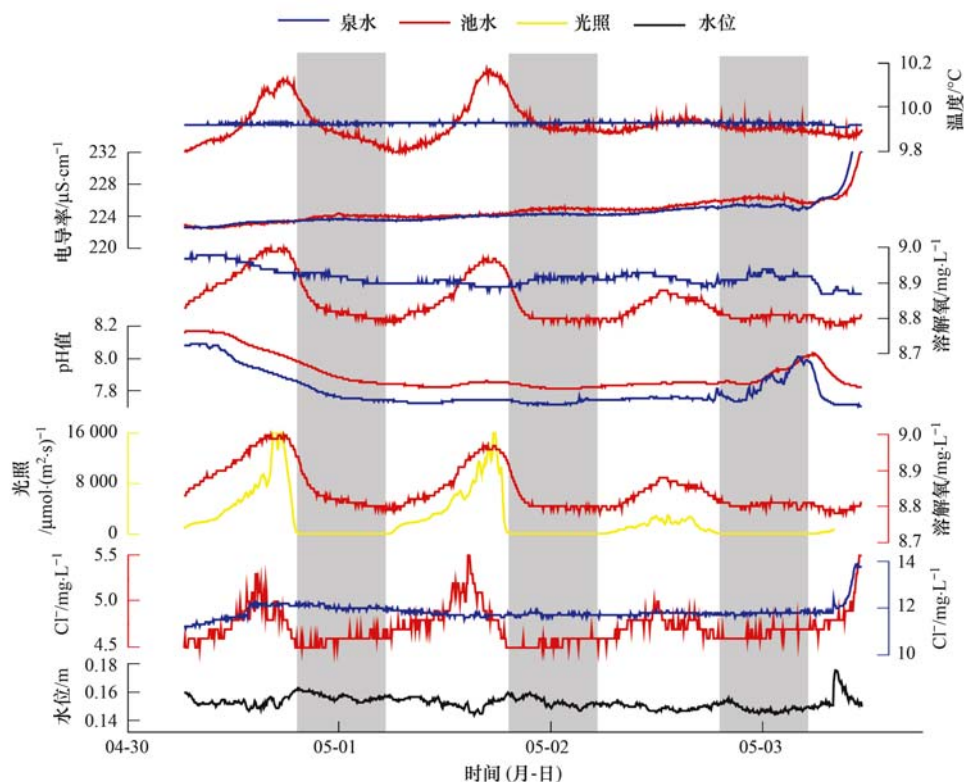
UV2450 紫外分光光度计(日本岛津公司); K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子利用电感耦合等离子体发射光谱仪(简称 ICP-OES, 美国 Perkin-Elmer 公司生产)测定, 仪器检测下限为 0.001 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 5 min 内 RSD 小于 2%. 样品测试在西南大学水化学实验室完成. SIc 与 $p\text{CO}_2$ 计算: 将水温、pH 值、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 等指标输入 WATSPEC15 软件中进行运算即可.

3 结果与分析

总体来说, 泉水的物理化学指标在昼夜时间尺度上变化不大, 而池水则展现出了较为明显的波动(图 2). 池水的水温、溶解氧、 Cl^- 昼夜变化幅度较大, 三者均在白天升高, 夜晚降低, 其中 Cl^- 与溶解氧变化趋势一致; pH 值、电导率、 $p\text{CO}_2$ 、SIc、 HCO_3^- 与 Ca^{2+} 表现出了较小幅度的昼夜变化: pH 值、SIc 白天升高, 晚上降低, 电导率、 $p\text{CO}_2$ 、 HCO_3^- 与 Ca^{2+} 白天降低, 晚上升高; 浊度、盐度、 NO_3^- 等指标未表现出明显的昼夜波动.

气温白天升高, 最高出现于日落前的 18:00 左右, 夜晚气温降低并在日出后的 06:00 左右达到最低值. 虽然监测中后期有阵雨发生, 但泉水水位并未出现明显上升. 泉水温度相当稳定, 基本维持在 9.9℃, 池水水温波动于 9.8~10.2℃, 平均温度 9.9℃. 泉水与池水电导率的变化大体一致, 为 223~231 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 监测前期变化平稳, 略有升高, 后期出现了较为明显的上升; 两条曲线存在细微的差别: 夜晚池水电导率略高于泉水, 白天低于泉水. 泉水中溶解氧浓度介于 8.87~8.98 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值 8.92 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 变幅仅 1.2%. 池水中的溶解氧浓度为 8.78~9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值 8.84 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 昼夜变幅接近泉水的两倍. 泉水与池水 pH 值分别变化于 7.7~8.1、7.8~8.2, 池水 pH 值整体大于泉水 0.1 左右, 两曲线均向下凸出, 监测后期出现一次峰值后再次回落. 泉水与池水 pH 值变化于 7.7~8.2, 呈弱碱性, 因此 DIC 主要以 HCO_3^- 形式存在^[19].

池水溶解氧含量与光合有效辐射变化高度一致, 光合有效辐射的峰值对应的也是溶解氧含量的峰值. Cl^- 的昼夜变化: 一般认为, Cl^- 在自然界中是相对保守的元素^[20], 泉水中 Cl^- 在观测期间表现较为平稳(观测后期有一定程度的升高), 但池水中的 Cl^- 含量却表现出强烈昼夜变化, 白天增加, 晚上减少, 其机制有待进一步的探究.



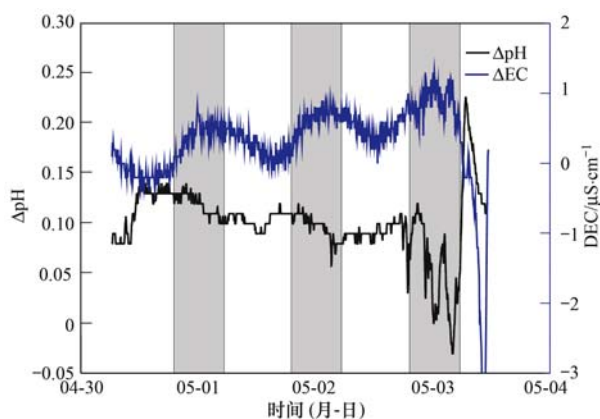
图中灰色部分代表黑夜,白色部分为白昼,下同

图2 泉水及池水物理化学指标昼夜变化

Fig. 2 Diel variation of physical-chemistry parameters of spring and pool water

为了更好地表现 pH 值、电导率、 $p\text{CO}_2$ 、 SiIc 、 DIC 与 Ca^{2+} 的昼夜波动,在此引入“ Δ ”的概念:“ Δ ”为以上指标在池水中的值减去同一时刻泉水中的数值。如 $\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{池水}} - \text{pH}_{\text{泉水}}$, $\Delta\text{EC} = \text{EC}_{\text{池水}} - \text{EC}_{\text{泉水}}$ 等(pH 值变化细微,在此使用的数据由精度更高的 WTW3430 测定,其精度为 0.001;电导率数据为 Manta2 测定,精度为 $0.1 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)。

图3表示 ΔpH 和 ΔEC 在监测期间的变化趋势,



$\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{池水}} - \text{pH}_{\text{泉水}}$, $\Delta\text{EC} = \text{EC}_{\text{池水}} - \text{EC}_{\text{泉水}}$

图3 池水 ΔpH 与 ΔEC 昼夜变化

Fig. 3 Diel variation of ΔpH and ΔEC in the pool water

从中可以看出,池水 ΔpH 呈现昼夜波动,波动幅度接近 0.075: 白天升高,夜晚降低; ΔEC 与 ΔpH 变化趋势相反: 白天降低,晚上升高,最低值出现于 14:00 左右,最大值出现于 00:00 附近,波动幅度接近 $1.2 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. ΔpH 与 ΔEC 昼夜变化幅度均大于仪器精度一个数量级,可以排除仪器误差造成的干扰。

ΔSiIc 整体大于 0,并表现出白天增加,晚上降低的趋势, $\Delta p\text{CO}_2$ 整体小于 -10 Pa ,与 ΔSiIc 变化趋势相反. ΔDIC 与 ΔCa^{2+} 的数据表现出了一定的昼夜波动: 白天降低,晚上增加;两者的变化幅度分别为 $0.3 \sim 0.4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $5 \sim 10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 说明池水中的 DIC 与 Ca^{2+} 浓度存在昼夜变化。

4 讨论

4.1 泉水地球化学指标的变化

泉水地球化学指标变化相对平稳,不存在昼夜时间尺度的变化,这与地下岩溶含水介质具有一定的调蓄功能有关. 地表水自裂隙、落水洞等通道进入地下后,在含水介质中与“老水”发生混合,而且地表水经过含水层到达排泄点有一定的时间,期间地表水受到含水介质的调蓄而改变其原有特性. 以

温度为例,地下含水介质多处于恒温层,因而泉水水温稳定. 其他指标也是如此.

在监测期间,泉水 pH 值出现了较大幅度的下降,电导率、 Cl^- 与 NO_3^- 出现了一定幅度的上升. $\text{NO}_3^- + \text{Cl}^-$ 浓度与 pH 值变化趋势基本相反(图 4),呈负相关关系($R^2=0.43$). 在“五一黄金周”期间,滞留在山上的游客数量骤增导致生活污水的排放量大增,泉域内与人类活动密切相关的 NO_3^- 与 Cl^- 浓度上升,这些物质进入地下水体后,使得 pH 值降低. 同时,溶解金属离子能力增强,电导率增加,这与李营刚等的研究成果基本一致^[21]. 因此,监测期间 pH 值总体降低和电导率的增加可能与游客数量

剧增有关.

4.2 池水物理化学指标的昼夜变化

池水在一定程度上继承了泉水的特征,但由于位于地表,其影响因子更为复杂. 在地表水中,各项地球化学指标并不是孤立的,它们之间存在一定的联系. 温度、水气交换、水体生物的光合作用、呼吸作用可以驱动 pH 值、溶解氧、 $p\text{CO}_2$ 、DIC 的昼夜变化,并能潜在地驱动碳酸盐岩矿物的溶解与沉淀^[11]. 在大部分的水体中, CO_2 浓度的变化控制着 HCO_3^- 的变化, HCO_3^- 的变化会将导致 pH 值的变化^[22],pH 值的变化进而引起电导率的改变,因而 $p\text{CO}_2$ 与水体 DIC 含量、pH 值及电导率有着直接的关系. 温度、水气交换等物理因素与水生植物的光合作用、呼吸作用共同导致了 $p\text{CO}_2$ 的昼夜变化,因而区分物理因素与生物因素对 $p\text{CO}_2$ 变化的贡献,对于认识控制池水物理化学指标变化的主导因素是有必要的.

为了量化温度日变化对池水 $p\text{CO}_2$ 的影响程度,通过计算温度对亨利常数的影响进行评估^[13]. 假定 K_{hmax} 、 K_{hmin} 分别为当日温度最低、最高时的亨利常数, $p\text{CO}_{2\text{max}}$ 为当日二氧化碳分压最高值, $p\text{CO}_{2\text{min}}$ 为当日二氧化碳分压最低值,可利用公式(1)来计算温度变化对池水 $p\text{CO}_2$ 变化的影响程度 F . 计算所得数据见表 1.

$$F = [(K_{\text{hmax}} - K_{\text{hmin}}) / K_{\text{hmax}}] \div [(p\text{CO}_{2\text{max}} - p\text{CO}_{2\text{min}}) / p\text{CO}_{2\text{max}}]$$

(1)

图 4 泉水 $\text{NO}_3^- + \text{Cl}^-$ 浓度与 pH 值变化
Fig. 4 Variation of $\text{NO}_3^- + \text{Cl}^-$ concentration and pH value in the spring

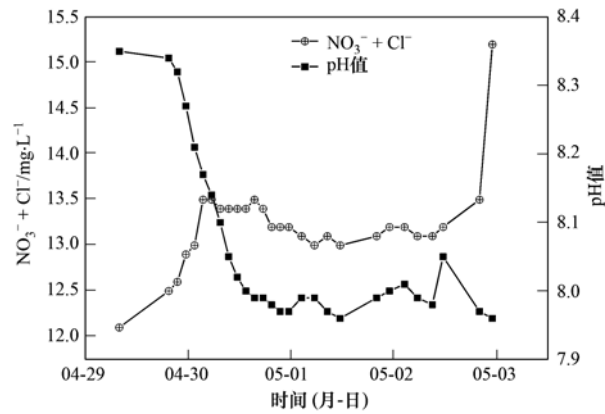


表 1 温度对 $p\text{CO}_2$ 的影响

Table 1 Influence of temperature on CO_2 partial pressure			
时间	$(K_{\text{hmax}} - K_{\text{hmin}}) / K_{\text{hmax}}$	$(p\text{CO}_{2\text{max}} - p\text{CO}_{2\text{min}}) / p\text{CO}_{2\text{max}}$	温度变化对 $p\text{CO}_2$ 变化的影响率/%
4 月 30 日	0.010 219 257	0.560 458 498	1.82
5 月 1 日	0.011 908 872	0.118 951 262	10.01
5 月 2 日	0.001 371 399	0.172 057 869	0.79

如表 1 所示,监测期间温度对水体 $p\text{CO}_2$ 的影响率为 0.79% ~ 10.01%. 可见仅为 0.4℃ 的水温变幅对 $p\text{CO}_2$ 的变化影响微弱. 同样,平稳的水流也限制了水气交换的进行, $p\text{CO}_2$ 的变化主要由生物作用引起. 这与前人的研究结果是相符合的^[23].

溶解氧作为水体一项重要的生物地球化学指标,是水体生态环境健康与否的指示剂^[24],它的变化情况可以反映水体生物地球化学作用的强弱. 一般而言, O_2 、 CO_2 等溶解性气体的溶解度是随着温度的降低而增加的^[16,25]. 因此,从理论上说,白天气温较高时的溶解氧浓度应该较低,晚上气温低时溶解氧浓度较白天高^[11],但监测结果却表明白天溶解

氧含量高,夜晚降低(图 2). 此外,溶解氧与 $p\text{CO}_2$ 值变化趋势相反也证明了温度并不是主要控制因素. 池水中溶解氧与光合有效辐射变化的高度一致,表明水生植物的光合作用才是驱动溶解氧变化的主要因子.

因此,生物作用对池水溶解氧、 $p\text{CO}_2$ 、pH 值、电导率等物理化学指标影响较大,温度变化、水气交换对其影响较小.

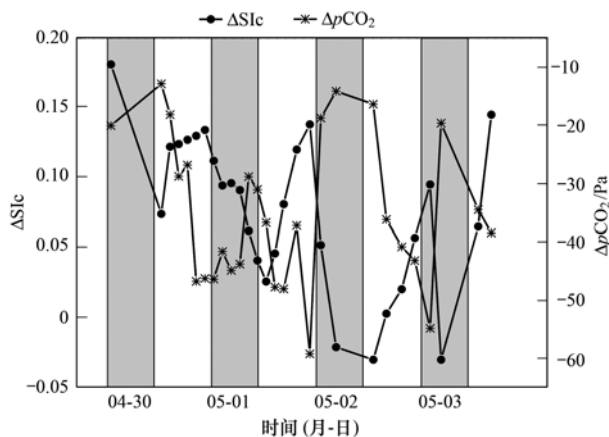
在某些生物生产力高且流速缓慢的溪流中,其物理化学指标的变幅很大,如 pH 值变化幅度可达到 2 以上^[26],水房泉池水 pH 值昼夜变化幅度仅为 0.075. 池水物理化学指标昼夜变化幅度小应该与

池水温度低、变化小和生物量不够丰富有较大的关系。

4.3 方解石饱和指数 (SIc) 及二氧化碳分压 ($p\text{CO}_2$) 的变化

在大部分的水体中, CO_2 浓度的变化控制着 pH 值的变化, 并且可以改变方解石饱和指数^[22]. 因此, 水生植物呼吸作用产生的 CO_2 浓度变化将会导致水体 SIc 的变化. 白天期间, 水生植物的光合作用使得水中的溶解性 CO_2 浓度降低, pH 值上升, 方解石饱和指数相应增加, 潜在地驱动碳酸盐岩沉淀. 相反, 晚上水生植物产生的 CO_2 又会导致水中溶解性 CO_2 浓度增加, pH 值降低, 方解石饱和指数降低, 潜在地驱动碳酸盐岩的溶解.

ΔSIc 的值基本都大于 0, 表明池水 SIc 大于泉水; $\Delta p\text{CO}_2$ 均小于 -10 Pa, 池水 $p\text{CO}_2$ 在监测期间始终小于泉水, 可以证明 $\text{SIc}_{\text{池水}}$ 始终大于 $\text{SIc}_{\text{泉水}}$ 主要是池水发生脱 CO_2 气体作用造成. ΔSIc 与 $\Delta p\text{CO}_2$ 的变化幅度分别为 0.12、50 Pa (图 5), 因此, 可以潜在地驱动碳酸盐岩在昼夜时间尺度上溶解、沉淀交替进行.



$$\Delta\text{SIc} = \text{SIc}_{\text{池水}} - \text{SIc}_{\text{泉水}}; \Delta p\text{CO}_2 = p\text{CO}_{2\text{池水}} - p\text{CO}_{2\text{泉水}}$$

图 5 ΔSIc 与 $\Delta p\text{CO}_2$ 昼夜变化

Fig. 5 Diel variation of ΔSIc and $\Delta p\text{CO}_2$

从图 6 来看, ΔHCO_3^- 与 ΔCa^{2+} 的数据表现出了一定的昼夜波动: 白天降低, 晚上增加; 两者的变化幅度分别为 $0.3 \sim 0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $5 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 说明池水中的 DIC 与 Ca^{2+} 浓度存在昼夜变化.

相比于泉水输入的 Ca^{2+} 和 DIC 浓度, 池水与之存在一定的差别. 温度变化、碳酸盐岩矿物的溶解与沉淀、水生植物的光合作用与呼吸作用是造成这些差别的主要因素^[11]. 如前所述, 温度对池水 $p\text{CO}_2$ 变化影响程度仅占 0.79% ~ 10.01%, 其对

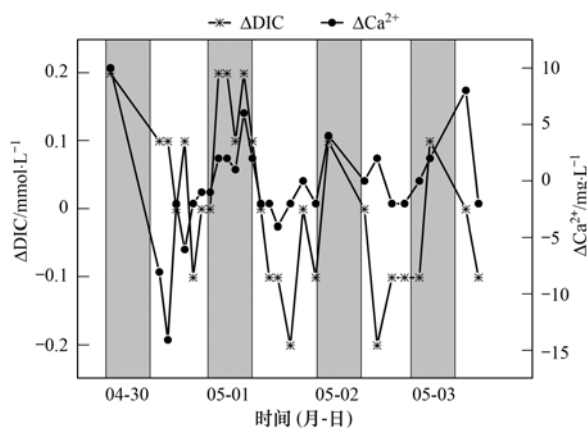
DIC 浓度所造成的影响较小. 碳酸盐岩溶解、沉淀造成的 Ca^{2+} 和 DIC 损耗可以通过公式 (2) 和 (3) 计算出来.

$$S_{\text{Ca}^{2+}} = \sum [\Delta\text{Ca}^{2+}] \times t \times Q \quad (2)$$

$$S_{\text{DIC}} = 2S_{\text{Ca}^{2+}} \quad (3)$$

$$Z_{\text{DIC}} = \sum [\Delta\text{DIC}] \times t \times Q \quad (4)$$

式中, $S_{\text{Ca}^{2+}}$ 与 S_{DIC} 分别表示碳酸盐岩溶解、沉淀造成的 Ca^{2+} 和 DIC 损耗, $[\Delta\text{Ca}^{2+}]$ 代表池水某一时刻损失的 Ca^{2+} 浓度 ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$), Z_{DIC} 为池水 DIC 总损耗量, $[\Delta\text{DIC}]$ 为池水某一时刻损失的 DIC 浓度, t 为时间 (s), Q 为流量 ($\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$).



$$\Delta\text{DIC} = \text{DIC}_{\text{池水}} - \text{DIC}_{\text{泉水}}; \Delta\text{Ca} = \text{Ca}_{\text{池水}} - \text{Ca}_{\text{泉水}}$$

图 6 ΔDIC 与 ΔCa^{2+} 昼夜变化

Fig. 6 Diel variation of ΔDIC and ΔCa

本次计算以监测期间 2014-05-01T01:30 至 2014-05-02T01:30 为例. 经计算, 得出 $S_{\text{Ca}^{2+}}$ 为 $1057 \text{ mmol} \cdot \text{d}^{-1}$, S_{DIC} 为 $2114 \text{ mmol} \cdot \text{d}^{-1}$. 池水中 DIC 的总损耗量可由式 (4) 算出, 计算结果显示, $Z_{\text{DIC}} = 5375 \text{ mmol} \cdot \text{d}^{-1}$. 因此, 水生植物光合作用所消耗的那一部分 $[\Delta\text{DIC}] = 5375 - 2114 = 3261 \text{ mmol} \cdot \text{d}^{-1}$, 即生物作用消耗了池水 60.67% 的 DIC, 碳酸盐岩沉淀消耗了 39.33% 的 DIC, 水生植物对池水 DIC 的影响明显大于物理因素.

5 结论

(1) 泉水地球化学特征未表现出昼夜波动, 而池水中的部分指标存在明显的昼夜变化: 水温、溶解氧、 Cl^- 、pH 值、SIc 白天升高, 夜晚降低; $p\text{CO}_2$ 、电导率、 Ca^{2+} 、DIC 白天降低, 晚上升高.

(2) 池水物理化学指标变幅偏小, 这与池水所处位置海拔高, 气温低、水流缓慢、生物量较小等山地岩溶区的特殊环境有关, 也与监测的时间为春

季有关。从不同天气状况来看,晴朗天气下的水温、溶解氧、 Cl^- 变化幅度大于阴雨天,这说明温度、水生植物光合作用、呼吸作用能显著地影响岩溶池水地球化学特征。

(3)通过计算温度对亨利常数的影响:发现监测期间温度对水体 $p\text{CO}_2$ 的影响率为 0.79% ~ 10.01%,水温变幅对 $p\text{CO}_2$ 的变化影响微弱, $p\text{CO}_2$ 的变化主要由水生生物作用引起。生物作用消耗了池水 60.67% 的 DIC,碳酸盐岩沉淀消耗了 39.33% 的 DIC,水生植物对池水 DIC 的影响大于物理因素的影响。

致谢:本实验得到了西南大学地理科学学院蒋先淑、刘肖、刘梦娇等的大力协助,在此一并致谢!

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.
- [2] Yuan D X. Sensitivity of karst process to environmental change along the PEPH transects [J]. *Quaternary International*, 1997, **37**: 105-113.
- [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.
- [4] 郭芳,姜光辉,裴建国,等. 广西主要地下水水质评价及其变化趋势[J]. *中国岩溶*, 2002, **21**(3): 195-201, 205.
- [5] 蒋勇军,袁道先,谢世友,等. 岩溶流域土地利用变化对地下水水质的影响——以云南小江流域为例[J]. *地理学报*, 2006, **61**(5): 471-481.
- [6] 贾鹏,蒋勇军,杨平恒. 典型岩溶槽谷区地下水水质变化对农业活动的响应——以重庆市青木关地下河为例[J]. *水土保持通报*, 2010, **30**(1): 205-209.
- [7] 杨平恒,袁道先,袁文昊,等. 以 PCA 揭示降雨期间岩溶地下水水文地球化学的形成[J]. *科学通报*, 2010, **55**(9): 788-797.
- [8] 杨平恒,旷颖仑,贺秋芳,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.
- [9] Nimick D A, Gammons C H, Parker S R, *et al.* Diel biogeochemical processes and their effect on the aqueous chemistry of streams: a review [J]. *Chemical Geology*, 2011, **283**(1-2): 3-17.
- [10] Nimick D A, Cleasby T E, McClesky R B. Seasonality of diel cycles of dissolved trace-metal concentrations in a Rocky Mountain Stream [J]. *Environmental Geology*, 2005, **47**(5): 603-614.
- [11] Jiang Y J, Hu Y J, Schirmer M. Biogeochemical controls on daily cycling of hydrochemistry and $\delta^{13}\text{C}$ of dissolved inorganic carbon in a karst spring-fed pool [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, **478**: 157-168.
- [12] Loperfido J V, Just C L, Schnoor J L, *et al.* High-frequency diel dissolved oxygen stream data modeled for variable temperature and scale [J]. *Environmental Engineering*, 2009, **135**(12): 1250-1256.
- [13] 莫雪,蒲俊兵,袁道先,等. 亚热带典型岩溶区地表溪流溶解无机碳昼夜变化特征及其影响因素[J]. *第四纪研究*, 2014, **34**(4): 873-880.
- [14] 张陶,蒲俊兵,袁道先,等. 亚热带典型岩溶区地表溪流水文地球化学昼夜变化及其影响因素研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 2944-2951.
- [15] Zhang C, Wang J L, Pu J B, *et al.* Bicarbonate daily variations in a karst river: the carbon sink effect of subaquatic vegetation photosynthesis [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, **86**(4): 973-979.
- [16] 刘再华,李强,孙海龙,等. 云南白水台钙华水池中水化学日变化及其生物控制的发现[J]. *水文地质工程地质*, 2005, **32**(6): 10-15.
- [17] 李林立,况明生,蒋勇军,等. 金佛山岩溶生态系统初步探讨[J]. *四川师范大学学报(自然科学版)*, 2003, **26**(2): 201-204.
- [18] Wu Y X, Jiang Y J, Yuan D X, *et al.* Modeling hydrological responses of karst spring to storm events: example of the Shuifang spring (Jinfo Mt., Chongqing, China) [J]. *Environmental Geology*, 2008, **55**(7): 1545-1553.
- [19] 沈照理,朱宛华,钟佐桑. 水文地球化学基础[M]. 北京:地质出版社,1993.
- [20] Mengis M, Schiff S L, Harris M, *et al.* Multiple geochemical and isotopic approaches for assessing ground water NO_3^- elimination in a riparian zone [J]. *Ground Water*, 1999, **37**(3): 448-457.
- [21] 李营刚,蒋勇军,张典. 旅游活动对岩溶地下水水质动态变化的影响——以重庆金佛山水房泉为例[J]. *环境污染与防治*, 2010, **32**(12): 14-17, 53.
- [22] Stumm W, Morgan J J. *Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters* [M]. (3rd ed.). New York: Wiley-Interscience, 1995.
- [23] 吕保樱,刘再华,廖长君,等. 水生植物对岩溶水化学日变化的影响——以桂林岩溶水文地质试验场为例[J]. *中国岩溶*, 2006, **25**(4): 335-340.
- [24] Poulson S R, Sullivan A B. Assessment of diel chemical and isotopic techniques to investigate biogeochemical cycles in the upper Klamath River, Oregon, USA [J]. *Chemical Geology*, 2010, **269**(1-2): 3-11.
- [25] Dreysdale R, Lucas S, Carthew K. The influence of diurnal temperatures on the hydrochemistry of a tufa-depositing stream [J]. *Hydrological Process*, 2003, **17**(17): 3421-3441.
- [26] Parker S R, Poulson S R, Gammons C H, *et al.* Biogeochemical controls on diel cycling of stable isotopes of dissolved O_2 and dissolved inorganic carbon in the Big Hole River, Montana [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(18): 7134-7140.

CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>	(1141)
Regional Source Apportionment of PM _{2.5} in Beijing in January 2013	LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>	(1148)
Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(1154)
Soluble of Metals within TSP in Shanghai	CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>	(1164)
Analysis of Component Spectral Characteristics of PM ₁₀ -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen	ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>	(1173)
Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes	WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>	(1182)
Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014	BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(1187)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM _{2.5-10} in Mountain Background Region of East China in Spring	SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>	(1195)
Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves	YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>	(1202)
Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province	HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>	(1208)
Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen	YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>	(1217)
Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes	SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>	(1227)
Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards	ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1234)
Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen	JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i>	(1241)
Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport	ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long	(1249)
Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary	WANG Miao-miao, SUN Zhi-guo, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>	(1256)
Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>	(1263)
Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event	REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>	(1270)
Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources	ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai	(1277)
Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period	LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>	(1285)
Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary	CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>	(1293)
Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake	WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>	(1301)
Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond	YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>	(1309)
Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer	LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>	(1317)
Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study	ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>	(1326)
Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using γ Irradiation	ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>	(1332)
Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony	CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>	(1338)
Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation	SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>	(1345)
Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol	KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>	(1352)
Photolysis of Gaseous HNO ₃ on the α -Fe ₂ O ₃ Films Under 308 nm UV Light	LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>	(1359)
Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode	HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>	(1365)
Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis	XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>	(1374)
Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i>	MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>	(1379)
Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water	LI Jing, LI Wen-ying	(1385)
Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process	LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>	(1392)
Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>	(1399)
Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1406)
Effects of Total Nitrogen and BOD ₅ /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor	YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>	(1412)
Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinpo Mountain, Chongqing	SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>	(1417)
Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province	ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1425)
Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain	SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil	WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>	(1437)
Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions	DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1445)
Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County	QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>	(1453)
Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure	WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>	(1461)
Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead	CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>	(1468)
Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling	XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>	(1474)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content	GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>	(1481)
A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area	CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>	(1489)
Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase	WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1497)
Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs	WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>	(1507)

《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)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 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