

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

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

|                                                                  |                                                  |
|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析 .....                                   | 王洪强, 贺千山, 陈勇航, 亢燕铭 (1215)                        |
| 乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征 .....                             | 陆辉, 魏文寿, 崔彩霞, 何清, 王瑶 (1223)                      |
| 典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布 .....                               | 吴辉, 金军, 王英, 李明圆, 何松洁, 徐萌, 孙一鸣 (1230)             |
| 某焦化厂周边大气 PM <sub>10</sub> 重金属来源及健康风险评价 .....                     | 董婷, 李天昕, 赵秀阁, 曹素珍, 王贝贝, 马瑾, 段小丽 (1238)           |
| 基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法 .....                             | 李润奎, 赵彤, 李志鹏, 丁文军, 崔骁勇, 许群, 宋现锋 (1245)           |
| 珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究 .....                                         | 孙成玲, 谢绍东 (1250)                                  |
| 低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究 .....                                        | 李华琴, 何觉聪, 陈洲洋, 黎宝仁, 黄倩茹, 张再利, 魏在山 (1256)         |
| 太子河流域莠去津的空间分布及风险评价 .....                                         | 郑磊, 张依章, 张远, 朱鲁生, 王志强 (1263)                     |
| 一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法 .....                              | 王燕, 朱春刚, 许笛, 丁士明 (1271)                          |
| 外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化 .....                                      | 傅玲, 赵凯, 王国祥, 欧媛, 范嫻, 毛丽娜, 张佳, 韩睿明 (1278)         |
| 基于物理过程的矿区地下水污染风险评价 .....                                         | 孙法圣, 程品, 张博 (1285)                               |
| 重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究 .....                                      | 杨平恒, 卢丙清, 贺秋芳, 陈雪彬 (1290)                        |
| 重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究 .....                                    | 蓝家程, 杨平恒, 任坤, 陈雪彬, 徐昕, 胡宁 (1297)                 |
| 苦草 ( <i>Vallisneria natans</i> ) 根系对沉积物中各形态磷的影响 .....            | 李振国, 王国祥, 张佳, 马久远, 魏宏农, 俞振飞 (1304)               |
| 循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究 .....                                           | 彭剑峰, 宋永会, 袁鹏, 张雪妍, 胡小明 (1311)                    |
| 不同环境因素下太湖中四环素的自然消减 .....                                         | 段伦超, 王凤贺, 纪莹雪, 张帆, 赵斌, 王国祥 (1318)                |
| 再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究 .....                                | 黄晶晶, 汤芳, 席劲璇, 庞宇辰, 胡洪营 (1326)                    |
| 二级处理出水的 UV-TiO <sub>2</sub> 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌光复活试验 .....              | 王西峰, 龚昕, 胡晓莲, 任伯帜 (1332)                         |
| 水中 C <sub>60</sub> 纳米颗粒的稳定性研究 .....                              | 方华, 沈冰冰, 荆洁, 陆继来, 王媛 (1337)                      |
| XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染 .....                                 | 赵应许, 纵瑞强, 高欣玉, 谢慧君, 殷永泉, 梁爽 (1343)               |
| 纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究 .....                             | 付融冰 (1351)                                       |
| 共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响 .....                                      | 王琪, 刘辉, 姜林, 唐军 (1358)                            |
| 硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究 .....                                     | 吴宣, 谭科艳, 胡希佳, 顾远, 杨宏 (1366)                      |
| 基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究 .....                                | 姜应和, 刘佩炬, 王磊, 田中凯, 刘小英 (1372)                    |
| 模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响 .....                                  | 陈燕, 黄芳, 谢鑫源 (1377)                               |
| 电活性生物膜介导 Cu <sup>2+</sup> 生物还原的试验研究 .....                        | 刘毅, 周顺桂, 袁勇, 刘志 (1384)                           |
| 模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收 .....                                          | 程丹, 朱能武, 吴平霄, 邹定辉, 邢翊佳 (1391)                    |
| 填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因 .....                                      | 何小松, 余红, 席北斗, 崔东宇, 潘红卫, 李丹 (1399)                |
| 化学合成施氏矿物与 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究 ..... | 王鹤茹, 宋永伟, 徐峙辉, 崔春红, 周立祥 (1407)                   |
| 处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究 .....                          | 杨娜, 陈秀荣, 林逢凯, 黄华, 章斐, 赵骏, 丁毅 (1414)              |
| 剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌群多样性的比较研究 .....                                | 董慧岭, 季民 (1421)                                   |
| 锰氧化菌 <i>Aminobacter</i> sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究 .....              | 晏平, 姜理英, 陈建孟, 何智敏, 肖少丹, 蒋铁锋 (1428)               |
| 1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性 .....                                          | 王弘宇, 杨开, 张倩, 季斌, 陈丹, 孙宇翀, 田俊 (1437)              |
| 碘普罗胺降解菌 <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 共代谢降解性能研究 .....              | 徐冰洁, 高品, 薛翌, 何梦琦, 吴凡 (1443)                      |
| 利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化 .....                       | 张梦露, 党志, 伍凤姬, 梁旭军, 郭楚玲, 卢桂宁, 杨琛 (1449)           |
| 毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究 .....                                  | 陈善佳, 陈秀荣, 闫龙, 赵建国, 章斐, 江子建 (1457)                |
| 缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响 .....                                     | 王珊, 赵树欣, 魏长龙, 于水燕, 史吉平, 张保国 (1462)               |
| 微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响 .....                                      | 王妮敏, 邓琦, 邹华, 梁婢娟 (1468)                          |
| 东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应 .....                                      | 张巍巍, 王光华, 王美玉, 刘晓冰, 冯兆忠 (1473)                   |
| 生物结皮的发育演替与微生物生物量变化 .....                                         | 吴丽, 张高科, 陈晓国, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1479)               |
| 老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响 .....                                       | 陈丽红, 刘征涛, 方征, 王晓南, 王婉华 (1486)                    |
| 土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议 .....                                         | 赵晓军, 陆泗进, 许人骥, 李伯苓, 吴国平, 魏复盛 (1491)              |
| 藏北可可西里地区土壤元素背景值研究 .....                                          | 柏建坤, 王建力, 李潮流, 康世昌, 陈鹏飞 (1498)                   |
| 三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析 .....                                | 胥焘, 王飞, 郭强, 聂小倩, 黄应平, 陈俊 (1502)                  |
| 浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析 .....                               | 厉炯慧, 翁珊, 方婧, 黄佳蕾, 陆芳华, 卢宇浩, 张洪铭 (1509)           |
| 西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征 .....                                   | 张海珍, 唐宇力, 陆骏, 周虹, 徐芸茜, 陈川, 赵赞, 王美娥 (1516)        |
| 生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价 .....                                        | 解惠婷, 张承中, 徐峰, 李海凤, 田振宇, 唐琛, 刘文彬 (1523)           |
| 上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征 .....                                       | 诸葛祥真, 毕春娟, 陈振楼, 张焕焕, 倪玮怡 (1531)                  |
| SDBS/Na <sup>+</sup> 对红壤胶体悬液稳定性的影响 .....                         | 唐颖, 李航, 朱华玲, 田锐, 高晓丹 (1540)                      |
| 稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究 .....                                      | 赵述华, 陈志良, 张太平, 潘伟斌, 彭晓春, 车融, 欧英娟, 雷国建, 周鼎 (1548) |
| 藻类水体 Cd <sup>2+</sup> 毒性快速监测新方法研究 .....                          | 段静波, 刘文清, 张玉钧, 赵南京, 殷高方, 肖雪, 余晓娅, 方丽 (1555)      |
| 用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究 .....                                    | 龙峰, 施汉昌, 王洪臣, 盛建武 (1561)                         |
| Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 吸附性能的研究 ..... | 钟琼, 李欢 (1566)                                    |
| 污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨 .....                                      | 廖晓勇, 陶欢, 阎秀兰, 赵丹, 林龙勇, 李尤 (1576)                 |
| 城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展 .....                                      | 杨孟, 李凤英, 刁一伟, 吴丹 (1586)                          |
| 水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展 .....                                       | 张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 杨毅, 安代志 (1597)                 |
| 六价铬细菌还原的分子机制研究进展 .....                                           | 李斗, 赵由才, 宋立岩, 尹雅洁, 王洋清, 徐中慧 (1602)               |
| 农副食品加工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术 .....                                    | 魏源送, 郁达伟, 曹磊 (1613)                              |
| 《环境科学》征稿简则 (1427) 《环境科学》征订启事 (1497) 信息 (1383, 1390, 1398, 1560)  |                                                  |

# 重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究

蓝家程<sup>1,2</sup>, 杨平恒<sup>1,2\*</sup>, 任坤<sup>1</sup>, 陈雪彬<sup>1,2</sup>, 徐昕<sup>1</sup>, 胡宁<sup>1</sup>

(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:** 随着城镇化不断发展, 我国地下水普遍遭受了不同程度的污染, 尤其是西南岩溶区地下水是当地重要的水源, 一旦遭受污染将很难恢复。本研究选取  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{NH}_4^+$  和总细菌 (total coliform)、大肠杆菌 (total *E. coli*)、粪大肠杆菌 (fecal coliform) 作为指标, 对重庆南山老龙洞流域进行多年来的调查研究。结果表明, 老龙洞流域地下水  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  含量均超过天然水规定值, 尤其以  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  污染较为严重。桂花湾泉  $\text{NO}_3^-$  含量为  $19.78 \sim 68.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 有的月份超过了世界卫生组织规定的标准  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。老龙洞出口  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  含量分别为  $2.71 \sim 12.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.16 \sim 11.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 是污染最重的地下水。老龙洞地下河  $\text{NO}_3^-$  含量低于岩溶表层泉, 而  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  含量则高于表层岩溶泉。城镇化的发展、农田减少以及洞内还原环境是导致老龙洞地下河  $\text{NO}_3^-$  含量从 2008 ~ 2013 年降低的原因, 而高  $\text{PO}_4^{3-}$  含量污水不断输入地下河使得老龙洞地下河  $\text{PO}_4^{3-}$  含量呈增加趋势。微生物污染极为严重, 甚至远超过中国地下水和饮用水规定的 V 类标准, 以粪大肠杆菌为例, 地下水中其含量波动范围为  $3.4 \times 10^4 \sim 3.68 \times 10^4 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。岩溶区由于特殊的水文地质结构, 岩溶洼地、天窗、落水洞导致岩溶地下水极易遭受到污染。农业活动、城镇、企业和居民点生产生活排污, 是地下水氮、磷和微生物污染的主要来源。

**关键词:** 城镇化; 老龙洞地下河流域; 氮、磷和微生物污染; 污染原因; 西南岩溶区

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1297-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.04.013

## Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing

LAN Jia-cheng<sup>1,2</sup>, YANG Ping-heng<sup>1,2</sup>, REN Kun<sup>1</sup>, CHEN Xue-bin<sup>1,2</sup>, XU Xin<sup>1</sup>, HU Ning<sup>1</sup>

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

**Abstract:** With urbanization, groundwater in China has been widely polluted. Karst groundwater is important in southwest China, and would be difficult to recover once contaminated.  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ , total coliform, total *E. coli* and fecal coliform were chosen as indexes in the study of groundwater of Laolongdong Underground River System in Nanshan Mountain, Chongqing. After a few years of survey, the results showed that  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{PO}_4^{3-}$  concentrations in the water were all above the nature value, especially  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{PO}_4^{3-}$ . The  $\text{NO}_3^-$  concentration of Guihuawan spring ranged from  $19.78 \sim 68.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , in some months, above the recommended water quality guideline ( $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) according to Standards for Drinking Water Quality set by World Health Organization.  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{PO}_4^{3-}$  concentrations in Laolongdong underground river varied from  $2.71 \sim 12.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  and  $0.16 \sim 11.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . The  $\text{NO}_3^-$  concentration in Laolongdong underground river was lower than in karst spring; however, the concentrations of  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{PO}_4^{3-}$  were higher than in the spring. It seemed that the  $\text{NO}_3^-$  concentration tended to decrease from 2008 to 2013 in the underground river caused by urbanization, reduction of farmland and reducing environment. However, waste water with a high  $\text{PO}_4^{3-}$  concentration led to an increasing trend in the  $\text{PO}_4^{3-}$  concentration in underground river. Microbial contamination was extremely serious, and even far exceeded class V of water quality standards of China. For example, the concentration of fecal coliform in the groundwater ranged from  $3.4 \times 10^4 \sim 3.68 \times 10^4 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ . Because of the special hydrogeological structure, karst depressions, skylights and sinkholes can lead pollutants easily to the underground water. Agriculture activity, sewage from towns, enterprises and residential areas were the major sources of nitrogen, phosphorus and microbial contamination.

**Key words:** urbanization; Laolongdong underground river system; nitrogen, phosphorus and microbial contamination; pollution reasons; Karst areas in Southwest China

西南岩溶区特殊的地质背景形成的相对脆弱的生态环境, 敏感度高<sup>[1]</sup>, 引起了岩溶区一系列的生态

收稿日期: 2013-08-28; 修订日期: 2013-10-25

基金项目: 重庆市院士专项 (cstc2013jcyjys20001); 中央高校基本科研业务费专项 (XDJK2013D012); 国家自然科学基金项目 (41072192, 41103068); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (41301541); 2011 年度重庆市国土房管局科技计划项目

作者简介: 蓝家程 (1986 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为岩溶环境学与土壤环境, E-mail: lanjc@swu.edu.cn

\* 通讯联系人, E-mail: balance @ swu.edu.cn

态环境问题. 目前,除了干旱、洪涝、水土流失、石漠化和岩溶工程地质灾害外<sup>[2]</sup>,地下水污染也成为岩溶区重要的环境地质问题<sup>[3]</sup>. 近年来,地下水污染问题引起了政府和学术界的广泛重视. 2011 年 10 月国务院正式批复《全国地下水污染防治规划(2011~2020 年)》首次对全国地下水污染防治工作做出总体部署,标志着地下水污染防治工作正式纳入国家规划. 然而随着重庆社会、经济的快速发展,城市化速度加快,城市规模急剧扩大,地下水污染事件不断被发现. 西南岩溶区特殊的“地表地下双层结构”使其防污性很脆弱,导致大部分地下水容易遭受污染<sup>[4~8]</sup>. 关于岩溶区地下水氮污染及运移、来源研究比较多<sup>[9~12]</sup>,而国内有关磷和微生物污染<sup>[13,14]</sup>的研究并不多见. 城市化进程严重污染了部分岩溶地下水系统,使其成为名副其实的“下水道”. 其中以重庆南山老龙洞地下河最为典型,曾引起媒体的高度重视,并认为该地下水系统已经成为下水道,面临“污染源多样化,无机与有机污染并存,污染由点向面扩展”的严峻形势,引发了社会的广泛关注. 本文通过对重庆南山老龙洞地下河流域进行多年监测,对地下水氮、磷和微生物污染进行研究. 结合野外水文地质和污染源调查以及文献分析,指出目前该流域地下水水质状况,并讨论其污染特征和原因.

## 1 研究区概况

南山岩溶槽谷地区位于重庆市区东南面南岸区与巴南区境内,东经  $29^{\circ}32'30''$ ,北纬  $106^{\circ}37'30''$ ,为亚热带湿润气候,年均降雨量 1 100 mm,降雨主要集中在 4~9 月,区内植被主要为亚热带常绿阔叶林,土壤为黄壤和石灰土. 区域整体地貌类型为背斜低山,背斜北段由于受到 NW-SE 侧向挤压应力作用,西翼陡峻,东翼平缓,并形成一复式背斜,呈现“一山二岭一槽”的岩溶景观;背斜南段受到近东西向挤压力作用,呈现“一山三岭两槽”的岩溶景观. 整个背斜轴部地层为三叠系下统嘉陵江组( $T_{1j}$ )碳酸盐岩;背斜两翼为三叠系中统雷口坡组( $T_{2l}$ )碳酸盐岩和三叠系上统须家河组( $T_{3xy}$ )地层(图 1).

老龙洞地下河流域位于南山岩溶槽谷核部,沿背斜轴部南北纵向发育,流域内碳酸盐岩面积约 11 km<sup>2</sup>. 岩溶槽谷内广泛分布有岩溶洼地、岩溶裂隙、落水洞,并有表层岩溶泉出露. 老龙洞地下河总长约 6 km,地下河出口为老龙洞风景区,常流量为 50~80 L·s<sup>-1</sup>.

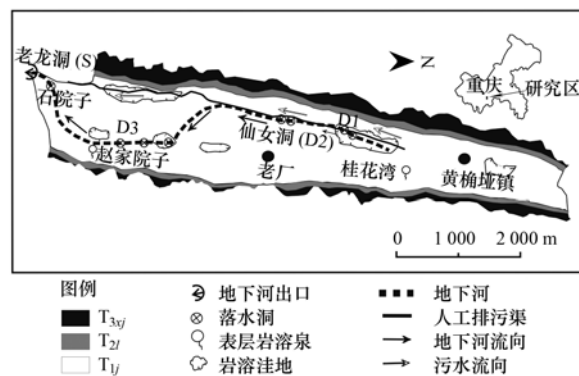


图 1 研究区位置和水文地质

Fig. 1 Location and hydrogeological map of study area

流域面积大约为 12.6 km<sup>2</sup>,其中,居民建设用地约 4.5 km<sup>2</sup>,厂矿用地约 2.5 km<sup>2</sup>,农业用地约 2 km<sup>2</sup>,其余为林地及在建地. 流域总人口为 50 000 人. 随着城镇化发展,农地被占用,建设用地有扩大趋势,地下水将面临更多污水的污染.

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集

2008 年 4 月~2013 年 5 月,每月一次定期采集老龙洞地下河出口,2010 年 9 月~2013 年 5 月每月一次定期采集桂花湾和赵家院子表层岩溶泉水样. 为了探究污染源,2013 年 4、5 月对可能与老龙洞地下河有水力联系的落水洞进行了采样. 用事先清洗过的 50 mL 高密度聚乙烯塑料瓶采集阴、阳离子水样. 2012 年 1 月~2013 年 5 月,使用标准美国 brand 微生物采样袋,水面以下打开采样袋,收集地下水样品,放入野外便携冰箱密封 4~8℃ 保存,带回实验室 8 h 内接种,培养,分析检测总细菌 (total coliform)、大肠杆菌 (total *E. coli*)、粪大肠杆菌 (fecal coliform).

### 2.2 水化学分析

样品带回实验室使用紫外分光光度计分析 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>,其中 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 测定采用钼酸铵比色法, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 采用靛酚蓝比色法,使用仪器为 UV2450 紫外-可见分光光度计(日本 Shimadzu 公司)阳离子使用 ICP-OES Optima 2100DV(美国 PerkinElmer 公司)检测,仪器 1 h 内相对标准偏差 ≤ 0.5%.

### 2.3 微生物分析

微生物分析采用滤膜法. 根据地下水类型和前期检测数据,确定适当的接种浓度. 每个样品接种 3 个浓度梯度,每个浓度梯度接种 2 个以上平行样品. 接种完成后放入恒温培养箱,总细菌数和总大肠菌

群 37℃、粪大肠菌群 44.5℃ 培养 24 h 后计数。

## 2.4 示踪试验

选择极易溶于水、无毒、无味、自然含量极低且容易被仪器检测到的荧光素钠 (uranine) 和天来宝 (Tinopal CBS-X) 作为示踪剂,选取流域内桃子湾 (D1)、仙女洞天窗 (D2) 和赵家院子落水洞 (D3) 作为示踪剂投放点,老龙洞地下河出口 (S) 作为唯一接收点。使用瑞士 Albillia 公司生产的野外自动化荧光仪 (flow-through field flourometer, 型号为 GGUN-FL30) 在线高分辨率进行野外自动监测,每 5 min 测试一组数据,荧光素钠的分辨率为  $0.01 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,天来宝的检测下限为  $0.02 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。示踪试验总共进行 3 次。第一次于 2012 年 5 月在 D2 处投放荧光素钠,第二次为 2012 年 7 月在 D1 处投放荧光素钠,第三次则在 D3 处投放天来宝示踪剂。3 次示踪都在 S 处回收示踪剂。

## 3 结果与分析

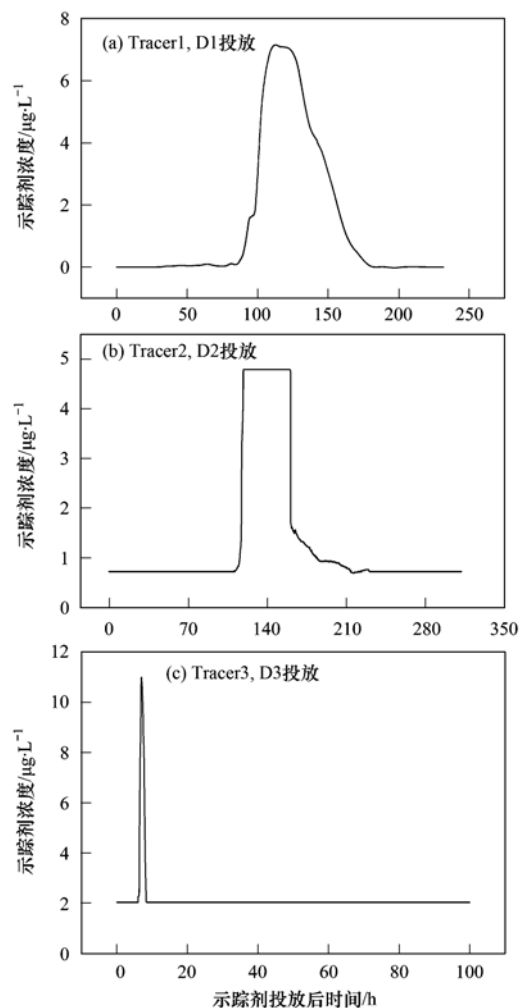
### 3.1 示踪试验结果

3 次示踪试验的曲线如图 2, Tracer1、Tracer2、Tracer3 分别为 3 次示踪试验结果。试验结果表明 3 次示踪均在 S 处回收到示踪剂,D1、D2、D3 与 S 是相连通的,存在水力联系。示踪曲线可以分析岩溶含水层结构特征,影响示踪剂浓度随时间变化曲线的主要因素是地下河的结构特征<sup>[15]</sup>。从图 2 可以看出,示踪剂浓度历时曲线为单峰型,说明岩溶含水介质极不均匀,通道相对单一。

### 3.2 主要指标

#### 3.2.1 氮、磷污染

根据中华人民共和国地下水环境质量标准 (GB/T 14848-93) 地下水  $\text{NO}_3^-$ -N 的天然背景浓度小于  $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,而天然地下水中  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 的含量低于  $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  或者  $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ <sup>[16]</sup>。由表 1 可知,老龙洞流域地下水  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{PO}_4^{3-}$  含量均超过了天然水条件下的含量,表明地下水系统已经受到人类活动的影响。以  $\text{NO}_3^-$  来看,其平均含量为:桂花湾和赵家院子泉 > 赵家院子落水洞 > 老龙洞 > 污水出口 > 石院子落水洞 > 仙女洞,且各个监测点变化范围较大。然而,除了桂花湾外,所有监测点  $\text{NO}_3^-$  含量均低于世界卫生组织规定的饮用水标准  $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (表 1)。由表 1 可知,所有监测点均有检测到  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  平均含量高低表现为落水洞 > 地下河 > 岩溶表层泉 (污水出口和仙女洞并未监测)。根据《地下水环境质量标准》GB/T 14848-93,桂花湾泉属于Ⅲ类水



接收点均为 S

图 2 高分辨率示踪历时曲线

Fig. 2 Curves of high-resolution tracing test

质,赵家院子泉属于Ⅳ类水,而老龙洞地下河则明显超过Ⅴ类水标准。进入落水洞的水为周边生活污水或企业废水  $\text{NH}_4^+$  含量最高。以  $\text{PO}_4^{3-}$  来看,赵家院子落水洞 > 污水出口 > 老龙洞 > 仙女洞 > 石院子落水洞 > 岩溶表层泉。

图 3 表明,老龙洞地下河从 2008 ~ 2013 年以来,  $\text{NO}_3^-$  含量呈现逐渐降低趋势,  $\text{PO}_4^{3-}$  含量与  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  含量则呈现逐渐增加的趋势,主要是因为老龙洞地下河常年溶解氧 (DO) 含量低于  $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,处于还原环境,不利于以  $\text{NO}_3^-$  的形式存在,反而  $\text{NH}_4^+$  含量较高;另外这几年城镇化使农田逐渐减少,化肥的使用使氮的输入减少。  $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  含量呈现逐渐增加表明城镇化效应明显,  $\text{PO}_4^{3-}$  主要来源为洗涤剂等生活污染源,研究区污水  $\text{PO}_4^{3-}$  含量最高,导致地下河  $\text{PO}_4^{3-}$  含量也很高。值得一提的是进入 2013 年以后,地下河中的  $\text{PO}_4^{3-}$

表 1 各监测点水质指标范围及平均值<sup>1)</sup>

Table 1 Mean(max and min) values of water quality index in each monitor point

| 监测点     | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>/mg·L <sup>-1</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup><br>/mg·L <sup>-1</sup> | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup><br>/mg·L <sup>-1</sup> | 总细菌<br>/CFU·mL <sup>-1</sup>       | 大肠杆菌<br>/CFU·mL <sup>-1</sup>    | 粪大肠杆菌<br>/CFU·mL <sup>-1</sup> |
|---------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| 桂花湾     | 19.78 ~ 68.55<br>45.63                              | 0.03 ~ 0.15<br>0.09                                 | 0.09 ~ 2.32<br>0.72                                  | 100 ~ 2 780<br>867.33              | 39.5 ~ 1 200<br>269.83           | 3.4 ~ 390<br>89.78             |
| 污水出口    | 2.79 ~ 12.61<br>7.29                                | —<br>—                                              | 2.13 ~ 16.50<br>8.60                                 | 50 000 ~ 7 020 000<br>2 076 428.57 | 85 000 ~ 1 055 000<br>666 375.00 | 7 420 ~ 180 500<br>106 115.00  |
| 仙女洞天窗   | 0.93 ~ 1.16<br>1.04                                 | —<br>—                                              | 2.32 ~ 4.35<br>3.33                                  | 81 000 ~ 246 000<br>130 700        | 5 050 ~ 176 000<br>57 120        | 930 ~ 12 400<br>5 459          |
| 赵家院子泉   | 9.02 ~ 45.14<br>33.75                               | 0 ~ 1.62<br>0.48                                    | 0.04 ~ 2.32<br>0.46                                  | 175 ~ 31 000<br>9 734.09           | 55 ~ 10 850<br>8 878             | 10 ~ 1 390<br>257.66           |
| 赵家院子落水洞 | 2.71 ~ 46.16<br>24.44                               | 20.44 ~ 23.59<br>22.02                              | 21.66 ~ 62.04<br>41.85                               | 750 000<br>—                       | 155 000<br>—                     | 92 500<br>—                    |
| 石院子落水洞  | 0.56 ~ 8.09<br>3.28                                 | 8.20 ~ 12.93<br>11.07                               | 0.56 ~ 1.52<br>0.88                                  | 151 000<br>—                       | 60 500<br>—                      | 14 000<br>—                    |
| 老龙洞     | 0.21 ~ 44.39<br>12.84                               | 2.71 ~ 12.92<br>6.45                                | 0.16 ~ 11.22<br>2.54                                 | 5 800 ~ 164 500<br>75 771.43       | 950 ~ 164 500<br>30 930.00       | 230 ~ 36 800<br>3 939.09       |

1) “—”为未检测

含量有降低的趋势,这主要是由于地下河上游黄桷埡镇排放的污水不再直接排入落水洞,而是通过新修的地下排污管道排走。

### 3.2.2 微生物污染

由表 1 可知,选取的 3 种微生物指标表明,南山老龙洞地下水中微生物含量很高,尤其是仙女洞、地下河和赵家院子泉污染最严重。从图 4 可知,仙女洞、老龙洞地下河全部月份,赵家院子泉除了 2013 年 2 月外,微生物含量都远远超过中国地下水和饮用水规定的 V 类标准。仙女洞和老龙洞地下河总细菌数最高可达  $1.6 \times 10^5$  CFU·mL<sup>-1</sup>,且大多月份达到  $10^5$  CFU·mL<sup>-1</sup> 水平,大肠杆菌含量也高达  $1.6 \times 10^5$  CFU·mL<sup>-1</sup> 以上,老龙洞粪大肠杆菌含量最高达到  $3.68 \times 10^4$  CFU·mL<sup>-1</sup>,仙女洞则高达  $1.24 \times 10^4$  CFU·mL<sup>-1</sup>;赵家院子泉水微生物污染仅次于老龙洞地下河,只有桂花湾泉水的微生物污染最轻,但仍常年检测到粪大肠菌的存在,且其含量超过 1 CFU·mL<sup>-1</sup>,而国家相关规定,Ⅱ类水为 100 mL 水中不得检出粪大肠菌。因此,即使水质最好的桂花湾泉水,其细菌总量仍超出国家Ⅱ类水标准的 100 倍以上。在调查流域内的几个排污口中,以南山污水出口水中的微生物含量最多,其数量全年大多在  $10^6$  CFU·mL<sup>-1</sup> 以上(图 4)。在下游的南山老龙洞和仙女洞,微生物污染物的含量为南山污水出口的 1/10 ~ 1/100 左右,粪大肠菌的含量减少更多,有时比南山污水出口的数量少 3 个数量级。2013 年 5 月对赵家院子和石院子落水洞所排污水取样发现,其

总细菌含量也达到  $10^5$  CFU·mL<sup>-1</sup> 以上,大肠杆菌和粪大肠杆菌含量也都在  $10^4$  CFU·mL<sup>-1</sup> 以上(表 1)。这些数据表明,南山老龙洞地下河流域的水体都存在严重的微生物污染和动物粪便污染,地下河甚至已相当于污水。

## 4 讨论

### 4.1 污染原因分析

岩溶区由于特殊的水文地质结构,导致岩溶地下水极易遭受到污染。老龙洞地下河流域沿途分布着大小不一的落水洞、天窗和洼地,是地下河最主要的入口,污染物随着雨水最终进入地下河。然而,人为的通过这些通道排污在研究区普遍存在,使地下河遭受严重污染。

老龙洞地下河流域上游主要分布有黄桷埡街区、重庆邮电大学等主要的人口聚集区。在流域中下游分布有老厂社区、重庆第二师范学院、“重庆泉山市级小企业创业基地”等 20 来家小企业和大量火锅店。在流域下游还有拉法基水泥厂、巨成石材等厂矿以及汽修、电焊、木材厂等企业。老龙洞地下河流域内有一南北方向的地表排污沟渠,流域上游黄桷埡镇所有的污水都排入此沟渠(图 5)。由于地表排污渠设施不完善,存在渗漏的现象,沿途污水渠中的污水部分泄漏至低洼农田和落水洞;除了地表排污渠的污染外,在流域的中下游,居民点和小企业通过落水洞排放污水和倾倒垃圾的现象非常普遍。



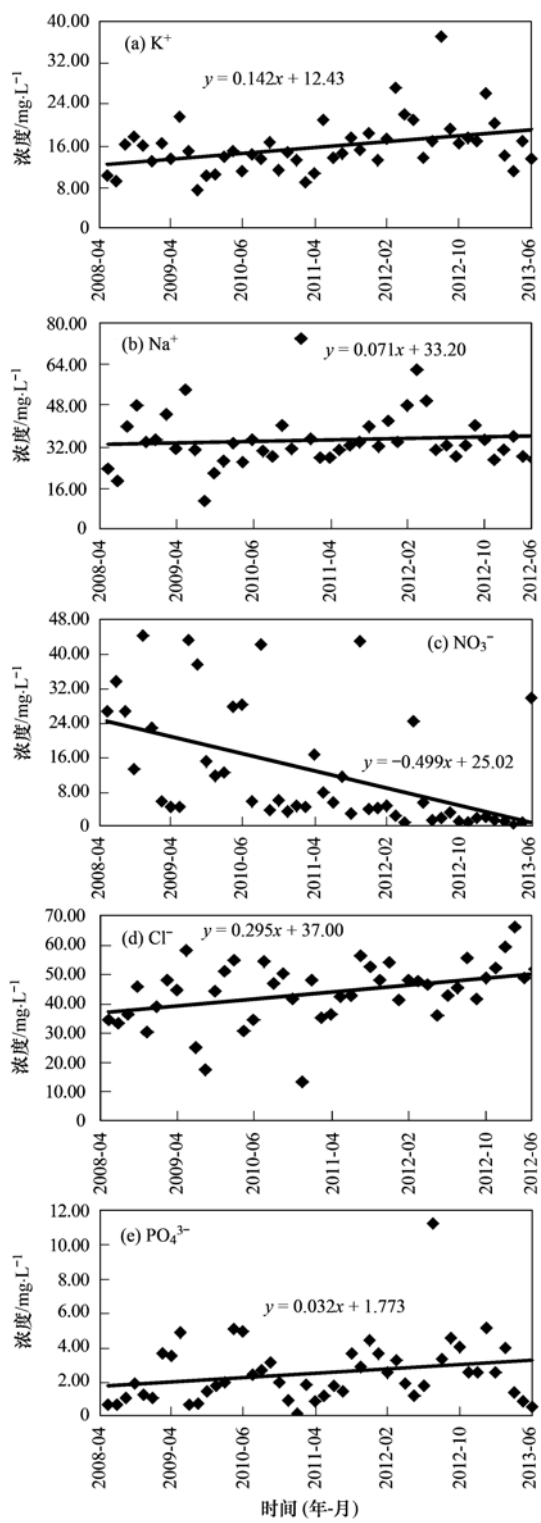


图3 2008~2013年 $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Cl^-$ 、 $NO_3^-$ 和 $PO_4^{3-}$ 变化趋势

Fig. 3 Linear fit of  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$  and  $PO_4^{3-}$  concentrations from 2008 to 2013

示踪试验可以确定水力联系,有助于判断地下水补给源以及污染源. 本研究总共进行的3次示踪试验表明,老龙洞地下河为岩溶管道系统,通过落水洞排放的污水与地下河有直接联系,是地下水的补

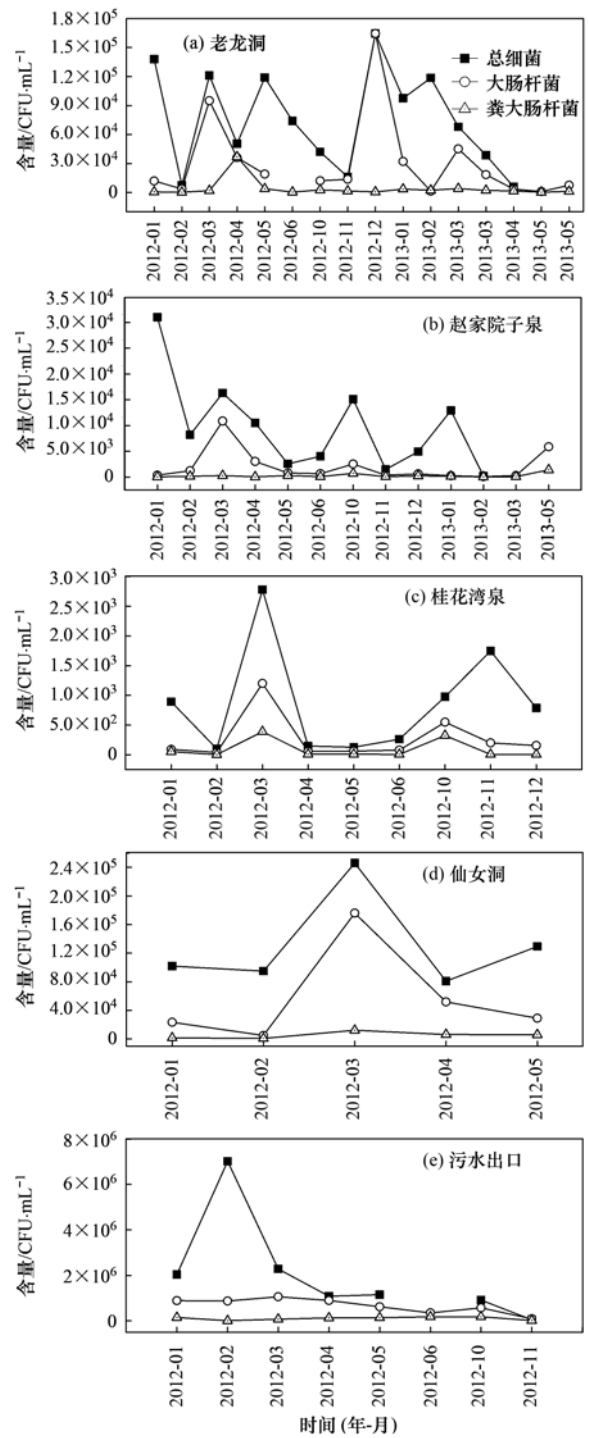


图4 老龙洞流域各监测点微生物含量月变化

Fig. 4 Monthly variations of microbiology concentrations of each monitoring point

给来源之一. 野外调查发现,排入落水洞的污水主要为上游黄桷垭镇和流域中下游的生活污水,以及流域下游企业废水. 另外,流域内污水排入农田,垃圾堆放等在雨水的驱动下,通过土壤层进入含水层.

4.2 地下水氮磷来源

研究表明,地下水中的 $NO_3^-$ 主要来源于人为活

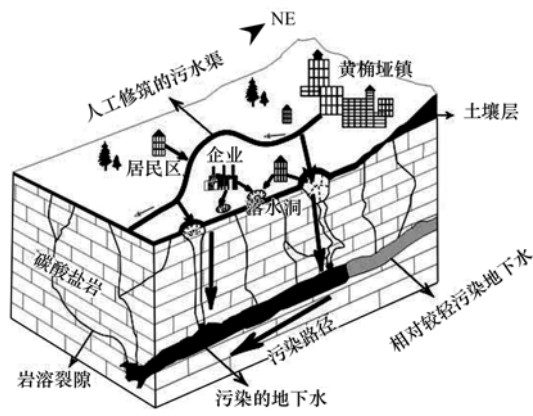


图5 老龙洞流域地下水污染示意  
Fig. 5 Sketch map of pollution in Laolongdong underground river system pollution

动的输入,例如农业施肥、大气输入、人类和动物排泄物、“三废”以及土壤有机氮矿化和硝化作用转化而来<sup>[9,17,18]</sup>,而 $\text{NH}_4^+$ 主要来自于生活污水、垃圾淋滤液、养殖场污水、企业废水等<sup>[19]</sup>.在农业活动区, $\text{PO}_4^{3-}$ 来自于化肥及人畜粪便<sup>[20,21]</sup>;另外还来自于生活污水中的洗涤剂.因此,研究区地下水氮、磷含量主要来自于施肥等农业活动和各种生活污水和企业废水.由表1和前面分析可知,地下河处于还原环境,来源于落水洞的 $\text{NH}_4^+$ 含量高,导致老龙洞地下河 $\text{NH}_4^+$ 超标,而 $\text{NO}_3^-$ 的含量相对较低.然而表层

岩溶泉 $\text{NO}_3^-$ 平均浓度高于地下河,雨季大于旱季,正好与农业施肥季节相对应,这不仅是雨季大量的降水形成径流或渗流淋溶使水体中 $\text{NO}_3^-$ 增加,而且雨热同期导致土壤和地下水中的微生物活动活跃,硝化作用进行快速,加速了土壤有机氮的转化和运移<sup>[22]</sup>.由此断定表层岩溶泉 $\text{NO}_3^-$ 主要来自农业施肥.研究区赵家院子泉主要受农业活动影响,其 $\text{PO}_4^{3-}$ 含量为 $0.04 \sim 2.32 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,而老龙洞地下河中 $\text{PO}_4^{3-}$ 含量却高达 $0.16 \sim 11.22 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,落水洞的污水中 $\text{PO}_4^{3-}$ 含量更高,表明农业活动对老龙洞地下河中 $\text{PO}_4^{3-}$ 的贡献相对较小, $\text{PO}_4^{3-}$ 主要来自于污水的排放,尤其是生活污水.

通常 $\text{Cl}^-$ 是水循环中的保守元素,其并不参与化学风化,但可以来自于人类源,比如农业化合物(碳酸钾或 $\text{KCl}$ )、含盐的生活污水、动物排泄物以及经过 $\text{Cl}_2$ 处理的自来水.表2是 $\text{Cl}^-$ 与 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ 之间的相关性,可以用来讨论它们的来源.从中可知,除了 $\text{NO}_3^-$ 外, $\text{Cl}^-$ 与其余离子都呈正相关,说明它们具有共同来源.研究表明受人类活动影响的地下水 $\text{NO}_3^-$ 与 $\text{Cl}^-$ 呈显著正相关<sup>[23]</sup>,但本研究中 $\text{NO}_3^-$ 与 $\text{Cl}^-$ 呈显著负相关,说明地下河中可能存在反硝化作用,这与3.2.1节分析相对应.

表2 老龙洞地下河各离子相关性<sup>1)</sup>  
Table 2 Correlation of ions in Laolongdong underground river

|                    | $\text{K}^+$ | $\text{Na}^+$ | $\text{NO}_3^-$ | $\text{Cl}^-$ | $\text{PO}_4^{3-}$ |
|--------------------|--------------|---------------|-----------------|---------------|--------------------|
| $\text{K}^+$       | 1            | 0.517 **      | -0.350 *        | 0.452 **      | 0.306 *            |
| $\text{Na}^+$      | 0.517 **     | 1             | -0.399 **       | 0.412 **      | 0.172              |
| $\text{NO}_3^-$    | -0.350 *     | -0.399 **     | 1               | -0.547 **     | -0.310 *           |
| $\text{Cl}^-$      | 0.452 **     | 0.412 **      | -0.547 **       | 1             | 0.334 *            |
| $\text{PO}_4^{3-}$ | 0.306 *      | 0.172         | -0.310 *        | 0.334 *       | 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

4.3 地下水微生物来源

大肠菌群主要来自动物粪便,但不同来源的大肠菌群生长温度不同.自然界中大肠菌群最适生长温度为 $25^\circ\text{C}$ ,而来自人类肠道的粪大肠菌群最适生长温度 $37^\circ\text{C}$ 左右.在 $37^\circ\text{C}$ 培养生长的大肠菌群,包括在粪便内生长的大肠菌群称为“总大肠菌群”(total coliform),在 $44.5^\circ\text{C}$ 仍能生长的大肠菌群称为“粪大肠菌群”(fecal coliform).贺秋芳等<sup>[13]</sup>研究了降雨过程中岩溶地下河微生物污染发现,降雨过程中地下水中的微生物主要来自于家禽粪便和土壤微生物.大肠杆菌进入土壤后在土壤中滞留休眠,且在土壤中滞留半年以上仍有活性,并在一次较强的降

雨过程下渗入洞穴和地下河中<sup>[24]</sup>.岩溶地区由于独特的“二元”水文地质结构<sup>[25]</sup>,土层浅薄,对微生物和其它污染物截留降解有限,污染质容易通过落水洞,岩溶裂隙等进入地下水系统,形成特殊的脆弱性.野外调查发现,2013年2月以前,老龙洞流域上游的黄桷埡城镇的生活污水有一部分直接排入落水洞;部分作为灌溉水用于农地灌溉,由于农地离落水洞比较近,降水形成的地表径流携带土壤物质进入落水洞,或者土壤中的污染物被淋溶进入地下水系统;另外居民点和小企业通过落水洞排放污水和倾倒垃圾.这些都是地下水中微生物污染的主要来源.



## 5 结论

(1) 随着城镇化发展,受人类活动影响,老龙洞流域地下水  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  含量均超过天然水规定值,尤其以  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  污染较为严重.而微生物污染极为严重,甚至远超过中国地下水和饮用水规定的 V 类标准.

(2) 岩溶区由于特殊的水文地质结构,农业活动、城镇、企业和居民点生产生活的不合理的排污,导致岩溶地下水极易遭受到污染,老龙洞地下河成为名副其实的“下水道”.这些人类活动的输入,是地下水氮、磷和微生物污染的主要来源.

(3) 针对老龙洞地下河流域特殊的岩溶地质环境及污染现状,今后老龙洞流域的污染防治应着重在以下方面:①严格执法,禁止向落水洞和洼地排污,对随意向落水洞、岩溶洼地排污的行为严惩不贷.②采取必要的工程措施切断仍威胁老龙洞地下河的污染源,修建排污管道、污水处理站和垃圾处理厂,将污水、城市垃圾进行集中处理;③清理地下河中的淤泥,并对其进行处理后再利用;④加强宣传和教育力度,使群众对岩溶区地下水重要性具有深刻的认识,增强公众保护岩溶地下水资源的自觉性.

致谢:在野外和室内工作中得到西南大学地理科学学院老师和同学的帮助,在此一并致谢!

## 参考文献:

- [1] 李阳兵,邵景安,王世杰,等.岩溶生态系统脆弱性研究[J].地理科学进展,2006,25(5):1-8.
- [2] 袁道先.我国西南岩溶石山的环境地质问题[J].世界科技研究与发展,1997,19(5):41-43.
- [3] 郭芳,姜光辉,蒋忠诚.中国南方岩溶石山地区不同岩溶类型的地下水与环境地质问题[J].地质科技情报,2006,25(1):83-87.
- [4] 蒋勇军,袁道先,谢世友,等.典型岩溶农业区地下水水质与土地利用变化分析[J].地理学报,2006,61(5):471-481.
- [5] 郭芳,姜光辉.岩溶盆地中农业和村镇引起的地下水化学演变[J].地球与环境,2008,36(1):56-63.
- [6] Panno S V, Kelly W R. Nitrate and herbicide loading in two groundwater basins of Illinois' sinkhole plain[J]. Journal of Hydrology, 2004, 290(3-4):229-242.
- [7] 贾亚男,袁道先.土地利用变化对水城盆地岩溶水水质的影响[J].地理学报,2003,58(6):831-838.
- [8] Mahler B, Masseib N. Anthropogenic contaminants as tracers in an urbanizing karst aquifer[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2007, 91(1-2):81-106.
- [9] 汪智军,杨平恒,旷颖仑,等.基于 $^{15}\text{N}$ 同位素示踪技术的地下河硝态氮来源时空变化特征分析[J].环境科学,2009,30(12):3548-3554.
- [10] 蒲俊兵,袁道先,扈志勇,等.高分辨率监测岩溶地下水  $\text{NO}_3^-$  的动态变化及对外界环境的响应[J].环境科学,2011,32(3):680-686.
- [11] 伍坤宇,王鹏,沈立成,等.金佛山地区地下水硝态氮污染时空变异性研究[J].环境科学,2011,32(11):3247-3254.
- [12] 杨平恒,袁道先,任幼蓉,等.川东平行岭谷区典型岩溶含水系统中  $\text{NO}_3^-$  的存储和运移[J].环境科学,2012,33(9):3124-3131.
- [13] 贺秋芳,邱述兰,张兴波.降雨过程中岩溶地下河微生物污染及其指示意义[J].三峡环境与生态,2012,34(6):9-13.
- [14] 邹胜章,邓振平,梁彬,等.岩溶水系统中微生物迁移机制[J].环境污染与防治,2010,32(10):1-4.
- [15] 杨立铮,刘俊业.试用示踪剂浓度-时间曲线分析岩溶管道的结构特征[J].成都理工大学学报(自然科学版),1979,16(4):43-49.
- [16] Kilroy G, Coxon C. Temporal variability of phosphorus fractions in Irish karst springs[J]. Environmental Geology, 2004, 47(3):421-430.
- [17] Valdes D, Dupont J P, Laignel B, et al. A spatial analysis of structural controls on Karst groundwater geochemistry at a regional scale[J]. Journal of Hydrology, 2007, 340(1-4):244-255.
- [18] Jeong C H. Effect of land use and urbanization on hydrochemistry and contamination of groundwater from Taejon area, Korea[J]. Journal of Hydrology, 2001, 253(1-4):194-210.
- [19] 宁卓,张翠云,张胜.地下水铵污染及其氮同位素研究[J].南水北调与水利科技,2011,9(3):129-132.
- [20] Sims J T, Simard R R, Joern B C, et al. Phosphorus loss in agricultural drainage: historical perspective and current research[J]. Journal of Environmental Quality, 1998, 27(2):251-317.
- [21] Novak J M, Watts D W, Hunt P G, et al. Phosphorus movement through a coastal plain soil after a decade of intensive swine manure application[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(4):1310-1315.
- [22] 申宏岗,曹建华,潘根兴.岩溶生态系统中土壤微生物量氮含量及其变化规律[J].生态环境,2007,16(6):1728-1732.
- [23] Li X D, Liu C Q, Harue M, et al. The use of environmental isotopic (C, Sr, S) and hydrochemical tracers to characterize anthropogenic effects on karst groundwater quality: a case study of the Shuicheng Basin, SW China[J]. Applied Geochemistry, 2010, 25(12):1924-1936.
- [24] Vanderhoff, Sean M. Multiple storm event impacts on epikarst storage and transport of organic soil amendments in South-Central Kentucky[EB/OL]. Masters Theses & Specialist Projects, <http://digitalcommons.wku.edu/theses/1128>, 2011.
- [25] 袁道先.中国岩溶学[M].北京:地质出版社,1994.1-2.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                  |                                                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012 .....                                                                                    | WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215) |
| Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi .....                                         | LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)             |
| Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban .....                   | WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)                    |
| Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM <sub>10</sub> from One Coking Plant .....                                                                    | DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)           |
| Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration .....                                               | LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)            |
| Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta .....                                                                                                    | SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)                                |
| Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process .....                                                                                   | LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)       |
| Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China .....                                                                                           | ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)         |
| Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes .....  | WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)                |
| Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input .....                                                                                      | FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)             |
| Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area .....                                                                                         | SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)                            |
| Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing .....                                                                                        | YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)     |
| Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing .....                                                     | LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)        |
| Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria spiralis</i> .....                                                                            | LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)        |
| Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland .....                                                                                                 | PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)      |
| Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions .....                                                                    | DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)      |
| Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water .....                                                         | HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)       |
| Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO <sub>2</sub> .....                                 | WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)          |
| Stability of C <sub>60</sub> Nanoparticles in Aquatic Systems .....                                                                                                              | FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)            |
| Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach .....                                                                   | ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)      |
| Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) ..... | FU Rong-bing (1351)                                                 |
| Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene .....                                                                         | WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)                   |
| Research on Removal Efficiency of Cd(II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter .....                                                                          | WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)                |
| Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance .....                                                          | JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)           |
| Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> .....                                 | CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)                           |
| Microbial Reduction of Cu <sup>2+</sup> Mediated by Electroactive Biofilms .....                                                                                                 | LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)              |
| Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards .....                                                                                       | CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)          |
| Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons .....                                                                           | HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)             |
| Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....                                                    | WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)         |
| Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater .....                                                                    | YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)          |
| Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge .....                                                  | DONG Hui-yu, JI Min (1421)                                          |
| Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism .....                                                               | YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)       |
| Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(II)-Oxidizing Bacteria .....                                                                                                 | WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)            |
| Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism .....                                                                   | XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)                |
| Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene .....                     | ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)           |
| Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i> .....                                                           | CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)        |
| Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride (TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i> .....                                           | WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)       |
| Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots .....                                                                                                     | WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)                |
| Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O <sub>3</sub> Concentrations in Northeast China .....                                                                    | ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)    |
| Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses .....                                                                                | WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)            |
| Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils .....                                                                                    | CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)       |
| Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research .....                                                                                             | ZHAO Xiao-jun, LI Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)           |
| Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet .....                                                                                                 | BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)       |
| Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area .....                  | XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)                   |
| Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park .....                                                  | LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)            |
| Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area .....                                                                            | ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)            |
| Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator .....                                                                          | XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)      |
| Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai .....                                                                           | ZHUO Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)  |
| Impact of SDBS/Na <sup>+</sup> on Red Soil Colloidal Stability .....                                                                                                             | TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)              |
| Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues .....                                                               | ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)  |
| Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd <sup>2+</sup> by Algal in Water .....                                                                                    | DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)      |
| Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene .....                                                                                                                     | LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)      |
| Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate .....                                                          | ZHONG Qiong, LI Huan (1566)                                         |
| Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites .....                                                                          | LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)         |
| A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils .....                                                                         | YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)          |
| Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment .....                                                                    | ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)         |
| Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium .....                                                                                              | LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)             |
| Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength .....                                                                   | WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)                            |

# 《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4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(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