

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0158

卢丽,王喆,裴建国,等.西南地区典型岩溶地下水系统污染模式[J].南水北调与水利科技,2018,16(6):89-96.LU L, WANG Z, PEI J G, et al. Study on pollution model of typical karst groundwater system in area of southwest China[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 89-96. (in Chinese)

# 西南地区典型岩溶地下水系统污染模式

卢丽,王喆,裴建国,邹胜章,林永生,樊连杰

(中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部岩溶动力学重点实验室,广西桂林541004)

**摘要:**岩溶地下水资源是西南地区社会和经济发展的保障,随着城市化进程的不断加快,西南地区岩溶地下水污染问题也日益凸显,直接威胁当地群众的健康安全,已成为社会热点。以西南地区典型岩溶地下水系统污染实例为研究对象,通过分析每个岩溶地下水系统污染实例的水文地质条件、污染源特征、污染物迁移规律及污染危害等方面,归纳总结西南地区典型岩溶地下水系统污染模式,分为四种:间歇型入渗污染、持续型入渗污染、灌入型污染和越流型入渗污染。该项研究便于识别污染物的运移特征及规律、掌握污染范围和污染程度,为西南岩溶地区地下水污染物的防治工作提供重要的借鉴意义。

**关键词:**西南地区;岩溶地下水系统;污染模式

中图分类号: X82; P642 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Study on pollution model of typical karst groundwater system in area of southwest China

LU Li, WANG Zhe, PEI Jianguo, ZOU Shengzhang, LIN Yongsheng, FAN Lianjie

(Institute of Karst Geology of CAGS / Karst Dynamics Laboratory of MLR, Guilin 541004, China)

**Abstract:** Karst groundwater resource is an important guarantee for the social and economic development in southwest China. With the continuous acceleration of urbanization process, the problem of karst groundwater pollution in southwest China is becoming increasingly prominent. Posing direct threats to the health and safety of the local people, it has become a hot social issue. In this paper, we studied the typical karst groundwater system pollution cases in southwest China. Through the analysis of the hydrogeological conditions, characteristics of pollution sources, law of pollutant migration, and pollution harm of each karst groundwater system, we summarized the typical karst groundwater system pollution models in southwest China, including intermittent infiltration pollution, continuous infiltration pollution, pouring pollution and leakage infiltration pollution. This study can help researchers to better identify the characteristics and laws of pollutants transport, and more accurately grasp the scope and extent of pollution. It can provide important reference for the prevention and control of groundwater pollutants in karst areas in southwest China.

**Key words:** southwest China; karst groundwater system; pollution models

西南地区岩溶地下水资源是当地社会和经济发展的基石,更是生态文明建设和可持续发展的重要

收稿日期: 2018-04-25 修回日期: 2018-08-05 网络出版时间: 2018-10-16

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20181011.1122.010.html>

基金项目: 国家自然科学基金(41602277; 41807218); 中国地质调查局地质调查项目(DD20160300; DD20160302)

Funds: National Natural Science Foundation of China (41602277; 41807218); Geological survey project of China Geological Survey (DD20160300; DD20160302)

作者简介: 卢丽(1985-),女,湖北钟祥人,助理研究员,主要从事地下水污染调查与评价方面研究。E-mail: luli@karst.ac.cn

通讯作者: 王喆(1985-),男,助理研究员,主要从事岩溶水文地质、环境地质方面研究。E-mail: wangzhe@karst.ac.cn

保障。随着西南岩溶地区城市化进程的加快,人口及经济规模得到快速发展,人类活动对岩溶地下水水质影响也日趋增强<sup>[1,2]</sup>。西南地区岩溶发育强烈,含水介质包括了孔、隙、缝、管、洞等多种类型,非均质性强,三水转化迅速,且地表缺少足够厚度的土壤防护层,这使得污染物在缺少过滤作用下直接渗入或灌入含水层中,极易产生地下水污染<sup>[3]</sup>。近年来,西南岩溶地区水质有逐渐恶化趋势,水安全事件频发,如何保护好岩溶地下水,使其避免成为“地下排污管道”,已成为当地政府和相关学者高度关注的热点。

目前有关岩溶地下水污染研究多集中在污染物的分布特征、成因解析、污染途径、评价方法(包括质量评价、污染评价和风险评价等)等方面的研究。其中在污染物分布特征研究方面,王喆等<sup>[4]</sup>利用广西城市近郊型地下河水中多环芳烃的质量浓度、组成和分布,并对其进行生态风险评价;樊连杰等<sup>[5,6]</sup>分析了广西红水河中下游地区的地球化学特征及地下水重金属分布规律;杨秀丽等<sup>[7]</sup>和李营刚等<sup>[8]</sup>则根据不同时期的水质监测数据,开展了贵阳市和重庆金佛山的岩溶地下水的水质变化特征分析。在成因解析研究方面,卢丽等<sup>[9]</sup>、林永生等<sup>[10]</sup>、曹敏等<sup>[11]</sup>、王喆等<sup>[12]</sup>同时利用因子分析法分别总结了红水河流域地下水、重庆金佛山表层岩溶水以及广西桂林寨底地下河的水质影响因素;卢丽等<sup>[13]</sup>和陈立华等<sup>[14]</sup>则根据污染物的成分组成数据,结合各自研究区污染源特征,开展污染物的成因分析。在污染途径研究方面,何愿等<sup>[15]</sup>虽然总结出了桂江流域地下水污染途径的五种类型,但这五种类型仅以岩溶地貌进行划分,缺少污染物迁移规律、污染源特征等机理方面的研究,划分体系较为笼统;张江华等<sup>[16]</sup>和张军以等<sup>[17]</sup>则从污染源方面分析了岩溶地下水污染途径,但分析不够全面。对于岩溶地下水评价方法的研究,大多数学者采用已有的规范标准或数学模型进行评价,如曾红晓等<sup>[18]</sup>和李录娟等<sup>[19]</sup>分别根据《生活饮用水卫生标准》和《地下水质量标准》在贵州省内进行了地下水质量评价;鄢贵权等<sup>[20]</sup>利用集中参数模型和分布参数模型,对贵州典型岩溶区地下水污染进行了评价,评价效果较好;李燕妮等<sup>[21]</sup>、郭永丽等<sup>[22]</sup>和崔亚丰等<sup>[23]</sup>则采用层次分析法、评价模型等多种方法,开展了不同岩溶地区的水污染风险评价,为当地岩溶地下水的保护和管理提供了依据。

综上所述,目前大部分学者虽然试图从污染物的分布特征、成因解析、污染途径等方面去总结岩溶

地区地下水迁移规律,但由于各自研究方向较为单一,无法形成系统的污染模式体系。偶有少数学者涉及岩溶地下水污染模式体系研究,也只对某一特定岩溶地区或某一特定污染模式开展研究,如莫美仙等<sup>[24]</sup>提出了滇东断陷盆地地下水污染的水文地质模式,该模式虽有一定代表性,但仅在滇东地区适用,无法在整个西南岩溶地区进行推广;袁伟等<sup>[25]</sup>虽也提出了污染模式,但仅通过不同水体(地表水体、包气带和地下水)进行模式划分,未考虑污染物迁移、含水介质结构等方面,分析不够全面,划分较为笼统;丁坚平等<sup>[26]</sup>仅侧重研究了岩溶地区渗漏污染模式,虽研究较为深入,但其他类型模式未提及,无法形成较为完整的西南岩溶地区地下水污染模式体系。

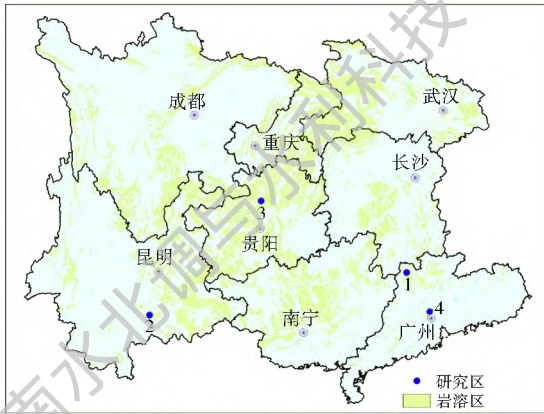
因此,建立合理的岩溶地下水污染模式,既可以从宏观层面上反映岩溶地区污染物的运动规律,又可以为岩溶地区开展地下水污染防治提供依据,做到有的放矢。本文通过对典型岩溶地下水系统的污染情况进行解析,总结该地区具有代表性的水文地质污染模式,形成较为完整的西南岩溶地区地下水污染模式体系,可以更好识别污染物的运移特征及规律,对西南地区岩溶地下水污染物的防治工作具有重要的借鉴意义。

## 1 研究区概况

西南地区范围为东经 $100^{\circ}40'$ — $114^{\circ}20'$ ,北纬 $21^{\circ}09'$ — $31^{\circ}01'$ ,包括云南、贵州、广西、湖南、湖北、重庆、四川和广东8个省(区、市),该地区总人口超过4亿人,人口与资源矛盾突出,岩溶分布面积78万 $\text{km}^2$ 。西南地区属于湿热多雨亚热带气候,年平均气温 $14\sim 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、多年平均降水量 $1\ 100\sim 2\ 300\text{ mm}$ ,每年4月—9月为汛期。区内珠江和长江两大流域为重要补给和径流区,总的地势西高东低,从西到东从岩溶高山峡谷到低山丘陵,从岩溶高原到峰林平原,各种岩溶地貌均有分布。

岩溶地层以碳酸盐岩为主,总厚可达 $3\ 000\sim 10\ 000\text{ m}$ ,以寒武系、泥盆系、石炭系、二叠系及中、下三叠系为主。受地形地貌和岩溶条件的控制,西南地区地表水和地下水在空间上分布极不均匀,地下岩溶含水介质以管道和溶蚀孔隙为主,具有高度不均匀性,含水岩组分为岩溶水、基岩裂隙水和松散岩类孔隙水三种类型。根据岩溶地下水的出露条件,岩溶地下水系统可划分为四大类,即地下河系统、岩溶泉系统、集中排泄带岩溶地下水系统、分散排泄岩溶地下水系统。

本文所选研究区共四个,分别为广东连州湟白水地下河系统、云南个旧地下河系统、贵州息烽交椅山地下河系统和广东广花盆地岩溶地下水系统,其位置分布见图1。



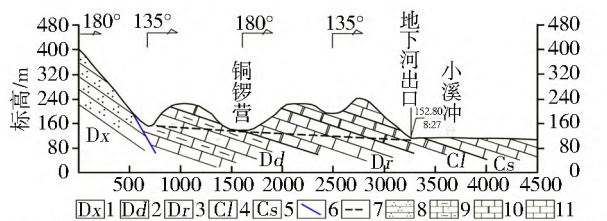
1 广东连州湟白水地下河系统 2 云南个旧地下河系统  
3 贵州息烽交椅山地下河系统 4 广东广花盆地岩溶地下水系统

图1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

### 1.1 广东连州湟白水地下河系统概况

广东湟白水地下河系统为连州盆地西部岩溶水系统的一个子系统。地下河出口位于清远市连州市湟白水村,距连州市区约为7 km,地下河主干管道长约3.0 km,汇水面积约为16.41 km<sup>2</sup>。系统内部以碳酸盐地层为主,岩性主要为D<sub>2d</sub>、D<sub>3r</sub>、C<sub>1l</sub>和C<sub>1s</sub>厚层灰岩,岩溶发育强烈,形成了大量的漏斗落水洞以及岩溶洼地等岩溶形态。除西侧碎屑岩山区外,其它地带无常年性地表水体,地表干旱缺水。系统主要受大气降雨补给,并可能存在少量的侧向补给,地下河流量对降雨的响应较为迅速,地下水自北西往南东径流,在湟白水村地下河出口处集中排泄进入三江河,后汇入连江(图2)。系统内地下水化学类型以HCO<sub>3</sub>-Ca型为主,HCO<sub>3</sub>-Mg·Ca型和Cl-Ca型虽有出现,但均为局部点状分布,分布面积小。系统内的K<sup>+</sup>+Na<sup>+</sup>和Cl<sup>-</sup>浓度呈逐年减少趋势,但pH值、Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、TDS和三氮的浓度却逐年升高,其中三氮浓度升高速度最快,超标现象明显。



1信都组 2东岗岭组 3融县组 4连县组 5石碓子组 6断层 7推测地下河管道 8石英砂岩 9泥灰岩、生物屑灰岩 10白云质灰岩 11灰岩

图2 广东湟白水地下河地质纵剖面示意图

Fig. 2 Geological profile of Huangbaihui underground river in Guangdong Province

经野外调查,系统内污染源包括4个养殖场、1个洗矿场和1个垃圾填埋场。洗矿场和垃圾填埋场均位于上游铜锣营洼地内,露天堆放无遮挡,大气降雨对其淋滤产生污染溶液,通过岩溶裂隙入渗污染地下河系统。该地下河属于城市近郊型地下河系统类型,代表了以农业非点源污染与生活污染为主的复合污染类型地区。

### 1.2 云南个旧地下河系统概况

云南个旧地下河系统位于个旧市区至水头村区域内,地下河出口距个旧市区13 km,系统面积50 km<sup>2</sup>(图3)。地貌以峰丛洼地为主,地势南高北低,地表水系不发育。系统内区内主要出露地层为下三叠统永宁镇组(T<sub>2y</sub>)、中三叠统个旧组(T<sub>2g</sub>)、中三叠统法郎组(T<sub>2f</sub>),岩性主要为中厚层状泥晶灰岩、灰质白云岩等。系统东、南、西三侧边界为地下水分水岭边界、北侧边界为地下水排泄边界,地下水由南向北径流,在径流过程中,经历了多次地表水与地下水间的转换过程,最终在水头村集中排出地表。系统内地下水化学类型以HCO<sub>3</sub>-Ca为最多,占75.7%,其次为HCO<sub>3</sub>-Ca·Mg型。岩溶水中HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>含量均占明显优势,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>浓度多在20.0 mg/L以下,整体表现出以弱酸、碱土金属离子为主的化学特征。



1.泉点; 2.落水洞; 3.洼地; 4.岩溶径流带; 5.断层; 6.尾矿及废渣

图3 云南个旧地下河系统水文地质质简图

Fig. 3 Hydrogeological map of the Gejiu underground river system in Yunnan Province

系统上游地区有多个矿山企业,主要以锡矿为主。截止2015年底,个旧矿区内已修建尾矿库约有30个,其中个旧地下河系统内上游有团山、管家山、

大它冲三个尾矿库, 这些尾矿库多建于 1988 年以前, 均存在较为严重的尾矿库渗漏现象, 尾矿水渗入地下后进入岩溶地下水系统造成水质污染。该地下河属于能源工业区地下河系统类型, 代表了以矿山开采为主的内源性污染类型地区。

### 1.3 贵州息烽交椅山地下河系统概况

贵州息烽交椅山地下河系统位于养龙司向斜的核部, 流域面积 65 km<sup>2</sup>。向斜核部出露地层为三叠系中统松子坎组(T<sub>2s</sub>)、下统茅草铺组(T<sub>1m</sub>), 翼部为三叠系下统夜郎组(T<sub>1y</sub><sup>3</sup>)。松子坎组(T<sub>2s</sub>)岩性为泥质白云岩、白云质泥岩, 含水性和透水性较差, 具有相对隔水性能; 茅草铺组(T<sub>1m</sub>)岩性为白云质灰岩, 富水性强, 为系统内主要含水层; 夜郎组(T<sub>1y</sub>)岩性为红色泥岩, 透水性差, 为隔水层。上述地层结构构成了一个具有完整隔水底板、局部存在隔水顶板、中部为岩溶强含水层的向斜储水构造。茅草铺组(T<sub>1m</sub>)岩溶含水层中发育了一条地下河, 汇集向斜核部地下水从南向北径流, 最终集中排入乌江(图 4)。系统内地下水化学类型以 HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Ca 型和 HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Ca·Mg 型为主, 受人类活动影响, 系统内地下水中硫酸根离子浓度明显偏高, 尤其在补给区内 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度超标严重。

系统上游的磷石膏库区为主要污染源, 该库区为某磷化工企业产品的尾渣库, 磷石膏为企业产品的尾渣, 排放方式为湿排, 废液中: 总磷为 2 635.0 mg/L、F 为 5 961.0 mg/L、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>为 3 073.0 mg/L, pH 为 1.29。该地下河属于化学工业区地下河系统类型, 代表了以化工企业为主的内源性污染类型地区。

### 1.4 广东广花盆地岩溶地下水系统概况

广花盆地地下水系统自北东向南西倾斜, 盆地内水系发育。广花盆地是新生代沉降区, 第四系松散层厚 30~40 m, 上部多为黏土, 一般厚 5~7 m, 但分布不连续, 不构成统一隔水层; 下部为砂、砾石层, 厚 2~36 m, 含水较丰富; 石炭系石蹬子段、壶天群和二叠系阳新群隐伏于平原中, 岩性为灰岩、大理岩化灰岩、白云质灰岩等(图 5)。盆地内发育北东东、北西西向两组平移断层, 是岩溶水的富集通道。水位埋深一般小于 3m, 曾是良好的供水水源

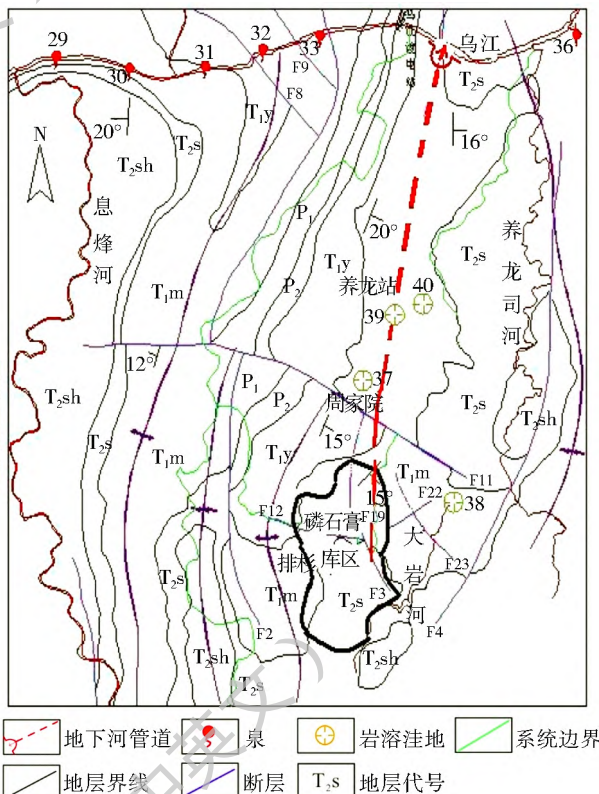


图 4 贵州息烽交椅山地下河系统水文地质简图

Fig. 4 Hydrogeological map of the Jiaoyishan underground river system in Xifeng in Guizhou Province

地。水化学类型为 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ca 型, 系统内整体水质较差, I<sup>-</sup>、As、Pb、Hg 等指标超标严重。浅层第四系地下水较差, 主要为农药化肥施用导致的面源污染所致。岩溶地下水水质优于第四系水质, 但仍然劣于区域岩溶地下水水质的平均水平。

系统内污染源分布较为分散, 数量众多, 类型较为复杂, 包含有污水处理厂 11 个、纺织印染厂 14 个、规模化养殖场 1 个、五金电镀厂 11 个、医药化工企业 5 个。这些污染源产生了各种工业垃圾、工业废污水、生活污水等污染物, 污染物经降雨的淋滤渗入第四系孔隙水含水层。该系统属于埋藏型岩溶地下水系统, 代表了以生活污染和工业污染为主的复合污染类型地区。

## 2 研究方法

本研究采用野外调查和采样测试相结合的方法对典型岩溶地下水系统污染实例进行分析, 进而总

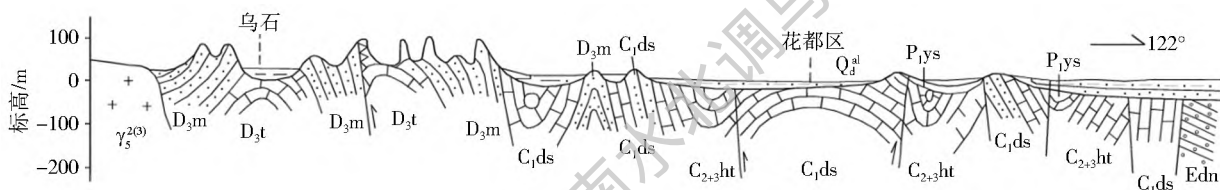


图 5 广东广花盆地水文地质剖面

Fig. 5 Hydrogeological profile of the Guanghua Basin in Guangdong Province

结和归纳不同类型的岩溶地下水污染模式。

## 2.1 野外调查

野外调查按照《地下水污染调查评价规范》(DZ/T 0288-2015)等技术要求执行,以岩溶水系统作为基本调查单元,采用线路追索法和穿越法,重点开展系统内水文地质、污染源以及土地利用等方面调查。水文地质调查,重点是核查岩溶水点的地貌特征、地层岩性、地质构造、岩溶发育、地下水补、径、排特征、开发利用历史与现状等。污染源调查,以收集、整理研究区污染源资料为主,对重要污染源或重要潜在污染源应进行补充野外调查;调查污染源的类型、空间分布特征,重点核查污染源的位置、类型、性质、规模及排放处置情况,以及周边环境情况。土地利用调查,以收集资料为主;重点核查土地利用现状、历史和规划,核查生态环境现状、历史和规划。

## 2.2 采样测试

本研究中野外采样点的布设、采样点的数量按照《地下水污染调查评价规范》(DZ/T 0288-2015)、《区域地下水污染调查评价技术要求》及《岩溶地下水污染地质调查评价技术要求》中的技术要求执行。水样的采集、保存、运输与测试均按《水质采样技术指导》(GB 12998-91)、《水质采样样品的保存和管理技术规定》(GB 12999-91)、《生活饮用水标准检验方法》(GB 5750-2006)等规范的要求执行。地下水水质评价按照《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)的要求执行。测试指标为30项,包括pH、总硬度、溶解性总固体、硫酸盐、氯离子、铁、锰、铜、锌、铝、耗氧量、氨氮、钠、镁、钙、硝酸盐、亚硝酸盐、氟化物、碘化物、汞、砷、硒、镉、铬(六价)、铅、三氯甲烷、四氯化碳、苯、甲苯、总磷。四个岩溶地下水系统的采样时间统一设定为2015年12月,其中由于广东连州湟白水地下河系统需要开展不同季节污染对比分析,其增加了一次的暴雨后采样,时间为2015年7月。

## 3 结果与分析

### 3.1 广东连州湟白水地下河系统污染分析

系统内污染源(包括养殖场、洗矿场、垃圾填埋场等)通过降雨入渗地下河系统,这种情况在大雨或暴雨后尤其明显,地下河出口处水体颜色由无色变为黑色。通过对比暴雨后和长期干旱两个时期的地下河出口的样品测试数据,发现降雨后出口水质明显变差,其中氨氮浓度由0.02 mg/L升高至2.32 mg/L,增长近100倍,由Ⅲ类水变为Ⅰ类水;耗氧量

浓度由0.95 mg/L升高至10.05 mg/L,增长近10倍,由Ⅲ类水变为Ⅰ类水;其他三氮指标浓度也明显升高,如 $\text{NO}_3^-$ 由21.36 mg/L升高至75.33 mg/L、 $\text{NO}_2^-$ 由0.21 mg/L升高至1.88 mg/L。氨氮和耗氧量浓度的骤升与上游垃圾填埋场的类型相吻合(生活垃圾填埋场)。由此可见,湟白水地下河系统在长期干旱无雨季节,地下河水质受上游污染源的影响较小,经过一定时间的水循环,地下河水质可达饮用水标准;但在雨季,尤其是暴雨后,系统内水质受上游污染源影响较大。

此类型地下水污染程度与降雨量大小、降雨时间长短,以及岩溶含水层的厚度、岩性、渗透性等有关,且该类型污染雨季和旱季差异较大,雨季一般较为严重,而旱季多为轻度污染或未污染,污染动态属于间歇型污染。

### 3.2 云南个旧地下河系统污染分析

系统上游地区的尾矿库多建于1988年以前,均存在较为严重的尾矿库渗漏现象,尾矿水渗漏入地下后进入岩溶地下水系统造成水质污染。对地下河出口(Gj58)及地下河管道两侧泉点(Gj62、Gj68)进行测试分析,测试结果表明,三个出水点水质为Ⅰ类-Ⅱ类,水质影响指标为Mn、As、 $\text{NH}_4^+$ 、Zn、Cd、 $\text{Cl}^-$ 、Pb(Mn:0.44 mg/L,As:0.06 mg/L, $\text{NH}_4^+$ :1.21 mg/L,Zn:6.30 mg/L,Cd:0.03 mg/L, $\text{Cl}^-$ :268.23 mg/L,Pb:0.19 mg/L),其中毒重金属Pb、Zn、Cd和As的浓度均达到中度污染程度。从水质影响指标和污染程度可以看出,系统内水质变差与上游尾矿库的持续渗漏密切相关。

该类型地下水污染程度与污染源渗漏范围及渗漏量,以及岩溶含水层渗透性、厚度等有关,与降雨关系不明显,污染动态属于持续型污染,受季节变化影响较小。

### 3.3 贵州息烽交椅山地下河系统污染分析

系统上游的磷石膏库建在向斜核部松子坎组( $T_{2s}$ )地层分布区,场址选择的原意是利用松子坎组( $T_{2s}$ )地层的隔水性能作为库区的防渗隔水层,并利用负地形的优势作为库容。但是,由于库区 $T_{2s}$ 地层厚度较薄,且下伏茅草铺组( $T_{1m}$ )地层的岩溶极为发育,库区使用4年后,在磷石膏的重压以及酸性水的浸泡和侵蚀下,库区 $T_{2s}$ 地层底板发生岩溶塌陷,导致大量的磷石膏和废液直接灌入地下河管道,造成了地下河系统严重的污染,当时废液渗漏量高达353.27  $\text{m}^3/\text{h}$ 。由于地下河出口紧邻乌江,造成乌江严重污染,使得出口以下乌江水从清澈

变成乳白色。经采样检测,目前出口下游乌江水中 pH、总磷、 $F^-$ 、 $SO_4^{2-}$  等指标仍严重超标,其中 pH 为 9.32,总磷为 47.30 mg/L,  $F^-$  为 36.42 mg/L,  $SO_4^{2-}$  为 463.59 mg/L。

该类型污染多发生在岩溶管道发育区,污染物通过落水洞、天窗等直接注入地下河管道,污染动态属于灌入型污染。

### 3.4 广东广花盆地岩溶地下水系统污染分析

由于广花盆地内工业发达,工业用水需求强烈,因此在盆地内部建有机民井 40 余口,主要为机井开采。由于开采井过密,开采强度大,形成了区域性的地下水位降落漏斗。降落漏斗的出现改变了原有地下水的补径、排条件,加大了孔隙水和岩溶水的水力梯度,增加了孔隙水越流补给下伏岩溶含水层的强度,使得孔隙含水层中的污染物逐渐入渗补给岩溶含水层。对系统内 27 个机井进行采样测试,结果显示系统内水质较差,水样中无 0 类水,0 类水仅有 7 个,1 类水有 14 个,2 类水有 6 个,污染因子主要为  $Cl^-$ 、As、Pb、Hg ( $Cl^-$ : 0.73 mg/L, As: 0.07 mg/L, Pb: 0.18 mg/L, Hg: 0.0028 mg/L),其中  $Cl^-$ 、As 超标是由农药化肥施用导致的面源污染造成的, Pb、Hg 超标则是由五金电镀厂和纺织印染厂随意排放引起的点源污染造成的。

该类型污染发生在双层结构的地下水系统中,污染过程较为缓慢,污染入渗方向为垂直方向,污染动态属于越流型入渗污染。

## 4 讨论

根据污染源特征、污染过程、含水层结构及含水介质特征等,西南地区岩溶地下水系统污染模式可以归纳为 4 种类型:间歇型入渗污染、持续型入渗污染、灌入型污染和越流型入渗污染。

(1) 间歇型入渗污染。主要发生在裂隙型或管道型岩溶含水层中,污染物在降雨的淋滤作用下通过岩溶裂隙入渗含水层或岩溶管道内,造成岩溶地下水污染(图 6)。该模式受降雨影响明显,降雨前后水质差异较大;如缺少降雨外因,经过长时间地下水循环,该模式污染可自行修复,水质逐渐变好。该

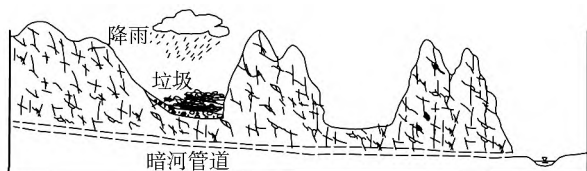


图 6 间歇型入渗污染模式

Fig. 6 Intermittent infiltration pollution model

污染模式主要分布在岩溶较发育但土壤层较厚的岩溶含水系统内。

(2) 持续性入渗污染。主要发生在裂隙岩溶含水层中,污染物在系统上游通过岩溶裂隙持续性入渗岩溶地下水系统中,造成岩溶地下水污染(图 7)。该模式与污染源的渗漏量相关,但受季节变化影响较小;如不做好污染源防渗措施,该模式污染不可自我修复,水质始终较差。该污染模式主要分布在岩溶较发育但土壤层较薄的岩溶含水系统内。

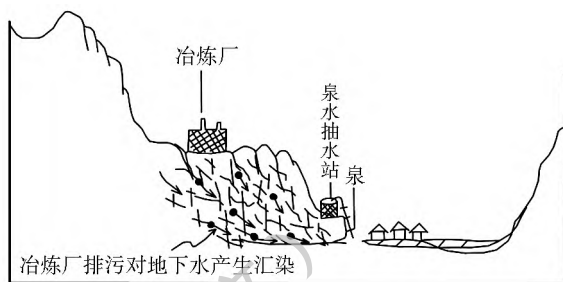


图 7 持续型入渗污染模式

Fig. 7 Continuous infiltration pollution model

(3) 灌入型污染。主要发生在管道型岩溶含水层中,污染物通过落水洞、地下河入口、天窗等直接灌入地下河管道中,造成地下水污染(图 8),该模式中污染速度快、规模大、污染物集中、污染程度高,极易引发大规模的饮用水安全事件。该污染模式主要分布在落水洞、天窗附近有污染源的管道型岩溶含水系统内。



图 8 灌入型污染模式

Fig. 8 Pouring pollution model

(4) 越流型入渗污染。主要发生在双层结构地下水系统中,上层为孔隙水含水层,下层为岩溶水含水层(图 9),受污染的上覆孔隙水通过越流补给的方式进入下伏的岩溶含水层中,该模式中污染速度缓慢,污染方向以垂向为主。该污染模式主要分布在埋藏型岩溶地下水系统内。

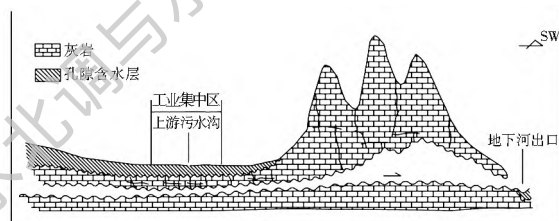


图 9 越流型入渗污染模式

Fig. 9 Leakage infiltration pollution model

上述污染模式会随着污染源特征、污染过程、含水层结构及含水介质特征等条件发生改变而变化。在间歇型入渗污染模式和持续性入渗污染模式中,污染过程的改变(间歇性污染或持续性污染)会直接导致两种模式的相互转化。含水层结构及含水介质特征的变化也会改变污染模式,如在间歇型入渗污染模式中,如果发生岩溶塌陷,污染物可能直接进入管道造成污染,则该模式变为灌入型污染模式。污染源分布特征的变化同样会改变污染模式,如在灌入型污染模式中,污染源从天窗或滴水洞移至他处,则该模式可能会变为入渗污染模式。

## 5 结论

通过对污染源特征、污染过程、含水层结构及含水介质特征等方面分析,将西南地区岩溶地下水系统污染模式归纳为4种类型,分别为间歇型入渗污染、持续型入渗污染、灌入型污染和越流型入渗污染,其中灌入型污染规模大、速度快、危害广,而剩余三种模式污染较为缓慢,不易被发现,但一旦污染则具有不可逆性。

针对目前存在的岩溶地下水污染情况,应该采取多种措施进行防治:(1)加强岩溶地下水动态监测;(2)加强岩溶地下水环境保护宣传,提高公众尤其是村民的水环境保护意识;(3)调整产业结构,关停岩溶地区重污染企业;(4)发展有机农业,减少化肥和农药对岩溶地下水的污染;(5)加大农村生态环境治理,推进农村垃圾集中处理。

### 参考文献(References):

- [1] 夏日元,蒋忠诚,邹胜章,等.岩溶地区水文地质环境地质综合调查工程进展[J].中国地质调查,2017,4(1):1-10.(XIA R Y,JIANG Z C,ZOU S Z,et al. Progress of hydrogeology and environmental geology comprehensive survey in karst area[J]. Geological Survey of China,2017,4(1):1-10.(in Chinese)) DOI:10.19388/j.zgdzdc.2017.01.01.
- [2] 刘长礼,王秀艳,吕敦玉,等.中国南方岩溶地下水水源污染风险评价及防控对策[J].地球学报,2017,38(6):910-918.(LIU C L,WANG X Y,LYU D Y,et al. Risk assessment and control countermeasures of southern China's karst groundwater areal source pollution[J]. Acta Geoscientica Sinica,2017,38(6):910-918.(in Chinese)) DOI:10.3975/cagsb.2017.06.06.
- [3] 张军以,王腊春,苏维朝,等.岩溶地区人类活动的水文效应研究现状及展望[J].地理科学进展,2014,33(8):1125-1135.(ZHANG J Y,WANG L C,SU W C,et al. Status and prospect of the hydrological effects of human activities in the karst area[J]. Progress in Geography,2014,33(8):1125-1135.(in Chinese)) DOI:10.11820/dlkxjz.2014.08.013.
- [4] 王喆,卢丽,夏日元.广西城市近郊型地下河水中多环芳烃污染特征研究[J].中国环境监测,2016,32(4):63-68.(WANG Z,LU L,XIA R Y.S Research on pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in water from suburban type underground river in Guangxi[J]. Environmental Monitoring in China,2016,32(4):63-68.(in Chinese)) DOI:10.19316/j.issn.1002-6002.2016.04.12.
- [5] 樊连杰,裴建国,杜毓超,等.广西红水河中下游澄江地区地下水地球化学特征[J].现代地质,2015,29(4):958-966.(FAN L J,PEI J G,DU Y C,et al. Geochemical characteristics of groundwater in Chengjiang Area of the Hongshui River in Guangxi[J]. Geoscience,2015,29(4):958-966.(in Chinese))
- [6] 樊连杰,裴建国,杜毓超,等.广西红水河中下游马山上地区地下水重金属含量及分布特征[J].中国岩溶,2015,34(4):410-414.(FAN L J,PEI J G,DU Y C,et al. Characteristics of the content and distribution of heavy metals in groundwater in Mashan area, middle to lower Hongshui River, Guangxi, China[J]. Carsologica Sinica,2015,34(4):410-414.(in Chinese)) DOI:10.11932/karst20150415.
- [7] 杨秀丽,罗维,裴建国,等.贵阳市岩溶地下水水质变化特征浅析[J].中国岩溶,2017,36(5):713-720.(YANG X L,LUO W,PEI J G,et al. Analysis of variation characteristics of karst groundwater quality in Guiyang City[J]. Carsologica Sinica,2017,36(5):713-720.(in Chinese)) DOI:10.11932/karst20170515.
- [8] 李莹刚,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.(LI Y G,JIANG Y J,ZHANG D. Study on the effect of tourism activities on dynamic variation of karst groundwater quality: a case study of Shuifang Spring, Jinfo Mountain, Chongqing[J]. Environmental Pollution & Control,2010,32(12):14-17.(in Chinese)) DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2010.12.004.
- [9] 卢丽,王喆,裴建国,等.红水河上游流域岩溶地下水水质影响因素的R型因子分析[J].中国岩溶,2015,34(4):415-419.(LU L,WANG Z,PEI J G,et al. R mode analysis for influencing factors of karst groundwater quality in middle and upper reaches of the Hongshuihe river[J]. Carsologica Sinica,2015,34(4):415-419.(in Chinese)) DOI:10.11932/karst20150416.
- [10] 林永生,裴建国,杜毓超,等.基于多元统计方法的岩溶地下水化学特征及影响因素分析[J].环境化学,2016,35(11):2394-2401.(LIN Y S,PEI J G,DU Y C,et al. Hydrochemical characteristics of karst groundwater and their influencing factors based on multiple statistical analysis[J]. Environmental Chemistry,2016,35(11):2394-2401.(in Chinese)) DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2016.11.2016032801.
- [11] 曹敏,沈立成,肖琼,等.基于SPSS的岩溶地下水水质变化及其影响因素—以重庆市金佛山表层岩溶地下水为例[J].湖南师范大学自然科学学报,2012,35(2):82-87.(CAO M,SHEN L C,XIAO Q,et al. Application of factor analysis in the assessment of influence factors of karst groundwater quality—a case from epikarst groundwater at Jinfo Mountain in Chongqing[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University,2012,35(2):82-87.(in Chinese))

- [12] 王喆, 夏日元, Chris Groves, 等. 西南岩溶地区地下水水质影响因素的 R 型因子分析—以桂林寨底地下河为例[J]. 桂林理工大学学报, 2014, 34(1): 45-50. (WANG Z, XIA R Y, Chris G, et al. R node analysis for influencing factors determination of karst underground river quality in southwest China Take Zhaidi underground river as an example[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2014, 34(1): 45-50. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1674-9057.2014.01.007.
- [13] 卢丽, 王喆, 裴建国. 岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2015, 36(3): 862-868. (LU L, WANG Z, PEI J G. Contamination characteristics and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in multi-medium in karst underground river[J]. Environmental Science, 2015, 36(3): 862-868. (in Chinese)) DOI: 10.13227/j.hjks.2015.03.015.
- [14] 陈立华, 赵雅坤, 朱海涛, 等. 竹鹅溪片区岩溶地下水污染特征及成因分析[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2012, 37(6): 1071-1077. (Chen L H, ZHAO Y K, ZHU H T, et al. Characteristics and causes analysis of karst groundwater pollution in Zhr Creek[J]. Journal of Guangxi University: Nat Sci Ed, 2012, 37(6): 1071-1077. (in Chinese))
- [15] 何愿, 张颖, 朱明. 桂江流域地下水污染途径及防控措施研究[J]. 中国岩溶, 2015, 34(4): 387-394. (HE Y, ZHANG Y, ZHU M. The pollutant infiltration pathways and measures to control groundwater pollution in the Guijiang River drainage system[J]. Carsologica Sinica, 2015, 34(4): 387-394 (in Chinese)) DOI: 10.11932/karst20150412.
- [16] 张江华, 袁艳芳. 娘子关泉岩溶地下水污染途径分析[J]. 山西水利, 2009(3): 14-15. (ZHANG J H, DOU Y F. Analysis on the pollution way of karst groundwater in Niang Zi Guan Spring[J]. Water Resources in Shanxi, 2009(3): 14-15. (in Chinese))
- [17] 张军以, 王腊春, 马晓雪, 等. 西南岩溶地区地下水污染及防治途径[J]. 水土保持通报, 2014, 34(2): 245-249. (ZHANG J Y, WANG L C, MA X X, et al. Groundwater pollution and controlling measures in karst mountainous areas of southern western China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(2): 245-249. (in Chinese)) DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2014.02.051.
- [18] 曾红晓, 顾尚义. 晴隆锑矿和煤矿矿区岩溶地下水环境质量评估[J]. 中国环境监测, 2017, 33(6): 78-86. (ZENG H X, GU S Y. Environmental quality assessment on karst groundwater in antimony and coal mines concentration area of Qir glong[J]. Environmental Monitoring in China, 2017, 33(6): 78-86. (in Chinese)) DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2017.06.11.
- [19] 李录娟, 邹胜章. 综合指数法和模糊综合法在地下水质量评价中的对比—以遵义市为例[J]. 中国岩溶, 2014, 33(1): 22-30. (LI L J, ZOU S Z. Comparison of comprehensive index method and fuzzy comprehensive method in the evaluation of groundwater quality: A case study in Zunyi City[J]. Carsologica Sinica, 2014, 33(1): 22-30. (in Chinese))
- [20] 都贵权, 丁坚平, 王伍军, 等. 贵州典型岩溶区岩溶地下水污染评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 10(1): 81-87. (DU G Q, DING J P, WANG W J, et al. Evaluation on the groundwater pollution in the typical karst areas of Guizhou Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1999, 10(1): 81-87. (in Chinese)) DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.1999.01.015.
- [21] 李燕妮, 罗朝晖, 柳山, 等. 贵州地区灰场的地下水污染风险评估—以易家寨灰场为例[J]. 环境工程, 2015, (1): 123-127. (LI Y N, LUO C H, LIU S, et al. Groundwater pollution risk assessment on ash field in GUIZHOU: taking the YIJIAZHAI ash field as an example[J]. Environmental Engineering, 2014, (1): 123-127. (in Chinese)) DOI: 10.13205/j.hjgc.201501029.
- [22] 郭永丽, 滕彦国, 翟远征, 等. 基于 DRWMLPE 模型的岩溶潜水污染风险评估[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, 49(5): 511-516. (GUO Y L, TENG Y G, ZHAI Y Z, et al. Risk assessment of karst phreatic pollution based on DRWMLPE Model[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2013, 49(5): 511-516. (in Chinese))
- [23] 崔亚丰, 何江涛, 王曼丽, 等. 岩溶地区地下水污染风险评估方法探究—以地苏地下河流域为例[J]. 中国岩溶, 2016, 34(4): 372-383. (CUI Y F, HE J T, WANG M L, et al. Exploration karst of risk assessment method towards groundwater contamination in region: A case study in Disu underground river system basin[J]. Carsologica Sinica, 2016, 34(4): 372-383. (in Chinese)) DOI: 10.11932/karst20160404.
- [24] 莫美仙, 王宇, 李峰. 滇东断陷盆地地下水污染的水文地质模式[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2014, 39(5): 88-95. (MO M X, WANG Y, LI F. Hydrogeological model of groundwater pollution in Eastern Yunnan plateau downfaulted basin[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 39(5): 88-95. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-855x.2014.05.017.
- [25] 袁伟, 罗本全, 王川. 煤区岩溶地下水污染模式及特征研究—以黔西盘关向斜区域为例[J]. 地下水, 2017, 39(4): 81-83. (YUAN W, LUO B Q, WANG C. Study on the model and characteristics of karst groundwater pollution in coal area: A case study of the Qianxi Panguan syncline region[J]. Groundwater, 2017, 39(4): 81-83. (in Chinese))
- [26] 丁坚平, 王中美, 毛健全, 等. 岩溶地下水渗漏污染研究[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2003, 32(4): 98-102. (DING J P, WANG Z M, MAO J Q, et al. Study on the seepage pollution of karst groundwater[J]. Journal of Guizhou University of Technology (Natural Science Edition), 2003, 32(4): 98-102. (in Chinese))