

滇东南泸江流域岩溶地下水质量及污染影响因素研究

王 波¹⁾, 王 宇^{2)*}, 张 贵¹⁾, 张 华¹⁾, 代旭升¹⁾, 康晓波¹⁾

1) 云南省地质环境监测院, 云南昆明 650216; 2) 云南省地质调查局, 云南昆明 650051

摘 要: 泸江流域是滇东南典型的喀斯特断陷盆地发育区, 主干水系连接着多个断陷盆地及坡立谷。根据最新的地下水污染调查资料, 流域喀斯特地下水质量总体以Ⅲ类为主, 水质超Ⅲ类的岩溶水点中, 东部多, 西部少, 且暗河占比最大, 岩溶泉次之, 机井最小。主要污染源是工矿企业及城镇生活垃圾污染源, 研究分析了污染影响因素为环境水文地质条件的差异、污染源类型及排污强度、岩溶含水层防污性能的强弱程度和岩溶地下水污染机制的不同。详细阐述了岩溶地下水主要污染机制为落水洞或岩溶洞管灌入污染机制、溶隙溶孔含水介质渗透污染机制及浅覆盖型岩溶含水层越流渗漏污染机制。针对性的提出了 3 条防治对策: 一是调整工业布局, 切实减少、杜绝污染源; 二是调查污染源及污染途径, 重视环境水文地质条件对污染物迁移转化的影响; 三是编制地下水开发与保护规划, 制定相应的管理措施, 有效保护水源。

关键词: 水环境; 水污染; 无机污染; 有机污染; 岩溶地下水

中图分类号: P641.134 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2020.070701

A Study of Quality and Pollution Factors of Karst Groundwater in Lujiang River Basin in Southeast Yunnan

WANG Bo¹⁾, WANG Yu^{2)*}, ZHANG Gui¹⁾, ZHANG Hua¹⁾, DAI Xu-sheng¹⁾, KANG Xiao-bo¹⁾

1) Yunnan Institute of Geo-Environment Monitoring, Kunming, Yunnan 650216;

2) Yunnan Geological Survey, Kunming, Yunnan 650051

Abstract: The Lujiang River basin is a typical area of karst fault basin in southeast Yunnan, and its main drainage system is connected with many fault basins and slope valleys. According to the latest investigation data of groundwater pollution, the quality of karst groundwater in the basin is mainly in Class III. The karst water points with super-class III water quality are more in the east and less in the west, and the proportion of underground river is the largest, the karst spring is the second and the manhole is the smallest. The major sources of pollution are industrial and mining enterprises and urban domestic waste, the factors affecting the pollution are the difference of environmental hydrogeological conditions, the type and intensity of pollution source, the degree of anti-pollution capability of karst aquifer and the difference of pollution mechanism of karst groundwater. The main pollution mechanisms of karst groundwater are water fall hole or karst cave pipe filling pollution mechanism, karst pore water-bearing medium seepage pollution mechanism and shallow overburden karst aquifer leakage pollution mechanism. Three countermeasures are put forward: the first is to adjust the industrial layout and reduce and eliminate the pollution sources; the second is to investigate the pollution sources and pollution ways and pay attention to the influence of environmental hydrogeological conditions on the migration and transformation of pollutants; the third is the development and protection of groundwater planning, the development of corresponding management measures, and the effective protection of water resources.

Key words: water environment; water pollution; inorganic pollution; organic pollution; karst groundwater

本文由国家重点研发计划项目“断陷盆地地表、地下水资源高效利用与优化调控”(编号: 2016YFC0502502)和中国地质调查局地质调查项目“西南地区岩溶地下水污染调查评价”(编号: 1212011121164)联合资助。

收稿日期: 2020-05-19; 改回日期: 2020-06-28; 网络首发日期: 2020-07-10。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 王波, 男, 1981 年生。高级工程师。主要从事水文、工程、环境地质调查研究。通讯地址: 650216, 云南省昆明市人民东路王大桥云南省地质环境监测院。E-mail: 393195356@qq.com。

*通讯作者: 王宇, 男, 1960 年生。博士, 教授级高工。主要从事水工环地质研究。E-mail: ynddywy@163.com。

环境水文地质学是以水文地质学的基本理论为基础,研究地下水环境恶化、保护和改善地下水环境的学科(吴志亮等,2001)。研究地下水质量及污染问题,是环境水文地质的主要内容之一,查清地下水质量及污染状况,分析引起地下水水质变化的各种影响因素,为地下水环境保护、改善和治理提供技术支撑,对生态地质环境保护和修复具有重要意义。泸江流域是滇东南典型喀斯特断陷盆地,主干水系连接着石屏、建水、甸甸、倘甸、个旧、乍甸、蒙自、开远等多个断陷盆地及坡立谷(王宇等,2003),是各个断陷盆地、谷地地表水、地下水的排泄基准,以流域为单元进行岩溶地下水质量及污染影响因素研究,该流域具系统性、代表性和重要性。泸江流域是云南工业化进程最早启动和滇东南大型城市群兴建的区域,各断陷盆地地下水开发利用历史悠久,开发程度高,开采强度大,环境问题突出(张贵等,2008)。水资源短缺是石漠化治理的主要限制性因子之一,水质型缺水问题在泸江流域较为严重,水污染直接影响到了人民生活、经济发展和生态文明建设,地下水污染也日趋严重。新时代对生态文明建设提出了更高的要求,使水环境污染治理与保护更显紧迫,研究泸江流域地下水质量及污染影响,提出防治对策,不仅对滇南大型城市群的水资源安全和应急水源保障具有具体的现实意义,也是流域生态恢复、石漠化综合治理,以及合理利用与有效管理地下水资源的迫切需要(袁道先,2000)。

1 研究区概况

泸江流域位于云南省东南部,属珠江上游南盘江流域,地理坐标为东经 $102^{\circ}19'$ — $103^{\circ}44'$,北纬 $23^{\circ}13'$ — $23^{\circ}52'$,流域面积 $4\,647.87\text{ km}^2$,生态区位十分重要。流域东与文山、屏边县相邻;南与红河、元阳县隔河相望;西与玉溪市元江、新平、峨山、通海县毗邻;北与弥勒县接壤。行政区划涉及红河州蒙自市、个旧市、开远市、建水县及石屏县。

流域内地貌类型多样,总体地势南部、东南部较高,北部较低,主要特征是中部发育一系列断陷盆地。盆地规模、形态差异较大,盆地深陷,高差一般 $300\sim 700\text{ m}$,外围山区残留高原面,其上喀斯特峰丛洼地发育。流域内碳酸盐岩分布面积 $2\,505.04\text{ km}^2$,占流域总面积的 53.89% ,岩溶地貌组合形态主要有岩溶山间盆地、岩溶山间河谷。不同的地貌格局,控制了区内地下水的富存运移和空间分布特征。区内主干构造为北西、北东和近南北向,控制了盆地的形成和分布。地层发育除奥陶系、志留系、白垩系缺失外,自元古界至第四系均有出露,地层总厚度 $40\,730.88\text{ m}$,局部地区还分布有侵

入岩体。

2 研究方法

2.1 地面调查

2011 年开展了泸江流域 $1:25\text{ 万}$ 岩溶地下水污染调查评价工作,调查主要包括水文地质调查、土地利用类型调查及污染源调查。水文地质调查以大泉、暗河为重点,调查岩溶地下水系统结构(渗流带岩性组成、厚度、透水性能及分布特征)、边界、补径排特征、动态变化、现状环境问题及开发利用状况等;土地利用类型调查以资料收集为主,核查各类用地数量、质量、分布规律和土地利用构成特点,分析土地利用现状特点及变化趋势;污染源调查在土地利用调查基础上,通过资料收集,对重要污染源或重要潜在污染源进行补充调查,调查污染源类型、强度和空间分布等(姚普等,2009)。

2.2 采样布设及测试分析

在调查的基础上,遵循“控制面上,突出重点”的原则,岩溶山区以暗河、大泉为主,盆地地区以开采井、钻孔为主,兼顾天窗、竖井和消溢水洞,优先选择国家级、省级岩溶地下水监测孔、农用井、工矿自备水源地、矿山排污点等。对流域内 63 个具有代表性的岩溶水点进行取样分析,其中大泉 52 个,暗河出口 8 个,机井 3 个(图 1)。

采样于平水期(10—12 月)进行,样品检测单位均具有国家计量认证、国家实验室认可和(或)自然资源部产品质量监督检验测试中心审查认定资质,并同时具备“地下水污染调查评价规范”中所列测试项目的相应技术能力(文冬光等,2012)。采样方法严格执行《 $1:250\,000$ 区域地下水污染调查评价技术要求》(中国地质调查局,2011)。

测试项目及标准选用与《地下水质量标准》(GB/T14848-2017)对应的 48 项指标进行分析评价。其中无机物包括感官性及一般化学指标、重金属毒理学指标及其他毒理学指标 3 类 22 项;有机物均为毒理学指标,包括卤代烃、氯代苯类、单环芳烃、有机氯农药 4 类 26 项指标(表 1)。

2.3 地下水质量评价

依据《 $1:250\,000$ 区域地下水污染调查评价技术要求》(中国地质调查局,2011),采用《地下水质量标准》(GB/T14848-2017)地下水综合评价法,按单指标评价结果最差类别确定综合质量类别,并指出最差类别指标,对流域内岩溶地下水样检测结果进行评价。将地下水水质划分为 V 类:Ⅰ类地下水化学组分含量低,适用于各种用途;Ⅱ类地下水化学组分含量较低,适用于各种用途;Ⅲ类地下水化学组分含量中等,主要用于集中式生活饮用水水源及工

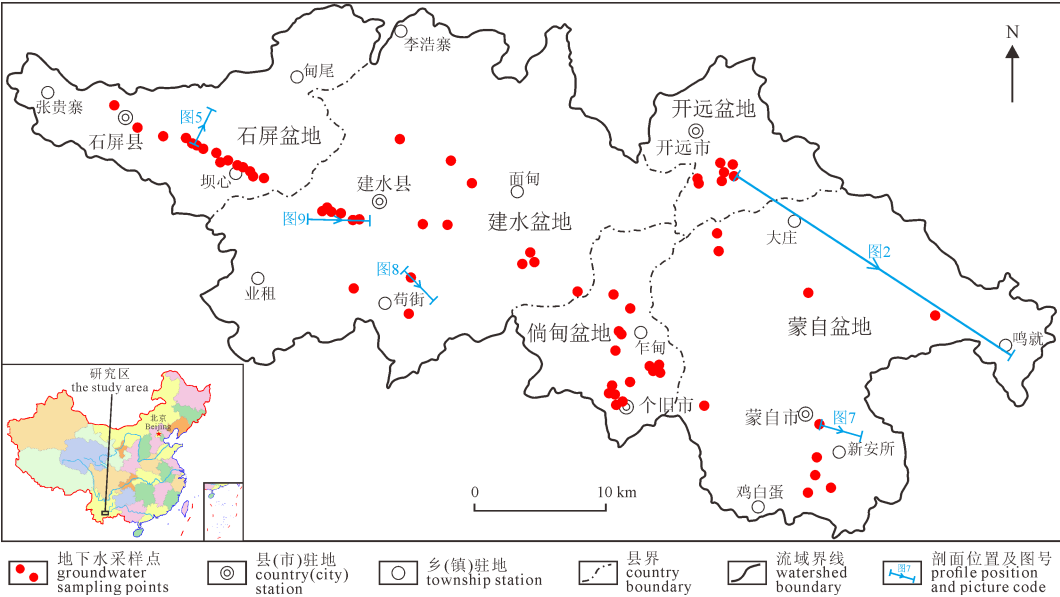


图 1 泸江流域岩溶水采样点分布图
Fig. 1 Distribution of karst water sampling points in the Lujiang River Basin

表 1 参评指标分类统计表
Table 1 Statistical table of evaluation index classification

组份	指标类型	指标名称	指标数
无机物	感官性及一般化学指标	pH 值、总硬度、溶解性总固体、耗氧量、氯化物、硫酸盐、钠、铁、锰、锌、铝	11
	重金属毒理学指标	砷、镉、六价铬、铅、汞	5
	其他毒理学指标	氨氮、硝酸盐、亚硝酸盐、氟化物、碘化物、硒	6
有机物(毒理学指标)	卤代烃	三氯甲烷、四氯化碳、1,1,1-三氯乙烷、三氯乙烯、四氯乙烯、二氯甲烷、1,2-二氯乙烷、1,1,2-三氯乙烷、1,2-二氯丙烷、溴仿、氯乙烯、1,1-二氯乙烯、1,2-二氯乙烯	13
	氯代苯类	氯苯、邻二氯苯、对二氯苯、1,2,4-三氯苯	4
	单环芳烃	苯、甲苯、乙苯、二甲苯、苯乙烯	5
	有机氯农药	总六六六、 γ -BHC、滴滴涕、六氯苯	4

表 2 岩溶地下水质量评价统计表
Table 2 Statistical table of karst groundwater quality evaluation

区域	地下水类型	数量/个	质量类别	IV类指标	V类指标	占同区域同类型水点比例/%
西部	岩溶泉	2	II			8.3
		17	III			71.0
		3	IV	亚硝酸盐、铅、滴滴涕		12.4
		2	V		亚硝酸盐、镉	8.3
	暗河出口	2	II			40.0
		2	III			40.0
		1	IV	铅		20.0
东部	机井	1	II			33.3
		2	III			66.7
	岩溶泉	5	II			17.8
		14	III			50.0
		4	IV	铝、锰、铅、镉		14.3
	暗河出口	5	V	耗氧量、铝、锌、锰、氯化物、氟化物、亚硝酸盐、硫酸盐、砷、镉、铅	总硬度、铝、锰、氨氮、氟化物、硝酸盐、亚硝酸盐、砷、镉、汞	17.9
		2	III			33.3
		1	IV	锰		66.7

农业用水; IV类地下水化学组分含量较高, 以农业和工业用水质量要求以及一定水平的人体健康风险为依据, 适用于农业和部分工业用水, 适当处理后

可作生活饮用水; V类地下水化学组分含量高, 不宜作为生活饮用水水源, 其他用水可根据使用目的选用。

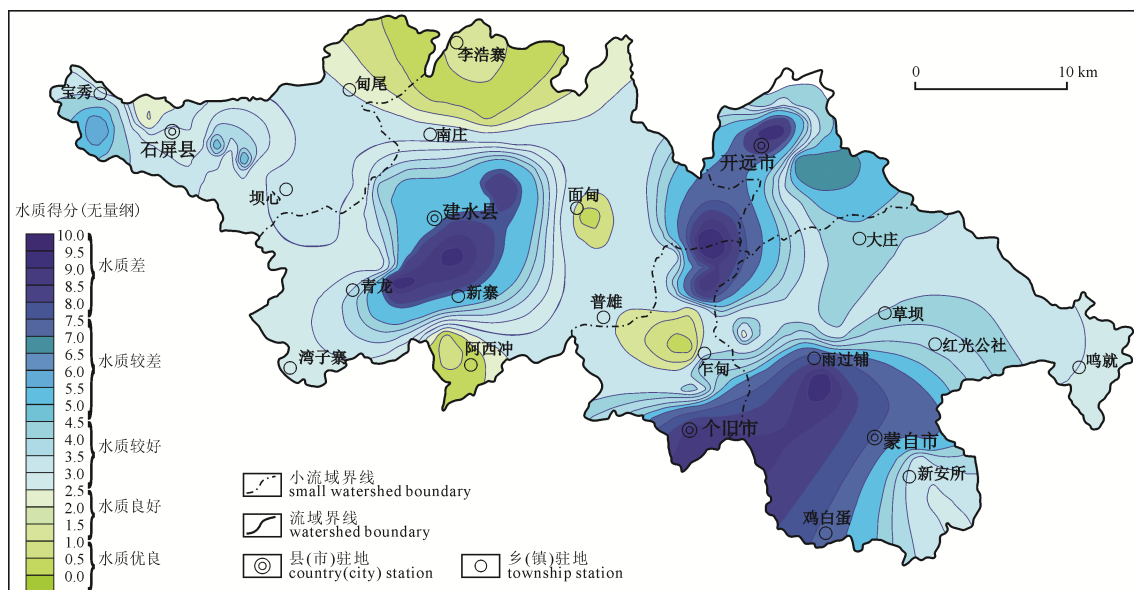


图2 泸江流域岩溶地下水质量评价图

Fig. 2 Karst groundwater quality assessment map in Lujiang River Basin

评价结果: 流域内岩溶地下水质量无 I 类, 以 III 类为主。63 个水样中 II 类水 10 个, 占 6.3%, III 类水 37 个, 占 58.7%, IV 类水 9 个, 占 14.3%, V 类水 7 个, 占 11.1%(表 2, 图 2)。

3 结果分析

根据上述评价结果, 泸江流域岩溶地下水质量具有如下特征:

(1) 水质较差、差的 IV、V 类水, 集中分布于三个片区: 建水盆地东南部边缘及外围山区、倘甸—开远盆地及外围山区、个旧坡立谷—蒙自盆地南部及外围山区。除上述三个片区外, 石屏盆地、海河谷地、面甸盆地、乍甸盆地以及大庄草坝盆地, 以分布水质较好的 II、III 类水为主。

(2) 超 III 类水质岩溶地下水中, 无机指标项多, 有机指标项少。水质超过 III 类的岩溶水点中, 有机指标 1 项, 为总滴滴涕; 无机指标项 15 项, 以毒理学指标为主。

(3) 西部水质超过 III 类的岩溶地下水点较少, 为 6 个, 影响指标单一集中, 6 个水点均是单项指标; 东部水质超过 III 类的岩溶水点较多, 有 10 个, 影响指标复杂多样, 其中 4 个为单项指标, 6 个为多项指标。

(4) 流域内以重金属及三氮毒理学指标影响最为严重和普遍。水质超过 III 类的 16 个样点中, 5 个与三氮指标有关, 占 31%, 10 个与重金属指标有关, 占 62.5%。

(5) 水质超 III 类的岩溶水点中, 暗河占比最大, 岩溶泉次之, 机井最小。5 个暗河出口, 2 个水质超过 III 类, 占同类水样的 40%; 52 个岩溶泉, 14 个水

质超过 III 类, 占同类水样 26.9%; 3 个机井水质均没有超过 III 类。

污染对地下水质量的影响程度和特征, 主要取决于环境水文地质条件的差异、污染源类型及排污强度、岩溶含水层防污性能的强弱程度, 及岩溶地下水污染机制的不同。综合区域水文地质调查和地下水污染调查评价成果进行分析, 泸江流域岩溶地下水污染影响特征明显。

3.1 地表-地下交替转化的环境水文地质条件

环境水文地质条件不同, 岩溶发育特征、含水介质、地表-地下水转化径流过程、水文地质功能等具有明显的差异。不同的环境水文地质特征, 地下水污染过程、受污染的方式、污染程度及污染组分构成和类型也不同。

受地层、构造、新构造运动的控制, 以开远—倘甸为界, 流域可划分为东部、西部两个片区, 其水文地质条件差异大。东部以三叠系碳酸盐岩为主, 西部以泥盆、石炭系碳酸盐岩为主, 出露震旦系浅变质岩(图 3)。

东部靠近南盘江河谷, 地形起伏度加大, 河谷切割加深, 水文地质条件复杂, 盆地上游、中上游岩溶发育较均一, 有大泉暗河出露, 水位埋藏浅, 可形成富水块段, 盆地下游底部岩溶发育不均一, 水位埋深大, 动态变幅大, 常有落水洞分布, 暗河管道发育。盆地外围发育多层溶洞, 各岩溶层之间既相互独立, 又常可通过垂向岩溶裂隙发生联系, 多层岩溶水现象明显, 径流呈阶梯状降低, 水力坡度大, 一般以地表分水岭为汇水边界, 在汇水边界内地下水获得的补给量, 其径流、排泄过程可分为两部份: 一是盆地底面以上的部份上层径流带的地

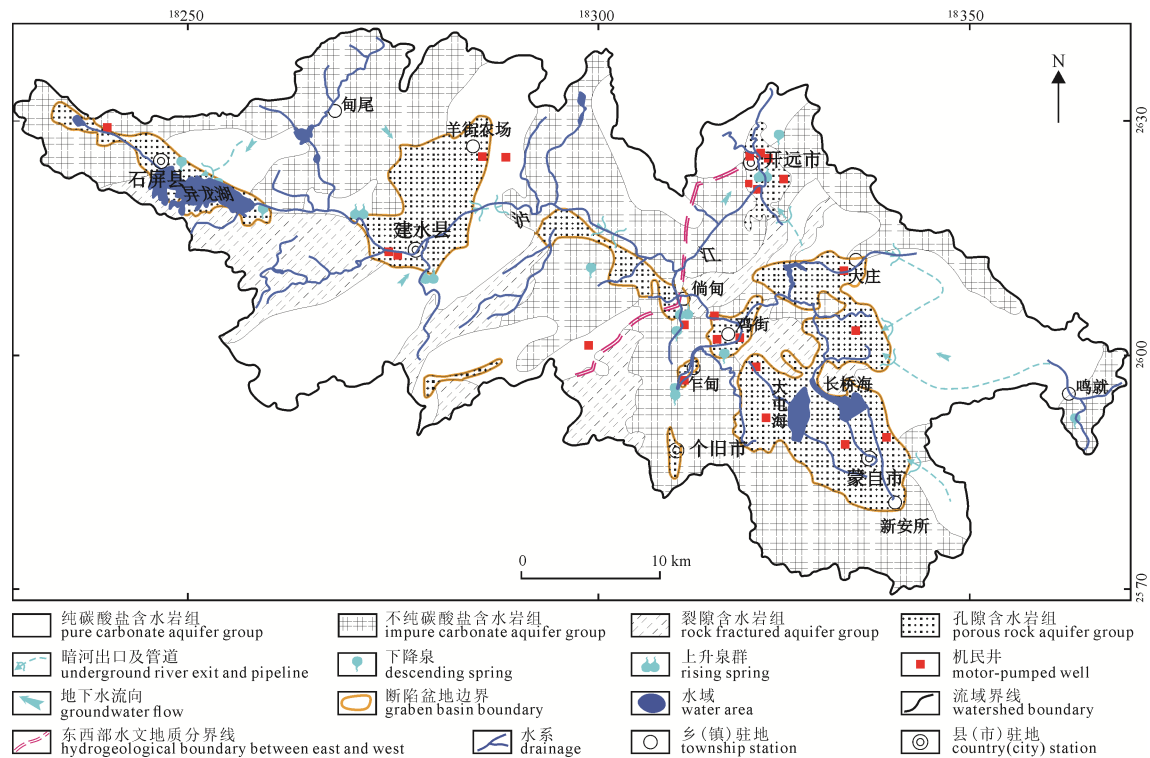


图 3 泸江流域水文地质图
Fig. 3 Hydrogeological map of the Lujiang River Basin

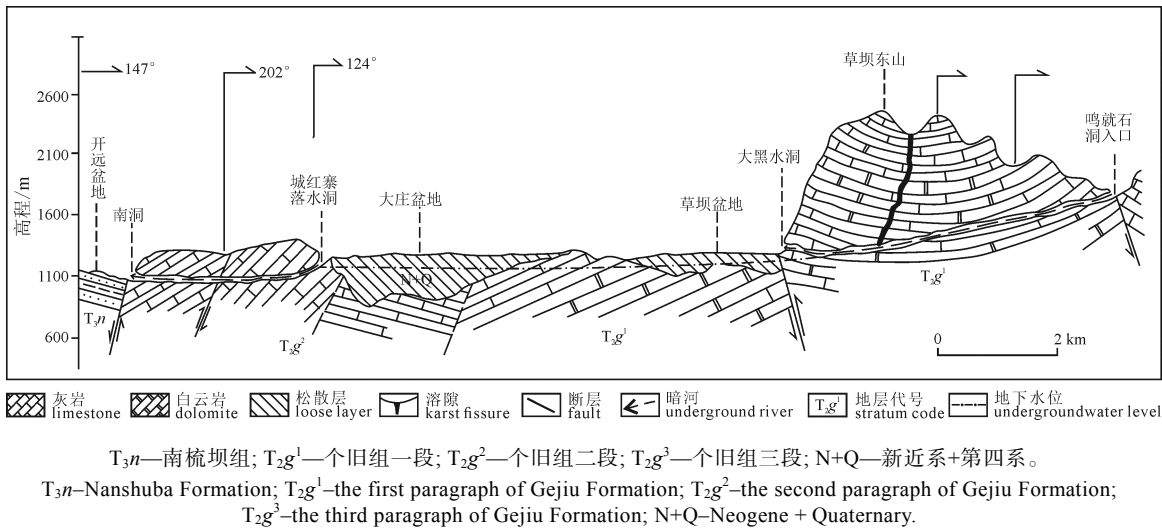


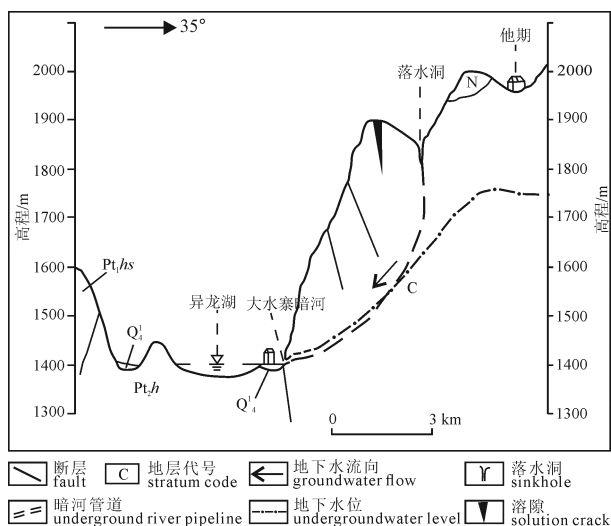
图 4 泸江流域东部水文地质剖面图
Fig. 4 Hydrogeological section of the eastern Lujiang Basin

下水，以盆底为排泄基准，在盆地内排泄。二是盆地底面以下下层径流带的地下水，通过盆地周边存在的某一段透水边界，汇入深、远程径流，流往盆地汇水边界外更低的盆地或河谷排泄，如：乍甸谷地、蒙自盆地、泸江河床(图 4)。

西部处于高原河间地带，地形起伏较为和缓，水文地质条件相对简单，盆地内岩溶发育均匀性较好，水位埋藏浅，多具承压性，盆地四周多有大泉、暗河出露或形成富水块段，盆地外围包气带厚度大，但岩溶土层间联系较密切，径流水力坡度相对较小，在径流过程中，地表水与地下水的转换过程较少，

一般以地表分水岭为汇水边界，在汇水边界内地下水获得的补给量基本上全部在盆地内排泄到地表，如石屏、建水、倘甸、开远盆地(图 5)。

由于环境水文地质条件的差异，流域东部地下水自补给区至排泄区，在径流过程中，多数经历补给—盆地内径流、排泄出地表—再补给、径流排泄的过程，地表地下水转换频繁(王宇, 2019)；西部则多为补给—盆地内排泄，地表、地下水水力联系不明显。因此，东部较西部地下水污染过程长而复杂、受污染方式多种，污染程度严重，污染组分构成和类型多样。



Pt₁hs—黑山头组; Q₄—第四系; Pt₂h—黄草岭组;
C—石炭系; N—新近系。

Pt₁hs—Heishantou Formation; Q₄—Quaternary; Pt₂h—Huangcaoling Formation; C—Carboniferous; N—Neogene.

图 5 泸江流域西部水文地质剖面图

Fig. 5 Hydrogeological section of the western Lujiang Basin

3.2 地下水污染主要来源于人类工业活动

随着人口的增长和经济活动的增强, 生产生活“三废”排放污染早已对岩溶地下水的质量产生了深远的影响。泸江流域污染源按产业来源主要有工业污染源、农业污染源及生活污染源(蔡五田, 2015), 其中工业污染源对地下水影响最为突出。

流域内工业污染源主要集中分布于建水盆地东南部、倘甸—开远盆地及个旧坡立谷—蒙自盆地南部的大屯 3 处(图 6), 该区分布了 44 处工矿企业污染源, 占总工矿企业污染源的 67.7%。工矿企业

类型有矿山、化肥、冶炼、造纸、水泥等, 其中矿山企业分布最多, 以有色、黑色金属和能源类矿山为主。能源矿山(煤矿)主要集中分布于开远市境内, 金属矿(锡矿)等主要分布于个旧、蒙自境内, 全区共有采矿证 50 余个, 选冶主要集中于蒙自盆地南部的大屯、沙甸和鸡街一带。污染物以金属和有机物为主, 主要有汞、镉、铅、砷、钡等, 废水不达标排放对地下水的污染较为严重(张水燕等, 2014)。

城镇生活垃圾污染源主要集中分布在经济发达、人口稠密的盆地区(图 6), 随着社会经济的繁荣, 城镇生活污水和垃圾日益增多, 由于处理能力不足, 多为不达标排放, 有害成份就地渗入污染地下水或通过落水洞灌入含水层, 对地下水造成远程污染, 污染物主要为细菌、亚硝酸盐、硝酸盐、氨氮、硫酸盐等(王宇等, 2013)。

农业污染源主要来自于种植业, 流域土地面积为 4 696.12 km², 其中耕地 1 719.59 km², 占土地总面积的 36.62%。耕地种植施用的化肥、农药是造成地下水水质超标和污染的重要来源, 流域内农业污染源主要集中分布于建水盆地及蒙自盆地大庄片区, 以片状分布为主(图 6), 污染物主要为细菌、亚硝酸盐、硝酸盐、氨氮、硫酸盐、有机氯农药等。

3.3 喀斯特地下水污染物迁移途径的多样性及含水介质防污性能差异性

(1) 岩溶含水层防污性能的强弱程度

岩溶地下水防污性能主要决定于岩溶水系统的本质因素(即水文地质结构), 包括岩溶含水层结构、覆盖层性质(岩性、结构、厚度、渗透性)、含

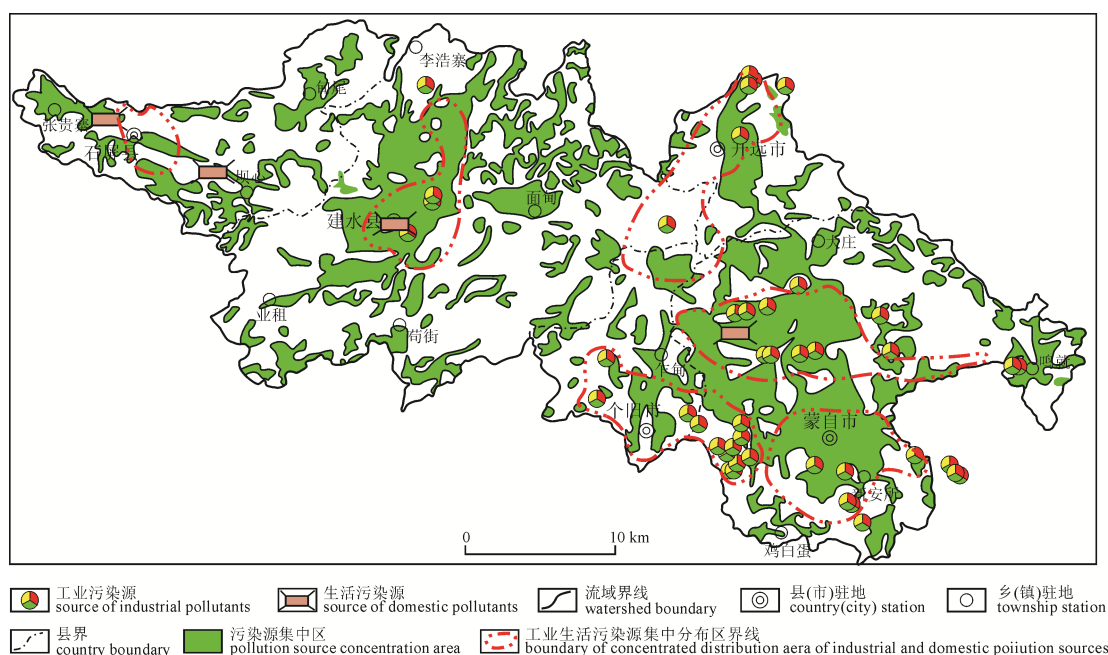


图 6 泸江流域污染源分布图

Fig. 6 Pollution source distribution in the Lujiang River Basin

水层的导水、储水系统的特征、地下水补给源及补给方式、水动力条件、水源地的动态稳定性、对污染物的净化能力等;其次为人为因素,包括现状及将来条件下的人口密度、土地利用状况、污染源的数量及污染途径等(彭淑惠等, 2011)。因此,除去外部因素,水文地质结构是判定地下水受污染程度最直接的因素,岩溶区保护性盖层、表层岩溶带发育强度、岩溶网络发育情况等直接决定了区域地下水质量受外界扰动的影响程度(劳文科等, 2003; 邹胜章等, 2014)。从调查结果评价,含水层的覆盖或埋藏条件是最关键的因子(王宇, 2002),覆盖型和埋藏型含水层水质多不超过Ⅲ类水标准,裸露型含水层水质正好相反。

裸露型岩溶区,防污性能弱。主要分布于流域内盆地外围喀斯特山区,含水层裸露地表,土壤层分布不连续且厚度较薄或缺失,表层岩溶带发育,地表-地下双层含水介质结构分布极不均匀,岩溶水系统以落水洞、地下河管道为特征,“三水”转化和地下水循环速度相对较快。这类区域阻止污染物渗透的能力低,含水层渗透性高,地下水自补给区至排泄区,径流过程短而简单,导水、储水空间较为单一,污染物在含水层中扩散、运移较容易。

覆盖或埋藏型岩溶区,防污性能较强-强。主要分布于流域内盆地区,含水层被松散堆积物所覆盖,仅局部有峰簇或孤峰等石山出露。岩溶水系统以主径流带发育为特征,地下河管道特征不明显,岩溶塌陷坑较发育。“三水”转化和地下水循环速度相对较慢。这类区域覆盖层厚度大且连续,多为紧而密室的粘土层,其孔隙度小,渗透性差,可作相对隔水层,对进入岩溶含水层的污染物扩散迁移能起到一定吸附或过滤作用。

(2)喀斯特地下水污染物迁移途径的多样性

依据调查,研究分析岩溶地下水污染传输空隙的形态、水流输入的形式和水动力强度、污染物在岩溶含水层中运移、扩散、混合过程的物理化学作用特征,泸江流域岩溶地下水污染物的主要迁移途径(即岩溶地下水主要污染机制)可归纳为三种类型:

①落水洞或岩溶洞管灌入污染机制

裸露岩溶山区,污染物随大气降水或地表水通过岩溶落水洞、漏斗等通道迅速灌入暗河,造成地下水污染,这种污染通道规模大,水流集中、快速,基本不能起到吸附、过滤及溶解沉淀污染物的作用,造成的污染速度快,影响广,危害大(莫美仙等, 2014)。

如蒙自黑龙潭暗河,位于蒙自盆地东缘,暗河系统平面上呈 NW-SE 向展布,地势南东高、北西

低,坡度在 15°左右,补给区海拔一般 1600~1800 m,北、东、南以地表分水岭为边界,西以断层、地表分水岭为边界。暗河系统内含水层主要为 ϵ_1d 、 ϵ_2t 、 ϵ_2l 、 D_2d 、 D_2dn^2 、 D_3 灰质白云岩、白云岩、白云质灰岩,富水性中等—强;隔水层为 E、 ϵ_1ch 、 D_1p 砂岩、页岩、粉砂岩。地貌类型为盆地边缘裸露型岩溶中山,洼地、落水洞发育,南东补给区接受大气降雨,通过落水洞灌入式补给地下水,以导水断层岩溶管、隙发育带为运移管道,由南东向北西径流,受地形切割在黑龙潭呈股状涌出地表。出口被人工封闭,只留有一个出水口,用水管引到南侧 100 m 处加工矿泉水,地下水大部分已被利用,北侧有三面光水渠引水至小东山村、布衣透村供生活、农田、果树灌溉用水,少部分顺沟向西流,汇入长桥海。

系统南东部补给区地表分水岭西坡打马坎附近分布有某冶炼厂,主要生产钢、锌等有色金属,产生的污染组分主要有重金属元素、硫化物、有色金属等。冶炼厂矿渣堆场就位于一落水洞附近,矿渣淋漓液及冶炼产生的废水等通过落水洞、漏斗等岩溶通道,直接灌入地下含水层,严重污染地下水,造成镉、锌、耗氧量、砷、铅等多种元素超标,其中镉达到 V 类标准,致使下游暗河出口水体再无法饮用,附近矿泉水厂关闭(图 7)。

②溶隙溶孔含水介质渗透污染机制

基岩裸露-浅覆盖区,覆盖层薄,结构松散,渗透性较好。下伏基岩导水、储水空间为树枝状或网脉状的溶蚀溶隙、溶孔,污染物主要随降雨通过溶孔、溶隙以面状入渗方式进入含水层,弥散式污染地下水(张新钰等, 2011),污染程度和强度随导水通道的大小、密集程度及距离长短而发生变化。这种污染水流面广且较缓,含水介质对对污染物有一定的吸附、沉淀和溶解作用,但减缓污染物扩散、迁移的能力低(王昭等, 2008),造成污染速度较慢,影响和危害较落水洞或岩溶洞管灌入污染小。

如包家山大泉,位于建水南部包家山村北东方向,距县城 5 km,出露于岩溶低中山一冲沟的下部,三面环山,北部延伸至建水盆地。含水岩组主要为 D_2dn^1 、 D_3t^1 灰岩、白云岩,地表溶隙、溶沟发育,泉水接受大气降水通过溶隙的渗入补给,溶隙是主要运移通道,岩溶水自南东向北西径流,由于地形切割出露地表,主要供包家山村 600 人生活生产使用。

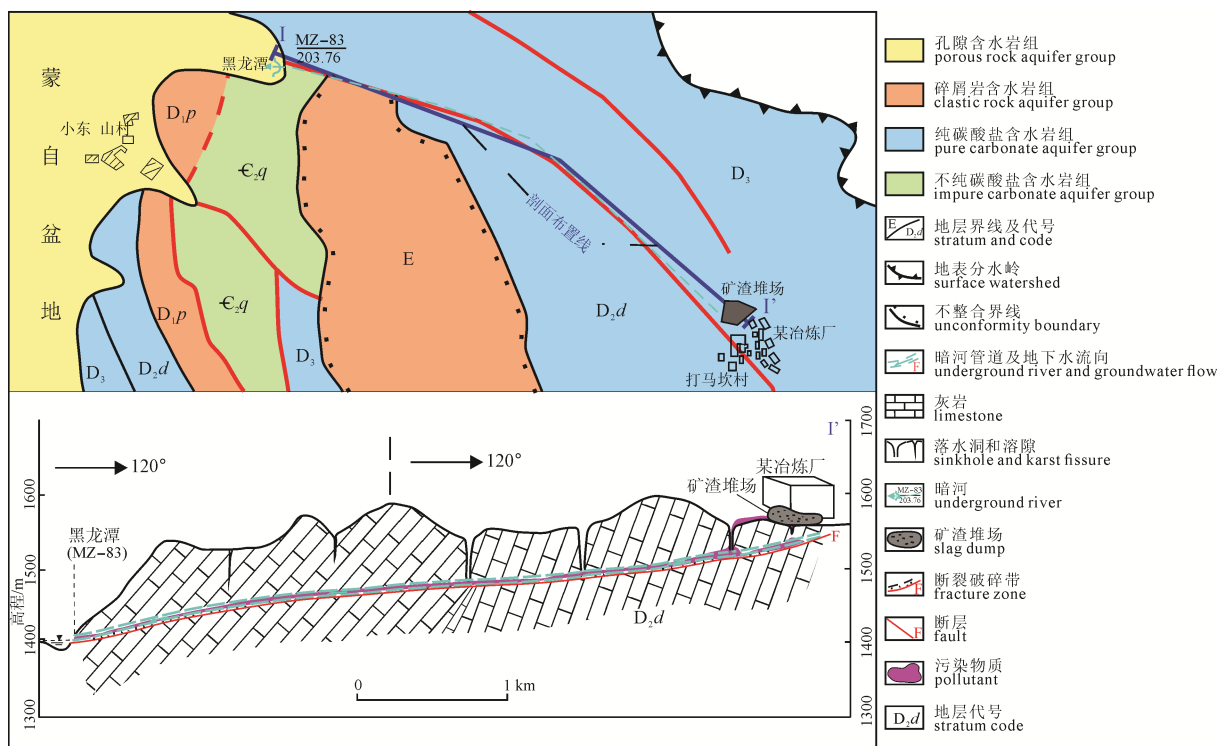
泉点南东补给区有一化工厂,生产高锰酸钾,产生锰渣、苛化渣等工业废物,污染组分主要为锰、重金属及硫酸等。对泉点取样分析显示,地下水仅镉一项超标,但类别达 V 类。分析原因,化工厂产

生的废水及废物淋漓液等,通过溶隙入渗进入岩溶含水层后,由于受密集发育的溶隙及充填黏性土的过滤、吸附作用,加之长途径径流条件,地下水中部分污染物在扩散、迁移过程中浓度逐渐降低,形成了泉水在众多污染组分中仅个别单项超标,但持续存在的污染源及裸露的岩溶形态,又使地下水在长期污染渗透过程中已形成单一的高强度污染,随着时间的迁移还可能形成复杂的综合污染(图 8)。

③浅覆盖型岩溶含水层越流渗漏污染机制

该机制为上覆松散孔隙含水层和下伏岩溶含水层的双层水文地质结构系统(袁道先和蔡桂鸿,1988),污染物随大气降水或地表水进入上覆孔隙含水层后,通过不同组分和水理性质分层之间的界

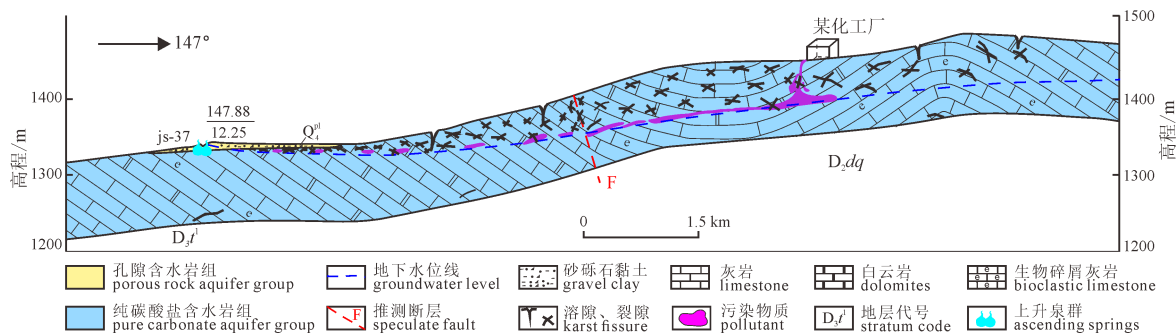
面,以越流渗漏的方式进入下伏岩溶含水层中,从而造成岩溶地下水污染。这种污染方式,越流速度缓慢,呈渐进性发展,又因覆盖层吸附和降解较强,污染强度较低、速度较慢。如建水盆地朱家寨机井,位于建水盆地南西部施家寨溶蚀洼地南部,含水岩组为 D_2dq 灰、灰白色厚层白云岩、灰质白云岩,连通性、均匀性较好,富水性较强。岩溶水在洼地周边山区接受大气降水补给,沿裂隙渗入洼地底部,赋存于溶蚀孔隙中。机井井深 120.64 m,水位埋深 10.21 ~ 31.27,涌水量 1.7 L/s,日抽水量为 300 m³/d,为朱家寨村民生活及农业用水水源。机井南东侧约 30 m 有一民井,井深 6 m,水位埋深 1.5 m,少量村民零星生活使用。



D_3 —泥盆系上统; D_2d —东岗岭组; D_1p —坡脚组; ϵ_2q —高台组; E—古近系。
 D_3 —Upper Devonian; D_2d —Donggangling Formation; D_1p —Pojiao Formation; ϵ_2q —Gaotai Formation; E—Paleogene.

图 7 蒙自黑龙潭平剖面示意图

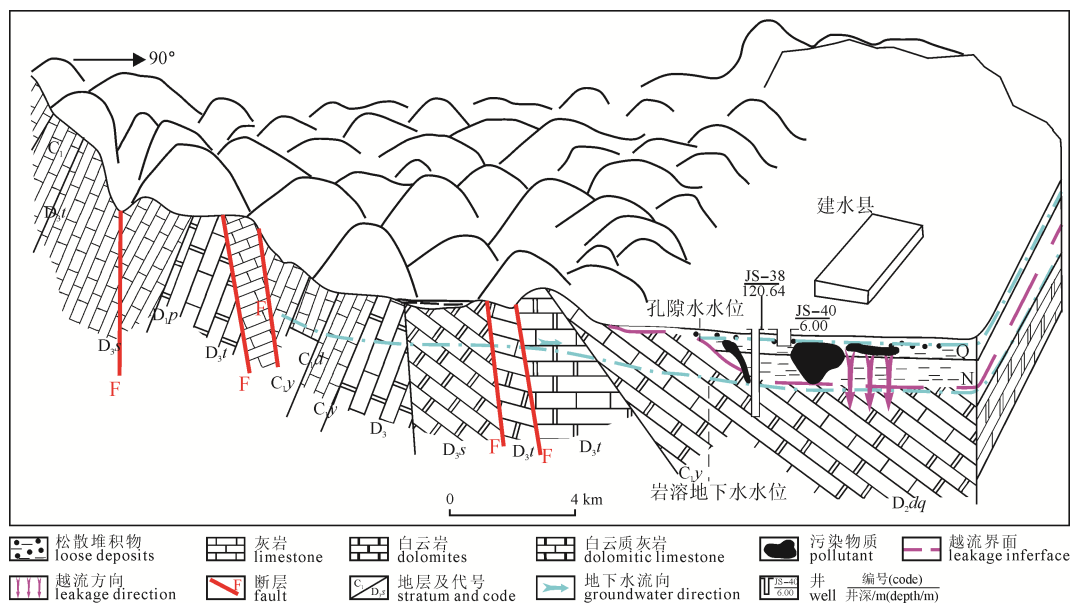
Fig. 7 Sketch map of the Heilongtanping section in Mengzi



D_3t^1 —驮山组一段; Q_4^p —第四系洪积层; D_2dq —曲靖组。
 D_3t^1 —the first paragraph of Tuoshan Formation; Q_4^p —Quaternary diluvial deposits; D_2dq —Qujing Formation.

图 8 包家山大泉剖面示意图

Fig. 8 Schematic diagram of great spring section in Baojiashan



C₁—石炭系下统; D_{3t}—驮山组; D_{3s}—石关山组; D_{1p}—坡脚组; C_{1y}—岩关组; C_{1d}—大塘组; D₃—泥盆系上统;
D_{2dq}—曲靖组; N—新近系; Q—第四系。

C₁—Lower Carboniferous; D_{3t}—Tuoshan Formation; D_{3s}—Shiguanshan Formation; D_{1p}—Pojiao Formation; C_{1y}—Yanguan Formation;
C_{1d}—Datang Formation; D₃—Upper Devonian; D_{2dq}—Qujing Formation; N—Neogene; Q—Quaternary.

图 9 朱家寨机、民井剖面示意图

Fig. 9 Schematic diagram of Zhujiashai deep well and shallow well section

朱家寨机井、民井污染物主要来自附近居民生活垃圾及农业污染源,产生的污染组分主要为硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮及有机组分。污染物随大气降水或地表水下渗进入孔隙含水层,污染孔隙水,受污染的孔隙水继续下渗至孔隙含水层与岩溶含水层分界面,以越流渗漏方式逐步缓慢进入岩溶含水层,最终污染岩溶水(图 9)。整个污染过程中,孔隙水污染最直接明显,污染的组分类别多,污染强度大。岩溶水受污染的程度则取决于孔隙含水层的厚度及性质,一般孔隙含水层厚度越大,结构越致密等,越流越不易发生,污染亦越不易形成。取样分析结果显示,朱家寨民井水质超标项为硝酸盐、铝、锰,均达 V 类,有机指标三氯乙烯检出且超过 II 类。机井水质未超标,但 48 项分析指标中,硝酸盐和铝含量明显较高,硝酸盐超过 II 类,铝超过 I 类,同样,有机指标三氯乙烯检出且超过 II 类。对比研究发现,岩溶水中浓度较高的指标和指标项均包含于孔隙水超标项中,且两者有机指标检出相同,说明孔隙水对岩溶水的越流污染已存在或正在发生,但污染程度较低。

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 泸江流域岩溶地下水污染程度普遍较低,岩溶地下水质量以 III 类水为主。工矿企业及城镇生活污染为主的污染源特征,致使水质较差、差的 IV、V 类水,集中分布于工矿企业多、人口稠密的建水

盆地东南部、倘甸—开远盆地及个旧坡立谷—蒙自盆地南部 3 处,且水质超标指标中,以重金属和三氮毒理学指标最为普遍和严重。

(2) 岩溶地下水污染影响因素为环境水文地质条件的差异,污染源类型及排污强度、岩溶含水层防污性能的强弱程度及岩溶地下水污染机制的不同。

(3) 流域东部盆地内岩溶发育深度大,外围基岩裸露,地下水径流水力坡度大,径流过程长而复杂,地表地下水转换频繁。西部盆地内岩溶发育较均匀,外围包气带厚度大,地下水径流水力坡度较小,径流过程短而简单,地表、地下水水力联系不明显。东西部环境水文地质条件的差异及污染源分布特征影响,使流域内水质超过 III 类的岩溶水点中,东部多西部少,影响指标项东部复杂多样,西部普遍单一。

(4) 流域内分布于盆地外围的裸露型岩溶区,防污性能弱,上覆土壤层分布不连续且厚度较薄或缺失,表层岩溶带发育,含水层渗透性高,阻止污染物渗透的能力低,岩溶水水质超过 III 类水标准较多;分布于盆地地区的覆盖或埋藏型岩溶区,防污性能较强—强,岩溶含水层覆盖层厚度大且连续,渗透性差,阻止污染物扩散迁移能力较高,岩溶水水质超过 III 类水标准较少。

(5) 岩溶地下水污染机制主要为落水洞或岩溶洞管灌入污染机制、溶隙溶孔含水介质渗透污染机制及浅覆盖型岩溶含水层越流渗漏污染机制,以落

水洞或岩溶洞管灌入污染速度最快、影响面广、危害极大。暗河多为落水洞或溶管灌入式污染,岩溶泉为溶隙、溶孔含水介质渗透污染,机井为浅覆盖型岩溶含水层越流渗漏污染的污染机制,是造成流域内超过Ⅲ类水标准岩溶水点中,暗河占同类型水点的比例最大,岩溶泉次之,机井最小的本质因素。

4.2 防治对策建议

针对以上结论,为深入研究地下水质量、污染特征,有效保护、合理开发地下水资源,建议做好以下几方面工作:

(1)调整工业布局,切实减少污染源。严禁污染严重的企业在防污性能脆弱区,特别是岩溶区布设,对工业三废推行排放合理化、减量化、无害化、资源化管理。严格执法,坚决打击违法排污行为。新建、改扩建企业,必须执行“三同时”,使环保与建设同步或超前进行。企业必须努力改进生产工艺,减少工业“三废”的排放量,提高达标排放率,减少工业污染源。城镇系统建设排水管网,健全生活污水、垃圾处理设施,逐步杜绝任意排污。农村应加大沼气池、无公害化卫生厕所的建设力度,科学施用化肥农药,限制污水灌溉,禁止使用残留量高的农药,鼓励发展绿色农业,减少面源污染。

(2)调查污染源及污染途径,重视环境水文地质条件对污染物迁移转化的影响。污染地点的环境水文地质条件对地下水污染有着至关重要的作用,研究中要重视包气带厚度、包气带和地下水含水层的岩性、地下水径流条件等对地下水污染调查及污染含水层修复的影响。包气带是污染物进入地下水系统的必经之路,在开展地下水水质保护工作过程中,必须要考虑到包气带土壤的物理、化学和生物特性对污染物的运移和自然降解的影响。对已经污染的含水层或岩溶洞管系统,应采取有效的水文地质措施进行治理,如通过人工注水强化补给,稀释和净化污染物,清洗赋水空隙;管井大降深强力抽水,加快地下水循环速度,促进净化作用;在勘查试验的基础上,布设防渗帷幕或墙,阻断污染物的弥散迁移途径,阻止污染物扩散到水源地等。

(3)编制地下水开发与保护规划,制定相应的管理措施,有效保护水源。在调查的基础上,做好区域水资源承载极限评价,并以之为基础,确定区域社会、经济发展极限,遵循“统筹规划、综合开发、开发与保护并重”的原则,编制岩溶区岩溶水资源开发与保护专业规划,从规划源头加强环境保护工作,对水源地进行有效的保护;按不同地下水类型划分保护区,各有侧重,突出重点,贯彻执行“预防

为主、防治结合”的方针,实行分区、分级管理,并制定相应的管理办法。作好生态环境的保护,逐步提高岩溶区植被覆盖率,涵养水源,遏制生态恶化,改善水资源环境。

Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0502502), and China Geological Survey (No. 1212011121164).

参考文献:

- 蔡五田. 2015. 浅论地下水污染源强[J]. 水文地质工程地质, 42(6): 126-130.
- 劳文科, 蒋忠诚, 时坚, 梁彬. 2003. 洛塔表层岩溶带水文地质特征及其水文地质结构类型[J]. 中国岩溶, 22(4): 258-266.
- 莫美仙, 王宇, 李峰. 2014. 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), 39(5): 88-95.
- 彭淑惠, 王宇, 张贵, 李继红, 李玉辉. 2011. 昆明盆地土地利用对岩溶水质的影响[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 36(6): 1-7.
- 王宇, 李燕, 谭继中, 张贵, 何绕生. 2003. 断陷盆地岩溶水赋存规律[M]. 昆明: 云南科技出版社: 12-22.
- 王宇, 张贵, 柴金龙, 王波, 何绕生, 彭淑惠, 康晓波, 周翠琼. 2013. 云南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策[M]. 昆明: 云南科技出版社: 17-27.
- 王宇. 2002. 西南岩溶地区岩溶水系统分类、特征及勘查评价要点[J]. 中国岩溶, 21(2): 114-119.
- 王宇. 2019. 岩溶区地表水与地下水资源及环境统一评价的流域边界划分研究[J]. 中国岩溶, 38(6): 823-830.
- 王昭, 王慧珍, 石建省, 张兆吉, 费宇红, 张凤娥, 陈京生, 钱永. 2008. 地下水有机污染研究进展[J]. 勘察科学技术, (06): 23-27.
- 文冬光, 林良俊, 孙继朝, 张兆吉, 姜月华, 叶念军, 费宇红, 钱永, 龚建师, 周迅, 张玉玺. 2012. 中国东部主要平原地下水质量与污染评价[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 37(2): 220-228.
- 吴志亮, 曹广祝, 李峰. 2001. 环境地质学[M]. 重庆: 重庆大学出版社: 78-79.
- 姚普, 刘华, 支兵发. 2009. 珠江三角洲地区地下水污染调查内容综述[J]. 地下水, 31(4): 74-75, 84.
- 袁道先, 蔡桂鸿. 1988. 岩溶环境学[M]. 重庆: 重庆出版社: 172-182.
- 袁道先. 2000. 对南方岩溶石山地区地下水资源及生态环境地质调查的一些意见[J]. 中国岩溶, 19(2): 103-107.
- 张贵, 周翠琼, 康晓波. 2008. 云南开远南洞地下水水质演变特征[J]. 中国岩溶, 27(4): 366-370.
- 张水燕, 王在峰, 杜天君, 张厚勇, 戈锡林. 2014. 流域重点工业污染源识别特征成分谱建立技术[J]. 中国环境监测, 30(3): 85-89.
- 张新钰, 辛宝东, 王晓红, 郭高轩, 陆海燕, 纪轶群, 沈媛媛.

2011. 我国地下水污染研究进展[J]. 地球与环境, 39(3): 415-422.
- 邹胜章, 李录娟, 卢海平, 刘芹芹, 苏春田, 朱丹尼. 2014. 岩溶地下水系统防污性能评价方法[J]. 地球学报, 35(2): 262-268.

References:

- CAI Wu-tian. 2015. On source intensity of groundwater contamination[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 42(6): 126-130(in Chinese with English abstract).
- LAO Wen-ke, JIANG Zhong-cheng, SHI Jian, LIANG Bin. 2003. Hydrogeologic structure and feature of the epi-Karst in Luotajiang[J]. Carsologica Sinica, 22(4): 258-266(in Chinese with English abstract).
- MO Mei-xian, WANG Yu, LI Feng. 2014. Hydrogeological Model of Groundwater Pollution in Eastern Yunnan Plateau Down-faulted Basin[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 39(5): 88-95(in Chinese with English abstract).
- PENG Shu-hui, WANG Yu, ZHANG Gui, LI Ji-hong, LI Yu-hui. 2011. Effect of Kunming Basin Land Use on Karst Water Quality[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 36(6): 1-7(in Chinese with English abstract).
- WANG Yu, LI Yan, TAN Ji-zhong, ZHANG Gui, HE Rao-sheng. 2003. Storage Rule of Karst Water in Fault Basins[M]. Kunming: Yunnan Science & Technology Publishing House: 12-22(in Chinese).
- WANG Yu, ZHANG Gui, CHAI Jin-long, WANG Bo, HE Rao-sheng, PENG Shu-hui, KANG Xiao-bo, ZHOU Cui-qiong. 2013. The serious environmental geological problems and countermeasures in karst area of Yunnan province[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press: 17-27(in Chinese).
- WANG Yu. 2002. Classification, features of karst water system and point for the evaluation to karst water exploration in southwestern China karst area[J]. Carsologica Sinica, 21(2): 114-119(in Chinese with English abstract).
- WANG Yu. 2019. Study on watershed boundary division for unified evaluation of surface water and groundwater resources and environment in karst areas[J]. Carsologica Sinica, 38(6): 823-830(in Chinese with English abstract).
- WANG Zhao, WANG Hui-zhen, SHI Jian-sheng, ZHANG Zhao-ji, FEI Yu-hong, ZHANG Feng-e, CHEN Jing-sheng, QIAN Yong. 2008. Research Advances of Groundwater Organic Contamination[J]. Exploration Science and Technology, (06): 23-27(in Chinese with English abstract).
- WEN Dong-guang, LIN Liang-jun, SUN Ji-chao, ZHANG Zhao-ji, JIANG Yue-hua, YE Nian-jun, FEI Yu-hong, QIAN Yong, GONG Jian-shi, ZHOU Xun, ZHANG Yu-xi. 2012. Groundwater quality and pollution assessment in the main plains of eastern China[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 37(2): 220-228(in Chinese with English abstract).
- WU Zhi-liang, CAO Guang-zhu, LI Feng. 2001. Environmental Geology[M]. Chongqing: Chongqing University Press: 78-79(in Chinese).
- YAO Pu, LIU Hua, ZHI Bing-fa. 2009. Review of Investigated Contents of Groundwater Contamination in Pearl River Delta[J]. Ground water, 31(4): 74-75, 84(in Chinese with English abstract).
- YUAN Dao-xian, CAI Gui-hong. 1988. Karst Environment[M]. Chongqing: Chongqing Publishing House: 172-182(in Chinese).
- YUAN Dao-xian. 2000. Aspects on the newround land and Resources survey in Karst rock desertification areas in South China[J]. Carsologica Sinica, 19(2): 103-107(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Gui, ZHOU Cui-qiong, KANG Xiao-bo. 2008. Changing features of water quality in the Nandong underground river, Kaiyuan, Yunnan[J]. Carsologica Sinica, 27(4): 366-370(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Shui-yan, WANG Zai-feng, DU Tian-jun, ZHANG Hou-yong, ZHAN Xi-lin. 2014. Characteristic Compositions Establishing Technique for the Watershed Key Industrial Pollution Source Identification[J]. Chinese Environmental Monitoring, 30(3): 85-89(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xin-yu, XIN Bao-dong, WANG Xiao-hong, GUO Gao-xuan, LU Hai-yan, JI Yi-qun, SHEN Yuan-yuan. 2011. Progress in Research on Groundwater Pollution in Our Country[J]. Earth and Environment, 39(3): 415-422(in Chinese with English abstract).
- ZOU Sheng-zhang, LI Lu-juan, LU Hai-ping, LIU Qin-qin, SU Chun-tian, ZHU Dan-ni. 2014. The Vulnerability Assessment Method of Karst Groundwater[J]. Acta Geoscientica Sinica, 35(2): 262-268(in Chinese with English abstract).