

# 西南喀斯特地区地表水和地下水环境污染特征 与研究展望

肖旭芳<sup>1,2</sup>, 张双龙<sup>1,2</sup>, 郭雯<sup>1,2</sup>, 王敬富<sup>1</sup>, 杨海全<sup>1</sup>, 廖鹏<sup>1,\*</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 西南喀斯特地区是长江和珠江上游的重要水资源安全屏障。随着全球变化和矿产资源的开发利用, 西南地区地表水和地下水污染日益严峻。本文系统总结了西南地区地表水和地下水的污染特征, 主要表现在: 1) 地表水和地下水之间独特的交互关系影响水循环和水资源利用; 2) 水动力条件驱动水环境中污染物的富集和迁移转化动力学过程; 3) 大宗固体废弃物引起地表水和地下水交叉污染; 4) 湖泊水库潜流带高内源污染负荷导致二次污染风险大; 5) 地下水环境极其脆弱, 极易受到污染, 脆弱性评价方法缺乏。水污染难以根治的主要原因在于未弄清污染物在地表水-地下水系统中的运移规律。未来研究亟需瞄准西南喀斯特地区水环境保护国家重大需求, 构建地表水-地下水监测网络体系, 揭示污染物的多尺度迁移转化动力学规律与健康风险, 研发经济、高效的水污染综合防治技术, 支撑西南生态文明建设和乡村振兴战略。

**关键词:** 西南喀斯特地区; 地表水-地下水环境; 污染特征; 研究展望

**中图分类号:** X131.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2023)05-0564-10 **doi:** 10.14050/j.cnki.1672-9250.2023.51.005

喀斯特是全球普遍存在的一种地貌类型, 是水对可溶性碳酸盐岩进行化学和物理作用形成的特殊地貌类型。喀斯特地区地下水资源占全球地下水资源的 25%<sup>[1]</sup>。在欧洲部分喀斯特地区约 50% 生产生活用水来源于地下水<sup>[2-3]</sup>。我国喀斯特地区地下水资源量 2 034 亿 m<sup>3</sup>/a, 地下河达 3 000 多条, 占全国地下水资源的 23%<sup>[4]</sup>。地下水因具有良好的水质, 是喀斯特地区重要的水资源。据统计, 地下水可开采量约为地表水资源量的 1/3<sup>[5]</sup>, 在维护经济社会发展和生态平衡等方面也发挥了不可替代的作用, 是可持续发展的重要战略资源。以贵州、云南、广西为中心的西南喀斯特地区是世界上面积最大、最集中连片分布区<sup>[6]</sup>。西南喀斯特地区位于长江和珠江流域的上游, 是“两江”流域重要的水资源安全屏障, 也是我国乡村振兴战略的主战场。西南喀斯特地区是我国水资源富集区, 占全国水能资源的 75% 以上<sup>[7]</sup>。根据 2020 年中国水资源公报, 西南地区地表水水量约为 5 751.1 亿 m<sup>3</sup>, 以深水区-亚深水区水库为主要存储形式。西南喀斯特

地区水资源在维持饮用水、工农业用水、生态用水及旅游业等方面发挥着极其重要的作用。

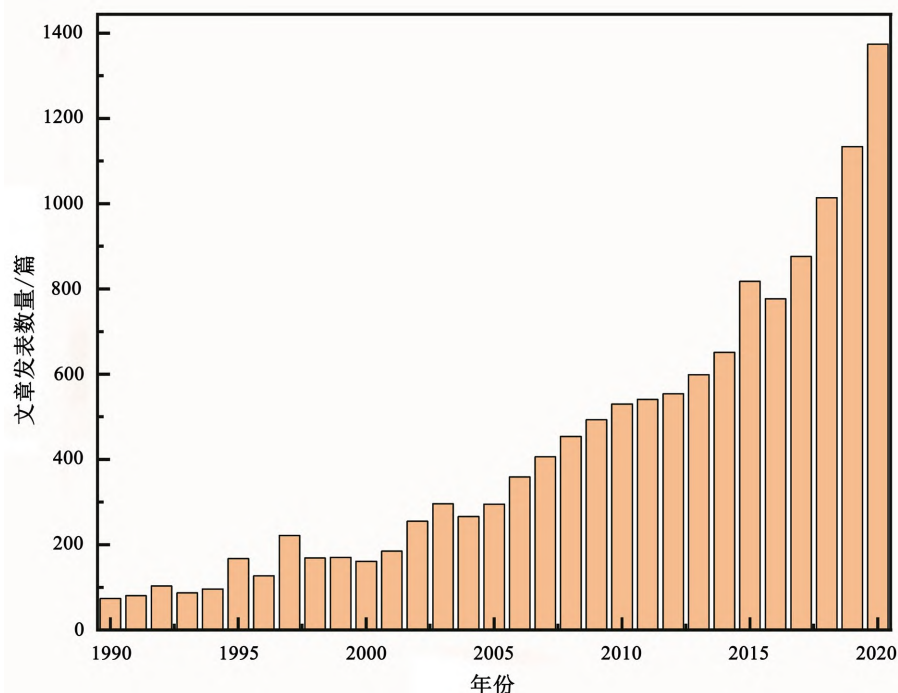
喀斯特地区地表水和地下水环境研究受到了越来越多的关注。地表水和地下水是生态环境系统的基本要素, 也是地球关键带多圈层体系研究中最活跃的要害, 在流域生态系统物质和能量循环中发挥着重要作用<sup>[2-3, 8-9]</sup>。根据 Web of Science 收录论文统计, 近 30 年来, 喀斯特地区水环境研究论文呈逐年增加趋势(图 1)。当前学界对喀斯特地区地表水水量、水质、泥沙、生物和碳汇等水安全因子进行了多维度的研究, 在喀斯特系统的水动力特征和污染物的迁移转化特征等方面取得了长足的进步, 但对地下水以及地表水-地下水交互过程中的水量和水质研究缺乏系统性和整体性的认识, 导致喀斯特地区存在复杂水环境污染问题, 给饮水安全、供水安全、工/农业生产保证乃至社会稳定带来了巨大挑战。需要指出的是, 喀斯特地区具有与非喀斯特地区不同的地质条件, 其水体中污染物循环过程独具自身特点, 但相

收稿日期: 2022-10-18; 改回日期: 2023-02-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177237、U1612441); 中国科学院先导 B 项目(XDB40020000); 中央引导地方科技发展资金项目(黔科中引地[2021]4028)。

第一作者简介: 肖旭芳(1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事喀斯特地区水循环研究。E-mail: xiaoxufang@mail.gyig.ac.cn.

\* 通讯作者: 廖鹏(1986-), 男, 研究员, 主要从事水环境胶体地球化学研究。E-mail: liaopeng@mail.gyig.ac.cn.



数据来自 web of science,检索关键词为 karst groundwater, karst surface water

图 1 喀斯特地区地表水和地下水方面论文统计

Fig. 1 Statistics of research papers on surface water and groundwater in karst areas

关研究比较薄弱。本研究阐述了喀斯特地区水环境污染特征,论述了开展喀斯特地区地表水-地下水交互过程中物质循环研究的重要性和必要性,并对未来的水环境研究进行了展望,为西南喀斯特地区的经济发展、生态环境保护及保障人民生活安全提供科学指导。

## 1 西南喀斯特地区地表水和地下水污染特征

喀斯特地区具有与非喀斯特地区不同的水文地质结构和生态环境特征。独特的可溶性岩层及储水介质造就了水化学组分的独特性。地表水化学组成主要以  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  为主,其次为  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$ <sup>[10-11]</sup>。地下水化学组成主要为  $\text{HCO}_3^-$ -Ca 型和  $\text{HCO}_3^-$ -Ca-Mg 型,  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  来源于水和碳酸盐岩之间的相互作用,其它常规离子源自地表水补给<sup>[12-14]</sup>。由于碳酸盐岩的风化作用,地表水和地下水多呈碱性,pH 值介于 6.5~9.5 之间<sup>[14-15]</sup>。上述特殊的水化学和含水层介质特征使得水环境特征独具特点,主要体现在以下几个方面。

### 1.1 地表水和地下水之间独特的交互关系影响水循环和水资源利用

西南喀斯特地区相比非喀斯特地区具有不同的地表水-地下水交互关系(图 2)。碳酸盐岩溶蚀作用造就复杂的地形地质,岩溶洼地、落水洞、地下岩溶通道、岩溶裂隙发育,塑造了喀斯特地区特殊的地表-地下双重水文地质结构,表现为地表水与地下水剧烈交互,其交互频率远高于非喀斯特地区<sup>[16]</sup>,并在不同时空尺度上呈现较大差异。此外,喀斯特地区发育的地下管道、裂隙、溶洞可使地表水与地下水发生快速动态转化,水位波动明显,水流受到管道和裂隙介质的控制<sup>[5,17-18]</sup>。地表水的水位受季节性降雨和各种水利设施等影响,如清江流域和香溪河流域的地下水的储水和释水有着明显的季节性,在丰水期储水,而在枯水期补给河流<sup>[17]</sup>。在强降雨情况下,岩溶管道水位迅速上升,且比周围裂隙含水介质的水位增长更快,导致高水位的管道含水介质在压力差驱动下,管道中的水流进入到与此连通的裂隙中<sup>[19]</sup>。随着降雨停止,管道中水进入到更深的含水层中,周围裂隙含水介质中水位的下降速度较管道缓慢的多,两者之间的水位差使得先进入到裂隙中的水流再次流入管道中<sup>[20]</sup>。另

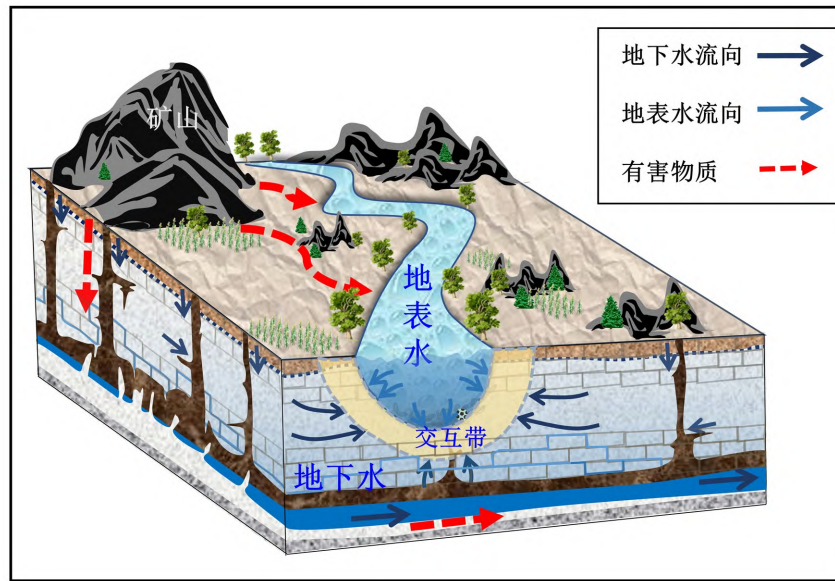


图2 喀斯特地表水-地下水交互示意图

Fig. 2 Schematic diagram of karst surface water-ground water interaction

一方面,喀斯特地区具有土层浅薄、大量基岩裸露、渗透性强等特点,这进一步导致地表水快速渗入地下水<sup>[21-22]</sup>。为了有效利用地下水资源,工程上通常利用凿井供水或直接利用地下河修建各种水利工程等方式来开发地下水<sup>[5]</sup>。然而,含水层的强非均质性和水资源时空分布不均匀性增加了水资源开发利用难度,目前西南地区水资源利用率只占总开发量的15%左右。由地表水快速渗入地下水引起的工程性缺水问题尤为突出。例如,位于西南地区中心的贵州尽管有着充沛的降雨量(如年均降水量达1 178.6 mm,年均径流量达602.8 mm),但地表持水能力极弱且下渗严重<sup>[18,23-24]</sup>,给地下水资源高效利用带来了巨大挑战,也给水资源预警-溯源-管理造成了极大困难。虽然有大量的理论和模型研究用于预测喀斯特流域的水循环过程<sup>[25-26]</sup>,但模型识别精度离解决实际问题仍有不小的距离。因此迫切需要从不同尺度阐释地表水与地下水之间的转换规律。

### 1.2 水动力条件影响水环境中污染物的富集和迁移转化动力学过程

西南地区地表水和地下水均受到了不同程度的污染,地表水和地下水的主要污染类型有重金属(Hg、Cr、Cu、As、Cd、Pb等)、生源物质(N、P等)、氮素、硫酸根、抗生素和个人护理产品等新型有机污染物(百菌清、磺胺类、唑诺酮类、邻苯二甲酸酯等)(表1),它们的种类和浓度呈现高度的空间异质性,

严重威胁区域生产生活用水安全。近年来的野外研究表明新型污染物(如邻苯二甲酸酯,一种增塑剂)和放射性核素(<sup>137</sup>Cs、<sup>241</sup>Am、<sup>90</sup>Sr、<sup>239+240</sup>Pu)能在喀斯特系统中长距离迁移扩散,对饮用水安全造成了严重的威胁<sup>[27]</sup>。自“水十条”和“河长制”颁布实施以来,水污染治理取得了积极效果,但由于缺乏对污染物在地表水-地下水系统中迁移转化规律的系统认知,水污染治理效果仍难以达到预期(见1.3部分)。需要突破的难点是搞清地表水-地下水复杂系统的水动力过程。西南地区水循环的特点是,地表水-地下水之间存在剧烈水动力交换,且交互过程呈现时空异质性。理论上讲,水动力条件非均质性会影响水化学条件的非均质性,进而影响污染物的生物地球化学动力学过程<sup>[28]</sup>。最近的研究表明,水动力条件可影响重金属在管道中的富集和迁移<sup>[27]</sup>。水动力条件变化还能诱导胶体颗粒的形成以及胶体携带污染物的长距离迁移,引起污染物扩散<sup>[29-30]</sup>。因此,要定量理解污染物的迁移转化规律,本质上需要明晰地表水-地下水交互过程中水流和溶质运移规律。当前,地表水-地下水交互引起的环境问题是国际地球科学、环境科学、资源科学交叉研究的前沿和热点<sup>[31]</sup>。喀斯特地表水与地下水交互过程中也伴随着物质循环、能量和信息传递等过程<sup>[17,32-33]</sup>。伴随着全球变化和人类活动频繁的双重影响,以喀斯特地表水-地下水作为一个整体的水环境系统进行研究的重要性与日俱增。

表1 西南喀斯特地区地表水和地下水污染状况

Table 1 Surface water and groundwater pollution in karst areas of southwestern China

水类型	污染物	污染特征
地表水	重金属	贵州高原水库 Hg、MeHg(甲基汞)、DHg(溶解态汞)浓度分别为: $5.82 \pm 4.99$ 、 $0.08 \pm 0.07$ 、 $2.48 \pm 0.79$ ng/L, 处于较高的水平 <sup>[36]</sup> ; 乌江构皮滩水库 Cr、Cu、As、Cd、Pb 等重金属被不同程度检测出 <sup>[37]</sup> ; 重庆青木关地表水中的 Mg 高达 $12.45$ mg/L <sup>[38]</sup> 。
	生源要素	贵州红枫湖 TN、TP 分别处于 $0.56 \sim 2.80$ 、 $0.016 \sim 0.103$ mg/L 水平, 属于轻富营养化水体 <sup>[39]</sup> 。
	农药、抗生素、护理产品	在贵州阿哈湖 <sup>[40]</sup> 、红枫湖 <sup>[40]</sup> 、草海 <sup>[41]</sup> 、乌江重庆段 <sup>[42]</sup> 水域检测出六六六、百菌清、磺胺类、喹诺酮类、邻苯二甲酸酯等较高浓度的农药残留, 六六六达 $9.72$ $\mu\text{g/L}$ ; 以色列耶路撒冷西部 CAF(咖啡因)CBZ(卡马西平)浓度分别为 $0.1$ 、 $0.25$ $\mu\text{g/L}$ <sup>[43]</sup> 。
地下水	重金属	贵州普定后寨河流域中 Cr、Cu、Hg、Cd、Pb 等重金属被不同程度检测出, 其中 Pb 高达 $4.3 \sim 5.3$ $\mu\text{g/L}$ <sup>[44]</sup> ; 广西里湖地下河中的 As 高达 $13$ $\mu\text{g/L}$ <sup>[45]</sup> ; 国外西班牙马略卡岛地下水中 Co、Ni、Zn、Pb、V 等重金属被检测出 <sup>[46]</sup> 。
	生源要素	广西桂林东郊地下水 $\text{NO}_3^-$ 为 $0.09 \sim 46.69$ mg/L, 处于较高污染水平 <sup>[47]</sup> ; 重庆川东平行岭谷区 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ 浓度分别高到 $73.2 \sim 81.2$ 、 $63.0 \sim 161.0$ mg/L <sup>[13]</sup> ; 贵州普定水域的 TN 处于高浓度水平 $4.393 \sim 105.699$ mg/L <sup>[48]</sup> 。
	农药、抗生素、护理产品	重庆市南川区 PAH <sub>scarce</sub> (致癌性)高达 $0.877$ $\mu\text{g/L}$ <sup>[21]</sup> ; 山东省淄博市临淄区地下水被三氯甲烷、苯、氯苯、1,1,2-三氯乙烷等有机物不同程度污染 <sup>[49]</sup> 。

喀斯特地表水-地下水是一个复杂系统,其内部存在各种物理、化学、生物相互作用,共同控制污染物的反应、迁移、转化等过程。前人对喀斯特地区地表水和地下水系统污染物迁移转化进行了大量的研究<sup>[34-35]</sup>,如在喀斯特水动力特征和污染物迁移转化特征等方面取得了长足的进步,这些研究有助于我们深化对复杂系统中污染物迁移转化过程的理解。但迄今,我们对喀斯特地表水-地下水系统中水动力驱动水化学组分微尺度相互作用的认识仍十分有限,而正是这些微尺度上化学组分的相互作用控制着宏观尺度污染物的迁移转化。未来要加强这方面的研究,为水污染技术研发和打赢水污染防治攻坚战提供理论支撑。

### 1.3 大宗固体废弃物引起地表水和地下水交叉污染

受喀斯特地质背景和区域矿产开发叠加影响,大宗固体废弃物引起的水环境问题十分严峻。西南喀斯特地区位于世界最大的两个低温成矿区域之一,磷矿、金属矿产、煤矿资源极为丰富。矿业活动导致磷石膏、赤泥、锰渣、煤矸石等大宗固废大量堆存。例如,我国75%储量磷矿资源分布于西南地区,副产物磷石膏堆存量高达4.4亿吨,占全国3/4,且每年新增约8000万吨。此外,贵州兴仁县的砷和铊、万山的汞、黔西北的铅和镉等重金属污染问题引起了学界和社会高度关注。矿业活动导致污染地表水向地下水迁移扩散,如我国西南喀斯特地区部分流域受到矿井淋溶水直排影响,导致多

河段水体呈现黄色或者红色的酸性水, $\text{SO}_4^{2-}$ 、Fe、Mn 严重超标<sup>[50]</sup>。实际上,大宗固废引发严重水污染事件,治理难度极大。主要原因在于喀斯特地表水与地下水之间存在紧密的水力和物质循环联系<sup>[51-52]</sup>,受污染的地表水极易进入地下水,通过裂隙和管道流引起地下水污染扩散<sup>[1]</sup>(图2、图3)。反过来,被污染的地下水亦可通过泉水等方式进入地表水,危害生态安全和生命健康。以磷石膏为例,强酸性磷石膏渗滤液与碳酸盐岩相互作用,使地表水和地下水总磷含量严重超标(最高达1000 mg/L以上),乌江流域也因此受到严重污染,引起了中央环保督察高度关注<sup>[53-54]</sup>。虽然地方政府和企业投入治污资金20亿元,仍难以根治。主要原因在于,喀斯特水-岩相互作用下污染物在地下水中的输移规律不清,治理抓不住重点。此外,强酸性渗滤液导致地下管道、裂隙不断增大,大量污染物进入地下水系统,地表涌水量亦持续加大。因此,为了有效管控水污染,需要从科学理论层面弄清地表水-地下水污染物迁移转化规律。然而,当前这方面的基础研究还有待加强。

### 1.4 湖泊水库潜流带高内源污染负荷导致二次污染风险大

潜流带是地表水和地下水水量交互及物质迁移转化的重要地带,是生物地球化学反应最为活跃的区域<sup>[31]</sup>。在喀斯特地区,潜流带的区域除了包括河床及河岸带补给地下水形成的混合区外,还包括向更深处含水层延伸与河流之间形成的区域<sup>[31]</sup>。

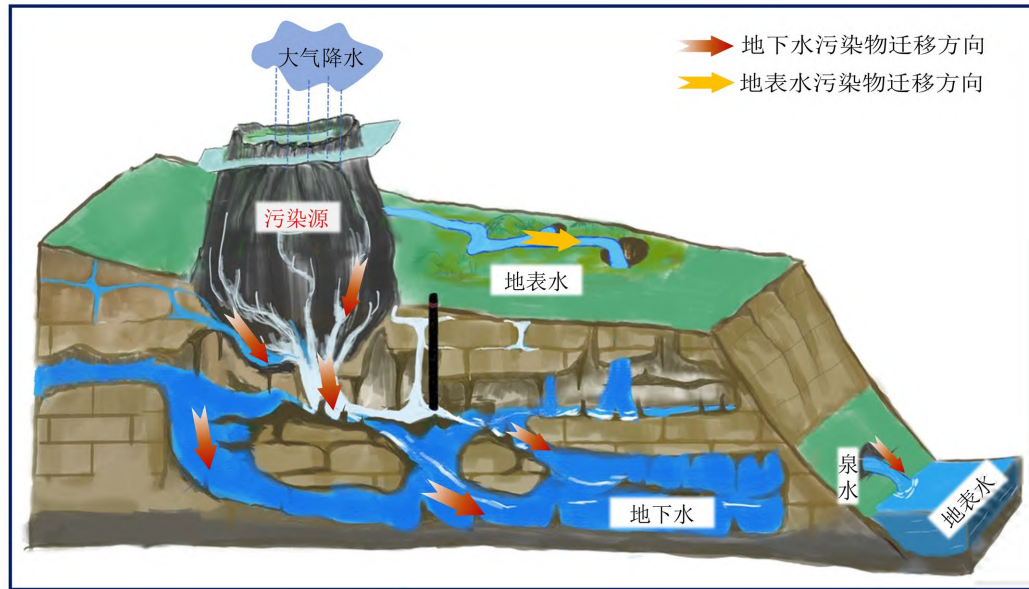


图3 喀斯特地区地表水-地下水交互污染示意图

Fig. 3 Schematic diagram of surface water-groundwater cross contamination in karst areas

河流、湖泊、水库交互带界面存在各种物理、化学和生物过程相互作用,共同控制着物质和元素的迁移转化,是污染物和营养物质富集和转化的重要区域<sup>[31,55]</sup>。西南地区湖泊水库潜流带通常含有丰富的氧化还原活性物质如有机质、铁、锰、硫化物,它们的生物地球化学循环往往耦合在一起。同时,沉积物中还可能存在生源物质(如磷等)与重金属(Hg、As、Sb、Pb、Zn)的耦合。例如,饮用水源地红枫湖沉积物中总磷含量高达3 000 mg/kg<sup>[7]</sup>。水动力条件和氧化还原条件的变化可导致赋存在沉积物中污染物的释放,造成污染风险扩散。例如,红枫湖沉积物夏季磷释放通量可达8吨,约占全湖流域水体总磷的28%<sup>[7]</sup>。贵州威宁天然湖泊草海沉积物中有有机质和总磷含量高,内源磷负荷较大。重金属Cd、Pb等含量严重超标,导致湖泊内肉食性和植食性水鸟的重金属暴露风险较高。水动力条件的剧烈变化引起湖泊水体浑浊,大量富集在沉积物中的生源物质释放到水体,导致地表水体富营养化<sup>[56]</sup>。当前,学界对喀斯特湖泊水库潜流带中物质和元素迁移转化动力学研究较少,尤其是对物质和元素在沉积物-水界面和氧化-还原界面等多界面迁移转化耦合过程尚缺乏系统的认识。

### 1.5 地下水环境极其脆弱,极易受到污染,脆弱性评价方法缺乏

由于地表-地下双重地质结构,地下水环境对外界环境干扰敏感,地下水质量容易受到人类活动

的影响。人类在喀斯特地区进行工农业生产、旅游活动等产生的生活垃圾、工业废水、化肥农药直接通过落水洞、岩溶管道注入地下,超过了地下水的自净能力,改变了地下水文系统的功能,从而导致水质下降<sup>[57]</sup>。如磷石膏大宗固废引起地下水总磷严重污染,矿山开采形成的酸性矿山废水随着地下水运移,导致扩散污染风险增加<sup>[58]</sup>。一般来讲,地下水的脆弱性是衡量地下水对外界条件扰动(如降水入渗、地表水-地下水交互作用)的响应<sup>[59]</sup>。与地表水不同的是,地下水具有隐蔽性,一旦污染,治理难度巨大,其水质恢复到污染前水平的难度大,即地下水弹性和可恢复性差。地下水脆弱性评价研究有助于我们厘清影响地下水脆弱性的主控因素,预测不同自然和人为情景下地下水质量变化趋势,以期更好保护地下水环境。目前用于评价地下水脆弱性的主要因素包括地层结构、水文地质条件、含水层化学组成、气候条件、土地利用、污染排放、人类活动强度等<sup>[60]</sup>。过去30年间,学术界建立了多种地下水脆弱性评价方法体系,大体包括基于地理信息系统的DRASTIC、GOD和KAV1法、统计法、数值模拟法<sup>[27,61]</sup>。最近国外多个研究团队联合在Earth-Science Reviews期刊上详细综述了地下水脆弱性评价方法,强调每种方法均有各自的适用范围。目前普遍使用的DRASTIC法主要应用于地下孔隙介质,但不太适合评价喀斯特裂隙和管道介质地下水的脆弱性。为此,瑞士学者提出了针对喀斯

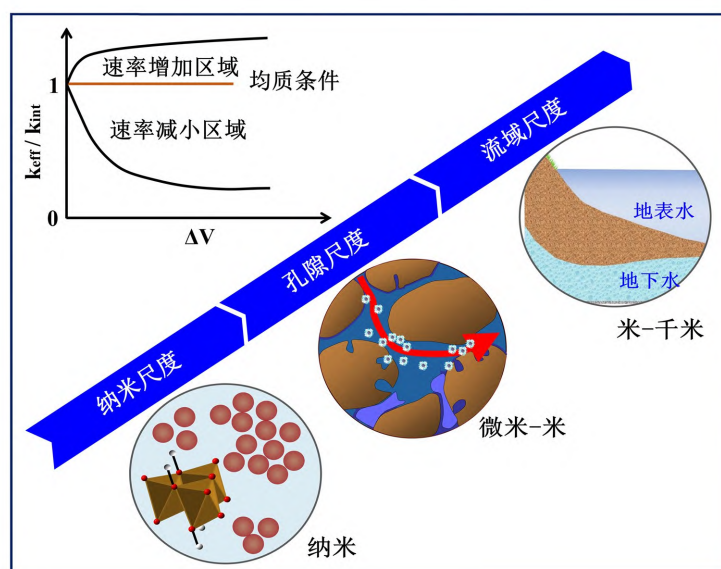
特地区地下水脆弱性评价的 EPIK 法<sup>[61]</sup>。例如,瑞士学者通过补给-管道流-扩散流-降雨排放模型和 AQUASIM 软件较好地预测了地下水水量的脆弱性及其对气候变化的响应<sup>[62]</sup>。然而,目前的评价方法更多侧重在水量方面,较少关注水质。另外,评价对象往往被处理为黑箱,在参数赋值上具有一定的主观性<sup>[61]</sup>。因此,在已有的评价方法基础上,耦合基于生物地球化学的多尺度动力学模型将有助于评价污染物对地下水水质演化过程和提高预测精度,为科学管理地下水环境,有效支撑西南生态文明建设和乡村振兴战略提供方法指导。然而,目前这方面的研究还十分有限,亟待加强。

## 2 研究展望

近 30 年来,强烈的人类活动使得西南喀斯特地区地表水和地下水均受到了一定程度的污染,如地表水和地下水的水质恶化,乌江部分流域和威宁草海富营养等环境问题频繁发生。尽管投入了大量的治理资金,但仍难以根治,主要原因在于没有搞清污染物在地表水-地下水系统中的运移规律。因此,开展西南地区水科学研究具有重要的理论意义和现实意义。未来研究可瞄准西南喀斯特地区水环境保护和可持续发展国家重大需求,构建地表水-地下水监测网络体系,从科学原理上明晰地表水

和地下水循环机制,揭示有害物质的迁移转化规律和健康风险,研发经济、高效、先进的水污染综合防治与管控技术。未来研究可从如下几个方面展开。

(1) 创建地表水-地下水监测网络和多尺度观测系统。联合国 2022 年可持续发展目标报告指出,到 2030 年将有 16 亿人缺乏安全处理的饮用水<sup>[63]</sup>,充分说明水质监测的重要性。西南地区水污染状况未得到根本扭转的重要原因是缺乏地表水-地下水流域长周期、多指标、高频率的监测系统。与地表水紧密联系的地下水具有强空间异质性,同一含水层介质中随深度不同差别巨大,这极大地增加了地表水-地下水污染物耦合循环的复杂性,并增加了水污染防治的技术和管理难度<sup>[64]</sup>。因此,亟需开发喀斯特地区地下水高精度、高密度、长周期、多尺度监测技术,建立地下水监测网络体系,通过获取地下水物理、化学、生物等方面的基础数据,明晰地下水形成分布规律,为建立地下水和饮用水安全预警方法提供数据基础,也为建立地下水脆弱性和可恢复性定量评价方法体系提供科学依据。考虑到地下水的水量 and 水质对地表水响应十分敏感,未来可将同位素示踪技术、原位快速检测技术、地球物理探测、光谱-质谱分析技术、数值可视化等技术应用到地下水的监测中<sup>[28]</sup>。在湖泊水库的监测体系中可通过遥感技术构建流域面积的时空动态变化



左上图曲线参考文献[72]

图4 喀斯特地表水-地下水物质多尺度迁移转化示意图

Fig. 4 Schematic diagram of multi-scale transport and transformation of substances in karst surface water and groundwater systems

数据集<sup>[65]</sup>。

(2)地表水-地下水系统中物质多尺度迁移转化动力学规律。西南喀斯特地区地表水和地下水污染治理难以达标的原因之一在于,污染物在喀斯特地表-地下二元结构中的多尺度迁移转化机理不清。除了溶解形式的污染物外,喀斯特系统中普遍存在的胶体还可携带难迁移的低溶解度污染物远距离迁移<sup>[66]</sup>,进一步增加水污染扩散风险。因此迫切需要揭示控制地表水-地下水系统中污染物迁移转化的关键水文生物地球化学过程和驱动机制,建立含水层介质空间异质性影响下水流运动、溶质与胶体运移、生物地球反应等多过程耦合的污染物迁移转化模型<sup>[67-68]</sup>,定量预测污染物通量与水质的时空变化规律,为全面认识污染物的迁移转化规律提供理论基础。近年来发展起来的多尺度理论表明<sup>[69]</sup>,化学物质的地球化学反应速率具有明显的尺度效应,实验室微尺度下的物质地球化学反应速率与野外尺度观测的速率往往相差几个数量级<sup>[69-70]</sup>。因此,为了更好弄清地表水-地下水系统中物质循

环和污染物的迁移转化规律,须开展小到分子尺度大到流域尺度的多尺度研究(图4),为深入认识地表水-地下水系统污染物迁移转化规律提供理论基础,为西南地区供水水质安全、污染场地修复、流域生态环境保护等提供科学依据。

(3)地表水-地下水污染防控创新防治技术。中共中央国务院关于打好污染防治攻坚战的意见(2021)<sup>[71]</sup>指出,要强化地下水污染协同防治,在地表水、地下水交互密切的典型地区开展污染综合防治试点。西南喀斯特地区恰恰是地表水、地下水交互密切的典型地区,未来研究要在上述基础理论研究的基础上,研发适合喀斯特地区地表水和地下水污染防控治理成套技术,包括沉积物-水界面生源要素原位钝化技术、磷石膏等大宗固废无害化、减量化与资源化技术、地表水-地下水-土壤系统污染风险联合防控技术和评价体系、酸性矿山废水协同治理技术等,为地表水和地下水污染应急处置和政府决策提供科技支持,服务西南生态文明建设和乡村振兴战略。

## 参 考 文 献

- [1] Green R T, Painter S L, Sun A, et al. Groundwater contamination in karst terranes[J]. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 2006, 6(1-2): 157-170.
- [2] Goldscheider N. A new quantitative interpretation of the long-tail and plateau-like breakthrough curves from tracer tests in the artesian karst aquifer of Stuttgart, Germany[J]. *Hydrogeology Journal*, 2008, 16(7): 1311-1317.
- [3] Andreo B, Duran J J. Theme issue on groundwater in Mediterranean countries[J]. *Environmental Geology*, 2008, 54(3): 443-444.
- [4] 杜雪莲. 贵州喀斯特地区水资源研究进展[J]. *科技创新导报*, 2015, 12(13): 96-97.
- [5] 蒋忠诚, 夏日元, 时坚, 等. 西南岩溶地下水资源开发利用效应与潜力分析[J]. *地球学报*, 2006, 27(5): 495-502.
- [6] 李大通, 落雁. 中国碳酸盐岩分布面积测量[J]. *中国岩溶*, 1983, 2(2): 61-34.
- [7] 陈敬安, 王敬富, 于佳, 等. 西南地区水库生态环境特征与研究展望[J]. *地球与环境*, 2017, 45(2): 115-125.
- [8] Goldscheider N, Chen Z, Auler A S, et al. Global distribution of carbonate rocks and karst water resources[J]. *Hydrogeology Journal*, 2020, 28(5): 1661-1677.
- [9] 单海平, 邓军. 我国西南地区岩溶水资源的基本特征及其和谐利用对策[J]. *中国岩溶*, 2006, 25(4): 324-329.
- [10] 吴起鑫, 韩贵琳, 唐杨. 水位变化对湖泊(水库)消落带生态环境影响的研究进展[J]. *地球与环境*, 2009, 44(4): 446-453.
- [11] 刘从强. 生物地球化学过程与地表物质循环:西南喀斯特流域侵蚀与生源要素循环[M]. 北京:科学出版社, 2007.
- [12] 杨平恒, 刘子琦, 贺秋芳. 降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2012, 33(10): 3376-3381.
- [13] 杨平恒, 袁道先, 叶许春, 等. 降雨期间岩溶地下水化学组分的来源及运移路径[J]. *科学通报*, 2013, 58(18): 1755-1763.
- [14] 郎赞超, 刘从强, 赵志琦, 等. 贵阳市地表水地下水化学组成:喀斯特水文系统水-岩反应及污染特征[J]. *水科学进展*, 2005(6): 826-832.
- [15] 马松, 魏榆, 韩翠红, 等. 喀斯特水库水化学特征及对无机碳沉积通量的指示[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(6): 1701-1713.
- [16] 杨立铮. 地下河流域岩溶水天然资源类型及评价方法[J]. *水文地质工程地质*, 1982(4): 22-25.
- [17] 罗明明. 南方岩溶水循环的物理机制及数学模型研究[D]. 武汉:中国地质大学, 2017.
- [18] 赵先进, 周创兵, 张华. 喀斯特山区地下水资源特点及其开发利用问题—以贵州省为例[J]. *中国农村水利水电*, 2015(6): 52-55+65.
- [19] Binet S, Joigneaux E, Pauwels H, et al. Water exchange, mixing and transient storage between a saturated karstic conduit and the surrounding aquifer: Groundwater flow modeling and inputs from stable water isotopes[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 544: 278-289.

- [20] Zhang L, Luo M M, Chen Z H. Identification and estimation of solute storage and release in karst water systems, South China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(19).
- [21] 孙玉川, 沈立成, 袁道先. 表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2014, 35(6): 2091-2098.
- [22] Jiang Z, Liu H Y, Wang H Y, et al. Bedrock geochemistry influences vegetation growth by regulating the regolith water holding capacity[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 2392.
- [23] 蒋佩东, 董前进, 赵先进. 喀斯特地区水资源与社会经济的时空匹配特征—以贵州省为例[J]. *中国农村水利水电*, 2021(8): 74-80.
- [24] 张育林, 程星, 王恒松, 等. 贵阳市乌当区北部地下水资源特征与开发利用研究[J]. *贵州科学*, 2018, 36(6): 74-80.
- [25] Abdelmohsen K, Sultan M, Save H, et al. What can the GRACE seasonal cycle tell us about lake-aquifer interactions? [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 211: 103392.
- [26] White W B, White E L. Ground water flux distribution between matrix, fractures, and conduits: Constraints on modeling[J]. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, 2005, 3(2): 1-6.
- [27] White W B, Herman J S, Rutigliano M, et al. *Karst groundwater contamination and public health*[M]. Springer International Publishing, 2017.
- [28] 中国科学院. *中国学科发展战略*[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [29] Goepfert N G N. Improved understanding of particle transport in karst groundwater using natural sediments as tracers[J]. *Water Research*, 2019, 166: 115045.
- [30] Zhang W, Tang X, Weisbrod N, et al. A review of colloid transport in fractured rocks[J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, 9(6): 770-787.
- [31] Sophocleous M. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science[J]. *Hydrogeology Journal*, 2002, 10(1): 52-67.
- [32] Thomas C. *Ground water and surface water* [M]. U. S.: Geological Survey, 1998.
- [33] Bailly-Comte V, Martin J B, Jourde H, et al. Water exchange and pressure transfer between conduits and matrix and their influence on hydrodynamics of two karst aquifers with sinking streams[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 386(1-4): 55-66.
- [34] Liu C Q, Lang Y C, Satake H, et al. Identification of anthropogenic and natural inputs of sulfate and chloride into the karstic ground water of Guiyang, SW China: combined  $\delta^{37}\text{Cl}$  and  $\delta^{34}\text{S}$  approach[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(15): 5421-5427.
- [35] Visser A N, Lehmann M F, Rügner H, et al. Fate of nitrate during groundwater recharge in a fractured karst aquifer in Southwest Germany[J]. *Hydrogeology Journal*, 2021, 29(3): 1153-1171.
- [36] 高廷进, 李秋华, 孟博, 等. 贵州高原水库汞的分布特征及其对富营养化的响应[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(5): 1248-1257.
- [37] 吕红, 杨梦迪, 崔高仰, 等. 高原深水型湖库水体重金属及营养盐耦合关系探究—以乌江构皮滩水库为例[J]. *地球与环境*, 2019, 47(6): 777-785.
- [38] He Q F, Yang P H, Yuan W H, et al. The use of nitrate, bacteria and fluorescent tracers to characterize groundwater recharge and contamination in a karst catchment, Chongqing, China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2010, 18(5): 1281-1288.
- [39] 曾华献, 王敬富, 李玉麟, 等. 贵州红枫湖近 10 年来(2009—2018 年)水质变化及影响因素[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(3): 676-687.
- [40] 刘园, 杨卫萍, 魏琛, 等. 枯水期贵阳市饮用水源农药污染特征及健康风险[J]. *地球与环境*, 2015, 43(6): 653-659.
- [41] 王娅南, 黄合田, 彭洁, 等. 贵州草海喀斯特高原湿地水环境中典型抗生素的分布特征[J]. *环境化学*, 2020, 39(4): 975-986.
- [42] 卓丽, 石运刚, 蔡凤珊, 等. 长江干流、嘉陵江和乌江重庆段邻苯二甲酸酯污染特征及生态风险评估[J]. *生态毒理学报*, 2020, 15(3): 158-170.
- [43] Dvory N Z, Livshitz Y, Kuznetsov M, et al. Caffeine vs. carbamazepine as indicators of wastewater pollution in a karst aquifer[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22(12): 6371-6381.
- [44] 郭琴. 贵州典型高原喀斯特山区浅层地下水质量的影响与评价[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2017.
- [45] 郭芳, 王文科, 姜光辉, 等. 岩溶地下河污染物运移特征及自净能力——以广西里湖地下河为例[J]. *水科学进展*, 2014, 25(3): 414-419.
- [46] Tovar-Sánchez A, Basterretxea G, Rodellas V, et al. Contribution of groundwater discharge to the coastal dissolved nutrients and trace metal concentrations in Majorca Island: Karstic vs detrital systems[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(20): 11819-11827.
- [47] Wang K, Chen H, Li F, et al. Spatial distribution characteristics of nitrogen pollution in a typical karst groundwater system[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13: 1-9.
- [48] 凌明阁, 刘方, 朱健, 等. 贵州省中部喀斯特山区城镇化对浅层地下水氮磷的影响及评价[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(5): 141-144.
- [49] 郭永丽, 全洗强, 吴庆. 北方喀斯特地区地下水 VOCs 污染特征及健康风险——以山东省淄博市临淄区为例[J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 38(6): 102-113.
- [50] 梁浩乾, 冯启言, 周来, 等. 鱼洞河流域废弃煤矿矿井水对水环境的影响[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 382-388.
- [51] Chu H B, Wei J H, Wang R, et al. Characterizing the interaction of groundwater and surface water in the karst aquifer of Fangshan, Beijing



- (China)[J]. *Hydrogeology Journal*, 2017, 25(2): 575-588.
- [52] Rugel K, Golladay S W, Jackson C R, et al. Delineating groundwater/surface water interaction in a karst watershed: Lower Flint River Basin, southwestern Georgia, USA[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2016, 5: 1-19.
- [53] 贺先超. 乌江 34 号泉眼水环境现状调查和对策[J]. *环境与发展*, 2020, 32(7): 253+256.
- [54] 叶婷婷, 丁坚平, 褚学伟. 乌江 34 号泉磷污染预测[J]. *贵州大学学报(自然科学版)*, 2017, 34(3): 115-120.
- [55] Guo F, Jiang G H. Hydro-ecological processes of hyporheic zone in a karst spring-fed pool: Effects of groundwater decline and river backflow[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 587: 124987.
- [56] 余伟, 杨海全, 郭建阳, 等. 贵州草海水化学特征及离子来源分析[J]. *地球与环境*, 2021, 49(1): 32-41.
- [57] 袁道先, 蒋勇军, 沈立成. 现代岩溶学[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [58] 任虎俊. 废弃煤矿岩溶地下水污染机理及防控研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- [59] 夏军, 翁建武, 陈俊旭, 等. 多尺度水资源脆弱性评价研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2012, 20(S1): 1-14.
- [60] 吴建强, 王敏, 黄沈发, 等. 平原河网区地下水污染风险评价体系及其应用[J]. *水资源保护*, 2019, 35(4): 55-62.
- [61] Machiwal D, Jha M K, Singh V P, et al. Assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution: Current status and challenges[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 185: 901-927.
- [62] Butscher C, Huggenberger P. Modeling the temporal variability of karst groundwater vulnerability, with implications for climate change[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43: 1665-1669.
- [63] Sachs J, Kroll C, Lafortune G, et al. Sustainable development report 2022[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [64] Kalantari N, Rouhi H. Discharge hydraulic behavior comparison of two karstic springs in Kuhe-Safid anticline, Khuzestan, Iran[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2019, 34(4): 1343-1351.
- [65] Hou X J, Feng L, Dai Y H, et al. Global mapping reveals increase in lacustrine algal blooms over the past decade[J]. *Nature Geoscience*, 2022, 15(2): 130-134.
- [66] Pronk M G N, Zopfi J. Particle-size distribution as indicator for fecal bacteria contamination of drinking water from karst springs[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(24): 8400-8405.
- [67] Ning Z G, Li R, Lian H S, et al. Effects of flow-interruption on the bacteria transport behavior in porous media[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 595:125677.
- [68] Duan Y H, Li R, Gan Y Q, et al. Impact of physico-chemical heterogeneity on arsenic sorption and reactive transport under water extraction[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(23): 14974-14983.
- [69] 刘媛媛, 马腾飞, 陈旸, 等. 表生地球化学反应的尺度效应[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2021, 40(5): 1107-1120+998.
- [70] Li R, Yang C, Ke D, et al. The scaling of mineral dissolution rates under complex flow conditions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 274: 63-78.
- [71] 新华社. 中共中央 国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见[J]. *中华人民共和国国务院公报*, 2021(32):12-19.
- [72] Liu C, Liu Y, Kerisit S, et al. Pore-scale process coupling and effective surface reaction rates in heterogeneous subsurface materials[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2015, 80(1): 191-216.

## Environmental Pollution Characteristics of Surface Water and Groundwater in Southwest China and Its Research Prospects

XIAO Xufang<sup>1,2</sup>, ZHANG Shuanglong<sup>1,2</sup>, GUO Wen<sup>1,2</sup>, WANG Jingfu<sup>1</sup>,  
YANG Haiquan<sup>1</sup>, LIAO Peng<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The karst region in southwestern China is an important water resource securing the upper reaches of the Yangtze and Pearl River. With the global change and the exploitation of mineral resources, surface water and groundwater pollution in southwestern China has become a growing problem, posing a significant challenge to the sustainable supply of water resources. Here, we systematically summarized the pollution characteristics of surface water and groundwater in southwestern China, including 1) The unique interaction between surface water and groundwater significantly influencing the water cycling and water resources utilization; 2) The pollutant accumulation, migration and transformation in the aquatic environment modulated by hydrodynamic conditions; 3) Cross contamination of surface water and groundwater caused by bulk solid wastes; 4) Increased risk of secondary pollution triggered by the high endogenous pollution load in the hyporheic zone of lakes and the reservoirs; 5) The extremely vulnerable groundwater environment and the lack of vulnerability assessment methods. The key challenge in the effective control of water pollution is the ill-understanding of the transport of pollutants in the surface water-groundwater system. Future research should aim at water environment protection in southwestern China, including building a surface water-groundwater monitoring network system, revealing the multi-scale transport and transformation dynamics of pollutants, as well as the associated risks to the environment and human health, and developing economic and efficient technologies to prevent and control water pollution. These efforts can support the ecological civilization construction and rural revitalization strategy in southwestern China.

**Key words:** southwest karst area; surface water-groundwater environment; pollution characteristics; research prospects