

水文地质条件对岩溶地下暗河污染的影响

鲁震 方晓

山东省地矿工程勘察院(山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队),山东济南,250014;

摘要: 岩溶地下暗河作为特殊的地下水系统,其独特的形成机制和结构特征使其在污染物迁移转化过程中表现出与常规地下水系统明显不同的规律。研究表明,岩溶发育程度、覆盖层特性、水动力条件和地质构造是影响暗河系统污染物迁移行为的关键水文地质因素。针对这些因素,本文提出建立基于水文地质特征的差异化保护区划分系统,构建多层次监测预警网络,优化污染源头控制与土地利用模式,并加强应急响应能力建设等措施,从而实现岩溶地下暗河系统的可持续利用。

关键词: 岩溶地下暗河; 水文地质条件; 污染迁移

DOI: 10.69979/3029-2727.25.06.014

引言

近年来,随着城市化和工业化进程加速,岩溶地区人类活动日益频繁,农业面源污染、城市生活污水和工业废水等不断威胁着地下暗河水质安全。与普通地下水系统相比,岩溶地下暗河污染具有扩散速度快、影响范围广、治理难度大等特点,而这些特点与区域水文地质条件密切相关。因此,水文地质条件对岩溶地下暗河污染的影响是一项十分重要的课题。

1 水文地质条件对岩溶地下暗河污染的影响

1.1 岩溶发育程度对污染物迁移的影响

影响地下暗河系统污染物迁移特征的关键因素当属岩溶发育程度。在岩溶高度发育的区域,溶洞、管道以及裂隙网络呈现出发达的态势,优势流通道由此形成,污染物即能在系统内实现快速且广泛的传输。一旦溶洞具备较大的直径并且连通性良好,污染物在随水流迅速运移之时,几乎可不经过任何过滤或吸附作用,其流速能达到每日数百米至数千米,这一速度远远高于普通孔隙含水层。在此种情形下,污染物从入渗点迁移至排泄点,所花费的时间或许仅为数小时至数天,进而致使污染范围迅速地扩大开来^[1]。

与之形成对比的是,在岩溶发育程度偏低的地区,地下水主要是经由细小裂隙以及微小孔隙来流动,流速相对缓慢,污染物在运移期间便拥有了更多与周围介质接触的契机,吸附、降解等作用得以发生,扩散的速度与范围也就随之减缓下来。而且,岩溶发育程度还对系统的存储特性产生着影响,高度发育的岩溶系统,其溶洞虽容量较大,但水交换的速度也很快,这对于污染物的长期滞留是不利的;而发育程度较低的系统,却有可

能因水交换的缓慢而形成污染物长期存储的区域,从而造成持续性的影响。所以,在对岩溶地下暗河污染风险展开评估之际,必须将区域岩溶发育程度所存在的空间差异性充分地考虑进去。

1.2 覆盖层特性对污染物入渗的作用

污染物从地表进入地下暗河系统的第一道屏障即为岩溶区覆盖层,污染物的入渗过程会直接受到其厚度、成分以及结构特性的影响。在那些没有覆盖层或者覆盖层极为单薄的裸露岩溶区,地表的污染物能够通过漏斗、落水洞等通道径直进入地下水系统,几乎不会受到任何的阻拦,这类地区对于污染表现得极为敏感。相较于此,具备较厚覆盖层的覆盖型岩溶区则具备了更为强大的保护功能。覆盖层越厚,污染物穿透它所需要的时间就越长,被拦截、吸附或者降解的可能性也就越大。

同时覆盖层的质地结构同样起着极为关键的作用:以粘土含量高为特点的覆盖层,其吸附能力相对较强,对于重金属、有机污染物等能够起到良好的截留效果;而以砂质为主的覆盖层,尽管其渗透性较高,然而过滤和吸附能力却相对较弱。覆盖层当中的有机质含量同样会对污染物的迁移行为产生影响,通常情况下,高有机质含量能够增强对有机污染物的吸附以及生物降解能力。此外,覆盖层的非均质性也是一个重要因素,局部存在的薄弱区域或者优先流路径(比如动物洞穴、植物根系通道)会成为污染物快速入渗的“绿色通道”,这会显著降低其整体的保护效能。

1.3 水动力条件对污染物分布的影响

决定污染物迁移行为的核心因素在于地下暗河系统的水动力条件,其涉及流速、水力梯度、流量变化等诸多方面。在流速较高的条件下,污染物会受到更强的

机械分散作用，从而沿流向方向能实现更快的扩散，不过与此同时，也会历经更强的稀释作用，这便有可能致使污染物浓度快速降低。地下暗河系统水动力条件有着极不稳定的典型特征，且受降雨事件的影响颇为显著。在暴雨期间，大量地表水会迅速注入地下，进而形成“洪水波”现象，此时系统的流速与流量会急剧增加，有可能在短时间内就将原本滞留在溶洞或裂隙中的污染物冲刷出来，由此形成污染物浓度的“峰值效应”。这种现象在春季融雪时段或者雨季初期表现得尤为明显，往往会使得出水点污染物浓度出现突然升高的情况。

而在枯水期，系统流速会有所减缓，污染物便会在某些流速较低的区域发生沉积或者滞留，进而形成污染物的“储存区”。水力梯度在空间上的分布情况同样会对污染扩散路径以及速率产生影响，高梯度区能够促进污染物进行定向迁移，而低梯度区则有可能形成污染物的聚集区。除此之外，不同水动力区带的转换区域，比如暗河与伏流区、主干道与支流的交汇处等，常常会因为流速的变化而导致污染物出现非线性迁移行为，具体表现为局部的聚集或者稀释效应。所以，对地下暗河系统水动力条件变化进行准确监测以及预测，是污染防控当中极为关键的环节。

1.4 地质构造对污染物迁移路径的控制

岩溶地下暗河系统形态以及发育方向主要受地质构造这一因素所控制，并且污染物在该系统内的迁移路径和模式同样由地质构造来决定。断层、褶皱、岩层产状等构造因素构建了岩溶系统内的优势流路径，使得污染物的迁移呈现出强烈的方向性与非均质性特点。通常而言，断层和大型裂隙带是地下水的主要通道，污染物沿着这些结构快速迁移的倾向较为明显。在多组断裂相互交叉的区域，往往会造成复杂的网络结构，污染物有可能会沿着不同方向进行扩散，这无疑增加了对污染范围预测的复杂性。

另外，地层的倾斜角度对污染扩散模式的影响也颇为显著，在陡倾地层当中，污染物更易于沿着层面向深部进行迁移；而在缓倾地层里，水平方向的扩散则会更加明显。不同岩性之间的接触带同样是重要的控制因素，尤其是可溶性岩石（如图1）与非可溶性岩石的接触面，常常会形成地下水水流的天然屏障或者导流带，进而影响污染物的迁移方向和速度。在实际的岩溶区，这些构造因素常常会相互叠加发挥作用，由此形成高度复杂的污染物迁移网络，使得常规的均质媒质污染物迁移模型难以对岩溶系统中的污染行为进行准确预测。所以，工程要开展详细的构造地质调查，提高岩溶区污染预警和防

控。



图1 可溶性岩石

2 岩溶地下暗河污染防控的综合治理措施

2.1 基于水文地质特征的差异化保护区划分与管理

岩溶地下暗河系统有着复杂性与脆弱性的特点，在污染防控方面，基于其水文地质特征来建立差异化保护区划分，这属于基础工作范畴。暗河存在补给区、径流区和排泄区，各区域特点不同，再结合岩溶发育程度以及覆盖层条件，可把暗河流域划分成严格保护区、控制开发区、一般防护区这三个等级。在管理过程中，暗河出入口、主要漏斗、落水洞等直接补给区域应被归入严格保护区，这些区域往往是污染物能快速进入系统的关键所在，一切可能造成污染的人类活动都得禁止。对于覆盖层较薄、岩溶中度发育的区域，可划分到控制开发区，这里允许开展有限的人类活动，不过要对污染源加以严格控制，像化工厂、垃圾填埋场这类高风险设施需严禁进入。而一般防护区虽说允许更多开发活动，但常规监测制度的建立不可或缺，要确保污染物不会超标。在保护区划分期间，要充分利用地下水示踪试验、水文地球化学分析等技术手段，准确识别补给关系以及地下水水流系统，为科学划定保护范围提供依据，避免因保护区划分不合理，出现过大或过小的情况，从而导致资源浪费或者保护不到位的问题^[2]。

2.2 构建岩溶地下暗河系统的多层次监测预警网络

鉴于岩溶地下暗河系统既复杂，污染物又有快速迁移的特性，工程人员需建立起全面且高效的监测预警网络（如图2），重点在于打造“地表-地下-出口”这种多层次的监测网络，使其能覆盖污染物从渗入到排出的整个过程。



图2 监测预警网络

在地表这个层面，主要漏斗、落水洞等关键入渗点周围的环境状况以及潜在污染源是重点监测对象；在地下层面，可借助钻孔或者利用天然洞穴来设置监测点，以此实时监测暗河主干道和主要支流的水质参数；在出口层面，针对暗河出水点可设立常规监测站，监测指标应涵盖常规理化指标（比如pH值、电导率、溶解氧等）以及地区特征污染物指标，要依据不同区域的污染风险特点来有针对性地设置。现代监测技术的应用对于提高监测效率作用显著，除此之外，需要定期开展地下水水流示踪实验，更新对暗河系统结构和动态特性的认识，进而优化监测网络的布局，有效提升预警的准确性与及时性。

2.3 优化污染源头控制与岩溶区土地利用模式

岩溶地下暗河污染防控，最经济有效的途径在于源头预防，工程需从污染源控制以及土地利用优化这两方面来着手开展相关工作。就点源污染而言，对于工业企业尤其是化工、制药、冶金等高污染行业在岩溶敏感区的布局，要予以严格控制。针对已有的相关企业，需强化废水处理设施的建设工作，达成达标排放的要求。另外，处理农村生活污水，可采用人工湿地系统这样的生态型处理技术，其既能对污水进行有效处理，又能实现与当地景观的协调一致^[3]。

另外，针对面源污染方面，工程要对农业生产方式加以优化，推广生态农业以及精准施肥技术，让农作物产量维持稳定，还使得农田溪沟和地下水硝酸盐含量出现明显的下降态势。对于畜禽养殖，应当实行集中化的管理模式，配套建设粪污处理设施，推广粪污资源化利用技术。此外，垃圾处理设施在选址时，要避开岩溶敏感区，对于已有的简易垃圾堆放点，要进行整治或者实

施搬迁处理。还有岩溶落水洞、漏斗等敏感点的周围，应当建立起生态缓冲带，通过植被的过滤作用以及土壤的吸附作用来减少污染物的入渗情况。

2.4 加强应急响应能力与岩溶水资源综合治理

针对岩溶地下暗河系统污染事件发生迅速、扩散范围广泛的特点，工程单位有必要建立起高效的应急响应机制。例如，基于岩溶水文地质特征，构建污染物迁移预测模型，明确污染物在不同水文条件下的扩散路径以及到达时间，从而为应急决策提供科学的依据。并且，编制具有针对性的应急预案，明确不同类型污染事件的处置流程、责任分工以及技术措施，并且要定期组织演练活动，确保应急队伍能够熟悉应对程序。在应急处置技术方面，要针对岩溶系统的特点来开发专门的污染控制方法，比如在关键节点设置能够快速启动的拦截设施，必要时采用水力屏障技术来改变地下水流向，以此减缓污染物的扩散速度。

此外，岩溶水资源的综合治理属于一项长期的工作任务，应当结合当地的实际情况，统筹考虑水资源保护、水环境治理以及水生态修复等方面。如建设生态清洁小流域或坡面径流控制工程，减少面源污染的入渗情况；通过漏斗整治、洞穴清理等工程措施来恢复和维护岩溶系统的自然功能。长期坚持下去，形成制度化、常态化的工作机制，这样才能确保岩溶地下暗河系统能够长久保持健康状态。

3 结束语

综上所述水文地质条件是影响岩溶地下暗河污染过程的关键因素，深入理解两者之间的关系对于暗河系统的保护与治理具有重要意义。未来，应加强水文地质条件与污染过程的定量关系研究，结合现代监测技术和模拟方法，建立更加精确的暗河污染预测模型。同时，应根据不同区域的水文地质特征，制定差异化的保护策略，实现岩溶地下暗河系统的精细化管理，促进区域可持续发展。

参考文献

- [1] 马蓝建,陈世万,田浪,余会云,吴攀.岩溶区矿山地下水通道精细探查与地质模型构建[J].水利水电技术(中英文),2025,56(01):203-216.
- [2] 田浪.岩溶山区闭坑和生产矿山三维地质建模及其在地下水污染防治应用研究[D].导师:陈世万.贵州大学,2023.
- [3] 宁航,王宗星,柳富田,蒋万军,常威,张竞,万军伟.基于系统空间特征识别的岩溶地下水污染成因分析[J].地质科技通报,2022,41(05):367-376.