# 山间盆地中白云岩含水介质溶质弥散特征研究

——以黔东北某试验区为例

陈俊贤1,朱昱桦<sup>2,3,4</sup>,覃红亮<sup>2</sup>,何妙玲<sup>2</sup>,赵 翠<sup>5</sup>,华 兴<sup>2</sup>,陈 川<sup>1</sup>

(1.贵州省地矿局117地质大队,贵州 贵阳 550018;2.贵州省地质调查院,贵州 贵阳 550081;
3.贵州大学 资源与环境工程学院,贵州 贵阳 550025;4.贵州大学 喀斯特地质资源与环境教育部 重点实验室,贵州 贵阳 550025;5.贵州省地矿局111地质大队,贵州 贵阳 550081))

[摘 要]为了解污染物在寒武系白云岩中的弥散特征,本文以黔东北某场地为研究区,通过对 试验场小尺度模型刻画,进行实地的弥散实验,解析弥散曲线求解弥散参数,总结山间盆地白云 岩弥散特征。研究成果可为同类型环境水文地质条件场区工程建设及地下水污染防治提供借 鉴,也为山间盆地区开展野外弥散试验提供示范。

[关键词]山间盆地;白云岩;溶质弥散特征

[中图分类号]P641134 [文献标识码]A [文章编号]1000-5943(2024)01-056-05

## 1 引言

寒武系白云岩山间盆地拥有地势平缓、地质 结构稳定的特点,工程建设的适宜性强,但白云岩 层中多发育了大量的溶蚀孔洞、溶蚀裂隙,含水层 的脆弱性较高,一旦发生污染,对地下水环境的影 响较大。开展该类型含水介质中地下水的弥散特 征研究,对地下水环境保护与治理具有重要意义。

前人对不同含水介质中岩层弥散特征做了很 多研究,如Zhang R et al. (1994)装填12.5 m 的土 柱进行试验后获得均质与非均质介质均具有尺度 效应,弥散度都会随着溶质迁移距离的增加而增 大的结论;宫玥等(2019)开展了砂箱弥散试验尺 寸效应及弥散度尺度效应的研究后认为砂箱尺寸 越大则尺寸效应越小,尺度越大,尺寸效应越不明 显;刘泳佚等(2023)通过对不同长度黏性层状土 进行弥散试验得出层状土中土壤质地与结构均会 影响穿透曲线的形状;陈川等(2021)采用单井注 水-多井观测试验法对黔北白云岩进行了地下水 水动力弥散试验初步研究。上述这些研究大部分 都是在室内模拟完成的,对野外实地的研究较少。 本文以黔东北某场地为研究区,针对寒武系追屯 组(*E*<sub>3</sub>*zh*)白云岩地层开展野外弥散试验,在对小 尺度地下水模型刻画的基础上,通过弥散曲线解 析,求解弥散参数,探索山间盆地白云岩弥散特 征。研究成果可为同类型环境水文地质条件场区 工程建设及地下水污染防治提供借鉴,也为山间 盆地区开展野外弥散试验提供示范。

## 2 研究方法

## 2.1 研究区水文地质概况

研究区位于贵州省境内,地处贵州高原向湘西 丘陵过渡的山间盆地内。岩溶地貌主要为溶蚀缓

<sup>[</sup>收稿日期]2023-09-11 [修回日期]2023-12-30

<sup>[</sup>基金项目]铜仁市生态环境局项目(编号 GZZT-2022-05-215)与贵州省地质矿产勘查开发局地质科研项目(黔地矿科和[2020]30 号)联合资助。

<sup>[</sup>作者简介]陈俊贤(1990—),水工环工程师,长期从事矿山生态修复、水文地质、工程地质、环境地质等方面研究。

<sup>[</sup>通讯作者]朱昱桦(1989—),地质工程师,博士研究生,长期从事地质类相关工作。E-mail:zhuyuhua23@163.com。

丘、溶蚀谷地和岩溶洼地组成(图1)(李宗发, 2011)。研究区属亚热带温和湿润气候,多年平均降 水量为1154.0 mm,最高年降雨量值为1460.6 mm。 出露地层主要为寒武系追屯组(*C*<sub>3</sub>*zh*)(图1),岩 性为中厚层状白云岩,含水介质组合类型为溶隙+ 溶孔,地下水埋深小于10 m,地下水类型为潜水。 区内未见泉出露,地下水补给方式为大气降水人 渗,整体径流方向由北东、北西向南西径流,最终 在低地势排泄。



Fig. 1 Hydrogeological schematic diagram of the study area 1-第四系含水岩组;2-寒武系追屯组含水岩组;3-水库和溪 沟;4-地层界线;5-断层;6-产状

### 2.2 研究方法

2.2.1 野外弥散试验

(1)试验场布置

根据研究区水文地质条件,本次试验场总共布 设3个水文地质监测井,分别为ZK01监测井(孔半 径8 cm、孔深48.90 m)、ZK02监测井(孔深51.65 m)和ZK03监测井(孔深51.65 m)。研究区地下水 流向为南西,试验井布设情况为:正北方向ZK01 为 投源井,南西方向ZK02为监测井,正南方向ZK03 为监测井,ZK02 与ZK03 夹角为61°。

(2)试验方法

弥散试验示踪剂的选择应遵循无毒无害、价 廉、用量少、易测试、可伴随地下水运移而不改变 流场的性质,且以对吸附现象反应最小等为原则 (贾利军等,2016),因此本次选取食用盐(NaCl) 配置溶液作为示踪剂。试验采用 NaCl 与现场抽 出的背景值水混合来配置浓度为 30 g/L 的示踪 剂溶液,并注入 ZK01 井孔所在的含水层中,注入 前使溶液均匀混合至饱和。通过人工监测的方式 对 ZK02、ZK03 监测井中地下水进行电导率测量, 数据获取间隔时间为 30 min,根据电导率变化情 况加密监测频次,最终直至监测的电导率在 3 次 测定无变化后,则终止试验。

2.2.2 数学模型构建

基于研究区地下水为潜水,示踪剂的弥散主要是随地下水流的机械扩散,溶质在地下水流场中的运动满足(丁家平等,1998;吴耀国等,1998; 刘岩磊等,2014;杨章贤,2018):

 $\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \qquad ( \& \exists 1 )$   $\overline{\partial} h \& H:$ 

$$C(x,y,0) = \begin{cases} \frac{M}{n} \delta(x) \delta(y) & x, y = 0\\ C_0 & x, y \neq 0 \end{cases}$$

上述定解问题可简化为:

$$D_{L} = \alpha_{L} |v| \qquad ( \& \exists 2)$$

$$D_{T} = \alpha_{T} |v| \qquad ( \& \exists 2)$$

$$C_{R}(\alpha, t_{R}) = K t_{R}^{-1} \exp(-\frac{a^{2} + t_{R}^{2}}{4t_{R}})$$

式中,*C* 为在点(x,y)处 *t* 时刻示踪剂浓度 (mg/L),*v* 为地下水实际平均流速(m/d),*M* 为含 水层中注入示踪剂的质量(本次 NaCl 为 30 kg),*n* 为含水层有效孔隙度(或孔隙率), $D_L$  为纵向弥散 系数(m<sup>2</sup>/d), $D_T$  为横向弥散系数(m<sup>2</sup>/d)。 $\alpha_L$  是 纵向弥散度(m), $\alpha_T$  是横向弥散度(m)。

当不考虑垂向流,且假设稀释段内各点浓度 保持相等、示踪剂浓度很低,则对于任何种类的示 踪剂存在如下关系(即"点稀释定理")(Drost W et al.,1968;Pitrak M et al.,2007;刘岩磊等,2014; Piccinini L et al.,2016;杨章贤,2018):

$$V_{f} = \pi r \times \frac{In(\frac{N_{0}}{N})}{2At} \qquad ( \& \exists 3 )$$

$$v = \frac{V_{f}}{n} = \pi r \times \frac{In(\frac{N_{0}}{N})}{2An \times \Delta t}$$

$$= 3. 141 59 \times r \times \frac{In(\frac{C_{1} - C_{0}}{C_{2} - C_{0}})}{2An \times \Delta t} \qquad ( \& \exists 4 )$$

式中: $V_f$ 为渗透流速,v为地下水实际平均流速,r为投源钻孔半径(8 cm),A为流场畸变校正

系数(一般为 0.5 ~ 2.0,本次取 1.5)(刘春华等, 1993;任宏微等,2013), $N_0$ 为 t=0时示踪剂投放 初始浓度,N为投放时间  $\Delta t$ 时刻示踪剂浓度,n为 含水层有效孔隙度(根据白云岩含水层有效孔隙 度经验值有效孔隙度范围为 0.03 ~ 0.05,平均为 0.04), $C_0$ 为示踪剂本底背景值(mg/L), $C_1$ 为投 入示踪剂后投放孔的示踪剂浓度(mg/L)(用电导 率 X 代替浓度 C 参加计算)。

## 3 数据采集及分析

## 3.1 数据采集

在 ZK02、ZK03 监测井进行总计 60 小时连续采 样,采用手持式水质监测仪对现场水样进行电导率 数据收集共计 270 件。该仪器电导率测定精度为 0.01 μS/cm,在监测前进行探头校准,以保证数值 可靠性。数据处理时,采用 SPSS 17 软件统计并绘 制 ZK02、ZK03 的时间-电导率图解(图 2)。



## 3.2 数据分析

为了排除同期试验时有污水等排入引起阴、 阳离子和化合物浓度升高而干扰电导率,同批次 采取10件水样送检,其中ZK02、ZK03监测井背 景样各1件,电导率峰值样品各2件,其余6件均 为各井中地下水电导率上升过程中随机取样。根 据分析数据,由拟合计算相关性方程可知(图3): 当电导率达到最大值时,氯离子质量浓度亦为最 大值,电导率与氯离子含量显著线性正相关,实验 假设条件成立。



### 图 3 氯离子浓度与电导率相关性图

Fig. 3 Correlation plot of chloride ion concentration and conductivity

根据监测结果和电导率曲线(图 2),初始时 电导率基本为背景值 0.68 mS/cm,随着示踪剂水 流沿裂隙渗流扩散,ZK02 和 ZK03 的电导率曲线 开始变陡直至峰值 2.41 mS/cm 和2.45 mS/cm, 而后缓慢下降出现平缓区,最后恢复至背景值。

## 4 结果与讨论

## 4.1 试验结果

4.1.1 弥散参数

采用标准曲线配线法计算弥散度,将有量纲

的数据进行无因次转换成无量纲的形式,可得到 ZK02 和 ZK03 监测井的无因次浓度-时间曲线,并 基于 CR=1 时计算绘制标准曲线后叠加拟合配线 (图 4)。



根据曲线 ZK02、ZK03 得出 α 值为 6,将地下 水流向同向的投源井 ZK01 至 ZK03 监测井方向 设为 X 轴线, X 轴近 ZK02 监测井的垂线设为 Y 轴线, 图 解 获得 ZK03 监测井的坐标值  $x_1$  = 2.95 m, $y_1$ =0; ZK02 监测井的坐标值按角度 61° 进行换算后获得其坐标值  $x_2$ =1.60, $y_2$ =2.89。代 入公式(1)至(4),最终可得到弥散参数(表 1)。

表1 弥散参数结果表

Table 1 Results table of dispersion parameter

名称	单位	数值
实际平均流速	m∕ d	6. 63
横向弥散度	m	0.668
横向弥散系数	m²/d	4.43
纵向弥散度	m	0.492
纵向弥散系数	m²/d	3.26

4.1.2 山间盆地白云岩溶质弥散特征 根据弥散曲线和弥散参数分析,得出:

(1)弥散曲线过峰值后斜率缓慢下降,说明山间盆地白云岩弥散存在拖尾现象。

(2)横向弥散度大于纵向弥散度,反映出渗流 速度在径流方向上横向弥散系数是大于纵向方向 的系数,这和地下水流场特征是一致的。

(3)横向弥散系数和纵向弥散系数的比值为 1.36,说明白云岩山间盆地内含水层的弥散速度 差异较小。

## 4.2 讨论

4.2.1 弥散曲线特征分析

甘磊等(2023)通过对碳酸盐岩石样本进行渗透试验得出在层流条件下,裂隙面隙宽不变的情况下,水体渗流通过岩石孔隙趋于稳定。左小鹏等(2023)对白云岩单裂隙渗流特性研究发现,随

着水-岩作用周期的增加,裂隙渗流量呈先快后慢的减小,随后缓慢增加并趋于稳定。

本次试验区白云岩岩体裂孔隙结构稳定,渗 流情况也基本一致的。图 2 中曲线斜率从无变化 至快速提升至峰值,达峰值后转换为无变化或缓 慢下降,最终曲线斜率为缓慢下降,表明地下水在 流经孔隙时,初始状态为快速通过,后续裂隙表面 局部区域晶体脱落或溶解,有效孔隙度降低,渗流 速度减小,减缓了溶质间的置换作用。这与陈亮 等(2020)室内弥散试验得出浓度降为本底值时间 大于理论时间,弥散出现拖尾现象基本一致。 4.2.2 有效孔隙度分析

有效孔隙度可通过野外采样在室内运用微观 粒度方法、饱水称重方法和水土特征曲线方法等 测定。然而,室内测定的有效孔隙度并不能完全 拟合野外的情况。岩心样本相较于含水层厚度比 例较小,可能无法代表整个含水层;在裂隙、孔洞 介质完全饱水的情况下,充水裂隙也有封闭的阻 水结构妨碍流动。同时,野外采取的岩心基本垂 直于岩石层理,而含水层的流动方式是在层间水 平流动。相对较为准确的方式为扩大样本量,通 过统计学方式计算得到平均值(代表值)。

本地区白云岩的有效孔隙度经验值为 0.03 ~ 0.05,本次采用其平均值(0.04)参与计算,对参数计算结果有一定影响。

## 5 结论

(1)本试验确定场区内地下水流速为6.63 m/d, 潜水含水层的纵向弥散度为0.492 m,纵向弥散系 数为3.26 m<sup>2</sup>/d;横向弥散度为0.668 m,横向弥 散系数为4.43 m<sup>2</sup>/d。

(2)山间盆地白云岩弥散系数横向大于纵向, 比值为1.36,横、纵向弥散系数差异小,同时也存 在弥散拖尾现象。

(3)本次试验示范仅做了一组样本,尽管取得 了成果,但样本总量少,后续应加大样本数量;监 测井间距较近,对弥散参数有一定影响,其他参考 试验应适当增加孔距。

### [参考文献]

陈亮,张赏,余旺,等.2020. 室内二维弥散试验拖尾现象研究 [J].河北工程大学学报(自然科学版),37(03):1-8.

陈川,陈俊贤.等.2021.贵州省白云岩地区潜水含水层地下水水

动力弥散试验研究——以正安县某建设用地为例[J].四川 地质学报,41(01):70-73.

- 丁家平,李樟苏.1998. 地下水弥散系数的野外试验新方法[J]. 水利学报,(08):39-43.
- 宫玥,张敏,任宇,等.2019. 砂箱弥散试验尺寸效应及弥散度尺度 效应[J]. 地球科学与环境学报,41(06):748-756.
- 甘磊,刘玉,张宗亮,等.2023. 岩体裂隙粗糙度表征及其对裂隙渗 流特性的影响[J]. 岩土力学,44(06):1585-1592.
- 贾利军,邓吉强,康卫东,等.2016. NaCl 作为示踪剂在西北苦咸水 区地下水水动力弥散试验研究——以定边县东梁村为例 [J].科技创新与生产力,(11):117-120.
- 李宗发.2011. 贵州喀斯特地貌分区[J]. 贵州地质,28(03):177-181+234.
- 刘春华,宋玉田,单共萌,等.1993. 基础防渗工程质量检测技术的 研究[J]. 水利水电技术,(07):33-36.
- 刘泳佚,史婷婷,王清,等.2023. 江汉平原过渡带黏性层状土弥散 试验与模拟研究[J].水文地质工程地质,50(01):41-50.
- 刘岩磊,王庆来.2014. 不同流场情况下地下水弥散试验方法分析 [J]. 地下水,36(02):10-13+21.
- 任宏微,刘耀炜,孙小龙,等.2013. 单孔同位素稀释示踪法测定地 下水渗流速度、流向的技术发展[J]. 国际地震动态,(02):5-15.

- 吴耀国,田春声,李云峰,等.1998. 本溪郑家潜水含水层二维水动 力弥散试验及其结果分析[J]. 水文地质工程地质,(01):35 -38.
- 杨章贤.2018. 基于标准曲线配线法的野外弥散试验求解[J]. 上 海国土资源,39(04):165-169.
- 左小鹏,孙旭曙,郭晓萍,等.2023. 水-岩作用下白云岩单裂隙渗 流特性演化规律试验研究[J]. 水电能源科学,41(04):186 -189.
- Drost W, Klotz D, Koch A, et al. 1968. Point dilution methods of investigating ground water flow by means of radioisotopes [J]. Water Resources Research,4(1):125-146.
- Piccinini L, Fabbri P, Pola M. 2016. Point dilution tests to calculate groundwater velocity: an example in a porous aquifer in northeast Italy [J]. Hydrological Sciences Journal – Journal Des Sciences Hydrologiques, 61(8):1512–1523.
- Pitrak M, Mares S, Kobr M. 2007. A simple borehole dilution technique in measuring horizontal ground water flow [J]. Ground Water, 45 (1):89–92.
- Zhang R, Huang K, Xiang J. 1994. Solute movement through homogeneous and heterogeneous soil columns[J]. Advances in Water Resources, 17(5):317–324.

## Research on the Solute Dispersion Characteristics of Karst Aquifers in Mountainous Basins

## CHEN Jun-xian<sup>1</sup>, ZHU Yu-hua<sup>2,3,4</sup>, QIN Hong-liang<sup>2</sup>, HE Miao-ling<sup>2</sup>, Zhao Cui<sup>5</sup>, HUA Xing<sup>2</sup>, CHEN Chuan<sup>1</sup>

(1. No. 117 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources Development,

Guiyang 550081, Guizhou, China;

2. Guizhou Geological Survey, Guiyang 550081, Guizhou, China;

3. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China;

4. Key Laboratory of Karst Georesources and Environment, Ministry of Education, Guizhou University,

#### Guiyang 550025, Guizhou, China;

5. No. 111 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources Development,

Guiyang 550081, Guizhou, China)

[Abstract] In order to understand the dispersion characteristics of pollutants in the Cambrian dolomite, this study takes a site in Northeast Guizhou as the research area. Through the characterization of small-scale models in the experimental field, on-site dispersion experiments are conducted to analyze dispersion curves and solve dispersion parameters. The study summarizes the dispersion characteristics of dolomite in mountainous basin areas. The research findings can serve as a reference for engineering construction and groundwater pollution control in areas with similar hydrogeological conditions. Additionally, they provide a demonstration for conducting field dispersion experiments in mountainous basin regions.

[Key Words] Mountainous Basin; Dolomite; Solute dispersion characteristics