

# 稀释法在地下水渗流中水平流速及流向测试研究

张磊<sup>1</sup>, 刘治鲁<sup>2</sup>, 冉德钦<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>中铁十二局集团第二工程有限公司, 山西 太原

<sup>2</sup>山东省交通科学研究院, 山东 济南

收稿日期: 2022年4月30日; 录用日期: 2022年5月30日; 发布日期: 2022年6月9日

---

## 摘要

利用示踪稀释法可以测试含水层的水文地质参数。本文介绍了稀释法测定地下水渗流中水平流速和流向、垂向流的基本原理以及在某市地铁两站区间地层中地下水流速和流向测试中的应用, 测试结果为地下水渗流场计算提供了水文地质参数。考虑到该技术的局限性, 文章还对以后类似工作中提出了建议。

## 关键词

地下水渗流, 稀释法, 水文地质参数, 地下水流速, 地下水流向

---

# Measurement of Horizontal Velocity and Flow Direction in Groundwater Seepage by Dilution Method

Lei Zhang<sup>1</sup>, Zhilu Liu<sup>2</sup>, Deqin Ran<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>The 2nd Engineering Co., Ltd. of China Railway 12th Bureau Group, Taiyuan Shanxi

<sup>2</sup>Shandong Transportation Institute, Jinan Shandong

Received: Apr. 30<sup>th</sup>, 2022; accepted: May 30<sup>th</sup>, 2022; published: Jun. 9<sup>th</sup>, 2022

---

## Abstract

The hydrogeological parameters of the aquifer can be tested by the tracer dilution method. This paper introduces the basic principle of measuring horizontal velocity and flow direction and ver-

\*通讯作者。

tical flow in groundwater seepage by dilution method, and its application in the measurement of groundwater velocity and flow direction in the stratum between two subway stations in a city. The test results provide hydrogeological parameters for the calculation of groundwater seepage fields. Considering the limitations of this technology, the paper also puts forward some suggestions for similar work in the future.

## Keywords

Groundwater Seepage, Dilution Method, Hydrogeological Parameters, Groundwater Velocity, Groundwater Flow Direction

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

利用示踪稀释法测试含水层的水文地质参数,研究地下水的运动规律,不受井液温度、压力、矿化度的影响,测试灵敏度较高,方便快捷,单井测定流速准确可靠。鲁程鹏等[1]提出了一套基于对流稀释作用的数学模型,利用电导率与溶质浓度的正相关关系,可方便准确地计算示踪试验投源井的天然径流量和地下水中示踪剂的背景浓度。黄冠星等[2]利用单孔稀释法和单孔吸附示踪法分别测定龙口库区地下水的渗透流速和流向,从而推断龙口库区水的渗漏量和渗漏方向,为龙口水库建设防渗提供科学依据。但这种技术也有它的局限性[3][4]。

## 2. 单孔示踪稀释法的基本原理

滤水管中的水柱被少量示踪剂标记,标记地下水的浓度被流过滤管的水降低,示踪剂浓度稀释的速度与地下水渗透流速有关,根据这种关系可以求出渗透流速[5]。示踪剂在稀释水柱内均匀混合,水平流连续均匀稳定没有垂直水流的干扰,在现场可以通过投放示踪剂,等待30分钟到1个小时,示踪剂就会混合均匀,满足假设的要求。

## 3. 地下水流速测试

电导是指水的导电能力,电导值为浸入水中的两个电极在 $1\text{ cm}^2$ 的表面上,距离 $1\text{ cm}$ 、电势为 $1\text{ v}$ 时的电流强度[6]。在测试区域根据设计的测试深度进行钻孔,恢复一定时间后,测试孔中的电导率较小;进行示踪试验时,在测试孔中进行食盐投放,以增大测试孔中的电导率大小,在食盐示踪剂投放时应尽量使测试孔中食盐浓度大小相同;因测试地层中地下水的流动,而使测试孔中食盐溶液的浓度降低,从而使测试孔中溶液的电导率减小,相对透水层中地下水流动较快,从而其对应地层中电导率值的大小也将减小较快[7]。测试中使用电导率测试仪及配套的电导率探头对测试孔中每米深度的电导率进行采集,通过不同时刻电导率的变化,可以计算得出每米位置处地下水的流动速度。

试验步骤如下:

- ① 利用现场已有的水文地质钻孔(钻孔地下水已经稳定),测量并记录本底值;
- ② 根据钻孔测量数据与实际情况,选择氯化钠作为示踪剂测量氯化钠示踪剂的浓度与稀释相关曲线;
- ③ 利用氯化钠示踪剂对钻孔地下水进行标记(投源),投源量与标记尺寸(深度)与上述示踪剂曲线有

关;

④ 测量孔中地下水示踪剂浓度;

⑤ 间隔一段时间,再次测量地下水浓度,测量的时间间隔一般为等比例增长,特殊情况下可以补充测量;

⑥ 当测量到的示踪剂浓度数值接近本底值时,可以结束试验,通常情况下,试验数据不小于3组,测量的数据应有良好的区分度;

⑦ 等待示踪剂浓度为0,钻孔恢复本底值,重复投源与测量,直至全孔测量结束;

⑧ 如数据处理中发现钻孔存在垂向流,针对垂向流进行逐点检测,修正水平流速;

⑨ 整理数据,计算出水平流速,画流速分布图。

#### 4. 地下水流向试验

##### (1) 质心偏移法的试验原理

初始情况下投入到测井中的示踪剂(本试验使用淡水作为示踪剂)混合均匀,即同一深度平面上,各点处的示踪剂溶液电导率大小相同,示踪剂溶液的质心位于圆形滤管的圆心处。示踪剂投入测井以后,含水层上游含有盐的地下水不断补给到测井中,测井中的示踪剂主要沿着水流方向以一定的弥散角被地下水带出到孔外的含水层中去,因此会形成测井中同一平面的示踪剂浓度在各个方向上不同,由于含有盐的地下水的流入,从而使地下水流入方向的浓度最高,流出方向示踪剂的浓度最低。因此在此平面上示踪剂溶液的质心因为示踪剂浓度的分布不均而发生偏移,质心位置偏向于水流的上游方向。盐溶液的浓度在  $0.2442 \text{ mol/L} \sim 2.442 \text{ mol/L}$  之间时(天然状态下盐溶液的浓度均在此范围内),其浓度与其电导率成线性关系,因此,可以用溶液的电导率分布代替溶液浓度的分布,从而测试分析出地下水的流向。基于上述原理,在示踪剂均匀混合后,本次试验采用成  $90^\circ$  角分布的圆形四探头流向仪,间隔一定时间采集测井内一定位置处电导率的大小,绘制四个方向电导率分布图,见图1,分布图的形心即为示踪剂溶液的质心。示踪剂分布图的形心可通过矢量叠加获得,形心位置坐标如下计算:

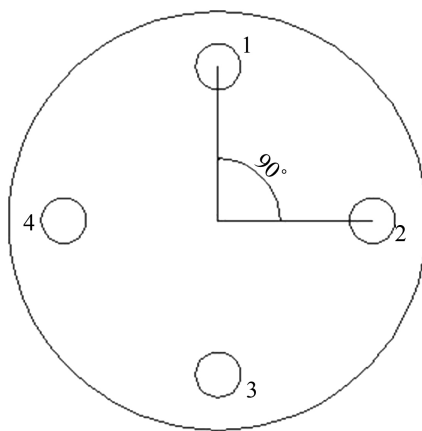


Figure 1. Probe distribution coordinates

图1. 探头分布坐标图

方向确定时先计算形心与坐标原点的连线和1号探头所指的夹角,利用定位系统获得1号探头与正北方的夹角,得出水流流向的方向角。

##### (2) 试验步骤

① 根据流速试验得到孔中各深度处的水平渗透流速,选择渗透流速大的深度作为测试深度。

② 在将要测试的深度范围内投放氯化钠示踪剂，对地下水进行标记。

将四探头流向仪通过指北针使 1 号探头与孔心的连线与正北方向平行，测试时使用固定套管控制流向仪，从而使流向仪下置至测试深度时不产生旋转错动，当流向仪到达指定深度时，进行 1、2、3、4 号探头的数据的采集。

③ 间隔一段时间，再次测量相同深度处的浓度，一般数据不少于三组。

整理数据，拟合差量，计算流向结果。

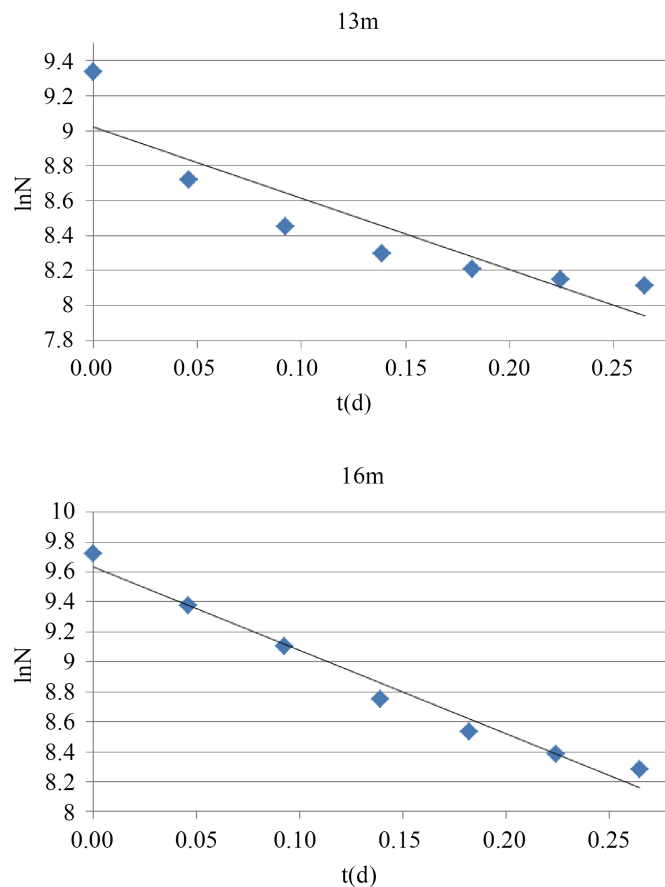
## 5. 研究区工程概况

某地铁两站区间为左右分修的两条单线单洞区间，长度约 1111.5 米，联络通道及排水泵房暂未施工。联络通道原设计采用矿山法施工，加固范围为联络通道及两侧各 3.0 米，加固深度为地面以下 9.2~23.4 米；洞内进行水平双液浆加固。同时施工单位在联络通道加固区内打设了 8 口  $\Phi 300$  mm 的乔氏滤水管(钢质透水管)降水井。

联络通道宽 4.2 米，长 9.0 米，高 3.8 米，底标高-8.072 米；泵房宽 3.5 米，深 3.35 米，底标高-11.422 米。为查明联络通道附近地下水流速、流向及流量情况，利用示踪分析，得到了各钻孔内部分深度的流速以及流向。

## 6. 试验结果与分析

J1 孔于 2019 年 9 月 30 日 12:29 开始进行地下水水平流速测试，各深度处  $\ln N$ - $t$  关系曲线见图 2 所示：



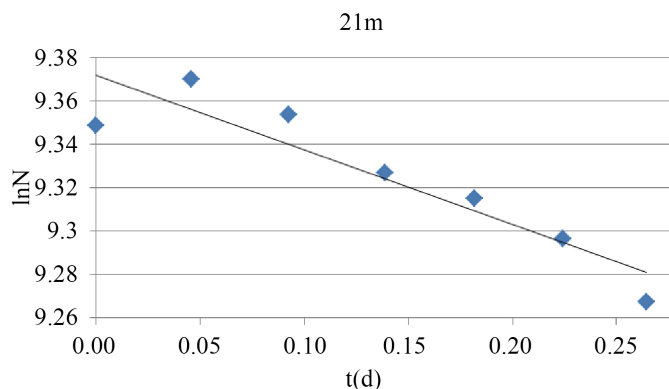


Figure 2. LnN-t diagram of J1 hole  
图 2. J1 孔 lnN-t 关系图

由稀释定理计算得到 J1 孔各深度水平流速如表 1 所示:

Table 1. Summary chart of horizontal velocity and flow direction of groundwater in borehole J1  
表 1. J1 钻孔地下水水平流速流向汇总图表

观测井号	观测深度(m)	流速(m/d)	流向(°)
J1	13	3.12	7
	16	4.29	32
	21	0.3	192

勘察区间地下水从表层向下流速呈现上大下小趋势, 表层流速和 20 米(左右)埋深的流速差异到一个数量级以上, 最大流速基本在潜水位下浅层范围, 流速最大值基本在 101 m/d 数量级, 最大流速接近 5 m/d, 流速水平分布从远到近呈现增大趋势, 规律性明显, 浅层流向各孔存在较大差异, 但是总体指向隧道与联络通道, 浅层地下水流动受隧道与联络通道施工的影响明显。

## 7. 结论

运用稀释法测定地下水流速、流向可以在地下水渗流研究中发挥重要作用。本文将这一技术运用于某市地铁两站区间地层中地下水流速和流向测试中, 测试结果为地下水渗流场计算提供了水文地质参数。考虑到该技术的局限性, 对以后类似工作中提出以下建议: 将过滤器长度增加至与含水层的厚度一致, 以提高测试精度; 建议选定典型地段布置观测孔来测量地下水水力坡度; 在经济允许的情况下尽可能多地布置测试井孔。

## 参考文献

- [1] 鲁程鹏, 束龙仓, 苑利波, 等. 基于示踪试验求解岩溶含水层水文地质参数[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2009, 39(4): 717-721.
- [2] 黄冠星, 孙继朝, 郭秀红, 等. 龙口库区同位素技术测试水文地质参数[J]. 工程勘察, 2006(4): 23-25+76.
- [3] 李远伟, 苏欣, 张静, 等. 水文地质参数对地下水溶质预测结果的影响[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(3): 303-307.
- [4] 路素明, 耿明奇, 郭爱华. 同位素示踪法在地下水渗流场测定中的应用[J]. 河北煤炭, 2007(5): 16-17.
- [5] 叶合欣, 陈建生, 童海滨, 等. 考虑示踪剂弥散作用的渗透流速计算方法[J]. 水利学报, 2008, 39(2): 240-224.
- [6] 李应. 水溶液电导率测量系统的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2013.
- [7] 刘成伦, 徐龙君, 鲜学福. 水溶液中盐的浓度与其电导率的关系研究[J]. 中国环境监测, 1999(4): 21-24.