ICS 13.060.10
CCS P 13

T/GXAS

团　　体　　标　　准

T/GXAS XXXX—XXXX

西南岩溶区地下水示踪试验技术指南

Technical guideline for groundwater tracer test in Southwest Karst Area

（征求意见稿）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布　　XXXX - XX - XX 实施

广西标准化协会　　发 布

目　　次

前言 II
1　范围 1
2　规范性引用文件 1
3　术语和定义 1
4　总体原则 1
5　试验准备 2
6　示踪剂选择 2
7　现场实施 2
8　样品采集与检测 3
9　数据分析与解译 4
10　报告编制 5
11　安全与环保 5
附录 A（资料性）　常见示踪剂特性及检测方法 6
附录 B（资料性）　岩溶区示踪试验相关参数计算 7
附录 C（资料性）　岩溶区示踪试验解译管道结构示意图 8
参考文献 9

前　言

本文件参照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则　第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国地质科学院岩溶地质研究所提出并宣贯。

本文件由广西标准化协会归口。

本文件起草单位：中国地质科学院岩溶地质研究所、广西水文地质工程地质勘察院、桂林理工大学、中国地质大学（武汉）、贵州省地质矿产勘查开发局114地质大队、广西壮族自治区地质环境监测站。

本文件主要起草人：曹建文、焦友军、李小盼、赵良杰、罗飞、吉勤克补子、王全荣、刘振宇、潘晓东、许丹丹、刘朋雨、梁健、栾崧、陈志军、任坤、梁建宏、张文平、吴华英、宋晨。

西南岩溶区地下水示踪试验技术指南

1 范围

本文件界定了西南岩溶区地下水示踪试验技术涉及的术语和定义，确立了西南岩溶区地下水示踪试验的原则，提供了西南岩溶区地下水示踪试验技术的试验准备、示踪剂的选择、现场实施、样品采集与检测、数据分析与解译、报告编制、质量控制、安全与环保等方面的指导。

本文件适用于西南岩溶区地下水示踪试验技术指导。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 12329 岩溶地质术语

GB/T 14157 水文地质术语

GB/T 14848 地下水质量标准

GB 39800.1 个体防护装备配备规范 第1部分：总则

GB/T 50585 岩土工程勘察安全标准

AQ 2004 地质勘探安全规程

DZ/T 0148 水文水井地质钻探规程

HJ 164 地下水环境监测技术规范

3 术语和定义

GB/T 12329、GB/T 14157界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

岩溶区地下水示踪试验 groundwater tracer test in karst area

以查明岩溶地下水系统边界、地下水流速流向、水力联系、管道结构特征及溶质运移参数为目的的岩溶区水文地质调查、岩溶地下空间和地下河系统结构探测、水源地保护、地下水污染溯源、水利水电工程建设及矿山岩溶水污染修复等领域的示踪试验

4 总体原则

4.1 适用性

西南岩溶区含水层存在岩溶管道或裂隙优势通道，地下水运移速度远大于孔隙介质或非可溶岩裂隙含水层，示踪试验所需时间也远小于非岩溶区，宜根据岩溶水文地质条件和不同工程类型、试验目的选择合适方法。

4.2 安全性

不宜使用放射性核素及具有持久性毒性的化学物质。

4.3 系统性

宜结合地面调查、监测、物探和钻探工作进行综合分析。

5 试验准备

5.1 资料收集

开展示踪试验前，宜收集以下主要资料：
——区域地质图、水文地质图、水文地质剖面图；
——试验区相关水文地质报告；
——岩溶发育特征、地下河系统分布资料；
——已有钻孔资料；
——地下水化学背景值及历史水文动态数据。

5.2 现场踏勘

5.2.1 宜开展地面水文地质调查，查明集中补给点（如落水洞、伏流入口、天窗或人工补给钻孔）与排泄点（泉、地下河出口、河流底部地下水排泄点或钻孔）的分布，初步推测补给点与排泄点之间可能存在的岩溶裂隙或优势通道。
5.2.2 宜根据调查结果确定监测网。

5.3 背景值测定

5.3.1 在示踪剂投放前，宜对所有接收点进行连续采样，为确保背景值浮动范围稳定，采样间隔不宜大于 1 h，且采样次数不宜少于 3 次。
5.3.2 宜测定示踪剂背景浓度，确保背景值低于检测限或保持稳定。

6 示踪剂选择

6.1 选择原则

示踪剂的选择宜符合下列建议：
——在试验区内地下水自然本底值低或波动小，检测灵敏度高；
——与围岩的物理吸附和化学反应弱；
——在运移过程中化学性质稳定，不易分解、变质、褪色或挥发；
——无毒或低毒，易降解，不造成地下水污染，不破坏生态环境；
——成本可控，检测便捷。

6.2 示踪剂分类

岩溶区常用的示踪剂主要有两类：
——化学染料类：荧光素钠、罗丹明、荧光增白剂等；
——盐类：钼酸铵、氯化钠、氯化钾等。

6.3 示踪剂特性

常见示踪剂的特性见附录A。

7 现场实施

7.1 示踪剂投放

7.1.1 投放点与接收点布设

7.1.1.1 投放点与接收点之间宜有一定的水力梯度，投放点宜布设在水位较高处，接收点布设在水位较低处；必要时可在接收点附近进行抽水或放水，或在投放点进行注水，以增大水力梯度。
7.1.1.2 投放点为钻孔时，宜进行充分洗井并观测稳定水位，确保投放孔不堵塞、示踪剂顺利进入目标含水层，洗井操作宜参照 DZ/T 0148 执行。
7.1.1.3 接收点宜覆盖所有可能的下游排泄点（泉、地下河出口）及侧向边界点（如河流等）；主接收点宜设置于所有推测可能的岩溶管道或裂隙主径流带上的泉口、河流底部排泄点或地下河出口处。

7.1.2 投放方式

示踪剂投放方式分为以下两类：

——瞬时投放：适用于测定最大流速和弥散系数；

——连续投放：适用于模拟污染物长期运移或确定稳态流场。

7.1.3 投放点操作

7.1.3.1 落水洞、天窗、投放伏流入口时，宜将示踪剂充分溶解后利用管路注入，并冲洗容器。

7.1.3.2 钻孔投放时，宜通过注水管将充分溶解后的示踪剂送至目标含水层段，有条件时宜对相邻非目标含水层段进行止水。

7.1.4 投放量估算

7.1.4.1 化学染料类示踪剂投放前可参照经验公式（1）估算投放量：

$$M_0=1.9\times10^{-5}\times(LQC)^{0.95} \quad \cdots\cdots(1)$$

式中：

M_0——示踪剂投放量，单位为克（g）；

L——预判投放点与接收点之间的距离，单位为千米（km）；

Q——管道流量，单位为升每秒（L/s）；

C——示踪剂预期浓度，单位为微克每升（μg/L）。

注：公式（1）为引自文献4经验公式，适用于一般岩溶管道条件。当试验条件与公式适用条件偏差较大时，根据实际情况调整投放量。根据监测结果分析及任务需要，可在后续试验中调整投放量。

7.1.4.2 盐类示踪剂如氯化钠等投放量大，可以吨计，监测指标可采用电导率。

7.1.5 接收时间

投放前宜根据预判距离和地下水流速初步预估示踪剂到达接收点的时间。

7.2 示踪剂监测

7.2.1 监测可采用人工或者自动监测设备，或两者结合验证分析。

7.2.2 仪器观测可设置固定频率监测，考虑设备电量和长时间监测可设为 15 min～30 min；初期人工采样间隔可为 1 h～3 h，后期宜根据穿透曲线发生变化时减小监测间隔，如人工采样 30 min～60 min，仪器观测可进一步加密观测，间隔 1 min～15 min。

7.2.3 监测宜持续至示踪剂浓度回落至背景值。

7.2.4 暴雨期宜适当加密监测频率，仪器观测时间间隔可为 1 min～15 min。

7.2.5 当监测全程示踪剂浓度曲线出现轻微波动但未明显高于背景值时，可增加投放量后重新进行试验以确认是否接收到示踪剂。

7.3 水文同步观测

示踪试验期间宜同步记录接收点的水位、流量、水温、电导率等参数，用于修正示踪剂运移速度。

8 样品采集与检测

8.1 样品采集

按HJ 164采集样品。取样瓶宜避光保存（如荧光素钠样品宜避光、低温保存）。

8.2 检测方法

示踪剂的检测可参照附录A选用相应的检测方法。

8.3 质量控制

8.3.1 投放前宜对示踪剂称量器具进行校准。

8.3.2 现场检测仪器宜每日进行校准或核查。

8.3.3 样品采集、运输、保存宜按照 HJ 164 执行。
8.3.4 每批样品宜至少包含 1 个空白样和 1 个加标回收样。
8.3.5 检测数据宜经审核确认后方可用于分析。

9 数据分析与解译

9.1 穿透曲线绘制

宜根据监测数据绘制示踪剂浓度与时间关系曲线（如图C.1穿透曲线）。

9.2 参数计算

9.2.1 宜根据穿透曲线计算下列参数：
——峰值浓度：指示管道规模与稀释程度；
——峰值到达时间（t_{peak}）：指示地下水流动快慢和路径；
——最大运移速度（V_{max}）：可按公式（2）计算。

$$V_{max}=L/t_{peak} \quad \cdots\cdots (2)$$

式中：
V_{max}——最大运移速度，单位为米每秒（m/s）；
L——投放点与接收点之间的距离，单位为米（m）；
t_{peak}——峰值到达时间，单位为秒（s）。
——平均运移速度（V_{avg}）：可按公式（3）计算。

$$V_{avg}=L/t_{mean} \quad \cdots\cdots (3)$$

式中：
V_{avg}——平均运移速度，单位为米每秒（m/s）；
t_{mean}——平均运移时间，单位为秒（s）。
——回收率（R）：可按公式（4）计算。

$$R=(M_R/M_0)\times 100\% \quad \cdots\cdots (4)$$

式中：
R——回收率；
M_R——总回收质量，单位为克（g）；
M_0——投放质量，单位为克（g）。
——弥散系数：可通过对流-弥散方程数学模型拟合计算。
9.2.2 水动力弥散系数和弥散度可采用解析软件拟合计算。示踪试验解译岩溶管道的几何参数和水力参数的定量计算宜选用能模拟对流-弥散过程和非理想流动特征的软件进行。
9.2.3 岩溶区示踪试验相关参数计算可参照附录 B 执行。

9.3 穿透曲线解译

9.3.1 岩溶结构推断

9.3.1.1 定性分析穿透曲线形态与岩溶结构的对应关系，可参考下列描述：
——单峰型：指示投放点与接收点之间为单一管道（尖峰）或存在溶潭（缓峰）；
——拖尾现象：指示存在溶潭、裂隙储水空间或吸附解吸作用；
——双峰型：指示存在双通道结构或滞流区、迂回通道；先高后低可解译为主通道峰值、支流峰值（滞后且被稀释）；先缓后高可解译为主通道存在溶潭、支流路径长水量小；
——多峰型：指示多管道结构或存在滞流区、迂回通道。
9.3.1.2 定性分析岩溶区示踪试验解译管道结构示意图见图 C.1。
9.3.1.3 定量模拟预测管道的结构：
——基于钻孔与物探资料，构建三维地质模型；
——在地质模型的基础上，构建地下水流模型与溶质运移数值模拟，通过拟合实测数据调整三维地质模型与数值模拟参数，确定管道的结构。

9.3.2 多接收点分析

宜根据各接收点示踪剂出现的先后顺序和峰值差异，判别地下河系统的分支流向、汇流点及流域边界。

10 报告编制

10.1 示踪试验设计方案宜在现场实施前完成，可按第 4～9 章的建议依次确定。

10.2 示踪试验分析报告宜至少包括下列内容：

——试验目的与任务；

——地质与水文地质背景；

——示踪剂选择依据及投放参数；

——监测布点与采样频率；

——检测数据及穿透曲线图；

——水文地质参数计算结果（流速、弥散系数、回收率）；

——岩溶管道结构及水力联系解译；

——环境安全评价及示踪剂降解说明；

——结论与建议。

10.3 原始记录、采样单、检测图谱及分析数据宜归档保存，保存期限不宜少于 10 年。

11 安全与环保

11.1 安全防护

11.1.1 操作人员在投放化学试剂时宜佩戴防护手套、护目镜等个人防护装备，防护装备配备参照 GB 39800.1。

11.1.2 进入落水洞、天窗及一般岩溶洞穴进行踏勘或投放作业时，安全防护参照 AQ 2004。

11.1.3 当有限空间作业涉及竖井、深坑，或作业点距洞口（井口）深度大于 2.0 m 时，安全防护参照 GB/T 50585。

11.1.4 现场作业宜防范岩溶塌陷、极端天气和地下河洪水等灾害。

11.2 环境保护

11.2.1 试验结束后，若示踪剂残留浓度超过 GB/T 14848 规定的限值，宜在确保安全的前提下进行吸附处理。

11.2.2 不在饮用水水源地一级保护区使用荧光染料等高显色性示踪剂。

附 录 A
（资料性）
常见示踪剂特性及检测方法

常见示踪剂特性及检测方法见表A.1。

表A.1 常见示踪剂特性及检测方法一览表

类型	名称	特性	检测方法
荧光类	荧光素钠	背景值低，易溶于水，廉价，无毒，吸附性很低，在太阳光照射下易分解，灵敏度高	荧光光度计或比色计
	罗丹明	背景值低，易溶于水，有强烈荧光，吸附性强，灵敏度高	荧光光度计或比色计
	荧光增白剂	背景值低，无色，快速溶解于水，性质稳定，不与其他物品发生化学反应，灵敏度高	荧光光度计
盐类	钼酸铵、NaCl、KCl等	背景值高，价格低廉，无毒，具有较高电导性和较弱的被吸附性，用量大，会改变水的相对密度、流速、流向，精度低	钼离子、电导率法

附 录 B
（资料性）
岩溶区示踪试验相关参数计算

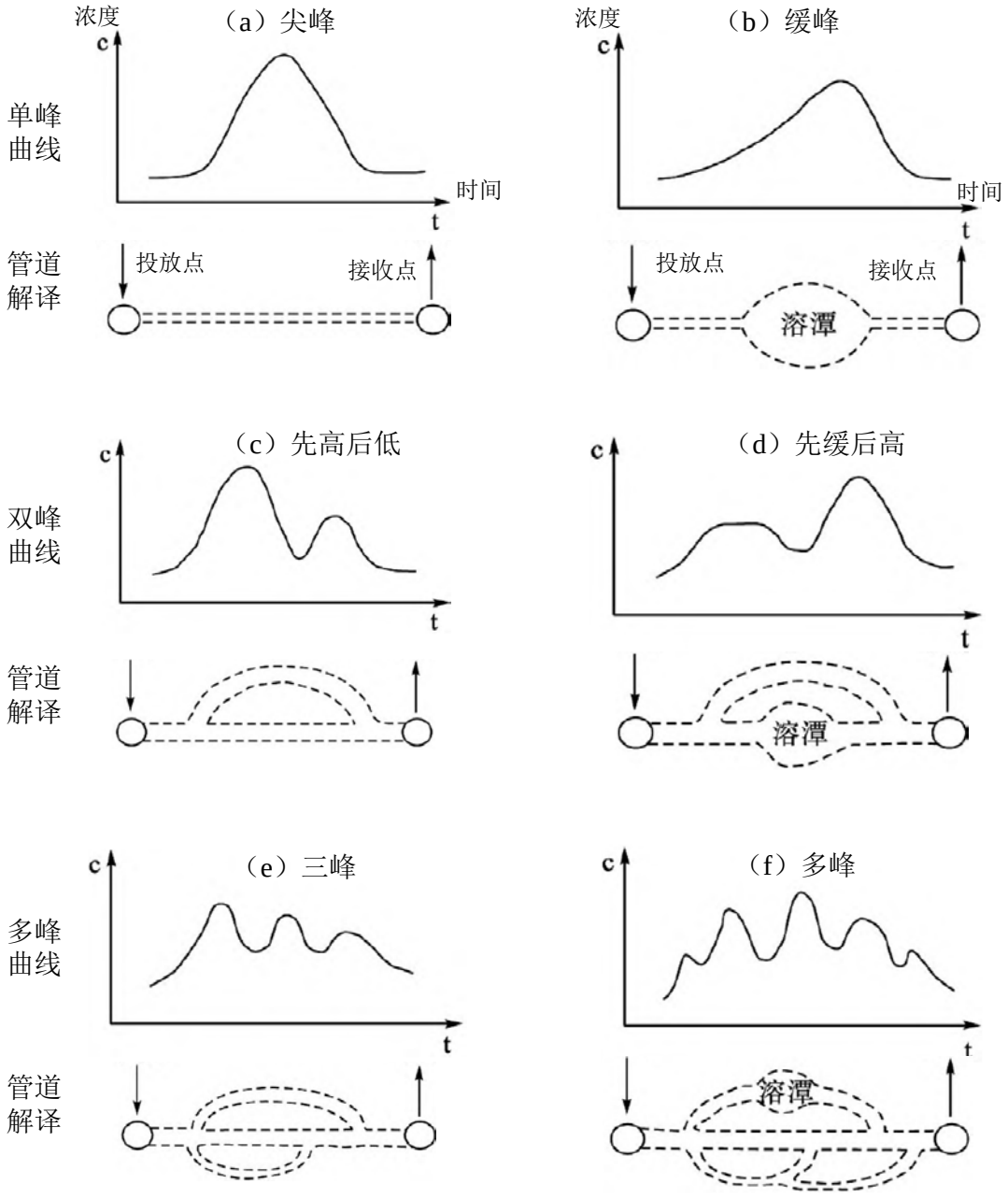
岩溶区示踪试验相关参数计算见表B.1。

表B.1 岩溶区示踪试验相关参数计算

参数	公式	备注
示踪剂回收量	$M_R=\int_0^{\bar{t}} C(t)Q(t)\,dt$	式中：C为示踪剂浓度，μg/L；Q为接收点流量，m^3/s；$\bar{t}$为示踪剂浓度回落至背景值所需的监测总时长，；M_R为示踪剂回收质量
岩溶管道储水体积	$V=\int_0^{\bar{t}} Q dt$	式中：V为储水体积，m^3
管道过湿横截面积	$A=\frac{V}{x_s}$	式中：A为过湿横截面积，m^2；x_s为示踪剂迁移距离，m
管道过水平均直径	$D_C=2\sqrt{\frac{A}{\pi}}$	式中：D_C为管道过水平均直径，m

附 录 C
（资料性）
岩溶区示踪试验解译管道结构示意图

岩溶区示踪试验解译管道结构示意图见图C.1。



图C.1 岩溶区示踪试验解译管道结构示意图

参 考 文 献

[1] GB/T 30943—2014 水资源术语[S].

[2] DZ/T 0469—2024 地下水资源调查评价规范[S].

[3] HJ 91.2—2022 地表水环境质量监测技术规范[S].

[4] 罗锐恒, 刘天云, 胡顺强, 赵永宾, 潘晓东, 彭聪. 示踪试验在一把伞水库水文地质勘察中的应用[J]. 长江科学院院报. 2023, 40(6): 43-48.

[5] 肖洋, 李强, 马显春, 李苍松. 岩溶隧道地下水示踪技术应用研究进展[J]. 现代隧道技术, 2025, 62: 1-8.

[6] 赵一, 李衍青, 覃星铭, 等. 南洞地下河岩溶管道展布及结构特征的示踪试验解析[J]. 中国岩溶, 2017, 36(2): 226-233.

[7] 张浪, 李俊, 潘晓东, 等. 西南某岩溶区地下水系统示踪试验与解析[J]. 中国岩溶, 2020, 39(1): 42-47.

[8] 王喆, 夏日元, 易连兴, 等. 西南典型地下河含水介质结构特征分析——以寨底地下河塘子厄至东究段示踪试验为例[J]. 中国岩溶, 2015.

[9] 李腾芳, 黄奇波, 沈利娜, 等. 基于示踪试验和裂隙测量分析地下河管道特征及控制因素——以罗汉肚地下河为例[J]. 中国岩溶, 2025, 44(5): 981-991.

[10] 李腾芳, 覃小群, 黄奇波, 等. 岩溶区地下水示踪试验及曲线特征[J]. 中国岩溶, 2019, 38(S2): 497-498.

[11] 易连兴, 卢海平, 赵良杰, 等. 鱼泉地下河示踪试验及回收强度法管道结构分析[J]. 工程勘察, 2015(2): 46-51.

[12] 易连兴, 赵良杰, 卢海平, 等. 两种常用染色剂管道及淤泥条件下示踪及对比——以丁旗地下河连通试验为例[J]. 中国岩溶, 2017, 36(5): 721-726.

[13] 赵良杰, 夏日元, 易连兴, 等. 岩溶地下河浊度来源及对示踪试验影响的定量分析[J]. 地球学报, 2016, 37(2): 241-246.

[14] 张鹏, 潘晓东, 任坤, 等. 岩溶台地深埋特长隧道岩溶水流特征及涌水评估[J]. 公路, 2022(2): 337-345.

[15] 张劲松, 杨玫. 人工示踪试验方法在岩溶地下水调查中的应用[J].

[16] 栾崧, 曹建文. 揭秘“洞水突然变红”:探究地下水示踪试验[J]. 中国矿业, 2018, 27(S2): 304-305.

[17] 肖洋, 李强, 马显春, 等. 岩溶隧道地下水示踪技术应用研究进展[J]. 现代隧道技术, 2025, 62: 1-8.

[18] 中国地质科学院岩溶地质研究所. 一种地下岩溶多支流管道轨迹确定装置及方法: 中国, ZL 2023 1 1366586.9[P]. 2026-07-28.