



缪子成像在水利设施内部结构探测应用

汇报人：张建鸣

华北电力大学

代表宇宙线缪子成像团队

2026 年 07 月 12 日 北京



汇报提纲

1

研究背景

2

原理与方法

3

大坝应用案例

4

输水隧道应用案例

5

结论与展望



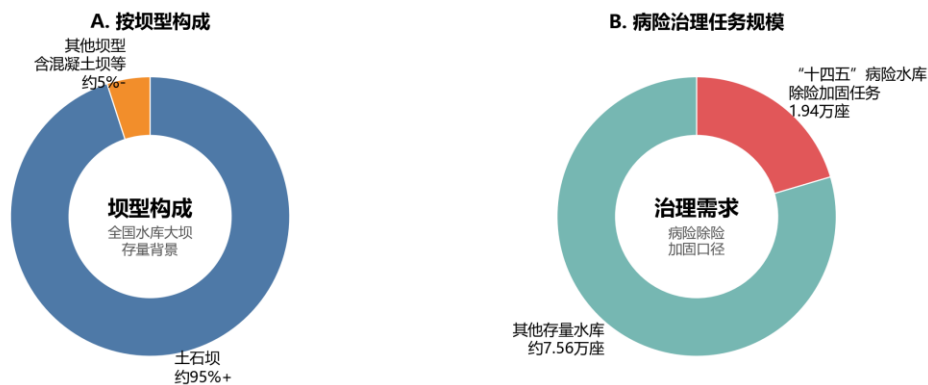
1. 背景：水利工程探测需求



华北电力大学
NORTH CHINA ELECTRIC POWER UNIVERSITY

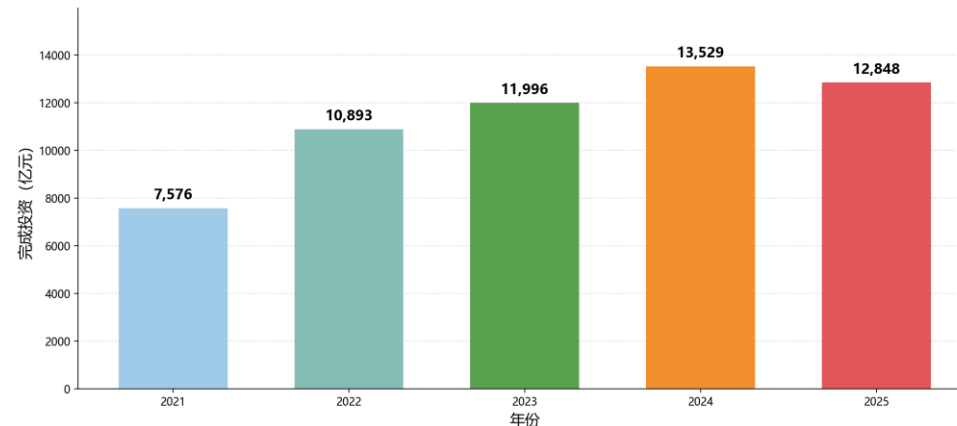
水利工程安全监测面临深部结构识别需求

水库大坝类型背景与病险治理需求（公开资料口径）



注：左图为全国水库大坝坝型存量背景，公开资料显示土石坝占95%以上；右图以全国约9.5万座水库为参照，“十四五”病险水库除险加固任务约1.94万座。两图口径不同，右图“病险治理任务”不按坝型拆分。

近五年全国水利建设完成投资



注：该图为全国水利建设完成投资口径，可作为水利工程建设、更新改造、除险加固与安全监测能力提升的背景数据；若需“纯维修经费”，需进一步按财政科目或专项项目口径筛选。

1. 水利设施绝大部分为土石坝，随着运行时间增加，风险日益增加。
2. 隐蔽空洞、松散区、低密度异常、结构边界变化等问题难以及时直接识别。
3. 工程安全监测需要从“表面状态监测”扩展到“内部结构感知”。

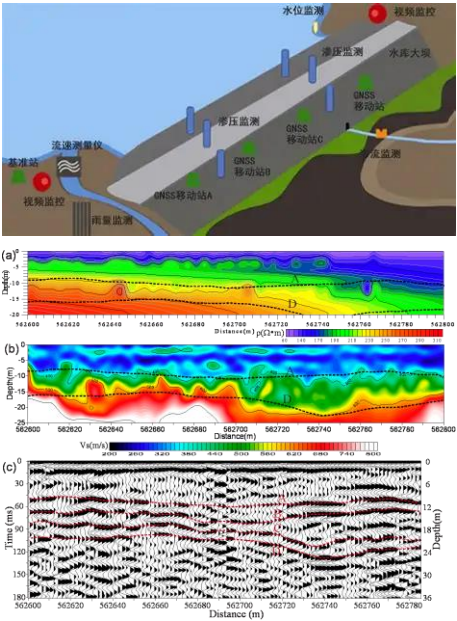


1.背景：水利工程探测需求



传统监测手段的优势与不足

方法	优势	局限
变形/渗流监测	连续、成熟	反映状态，难直接成像内部结构
钻孔	直接	局部、侵入性强
地质雷达/电磁法	快速	探测深度和介质适应性受限
声波/弹性波	可识别局部异常	受耦合条件和场地限制



缪子成像：无源、无损、非接触、适合较大尺度内部结构探测。



汇报提纲

1

研究背景

2

原理与方法

3

大坝应用案例

4

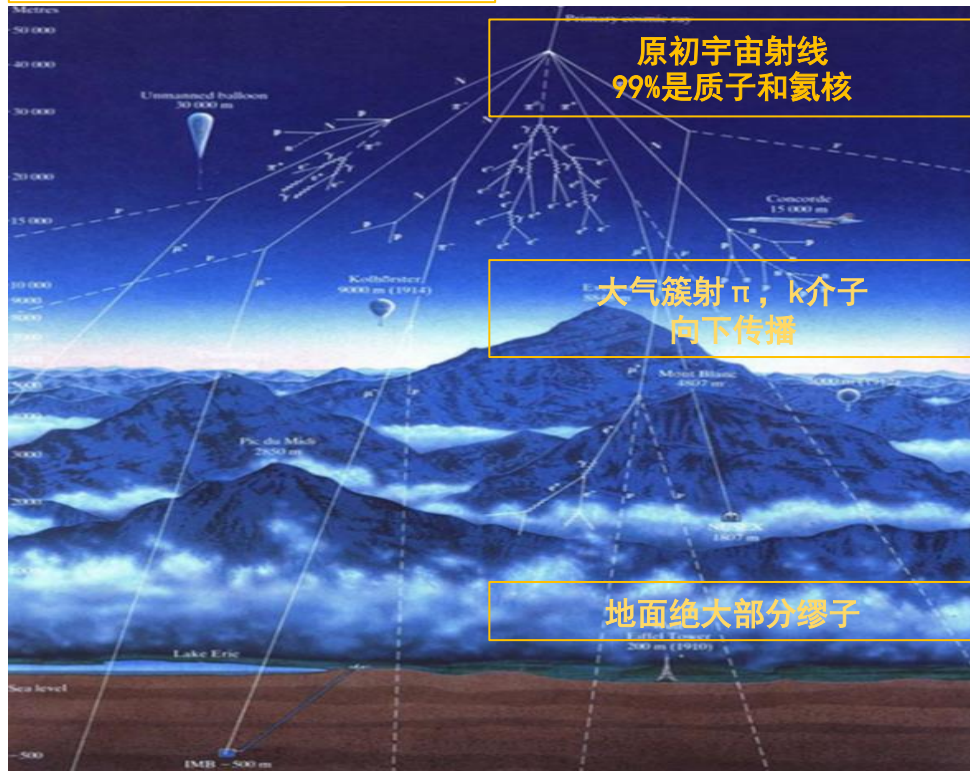
输水隧道应用案例

5

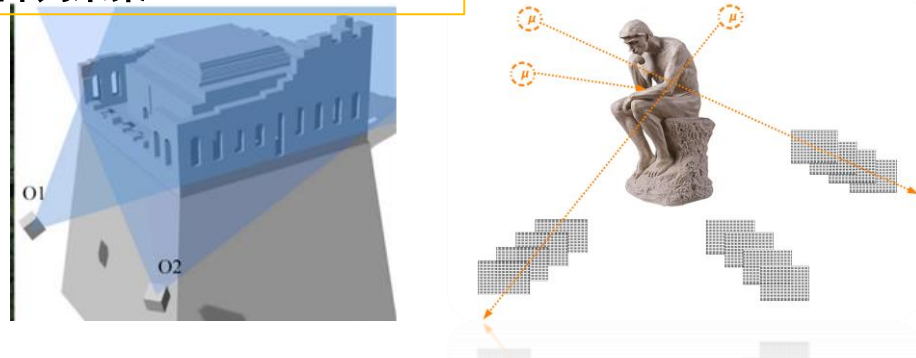
结论与展望

2. 原理和方法

缪子产生



阵列采集



三维反演算法

构建反问题:

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2 m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{\max}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

$$I[\varrho, \theta] = \int_{E_{\min}(\varrho)}^{\infty} \Phi(E_0, \theta) dE_0 \text{ (cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}) \quad E_{\min} - \int_0^{\varrho} \frac{dE}{d\varrho} d\varrho = E_{\mu}$$

$$\varrho(L) \equiv \int_L \rho(\xi) d\xi$$

线性方程组

$$p = L\rho + \epsilon$$

代数迭代重建求解: 引入射线松弛因子和体素概率密度加权项

$$\rho_j^{(k+1)} = \rho_j^{(k)} + \lambda \frac{p_i - \sum_{j=1}^N l_{ij} \rho_j^{(k)}}{\sum_{j=1}^N l_{ij}^2} l_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, N$$

$$r_i^{(k)} = p_i - \sum_{j=1}^N l_{ij} \rho_j^{(k)}$$

$$\lambda_i^{(k)} = \lambda_0 \cdot f\left(\frac{|r_i^{(k)}|}{\sigma_i}, \frac{L_i}{\bar{L}}\right)$$

射线项:
自适应松弛因子

$$f(j) = \frac{1}{1 + C} \cdot g(y)$$

模型项:
概率密度加权

$$\rho_p(x, y, z) = \Omega(x, y, z) \cdot P_i$$

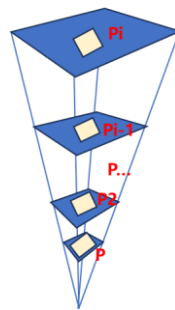
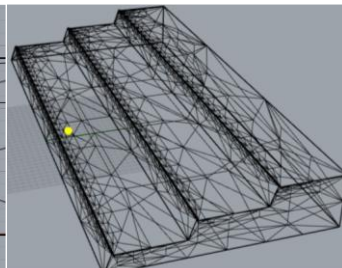
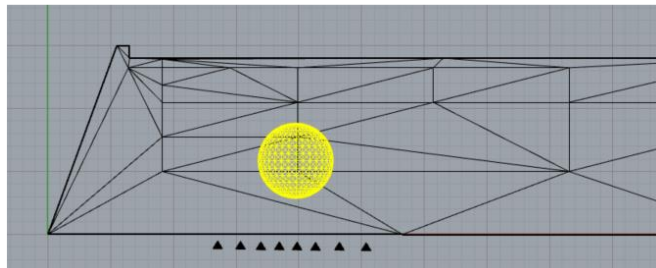
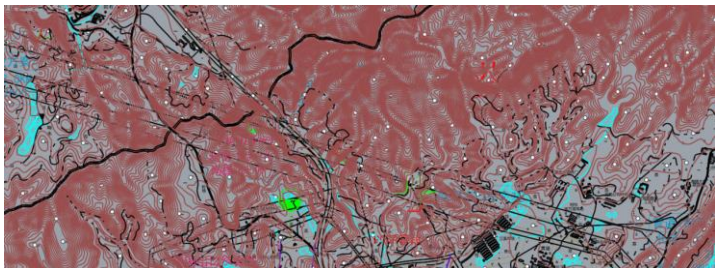
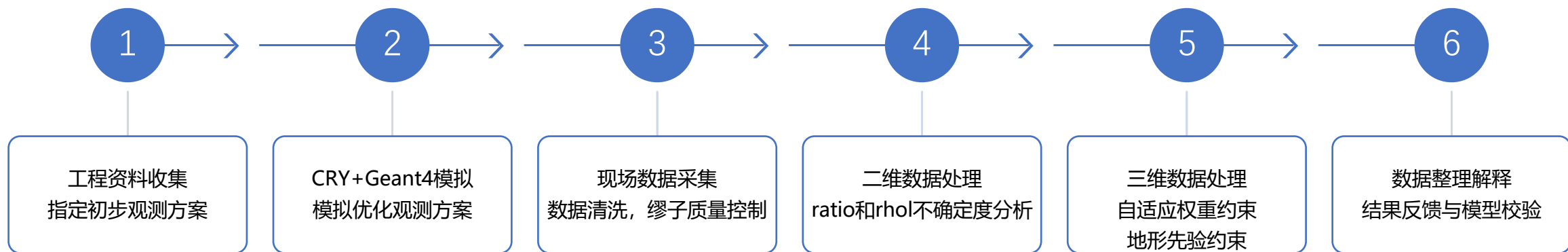


2. 原理和方法



华北电力大学
NORTH CHINA ELECTRIC POWER UNIVERSITY

缪子透射成像的技术流程





汇报提纲

1

研究背景

2

原理与方法

3

水利设施应用案例

4

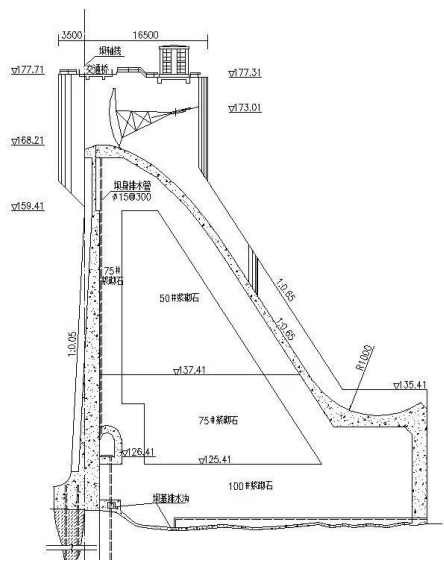
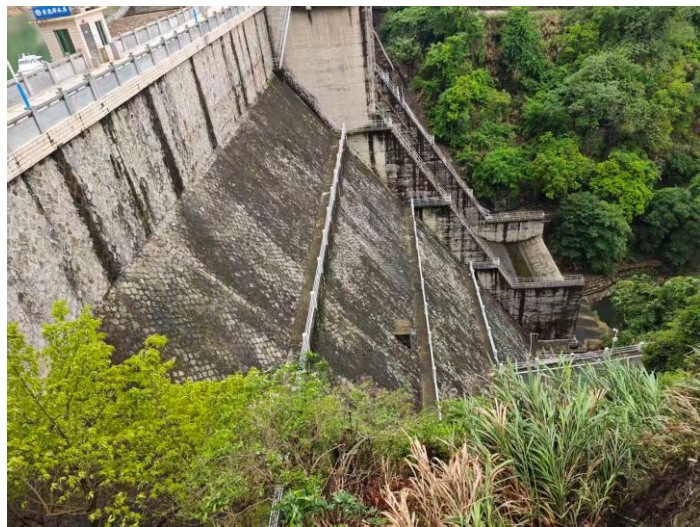
输水隧道应用案例

5

结论与展望

案例一：黄龙带大坝

- 工程类型：水库大坝工程
- 目标：验证水库现场布设、观测和成像能力
- 关注：工程体内部密度差异与隐蔽异常识别



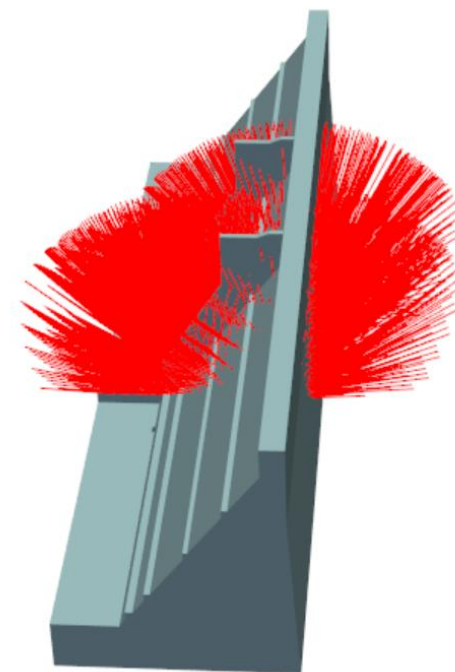
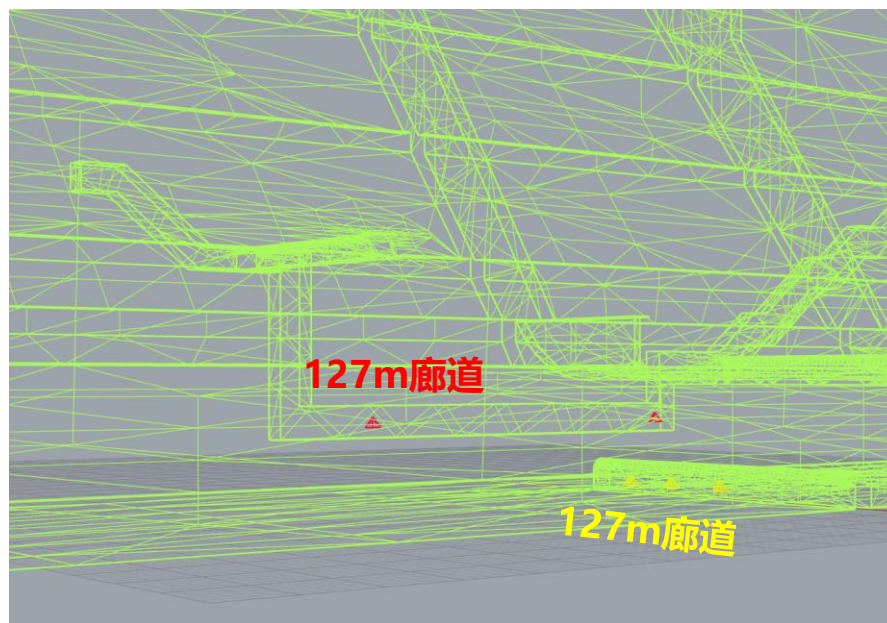
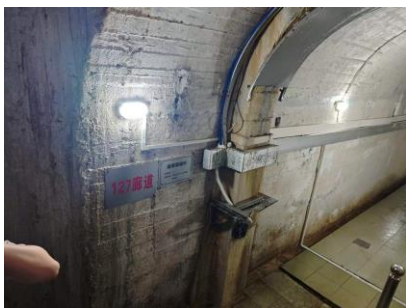
案例二：赤坳水库输水隧道

- 工程类型：地下输水结构
- 目标：验证隧道及周边介质探测能力
- 关注：地下暗河/低密度结构响应



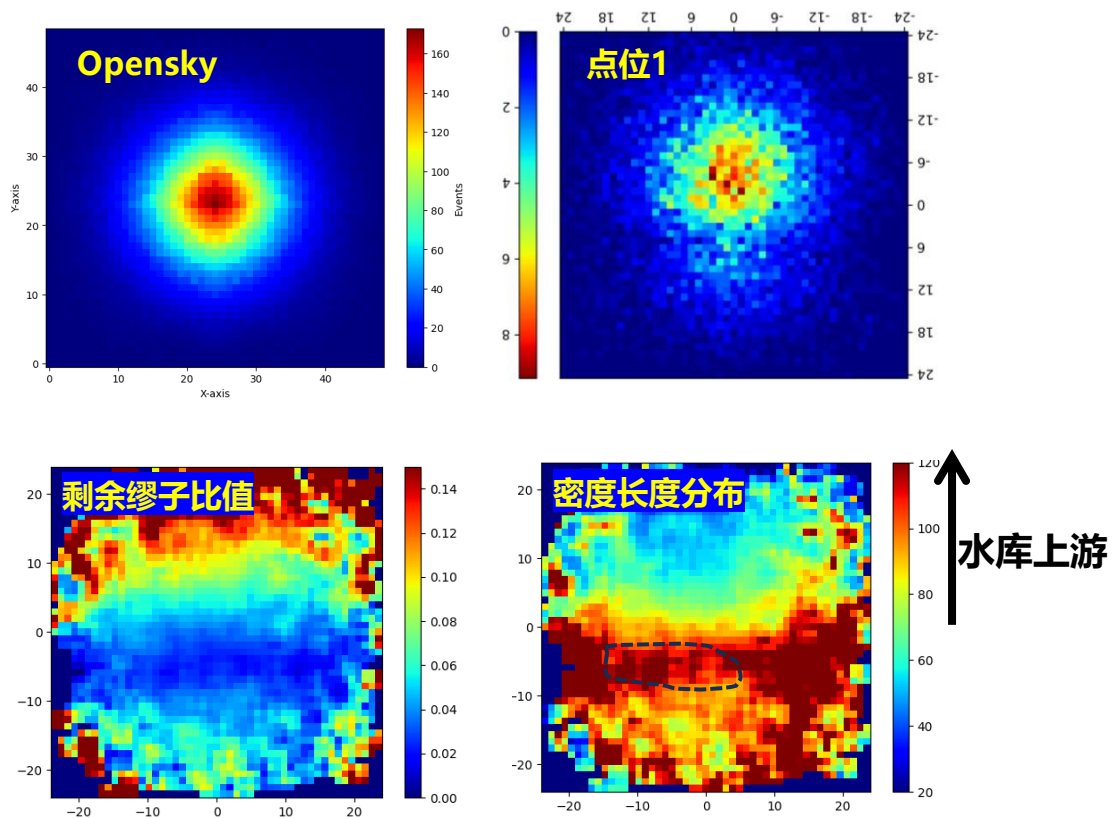
黄龙带水库：现场布设与观测

1. 布设5个点位，其中127m廊道2个点位，间距30m。121m廊道3个定位，间距5m。
2. 缪子探测视角范围：天顶角 $\theta \leq 59^\circ$ (准确范围约 $\pm 39^\circ$)
3. 探测范围基本覆盖整个廊道区域。



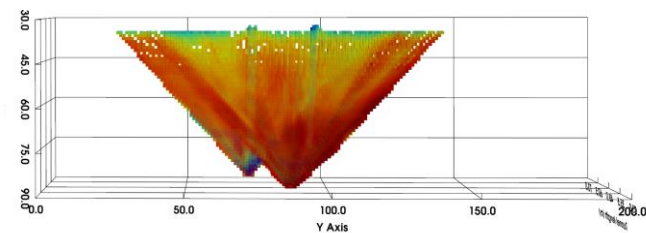
黄龙带大坝：数据分析与结果

二维处理

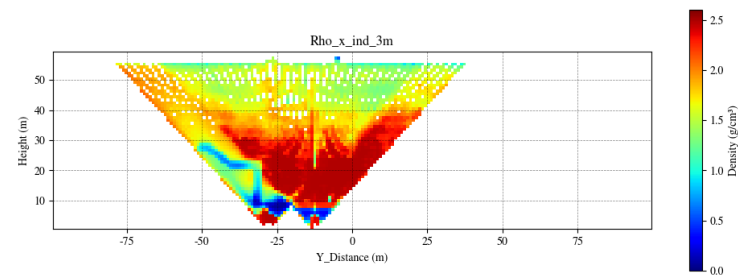


密度整体分布

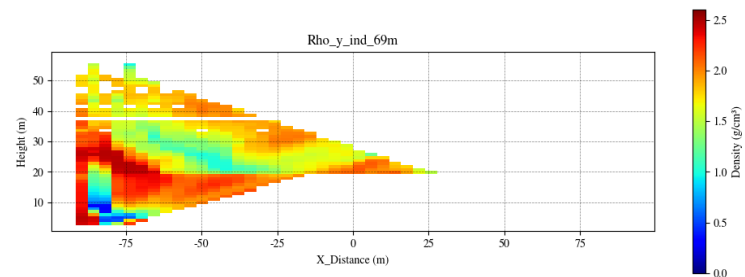
三维密度结果



密度的Y-Z切面



密度的X-Z切面



相对低密度区域与内部廊道形状基本一致
低密度区域与周边界限明显，其余未发现低密度异常。



汇报提纲

1

研究背景

2

原理与方法

3

水利设施应用案例

4

输水隧道应用案例

5

结论与展望

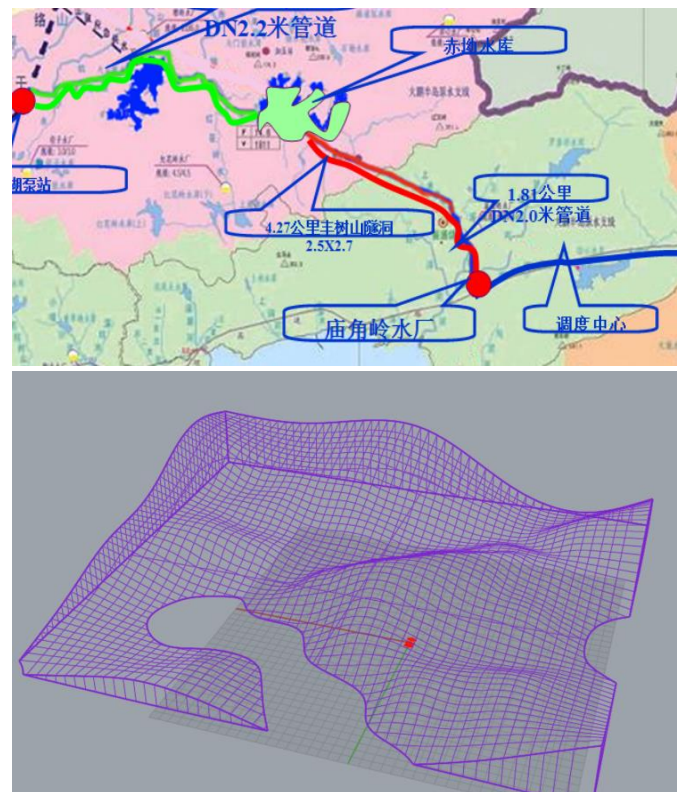


4. 输水隧道应用案例



华北电力大学
NORTH CHINA ELECTRIC POWER UNIVERSITY

大鹏赤坳水库输水隧道：地下空间场景验证



1. 使用便携式缪子探测器，与输水隧道内布设3个点位。
2. 缪子探测视角范围：横向方向天顶角 $\theta \leq 45^\circ$ ；纵向方向天顶角 $\theta \leq 37^\circ$
3. 探测范围基本覆盖漏水点前后左右20m范围内。



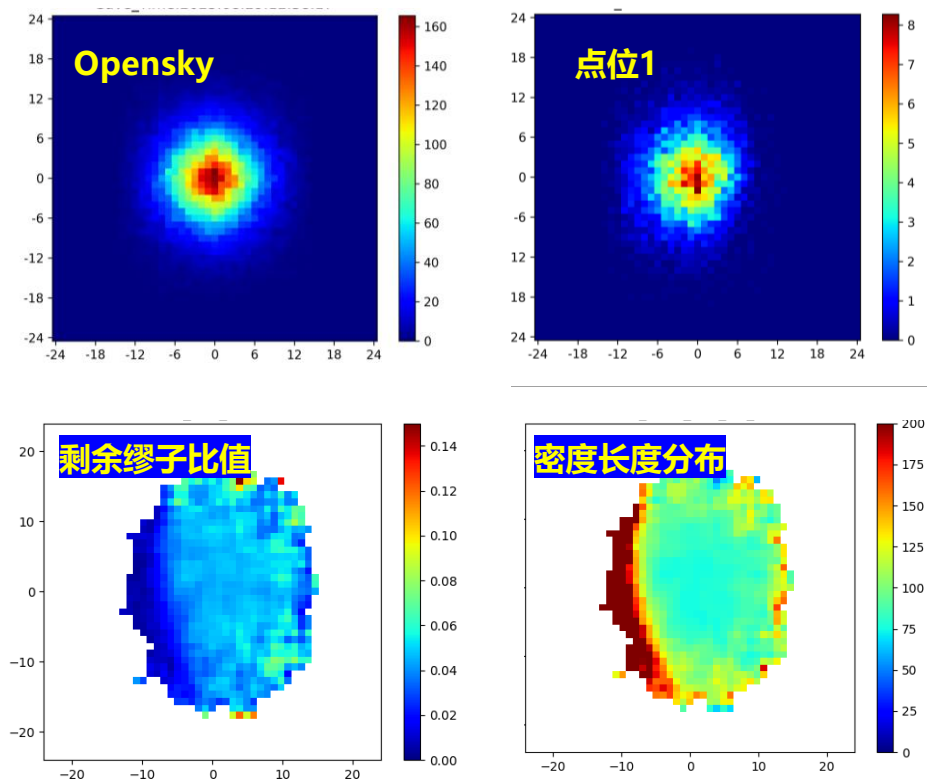
4. 输水隧道应用案例



华北电力大学
NORTH CHINA ELECTRIC POWER UNIVERSITY

大鹏赤坳水库：数据分析与结果

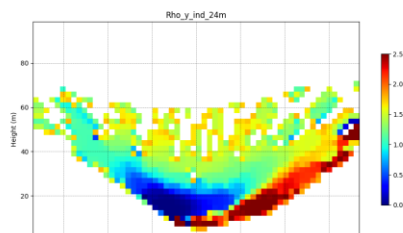
二维处理



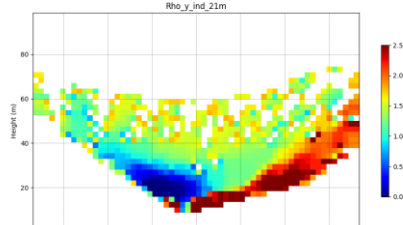
三维密度结果

纵剖面切片

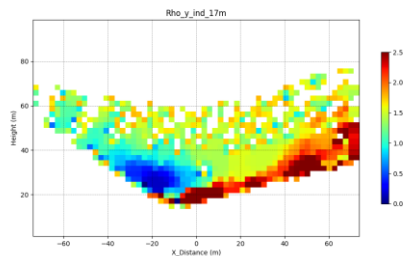
隧道左侧9m



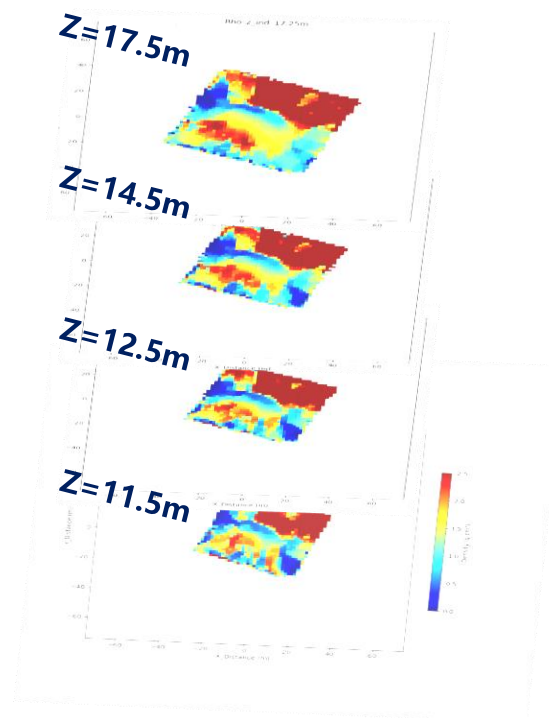
隧道左侧6m



隧道左侧2m



水平面切片(探测器在7m高度)



输水隧道左侧上方存在约4-10m高度的低密度区，整体密度在 1.2g/cm^3 以下。
推测为地下暗河引起的隧道内漏水。



汇报提纲

1

研究背景

2

原理与方法

3

大坝应用案例

4

输水隧道应用案例

5

结论与展望

两类工程场景的应用对比

1. 设备可适应不同水利工程场景。
2. 缪子结果形成三维密度结构结果。
3. 与传统方法互补，适合深部隐蔽结构探测。

内容	黄龙带水库	大鹏输水隧道
场景特点	水库工程环境复杂	隧道狭小，湿度高
观测重点	工程体内部密度差异	隧道及周边低密度响应
技术难点	布设条件、环境适配	空间受限、观测几何
结果价值	完善内部结构信息	水文发达环境的水系结构成像
推广意义	水库安全监测	输水隧洞/地下廊道检测



结论和展望

主要结论：

- 1.建立了面向水利工程的宇宙线缪子成像现场观测流程。
- 2.在黄龙带水库和赤坳水库输水隧道完成安装、调试、观测和成像分析。
- 3.结果表明，该技术可识别工程体内部密度差异和地下暗河，溶洞等低密度结构。
- 4.缪子成像可作为传统水利工程安全监测方法的重要补充。

后续展望：

1. 多点位、多周期连续观测。
2. 与渗流、变形、地质资料和物探成果联合解释。
3. 推动设备小型化、流程标准化和水利工程应用推广。



华北电力大学
NORTH CHINA ELECTRIC POWER UNIVERSITY



感谢聆听!

欢迎各位老师专家批评指正!