

ICS 01.120

A 00

团 体 标 准

T/GSC xxx—2026

地下水位回升与地表变形协同监测技术指南

Guideline for collaborative monitoring of groundwater level recovery and surface deformation

（征求意见稿）

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国地质学会 发布

目 次

目 次	2
前 言	4
引 言	1
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 缩略语	2
5 总则	3
5.1 目的任务	3
5.2 基本原则	3
5.3 工作内容	3
5.4 工作流程	3
5.5 质量控制	5
6 监测方案设计	5
6.1 基本原则	5
6.2 协同组网	6
6.3 方案设计书编制	7
7 地下水位动态监测	8
7.1 人工监测	8
7.2 自动监测	8
7.3 地球物理监测	9
8 地表变形监测	9
8.1 几何水准测量法	9
8.2 GNSS 测量法	10
8.3 分层变形监测	10
8.4 InSAR 监测法	11
9 数据采集与分析	12
9.1 数据采集	12
9.2 数据模型与元数据标准	13
9.3 数据处理	14
9.4 监测数据成因分析	15

9.5 数据分析.....	15
10 成果编制.....	16
10.1 数据集建设.....	16
10.2 图件编制	16
10.3 报告编制	17
附录 A（资料性）	18
附录 B（资料性）	20
附录 C（资料性）	22
附录 D（资料性）	23
附录 E（资料性）	25
附录 F（资料性）	26
附录 G（资料性）	27
附录 H（资料性）	30
附录 I（资料性）	31

前 言

本文件按照 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。

本文件由中国地质学会提出并归口。

本文件起草单位：中国地质大学（北京）、河北省地质环境监测院、中国自然资源航空物探遥感中心、中国地质环境监测院、中国地质大学（北京）郑州研究院、中建八局雄安发展有限公司、北京城建勘测设计研究院有限公司。

本文件主要起草人：张永双、苏贺涛、马百衡、葛大庆、杨香福、王海刚、王飞永、魏英杰、赵伟玲、唐超、高涛、赵杰、任三绍、万祥星、刘霁萱、张涛、褚立峰、郭云涛，等。

引 言

近年来，随着降水补给增加、南水北调工程实施及地下水禁限采管理等综合因素影响，华北平原地下水位呈现明显回升态势，引发了诸如地表变形、浅埋管廊和地铁等地下空间基础设施渗漏水及结构病害等问题，严重威胁城市地下空间利用的安全性与可持续性。目前，地下水位和地面沉降两类单要素监测技术已较为成熟，然而两者在时空基准、观测频次和数据格式上尚未统一，地下水位变化与地表形变响应之间尚缺乏有效的联合观测分析。亟需在既有地下水监测和地面沉降监测网络基础上，进一步开展地下水位回升与地表变形协同监测和分析评估，为重要规划建设区地质安全风险防控和平原区城市高质量发展提供有力支撑。

为指导地下水位回升与地表变形协同监测工作，特制订本文件。

地下水位回升与地表变形协同监测 技术指南

1 范围

本文件给出了地下水位回升与地表变形协同监测基本原则、工作流程、质量控制，提供了监测方案设计、地下水位动态监测、地表变形监测、监测数据采集与分析、成果编制等方面的指导和建议。

本文件适用于平原城市或国土空间规划建设区地下水位与地表变形协同监测，也可供城市综合管廊、地铁工程等地下空间基础设施建设场地开展相关监测时参考。

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，引用文件的最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 11828.2 水位测量仪器 第2部分：压力式水位计

GB/T 18314 全球导航卫星系统（GNSS）测量规范

GB/T 20256 国家重力控制测量规范

GB/T 44146 基于 InSAR 技术的地壳形变监测规范

GB 50026 工程测量标准

GB/T 50138 水位观测标准

GB 50497 建筑基坑工程监测技术标准

GB/T 51040 地下水监测工程技术标准

GB 51099 有色金属工业岩土工程勘察规范

GB 55018 工程测量通用规范

SL 183 地下水监测规范

JGJ 8 建筑变形测量规范

JGJ 111 建筑与市政工程地下水控制技术规范

DZ/T 0154 地面沉降测量规范

DZ/T 0450 地质灾害监测数据通信技术要求

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

地下水位回升 groundwater level recovery

由自然条件和人工干预作用下，地下水位呈现持续或周期上升的现象。

3.2

协同监测 collaborative monitoring

为分析地下水位变化与地表变形的响应关系，在统一的时空基准下同步开展地下水位动态监测与地表变形动态监测的工作模式。

3.3

时空匹配 spatiotemporal matching

在协同监测中，通过统一时间与空间基准，并在考虑地层变形响应滞后时间的基础上，建立地下水位与地表变形数据的对应关系，使其具备时空可比性和关联分析基础。

3.4

监测目标区 monitoring target area

地下水位回升可能引发地表变形、需要开展协同监测的重点区域。

3.5

基准点 reference point

埋设于监测对象变形影响范围之外稳定区域、坐标和高程在监测期间视为固定不变，用作监测系统起算依据的控制点。

3.6

监测剖面 monitoring profile

在特定方位上布设的由若干监测点组成的监测面。

3.7

工作基点 working reference point

监测区域内作为观测起算点的控制点，与基准点配合使用。

3.8

分层标 layered settlement marker

埋设在特定深度土层中测量其垂向变形量的地面水准观测装置。

4 缩略语

本文件给出下列缩略语的统一表述，便于文档阅读和专业术语的规范使用，适用于本文件所有内容。

GIS: 地理信息系统 (Geographic Information System)

GNSS: 全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System)

SAR: 合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar)

InSAR: 合成孔径雷达干涉测量 (Interferometric SAR)

DFOS: 分布式光纤传感 (Distributed Fiber Optic Sensing)

5 总则

5.1 目的任务

通过地下水位与地表变形协同监测,明晰地下水位动态变化与地表变形的响应关系,为有效防范地下水位回升引发的地表变形及工程灾变风险提供基础数据支撑。

5.2 基本原则

开展地下水位与地表变形协同监测工作宜遵循系统性原则、分级适配原则和技术互补原则。

5.2.1 系统性原则:统一水位监测与变形监测的技术框架,协调方案设计、基准统建、数据采集与分析的全过程。

5.2.2 分级适配原则:根据水位回升幅度、变形敏感性和工程风险等级,合理确定监测范围、密度、频次及精度,突出监测重点。

5.2.3 技术互补原则:综合运用多技术手段,发挥各技术优势,实现区域普查与定点监测的有效互补。

5.3 工作内容

5.3.1 调查监测区水文地质、工程地质与地表变形现状,收集区域水文地质、工程地质、环境地质,地下水位和地表变形、主要建设工程等资料,识别地下水位回升主要问题和周边工程影响,确定监测区范围。

5.3.2 识别地下水位回升引发的主要工程地质问题类型、评价其对地表变形及周边工程的影响程度,制定协同监测计划,布设地下水位与地表变形协同监测网,组织实施监测工作。

5.3.3 按监测区段和关键节点,开展地下水位与地表变形协同监测,分析地下水位与地表变形协同监测数据,评价其对工程的影响程度,划分监测区风险等级。

5.3.4 编制监测成果报告,提出水位回升与地表变形的风险防控措施及监测优化建议。

5.4 工作流程

地下水位回升与地表变形协同监测一般分为准备工作、监测方案设计、数据采集与处理、数据分析、成果编制与提交等5个阶段(图1)。

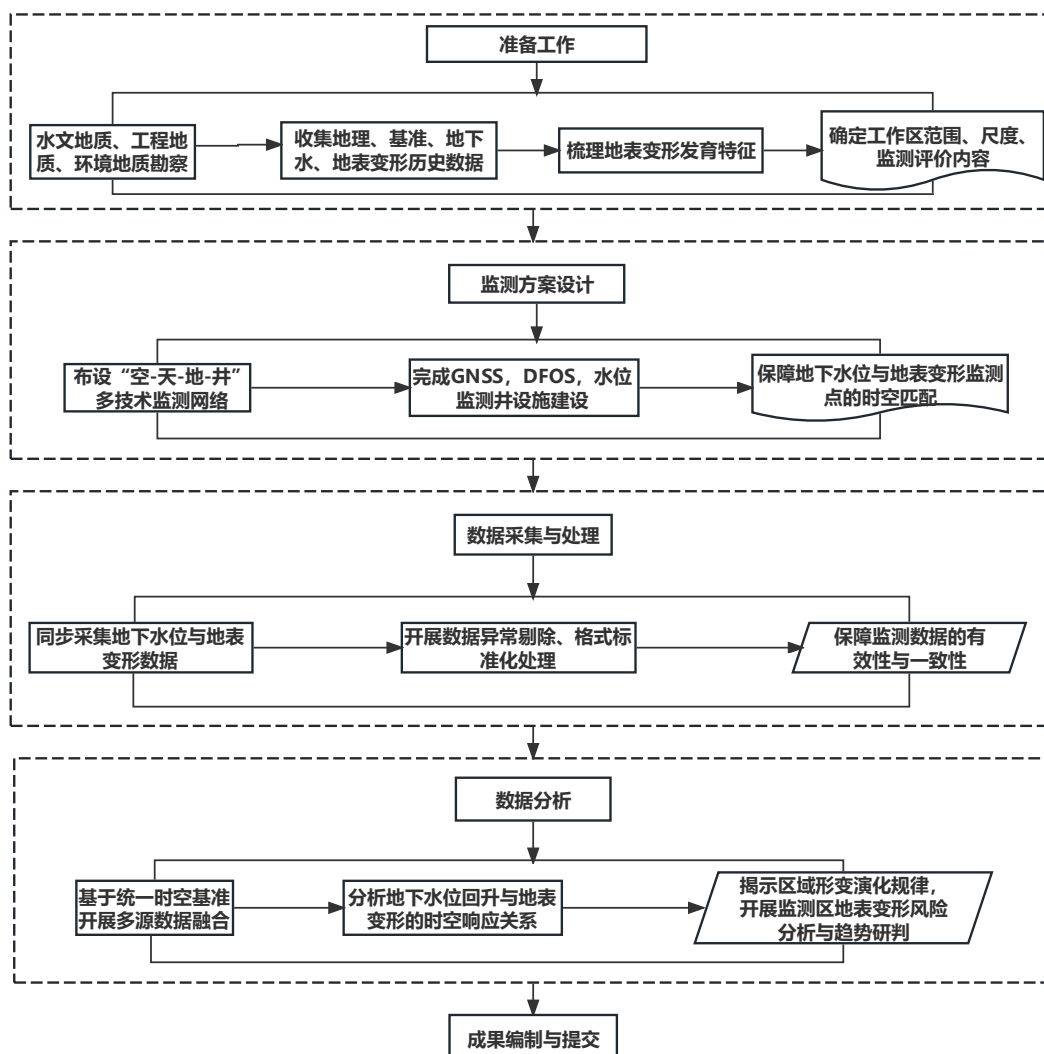


图 1 地下水位回升与地表变形协同监测工作流程图

5.4.1 准备工作阶段：结合协同监测工程特点，开展监测区域水文地质、工程地质、环境地质勘察，收集基础地理信息、坐标基准、历史地下水与地表变形数据，梳理地表变形发育特征，确定工作区范围、工作尺度和监测评价内容。

5.4.2 监测方案设计阶段：根据搜集的资料，布设“空-天-地-井”多技术监测网络，完成GNSS站、DFOS、水位监测井等设施建设，保障地下水位与地表变形监测点的时空匹配。

5.4.3 数据采集与处理阶段：按照监测需求，同步采集地下水位与地表变形数据，开展数据异常剔除、格式标准化处理，保障监测数据的有效性与一致性。

5.4.4 数据分析阶段：对各类监测成果进行分析研究，基于统一时空基准开展多源数据融合，分析地下水位回升与地表变形的时空响应关系，揭示区域形变演化规律，开展监测区地表变形风险分析与趋势研判。

5.4.5 成果编制与提交阶段：编制地下水位回升与地表变形协同监测成果报告和专题图件，成果内容与比例尺按照项目和相关规范要求进行编制。

5.5 质量控制

5.5.1 所有监测仪器或配套设备应定期进行校准，经检验合格后方可使用；InSAR、GNSS 等高精度技术配套设备校准周期宜遵循 GB/T 44146 与 GB/T 18314 相关要求。

5.5.2 监测数据可通过异常数据识别与剔除、多源交叉验证等方式进行质量控制，保证监测数据的有效性、一致性和可靠性。

5.5.3 根据监测目的、工程风险等级和协同分析需求，在监测方案中明确各监测方法的精度指标，并配备相应的设备或作业方法。

5.5.4 地表变形监测可增加外业现场验证，验证相对误差宜小于等于 10%。

5.5.5 现场维护宜考虑以下方面：

5.5.5.1 监测点标志宜定期检查，发现松动、破坏或被遮挡时及时修复或补设，并重新测定其坐标和高程。重新测定时，平面坐标应采用 2000 国家大地坐标系，高程应采用 1985 国家高程基准。

5.5.5.2 数据传输设备宜定期巡检，检查供电、通信信号及数据上传状态，确保组网运行正常。全部维护工作形成记录，作为成果数据质量追溯的依据。

6 监测方案设计

6.1 基本原则

6.1.1 监测方案设计宜遵循以下原则：

6.1.1.1 监测方案设计建议以本指南第 5 章确立的总则、基本原则和工作流程为依据，在充分搜集和分析监测区既有资料的基础上进行。

6.1.1.2 设计方案宜明确监测目的、技术路线、监测范围、监测内容、组网方案、实施计划及质量保障措施，确保方案的科学性、可行性和经济合理性。

6.1.1.3 方案设计应遵循系统性、分级适配和技术互补的基本原则，实现地下水位监测与地表变形监测在时空上的协同。

6.1.2 监测范围划定建议参照以下原则：

6.1.2.1 监测目标区的范围根据水文地质条件、地下水位回升的幅度与速率、地表变形敏感性、工程风险等级综合划定。

6.1.2.2 监测范围宜由监测目标区中心向外延伸，直至地下水位变化和地表变形趋于稳定的边界。对于重大工程或高风险区，应适当扩大监测范围。

6.1.2.3 在监测目标区内，宜根据水位回升趋势和工程风险评价结果，进一步划分重点监测区和一般监测区，实行分级监测。

6.1.3 监测方法选择原则

地下水位与地表变形的监测方法可根据监测目的、现场条件、精度要求和技术条件等

因素综合选定，各方法优缺点与适用场景具体见附录 A、附录 B。

6.1.3.1 地下水位变化可采用人工监测、自动监测和地球物理监测或多种方法联合监测。

- a) 人工监测方法主要有：电测水位计法和钢尺水位计法等。
- b) 自动监测方法主要有：浮子式水位计法、压力式水位计法、气泡水位计法、超声波水位计法、雷达水位计法和一体化遥测水位计法等。
- c) 地球物理监测方法主要有：空间重力监测法和电阻率成像法等。

6.1.3.2 地表变形可采用传统测量法、自动化测量法和空间测量法进行监测。

- a) 传统测量法主要有：几何水准测量法、三角高程测量法、全站仪极坐标法、全站仪交会法等。
- b) 自动化测量法主要有：GNSS 法、分层标法、DFOS 法、测量机器人法等。
- c) 空间测量法主要有：InSAR 法、无人机航测法、三维激光扫描法等。

6.2 协同组网

6.2.1 基准点网

6.2.1.1 基准点宜布设在监测目标区之外、稳固且易于长期运行的位置。

6.2.1.2 每个监测目标区宜布设不少于 3 个基准点，基准点与邻近建筑物的距离宜不小于 50m。基准点按 GB/T 18314 中 D 级及以上 GNSS 控制网精度要求施测；对于区域性大范围沉降监测，基准点等级不宜低于 C 级。

6.2.1.3 水平位移基准点宜采用带有强制归心装置的观测墩，观测墩的制作与埋设可参照 GB 50026 的要求。

6.2.1.4 基准点宜定期联测以验证稳定性，复测周期不宜超过 6 个月。

6.2.2 监测点网布设

6.2.2.1 地下水位监测点布设

- a) 地下水位监测点的布设可参照 GB/T 51040 的相关要求，水平方向上点、线、面结合，垂直方向上分层监测，可选用已有井孔改建。
- b) 点状监测点宜布设在地下水位回升显著、地表变形敏感或工程风险较高的部位。
- c) 线状监测点宜沿地下水主体流向、变形梯度方向或典型水文地质剖面布设，剖面宜由监测目标区中心延伸至影响边界外。
- d) 面状监测点宜覆盖重点监测区、一般监测区及外围稳定区，重点区可适当加密。
- e) 多含水层发育区宜设置分层监测井或监测井组，监测层位应与目标含水层及变形敏感层位相对应。
- f) 监测井滤水管位置应与目标含水层相匹配，不同含水层之间宜采取封隔措施，避免水力串通。
- g) 监测井质量可参照 GB/T 51040 的相关要求。

6.2.2.2 地表变形监测点布设

- a) 地表变形监测点布设可参照 GB 55018 的相关要求。
- b) 地表变形监测可布设分层标监测点或地面监测点，尽量反映地下水位变化过程中的地表变形情况。
- c) 点状变形监测点宜布设在变形速率较大或工程风险较高部位。
- d) 线状变形监测点宜沿地下水位监测剖面、主要变形方向或工程轴线布设。
- e) 面状变形监测宜结合 InSAR、GNSS 或水准测量等方法开展，覆盖监测目标区及外围稳定区。

6.2.2.3 协同监测点网布设

- a) 协同监测点宜布设在地下水位变化显著、地表变形速率较大的地段。
- b) 地下水位监测井与地表变形监测点尽量布设在同一条监测剖面上，剖面方位宜与地下水的主体流向或主要变形方向平行，由监测目标区中心向外延伸至影响边界之外。
- c) 监测点布设宜考虑地形地貌、地层结构、含水层分布、变形特征及通信条件，监测点平面与剖面布置图见附录 C。

6.2.3 数据传输组网

6.2.3.1 通信组网

- a) 通信组网根据监测点分布、现场公网信号覆盖情况及供电条件，并结合地下水位回升和地表变形协同监测的数据实时性、同步性需求综合比选确定。
- b) 公网信号覆盖良好区域，可采用 4G/5G 蜂窝网络；数据传输频率较低且对功耗敏感的监测点，可选用窄带物联网（NB-IoT）。
- c) 无公网信号或信号弱的区域（如偏远山区、地下洞室、监测井内），可结合场地条件选用符合国家标准自建局域网络技术实现数据传输，并通过中继站汇聚后统一上传。
- d) 网关和中继设备的布设考虑传输距离、障碍物衰减及供电条件。

6.2.3.2 数据传输

- a) 数据采集终端与远程监控平台之间的数据传输，可参照 DZ/T 0450 的相关要求。
- b) 网络中断时，采集的本地数据可暂时保存在终端，待网络恢复后再自动断点续传。
- c) 数据传输可按 DZ/T 0450 的要求进行加密，接入平台接口时进行身份认证和签名验证。
- d) 传输的数据内容通常包括监测点基本信息、监测值、设备参数、采集时间等。

6.3 方案设计书编制

为做好协同监测工作，一般要编制监测方案设计书，明确技术路线、实施计划与质量要求等。监测方案设计书提纲详见附录 D。

7 地下水位动态监测

地下水位动态监测内容主要包括水位埋深或高程，本文件重点推荐电测水位计法、压力式水位计法、气泡水位计法、一体化遥测水位计法，其他监测方法可根据具体情况参照 GB/T 51040 进行选择。

7.1 人工监测

7.1.1 钢尺水位计法

7.1.1.1 钢尺水位计法适用于需要精确校准测量的常规人工监测，尤其适用于小型项目或无供电条件的测点。

7.1.1.2 钢尺水位计法宜采用带有毫米级刻度的不锈钢钢尺，最小读数可至 1 mm，测量误差宜不大于 2 mm。钢尺刻度每半年进行一次计量校准。

7.1.1.3 钢尺水位计的操作及记录要求可参考 GB/T 51040、GB/T 50138、SL 183 的相关要求。

7.1.2 电测水位计法

7.1.2.1 电测水位计法适用于短期监测、临时抽水试验或自动化设备故障时的备用监测。

7.1.2.2 电测水位计法采用电测水位计进行测量，水位埋深测量误差不宜大于 ± 10 mm，水位高程误差不宜大于 ± 10 mm。

7.1.2.3 电测水位计法每次测量前记录水位测量仪的型号和编号，下放电极探头速度宜缓慢、匀速下放探头，遇地下水位监测井井壁时缓慢上下移动，防止数据突跳。

7.2 自动监测

7.2.1 压力式水位计法

7.2.1.1 压力式水位计法适用于长期连续监测或环境复杂的场景。

7.2.1.2 压力式水位计法测量精度不宜低于 0.2% F·S（满量程）。

7.2.1.3 压力式水位计安装及维护要求，可参考 GB/T 11828.2-和 SL 183 的相关要求。

7.2.2 气泡水位计法

7.2.2.1 地下水位气泡水位计法适用于水质较差的监测井。

7.2.2.2 气泡水位计安装时，气管出口固定于监测期最低水位以下，并保证气路密封良好、无泄漏，定期检查气路状态和供气压力。

7.2.3 一体化遥测水位计法

7.2.3.1 地下水位一体化遥测水位计法适用于分布零散、无市电覆盖的大规模地下水监测站

网。

7.2.3.2 一体化遥测水位计集传感器、数据采集仪、无线通信模块和电池为一体，电池持续供电时间不少于 1 年。

7.2.3.3 一体化遥测水位计安装时，主机箱与供电单元固定在井口或井壁稳固处，天线朝向保证通信信号良好。

7.3 地球物理监测

7.3.1 卫星重力反演监测法

7.3.1.1 重力卫星通过测量双星间距的微米级变化反演地球重力场，获取陆地水储量变化，分离非地下水分量后换算为地下水位变幅。

7.3.1.2 重力卫星遥感反演地下水位监测适用于流域、平原区等大范围区域。对于面积较小的研究区，可通过扩展至更大的水文单元或采用降尺度技术解决。

7.3.1.3 重力卫星数据时间分辨率大都为月、空间分辨率约为 300 km，降尺度可达 1 km～50 km。

7.3.2 电阻率成像法

7.3.2.1 电阻率成像法通过布设电极阵列测量地下介质视电阻率分布，利用含水地层与干燥地层的电阻率差异，对比不同时期剖面变化推断地下水位变化趋势。

7.3.2.2 电阻率成像法适用于监测剖面或重点区块的地下水位动态变化，尤其适宜于水文地质条件相对简单、电阻率界面清晰的场地。

7.3.2.3 装置长度和极距的确定可参考 GB 51099-2015 的相关要求。

7.3.2.4 电阻率成像法反演得到的是地下介质的电阻率分布，宜结合钻探、监测井实测水位等资料进行标定和验证。反演结果的垂向分辨率随深度增加而降低，深层水位变化的判别能力有限。

8 地表变形监测

地表变形监测内容主要包括水平位移监测和竖向位移监测，本文件重点推荐几何水准测量法、GNSS 测量法和分层变形监测法。InSAR 可作为区域性地表变形普查手段；DFOS 法既可进行分层变形监测，也可通过地表浅埋方式直接监测地表变形。其他方法可参照 JGJ 8、GB 50026、DZ/T 0154 及 GB/T 44146 等按需选择。

8.1 几何水准测量法

8.1.1 几何水准测量使用水准仪和水准尺测定地面点间的高差，是目前精度最高的竖向位移监测方法。

8.1.2 几何水准测量适用于建立高精度高程控制基准网；验证其他方法的监测精度；作为局部高精度变形监测手段。变形监测可分为一等、二等、三等、四等共四级精度具体精度

指标见附录 E。

8.2 GNSS 测量法

8.2.1 GNSS 测量利用全球导航卫星系统信号接收机连续采集点位三维坐标，可实现全天候自动化监测，同时测定水平位移和竖向位移。

8.2.2 GNSS 测量适用于大范围地表变形场关键控制点连续监测；无法布设水准路线的区域；需要自动化、连续时间序列数据的监测项目，尤其适合地下水位回升期的动态跟踪。

8.2.3 用于地表变形监测的 GNSS 网精度分级如下：

- a) 一级网：相邻点基线水平分量中误差不宜大于 $\pm 3\text{ mm}$ ，垂直分量中误差不宜大于 $\pm 6\text{ mm}$ ；
- b) 二级网：相邻点基线水平分量中误差不宜大于 $\pm 5\text{ mm}$ ，垂直分量中误差不宜大于 $\pm 10\text{ mm}$ 。

8.2.4 GNSS 测量的误差主要来源于以下三个方面：

- a) 与卫星相关的误差：主要包括卫星星历误差和卫星钟差。可采用精密星历替代广播星历、采用差分定位或精密单点定位技术予以削弱。
- b) 与信号传播相关的误差：主要包括电离层延迟和对流层延迟。电离层延迟可采用双频观测值组合消除，或采用电离层模型进行改正；对流层延迟可采用对流层模型进行改正。
- c) 与接收机及测站相关的误差：主要包括接收机钟差、天线相位中心偏差、多路径效应等。应选择多路径效应较小的点位，采用扼流圈天线。

8.2.5 GNSS 基线解算宜采用精密星历，起算点坐标宜选用国家高等级控制网点；数据处理应按 GB/T 18314 的要求进行质量检核和网平差。

8.3 分层变形监测

8.3.1 一般说明

8.3.1.1 分层变形监测的目的是获取不同深度地层的竖向压缩量或回弹量，定量评价各土层，尤其是含水层与弱透水层在地下水位回升过程中的变形响应特征及贡献度。

8.3.1.2 分层变形监测可采用分层标法或 DFOS 监测法实现。两种方法均可提供分层变形数据，可根据监测目的、地层条件、精度要求及成本等因素比选确定。

8.3.1.3 分层变形监测点宜与地下水位监测井布设在同一条监测剖面上，且宜在同一钻孔或相邻位置实现地层分层变形与分层水位的对应监测。

8.3.2 分层标监测法

8.3.2.1 分层标监测通过在不同深度土层中埋设多层沉降标，利用分层沉降仪测各土层界面的压缩、回弹量，可精确获取不同地层的分层变形信息。

8.3.2.2 分层标监测适用于需要区分不同土层变形贡献度的协同监测项目，也可作为其他分

层监测方法的比对验证手段。

8.3.2.3 静力水准仪的系统精度不宜低于 1.5mm，每次监测重复 2 次测量，2 次读数较差不宜大于 1.5mm，取平均值作为监测结果。

8.3.2.4 埋设与施工

- a) 沉降标在基坑开挖、抽降水开始或回灌工程实施前至少 1 周埋设。
- b) 埋设后保证稳定时间不少于 1 周，方可量测初始值。
- c) 分层标钻孔垂直，各层沉降磁环准确固定在设计深度对应的土层中。
- d) 沉降管接头密封良好，防止泥沙渗入。
- e) 钻孔回填材料与原状土物理性质相近，避免产生人为沉降或窜层。

8.3.3 DFOS 监测法

8.3.3.1 DFOS 监测通过在地层不同深度埋设或粘贴传感光缆，实现沿光缆路径的分布式应变监测，经反演可获取分层变形信息。

8.3.3.2 DFOS 监测法适用于关键监测剖面上需要高密度、连续分层变形数据的区域或分层标法难以布设足够数量测点的狭长地带。

8.3.3.3 DFOS 可同时实现地表变形监测与地层分层变形监测，弥补分层标仅能定点监测竖向分层变形的不足，实现地表全域线状形变全覆盖监测。

8.3.3.4 光纤监测的布设方式、测试方法及精度可参考符合 DZ/T 0154 的相关要求。

8.3.3.5 如需区分不同土层的变形特征，可在关键层位界面处加密标定或采用定点式光缆。

8.3.3.6 DFOS 监测的主要误差来源包括

- a) 应变与温度耦合误差：光纤对温度和应变同时敏感，温度变化会引起应变测量偏差，可采用温度补偿光缆或同时测量温度进行校正。
- b) 光缆与地层耦合误差：光缆与周围土体变形不协调会导致测量值不能真实反映地层变形。需保证光缆与地层之间良好耦合，回填材料宜与原状土压缩性相近。
- c) 解调仪测量误差：包括系统噪声、波长漂移等。应定期校准解调仪，可采用稳定的光源和参考光路。
- d) 应变-变形反演模型误差：由应变分布推求分层变形量依赖反演模型，模型假设与实际地层条件之间的差异会引入误差，宜结合分层标或水准测量结果进行标定和验证。

8.4 InSAR 监测法

8.4.1 InSAR 基于卫星雷达影像进行干涉处理，可获取大范围地表形变信息。时序 InSAR 技术可提取长期缓慢形变。

8.4.2 InSAR 适用于区域性地面普查，识别重点监测区；历史形变回溯分析；受通视条件或地形限制，传统测量方法难以实施的区域。

8.4.3 年形变监测精度可达 5mm；不同频段载荷卫星 SAR 数据空间分辨率可达 3m~30m。

9 数据采集与分析

9.1 数据采集

9.1.1 数据联测

9.1.1.1 监测网布设完成后，宜进行首次全网点联测，测定各监测点的初始值。初始值经二次独立观测，取稳定值的平均值作为基准。

9.1.1.2 基准点定期复测，复测周期不宜超过 6 个月。当测区数据出现系统性异常或发生影响基准点稳定的环境变化时，可立即复测。

9.1.1.3 工作基点与基准点在每次监测周期开始时进行联测，确保当次观测的起算点稳定。

9.1.2 采集频率

9.1.2.1 地下水位监测频率

地下水位监测频率应根据监测目标区工程状态差异化确定，并依据水位回升动态过程划分为常规监测阶段、水位急速回升阶段和临近抗浮设防水位阶段。

- a) 常规监测阶段地下水位基本稳定未出现持续回升趋势或回升速率小于设计预警速率时，按常规监测频率执行，具体可参照 GB/T 51040、JGJ 111 的相关要求。
- b) 水位急速回升阶段时间地下水位出现持续上升且回升速率明显增大时，应加密监测，加密监测周期不宜少于 7 天，直至回升速率趋缓。该阶段应重点关注水位回升对既有地下结构浮托力增大或对在建基坑底板抗浮稳定的动态影响。
- c) 临近抗浮设防水位阶段地下水位接近或达到工程设计抗浮设防水位时，立即实施高频加密监测，持续监测时间不宜少于 24 小时，直至水位回落至安全区间或工程防控措施生效。对于已建工程，此阶段重点监测水位是否超越结构抗浮设防安全余量；对于在建工程，尤其是深基坑，此阶段重点监测坑内外水头差变化及坑底隆起风险。
- d) 当出现地下水位上升速率持续增大并达到设计预警值、或水位变化幅度超过正常波动范围时，地下水位监测的加密条件可参考 GB 50497 的相关要求。

9.1.2.2 地表变形监测频率

地表变形监测频率应与地下水位监测的三个阶段保持分级协同。

- a) 常规监测阶段：几何水准测量频率与地下水位常规监测频率一致。GNSS 法一般监测点可采用定期观测模式，观测周期与水位常规监测周期同步。
- b) 水位急速回升阶段及临近抗浮设防水位阶段：几何水准测量应同步加密观测次数，加密规则与水位监测保持一致；当变形量接近预警值时，应按 GB 50026 的相关要求持续观测。GNSS 法在关键监测点宜采用连续观测模式，加密观测时段应

与地下水位加密监测时段同步。当监测区出现水位快速回升、变形速率明显增大或超过预警值时，两类监测应同步加密。

- c) InSAR 监测法原始时间分辨率受卫星重访周期约束，难以完全匹配水位加密频次，在协同分析中可通过插值或函数拟合将 InSAR 形变序列重采样至水位监测时间点，并注明插值方法及误差范围。

9.1.2.3 协同监测频率

- a) 地下水位监测的三个阶段性划分是地表变形监测频率调整的基准。水位急速回升阶段和临近抗浮设防水位阶段，地表变形监测频率不宜低于地下水位监测频率，且两类监测宜同步加密。
- b) 采用自动化监测方法，如 GNSS 监测法、DFOS 监测法、自动水位计法、分层标监测法等，两类数据的采集采样间隔宜设为相同值；采用人工监测方法，如几何水准测量、电测水位计法等时，观测周期应保持一致。
- c) 监测方案中应明确列出地下水位常规监测频率、急速回升阶段加密频率、临近抗浮设防水位阶段加密频率及地表变形对应匹配方案。实际执行的监测频率与方案不一致时，应在监测报告中说明差异及原因。

9.2 数据模型与元数据标准

9.2.1 数据结构标准

9.2.1.1 所有监测数据应采用统一的数据结构，至少包含监测点标识、采集时间、坐标、高程、监测值、数据类型标识、仪器编号及采集状态码。

9.2.1.2 地下水位监测数据与地表变形监测数据应分别定义数据表结构，但两者应包含公共字段，如监测剖面编号、统一时间戳、点位对应关系等，以便后续时空匹配和协同分析。

9.2.1.3 各监测方法的数据表应遵循统一的字段命名规则，具体字段定义宜参照附录 G 中对应的记录表格式，并补充数据版本号和修订记录字段。

9.2.1.4 数据传输与交换宜采用 JSON、CSV 或 GeoJSON 格式，交换文件应附带完整的字段说明和单位信息，确保不同系统间可互操作。

9.2.2 元数据字段

9.2.2.1 每个监测数据集应建立配套的元数据文件，元数据内容至少包括：数据集名称、监测区域范围、时间范围、数据来源、技术方法、精度指标、坐标系与高程基准、数据质量评价、使用限制和引用方式。

9.2.2.2 监测点级别的元数据应包含：点位编号、点位类型、埋设日期、所在监测剖面、所属风险分区、仪器安装参数及维护历史记录。

9.2.2.3 元数据应采用通用的元数据标准进行结构化存储，并随数据成果一并提交。

9.2.3 数据质量与管理

9.2.3.1 数据质量应在元数据和数据结构中嵌入质量标识，包括数据完整性、一致性、精度和可追溯性。

9.2.3.2 所有监测数据宜经两级审核，采集人自检与质量负责人抽检，质量审核结果应记入元数据中的“数据质量评价”字段。

9.2.3.3 数据库或数据集中应建立版本管理机制，每次数据修订、补插或重处理均生成新版本，并保留历史版本记录，确保数据溯源清晰。

9.2.3.4 数据管理与存储应符合 10.3 “数据集建设”的内容，并确保数据结构与元数据字段在数据入库前通过一致性校验。

9.3 数据处理

9.3.1 单向处理

9.3.1.1 地下水位监测数据与地表变形监测数据分别进行独立处理。

9.3.1.2 地下水位数据处理

- a) 剔除人为扰动或仪器故障导致的异常数据。
- b) 短时段缺失数据可采用线性插值法或滑动平均法补插。

9.3.1.3 地表变形监测数据处理

- a) InSAR 获取影像进行精密轨道校正、数据配准、干涉处理、大气相位校正、时序分析和地理编码，数据宜重点提升地表变形中心附近的解算精度。
- b) GNSS 数据进行基线解算，并转换至 CGCS2000 坐标系。
- c) 水准测量数据进行尺长改正、温度改正和正常水准面不平行改正。
- d) DFOS 进行应变-变形反演，其结果与水准测量结果一致。
- e) 分层标进行垂向解算，其结果与水准测量结果一致。
- f) 若需专项监测数据，则可标注变形类型、发育位置及对应的水位监测井编号。

9.3.1.4 处理后的各类地表变形数据宜按监测时间插值或重采样，形成时间粒度一致的形变数据集。

9.3.2 交叉处理

9.3.2.1 交叉处理可实现地下水位数据与地表变形数据的时空匹配，时间匹配以监测系统的统一时间为基准，同步误差不宜大于 1 min；空间匹配在 GIS 平台中建立水位监测井与地表变形监测点的对应关系，协同监测时空匹配流程图见附录 H。

9.3.2.2 高频监测数据宜与水位高频监测数据时间同步，并满足短时间尺度响应分析要求。

9.3.2.3 时空匹配后的数据可整合为协同监测数据集，宜包含点位信息、监测时间、水位

值、形变量和变形类型等核心数据。

9.4 监测数据成因分析

9.4.1 监测数据分析在基于时空匹配后的协同监测数据集进行。

9.4.1 水位变化与地表变形的关联分析采用相关性分析方法计算相关系数，存在非线性关联时，采用灰色关联分析法。

9.4.1 地表变形成因分析应先排除基坑开挖、邻近施工加载或卸载、建筑结构基础变位等环境因素的干扰，在此基础上再定量分析水位回升对土体固结或地层滑移的驱动作用；结合工程需求分析不同含水层水位回升对地面变形的贡献度。

9.4.1 宜结合人类工程活动、气象水文等辅助信息，分析外界因素对水位与变形耦合关系的影响。

9.5 数据分析

9.5.1 延迟响应分析

绘制地下水位与地表变形的时间序列曲线，采用互相关分析法确定水位变化与地表变形的最优滞后时间，据此对水位序列进行时移校正，使两类数据在时间轴上建立准确的响应关系。

9.5.2 空间分布规律分析

- a) 基于 GIS 技术，利用监测点实测数据直接勾绘地下水位等值线图 and 地表形变量分区图。等值线间隔应能清晰反映水位或变形的空间变化梯度，图面上应标注监测点实测值。
- b) 地表变形宜单独绘制变形速率等值线图，以识别变形集中区和变形梯度带。通过不同时期等值线图的叠加对比，分析变形中心迁移和范围扩展规律。
- c) 综合分析水位等值线与变形等值线的空间叠合特征，判断水位回升高幅区与地表变形高值区的空间对应关系，为风险分区提供依据。

9.5.3 分层变形贡献分析

当开展分层变形监测（分层标法或 DFOS 法）时，应计算各主要土层（含水层、弱透水层等）的形变量占总变形量的比例，识别主要贡献层位。

9.5.4 变化趋势分析

- a) 分别绘制地下水位与地表变形的时间序列曲线，分析各自在监测期内的长期变化趋势及阶段性变化特征，划分水位平稳期、回升加速期和变形调整期等阶段。
- b) 计算各阶段的水位平均回升速率与地表变形平均速率，分析速率变化的时间节点及其与外部因素的时序关联，为预警阈值设定提供速率依据。
- c) 采用趋势分析方法对水位与变形的未来变化趋势进行预测。对于专项监测数据，可采用多项式拟合或 Logistic 增长模型进行趋势拟合。

- d) 当监测项目配备孔隙水压力监测资料时,应在趋势分析中纳入孔压数据,绘制超静孔隙水压力消散曲线与地表变形速率曲线的叠合对比图,分析孔压快速消散阶段与变形加速阶段的速率对应关系,结合固结理论判断土体当前所处的固结状态(主固结阶段或次固结阶段),为变形趋势判断提供力学机制解释。

10 成果编制

10.1 数据集建设

10.1.1 数据集以地下水位监测数据、地表变形监测数据及相关基础地质资料为对象,充分利用已有基础数据、地表变形现状、地下水与形变历史资料,按协同监测需求进行整理。

10.1.2 数据集系统宜采用 2000 国家大地坐标系和 1985 国家高程基准,采用点、线、面相结合的空间数据组织方式。

10.1.3 数据库宜包含地理数据、遥感数据、地质数据、水文地质数据、地下水位动态监测数据、地表变形监测数据等基本数据。同时宜包含监测点布置图、地下水位等值线图、地表变形等值线图和地下水位与地表变形协同分析图等成果图件,并明确各图层的属性字段及相互关系。

10.1.4 数据集支持监测数据的时间序列查询、空间分析及成果图件输出,并建立数据更新、备份与安全管理制度。

10.2 图件编制

10.2.1 一般要求

10.2.1.1 图件坐标系采用 2000 国家大地坐标系,高程基准采用 1985 国家高程基准。

10.2.1.2 地下水位等值线图、地表变形等值线图宜采用同比例尺、同范围出图,多期次监测图宜保持出图范围一致、比例尺一致,以便对比分析。

10.2.1.3 图件编号采用"章节号-图号"的形式(如 2-1 表示第 2 章第 1 幅图),与报告正文引用位置对应,确保图文一致性。

10.2.1.4 图件类型宜包括基础类图件、监测数据类图件和分析成果类图件。

10.2.2 基础类图件编制

10.2.2.1 基础类图件宜包括监测区地理位置图、监测点布置图。监测点布置图的比例尺宜根据监测范围确定,工程场地或局部重点监测区域宜采用 1:500~1:2000;城市或国土空间规划建设区等大范围监测区域宜采用 1:10000 或更小比例尺。

10.2.2.2 监测点布置图内容。

- a) 基准点、工作基点的坐标位置、编号及高程基准。
- b) 地下水位监测井的坐标位置、井深、监测层位及编号。
- c) 地表变形监测点的坐标位置、类型及编号。

- d) 监测剖面的起止点坐标及方向。
- e) 主要地形地物、行政区划边界及交通干道。

10.2.3 监测数据类图件编制

10.2.3.1 监测数据类图件宜包括地下水位等值线图、地下水位时程曲线图、地下水位变差图、地表变形等值线图、地表变形时程曲线图。

10.2.3.2 等值线图编制

- a) 以监测点实测数据为基础，直接汇编实测值进行勾绘。
- b) 等值线间隔能清晰反映水位或变形的空间变化梯度。
- c) 图面上标注监测点实测值。地下水位等值线图可采用色阶填充表示水位埋深或高程分区；地表变形等值线图可采用色阶或晕线表示变形量级分区。色阶或晕线的图例应标注数值区间，色阶过渡应连续、可辨。

10.2.3.3 时程曲线图编制

- a) 同一监测项目中同类曲线图的坐标轴量程保持一致。
- b) 曲线图中标注监测工况变化时段。

10.2.4 分析成果类图件编制

10.2.4.1 分析成果类图件宜包括地下水位与地表变形协同分析图。

10.2.4.2 协同分析图编制

- a) 同一监测剖面上地下水位埋深曲线与地表累计变形量曲线的叠合对比图。
- b) 水位回升幅度与地表变形量的关系散点图及拟合曲线，并标注拟合方程及相关系数。
- c) 关系散点图中的每个点宜标注对应监测剖面的编号及监测时段。

10.2.5 其他类图件编制

可根据情况，编制重点监测区域的专题图件。

10.3 报告编制

10.3.1 在地下水位与地表变形监测数据综合分析的基础上，对监测期内水位回升过程与地表变形响应可进行关联分析，评估变形量级、范围及速率，判断变形发展趋势。

10.3.2 根据关联分析结果，提出地下水位调整或地表变形控制的风险应对措施建议，包括但不限于水位调控、排水或回灌方案优化、变形敏感区保护措施等。

10.3.3 对照地下水位与地表变形协同分析图、等值线图、时程曲线图等成果图件，编写图件说明书，说明图件的数据来源、编制方法及主要结论。

10.3.4 成果报告及附件资料完整、真实准确、数据无误、图表清晰、结论可靠；协同监测成果报告编制提纲见附录 I。

附录 A

(资料性)

地表变形监测技术适用性及优缺点

表 A.1 给出了 InSAR、GNSS、水准测量、分层标监测、DFOS 等技术的优点、缺点、适用范围、精度参考指标，重点明确各技术在地表变形监测中的适配场景；表 A.2 给出了各地表变形监测方法的主要误差来源与解决方法。

表 A.1 地表变形监测技术适用性及优缺点

监测技术	优点	缺点	适用范围	精度参考指标
几何水准测量法	精度最高、原理简单、结果可靠；直接获取竖向绝对位移；成本低、易操作	效率低、需通视；受地形地物限制；人工成本高、难自动化；长路线误差累积	高精度高程基准；局部竖向变形监测；其他方法精度验证	见附录 D
GNSS 测量法	全天候自动化；同时测水平+竖向；无需通视；时序连续；组网灵活	遮挡区信号差；设备成本高；垂直精度弱于水准；单点动态精度低	大范围变形控制点；水准难布设区域；水位回升动态跟踪	见 GB/T 18314
分层标监测法	分层变形直接、精确；单点竖向分层位移精度高；数据稳定、抗干扰强；量化土层变形贡献	定点监测；钻孔成本高、周期长；不可复用；不测水平变形；狭长地带受限	土层变形贡献分析；分层监测比对验证	系统精度 ≤ 1.5 mm；两次读数较差 ≤ 1.5 mm
DFOS 监测法	高密度连续监测；分层+地表线状变形全覆盖；抗电磁干扰、耐腐蚀；长期稳定、自动化；适配狭长地带	布设复杂；解调仪成本高；应变反演依赖模型；空间分辨率有限 (0.1~1 m)；深层精度降低	关键剖面分层变形；狭长工程；地表线状变形监测	应变精度 $\leq 10\mu\epsilon$ ；变形精度亚毫米级
InSAR 监测法	大范围普查；历史形变回溯；无需现场设备；空间覆盖均匀；识别地表形变中心	时间分辨率低 (6~12 天)；植被易失相干；垂直精度中等；难测瞬时变形	区域性变形普查；历史形变回溯；传统测量难实施区	年形变 5 mm；空间分辨率 3~30 m

表 A.2 地表变形监测方法主要误差来源与解决方法

监测方法	主要误差来源	解决方法/削弱措施	参考标准
几何水准测量法	①仪器误差；②观测误差；③外界条件误差	①进行尺长改正、温度改正和正常水准面不平行改正；②一、二等水准测量进行重力异常改正；③采用数字水准仪减少读数误差；④按精度等级控制视线长度和前后视距差	GB 50026、DZ/T 0154
GNSS 测量法	①卫星星历误差和卫星钟差；②电离层延迟和对流层延迟；③接收机钟差、天线相位中心偏差、多路径效应	①采用精密星历替代广播星历；②采用差分定位或精密单点定位（PPP）技术；③电离层延迟采用双频观测值组合消除；④选择多路径效应较小的点位，采用扼流圈天线；⑤对流层延迟采用模型改正	GB/T 18314
分层标监测法	①钻孔垂直度偏差导致磁环定位误差；②沉降管接头密封不良导致气体渗入；③读数误差	①钻孔保持垂直，沉降磁环准确固定在设计深度；②沉降管接头密封良好；③每次监测重复 2 次测量，取平均值	DZ/T 0154
DFOS 监测法	①应变与温度耦合误差；②光缆与地层耦合误差；③解调仪测量误差；④应变-变形反演模型误差	①采用温度补偿光缆或同时测量温度进行校正；②保证光缆与地层良好耦合，回填材料宜与原状土压缩性相近；③定期校准解调仪，采用稳定光源和参考光路；④结合分层标或水准测量结果进行标定和验证	DZ/T 0154
InSAR 监测法	①轨道误差（卫星轨道不精确）；②DEM 误差（地形相位去除不彻底）；③大气延迟误差（对流层、电离层延迟）；④失相干与相位解缠误差（植被覆盖、时间失相干）	①精密轨道校正；②采用时序 InSAR 技术（PS-InSAR、SBAS-InSAR）提取长期缓慢形变；③大气相位校正；④采用水准或 GNSS 观测点进行交叉验证；⑤质量保障与真实性检验	GB/T44146、DZ/T 0154

附录 B

(资料性)

地下水位监测技术适用性及优缺点

表 B.1 给出了电测水位计法、钢尺水位计法、压力式水位计法、气泡水位计法、一体化遥测水位计法、卫星重力反演法、电阻率成像法等技术的优点、缺点、适用范围、精度参考指标；表 B.2 给出了各地下水位监测方法的主要误差来源与解决方法。

表 B.1 地下水位监测技术适用性及优缺点

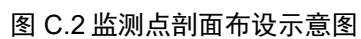
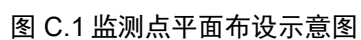
监测技术	优点	缺点	适用范围	精度参考指标
钢尺水位计法	精度高、读数直观；无需电源；可直接量测孔口至水面距离；校准便捷；数据可靠性强	操作耗时、效率低；受井深限制（深孔作业难度大）；无法自动化；遇高水位波动时读数易偏差	高精度水位基准建立；监测井校准；关键井位人工复核；浅井/中深井精细监测	水位埋深误差 $\leq \pm 2 \text{ mm}$ ； 两次读数较差 $\leq \pm 2 \text{ mm}$
电测水位计法	原理简单、操作便捷；设备成本低；无需复杂校准；可快速获取水位埋深；适用于各类监测井	人工读数效率低；无法实现连续自动监测；受井内条件（如井径、水位波动）影响；长距离监测劳动强度大	常规人工巡检；单点水位校核；应急监测；各类浅层/中深层地下水监测	水位埋深误差 $\leq \pm 10 \text{ mm}$ ； 水位高程误差 $\leq \pm 10 \text{ mm}$
压力式水位计自动监测	全天候自动化连续监测；数据时序完整；可同步采集温度/气压；易于组网遥测；适应深孔环境	设备成本较高；需定期校准压力传感器；受气压/温度漂移影响；电源/通信故障易导致数据断档	长期动态水位监测；区域地下水水位变化跟踪；自动化监测站点；深井/承压水监测	水位测量精度 $\leq 0.2\% \text{ F} \cdot \text{S}$ ； 水位高程误差 $\leq \pm 5 \text{ mm}$
气泡水位计法	无电子部件浸入水中，抗腐蚀、寿命长；适应高矿化度/腐蚀性地下水；维护便捷；可实现自动监测	气路易堵塞/泄漏；需稳定气源；响应速度较慢；深孔监测时管路延迟明显；精度略低于压力式	高腐蚀性地下水监测；恶劣环境（如矿山、盐碱地）监测井；长期无人值守站点	水位埋深误差 $\leq \pm 10 \text{ mm}$ ； 两次测量差值 $\leq \pm 5 \text{ mm}$
一体化遥测水位计法	集成采集、传输、存储功能；低功耗设计；支持断点续传；可远程运维；组网灵活	设备集成度高，故障排查复杂；通信依赖运营商网络；电池寿命有限；成本较高	区域地下水监测网；野外无人值守站点；动态水位实时预警；分布式监测	水位埋深误差 $\leq \pm 10 \text{ mm}$ ； 数据传输延迟 $\leq 5 \text{ min}$
卫星重力反演法（GRACE/GRACE-FO）	大尺度、全覆盖监测；不受地面条件限制；可反演陆地水储量变化；适用于区域尺度评估	空间分辨率低（ $\geq 1^\circ \times 1^\circ$ ）；时间分辨率粗（月/旬尺度）；无法区分地下水分量；需地面站点标定	流域/区域尺度地下水储量变化评估；大尺度地下水位回升趋势分析；气候变化背景下水资源研究	陆地水储量变化精度 $\approx 1 \text{ cm}$ 等效水高； 反演水位变幅误差 $\geq 0.1 \text{ m}$

表 B.2 地下水位监测方法主要误差来源与解决方法

监测方法	主要误差来源	解决方法 / 削弱措施	参考标准
钢尺水位计法	①钢尺拉伸变形；②钢尺磨损；③温度变化引起的长度误差；④读数偏差	①钢尺刻度每半年进行计量校准；②读数时视线垂直于尺面；③采用带有毫米级刻度的不锈钢钢尺	GB/T 51040、GB/T 50138、SL 183
电测水位计法	①测绳刻度误差；②探头触水判断误差；③井口高程测量误差	①定期校准测绳刻度；②缓慢匀速下放探头，遇井壁时缓慢上下移动防止数据突跳；③每次测量前记录仪器型号和编号	GB/T 51040
压力式水位计法	①传感器漂移（零点漂移、温度漂移）；②大气压补偿误差；③水体密度变化；④长期稳定性误差	①定期校准压力传感器；②采用温度补偿和气压补偿；③按 GB/T 11828.2 要求进行安装与维护；④传感器测量精度不低于 $0.2\% F \cdot S$	GB/T 11828.2
气泡水位计法	①气路泄漏或堵塞；②供气压力不稳定；③气管出口位置变化	①定期检查气路状态和供气压力；②气管出口固定于监测期最低水位以下；③保证气路密封良好、无泄漏	GB/T 11828.2
一体化遥测水位计法	①传感器漂移；②通信信号中断；③电池供电不稳定	①主机箱与供电单元固定在井口或井壁稳固处；②天线朝向保证通信信号良好；③电池持续供电时间不少于 1 年；④定期巡检维护	DZ/T 0307、GB/T 51040
卫星重力反演监测法	①空间分辨率低（约 300km）；②时间分辨率粗（月尺度）；③无法区分地下水分量；④反演模型不确定性	①扩展至更大的水文单元或采用降尺度技术（1 km~50 km）；②结合地面监测井实测水位进行标定和验证；③分离非地下水分量依赖模型计算	—
电阻率成像法	①反演结果垂向分辨率随深度增加而降低；②深层水位变化判读能力有限；③电阻率反演多解性	①结合钻探、监测井实测水位等资料进行标定验证；②装置长度和极距参照 GB 51099 确定	GB 51099

(资料性)

图 C.1 给出了地下水位回升与地表变形协同监测的平面组网架构；图 C.2 给出了监测点剖面布设示意图。



附录 D

(资料性)

监测方案设计书提纲

第一章 概述

- 1.1 任务来源
- 1.2 工作内容
- 1.3 编制依据

第二章 监测区概况

- 2.1 自然地理
- 2.2 水文地质条件
- 2.3 工程地质条件
- 2.4 人类工程活动

第三章 监测目标与内容

- 3.1 监测目标
- 3.2 地下水位监测
- 3.3 地表变形监测
- 3.4 协同监测要求

第四章 监测方法与技术要求

- 4.1 地下水位监测方法
- 4.2 地表变形监测方法
- 4.3 仪器设备技术参数
- 4.4 精度控制指标

第五章 监测点网布设

- 5.1 基准点布设
- 5.2 地下水位监测点布设
- 5.3 地表变形监测点布设
- 5.4 协同监测剖面布设

第六章 监测频率与周期

- 6.1 地下水位监测频率
- 6.2 地表变形监测频率
- 6.3 频率调整规则

第七章 数据采集、传输与处理

- 7.1 数据采集
- 7.2 数据传输
- 7.3 数据处理
- 7.4 时空匹配

第八章 预期成果与进度安排

- 8.1 预期成果
- 8.2 进度安排

第九章 质量控制与保障措施

9.1 仪器校准

9.2 现场质控

9.3 数据质量控制

9.4 安全保障措施

附录 E 几何水准测量精度等级指标表

表 D.1 给出了几何水准测量法变形监测精度等级指标表。

表 E.1 变形监测水准测量精度等级指标

指标项目	精度等级			
	一等	二等	三等	四等
监测点测站高差中误差/mm	≤ 0.15	≤ 0.5	≤ 1.5	≤ 3.0
每千米高差偶然中误差 $M\Delta$ /mm	≤ 0.45	≤ 1.0	≤ 3.0	≤ 5.0
每千米高差全中误差 MW /mm	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 6.0	≤ 10.0
视线长度/m	≤ 30	≤ 50	≤ 75	≤ 100
前后视距差/m	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 3.0
前后视距累积差/m	≤ 1.5	≤ 3.0	≤ 6.0	≤ 10.0
视线高度（上丝读数）/m	≥ 0.5	≥ 0.45	≥ 0.4	≥ 0.35
往返/附合环线闭合差/mm	$\pm 0.3L$	$\pm 1.0L$	$\pm 3.0L$	$\pm 6.0L$
单程双测站高差较差/mm	≤ 0.3	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 4.0

附录 F

(资料性)

现有可用星载 SAR 传感器基本参数

表 F.1 给出了目前主流星载 SAR (Sentinel-1、TerraSAR-X 等) 的分辨率、重访周期、波段等基本参数, 为 InSAR 技术数据源选择提供参考。

表 F.1 现有可用 SAR 传感器基本参数

卫星	波段	重访周期	空间分辨率
Sentinel-1(A/B/C)	C	12 天 (单星), 6 天 (A+B 双星)	5 m × 20 m (IW 模式)
TerraSAR	X	11 天 (回归周期), 可与 TanDEM-X 编队获取更短时间基线	聚束模式 (ST): ≤0.5 m 高分辨率聚束 (HS): ≤1 m 条带模式: 1 m~3 m
陆地探测一号	L	双星组网: 标准模式 4 天, 快速响应模式 3 天 单星 8 天	条带模式为 3m
高分三号三星组网	C	理论重访周期最短约 5 小时	条带模式

附录 G

(资料性)

地下水位与地表形变监测记录表

表 G.1 给出了电测水位计法监测记录表；表 G.2 给出了钢尺水位计法监测记录表；表 G.3 给出了压力式水位计自动监测记录表；表 G.4 给出了气泡水位计监测记录表；表 G.5 给出了一体化遥测水位计记录表；表 G.6 给出了几何水准测量记录表；表 G.7 给出了 GNSS 地表变形监测记录表；表 G.8 给出了分层标法变形监测记录表；表 G.9 给出了 DFOS 分布式光纤监测记录表；表 G.10 给出了 InSAR 地表变形监测记录表；表 G.11 给出了协同监测同步观测记录表。

表 G.1 电测水位计法监测记录表

监测井编号：_____ 监测层位：_____ 仪器型号/编号：_____

观测日期	观测时间	井口高程(m)	孔口至水面深度(m)	水位埋深(m)	水位高程(m)	复测1	复测2	平均值	异常情况	观测人	校核人

表 G.2 钢尺水位计法监测记录表

监测井编号：_____ 钢尺编号/校准日期：_____

观测日期	观测时间	井口高程(m)	孔口至水面深度(m)	水位埋深(m)	水位高程(m)	测量误差(mm)	复测差值	天气/现场	观测人	校核人

表 G.3 压力式水位计自动监测记录表

监测井编号：_____ 仪器型号：_____

采集时间	压力值(kPa)	水位埋深(m)	水位高程(m)	温度(℃)	大气压(kPa)	信号强度	供电电压	异常标记	观测人	校核人

表 G.4 气泡水位计监测记录表

监测井编号：_____ 气管出口深度：_____ m

观测日期	观测时间	气路密封性	供气压力	水位埋深(m)	水位高程(m)	复测值	差值	设备状态	观测人	校核人

表 G.5 一体化遥测水位计记录表

监测井编号: _____ 设备编号: _____

采集时间	水位埋深(m)	水位高程(m)	电池电压	通信方式	信号强度	上传状态	本地存储	维护情况	观测人	校核人

表 G.6 几何水准测量记录表

监测点编号: _____ 水准路线: _____ 精度等级: _____

观测日期	观测时间	后视读数	前视读数	高差(m)	高程(m)	本次变形(mm)	累计变形(mm)	闭合差	气象	观测人	校核

表 G.7 GNSS 地表变形监测记录表

测点编号: _____ 观测模式: _____

观测日期	观测时间	X(m)	Y(m)	H(m)	水平位移(mm)	竖向位移(mm)	累计位移(mm)	卫星数	PDOP	观测人	处理人

表 G.8 分层标法变形监测记录表

钻孔编号: _____ 标深度: _____ m 系统精度: $\leq 1.5\text{mm}$

观测日期	初始读数(mm)	本次读数(mm)	本次变形(mm)	累计变形(mm)	复测较差(mm)	孔内状况	观测人	校核人

表 G.9 DFOS 分布式光纤监测记录表

光缆编号: _____ 铺设方式: _____ 解调仪型号: _____

观测时间	采样间距(m)	应变值($\mu\epsilon$)	变形量(mm)	空间分辨率	关键层位	异常区段	比对差	观测人	处理人

表 G.10 InSAR 地表变形监测记录表

卫星型号：_____ 重访周期：_____d

影像时间	轨道/波段	空间分辨率(m)	形变值(mm)	形变速率(mm/a)	校正内容	失相干区	验证点	处理人	审核人

表 G.11 协同监测同步观测记录表

监测剖面：_____ 统一时间基准：_____

观测批次	观测时间	水位井号	水位值(m)	变形点号	变形值(mm)	时间同步误差	匹配关系	异常	记录人	审核人

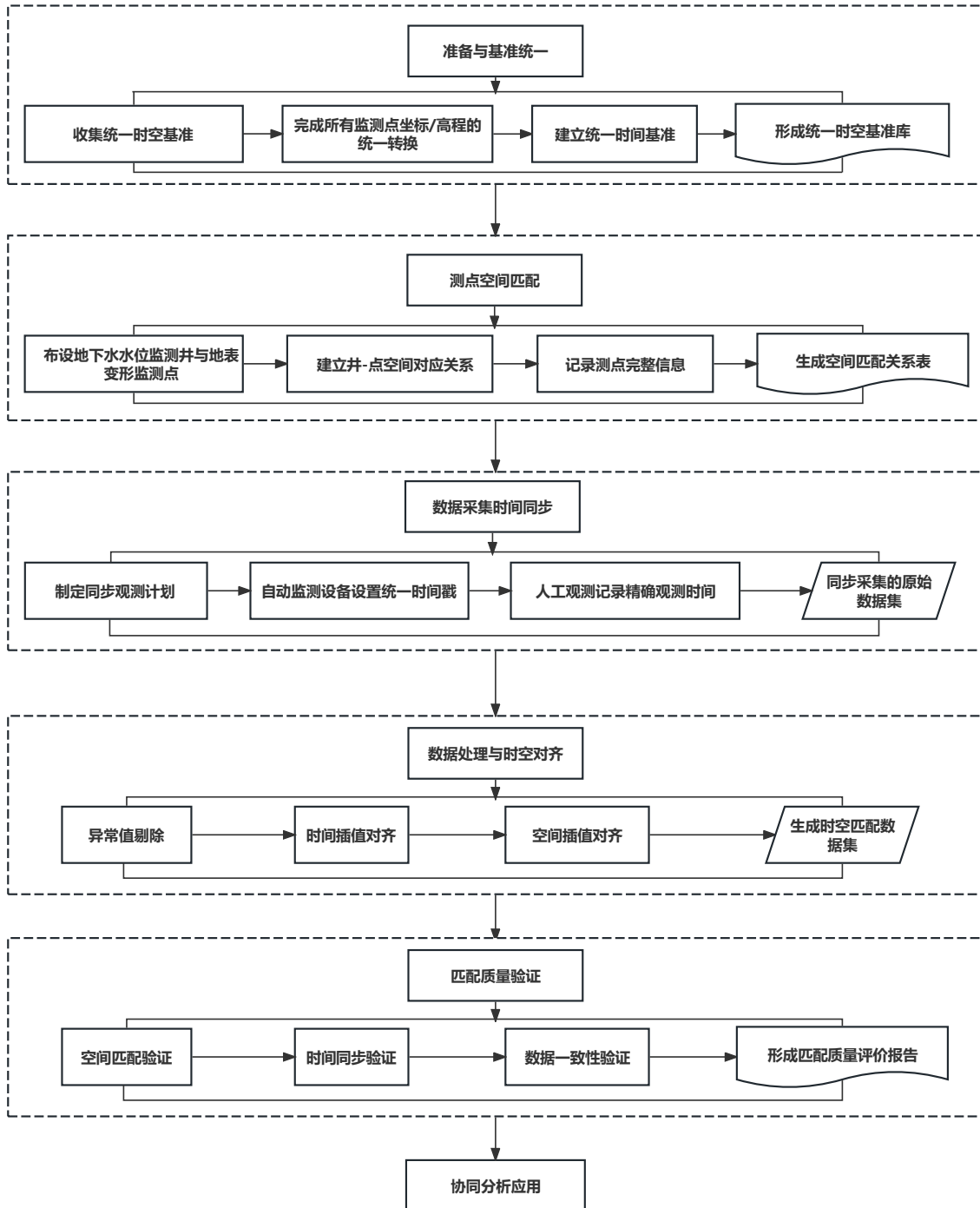
附录 H

(资料性)

地下水位与地表变形协同监测时空匹配流程

图 H.1 给出了地下水位与地表变形协同监测时空匹配流程。

图 H.1 地下水位与地表变形协同监测时空匹配流程



附录 I

(资料性)

成果报告编制提纲

第一章 概述

简述工作任务来源、主要工作内容、技术路线、完成工作量、质量评述、取得的主要成果等。

第二章 监测区地质环境背景

第一节 自然地理

第二节 区域地质

第三节 水文地质条件

第四节 人类工程活动

第三章 监测数据采集与处理

第一节 原始数据采集与完整性评述

第二节 地下水位数据处理

第三节 地表变形数据处理

第四节 时空匹配与数据传输

第四章 地下水位动态特征分析

第一节 地下水位时空分布特征

第二节 地下水位变化规律与影响因素

第三节 地下水位回升过程与演化趋势

第五章 地表变形特征分析

第一节 分层变形与土层响应特征

第二节 地表变形与地下水位的响应分析

第三节 地表变形发展趋势分析

第六章 结论与建议

第一节 主要结论

第二节 建议

条文说明

1 平原城市与国土空间规划建设区是地下水位回升引发地表变形等问题的典型区域；水电管廊、地铁工程等场地因基坑回灌等工程活动同样可能发生水位回升，故列为参考使用。

3.1 界定的“回升”是指水位在某一时段内持续或周期性上升，区别于短时的偶然性水位波动。驱动因素包括自然补给增加、人为开采减少、工程回灌等，不同因素导致的水位回升幅度和速率差异较大，在监测方案设计中予以区分。

3.2 本条强调“在统一的时空基准下同步开展”，明确建立水位数据与变形数据的一一对应关系，使其具备时空可比性。实际操作中，时间同步误差不宜大于 1 分钟。

3.3 本条强调的“时空匹配”包含空间对应和时间对齐。时间对齐包含两个层次：一是监测数据采集时刻的统一基准如自动化设备同步误差不宜大于 1 分钟；二是地层变形对水位变化的物理响应滞后，该滞后时间因弱透土层厚度、渗透系数等水文地质条件而异，宜在数据分析阶段通过相关性分析确定后，再将水位序列与变形序列进行时移对齐。

3.4 明确了监测目标区的划定需要综合考虑水文地质条件、水位回升幅度和地表变形敏感程度。需要说明的是，监测目标区的边界并非固定不变，可根据监测数据反馈动态调整。

3.5 本条强调基准点埋设于“监测对象变形影响范围之外”，测绘行业习惯将基准点选在测区内稳定位置。但地下水位回升引起的变形范围可能较大，若基准点位于变形区内，将导致整个监测系统产生系统误差。

3.6 不同行业对“剖面”的理解可能不同，如地质剖面强调地层结构，测量剖面强调方位线，本条明确其用于监测目的，即布设监测点的线状排列。

3.7 测绘行业中工作基点常被视为临时起算点，但本指南建议工作基点与基准点定期联测以验证稳定性。此定义避免与常规测绘术语混淆，强调工作基点的稳定性需动态验证。

3.8 分层标由沉降磁环、沉降管及保护装置等组成，使用该方法时需配合分层沉降仪或水准测量进行观测。[

5.2.1 本条提出“统一水位监测与变形监测的技术框架”。水利部门管水位，测绘部门管变形导致数据难以融合。本条强调从方案设计阶段开始就需协调统一。

5.2.2 本条的“分级”包括监测范围、密度、频率及精度四个维度。需要说明的是，分级不是随意划分，而是根据水位回升幅度、变形敏感性和工程风险等级综合确定。例如，高风险区加密监测，低风险区可适当放宽。

5.2.3 单一技术均有局限，如 InSAR 适合区域普查但时间分辨率受卫星重访周期限制，水准测量精度较高但时间分辨率较低。互补是指发挥各自优势，形成“空-天-地-井”一体化监测网络。

5.3.2 地下水位回升引发的地表变形与地下水开采引发的地表变形机理不同，识别类型对选择监测方法和防控措施至关重要。

5.4 本条将工作划分为五个阶段，实际工作中各阶段存在迭代反馈。例如，数据分析阶段发现的重点区域可反馈至监测方案设计阶段加密布点。本条划分主要是为便于质量管理和进度控制，不宜机械套用。

5.5.3 InSAR 的毫米级精度通常需要在理想条件下才能达到，实际应用中可能降低至厘米级；GNSS 精度指标适用于静态测量，动态或单点定位精度较低。

5.5.4 本条推荐的验证相对误差小于等于 10%，该指标是行业通行做法，但需要说明的是，“相对误差”适用于变形量较大的场景；当变形量接近仪器噪声水平时，绝对误差限可能更为合适。

5.5.5.1 “被遮挡”包括植被生长、堆土、建筑物遮挡等，尤其对于 InSAR 角反射器和 GNSS 观测墩，遮挡会直接导致数据失效。维护记录是数据质量追溯的依据。

6.1.1.1 “既有资料”主要包括：区域水文地质与工程地质资料、地下水监测历史数据、地表变形历史数据等。方案设计前充分搜集和分析上述资料，可避免重复工作，确保监测点位布设、频率设定等关键参数的选择有据可依，减少盲目性。

6.1.3 三维激光扫描多用于局部高精度变形监测（如边坡、隧道），在大范围地表变形监测中仍以 InSAR 为主。可据监测范围和精度要求选择。

6.2.1.2 本条建议每个监测目标区布设宜不少于 3 个基准点。这是测量学的基本要求：3 个点可以构成平面和高程控制网，并通过冗余观测检验基准点的稳定性。少于 3 个点则无法判断哪个点发生了位移。

6.2.1.4 不同行业对复测周期的要求不同，如建筑变形测量规范可能要求每月或每季度，本条推荐 6 个月是基于地下水位回升变化相对缓慢的特点。若监测区变形速率较大，可适当缩短复测周期。

6.2.2.1 已有井孔改建为监测井时，核实井孔结构是否符合监测要求。若不符合不勉强使用。

6.2.3.1 自建网络符合国家无线电管理相关规定，使用频段须申请许可。施工前可进行电磁环境测试，避免干扰。

6.3 方案设计书在监测工作开始前完成，并经技术审查。监测过程中如遇重大变更如监测范围调整、监测频率大幅变化等，宜修订方案设计书并重新审查。

7.1.1.2 钢尺在使用中可能因拉伸、磨损、温度变化产生长度误差，半年校准一次可有效控制误差累积。校准在有资质的计量机构进行。

7.1.2.3 本条建议电极探头下放速度缓慢匀速。过快的下放速度可能导致测绳晃动、探头与井壁碰撞，引起数据突跳。该速度为操作经验值，非强制标准，但超过该速度时数据可靠性下降。

7.2.1.2 测量精度是传感器本身的指标，实际监测精度还受温度漂移、大气压补偿、水体密度变化等因素影响。选型时宜综合考虑。

7.3.1 卫星重力反演监测法获取的是陆地水储量变化，并非直接测量地下水位。分离非地下水分量需要依赖模型，存在不确定性，因此反演结果宜作为辅助信息。

7.3.1.2 需要说明的是，受 GRACE/GRACE-FO 数据空间分辨率和时间分辨率的限制，该方法不适用于城市建成区、国土空间规划建设区等中小尺度的工程监测需求，其反演结果亦不宜直接作为地下水位动态监测的定量依据，仅可作为大区域趋势分析的辅助参考。

8.1 明确了几何水准测量是精度最高的竖向位移监测方法。需要说明的是，这一结论基于理想观测条件。在地表变形明显区域，水准测量同样可能产生误差，增加测回数。

8.2.2 GNSS 在建筑物密集区、高植被覆盖区、深基坑内可能信号受遮挡不适用，在这些区域可采用全站仪、水准测量或 DFOS 替代。

8.3.1.3 本条推荐将分层变形监测点与水位监测井布设在同一条监测剖面上，宜在同一钻孔或相邻位置实现对应监测。这是因为不同位置的地层结构可能存在差异，若分层标与水位井相距较远，二者的对应关系将受到地层非均质性的影响。条件允许时优先采用同孔监测。

8.3.2.4 若回填材料过软会因自重固结产生附加沉降；过硬则与周围土体变形不协调。宜采用原土或与原状土压缩性相近的材料回填。

9.1.2.1 水位回升可能不是瞬时完成的，短于 24 小时的加密可能只捕捉到回升过程的片段，无法完整记录峰值形态。24 小时覆盖至少一个完整的日周期，有利于消除人为用水等日变化干扰。

9.1.2.3 本条指出宜在监测报告中说明实际频率与方案不一致的原因，这是为了保证数据分析时能够正确理解数据的时间代表性。

9.2.1 地下水位监测与地表变形监测在传统工作中各自采用独立的数据格式，字段命名、编码规则、存储方式均不一致，直接进行协同分析的预处理成本极高。

9.2.2.3 元数据采用通用标准进行结构化存储并随成果一并提交，旨在确保元数据不因项目结束而丢失，便于数据长期管理和跨系统共享。

9.3.1 本条提出地下水位与地表变形数据分别独立处理，原因在于两类数据的误差来源和处理方法完全不同，混合处理将相互干扰、放大误差。

9.4.1 本条强调监测数据分析宜以时空匹配后的协同数据集为基础。未经时空匹配的水位与变形数据，在时间基准和空间位置上均不一致，直接进行关联分析可能导致错误的因果关系判断。

9.4.2 灰色关联分析适用于样本量较小或数据分布特征不明确的情形，可判断各因素与变形之间的关联强弱，但结果仅为关联度排序，不能给出定量函数关系。如需建立定量预测模型，可在关联分析基础上进一步采用回归分析或时序模型。

9.4.3 城市建成区地表变形往往是多因素叠加结果，分析水位回升的驱动作用前需剔除环境干扰。

9.4.4 辅助信息主要包括地下水开采量与回灌量、降水量、地表水体水位变化、周边施工记录等。结合方式可采用定性时序对比或定量多因子回归分析。建议在成果报告中系统论述辅助信息对水位—变形耦合关系的影响。

9.5.1 不同地层滞后时间差异显著，若最优滞后时间超出监测总时长，表明变形尚未对水位回升产生可识别响应，宜延长监测周期后重新分析。

9.5.2 变形中心迁移可通过对比不同时期速率等值线图的高值区位置变化判断。空间叠合时，水位回升高幅区与变形高值区对应良好，说明水位回升是变形主控因素；对应较差时，宜进一步分析地层岩性差异、局部荷载变化等因素的影响。

9.5.4 趋势预测方法选择考虑数据特征：线性趋势采用线性回归；呈现增长上限的“S”形趋势采用 Logistic 模型；对短序列（少于 6 个数据点）不宜外推预测。

10.1.2 采用 2000 国家大地坐标系和 1985 国家高程基准，所有测绘活动均宜采用。若历史数据使用其他坐标系可进行坐标转换并在报告中注明转换参数。

10.2.1.2 若比例尺不一致，同一区域的变形与水位变化在图上显示的位置和密度会不同，容易造成误判。

10.2.2.3 同一监测项目中同类曲线图的坐标轴量程保持一致，是为了确保多图并列对比时视觉尺度统一，避免因量程不同造成变形趋势的视觉误判。

10.3.4 本条强调成果报告及附件资料宜满足完整性、真实性、准确性、清晰性和结论可靠性，协同监测成果报告的具体编制格式与内容见附录（成果报告编制提纲），以确保不同监测单位提交的报告结构统一、便于比对和审查。