

# 不同埋深地下水温度动态特征及其影响因素

徐亚豪

新疆维吾尔自治区喀什水文勘测中心

DOI:10.32629/hwr.v10i1.6765

**[摘要]** 为明确不同埋深地下水温度动态规律及核心影响因素,支撑南疆地区地下水资源科学调控与水文监测工作,基于南疆实测数据,结合典型水文地质单元特征,系统剖析浅、中、深层地下水温度时空动态演化规律,量化识别四大核心影响因素的作用机制。研究表明:南疆地下水温度随埋深增加呈现“波动强度衰减—动态趋于稳定—随深度梯度递增”的分异特征;气温、地下水埋深、地下流体运移强度及人类开采活动是关键调控因子。研究成果可为区域地下水监测网络优化、水资源可持续利用及生态保护提供技术支撑与理论参考。

**[关键词]** 地下水; 埋深; 温度动态特征; 影响因素

中图分类号: P641.2 文献标识码: A

## Dynamic Characteristics and Influencing Factors of Groundwater Temperature at Different Buried Depths

Yahao Xu

Kashi Hydrological Survey Center, Xinjiang Uygur Autonomous Region

**[Abstract]** To clarify the dynamic laws and core influencing factors of groundwater temperature at different buried depths, and to support the scientific regulation of groundwater resources and hydrological monitoring in Southern Xinjiang, this study systematically analyzed the spatiotemporal dynamic evolution laws of shallow, medium and deep groundwater temperature, and quantitatively identified the action mechanisms of four core influencing factors, based on the measured data in Southern Xinjiang and combined with the characteristics of typical hydrogeological units. The results show that with the increase of buried depth, the groundwater temperature in Southern Xinjiang presents a differentiation characteristic of "attenuation of fluctuation intensity — dynamic tending to be stable — gradual increase with depth gradient". Air temperature, groundwater buried depth, underground fluid migration intensity and human exploitation activities are the key controlling factors. The research results can provide technical support and theoretical reference for the optimization of regional groundwater monitoring network, sustainable utilization of water resources and ecological protection.

**[Key words]** groundwater; buried depth; temperature dynamic characteristics; influencing factors

### 引言

地下水温度是地下水水文循环与热传输过程的综合表征指标,直接反映地表环境与地下水文地质系统的能量交换机理,对地下水化学场演化、水生生态系统稳定及地下水资源高效开发具有重要调控作用。南疆地处塔里木盆地核心区域,涵盖山前冲积平原、沙漠、绿洲等多元水文地质单元,属典型温带大陆性干旱气候,年降水量仅10~200mm,潜在蒸发量高达2100~3400mm/a,干旱指数远大于10,地下水是区域工农业生产、城乡生活及绿洲生态平衡的核心保障。南疆地下水埋深空间分异显著(山前区最大埋深达20m,绿洲区多为1~5m),不同埋深地下水温度呈现明显差异化动态特征,且与区域水文地质条件、气象环境及人类活动

强度密切相关。本文依托南疆长期地下水监测资料与核心文献成果,科学划分地下水埋深层级,系统分析不同埋深地下水温度时空动态特征,深入剖析核心影响因素的作用机制,揭示区域地下水温度动态演化内在规律,为南疆地下水科学管理提供理论依据与实践支撑。

### 1 研究区域概况

研究区域涵盖南疆喀什、和田、阿克苏地区及塔克拉玛干沙漠周边核心区域,总面积约106万km<sup>2</sup>。区域属温带大陆性干旱气候,年平均气温10~20℃,冬夏极端气温分别低于-20℃和高于40℃;年降水量80%以上集中在夏季,潜在蒸发量远大于降水量,水资源匮乏特征显著,该气候特征直接主导浅层地下水温度动

态演化。区域地势南高北低、西高东低, 周边环绕天山、昆仑山等山脉, 中部为塔里木盆地, 形成“三山夹一盆”地貌格局。地

下水主要补给来源为山区大气降水、冰雪融水及河流入渗, 排泄方式以蒸发、人工开采及地下径流为主, 绿洲区以人工开采为主, 沙漠区以蒸发为主。受多因素综合影响, 南疆不同区域水温分异显著: 喀什山前冲积平原区水温随埋深递增, 天山周边地下流体流速慢( $0.10\sim 1.94$ ) $\times 10^{-7}$   $m\cdot s^{-1}$ , 热量传输以传导为主, 水温波动小; 昆仑山周边流速快( $8.56\sim 9.71$ ) $\times 10^{-7}$   $m\cdot s^{-1}$ , 热量传输以对流为主, 水温受运移影响显著。塔克拉玛干沙漠区浅层(埋深<1.5m)水温受地表极端高温影响, 夏季可达30℃以上, 埋深大于1.5m后波动幅度显著减弱。

## 2 不同埋深地下水温度动态特征

地下水温度动态特征体现在时间演化与空间分异两个维度, 受埋深影响, 不同层级地下水热量传输机制存在本质差异, 导致水温动态规律显著不同。

2.1 浅层地下水(埋深<10m)温度动态特征。浅层地下水热量传输以大气降水入渗热交换、地表热量垂直传导为主, 受气象因素影响最为显著, 温度呈现强烈的季节性与日内波动, 波动幅度随埋深增加呈指数型衰减。喀什地区监测数据证实, 埋深从1m增至10m时, 水温波动幅度衰减速率达0.8~1.2℃/m。

时间动态上, 浅层水温季节性波动与气温高度同步, 呈“夏季高、冬季低”特征。实测数据显示, 埋深1~5m的浅层地下水夏季平均水温22~28℃, 极端最高32℃; 冬季平均4~8℃, 极端最低2℃; 春秋为过渡阶段, 月均变化幅度2~4℃。埋深<2m的浅层地下水存在显著日内波动, 最高水温出现在14~16时, 最低在凌晨4~6时, 波动幅度1~3℃, 埋深大于5m后日内波动小于0.5℃, 可忽略不计。沙漠区浅层(埋深<1.5m)受地表极端高温影响, 夏季平均水温28~32℃, 季节性波动幅度比绿洲区大3~5℃。

空间分布上, 浅层水温差异显著, 受地貌、埋深及地表覆盖类型控制。绿洲区(埋深1~3m)平均水温18~24℃, 空间分布均匀, 灌溉入渗使水温波动幅度比沙漠边缘区小1~2℃; 山前冲积平原区(埋深5~10m)平均水温14~20℃, 空间变化平缓; 沙漠区(埋深<5m)平均水温20~32℃, 空间差异最大, 沙丘顶部水温高于冲沟及补给区。喀什地区天山周边浅层水流速慢, 水温空间分布均匀; 昆仑山周边流速快, 水温空间差异明显。

2.2 中层地下水(埋深10~50m)温度动态特征。中层地下水处于深浅层过渡地带, 热量传输为传导与对流并存, 受气象因素影响显著减弱, 受水文地质条件与地下流体运移强度影响增强, 温度动态呈现“波动平缓、趋势稳定”特征, 是分析区域地下水热传输过程的重要载体。

时间动态上, 中层水温季节性波动幅度仅为浅层的1/2~1/3, 且存在明显相位延迟。埋深10~30m的中层地下水夏季平均水温16~20℃, 冬季8~12℃, 年波动幅度4~8℃; 埋深30~50m时年波动幅度降至2~4℃, 季节性特征弱化。水温峰值出现时间比浅层滞后1~2个月, 比气温滞后2~3个月, 埋深每增加10m, 相位延迟约15~20天。中层地下水无明显日内波动, 日变化幅度小于0.1℃,

温度动态受季节性热量传导与地下流体运移综合影响。

空间分布上, 中层水温相对均匀, 受地下水流向、岩性及地热梯度初步作用控制。山前冲积平原区(埋深10~30m)平均水温12~16℃, 由山前向平原腹地递增, 增幅0.1~0.2℃/km; 绿洲区(埋深10~20m)平均水温16~18℃, 略高于非灌溉区域; 盆地边缘(埋深30~50m)平均水温18~20℃, 空间分布最均匀。中层水温与地下水流向显著相关, 补给区水温低于排泄区, 喀什昆仑山周边测点因流体向上运移, 中层水温比周边高1~2℃。

2.3 深层地下水(埋深>50m)温度动态特征。深层地下水完全脱离地表气象因素的直接影响, 热量传输以地热传导为主, 受水文地质构造、地下流体深循环及地热异常区分布影响显著, 温度动态呈现“稳定递增、无季节性波动”特征, 其温度变化仅受地热梯度与流体深循环控制。

时间动态上, 深层水温极其稳定, 无季节性与日内波动。监测数据显示, 埋深50~200m的深层地下水水温长期稳定在20~40℃, 年变化幅度小于0.5℃; 埋深大于200m时水温稳定在40℃以上, 地热异常区可达100℃以上, 曲曼地热田钻孔最高水温达162℃, 且长期稳定。深层水温短时间尺度(1~5年)内无明显变化, 需长系列监测(10年以上)捕捉微弱演化规律。

空间分布上, 深层水温呈显著梯度递增特征, 符合区域地热梯度规律, 构造断裂带及地热异常区存在水温异常升高。南疆区域平均地热梯度1~3℃/100m, 山前断裂带附近达2~3℃/100m, 盆地腹地为1~1.5℃/100m。喀什天山山前断裂带周边, 埋深200m与500m处水温分别为25~30℃和35~45℃, 地热梯度2.0~2.5℃/100m; 沙漠腹地同埋深处水温分别为22~26℃和28~32℃, 地热梯度1.2~1.5℃/100m。构造断裂带是水温异常核心区域, 曲曼地热田因断裂带深循环作用, 埋深100m与200m处水温分别达60~80℃和100~162℃。

## 3 地下水温度动态特征影响因素分析

南疆不同埋深地下水温度动态是气象因素、水文地质条件、地下水运移及人类活动综合作用的结果, 各因素作用强度随埋深递增呈显著分异: 浅层以气象因素主导, 中层受多因素综合影响, 深层以水文地质构造与地热因素控制为主。

3.1 气象因素。气象因素(气温、太阳辐射、降水)是浅层水温动态的核心主导因素, 对中深层影响随埋深增加逐渐衰减, 作用机制为地表热量垂直传导与降水入渗热交换。气温与浅层水温呈显著正相关, 相关系数随埋深递减: 浅层(1~5m)0.75~0.90, 中层(10~30m)0.30~0.50, 深层(>50m)小于0.10。夏季气温升高使浅层水温上升, 冬季气温降低使水温下降, 热量传导存在时间滞后性, 浅层滞后1~7天, 中层滞后1~2个月。太阳辐射通过影响地表温度间接调控水温, 南疆年太阳辐射总量5400~6300MJ/m<sup>2</sup>, 夏季强烈辐射加剧浅层水温升高幅度, 冬季弱辐射增大水温下降幅度。降水对水温的影响局限于埋深<5m的浅层, 夏季暴雨短时快速入渗可使浅层水温1~2天内下降2~4℃, 影响持续3~7天。绿洲区因农田覆盖导致降水入渗速度慢, 水温受降水影响幅度比沙漠区小1~2℃。

3.2 水文地质条件。水文地质条件(岩性、地质构造、埋深)是影响各埋深水温动态的基础性因素,对中深层影响更为显著,作用机制为控制热量传导速度、地热梯度分布及地下水储存条件。其中,埋深是决定水温波动幅度的关键因子,埋深越小,水温受地表环境影响越大,波动幅度越大。南疆埋深空间分异导致浅层水温波动幅度差异显著:山前冲积平原区(埋深5~10m)年波动幅度4~6℃,绿洲区(1~5m)8~12℃,沙漠区(<3m)10~15℃。区域内埋深每增加1 m,浅层水温年波动幅度减小0.5~1.0℃,埋深大于10m后波动幅度小于5℃,季节性特征弱化,10m埋深是深浅层水温动态特征的临界分界。岩性通过导热系数差异影响热量传输速度,山前冲积平原区以砾石、砂卵石为主(导热系数 $1.5\sim 2.5\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ),浅层水温波动小;绿洲区以粉砂、细砂为主( $1.0\sim 1.5\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ),波动幅度中等;沙漠区以砂黏互层为主( $0.5\sim 1.0\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ),波动大且空间分布不均。地质构造对深层水温起决定性作用,断裂带为地热传输与流体深循环通道,可使深层水温显著升高形成异常区,褶皱构造通过改变水流向与流速影响热量分布均匀性。

3.3 地下水运移。地下水运移(流速、流向)通过热量对流传输影响水温动态,流速越快,对流作用越强,对中深层水温影响更为突出。地下水流速直接导致水温动态区域分异,喀什天山周边流速慢,热量传输以传导为主,水温波动小、空间均匀;昆仑山周边流速快,热量传输以对流为主,水温波动大、空间差异显著。流速还影响水温相位延迟,绿洲区浅层流速快(1~5m/d),相位延迟1~7天;山前平原区流速慢(0.1~1m/d),延迟7~15天。地下水流向决定热量传输主导方向,补给区(天山、昆仑山山区)水温4~10℃,排泄区(绿洲、盆地腹地)水温16~24℃。喀什昆仑山山区为补给区,地下水流向由山区向平原,导致山前平原区水温从南向北递增,增幅0.1~0.2℃/km。流体流向向上的区域,深层地热可通过对流传热至浅中层,形成局部水温异常。

3.4 人类活动。人类活动(地下水开采、农田灌溉、城市化建设)通过改变埋深、水流状态及地表覆盖条件影响水温动态,对浅中层影响显著。地下水开采是核心影响因子,长期大规模开采导致地下水位下降、埋深增加,减弱浅层水温波动幅度,改变中深层水温分布格局。喀什地区近20年地下水埋深年均递增0.17m/10a,开采旺季递增更明显,开采井周边因冷水集中补给,中层水温比周边低1~2℃。深层开采可导致地热异常区水温年均下降0.5~1.0℃,需合理调控开采量;农田灌溉通过热交换与埋深改变影响浅层水温,绿洲区夏季灌溉水(20~25℃)入渗使浅层水温降低1~2℃,冬季灌溉水(5~10℃)入渗使水温升高1~2℃。灌溉入渗还可降低埋深,增强浅层水温受地表环境影响程度,使波动幅度增大1~2℃;城镇化建设通过硬化地面改变地表导热与渗透特性,使城市浅层水温夏季比绿洲区高2~3℃、冬季高1~2℃,波动幅度增大0.5~1.0℃,污水入渗也会导致浅层水温升高1~2℃,干扰水温波动规律。

## 4 结论与建议

4.1 结论。基于实测监测数据与文献研究成果,系统分析

南疆不同埋深地下水温度动态特征及影响因素,得出以下核心结论:

(1) 水温动态特征呈显著层级分异:浅层地下水受气象因素主导,呈强烈季节性与日内波动,波动幅度随埋深指数型衰减,夏季平均水温22~28℃,冬季4~8℃;中层地下水受多因素综合影响,波动平缓且存在相位延迟,年波动幅度4~8℃,水温峰值滞后气温2~3个月;深层地下水受地热梯度控制,呈稳定递增趋势,无季节性波动,地热梯度1~3℃/100m,异常区水温可达100℃以上。(2) 影响因素作用强度随埋深分异显著:气温与太阳辐射是浅层水温波动的主导因素,相关系数0.75~0.90;水文地质条件是控制水温空间分布与长期动态的基础性因素,埋深决定波动幅度,构造控制深层地热异常;地下水运移是中深层水温的重要调控因子,流速越快波动越显著;人类活动对浅中层水温影响贡献率达30%以上,开采改变水温分布,灌溉调控浅层季节性变化。(3) 水温动态呈现明显区域分异:沙漠区浅层水温波动最大(年波动10~15℃),山前冲积平原区水温空间分布最均匀,构造断裂带周边深层水温存在显著异常,充分反映南疆地区水温动态的特殊性。

4.2 建议。结合研究结论与区域地下水管理实践,提出以下针对性建议。

(1) 优化监测网络布局:构建“分层监测、重点管控”体系,浅层重点布设绿洲与沙漠边缘区,核心区每日1次高频监测,其余每月2~3次;中层保持每月1次监测,重点关注流向沿线与集中开采区;深层每季度1次监测,重点覆盖构造断裂带与地热异常区。(2) 合理调控开采强度:绿洲区严控浅层开采量,避免埋深过度增加;地热异常区深层开采量控制在补给范围内,防止水温下降与资源枯竭;山前平原区优化开采井布局,避免干扰水流向与水温分布。(3) 强化灌溉与生态保护:绿洲区推广高效节水灌溉技术,减少灌溉水入渗对浅层水温的干扰;沙漠边缘区加强植被建设,减缓地表热量传导;重点保护山区地下水补给区,维系区域水文循环稳定。(4) 加强多因素协同监测研究:开展水温与气温、降水等多因子协同分析,建立动态预测模型;深入研究地热异常区水温变化机制,支撑地热资源开发保护;持续积累长期监测数据,完善区域地下水温度动态数据库。

## [参考文献]

[1] 陈顺云,吴志伟.利用基岩温度获取地下流体运移特征:以喀什地区为例[J].地球物理学进展,2021,36(2):689-698.

[2] 范敬龙,何清,李火青,等.塔克拉玛干沙漠地下水十大问题与展望:基于60年来的水文地质质调查研究成果[J].中国地质,2022,49(8):2645-2656.

[3] 张光辉,刘娟,赵志江,等.新疆喀什库车县曲曼地热田地下水同位素研究[J].地球学报,2022,43(5):645-654.

## 作者简介:

徐亚豪(1993--),男,汉族,河南商丘人,大学本科,助理工程师,研究方向为水文。