

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.212>



吐鲁番盆地地下水动态变化及其与地面沉降关系研究

丁启振^{1,2,3}, 周金龙^{1,2,3*}, 张红忠^{1,3}, 黄静^{1,3}, 孙英^{1,2,3}, 白凡^{1,2,3}, 涂治^{1,2,3}, 李军^{1,2,3}

1. 新疆农业大学水利与土木工程学院,新疆乌鲁木齐 830052
2. 新疆水文水资源工程技术研究中心,新疆乌鲁木齐 830052
3. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室,新疆乌鲁木齐 830052

摘要: 地面沉降的发生、发展已成为一种全球性的地质灾害。基于多年地下水位、水质和地面沉降监测数据,综合运用 GIS 技术、逻辑斯谛曲线模型、线性趋势分析和灰色关联分析等方法,从空间水平向—垂向一点的角度探究地下水位动态与地面沉降的关系,最后讨论了地面沉降对地下水水质的影响。研究区地下水动态类型包括开采型、水文—灌溉型和灌溉型,2019—2022 年地下水位整体呈快速下降和缓慢下降趋势,年均速率范围为 $-0.97 \sim -0.25 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。截至 2021 年,南盆地高昌区东南方向大型地面沉降漏斗中心地面沉降量与沉降速率分别为 -366 mm 和 $-140 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。承压水位降落漏斗与地面沉降漏斗耦合度良好,深层承压水位与地面沉降量呈显著正相关($r=1.00$),且在逻辑斯谛曲线模型中近似呈线性关系。深层承压水监测井的地面沉降量与地下水 SO_4^{2-} 含量显著正相关($r=0.95$)。长期过度开采深层承压水用于农业灌溉,导致黏土压缩固结出现地面沉降漏斗,同时可能释放出部分 SO_4^{2-} 进入深层承压含水层。

关键词: 地下水位动态;地下水水质动态;地面沉降;逻辑斯谛曲线;吐鲁番盆地;水文地质。

中图分类号: P641.3

文章编号: 1000-2383(2025)02-737-15

收稿日期: 2023-05-23

Study on Groundwater Dynamics and Its Relationship with Land Subsidence in Turpan Basin

Ding Qizhen^{1,2,3}, Zhou Jinlong^{1,2,3*}, Zhang Hongzhong^{1,3}, Huang Jing^{1,3}, Sun Ying^{1,2,3}, Bai Fan^{1,2,3}, Tu Zhi^{1,2,3}, Li Jun^{1,2,3}

1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

2. Xinjiang Hydrology and Water Resources Engineering Research Center, Urumqi 830052, China

3. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi 830052, China

Abstract: The occurrence and development of land subsidence has become a global geological disaster. Based on the monitoring data of groundwater level, groundwater quality and land subsidence for years, the relationship between groundwater level dynamics and land subsidence was explored from the perspective of spatial horizontal-vertical-point by using GIS technology, Logistic curve model, linear trend analysis and grey correlation analysis. Finally, the influence of land subsidence on groundwater quality was discussed. The groundwater dynamic types in the study area included exploitation type, hydrologic-irrigation type and irrigation type, and the groundwater level showed a rapid and slow decline trend from 2019 to 2022, the average annual rate ranges from $-0.97 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ to $-0.25 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$. The center of large-scale ground subsidence漏斗 in the southeast direction of the South Basin has a ground subsidence量 of -366 mm and a ground subsidence rate of $-140 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$. The coupling degree between承压水位降落漏斗 and ground subsidence漏斗 is good, and the承压 water level and ground subsidence量 are significantly positively correlated ($r=1.00$), and are approximately linearly related in the Logistic curve model. The ground subsidence量 and groundwater SO_4^{2-} content are significantly positively correlated ($r=0.95$). Long-term over-exploitation of deep承压水 for agricultural irrigation causes soil compression and solidification, resulting in ground subsidence漏斗, and may release part of SO_4^{2-} into the deep承压含水层.

基金项目: 国家科技基础资源调查专项“第三次新疆综合科学考察”项目“吐哈盆地水资源调查和承载力评估”(No 2021xjkk1000)。

作者简介: 丁启振(1998—),男,博士研究生,主要研究方向为干旱区地下水水质演化。ORCID: 0000-0003-4304-3628. E-mail: 1650655141@qq.com

* 通讯作者:周金龙,ORCID:0000-0001-5055-0252. E-mail:zjzhoujl@163.com

引用格式: 丁启振,周金龙,张红忠,黄静,孙英,白凡,涂治,李军,2025. 吐鲁番盆地地下水动态变化及其与地面沉降关系研究. 地球科学,50(2):737—751.

Citation: Ding Qizhen, Zhou Jinlong, Zhang Hongzhong, Huang Jing, Sun Ying, Bai Fan, Tu Zhi, Li Jun, 2025. Study on Groundwater Dynamics and Its Relationship with Land Subsidence in Turpan Basin. *Earth Science*, 50(2):737—751.

$\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$. By 2021, the amount and rate of land subsidence in the center of large land subsidence cone in the southeast direction of Gaochang district in the South Turpan Basin were -366 mm and $-140 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. There was a good coupling between the confined groundwater level depression cone and land subsidence cone, and there was a significant positive correlation between the deep confined groundwater level and the land subsidence ($r=1.00$), and the relationship was approximately linear in the Logistic curve model. There was a significant positive correlation between the land subsidence and SO_4^{2-} content in groundwater ($r=0.95$). Long-term over-exploitation of deep confined groundwater for agriculture irrigation results in compaction and consolidation of clay resulting in the land subsidence cone, and part of the released SO_4^{2-} may enter deep confined aquifers.

Key words: groundwater level dynamic; groundwater quality dynamic; land subsidence; logistic curve; Turpan Basin; hydrogeology.

0 引言

地面沉降是在自然因素和人为活动影响下形成的地表垂直下降现象。据研究表明,到 2040 年地面沉降将威胁全球近 1/5 人口,地面沉降的发生、发展已成为一种全球性的地质灾害,对人类生存环境产生严重影响(Herrera-García *et al.*, 2021; Hasan *et al.*, 2023)。近年来,国外学者在地面沉降影响因素方面,除地下水开采之外,还从城市扩张(Cigna *et al.*, 2021)、断层(Cigna *et al.*, 2020)和采矿(Jones *et al.*, 2016)等不同角度开展了地面沉降的深入研究。对于我国而言,地下水开采引发了较大范围的地面沉降(Ye, 2016),更多侧重于地下水开采驱动下的地面沉降机理研究,并且趋于成熟。在长江三角洲地区,分析认为含水层砂土的蠕变是造成其变形长期发展的主要原因(王非等,2011);对于黄河三角洲地区,地面沉降主要贡献层为第三粘性压缩层(刘勇,2013);通过在华北地区的沧州市建立地下水开采与地面沉降三维变参全耦合黏弹性数值模型,研究发现地面沉降严重的情况下,地下水可采资源量相对较少(骆祖江等,2023)。与东部发达地区相比,西部欠发达地区的地面沉降演化机理及其与地下水动态的关系研究程度较低。

地下水动态是地下水系统对各种外界因素变化的响应(靳孟贵,1991),水位、水质是两个重要的地下水动态要素。地下水位变化可以反映孔隙水压力的改变过程,在由松散冲积物组成的含水层中,孔隙水压力降低,水的支撑转移到含水层骨架上,骨架压缩而发生地面沉降(Terzaghi, 1943),而压实作用能够驱动黏土层等弱透水层中的孔隙水和原本富集于其中的化学物质进入到含水层中,对地下水水质产生一定影响(Erban *et al.*, 2013; Smith *et al.*, 2018; 刘妍君等,2021)。吐鲁番盆地作为新疆缺水最严重的地区之一,气候干旱,年降水量仅 16 mm,素有“火州”之称。面临的最大挑战就是地下水

的多年过度开采,并导致一系列典型的环境地质问题。已有研究表明,利用地表形变监测技术,一定程度上揭示了历史不同时期吐鲁番盆地的地面沉降特征,并从地质和人为因素两方面做了定性解释(Wang *et al.*, 2022)。但由于缺乏地下水位、水质监测数据,尚未对吐鲁番盆地的地下水动态尤其是深层地下水位、水质与地面沉降之间的关系进行详细而深入的探讨。

为此,本文以吐鲁番盆地地下水主要开采区为研究区,基于 19 眼国家级监测井地下水位、水质监测资料以及 InSAR 地面沉降监测资料,综合利用 GIS 空间分析技术、逻辑斯谛曲线模型、线性趋势分析方法和灰色关联度分析方法等,以总结地下水位动态特征与地面沉降时空分布特征为前提,从空间水平向—垂向一点的角度探究地下水位动态与地面沉降的关系,最后讨论地面沉降对地下水水质的影响。研究结果可为吐鲁番盆地调控地下水位、监控地下水水质与防治地面沉降提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

吐鲁番盆地位于新疆东部($87^{\circ}40' \text{E} \sim 91^{\circ}30' \text{E}$, $42^{\circ}30' \text{N} \sim 43^{\circ}20' \text{N}$),东西长约 245 km,南北宽约 75 km,东临哈密市伊州区,北隔天山与乌鲁木齐市相望,是典型的“三山夹两盆”的封闭式山间盆地。总体地形西北和南部高,中部低,北部分布巍峨的博格达山、喀拉乌成山,南部为觉罗塔格山,中部贯穿海拔较低的火焰山、盐山并将盆地分为南盆地和北盆地,南盆地的艾丁湖是我国陆地海拔最低点,也是世界第二低地。行政区包括高昌区、托克逊县和鄯善县。研究区属暖温带干旱荒漠气候,全年平均气温 14°C ,夏季最高可达 48°C ,而年蒸发量高达 2 184.7 mm。区内 14 条主要河流均发源于西、北部中高山区,年径流总量 $10.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中白杨河、大

河沿河、阿拉沟和柯柯亚河年径流量超过 $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。吐鲁番盆地属于北天山地槽褶皱带范畴,包括博格达背斜、吐鲁番山间断陷盆地和觉罗塔格复背斜3个三级构造单元(陈鲁,2014)。区内地层自下古生界至新生界均有分布,其中第四纪松散冲洪积物分布最为广泛,为地下水的赋存和运移提供了巨大的空间。北盆地第四系厚度在300~500 m之间,南盆地范围为400~600 m。单一结构含水层分布在北盆地山前倾斜平原中上部,岩性以卵砾石为主,在北盆地南缘靠近盐山—火焰山一带,分布由砂砾石、砂、黏土层组成的多层结构潜水—承压水含水层(李英连,2017);地下水流向大致由北向南;主要接受山区基岩裂隙水侧向补给和河水下渗补给,补给条件较好;排泄以局部地下水开采为主。南盆地地层颗粒由北向南逐渐变细,含水层厚度由大变小,在盆地腹部分布多层结构的潜水—承压水含水层,岩性为砂,隔水层主要为黏土,沿剖面图A-A'(图1c),越靠近艾丁湖黏土层越厚,耕地、草地区域的黏土厚度大致范围分别为60~140 m、140~170 m;地下水流向自山前向盆地中心(尾闾艾丁湖)汇聚;补给项主要为河水、渠系水、农田灌溉水入渗补给和侧向补给;人工开采、浅埋带潜水蒸发为主要的排泄方式。

1.2 数据来源与处理

本研究在吐鲁番盆地平原区共搜集国家级地下水位、水质监测井19眼(图1),其中潜水井13眼(单一结构潜水井7眼、承压水区潜水井6眼),承压水井6眼,监测井控制面积约 3592.5 km^2 ,监测井密度为 $5.3 \text{ 眼}/10^3 \text{ km}^2$,符合《地下水监测规范 SL183-2005》冲洪积平原区超采区地下水水质监测站的布设密度 $1\sim1.6 \text{ 眼}/10^3 \text{ km}^2$ 的要求。

19眼国家级地下水位、水质监测井数据均来自中国地质环境监测院。地下水位监测期为2019年1月至2022年10月;地下水水质监测期为2018年至2021年,于每年的8月(低水位期)采集水样。2017年至2021年地面沉降数据利用PS-InSAR技术提取,由新疆农业大学水利与土木工程学院提供,各期数据对应的累积沉降量均是相对于2017年3月21日而言。分辨率 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的2020年土地利用类型数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心网站(<https://www.resdc.cn>)。

采用IBM SPSS Statistics 26及Excel 2021对数据进行处理,76组地下水水质数据经阴阳离子平衡

检验, E 均介于 $\pm 5\%$ 之间。运用ArcGIS 10.2、Origin 2021软件绘制相关图表。灰色关联度计算基于灰色建模软件第七版进行(南京航空航天大学灰色系统研究所开发,<http://igss.nuua.edu.cn>)。

1.3 研究方法

1.3.1 线性趋势分析 线性趋势(Linear Trend)分析可以反映气象、水文要素的变化趋势。基于最小二乘法原理拟合得到一元线性回归方程(式1),其斜率 c 表示趋势系数(任国玉等,2005)。若 $c>0$,意为要素随时间的增加呈上升趋势,反之则呈下降趋势; $|c|$ 绝对值越大,表明变化趋势越明显。

$$y = cx + d. \quad (1)$$

趋势系数 c 的正负分别表示水位上升和下降的月变化速率。本文地下水位多年动态类型划分为水位快速下降($\leq -0.5 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$)、缓慢下降($-0.5\sim-0.1 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$)、基本稳定($-0.1\sim0.1 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$)、缓慢上升($0.1\sim0.5 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$)和快速上升($\geq 0.5 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$)5种类型(王贞岩等,2019)。

1.3.2 逻辑斯谛曲线模型 逻辑斯谛曲线(Logistic Curve)是由比利时学者Verhulst在1838年提出的一种特殊曲线(Reed *et al.*, 1927),直到1920年才被Pearl和Reed用于研究美国人口增长规律(Pearl *et al.*, 1920),之后也用于地下水位与地面沉降的关系研究(杨勇等,2013)。其常见模型为:

$$S = \frac{K}{1 + ae^{bH}}, \quad (2)$$

式中: S 为地面累积沉降量(mm), K 为相应的理论最大值(mm); $e\approx 2.71828$,为常数; H 为地下水位标高(m); a 为系数, b 为相对增长率。

本次选用三点法先估计 K 值(公式3),后通过直线回归方程求出两个参数(a,b),最终建立Logistic曲线模型(胡文冉等,2013)。

$$K = \frac{2P_1 P_2 P_3 - P_2^2(P_1 + P_3)}{P_1 P_3 - P_2^2}, \quad (3)$$

式中: P_1 、 P_2 和 P_3 分别表示3个等距离的横坐标所对应的 S 值。 a 、 b 的取值不仅与 K 直接相关,而且还受点个数影响,仅取 $S < K$ 前面的点(万昌秀等,1983)。

1.3.3 灰色关联度分析 灰色系统理论是中国学者邓聚龙在1982年创立的一种系统科学理论,其中灰色关联度分析(GRA, grey relation analysis)是通过各因素变化曲线几何形状的相似程度,来衡量因素间关联程度的方法,该方法具有所需数据少、原理简单等特点(邓聚龙,1987)。

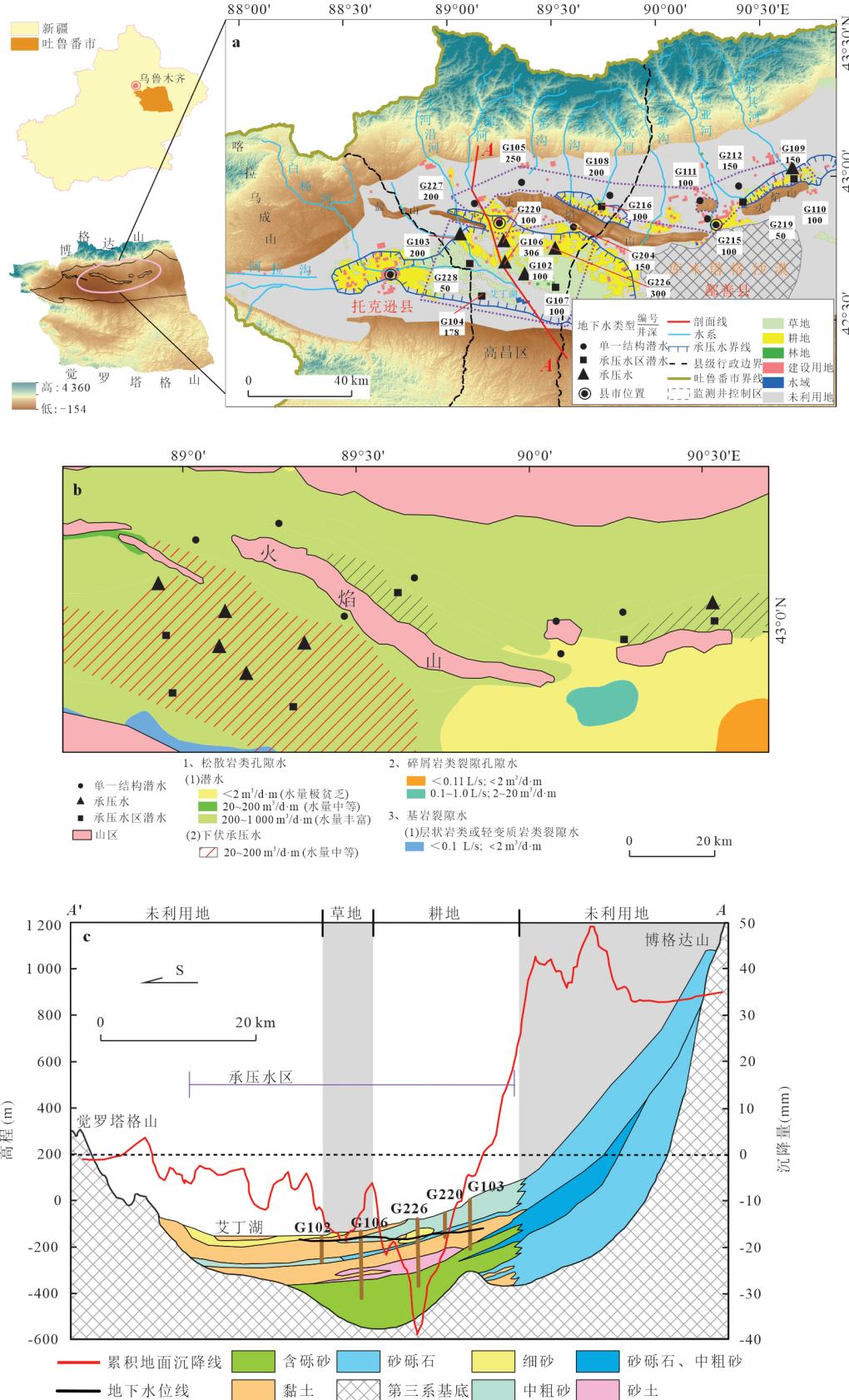


图 1 吐鲁番盆地土地利用与地下水监测井分布(a)和水文地质图(b)与水文地质剖面图(c)

Fig.1 Land use and groundwater monitoring wells distribution (a), hydrogeological map (b), hydrogeological profile (c) in the Turpan Basin

c. 改自陈鲁(2014)

$x_0(t)$ 为母序列, $x_1(t) \sim x_m(t)$ 为子序列,则在 $t=k$ 时刻,母序列与其各子序列之间的关联系数 ξ_i :

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \delta \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \delta \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}, \quad (4)$$

式中: δ 表示分辨系数,本研究取0.5; k 表示某时刻; i 表示子序列个数; $\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 和 $\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 分别为两级最大差和两级最小差.

母序列与各子序列之间的关联度 r_i 的计算公式如下:

$$r_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_i(k). \quad (5)$$

2 结果与分析

2.1 地下水位动态特征分析

2.1.1 地下水位年内动态特征 为研究地下水位年内动态特征,在南、北盆地,针对不同地下水类型选择6眼典型监测井绘制地下水位动态曲线,结合水文地质条件及土地利用类型(图1),将其划分为灌溉型、水文—灌溉型和开采型3种.

在北盆地,承压水区潜水位包括灌溉型和水文—灌溉型.在火焰山北侧山前地带的承压水区为农灌区且潜水水量丰富,8—9月水位最低,3月水位最高,为灌溉型(图2a);同时,个别监测井距河道较近,接受一定程度的河水补给,4—6月水位变化平稳,8—9月水位恢复,为水文—灌溉型(图2b).单一结构潜水位含灌溉型(图2c)和开采型(图2d),该灌溉型与图2a相比,年内变化上趋势基本一致,略滞后一个月,而年际变化趋势恰相反,这可能由于监测井处于火焰山缺口,良好的补给条件是水位整体呈缓慢上升趋势的主要驱动力;在富水含水岩组的工业区附近,水位直线下降,为开采型.

在南盆地,承压水区潜水位及承压水位均呈灌溉型特征.南盆地中部周边为富水含水岩组,潜水水量丰富,承压水水量中等,分布着大面积耕地和草地.该区潜水位9—10月水位最低,相较北盆地滞后1~2个月(图2e).与承压水区潜水位相比,承压水位具有同样的动态特征,但年内水位变幅较大(图2f).

2.1.2 地下水位年际动态特征 基于19眼监测井的地下水位年际动态曲线(图2),根据线性趋势分析结果划分地下水动态类型(表1).研究区各监测

(k)为:

井空间分布相对均匀,选用反距离权重方法插值绘制地下水位变幅分区(图3).吐鲁番盆地含南、北盆地为两个地下水系统,插值过程分开进行.

吐鲁番盆地2019~2022年地下水位整体呈下降趋势,地下水动态类型主要为快速下降型和缓慢下降型.在北盆地,单一结构潜水位缓慢下降,年均下降速率为 $-0.25 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$,年最大下降速率为 $-1.24 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ (G111),位于鄯善县的鄯善镇,水位下降 -3.56 m ;地下水位快速下降出现在承压水区潜水中,年均下降速率为 $-0.97 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$,年最大下降速率为 $-2.17 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ (G110),位于鄯善县七克台镇,水位下降最大 -7.30 m .南盆地承压水位年均下降速率为 $-0.77 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$,其中年最大下降速率为 $-1.80 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$,位于高昌区的三堡乡(G226),水位下降 -5.48 m ;而承压水区潜水位下降速率约为承压水下降速率的1/3,同时在三堡乡(G107)观测到年最大下降速率为 $-0.66 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$,水位下降 -3.26 m .

2.2 地面沉降时空分布特征

采取PS-InSAR技术提取吐鲁番盆地2017年3月至2021年11月地表位移信息(正值代表抬升,负值代表下降),地面沉降数据主要位于监测井控制区,其中托克逊县局部区域为沉降数据空白区.

分析得出,吐鲁番盆地平原区地面累积沉降量在 $-366 \sim 63 \text{ mm}$,沉降最为严重区域位于高昌区东南方向约14.6 km处,一宽约10.6 km、长约49.1 km的“7”字形狭长区域(图4),形成一处地面沉降漏斗.其中,累积沉降量绝对值大于100 mm的地区主要包括鲁克沁镇、达朗坎乡、吐峪沟乡、火焰山镇、三堡乡和恰特喀勒乡等,面积为 310.2 km^2 ,并在达朗坎乡出现沉降量的最大值(-366 mm).根据《地质灾害分类分级标准(试行)(T/CAGHP 001-2018)》,该区沉降规模属大型地面沉降.另外,在高昌区城区南部存在一处中型沉降漏斗,位于亚尔镇、艾丁湖镇和恰特喀勒乡交界处,累积沉降量绝对值大于100 mm的面积为 4.5 km^2 ,最大沉降量为 -213 mm .总体而言,北盆地未发生明显地面沉降,沉降较为严重区域均位于南盆地灌区.

平均沉降速率(沉降速率用负值表示,正值表示回弹速率)与累积沉降量空间分布具有相似性.

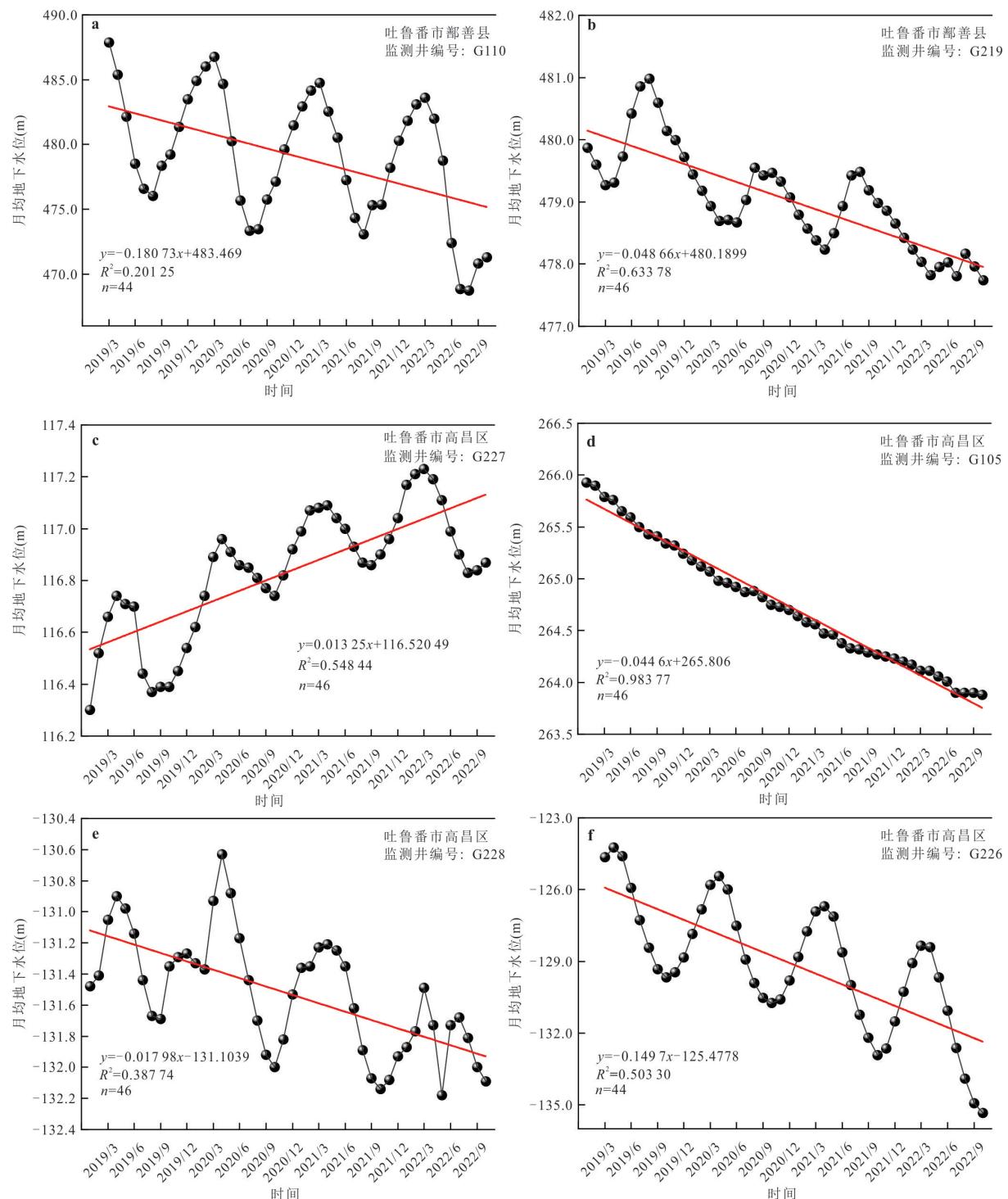


图 2 典型监测井 G110(a)、G219(b)、G227(c)、G105(d)、G228(e)、G226(f) 地下水位年内、年际动态

Fig.2 Intra-year and inter-year dynamics of groundwater level in typical monitoring wells G110(a)、G219(b)、G227(c)、G105(d)、G228(e)、G226(f)

吐鲁番盆地平原区平均沉降速率范围为 $-140\sim18\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ，“7”字形地面沉降漏斗区内平均沉降速率自西北向东南递增，最大沉降速率为 $-140\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ，高昌区城区南部中型沉降漏斗内最大沉降速率为 $-59\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

结合水文地质条件(图 1)，地面沉降漏斗区域地处承压水区，具有多层结构的含水层，且有较厚的黏土层，这为地面沉降提供了有利的孕育环境。其次考虑土地利用情况(图 4)，发现耕地和草地地区与沉降漏斗区吻合度较高，该地面沉降漏斗的出

表1 吐鲁番盆地监测井2019—2022年地下水位变幅

Table 1 Variation of groundwater level in monitoring wells in Turpan Basin from 2019 to 2022

地下水类型	区域	井编号	井/眼	年上升/下降速率 (m·a ⁻¹)	年均上升/下降速 率(m·a ⁻¹)	地下水动态 类型
单一结构潜水	北盆地	G105、G108、G111、G212、G215、G227	6	-1.24~0.21	-0.25	缓慢下降
	南盆地	G204	1	-1.27	-1.27	快速下降
承压水区潜水	北盆地	G110、G216、G219	3	-2.17~-0.17	-0.97	快速下降
	南盆地	G104、G107、G228	3	-0.66~0.005	-0.29	缓慢下降
承压水	北盆地	G109	1	-1.05	-1.05	快速下降
	南盆地	G102、G103、G106、G220、G226	5	-1.80~-0.02	-0.77	快速下降

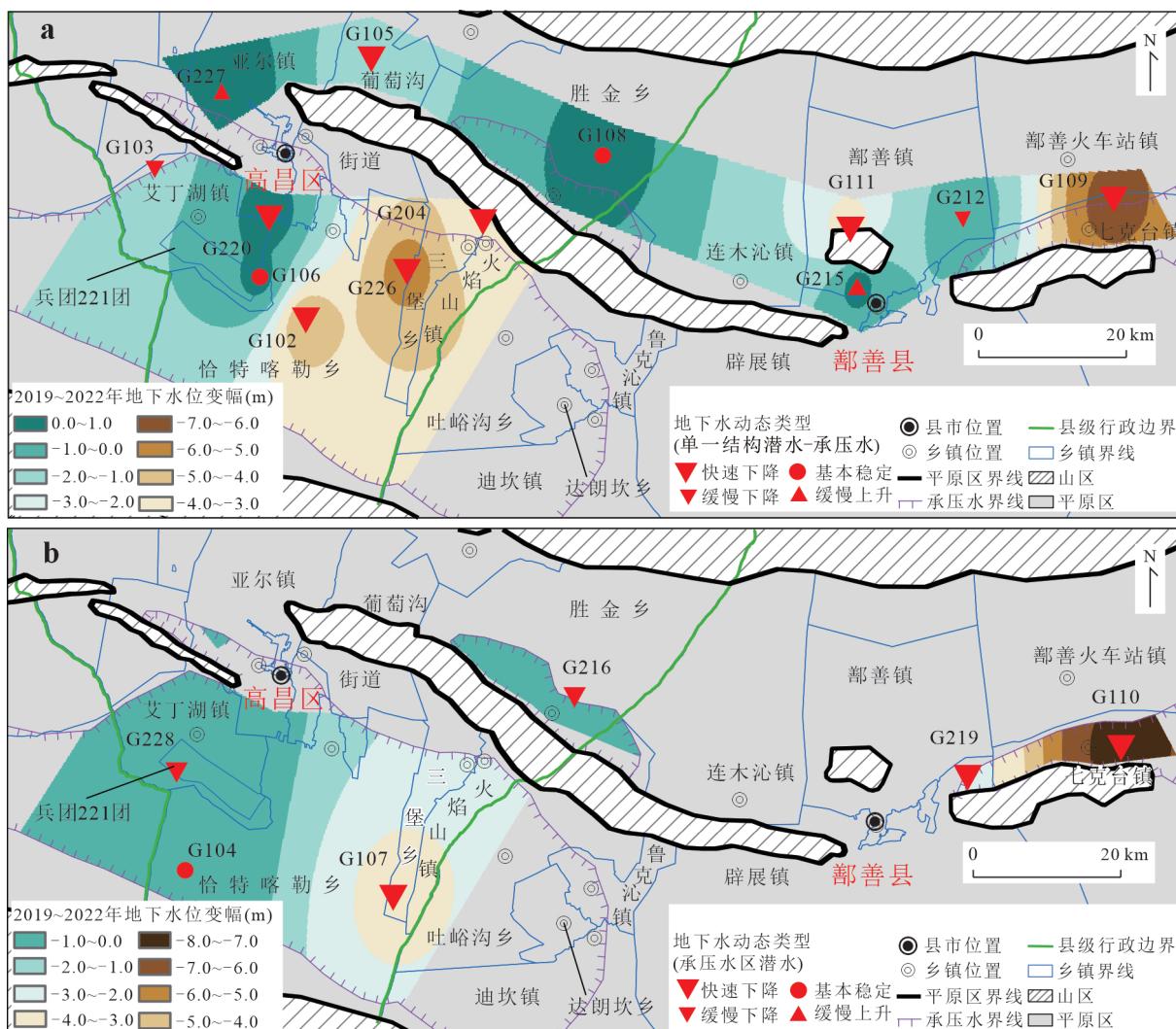


图3 吐鲁番盆地单一结构潜水—承压水(a)、承压水区潜水(b)水位变幅分区与地下水动态类型

Fig.3 Variation zone of groundwater level and groundwater dynamic type of single structure unconfined-confined groundwater(a), unconfined groundwater in confined area (b) in Turpan Basin

现可以认为是农业灌溉大量抽取地下水所致。

2.3 地下水位动态与地面沉降关系

2.3.1 地下水位降落漏斗与地面沉降空间分析

为了详细研究地面沉降与地下水位降落漏斗的关

系,选取南盆地重点沉降区域为典型研究区域,将累积沉降量图与地下水流动场图进行叠加分析。如图5所示,2019—2022年低水位期地下水位等值线整体下移或外移,均处于下降状态,且地下水位漏斗

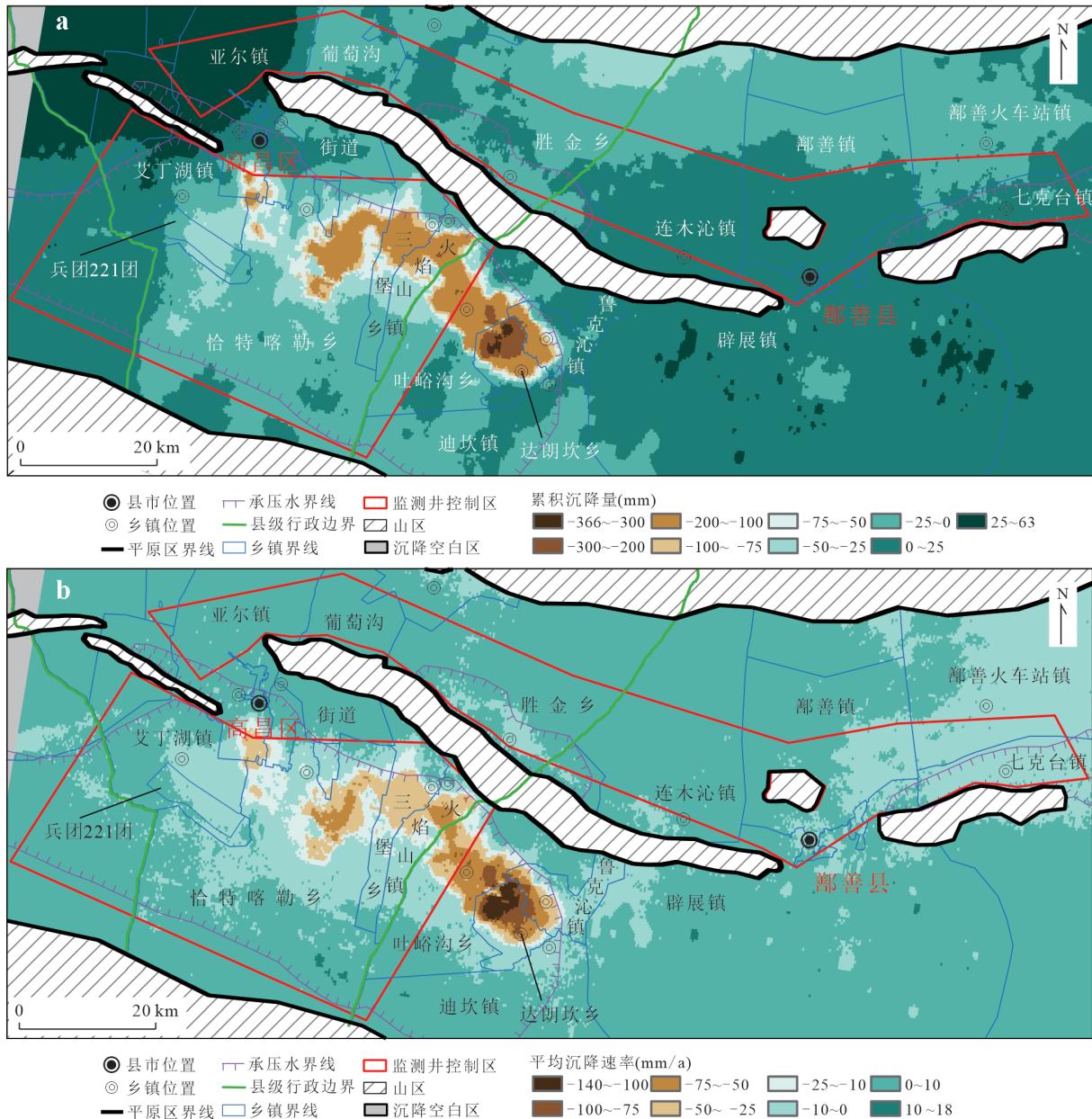


图4 吐鲁番盆地平原区2017—2021年地面累积沉降量(a)与平均沉降速率(b)分布

Fig.4 Distribution of cumulative land subsidence (a) and the average land subsidence rate (b) from 2017 to 2021 in the plain area of Turpan Basin

中心下降最为明显。

承压水区潜水位漏斗中心位于三堡乡、火焰山镇和恰特卡勒乡交界处,远离地面沉降漏斗,表明地面沉降与承压水区潜水的开采并无直接关系(图5a)。承压水位漏斗中心位于恰特卡勒乡,与-100 mm圈闭的地面沉降漏斗区部分重合,空间耦合度良好,但地下水位漏斗中心并非与地面沉降中心完全吻合,地面沉降漏斗有向东北偏移的趋势,其主要原因可能是黏土层固结速度滞后于地下水位变化(陈崇希, 2001)。可见,吐鲁番南盆地承压水开采

是地面沉降产生的影响因素之一。

进一步从垂向角度来研究二者关系,利用GIS技术提取A-A'剖面的地面累积沉降量和地下水位,并叠加至水文地质剖面(图1c)。据累积地面沉降量等值线可知,盆地北边缘地面抬升,最高值达50 mm,中心处沉降最大约为-40 mm,而南边缘无明显变化。另外,结合含水层类型及土地利用情况分析得到,在北部裸地(单一结构潜水含水层)地面抬升,在多层结构的潜水—承压水含水层(农灌区为主)由于地下水过量开采,产生地下水位下降漏

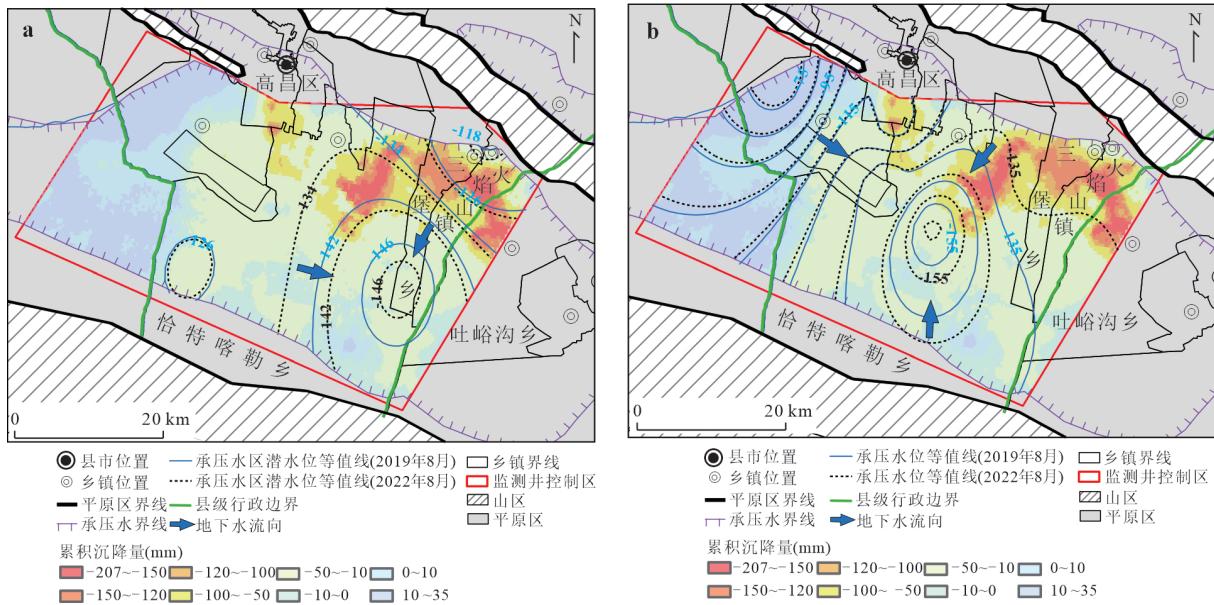


图5 重点沉降区地下水水流场与沉降空间分布[潜水(a)、承压水(b)]

Fig.5 Distribution of groundwater flow field and cumulative land subsidence in the key land subsidence area[unconfined ground-water (a) confined ground-water (b)]

斗,地面沉降漏斗与之吻合度相对较高,与2.2节结论一致。

2.3.2 地下水位与地面沉降的关系 研究区地面沉降较发育,地下水位动态变化与地面沉降变化关系密切。为研究地下水位与地面沉降的关系,特取沉降区内典型监测井PS点沉降量值作为观测孔处地面沉降值,整理典型监测井地下水位变幅与累计地面沉降量对照表(表2),并绘制地面沉降与地下水位的时序变化(图6)。根据研究区地层剖面资料,吐鲁番盆地承压水区在地下200 m左右分布有比较稳定的连续隔水层(图1),因此把井深200 m以内的地下水称之为浅层地下水,200 m以下的地下水称之为深层地下水。从表3可以看到,可压缩层的存在是产生沉降的根本因素,深层地下水位的快速下降是主要诱因,井深则是纽带,三者缺一不可。

通常认为,弱透水黏性土层的固结压密是产生地面沉降的主要原因,而砂土的变形往往不可忽略,砂土变形一般发生在人口密集区或者以砂土作为主要开采层的地区(张云等,2009;孙晓涵,2012)。而监测井226的监测位置为234~294 m(表2),结合图1c,开采层主要为含砾砂。因此,本研究只考虑由弱透水层引起的地面沉降,含水层的压缩不做考虑。

监测井G220、G226均位于农灌区,受季节开采影响,地下水位反复升降;在该位置地层处于反复

加载、卸载状态,但沉降量总体表现出持续累加状态,截至目前并未出现减缓的迹象,表明非弹性压实在变形过程中占主导地位。结合图1和表2,G226井深300 m,分布多层易被压缩的黏土,而G220井深100 m,地层岩性以中粗砂为主。因此认为相比深层承压水而言,地面沉降变化与浅层承压水水位变化并无明显的直接关系,在2.4节得到验证。另外,由于G103、G106深层承压水监测井地面沉降量变化不大(介于±20 mm之间),因此不做进一步讨论。

为进一步分析地下水位变化与地面沉降的响应关系,采用Logistic方程(非线性)和线性拟合2019—2021年典型监测井G226地面沉降与水位之间的关系,如图7所示。累积地面沉降量应与一个阶段水位的下降值相关,本文沉降数据与地下水位数据初始时间不一致,故将地下水位作为横坐标,但这并不影响结果的可靠性。两个模型计算出的相关系数、决定系数均分别在0.800和0.600左右,拟合结果准确且效果相对较好,基本反映地下水位与地面沉降之间的关系。但相比较而言,Logistic拟合效果略好一些,其得到的关系式为: $S = -281.651 / (1 - 1.425 \times 10^{10} \times e^{0.180H})$ 。根据 H_1 、 H_2 和 H_3 等3个分界点可将地面沉降划分为前期、中期和后期,其中: $H_1 = (\ln a - 1.317) / b$ 、 $H_2 = (\ln a) / b$ 、 $H_3 = (\ln a + 1.317) / b$ 。在Logistic曲线起始段,地下水位与地面累积沉降量值基本呈线性正相关;在曲线中段,实

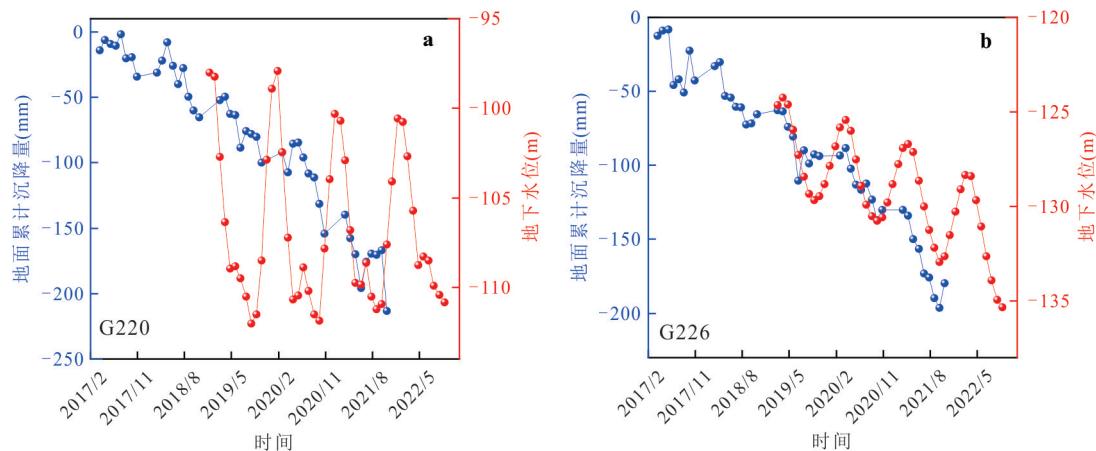


图 6 典型监测井地下水位与地面沉降时序变化图[G220(a)、G226(b)]

Fig.6 Temporal changes of groundwater level and land subsidence in typical monitoring wells [G220(a), G226(b)]

表 2 吐鲁番盆地典型监测井地下水位变幅与累计地面沉降量对照

Table 3 Comparison between variation of groundwater level and accumulated ground settlement in typical monitoring Wells in Turpan Basin

监测井编号	井深(m)	花管位置(m)	层位	地下水位年上升/下降速率 ($m \cdot a^{-1}$)		地面累计沉降量 (mm)	主要的可压缩层	地下水动态类型
				上升速率	下降速率			
G102	100	52~94	浅层	-	-1.16	-24.98	黏土	快速下降
G103	200	146~194	深层	-	-0.23	15.28	黏土	缓慢下降
G106	306	143~283	深层	-	-0.02	-3.00	黏土	基本稳定
G220	100	52~94	浅层	-	-0.65	-213.18	/	快速下降
G226	300	234~294	深层	-	-1.16	-179.86	黏土	快速下降
G204	200	99~144	单一结构潜水	-	-1.20	0.59	/	快速下降
G227	200	152~194	单一结构潜水	-	0.16	10.22	/	缓慢上升
G215	100	94~100	单一结构潜水	-	0.19	6.26	/	缓慢上升

注: / 表示无可压缩层。

测点位于拟合曲线两侧,这说明受季节开采影响,变形过程存在一定程度的弹性变形,而且地面沉降与地下水位变化存在一定滞后性。另外,从曲线末端可看出,随着深层承压水位的下降,地面沉降量并未有减缓的迹象,尚未到达明显的拐点,表明含水层仍处于快速压缩的阶段(图 7a)。

总体来看,2019—2021 年地面沉降量与深层承压水位近似呈线性关系,处于地面沉降的中期,未来一段时间内,沉降量将随着深层地下水位的下降继续快速增加。

2.4 地下水水质与地面沉降的关系探讨

前人大量研究表明,地下水位下降与地下水化学组分具有一定关联,同时地面沉降过程中也可促使黏土等弱透水层释放某种组分至含水层(Wang *et al.*, 2020)。因此,利用地下水位(2019—2022 年)、累积地面沉降量(2018—2021 年)以及 10 项水化学组分(2018—2021 年)对承压水区内地下水位

下降明显的 5 眼承压水监测井(G102、G106、G226、G220、G103)和非沉降区内地下水位无明显变化的监测井 G215 做时序相关性分析(图 8),并在此基础上定量计算其关联度(表 3),重点探讨地下水水质与地面沉降的关系。

5 眼承压水监测井中,地面沉降、地下水位以及水化学组分均无相关关系,但对于深层承压水监测井 G226 而言,地下水位和地面沉降均分别与 TDS、总硬度(TH)具有显著正相关关系(图 8b),这表明 TDS、TH 的含量受二者共同影响。此外,地面沉降还与 SO_4^{2-} 显著相关,因此初步认为地面沉降过程中,部分 SO_4^{2-} 可能源于黏土的压缩释放。另外,图 8c 显示,位于非沉降区或地下水位无明显变化区的监测井,地面沉降、地下水位也均与水化学组分无相关关系,进一步佐证了上述分析。

由表 3 可知,无论是地下水位(H)还是地面沉降(S)作为母序列,计算出的关联度均大于 0.70,关

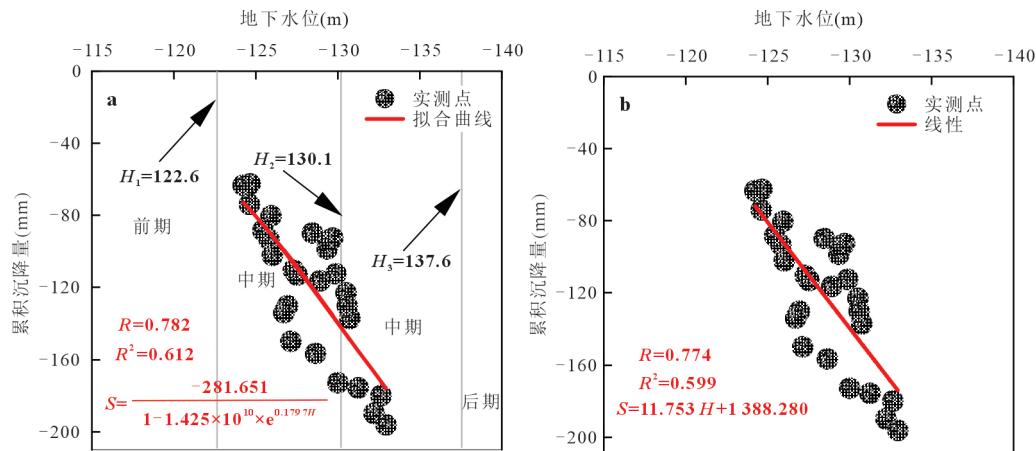


图7 监测井G226深层承压水位与地面沉降相关关系[Logistic(a)、线性(b)]

Fig.7 Correlation between deep confined groundwater level in G226 monitoring well and land subsidence [Logistic(a), linear (b)]

联度较好,与相关性分析得出的结论一致。相较地下水位而言,地面沉降与TDS关联度略大,可能主要受 SO_4^{2-} 的主导;相较地面沉降而言,地下水位与TH的关联度略大,表明地下水位变化一定程度促进了含钙镁矿物的溶解。

总之,同深层地下水系统的水化学变化相比,地面沉降对浅层承压水影响不显著。承压水位的降低只会在其含水层和上下两个隔水层中引起有效应力增加,并产生土层的固结沉降(周载阳, 2012),从而对地下水水质产生一定程度的影响。

3 讨论

考虑到第四系松散地层的天然固结过程在漫长的地质历史时期已完成,因此认为该区地面沉降与土体天然固结无关(郭清海, 2005)。由2.3.1节可知,北部单一结构潜水区地面抬升,未利用地为该区域土地利用类型,地层岩性以砂砾石和中粗砂为主,认为受地层压缩的影响较小,可能与地质构造有关,有待进一步细致研究。因资料有限,在2.4节中利用2019—2022年地下水位数据探讨地下水水质与地面沉降的关系,相比地下水位数据和地面沉降数据监测期延长1年。该区域地下水多年过度开采,且地下水位持续下降,认为这并不影响结果的可靠性。在最近的将来,应考虑在沉降区内减少深层承压水的开采,优化开采方案,这是防治地面进一步下沉的重要技术措施。当然,即便地下水位下降得到有效的控制,地面沉降也将会持续一段时间,因此着重考虑引发地面沉降的内因(可压缩层厚度)、外因(地下水位、土地利用),编制地面沉降

灾害风险图是必要的。

2.4节中结果显示,地面沉降与地下水 SO_4^{2-} 含量呈显著正相关,由此推断地面沉降过程中黏土压缩可能释放了一部分 SO_4^{2-} ,主要出于以下考虑:地下水 SO_4^{2-} 主要的自然和人为来源包括蒸发盐岩溶解(石膏、芒硝)和农田土壤肥料淋溶等(Zak *et al.*, 2020;曹慧丽等, 2023)。通过相关性热图(图8)可知,仅监测井G226地下水 SO_4^{2-} 与地面累积沉降量呈显著正相关,而其余均无相关关系。根据2019—2021年承压水区5眼承压水监测井 SO_4^{2-} 含量变化趋势可知(图9a),除监测井G226地下水 SO_4^{2-} 含量呈上升趋势以外,余下均表现出下降趋势,且 SO_4^{2-} 含量随地面沉降量增大而明显增大(图9b),一致性较好。研究区地下水中存在蒸发岩盐的溶解(白凡等, 2022),根据 $(\text{Na}^++\text{K}^++\text{Ca}^{2+})-\text{Cl}^-$ 与 SO_4^{2-} 的毫克当量关系(图9b)可知,2018~2020年监测井G226的水样点分布在石膏和芒硝溶解线左侧,而2021年水样点落在右侧,表明早期 SO_4^{2-} 主要来自溶解性的硫酸盐,近年 SO_4^{2-} 的急剧上升受到额外来源的影响,相关结论在付昌昌等人的研究中也得到验证(付昌昌等, 2014)。造成二者相关的主要原因可能是近年地面沉降量急剧增大,释放了部分 SO_4^{2-} ,尽管前期沉降量缓慢增大,但 SO_4^{2-} 含量增加主要取决于蒸发岩盐(石膏、芒硝)的溶解,也侧面说明黏土的压缩释放是有界线的。此外,尽管新疆的农用化肥中包括硫酸钾化肥(李浩等, 2008),但浅层承压水监测井G220地下水 SO_4^{2-} 含量呈多年下降趋势,因此不认为同在地面沉降区(农业区)的深层承压水监测井G226地下水 SO_4^{2-} 来源农田土壤肥料淋溶。结合表2和图8,监测井

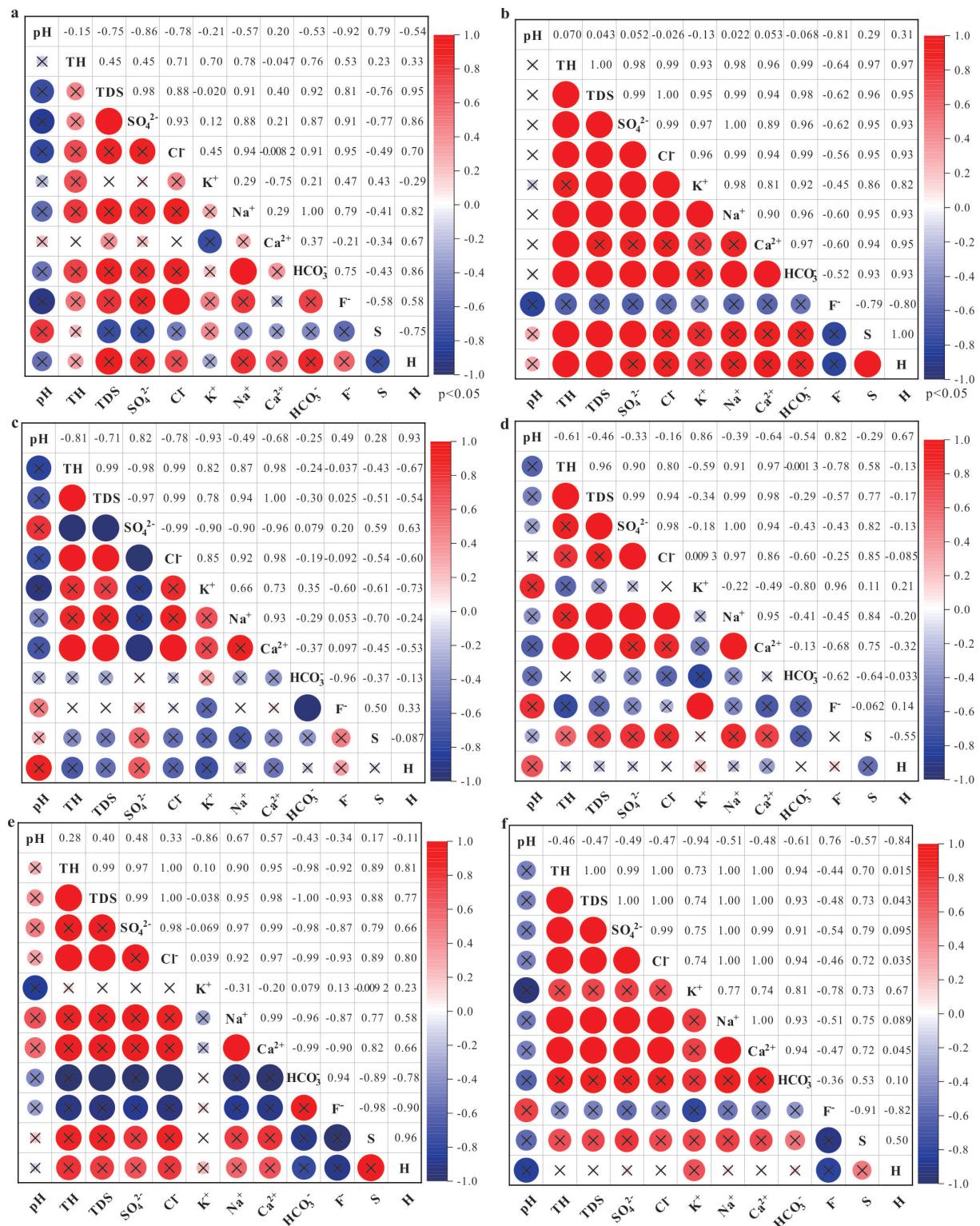


图 8 地下水位、水化学组分含量和地面沉降量的相关性热图[G220(a)、G226(b)、G215(c)、G106(d)、G103(e)、G102(f)]

Fig.8 Correlation heat map of groundwater level, hydrochemical components content and land subsidence[G220(a)、G226(b)、G215(c)、G106(d)、G103(e)、G102(f)]

G102 SO_4^{2-} 含量升高的原因主要是地下水位下降促进了蒸发盐的溶解。

最终认为地面沉降过程中,黏土压缩可能额外

释放了一部分的 SO_4^{2-} , 打破了原有的地下水平衡系统。为证实这一推断,今后还需开展研究区弱透水层的岩矿鉴定和化学组分测定,并进行室内压密

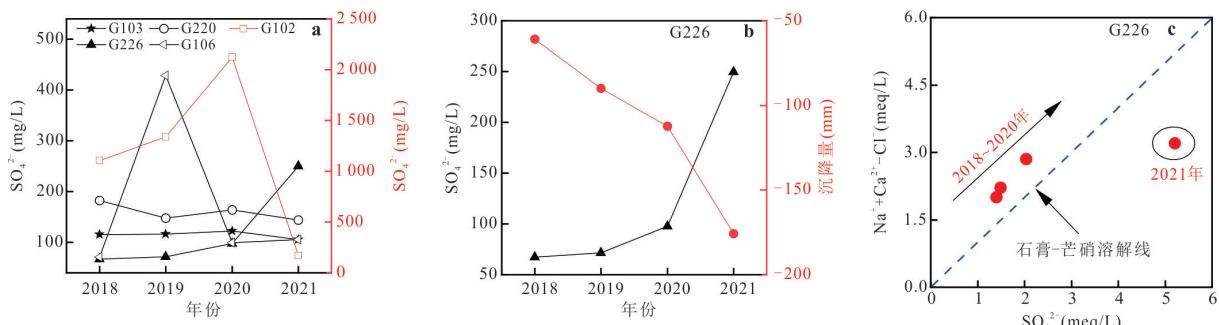


图9 吐鲁番南盆地承压水中SO₄²⁻含量时序变化(a)、监测井G226的地面沉降量与SO₄²⁻的关系(b)、(Na⁺+K⁺+Ca²⁺)-Cl⁻与SO₄²⁻关系(c)

Fig.9 Time series changes of SO₄²⁻ concentration in confined groundwater of South Turpan Basin(a), the relationship between land subsidence and groundwater SO₄²⁻ concentration the G226 monitoring well(b), the relationship between(Na⁺+K⁺+Ca²⁺)-Cl⁻ and SO₄²⁻of groundwater(c)

表3 地面沉降量、地下水位分别与地下水化学组分含量的灰色关联度(G226)

Table 3 Grey correlation degree between land subsidence, groundwater level and chemical components content of groundwater (G226)

母序列	子序列	关联度	母序列	子序列	关联度
地面沉降量 S	TH	0.71	地下水位 H	TH	0.72
	TDS	0.90		TDS	0.86
	SO ₄ ²⁻	0.86		S	0.83
	H	0.78			

释水、淋洗,再运用δD、δ¹⁸O-H₂O和δ³⁴S-SO₄²⁻同位素等手段分析地下水SO₄²⁻化学特征及来源.

4 结论

本文利用多种手段及监测数据,总结吐鲁番盆地平原区地下水位、地面沉降的时空变化特征,分析地下水位动态与地面沉降的关系,并探讨地面沉降对地下水水质的影响.研究结果对掌握吐鲁番盆地平原区地下水位下降和地面沉降状况,保护地下水资源,促进当地农业与矿业经济发展具有重要意义.

(1)吐鲁番盆地平原区地下水位动态类型包括开采型、水文—灌溉型和灌溉型3种,南盆地地下水位均表现出灌溉型特征.在北盆地,局部区域地下水为工业供水水源,但地下水仍以灌溉为主;而南盆地地下水主要用于农业灌溉,且以开采承压水为主;工业和农业开采地下水共同驱动2019—2022年吐鲁番盆地平原区地下水位整体呈现快速下降和缓慢下降的趋势.

(2)2017—2021年地面沉降均发生在吐鲁番南盆地内的高昌区、鄯善县的灌区.在高昌区东南方向有一处沉降漏斗,规模属大型地面沉降,面积310.2 km²;地面沉降漏斗内累积沉降量和平均沉降速率大致自西北向东南递增,最大值分别为-366 mm和-140 mm·a⁻¹,均出现在达朗坎乡.耕地和草地区域与该地面沉降漏斗区吻合度较高,表明农业灌溉大量抽取地下水是地面沉降漏斗出现的主要原因.

(3)在吐鲁番南盆地,地面沉降和地下水位分析发现,与承压水位相比,潜水位对地面沉降几乎无影响;同浅层承压水位相比,深层承压水位与地面沉降呈显著正相关(相关系数达1.00),为地面沉降的主要影响因素,这归因于沉降区内较厚的黏土层.逻辑斯谛曲线模型表明,地下水位与地面沉降基本呈线性关系(属沉降中期),地面沉降有进一步加剧的趋势.

(4)地面沉降仅与深层承压水中SO₄²⁻含量呈显著正相关(相关系数为0.95),而对浅层承压水中SO₄²⁻含量没有显著影响.深层承压水位持续下降,诱发地面沉降的过程中,黏土压缩固结可能额外释放了一部分的SO₄²⁻,从而影响了深层地下水水质.

References

- Bai, F., Zhou, J. L., Zeng, Y. Y., 2022. Hydrochemical Characteristics and Quality of Groundwater in the Plains of the Turpan Basin. *Arid Zone Research*, 39(2): 419–428 (in Chinese with English abstract).
- Cao, H. L., Li, W., Su, C. L., et al., 2022. Indication of Hydrochemistry and δ³⁴S-SO₄²⁻ on Sulfate Pollution of Groundwater in Daye Mining Area. *Earth Science*, 48(9):

- 3432—3443 (in Chinese with English abstract).
- Chen, L., 2014. The Study of Regional Hydrogeological Conditions and Groundwater Circulation in Turpan Basin (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Chen, C. X., Pei, S. P., 2001. Study on Groundwater Exploitation and Land Subsidence Model. *Hydrogeology & Engineering Geology*, (2): 5—8(in Chinese with English abstract).
- Cigna, F., Tapete, D., 2021. Urban Growth and Land Subsidence: Multi-Decadal Investigation Usinghuman Settlement Data and Satellite InSAR in Morelia, Mexico. *Science of the Total Environment*, 811: 152211. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152211>
- Cigna, F., Tapete, D., 2020. Present-Day Land Subsidence Rates, Surface Faulting Hazard and Risk in Mexico City with 2014—2020 Sentinel-1 IW InSAR-ScienceDirect. *Remote Sensing of Environment*, 253: 112161. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112161>
- Deng, J. L., 1987. Basic Methods of Grey System. Huazhong University of Science and Technology Press, Wuhan, 20—21(in Chinese with English abstract).
- Erban, L. E., Gorelick, S. M., Zebker, H. A., et al., 2013. Release of Arsenic to Deep Groundwater in the Mekong Delta, Vietnam, Linked to Pumping-Induced Land Subsidence. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(34): 13751—13756. <https://doi.org/10.1073/pnas.1300503110>
- Fu, C. C., Zhang, S., Zhang, W. J., et al., 2014. Hydrochemical Characteristics and Sources of Sulfate in Xijiteritary Confined Groundwater. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 32(4): 187—193 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Q. H., 2005. Groundwater System Evolution and Genesis of RelevantEnvironmental Problems: a Case Study at Taiyuan Basin, Shanxi Province, China(Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Hasan, M. F., Smith, R., Vajedian, S., et al., 2023. Global Land Subsidence Mapping Reveals Widespread Loss of Aquifer Storage Capacity. *Nature Communications*, 14(1): 6180. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41933-z>
- Herrera-Garcia, G., Ezquerro, P., Tomás, R., et al., 2021. Mapping the Global Threat of Land Subsidence. *Science*, 371(6524): 34—36. <https://doi.org/10.1126/science.abb8549>
- Hu, W. R., Fan, L., Tian, X. L., et al., 2013. Application of Excel in Logistic Curve Fitting. *Agriculture Network Information*, (3): 14—16(in Chinese with English abstract).
- Jones, C. E., An, K., Blom, R. G., et al., 2016. Anthropogenic and Geologic Influences on Subsidence in the Vicinity of New Orleans, Louisiana. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121, 3867—3887. <https://doi.org/10.1002/2015JB012636>
- Jin, M. G., 1991. The Forecast of Groundwater Regime in the Grey System. *Earth Science*, 16(1): 91—94, 78 (in Chinese with English abstract).
- Li, H., Tang, Z. F., Liu, C. F., et al., 2008. Comprehensive Exploitation and Research of Brine Resources in the Lop Nur Salt Lake, Xinjiang. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(4): 517—524 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., 2013. Spatiotemporal Evolution of Land Subsidence and Mechanism Discussion in the Yellow River Delta(Dissertation). Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, Qingdao(in Chinese with English abstract).
- Li, Y. L., 2017. The Integrated Governance Research of Groundwater Over-Exploitation Region in Turpan Basin (Dissertation). Xinjiang Agricultural University, Urumqi (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. J., Ma, T., Du, Y., et al., 2021. Compaction of Clay Aquitard: Principle, Technology and Hydrogeological Significance. *Earth Science Frontiers*, 25(5): 59—67(in Chinese with English abstract).
- Luo, Z. J., Wang, X., Dai, J., et al., 2023. Research on the Influence of Land Subsidence on the Minalle Groundwater Resources. *Earth Science*, 49(1): 238—252 (in Chinese with English abstract).
- Pearl, R., Reed, L. J., 1920. On the Rate of Growth of the Population of the United States since 1790 and Its Mathematical Representation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 6(6): 275—288. <https://doi.org/10.1073/pnas.6.6.275>
- Reed, L. J., Pearl, R., 1927. On the Summation of Logistic Curves. *Journal of the Royal Statistical Society*, 90(4): 729—746. <https://doi.org/10.1111/j.2397-2335.1927.tb02016.x>
- Ren, G. Y., Xu, M. Z., Chu, Z. Y., et al., 2005. Changes of Surface Air Temperature in China during 1951—2004. *Climatic and Environmental Research*, 10(4): 717—727(in Chinese with English abstract).
- Smith, R., Knight, R., Fendorf, S., 2018. Overpumping Leads to California Groundwater Arsenic Threat. *Nature Communications*, 9(1): 2089. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04475-3>
- Sun, X. H., 2012. The Relationship between Sand Creep Characteristic and Land Subsidence of Xi'an (Dissertation). Chang'an University, Xian (in Chinese with English abstract).
- Terzaghi, K., 1943. Theoretical Soil Mechanics. John Wiley and Sons, Inc, New York, 265—269.
- Wan, C. X., Liang, Z. Y., 1983. A Method Fitting the Logistic

- Curve. *Acta Ecologica Sinica*, 3(3): 288—296(in Chinese with English abstract).
- Wang, F., Miu, L.C., 2011. Study of Long-Term Deformation Characteristic of Sand Aquifers for Land Subsidence Caused by Groundwater Withdrawal. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30(S1): 3135—3140 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. Y., Gao, Z. J., Wang, Z., et al., 2019. Variation Characteristics of Groundwater Level in the Middle Reaches of the Heihe River Basin. *Water Resources and Power*, 37(4): 140—143(in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. D., Feng, G., Li, Z. W., et al., 2022. A Strategy for Variable-Scale InSAR Deformation Monitoring in a Wide Area: a Case Study in the Turpan-Hami Basin, China. *Remote Sens*, 14: 3832. <https://doi.org/10.3390/rs14153832>
- Wang, Y. X., Li, J. X., Ma, T., et al., 2020. Genesis of Geogenic Contaminated Groundwater: As, F and I. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(24): 2895—2933. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1807452>
- Yang, Y., Zheng, F. D., Liu, L. C., et al., 2013. Study on the Correlation between Groundwater Level and Ground Subsidence in Beijing Plain Areas. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 41(8):44—48(in Chinese with English abstract).
- Ye, S. J., Xue, Y. Q., Wu, J. C., et al., 2016. Progression and Mitigation of Land Subsidence in China. *Hydrogeology Journal*, 24(3): 685—693. <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1356-9>
- Zak, D., Hupfer, M., Cabezas, A., et al., 2020. Sulphate in Freshwater Ecosystems: a Review of Sources, Biogeochemical Cycles, Ecotoxicological Effects and Bioremediation. *Earth-Science Reviews*, 212: 103446. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103446>
- Zhang, Y., Xue, Y. Q., Wu, J. C., et al., 2009. Experimental Research on Creep of Shanghai Sands. *Rock and Soil Mechanics*, 30(5):1226—1230(in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z. Y., 2012. Mechanism Research of Land Subsidence Caused by Groundwater Extraction. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 40(3): 22—26(in Chinese with English abstract).
- 特征及水质评价. *干旱区研究*, 39(2):419—428.
- 曹慧丽, 李伟, 苏春利, 等, 2023. 水化学及硫同位素对大冶矿区地下水硫酸盐污染的指示. *地球科学*, 48(9): 3432—3443.
- 陈崇希, 裴顺平, 2001. 地下水开采—地面沉降模型研究. *水文地质工程地质*, (2):5—8.
- 陈鲁, 2014. 吐鲁番盆地区域水文地质条件及地下水循环研究(博士学位论文). 北京:中国地质大学.
- 邓聚龙, 1987. 灰色系统基本方法. 武汉:华中理工大学出版社.
- 付昌昌, 张晟, 张文静, 等, 2014. 西吉县第三系承压水中硫酸盐的水文地球化学特征及其来源. *干旱地区农业研究*, 32(4): 187—193.
- 郭清海, 2005. 山西太原盆地孔隙地下水系统演化与相关环境问题成因分析(博士学位论文). 武汉:中国地质大学.
- 胡文冉, 范玲, 田晓莉, 等, 2013. Excel在Logistic曲线拟合中的应用. *农业网络信息*, (3):14—16.
- 靳孟贵, 1991. 地下水动态的灰色预测. *地球科学*, 16(1):91—94, 78.
- 李浩, 唐中凡, 刘传福, 等, 2008. 新疆罗布泊盐湖卤水资源综合开发研究. *地球学报*, 29(4):517—524.
- 李英连, 2017. 吐鲁番盆地地下水超采区综合治理研究(硕士学位论文). 乌鲁木齐:新疆农业大学.
- 刘妍君, 马腾, 杜尧, 等, 2021. 黏性土弱透水层压实作用:原理、技术及其水文地质意义. *地学前缘*, 28(5):59—67.
- 刘勇, 2013. 黄河三角洲地区地面沉降时空演化特征及机理研究(博士学位论文). 青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所).
- 骆祖江, 王鑫, 代敬, 等, 2023. 地面沉降对地下水可采资源影响研究. *地球科学*, 49(1): 238—252.
- 任国玉, 徐铭志, 初子莹, 等, 2005. 近54年中国地面气温变化. *气候与环境研究*, 10(4):717—727.
- 孙晓涵, 2012. 西安地面沉降与砂土蠕变关系初探(硕士学位论文). 西安:长安大学.
- 万昌秀, 梁中宇, 1983. 逻辑斯谛曲线的一种拟合方法. *生态学报*, 3(3):288—296.
- 王非, 缪林昌. 2011. 抽水地面沉降中含水层长期变形特性研究. *岩石力学与工程学报*, 30(S1):3135—3140.
- 王贞岩, 高宗军, 王姝, 等, 2019. 黑河流域中游地区地下水水位多年变化特征. *水电能源科学*, 37(4):140—143.
- 杨勇, 郑凡东, 刘立才, 等, 2013. 北京平原区地下水水位与地面沉降关系研究. *工程勘察*, 41(8):44—48.
- 张云, 薛禹群, 吴吉春, 等, 2009. 上海砂土蠕变变形特征的试验研究. *岩土力学*, 30(5):1226—1230, 1236.
- 周载阳, 2012. 地下水开采引起地面沉降的机理研究. *工程勘察*, 40(3):22—26.

中文参考文献

白凡, 周金龙, 曾妍妍, 2022. 吐鲁番盆地平原区地下水水化学