

DOI: 10.12401/j.nwg.2023045

## 黑河干流中游地区近 40 年来地下水 环境变化特征及其成因

冯嘉兴<sup>1</sup>, 蒙琪<sup>1</sup>, 王茜<sup>2,\*</sup>

(1. 甘肃省地质矿产勘查开发局水文地质工程地质勘察院, 甘肃 张掖 734000; 2. 中国地质调查局  
水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051)

**摘要:** 长期的监测结果表明自 20 世纪 80 年代以来黑河中游张掖地区地下水环境发生显著变化。笔者应用时间序列分析、相关性分析和遥感解译等方法分析近 40 年来该地区地下水水位、地下水水化学、黑河出山径流量、气象要素、绿洲面积演变规律, 识别地下水环境对气候变化及人类活动的响应规律。结果表明, 研究区中部区域地下水水位变化与出山径流量相关性显著, 与张掖地区降水量相关性差, 气候变化通过影响黑河上游径流量进而对研究区中部地下水水位产生影响, 研究区降水变化对地下水水位影响微弱; 研究区西部、东部地下水水位变化受人类活动影响显著, 东部山前区受河流弃水量持续增大影响, 近年来地下水水位显著回升, 西部明花乡至骆驼城一带井灌区由于地下水大量开采, 地下水水位仍处于持续下降状态; 研究区南部山前带河流两侧一定范围内地下水水化学特征多年保持稳定, 其余地区地下水水化学特征变化显著。

**关键词:** 气候变化; 人类活动; 地下水环境; 地下水水位

中图分类号: P641.69; X523

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)04-0243-11

### Characteristics and Causes of Groundwater Environment Changes in the Middle Reaches of the Mainstream of the Heihe River in Recent 40 Years

FENG Jiaxing<sup>1</sup>, MENG Qi<sup>1</sup>, WANG Xi<sup>2,\*</sup>

(1. Institute of Hydrogeology and Engineering, Geology of Gansu Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Zhangye 734000, Gansu, China; 2. Center For Hydrogeology and Environmental Geology, CGS, Baoding 071051, Hebei, China)

**Abstract:** The long-term monitoring results have shown significant changes in the groundwater environment in the middle reaches of the Heihe River in Zhangye area since the 1980s. Time series analysis, correlation analysis and remote sensing interpretation were applied to analyze the evolution of groundwater level, groundwater hydrochemistry, mountain runoff of Heihe river, meteorological elements, and oasis area in this area in recent 40 years, and to identify the response of groundwater environment to climate change and human activities. The results demonstrate that groundwater level changes in the central part of the study area are significantly correlated with the runoff from the mountain, and poorly correlated with the precipitation in Zhangye area. Climate change affects the groundwater level in the central part of the study area by affecting the runoff in the upper reaches of

收稿日期: 2022-10-24; 修回日期: 2023-03-24; 责任编辑: 贾晓丹

作者简介: 冯嘉兴(1967-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为水工环地质、矿产地质。E-mail: 3581572887@qq.com。

\* 通讯作者: 王茜(1985-), 女, 工程师, 硕士, 主要研究方向为水文学及水资源。E-mail: wangq@mail.cgs.gov.cn。

Heihe river. Rainfall change in the study area has a weak impact on the groundwater level. The change of groundwater level in the west and east of the study area is significantly affected by human activities. Affected by the continuous increase of surplus water, the groundwater level in the eastern pre-mountain area has risen significantly in recent years, while the groundwater level in the well irrigation area from Minghua township to Camel City in the west is still in a state of continuous decline due to the massive exploitation of groundwater. The groundwater chemical characteristics in a certain range on both sides of the river in the southern pre-mountain area have remained stable for many years, while significant changes have been observed in other areas.

**Keywords:** climate change; human activities; groundwater environment; groundwater level

地下水在维持西北干旱区生态环境及经济社会发展方面起着重要作用,由于西北地区气候干旱少雨,生态环境脆弱(李文明等, 2022),地下水环境对气候变化及人类活动较为敏感,气候变化和人类活动已对西北地区地下水循环演化产生深刻影响(党学亚等, 2022)。如在气候变化和人类活动共同影响下,格尔木地区地下水水位发生明显变化(刘得俊, 2016);受生态调水影响,额济纳绿洲地下水水位下降趋势得到很大程度的遏制(张震域等, 2019)。气候变化和人类活动双重影响下地下水动态响应机制逐渐受到重视。Bekele等(2010)利用SWAT水文模型发现,气候变化对Fox Catchment地下水补给有显著影响。Green等(2011)研究了气候变化对地下水开采的影响,预测了极端干旱年份地下水水位变化趋势。张楠(2017)采用灰色关联度法定量分析了伊舒盆地气象要素和人类活动与地下水动态的相关性,并识别了气象要素和人类活动对地下水动态的影响程度。黑河流域作为减缓西北地区生态环境恶化的重要生态防线,地下水在维持流域生态环境方面发挥着重要作用,地处黑河干流中游的张掖盆地作为黑河流域地表水与地下水相互转换频繁(钱云平, 2005)、地表水来水量受上游气候变化影响强烈(李卓仑, 2012; 牛最荣, 2013)、人工绿洲扩张及地下水高强度开采等人类活动对地下水影响强烈的地区(米丽娜, 2016; 王浩等, 2020),是开展干旱区气候变化与人类活动双重影响下地下水环境响应机制研究的理想区域。连英立(2011)以张掖盆地长系列地下水监测数据为基础,探讨了张掖盆地地下水变化对气候变化响应的非均一性特征和机制。闫云霞等(2014)通过构建地下水“消耗因子”和“补给因子”并结合降水、径流量变化,揭示了张掖盆地中部沿河灌区地下水水位变化原因。上述研究均利用2010年以前张掖盆地长序列地下水监测数据对地下水水位变化原因进行系统分析。近年来,随

着气候持续变化、地下水超采治理、河流生态补水,张掖盆地地下水环境发生了新的变化。同时,前人研究较少涉及张掖地区地下水水化学特征对气候变化及人类活动的响应分析。笔者系统分析1985~2018年地下水水位、水化学特征、出山径流量、绿洲面积、降水、气温变化规律,全面解析张掖地区地下水环境变化特征及其成因,可为西北内陆盆地生态环境保护与水资源合理开发利用提供科学依据。

## 1 研究区概况

### 1.1 地理位置

黑河流域属西北内陆河流域,流域纵贯青海、甘肃、内蒙3省区,地理坐标为E 97°37'~102°06', N 37°44'~42°40',流域面积为128 283.4 km<sup>2</sup>,是中国西北地区第二大内陆河流域。黑河流域地势南高北低,纵穿山地、平原及高原3个地貌类型区。河西走廊中段的张掖盆地位于黑河干流中游地区,为夹持于南部祁连山与北部龙首山之间的平原区(图1)。

### 1.2 含水层特征及地下水循环规律

研究区南部山区各河流携带粗颗粒物出山后在盆地内迅速堆积,构成地下水的贮存空间。第四系含水层岩性变化总趋势为由南部山前冲洪积扇向北部细土平原变细。由于黑河冲洪积作用明显,含水层自南向北由单一结构大厚度砾卵石层渐变为上部黏性土夹砂、砂砾石,下伏大厚度砂砾石的二元结构,地下水类型由潜水变为上部潜水、下部承压水。

研究区地下水在山前冲洪积平原区得到地表水入渗、渠系和田间灌溉水入渗、山区侧向径流补给后,从南西向北东径流。在细土平原区由于含水层颗粒变细,地形趋缓,地下水径流受阻,形成泉水溢出带向河流排泄,并伴随地下水蒸发蒸腾排泄;本区人类活动强烈,地下水开采也是重要的排泄方式。

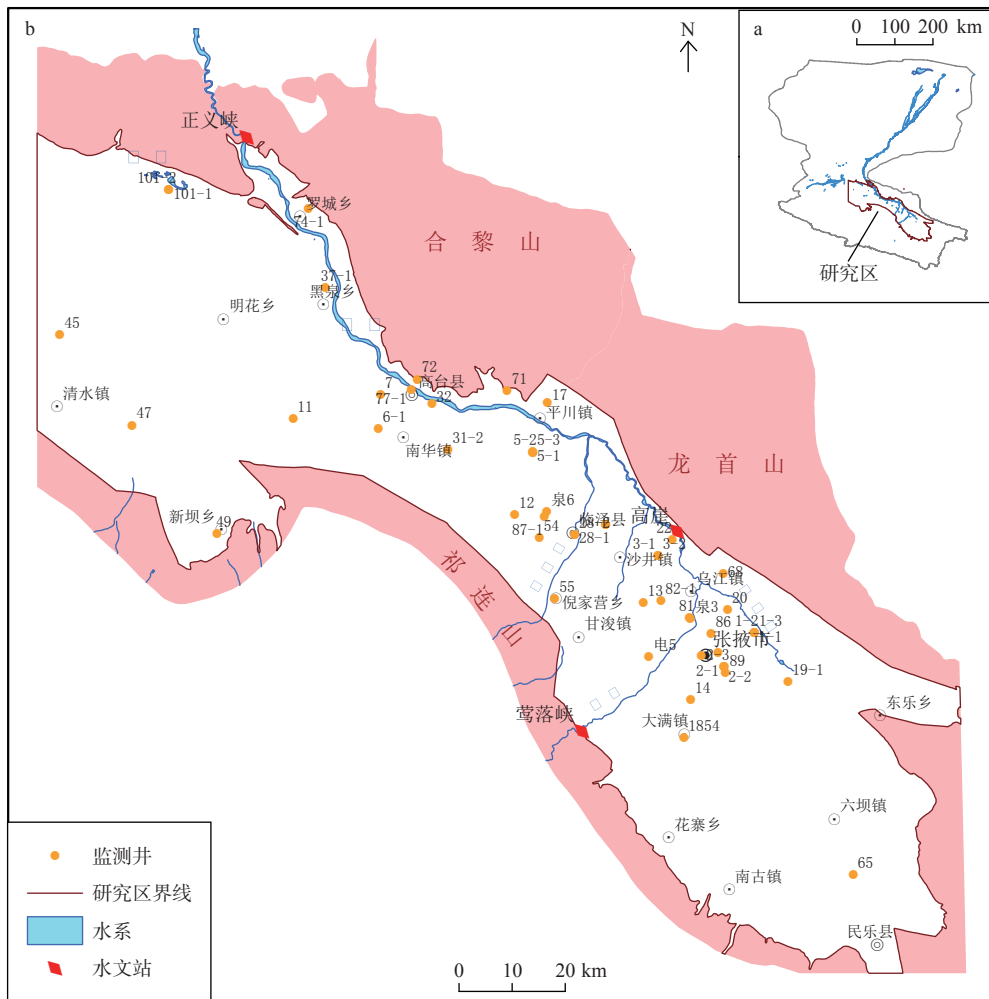


图 1 研究区在黑河流域中的位置(a)及研究区范围图(b)

Fig. 1 (a) The location of the study area in Heihe river basin and (b) scope map of study area

## 2 数据来源及研究方法

### 2.1 数据来源

文中所用气象资料选取张掖气象站 1953~2016 年气象数据, 包括年均气温、年均降水量。水文资料选取位于黑河干流出山口的莺落峡水文站 1953~2016 年年均径流量数据。地下水水位、水化学监测资料选取甘肃省地质矿产勘查开发局水文地质工程地质勘察院观测系列长且连续性好的 50 眼监测井 1985~2018 年监测数据, 监测井位置见图 1。遥感数据为 Spot6、Landsat 卫星多光谱数据。

### 2.2 研究方法

笔者以研究区气象、水文、地下水动态长时间序列数据为基础, 采用线性拟合方法分析各要素的变化趋势, 用最小二乘法估计拟合参数。采用相关分析方

法分析地下水水位与降水、出山径流的关系。突变检验方法较多, 每种方法都有优缺点, 存在检验结果因方法不同而不同的现象, 使用多种方法进行比较, 并指定严格的显著性水平进行检验显得尤为必要。本研究采用 Mann-Kendall(M-K)趋势检验和 Pettitt 突变检验分析研究区气温、降水量变化趋势及其显著性和突变性。

## 3 结果与分析

### 3.1 气温、降水量、黑河干流出山径流量及人工绿洲时空分布年际变化特征

张掖站在 1953~2016 年间多年平均气温为 7.5 °C, 呈现波动上升趋势, 平均升幅为 0.33 °C/10a, 多年平均降水量为 128.6 mm, 平均增幅为 1.1 mm/10a(图 2)。通过 M-K 法对张掖站多年平均气温和年平均降水量

进行趋势分析,年平均气温的M-K检验统计量Z值为6.71,且通过了0.01的显著性检验,进一步表明年平均气温在1953~2016年间上升趋势十分显著。根据年平均气温M-K突变检验曲线(图3),自1986年开始张掖地区的气温开始呈上升趋势,UF线在1993年超过+1.96的信度线,表明1993年之后增温趋势愈加明显。UF线和UB线相交于1996年,表明虽然以1986年为分界点气温由下降转为上升,但1996年为年平均气温的突变点。该结果与中国西北地区年平均气温的变化趋势一致。年平均降水量的M-K检验统计量Z值为0.44,未通过0.1的显著性检验,表明其呈现出微弱的增加趋势。张掖地区1953~2016年气温、降水量变化趋势与中国西部地区近年来气候暖湿化的变化趋势一致。

黑河干流年平均出山径流量在1953~2016年间总体保持上升趋势,多年平均增幅为 $0.65 \times 10^8 \text{ m}^3/10\text{a}$ ,其中2001年以后增幅为 $3.5 \times 10^8 \text{ m}^3/10\text{a}$ ,2001年以前

增幅为 $0.26 \times 10^8 \text{ m}^3/10\text{a}$ ,黑河干流出山径流量多年变化曲线见图4。对年平均径流量进行M-K突变检验发现,在95%置信水平上年径流量的突变点在2006年。Pettitt突变检验的结果表明,在99%的置信水平下,年均径流量的突变年份为2001年。通过对比,本研究采用置信水平较高的检验结果,即年均径流量的增加是突变现象,突变点为2001年。

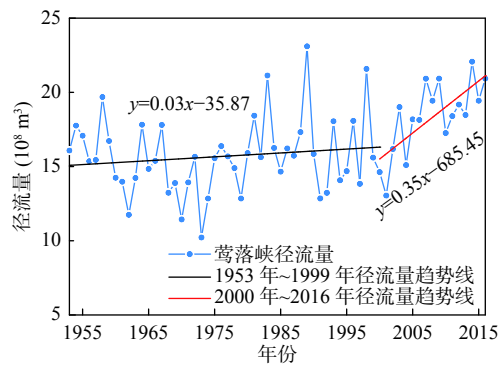


图4 黑河干流出山径流量多年变化趋势线

Fig. 4 Multi-year trend line of mountain runoff from the main stream of the Heihe river

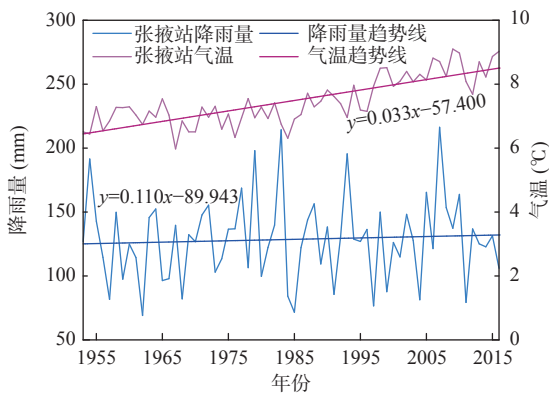


图2 1953~2016年张掖站年均气温、降水量变化曲线

Fig. 2 Variation curves of annual temperature and rainfall of Zhangye station from 1953 to 2016

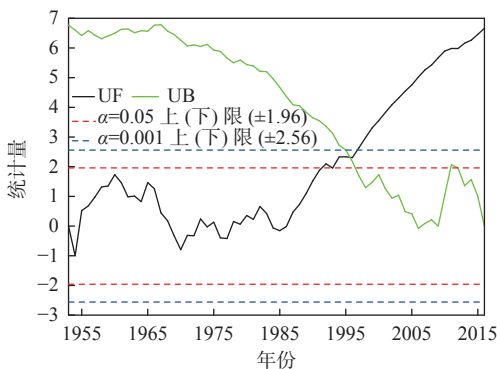


图3 张掖站1953~2016年平均气温M-K统计量曲线

Fig. 3 M-K statistic curve of annual average temperature in Zhangye station from 1953 to 2016

研究区人工绿洲主要靠引地表水灌溉和开采地下水维持,绿洲面积的时空变化反映了引地表水灌溉及地下水开采等水资源开发历史的演变。研究区人工绿洲扩张规律存在显著空间差异,张掖绿洲、临泽绿洲主要在原有老绿洲基础上向四周扩张;肃南县政府自1990年决定开发明花乡荒区后,明花乡绿洲由南向北快速扩张;高台县骆驼城绿洲扩张规律与明花乡绿洲一致。人工绿洲面积变化可划分为快速扩张和稳步发展两个阶段。1990年以来研究区耕地面积呈现出明显增大趋势,其中1990~2002年全区耕地进入快速扩张阶段,研究区中、西部绿洲扩张显著,特别是西部明花乡至骆驼城一带绿洲面积剧增,东部绿洲面积保持稳定态势。2002~2014年研究区绿洲扩张速度放缓,但明花乡至骆驼城一带仍为全区绿洲扩张最快区域(图5)。

3.2 地下水水位、水化学时空变化特征

根据研究区50个地下水监测井长序列监测数据,结合前人关于研究区2009年以前地下水水位变化趋势研究成果(连英立,2011)和2015年后对研究区地下水水位开展的持续高密度、高频监测与统测工作认识,绘制1985~2001年及2001~2018年研究区地下水水位变差图(图6、图7)。可以看出,研究区北部细土平

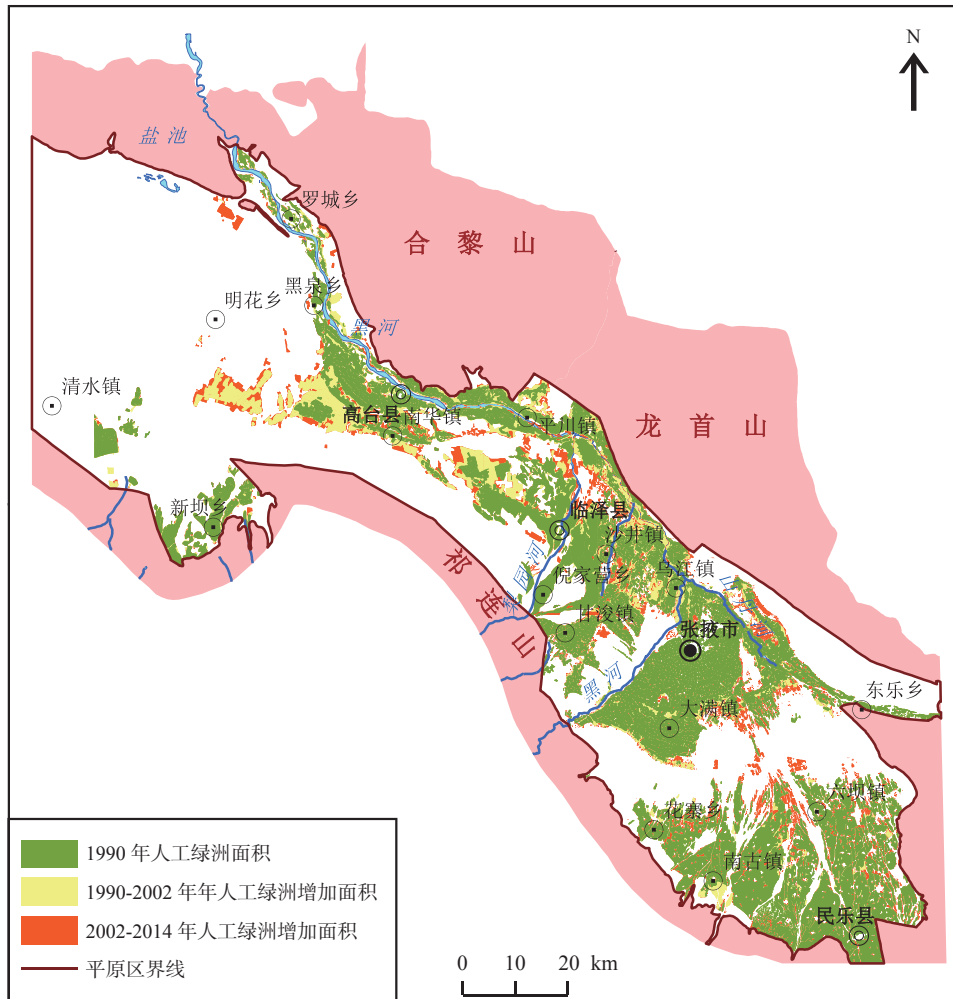


图5 研究区1990~2014年人工绿洲扩张图

Fig. 5 Expansion map of artificial oases in the study area from 1990 to 2014

原沿河绿洲区地下水水位总体保持稳定趋势,研究区南部山前洪积扇群带地下水水位波动明显,尤以研究区中部黑河干流冲洪积扇、研究区东部民乐山前地带、研究区西部骆驼城地区地下水水位变化趋势最为显著(图6、图7)。黑河干流山前冲洪积扇地区水位1985~2001年持续下降,2001年以后持续上升(图8);研究区东部地下水水位1985~2001年地下水水位持续下降,2002~2018年水位下降速度显著降低,2016年以来水位快速回升(图9);研究区西部明花乡至骆驼城一带地下水水位从1985到2018年持续下降(图10)。

研究区潜水水化学类型中阳离子类型变化较小,因此主要用阴离子类型变化来表征潜水水化学类型变化。1985~2016年,研究区南部山前带河流两侧一定范围内潜水水化学类型保持稳定趋势,其

余地区水化学类型变化显著(图11、图12)。从不同水化学类型的潜水分布面积占比来看,与1985年相比, $\text{SO}_4^{2-}$ 型水分布面积变化最大, $\text{SO}_4^{2-}$ 型水分布面积增加了16.91%,主要位于研究区西部, $\text{HCO}_3^-$ 型水次之, $\text{Cl}^-$ 型水最小。各水化学类型潜水分布面积占比变化(图13)。北部细土平原区承压水水化学特征保持稳定趋势,典型监测孔TDS值变化曲线(图14)。

### 3.3 地下水水位、水化学特征时空变化原因解析

黑河中游山前冲洪积平原是研究区地下水的主要补给区,黑河出山径流主要在这一区域入渗补给地下水。根据前述地下水水位变差分析及出山径流量演变趋势分析结果,选取2001~2018年黑河冲洪积扇中上部含水层单一结构区、距河道较近的潜水监测井电5及黑河冲洪积扇中下部细土平原多层结构、含水

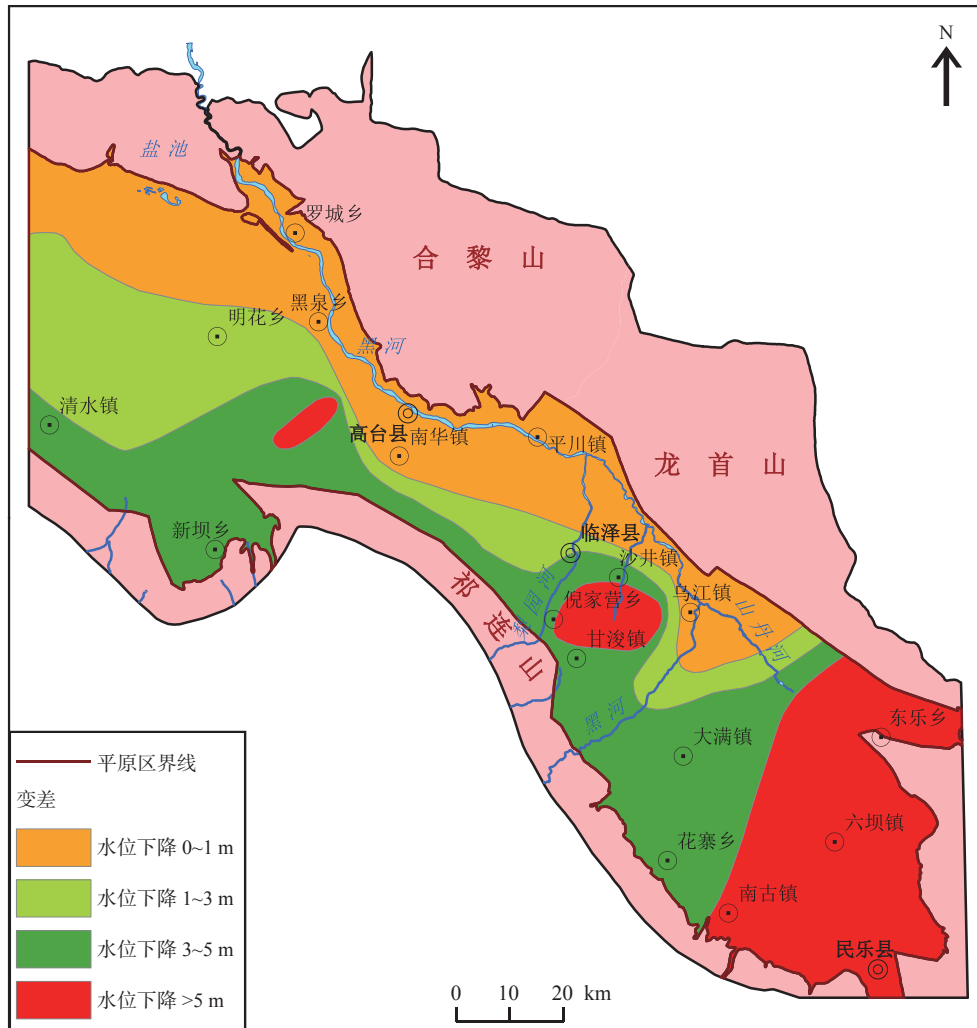


图6 研究区1985~2001年地下水水位变差图

Fig. 6 Groundwater level variation map of the study area from 1985 to 2001

层区潜水监测井3-2和承压水监测井3-1的地下水水位监测数据与该时段黑河出山径流量做相关性分析,研究黑河出山径流量显著增大即对地下水系统“刺激”最强烈时段地下水水位响应特征。结果表明,黑河出山径流量与监测井电5、3-2地下水水位在0.05水平(双侧)上存在显著的相关关系,相关系数分别为0.505、0.486;黑河出山径流量与监测井3-1不存在显著相关关系。地下水水位与出山径流量相关性沿黑河干流向由南向北递减,即在冲洪积平原两者相关性较高,而在细土平原相关性较弱,细土平原区相关性在垂向上表现出由浅而深递减的趋势。选取张掖、高台气象站附近的潜水监测井地下水水位长序列监测数据与年降水量做相关性分析,相关系数分别为0.32、-0.18,地下水水位与降水量在长时间序列上相关程度低。1985~2001年受人工绿洲扩张大规模引水灌溉

影响,黑河出山径流量在入渗补给地下水之前被大规模引走灌溉,导致线状集中入渗量持续减少,同时渠道衬砌率不断提高,是研究区中部黑河干流冲洪积平原地下水水位下降的原因。

前人对研究区东部山前1985~2001年地下水水位下降原因进行了分析,认为出山径流被拦截是导致区域地下水水位下降的主要原因之一(李文鹏等,2010)。近40年来东部地区人工绿洲面积保持稳定,表明这一区域农业需水量未发生明显改变。对2010年以来东部山前平原地区民乐县境内地表水径流量进行分析发现,2013年以来民乐县祁连山山前平原上游河流弃水量显著增大,河流弃水量与65观测孔水位显著相关(图15),表明东部民乐县山前带地下水水位上升主要受河流弃水量增大影响。

研究区西部肃南县明花乡至高台县骆驼城镇一

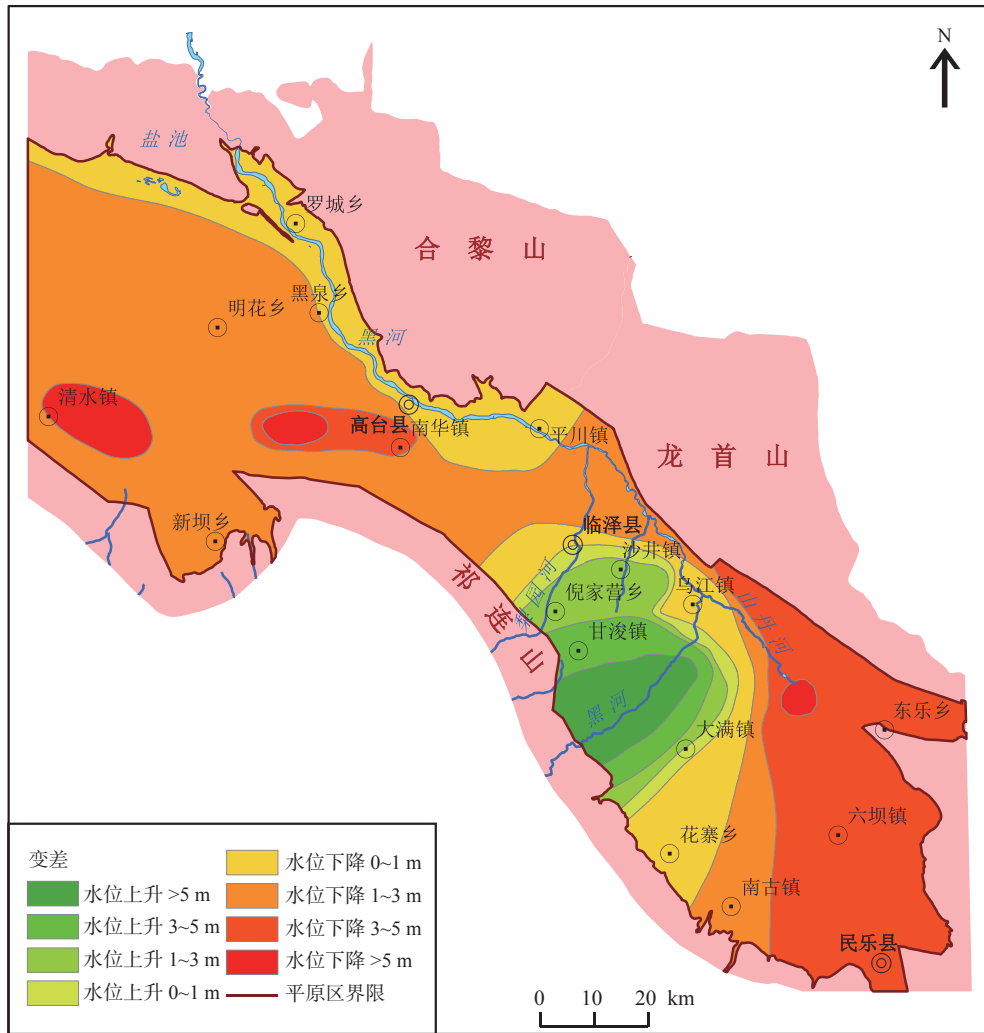


图 7 研究区 2001~2018 年地下水水位变差图

Fig. 7 Groundwater level variation map of the study area from 2001 to 2018

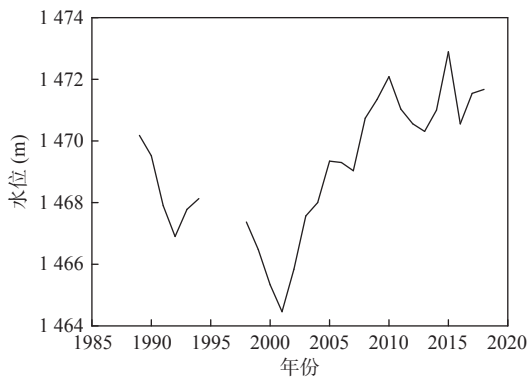


图 8 电 5 号观测孔水位变化曲线

Fig. 8 Groundwater level change curve of observation hole Electric 5

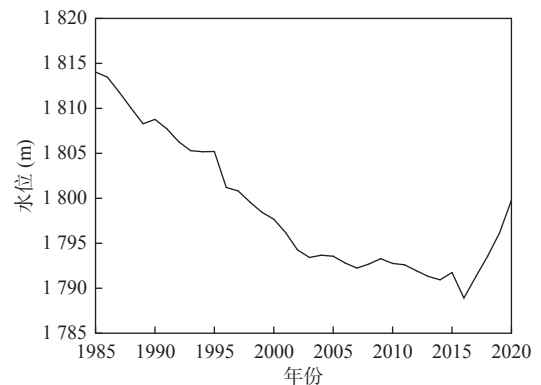


图 9 65 号观测孔水位变化曲线

Fig. 9 Groundwater level change curve of observation hole No. 65

带地下水水位从 1985 年至今仍呈持续下降趋势。以骆驼城地区为例, 本区农田主要靠井灌, 地下水开采量由 20 世纪 80 年代的  $2\,000 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ , 上升到 2018 年

的  $10\,000 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。近年来人工绿洲面积已保持稳定, 地下水开采量也保持稳定状态, 明花乡地下水开发利用情况与骆驼城镇相似。骆驼城镇、明花乡区域地下

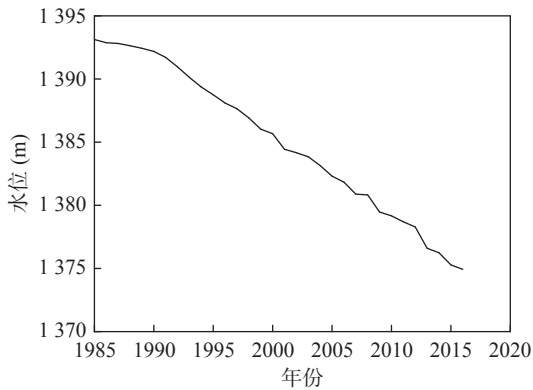


图 10 11 号观测孔水位变化曲线

Fig. 10 Groundwater level change curve of observation hole No. 11

水主要接受摆浪河出山径流入渗后侧向补给,由于上游修建水库,大部分地表水在出山后被引走灌溉;马

营河对本区也有少量的侧向补给,马营河 90% 的水量在出山前被引走灌溉,仅洪水期才有少量地表径流在明花乡一带入渗补给地下水。本区第四系以中细砂夹粉质黏土为主,含水层渗透性及富水性差,据抽水试验,含水层渗透系数仅为 3~5 m/d。持续高强度开采地下水、含水层渗透性较差、上游地下水补给来源被拦截 3 个因素相叠加是本区地下水水位持续下降的主要原因。

研究区水化学类型变化最强烈的地区与绿洲面积增加最快的地区存在一致性,这一区域也是地下水开发利用程度较高的区域。笔者在这一区域选择代表性样点,开展了不同深度土壤易溶盐分析,发现表层土壤(0~20 cm)的含盐量、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 离子含量一般大于深层土壤,大部分属于盐碱土,

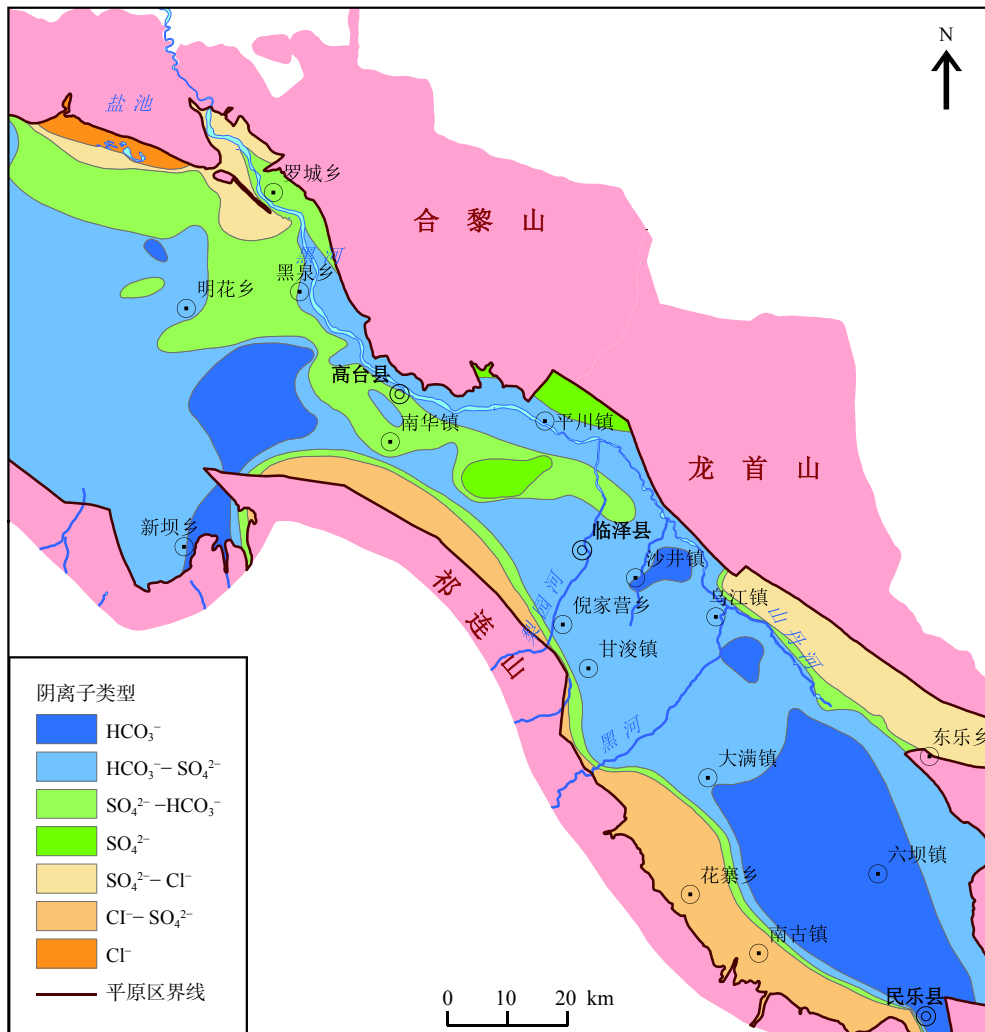


图 11 1985 年研究区潜水水化学类型图

Fig. 11 The phreatic water chemical types of the study area in 1985



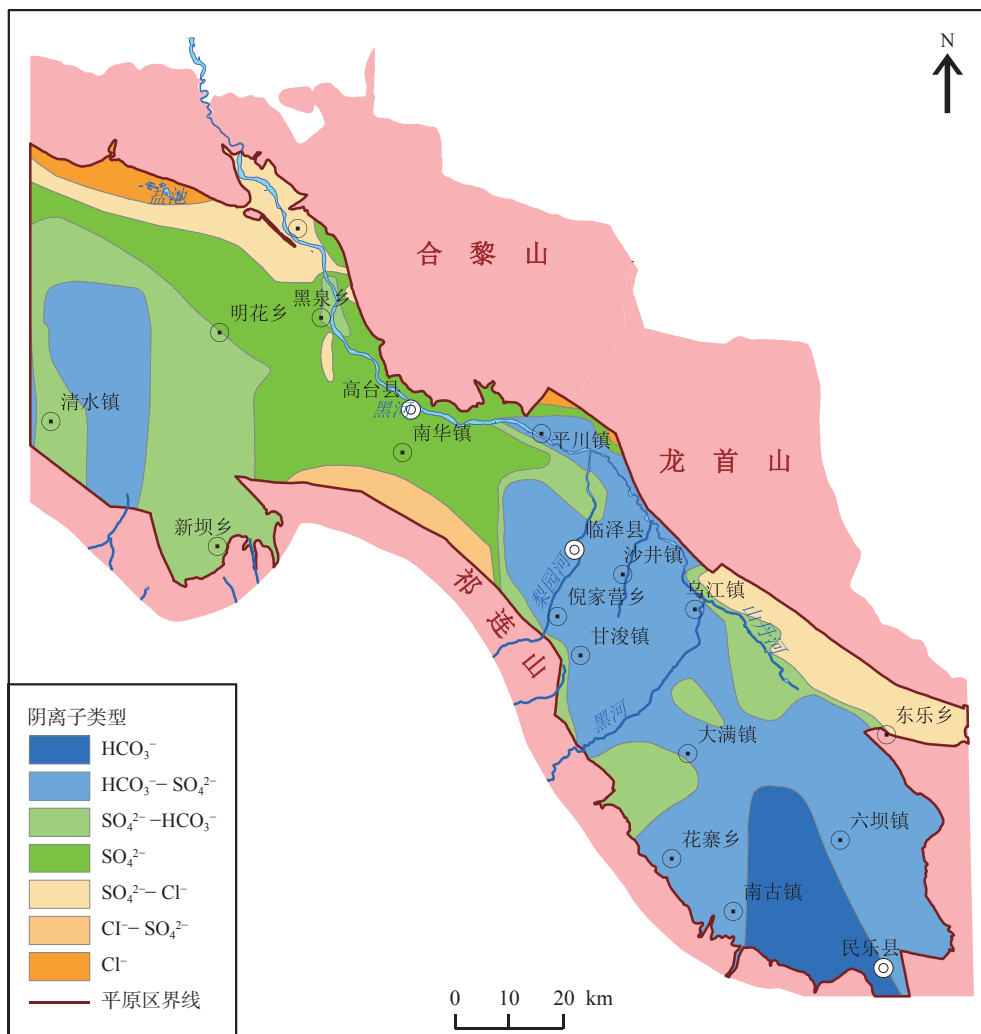


图 12 2016 年研究区潜水水化学类型图

Fig. 12 The phreatic water chemical types of the study area in 2016

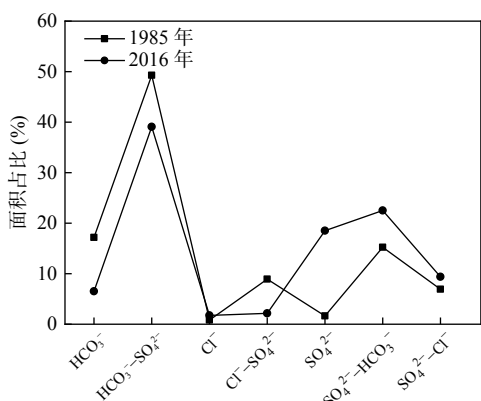


图 13 不同水化学类型潜水分布面积占比变化曲线

Fig. 13 Change curves of diving distribution area of different hydrochemical types

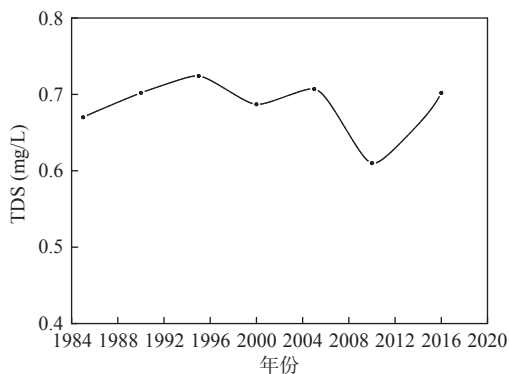


图 14 研究区北部细土平原区典型承压水监测井 TDS 值变化曲线

Fig. 14 TDS value variation curve of typical pressurized water monitoring wells in the fine soil plain area in the northern part of the study area

盐渍化类型多为 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>型。深层土壤盐渍化类型为 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>型和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>·Cl<sup>-</sup>型。地下水开采量增大后, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>型

的灌溉水及大气降水在入渗过程对包气带中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>溶滤作用是本区地下水水化学类型变化的主要原因。

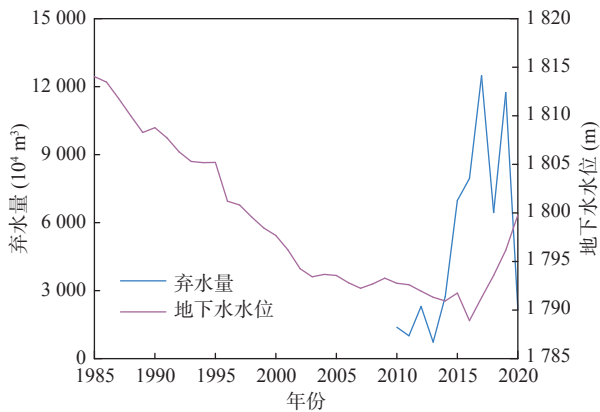


图 15 民乐县河流弃水量与山前地下水水位变化趋势线  
Fig. 15 The trend line of river discarded water and groundwater level in front of mountains in Minle County

## 4 讨论

据前人研究,黑河出山口年径流量与黑河源区年降水量存在正相关关系(廉耀康, 2019),本研究发现黑河出山径流量与研究区南部山前冲洪积扇地下水水位相关性较好,而研究区内降水量与地下水水位相关性差,所以气候变化主要通过影响出山径流量间接对研究区地下水产生影响。Wang 等(2021)在柴达木盆地格木河流域平原区基于 1977~2017 年长序列观测数据的研究也发现降水量与地下水水位相关性差。这一认识在西北干旱内陆盆地可能具有普适性,西北内陆盆地降水入渗补给地下水可能并没有因为气候暖湿化而显著增多,气候暖湿化还会引起包气带水分蒸发量增大,对减小降水入渗补给地下水也有一定作用。

由于山前冲洪积扇区沉积了巨厚的第四系松散砂卵石,是一巨大的“地下水库”,其极强的调蓄作用可能是维持盆地北部细土平原区近 40 年来地下水水位总体保持稳定的重要原因,据此可进一步推测北部细土平原区依赖地下水的生态系统稳定性较好。

根据研究区东部山前冲洪积扇上部地下水水位持续下降原因,可以推测在黑河出山径流量偏小的年份,黑河干流冲洪积扇顶部地下水水位在持续下降,限于该区域地下水埋深大于 200 m,地下水动态观测点很少,这一规律很难被直接观测。

## 5 结论

(1)研究区中部地下水水位下降与上升与出山径

流量相关性显著,与张掖地区降水量相关性差,气候变化通过影响黑河上游径流量进而对研究区中部地下水水位产生影响,研究区内降水变化对地下水水位影响微弱。1985~2001 年,研究区中部地下水水位下降原因是大量引地表水灌溉导致黑河出山后由集中线状补给演变为线状与面状补给。2001~2018 年受上游来水偏丰影响,研究区中部水位上升显著。

(2)研究区西部、东部地下水水位变化主要受人类活动影响,通过持续大量开采地下水、截引出山径流对地下水水位产生影响。研究区东部截引地表水灌溉减小了地表水入渗补给地下水,自 80 年代以来地下水水位持续下降,2013 年以来民乐县河流弃水量持续增大,研究区东部山前地带地下水水位显著回升;研究区西部明花乡至骆驼城一带井灌区由于地下水大量开采,地下水水位仍处持续下降状态。

(3)研究区南部山前带河流两侧一定范围内潜水水化学特征在地下水水位显著下降和显著上升过程中始终保持稳定状态。其余地区受人类活动影响,潜水水化学特征 1985~2016 年发生较显著的变化,表现为受人工绿洲不断扩张导致地下水开发强度增大影响,地下水 TDS 值升高,由  $\text{HCO}_3^-$  型水演变为  $\text{SO}_4^{2-}$  型水;北部细土平原区承压水水化学特征保持稳定趋势。

## 参考文献(References):

- 党学亚,张俊,常亮,等.西北地区水文地质调查与水资源安全[J].西北地质,2022,55(3):81-95.
- DANG Xueya, ZHANG Jun, CHANG Liang, et al. Hydrogeological Survey and Water Resources Security in Northwest China[J]. Northwest Geology, 2022, 55(3): 81-95.
- 李文明,李健强,徐永,等.西北生态地质调查研究进展与展望[J].西北地质,2022,55(3):108-119.
- LI Wenming, LI Jianqiang, XU Yong, et al. Progress and Prospects of Ecological Geological Survey in Northwest China[J]. Northwest Geology, 2022, 55(3): 108-119.
- 李文鹏,康卫东,刘振英,等.西北典型内流盆地水资源调控与优化利用模式——以黑河流域为例[M].北京:地质出版社,2010,1-362.
- LI Wenpeng, KANG Weidong, LIU Zhenying, et al. Water resources regulation and optimal allocation in arid inland basins of Northwest China: the case of the Heihe River Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010, 1-362.

- 李卓仑,王乃昂,李育,等.近50年来黑河出山径流对气候变化的响应[J].*水土保持通报*,2012,32(02):7-11+16.
- LI Zhuolun, WANG Naiang, LI Yu, et al. Variations of Runoff in Responding to Climate Change in Mountainous Areas of Heihe River During Last 50 Years[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(02): 7-11+16.
- 廉耀康,柳小龙,周润田,等.黑河出山口径流与源区降水特征及匹配度分析[J].*人民黄河*,2019,41(07):14-17.
- LIAN Yaokang, LIU Xiaolong, ZHOU Runtian, et al. Matching Degree and Characteristics of Runoff from Mountainous Watershed and Precipitation in the Source Areas of Heihe River[J]. *Yellow River*, 2019, 41(07): 14-17.
- 连英立.张掖盆地地下水对气候变化响应特征与机制研究[D].北京:中国地质科学院,2011,1-165.
- LIAN Yingli. Variation characteristics and mechanism of groundwater response to climate Change in Zhangye Basin[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2011, 1-165.
- 刘得俊.格尔木流域地下水水位对气候变化和人类活动的响应[J].*南水北调与水利科技*,2016,14(A1):23-25+49.
- LIU Dejun. Response of Groundwater to Climate Change and Human Activities in Golmud Basin[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(A1): 23-25+49.
- 米丽娜,肖洪浪,田军仓,等.张掖盆地地下水资源时空分异特征及影响因素[J].*水文*,2016,36(06):81-88.
- MI Lina, XIAO Honglang, TIAN Juncang, et al. Temporal spatial variations of the groundwater level and its mechanism analysis for middle part of the Zhangye basin[J]. *Journal of China Hydrology*, 2016, 36(06): 81-88.
- 牛最荣.气候变化对祁连山区水文循环的影响研究[M].兰州:甘肃人民出版社,2013.
- NIU Zuirong. Effects of Climate Change on Hydrological Cycle in Qilian Mountains[M]. Lanzhou: Gansu People's Publishing House, 2013.
- 钱云平,Andrew L H,张春岚,等.应用<sup>222</sup>Rn研究黑河流域地表水与地下水转换关系[J].*人民黄河*,2005,(12):58-59+61.
- QIAN Yunping, Andrew L H, ZHANG Chunlan, et al. Applying <sup>222</sup>Rn to Study the Conversion Relationship Between Surface Water and Groundwater in Heihe River Basin[J]. *Yellow River*, 2005, (12): 58-59+61.
- 王浩,段磊,王文科.秦岭北麓地下水水位动态特征与影响因素[J].*西北地质*,2020,53(2):280-288.
- WANG Hao, DUAN Lei, WANG Wenke. Dynamic Features of Groundwater Level in Northern Qinling and Its Influence Factors[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(2): 280-288.
- 闫云霞,王随继,颜明,等.张掖盆地中部地下水位的时空变化及机理探讨[J].*干旱区资源与环境*,2014,28(11):90-97.
- YAN Yunxia, WANG Suiji, YAN Ming, et al. Temporal spatial variations of the groundwater level and its mechanism analysis for middle part of the Zhangye basin[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(11): 90-97.
- 张楠.气候变化和人类活动影响下伊舒盆地地下水环境演化研究[D].长春:吉林大学,2017.
- ZHANG Nan, Research on Groundwater Environmental Evolution of Yishu Basin under the Impact of Climate Change and Human Activities[D]. Changchun: Jilin University, 2017, 1-213.
- 张震域,赵沛,畅祥生,等.额济纳绿洲1992-2015年地下水埋深变化分析[J].*人民黄河*,2019,41(07):33-37.
- ZHANG Zhenyue, ZHAO Pei, CHANG Xiangsheng, et al. Analysis of Groundwater Depth Change in Ejina Oasis from 1992 to 2015[J]. *Yellow River*, 2019, 41(07): 33-37.
- Bekele E G, Knapp H V. Watershed Modeling to Assessing Impacts of Potential Climate Change on Water Supply Availability[J]. *Water Resources Management*, 2010, 24(13): 3299-3320.
- Green T R, Taniguchi M, Kooi H, et al. Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 405(3): 532-560.
- Wang Jiawei, Huang Jinting, Fang Tuo, et al. Relationship of underground water level and climate in Northwest China's inland basins under the global climate change: Taking the Golmud River Catchment as an example[J]. *China Geology*, 2021, 4(03): 402-409.