

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.03.017

巴音河冲洪积扇前缘地下水位上升灾害特征及影响因素

赵振^{1,2,3}, 陈惠娟^{2,3}, 段隆臣¹

(1. 中国地质大学工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 青海省环境地质勘查局, 青海 西宁 810001;
3. 青海省环境地质重点实验室, 青海 西宁 810001)

摘要:针对柴达木盆地巴音河冲洪积扇前缘地下水位上升, 严重影响到该地区百姓日常生活及生命安全的问题, 开展了水资源利用现状调查、水文地质补充钻探、水文物探及水土样测试等勘察工作, 阐明了研究区地下水位上升的灾害特征, 并从水文气象、地形地貌特征、水文地质条件和人类活动等方面, 采用层次分析法计算导致地下水上升灾害的各影响因素权重。结果表明, 研究区径流量、降水量、引水灌溉和地下水动力条件是地下水位上升的主要因素, 4者权重之和为0.7642。

关键词:地下水位上升; 层次分析法; 柴达木盆地; 巴音河

中图分类号: P641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2023)03-0142-06

Disaster characteristics and influencing factors of groundwater level rise in front edge of the Bayin River alluvial fan // ZHAO Zhen^{1,2,3}, CHEN Huijuan^{2,3}, DUAN Longchen¹ (1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Qinghai Environmental Geological Exploration Bureau, Xining 810001, China; 3. Qinghai Key Laboratory of Environmental Geology, Xining 810001, China)

Abstract: In response to the issue of the rising groundwater level in the front edge of the Bayin River alluvial fan in the Qaidam Basin, which seriously affects the daily life and safety of the people in the area, investigations on the current status of water resource utilization, hydrogeological supplementary drilling, hydrogeological exploration, and soil and water sample testing were conducted and the disaster characteristics of the rising groundwater level in the study area were clarified. The analytic hierarchy process (AHP) was used to study the weights of various influencing factors leading to groundwater rise disasters from the perspectives of hydrological meteorology, terrain and geomorphological characteristics, hydrogeological conditions, and human activities. The results show that the increase in runoff, increase in precipitation of the study area, water diversion irrigation and groundwater dynamic conditions are the main factors contributing to the increase in groundwater level, with a total weight of 0.7642.

Key words: groundwater level rise; analytic hierarchy process; Qaidam Basin; Bayin River

全球变暖加剧了水循环过程, 导致极端气候事件频发^[1-3]。20世纪末, 柴达木盆地暖湿化明显, 大部分内陆干旱区河流域水资源量增加, 引起中下游地区地下水位上升, 在格尔木河、巴音河流域表现突出, 地下水位持续上升灾害已成为柴达木盆地目前面临的严重问题^[4]。2002年以来, 随着德令哈地区降水量增大、巴音河径流量增加, 巴音河冲洪积扇前缘尕斯库勒湖地区地下水大范围泄出地表, 致使巴音河冲洪积扇前缘尕斯库勒镇和柯鲁柯镇受灾严重, 已影响当地人民群众生命财产安全和德令哈市的投资建设环

境^[5]。该地区地下水位上升灾害引起国内学者广泛关注, 文广超等^[6-7]研究了巴音河上游径流量对气候变化、人类活动的响应和1956—2013年降水变化特征进行了分析; 韩启霞等^[8]研究了巴音河河床硬化对地下水循环模式的影响, 指出河床硬化改变了河流对地下水的补给机制, 极大地影响了局部地下水流系统; 梁晓燕等^[9]研究了德令哈气象站1956—2016年气象资料, 发现巴音河流域1956年以来年气温和降水量均呈显著增长趋势。前人从气候变化、人类活动、气温上升等因素分析了研究区地

基金项目: 中国地质调查局西北大型盆地水文地质调查项目(1212011220975); 青海省地质勘查基金(青国土资矿[2012]28号)

作者简介: 赵振(1982—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水文地质、地热地质调(勘)查评价研究。E-mail: zhaozhen906@126.com

通信作者: 陈惠娟(1983—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事水文地质调(勘)查评价研究。E-mail: 595798744@qq.com

下水位上升原因,但未开展本地区关于地下水位上升灾害专项调查工作。本文结合前人研究资料和2013—2016年的勘查项目,在获得大量野外勘查资料基础上,系统分析地下水位上升区灾害特征以及导致地下水上升灾害各种因素,采用层次分析法分析地下水位上升灾害形成机理,提出地下水位上升灾害治理思路,以期为致灾区治理提供参考。

1 研究区概况

柴达木盆地巴音河冲洪积扇前缘属于典型西北内陆干旱气候,具有寒冷、海拔高、降水少、蒸发强度大、风速强劲等高原气候特征^[8]。根据德令哈气象站 1960—2016 年数据,研究区内多年平均降水量 195.3 mm,多年平均蒸发量 2036.6 mm,蒸发主要集中在春、夏、秋季;多年平均气温 4℃。图 1 为巴音河流域水系分布概况,源头河流发源于祁连山脉野牛脊山南麓,在野牛脊山、哈尔科山以南与宗务隆山以北的山间向东流动,形成典型的梳状水系,经过哈尔科山后,由北向南流入蓄集盆地,河水大量渗入补给地下水。巴音河出黑石山水库,流经德令哈市区后,在戈壁滩上开始大量渗漏,潜入地下东西分流。一棵树以南以泉水形式形成泉集河,向西流经戈壁水文站,流经可鲁克湖,最终排泄至托素湖。德令哈水文站以上区域的集水面积为 1.01 万 km²,多年平均流量为 11.04 m³/s,多年平均径流量为 3.48 亿 m³^[10]。

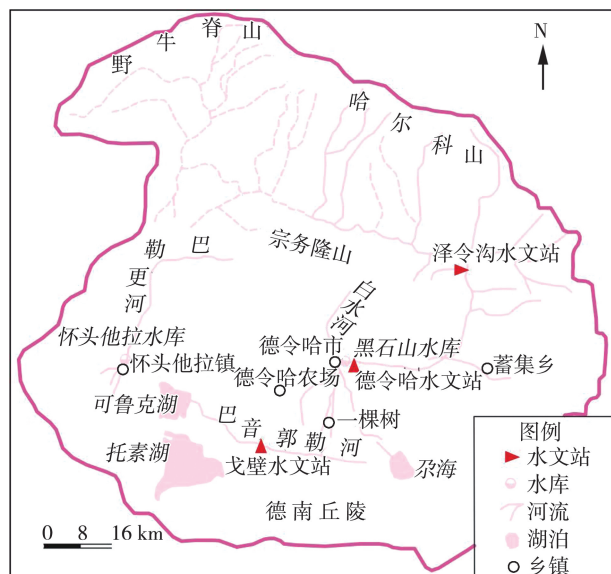


图1 巴音河流域水系分布概况

Fig. 1 Overview of river system distribution in the Bayin River Basin

2 地下水位上升灾害特征

2.1 灾害分布范围

经调查以往地下水位上升年份的卫星影像图,

研究区地下水位上升区域主要位于尕海镇和柯鲁柯镇以南的巴音河冲洪积扇前缘细土带、冲湖积平原区。2012 年致灾面积为 409.01 km², 2012 年 6—8 月两镇地下水位上升幅度较大, 已经造成民房裂缝、倾倒、塌踏, 农田地下水位过浅甚至淹没, 道路淹没等灾害发生, 严重影响威胁当地人民生活。

尕海镇东升村—富源村—泉水村—郭里木公社——一棵树——托格若格以南的巴音河冲洪积扇前缘地下水位上升区,2002 年面积为 308.88 km^2 ,2005 年面积为 354.05 km^2 ,2012 年面积为 394.18 km^2 ,2013 年面积为 8.44 km^2 。据 2013 年 3 月 14—16 日地下水位统测数据,该区地下水埋深小于 3 m 。2012 年 5 月至 2013 年 12 月是尕海镇地下水位上升幅度最大的时期。图 2 为尕海镇观测孔地下水位动态曲线,可见,位于尕海镇一棵树和团结村的 J56 和 J34 观测孔地下水位上升幅度分别为 2.06 m 和 3.07 m 。J56 观测孔 2012 年 9—10 月、J34 观测孔 2012 年 9—11 月地下水埋深为 0,地下水溢出地表;位于尕海镇的 J04 和 J20 观测孔地下水位上升幅度为 1.47 m 和 3.90 m 。

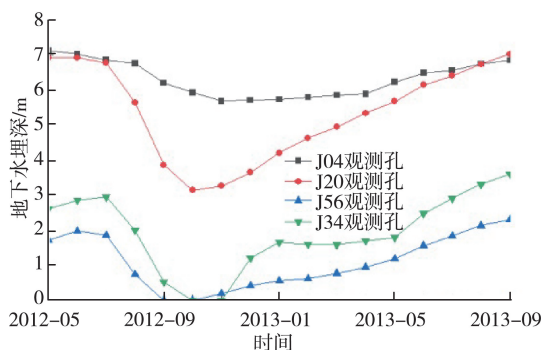


图2 2012—2013年尕海镇观测孔地下水位动态曲线
Fig.2 Dynamic curve of groundwater of observation hole in Gahai Town from 2012 to 2013

柯鲁柯镇新秀村—金源村以南的巴音河冲洪积扇前缘区域地下水上升区, 2012 年面积为 14.83 km^2 , 2013 年面积为 1.52 km^2 。据 2013 年 3 月 14—16 日地下水位统测数据, 该区地下水埋深一般为 $2 \sim 5 \text{ m}$, 2012 年 5 月至 2013 年 9 月柯鲁柯镇地下水位上升幅度最大的时期, 水位上升幅度为 $1.55 \sim 2.16 \text{ m}$ 。图 3 为柯鲁柯镇观测孔地下水位动态曲线, 可见该地区地下水位在 2013 年 5—9 月处于持续上升期, 该时间段山区降水量增加, 冰雪融水量亦随之增加, 导致河水量增大, 大量河水入渗地下水, 导致该区地下水位上升明显。

2.2 灾害现状

参照 DZ/T 0261—2014《滑坡崩塌泥石流灾害调查规范》,将研究区地下水位上升灾害现状影响分为严重、中等、较轻 3 个分区。影响严重区主要分

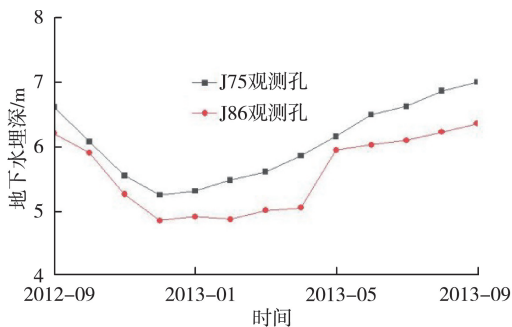


图3 2012—2013年柯鲁柯观测孔地下水位动态曲线

Fig. 3 Dynamic curve of groundwater of observation hole in Keluke Town from 2012 to 2013

布于尕海镇东升村—富源村—泉水村—郭里木公社一带,受灾面积 37.1 km²。该区域地下水埋深小于 3 m,2012 年地下水位上升幅度为 1.47 ~ 3.90 m,浅井勘查毛细水上升高度为 1.8 ~ 2.3 m,地面最大积水深度为 0.6 m 左右。尕海镇地下水上升区 2004—2013 年累积搬迁 1 648 户,受损耕地 4 km²,其中 2004 年,尕海镇郭里木村一社、二社和团结村 166 户搬迁,0.67 km²受灾。2006 年开始,该区域地下水位开始下降,一般只在 8、9 月份溢出地表。2007 年,尕海镇 264 户搬迁。2012 年,东升村搬迁 190 户,富源村搬迁 289 户;受影响耕地 3.33 km²,其中受灾严重的耕地 0.67 km²,另有 0.06 km²枸杞地和 0.04 km²大棚蔬菜受灾。2013 年尕海村搬迁 171 户、泉水村搬迁 137 户、努尔和陶哈两牧业村共计搬迁 210 户;尕海镇村庄搬迁和农田经济损失约为 12 168 万元,属特大型地质灾害。影响中等区主要分布于柯鲁柯镇老德令哈—尕海镇富源新村以及富康村以南区域,面积 554.37 km²。该区域地下水埋深小于 10 m,地下水位上升幅度 0.63 ~ 1.97 m。地下水埋深较大,地下水位上升幅度较小,该区域内大部分地段居民地、道路、农田和水利设施等分布较少且分散,地下水位上升灾害影响中等。影响较轻区主要分布于柯鲁柯镇老德令哈—尕海镇富源新村以及富康村以北区域,面积 477.93 km²。该区域地下水埋深 10.0 ~ 108.82 m,地下水位上升幅度 6.65 ~ 10.98 m,地下水埋深大于地下水位升幅,地下水位上升灾害对城区、居民地、道路、农田和水利设施等影响较轻。

3 地下水位上升影响因素分析

3.1 致灾区地下水现状

尕海镇地下水位上升灾害区分布于团结村—东升村一带,为巴音河冲洪积扇前沿及尕海冲积湖积平原区,地层颗粒由粗变细,含水层组由中、上更新

统冲湖积粉细砂、细砂、中粗砂、砂砾石及含泥砂砾石,砂卵石与黏性土相间组成。本区地下水主要接受郭里木新村一带上游地下水的侧向径流、引水灌溉和大气降水入渗补给,以向尕海湖方向径流和潜水蒸发排泄为主,泉水排泄量较小。采用断面法核算尕海镇地下水位上升区地下水资源量。尕海地下水位上升区地下水总补给量为侧向径流补给量、引水灌溉和大气降水入渗补给量之和,为 16.35 万 m³/d。地下水总排泄量为侧向径流排泄量和蒸发排泄量之和,为 4.67 万 m³/d。地下水处于正均衡状态,正均衡水量为 11.68 万 m³/d,尕海地区孔隙含水层的平均给水度为 0.028,根据水量均衡方程,这部分水量 2 月内将使尕海镇驻地至东升村以南地下水埋深小于 4 m 的 84.13 km²范围的地下水位上升 2.97 m。

柯鲁柯镇地下水位上升灾害区分布于新秀村—金源村一带,位于巴音河冲洪积扇中上游的西侧,德令哈丘陵隆起的北侧,含水层组由上更新统冲积粉细砂、细砂、中粗砂含泥砂砾石,含水砂层、砂砾石层与黏性土相间组成,地下水受德令哈丘陵的阻挡由自北西而南东径流转向东南方向径流,形成地下水的壅水和上升区。本区地下水主要接受新秀村一带上游地下水的侧向径流、引水灌溉和大气降水入渗补给,以向三大队方向径流排泄为主,蒸发排泄次之。采用断面法核算柯鲁柯镇地下水位上升区地下水资源量,地下水总补给量为侧向径流补给量和引水灌溉入渗补给量之和,为 4.69 万 m³/d。地下水总排泄量为侧向径流排泄量和蒸发排泄量之和,为 3.26 万 m³/d,地下水处于正均衡状态,正均衡水量为 1.43 万 m³/d,柯鲁柯地区孔隙含水层的平均给水度为 0.011,根据水量均衡方程,这部分水量 2 个月内将使柯鲁柯镇金源村南部一带 30 km²范围的地下水位上升 2.61 m。

3.2 地下水位上升影响因素

a. 气象因素。气候变化加速了全球水循环过程,导致大气环流、降水、蒸发发生变化,进而导致极端事件频发^[11-13]。受气温上升导致的冰雪融水增多和降水量显著增加的影响,柴达木地区内陆河径流量总体呈微弱增加趋势^[14],引起流域中下游大部分地区地下水位上升灾害发生。根据德令哈气象站资料年代际分析,20 世纪 80 年代之前研究区处于降水偏少期,20 世纪 80 年代至 2013 年处于降水偏多期,且降水量总体上呈上升趋势,冬季降水变化相对平稳^[7]。研究区 2000—2014 年平均降水量为 224.5 mm,与多年平均降水量相比明显增加,特别是 2002 年、2004 年、2005 年和 2012 年降水量急剧增加,2002 年为 302.4 mm,2004 年为 287.3 mm,

2005 年为 228.0 mm, 2012 年为 306.5 mm, 其中 2002 年和 2012 年降水量分别为多年平均降水量的 1.73 和 1.769 倍。年平均降水量变化情况见图 4, 可见降水量增加, 一方面引起巴音河径流量增加, 间接入渗补给地下水, 另一方面降雨入渗量增加引起地下水位上升。图 4 可见, 年平均气温变化情况, 从气温的角度来看, 1956—2014 年多年平均气温为 3.93℃, 2010 年以来平均气温分别较 20 世纪 60、70、80、90 年代气温平均值分别偏高 2.16℃、1.30℃、1.16℃ 和 0.31℃, 多年平均气温以每 10 a 0.45℃ 的速率上升。

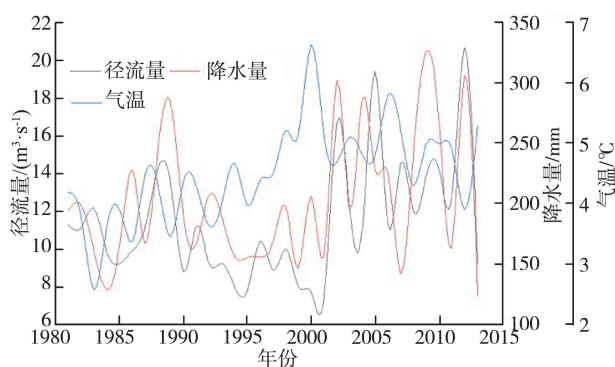


图 4 研究区降水量、气温及巴音河径流量多年变化情况

Fig. 4 Annual changes in precipitation and temperature in study area and runoff of Bayin River

b. 水文因素。西北干旱地区冲洪积扇地下水资源主要来源于河水补给, 根据巴音河径流量多年变化情况(图 4), 可见河川径流量在 1990 年以前基本呈现规律的周期性变化, 在平均值上下波动; 1991—2001 年的径流量远低于多年平均值; 2002—2022 年, 除 2013 年、2014 年远低于平均值外, 地下水位上升的年份(2002 年、2005 年、2012 年、2017 年、2018 年)的径流量远高于平均值, 2002 年径流量为多年平均值的 1.5 倍, 2017 年为多年平均值的 1.6 倍, 2018 年达到多年平均值的 2 倍以上, 可见径流的增加对地下水位上升致灾影响较大。

c. 地形地貌条件因素。区域地形地貌控制地下水赋存、补给、径流、排泄条件。巴音河平原为较大的山间盆地, 北倚宗务隆山, 南接德南低山丘陵, 东邻布赫山西端余脉, 西有德令哈隆起。地势四周高中部低, 最高点位于北部的宗务隆山, 地形坡度为 10‰~35‰。地貌总体上可分为中高山、中低山、低山丘陵、洪积平原、冲洪积平原、冲积平原和冲湖积平原。尕斯库勒镇地下水位上升致灾区位于巴音河冲洪积平原东南部前缘和冲湖积平原东北角, 地势自西北向东南微倾斜, 东南靠近尕斯库勒湖方向最低, 地面海拔 2861~2876 m, 高差 15 m, 地形坡度为 1.6‰。致灾区接近冲湖积平原, 地下水径流缓慢, 南部 7.3 km

处为德南丘陵, 主要分布新近系砂质泥岩、粉砂岩等阻水地层。受德南丘陵和前缘细土带阻水影响, 地下水径流受阻, 丰水期和丰水年份在尕斯库勒镇东升村—团结村一带产生壅水和上升。柯鲁柯镇地下水位上升致灾区位于巴音河冲洪积平原西北部后缘, 地势自西北向东南倾斜, 地面海拔 2860~2895 m, 高差 35 m, 地形坡度为 4.0‰, 上升区南部靠德令哈隆起, 地势较高。受地形隆起阻水影响, 地下水径流受阻, 丰水期和丰水年份在柯鲁柯镇新秀村—金源村一带产生地下水位的上升区。

d. 水文地质条件因素。水文地质条件是研究区地下水位上升的主要因素之一, 主要通过含水层结构变化和地下水动力条件两个方面作用。在巴音河冲洪积扇后缘及中部一带, 含水层岩性颗粒主要由砂砾卵石、中粗砂和含泥砂砾石层构成, 岩性单一, 厚度为 50~100 m, 导水性良好; 冲洪积扇中部巴音河流速减小, 堆积物主要以厚层的冲积、洪积砂砾石、中粗砂及中更新统冰水含泥砂砾石层为主, 含水层颗粒变小, 导水性能相对减小; 而在巴音河冲洪积扇前缘尕斯库勒南部一带, 由于巴音河的流速变慢, 和德南丘陵的阻挡, 细颗粒的细砂、中砂和粉土、粉质黏土便开始沉积, 含水粗颗粒和细颗粒呈交错状分布, 厚度 100 m 左右, 导水性较弱, 与德南丘陵阻水效果相互叠加, 地下水径流受阻, 形成地下水溢出带, 含水层也由单层变为多层, 地下水的类型由潜水过渡到承压自流水^[15]。从地下水运动特征来看, 巴音河冲洪积扇后缘及中部一带为地下水的补给、径流区, 地下水受巴音河补给后, 从北向南径流, 由于巴音河冲洪积物厚度大, 导水性能良好, 水力梯度在 4.57‰左右。而在巴音河冲洪积扇前缘, 受德南丘陵阻水和细土带导水性较差的影响, 迫使地下水转向西流, 汇入克鲁克湖, 少量地下水沿古河道向东南方向径流, 汇入尕斯库勒湖, 该地段地势平坦, 地下水水力梯度在 2.33‰左右, 地下水径流速度逐渐变缓, 水位埋深由深变浅^[16], 以致溢出地表。在一棵树周边呈片状沼泽或泉水溢出, 以沼泽和下降泉补给上部潜水, 以上升泉排泄深层承压水^[17], 形成泉集河, 巴音河水重现。2012 年, 郭里木以东地区出现大面积的地下水位上升区。同样在柯鲁柯镇原金源村一带, 受德令哈丘陵阻水和细颗粒含水层导水性较差的影响, 地下水由北向南径流转而向东南径流, 绕道汇入巴音河冲洪积扇前沿, 并在地下水绕道转向的原金源村南部一带形成地下水位上升区。

e. 人类活动因素。人类活动改变了流域产汇流条件, 是引起研究区地下水动态变化的关键因素^[18]。目前, 研究区人类活动对地下水影响主要体

现农业灌溉和人类工程活动两个方面:①农业灌溉。德令哈市建有白水河、东山、德农、尕海和泽令沟灌区 5 个灌区,其中泽令沟灌区位于研究区外,德农和尕海灌区灌溉用水量较大,通过东西干渠引自黑石山水库,干渠和支渠向四周延伸,形成灌溉网,总灌溉面积为 109.33 km²,多年平均引水量为 47.59 万 m³/d,小麦一般年份灌 8 次水。区内灌溉多为大水漫灌,渠系引水渗漏和农田大水漫灌入渗对地下水的补给量较大,引起地下水位上升。随着灌区的逐步改造,渠系水渗漏量减小,而多年引水灌溉量保持稳定,到达田间的灌溉水量增加,田间灌溉水入渗补给量增加,也是引起致灾区地下水位上升灾害的关键因素。据尕海灌区水位动态资料,2013—2014 年灌溉期,地下水位平均升幅为 0.61 m,说明灌溉水入渗促使了地下水位的上升。②人工河道硬化。2015 年 12 月德令哈市对巴音河二级电站至老铁路桥约 3.56 km 河段进行了硬化,不改变地下水的储水空间,但加速河水向下游径流,使下游地区河水入渗量增加,一定程度上导致巴音河下游地区地下水位上升。根据资料,在硬化河段,河水渗漏对地下水补给量小,地下水埋深大,地形坡度变化大,地下水位等值线表现为密集;在没有硬化河段,河水渗漏对地下水的补给量大,地下水埋深浅,地下水位等值线表现为相对疏缓。

综上所述,研究区地下水水位上升的形成与气象、水文、地形地貌、水文地质条件和人类活动等因素有着密切的关系,是各因素综合作用的结果(图 5)。

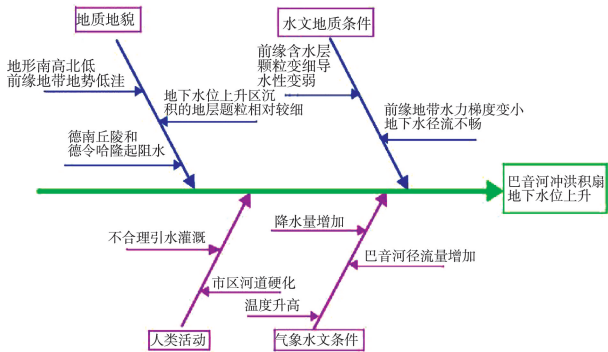


图 5 研究区地下水位上升影响因素
Fig. 5 Factors influencing groundwater level rise in study area

3.3 影响因素权重

为确定不同影响因素对研究区地下水位上升的影响程度,采用层次分析法分析气象水文地形地貌条件、水文地质条件和人类活动影响等因素的权重。层次分析法能把复杂系统的决策思维进行层次化,是一种将定性分析与定量分析方法有机结合的综合评价

方法^[19],广泛应用于工程计划、资源分配、城市规划、经济管理、水资源评价等方面^[20-22]。本文构建的巴音河冲洪积扇前缘地下水位上升评价体系(图 6)由 3 层构成,决策目标层为巴音河冲洪积扇前缘地下水位上升评价体系;属性指标层包括:气象水文地形地貌条件、水文地质条件、人类活动影响;要素指标层包括:径流量、降水量、气温、地形地貌条件、含水层结构、地下水动力条件、引水灌溉和市区河道硬化等 8 个因素。

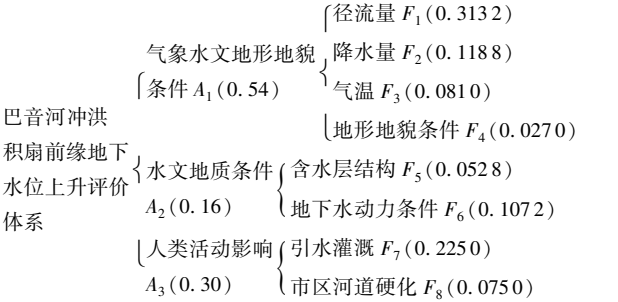


图 6 研究区地下水位上升层次分析法评价体系
Fig. 6 AHP evaluation system for groundwater level rise in study area

0 评价因素的权重反映了各因素对巴音河冲洪积扇前缘地下水位上升的贡献。根据层次分析法的原理^[23],在评价体系的层次隶属关系的基础上,分别比较同一层次各要素之间的相对重要性,采用 1~9 标度法给出各要素的分值^[24],利用 Yaahp 层次分析法软件建立比较矩阵,经校验比较矩阵的一致性后,得到要素层中各要素在目标层中所占的权重,结果如图 6 所示,各项权重为:径流量 0.3132、降水量 0.1188、气温 0.0810、地形地貌条件 0.0270、含水层结构 0.0528、地下水动力条件 0.1072、引水灌溉 0.2250 及市区河道硬化 0.0750。根据层次分析法结果,研究区径流量、降水量、引水灌溉和地下水动力条件是地下水位上升区主要因素,4 者权重之和为 0.7642;而气温、市区河道硬化、含水层结构和地形地貌条件则是致灾的次要因素。

4 结 语

巴音河冲洪积扇前缘地下水位上升致灾区主要分布在柯鲁柯镇新秀村—金源村和尕海镇—一棵树—托格若格以南的巴音河冲洪积扇前缘细土带、冲湖积平原区。研究区地下水上升灾害的原因包括主观和客观两方面。研究区径流量、降水量、引水灌溉和地下水动力条件是地下水位上升区主要因素,4 者之和的权重比例为 0.7642;气温、地形地貌条件、含水层结构、市区河道硬化是致灾的次要因素。根据研究结果,建议尽快开展巴音河冲洪积扇前缘地下水位上升灾害治理工作。

参考文献:

- [1] 栗晓玲,褚江东,张特,等.西北地区地下水干旱时空演变趋势及对气象干旱的动态响应[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 34-42. (SU Xiaoling, CHU Jiangdong, ZHANG Te, et al. The temporal and spatial evolution trend of groundwater drought in Northwest China and its dynamic response to meteorological drought [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 34-42. (in Chinese)).
- [2] 乔晓英,王文科,姜桂华,等.西北干旱内陆盆地地下水生态功能的探讨[J]. 水资源保护, 2005, 21(5): 6-10. (QIAO Xiaoying, WANG Wenke, JIANG Guihua, et al. Discussion on the ecological function of groundwater in arid inland basins in Northwest China [J]. Water Resources Protection, 2005, 21(5): 6-10. (in Chinese)).
- [3] 栗晓玲,姜田亮,牛纪苹.生态干旱的概念及研究进展[J]. 水资源保护, 2021, 37(4): 15-21. (SU Xiaoling, JIANG Tianliang, NIU Jiping. The concept and research progress of ecological drought [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 15-21. (in Chinese)).
- [4] 党学亚,常亮,卢娜.青藏高原暖湿化对柴达木水资源与环境的影响[J]. 中国地质, 2019, 46(2): 359-368. (DANG Xueya, CHANG Liang, LU Na. Influence of warming and humidification of Qinghai-Tibet Plateau on water resources and environment in Qaidam [J]. China Geology, 2019, 46(2): 359-368. (in Chinese)).
- [5] 赵振,陈惠娟.青海省德令哈市尕斯库勒地区地下水位上升治理勘查方案研究[J]. 勘察科学技术, 2014(1): 45-48. (ZHAO Zhen, CHEN Huijuan. Research on the investigation plan for the rise of groundwater level in Gahai area of Delingha City, Qinghai Province [J]. Investigation Science and Technology, 2014(1): 45-48. (in Chinese)).
- [6] 文广超,王文科,段磊,等.青海柴达木盆地巴音河上游径流量对气候变化和人类活动的响应[J]. 冰川冻土, 2018, 40(1): 136-144. (WEN Guangchao, WANG Wenke, DUAN Lei, et al. Responses of runoff to climate change and human activities in the upper reaches of Bayin River, Qaidam Basin, Qinghai [J]. Glacier and Permafrost, 2018, 40(1): 136-144. (in Chinese)).
- [7] 文广超,王文科,段磊,等.巴音河流域德令哈市气象站近60年来降水变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(1): 18-24. (WEN Guangchao, WANG Wenke, DUAN Lei, et al. Analysis on the characteristics of precipitation changes in Delingha meteorological station in the Bayin River Basin in the past 60 years [J]. Chinese Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(1): 18-24. (in Chinese)).
- [8] 韩启霞,宋润峰,顾小凡,等.巴音河河床硬化对地下水循环模式的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(7): 60-64. (HAN Qixia, SONG Runfeng, GU Xiaofan, et al. Study on the effect of hardening of Bayin River bed on groundwater circulation pattern [J]. China Rural Water Resources and Hydropower, 2020(7): 60-64. (in Chinese)).
- [9] 梁晓燕,莫淑红,巩瑶,等.巴音河流域气象要素变化特性探析[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(10): 82-89. (LIANG Xiaoyan, MO Shuhong, GONG Yao, et al. Analysis on the variation characteristics of meteorological elements in the Bayin River Basin [J]. Power Grid and Clean Energy, 2019, 35(10): 82-89. (in Chinese)).
- [10] 赵佳辉.巴音河流域农田灌溉模式对地下水补给的影响研究[D]. 西安:长安大学, 2018.
- [11] 马明卫,韩宇平,严登华,等.特大干旱事件灾害孕育机理及影响研究进展[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 11-21. (MA Mingwei, HAN Yuping, YAN Denghua, et al. Research progress on the mechanism and impact of catastrophic drought events [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 11-21. (in Chinese)).
- [12] 王卫光,黄茵,邢万秋,等.基于SPEI的海河流域干旱时空演变特征及环流成因分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(3): 8-13. (WANG Weiguang, HUANG Yin, XING Wanqiu, et al. Analysis of the temporal and spatial evolution characteristics of drought in the Haihe River Basin and the causes of circulation based on SPEI [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(3): 8-13. (in Chinese)).
- [13] 袁飞,章益棋,刘懿,等.基于标准化帕尔默干旱指数的西江流域干旱评估[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 46-52. (YUAN Fei, ZHANG Yiqi, LIU Yi, et al. Drought assessment in the Xijiang River Basin based on the standardized Palmer drought index [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 46-52. (in Chinese)).
- [14] 张强,张存杰,白虎志,等.西北地区气候变化新常态及对干旱环境的影响:总体暖干化,局部出现暖湿迹象[J]. 干旱气象, 2010, 28(1): 1-7. (ZHANG Qiang, ZHANG Cunjie, BAI Huzhi, et al. New trends of climate change in Northwest China and its impact on arid environment: warm and dry in general, and signs of warmth and humidity locally [J]. Arid Meteorology, 2010, 28(1): 1-7. (in Chinese)).
- [15] 谢世杰.格尔木新城区地下水环境影响效应评价[D]. 成都:成都理工大学, 2014.
- [16] 郑紫文.新疆伊犁—巩乃斯河河床沉积物渗透系数空间变异性及河水与地下水转化关系[D]. 西安:长安大学, 2017.
- [17] 王安.尕斯库勒地区盐渍土的成因探究[J]. 科学时代, 2014(1): 1-3. (WANG An. Research on the formation of saline soil in Gahai Area [J]. Science Times, 2014(1): 1-3. (in Chinese)).