

山前冲积扇蓄洪入灌坎儿井水源保护方法研究

郑艳琼, 张爱军, 韩帅

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:新疆吐鲁番盆地的坎儿井是我国宝贵的非物质文化遗产,且对吐鲁番绿洲生态的存在与发展具有不可替代的作用。近年来随着大量机电井的使用,区域地下水位持续下降,致使坎儿井出水流量减少甚至干涸。吐鲁番盆地北侧天山山脉的年降雨量可达 300~400 mm,该降雨除一部分通过多条河流排出外,在山前冲积扇上也会造成一定规模的洪水,给盆地边缘地区带来一定的威胁。通过分析吐鲁番盆地基本情况、坎儿井现状和山前冲积扇蓄洪入灌的自然条件,提出一种山前冲积扇蓄洪入灌坎儿井水源保护方法,并采用数值模拟对此方法进行了研究。山前冲积扇蓄洪入灌坎儿井水源保护方法,即在冲积扇修筑拦洪坝的方式,拦蓄该部分洪水,一方面起到防洪效果,另一重要方面就是补给地下水,抬升地下水位,从而增加该区域的坎儿井的出水量。研究表明:该方法可以大幅提升地下水位,增加坎儿井的出水量,甚至可使得已经干涸的坎儿井重新出水,是经济可行的一种保护坎儿井的方法。

关键词:绿洲生态;坎儿井;蓄洪入灌;非饱和土渗流

中图分类号:S237.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)03-0366-07

Research on Water Source Protection of Karez Wells Using Flood Irrigation From Piedmont Alluvial Fan

ZHENG Yanqiong, ZHANG Aijun, HAN Shuai

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Karez well system in Turfan Basin of Xinjiang is a precious intangible cultural heritage of China. It also plays an irreplaceable role in the conservation and development of oasis ecosystem in Turfan Basin. Recently, the continuous declination of regional groundwater level results in the decrease of water flow or even dry-up of Karez wells due to the extensive use of electro-mechanical wells. Meanwhile, the annual precipitation of north Turfan Basin near Tianshan Mountains is 400~600 mm. Except for a small proportion streams out through rivers, the flood forming in the piedmont alluvial fan often creates threats to nearby edge areas of Turfan Basin. Thus, we present new method to protect the water source of Karez well system by analyzing the basic conditions of Turfan Basin and Karez wells, as well as the natural irrigation condition of piedmont alluvial fan. The main idea is to build retaining dams in piedmont alluvial fan to preserve the flood. The dams will control the flood and improve groundwater level. In the meantime, the water flow in Karez well system will also increase. Numerical simulations are used to investigate the potential benefits. The simulation results show that the proposed method could significantly elevate the groundwater level and increase the total amount of water flow in Karez well system. The dried-up wells can even be restored. It is proved that the proposed method is an economically feasible and applicable method to protect water source of Karez wells.

Keywords: oasis ecosystem; Karez well; flood irrigation; unsaturated soil seepage

新疆吐鲁番地区的坎儿井是我国宝贵的非物质文化遗产,很长一段时间内(20 世纪 60 年代以前)是

吐鲁番绿洲除了泉水外的唯一的人工水源^[1],对吐鲁番绿洲生态的存在与发展具有不可替代的作用。它

收稿日期:2017-07-24

修回日期:2017-08-24

资助项目:水利部水资源管理与保护专项(1261330111014),坎儿井地下水资源涵养与保护方案编制

第一作者:郑艳琼(1992—),女,湖北恩施人,硕士研究生,从事水利水电工程中岩土问题研究。E-mail:zhengyanqiong0508@163.com

通信作者:张爱军(1964—),男,山西阳高人,博士,教授,博士生导师,从事非饱和和特殊土、岩土工程数值计算等问题的教学与科研工作。

E-mail:zaj@nwsuaf.edu.cn

结合当地独特的地质、地形和气候条件,充分利用天山山前冲积扇丰富的地下水资源,采用地下输水的形式,为吐鲁番绿洲提供了源源不断的水源,是吐鲁番绿洲之根,具有无需动力提水、不受风沙和蒸发影响,以及引的水不经过含盐大的岩层而矿化度低的种种优点,是可持续、生态友好型的水利工程。

然而自20世纪60年代以来,由于农业灌溉用水量的增大,另外一种取水方式——机电井,在吐鲁番绿洲地区迅猛发展。机电井在绿洲腹地直接抽取地下水灌溉耕地。机井大规模抽水导致土地盐碱化,更为严重的是导致了绿洲腹地地下水水位持续下降,从而使得坎儿井的出水量减少甚至干涸。有水坎儿井由1957年的1237条减小到2009年的246条,按照目前坎儿井的衰减速度,过不了多久有水的坎儿井将消失^[1]。所以研究坎儿井保护技术,加大坎儿井保护力度刻不容缓。

张伟等^[2]从机井的抽水量和数量上阐述了机井对坎儿井水量的影响;买尔旦·买买提等^[3]提出了坎儿井水量控制的辐射管技术,该技术可以大大增加坎儿井的出水量,同时也可以在水淡季对坎儿井的水量进行控制,避免不必要的浪费。很多学者从社会经济方面、历史文化方面以及生态方面,提出相应的保护坎儿井的措施^[4-9]。本文从保护绿洲生态的角度,提出拦截天山南侧山前冲积扇洪水入灌地下,提高坎儿井集水段的地下水位,从而增加坎儿井出水量的方法,为坎儿井可持续出水提供治本的方法。该方法也是吐鲁番地区生态环境恢复的重要措施。

1 吐鲁番盆地基本情况与坎儿井现状分析

1.1 吐鲁番盆地的基本情况

吐鲁番盆地位于我国新疆东部,西起阿拉山沟口,东至七角井峡谷西口,东西长245 km,南北宽约

75 km。行政区划隶属于吐鲁番地区,主要由吐鲁番市、鄯善县、托克逊县组成。地形特征上是一个北南西三面山地环绕而东部有高地阻隔的盆地,盆地中部存在有东西走向的火焰山—盐山隆起山丘,将盆地分割为南盆地和北盆地两个部分,火焰山和盐山之间存在一个构造缺口,即著名的葡萄沟,是南盆地和北盆地之间的主要交通要道和透水通道。盆地地势为西北高而东南低,盆地最低处为艾丁湖,最低海拔为一154.31 m,低于海平面。长期以来艾丁湖整个湖面大部为盐壳所覆盖。盆地北面为东天山山脉的博格达山,最高峰海拔为5 445 m;西部为喀拉乌成山的一段,海拔高度在3 500~4 000 m,南部的觉罗塔格山(或称为库鲁塔格山),最高海拔在1 500 m左右;而火焰山和盐山的海拔高度最高为900 m左右。东部及东南面略呈开口状,连接广袤的库木塔格荒漠,只有低矮沙丘。整个盆地的地貌单元可分为高山带、中山带、山前冲积扇、绿洲、荒漠带等类型。

吐鲁番盆地地处亚洲腹地,远离海洋,属典型的干旱荒漠性气候。夏季炎热,冬季干冷。极端最高气温达49.6℃,极端最低气温-25.3℃;多年平均各月气温年内分配极不均匀,多年月平均气温温差达42℃。由于气候干燥炎热,盆地内降水十分稀少,吐鲁番气象站多年平均降水量只有16.3 mm(见表1),多年降水的年际变化也较大,最大年降水量与最小年降水量相差高达16倍以上。干旱性的气候使得吐鲁番盆地的蒸发十分强烈,水面蒸发能力可达1 800 mm;吐鲁番盆地光热资源十分丰富,多年平均日照时数3 049.5 h; $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温多年平均为5 425℃;盆地内多大风,甚者造成风灾,著名的三十里风区正位于盆地之内;据吐鲁番气象站记载,多年年最大风速平均值为23.0 m/s;多年最大瞬时风速为40 m/s,风向NW。吐鲁番盆地素有“火州”、“风库”之称。

表1 吐鲁番市各雨量站降水量统计表

站名	所属县市	地理位置		测站 高程/m	实测 年份	年数	多年平均 降水量/mm	连续4个月最大降水量		
		东经/ 度,分	北纬/ 度,分					最大降 水量/mm	占年比/ %	出现月
吐鲁番	吐鲁番	89°12'	42°56'	34.5	1952—2008	57	16.3	9.4	58.5	6月9日
托克逊	托克逊	88°48'	42°48'	1.0	1958—2008	51	7.7	5.8	75.4	6月9日
二塘沟	鄯善	89°56'	43°18'	1450.0	1992—2008	17	131.9	93.7	71	6月9日
煤窑沟	吐鲁番	89°24'	43°11'	940.0	1957—2008(有间断)	44	68.7	44.7	65.1	6月9日
东坎	吐鲁番	89°15'	42°50'	-49.0	1957—2008(有间断)	45	16.6	9.9	59.6	6月9日
五工区	吐鲁番	89°15'	43°17'	1708.0	1966—1987(有间断)	20	156.8	124.6	79.5	6月9日
开垦	奇台	89°50'	43°36'	2370.0	1960—2008	49	604.7	350.6	58	5月8日

吐鲁番地区面积广阔,地貌类型复杂多样,高差悬殊,气候差异非常明显。盆地气候大致可以划分成 5 个气候带:博格达山是中高山区,年降水量 300~400 mm,为高寒潮湿带;此带向南是低山丘陵区,至盆地北缘山口处,年降水量 160 mm,为冷凉半湿润带;天山山口至火焰山麓是山前砾质倾斜平原区,年降水量 25~30 mm 是炎热干旱带;火焰山及其南坡山前砾质倾斜平原区,年降水量 16.6~20 mm,是酷热干旱热带,年降水量约 7 mm,有的年份无降水;再向南至艾丁湖是滨湖及盐泽区,为极干旱、极热风沙带,其绿洲生态环境极为脆弱。

吐鲁番盆地有 14 条主要河流(含独立支流),按行政区域划分分别为托克逊县 6 条:乌斯通沟、祖鲁木图沟、艾维尔沟(鱼尔沟)、柯尔碱沟、阿拉沟、白杨河;吐鲁番市 5 条:大河沿河、塔尔朗河、煤窑沟、喀让郭勒沟、恰勒坎沟;鄯善县 3 条:二塘沟、柯柯亚尔河、坎儿其沟。其中乌斯通沟(右支)、祖鲁木图沟(右支)、艾维尔沟(左支)、均为阿拉沟支流。柯尔碱沟(右支)为白杨河支流。这些河流出口之间就是天山的山前冲积扇区域。很多坎儿井的集水段就分布在这个区域。

1.2 坎儿井的现状分析

坎儿井在新疆吐鲁番及哈密盆地区存在已经有两千多年的历史。20 世纪 60 年代以前,坎儿井是吐鲁番盆地的主要取水形式,是吐鲁番绿洲区除了泉水以外的唯一人工水源。坎儿井一般由竖井、集水段暗渠、输水段暗渠、明渠、涝池组成。竖井一般间隔 20~50 m 设置一口,用于出土、通风和维修出入;暗渠将山前浅层地下水引到绿洲供灌溉和生活用水使用,是主要组成部分。一般暗渠长度在几百米到十几千米不等,分为集水段和输水段两部分,集水段处于地下水位以下,用来汇集地下水,是坎儿井的主要部分;输水段用来将集水引出地面。明渠主要用于输水,将引水引入需要灌溉的田地;涝池用于贮存多余水量。坎儿井的基本原理示意图 1。坎儿井的暗渠集水段主要分布在天山中段和盐山—火焰山周围,暗渠出口主要在绿洲腹地,从而实现将山区地下水引入绿洲腹地用于灌溉和生活用水的目的。

但是坎儿井的发展面临诸多问题,由于当地地面引水工程的发展,特别是机电抽水井的大规模发展,已经濒临消失的状态,若不加保护将在不久彻底消失。存在的问题主要表现在:

(1) 由于地下水严重超采,地下水位持续下降,

坎儿井出水量日渐减小,有水坎儿井数量急剧衰减,很多坎儿井已经干涸。图 2 为解放后坎儿井数量和出水量变化统计。从图中看出有水坎儿井数量由最多的 1 237 条(1957 年)减少到 2009 年的 246 条,出水量由最大的 6.61 亿 m^3 减小到目前的 2.68 亿 m^3 ,情况非常严重;

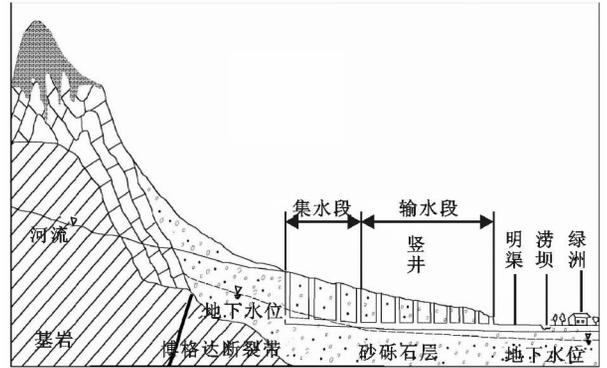


图 1 坎儿井集水输水原理示意图

(2) 坎儿井暗渠及竖井破坏严重,维修维护困难,劳动强度大,而掌握维修技术的人员原来越少,年轻人大多不愿意从事如此繁重的劳作,急需要用现代技术进行维修改造;

(3) 另外还有:水量无法控制,管理模式落后,管理体制不顺等诸多问题。

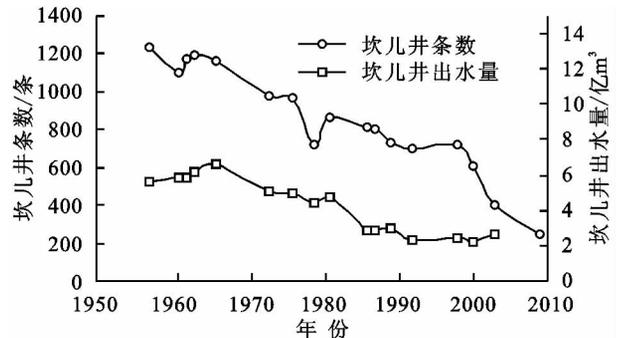


图 2 有水坎儿井数量和出水量年度变化统计

2 山前冲积扇蓄洪入灌的自然条件

以上分析表明,坎儿井出水量减小的主要原因是地下水位的持续下降。若采用一定的方法提升地下水位将会增加坎儿井的出水量,甚至可以使得已经干涸的坎儿井重新有水而恢复生机。限制地面引水工程和机电井的发展,关停一批机电井是提高地下水位的有效方法,吐鲁番地区已经开展了限井和恢复生态的措施,但是由于工业和农业用水量的大幅提升,以及居民生活用水量的增加,全面限井和废弃地面引水工程是不可能的。而天山山区降雨量较大,在夏季还会形成一定规模的洪水。该部分洪水除一部分通过多条河流排出外,在

山前冲积扇上也会形成一定规模的洪水,对山前冲积扇地区的电力,水利,铁路,村镇,甚至坎儿井的竖井等构成威胁。该部分洪水最终于盆地中下游消散蒸发殆尽,对坎儿井补给区潜水的补给量很少。如果能采用一定的拦洪蓄洪入灌措施,把该部分洪水在高程较高的冲积扇上回灌入渗地下,将大幅提升地下水位,从而为坎儿井提供更多的补给水量,大大增加坎儿井的出水量,是坎儿井水源保护的“开源”之策和“治本”措施,同时对于削减洪水危害也具有一定的作用。本文拟通过在冲积扇修筑拦洪坝的方式,拦蓄该部分洪水,一方面起到防洪效果,另一重要方面就是补给地下水,抬升地下水位,从而增加该区域的坎儿井的出水量。

蓄洪入灌地下是有条件的,而吐鲁番独特的地质情况为入灌提供了极好的条件,主要表现在:

(1) 北盆地沉积着数十米至千米的第四系卵砾石、砂砾石、砂及少量粘性土层,为地下水赋存提供了良好的空间,也为蓄洪入灌提供了极佳的入灌条件。吐鲁番盆地是位于天山山脉东部的山间盆地,天山山系的强烈上升使天山南部基底层形成巨大向斜构造,形成吐鲁番盆地坳陷带,周边山体风化剥蚀物在洪流的搬运作用下沉积于坳陷带内,形成山前厚度变化较大的第四纪松散含水层。坳陷带南部和火焰山基底

基岩隆起,起到了强烈的阻水作用,使得北盆地成为一个封闭的内含巨厚砂砾层的空间。由西向东存在3个沉降中心:西部煤窑沟以南最大厚度大于1 000 m;中部连木沁东北最大厚度大于700 m;东部以鄯善火车站为中心,最大厚度大于600 m。一般第四系沉积厚度均大于100 m。含水层由单一结构潜水含水层演化为上部第四纪潜水含水层、下部第三纪裂隙承压含水层,其区域地下水以第四系孔隙潜水及承压水、第三纪碎屑岩类孔隙裂隙承压水的形式广泛赋存空间,这种特殊的地质结构为蓄洪入灌提供了较好的人渗和贮存条件。

(2) 北盆地中部、上部为一由北向南倾斜的山前戈壁平原,由一系列单一卵砾石组成的冲洪积扇构成,地形坡降大于0.4%。并且该区域人烟稀少,为蓄洪入灌提供了开阔的场地。

(3) 北盆地地下水接受山前侧渗和河水的补给,受地形和构造的控制,由山前向南径流,至火焰山—盐山一带受阻而溢出成泉。在构造缺口,直接以地下水径流的方式侧向流入南盆地。由于北盆地地形坡度大,含水层以卵砾石为主,地下水径流条件好。吐鲁番盆地地下水的径流方向与地形坡降基本相同,北盆地地下水由北向南径流(图3)。

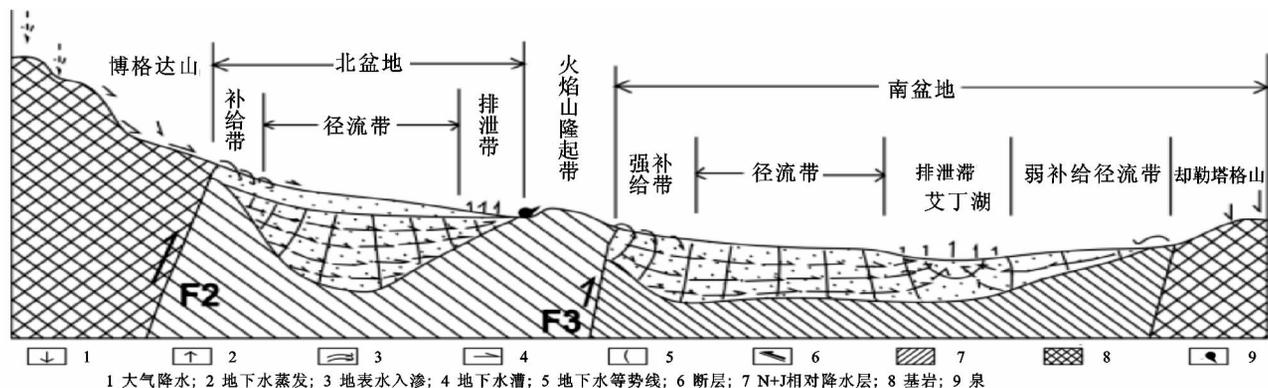


图3 吐鲁番盆地地下水径流示意图

(4) 吐鲁番地区由于降雨较少、蒸发强烈、周边干燥、疏松、裸露的地表土壤剥离侵蚀,并将细小的土壤颗粒吹起、搬运、四处侵袭,因此其主要的水土流失危害因子是风力侵蚀,而水力侵蚀较小。蓄洪入灌后也将会促进冲积扇区域植被生长而减小侵蚀的危害。

从以上分析看出,在吐鲁番盆地北部天山冲积扇区域存在布设蓄洪入灌工程的良好条件。

3 山前冲积扇蓄洪入灌抬升地下水位的数值模拟分析

蓄洪入灌是通过在冲积扇区域修筑低矮拦洪坝

的方式,拦蓄洪水,回灌地下。拦河坝的形式为采用当地砂砾石填筑的均质坝(图4),依据当地的北高南低的地势条件,由北到南连续布置,达到拦蓄洪水的目的。

拦洪坝由冲积扇的上游区开始布置,一直布设到冲积扇的下游区,用以保证拦洪坝能够持续不断地拦截所有的雨洪水。为了高效率地拦截所有的雨洪水,依据地面坡度4.0%,结合所设计的拦洪坝坝高(保证上游拦洪坝坝趾与下游拦洪坝坝顶在同一水平线上),设计的两个拦洪坝之间的距离为54 m。鉴于坝体有过水的可能性,为了保证上下游坝坡不被严重冲刷,坝顶宽度设置为3 m,坝高为2.0 m,上下游坝坡

坡比设置为 1:6。坝体采用当地砂砾石填筑,其抗冲蚀能力较强,同时拦洪坝设计中考虑了挖填平衡,使得挖出来的砂砾石正好填筑拦洪坝,无须设置土料场,节省建设成本。

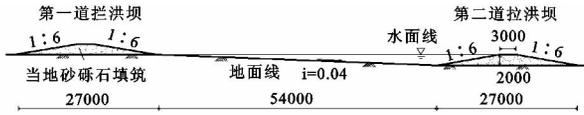


图 4 蓄洪入灌的拦河坝断面形式与布置图

计算中采用非饱和土渗流理论进行,采用有限元方法计算。考虑到拦河坝底部可能有洪水带来的泥沙沉积,会减小入渗量,设置了 5 cm 厚的淤积层。

3.1 非饱和渗流计算原理与参数

非饱和土渗流理论的基本控制方程为^[10~13]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

式中: H 为水头; k 为渗透系数,是吸力的函数; m_w 为土水特征曲线的斜率; γ_w 为水的密度; t 为时间; Q 为边界输入的流量。

在非饱和渗流计算中,渗透系数 k 值在非饱和时会随着吸力的变化而变化。其值可以通过土水特征曲线估算得到。具体方法为通过土水特征曲线和饱和情况下的渗透系数,用 Van Genuchten 估算公式进行估算得到。估算公式为:

$$k_w = k_a \frac{[1 - a s^{n-1} (1 + a^{-m} s^{-mm})]^2}{(1 - a s^n)^{m/2}} \quad (2)$$

式中: k_w , k_a 为吸力为 s 时土的渗透系数值和饱和渗透系数值; a , m , n 为曲线拟合参数, $n = 1/(1 - m)$ 。拟合参数 a , m 可以基于土水特征曲线求得,并将残余体积含水率和饱和含水率之间的土水特征曲线上的数据点作为最佳的拟合位置。

式中: m 值可以由下式计算:

$$m = 1 - \exp \left[- \frac{0.8}{\theta_s - \theta_r} \left| \frac{\Delta \theta_p}{\Delta (\lg s_p)} \right| \right] \quad (3)$$

式中: θ_s , θ_r , θ_p 为饱和、残余体积含水率和体积含水率函数中点对应的体积含水率; s_p 是体积含水率函数中点对应的吸力值。

当 $B_p = \frac{1}{\theta_s - \theta_r} \left| \frac{\Delta \theta_p}{\Delta (\lg s_p)} \right|$ 值在 0~1 时:

$$a = 1 - \frac{0.5755}{B_p} + \frac{0.1}{B_p^2} + \frac{0.025}{B_p^3} \quad (4)$$

当 S_p 大于 1.0 时,则:

$$a = \frac{1}{s} (2^{\frac{1}{m}} - 1)^{1-m} \quad (5)$$

通过试验得到砂砾石层的土水特征曲线见图 5,淤积层参考类似试验确定。各层的饱和渗透系数值

为:拦河坝 5.962 m/d,淤积层 0.086 4 m/d,砂砾石层 11.837 m/d。

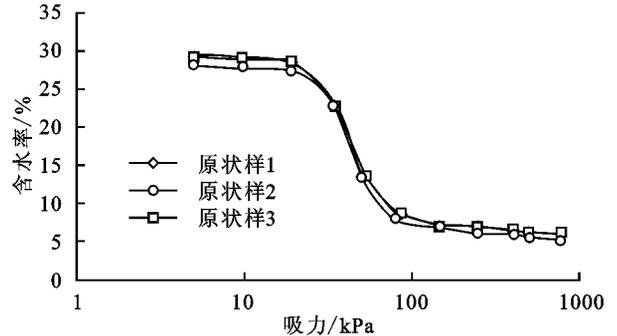


图 5 砂砾石层土水特征曲线

3.2 计算模型

本文采用非饱和土体渗流 GEO-STUDIO 软件进行蓄洪入灌模拟计算。为了计算方便,只进行一个拦河坝影响范围内的渗流计算。模型为单位宽度的拦洪坝,计算范围主要是上下游两个拦洪坝之间的区域,即拦洪坝的实际影响区域。模型设置为:储水空间最大水深为 2 m,上游水位设置为 37 m,地下水埋深设置为 5 m,淤积层厚度设置为 5 cm。模型两侧和底部均设置为不透水边界,即不考虑地下水的排泄,同时也不考虑蓄积水量的蒸发。这样模拟可以反映在大面积情况下的拦洪坝拦蓄洪水情况下的蓄洪入灌的效果。其计算模型如图 6 所示。

由于该工程中,只有拦河坝库内存蓄的水量才能入渗地下,而翻越拦河坝的水不能入渗,这样拦河坝库内水面在整个入渗过程中不断下降,直到库水完全渗入土中为止。因此,计算中上游水面水位按照入渗函数给定,从而反映了这种影响。

3.3 计算结果

蓄水后不同时间段内的地下水位变化过程如图 7 所示。该图示出了拦洪坝方案的地下水位线位置和渗透压力等值线,同时也示出了坝内水深的变化和渗透水流的矢量分布。

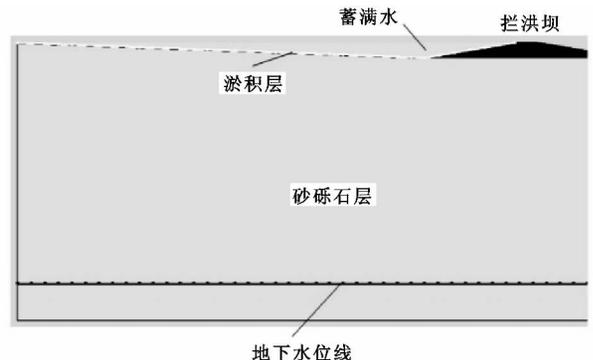


图 6 拦洪坝计算模型

计算表明:从渗流形式上看出,拦洪坝内的水均

以非饱和渗流的形式渗入地下,补充地下水。渗流方向以垂直方向入渗为主,其中在坝内最低点渗透强度较大,而两侧渗透强度较小;拦洪库内水位随入渗时间的延长逐步降低,蓄水初期的坝内水深为2 m,在蓄水后14.2 h坝内水位与坝底高程相同,此时坑内水深为0 m,也就是坑内蓄水全部渗入地下。之后渗入地下的水持续向地下入渗补充地下水,使得地下水位持续上升。从地下水位线变化看,随着入渗时间的延长而地下水位持续抬升,在坝内蓄水全部渗入地下后,地下水位由于局部水位不平衡,仍然在均匀化流

动,最后基本趋于稳定。

坝内水位随入渗时间的增长而持续降低,同时地下水被逐渐抬升,最终地下水位比初始地下水位抬升了13.5 m,抬升幅度较大。以上计算是在假定地下水位没有向下游排泄的条件下进行的,主要考虑到不同地段地下水向下游排泄的坡度有很大的不同,计算无排泄条件下的抬升情况有利于对规律性的认识和理解。若考虑排泄条件,地下水位的抬升会降低,在考虑地下水下游排泄坡度在0.4%~2.0%时,计算蓄洪入灌后地下水抬升量在2~4 m,抬升量也相当可观。

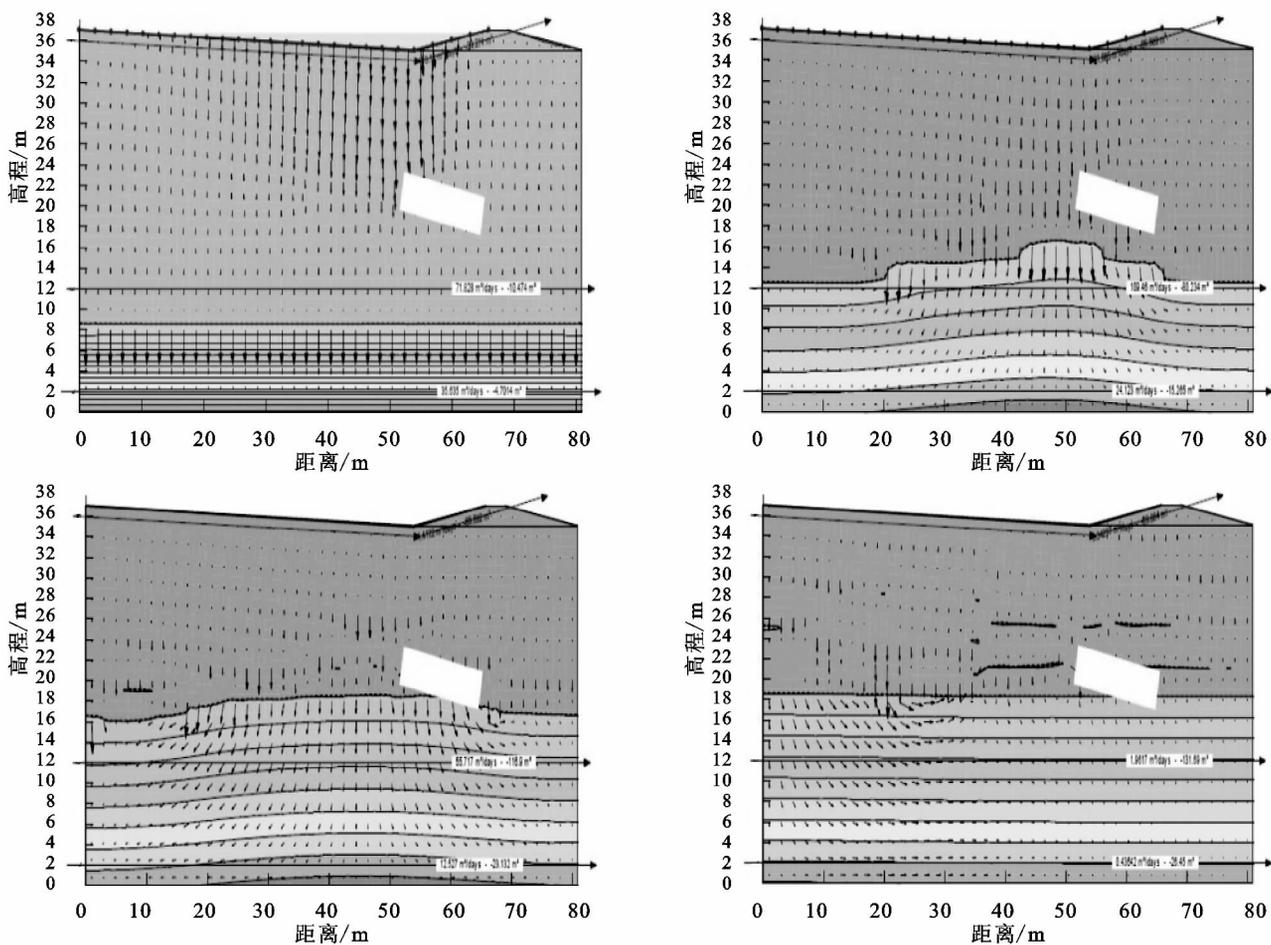


图7 蓄水后不同时间地下水位线与压力水头等值线

以上计算说明,拦河坝库内水可以很快地渗入地下,且可以大幅提升区域内的地下水位,表明采用拦河坝拦蓄洪水入渗地下提升地下水的方法是有效的。

4 入灌后对坎儿井出水量的影响数值分析

为了研究地下水位抬升对坎儿井出水量的影响规律,另外建立了一个三维渗流计算模型,模型范围为 $2\,500\text{ m}\times 2\,500\text{ m}\times 100\text{ m}$,只考虑坎儿井的集水

段,不考虑输水和明渠段。模型中沿 x 方向为水流方向,上下游边界设置为流入和流出边界,左右边界为不透水边界;地层为厚度为100 m的砂砾石层,其饱和渗透系数取值与蓄洪入灌相同。坎儿井呈城门洞型,尺寸为宽1 m,高1.5 m,坎儿井井壁渗透系数与地层渗透系数相同。

计算采用ADINA软件进行。改变坎儿井集水段的地下水位得到汇入坎儿井的水量大小,计算结果见表2。从表中看出:对于集水段长度为2 km的坎儿井,原始地下水位下坎儿井的出水量为 $7\,240\text{ m}^3/\text{d}$

(83.80 L/s),当地下水位抬升时坎儿井出水量持续增加,抬升 2~4 m 时,出水量增加到 9 104~11 758 m³/d(105.37~136.09 L/s),增加了 25.7%~62.4%。说明抬升地下水位可以有效地增加坎儿井的出水量,是保护坎儿井的有效方法。

表 2 地下水位抬升时坎儿井出水量计算结果表

地下水位 抬升量/m	坎儿井出水 量/(m ³ ·d ⁻¹)	出水量增量/ (m ³ ·d ⁻¹)	增加 百分比/%
0.0	7240	0	0.0
1.0	7877	637	8.8
2.0	9104	1864	25.7
3.0	10617	3377	46.6
4.0	11758	4518	62.4
5.0	13001	5761	79.6

5 结论

(1) 在天山南麓冲积扇上修筑低拦洪坝,促使冲积扇上洪水回灌地下,抬升地下水位,不仅可以减轻吐鲁番北盆地的防洪压力,而且可以增加坎儿井的出水量,是坎儿井水源保护的“开源”之策和“治本”措施,合理有效。

(2) 计算表明采用山前冲积扇蓄洪入灌后,在考虑地下水下游排泄坡度在 0.4%~2.0%之间时,可以将地下水抬升 2~4 m,相应附近的坎儿井出水量可以增加 62.4%~25.7%,效果非常明显。

参考文献:

[1] 邢义川,张爱军,王力,等.坎儿井地下水资源涵养与保

护措施研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2016,14(2):129-137.

[2] 张伟,张爱军,邢义川,等.机井和地下水位对坎儿井水量影响的数值模拟[J].排灌机械工程学报,2015,33(5):442-449.

[3] 买尔旦·买买提,张爱军,邢义川,等.辐射管技术在坎儿井水量控制中的应用及数值模拟[J].农业工程学报,2015,31(9):92-99.

[4] 爱斯卡尔·买买提.吐鲁番地区坎儿井的保护与利用[D].西安:长安大学,2010.

[5] 裴建生,王新,艾尼瓦尔·卡德尔,等.新疆吐鲁番盆地的坎儿井保护利用及工程措施[J].干旱区地理,2008,31(5):737-742.

[6] 崔峰,王思明,赵英.新疆坎儿井的农业文化遗产价值及其保护利用[J].干旱区资源与环境,2012,26(2):47-55.

[7] 高春莲.谈吐鲁番坎儿井的利用与保护[J].边疆经济与文化,2012(3):76-77.

[8] 麦麦提.论新疆坎儿井的环境资源价值及其保护[J].甘肃农业,2007(10):33-34.

[9] 邓正新,胡居红.吐鲁番盆地坎儿井的利用与保护探讨[J].干旱环境监测,2008,22(3):165-168.

[10] 谢定义,姚仰平,党发宁.高等土力学[M].北京:高等教育出版社,2008.

[11] Fredlund D G, Rahardjo H.非饱和土土力学[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.

[12] 谢定义.非饱和土土力学[M].北京:高等教育出版社,2015.

[13] 张爱军,邢义川,汪海涛,等.基于增湿变形的渠道工程黄土渠基湿陷性评价方法[J].水利学报,2017,48(1):41-51.

(上接第 365 页)

[28] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等.2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J].地理学报,2012,67(9):1255-1268.

[29] 张宪洲,杨永平,朴世龙,等.青藏高原生态变化[J].科学通报,2015,60(32):3048-3056.

[30] 宋辞,裴韬,周成虎.1960 年以来青藏高原气温变化研究进展[J].地理科学进展,2012,31(11):1503-1509.

[31] 刘雅勤,范广洲,周定文,等.青藏高原冬、春植被归一化指数变化特征及其与高原夏季降水的联系[J].气象学报,2007,65(6):959-967.

[32] 王敏,周才平,吴良,等.近 10a 青藏高原干湿状况及其与植被变化的关系研究[J].干旱区地理,2013,36(1):49-56.

[33] 魏伟,赵军,王旭峰.天祝高寒草原区 NDVI、DEM 与地表覆盖的空间关系[J].干旱区研究,2008,25(3):394-401.

[34] 万红,李希灿,万剑华,等.青藏高原地区不同植被类型 MODIS 植被指数与海拔高度的关系研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(11):39-44.