

DOI: 10.12401/j.nwg.2023055

## 敦煌月牙泉湖水位下降治理研究

李平平<sup>1</sup>, 王晓丹<sup>2</sup>, 黎涛<sup>3,\*</sup>, 刘心彪<sup>1</sup>, 缪云腾<sup>1</sup>, 刘德玉<sup>1</sup>

(1. 甘肃省地下水工程及地热资源重点实验室, 甘肃省地质环境监测院, 甘肃 兰州 730050; 2. 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; 3. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

**摘要:** 敦煌鸣沙山月牙泉以“山泉共处, 沙水共生”的奇妙景观著称于世, 被誉为“塞外风光之一绝”, 是甘肃省著名风景名胜区。但从 20 世纪 70 年代中期开始, 由于党河水库的修建, 河道断流, 地下水补给量减少, 区域地下水位下降, 引起月牙泉湖水位急剧下降, 泉湖底多次部分露出水面, 造成周围地质环境恶化, 严重影响敦煌旅游业的发展, 引起社会广泛关注。自 1986 年开始, 有关部门多次对月牙泉湖实施抢救措施。笔者阐述了月牙泉湖水文地质条件、水位下降的原因及治理过程, 运用 FEFLOW 软件模拟分析预测月牙泉湖不同治理方案情况下, 月牙泉湖水位及面积变化情况。2018 年 4 月, 月牙泉湖治理工程实施后, 月牙泉湖水面逐渐上升扩大, 效果良好。月牙泉湖水位下降治理的成功经验对于西北干旱地区环境治理与修复具有典型的示范和推广价值。

**关键词:** 敦煌月牙泉; 水位下降; 治理研究

中图分类号: P641

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)05-0165-07

### Study on Water Level Decline Control of Yueyaquan Lake in Dunhuang

LI Pingping<sup>1</sup>, WANG Xiaodan<sup>2</sup>, LI Tao<sup>3,\*</sup>, LIU Xinbiao<sup>1</sup>, MIAO Yunteng<sup>1</sup>, LIU Deyu<sup>1</sup>

(1. Gansu Province Key Laboratory of Groundwater Engineering and Geothermal Resources, Geological Environment Monitoring Institute of Gansu Province, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. Institute of Hydrologic and Engineering Geologic Survey, Gansu Province Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Zhangye 734000, Gansu, China; 3. China Geological Environment Monitoring Institute, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Mingsha mountain and Yueyaquan lake in the city of Dunhuang are famous for their wonderful landscapes of “coexistence of mountains and springs, symbiosis of sand and water”. They are known as “one of the most beautiful scenery outside the Great Wall” and are famous scenic spots in Gansu province. However, since the mid-1970s, due to the construction of the Danghe reservoir, the river was cut off, the groundwater replenishment was reduced, and the regional groundwater level dropped, causing the water level of the Yueyaquan lake to drop sharply and the bottom of the spring lake had repeatedly partially exposed to the surface of the water, causing the deterioration of the surrounding geological environment, seriously affecting the development of Dunhuang's tourism industry, and causing widespread concern in the society. Since 1986, relevant departments have implemented multiple rescue measures on Yueyaquan lake. This paper describes the hydrogeological conditions of Yueyaquan lake, the causes of water level decline and the treatment process, FEFLOW software is

收稿日期: 2021-10-15; 修回日期: 2022-05-08; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 甘肃省地下水工程及地热资源重点实验室开放基金项目“敦煌月牙泉水环境恢复治理研究”(201902)资助。

作者简介: 李平平(1990-), 男, 高级工程师, 主要从事水文水资源调查评价。E-mail: Xiaopingcumt@163.com。

\* 通讯作者: 黎涛(1984-), 男, 博士, 主要从事水文水资源调查评价。E-mail: lit@mail.cigem.gov.cn。

used to simulate, analyze and predict the different treatment scenarios of the Yueyaquan Lake, changes in water level and area of the Lake. After the implementation of the Yueyaquan lake treatment project in April 2018, the water surface of the Yueyaquan lake has gradually risen and expanded, with good results. The successful experience in the treatment of the decline in the water level of the Yueyaquan lake has a typical demonstration and promotion value for environmental treatment and restoration in the arid area of Northwest China.

**Keywords:** Yueyaquan lake in Dunhuang; water level decline; governance research

月牙泉湖地处敦煌市南部的鸣沙山之中, 处于一个北西南三面沙山环抱东面开口的半封闭形洼地中, 总的地形南北部高, 中东部低, 形酷似一弯新月(李平等, 2020)。敦煌鸣沙山月牙泉是甘肃省著名风景名胜, 以“山泉共处, 沙水共生”的奇妙景观著称于世, 被誉为“塞外风光之一绝”。月牙泉湖形成距今约为 12 ka(许朋柱等, 2002)。对于月牙泉湖的形成研究者有上升泉、断层泉、风成泉、基岩裂隙泉、沙漠地下水溢出泉和古河道残留湖等 6 种观点(孙显科等, 2006; 尹念文等, 2010), 由于缺乏充分的资料和专门性的研究, 对上述观点仍存在较大分歧(张号等, 2014), 没有形成科学的定论。从 20 世纪 70 年代开始, 由于党河水库的修建、渠道衬砌及垦荒造田大面积抽水灌溉引起区域地下水位急剧下降, 从而导致月牙泉湖水位急剧下降, 逐渐威胁月牙泉存亡(安志山等, 2013, 2016), 以致于从 1986 年开始月牙泉湖底多次露出水面, 形成 2 个小泉成葫芦形, 造成月牙泉周围环境地质的恶化, 导致敦煌市旅游资源的衰竭(张克存等,

2012)。近年来, 国内虽有学者对月牙泉泉域沉积环境及泉水的形成、水位下降等原因进行探讨分析, 这些研究结果对月牙泉湖的形成及治理具有重要意义。笔者梳理前人研究成果, 分析月牙泉形成的水文地质条件, 探讨月牙泉湖水位下降的原因, 论证月牙泉水位下降过程中不同时期的治理措施与效果。

## 1 月牙泉湖水文地质条件

月牙泉湖地处河西走廊西端内陆敦煌盆地, 气候干燥, 多年平均降水量仅 39.1 mm, 蒸发量高达 2 487.7 mm, 蒸发量为降水量的 62 倍。月牙泉湖在党河洪积扇与西水沟洪积扇之间的风蚀沙漠洼地之中形成, 因地形低洼风蚀切割地下水出露, 为第四系松散岩类孔隙潜水含水层, 含水层厚度达数百米(图 1), 砂质纯净, 富水性丰富, 水质良好。党河是补给月牙泉湖唯一的一条河流(图 2), 河道距月牙泉湖最近处约为 4.5 km, 地下水自西南向东北径流, 泉域水力坡度为 0.2%~0.3%

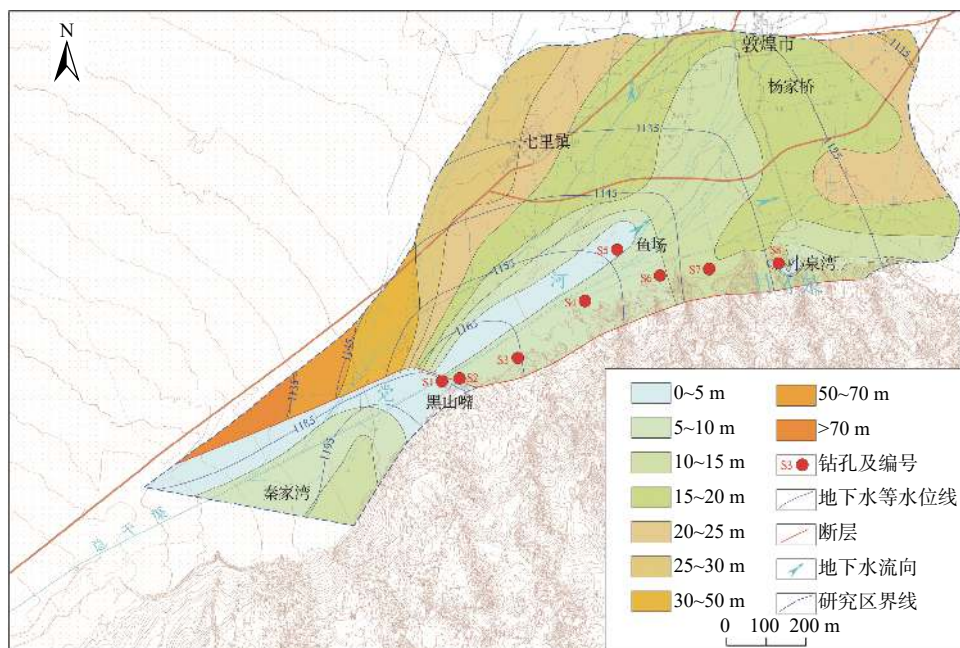


图 1 敦煌月牙泉地区地下水埋深及等水位线图

Fig. 1 Groundwater depth and water level map in the Yueyaquan area of Dunhuang

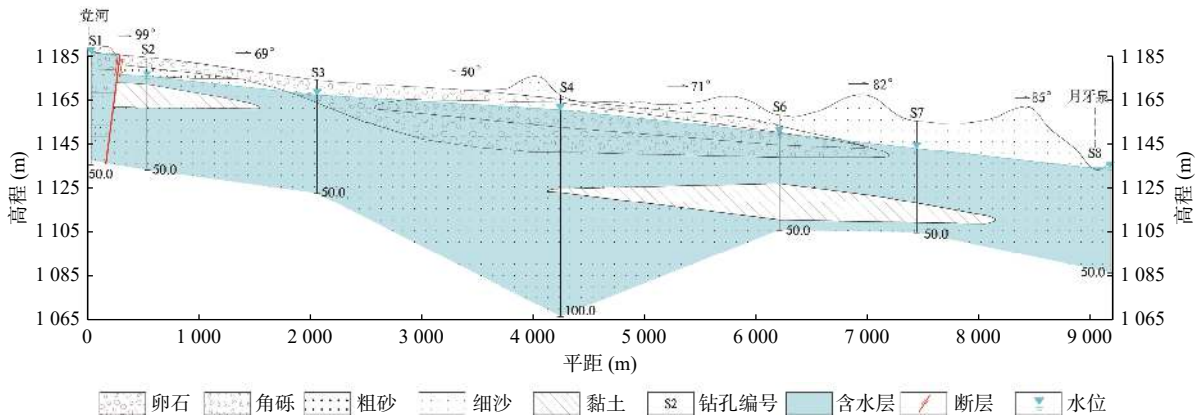


图 2 党河河道地下水与月牙泉水位关系剖面图

Fig. 2 Section diagram of relationship between water level of the Danghe river and groundwater of the Yueyaquan

(杨俊仓等, 2003; Tu, 2009), 单井涌水量一般小于 1 000 m<sup>3</sup>/d, 渗透系数为 0.50~6.43 m/d, 矿化度为 0.60~1.0 g/L, 月牙泉地下水化学类型以 SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub>-Na-Mg-Ca 型或 SO<sub>4</sub>-Cl-Na 型为主(黎涛等, 2013)。

## 2 月牙泉水位下降原因分析

### 2.1 月牙泉水位动态特征

20 世纪 60 年代以前, 人类活动对月牙泉水位影响极小, 湖水位一直相对稳定(图 3), 是一种天然状态下的补给、径流、排泄过程(张文化等, 2009), 即便是严重干旱的年份, 月牙泉湖也没有出现萎缩现象(袁国映等, 1997; 丁宏伟等, 2004)。从 70 年代中期开始, 月牙泉水位急剧下降, 以致于月牙泉湖底几度部分露出水面, 到 90 年代后期, 月牙泉接近枯涸。2008 年开始, 月牙泉湖应急治理工程实施后水位开始缓慢上升(桑学锋等, 2007), 为月牙泉湖后期的治理赢得了时间; 2018 年 4 月, 月牙泉湖恢复治理工程实施以来, 月牙泉水位快速上升, 当年上升了 1.58 m, 遏制了月牙泉湖周边环境地质的进一步恶化。

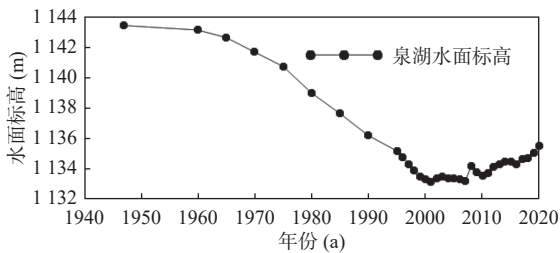


图 3 1947~2020 年月牙泉水位动态变化趋势图

Fig. 3 Active change trend of water level of the Yueyaquan lake from 1947 to 2020

### 2.2 泉湖水位下降影响因素分析

月牙泉湖地处河西走廊西端内陆, 属典型的大陆性气候(Li et al., 2009; 张晨等, 2016)、温热沙漠型气候区, 降水量少(冀钦等, 2018; 柴娟等, 2018), 蒸发强烈, 是干旱气候区的显著特征(岳峰等, 2007)。月牙泉湖面年蒸发消耗量为 1.338 2×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>, 月牙泉水来自西部党河冲洪积平原区地下水的补给, 只要区域地下水位始终保持一定的高度, 水面蒸发对泉水水位的影响微乎其微。

泉湖域地下水的运动规律大体上受区域地下水位控制, 径流方向与党河地表水系状况基本一致, 总体泉湖周围地下水径流方向为由西南向东北。党河水库修建前, 党河河道处自然径流状态(Phan et al., 2008; 韩积斌等, 2019), 通过入渗补给地下水, 月牙泉湖处于稳定状态。1975 年党河水库的修建及后期高标准输水渠道的修建, 党河基本断流, 大部分河水被引入灌区, 灌溉敦煌绿洲。输水渠道的修建, 从而代替了原来以河道流水为主的自然水流输送状态, 造成入渗补给地下水量迅速减少, 导致区域性地下水位下降, 并进一步对月牙泉湖产生影响(安志山等, 2013, 2016)。近半个世纪以来, 特别是改革开放以来, 敦煌随着人口的快速增长和旅游业的快速发展, 种植面积不断扩大, 区域内用水量剧增, 人们开始开采地下水(施锦等, 2014)。1971 年到 1997 年再到 2007 年及 2019 年, 敦煌市地下水开采机井由 400 余眼发展到 1 134 眼再快速发展到 3 217 眼及 3 231 眼(李平等, 2020), 机井数量逐年增加(Zhu et al., 2015; 祁泽学等, 2018), 开采地下水量(Katsifarakis, 2008; Gaur et al., 2011; Lan et al., 2015)由小于 1 000×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>增加到 4 123.72×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,



再增加到近  $13\ 084 \times 10^4 \text{ m}^3$  及  $6\ 440 \times 10^4 \text{ m}^3$  (图 4), 地下水严重超采(张明泉等, 2004), 地下水位持续下降(李平平, 2019), 造成区内地下水补给、排泄严重失衡和区域地下水位的下降(Garth et al., 2008), 月牙泉水域不断萎缩(张克存等, 2012)。2007 年以后, 地下水开采量逐渐减少, 月牙泉水位开始缓慢上升。

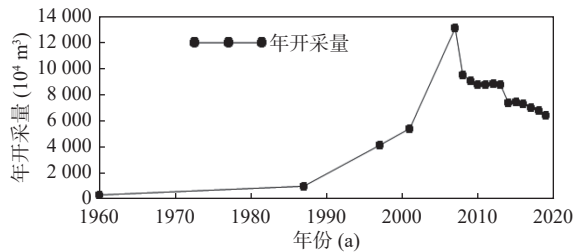


图 4 敦煌地下水开采量变化曲线图

Fig. 4 Variation curve of groundwater exploitation in Dunhuang

### 3 治理工程

#### 3.1 淘泉工程和注水工程

月牙泉水位持续下降, 1986 年月牙湖中部泉底出露变成“亚铃形”, 水域面积缩小到  $4\ 600.0 \text{ m}^2$ , 最大水深为 1.9 m。于当年 10 月 15 日开始掏泉工程, 历时 45 d, 掏泉工程只增大水面以下深度, 并不能提高泉湖水位的海拔标高。

1988 年 10 月, 在小泉湾利用人工湖开始向月牙泉进行注水(2 根 100 mm 暗管), 注水历时 15 d, 注水量约为  $28\ 460 \text{ m}^3$ , 期间泉湖水面上升 65.2 cm。停止注水约 31 天后, 湖水下降 61 cm。注水工程期间, 由于注水水质与月牙泉水质相差较大, 导致月牙泉水变浑浊。

#### 3.2 渗水试验

为了不使月牙泉湖在 2001 年干涸, 于当年 3 月 9 日在小泉湾林草地直接利用人工湖地表水进行灌溉渗水, 灌水量约为  $32 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 期间月牙泉水位升高 0.496 m。渗水期间泉湖水由清变浑浊, pH 值由 7.8 变到 9.0, 在泉湖周边的林草灌地出现盐渍化即土壤次生盐碱化迹象。

#### 3.3 应急治理工程

2007 年 4 月开始月牙泉湖近期工程, 工程包括供水工程、输水工程、水处理工程和渗水工程 4 部分组成。2007 年 3 月 12 日开始渗水, 日渗水量为  $10\ 000 \text{ m}^3$ ,

到 6 月 15 日上升了 1.70 m; 泉域面积由  $5\ 333.3 \text{ m}^2$  扩大到  $7\ 333.3 \text{ m}^2$ , 9 月 15 日扩大到  $11\ 200.0 \text{ m}^2$ 。此后, 月牙泉水位基本稳定且缓慢上升。

#### 3.4 水位恢复治理工程

为遏制月牙泉水位下降, 使月牙泉湖及周边生态恶化趋势得以遏制, 不再恶化, 提出了月牙泉恢复补水工程, 即通过综合治理使月牙泉湖面积和水深实现恢复性转变, 逐步恢复水深并提高到 2.0 m 以上, 恢复月牙形状, 满足自然景观要求。本研究采用国际上较为流行的 FEFLOW 软件模拟(吕晓立等, 2020), 按照研究区地下水的补给、径流与排泄关系, 计算地下水流场, 根据监测孔水位数据进行拟合(朱亮等, 2020), 最后通过模型进行预测分析不同地段补水后水位变化及月牙泉上升至 2.0 m 所需的水量。

## 4 结果与分析

#### 4.1 自然洼地补水

利用鸣沙山前的自然洼地地段进行补水, 每年所需补水量为  $1\ 004.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 加上蒸发损耗量约占渗水量 30%, 每年总补水量为  $1\ 306.24 \times 10^4 \text{ m}^3$  的情况下, 月牙泉水位由 1 134.24 m 上升到 1 135.44 m, 可提升 1.2 m (图 5、图 6)。

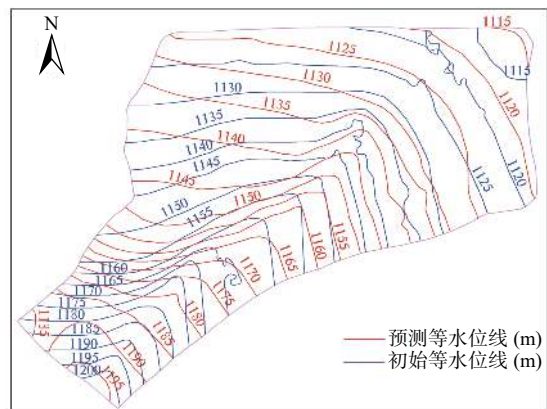


图 5 补水前后地下水流场对比图

Fig. 5 Comparison of groundwater flow field before and after water replenishment

#### 4.2 党河河道补水

黑山嘴子至鱼场段长为 5.92 km, 单位面积渗水量为  $1.51 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ , 包气带厚度为 3.595 m, 每天可入渗量为  $32\ 136.424 \text{ m}^3$ , 年补水时间按 258 d 计, 共可入渗量为  $1\ 658.24 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。在此补给条件下, 通过模拟计算, 河

道入渗补给量为  $1\ 658.24 \times 10^4\ \text{m}^3$  的情况下, 月牙泉湖水水位可上升 2.0 m(图 7、图 8)。

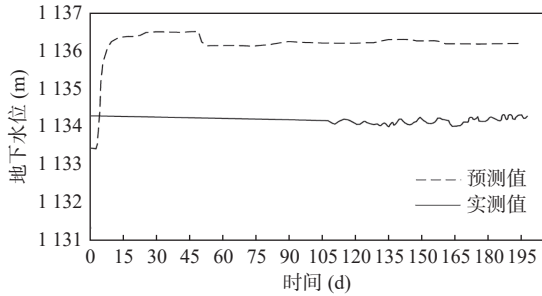


图 6 月牙泉湖水水位变化对比曲线图

Fig. 6 Comparison curve of water level change in Yueyaquan lake

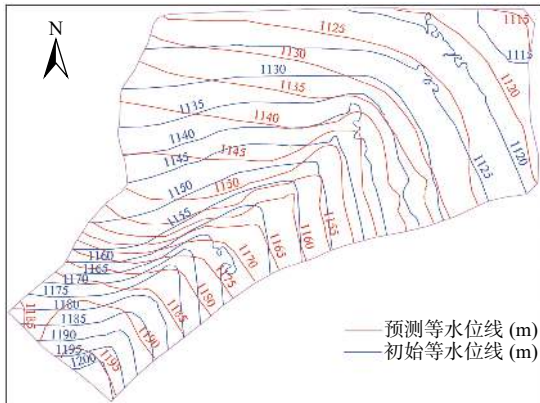


图 7 补水前后地下水流场对比图

Fig. 7 Comparison of groundwater flow field before and after water replenishment

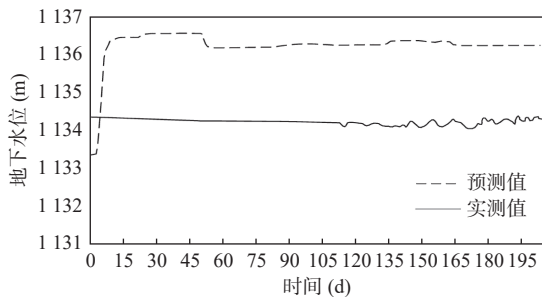


图 8 月牙泉湖水水位变化对比曲线图

Fig. 8 Comparison curve of water level change in Yueyaquan lake

### 4.3 对比分析

#### 4.3.1 从地下水流场分析

研究区地下水初始等水位线可看出, 不管在丰水期还是枯水期, 研究区南部鸣沙山前黑山嘴子至 S6 监测孔之间地下水流向基本均为自西向东径流至月

牙泉, 该段地下水位于月牙泉上游, 对月牙泉的补给方式最为直接。

#### 4.3.2 从地下水水力坡降分析

根据监测数据, 党河河道中没有地表水入渗补给时, S5 与月牙泉湖形成的天然水力坡降为 4.658%; 当党河河道泄水量  $3\ 887.36 \times 10^4\ \text{m}^3$  时, 导致 S5 水位升高, 与月牙泉湖之间的水力坡降增大至 5.534%。随着时间的径流, 党河河道下部形成的“水丘”向东南侧的月牙泉湖扩散, 最终导致月牙泉水位上升。从 S5 上游进行补水其效果要好于 S5 以下段。

#### 4.3.3 从补水所需水量分析

鸣沙山前自然洼地地段每年补水量为  $1\ 306.24 \times 10^4\ \text{m}^3$ , 月牙泉湖水水位可提升 1.2 m。党河河道每年补水量为  $1\ 658.24 \times 10^4\ \text{m}^3$ , 月牙泉湖水水位可提升 2.0 m。在党河河道补水需水量要大于鸣沙山前自然洼地补水需水量但月牙泉湖水水位能上升 2.0 m, 分析表明党河河道补水方案为最佳。

### 4.4 恢复补水工程效果

按照 FEFLOW 软件模拟补水方案, 月牙泉湖恢复补水工程修建于党河河道黑山嘴下游, 修建 12 个渗水场, 最大蓄水量为  $98 \times 10^4\ \text{m}^3$ ; 2017 年 10 月开始蓄水, 保证了月牙泉湖地下水的补给来源; 补水开始后月牙泉湖水水位呈上升趋势, 湖面上升 1.58 m, 年均上升 0.53 m, 月牙泉湖水域面积由  $11\ 183.31\ \text{m}^2$  也逐渐扩大到  $18\ 334.75\ \text{m}^2$ 。

恢复补水工程发现, 党河水未进行除砂除泥处理直接引入渗水场, 水位下降后底部有一层沉淀淤泥, 随着时间越长淤泥越厚。淤泥透水性很差并未作处理, 随着淤泥厚度的增加, 渗水场内水体下渗速度逐渐降低, 最终会形成一潭死水而无法下渗。

## 5 结论

(1) 月牙泉湖水水位下降由自然因素和人为因素所造成, 其中人为因素是导致月牙泉水位下降最主要原因, 也是最直接原因。泉水水位的下降导致周围环境地质的恶化和旅游资源的衰竭。

(2) 月牙泉湖水位的急剧下降和周围环境地质的恶化, 引起党和国家领导人及相关部门的极大关注。1986 年开始, 先后进行淘泉工程、注水工程、渗灌工程及应急治理工程等一系列的治理工程, 效果都不尽人意, 为了从根本上解决月牙泉湖水水位下降问题, 开

始实施恢复补水工程。

(3)FEFLOW 软件模拟预测表明,鸣沙山前自然洼地地段每年补水量为  $1\ 306.24 \times 10^4\ \text{m}^3$ ,月牙泉湖水可提升 1.2 m;党河河道每年补水量为  $1\ 658.24 \times 10^4\ \text{m}^3$ ,月牙泉湖水可提升 2.0 m。党河河道补水效果最佳。

(4)补水方案实施后,月牙泉湖水面上升了 1.58 m,水域面积扩大到  $18\ 334.75\ \text{m}^2$ ,达到预期效果。恢复补水工程直接把党河水引入渗水场,随着时间的推移渗水场底部逐渐沉淀一层淤泥,此淤泥透水性很差并未作处理,水体下渗速度逐渐降低。此外,关于短期监测中发现问题与判定仍需进一步监测与研究。

## 参考文献(References):

- 安志山,张克存,牛清河,等.敦煌鸣沙山月牙泉景区高大沙丘短期动态变化特征[J].干旱区研究,2016,33(5):981-987.
- AN Zhishan, ZHANG Kecun, NIU Qinghe, et al. Short-term Dynamic Change of Mega-dunes around the Crescent Spring in Dunhuang[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(5): 981-987.
- 安志山,张克存,王晓雷,等.敦煌月牙泉风沙环境及沙山动态监测[J].干旱区资源与环境,2013,27(3):115-120.
- AN Zhishan, ZHANG Kecun, WANG Xiaolei, et al. Dynamic monitoring of sand hill and wind-blown sand environment in the scenic spots of Crescent Moon Spring in Dunhuang, China[J]. Journal of Arid Land Resource and Environment, 2013, 27(3): 115-120.
- 柴娟,刘莎.兴平市地下水位动态变化及影响因素分析[J].地下水,2018,40(5):46-49.
- CHAI Juan, LIU Sha. Characteristics and Influencing Factors of Groundwater Level Dynamics in Xingping City[J]. Under-ground Water, 2018, 40(5): 46-49.
- 丁宏伟,龚开诚.敦煌月牙泉湖水持续下降原因及对策分析[J].水文地质工程地质,2004,31(6):74-77.
- DING Hongwei, GONG Kaicheng. Analyses of the reasons and countermeasures for the decline in the water level of the Crescent Spring Lake near Dunhuang[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, 31(6): 74-77.
- 韩积斌,许建新,徐凯,等.柴达木盆地尕斯库勒盐湖地表水—地下水的转化与轴的补给通量[J].湖泊科学,2019,31(06):1738-1748.
- HAN Jibin, XU Jianxin, XU Kai, et al. The exchange relationship of surface water-groundwater and uranium flux in the Gas Hure Salt Lake of northwest Qaidam Basin, China[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(06): 1738-1748.
- 冀钦,杨建平,陈虹举.1961-2015年青藏高原降水量变化综合分析[J].冰川冻土,2018,40(6):1090-1099.
- Ji Qin, YANG Jianping, CHEN Hongju. Comprehensive analysis of the precipitation changes over the Tibetan Plateau during 1961~2015[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(6): 1090-1099.
- 李平平,王晓丹,缪云腾,等.敦煌月牙泉湖近百年水位变化及其原因分析[J].地质论评,2020,66(6):1619-1625.
- LI Pingping, WANG Xiaodan, MIAO Yunteng, et al. The Change of water level and its causes in Crescent Lake in Dunhuang area in the last 100 years[J]. Geological Review, 2020, 66(6): 1619-1625.
- 李平平.甘肃省地下水超采区地面沉降控制区判定方法和结果探讨[J].中国农村水利水电,2019,(6):74-77.
- LI Pingping. Determination Method and Discussion of Ground Subsidence Control Area of Groundwater Overmining Area in Gansu Province[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019, (6): 74-77.
- 黎涛,杨俊仓,苏春丽,等.敦煌月牙泉域沉积环境及泉湖水化学成因分析[J].干旱区地理,2013,36(5):812-817.
- LI Tao, YANG Juncang, SU Chunli, et al. Strata sedimentary environment and hydrochemistry cause of Lake Grescent Spring in Dunhuang[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(5): 812-817.
- 吕晓立,刘景涛,周冰,等.新疆塔城盆地地下水中铁锰分布特征及人类活动的影响[J].中国地质,2020,47(6):1765-1775.
- LV Xiaoli, LIU Jingtao, ZHOU Bing, et al. Fe and Mn distribution of groundwater and impact of human activities in the Tacheng Basin, Xinjiang[J]. Geology in China, 2020, 47(6): 1765-1775.
- 祁泽学,汪生斌,王万平,等.气格尔木河冲洪积平原地下水开采潜力分析[J].人民黄河,2018,40(06):66-71.
- QI Zexue, WANG Shengbin, WANG Wanping, et al. Analysis of Sustainable Groundwater Resources Development Scenarios in the Golmud Alluvial Plain[J]. Yellow River, 2018, 40(06): 66-71.
- 桑学锋,张明泉,王浩,等.敦煌盆地地下水数值模拟及可视化与管理[J].兰州大学学报:自然科学版,2007,43(3):18-22.
- SANG Xuefeng, ZHANG Mingquan, WANG Hao, et al. Visual simulation and management of groundwater in Dunhuang Basin[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2007, 43(3): 18-22.
- 施锦,王建红.机井开采对月牙泉水位的影响及应对措施[J].地下水,2014,36(6):57-58.
- SHI Jin, WANG Jianhong. Groundwater Exploitation Influence on Crescent Lake Water Level and Its Countermeasures[J]. Under-ground Water, 2014, 36(6): 57-58.
- 孙显科,吕亚军,张大治,等.风成沙地地形 1/10 定律的研究与

- 敦煌鸣沙山成因的猜想[J]. 中国沙漠, 2006, 26(5): 704-710.
- SUN Xianke, LV Yajun, ZHANG Dazhi, et al. Probe into the "one-tenth" Law of Aeolian Sandy Landform and Guess at Causes of Sand-dinging Mountain in Dunhuang[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(5): 704-710.
- 许朋柱, 秦伯强. 太湖湖滨带生态系统退化原因以及恢复与重建设想[J]. 水资源保护, 2002, 18(3): 31-36.
- XU Pengzhu, QIN Boqiang. Degeneration of ecosystem of lakeside zone around Taihu Lake and planning for its rehabilitation[J]. Water Resources Protection, 2002, 18(3): 31-36.
- 杨俊仓, 张川. 月牙泉渗流场数学模型及治理方案研究[J]. 西北水资源与水工程, 2003, 14(3): 25-28.
- YANG Juncang, ZHANG Chuan. The selection of leakingflow fields mathematical model and harnessing program in Crescent Spring[J]. Northwest Water Resources & Water Engineering, 2003, 14(3): 25-28.
- 尹念文, 魏玉涛. 月牙泉的成因分析[J]. 地下水, 2010, 32(2): 20-22.
- YIN Nianwen, WEI Yutao. The analysis about the causes of crescent lake[J]. Ground Water, 2010, 32(2): 20-22.
- 袁国映, 赵子允. 楼兰古城的兴衰及其与环境变化的关系[J]. 干旱区地理, 1997, 20(3): 7-12.
- YUAN Guoyang, ZHAO Ziyun. Relations between the rise and the decay of the ancient city, Loulan and its environmental change[J]. Arid Land Geography, 1997, 20(3): 7-12.
- 岳峰, 董霁红, 温秀琴. 敦煌市月牙泉景观衰退的原因及对策[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2): 200-202+206.
- YUE Feng, DONG Wenhong, WEN Xiuqin. The Decadent Reason and Countermeasure of Crescent Spring View of Dunhuang City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(2): 200-202+206.
- 张晨, 来世玉, 高学平, 等. 气候变化对湖库水环境的潜在影响研究进展[J]. 湖泊科学, 2016, 28(4): 691-700.
- ZHANG Chen, LAI Shiyu, GAO Xueping, et al. A review of the potential impacts of climate change on water environment in lakes and reservoirs[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(4): 691-700.
- 张号, 张克存, 安志山, 等. 敦煌月牙泉景区沙丘粒度特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 645-639.
- ZHANG Hao, ZHANG Kecun, AN Zhishan, et al. Grain size characteristics of sand dunes around the Crescent Moon Spring in Dunhuang, China[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(3): 645-639.
- 张克存, 牛清河, 屈建军, 等. 敦煌鸣沙山月牙泉景区风沙环境分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(4): 896-900.
- ZHANG Kecun, NIU Qinghe, QU Jianjun, et al. Analysis of Wind-blown Sand Environment in the Singing Sand Mountain & Crescent Moon Spring Scenic Spot in Dunhuang, China[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(4): 896-900.
- 张明泉, 曾正中, 蔡红霞, 等. 敦煌月牙泉水环境退化与防治对策[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2004, 40(03): 99-102.
- ZHANG Mingquan, ZENG Zhengzhong, CAI Hongxia, et al. A study of degradation of water system and some control measures in the Moon Lake of Dunhuang Region[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2004, 40(03): 99-102.
- 张文化, 魏晓妹, 李彦刚. 气候变化与人类活动对石羊河流域地下水动态变化的影响[J]. 水土保持研究, 2009, 16(01): 183-187.
- ZHANG Wenhua, WEI Xiaomei, LI Yangang. Groundwater Dynamic Evolution Under Climatic Change and Human Activities in Shiyang River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(01): 183-187.
- 朱亮, 刘景涛, 杨明楠, 等. 1998年以来兰州市地下水环境变化及驱动因素[J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1677-1687.
- ZHU Liang, LIU Jingtao, YANG Mingnan, et al. Changes and driving factors of groundwater environment in Lanzhou since 1998[J]. Geology in China, 2020, 47(6): 1677-1687.
- Garth V D K, Dwayne K, Marlene S E. Long-Term Water Level Changes in Closed-Basin Lakes of the Canadian Prairies[J]. Canadian Water Resources Journal, 2008, 1(1): 23-38.
- Katsifarakis K L. Groundwater Pumping Cost Minimization-an Analytical Approach[J]. Water Resources Management, 2008, 8(8): 1089-1099.
- Lan Yingying, Jin Menggui, Yan Chun, et al. Schemes of groundwater exploitation for emergency water supply and their environmental impacts on Jiujiang City, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 5(5): 2365-2376.
- Li Zhi, Liu Wenzhao, Zhang Xunchang, et al. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology, 2009, (1-2): 35-42.
- Phan S V, Leavitt P R, McGowan S. Spatial variability of climate and land-use effects on lakes of the northern Great Plains[J]. Limnology and Oceanography, 2008, 2(2): 728-742.
- Gaur S, Mimoun D, Graillet D. Advantages of the analytic element method for the solution of groundwater management problems[J]. Hydrological Processes, 2011, 25(22): 3426-3436.
- Tu J. Combined impact of climate and land use changes on streamflow and water quality in eastern Massachusetts, USA[J]. Journal of Hydrology, 2009, (3-4): 268-283.
- Zhu Lin, Gong Huili, Li Xiaojuan, et al. Land subsidence due to groundwater withdrawal in the northern Beijing plain, China[J]. Engineering Geology, 2015, 193(02): 243-255.