

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222492

# 吐鲁番盆地坎儿井冬闲水回灌适宜性评价及回灌方式研究

陈 泽<sup>1,2</sup>, 吴 彬<sup>1,2</sup>, 高 凡<sup>1,2</sup>, 杜明亮<sup>1,2</sup>

(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:** 为了实现吐鲁番盆地坎儿井冬闲水资源的有效利用,同时回补区域地下水,亟需建设地下水回灌工程,并确定合理的工程建设位置及有效的回灌方式。首先基于坎儿井流量、回灌水源距离、含水层渗透系数、地下水埋深、机井密度及地形坡度6项指标构建地下水回灌适宜性评价体系,利用 ArcGIS 空间分析功能进行地下水回灌适宜性区划,并在典型回灌适宜区开展现场试验确定地下水回灌方式。结果表明,高昌区中部、鄯善县北盆地灌区及托克逊县东北部部分区域具有丰富的回灌水源及储水空间,整体渗透系数均大于 15 m/d,适宜开展坎儿井冬闲水回灌;利用机电井回灌的井灌方式,能实现对地下水的有效回补,适用于研究区坎儿井冬闲水回灌。

**关键词:** 地下水回灌;适宜性;回灌方式;吐鲁番盆地;坎儿井

**中图分类号:** TV213.9; P641

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)05-0139-05

## 1 概况

吐鲁番盆地位于新疆中部偏东,辖高昌区、鄯善县、托克逊县3个县区。吐鲁番盆地是天山东部的大型封闭山间盆地,北、南、西三面分别被博格达山、却勒塔格山、喀拉乌成山环绕,东部以低矮丘陵与哈密盆地分开。火焰山、盐山横贯东西,将盆地分割为南、北两个次一级盆地,南盆地中部艾丁湖海拔-154 m,为中国内陆最低点。特殊的地理位置及盆地内的地形、地势造成了独特的暖温带干旱沙漠气候,特点为干旱、高温、多风,降雨量由南向北随着海拔降低递减,盆地内多年平均降水量仅为 16.7 mm。第四系松散沉积物为盆地内分布最广的地层,为地下水储存运移的主要场所。北盆地地下水补给主要依靠大河沿河、二塘沟等9条河流的山前侧向补给及渗漏补给,含水层以砂砾石为主,地下水径流条件好,径流方向与地形坡度基本一致,由北向南,至火焰山溢出形成泉。南盆地地下水补给主要依靠乌成山水系5条河流、白杨河河床侧向补给及渗漏补给,以艾丁湖为中心形成封闭盆地,含水层主要成分为砂

砾石、卵砾石、砂和粘性土层,径流方向由四周流向低洼的艾丁湖。地下水的主要排泄方式为人工开采、坎儿井开采及潜水蒸发。研究区补、径、排示意图见图1。

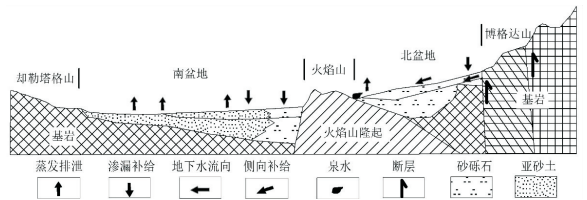


图1 研究区地下水补、径、排条件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of groundwater recharge and discharge conditions in study area

坎儿井是干旱、半干旱地区一种特殊的取水方式<sup>[1]</sup>,在极度干旱的吐鲁番盆地广泛分布。据调查资料显示,2021年吐鲁番盆地有水坎儿井共162条,年出水量 $1.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。坎儿井水常年自流,在非灌溉期除部分用于生态生活用水,大部分水量通过涝坝蒸发,造成水资源的严重浪费,初步计算坎儿井冬闲水总量为 $4\,000 \text{ m}^3/\text{a}$ 。利用坎儿井冬闲水进行地下水回灌,一方面能实现水资源的高效利用,另一方面可缓解地下水位下降、涵养

收稿日期: 2022-11-28, 修回日期: 2023-01-05

基金项目: 新疆自然科学基金项目(2021D01A99);新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室研究项目(ZDSYS-YJS-2021-08)

作者简介: 陈泽(1997-),男,硕士研究生,研究方向为地下水管理及保护,E-mail:1205360309@qq.com

通讯作者: 吴彬(1972-),男,博士、教授、博导,研究方向为内陆干旱区水资源利用,E-mail:wubinxi@163.com

地下水源。选择适宜的地下水人工补给地点是提高补给效率的关键<sup>[2]</sup>。本文基于多指标综合评价法<sup>[3]</sup>,根据回灌水源条件、含水层条件、工程建设条件建立评价体系,利用 GIS 空间分析划分了吐鲁番盆地地下水回灌的适宜性地区,在此基础上,在典型适宜区开展地下水现场试验,确定了利用农用机井作为回灌井的井灌方式并验证了其可行性,可为吐鲁番盆地坎儿井冬闲水回灌工程建设提供参考。

## 2 基于 GIS 的地下水回灌适宜性分区

以不动用大规模水利工程及开凿回灌井为原则,优先采用以机电井作为回灌井,实现坎儿井冬闲水回灌。确定坎儿井冬闲水回灌的主要影响因素,采用专家打分结合已有研究成果对各指标进行分级评分,采用层次分析法计算各指标权重,通过 GIS 技术评价坎儿井冬闲水回灌的适宜性。

### 2.1 数据收集及指标评分

针对坎儿井冬闲水适宜性评价,考虑影响回灌的主要因素,选择的评价指标包括坎儿井流量、回灌水源距离、地下水埋深、含水层渗透系数、机井密度、地形坡度。

(1)坎儿井流量。坎儿井流量越大,可利用有回灌水量越充足。根据 2021 年坎儿井调查结果,绘制坎儿井流量分布图(图 2(a))。将坎儿井流量划分为 < 100、100 ~ 300、300 ~ 500、500 ~ 1 000、>1 000 m<sup>3</sup>/h 5 个等级(表 1)。

(2)回灌水源距离。回灌水源距离越远,引水所需成本越高,同时回灌水源受到污染的风险越大。根据坎儿井渠道分布,绘制据坎儿井距离分布图(图 2(b)),参考罗飞<sup>[4]</sup>对回灌水源距离的分级原则,将其划分为 >1 000、500 ~ 1 000、300 ~ 500、100 ~ 300、<100 m 5 个等级(表 1)。

(3)地下水埋深。通常地下水埋深越大,地下水回灌的储存空间越大。根据 2020 年地下水水位统测数据,利用克里金插值法绘制研究区地下水埋深分区图(图 2(c)),结合钟佐燊<sup>[5]</sup>的分级原则,将研究区地下水埋深划分为 <5、5 ~ 10、10 ~ 30、30 ~ 50、>50 m 5 个等级(表 1)。

(4)含水层渗透系数。渗透系数代表了含水层的导水能力与渗透效率。基于研究区 22 组钻孔抽水试验计算结果,绘制渗透系数分布图(图 2(d)),结合龙传誉<sup>[6]</sup>的划分原则,将研究区渗透系数划分为 <10、10 ~ 15、15 ~ 20、20 ~ 25、>25 m/d 5 个等级(表 1)。

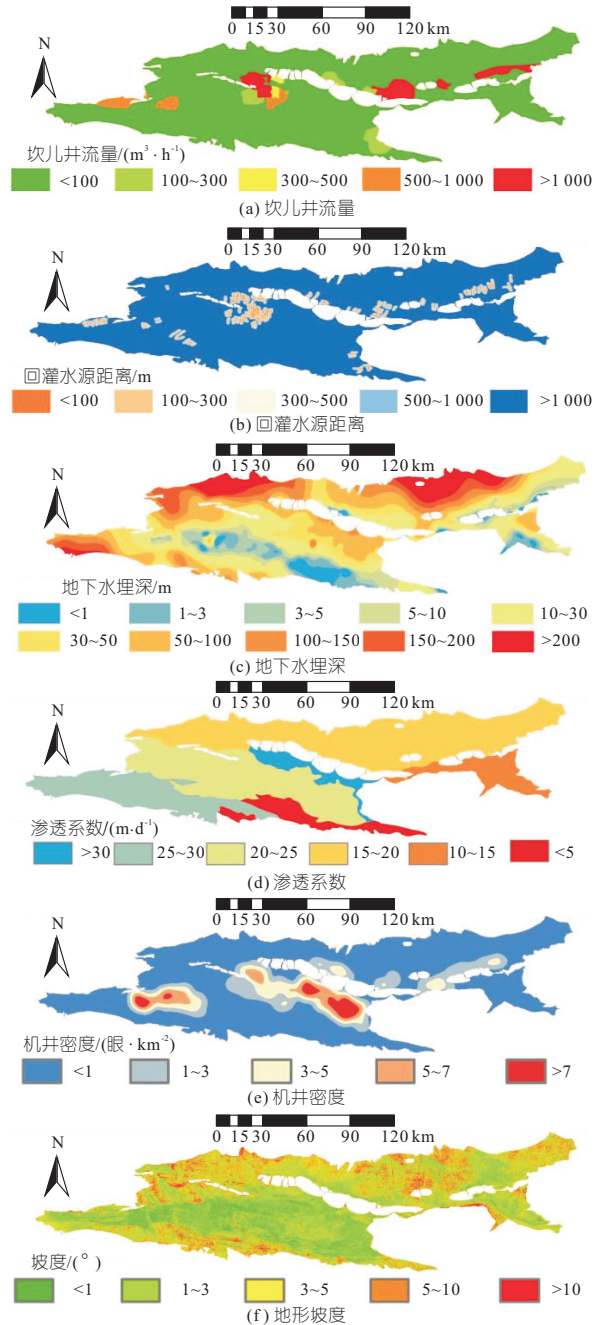


图 2 研究区各评价指标分区图

Fig. 2 Evaluation index zoning map of study area

(5)机井密度。利用农业机电井作为回灌井实现地下水回灌,机电井分布密集有利于回灌工程建设。基于研究区机电井分布情况(图 2(e)),将研究区划分为若干 1 km×1 km 的单元格,计算各单元格机电井数量。针对地下水回灌适宜性将研究区机井密度划分为 <1、1~3、3~5、5~7、>7 眼/km<sup>2</sup> 5 个等级(表 1)。

(6)地形坡度。基于 30 m 精度 DEM 数字高程数据,利用 ArcGIS 坡度分析获取研究区坡度分布图(2(f))。根据彭晓鹃等<sup>[7]</sup>的划分原则,将研究区地形坡度划分为 <1°、1°~3°、3°~5°、5°~10°、>10° 5 个等级(表 1)。

表 1 评价指标分级评分

Tab. 1 Evaluation index grading

| 目标层                       | 准则层                          | 指标层                            | 等级                             | 评分     |
|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------|
| 坎儿井<br>冬闲水<br>回灌适<br>宜性程度 | 补给水<br>源条件                   | 坎儿井流量<br>$/(m^3 \cdot h^{-1})$ | <100                           | 1      |
|                           |                              |                                | 100~300                        | 5      |
|                           |                              |                                | 300~500                        | 7      |
|                           |                              |                                | 500~1 000                      | 9      |
|                           |                              |                                | >1 000                         | 10     |
|                           |                              |                                | 回灌水源距离/m                       | >1 000 |
|                           |                              |                                | 500~1 000                      | 4      |
|                           |                              |                                | 300~500                        | 8      |
|                           |                              |                                | 100~300                        | 9      |
|                           |                              |                                | <100                           | 10     |
|                           | 含水层<br>条件                    | 地下水埋深/m                        | <5                             | 1      |
|                           |                              |                                | 5~10                           | 3      |
|                           |                              |                                | 10~30                          | 5      |
|                           |                              |                                | 30~50                          | 8      |
|                           |                              |                                | >50                            | 10     |
|                           |                              |                                | 含水层渗透系数<br>$/(m \cdot d^{-1})$ | <10    |
|                           | 10~15                        | 4                              |                                |        |
|                           | 15~20                        | 6                              |                                |        |
| 20~25                     | 8                            |                                |                                |        |
| >25                       | 10                           |                                |                                |        |
| 工程建<br>设条件                | 机井密度<br>$/(眼 \cdot km^{-2})$ | 0~1                            |                                | 1      |
|                           |                              | 1~3                            | 4                              |        |
|                           |                              | 3~5                            | 6                              |        |
|                           |                              | 5~7                            | 9                              |        |
|                           |                              | >7                             | 10                             |        |
|                           | 地形坡度/ $^{\circ}$             | 0~1                            | 1                              |        |
|                           |                              | 1~3                            | 3                              |        |
|                           |                              | 3~5                            | 5                              |        |
|                           |                              | 5~10                           | 7                              |        |
|                           |                              | >10                            | 10                             |        |

2.2 层次分析法

(1)构建判断矩阵。选择 6 个指标构建  $6 \times 6$  判断矩阵,根据地下水回灌评价所赋权重大小<sup>[8]</sup>,结合专家意见构建本次评价的判断矩阵(表 2),以判断各指标间相对重要性。

表 2 适宜性评价判断矩阵

Tab. 2 Suitability evaluation judgment matrix

| 指标     | 地形<br>坡度 | 坎儿井<br>流量 | 回灌水<br>源距离 | 地下水<br>埋深 | 渗透<br>系数 | 机井<br>密度 |
|--------|----------|-----------|------------|-----------|----------|----------|
| 地形坡度   | 1        | 1/6       | 1/4        | 1/3       | 1/3      | 1/4      |
| 坎儿井流量  | 6        | 1         | 3/2        | 2/1       | 2/1      | 3/2      |
| 回灌水源距离 | 4        | 2/3       | 1          | 4/3       | 4/3      | 1        |
| 地下水埋深  | 3        | 1/2       | 3/4        | 1         | 1        | 3/4      |
| 渗透系数   | 3        | 1/2       | 3/4        | 4/3       | 1        | 3/4      |
| 机井密度   | 4        | 2/3       | 1          | 4/3       | 4/3      | 1        |

(2)指标权重计算。计算判断矩阵中行元素乘积  $M_i$ ,并计算其  $n$  次方根  $W_i$ :

$$M_i = \prod_{j=1}^i b_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$W_i = \sqrt[n]{M_i} \quad (2)$$

对向量  $w = [W_1, W_2, \dots, W_n]^T$  归一化,  $W_i$  即为指标权重:

$$W_i = W_i / \sum_{i=1}^n W_i \quad (3)$$

计算各指标权重,结果见表 3。

表 3 各指标权重计算值

Tab. 3 Calculation value of each index weight

| 指标 | 坎儿井<br>流量 | 回灌水<br>源距离 | 地下水<br>埋深 | 含水层<br>渗透系数 | 机井<br>密度 | 地形<br>坡度 |
|----|-----------|------------|-----------|-------------|----------|----------|
| 权重 | 0.285 7   | 0.190 5    | 0.142 9   | 0.142 9     | 0.190 4  | 0.047 6  |

(3)判断矩阵合理性检验。对研究区各评价指标情况认识不清,容易造成权重计算结果不准确,因此须检验权重计算结果的一致性和随机性。计算公式为:

$$C_R = C_1 / C_R \quad (4)$$

$$其中 \quad C_1 = (\lambda_{max} - m) / (m - 1) \quad (5)$$

式中,  $C_R$  为矩阵计算一致性比率;  $C_1$  为矩阵计算一致性指标。

计算结果的  $C_R < 0.1$ , 则认为矩阵一致性检验通过,权重分配合理。本文计算结果  $C_R = 0.00 < 0.01$ , 矩阵一致性检验通过,权重分配合理,可用于后续评价。

2.3 地下水回灌适宜性评价结果与分析

将 6 项评价指标栅格图层叠加,利用 ArcGIS 栅格计算器,得到研究区各区域坎儿井冬闲水回灌地下水回灌适宜性综合得分  $S_i$ , 计算结果最小值为 1.00,最大值为 9.17。采用自然间断分级法将研究区坎儿井冬闲水回灌适宜性分为 3 个等级,分别为适宜区、较适宜区、不适宜区,各适宜性等级分布情况见图 3。由图 3 可知:①高潜力区主要为高昌区中部、鄯善县北盆地灌区及托克逊县东北部分区域,该部分区域坎儿井流量大于  $500 m^3/h$ ,回灌水源充足,地下水埋深在 30~50 m 之间,位于地下水超采区,存在地下水降落漏斗,储水空间充足,且渗透系数普遍大于 15 m/d,具备地下水回灌的入渗条件。②地下水回灌较适宜区主要分布于鄯善县南盆地灌区,该区域机电井密集、地下水埋深大,具有适宜地下水回灌的含水层条件,但坎儿井分布零散,回灌水源条件相对较差。

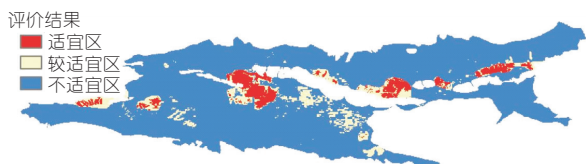


图 3 坎儿井冬闲水回灌适宜性评价结果

Fig. 3 Evaluation results of winter fallow water recharge suitability in kariz

综合分析,回灌水源条件在坎儿井冬闲水回

灌适宜性评价中占主导地位,同时受回灌水源引水条件限制,地下水回灌适宜区均位于坎儿井分布区域附近,且具备入渗条件及工程建设条件影响。进一步分析高昌区回灌适宜区坎儿井数目多,合计 116 条,总流量为 4 520.16 m<sup>3</sup>/h,地下水回灌水源丰富;鄯善县适宜区坎儿井共 48 条,但单条坎儿井流量大,普遍大于 100 m<sup>3</sup>/h,总流量为 5 799.00 m<sup>3</sup>/h;托克逊县坎儿井共 24 条,总量为 1 921.29 m<sup>3</sup>/h,但坎儿井集中分布于东北部区域,有利于回灌工程集中引水。

### 3 典型适宜区地下水回灌方式

#### 3.1 地下水回灌方式

目前,地下水回灌方式主要有地表入渗法<sup>[9]</sup>与井灌法<sup>[10]</sup>两种。其中,地表入渗法可利用土壤对回灌水进行自然净化,能够有效改善回灌水水质,且成本低、工程建设简单,但地表入渗法占地面积大,在土地资源匮乏的区域不宜使用;井灌法能够实现直接向特定含水层注水,占地面积小,且不受地形条件及弱透水层的限制,但对回灌水水质要求高。

机电井是干旱地区生产生活常用的取水建筑物,其主要结构为井口、井壁管、过滤器、水泵和输水管。如图 4 所示,机电井与反滤回灌井的原理相似,均是将滤水管置于易透水层,区别在于水流的方向不同,利用机电井的高透水能力实现地下水回灌。综合分析在研究区利用机电井实现井灌回补具有以下优势:①吐鲁番地区机电井总数为 6 649 眼,广泛分布的机电井为回灌井的设置提供了充分选择,且能缩短回灌引水距离,减少工程建设成本;②吐鲁番盆地蒸发量极大,井灌法能有效减小蒸发损耗;③坎儿井水质较好,井灌过程中发生堵塞问题的风险较低。综上所述,确定了以机电井作为回灌井的井灌方式开展坎儿井冬闲水回灌。

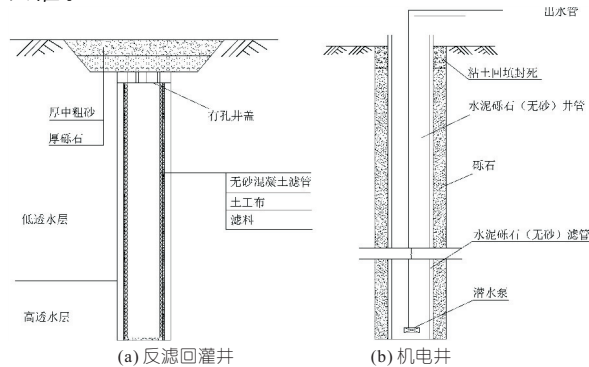


图 4 回灌井与机电井结构

Fig. 4 Structure of recharge well and electromechanical well

#### 3.2 地下水回灌效果验证

为进一步验证井灌方式的回灌效果,基于地下水回灌适宜性评价结果,在高昌区地下水回灌适宜区进行了现场回灌试验。采用 30 m<sup>3</sup>/h 稳定流量进行地下水回灌,同时以回灌井作为观测井,观测回灌过程中地下水位变化,见图 5。

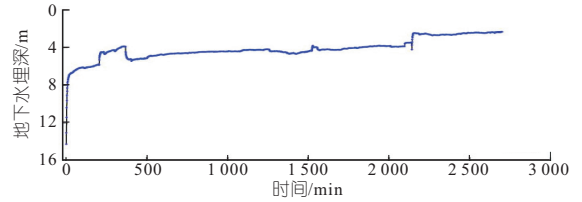


图 5 回灌过程地下水位变化

Fig. 5 Groundwater level change in recharge process

由图 5 可知,回灌过程大致分为 3 个阶段,即第一阶段回灌井内水位急剧上升,第二阶段井内水位上升速度减缓,第三阶段井内水位趋于稳定。地下水埋深由 14.28 m 减至 2.30 m,地下水位累计抬升 11.98 m,单日稳定回灌水量 720 m<sup>3</sup>。回灌过程中井内水位上升,但未发生堵塞问题及井水漫溢,验证了利用机电井实现地下水回灌的可行性,同时说明地下水回灌能促使地下水位抬升,对涵养地下水有利。

### 4 结论

a. 选取坎儿井流量、回灌水源距离、地下水埋深、含水层渗透系数、机井密度、地形坡度 6 项指标建立了地下水回灌评价体系,可为吐鲁番盆地坎儿井冬闲水回灌适宜性做出合理评价。

b. 高昌区中部、鄯善县北盆地灌区及托克逊县东北部部分区域由于具有丰富的回灌水源及重复的储水空间,建设坎儿井冬闲水回灌工程的适宜性高;鄯善县南盆地灌区坎儿井分布相对零散,开展回灌的适宜性较低;其他区域不具备回灌的水源条件,不易建设坎儿井冬闲水回灌工程。

c. 确定了利用机井实现地下水回灌的井灌方式,在降低工程建设成本的同时能实现对地下水的有效回补,具有建设实际回灌工程的可行性。

#### 参考文献:

[1] 郑艳琼,张爱军,韩帅. 山前冲积扇蓄洪入灌坎儿井水源保护方法研究[J]. 水土保持研究,2018,25(3): 366-372.  
 [2] 曹峰,郑跃军. 基于 GIS 技术的人工补给地下水区域选择——以乌鲁木齐河流域乌拉泊洼地为例[J]. 水文地质工程地质,2015,42(6):44-50.  
 [3] 张艺武. 基于 GIS-EWM 的大清河流域平原区地下水人工补给适宜性评价[D]. 长春:吉林大学,2020.

