

于璐璐, 吉珍霞, 王力. 黄土高原羊圈沟小流域坝地上层滞水补给特征[J]. 土壤学报, 2025,  
YU Lulu, JI Zhenxia, WANG Li. Characteristics of Perched Water Recharge in the Dam Land of Yangjuangou Small Watershed  
on the Loess Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025,

# 黄土高原羊圈沟小流域坝地上层滞水补给特征\*

于璐璐<sup>1</sup>, 吉珍霞<sup>1,2</sup>, 王力<sup>1,2,3†</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院, 陕西杨凌 712100;  
3. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 淤地坝作为黄土高原水土流失治理的核心工程, 通过拦截径流和泥沙, 有效减少了水土流失, 改善了生态环境和农业生产条件。然而, 关于坝地上层滞水补给过程及其机制的研究尚不充分, 深入理解这一问题对于全面认识淤地坝的生态功能和水文作用至关重要。基于此, 本文以黄土高原典型流域坝地为实验样地, 采用不同示踪剂对上层滞水补给过程进行追踪(碘离子、溴离子), 结合水位监测和氯质量平衡法, 揭示坝地上层滞水补给过程与机制。结果表明, 不同土地利用类型下坝地上层滞水补给速率为农田>乔木地>草地>灌木地, 范围为 32.94~60.96 mm·a<sup>-1</sup>。溴离子示踪结果表明(>15 mm·d<sup>-1</sup>)降水事件能使水分较快入渗到上层滞水进行补给, 其垂向入渗速率约为 0.13~0.15 m·d<sup>-1</sup>, 但该补给存在一定的滞后性, 滞后时间为 6~11 d; 碘离子示踪结果表明坝地内上层滞水具有较好的连通性, 其横向运移速率约为 6 m·d<sup>-1</sup>。该研究为进一步了解坝地水分变化及上层滞水补给机制提供了理论参考和科学依据。

**关键词:** 淤地坝; 土壤水分; 离子示踪; 氯质量平衡; 地下水

中图分类号: S151.9\*1

文献标志码: A

## Characteristics of Perched Water Recharge in the Dam Land of Yangjuangou Small Watershed on the Loess Plateau

YU Lulu<sup>1</sup>, JI Zhenxia<sup>1,2</sup>, WANG Li<sup>1,2,3†</sup>

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** 【Objective】 Check dams, as one of the core projects for soil erosion control in the Loess Plateau region, have played an irreplaceable role in preventing soil erosion and improving the ecological environment. By

\* 国家自然科学基金项目(42171043, 42377318)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42171043, 42377318)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wangli5208@nwsuaf.edu.cn

作者简介: 于璐璐(2000—), 女, 河南周口人, 硕士研究生, 主要从事黄土高原淤地坝地下水研究。E-mail: yululu0224@163.com

收稿日期: 2024-06-24 收到修改稿日期: 2024-09-11 网络首发日期(www.cnki.net):

intercepting runoff and depositing sediment, check dams effectively reduced soil erosion, which in turn improved the local ecological environment and agricultural production conditions. However, despite the remarkable success of check dams in soil and water conservation, research on the perched water in dam lands on the Loess Plateau remains insufficient, particularly in understanding the recharge process and mechanisms of the perched water. The study is of great significance for the comprehensive understanding of the ecological function and hydrological role of check dams. **【Method】** Based on this, dam lands were selected in typical watersheds of the Loess Plateau as the research object, and using iodide and bromide ions as tracers, along with water level monitoring and chlorine mass balance method, the recharge process of perched water in the dam land was systematically traced. The core objective of the study was to reveal the recharge process and mechanism of perched water in dam land under different land use types, and to provide a scientific basis for water resource management. **【Result】** The results showed that soil moisture in the dam land under different land use types followed the order: farmland > shrubland > arbor land > grassland. Different land use types had a significant impact on the recharge rate of perched water in the dam land. Specifically, the recharge rate of farmland was the highest, followed by arbor land, then grassland, with shrubland having the lowest recharge rate, ranging from 32.94 to 60.96 mm·a<sup>-1</sup>. This difference reflects the influence of different vegetation types and land management practices on the perched water recharge process, providing important clues for understanding the hydrological functions of different ecosystems. Furthermore, it found that when the precipitation exceeded 15 mm·d<sup>-1</sup>, water could infiltrate into the perched water and quickly recharged it. At this time, the vertical infiltration rate of water was about 0.13 to 0.15 m·d<sup>-1</sup>. However, this recharge process was not immediately completed as there was a lag time of about 6 to 11 days, suggesting that the recharge of perched water has a time-lag effect. In addition, the results of iodine ion tracer experiments showed that the perched water in the dam land had good connectivity, with a horizontal water transport rate of 6 m·d<sup>-1</sup>. This finding suggests that the perched water has a strong hydraulic connection, which could realize the horizontal distribution and redistribution of water within a certain range, and thus form a relatively stable hydrological cycle system on a local scale. **【Conclusion】** Overall, this study not only reveals the recharge process and mechanism of perched water in the dam land, but also provides an important theoretical reference and scientific basis for further understanding of the perched water in the dam land. Through these research results, the water resource dynamics of the dam land can be better grasped, and technical support can be provided for soil and water conservation and ecological restoration in the Loess Plateau region. These studies can provide strategies to optimize the management and maintenance of check dams, and further promote the protection and improvement of the regional ecological environment.

**Key words:** Check dam; Soil moisture; Ion tracing; Chlorine mass balance; Groundwater

地下水是指埋藏在地表以下各种形式的重力水。作为重要的饮用水源和战略资源,它在保障城乡居民生活、支撑经济社会发展和维持生态系统稳定性等方面具有十分重要的战略意义<sup>[1]</sup>。上层滞水是地下水的一种特殊类型,它是指存在于潜水面以上包气带中的局部不透水层上的重力水<sup>[2]</sup>,是维持植被健康生长和保持流域生态系统稳定的重要因素。然而,由于气候变化和人类活动(如干旱地区抽水增加和土地利用变化)的影响,地下水水量和水质等资源面临着严重威胁,这一问题在未来几十年可能会进一步加剧<sup>[3-4]</sup>,从而导致地下水依赖型生态系统明显退化,甚至危及区域生态安全。地下水补给是指含水层或含水系统从外界获得水量的过程,定量评价地下水补给是研究区域水文循环过程的基础。尽管中外许多科学家在该领域进行了大量的研究<sup>[5-7]</sup>,但以往研究侧重于地下水补给的探讨,关于上层滞水补给特征的研究相当匮乏。

黄土高原地区土质疏松、垂直节理发育、质地均一,降水很难穿过厚重的非饱和带对上层滞水进行补给。最可能发生补给的区域是沟道低洼地区,淤地坝恰好大多修建于此。淤地

坝是指在水土流失地区各级沟道中,以拦泥淤地为目的而修建的坝工建筑物。最初的淤地坝是自然形成的,受天然“聚淤”的启发,当地百姓在沟道中修筑坝堰拦蓄水土,使流失的水土淤积沉淀形成平坦的土地<sup>[8]</sup>。淤地坝坝高通常为 10~50 m,淤积深度、长度和体积随时间和维护情况变化,截至 2018 年黄土高原淤积库容达到了 110.33 亿立方米<sup>[9]</sup>。作为最常见的水利结构,淤地坝不仅重新分配了集水区的径流和上层滞水<sup>[10]</sup>,还改变了原有的生态水文环境,使得农业活动可以持续进行。国家发展和改革委员会颁布的《黄土高原地区综合治理规划大纲(2010—2030 年)》中强调,截至 2030 年,黄土高原规划建设淤地坝 56 161 座,其中骨干坝 10 223 座,中小型淤地坝 45 938 座。淤地坝通过拦截上游泥沙形成沉积物层,逐渐转变为坝地。坝地内的土壤呈多层次分布,其特殊的水文物理结构在流域产汇流过程中起到重要的截流和调蓄作用,使更多的水分停留在浅层土壤中,补给上层滞水。在干旱半干旱地区,由于非饱和带较厚,补给速率有限,目前的上层滞水很少处于近地表边界条件下的水力平衡状态。作为流域汇水面,坝地上层滞水埋深相对较浅,是进行补给研究的理想区域<sup>[11]</sup>。此外,不同土地利用类型对上层滞水资源也会产生影响<sup>[12]</sup>,在各类因素影响下,坝地内分布着多种土地利用类型。但是,以往对坝地的研究热点聚焦于沟道恢复效应、土壤侵蚀过程<sup>[13]</sup>和泥沙拦截效益<sup>[14]</sup>等方面,关于不同土地利用类型下坝地上层滞水补给的研究还存在缺失。

目前,国内外关于地下水补给的研究采用了诸多方法,包括地中渗透仪法、水位波动法、数值模拟法和示踪法等<sup>[15-16]</sup>,其中示踪法因时间尺度广泛、空间分辨率高和适用性广等优势,在水文研究中广泛应用。它可精准追踪水流路径并提供可靠结果,对水资源管理和环境监测至关重要。示踪剂入渗到土壤中,会随土壤水分下渗流动,可以时刻表征土壤水分运动过程。碘离子作为一种理想的示踪剂,其化学性质稳定、测量精度高,是研究水分运移过程的有效手段之一。但在之前的研究中,碘离子主要用于探究土壤水入渗速率<sup>[17]</sup>、岩石中的孔隙扩散系数<sup>[18]</sup>等,关于碘离子示踪上层滞水运移过程的研究尚显不足。溴离子因在自然界中背景值浓度低、水溶性好等特点已被广泛用于研究水分入渗运动<sup>[19-20]</sup>;但以往溴离子示踪技术主要针对土壤水,通过土壤水垂直剖面中溴离子峰值运移的时间来判断水分入渗过程,很少有针对上层滞水中溴离子含量变化的研究,这很难反应不同降水事件在上层滞水中的变化规律。氯质量平衡法(Chloride mass balance method, CMB),鉴于其指示性强、适用范围广等优点已被成功且广泛应用于估算地下水补给。例如 Watson 等<sup>[21]</sup>通过 CMB 法算出南非流域地下水补给速率占年均降水量的 4.2%~5.6%;Zhang 等<sup>[22]</sup>通过 CMB 法计算出黄土高原南部农田地下水补给量平均值为 58 mm·a<sup>-1</sup>。基于此,本研究以黄土丘陵沟壑区典型流域坝地为实验样地,结合碘、溴离子示踪技术,水位监测和氯质量平衡技术,探究不同土地利用类型下坝地上层滞水补给过程与机制,以期为流域水资源可持续利用及生态环境保护提供科学依据。

## 1 材料与方 法

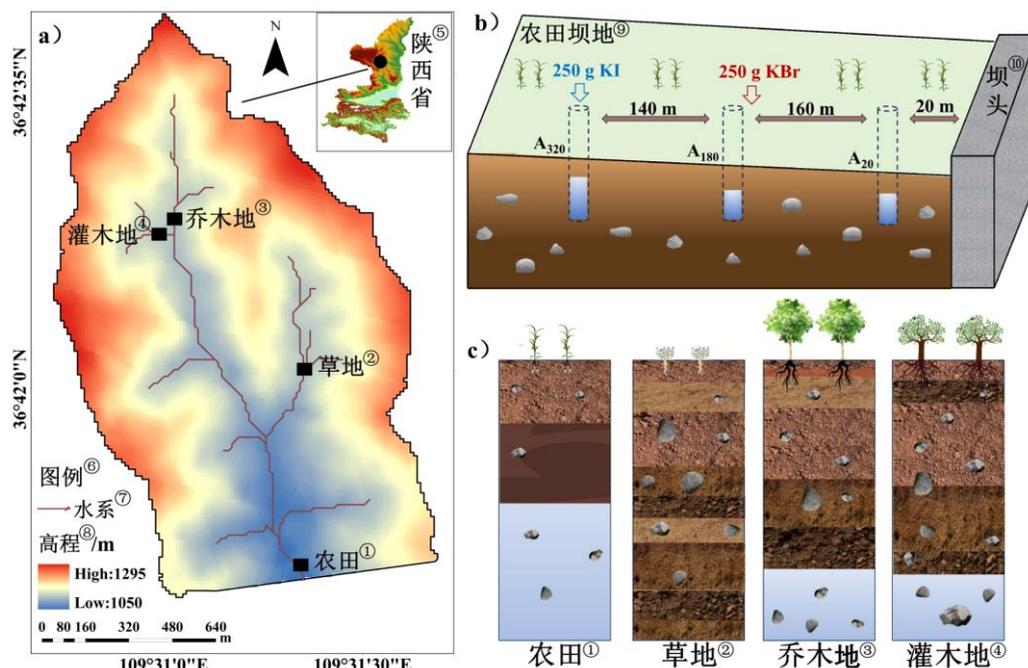
### 1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市宝塔区李渠镇羊圈沟村(36°41'-36°43'N、109°30'-109°31'E),如图 1 所示。该流域属于典型黄土丘陵沟壑地貌,海拔在 1 050~1 295 m 之间。区域气候为半干旱大陆性季风气候,多年平均气温 9.4 °C,多年平均降水量 535 mm,降水多集中在 7—9 月。流域内土壤以黄绵土为主,流域面积约为 3.1 km<sup>2</sup>,其中坝地约占 0.13 km<sup>2</sup>。

本研究在坝地内设置 4 个样地,代表 4 种土地利用类型,分别为农田、草地、乔木地和灌木地,不同土地利用类型下坝地基本信息如表 1 所示。农田种植作物为玉米(*Zea mays* L.);草地典型植物为紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.);乔木地典型植物为刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.);灌木地典型植物为互叶醉鱼草(*Buddleja alternifolia* Maxim.)。玉米属于

禾本科植物, 叶片扁平宽大, 根系发达, 具有较强的适应性; 紫花苜蓿属于多年生草本植物, 茎直立, 枝叶茂盛, 根系粗壮; 刺槐属于豆科落叶乔木, 根系浅而发达, 具有一定的抗旱性; 互叶醉鱼草别名白芨梢, 是醉鱼草属, 该类植被枝叶细弱, 短枝簇生, 分枝能力强。

羊圈沟流域内水流携带的泥沙在沟道地区沉积, 经年累月形成自然阻塞体。这些自然堆积逐渐形成局部平坦的土地, 即“坝地”。坝地下方分布着众多石块, 形成钙化层, 阻碍了水分的下渗; 加上坝体的修建, 导致水分在土壤上下层之间滞留, 形成上层滞水。本研究中的地下水即为上层滞水, 下覆弱透水层。



①Farmland, ②Grassland, ③Arbor land, ④Shrubland, ⑤Shaanxi Province, ⑥Legend, ⑦Hydrological system, ⑧Elevation, ⑨Farmland in the dam area, ⑩Dam head

注: 图 1a 为羊圈沟流域高程图, 图 1b 为碘、溴离子示踪图, 图 1c 为 4 种土地利用类型土壤剖面图。Note: Fig. 1a is an elevation map of Yangjuangou watershed, Fig. 1b is a tracer map of iodine and bromine ions, and Fig. 1c is a soil profile of four land-use types.

图 1 研究区概况

Fig. 1 Situation of the study area

表 1 不同土地利用类型下坝地基本信息

Table 1 Basic information on dam land under different land use types

| 土地利用类型           | 经纬度        |             | pH   | 容重                                     | 海拔          | 地理位置                  | 平均上层滞水埋深                      |
|------------------|------------|-------------|------|--|-------------|-----------------------|-------------------------------|
| Land use type    | Latitude/° | Longitude/° |      | Bulk density/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | Elevation/m | Geographical position | Average perched water depth/m |
| 农田 <sup>①</sup>  | 36°41'38"  | 109°31'19"  | 7.18 | 1.57                                   | 1 056       | 流域下游                  | -2.98                         |
| 草地 <sup>②</sup>  | 36°42'01"  | 109°31'21"  | 7.32 | 1.58                                   | 1 102       | 流域中游                  | —                             |
| 乔木地 <sup>③</sup> | 36°42'23"  | 109°31'05"  | 7.13 | 1.47                                   | 1 112       | 流域上游                  | -4.16                         |
| 灌木地 <sup>④</sup> | 36°42'18"  | 109°31'01"  | 7.12 | 1.61                                   | 1 106       | 流域上游                  | -4.18                         |

①Farmland, ②Grassland, ③Arbor land, ④Shrubland

## 1.2 数据来源

气象数据来源于陕西黄土高原地球关键带国家野外科学观测研究站延安羊圈沟分站, 包

括日降水量和日平均气温。

用空心杆手动螺旋钻钻取土壤样品,采集后一部分装入铝盒,用于测定土壤质量含水量;另一部分装进聚乙烯袋中,用于测定土壤颗粒组成和氯离子浓度。土壤颗粒组成由中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室激光粒度仪 MS 2000 (马尔文公司,英国,APA2000)进行测量;土壤氯离子浓度的测定方法是将去离子水 (25 mL) 加入到风干过筛的土壤样品 (5 g) 中震荡离心,以获取上清液。再将上清液通过 0.22 μm 过滤器及活化 RP 柱后使用离子色谱仪 (赛默飞世尔科技,墨西哥,DIONEX Aquion) 进行测定。基于样品的重现性分析,仪器测定结果的相对误差为±3%。具体计算如下:

$$Cl_s = \frac{Cl_m(m_w/m_s)}{\theta_g} \quad (1)$$

式中,  $Cl_s$  为土壤氯离子浓度 ( $mg \cdot L^{-1}$ );  $Cl_m$  为上清液测定结果浓度 ( $mg \cdot L^{-1}$ );  $m_w/m_s$  为浸提水-土质量比;  $\theta_g$  为土壤质量含水量 (%)。

### 1.3 研究方法

**1.3.1 不同土地利用类型下坝地土壤水分测定** 土壤储水量是指一定面积和土层内储存水分的数量<sup>[23]</sup>,通过下式计算:

$$SWS = \sum_{i=1}^n \theta_g \times BD \times H_i \quad (2)$$

式中,  $BD$  为土壤容重 ( $g \cdot cm^{-3}$ );  $H_i$  为土层深度 (mm);  $n$  为土壤层数。

为定量评价不同土层的土壤水分相对于对照样地的亏缺程度,本研究在土壤水分亏缺程度评价中引入了对照样地的土壤水分数据,构建了土壤水分相对亏缺指标<sup>[24]</sup>。通过下式计算:

$$SWD = \frac{SWS_T}{SWS_C} - 1 \quad (3)$$

式中,  $SWD$  为土壤水分相对亏缺,  $SWS_T$  分别代表乔木地、灌木地和草地的土壤储水量,  $SWS_C$  为农田土壤储水量。

本研究利用变异系数 ( $CV$ ) 来衡量坝地不同月份体积分含水量的变异程度,其计算公式为:

$$CV = \left| \frac{SD}{MN} \right| \times 100\% \quad (4)$$

式中,  $SD$  为标准偏差,  $MN$  为不同月份体积分含水量平均值。  $CV < 10\%$  为低变异性;  $10\% \leq CV < 20\%$  为中等变异性;  $CV \geq 20\%$  为高变异性。

**1.3.2 不同土地利用类型下坝地上层滞水补给速率测定** 氯质量平衡法 ( $CMB$ ) 在使用时须满足以下假设<sup>[25]</sup>: 大气氯离子输入通量与入渗补给输出的氯离子含量保持平衡状态;不产生地表径流或地表径流很少几乎可以忽略不计;氯离子在循环过程中保持稳定,不参与任何地球化学反应;水的入渗可以简化为一维、向下的活塞式流入。补给速率 ( $R$ ):

$$R = \frac{P \times Cl_p}{Cl_{sw}} \quad (5)$$

式中,  $P$  为多年平均降水量 (mm),  $Cl_p$  为降水中氯离子浓度 ( $mg \cdot L^{-1}$ ),  $Cl_{sw}$  为蒸发影响层之下土壤水氯离子浓度 ( $mg \cdot L^{-1}$ )。本研究测定 2023 年  $Cl_p$  为  $1.76 mg \cdot L^{-1}$ 。由于监测周期较短,遂与最近的延长观测站 2020—2022 年连续三年的  $Cl_p$   $1.8 \pm 1.1 mg \cdot L^{-1}$  平均<sup>[26]</sup>,最终采用  $Cl_p$  值为  $1.78 mg \cdot L^{-1}$ 。

水在土壤中的停留时间  $t$  计算为从根区底部 ( $h_0$ ) 到地下某深度处 ( $h_i$ ) 的累积氯化物比值,计算公式如下:

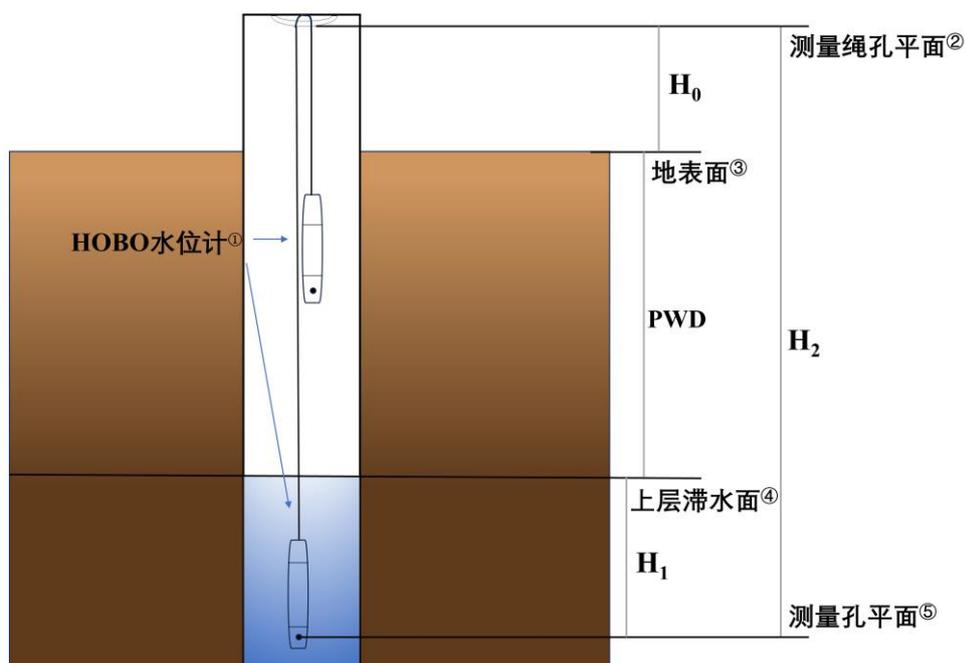
$$t = \frac{1}{P \times Cl_p} \int_{h_0}^{h_i} \theta_v(h) \times Cl_{sw}(h) dh \quad (6)$$

式中,  $t$  为土壤水中氯离子累计时间 (a);  $\theta_v$  为体积含水量 ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )。

**1.3.3 坝地上层滞水埋深监测** 本研究坝地内主要土地利用类型为农田, 考虑到农田对于保障粮食安全的重要性的和对水位变化的敏感性, 在农田坝地内自坝头至坝尾布设三个水位监测井, 分别命名为  $A_{20}$ 、 $A_{180}$  和  $A_{320}$  (字母右下角的数字下标表示井到坝头的距离); 草地由于上层滞水埋藏较深, 且地表下石块分布密集, 未能探测到上层滞水层; 在乔木地布设一个水位监测井, 命名为  $B_{140}$ ; 灌木地布设一个水位监测井, 命名为  $C_{30}$ 。利用 HOBO 水位计 (Onset Computer Corporation, 美国, U20-001-02, ) 每 30 min 记录一次, 长期监测上层滞水动态变化过程, 如图 2 所示。上层滞水埋深 (Perched water depth, PWD) 计算公式如下:

$$\text{PWD} = H_2 - H_0 - H_1 \quad (7)$$

式中,  $H_1$  为上层滞水面到探头测量孔的距离 (m),  $H_2$  为绳孔到探头测量孔的距离 (m),  $H_0$  为绳孔到地表面的距离 (m)。



①HOBO water level gauge; ②Measurement tape plane; ③Ground surface; ④Perched water surface; ⑤Measurement hole plane

图 2 HOBO 水位计示意图

Fig. 2 Schematic diagram of HOBO water level gauge

**1.3.4 坝地水分运移分析** 本研究于 2023 年 7 月 29 日在农田坝地开展离子示踪实验, 将碘化钾投放进  $A_{320}$  井内, 投放量为 250 g, 探究坝地内水分的横向运移规律; 将溴化钾埋藏在  $A_{180}$  井附近, 埋藏深度位于土层下 5 cm 处, 探究坝地内水分的垂向入渗情况, 详见图 1b。每五天一次, 定期采集水样。若出现连续性降水则等降水结束后采集, 水样用棕色瓶收集, 置于冰箱保存, 后期带回实验室通过离子色谱仪进行测量。离子色谱仪的使用是根据样品的相对峰面积值来换算溶液的离子浓度, 并绘制相应的标准曲线。其中, 碘离子的标准曲线为  $y=0.026x-0.194$ ,  $R^2=99.99\%$ ; 溴离子的标准曲线为  $y=0.037x-0.03$ ,  $R^2=99.97\%$ 。

#### 1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据整理分类; 采用 SPSS 26 进行数据分析, 通过单因素方差分析检验不同土地利用类型下坝地不同土层 SWS 和 SWD 的差异显著性,  $P < 0.05$  表示差异性显著; 采用 Origin 2021 进行填充图、点线图等的绘制。

## 2 结果

### 2.1 不同土地利用类型下坝地土壤物理特征

**2.1.1 不同土地利用类型下坝地土壤颗粒组成** 由图 3 可知,不同土地利用类型下坝地砂粒、粉粒和黏粒的含量变化范围为 12.89%~20.92%、62.07%~67.54%和 16.99%~19.55%,粉粒含量最多,黏粒含量次之,砂粒含量最少。0~100 cm 内,不同土地利用类型下黏粒含量基本逐渐增加,表现出上粗下细的变化趋势。0~300 cm 内,不同土地利用类型黏粒含量大小依次为农田、灌木地、草地和乔木地。玉米农田的黏粒含量呈先增加后降低趋势;苜蓿草地的黏粒含量随土层深度增加变化幅度较大;乔木地和灌木地的黏粒含量随土层深度增加呈缓慢增加趋势,且二者变化情况基本一致。

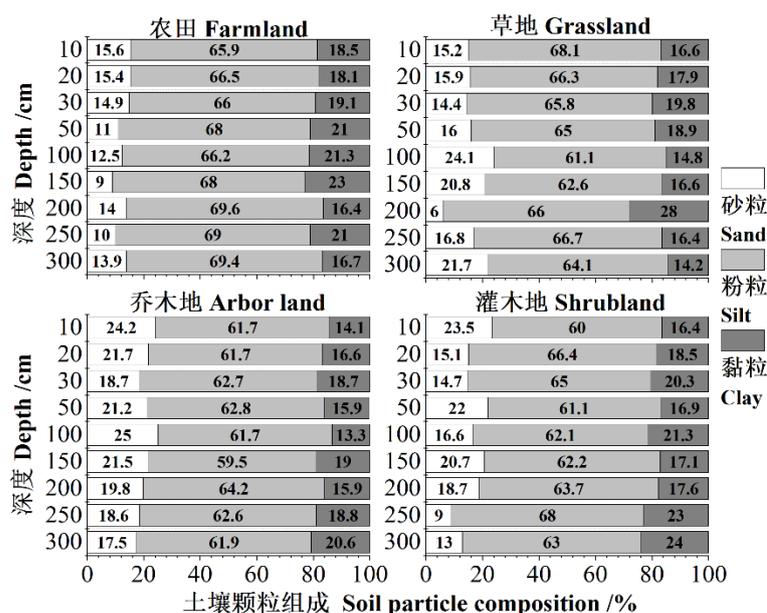
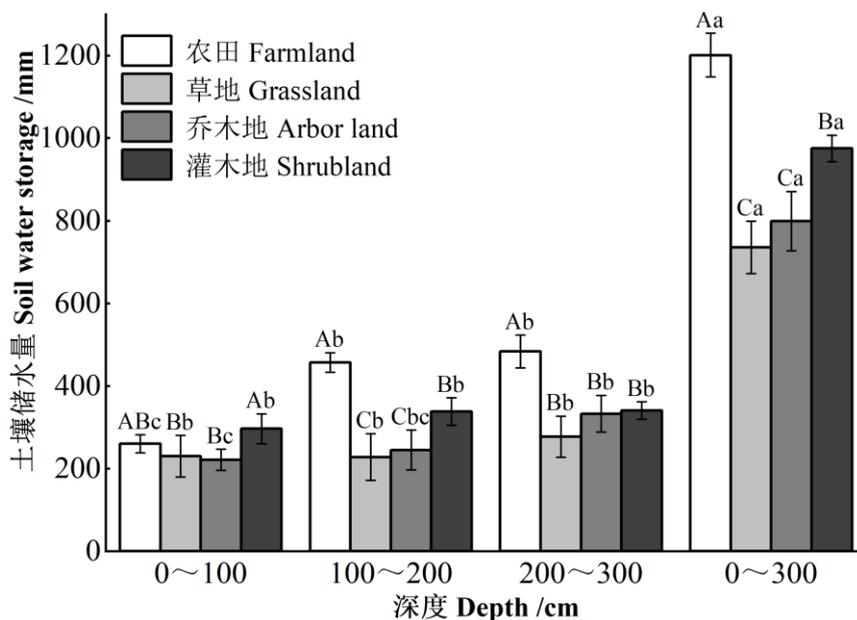


图 3 不同土地利用类型下坝地土壤颗粒组成

Fig. 3 Soil particle composition in dam lands under different land use types

**2.1.2 不同土地利用类型下坝地土壤储水量** 如图 4 所示, 0~100 cm 内, 不同土地利用类型下 SWS 依次为灌木地>农田>草地>乔木地; 100~200 cm 和 200~300 cm 内, 不同土地利用类型下 SWS 依次为农田>灌木地>乔木地>草地 ( $P<0.05$ )。整体上, 不同土地利用类型下坝地 SWS 随土层深度增加逐渐增大, 即 200~300 cm>100~200 cm>0~100 cm。0~300 cm 内, 总 SWS 农田显著大于灌木地、乔木地和草地 ( $P<0.05$ )。



注: 大写字母表示同一土层不同植被类型间差异显著 ( $P<0.05$ ), 小写字母表示同一植被类型不同土层间差异显著 ( $P<0.05$ ), 下同。Note: The upper case letters indicate significant differences ( $P<0.05$ ) between different vegetation types in the same soil layer, and lower case letters indicate significant differences ( $P<0.05$ ) between different soil layers of the same vegetation type. The same as below.

图 4 不同土地利用类型下坝地土壤储水量

Fig.4 Soil water storage in dam lands under different land use types

**2.1.3 不同土地利用类型下坝地土壤水分相对亏缺程度** 坝地 0~300 cm 内草地、乔木地和灌木地相对于农田的土壤水分亏缺程度如图 5 所示。0~100 cm 内, 不同土地利用类型下的土壤水分未见亏缺, 三者之间无显著差异; 100~200 和 200~300 cm 内, 草地 SWD 最严重, 其次是乔木地、灌木地。整体上, SWD 随土层深度的增加先趋于严重后缓慢降低, 在 100~200 cm 最严重, 200~300 cm 次之, 0~100 cm 未见亏缺。0~300 cm 内, 不同土地利用类型的 SWD 乔木地最严重, 草地次之, 灌木地亏缺程度最低, 且乔木地和草地相对农田的亏缺程度差异不显著。

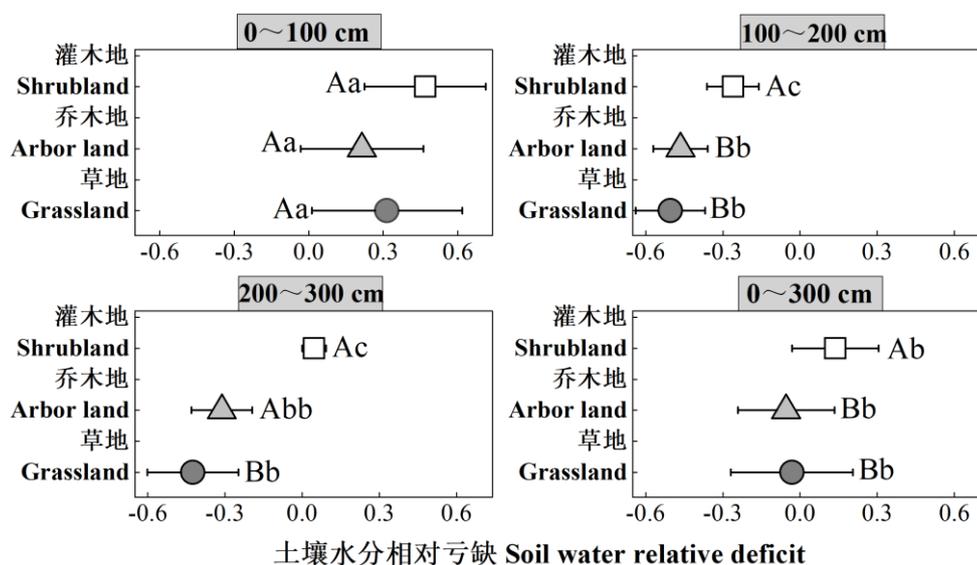


图 5 不同土地利用类型下坝地土壤水分相对亏缺

Fig. 5 Soil water relative deficit in dam lands under different land use types

**2.1.4 不同土地利用类型下坝地土壤体积含水量** 图 6 显示了不同土地利用类型下坝地土壤体积含水量变化情况。0~100 cm 内, 草地和乔木地的体积含水量随土层深度增加逐渐降低, 而农田和灌木地的体积含水量随土层深度增加逐渐增大; 100~300 cm 内, 除草地外其他土地利用类型下体积含水量均逐渐增大, 其中农田体积含水量基本达到饱和状态。总体而言, 0~300 cm 内土壤体积含水量依次为农田>灌木地>乔木地>草地。

0~300 cm 内, 农田和灌木地的体积含水量 CV 随土层深度的增加而减小, 农田由高变异性降为低变异性, 灌木地由中等变异性降为低变异性, 而草地的体积含水量 CV 持续在 10.39%~39.60%内波动, 乔木地的体积含水量 CV 持续在 15.38%~24.19%内波动。0~100 cm 和 200~300 cm 内, 不同土地利用类型体积含水量 CV 依次为草地>乔木地>农田>灌木地; 100~200 cm 内, 不同土地利用类型体积含水量 CV 依次为草地>乔木地>灌木地>农田。总体上, 0~300 cm 内不同土地利用类型体积含水量 CV 依次为草地>乔木地>灌木地>农田。

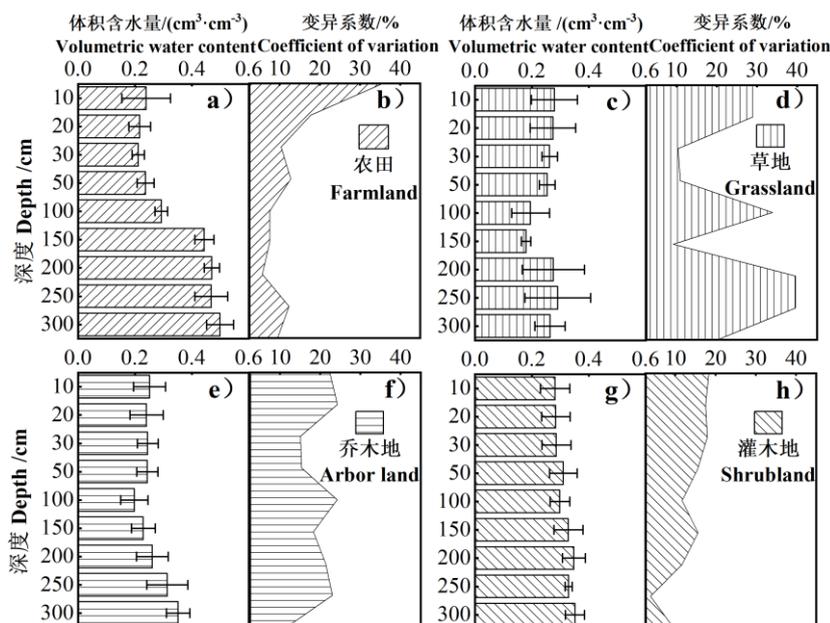


图 6 不同土地利用类型下坝地土壤体积含水量

Fig. 6 Soil volumetric water content in dam lands under different land use types

## 2.2 不同土地利用类型下坝地上层滞水补给速率

**2.2.1 不同土地利用类型下坝地氯离子浓度** 由图 7 可知, 随土层深度增加, 不同土地利用类型下氯离子浓度存在差异。0~300 cm 内, 农田土壤氯离子浓度范围为 4.45~80.97 mg·L<sup>-1</sup>, 草地为 7.83~60.43 mg·L<sup>-1</sup>, 乔木地为 11.56~52.51 mg·L<sup>-1</sup>, 灌木地为 8.48~50.79 mg·L<sup>-1</sup>, 大小依次为灌木地>草地>乔木地>农田。其中, 农田、乔木地和灌木地氯离子浓度在 0~50 cm 层达到峰值, 峰值浓度分别为 80.97 mg·L<sup>-1</sup>、52.51 mg·L<sup>-1</sup> 和 50.79 mg·L<sup>-1</sup>, 50~300 cm 层氯离子浓度逐渐降低并趋于稳定; 草地氯离子浓度在 200 cm 深达到峰值, 峰值浓度为 60.43 mg·L<sup>-1</sup>。

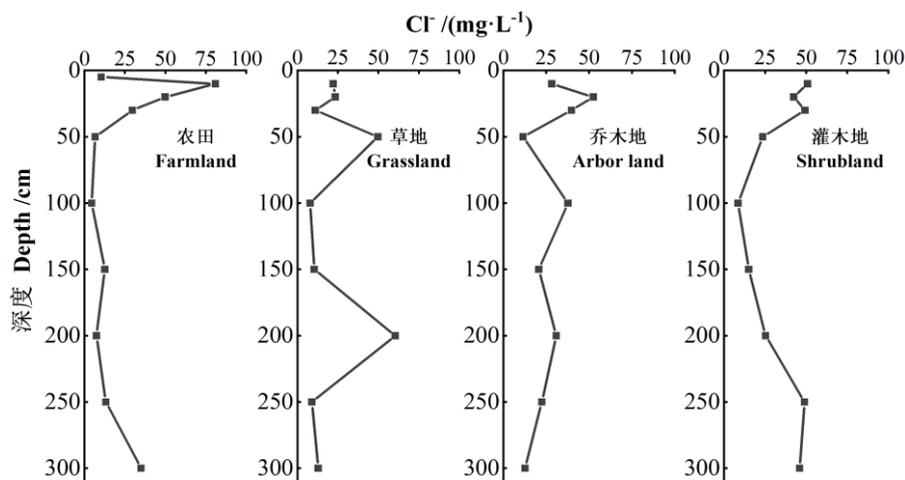


图 7 不同土地利用类型下坝地土壤氯离子浓度

Fig. 7 Soil chloride ion concentration in dam lands under different land use types

2.2.2 不同土地利用类型下坝地上层滞水补给速率及氯累计时间 由图 8 可知, 不同土地利用类型下坝地上层滞水补给速率依次为农田 ( $60.96 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ) > 乔木地 ( $40.98 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ) > 草地 ( $33.35 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ) > 灌木地 ( $32.94 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ), 补给范围为  $32.94\sim 60.96 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ; 300 cm 土层深度的氯离子累计时间依次为灌木地 (27.44 a) > 草地 (21.90 a) > 农田 (19.85 a) > 乔木地 (18.17 a), 不同土地利用类型下坝地氯离子累计时间范围为 18.17~27.44 a。

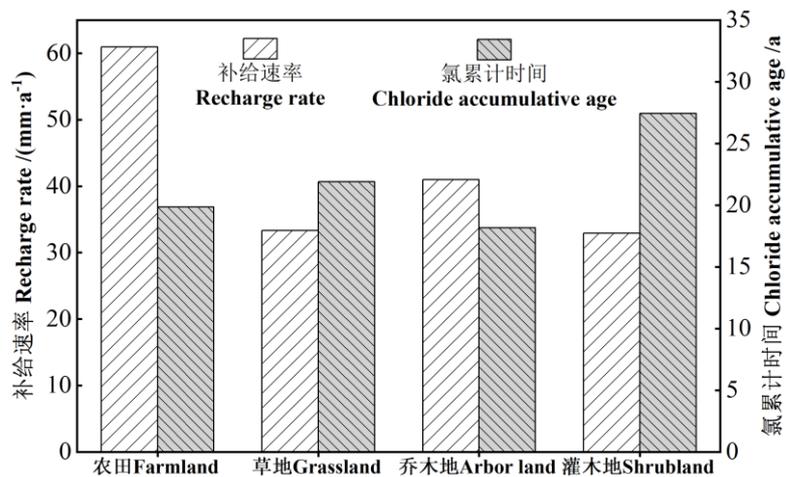


图 8 不同土地利用类型下坝地上层滞水补给速率及氯累计时间

Fig.8 Perched water recharge rates and chloride accumulative age in dam lands under different land use types

### 2.3 坝地上层滞水补给过程与机制

**2.3.1 坝地上层滞水埋深动态变化** 研究区降水和温度变化及坝地上层滞水埋深情况如图9所示。图9f显示8—9月份的降水量为264.2 mm；夏季气温较高，范围为23.5~26.6℃，秋冬气温开始降低。图9a显示A<sub>20</sub>在2023年10月初水位上升至最高后缓慢下降，在2023年11月中旬水位下降到最低后又在降水的影响下缓慢上升，至2024年2月之后基本保持稳定；图9b显示B<sub>140</sub>在2023年9月中旬水位下降至最低后在降水的影响下缓慢上升，至2024年3月底水位上升至最高后又缓慢下降；图9c显示A<sub>180</sub>在2023年10月中旬水位下降至最低后在降水的影响下缓慢上升，至2024年2月中旬水位上升到最高后又缓慢下降；图9d显示C<sub>30</sub>在2023年10月初水位下降至最低后缓慢上升，至2024年2月初水位上升至最高后又缓慢下降；图9e显示A<sub>320</sub>在2023年10月中旬水位下降至最低后在降水的影响下缓慢上升，至2024年2月中旬水位上升至最高后又缓慢下降。

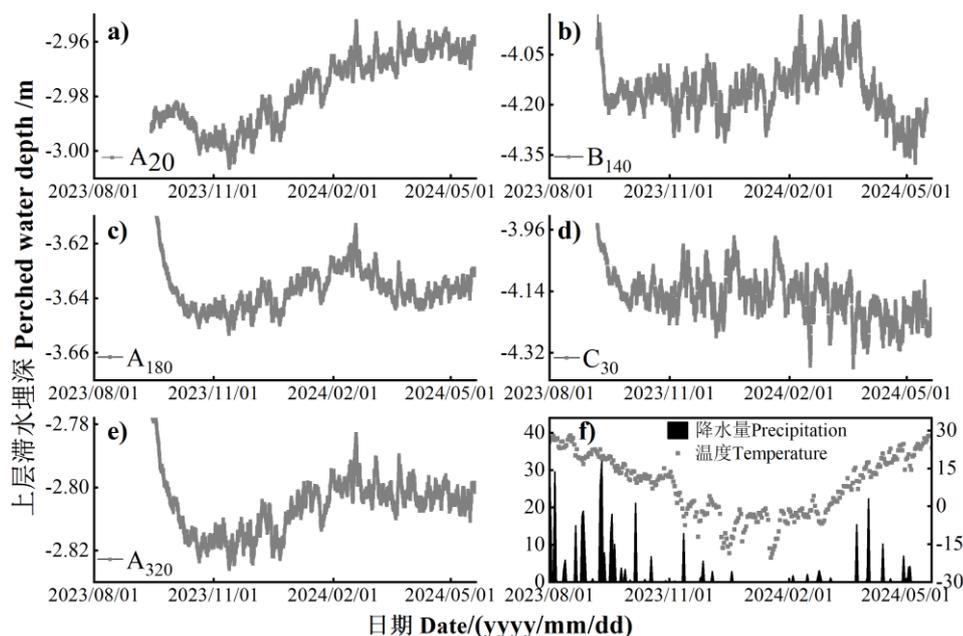


图9 坝地上层滞水波动特征

Fig. 9 Characterization of perched water fluctuations in the dam land

**2.3.2 人工示踪剂示踪上层滞水运移过程** 水位监测井中碘离子含量变化如图10a所示。8月8日之前A<sub>180</sub>井中尚未监测到碘离子，直至8月16日A<sub>180</sub>井中出现第一次碘离子峰值，浓度为112.5 mg·L<sup>-1</sup>；9月5日出现第二次弱峰值，浓度为80.5 mg·L<sup>-1</sup>；A<sub>20</sub>井中的碘离子在9月11日出现一次较低的峰值，浓度为40.89 mg·L<sup>-1</sup>。两口井中的碘离子浓度自峰值期后均呈降低趋势，且碘离子浓度A<sub>180</sub>井大于A<sub>20</sub>井。通过两口井中碘离子浓度峰值出现的日期，计算出上层滞水横向运移速率为6 m·d<sup>-1</sup>。

水位监测井中溴离子含量变化如图10b所示。A<sub>180</sub>和A<sub>20</sub>两口井中均监测到不同浓度的溴离子。A<sub>180</sub>井中存在多个溴离子浓度峰值，结合日降水量发现(>15 mm·d<sup>-1</sup>)降水事件会导致溴离子较快穿过非饱和带进入到上层滞水，但存在一定的滞后时间。通过降水事件及两口井中溴离子峰值出现的时间，计算出滞后时间约为6~11 d。此外，根据两口井中溴离子峰值出现的时间和对应的上层滞水埋深，计算出降水垂向入渗速率为0.13~0.15 m·d<sup>-1</sup>。

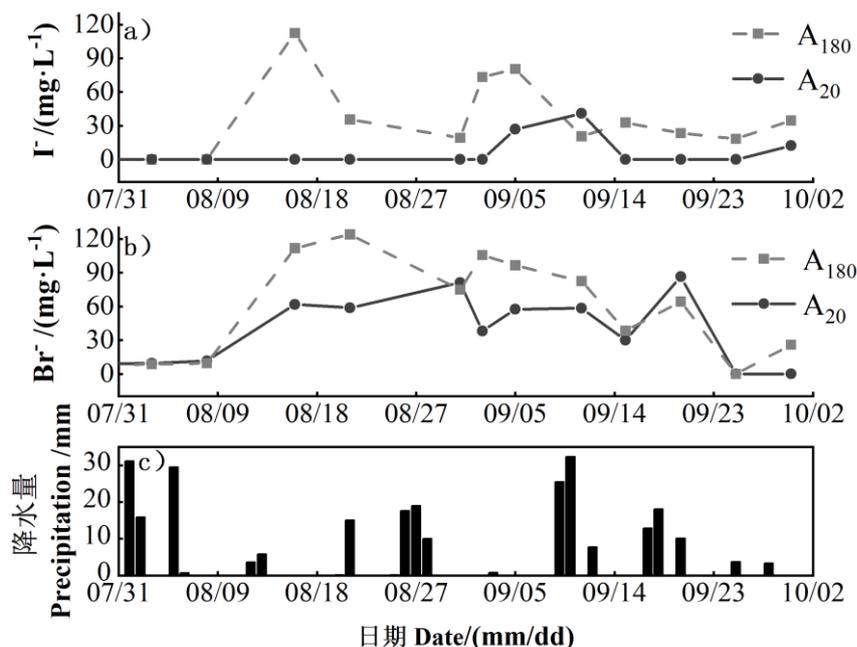


图 10 农田坝地内碘离子和溴离子含量变化情况

Fig. 10 Change situation in iodide and bromide ion levels in agricultural dam land

### 3 讨论

#### 3.1 坝地土壤水分特征

淤地坝作为黄土高原重要的水土保持工程措施,在拦截洪水泥沙过程中会在坝地内形成不同粒径大小的泥沙淤积层,使得坝地土壤剖面具有非均质多分层结构<sup>[27]</sup>。在常年淤积的影响下,坝地土壤水分的时空格局会逐渐发生转变,而土地利用类型对这一转变具有显著影响<sup>[28]</sup>。本研究中农田和灌木地 SWS 较高,这可能与其黏粒含量高导致土壤通透性相对降低和水分运移滞缓有关。乔木地和灌木地位于相邻坝地,乔木地 SWS 较灌木地低 175.8 mm,这可能是由于乔木地刺槐根系发达,植被生长吸收更多土壤水分,导致 SWS 较低。此外,本研究发现乔木地的 SWD 也较灌木地严重,这与 Jia 等<sup>[29]</sup>研究的水分降低将加剧包气带土壤水分亏缺情况相符。研究将 0~300 cm 的剖面划分为 9 个土层,分别计算各土层的 SWD,再对 0~100 cm、100~200 cm 和 200~300 cm 层的 SWD 取平均。因此,当图 4 中草地、乔木地或灌木地的 SWS 高于农田时,对应的 SWD 可能为负值<sup>[30]</sup>。不同土地利用类型下,乔木地的水分亏缺情况最严重,这与 He 等<sup>[31]</sup>的结果基本一致。草地的土壤水分亏缺程度较灌木地严重,这与 Gao 等<sup>[24]</sup>的结果存在差异,产生差异的原因可能是本研究中灌木地的上层滞水埋深较浅,上层滞水或许通过毛管作用对灌木地的土壤水分进行了一定补充。

不同土地利用类型对土壤水分分布的影响,主要表现为地上植被覆盖密度、地下根系分布以及土壤性质差异等方面<sup>[32]</sup>。农田种植的玉米,其根系耗水深度达到约 50 cm,导致 50 cm 深度内体积含水量较低<sup>[33]</sup>;草地分布着大量的紫花苜蓿,深根植被根系持续耗水,增加了土壤水的输出量,使该地土壤水分较低。且草地土壤层具有较大的异质性,如图 3 中显示,草地在 200~250 cm 层深度的黏粒含量最低,与之对应土层的变异系数最大。此外,石块分布和剖面不平也会影响水分的汇集与流失,从而导致不同深度的体积含水量 CV 差距较大<sup>[34]</sup>;乔木地分布着刺槐,其根系通过吸收大量的水分来促进植被生长,且该类植被枝叶茂

盛, 叶片蒸腾散失大量水分, 进一步促进根系对水分的吸收, 使得该地土壤水分相对较低<sup>[35]</sup>; 灌木地地表主要覆盖着互叶醉鱼草, 植被稀疏, 根系耗水较少, 且该地土质黏重, 因蒸散发作用导致的土壤水分流失较少。0~20 cm 内, 不同土地利用类型下体积含水量 CV 基本均超过 20%, 这表明表层土壤在时间尺度上受到降水和蒸发的显著影响, 同一土层在不同时间段内的体积含水量存在较大差异<sup>[36]</sup>; 200~300 cm 内, 农田和灌木地的体积含水量 CV 均位于 10% 左右, 显示出低变异性, 这表明深层土壤水分趋于稳定, 受降水、土壤蒸发和植被蒸腾作用等影响较小。

### 3.2 坝地上层滞水补给速率

本研究通过与最近的延长观测站 2020—2022 年的降水氯离子浓度平均<sup>[26]</sup>, 得到研究区最终的降水氯离子浓度为  $1.78 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 该值与延安周围其他站点测得的值相近。例如, 陆彦玮<sup>[37]</sup>在延安测得 2015 年和 2018—2019 年三年氯离子的平均浓度为  $1.52 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。鉴于研究区降水化学数据的稀缺性, 结果的不确定性主要源自对降水氯离子浓度估计的误差。通过平均近几年降水氯离子浓度, 在一定程度上避免了误差。毋庸置疑, 更多的氯离子沉降数据将减少该方法补给估算的不确定性。因此, 后期应更加重视黄土高原乃至全球干旱半干旱地区氯离子沉降的长期监测。土壤氯离子浓度因土地利用类型不同而存在差异。本研究中, 农田和灌木地在 0~300 cm 内存在氯离子单峰值, 这种峰值可能是由于溶质在近地表区域的累积效应所致, 即由降水沉积的水分在经历蒸发和蒸腾作用后快速减少, 使得土壤中氯离子浓度升高; 草地存在多个氯离子峰值, 可能是由于其高植被盖度和密集根系分布, 导致土壤水分和溶质在不同深度之间发生复杂迁移。此外, 草地土壤质地在不同深度的差异也会影响氯离子的迁移路径和分布<sup>[38]</sup>。

羊圈沟流域内的水文物理结构和水文过程受地理位置与流域出口距离的影响, 靠近流域出口的地区通常具有不同的植被特征和水文特性<sup>[39]</sup>。农田位于流域最下游, 其上层滞水补给速率明显高于其他土地利用类型, 农田种植的玉米属于典型浅根植被, 其特征是根系小、吸水能力弱、蒸散量少, 能保留更多的土壤水分<sup>[40]</sup>, 从而使土壤中的氯离子浓度偏低。根据式 (5) 可知, 氯离子浓度越低, 补给速率越大。草地和灌木地的上层滞水补给速率差异不大, 草地分布的紫花苜蓿和灌木地生长的互叶醉鱼草均属于深根植被, 深根植被主要通过地表以下的根系吸水和地表以上的叶片截留蒸发来减少土壤中的水分, 从而使土壤中的氯离子富集。乔木地和灌木地位于相邻坝地, 海拔相差 6 m, 乔木地的上层滞水补给速率高于灌木地, 可能是因为乔木根系生长产生生物大孔隙, 增强了水分入渗能力, 使得水分易较快穿过非饱和带对上层滞水进行补给<sup>[41]</sup>。乔木地和草地的取样点均位于坝头位置, 海拔分别为 1 112 和 1 102 m, 但乔木地的补给速率大于草地。一方面可能是因为乔木地的砂粒和粉粒含量相对较高, 土壤透水能力强; 另一方面可能是由于二者的上层滞水埋深不同, 乔木地的上层滞水埋深较草地浅。上层滞水埋深越浅, 越易通过入渗得到补给<sup>[42]</sup>。本研究中, 农田上层滞水补给速率最大, 这可能导致营养盐、农药等快速进入上层滞水, 增加污染风险, 不利于当地的农业生产。具体的污染情况及后续改进措施还需进一步深入研究。

国内外关于淤地坝上层滞水补给的研究具有相似性。例如, Luo 等<sup>[43]</sup>研究表明, 上层滞水可通过原位垂直入渗和地下横向运动进行补给; Zhao 和 Wang<sup>[44]</sup>研究发现黄土高原淤地坝对地下水补给的贡献明显高于台地。在国际上, Abdalla 和 Al-Rawahi<sup>[45]</sup>通过地下水位波动法算出阿拉伯半岛阿曼地区坝内的地下水补给量为  $2.7 \times 10^7 \text{ m}^3$ ; Sherif 等<sup>[46]</sup>调查发现, 中东和北非地区 65% 以上的坝建在较大河流或干流上, 以提供灌溉水源和改善土壤条件。相比之下, 国内的淤地坝主要分布在小沟壑或支流上, 以拦截径流和泥沙, 防止水土流失。尽管这些水利工程在学术命名和具体结构上可能有所不同, 但它们在干旱缺水地区的主要功能相似, 均通过集蓄雨洪径流来补给地下水。

以往关于黄土高原地下水的研究主要为潜水, 潜水是指埋藏于地表以下第一个稳定隔水

层上的地下水。如程立平等<sup>[47]</sup>探究了长武塬区土地利用变化对潜水补给的影响；向伟等<sup>[48]</sup>探究了黄土高原区域尺度内潜水样品的稳定同位素特征。本研究地下水类型为上层滞水，即存在于潜水面以上包气带中的局部不透水层上的重力水。虽然潜水和上层滞水均属于地下水，但它们在埋深、水质和补给速率等方面存在一定差异（表 2）。

表 2 黄土高原不同类型地下水特征

Table 2 Characteristics of different types of groundwater in the Loess Plateau

| 特征<br>Feature        | 上层滞水（淤地坝地下水）<br>Perched water (Groundwater of check dams)                             | 黄土高原传统地下水<br>Traditional groundwater in the Loess Plateau |
|----------------------|---|---|
| 埋深 <sup>①</sup>      | 较浅  | 相对较深  |
| 水质特点 <sup>②</sup>    | 可能含有较高泥沙、营养盐和污染物  | 较稳定，受自然环境影响，杂质较少<br>[49]                                  |
| 补给速度和影响 <sup>③</sup> | 较快，受降雨量和坝体结构影响大 <sup>[50]</sup>   | 较慢，依赖长期降雨和地下水流动，<br>补给量稳定                                 |
| 相似性 <sup>④</sup>     | 降雨是主要的补给来源，两种地下水的补给量均表现出季节性变化   |   |
| 差异性 <sup>⑤</sup>     | 上层滞水的形成和补给速度受人工因素影响较大，而普通地下水的补给主要受自然因素控制；上层滞水更易受到外来污染物的影响，导致水质波动；普通地下水由于埋藏较深，水质相对更为稳定 |   |

①Perched water depth; ②Water quality characteristics; ③Recharge rate and impacts; ④Similarity; ⑤Difference

### 3.3 坝地上层滞水补给机制

沟道低洼地区具有复杂的地形和较浅的含水层，可能会储存相对大量的地下水<sup>[51]</sup>。本研究表明，随土层深度增加，坝地土壤黏粒含量基本逐渐增大。表层土壤相对疏松，下层土壤趋于紧实，导致水分在上下层之间滞留，形成上层滞水。本研究中的浅层地下水即为上层滞水，该水体分布范围有限，往往雨季时存在，干旱季节消失或大幅度减少，水位存在着明显的季节变化。上层滞水对降水事件存在一定的滞后效应，主要是由于土壤水分亏缺、植物蒸腾需求以及土壤传导特性等综合因素的影响，使得上层滞水在 10 月底左右才显著回升<sup>[52-53]</sup>。上层滞水埋深波动对降水的响应和植被耗水等方面具有重要的生态意义，其水位的上升和下降，可以反映坝地地下水库的动态变化过程，是调节区域水文循环、保障地下水资源可持续性的重要因素。

水文循环过程的研究受到诸多复杂因素的干扰，国内外关于地下水研究的技术手段也在不断地更新变化。其中，示踪剂因其原理简单、操作方便等优点，已被广泛应用于地下水运动<sup>[54]</sup>。本研究采用碘离子示踪证实了羊圈沟流域坝地内上层滞水存在横向运移情况，这说明在坝地饱和带内，上层滞水在一定的水力梯度下可以横向移动<sup>[18]</sup>，其横向运移速率为  $6 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ ，该结果高于雍晨旭<sup>[55]</sup>利用水位波动数据算出的  $3.2 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ ，可能是因为坝地土壤物理性质差异等造成结果的偏差。此外，溴离子示踪结果也在一定程度上证明了坝地上层滞水横向运移情况的发生。A<sub>180</sub> 井中溴离子浓度略高于 A<sub>20</sub> 井，这与金沐<sup>[56]</sup>研究的溴离子在土壤中的垂向运移情况相符。两口井中溴离子浓度的变化证明随着降水强度增加 ( $>15 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )，水分在充分补给土壤水后会继续向下渗透补给上层滞水。弱降水事件则不会引起补给的发生，溴离子会随降水积累在非饱和带中，直至下次较强降水事件将溴离子带入饱和带才会对上层滞水进行补给<sup>[57]</sup>，但该入渗补给存在一定的滞后性。本研究结合上层滞水埋深监测和离子示踪技术，旨在深入剖析丘陵沟壑区坝地上层滞水的动态特征及补给规律，这为坝地生态建设及地下水资源的可持续利用提供了科学依据。

随着气候变化和土地利用方式的转变,淤地坝的作用和价值变得尤为重要。作为黄土高原常见的水利工程,淤地坝在过去几十年中通过拦截径流和泥沙,减少了水土流失,改善了农田土壤结构,提升了农业生产力,并有效调蓄水资源,为干旱季节提供了稳定的灌溉水源。未来,淤地坝的发展方向应在保持核心功能的基础上,进一步优化水土保持和水资源调控能力,实施灵活的适应性管理,并朝着多功能化方向拓展,如发展生态旅游和休闲农业。同时,应与流域综合治理相结合,发挥水资源调节和土壤保护的节点作用,实现生态保护与经济发展的双赢。

## 4 结论

本文通过对不同土地利用类型下坝地的土壤水分变化、氯离子分布情况、上层滞水动态及碘、溴离子示踪内容进行研究,探究丘陵沟壑区典型流域坝地上层滞水的补给特征。结果表明:不同土地利用类型下坝地土壤水分依次为农田>灌木地>乔木地>草地;不同土地利用类型下坝地上层滞水补给速率依次为农田>乔木地>草地>灌木地,补给速率表现出明显的差异性。离子示踪结果表明( $>15\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )降水事件会对坝地上层滞水形成补给,但存在一定滞后性,滞后时间约为6~11 d。此外,坝地上层滞水在水平方向上存在着运移情况,其横向运移速率约 $6\text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ ,垂向入渗速率为 $0.13\sim 0.15\text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ 。本文通过研究坝地上层滞水补给过程与机制,为当地生态建设及水资源高效利用提供了理论参考和数据支撑。

## 参考文献 (References)

- [1] Fan Y. Groundwater in the earth's critical zone: Relevance to large-scale patterns and processes[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(5): 3052-3069.
- [2] Pan H Y, Ma S Z. Introduction to hydrogeology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009. [潘宏雨, 马锁柱. 水文地质学概论 [M]. 北京: 地质出版社, 2009.]
- [3] Zheng C M, Guo Z L. Plans to protect China's depleted groundwater[J]. *Science*, 2022, 375(6583): 827.
- [4] Jasechko S, Perrone D. Global groundwater wells at risk of running dry[J]. *Science*, 2021, 372(6540): 418-421.
- [5] Cai Z S, Ofterdinger U. Analysis of groundwater-level response to rainfall and estimation of annual recharge in fractured hard rock aquifers, NW Ireland[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 535: 71-84.
- [6] Pu X, Cai K, Li Z M, et al. Quantifying groundwater recharge in an agricultural basin using water stable isotope analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 376: 109228.
- [7] Ma J Y, Sun B Y, Xiao J B, et al. Characteristics of groundwater recharge of small watershed in hilly and Gully Region of the Loess Plateau[J]. *Arid Land Geography*, 2018, 41(5): 992-1000. [马建业, 孙宝洋, 肖俊波, 等. 黄土高原丘陵区小流域地下水补给特征 [J]. 干旱区地理, 2018, 41(5): 992-1000.]
- [8] Ai K K. Turning a disadvantage into an advantage: An analysis of dry farming system of warping dams in the Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(5): 404-410. [艾开开. 化害为利: 黄土高原淤地坝旱作农业系统探析[J]. 水土保持研究, 2022, 29(5): 404-410.]
- [9] Liu B L. Study on the response relationship between warping dam construction and topographic characteristics in Loess Plateau[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021. [刘蓓蓓. 黄土高原淤地坝建设与地形特征的响应关系研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.]
- [10] Norman L M, Brinkerhoff F, Gwilliam E, et al. Hydrologic response of streams restored with check dams in the Chiricahua mountains, Arizona[J]. *River Research and Applications*, 2016, 32(4): 519-527.
- [11] Liu J G, Meng Y, Zhang X J. Interpretation of IPCC AR6 report: Groundwater[J]. *Climate Change Research*, 2022, 18(4): 414-421. [刘俊国, 孟莹, 张学静. IPCC AR6 报告解读: 地下水[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(4): 414-421.]

- [12] Wu Z, Jiang Y J, Jiang G H, et al. Characteristics of different land-use types of slope runoff in a Karst trough valley located in Zhongliang Mountain, Chongqing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(16): 6072-6082. [吴泽, 蒋勇军, 姜光辉, 等. 中梁山岩溶槽谷区不同土地利用方式坡地产流规律[J]. *生态学报*, 2019, 39(16): 6072-6082.]
- [13] Li X G, Wei X, Wei N. Correlating check dam sedimentation and rainstorm characteristics on the Loess Plateau, China[J]. *Geomorphology*, 2016, 265: 84-97.
- [14] Fu B J, Liu Y, Lü Y H, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China[J]. *Ecological Complexity*, 2011, 8(4): 284-293.
- [15] Li J B, Su R, Tian X, et al. Reviews on study methods of groundwater recharge in arid and semi-arid regions[J]. *World Nuclear Geoscience*, 2013, 30(3): 168-173. [李杰彪, 苏锐, 田霄, 等. 干旱-半干旱地区地下水补给方法研究综述[J]. *世界核地质科学*, 2013, 30(3): 168-173.]
- [16] Hou Y S, Xin H, Liu S, et al. Effects of pore-scale structure of saturated soil with different cementation degrees on groundwater seepage characteristic[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(2): 398-407. [侯玉松, 辛虎, 刘苏, 等. 不同胶结度的饱和土壤孔隙尺度结构对地下水渗流特性的影响[J]. *土壤学报*, 2024, 61(2): 398-407.]
- [17] Sheng F, Fang Y. Study on preferential soil water flow using iodine-starch staining method[J]. *Soils*, 2012, 44(1): 144-148. [盛丰, 方妍. 土壤水非均匀流动的碘-淀粉染色示踪研究[J]. *土壤*, 2012, 44(1): 144-148.]
- [18] Zhao J J, Wang Z, Zhang Z D, et al. The pore diffusion coefficient of iodide ion in rock samples using X-ray K-edge imaging[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2023, 42(4): 667-676. [赵九江, 王哲, 张志都, 等. 利用 X 射线 K 吸收边成像法测量碘离子在岩石中的孔隙扩散系数[J]. *岩矿测试*, 2023, 42(4): 667-676.]
- [19] Wang D, Huo S Y, Sun F, et al. Numerical simulation on applicability of bromide tracer method for evaluating groundwater evaporation[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(1): 19-27. [王登, 霍思远, 孙芳, 等. 人工溴示踪法评价潜水蒸发可行性数值模拟[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(1): 19-27.]
- [20] Cui H Q, Li W P, Kang W D, et al. A study of groundwater recharge under different irrigation conditions in the middle reaches of the Heihe River[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(3): 22-28. [崔虎群, 李文鹏, 康卫东, 等. 黑河中游不同灌溉方式地下水入渗补给特征研究[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(3): 22-28.]
- [21] Watson A, Eilers A, Miller J A. Recharge estimation using CMB and environmental isotopes in the verloreenvlei estuarine system, South Africa and implications for groundwater sustainability in a semi-arid agricultural region[J]. *Water*, 2020, 12(5): 1362.
- [22] Zhang Z Q, Li M, Si B C, et al. Deep rooted apple trees decrease groundwater recharge in the highland region of the Loess Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 622: 584-593.
- [23] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. Vertical distribution and influencing factors of soil water content within 21-m profile on the Chinese Loess Plateau[J]. *Geoderma*, 2013, 193: 300-310.
- [24] Gao X D, Li H C, Zhao X N, et al. Identifying a suitable revegetation technique for soil restoration on water-limited and degraded land: Considering both deep soil moisture deficit and soil organic carbon sequestration[J]. *Geoderma*, 2018, 319: 61-69.
- [25] Scanlon B R, Gates J B, Reedy R C, et al. Effects of irrigated agroecosystems: 2. Quality of soil water and groundwater in the southern High Plains, Texas[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(9): e2009wr008428.
- [26] Huang Y N. Optimizing chloride tracing technology to estimate the impacts of vegetation change on potential groundwater recharge on the Loess-Covered Region[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2023. [黄亚楠. 优化氯示踪技术估算植被变化对黄土区地下水潜在补给的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2023.]
- [27] Li M, Yang J F, Hou J C, et al. Sediment deposition process for a silt dam in a small watershed in Loess Hilly Region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(2): 64-69. [李勉, 杨剑锋, 侯建才, 等. 黄土丘陵区小流域淤地坝记录的泥沙沉积过程研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(2): 64-69.]
- [28] Liu J H, Xin Z B, Shen H Y, et al. Water holding capacities under different vegetation types in Bashang area of Hebei Province[J]. *Soils*, 2021, 53(4): 833-840. [柳金昊, 信忠保, 沈晗悦, 等. 河北坝上地区不同植被类型土壤持水性能研究[J]. *土壤*, 2021, 53(4): 833-840.]
- [29] Jia X X, Shao M A, Zhu Y J, et al. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*,

2017, 546: 113-122.

- [30] Huang Z. Soil water deficit and replenishment potential of different land use types on the Loess Plateau[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2022. [黄泽. 黄土高原不同土地利用类型的土壤水分亏缺及补偿潜力研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2022.]
- [31] He M N, Wang Y Q, Wang L, et al. Spatial-temporal dynamics and recovery mechanisms of dried soil layers under *Robinia pseudoacacia* forest based on *in situ* field data from 2017 to 2020[J]. Land Degradation & Development, 2022, 33(14): 2500-2511.
- [32] Yang Y S, Shi D M, Yao Z Y. Study on runoff and permeability of eroded soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 1984, 21(2): 203-210. [杨艳生, 史德明, 姚宗虞. 侵蚀土壤地表径流和土壤渗透的研究[J]. 土壤学报, 1984, 21(2): 203-210.]
- [33] Lü L G, Liao K H, Zhou Z W, et al. Determining hot moments/spots of hillslope soil moisture variations based on high-resolution spatiotemporal soil moisture data[J]. Catena, 2019, 173: 150-161.
- [34] Ma F L, Yang Y S, Wang J B, et al. Temporal heterogeneity and dominant factors of soil water content in the grassland in the northern Qinghai Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(4): 178-183. [马扶林, 杨永胜, 王军邦, 等. 青海北部草地水分时间异质性及主导因素[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4): 178-183.]
- [35] Zhu W, Zhou O, Sun Y M, et al. Dynamic niche partitioning in root water uptake of *Populus tomentosa* and *Robinia pseudoacacia* in mixed forest[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(3): 389-403. [祝维, 周欧, 孙一鸣, 等. 混交林内毛白杨和刺槐根系吸水的动态生态位划分[J]. 植物生态学报, 2023, 47(3): 389-403.]
- [36] Wang J Z, Zhang Q F, Peng H, et al. Impact of individual rainfall on the changes of soil water content in deep layer of different land uses[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 69-75. [王佳珍, 张秋芬, 彭华, 等. 不同土地利用方式下次降雨对土壤含水量深层变化的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 69-75.]
- [37] Lu Y W. Study on typical hydrological characteristics of the vadose zone and spatiotemporal evolution of potential groundwater recharge in the Chinese Loess Plateau[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2020. [陆彦玮. 黄土高原包气带典型水文特征与潜在地下水补给的时空演变研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2020.]
- [38] Hassen I, Slama F, Bouhlila R. Groundwater recharge assessment in an arid region through chloride mass balance and unsaturated numerical modelling: The Kasserine aquifer system[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(22): 2282.
- [39] Jiang G L, Wang N A, Mao X, et al. Hydrological evolution of a lake recharged by groundwater in the Badain Jaran Desert over the past 140 years[J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 793.
- [40] Ye L P, Fang L C, Shi Z H, et al. Spatio-temporal dynamics of soil moisture driven by 'Grain for Green' program on the Loess Plateau, China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 269: 204-214.
- [41] Jia A Y, Zhang Y Y, Zhao W Z, et al. Characteristics of soil macropores and water infiltration in oasis croplands in an arid region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(2): 486-497. [贾昂元, 张勇勇, 赵文智, 等. 干旱区绿洲农田土壤大孔隙与水分入渗特征[J]. 土壤学报, 2022, 59(2): 486-497.]
- [42] Pei Y W, Huang L M, Shao M A, et al. Characteristics and their influencing factors of water recharge under different groundwater levels in the Mu Us Sandy Land of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(12): 108-116. [裴艳武, 黄来明, 邵明安, 等. 毛乌素沙地不同地下水位埋深下土壤水补给特征及影响因素[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 108-116.]
- [43] Luo Z B, Yong C X, Fan J, et al. Precipitation recharges the shallow groundwater of check dams in the loessial hilly and Gully Region of China[J]. Science of the Total Environment, 2020, 742: 140625.
- [44] Zhao Y, Wang L. Determination of groundwater recharge processes and evaluation of the 'two water worlds' hypothesis at a check dam on the Loess Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2021, 595: 125989.
- [45] Abdalla O A E, Al-Rawahi A S. Groundwater recharge dams in arid areas as tools for aquifer replenishment and mitigating seawater intrusion: Example of AlKhod, Oman[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 69(6): 1951-1962.
- [46] Sherif M, Sefelnasr A, Al Rashed M, et al. A review of managed aquifer recharge potential in the middle east and North Africa Region with examples from the Kingdom of Saudi Arabia and the united Arab emirates[J]. Water, 2023, 15(4): 742.
- [47] Cheng L P, Liu W Z, Li Z, et al. Land use change affects groundwater recharge in the Changwu Loess Tableland of China[J]. Advances

- in *Water Science*, 2016, 27(5): 670-678. [程立平, 刘文兆, 李志, 等. 长武黄土塬区土地利用变化对潜水补给的影响[J]. *水科学进展*, 2016, 27(5): 670-678.]
- [48] Xiang W, Liu X, Si B C. Characteristics and indicative significance of groundwater stable isotopes in the Loess Plateau at the regional scale[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(9): 5290-5297. [向伟, 刘鑫, 司炳成. 黄土高原区域尺度地下水稳定同位素特征及其指示意义[J]. *环境科学*, 2024, 45(9): 5290-5297.]
- [49] Li Z J, Yang Q C, Xie C, et al. Spatiotemporal characteristics of groundwater quality and health risk assessment in Jinghe River Basin, Chinese Loess Plateau[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 248: 114278.
- [50] Jiang K X, Yu K X, Li P, et al. Sediment characteristics and sources analysis of typical check dam in pisha sandstone area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(1): 47-53. [蒋凯鑫, 于坤霞, 李鹏, 等. 砒砂岩区典型淤地坝沉积泥沙特征及来源分析[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(1): 47-53.]
- [51] Tian F, Lü Y H, Fu B J, et al. Challenge of vegetation greening on water resources sustainability: Insights from a modeling-based analysis in Northwest China[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(7): 1469-1478.
- [52] Jin Y R, Lu K X, Li P, et al. Research on soil water movement based on stable isotopes[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4): 792-801. [靳宇蓉, 鲁克新, 李鹏, 等. 基于稳定同位素的土壤水分运动特征[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 792-801.]
- [53] Luo Z B, Fan J, Shao M A, et al. Soil water dynamics and groundwater evolutions of check dams under natural rainfall reduction in semi-arid areas[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 617: 129099.
- [54] Wu J, Li S C, Xu Z H, et al. Numerical simulation of solute transport and structural analysis for groundwater connection medium based on the tracer test[J]. *Water and Environment Journal*, 2020, 34(1): 143-152.
- [55] Yong C X. Experimental study on the shallow groundwater dynamics and recharge process in the Loess Plateau[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2018. [雍晨旭. 黄土区浅层地下水动态及其补给过程试验研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2018.]
- [56] Jin M. Shallow groundwater dynamics and recharge laws in check dams on the Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2020. [金沐. 黄土高原淤地坝内浅层地下水动态及补给规律[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2020.]
- [57] Wang Z R, Liu J. Groundwater dynamics in Haihe River Plain under the influence of severe rainfall in 2021[J]. *Journal of China Hydrology*, 2022, 42(6): 68-72. [王卓然, 刘杰. 2021年强降水影响下的海河平原地下水动态特征研究[J]. *水文*, 2022, 42(6): 68-72.]

(责任编辑: 檀满枝)