

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.020

白晨赞,余小玲,马琛琛,等.梯田侧壁显著影响黄土塬区梯田土壤水分空间分布[J].水土保持学报,2024,38(6):105-112.

BAI Chenyun, YU Xiaoling, MA Chenchen, et al. The terraced walls significantly influence the spatial distribution of soil water in terraced areas on the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 105-112.

## 梯田侧壁显著影响黄土塬区梯田土壤水分空间分布

白晨赞<sup>1,2</sup>, 余小玲<sup>2,3</sup>, 马琛琛<sup>1,2</sup>, 韩晓阳<sup>1,2,3</sup>, 乔江波<sup>1,2,3</sup>, 朱元骏<sup>1,2,3</sup>

(1.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所),陕西 杨凌 712100;2.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;3.中国科学院

教育部水土保持与生态环境研究中心,陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 坡地改梯田是黄土塬区重要的水土保持和农业措施,明确梯田侧壁(梯壁)对梯田土壤水分空间分布的影响有助于保持梯田水分,提高梯田生产力。[方法] 通过对黄土塬区典型人工高坡(梯壁高5 m)梯田不同位置土壤取样测定含水量和土壤物理化学性质,分析梯田土壤水分的空间分布特征和影响因素。[结果] 随着距梯壁距离的增加,梯田0—300 cm土层土壤储水量从15.9 mm增加至328.6 mm,呈显著上升趋势;梯壁蒸发量从318.0 mm逐渐降低至83.4 mm;梯面宽为300 cm时,梯壁蒸发量可以达到土壤储水量的33%~38%。土层深度和距梯壁的距离是影响梯田土壤含水量的主要因素,土壤颗粒组成和有机质含量与土壤含水量的相关性较低。[结论] 黄土塬区梯壁导致的侧向蒸发显著影响梯田土壤水分分布,导致侧壁一侧土壤水分降低。在梯田的维护和管理中应采取适当措施降低梯田侧壁蒸发导致的水分损耗。

**关键词:** 黄土塬区; 梯田侧壁; 土壤含水量; 侧向蒸发

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)06-0105-08

## The Terraced Walls Significantly Influence the Spatial Distribution of Soil Water in Terraced Areas on the Loess Plateau

BAI Chenyun<sup>1,2</sup>, YU Xiaoling<sup>2,3</sup>, MA Chenchen<sup>1,2</sup>, HAN Xiaoyang<sup>1,2,3</sup>, QIAO Jiangbo<sup>1,2,3</sup>, ZHU Yuanjun<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation),

Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion

and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. The Research

Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy

of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] Converting slopes into terraces is a crucial soil and water conservation and agricultural measure on the Loess Plateau. Understanding the impact of terraced walls on soil water is conducive to preserving soil water and enhancing terrace productivity. [Methods] Soil samples were collected from different locations on typical artificial high-slope terraces (terraced wall height of 5 meters) on the Loess Plateau to measure soil water content and soil physical and chemical properties. The spatial distribution characteristics and influencing factors of soil water were analyzed. [Results] The results showed that as the distance from the terraced wall increased, the soil water storage in the 0—300 cm soil layer increased significantly from 15.9 mm to 328.6 mm. The evaporation from the terraced wall decreased gradually from 318.0 mm to 83.4 mm. When the terrace width was 300 cm, the evaporation from the terraced wall could account for 33% to 38% of the soil water storage. The depth of the soil layer and the distance from the terraced wall were the main factors influencing soil water content, while the correlation between soil particle

收稿日期: 2024-06-15

修回日期: 2024-07-27

录用日期: 2024-08-10

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-12-03

资助项目: 国家自然科学基金项目(42377316)

第一作者: 白晨赞(1996—), 男, 在读博士研究生, 主要从事农田水文过程研究。E-mail: baichenyun1996@163.com

通信作者: 朱元骏(1978—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤水文过程及循环研究。E-mail: zhuyj@nwfafu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

composition as well as organic matter content and soil water content was low. [Conclusion] Lateral evaporation caused by the terraced walls on the Loess Plateau significantly affects the distribution of soil moisture, leading to a reduction in soil water on the side adjacent to the walls. Appropriate measures should be taken in terrace maintenance and management to reduce soil water loss due to evaporation from the terraced walls.

**Keywords:** Loess Plateau; terraced walls; soil water content; side evaporation

**Received:** 2024-06-15

**Revised:** 2024-07-27

**Accepted:** 2024-08-10

**Online**(www.cnki.net): 2024-12-03

坡地改梯田是黄土高原生态环境综合治理及农业发展的核心工程措施<sup>[1]</sup>,通过在坡面上人工推建水平台阶或平台,可显著改变坡面水文过程<sup>[2]</sup>、物质迁移和能量传输<sup>[3]</sup>,进而能在水土保持、水文调节、粮食供给<sup>[1]</sup>、固碳<sup>[4]</sup>等方面发挥重要作用。目前,区域已有 902 万  $\text{hm}^2$  梯田,且其面积和分布范围还将持续增加<sup>[5]</sup>。梯田的保水能力是梯田水文功能和服务的主要指标<sup>[6]</sup>。坡地改梯田改变地面坡度和径流系数,缩短坡长,从而降低坡面径流的冲刷力,使降雨就地入渗,增加土壤水分,因此是增加土壤储水量的重要措施<sup>[1,7-8]</sup>。

土壤水分作为作物生长的关键因素之一,其分布特性直接关联作物根系的分布特点及对水分的需求规律<sup>[9-10]</sup>。深入探究梯田土壤水分分布,有助于制定科学的灌溉制度,进而提升作物产量与品质,并为优化种植结构提供依据<sup>[11]</sup>。生态环境层面,了解梯田土壤水分分布有助于优化梯田设计与管理,进而提升水土保持效益。通过实施合理的水分管理策略,可以促进梯田内的植被恢复,改善生态环境<sup>[12]</sup>。特别地,黄土高原地区地形复杂多变,气候条件亦不稳定。研究该区域梯田土壤水分分布,有助于揭示土壤水分的时空变化规律,为区域水资源管理与利用提供理论支持。

梯田水分空间分布与梯田独特的三维空间特征显著相关。梯田阶面不同部位水土过程存在显著差异。阶面内侧为水、沙输入区,阶面中部可能为水、沙平衡区,阶面外侧在降雨作用下发生水土流失,成为水、沙输出区<sup>[13-14]</sup>。此外,除了可供耕作的阶面外,梯田还存在垂直或坡度较大的、不可耕作的侧壁(梯壁),导致梯田暴露于空气的面积较坡面更大,这可能加速土壤冷热、干湿循环,加快梯壁水土流失,促进土壤水分侧向蒸发,从而降低土壤水分<sup>[6,15-16]</sup>。

侧向蒸发显著增加梯田水分空间变异性,使梯田的保水作用产生极大的不确定性,导致梯田产量的变异系数远高于坡耕地<sup>[17]</sup>。已有研究<sup>[18]</sup>表明,梯田中的侧向蒸发量不可忽视,约占梯田总蒸发量的 1/3。侧向蒸发的影响距离可宽达 5 m,对梯田的水分状况产生深远影响<sup>[19]</sup>。且随着时间推移,没有得到良好维护的梯田其保水作用逐渐减弱<sup>[20]</sup>,同时,阳坡梯田由于能接受到更多

的太阳辐射,其侧向蒸发量较阴坡梯田更高<sup>[21]</sup>。尽管雨季梯田的保水效果优于坡地,但在旱季,由于梯田无水可蓄,梯壁的存在增加无效蒸发,导致梯田的保水、蓄水作用削弱<sup>[6]</sup>。因此,在梯田建设与利用时,不仅应考虑水平阶面的保水作用,还应权衡垂直梯壁的侧向蒸发作用对土壤水分分布和消耗的影响,这将对维持黄土塬区植被生长和生态系统稳定具有重要意义<sup>[22-23]</sup>。

本研究选取黄土塬区典型梯田为研究对象,通过分析梯田不同位置土壤含水量和物理化学性质,研究梯田土壤水分分布特征,量化梯田侧向蒸发量,明确梯壁对梯田土壤水分的影响,以期为区域梯田水分高效利用和土地生产力提升提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

本研究于中国科学院长武黄土高原农业生态试验站(长武站)开展。长武站位于黄土高原南部( $35^{\circ}14'30''\text{N}$ ,  $107^{\circ}40'59''\text{E}$ ),气候类型属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温  $9.1^{\circ}\text{C}$ ,年平均降水量 580 mm,超过 50% 的降雨集中在 7—9 月。该区域属于高原沟壑区,塬面和沟壑分别占总面积约 35% 和 65%,塬面海拔 1 200 m,沟口海拔 940 m。土壤类型为黑垆土,土质疏松、质地均匀,母质为深厚的中壤质马兰黄土,具有良好的土壤水库效应。长武站所处地区于上世纪 70 年代起大范围推行坡改梯建设,坡地大部分改建为梯田,不同海拔、坡向、坡度、植被利用类型梯田在该地区分布广泛(图 1)。

### 1.2 样品采集与分析

长武站重力侵蚀场(重力场)建于 2016 年,其观测小区的水平阶面尺寸统一为长 6.5 m,宽 3 m,地面覆盖以草地为主,植被覆盖率约 70%。重力场垂直高度为 5 m,边壁保持自然状态,无植被覆盖。其独特的设计包含水平的阶面和垂直的侵蚀面(梯壁),与梯田结构相似。为确保研究环境封闭性和数据准确性,观测小区四周均由水泥和铁皮牢固围合,有效隔绝外来地表径流。在此环境下,降雨成为小区内土壤水分的唯一补给源,使得重力场成为观测侧向蒸发的理想试验场地。

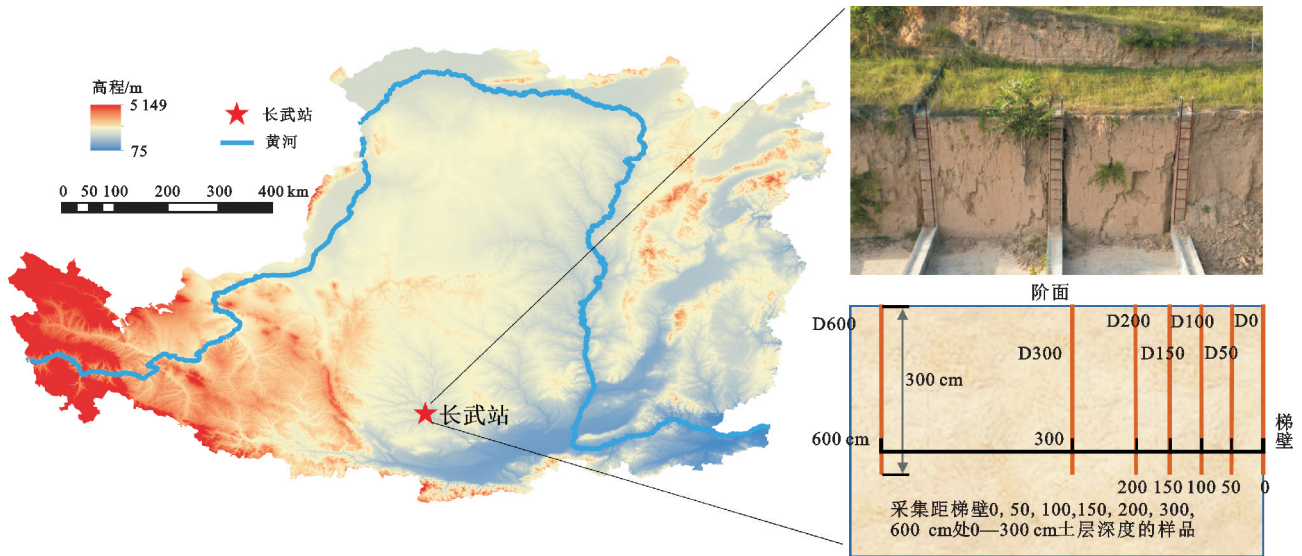


图 1 研究区位置及采样位点示意

Fig.1 Schematic diagram of the location and sampling sites of the research area

本研究利用重力场模拟黄土高原常见的阶面宽 3 m、梯壁高 1~3 m 的梯田,于 2023 年 7 月 14-16 日(期间无降水),分别在距离梯壁 0,50,100,150,200,300 cm 位置(依次标记为 D0、D50、D100、D150、D200 和 D300)进行土壤采集,并以在距离梯壁 600 cm 的位置(记为 D600)作为对照(图 1)。采样遵循标准的土壤采集程序,以确保样品代表性和一致性。在每个采样点均采集 0—300 cm 深的土壤,在 0—100 cm 深度采样间隔为 10 cm,在 100—300 cm 深度采样间隔为 20 cm。连续 3 天,每天在 2 个观测小区内各采集 1 次样品,共计 6 次(D0 处在第 1 天和第 3 天进行采样,共计 4 次),作为重复样本。采集的土壤样品被分为 2 份,一份置于铝盒中,采用 105 °C 烘干法烘干至恒重,用于测定土壤质量含水量(%,g/g);另一份用塑封袋收集,经室内风干后过 2,0.25 mm 筛,用于测定土壤颗粒组成(使用 Mastersizer-2000, Malvern Instruments, Melvin, England)和土壤有机质(SOM,g/kg,重铬酸钾容量法(外加热)),粒径划分遵循美国农业部标准,具体为:黏粒直径<0.002 mm,粉粒直径 0.002~0.05 mm,砂粒直径 0.05~2 mm<sup>[24-25]</sup>。

### 1.3 计算与分析

#### (1) 土壤储水量

$$SWS_i = \rho_i \times SWC_i \times d_i \times 10 \quad (1)$$

式中:SWS<sub>i</sub>为第 i 层土壤储水量(mm);ρ<sub>i</sub>为第 i 层土壤质量密度(取 1.3 g/cm<sup>3</sup>);SWC<sub>i</sub>为第 i 层土壤水分含量(%);d<sub>i</sub>为第 i 层土壤厚度(cm);10 为单位转换系数。

#### (2) 梯壁蒸发量

阶面中植被覆盖较均匀,因此,本研究认为,阶面

所产生的蒸散量在阶面范围内相同。土壤水分通过阶面和梯壁 2 个部位散失,前期研究<sup>[19]</sup>结果表明,侧向蒸发的影响深度不超过 5 m,因此,选取 D600 为对照(CK),认为 D600 不受梯壁侧向蒸发的作用,只受阶面垂向土壤蒸散的影响,其他位点的土壤储水量(SWS<sub>i</sub>)与对照值的差值为梯壁蒸发量(E<sub>tw</sub>)。分别计算 0—100,0—200,0—300 cm 土层深度梯壁蒸发量,用以模拟高度分别为 100,200,300 cm 的梯田。

$$E_{tw} = SWS_{ck} - SWS_i \quad (2)$$

式中:E<sub>tw</sub>为梯壁蒸发量(mm);SWS<sub>ck</sub>为对照位点土壤储水量(mm);SWS<sub>i</sub>不同采样位点土壤储水量(mm)。

### 1.4 数据处理

采用 Microsoft excel 2019 软件对数据进行整理和计算;利用 IBM SPSS Statistic 26.0 软件进行统计分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)研究不同位点土壤含水量、土壤颗粒组成和土壤有机质含量的差异,并采用 Duncan 法进行多重比较,显著性水平分别为 p<0.05 和 p<0.01;使用 IBM SPSS Amos 24.0 软件构建结构方程模型;使用 Origin 2024 pro 软件绘图。

## 2 结果与分析

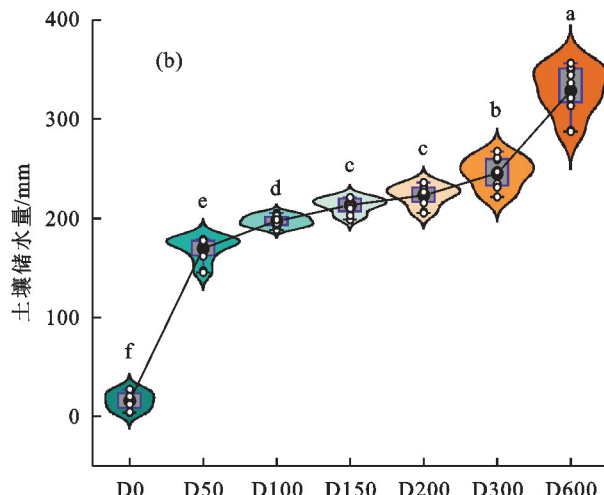
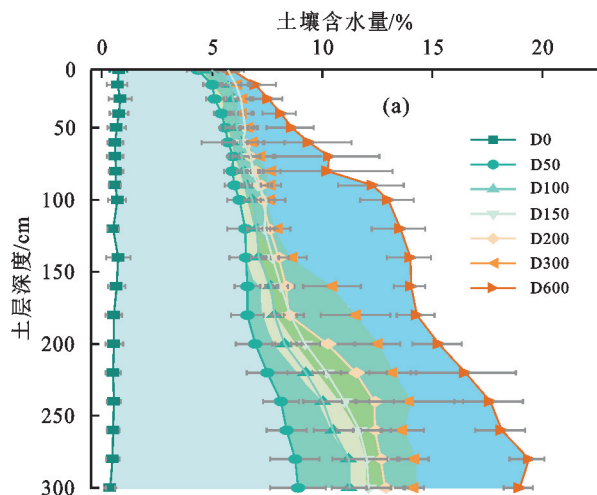
### 2.1 不同位点土壤水分分布特征

由图 2 可知,随着土层深度增加,各位点土壤含水量呈显著差异(p<0.05)。在 0—300 cm 土层,D0 位点的土壤含水量始终接近 0,近似风干土。其他位点的土壤含水量随着土层深度的增加呈上升趋势。具体而言,D0、D50、D100、D150、D200、D300 和 D600 这 7 个位点的土壤含水量分别为 0.1%~1.5%,3.4%~10.1%,3.9%~12.4%,4.6%~13.0%,5.3%~14.4%,4.4%~14.8%,4.8%~20.5%。D600 的平均含水量最



高,为 12.6%,显著高于 D300 (9.4%)、D200(8.6%)、D150(8.2%)、D100 (7.6%)、D50 (6.5%)和 D0 (0.6%) ( $p < 0.05$ )。在 0—300 cm 土层,随着土层深度的增加,各位点间的土壤含水量差异也逐渐扩大。不同位点的土壤储水量也存在显著差异,从 D0 至 D50 位

点,土壤平均储水量从 15.9 mm 迅速增加至 169.4 mm,而在 D100 至 D600 位点,土壤平均储水量从 197.2 mm 增加至 328.6 mm,虽然仍呈显著增长趋势,但增加幅度逐渐降低,D600 平均土壤储水量显著高于其他位点( $p < 0.05$ )。



注:图中不同小写字母表示不同位点间差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

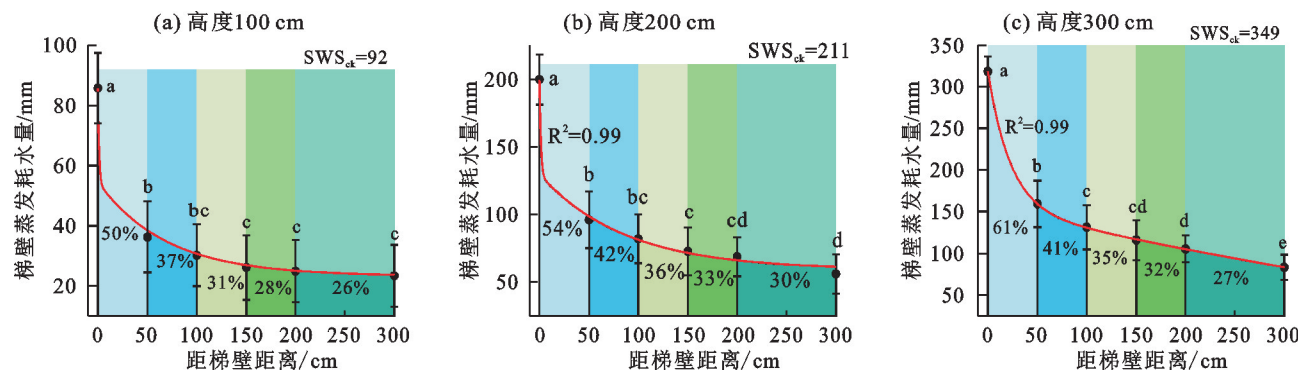
图 2 不同位点土壤含水量与土壤储水量

Fig.2 Soil water content and soil water storage at different sites

### 2.2 梯壁侧向土壤蒸发量

由图 3 可知,与对照位点 D600 相比,不同位点梯壁蒸发量存在显著差异( $p < 0.05$ )。在 100,200,300 cm 高的梯田中,梯壁蒸发量均随距梯壁距离的增加而呈显著下降趋势。具体而言,这 3 个高度的梯田梯壁蒸发量分别为 23.4~85.8,56.0~199.9,83.4~318.0 mm。梯壁蒸发量在距梯壁 50 cm 范围内迅速下降,之后随距离的增加仍显著降低,但降速

有所减缓( $p < 0.05$ )。当以拟合曲线作为耗水边界时,对于 300 cm 宽的阶面,在 100,200,300 cm 高的梯田中,梯壁蒸发量分别占 CK 储水量的 33%,38%,37%。通过分段计算积分面积进一步分析发现,在 100,200,300 cm 高的梯田中,距梯壁不同距离(0—50,50—100,100—150,150—200,200—300 cm)的区域内,梯壁蒸发量分别占 CK 储水量的 26%~50%,30%~54%,27%~61%。



注:图中百分数为距梯壁不同距离范围内,梯壁蒸发量占 CK 储水量的百分比。

图 3 不同位点梯壁蒸发量

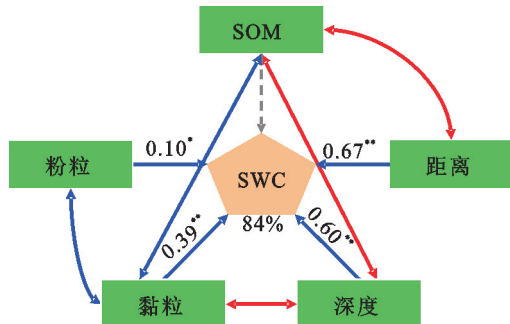
Fig.3 Terrace riser evaporation at different sites

### 2.3 土壤、环境因子对土壤含水量的贡献

使用结构方程模型,分析土壤颗粒组成、土壤有机质(SOM)含量、土层深度和距梯壁距离等多个因素对 SWC 的影响。由图 4 可知,土层深度和距梯壁距离与 SWC 的相关性最高,且均呈极显著正相关

( $p < 0.01$ )。具体而言,距离和深度与 SWC 的相关性系数分别为 0.67 和 0.60,即随着距离和深度增加,SWC 也相应增加。黏粒和粉粒含量与 SWC 也呈显著正相关( $p < 0.05$ ),相关性系数分别为 0.39 和 0.10。然而,SOM 与 SWC 之间无显著相关性。总体而言,以上

土壤和环境参数对 SWC 的解释度达 84%。模型拟合度的评估指标 GFI、RMSEA、CFI 和 TLI 均显示出该模型具有良好的拟合效果。



GFI=0.97 RMSEA=0.11 CFI=0.98 TLI=0.94

图 4 土壤含水量与土壤及环境因子的相关性

Fig.4 Correlations between soil water content and soil and environmental factors

### 3 讨论

本研究关注梯田对土壤水分空间分布的影响,研究结果发现,距离梯壁越近的区域受侧向蒸发的影响越大,土壤含水量相应越小(图 2)。具体来说,随着距梯壁的距离增加,梯壁蒸发量呈先快速后缓慢下降的趋势。总体而言,高度分别为 100,200,300 cm 高的梯田中梯壁蒸发量占 CK 储水量的 33%~38%,与 LÜ 等<sup>[18]</sup>研究结果相近。导致该结果的可能原因在于梯田阶面内侧为水土汇集区<sup>[13]</sup>,而阶面外侧由于经历更频繁的干湿、冷热、冻融循环以及受多重侵蚀因素的影响<sup>[26-27]</sup>,可能成为梯田水土流失的主要源区,这种差异导致阶面土壤水分空间分布的不均匀性。另外,梯壁侧向蒸发进一步加剧土壤水分在梯田空间分布的差异性<sup>[28]</sup>。侧向蒸发现象对土壤水分空间分布的影响在伊朗东北部<sup>[29]</sup>、我国黄土高原的西部<sup>[6]</sup>和北部<sup>[30]</sup>等地区均有发现,且并不局限于梯田环境,在沟壑、塌陷区等地貌类型中均有发现,表明侧向蒸发现象对土壤水分分布和动态变化具有广泛影响。与宽幅梯田相比,窄幅梯田土壤水分变异性更大<sup>[31]</sup>,因此,建议在修建梯田时,应尽可能加宽梯田,以减少土壤水分侧向蒸发所带来的损耗,将有助于推动土壤水分的高效利用,同时也有助于维护梯田的生态平衡和可持续发展。

本研究中,不同位点的有机质含量和土壤颗粒组成差异显著(图 5 和图 6),造成不同位点土壤理化性质差异的原因还有待进一步探究。值得注意的是,黏粒和粉粒含量与土壤含水量之间呈低水平的显著正相关性(分别为 0.39 和 0.10),可能是因为黏粒和粉粒具有较小的粒径和较大的比表面积<sup>[32]</sup>,增强对水

分的吸附能力,提高土壤的持水性<sup>[33]</sup>,且黏粒含量较高时,土壤颗粒间的凝聚力增强,导致土壤结构变紧密,孔隙度减小,从而导致土壤透水性降低,但保水性增强<sup>[34]</sup>。模型拟合结果表明,土层深度和距离与土壤含水量的相关性高于黏粒和粉粒含量(分别为 0.60 和 0.67)。意味着不同位点土壤水分的差异在很大程度上是由侧向和垂向蒸发所驱动。这一发现对于理解梯田水分动态和制定有效的水分管理策略具有重要意义。

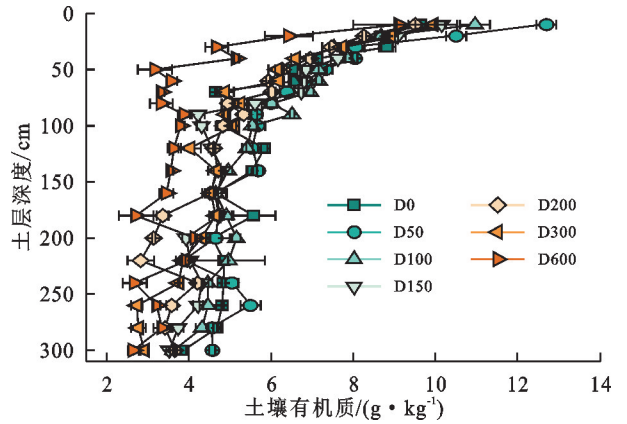


图 5 不同位点土壤有机质含量分布

Fig.5 Distribution of soil organic matter content at different sites

当前的农业实践中,为了减少土壤无效蒸发,常采用秸秆覆盖、地膜覆盖<sup>[35]</sup>和调整耕作方式<sup>[36-37]</sup>等方法。然而,这些方法往往只关注阶面土壤蒸散发,忽视梯田土壤侧向蒸发。干旱年份,在侧向蒸发的作用下,梯田的保水效果显著降低,甚至产生负面影响,对作物生产构成严重威胁<sup>[17]</sup>。因此,未来研究应明确侧向蒸发的影响深度和贡献量,并探究减少梯田侧向蒸发的方法。覆被措施能显著降低土壤蒸发量,然而,梯壁含水量较低,接近风干土状态,导致植物和生物结皮等难以生长,覆盖率因此较低。在黄土塬区,生物覆盖难以实现大范围应用。为此,可考虑采用砌石防护、抹面防护、喷浆等措施进行覆盖,或者利用常见的防晒网、秸秆等进行覆盖,以防止侧向蒸发。不同类型的梯壁对水分分布有不同影响<sup>[38]</sup>。因此,需要进一步探究不同覆盖措施下抑制土壤侧向蒸发的效益,并综合评价这些覆盖措施的耐久性、经济性和功能性。考虑到不同坡向、降雨量和土地利用方式对梯田侧向蒸发程度的影响,还需进一步探讨在不同气候区、土地利用类型和季节下梯田水分的时空变化特征,这将为梯田水分的高效利用提供科学依据和实践指导,有助于实现农业生产的可持续发展。

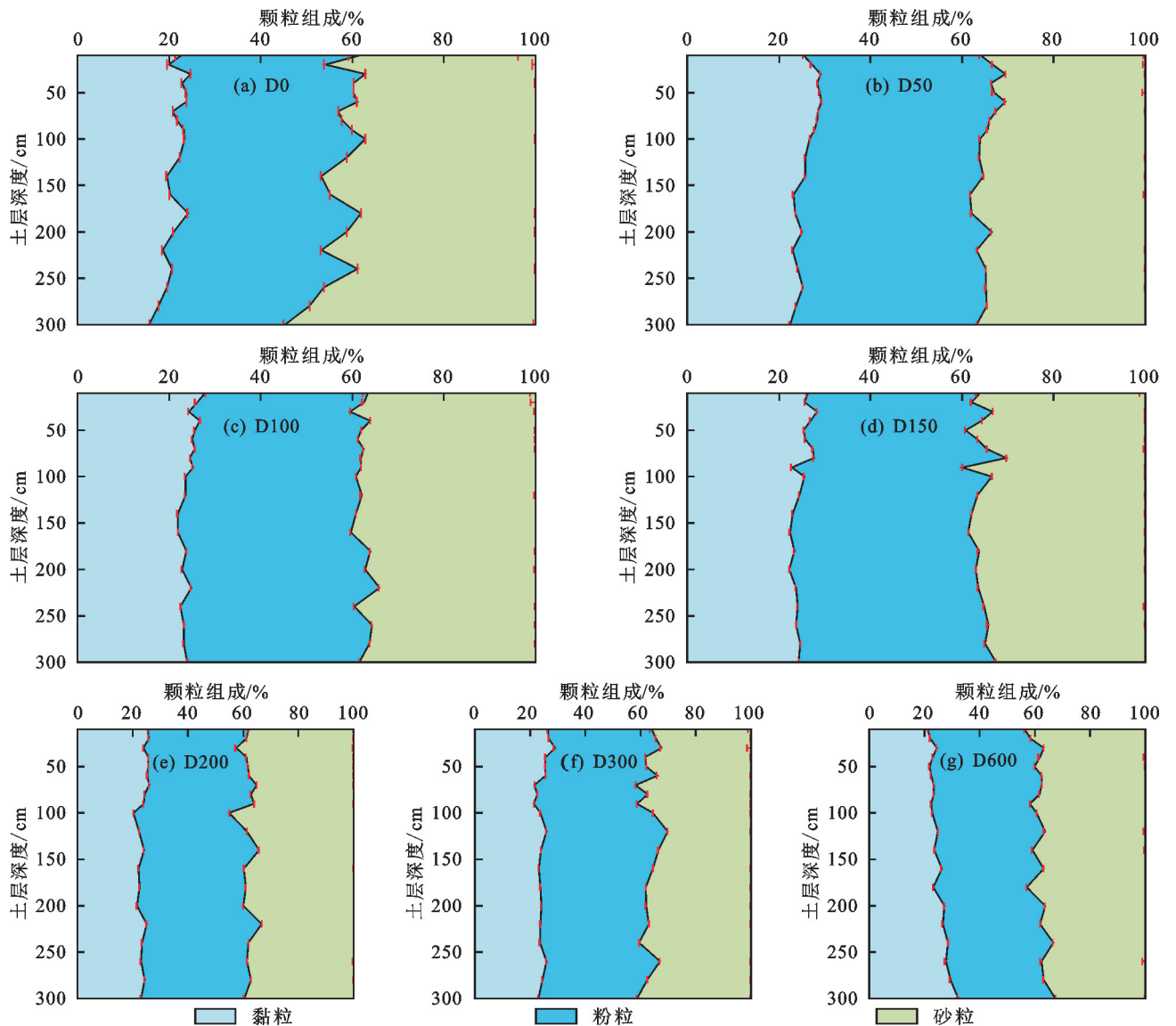


图 6 不同位点土壤颗粒组成分布

Fig.6 Distribution of soil particle composition at different sites

### 4 结论

(1) 梯田土壤储水量与距梯壁的距离密切相关, 梯田侧壁对梯田土壤水分的影响随距梯壁距离的增加而逐渐减弱。

(2) 梯田阶面宽度为 300 cm 时, 不同高度(100, 200, 300 cm)的梯田侧向蒸发量均占 CK 土壤储水量的 1/3 以上, 具体分别为 33%, 38%, 37%。

(3) 为减少梯田侧壁对梯田土壤水分的影响, 建议在梯田设计和建设时适当加宽阶面宽度, 同时采取增加梯壁覆盖、改善土壤结构等措施削弱侧向蒸发, 提高梯田有限水资源的高效利用, 促进黄土塬区梯田农业的可持续发展。

未来研究可进一步考虑不同气候区和土壤类型对梯田水分动态的影响, 探讨梯田水分平衡的控制因素, 以期为黄土高原梯田水分的优化管理提供观测依据。

### 参考文献:

[1] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 等. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7398-7409.  
LI Z S, YANG L, WANG G L, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: Present situations, problems, and counter-solutions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7398-7409.

[2] 李佩成. 论水文生态学的建立及其历史使命[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(1): 1-4.  
LI P C. The establishment and historic mission of hydroecology[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(1): 1-4.

[3] 白璐璐, 时鹏, 李占斌, 等. 黄土高原梯田和淤地坝坡沟治理措施对产流产沙的协同效应[J]. 农业工程学报, 2023, 39(13): 96-104.  
BAI L L, SHI P, LI Z B, et al. Synergistic effects of

- terraces and check dams on runoff and sediment yields in a slope-gully system in Loess Plateau[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(13):96-104.
- [4] 张晓伟,许明祥,师晨迪,等.半干旱区县域农田土壤有机碳固存速率及其影响因素:以甘肃庄浪县为例[J].植物营养与肥料学报,2012,18(5):1086-1095.  
ZHANG X W, XU M X, SHI C D, et al. Soil organic carbon sequestration rate and its influencing factors in farmlands of semi-arid regions: A case study in Zhuanglang County, Gansu Province[J].Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(5):1086-1095.
- [5] LU Y H, LI X B, XIN L J, et al. Mapping the terraces on the Loess Plateau based on a deep learning-based model at 1.89 m resolution[J].Scientific Data, 2023, 10(1):e115.
- [6] WEI W, PAN D L, YANG Y. Effects of terracing measures on water retention of *Pinus tabulaeformis* forest in the dryland Loess Hilly Region of China[J].Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 308:e108544.
- [7] PAOLO T, ANTON P, SARA C, et al. Slope instabilities in steep cultivation systems: Process classification and opportunities from remote sensing[J].Land Degradation and Development, 2020, 32(3):1368-1388.
- [8] YU Y, WEI W, CHEN L D, et al. Quantifying the effects of precipitation, vegetation, and land preparation techniques on runoff and soil erosion in a Loess watershed of China[J].Science of the Total Environment, 2019, 652:755-764.
- [9] LIU X, JIAO L, CHENG D, et al. Light thinning effectively improves forest soil water replenishment in water-limited areas: Observational evidence from *Robinia pseudoacacia* plantations on the Loess Plateau, China[J].Journal of Hydrology, 2024, 637:e131408.
- [10] GAO J, ZHANG Y J, XU C C, et al. Enhancing spatial and temporal coordination of soil water and root growth to improve maize (*Zea mays* L.) yield[J].Agricultural Water Management, 2024, 294:e108728.
- [11] WANG B, WANG G Y, DAM J V, et al. Diversified crop rotations improve crop water use and subsequent cereal crop yield through soil moisture compensation[J].Agricultural Water Management, 2024, 294:e108721.
- [12] QI Y L, WEI W, LI J R, et al. Effects of terracing on root distribution of *Pinus tabulaeformis* Carr. forest and soil properties in the Loess Plateau of China[J].Science of the Total Environment, 2020, 721:e137506.
- [13] 李仕华,王超凡.不同种植作物对梯田土壤水分的影响[J].灌溉排水学报,2016,35(5):89-92.
- LI S H, WANG C F. Changes of soil moisture of the terraced fields under the growing conditions[J].Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(5):89-92.
- [14] 徐英,王俊生,蔡守华,等.缓坡水平梯田土壤水分空间变异性[J].农业工程学报,2008,24(12):16-19.  
XU Y, WANG J S, CAI S H, et al. Spatial variability of soil moisture in horizontal terrace on slightly sloping land[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(12):16-19.
- [15] FENG X M, FU B J, PIAO S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J].Nature Climate Change, 2016, 6:1019-1022.
- [16] LIU Y X, XIN Y, XIE Y, et al. Effects of slope and rainfall intensity on runoff and soil erosion from furrow diking under simulated rainfall[J].Catena, 2019, 177:92-100.
- [17] 李凤民,王静,赵松岭.半干旱黄土高原集水高效旱地农业的发展[J].生态学报,1999,19(2):117-122.  
LI F M, WANG J, ZHAO S L. The rainwater harvesting technology approach for dryland agriculture in semi-arid Loess Plateau of China[J].Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(2):117-122.
- [18] LÜ H S, ZHU Y H, SKAGGS T H, et al. Comparison of measured and simulated water storage in dryland terraces of the Loess Plateau, China[J].Agricultural Water Management, 2009, 96(2):299-306.
- [19] JIA Y H, LI T C, SHAO M G. A preliminary investigation of gully edge effect on the distribution pattern of soil moisture across a permanent gully[J].Journal of Hydrology, 2020, 590:e125288.
- [20] RAN Q H, CHEN X X, HONG Y Y, et al. Impacts of terracing on hydrological processes: A case study from the Loess Plateau of China[J].Journal of Hydrology, 2020, 588:e125045.
- [21] 杨开宝,李景林,郭培才,等.黄土丘陵区第I副区梯田断面水分变化规律[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999,13(2):64-69.  
YANG K B, LI J L, GUO P C, et al. Law of soil moisture change in terrace land section in Loess Hilly Region[J].Journal of Soil and Water Conservation, 1999, 13(2):64-69.
- [22] ZHAO C L, SHAO M A, JIA X X, et al. Spatial distribution of water-active soil layer along the south-north transect in the Loess Plateau of China[J].Journal of Arid Land, 2019, 11(2):228-240.
- [23] 贾小旭,邵明安,张晨成,等.黄土高原南北样带不同土层土壤水分变异与模拟[J].水科学进展,2016,27(4):520-528.  
JIA X X, SHAO M A, ZHANG C C, et al. Variation



- and simulation of soil water content within different soil depths along the south-north transect of the Loess Plateau [J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(4): 520-528.
- [24] 韩晓阳, 王亚萍, 朱元骏, 等. 黄土塬区果园-农田交界带土壤水分分布及农田对果园的供水特征[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(2): 197-204.  
HAN X Y, WANG Y P, ZHU Y J, et al. Soil water distribution and water supply characteristics of farmland to apple orchard in their adjacent areas on the loess tableland [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(2): 197-204.
- [25] 白晨赞, 田涵洋, 乔江波, 等. 黄土塬区土地利用方式对土壤主要理化性质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(4): 223-229.  
BAI C Y, TIAN H Y, QIAO J B, et al. Effects of land use patterns on soil physical and chemical properties in the Loess Plateau [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(4): 223-229.
- [26] 宋鹏帅, 王健, 陈琳, 等. 干湿交替作用对关中地区壤土临界剪切力的影响[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(6): 1731-1740.  
SONG P S, WANG J, CHEN L, et al. Effect of dry-wet alternation on critical shear stress of Lou Soil in the Guanzhong area [J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(6): 1731-1740.
- [27] 喻涵, 周子渊, 王一, 等. 极端暴雨下典型小流域重力侵蚀的分布及影响因素[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(4): 69-74.  
YU H, ZHOU Z Y, WANG Y, et al. Distribution and influencing factors of gravitational erosion in typical small watershed under extreme rainstorm [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(4): 69-74.
- [28] 陈蝶, 卫伟, 陈利顶, 等. 梯田生态系统服务与管理研究进展[J]. *山地学报*, 2016, 34(3): 374-384.  
CHEN D, WEI W, CHEN L D, et al. Progress of the ecosystem services and management of terraces [J]. *Mountain Research*, 2016, 34(3): 374-384.
- [29] SADEGHI S H, ALI GHAFARI G, RANGAVAR A, et al. Spatiotemporal distribution of soil moisture in gully facies [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2020, 8(1): 15-25.
- [30] LI T C, SHAO M A, JIA Y H, et al. Profile distribution of soil moisture in the gully on the northern Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2018, 171: 460-468.
- [31] 张玉斌, 曹宁, 武敏, 等. 黄土高原南部水平梯田的土壤水分特征分析[J]. *中国农学通报*, 2005, 21(8): 215-220.  
ZHANG Y B, CAO N, WU M, et al. Analysis on soil moisture character of level terrace on the South Loess Plateau [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(8): 215-220.
- [32] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(4): 611-620.  
LI Z, WU P T, FENG H, et al. Simulated experiment on effects of soil bulk density on soil water holding capacity [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(4): 611-620.
- [33] NGUYEN P M, DE PUE J, VAN LE K, et al. Impact of regression methods on improved effects of soil structure on soil water retention estimates [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 525: 598-606.
- [34] 何楷迪, 孙建, 陈秋计. 气候要素和土壤质地对青藏高原草地净初级生产力和降水利用率的影响[J]. *草业科学*, 2019, 36(4): 1053-1065.  
HE K D, SUN J, CHEN Q J. Response of climate and soil texture to net primary productivity and precipitation-use efficiency in the Tibetan Plateau [J]. *Pratacultural Science*, 2019, 36(4): 1053-1065.
- [35] DONG Q, DANG T H, GUO S L, et al. Effects of mulching measures on soil moisture and N leaching potential in a spring maize planting system in the southern Loess Plateau [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 803-808.
- [36] CHEN H Q, LIANG Q, GONG Y S, et al. Reduced tillage and increased residue retention increase enzyme activity and carbon and nitrogen concentrations in soil particle size fractions in a long-term field experiment on Loess Plateau in China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 194: e104296.
- [37] LI H Y, ZHANG Y H, SUN Y G, et al. No-tillage with straw mulching improved grain yield by reducing soil water evaporation in the fallow period: A 12-year study on the Loess Plateau [J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 224: e105504.
- [38] 蓝郭华, 韩剑桥, 王飞, 等. 基于农户视角的陕南坡地利用与治理措施调查研究[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(1): 149-156.  
LAN G H, HAN J Q, WANG F, et al. Survey on utilization and measures of hillside fields from perspective of farmers in southern Shaanxi Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(1): 149-156.