

滴灌和覆盖条件下山地苹果园 土壤蒸发的空间分布

李黄涛¹, 曹红霞¹, 杨诗雨¹, 张 浥¹, 裴书瑶¹, 南学平², 李志军¹

(1.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2.陕西果业科技集团有限公司, 陕西 杨凌 712100)

摘要:减少土壤蒸发是提高果园水分利用效率的重要途径,覆盖是减少土壤蒸发的有效方式。在黄土高原山地苹果园4个土壤干湿循环周期中,设置3个灌水水平,即高水($85\%\theta_f$)、中水($70\%\theta_f$)和不灌水;2种覆盖方式,即园艺地布覆盖和不覆盖。各处理中根据与果树种植行的间距在水平方向设置3个空间点位(点位A, 120 cm; 点位B, 60 cm; 点位C, 0 cm),研究滴灌与覆盖下果园土壤蒸发的空间分布并分析点位、气象因素和土壤水分情况对土壤蒸发的影响。研究表明:高水和中水处理下,土壤蒸发在空间上呈“单峰型”曲线分布,不灌水处理下水平方向上3个点位的土壤蒸发差异不显著。园艺地布覆盖可有效抑制土壤蒸发。在中水水平下,园艺地布覆盖显著增大了距果树行60 cm点位的土壤水分,土壤蒸发量减少5.26%~27.75%。偏相关分析表明,园艺地布覆盖减弱了点位和环境因素对土壤蒸发的影响,增大了土壤水分对土壤蒸发的影响。本研究推荐处理组合为园艺地布覆盖+中水。

关键词:滴灌;园艺地布;土壤蒸发;空间分布

中图分类号:S152.7; S661.1 **文献标志码:**A

Spatial variation of soil evaporation in mountain apple orchards under drip irrigation and mulching

LI Huangtao¹, CAO Hongxia¹, YANG Shiyu¹, ZHANG Yi¹, PEI Shuyao¹, NAN Xueping², LI Zhijun¹

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Shaanxi Fruit Technology Group Co. Ltd., Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Reducing soil evaporation is an important way to improve water use efficiency in orchards, and mulching is an effective method to reduce soil evaporation. This research aimed at the apple tree on the loess plateau, studied the spatial distribution of soil evaporation during four wet-dry cycles in apple orchard. This experiment set three irrigation levels (high water, medium water and low water), two mulching methods (fabric-mulching and non-mulching) and three points based on the distance to drip line in horizontal direction in each treatment to examine the spatial variation of soil evaporation under different irrigation amount and mulching. The correlation between space point, meteorological factor, soil water and soil evaporation were also studied. Under high-water and medium-water treatments, soil evaporation presented a ‘single-peak’ spatial distribution curve, while under low-water treatment, there was non-significant difference in soil evaporation at the three horizontal points. Soil evaporation was effectively inhibited by fabric-mulching. At the medium water, the soil moisture at the point 60 cm away from the tree line was significantly increased and the soil evaporation was reduced by 5.26%~27.75%. The partial correlation analysis showed that the influence of point and environmental factors on soil evaporation was weakened and the influence of soil moisture on soil evaporation was increased. Recommending combination of mulching and irrigation is fabric mulching and medium water.

Keywords: drip irrigation; fabric mulching; soil evaporation; spatial distribution

黄土高原因其独特的地理环境成为优质苹果的主要产区^[1-3],该地区干旱少雨,水资源短缺是制约当地农业发展的重要因素。滴灌和覆盖等节水措施在黄土高原苹果种植中已经有了广泛应用。然而,目前黄土高原的用水仍旧紧张、用水矛盾依旧严峻,提升水分利用效率是发展可持续农业的重要主题,探明果园中土壤蒸发的空间分布特征对进一步提升水分利用效率具有指导意义。

将土壤蒸发过程分为两个阶段^[4-8],即含水率较高时主要受气象因素影响的能量限制阶段和土壤含水率较低时主要受土壤水分影响的速率下降阶段^[9]。随着滴灌技术的应用,尽管灌溉水利用效率有了极大提升,然而灌后水分分布不均匀必然导致土壤蒸发空间分布不均匀。将滴灌后未湿润区域的土壤蒸发视作与湿润区域的相同,致使土壤蒸发的评估值偏大。除此之外,冠层的遮荫效果会阻碍太阳辐射向地面传播,而果园内植株间距大则会造成冠层下与行间蒸发情况的差异^[10]。目前,已有许多学者针对土壤蒸发提出了主要基于气象参数物理驱动模型,例如 Fox 模型、Wei-Kang Song 模型等。

前人对土壤蒸发的变化已开展大量研究^[11-17],但对滴灌和覆盖条件下果园的土壤蒸发研究较少,即对于土壤含水量非均匀状况下蒸发量估计的研究不足。针对目前仍存在果园滴灌后土壤蒸发分布不均匀等问题,本文研究的主要内容有:(1)滴灌及覆盖对黄土高原山地苹果园土壤蒸发空间分布的影响;(2)探究覆盖下空间点位、气象因素及土壤水分状况对土壤蒸发的影响;(3)针对果园土壤蒸发的空间分布特征提出合理的灌溉策略。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2021 年在陕西省榆林市子洲县清水沟现代农业专业合作社(37°27'N,110°2'E)进行。该地区是典型的半干旱区域,年平均气温 15℃,多年平均降雨量 428.1 mm,年平均日照时数 2 633 h。试验地块选在向阳的山地梯田区,海拔 1 040 m,供试土壤为黄绵土,田间持水量 24.6%,土壤干容重 1.38 g·cm⁻³,pH 为 8.5,偏碱性,地下水埋深在 100 m 以下。该区域是中、晚熟苹果的适生区。试验地在 2021 年苹果生育期内的气象数据见图 1。

1.2 试验设计

试验果园主栽品种为 5 a 生‘富士’苹果,砧木为八棱海棠。果树种植于向阳的山地梯田上,每条

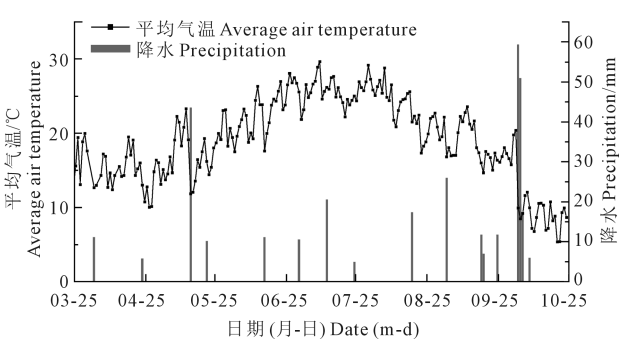


图 1 2021 年苹果生育期内气象情况
Fig.1 Meteorological data for apple growth period in 2021

梯田种植 2 行,种植间距为 3.5 m×4 m。试验共设置了 2 种覆盖方式与 3 个灌水水平。覆盖方式包括园艺地布覆盖与不覆盖。其中覆盖宽度为 2 m,树行位于覆盖中线(图 2),园艺地布为多孔编织的聚乙烯材质,厚度为 0.5 mm,试验布置见图 2。灌水水平包括高水(土壤含水率上限为 85%θ_t,θ_t为田间持水量)、中水(土壤含水率上限为 70%θ_t)和不灌水,灌水频率为每 10 天 1 次,灌水方式为双管滴灌,灌水定额的计算见公式(1):

$$I = (\theta - \theta_0) \cdot z \cdot p / \eta \tag{1}$$

式中,I 为灌水量(mm);θ 为土壤含水量的上限(cm³·cm⁻³);θ₀为灌水前的土壤含水量(cm³·cm⁻³);z 为计划湿润层深度,取 z=800 mm;p 为滴灌湿润比,取 p=0.3;η 为灌溉水利用系数,取 η=1。

滴灌管铺设于树行两侧 60 cm 处(图 2),滴头间距 30 cm,每个小区长 16 m,独立小区之间设置 3 排果树作为保护树,灌水小区采用独立水表与阀门控制灌水量。试验采用全因素试验设计,因此共设置有 6 个处理:园艺地布覆盖高水(MH)、园艺地布覆盖中水(MM)、园艺地布覆盖不灌水(ML)、不覆盖高水(BH)、不覆盖中水(BM)和不覆盖不灌水(BL)。

选取水分胁迫对苹果影响最大的果实膨大期^[3]进行土壤干-湿循环观测。在此期间,将两次连续灌水间隔期内无降雨的周期作为典型土壤干-湿循环进行分析,共筛选出 4 个典型的土壤干-湿循环周期。其中第一个土壤干-湿循环在 5 月 25 日~5 月 29 日,处于果实膨大前期,共 5 d;第二个土壤干-湿循环在 6 月 25 日~6 月 30 日,处于果实膨大中期,共 6 d;第三个土壤干-湿循环在 7 月 6 日~7 月 10 日,处于果实膨大中期,共 5 d;第四个土壤干-湿循环在 7 月 26 日~7 月 31 日,处于果实膨大后期,共 6 d。4 个干湿循环前灌水时间及灌水量见表 1,灌水量随生育期的推进呈增大趋势,且在

各个干-湿循环中,同种覆盖方式下,高水处理的灌水量高于中水处理;同一灌水水平下,园艺地布覆盖下的灌水量低于不覆盖。基础气象数据见表 2,平均气温及太阳辐射随时间呈先增大后减小的趋势,在干-湿循环 3 内达到峰值,分别为 27.54℃ 和 15.46 MJ · m⁻² · d⁻¹,干-湿循环期内无降水。

1.3 测量指标与方法

1.3.1 气象数据 气象数据由安装在实验场地旁的全自动小型气象站(Decagon Devices Inc., USA)采集。采集项目包括气温(*T*)、降水(*P*)、空气相对湿度(*RH*)、太阳辐射(*PAR*)与距地面 2 m 高处的风速(*D*),采集频率为 30 min。

1.3.2 土壤蒸发 土壤蒸发采用自制小型蒸渗仪进行测量。小型蒸渗仪筒由内筒与外筒组成,其中内筒高 15 cm、外径 11 cm、筒壁厚度为 3 mm,材质为 PVC 塑料;外筒起固定内筒位置作用,与内筒等高,其内径稍大于内筒外径。取测量位置附近的原状土于小型蒸渗仪中,每日 9 : 00 前使用精度为 0.01 g 的电子天平对其进行称重,连续两日的重量差为前一日的蒸发量。小型蒸渗仪中的原状土壤在每次灌水或降雨后进行更换。

小型蒸渗仪布置在沿垂直于树行铺设的方向的 3 个点位,如图 2 所示,其中点位 A 位于果树行间,距离树行 120 cm,代表果树冠层外的区域;点位 B 位于苹果树冠层下方偏外,距离树行 60 cm,代表滴灌管周围的区域;点位 C 均位于苹果树冠层下靠内,位于树行内,距离果树 30 cm,代表果树冠层下但距离滴灌管较远的区域。

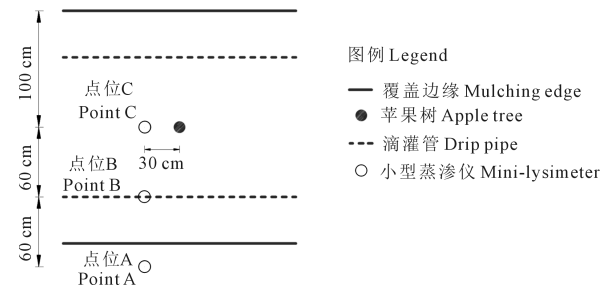


图 2 试验布置图
Fig.2 Layout of experiment

表 1 灌水日期及灌水量

Table 1 Irrigation date and amount				
灌水日期 Irrigation date	灌水量 Irrigation amount/mm			
	BH	BM	MH	MM
05-21	30.78	16.63	23.83	18.17
06-21	32.51	24.05	26.92	22.33
07-01	33.40	24.36	27.16	23.46
07-21	33.64	25.25	29.11	21.176

1.3.3 土壤含水率 土壤含水率采用 Time Domain Reflectometry (TDR) 系统(TRIME-PICO IPH/T3; IMKO, Germany)进行测量,采集的土壤含水率数据为体积含水率(cm³ · cm⁻³)。TRIME 管理于点位 A、点位 B 及点位 C 附近。每日在 9 : 00 前采集 0~40 cm 土层的平均含水率。

1.4 统计分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2019 软件进行整理,采用 SPSS 26.0 软件进行方差分析及相关性分析,采用 Origin 软件进行数据作图。

2 结果与分析

2.1 表层土壤水分的空间分布

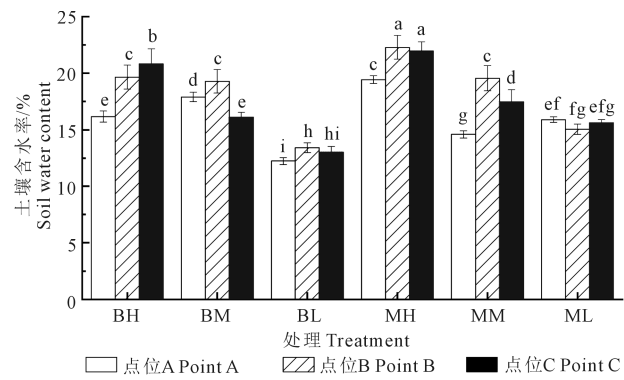
滴灌对土壤水分的空间分布受灌水量影响。由图 3~6 可知,在水平方向的 3 个空间点位中,点位 B 的表层水分最高,两侧的表层土壤水分则较低。覆盖增大了水分沿水平方向的运移,在 MH 处理中,点位 B 与点位 C 之间土壤水分在 4 个干-湿循环中的差异不显著。在不灌水处理中,各处理水平方向的 3 个空间点位之间表层土壤水分之间的差异不显著。

园艺地布覆盖保水效果好,体现在高水与中水处理中。高水处理下,点位 A 园艺地布覆盖的表层土壤水分在 4 个干-湿循环中分别较不覆盖处理高 20.18%、26.77%、21.63%、30.29%;点位 B 园艺地布覆盖的表层土壤水分在 4 个干-湿循环中分别较不覆盖处理高 13.40%、12.53%、14.89%、17.30%,中水处理下园艺地布覆盖的表层土壤水分则较不覆盖处理提高 1.41%、12.80%、14.80%、9.14%;在点位 C,高水处理下园艺地布覆盖的表层土壤水分在 4 个干-湿循环中分别较不覆盖处理高 5.55%、14.90%、16.43%、24.93%;而中水处理下园艺地布覆盖的表层土壤水分在干-湿循环 2、干-湿循环 3、干

表 2 各干-湿循环内基础气象数据表

Table 2 Fundamental meteorological data during each wet-dry cycle

项目 Item	日期 Date(m-d)	平均气温 Average temperature/℃	太阳辐射 Solar radiation / (MJ · m ⁻² · d ⁻¹)
干-湿循环 1 Wet-dry cycle 1	05-25~05-29	18.02	14.58
干-湿循环 2 Wet-dry cycle 2	06-25~06-30	26.59	14.69
干-湿循环 3 Wet-dry cycle 3	07-06~07-10	27.54	15.46
干-湿循环 4 Wet-dry cycle 4	07-26~07-31	26.56	14.39



注:不同小写字母表示同一干-湿循环中处理内不同空间点位的差异显著,显著性水平 $P<0.05$ 。下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments, significance level at $P<0.05$. The same below.

图 3 干-湿循环 1 中各处理 0~40 cm 土层内土壤含水率平均值

Fig.3 Average surface soil water content in 0~40 cm soil layer during dry-wet cycle 1

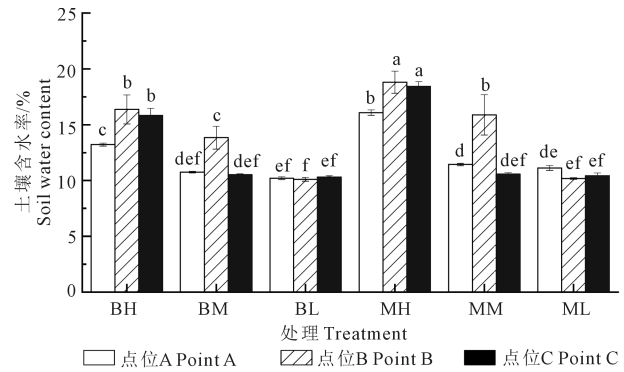


图 5 干-湿循环 3 中各处理 0~40 cm 土层内土壤含水率平均值

Fig.5 Average surface soil water content in 0~40 cm soil layer during dry-wet cycle 3

-湿循环 4 分别比不覆盖处理大 15.36%、0.64%、19.65%。对于不灌水处理,园艺地布覆盖仅在干-湿循环 1 中的表层土壤水分高于不覆盖,在其余 3 组干-湿循环中,各空间点位园艺地布覆盖与不覆盖之间表层土壤水分差异不显著。

表 3 为各因素对于干-湿循环中土壤含水率的三因素方差分析。由表 3 可知,灌水水平、覆盖与点位 3 个因素在 4 个干-湿循环中对土壤表层含水率影响极显著。在双因素交互作用中,灌水与空间点位、灌水与覆盖的双因素交互对表层土壤含水率的影响极显著,而点位与覆盖的双因素交互作用仅在干-湿循环 2 中对表层土壤水分显著,而在其余 3 个干-湿循环中则不显著。灌水、覆盖和空间点位三因素交互在干-湿循环 1 及干-湿循环 2 中对表层土壤水分的影响显著,而在其余两个干-湿循环中则不显著。

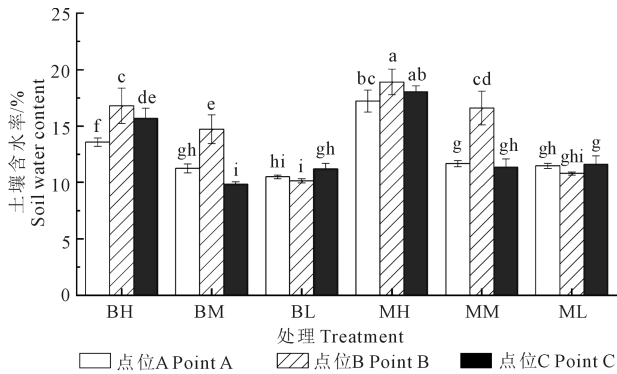


图 4 干-湿循环 2 中各处理 0~40 cm 土层内土壤含水率平均值

Fig. 4 Average surface soil water content in 0~40 cm soil layer during dry-wet cycle 2

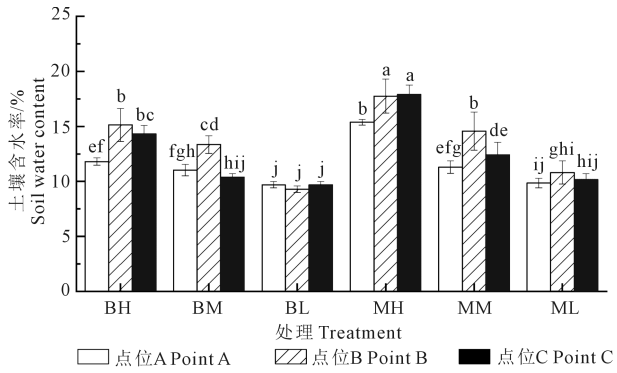


图 6 干-湿循环 4 中各处理 0~40 cm 土层内土壤含水率平均值

Fig.6 Average surface soil water content in 0~40 cm soil layer during dry-wet cycle 4

表 3 各处理在 0~40 cm 土层内的土壤含水率多因素方差分析

Table 3 Variance analysis of soil moisture content in dry-wet cycle by various factors

因素 Factor	干-湿循环 1 Wet-dry cycle 1	干-湿循环 2 Wet-dry cycle 2	干-湿循环 3 Wet-dry cycle 3	干-湿循环 4 Wet-dry cycle 4
I	**	**	**	**
M	**	**	**	**
P	**	**	**	**
I×M	**	**	**	**
I×P	**	**	**	**
M×P	ns	**	ns	ns
I×M×P	**	**	ns	ns

注:I 代表灌水水平,M 代表覆盖类型,P 代表空间点位;ns 表示差异不显著,** 表示在 $P<0.01$ 水平显著

Note: I indicates irrigation level, M indicates mulching type, P indicates different point, ns indicates non-significant difference, ** indicates significant difference at $P<0.01$ level.

2.2 土壤蒸发的空间分布

2.2.1 灌水对土壤蒸发量空间分布的影响 灌水处理在各干-湿循环中的灌水日期及灌水量见表 1, 各处理在 4 个干-湿循环中土壤蒸发的空间分布见表 4。灌水对土壤蒸发的空间分布有显著影响。在各灌水处理中,0~40 cm 土层深度土壤蒸发量在水平方向上的最高值均出现在点位 B。4 个干湿循环中,相较于点位 B,高水处理在点位 A 和点位 C 共分别减少 45.61%和 45.27%的土壤蒸发;中水处理在点位 A 和点位 C 共分别减少 30.52%和 36.31%的土壤蒸发。在相同的覆盖类型下,灌水对点位 A 在 4 个干-湿循环中产生的土壤蒸发差异不显著;不覆盖处理下,在点位 B 高水的土壤蒸发最大,土壤蒸发随灌水水平的增大而减小,高水处理的土壤蒸发最强,其次为中水处理,不灌水处理的土壤蒸发最弱;在园艺地布覆盖下,高水处理的土壤蒸发最大,不灌水处理土壤蒸发最小。

2.2.2 覆盖对土壤蒸发空间分布的影响 园艺地布覆盖在不同的水分状态下对土壤蒸发的空间分布影响不同。在高水处理下,点位 B 的土壤蒸发最高,而在不覆盖处理点位 A 的土壤蒸发较点位 C 在 4 个干-湿循环中分别高 13.79%、59.18%、30.48%、16.09%,而园艺地布覆盖下点位 A 的土壤蒸发较点位 C 在 4 个干-湿循环中分别低17.95%、41.30%、11.61%、10.53%。在中水处理下,在同覆盖类型下,点位 C 的土壤蒸发小于点位 A。不灌水处理下,干-湿循环 1 中不覆盖处理 3 个点位的土壤蒸发差异

表 4 各处理下日土壤蒸发量比较
Table 4 Comparison of daily soil evaporation in each treatment

周期 Period	点位 Point	BH	BM	BL	MH	MM	ML
1	A	1.32Ba	1.33Aa	1.11Aa	1.28Ba	1.13Aa	1.02Aa
	B	1.87Aab	1.48Abc	1.00Ad	2.08Aa	1.13Acd	0.99Ad
	C	1.16Bbc	1.04Abc	0.91Ac	1.56Ba	1.29Aab	0.97Ac
2	A	0.78Bab	0.58Bb	0.6Ab	0.81Cab	0.82Bab	0.86Aa
	B	1.53Ab	1.33Abc	0.36Bd	2.32Aa	1.26Ac	0.39Bd
	C	0.49Cb	0.57Bb	0.34Bc	1.38Ba	0.6Cb	0.48Bbc
3	A	1.37Ba	1.29ABa	1.26Aa	1.37Ba	1.14Aa	1.18Aa
	B	2.8Aa	2.09Ab	1.32Ac	2.78Aa	1.51Ac	1.21Ac
	C	1.05Bb	0.97Bbc	0.93Abc	1.55Ba	1.11Aab	0.54Bc
4	A	1.01Ba	0.86Ba	0.96Aa	1.02Ba	1.00Aa	0.89Aa
	B	1.6Aab	1.63Aab	0.94Ac	1.83Aa	1.3Aabc	1.12Abc
	C	0.87Ba	0.82Ba	0.82Aa	1.14ABa	1.07Aa	1.08Aa

注:同列中不同大写字母表示同一干湿循环中土壤蒸发差异显著,同行不同小写字母表示不同处理间土壤蒸发差异显著;显著性水平 $P<0.05$ 。

Note: The different capital letters in a column indicate significant differences among treatment, the lowercase capital letters in a row indicate significant differences among treatment; significance level at $P<0.05$.

不显著;干-湿循环 1 与干-湿循环 4 中,园艺地布覆盖下 3 个点位的土壤蒸发差异不显著。

园艺地布覆盖对不同点位土壤蒸发影响显著。相同的灌水水平下,点位 A 两种覆盖方式的土壤蒸发差异不显著。高水处理下,点位 B 园艺地布覆盖与不覆盖的土壤蒸发在干-湿循环 1、干-湿循环 3、干-湿循环 4 中差异不显著;中水处理园艺地布覆盖下的土壤蒸发在 4 个干-湿循环中较不覆盖分别减少了 23.65%、5.26%、27.75%、20.25%;不灌水处理园艺地布覆盖与不覆盖之间土壤蒸发在 4 个干-湿循环差异不显著。高水处理下,点位 C 不覆盖在 4 个干-湿循环中较园艺地布覆盖处理分别减少 25.64%、73.22%、32.26%、23.68%的土壤蒸发;中水处理的不覆盖较园艺地布覆盖则分别减少19.38%、5.00%、12.61%、23.36%的土壤蒸发;不灌水处理在 4 个干-湿循环中园艺地布覆盖与不覆盖之间土壤蒸发无显著差异。

2.3 灌水、覆盖及空间点位对土壤蒸发的交互影响

表 5 为灌水水平、覆盖及空间点位 3 个因素对干-湿循环中土壤蒸发的方差分析。可知灌水水平与空间点位均可以对土壤蒸发造成极显著影响,而覆盖仅在第 2 个与第 4 个干-湿循环中对土壤蒸发有显著影响,在其他两个干-湿循环中无显著影响。在双因素交互作用中,灌水与覆盖的交互作用与覆盖的单因素作用一致;灌水与空间点位双因素交互作用在 4 个干-湿循环中对土壤蒸发的影响均可达到极显著水平;覆盖与空间点位双因素交互仅在第

表 5 各因素对干-湿循环中土壤蒸发的方差分析
Table 5 Variance analysis of each factor on soil evaporation during dry-wet cycles

因素 Factor	干-湿循环 1 Wet-dry cycle 1	干-湿循环 2 Wet-dry cycle 2	干-湿循环 3 Wet-dry cycle 3	干-湿循环 4 Wet-dry cycle 4
I	* *	* *	* *	*
M	ns	* *	ns	ns
P	* *	* *	* *	* *
I×M	ns	* *	ns	ns
I×P	* *	* *	* *	ns
M×P	*	ns	ns	ns
I×M×P	ns	* *	ns	ns

注:I 代表灌水水平,M 代表覆盖类型,P 代表不同空间点位;ns 表示差异不显著,*、*、* 分别表示在 $P<0.05$ 与 $P<0.01$ 水平显著。

Note: I indicates irrigation level, M indicates mulching type, P indicates different space point, ns indicates non-significant difference, * and * * indicates significant difference at $P<0.05$ and $P<0.01$ level, respectively.

1 个与第 3 个干-湿循环中可以对土壤蒸发造成显著影响,其余两个干-湿循环则对土壤蒸发的影响不显著。在三因素交互作用下,仅在第 2 个干-湿循环中对土壤蒸发的影响显著,在其余 3 个干-湿循环中则影响不显著。

2.4 相关分析

表 6 为覆盖与不覆盖处理下土壤蒸发与点位、各环境因子及土壤水分的偏相关分析。由表 6 可知,覆盖处理中,点位与土壤蒸发之间的相关关系不显著;环境因素中,仅有辐射与土壤蒸发显著相关,其偏相关系数为 0.287,而气温与风速和土壤蒸发的相关关系不显著;土壤水分与土壤蒸发的相关关系显著,其偏相关系数达 0.484。在不覆盖处理中,点位与土壤蒸发显著相关,相关系数达 0.246;环境因素中,太阳辐射与土壤蒸发显著相关,相关系数 0.404;土壤水分与土壤蒸发显著相关,偏相关系数达 0.309。综上所述,相较于覆盖处理,不覆盖增大了空间点位与土壤蒸发的相关性,进一步增大了环境因素对土壤蒸发的影响,减小了土壤水分与土壤蒸发之间的相关性。

表 6 土壤蒸发的相关性分析					
Table 6 Correlation analysis of soil evaporation					
处理 Treatment	空间点位 Space point	气温 Air temperature	太阳辐射 Solar radiation	风速 Wind speed	土壤水分 Soil water content
园艺地布覆盖 Fabric-mulching	0.103	0.119	0.287 **	0.132	0.484 **
不覆盖 Non-mulching	0.246 **	0.089	0.404 **	0.111	0.309 **

注: *、** 分别表示在 $P<0.05$ 与 $P<0.01$ 水平显著。
Note: * and ** indicates significant difference at $P<0.05$ and $P<0.01$ level, respectively.

3 讨 论

3.1 覆盖对土壤蒸发的影响

土壤蒸发同时受土壤含水率与气象条件的共同作用^[4,10]。本研究发现园艺地布覆盖增大了土壤蒸发与土壤水分之间的相关性,而减弱了与环境因素之间的相关性。这是因为覆盖对太阳辐射等环境因素具备较好的隔绝作用,使土壤蒸发受到的环境因素干扰减小。而在土壤蒸发的两个阶段中,“速率下降”阶段的土壤蒸发主要受到土壤水力特性的影响,环境因素对土壤蒸发的影响则较小。因此,园艺地布覆盖提高了土壤蒸发进入第二阶段的土壤水分阈值。在同种覆盖类型下,土壤蒸发受气象因素的影响大致相同,因此土壤蒸发速率的差异

主要由土壤含水率导致。在本研究中,点位 B 园艺地布覆盖下表层土壤含水量显著高于不覆盖处理,而土壤蒸发与不覆盖差异不显著,这充分说明园艺地布抑制土壤蒸发效果好,这与前人的研究结果相似^[4,18]。本研究发现在位置 C,MH 处理表层土壤水分显著高于 BH 处理,说明更多的灌水在覆盖下沿水平方向运移,Lin 等^[19]发现了相似的结果。与塑料薄膜不同的是,园艺地布由聚丙烯材料编织而成,是一种多孔介质,土壤与大气之间的水汽交换可通过园艺地布的孔隙进行,因此园艺地布对土壤蒸发只有一定的抑制作用。灌水在覆盖下沿水平方向运移较多,扩大了表层土壤湿润面积,因此不利于抑制距滴灌管较远位置的土壤蒸发。

本研究还发现不灌水处理下各空间点位覆盖与不覆盖之间土壤蒸发的差异不显著,这是由于 2021 年长期的干旱条件下,不灌水处理土壤水分处于较低的含水率的状态,使土壤蒸发一直维持在较低水平。园艺地布是一种多孔介质,较低的水汽交换速率可通过园艺地布的孔隙进行,从而使得园艺地布对低水分状态土壤的蒸发抑制减弱。在不灌水处理中,由于长期没有灌溉或降雨的补给,土壤含水率一直维持在极低水平,无论覆盖与否,土壤蒸发都维持在较低水平,从而使覆盖对土壤蒸发的限制作用减弱^[20-21]。因此,灌溉是苹果种植是必要条件。综上所述,覆盖对抑制土壤蒸发有积极作用,但是在园艺地布覆盖下,需要控制单次灌水量,减少灌溉水的水平运移,使得更多的水分垂直入渗以供苹果根系吸收,减少土壤蒸发,从而提高灌溉水利用效率。

3.2 灌水对土壤蒸发的影响

本研究发现在干-湿循环 1、干-湿循环 2、干-湿循环 4 中,BH 处理在点位 B 的水分显著高于 BM 处理,但土壤蒸发却无显著差异,这是由于冠层的树荫遮蔽导致的。中水处理下的果树由于灌溉量不足导致的土壤水分偏低,由此受到了一定程度的水分胁迫,果树为抵抗水分胁迫会限制自身的营养生长,导致果树叶面积指数减少^[22],并进一步降低了冠层对土壤的遮荫能力,使地面接收到更多的太阳辐射^[10],最终导致土壤蒸发增大。树荫遮蔽导致的地面接收到的太阳辐射减少也是中水处理下点位 C 土壤蒸发弱于点位 A 的原因。本研究发现灌水对土壤蒸发有增强作用,但在不同的干-湿循环内,灌水处理相较于不灌水处理土壤蒸发的提升效

果不同,这与干-湿循环前降雨有关。在干-湿循环1开始的前3 d有10.2 mm的降雨,而在干-湿循环2与干-湿循环3前较长的时间内都没降雨,尤其是干-湿循环2前10 d内都没有降雨,而干-湿循环4开始的前1 d有5 mm的降雨。降雨补充了表层土壤的水分,而灌水处理下的果树因为较大的叶面积指数增大了冠层截留,从而减少降雨入渗,此消彼长导致了灌水与不灌水处理之间土壤蒸发之间差异的减小。长期干旱使不灌水的小区土壤水分都处于较低水平,因此使土壤蒸发在空间上分布较为均匀。

黄土高原山区海拔高,日照充足,土壤蒸发仅可以在第一阶段维持较短的时间。土壤蒸发受土壤含水率影响,尤其是在土壤蒸发的第二阶段,土壤含水率是制约土壤蒸发最重要的因素^[4-5,9]。滴灌仅湿润作物根区部分土壤,滴头周围的土壤水分处于饱和状态,并借助毛细管作用向四周扩散。因此,在滴灌完成后,湿润土壤的范围随灌水量的增大而增大,并且距离滴灌管越远点位的土壤,其含水率越低,土壤蒸发速率越慢,滴灌带位于距离果实种植行60 cm处,因此导致了土壤蒸发随与果树种植行距离的增大而呈现出先增大后减小的趋势。尽管旱作果园的水分利用效率较高,土壤蒸发少,但存在着产量不足和过度消耗深层土壤水分进而影响植被对生态系统的正向调节功能^[20]。园艺地布覆盖下,中水处理的土壤蒸发在点位A与高水处理的差异不显著,在点位B及点位C都显著低于高水。因此园艺地布覆盖下,中水可以显著减少土壤蒸发。综上所述,本研究推荐的灌水与覆盖组合为中水与园艺地布覆盖。

4 结 论

1)滴灌条件下,高水与中水处理的土壤蒸发在水平方向上的分布呈“中间高,两边低”的特点,点位B的土壤蒸发最强烈。点位A和点位C在高水处理中比点位B可分别减少45.61%和45.27%的土壤蒸发;中水处理下则可分别减少30.52%和36.31%的土壤蒸发。不灌水的处理中3个点位土壤蒸发的差异不显著。

2)由于冠层对太阳辐射的阻碍作用,灌水处理下果树冠层下的土壤蒸发量高于冠层外;然而在园艺地布覆盖高水处理下,点位C的土壤蒸发比点位A高13.65%。

3)园艺地布覆盖下与土壤蒸发相关性最强的

因素的土壤水分,偏相关系数为0.484;气象因素中,仅有太阳辐射与土壤蒸发显著相关。不覆盖处理减弱了土壤水分与土壤蒸发之间的相关性,增强了点位、太阳辐射及风速与土壤蒸发之间的相关性。

4)本研究推荐园艺地布覆盖与中水作为陕北山地梯田苹果种植的覆盖与灌水组合方案。

参 考 文 献:

[1] 刘星,曹红霞,廖阳,等.滴灌模式对苹果光合特性、产量及灌溉水利用的影响[J].中国农业科学,2021,54(15):3264-3278.
LIU X, CAO H X, LIAO Y, et al. Effects of drip irrigation methods on photosynthetic characteristics, yield and irrigation water use of apple[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(15): 3264-3278.

[2] 张义,谢永生,郝明德.黄土高原沟壑区塬面苹果园土壤水分特征分析[J].土壤,2011,43(2):293-298.
ZHANG Y, XIE Y S, HAO M D. Study on characteristics of apple orchard soil moisture in gully region of Loess Plateau[J]. Soils, 2011, 43(2): 293-298.

[3] ZHONG Y, FEI L J, LI Y B, et al. Response of fruit yield, fruit quality, and water use efficiency to water deficits for apple trees under surge-root irrigation in the Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2019, 222: 221-230.

[4] ZRIBI W, ARAGÜÉS R, MEDINA E, et al. Efficiency of inorganic and organic mulching materials for soil evaporation control[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 148: 40-45.

[5] PHILIP J R. Evaporation, and moisture and heat fields in the soil[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1957, 14(4): 354-366.

[6] RITCHIE J T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover[J]. Water Resources Research, 1972, 8(5): 1204-1213.

[7] LEMON E R. The potentialities for decreasing soil moisture evaporation loss[J]. Soil Science Society of America Journal, 1956, 20(1): 120-125.

[8] IDSO S B, REGINATO R J, JACKSON R D, et al. The three stages of drying of a field soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1974, 38(5): 831-837.

[9] TUGWELL-WOOTTON T, SKRZYPEK G, DOGRAMACI S, et al. Soil moisture evaporative losses in response to wet-dry cycles in a semi-arid climate[J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125533.

[10] KOOL D, BEN-GAL A, AGAM N, et al. Spatial and diurnal below canopy evaporation in a desert vineyard: measurements and modeling[J]. Water Resources Research, 2014, 50(8): 7035-7049.

[11] HU X L, SHI L S, LIN G, et al. Comparison of physical-based, data-driven and hybrid modeling approaches for evapotranspiration estimation[J]. Journal of Hydrology, 2021, 601: 126592.

[12] 高昊辰,焦爱萍,陈诚,等.高分子化学地膜对盐渍土壤物理性质与水分蒸发效应[J].土壤,2021,53(5):1057-1063.
GAO H C, JIAO A P, CHEN C, et al. Effects of polymer compound film on physical properties and water evaporation in saline soil[J]. Soils, 2021, 53(5): 1057-1063.

[13] 刘秀强,陈喜,刘琴,等.西北干旱区尾间湖过渡带陆面蒸发和潜水对土壤水影响的同位素分析[J].干旱区资源与环境,2021,

- 35(6): 52-59.
- LIU X Q, CHEN X, LIU Q, et al. Variation of hydrogen and oxygen isotopes in soil water and soil water evaporation depth around Terminal lake in arid region of Northwest China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(6): 52-59.
- [14] 荣颖, 王淳, 胡振琪. 表土替代材料不同夹层位置对风沙土水分入渗和蒸发的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(5): 967-977.
- RONG Y, WANG C, HU Z Q. Effects of different layer positions of topsoil alternatives on infiltration and evaporation of sandy soil water [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(5): 967-977.
- [15] 孙池涛, 邓亚鹏, 张俊鹏, 等. 秸秆覆盖条件下滨海土壤蒸发阻力模型研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 284-291.
- SUN C T, DENG Y P, ZHANG J P, et al. Model on coastal soil evaporation resistance under straw coverage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 284-291.
- [16] 徐天渊, 贾振江, 李王成, 等. 宁夏中部干旱带微咸水灌溉对砂土混合覆盖下土壤水盐运移的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(5): 138-144.
- XU T Y, JIA Z J, LI W C, et al. Effects of brackish water irrigation on water and salt transport under mixed sand cover in arid zone of central Ningxia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(5): 138-144.
- [17] 姚宝林, 孙三民, 李发永, 等. 潜水蒸发条件下不同棉秆隔层埋深对土壤盐分时空分布的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(10): 95-102.
- YAO B L, SUN S M, LI F Y, et al. Using cotton straw interlayer to reduce evaporation and salt migration from groundwater to the soil surface[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(10): 95-102.
- [18] LIAO Y, CAO H X, LIU X, et al. By increasing infiltration and reducing evaporation, mulching can improve the soil water environment and apple yield of orchards in semiarid areas[J]. Agricultural Water Management, 2021, 253: 106936.
- [19] LIN X M, WANG Z, LI J S. Identifying the factors dominating the spatial distribution of water and salt in soil and cotton yield under arid environments of drip irrigation with different lateral lengths[J]. Agricultural Water Management, 2021, 250: 106834.
- [20] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 等. 黄土高原土壤干层研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2016, 31(1): 14-22.
- SHAO M A, JIA X X, WANG Y Q, et al. A review of studies on dried soil layers in the loess plateau[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(1): 14-22.
- [21] WANG L, WANG S P, SHAO H B, et al. Simulated water balance of forest and farmland in the hill and gully region of the Loess Plateau in China[J]. Plant Biosystems-An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology, 2012, 146(sup1): 226-243.
- [22] WU W J, TAO Z, CHEN G J, et al. Phenology determines water use strategies of three economic tree species in the semi-arid Loess Plateau of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 312: 108716.