

DOI: 10.11766/trxb202002270076

程谅, 焦雄, 邸涵悦, 熊翱宇, 郭忠录. 不同整地措施坡面土壤水分时空分布特征[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1423–1435.

CHENG Liang, JIAO Xiong, DI Hanyue, XIONG Aoyu, GUO Zhonglu. Spatio-Temporal Distribution of Soil Moisture on Slopes relative to Land Preparation Measure[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(6): 1423–1435.

不同整地措施坡面土壤水分时空分布特征*

程 谅^{1, 2}, 焦 雄¹, 邸涵悦¹, 熊翱宇¹, 郭忠录^{1†}

(1. 华中农业大学水土保持研究中心, 武汉 430070; 2. 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 武汉 430071)

摘 要: 了解不同整地措施的梯田果园土壤水分的时空异质性及影响机制对提升林果产业发展具有重要意义。以赣南小洋小流域脐橙果园开发示范区内的 3 种典型的土地利用结构坡面(优化整地坡面、粗放整地坡面、未整地荒草地坡面)和 4 种土地利用类型(优化整地果园、粗放整地果园、荒草地、农地)为研究对象, 研究其在 0~100 cm 土壤剖面上的水分时空分布特征及主控地形因子。结果表明: 不同土地利用类型土壤含水量在雨季表现为农地>粗放整地果园>优化整地果园>荒草地, 果园之间无显著差异, 其他土地利用之间差异均显著 ($P<0.05$); 在旱季为农地>优化整地果园>粗放整地果园>荒草地, 荒草地和粗放整地果园土壤含水量大幅降低, 要显著低于优化整地果园 ($P<0.05$)。在不同坡位, 雨季与旱季土壤含水量从坡顶到坡脚均表现为逐渐升高趋势, 且坡上、中、下部位的差异均很小。通过冗余分析也发现雨季和旱季土壤水分异质性的主控因子分别为坡位和土地利用类型 ($P<0.01$), 均通过表层 (0~20 cm) 土壤来影响水分分布。整地措施对坡面土壤水分的空间异质性提升明显, 且显著提升了坡面在雨季对降雨的入渗能力, 同时优化整地措施显著提升了梯田表层土壤在旱季的蓄水保水能力。研究结论可为区域内整地措施空间布局优化以及水土流失的综合治理提供理论依据。

关键词: 整地措施; 坡面; 土地利用结构; 土壤含水量; 时空分布; 冗余分析

中图分类号: S157.1 文献标志码: A

Spatio-Temporal Distribution of Soil Moisture on Slopes Relative to Land Preparation Measure

CHENG Liang^{1, 2}, JIAO Xiong¹, DI Hanyue¹, XIONG Aoyu¹, GUO Zhonglu^{1†}

(1. Research Center of Water and Soil Conservation, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Central Southern China Electric Power Design Institute, China Power Engineering Consulting (Group) Corporation, Wuhan 430071, China)

Abstract: 【Objective】 How to arrange rationally land preparation measures on terraced slopes affects runoff generation, rainfall infiltration, and water conservation capacity, thereon. It's of great significance to understand the spatio-temporal heterogeneity of soil moisture in terraced orchards different in land preparation measure and its mechanism, for promoting development of the forest and fruit industry. 【Method】 For this paper, the navel orange orchard development demonstration area in the small watershed of Xiaoyang in a low hilly red soil region in South China is selected as the research area. Three slopes, typical of the area, but different in land use structure (optimally prepared terraced slope, extensively prepared terraced slope, and unprepared

* 国家重点研发计划课题 (2017YFC0505405) 资助 Supported by the National Key R&D Program of China (No.2017YFC0505405)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zlguohezau@163.com

作者简介: 程 谅 (1995—), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与生态恢复研究。E-mail: 1601558599@qq.com

收稿日期: 2020-02-27; 收到修改稿日期: 2020-06-01; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-12-08

waste grassland slope) and four types of land use (orchard on optimally prepared terraced slope, orchard on extensively prepared terraced slope, waste grassland, and cropland) were selected as the research objects for the study on spatio-temporal distribution of soil water relative to land preparation and land use. Soil water content in five soil layers (0~20, 20~40, 40~60, 60~80 and 80~100 cm) at five slope positions (top slope, upper slope, middle slope, lower slope, and toe slope) on all the four slopes was monitored in both seasons (rainy and dry season). And redundant analysis was performed to determine the main terrain factors (including slope position, slope, land use type and altitude) that affect spatio-temporal distribution of soil water content in different seasons and soil layers. 【Result】 Results show: 1) soil water content during the rainy season varied with land use of a slope, exhibiting an order of slope of cropland ($0.4088 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) > orchard on extensively prepared terraced slope ($0.3227 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) > orchard on optimally prepared terraced slope ($0.3078 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) > slope of waste grassland ($0.2739 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$). Apparently, the two orchards did not differ much, but did significantly from the other two. During the dry season, soil water content decreased much faster in the slope of waste grassland and the orchard on extensively prepared terraced slope than in the two. On the slope of farmland, the impact of slope position on soil water content was the least. In terms of soil water content during the dry season, the four slopes followed a decreasing order of slope of cropland ($0.3524 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) > orchard on optimally prepared terraced slope ($0.1980 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) > orchard extensively prepared terraced slope ($0.1475 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) > slope of waste grassland ($0.1380 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$). Obviously the last two were much lower than the first two. 2) Soil water content gradually increased along the slope from the top to the toe, during both the rainy and dry seasons, but differed slightly between the upper, middle and lower parts of the three slopes, however, spatial heterogeneity intensified significantly after land preparation of the slopes. 3) The main topographic factors affecting the distribution of soil water content during the rainy season were slope position ($P=0.002$) and land use ($P=0.048$), and during the dry season were land use ($P=0.008$), slope position ($P=0.024$) and altitude ($P=0.024$), however, slope gradient was an insignificant one. 【Conclusion】 In general, land preparation of the slopes significantly increased rain water infiltration capacity and hence soil water content of the surface (0~20 cm) soil layer during the rainy season, especially in the orchard on the optimally prepared terraced slope, where the water storage and retention capacity was significantly improved during the dry season. All the findings in this study may serve as a scientific basis for rational arrangement of land resources in the region, optimization of the spatial layout of soil and water conservation measures, and comprehensive soil erosion control.

Key words: Land preparation measures; Slope; Land use structure; Soil water content; Spatio-temporal distribution; Redundancy analysis

土壤水分是影响地表水、溶质和能量的重要变量^[1],它是水文循环的主要组成部分,控制着不同规模的径流,入渗和蒸散过程,并且土壤水分对土壤养分状况也有很大的影响,是影响南方地区农业发展的关键水资源^[2-3]。季节性干旱是南方红壤区农业发展最为突出的问题之一,其表现为频率高,而且强度大,对于农业和林果业的产量与质量有较大影响,因此研究并掌握土壤水分的变化规律至关重要^[4]。土壤水分在多重尺度上均会表现出高度的时空变异性,其时空变异性是受景观类型、气象、地形、土壤、人为活动等多因素综合作用的结果,这些因素的影响是复杂的,因为这些因素本身可能还存在着相互作用^[5-6]。在已有认知中,地形在土壤水分的空间再分配中有着重要作用^[7],是影响土壤水分的关键因素,已有研究^[8-9]表明,坡面上较平缓的

坡脚较陡的坡顶具有更高的土壤含水量,此外地形对表层和深层土壤水分变化的影响具有较大差异。土地利用类型对土壤水分也有重要的影响^[10],多针对农地、林地、草地等不同土地利用类型下控制土壤水分的因素展开研究^[11-12],Liu和Shao^[13]的研究表明植被类型是引起土壤水分时间分布和剖面分布变化的主要因素,但是在不同的区域尺度上有所差异。

南方红壤区土壤水分还与季节(雨季、旱季)密切相关,在不同季节内的土壤水分空间异质性也一直是研究的重点。一般认为,土壤水分空间异质性的驱动因子在两种时期具有较大差异:在雨季主要受到地形因素的控制,旱季则主要受到土壤性质和植被差异的影响^[14-15],但实际上不同季节土壤水分的主控因子还存在着较大差异,如Zhao等^[15]针

对半干旱草原地区的研究指出土壤（土壤质地、有机质和容重）和植被性质均会显著影响旱季土壤水分空间格局的时间稳定性，而张伟等^[16]对喀斯特地区旱季表层土壤水分空间变异性的研究发现旱季洼地表层土壤水分主要受石丛和地形两个不同尺度的环境因素影响，这种差异说明土壤水分分布的控制因素在空间和时间上是可变的。

这些研究对象大多为不同土地利用坡面，还有较少学者针对于梯田展开研究，如梯田内不同的耕作方式、旱作措施、耕作年限以及梯田类型下的土壤水分环境效益，这类研究可为梯田、植被和作物的类型选择和布设提供重要参考，帮助提升地区农业的节水效率和生态恢复效率^[17-20]。如 Wei 等^[19]对多种梯田及植被类型下的土壤水分状况进行研究，指出梯田可使自然坡面土壤水分增加 0.87%~37.71%，有利于生态恢复，但各种梯田措施对土壤水分的影响是不同的，Widomski^[20]的研究指出梯田可使土壤体积含水量最大增加约 20.00%，这是由于梯田通过增加地表水渗透到更深的土壤中来改善土壤中的水分平衡。本文针对南方红壤低山丘陵区经济林果产业开发园区内新修梯田整地粗放、水土流失加剧、生态效益低下等问题，研究了新修梯田坡面在不同季节内的土壤水分分布特征以及主控因子，为区域内荒草地坡面开发后梯田果园的蓄水保水工作提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区域位于江西省赣州市宁都县固厚乡小洋小流域，属南方红壤区，区域于 2017 年开发为“南

方红壤低山丘陵区水土流失综合治理”核心示范区，开发项目属于“十三五”国家重点研发计划——“典型脆弱生态恢复修复与保护研究”专项。位置介于 116°02'29"~116°06'56"E 和 26°14'51"~26°19'56"N 之间，流域总面积 46.85 km²。土壤以花岗岩母岩发育的红壤为主，地貌类型以低山丘陵区为主，土壤侵蚀类型以水力侵蚀为主，水土流失面积为 25.17 km²，占土地总面积的 53.42%。区域属亚热带季风温和气候，年平均气温 18℃，年平均降雨量 1 800 mm 左右，但分配不均，伏旱、秋旱频繁。区域内自然坡面修整前属红砂岩侵蚀劣地，水土流失严重，项目将坡地修整为水平梯田，田面种植脐橙，园区内主要包括 2 种整地模式的梯田果园：

(1) 优化整地：前埂后沟，使用梯壁植草防护技术对新修梯田布设水土保持措施，针对植被破坏比较严重的林果地，为尽快修复梯壁植被，稳固梯壁防止水土流失，在地埂和梯壁上人工种植乡土草本宽叶雀稗 (*Paspalum wettsteinii*)，构建植被带。

(2) 粗放整地：有沟，无地埂及其他水土保持措施，植被覆盖度低，地表裸露严重。

1.2 点位选择

于 2019 年 5 月，在研究区内选择 3 个典型坡面进行研究，按照一个坡面的坡顶、坡上、坡中、坡下、坡脚选择 5 个样点，共 15 个点位。3 个坡面分别为：优化整地坡面，从上至下的土地利用结构为荒草地-优化整地果园-优化整地果园-优化整地果园-农地 (TA1 至 TA5)；粗放整地坡面，土地利用结构为荒草地-粗放整地果园-粗放整地果园-粗放整地果园-农地 (TB1 至 TB5)；同时设荒草地坡面为对照，其土地利用结构为荒草地-荒草地-荒草地-荒草地-荒草地 (CK1 至 CK5) (图 1)。

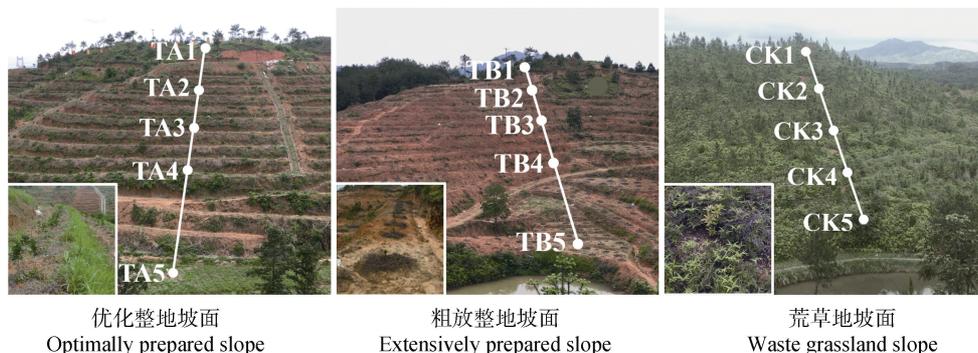


图 1 研究点位选择

Fig. 1 Selection of the study sites

对 15 个点位的地形以及植被覆盖状况进行调查, 包括土地利用类型、与坡顶距离、坡向、坡度、经纬度、海拔、优势植被物种以及植被覆盖度等。优化整地和粗放整地坡面中的果园内的作物均为脐橙, 且在整地之前均为荒草地, 植被覆

盖状况和荒草地相同。3 个坡面均为阳坡, 坡向相近, 总坡长差异较小。荒草地的植被优势种均为铁芒萁 (*Dicranopteris linearis*) 和马尾松 (*Pinus massoniana*), 铁芒萁占绝大部分, 整体覆盖度较低 (表 1)。

表 1 样点的地形因子概况

Table 1 Topographical factors of the sampling sites

坡面 Slopes	点位 Sampling site	坡位 Slope position	土地利用类型 Land use type	与坡顶距离 Distance to the top /m	坡度 Slope gradient/ °	坡向 Slope aspect/ °	海拔 Elevation /m	主要植被 Main vegetation	覆盖度 Coverage /%
优化整地坡面 Optimally prepared slope	TA1	坡顶 Top slope	荒草地	7	13		266	铁芒萁, 马尾松	55
	TA2	坡上 Upper slope	优化整地果园	45	0	226°	261	-	-
	TA3	坡中 Middle slope	优化整地果园	62	0		257	-	-
	TA4	坡下 Lower slope	优化整地果园	78	0		252	-	-
	TA5	坡脚 Toe slope	农地	101	0		249	-	-
粗放整地坡面 Extensivel y prepared slope	TB1	坡顶 Top slope	荒草地	10	11		244	铁芒萁, 马尾松	65
	TB2	坡上 Upper slope	粗放整地果园	25	0	267°	241	-	-
	TB3	坡中 Middle slope	粗放整地果园	46	0		237	-	-
	TB4	坡下 Lower slope	粗放整地果园	68	0		233	-	-
	TB5	坡脚 Toe slope	农地	103	0		230	-	-
荒草地坡面 Waste grassland slope	CK1	坡顶 Top slope	荒草地	10	22		241		50
	CK2	坡上 Upper slope	荒草地	27	27		236		55
	CK3	坡中 Middle slope	荒草地	40	15	242°	233	铁芒萁, 马尾松	65
	CK4	坡下 Lower slope	荒草地	59	18		229		75
	CK5	坡脚 Toe slope	荒草地	87	13		226		55

1.3 土壤含水量监测

于 2019 年 5 月 21 日-12 月 21 日(共持续 211 d) 使用 TDR 连续监测 15 个点位的土壤体积含水量时空变化特征, 每个点位分 5 个土层 (0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm) 进行测量。监测方法分为以下两种: (1) 优化整地坡面: 在优化整地坡面的 5 个点位中分土层埋设 H21-USB 土壤湿度测量系统探头, 每隔 5 d 测量一次土壤含水量并自动记录数据; (2) 粗放整地坡面和荒草地坡面: 在 10 个点位上使用螺旋土钻钻孔后, 使用 MP-406 土壤

水分测定仪分 5 个土层测定土壤水分, 重复 3 次, 每隔 5 d 测量一次土壤含水量。土壤含水量一般在上午 8:00~10:00 左右进行测量, 同时使用雨量计记录流域内的降雨量和气温数据。

为检验 TDR 的准确性, 使用野外校正方法对监测的含水量数据进行校正^[21], 在使用 TDR 记录土壤含水量的同时, 使用环刀 (体积 100 cm³) 在各样点探头埋设点取原状土样, 每次重复 3 次, 并记录采样时间, 带回室内使用烘干法测定土壤体积含水量, 以此得到两种方法测得的土壤体积含水量, 每两个

月校正一次，得到校正回归方程。

H21-USB 土壤湿度测量系统校正回归方程如下：

$$Y=1.4566X-0.0365 \quad R^2=0.9494 \quad n=225 \quad (1)$$

式中， X 为使用 TDR 测得的土壤体积含水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)； Y 为校正后的土壤体积含水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)。

MP-406 土壤水分测定仪校正回归方程如下：

$$Y=1.1566X-0.0124 \quad R^2=0.9311 \quad n=225 \quad (2)$$

式中， X 为使用 TDR 测得的土壤体积含水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)； Y 为校正后的土壤体积含水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)。

1.4 数据处理与分析

使用 Excel 2016 和 SPSS 20.0 软件对数据进行常规统计分析，使用 Origin 2017 软件绘制图表，使用 Canoco 5 软件进行冗余分析 (Redundancy analysis, RDA)，并绘制 RDA 排序图。

2 结 果

2.1 研究区降雨量监测情况

在整个监测期间，共有 55 d 发生过降雨，总降雨量为 793.50 mm，最大日降雨量为 107.80 mm (图 2)。由于在 8 月 5 日之后，近 1 个月的时期无降雨，且土壤含水量有明显降低，因此将整个监测期划分为两个时期进行分析。雨季：5 月 21 日—8 月 5 日，共 77 d，总降雨量为 735.60 mm，占观测期总降雨量的绝大部分，为 92.70%，日均气温为 26.19℃；旱季：8 月 6 日—12 月 17 日，共 134 d，总降雨量为 57.90 mm，占观测期总降雨量的 7.30%，日均气温为 23.47℃。

2.2 不同坡面和坡位在雨季和旱季的土壤含水量差异

在雨季，优化整地坡面土壤含水量介于 0.1677~0.4559 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ，从坡顶至坡脚平均值依次为 0.2699、0.2913、0.2992、0.3328、0.3967 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ，总体均值为 0.3180 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 。粗放整地坡面介于 0.1310~0.4647 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ，从坡顶至坡脚平均值依次为 0.2301、0.3181、0.3164、0.3336、0.4209 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ，总体均值为 0.3238 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ，两个坡面从坡顶至坡脚

均逐渐升高，且坡脚含水量均显著 ($P<0.05$) 高于其他部位，从两个坡面对比来看，除坡顶和坡上部位，其他坡位差异均不显著 ($P>0.05$)。荒草地坡面介于 0.1473~0.3683 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ，从坡顶至坡脚平均值依次为 0.2436、0.2862、0.3061、0.2939、0.2876 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ，总体均值为 0.2835 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ，不同坡位之间的土壤含水量均值与变异系数差异较小，仅坡顶显著 ($P<0.05$) 低于其他坡位。其中 TA5 与 TB5 的变异系数最小，分别为 6.42% 和 5.54%。

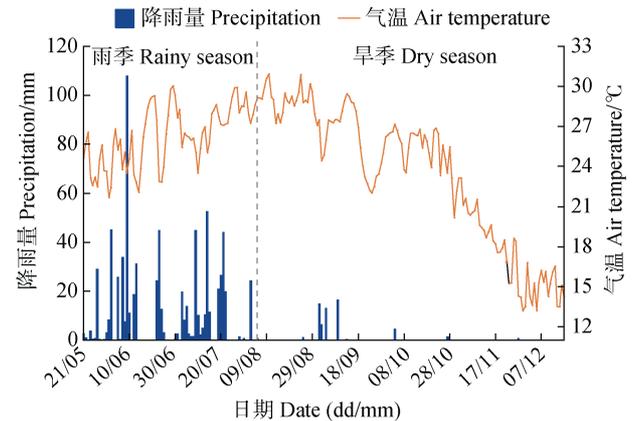


图 2 降雨量与气温概况

Fig. 2 Overview of precipitation and temperature

在旱季，优化整地坡面土壤含水量介于 0.0685~0.4077 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ，从坡顶至坡脚平均值依次为 0.1944、0.1928、0.2036、0.1975、0.3540 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ，均值为 0.2285 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 。粗放整地坡面介于 0.0557~0.4203 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ，从坡顶至坡脚平均值依次为 0.0974、0.1513、0.1449、0.1465、0.3508 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ，均值为 0.1782 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ，除坡脚外，其他坡位均显著 ($P<0.05$) 低于优化整地坡面，且两个坡面的坡脚均要显著 ($P<0.05$) 高于其他坡位，在坡上、中、下土壤含水量差异很小。荒草地坡面介于 0.0553~0.2993 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ，从坡顶至坡脚平均值依次为 0.1227、0.1364、0.1301、0.1344、0.1508 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ，均值为 0.1349 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ，坡位间无显著差异，但坡脚和坡顶均与其他两个坡面具有显著差异 ($P<0.05$)。

3 个坡面在旱季土壤含水量均要明显低于雨季，且荒草地坡面下降最为明显，降低了 52.81%，其次为粗放整地坡面，为 45.06%，优化整地坡面最低，为 28.93%。并且在旱季各点位变异系数有明显提升，均要高于雨季 (表 2)。

表 2 土壤含水量在雨季和旱季的统计特征值

Table 2 Statistical eigenvalue of soil moisture contents in the rainy and dry seasons

点位 Points	雨季 Rainy season					旱季 Dry season				
	极小值	极大值	均值	标准差	CV/%	极小值	极大值	均值	标准差	CV/%
	Min	Max	Mean	SD	CV/%	Min	Max	Mean	SD	CV/%
	$/(m^3 \cdot m^{-3})$	$/(m^3 \cdot m^{-3})$	$/(m^3 \cdot m^{-3})$	$/(m^3 \cdot m^{-3})$		$/(m^3 \cdot m^{-3})$	$/(m^3 \cdot m^{-3})$	$/(m^3 \cdot m^{-3})$	$/(m^3 \cdot m^{-3})$	
TA1	0.1765	0.3281	0.2699Ca	0.0392	14.53	0.0771	0.2792	0.1944Ba	0.0526	27.08
TA2	0.1677	0.3528	0.2913BCb	0.0304	10.45	0.0685	0.2793	0.1928Ba	0.0560	29.04
TA3	0.2378	0.3558	0.2992BCa	0.0355	11.86	0.1408	0.3455	0.2036Ba	0.0540	26.54
TA4	0.2006	0.4481	0.3328Ba	0.0670	20.13	0.0562	0.3836	0.1975Ba	0.0894	45.27
TA5	0.3425	0.4259	0.3967Aa	0.0255	6.42	0.2132	0.4077	0.3540Aa	0.0570	16.09
TB1	0.1310	0.2893	0.2301Cb	0.0362	15.75	0.0557	0.1713	0.0974Cc	0.0250	25.64
TB2	0.2473	0.4253	0.3181Ba	0.0408	12.82	0.0703	0.2963	0.1513Bb	0.0496	32.77
TB3	0.2173	0.4183	0.3164Ba	0.0349	11.02	0.0697	0.2757	0.1449Bb	0.0497	34.30
TB4	0.2417	0.4223	0.3336Ba	0.0400	11.99	0.0690	0.3377	0.1465Bb	0.0513	35.04
TB5	0.3430	0.4647	0.4209Aa	0.0233	5.54	0.2640	0.4203	0.3508Aa	0.0370	10.54
CK1	0.1473	0.3023	0.2436Bb	0.0263	10.78	0.0553	0.2197	0.1227Ab	0.0297	24.23
CK2	0.1827	0.3483	0.2862Ab	0.0335	11.72	0.0687	0.2437	0.1364Ab	0.0426	31.24
CK3	0.2047	0.3683	0.3061Aa	0.0340	11.11	0.0623	0.2533	0.1301Ab	0.0451	34.63
CK4	0.2290	0.3433	0.2939Ab	0.0272	9.27	0.0560	0.2993	0.1344Ab	0.0487	36.23
CK5	0.1643	0.3583	0.2876Ab	0.0365	12.69	0.0657	0.2650	0.1508Ab	0.0492	32.61

注：表中不同大写字母表示同一坡面内不同坡位间差异显著 ($P < 0.05$)，不同小写字母表示同一坡位的不同坡面间差异显著 ($P < 0.05$)，雨季 $n=80$ ，旱季 $n=135$ 。Note: Different capital letters in the table indicate significant differences between different slope positions on the same slope at the level of 0.05; different lowercase letters in the table indicate significant differences between different slopes in the same slope position at the level of 0.05; rainy season $n=80$; and dry season $n=135$.

2.3 不同土层在雨季和旱季的土壤含水量差异

在雨季时，优化整地坡面 0~100 cm 的 5 个土层从上至下土壤含水量均值依次为 0.2697、0.3253、0.3333、0.3303、0.3313 $m^3 \cdot m^{-3}$ ，0~20 cm 土层土壤含水量要明显小于 20~100 cm；粗放整地坡面依次为 0.3185、0.3319、0.3336、0.3198、0.3153 $m^3 \cdot m^{-3}$ ，从上至下呈先升高再降低的趋势；荒草地坡面依次为 0.2789、0.2814、0.2841、0.2860、0.2869 $m^3 \cdot m^{-3}$ ，从上至下总体呈逐渐升高趋势，但土层之间差异较小。

在旱季，优化整地坡面 5 个土层从上至下土壤含水量均值依次为 0.1441、0.2137、0.2494、0.2580、0.2772 $m^3 \cdot m^{-3}$ ；粗放整地坡面依次为 0.1454、0.1608、0.1778、0.1978、0.2090 $m^3 \cdot m^{-3}$ ，从上至下呈先升高再降低的趋势；荒草地坡面依次为 0.1051、0.1164、

0.1367、0.1496、0.1664 $m^3 \cdot m^{-3}$ 。不同土层的土壤含水量在从雨季到旱季时均发生了较大变化，旱季土壤含水量从上至下均呈逐渐升高趋势，且不同土层之间差异要明显大于雨季，其中变化较大的点位为 TA2、TA3、TA4、TB2、TB3 和 TB4，均为果园（图 3）。

2.4 不同土地利用类型的土壤含水量差异

从不同土地利用类型来看，优化整地果园、粗放整地果园、荒草地和农地在雨季的土壤含水量范围依次为：0.2868~0.3157、0.2803~0.3756、0.2185~0.3012、0.3824~0.4213 $m^3 \cdot m^{-3}$ ，均值依次为 0.3078、0.3227、0.2739、0.4088 $m^3 \cdot m^{-3}$ ，表现为农地要显著大于其他土地利用，粗放整地果园与优化整地果园差异不明显，但均要显著大于荒草地，优化整地果园和农地土壤含水量在整个雨季观测期内对降雨的响应幅度要小于粗放整地果园和荒草

地。在旱季，优化整地果园、粗放整地果园、荒草地和农地在旱季内的土壤含水量范围依次为：0.1610~0.2728、0.1136~0.2713、0.1132~0.2174、0.3291~0.3883 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ ，均值依次为 0.1980、0.1475、0.1380、0.3524 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ ，农地和优化整地果园均要显著高于粗放整地果园和荒草地（图 4）。

根据图 3 的等值线图计算发现，粗放整地果园和荒草地的土壤含水量等值线均较优化整地果园更

陡，这说明粗放整地果园的土壤耗水深度增长更快。在旱季除农地外各点位的土壤含水量均不同程度地降至 0.2000 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ 左右（旱季整个坡面的土壤含水量为 0.2000 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ 左右），但是在不同点位的 0.2000 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ 含水量等值线下降速度具有明显差异，优化整地果园等值线在剖面上的下降速度约为 1.2 $\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$ ，粗放整地果园约为 3.2 $\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$ ，远高于优化整地果园，荒草地约为 2.5 $\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

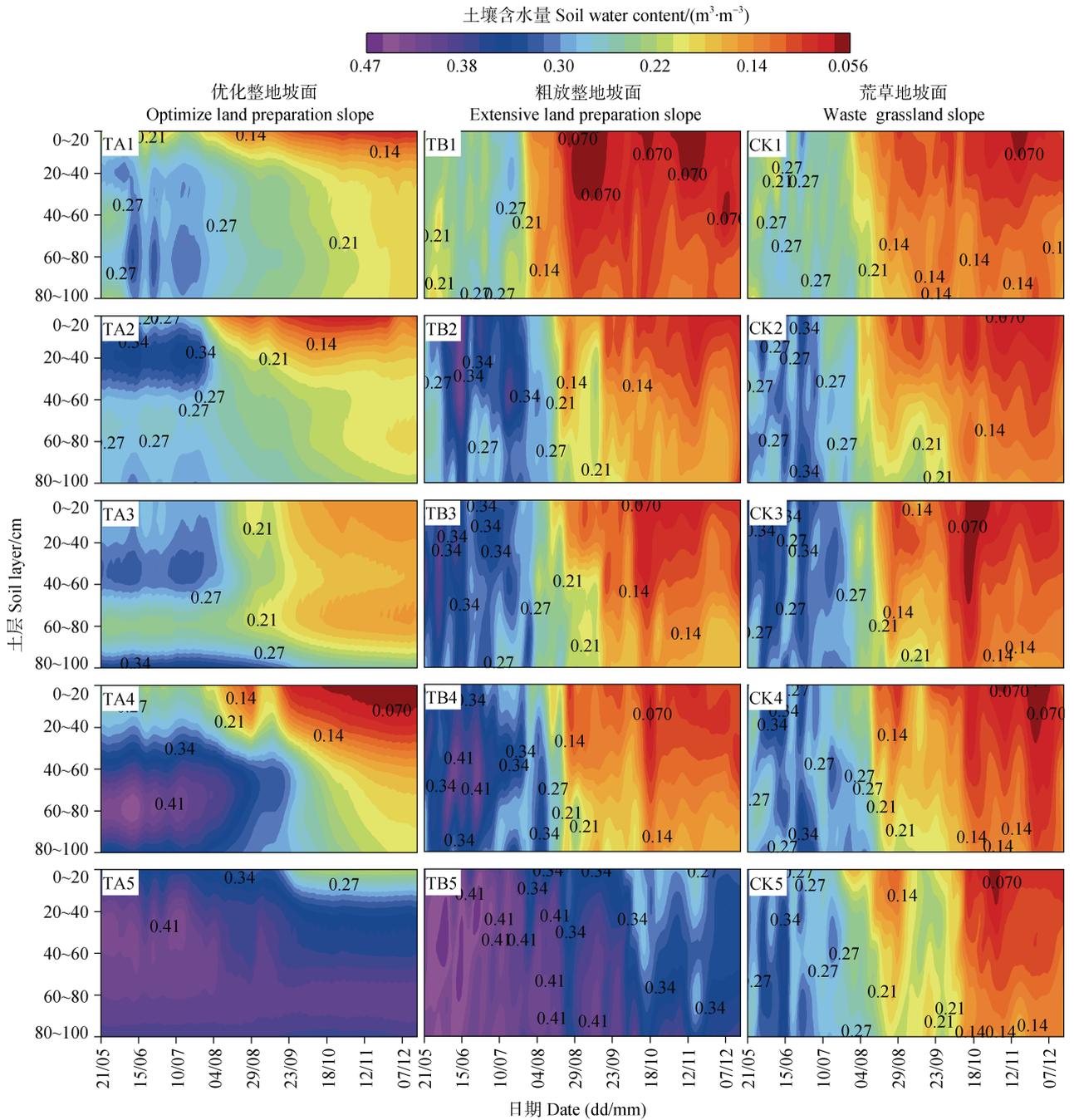
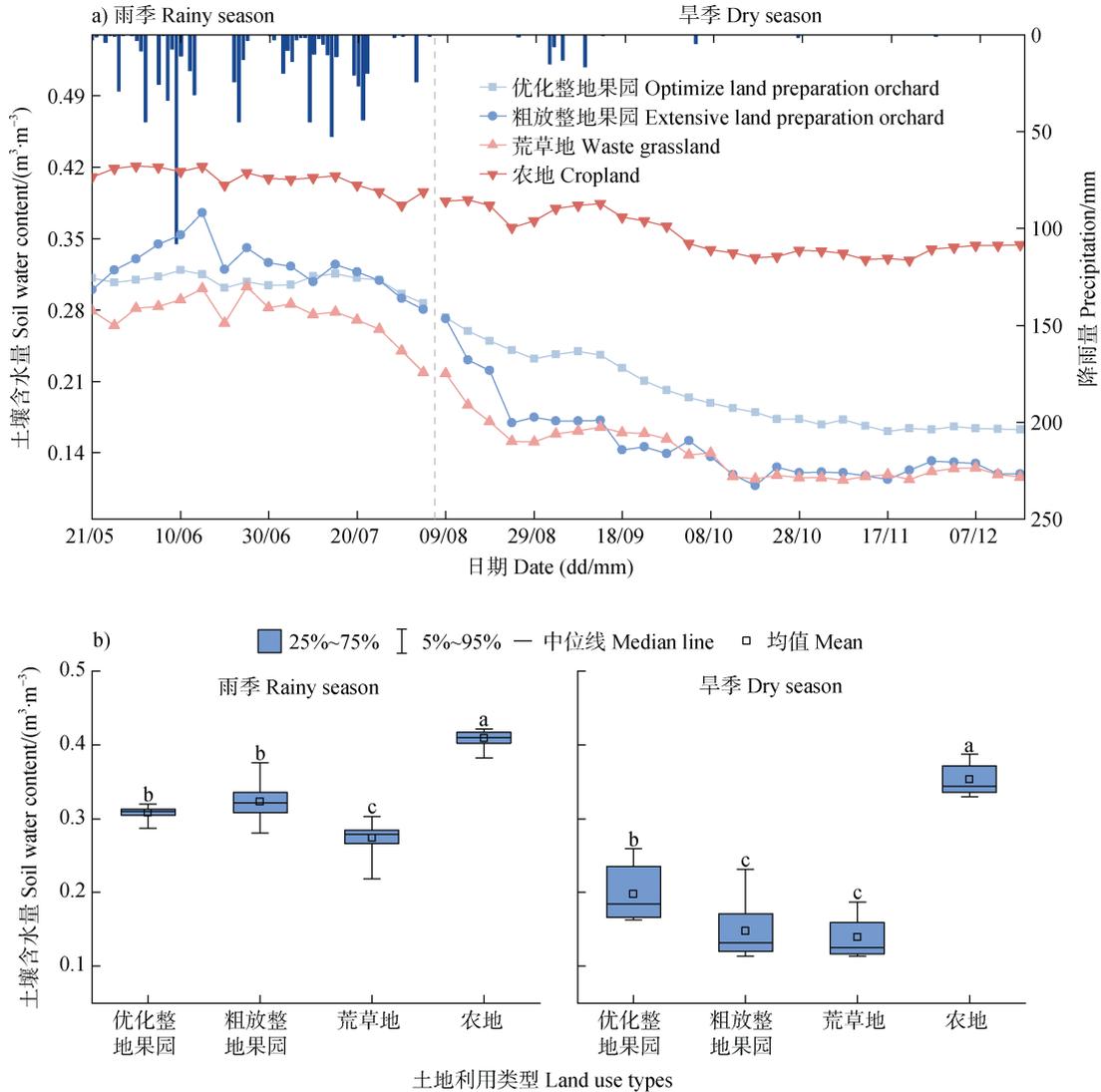


图 3 3 个坡面土壤含水量时空变化

Fig. 3 Spatio-temporal variation of soil water content relative to slope



注:图 b)中不同小写字母表示同一季节内不同土地利用类型间差异显著($P < 0.05$),雨季 $n=16$,旱季 $n=27$ 。Note:Different lowercase letters in figure b) indicate significant differences between land use types at the level of 0.05; rainy season $n=16$; and dry season $n=27$.

图 4 不同土地利用类型下土壤含水量时间变化 (a) 和差异情况 (b)

Fig. 4 Temporal variation (a) of soil water content relative to land use and difference (b) between land uses

2.5 不同季节土壤含水量与地形因子的关系

对雨季、旱季的土壤含水量及地形因子进行 RDA 分析, RDA 分析包括两个矩阵, 其中土壤含水量矩阵为 $P \times N$ 维, 其中 P 为土层数, 共 5 个土层, N 为监测点位数目, 共 15 个点位。地形因子矩阵为 $Q \times N$ 维, 其中 Q 为地形因子数量, 本研究包含的地形因子包括土地利用类型、坡度、坡位和海拔。其中土地利用类型分 4 类: 1 表示优化整地果园、2 表示粗放整地果园、3 表示荒草地、4 表示农地, 坡位分 5 类, 1 表示坡脚、2 表示坡下、3 表示坡中、4 表示坡上、5 表示坡顶。使用 RDA 来对监测点位的

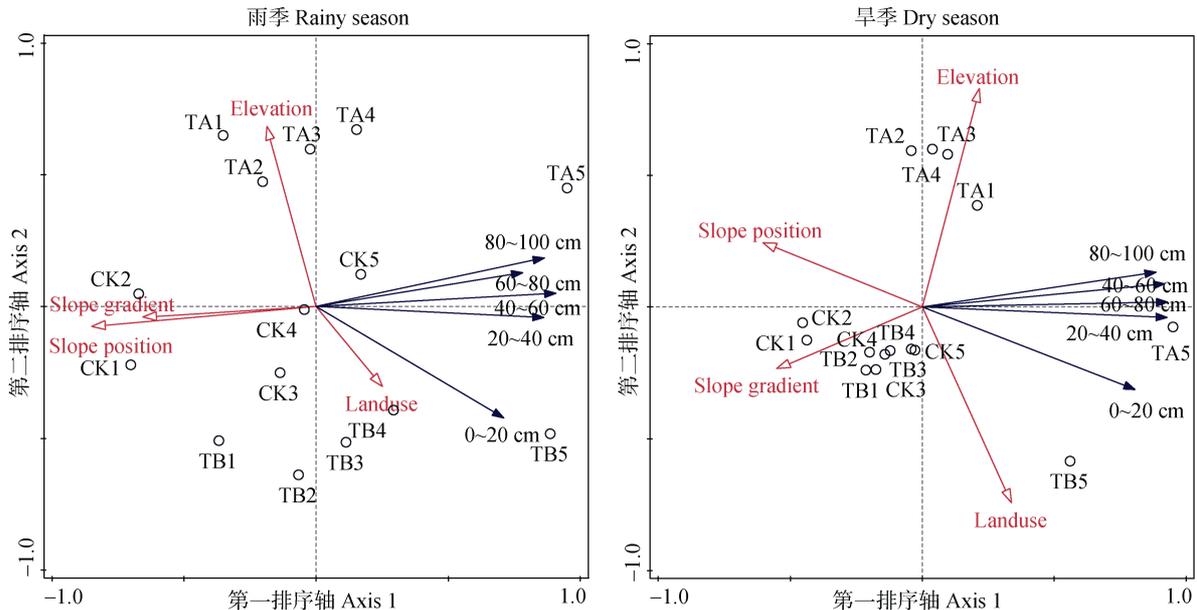
土壤含水量数据和地形因子数据进行排序分析。

在雨季, RDA 双序图第 1 排序轴揭示了 68.3% 的土壤水分变化以及土壤水分与地形因子之间的关系, 第 2 排序轴揭示了 4.39%, 在旱季第 1 排序轴和第 2 排序轴分别揭示了 81.1% 和 2.01% (图 5)。第 1、2 排序轴解释了绝大部分信息, 因此选用前两轴来分析地形因子与土壤水分的相互关系。在排序图中, 空心箭头连线代表环境因子, 箭头连线的长度代表环境因子与土壤含水量的相关性大小, 连线越长, 相关性越大, 反之越小, 箭头连线投影在排序轴上的长度代表该环境因子与排序轴的相关性大

小，投影于正坐标为正相关，负坐标为负相关；实心箭头连线代表各土层土壤含水量指标，两条箭头连线的夹角余弦表示其相关性，锐角为正相关，钝角为负相关。

在雨季，坡位 ($P=0.002$) 的解释度较高，对雨季土壤含水量的分布具有极显著影响，其次土地

利用类型 ($P=0.048$) 的影响显著，坡度 ($P=0.052$) 和海拔 ($P=0.098$) 的影响较小。在旱季，土地利用类型 ($P=0.008$) 对旱季土壤含水量的分布具有极显著影响，其次为坡位 ($P=0.024$) 和海拔 ($P=0.024$) 均具有显著影响，坡度 ($P=0.062$) 的影响较小 (表 3)。



注：图中空心箭头为地形因子，Slope position 为坡位，Slope gradient 为坡度，Landuse 为土地利用类型，Elevation 为海拔；实心箭头为不同土层；空心圆点为不同监测点位。Note: Hollow arrows in the figure denote environmental factors; solid arrows do soil layers; and hollow circles do monitoring points.

图 5 不同季节土壤含水量与地形因子的 RDA 排序图

Fig. 5 RDA graph of soil water content and topographic factors relative to season

表 3 RDA 分析中地形因子的前向选择

Table 3 Forward selection of topographic factors in RDA analysis

地形因子 Topographic factor	雨季 Rainy season		旱季 Dry season	
	解释力度 Explanatory power	P	解释力度 Explanatory power	P
坡位 Slope position	12.7	0.002	5.5	0.024
坡度 Slope gradient	3.3	0.052	4.2	0.062
土地利用类型 Land use types	3.3	0.048	9.5	0.008
海拔 Elevation	1.6	0.098	7.3	0.024

在雨季，RDA 排序图的第一轴和第二轴分别主要反映了土壤含水量随坡位和海拔的梯度变化。从土层箭头与地形因子箭头的夹角来看，土地利用类型与 0~20 cm 土层夹角最小，说明土地利用类型对表层的影响最大，且随土层向下影响也逐渐减弱。

海拔与各土层基本呈直角，说明海拔对深层土壤水分分异性基本无影响。此外，坡度和坡位与各土层夹角基本为 180°左右，说明其与土壤水分分异性为负相关。旱季第一轴和第二轴分别主要反映了土壤含水量随坡位和土地利用类型的梯度变化，土地利

用类型 and 海拔对各土层均为正相关, 但相关性不显著, 坡位与表层呈显著负相关, 与其他土层相关性均显著, 坡度与深层显著负相关, 与表层相关性则较小 (图 5)。

3 讨 论

3.1 不同土地利用结构与坡位的土壤含水量差异

影响到土壤含水量的因素众多且复杂, 一般包括土壤因素、地形因素、植被因素、土地利用因素、气候因素等^[14,22], 在单一土地利用结构下 (如本研究中的荒草地坡面), 坡面土壤含水量变异性较低, 而不同的土地利用结构 (如优化整地和粗放整地坡面) 会使土壤含水量变异性变高^[23], 本研究具有类似表现。在雨季, 优化整地和粗放整地坡面从坡顶至坡脚均呈逐渐升高趋势, 且坡上、中、下部位差异较小, 坡顶与坡脚则具有显著 ($P<0.05$) 差异, 而在荒草地坡面中, 除坡顶土壤含水量较低外, 其他坡位之间差异不显著, 在旱季也具有类似表现, 根据 RDA 分析结果发现, 坡位对雨季土壤含水量的分布具有极显著 ($P<0.01$) 影响, 在旱季也有显著 ($P<0.05$) 影响。这是由于本研究中优化整地和粗放整地坡面坡顶均为荒草地, 坡上、中、下均为梯田果园, 坡脚为农田, 在坡顶由于具有一定坡度和植被覆盖, 降雨后容易产生径流, 因此对降雨的入渗较少。而梯田果园由于特殊的台阶地形, 促进了土壤水分入渗量, 从而具有较高的土壤含水量^[24], 同时梯田果园则较少受到降雨径流的影响, 因此梯田果园之间的含水量差异较小。当地的土地利用结构设计会在坡脚旁开挖池塘, 坡脚具有较大的汇水面积以及水分补充, 因此土壤含水量最高。研究结果与已有研究结论一致^[8-9,25], Mei 等^[25]研究了 3 个山坡土壤含水量在生长和非生长季节的变化, 发现坡脚的土壤储水量要较山坡的其他部位高, 指出这可能是由于坡脚一般具有较大面积的集水区。黄艳丽等^[26]分析了小流域不同部位土壤水分的空间异质性, 结果表明坡位、土层是影响流域内土壤水分分布的重要空间因素, 如坡脚含水量显著高于坡腰和坡肩, 坡肩最低, 而坡向和区段的影响并不显著。值得一提的是, 郭欣欣等^[27]针对东北黑土区不同土地利用结构坡面的研究发现土壤含水量在不同坡位

并无明显变化规律, 且在不同土地利用结构下, 坡顶至坡脚的变化趋势具有较大差异, 这与本研究具有较大差异, 这主要是由于其土地利用结构较为复杂, 且可能受研究区域的影响, 说明不同坡位的土壤含水量之间的差异主要还需考虑土地利用类型的影响。

3.2 不同土地利用类型的土壤含水量差异

修建梯田是通过改造地形来限制地表径流的产生和径流速度, 从而增加斜坡地形中土壤水分和入渗量^[24], 而降雨入渗的增加主要是由于梯田的几要素: 水平、近水平或反坡梯田台阶、地埂、排水沟或其他排水措施等。Lü 等^[28]研究了梯田作为黄土高原部分流域水土保持措施的有效性, 在梯田效应最重要的指标中, 土壤水分增加了 20.70%, 土壤流失量和土壤养分流失量分别减少了 57.90%~89.90% 和 89.30%~95.90%。Fu 等^[29]在黄土高原大南沟集水区进行的研究涵盖了包括梯田在内的 5 种土地利用结构和 7 种土地利用类型, 发现梯田耕地平均土壤含水量要高于坡地果园、休耕地、草地和坡耕地, 分别高 11.15%、11.09%、10.82% 和 11.10%。本研究与之结论相似, 在雨季不同土地利用类型的土壤含水量表现为农地>粗放整地果园>优化整地果园>荒草地, 优化整地果园和粗放整地果园的土壤含水量差异并不大, 但是优化整地果园对降雨的响应幅度要低于其他土地利用。在旱季土壤含水量均具有较大幅度的降低, 农地最慢, 其余依次为优化整地果园、荒草地、粗放整地果园, 在整个旱季内, 土壤含水量表现为农地>优化整地果园>粗放整地果园>荒草地, 同时 RDA 分析发现, 在雨季和旱季的土地利用类型均对土壤含水量的分布具有显著 ($P<0.05$) 影响。说明坡地开发成梯田后, 地形的改造增强了降雨在坡面的入渗, 优化整地果园中布设的水土保持措施对于入渗的增强效果并不明显, 但在旱季则发挥了较强的保水效益, 相较于粗放整地果园, 其增加了果园内的植被覆盖度, 降低了旱季的浅层土壤水分蒸发, 并且地埂植草还具有截留降雨的作用, 一定程度上减少了旱季降雨的流失。坡脚的农田主要受坡位影响, 在各时期均具有较高的土壤含水量, 以上结果说明优化整地坡面类型的土地利用结构能充分合理的利用水资源, 提升蓄水保墒能力, 具有良好的应用前景。

3.3 剖面尺度上土壤含水量的时空变化特征

优化整地和粗放整地坡面不同土层的土壤含水量在雨季时无明显变化规律, 而到了旱季, 所有点位在不同土层的土壤含水量从上至下均呈逐渐升高趋势, 且不同土层之间差异要明显大于雨季。其中变化较大的点位均为果园, 这主要是由于果园田面植被覆盖较少, 在旱季时脐橙的需水量也较大, 同时太阳辐射大导致浅层土壤水分物理蒸发量大导致的。这与已有研究结果一致, 张川等^[30]研究指出土壤含水量从表层到深层具有明显的分层, 根据不同季节的异质性可分为活性层、亚活性层和相对稳定层。史君怡等^[31]研究也指出在草原区不同土层土壤含水量从上至下呈逐渐降低趋势, 是由于表层腐殖质加强了土壤蓄水能力, 而森林土壤含水量则具有相反表现, 并推测这可能是由于土壤与气候差异引起的。结合 RDA 分析发现, 本研究在雨季和旱季, 土地利用类型与坡位均是影响表层土壤含水量分布的关键, 这与郭欣欣等^[27]研究结论相似, 其通过 RDA 分析发现不同土地利用结构下坡位对表层土壤水分的影响最大, 且土地利用类型和海拔高度对所有土层均呈显著负相关。而 Mei 等^[25]研究也发现地形和植被类型是控制不同土层土壤蓄水量的主要因素, 浅层土壤蓄水量主要受地形影响, 深层土壤蓄水量主要受植被影响。

值得注意的是, 研究区在此次观测期的旱季内为严重干旱, 在 4 个多月的时间内降雨量仅 57.90 mm, 要远低于往年同期降雨量。有研究^[25]指出, 在不同时期, 土壤水分分布的主控环境因素各不相同, 相对湿润年份的土壤水分主控环境因素较干旱年份更为复杂, 且最大的影响因素也不尽相同。这可能是由于在气候正常的年份, 降雨会影响地形因子、植被类型和土壤性质在控制土壤水分变化中的作用, 而在严重干旱年份的降雨量相对较低, 因此几乎不会影响土壤水分的控制因素。本研究在正常气候年份的土壤水分主控因子还需今后继续监测进行论证。

4 结 论

本研究结合 RDA 分析结果发现, 土壤含水量受地形影响较大, 雨季和旱季土壤水分分布分别受坡

位和土地利用类型的极显著 ($P < 0.01$) 影响, 且主要影响到 0~20 cm 的表层土壤含水量。同一坡面内, 坡顶至坡脚在雨季和旱季均表现为逐渐升高趋势, 荒草地坡面的坡位间差异要小于优化整地和粗放整地坡面, 优化整地、粗放整地坡面的坡脚土壤含水量均要显著 ($P < 0.05$) 高于其他坡位, 而变异系数均要明显低于其他坡位, 坡上、中、下部位间差异较小且不显著。在不同土地利用类型下, 雨季土壤含水量表现为农地>粗放整地果园>优化整地果园>荒草地, 除两种果园外均具有显著差异 ($P < 0.05$), 且优化整地果园和农地土壤含水量对降雨的响应幅度要小于粗放整地果园和荒草地。在旱季, 粗放整地果园和荒草地的土壤含水量下降速度远高于优化整地果园和农地, 因此在旱季农地和优化整地果园土壤含水量要显著 ($P < 0.05$) 高于粗放整地果园和荒草地。区域内荒草地坡面修整为梯田果园后, 一方面, 土壤入渗性能得到较大提升, 在雨季具有更高土壤含水量, 同时坡面土壤水的空间异质性也有较大提升。另一方面, 优化整地果园内的水土保持措施在旱季发挥了非常显著的保水效益, 说明优化整地坡面的土地利用结构设计以及地埂梯壁植草等优化整地技术的应用在减少坡面径流、提升蓄水保水能力方面具有较广阔的应用前景。

参考文献 (References)

- [1] Vereecken H, Kamai T, Harter T, et al. Explaining soil moisture variability as a function of mean soil moisture: A stochastic unsaturated flow perspective[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34 (22): L22402.
- [2] Schmidt J P, Sripada R P, Beegle D B, et al. Within-field variability in optimum nitrogen rate for corn linked to soil moisture availability[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75 (1): 306—316.
- [3] Li X Z, Shao M A, Jia X X, et al. Profile distribution of soil-water content and its temporal stability along a 1340-m long transect on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2016, 137: 77—86.
- [4] Chen Z F, Zhang X X. Effect of seasonal drought on forestry and fruit industry at red soil region in Southern China[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2002, 21 (3): 241—244. [陈正法, 张茜茜. 我国南方红壤区季节性干旱及对林果业的影响[J]. *农业环境保护*, 2002, 21 (3): 241—244.]
- [5] Guo D L, Mou P, Jones R H, et al. Temporal changes in spatial patterns of soil moisture following disturbance:

- An experimental approach[J]. *Journal of Ecology*, 2002, 90 (2): 338—347.
- [6] Qiu Y, Fu B J, Wang J, et al. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 240 (3/4): 243—263.
- [7] Western A W, Blöschl G. On the spatial scaling of soil moisture[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 217 (3/4): 203—224.
- [8] Ali G A, Roy A G, Legendre P. Spatial relationships between soil moisture patterns and topographic variables at multiple scales in a humid temperate forested catchment[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46 (10): 2290—2296.
- [9] Western A W, Zhou S L, Grayson R B, et al. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 286 (1/4): 113—134.
- [10] Sun F X, Lü Y H, Fu B J, et al. Spatial explicit soil moisture analysis: Pattern and its stability at small catchment scale in the loess hilly region of China[J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28 (13): 4091—4109.
- [11] Dick J, Tetzlaff D, Bradford J, et al. Using repeat electrical resistivity surveys to assess heterogeneity in soil moisture dynamics under contrasting vegetation types[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 559: 684—697.
- [12] Korres W, Reichenau T G, Fiener P, et al. Spatio-temporal soil moisture patterns – A meta-analysis using plot to catchment scale data[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 520: 326—341.
- [13] Liu B X, Shao M G. Response of soil water dynamics to precipitation years under different vegetation types on the northern Loess Plateau, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2016, 8 (1): 47—59.
- [14] Penna D, Brocca L, Borga M, et al. Soil moisture temporal stability at different depths on two alpine hillslopes during wet and dry periods[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 477: 55—71.
- [15] Zhao Y, Peth S, Wang X Y, et al. Controls of surface soil moisture spatial patterns and their temporal stability in a semi-arid steppe[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24 (18): 2507—2519.
- [16] Zhang W, Chen H S, Wang K L, et al. Spatial variability of surface soil water in typical depressions between hills in Karst region in dry season[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43 (4): 554—562. [张伟, 陈洪松, 王克林, 等. 喀斯特地区典型峰丛洼地旱季表层土壤水分空间变异性初探[J]. *土壤学报*, 2006, 43 (4): 554—562.]
- [17] Li J Y, Wang Y P, Han M Y, et al. Soil moisture dynamics of apple orchards in Loess Hilly Area of northern Shaanxi Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25 (5): 749—758. [李佳旻, 王延平, 韩明玉, 等. 陕北黄土丘陵区山地苹果园的土壤水分动态研究[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25 (5): 749—758.]
- [18] Zou Y J, Chen J X, Ma F W, et al. Characteristics of soil moisture change of apple orchards of different planting years in Weibei dryland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29 (1): 41—43, 47. [邹养军, 陈金星, 马锋旺, 等. 渭北旱塬不同种植年限苹果园土壤水分的变化特征[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29 (1): 41—43, 47.]
- [19] Wei W, Feng X R, Yang L, et al. The effects of terracing and vegetation on soil moisture retention in a dry hilly catchment in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 647: 1323—1332.
- [20] Widomski M K. Terracing as a measure of soil erosion control and its effect on improvement of infiltration in eroded environment[M] // *Soil Erosion Issues in Agriculture*, 2011: 315—334
- [21] Wu Y Q, Liu B Y, Erikvanden E, et al. Automatic measurement for soil water content on Loess Plateau—TDR system and its application[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15 (2): 108—111. [伍永秋, 刘宝元, Erikvanden Elsen, 等. 黄土高原土壤水分的自动监测——TDR 系统及其应用[J]. *水土保持学报*, 2001, 15 (2): 108—111.]
- [22] Hu W, Shao M G, Han F P, et al. Watershed scale temporal stability of soil water content[J]. *Geoderma*, 2010, 158 (3/4): 181—198.
- [23] She D L, Shao M A, Yu S E. Spatial variability of soil water content on a cropland-grassland mixed slope land in the Loess Plateau, China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2010, 41 (7): 57—63. [余冬立, 邵明安, 俞双恩. 黄土区农草混合利用坡面土壤水分空间变异性[J]. *农业机械学报*, 2010, 41 (7): 57—63.]
- [24] Tenge A J, de graaff J, Hella J P. Financial efficiency of major soil and water conservation measures in West Usambara Highlands, Tanzania[J]. *Applied Geography*, 2005, 25 (4): 348—366.
- [25] Mei X M, Zhu Q K, Ma L, et al. Effect of stand origin and slope position on infiltration pattern and preferential flow on a Loess hillslope[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29 (5): 1353—1365.
- [26] Huang Y L, Li Z B, Su H, et al. Effect of man-made forest on soil moisture of different slopes in upper and lower reaches of small watershed of Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34 (15): 108—116. [黄艳丽, 李占斌, 苏辉, 等. 人工林对黄土高原小流域上下游不同坡面土壤水分的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34 (15): 108—116.]
- [27] Guo X X, Fu Q, Lu H, et al. Spatial variability and its controlling factors of soil moisture on

- cropland-forestland mixed hillslope in black soil area of Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34 (19): 123—130. [郭欣欣, 付强, 卢贺, 等. 东北黑土区农林混合利用坡面土壤水分空间异质性及主控因素[J]. *农业工程学报*, 2018, 34 (19): 123—130.]
- [28] Lü H, 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.
- [29] Fu B J, Wang J, Chen L D, et al. The effects of land use on soil moisture variation in the Danangou catchment of the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2003, 54(1/2): 197—213.
- [30] Zhang C, Chen H S, Nie Y P, et al. Dynamics of soil profile water content in peak-cluster depression areas in Karst region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21 (10): 1225—1232. [张川, 陈洪松, 聂云鹏, 等. 喀斯特地区洼地剖面土壤含水率的动态变化规律[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21 (10): 1225—1232.]
- [31] Shi J Y, Wang G L, Liu G B. Effect of graining for green on water content of soil profile under different land use patterns in the Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25 (2): 81—86. [史君怡, 王国梁, 刘国彬. 退耕还林(草)对黄土高原不同土地利用方式下土壤剖面水分含量的影响[J]. *水土保持研究*, 2018, 25 (2): 81—86.]

(责任编辑: 檀满枝)