

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.015.

韩新生, 许浩, 蔡进军, 等. 立地因子和盖度对宁南黄土区中庄小流域玉米土壤水分的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 112-122.

Han Xinsheng, Xu Hao, Cai Jinjun, et al. Effects of Site Factor and Coverage on Soil Moisture of Maize Field in Zhongzhuang Small Watershed in the Loess Area of Southern Ningxia[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 112-122.

立地因子和盖度对宁南黄土区中庄小流域 玉米土壤水分的影响

韩新生^{1,2}, 许浩¹, 蔡进军^{3,4}, 董立国¹, 郭永忠¹, 安钰¹, 万海霞¹, 王月玲¹

(1.宁夏农林科学院 林业与草地生态研究所 宁夏防沙治沙与水土保持重点实验室

宁夏生态修复与多功能林业综合研究中心, 银川 750002; 2.中国水利水电科学研究院, 北京 100038;

3.宁夏农林科学院 农业资源与环境研究所, 银川 750002; 4.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的]探讨立地因子和植被盖度对小流域玉米土壤水分空间变异的影响, 可为流域植被种植结构优化调整和作物合理空间布局提供理论基础。 [方法]以宁夏南部黄土丘陵区中庄小流域旱地玉米为对象, 在2021年生长季中期采用土钻法获取200 cm深的土壤含水量, 并分析了坡向、坡位、盖度对土壤水分的影响。 [结果]小流域玉米土壤含水量平均为11.93%, 其中, 川地土壤含水量平均为13.97%, 显著高于梯田。小流域玉米盖度平均为0.39, 川地盖度为0.45, 显著高于梯田; 在梯田玉米中, 阳坡盖度显著高于阴坡, 下坡位显著高于上坡位; 随盖度增加, 川地玉米土壤水分呈降低或先下降后稳定的变化, 梯田阴坡上坡位呈升高趋势, 阳坡上坡位呈降低趋势, 其他坡位变化不明显。阴坡土壤水分高于阳坡, 上坡位高于下坡位, 两者间差异不显著; 当盖度为0~0.3, 0.3~0.6时, 上坡位土壤水分高于下坡位, 盖度为0.6~0.9时, 下坡位高于上坡位。随土层加深, 小流域、川地、梯田、不同盖度、不同立地土壤水分大致均呈先微弱变化、再迅速升高、后逐渐稳定, 且大多数均属中等变异性。 [结论]中庄小流域旱地玉米土壤水分空间变异明显, 且盖度、坡向、坡位对土壤水分影响较大, 未来应加强不同生育期玉米土壤水分的监测研究。

关键词: 土壤水分; 立地因子; 植被盖度; 玉米; 黄土区

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0112-11

Effects of Site Factor and Coverage on Soil Moisture of Maize Field in Zhongzhuang Small Watershed in the Loess Area of Southern Ningxia

Han Xinsheng^{1,2}, Xu Hao¹, Cai Jinjun^{3,4}, Dong Ligu¹,

Guo Yongzhong¹, An Yu¹, Wan Haixia¹, Wang Yueling¹

(1. Research Center for Ecological Restoration and Multi-Functional Forestry of Ningxia,

Ningxia Key Laboratory of Desertification Control and Soil and Water Conservation, Institute of

Forestry and Grassland Ecology, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002,

China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry, Yinchuan 750002, China;

4. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] Exploring the effects of site factors and vegetation coverage on the spatial variability of soil moisture of maize field in small watershed can provide a theoretical basis for the optimization and adjustment of vegetation planting structure and reasonable spatial layout of crops in the watershed. [Methods] The dryland maize in the Zhongzhuang small watershed in the loess hilly area in southern Ningxia was taken as

收稿日期: 2022-10-17

修回日期: 2022-10-31

资助项目: 宁夏农业高质量发展和生态保护科技创新示范课题(NGSB-2021-11-06, NGSB-2021-14-01, NGSB-2021-14-02); 宁夏重点研发计划“引才专项”(2022YCX0054); 宁夏重点研发计划(2020BCF01001, 2021BEG03017)

第一作者: 韩新生(1988—), 男, 河南博爱人, 博士, 副研究员, 主要从事生态水文研究。E-mail: hanxinsheng123@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

the object, and the soil water content at a depth of 200 cm was obtained by soil drilling method in the middle of the growing season in 2021. The influence of slope aspect, slope position and cover on soil water content was analyzed. [Results] The average soil water content of corn field in small watersheds was 11.93%, and the average soil water content in plat fields was 13.97%, which was significantly higher than that of terraced fields. The average coverage of maize in small watersheds was 0.39, and the coverage in plat fields was 0.45, which was significantly higher than that of terraced fields. In corn terrace, the coverage of sunny slopes was significantly higher than that of shady slopes, and the coverage of downslopes was significantly higher than that of upslopes. As the coverage increased, the soil moisture of maize plat fields decreased or first decreased and then stabilized. The soil moisture of upslope of terraced shady slopes showed an increasing trend, the soil moisture of upslope of sunny slopes showed a decreasing trend, and soil moisture of the other slopes did not change significantly. The soil moisture of the shady slope was higher than that of the sunny slope, and the soil moisture of upper slope was higher than the downward slope, and the difference between them was not significant. When the coverage was 0~0.3 and 0.3~0.6, the soil moisture in the upslope was higher than that the downslope, and when the coverage was 0.6~0.9, the downslope was higher than the upslope. With the deepening of the soil layer, the soil moisture in small watersheds, flat fields, terraced fields, different coverage and different sites generally showed weak changes at first, then increased rapidly, and then gradually stabilized, and most of them were of moderate variability. [Conclusion] The spatial variation of soil moisture in dryland maize in Zhongzhuang small watershed is obvious, and the coverage, slope aspect and slope position have great influence on soil moisture. In the future, the monitoring of soil moisture in maize field at different growth stages should be strengthened.

Keywords: soil moisture; site factor; vegetation coverage; maize; loess region

土壤水分是植被生长与分布的主要作用因子之一,易受气候、地形、植被、土壤和人类活动等因素影响^[1],具有明显的时空差异。西北半干旱区年降雨量为 300~550 mm,属典型的雨养农业区,旱地作物的空间配置、经济产量受土壤水分的调控与制约。另外,土壤水分还是土壤-植被-大气连续体中水循环的重要一环,能够调控陆地表面与大气之间的相互作用过程,进而影响陆地生态系统水文、生物化学等过程,全面了解和深入刻画旱地作物土壤水分变化特征,为旱作区作物种植模式构建及合理空间规划提供科技支撑。

玉米(*Zea mays*)是全球种植面积最广的粮食和饲料作物之一,在三大粮食作物(玉米、小麦和水稻)中产量最高。中国是第二大玉米生产国,其玉米产量占全球总产量的 20%,在保障粮食安全、饲料供给、国民经济发展中起着不可替代的作用。同时,玉米也是需水量较多和耗水量较高的作物,我国 2/3 的玉米在旱地上种植,土壤水分是影响旱地玉米生长及产量的主要因素之一,严重干旱可导致玉米大幅减产甚至绝收。以往研究主要集中于多种措施对玉米土壤水分及生长、产量的影响^[2-3],对自然状态下分析玉米土壤水分特征的报道较少。刘继龙等^[4]在东北黑土区、姚小英等^[5]在西北黄土旱塬区利用地统计学等方法

分析样地尺度玉米土壤水分时空变异性;王敏政等^[6]利用地面遥感信息和气温估算了玉米土壤水分;孙宁霞等^[7]采用同位素示踪技术研究了玉米土壤水分的动态变化。上述报道主要针对单一站点或样地尺度玉米土壤水分开展研究,对流域尺度上玉米土壤水分变化及对主要因子的响应研究还鲜有报道,未能充分认识玉米土壤水分在流域尺度上的空间差异。基于此,本文以宁夏南部黄土区中庄小流域旱地玉米为研究对象,采用经典方法阐述小流域玉米土壤水分的空间变异特征,分析植被盖度及立地因子对各土层水分条件的影响,为旱作区种植结构调整、保障粮食安全及实施乡村振兴战略提供理论基础。

1 研究区概况

研究区位于宁夏南部边缘、六盘山东麓的固原市彭阳县(106°32'—106°58'E, 35°41'—36°17'N),海拔区间为 1 248~2 418 m。属于典型的温带半干旱大陆性季风气候,冬季干燥寒冷,夏季潮湿炎热;年平均气温 7.4~8.5℃,≥10℃年积温 2 500~2 800℃,无霜期 140~170 d;年降水量 350~550 mm,主要集中于 6—9 月份;年均蒸发量 1 360 mm;土壤以黑垆土和黄绵土为主,侵蚀较为严重。为控制水土流失和改

善生态环境,2000年前后在县域范围内开展坡改梯和水平沟整地、退耕还林还草等生态修复工程。现如今,分布的主要林木有山杏(*Armeniaca sibirica*)、山桃(*Amygdalus davidiana*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等;草本植被由委陵菜(*Potentilla chinensis*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、本氏针茅(*Stipa capillata*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、茭蒿(*Incarvillea sinensis*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)等群落构成;种植的作物主要有玉米、苜蓿(*Medicago sativa*)、马铃薯(*Solanum tuberosum*)等。

2 研究方法

2.1 流域选择和取样点位布设

中庄小流域位于彭阳县中部,属于黄土区,面积为88.38 km²,最高海拔为1 858 m,最低海拔为1 410 m,小流域内作物种植以玉米(铺设地膜)为主,种植密度约为75 000株/hm²。2021年7月3日—24日(共22 d),在中庄小流域共设置276个玉米(抽雄期)土壤水分测定点位(图1),每个点位均在玉米地的中间位置,同时,调查各点位的经纬度、海拔、坡向、坡位、盖度等指标,以取样点位中心,设置100 m²的临时样地,利用对角线法确定玉米取样点的盖度。取样期间总降水量为23.4 mm,其中仅有1日的降水量大于5 mm,因此,降水对土壤水分的影响极其微弱。

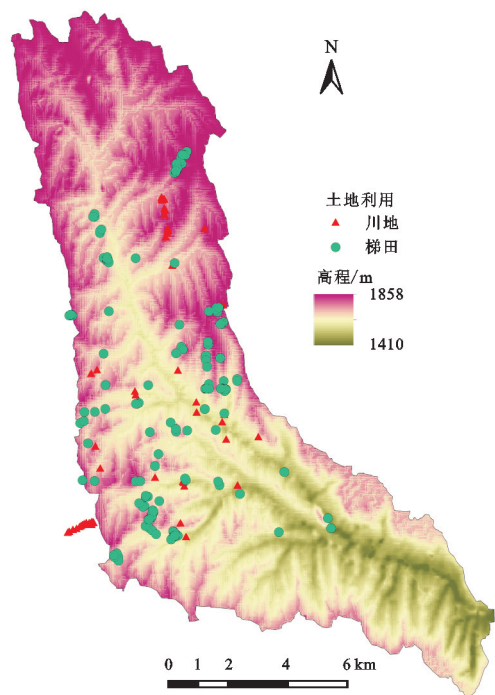


图1 小流域玉米土壤水分取样点位示意图

Fig. 1 The corn soil moisture sampling point diagram in small watershed

2.2 立地类型划分

中庄小流域基本无坡耕地,将各取样点位整体划分为川地和梯田。梯田依据坡向划分为阴坡(0°~90°和270°~360°)和阳坡(90°~270°),按照梯田的相对海拔高差划分为上坡位和下坡位。

2.3 土壤水分测定

依据各立地条件玉米的种植面积决定采样点数量,川地的取样点为64个,梯田的取样点位212个(其中,阴坡上坡位40个,阴坡下坡位74个,阳坡上坡位14个,阳坡下坡位84个)。利用土钻在各样点分层采集土壤样品,取样层次包括0—20,20—40,40—60,60—80,80—100,100—120,120—140,140—160,160—180,180—200 cm,共10个层次,采集的样品分别放入到铝盒中,带回实验室称湿重,然后在烘箱内烘24 h称干土重,将干土倒掉后称铝盒重,计算不同点位各土层的土壤含水量。中庄小流域及各立地类型的土壤含水量是由各调查样点的算术平均值计算得出。

2.4 数据处理

变异系数可反映数据的离散程度,根据变异系数大小划分为强变异性(变异系数>30%)、中等变异性(30%≤变异系数≤10%)和弱变异性(变异系数<10%)。采用SPSS 21.0软件的单因素方差分析(LSD)比较土壤水分的差异显著性($p<0.05$)。使用Excel 2016和Origin 2021进行数据分析和作图,图中的误差棒指的是标准差(SD)。

3 结果与分析

3.1 小流域玉米土壤水分变化

随土层深度增加(图2),中庄小流域、川地、梯田玉米土壤水分整体均呈稳定(0—60 cm)—增加(60—140 cm)—稳定(140—200 cm)的变化;小流域土壤水分的变异系数基本表现为先降低后升高的趋势(图3),川地呈先升—后降—再升的变化,梯田大致呈降低的趋势;土壤水分变异性总体表现为浅层(0—100 cm)大于深层(100—200 cm),三者不同土层均属中等变异性。0—200 cm土层中庄小流域玉米土壤含水量平均为11.93%,川地(13.91%)土壤水分显著($p<0.05$)高于梯田(11.37%)。从各土层平均值的极差看,川地(6.50%)最大,小流域(4.25%)次之,梯田(3.84%)最小。

3.2 盖度对玉米土壤水分的影响

中庄小流域玉米盖度平均为0.39(图4),川地(0.45)盖度显著($p<0.05$)高于梯田(0.37)。梯田阴坡上坡位、阴坡下坡位、阳坡上坡位、阳坡下坡位玉米

的平均盖度分别为 0.24,0.34,0.38,0.46(图 5);阳坡上坡位盖度与阴(阳)坡下坡位差异不显著($p>0.05$),其余立地类型间差异显著($p<0.05$);阳坡(下坡位)盖度显著($p<0.05$)高于阴坡(上坡位)。

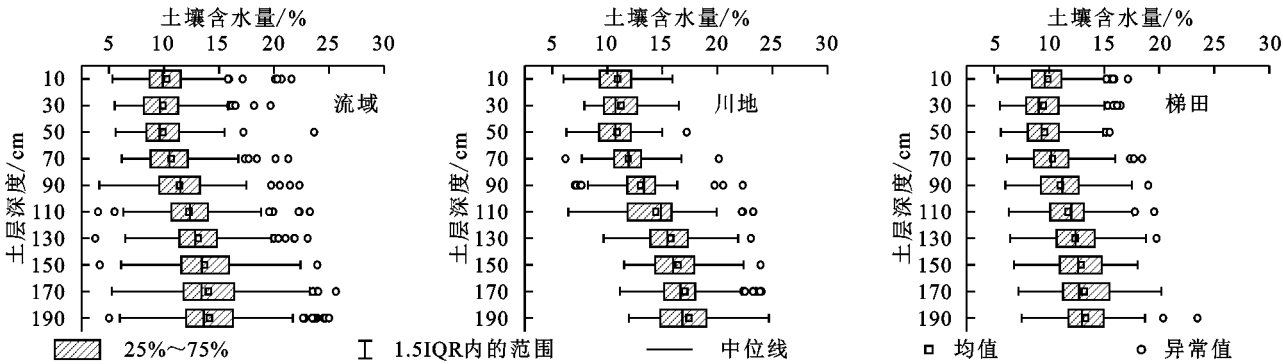


图 2 小流域玉米土壤水分随土层深度的变化

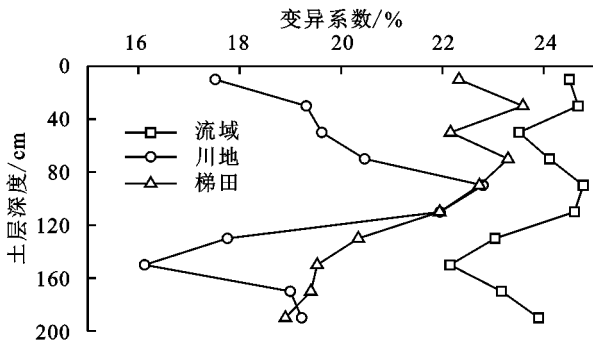


图 3 小流域玉米土壤水分变异系数随土层深度的变化

川地玉米土壤水分除受盖度影响外,还与微气象、本底土壤性质等密切相关,因此对盖度的响应关系较差。为简化分析,将所有点按盖度大小分为

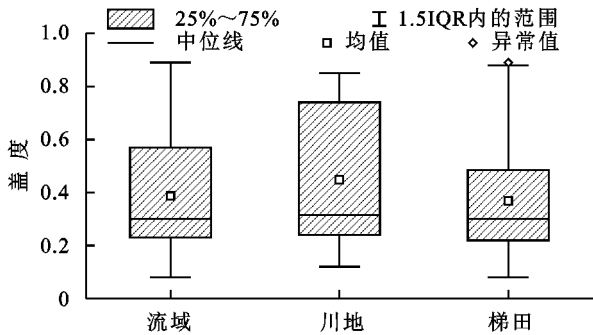


图 4 小流域玉米盖度的变化

为了更深入地分析梯田玉米盖度对土壤水分的影响,且尽可能排除立地因子的干扰,将立地因子划分为阴坡上坡位、阴坡下坡位、阳坡上坡位、阳坡下坡位 4 个。首先,分析阴坡上坡位盖度对土壤水分的影响(图 9),整体来说,不同土层两者间均呈正效应,拟合精度范围 0.007 3~0.29,拟合效果相对较差。

随盖度增大(图 10),阴坡下坡位 40—60 cm,

5 段($<0.21, 0.21\sim0.40, 0.41\sim0.60, 0.61\sim0.80, >0.80$),分别计算每组盖度与土壤水分均值,并分析两者关系(图 6)。0—100 cm 土层,土壤水分随盖度增加呈线性降低的变化,拟合精度(R^2)范围为 0.24~0.55;当盖度增大到 0.2(100—160 cm)或 0.4(160—200 cm)时土壤含水量降低,之后趋于稳定。

将梯田玉米盖度划分为 3 个等级(0~0.3,0.3~0.6,0.6~0.9),不同盖度土壤水分随土层深度增加大致呈不完整的“S”型(图 7)。从 0—200 cm 土层均值看,盖度为 0.3~0.6 最大(11.45%),盖度为 0~0.3 次之(11.38%),盖度为 0.6~0.9 最小(11.21%),三者间差异不显著($p>0.05$)。不同盖度土壤水分变异系数大致表现为浅层(0—100 cm)大于深层(100—200 cm)(图 8),且均属于中等变异性。

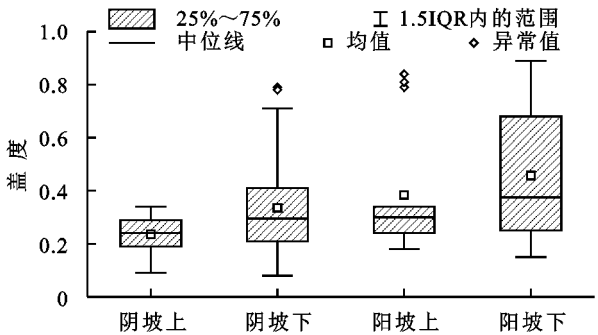


图 5 梯田各立地条件玉米盖度的变化

140—200 cm 土层水分条件呈不明显的降低,其余土层呈不明显的升高,拟合精度范围 $2.37\times10^{-6}\sim0.024$,拟合效果极差。

阳坡上坡位玉米盖度与土壤水分的关系呈现出和阴坡上坡位相反的规律(图 11),随盖度增加,各层次土壤水分均表现不同程度的下降趋势,且拟合精度(0.12~0.64)较高,关系更为紧密。

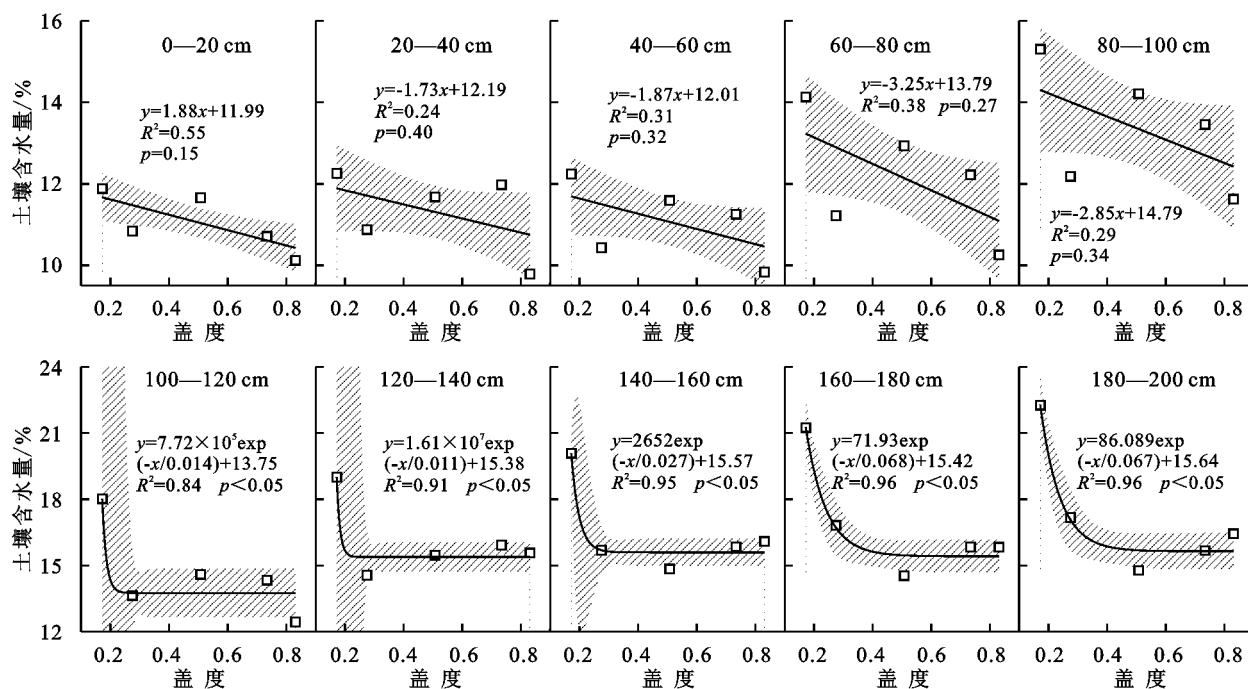


图6 川地玉米盖度对土壤水分的影响

Fig. 6 Effect of corn coverage on soil moisture in plat fields

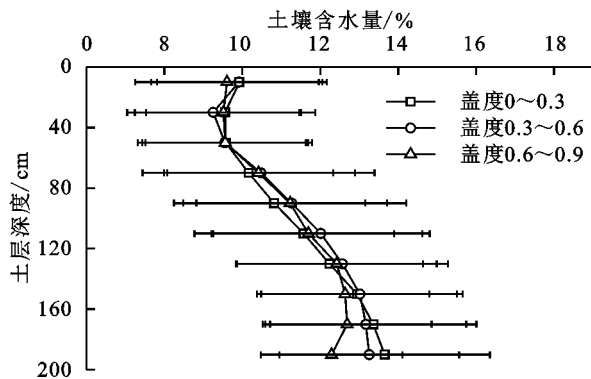


图7 梯田玉米盖度对土壤水分的影响

Fig. 7 Effect of corn coverage on soil moisture in terraced fields

阳坡下坡位 40—180 cm 土层含水量随盖度增加呈不明显升高趋势(图 12),其余土层呈不明显的降低,盖度与土壤水分拟合效果极差(拟合精度为 0.001 0~0.053)。

3.3 坡向和坡位对梯田玉米土壤水分的影响

梯田 4 个立地条件土壤水分随土层深度增加均呈先微弱降低后升高(先快后慢升高)的变化(图 13)。从 0—200 cm 土层水分条件均值来说,阴坡(11.62%)略高于阳坡(11.07%),上坡位(11.76%)略高于下坡位(11.23%),坡向和坡位间差异均不显著($p > 0.05$)。随土层深度增加,坡向和坡位间土壤水分的差异逐渐增大。各坡向和坡位土壤水分的变异系数基本表现为浅层(0—100 cm)大于深层(100—200 cm)(图 14),且均属于中等变异性。

为减弱玉米盖度对土壤水分的影响,分析立地因

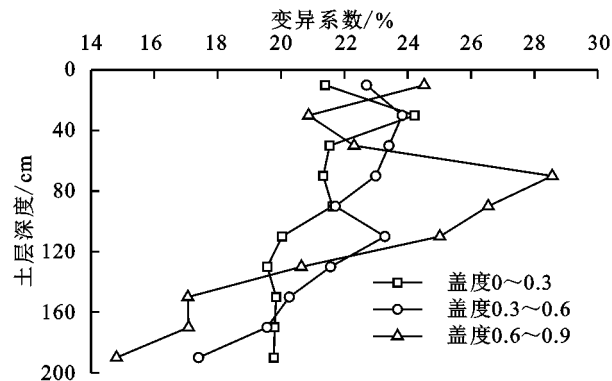


图8 梯田不同盖度玉米土壤水分变异系数

Fig. 8 The variation coefficient of soil moisture of maize with coverage in terraced fields

子对土壤水分的影响时,将玉米盖度划分为 3 个等级(0~0.3, 0.3~0.6, 0.6~0.9)。总体来看,随土层加深,同一盖度等级玉米土壤水分均表现为不同程度的增加趋势(图 15)。当盖度为 0~0.3 时,不同立地条件土壤水分均值的大小顺序为阳坡上(12.46%)>阴坡上(11.63%)>阴坡下(11.59%)>阳坡下(10.58%),阳坡上显著($p < 0.05$)高于阳坡下,其余立地因子间差异均不显著($p > 0.05$)。当盖度为 0.3~0.6 时,不同立地条件土壤水分均值的大小顺序为阴坡上(12.82%)>阳坡上(12.59%)>阴坡下(11.35%)>阳坡下(11.06%),各立地因子间差异均不显著($p > 0.05$)。当盖度为 0.6~0.9 时,不同立地条件土壤水分均值的大小顺序为阴坡下(11.72%)>阳坡下(11.37%)>阳坡上(8.55%),阳坡上坡位显著($p < 0.05$)低于其他立地因子,阴坡和阳坡下坡位差异不显著($p > 0.05$)。

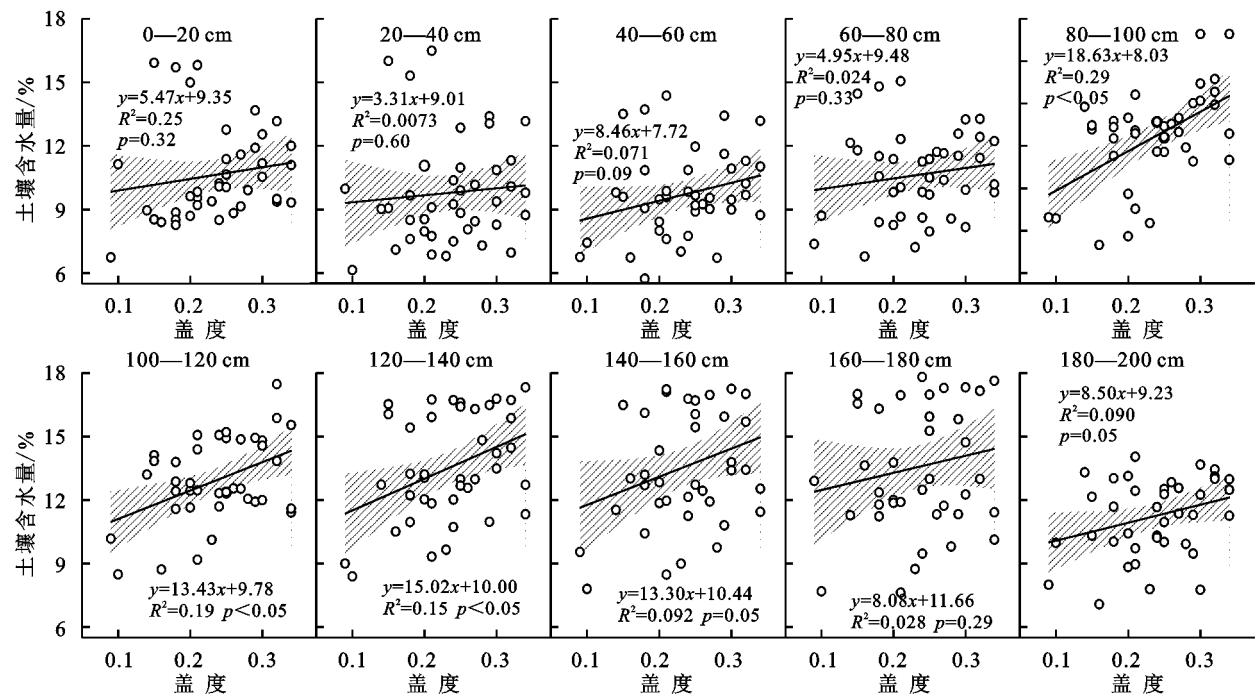


图 9 梯田阴坡上坡位玉米盖度对土壤水分的影响

Fig. 9 Effect of corn coverage on soil moisture at upslope of shady slope in terraced fields

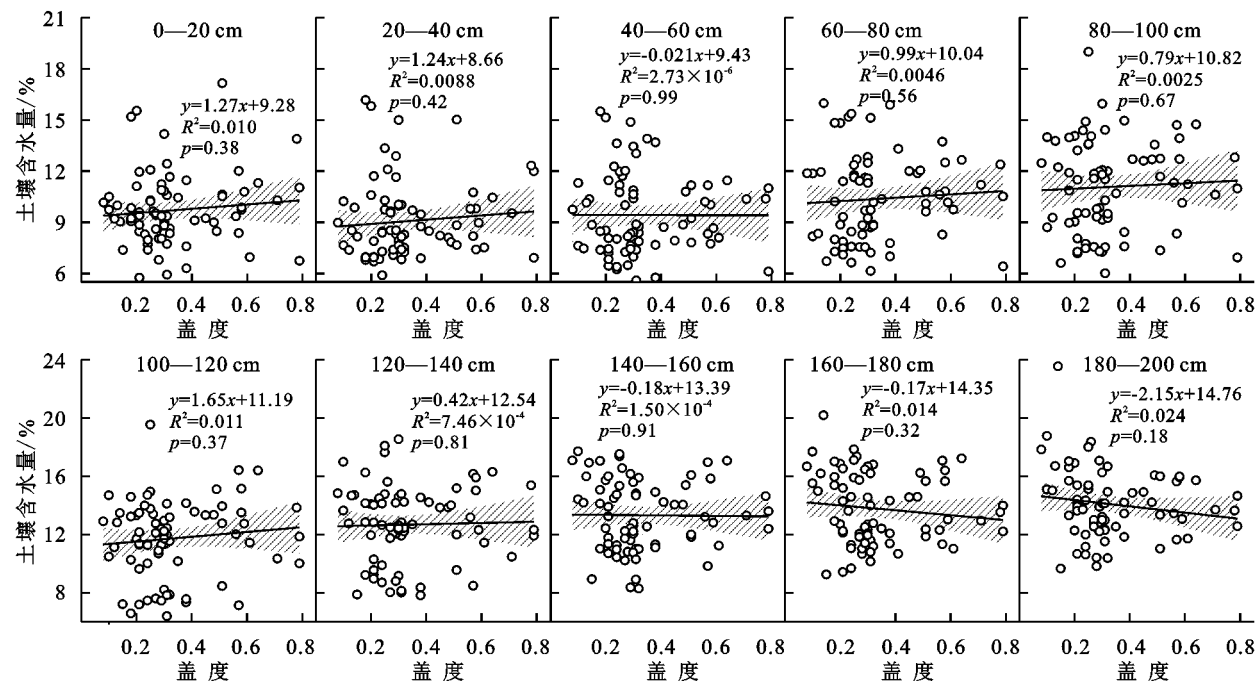


图 10 梯田阴坡下坡位玉米盖度对土壤水分的影响

Fig. 10 Effect of corn coverage on soil moisture at downslope of shady slope in terraced fields

从变异系数看(图 16),盖度为 0~0.3 的阳坡下坡位、盖度为 0.3~0.6 的阴坡上坡位大致表现为深层(100—200 cm)土壤水分变异系数大于浅层(0—100 cm),其余基本变现为浅层(0—100 cm)变异系数大于深层(100—200 cm);盖度为 0.3~0.6 的阳坡上坡位 20—40 cm 土壤含水量为强变异性,盖度为 0~0.3 的阳坡上坡位 100—120,140—160 cm 土层、盖度为 0.3~0.6 的阴坡上坡位 80—100 cm 土层和阳

坡上坡位(60—80,120—200 cm 土层)、盖度为 0.6~0.9 阴坡下坡位 180—200 cm 和阳坡上坡位 0—200 cm 土壤水分属弱变异性,其余均为中等变异性。

4 讨论

4.1 小流域土壤水分变异

土壤水分受植被特征、立地环境、土壤结构、气象要素、地形条件、人为活动等因子影响,且各因子间存在交

相互作用^[8]。在黄土区,降雨入渗、土壤蒸散、植被蒸腾等水文过程复杂导致剖面土壤水分存在明显变异性,本研究发现,土壤水分随土层加深呈先稳定—再增加—后稳定的变化,这与研究年份降水季节分布不均密切相关(4月、5月、6月、7月、8月、9月、10月的降水量分别为46.6,50.8,30.8,29.6,75.8,176.6,110.2 mm),6月和7月份降水量少,而玉米生长和土壤蒸发消耗的土壤水分多,导致7月份浅层(0—100 cm)的土壤水分含量低于深层(100—200 cm)。有学者在相同地区发现与本研究相

反的土壤水分变化^[9],主要是由取样时段(9月底)不同引起的;程凉等^[10]在旱季发现与本研究相同的规律,主要是因太阳辐射较强和地表覆盖度较低造成的。小流域玉米土壤水分变异性总体表现为0—100 cm土层大于100—200 cm土层,是因气温、太阳辐射等气象因子对表层土壤影响强,且随土层加深影响逐渐减弱。本研究显示川地玉米土壤水分显著高于梯田,主要是因川地地形平坦且位于海拔相对较低的区域,受微气象、地形等多因子共同影响,水分含量相比梯田较高。

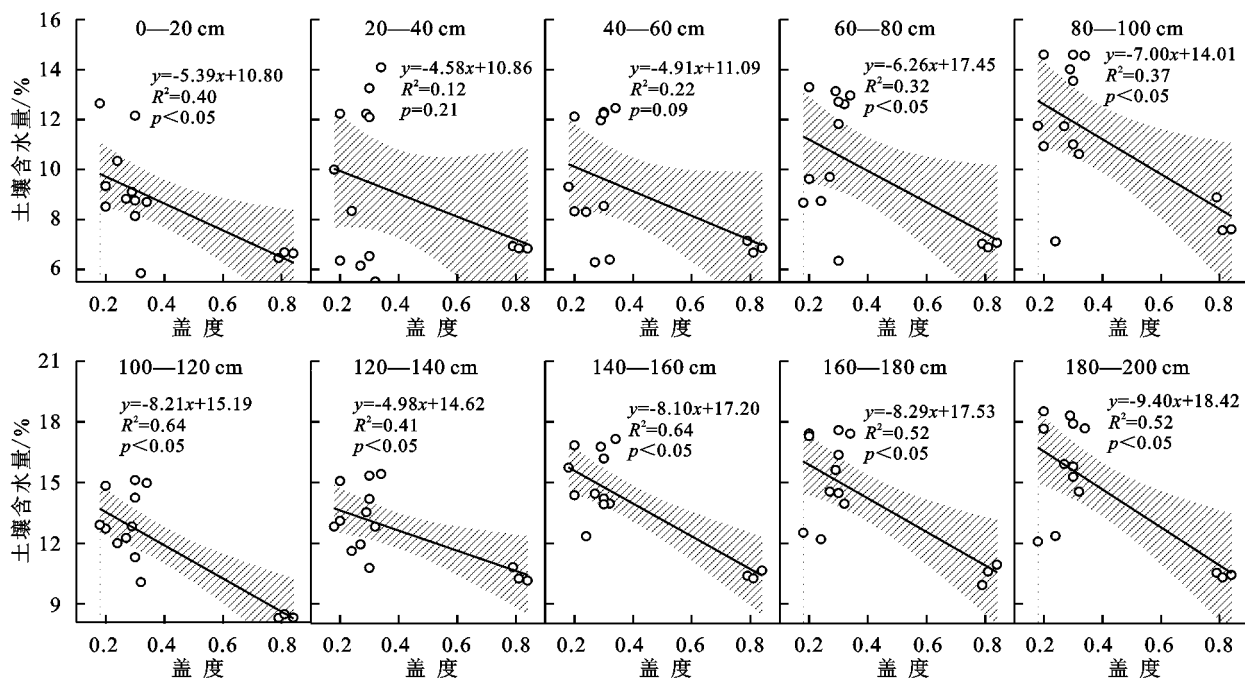


图 11 梯田阳坡上坡位玉米盖度对土壤水分的影响

Fig. 11 Effect of corn coverage on soil moisture at upslope of sunny slope in terraced fields

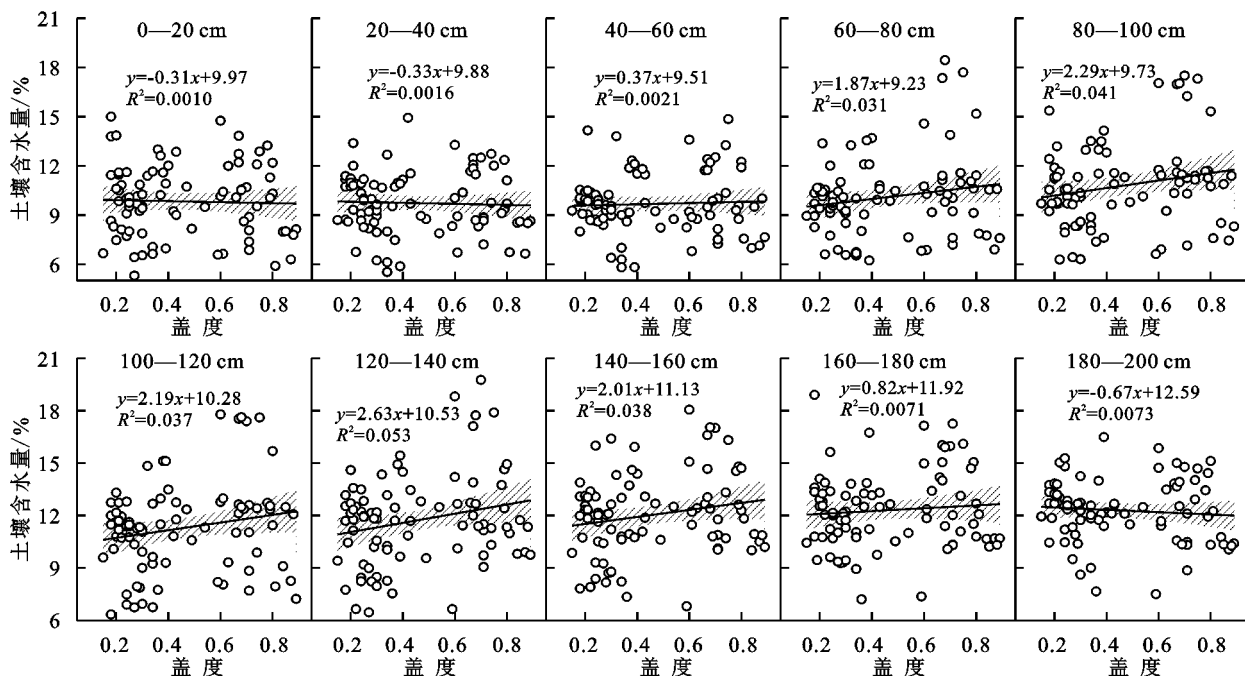


图 12 梯田阳坡下坡位玉米盖度对土壤水分的影响

Fig. 12 Effect of corn coverage on soil moisture at downslope of sunny slope in terraced fields

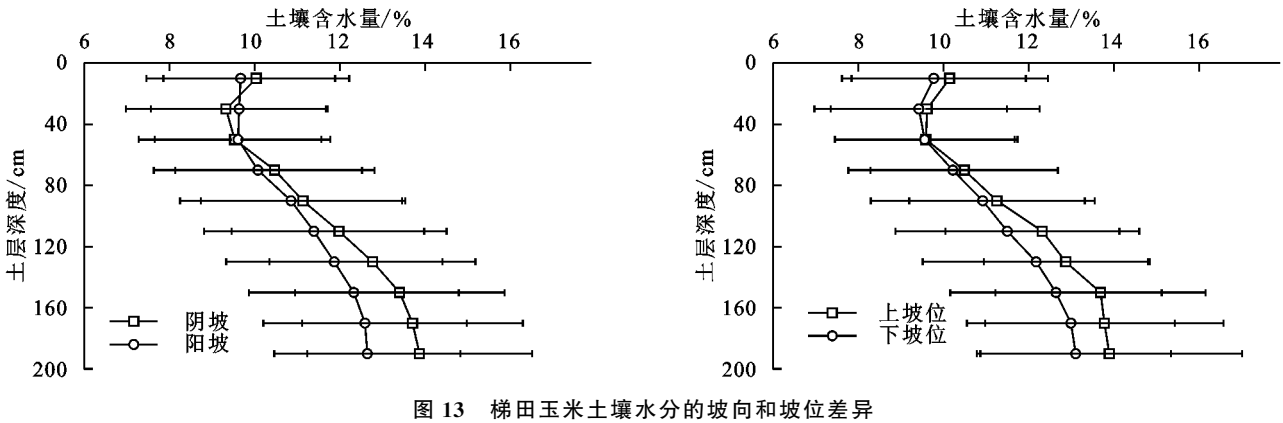


图 13 梯田玉米土壤水分的坡向和坡位差异

Fig. 13 The variation of slope aspect and slope position of corn soil moisture in terraced fields

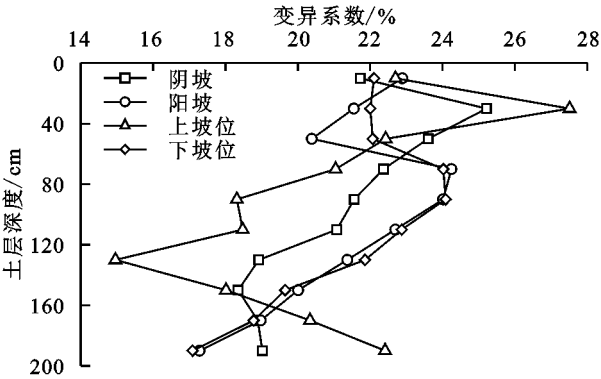


图 14 梯田不同立地玉米土壤水分的变异系数

Fig. 14 The variation coefficient of soil moisture of maize under different site in terraced fields

4.2 植被盖度变化及对土壤水分的影响

研究发现,川地玉米盖度显著高于梯田,与川地的土壤水分高于(植被生长优于)梯田有关,郭艳菊等^[11]在宁夏东部风沙区研究表明,植被盖度与各层次土壤水分呈(极)显著正相关,主要因土壤水分是限制干旱区植被

生长的重要因子;陆丰帅等^[12]在祁连山高寒草原发现,随土壤水分增加,植被盖度呈反比例函数递增趋势,可能是因土壤水分供给使植被地上部分具有一定的膨压,上述结果与本研究结论相似。中庄小流域梯田玉米不同立地环境盖度的大小顺序为阳坡下坡位>阳坡上坡位>阴坡下坡位>阴坡上坡位,可能与阳坡的气温、太阳辐射等气象因子较高、下坡位土壤水分含量较高等有关;马扎雅泰等^[13]分析显示不同立地类型梭梭(*Haloxyylon ammodendron*)人工林盖度存在显著差异,这与不同立地类型的质量等级相一致;有学者发现坡度是影响植被覆盖度的主要因子^[14];王采娥等^[15]研究三江源高寒坡地退化植物发现上坡位植被盖度显著大于下坡位,主要是因下坡位家畜践踏和啃食频繁等人类活动较多导致的,与本研究结论相反;还有研究者发现半阴坡的植被盖度高于半阳坡^[16],主要是因半阴坡光照时间相对较短,土壤水分较高且分布均匀,更适合植被生长。

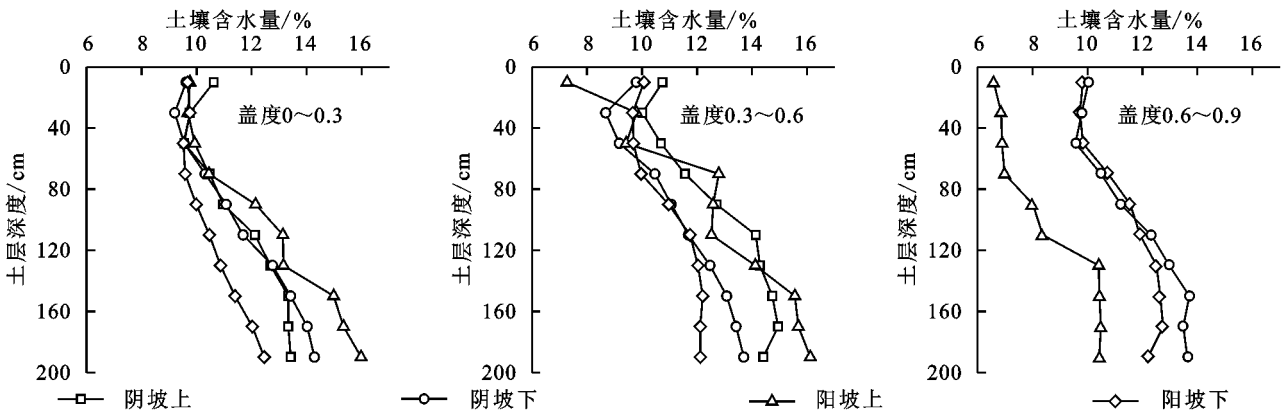


图 15 梯田同一等级盖度玉米土壤水分对坡向和坡位的响应

Fig. 15 Responses of soil moisture on slope aspect and slope position of maize with the same coverage in terraced fields

植被盖度影响土壤的遮阴情况、植被的蒸散发特征等,进而对土壤水分变化起作用。研究显示,川地玉米土壤水分随盖度增加呈线性降低(0—100 cm 土层)或先降低后稳定(100—200 cm 土层)的变化,主要是因玉米盖度高、生长好导致消耗的土壤水分较

多,可能也与随土层加深,玉米根系的吸水能力逐渐减弱、对土壤水分的影响逐渐减小有关。梯田不同玉米盖度(0~0.3,0.3~0.6,0.6~0.9)对土壤水分的影响微弱,可能是因立地环境的差异减弱了盖度的作用。为排除立地因子干扰,分析梯田 4 个立地因子玉

米盖度对土壤水分的作用,阴坡下坡位和阳坡下坡位玉米盖度对土壤水分的影响较弱,斜率范围分别为 $-2.15 \sim 1.65$ 和 $-0.67 \sim 2.63$;阴坡上坡位和阳坡上坡位盖度对土壤水分的影响相对较强,斜率范围分别为 $3.31 \sim 18.63$ 和 $-9.40 \sim -4.58$,可能与上坡位土壤水分较高、植被生长较差等有关。随盖度增加,梯田阴坡上坡位土壤水分呈增加趋势,阳坡上坡位呈减小变化,这可能与阴坡上坡位玉米盖度分布在较小的范围内(集中于 $0.1 \sim 0.3$)、阳坡上坡位玉米盖度分布范围较大(集中于 $0.2 \sim 0.8$)等有关,在一定较小的盖度范围内,植被盖度增加,能增加土壤遮阴面积,减少土壤蒸发,当植被盖度过大时,植被增加消耗的土壤

水分大于减小的土壤蒸发量,导致土壤水分降低。有学者分析显示,随植被盖度增大, $0 \sim 60$ cm($60 \sim 200$ cm)的土壤水分逐渐增加(减小)^[9],可能与植被盖度增大降低地表蒸发且同时对深层土壤水分需求逐渐增加等有关;还有研究得出,植被盖度与土壤水分之间呈正效应^[11,17]或负效应^[18],前者是因土壤水分高时植被生长较好,后者是因土壤水分主要用于植被的生长发育消耗,植被盖度越高,土壤水分越少;再有报道发现随植被盖度增加,土壤水分呈倒“V”型^[19]。因气候带、土壤特性、植被类型等存在差异,同时,植被盖度和土壤水分的影响因子较多且复杂,导致植被盖度与土壤水分的关系形式多样且差别较大。

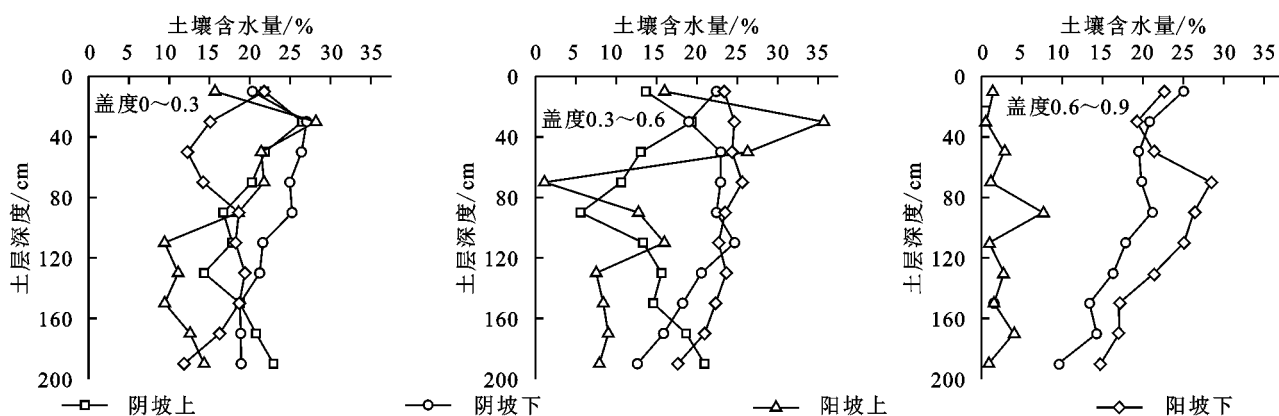


图 16 梯田同一等级盖度不同立地玉米土壤水分的变异系数

Fig. 16 The variation coefficient of corn soil moisture in different sites with the same coverage in terraced fields

4.3 立地因子对土壤水分的影响

立地因子影响微气象、植被生境、降雨的下渗、径流等,进而造成土壤水分差异,且相关研究^[8]认为,土壤水分较低的区域,立地环境的影响作用更为显著。宁南黄土区中庄小流域梯田玉米土壤水分的立地条件差异总体表现为,阴坡高于阳坡,上坡位高于下坡位,主要是因阳坡的气温、太阳辐射等与蒸散能力相关的气象要素均高于阴坡,导致阳坡的土壤水分消耗量高于阴坡,这与黄土高原其他区域的研究结论^[20-21]相同。研究区梯田上坡位玉米生长较差、盖度较低,玉米生长消耗的土壤水分较少,是导致上坡位玉米土壤水分高于下坡位的主要原因,白一茹^[22]和沈晗悦^[23]等均发现了相同的结论,前者是因上坡位土壤结构好于下坡位、土壤水力学性质空间差异等,后者是因坡面整地后,水平台阶阻断了地表径流和壤中流由上至下运移等。相似区域大多研究均显示,下坡位土壤水分高于上坡位^[24-25],与土壤水分坡面产流汇流、局地微气象、土壤结构、植被特征等因子密切相关。为减小植被生长的干扰,分析了相似玉米盖度时土壤水分的坡位差异,当盖度为 $0 \sim 0.3$, $0.3 \sim 0.6$ 时,

上坡位高于下坡位,当盖度为 $0.6 \sim 0.9$ 时,下坡位高于上坡位,可能与不同玉米盖度对降雨再分配特征、局地微气象变化等的影响有关。

本研究取样时间为生长季中期的7月份,能较好地体现小流域玉米土壤水分空间变异及对立地因子和盖度的响应,如在生长季前期或末期取样,不能很好地体现玉米生长对土壤水分的影响。受取样时间和数量限制,仅采集了一个年份生长季中期的土壤水分,未来研究中,应增加取样的年份、次数、数量等,分析不同年份(丰水年、平水年、枯水年)、不同生长时段(不同月份)玉米土壤水分空间特征,为流域尺度上作物种植结构优化调整提供理论基础。

5 结论

小流域200 cm深的土壤含水量平均为11.93%,川地为13.91%,显著高于梯田(11.37%);土壤水分随土层加深整体表现为先稳定($0 \sim 60$ cm)、再增加($60 \sim 140$ cm)、后稳定($140 \sim 200$ cm)的变化,浅层($0 \sim 100$ cm)土壤水分的变异性高于深层($100 \sim 200$ cm),均属中等变异性。随盖度增加,川地玉米土壤水分呈线性降低或先下降后稳定的变化,梯田阴坡上

坡位呈线性升高的趋势,阳坡上坡位呈逐渐减小的变化,阴坡和阳坡下坡位变化微弱。整体来看,阴坡(上坡位)土壤水分高于阳坡(下坡位),差异均不显著;而当盖度为0~0.3,0.3~0.6时,上坡位土壤水分高于下坡位,当盖度为0.6~0.9时,下坡位高于上坡位。

参考文献:

- [1] Jia Y H, Shao M A. Dynamics of deep soil moisture in response to vegetational restoration on the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 523-531.
- [2] 张丽华,徐晨,于江,等.半湿润区秸秆还田对土壤水分、温度及玉米产量的影响[J].*水土保持学报*, 2021, 35(4): 299-306.
Zhang L H, Xu C, Yu J, et al. Effects of straw returning on soil moisture, temperature and maize yield in semi humid area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4): 299-306.
- [3] 庞津雯,王钰皓,刘畅,等.不同施肥量对旱作沟垄集雨种植农田土壤水分及玉米产量的影响[J].*植物营养与肥料学报*, 2021, 27(5): 826-836.
Pang J W, Wang Y H, Liu C, et al. Effects of fertilization on soil moisture and maize yield in rainfed farmland with ridge mulching-furrow planting system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(5): 826-836.
- [4] 刘继龙,任高奇,付强,等.黑土区玉米地土壤水分的时空变异性研究[J].*应用基础与工程科学学报*, 2016, 24(6): 1087-1099.
Liu J L, Ren G Q, Fu Q, et al. Spatial and temporal variability of soil moisture of corn field in black soil region[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2016, 24(6): 1087-1099.
- [5] 姚小英,王莺,王兴,等.黄土高原旱塬区玉米田土壤水分变化特征及对产量的影响[J].*江苏农业科学*, 2020, 48(12): 292-297.
Yao X Y, Wang Y, Wang X, et al. Characteristics of soil moisture change and its effect on yield of maize field in dryland of Loess Plateau[J]. *Jiangsu Agricultural sciences*, 2020, 48(12): 292-297.
- [6] 王敏政,周广胜.基于地面遥感信息与气温的夏玉米土壤水分估算方法[J].*应用生态学报*, 2016, 27(6): 1804-1810.
Wang M Z, Zhou G S. Soil moisture estimation method based on both ground-based remote sensing data and air temperature in a summer maize ecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(6): 1804-1810.
- [7] 孙宁霞,马英,胡晓农,等.基于同位素示踪的夏玉米土壤水分动态变化规律[J].*灌溉排水学报*, 2014, 33(4/5): 256-260.
Sun N X, Ma Y, Hu X N, et al. Soil moisture dynamic variation law of summer maize based on isotopic tracing[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(4/5): 256-260.
- [8] 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.
- [9] 韩新生,于艺鹏,蔡进军,等.宁南黄土丘陵区中庄小流域土壤水分空间变异及影响因子[J].*中国水土保持科学*, 2022, 20(3): 44-52.
Han X S, Yu Y P, Cai J J, et al. Spatial variability of soil moisture in Zhongzhuang small watershed, loess hilly region, southern Ningxia and influencing factors[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, 20(3): 44-52.
- [10] 程凉,焦雄,邸涵悦,等.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 L, Jiao X, Di H Y, et al. Spatio-temporal distribution of soil moisture on slopes relative to land preparation measure[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(6): 1423-1435.
- [11] 郭艳菊,马晓静,许爱云,等.宁夏东部风沙区沙化草地土壤水分和植被的空间特征[J].*生态学报*, 2022, 42(4): 1571-1581.
Guo Y J, Ma X J, Xu A Y, et al. Spatial characteristics of soil moisture and vegetation in desertification grassland in eastern Ningxia sand-wind area, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(4): 1571-1581.
- [12] 陆丰帅,阿的鲁骥,程云湘,等.祁连山高寒草原土壤水分与植被盖度的关系[J].*草业学报*, 2020, 29(11): 23-32.
Lu F S, Ade L J, Cheng Y X, et al. Relationship between soil moisture and vegetation cover in Qilian Mountain alpine steppe[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(11): 23-32.
- [13] 马扎雅泰,赵晨光,李慧瑛,等.立地类型对干旱沙区梭梭人工林群落特征的影响[J].*防护林科技*, 2022(1): 35-40.
Ma Z Y T, Zhao C G, Li H Y, et al. Effect of site types on community characteristics of *Haloxylon ammodendron* plantation in Alax Desert[J]. *Protection Forest Science and Technology*, 2022, (1): 35-40.
- [14] 王国重,李中原,程焕玲,等.偃师区不同坡度带植被覆盖度分布研究[J].*湖北农业科学*, 2022, 61(5): 106-110.
Wang G Z, Li Z Y, Cheng H L, et al. Study on vegetation coverage distribution of different slope belts in Yanshi District[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2022, 61(5): 106-110.

- [15] 王采娥, 黄梅, 王文银, 等. 三江源区高寒坡地退化植物群落多样性和地上生物量沿海拔梯度的变化特征[J]. 生态学报, 2022, 42(9): 3640-3655.
Wang C E, Huang M, Wang W Y, et al. Variation characteristics of plant community diversity and above-ground biomass in alpine degraded slopes along altitude gradients in the headwaters region of three-river on Tibetan plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(9): 3640-3655.
- [16] 石若莹, 朱清科, 李依璇, 等. 陕北黄土区坡面微地形与群落数量特征的关系[J]. 中国水土保持科学, 2021, 19(3): 1-7.
Shi R Y, Zhu Q K, Li Y B, et al. The relationship between slope micro topography and community quantity characteristics in loess area of North Shaanxi Province[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(3): 1-7.
- [17] 刘乐, 孙宏义, 张建新, 等. 几种工程措施对黄土区陡峭边坡植被盖度的影响及其机理[J]. 干旱区研究, 2019, 36(4): 1041-1048.
Liu L, Sun H Y, Zhang J X, et al. Effect of several engineering measures on vegetation coverage on steep slope in the loess region[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(4): 1041-1048.
- [18] 赵晓雪, 饶良懿, 申震洲. 砒砂岩区不同地形位置土壤物理性质分异特征[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(6): 1359-1368.
Zhao X X, Rao L Y, Shen Z Z. Heterogeneous characteristics of soil physical properties of different terrain locations in the Pisha sandstone area[J]. Chinese Journal of Applied Environment Biology, 2020, 26(6): 1359-1368.
- [19] 王明明, 刘新平, 李玉霖, 等. 不同植被盖度沙质草地生长季土壤水分动态[J]. 中国沙漠, 2019, 39(5): 54-61.
Wang M M, Liu X P, Li Y L, et al. Soil moisture dynamic under different plant coverages in sandy grassland during growing season[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(5): 54-61.
- [20] 邱德勋, 赵佰礼, 尹殿胜, 等. 黄土丘陵沟壑区土壤水分垂直变异及影响因素[J]. 中国水土保持科学, 2021, 19(3): 72-80.
Qiu D X, Zhao B L, Yin D S, et al. Vertical variation of soil moisture in the loess hilly and gully region and its influence factors[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(3): 72-80.
- [21] 徐澜, 王云强, 孙慧, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错带小流域土壤水分季节变化特征与主控因素[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 122-129.
Xu L, Wang Y Q, Sun H, et al. Seasonal changes of soil water content and controlling factors in a small watershed in the Water-wind Erosion Crisscross Region of the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5): 122-129.
- [22] 白一茹, 王幼奇, 王建宇. 黄土高原雨养区坡面土壤水力学性质空间特征及影响因素[J]. 水土保持研究, 2015, 22(4): 168-172, 177.
Bai Y R, Wang Y Q, Wang J Y. Spatial variability of soil hydraulic properties and influence factors on hill slope in rainfed region of the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(4): 168-172, 177.
- [23] 沈晗悦, 信忠保, 王志杰. 北京山区侧柏林坡面土壤水分时空动态及其影响因素[J]. 生态学报, 2021, 41(7): 2676-2686.
Shen H Y, Xin Z B, Wang Z J. Spatial and temporal dynamics of soil moisture and its influencing factors on the slope of *Platycladus orientalis* in Beijing mountain area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(7): 2676-2686.
- [24] 安文明, 韩晓阳, 李宗善, 等. 黄土高原不同植被恢复方式对土壤水分坡面变化的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(13): 4852-4860.
An W M, Han X Y, Li Z S, et al. Effects of different vegetation restoration types on the slope difference of soil water content in the Loess Plateau, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13): 4852-4860.
- [25] 单玉琳, 解建仓, 韩霁昌, 等. 黄土高原坡面土壤水分特征及时间稳定性: 以延安市九龙泉沟为例[J]. 中国水土保持科学, 2021, 19(6): 1-7.
Shan Y L, Xie J C, Han J C, et al. Soil moisture characteristics and temporal stability on the slope of the Loess Plateau: A case study of Jiulongquan Ditch in Yan'an City[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(6): 1-7.