

# 宁夏南部半干旱黄土区 3 种土地利用类型的土壤水分时空变化特征

韩新生<sup>1,2,3</sup>, 刘广全<sup>1</sup>, 许浩<sup>2</sup>, 于艺鹏<sup>3</sup>, 郭永忠<sup>2</sup>,  
万海霞<sup>2</sup>, 安钰<sup>2</sup>, 王月玲<sup>2</sup>, 董立国<sup>2</sup>

(1.中国水利水电科学研究院,北京 100038;2.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;3.中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所,北京 100091)

**摘要:** 选择宁南黄土区贾新庄组的 3 种土地利用类型(川地农田、阴坡梯田、阳坡人工林),在 2021 年生长季使用土钻监测土壤含水量(SMC),同时利用自动气象站监测气象数据,分析土地利用、坡位、作物种类影响下的土壤水分时空变化特征。结果表明:3 种土地利用类型的 SMC 大小为川地农田(16.32%)>阴坡梯田(12.66%)>阳坡人工林(10.82%);随着研究时段推进,SMC 呈先降后升的变化,SMC 与降水量存在较好的时间协同性,气温、太阳辐射、饱和水汽压差与阳坡人工林 SMC 显著相关;随土层深度增加,川地农田、阴坡梯田、阳坡人工林的 SMC 分别呈升高、降低、先降后升的变化,0—100 cm 土层的土壤水分变异系数大于 100—200 cm 土层。SMC 季节变化分为相对稳定期(4—5 月)、消退期(6—8 月)和恢复期(9—10 月);SMC 土层变化分为活跃层(0—40 cm)、相对活跃层(40—140 cm)、相对稳定层(140—200 cm)。土壤水分的补给时间滞后于降水,下层土壤水分补给滞后于上层土壤。阴坡梯田和阳坡人工林 SMC 随坡位降低均先降后升,最小值分别在坡上和中下坡位。土地利用、坡位差异、作物种类、气象因子均是影响 SMC 的因素;从 SMC 的变异程度看,各因子对 SMC 的作用大小依次为气象>土地利用>坡位>作物种类。研究结果有利于指导半干旱黄土区的植被重建与生态产业发展,确定不同立地环境下的合理植被配置。

**关键词:** 土地利用;坡位差异;作物种类;时空变化;土壤水分

中图分类号:S152.7      文献标识码:A      文章编号:1009-2242(2022)06-0250-10

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2022.06.031

## Temporal and Spatial Variation Characteristics of Soil Moisture Under Three Land Use Types in the Semi-arid Loess Region of Southern Ningxia

HAN Xinsheng<sup>1,2,3</sup>, LIU Guangquan<sup>1</sup>, XU Hao<sup>2</sup>, YU Yipeng<sup>3</sup>, GUO Yongzhong<sup>2</sup>,  
WAN Haixia<sup>2</sup>, AN Yu<sup>2</sup>, WANG Yueling<sup>2</sup>, DONG Ligu<sup>2</sup>

(1.China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038; 2.Institute of Forestry and Grassland Ecology, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Ningxia Key Laboratory of Desertification Control and Soil and Water Conservation, Research Centre for Ecological Restoration and Multi-Functional Forestry of Ningxia, Yinchuan 750002; 3.Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091)

**Abstract:** In this study, three land use types (flat field farmland, shady slope terrace and sunny slope plantation) of Jiaxinzhuan Formation in the loess region of southern Ningxia were selected. Soil water content (SMC) was observed by soil drill in the growing season of 2021. At the same time, meteorological data were monitored by an automatic weather station. The spatio-temporal variation characteristics of SMC under the influence of land use, slope position and crop species were analyzed. The results showed that the order of SMC of the three land use types was flat field farmland (16.32%)>shady slope terrace (12.66%)>sunny slope plantation (10.82%). With the advance of the study period, SMC decreased first and then increased. There was excellent temporal synergy between SMC and precipitation. Temperature, solar radiation and saturation vapor pressure

收稿日期:2022-03-25

资助项目:IWHR 基本科研业务费专项(SC0145B012021);宁夏农业高质量发展和生态保护科技创新示范项目(NGSB-2021-14-01,NGSB-2021-11-06,NGSB-2021-14-02);宁夏重点研发计划项目(2021BEG03017)

第一作者:韩新生(1988—),男,博士,副研究员,主要从事森林生态水文与多功能管理研究。E-mail:hanxs@caf.ac.cn

通信作者:刘广全(1964—),男,研究员,主要从事流域水土资源和生态系统管理技术研究。E-mail:gqliu@iwhr.com

deficit were significantly related to the SMC of sunny slope plantations. With the increase of soil depth, SMC increased in flat field farmland, decreased in shady slope terrace, first decreased and then increased in sunny slope plantation. The variation coefficient of SMC in the 0—100 cm soil layer was greater than that in the 100—200 cm soil layer. Seasonal variation of SMC were divided into a relatively stable period (April-May), regression period (June-August) and recovery period (September-October). The change of SMC in different soil layers was divided into the active layer (0—40 cm), the relatively active layer (40—140 cm) and the relatively stable layer (140—200 cm). The replenishment time of soil moisture lagged behind precipitation, and the replenishment of lower soil moisture lagged behind that of upper soil. SMC of shady slope terrace and sunny slope plantation decreased first and then increased with the decreasing of slope position, and the minimum values were at the upper and middle-down slope position, respectively. Land use, slope position, crop species and meteorological elements were all factors that affected SMC. In terms of the variation degree of SMC, the effect of each factor on SMC followed the order of meteorological>land use>slope position>crop species. The results of this study were conducive to guiding the vegetation reconstruction and ecological industry development in semi-arid loess area, and determining the reasonable vegetation allocation under different site environments.

**Keywords:** land use; slope position difference; crop species; temporal and spatial variation; soil moisture

土壤水分可供植物吸收利用与大气蒸发<sup>[1]</sup>,是土壤—植物—大气连续体中水分和物质能量交换的关键影响因子<sup>[2]</sup>,与地表径流、壤中流、地下水补给、植被蒸腾、土壤蒸发等一系列水文循环密切相关<sup>[3]</sup>,能影响生态系统的水文、生物化学等过程<sup>[4]</sup>。定量分析和深入刻画土壤水分时空变化对全面理解植被生态和生长过程意义重大。在黄土高原的广大水土流失区,是植被恢复与重建的重点区域,但土壤水分不足是关键限制因子<sup>[5]</sup>。因此,干旱半干旱区的生态环境建设与农林草业发展都必须考虑土壤水分因素。

受气候、地形、植被、土壤等众多因子综合影响,土壤水分表现出明显时空变异<sup>[6]</sup>。坡面是影响植被生长与分布的基本空间单元<sup>[7]</sup>,其土壤水分表现出一定变化规律,通常表现为土地利用和坡位等因子对土壤水分影响较大<sup>[8-9]</sup>。然而,由于各地的气候、植被、地形、土壤等影响因子差异较大,其综合影响使得土壤水分的坡面变化或坡位差异较为复杂。有分析<sup>[8-11]</sup>表明,土壤水分坡位差异呈现坡下>坡中>坡上的趋势;宁夏固原的柠条(*Caragana korshinskii*)林土壤水分在坡顶最高,坡中部和坡下部次之,坡上部最小<sup>[12]</sup>;在青藏高原冻土区,冻结期为上坡位土壤水分高于下坡位,融化期则相反<sup>[13]</sup>;北京山区侧柏(*Platycladus orientalis*)林的土壤水分在夏季和秋季为上坡位显著高于下坡位<sup>[6]</sup>;毛乌素沙地长柄扁桃(*Amygdalus pedunculata*)林的土壤含水量为坡底>坡中>坡上≥坡顶>坡下<sup>[14]</sup>。土地利用也是影响土壤水分的重要因子,如有研究表现为梯田>草地>林地<sup>[15]</sup>,或农地>荒地>林地<sup>[16]</sup>,或草地>农地>弃耕地>林地<sup>[17]</sup>,整体上表现为林地土壤水分最低。

上述报道多集中于分析土地利用、坡位等单个因素的土壤水分影响,同时分析多个土地利用类型的(如梯田、林地、川地等)土壤水分时空变化研究还相对较少。本文选择宁夏南部彭阳县玉洼村贾新庄组为研究地点,采用经典方法揭示川地、梯田、林地 3 个土地利用类型的土壤水分时空变化特征,应用统计学方法分析土地利用、立地条件、作物种类等对土壤水分的作用,为在村域等较小空间尺度内的植被恢复管理、农村经济发展、乡村振兴战略实施等提供科技支撑。

## 1 研究区概况

研究区隶属宁夏固原市彭阳县(106°32′—106°58′E,35°41′—36°17′N),海拔 1 248~2 418 m,分为北部黄土丘陵区、中部河谷残塬区和西南部土石山区 3 个自然类型区,属典型的温带半干旱大陆性季风气候,平均气温 7.4~8.5 ℃,无霜期 140~170 天,年降水量 350~550 mm,降水集中于 7—9 月。土壤类型以黄绵土和黑垆土为主。为提高水分利用效率和减少土壤侵蚀,自 2000 年前后相继开展了“坡改梯”“退耕还林还草”等生态修复工程。现人工林以柠条、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)、山桃(*Amygdalus davidiana*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等树种为主,草本植被以长茅草(*Stipa bungeana*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、早熟禾(*Poa annua*)、委陵菜(*Potentilla chinensis*)、本氏针茅(*Stipa capillata*)等为主。

## 2 材料与方法

### 2.1 立地类型与植被

具体研究地点位于彭阳县白阳镇玉洼村贾新庄组,

属黄土区,北部为阳坡人工林,中部为川地农田,南部为阴坡梯田。人工林主要是由山桃、山杏、柠条、沙棘、油松(*Pinus tabulaeformis*)、云杉(*Picea asperata*)等树种组成的混交林;梯田作物以玉米(*Zea mays*)和苜蓿(*Medicago sativa*)等为主;川地作物以玉米、冬小麦(*Triticum aestivum*)、马铃薯(*Solanum tuberosum*)、谷子(*Setaria italica*)、燕麦(*Avena sativa*)等为主,还零星种植油葵(*Helianthus annuus*)、春油菜(*Brassica napus*)、小茴香(*Foeniculum vulgare*)、甜高粱(*Sorghum bicolor*)等。阳坡和阴坡均从上至下设置了坡顶、坡上、中上、中下、坡下、坡底 6 个坡位。

### 2.2 土壤水分测定

在阴坡梯田、阳坡人工林的 6 个坡位、川地农田(无灌溉)的 9 种作物种类,于 2021 年生长季每月 1 次(4 月 17 日、5 月 13 日、6 月 14 日、7 月 14 日、8 月 27 日、9 月 22 日、10 月 21 日)用土钻法测定 200 cm 土壤水分,每层间隔 20 cm,3 次重复,每个重复约隔 10 m;每月采集 630 个土样,研究期间共取土样 4 510 个,带回实验室称湿重后在 105 ℃烘箱烘 24 h 后称干重,计算含水量。

### 2.3 气象要素监测

在川地测点中心空地处架设 1 台自动气象站,于 2021 年 4 至 10 月监测太阳辐射强度( $R_s$ ,  $W/m^2$ )、空气温度( $T_a$ , ℃)、相对湿度( $RH$ , %)、降水量( $P$ , mm)、风速( $W_a$ , m/s)、风向[ $W_d$ , (°)]等,每 30 min

自动记录 1 次。饱和水汽压差( $VPD$ , kPa)由空气温度和相对湿度计算得出。

$$VPD=0.611\times(1-RH)\times EXP[17.502\times T_a/(T_a+240.97)]$$

### 2.4 数据处理

根据变异系数(标准差与平均值的比值)大小评价数据的离散程度,划分为强变异(变异系数>30%)、中等变异( $30\%\leq$ 变异系数 $\leq 10\%$ )、弱变异(变异系数 $< 10\%$ )<sup>[18]</sup>。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;采用双变量相关(Pearson)方法,分析各土地利用下土壤水分与气象因子的相关性。使用 EXCEL 软件 2016 版本和 ORIGIN 软件 2021 版本,进行数据分析和作图。

## 3 结果与分析

### 3.1 气象因子变化

由图 1 可知,随研究时段推进,太阳辐射、气温、VPD 和风速呈先升高后降低的波浪状变化,最大月均值分别出现在 5,7,6,4 月,前三者的最小月均值在 10 月,风速的最小月均值在 9 月;相对湿度呈相反变化趋势,最大值和最小值分别出现在 10 月和 5 月。研究期间总降水量 520.4 mm,9 月(176.6 mm)最大,7 月(29.6 mm)最小;4—8 月降水量 233.6 mm,占总量的 44.89%,9,10 月占 55.11%。太阳辐射、气温、相对湿度、VPD 和风速在 4—8 月的均值依次为 204  $W/m^2$ , 16.4 ℃, 65.6%, 0.70 kPa, 1.18 m/s,比后面 9,10 月的均值分别高 61.08%、高 77.19%、低 18.89%、高 52.45%、高 156.79%。

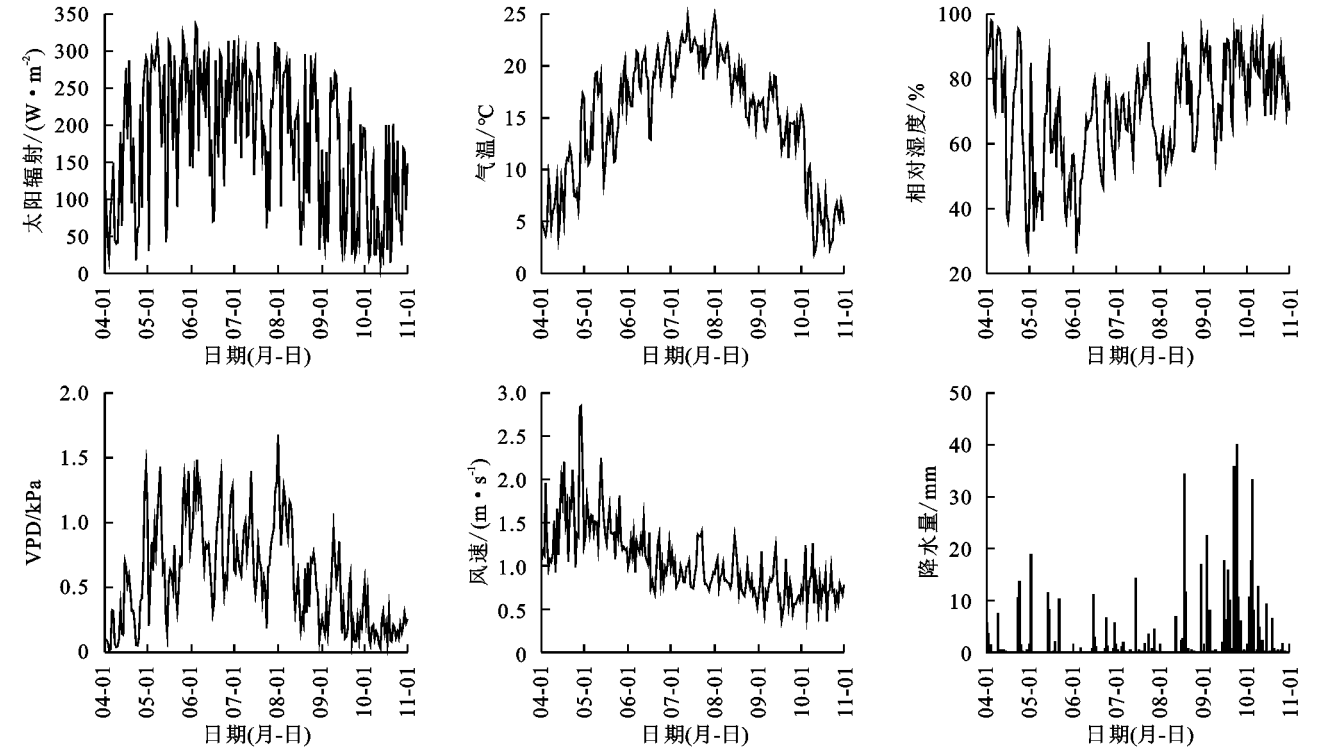


图 1 研究期间气象因子日变化

### 3.2 土壤水分的土地利用类型差异

从图 2 可以看出,贾新庄 3 种土地利用类型均值及阳坡人工林随土层深度呈先降后升的变化,阴坡

梯田呈逐渐降低趋势,川地农田呈缓慢升高趋势。0—200 cm 平均土壤含水量以川地农田最高,达16.32%,阴坡梯田次之(12.66%),阳坡人工林最低10.82%,三者之间差异均达到显著水平( $p<0.05$ )。

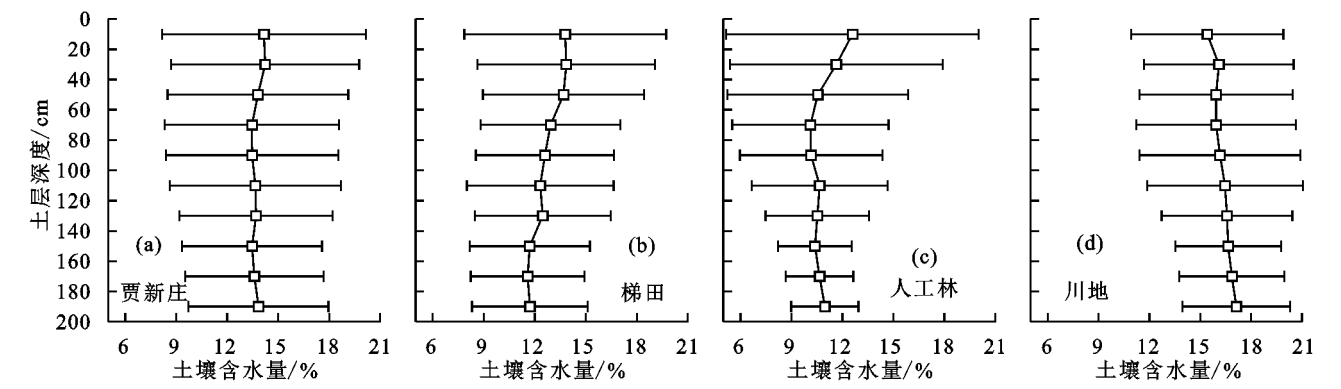


图 2 不同土地利用类型下的土壤水分随土层深度的变化

不同土地利用类型下,0—100 cm 土壤水分的变异系数大于 100—200 cm 土层(图 3),贾新庄和阴坡梯田的 160—200 cm、阳坡人工林的 120—200 cm、川地农田的 0—200 cm 土层属中等变异性,其余为强变异性。贾新庄 0—20 cm 土壤水分的变异系数(42.28%)较高;20—120 cm 变异系数(36.87%~38.94%)次之,且各层次接近;120—200 cm 变异系数最小。3 种土地利用类型下的土壤水分变异系数随土层深度增加基本呈降低趋势,阴坡梯田 100—120 cm 变异系数相对较高,可能与梯田作物(苜蓿、玉米等)根系分布深度及吸收水分的土层深度在该土层差异较大有关。阴坡梯田、阳坡人工林、川地农田各土层土壤含水量变异系数最大值分别为 43.03%,59.03%,29.56%;各土层变异系数的平均值与极差均为阳坡人工林(37.42%,40.97%)最大,阴坡梯田(33.44%,14.20%)居中,川地农田(25.06%,11.05%)最小,表明林地(人工林)的土壤水分变异强于农地(梯田),坡面人工林和梯田土壤水分的坡位间变异强于川地作物种类间变异。

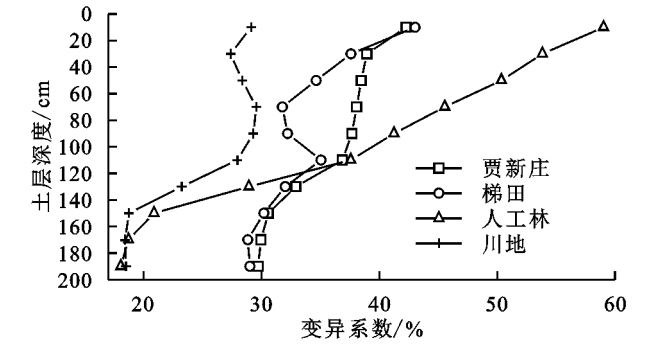


图 3 不同土地利用类型下的土壤水分变异系数随土层深度的变化

### 3.3 土壤水分的时间变化

在研究年份的降水季节分布格局影响下,各土地利用类型及贾新庄的不同深度(各坡面坡位或川地作物种类的均值)土壤水分随月份推进均是整体呈先降后升的变化(图 4),0—200 cm 土壤水分的最大值均在 10 月,阳

坡人工林的最小值出现在 6 月,其余类型的最小值均在 8 月。依据土壤水分的时间变化,将研究阶段划分为土壤水分相对稳定期(4—5 月)、消退期(6—8 月)和恢复期(9—10 月);依据土壤水分及变异性的层次变化,将研究土层划分为土壤水分活跃层(0—40 cm)、相对活跃层(40—140 cm)和相对稳定层(140—200 cm)。

方差分析显示,贾新庄 10 月土壤水分显著高于其他月份,4 月显著高于 7 月,5 月显著高于 7 月和 9 月,8 月显著低于除 7 月的其他月份,其余月份间差异不显著( $p>0.05$ )。阴坡梯田各月的差异显著性与贾新庄相似。阳坡人工林 10 月土壤水分显著高于其他月份,9 月显著高于 5—8 月,4 月显著高于 6 月。川地农田 10 月(8 月)土壤水分显著高于(低于)其他月份,4—6 月显著高于 7 月和 9 月。相关分析表明,气温与贾新庄、阴坡梯田、阳坡人工林土壤水分呈显著负相关( $p<0.05$ ),可能是因气温升高,土壤蒸发与植被蒸腾等增加引起土壤含水量下降;阳坡人工林土壤水分还与太阳辐射、VPD 呈显著负相关,可能与太阳辐射、VPD 对林木蒸腾的影响强于作物等有关;降水量与各土地利用类型的土壤水分呈正效应,但相关性不显著。

在阴坡梯田,各坡位土壤水分从 4—10 月均表现出先降后升的变化(图 5),最大值均在 10 月;最小值对坡顶、坡上、中上坡位出现在 8 月,中下坡位在 7 月,坡下和坡底在 9 月。从 4—8 月,坡顶、坡上、中上、中下坡位土壤水分降低程度高于坡下和坡底,表明土壤水分除受气象因子和植被影响外,坡位也起到一定的作用;在 9、10 月降水量增多以后,0—60 cm 土壤含水量明显高于 60—200 cm 土层。各坡位土壤水分的极差随月份推进呈先升后降的变化,最大和最小极差分别在 7 月(6.73%)和 4 月(2.74%)。

在阳坡人工林,各坡位土壤水分的月变化与阴坡梯田相似(图 6),最小值出现的月份与阴坡梯田存在差异,对坡顶、坡下、坡底出现在 6 月,坡上在 8 月,中上和中下在 7 月。从 4—8 月,各坡位土壤水分下降



的程度相近;在 9,10 月,20—60 cm 土壤含水量明显高于 0—20,60—200 cm 土层。阳坡人工林各坡位土壤水分极差的月份变化与阴坡梯田相似,但阴坡梯

田极差的各月均值(4.45%)显著高于阳坡人工林(2.41%),阳坡人工林各坡位最大和最小极差分别在 7 月(3.94%)和 10 月(0.98%)。

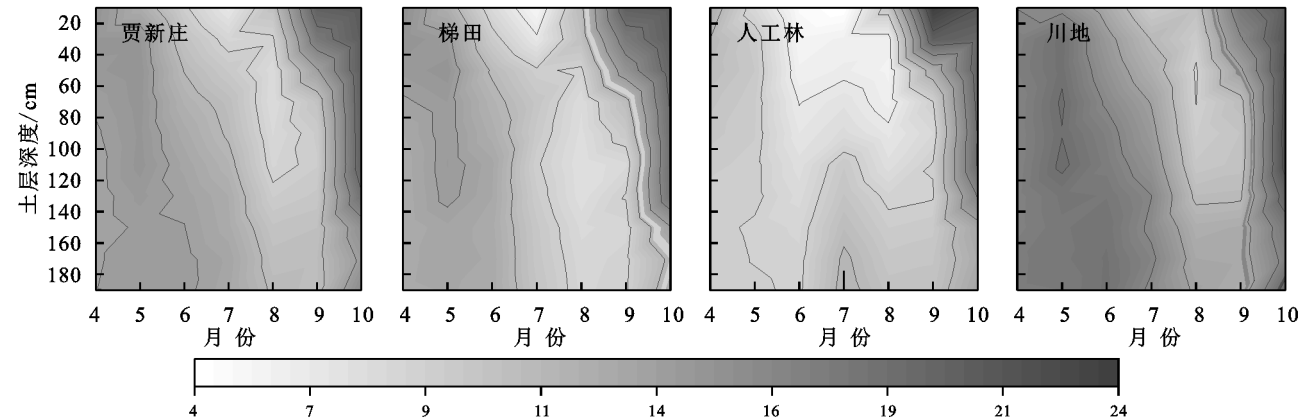


图 4 不同土地利用类型下的土壤水分月变化

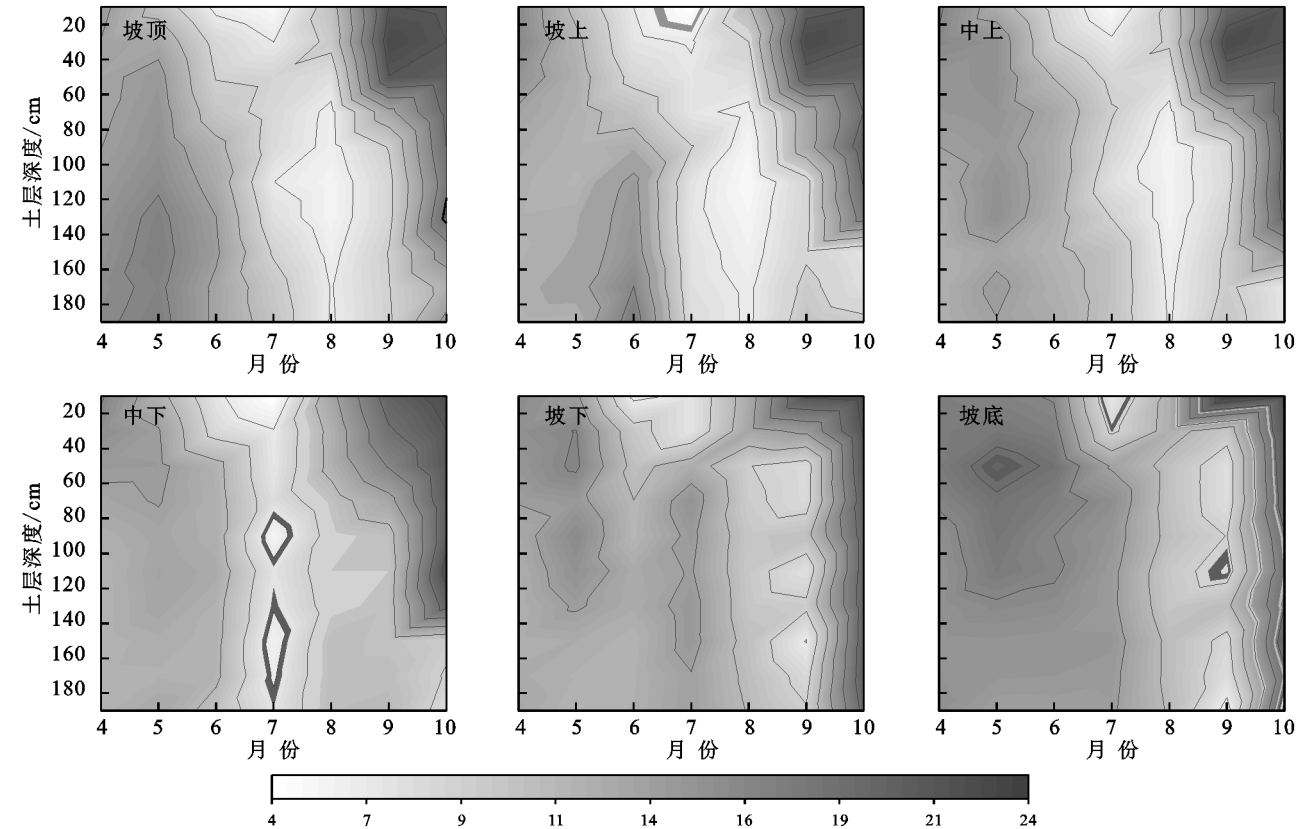


图 5 阴坡梯田不同坡位土壤水分的月变化

川地农田各作物的土壤水分月变化也与阴坡梯田相似(图 7),各作物土壤水分最大值均在 10 月,油菜和甜高粱的最小值在 9 月,其余作物均在 8 月。从 4—8 月,冬小麦、玉米、马铃薯的土壤水分降低程度较大,其余作物土壤水分的降低程度较小。随月份推进,各作物土壤水分极差呈先升后降的变化,最大和最小极差分别在 9 月(6.54%)和 4 月(2.51%)。

不同土地利用类型的土壤水分变异系数在生长季前期(4—7 月)低于后期(7—10 月),4,5 月基本属于弱变异性,贾新庄、阳坡人工林、阴坡梯田的 9 月和阳坡人工林的 7 月基本为强变异性,其余均属中等变异性。随

月份推进,不同土地利用类型的土壤水分变异系数基本呈“双峰”型(图 8),9 月和 7 月均较高,这可能与 9 月降水量最高(导致土壤水分补给量的差异较大)、7 月降水量最低(导致土壤水分减少量的差异较大)等有关。阳坡人工林不同坡位土壤水分变异系数均呈现出与贾新庄相似的月变化。阴坡梯田不同坡位土壤水分变异系数总体在 4 月和 5 月(平均为 8.91%)最低,6—8 月(平均为 17.87%)升高,9 月(39.94%)达到峰值,10 月(20.51%)逐渐下降。川地农田各作物土壤水分变异系数大小顺序为 9 月(20.64%)>7 月(18.58%)>8 月(17.85%)>6 月(11.74%)>10 月(9.74%)>4 月(8.72%)>5 月(4.11%)。

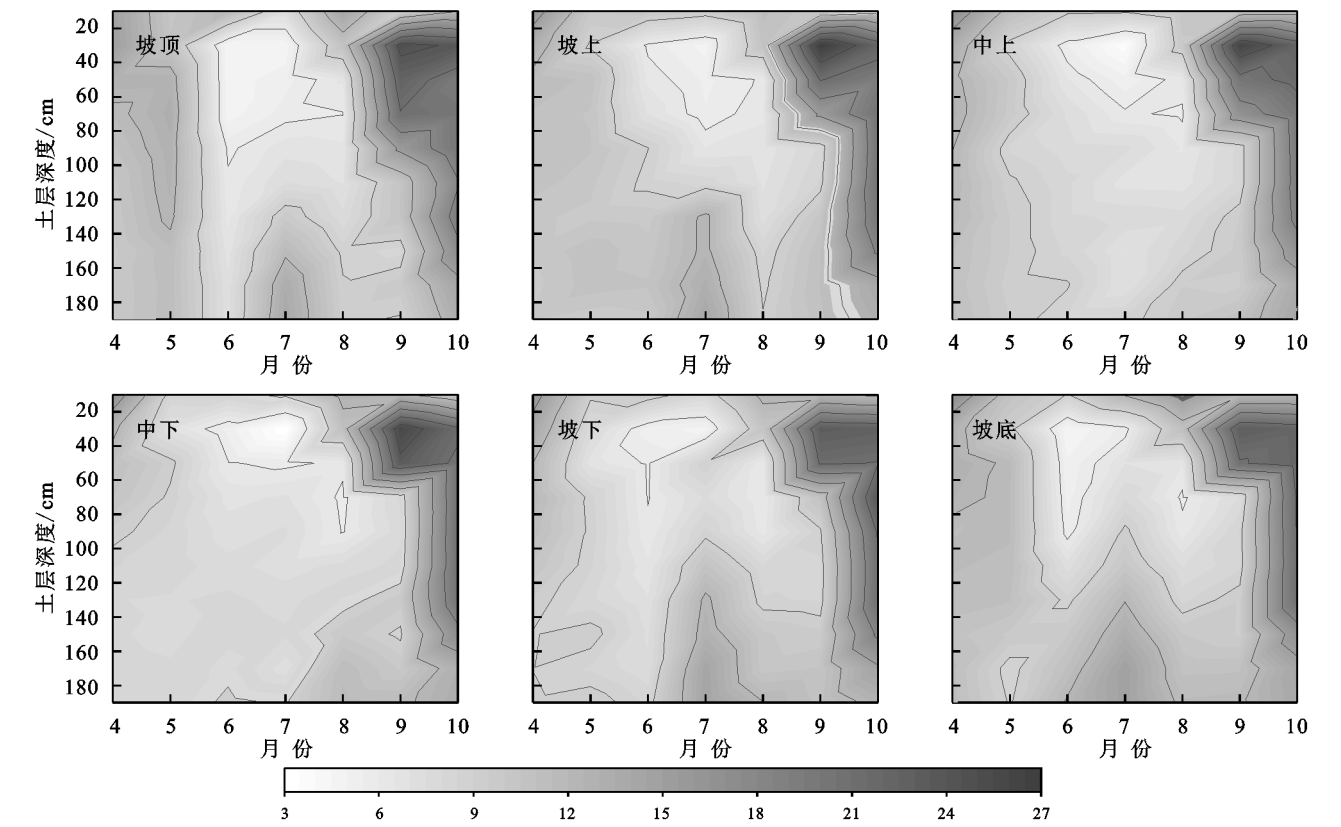


图6 阳坡人工林不同坡位土壤水分的月变化

### 3.4 土壤水分的坡位差异

从各月均值来看,阴坡梯田土壤水分随坡位下降呈先降后升的微弱变化(图9),最大值和最小值分别为坡底(14.68%)和坡上(11.67%),0—100 cm 土壤水分高于100—200 cm 土层。方差分析显示,坡底土壤水分显著高于其他坡位,坡下显著高于坡上、中上和 中下,其他坡位间差异不显著。4,5 月,气温低、太阳辐射弱,饱和和水气压差小,降水少,植被生长慢,土壤水分的消耗和补给相近;6 月,气温升高,太阳辐射增强,植被生长加快,土壤水分的消耗大于补给,坡位较高的 0—60 cm 土层的土壤水分明显下降;7 月,各坡位不同土层水分含量逐渐降低,上坡位(下坡位)的土壤水分降低幅度较大(较小);8 月,植被持续旺盛生长,各坡位 60—200 cm 土层的土壤水分持续下降,而 0—60 cm 土层土壤水分因降水输入略有回升;9 月,气温下降、太阳辐射减弱,植被生长逐渐停止,且降水增加(图1),导致土壤水分的补给大于消耗,上坡位(0—100 cm 土层)的土壤水分高于下坡位(100—200 cm 土层);10 月,随降水的持续输入和坡位效应,下坡位的土壤水分高于上坡位。

阳坡人工林各月土壤水分坡面变化趋势与阴坡梯田相似(图10),最大值和最小值分别在坡底(11.39%)和中下(10.16%)。方差分析显示,坡底的土壤水分显著高于中上和 中下,中下显著低于坡顶和坡上。

总体来说,阴坡梯田和阳坡人工林土壤水分均值

的变异系数随坡位降低基本呈先升后降的变化(图11),阴坡梯田土壤水分变异系数的最大值和最小值分别在中上(11.03%)和坡下(3.35%),阳坡人工林分别在中下(9.11%)和坡下(5.95%);除阴坡梯田的中上和 中下坡位,其余均为弱变异性。受多种因子综合影响,不同月份土壤水分变异系数的坡位变化较复杂,但阴坡梯田的 4,6,8,10 月和阳坡人工林的 8,9,10 月随坡位下降,变异系数整体呈先升后降,其余月份基本呈相反趋势。

## 4 讨论

### 4.1 土地利用类型的土壤水分影响

研究区 3 种土地利用类型的土壤水分大小总体为川地农田>阴坡梯田>阳坡人工林,主要是因川地的地形平坦(可能受沟道径流及地下水影响等)、梯田在阴坡、人工林在阳坡。阳坡的气温、太阳辐射等与蒸散发相关的气象因子均高于阴坡,导致阳坡的土壤水分含量低于阴坡,这与黄土高原其他区域研究结论<sup>[19]</sup>相同,主要也是因坡向差异导致的。同时,林木的生物量较大、根系分布较深和生育期较长,是导致林地蒸散大于农地蒸散的主要原因,多个研究<sup>[15-17]</sup>也显示林地土壤水分低于农地,可能是林地耗水明显高于农地引起的。苜蓿为多年生草本,也是导致梯田土壤水分低于川地的一个原因,相关研究<sup>[20]</sup>发现,苜蓿转变成天然草地后,土壤水分最初以每年 45 mm 的速率得到恢复;苜蓿地土壤水分亏缺相比其他植被较为严重<sup>[21]</sup>,以上报道均显示苜蓿蒸腾耗水高于其他植被。

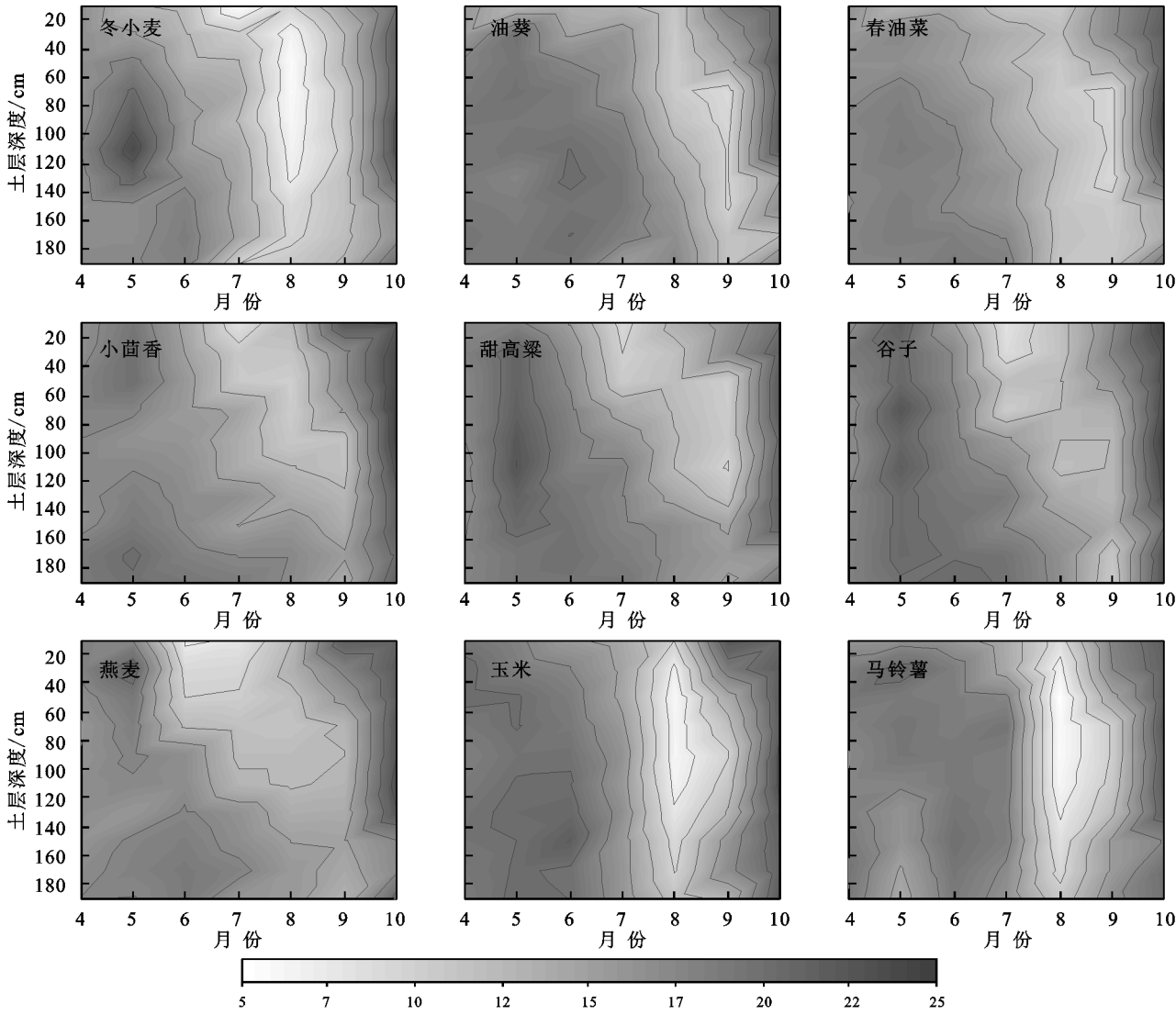


图 7 川地不同作物样地土壤水分的月变化

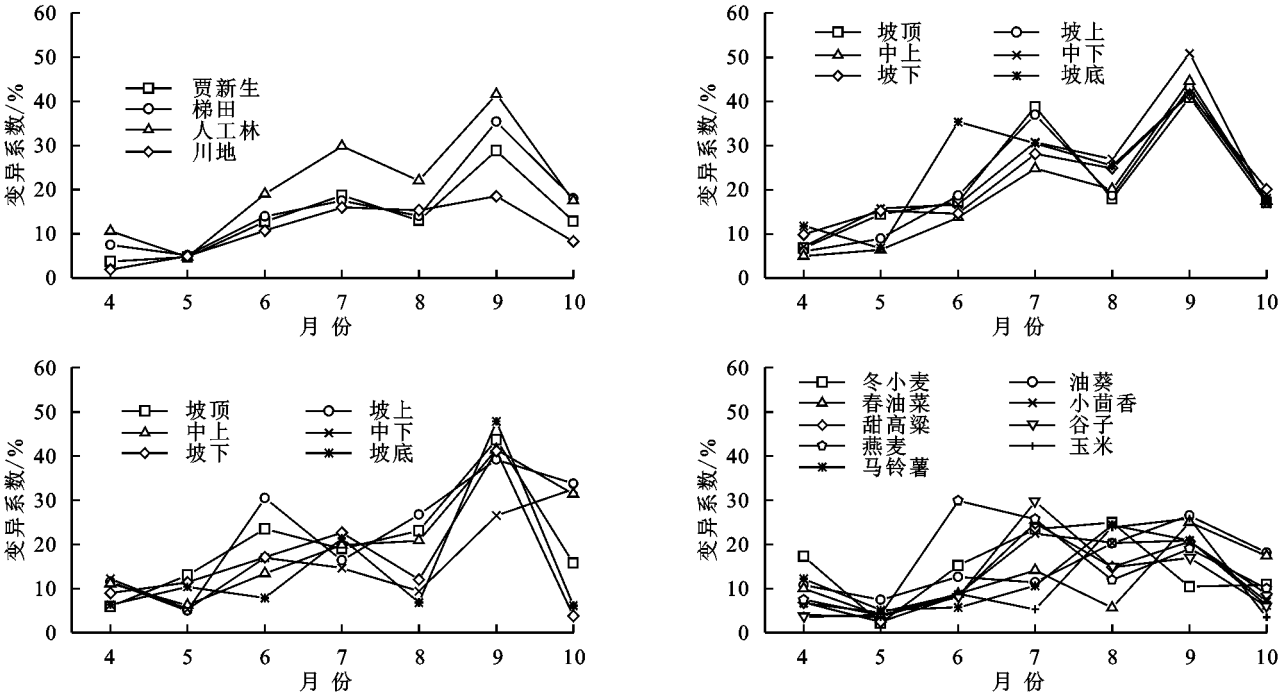


图 8 不同土地利用类型下的土壤水分变异系数月变化

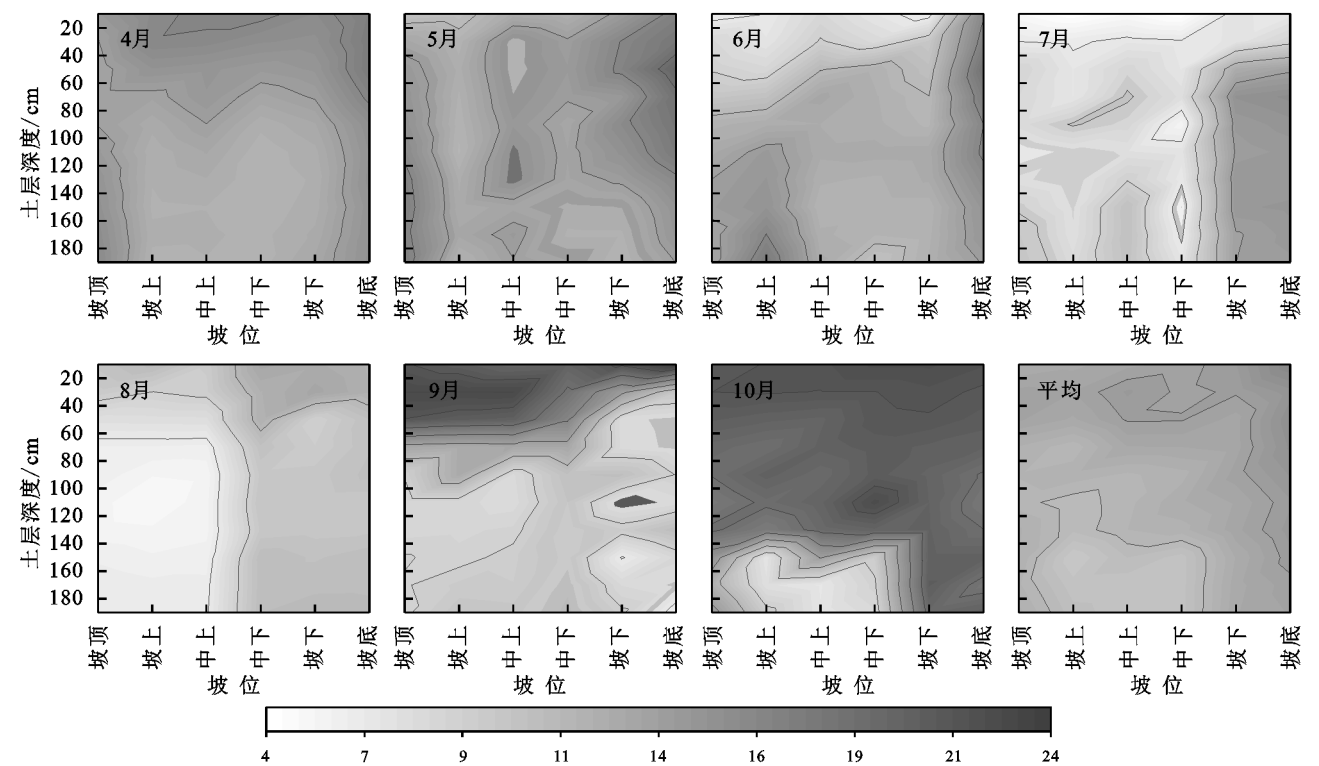


图9 阴坡梯田各月土壤水分的坡位差异

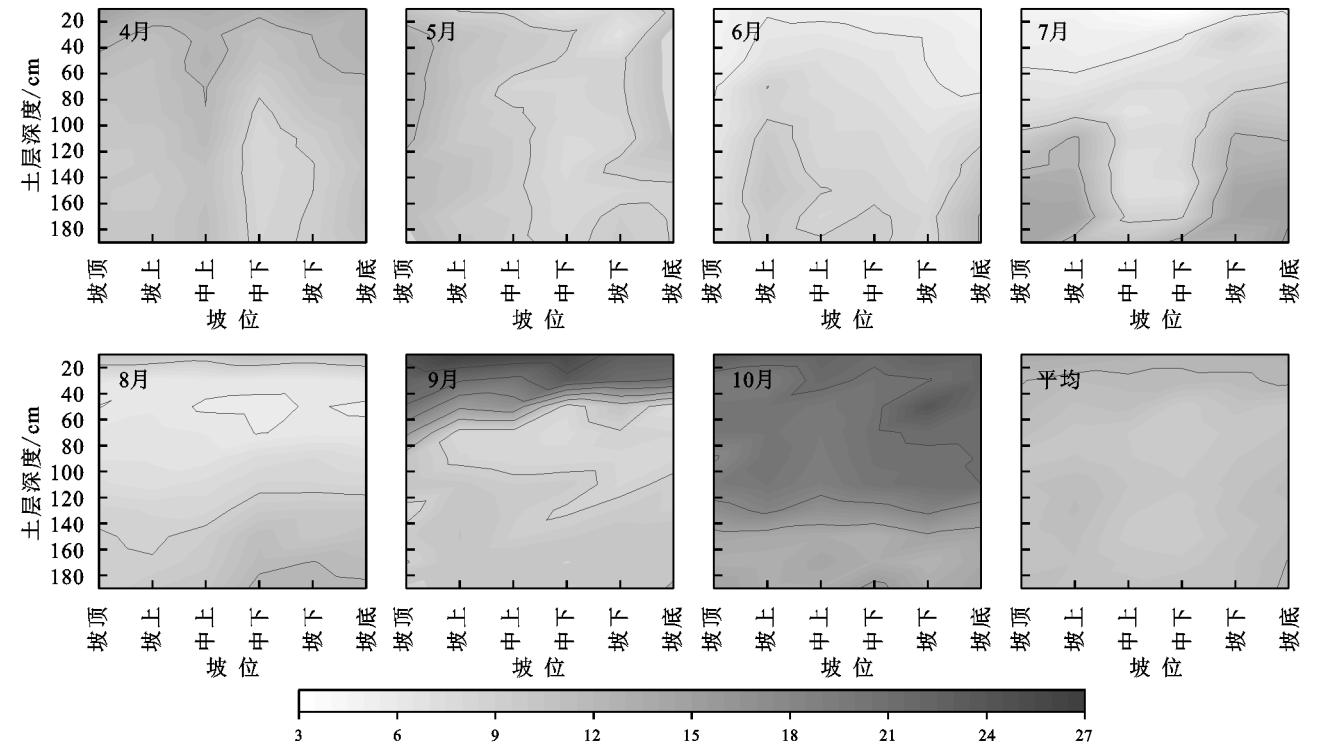


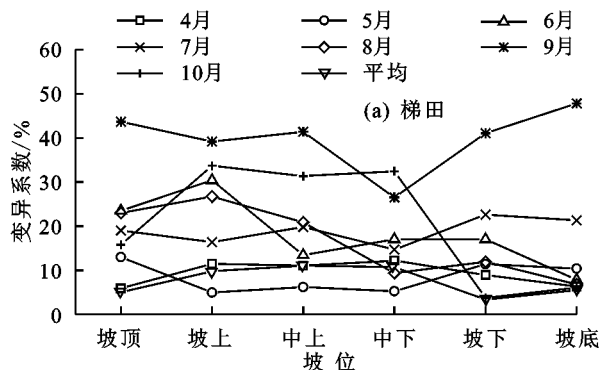
图10 阳坡人工林各月土壤水分的坡位差异

土地利用、立地环境、作物种类、气象条件等是造成研究区土壤水分空间分布现状的主要因子。随土层深度增加,阴坡梯田土壤水分微弱减小,可能是因梯田位于阴坡,太阳辐射等气象因子相对较弱;川地农田土壤水分微弱增加,与作物根系分布较浅、太阳辐射等因子相对较强有关;阳坡人工林土壤水分呈先降后升的微弱变化,主要因林木根系相对较深,对深层土壤水分吸收相对较多。整体来看,各土地利用类

型的表层土壤水分变异系数强于深层,是由于降水、太阳辐射、气温等气象因子的影响在表层土壤最强,并随土层加深而逐渐减弱<sup>[22]</sup>。阴坡梯田的土壤水分变异性强于川地农田,是因坡面上不同坡位导致的微地形、微气象差异对土壤水分的作用大于川地(平地)上不同作物种类导致的土壤水分差异。0—100 cm 土层坡面林地的土壤水分变异性强于梯田,与坡面林地水分顺坡而下导致不同坡位的土壤水分差异较大、梯田



更易就地入渗导致土壤水分的坡位差异较小等密切相关;100—200 cm 土层出现相反的变化规律,可能



是因林木根系较深,在生长季对 100—200 cm 土壤水分的消耗量大,导致该层土壤水分变异相对较小。

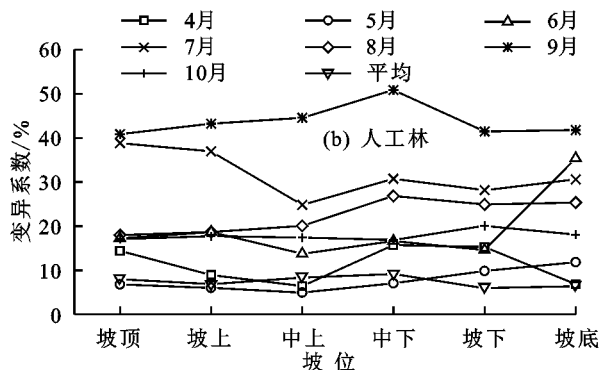


图 11 阴坡梯田和阳坡人工林各月土壤水分变异系数的坡位差异

#### 4.2 气象条件的土壤水分影响

不同土地利用类型的土壤水分都具有明显季节变化,除降水等气象因子外,土壤水分还与植被蒸腾、土壤蒸发等过程密切相关,这是立地环境、气候条件、植物生长节律等因子共同作用的结果<sup>[23]</sup>。研究区土壤水分大致呈现出生长季中期较低,前期和后期较高的时间变化。在生长季前期(土壤水分相对稳定期)土壤水分较高,与冬季融雪、年初降水补给等有关;在生长季中期(土壤水分消退期)较低,主要因气温、太阳辐射、VPD 升高,降水量较低,植被蒸腾和土壤蒸发较大有关;在生长季后期(土壤水分恢复期)较高,是由降水量增加、与蒸散发相关的气象因子减弱等造成的。土壤水分与降水量具有较好的季节协同性,王艳萍等<sup>[24]</sup>在黄土区发现不同土地利用方式下土壤水分与降水的季节变化趋势相一致,主要是因降水对土壤水分的补给作用引起的,与本研究结果相同。贾新庄、阴坡梯田和川地农田 4、5 月不同深度土壤水分差异较小,6—8 月(9 月和 10 月)土壤水分随土层深度的增加而增大(减小);在 6 月和 7 月,0—40 cm 土层的土壤水分小于其他月份,而 8 月 40—120 cm 土层的土壤水分小于其他月份,主要是因植被生长继续消耗较深层(40—120 cm)的土壤水分,而 8 月的降水仅补给到 0—40 cm 土层。阳坡人工林 5 月土壤水分开始下降,这与多年观测发现 5 月和 6 月山杏和山桃等林木的蒸腾速率最高有关。土壤水分的补给时间上滞后于降水、下层土壤水分补给滞后于上层土壤,主要是因植被层等对降水的拦截、表层土壤对水分的吸收等增加(延长)了土壤水分输送的距离(时间),进而引起土壤水分传输的滞后性明显<sup>[25]</sup>。

#### 4.3 坡位差异的土壤水分影响

梯田和水平沟整地后,改变了微地貌,截断了坡面径流,增加了坡面起伏度,改变降水的坡面再分配,使局部地势相对平坦,利于局地土壤水分的积蓄和入渗,减少坡面地表径流和土壤侵蚀,提高土壤水分

含量<sup>[26]</sup>。整地措施有效减少土壤水分顺坡而下,一定程度上减少坡面土壤水分的顺坡输移,从而减弱土壤水分坡位差异。本研究发现,从各月均值来看,阴坡梯田和阳坡人工林坡面的土壤水分均随坡位下降呈现出先降后升的微弱变化,可能与上坡位植被较差和蒸散耗水较少、下坡位潜在蒸散相对较低等有关。大多数研究均表明,下坡位土壤水分高于上坡位,但也有研究发现相反的变化,如白一茹等<sup>[27]</sup>在黄土高原雨养区发现,上坡位土壤水分高于下坡位,主要因土壤水力学性质的空间差异、上坡位土壤结构好于下坡位等造成的。不同月份的土壤水分分坡位变化存在差异,如阴坡梯田坡面在 4、5、10 月为坡上部土壤水分略高于坡下部,在 6—8 月植被旺盛生长期的坡上部土壤水分消耗量相对较大导致坡下部土壤水分明显高于坡上部,9 月因降雨补给和坡上部植被较稀疏等引起坡上部土壤补充相对较多故而含水量较高。人工林坡面的土壤水分坡位差异的季节变化与梯田坡面相似。

因研究时段和研究条件的限制,本文仅调查了 2021 年整个生长季 3 种土地利用类型的土壤水分时空变化,未来应增加更多种的立地类型和植被类型,增强研究结果之间的可对比性,延长观测时段(整年或多年),并结合水量平衡研究来定量描述引起变化的原因与过程,从而得出更加普遍的规律,为当地制定以土壤水分为基础的合理植被配置方案与植被优化布局提供科技支撑。

## 5 结论

(1)在 2021 年生长季(4—10 月),宁南黄土区的贾新庄平均土壤含水量为 13.74%,其中川地农田的土壤水分含量最高,其次为阴坡梯田,阳坡人工林最低,且三者之间差异显著。依据土壤水分变化,不同土层可划分为 0—40 cm 活跃层、40—140 cm 相对活跃层、140—200 cm 相对稳定层,活跃层和相对活跃层多数为强变异性,相对稳定层多为中等变异性。土

壤水分存在明显月份变化,大致分为土壤水分相对稳定期(4—5 月)、土壤水分消退期(6—8 月)和土壤水分恢复期(9—10 月)。

(2)不同土地利用类型坡面的土壤水分作用存在明显的坡位差异,阴坡梯田各坡位土壤水分大小顺序为坡底>坡下>坡顶>中下>中上>坡上,阳坡人工林坡面各坡位土壤水分大小顺序为坡底>坡顶>坡上>坡下>中上>中下。川地农田作物种类也是影响土壤水分差异的重要因子,其土壤水分大小顺序为谷子>甜高粱>玉米>小茴香>油葵>马铃薯>燕麦>春油菜>冬小麦。

(3)土壤水分的补给时间滞后于降水,下层土壤水分补给滞后于上层土壤。

(4)土壤水分受土地利用、立地环境、作物种类的共同影响,从土壤水分的变异性上看,土地利用的作用最大,其次为坡位,作物种类的作用最小。

参考文献:

[1] 常学尚,常国乔.干旱半干旱区土壤水分研究进展[J].中国沙漠,2021,41(1):156-163.

[2] Bogen H R, Huisman J A, Baatz R, et al. Accuracy of the cosmicray soil water content probe in humid forest ecosystems: The worst case scenario [J]. Water Resource Research,2013,49:5778-5791.

[3] Heathman G C, Cosh M H, Merwade V, et al. Multi-scale temporal stability analysis of surface and subsurface soil moisture within the Upper Cedar Creek Watershed, Indiana[J].Catena,2012,95:91-103.

[4] Dobriyal P, Qureshi A, Badola R, et al. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management[J].Journal of Hydrology,2012,458/459:110-117.

[5] Yang L, Chen L D, Wei W, et al. Comparison of deep soil moisture in two re-vegetation watersheds in semi-arid regions [J].Journal of Hydrology,2014,513:314-321.

[6] 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.

[7] 韩新生.六盘山半干旱区三种典型植被的结构变化及其多功能影响[D].北京:中国林业科学研究院,2020.

[8] 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.

[9] 程谅,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.

[10] 董起广,张扬,陈田庆,等.黄土高原丘陵沟壑区小流域

坡面土壤水分分布特征[J].中国农村水利水电,2018(7):65-68,73.

[11] 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.

[12] 杜雨佳,赵勇钢,刘小芳,等.黄土丘陵区柠条种植带状结构对坡面土壤水分的影响[J].水土保持研究,2020,27(6):52-59.

[13] 曹伟,盛煜,吴吉春,等.青藏高原坡面冻土土壤水分空间变异特性[J].水科学进展,2017,28(1):32-40.

[14] 赵鑫,翟胜,李建豹,等.不同坡位条件对毛乌素沙地长柄扁桃林地土壤水分的影响[J].水土保持通报,2020,40(4):45-52.

[15] 杜康,张北赢.黄土丘陵区不同土地利用方式土壤水分变化特征[J].水土保持研究,2020,27(6):72-76.

[16] 施政乐,张建军,申明爽,等.晋西黄土区不同土地利用类型对土壤水分的影响[J].水土保持学报,2021,35(6):190-197.

[17] 包维斌,王幼奇,刘鹏,等.宁南山区不同土地利用类型下土壤水分分布及其干燥化特征[J].草地学报,2020,28(3):775-783.

[18] 王艳莉,刘立超,高艳红,等.人工固沙植被区土壤水分动态及空间分布[J].中国沙漠,2015,35(4):942-950.

[19] 艾宁,宗巧鱼,高金续,等.陕北黄土区雨季后山地枣林土壤水分动态变化研究[J].植物研究,2020,40(4):559-567.

[20] 白晓,贾小旭,邵明安,等.黄土高原北部土地利用变化对长期土壤水分平衡影响模拟[J].水科学进展,2021,32(1):109-119.

[21] 缪凌,董建国,汪有科,等.黄土丘陵区不同土地利用类型下的深层土壤水分变化特征[J].水土保持研究,2016,23(2):13-18.

[22] 朱海,胡顺军,刘翔,等.不同龄阶梭梭根区土壤水分时空变化特征[J].生态学报,2017,37(3):860-867.

[23] 马月存,秦红灵,高旺盛,等.农牧交错带不同耕作方式土壤水分动态变化特征[J].生态学报,2007,27(6):2523-2530.

[24] 王艳萍,王力,韩雪,等.黄土塬区不同土地利用方式土壤水分消耗与补给变化特征[J].生态学报,2015,35(22):7571-7579.

[25] 胡良军,邵明安.黄土高原植被恢复的水分生态环境研究[J].应用生态学报,2002,13(8):1045-1048.

[26] 穆兴民.黄土高原土壤水分与水土保持措施相互作用[J].农业工程学报,2000,16(2):41-45.

[27] 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.