

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2025.04.003

CSTR:32310.14.stbcb.2025.04.003

韩新生, 许浩, 刘广全, 等. 宁夏黄土丘陵区不同时间尺度山杏林土壤水分动态及影响因素[J]. 水土保持学报, 2025, 39(4):48-59.

HAN Xinsheng, XU Hao, LIU Guangquan, et al. Soil moisture dynamics of *Prunus sibirica* plantation at different time scales in loess hilly region of Ningxia and the influencing factors[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4):48-59.

宁夏黄土丘陵区不同时间尺度山杏林 土壤水分动态及影响因素

韩新生^{1,2}, 许浩¹, 刘广全², 曹扬³

(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, 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 3. 西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 明确不同水文年和时间尺度气象因子对土壤水分的影响, 为气候变化背景下水土资源综合管理提供科学依据。 [方法] 以宁夏南部半干旱黄土丘陵区山杏人工林为研究对象, 于2018—2023年生长季, 利用智墙传感器连续监测土层深度为100 cm的水分特征, 分析土壤水分对降水量、气温、太阳辐射、相对湿度等气象因子的响应特征。 [结果] 丰水年、平水年、枯水年生长季平均降水量分别为597.7、428.5、298.1 mm, 生长季0~100 cm土层土壤水分体积分数分别为19.69%、16.67%、11.88%。土壤水分月变化在丰水年呈先升后降趋势, 平水年和枯水年呈先降后升趋势; 土壤水分日变化在丰水年、平水年、枯水年分别呈波浪状、“u”形、“w”形。不同水文年土壤水分的季节变化格局均为相对稳定期(4—5月)和频繁波动期(6—10月)。土壤水分的垂直空间格局整体来看, 从丰水年到枯水年, 速变层深度逐渐加长, 活跃层先增后减, 次活跃层逐渐减短, 相对稳定层逐渐显现; 从丰水年到枯水年, 土壤水分与气温的相关性逐渐增强, 与太阳辐射、潜在蒸散的相关性先升后降, 与相对湿度的相关性由正转负, 与饱和水汽压的相关性逐渐减弱; 气象因子对土壤水分变化的解释率逐渐升高, 分别为29.2%、44.8%、61.5%。在日、月、生长季尺度, 降水量对土壤水分变化的作用逐渐增强, 逐步回归分析进入的气象因子逐渐减少, 对土壤水分变化的解释率逐渐增大。 [结论] 不同水文年、时间尺度、土层土壤水分动态及影响因素均存在差异, 枯水年土壤水分下降明显, 今后人工林恢复及经营时, 应兼顾考虑树种的抗旱特性及对环境要素的适应性。

关键词: 土壤水分; 时间尺度; 降水年型; 山杏林; 黄土丘陵区

中图分类号: S714.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0048-12

Soil Moisture Dynamics of *Armeniaca sibirica* Plantation at Different Time Scales in Loess Hilly Region of Ningxia and the Influencing Factors

HAN Xinsheng^{1,2}, XU Hao¹, LIU Guangquan², CAO Yang³

(1. 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 Center for Ecological Restoration and Multi-Functional Forestry of Ningxia, Yinchuan 750002, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China; 3. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] To clarify the effects of meteorological factors on soil moisture in different hydrological years and temporal scales, in order to provide a scientific basis for integrated management of soil and water resources under the background of climate change. [Methods] The apricot plantation in the semi-arid loess hilly region of southern Ningxia was taken as the research object. In the growing season from 2018 to 2023, soil

收稿日期: 2024-10-10

修回日期: 2025-02-28

录用日期: 2025-04-26

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-05-15

资助项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF1305104); 宁夏重点研发项目(引才专项)(2022BSB03070); 宁夏自然科学基金项目(2019AAC03148); 中国水利水电科学研究院R&D项目(SC0145C022023)

第一作者: 韩新生(1988—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事生态水文与生态系统多功能评价管理研究。E-mail: hanxinsheng123@126.com

通信作者: 刘广全(1964—), 男, 博士, 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

http://stbcb.alljournal.com.cn

moisture characteristics of the 0—100 cm soil layer were continuously monitored by the soil moisture sensor. The response characteristics of soil moisture to meteorological factors such as precipitation, temperature, solar radiation and relative humidity were analyzed. [Results] The average precipitation in the growing season in wet years, normal years, and dry years was 597.7, 428.5 and 298.1 mm, respectively. The volumetric soil moisture of the 0—100 cm soil layer in the growing season was 19.69%, 16.67% and 11.88%, respectively. The monthly variation of soil moisture increased first and then decreased in wet years, and decreased first and then increased in normal years and dry years. The diurnal variation of soil moisture was wavy, 'u' type and 'w' type in wet years, normal years and dry years, respectively. The seasonal variation pattern of soil moisture in different hydrological years all showed a relatively stable period from April to May, and a frequent fluctuation period from June to October. In general, from wet years to dry years, for the vertical spatial pattern of soil moisture, the depth of the rapidly changing layer gradually increased, the active layer increased first and then decreased, the sub-active layer gradually decreased, and the relatively stable layer gradually appeared. From wet years to the dry years the correlation between soil moisture and temperature gradually increased, the correlation between soil moisture and solar radiation and potential evapotranspiration increased first and then decreased, while the correlation between soil moisture and relative humidity changed from positive to negative, and the correlation between soil moisture and saturation vapor pressure deficit gradually weakened. The interpretation rates of meteorological factors on soil moisture changes gradually increased, which were 29.2%, 44.8% and 61.5%, respectively. At the daily, monthly, and growing season scales, the effect of precipitation on soil moisture changes gradually increased, the meteorological factors entered by stepwise regression analysis gradually decreased, and the interpretation rate of soil moisture changes gradually increased. [Conclusion] Soil moisture dynamics and the influencing factors vary with different hydrological years, time scales, as well as soil layers. Soil moisture decreases significantly in dry years. For restoration and management of plantations in the future, the drought resistance characteristics and adaptability to environmental factors of tree species should be taken into account.

Keywords: soil moisture; temporal scales; annual precipitation pattern; *Armeniaca sibirica* plantation; loess hilly region

Received: 2024-10-10

Revised: 2025-02-28

Accepted: 2025-04-26

Online(www.cnki.net): 2025-05-15

宁夏南部黄土丘陵区地处黄土高原中西部,因潜在蒸散发高,降水少而不均,主要分布在7—9月,且多以大雨或暴雨的形式出现,导致生态环境脆弱,水土流失严重^[1]。该区土壤层常发生季节性或年际干旱,土壤水资源匮乏,加之植被结构不合理,造成旱灾严重。干旱已成为宁南黄土区面积最广、危害最重、发生最多、影响最深的自然灾害,引起自然和人工恢复的林草植被难以健康生长,作物产量低且稳定性差^[2]。开展土壤水分长期动态监测,分析土壤水分与环境因子的关系,为雨水资源合理利用、林草植被科学恢复提供理论支撑。

土壤水分是干旱半干旱区限制植被恢复与分布、植物健康生长的关键作用因子^[3],调节着大气层-植被层-土壤层间的相互关系,对植物生长与植被演替、物质交换与运移、水资源形成与转换、生态系统生物与化学等过程影响较大^[4]。受气候、植被、土壤、地形等多要素的综合影响,土壤水分存在明显的时空差异^[5]。定量描述土壤水分时空差异有助于深入

理解水文过程、生态格局,对半干旱黄土区生态恢复与植被建设意义重大。

在干旱缺水地区土壤水分的大多报道中,随研究时间尺度的不同,土壤水分变化的影响因素存在差异。日尺度,降雨量越大、历时越长,对柠条(*Caragana korshinskii*)林深层土壤水分补给增量越大^[6];华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)林土壤水分变化的主要影响因子为气温和饱和水汽压差、林木蒸腾、林下蒸散^[7]。月尺度,3种土地利用类型土壤水分变异的影响因子包括气象、土地利用、坡位、植物种类等^[8];2种森林群落的土壤水分动态与降水量的月际动态大致相似^[9]。年尺度,降水和气温是影响30~70 cm土层土壤水分动态的主要因子^[10];有研究^[11]发现,丰水年土壤水分明显高于枯水年。上述研究发现,降水是影响干旱半干旱区土壤水分动态的关键因子,与土壤水分的主要来源为降水有关,而已有研究仅分析单一的降水年型,针对不同水文年土壤水分变化的研究较少。在为数不多的丰水

年、平水年、枯水年土壤水分动态研究中,刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林分别呈“V”形、整体降低、“W”形^[12];不同植被类型分别呈“V”形、“W”形、持续下降^[11];多种土地利用分别呈“W”形、正弦曲线、下降趋势^[13]。仅调查不同水文年土壤水分变化,而对不同水文年和时间尺度导致土壤水分变化的因子仍需研究,以为在复杂的气候变化背景下理解土壤层生态水文过程提供理论依据。

山杏(*Armeniaca sibirica*)是黄土丘陵区的主要造林树种之一,在保持水土、改善环境等方面起重要作用。本研究在宁夏南部具有半干旱气候的固原市彭阳县,通过长期定位监测不同土层山杏林土壤水分变化,探讨土壤水分动态与气象因子的关系及其在不同水文年和时间尺度的差异,有助于更好地理解林地土壤水分动态及对外界气象因子的响应特征,为半干旱区水土资源开发利用、林草植被科学恢复打下坚实基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏固原市彭阳县,地理坐标为35°41′~36°17′N,106°32′~106°58′E,海拔为1 248 m。属典型的温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温为7.4~8.5℃,年降水量为350~550 mm;土壤类型以黄绵土和黑垆土为主。为防治水土流失及加强雨水利用,于2000年前后开展“坡改梯”“退耕还林还草”“88542整地造林”等生态工程。现人工林以山杏、山桃(*Amygdalus davidiana*)、柠条和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等树种为主,草本植被以委陵菜(*Potentilla chinensis*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、长茅草(*Stipa bungeana*)、早熟禾(*Poa annua*)等为主。

1.2 研究方法

1.2.1 样地基本情况 在彭阳县草庙乡王岔村(35°56′59″N,106°45′30″E),选择山杏纯林样地1个。海拔1 714 m,坡向西北,坡度15°,坡位中上,面积为1 400 m²。2023年测得林龄22 a,密度为380株/hm²,树高4.18 m,枝下高0.62 m,地径13.06 cm,冠层郁闭度0.34,南北冠幅2.90 m,东西冠幅3.08 m。

1.2.2 土壤水分监测 在样地的中心位置,安装Insentek智墒传感器,设备深度为100 cm,探头共10个,分别位于5、15、25、35、45、55、65、75、85、95 cm深的土层中,可均匀测定100 cm深土层的土壤水分体积分数(VSM,%),数据自动连续记录,时间间隔为60 min。测定时间为2018—2023年。

1.2.3 气象因子测定 在距样地100 m的位置,安装HOBO气象站,自动连续监测气温(T ,℃)、降水量

(P_{RE} ,mm)、太阳辐射(ESR, w/m²)、相对湿度(RH,%)、风速(WS, m/s)等气象因子,数据每30 min记录1次,监测时间为2018年5月至2023年10月。饱和水汽压差(VPD,kPa)由气温和相对湿度计算得出,计算公式为:

$$VPD = 0.611 \times (1 - RH) \times \text{EXP}[17.502 \times T / (T + 240.97)]$$

潜在蒸散(PET,mm/d)可表征大气蒸发潜力,能代表多种气象因子的综合作用,常用联合国粮农组织推荐的Penman-Monteith方程计算得出^[14]。

2018—2023年生长季(4—10月)降水量总和分别为604.0、591.4、438.4、418.6、286.8、309.4 mm。彭阳县气象局提供的资料显示,1988—2023年生长季降水总量平均为414.3 mm,因此,2018年、2019年为丰水年,2020年、2021年为平水年,2022年、2023年为枯水年。

依据中国气象局颁布的降水等级标准^[15],将24 h降水量(mm)划分为小雨(0.1~9.9)、中雨(10.0~24.9)、大雨(25.0~49.9)、暴雨(50.0~99.9)、大暴雨(100.0~249.9)和特大暴雨(≥ 250.0 mm)。相同地区研究^[16]发现,24 h降水量 < 1 mm对土壤水分影响可忽略,因此,本研究小雨的范围调整为24 h降水量为1~9.9 mm;测定土壤水分的最大深度为100 cm,将降水对土壤水分入渗深度 ≥ 100 cm时均取值为100 cm。

1.2.4 数据处理分析 将土壤水分体积分数、气温、太阳辐射、相对湿度、风速、饱和水汽压差、潜在蒸散转换成日、月、生长季(4—10月)尺度的平均值,降水量转换成3个尺度的求和值。变异系数指标准差与平均值的比值,依据其大小评价土壤水分的变异程度。利用Origin 21.0软件中Correlation Plot绘制不同土层、水文年、时间尺度土壤水分与气象因子的相关分析图。以气象因子为自变量、土壤水分体积分数为因变量,采用SPSS 21.0软件进行线性逐步回归分析。

2 结果与分析

2.1 日尺度土壤水分变化及影响要素

日尺度土壤水分在生长季内波动明显(图1),不同年份存在差异,2018年为先下降、再大幅升高、之后处于较高水平、最后逐渐减小;2019年为先平稳后大幅升高、再明显降低、之后呈波浪状升高、最后缓慢下降;2020年为先降低、再波浪状上升、后逐步减小;2021年为先平稳、再大幅降低、之后明显升高、最后减小;2022年和2023年为先降低后升高的波浪状变化。整体上,丰水年、平水年、枯水年土壤水分分

别呈波浪状、“u”形和“w”形。

从 0~100 cm 土层土壤水分体积分数日平均值看, 2018—2023 年最大值分别出现在 8 月 22 日 (25.71%)、8 月 27 日 (26.04%)、8 月 24 日 (24.29%)、

10 月 7 日 (24.91%)、4 月 1 日 (18.98%)、10 月 19 日 (16.48%); 最小值分别出现在 6 月 24 日 (13.09%)、6 月 20 日 (15.33%)、6 月 15 日 (12.04%)、8 月 16 日 (7.72%)、8 月 17 日 (8.05%)、7 月 27 日 (7.50%)。

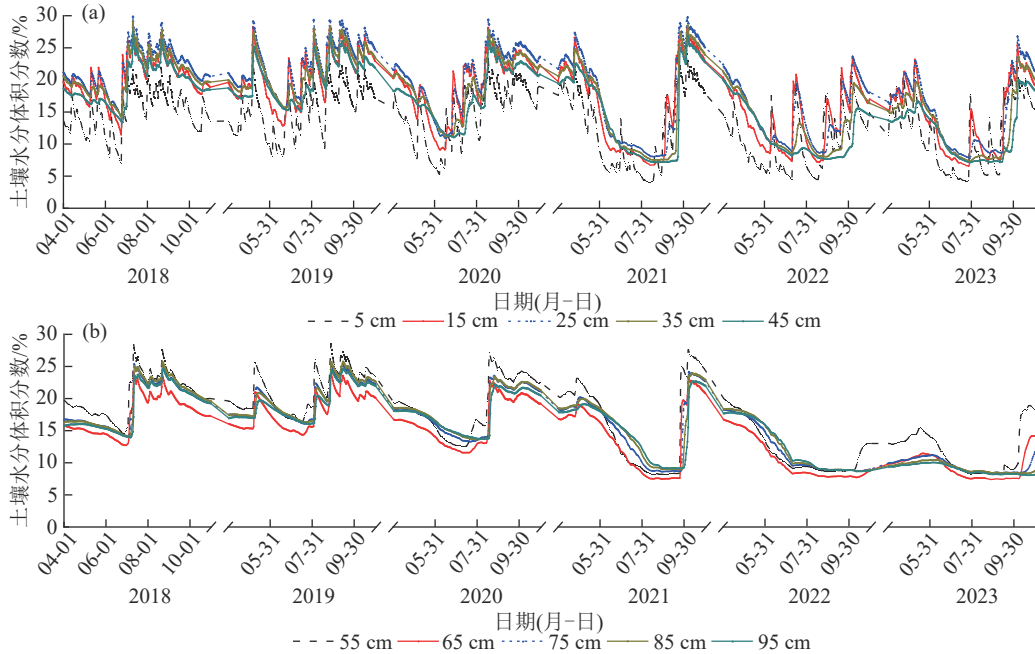


图 1 丰水年、平水年、枯水年不同深度土壤水分体积分数日变化

Fig. 1 Diurnal variation of volumetric soil moisture at different depths in wet years, normal years and dry years

由图 2 可知,不同水文年,日尺度土壤水分体积分数变异系数随土层加深大致呈倾斜的“S”形,随土层加深变异系数基本表现为先降低一再稳定一后减小的变化趋势。2018—2023 年,0~100 cm 土层土壤水分体积分数变异系数平均值分别为 17.04%、16.38%、22.19%、39.57%、31.85%、27.03%,最大值与最小值的差值分别为 6.48%、10.49%、13.93%、19.90%、12.14%、37.86%,最大值与最小值的比值分别为 1.44、1.76、1.85、1.70、1.41、5.66。

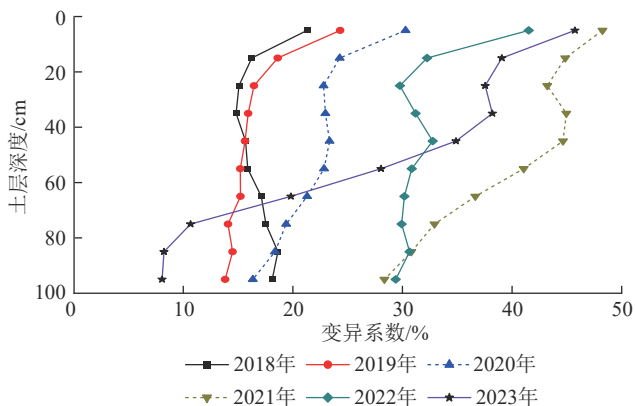


图 2 日尺度土壤水分体积分数变异系数随土层深度的变化
Fig.2 The variation coefficient of volumetric soil moisture with soil depth at daily scale

由图 3 可知,各土层土壤水分变异系数活跃等级。当变异系数 > 30% 为速变层,变异系数处于

20%~30% (10%~20%) 为活跃层 (次活跃层), 变异系数 < 10% 为相对稳定层。不同水文年土壤水分垂直分布见图 3。2018 年、2019 年 0~10 cm 为活跃层, 10~100 cm 为次活跃层; 2020 年 0~10 cm 为速变层, 10~70 cm 活跃层, 70~100 cm 为次活跃层; 2021 年、2022 年 0~90 cm 为速变层, 90~100 cm 为活跃层; 2023 年 0~50 cm 为速变层, 50~60 cm 为活跃层, 60~80 cm 为次活跃层, 80~100 cm 为相对稳定层。

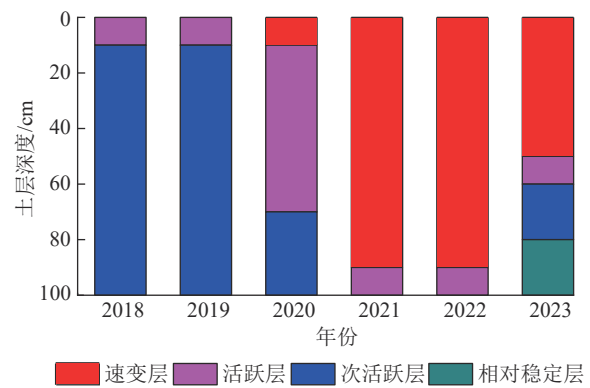


图 3 丰水年、平水年、枯水年土壤水分垂直分布
Fig.3 Vertical distribution of soil moisture in wet years, normal years and dry years

由图 4 可知,从小雨到大雨及暴雨,土壤水分入渗的深度逐渐加深。丰水年 (2018 年) 到枯水年

(2023年),土壤水分平均入渗深度呈下降趋势,具体分别为42、45、44、36、26、28 cm;不同降水类型也基本表现出类似的变化,土壤水分年际平均入渗深度

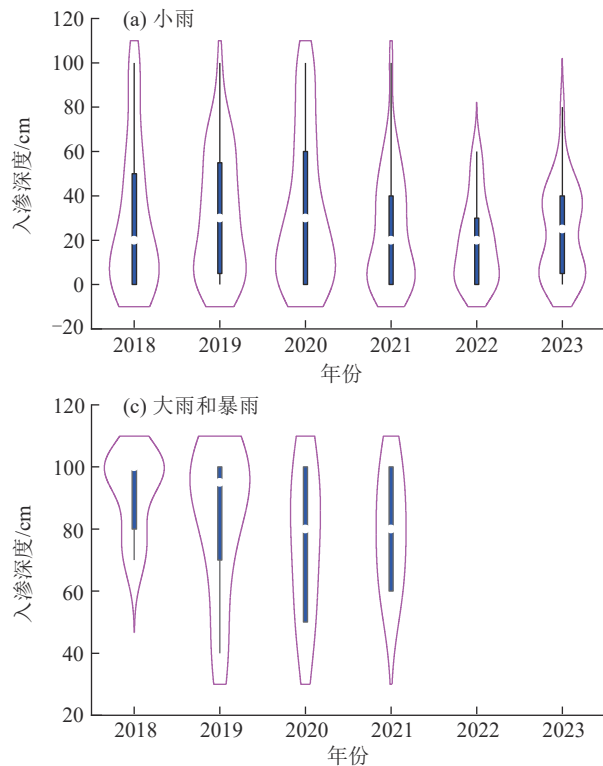


图4 土壤水分入渗深度对降水类型的响应

Fig. 4 Response of soil water infiltration depth to precipitation types

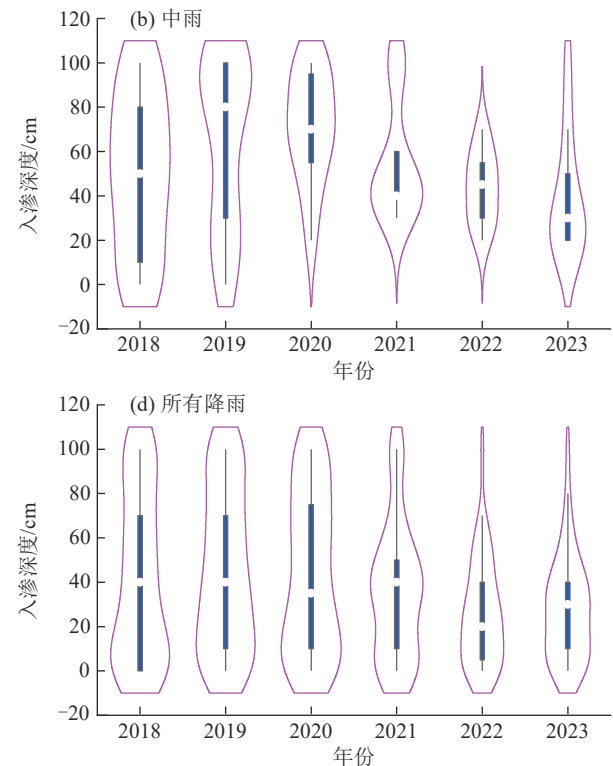
由图5可知,在丰水年和平水年,不同层次土壤水分体积分数间均为显著正相关性($p < 0.05$),在枯水年,70~100 cm土层土壤水分体积分数与其他土层相关性不显著($p > 0.05$),个别为显著负相关,表明丰水年和平水年不同层次土壤水分时间动态较为一致,而枯水年差异较大。

丰水年,0~100 cm土层土壤水分体积分数与日平均气温、日最高气温、太阳辐射、饱和水汽压差、潜在蒸散呈显著负相关,与相对湿度呈显著正相关,与其他因子相关性不显著。随土层加深,日平均气温、日最高气温、太阳辐射、相对湿度、饱和水汽压差、潜在蒸散对土壤水分的作用大致表现为先减弱后轻微增强,降水量对土壤水分的作用表现为逐渐减弱,以上7个因子对5 cm处土壤水分的影响最强。

平水年,0~100 cm土层土壤水分体积分数与气象因子的相关性与丰水年相似(除与日最低气温显著负相关外)。随土层加深,日平均气温、日最高气温(日最低气温)对土壤水分的作用呈不明显减弱(增强),太阳辐射、相对湿度、饱和水汽压差、风速、潜在蒸散对土壤水分的作用表现为逐渐减弱,降水量对土壤水分的影响由正效应转变为负效应。

枯水年,0~100 cm土层土壤水分体积分数与气

在小雨时分别为30、31、33、25、19、24 cm,在中雨时分别为50、65、71、55、44、40 cm;因2022年、2023年大雨和暴雨共仅有1场,难以体现变化规律。

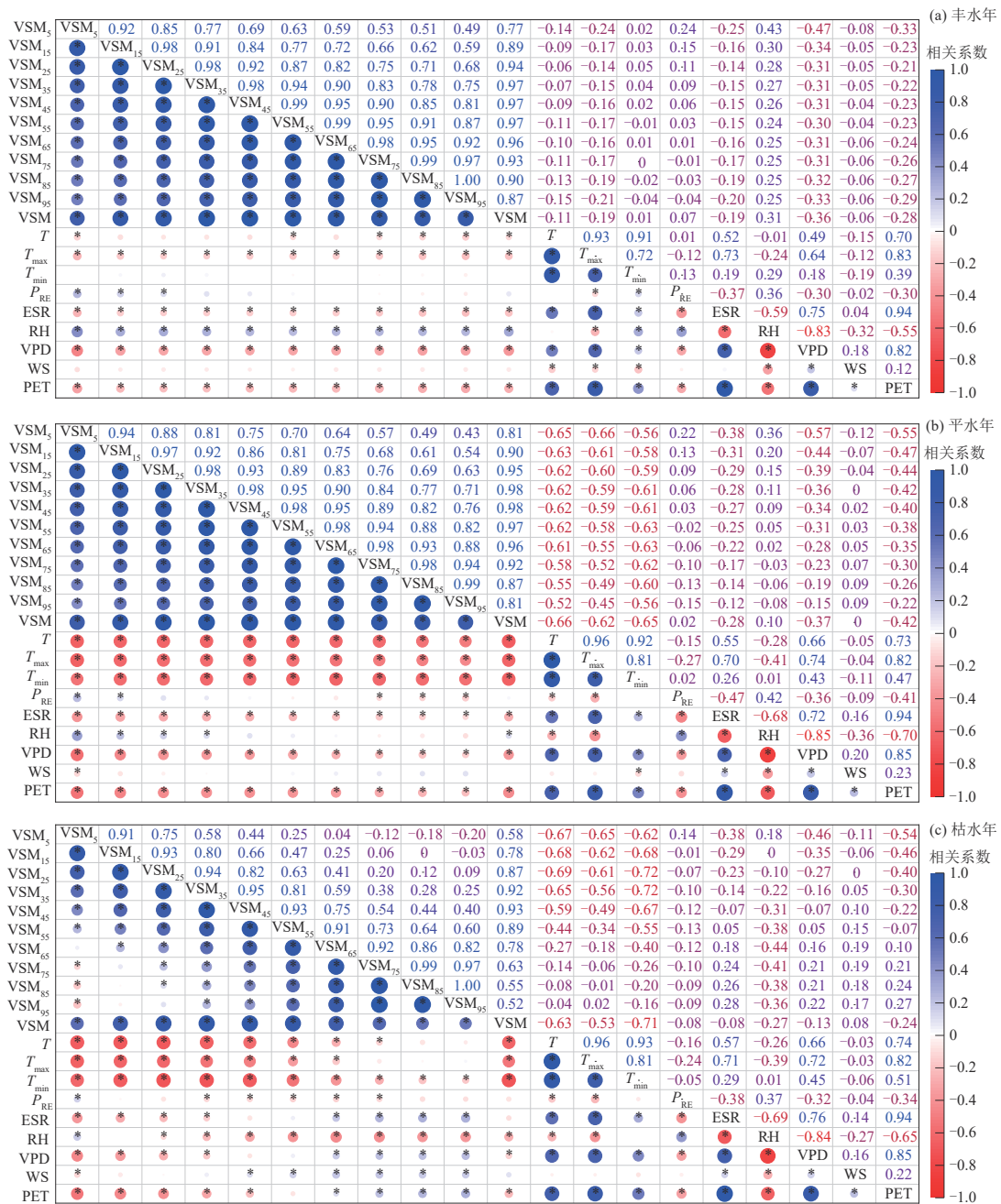


温、相对湿度、饱和水汽压差、潜在蒸散呈显著负相关,与其他因子相关性不显著。随土层加深,气温对土壤水分的作用逐渐减弱,降水量和相对湿度对土壤水分的影响由正效应转变为负效应,其他因子对土壤水分的影响由负效应转变为正效应。

日尺度土壤水分体积分数与气象因子的逐步回归分析显示(表1),进入的气象因子依次为日最高气温、太阳辐射、饱和水汽压差等7个,共同解释土壤水分23.1%的变异;从丰水年到枯水年,进入的气象因子分别为5个(太阳辐射、潜在蒸散、风速等),2个(日平均气温和太阳辐射),5个(相对湿度、日平均气温、风速等),分别解释土壤水分29.2%、44.8%、61.5%的变异。

2.2 月尺度土壤水分变化及影响要素

月尺度(图6)土壤水分时间动态与日尺度(图2)相似。丰水年土壤水分呈先升后降,峰值不同,2019年比2018年滞后1个月;平水年土壤水分为先降后升,低谷存在差异,2021年比2020年滞后1个月;枯水年与平水年类似,但低谷的时段较长,影响的土层深度更深。总体上,不同水文年生长季土壤水分季节动态可大致分为相对稳定期(4—5月)和频繁波动期(6—10月)。



注: VSM₅、VSM₁₅、VSM₂₅、VSM₃₅、VSM₄₅、VSM₅₅、VSM₆₅、VSM₇₅、VSM₈₅、VSM₉₅、VSM 分别为 5、15、25、35、45、55、65、75、85、95、0~100 cm 土层土壤水分体积分数; T、T_{max}、T_{min} 分别为日(月、生长季)平均气温、日最高气温、日最低气温; P_{RE}、ESR、RH、VPD、WS、PET 分别为降水量、太阳辐射、相对湿度、饱和水汽压差、风速、潜在蒸散量; *表示相关性显著(p<0.05)。下同。

图 5 丰水年、平水年、枯水年土壤水分体积分数与气象因子的相关分析

Fig. 5 Correlation analysis between volumetric soil moisture and meteorological factors in wet years, normal years and dry years

表 1 不同时间尺度土壤水分体积分数与气象因子的逐步回归分析

Table 1 Stepwise regression analysis of volumetric soil moisture and meteorological factors at different time scales

尺度	水文年	拟合方程	R ²	p
日尺度	丰水年(n=398)	SWC=0.070ESR-5.145PET+1.203WS-0.618T _{max} +0.974T+18.811	0.292	<0.001
	平水年(n=428)	SWC=-0.608T+0.007ESR+24.627	0.448	<0.001
	枯水年(n=428)	SWC=-0.097RH-0.364T-0.511WS-1.811VPD+0.327PET+24.732	0.615	<0.001
月尺度	(n=1254)	SWC=-0.688T _{max} +0.031ESR-3.717VPD+0.054P _{RE} -0.071RH+0.496T-1.126PET+27.624	0.231	<0.001
生长季	(n=41)	SWC=-0.683T+0.053P _{RE} +23.237	0.535	<0.001
	(n=6)	SWC=0.026P _{RE} +4.744	0.907	<0.01

从 0~100 cm 土层土壤水分体积分数月平均值来看,2018—2023 年土壤水分体积分数最大值分别出现在 8 月(22.90%)、9 月(23.75%)、9 月(21.96%)、10

月(23.49%)、4 月(17.76%)、10 月(15.57%);最小值分别为 6 月(14.89%)、6 月(16.58%)、6 月(13.02%)、8 月(8.08%)、8 月(8.85%)、7 月(8.21%)。

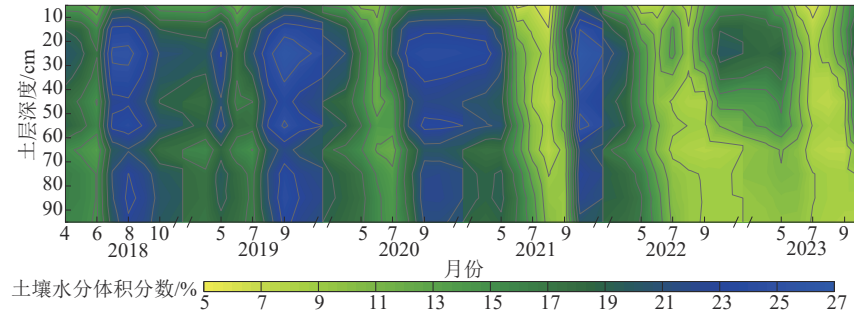


图 6 丰水年、平水年、枯水年土壤水分体积分数月变化

Fig. 6 Monthly variation of volumetric soil moisture in wet years, normal years and dry years

随土层加深,丰水年各月土壤水分大致呈倾斜 90°的“M”形(图 7),各土层的土壤水分差异较小;平水年各月土壤水分变化与丰水年大致相似,但 2020 年 7 月和 2021 年 9 月变化不同,0~40 cm 土层土壤水

分明显高于 40~100 cm 土层;枯水年 2022 年 5 月和 6 月土壤水分呈波浪状逐渐增加,2022 年 7 月、9 月、10 月和 2023 年 4 月、5 月、6 月、9 月、10 月大致呈先升后降,其余月份变化与丰水年相似。

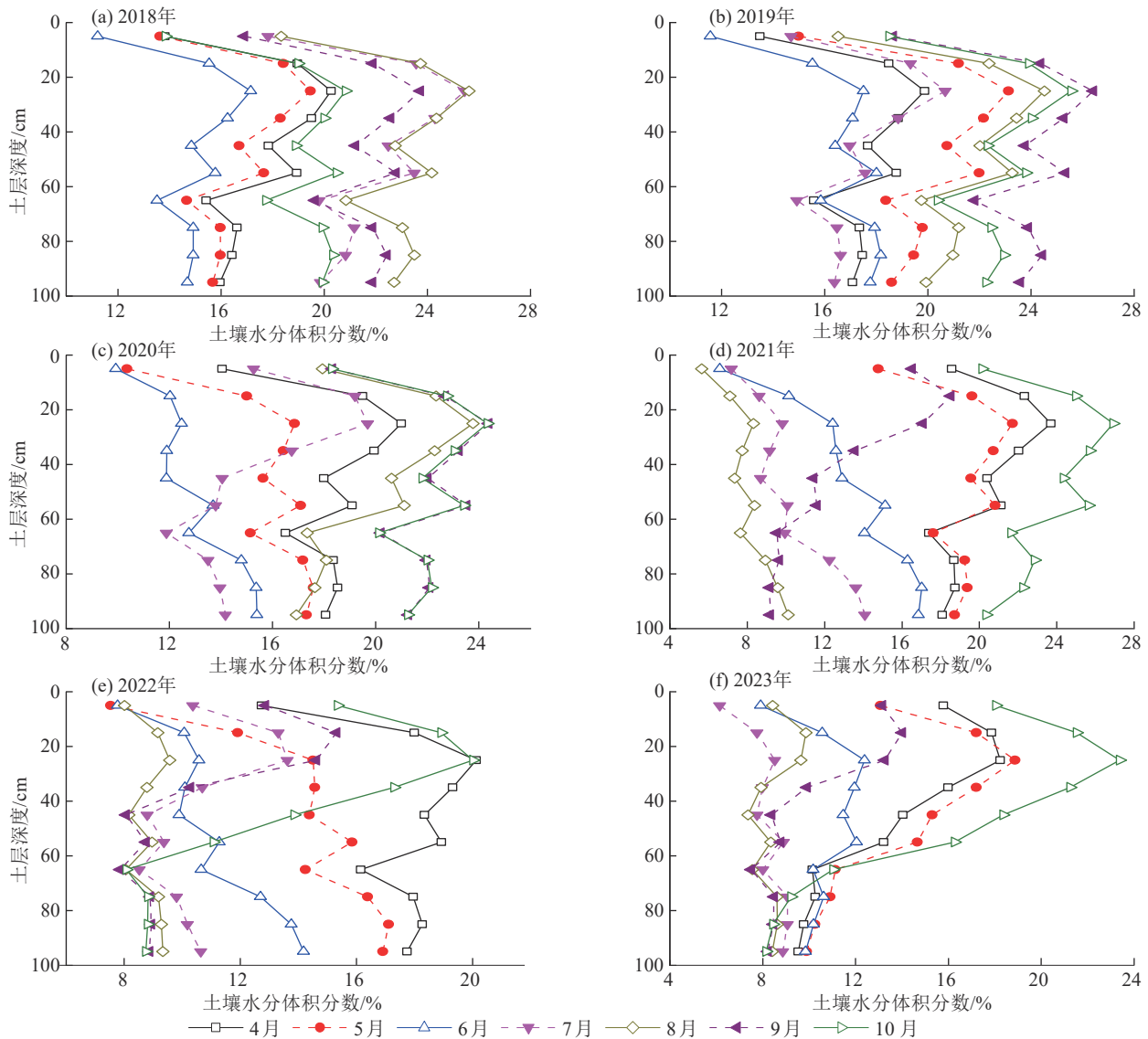


图 7 丰水年、平水年、枯水年月平均土壤水分体积分数随土层深度的变化

Fig. 7 The variation of monthly average volumetric soil moisture with soil depth in wet years, normal years and dry years

不同层次的土壤水分体积分数月平均值均呈显著正相关(图8)。0~100 cm 土层土壤水分体积分数与气温、太阳辐射、饱和水汽压差、潜在蒸散呈显著负相关,与降水量呈显著正相关,与相对湿度、风速呈正相关但不显著。随土层加深,气温、降水量、太

阳辐射、相对湿度、饱和水汽压差、潜在蒸散对土壤水分的作用逐渐减弱,风速对土壤水分的影响由负效应变为正效应。月尺度土壤水分体积分数与气象因子的逐步回归分析(表1)显示,进入的气象因子依次为气温和降水量,二者共同解释土壤水分53.5%的变异。

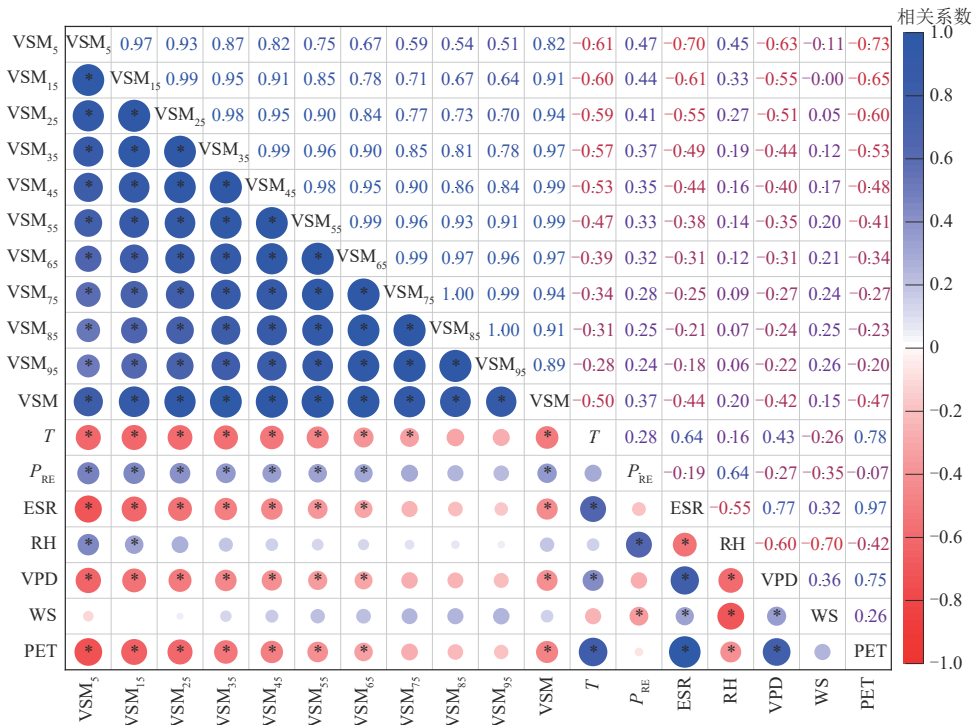


图8 土壤水分体积分数月均值与气象因子的相关性

Fig. 8 Correlation analysis between monthly mean volumetric soil moisture and meteorological factors

2.3 生长季土壤水分变化及影响因素

随土层加深,生长季土壤水分大致呈倾斜90°的“M”形(图9),0~100 cm 土层土壤水分体积分数大小顺序依次为2019年(19.88%)、2018年(19.50%)、2020年(18.02%)、2021年(15.32%)、2022年(12.29%)、2023年(11.47%)。2018—2023年,不同层次土壤水分均逐渐降低,以年份为X轴,土壤水分体积分数为Y轴,土层由浅至深,土壤水分体积分数平均每年降低值分别为0.98%、1.58%、1.79%、1.92%、1.89%、2.15%、1.91%、2.17%、2.22%、2.12%,平均为1.87%,表现为先增加后趋于稳定。

生长季不同层次的土壤水分体积分数间均为显著正相关(图10)。0~100 cm 土层土壤水分体积分数与饱和水汽压差呈显著负相关,与降水量、风速呈显著正相关,与其他因子相关性不显著。随土层加深,气温、太阳辐射、潜在蒸散对土壤水分的作用微弱降低,其他因子对土壤水分的作用呈先升后降的微弱变化。生长季土壤水分体积分数与气象因子的逐步回归分析(表1)显示,进入的气象因子仅为降水量,单独解释土壤水分90.7%的变异。

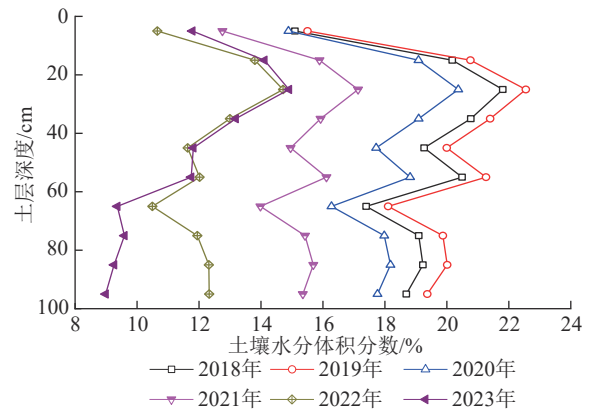


图9 生长季土壤水分体积分数随土层深度的变化

Fig. 9 Variation of volumetric soil moisture with soil depth in the growing season

3 讨论

3.1 土壤水分动态特征

在干旱半干旱区,降水是林草植被生态耗水和土壤水分补给的主要来源,已有研究^[5-6,9,17]也证实,土壤水分时空变化主要受降水影响。本研究显示,丰水年土壤水分高于平水年,平水年高于枯水年,主要由不同水文年降水量差异导致。研究期间从丰水年至枯水年,土壤水分体积分数平均每年降低值随

土层加深为先增大后稳定,与降水在丰水年对深层土壤补给时段较长、平水年和枯水年补给时段较短有关。月土壤水分体积分数最大值在丰水年和平水年多在降水量最大月的次月(除 2018 年二者均为 8 月外),是因降水对土壤水分补给具有滞后性^[5];第 1 个枯水年出现在 4 月,是因上年 9 月、10 月降水量高(占生长季总量的 56.95%),气温低,太阳辐射弱,存储在土壤中的水分较多,而 2022 年降水少,土壤水分

消耗大于补给;第 2 个枯水年出现在 10 月,是因上年为枯水年,存储在土壤中的水分较少,2023 年 9 月和 10 月降水相对较高,且与蒸散相关的因子均较低,土壤水分的补给大于消耗。月土壤水分体积分数最小值在 2018—2020 年均均为 6 月,主要与 6 月气温和饱和水气压差较高、太阳辐射较强有关;2021—2023 年出现在 7 月或 8 月,与该月份和蒸散相关的因子较高、降水量较低紧密相关。

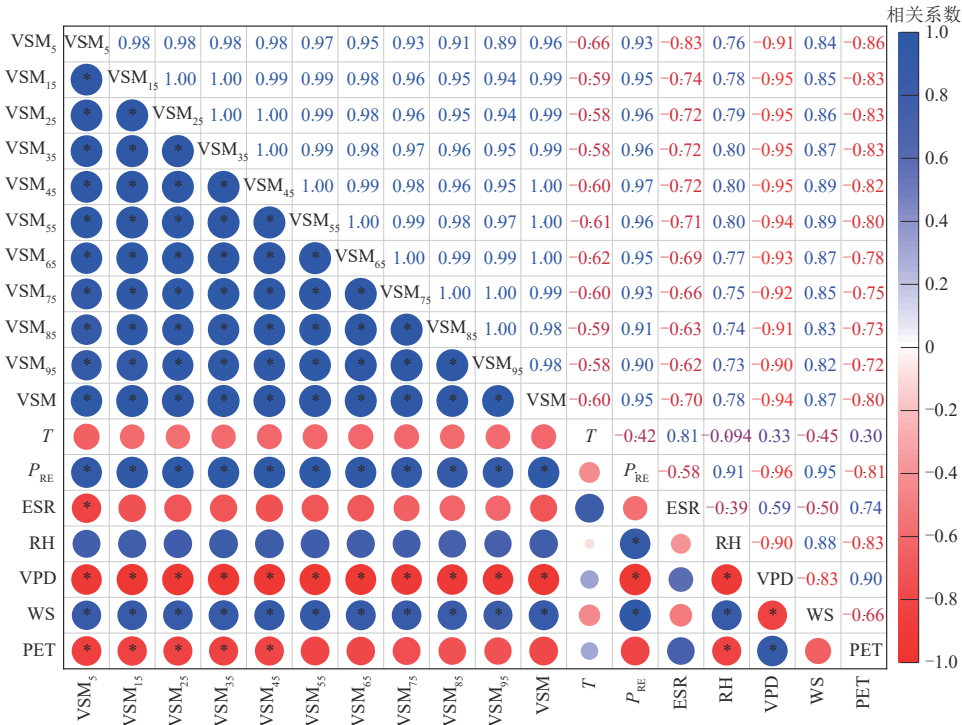


图 10 生长季土壤水分体积分数与气象因子的相关分析

Fig. 10 Correlation analysis between volumetric soil moisture and meteorological factors in the growing season

丰水年、平水年、枯水年日土壤水分分别呈波浪状、“u”形、“w”形,与不同水文年降水格局、蒸散发特征、植物生长节律等相关。从丰水年至枯水年,不同土层(如 5、95 cm)土壤水分变化差异逐渐增大,即不同土层水分动态在丰水年相似(2019 年 5、95 cm 均为相似波浪状),而枯水年差异较大,2023 年 5 cm 为“w”形,而 95 cm 为先平稳后缓慢降低,是因为丰水年土壤水分整体较高,而枯水年深层土壤受到降水补给的时段极少。日土壤水分体积分数最大值和最小值出现的月份与月尺度相似,证明日和月土壤水分动态受降水等多个气象因子的综合影响。本研究发现,不同水文年和降水类型土壤水分入渗深度存在差异,主要受(年)降水量大小、降水前期土壤水分状况等因素影响,降水优先补给表层土壤,或表层土壤水分接近饱和也可直接补给到深层,有研究^[5]发现相似的特征。

层次,丰水年 0~10 cm 为活跃层,其余为次活跃层,主要因丰水年 10~100 cm 土层土壤水分处于较高水平,变幅较小;第 1 个平水年 0~10 cm 为速变层,10~70 cm 为活跃层,其余为次活跃层,表明随降水减少,出现速变层且活跃层延伸至 70 cm 土层;第 2 个平水年和第 1 个干旱年 0~90 cm 为速变层,90~100 cm 为活跃层,主要因第 2 个平水年季节干旱明显,相近地区也得到验证^[18],第 1 个干旱年初期土壤水分较好,后期持续降低导致速变层延伸至 90 cm;第 2 个干旱年 0~50 cm 为速变层,80~100 cm 为相对稳定层,主要因初期土壤水分较低,降水大多补给到 50 cm 土层,而 80 cm 土层未得到有效补给,一直处于较低水平。不同区域或植被研究结果存在差异,如单燕等^[19]在黄土高原不同地貌区调查发现,500 cm 深的土壤剖面划分为速变层(0~40 cm)、活跃层(40~100 cm)、次活跃层(100~200 cm)、相对稳定层(200~500 cm);张维福等^[20]将宁夏河东沙地 150 cm 土层垂直划分为

依据土壤水分变异系数将土层划分为 4 个垂直

活跃层(0~20 cm)、次活跃层(20~40 cm)、稳定层(40~150 cm);闵梓骁等^[21]将新疆沙棘林100 cm土层划分为显著变化层、次变化层、相对稳定层;施政乐等^[22]在晋西黄土区研究得出,不同土地利用类型1 000 cm土层垂直变化分为剧烈变化层、弱变化层、稳定变化层;廉泓林等^[23]在科尔沁沙地将200 cm深的土壤剖面划分为易变层、活跃层、稳定层。上述研究结果均表现为表层土壤水分变化大于底层,与表层土壤水分消耗与补给均比深层明显有关。干旱地区多个研究点位的土壤水分垂直层次划分不尽相同,与土壤特性、气候特征、植被类型、土地利用、研究土层深度差异等紧密相关。

受植被季节性生长、气象条件等影响,土壤水分季节变化明显。本研究土壤水分季节动态分为相对稳定期(4—5月)和频繁波动期(6—10月)。4月、5月降水较少、影响林地蒸散的气象要素较低等导致土壤水分相对稳定,而6—10月,林地蒸散导致土壤水分减少,降水补给增加土壤水分,土壤水分在丰水年(枯水年)呈整体较高(低)的波浪状。多个研究在不同区域对土壤水分季节动态的划分不完全一致,如将宁夏河东沙地划分为积累期(4—5月)、消耗期(6—8月)、平稳期(9—11月)^[20];在新疆玛纳斯县将沙棘林划分为消耗期(5—6月)、快速补充期(6—7月)、消退期(7—9月)^[21];在晋西黄土区将典型林地划分为稳定期(1—3月)、波动期(4—6月)、增长期(7—9月)、消耗期(10—12月)^[24];将科尔沁固沙人工林地划分为冻结期(11月下旬至翌年2月)、补充期(3—4月)、消耗期(5—9月)、稳定期(10—11月上旬)^[23]。上述报道均存在差异,与植被类型、植物生长节律、降水年型与季节格局、研究时段等差异有关。

3.2 土壤水分动态影响要素

受气象、土壤、植被等共同影响,土壤水分时空动态明显。已有研究^[5,25]发现,土壤水分时间动态与气象要素的变化紧密相关。通常来说,降水和相对湿度可增加土壤水分,温度、太阳辐射、饱和水汽压差、风速、潜在蒸散能导致土壤水分散失。有学者^[26]分析得出,日尺度土壤水分与降水量呈显著正相关;受降水等气象条件、植被生长节律的共同影响^[27];与气温和地表温度呈负相关,与降水量呈正相关^[28]。上述结果存在差异,与研究区气候、物种生物学特性、研究时段等不一致有关。本研究显示,在丰水年和平水年,土壤水分与气温、太阳辐射、饱和水汽压差、潜在蒸散呈显著负相关,与相对湿度呈显著正相关;在枯水年,土壤水分与气温、相对湿度、饱和水汽压差、潜在蒸散呈显著负相关,与大多数的研究^[5,26-28]

基本相符。不同水文年0~100 cm土层土壤水分与降水量相关性不显著,仅浅层土壤水分与降水量呈显著正相关,主要因生长季初期和末期植被蒸腾耗水较小、引起土壤蒸发的气象因子较弱等导致土壤水分较高,而降水较多的中期土壤水分较低。从丰水年至枯水年逐步回归进入的气象因子分别为5、2、5个,对土壤水分变化的解释率逐渐增加,分别为29.2%、44.8%、61.5%,可能与不同水文年降水等的格局差异有关。

有研究^[9,27]发现,月尺度土壤水分动态与降水量变化大致同步;受降水格局影响较大^[29];除降水量、植被种类和分布影响外,还与地貌有关^[20]。本研究显示,土壤水分与气温、太阳辐射、饱和水汽压差、潜在蒸散呈显著负相关,与降水量呈显著正相关,与多数研究^[9,20,27,29]结论相同,也表明从日到月尺度,降水对土壤水分的作用逐渐增强。有学者^[30]基于13 a的观测发现,年尺度土壤贮水量与降水量变化较为一致,与本研究结果基本一致;本研究表明,生长季土壤水分与饱和水汽压差呈显著负相关,与降水量、风速呈显著正相关,且降水量单独解释土壤水分90.7%的变化,再次证明研究时间尺度越大,降水量对土壤水分变化的作用越强。

土壤水分影响林分的类型与分布,而不同时间尺度和降水年型造成土壤水分较大差异。土壤水分动态是生态人工林地降雨补给与消耗相互作用的结果,如长时间序列枯水年影响林木生长,特别是人为高密度造林区域,还对林分稳定性构成威胁,林木生长依赖降水,受干旱气候制约,林分抗逆性脆弱,易恶化林木更新环境,影响人工林的稳定可持续发展,因此,在人工林经营时,必须考虑土壤水分因素的限制作用。

4 结论

1)山杏林土壤水分日变化在丰水年为波浪状,平水年呈“u”形,枯水年呈“w”形;月变化在丰水年为先升后降,平水年和枯水年为先降后升;生长季随年份推进逐渐降低。生长季0~100 cm土层土壤水分体积分数在丰水年、平水年、枯水年分别为19.69%、16.67%、11.88%。

2)土壤水分变异系数随土层加深大致呈倾斜的“S”形,其大小顺序为季节干旱的平水年、枯水年、平水年、丰水年。0~100 cm土层土壤水分垂直分布在丰水年存在活跃层和次活跃层;平水年存在速变层、活跃层和次活跃层;季节干旱的平水年和首个枯水年存在速变层和活跃层;持续干旱年存在速变层、活跃层、次活跃层、相对稳定层。

3)日尺度,丰水年和平水年土壤水分与气温、太阳辐射、饱和水汽压差、潜在蒸散呈显著负相关,与相对湿度呈显著正相关,枯水年不同的是与相对湿度呈负相关;月尺度土壤水分与气温、太阳辐射、饱和水汽压差、潜在蒸散呈显著负相关,与降水量呈显著正相关;生长季土壤水分与饱和水汽压差呈显著负相关,与降水量、风速呈显著正相关。从丰水年到枯水年、日尺度到生长季尺度,气象因子对土壤水分变化的解释率逐渐增大。

参考文献:

- [1] XU J, WANG S, XIAO Y, et al. Mapping the spatio-temporal heterogeneity of ecosystem service relationships and bundles in Ningxia, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 294: e126216.
- [2] 温晓霞, 廖允成, 王立祥, 等. 宁南旱作农区种植业结构调整研究[J]. 中国农业科技导报, 2002, 4(6): 28-31.
WEN X X, LIAO Y C, WANG L X, et al. Studies on cropping structure adjustment in the dry-land region of south Ningxia[J]. Review of China Agricultural Science and Technology, 2002, 4(6): 28-31.
- [3] YANG L, ZHANG H D, CHEN L D. Identification on threshold and efficiency of rainfall replenishment to soil water in semi-arid loess hilly areas [J]. Science China Earth Sciences, 2018, 61(3): 292-301.
- [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: 110-117.
- [5] 韩新生, 许浩, 蔡进军, 等. 宁夏黄土区稀疏带状山杏人工林土壤湿度动态与影响因素[J]. 林业科学, 2024, 60(4): 79-90.
HAN X S, XU H, CAI J J, et al. Soil moisture dynamics and the influencing factors in the sparse strip-planted *Prunus sibirica* plantation in the loess region of Ningxia [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2024, 60(4): 79-90.
- [6] 孙亚荣, 陈云明, 王亚娟, 等. 黄土丘陵区柠条人工林土壤水分动态变化特征及降雨特征对其影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(1): 272-279.
SUN Y R, CHEN Y M, WANG Y J, et al. Dynamic variation characteristics of soil moisture in *Caragana korshinskii* plantation in loess hilly area and the influence of rainfall characteristics on it [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(1): 272-279.
- [7] 韩新生, 王彦辉, 于澎涛, 等. 六盘山半干旱区华北落叶松林土壤水分时空变化与影响因素[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 111-117.
HAN X S, WANG Y H, YU P T, et al. Temporal and spatial variation and influencing factors of soil moisture in *Larix principis-rupprechtii* plantation in semiarid Liupan mountains, northwest China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(1): 111-117.
- [8] 韩新生, 刘广全, 许浩, 等. 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[J]. 水土保持学报, 2022, 36(6): 250-259.
HAN X S, LIU G Q, XU H, et al. Temporal and spatial variation characteristics of soil moisture under three land use types in the semi-arid loess region of southern Ningxia [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6): 250-259.
- [9] 翟博超, 朱燕, 申小娟, 等. 黄土丘陵区两个典型成熟森林群落土壤水分时空变化特征及对降雨事件的响应[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 170-178.
ZHAI B C, ZHU Y, SHEN X J, et al. Spatiotemporal variation of soil moisture and the responses to rainfall events in two typical mature forest stands in the Loess Hilly Region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 170-178.
- [10] 钱海燕, 陈玲, 孙波. 不同水文年气候和施肥对红壤剖面水分变化的相对影响[J]. 土壤, 2015, 47(2): 378-386.
QIAN H Y, CHEN L, SUN B. Relative impact of climate and long-term manuring in shaping water variation in red soil profile during different hydrological years [J]. Soils, 2015, 47(2): 378-386.
- [11] 邹文秀, 韩晓增, 王守宇, 等. 降水年型对黑土区土壤水分动态变化的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 138-142.
ZOU W X, HAN X Z, WANG S Y, et al. Impact of different yearly rainfall patterns on dynamic changes of soil moisture in black soil region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(5): 138-142.
- [12] 张北赢, 徐学选, 刘文兆, 等. 黄土丘陵沟壑区不同降水年型下土壤水分动态[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1234-1240.
ZHANG B Y, XU X X, LIU W Z, et al. Dynamic changes of soil moisture in loess hilly and gully region under effects of different yearly precipitation patterns [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6): 1234-1240.
- [13] 杨淑香. 农牧林交错带不同降水年型下土壤水分动态研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(7): 107-110.
YANG S X. Soil moisture dynamics in farming-foresting-pasturing area under different rainfalls [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(7): 107-110.
- [14] ALLEN R, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements [J]. FAO Irrigation and Drainage, 1998, 56: 1-15.
- [15] 仇知雨, 梁忠民, 赵建飞, 等. 场次降雨空间插值方法对比研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(11): 60-68.
QIU Z Y, LIANG Z M, ZHAO J F, et al. Comparative study on spatial interpolation methods of rainfall events

- [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53(11):60-68.
- [16] 韩新生, 许浩, 安钰, 等. 不同天气条件下山杏树干液流速率对环境因子变化的响应[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2023, 43(6):54-64.
HAN X S, XU H, AN Y, et al. Responses of trunk sap flow of *Armeniaca sibirica* to varied environmental factors in different weather conditions[J]. *Journal of Southwest Forestry University(Natural Sciences)*, 2023, 43(6):54-64.
- [17] 吕浩, 王兴, 宋乃平, 等. 荒漠草原4种典型草本植物群落土壤水分动态对极端干旱降水的响应[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(6):145-152.
LÜ H, WANG X, SONG N P, et al. Response of soil moisture dynamics in four typical herbaceous communities to extreme drought precipitation in the desert steppe[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(6):145-152.
- [18] LIU B B, YU P T, ZHANG X, et al. Transpiration sensitivity to drought in quercus wutaishansea mary forests on shady and sunny slopes in the Liupan Mountains, northwestern China[J]. *Forests*, 2022, 13(12):e1999.
- [19] 单燕, 索立柱, 王洁, 等. 黄土高原样带典型地貌类型坡面土壤水分分布特征及其差异[J]. *土壤*, 2024, 56(3):593-600.
SHAN Y, SUO L Z, WANG J, et al. Distribution characteristics of soil water on slopes in typical landform types on Loess Plateau[J]. *Soils*, 2024, 56(3):593-600.
- [20] 张维福, 张呈春, 马思怡, 等. 宁夏河东沙地土壤水分动态变化[J]. *水土保持通报*, 2024, 44(4):97-106.
ZHANG W F, ZHANG C C, MA S Y, et al. Dynamic changes of soil moisture in sandy lands in east of Yellow River in Ningxia[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(4):97-106.
- [21] 闵梓骁, 张建新, 范文波, 等. 不同立地条件下沙棘土壤水分分布特征及动态生长研究[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(4):204-210.
MIN Z X, ZHANG J X, FAN W B, et al. Soil moisture distribution and dynamic growth of *Hippophae rhamnoides* under different site conditions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(4):204-210.
- [22] 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.
SHI Z L, ZHANG J J, SHEN M S, et al. Effects of different land use types on soil moisture in the loess region of western Shanxi Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(6):190-197.
- [23] 廉泓林, 李卫, 冯金超, 等. 科尔沁沙地典型固沙人工林地土壤水分时空特征及其对环境因子的响应[J]. *生态学报*, 2021, 41(20):8256-8265.
LIAN H L, LI W, FENG J C, et al. Spatiotemporal characteristics of soil moisture and its responses to environmental factors in two typical sand-fixing plantations at the south edge of Horqin Sandy Land[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(20):8256-8265.
- [24] 赵丹阳, 毕华兴, 侯贵荣, 等. 晋西黄土区典型林地土壤水分变化特征[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1):181-187.
ZHAO D Y, BI H X, HOU G R, et al. Soil moisture dynamics of typical plantation in loess region of west Shanxi[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1):181-187.
- [25] CHEN D Y, WANG Y K, LIU S Y, et al. Response of relative sap flow to meteorological factors under different soil moisture conditions in rainfed jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) plantations in semiarid northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 136:23-33.
- [26] 安钰, 韩新生, 郭永忠, 等. 宁南山区不同植被类型土壤水分变化特征[J]. *北方园艺*, 2024(8):59-65.
AN Y, HAN X S, GUO Y Z, et al. Variation characteristics of soil water under different vegetation types in mountain area of southern Ningxia[J]. *Northern Horticulture*, 2024(8):59-65.
- [27] 万佳怡, 矢佳昱, 张华敏, 等. 三江源区不同覆被类型高寒草甸土壤水分变化特征[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(8):1343-1353.
WAN J Y, SHI J Y, ZHANG H M, et al. Soil moisture variation characteristics of alpine meadow with different cover types in the Three-River Source Region[J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(8):1343-1353.
- [28] CHO E, CHOI M. Regional scale spatio-temporal variability of soil moisture and its relationship with meteorological factors over the Korean peninsula[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 516:317-329.
- [29] 成龙, 吴波, 贾晓红, 等. 基于连续观测数据的毛乌素沙地生长季土壤水分动态及其对降雨的响应[J]. *干旱区地理*, 2024, 47(4):648-661.
CHENG L, WU B, JIA X H, et al. Dynamic change of soil moisture and its response to rainfall during the growing season in Mu Us Sandy Land based on continuous observation data[J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(4):648-661.
- [30] 程积民, 万惠娥, 王静, 等. 黄土丘陵半干旱区天然草地土壤水分调控研究[J]. *草地学报*, 2003, 11(4):296-300.
CHENG J M, WAN H E, WANG J, et al. Soil water regulation of the natural grassland of semi-arid loess hilly region[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2003, 11(4):296-300.