

晋西黄土区不同土地利用类型对土壤水分的影响

施政乐¹, 张建军^{1,2,3,4}, 申明爽¹, 刘畅¹, 胡亚伟¹, 徐勤涛¹, 李阳¹

(1.北京林业大学水土保持学院, 北京 100083;

2.山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 山西 吉县 042200; 3.水土保持国家林业局重点实验室 (北京林业大学), 北京 100083; 4.林业生态工程教育部工程研究中心 (北京林业大学), 北京 100083)

摘要: 为明确不同土地利用类型对土壤水分的影响, 采用土钻法在 2019 年和 2020 年 4—10 月定期对晋西黄土区人工油松林地、荒草地、农地 0—10 m 土层的含水量进行了观测研究。结果表明: (1) 人工油松林地 0—10 m 土层的蓄水量为 1 281.13 mm, 荒草地为 1 712.85 mm, 农地为 1 804.77 mm。油松林地较荒草地和农地多消耗 431.72, 523.64 mm 的水分, 且多消耗的土壤水分主要来源于深层土壤。 (2) 3 个土地利用类型 0—10 m 土层含水量的垂直变化可以划分为土壤水分剧烈变化层、弱变化层和稳定变化层, 各层的含水量随时间的变化也不尽相同。 (3) 油松林根系的直接吸水深度为 5.4 m, 影响深度可达 10 m 土层以下, 农作物的吸水深度为 4.2 m, 影响深度可达 8 m 土层以下。对研究区内地势平坦、交通便利的地方可种植农作物, 促进当地农业经济建设; 而针对油松林地土壤含水量低的现象, 可采取适当水分管理措施降低林地耗水。

关键词: 水土保持林; 土壤水分; 耗水量; 黄土高原

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)06-0190-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.06.026

Effects of Different Land Use Types on Soil Moisture in the Loess Region of Western Shanxi Province

SHI Zhengle¹, ZHANG Jianjun^{1,2,3,4}, SHEN Mingshuang¹,

LIU Chang¹, HU Yawei¹, XU Qintao¹, LI Yang¹

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2.National Station for Forest Ecosystem Research in Ji County, Ji County, Shanxi 042200;

3.State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

4.Center of Forestry Ecological Engineering, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: Soil water content in artificial *Pinus tabulaeformis* forestland, native grassland and farmland in the loess region of western Shanxi province were observe and studied to define the effects of different land use types on soil moisture. The water content in 0—10 m soil layer was measured by soil core method from April to October in 2019 and 2020. The results showed that: (1) The soil water storage of the 0—10 m soil profile in artificial *P. tabulaeformis* forestland was 1 281.13 mm, 1 712.85 mm in native grassland, and 1 804.77 mm in farmland. *P. tabulaeformis* forest land consumed 431.72 mm and 523.64 mm water more than wasteland and agricultural land, respectively, and the more consumed soil water mainly came from deep soil. (2) The vertical change of water content in 0—10 m soil layer of three land use types could be divided vertically into three layers, including severe-changing layer, weak changing layer and relatively stable layer, and the change of water content in each layer with time was also different. (3) The depth of root water absorption was 5.4 m for *P. tabulaeformis*, 4.2 m for crops. The influence of depth was 10 m for *P. tabulaeformis*, 8 m for crops. Crops could be planted on flat and accessible sites in the study area to promote the local agricultural economy. In view of the low soil water content in *P. tabulaeformis* forest land, appropriate water management measures could be used to reduce stand water depletion in *P. tabulaeformis* forestland.

收稿日期: 2021-06-15

资助项目: 中央高校基本科研业务费专项 (2021BLRD04)

第一作者: 施政乐 (1997—), 女, 浙江丽水人, 硕士研究生, 主要从事林业生态工程研究。E-mail: shizhengle1997@163.com

通信作者: 张建军 (1964—), 男, 甘肃天水人, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持、植被恢复、生态效益评价、森林水文研究。E-mail: zhangjianjun@bjfu.edu.cn

Keywords: water and soil conservation forest; soil water; water consumption; the Loess Plateau

黄土高原作为我国生态脆弱和水土流失严重的地区,为了治理水土流失,国家展开了大规模的退耕还林工程^[1-2]。但由于黄土高原降水量少且分布不均^[3-4],大规模植被恢复消耗大量的土壤水分^[5-6],使林地经常处于土壤水分亏缺状态^[7-8],进而影响到林地的人文过程^[9-10],造成土壤干层范围不断扩大^[11-12]。可见,如何协调植被与土壤水分的关系已成为黄土高原地区及干旱半干旱地区植被恢复与重建的关键问题。

目前,对土壤水分的研究多集中在不同地类与土壤水分的关系方面。黄艳丽等^[13]研究了人工刺槐林地和天然林对水分含量的影响后指出,刺槐林地和天然林地 0—1.2 m 土层土壤水分差异较大,天然林地的含水量显著高于刺槐林地;赵荣玮等^[14]研究了不同地类的耗水量后指出,人工刺槐林地 0—2 m 土层的耗水量最大,人工侧柏林地次之,刺槐侧柏混交林地最小;胡波等^[15]研究了果园与人工林地之间含水量的差异指出,苹果园的土壤水分优于油松林地和刺槐林地。这些研究多集中于不同林地含水量之间的对比,且研究的土层范围多集中于浅层,而对农地、荒草地、人工林地深层土壤水分状况的对比研究并不多见。深层土壤水分作为植被生长利用的储备水资源,在植被应对长期干旱等极端气候事件中起着至关重要的作用^[16-18]。林木对深层土壤水分的利用和影响程度,是科学评价黄土高原地区大面积退耕还林生态效益的关键。长期定位监测深层土壤水分动态变化,对黄土高原土壤水库的评估及植被建设的可持续发展尤为重要^[19]。

为此,本文以晋西黄土区人工油松林地、农地、荒草地为研究对象,在 2019 年和 2020 年的 4—10 月采用土钻法对山西吉县蔡家川流域 3 个土地利用类型 0—10 m 土层的土壤含水量进行测定,比较人工油松林地、农地、荒草地对 0—10 m 土层水分的消耗和利用状况,探讨土壤水分动态和垂直变化,以期对黄土高原水土保持植被恢复的土壤水文效应评价提供参考和依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省吉县蔡家川流域(110°39′45″—110°47′45″E, 36°14′27″—36°18′23″N)(图 1),海拔 900~1 513 m,多年平均降水量 575.9 mm,研究期间的降水量见图 2。多年平均蒸发量 1 723.9 mm。平均气温 10 ℃,无霜期 172 天。该地区属于典型的黄土梁状丘陵沟壑区,褐土,黄土母质。主要土地利用类型有林地、农地、荒草地、果园等,植被类

型有次生林、人工油松林和刺槐林等。

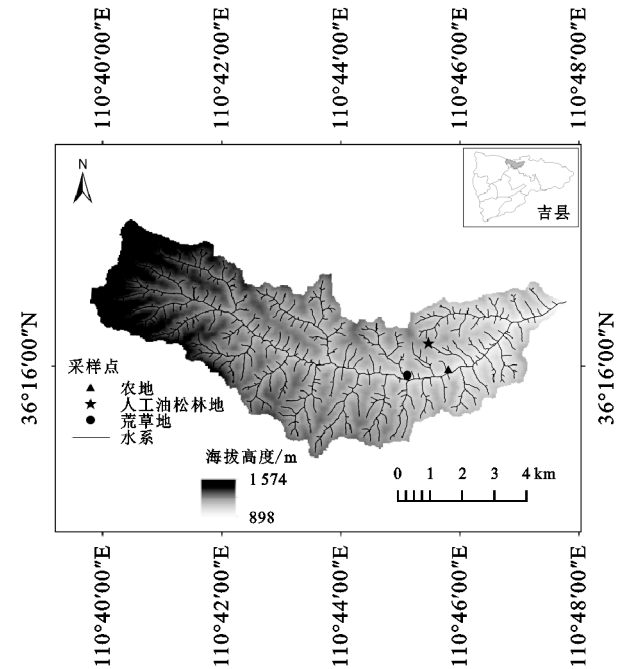


图 1 蔡家川流域研究区和采样点位置

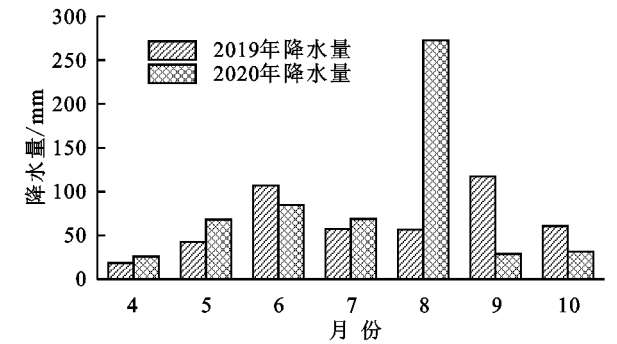


图 2 2019—2020 年生长季降水量

1.2 研究方法

1.2.1 土壤水分数据采集 在研究区内选择有代表性的人工油松林地、荒草地、农地为观测样地,各样地均位于坡中部,地理位置见图 1。样地调查和每木检尺的结果见表 1。

在 2019—2020 年生长季(4—10 月)期间,每月下旬在各样地利用土钻法测定含水量,取样深度为 0—10 m 土层,0—100 cm 土层内每隔 10 cm 取样,100—1000 cm 土层内每隔 20 cm 取样,每层采集 3 个土样分别装入铝盒,带回实验室称重后放入烘箱,在 105 ℃条件下烘 24 h 至恒重,计算土壤质量含水量。同时用 MS 2000 激光粒度仪测定土壤粒径组成,土壤粒径分级根据美国制分类标准,即砂粒(粒径 0.05~2 mm)、粉粒(粒径 0.002~0.05 mm)和黏粒(粒径 0~0.002 mm)。

路远等^[20]对黄土高原沟壑区 0—6 m 土层容重进行测定发现,2 m 以下土层的容重基本保持不变,

因此本研究使用 100 cm³ 的环刀测定 0—200 cm 土层的容重。黄土高原地区 2 m 以下土层的毛管孔隙度变化不大^[21],因此本研究使用 100 cm³ 的环刀测定 0—200 cm 土层的毛管孔隙度,结果见表 1。

表 1 观测样地基本情况

土地利用类型	海拔/ m	坡度/ (°)	主要植被类型	胸径/ cm	树高/ m	冠幅/ m	盖度/ %	容重/ (g·cm ⁻³)	毛管孔隙度/%	整地方式
人工油松林地	1124	21.1	油松(<i>Pinus tabulaeformis</i>)	9.83	5.12	2.5×3.5	65	1.11~1.20	50.50~54.97	水平条
荒草地	940	20.2	矮苔草(<i>Carex humilis</i>) 白羊草(<i>Bothriochloa ischaemum</i>)	—	—	—	72	1.22~1.31	49.58~52.22	—
农地	934	—	玉米(<i>Zea mays</i> L.)	—	—	—	85	1.15~1.55	41.56~51.94	播种时间在 5 月,9 月下旬至 10 月上旬收获

1.2.2 数据计算与处理

(1)土壤含水量的计算。土壤质量含水量计算公式为:

$$SMC=\frac{\omega_1-\omega_2}{\omega_2}\times100\%$$
 (1)

式中:SMC 为质量含水量(%);ω₁为湿土质量(g);ω₂为烘干土质量(g)。

(2)土壤蓄水量的计算。土壤蓄水量(SMS)为一定厚度土层所储存的水量,计算公式^[22]为:

$$SMS=\frac{10\times SMC\times BD\times H}{\rho}$$
 (2)

式中:SMS 为土壤蓄水量(mm);BD(bulk density)为土壤容重(g/cm³),取值见表 1;SMC 为土壤质量含水量(%);H 为土层厚度(mm);ρ 为水的密度,取值为 1.0 g/cm³。

(3)土壤耗水量的计算。荒草地没有过度消耗土壤水分,土壤含水量保持在一个稳定的水平,因此,本研究以荒草地土壤含水量为对照^[23-24],通过对比油松

林地与荒草地的蓄水量、农地与荒草地的蓄水量来确定油松林和农作物的耗水量,计算公式:

$$SMS_{耗}=SMS_1-SMS_0$$
 (3)

式中:SMS_耗 为土壤耗水量(mm);SMS₁ 为农地土壤蓄水量或油松林地土壤蓄水量(mm);SMS₀ 为草地土壤蓄水量(mm)。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型土壤质地

由图 3 可知,油松林地、农地、荒草地的剖面土壤平均黏粒含量变化范围分别为 2.41%~4.71%,3.22%~5.71%,2.36%~5.91%,平均粉粒含量变化范围为 26.25%~54.84%,28.76%~45.55%,23.17%~50.26%,平均砂粒含量变化范围为 40.44%~70.5%,49.62%~67.74%,45.19%~74.47%。

油松林地、农地、荒草地 0—2 m 土层的容重变化范围分别为 1.11%~2.20%,1.15%~1.55%,1.22%~1.31%,毛管孔隙度变化范围分别为 50.50%~54.97%,41.56%~51.94%,49.58%~52.22%。

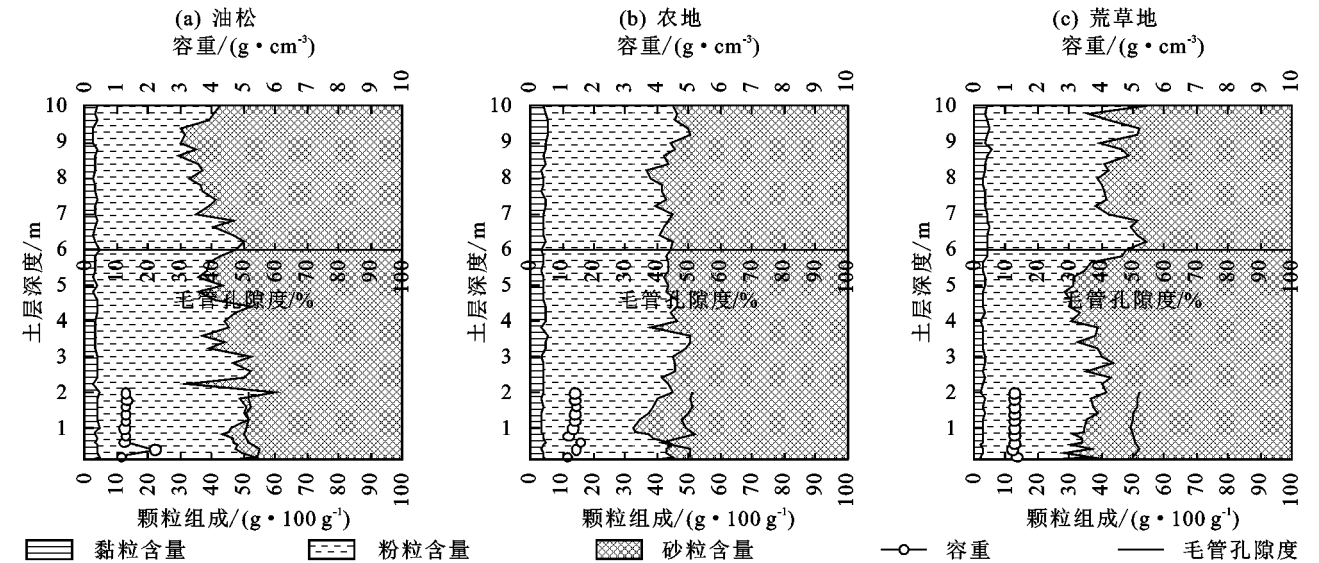


图 3 油松林地、农地、荒草地土壤质地

2.2 不同土地利用类型 0—10 m 土层蓄水量

由图 4 可知,农地的蓄水量最高,达 1 804.77 mm,而油松林地的蓄水量最低,只有 1 281.13 mm,荒草地

的蓄水量介于农地和油松林地之间,为 1 712.85 mm,可见,油松林地耗水量最高。经方差分析得出,荒草地、农地、油松林地蓄水量差异显著(P<0.05)。

通过对比油松林地、荒草地、农地的蓄水量可以发现,油松林地较农地多消耗 523.64 mm 的土壤水分,较荒草地多消耗 431.72 mm。

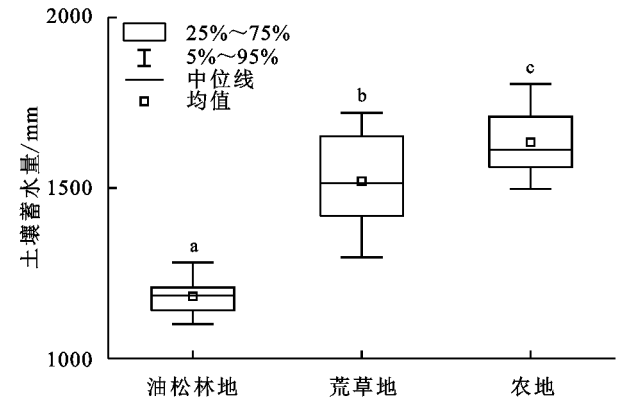


图 4 油松林地、荒草地、农地土壤蓄水量

由图 5 可知,油松林地 0—1 m 土层的蓄水量较荒草地多 17.15 mm,而 1—10 m 土层蓄水量较荒草地少 370.06 mm,这表明油松林对 1—10 m 土层的消耗量多于荒草地。油松林地在 0—10 m 土层范围内蓄水量均小于农地,总蓄水量较农地低 422.67 mm,表明油松林对 0—10 m 土层水分的消耗量高于农地。

对比农地和荒草地各层蓄水量的大小可见,农地 0—1,4—6,8—10 m 土层蓄水量较荒草地分别多 38.02,26.73,55.35 mm,而在 1—4,6—10 m 土层的蓄水量比荒草地分别低 38.29,12.05 mm。

总体而言,农作物对 0—10 m 土层含水量的消耗最少,土壤水分条件最好。油松林的耗水量最大,且随着土层深度的增加耗水量也增加。

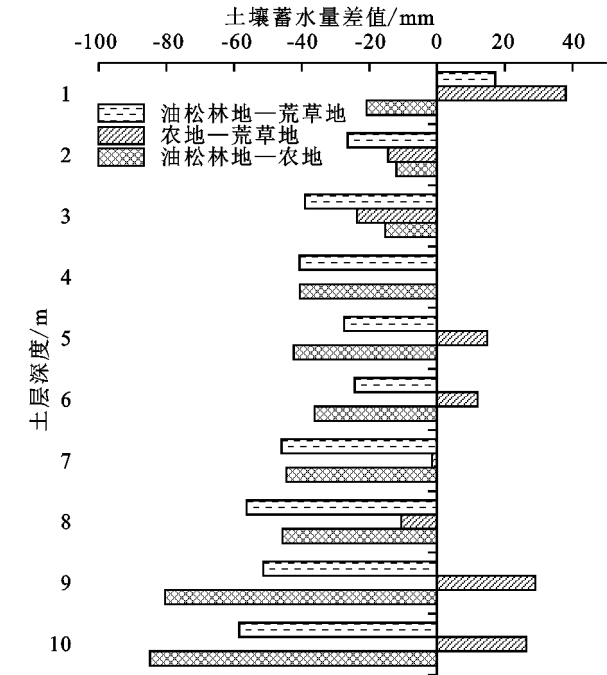


图 5 油松林地、荒草地、农地各层蓄水量差值

2.3 不同土地利用类型土壤水分的垂直分布

从图 6 可以看出,荒草地 0—0.8 m 土层的含水

量最低,仅为 9.71%,分别比油松林地和农地低 2.57 个百分点和 2.81 个百分点。而在 0.8—4 m 土层,荒草地的含水量最高,为 12.02%,分别比油松林地和农地高 2.37个百分点和 1.80 个百分点,4—10 m 土层中,含水量随深度呈双峰型变化,2 个峰值分别出现在 6.8—7, 9.8—10 m 处,含水量分别为 13.40%和 14.46%。

油松林地的含水量随土层深度的增加不断减小,油松林地 0—2.6 m 土层的含水量为 11.07%,与农地的含水量(11.06%)十分相近,在 2.6—10 m 土层中,油松林地含水量最低,仅为 8.82%,分别比农地和荒草地低 2.88 个百分点和 3.37 个百分点。

农地的含水量随土层深度的变化呈现出先减少后趋于稳定再增加的趋势,在 0—1.4 m 土层中,农地含水量不断减小,由 13.55%减小到 10%,在 1.4—8 m 土层中,土壤含水量随土层深度的变化较小,平均土壤含水量为 10.66%,而在 8—10 m 土层,农地土壤含水量急剧增大,含水量极差为 3.19%。

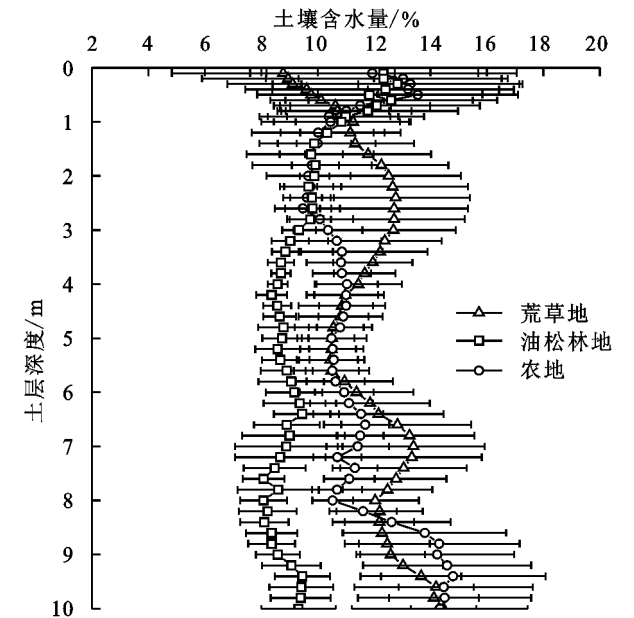


图 6 油松林地、农地、荒草地平均土壤含水量垂直分布情况

2.4 不同土地利用类型土壤含水量的垂直分层

变异系数 C_v 是反映土壤含水量变化程度的指标, $C_v > 25\%$ 的土层为剧烈变化层, $10\% < C_v < 25\%$ 的土层为弱变化层, $C_v < 10\%$ 的土层为相对稳定层^[25-28]。从表 2 可以看出,荒草地的 0—0.4 m 土层、农地的 0—0.5 m 土层、油松林地的 0—0.9 m 土层为剧烈变化层;各土地利用类型的弱变化层分别为荒草地 0.4—8.8 m 土层、农地 0.5—4.2 m 土层和 8—10 m 土层,油松林地 0.9—1.6 m 土层和 5.4—10 m 土层;各土地利用类型的稳定变化层分别为荒草地 8.8—10 m 土层、农地 4.2—8 m 土层和油松林地 1.6—5.4 m 土层。

从表 2 还可看出,各土地利用类型各层的土壤含水量和变异系数均随土层深度而变化。荒草地的含

水量随土层深度的增加不断增大,变异性逐渐减小。油松林地含水量随土层深度的增加不断减小,且在 1.6 m 土层以下,含水量显著低于农地和荒草地。油松林地含水量的变异系数在 0—5.4 m 土层范围内逐渐递减,但 5.4—10 m 土层的变异系数却显著高于 1.6—5.4 m

土层。农地含水量和变异系数在 0—4.2 m 土层内随土层深度的增加而减小,在 4.2—10 m 土层内含水量随土层深度的增加而增加。农地 8—10 m 土层的含水量为 13.93%,显著高于 0—8 m 土层,且 8—10 m 土层的变异系数高达 19.43%,仅次于 0—0.5 m 土层。

表 2 人工油松林地、农地、荒草地土壤含水量的分层情况

土地利用类型	土层深度/m	分层	平均含水量/%	含水量范围/%	变异系数/%	变异系数范围/%
荒草地	0—0.4	剧烈变化层	9.11	8.78~9.61	31.76	22.60~44.96
	0.4—8.8	弱变化层	11.76	9.77~13.40	15.85	9.33~21.12
	8.8—10	稳定变化层	13.68	12.59~14.46	9.92	8.02~11.29
农地	0—0.5	剧烈变化层	13.00	11.94~13.55	28.71	26.21~31.49
	0.5—4.2	上层弱变化层	10.47	9.48~12.59	16.20	8.78~23.68
	4.2—8	稳定变化层	10.95	10.49~11.69	8.07	6.82~9.74
油松	8—10	深层弱变化层	13.93	11.61~14.80	19.43	10.26~22.16
	0—0.9	剧烈变化层	12.14	11.00~12.83	31.69	25.18~38.30
	0.9—1.6	上层弱变化层	10.21	9.77~10.85	15.66	11.41~22.09
	1.6—5.4	稳定变化层	9.08	8.37~9.92	7.08	3.96~10.26
	5.4—10	深层弱变化层	8.83	8.08~9.46	12.63	9.07~20.47

2.5 不同土地利用类型的土壤水分动态

从图 7a 可以看出,荒草地 0—0.4 m 土层的含水量在研究期内随时间呈双峰型变化,2 个峰值分别出现在 2019 年 9 月和 2020 年 6 月,2 个峰值的含水量分别为 14.40%和 12.29%。0.4—8.8,8.8—10 m 土层的含水量随时间的波动较小,含水量的波动范围分别为 9.89%~13.53%和 11.71%~15.51%。

从图 7b 可以看出,油松林地 0—0.9 m 土层的含水量随时间波动较大,含水量的 2 个较大值出现在 2019 年 9 月和 2020 年 8 月,分别为 18.18%和 15.67%。0.9—1.6 m 土层的含水量在 2 个研究期内均呈现出先保持稳定后增大的趋势。1.6—5.4,5.4—10 m 土层的含水量随时间波动较为平缓,含水量的波动范围分别为 8.01%~9.60%和 7.28%~9.46%。

从图 7c 可以看出,农地 0—0.5 m 土层的含水量随时间变化剧烈,含水量的 2 个最大值出现在 2019 年 9 月和 2020 年 8 月,分别为 18.20%和 18.40%。0.5—4.2,4.2—8 m 土层的含水量随时间的波动较小,含水量的波动范围分别为 8.44%~12.33%和 9.23%~11.74%。8—10 m 土层的含水量在 2 个研究期内均随时间呈现出先增大后保持稳定的趋势。

2.6 不同土地利用类型土壤含水量与土壤质地的相关性

从表 3 可以看出,黏粒含量、粉粒含量、砂粒含量与 3 种土地利用类型土壤含水量均呈显著相关($P<0.05$),其中砂粒含量是显著负相关,黏粒含量和粉粒含量是显著正相关。容重、毛管孔隙度与 3 种土地利

用类型含水量的相关性不显著。

3 讨论

随着“退耕还林”工程的实施,黄土高原的水土流失得到显著缓解,但深根系植被的高密度栽植影响土壤水分状况。在本研究中,油松林地的土壤蓄水量显著小于农地和荒草地($P<0.05$),这与前人^[29-30]的研究结果一致,表明人工植被消耗大量的土壤水,加剧土壤干燥化,甚至导致干层的形成^[31-32]。不同土地利用类型的含水量除受植被耗水影响之外,也与剖面土壤颗粒组成有关,土壤颗粒组成调控土壤对水分的保持能力^[33]。经皮尔逊相关分析发现,3 种土地利用类型的含水量与黏粒含量、粉粒含量呈显著正相关($P<0.05$),与砂粒含量呈显著负相关($P<0.05$),3 种土地利用类型的土壤含水量受土壤颗粒含量的影响较大,这已在前人^[34]的研究得到验证。

荒草地、油松林地和农地的土壤含水量和变异系数随土层深度的变化各异。荒草地的含水量随土层深度的增加不断增大,变异性逐渐减小,这表明荒草地主要消耗和利用浅层土壤水分。植物对土壤水分的利用深度与根系分布密切相关,荒草地的根系主要分布在表层土壤中^[35],因此荒草地对土壤水分的消耗主要集中在浅层土壤。油松林地含水量随土层深度的增加不断减小,含水量的变异系数在 0—5.4 m 土层范围内逐渐递减,但 5.4—10 m 土层的变异系数却显著高于 1.6—5.4 m 土层,这充分说明 5.4—10 m 以下土层是油松林地土壤水分的调节层,当 5.4 m 以上土层中的水分被油松林吸收后,该层水分因向上补

给而使含水量降低,其后更深层次的水分对该层水分再进行补给,从而导致该层土壤水分含量的变化更为剧烈,保证 1.6—5.4 m 土层含水量维持在一个稳定区间,以维持油松林的正常生长。

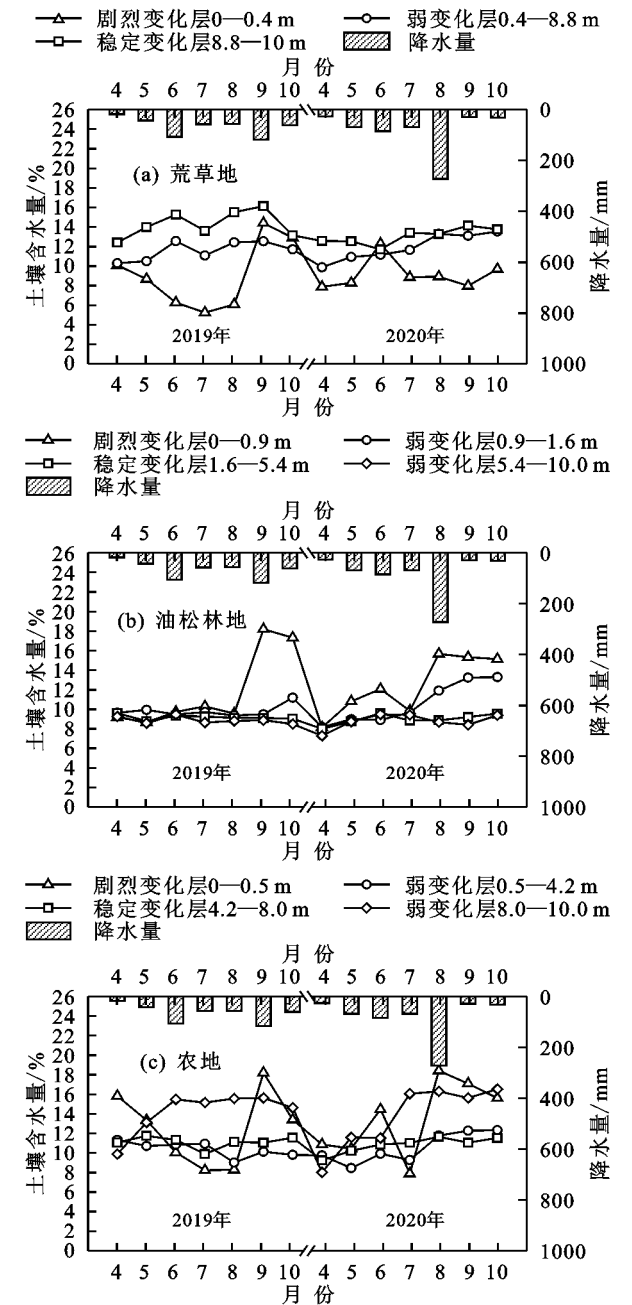


图 7 油松林地、农地、荒草地各层土壤含水量的动态变化

表 3 油松林地、农地、荒草地土壤含水量与其影响因子的相关系数

影响因子	油松林地	农地	荒草地
黏粒含量	0.290*	0.505**	0.594**
粉粒含量	0.502**	0.318*	0.645**
砂粒含量	-0.498**	-0.360**	-0.655**
容重	0.237	0.027	0.237
毛管孔隙度	0.220	-0.413	0.433

这也许可以认为油松林根系的直接吸水深度为 5.4 m,影响深度可达 10 m 土层以下。农地含水量和

变异系数在 0—4.2 m 土层内随土层深度的增加而减小,在 4.2—10 m 土层内含水量随土层深度的增加而增加,这说明农地主要利用 0—4.2 m 土层的水分。农地 8—10 m 土层的含水量为 13.93%,虽与荒草地的 8.8—10 m 土层的含水量 13.68%很接近,但变异系数却高达 19.43%,因此,可以认为农作物的吸水深度为 4.2 m,影响深度可达 8 m 土层以下。油松林和农作物的耗水深度远大于根系分布范围,可能是土壤水分在势能和植物根系共同作用下的结果^[36],当浅层土壤由于降雨被湿润,含水量较大,水分可以通过自身重力和根系向下层运输^[37],若表层土壤相对干旱缺水,影响植被正常生长时,土壤水分在根系和上层的较干土层水势梯度的共同作用下,自深层向浅层运动^[38-39],较深土层较干土层的水势梯度又促使更深层水分的运动,这种情况下水分的运动较复杂,使得植被的耗水深度远大于根系的分布范围。

在干旱半干旱的黄土丘陵沟壑区,降雨是影响土壤水分动态变化的主要因素^[40-41]。结合图 7 土壤含水量随时间的动态变化可以发现,3 个土地利用类型土壤水分剧烈变化层的含水量随时间的变化较弱变化层和稳定变化层更加剧烈,特别是在经历较大的月降雨后,3 个土地利用类型剧烈变化层的含水量出现不同程度的升高。但在 2020 年 8 月,经历较大降雨后,荒草地剧烈变化层的含水量并没有明显的升高,这可能是因为不同土地利用类型的水土保持效果不同,油松林冠幅大,枯枝落叶层厚,根系发达,蓄水保土效果较好,玉米根系的生长能使土壤紧实,增加土壤抗蚀性,而荒草地地上部分对降雨的拦截较少,根系较浅,在经历较大的降雨时会产生水土流失^[42],这使得荒草地蓄水能力弱,土壤含水量低。有研究^[43-45]表明,土地利用类型影响降雨在土壤中的再分配过程,即土地利用类型是影响土壤水分分布格局的重要因子,这也在诸多研究中得到证实。

黄土高原地下水埋藏深,无法被植被吸收利用,降水成为黄土高原植被恢复与生态建设的主要水分来源^[46-47]。大规模的植被恢复对土壤水分的消耗严重超出天然降雨的补偿能力,造成土壤水分经常处于亏缺状态^[48-49]。本研究表明,油松林地土壤含水量显著低于荒草地和农地,在植被恢复过程中,油松生长消耗大量的土壤水分。因此,在未来进行植被恢复和生态建设过程中,应根据当地土壤水条件,合理选择植被类型,可在地势平坦、交通便利的地方进行

农业种植,同时也增加当地经济,促进当地农业经济建设;在降雨缺失或水土流失轻微的地区,可以通过恢复草地的方式减少土壤水分的亏缺。对于目前已存在的土壤水含量低的人工林地,可通过间伐等措施改善水分状况。

4 结 论

(1)3 个土地利用类型中,荒草地 0—10 m 土层的蓄水量最高,农地次之,油松林地最低,油松林地相较于荒草地和农地多消耗的水分主要来源于深层土壤。

(2)油松林根系的直接吸水深度为 5.4 m,影响深度可达 10 m 土层以下,农作物的吸水深度为 4.2 m,影响深度可达 8 m 土层以下。

(3)3 个土地利用类型 0—10 m 土层含水量的垂直变化可以划分为土壤水分剧烈变化层、弱变化层和稳定变化层,各层土壤含水量随时间的变化也不尽相同。

(4)在未来进行植被恢复和生态建设过程中,应考虑当地土壤水分条件,选择合理的人工植被配置模式,以达到最大的林分效益。

参考文献:

[1] 刘宥延,刘兴元,张博,等.黄土高原丘陵区人工灌草生态系统水土保持功能评估[J].水土保持学报,2020,34(3):84-90,97.

[2] 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.

[3] 何娜娜,贾如浩,叶苗泰,等.黄土高原旱地苹果园油菜间作对土壤大孔隙结构的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):259-264.

[4] 高思远,张建军,李梁,等.黄土区水土保持林地的蓄水动态及雨水渗透深度[J].中国水土保持科学,2019,17(2):17-26.

[5] Gou Q P, Zhu Q K. Response of deep soil moisture to different vegetation types in the Loess Plateau of northern Shannxi, China[J].Scientific Reports,2021,11(1):e15098.

[6] Su B Q, Su Z X, Shangguan Z P. Trade-off analyses of plant biomass and soil moisture relations on the Loess Plateau[J].Catena,2021,197(1):e104946.

[7] 杨阳,朱元骏,安韶山.黄土高原生态水文过程研究进展[J].生态学报,2018,38(11):4052-4063.

[8] 程立平,刘文兆,李志.黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征[J].生态学报,2014,34(8):1975-1983.

[9] 兰志龙,潘小莲,赵英,等.黄土丘陵区不同土地利用模式对深层土壤含水量的影响[J].应用生态学报,2017,28

(3):847-855.

[10] 雷斯越,郭晋伟,何亮,等.黄土丘陵区退耕坡面草地恢复与土壤物理性质空间分异特征[J].水土保持学报,2021,35(1):251-258.

[11] 濮阳雪华,王月玲,赵志杰,等.陕北黄土区不同植被恢复模式植被与土壤耦合关系研究[J].草业学报,2021,30(5):13-24.

[12] 王宪志,赵西宁,高晓东,等.黄土高原苹果园土壤水分及水分生产力模拟[J].应用生态学报,2021,32(1):201-210.

[13] 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.

[14] 赵荣玮,张建军,李玉婷,等.晋西黄土区人工林地土壤水分特征及其对降雨的响应[J].水土保持学报,2016,30(1):178-183.

[15] 胡波,陈丽华.黄土高原不同林地土壤水分特征及影响因素通径分析[J].中国水土保持科学,2021,19(1):79-86.

[16] Li B B, Li P P, Zhang W T, et al. Deep soil moisture limits the sustainable vegetation restoration in arid and semi-arid Loess Plateau [J]. Geoderma, 2021, 399: e115122.

[17] Li B B, Zhang W T, Wang J, et al. Severe depletion of available deep soil water induced by revegetation on the arid and semiarid Loess Plateau[J].Forest Ecology and Management,2021,491:e119156.

[18] Shen M S, Zhang J J, Zhang S H, et al. Seasonal variations in the influence of vegetation cover on soil water on the loess hillslope[J].Journal of Mountain Science, 2020,17(9):2148-2160.

[19] Li Y T, Yu Y, Sun R X, et al. Simulation of soil water dynamics in a black locust plantation on the Loess Plateau, Western Shanxi Province, China[J/OL].Water,2021,13(9):1213. DOI:10.3390/w13091213.

[20] 路远,党廷辉,成琦.黄土高原沟壑区苹果园土壤剖面水分及矿质氮分布特征[J].水土保持学报,2021,35(2):106-112,121.

[21] 毛娜.典型黄土区不同坡向地形序列土壤碳与水分垂直分布特征及其影响因素[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.

[22] 苟清平,朱清科,李依璇,等.陕北黄土区不同林地土壤干燥化效应[J].生态学报,2019,39(19):7161-7168.

[23] 王舒,马岚,张栋,等.晋西黄土区不同林龄人工刺槐林下植被及土壤水分特征[J].北京师范大学学报(自然科学版),2016,52(3):253-258.

[24] 张星星,刘小芳,赵勇钢,等.黄土丘陵区柠条坡地水分

- 空间异质性及其主控因素[J].中国水土保持科学, 2020,18(6):24-32.
- [25] 张建军,李慧敏,徐佳佳.黄土高原水土保持林对土壤水分的影响[J].生态学报,2011,31(23):71-81.
- [26] 张敏,刘爽,刘勇,等.黄土丘陵缓坡风沙区不同土地利用类型土壤水分变化特征[J].水土保持学报,2019,33(3):115-120,128.
- [27] 孔凌霄,毕华兴,周巧稚,等.晋西黄土区不同立地刺槐林土壤水分动态特征[J].水土保持学报,2018,32(5):163-169.
- [28] 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.
- [29] 焦瑞,赵英,司炳成,等.黄土高原退耕还林措施对深层土壤含水率的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(5):129-135.
- [30] 朱炜歆,牛俊杰,刘庚,等.植被类型对生长季黄土区土壤含水量的影响[J].干旱区资源与环境,2016,30(1):152-156.
- [31] 邵明安,贾小旭,王云强,等.黄土高原土壤干层研究进展与展望[J].地球科学进展,2016,31(1):14-22.
- [32] 刘丙霞,任健,邵明安,等.黄土高原北部人工灌草植被土壤干燥化过程研究[J].生态学报,2020,40(11):3795-3803.
- [33] Bolotov A G, Shein E V, Makarychev S V. Water retention capacity of soils in the Altai Region[J].Eurasian Soil Science,2019,52(2):187-192.
- [34] 谭学进,穆兴民,高鹏,等.黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响[J].中国环境科学,2019,39(2):713-722.
- [35] 万艳萍,赵洋毅,段旭,等.干湿交替对红河干旱河谷区土壤优先流形成特征的影响[J].应用生态学报,2021,32(7):2397-2406.
- [36] 周宏.干旱区包气带土壤水分运移能量关系及驱动力研究评述[J].生态学报,2019,39(18):6586-6597.
- [37] Aa Y L, Wang G Q, Sun W C, et al. Stratification response of soil water content during rainfall events under different rainfall patterns[J].Hydrological Processes,2018,32(20):3128-3139.
- [38] Anooja T, Brijesh K Y, Jiří Š. Root water uptake under heterogeneous soil moisture conditions: An experimental study for unraveling compensatory root water uptake and hydraulic redistribution[J].Plant and Soil, 2020,457:421-435.
- [39] Wang P, Song X F, Han D M, et al. A study of root water uptake of crops indicated by hydrogen and oxygen stable isotopes: A case in Shanxi Province, China[J].Agricultural Water Management,2010,97(3):475-482.
- [40] 郭茹茹,杨磊,李宗善,等.半干旱黄土高原苜蓿草地撂荒过程土壤水分变化特征[J].生态学报,2020,40(23):8618-8626.
- [41] 郭利军,王百田,王旭虎.晋西黄土区不同土地利用的土壤水分灰关联分析[J].中国水土保持科学,2020,18(3):81-89.
- [42] 柏勇,杜静,杨婷婷,等.不同水土保持措施对石漠化区水土流失的影响[J].中国水土保持科学,2018,16(2):103-110.
- [43] 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.
- [44] 唐敏,赵西宁,高晓东,等.黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分变化特征[J].应用生态学报,2018,29(3):765-774.
- [45] 葛俸池,许明祥.黄土丘陵沟壑区不同退耕模式的土壤水文性质影响对比[J].水土保持学报,2021,35(1):154-160,168.
- [46] 杜康,张北赢,李凯,等.黄土丘陵区不同水体中氢氧同位素特征及相互关系[J].地球与环境,2021,49(3):270-276.
- [47] 王宁,毕华兴,孔凌霄,等.晋西黄土区不同密度刺槐林地土壤水分补偿特征[J].水土保持学报,2019,33(4):255-262.
- [48] 周壮壮,任宗萍,李鹏,等.不同植被覆盖下土壤含水量对降水的分级响应[J].中国水土保持科学,2020,18(6):62-71.
- [49] 陈曦,李志,程立平,等.黄土塬区大气降水的氢氧稳定同位素特征及水汽来源[J].生态学报,2016,36(1):98-106.