

黄土沟壑区不同树龄侧柏林地土壤水分动态特征

李蓝君¹, 宋孝玉¹, 夏露¹, 符娜¹, 孟春芳^{1,2}, 李怀有³, 李垚林³

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 河南省新乡市水文水资源勘测局, 河南 新乡 353000; 3. 黄委会西峰水土保持科学试验站, 甘肃 西峰 745000)

摘要: [目的] 研究黄土沟壑区侧柏林地土壤水分动态特征, 为黄土沟壑区退耕还林、生态建设以及人工侧柏林地的经营管理工作提供支持。[方法] 以黄土沟壑区典型小流域南小河流域内 5, 25 以及 35 a 树龄侧柏为研究对象, 使用烘干法对其生长季 0—100 cm 土层土壤水分进行观测, 并对其时空分布特征、土壤层次以及各层次干燥化特征进行分析。[结果] ① 降雨对侧柏林地土壤水分的补给深度集中在 0—40 cm 范围内, 侧柏根系吸水主要作用范围则分布在 40—100 cm 土层中。② 3 种树龄侧柏生长季 0—100 cm 土层中的土壤水分的时间变化可以分为恢复期(5 月)与消耗期(6—9 月)。在恢复期, 树龄对于土壤水分分布的影响不大, 5, 25 与 35 a 侧柏 0—100 cm 土层蓄水量分别分布在 230.3~304.2 mm, 177.7~249.7 mm 以及 202.2~283.6 mm。在消耗期, 10—40 cm 土层中, 土壤水分分布表现为: 5 a 侧柏>35 a 侧柏>25 a 侧柏, 而在 60—100 cm 土层中, 则表现为: 5 a 侧柏>25 a 侧柏>35 a; 3 种树龄侧柏林地 0—100 cm 土层蓄水量则分布在 131.2~207.2 mm, 123.4~220.8 mm 以及 109.6~204.7 mm。③ 在恢复期, 5 a 侧柏林地各垂直分层土壤水分干燥化指数(SDI)差异不大, 25 与 35 a 侧柏林地 SDI 在活跃层与过渡层随着深度的增大而增大。在根系作用层, 25 与 35 a 侧柏林地 SDI 保持相对稳定。在消耗期, 3 种树龄侧柏林地 SDI 在活跃层较小, 在过渡层随深度增大而增大, 而在根系作用层保持相对稳定。[结论] 与恢复期相比, 在消耗期, 3 种树龄侧柏林地土壤水分变化剧烈程度均显著增大, 其根系吸水能力随树龄增大而增大。

关键词: 侧柏; 土壤水分; 动态特征; 黄土沟壑区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)06-0092-09

中图分类号: S152.7

文献参数: 李蓝君, 宋孝玉, 夏露, 等. 黄土沟壑区不同树龄侧柏林地土壤水分动态特征[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6): 92-100. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 06. 015; Li Lanjun, Song Xiaoyu, Xia Lu, et al. Dynamic characteristics of soil moisture for different age of *Platycladus orientalis* in gully region of Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(6): 92-100. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 06. 015

Dynamic Characteristics of Soil Moisture for Different Age of *Platycladus Orientalis* in Gully Region of Loess Plateau

LI Lanjun¹, SONG Xiaoyu¹, XIA Lu¹, FU Na¹,
MENG Chunfang^{1,2}, LI Huaiyou³, LI Yaolin³

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. Xinxiang Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Xinxiang, He'nan 453000, China; 3. Xifeng Experiment Station of Soil and Water Conservation, Yellow River Conservancy Committee, Xifeng, Gansu 745000, China)

Abstract: [Objective] Studying of dynamic characteristics of soil water in the gully region of Loess Plateau is very important to provide supports for the constructions of forest, ecological restoration and management of *Platycladus orientalis*. [Methods] Sites of 5, 25 and 35 a *Platycladus orientalis* in typical small basin (Nanxiaohogou basin) in the gully region of Loess Plateau were selected, where the soil moistures in growing

收稿日期: 2017-05-03

修回日期: 2017-06-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土坡地土壤养分随地表径流流失动力机制与模拟模型”(51239009), “渭北旱塬不同种植结构农田绿水的形成、转化机理及水文生态响应研究”(41171034); 陕西省教育厅省级重点实验室科研计划项目(14JS059); 2016 陕西省水利科技计划项目(2016slkj-11)

第一作者: 李蓝君(1992—), 男(汉族), 甘肃省白银市人, 硕士研究生, 研究方向为水文学及水资源。E-mail: li_lanjun@126.com。

通讯作者: 宋孝玉(1971—), 女(汉族), 陕西省安康市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水文学及水资源方面的研究。E-mail: songxy@xaut.edu.cn。

season were observed with drying method. On the basis of this, the spatial and temporal distributions of soil moisture in different layers and the desiccation characteristics of each layer were analyzed. [Results] ① The rainfall recharged depth on soil moisture of the *Platycladus orientalis* concentrated in 0—40 cm while the effect of *Platycladus orientalis*' roots on soil moisture concentrated in 40—100 cm. ② The temporal variation of 0—100 cm soil moisture during growth season can be divided into recovery period(May) and depletion period (Jun. to Sept.). In the recovery period, the age of the *Platycladus orientalis* had little effect on soil water distribution. The water storages of 5 a, 25 a and 35 a *Platycladus orientalis* in 0—100 cm varied between 230.3~304.2 mm, 177.7~249.7 mm and 202.2~283.6 mm, respectively. In the depletion period, the soil moistures of 10—40 cm in different sites ranked: 5 a>35 a>25 a; while in 60—100 cm, the rank was 5 a>25 a>35 a. The 3 sites' water storages of 0—100 cm varied between 131.2~207.2 mm, 123.4~220.8 mm and 109.6~204.7 mm, respectively. ③ In the recovery period, there was little difference for the SDIs among different soil layers; while the SDIs in the active layer and transition layer of 25 a and 35 a sites increased with the increase of depth. For root affected layer, its value was relatively stable. In the depletion period, SDI value of the *Platycladus orientalis* was smaller in the active layer and increased with the increase of depth in the transition layer. For the root layer, the value was relatively stable. [Conclusion] As compared with it in the recovery period, the change degree of soil moisture increased significantly in the depletion period, and the absorption capacity of root increased in older *Platycladus orientalis* site.

Keywords: *Platycladus orientalis*; soil moisture; dynamic characteristics; gully region of the Loess Plateau

土壤水分是水分循环中水量平衡与热量平衡的重要组成部分,也是土壤性质的重要指标以及作物生长的控制因子;土壤水作为连接地表水、地下水与大气水的纽带,还是确定土壤—植被—大气连续体 (SPAC) 系统中各因素相互作用的关键环节^[1-2],因此,土壤水分的动态特征一直是水文学领域研究的重点问题^[1-3]。黄土高原地区流域植被结构单一,生态环境脆弱,气候条件变化剧烈且降雨量分配极不均匀,这使得区域内干旱灾害频发,水资源短缺,生态建设与农业生产面临着严峻的挑战^[3-5]。因此,对黄土高原地区土壤水分动态特征进行研究,对于恢复种植结构、促进林业生产以及加速生态环境建设均具有十分重要的意义^[3,6]。退耕还林作为治理水土流失、涵养水源的主要途径,已经在黄土高原地区得到广泛应用与推广^[6]。侧柏作为黄土高原地区实施退耕还林措施的主要树种之一,具有蒸腾耗水量小、土壤水分利用率高等特点^[7],侧柏林地具有实际蒸散发量小,土壤抗冲性良好的优势^[7-8]。现阶段,黄土高原地区土壤水分特征的相关研究主要集中在刺槐、油松、柠条、苜蓿等典型植被上,并在一定程度上说明了降雨、地形、树龄等因素对于上述典型植被土壤水分的影响^[9-10],但是,到目前为止,对于黄土沟壑区侧柏林地土壤水分变化特征的相关研究还较为少见^[11-12],对于不同龄阶人工侧柏林地土壤水分动态变化特征进行对比的研究尚显空白。因此,本文选取黄土沟壑区典型小流域南小河沟流域 3 种树龄(5, 25 和 35 a)人工侧柏林为研究对象,对不同土层土壤水分的时空分布

特征、垂直分层情况及其干燥化特征进行分析,以期为黄土沟壑区退耕还林以及生态建设等措施提供参考,为黄土沟壑区人工侧柏的经营管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

南小河沟流域位于甘肃省庆阳市西峰区(35°41'—35°44'N, 107°30'—107°37'E),是黄河水利委员会西峰水保站于 1951 年建立的黄土沟壑区典型原型观测小流域,流域面积为 36.5 km²,目前已积累了大量的降雨、径流、泥沙、土壤含水量、气象等实测数据。流域内多年平均降水量为 545.8 mm,主要集中在 6—9 月,并且大多以暴雨形式发生。流域地质构造单一,主要土壤类型为黄绵土和粉壤土,土壤抗蚀性差,易发生水土流失。流域内植被群落较为单一,以刺槐、侧柏、油松、山杏以及苜蓿等为主。

1.2 试验布置

1.2.1 样地选择以及土壤与植物指标的测定 对研究区侧柏林地分布状况进行踏查后,选取 3 种不同树龄的人工侧柏林地作为试验样地,在每个样地中,选取长势接近的 9~12 棵植株作为该样地代表植株,采用每木检尺测定每个代表植株的植物参数(胸径、树高以及最大冠层幅度);土壤容重采用环刀法测定,土壤水分常数根据《土壤物理试验指导》^[13]中相关方法测定,土壤容重与土壤水分常数选取 3 个样株进行平行测量,各样地内植物参数以及土壤参数均使用其样本平均值为样地代表(表 1—2)。

表 1 试验样地植株及地貌基本特征

树龄/a	树高/cm	胸径/cm	冠幅/cm	覆盖度/%	地形	坡向	坡度/(°)	坡位
5	214.4±7.8	6.4±0.2	46.8±7.2	26.1	阶地	SE	24	下
25	434.6±16.3	24.0±3.3	132.2±18.0	81.4	阶地	SE	17	上
35	602.4±19.6	34.0±1.6	198.4±24.5	89.8	阶地	SE	26	中

表 2 试验样地土壤容重与土壤水分常数

树龄/a	土壤类型	土壤容重	凋萎含水率	毛管断裂含水率	田间持水率	饱和含水率
5	粉壤土	1.63±0.09	0.109±0.010	0.251±0.024	0.347±0.034	0.618±0.049
25	粉壤土	1.48±0.02	0.090±0.004	0.209±0.009	0.299±0.013	0.569±0.038
35	粉壤土	1.59±0.08	0.105±0.004	0.236±0.010	0.321±0.015	0.591±0.016

注：土壤容重单位为 g/cm³；土壤水分常数单位为 cm³/cm³。

1.2.2 观测项目及时段 使用 50 mm 土钻取土样，取样位置位于距离样本植株树干 0.5 m 处，取样深度为 1 m，共分为 7 层，即 0、10、20、40、60、80 与 100 cm。样本取出后立即装入铝盒，并用精度 0.01 g 电子天平进行称重，使用烘干法(105 ℃)^[14]对其质量含水率进行测定，以 3 个平行样本的均值作为该土层的土壤质量含水率，并将其通过以下公式转化为体积含水率：

$$\theta_v = \theta_m \cdot \rho \tag{1}$$

式中： θ_v ——体积含水率(cm³/cm³)； θ_m ——质量含水率(g/g)； ρ ——容重(g/cm³)。

土壤水分测定时段为 2015 年 5 月 1 日至 2015 年 9 月 30 日，采样间隔为 1~5 d，雨后加测，取样及称重均在 2 h 内完成。降雨及气象资料由自动气象测报系统(watch dog series 2010)进行观测，观测时段间隔为 0.5 h，各样地距离气象站直线距离小于 100 m。研究区 2015 年降雨总量为 533.2 mm，属平水年，生长季(5—9 月)降雨量为 446.7 mm，占全年总降雨量的 83.78%。研究区 2015 年生长季(5—9 月)降雨量以及参考作物蒸散量如图 1 所示。

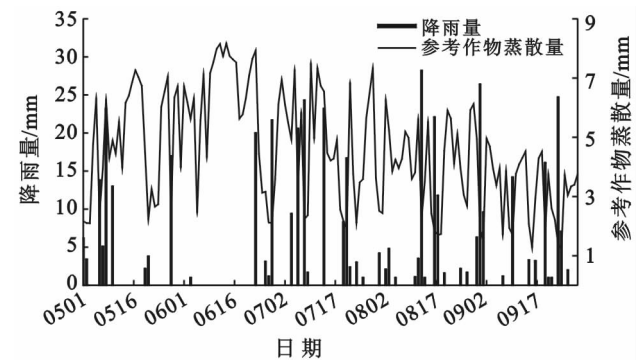


图 1 研究区 2015 年生长季降雨量及参考作物蒸散量

1.3 土壤蓄水量与干燥化指数

不同土层土壤蓄水量^[14]由以下计算公式计算：

$$D_i = \theta_{wi} \cdot H_i \tag{2}$$

式中： D_i ——各土层土壤蓄水量(mm)； θ_{wi} ——土壤体积含水率(cm³/cm³)； H_i ——土层厚度(mm)。

黄土高原地区降雨对土壤水分的补给有限，由于植被根系对土壤水分的消耗，导致土壤干燥化现象非常普遍^[15]，土壤干燥化将引起植被长势减缓、产量降低，并最终导致植被群落的退化，因此，研究土壤水分的干燥化特征对于土壤水分的恢复与提高，植被种群的更新与持续利用均具有十分重要的意义^[15-16]。土壤水分干燥化指数(SDI)^[15]由以下公式进行计算：

$$SDI = S_{(SSM-AM)} / S_{(SSM-WM)} \times 100\% \tag{3}$$

式中： $S_{(SSM-AM)}$ ——稳定湿度曲线与实测湿度曲线的面积差； $S_{(SSM-WM)}$ ——稳定湿度曲线与凋萎湿度曲线的面积差。

土壤稳定湿度采用凋萎含水率与田间持水率之和的平均值进行计算^[16]。根据 SDI 的大小，土壤干燥程度可以分为以下 6 个等级^[15]：(1) $SDI > 100\%$ ，为完全干燥化；(2) $75\% < SDI \leq 100\%$ ，为强烈干燥化；(3) $50\% < SDI \leq 75\%$ ，为重度干燥化；(4) $25\% < SDI \leq 50\%$ ，为中度干燥化；(5) $0\% < SDI \leq 25\%$ ，为轻度干燥化；(6) $SDI \leq 0$ ，为无干燥化。

1.4 数据处理

数据预处理使用 Excel 2007 进行，差异显著性使用 Duncan 法多重比较，数据分析及有序聚类分析使用 SPSS 17.0 与 Matlab R2014 b 进行，使用 Origin 8.0 进行曲线面积积分运算与绘图。

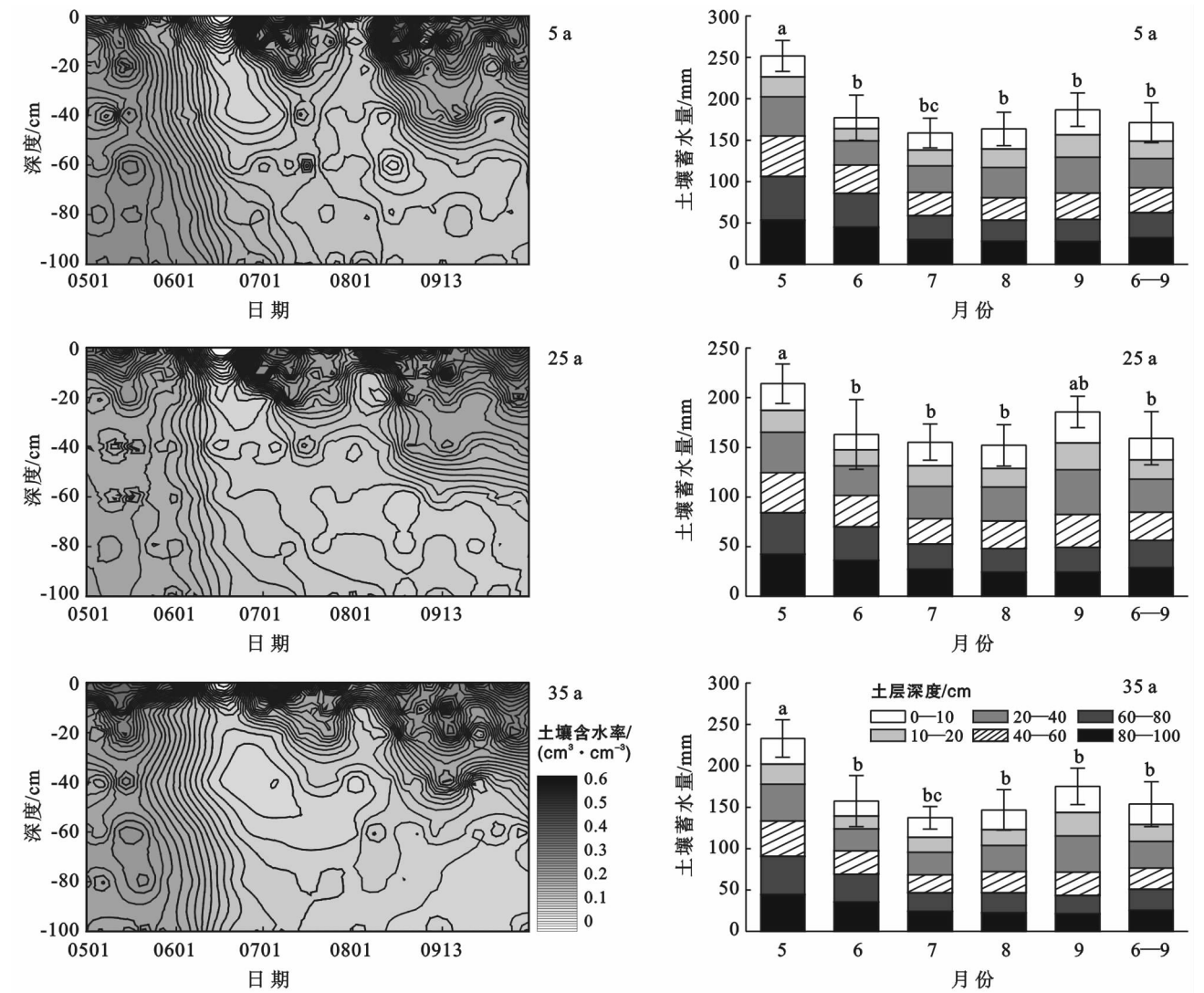
2 结果与分析

2.1 不同树龄侧柏人工林土壤水分的时间变化特征

生长季(5—9 月)不同树龄侧柏林地土壤含水率及蓄水量随时间的变化过程如图 3 所示。由图 3 可以看出，整体来看，3 种树龄侧柏林地土壤水分具有相似的时间变化趋势。5 月初至 6 月初，降雨引起的土

壤水分的变化主要集中在 0—20 cm 土层中,40 cm 以下土层中含水率变化不明显,6 月上旬的持续干旱使得表层土壤含水率出现整个生长季内的最低值,20 cm 以下土层中土壤含水率开始逐渐减小,6 月中旬至 9 月末,连续的有效降雨使得 0—40 cm 土层中土壤含水率的变化十分剧烈,而 40—100 cm 土层中土壤含水率较 5 月初至 6 月初则明显偏低。张建军等^[9]通过使用 EnviroSMART 土壤水分定位监测系统对晋

西黄土残塬沟壑区人工刺槐、人工油松以及次生林地的土壤水分进行监测分析后,将 3 种植被 0—150 cm 土层土壤水分的年内变化分为土壤水分减少期(11 月一次年 1 月)、土壤水分缓慢恢复期(2—5 月)以及土壤水分剧烈变化期(6—10 月)。本研究根据各树龄侧柏林地土壤水分的时间变化趋势,采用与其研究相同的时段进行划分,将整个侧柏生长季分为土壤水分恢复期(5 月)与消耗期(6—9 月)。



注:误差线表示 0—100 cm 土层蓄水量的标准差;小写字母表示 0—100 cm 土层蓄水量月份间差异性($p=0.05$)。

图 2 不同树龄侧柏林地土壤含水率与蓄水量的时间变化

在恢复期,随着气温逐渐升高与侧柏林地叶面积的增大,土壤蒸发量与植被蒸腾量开始升高,研究区降雨量与冬季相比明显增多,有效降雨对土壤水分的补给也在增大,水分耗散与补给的共同作用使得土壤水分保持在一个缓慢恢复的状态。在恢复期,5,25 与 35 a 侧柏 0—100 cm 土层蓄水量分别分布在 230.3~304.2 mm,177.7~249.7 mm 以及 202.2~283.6 mm,

均值为 251.8,214.1 及 233.0 mm,整体表现为:5 a>35 a>25 a。其中,0—10 cm 土层蓄水量随树龄增大而增大,分别分布在 10.9~33.3 mm,17.1~35.8 mm 与 17.4~36.9 mm 之间,10—20 cm 土层蓄水量分布在 18.0~32.1 mm,18.3~28.3 mm 与 19.1~35.4 mm 之间,表现为:35 a>5 a>25 a。而 20—100 cm 土层蓄水量则整体表现为:5 a>35 a>25 a,分别分布在

36.2~63.6 mm, 31.3~59.4 mm 与 35.9~59.6 mm。

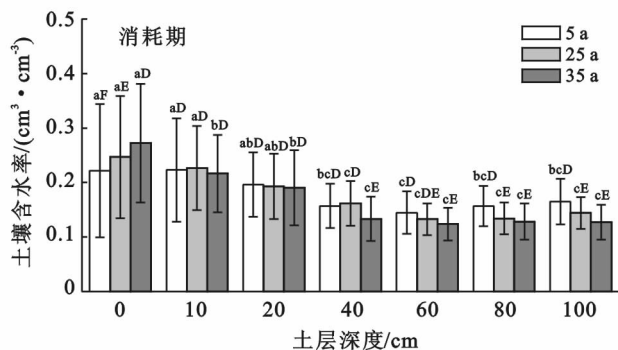
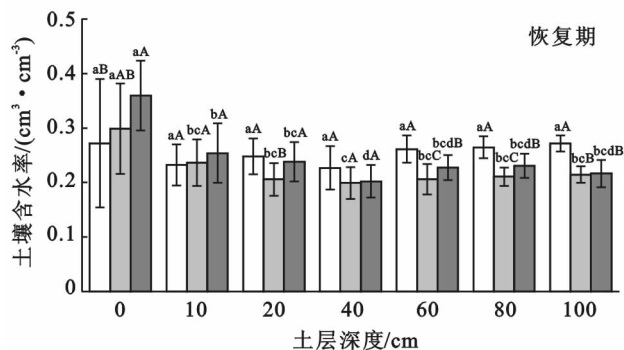
进入 6 月以后,侧柏林地的生长达到旺盛阶段,叶片蒸腾耗水迅速增大,这使得林地根区的土壤水分消耗增大(图 3),并且,气温的迅速升高使得表层土壤的蒸发速率增大。同时,6—9 月还是研究区降雨集中发生的时段,受到降雨补给与蒸发蒸腾的共同作用,侧柏林地土壤水分在 6—9 月变化十分剧烈。在消耗期,侧柏林地 0—100 cm 土壤蓄水量分别分布在 131.2~207.2 mm, 123.4~220.8 mm 以及 109.6~204.7 mm 之间,均值为 171.1, 164.1 与 153.6 mm, 表现为: 5 a>25 a>35 a, 且与恢复期相比均显著减小, 减幅分别达 32.05%, 23.35% 以及 34.08%。5, 25 与 35 a 侧柏林地除 10—20 cm 土层蓄水量整体表现为: 5 a>35 a>25 a 以外, 其余各土层蓄水量均表现为: 5 a>25 a>35 a, 并且, 当深度位于 40—100 cm 时, 5, 25 与 35 a 侧柏各土层蓄水量较恢复期减小更为显著, 减幅分别为 38.12%~42.62%, 29.60%~34.53% 以及 40.24%~45.00%, 可以看出, 侧柏根系吸水对于土壤水分的消耗主要集中在 40 cm 以下

土层。赵荣玮等^[12]的研究表明, 晋西黄土区 19 a 生侧柏林地 0—100 cm 土层中全年土壤平均蓄水量达到 219.7 mm, 而在本研究中, 3 种侧柏林地整个生长季 0—100 cm 土层平均蓄水量分别为 197.3, 180.2 以及 179.4 mm, 均小于其全年平均值, 这主要是由于以下原因造成的: 生长季虽有效降雨增多, 但降雨对侧柏林地土壤水分的补给主要集中在 0—50 cm 范围内^[11], 而对于深层土壤水分的补给较小, 而侧柏根系对于 40—100 cm 土层中土壤水分的消耗起到主要作用, 使得生长季的平均蓄水量偏小。

2.2 不同树龄侧柏林地土壤含水率的垂直分布特征

受到降雨、植物根系吸水以及土壤蒸发的共同作用, 土壤水分往往表现出显著的垂直性差异^[14]。图 4 为恢复期与消耗期 3 种树龄侧柏林地各土层平均含水率随深度的变化。

由图 4 可以看出, 不同树龄侧柏林地土壤含水率整体呈现出相似的垂直分布规律, 其值在 0—40 cm 范围内随着深度增加而减小, 而在 40—100 cm 范围内则保持相对稳定。



注: 小写字母代表不同土层间土壤含水率差异显著性 ($p=0.05$); 大写字母 ABC 与 DEF 分别代表恢复期与消耗期同一土层树龄间土壤含水率的差异性 ($p=0.05$)。

图 3 侧柏林地土壤水分的垂直分布

在恢复期, 5 a 侧柏各土层含水率间无显著性差异 ($p>0.05$), 位于 $0.233\sim0.272\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 25 与 35 a 侧柏 0 cm 土层含水率显著高于其他土层 ($p<0.05$), 分别达到 0.299 与 $0.360\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 而当土层深度位于 10—100 cm 时, 除 35 a 侧柏 40 cm 土层显著小于其他各土层外 ($p>0.05$), 其余各土层含水率间差异不显著 ($p>0.05$), 分别位于 $0.199\sim0.237\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 与 $0.217\sim0.254\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 之间。在恢复期, 3 种树龄侧柏林地 0—10 cm 土层土壤含水量的分布规律为: 35 a>25 a>5 a, 而在 20—100 cm 土层中, 则表现为: 5 a>35 a>25 a。

在消耗期, 5, 25 与 35 a 侧柏林地 0—20 cm 土层平均土壤含水率分别达到 $0.196\sim0.223\text{ cm}^3/\text{cm}^3$,

$0.193\sim0.247\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 与 $0.190\sim0.272\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 显著大于 40—100 cm 土层, 其值分别达到 $0.145\sim0.165\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $0.133\sim0.162\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 与 $0.124\sim0.133\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。3 种树龄侧柏 0—100 cm 各层平均土壤含水率与恢复期相比均出现不同程度的降低, 0—20 cm 土层中土壤含水率分别减小 4.29%~20.97%, 4.64%~17.39% 与 14.57%~24.44%, 40—100 cm 土层中土壤含水率减小程度则分别达到 30.84%~44.44%, 18.59%~36.49% 以及 34.16%~45.61%, 由于 6 月之后侧柏的生理活动增强, 对比分析也可以说明, 侧柏根系吸水对土壤水分布的影响主要在 40—100 cm 土层中, 并且, 在 60—100 cm 土层中, 土壤水分表现为: 5 a 侧柏>25 a 侧柏>35 a 侧柏,

这说明侧柏在处于生长旺盛阶段时,树龄越大,其根系吸水对于土壤水分分布的影响也越大。在消耗期,0 cm 土层土壤含水量的分布规律为:35 a 侧柏>25 a 侧柏>5 a 侧柏,与恢复期 0—10 cm 土层含水率的分布规律相同,这主要是由于不同树龄侧柏冠层对于降雨截留以及土壤蒸发的影响程度不同:树龄越大,冠层越厚,其对于降雨的截留作用越大^[17],这使得较大树龄侧柏林地表层土壤的含水率在降雨之后偏小,但同时,植被冠层也能够有效减少太阳短波辐射,并降低地面温度^[18-19],这使得土壤蒸发量减小,因而植被冠层又起到减缓表层土壤水分蒸发的作用。因此,在长时段的观测中,树龄越大,表层的土壤含水率则越高。

2.3 不同树龄侧柏林地土壤水分的垂直层次分析及各层次干燥化特征

黄土高原人工林地土壤水分的循环是简单的降雨入渗、土壤蒸发和植物蒸腾过程,这使得剖面上的土壤水分的变异及动态表现出一定的层次性^[20],因而研究人工林剖面层次的水分动态,对于深入研究人工林群落稳定性及演替规律有重要意义^[20-21]。为更加直观理解 3 种树龄侧柏林地土壤水分的垂直变化特征,采用有序聚类最优分割法,将 0—100 cm 各土层按深度进行排序,采用变异系数(C_v)和标准差(SD)为指标,按土壤含水率进行聚类,将水分恢复期

与消耗期各树龄侧柏林地 0—100 cm 土层划分为活跃层、过渡层与根系作用层(表 3)。

样本变异系数(C_v)可以反映不同深度土壤水分的变化程度,其值越大,表明土壤水分的变化程度越大,即土壤水分运动越活跃,干湿交替越频繁^[22]。根据相关研究^[23],可以将变异程度分为:弱变异性($C_v<10\%$)、中等变异性($10\%\leq C_v\leq 100\%$)与强变异性($C_v>100\%$)。可以看出(表 3),在整个生长季内,3 种树龄侧柏林地土壤水分变异程度整体表现为:活跃层>过渡层>根系作用层,活跃层(0—10 cm)土壤水分的变异程度大于其他各分层,与张建军等^[9]对于黄土区刺槐、油松等其他造林树种的研究结果相一致,这说明降雨及气象因素对于土壤水分的影响程度大于根系吸水对其变异程度的贡献。从不同时期各土层变异程度来看,在恢复期,除根系作用层中 5,35 a 侧柏 60—80 cm 以及 25 a 侧柏 80—100 cm 土层含水率属弱变异性外,其他各层次土壤水分均属中等变异,而在消耗期,3 种树龄侧柏林地各土层土壤水分均属于中等变异,且其变异程度均明显大于恢复期。这说明与恢复期相比,在消耗期,除了降雨及气象要素对活跃层以及过渡层的土壤水分变异性的影响增大外,侧柏生长需水对于根系作用层土壤水分变异性的影响也明显增大。

表 3 侧柏林地土壤水分分层及统计特征

时期	树龄/ a	活跃层			过渡层			根系作用层		
		深度/cm	$C_v/\%$	SD	深度/cm	$C_v/\%$	SD	深度/cm	$C_v/\%$	SD
恢 复 期	5	0—10	15.52~41.51	0.038~0.118	10—40	12.95~17.25	0.033~0.040	40—100	5.44~17.25	0.015~0.040
	25	0—10	17.33~26.86	0.043~0.083	10—20	14.16~17.33	0.030~0.043	20—100	6.83~14.16	0.015~0.030
	35	0—10	17.28~20.39	0.055~0.064	10—20	14.44~20.93	0.036~0.055	20—100	9.19~14.44	0.022~0.036
消 耗 期	5	0—10	42.57~55.12	0.095~0.122	10—40	26.01~42.57	0.041~0.095	40—100	23.38~26.61	0.037~0.042
	25	0—10	33.51~44.58	0.077~0.112	10—40	25.11~33.51	0.041~0.077	40—100	19.97~25.11	0.029~0.041
	35	0—10	32.01~39.36	0.071~0.109	10—40	30.51~35.67	0.030~0.071	40—100	23.47~30.51	0.030~0.041

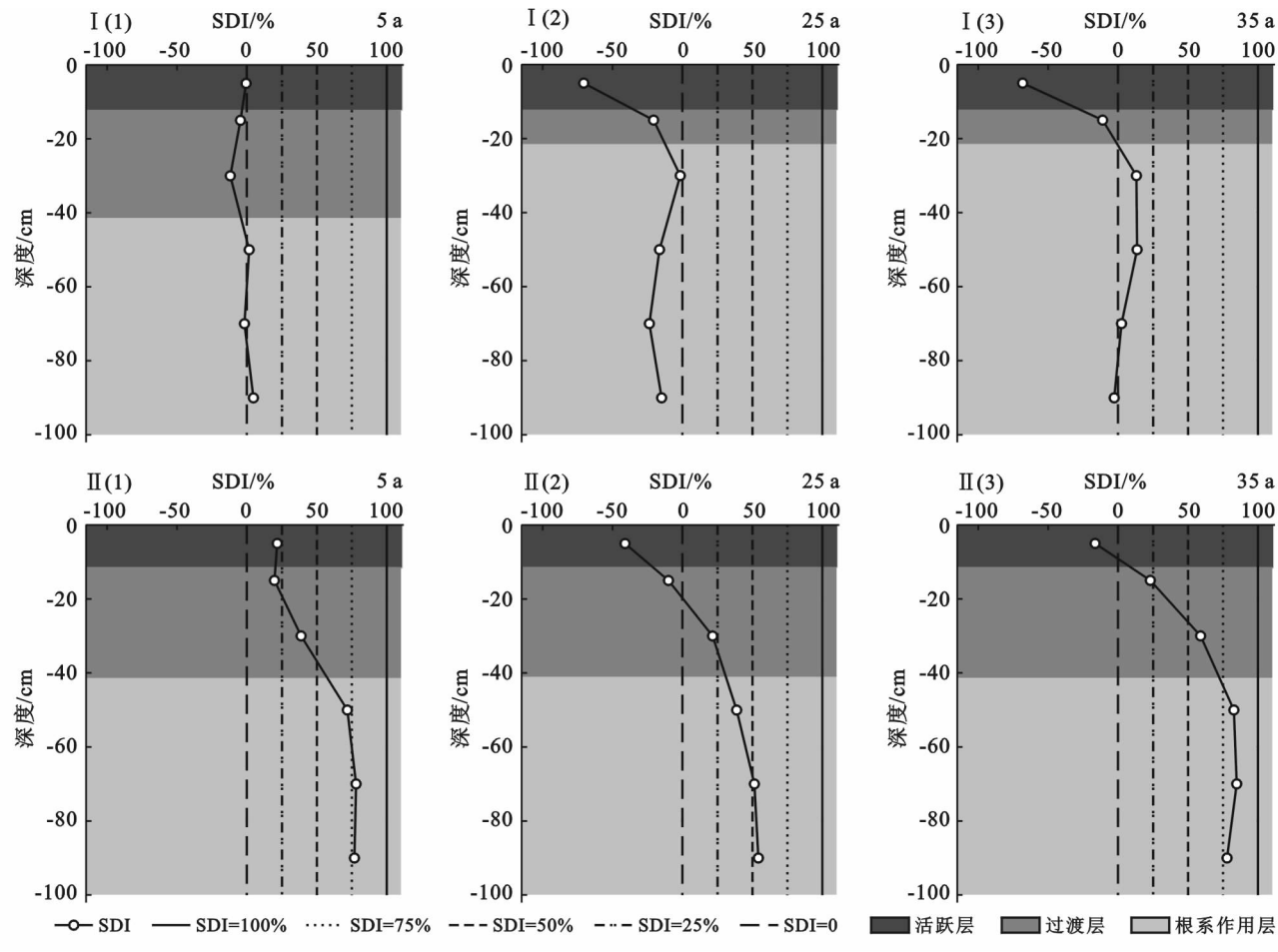
降雨、气象因素以及根系吸水对于不同层次土层的作用程度不同,因此,3 种侧柏林地各分层土壤水分将呈现出不同的干燥化特征。图 5 是将土壤水分进行有序聚类分层后,3 种树林侧柏林地活跃层、过渡层以及根系作用层的干燥化指数(SDI)在恢复期及耗散期的分布情况,可以看出,在恢复期,5 a 侧柏林地各垂直分层 SDI 差异不大,位于-11.82%~4.59%之间,干燥程度表现为无干燥化或轻度干燥化。25 与 35 a 侧柏林地 SDI 在活跃层与过渡层随着深度的增大而增大,分别达到-70.62%与 68.23%,以及-20.58%与-11.08%,干燥程度均属无干燥化;在根系作用

层,两种树龄侧柏林地 SDI 保持相对稳定,分别介于-23.71%~-1.64%以及-2.73%~13.07%之间,干燥程度分属无干燥化以及无干燥化或轻度干燥化。

在消耗期,3 种树龄侧柏林地 SDI 整体表现出相同的分布特点,SDI 在活跃层较小,在过渡层随深度增大而增大,而在根系作用层保持相对稳定。5,25 与 35 a 侧柏林地活跃层干燥化程度分别属轻度干燥化、无干燥化与无干燥化;当深度处于过渡层时,其 SDI 分别位于 19.69%~38.72%, -10.00%~21.62%以及 23.12%~58.94%之间,干燥化程度分别为轻度干燥化或中度干燥化、无干燥化或轻度干燥化以及轻度

干燥化或重度干燥化;当深度为与根系作用层时,SDI 则分别位于 71.77%~78.16%,38.79%~54.31%以及 77.92%~84.89%之间,干燥化程度分别为重度干燥化或强烈干燥化、中度干燥化或重度干燥化以及强烈干燥化。对比分析可以看出,在消耗期,各土层 SDI 值与恢复期相比均明显增大,其中,以 40 cm 以

下土层 SDI 增大变化最为显著,这也说明在消耗期,降雨对于 40 cm 以下土壤水分的补给较小,该深度以下土壤水分的变化主要受到根系吸水的影响,而在消耗期,侧柏生长需水增大,根系吸水对于土壤水分的消耗增大,这使得土壤干燥化程度与恢复期相比显著增大。



注: I 代表恢复期; II 代表消耗期; 数字代表标准差。

图 4 侧柏林地各层次干燥程度分布

3 讨论

3.1 侧柏林地土壤水分划分时段的再讨论

林地土壤水分不仅受到降雨特性(降雨量、降雨强度、降雨历时、降雨频率)的影响,还与林冠截留、土壤质地以及微地形等因素紧密相关^[23]。赵荣玮等^[12]通过研究表明,晋西南黄土区 19 年生侧柏年生长季(5—9 月)内土壤水分变化分属于消耗期(5 月)、累积期(6—8 月)、消退期(9 月),与本研究中将侧柏生长季土壤水分变化分为恢复期(5 月)与消耗期(6—9 月)的时段划分不同,主要是由于在其研究中,生长季内的降雨主要发生在 7 月(降雨量大于 300 mm),而其他各月(5, 6, 8, 9 月)降雨均明显偏小(小于 100

mm),其中,5 月降雨量小于 50 mm,使得该月份侧柏林地蒸腾作用虽然不强,但仍然对土壤水分的减少起到主要作用;7 月降雨集中对土壤水分进行充分的补给,虽然土壤蒸发与植被蒸腾仍在不断消耗土壤水分,但其消耗量远小于降雨补给量,使得侧柏林地土壤水分在 6—8 月逐渐累积;9 月降雨仍然偏少,侧柏蒸散使得土壤水分偏低。本研究中,根据土壤水分在整个生长季内的变化特点,将土壤水分变化分为恢复期(5 月)与消耗期(6—9 月),由于本研究中降雨在生长季内的分布比较均匀(图 1),因而该时段划分更能反映出侧柏生长需水对于土壤水分的影响。本研究中,3 种树龄侧柏林地 9 月土壤蓄水量均大于消耗期其他各月(图 3),这是由于进入 9 月后,秋季的温度较

夏季低,温度低植被的蒸散作用减弱^[20],同时,9月降雨仍然较为充分(83.4 mm),因此降水能够有效补给,使土壤含水量逐渐增加。虽然降雨补给增大且植被蒸散消耗减小,但该月份土壤蓄水量仍显著小于恢复期(5月)蓄水量(图3),因此在分析中仍然将9月归为消耗期进行处理。

3.2 侧柏林地土壤水分观测深度、时段分析及建议

相关研究^[6,9,15]认为,黄土高原地区人工林的根系主要分布在0—200 cm土层中,因此植被特征对于0—200 cm土层中水分情况作用较大^[6]。蔡鲁等^[24]的研究认为,因为侧柏属于浅根水平分布型植物,主要依靠根系在水平空间的拓展来吸收水分。赵忠等^[25]的研究认为,10 a生侧柏林地的根系仅仅局限在0—90 cm土层中,并主要集中于0—40 cm土层中,因此,本研究对不同树龄侧柏林地土壤水分观测深度分布为0—100 cm。从3种树龄侧柏林地生长季土壤水分的变化特点来看(图3),5与25 a侧柏根系吸水的区域主要分布在0—100 cm范围内,可以认为其对于100 cm以下土壤水分的消耗较小,而35 a侧柏根系吸水对于更深层土壤水分的分布仍然可能起到一定的作用,并因此造成深层土壤的干化,因此,建议在生长年限为25 a左右时对侧柏林地进行间伐,以此减小蒸腾耗水、提高土壤水分含量。从3种树龄侧柏林地恢复期与消耗期土壤水分分布及其土壤干燥化特点来看(图4—5),在消耗期,侧柏生理需水的迅速增大造成了根系作用层土壤水分含量显著减小,干燥化程度显著增大,因此,建议在消耗期(6月)之前对侧柏进行修枝抚育,以此减小植被生理需水,降低侧柏林地的干燥化速率与程度。在本研究中,为避免土壤质地造成的测量误差,进行数据分析时采用3组平行样本均值为代表,但土钻法不可避免要对土壤带来扰动,并且未能实现对土壤水分进行短时段连续观测,因此,使用其他观测方法减小对于土壤的扰动程度,并对不同树龄侧柏林地土壤水分进行短时段连续观测,以此分析不同树龄侧柏对不同类型降雨的响应及消退过程,并对包括非生长季在内的自然年(12个月)土壤水分变化进行观测与分析,将是下一步的研究重点。此外,间伐与修枝抚育虽能减少植被蒸腾耗水,但不可避免要对植被的生理特征(叶绿素与叶片营养物元素含量、林下群落特征及枯落物水文特性等)产生影响,因此,合理确定不同树龄侧柏林地间伐与修枝强度,仍有待于进一步研究。

4 结论

(1) 3种树龄侧柏生长季(5—9月)0—100 cm土

层中的土壤水分的时间变化可以分为恢复期(5月)与消耗期(6—9月),在恢复期,5、25与35 a侧柏0—100 cm土层蓄水量分别分布在230.3~304.2 mm,177.7~249.7 mm以及202.2~283.6 mm之间,而在消耗期土层蓄水量减小,则分布在131.2~207.2 mm,123.4~220.8 mm以及109.6~204.7 mm。

(2) 在恢复期,树龄对于土壤水分分布的影响不大,3种树龄侧柏林地0—10 cm土层土壤含水量的分布规律为:35 a侧柏>25 a侧柏>5 a侧柏,表明树龄越大,表层土壤保水效果越好;而在20—100 cm土层中,则表现为:5 a侧柏>35 a侧柏>25 a侧柏。在消耗期,侧柏处于生长旺盛阶段,树龄越大,其根系吸水能力越强,对于土壤水分分布的影响也越大,并且,侧柏根系吸水主要作用范围分布在40—100 cm土层中,在消耗期10—40 cm土层中,土壤水分分布表现为:5 a侧柏>35 a侧柏>25 a侧柏,而在60—100 cm土层中,则表现为:5 a侧柏>25 a侧柏>35 a侧柏。

(3) 3种树龄侧柏林地生长季土壤水分变异程度整体表现为:活跃层>过渡层>根系作用层。在恢复期,除5、35 a侧柏60—80 cm以及25 a侧柏80—100 cm土层含水率属弱变异性外,其他各层次土壤水分均属中等变异,而在消耗期,3种树龄侧柏林地各土层土壤水分均属于中等变异。

(4) 在水分恢复期,5 a侧柏林地各垂直分层SDI差异不大,25与35 a侧柏林地SDI在活跃层与过渡层随着深度的增大而增大,在根系作用层,25与35 a侧柏林地SDI保持相对稳定。在消耗期,3种树龄侧柏林地SDI整体表现出相同的分布特点,即SDI值在活跃层较小,在过渡层随深度增大而增大,而在根系作用层保持相对稳定。

[参 考 文 献]

- [1] 赵传普,徐学选,高朝侠,等.黄土丘陵区不同植被类型下土壤水分动态[J].水土保持通报,2015,35(1):68-72.
- [2] Gad M R M, Kelan S S. Soil seed bank and seed germination of sand dunes vegetation in North Sinai-Egypt [J]. Annals of Agricultural Sciences, 2012, 57(1): 63-72.
- [3] Wang Yunqing, Shao Mingan, Shao Hongbo. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology, 2010, 381(1/2): 9-17.
- [4] 刘宪锋,任志远,张翀,等.1959—2008年黄土高原地区年内降水集中度和集中期时空变化特征[J].地理科学进展,2012,31(9):1157-1163.
- [5] 郭敏杰,张亭亭,张建军,等.1982—2006年黄土高原地

- 区植被覆盖度对气候变化的响应[J]. 水土保持研究, 2014, 21(5): 35-40.
- [6] 王舒, 马岚, 张栋. 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.
- [7] 韩磊. 黄土半干旱区主要造林树种蒸腾耗水及冠层蒸腾模拟研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011: 1-2.
- [8] 王丹丹. 晋西黄土高原不同植被覆盖下的土壤抗冲性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014: 3-4.
- [9] 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): 7056-7066.
- [10] 郭忠升, 邵明安. 黄土丘陵半干旱区柠条锦鸡儿人工林对土壤水分的影响[J]. 林业科学, 2010, 46(12): 1-7.
- [11] 杨光, 荣丽媛. 黄土高原沟壑区人工植被类型对土壤水分和碳氮的影响[J]. 水土保持通报, 2007, 27(6): 30-33.
- [12] 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.
- [13] 程东娟, 张亚丽. 土壤物理试验指导[M]. 北京: 水利水电出版社, 2012: 68-79.
- [14] 张义, 谢永生, 郝明德. 黄土高原沟壑区苹果园土壤水分特征分析[J]. 土壤, 2011, 43(2): 293-298.
- [15] 包睿, 邹养军, 马锋旺, 等. 种植年限及密度对渭北旱塬苹果园深层土壤干燥化的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 143-149.
- [16] 李军, 陈兵, 李小芳, 等. 黄土高原不同干旱类型区苜蓿草地深层土壤干燥化效应[J]. 生态学报, 2007, 27(1): 75-88.
- [17] 王爱娟, 章文波. 林冠截留降雨研究综述[J]. 水土保持研究, 2009, 16(4): 55-59.
- [18] 李伟平, 孙菽芬, 刘新, 等. 阿尔卑斯山杉林冠层影响辐射传输的个例分析[J]. 高原气象, 2008, 27(4): 749-756.
- [19] 赵梦启, 高满, 陈喜, 等. 不同覆被下的温度日变化特征及空间尺度效应: 以贵州陈旗小流域为例[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(S1): 115-122.
- [20] 于洋, 卫伟, 陈利顶, 等. 黄土丘陵区坡面整地和植被耦合下的土壤水分特征[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3441-3449.
- [21] 莫保儒, 蔡国军, 杨磊, 等. 半干旱黄土区成熟柠条林地土壤水分利用及平衡特征[J]. 生态学报, 2013, 33(13): 4011-4020.
- [22] 赵磊磊, 朱清科, 聂立水, 等. 陕北黄土区陡坡土壤水分变异规律研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2): 253-259.
- [23] 赵永宏, 刘贤德, 张学龙, 等. 祁连山区亚高山灌丛土壤含水量的空间分布与月份变化规律[J]. 自然资源学报, 2016, 31(4): 672-681.
- [24] 蔡鲁, 朱婉芮, 王华田, 等. 鲁中南山地 6 个造林树种根系形态的比较[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(2): 84-92.
- [25] 赵忠, 李鹏. 渭北黄土高原主要造林树种根系分布特征及抗旱性研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 96-100.

欢迎订阅 2018 年《农业工程》

《农业工程》是由中国农业机械化科学研究院主管, 北京卓众出版有限公司主办的农业工程类综合性学术期刊。2011 年创刊, 月刊, 国内统一连续出版物号 CN 11-6025/S, 国际标准连续出版物号 ISSN 2095-1795。办刊宗旨是解读农业工程政策, 聚焦农业工程各领域关键技术的创新突破、成套技术系统集成和先进实用技术的推广示范, 搭建农业工程交叉学科产学研集成信息平台, 推进农业工程技术创新与成果转化, 更好地为“三农”服务。

该刊设有“装备与机械化”“信息与电气化”“生物环境与能源”“农副产品加工与贮藏”“食品科学与工程”“水土工程”“土地资源管理”“设计制造及理论研究”“教学研究”“农学与生物技术”“农业经济管理”等栏目, 入选国家新闻出版广电总局认定的首批学术期刊和中国科技核心期刊。

《农业工程》每期定价 20 元, 全年 240 元, 欢迎订阅, 欢迎投稿。

《农业工程》编辑部