

黄土丘陵沟壑区红砂灌丛土壤水分动态研究

张娟娟, 单立山, 杨彩红, 吴央宝才让, 冯财林, 胡兴玲, 史晶霞

(甘肃农业大学 林学院, 兰州 730070)

摘要: 土壤水分是黄土丘陵区植被成活与正常生长的关键因素, 对黄土丘陵沟壑区不同坡位红砂灌丛土壤水分动态进行了研究, 结果表明: 不同坡位土壤容重均随土层深度增加呈先增加后缓慢减小的变化趋势, 不同坡位的持水量表现为: 上坡>下坡>中坡。土壤含水量季节变化表现为不明显的“双峰”曲线, 6月份第一次达到最大值, 8月略有增加。根据红砂土壤水分变化情况和植物根系吸水状况, 土壤水分的垂直变化可分为3个层次: 土壤水分活跃层、次活跃层和相对稳定层。黄土丘陵沟壑区各月份均存在着不同程度的土壤干层, 其中月份4月土壤干层最明显, 而各月0—20 cm土层土壤干层最严重, 因此, 在黄土丘陵沟壑区4月进行造林, 应进行适当灌溉以满足苗木对水分需求, 且在雨季造林时密度不宜过大。

关键词: 黄土丘陵沟壑区; 红砂; 土壤水分

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)04-0029-05

Soil Moisture Dynamics of *Reaumuria soongorica* shrubs in Loess Hill and Gully region

ZHANG Juanjuan, SHAN Lishan, YANG Caihong, Wuyangbaocairang,

FENG Cailin, HU Xingling, SHI Jingxia

(College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Soil moisture is the key factor for the growth and survival of vegetation in the loess hilly region. Soil moisture dynamics of *Reaumuria soongorica* population was monitored under different slope positions in the loess hill and gully region in Gansu Province of northwest China. The results showed that: (1) soil bulk density tended to increase at first and then decreased with increase of soil depth in different slope positions, the water holding capacity decreased in the order: upper slope>down slope>mid slope; (2) seasonal changes of soil moisture were expressed as dual peaks curve, and reached to the maximum at the first time in June, then increased a bit in August, according to soil moisture changes and plant root water absorption conditions, the vertical variation of soil moisture would be divided into three levels: active layer, less active layer and relative stable layer; (3) there were various degrees of dry soil layers in each month in loess hilly region, Dry soil layer is the most obvious in April and in the soil depth of 0—20 cm. Therefore, it is necessary to appropriately irrigate in April in the loess hilly and gully region when afforestation was carried out, and the density of planted trees should not be too large when afforestation was launched in rainy season.

Keywords: loess hill and gully region; *Reaumuria soongorica*; soil water

黄土高原水土流失严重, 植被覆盖率低, 干旱加剧, 生态环境失调, 生态系统抗御自然灾害的能力差, 极大地限制了区域经济的可持续发展^[1]。以水分动态平衡为基础的植被恢复和建设技术, 不仅是我国北方地区实施退耕还林、天然林保护和防沙治沙工程的一项关键技术, 也是黄土高原水土流失综合治理, 提高流域生产力的重要理论支撑^[2-4]。对黄土高原及其他区

域土壤水分动态的研究认为: 水分条件是植被生存、生长的首要条件, 高效利用降水资源, 提高土壤水分利用率显得尤为重要^[5-7]。目前, 对黄土高原及其他区域土壤水分动态的研究成果较多。卢宗凡等^[8]对黄土高原人工草地土壤水分的研究中将该地区土壤水分季节性变化分为三个时期: 春季失墒期(4月初—6月上旬), 夏季增墒期(6月中旬—9月下旬), 秋末冬季缓慢失墒

收稿日期: 2014-08-27

修回日期: 2014-10-08

资助项目: 国家自然科学基金资助项目(41361100, 31360205, 41461044, 31460180); 甘肃农业大学国家级大学生创新创业训练计划项目(201310733016); 国家国际科技合作专项(2012DFR30830); 甘肃省科技支撑计划项目(1204NKCA084)

第一作者: 张娟娟(1990—), 女, 甘肃天水市人, 在读本科生, 主要研究方向为荒漠植物生理生态。E-mail: 1123596649@qq.com

通信作者: 单立山(1975—), 男(蒙古族), 湖南衡阳市人, 博士后, 副教授, 主要从事荒漠植物生理生态等方面研究。E-mail: shanls@gsau.edu.cn

期(9月下旬—翌年3月下旬)。李洪建等^[9]研究了晋西北黄土丘陵区人工林土壤水分变化规律,将土壤水分年内变化分为三种类型:积累型,消耗型和平衡型。邱扬等^[10]的研究表明黄土高原总体上土壤平均含水量年际变化与年降水量年际变化一致。王孟本等^[11]在对黄土高原河北杨林、刺槐林等林地土壤水分研究中,将土壤剖面按含水量变化幅度大小分为活跃层、次活跃层和相对稳定层。可见,目前对黄土高原植被土壤水分动态的研究已经成为热点。

红砂(*Reaumuria soongorica*)是怪柳科红砂属小灌木,具有抗盐碱、抗旱、抗寒、耐瘠薄等特点,也是黄土高原西部荒漠草原区的优势植物和建群植物之一^[12]。目前对红砂自身特性的报道较多,石松利等^[13]运用酶联免疫吸附法比较分析了盐分生境下长叶红砂其近缘种红砂叶片中内源激素的含量差异,并对其在不同生境间的差异性进行了研究。刘玉冰等^[14]研究了参与非生物胁迫原活化蛋白激酶PKMA基因在红砂中的抗旱作用。然而,有关红砂灌丛土壤理化性质和土壤水分动态的研究报道极少。本研究以黄土丘陵沟壑区不同坡位红砂灌丛为研究对象,通过对其土壤物理性质及土壤水分动态变化规律进行研究,以便为该地区生态工程建设与林草植被恢复提供必要的理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地区概况

试验地位于兰州北山,属典型黄土丘陵沟壑区,区内海拔1 550~1 950 m。总气候特点:干燥寒冷,温差大,冬季长,年降水量少且分布不均,蒸发量大,日照强。该区年平均气温9.1℃,1月平均温度-6.9℃,7月平均气温22.2℃,≥10℃活动积温3 354.6℃,极端最高气温39.8℃,极端最低气温-23.1℃;年平均降水量327 mm,降水主要集中在7—9月,年蒸发量1 600~1 800 mm,为年降水量的5倍多,年相对湿度58%;年日照时数2 607.6 h,无霜期186 d^[15]。试验地内的土壤种类主要为淡灰钙土,属湿陷性黄土,质地疏松,抗侵蚀能力弱,易崩塌。山坡地带由于侵蚀强烈,植被稀疏,成土过程缓慢,原始土壤已残存无几,现所见土壤基本为黄土母质或淡灰钙土下残存的钙积层,腐殖质缺乏,有机质含量低,土壤肥力和保水保肥能力极差。本区由于受气温、降水、土壤等因素的影响,山地植被类型基本属典型草原向荒漠草原的过渡类型,植被覆盖稀疏,种类贫乏,地表植被主要由旱生和盐生类型的植物所组成。灌木主要有白毛锦鸡儿(*Caragana leucophloea*)、红砂(*R. soongorica*)、合头草

(*Sympegma regelii*)、珍珠猪毛菜(*Salsola passerina*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、中国枸杞(*Lycium chinenses*)、蒙古莠(*Caryopteris mongholica*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、霸王(*Zygophyllum xanthoxylum*)等;草本植物有本氏针茅(*Stipa bungeana*)、戈壁针茅(*S. gobica*)、驴驴蒿(*Artemisia dalailamae*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)、碱蓬(*Suaeda glauca*)等。其中,柠条、怪柳、侧柏在人工林中重要值最高;枸杞、红砂在各类天然灌木林中重要值较高,分布最广。整个植被类型中,特别是天然植被类型中,红砂为主要的优势种和建群种,其盖度5%~80%^[16]。

1.2 研究方法

为了避免不同地貌部位和地形等对土壤水分的影响,均选地貌、坡向和坡度相近的同一个直型山坡上的上坡、中坡、下坡3个样地,样地面积为10 m×10 m。在每个样地随机布设3~6个样点进行取样,分6层(取样深度分别为0—10,10—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm),取回的土壤在室内105℃烘干称重。并根据《森林土壤水分物理性质测定标准》采用环刀分层取土测定不同坡位土壤容重、最大持水量(饱和持水量)、毛管持水量、最小持水量(田间持水量)^[17],各样地重复数为3。萎蔫湿度采用盆栽的方法测定,重复三次。测得萎蔫系数为2.17%。从4月开始取样,每月采样一次,9月份结束。

1.3 数据处理方法

利用SPSS 13.0统计分析软件进行数据的管理和统计,应用单因素方差(one-way ANOVA)分析地形对各层土壤含水量和储水量的影响,同时采用LSD多重比较检验不同坡位土壤含水量之间的差异。

2 结果与分析

2.1 土壤容重

土壤容重说明土壤的松紧程度,是土壤物理性质的一个重要指标,直接影响其他土壤肥力因素和植物生长状况^[18]。从图1可以看出,在整个土壤剖面,土壤容重的平均值按地形高低依次为:下坡位(1.21 g/cm³)>中坡位(1.19 g/cm³)>上坡位(1.17 g/cm³)。不同坡位红砂灌丛土壤容重在0—60 cm均随土壤深度的增加而逐渐增加,这可能由于在该地区植被根系主要集中该土壤层,通过根系的改良作用,土壤团粒结构较多,结构疏松土壤容重相对较小;在60—100 cm各坡位土壤容重随土壤深度的增加而逐渐减少,且差异显著($p<0.05$)。这在一定程度上说明黄土丘陵沟壑区红砂灌丛土壤水源涵养和理水调洪能力主要体现在上层土壤。

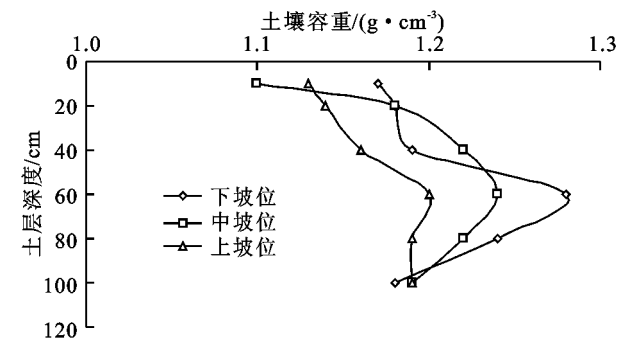


图 1 红砂灌丛不同坡位土壤容重垂直分布

2.2 土壤持水量

土壤的持水特性决定于土壤物理性质及物理化学性质。土壤深度在 0—100 cm 内,不同坡位的最大持水量、毛管持水量、最小持水量(田间持水量)差异明显(表 1),表现为:上坡>下坡>中坡。对各坡位不同土壤持水量进行了分析,发现红砂灌丛土壤上层(0—40 cm)其持水量均比下层(40—100 cm)要大,这可能与红砂灌丛上层土壤根系多、枯落物多、有机质含量高有关。

表 1 不同坡位红砂灌丛土壤物理性质比较

| 坡位 | 深度/ cm | 最大持水量/ (g · kg ⁻¹) | 毛管持水量/ (g · kg ⁻¹) | 最小持水量/ (g · kg ⁻¹) |
|-----|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 下坡位 | 0—10 | 481.68 | 426.23 | 248.19 |
| | 10—20 | 502.37 | 434.34 | 237.39 |
| | 20—40 | 563.08 | 506.62 | 325.22 |
| | 40—60 | 436.24 | 372.75 | 221.84 |
| | 60—80 | 450.62 | 398.43 | 232.14 |
| | 80—100 | 471.58 | 374.71 | 223.96 |
| | 平均值 | 484.26 | 418.85 | 248.12 |
| 中坡位 | 0—10 | 522.37 | 446.22 | 176.32 |
| | 10—20 | 471.65 | 427.96 | 189.36 |
| | 20—40 | 455.34 | 398.64 | 175.82 |
| | 40—60 | 431.35 | 368.22 | 147.42 |
| | 60—80 | 425.03 | 375.05 | 170.75 |
| | 80—100 | 425.01 | 363.52 | 165.59 |
| | 平均值 | 455.13 | 396.60 | 170.88 |
| 上坡位 | 0—10 | 513.29 | 453.04 | 242.38 |
| | 10—20 | 567.15 | 495.77 | 320.53 |
| | 20—40 | 490.21 | 432.12 | 276.49 |
| | 40—60 | 514.04 | 458.62 | 294.48 |
| | 60—80 | 484.39 | 437.23 | 297.22 |
| | 80—100 | 490.36 | 441.02 | 303.98 |
| | 平均值 | 509.91 | 452.97 | 289.18 |

2.3 土壤水分变化

2.3.1 土壤含水量季节变化动态 对不同坡位红砂灌丛下土壤水分季节变化进行了分析,发现不同坡位土壤含水量随时间的变化趋势基本一致,均表现为不明显的“双峰”曲线(图 2),6 月份第一次达到最大值。7 月的土壤含水量呈降低趋势,这可能因为气温较高,红砂在该时期生长旺盛,植被蒸腾和土壤蒸发较

大所致。8 月土壤含水量略有上升,虽该时期土壤蒸发和植被蒸腾较强,但此时期土壤水总的特征是补给大于消耗从而使 8 月土壤含水量第二次达到高峰,9 月份随着降雨量的减少,土壤含水量稍有下降。对不同月份土壤含水量平均值分析表明,不同坡位红砂灌丛 0—100 cm 深度的土壤含水量表现为上坡位(6.26%)>下坡位(5.54%)>中坡位(5.07%)。

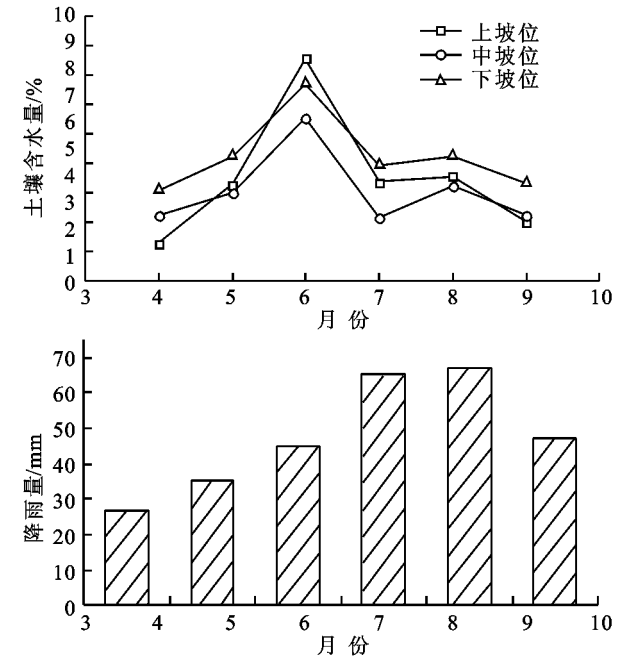


图 2 红砂灌丛不同坡位 100 cm 平均含水量及降雨量动态变化

2.3.2 土壤含水量垂直变化 从图 3 可以看出:不同坡位上层土壤含水量(0—40 cm)变幅较大,而 40—100 cm 土壤含水量保持相对稳定,这可能是上层土壤含水量受太阳辐射和降水变化影响的结果。从图 3 还可以看出,4 月不同坡位红砂灌丛土壤含水量均随深度的增加持续增加,在 0—10 cm 内土壤含水量低于萎蔫系数(2.17%),此阶段植物生长未萌动,且降雨少风大,表层含水量低可能是风干而蒸发。6 月不同坡位土壤含水量表层含水量均最大,在 0—60 cm 内土壤含水量急剧减小,在 60—100 cm 基本趋于稳定。5 月、7 月、8 月、9 月不同坡位土壤含水量随土壤深度的增加上层有所波动,在 60—100 cm 趋于稳定,这可能是在黄土丘陵沟壑区其植被根系主要分布在上层(0—40 cm),在其生长过程中改变了土壤水分状况,同时该地区上层的土壤水分来源主要来源于降水,因根系的生长和降水的波动从而使该地区上层(0—40 cm)土壤水分呈现出波动情况。

根据土壤水分变化情况和植物根系吸水状况,土壤水分的垂直变化可分为土壤水分活跃层、次活跃层和相对稳定层 3 个层次。

(1) 土壤水分活跃层(0—20 cm),该层的土壤水分变异系数下坡最大为 0.557,上坡次之 0.485,中坡最小 0.485。可能是因为该层土壤受大气影响最大,又是植物根系的主要分布层,所以土壤水分变幅大,其上限可达饱和含水量以上,下限能到凋萎系数。土壤水分的增减和季节干湿变化基本一致,这些特点 0—20 cm 的浅层尤为明显。

(2) 土壤水分次活跃层(20—80 cm),该层土壤水分变异系数下坡为 0.354,中坡 0.165,上坡为 0.116,较土壤水分活跃层(0—20 cm)小,土壤水分相对稳定层(80—100 cm)大。可能是因为该层土壤受大气影响减小,土壤蒸发的耗水强度降低,所以变幅比土壤水分活跃层(0—20 cm)稍小。但是从 6 月底至 7 月中旬,该层土壤含水量下降较快,可能是植物蒸腾耗水量较大所致,说明它对植物的供水起着重要的作用。

(3) 土壤水分相对稳定层(80—100 cm),该层土壤水分的变异系数下坡最大为 0.342,上坡次之为 0.186,中坡最小为 0.113,说明土壤水分受季节干湿变化的影响较小。该层贮存的水分一方面为植物生长后期直接供水,另一方面通过毛管上升水给土壤上层供水。

表 2 红砂灌丛不同坡位土壤水分变异系数

| 坡位 | 0—20 cm | 20—80 cm | 80—100 cm |
|-----|---------|----------|-----------|
| 下坡位 | 0.557 | 0.354 | 0.342 |
| 中坡位 | 0.490 | 0.165 | 0.127 |
| 上坡位 | 0.539 | 0.116 | 0.113 |

2.4 土壤干层

根据王力等^[19]研究认为土壤干层的量化指标上限应以田间稳定持水量为宜,将该值以下的水分亏缺全部看作土壤干层的范畴。从表 3 中可以看出,红砂灌丛都存在着不同程度的干层,大部分为中度和严重

土壤干层;从月份看,4 月的干层最为严重,从不同深度看,0—20 cm 严重,严重地影响到了红砂灌丛的更新和生长。

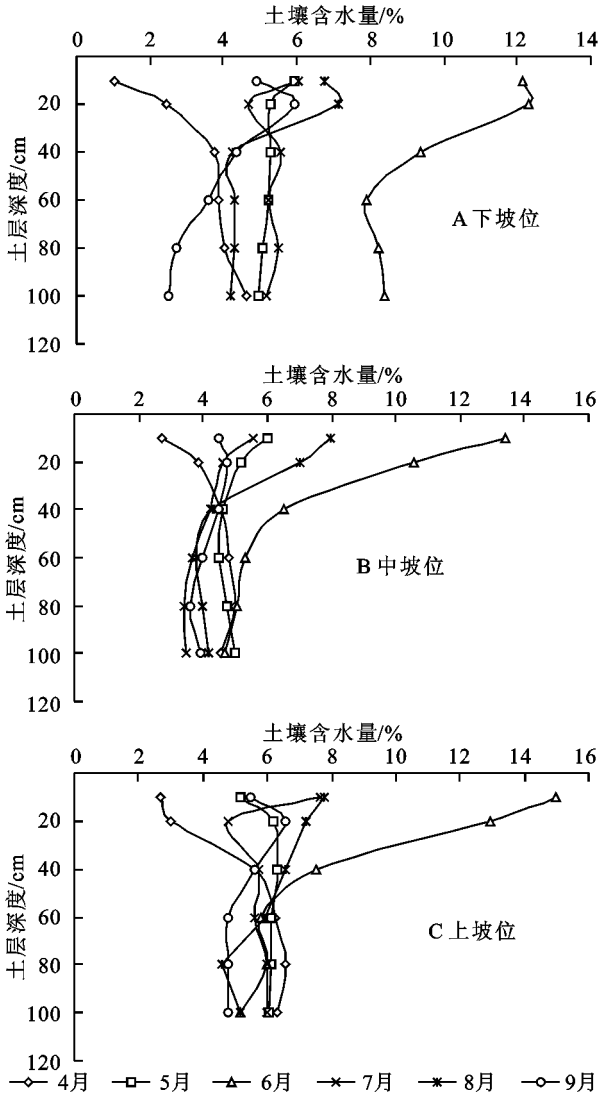


图 3 红砂灌木不同坡位土壤含水量的垂直变化

表 3 红砂灌丛不同坡位各月份土壤含水量

| 坡位 | 深度/cm | 田间稳定 持水量/% | 土壤含水量/% | | | | | |
|-----|--------|---------------|---------|-------|-------|------|------|------|
| | | | 4 月 | 5 月 | 6 月 | 7 月 | 8 月 | 9 月 |
| 下坡位 | 0—10 | 14.89 | 1.03 | 5.95 | 12.17 | 6.02 | 6.75 | 4.92 |
| | 10—20 | 14.24 | 2.45 | 5.29 | 12.32 | 4.70 | 7.13 | 5.96 |
| | 20—40 | 19.51 | 3.78 | 5.29 | 9.35 | 5.53 | 4.25 | 4.37 |
| | 40—60 | 13.31 | 3.86 | 5.23 | 7.91 | 5.25 | 4.28 | 3.58 |
| | 60—80 | 13.93 | 4.03 | 5.08 | 8.23 | 5.51 | 4.30 | 2.71 |
| | 80—100 | 13.44 | 4.61 | 4.95 | 8.40 | 5.18 | 4.21 | 2.52 |
| | 0—100 | 14.89 | 3.29 | 5.30 | 9.73 | 5.37 | 5.57 | 4.01 |
| 中坡位 | 0—10 | 10.58 | 2.70 | 3.85 | 4.53 | 4.81 | 5.01 | 4.58 |
| | 10—20 | 11.36 | 6.03 | 5.19 | 4.62 | 4.51 | 4.75 | 4.97 |
| | 20—40 | 10.55 | 13.39 | 10.57 | 6.53 | 5.32 | 5.05 | 4.69 |
| | 40—60 | 8.85 | 5.54 | 4.60 | 4.26 | 3.69 | 3.43 | 3.48 |
| | 60—80 | 10.25 | 7.98 | 6.99 | 4.31 | 3.82 | 3.97 | 4.20 |
| | 80—100 | 9.94 | 4.51 | 4.73 | 4.46 | 3.96 | 3.63 | 3.93 |
| | 0—100 | 10.25 | 4.25 | 5.01 | 7.59 | 4.17 | 5.21 | 4.20 |

续表 3

| 坡位 | 深度/cm | 田间稳定 持水量/% | 土壤含水量/% | | | | | |
|-----|--------|---------------|---------|------|-------|------|------|------|
| | | | 4 月 | 5 月 | 6 月 | 7 月 | 8 月 | 9 月 |
| 上坡位 | 0—10 | 14.54 | 2.66 | 5.14 | 14.98 | 7.68 | 7.80 | 5.51 |
| | 10—20 | 19.23 | 2.98 | 6.18 | 12.97 | 4.75 | 7.22 | 6.58 |
| | 20—40 | 16.59 | 5.63 | 6.29 | 7.50 | 5.71 | 6.57 | 5.58 |
| | 40—60 | 17.67 | 6.25 | 6.13 | 5.78 | 5.64 | 5.92 | 4.80 |
| | 60—80 | 17.83 | 6.56 | 6.11 | 6.00 | 6.00 | 4.61 | 4.80 |
| | 80—100 | 18.24 | 6.34 | 6.04 | 5.16 | 6.00 | 5.16 | 4.77 |
| | 0—100 | 17.35 | 5.07 | 6.26 | 8.73 | 5.96 | 6.21 | 5.34 |

3 结 论

(1) 红砂灌丛的土壤容重随深度的增加,呈先增加后逐渐减小的变化趋势。在 0—100 cm 深度内,不同坡位的土壤持水量大小顺序表现为:上坡位>下坡位>中坡位。

(2) 兰州北山红砂灌丛土壤水分季节变化表现为不明显的“双峰”曲线,6 月份达第一次高峰,8 月份达第二次高峰。在不同月份间,红砂灌丛的土壤水分变化具有明显的季节特征,这是植物生长规律和当地气候特点共同作用的结果。

(3) 根据兰州北山红砂土壤水分变化情况和植物根系吸水状况,土壤水分的垂直变化可分为 3 个层次:土壤水分活跃层(0—20 cm)、次活跃层(20—80 cm)和相对稳定层(80—100 cm)3 个层次。不同坡位随着深度的增加,上层土壤水分变化幅度大于下层,这与其他研究者^[20-21]的研究结果一致。

(4) 兰州北山红砂灌丛在 4—9 月均存在着不同程度的土壤干层,且 4 月的干层最为严重,从深度来看,各月 0—20 cm 干层严重,因此,黄土丘陵沟壑区在 4 月进行造林应该进行适当的灌溉以满足苗木早期对水分的需求。同时,该地区不同季节均存在土壤干化现象,在造林时造林密度不宜过大,以保证土壤水分的科学合理利用。

参考文献:

[1] 莫保儒,蔡国军,赵廷宁,等. 甘肃半干旱黄土丘陵沟壑区人工植被土壤水分研究[J]. 水土保持研究,2009,16(6):125-128.

[2] 贾志清. 晋西北黄土丘陵沟壑区典型灌草植被土壤水分动态变化规律研究[J]. 水土保持通报,2006,26(1):10-15.

[3] 苏娜,焦菊英,马祥华. 黄土丘陵沟壑区主要群落地上生物量季节变化及其与土壤水分的关系[J]. 水土保持研究,2012,19(6):7-12.

[4] 邹俊亮,邵明安,龚时慧. 不同植被和土壤类型下土壤水分剖面的分异[J]. 水土保持研究,2011,18(6):12-17.

[5] 李洪建,王孟本. 不同利用方式下土壤水分循环规律的比较研究[J]. 水土保持通报,1996,16(2):24-28.

[6] 杨文治,邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京:科

学出版社,2000.

[7] 李玉山,韩仕峰,汪正华. 黄土高原土壤水分性质及其分区[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊(土壤分水与土壤肥力研究专集),1985(2):1-17.

[8] 卢宗凡,张兴昌. 黄土高原人工草地的土壤水分动态及水土保持效益研究[J]. 干旱区资源与环境,1995,9(1):40-49.

[9] 李洪建,王孟本. 晋西北人工林土壤水分特点与降水关系研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(4):60-65.

[10] Qiu Y, Fu B, Wang J, et al. Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Environments, 2001, 49(4):723-750.

[11] 王孟本,李洪建. 晋西北黄土区人工林土壤水分动态的定量研究[J]. 生态学报,1995,15(2):178-184.

[12] 刘家琼,邱明新,蒲锦春,等. 我国荒漠典型超旱生植物:红砂[J]. 植物学报,1982,24(5):93-96.

[13] 石松利,王迎春,周健华,等. 盐分生境下长叶红砂和红砂内源激素含量及其生境差异性[J]. 应用生态学报,2011,22(2):350-356.

[14] 刘玉冰,王进,谭会娟,等. 红砂促分裂原活化蛋白激酶 MAPK 基因 cDNA 片段克隆及序列分析[J]. 兰州大学学报:自然科学版,2008,44(5):44-48.

[15] 李嘉珏,于洪波. 甘肃黄土高原立地分类与适地适树[M]. 北京:科学出版社,1990.

[16] 张万儒,许本彤. 森林土壤定位研究方法[M]. 北京:中国林业出版社,1986.

[17] 肖生春,肖洪浪,宋耀选,等. 荒漠植被红砂(*Reaumurta soongorica*)水热响应的年轮学研究[J]. 中国沙漠,2006,26(4):548-552.

[18] 刘云鹏,张社奇,谷洁,等. 不同土地利用方式对陕西黄河湿地土壤水分物理性质的影响[J]. 安徽农业科学,2011,39(5):2725-2728.

[19] 王力,邵明安,侯庆春. 土壤干层量化指标初探[J]. 水土保持学报,2000,14(4):87-90.

[20] 王孟本,李洪建. 晋西北黄土区人工林土壤水分动态的定量研究[J]. 生态学报,1995,15(2):178-184.

[21] 阮成江,李代琼. 半干旱黄土丘陵区沙棘林地土壤水分及其对沙棘生长影响研究[J]. 水土保持通报,1999,19(5):27-30.