

紫花苜蓿和短花针茅根系分布与土壤水分研究

成向荣^{1,2}, 黄明斌^{1*}, 邵明安¹, 樊军¹

(1. 中国科学院水利部西北农林科技大学水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨陵 712100;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 以陕北农牧交错带人工草种紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)和天然草种短花针茅(*Stipa breviflora* Griseb.)为对象,采用根钻法调查两个草种的根系垂直分布以及刈割后苜蓿根系变化特征,并通过定位观测研究土壤水分动态变化。结果表明:紫花苜蓿和短花针茅根系密度随土壤深度增加而减少,而且均以直径小于等于1 mm的须根为主;0~50 cm土层紫花苜蓿和短花针茅根系量分别占0~100 cm剖面总量的67%和84%。紫花苜蓿和短花针茅根系分布与土壤水分消耗特征吻合。生长旺盛期苜蓿大量消耗0~140 cm土层土壤水分,5~9月平均有效土壤储水不足10 mm;生长季末深层(140~280 cm)土壤储水也逐渐降低,约为裸地储水量的50%。短花针茅0~280 cm剖面土壤水分状况明显好于苜蓿地,比苜蓿地多储水100 mm左右;主要消耗浅层(0~50 cm)土壤水分,深层水分利用较少。

关键词: 紫花苜蓿; 短花针茅; 根系分布; 土壤水分

中图分类号: S797.27

文献类型: A

文章编号: 1007-0435(2008)02-0172-06

Root Distribution and Soil Water Dynamics of *Medicago sativa* L. and *Stipa breviflora* Griseb.

CHENG Xiangrong^{1,2}, HUANG Mingbin^{1*}, SHAO Ming'an¹, FAN Jun¹

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming of the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, and Northwest Sci&Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi Province 712100, China;
2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Vertical root distributions of *Medicago sativa* L. and *Stipa breviflora* Griseb. were investigated using drill method and soil water dynamics were studied by positioning field observation in the farming&2 pastoral interlaced region of northern Shaanxi province. The results show that root densities of *M. sativa* and *S. breviflora* decreased along with the increased soil depth, and the diameter of most roots was within 1 mm. The percentage of *M. sativa* and *S. breviflora* roots in 0- 0.5 m soil layer were 67% and 84% of the total root amount throughout 0- 1.0 m profile, respectively. Soil water used by *M. sativa* and *S. breviflora* were greatly affected by their roots distribution in profile. Water stored in 0- 140 cm soil layer was depleted mainly by *M. sativa*; the averaged plant available water was less than 10 mm from May to September; in deep soil layer of 140- 280 cm, soil water storage also declined gradually at the end of the growing season and was about 50% of that in bare land. Water stored in 0- 280 cm soil layer under *S. breviflora* was 100 mm more than that under *M. sativa*. Soil water consumed by *S. breviflora* was mainly from 0- 50 cm soil layer, and little soil water consumption was observed in deep soil layer.

Key words: *Medicago sativa* L.; *Stipa breviflora* Griseb.; Root distribution; Soil water storage

陕北农牧交错带是毛乌素沙漠向陕北黄土高原丘陵沟壑区的过渡地带,也是我国典型的风沙过渡

区和生态脆弱区。加强这一地区草场资源建设,不仅是畜牧业发展的物质基础,也是防止水土流失,改

收稿日期: 200706218; 修回日期: 200710225

基金项目: 国家自然科学基金(40471062), 西北农林科技大学创新团队项目

作者简介: 成向荣(1972), 男, 甘肃天水人, 博士研究生, 研究方向为土壤物理和生态水文, E-mail: cxr@nwsuaf.edu.cn; * 通讯作者
Author for correspondence, Email: hmbd@nwsuaf.edu.cn

善生态环境的重要措施。水分是农牧交错带草地建设主要限制因素。根系是植物吸收、转化和储藏营养物质的重要器官,对地上部的生长、形态建成发生作用,其分布特征反映了植物对地下资源的利用状况和水土保持性能的强弱。目前,在黄土高原农牧交错带,已开展了许多人工、天然草地土壤水分消耗和恢复的研究^[1-4],但有关根系分布研究较少^[5,6]。因此,研究草地根系分布与土壤水分的相互关系,具有重要的现实意义。紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.) (以下简称苜蓿)作为一种优质、高产、抗旱,适应性强的草种,在陕北农牧交错带广泛种植。随生长年限的增加,苜蓿逐渐衰败,进而演替到该地区的稳定草原群落短花针茅(*Stipa breviflora* Griseb.)群落^[7]。本文的研究目的是比较生长旺盛期(种植的第3,4年)的人工苜蓿和退化苜蓿地上发育的天然短花针茅根系分布特征及其土壤水分动态,初步探讨根系分布对土壤水分的影响。

1 研究区概况

试验区位于陕西神木县以西 14 km 处的六道沟流域(东经 110°21'~110°23', 北纬 38°46'~48°51'),海拔 1094.0~1273.9 m。流域北依长城,地处毛乌素沙漠的边缘,属于黄土高原水蚀风蚀交错带的强烈侵蚀中心,流域面积 6.89 km²。该区年均降水量 437.4 mm,年内年际变率大,50% 以上集中在 7-8 月。年均气温 8.4℃, < 10℃ 活动积温为 3248.0℃,无霜期 153 d,全年日照时数 2836 h,年总太阳辐射量为 5922 MJ/m²,属中温带半干旱气候。土壤主要为沙黄土和风沙土。

2 材料与方法

在六道沟小流域选取处于产草高峰期的 3,4 年生人工苜蓿,种植 20 多年苜蓿退化后发育的短花针茅为主要建群种的天然草地和裸地建立 3 个 4 m @ 15 m 的小区(西北向,13~15°坡地),其中苜蓿地和裸地 2003 年以前均为农地。苜蓿生长旺盛期高 35~50 cm,盖度 70% 左右;小区内杂草非常少,仅有个别狗尾草(*Setaria viridis* (L.) Beauv.) 茵陈蒿(*Artemisia capillaris* Thunb.) 和猪毛菜(*Salsola collina* Pall.) 分布,盖度小于 5%。短花针茅高 10~35 cm,盖度 60% 以上;小区内零星苜蓿和少量达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica* (Laxm.) Schindl.) 混杂分布。裸地定期除草。各小区下方安装径流桶,分为两级,收集小区的产流,降雨后测

定径流量。

每个小区在坡的上、中和下部各安装 1 根 3 m 中子管,用中子水分仪(CNC503DR)监测土壤水分变化。0~1 m 土层每 10 cm 读取 1 组数据,1 m 以下 20 cm 读数。3 点的平均值为该小区的测定值。在生长季长芒草地随机割取 1 m @ 1 m 的 2 个样方,称重计算生物量。2006 年 7 月 19 日和 10 月 17 日以及 2007 年 8 月 2 日刈割苜蓿,统计小区生物量。

用内径 9 cm 的根钻分别在小区的上、中和下部确定 4 个样点,分层(10 cm)取样调查苜蓿和长芒草 0~1.0 m 根系垂直分布特征。2006 年苜蓿第 1 次刈割后测定 0~0.5 m 土层根系动态变化。检出每层所有活根系,编号后装入纸袋。将野外带回的根样用自来水清洗干净后,采用加拿大 REGENT 公司产的根系形态学和结构分析系统(WINRhizo),按直径 [1 mm、[2 mm 和 > 2 mm 的标准分为 3 级,测定各径级的根系长度和表面积。

用下式计算某土层根长密度(root length density, RLD) 和根系表面积密度(root surface area density, RSD):

$$RLD, RSD = \frac{\sum_{i=1}^n s}{n} \# \frac{1}{Pr^2 \# h}$$

式中: r 土钻半径(m), h 土层厚度(m), s 根系长度(m)或表面积(m²), n 为样点总数。

短花针茅地土壤容重在 1.42~1.5 g/cm³, 苜蓿和裸地容重在 1.35 g/cm³ 左右。降雨量用标准雨量桶测定。2006 和 2007 年 5~9 月总降水量较为接近,分别为 320.6 和 316.6 mm,比多年均值少 10%。2 年各月降水变化特征基本一致(图 1),2006 年 7 月降水量比 2007 年约高 30 mm,而 9 月比 2007 年低 30 mm 左右,5、6 和 8 月降水量相差不大。

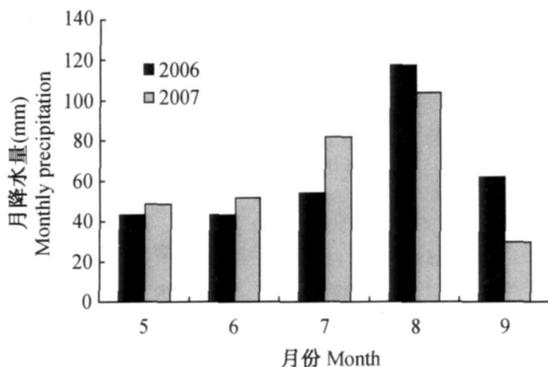


图 1 试验期各月降水量

Fig. 1 Monthly precipitation during the experimental period

使用 Excel 2003 进行数据分析和处理。

3 结果与分析

3.1 苜蓿和短花针茅根系垂直分布特征

从图2可以看出,在0~1.0 m剖面,苜蓿和短花针茅根长密度(RLD)随土壤深度增加均呈减小趋势。其中0~0.5 m土层,根系直径小于1 mm、2 mm和总根系密度随土壤深度增加显著下降,0.5 m以下土层缓慢减少。直径小于1和2 mm根长密度垂直分布与总根长密度没有显著差异,直径大于2 mm的根系较少,仅为总根长密度的1.4%(苜蓿)和4.5%(短花针茅)。可见,苜蓿和短花针茅根系均以直径小于1 mm的毛根为主。

苜蓿和短花针茅根系表面积密度(RSD)与根长密度垂直分布特征类似(未列出)。苜蓿0~100 cm剖面直径小于1 mm、2 mm、大于2 mm和总根系表面积密度分别为8.756、10.486、1.670和12.156 m² # m⁻³。而短花针茅0~1.0 m剖面相应根径的RSD分别为1.218、1.685、0.315和1.999 m² # m⁻³。无论是根长密度还是表面积密度,0~1.0 m剖面苜蓿都比短花针茅大的多,分别为短花针茅的7.4倍和6.1倍。

1 m处直径小于1 mm的苜蓿根长密度为387.1 m # m⁻³,而短花针茅只有28.8 m # m⁻³,即使在0.5 m处也仅为49.9 m # m⁻³。苜蓿根系的分布没有测定,已有研究表明,研究区4年生苜蓿根系分布深度接近4 m^[8]。但本研究中的苜蓿小区,2 m以下土壤中有不均匀料浆石块分布,可能对苜蓿根系垂直分布深度有一定影响。尽管如此,苜蓿根系分布比短花针茅要深广的多。

3.2 苜蓿刈割后根系动态分布特征

刈割后直径小于1 mm的苜蓿根系动态特征如图3所示。0~0.5 m土层总根长密度随时间增加先减小后增大,最后再减小。0~0.2 m土层根长密度变化较大,其中表层10 cm土层根长密度变化最大,在1550.52~2850.27 m # m⁻³,变异系数0.27。0.3~0.5 m土层根长密度变化相对较小。Luo等^[9]的研究表明,夏季苜蓿根系生长主要取决于地上部供给根系碳水化合物的状况,刈割后根系获取的碳水化合物减少,根系生长受到抑制,根系死亡率增加,导致根长密度降低。此后,随地上部分的生长,根系获取的碳水化合物增加,苜蓿根长密度相应增大。

3.3 土壤水分动态

3.3.1 水量平衡 2006和2007年观测期(5月中旬-9月底)苜蓿、短花针茅和裸地的水量平衡特征见表1。2年观测期内降水量基本相同,接近290 mm。观测期末苜蓿地土壤储水量比观测初期有不同程度的下降,而短花针茅和裸地储水量均有一定的增加。2006年短花针茅小区产流6次,径流量为35.4 mm,苜蓿和裸地小区产流4次,径流总量分别为5.7和15.2 mm;2007年仅短花针茅小区产流3 mm,苜蓿和裸地小区产流非常少。观测期末苜蓿地蒸散量已超过同期降水量,两年的ET/P(蒸散量/降水量)分别为104.5%和102.1%,短花针茅地的分别为82.8%和86.8%,裸地的分别为92%和97.3%。苜蓿地两年平均蒸散量分别比短花针茅地和裸地多45.9和32.4 mm,短花针茅蒸散量略低于裸地蒸散量(表1)。

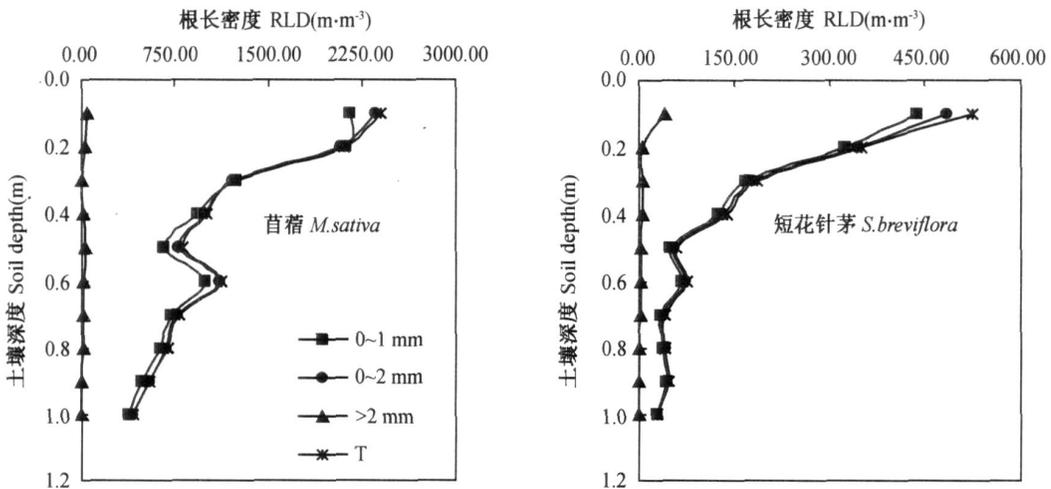


图2 苜蓿和短花针茅不同径级根长密度垂直分布

Fig.2 Vertical RLD distribution of *M. sativa* and *S. brevisflora* in different diameter grades

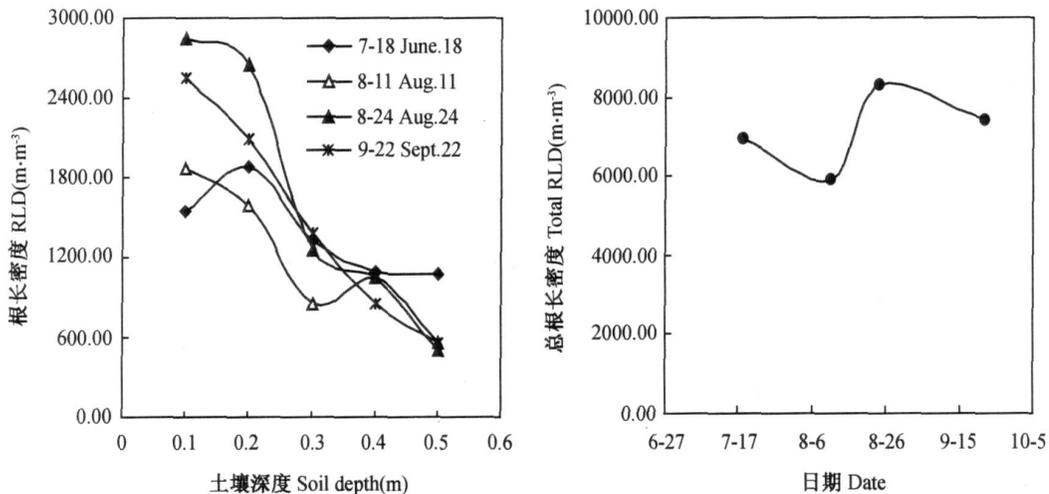


图 3 0.0~ 0.5 m 土层苜蓿刈割后不同时期根长密度 ([1 mm) 分布特征(左)和总根长密度变化特征(右)
Fig.3 Vertical RLD ([1 mm) distribution in different time after cut in 0.0- 0.5 m profile (left) and changing characteristics of total RLD with time (right) of *M. sativa*

表 1 苜蓿、短花针茅和裸地水量平衡特征

Table 1 Water balance of different land use patterns

土地利用方式 Land use pattern	时段 Period	降水量 Rainfall (mm)	土壤储水量变化量 Change of soil water storage (mm)	径流量 Runoff (mm)	蒸发量 ET (mm)
苜蓿 <i>M. sativa</i>	2006. 5. 13- 9. 27	285. 9	- 18. 7	5. 7	298. 9
	2007. 5. 16- 9. 28	289. 4	- 6. 3	0. 1	295. 6
短花针茅 <i>S. breviflora</i>	2006. 5. 13- 9. 27	285. 9	13. 9	35. 4	236. 6
	2007. 5. 16- 9. 28	289. 4	20. 3	3. 0	266. 1
裸地 Bare land	2006. 5. 13- 9. 27	285. 9	22. 5	15. 2	248. 2
	2007. 5. 16- 9. 28	289. 4	7. 7	0. 2	281. 5

3.3.2 土壤储水量季节变化 2006 和 2007 年观测期, 苜蓿、短花针茅和裸地不同土层土壤储水量季节变化趋势基本一致(图 4)。0~ 50 cm 土层储水季节变化较大, 对降水有明显的响应。50~ 140 和 140~ 280 cm 土层土壤水分的变化较为平缓。2006 年 0~ 50 cm 土层裸地平均土壤储水量为 74 mm, 短花针茅地为 51.1 mm, 苜蓿地储水量最低为 35.5 mm, 且部分时段已低于无效储水。可见, 苜蓿对该层水分消耗已相当严重。短花针茅地产流较多(表 1), 减少了土壤水分的补给, 也导致土壤储水量下降。5 月中旬至 7 月中旬降水较少, 3 个小区 0~ 50 cm 土层土壤储水量基本上呈减小的趋势; 7 月中旬至 8 月底降水比较集中, 土壤储水量均有明显恢复; 9 月土壤储水量又开始下降。2006 年观测期, 50~ 140 cm 土层观测期末苜蓿地土壤储水量减少 5 mm, 裸地土壤储水略有增加, 短花针茅变化很小。苜蓿地平均土壤储水量为 58.7 mm, 有效水不足 10 mm, 比裸地低 105.2 mm; 短花针茅地平均土壤储水量为 111.1 mm, 比裸地低 52.7 mm。140~ 280 cm 土层观测期末苜蓿地土壤储水量减少了 13 mm, 平均土壤储水量为 168.9 mm。短花针茅和裸地土壤储水量略有增加, 平均土壤储水量分别为

186.8 和 295.1 mm。苜蓿对该层土壤水分的消耗相对较少, 略低于短花针茅土壤储水量。

2007 年观测期苜蓿、短花针茅和裸地各土层土壤储水量动态变化与 2006 年类似。0~ 50 cm 土层苜蓿地土壤储水量仍维持在较低水平, 部分时段低于无效储水。短花针茅地 0~ 50 cm 土层平均土壤储水量为 59.5 mm, 仅比裸地平均储水量低 8.6 mm。7 月中旬以前, 裸地土壤储水量明显高于短花针茅; 7 月中旬以后, 由于裸地没有除草, 杂草生长旺盛, 到 9 月初地表盖度已达 38%, 增加了土壤水分消耗, 土壤储水量和短花针茅地接近(图 4)。50~ 140 cm 土层这 3 个小区土壤储水量变化较小, 与 2006 年大体一致。140~ 280 cm 土层观测期末苜蓿地土壤储水量减少了 17mm, 平均土壤储水量为 150.4 mm, 约为裸地的 50%; 短花针茅和裸地土壤储水变化较小, 观测期末较观测初期土壤储水量分别减少了 4 mm 和 2 mm。短花针茅平均土壤储水量为 184.4 mm, 比苜蓿地多储水 34 mm, 约为裸地储水量的 63%。2 个生长季短花针茅 140~ 280 cm 土层水分几乎没有变化, 但土壤储水相对较低, 可能是前期苜蓿强烈耗水, 深层水分没有得到完全恢复。试验

区15年生苜蓿-短花针茅群落200 cm以下土壤含水量^[4]与短花针茅140~280 cm土层水分接近,就

是一个很好的证明。

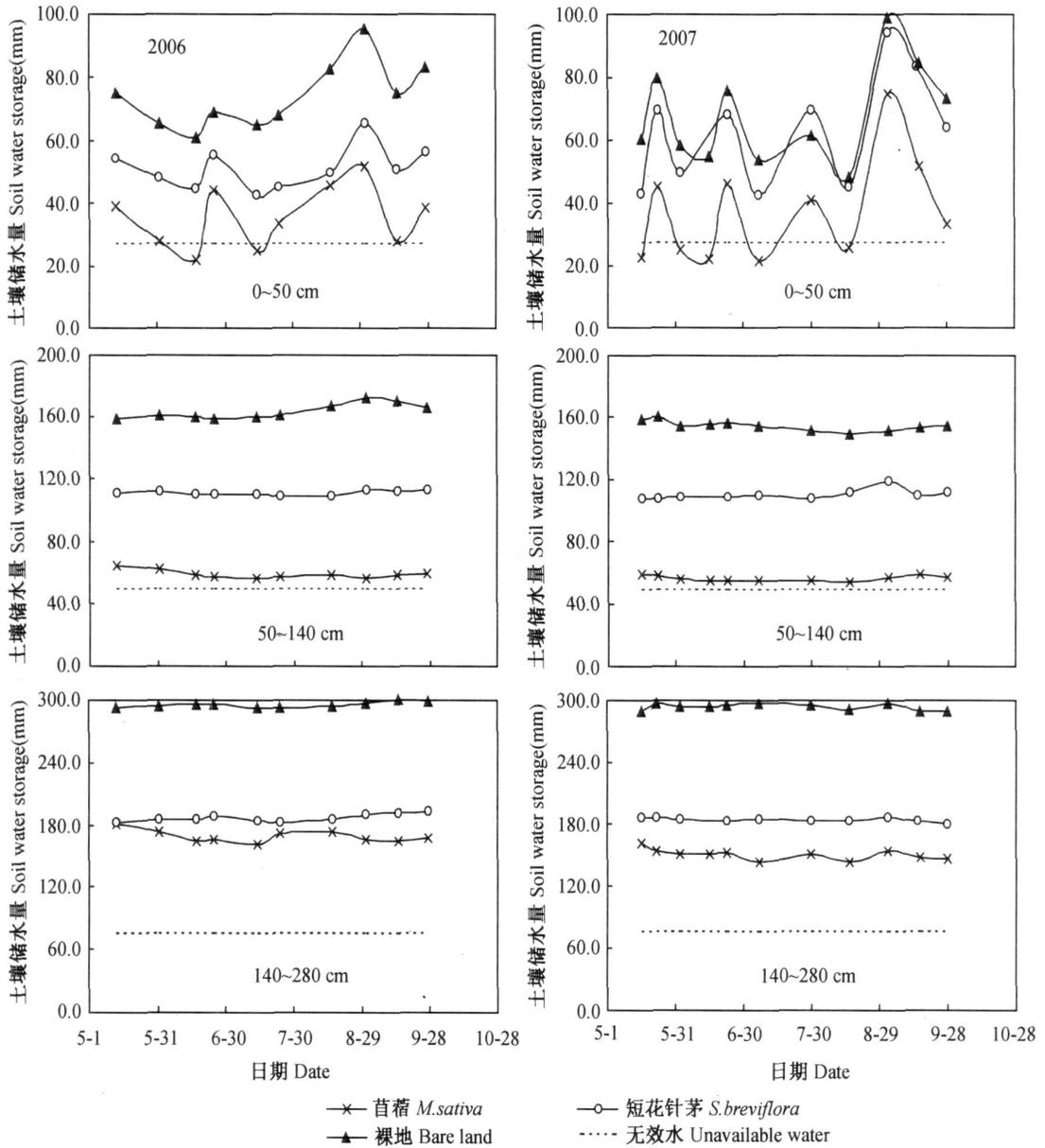


图4 2006, 2007年苜蓿、短花针茅和裸地0~50 cm、50~140 cm和140~280 cm土层土壤储水量季节变化
Fig. 4 Seasonal dynamics of soil water storage in 0~50 cm, 50~140 cm, and 140~280 cm soil layers of M. sativa land, S. breviflora land, and bare land

4 讨论

无论是天然草种还是人工草种,根系密度均随土壤深度的增加而减少。短花针茅84%根系(0~100 cm剖面)集中在0~50 cm土层,其中表层30 cm土层达70%。3年生苜蓿这一比例分别为67%和51%。这与现有的一些研究结果一致^[5,10,11]。郭正刚等^[5]和万素梅等^[10]研究多个紫花苜蓿品种在黄土高原根系发育能力,认为根系集中在土壤表层与

该层苜蓿具有发达侧根有关。而表层土壤具有丰富的养分,且可获得较多降水的补给,也是根系(尤其是细根)集中分布于土壤表层的重要原因^[12]。

根系垂直分布对剖面土壤水分有重要影响。大部分根系集中在0~50 cm土层增加了对土壤水分消耗。2年观测期内,0~50 cm土层苜蓿地平均土壤储水量为36 mm,土壤有效水不足10 mm。由于耗水强烈,该层储水时常低于无效储水,土壤储水量仅为裸地的50%。短花针茅0~50 cm土层平均土

壤储水量为 55 mm, 约为裸地的 77%。苜蓿土壤储水显著低于短花针茅, 这与该层根系分布特征吻合。此外, 苜蓿刈割后, 随地上部分生长, 0~50 cm 土层的根毛总量比刈割前增加, 尤其是 0~20 cm 土层根系密度明显增大, 这有利于第 2 茬苜蓿充分利用雨季的降水。郭正刚等^[13]研究表明, 刈割抑制紫花苜蓿主根纵向发展, 而促进侧根横向发育; 随刈割次数增加, 侧根集中分布在土壤表层的比例也增加。

生长旺盛期苜蓿根系分布可能已超出我们观测的 280 cm 深度, 尽管深层土壤根系分布较少, 但对土壤水分消耗非常严重。两年观测期内, 50~140 cm 土层土壤储水量接近无效储水, 可利用的水分较少, 几乎得不到降水的补给; 140~280 cm 土层储水也呈逐渐下降趋势。而短花针茅作为研究区地带性的草本植物, 50~280 cm 土层土壤储水量相对较高。在黄土高原典型草原区的研究也表明, 3 年生苜蓿蒸腾耗水占蒸散量的 86%, 而禾本科草本长芒草仅为 40.7%; 水分利用强度苜蓿草地为 137.3%, 而长芒草地为 88.7%^[13]。这也说明, 苜蓿生长旺盛期, 土壤水分的消耗较大, 强烈的耗水导致土壤储水不断下降。此外, 苜蓿地上部生物特征也说明其耗水性比短花针茅强。短花针茅鲜生物量为 1423~1464 kg # hm⁻², 苜蓿小区鲜生物量为 2516~5200 kg # hm⁻², 比短花针茅高 1.7~3.5 倍。说明干旱的苜蓿地具有较高的生物量, 而水分条件相对较好的短花针茅地生物量却较低。这与李凤民和张振万^[14]对苜蓿和长芒草的研究结果一致。

尽管苜蓿为当地畜牧业的发展提供了优良的牧草, 也对减少地表径流、防止水土流失有积极作用。但生长旺盛期的苜蓿耗水严重, 水分胁迫极大的影响和抑制苜蓿的正常生长。生长盛期持续时间较为短暂, 最多不超过 6 年, 经过 10 年时间紫花苜蓿草地可演替到该地区的稳定草原群落²短花针茅群落^[7]。樊军等^[4]研究证实, 试验区 15 年生苜蓿-短花针茅群落翻耕 2 年后, 200 cm 土层土壤水分有明显提高。因此, 必须采取适当的管理措施, 如确定适宜的种植密度, 每年适当增加刈割次数, 苜蓿-作物带状混播或轮作等, 增加水分的利用效率, 延长人工草地的使用寿命。

5 结论

5.1 生长旺盛期的苜蓿和短花针茅根系密度均随土壤深度增加而减少, 短花针茅 0~0.5 m 土层根

系密度占总量(0~1.0 m 剖面)的 84%, 苜蓿这一比例为 67%, 而且均以直径 [1 mm 须根为主。

5.2 刈割后 0~0.5 m 土层直径小于 1 mm 的苜蓿总根长密度, 随时间增加先减小后增大, 最后再减小, 可能与地上部供给根系碳水化合物量有关。

5.3 2006 和 2007 年观测期末苜蓿地蒸散量均超过同期降水量, 平均 ET/P(蒸散量/降水量)为 103.3%, 短花针茅 84.8%, 裸地 94.6%。苜蓿地 2 年平均蒸散量分别比短花针茅地和裸地多 45.9 和 32.4 mm, 短花针茅蒸散量略低于裸地。

5.4 苜蓿和短花针茅对剖面水分消耗与根系密度垂直分布特征一致。苜蓿地 0~140 cm 土层水分消耗严重, 有效储水非常低, 140~280 cm 土层生长季末土壤储水也呈减少趋势。而短花针茅主要消耗浅层土壤水分, 对深层土壤水分影响不大。

参考文献

- [1] 李玉山. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应[J]. 土壤学报, 2002, 39(3): 4012411
- [2] 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): 2962300
- [3] 程积民, 万惠娥, 王静. 黄土丘陵区紫花苜蓿生长与土壤水分变化[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 4352438
- [4] 樊军, 邵明安, 王全九. 陕北水蚀风蚀交错区苜蓿地土壤水分过耗与恢复[J]. 草地学报, 2006, 14(3): 252257
- [5] 郭正刚, 张自和, 肖金玉, 等. 黄土高原丘陵沟壑区紫花苜蓿品种间根系发育能力的初步研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(8): 10021012
- [6] 韩国栋, 李博, 卫智军, 等. 短花针茅草原放牧系统植物补偿性生长的研究. I. 植物净生长量[J]. 草地学报, 1999, 7(1): 127
- [7] 李裕元, 邵明安, 上官周平, 等. 黄土高原北部紫花苜蓿草地退化过程与植被演替研究[J]. 草业学报, 2006, 15(2): 85292
- [8] 成向荣, 黄明斌, 邵明安. 神木水蚀风蚀交错带主要人工植物细根垂直分布研究[J]. 西北植物学报, 2007, 27(2): 3212327
- [9] Luo Y, Meyerhoff P A, Loomis R S. Seasonal patterns and vertical distributions of fine roots of alfalfa [J]. Field Crops Research, 1995, 40: 112127
- [10] 万素梅, 胡守林, 黄勤慧, 等. 不同紫花苜蓿品种根系发育能力的研究[J]. 西北植物学报, 2004, 24(11): 20422052
- [11] 焦树英, 韩国栋. 若干禾本科牧草在荒漠草原区的适应性及其生产性能和营养价值评价[J]. 草地学报, 2007, 15(4): 322334
- [12] Tiarks A, Nambiar E K S, Cossalter C. Site management and productivity in tropical forest plantations [R]. Center for International Forestry Research, Occasional Paper No. 16, ISSN 08529818, 1998
- [13] 郭正刚, 刘慧霞, 王彦荣. 刈割对紫花苜蓿根系生长影响的初步分析[J]. 西北植物学报, 2004, 24(2): 212220
- [14] 李凤民, 张振万. 宁夏盐池长芒草草原和苜蓿人工草地水分利用研究[J]. 植物生态学与地植物学学报, 1991, 15(4): 312330

(责任编辑 梁艳萍)