

黄土塬区 3 种豆科牧草对土壤水分的消耗利用研究

张晓红, 王惠梅, 徐炳成, 李凤民*

(中国科学院水利部水土保持研究所 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)

摘要: 在田间完全旱作条件下采用 3 个密度和 2 种播种方式观察了 3 种多年生豆科牧草生长第 2 年对土壤水分的消耗利用情况。结果表明: 苜蓿主要耗水深度在 2~3 m, 最深可达 5 m, 其中、高密度处理 3 m 以上土壤水分含量都在稳定田间持水量之下, 已经开始形成土壤下伏干层; 沙打旺耗水深度在 0~2 m, 最低含水量(11.61%) 处于 80~100 cm, 在雨季可以恢复到稳定田间持水量之上; 达乌里胡枝子主要耗水深度在 1 m 以上, 最低含水量也在稳定田间持水量之上。单播沙打旺、苜蓿和达乌里胡枝子全生长期对土壤水分的消耗分别为 249.9、180.2 和 136.6 mm, 水分利用效率分别是 29.39、26.04 和 8.91 kg·mm⁻¹·hm⁻²。混播、加大播种密度都会增加 3 种牧草土壤水分消耗, 降低土壤储水量, 提高干草产量和水分利用效率, 但影响程度因牧草种类、播种方式以及不同的生长时段而异。

关键词: 土壤水分动态; 豆科牧草; 黄土旱塬; 苜蓿; 沙打旺; 达乌里胡枝子

中图分类号: Q948.118 文献标识码: A

Soil Water Using and Consume of Three Legumes on Highland of Loess Plateau

ZHANG Xiaohong, WANG Huimei, XU Bingcheng, LI Fengmin*

(State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Soil water using and consume of three legumes on highland of Loess Plateau next to the planted year were observed by 2 seeding modes in three densities in a field experiment. It was showed that *Medicago sativa* soil water consuming depth was 2~3 m mostly, but the deepest had gotten to 5 m. The soil water contents both medium and high density were below the soil water steady content. Thus the dry layer had begun to form in lower soil profile. *Astragalus adsurgens* mainly consumed 0~2 m depth soil water. The lowest water content (11.61%) appeared at 80~100 cm, which could be restored to above the steady content level. *Lespedeza davurica* mainly absorbed 1 m upside soil water and even the lowest water content was above the steady content. The soil water consume (SWC) and water use efficient (WUE) of the whole year were: 249.9, 180.2, 136.6 mm and 29.39, 26.04, 8.91 kg·mm⁻¹·hm⁻² for *Medicago sativa*, *Astragalus adsurgens*, and *L. davurica* respectively. Both increasing density and commixing could increase legumes' water consuming, or improve their yield and WUE, but the effects varied with component species, mixing mode, densities and so on.

* 收稿日期: 2006-12-20; 修改稿收到日期: 2007-06-09

基金项目: 中国科学院百人计划择优支持项目(C23013500)

作者简介: 张晓红(1976-), 女(满族), 在读博士研究生, 主要从事农业生态与土壤方面的研究。E-mail: zhx_1976@163.com

* 通讯作者: 李凤民, 教授, 博士生导师, 主要从事植物/作物生态学研究。E-mail: fml@ms.isw.c.ac.cn; fml@lzu.edu.cn

Key words: soil water dynamic; legume; highland of Loess Plateau; *Medicago sativa*; *Astragalus adsurgens*; *Lespedeza davurica*

苜蓿(*Medicago sativa* L.)、沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall.) 和达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica* Schind.) 均属多年生豆科牧草,除具有固氮特性外,还因其耐寒、耐旱、有较强的防风固沙能力以及较高的营养价值,在我国黄土高原丘陵沟壑区的水土保持和畜牧业发展中颇受重视^[1-5]。

黄土高原土层深厚,是我国西部地区巨大的天然储水库,但近年来的研究发现,人工植被下面常有因对土壤水分过度利用引起的不同程度的下伏干层,对生态环境和区域可持续发展构成了威胁^[6-9]。然而人工植被,特别是以豆科植物为主体的人工草地是发展草地畜牧业、调整产业结构并改善生态环境的重要土地利用方式,因此人工草地与土壤水分关系的研究一直是黄土高原地区水分利用和环境整治中的重要研究课题。许多研究表明,早期以改善生态环境、发展地区经济为主要目标建立的人工草地,由于牧草种类选择、种植密度和模式不当等原因导致土壤旱化现象严重,草地生产力和稳定性差,有效利用期短^[4,10-13],多年生长形成的土壤干层对多年生豆科人工草地后期生产、管理、恢复和再利用造成了严重障碍^[6,10,13-15]。因此,摸清多年生豆科人工草地耗水特点和规律,通过牧草种类、密度、播种模式等可调控方式,结合当地气候环境条件,建立优质高效的人工草地对黄土高原草地畜牧业的可持续发展极为重要。本实验在典型黄土塬区以苜蓿、沙打旺和达乌里胡枝子 3 种多年生豆科牧草为材料,研究了不同播种密度和模式的人工草地在建植次年对土壤水分的消耗利用情况,以期为人工草地管理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

实验于 2004~2005 年在中国科学院水利部水土保持研究所武农业生态试验站进行。该站位于黄土高原中南部的陕甘交界处,地处北纬 35°12',东经 107°40',海拔 1 200 m,暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均降水量 584 mm,年平均气温 9.1℃,无霜期 171 d,地下水埋深 50~80 m,属典型的旱作农业区。

1.2 供试材料

沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall.) 为水土保

持研究所自行辐射育成的‘彭阳’早熟型(千粒重 1.943 g),苜蓿(*Medicago sativa* L.) 为引自加拿大的“阿尔冈金”(千粒重 1.285 g),二者在黄土高原地区均是典型的当家品种;达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica* Schind.) 为野生种(千粒重 1.874 g),属黄土高原森林草原地带的代表性群落建群种之一。

1.3 试验方法

1.3.1 处理设置及播种 实验设单播(A. 沙打旺; B. 苜蓿; C. 达乌里胡枝子)、等比例混播(AB、AC、BC、ABC) 2 种播种方式,每播种方式设高、中、低 3 个密度(67.5、22.5 和 7.5 万株/hm²) 处理,1 个裸地对照(CK),共 22 个处理,每处理 3 次重复,小区面积 10 m²(4 m×2.5 m),完全随机区组排列;2004 年 5 月 27 日将种子与干土混合均匀后撒播,播深 2~3 cm,出苗后除去杂苗。当年以保苗为主,冬前刈割一次不计产。

1.3.2 指标测定与计算 2005 年 4 月中旬牧草返青后开始每月定期观测土壤水分。表层 0~30 cm 用土钻取土,用烘干称重法测定,30~500 cm 用水分中子仪(美国 CPN 公司 503DR) 分层(30~100 cm 每 10 cm 1 层,1~5 m 每 20 cm 1 层)测定;分别在 5、7 和 9 月下旬取 1 m² 样区,分别刈割先称小区牧草鲜重,后用烘干法测干鲜重比,计算小区地上生物量的干、鲜重;整个试验过程不施用任何肥料,适时去除杂草。根据测得数据计算以下指标:

土壤储水量(水深 D_w , mm): $D_w = \sum \theta_v \cdot h$, $\theta_v = \theta_m \cdot \rho$, θ_v 为容积含水量(%), h 为土层厚度(cm), θ_m 为质量含水量(%), ρ 为土壤容重^[16]。

阶段土壤耗水量(ΔW , mm): $\Delta W = D_{w1} - D_{w2}$, D_{w1} 为生育阶段初 0~5 m 土壤储水量(mm), D_{w2} 为生育阶段末 0~5 m 土壤储水量(mm)。

蒸散量(mm): $P + \Delta W$, ΔW 同上, P 为同期降水量(mm)。

水分利用效率(kg·mm⁻¹·hm⁻²): 牧草生产力/蒸散量,牧草生产力为一定时期内牧草累积干生物量。

1.4 数据分析处理

所得数据采用 SAS 统计分析软件和 Excel 2000 进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤储水量的影响

2.1.1 不同处理土壤储水量比较 图1是牧草生育期内裸地对照(CK) 5 m 深土壤储水量(Dw)和降水量的年度动态变化趋势。CK在生育期内5m深

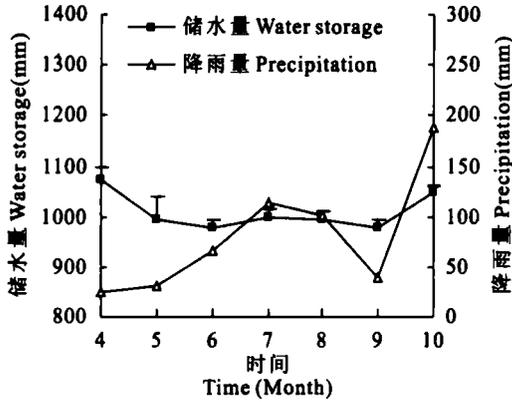


图1 2005年降水和对照(CK) 储水量(0~ 5 m) 动态变化

Fig.1 Dynamic change of soil water storage(0~ 5 m) between bare land and precipitation in 2005

土壤储水量在 980~ 1 100 mm 范围内波动, 生长季初期和末期较高, 中期大部分时间(6~ 9 月份) 较低。这可能是 4~ 6 月份降水较少, 而且 CK 地表裸露蒸发强烈, 储水量随时间延续而逐渐下降, 而 7 月份雨季开始后土壤储水量明显受降水的影响, CK 土壤储水量随降水多少而波动。

与裸地对照的 Dw 相似, 3 种牧草无论单播还是混播, 3 个密度下 Dw 的年度动态变化均受降水的影响, 表现为两头高中间低的趋势, 但在数量和变化幅度上因牧草的种类、播种密度和播种方式而异(表1)。其中, 各处理 5 m Dw 在牧草生长初期(4 月份) 均约为 1 050 mm 左右, 处理间差异并不显著 ($P > 0.05$), Dw 随着生长时期的推进而开始迅速下降, 9 月份均降到了各自最低点; 10 月份生长期结束后都有不同程度的恢复。

各处理全生育期 5 m 土壤储水量(Dw) 平均值相比(表1), 除低密度的沙打旺(A) 和达乌里胡枝子(C) 外其它处理 Dw 均显著低于对照(CK)。其中达乌里胡枝子 3 个密度的 Dw 均在 950 mm 以上, 仅

表1 不同播种方式和播种密度的 3 种豆科牧草地储水量年度变化

Table 1 Temporal change and compare of three legumes' soil water storage in different treatment with different densities

播种方式 Planting model	密度 Density	生育期内各月土壤储水量 Monthly soil water storage (mm)							平均 Average
		4 Apr.	5 May	6 Jun.	7 Jul.	8 Aug.	9 Sept.	10 Oct.	
CK	-	1 071	997	976	1 000	995	979	1 047	1 009 a
	D1	1 074	1 034	965	974	960	945	1 013	995 ab
A	D2	1 040	981	883	881	885	848	910	918 gh
	D3	1 038	945	866	862	860	819	897	898 hi
	D1	1 031	963	894	877	879	845	911	914 gh
B	D2	1 052	958	846	818	823	788	849	876 ijk
	D3	1 041	908	819	795	823	741	828	851 klm
	D1	1 059	1 011	955	955	967	945	1 010	986 abc
C	D2	1 063	988	942	937	938	918	984	967 cde
	D3	1 053	1 003	921	924	928	903	966	957 e
	D1	1 045	975	904	879	894	846	903	921 fgh
AB	D2	1 037	874	823	808	795	764	827	847 lm
	D3	1 039	936	825	807	838	760	829	862 jkl
	D1	1 049	974	921	926	902	890	955	945 ef
AC	D2	1 059	1 028	951	957	979	928	979	983 bed
	D3	1 073	1 017	911	913	937	899	961	959 de
	D1	1 054	956	903	892	887	854	921	924 fgh
BC	D2	1 050	954	850	830	827	789	851	879 ij
	D3	1 032	873	798	785	778	748	830	835 m
	D1	1 058	1 011	887	878	891	861	914	928 fg
ABC	D2	1 039	904	850	831	827	794	926	882 ij
	D3	1 040	882	817	799	797	757	839	847 lm

注: D1、D2、D3 分别为低密度($7.5 \times 10^4 / \text{hm}^2$)、中密度($22.5 \times 10^4 / \text{hm}^2$)和高密度($67.5 \times 10^4 / \text{hm}^2$); 小写字母表示各处理间在 0.05 水平的差异显著性。

Note: D1, D2, D3 present low density, middle density and high density respectively; Normal letters followed means indicate significance at 0.05 level among treatments.

次于 CK; 单播苜蓿(B) 和与苜蓿混播处理 Dw 最低, 尤其是它们的中、高密度处理平均比对照低 12%~17%; 沙打旺(A) 和 AC 的 Dw 居于 B、AB、BC、ABC 与 C 之间。单播 A、B、C 的 Dw 均随密度加大而降低, 高密度与中密度处理间差异不显著并均显著低于低密度处理。混播中 BC 和 ABC 的 Dw 随密度升高而降低, AB 的中密度处理 Dw 最低, 而 AC 的中密度处理 Dw 最高。

2.1.2 不同处理方式对土壤储水量的影响 3 种牧草生育期内土壤储水量动态变化如图 2 所示, A、B、C 全生育期 0~5 m 土壤储水量变化趋势大体相同, 均是降低—持平—降低—恢复; 大小呈现 CK > A > C > B 的趋势。6 月份 A 的土壤储水量显著低于 C ($P < 0.05$), C 又显著低于 CK ($P < 0.05$), 之前三者之间没有显著差异。B 的土壤储水量全生育期均显著低于 A、C, 在 7 和 9 月份有两次低谷期, 平均储水量分别为 830 和 790 mm。10 月份 3 种牧草土壤水分恢复后平均储水量分别为 990、863 和 987 mm, 比 CK 降低 6%~18%。

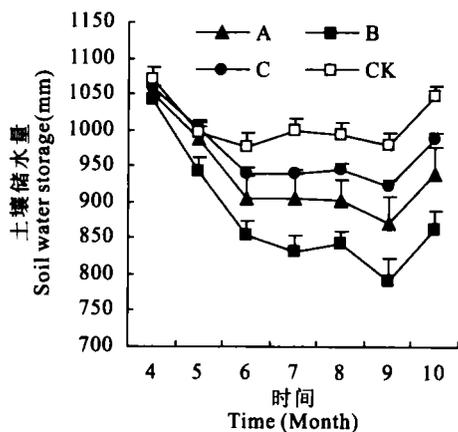


图 2 3 种牧草地储水量(0~5 m) 年度变化

A. 沙打旺; B. 苜蓿; C. 达乌里胡枝子; CK. 对照。下同

Fig.2 Temporal change of the three legumes' soil water storage (0~5 m)

A. *Astragalus adsurgens*; B. *Medicago sativa*; C. *Lespedeza davurica*; CK. Control. The same as below

3 种牧草土壤储水量均显著低于 CK ($P < 0.05$) (图 3)。3 种播种方式相比较, 土壤储水量大小顺序为 SVP > DVP > TVP, 在生长前期(4~5 月份)和生长末期(10 月份)它们之间的差异并不显著, 6~9 月份 SVP 和 DVP 处理之间也没有显著差异, 但 TVP 处理显著低于 SVP 处理。

播种密度对土壤储水量的影响非常显著(图 4), 3 个密度处理土壤储水量均显著低于 CK, 且随密度加大而降低。D3 处理土壤储水量全生育期都

比 D2 略低而差异不显著, 但从 5 月份开始 D3、D2 处理均显著低于 D1 处理。

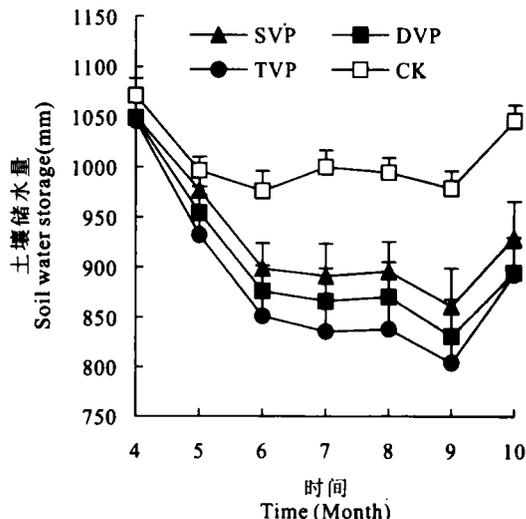


图 3 不同播种方式储水量(0~5 m) 年度变化

SVP. 单播; DVP. 双混播; TVP. 三混播; CK. 对照。下同

Fig.3 Temporal change of the three legumes' soil water storage (0~5 m) in different planting model

SVP. Single variety planting; DVP. Two varieties planting; TVP. Triple varieties planting; CK. Control; The same as below

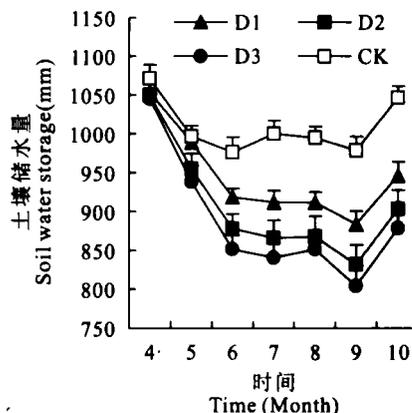


图 4 不同播种密度储水量(0~5 m) 年度变化

D1. 低密度; D2. 中密度; D3. 高密度; CK. 对照。下同

Fig.4 Temporal change of the three legumes' soil water storage (0~5 m) in different densities

D1. Low density; D2. Middle density; D3. High density; CK. Control. The same as below

2.2 土壤水分剖面特征

对不同处理的 0~5 m 深度剖面土壤水分质量百分含量全生育期观测值进行统计分析计算, 得到的平均值和变异系数如图 5~ 图 7 所示。

2.2.1 各牧草土壤水分的剖面特征 如图 5, a 所示, 随着土层深度的增加, 各处理的土壤水分含量均大体呈现出先逐渐降低后缓慢升高的共同趋势, 但

处于最低值的深度因处理而异。其中 CK 的土壤含水量先随土层深度增加而降低,在 2.5 m 深度达最低值(15.3%),继续向下则逐渐升高,至 5 m 深度时土壤含水量为 18.2%。苜蓿(B) 0~50 cm 土壤含水量平均为 14%~15%,50~300 cm 深度均低于 14%;在 1 m(12.37%)和 2 m(12.31%)处达最低值,2 m 以下则逐渐增加,至 5 m 时平均土壤含水量为 17.5%。沙打旺(A)和达乌里胡枝子(C)分别在 80~100 cm 和 60~80 cm 处平均土壤含水量最低,分别为 13.1%和 14.7%,继续向下则逐渐升高,至 2.5 m 深度以下与 CK 的变化趋势和数量上都比较接近,4~5 m 的深层土壤含水量比 CK 略低。

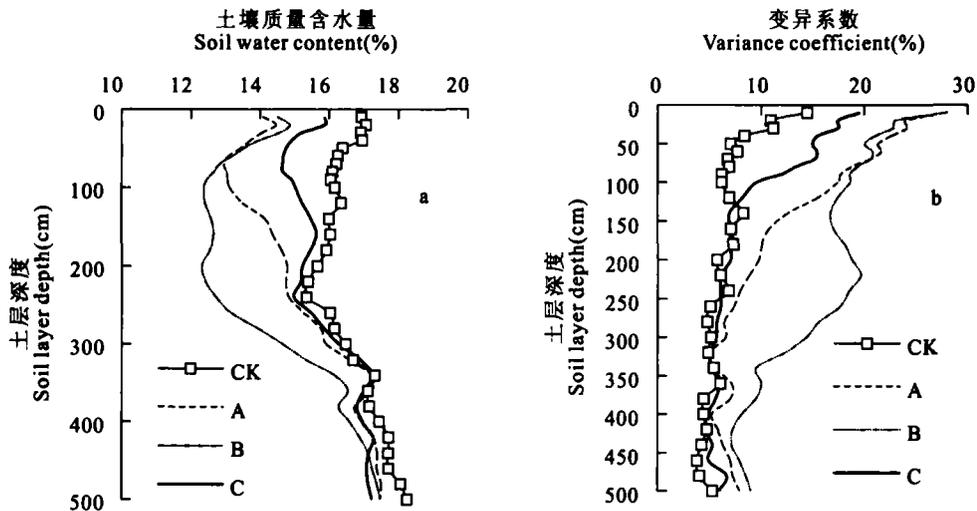


图5 3种牧草全生育期平均土壤质量含水量(a)和变异系数(b)

Fig. 5 Average soil water moisture (a) and its variation coefficient (b) of the three legumes in growth period

2.2.2 不同播种方式处理土壤水分的剖面特征

图6是3种牧草在单播、两两混播和3种混播情况下的平均土壤水分含量和变异系数随土层深度变化情况。从图6, a可以看出,3种播种方式均显著降低了土壤水分含量,增大了土壤含水量通体变异程度。从绝对量上看,土壤含水量大小顺序为SVP>DVP>TVP,均显著低于CK;其中双混播(AB、BC、AC)平均土壤含水量在0~1 m范围内随深度增加而逐渐降至最低值(12.3%),1~2.5 m平均土壤含水量逐渐回升并维持在12.8%左右,向下则与单播和3种混播一样呈逐渐增加趋势。图6, b显示,3种播种方式的变异系数是SVP<DVP<TVP,均显著高于CK。从变化趋势上看,3种播种方式处理的土壤平均含水量以及变异系数随土层深度的变化特点相似,土壤含水量在3.5 m之上均呈双峰曲线形,分别在1 m和2.5 m深度最低,向下与CK在数量上和变化上都比较接近;平均变异系数均是随深

根据陈洪松等^[11]提出的变异系数指标对土壤水分剖面进行层次划分。图5, b显示,CK的土壤水分垂直变化并不剧烈,0~30 cm土层平均变异系数为12%,为次活跃层,30 cm以下为相对稳定层,平均变异系数只有6%;沙打旺(A)、达乌里胡枝子(C)土壤水分变化较活跃土层主要在1 m以上,变异系数均随深度增加而逐渐减小,其中A的平均变异系数(21.6%)比C(15.6%)高了6个百分点,2.5 m以下基本都达到稳定层标准;苜蓿(B)在0~3.5 m深度范围内土壤含水量变异活跃,变异系数均在10%以上,2 m处出现了一个深层变异高峰,变异系数达20%,3.5 m以下变异仍高于CK和A、C。

度增加而降低,1 m以上的平均值都>20%,没有显著差异,1~3.5 m深度范围内三混>双混>单播且差异明显,向下均降低到10%以下,略高于CK。

2.2.3 不同播种密度处理土壤水分的剖面特征

如图7, a所示,3个密度处理的平均土壤含水量均低于CK, D1、D2和D3处理3 m以上土层的平均值分别比CK降低10%、15%和19%,3~5 m土层的平均值比CK降低4%;密度处理间比较,土壤水分含量表现为D1>D2>D3,1 m深处土壤平均含水量最低,分别为14.0%、13.1%和12.2%。2.5 m向下土壤含水量逐渐升高,D3与D2处理间没有显著差异,但均显著低于D1处理,4.5 m以下这种差异消失。

图7, b显示,3个密度处理平均土壤含水量的变异系数均是随土层深度增加而降低,随播种密度增大而增大。D1、D2和D3处理1 m以上平均变异系数分别为17.0%、20.5%和23.3%,1~3 m平均分别为

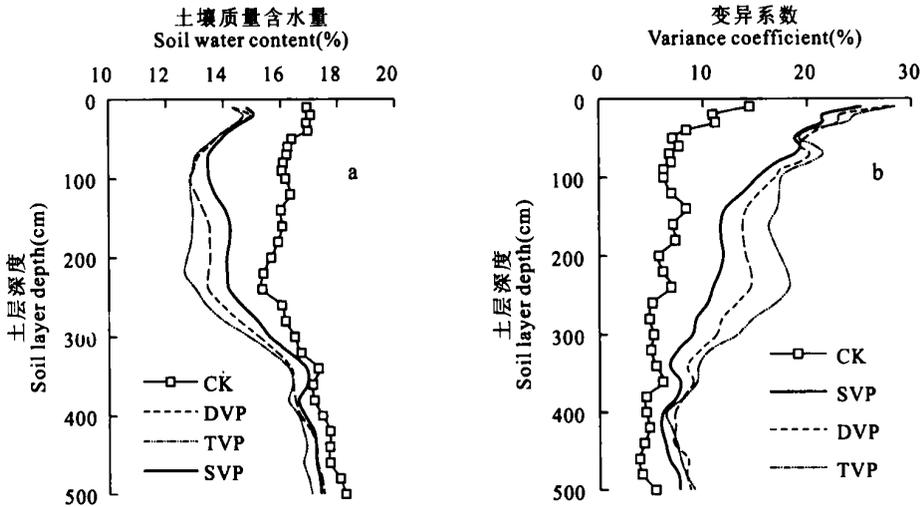


图 6 不同播种方式全生育期平均土壤质量含水量(a)和变异系数(b)

Fig. 6 Average soil water moisture (a) and its variation coefficient (b) of different planting mode in growth period

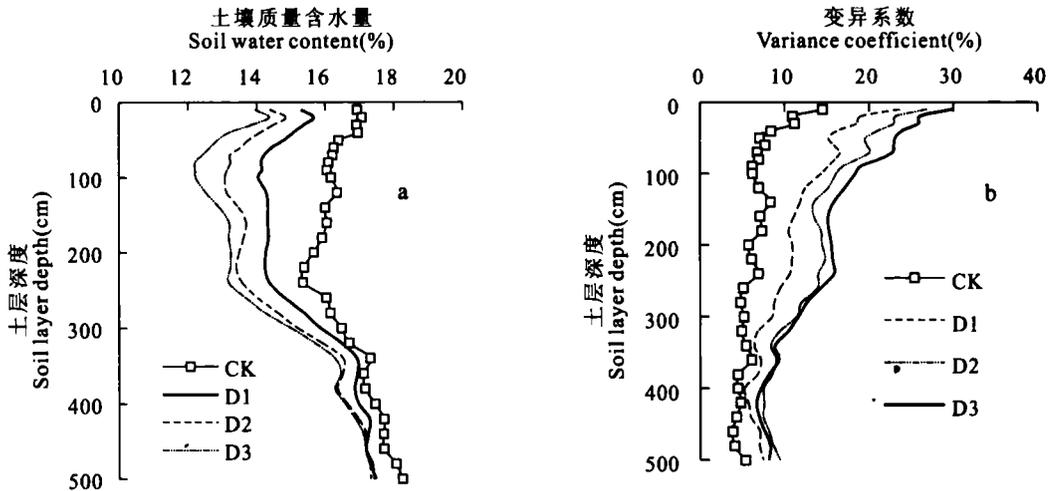


图 7 不同密度处理全生育期平均土壤质量含水量(a)和变异系数(b)

Fig. 7 Average soil water moisture (a) and its variation coefficient (b) of different densities in growth period

10.5%、13.7%和14.9%，向下延伸至5m时D2和D3处理稳定在8.1%~8.4%之间，D1平均为6.6%。

2.3 不同处理对水分利用效率的影响

本试验分4~5月(春季)、6~7月(夏季)和8~9月(秋季)3个生长期观测计算了各处理土壤水分消耗、牧草产量及水分利用效率。3个时段分属春末夏初气候性干燥期、夏季土壤水分蓄积期和秋季土壤水分恢复期，其对应时段的降水量分别为54.5、178.5和140.4mm。裸地对照(CK)相应3个时段蒸散量分别为129.1、175.1和161.5mm，土壤水分消耗分别为74.6、-3.4和21.1mm，分别占同期蒸散量的58%、-2%和13%。

2.3.1 3种牧草的土壤水分消耗、产草量、水分利用效率比较 3个生长时段内3种牧草的土壤水分消耗量均是苜蓿(B) > 沙打旺(A) > 达乌里胡枝子

(C)(图8, a)。4~5月份春末夏初气候性干燥期内，只有B的平均土壤耗水量比CK多，A、C对土壤水分的消耗量甚至低于CK；6~7月份(夏季)是3种牧草的土壤水分消耗高峰期，A、B、C的消耗量分别为80.4、113.1和62.1mm。8~9月份(秋季)3种牧草土壤水分消耗均显著降低，其中A、B比CK多消耗60%~80%，C比CK少消耗20%。

全生育期干草产量苜蓿 > 沙打旺 > 达乌里胡枝子，分别为18.40、15.16和4.93 t · hm⁻²(图8, b)；3种牧草的生产高峰期均是夏季，其中A和B之间没有显著差异(8.94 t · hm⁻²和8.78 t · hm⁻²)，而C只有2.89 t · hm⁻²。A春季产草能力高于秋季，而C秋季比春季高，B的这2个时段差异不明显。

3种牧草水分利用效率的时段分配特点显著不同(图8, c)。A为夏季最高(34.10 kg · mm⁻¹ ·

hm⁻²), 春季又高于秋季; B 在春、夏、秋 3 个生长时段依次降低, 分别是 31.58、30.10 和 26.50 kg · mm⁻¹ · hm⁻²; C 在夏季最高 (11.93 kg · mm⁻¹ · hm⁻²), 而秋季又高于春季。

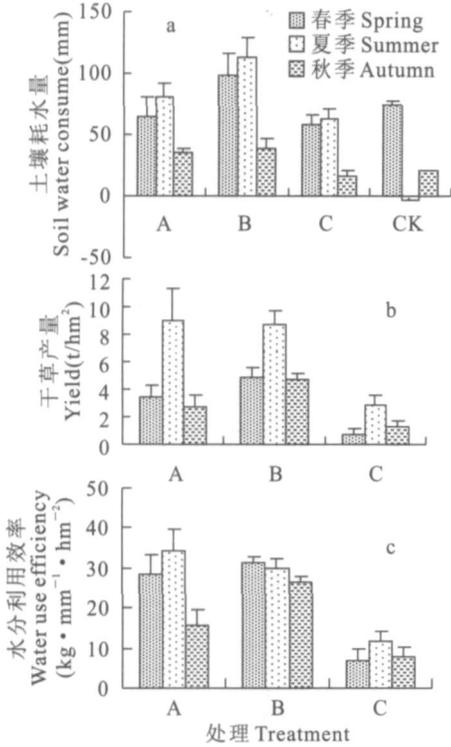


图 8 3 个生长时段内 3 种牧草的耗水量(a)、产草量(b)和水分利用效率(c)

Fig. 8 The three legumes' water consume(a), yield(b) and WUE(c) in three growing periods

2.3.2 不同播种方式对土壤水分消耗、产草量、水分利用效率影响 播种方式对春季土壤水分消耗影响显著($P < 0.05$), 其平均土壤耗水量表现为 TVP > DVP > SVP > CK, 而夏、秋季不同处理间土壤水分消耗没有明显差异(图 9, a), 其中, SVP 夏季土壤耗水最多(平均 85.2 mm), 春季次之(平均 73.4 mm), 秋季最少(30.3 mm); DVP 和 TVP 处理均是春季最多, 夏季略少, 秋季最低。

图 9, b 显示, 干草产量在夏季单播、混播之间差异不显著; 春季 2 种混播方式处理间没有显著差异, 但均显著高于单播; 秋季三混处理明显比单播高, 但与双混播处理差异还是不显著。3 种播种方式处理的产草量均是夏季最高, 春季混播处理显著高于秋季, 单播处理春、秋两季没有显著差异。

水分利用效率受播种方式影响如图 9, c 所示, 混播处理水分利用效率在春、夏、秋各时段顺次递减, 其中 DVP 3 个时段差异均达到显著水平($P < 0.05$), TVP 处理的春、夏季差异不显著, 但均显著

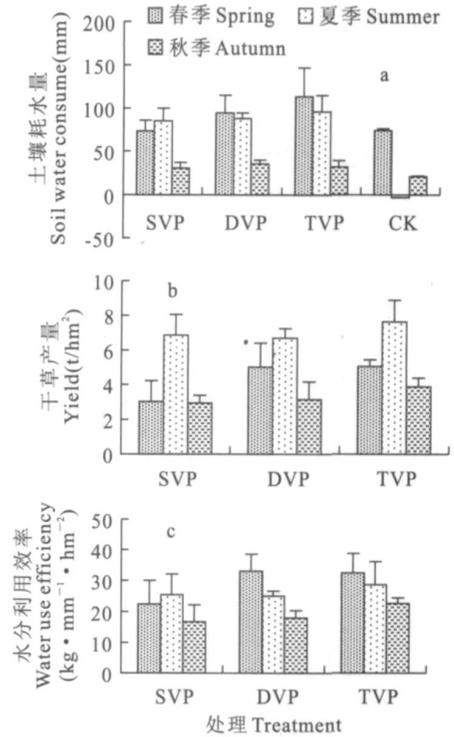


图 9 3 个生长时段内不同播种方式的耗水量(a)、产草量(b)和水分利用效率(c)

Fig. 9 Water consume(a), yield(b) and WUE(c) for different planting mode in three growing periods

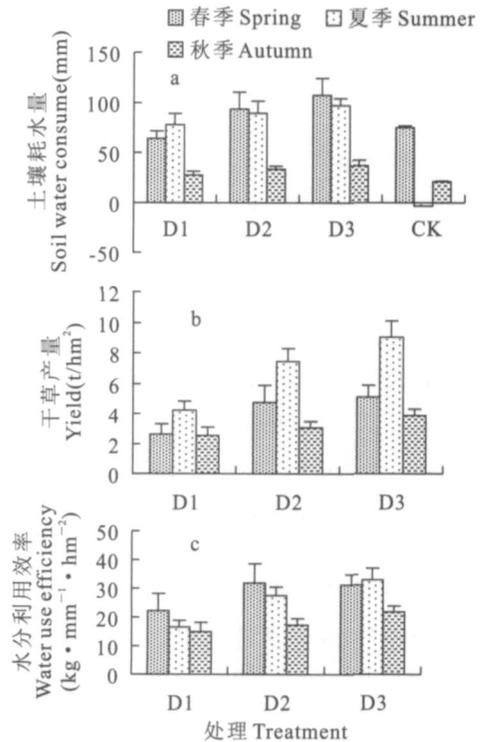


图 10 3 个生长时段内不同播种密度的耗水量(a)、产草量(b)、水分利用效率(c)

Fig. 10 Water consume(a), yield(b) and WUE(c) for different densities in three growing periods

高于秋季;SVP 处理的夏季水分利用效率最高,春季次之,秋季最低。全生育期平均水分利用效率 TVP> DVP> SVP, 分别依次为 27.9、25.3 和 21.5 $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

2.3.3 不同播种密度对土壤水分消耗、产草量、水分利用效率的影响 图 10, a 显示,随播种密度加大土壤水分消耗随之升高,全生育期 3 个密度土壤水分平均消耗分别为 56.4、72.1、80.4 mm,均显著高于 CK(30.8 mm)。且春、夏季平均耗水量均显著比秋季多,D1 处理夏季土壤耗水显著高于春季,而 D2 和 D3 处理春季耗水比夏季略高。

各密度处理的干草产量在 3 个生育阶段均随播种密度加大而显著增多(图 10, b),即 D3> D2> D1。其中,春季的 D2 与 D3 处理间差异不显著,夏季 3 个密度间的差异都很显著,秋季 D1 与 D2 处理间差异不显著。在 3 个生长时段间,3 个密度处理干草产量均是夏季最高,分别为 4.25、7.45 和 9.03 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$;D1 春、秋两季产草量较低且差异不显著,并均在 2.5 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右。D2、D3 处理春季产草量

显著高于秋季。

3 个生长时段平均水分利用效率表现为 D3> D2> D1,分别为 17.9、25.6 和 28.6 $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图 10, c)。D1 和 D2 处理水分利用效率春、夏、秋 3 个时段逐次降低,而且 D1 处理的夏、秋两季间无显著差异,D2 的 3 个时段间差异显著,D3 处理夏季水分利用效率略高于春季而显著高于秋季。

2.3.4 水分利用效率与土壤耗水、产草量的相关性

3 个生长时段土壤水分利用效率与土壤耗水量、产草量的相关分析表明(表 2),干草产量与土壤耗水量在 3 个生长时段均显著呈正相关,春、秋两季这种相关性尤为显著($P < 0.05$),相关程度大小(相关系数)相近,均比夏季高。水分利用效率与干草产量在各生长时段均高度正相关($P < 0.05$),相关程度随春、夏、秋季 3 个生长时段依次递增,夏季和秋季相关系数分别为 0.98^{**} 和 0.99^{**}。春季和夏季水分利用效率与土壤水分消耗相关性不大,但在秋季相关达显著水平。

表 2 3 个生长时段土壤水分利用效率与土壤耗水、产草量的相关系数

Table 2 Correlation coefficient of WUE with soil water consume and yield in three growing periods

相关系数 Correlation coefficient	春季 Spring			夏季 Summer			秋季 Autumn		
	WC	DY	WUE	WC	DY	WUE	WC	DY	WUE
WC	1	0.64 [*]	0.21	1	0.44	0.25	1	0.64 ^{**}	0.53 [*]
DY		1	0.87 ^{**}		1	0.98 ^{**}		1	0.99 ^{**}
WUE			1			1			1

注:WC 为土壤水分消耗;DY 为干草产量;WUE 为水分利用效率;* 表示 0.05 水平显著,** 表示 0.01 水平显著。

Note:WC means soil water consume;DY means dry yield;WUE means water use efficiency;* indicates significant difference at $P < 0.05$,

** indicates significant difference at $P < 0.01$.

3 讨论

3.1 不同牧草对土壤水分的消耗利用特点

从全年生长期各处理对土壤水分的消耗利用来看,3 种豆科牧草单播时对土壤水分的消耗量和水分利用效率均是苜蓿> 沙打旺> 达乌里胡枝子。它们对土壤水分的消耗量分别为苜蓿 249.9 mm、沙打旺 180.2 mm、胡枝子 136.6 mm,其水分利用效率分别是苜蓿为 29.39 $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、沙打旺 26.04 $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、达乌里胡枝子为 8.91 $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。这种结果与 3 种多年生豆科牧草生长特性有关。从土壤水分剖面上可以看出,苜蓿主要耗水深度为 2~3 m,最深可达 5 m,中、高密度处理 3 m 以上土壤水分含量都在稳定田间持水量之下。白文明等^[17]对紫花苜蓿根系发育和吸水规律的研究指出,土壤水分含量与植物根系的入土深

度有一定的相关性,进入花期以后苜蓿在中层土壤的根密度增加。沙打旺耗水深度在 0~2 m,最低土壤含水量(11.61%)处于 80~100 cm,在雨季可以恢复到稳定田间持水量之上;达乌里胡枝子主要耗水深度在 1 m 以上,最低含水量也在稳定田间持水量之上。苜蓿的耗水深度和强度均强于沙打旺和达乌里胡枝子。虽然苜蓿的土壤水分消耗比沙打旺和达乌里胡枝子都高,但苜蓿全生育期产草量也较高,水分利用效率与产草量的相关性大于其与土壤耗水量的相关性。苜蓿和沙打旺均是高产高耗型人工牧草^[18,19],在黄土塬区可以充分利用土壤深层水分,水分利用效率高。何福红等^[20]认为在王东沟小流域内 2 m 以下水分含量低于 14% 的土层可以看作土壤干层,以此为标准,本试验结果表明苜蓿在生长的第 2 年已经开始形成土壤干层。苜蓿和沙打旺的强耗水性在生产上不容忽视,有研究表明,刈割能

使苜蓿根系分布表层化^[21],或许可以通过适当的刈割等科学管理方式来控制苜蓿和沙打旺等多年生牧草对土壤水分的消耗。

3.2 牧草密度效应及其合理利用

对3种牧草的单播和混播处理密度效应计算结果表明,加大播种密度显著地增加了土壤水分消耗,干草产量和水分利用效率也随播种密度而提高。但这种密度效应因牧草品种及其播种方式不同而存在较大差异,即使对同一种牧草或同一个播种处理在不同的生长时段的影响亦有差别。本研究结果表明,达乌里胡枝子低密度处理土壤水分与对照差异不显著,中、高密度处理1 m以上平均含水量分别比对照略低。低密度沙打旺耗水较少,中、高密度耗水强度显著增加,80~100 cm土壤水分含量均在稳定田间持水量(14%)之下。苜蓿低密度处理含水量最低点为12.53%,处于2 m深度。而有研究显示,播种密度对小麦土壤储水量并无显著影响^[22],可见播种密度对多年生牧草耗水性能的影响不同于一年生大田作物。4~5月份单播苜蓿和达乌里胡枝子水分利用效率随密度增大而提高,而沙打旺水分利用效率以中等密度较高;混播处理中AB、ABC中等密度水分利用效率最低,而BC却相反。6~7月份水分利用效率除苜蓿与沙打旺的混播处理的AB在中等密度下最大外,其它处理均随密度增大而增加。8~9月份沙打旺和达乌里胡枝子水分利用效率都随密度增大而增加,而苜蓿中等密度水分利用效率相对较低,混播处理的AB水分利用效率随密度增大呈降低趋势,AC则相反。结果表明密度与牧草种类和播种方式之间有着密切而复杂的关系,在生产实践中可以也应该通过控制密度来提高牧草的生产力和水分利用效率,同时尽量避免无谓的水分竞争消耗。如苜蓿耗水随密度增加而加剧,第2年中、高密度处理已经开始形成土壤下伏干层,因此从土地可持续利用的角度来讲,苜蓿密度不宜过高,种植年限不宜超过3 a;沙打旺种植年限可以适当延长,密度也要适当加大;达乌里胡枝子不适合单独种植,它与沙打旺和苜蓿混播后可以提高春旱季节的水分利用效率,起到一定的竞争稀释作用,因此可以适当

加大其播种密度。

3.3 牧草混播效果与合理利用

从总体试验结果来看,牧草混播处理一方面增加了土壤水分消耗,降低土壤储水量,另一方面却也提高了牧草产草量,进而提高了水分利用效率,具有一定的混播优势。但试验结果同时表明,不同的混播方式由于种间的竞争或资源互补效应有别,所以混播处理的水分消耗利用特点也有不同。AB处理土壤水分利用效率较低,主要是种间竞争的结果,因为沙打旺(A)和苜蓿(B)的生长特性接近,2个种个体的根系下扎深,生长速度快,达到一定密度后混播群体内个体间对土壤水分等有限资源竞争激烈,使群体生产力相应受到限制,降低了水分利用效率。BC和AC处理水分利用效率较高是种间资源利用的互补效应在起作用,苜蓿(B)的根系下扎能力非常强,而达乌里胡枝子(C)的根系分布较浅,两者混播可以各自发挥优势,充分利用土壤资源提高混合群体生产力。全生育期平均水分利用效率为三混播>双混播>单播,分别为27.9、25.3和21.5 kg·mm⁻¹·hm⁻²,这说明在黄土塬区发展草业建立人工草地时应该选择合适的牧草进行混播,以提高水分利用效率。当苜蓿与沙打旺混播时,应注意播种密度不宜过大,最好加入像达乌里胡枝子一类生长特性差异较大、资源利用方式不同的其它草种,增加混播群体的多样性。

4 结 论

本研究结果表明:全年生长期3种豆科牧草单播时对土壤水分的消耗量和水分利用效率均是苜蓿>沙打旺>达乌里胡枝子;加大播种密度会显著地增加多年生牧草土壤水分消耗,干草产量和水分利用效率也随播种密度而相应提高,但密度效应因牧草种类、播种方式以及不同的生长时段而异;牧草混播一方面会增加土壤水分消耗,降低土壤储水量,另一方面也能提高牧草产草量,进而提高水分利用效率;但不同牧草混播方式对于资源的消耗利用有着不同的效果,有互补效应,也有竞争消耗,它受参与混播牧草种类和播种密度的综合影响。

参考文献:

- [1] CHENG J M(程积民), WAN H E(万惠娥), WANG J(王 静). Alfalfa growth and its relation with soil water status in loess hilly and gully region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, 16(3): 435-438 (in Chinese).

- [2] ZENG Q F(曾庆飞), SUN ZH M(孙兆敏), JIA ZH K(贾志宽), *et al.* Effects of sowing dates on alfalfa productivity and winter ability [J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.* (西北植物学报), 2005, **25**(5): 1 007- 1 011(in Chinese).
- [3] SUN J H(孙建华), WANG Y R(王彦荣), YU L(余玲). Evaluation on yield and quality characteristics of alfalfa varieties[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.* (西北植物学报), 2004, **24**(10): 1 837- 1 844(in Chinese).
- [4] WU X D(吴学栋), DONG J(董俊), QIAO X L(乔小林). Soil water dynamics and net prime productivity of *Astragalus adsurgens* pasture on semi arid hilly region of Loess Plateau in Longzhong[J]. *Bull. Soil Water Cons.* (水土保持通报), 1998, **10**(9): 119- 123(in Chinese).
- [5] XU ZH(徐柱), MA Y B(马玉宝), *et al.* A primary evaluation the adaptability of three wild *Lespedeza*[J]. *Inner Mongolia Pratacultural* (内蒙古草业), 2005, **17**(2): 23- 26(in Chinese).
- [6] LI Y SH(李玉山). Productivity dynamic of alfalfa and its effect on water ecøenvironment[J]. *Acta Pedol. Sinica*(土壤学报), 2002, **39**(3): 403- 410(in Chinese).
- [7] LI Y SH(李玉山). Yield fluctuation and soil desiccation of high yielding dryland[J]. *Acta Pedol. Sin.* (土壤学报), 2001, **38**(3): 353- 356(in Chinese).
- [8] RODRIGUEZ HURBE I. Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate soil vegetation dynamics[J]. *Water Resour. Res.*, 2000, **36**(1) 1- 9.
- [9] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京: 北京科学出版社, 2000: 86- 114.
- [10] LI Y Y(李裕元), SHAO M A(邵明安). Degradation process and plant diversity of alfalfa grassland in North Loess Plateau of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(12): 2 321- 2 327(in Chinese).
- [11] CHEN H S(陈洪松), SHAO M A(邵明安), WANG K L(王克林). Water cycling characteristics of grassland and bare land soils on Loess Plateau[J]. *Chin. J. Appl. Eco.* (应用生态学报), 2005, **16**(10): 1 853- 1 857(in Chinese).
- [12] LIANG Y M(梁一民), LI D Q(李代琼), CONG X H(丛心海). The soil water and productivity characteristic of *Astragalus adsurgens* pasture in Wuqi[J]. *Bull. Soil Water Cons.* (水土保持通报), 1990, **10**(6): 113- 118(in Chinese).
- [13] WEI Y SH(魏永胜), LIANG Z S(梁宗锁), SHAN L(山仑). The role of water in grassland degeneration[J]. *Pratacultural Science* (草业科学), 2004, **21**(10): 13- 18(in Chinese).
- [14] GUO ZH SH(郭忠升), SHAO M A(邵明安). Soil water carrying capacity of vegetation and soil desiccation in artificial forestry and grassland in semi arid regions of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23**(8): 1 640- 1 647(in Chinese).
- [15] YANG R R(杨汝荣). Analysis of the cause of pasture degradation and sustainable development in China west[J]. *Pratacultural Science* (草业科学), 2002, **19**(1): 23- 27(in Chinese).
- [16] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 101- 102.
- [17] BAI W M(白文明), ZUO Q(左强), HUANG Y F(黄元仿), *et al.* Effect of water supply on root growth and water uptake of alfalfa in Wulanbuhe Sandy Region[J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2001, **25**(1): 35- 41(in Chinese).
- [18] WAN S M(万素梅), HU SH L(胡守林), HUANG Q H(黄勤慧), *et al.* Study on root system development ability of alfalfa cultivar[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.* (西北植物学报), 2004, **24**(11): 2 048- 2 052(in Chinese).
- [19] NAN H M(南红梅), WANG J P(王俊鹏), YAN J B(闫建波). Comparative study on the growth characteristics of 8 foreign alfalfa cultivars[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.* (西北植物学报), 2004, **24**(12): 2 261- 2 265(in Chinese).
- [20] HE F H(何福红), HUANG M B(黄明斌), DANG T H(党廷辉). Distribution characteristic of dried soil layer in Wangdonggou Watershed in gully region of the Loess Plateau[J]. *J. Nat. Resour.* (自然资源学报), 2003, **18**(1): 30- 36(in Chinese).
- [21] GUO ZH G(郭正刚), LIU H X(刘慧霞), WANG Y R(王彦荣). Effect of cutting on root growth in lucerne[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.* (西北植物学报), 2004, **24**(2): 215- 220(in Chinese).
- [22] QIANG Q(强秦), CAO W X(曹卫贤), LIU W G(刘文国), *et al.* Dynamics of soil moisture and water use efficiency under different wheat cultivation modules in dry land [J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.* (西北植物学报), 2004, **24**(6): 1 066- 1 071(in Chinese).