

苜蓿与沙打旺苗期生长和水分利用对土壤水分变化的反应*

徐炳成 山 仑 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, 西北农林科技大学, 杨凌 712100)

【摘要】 通过室内生长箱内盆栽实验, 比较了苜蓿和沙打旺苗期的根冠生长和水分利用对5种土壤水分环境变化的响应和差异. 结果表明, 充分供水下苜蓿和沙打旺苗期生物量和蒸腾效率均最高, 苜蓿均显著高于沙打旺. 土壤水分减少后苜蓿苗期生物量和蒸腾效率下降幅度均大于沙打旺. 从低水到阶段低水处理后土壤水分逐渐降低和降低后再复水到低水处理, 苜蓿和沙打旺的生物量分别较持续低水处理显著减少47.8%和27.9%. 旱后复水后苜蓿根冠比和单位根量耗水量较显著增加, 蒸腾效率显著下降; 沙打旺根冠比显著下降, 单位根量耗水量和蒸腾效率变化不显著.

关键词 苜蓿 沙打旺 苗期生长 土壤水分 耗水量

文章编号 1001-9332(2005)12-2328-05 **中图分类号** S152.75, S541 **文献标识码** A

Responses of *Medicago sativa* and *Astragalus adsurgens* seedlings growth and water use to soil moisture regime. XU Bingcheng, SHAN Lun, LI Fengmin (State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Northwest A & F University Yangling 712100, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2005, 16(12): 2328~2332.

In the semi-arid area of Loess Plateau, seasonal drought often occurs during the vegetative stage of grass plants, leading to the subsequent serious reduction of their yield. Aimed to study the responses of the seedlings growth and water use of two perennial leguminous grasses *Medicago sativa* and *Astragalus adsurgens* to different soil moisture regimes, a pot experiment was installed with five treatments, i. e., adequate water supply (HW), moderate water stress (LW), soil drying gradually from HW (DHW) and LW (DLW), and refilling water to LW after soil drying from LW (RWL). The results showed that under HW, the seedlings of both *M. sativa* and *A. adsurgens* had the highest biomass and transpiration water use efficiency (TWUE), and *M. sativa* had a significantly higher biomass than *A. adsurgens* ($P < 0.05$). When the soil moisture content declined, *M. sativa* had a higher reduction rate in biomass and TWUE than *A. adsurgens*, and after the soil moisture regime changed from LW and DLW to RWL, the biomass of *M. sativa* and *A. adsurgens* was reduced by 47.8% and 27.9%, respectively, as compared to LW ($P < 0.05$). At the same time, the root/shoot ratio (R/S) of *M. sativa* and its water consumption per unit root increased significantly, while the TWUE decreased significantly ($P < 0.05$); but for *A. adsurgens*, its R/S decreased significantly ($P < 0.05$), while the TWUE and the water consumption per unit root had no significant change.

Key words *Medicago sativa*, *Astragalus adsurgens*, Seedling growth, Soil moisture, Water consumption.

1 引 言

加强优良牧草植物的水分生态适应性研究对促进我国旱区草地建设和草业科学的发展具有十分重要的意义. 紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 和沙打旺 (*Astragalus adsurgens*) 是黄土高原半干旱地区人工草地建设中两种主要的多年生豆科牧草, 具有优质、高产、抗旱适应性强等特点, 同时也是优良的改土培肥和水土保持植物^[16]. 目前, 关于苜蓿和沙打旺不同生长发育阶段的抗旱适应性、生产特征、苜蓿和沙打旺的品种间以及与其它类型植物间水分利用的比较方面均有大量研究^[1~3, 5, 8, 14, 15, 21~24], 但关于二者苗期的根冠生长和水分利用对土壤水分环境变化

比较研究较少.

水分是干旱半干旱地区牧草生产的主要限制因素. 苗期作为牧草植株生长发育的开始阶段, 对水分亏缺较为敏感, 此时的水分胁迫不仅威胁牧草幼苗的生存, 且对其后期的生长、生物量形成以及越冬等都有影响^[18]. 黄土高原干旱半干旱地区气候干旱, 降水不足且季节分配不均, 导致田间土壤水分环境处在不断地变化之中, 土壤水分的阶段性“干湿”变化往往对牧草植物苗期的生长发育产生严重影响^[16]. 因此, 本研究在植物生长箱内通过盆栽控水实验模拟土壤水分的阶段性变化, 比较苜蓿和沙打

* 中国科学院“百人计划”择优支持资助项目(24016200).

** 通讯联系人. E-mail: fmlh@ms.iswc.ac.cn.

2004-10-12 收稿, 2005-02-28 接受.

旺苗期生长和水分利用的差异, 试图为该地区人工草地建设中对苜蓿和沙打旺的合理布局和栽培管理提供依据和参考。

2 材料与方法

2.1 供试材料

实验材料为苜蓿和沙打旺。苜蓿为引自加拿大的阿尔冈金紫花苜蓿 (*Medicago sativa*)。该品种具有抗旱适应性强、高产优质等特点, 为黄土高原干旱半干旱地区当前广泛种植的品种。沙打旺为辐射育种的彭阳早熟沙打旺 (*Astragalus adsurgens*)。与普通沙打旺品种相比, 该品种具有生长速度快、成熟期早和结实率高等特点^[12]。

2.2 研究方法

2.2.1 实验条件 实验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 PGV36 型步入式植物生长箱 (Cmp3244, Conviron8601, Canada) 内进行。在黄土丘陵区春夏播种的牧草植物成苗期间, 为了避免高温、强光和高温造成的土壤和植物水分损失过快而导致的“烧苗”(是一种高温生理灾害, 多发生在幼苗出土期和幼苗出土后的一段时间), 在该地区春夏播种的牧草植物成苗期间, 常以枯草、作物秸秆或遮阳网覆盖遮阴, 以确保苗期的良好生长。这使得牧草植物苗期通常生长在弱光条件下^[16]。因此, 本实验在水分处理前, 冠层光照强度设为 $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、光照周期为 12 h、光期和暗期温度分别为 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (7:30~19:30) 和 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ (19:30~7:30); 而后的水分处理期间, 光强调升为 $375 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、昼夜温度调为 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, 时段不变, 相对湿度均控制在 $75\pm 5\%$ 。采用盆栽种植, 塑料桶内径上为 17 cm、下为 10.5 cm、高 16 cm, 每桶装风干土 2 500 g, 土壤为黄绵土, 取自陕北安塞县农田耕层, 自然状态下田间持水量(重量含水量)为 18.4%、凋萎含水量为 3.8%^[20], 装桶时土壤重量含水量为 4.2%。

2.2.2 土壤养分 土壤基础养分含量和测定方法分别为: 有机质 $3.182\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (重铬酸钾外化加热氧法), 全氮 $0.257\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (半微量凯氏蒸馏法), 速效氮 $12.69\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (碱解扩散法), 全磷 $0.566\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法), 速效磷 $0.641\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法), 速效钾 $83.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (醋酸铵浸提-原子吸收法)。由于养分含量较低, 装土时按照 1 kg 干土施 0.1 g 纯 N、0.08 g 纯 K 和 0.04 g 纯 P 的标准, 每盆补充施尿素 0.55 g (纯 N 含量 46%) 和 KH_2PO_4 1.0 g (纯 P 含量 10.48%, 纯 K 含量 22.82%)。

2.2.3 播种与水分处理 种子精选、消毒和浸种后于 1 月 22 日播种, 出苗期间土壤水分维持在田间持水量的 80% 以上。由于苗期生长较慢, 试验于 3 月 3 日开始水分处理并间苗, 每盆留苗 10 株。水分设定为高水和低水 2 个水平, 分别为田间持水量的 80% (实际含水量 14.72%, 代号为 HW) 和 50% (实际含水量 9.2%, 代号为 LW), 每盆表面撒 15 g 珍珠岩, 厚度大于 1.0 cm。HW 和 LW 处理 12 d 后, 分别从 80% FC 和 50% FC 土壤水分自然干旱, 称为高降 (DHW) 和低降 (DLW), 土壤水分自然干旱持续 15 d。复水到 50% FC 处理 (RWL) 在 DLW 持续 12 d 后, 此时约 50% 的植物叶片出现萎蔫(具体过程见图 1), 然后采样测定。各处理同时用初始土壤装土 3 桶, 作相同处理, 用以标定土面蒸发。所有处理均重复 3 次。

2.2.4 测定项目与计算方法 1) 蒸腾耗水量: 采用水量平衡法 ($\pm 2\text{ g}$) 计算, 每日 15:00 控水盆按既定水平加水, 水从桶内侧塑料管加入。对照桶称重值与既定值之间差值为当日蒸腾耗水量, 再减去对照桶重量减少量即为每桶蒸腾耗水量。降水处理桶只称重, 其重量变化量与对照桶减少量差值为日蒸腾耗水量。2) 苗期生物量: 水分处理前和结束后, 参照张娜等^[25]的方法, 将根部泥土冲洗干净, 再将植物地上与地下部分分开后装入纸袋, $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温下烘至恒重, 电子天平(感量为 0.01 g) 上称干重。每桶植株地上与地下部分生物量之和为单桶生物量, 生物量根冠比 (R/S) 为地下部分与地上部分生物量干重之比。3) 蒸腾效率 (TWUE): 水分处理期间每桶植株生物量增加量/总蒸腾耗水量 ($\text{g DW}\cdot\text{kg}^{-1}\text{H}_2\text{O}$)。4) 单位

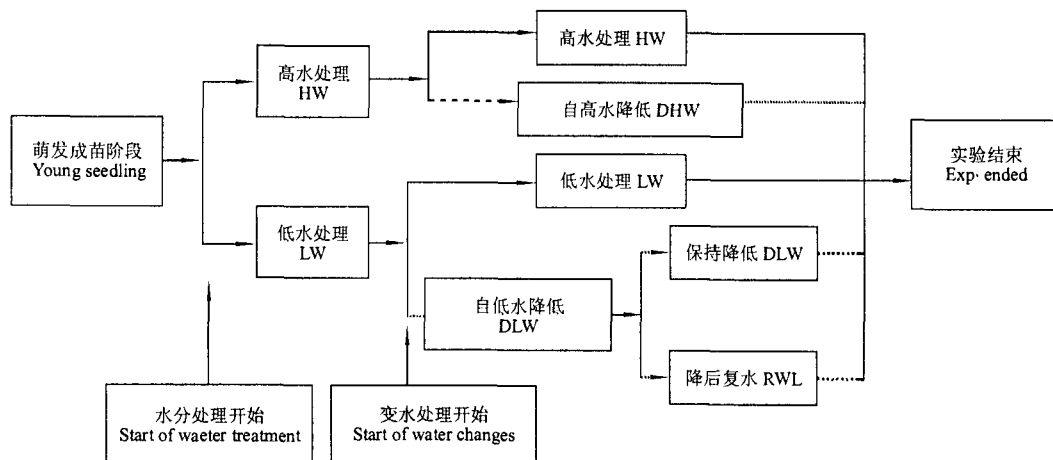


图 1 土壤水分处理结构图 (所有水分处理结束时间相同)

Fig. 1 Structure map of soil moisture treatments (soil water treatments ended at the same time).

根量耗水量:水分处理期间总蒸腾耗水量(kgH_2O)与根系增加量(g)之比。

2.2.5 数据处理 所有实验数据利用 Excel 2000 进行统计计算和分析,采用单因素方差分析(ANOVA)进行差异显著性检验($P=0.05$)。

3 结果与分析

3.1 苜蓿和沙打旺苗期生物量

由图2可见,充分供水下(HW)苜蓿和沙打旺苗期均具有最高的生物量.与HW相比,DHW和LW处理下苜蓿的生物量分别下降了65.8%和57.0%,沙打旺分别减少了62.2%和50.3%.而与LW相比,DLW下苜蓿和沙打旺生物量分别减少55.1%和49.2%.在经历DLW再复水到低水水平后(RWL),苜蓿和沙打旺生物量仍较LW分别低47.8%和27.9%.由此可以看出,土壤水分含量减少对苜蓿苗期生物量的影响较大.除RWL外,其它处理下苜蓿苗期的生物量均显著($P<0.05$)高于沙打旺,以HW下差异最大。

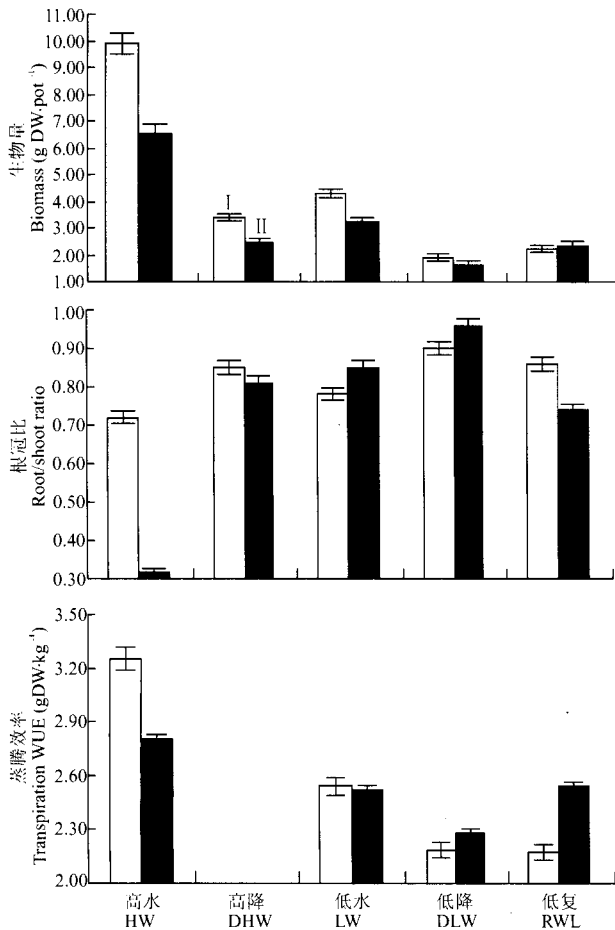


图2 各水分处理下苜蓿(I)和沙打旺(II)苗期生物量、根冠比和蒸腾效率

Fig. 2 Seedlings biomass, R/S ratios and transpiration WUE of *M. sativa* (I) and *A. adsurgens* (II) after each soil moisture treatment.

3.2 苜蓿和沙打旺苗期根冠生物量分配

水分胁迫导致苜蓿和沙打旺苗期生物量向根系分配增加.与HW相比,LW处理下苜蓿和沙打旺R/S分别显著提高8.3%和165.6%(图2).DHW后苜蓿和沙打旺R/S较HW分别提高18.1%和153.1%.而与LW相比,DLW处理后苜蓿和沙打旺R/S分别增加15.4%和12.9%.在经历LW-DLW-RWL处理后,苜蓿R/S较LW显著提高,沙打旺显著下降($P<0.05$).HW与RWL处理下苜蓿根冠比(R/S)显著高于沙打旺,LW下沙打旺显著高于苜蓿,DHW和DLW下二者差异不显著。

3.3 苜蓿和沙打旺苗期蒸腾效率

HW处理下苜蓿和沙打旺均具有最高的TWUE,苜蓿显著高于沙打旺(图2).中度水分胁迫(LW)导致苜蓿和沙打旺TWUE较HW分别显著下降21.9%和10.0%.在经历阶段性DLW后再复水到LW水平(RWL处理),苜蓿的TWUE仍显著低于LW处理,沙打旺无显著变化,由于苜蓿的TWUE显著下降,沙打旺TWUE显著高于苜蓿($P<0.05$)。

3.4 苜蓿和沙打旺苗期总耗水量与单位根量耗水量

由图3可见,HW、LW和DLW处理下苜蓿平均单桶总耗水量均显著高于沙打旺,且变化趋势相同,均为HW>LW>DLW,并且RWL>DLW,RWL处理后苜蓿和沙打旺的耗水量非常接近,分别为1024和1027 g H₂O/桶($P<0.05$),表明沙打旺阶段干旱后复水可以更大幅度地提高耗水能力.在

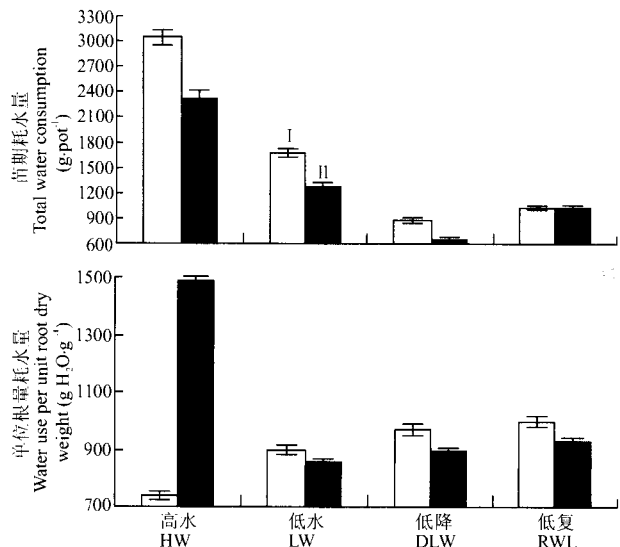


图3 各水分条件下苜蓿(I)和沙打旺(II)苗期耗水量与单位根量耗水量

Fig. 3 Water consumption and water use per unit root dry weight of *M. sativa* (I) and *A. adsurgens* (II) seedlings.

单位根量耗水量方面,除 HW 下沙打旺显著高于苜蓿外,其它 3 种处理均以苜蓿高于沙打旺,其中 DLW 和 RWL 达显著水平($P < 0.05$).与 HW 相比,水分胁迫(LW)导致苜蓿单位根量耗水量显著增加,而沙打旺则显著下降.从 LW 到 DLW 再到 RWL 处理,苜蓿和沙打旺单位根量耗水量均呈逐渐增加的趋势,苜蓿的 RWL 处理显著高于 LW,沙打旺变化未达显著水平($P > 0.05$).

4 讨 论

4.1 苜蓿与沙打旺苗期生物量、蒸腾效率与供水量关系

苜蓿和沙打旺在土壤水分保持相对稳定条件下(HW 和 LW)苗期生物量均较高(图 2),相对于土壤水分稳态环境(HW 和 LW),苜蓿和沙打旺在低水环境中(LW、DLW 和 RWL 处理)苗期生物量显著下降,对 HW、LW、DLW 和 RWL 处理下苜蓿和沙打旺苗期生物量(Y)与蒸腾耗水量(T)拟合结果表明,二者呈线性关系.其中苜蓿 $Y = 266.27T + 437.76$, $r^2 = 0.9944$;沙打旺 $Y = 332.31T + 179.93$, $r^2 = 0.9928$,说明土壤水分的充足供应有利于苜蓿和沙打旺苗期生长.

充分供水(HW)下苜蓿不仅苗期生物量显著高于沙打旺, TWUE 也显著高于沙打旺 16.1% ($P < 0.05$),表明充足的水分供应有利于苜蓿生物量和水分利用效率(WUE)的提高. Bolger 等^[1]比较苜蓿与三叶草不同收获季节产量与 WUE 的结果表明,不论是单一的收获季节或整个生长季,二者的蒸散耗水量(ET)与产量为直线关系($r^2 = 0.87 - 0.97$),但最大产量三叶草只有苜蓿的 85%.其它研究也均表明苜蓿生物量和 WUE 对充分供水具有良好反应^[1, 2, 4, 14, 15].

在水分亏缺条件下,植物生长与存活能力主要取决于植物对水分的吸收、保持能力和利用效率的高低, WUE 常被用作比较植物间对干旱环境适应性强弱的重要指标^[17].从苜蓿和沙打旺苗期生物量和蒸腾耗水量的拟合关系式可以看出,单位蒸腾耗水量下沙打旺生物量增加速率要快于苜蓿.在低水环境(LW、DLW 和 RWL)条件下,沙打旺不仅 TWUE 较苜蓿高,土壤水分变化下苗期生物量变化幅度小于苜蓿(图 2),表明沙打旺苗期对土壤低水环境的适应性强于苜蓿.

4.2 沙打旺苗期生长、水分利用与供水关系

在水分亏缺逐渐加剧环境中,植物会在受到水

分供应不足导致伤害之前做出一些适应性反应,从而影响植物干物质的积累与不同部位的分配比例^[7].生物量向根系分配比例增加一方面是为了增加吸水,为地上部分提供蒸腾所需水分,另一方面,也可使植物根系保持一定活力,追逐有限的供水.同时,根系也是同化产物的主要消耗器官之一,生产单位干重根系所需要的光合同化物质约是形成单位地上部分干重同化物质的两倍^[13].因此,当植物在基本满足地上部分水分需求时,维持较低的根冠比,将有利于降低光合物质消耗和提高 WUE,以有利于增强植物对干旱的适应能力^[7].本研究中沙打旺不论在充分供水条件下(HW)或土壤水分条件改善后(RWL)维持较小的 R/S 比例, TWUE 和单位根量耗水量变化不显著(图 2),主要是沙打旺叶片 WUE 较高^[19],说明沙打旺在良好水分环境中主要加强地上部分生长.这将有利于其光合面积增加和覆盖度的提高,从而达到土壤水分的有效保持与高效利用.

4.3 苜蓿苗期旱后复水反应

旱后复水(RWL)后苜蓿单位根量耗水量较 LW 处理显著提高(图 3), R/S 增大, TWUE 却显著下降(图 2). Hunt 等^[6]对龙舌兰属植物的研究表明,新生根的导水率较老根呈数量级增大,从而使干旱复水后新根的快速生长对植物加快吸水具有重要意义^[9].因此,在阶段水分亏缺解除后,苜蓿主要加强根系生长以促进吸水,有利于增强其抗旱性,但地上部分 TWUE 的下降容易造成土壤水分的大量和快速消耗.由此可以推断,黄土高原半干旱地区苜蓿草地在追求高生产力的趋势下,受降雨季节分配的影响,土壤水分经历由阶段干旱到湿润变化后根系加速生长、吸水量增加和 TWUE 下降可能是造成苜蓿草地土壤深层干燥化加剧的原因之一^[10].

综上所述,在干旱半干旱地区建立人工草地时,苜蓿和沙打旺应该选择在雨季期间播种,以保证苗期的良好生长.在发展草地生产中,苜蓿应选择在水分条件较好的地块种植,在适当条件下可以考虑灌溉,以充分发挥其生产效益.沙打旺对低土壤含水量的利用能力和适应性均较强, WUE 较高,可在坡地等土壤水分较差地块种植,但在高密度种植下会造成土壤水分的大量消耗并不易恢复^[11],可以考虑与禾本科牧草混播.

参考文献

- 1 Bolger TP, Matches AG. 1990. Water-use-efficiency and yield of sainfoin and alfalfa. *Crop Sci*, **30**: 143~148
- 2 Fan W-B(范文波), Liu H-F(刘焕芳), Zhu B-R(朱保荣), et al .

2003. Research on water-consuming law of Lucerne in abandoned land. *J Soil Water Cons* (水土保持学报), 17(3): 165~167 (in Chinese)
- 3 Gao JL, Terefeworkb Z, Chen WX, *et al.* 2001. Genetic diversity of rhizobia isolated from *Astragalus adsurgens* growing in different geographical regions of China. *J Biotechnol*, 91: 155~168
 - 4 Grimes DW, Wiley PL, Sheesley WR. 1992. Alfalfa yield and plant water relations with variable irrigation. *Crop Sci*, 32: 1381~1387
 - 5 Guo Z-G (郭正刚), Zhang Z-H (张自和), Xiao J-Y (肖金玉), *et al.* 2002. Root system development ability of several alfalfa cultivars in the hilly and valley regions of Loess Plateau. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 13(8): 1007~1012 (in Chinese)
 - 6 Hunt ER, Zakir JNJD, Nobel PS. 1987. Water cost and water revenues for established and rain-induced roots of *Agave deserti*. *Funct Ecol*, 1: 125~129
 - 7 James FC. 2002. Interactions between root and shoot competition vary among species. *OIKOS*, 99: 101~112
 - 8 Johnson RC, Tieszen LL. 1994. Variation for water-use efficiency in alfalfa germplasm. *Crop Sci*, 34: 452~458
 - 9 Lauenroth WK, Sala OE, Milchunas DG, *et al.* 1987. Root dynamics of *Bouteloua gracilis* during short-term recovery from drought. *Funct Ecol*, 1: 117~124
 - 10 Li Y-S (李玉山). 2002. Productivity dynamic of alfalfa and its effect on water eco-environment. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 39(3): 404~411 (in Chinese)
 - 11 Liang Y-M (梁一民), Li D-Q (李代琼), Cong X-H (丛心海). 1990. Study on the soil water and productivity of *Astragalus adsurgens* Pall. in Wuqi. *Bul Soil Water Cons* (水土保持通报), 10(6): 113~118 (in Chinese)
 - 12 Ma J-Z (马建中), Yu H-B (鱼宏斌), Yi H-Y (伊虎英). 2000. A few questions on radiation breeding for herbages. *Acta Agric Nuclatae Sin* (核农学报), 14(3): 167~173 (in Chinese)
 - 13 Passioura JB. 1983. Roots and drought resistance. *Agric Water Man*, 7: 265~280
 - 14 Ray IM, Townsend MS, Muncy CM. 1999. Heritabilities and interrelationships of water-use efficiency and agronomic traits in irrigated alfalfa. *Crop Sci*, 39: 1088~1092
 - 15 Salter RM, Melton B, Wilson M, *et al.* 1984. Selection in alfalfa for forage yield with three moisture levels in drought boxes. *Crop Sci*, 24: 345~349
 - 16 Shan L (山 仑), Chen G-L (陈国良). 1993. The Theory and Practice of Dryland Farming on the Loess Plateau. Beijing: Science Press. 115~144 (in Chinese)
 - 17 Stephen OD. 1986. Weed Physiology I. Reproduction and Ecophysiology. Boca Raton: CRC Press, Inc. 119~122
 - 18 Volaire F. 2003. Seedling survival under drought differs between an annual (*Hordeum vulgare*) and a perennial grass (*Dactylis glomerata*). *New Phytol*, 160(3): 501~510
 - 19 Xu B-C (徐炳成), Shan L (山 仑). 2003. A study comparing water use efficiency and root/shoot ratio of alfalfa and at seedling stage. *Acta Agrestia Sin* (草地学报), 11(1): 78~82 (in Chinese)
 - 20 Yang W-Z (杨文治), Shao M-A (邵明安). 2000. Study of Soil Water on the Loess Plateau. Beijing: Science Press. 23~25 (in Chinese)
 - 21 Yun L (云 岚), Mi F-G (米福贵), Yun J-F (云锦凤), *et al.* 2004. Drought resistance of six alfalfa varieties seedlings under water stress. *Grassl China* (中国草地), 26(2): 15~20 (in Chinese)
 - 22 Wang YF, Wang SP, Cui XY, *et al.* 2003. Effect of sulphur supply on the morphology of shoots and roots of alfalfa. *Grass Forage Sci*, 58: 160~167
 - 23 Wang Y-R (王彦荣), Zhang J-Q (张建全), Liu H-X (刘慧霞), *et al.* 2004. Physiological and ecological responses of alfalfa and milkvetch seed to PEG priming. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 24(3): 402~408 (in Chinese)
 - 24 Zhang J-H (张建华), Wang Y-R (王彦荣). 2004. Yield characteristics and genetic diversity of main alfalfa varieties in China. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 15(5): 803~808 (in Chinese)
 - 25 Zhang N (张 娜), Liang Y-M (梁一民). 2002. Effect of arid climate on underground growth of *Bothrichloa ischaemum* community. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 13(7): 827~832 (in Chinese)

作者简介 徐炳成, 男, 1973年生, 博士. 主要从事不同类型植物生态适应性的比较研究, 发表论文多篇. Tel: 029-87016571; E-mail: Bcxu@163.com
