

半干旱黄土丘陵区垄沟集雨对紫花苜蓿人工草地土壤水分和产草量的影响

贾宇¹ 徐炳成^{1,2} 王晓凌^{1,3} 孙国均¹ 徐进章¹ 李凤民^{1,2*}

(1 兰州大学生命科学学院干旱与草地生态教育部重点实验室, 兰州 730000)

(2 中国科学院-水利部水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

(3 河南科技大学农学院, 河南洛阳 471003)

摘要 研究了黄土丘陵区垄沟集雨技术对紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 人工草地生产力以及土壤水分的影响。垄和沟的宽度均为 30 或 60 cm, 且垄上覆膜的处理水分利用效率分别比平作对照显著提高了 13% 和 41%。垄和沟的宽度均为 30 cm 且垄上覆膜的处理 4 年的干草产量和平作对照无显著差异, 而垄和沟的宽度均为 60 cm, 且垄上覆膜的处理干草产量比平作对照显著提高了 41%, 并且使紫花苜蓿草地产草高峰期提早了 1~2 年。垄和沟的宽度均为 30 或 60 cm, 且垄面裸露的两个处理产草量比平作对照有不同程度的降低。紫花苜蓿草地生长的第三年, 深度为 150 cm 左右的土层是降水补充和水分消耗的平衡点。所有处理在紫花苜蓿生长 4 年后, 200~500 cm 深度的土壤水分已经接近萎蔫系数。

关键词 黄土丘陵区 集雨技术 紫花苜蓿 土壤水分

EFFECT OF RIDGE AND FURROW MICRO-CATCHMENT ON SOIL WATER IN SEEDED *MEDICAGO SATIVA* GRASSLAND IN THE SEMIARID LOESS HILL AND GULLY REGION OF NORTHWESTERN CHINA

JIA Yu¹, XU Bing-Cheng^{1,2}, WANG Xiao-Ling^{1,3}, SUN Guo-Jun¹, XU Jin-Zhang¹, and LI Feng-Min^{1,2*}

¹Key Laboratory of Arid and Grassland Ecology, Ministry of Education, School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China,

²State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China, and ³Agronomy College, Henan University of Sciences and Technology, Luoyang, Henan 471003, China

Abstract *Aims* The semiarid loess hill and gully region of northwestern China is a pasture and agriculture transitional zone lacking water resources for irrigation. The agroecosystem in this region is very vulnerable. An effective method to improve the ecosystem is to combine agriculture with animal husbandry, in which productive grassland plays a key role. However, water is the main limitation on grassland production in this region. We studied the effect of alternating ridges and furrows (for harvesting rainfall) on alfalfa (*Medicago sativa*) forage yield and soil water.

Methods Five treatments were compared: 1) conventional cultivation in a flat plot without mulch (CK), 2) plastic mulched ridges with 30 cm wide ridges and furrows (M30), 3) plastic mulched ridges with 60 cm wide ridges and furrows (M60), 4) bare ridges with 30 cm wide ridges and furrows (B30), and 5) bare ridges with 60 cm wide ridges and furrows (B60). We measured soil water consumption, forage yield of alfalfa and soil water profile in all treatments.

Important findings The water use efficiency of M30 and M60 treatments was greater than that of CK by 13% and 41%, respectively. The total forage yield of alfalfa of M30 in four years was not significantly different from that of CK, but the total forage yield of M60 was significantly higher than that of CK by 41%. In both bare treatments, the total forage yield of alfalfa was lower than in CK. In the 3rd alfalfa growing season, the 150 cm soil layer was the balance point of water supplement and soil water consumption. Below 150 cm, soil water can not be supplied by rainfall. Water at 200–500 cm soil depth was close to the permanent wilting point after four years. This study indicates that the M60 treatment is the optimum model for alfalfa establishment in this region. However, after the alfalfa phase, the shallow-root crop must be planted to restore soil water content for subsequent conventional crops.

Key words loess hill and gully region , rainwater-harvesting technology , *Medicago sativa* , soil water

半干旱的黄土丘陵地区是典型的农牧交错带,也是生态脆弱带,降水相对较少,农业生产主要依靠降水,几乎没有其它水源。退耕还草是这一地区改善生态环境和发展畜牧业的重要基础(白文明,2002)。

紫花苜蓿(*Medicago sativa*)在西北地区具有悠久的种植历史(李玉山,2002),是目前这一地区农业结构转型和生态环境建设中大力推广的优良饲草(朱湘宁等,2002),在建立半干旱地区草田轮作和舍饲养殖相结合的农业经营模式中占有重要地位(李凤民,2000)。但紫花苜蓿作为一种高耗水的饲草(Blad & Rosenberg, 1976; Krogman & Hobbs, 1965)和半干旱黄土丘陵地区有限的降水之间存在着矛盾。很多研究表明(陈洪松等,2003;程积民和万惠娥,2002;Ottman *et al.*, 1996;杨文治等,1998;赵姚阳等,2002),紫花苜蓿的种植会引起土壤水分的亏缺和深层土壤的干燥化,可能不利于土壤水分的平衡和后茬作物的生长。因此研究紫花苜蓿草地的耗水过程,采取可行的方法解决土壤干燥化和草地需水之间的矛盾具有重要的现实意义。垄沟集雨技术因其简单、廉价、高效和适应性强的特点,在国内外很多半干旱地区得以应用(Reiz *et al.*, 1988)。Boer 和 Ben-Asher (1982) 报道,这种技术能够促进土壤的储水量,促进农业、园艺、森林作物的生长。在黄土丘陵区的试验也表明这种技术能够提高玉米(*Zea mays*) (Li *et al.*, 2001)和马铃薯(*Solanum tuberosum*) (Tian *et al.*, 2003)的产量。本文旨在研究垄沟集雨技术能否提高草地的生产力和水分利用

效率,并了解对土壤水分的消耗过程。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

试验地点位于甘肃省中部榆中县中连川乡中连川村(36°02' N, 104°25' E)兰州大学黄土高原半干旱生态系统定位研究站,属于黄土高原西部丘陵沟壑区,海拔 2 400 m。中温带半干旱气候,年均气温 6.5 °C,最热月(7月)平均气温为 19.0 °C,最冷月(1月)为 -8.0 °C,年平均降水量 314.1 mm (1999~2003年)。降水季节分布不均匀,大约 56% 的降水发生在 7~9 月。地下水位深度大于 20 m,超过作物利用范围。

试验地点沟壑纵横,土壤为黄土母质上发育的黑麻土和黄绵土。本次试验之前,2000 年该大田所种植作物为春小麦(*Triticum aestivum*),小麦收获到春季试验开始之间有近 220 d 的冬春休闲期。2001 年春季布置试验。2001~2004 年试验进行的 4 年间,紫花苜蓿生长旺季(7~10 月)降水分别为 226.5、323.4、294.6 和 150.7 mm。3 个冬春季休眠期降水分别为 52.1、44.0 和 25.4 mm。显然,2004 年为干旱年份,2002 年为湿润年份。试验期间降水的旬分布见图 1。

1.2 试验设计

本次研究于 2001 年开始,一直到 2004 年仍在进行。人工草地种植紫花苜蓿。田间垄沟集雨系统包括垄和沟两部分。垄作为集雨区,沟作为种植区。垄沟宽度比为 1:1。试验设 5 个处理:1)CK:常规平

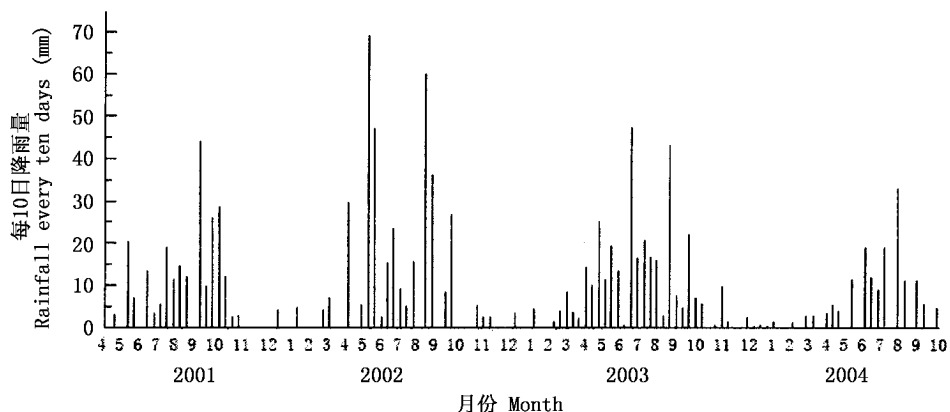


图 1 2001~2004 年试验地点降雨量(每 10 日)分布情况

Fig. 1 Distribution of rainfall every ten days during the *Medicago sativa* growing seasons in 2001-2004 at the experimental site

作,不起垄,不覆膜(对照);2)M30:垄和沟的宽度都为 30 cm,垄上覆盖塑料薄膜;3)M60:垄和沟的宽度都为 60 cm,垄上覆盖塑料薄膜;4)B30:垄和沟的宽度都为 30 cm,不覆膜;5)B60:垄和沟的宽度都为 60 cm,不覆膜。

每个试验小区宽 3.6 m,长 10 m。垄沟处理沿长轴起垄,垄面与地面成 45°角,顶部成弧形,垄高 15~20 cm,每处理 3 次重复,试验小区随机排列。透明塑料薄膜为 PE 薄膜,宽 1.2 m,厚 0.007~0.008 mm,边缘用土压牢,以防被风损害。每年秋季收获后,整理沟垄,次年春季重新覆盖地膜。试验小区建在一整块农田中,由于长期耕作土壤的理化性质差别不大。

2001 年 4 月中旬播种,条播,播种量为 22.5 kg·hm⁻²,并且每个试验小区的播种量相同,播种深度为 2~3 cm,30 cm 沟内种两行,60 cm 沟内 4 行,对照播种行距为 15 cm。播种前施肥:尿素 34.5 kg N·hm⁻²,过磷酸钙 8.0 kg P·hm⁻²。人工去除杂草,无灌溉。

2001 年 10 月中旬收获 1 次,其余年份(2002~2004 年)每年分别在 7 月中旬和 10 月中旬收获两次,紧贴地面刈割。在播种前、2003 和 2004 年的生长季初期(4 月)、生长季末期(10 月)测定 0~500 cm 土壤水分,2001 和 2002 年的生长季初、季末测定 0~200 cm 土壤水分,土壤水分的测定均以 20 cm 为分层。每个小区重复测定 3 次。土壤水分用烘干法(105 °C,8 h)进行测定,在垄沟处理小区沟的中间位置和整个对照处理小区中随机采样。

在计算紫花苜蓿耗水量时,单季的耗水量是由单季降水量和相应深度土壤水分差值相加所得,而试验期间的耗水量是试验期间降水量和试验始末相应深度土壤水分差值之和。

数据采用 SAS 软件包中的 ANOVA 过程进行方差分析,Excel 进行图形绘制等工作。

2 结果与分析

2.1 紫花苜蓿草地产草量

在不同处理之间比较可以看出,M60 的紫花苜蓿干草产量始终处于所有处理的最高值(表 1)。M60 处理试验 4 年的总干草产量比对照 CK 显著提高了 41%。而 M30 处理在 4 年间总的干草产量和对照 CK 相比有所提高,但差异不显著。而两个裸露处理 B30 和 B60 的干草产量却不同程度地比 CK 有所下降。M60 的干草产量在 2002 年就已经超过 CK 在 2003 年的产量,并且接近 CK 在 2004 年的产量。

2.2 土壤水分消耗和水分利用效率

试验 4 年间 M60 总的耗水量和 CK 保持相当水平(表 2),而前者的干草产量相对于后者要高出近 41%,M30 的耗水量显著低于 CK,但二者产量相当(表 1)。表 3 也明确表明了两个覆膜处理在水分利用效率上的优势。以 4 年总的干草产量和总的水分消耗来计算,M30 和 M60 的水分利用效率分别比 CK 显著高出 13%和 41%。

2.3 土壤剖面水分动态

在 2003 年紫花苜蓿生长季末,除了 150 cm 深度的土壤水分相对于播种前保持稳定外,在该土层以上和以下土层的土壤含水量经过 3 年时间都大幅度下降(图 2)。在 150 cm 以上土层所有垄沟处理的土壤水分含量均高于 CK。M60 在 260~340 cm 土层的土壤含水量要低于其它处理,且已经接近永久萎蔫点。2004 年紫花苜蓿生长季末,在 180 cm 土层以下所有处理的土壤含水量均已经接近永久萎蔫点,而且各处理之间差异不大。

表 1 2001~2004 年不同生长季各处理的紫花苜蓿干草产量(kg·hm⁻²)
Table 1 Forage yield of *Medicago sativa* (kg·hm⁻²) in the various treatments in 2001~2004

处理 Treatments	2001	2002	2003	2004	2001~2004
CK	624.11 ^{bc}	3 389.8 ^{bc}	4 541.2 ^{bc}	4 657.1 ^b	13 212.1 ^{bc}
M30	744.59 ^{ab}	3 824.3 ^{ab}	4 897.4 ^b	4 855.2 ^b	14 321.5 ^b
M60	763.78 ^a	4 608.9 ^a	6 631.2 ^a	6 615.1 ^a	18 619.0 ^a
B30	535.00 ^c	3 027.5 ^{bc}	3 779.9 ^{bc}	3 180.7 ^c	10 523.2 ^c
B60	547.11 ^c	2 512.3 ^c	3 074.7 ^c	3 370.1 ^c	9 504.2 ^d

CK:传统平作方式 Conventional cultivation in flat treatment without mulch M30、M60:垄沟宽度均为 30 cm(M30)或 60 cm(M60)且垄上覆膜的处理 Plastic mulched ridge with the width of ridge and furrow as 30 cm(M30) or 60 cm(M60) B30、B60 垄沟宽度均为 30 cm(B30)或 60 cm(B60)且垄上裸露的处理 Bare ridge with width of ridge and furrow 30 cm(B30) or 60 cm(B60) 同一列中相同字母表示数据间无显著差异($p = 0.05$) Values within a column followed by the same letters do not differ significantly at $p = 0.05$

表 2 2001~2004 年各处理土壤水分消耗量 (mm)
Table 2 Soil water consumption (mm) in the treatments in 2001-2004

处理 Treatments	0~200 cm			0~500 cm	
	2001	2002	2003	2004	2001~2004
CK	-10.8 ^a	97.7 ^a	80.1 ^b	61.1 ^a	274.9 ^a
M30	8.9 ^a	79.2 ^a	122.6 ^a	62.0 ^a	223.0 ^b
M60	-10.3 ^a	83.4 ^a	112.4 ^a	65.2 ^a	271.9 ^a
B30	5.9 ^a	91.4 ^a	96.1 ^b	55.7 ^b	224.6 ^b
B60	-11.2 ^a	88.6 ^a	70.5 ^b	64.1 ^a	224.9 ^b

表注同表 1 Notes see Table 1

表 3 2001~2004 年各处理的水分利用效率 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$)
Table 3 Water use efficiency ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$) in various treatments in 2001-2004

处理 Treatments	0~200 cm			0~500 cm	
	2001	2002	2003	2004	2001~2004
CK	2.89 ^{abc}	8.06 ^{bc}	12.16 ^b	21.99 ^b	9.61 ^c
M30	3.18 ^{ab}	9.51 ^{ab}	11.79 ^b	22.83 ^b	10.83 ^b
M60	3.58 ^a	11.33 ^a	16.95 ^a	30.64 ^a	13.57 ^a
B30	2.31 ^c	7.26 ^{bc}	9.80 ^b	15.41 ^c	7.95 ^d
B60	2.54 ^{bc}	6.11 ^c	8.41 ^b	15.69 ^c	7.17 ^d

表注同表 1 Notes see Table 1

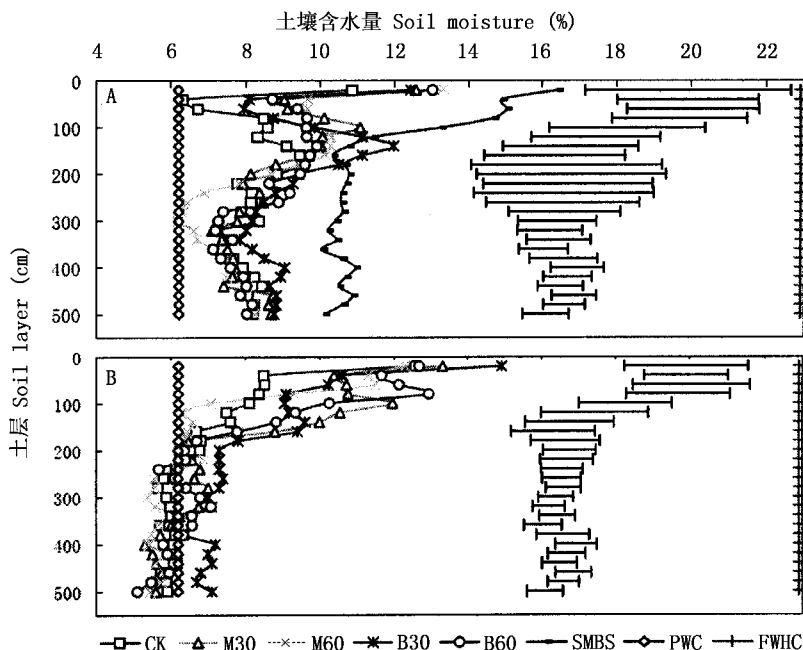


图 2 播种前、2003 年 10 月和 2004 年 10 月收获时土壤剖面 (500 cm 土层以上) 含水量情况

Fig. 2 Profile soil moisture in the upper 500-cm layer at increments of 20 cm in various treatments in April 2001, Oct. 2003 and Oct. 2004

A 播种前和 2003 年土壤剖面水分含量 The profile soil moisture in 2003 and before sowing B 2004 年土壤剖面水分含量 The profile soil moisture in 2004 SMBS: 为播种前的土壤含水量 Soil moisture before sowing PWC: 永久萎蔫点 Permanent wilting coefficient (6.2%) FWHC: 田间持水量 (22.9%) Field water holding capacity (maximum capillary held water, 22.9%) 误差线表示在 $p = 0.05$ 水平的 LSD 值 Error bars are the LSD at $p = 0.05$

3 讨论

近些年来,随着退耕还草工程的实施和畜牧业的发展,紫花苜蓿种植在黄土丘陵区发展很快,面积逐年扩大。但该地区降雨少,且变率大,草地水分不

足,特别是土壤的干旱化对紫花苜蓿的高产稳产造成较大威胁。因此,如何建成高产的人工紫花苜蓿草地,提高草地的水分利用效率,解决草地土壤干旱化的问题是大面积推广人工紫花苜蓿草地的前提。土壤水分是牧草蒸腾耗水的直接来源,牧草不断地

通过根系吸收水分来满足蒸腾耗水。由于人工草地,特别是豆科牧草在黄土丘陵区生长旺盛,耗水量大,根系所达土层的水分能够被充分吸收。因此随着生长年限的增加,根系不断下伸,利用更深层的土壤水分(程积民等,2005)。这就使得人工草地生产力和土壤水分维持之间存在矛盾。我们既不能采用大幅度降低人工草地生产力的方法单纯维持土壤水分,又不能过度消耗土壤水分以达到草地高产的目的(李玉山,2002)。如何权衡两者之间的关系就成为在该地区建成人工草地成败与否的关键。

虽然研究表明紫花苜蓿的干草产量和其耗水量成线性正相关(Bauder *et al.*, 1987),但在本次实验中 M60 高的干草产量并不是以高耗水量而获得的,而是以提高水分利用效率而获得的。程积民等(2005)指出,在黄土丘陵地区紫花苜蓿根系的分布深度在生长的前 6 年,每年平均以 112.5 cm 的速度下伸。本次实验的前两年以 200 cm 土壤深度计算土壤水分消耗,后两年以 500 cm 土壤深度计算土壤水分消耗,基本代表了实际土壤水分消耗深度。

研究中发现,垄沟集雨技术对紫花苜蓿生长也产生强烈的影响。在黄土丘陵半干旱区,紫花苜蓿一般生长年限为 10 年左右,生长高峰期为第四年至第五年,生长到第六年,生物产量逐年下降,草地开始衰败(程积民等,2005)。而本次研究发现, M60 处理在第二年的紫花苜蓿干草产量已经接近平作 CK 第四年的产量,说明 M60 处理能够提前紫花苜蓿产草高峰期 1~2 年。在此过程中 M60 并没有过多地消耗土壤水分,而是提高了水分利用效率。由此看来,以 M60 处理模式建成的人工紫花苜蓿草地不仅能够提高草地的生产力,还使紫花苜蓿草地的生长高峰期提前到来。

由于该地区黄土质地均一,在常规农田转为人工紫花苜蓿草地时导致不同土层土壤水分消耗差异的原因可能是因为降水对各层次土壤水分补充能力的不同以及紫花苜蓿对不同土层水分消耗所造成的。利用示意图 3 加以说明。曲线 A 代表雨水对各土层水分的补充;曲线 B 代表紫花苜蓿对各土层土壤水分的消耗。纵轴代表土层深度,横轴对于曲线 A 来说代表的是土壤水分的补给量;对于曲线 B 来说代表的是土壤水分的消耗量。雨水对土壤的水分补充量是随着土层深度的增加而减少的(如曲线 A 所示)。土壤水分的消耗是随着根系的分布而变化的。紫花苜蓿的根系在土表分布很少,然后随着深度的增加迅速增多,而后逐渐减少。土壤水分的消

耗也符合这个规律(如曲线 B 所示)。紫花苜蓿生长的第三年季末,在 150 cm 附近土层土壤水分的补充和消耗量相同,而在该土层以上和以下水分的消耗都要高于水分的补给,所以出现了如图 2 的土壤水分剖面分布。在此后,由于紫花苜蓿根系的不断生长,这一平衡被打破。在该层以下紫花苜蓿持续消耗土壤水分,并且根系不断下伸,在该层和该层以上,水分的补充能力也难以维持根系强烈的水分消耗。而生长良好的大田作物根系分布一般都可达 200 cm(李玉山等,1989)。因此,在紫花苜蓿人工草地翻耕后,传统作物种植前,应当种植根系浅、低耗水的作物,以便土壤深层的水分得到有效恢复,保证传统作物生长的田间水分条件。

土壤水分补给量 and 水分消耗量的比较
The comparison of soil water supplement and soil water consumption (mm)

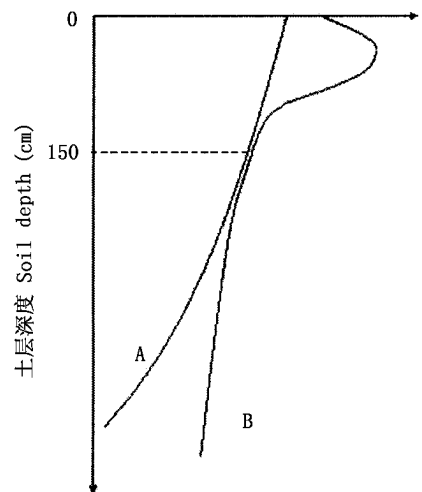


图 3 土壤水分补给和消耗示意图

Fig. 3 The sketch map of soil water supplement and consumption

A. 土壤水分补给量 Soil water supplement B. 土壤水分消耗量 Soil water consumption

参 考 文 献

- Bai WM (白文明) (2002). Effect of irrigation methods and quota on morphological characteristics of alfalfa in Wulanbuhe sandy region. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 22, 1247 - 1253. (in Chinese with English abstract)
- Bauder JW, Bauder A, Ramirez JM, Cassel DK (1987). Alfalfa water use and production on dryland and irrigated sandy loam. *Agronomy Journal*, 70, 95 - 99.
- Blad BL, Rosenberg NJ (1976). Evaluation of resistance and mass transport evapotranspiration models requiring canopy temperature data. *Agronomy Journal*, 68, 764 - 769.
- Boers TM, Ben-Asher J (1982). A review of rainwater harvesting. *Agricultural Water Management*, 5, 145 - 158.

- Chen HS (陈洪松), Shao MA (邵明安), Zhang XC (张兴昌) (2003). Effect of soil water and fertilizer on soybean yield on loess slopeland. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 14, 211 – 214. (in Chinese with English abstract)
- Cheng JM (程积民), Wan HE (万惠娥) (2002). *Vegetation Construction and Soil and Water Conservation in the Loess Plateau of China* (中国黄土高原植被建设与水土保持). China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese)
- Cheng JM (程积民), Wan HE (万惠娥), Wang J (王静) (2005). Alfalfa growth and its relation with soil water status in loess hilly and gully region. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 16, 435 – 438. (in Chinese with English abstract)
- Krogman KK, Hobbs EH (1965). Evapotranspiration of irrigated alfalfa as related to season and growth stage. *Canadian Journal of Plant Science*, 45, 310 – 313.
- Li FM (李凤民) (2000). Eco-farming mixed planting with animal husbandry based on rainwater-harvesting technology in semi-arid Loess Plateau. *Ecological Agriculture Research* (生态农业研究), 8(4), 21 – 24. (in Chinese with English abstract)
- Li YS (李玉山) (1989). *The Relationship and Regulation of Water Between Soil and Crops* (土壤-作物水分关系和调节). China Agriculture Press, Beijing. (in Chinese)
- Li YS (李玉山) (2002). Productivity dynamic of alfalfa and its effects on water eco-environment. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 39, 404 – 411. (in Chinese with English abstract)
- Li XY, Gong JD, Gao QD, Li FR (2001). Incorporation of ridge and furrow method of rainfall harvesting with mulching for crop production under semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, 50, 173 – 183.
- Ottman MJ, Tickes BR, Roth RL (1996). Alfalfa yield and stand response to termination in an arid environment. *Agronomy Journal*, 88, 44 – 48.
- Reiz C, Maulder P, Begemann L (1988). *Water Harvesting for Plant Production*. World Bank, Washington.
- Tian Y, Su DR, Li FM, Li XY (2003). Effect of rainwater harvesting with ridge and furrow on yield of potato in semiarid areas. *Field Crops Research*, 84, 385 – 391.
- Yang WZ (杨文治), Shao MA (邵明安), Peng XD (彭新德) (1998). On the relationship between environmental aridization of the Loess Plateau and soil water of loess. *Science in China Series D* (中国科学·D 辑), 28, 357 – 365. (in Chinese with English abstract)
- Zhao YY (赵姚阳), Liu WZ (刘文兆), Pu LM (濮励木) (2002). Effect of alfalfa growth on soil water environment in hill-gully area of the Loess Plateau. *Journal of Nature Research* (自然资源学报), 20, 85 – 91. (in Chinese with English abstract)
- Zhu XN (朱湘宁), Guo JX (郭继勋), Liang CZ (梁存柱) (2002). Irrigation effects on the yield of alfalfa and soil-water condition in Huabei Plain. *Grassland of China* (中国草地), 24 (6), 32 – 37. (in Chinese with English abstract)

责任编辑:张金屯 责任编辑:张丽赫