

# 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应\*

李玉山

(中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨陵 712100)

**摘要** 根据长期田间试验实测数据, 分析了苜蓿人工草地鲜草产量水平, 产量随生长年限的变化, 以及产草量和降水量的关系; 苜蓿对肥料的敏感性较低, 但肥料有延长苜蓿经济性生长年限的功能; 水量平衡法计算苜蓿耗水量时, 土层计算深度具有重要意义。当采用 2m 和 10m 两种不同计算深度时, 所得耗水量差值巨大, 特别是在揭露水分生态环境演变趋势上, 会得到不同结论。10m 测深研究结果表明, 在黄土高原, 苜蓿草地年蒸散量大于年降水量, 根系吸水层达 10m 以下, 多年连续种植会导致土壤干燥化, 形成生物性土壤下伏干层, 从而对陆地水分循环路径发生影响。据此提出黄土高原草地生产要改高产目标为适度生产力目标, 以减缓或阻止下伏干层的形成, 并提出了相应的农业技术措施。

**关键词** 苜蓿, 草地生产力, 生态环境, 干燥化

**中图分类号** S157.4

苜蓿在我国西北地区种植历史悠久, 分布广泛。建国前后黄土高原传统农业时期, 农村以大牲畜为农耕动力, 以人畜粪尿堆肥为主要肥源。各家各户多利用耕地种植苜蓿, 以饲养家畜, 提高地力, 种植面积接近耕地面积的 10%<sup>[1]</sup>。随着人口增长, 粮食面积比例激增, 机械代替了畜力, 化肥代替了传统的用地养地种植模式, 招致苜蓿面积锐减, 占耕地面积已不到 1%, 在地少人多地区, 苜蓿种植几近消失。但苜蓿对家畜的营养价值及其提高地力的作用, 以及在农业生态系统中的功能, 已为农业生产和科研成果所肯定。在当前开发大西北, 加强生态环境建设中, 扩大草地规模, 发展养畜业, 已列为重要内容, 苜蓿则是主要草种。黄土高原草地生产力及其生态环境效应, 是当前生态环境建设中急需回答的问题。关于草地研究, 在类型、分布、生产力, 或减流、拦沙水保效益方面, 有较多成果报道, 草地种植对水分生态环境影响的研究方面, 几乎是一片空白。七十年代以来, 作者陆续对这一问题做过报道<sup>[2,3]</sup>, 近年来这一方面的研究愈来愈引起人们的关注。

## 1 研究地区农业生态条件和研究方法

厚层黄土覆盖的典型黄土高原, 在我国面积为 28 万平方公里, 大部海拔为 600~1200m, 95% 以上耕地属旱作农区。区内太阳辐射年总量为  $5 \times 10^8 \sim 63 \times 10^8 \text{ J m}^{-2}$ , 年均气温 5~12.5℃, 年均降水量 300~600mm, 年均农田蒸发量为 750~950mm, 年均干燥度 1.3~3.2。东南端为半湿润地区, 西北大部为半干旱地区。黄土覆盖厚度多在 50m 以上, 壤质、疏松多孔的深厚黄土层, 为植物根系深层生长创造了特有

\* 本文是国家自然科学基金(49890330)和国家科技攻关项目(96-004-05-05)的阶段性研究成果

收稿日期: 2000-07-27; 收到修改稿日期: 2000-08-15

的良好生态条件。

本项目采用长期田间试验方法。苜蓿试验区设于陕西省长武县,属半湿润区,海拔1200m,1986~1998年试验时段年均降水量537mm,较多年平均量减少8%。地下水埋深60m,不参加生物循环。土壤是中壤质黑垆土,田间持水量21%~24%,萎蔫湿度7%~8%,每米土层蓄水能力约250mm。试验区土地肥力中等(小麦亩产2700kg $\text{hm}^{-2}$ )。苜蓿于1984年播种,分为连续种植区和草田轮作区两类。系统测定鲜草产量和土壤水分变化,土壤水分的系统测定深度为2m,不定期测定深度为3~10m。该长期试验现仍在继续进行。

## 2 结果和讨论

### 2.1 苜蓿生产力动态及水分生产函数

2.1.1 苜蓿鲜草产量 在半干旱和半湿润地区,苜蓿产草量主要决定于水分条件。表1为1986~1998年历时13年的苜蓿鲜草生产力。单纯依靠土地背景肥力的L1无肥区,每公顷共生产鲜草413565kg,年均31812.6kg。配施氮、磷化肥和农家肥料的L3处理区,每公顷共产鲜草485310kg,年均37331.5kg,增产17.3%,低于粮食作物对于肥料的敏感性。同一试验中同量肥料施于同一肥力粮田,粮食单产可增加80%以上。单纯施磷素的L2处理区,产量和无肥区极为相近,13年共产鲜草429525kg $\text{hm}^{-2}$ ,年均33040.4kg $\text{hm}^{-2}$ ,仅增加3.8%,差异不显著。在苜蓿2~5年生高产期,降水量亦属正常年份,苜蓿鲜草单产达到47670~50985kg。上述各类产量代表黄土高原南部半湿润区苜蓿的区域生产力水平。

表1 黄土高原南部苜蓿鲜草生产力

Table 1 Yield of alfalfa in the south of the loess plateau

处理区 Treatments	生育年限 Growth years	鲜草总产量 (kg $\text{hm}^{-2}$ )	鲜草年均产量 (kg $\text{hm}^{-2}$ )	总降水量 (mm)	年均降水量 (mm)	2~5年生鲜草 产量(kg $\text{hm}^{-2}$ )
L1 无肥区	1986~1998	413565	31812.6	6981.4	537.0	47670
L2 纯磷区	1986~1998	429525	33040.4	6981.4	537.0	48210
L3 全肥区	1986~1998	485310	37331.5	6981.4	537.0	50985

2.1.2 苜蓿鲜草产量与生长年限的关系 苜蓿的生长年限可区分为生物性生长年限和经济性生长年限。前者是指生物学寿命生长年限,后者是指具有经济效益的生长年限,也即是退化或衰败发生前的生长年限。本文主要讨论经济性生长年限。为避免因各年降水量丰缺有别对产量发生波动性影响,而难于判断生长衰退发生时期,特采用产量动态指数 $Y_i$ 来描述产量随生长年限的变化。 $Y_i$ 即各生长年限的苜蓿实际产量和同一年份的2~4年生高产期苜蓿产量之比。图1给出1986年至1998年,即1~13年生苜蓿的 $Y_i$ 值变化。可以看出,无肥区生长9年后, $Y_i$ 值开始下降,绝对产量亦低于生长盛期,生长出现衰退。全肥区直到1998年,苜蓿13年生时, $Y_i$ 值仍大于1.0,绝对产量不低于生长盛期产量,没有出现衰退。这说明施肥能够延缓衰退发生时间。

2.1.3 苜蓿鲜草产量波动性及其与降水量的关系 长期田间试验表明,苜蓿生长前五年,产量表现相对稳定。五年生以后的苜蓿绝对产量出现了很大波动性。长期试验中

1986~1998年三个处理平均鲜草单产( $Y_a$ )为  $34,065\text{kg hm}^{-2}$ , 最高年(1990年)单产为  $51,120\text{kg hm}^{-2}$ , 最低年(1994年)单产为  $11,430\text{kg hm}^{-2}$ , 后二者之差即波动区域( $Fr$ )达到  $39,690\text{kg hm}^{-2}$ , 波动系数( $Fr/Y_a$ )为 1.17。波动区域大于多年平均产量, 说明苜蓿生长中后期产量波动剧烈。

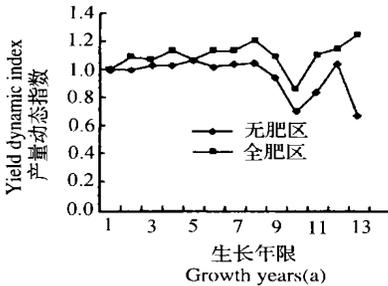


图1 苜蓿产量动态指数随生长年限的变化

Fig.1 Change of yield dynamic index for alfalfa with growth years

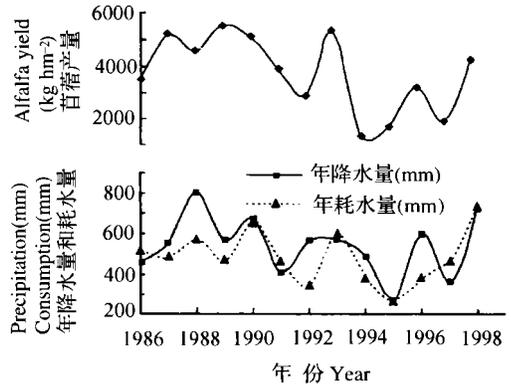


图2 苜蓿产量, 年降水量, 耗水量动态

Fig.2 Dynamics of yield, precipitation and consumption for alfalfa grassland

苜蓿鲜草产量的波动程度与前一年和当年降水量关系密切。改种草地之初, 土壤深层储水丰富, 不存在土壤下伏干层。在降水偏少年份中, 苜蓿需水可由土壤深层储水调节补给, 产量的相对稳定得能保持。随着生长年限延长, 通体土层向干燥发展, 土层储水的供水调节能力急剧降低, 转而使苜蓿产量逐渐转向依靠当年降水提供水源, 于是随降水丰缺形成了产量的上下波动。图2表现了这种趋势。

2.1.4 苜蓿鲜草产量、耗水量与水分生产效率 苜蓿鲜草产量、耗水量和水分生产效率均具有年度波动性。本文根据1986~1997年共12年的实测数据, 采用土壤水量平衡方法, 按2米和10米两种水分消耗层深度计算耗水量, 所得结果列于表2。可以看出, 计算层深度不同, 不但耗水数量差别巨大, 主要是对水分生态环境演变趋势上性质也不同。前者全年(含冬眠期)消耗水量与年降水量相近, 每年耗水平均高出10.3mm, 12年共多耗水123.8mm, 该量居于年内2米土层水分循环变化量之内, 可视为土壤水分收支处于平衡状态, 不致引起深层土壤干燥化; 而后者全年消耗水量远大于年降水量, 每年多出71.5mm, 12年共多耗水858mm, 远远超出降水量所能补充土壤水量亏缺的范围。土壤水分处于严重负平衡状态, 其后果将引起深层土壤干燥化。由此看来, 采用2米土层计算苜蓿耗水量, 会得到失真的结论。产生此种差别的原因, 在于苜蓿具有超常的吸水深度。根据所测数据判断, 本试验苜蓿吸水深度超过10米。L3处理区1986~1997年苜蓿鲜草产量年均  $36,879\text{kg hm}^{-2}$ , 年均生长期耗水量为  $519.4\text{mm}$ , 非生长期蒸发量为  $65.5\text{mm}$ , 全年消耗水量共  $584.9\text{mm}$ , 高于同期降水量  $513.4\text{mm}$ , 不足水分从2~10m和10m以下土层吸取。苜蓿鲜草水分生产效率为  $79.95\text{kg mm}^{-1}\text{hm}^{-2}$ , 风干草为  $22.84\text{kg mm}^{-1}\text{hm}^{-2}$ , 和粮食作物(以生物量为基数)相比, 水分生产效率大于小麦, 小于玉米。

表 2 苜蓿产量、耗水量和水分生产效率(1986~ 1997)

Table 2 Yield, water consumption and water use efficiency of alfalfa

项目 Items	计算层 2 米		计算层 10 米		
	Calculating layer of 2m		Calculating layer of 10m		
	12 年总计	年均	12 年总计	年均	
	Sum in 12years	Annual aver.	Sum in 12years	Annual aver.	
年总量	6 161. 2	513. 4	6 161. 2	513. 4	
降水量(mm)	生长期	5 580. 6	465. 1	5 580. 6	465. 1
	非生长期	580. 6	48. 3	580. 6	48. 3
	年总量	123. 8	10. 3	858. 0	71. 5
土壤供水量(mm)	生长期	- 40. 1	- 3. 3	652. 5	54. 4
	非生长期	163. 9	13. 6	205. 5	17. 1
	年总量	6 285. 0	523. 7	7 019. 2	584. 9
耗水量(mm)	生长期	5 540. 5	461. 7	6 133. 1	519. 4
	非生长期	744. 5	62. 0	786. 1	65. 5
	年总量	442 560	36 879	442 560	36 879
产量(kg hm <sup>-2</sup> )	鲜草	126 446	10 537	126 446	10 537
	风干草	6 285. 0	523. 7	7 019. 2	584. 9
水分生产效率 (kg mm <sup>-1</sup> hm <sup>-2</sup> )	鲜草	79. 95	79. 95	70. 95	70. 95
	风干草	22. 84	22. 84	20. 27	20. 27

## 2.2 苜蓿生长对土壤水分生态环境的影响

2.2.1 两米土层是干湿交替层,不反映长时间尺度水分变化 黄土高原具有壤质深厚土层,整层容重在  $1.3\text{g cm}^{-3}$  左右,田间持水量条件下,固、液、气相容积比为 0.5:0.3:0.2,和其他地区土壤相比,黄土高原土层具有植物根系深层生长适宜的生态条件。一年生作物根系深为 2~ 3m,沙打旺、苜蓿等多年生豆科草本根系深达 7~ 8m 以下<sup>[4,5,6]</sup>,固有的和循环的深层储水得能成为植物重要的供水源。黄土高原自西北向东南,降水入渗深度与降水量相对应,降水愈丰入渗愈深,年入渗深度多为 1~ 2.5m 深,愈向西北,入渗愈浅。农、林、草各种土地利用类型,多数地区多数年份渗深均少于 2 米。本试验所在地区位置偏南,属于入渗较深地区,历年实测降雨入渗深度列于表 3。1986~ 1997 年,入渗达到田间持水量湿度的土层深度年均均为 112.5cm,变幅为 20~ 260cm。水分向下继续扩散深度年均均为 138.3cm,变幅为 30~ 300cm。在干湿季明显的季风条件下,上层土壤处于水分消耗、补充的不断干湿交替过程中,是生物-气候水分交换层,含水量在萎蔫湿度至田间持水量间剧烈波动。从长时段观点看,年均土壤水分盈缺变化量很小,时段愈长,变化量愈接近

表 3 历年苜蓿地降雨入渗深度(长武)

Table 3 Infiltration depth of rainfall on alfalfa land in different years(Changwu)

年 份 Years	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	平均 Aver.
田间持水量 恢复深度(cm)	100	130	260	120	140	120	160	90	100	20	90	20	112.5
继续扩散 深度(cm)	120	140	300	160	160	140	200	120	120	30	120	50	138.3

零,因而不反映长时段土壤水分环境的变化趋势。该层是一年生作物主要吸水层,可作为年度耗水量的计算深度。多年生豆科人工草地生长期间 2 米以下土层难有水分入渗补充,出现生物耗水形成的干燥层,称为生物性干层。

2.2.2 苜蓿深层土壤干燥化进程 为揭露苜蓿用水层深度和土壤干燥化涉及的深度和强度,根据实测资料,绘制出 13 年生苜蓿地历年土壤湿度剖面变化进程(图 3)。由于上层 2m 土层干走走向随降雨频繁变化,所以未予绘出。图 3 中只绘出 2~ 10m 深度的 5 条土壤湿度曲线,代表不同种植年份的 5 次测定。从种植前的 1985 年,直到生长第 13 年的 1998 年。5 条曲线随生长年限延长,顺序向左近似平行移动的规律表明,整个剖面各层土壤湿度在以类似的速率逐年降低,这也说明苜蓿对于不同深度土层储水具有类似的利用能力。表 4 列出了苜蓿种植前后土壤湿度降低进程。苜蓿播种前 2~ 5 米土层湿度为 20.2%, 5~ 10 米为 21.9%, 此后逐年降低。生长 12 年后,同层湿度分别降低到 12.6% 和 13.6%, 平均年干燥速率为 0.66%。

表 4 苜蓿不同生长年限中深层土壤湿度演变

Table 4 Variation of soil moisture in deep layer of alfalfa field in different growth years

生长年限	种植前	3 年生	4 年生	5 年生	6 年生	10 年生	12 年生	13 年生
Growth years	Before growth	Growth in 3 years	Growth in 4 years	Growth in 5 years	Growth in 6 years	Growth in 10 years	Growth in 12 years	Growth in 13 years
测定时间	1985- 07	1989- 04	1989- 10	1990- 10	1991- 10	1995- 10	1997- 10	1998- 09
土壤湿度 (%)	2~ 5m 20.2	18.7	15.7	14.5	13.9	12.1	12.6	11.0
	5~ 10m 21.9	—	19.2	17.1	—	—	13.6	—

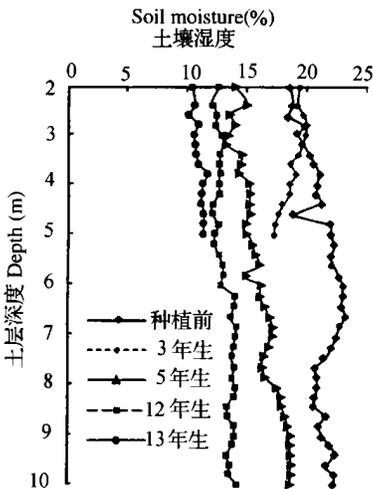


图 3 苜蓿地 2~ 10m 土层干燥化进程

Fig. 3 Desiccation process in profile of 2~ 10m for alfalfa grassland

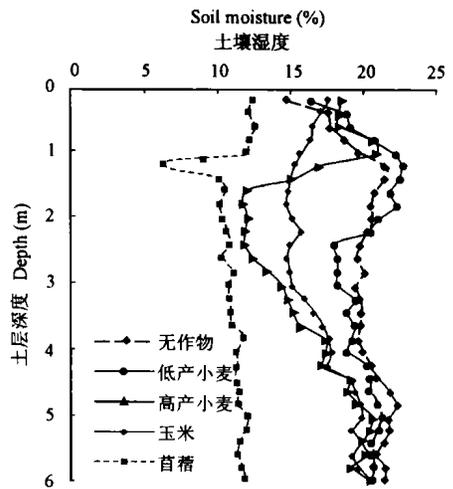


图 4 长期种植不同作物之土壤湿度差异

Fig. 4 Difference in soil moisture profile for different crops after growing for long time

12 年累计从 2~ 10m 土层中吸收水量 835. 2mm, 占该层有效水储量的 70%。以整层土壤田间持水量为 21. 5% 计算, 由于长期连续种植苜蓿消耗水分, 土壤水库亏缺量已高达 1 108mm。按照研究地区农田水量平衡模式和已取得的入渗深度成果分析<sup>[7]</sup>, 土壤深层亏缺的水量几乎不能恢复, 2m 以下形成的干层将长期存在。

2. 2. 3 苜蓿、一年生作物连续种植对土壤水分生态环境影响的差别 在黄土高原, 降水入渗并储存于土壤水库, 使降水和植物需水时间上的不一致性得以调节, 成为本区植物生长的重要生态环境条件。土壤水库中水分的储量和分布, 深受植物用水特征的强烈影响而产生分异。图 4 绘出无植物裸地、一年生小麦低产地、一年生小麦高产地、玉米高产地和多年生苜蓿地连续利用 13 年后的土壤湿度剖面, 可以看出, 其差别是巨大的。5 条曲线分为三类: 第一类是裸地和低产地。裸地因无蒸腾耗水而整层湿润, 1m 以下土层湿度达到田间持水量。低产地之低蒸腾量, 在土壤水量平衡上没有引起反应, 其湿度剖面类似裸地; 第二类为小麦、玉米高产地。因高产引起的高蒸散量, 使 5m 以上土层出现不同程度的干燥。湿度剖面分布曲线于 5m 深处和裸地交汇表明, 一年生高产作物利用水分的深度达到 5m, 5m 以下土层湿润类似裸地。根据根系和非饱和水移动规律研究成果<sup>[4]</sup>, 可以认为, 根系直接吸水层为 3m, 3m 以下储水被利用是水分运动上移的结果; 第三类是苜蓿地。由于全年蒸发蒸腾量超过年降水量, 引起整个测定层严重干燥, 干燥层已延至 10m 以下。根据土壤湿度低于田间稳定湿度和所处的水势梯度条件判断<sup>[8]</sup>, 和一年生作物不同, 苜蓿根系直接吸水层已超过 10 米深度。

### 2. 3 苜蓿地土壤干燥化对水分生态环境的影响

通常认为, 在既定气候条件下, 草地耗水量小于林地。在黄土高原, 天然草地由于超载滥牧, 实际已沦为牧荒地, 生物产量甚低, 根系分布和水分影响层不超过 1m。其耗水量与裸地、作物低产地类似, 水分循环属年周期类型, 对土壤水分生态环境不生长时间尺度的干湿影响。而刈割用人工草地和牧荒地式天然草地全然不同, 它有生长良好的密集草丛, 较高的生物产量, 超过降水量的耗水量和深层分布的根系, 水分影响层往往达到 5m 以下。半干旱区陕西吴旗 7 年生豆科沙打旺草地的研究表明, 因蒸散耗水形成的干层深达 8m, 水分亏缺量超过 15 00mm<sup>[6]</sup>。半湿润区陕西杨陵 4 年生苜蓿草地研究同样表明, 干层超过测定深度 7m, 水分亏缺量达到 1 037mm<sup>[2]</sup>。

自然界是一个庞大、多元的复合生态系统。每个生态和环境的要素都是一个长长的链条, 改变其中一个环节, 都会影响整个链条的演变走向。可以认为, 在黄土高原一切拦蓄径流、提高产量的措施都具有增加生物耗水量, 改变水分循环走向, 最终影响水分小循环和大循环比例关系的性质, 使宏观生态环境面貌有所改变<sup>[9]</sup>。一年生作物根系用水层在 3m 以内, 与水分年循环深度相近, 限制形成深层干层。而高产人工草地和林地相似, 可以产生厚层干层, 形成巨大水分亏缺量, 对降水垂直补给地下水过程发生阻止作用。黄土高原浅层地下水补给来源, 总体上依靠降水, 但机制上学术界至今尚未说清。有限地下水资源的保护就成为异常重要的事情。例如, 南部高塬沟壑区, 居民点多分布于邻沟塬边, 人畜饮水依靠埋深为 60~ 100 米深的泉水和深井水。一旦地下水、泉水萎缩, 生存条件即受到威胁, 后果不堪设想。黄土高原植被建设中, 要研究适宜植被类型、适宜面积规模、适宜密度和适度生产力。制定农业和植被规划时, 即要考虑土地类型等自然因素, 产

量效益等经济因素,还要考虑生态环境各要素的平衡因素。

#### 2.4 草地适度生产力建议

农业生产和科学研究,过去以追求高产为目标,对生态环境的协调发展未予以应有注意,这是当时社会经济发展和生产水平所决定的。现在,持续发展战略要求同步实现双重目标,即在提高土地生产力的同时,确保生态环境良性发展。人工苜蓿草地引起土壤深层干燥化问题,是一个生产力和生态环境出现相互失衡的问题。

黄土高原人工草地分布在降水量 300~ 600mm 的旱作农业区,主要类型是苜蓿草地。年降雨量 400mm 的半干旱丘陵地区研究结果表明<sup>[10]</sup>,苜蓿高产期亩产鲜草达 1 400kg,衰退初期为 800kg,伴随苜蓿生长土壤出现变干过程。半湿润高原沟壑区苜蓿高产期亩产鲜草为 2 600kg~ 3 000kg<sup>[11,12]</sup>。本项研究苜蓿高产期亩产鲜草 3 000~ 3 600kg,各处理 13 年平均亩产 2 120.8~ 2 488.8kg。在此种生产力条件下,产生土壤深层严重干燥化。由此看来,单纯以追求高产为目标的草地生产,应调整为以得到适度产量为目标,并减缓或避免土壤下伏干层的形成。

调控草地产量的主要农业技术措施有三:降低种植密度,缩短种植年限,采用浅根性禾本科牧草混播。黄土高原人工草地适度生产力大致范围,半干旱地区高产期在 1 000kg 以下,半湿润地区在 2 000kg 以下,各地应通过研究来确定。

#### 参 考 文 献

1. 彭祥林等. 关中红油土地区的轮作制. 土壤学报, 1961, 9: 1~ 2, 42~ 55
2. 李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响. 生态学报, 1983, 3(2): 91~ 101
3. 熊毅, 李庆远主编. 中国土壤(第二版). 北京: 科学出版社, 1987. 270
4. 李玉山. 土壤深层储水对小麦产量效研究. 土壤学报, 1981, 17(1): 43~ 54
5. 李玉山. 土壤深层储水对棉花产量效研究. 土壤学报, 1962, 10(3): 383~ 388
6. 曹淑定等. 吴旗飞播区沙打旺根系的研究. 水土保持通报, 1982, 3: 57~ 62
7. 朱显谟主编. 黄土高原土壤与农业. 北京: 农业出版社, 1989. 353~ 354
8. 李玉山. 土水分状况与作物生长. 土壤学报, 1962, 10(3): 289~ 294
9. 李玉山. 黄土高原治理开发与黄河断流的关系. 水土保持通报, 1997, 17(6): 41~ 44
10. 韩仕峰. 宁南山区苜蓿地土壤水分利用特征. 草地科学, 1990, 7(5): 47~ 52
11. 李琪等. 陇东紫花苜蓿现状. 草地科学, 1992, 9(5): 7~ 11
12. 仇化民等. 黄土高原牧草耗水量规律研究. 草地科学, 1993, 1: 33~ 39

## PRODUCTIVITY DYNAMIC OF ALFALFA AND ITS EFFECTS ON WATER ECO-ENVIRONMENT

Li Yir shan

(*Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Shaanxi Yangling 712100*)

### Summary

The emphasis of this study is laid on effect of alfalfa growth on soil water eco environment based on data obtained from actual measurements in a long term experiment. At first, yield of fresh alfalfa and its change with the growth life, and the relationship between grass yield and precipitation were analysed. Then, the significance of measuring soil water at depth for calculating consumption and revealing effects of alfalfa on water eco environment were presented. Difference in calculating soil depth resultd in different conclusions in analysis of effects on water eco environment. It pointed out that in the Loess Plateau the annual consumption is more than the annual precipitation for alfalfa which has deep roots more than 10 meters. Therefore continual growth of alfalfa can lead to desiccation and form a desiccative layer below the upper soil layer, which affects the way of water cycle on land. It is concluded that in order to slow down or prevent formation of the drying layer an appropriate productivity goal of grassland should be set and relevant agricultural technological measures are proposed.

**Key words** Alfalfa, Productivity of grass land, Eco environment, Desiccation