

# 宁夏中部干旱带沙地人工甘草不同种植密度 土壤水分时空变化及产量性状分析

张清云<sup>1</sup>, 王宁庚<sup>2</sup>, 杨朝霞<sup>3</sup>, 左忠<sup>1</sup>, 李明<sup>1</sup>

(1. 宁夏农林科学院 荒漠化治理研究所, 银川 750002; 2. 宁夏盐池县林业局,  
宁夏 盐池 751500; 3. 宁夏盐池县科技局, 宁夏 盐池 751500)

**摘要:**水分是影响宁夏中部干旱带沙地人工种植甘草最重要的限制生态因子,通过对不同密度人工种植甘草地土壤水分特征变化及产量性状进行分析,确定了人工种植甘草的最佳种植密度。结果表明:(1)不同种植密度人工甘草地土壤水分变异系数和标准差随着土层深度的增加均呈现先增大后降低的趋势;(2)不同种植密度人工甘草地土壤垂直剖面水分变化幅度大小划分为0—20 cm活跃层、20—80 cm次活跃层和80—100 cm相对稳定层,土壤含水量从高到低依次为180 000株/hm<sup>2</sup>>150 000株/hm<sup>2</sup>>120 000株/hm<sup>2</sup>>210 000株/hm<sup>2</sup>>90 000株/hm<sup>2</sup>;(3)土壤含水量季节动态变化可划分为3个时期:土壤水分积累期(5—6月)、土壤水分消耗期(7—9月)、土壤水分稳定期(10月—次年4月);(4)从不同种植密度、产量性状以及水分特征变化的整体分析看,人工种植甘草的最佳密度约为180 000株/hm<sup>2</sup>。

**关键词:**甘草;种植密度;土壤水分

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)01-0031-05

## Analysis of Yield and Soil Water Spatiotemporal Variation in Different Densities of Artificial Planting *Glycyrrhiza uralensis* in Sandy Land of Arid Region of Ningxia

ZHANG Qingyun<sup>1</sup>, WANG Ninggeng<sup>2</sup>, YANG Zhaoxia<sup>3</sup>, ZUO Zhong<sup>1</sup>, LI Ming<sup>1</sup>

(1. Desertification Control Research Institute, Ningxia Academy of Agriculture and  
Forestry, Yinchuan 750002, China; 2. Ningxia Yanchi County Forestry Bureau, Yanchi,  
Ningxia 751500, China; 3. Ningxia Yanchi County Technology Bureau, Yanchi, Ningxia 751500, China)

**Abstract:** Water is one of the most important limiting ecological factors of impact cultivated *Glycyrrhiza uralensis* in sandy land of central arid region of Ningxia. The soil moisture characteristic variation and yield under different densities of cultivated *Glycyrrhiza uralensis* were analyzed to determine the best planting density of the cultivated *Glycyrrhiza uralensis*. The results showed that: (1) the soil moisture variation coefficient and standard deviation in different planting density of *Glycyrrhiza uralensis* showed increased first and then gradually decreased with the increase of soil depth; (2) the variation of soil moisture magnitude of vertical section under *Glycyrrhiza uralensis* in different planting densities is divided into 0—20 cm active layer, 20—80 cm sub-active layer and 80—100 cm relatively stable layer, the soil moisture followed the order: 180 000 individual/hm<sup>2</sup>>150 000 individual/hm<sup>2</sup>>120 000 individual/hm<sup>2</sup>>210 000 individual/hm<sup>2</sup>>90 000 individual/hm<sup>2</sup>; (3) the seasonal dynamics of soil moisture can be divided into three periods: the soil moisture accumulation period (May—June), soil moisture depletion period (July—September), soil moisture stabilization period (October—next April); (4) from the overall analysis of different planting density, yield and characteristics of water changes, the best planting density of cultivated *Glycyrrhiza uralensis* is about 180 000 individual/hm<sup>2</sup>.

**Keywords:** *Glycyrrhiza uralensis*; planting density; soil water

收稿日期:2016-01-15

修回日期:2016-03-02

资助项目:宁夏农林科学院科技创新先导资金项目“甘草连作障碍因素及解除措施研究”(NKYJ-14-25);“钙镁营养对栽培甘草生长发育及有效成分含量的影响”(NKYJ-16-04)

第一作者:张清云(1964—),男,宁夏盐池县人,学士,副研究员,主要从事防沙治沙与沙生药用植物栽培研究。E-mail:nxzhqy@163.com

通信作者:李明(1965—),男,宁夏平罗县人,硕士,研究员,主要从事防沙治沙与沙生药用植物栽培研究。E-mail:lm\_nxpl@163.com

乌拉尔甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)为豆科(Legu-  
minosae)甘草属(*Glycyrrhiza* Linn.)多年生草本植物<sup>[1]</sup>,  
其根及根茎为常用中药材,具有补脾益气、润肺止咳、通  
经脉、利血气、清热解毒及止咳祛痰润肺的功效。近年  
来,随着甘草的药理研究日益深入,甘草是荒漠半荒漠  
草地自然植被的主要组成部分,也是宁夏干旱、半干旱  
地区重要的沙生药用植物资源。甘草根系发达,生命力  
强,覆盖度高,具有耐旱、耐碱和耐瘠的特性,适宜在干  
旱、半干旱地区砂质偏碱性的钙质土壤上生长,是半干  
旱荒漠地区优良的药用和防风固沙植物<sup>[2]</sup>。自 20 世纪  
80 年代以来,全宁夏因采挖甘草直接破坏草原面积达  
17.83 万 hm<sup>2</sup>,间接破坏草原 35.7 万 hm<sup>2</sup><sup>[3]</sup>,从而使草原  
大面积沙化,甘草资源面临枯竭。为了保护好现有的野  
生甘草资源,必须大力发展人工种植甘草。发展人工种  
植甘草就离不开水,水分既是干旱、半干旱地区植被  
建设最重要的生态因子,同时也是限制我国西北干旱  
区、半干旱区农业生产的关键因素<sup>[4-5]</sup>,又是制约宁夏  
中部干旱带人工栽培甘草产业发展的主要因素之一。  
在旱作农业区,产量与降雨的多少和生产关键时期的  
干旱程度呈正相关关系<sup>[6]</sup>。目前,诸多学者对水地人  
工种植甘草对水分的影响进行了大量的研究<sup>[7-10]</sup>,但  
关于旱地不同密度下人工种植甘草对水分影响的报  
道较少。本文通过对不同人工种植密度甘草土壤水  
分的监测,分析干旱、半干旱地区不同密度人工种植  
甘草对土壤水分的影响,研究旱地人工甘草不同栽培  
密度对土壤水分时空变化的影响,确定干旱地区人工  
栽培甘草最佳种植密度,为干旱地区人工种植甘草高  
产、丰产栽培提供理论依据。

1 研究区概况

试验基地位于宁夏盐池县花马池镇沙边子村,地  
处盐池县北部,距县城 15 km,地理位置为北纬  
37°50′27″—37°53′50″,东经 107°20′35″—107°25′38″。  
年降雨量为 230~330 mm,多集中在 7—9 月,蒸发  
量为 2 180 mm,海拔 1 240 m,无霜期 128 d,年平均  
气温 7.7℃,平均日差 14.1℃,≥10℃的年有效积温  
平均为 2 963.1℃,年太阳总辐射 602.5 kJ/cm<sup>2</sup>,年  
日照时数达 3 036.4 h,属中温带干旱气候区,大陆性  
气候特征十分明显。土壤质地为沙壤土,pH 值为  
8.3,适合甘草的生长和干物质积累。

2 材料与方法

供试甘草为宁夏盐池县产乌拉尔甘草 1 年生种  
苗,小区面积 50 m<sup>2</sup>(10 m×5 m),共设 5 个处理,移  
栽密度为 90 000,120 000,150 000,180 000,210 000

株/hm<sup>2</sup>,重复 3 次,移栽时间为 4 月 5 日,肥料用量  
参照大田生产水平施用,采用人工种植,行距 25 cm,  
种植深度为 10 cm。甘草移栽后的整个生长期,不  
进行灌水处理。移栽 1 个月后进行田间水分测定,人  
工种植甘草根系分布主要在 20~80 cm,从 5 月份开  
始,采用三点混合取样法在 0—100 cm 的土层中,每  
20 cm 为一层采样。土样用烘干法在(105±5)℃下  
烘至恒重,计算其土壤含水量,用重量百分比(干土  
重%)表示。每月 5 日测定 1 次土壤 0—20 cm,20—  
40 cm,40—60 cm,60—80 cm,80—100 cm 土壤含水  
量。用环刀取土测定各层土壤容重,采用 Wilcox 环  
形法测定最大田间持水量(表 1)。

表 1 试验地土壤的基本情况

土壤层次/cm	0—20	20—40	40—60	60—80	80—100
土壤容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	1.42	1.39	1.32	1.40	1.38
最大田间 持水量/%	13.5	14.2	14.6	13.7	14.1

变异系数 C<sub>v</sub> 和标准差 S 的计算公式分别为:

$$S=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^n(X_i-\bar{X})^2}$$
$$C_v=\frac{S}{\bar{X}}$$

式中: $\bar{X}$  为样本(土壤水分观测值)平均值; $n$  为样本  
总体个数; $X_i$  为样本的第  $i$  个观测值。

在甘草生育期观测各处理地上部分生长变化,10 月  
下旬收获地下部分进行田间考种,测量主根长、径粗和  
产量等,其产量为 3 个重复的平均产量,并进行分析。

3 结果与分析

3.1 人工甘草不同种植密度土壤含水量特征值变化

土壤水分的垂直变化为了反映土壤水分垂直变  
化情况,用变异系数 C<sub>v</sub> 表示其变化情况,越大表示土  
壤水分变化越剧烈,反之表示土壤水分差异越小<sup>[11]</sup>。

整个生长季(5—10 月)土壤剖面水分的平均值、  
标准差和变异系数垂直分布的变化趋势如表 2 所示。  
随着人工甘草不同种植密度的增加,土壤剖面内土壤  
水分的变异系数和标准差随着土层深度的增加均呈  
现出降低的趋势,降雨对(0—40 cm)土壤的作用明显  
大于其对深层(40—100 cm)土壤,由于是沙壤土地,  
降雨时雨水下渗速度较快,使土壤含水量急剧增加,  
之后由于甘草耗水和地表蒸发以及在重力势与基质  
势的作用下该层水分向深层运动<sup>[12]</sup>,使其含水量减  
小,从而使土壤含水量的波动较大。根据陈海宾  
等<sup>[13]</sup>的研究表明,随着土层深度的增加,变异系数逐

渐减小,主要是在没有人工补给水的情况下,降雨对(0—40 cm)土壤含水量的影响较大。说明降雨是引起干旱和半干旱区沙地浅层土壤水分变化的主要因素,而人工种植甘草主要吸收 20—60 cm 的水分,由于种植密度不同,种植密度越大,土壤蒸发量减少,但甘草耗水量增大,从而使土壤含水量减少,因而变异系数和标准差明显大于下层土壤。

表 2 人工种植甘草不同密度各土层含水量的特征值

处理/ (株·hm <sup>-2</sup> )	项目	土层深度/cm				
		0—20	20—40	40—60	60—80	80—100
210000	平均含水量/%	4.74	6.42	7.08	6.91	6.61
	标准差	1.75	2.32	1.7	1.25	1.33
	变异系数	0.37	0.36	0.24	0.18	0.2
180000	平均含水量/%	4.85	5.88	5.93	6.17	6.33
	标准差	1.10	1.63	1.05	0.68	0.53
	变异系数	0.27	0.28	0.18	0.11	0.22
150000	平均含水量/%	4.65	5.85	5.91	6.30	6.42
	标准差	1.36	1.58	0.84	0.68	0.98
	变异系数	0.29	0.27	0.14	0.11	0.15
120000	平均含水量/%	4.54	5.27	5.86	6.40	6.30
	标准差	1.27	1.76	0.93	1.04	1.35
	变异系数	0.28	0.33	0.16	0.16	0.21
90000	平均含水量/%	4.51	5.80	5.67	6.20	6.22
	标准差	1.05	1.52	0.97	0.87	1.15
	变异系数	0.23	0.26	0.17	0.14	0.19

3.2 人工甘草不同种植密度土壤含水量的总体特征

以甘草整个生长季(5—10月)土壤含水量平均值的变化为例,研究人工甘草不同种植密度土壤含水量的总体特征。由图 1 可看出,从土壤的含水量的垂直变化来看,不同种植密度甘草地土壤含水量存在差异,在土壤表层 0—20 cm 不同种植密度土壤含水量基本上维持在 4.51%~4.74%,随着土层深度的增加,不同种植密度的土壤含水量整体上表现为先增加后降低的趋势。由此可以看出,甘草幼苗对土壤水分的影响主要在土壤 20—60 cm,且不同种植密度间的差异较大,种植密度在 210 000 株/hm<sup>2</sup> 和 180 000 株/hm<sup>2</sup> 土壤含水量明显高于其他移栽密度的含水量。

可能是随着种植密度逐渐增加,地表覆盖度增大,土壤的无效蒸发减少,导致土壤含水量增大。

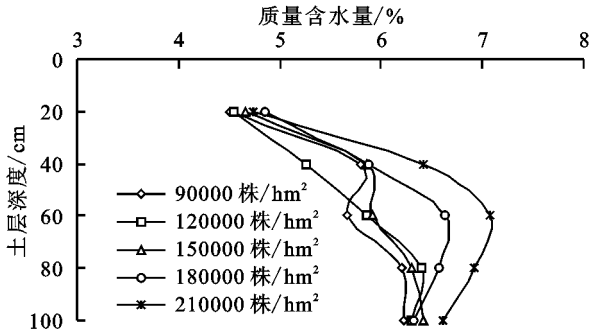


图 1 人工甘草不同种植密度土壤质量含水量的垂直分布

3.3 人工甘草不同种植密度土壤含水量垂直变化规律

根据人工甘草不同种植密度生长季初期(5月)和生长季末期(10月)土壤含水量进行研究,分析不同种植密度下土壤含水量的垂直分布变化规律。一般来讲随着土层深度的增加,土壤平均含水量的变化幅度在减少,根据王孟本等<sup>[14]</sup>的研究,由图 2 可以看出将土壤水分变化幅度大小划分为 0—20 cm 活跃层、20—80 cm 次活跃层和 80—100 cm 相对稳定层。在甘草生长初期,各处理的各土层土壤含水量在生长季始末期有明显的差异,种植密度为 90 000~12 000 株/hm<sup>2</sup> 在生长季初期,土壤水分含量 0—100 cm 基本处于一个平稳状态,但含水量比较低,主要原因是种植密度比较小,地表蒸发量大;在甘草生长末期,虽然经过 7 月、8 月、9 月的雨季,但降水不能满足其生长,需要消耗土层中储存的水分才能满足其生长,种植密度在 120 000,150 000,180 000 株/hm<sup>2</sup> 时,土壤含水量在逐渐增加,并明显高于种植密度为 90 000,210 000 株/hm<sup>2</sup> 的土壤含水量,说明种植密度小的,地表蒸发量加大,种植密度大的,叶片蒸发量加大,需要消耗土层中储存的水分,所以生长季末的土壤含水量明显低于其他种植密度的土壤含水量,因此,人工甘草不同种植密度土壤含水量从高到低依次为 180 000 株/hm<sup>2</sup>>150 000 株/hm<sup>2</sup>>120 000 株/hm<sup>2</sup>>210 000 株/hm<sup>2</sup>>90 000 株/hm<sup>2</sup>。

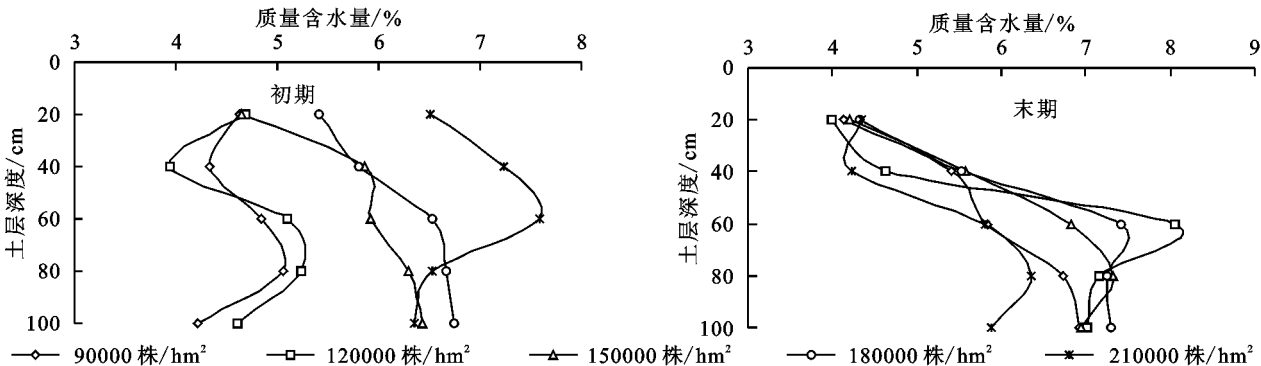


图 2 人工甘草不同种植密度初期、末期土壤质量含水量的垂直分布

3.4 人工甘草不同种植密度土壤含水量季节变化规律

不同种植密度土壤含水量具有明显的季节变化规律,土壤含水量按季节变化分为 3 个阶段,5—6 月为土壤水分弱失水阶段,6—8 月为土壤水分消耗阶段,9—10 月为水分缓慢恢复阶段。土壤水分主要受降雨量和蒸发的影响较大,而降雨量对土壤含水量是最直接的影响气象因子<sup>[15]</sup>。

由图 3 可以看出,2011 年在甘草生长季节(5—10 月)降雨量为 292.6 mm,属于平水年,各试验处理地的土壤质量含水量时空变化随着降雨量的季节变化呈现有规律的变化,且表现出一定的滞后性<sup>[16]</sup>。5 个不同种植密度,除了在 5—7 月种植密度为 90 000 株/hm<sup>2</sup> 和 120 000 株/hm<sup>2</sup> 的土壤含水量呈先上升后下降的趋势,其他种植密度则呈下降趋势,7—9 月不同种植密度的甘草均表现为土壤含水量先上升后下降的趋势。并且在 7 月份时土壤含水量均达到最低,7 月以后土壤含水量明显加速变化,这主要是因为 7—9 月份自然降雨的增加,土壤含水量在逐渐升高,甘草也进入了生长旺盛期,9 月份以后甘草生长逐渐减缓,土壤含水量也在缓慢降低,因此,从甘草的整个生长季 5—10 月份,把土壤含水量季节动态变化划分为 3 个时期:土壤水分积累期(5—6 月)、土壤水分消耗期(7—9 月)、土壤水分稳定期(10 月—次年 4 月)。

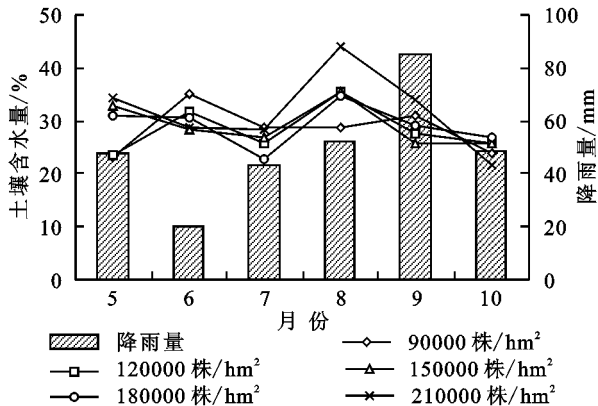


图 3 人工甘草不同种植密度末期土壤含水量季节分布

3.5 不同种植密度人工甘草单株性状及产量分析

从表 3 可以看出,从甘草考种的主要性状上分析,甘草的主根长度、横径和单株重量也是随着密度的增大呈现减小的趋势,表明适当增加栽植密度,虽然不利于个体商品性的提高,但却有利于整体产量的提高。从产量结果方差分析看,收获株数随栽植密度的增大而增大,产量也在逐渐增加,当移栽密度达到 180 000 株/hm<sup>2</sup> 时,产量达到最大 5 663 kg/hm<sup>2</sup>,显著高于密度在 150 000 株/hm<sup>2</sup> 及以下密度的产量。种植密度在 150 000,120 000,90 000 株/hm<sup>2</sup> 差异不显著,其后随着移栽密度的增加超过一定的限度,达到 210 000 株/hm<sup>2</sup> 时,产量则呈现下降趋势。根据不同种植密度以及水分特征变化的整体分析,想要高产必须要有一定的密度,但也不主张种植密度过大。宁夏中部干旱带人工种植甘草的适宜密度约为 180 000 株/hm<sup>2</sup>。

表 3 不同栽培密度下的甘草鲜草单株性状及产量方差分析

处理/ (株·hm <sup>-2</sup> )	收获株数/ (株·hm <sup>-2</sup> )	地上 株高/cm	单株 重量/g	横径/ cm	主根 长度/cm	小区产量 均值/kg	5%显著 水平	1%显著 水平	折合产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )
90000	65055	27.4	53.15	1.27	35.6	17.31	b	A	3458
120000	88335	26.5	45.93	1.26	36.1	20.30	b	A	4064
150000	116715	26.7	41.01	1.21	35.8	23.95	b	A	4787
180000	138390	25.8	40.92	1.19	35.2	28.38	a	A	5663
210000	146750	24.1	38.09	0.96	34.4	28.01	ab	A	5589

4 结论

在干旱半干旱区,土壤水分是植物生长的最大限制因素,也是影响人工种植中药材(甘草)重要方面,在一定的降雨条件下,土壤水分主要受种植密度影响比较大,随着种植密度的增加呈降低趋势,种植密度高意味着水分消耗比较大<sup>[17]</sup>。本文探讨宁夏中部干旱带沙地不同密度人工种植甘草土壤水分时空变化,就是为了获得最佳的人工甘草种植密度并获得最大的产量效益。通过以上分析表明,在旱地人工种植甘草过程中,在同一栽培方式下不同种植密度会对土壤水分产生重要的影响,并且对甘草个体发育起到关键性的作用。

(1) 甘草幼苗对土壤水分的影响主要在土壤 20—60 cm,且不同种植密度间的差异较大,种植密度在 210 000 株/hm<sup>2</sup> 和 180 000 株/hm<sup>2</sup> 土壤含水量明显高于其他移栽密度的含水量。可能是随着种植密度逐渐增加,地表覆盖度增大,土壤的无效蒸发减少,导致土壤含水量增大。

(2) 人工甘草种植密度小的,地表蒸发量加大,种植密度大的,叶片蒸发量加大,需要消耗土层中储存的水分,所以在生长季末,种植密度小的土壤含水量明显低于其他种植密度的土壤含水量,因此根据不同种植密度人工甘草地土壤垂直剖面水分变化幅度大小划分为 0—20 cm 活跃层、20—80 cm 次活跃层和 80—100 cm 相对稳定层,土壤含水量从高到低依

次为 180 000 株/hm<sup>2</sup> > 150 000 株/hm<sup>2</sup> > 120 000 株/hm<sup>2</sup> > 210 000 株/hm<sup>2</sup> > 90 000 株/hm<sup>2</sup>。

(3) 不同种植密度人工甘草的土壤含水量季节动态特征主要受降雨的季节性变化决定,变化幅度又受种植密度和降雨的影响,但在甘草整个生长季土壤水分变化趋势是基本一致的,因此根据土壤含水量季节动态变化可划分为 3 个时期:土壤水分积累期(5—6 月);土壤水分消耗期(7—9 月);土壤水分稳定期(10 月—次年 4 月)。

(4) 从甘草考种的主要性状上分析,甘草的主根长度、横径和单株重量也是随着密度的增大呈现减小的趋势,表明适当增加栽植密度,虽然不利于个体商品性的提高,但却有利于整体产量的提高。从不同种植密度、产量性状以及水分特征变化的整体分析看,种植密度在 180 000 株/hm<sup>2</sup> 左右时比较符合宁夏中部干旱带的人工甘草的种植密度,并且能获得最佳的产量效益,产量达到 5 663 kg/hm<sup>2</sup>。

在宁夏中部干旱带地区,降雨量有限,地表蒸发量大,人工种植甘草密度不宜过大,以防止耗水过大的季节(6 月中下旬和 7 月上中旬)造成甘草缺水而枯死,而造成人工甘草减产,效益下降。在生产实践中,合理的种植密度是获得高产和优良质量的必要条件。

参考文献:

[1] 蒋齐,潘占兵,张清云,等. 宁夏甘草资源的保护及可持续利用对策[J]. 资源开发与市场,2004,20(2):128-130.

[2] 蔺海明,纪瑛,邱黛玉. 灌水对沙漠绿洲区甘草生长动态和产量的影响[J]. 草业科学,2011,28(11):1992-1997.

[3] 张国荣. 强度采挖甘草资源对干旱区环境的影响[J]. 干旱区资源与环境,1993(S1):363-365.

[4] 李生秀,胡田田,高亚军. 旱地土壤的合理施肥: I. 旱地

土壤的供肥特点和施肥的迫切性[J]. 干旱地区农业研究,1993(S1):1-6.

[5] 张继,姚健,丁兰,等. 甘草的利用研究进展[J]. 草原与草坪,2000,89(2):12-14.

[6] 张玉斌,曹宁,武敏,等. 黄土高原南部水平梯田的土壤水分特征分析[J]. 中国农学通报,2005,21(8):215-220.

[7] 李明,张清云,蒋齐,等. 灌水量对宁夏中部干旱带沙地土壤水分的影响研究[J]. 水土保持研究,2006,13(6):222-227.

[8] 刘长利,王文全,魏胜利. 干旱胁迫对甘草各营养器官生物量及分配的影响[J]. 中药材,2005,28(1):7-8.

[9] 祝玲敏,安文芝,谢建军,等. 播种期对栽培甘草越冬性及根系生长特征的影响[J]. 中国沙漠,2007,27(3):469-472.

[10] 王秀英,张大惠. 不同氮肥施用量对甘草农艺性状的影响[J]. 安徽农业科学,2009,37(3):1178-1181.

[11] 孙中峰,张学培,张晓明,等. 晋西黄土区林地坡面土壤水分异质性研究[J]. 干旱地区农业研究,2004,22(2):81-86.

[12] 余新晓. 土壤动力水文学及其应用[M]. 北京:中国林业出版社,1995.

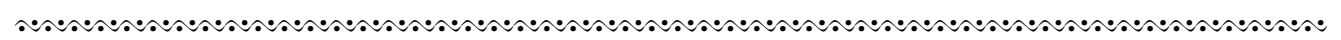
[13] 陈海宾,孙长忠,安峰,等. 黄土高原沟壑区林地坡面土壤水分特征的研究[J]. 西北林学院学报,2003,18(4):13-16.

[14] 王孟本,李洪建. 晋西北黄土区人工林土壤水分动态的定量研究[J]. 生态学报,1995,15(2):178-184.

[15] 潘颜霞,王新平. 荒漠人工植被区浅层土壤水分空间变化特征分析[J]. 中国沙漠,2007,27(2):250-256.

[16] 潘占兵,李生宝,郭永忠,等. 不同种植密度人工柠条林对土壤水分的影响[J]. 水土保持研究,2004,11(3):265-267.

[17] 舒维花,蒋齐,王占军,等. 宁夏盐池沙地不同密度人工柠条林对土壤微生物的影响[J]. 宁夏大学学报:自然科学版,2012,33(2):205-209.



(上接第 30 页)

[23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.

[24] 黄云凤,张珞平,洪华生,等. 不同土地利用对流域土壤侵蚀和氮、磷流失的影响[J]. 农业环境科学学报,2004,23(4):735-739.

[25] 牛新湘,马兴旺. 农田土壤养分淋溶的研究进展[J]. 中国农学通报,2011,27(3):451-456.

[26] 王洪杰,李宪文,史学正,等. 不同土地利用方式下土壤养分的分布及其与土壤颗粒组成关系[J]. 水土保持学报,2003,17(2):44-47.

[27] 高海鹰,黄丽江,张奇,等. 不同降雨强度对农田土壤氮素淋失的影响及 LEACHM 模型验证[J]. 农业环境科学学报,2008,27(4):1346-1352.

[28] 左海军,张奇,徐力刚. 农田氮素淋溶损失影响因素及防治对策研究[J]. 环境污染与防治,2008,30(12):83-89.

[29] 方堃,陈效民,沃飞,等. 典型水稻土中硝态氮垂直穿透状况及模拟[J]. 安全与环境学报,2007,7(5):16-20.

[30] Zhang Yulong, Wang Yaosheng. Soil enzyme activities with greenhouse subsurface irrigation[J]. Pedosphere, 2006,16(4):512-518.

[31] 常龙飞,王晓龙,李恒鹏,等. 巢湖典型低山丘陵区不同土地利用类型壤中流养分流失特征. [J]. 生态与农村环境学报,2012,28(5):511-517.

[32] 刘嘉. 磷在原状土中的淋溶规律[J]. 环境保护科学,2014,40(6):25-29.

[33] 袁玲,王容萍,黄建国. 三峡库区典型农耕地的氮素淋溶与评价[J]. 土壤学报,2010,47(4):674-683.

[34] 纪雄辉,郑圣先,卢艳红,等. 施用尿肥和控释氮肥的双季稻田表面水氮素动态及其径流损失规律[J]. 中国农业科学,2006,39(12):2521-2530.