

黄土母质生土上 4 种豆科牧草根系生长特征的研究

杜天庆¹, 苗果园^{1*}, 郝建平¹, 杨锦忠², 崔福柱¹, 薛建福¹

(1. 山西农业大学, 山西 太谷 030801; 2. 青岛农业大学, 山东 青岛 266109)

摘要:以黄土母质生土为供试土壤,采用根管土柱栽培方法,研究了苜蓿(*Medicago sativa* L.)、草木樨(*Melilotus officinalis* Desr.)、小冠花(*Coronilla buxifolia* Hance.)和红三叶(*Trifolium pratense* L.) 4 种豆科牧草根系生长规律的差异。结果表明:4 种豆科牧草根系各项指标的增长随生育期变化(时间构型)皆呈“S”型增长模型,可划分为缓增期、速增期和顶峰期,在一个生长季内,根系不存在衰老死亡生物量急剧减少的现象;4 种豆科牧草根系垂直分布存在很大差异,根系生物量空间呈“T”型分布,其垂直递减率符合指数递减方程 $Y=A \cdot e^{-bx}$;4 种豆科牧草根冠生长模式分属于 4 类:根苗增长同步型(小冠花)、根强持久增长型(草木樨)、根强持久增长型(苜蓿)和苗弱根弱增长型(红三叶草),豆科牧草根系峰值常出现在生育后期晚于冠层。本研究结果对建立黄土母质生土上牧草高产栽培技术体系以及促进根苗系统的协调生长提供了依据。

关键词:黄土母质生土;豆科牧草;根系生物量;根系分布;根冠生长模式

中图分类号:S541;Q944.54

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2012)01-0017-06

Root Growth Characteristics of Four Species Leguminous Forage in Immature Loess Subsoil

DU Tian-qing¹, MIAO Guo-yuan^{1*}, HAO Jian-ping¹, YANG Jin-zhong², CUI Fu-zhu¹, XUE Jian-fu¹

(1. Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi Province 030801, China;

2. Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong Province 266109, China)

Abstract: The root-growth rhythm of four leguminous forage species in immature loess subsoil was studied by root-tube soil column culture methods. Results indicated that the root growth index of four legume species followed an “S”-shaped growth model (classified as slow-increased period, rapid-increased period and peak period). Root biomass had no sharp decrease with root aging death during a one-year growth period. Vertical distribution of roots had significant difference for all tested legume species. The dry biomass of root showed “T”-shaped distribution model for vertical depth and root biomass followed an index mode of decreasing successive reduction ($Y=A \cdot e^{-bx}$). The root and shoot growth model of four leguminous forage species typified the following four categories: synchronous growth type of root and seeding (crown vetch), permanent growth type of seeding strength (sweet clove), persistent growth type of root strength (alfalfa), growth type of weak seed and root (red clover). The root-growth climax of legumes appeared in a subsequent growth period and later than canopy. This study supplied a theoretical basis for developing a sound technical system of high yield and promoting coordinated growth of seedling and root system of leguminous forage in immature loess subsoil.

Key words: Immature loess subsoil; Leguminous forage; Root biomass; Root distribution; Growth model of root and shoot

黄土高原沟壑区平沟造田、小流域治理过程中,不可避免地造成表土剥离、土层混乱、生土位形成典型的生土地,严重影响生产。豆科牧草作为优质的饲料植物资源同时具有强大的防风固沙和保持水

土功能,黄土母质生土上种植豆科牧草既可以增加经济效益,又可以保护生态环境。根系是地上部“叶光系统”的基础,其分化产生规律、空间构型分布及生长的基本特点在植物的生长发育过程中起着重要

收稿日期:2011-08-24;修回日期:2011-10-25

基金项目:国家青年科学基金(31101113);山西省自然基金项目(991102);山西省科技攻关项目(20100311002-9);山西农大博士启动基金资助

作者简介:杜天庆(1968-),女,山西祁县人,博士,副教授,主要从事植物土壤生态研究,E-mail:tgdtq1968@sina.com; * 通信作者 Author for correspondence, E-mail:miaoguoyuan1934@yahoo.com.cn

的作用,国内外许多专家学者对紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)根系在不同环境条件下表现出的特点以及各自根系发育特性做了大量的研究工作^[1~14],而对其他豆科牧草根系研究则较少^[15,16],尤其对同等条件下不同豆科牧草根系生长发育是否存在分异报道更少^[17]。本研究选择紫花苜蓿、草木樨(*Melilotus officinalis* Desr.)、小冠花(*Coronilla buxifolia* Hance.)和红三叶(*Trifolium pratense* L.)4种人工草地主要草种为研究对象,考虑不同植物种对土壤养分需求存异,为避免土壤养分的影响,选用土壤理化性质本底值极低、处于黄土母质状态的生土土壤为试验基质,试图在极度缺乏基本营养的相同本底条件下,探讨在同一时间同一研究方法下根系生长的数量特征差异,弥补以往单一研究的不足,以期为人工草地的可持续利用、豆科牧草高产栽培、退化天然草地的恢复以及选择生态与生产效益俱佳的豆科牧草提供决策依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试植物苜蓿、草木樨、小冠花和红三叶由山西农业大学动科院草业科学系提供。供试土壤为排除耕作土壤肥力不均的干扰,本试验用土取自地表 3 m 以下的生土,其养分含量为:全 N 0.198 g·kg⁻¹,有机质 0.403%,速效 P 4.75 mg·kg⁻¹,速效 K 35.22 mg·kg⁻¹。为保持作物正常生长,在土壤中加入肥料,肥料用量以大田施肥量折算,依据为施有机肥 2500 kg·666.7 m⁻²,尿素 15 kg·666.7 m⁻²,过磷酸钙 35 kg·666.7 m⁻²,氯化钾 7.5 kg·666.7 m⁻²,全部作基肥施入。

1.2 试验方法

本试验在山西农业大学黄土高原作物研究所内进行,研究采用根管土柱法。根管为特制硬质塑料管,直径 20 cm,管壁厚度 1 cm,截为 1 m 或 2 m 长,再垂直等分锯成两半。根管两端装有可相互连接与固定的铁环,以便将根管连接成需要的长度。取样时打开根管,人工细心将根土分离,在子叶节处将植株剪断,分为根、冠 2 部分,对根系及地上性状进行分别测定。测定项目包括根重、主根长度和粗度、侧根条数、侧根长度、冠重。

试验 1:采用 1 m 长根管进行,立于 1 m 深的土坑中。试验设 4 个处理,于 2009 年 4 月 30 日分别

播种苜蓿、草木樨、小冠花和红三叶,播种深度 1.5~2.5 cm,每个处理重复 15 次。出苗后各留苗 5 株,试验期间适时灌溉。年内分 5 次取样,每次每处理各取样 3 个重复调查根系形态学特征。

试验 2:采用 4 m 长根管进行,立于 4 m 深的土坑中。试验设 4 个处理,于 2009 年 4 月 30 日分别播种苜蓿、草木樨、小冠花和红三叶,播种深度 1.5~2.5 cm,每个处理重复 3 次。出苗后各留苗 5 株,试验期间适时灌溉。在第 2 年盛花期取样调查根系的空间分布特征。

1.3 数据处理

利用 Excel 软件进行数据整理、分析与绘图。用 SPSS 数据分析软件进行系统分析。

2 结果与分析

2.1 年内 4 种豆科牧草根系生长的时间分布

4 种豆科牧草根系构建的共同特点是都经历了 3 个连续的时空过程,即:苗期弱势生长过程(以根条数、根长生长为主,生长目标是扩大根群对根土空间的占领)、盛期强势生长过程(以主根增粗、侧根增长为主,强化主根群的吸收能力,更加严密地扩存根土空间)和后期根系干物质积累运输贮藏过程(表 1)。

综合年内各项根系生长指标可知,4 种豆科牧草之间存在明显的差异。紫花苜蓿主根生长的动态过程表现为,在播种后 65 d(盛花期)以前,主根入土的速度较为平稳,日增长速度为 0.42~0.49 cm·d⁻¹·株⁻¹;从盛花期到结荚期(播种后 65~86 d),日增长速度为 1.02 cm·d⁻¹·株⁻¹;结荚期到成熟期(播种后 86~119 d)主根生长速度缓慢。播种后 20~43 d,紫花苜蓿处于分枝期到始花期,根条发生的速度为 3.86 条·d⁻¹·株⁻¹,此期结束时,侧根发生条数占到侧根总数的 80.68%;从始花期到盛花期,发生的侧根数仅占总侧根数的 15%;盛花期之后,侧根发生很少。主根粗度的变化规律与根条数的发生规律基本一致,不同之处在于从始花期之后到结荚之前,增粗的过程比较平稳。根系干重积累的过程表现为始花前速率最慢,始花期到盛花期急剧上升,盛花期之后积累速率有所减慢。

播种后 65 d 以前为草木樨苗期,地上部分生长缓慢,主要在进行根系的生长,其中 43~65 d,主根入土的速度、根条的发育、侧根横向扩展以及根系干

重的积累速度最快;播种后 65~106 d,草木樨茎叶进入繁茂生长阶段,同时根系也在进行着加粗和分化根瘤的过程,此期根系的生长有所减慢,表现在各项日增长速度的下降;播种后 106~133 d,进入根部生长的第 2 次高峰期,根部膨大加快,此期结束时,主根粗壮强大,侧根较为发达,为草木樨正常越冬贮藏累积了足够的营养物质。与其他 3 种豆科牧草相比,草木樨属于超强根系生长类型,年内最大根条数达 282 条,最大日增长量达 4.08 条,主根长达 86.62 cm,年内最大主根粗达 0.819 cm,年内最

大根干重达 6.1233 g·株⁻¹。所有这些指标都十分明显的大于其他 3 种豆科牧草。

弱势根系小冠花苗期生长缓慢,播后 20 d 左右,主根入土深度只有 10.37 cm,且侧根生长也缓慢,但播后 43 d 以后根系的生长发育明显加快,根条数、主根长、主根粗以及根系干物质都明显较红三叶草长势强。红三叶是 4 种豆科牧草根系生长最弱的草本植物,由于三叶草属于株型性木质化程度低的牧草,幼苗地上部茎叶弱小,群体光合产物制造能力低,因此年内根系生长始终处于弱势状态。

表 1 年内 4 种豆科牧草不同生育时期根系形态学特征

Table 1 Root morphological characters of four leguminous forage at different growing stage in the first year

	播后天数 Days after sowing/d	根条数 Root No.	日增长 Increment No./day	主根长 Main root length/cm	日增长 Increment No./day	主根粗 Main root thickness/cm	日增长 Increment No./day	最长侧根 Longest lateral root/cm	日增长 Increment No./day	根干重 Root dry weight/g	日增长 Increment No./day
苜蓿 Alfalfa	20	29.23±1.33		15.37±1.58		0.157±0.029		15.77±3.73		0.0050±0.0004	
	43	117.93±2.52	3.86	26.58±2.18	0.49	0.377±0.022	0.0096	17.68±3.05	0.08	0.0276±0.0082	0.0001
	65	139.86±13.00	1.00	35.72±5.69	0.42	0.502±0.022	0.0057	21.82±3.68	0.19	1.6389±0.4863	0.0732
	86	143.75±7.11	0.19	57.10±6.10	1.02	0.624±0.142	0.0058	27.63±3.06	0.28	2.6457±0.4013	0.0479
	119	146.17±9.46	0.07	61.40±1.62	0.13	0.629±0.047	0.0002	29.85±6.76	0.07	3.7975±0.3293	0.0349
草木樨 Sweet clover	20	4.67±2.67		13.43±1.11		0.199±0.005				0.0272±0.0107	
	43	37.00±0.58	1.41	28.13±2.03	0.64	0.542±0.022	0.0149	10.77±1.12		1.4197±0.3791	0.0605
	65	124.33±14.84	3.97	53.80±5.97	1.17	0.606±0.028	0.0029	17.43±6.13	0.30	3.7946±0.5159	0.1080
	106	171.83±26.82	1.16	66.77±4.68	0.32	0.735±0.031	0.0031	23.25±4.10	0.14	4.0702±0.4908	0.0067
	133	282.00±14.46	4.08	86.62±1.98	0.74	0.819±0.074	0.0031	30.00±7.37	0.25	6.1233±0.0904	0.0760
小冠花 Crown vetch	20	1.00±0.00		10.37±2.30		0.122±0.011				0.0045±0.0018	
	43	4.00±0.57	0.13	13.23±4.19	0.12	0.155±0.006	0.0014			0.0104±0.0004	0.0003
	65	13.50±9.50	0.43	21.87±1.27	0.39	0.238±0.031	0.0038			0.0765±0.0297	0.0030
	86	15.00±1.53	0.07	25.60±7.26	0.17	0.458±0.012	0.0100			0.1364±0.0516	0.0027
	119	20.00±2.08	0.15	29.60±2.19	0.12	0.497±0.070	0.0012			0.2477±0.1219	0.0034
红三叶 Red clover	20	4.33±0.33		8.85±0.66		0.105±0.045		7.60±0.58		0.0024±0.0004	
	43	29.00±1.15	1.07	17.43±0.33	0.37	0.187±0.004	0.0036	18.50±0.87	0.47	0.0153±0.0035	0.0006
	65	42.00±0.87	0.59	25.55±1.74	0.37	0.305±0.004	0.0054	25.98±3.14	0.34	0.3198±0.0546	0.0138
	86	137.25±12.00	4.33	30.76±2.45	0.24	0.410±0.024	0.0048	32.68±8.05	0.30	0.7711±0.1289	0.0205
	119	147.00±5.93	0.30	33.90±3.56	0.10	0.434±0.048	0.0008	35.50±1.44	0.09	0.8459±0.2486	0.0023

2.2 第 2 年盛花期 4 种豆科牧草根系生物量的空间分布

4 种豆科牧草于第 2 年 5 月下旬都进入盛花期,此时苜蓿根系入土深度超过 300 cm,草木樨接近 240 cm,小冠花和红三叶都在 100 cm 左右;总根重排序为草木樨>苜蓿>小冠花>红三叶;根/冠比排序为苜蓿>小冠花>草木樨>红三叶,根/冠比是根系与地上部干物质积累关系的具体反映,苜蓿和小冠花的根冠比较大,表明其根系更为发达。比较 4 种豆科牧草根重的层次分布,随着土层的加深,根量呈指数递减趋势,但减少的幅度不同(图 1)。4 种供试牧草的 *b* 值大小顺序为红三叶>草木樨>苜蓿>小冠花,说明红三叶根重随入土深度增加而下降

的幅度最大,而小冠花根系随土壤深度增加而递减的幅度最小,在土层 60 cm 以下,小冠花仍有 30.31% 的根系,而红三叶仅有 16.08% 的根系,小冠花下层根系比红三叶更为发达;草木樨根量随土壤深度增加而递减的幅度比苜蓿大,而且入土深度比苜蓿浅 60 cm 左右,说明豆科牧草进入第 2 年旺盛生长阶段根系生长强弱将会发生排序变化。4 种牧草中苜蓿根最深、重量仅低于草木樨且垂直递减十分缓慢,表明深层根量比重很大。

2.3 豆科牧草根苗生长的关系

由图 2 可知,4 种豆科牧草根苗生长的规律存在显著差异。草木樨苗期(播种后 65 d 以前)根系

表 2 第 2 年盛花期根系生物量的垂直分布
Table 2 Vertical distribution of root weight at full-bloom stage in the second year

土层深度 Soil depth	苜蓿 Alfalfa		草木樨 Sweet clove		小冠花 Crown vetch		红三叶 Red clover	
	根重 Root weight/g	所占比例 Ratio/%	根重 Root weight/g	所占比例 Ratio/%	根重 Root weight/g	所占比例 Ratio/%	根重 Root weight/g	所占比例 Ratio/%
0~20 cm	25.6930 ^{aA}	32.41	79.9560 ^{aA}	43.62	10.5093 ^{aA}	26.39	8.7332 ^{aA}	54.34
20~40 cm	10.1670 ^{bB}	12.83	27.3545 ^{bB}	14.92	9.2018 ^{bAB}	23.11	2.9531 ^{bB}	18.37
40~60 cm	7.4879 ^{cC}	9.45	15.7763 ^{cC}	8.61	8.0444 ^{cBC}	20.20	1.8010 ^{cC}	11.21
60~80 cm	5.7578 ^{dD}	7.26	11.1700 ^{dD}	6.09	7.4167 ^{cC}	18.62	1.2240 ^{dCD}	7.62
80~100 cm	4.6621 ^{deDE}	5.88	9.7664 ^{deDE}	5.33	4.6523 ^{dD}	11.69	1.0813 ^{dD}	6.73
100~120 cm	4.5492 ^{deDE}	5.74	8.4702 ^{deDE}	4.62			0.2788 ^{eE}	1.73
120~140 cm	4.2792 ^{eDEF}	5.40	7.9159 ^{efDE}	4.32				
140~160 cm	3.4289 ^{efEFG}	4.33	7.1878 ^{efE}	3.92				
160~180 cm	2.6450 ^{fgFGH}	3.34	6.8260 ^{efE}	3.72				
180~200 cm	2.2489 ^{ghGHI}	2.84	5.8505 ^{fEF}	3.19				
200~220 cm	1.9875 ^{ghGHI}	2.51	2.8202 ^{gFG}	1.54				
220~240 cm	1.7897 ^{ghGHI}	2.26	0.2084 ^{gG}	0.11				
240~260 cm	1.5992 ^{ghGHI}	2.02						
260~280 cm	1.5783 ^{ghGHI}	1.99						
280~300 cm	1.1081 ^{hiHI}	1.40						
>300 cm	0.2820 ^{il}	0.36						
总根重 Total root weight/g	79.2630		183.3022		39.8245		16.0714	
冠重 Shoot weight/g	31.9700		347.8800		34.8806		47.7000	
根/冠 Root/Shoot	2.4793		0.5269		1.1417		0.3369	

注:同列不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$),不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

Note: Different capital letters in the same column indicate significant difference at the 0.01 level, different small letters in the same column indicate significant difference at the 0.05 level

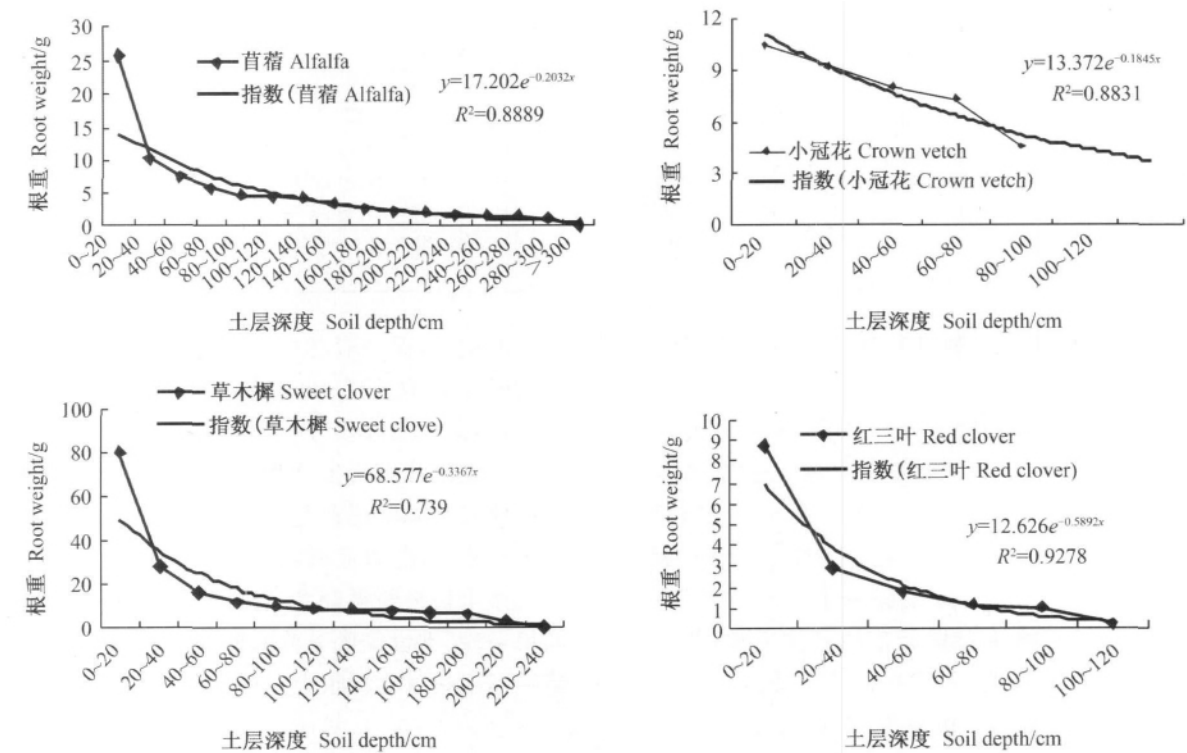


图 1 第 2 年盛花期根重的层次分布

Fig. 1 Distribution of root weight in different soil depth at full-bloom stage in the second year

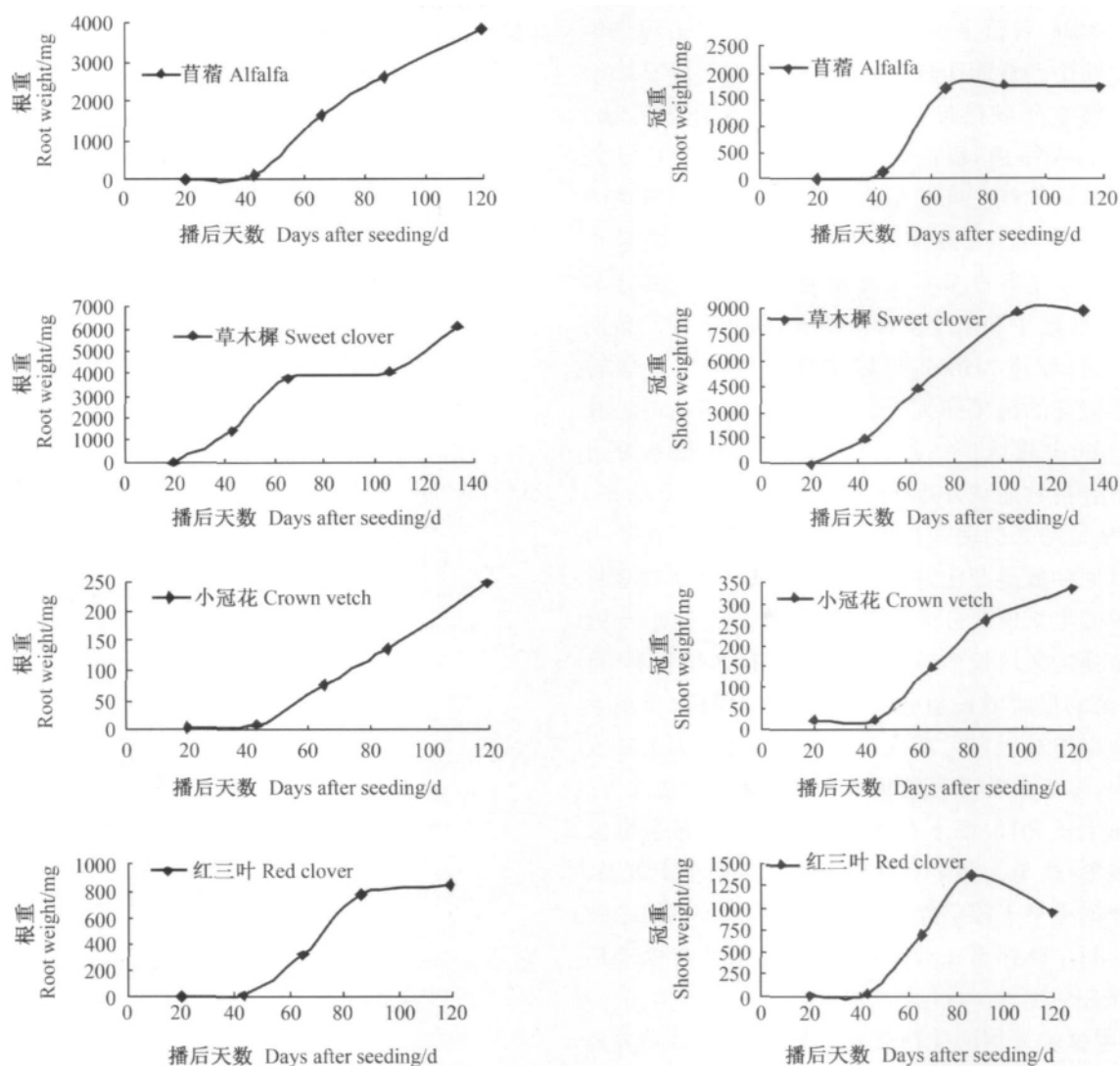


图2 豆科牧草生长规律

Fig. 2 Growth rhythm of leguminous forage

的生长较快,而地上部生长比较缓慢;之后 40 d 左右的时间里,可能与光照强烈有关,草木樨茎叶繁茂生长,致使冠部重量显著增加,而根部增长幅度很小;到 9 月中旬以后,草木樨根部膨大加快,越冬芽也快速发育,所以根系重量达到第 2 次增长高峰,但此期由于冠部大量叶片开始死亡,所以生长速度明显减慢。与草木樨相比,苜蓿生长最大的区别在于播种后 65 d 以后的时间里,根系重量依然在显著增加,而冠部重量出现了比较平稳的衰退。小冠花在播种后 43 d 以前,冠部的生长比根部稍快,但在 43 d 以后,根部重量近似直线上升,而冠部生长更符合“S”型模型。红三叶在地上部达到最大值后出现了较大的衰退。

3 讨论与结论

3.1 增进和维持地力是永续利用土地进行作物生产的根本。我国黄土高原传统农业的可贵与精辟之处就是将豆科牧草引入种植系统借助残留在土壤中的豆科根茬及根瘤维持土壤的氮素营养。本试验结果表明黄土母质生土上种植 4 种豆科牧草,根系生长具有年内和年际之间的时空效应,即年内和年际都存在“S”型生长高峰期,利用这种特性可以选择适宜的豆科作物进行合理轮作培肥来年地力或在生长盛期进行翻耕压青达到当年提高地力的目的。

3.2 豆科多年生牧草株型大小不同,根群强弱不

同。草木樨、苜蓿主根入土深且较为粗壮,播种当年的红三叶生产性能比较低,这与赵娜等^[18]研究结论一致。第2年盛花期4种豆科牧草根深分布在100~300 cm范围内,根重在16.0714~183.3022 g之间。小冠花和红三叶草根系分布较浅,但小冠花的根冠比是同期红三叶草的3.3888倍,这可能与小冠花侧根上生有许多不定芽根有关,由于其茎节密集、贴地蔓生和落地生根的特点,因而虽在幼苗期生长细弱,但进入第2年盛花期根群很快由弱转强。小冠花的抗旱性大于红三叶草,该结论与王礼男等^[19]的研究结论一致。4种豆科牧草根系垂直分布符合指数递减方程 $Y=A \cdot e^{-bx}$ 。

3.3 根冠增长的曲线反映了4种豆科牧草在年内不同时期的数量变化特征。本研究供试的4种豆科牧草根冠生长模式分为4类:根苗增长同步型(小冠花)、苗强持久增长型(草木樨)、根强持久增长型(苜蓿)和苗弱根弱增长型(红三叶草)。豆科牧草根系峰值常出现在生育后期晚于冠层,表明在1个年度生长内,多年生牧草尽管地上部为了越冬(在北方)而停止生长,但根系不存在衰老死亡生物量急剧减少的现象,这与1年生豆科根系的速生期早于冠层、因而峰值也早于冠层存在极显著差异^[20],该根系特点更有利于储存累积营养物质,加速第2年返青后地上部分的生长。

3.4 本试验采用的4种豆科牧草,由于所含营养成分的不同,茎叶木质化时期的不同,做为饲料可口性的不同,以及生长年限与衰老期的不同,因而种植的经济目的也不同。草木樨地上部生物量大,属于苗强持久型,可适期收获做为青贮饲料,草木樨深达240 cm的主根和发达的侧根使得根系比其他牧草大许多倍,能深入土壤深层积聚大量的有机物,增加茎叶体的生物量,是牧草高效益的重要体现。苜蓿是最优质的茎叶饲料,可分期收获做为绿色饲料;苜蓿根系入土深钻孔性强,含氮素高,适时收获后改种禾谷类作物可以连续数年获得丰收;苜蓿强大的根系优势特点使苜蓿在土壤干旱条件下,有利于充分利用土壤深层水,也为其高产提供了重要的生理保障,所以在干旱人工草地上苜蓿可以作为首选的最佳草种进行种植。小冠花进入第2年盛花期后,根系及茎叶生物量大可做为割收翻压的绿肥作物。红三叶进入生长盛期株体鲜嫩可做为精饲料。

参考文献

- [1] Luo Y, Meyerhoff P A, Loomis R S. Seasonal patterns and vertical distributions of fine roots of alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. Field Crops Research, 1995, 40: 119-127
- [2] 马其东, 高振声, 洪绶曾, 等. 黄河三角洲地区苜蓿生态适应性研究[J]. 草地学报, 1999, 7(1): 28-38
- [3] 孙启忠, 韩建国, 桂荣, 等. 科尔沁沙地苜蓿根系和根颈特性[J]. 草地学报, 2001, 9(4): 269-276
- [4] 白文明, 左强, 黄元仿, 等. 乌兰布和沙区紫花苜蓿根系生长及吸水规律的研究[J]. 植物生态学报, 2001, 25(1): 35-41
- [5] 郭正刚, 张自和, 肖金玉, 等. 黄土高原丘陵沟壑区紫花苜蓿品种间根系发育能力的初步研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(8): 1007-1012
- [6] 郭正刚, 王锁民, 张自和. 紫花苜蓿品种间根系发育过程分析[J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(4): 367-371
- [7] 万素梅, 胡守林, 黄勤慧, 等. 不同紫花苜蓿品种根系发育能力的研究[J]. 西北植物学报, 2004, 24(11): 2048-2052
- [8] Kavdir Y, Rasse D P, Smucker A J M. Specific contributions of decaying alfalfa roots to nitrate leaching in a Kalamazoo loam soil [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2005, 109: 97-106
- [9] 孙洪仁, 武瑞鑫, 李品红, 等. 紫花苜蓿根系入土深度[J]. 草地学报, 2008, 16(3): 307-312
- [10] 王月胜, 于林清, 张利军. 播种当年苜蓿根系研究初报(简报) [J]. 草地学报, 2008, 16(3): 313-315
- [11] 成向荣, 黄明斌, 邵明安, 等. 紫花苜蓿和短花针茅根系分布与土壤水分研究[J]. 草地学报, 2008, 16(2): 170-175
- [12] 刘慧霞, 郭正刚, 周雪荣, 等. 硅对紫花苜蓿根系生长的影响[J]. 中国草地学报, 2009, 31(1): 28-31
- [13] Xu L J, Wang B, Yu Z, et al. Root health evaluation of three alfalfa varieties in Kerqin sandy land [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29: 166-170
- [14] 李文晓, 张岁岐, 圣彦, 等. 干旱胁迫下紫花苜蓿根系形态变化及与水分利用的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(19): 5140-5150
- [15] 张秀玲. 草木樨生长发育特性研究[J]. 黑龙江生态工程职业学院学报, 2007, 20(3): 10-18
- [16] Zheng S J, Tang C X, Arakawa Y, et al. The responses of red clover (*Trifolium pratense* L.) to iron deficiency: a root Fe (III) chelate reductase [J]. Plant Science, 2003, 164: 679-687
- [17] 李会科, 郑秋玲, 赵政阳, 等. 黄土高原果园种植牧草根系特征的研究[J]. 草业学报, 2008, 17(2): 92-96
- [18] 赵娜, 赵桂琴, 胡凯军, 等. 不同生长年限红三叶生产性能与营养价值比较[J]. 草地学报, 2011, 19(3): 468-472
- [19] 王礼男, 周广柱, 马振文, 等. 沈阳浑河段硬质护岸生态复绿中的4种植物抗旱性比较[J]. 沈阳农业大学学报, 2010, 41(2): 218-220
- [20] 王继峰, 胡庆学, 陈广义. 大豆根系研究现状与展望[J]. 内蒙古农业科技, 2011(3): 113-114

(责任编辑 刘云霞)