

退化草地土壤上不同豆科作物根系生长特征的研究

郭秀卿 杜天庆* 郝建平 崔福柱 杨珍平

(山西农业大学 农学院,山西 太谷 030801)

摘要 以退化草地土壤为供试基质,采用盆栽和网箱栽培方法,研究大豆、黑大豆、绿豆、豌豆和蚕豆根系生长特征。结果表明:不同豆科作物根系各项指标的增长随生育期变化的时间趋势基本呈“S”型增长模型,可划分为缓增期、速增期、顶峰期和衰减期4个时期;不同豆科作物根系垂直分布的深浅存在较大差异,根系生物量空间呈“T”型分布,其垂直递减率符合幂曲线模型 $Y=B_0 \cdot X^{B_1}$ 。综合试验结果,黑大豆、蚕豆和大豆比绿豆和豌豆更适合在该试验条件下种植,其中黑大豆和蚕豆可以作为该类型土壤首选作物。本研究结果为选择适宜的豆科作物进行合理种植达到改良退化草地土壤、提高退化草地生物量产出提供了依据。

关键词 退化草地土壤;豆科作物;根系分布;根冠生长模式

中图分类号 S 52

文章编号 1007-4333(2016)08-0043-09

文献标志码 A

Root growth characteristics of different leguminous crop in degraded grassland soil

GUO Xiu-qing, DU Tian-qing*, HAO Jian-ping, CUI Fu-zhu, YANG Zhen-ping

(College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract The root-growth rhythm of different leguminous crops including soybean, black soybean, mung bean, pea, and broad bean in degraded grassland soil was studied by pot culture and rebar chain link mesh box cultivation methods. The results showed that: The root growth index of different leguminous crop followed an “S”-shaped growth model which classified as slow-increased period, rapid-increased period, peak period and decline period; Vertical distribution of roots had significant difference for all tested leguminous crops and the biomass of root system showed “T” shaped distribution model for vertical depth and root biomass followed the power curve model of decreasing successive reduction ($Y = B_0 \cdot X^{B_1}$). According to the result of the study, it was found that black soybean, broad bean and soybean were more suitable for planting in the experimental conditions than mung bean and pea, among them, the black soybean and broad bean were preferred crops for this type of soil. This study provided a theoretical basis for the selection of suitable legume crops to improve the degraded grassland soil and increase the output of degraded grassland biomass.

Keywords degraded grassland soil; leguminous crop; root distribution; growth pattern of root and shoot

草地土壤退化即土壤的物理、化学性质包括土壤的动物与微生物等特征发生不利于植被生长的变化^[1]。许多专家学者在退化的草地土壤上采用草粮轮作模式对退化草地水分恢复、草地土壤理化性状、生物性状以及土壤酶活性等动态指标进行了研究,认为合理的草粮轮作方式是提高作物产量和改良退

化草地土壤性状的一项重要的农业措施^[2-6]。豆科作物是兼具粮食、油料、饲料以及良好轮作养地与生态重建和保护的作物。它的根瘤固氮作用可以丰富土壤的氮素循环;通过根系的穿插、挤压所产生的机械作用,可显著地改善土壤物理性质;在根系腐解过程中所产生的化学作用,可补充和丰富土壤的碳、氮

收稿日期: 2015-11-25

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503121-07); 山西省自然科学基金项目(2014011031-1)

第一作者: 郭秀卿, 实验师, 主要从事作物栽培与土壤耕作研究, E-mail: cuifuz@sina.com

通讯作者: 杜天庆, 教授, 主要从事作物土壤生态研究, E-mail: tgdtq1968@sina.com

及其它各种养分;庞大的根系对土壤各个层次的营养物质具有转移和富积作用^[7]。因此,在退化草地土壤上种植豆科作物对增加草原经济效益和保护生态有着重要的意义。根系是作物地上部光合生产系统的基础,由于生长在土壤里,不易直接观测。近年来,随着根系研究手段的改进和一些现代化手段的应用^[8-13],对作物根系的研究有了很大进展。很多学者对豆科作物的根系在不同环境条件下表现出的特点(根系发育特性)进行了大量的研究,尤以对大豆形态学方面的研究较为细致,已明确了其生长发育的基本模式,分析了地上部性状、根系性状与外部环境的关系,从进化角度对根系性状进行了一些探讨^[14-17],而对其它豆科作物根系研究报道较为少见。因此,本研究以不同豆科作物为试验对象,比较分析在同等退化草地土壤条件下,其根系发育的时空分布差异以及根冠生长模式,旨在为选用合理的草粮轮作方式改良退化草地土壤、提高退化草地生物量产出提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试大豆品种为“晋大 53 号”,由山西农业大学农学院大豆研究室提供;供试绿豆品种为“晋绿豆 2 号”,由山西农业大学农学院绿豆研究室提供;供试黑大豆采用“同黑 325168”品种,豌豆采用“山西晋农豌豆”种子,蚕豆采用农家品种,这 3 个品种由山西省大同县种子公司提供。以上品种均适宜山西中北部春播。

本试验用土取自山西省朔州市右玉县典型的退化草地土壤,草地主要的植物类型是碱茅(*Puccinellia tenuiflora*)和披碱草(*Elymus dahuricus*)。该草地土壤呈砂质壤土,属于黄土高原典型盐碱地地貌。土壤 pH 平均为 8.94,碱化度平均超过 20%;呈微碱程度以上;土壤可溶性盐分含量呈盐渍土壤特性;土壤全氮及有机质含量分别为 0.049 8%和 0.676%,二者均比较缺乏。为了维持作物正常生长,在土壤中加入肥料,肥料用量以大田施肥量折算,施有机肥 37 500 kg/hm²,尿素 225 kg/hm²,全部作基肥施入^[18]。

1.2 试验方法

采用盆栽和网箱栽培 2 种方式,均在山西农业大学进行。

盆栽试验:设 5 个处理,于 2013 年 4 月 30 日分

别播种大豆、黑大豆、绿豆、豌豆和蚕豆,播种深度 3~5 cm。出苗后各留苗 5 株,试验期间适时灌溉。大豆、黑大豆和绿豆处理各重复 15 次,全生育期分 5 次取样;豌豆、蚕豆处理各重复 12 次,全生育期分 4 次取样。取样时每处理每次取 3 盆作为 3 次重复,将土坨轻轻倒在尼龙网筛上,然后用流水慢慢冲洗。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。测定指标包括植株主根长度、主根粗度、侧根根条数、最长侧根、根系及冠部重量等农艺性状。

网箱栽培:用 5 mm 钢筋制成 50 cm×50 cm×100 cm 的框架,并在框架中间用铁丝纵横按 10 cm×10 cm 分隔成垂直的 10 个层次;将网箱安放在试验田中 1 m 深的土坑内,网箱内装入供试土壤,网箱灌水保持土壤湿度为 15%~20%。试验设 5 个处理,于 2013 年 4 月 30 日分别播种大豆、黑大豆、绿豆、豌豆和蚕豆,播种深度 3~5 cm,重复 3 次,出苗后每个网箱留苗 5 株,在盛花期取样调查作物根系的空间构型。取样时从土壤中取出网箱,然后用自来水由上往下逐层轻轻淋洗,直至土壤被完全冲洗干净,露出架在网箱上的完整根系,然后调查分布在不同方位网格中的根量。

1.3 数据处理

利用 Microsoft office 软件进行数据整理,并使用 Sigmaplot 12.0 进行制图;用 SPSS 13.0 统计应用分析软件进行系统分析,结果用平均值与标准差来表示。

2 结果与分析

2.1 不同豆科作物根系生长的时间分布

表 1 为盆栽试验不同生育时期取样调查根系形态特征数据,大豆、黑大豆、绿豆取样 5 次,豌豆和蚕豆取样 4 次。表 1 数据表明,随着生育进程的推进,大豆根系逐渐下扎,根条数、主根长、主根粗、侧根横向扩展的范围以及根干重均在不断增加,且在播种后 69 d(结荚期)达到最大值,之后除主根粗度继续增大外,其他各项指标以不同的速率呈现负增长的趋势。大豆根系在苗期主根生长发育较快,主根长日增长量为 0.52 cm/(株·d),主根粗度日增长量为 2 μm/(株·d),主根上分生出一级侧根的速度为 1.68 条/(株·d);在花芽分化期,侧根生长旺盛,向四周水平伸展的速度为 1.17 cm/(株·d),且由于这些侧根在扩展过程中再分生出 2、3 级支根,所以

表 1 不同生育时期根系形态学特征

Table 1 Root morphological characters at different growing stage

作物 Crop	根 Root			主根/cm Tap root		主根粗 Tap root diameter		最长侧根/cm Longest branch root			根干重/mg Root dry weight	
	根条数 No.	日增长 Daily increment	长 Length	日增长 Daily increment	粗/cm Diameter	日增长/ μm Daily increment	长 Length	日增长 Daily increment	重 Weight	日增长 Daily increment	重 Weight	日增长 Daily increment
大豆 Soybean	24	48.33±9.60	13.10±0.31	0.308±0.032	8.07±0.64	2	17.10±1.37	0.39	86.47±15.05	0.39	408.33±4.07	13.99
	47	87.00±11.59	1.68	24.97±2.58	0.52	0.312±0.022	2	17.10±1.37	0.39	408.33±4.07	13.99	13.99
	69	107.50±2.02 cC	0.93	35.90±3.07 bD	0.50	0.315±0.012	1	29.98±1.41 B	0.59	1 278.±19.37 bB	0.59	39.56
	90	102.50±15.05	-0.23	26.51±4.07	-0.45	0.431±0.017	55	28.17±1.38	-0.09	1 168.±22.01	-0.09	-5.26
	123	68.88±9.66	-1.02	16.70±1.44	-0.30	0.433±0.020 cC	1	22.39±3.31	-0.18	1 136.3±9.75	-0.18	-0.97
黑大豆 Black soybean	24	43.00±1.73	11.17±1.32	0.328±0.007	7.22±1.18	0	14.84±1.48	0.33	75.53±8.17	0.33	295.56±16.42	9.57
	47	70.50±16.50	1.20	34.60±4.14	1.02	0.329±0.033	0	14.84±1.48	0.33	295.56±16.42	0.33	9.57
	69	143.50±3.75 bB	3.32	56.85±8.17 aA	1.01	0.371±0.041	19	34.43±0.05	0.89	1 007.5±11.10	0.89	32.36
	90	106.00±8.72	-1.79	54.83±3.44	-0.10	0.413±0.021	20	44.35±1.38 A	0.47	1 196.5±8.96	0.47	9.00
	123	88.88±10.93	-0.52	24.31±2.58	-0.92	0.707±0.167 aA	89	37.45±1.33	-0.21	1 377.43±9.88 bB	-0.21	5.48
绿豆 Mung bean	36	14.33±0.33	5.13±0.26	0.201±0.010	2.27±1.02	16	9.40±1.50	0.31	14.63±0.76	0.31	140.00±7.63	5.45
	59	41.67±7.22	1.19	19.37±3.10	0.62	0.237±0.001	16	9.40±1.50	0.31	140.00±7.63	0.31	5.45
	81	70.67±6.74	1.32	21.21±1.24 cC	0.08	0.343±0.014	48	16.55±6.73 D	0.33	920.00±12.11	0.33	35.46
	102	62.33±8.74 dD	-0.40	20.30±0.96	-0.04	0.348±0.010	3	16.24±1.66	-0.01	1 206.11±24.37 bB	-0.01	13.62
	135	61.71±5.70	-0.02	21.17±1.13	0.03	0.392±0.038 cC	13	7.14±2.19	-0.28	435.77±8.54	-0.28	-23.34
豌豆 Pea	25	11.70±1.46	9.33±0.78	0.144±0.013	1.56±0.06	21	3.90±0.45	0.21	32.22±0.44	0.21	57.20±3.24	2.27
	36	19.00±2.08	0.66	14.07±1.21	0.43	0.167±0.011	21	3.90±0.45	0.21	57.20±3.24	0.21	2.27
	48	43.33±0.88 dD	2.03	19.40±1.40 cC	0.44	0.201±0.037	29	7.67±1.65 E	0.31	263.33±4.65 cC	0.31	17.18
	85	21.70±3.53	-0.60	17.62±1.03	-0.05	0.202±0.472 dD	0	6.06±0.63	-0.04	247.50±3.78	-0.04	-0.43
	20	40.33±11.57	12.80±1.38	12.80±1.38	0.530±0.047	8.95±1.25	14	12.97±0.87	0.17	432.61±6.73	0.17	17.22
蚕豆 Broad bean	43	106.33±10.04	2.87	17.67±2.09	0.21	0.562±0.154	14	12.97±0.87	0.17	828.57±10.14	0.17	17.22
	65	186.00±45.61 aA	3.62	31.85±3.55	0.65	0.584±0.016	10	23.85±5.57 C	0.49	2 755.00±21.12 aA	0.49	87.57
	86	182.31±43.58	-0.20	31.88±4.32 bB	0.00	0.585±0.002 bB	1	23.31±4.25	-0.03	2 248.75±18.15	-0.03	-24.11

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 within 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.

此期结束时,根系干重达到最高值;结荚期到鼓粒成熟期,植株生长中心转移到生殖器官,所以根系的生长呈现出下降的趋势。

黑大豆根系随着生育时期的推后,主根入土深度和一级侧根数量不断增加,且在播种后 69 d 达到最大值,这与大豆是一致的;主根粗度的变化动态也与大豆相似,但黑大豆主根增粗的高峰期在鼓粒~成熟期,而大豆在开花结荚~鼓粒期,且黑大豆增粗的速度为 $89 \mu\text{m}/(\text{株} \cdot \text{d})$,高于大豆的 $55 \mu\text{m}/(\text{株} \cdot \text{d})$;侧根横向扩展的范围,黑大豆在鼓粒期(播种后 90 d)达到最大值,此时期比大豆滞后;黑大豆根干重直到成熟时都没有出现负增长的现象,这与大豆根干重变化动态有所不同。进一步比较大豆与黑大豆根系构型,发现除根系最大干重外,黑大豆各项根系指标所能达到的最大值都极显著高于大豆。在发育后期,黑大豆根系衰老进程较慢,从而使得根系的功能期延长,这对黑大豆籽粒的饱满度是极为重要的。

绿豆与大豆、黑大豆相比,其主根入土较浅、粗度较细,侧根入土深度也极显著浅于大豆与黑大豆。绿豆根系生长的时间分布规律与大豆、黑大豆基本一致,根条数、主根长、侧根横向扩展的范围在播种后 81 d(开花结荚期)达到最大值;不同之处在于绿豆生长进程较慢,开花结荚期要比大豆、黑大豆晚 12 d 左右;另绿豆根干重达到最大值的时间比大豆滞后,又不同于黑大豆的没有负增长,这可能与绿豆成熟期不一致有关,在绿豆后期进入完全成熟的过程中,根系衰减速度很快,为 $23.34 \text{ mg}/(\text{株} \cdot \text{d})$ 。对根系指标日增长速率分析,除主根长度外,其它指标发展动态均符合慢—快—慢的规律,与“S”型生长过程相吻合。

豌豆与大豆、黑大豆、绿豆不同,属于低温长日照作物,生长周期短,只有三个月左右时间。豌豆主根比较发达且发育较早,但侧根稀疏,一般根群大都分布在 0~20 cm 的土层中。豌豆根系生长的时间分布遵循“S”型曲线,从分枝期(播种后 25 d)~始花期(播种后 36 d),根系生长比较缓慢,各项指标的日增长速度均小于始花期~盛花期(播种后 48 d),在盛花期达到峰值之后,根系出现了缓慢的衰退。

蚕豆与豌豆均为低温长日照作物,生长周期短。在整个生育期内,蚕豆根系生长的时间特征与豌豆有所不同,随着生育进程的推进,蚕豆根系生长峰值的出现晚于豌豆,在播种后 65 d 蚕豆处于鼓粒阶

段,根条数、主根长、主根粗、侧根长以及根干重均达到一生最高值。在蚕豆整个生育过程中,根系重量达到的峰值极显著高于其它作物,主根粗度仅次于黑大豆,主根入土的深度和侧根扩展的范围均极显著高于绿豆和豌豆。在鼓粒~成熟阶段,蚕豆根系各项指标衰减速度缓慢,维持了较长的功能期,较充分地利用了土壤养分和水分。

2.2 开花结荚期根系的空间分布

表 2 为网箱栽培豆科作物开花结荚期不同土层根系鲜重及不同土层根系鲜重占根系总鲜重百分比数据。从表 2 可看出:大豆、黑大豆、绿豆开花结荚期根系的分布遵循相同的规律,即根系主要分布在 0~20 cm 土层,极显著高于其它层次;随着土层加深,根系分布逐渐减少,但 20 cm 以下各层次之间的差异没有达到显著水平。豌豆、蚕豆的根系分布与大豆、黑大豆、绿豆相似,0~20 cm 根量占总根量的 70%~80%,极显著高于 >20~40 cm 土层;>20~40 cm 根量显著高于 >60~80 cm 土层。

对试验中豆科作物根重随土层变化的动态进行拟合,符合幂曲线模型 $Y=B_0 \cdot X^{B_1}$ (图 1)。不同作物 B_0 排序为蚕豆>黑大豆>大豆>豌豆>绿豆,表明蚕豆的根重下降时的起点最高,即蚕豆根系在开花结荚期根量最大,根系最为发达; B_1 排序与 B_0 排序完全一致,也是蚕豆>黑大豆>大豆>豌豆>绿豆,表明随土层加深,绿豆根重递减速度最快。

2.3 根冠生长的关系

图 2 为盆栽试验不同生育时期各豆科作物根系及冠部鲜重变化图。由图 2 根冠重量的增长规律可以看出,不同作物根系及地上部分生长的规律基本符合“S”型增长曲线,即前期较缓慢,中期加快,后期又减缓以至停滞衰落的过程。比较不同作物根冠生长的差异可以发现,黑大豆的根重及冠重在成熟期仍有继续增加的趋势,大豆与豌豆根冠重量达到最大值之后维持的功能期较长,蚕豆下降的幅度也不大,绿豆根重在苗期增长速度较其它作物慢但在后期下降却最为明显,绿豆冠重下降的幅度小于根重,因此在农业生产上对绿豆更应注重后期防止根系早衰的管理工作。比较根重与冠重的增长曲线还可以发现,无论哪种作物,根重在生育前期增长的幅度都快于冠重。

对图 2 进行分析,黑大豆与大豆相比,二者根冠生长模式存在明显差异,黑大豆根系长势强,根系生物量大,根冠比大,根与冠都衰老慢直到成熟前干重

表 2 开花结荚期根系鲜重比较

Table 2 Comparison of root fresh weight at florescence-fruited period

土层/cm Soil depth	根系鲜重 Root fresh weight					g
	大豆 Soybean	黑大豆 Black soybean	绿豆 Mung bean	豌豆 Pea	蚕豆 Broad bean	
0~20	4.241 2±1.158 2 aA	5.190 0±0.403 2 aA	1.955 1±0.384 5 aA	2.609 9±0.098 6 aA	9.409 9±0.351 1 aA	
>20~40	0.482 2±0.104 2 bB	0.960 0±0.024 0 bB	0.178 8±0.047 8 bB	0.261 5±0.012 4 bB	1.540 0±0.024 0 bB	
>40~60	0.361 2±0.037 7 bB	0.630 0±0.012 9 bB	0.081 2±0.030 3 bB	0.193 0±0.008 0 bcBC	1.120 0±0.012 9 bcBC	
>60~80	0.314 4±0.008 4 bB	0.500 0±0.012 3 bB	0.042 4±0.020 3 bB	0.101 4±0.007 0 cBC	0.940 0±0.012 3 cBC	
>80~100	0.175 4±0.021 6 bB	0.410 0±0.015 7 bB	0.025 6±0.011 9 bB	0.060 1±0.003 4 cC	0.840 0±0.015 7 cC	

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 within 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.

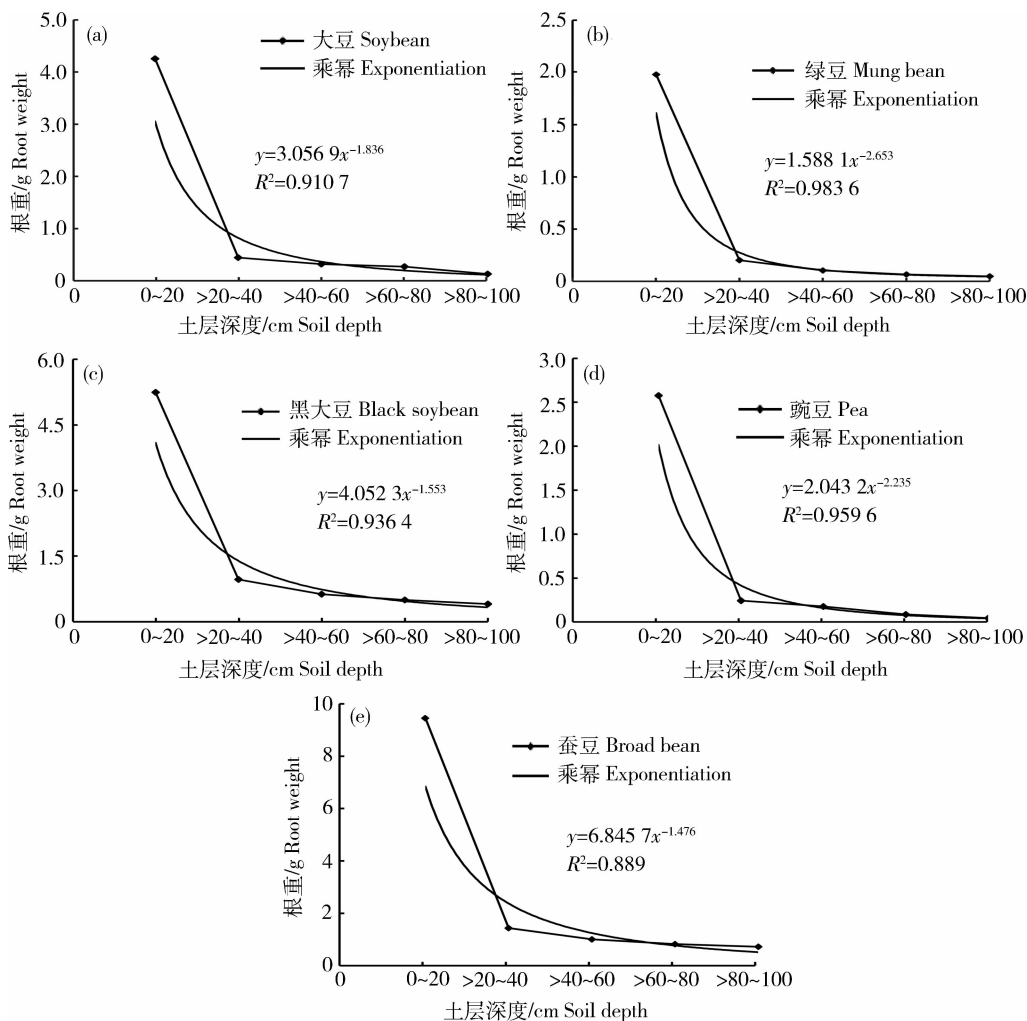


图1 开花结荚期根重的层次分布

Fig.1 Distribution of root weight at florescence-fruiting period in different soil depth

仍在增加,这一结果表明,黑大豆的抗逆性好于大豆,更适合在退化草地土壤上种植。

3 讨论

供试的豆科作物根系总生物量的增长随生育期变化的时间趋势(时间构型)基本呈“S”型增长模型,可划分为缓增期、速增期、顶峰期和衰减期4个时期;根系的各项指标中,主根长、侧根长、根条数也呈“S”型增长,但主根粗直到成熟前基本呈不断累加增长的趋势。

本试验结果表明,退化草地土壤上种植的豆科作物中,黑大豆主根的入土深度、主根粗度、侧根扩展范围以及根条数的最大值都极显著高于大豆。据杜天庆等^[19]报道,由容重、孔隙度、团粒结构及土壤养分状况总体分析,黑大豆对黄土母质生土具有良好的改良效果。本试验条件下,黑大豆主根粗壮、

入土深度大,侧根条数多且扩展范围宽广,该作物对退化草地土壤性状的改良作用有待进行深入的研究。

在蚕豆整个生育过程中,侧根条数和根系重量的峰值极显著高于其它作物,主根粗度仅次于黑大豆,主根入土的深度和侧根扩展的范围均极显著高于绿豆和豌豆;在鼓粒期蚕豆的根条数、主根长、主根粗、侧根长以及根干重均达到一生最高值,此结果与张恩和等^[20]结论稍有差异。据耿赛男等研究,就绿肥的生物产量而言,蚕豆较适宜在碱性紫色土上种植;就绿肥的养分积累量而言,在碱性紫色土中,蚕豆补充土壤养分最多;综合绿肥的生物产量和养分积累量,蚕豆较适宜在碱性紫色土上种植和翻压^[21]。本试验条件下,蚕豆比绿豆和豌豆长势良好,但该作物对退化草地土壤理化及生物学性状改良的效果有待进一步研究。

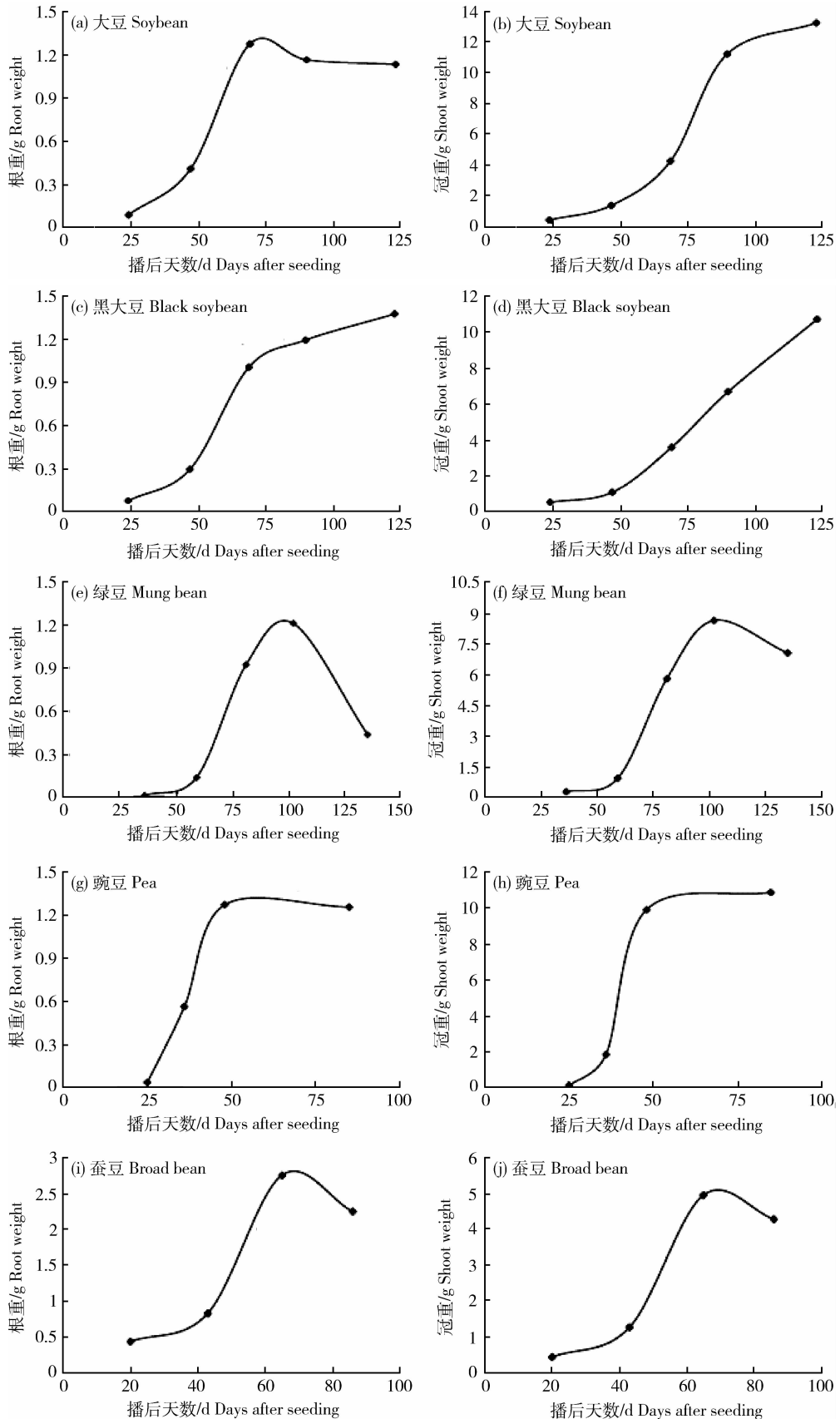


图 2 豆科作物根、冠生长规律

Fig. 2 The dynamic of root and shoot growth in leguminosae

一年生豆科作物依品种特性、感光与感温性能的不同,造成了不同作物地上部各器官及地下根系生长特点有所不同。豌豆属于低温长日照作物,又为蔓生型,在春播条件下,发育早,生育期短,与同为低温长日照作物的蚕豆比较,根系生物量低、侧根少、入土浅。大豆与黑大豆相比,二者虽为同一作物,大豆地上部总生物量高于黑大豆,但黑大豆的根系生长强度、持续时间以及根冠比值,明显高于大豆。

豆科作物根系的垂直空间分布因冠层生物量大小、冠层高度、冠层直立还是蔓生,以及人工选择的目标与强度等而有所不同。通常地上部生物量大、植株高大的豆科作物根系分布较深(如黑大豆),地上部生物量少、植株矮、蔓生型的(如豌豆)根系分布浅。试验中不同豆科作物根系垂直分布的深浅存在很大差异,但在根系生物量空间垂直分布中,均表现为76%左右的根系干物质集中分布于0~20 cm耕作层,呈“T”型分布,其垂直递减率符合幂曲线模型 $Y=B_0 \cdot X^{B_1}$ 。

本研究供试的豆科作物的根冠生长模型分为3类:同步增长型(绿豆、豌豆、蚕豆);根强增长型(黑大豆);苗强增长型(大豆)。豆科作物根冠生长的峰值出现期及峰值出现前后的走向差异,反映了豆科根冠生长的差异。

4 结 论

不同豆科作物在同等退化的碱化草地土壤条件下种植,依据其感光与感温性能的不同,冠层生物量大小、冠层高度、冠层直立还是蔓生的不同,以及品种特性的不同,不同豆科作物根系生长的时空分布和根冠生长模式均表现出了显著的差异。黑大豆、蚕豆和大豆比绿豆和豌豆更适合在本试验条件土壤上种植。仅从根系角度分析,黑大豆主根粗壮、入土深度深,侧根条数多且扩展范围广,在生育后期,黑大豆根系衰老进程较慢,该根系特点更有利于吸收利用土壤中的养分和水分,提高黑大豆籽粒的饱满度。而蚕豆生物量大,侧根条数和根系重量的峰值极显著高于其它作物。综上所述,黑大豆和蚕豆可以作为该类型土壤首选作物,通过合理种植可以提高对光能的利用率和增加北方农区退化草地生物量的产出,是草地农业内涵的周延和扩展。这两种作物对退化草地土壤理化及其生物学性状的改良效果有待进行更深入的研究。

参 考 文 献

- [1] 张文海,杨韞. 草地退化的因素和退化草地的恢复及其改良[J]. 北方环境, 2011, 23(8): 40-44
Zhang W H, Yang Y. The feature analysis for grassland degradation and the restoration of natural vegetation in degraded grassland[J]. *Northern Environment*, 2011, 23(8): 40-44 (in Chinese)
- [2] 刘沛松,贾志宽,李军,王俊鹏,韩清芳. 不同草粮轮作方式对退化苜蓿草地水分恢复的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 95-102
Liu P S, Jia Z K, Li J, Wang J P, Han Q F. Effects of different alfalfa-crop rotation patterns on water recovery of degradation alfalfa grassland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(2): 95-102 (in Chinese)
- [3] 方新宇,李军,王学春,任晶晶. 黄土高原半湿润区苜蓿草地土壤干燥化与草粮轮作水分恢复效应[J]. 中国农业科学, 2010, 43(16): 3348-3356
Fang X Y, Li J, Wang X C, Ren J J. Soil desiccation of alfalfa fields and effects of alfalfa-grain crop rotation on soil water restoration of desiccated alfalfa fields in semi-humid areas of the loess plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*. 2010, 43(16): 3348-3356 (in Chinese)
- [4] 刘沛松,贾志宽,李军,杨宝平,刘世新,李永平. 宁南旱区不同草粮轮作方式中前茬对春小麦产量和土壤性状的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 146-152
Liu P S, Jia Z K, Li J, Yang B P, Liu S X, Li Y P. Effects of different alfalfa-grains rotation patterns on spring wheat yield and soil properties in dry area of southern Ningxia[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(5): 146-152 (in Chinese)
- [5] 韩丽娜,丁静,韩清芳,丁瑞霞,聂俊峰,贾志宽,李文静. 黄土高原区草粮(油)翻耕轮作的土壤水分及作物产量效应[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 129-137
Han L N, Ding J, Han Q F, Ding R X, Nie J F, Jia Z K, Li W J. Effects of alfalfa-grain (oil) crop plowing rotation on soil moisture and crop yield in Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(24): 129-137 (in Chinese)
- [6] 鲁鸿佩,孙爱华. 草田轮作对粮食作物的增产效应[J]. 草业科学, 2003, 20(4): 10-13
Lu H P, Sun A H. The effect of grass-crop rotation on crop yield increase[J]. *Pratacultural Science*, 2003, 20(4): 10-13 (in Chinese)
- [7] 李强,周道玮,宋彦涛. 松嫩草地两种广布豆科植物分布特征及其与土壤因子关系[J]. 草业学报, 2014, 23(1): 31-40
Li Q, Zhou D W, Song Y T. The distribution features of two widespread legumes and their relationships with soil factors in Songnen grassland[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(1): 31-40 (in Chinese)

- [8] Chen Y L, Palta J, Clements J, Buirchell B. Root architecture alteration of narrow-leaved lupin and wheat in response to soil compaction[J]. *Field Crops Research*, 2014, 165: 61-70
- [9] Perkons U, Kautz T, Uteau D, Peth S, Geier V. Root-length densities of various annual crops following crops with contrasting root systems[J]. *Soil & Tillage Research*, 2014, 137: 50-57
- [10] 柴成武, 徐先英, 唐卫东, 王方琳, 王龙. 石羊河流域荒漠区主要固沙植物根系研究[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(4): 21-26
Chai C W, Xu X Y, Tang W D, Wang F L, Wang L. Root system of the main sand fixing plants in desert zone of shiyanghe river basin [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2009, 24(4): 21-26 (in Chinese)
- [11] 李鹏, 李占斌, 赵忠. 根系调查取样点数确定方法的研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 146-149
Li P, Li Z B, Zhao Z. Study of the method for determining sampling number for root investigation[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(1): 146-149 (in Chinese)
- [12] Worku M, Bänziger M, Erley G S A, Friesen D, Diallo A O, Horst W J. Nitrogen efficiency as related to dry matter partitioning and root system size in tropical mid-altitude maize hybrids under different levels of nitrogen stress [J]. *Field Crops Research*, 2012, 130: 57-67
- [13] Bian D H, Jia G P, Cai L J, Ma Z Y, Eneji A E, Cui Y H. Effects of tillage practices on root characteristics and root lodging resistance of maize[J]. *Field Crops Research*, 2016, 185: 89-96
- [14] 孙广玉, 张荣华, 黄忠文. 大豆根系在土层中分布特点的研究[J]. 中国油料作物学报, 2002, 24(1): 45-47
Sun G Y, Zhang Y H, Huang Z W. Soybean root distributions in meadow-blackland and albic-soil[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2002, 24(1): 45-47 (in Chinese)
- [15] 张伟, 邱强, 赵婧, 王曙明, 张伟龙, 闫晓艳, 赵丽梅, 张鸣浩, 张春宝. 杂交大豆根系形态生理特性与产量的关系[J]. 大豆科学, 2014, 33(3): 347-352
Zhang W, Qiu Q, Zhao J, Wang S M, Zhang W L, Yan X Y, Zhao L M, Zhang M H, Zhang C B. Relationship between root morphological characters and yield of hybrid soybeans[J]. *Soybean Science*, 2014, 33(3): 347-352 (in Chinese)
- [16] 金剑, 王光华, 刘晓冰, 李艳华, 陈雪莉, Stephen J Herbert. 东北黑土区高产大豆 R₅ 期根系分布特征[J]. 中国油料作物学报, 2007, 9(3): 266-271
Jin J, Wang G H, Liu X B, Li Y H, Chen X L, Herbert S J. Characteristics of root distribution at R₅ stage in high yielding soybean in black soil [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2007, 9(3): 266-271 (in Chinese)
- [17] 杨秀红, 吴宗璞, 张国栋. 大豆品种根系性状与地上部性状的相关性研究[J]. 作物学报, 2002, 28(1): 72-75
Yang X H, Wu Z P, Zhang G D. Correlations between characteristics of roots and those of aerial parts of soybean varieties[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(1): 72-75 (in Chinese)
- [18] 杜天庆, 苗果园, 郝建平, 杨锦忠, 崔福柱, 薛建福. 黄土母质生土上4种豆科牧草根系生长特征的研究[J]. 草地学报, 2012, 20(1): 17-22
Du T Q, Miao G Y, Hao J P, Yang J Z, Cui F Z, Xue J F. Root growth characteristics of four species leguminous forage in immature loess subsoil[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2012, 20(1): 17-22 (in Chinese)
- [19] 杜天庆, 苗果园, 郝建平, 杨锦忠, 崔福柱, 薛建福. 不同类型豆科作物对黄土母质生土的改土效果[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 76-80
Du T Q, Miao G Y, Hao J P, Yang J Z, Cui F Z, Xue J F. Soil improvement effect by planting different types of legume plants in immature loess subsoil [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2011, 25(6): 76-80 (in Chinese)
- [20] 张恩和, 李玲玲, 黄高宝, 黄鹏, 柴强. 供肥对小麦间作蚕豆群体产量及根系的调控[J]. 应用生态学报, 2002, 13(8): 939-942
Zhang E H, Li L L, Huang G B, Huang P, Chai Q. Regulation of fertilizer application on yield and root growth of spring wheat-faba bean intercropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(8): 939-942 (in Chinese)
- [21] 耿赛男, 习向银, 袁秀梅, 陈益银, 宋大利. 三种紫色土上不同绿肥品种的生物量及养分差异[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(6): 1320-1327
Geng S N, Xi X Y, Yuan X M, Chen Y Y, Song D L. Differences of biomass and nutrient in different varieties of green manure in three kinds of purple soil [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2015, 54(6): 1320-1327 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东