

DOI:10.11686/cyxb2024082

http://cyxb.magtech.com.cn

宋晋辉, 韩云杰, 张继宗, 等. 栗钙土田菜用架芸豆根系的建成. 草业学报, 2025, 34(1): 118—134.

SONG Jin-hui, HAN Yun-jie, ZHANG Ji-zong, et al. *Phaseolus vulgaris* root system formation in chestnut soil. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(1): 118—134.

栗钙土田菜用架芸豆根系的建成

宋晋辉^{1**}, 韩云杰^{2**}, 张继宗², 王志辉¹, 张立峰^{2*}, 李会彬²

(1. 河北北方学院农林科技学院, 河北 张家口 075000; 2. 河北农业大学农学院, 河北 保定 071200)

摘要: 水土资源匮乏背景下的农田精准水肥管理, 需要以作物根系时空建成规律为基础。本研究结合分层挖掘与扫描成像分析技术, 对两种栗钙土田菜用架芸豆不同生育时期的根系生物量、长度、表面积、体积和直径进行了监测和分析。结果表明: 两种栗钙土田菜用架芸豆根系生物量的建成规律一致, 大致分为缓慢增长、线性增长和缓慢下降 3 个时期, 线性增长期为初花期~结荚盛期, 此阶段轻壤质栗钙土田芸豆根系鲜重与干重的日增长速率分别为 2.46 与 0.24 g·2 株⁻¹, 沙壤质栗钙土田分别为 1.79 与 0.20 g·2 株⁻¹; 芸豆根系长度、表面积、体积与根系鲜干重间呈正相关增长。从垂直分布上看, 沙壤质栗钙土田芸豆根系分布较浅, 82.68% 以上的根系分布在 0~30 cm 土层内; 轻壤质栗钙土田芸豆在结荚初期之后 86.24% 以上的根系分布在 0~60 cm 土层。从侧向分布上看, 轻壤质栗钙土田芸豆全生育期内 77% 以上的根系分布在植株两侧 30 cm 范围内, 而沙壤质栗钙土田该范围内根系占比随生育期推移呈下降趋势, 至结荚末期降至 66% 以上。根系的等值线图表明, 轻壤质栗钙土田芸豆根系的总体分布呈“瘦长型”, 沙壤质栗钙土田呈“扁宽型”。本研究为坝上地区菜用架芸豆依根创新水肥高效利用技术奠定了基础。

关键词: 分层挖掘; 滴灌; 菜用架芸豆; 根系; 时空分布

Phaseolus vulgaris root system formation in chestnut soil

SONG Jin-hui^{1**}, HAN Yun-jie^{2**}, ZHANG Ji-zong², WANG Zhi-hui¹, ZHANG Li-feng^{2*}, LI Hui-bin²

1. College of Agriculture and Forestry, Hebei North University, Zhangjiakou 075000, China; 2. College of Agronomy, Hebei Agricultural University, Baoding 071200, China

Abstract: Precision water and fertilizer management in farmland when water is scarce needs to take account of the development patterns of the crop root system within the soil and over time. Here, *Phaseolus vulgaris* root biomass, length, surface area, volume and diameter was monitored in two differing light loamy or sandy chestnut soil fields at different growth stages using stratified excavation to extract root samples and image analysis techniques to quantify root parameters. The results showed that the root biomass of *P. vulgaris* in the two fields was similar, and roughly divided into three stages: slow growth, linear growth and slow decline. The linear growth period was from the initial flowering stage to the full pod stage. At this stage, the daily growth rates of fresh and dry weight of *P. vulgaris* root systems were 2.46 and 0.24 g·2 plants⁻¹ in light loamy chestnut soil fields, while they were 1.79 and 0.20 g·2 plants⁻¹ in sandy chestnut soil fields. The root system parameters, such as root length, surface area and volume, were all positively correlated with root fresh and dry weight. From a vertical distribution perspective, the root

收稿日期: 2024-03-17; 改回日期: 2024-04-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1901104-5)资助。

作者简介: 宋晋辉(1978—), 女, 河北安国人, 副教授, 硕士。E-mail: nkxsjh@163.com; 韩云杰(2000—), 男, 河北衡水人, 在读硕士。E-mail: 1455109986@qq.com. ** 共同第一作者 These authors contributed equally to this work.

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: zlf@hebau.edu.cn

distribution of *P. vulgaris* in sandy chestnut soil was shallower than in loamy chestnut soil. In the sandy soil, more than 82.68% of the roots were distributed in the 0–30 cm soil horizon. In the light loamy soil, more than 86.24% of the roots were distributed in the 0–60 cm soil horizon, after the initial pod stage. From a lateral distribution perspective, over 77% of the *P. vulgaris* root systems in light loamy chestnut soil were distributed within a 30 cm radius on both sides of the plant during the entire growth period, while the proportion of root systems in sandy chestnut soil showed a decreasing trend with growth development, and decreased to over 66% at the end of podding. The contour map of the root systems showed that, *P. vulgaris* roots in light loamy chestnut soil exhibited narrow and deep placement, while in sandy chestnut soil placement was wide and shallow. This research lays a foundation for development of innovative and efficient water and fertilizer utilization technology for *P. vulgaris* in the Bashang area.

Key words: stratified excavation; drip irrigation; *Phaseolus vulgaris*; root system; spatiotemporal distribution

根系从土壤中吸收水分和养分以供植株地上部生育,根系的形态、空间与时间分布在一定程度上反映了植物对环境的适应与资源利用能力^[1–3]。根系构型受土壤类型、土体结构以及土壤水分养分供应、土壤温度等多因素的影响^[4–5],由此明晰一定生境下的作物根系建成特征,成为能动地调控植物地上部与地下部的关系、设计与实施精准灌溉与施肥技术的基础。近些年来,在小麦(*Triticum aestivum*)^[6–9]、玉米(*Zea mays*)^[10–15]、棉花(*Gossypium hirsutum*)^[16–20]、水稻(*Oryza sativa*)^[21–22]等作物上,对根系建成特征与时空构型的研究取得重要进展。通过经典的分层挖掘法,明确了玉米^[10–15]根系生物量的积累呈先升后降的单峰曲线变化特征、棉花^[16,20–21]根系呈S形曲线变化特征。针对非均匀灌溉下玉米^[23–24]、条带滴灌田棉花^[20–21]根系分布浅、深层根量少、易早衰等问题,创新了相应的控制性分根交替灌水技术^[25–26]、膜下交替沟灌技术^[27]。目前有关菜用芸豆(*Phaseolus vulgaris*)根系的研究还未开展。冀西北坝上地区是国家夏秋季喜凉蔬菜南运的重要供应基地,常年播种面积在4万hm²以上^[28]。该区蔬菜种植的大力发展导致地下水超采严重,区域生态环境面临严重威胁^[29]。芸豆因其具有耐冷凉、喜光、生长周期短、产量高、效益好等特点,在坝上地区种植面积逐年增加,已由2011年的1600hm²增加至2021年的4800hm²,成为目前市场上重要的优质蔬菜之一^[30]。本研究以坝上地区芸豆为对象,对在轻壤质与沙壤质两种栗钙土田滴灌方式下根系的时空发育与建成特征进行系统研究,旨在为建立与根系发育相适宜的芸豆田精准水肥管理技术提供理论支持,为促进区域蔬菜产业与资源环境的可持续利用提供技术保障。

1 材料与方法

1.1 试验地点与供试材料

试验于2023年6–9月在河北农业大学张北实验站(114°42' E, 41°09' N)进行。试验区海拔1420 m,属于华北高寒半干旱生态类型区,典型气候特征为光照充足,但热量不足。区域年均温3.9℃,无霜期135 d,年降水量382.5 mm,80%的降水量集中在6–9月。

供试作物为菜用架芸豆,品种为“绿奥707”。供试土壤类型及相关物理性状见表1。

1.2 试验设计

轻壤质栗钙土田芸豆根系的建成监测在塑料大棚内进行,芸豆于2023年6月8日2叶1心期移栽,9月4日采收结束;沙壤质栗钙土田芸豆于2023年7月13日露地直播种植,9月4日采收结束。两个监测田面积均为255 m²,芸豆均采用起垄覆膜、滴灌供水生产,覆膜时将滴灌带铺于膜下。垄距1 m,垄高15 cm,每垄穴栽1行,穴距30 cm,每穴2株。生育期间共灌水8次,每次灌水至土壤质量含水量的85%,总灌水量为179.8 mm。生育期保持田间无杂草环境。

1.3 取样方法与测定项目

采用分层挖掘法采集根系样品。两种土壤类型农田的根系取样时间均从抽蔓期开始,其中轻壤质栗钙土田从7月1日起开始取样,沙壤质栗钙土田取样开始于7月30日。之后每7~8 d取样一次,每次取3穴,直至采收结

束。取样时以穴营养空间为单位,以植株基部为中心,水平方向取样宽度为 100 cm,每 20 cm 一段;垂直方向每 10 cm 一层,随着生育进程,取样深度逐渐下移。所挖掘的样本为 30 cm(株距)×20 cm×10 cm 的立方体土块,将其装入尼龙袋中,采用水洗法将根系拣出,剪去根茎部分归入地上部生物量,用吸水纸吸干根系表面水分,称量鲜重,之后放入自封袋中,于实验室用 ScanMarker i800 plus 扫描仪(杭州)扫描成像后,用 WinRHIZO 根系分析系统获取根系长度、表面积、体积和根系平均直径等性状。最后将根系置于烘箱中 105 ℃杀青 15 min,80 ℃烘至恒重,称其干重。取根同时测定植株地上部绿叶面积(采用直尺测量叶片长和宽,校正系数法, $K=0.5148^{[31]}$)与地上部干重(烘干方法同根系)。按照商品标准,及时采摘芸豆角,计入相应时期的生物产量。根冠比为根系干重与地上部干重的比值;根系鲜、干重占比分别为该土层根系鲜、干重与该生育时期根系鲜、干重总量的比值。

1.4 数据分析

利用 Excel 2021 进行数据处理分析,利用 SPSS 21.0 软件进行 Pearson 相关性分析,利用 SUFFER 15.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 芸豆根系与地上部生物量累积和性状间相关生长特征

2.1.1 轻壤质栗钙土田芸豆根系与地上部生物量累积和性状间相关生长特征

监测结果表明(表 2 和图 1),芸豆根系生物量的累积可分为 3 个时期:缓慢增长期、线性增长期和缓慢下降期。线性增长期始于移栽后 30 d(7月8日),结束于移栽后 60 d(8月7日),对应生育时期为初花期~结荚盛期,此阶段根系鲜重与干重的日增长速率分别为 2.46 与 0.24 g·2 株⁻¹。根系生长最快的时期出现在 7月8日(初花期)—7月16日(盛花期),根系鲜重与干重的日增长速率分别为 4.05 与 0.33 g·2 株⁻¹。

芸豆叶面积和地上部干重从 7月1日—8月21日的整个监测期均呈持续上升趋势。其中叶面积平均日增长速率为 355.19 cm²·2 株⁻¹,增速最快的时期出现在 7月23日—7月31日,日增长速率为 796.53 cm²·2 株⁻¹;地上部干重平均日增长速率为 4.42 g·2 株⁻¹,累积最快的时期出现在 8月7日—8月14日,日增长速率为 9.31 g·2 株⁻¹。

监测结果表明,根系鲜重与干重于 8月7日达最大值,叶面积与地上部干重在 8月21日的监测终止期仍呈增长趋势;而在 7月16日的盛花期,根系鲜重和干重分别累积了最大生物量的 60.61% 和 52.97%,同期叶面积和地上部干重则仅为监测期最大值的 27.80% 和 18.62%。比较分析表明,菜用架芸豆的株体器官建成中,根系早于叶面积、叶面积早于地上部生物量,初花期到结荚盛期是根系生物量累积的主要时段。根系和叶面积的优先发育是地上部生物量累积的基础条件。

轻壤质栗钙土田芸豆根系长度、表面积和体积的动态变化(表 3)与根系鲜干重趋势一致,均于 8月7日达最大,之后有所下降。相关性分析结果表明(表 4),根系鲜重、干重、根系长度、表面积、体积间均存在极显著的正相关关系($P<0.01$),即芸豆根系长度、表面积、体积与根系鲜干重呈时序相关生长特征。根系平均直径呈单峰曲

表 1 供试土壤类型与土壤物理性状

Table 1 Tested soil types and physical properties

轻壤质栗钙土 Light loamy chestnut soil		
土层 Soil layer (cm)	容重 Bulk density (g·cm ⁻³)	土层特征 Soil layer characteristics
0~10	1.4	土壤松软 Soft soil
10~20	1.3	土壤松软 Soft soil
20~30	1.5	土壤紧实 Soil compaction
30~40	1.4	土壤紧实 Soil compaction
40~50	1.3	土壤紧实 Soil compaction
50~60	1.1	黑土层,土壤紧实 Black soil layer, soil compaction
60~70	1.2	黑土层,土壤紧实 Black soil layer, soil compaction
70~80	1.4	黑土层,土壤紧实 Black soil layer, soil compaction
沙壤质栗钙土 Sandy loamy chestnut soil		
土层 Soil layer (cm)	容重 Bulk density (g·cm ⁻³)	土层特征 Soil layer characteristics
0~10	1.5	土壤松软 Soft soil
10~20	1.6	土壤松软 Soft soil
20~30	1.8	土壤紧实 Soil compaction
30~40	1.8	砂砾增多,土壤紧实 Gravel increases, soil compacts
40~50	1.7	砂砾增多,土壤紧实 Gravel increases, soil compacts
50~60	1.7	砂砾增多,土壤紧实 Gravel increases, soil compacts

表 2 轻壤质栗钙土田芸豆根系与地上部生物量的累积动态

Table 2 Cumulative dynamics of *P. vulgaris*'s root and above-ground biomass in light loamy chestnut soil

监测日期 Date of collection (月-日 Month-day)	生育时期 Growth stage	根系鲜重 Fresh root weight		根系干重 Root dry weight	
		重量	比例	重量	比例
		Weight (g·2 plant ⁻¹)	Percentage (%)	Weight (g·2 plant ⁻¹)	Percentage (%)
07-01	抽蔓期 Sprouting stage	29.25±0.19f	27.80	1.891±0.08g	19.67
07-08	初花期 Initial flowering stage	31.38±0.24f	29.82	2.421±0.09f	25.18
07-16	盛花期 Full flowering stage	63.77±0.54e	60.61	5.093±0.08e	52.97
07-23	结荚初期 Initial podding stage	82.76±0.96d	78.65	6.999±0.13d	72.80
07-31	结荚前期 Early podding stage	101.33±1.45b	96.30	8.193±0.11c	85.22
08-07	结荚盛期 Full podding stage	105.22±1.11a	100.00	9.614±0.09a	100.00
08-14	结荚后期 Late podding stage	89.15±0.86c	84.73	9.082±0.09b	94.47
08-21	结荚末期 Last podding stage	83.34±0.51d	79.21	9.005±0.05b	93.67

监测日期 Date of collection (月-日 Month-day)	生育时期 Growth stage	叶面积 Leaf area		地上部干重 Shoot dry weight	
		面积	比例	重量	比例
		Area (cm ² ·2 plant ⁻¹)	Percentage (%)	Weight (g·2 plant ⁻¹)	Percentage (%)
07-01	抽蔓期 Sprouting stage	614.9±10.56g	3.28	6.12±0.07h	2.64
07-08	初花期 Initial flowering stage	1727.0±13.07f	9.22	12.26±0.11g	5.30
07-16	盛花期 Full flowering stage	5207.1±98.57e	27.80	43.09±0.75f	18.62
07-23	结荚初期 Initial podding stage	6355.7±82.30d	33.93	56.47±0.94e	24.40
07-31	结荚前期 Early podding stage	12727.9±78.61c	67.96	98.22±0.93d	42.45
08-07	结荚盛期 Full podding stage	12621.0±93.19c	67.30	115.85±0.87c	50.06
08-14	结荚后期 Late podding stage	15780.5±37.93b	84.25	181.03±1.20b	78.23
08-21	结荚末期 Last podding stage	18729.6±112.14a	100.00	231.40±0.81a	100.00

不同小写字母表示同一指标在不同生育时期间差异显著($P<0.05$),下同。Different lowercase letters indicate significant differences of the same index among different growth stages ($P<0.05$), the same below.

线变化(表 3),于 7 月 16 日(盛花期)达到最大,之后逐渐下降。

2.1.2 沙壤质栗钙土田芸豆根系与地上部生物量累积和性状间相关生长特征 沙壤质栗钙土田芸豆根系生物量的变化趋势(表 5)与轻壤质栗钙土田相同,其线性增长期为 8 月 6 日(初花期)–8 月 27 日(结荚盛期),此阶段根系鲜重与干重的日增长速率分别为 1.79 与 0.20 g·2 株⁻¹。根系生长最快的时期出现在 8 月 6 日(初花期)–8 月 13 日(盛花期),根系鲜重与干重的日增长速率分别为 2.26 与 0.22 g·2 株⁻¹。

叶面积于 8 月 27 日(结荚盛期)增至最大,之后下降;叶面积增长最快的时期为 8 月 6 日–8 月 13 日,日增长速率为 205.34 cm²·2 株⁻¹。地上部干重呈持续增长趋势,累积最快的时期出现在 8 月 13 日–8 月 20 日,日增长速率为 2.90 g·2 株⁻¹。

根系鲜重、干重和叶面积于 8 月 13 日即盛花期分别累积最大值的 66.56%、59.56% 和 62.78%,同期地上部干重仅累积最大生物量的 45.18%,这与轻壤质栗钙土上芸豆的生长动态略有不同,其叶面积与根系发育进程基本同步,均早于地上部生物量的增长(表 5)。这与露地芸豆结荚初期(8 月 20 日)前日均温较高,之后日均温快速下降等有关。

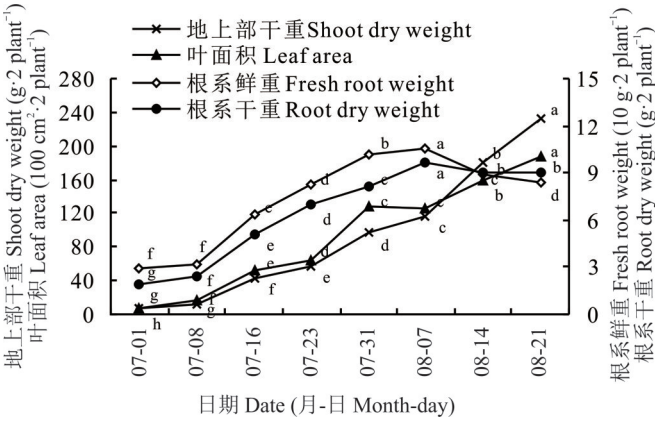


图 1 轻壤质栗钙土田芸豆根系与地上部生物量的累积动态
Fig. 1 Accumulative dynamics of *P. vulgaris*' s root and above-ground biomass in light loamy chestnut soil

表3 轻壤质栗钙土田芸豆根系相关指标的动态变化

Table 3 Dynamic change of *P. vulgaris*'s root related indexes in light loamy chestnut soil

监测日期 Date of collection (月·日 Month-day)	生育时期 Growth stage	根系长度 Root length (cm·2 plant ⁻¹)	根系表面积 Root surface area (cm ² ·2 plant ⁻¹)	根系体积 Root volume (cm ³ ·2 plant ⁻¹)	根系平均直径 Roots average diameter (mm·2 plant ⁻¹)
07-01	抽蔓期 Sprouting stage	10886.32±105.53g	1553.95±30.88h	25.49±0.14h	0.46±0.006d
07-08	初花期 Initial flowering stage	14862.51±72.65f	2074.69±47.51g	32.80±0.23g	0.49±0.010bc
07-16	盛花期 Full flowering stage	28659.71±54.42e	4356.51±50.16f	72.27±0.25f	0.53±0.006a
07-23	结荚初期 Initial podding stage	39553.86±58.57d	5880.52±60.15c	99.76±0.36c	0.51±0.006b
07-31	结荚前期 Early podding stage	43994.34±160.91b	6438.69±60.18b	105.02±1.19b	0.49±0.010bc
08-07	结荚盛期 Full podding stage	50138.62±76.32a	6947.82±61.33a	108.11±1.15a	0.47±0.006cd
08-14	结荚后期 Late podding stage	39748.10±114.45d	5627.86±59.21d	87.09±0.50d	0.47±0.010cd
08-21	结荚末期 Last podding stage	41524.18±133.81c	5326.29±46.55e	79.55±0.55e	0.42±0.010e

表4 轻壤质栗钙土田芸豆根系各指标间的相关性

Table 4 Correlation of *P. vulgaris*'s root indexes in light loamy chestnut soil field

项目 Items	根系鲜重 Fresh root weight	根系干重 Root dry weight	根系长度 Root length	根系表面积 Root surface area
根系干重 Root dry weight	0.962**			
根系长度 Root length	0.990**	0.973**		
根系表面积 Root surface area	0.992**	0.944**	0.990**	
根系体积 Root volume	0.976**	0.904**	0.969**	0.993**

**表示在 0.01 水平上显著相关。 ** indicates significant correlation at 0.01 level.

表5 沙壤质栗钙土田芸豆根系与地上部的动态变化

Table 5 Dynamic change of *P. vulgaris*'s roots and above-ground parts in sandy loamy chestnut soil

监测日期 Date of collection (月·日 Month-day)	生育时期 Growth stage	根系鲜重		根系干重		叶面积		地上部干重	
		Fresh root weight		Root dry weight		Leaf area		Shoot dry weight	
		重量	比例	重量	比例	面积	比例	重量	比例
		Weight (g·2 plant ⁻¹)	Percentage (%)	Weight (g·2 plant ⁻¹)	Percentage (%)	Area (cm ² ·2 plant ⁻¹)	Percentage (%)	Weight (g·2 plant ⁻¹)	Percentage (%)
07-30	抽蔓期 Sprouting stage	20.66±0.20f	31.72	1.769±0.08e	26.07	1603.3±37.62e	28.57	14.69±0.21f	17.53
08-06	初花期 Initial flowering stage	27.51±0.26e	42.23	2.507±0.10d	36.95	2085.7±60.82d	37.17	23.45±0.13e	27.99
08-13	盛花期 Full flowering stage	43.36±0.25d	66.56	4.041±0.07c	59.56	3523.1±79.48c	62.78	37.85±0.20d	45.18
08-20	结荚初期 Initial podding stage	52.06±0.29c	77.79	5.278±0.12b	77.20	4594.1±61.79b	81.87	58.13±0.32c	69.38
08-27	结荚盛期 Full podding stage	65.14±0.31a	100.00	6.710±0.09a	98.89	5611.4±70.78a	100.00	70.20±0.86b	83.79
09-03	结荚末期 Last podding stage	61.70±0.24b	94.72	6.785±0.09a	100.00	4689.0±54.84b	83.56	83.78±0.78a	100.00

沙壤质栗钙土田芸豆根系长度、表面积、体积的变化趋势(表6)与根系鲜重一致,均于8月27日达最大,之后下降;根系平均直径于8月13日(盛花期)达最大,为0.47 mm·2株⁻¹。

表 6 沙壤质栗钙土田芸豆根系相关指标的动态变化

Table 6 Dynamic change of *P. vulgaris*'s root related indexes in sandy loamy chestnut soil

监测日期 Date of collection (月-日 Month-day)	生育时期 Growth stage	根系长度 Root length (cm·2 plant ⁻¹)	根系表面积 Root surface area (cm ² ·2 plant ⁻¹)	根系体积 Root volume (cm ³ ·2 plant ⁻¹)	根系平均直径 Roots average diameter (mm·2 plant ⁻¹)
07-30	抽蔓期 Sprouting stage	9776.06±77.75f	1232.33±18.77f	16.69±0.12f	0.41±0.006d
08-06	初花期 Initial flowering stage	13138.78±63.12e	1952.33±22.20e	28.01±0.17e	0.44±0.006bc
08-13	盛花期 Full flowering stage	20266.01±73.17d	2818.01±48.83d	42.24±0.12d	0.47±0.010a
08-20	结荚初期 Initial podding stage	25612.54±132.42c	3378.35±29.52c	50.53±0.29c	0.46±0.006ab
08-27	结荚盛期 Full podding stage	31093.68±103.58a	4188.11±51.96a	63.43±0.13a	0.46±0.010ab
09-03	结荚末期 Last podding stage	28024.58±119.24b	3844.82±45.84b	57.97±0.23b	0.43±0.006c

2.1.3 两种栗钙土田芸豆根冠比的变化 两种栗钙土田芸豆的根冠比均随生育进程推移呈逐渐下降的趋势,轻壤质栗钙土田芸豆根冠比降幅大于沙壤质栗钙土田(表7)。盛花期之前,轻壤质栗钙土田芸豆的根冠比明显大于沙壤质栗钙土田,盛花期~结荚盛期,两种栗钙土田芸豆根冠比相差不大,为0.08~0.12;结荚盛期之后,轻壤质栗钙土田芸豆根冠比快速下降,最低降至0.04,说明大部分干物质累积于地上部支持持续结荚,而沙壤质栗钙土田只有一个小幅下降,由0.10降至0.08,原因一方面为其仍需要较强大的根系吸收营养,另一方面与后期低温导致叶面积的下降,进而影响了地上部干物质的积累等有关。

表 7 两种栗钙土田芸豆根冠比的动态变化

Table 7 Dynamic change of *P. vulgaris*'s root-shoot ratio in two kinds of chestnut soil

轻壤质栗钙土 Light loamy chestnut soil			沙壤质栗钙土 Sandy loamy chestnut soil		
监测日期 Date of collection (月-日 Month-day)	生育时期 Growth stage	根冠比 Root-shoot ratio	监测日期 Date of collection (月-日 Month-day)	生育时期 Growth stage	根冠比 Root-shoot ratio
07-01	抽蔓期 Sprouting stage	0.31	07-30	抽蔓期 Sprouting stage	0.12
07-08	初花期 Initial flowering stage	0.20	08-06	初花期 Initial flowering stage	0.11
07-16	盛花期 Full flowering stage	0.12	08-13	盛花期 Full flowering stage	0.11
07-23	结荚初期 Initial podding stage	0.12	08-20	结荚初期 Initial podding stage	0.09
07-31	结荚前期 Early podding stage	0.08	08-27	结荚盛期 Full podding stage	0.10
08-07	结荚盛期 Full podding stage	0.08	09-03	结荚末期 Last podding stage	0.08
08-14	结荚后期 Late podding stage	0.05			
08-21	结荚末期 Last podding stage	0.04			

2.2 芸豆根系的空间分布特征

2.2.1 芸豆根系的垂直分布特征 监测结果表明,芸豆根系鲜重与干重的垂直分布均呈随土层加深根量逐渐减少,随生育期推进根群分布逐渐加深的特征(表8)。芸豆根系于7月23日(结荚初期)达本项监测最大深度80 cm。0~20 cm土层根系生物量占比呈先降后升趋势(表9),8月14日降至最低,之后随根系的缓慢衰亡,该层根系生物量占比有所上升,根鲜重和根干重分别较8月14日上升5.12和4.20个百分点;20~40 cm土层根系占比呈波浪式变化趋势,两次高峰分别出现在盛花期(7月16日)与结荚后期(8月14日);40~60 cm、60~80 cm土层根系占比变化趋势相同,均呈先升后降的趋势,其根系生物量均于结荚盛期(8月7日)增至最高,之后逐渐下降。

表 8 轻壤质栗钙土田芸豆根系生物量的垂直分布
Table 8 Vertical distribution of *P. vulgaris*' s root biomass in light loamy chestnut soil (g·2 plant⁻¹)

项目 Items	土层 Soil layer (cm)	监测日期 Date of collection (月-日 Month-day)									
		07-01	07-08	07-16	07-23	07-31	08-07	08-14	08-21		
根鲜重 Fresh root weight	0~10	10.81±0.15a	13.11±0.06a	19.36±0.23a	23.14±0.10a	27.60±0.10a	26.16±0.11a	19.90±0.12a	24.36±0.15a		
	10~20	10.26±0.07b	9.32±0.08b	15.65±0.11b	16.31±0.06b	16.75±0.10b	15.11±0.07b	13.98±0.07b	11.58±0.09b		
	20~30	5.78±0.08c	6.52±0.07c	14.23±0.11b	14.02±0.08c	13.20±0.08c	14.06±0.07c	13.81±0.08b	11.87±0.06c		
	30~40	2.40±0.03d	2.10±0.04d	7.43±0.07d	10.55±0.08d	12.23±0.07d	13.75±0.07d	12.17±0.06c	8.84±0.06d		
	40~50	—	0.33±0.02e	5.96±0.09e	8.03±0.06e	10.93±0.08e	12.59±0.08e	10.83±0.08d	7.78±0.06e		
	50~60	—	—	1.14±0.04f	8.25±0.05f	9.22±0.04f	9.29±0.05f	6.53±0.08e	7.67±0.05e		
	60~70	—	—	—	2.01±0.03g	7.17±0.05g	8.57±0.06g	6.84±0.05f	6.12±0.06f		
	70~80	—	—	—	0.45±0.02h	4.23±0.05h	5.69±0.04h	5.09±0.05g	5.12±0.03g		
总计 Total		29.25	31.38	63.77	82.76	101.33	105.22	89.15	83.34		
根干重 Root dry weight	0~10	0.810±0.016a	1.063±0.022a	1.750±0.012a	2.365±0.013a	2.512±0.015a	2.626±0.011a	2.317±0.015a	2.802±0.011a		
	10~20	0.650±0.008b	0.669±0.015b	1.267±0.014b	1.423±0.017b	1.407±0.009b	1.384±0.009b	1.432±0.014b	1.293±0.012b		
	20~30	0.309±0.008c	0.515±0.012c	1.169±0.013c	1.262±0.012c	1.063±0.014c	1.214±0.011c	1.474±0.014c	1.279±0.011b		
	30~40	0.122±0.004d	0.157±0.011d	0.469±0.011d	0.733±0.012d	0.915±0.012d	1.155±0.012d	1.169±0.014d	0.932±0.013c		
	40~50	—	0.017±0.002e	0.365±0.007e	0.566±0.011e	0.847±0.012e	1.119±0.014e	0.945±0.013e	0.770±0.013d		
	50~60	—	—	0.073±0.003f	0.470±0.011f	0.628±0.013f	0.793±0.012f	0.598±0.014f	0.762±0.012d		
	60~70	—	—	—	0.147±0.009g	0.505±0.011g	0.740±0.011g	0.705±0.013g	0.661±0.011e		
	70~80	—	—	—	0.033±0.002h	0.316±0.008h	0.583±0.008h	0.442±0.010h	0.506±0.010f		
总计 Total		1.891	2.421	5.093	6.999	8.193	9.614	9.082	9.005		

不同小写字母表示同一指标在不同土层间差异显著 ($P<0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences of the same index among different soil layers ($P<0.05$). —: 无数据 No data. 下同 The same below.

表 9 轻壤质栗钙土田芸豆各层根系鲜干重所占比例

Table 9 Proportion of fresh and dry root weight in each layer of *P. vulgaris* in light loamy chestnut soil (%)

监测日期 Date of collection (月-日 Month-day)	根鲜重所占比例 Proportion of fresh root weight				根干重所占比例 Proportion of dry root weight			
	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm
07-01	72.03	27.97	—	—	77.21	22.79	—	—
07-08	71.48	27.47	1.05	—	71.54	27.76	0.70	—
07-16	54.90	33.97	11.13	—	59.24	32.16	8.60	—
07-23	47.67	29.69	19.67	2.97	54.12	28.50	14.80	2.57
07-31	43.77	25.10	19.89	11.25	47.83	24.14	18.00	10.02
08-07	39.22	26.43	20.79	13.55	41.71	24.64	19.89	13.76
08-14	38.00	29.14	19.47	13.38	41.28	29.10	16.99	12.63
08-21	43.12	24.85	18.54	13.49	45.48	24.55	17.01	12.96

随生育进程推进,芸豆根群垂直分布范围逐渐向下扩展(表 9 和表 10)。盛花期(7 月 16 日)前,71.54% 以上的根系干重分布在 0~20 cm 土层内,0~30 cm 土层根系干重占比在 92.81% 以上;盛花期 82.19% 的根系干重分布在 0~30 cm 土层内,0~40 cm 土层根系干重占比达 91.40%;结荚初期(7 月 23 日),根系继续向下扩展,0~40 cm、0~50 cm 土层根干重占比分别为 82.63% 与 90.71%;之后直至 8 月 21 日,77.99% 以上的根系干重分布在 0~50 cm 土层内,0~60 cm 土层根系干重占比在 86.24% 以上。

表 10 轻壤质栗钙土田 0~60 cm 土层芸豆根系鲜干重占比

Table 10 Proportion of fresh and dry root weight in 0~60 cm soil layer of *P. vulgaris* in light loamy chestnut soil (%)

监测日期 Date of collection (月-日 Month-day)	根鲜重所占比例 Proportion of fresh root weight					根干重所占比例 Proportion of dry root weight				
	0~20 cm	0~30 cm	0~40 cm	0~50 cm	0~60 cm	0~20 cm	0~30 cm	0~40 cm	0~50 cm	0~60 cm
07-01	72.03	91.79	—	—	—	77.21	93.55	—	—	—
07-08	71.48	92.26	—	—	—	71.54	92.81	—	—	—
07-16	54.90	77.21	88.87	—	—	59.24	82.19	91.40	—	—
07-23	47.67	64.61	77.36	87.06	—	54.12	72.15	82.63	90.71	—
07-31	43.77	56.79	68.86	79.65	88.75	47.83	60.81	71.98	82.31	89.98
08-07	39.22	52.59	65.65	77.62	86.45	41.71	54.34	66.35	77.99	86.24
08-14	38.00	53.49	67.15	79.29	86.62	41.28	57.51	70.38	80.79	87.37
08-21	43.47	57.37	67.97	77.31	86.51	45.48	59.68	70.03	78.58	87.04

轻壤质栗钙土田芸豆不同时期根系长度、表面积、体积的垂直分布(图 2)基本均随土层加深而减少,与根系鲜、干重变化趋势一致。芸豆根系各指标在 7 月 1 日—7 月 23 日随土层加深呈线性下降趋势,7 月 31 日—8 月 21 日,0~10 cm 的上层与 60~80 cm 的下层根系各指标的降速较中层更快。

沙壤质栗钙土田芸豆根系鲜、干重的垂直分布趋势(表 11)与轻壤质栗钙土田一致,根量均随土层加深逐层减少。由表 11 可知,沙壤质栗钙土田芸豆根群垂直分布范围较轻壤质栗钙土田浅,除 8 月 27 日监测到根系扩展到 60 cm 土层外,其余各期均分布在 0~50 cm 土层内。0~10 cm 土层根系占比呈先升后降再升的趋势(表 12),20~30 cm 土层变化趋势与之正好相反,但二者根系占比出现的高峰与低谷的日期相同,即 8 月 6 日与 8 月 27 日为变化趋势的转折点;10~20 cm 与 30~40 cm 土层根系占比的变化趋势分别为先升后降与先降后升,其转折点均出现在 8 月 13 日;40~50 cm 土层根系占比的变化趋势与 10~20 cm 土层一致,但其根量的最高峰推迟至

8月27日。

沙壤质栗钙土田芸豆63.70%以上的根系干重生物量分布在0~20 cm土层内,0~30 cm土层内根系干重占比在82.68%以上(表12和表13)。沙壤质栗钙土田芸豆根系分布明显较轻壤质栗钙土田浅,这与其30 cm以下土壤砂砾增多、蓄水保肥能力差等有关。

沙壤质栗钙土田芸豆不同时期根系长度、表面积、体积等指标,均呈随土层加深而线性下降的趋势,并随时间推移降速增快(图3),这与沙壤质栗钙土较轻壤质栗钙土田下层土壤粗砂、瘠薄等有关。

2.2.2 芸豆根系的侧向分布特征 两种土壤类型上芸豆根系鲜干重及所占比例均随距植株侧向距离的增加而减少,呈单峰曲线,但分布不完全对称。分析表明,各生育时期轻壤质栗钙土田距植株两侧各30 cm范围内根系鲜重所占比例为77.23%~91.09%,根系干重为79.39%~91.99%,即芸豆全生育期内77%以上的根系分布在植株两侧30 cm范围内(表14和表15,图4和图5)。

沙壤质栗钙土田距植株两侧各30 cm范围内根系鲜重占比为66.74%~88.58%,根系干重占比为68.50%~89.99%,且均随时间推移呈下降趋势。7月30日(抽蔓期)至8月6日(初花期),该范围内根系鲜干重占比均在87%以上,8月13日(盛花期)至8月27日(结荚盛期)鲜干重占比为76.68%~79.71%,9月3日(结荚末期)的鲜干重占比分别降至66.74%与67.84%。综上所述,芸豆根系在沙壤质栗钙土田具有更强的侧向伸展倾向。

2.3 芸豆根系生物量空间分布特征

对芸豆不同时期根系生物量的空间分布廓线分析(图6和图7)表明,两类农田下芸豆根系均表现越靠近植株中心位置生物量越大,且随生育进程推进根量逐渐增加。在时序上,植株发育前期(初花期)根系生物量廓线分布呈围绕植株中心位置的半圆扩展型;到盛花期,随着根量增长,根系生物量在25 cm土层向两侧凸展,根量廓线呈水盂扩展型,这在沙壤质栗钙土田更为明显;盛花期~结荚末期,根量在轻壤质栗钙土田的扩展更偏向纵向,而沙壤质栗钙土田则更偏于横向,这同样与两类农田的土壤结构特征等有关。

依据80%根量所在土体作为估算水养供给的主要范围^[9],分析表明,轻壤质栗钙土田芸豆初花期80%根量的根系横向扩展范围在以植株为原点的30 cm内,纵向延伸至35 cm;到结荚盛期,横向范围扩展至50 cm,纵向延伸达75 cm。沙壤质栗钙土田芸豆初花期80%根量的根系横向扩展范围在以植株为原点的40 cm范围内,纵向延伸达30 cm;结荚盛期,横向范围扩展至50 cm,纵向延伸仅为40 cm。两者比较表明,在轻壤质栗钙土田,芸豆根系的总体分布呈横向窄而集中,纵向深而分散的“瘦长型”;在沙壤质栗钙土田,芸豆根系分布呈横向宽而分散,纵向浅而集中的“扁宽型”。

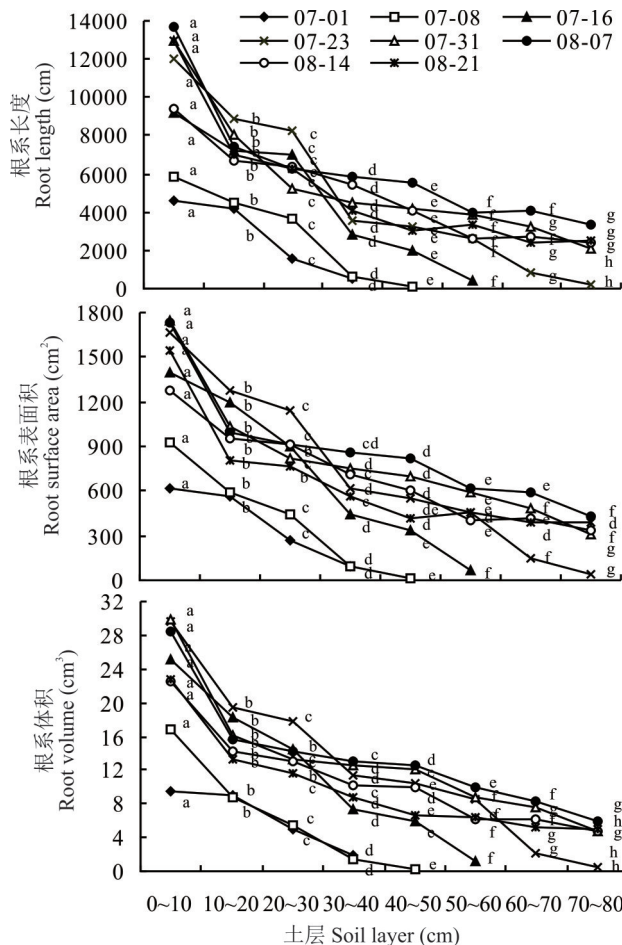


图2 轻壤质栗钙土田芸豆根系长度、表面积、体积的垂直分布
Fig. 2 Vertical distribution of root length, surface area and volume of *P. vulgaris* in light loamy chestnut soil

不同小写字母表示同一日期不同土层间差异显著($P < 0.05$),下同。
Different lowercase letters represent significant differences among different soil layers of the same date ($P < 0.05$), the same below.

表 11 沙壤质栗钙土田芸豆根系生物量的垂直分布

Table 11 Vertical distribution of *P. vulgaris*'s root biomass in sandy loamy chestnut soil ($\text{g}\cdot 2\text{ plant}^{-1}$)

项目 Items	土层 Soil layer (cm)	监测日期 Date of collection (月-日 Month-day)					
		07-30	08-06	08-13	08-20	08-27	09-03
根鲜重 Fresh root weight	0~10	9.01±0.08a	13.01±0.08a	17.12±0.09a	18.97±0.09a	20.24±0.12a	21.66±0.12a
	10~20	5.92±0.06b	8.11±0.04b	15.54±0.06b	16.30±0.08b	17.81±0.09b	15.27±0.10b
	20~30	3.97±0.06c	4.22±0.06c	7.84±0.05c	9.69±0.07c	14.71±0.06c	12.44±0.05c
	30~40	1.76±0.03d	1.74±0.05d	2.19±0.04d	4.72±0.03d	6.39±0.06d	9.09±0.05d
	40~50	—	0.43±0.04e	0.67±0.04e	2.38±0.03e	3.81±0.07e	3.24±0.04e
	50~60	—	—	—	—	2.18±0.04f	—
	总计 Total	20.66	27.51	43.36	52.06	65.14	61.70
根干重 Root dry weight	0~10	0.798±0.011a	1.262±0.009a	1.629±0.008a	2.159±0.009a	2.441±0.009a	2.621±0.007a
	10~20	0.507±0.008b	0.719±0.006b	1.471±0.006b	1.615±0.008b	1.935±0.009b	1.701±0.006b
	20~30	0.316±0.007c	0.365±0.005c	0.716±0.010c	0.891±0.005c	1.377±0.007c	1.288±0.005c
	30~40	0.148±0.006d	0.126±0.005d	0.172±0.004d	0.420±0.005d	0.549±0.005d	0.878±0.007d
	40~50	—	0.035±0.002e	0.053±0.004e	0.193±0.004e	0.263±0.006e	0.297±0.005e
	50~60	—	—	—	—	0.145±0.004f	—
	总计 Total	1.769	2.507	4.041	5.278	6.710	6.785

表 12 沙壤质栗钙土田芸豆各层根系鲜干重所占比例

Table 12 Proportion of fresh and dry root weight in each layer of *P. vulgaris* in sandy loamy chestnut soil (%)

监测日期 Date of collection (月-日 Month-day)	根鲜重所占比例 Proportion of fresh root weight						根干重所占比例 Proportion of dry root weight					
	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm	40~50 cm	50~60 cm	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm	40~50 cm	50~60 cm
07-30	43.61	28.65	19.22	8.52	—	—	45.11	28.66	17.86	8.37	—	—
08-06	47.29	29.48	15.74	6.29	1.56	—	49.34	26.09	14.56	5.03	1.40	—
08-13	39.39	35.76	18.04	5.04	1.54	—	40.56	36.82	16.43	4.78	1.41	—
08-20	36.44	31.31	18.61	9.07	4.57	—	40.91	30.60	16.88	7.96	3.66	—
08-27	31.07	27.34	22.58	9.81	5.85	3.35	36.38	28.84	20.52	8.18	3.92	2.16
09-03	35.11	24.75	20.16	14.73	5.25	—	41.26	27.15	16.86	11.15	3.58	—

表 13 沙壤质栗钙土田 0~40 cm 土层芸豆根系鲜干重占比

Table 13 Proportion of fresh and dry weight in 0~40 cm soil layer of *P. vulgaris* in sandy loamy chestnut soil (%)

监测日期 Date of collection (月-日 Month-day)	根鲜重所占比例 Proportion of fresh root weight			根干重所占比例 Proportion of dry root weight		
	0~20 cm	0~30 cm	0~40 cm	0~20 cm	0~30 cm	0~40 cm
07-30	72.27	91.48	—	73.77	91.63	—
08-06	76.77	92.11	98.44	79.02	93.58	98.60
08-13	75.32	93.40	98.45	76.71	94.43	98.69
08-20	69.79	86.98	95.29	74.03	89.94	96.21
08-27	58.41	80.99	90.80	65.22	85.74	93.92
09-03	59.85	80.02	94.75	63.70	82.68	95.62

3 讨论

3.1 菜用架芸豆根重的近线性增长特征

本研究表明,轻壤质栗钙土田芸豆根系干重自抽蔓期至结荚盛期在持续增长,结荚盛期之后增速下降,至监测结束时根量仅较结荚盛期减少6.33%;沙壤质栗钙土田芸豆根系干重则在整个监测期呈持续增长趋势,结荚盛期之后增速减缓,监测结束时根量较结荚盛期增加1.12%。邱新强等^[6]、王冀川等^[8]、刘荣花等^[9]、杨兆生等^[32]的研究指出,小麦根系生物量随生育进程推进呈单峰曲线变化,开花期达最大,随后逐步衰退,土层间根系衰退速度不同。杨青华等^[10]、赵秉强等^[11]、李潮海等^[12]、张玉芹等^[13]、楚光红等^[14]、齐文增等^[15]的监测表明,玉米根系生物量为单峰曲线;于吐丝期达最大^[10,13-14];根量的峰值期受土壤质地、土层结构等影响^[11-12]。孟芳^[21]、朱春生^[22]、魏中伟等^[33]、唐文帮等^[34]研究表明,常规稻与杂交稻的根系生物量也呈单峰变化趋势,于抽穗开花期达最大,杂交稻根量早于常规稻达到高峰。李少昆等^[16]、危常州等^[19]、杨荣等^[20]研究表明,棉花根系生物量的积累呈S形曲线,盛蕾期到盛花期为根系线性增长期。两种栗钙土田芸豆根系干重表现的近线性增长特征,与上述小麦、玉米、水稻及棉花等明显不同,这与收获菜用豆角而使拉秧期较粒用豆大幅提前有关。这也要求以菜豆角为目标的芸豆生产,应重视后期的田间水肥管理。

3.2 菜用架芸豆根系垂向与侧向分布特征

本研究表明,两种栗钙土田芸豆根群垂向与侧向分布范围不同。沙壤质栗钙土田芸豆根系分布较浅,除结荚盛期监测到根系扩展到60 cm土层外,其余各期均分布在0~50 cm土层内;轻壤质栗钙土田芸豆根系垂直分布范围随生育期推进而向下扩展,结荚初期达监测的最大深度80 cm。芸豆根系在沙壤质栗钙土田的侧向伸展幅度较轻壤质栗钙土田宽,轻壤质栗钙土田79.39%~91.99%的根系干重分布在植株两侧30 cm范围内,而沙壤质栗钙土田该范围内根系干重占比为67.84%~89.99%。这与两种土壤类型的理化性质与土体构型有关,沙壤质栗钙土田30 cm以下为砂砾层,土壤紧实且缺水缺肥,严重阻碍了根系向下扩展,迫使根群转为侧向发育;轻壤质栗钙土田土层深厚,50 cm以下为黑土层,保水保肥性好,由此芸豆盛花期后30 cm以下土层根系所占比例较大,且各层根系分布较为均匀。这与李潮海等^[12]、杨青华等^[35]在对玉米根系的研究中指出的土壤质地类型影响根系在土层中分布的结果一致。张玉芹等^[13]、齐文增等^[15]、李少昆等^[16]、魏中伟等^[33]的研究均表明,深层根系比重大,可提高作物对土壤深层水肥的吸收利用,易于实现高产,并增强作物抗逆性。沙壤质栗钙土田芸豆30 cm以下土层根系占比低是导致其后期衰亡速度快的原因之一。菜用芸豆根系在两种栗钙土田垂向与侧向不同的分布特征,为“因地制宜”地创新水肥时空施用技术提供了依据。

3.3 菜用架芸豆根系空间生物量分布特征

本研究通过监测基于原状土农田背景下的根系时空建成过程,发现两种栗钙土田芸豆根系生物量的廓线分布在不同生育时期存在明显差异。在初花期,根系生物量呈半圆形扩展;而进入盛花期,根量廓线在25 cm土层

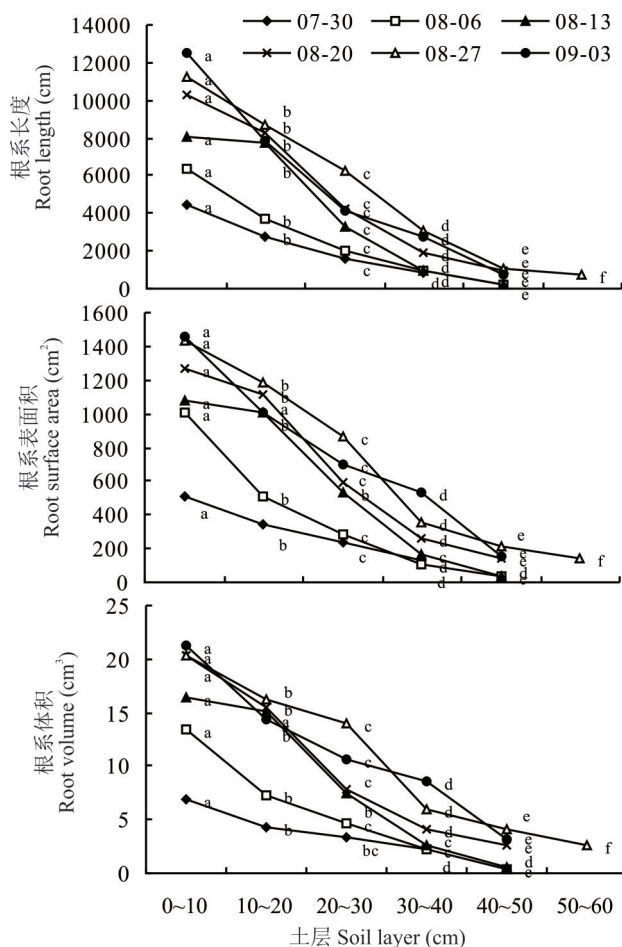


图3 沙壤质栗钙土田芸豆根系长度、表面积、体积的垂直分布
Fig. 3 Vertical distribution of root length, surface area and volume of *P. vulgaris* in sandy loamy chestnut soil

表 14 轻壤质栗钙土田芸豆侧向不同范围内的根系生物量

Table 14 Root biomass of *P. vulgaris* in different lateral ranges in light loamy chestnut soil field (g·2 plant⁻¹)

监测日期 Date of collection (月-日 Month-day)	根系鲜重 Fresh root weight				
	50~30 cm	30~10 cm	10~10 cm	10~30 cm	30~50 cm
07-01	3.06±0.08c	8.95±0.08b	13.04±0.08a	2.86±0.05d	1.34±0.04e
07-08	1.40±0.07d	5.93±0.05b	18.71±0.10a	3.49±0.06c	1.35±0.05d
07-16	4.18±0.12e	7.73±0.08d	29.44±0.11a	13.72±0.08b	8.70±0.06c
07-23	3.28±0.07e	11.55±0.07c	35.66±0.16a	24.47±0.11b	7.80±0.07d
07-31	1.55±0.05e	15.22±0.08c	43.93±0.09a	27.14±0.08b	13.49±0.10d
08-07	7.37±0.09e	24.08±0.12b	36.94±0.09a	23.27±0.08c	13.56±0.12d
08-14	10.25±0.12d	17.89±0.08c	31.79±0.10a	19.17±0.07b	10.05±0.10e
08-21	6.88±0.06e	13.22±0.09c	33.24±0.11a	20.61±0.09b	9.89±0.08d

监测日期 Date of collection (月-日 Month-day)	根系干重 Root dry weight				
	50~30 cm	30~10 cm	10~10 cm	10~30 cm	30~50 cm
07-01	0.180±0.008c	0.552±0.007b	0.915±0.007a	0.171±0.004c	0.073±0.004d
07-08	0.105±0.006d	0.503±0.007b	1.438±0.009a	0.286±0.006c	0.089±0.004e
07-16	0.252±0.006e	0.589±0.008d	2.530±0.011a	1.084±0.006b	0.638±0.006c
07-23	0.227±0.006e	0.935±0.008c	3.444±0.012a	1.877±0.006b	0.516±0.004d
07-31	0.114±0.005e	1.201±0.008c	3.817±0.010a	2.049±0.012b	1.012±0.007d
08-07	0.569±0.007e	2.127±0.007b	3.707±0.008a	1.956±0.010c	1.185±0.007d
08-14	0.918±0.008e	1.731±0.009c	3.584±0.010a	1.895±0.007b	0.954±0.007d
08-21	0.652±0.006e	1.374±0.008c	3.769±0.008a	2.285±0.007b	0.925±0.011d

表 15 沙壤质栗钙土田芸豆侧向不同范围内的根系生物量

Table 15 Root biomass of *P. vulgaris* in different lateral ranges in sandy loamy chestnut soil field (g·2 plant⁻¹)

监测日期 Date of collection (月-日 Month-day)	根系鲜重 Fresh root weight				
	50~30 cm	30~10 cm	10~10 cm	10~30 cm	30~50 cm
07-30	1.16±0.04d	4.73±0.08c	8.20±0.07a	5.37±0.05b	1.20±0.04d
08-06	1.57±0.05e	5.55±0.08c	10.62±0.14a	7.98±0.05b	1.79±0.04d
08-13	5.24±0.05d	10.66±0.11b	14.30±0.07a	9.26±0.05c	3.90±0.04e
08-20	6.17±0.04d	9.72±0.07c	17.12±0.16a	13.37±0.06b	5.69±0.04e
08-27	9.47±0.07d	13.64±0.07c	17.76±0.22b	18.40±0.11a	5.87±0.04e
09-03	8.28±0.05e	10.99±0.06d	16.70±0.09a	13.49±0.06b	12.24±0.04c

监测日期 Date of collection (月-日 Month-day)	根系干重 Root dry weight				
	50~30 cm	30~10 cm	10~10 cm	10~30 cm	30~50 cm
07-30	0.083±0.004d	0.394±0.004c	0.742±0.007a	0.456±0.005b	0.094±0.004d
08-06	0.124±0.005e	0.491±0.006c	0.995±0.006a	0.751±0.006b	0.146±0.003d
08-13	0.456±0.004d	0.986±0.007b	1.364±0.007a	0.871±0.006c	0.364±0.005e
08-20	0.577±0.007d	0.971±0.007c	1.844±0.008a	1.362±0.006b	0.523±0.005e
08-27	0.836±0.007d	1.322±0.009c	2.095±0.010a	1.886±0.007b	0.571±0.007e
09-03	0.781±0.008e	1.151±0.007d	1.898±0.009a	1.554±0.006b	1.336±0.006c

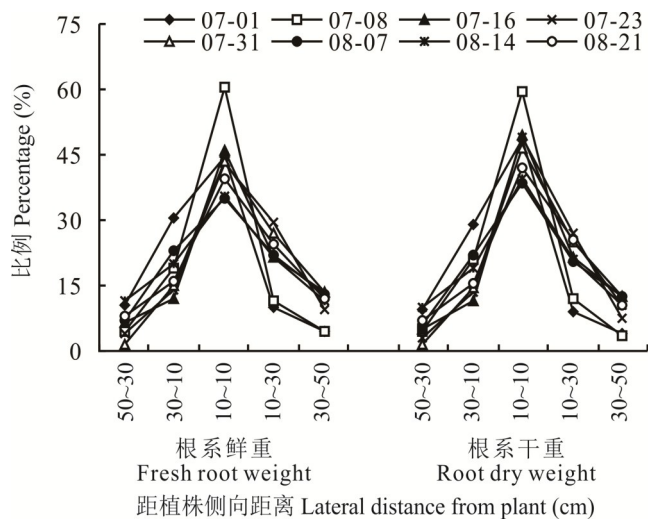


图4 轻壤质栗钙土田根系鲜干重所占比例的侧向分布

Fig. 4 Lateral distribution of the proportion of fresh and dry root weight in light loamy chestnut soil field

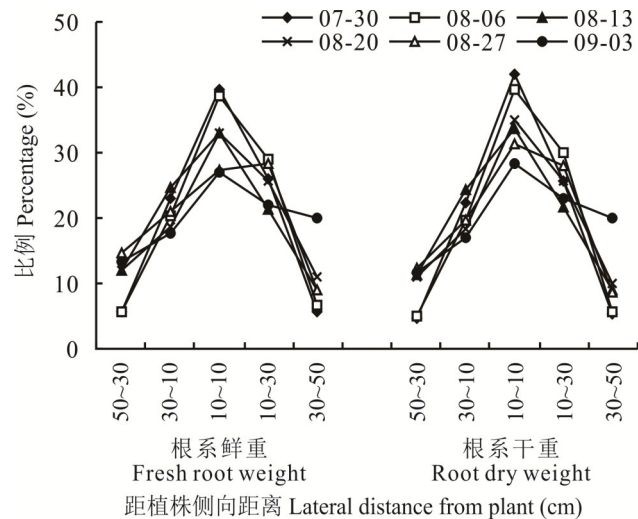


图5 沙壤质栗钙土田根系鲜干重所占比例的侧向分布

Fig. 5 Lateral distribution of the proportion of fresh and dry root weight in sandy chestnut soil field

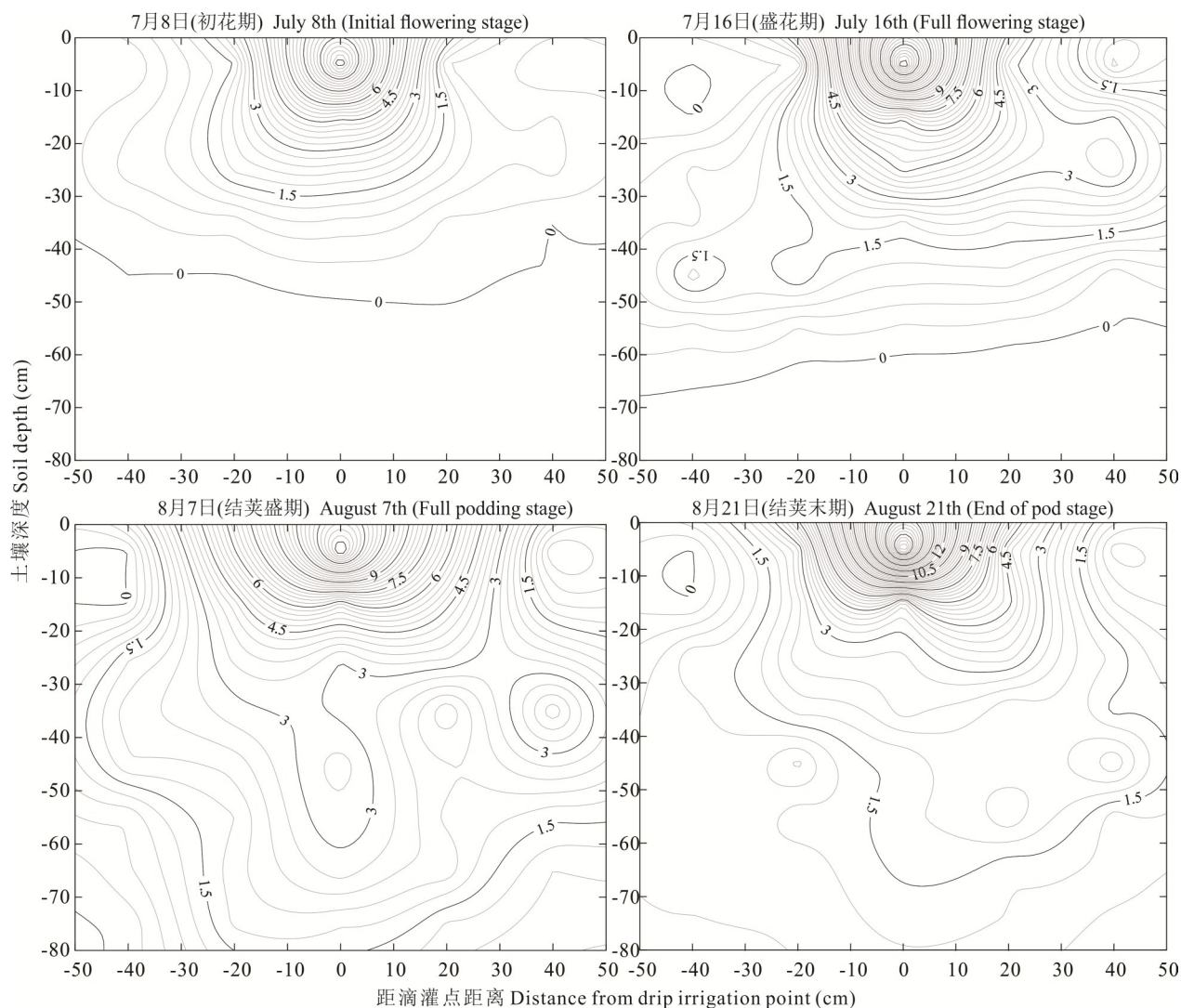


图6 轻壤质栗钙土田芸豆主要生育时期根系鲜重等值线

Fig. 6 Contour of fresh root weight in main growth stages of *P. vulgaris* in light loamy chestnut soil field

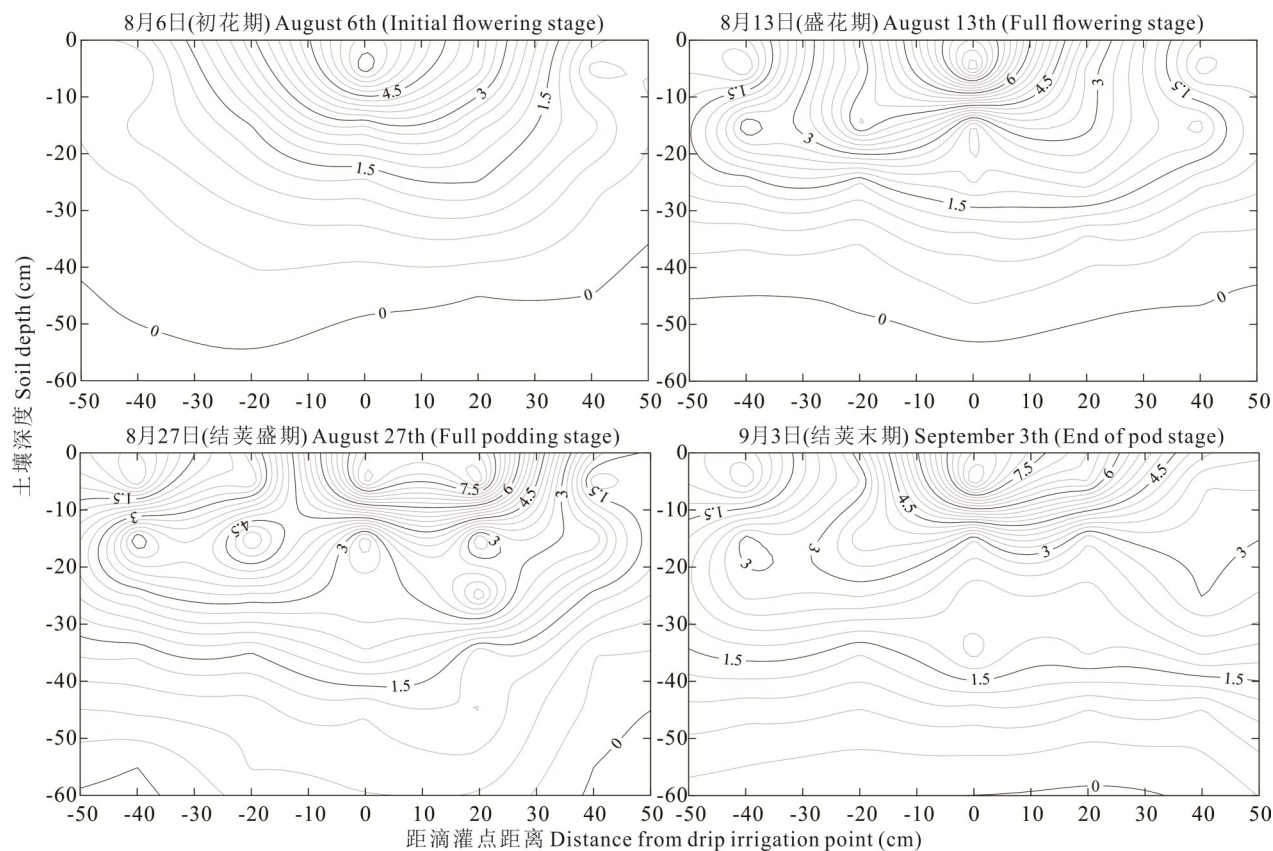


图7 沙壤质栗钙土田芸豆主要生育时期根系鲜重等值线

Fig. 7 Contour of fresh root weight in main growth stages of *P. vulgaris* in sandy chestnut soil field

向两侧凸出,呈水盂状扩展,沙壤质栗钙土田更为明显。根系之所以在盛花期后呈水盂状扩展,与农田土体中客观存在的犁底层有关。在常年土壤耕作过程中,由于犁铧对底土的压实,加之降水与灌溉时黏粒的沉积作用,而逐步形成了紧实、黏重的犁底土层。在旱作农田,犁底层一般存在于15~30 cm^[36-37],这与耕深有关。对供试的两种土壤类型的物理性状测定,也表明20~30 cm土层在整个土体中具有较大的容重。犁底层对水分、养分渗透的阻滞效应,在稻田的保水保肥生产中有积极的作用^[38-39];而在旱作农田,通常认为紧实的犁底层对土体水分蓄积与作物根系发育具有负面效应^[40-41]。然而,在设施栽培与有限供水情境下的作物生产中,调控犁底层埋深以塑形作物根群结构,利用犁底层阻滞渗透以提高水养利用效率,是一个值得深入研究的问题。

4 结论

本研究表明,菜用架芸豆根系生物量的时序建成分为缓慢增长、线性增长和缓慢下降3个时期,线性增长期为初花期~结荚盛期。芸豆根系生物量的廓线分布在初花期呈半圆形扩展,进入盛花期后呈水盂型扩展。在轻壤质栗钙土田,芸豆根系的空间分布呈横向窄而集中,纵向深而分散的“瘦长型”,在沙壤质栗钙土田则呈横向宽而分散,纵向浅而集中的“扁宽型”。本研究为坝上地区菜用架芸豆依根创新水肥高效利用技术奠定了基础。

参考文献 References:

- [1] Lynch J. Root architecture and plant productivity. *Plant Physiology*, 1995, 109(1): 7–13.
- [2] Fort F, Cruz P, Catrice O, *et al.* Root functional trait syndromes and plasticity drive the ability of grassland Fabaceae to tolerate water and phosphorus shortage. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, 110(2): 62–72.
- [3] Bardgett R D, Mommer L, De Vries F T. Going underground: Root traits as drivers of ecosystem processes. *Trends in Ecology & Evolution*, 2014, 29(12): 692–699.
- [4] Zhang Z Y, Fan B M, Song C, *et al.* Advances in root system architecture: functionality, plasticity, and research methods.

Journal of Resources and Ecology, 2023, 14(1): 15–24.

- [5] Chen Y J, Dong Q M, Zhou Q P. The impact of different soil moisture and sterilization treatments on root architecture and rhizosheath formation of *Kengyilia hirsute* at the seedling stage. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(3): 60–69.
陈有军, 董全民, 周青平. 不同水分和土壤处理对糙毛以礼草苗期根系构型和根鞘形成的影响. *草业学报*, 2020, 29(3): 60–69.
- [6] Qiu X Q, Gao Y, Huang L, *et al.* Temporal and spatial distribution of root morphology of winter wheat. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(11): 2211–2219.
邱新强, 高阳, 黄玲, 等. 冬小麦根系形态性状及分布. *中国农业科学*, 2013, 46(11): 2211–2219.
- [7] Yang Z S, Yan S H, Wang J J, *et al.* Root growth and distribution of different types of winter wheat. *Journal of Triticeae Crops*, 2000, 20(1): 47–50.
杨兆生, 阎素红, 王俊娟, 等. 不同类型小麦根系生长发育及分布规律的研究. *麦类作物学报*, 2000, 20(1): 47–50.
- [8] Wang J C, Xu Y L, Gao S, *et al.* The physiological characteristics and root spatial distribution of spring wheat in drip irrigation field. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2012, 21(5): 65–70.
王冀川, 徐雅丽, 高山, 等. 滴灌小麦根系生理特性及其空间分布. *西北农业学报*, 2012, 21(5): 65–70.
- [9] Liu R H, Zhu Z X, Fang W S, *et al.* Distribution pattern of winter wheat root system. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(11): 2024–2027.
刘荣花, 朱自玺, 方文松, 等. 冬小麦根系分布规律. *生态学杂志*, 2008, 27(11): 2024–2027.
- [10] Yang Q H, Gao E M, Ma X M. Study on growing dynamic of maize root system in Shajiang black soil. *Acta Agronomica Sinica*, 2000, 26(5): 587–593.
杨青华, 高尔明, 马新明. 砂姜黑土玉米根系生长发育动态研究. *作物学报*, 2000, 26(5): 587–593.
- [11] Zhao B Q, Zhang F S, Li Z J, *et al.* Vertical distribution and its change of root quantity and activity of inter-cropped summer maize. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(1): 81–86.
赵秉强, 张福锁, 李增嘉, 等. 套作夏玉米根系数量与活性的空间分布及变化规律. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(1): 81–86.
- [12] Li C H, Li S L, Wang Q, *et al.* Effect of different textural soils on root dynamic growth in corn. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(9): 1334–1340.
李潮海, 李胜利, 王群, 等. 不同质地土壤对玉米根系生长动态的影响. *中国农业科学*, 2004, 37(9): 1334–1340.
- [13] Zhang Y Q, Yang H S, Gao J L, *et al.* Root characteristics of super high-yield spring maize. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(4): 735–743.
张玉芹, 杨恒山, 高聚林, 等. 超高产春玉米的根系特征. *作物学报*, 2011, 37(4): 735–743.
- [14] Chu G H, Zhang J X, Gao Y, *et al.* Effects of nitrogen application rate on temporal and spatial distribution characteristics of super-high yield spring maize root and yield under drip irrigation. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(3): 156–160.
楚光红, 章建新, 高阳, 等. 施氮量对滴灌超高产春玉米根系时空分布及产量的影响. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(3): 156–160.
- [15] Qi W Z, Liu H H, Li G, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics of super-high-yield summer maize root. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(1): 69–76.
齐文增, 刘惠惠, 李耕, 等. 超高产夏玉米根系时空分布特性. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(1): 69–76.
- [16] Li S K, Wang C T, Wang C Y, *et al.* A study on the distributing pattern and construction of high-yield cotton root system in North Xinjiang. *Cotton Science*, 2000, 12(2): 67–72.
李少昆, 王崇桃, 汪朝阳, 等. 北疆高产棉花根系构型与动态建成的研究. *棉花学报*, 2000, 12(2): 67–72.
- [17] Zhang L Z, Cao W X, Zhang S P, *et al.* Characterizing root growth and spatial distribution in cotton. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2005, 29(2): 266–273.
张立桢, 曹卫星, 张思平, 等. 棉花根系生长和空间分布特征. *植物生态学报*, 2005, 29(2): 266–273.
- [18] Chen W L, Jin M G, Liu Y F, *et al.* Monitoring cotton root growth dynamics under mulched drip irrigation using minirhizotron technique. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(2): 87–93.
陈文岭, 靳孟贵, 刘延锋, 等. 微根管法监测膜下滴灌棉花根系生长动态. *农业工程学报*, 2017, 33(2): 87–93.
- [19] Wei C Z, Ma F Y, Lei Y W, *et al.* Study on cotton root development and spatial distribution under film mulch and drip irrigation. *Cotton Science*, 2002, 14(4): 209–214.

- 危常州, 马富裕, 雷咏雯, 等. 棉花膜下滴灌根系发育规律的研究. 棉花学报, 2002, 14(4): 209—214.
- [20] Yang R, Tian C Y, Mai W X. Characteristics of root development in cotton suffering presenility under drip irrigation and film mulch in Xinjiang Autonomous Region. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2016, 22(5): 1384—1392.
- 杨荣, 田长彦, 买文选. 新疆膜下滴灌棉花早衰的根系生长发育特征. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1384—1392.
- [21] Meng F. Simulation of root distribution in two paddy rice cultivars under water stress. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2009.
- 孟芳. 水稻根系分布规律与模拟研究. 南京: 南京信息工程大学, 2009.
- [22] Zhu C S. Study on the morphological characteristics of root and their relation with upland parts among different types rice. Changsha: Hunan Agricultural University, 2005.
- 朱春生. 不同类型水稻根系形态特性及其与地上部关系的研究. 长沙: 湖南农业大学, 2005.
- [23] Zhang Y Q, Yang H S, Zhang R F, *et al.* Effects of water and nitrogen application on root attenuation characteristics and yield of spring maize under shallow buried drip irrigation. Acta Agronomica Sinica, 2023, 49(11): 3074—3089.
- 张玉芹, 杨恒山, 张瑞富, 等. 浅埋滴灌下水氮运筹对春玉米根系衰减特性及产量的影响. 作物学报, 2023, 49(11): 3074—3089.
- [24] Zou H Y, Zhang F C, Zhang Y X, *et al.* Optimal drip irrigation and fertilization amount enhancing root growth and yield of spring maize in Hexi region of China. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(21): 145—155.
- 邹海洋, 张富仓, 张雨新, 等. 适宜滴灌施肥量促进河西春玉米根系生长提高产量. 农业工程学报, 2017, 33(21): 145—155.
- [25] Kang S Z, Zhang J H, Liang Z S, *et al.* The controlled alternative irrigation——A new approach for water saving regulation in farm land. Agricultural Research in the Arid Areas, 1997, 15(1): 1—6.
- 康绍忠, 张建华, 梁宗锁, 等. 控制性交替灌溉——一种新的农田节水调控思路. 干旱地区农业研究, 1997, 15(1): 1—6.
- [26] Liang Z S, Kang S Z, Shi P Z, *et al.* Effect on water use efficiency and water-saving by controlled root-divided alternative irrigation. Scientia Agricultura Sinica, 1998, 31(5): 88—90.
- 梁宗锁, 康绍忠, 石培泽, 等. 控制性分根交替灌水对作物水分利用率的影响及节水效应. 中国农业科学, 1998, 31(5): 88—90.
- [27] Jia H T, Luo L Q, Su G. Discuss on feasibility of alternate furrow irrigation under mulch in Xinjiang. Chinese Cotton, 2003, 30(7): 8—9.
- 贾宏涛, 罗立权, 苏刚. 新疆棉花膜下交替沟灌技术的可行性探讨. 中国棉花, 2003, 30(7): 8—9.
- [28] Qiao L J, Shen S X, Zhao B H. Effective vegetable supply in Hebei province under the background of Beijing-Tianjin-Hebei integration initiative. Journal of Hebei Agricultural University (Social Sciences), 2020, 22(1): 36—40.
- 乔立娟, 申书兴, 赵邦宏. 京津冀协同背景下河北省蔬菜有效供给研究. 河北农业大学学报(社会科学版), 2020, 22(1): 36—40.
- [29] Zhao Y F, Luo Z X, Yu Y J, *et al.* Spatio-temporal changes of groundwater level and its driving factors in a typical region of Beijing-Tianjin-Hebei region, China. Journal of Natural Resources, 2020, 35(6): 1301—1313.
- 赵玉峰, 罗专溪, 于亚军, 等. 京津冀西北典型区域地下水位时空演变及驱动因素. 自然资源学报, 2020, 35(6): 1301—1313.
- [30] Gu B Q, Liu X L, Zhang W, *et al.* Research of water consumption pattern and water saving irrigation schedule on facilities bean in Bashang Area. Beijing Water, 2021(6): 26—30.
- 顾宝群, 刘晓亮, 张玮, 等. 坝上地区设施架豆耗水规律及节水灌溉制度试验研究. 北京水务, 2021(6): 26—30.
- [31] Gao F L. Research on water-saving production technology for greenhouse kidney bean fields in the Bashang cold and arid area of northwest Hebei Province. Baoding: Hebei Agricultural University, 2023.
- 高伏龙. 冀西北坝上寒旱区大棚芸豆田节水生产技术研究. 保定: 河北农业大学, 2023.
- [32] Yang Z S, Zhang L Z, Yan S H, *et al.* Primary study on wheat root system growth, development and distribution of later season. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1999, 14(1): 28—31.
- 杨兆生, 张立桢, 闫素红, 等. 小麦开花后根系衰退及分布规律的初步研究. 华北农学报, 1999, 14(1): 28—31.
- [33] Wei Z W, Ma G H. Studies on characteristics of root system of super-high-yielding hybrid rice combination Chaoyou 1000. Hybrid Rice, 2016, 31(5): 51—55.
- 魏中伟, 马国辉. 超高产杂交水稻超优1000的根系特征研究. 杂交水稻, 2016, 31(5): 51—55.

- [34] Tang W B, Deng H B, Xiao Y H, *et al.* Root characteristics of high-yield C Liangyou rice combinations of two-line hybrid rice. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(14): 2859—2868.
唐文帮, 邓化冰, 肖应辉, 等. 两系杂交水稻C两优系列组合的高产根系特征. *中国农业科学*, 2010, 43(14): 2859—2868.
- [35] Yang Q H, Gao E M, Ma X M, *et al.* Study on growing dynamic of maize root system in various soils. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2000, 15(3): 88—93.
杨青华, 高尔明, 马新明, 等. 不同土壤类型玉米根系生长发育动态研究. *华北农学报*, 2000, 15(3): 88—93.
- [36] Song Q, Xia K, Yang B, *et al.* Distribution characteristic of penetration resistance and determination of plough layer thickness of typical soils in dry farming area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(3): 369—377.
宋强, 夏可, 杨斌, 等. 旱作区典型土类穿透阻力分布特征及耕层厚度确定. *水土保持学报*, 2021, 35(3): 369—377.
- [37] Qiao L, Huang M J, Zhang W P, *et al.* Spatial pattern of cultivated layer thickness and its influencing factors in typical area of Shanxi province. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(2): 75—82.
乔磊, 黄明镜, 张吴平, 等. 山西省典型县域农田耕作层厚度空间格局及影响因素. *中国土壤与肥料*, 2020(2): 75—82.
- [38] Liang L, Sun H T, Xu G M, *et al.* Soil infiltration of rice-wheat rotation field under long-term mechanical treatment based on field in situ experiments. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(7): 110—118.
梁磊, 孙浩田, 徐高明, 等. 田间原位试验分析长期机械作业稻麦轮作地块土壤入渗性能. *农业工程学报*, 2023, 39(7): 110—118.
- [39] Jeřábek J, Zúmr D, Dostál T. Identifying the plough pan position on cultivated soils by measurements of electrical resistivity and penetration resistance. *Soil and Tillage Research*, 2017, 174(12): 231—240.
- [40] Wei J T. Effect of depth of plough bottom on cotton growth under drip irrigation under film. Shihezi: Shihezi University, 2022.
魏建涛. 膜下滴灌条件下犁底层深度对棉花生长的影响研究. 石河子: 石河子大学, 2022.
- [41] Zhai Z. The effect and its related mechanism of plow pan on crop production and environmental benefit. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.
翟振. 犁底层对作物生产与环境效应的影响及其机制研究. 北京: 中国农业科学院, 2018.