

王欣,冯豪,卜锴,等.不同种植模式对绿豆根际环境、根系发育及产量的影响[J].山西农业科学,2026,54(1):96-105.

WANG X, FENG H, BU K, et al. The effects of different planting patterns on the rhizosphere environment, root development, and yield of mung beans[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2026, 54(1): 96-105.

doi:10.26942/j.cnki.issn.1002-2481.2026.01.11

不同种植模式对绿豆根际环境、根系发育及产量的影响

王欣¹,冯豪¹,卜锴^{1,2},高峰³,张雄^{1,4},张盼盼^{1,4},刘思家¹

(1.榆林学院现代农学院,陕西榆林719000;2.榆林市横山区魏家楼镇农牧综合服务站,陕西榆林719000;

3.榆林市横山区农业技术推广中心,陕西榆林719100;4.陕西省陕北旱区作物节水工程技术研究中心,陕西榆林719000)

摘要:为进一步明确适宜陕北旱区绿豆生产的种植模式,以陕西省榆林市横山区特色绿豆品种榆绿1号为试验材料,采用随机区组设计,设置露地垄沟栽培(CK)、全膜覆盖双垄沟播(QM)、垄膜覆盖膜侧沟播(LM)、双沟覆膜(SG)共4个处理,研究不同种植模式对绿豆根际土壤微生物、根系形态、根系生物量和产量的影响。结果表明,绿豆进入成熟期后,与QM、SG处理相比,LM处理的根系体积分别增加了32.23%、27.40%,根系平均直径分别增加了39.24%、30.77%,根系生物量分别提高了15.21%、22.41%。SG处理较CK的全氮、有机质含量分别提高了81.81%、92.23%,LM处理与QM、SG、CK相比,pH值、碱解氮、有效磷、速效钾含量表现均最优。在土壤微生物检测表明,成熟期优势微生物整体趋势表现为LM>SG>QM>CK。LM处理下的绿豆产量最高,显著高于SG处理和CK。综上,垄膜覆盖膜侧沟播的覆膜种植方式为绿豆营造了适宜的土壤养分和微生物环境,促进其根系生长,显著提高绿豆产量,建议在陕北旱区绿豆生产中推广该覆膜方式。

关键词:绿豆;种植模式;土壤养分;土壤微生物;根系形态;产量

中图分类号:S522

文献标识码:A

文章编号:1002-2481(2026)01-0096-10

Effects of Different Planting Patterns on the Rhizosphere Environment, Root Development, and Yield of Mung Beans

WANG Xin¹, FENG Hao¹, BU Kai^{1,2}, GAO Feng³, ZHANG Xiong^{1,4}, ZHANG Panpan^{1,4}, LIU Sijia¹

(1.College of Advanced Agricultural Sciences, Yulin University, Yulin 719000, China; 2.Comprehensive

Agriculture and Animal Husbandry Service Station, Weijialou Town, Hengshan District, Yulin 719000, China;

3.Agricultural Technology Extension Center, Hengshan District, Yulin 719100, China; 4.Shaanxi Northern

Dryland Crop Water-Saving Engineering Technology Research Center, Yulin 719000, China)

Abstract: To further clarify the suitable planting pattern for mung bean production in the arid areas of northern Shaanxi, in this study, a characteristic mung bean variety Yulu 1 from Hengshan district, Yulin city, Shaanxi province was used as the experimental material. A randomized block design was adopted, and four treatments were set up: open-field ridge and furrow cultivation(CK), full-film mulching with double ridges and furrows(QM), ridge film mulching with film-side furrow planting(LM), and double furrow mulching(SG). The effects of different planting patterns on mung bean rhizosphere soil microorganisms, root morphology, root biomass, and yield were investigated. The results showed that after the mature stage, compared with the QM and SG treatments, the root volume of the LM treatment increased by 32.23% and 27.40%, respectively; the average root diameter increased by 39.24% and 30.77%, respectively; and the root biomass increased by 15.21% and 22.41%, respectively. Soil nutrient content measurements indicated that the total nitrogen and organic matter content of the SG treatment increased by 81.81% and 92.23% compared to CK, respectively. Among LM, QM, SG, and CK treatments, LM showed the best performance in terms of pH, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, and

收稿日期:2025-03-16

基金项目:国家自然科学基金(32260078);中央引导地方科技发展基金陕西省工程技术研究中心项目(2022ZY2-GCZX-05);陕西省农业农村厅科技创新驱动项目(2022NYT01);榆林市科技局产学研合作项目(CXY-2021-70,CXY-2021-83)

作者简介:王欣,在读硕士,研究方向:旱作农业及作物栽培技术,E-mail:834744713@qq.com

通信作者:张雄,教授,博士,主要从事水分生理生态及作物高产高效生物学基础研究,E-mail:yulinzhang2007@126.com

available potassium content. In soil microbial detection results, the overall trend of dominant microorganisms during the mature stage was LM>SG>QM>CK. The yield under the LM treatment was the highest, significantly exceeding that under the SG treatment and the CK. In summary, the treatment of ridge film mulching with film-side furrow planting created a suitable soil nutrient and microbial environment for mung beans, promoting root growth and significantly increasing mung bean yield. It was recommended to promote the cultivation technology of ridge film mulching with film-side furrow planting in mung bean production in the arid areas of northern Shaanxi.

Keywords: mung bean; planting pattern; soil nutrient; soil microorganism; root morphology; yield

陕北旱区是我国优质绿豆的主产区和优势产区^[1],产出的优质绿豆约85%用于出口创汇创收^[2],该作物已成为发展区域特色农业和当地农民增加收入的代表作物之一。然而,受地理因素限制以及杂粮种植空间的制约,旱地绿豆大多种植于干旱瘠薄土壤,栽培管理方式粗放混乱^[3],地膜覆盖节水措施等技术投入和科学配置程度仍然偏低^[4],导致绿豆产量受制于气候变化而增长缓慢。加之经济收益有限,陕北旱区绿豆种植面积持续下降^[5],急需通过科技支撑挖掘其增产潜力。

覆膜栽培技术作为旱作农业生产中一项重要的栽培措施^[6],在水资源高效利用和作物提质增产方面发挥了巨大的作用^[7]。目前,陕北旱区作物地膜覆盖种植面积约占总种植面积的72.30%,且地膜覆盖方式多样^[8],作物增产增效能力参差不齐。膜际栽培技术是通过开沟起垄覆膜栽培,增强地表雨水蓄集效率,抑制田间无效蒸发,保蓄土壤有效水分,增强作物抗旱能力,提高粮食产量及品质^[9-11]。宁松瑞等^[12]研究表明,种植模式在农作物生长过程中发挥着关键作用。目前,关于不同种植模式对绿豆根际环境的系统性影响及其与根系发育和产量之间内在关联的研究还比较少。多数研究仅聚焦于单一因素,缺乏对各因素综合影响

的考量。

本研究设置全膜覆盖双垄沟播、垄膜覆盖膜侧沟播、双沟覆膜等种植模式,并运用先进的土壤微生物检测技术、根系扫描分析系统等,深入探究不同种植模式对绿豆根际环境的微生物群落结构、土壤理化性质、根系形态建成、生理功能的影响,进而明确其与绿豆最终产量的关系,以期得到一套科学合理、切实可行且能显著提升绿豆种植综合效益的种植模式,为陕北旱区覆膜绿豆增产、水分高效利用技术体系的完整性研究提供理论支持。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验所用的绿豆为榆绿1号,是陕北旱区主栽的绿豆品种,具有成熟荚果不炸裂的特点。

1.2 试验地概况

试验地位于陕西省榆林市横山区波罗镇朱家沟村(37°58'N, 109°23'E),海拔1 093 m,属典型的干旱半干旱农牧交错区,年均气温8.6℃,年日照时数2 644 h,无霜期146 d,年均降水量446.8 mm,年降水总量的60%~80%集中在7—9月(图1)。

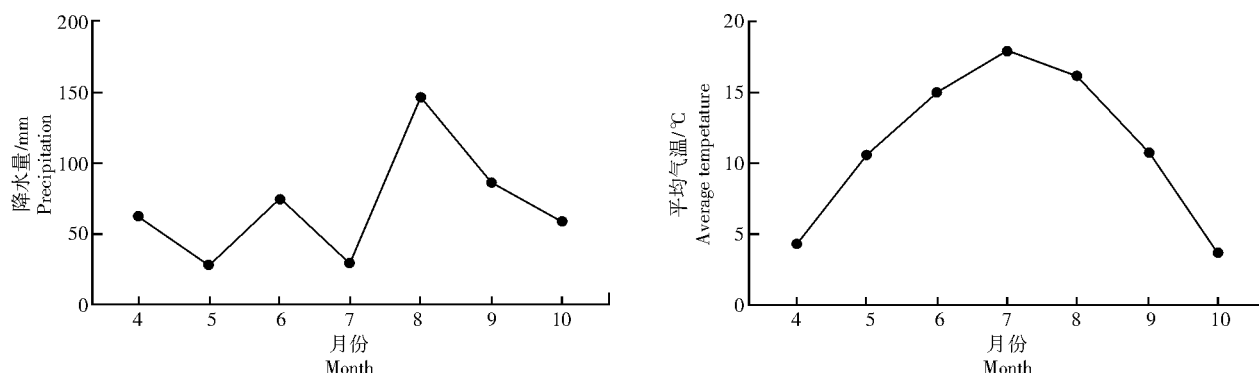


图1 2024年绿豆生育期内试验地日平均气温和降水量

Fig.1 Daily average temperature and precipitation in the experimental plot during the growth period of mung bean in 2024

从图1可以看出,降雨量月际间变化较大,分布严重不均,年蒸发量为1 211 mm。土壤为黄绵土,土壤基础养分含量低,耕层土壤有机质含量为3.2 g/kg,全氮含量为0.3 g/kg,碱解氮含量为18.9 mg/kg,速效磷含量为6.2 mg/kg,速效钾含量为66.0 mg/kg。土体疏松,孔隙度达50%~60%,透水性强,2 m土层内可蓄水400~500 mm。田间持水量为35.12%~22.30%,土壤有效水含量为8.40%~13.00%。

1.3 试验设计

试验采用随机区组设计,设置露地垄沟栽培(CK)、全膜覆盖双垄沟播(QM)、垄膜覆盖膜侧沟

播(LM)、双沟覆膜(SG)共4个处理,每种处理重复4次,每个小区长4 m,宽3 m,面积为12 m²。不同覆膜栽培方式如图2所示,QM处理采用双垄面全膜覆盖集雨沟播,穴播绿豆;LM处理仅垄上覆盖地膜,膜侧沟播绿豆;SG处理垄上“W”型双沟覆膜,“W”沟播绿豆;CK处理无膜覆盖,直接将绿豆穴播土壤中;各处理的垄高均为10 cm。CK、SG、LM、QM处理皆为宽窄行种植,行距为40~60 cm,播种深度为4~5 cm,小区间留存0.8 m保护行。地膜采用普通聚乙烯白色地膜,厚度为0.01 mm,便于后期地膜回收再利用。其他种植与管理方式与当地普通大田种植相同。

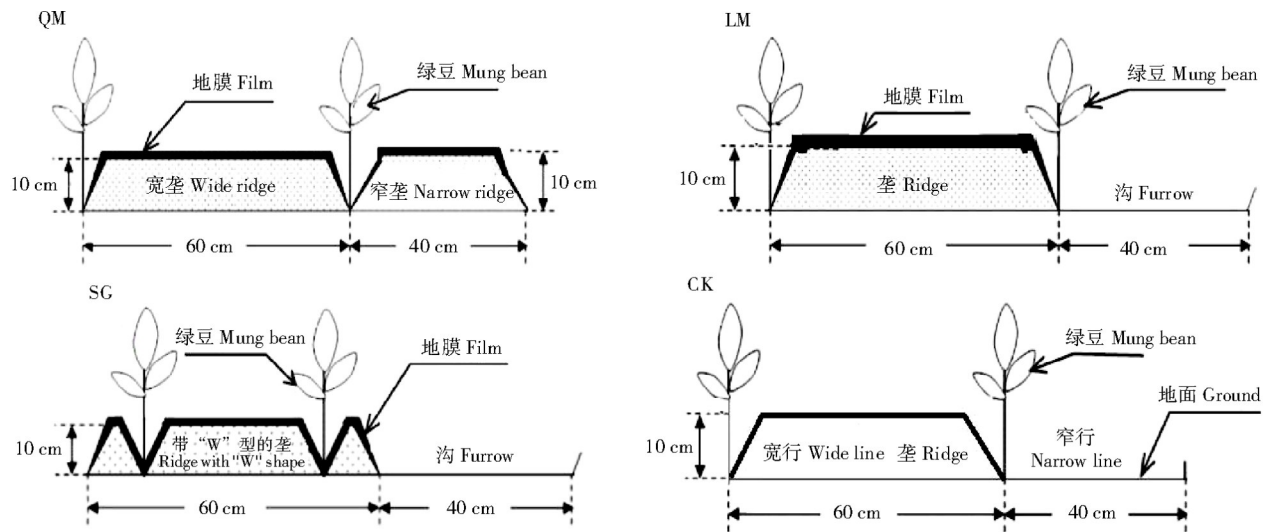


图2 不同覆膜种植方式

Fig.2 Different mulching planting methods

1.4 测定指标及方法

1.4.1 土壤养分含量测定 分别于播种前期、收获后,在绿豆行间(垄上)、株间(沟内)采集0~10、10~20、20~30 cm原状土,测定根际土壤养分含量。土壤pH值、根际土壤含氧量分别采用土壤酸碱度测定仪^[13]和含氧量测定仪进行动态监测,采用重铬酸钾容量法^[14]测定土壤有机质含量,采用凯氏定氮仪^[15]测定土壤碱解氮、全氮含量,采用钼锑抗比色法^[16]测定有效磷含量,采用火焰光度法^[17]测定土壤速效钾含量。

1.4.2 土壤微生物群落种类测定 分别于播种前、成熟期、收获后测定了各处理的根际土壤微生物群落种类和丰度。在根际范围内(根系周围5 mm的土壤),分别取10、20、30 cm深度的土壤,利用四

分法进行充分混匀,迅速通过150 μm筛子,取20 g储存于消毒后的离心管,于干冰条件下运输回实验室,-80℃超低温保存待测。测定根际土壤细菌16S和真菌ITS数量特征及多样性分布。对16S与ITS序列分别结合元数据进行ASV代表性序列抽平,统计抽平后ASV对应的界、门、纲、目、科、属、种各层级物种分类数量,并计算各ASV在不同样品中的丰度。

1.4.3 根系生物量测定 成熟期根系样品扫描后,挑出根瘤菌计数,并将根系样品于105℃杀青30 min,80℃烘至恒质量,分别称质量后获得土层根系生物量,作为根系干质量。

1.4.4 根系形态测定 成熟期采用根钻法和连续性采样装置采集绿豆根系,每个小区选取具有代

表性的植株3株,分离根系与地上部分,分别标记封装。带回实验室后清洗根系,首先用根系扫描仪(Epson V800)进行扫描,使用(Win RHIZO)根系分析系统进行测定,获得根系长度、表面积、直径、体积等形态指标。

1.4.5 绿豆产量及其构成因素的测定 收获期每个小区选取3 m²的区域采摘成熟绿豆,脱粒后统计产量,同时每个处理随机选取5株进行考种,记录单株荚数、单株粒数、百粒质量。

1.5 数据处理

采用Excel 2010和SPSS 24.0软件对数据统计分析并进行差异显著性检验(Duncan, $P < 0.05$),采用Graphpad Prism 9.5.0软件进行制图。

2 结果与分析

2.1 不同种植方式对土壤养分的影响

不同覆膜方式对绿豆收后土壤养分的影响如表1所示。

表1 不同覆膜方式对绿豆收后土壤养分的影响

Tab.1 Effects of different mulching methods on soil nutrients after harvesting mung bean

处理 Treatment	pH	全氮含量/(g/kg) Total nitrogen	有机质含量/ (g/kg) Organic matter	碱解氮含量/(mg/kg) Alkali-hydrolyzable nitrogen	有效磷含量/(mg/kg) Available phosphorus	速效钾含量/(mg/kg) Available potassium
CK	8.54±0.03c	0.22±0.00d	3.96±0.03d	15.36±0.39d	4.08±0.17c	66.00±1.73c
LM	8.68±0.03a	0.37±0.01b	6.78±0.01b	32.30±1.41a	10.50±0.20a	94.33±1.15a
QM	8.65±0.04ab	0.23±0.01c	4.60±0.09c	17.39±0.39c	2.41±0.11d	66.33±0.58c
SG	8.67±0.04b	0.39±0.01a	7.51±0.16a	27.78±0.68b	5.25±0.07b	77.67±1.15b

注:不同小写字母表示不同处理间在0.05水平上差异显著。下表同。

Note: The different lowercase letters indicated significant differences among the different treatments at the 0.05 level. The same as below.

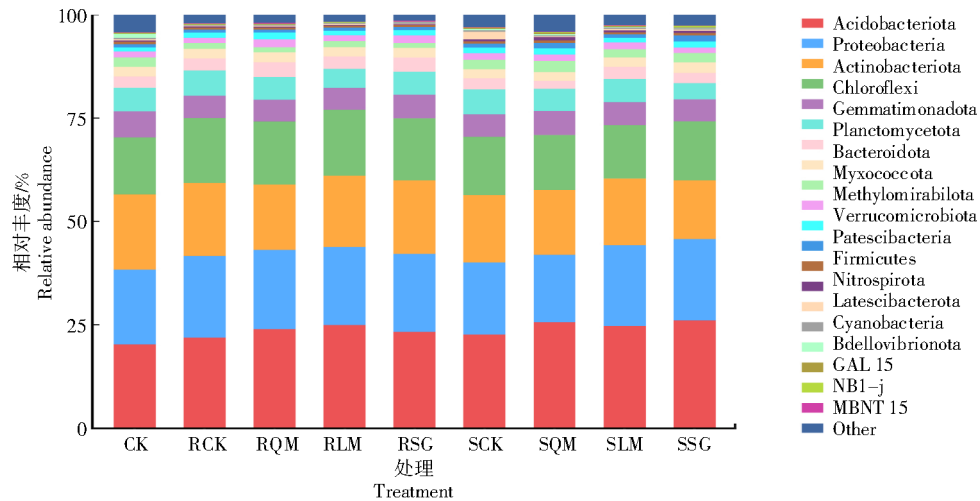
衡量土壤肥力的关键指标是土壤养分的含量。由表1可知,各处理的pH值、全氮、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量与CK相比,除QM处理的有效磷含量外,其余均有不同程度的提高,说明各处理均有利于土壤养分含量的积累,利于绿豆根系对养分的吸收利用。其中,LM处理的pH值、全氮、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量与CK相比分别显著增加了1.63%、72.72%、70.17%、114.03%、151.76%、40.97% ($P < 0.05$); LM处理的碱解氮、有效磷、速效钾含量较QM处理分别增加了88.07%、324.60%、40.41%,较SG处理分别增加了18.28%、101.12%、21.44%,表明LM处理利于土壤养分积累。

2.2 不同覆膜方式对土壤微生物丰度的影响

2.2.1 不同覆膜方式对土壤细菌丰度的影响 不同覆膜方式对土壤微生物群落组成数量影响不同,采用基于ASV(Amplicon sequence variant)的丰度及注释信息进行分析,对每个样品在各分类水平(门、纲、目、科、属、种)上的序列数目占总序列数的比例进行了统计。通过对播种前、成熟期、收获后的土壤微生物群落组成及丰度进行对比分析发现(图3),成熟期和收获后的土壤细菌丰度

均高于播种前,整体优势门类占比趋势是LM>QM>SG>CK,表明覆膜种植的土壤细菌丰度优势明显。

在门分类水平上,酸杆菌门(Acidobacteriota)、变形菌门(Proteobacteria)、放线杆菌门(Actinobacteriota)、绿弯菌门(Chloroflexi)和单胞菌门(Gemmatimonadota)为优势门类;其在CK、QM、LM、SG处理中的相对丰度分别为20.34%~26.10%、16.29%~19.61%、14.20%~18.24%、12.93%~15.92%、5.24%~6.34%。这些优势门类的相对丰度总和占比达69.77%~86.21%。其中,播种前,CK的细菌优势门类占比为76.12%;成熟期,RLM的细菌优势门类占比为86.13%,较RCK、RSG、RQM处理分别显著提高了9.12%、10.33%、4.55% ($P < 0.05$);收获后,各处理细菌优势门类占比均有所下降,SLM处理的细菌优势门类占比较SCK、SQM分别提高了9.10%、6.42%,而与SSG处理无显著差异。在主要菌群门类中,土壤酸杆菌门、变形菌门等的相对丰度对绿豆种植产生显著正响应,凸显出垄膜种植在门水平上的优势和影响。



CK 表示播种前露地垄沟栽培土壤, RCK、RQM、RLM、RSG 分别表示成熟期各处理的土壤, SCK、SQM、SLM、SSG 分别表示收获后各处理的土壤。图 4、5 同

CK represented soil under the treatment of open-field ridge and furrow cultivation before sowing. RCK, RQM, RLM, and RSG represented soil of each treatment at the mature stage, while SCK, SQM, SLM, and SSG represented soil of each treatment after harvest. The same as Fig. 4 and 5

图 3 不同覆膜方式下门水平上土壤细菌丰度分析

Fig.3 Analysis of soil bacterial abundance at the gate level under different mulching methods

在纲水平上,进一步分析不同覆膜方式下根际土壤细菌群落组成的差异,结果显示(图 4),不同覆膜方式间存在显著差异的根际土壤细菌的相对丰度均不超过 7.00% ($P < 0.05$),其中,相对丰度 $> 10.00\%$ 的菌纲主要为变形菌纲。成熟期和收获后的细菌丰度均高于播种前,整体优势纲类呈现 LM $>$ SG $>$ QM $>$ CK 的趋势,RLM 处理的变形菌纲(Vicinamibacteria)相对丰度较 RCK、RSG、RQM 处理显著提高了 11.48%~14.46% ($P < 0.05$),变形球菌纲(Alphaproteobacteria)、芽球菌纲(Blas-

tocatellia)、 γ -变形菌纲(Gammaproteobacteria)、放线菌纲(Actinobacteria)相对丰度分别显著提高了 8.81%~12.34%、5.60%~8.40%、6.99%~8.76%、5.26%~8.29% ($P < 0.05$); RCK、RQM、RSG 处理的细菌优势纲类总相对丰度,分别较 RLM 处理降低了 7.50%、7.13%、6.54%。收获后,LM 处理比 RCK、RQM、RSG 处理细菌优势纲类占比分别提高了 14.22%、12.53%、3.12%。综上,表明垄膜种植在土壤细菌纲水平上的优势明显。

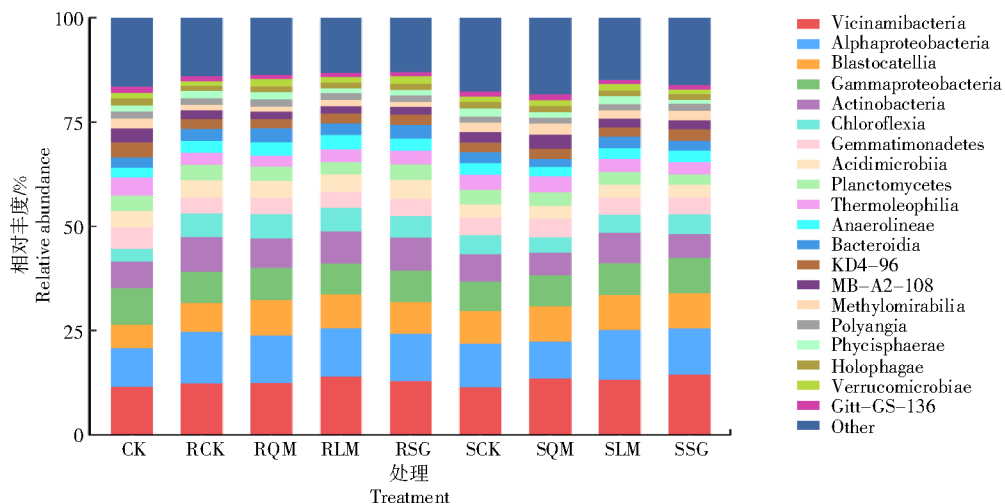


图 4 不同覆膜方式下纲水平上土壤细菌丰度分析

Fig.4 Analysis of soil bacterial abundance at the phylum level under different mulching methods

2.2.2 不同覆膜方式对土壤真菌丰度的影响 由图5可知,在门水平上,成熟期及收获后的真菌丰度均高于播种前,说明覆膜方式增加了绿豆土壤真菌的物种丰度。子囊菌门(Ascomycota)、被孢霉门(Mortierellomycota)、担子菌门(Basidiomycota)

为排名前3的优势门类,各处理中的相对丰度依次为73.15%~86.06%、1.63%~14.18%、3.47%~10.06%,这些优势门类的相对丰度总和占比达78.25%~91.30%。

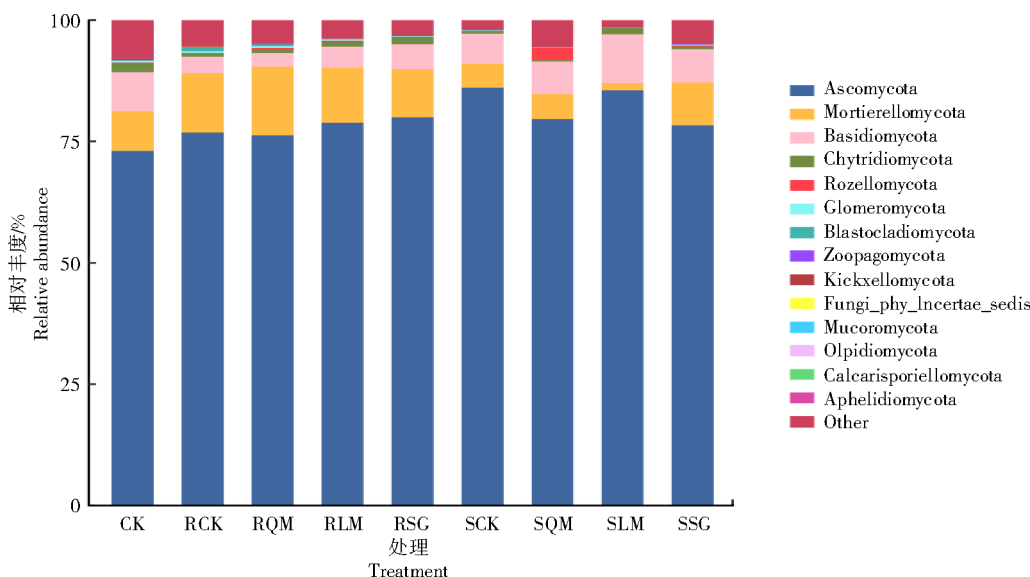


图5 不同覆膜方式下门水平上土壤真菌丰度分析

Fig.5 Analysis of soil fungal abundance at the gate level under different mulching methods

经过比较分析发现,优势门类在不同处理上的分布较均匀,RLM处理子囊菌门(Ascomycota)相对丰度显著高于其他优势门类($P<0.05$),丰度占比达到71.33%~84.66%。在主要菌群门类中,子囊菌、分枝杆菌等的相对丰度对绿豆生长产生显著正响应,在成熟期,RLM处理较RQM、RSG、RCK处理和CK分别提高了3.07%、0.22%、5.21%、10.77%;在收获后土壤样本中,SLM处理较SQM、SSG、SCK、CK分别提高了12.11%、8.53%、1.11%、16.33%,凸显出垄膜种植在门水平上真菌的丰度优势和影响。

2.3 不同覆膜方式对绿豆根系生物量及根瘤菌的影响

由表2可知,覆膜种植的根系鲜、干质量均高于露地种植,其中,LM处理与CK、QM、SG处理相比,根系鲜质量分别增加了67.52%、15.40%、22.37%;根系干质量分别增加了63.44%、37.30%、23.47%。根系生长到成熟期后,根瘤菌数量有所减少。LM处理的根瘤菌数量为65个,与QM、SG处理相比,分别显著增加了59.87%、39.68%($P<0.05$),其中,SG、QM处理的根瘤菌数量接近,无

显著差异,LM处理的根瘤菌数量最多。

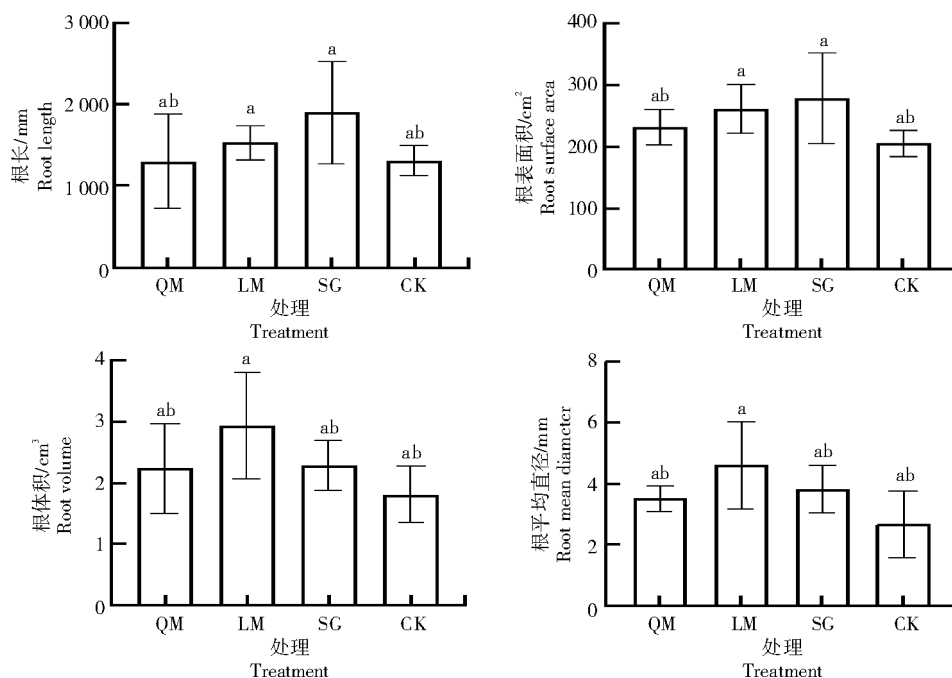
表2 不同覆膜方式对绿豆成熟期根系生物量及根瘤菌的影响

Tab.2 Effects of different mulching methods on root biomass and rhizobia at the mature stage of mung bean

处理 Treatment	根系鲜质量/ (g/株) Root fresh weight	根系干质量/ (g/株) Root dry weight	根瘤菌数量/ (个/株) Rhizobium
CK	15.47±1.78b	3.26±0.48c	31.33±15.95c
LM	23.50±5.14a	5.07±1.05a	65.67±23.86a
QM	19.75±5.11a	4.45±0.70ab	45.67±11.06b
SG	18.24±5.13ab	3.90±0.69b	49.67±13.65b

2.4 不同覆膜方式对绿豆根系形态构建的影响

不同覆膜方式下绿豆成熟期根系形态表现不同(图6),LM处理的根体积和根平均直径与CK、QM、SG处理相比,分别增加了42.19%、38.13%、32.77%、30.21%,20.60%、27.14%;SG处理的根长和根表面积与CK、QM、LM处理相比,分别增加了52.32%、43.31%、33.70%、37.54%,17.21%、23.17%。



不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平上差异显著

The different lowercase letters indicated significant differences among the different treatments at the 0.05 level

图 6 不同覆膜方式对绿豆根长、表面积、体积、平均直径的影响

Fig.6 Effects of different mulching methods on the root length, surface area, volume, and mean diameter of mung bean

2.5 不同覆膜方式对绿豆农艺性状及产量的影响

从表 3 可以看出,不同覆膜方式下的绿豆产量由高到低依次为 LM>QM>SG>CK。LM 处理的绿豆产量最高,较 SG 处理和 CK 分别显著增加了 21.40%、50.78% ($P<0.05$),较 QM 处理增加了 6.63%。各处理间单株荚数表现趋势与产量相同,

LM 处理的单株荚数较 SG 处理、CK 分别显著增加了 25.27%、60.29% ($P<0.05$); QM 处理的单株荚粒数最低。QM 处理的百粒质量最高,分别较 LM、SG 处理和 CK 显著增加了 17.88%、21.53%、22.26% ($P<0.05$)。

表 3 不同覆膜方式对绿豆农艺性状及产量的影响

Tab.3 Effects of different mulching methods on agronomic traits and yield of mung bean

处理 Treatment	单株荚数/个 Pods per plant	单荚粒数 Grains per pod	百粒质量/g One hundred grain weight	产量/(kg/hm ²) Yield	较 CK 增产 ± % Yield increase compared to CK
QM	41.22±9.59ab	7.30±1.07c	8.24±0.70a	1 518.06±34.51a	41.40
LM	48.44±4.72a	9.38±1.16a	6.99±0.42b	1 618.75±59.55a	50.78
SG	38.67±5.74bc	8.28±1.02bc	6.78±0.50b	1 333.33±74.51b	24.19
CK	30.22±9.24d	8.41±1.02ab	6.74±0.53b	1 073.61±96.47c	

3 结论与讨论

覆膜栽培技术改变了土壤的水分和温度状况,间接影响土壤养分的有效性^[18],同时创造了相对封闭的土壤微环境,有效减少了土壤中养分的流失。宋霄君等^[19]研究表明,垄膜种植技术作为一种新兴的农业种植技术,在调节土壤氮磷钾养分

方面具有独特作用。已有研究发现,垄膜种植显著改变了土壤中氮素的存在形态与含量^[20]。在陕西延安延川县的苹果园采用垄膜栽培后,土壤中的硝态氮含量明显增加^[21]。水稻田实施垄膜种植后发现,土壤有效磷含量有所提升,使得土壤中难溶性磷的溶解条件得到改善^[22]。蔬菜大棚采用膜际栽培技术种植黄瓜后,土壤速效钾含量显著提

高^[23]。本研究结果表明,不同种植模式对土壤养分含量影响不同,垄膜覆盖膜侧沟播技术营造出相对封闭的土壤环境,降低了土壤温度和湿度的变化幅度,有助于作物通气循环利用,减少土壤养分的挥发损失。其中,氮磷钾元素含量在覆膜种植方式中分别提高了18.28%~88.07%、101.12%~324.60%、21.44%~40.41%。因此,垄膜覆盖膜侧沟播对提高绿豆土壤中氮磷钾的含量有积极影响。

在覆膜种植体系下,土壤微生物展现出极为重要且复杂的作用。从养分循环角度来看,微生物作为分解者,显著加速了土壤中有机物质的矿化进程^[24]。蒋锐等^[25]研究发现,覆膜处理下土壤中参与氮素转化的氨化细菌、硝化细菌数量显著增加,使得土壤中可被植物直接吸收利用的铵态氮和硝态氮含量提升,有力保障了植物生长对氮素的需求。在针对小麦种植的研究中,利用高通量测序技术分析发现,垄膜种植田块土壤细菌的OTU(操作分类单元)数量相较于其他覆膜方式田块增加了15.33%~20.00%;在门水平上酸杆菌门、变形菌门、放线杆菌门等多个细菌门的相对丰度均有所上升^[26]。在柑橘种植研究中,垄膜种植处理下土壤中放线菌纲相对丰度相较于传统种植显著提高了40.21%~50.45%,土壤中柑橘黄龙病原菌数量锐减^[27]。在细菌微生物纲水平上,垄作覆膜处理下土壤中 α -变形菌纲、芽孢杆菌纲和放线菌纲的相对丰度远高于其他处理。在小麦—玉米轮作研究中,运用高通量测序技术分析发现,垄膜种植田块土壤真菌在纲水平的种类数相比传统种植增加了12.12%~18.33%。其中,子囊菌纲、莫氏分枝杆菌纲、担子菌纲等多个真菌纲的相对丰度显著上升^[28]。本研究结果表明,覆膜栽培技术对于土壤微生物的繁殖和优势菌群占比有显著影响,说明覆膜栽培可能通过提高土壤温度与湿度,为微生物的生长与繁殖创造了更为适宜的微环境,增强其活性;其中,垄膜种植技术细菌优势门类丰度占比在门水平上最大丰度达到86.21%,在纲水平上的丰度也有增加。在微生物真菌丰度分析中,垄膜种植技术无论在成熟期还是在收获后都能够突出优势真菌在门水平下的优势丰度。说明垄膜种植对土壤微环境进行了重塑,为多种细菌门和各类真菌纲创造了多样化且适宜的生存空间,有力推动了土壤细菌真菌在纲和门水平的多

样性发展。

查丽等^[29]在对玉米根系的研究中发现,垄膜种植的地上部分组织在生长逐渐停止后,根系依然保持较高的活力,继续吸收养分,维持干物质的缓慢积累,保障了籽粒灌浆等生理过程的顺利进行,这与本研究结果一致。阎旭东等^[30]研究发现,双沟覆膜栽培的玉米根系总根长相较于普通种植方式平均增加了30.41%~40.83%,在玉米成熟期,双沟覆膜栽培下的根系根表面积相较于普通种植增加了25.37%~35.60%。较大的根表面积意味着根系能够高效地吸收土壤中的养分和水分,为作物后期的籽粒灌浆等生理过程提供充足的物质保障。种植模式通过改变土壤水热条件为作物的根系形态发育提供良好环境,促进根系生长。垄膜覆盖膜侧沟播种植具有良好的土壤养分含量,能够培育出菌群多样性丰富、功能活性稳定的根际微生物环境,即根系分泌物为微生物提供碳源与能源,而微生物代谢产物则调控根系生长发育进程。本研究结果表明,高产品种绿豆在花期结束后,根系干物质积累速率呈现逐步下降的趋势,而根系细胞衰老进程得到显著延缓;从根系形态建成特征分析,垄膜种植模式则更利于提升根系体积与根平均直径。进入成熟期后,结合根系生物量动态变化与形态结构指标综合判断,垄膜种植模式可有效延缓根系老化进程,维持较高的根系生物量水平,进而保障生育后期根系对籽粒发育所需矿质养分与水分的持续供给能力,为绿豆实现优质高产奠定了坚实的生理基础。

本研究中,LM处理即垄膜种植模式显著提高了土壤养分含量、微生物细菌真菌丰度、根系生物量、根瘤菌数量、根体积、根平均直径,优化根系形态构建,使根系具有较强的抗逆性。该种植模式凭借其土壤养分与微生物群落调控的双重优势,形成了显著的互补效应:抑制土壤养分淋溶与挥发损失,促进速效氮、磷、钾等元素的累积;根际微生物丰度的提升能够强化土壤有机质分解、养分转化等生物化学过程,二者协同缓解干旱胁迫对作物生长的抑制作用。因此,在陕北旱区推荐垄膜覆盖膜侧沟播种植模式。

参考文献:

- [1] 王欧. 概述北方旱区农业技术[J]. 甘肃农业, 1999(5): 34-38.
WANG O. Overview of agricultural technology in the northern arid region[J]. Gansu Agriculture, 1999(5): 34-38.

- [2] 刘翠英,艾海舰.榆林大明绿豆及其无公害高产栽培技术研究[J].中国农学通报,2005(7):195-198.
LIU C Y, AI H J. Yulin Daming mung bean and its pollution-free high-yield cultivation technology[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005(7):195-198.
- [3] 穆志新,郝晓鹏,秦慧彬,等.山西省干旱地区农作物物质资源普查与分析[J].植物遗传资源学报,2016,17(4):637-648.
MU Z X, HAO X P, QIN H B, et al. General survey and analysis of crop germplasm resources in drought area of Shanxi Province[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2016, 17(4):637-648.
- [4] 杨芬,蔚富生,郝志华.山西农业灌溉节水对策探讨[J].山西农业科学,2004,32(1):79-81.
YANG F, WEI F S, HAO Z H. Inquiry into Shanxi agricultural irrigation water-saving policies[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2004, 32(1):79-81.
- [5] 王占礼.耕作技术在黄土高原地区的实践研究[J].重庆工学院学报,2000(1):91-98.
WANG Z L. Practice study of farming technology in Loess Plateau area[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, 2000(1):91-98.
- [6] 代海林,秦舒浩,张俊莲,等.沟垄覆膜栽培对旱作马铃薯生长及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2012,30(5):56-60.
DAI H L, QIN S H, ZHANG J L, et al. Effects of plastic film and ridge-furrow cropping patterns on growth and yield of potato in semiarid areas[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(5):56-60.
- [7] 张丽光,杨亚星,范雅琦,等.不同覆膜方式对旱作玉米产量与土壤理化性质的影响[J].山西农业科学,2025,53(4):11-19.
ZHANG L G, YANG Y X, FAN Y Q, et al. Effects of different film mulching methods on yield and soil physical and chemical properties of dryland maize[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(4):11-19.
- [8] 温晓霞,王立祥,廖允成.论我国北方旱区水资源的高效利用[J].中国农学通报,2000(1):59-60.
WEN X X, WANG L X, LIAO Y C. On the efficient utilization of water resources in the northern arid regions of China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2000(1):59-60.
- [9] 郭志利,古世禄.覆膜栽培方式对谷子(粟)产量及效益的影响[J].干旱地区农业研究,2000(2):33-39.
GUO Z L, GU S L. Effect of mulch cultivation on yield and benefit of millet (millet) [J]. Agricultural Research in Dry Areas, 2000(2):33-39.
- [10] 张雷,牛芬菊,李小燕,等.旱地全膜双垄沟播秋覆膜对玉米产量和水分利用率的影响[J].中国农学通报,2010,26(22):142-145.
ZHANG L, NIU F J, LI X Y, et al. Effects of planting in furrow and whole plastic-film mulching on double ridges in autumn on yield index of corn production and water use efficiency in dry lands[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(22):142-145.
- [11] 高翔,龚道枝,顾峰雪,等.覆膜抑制土壤呼吸提高旱作春玉米产量[J].农业工程学报,2014,30(6):62-70.
GAO X, GONG D Z, GU F X, et al. Inhibiting soil respiration and improving yield of spring maize in fields with plastic film mulching[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(6):62-70.
- [12] 宁松瑞,左强,石建初,等.新疆典型膜下滴灌棉花种植模式的用水效率与效益[J].农业工程学报,2013,29(22):90-99.
NING S R, ZUO Q, SHI J C, et al. Water use efficiency and benefit for typical planting modes of drip-irrigated cotton under film in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(22):90-99.
- [13] 陈花,刘娜,姚晓倩,等.改良基质对煤矿区土壤理化性质的优化[J].山西农业科学,2025,53(1):90-100.
CHEN H, LIU N, YAO X Q, et al. Optimization of improved substrates on soil physical and chemical properties in coal mining areas[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(1):90-100.
- [14] 荣国华,周景云,吴鸿宇,等.流动分析仪与凯氏定氮仪测定土壤全氮含量之比较研究[J].水土保持研究,2023,30(1):204-208.
RONG G H, ZHOU J Y, WU H Y, et al. Comparative study on the flow analyzer and the Kjeldahl nitrogen analyzer for measuring soil total nitrogen[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1):204-208.
- [15] KOWALENKO C G, BABUIN D. Interference problems with phosphoantimonymolybdenum colorimetric measurement of phosphorus in soil and plant materials[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2007, 38(9/10):1299-1316.
- [16] UMAZ A, UMAZ K, AYDIN I, et al. Determination of trace manganese contents in real samples and interference studies by combining coated magnetic nanoparticle-assisted solid-phase microextraction with slotted quartz tube-flame atomic absorption spectrometry[J]. Monatshefte Für Chemie - Chemical Monthly, 2025, 156(4):381-391.
- [17] GOWDA S, KRISHNA S D, DESAI S, et al. Clinical experience and outcomes in ASV reflux treatment: a 20-month single center analysis[J]. Journal of Vascular Surgery: Venous and Lymphatic Disorders, 2025, 13(2):102054.
- [18] 李凯,罗世武,王湛,等.不同类型地膜覆盖对宁夏旱作区土壤环境及饲用型作物生长的影响[J].河南农业科学,2025,54(1):90-100.
LI K, LUO S W, WANG Z, et al. Effects of different types of surface mulching on soil environment and growth of forage crop in Ningxia dry farming area[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2025, 54(1):90-100.
- [19] 宋霄君,吴会军,武雪萍,等.长期保护性耕作可提高表层土壤碳氮含量和根际土壤酶活性[J].植物营养与肥料学报,2018,24(6):1588-1597.
SONG X J, WU H J, WU X P, et al. Long-term conservation tillage improves surface soil carbon and nitrogen content and rhizosphere soil enzyme activities[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(6):1588-1597.
- [20] 李廷亮,谢英荷,洪坚平,等.追氮和垄膜沟播种植对晋南旱地冬小麦氮素利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17

- (6):1300-1308.
- LI T L, XIE Y H, HONG J P, et al. Effect of nitrogen chasing and ridge film furrow planting on nitrogen use of winter wheat in dry land in southern Shanxi province[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2011, 17(6):1300-1308.
- [21] 岳文俊, 张富仓, 李志军, 等. 水氮耦合对甜瓜氮素吸收与土壤硝态氮累积的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2):88-96.
- YUE W J, ZHANG F C, LI Z J, et al. Effects of water and nitrogen coupling on nitrogen uptake of muskmelon and nitrate accumulation in soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2):88-96.
- [22] 饶越悦, 周顺利, 黄毅, 等. 秸秆富集深层还田对农田土壤质量影响的研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(10):1579-1587.
- RAO Y Y, ZHOU S L, HUANG Y, et al. Advances in research involving deep incorporation of enriched straw on soil quality[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(10):1579-1587.
- [23] 朱国梁, 毕军, 夏光利, 等. 不同缓释肥料对黄瓜产量、品质及养分利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013(1):68-73.
- ZHU G L, BI J, XIA G L, et al. Effects of different slow-release fertilizers on cucumbers' yield, quality and nutrient use efficiency[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2013(1):68-73.
- [24] 丁雪丽, 韩晓增, 乔云发, 等. 农田土壤有机碳固存的主要影响因子及其稳定机制[J]. 土壤通报, 2012, 43(3):737-744.
- DING X L, HAN X Z, QIAO Y F, et al. Sequestration of organic carbon in cultivated soils: main factors and their stabilization mechanisms[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(3):737-744.
- [25] 蒋锐, 郭升, 马德帝. 旱地雨养农业覆膜体系及其土壤生态环境效应[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(3):317-328.
- JIANG R, GUO S, MA D D. Film mulching system of rain-fed agriculture in dryland and its effects on soil ecology and environment[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(3):317-328.
- [26] 黄儒, 苍晶, 于晶, 等. 冬小麦小RNA高通量测序及生物信息学分析[J]. 植物学报, 2014, 49(1):8-18.
- HUANG R, CANG J, YU J, et al. Solexa sequencing and bioinformatics analysis of small RNA in winter wheat[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2014, 49(1):8-18.
- [27] SAMBORSKA-GOIK K, BOTTRELL S. Bayesian modeling of sulphate isotopic composition in pristine, contaminated, and experimental environments for investigating microbial bacterial reduction[J]. Journal of Hydrology, 2025, 652:132662.
- [28] 陈磊, 宋书会, 云鹏, 等. 连续三年减施氮肥对潮土玉米生长及根际土壤氮素供应的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(9):1482-1494.
- CHEN L, SONG S H, YUN P, et al. Effects of reduced nitrogen fertilizer for three consecutive years on maize growth and rhizosphere nitrogen supply in fluvo-aquic soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(9):1482-1494.
- [29] 查丽, 谢孟林, 朱敏, 等. 垄作与覆膜对川中丘陵春玉米根系分布及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3):855-862.
- ZHA L, XIE M L, ZHU M, et al. Effects of ridge-cultivation and plastic film mulching on root distribution and yield of spring maize in hilly area of central Sichuan basin, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3):855-862.
- [30] 阎旭东, 王秀领, 徐玉鹏, 等. 旱地春玉米不同覆膜种植模式的增产效应[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(1):75-82.
- YAN X D, WANG X L, XU Y P, et al. Yield-increase effect of film-mulching and planting pattern on dryland spring maize [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(1):75-82.