

网络出版时间:2024-04-11 20:10 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2024.10.006
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1390.S.20240409.1714.011

藜麦播期和密度对土壤理化性质及 微生物群落结构的影响

吴嘉宇^{1a,2}, 马学军³, 刘文瑜^{3,4}, 王旺田^{1a,2}, 袁鹏飞^{1b}, 杨发荣^{3,4}

(1 甘肃农业大学 a 生命科学技术学院, b 草业学院 甘肃 兰州 730070; 2 省部共建干旱生境作物学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730070;
3 甘肃省农业科学院 畜牧与绿色农业研究所, 甘肃 兰州 730070; 4 甘肃省藜麦育种栽培技术及综合开发工程研究中心, 甘肃 兰州 730070)

[摘要] 【目的】分析藜麦播期、密度对土壤养分、酶活性和微生物群落结构的影响, 确定甘南地区藜麦的最佳播种期和播种密度, 旨在为藜麦栽培制度的调整和藜麦产业的推广提供理论依据和科学参考。【方法】以藜麦品种‘陇藜 5 号’为材料, 采用双因素随机区组设计, 设播期和播种密度 2 个因素, 其中播期设早播(5 月 15 日播种, E), 晚播(6 月 24 日播种, L) 2 个水平; 播种密度设低密度(1.2 万株/hm², D1)、中密度(1.6 万株/hm², D2)、高密度(2.0 万株/hm², D3) 3 个水平, 进行完全组合设计, 共 6 个处理, 分别为早播低密度(ED1)、早播中密度(ED2)、早播高密度(ED3)、晚播低密度(LD1)、晚播中密度(LD2)和晚播高密度(LD3), 分析不同处理藜麦的产量及其构成因子, 测定不同处理藜麦根际土壤 pH、养分含量以及土壤酶活性; 采用 Illumina-HiSeq 高通量测序技术, 分析不同处理藜麦根际土壤细菌群落结构组成和多样性, 最后对不同处理藜麦土壤 pH 和养分含量、细菌群落相对丰度与酶活性的相关性进行了分析。【结果】播期、密度对藜麦产量及其构成因子有明显影响。各处理间主穗长差异不显著。6 个处理中, LD1 处理藜麦有效分枝数、千粒质量均最高, ED2 和 ED3 处理总产量均较高。播期、密度对藜麦根际土壤 pH 无显著影响, 但对土壤养分含量以及酶活性有明显影响。在相同密度下, 无论是在分枝期还是在灌浆期, 晚播藜麦根际土壤全磷、全钾、全氮和有机质含量总体高于早播处理。在相同密度下, 分枝期晚播藜麦根际土壤过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶活性总体高于早播处理, 而早播处理土壤碱性磷酸酶活性低于晚播处理; 灌浆期晚播藜麦根际土壤过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性总体低于早播处理, 晚播处理土壤蔗糖酶活性则高于早播处理。播期、密度对藜麦根际土壤细菌群落结构有明显影响。在分枝期, ED2 处理 Shannon 指数平均值和 Simpson 指数平均值最大; 在灌浆期, LD2 处理 Chao1 指数最高, ED3 处理的 Coverage 指数最高。相关性分析结果表明, 土壤养分含量、酶活性与土壤细菌群落结构有明显相关性, 其中土壤脲酶活性与速效磷含量呈极显著正相关, 过氧化氢酶活性与速效钾含量呈显著正相关, 土壤蔗糖酶与全氮含量呈极显著正相关; 过氧化氢酶活性与放线菌门呈极显著正相关, 脲酶活性与变形菌门呈显著正相关, 蔗糖酶活性与芽单胞菌门呈极显著正相关。【结论】在甘肃省高海拔冷凉地区, 播期、密度对藜麦产量及其根际土壤养分含量、酶活性和细菌群落有明显影响, 在该地区藜麦播种时间以 5 月中旬、播种密度以(1.6~2.0)万株/hm² 为宜。

[关键词] 藜麦栽培; 播期; 密度; 土壤养分; 土壤微生物群落结构

[中图分类号] Q948.1; S512.9

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2024)10-0046-13

Effects of quinoa sowing date and density on soil physicochemical properties and microbial community structure

WU Jiayu^{1a,2}, MA Xuejun³, LIU Wenyu^{3,4}, WANG Wangtian^{1a,2},
YUAN Pengfei^{1b}, YANG Farong^{3,4}

[收稿日期] 2023-08-10

[基金项目] 国家自然科学基金项目(31660357); 中央引导地方科技发展专项; 甘肃省科技支撑计划项目(21JR7RA730); 甘肃省农业科学院农业科技创新专项(2022GASS07); 甘肃省农业科学院重点研发计划项目(2020GAAS31); 兰州市科技计划项目(2021-1-168); 甘肃省重点研发计划项目(23YFWA0011); 甘肃省现代农业科技支撑体系区域创新中心重点科技项目(2023GAAS03)

[作者简介] 吴嘉宇(1999—), 女, 四川三台人, 在读硕士, 主要从事农艺与种业研究。E-mail: 2812423420@qq.com

[通信作者] 王旺田(1975—), 男, 甘肃庄浪人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事作物遗传育种研究。E-mail: wangw@gsau.edu.cn

(1 a College of Life Science and Technology, b Pratacultural College, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2 State Key Laboratory of Arid Habitat Cropology, Lanzhou, Gansu 730070, China; 3 Institute of Animal Grass and Green Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China; 4 Engineering Research Center of Quinoa Breeding and Cultivation Technology and Comprehensive Development of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: 【Objective】 The effects of quinoa sowing date and density on soil nutrients, enzyme activities and microbial community structure were analyzed, and the optimal sowing date and sowing density of quinoa in Gannan area were determined, aiming to provide a theoretical basis and scientific reference for the adjustment of quinoa cultivation system and the promotion of quinoa industry. **【Method】** Using quinoa variety ‘Longquinoa No. 5’ as the material, a two-factor random block design was adopted, and two factors were set, including early sowing (sowing on May 15, E) and late sowing (sowing on June 24, L), and low density (1.2×10^4 plants/hm², D1), medium density (1.6×10^4 plants/hm², D2) and high density (2.0×10^4 plants/hm², D3), a total of 6 treatments, namely early sowing low density (ED1), early sowing medium density (ED2), early sowing high density (ED3), late sowing low density (LD1), late sowing medium density (LD2) and late sowing high density (LD3), the yield and its constituent factors of different treatments of quinoa were analyzed, and the rhizosphere soil pH of different treatments was determined. Nutrient content and soil enzyme activity, Illumina-HiSeq high-throughput sequencing technology was used to analyze the composition and diversity of bacterial community in rhizosphere soil of quinoa under different treatments, and finally the correlation between soil pH and nutrient content, relative abundance of bacterial community and enzyme activity was analyzed. **【Result】** Sowing date and density had significant effects on quinoa yield and its constituent factors. There was no significant difference in main panicle length among the treatments. Among the six treatments, the effective branch number and 1 000-grain weight of quinoa in LD1 treatment were the highest, and the total yield of ED2 and ED3 treatments was higher. Sowing date and density had no significant effect on soil pH in the rhizosphere of quinoa, but had a significant effect on soil nutrient content and enzyme activity. At the same density, the contents of total phosphorus, total potassium, total nitrogen and organic matter in the rhizosphere soil of late sowing quinoa were generally higher than those in the early sowing treatment, both at the branching stage and at the grain-filling stage. At the same density, the activities of catalase, sucrase and urease in the rhizosphere soil of late sowing quinoa at the branching stage were generally higher than those in the early sowing treatment, while the alkaline phosphatase in the early sowing treatment was lower than that in the late sowing treatment, and the catalase and alkaline phosphatase activities in the rhizosphere soil of late sowing quinoa at the grain filling stage were generally lower than those in the early sowing treatment, and the sucrase activities in the late sowing treatment were higher than those in the early sowing treatment. Sowing date and density had significant effects on the bacterial community structure of quinoa rhizosphere soil. In the branching stage, the average Shannon index and Simpson index of ED2 treatment were the highest, and the Chao1 index of LD2 treatment was the highest, and the coverage index of ED3 treatment was the highest. The results of correlation analysis showed that soil nutrient content and enzyme activity were significantly correlated with soil bacterial community structure, among which soil urease activity was significantly positively correlated with available phosphorus content, catalase activity was significantly positively correlated with available potassium content, soil sucrase was significantly positively correlated with total nitrogen content, catalase activity was significantly positively correlated with actinomycetes, urease activity was significantly positively correlated with Proteobacteria, and sucrase activity was significantly positively correlated with Blastomonas. **【Conclusion】** In the high-altitude cold areas of Gansu Province, the sowing date and density had significant effects on the yield of quinoa, its rhizosphere soil nutrient content, enzyme activity and bacterial community, and the sowing time of quinoa in this area was mid-May and the sowing density was $(1.6-2.0) \times 10^4$ plants/hm².

Key words: quinoa cultivation; sowing date; density; soil nutrients; soil microbial community structure

藜麦(*Chenopodium quinoa* Willd.) 又称南藜麦、藜谷、印第安麦等,是藜科藜属一年生双子叶草本植物^[1],原产于南美洲的安第斯山脉地区,主要分布在秘鲁、玻利维亚和厄瓜多尔等地方,距今已有 7 000 多年的种植历史,是古印加人的传统粮食作物^[2-3]。藜麦富含人体必需的多种营养物质,被联合国粮食及农业组织认定为唯一一种单体即可满足人类基本营养需求的食物^[4],因为其丰富、全面的营养价值,被人们称之为“粮食之母”^[5]。藜麦种植范围广,从海平面到海拔 3 800 m 均可种植,而且有很强的抗逆性,具有耐寒、耐旱、耐盐碱等生物学特性^[6]。

虽然我国于 1996 年在西藏开展了藜麦的试种,但并未形成大规模产业种植^[7],经过多年推广,直至 2019 年我国藜麦种植面积达 1.6 万 hm^2 ,总产量约 2.88 万 t,生产规模已排世界第 3 位,仅次于秘鲁和玻利维亚^[8]。由于生长习性以及对种植条件要求的特殊性,不同环境下生产出的藜麦品质相差极大,目前其主要分布于南美洲和亚洲的中国西北地区等^[9]。

研究发现,藜麦生长对温度、日照时长及光周期等环境比较敏感^[10-11]。只有适宜播期才能充分地利用自然条件中的有利因素,避开自然条件中不利因素,实现高产目标^[12-13]。密度是影响作物产量的重要因素,通过合理的群体密度可以调节单株分蘖数量、成穗率、抗倒伏性、结实性等实现作物高产潜力的发挥^[14-15]。目前,关于播期、密度对藜麦产量及土壤养分、酶活性、微生物群落结构影响的研究较少。因此,本试验以‘陇藜 5 号’为材料,以播期和密度为试验因素,测定不同处理藜麦产量和土壤养分含量,同时采用 Illumina-HiSeq 高通量测序技术,分析不同处理根际土壤细菌群落结构组成和多样性,旨在为藜麦栽培制度的调整及藜麦产业推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘南藏族自治州合作市卡加曼乡甘南州农业科学研究所,地处青藏高原的东北边缘。平均海拔 2 737 m,气候属于高寒湿润类型,冷季长、暖季短,年均气温 3 $^{\circ}\text{C}$,年均降水量 639.8 mm,降雨主要集中在 7—9 月,无霜期 139 d,地表径流深 200~350 mm,年均蒸发量 1 222 mm。试验地属旱

川地,土质为耕种亚高山草甸草原土,肥力中等。

1.2 试验材料

供试藜麦‘陇藜 5 号’由甘肃省农业科学院畜草与绿色农业研究所提供。

1.3 试验设计

试验开始于 2022 年 5 月,前茬作物为藜麦。试验采用双因素随机区组设计,设播期和播种密度 2 个因素,其中播期设早播(5 月 15 日播种,E)和晚播(6 月 24 日播种,L) 2 个水平;播种密度设低密度(1.2 万株/ hm^2 ,D1)、中密度(1.6 万株/ hm^2 ,D2)和高密度(2.0 万株/ hm^2 ,D3) 3 个水平,进行完全组合设计,共 6 个处理,分别为早播低密度(ED1)、早播中密度(ED2)、早播高密度(ED3)、晚播低密度(LD1)、晚播中密度(LD2)和晚播高密度(LD3),每个处理 3 次重复。每个试验小区面积为 28 m^2 (4 $\text{m} \times 7 \text{ m}$),共 18 个小区。区组之间走道宽 0.5 m,小区间设置 1.5 m 的保护行。分别在藜麦早播分枝期(7 月 11 日)和灌浆期(8 月 13 日)以及晚播分枝期(8 月 13 日)和灌浆期(9 月 29 日),在每个小区随机取 10 株植株(带 0~10 cm 土层根际土壤),自封袋开口保存,带回实验室,采用“抖土法”将根际土壤与根分离,一部分土壤装入 50 mL 离心管,于 -20 $^{\circ}\text{C}$ 保存,用于土壤微生物群落结构的测定;另一部分土壤自然风干后过 60 目(0.246 mm)筛,用于测定土壤 pH 和养分含量以及土壤酶活性。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 藜麦产量及构成因子 于藜麦成熟期,在每个小区随机取 10 株植株,采用卷尺测量主穗长,统计有效分枝数。收获后脱粒,用天平称量千粒质量与单株产量,最后统计小区产量并折合成总产量。

1.4.2 土壤 pH 和养分含量 土壤 pH 采用 pH 计测定(水土质量体积比为 2.5 : 1)。土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定,土壤全磷含量采用硫酸钼锑抗比色法测定,土壤全钾含量采用火焰光度计法测定,土壤速效氮、速效磷、速效钾含量采用土壤养分速测仪测定,土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法-外加热法测定。

1.4.3 土壤酶活性 土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶活性分别使用苏州科铭生物技术有限公司 Solid-Catalase、Solid-Urease、Solid-Sucrase、S-AKP/ALP 试剂盒检测,具体检测方法参照说明书进行。

1.4.4 土壤细菌群落结构组成和多样性 参照土壤 DNA 提取试剂盒使用说明书对土壤样品细菌总 DNA 进行提取,并经 1.2% 琼脂糖凝胶电泳检测后,对细菌的 16S rRNA 基因序列的 V3—V4 区进行扩增,将扩增产物送上海派森诺生物科技有限公司,利用 Illumina Hiseq 2500 平台对其进行高通量测序。对测序获得的原始数据进行双端拼接、过滤和去除嵌合体等步骤后,按照 QIIME2 data 2 分析流程进行去噪和聚类,获得操作分类单元(operational taxonomic units),然后对 OTUs 的序列进行物种注释。分析不同样本(组)之间共有、特有的 OTUs,绘制韦恩图(Venn graph)。根据 OTUs 在不同样本中的分布,分析不同处理土壤细菌群落 α 多样性和 β 多样性,其中 α 多样性用 Shannon 指数、Simpson 指数、Chao1 指数、Coverage 指数表征, β 多样性用

非度量多维尺度(NMDS)分析。在物种分类学组成层面,通过各种非监督、监督的排序、聚类和建模手段,结合相应统计学检验方法,进一步分析不同处理土壤细菌门水平上相对丰度组成差异。上述分析工作在上海派森诺生物科技有限公司 genescloud 云平台网站(www.genescloud.cn)完成。

1.5 数据处理与分析

用 Microsoft Excel 软件进行数据的处理,采用 SPSS 22.0 软件对所测数据进行相关性分析和多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 播期、密度对藜麦产量及其构成因子的影响

不同播期、种植密度对藜麦产量构成因子的影响如表 1 所示。

表 1 播期、密度对藜麦产量及构成因子的影响

Table 1 Effects of sowing date and density on yield components of quinoa

处理 Treatment	主穗长/cm Main panicle length	有效分枝数/株 ⁻¹ Effective branching number	千粒质量/g Thousang seed weight	单株产量/g Yield per plant	总产量/ (kg·hm ⁻²) Total yield
ED1	29.33±3.06 a	17.67±2.08 b	3.56±0.10 ab	88.53±2.76 b	2 465.40±4.07 b
ED2	24.67±3.51 a	9.67±3.51 c	3.61±0.05 ab	78.66±3.43 c	2 899.05±3.58 a
ED3	26.67±5.77 a	14.00±1.00 b	3.59±0.15 ab	96.25±3.70 a	2 807.25±3.77 a
LD1	23.56±4.74 a	22.33±2.52 a	3.67±0.21 a	41.20±1.17 e	2 142.60±3.49 c
LD2	24.78±5.50 a	14.67±2.52 b	3.29±0.10 c	47.04±3.34 d	1 443.45±4.54 e
LD3	23.11±1.95 a	17.33±0.58 b	3.36±0.15 bc	49.33±2.75 d	1 972.35±2.86 d

注:同列数据后标不同小写字母代表不同处理间差异显著($P<0.05$),下表同。

Note: Different lowercase letters represent significant differences between different treatments ($P<0.05$), the same below.

表 1 显示,各处理间主穗长差异不显著($P>0.05$),藜麦主穗长以 ED1 处理最大,LD3 处理最小,ED1 较 LD3 处理增加了 26.91%。LD1 处理有效分枝数最大,较 ED1、ED2、ED3、LD2 和 LD3 处理显著增加,但 ED1、ED3、LD2 和 LD3 处理间差异不显著。LD1 处理藜麦籽粒千粒质量最高,较 LD2 和 LD3 处理分别显著增加了 11.55% 和 9.23% ($P<0.05$),但是与 ED1、ED2 和 ED3 处理差异不显著。各处理间单株产量差异显著,早播处理的单

株产量显著高于晚播处理;6 个处理中,ED3 处理单株产量最高,较 ED1、ED2、LD1、LD2 和 LD3 处理分别显著增加了 8.72%,22.36%,133.62%,104.61%,95.11%。ED2 和 ED3 处理总产量均较高,且显著高于其他处理。

2.2 播期、密度对藜麦根际土壤 pH 及养分含量的影响

2.2.1 分枝期土壤 pH 及养分含量 不同播期、种植密度对藜麦分枝期土壤养分含量的影响如表 2 所示。

表 2 播期和密度对分枝期藜麦根际土壤 pH 及养分含量的影响

Table 2 Effects of sowing date and density on pH and nutrient contents in the rhizosphere soil at the branching stage of quinoa

处理 Treatment	全磷/(g·kg ⁻¹) Total phosphorus	全钾/(g·kg ⁻¹) Total potassium	全氮/(g·kg ⁻¹) Total nitrogen	速效氮/(mg·kg ⁻¹) Available nitrogen
ED1	2.78±0.30 c	18.05±3.50 a	1.74±0.03 bc	24.30±3.90 d
ED2	2.96±0.10 bc	19.17±0.18 a	1.64±0.04 c	28.80±1.41 c
ED3	2.84±0.11 c	18.20±0.48 a	1.63±0.06 c	32.76±2.17 bc
LD1	3.26±0.15 b	19.26±1.47 a	2.05±0.05 a	24.20±2.74 d
LD2	2.99±0.23 bc	18.61±1.22 a	2.06±0.03 a	34.68±1.46 ab
LD3	3.73±0.17 a	18.89±0.13 a	1.88±0.28 ab	38.16±1.55 a

表 2(续) Table 2(continued)

处理 Treatment	速效磷/(mg·kg ⁻¹) Available phosphorus	速效钾/(mg·kg ⁻¹) Available potassium	有机质/(g·kg ⁻¹) Organic matter	pH
ED1	18.71±1.05 c	46.13±0.17 d	2.82±0.02 e	7.65±0.17 a
ED2	21.90±0.43 b	72.61±3.16 d	2.47±0.15 e	7.77±0.10 a
ED3	25.73±0.24 a	56.86±3.51 d	3.62±0.05 d	7.84±0.03 a
LD1	9.83±0.28 d	735.82±14.43 a	19.96±0.14 a	7.83±0.13 a
LD2	6.53±0.25 f	615.46±30.68 b	13.04±0.36 b	7.66±0.10 a
LD3	8.46±0.38 e	435.38±12.17 c	8.40±0.65 c	7.73±0.26 a

表 2 显示,土壤全磷含量以 LD3 处理最大,较 ED1、ED2、ED3、LD1 和 LD2 处理分别显著增加了 34.17%,26.01%,31.34%,14.42% 和 24.75%。土壤全钾含量和 pH 值在各处理间差异不显著 ($P>0.05$),其中全钾含量以 LD1 处理最大,ED1 处理最小;pH 值以 ED3 处理最大,ED1 处理最小。全氮含量以 LD2 处理最大,ED3 处理最小。土壤速效氮含量以 LD3 处理最大,较 ED1、ED2、ED3、LD1 和 LD2 处理分别增加了 57.04%,32.50%,16.48%,57.69% 和 10.03%。ED3 处理土壤速效磷含量最高,较 ED1、ED2、LD1、LD2 和 LD3 处理分别显著增加了 37.52%,17.49%,161.75%,294.03% 和 204.14%。LD1 处理土壤速效钾和有机质含量均最大,较 ED1、ED2、ED3、LD2 和 LD3 处理分别显著增加了 1 495.10%,913.39%,1 194.09%,19.56%,69.01% 和 607.80%,708.10%,451.38%,53.07%,137.62%。

2.2.2 灌浆期土壤 pH 及养分含量 不同播期、密

度对藜麦灌浆期土壤养分含量的影响如表 3 所示。表 3 显示,LD1 处理土壤全磷含量最大,ED2 最小。各处理间的全钾含量和 pH 值差异不显著 ($P>0.05$),其中土壤全钾含量以 LD2 处理最大,ED1 处理最小;pH 值以 LD2 处理最大,ED3 处理最小。土壤全氮含量以 LD2 处理最大,分别较 ED1、ED2 和 ED3 处理显著增加了 23.78%,30.97%,26.09%。ED3 处理土壤速效氮含量最高,较 ED1、ED2、LD1、LD2 和 LD3 处理分别显著增加了 85.60%,26.98%,102.56%,74.58% 和 62.34%。LD1 处理土壤速效磷含量最高,较 ED1、ED2、ED3、LD2 和 LD3 处理分别增加了 6.60%,59.68%,26.91%,31.31% 和 9.29%。ED1 处理土壤速效钾含量最高,较 ED2、ED3、LD1、LD2 和 LD3 处理分别显著增加了 43.53%,90.82%,99.79%,140.44% 和 157.82%。LD1 处理土壤有机质含量最大,较 ED1、ED2、ED3、LD2 和 LD3 处理分别显著增加了 29.43%,87.55%,105.37%,25.51%,76.24%。

表 3 播期和密度对灌浆期藜麦根际土壤 pH 及养分含量的影响

Table 3 Effects of sowing period and density on pH and nutrient content in rhizosphere soil at the grain filling stage of quinoa

处理 Treatment	全磷/(g·kg ⁻¹) Total phosphorus	全钾/(g·kg ⁻¹) Total potassium	全氮/(g·kg ⁻¹) Total nitrogen	速效氮/(mg·kg ⁻¹) Available nitrogen
ED1	2.99±0.21 ab	17.65±0.97 a	1.64±0.04 b	14.10±0.13 e
ED2	2.82±0.22 b	17.90±0.83 a	1.55±0.05 b	20.61±0.18 b
ED3	2.99±0.27 ab	17.92±1.86 a	1.61±0.07 b	26.17±0.17 a
LD1	3.45±0.41 a	18.78±0.53 a	2.01±0.07 a	12.92±0.36 f
LD2	3.33±0.09 a	18.80±0.18 a	2.03±0.11 a	14.99±0.55 d
LD3	3.21±0.18 ab	17.85±0.93 a	1.97±0.10 a	16.12±0.09 c

处理 Treatment	速效磷/(mg·kg ⁻¹) Available phosphorus	速效钾/(mg·kg ⁻¹) Available potassium	有机质/(g·kg ⁻¹) Organic matter	pH
ED1	11.37±0.94 ab	435.66±3.82 a	3.84±0.04 b	7.92±0.14 a
ED2	7.59±0.32 d	303.54±7.81 b	2.65±0.01 c	7.90±0.17 a
ED3	9.55±0.04 c	228.31±17.92 c	2.42±0.01 c	7.81±0.13 a
LD1	12.12±0.49 a	218.06±36.03 c	4.97±0.43 a	7.86±0.20 a
LD2	9.23±0.20 c	181.19±12.30 d	3.96±0.14 b	8.04±0.05 a
LD3	11.09±0.12 b	168.98±7.82 d	2.82±0.27 c	7.84±0.01 a

2.3 播期、密度对藜麦根际土壤酶活性的影响

2.3.1 分枝期根际土壤酶活性 表 4 显示,LD1 处理土壤过氧化氢酶活性最高,较 ED1、ED2、ED3、LD2 和 LD3 处理分别显著增加了 88.21%,66.27%,49.44%,21.53% 和 13.00%。ED3 处理

土壤碱性磷酸酶活性最高,较 ED1、ED2、LD1、LD2 和 LD3 处理分别增加了 2.3%,3.37%,28.23%,121.05% 和 134.1%。LD2 处理土壤蔗糖酶活性最高,较 ED1、ED2、ED3、LD1 和 LD3 处理分别显著增加了 54.11%,50.63%,57.50%,43.08%,

52.74%。ED1 处理土壤脲酶活性最高,较 ED2、ED3、LD1、LD2 和 LD3 处理分别增加了 23.34%、17.24%、4.89%、7.34%、29.62%,

表 4 播期和密度对分枝期藜麦根际土壤酶活性的影响

Table 4 Effects of sowing period and density on soil enzyme activity in the rhizosphere at the branching stage of quinoa

处理 Treatment	过氧化氢酶/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) Catalase	碱性磷酸酶/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) Alkaline phosphatase	蔗糖酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) Sucrase	脲酶/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) Urease
ED1	22.13±1.77 f	1 099.17±1.37 ab	31.12±0.34 cd	6.87±0.29 a
ED2	25.05±2.21 e	1 087.80±1.23 b	31.84±0.29 c	5.30±0.09 d
ED3	27.87±0.10 d	1 124.50±9.94 a	30.45±0.09 d	5.57±0.06 cd
LD1	41.65±0.99 a	876.94±37.35 c	33.52±0.08 b	5.86±0.11 c
LD2	34.27±0.96 c	508.70±5.82 d	47.96±1.13 a	6.55±0.36 ab
LD3	36.86±1.60 b	480.34±17.65 d	31.40±0.28 d	6.40±0.03 b

2.3.2 灌浆期根际土壤酶活性 不同播期、密度对藜麦灌浆期根际土壤酶活性的影响如表 5 所示。表 5 显示,ED3 处理土壤过氧化氢酶活性最高,较 ED1、ED2、LD1、LD2 和 LD3 处理分别显著增加了 16.43%、9.65%、38.15%、53.54%和 83.08%。土壤碱性磷酸酶活性以 ED3 处理最大,较 ED2 和 LD1、LD2、LD3 处理分别显著增加了 6.77%、

9.63%、56.69%和 34.99%($P<0.05$)。土壤蔗糖酶以 LD2 处理最大,较 ED1、ED2、ED3、LD1 和 LD3 处理分别显著增加了 53.39%、21.24%、53.89%、50.99%、32.47%($P<0.05$)。土壤脲酶活性以 ED1 处理最大,显著高于 ED3、LD1 处理,较 ED2、ED3、LD1、LD2 和 LD3 处理分别增加了 3.37%、11.82%、13.25%、3.37%、3.61%。

表 5 播期和密度对灌浆期藜麦根际土壤酶活性的影响

Table 5 Effects of sowing period and density on soil enzyme activity in the rhizosphere at the grain filling stage of quinoa

处理 Treatment	过氧化氢酶/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) Catalase	碱性磷酸酶/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) Alkaline phosphatase	蔗糖酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) Sucrase	脲酶/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) Urease
ED1	36.70±1.00 b	858.64±0.34 ab	33.94±0.04 c	8.89±0.19 a
ED2	38.97±1.94 b	825.12±3.49 bc	42.94±2.47 b	8.60±0.13 a
ED3	42.73±1.74 a	880.95±9.27 a	33.83±0.11 c	7.95±0.20 b
LD1	30.93±0.83 c	803.53±34.15 c	34.48±1.07 c	7.85±0.10 b
LD2	27.83±0.70 d	562.21±17.92 e	52.06±4.34 a	8.60±0.28 a
LD3	23.34±1.66 e	652.62±52.98 d	39.30±0.31 b	8.58±0.45 a

2.4 播期、密度对藜麦根际土壤细菌群落结构的影响

2.4.1 OTU 聚类分析 由图 1 可知,测序所得的数据经过质检后,分枝期和灌浆期所有处理藜麦根际土壤细菌 OTUs 总数分别为 27 706 和 27 904

个,其中共有的 OTUs 数分别为 1 583 和 1 617 个。在分枝期,早播处理藜麦根际土壤细菌 OTUs 数随着种植密度的增大而减小。在灌浆期,LD3 处理 OTUs 数最多,ED1 处理最少;在同一密度下,晚播处理的土壤细菌 OTUs 数均高于早播处理。

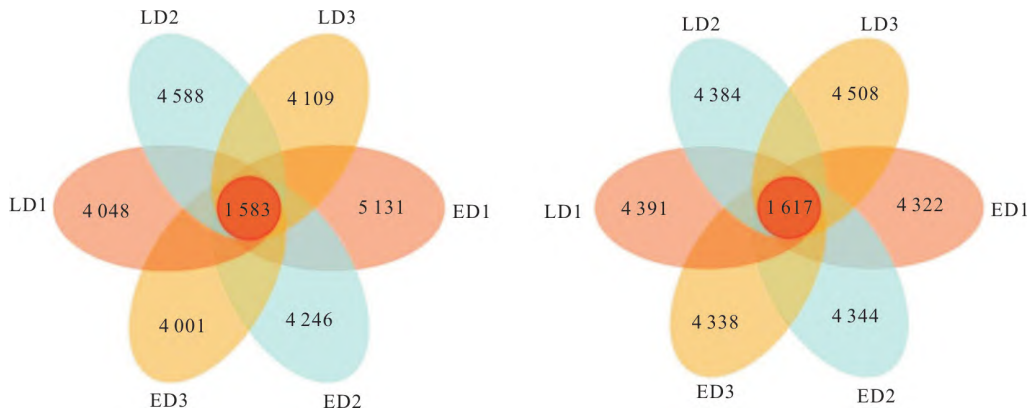


图 1 不同播期和密度处理下分枝期(左)、灌浆期(右)藜麦根际土壤细菌 OTUs 的韦恩图

Fig. 1 Venn graph of the number of bacterial OTUs in rhizosphere soil under different sowing and density treatments at the branching (left) and filling (right) stages of quinoa

2.4.2 土壤细菌 α 多样性 Shannon 指数表示微生物群落多样性; Simpson 指数反映微生物群落物种丰富度, 其值越小, 则该样品中的物种越丰富; Chao1 指数代表微生物种群丰度; Coverage 指数反映群落覆盖度。

表 6 显示, 在分枝期和灌浆期, 各处理的 Shannon 和 Simpson 指数总体均无显著差异, 其中 LD2 处理 Shannon 指数平均值最大, LD1 处理的 Simp-

son 平均值最大。在分枝期, 各处理的 Chao1 和 Coverage 指数均无显著差异 ($P > 0.05$)。在灌浆期, LD2 处理 Chao1 指数最高, 显著高于 ED2、ED3 和 LD1 处理 ($P < 0.05$), 与其余处理差异不显著 ($P > 0.05$); ED3 处理的 Coverage 指数最高, 显著高于 LD2 处理, 与其余处理差异不显著 ($P > 0.05$)。6 个处理中, LD2 处理 Chao1 指数平均值最大, ED3 处理的 Coverage 指数平均值最大。

表 6 播期和密度对分枝期和灌浆期藜麦 0~10 cm 土层土壤细菌 α 多样性的影响

Table 6 Effects of quinoa sowing date and density on bacterial α diversity in soil layer of 0 to 10 cm at the branching and grain filling stage of quinoa

α 多样性指数 α diversity index	处理 Treatment	分枝期 Branching stage	灌浆期 Filling period	均值 Mean
Shannon 指数 Shannon index	ED1	10.865 4 a	10.888 2 a	10.876 8
	ED2	10.914 2 a	10.682 4 a	10.798 3
	ED3	10.721 9 a	10.630 3 a	10.676 1
	LD1	10.872 4 a	10.901 7 a	10.887 1
	LD2	10.727 8 a	11.095 6 a	10.911 7
	LD3	10.753 7 a	10.870 7 a	10.812 2
Simpson 指数 Simpson index	ED1	0.998 2 a	0.998 5 a	0.998 4
	ED2	0.998 7 a	0.998 2 a	0.998 5
	ED3	0.998 1 a	0.997 7 a	0.997 9
	LD1	0.998 6 a	0.998 8 a	0.998 7
	LD2	0.998 3 a	0.998 9 a	0.998 6
	LD3	0.997 9 b	0.998 6 a	0.998 3
Chao1 指数 Chao1 index	ED1	5 130.29 a	5 142.14 ab	5 136.22
	ED2	5 133.48 a	4 785.97 b	4 959.73
	ED3	5 065.75 a	4 493.61 b	4 779.68
	LD1	5 224.24 a	4 945.16 b	5 084.70
	LD2	5 197.17 a	5 706.61 a	5 451.89
	LD3	5 539.79 a	5 145.17 ab	5 342.48
Coverage 指数 Coverage index	ED1	0.982 3 a	0.982 9 ab	0.982 6
	ED2	0.982 3 a	0.983 8 ab	0.983 1
	ED3	0.982 1 a	0.986 2 a	0.984 2
	LD1	0.981 1 a	0.983 8 a	0.982 5
	LD2	0.980 4 a	0.979 2 b	0.979 8
	LD3	0.978 6 a	0.982 3 ab	0.980 5

2.4.3 土壤细菌 β 多样性 NMDS 是基于 Bray-Curtis 距离来进行分析的非线性模型, 可以反映不同样本间的差异程度。用 NMDS 结果的第一个轴 (NMDS1) 和第二个轴 (NMDS2) 表示其群落组成。基于 OUTs 水平的播期和密度对分枝期、灌浆期藜麦土壤细菌群落影响的 NMDS 分析结果见图 2。由图 2 可知, 在分枝期, 除了 ED3 处理, 其余处理土壤细菌群落分布比较集中, 具有相似的土壤细菌群落结构。在灌浆期, 早播条件下各密度处理土壤细菌群落结构较分散, 差异较大; 晚播条件下各密度处理细菌群落结构集中, 差异较小。无论是在分枝期还是在灌浆期, 在同一种植密度下, 早播和晚播处理间土壤细菌群落分布比较离散且完全分离, 细菌群

落结构差异较大。

2.4.4 土壤细菌群落组成及相对丰度 统计结果显示, 在所有土壤样品中, 在门水平上, 土壤细菌相对丰度排名前 10 的类群包括放线菌门 (Actinobacteria)、变形菌门 (Proteobacteria)、绿弯菌门 (Chloroflexi)、酸杆菌门 (Acidobacteria)、芽单胞菌门 (Gemmatimonadota)、拟杆菌门 (Bacteroidota)、厚壁菌门 (Firmicutes)、浮霉菌门 (Planctomycetes)、硝化螺旋菌门 (Nitrospirae)、棒状杆菌门 (Rokubacteria), 所占比例依次为 42.04%, 24.23%, 12.06%, 8.70%, 5.17%, 2.26%, 1.37%, 0.85%, 0.65%, 0.59%。其中放线菌门、变形菌门、绿弯菌门、酸杆菌门、芽单胞菌门为优势种群, 其相对丰度

之和达到 92.20%。

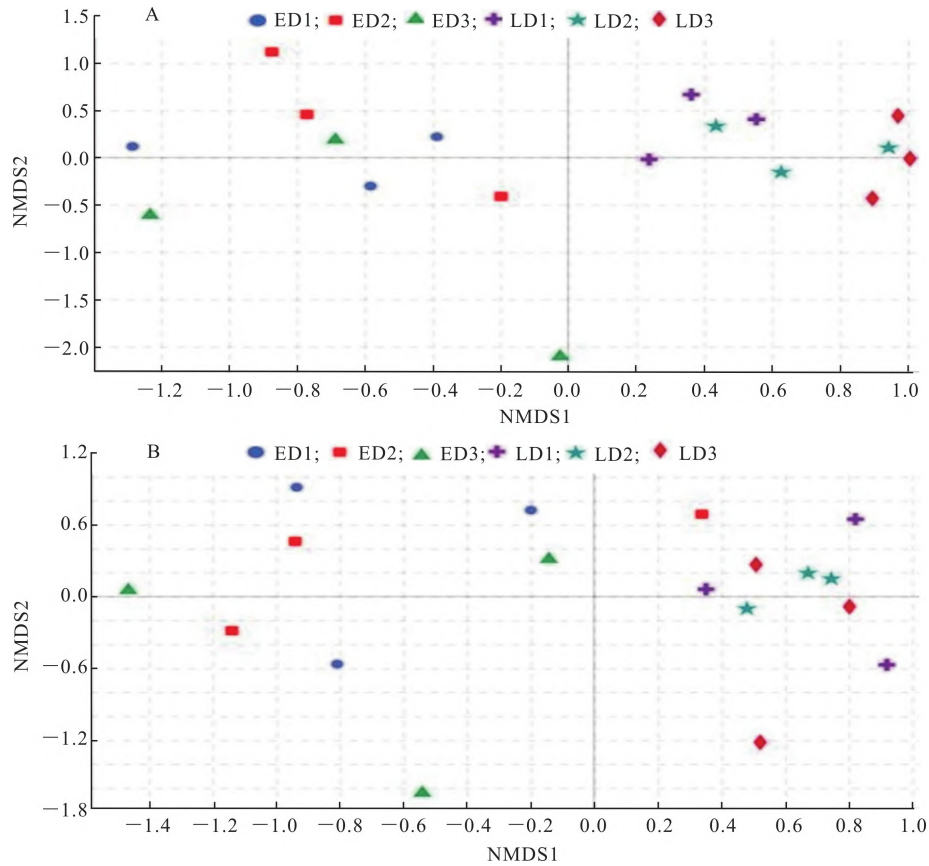


图 2 播期和密度对分枝期(A)、灌浆期(B)藜麦土壤细菌群落影响的非度量多维尺度(NMDS)分析

Fig. 2 NMDS analysis on effects of sowing period and density on soil bacterial communities at the branching (A) and grain filling (B) stages of quinoa

选择早播藜麦灌浆期(8月13日)以及晚播藜麦分枝期(8月13日)的土样,对相对丰度排名前10

的土壤细菌群落结构门水平上的差异进行分析,结果见图3和图4。

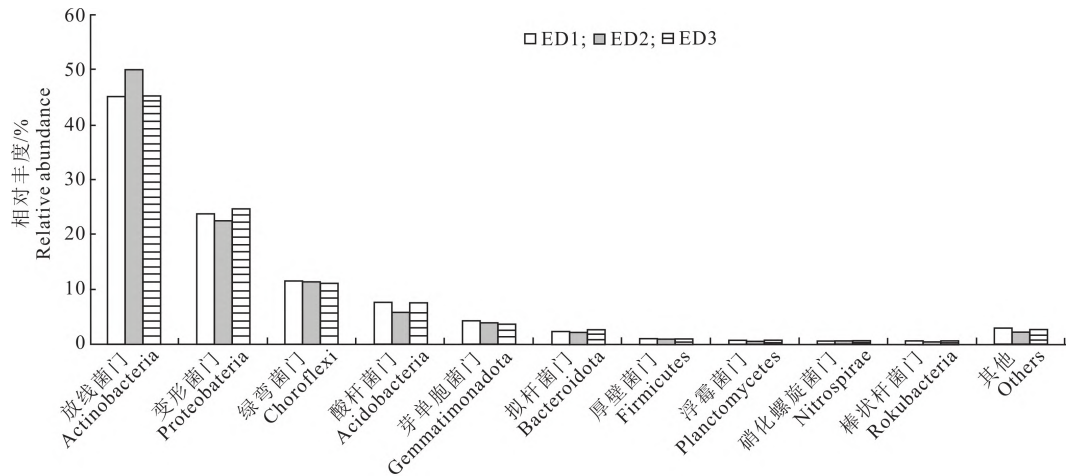


图 3 灌浆期早播藜麦土壤细菌群落结构门水平上的相对丰度

Fig. 3 Relative abundance at the phylum level of soil bacterial community structure at the grain filling stage in early sowing quinoa

图3显示,在早播藜麦灌浆期,同一月份下,不同处理间土壤放线菌门、变形菌门、绿弯菌门、酸杆菌门、芽单胞菌门、拟杆菌门、厚壁菌门、浮霉菌门、硝化

螺旋菌门、棒状杆菌门细菌的相对丰度均无显著差异($P>0.05$)。土壤放线菌门相对丰度随着种植密度的增大呈先增加后减小的趋势,其中ED2处理最大。

土壤变形菌门和酸杆菌门相对丰度随着种植密度的增加呈先减小后增大的趋势,其中 ED3 处理最大。

图 4 显示,在晚播藜麦分枝期,同一月份下,不同处理间放线菌门、变形菌门、绿弯菌门、酸杆菌门、芽单胞菌门、拟杆菌门、厚壁菌门、浮霉菌门、硝化螺旋菌门、棒状杆菌门细菌的相对丰度均无显著差异

($P>0.05$)。土壤放线菌门相对丰度随着种植密度的增加呈增大的趋势,其中 LD3 处理最大。变形菌门相对丰度随着种植密度的增加呈先减小后增大的趋势,ED3 处理最大。绿弯菌门、酸杆菌门、芽单胞菌门相对丰度随着种植密度的增加呈减小的趋势,其中 LD1 处理最大。

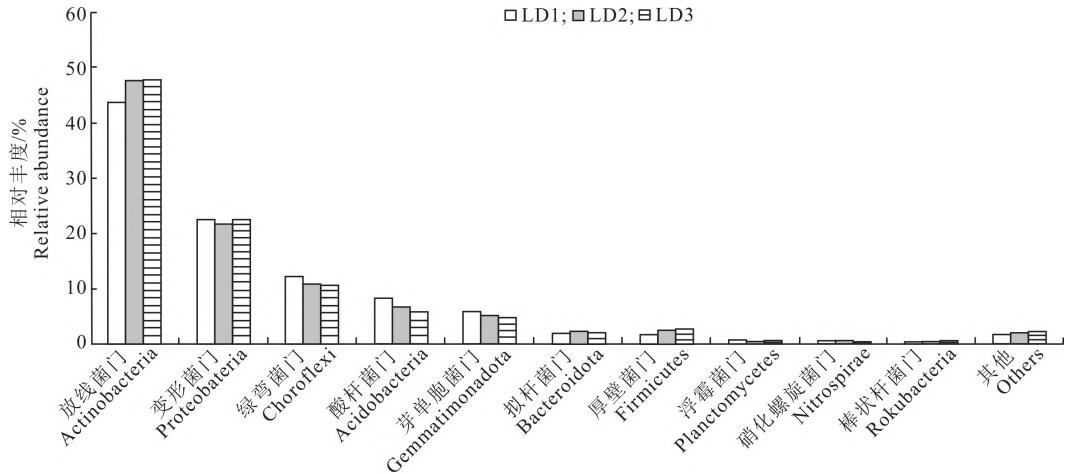


图 4 分枝期晚播藜麦土壤细菌群落结构门水平上的相对丰度

Fig. 4 Relative abundance at the phylum level of soil bacterial community structure at the branching stage in late sowing quinoa

2.5 不同处理藜麦土壤 pH 及养分含量、细菌群落与酶活性的相关性

2.5.1 土壤 pH 及养分含量与酶活性的相关性

由表 7 可知,过氧化氢酶与速效磷含量呈显著负相关,与速效钾含量呈显著正相关。土壤脲酶与蔗糖

酶活性以及全磷、全氮含量呈显著或极显著负相关,与速效磷含量呈极显著正相关。土壤蔗糖酶与碱性磷酸酶活性呈极显著负相关,与全氮含量呈极显著正相关。

表 7 不同处理藜麦土壤 pH 及养分含量与酶活性的相关性

Table 7 Correlations between soil pH and nutrient characteristics and soil enzyme activities in different quinoa treatments

指标 Index	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
X_2	-0.239					
X_3	-0.183	-0.731 **				
X_4	0.125	0.569	-0.899 **			
X_5	0.157	-0.664 *	0.613 *	-0.727 **		
X_6	0.125	0.009	0.173	-0.395	0.196	
X_7	-0.091	-0.637 *	0.952 **	0.922 **	0.630 *	0.207
X_8	0.139	-0.025	-0.052	-0.116	-0.004	0.668 *
X_9	-0.597 *	0.810 **	-0.424	0.259	-0.432	0.115
X_{10}	0.704 *	-0.492	0.329	-0.361	0.312	0.407
X_{11}	0.455	-0.300	0.468	-0.593 *	0.323	0.636 *
X_{12}	0.120	-0.100	0.062	0.113	0.135	-0.452
指标 Index	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
X_8	-0.101					
X_9	-0.432	0.189				
X_{10}	0.453	0.172	-0.663 *			
X_{11}	0.617 *	0.302	-0.365	0.869 **		
X_{12}	-0.025	-0.678 *	-0.156	-0.105	-0.242	1.000

注: ** 表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关, * 表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关。 X_1 . 过氧化氢酶; X_2 . 脲酶; X_3 . 蔗糖酶; X_4 . 碱性磷酸酶; X_5 . 全磷; X_6 . 全钾; X_7 . 全氮; X_8 . 速效氮; X_9 . 速效磷; X_{10} . 速效钾; X_{11} . 有机质; X_{12} . pH。

Note: ** indicates significant differences at $P<0.01$ level and * indicates significant differences at $P<0.05$ level. X_1 . Catalase; X_2 . Urease; X_3 . Sucrase; X_4 . Alkaline phosphatase; X_5 . Total phosphorus; X_6 . Total potassium; X_7 . Total nitrogen; X_8 . Available nitrogen; X_9 . Available phosphorus; X_{10} . Available potassium; X_{11} . Organic matter; X_{12} . pH.

土壤碱性磷酸酶活性与全磷和有机质含量呈显著或极显著负相关,而与全氮含量呈极显著正相关。全磷与全氮含量呈显著正相关。全钾与速效氮、有机质含量呈显著正相关。全氮与有机质含量呈显著正相关。速效氮含量与 pH 呈显著负相关。速效钾

与有机质含量呈极显著正相关。

2.5.2 土壤细菌群落相对丰度与土壤酶活性的相关性 不同处理藜麦土壤细菌群落相对丰度与酶活性的相关性见表 8。

表 8 不同处理藜麦土壤细菌群落相对丰度与酶活性的相关性

Table 8 Correlation coefficients between soil bacterial community and soil enzyme activities in different quinoa treatments

指标 Index	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇
X ₂	-0.239						
X ₃	-0.183	-0.731 **					
X ₄	0.125	0.569	-0.899 **				
X ₅	0.736 **	-0.343	-0.233	0.227			
X ₆	-0.599 *	0.667 *	-0.319	0.246	-0.726 **		
X ₇	-0.612 *	0.053	0.386	-0.276	-0.718 **	0.177	
X ₈	-0.457	0.179	0.285	-0.175	-0.785 **	0.276	0.803 **
X ₉	-0.502	-0.250	0.792 **	-0.802 **	-0.654 *	0.050	0.763 **
X ₁₀	-0.066	0.374	-0.343	0.263	-0.214	0.724 **	-0.427
X ₁₁	0.129	-0.294	0.302	-0.474	0.319	-0.219	-0.529
X ₁₂	-0.458	0.219	0.199	-0.187	-0.831 **	0.401	0.749 **
X ₁₃	-0.633 *	0.306	0.225	-0.060	-0.814 **	0.451	0.817 **
X ₁₄	-0.552	0.435	0.006	0.118	-0.801 **	0.578 *	0.590 *
X ₁₅	0.282	-0.312	-0.130	0.218	0.154	-0.094	-0.113
指标 Index	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄
X ₉	0.615 *						
X ₁₀	-0.258	-0.331					
X ₁₁	-0.503	0.013	0.055				
X ₁₂	0.874 **	0.624 *	-0.148	-0.439			
X ₁₃	0.838 **	0.575	-0.128	-0.436	0.739 **		
X ₁₄	0.776 **	0.375	0.158	-0.467	0.729 **	0.841 **	
X ₁₅	-0.168	-0.246	0.201	-0.381	-0.019	-0.372	-0.134

注: * 表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关, * 表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关。X₁. 过氧化氢酶; X₂. 脲酶; X₃. 蔗糖酶; X₄. 碱性磷酸酶; X₅. 放线菌门; X₆. 变形菌门; X₇. 绿弯菌门; X₈. 酸杆菌门; X₉. 芽单胞菌门; X₁₀. 拟杆菌门; X₁₁. 厚壁菌门; X₁₂. 浮霉菌门; X₁₃. 硝化螺旋菌门; X₁₄. 棒状杆菌门; X₁₅. 其他细菌。

Note: * * indicates significant differences at $P<0.01$ level and * indicates significant differences at $P<0.05$ level. X₁. Catalase; X₂. Urease; X₃. Sucrase; X₄. Alkaline phosphatase; X₅. Actinobacteria; X₆. Proteobacteria; X₇. Chloroflexi; X₈. Acidobacteria; X₉. Gemmatimonadota; X₁₀. Bacteroidota; X₁₁. Firmicutes; X₁₂. Planctomycetes; X₁₃. Nitrospirae; X₁₄. Rokubacteria; X₁₅. Other bacteria.

由表 8 可知,土壤过氧化氢酶活性与放线菌门呈极显著正相关,与变形菌门、绿弯菌门和硝化螺旋菌门呈显著负相关。土壤脲酶与蔗糖酶活性呈极显著负相关,与变形菌门呈显著正相关。土壤蔗糖酶与碱性磷酸酶活性呈极显著负相关,与芽单胞菌门呈极显著正相关。碱性磷酸酶活性与芽单胞菌门呈极显著负相关。放线菌门与变形菌门、绿弯菌门、酸杆菌门、芽单胞菌门、浮霉菌门、硝化螺旋菌门和棒状杆菌门呈显著或极显著负相关。变形菌门与棒状杆菌门和拟杆菌门呈显著或极显著正相关。绿弯菌门与酸杆菌门、芽单胞菌门、浮霉菌门、硝化螺旋菌门和棒状杆菌门呈显著或极显著正相关。酸杆菌门

与芽单胞菌门、浮霉菌门、硝化螺旋菌门、棒状杆菌门呈显著或极显著正相关。浮霉菌门与硝化螺旋菌门、棒状杆菌门呈极显著正相关。硝化螺旋菌门与棒状杆菌门呈极显著正相关。

3 讨 论

播种时间和种植密度是影响作物生长的重要因素,适宜的播种时间和合理的种植密度是实现作物高产稳产优质高效的重要手段。刘芳亮等^[16]研究了播期和密度对冬小麦普冰 151 籽粒灌浆特性及产量的影响,结果发现,密度对普冰 151 的产量、千粒质量有极显著影响;播期推迟会降低普冰 151 的千

粒质量,不利于产量的提高。李晓航等^[17]研究了不同播期和播种密度对冬小麦品种新麦 29 产量形成的影响,结果发现,当播种密度为(210~390)万株/hm²时,新麦 29 产量随着播期的推迟呈下降趋势,说明早播处理会提高冬小麦产量;在播期合理范围内适当增加播种密度会获得高产,但是播期过晚,即使高密度种植不一定能实现高产。本研究中,播期、密度对藜麦产量及构成因子有明显影响,在相同密度条件下,早播处理藜麦主穗长、千粒质量、单株产量和总产量总体均高于晚播处理;6 个处理中,早播中密度(ED2)处理藜麦总产量最高,这与前人研究结果^[16-17]一致。这是因为晚播后藜麦整个生育期缩短,光合时间随之缩短,使得植株营养生长和生殖生长比例发生失调,从而对藜麦籽粒产量造成了影响。

土壤酶主要来源于动植物腐解、植物根系分泌及土壤微生物的活动,在土壤物质和能量转化中发挥重要作用,其活性可表征土壤生物学功能,是评价土壤肥力的重要指标之一^[18-19]。马冬云等^[20]研究了不同种植密度对小麦根际土壤微生物数量及酶活性的影响,结果发现,土壤蛋白酶和脲酶活性均随着小麦种植密度的增加呈先上升后下降趋势,总体以 D2 处理(150 万株/hm²)的土壤蛋白酶和脲酶活性较高。本研究结果表明,播期和密度对藜麦分枝期、灌浆期藜麦根际土壤酶活性均有明显影响,但是在相同播期下,种植密度对土壤酶活性影响无明显的规律,这与前人的研究结果^[20]不一致。这可能与作物品种、种植模式、光热水肥等条件不同有关。

土壤理化性质、酶活性和土壤微生物多样性三者相互作用、相互制约,对维持土壤微生态系统稳定发挥了重要作用^[21-22]。微生物群落结构是评价土壤质量的敏感指标^[23-25]。本研究中,土壤养分含量、酶活性与土壤细菌群落结构有明显相关性,其中土壤脲酶活性与速效磷含量呈极显著正相关,过氧化氢酶活性与速效钾含量呈显著正相关,土壤蔗糖酶活性与全氮含量呈极显著正相关;过氧化氢酶活性与放线菌门呈极显著正相关,脲酶活性与变形菌门呈显著正相关,蔗糖酶活性与芽单胞菌门呈极显著正相关。说明在藜麦生长过程中,播期、密度改变了土壤微生物区系,进而影响土壤酶活性和土壤养分的有效性。

甘肃藜麦种植区域跨度较大,不同地区的藜麦品种、种植模式、光热水肥等条件存在着一定的差异,这些因素均会在一定程度上影响藜麦产量,本试

验只是在甘南进行了藜麦播期、密度对土壤养分、酶活性和微生物群落结构的影响,研究结果是否适用于其他地区,后续还有待进一步研究。

4 结 论

1)播期、密度对藜麦产量及其构成因子有明显影响。各处理间主穗长差异不显著,LD1 处理有效分枝数、藜麦籽粒千粒质量均最高。早播处理的单株产量显著高于晚播处理;6 个处理中,ED3 处理单株产量最高,ED2 和 ED3 处理总产量均较高。

2)播期、密度对藜麦根际土壤养分含量有明显影响,但是对土壤 pH 无显著影响。在相同密度下,分枝期晚播藜麦根际土壤全磷、全钾、全氮、速效氮、速效钾、有机质含量总体高于早播处理,速效磷含量显著低于早播处理;灌浆期晚播藜麦根际土壤全磷、全钾、全氮、速效磷、有机质含量均高于早播处理,速效钾含量显著低于早播处理。

3)播期、密度对藜麦根际土壤酶活性有明显影响。在相同密度下,分枝期晚播藜麦根际土壤过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶活性总体高于早播处理,而早播藜麦根际土壤碱性磷酸酶活性低于晚播处理;灌浆期晚播藜麦根际土壤过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性总体低于早播处理,晚播藜麦根际土壤蔗糖酶活性则高于早播处理。

4)播期、密度对藜麦根际土壤细菌群落结构有明显影响。在分枝期,ED2 处理 Shannon 指数平均值和 Simpson 指数平均值最大;在灌浆期,LD2 处理 Chao1 指数最高,ED3 处理的 Coverage 指数最高。分枝期,除了 ED3 处理,其余处理土壤细菌群落结构相似;灌浆期,早播条件下各密度处理土壤细菌群落结构差异较大,晚播条件下各密度处理细菌群落结构相似。

综上所述,在甘肃省高海拔冷凉地区,播期、密度对藜麦产量及其根际土壤养分、细菌群落及酶活性有明显影响,在该地区藜麦播种时间以 5 月中旬、播种密度以(1.6~2.0)万株/hm²为宜。

[参考文献]

- [1] 刘文瑜,杨发荣,谢志军,等.不同品种藜麦幼苗对于干旱胁迫的生理响应及耐旱性评价[J].干旱地区农业研究,2021,39(6):10-18.
Liu W Y, Yang F R, Xie Z J, et al. Evaluation of drought tolerance and physiological response to drought stress of different varieties of quinoa seedlings [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(6): 10-18.

- [2] 杨发荣. 藜麦新品种陇藜1号的选育及应用前景[J]. 甘肃农业科技, 2015(12):1-5.
Yang F R. Breeding and application prospects of new variety *Chenopodium quinoa* cv. Longli 1 [J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2015(12):1-5.
- [3] 杨发荣, 刘文瑜, 黄杰, 等. 河西地区2个藜麦品种引种试验研究[J]. 草地学报, 2018, 26(5):1273-1276.
Yang F R, Liu W Y, Huang J, et al. Introduction trail of two quinoa varieties in Hexi Area [J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(5):1273-1276.
- [4] 刘文瑜, 杨发荣, 黄杰, 等. NaCl胁迫对藜麦幼苗生长和抗氧化酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 2017, 37(9):1797-1804.
Liu W Y, Yang F R, Huang J, et al. Response of seedlings growth and the activities of antioxidant enzymes of *Chenopodium quinoa* to salt stress [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2017, 37(9):1797-1804.
- [5] 黄杰, 李敏权, 潘发明, 等. 不同播期对藜麦农艺性状及品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(S1):259-261.
Huang J, Li M Q, Pan F M, et al. Effects of different sowing dates on agronomic traits and quality of quinoa [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(S1):259-261.
- [6] 肖正春, 张广伦. 藜麦及其资源开发利用[J]. 中国野生植物资源, 2014, 33(2):62-66.
Xiao Z C, Zhang G L. Development and utilization of quinoa and its resources [J]. China Wild Plant Resources, 2014, 33(2):62-66.
- [7] 贡布扎西, 旺姆, 王莉. 南美藜育种原始材料研究[J]. 西藏科技, 1996(3):13-17.
Gongbu Z X, Wangmu, Wang L. Study on raw materials for South American quinoa breeding [J]. Tibet Science and Technology, 1996(3):13-17.
- [8] 王思宇, 左文博, 朱凯莉, 等. 71份藜麦品种资源的农艺性状及营养品质分析与评价[J]. 作物杂志, 2022(3):63-72.
Wang S Y, Zuo W B, Zhu K L, et al. Analysis and evaluation of agronomic characteristics and nutritional qualities of 71 quinoa accessions [J]. Crops, 2022(3):63-72.
- [9] 李玉英, 王玉玲, 王转花. 藜麦营养成分分析及黄酮提取物的抗氧化和抗菌活性研究[J]. 山西农业科学, 2018, 46(5):729-733, 741.
Li Y Y, Wang Y L, Wang Z H. Study on nutritional components of quinoa and the antioxidant and antibacterial activity of flavonoids extracts [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2018, 46(5):729-733, 741.
- [10] 张亚萍, 杜雷超, 孙建蓉, 等. 播期和密度对不同藜麦品种农艺性状和产量的影响[J]. 大麦与谷类科学, 2023, 40(1):36-42.
Zhang Y P, Du L C, Sun J R, et al. Effects of sowing date and planting density on the agronomic characters and yield of different quinoa varieties [J]. Barley and Cereal Sciences, 2023, 40(1):36-42.
- [11] Bertero H D. Response of developmental processes to temperature and photoperiod in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) [J]. Food Reviews International, 2003, 19(1/2):87-97.
- [12] 杨丽娜, 赵桂琴, 侯建杰. 播期、肥料种类及其配比对燕麦生长及产量的影响[J]. 中国草地学报, 2013, 35(4):47-51, 60.
Yang L N, Zhao G Q, Hou J J. Effects of seeding dates, fertilizers and their ratio on oat growth and yield [J]. Chinese Journal of Grassland, 2013, 35(4):47-51, 60.
- [13] 季晓菲, 游明鸿, 闫利军, 等. 不同播期对梦龙燕麦生产性能的影响[J]. 草学, 2018(1):23-27, 32.
Ji X F, You M H, Yan L J, et al. Effect of different sowing date on the production performance of *Avena sativa* L. cv. Magnum [J]. Prataculture & Animal Husbandry, 2018(1):23-27, 32.
- [14] 秦炎, 秦亚平. 种植密度对水稻群体质量和产量形成的影响[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(12):2222-2225.
Qin Y, Qin Y P. Effects of planting density on rice population quality and grain yield formation [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2017, 56(12):2222-2225.
- [15] Bendevis M A, Sun Y J, Shabala S, et al. Differentiation of photoperiod-induced ABA and soluble sugar responses of two quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2014, 33(3):562-570.
- [16] 刘芳亮, 任益锋, 王卫东, 等. 播期和密度对冬小麦普冰151籽粒灌浆特性及产量的影响[J]. 山东农业科学, 2017, 49(6):41-47.
Liu F L, Ren Y F, Wang W D, et al. Effects of sowing date and density on grain filling characteristics and yield of winter wheat Pubing 151 [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2017, 49(6):41-47.
- [17] 李晓航, 马华平. 不同播期和播量对冬小麦品种‘新麦29’产量形成的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(29):14-19.
Li X H, Ma H P. Effects of different sowing dates and sowing rates on yield formation of winter wheat variety ‘Xinmai 29’ [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(29):14-19.
- [18] 徐路路, 王晓娟. 有机肥等氮量替代化肥对土壤养分及酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(1):23-29.
Xu L L, Wang X J. Effects of organic manure replacing chemical fertilizer with equal nitrogen on soil nutrients and enzyme activities [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2023(1):23-29.
- [19] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 4版. 北京:高等教育出版社, 2001.
Pan R C. Phytophysiology [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2001.
- [20] 马冬云, 郭天财, 查菲娜, 等. 不同种植密度对小麦根际土壤微生物数量及土壤酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2008(3):154-157.
Ma D Y, Guo T C, Zha F N, et al. Effects of different planting densities on soil microbial abundance and soil enzyme activities in the rhizosphere of wheat [J]. Acta Ahuaenacea Sinica, 2008(3):154-157.
- [21] 刘建新. 不同农田土壤酶活性与土壤养分相关关系研究[J]. 土壤通报, 2004(4):523-525.

- Liu J X. Correlative research on the activity of enzyme and soil nutrient in the different types of farmland [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004(4): 523-525.
- [22] 彭木, 向智文, 周防震, 等. 碱蓬属植物对根际土壤理化性质和酶活性的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(2): 104-110.
- Peng M, Xiang Z W, Zhou F Z, et al. Effects of *Suaeda* on physicochemical properties and enzyme activities of rhizosphere soil [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(2): 104-110.
- [23] 董艳, 赵骞, 吕家兴, 等. 间作小麦和接种 AM 真菌协同提高蚕豆抗枯萎病能力和根际微生物碳代谢活性 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(10): 1646-1656.
- Dong Y, Zhao Q, Lü J X, et al. Intercropping wheat and inoculated AM fungi synergistically improve the resistance of broad bean to *Fusarium wilt* and the carbon metabolism activity of rhizosphere microorganisms [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2019, 25(10): 1646-1656.
- [24] 王光华, 金剑, 徐美娜, 等. 植物、土壤及土壤管理对土壤微生物群落结构的影响 [J]. 生态学杂志, 2006(5): 550-556.
- Wang G H, Jin J, Xu M N, et al. Effects of plants, soil and soil management on soil microbial community structure [J]. Chinese Journal of Ecology, 2006(5): 550-556.
- [25] 秦玮玺, 斯贵才, 雷天柱, 等. 氮肥添加对土壤微生物生物量及酶活性的影响 [J]. 江苏农业科学, 2021, 49(1): 170-175.
- Qin W X, Si G C, Lei T Z, et al. Effects of nitrogen fertilizer addition on soil microbial biomass and enzyme activity [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(1): 170-175.
- (责任编辑: 李小平)

(上接第 45 页)

- [33] 袁圆, 汪波, 周广生, 等. 播期和种植密度对油菜产量和茎秆抗倒性的影响 [J]. 中国农业科学, 2021, 54(8): 1613-1626.
- Yuan Y, Wang B, Zhou G S, et al. Effects of different sowing dates and planting densities on the yield and stem lodging resistance of rapeseed [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(8): 1613-1626.
- [34] 黄开健, 黄爱花, 莫润秀, 等. 基于气候变化特征的广西春玉米播期研究 [J]. 南方农业学报, 2018, 49(7): 1304-1310.
- Huang K J, Huang A H, Mo R X, et al. Sowing dates of spring maize in Guangxi based on climate change characters [J]. Journal of Southern Agriculture, 2018, 49(7): 1304-1310.
- [35] 彭丹丹, 吴超, 徐开未, 等. 不同播期玉米籽粒灌浆特性及其与气象因子的关系 [J]. 中国生态农业学报, 2022, 30(7): 1134-1142.
- Peng D D, Wu C, Xu K W, et al. The relationship between grain filling characteristics of maize and meteorological factors under different sowing dates [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(7): 1134-1142.
- [36] 董飞, 闫秋艳, 李峰, 等. 播期和种植密度对旱地玉米生长发育及产量的影响 [J]. 玉米科学, 2020, 28(2): 115-121.
- Dong F, Yan Q Y, Li F, et al. Effects of sowing date and planting density on growth and yield of dry-land maize [J]. Journal of Maize Sciences, 2020, 28(2): 115-121.
- [37] 董红芬, 李洪, 李爱军, 等. 玉米播期推迟与生长发育、有效积温关系研究 [J]. 玉米科学, 2012, 20(5): 97-101.
- Dong H F, Li H, Li A J, et al. Relations between delayed sowing date and growth, effective accumulated temperature of maize [J]. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(5): 97-101.
- [38] Novacek M J, Mason S C, Galusha T D, et al. Twin rows minimally impact irrigated maize yield, morphology, and lodging [J]. Agronomy Journal, 2013, 105(1): 268-276.
- (责任编辑: 马秋明)