

# 榆林沙土区马铃薯根层土壤因子、 微生物数量及酶活性特征

谢奎,张腾,李卓远,密菲瑶,李源,张帆,王秀康

(延安大学生命科学学院,陕西延安716000)

**摘要:**选取16个当地种植的马铃薯品种进行试验,采取单因素分析法和冗余分析法对榆林沙土区马铃薯田的土壤含水量、pH值、电导率、碱解氮、有效磷、速效钾、有机质含量和过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶活性,以及土壤细菌、真菌、放线菌数量进行研究,分析其特征。结果表明:在0~60 cm土层中,榆林沙土区马铃薯根层土壤过氧化氢酶和脲酶活性随着土壤深度的增加均呈现降低的趋势,土壤蔗糖酶活性随土壤深度的增加呈现先增大后降低的趋势,0~20 cm土层过氧化氢酶活性比20~40、40~60 cm土层分别高0.03%、28.74%,0~20 cm土层脲酶活性比20~40、40~60 cm土层分别高14.10%、169.70%,20~40 cm土层蔗糖酶活性比0~20、40~60 cm土层分别高21.74%、59.53%;在0~40 cm土层中,随土壤深度的增加土壤细菌、真菌、放线菌数量均呈现降低的趋势,细菌数量在3类微生物中占有绝对优势,占微生物总数的83.11%~97.28%,其次是放线菌,占微生物总数的2.49%~16.49%,真菌的数量最少,占微生物总数的0.13%~0.44%;不同品种马铃薯根层(0~60 cm)土壤含水量、pH值、电导率分别为2.94%~8.00%、8.30~8.79、101.92~210.87  $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,碱解氮、有效磷、速效钾、有机质的含量为16.47~30.14  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、15.37~25.49  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、95.83~163.60  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、2.85~5.43  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。相关性分析表明,马铃薯根层土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶活性均与土壤碱解氮、有机质含量呈极显著正相关( $P<0.01$ );土壤细菌、真菌、放线菌均与土壤有机质、有效磷、速效钾呈极显著正相关( $P<0.01$ );马铃薯块茎产量与土壤细菌呈极显著正相关( $P<0.01$ ),块茎可溶性总糖与土壤放线菌呈显著正相关( $P<0.05$ )。冗余分析表明,碱解氮和有机质是土壤过氧化氢酶和脲酶活性变化的主要驱动因子,有机质和有效磷是土壤细菌数量变化的主要驱动因子,速效钾是土壤真菌、放线菌数量变化的主要驱动因子。

**关键词:**马铃薯;沙土区;土壤因子;酶活性;微生物数量

**中图分类号:**S532 **文献标志码:**A

## Characteristics of soil factors, microbial quantity and enzyme activity in potato root layer in Yulin sandy soil area

XIE Kui, ZHANG Teng, LI Zhuoyuan, MI Feiyao, LI Yuan, ZHANG Fan, WANG Xiukang

(College of life sciences, Yan'an University Yan'an, Shaanxi 716000, China)

**Abstract:** 16 local potato varieties were selected for the experiment. Single factor analysis and redundancy analysis were used to analyze the soil water content, pH, electrical conductivity, alkali hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, available potassium, organic matter content, catalase, urease and sucrase activities as well as the number of soil bacteria, fungi and actinomycetes in Yulin sandy soil area. The results showed that in 0~60 cm soil layer, the activities of catalase and urease in potato root layer in Yulin sandy soil area decreased with the increase of soil depth. The activity of soil sucrase increased first and then decreased with the increase of soil depth. The activity of peroxidase in 0~20 cm soil layer was 0.03% and 28.74% higher than that in 20~40 cm and 40~60 cm soil layers, respectively. The urease activity in 0~20 cm soil layer was 14.10% and 169.70% higher than that in 20~40 cm and 40~60 cm soil layers respectively. The sucrase activity in 20~40 cm soil layer was 21.74% and 59.53% higher than that in 0~20 cm and 40~60 cm soil layers respectively. In the 0~40 cm soil layer, the num-

ber of soil bacteria, fungi and actinomycetes decreased with the increase of soil depth. The number of bacteria was dominant among the three types of microorganisms, accounting for 83.11%~97.28% of the total number of microorganisms followed by actinomycetes, accounting for 2.49%~16.49% of the total number of microorganisms. The number of fungi was the least, accounting for 0.13%~0.44% of the total number of microorganisms. The soil moisture content, pH and conductivity of the root layer (0~60 cm) of different potato cultivars were in the range of 2.94%~8.00%, 8.30~8.79  $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$  and 101.92~210.87  $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ , respectively. The contents of alkaline nitrogen, available phosphorus, available potassium and organic matter were in the range of 16.47~30.14  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 15.37~25.49  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 95.83~163.60  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  and 2.85~5.43  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively. The correlation analysis showed that the activities of catalase, urease and sucrase in potato root layer were significantly positively correlated with the contents of soil alkali hydrolyzable nitrogen and organic matter ( $P<0.01$ ), and the activities of soil bacteria, fungi and actinomycetes were significantly positively correlated with soil organic matter, available phosphorus and available potassium ( $P<0.01$ ). Potato tuber yield was significantly positively correlated with soil bacteria ( $P<0.01$ ), and tuber soluble total sugar was significantly positively correlated with soil actinomycetes ( $P<0.05$ ). Redundancy analysis showed that alkali hydrolyzable nitrogen and organic matter were the main driving factors for the change of soil catalase and urease activities. Organic matter and available phosphorus were the main driving factors for the change of soil bacteria. Available potassium was the main driving factor for the change of soil fungi and actinomycetes.

**Keywords:** potato; sandy soil area; soil factors; enzyme activity; microbial quantity

马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 属茄科, 一年生草本植物, 是全球第四大重要的粮食作物, 仅次于小麦、稻谷和玉米<sup>[1]</sup>。马铃薯是比小麦、水稻、玉米能获得更多的碳水化合物、蛋白质、纤维素、胡萝卜素、抗坏血酸等营养物质, 且具有很大增产潜力的高产作物。其本身含有丰富的矿质元素, 每 100 g 马铃薯中含 Ca 11~60 mg, P 15~68 mg, Fe 0.4~4.8 mg, 硫胺素 0.03~0.07 mg, 核黄素 0.03~0.11 mg, 尼克酸 0.4~1.1  $\text{mg}$ <sup>[2]</sup>, 通过食用马铃薯来补充人体所需营养成为更多人的选择<sup>[3]</sup>。马铃薯除了食用之外, 还可广泛用于化工、医药、动物饲料和生物燃料等领域<sup>[4-5]</sup>。中国是马铃薯生产第一大国, 全球马铃薯产量的 23% 都来自中国, 对保障粮食安全、贫困地区脱贫增收及振兴地区经济而言, 保障马铃薯产业的发展有着十分重要的现实意义<sup>[6]</sup>。

植物的生长与土壤质量密切相关, 根际微生物是土壤的重要成分, 参与了根际微系统的许多生物化学反应, 对土壤中的肥力演变、有机质分解、养分的分解、循环和转化起到了关键性作用<sup>[7]</sup>。良好的土壤环境是作物生长发育的重要条件, 土壤 pH 值、有机质、氮磷钾等土壤因子和土壤微生物是评价土壤质量的重要指标。Velasquez 等<sup>[8]</sup>研究发现, 长期施肥可降低土壤微生物数量, 这可能与土壤肥料残余量有关。谭周进等<sup>[9]</sup>研究表明, 植物会将 5%~20% 的光合作用产物释放到土壤中, 用于建立植物

与微生物的相互作用, 这些相互作用可以增加植物对矿质养分的利用率或促进植物激素的产生。Turner 等<sup>[10]</sup>研究发现, 微生物通过固氮及溶磷、解钾等作用可有效改善土壤中的养分条件, 有利于植物的生长。谭雪莲等<sup>[11]</sup>研究表明, 土壤中细菌和放线菌数量随马铃薯连作年限的增加呈下降趋势, 真菌呈上升趋势。王桂红等<sup>[12]</sup>研究发现, 玉米和牧草典型种植模式下, 随着土层加深土壤微生物量呈下降趋势。土壤酶活性是土壤中生物活性的综合指标, 反映了土壤酶催化物质转化的能力, 能够反映土壤养分转化及土壤环境变化状况<sup>[13]</sup>。王丽红等<sup>[14]</sup>研究发现, 马铃薯轮作时, 土壤过氧化氢酶活性有增加的趋势, 蔗糖酶活性提高, 且在马铃薯成熟期提高幅度最大。Baldrian 等<sup>[15]</sup>研究发现, 土壤有机碳可以作为酶的载体, 较高有机碳可以促进土壤中微生物的活动和酶的合成。Feng 等<sup>[16]</sup>研究发现, 在土壤垂直方向上, 土壤酶活性普遍随着土壤深度的增加而降低, 在有机质含量高、根系多、土壤微生物及动物活跃的土层, 土壤酶活性高, 而在有机质含量低、根系少、微生物及动物少的土层, 土壤酶活性低。Sardans 等<sup>[17]</sup>研究表明, 当土壤湿度降低 21%, 脲酶活性降低 10%~67%。综上所述, 土壤微生物和土壤酶在植物生长过程中发挥着重要的作用, 土壤水分、pH 值、氮磷钾、有机质等土壤因子和土壤微生物、土壤酶密切相关, 它们共同作用、相

互影响<sup>[18]</sup>,共同促进了植物的生长。因此,探明马铃薯根层土壤因子、微生物分布、土壤酶活性特征意义重大。

目前,对马铃薯土壤微生物生态结构的研究已有一些报道,但多集中在不同种植方式、施肥等对微生物的影响,而我国沙土区马铃薯根层土壤因子与微生物数量以及酶活性特征相关研究还未见报道。本研究以榆林沙土区 16 个马铃薯品种为研究对象,揭示马铃薯土壤因子、土壤微生物数量、土壤酶活性的变化特征,并分析土壤因子、土壤微生物、土壤酶活性、块茎产量与品质的相关性,为优化马铃薯田间管理和优良种质资源开发提供科学的理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验在陕西省榆林市现代农业科技示范园马铃薯试验站进行,试验站位于东经 109°45'30",北纬 38°22'37",海拔高度 1 100 m,试验地所在区域属于旱半干旱大陆性季风气候,全年降水集中在 6、7、8 月份,年平均降水量 400 mm,蒸发量 1 900 mm,年日照时数 2 900 h,年均气温 8.6℃。试验区土壤为沙质土壤,土壤 pH 值为 8,土壤容重为 1.38 g·cm<sup>-3</sup>,土壤有机质含量为 3.46 g·kg<sup>-1</sup>,土壤碱解氮含量为 14.32 mg·kg<sup>-1</sup>,土壤铵态氮含量为 5.8 mg·kg<sup>-1</sup>,土壤硝态氮含量为 2.1 mg·kg<sup>-1</sup>,土壤有效磷含量为 6.2 mg·kg<sup>-1</sup>,土壤速效钾含量为 67.4 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

试验材料为 16 个马铃薯品种,分别为 1014 (T1)、沙杂 15 号(T2)、青薯 5 号(T3)、丽薯 6 号(T4)、中薯 20 号(T5)、希森 6 号(T6)、陇薯 3 号(T7)、华颂 11 号(T8)、庄薯 3 号(T9)、华颂 7 号(T10)、中薯 10 号(T10)、华颂 33 号(T12)、华颂 35 号(T13)、陇薯 10 号(T14)、Shepody(T15)、华颂 34 号(T16),马铃薯于 2020 年 4 月 28 日种植,9 月 20 日收获。

田间马铃薯滴灌施肥设备采用液压比例施肥泵装置控制,设备主要由水源、水泵、比例施肥泵和输配水管道系统等组成,滴灌施肥时将肥料溶于水中,通过施肥罐进行施肥。根据当地经验选用滴灌所用肥料,分别选用尿素、磷酸二铵和硝酸钾混合配比施用,含量为 N 46.4%;N 18%、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46%;N 13.5%、K<sub>2</sub>O 18%。施肥采用同一施肥水平滴管,根

据当地推荐施肥水平设 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O 为 200-80-300 kg·hm<sup>-2</sup>。根据马铃薯生长特性,在苗期、块茎形成期、块茎膨大期、淀粉积累期和成熟期施肥量分别为 0%、20%、50%、30%和 0%。

本试验统一使用机械起垄种植,每小区 2 垄,小区长 20 m,宽 1.8 m,垄底宽 90 cm,株距 25 cm,种植密度为 45 000 株·hm<sup>-2</sup>。各处理土壤状况、种植密度、施肥水平、田间管理均相同。播种时用 70%乙醇消毒过的刀切开马铃薯块茎,每块留 2~4 个芽眼,种植深度 8~10 cm,植株成熟后统一收获。

### 1.3 样品采集和测定

1.3.1 块茎产量和品质 马铃薯于 2020 年 9 月 20 日采样,每个品种随机选取 5 株,称量块茎重量后计算产量。选择各处理中无病害的块茎,部分样品用于测定鲜样指标,部分样品杀青烘干至恒重后打粉,过筛待用。块茎淀粉含量采用蒽酮法测定,可溶性总糖含量采用蒽酮比色法测定,粗蛋白质含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定,维生素 C 含量采用钼蓝比色法测定。

1.3.2 土壤理化性质 收获马铃薯块茎当天采取土壤样品,每个马铃薯种植区中随机选取 5 个点,取 6 个深度土样,每个深度为 10 cm,采土深度为 0~60 cm,样品阴干,过筛后待用。土壤 pH 值采用雷磁 PHB-4 便携式 pH 计测定,碱解氮采用碱解扩散法测定,速效磷采用 NaHCO<sub>3</sub> 浸提钼锑抗比色法,速效钾采用 NH<sub>4</sub>OAc 浸提火焰光度法测定,有机质含量采用重铬酸钾-硫酸外加热法测定<sup>[19]</sup>。

1.3.3 土壤酶及微生物 土壤过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定;土壤蔗糖酶活性采用 3-5-二硝基水杨酸比色法测定;脲酶活性采用苯酚钠比色法测定<sup>[20]</sup>。

土壤微生物数量的测定采用稀释涂布平板计数法。细菌数量采用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基;真菌数量采用马丁-孟加拉红琼脂培养基;放线菌数量采用高氏一号琼脂培养基。接种后,用无菌涂布器均匀涂布,细菌培养皿于 37℃ 恒温培养箱倒置培养 2~3 d 后进行计数,真菌培养皿于 28℃ 恒温培养箱倒置培养 3~4 d 进行计数,放线菌培养皿于 28℃ 恒温培养箱倒置培养 5~7 d 后进行计数并计算结果<sup>[20]</sup>。

### 1.4 数据统计与分析

使用 Excel 软件进行数据整理,用 SPSS 25.0、Canoco 5 软件进行分析处理,用 Origin 2021 进行图像绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 马铃薯根层土壤酶活性特征

马铃薯土壤酶活性在 0~20、20~40 cm 和 40~60 cm 土层分布特征如表 1~3 所示。过氧化氢酶活性随着土壤深度的增加呈现降低的趋势(表 1), 0~20、20~40、40~60 cm 土层过氧化氢酶活性平均值分别为 5.42、5.26、4.21 ml · g<sup>-1</sup>, 0~20 cm 土层比 40~60 cm 土层高 28.74%。在 0~20 cm 土层, T1 土壤过氧化氢酶活性最高, 为 6.10 ml · g<sup>-1</sup>, T14 最低, 为 4.73 ml · g<sup>-1</sup>, T1 比 T14 高了 28.96%, 差异达显著水平, T1 与 T2、T3 无显著性差异。在 20~40 cm 土层, T3 土壤过氧化氢酶活性最高, 为 6.16 ml · g<sup>-1</sup>, T1 最低, 为 4.43 ml · g<sup>-1</sup>。在 40~60 cm 土层, T6 土壤过氧化氢酶活性最低, 其他处理无显著性差异。土壤过氧化氢含量平均值, T3 最高, T5 最低, T3 比 T5 高 25.83%。

表 1 马铃薯根层土壤 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 酶活性/(ml · g<sup>-1</sup>)

Table 1 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> enzyme activity in potato root layer

品种编号 Code	品种 Variety	土层深度 Soil depth/cm			平均值 Average value
		0~20	20~40	40~60	
T1	1014	6.10a	4.43f	4.28a	4.94
T2	沙杂 15 号 Shaza 15	6.09a	5.90ab	4.52a	5.5
T3	青薯 5 号 Qingshu 5	5.98a	6.16a	4.64a	5.59
T4	丽薯 6 号 Lishu 6	5.92ab	5.68abcd	3.56ab	5.05
T5	中薯 20 号 Zhongshu 20	4.88de	5.15abcdef	3.31ab	4.44
T6	希森 6 号 Xisen 6	5.01cde	5.83abc	2.76b	4.53
T7	陇薯 3 号 Longshu 3	5.35bcde	5.59abcd	4.27a	5.07
T8	华颂 11 号 Huasong 11	5.51abcd	5.30abcdef	4.11ab	4.97
T9	庄薯 3 号 Zhuangshu 3	5.10cde	4.94bedef	4.83a	4.96
T10	华颂 7 号 Huasong 7	5.26cde	4.56ef	4.08ab	4.63
T11	中薯 10 号 Zhongshu 10	5.62abc	4.80cdef	4.55a	4.99
T12	华颂 33 号 Huasong 33	5.24cde	5.05bedef	4.54a	4.94
T13	华颂 35 号 Huasong 35	5.06cde	4.74def	4.11ab	4.64
T14	陇薯 10 号 Longshu 10	4.73e	4.99bedef	4.64a	4.79
T15	Shepody	5.51abcd	5.61abcd	4.81a	5.31
T16	华颂 34 号 Huasong 34	5.36bcde	5.47abcde	4.39a	5.07
平均值 Average value		5.42	5.26	4.21	4.96

注:不同字母表示品种间差异显著( $P < 0.05$ ),下同。

Note: Different letters indicate significant difference ( $P < 0.05$ )

among varieties, the same below.

脲酶活性随着土壤深度的增加呈现降低的趋势(表 2), 0~20 cm 土层脲酶活性平均值为 0.89 mg · g<sup>-1</sup> · 24h<sup>-1</sup>, 20~40 cm 土层为 0.78 mg · g<sup>-1</sup> · 24h<sup>-1</sup>, 40~60 cm 土层为 0.33 mg · g<sup>-1</sup> · 24h<sup>-1</sup>, 0~20 cm 土层比 20~40、40~60 cm 土层分别高 14.10%、169.70%。在 0~20 cm 土层, T4 土壤脲酶活性最高, 为 1.13 mg · g<sup>-1</sup> · 24h<sup>-1</sup>, T13 最低, 为 0.63 mg · g<sup>-1</sup> · 24h<sup>-1</sup>, T1 比 T13 高 79.37%, T1 和 T13 土壤脲酶具有显著性差异。在 20~40 cm 土层, T14 土壤脲酶活性最高, 为 1.40 mg · g<sup>-1</sup> · 24h<sup>-1</sup>, T13 最低, 为 0.52 ml · g<sup>-1</sup>。在 40~60 cm 土层, T6 土壤脲酶活性最低, 其他处理无显著性差异。在 0~60 cm 土层, T14 脲酶活性最高, 比 T13 高 89.90%。

蔗糖酶活性随着土壤深度的增加呈现先增加后降低的趋势(表 3), 0~20 cm 土层脲酶活性平均值为 5.61 mg · g<sup>-1</sup> · 24h<sup>-1</sup>, 20~40 cm 土层为 6.86 mg · g<sup>-1</sup> · 24h<sup>-1</sup>, 40~60 cm 土层为 4.30 mg · g<sup>-1</sup> · 24h<sup>-1</sup>,

表 2 马铃薯根层土壤脲酶活性/(mg · g<sup>-1</sup> · 24h<sup>-1</sup>)

Table 2 Urease activity in potato root layer

品种编号 Code	品种 Variety	土层深度 Soil depth/cm			平均值 Average value
		0~20	20~40	40~60	
T1	1014	0.90bcd	0.77bcde	0.37ab	0.68
T2	沙杂 15 号 Shaza 15	1.01ab	0.95bc	0.55ab	0.83
T3	青薯 5 号 Qingshu 5	0.99abc	0.82bcde	0.56a	0.79
T4	丽薯 6 号 Lishu 6	1.13a	0.91bcd	0.33ab	0.79
T5	中薯 20 号 Zhongshu 20	0.99abc	0.99b	0.39ab	0.79
T6	希森 6 号 Xisen 6	0.87bcd	0.64cde	0.18b	0.56
T7	陇薯 3 号 Longshu 3	0.77de	0.62de	0.20ab	0.53
T8	华颂 11 号 Huasong 11	0.92bcd	0.90bcd	0.19ab	0.67
T9	庄薯 3 号 Zhuangshu 3	0.76de	0.66cde	0.34ab	0.59
T10	华颂 7 号 Huasong 7	0.84bcd	0.71bcde	0.27ab	0.61
T11	中薯 10 号 Zhongshu 10	0.94abcd	0.80bcde	0.47ab	0.74
T12	华颂 33 号 Huasong 33	0.89bcd	0.50bcde	0.39ab	0.68
T13	华颂 35 号 Huasong 35	0.63e	0.52e	0.21ab	0.45
T14	陇薯 10 号 Longshu 10	0.86bcd	1.40a	0.32ab	0.86
T15	Shepody	0.89bcd	0.57e	0.37ab	0.61
T16	华颂 34 号 Huasong 34	0.80cde	0.54e	0.21ab	0.52
平均值 Average value		0.89	0.78	0.33	0.67

表 3 马铃薯根层土壤蔗糖酶活性/( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24\text{h}^{-1}$ )

Table 3 Invertase activity in potato root layer

品种编号 Code	品种 Variety	土层深度 Soil depth/cm			平均值 Average value
		0~20	20~40	40~60	
T1	1014	5.11cd	4.75de	2.75cde	4.20
T2	沙杂 15 号 Shaza 15	5.73cd	11.92ab	7.15a	8.26
T3	青薯 5 号 Qingshu 5	4.94cd	5.65de	3.07cde	4.55
T4	丽薯 6 号 Lishu 6	8.77b	12.26a	6.71ab	9.24
T5	中薯 20 号 Zhongshu 20	6.05cd	7.22cde	5.55abc	6.27
T6	希森 6 号 Xisen 6	4.71cd	4.33de	6.80ab	5.28
T7	陇薯 3 号 Longshu 3	3.51d	11.11abc	2.80cde	5.80
T8	华颂 11 号 Huasong 11	4.88cd	5.67de	3.31cde	4.62
T9	庄薯 3 号 Zhuangshu 3	5.93cd	5.46de	5.02abc	5.47
T10	华颂 7 号 Huasong 7	12.40a	10.77abc	4.86abcd	9.35
T11	中薯 10 号 Zhongshu 10	4.25cd	3.02e	2.07de	3.11
T12	华颂 33 号 Huasong 33	4.59cd	8.13bcd	4.39abcd	5.70
T13	华颂 35 号 Huasong 35	3.75cd	4.17de	3.44cde	3.79
T14	陇薯 10 号 Longshu 10	3.96cd	4.70de	1.33e	3.33
T15	Shepody	4.64cd	3.03e	3.99bcde	3.89
T16	华颂 34 号 Huasong 34	6.53bc	7.54cd	5.58abc	6.55
平均值	Average value	5.61	6.86	4.30	5.59

0~20、20~40 cm 土层比 40~60 cm 土层分别高 30.47%、59.53%。在 0~20 cm 土层, T10 土壤蔗糖酶活性最高, 为  $12.40 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24\text{h}^{-1}$ , 其次为 T4, T7 最低, 为  $3.51 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24\text{h}^{-1}$ , T10 比 T7 高 253.28%, T10 和 T7 具有显著性差异。在 20~40 cm 土层, T4 土壤蔗糖酶活性最高 ( $12.26 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24\text{h}^{-1}$ ), 其次为 T2、T7、T10, T15 和 T11 含量较低, 与 T2、T7 和 T10 具有显著性差异。在 40~60 cm 土层, T2 土壤蔗糖酶活性最高, 为  $7.15 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24\text{h}^{-1}$ , 其次为 T6、T4, T14 最低, 为  $1.33 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24\text{h}^{-1}$ 。在 0~60 cm 土层中, T10 蔗糖酶活性最高, 比 T11 高 218.30%。

## 2.2 马铃薯根层土壤微生物数量特征

由图 1 可知, 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤中细菌、真菌和放线菌数量具有差异性。随着土壤深度的增加土壤细菌、真菌和放线菌数量呈现减少的趋势, 0~20 cm 土层土壤中细菌、真菌、放线菌的

数量分别为  $107.23 \times 10^4 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $23.48 \times 10^2 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $6.31 \times 10^4 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ , 20~40 cm 土层分别为  $49.02 \times 10^4 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $11.69 \times 10^2 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $3.80 \times 10^4 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ , 土壤中细菌、真菌、放线菌的数量 0~20 cm 土层比 20~40 cm 土层分别高 29.89%、100.85%、66.05%。由表 4 可知, 在土壤细菌、真菌和放线菌中, 土壤细菌的数量占据绝对优势, 真菌和放线菌数量相对较少, 细菌数量占微生物总数的 83.11%~97.28%, 其次是放线菌, 占微生物总量的 2.49% 以上, 真菌在三类微生物中占比最少, 占比为 0.13%~0.44%。微生物总数最多的是 T11, 其次是 T6, 最少的为 T14。

由图 1(A) 可知, 在 0~20 cm 土层, T11、T4、T5 土壤中细菌数量平均值较大, 分别为  $150.33 \times 10^4 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $143.67 \times 10^4 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $142.67 \times 10^4 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ 。在 20~40 cm 土层, T10 土壤中细菌数量平均值最大, 为  $76.67 \times 10^4 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ 。在 0~40 cm 土层, T11 土壤中细菌数量最多, 在三类微生物数量中占比 94.70%, 其次为 T6, T16 土壤中细菌数量最少, T16 与 T11 有显著性差异, T11 比 T16 高 172.83%。

由图 1(B) 可知, 在 0~20 cm 土层, T11、T9、T16 土壤中真菌数量较大, 分别为  $44.67 \times 10^2$ 、 $40.00 \times 10^2$ 、 $36.00 \times 10^2 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ , T7、T8 较小, 与 T11、T9、T16 具有显著性差异。在 20~40 cm 土层, T9 土壤中真菌数量最大, 为  $18.00 \times 10^2 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ , 与其他处理有显著性差异。在 0~40 cm 土层, T9、T11 土壤中真菌数量较多, 为  $29.00 \times 10^2 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $27.00 \times 10^2 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ , 占比分别为 0.44%、0.24%, T8 最少, T9、T11 比 T8 高 167.77%、140.07%。

由图 1(C) 可知, 在 0~20 cm 土层, T4、T16 土壤中土壤放线菌数量较大, 分别为  $11.73 \times 10^4 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $12.67 \times 10^4 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ , 其次为 T9、T8, T1 土壤中放线菌数量较小, 为  $3.00 \times 10^4 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ 。在 20~40 cm 土层, T9 土壤中真菌数量最大, 为  $9.30 \times 10^2 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ , T2、T3、T7 较小, 与其他处理有显著性差异。在 0~40 cm 土层, T9 土壤中放线菌数量最多, 为  $19.13 \times 10^4 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ , 占比为 14.42%, T1、T3、T5、T7 较少, 与其他处理有显著性差异。

## 2.3 马铃薯根层土壤因子分布特征

### 2.3.1 土壤含水量、pH 值、电导率

不同品种马铃薯根层土壤水分分布规律如图 2 所示。随着土壤深度的增加, 土壤含水量呈现先增大后减小的趋势, 在 0~20 cm 土层土壤含水量呈递增趋势, 20~40 cm 土层土壤含水量普遍较高, 40~60 cm 土层出现下降趋势。T7 处理 30~40 cm 土层含水量最大, 为 9.48%, T4 处理 50~60 cm 土层含水量最小, 为 2.16%。

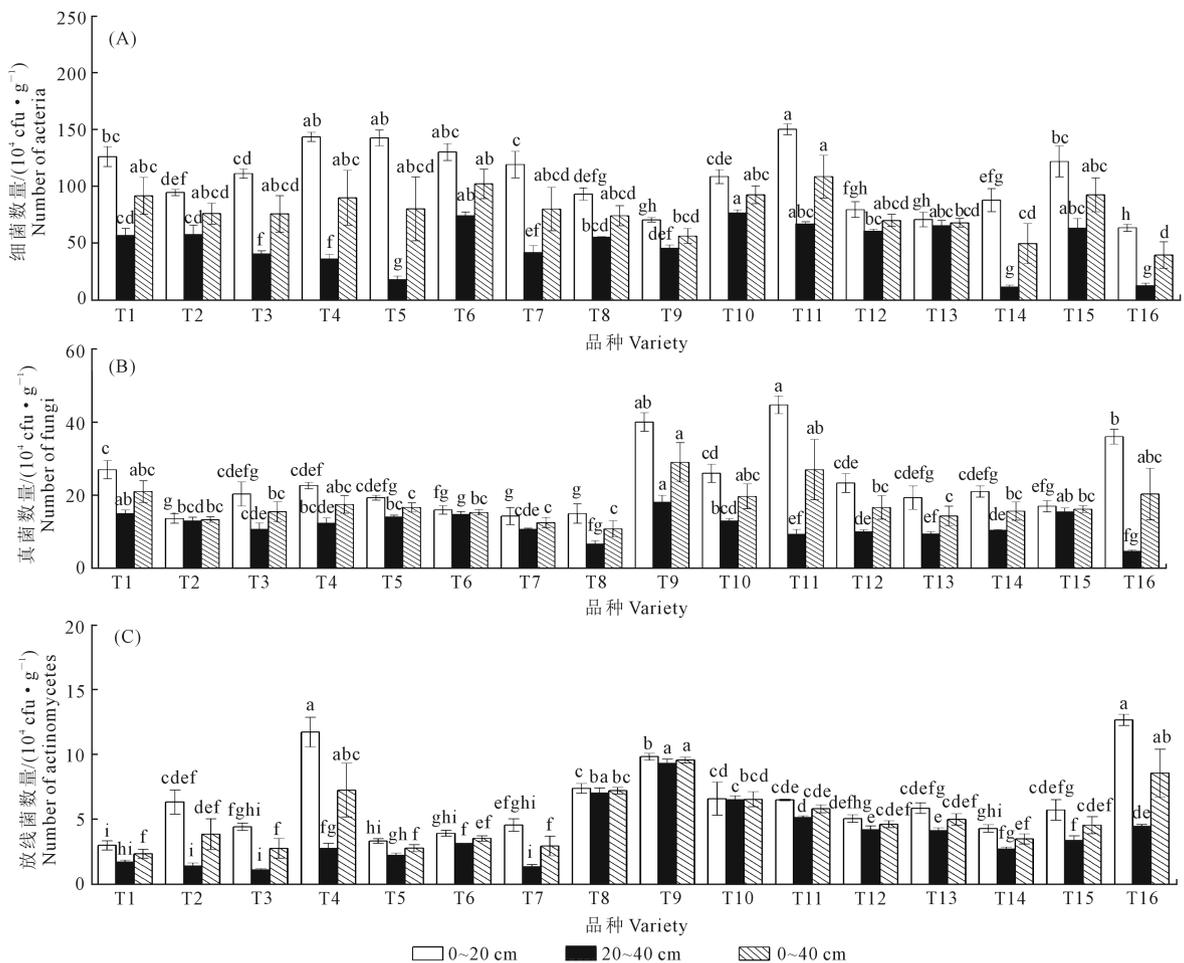


图 1 马铃薯根层土壤微生物数量

Fig.1 Number of microorganisms of soil in potato root layer

表 4 马铃薯根层 0~40 cm 土层土壤微生物数量

Table 4 Number of soil microorganisms in potato root layer 0~40 cm soil

品种 Variety	细菌数量 Number of bacteria /(10 <sup>4</sup> cfu · g <sup>-1</sup> )	占比 Proportion /%	真菌数量 Number of fungi /(10 <sup>2</sup> cfu · g <sup>-1</sup> )	占比 Proportion /%	放线菌数量 Number of actinomycetes /(10 <sup>4</sup> cfu · g <sup>-1</sup> )	占比 Proportion /%	微生物总数 Total microorganisms /(10 <sup>4</sup> cfu · g <sup>-1</sup> )
T1	91.6667	97.28	0.2100	0.22	2.3500	2.49	94.2267
T2	76.1667	95.01	0.1333	0.17	3.8667	4.82	80.1667
T3	76.0000	96.30	0.1550	0.20	2.7667	3.51	78.9217
T4	90.0000	92.38	0.1750	0.18	7.2500	7.44	97.4250
T5	80.3333	96.46	0.1667	0.20	2.7833	3.34	83.2833
T6	102.3333	96.52	0.1533	0.14	3.5333	3.33	106.0199
T7	80.1667	96.31	0.1250	0.15	2.9500	3.54	83.2417
T8	74.3333	91.03	0.1083	0.13	7.2167	8.84	81.6583
T9	56.5000	85.15	0.2900	0.44	9.5667	14.42	66.3567
T10	92.6667	93.21	0.1967	0.20	6.5500	6.59	99.4134
T11	108.6667	94.70	0.2700	0.24	5.8167	5.07	114.7534
T12	70.1667	93.60	0.1667	0.22	4.6333	6.18	74.9667
T13	68.1667	92.98	0.1433	0.20	5.0000	6.82	73.3100
T14	49.8333	93.16	0.1567	0.29	3.5000	6.54	53.4900
T15	92.6667	95.16	0.1617	0.17	4.5500	4.67	97.3784
T16	43.1667	83.11	0.2033	0.39	8.5667	16.49	51.9367

T13 土壤含水量平均值最高,其次是 T7、T13、T4 土壤含水量平均值最低。马铃薯土壤含水量平均值在 0~20 cm 土层为 5.46%, 20~40 cm 土层为 7.01%, 在 40~60 cm 土层为 5.93%, 20~40 cm 土层比 0~20 cm 土层高 28.39%, 20~40 cm 土层比 40~60 cm 土层高 18.21%。

不同品种马铃薯根层 pH 值分布规律如表 5 所示。随土层深度的增加土壤 pH 值呈现先减小后增加的趋势, 0~20 cm 土层 pH 值最高, 比 20~40 cm

土层高 2.02%, 比 40~60 cm 土层高 0.12%。在 0~60 cm 土层, 16 个马铃薯品种土壤 pH 值在 8.30~8.79 范围内, T9 土壤 pH 最高, 为 8.79, 其次是 T10、T8、T11 土壤 pH 值相对较低。

不同品种马铃薯根层土壤电导率分布规律如表 6 所示。随土层深度的增加土壤电导率值呈现先增大后减小的趋势, 20~40 cm 土层电导率比 0~20、40~60 cm 土层电导率分别高 45.21%、40.48%。T2 土壤电导率的平均值最高, T9 最低, T2 比 T9 高 93.03%。

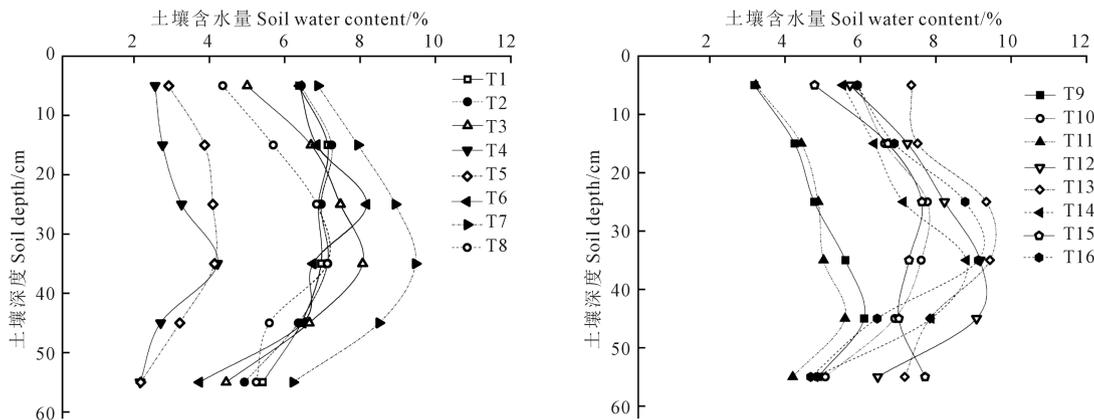


图 2 马铃薯根层土壤含水量

Fig.2 Soil water content in potato root layer

表 5 马铃薯根层土壤 pH 值特征

Table 5 Characteristics of soil pH value in potato root layer

土壤深度 Soil depth/cm	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
10	8.71	8.80	8.75	8.80	8.39	8.59	8.53	8.77	8.71	8.74	8.39	8.50	8.42	8.81	8.75	8.55
20	8.62	8.64	8.65	8.64	8.40	8.60	8.24	8.66	9.01	8.78	8.25	8.35	8.21	8.60	8.54	8.36
30	8.45	8.47	8.64	8.49	8.28	8.56	8.25	8.51	8.76	8.68	8.20	8.22	8.20	8.47	8.46	8.17
40	8.53	8.45	8.39	8.42	8.29	8.55	8.44	8.59	8.72	8.71	8.22	8.19	8.20	8.54	8.44	8.08
50	8.63	8.48	8.45	8.52	8.45	8.44	8.59	8.74	8.69	8.67	8.22	8.26	8.33	8.44	8.33	8.26
60	8.74	8.70	8.69	8.90	8.74	8.58	8.82	8.82	8.82	8.83	8.53	8.56	8.55	8.87	8.42	8.50

表 6 马铃薯根层土壤电导率/( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )

Table 6 Soil conductivity in potato root layer

土壤深度 Soil depth/cm	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
10	134.52	106.10	115.84	114.02	114.70	96.82	123.70	83.26	76.04	89.68	121.96	109.30	139.90	108.48	94.10	143.70
20	206.98	184.62	155.32	167.98	118.20	91.90	245.04	132.52	84.58	93.84	220.04	161.16	217.72	203.94	100.76	208.04
30	228.88	265.02	221.50	220.35	155.68	143.36	276.20	142.32	113.96	106.72	237.90	208.48	256.20	248.60	102.54	253.50
40	180.16	251.75	237.26	237.62	168.30	147.12	270.48	123.54	123.90	120.30	231.96	228.40	234.44	224.60	117.76	259.16
50	181.82	215.66	209.80	180.42	135.60	141.52	222.58	92.28	125.88	114.84	207.78	196.98	166.86	216.02	126.02	183.86
60	153.02	157.26	118.70	87.14	75.30	88.38	127.24	75.93	87.14	87.76	123.24	123.12	122.68	105.78	135.12	126.04

2.3.2 土壤碱解氮、有效磷、速效钾、有机质含量  
由图 3A 可知, T2 在 0~60 cm 土层碱解氮累积值最高, 为  $90.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , T3 次之, 为  $82.83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , T9 最低, 为  $49.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , T2 比 T9 高 83.02%。土壤碱解氮含量随土壤深度的增加呈现下降趋势, 土壤碱解氮主要积累于土壤 0~40 cm 土层, 在 40~60

cm 土层出现最低值。0~20 cm 土层碱解氮含量平均值为  $25.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 20~40 cm 土层碱解氮含量平均值为  $25.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 40~60 cm 土层碱解氮含量平均值为  $16.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 0~20 cm 土层比 20~40 cm 土层碱解氮含量高 0.43%, 0~20 cm 土层比 40~60 cm 土层碱解氮含量高 51.98%。

由图3B可知,马铃薯根层土壤有效磷含量随土层深度增加而下降,0~20 cm 土层有效磷含量平均值为  $28.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,比 20~40 cm 土层高 50.97%,比 40~60 cm 土层高 117.74%。T12 土层有效磷含量累积值最高,其次是 T14、T4、T5、T6、T7 和 T11 累积含量较低。

由图3C可知,在 0~20 cm 土层中,T16 速效钾含量平均值最高,为  $263.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,T4 最低,为  $138.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,T16 比 T4 高了 90.38%。在 20~40 cm 土层中,T16 速效钾含量平均值最高,为  $152.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,T4 土层速效钾含量平均值最低,T16 比 T4 高了 68.77%。在 40~60 cm 土层中,T1、T15 速效钾含量平均值较高,T4 土层速效钾含量平均值最低。土壤速效钾含量随土壤深度的增加呈现下降趋势,0~20 cm 土层速效钾含量平均值为

$178.93 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,比 20~40 cm 和 40~60 cm 土层分别高 35.93%和 126.15%。在 0~60 cm 土层中,T16 土壤速效钾含量累积值最高,为  $490.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,T4 土壤速效钾含量累积值最低,为  $287.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,T16 比 T4 高 70.71%。

由图3D可知,马铃薯根层土壤有机质含量随土层深度增加呈现下降趋势,0~20 cm 土层有机质含量平均值为  $5.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,20~40 cm 土层有机质含量平均值为  $4.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,40~60 cm 土层有机质含量平均值为  $2.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,0~20 cm 土层比 20~40、40~60 cm 土层分别高 14.51%、114.89%,有机质主要集中在 0~40 cm 土层。从不同品种马铃薯来看,T9 在 0~60 cm 土层有机质含量累积值最高,为  $16.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,T13 最低,T9 比 T13 高 90.87%。

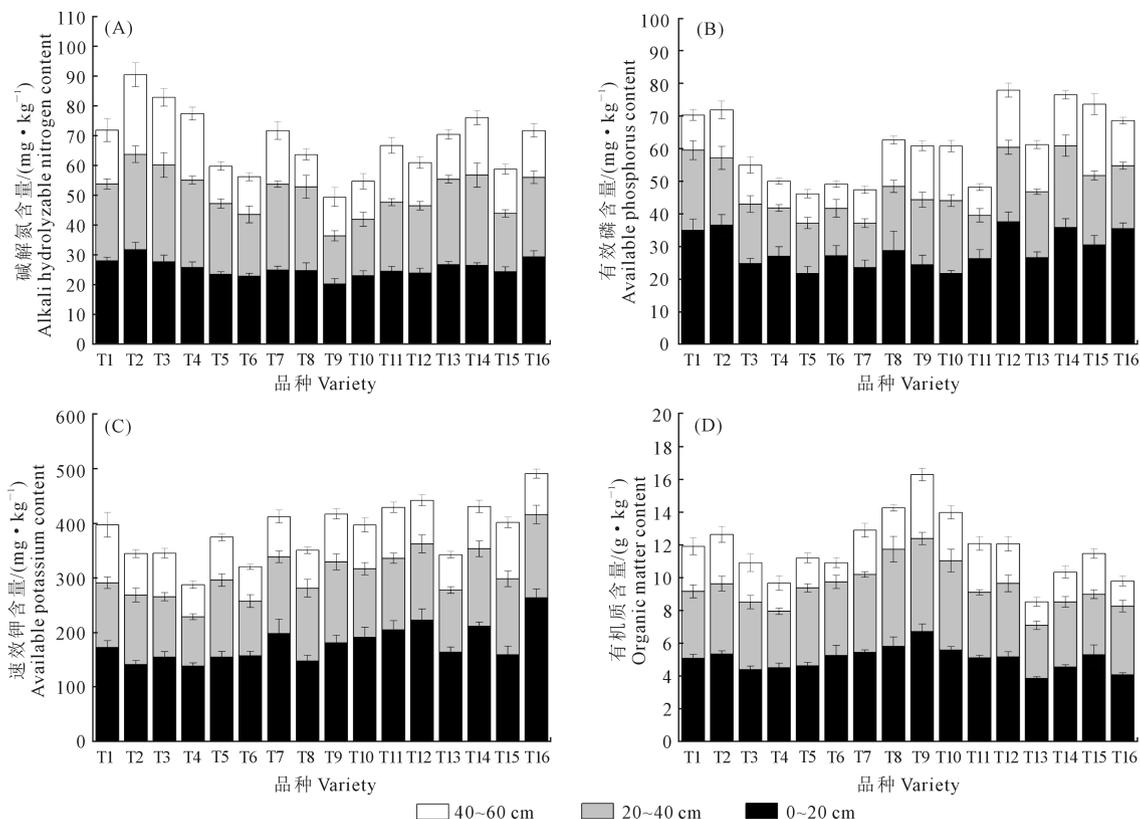


图3 马铃薯根层土壤碱解氮、有效磷、速效钾、有机质含量

Fig.3 Contents of alkali hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, available potassium and organic matter in potato root layer soil

## 2.4 不同品种马铃薯产量和品质差异

不同品种马铃薯块茎的产量和品质差异如图4所示。不同品种马铃薯的产量具有差异性,T5产量最高,为  $77.97 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,其次是 T11。T5产量比 T1 高 333.16%,比 T2、T3、T4、T6、T7、T8、T9、T10、T11、T12、T13、T14、T15、T16 分别高 183.42%、264.68%、

43.91%、11.85%、141.92%、38.05%、200.86%、70.05%、8.53%、183.42%、139.76%、95.22%、61.63%、123.54%。T1 和 T3 产量较低,与其他处理有显著性差异。T11 蛋白质含量最高,为  $1.36 \text{ g} \cdot 100\text{g}^{-1}$ ,其次是 T2、T8、T9、T15,分别为 1.29、1.27、1.19、1.15  $\text{g} \cdot 100\text{g}^{-1}$ ,T13 最低,T11 比 T13 高

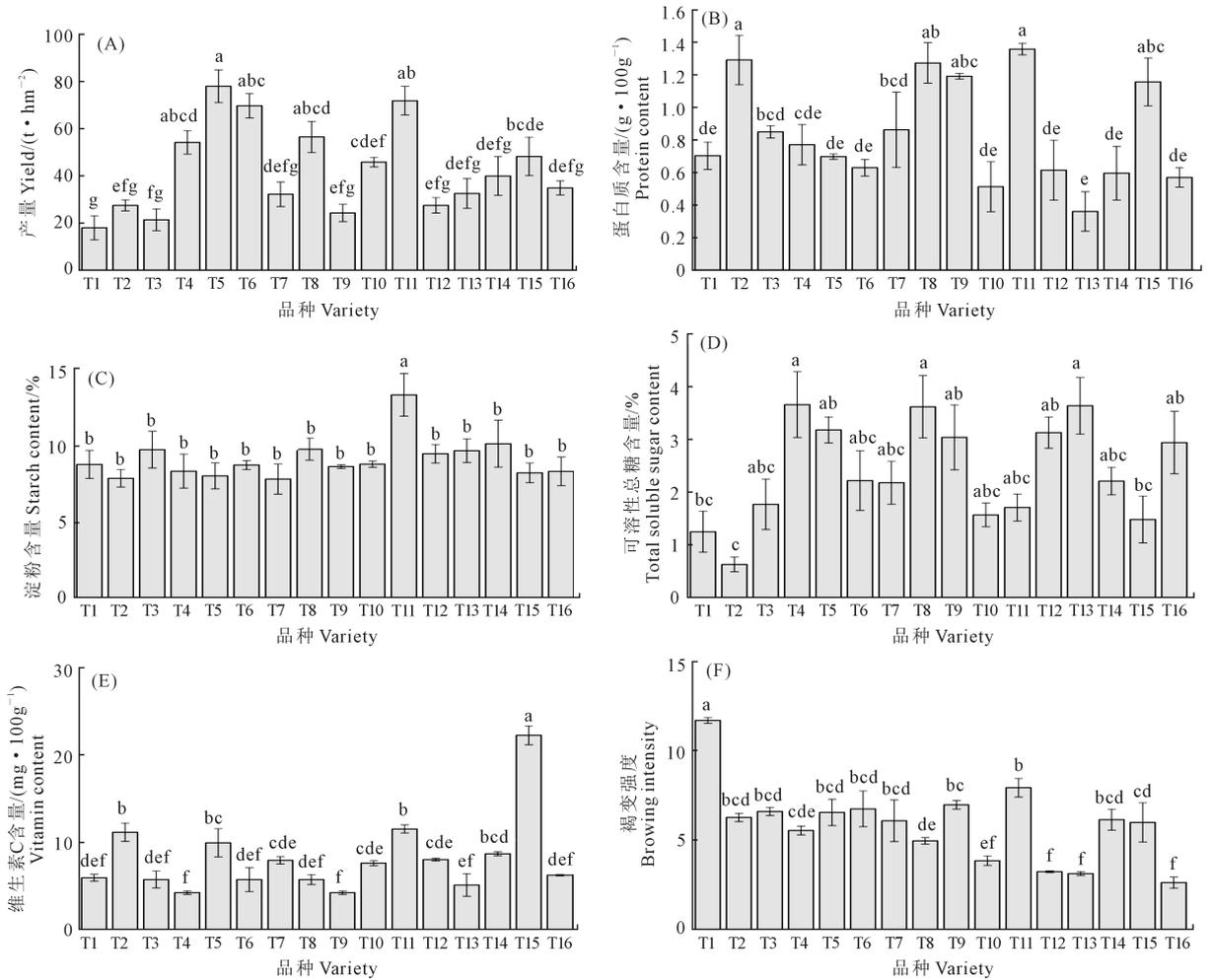


图 4 马铃薯块茎产量和品质

Fig.4 Potato tuber yield and quality

277.78%。T11 淀粉含量最高,为 13.35%,其他马铃薯品种块茎淀粉含量在 7.82%~10.14%,T11 与其他品种具有显著性差异。T4、T8、T13 可溶性总糖含量较高,与其他品种有显著性差异,其中 T13 最高,其次为 T4、T8, T13 比 T2 高 477.78%。T15 维生素 C 含量最高,为 11.54 mg·100g<sup>-1</sup>,其次是 T11、T2、T4、T9 含量较低, T4、T9 与其他品种有显著性差异。不同品种马铃薯块茎褐变强度具有差异性, T1 褐变强度最大,其次为 T11、T12、T13、T16 较小, T1 比 T11 高 47.35%,比 T16 高 347.12%。

## 2.5 马铃薯根层土壤养分与土壤酶活性、微生物的关系

### 2.5.1 土壤酶活性、微生物数量与土壤因子相关性分析

由表 7 可知,马铃薯根层土壤过氧化氢酶与土壤电导率、碱解氮、有效磷、速效钾、有机质、脲酶、细菌、真菌之间呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与土壤含水量、蔗糖酶、放线菌呈显著正相关( $P<0.05$ )。土壤脲酶与土壤电导率、碱解氮、有效磷、速效钾、

有机质、蔗糖酶、细菌、真菌之间呈极显著正相关( $P<0.01$ )。土壤蔗糖酶与土壤碱解氮、有机质之间呈极显著正相关( $P<0.01$ )。土壤细菌与土壤碱解氮、有效磷、速效钾、有机质、真菌、放线菌之间呈极显著正相关( $P<0.01$ )。土壤真菌与土壤有效磷、速效钾、有机质、放线菌之间呈极显著正相关( $P<0.01$ )。土壤放线菌与土壤有效磷、速效钾、有机质之间呈极显著正相关( $P<0.01$ )。马铃薯块茎淀粉含量与蔗糖酶活性呈显著负相关( $P<0.05$ )。可溶性总糖含量与放线菌数量呈显著正相关( $P<0.05$ )。褐变强度与 pH 值、细菌数量呈显著正相关( $P<0.05$ ),与土壤含水量、放线菌数量呈极显著负相关( $P<0.01$ ),与蔗糖酶活性呈显著负相关( $P<0.05$ )。块茎产量与细菌数量呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与含水量、电导率呈极显著负相关( $P<0.01$ )。

### 2.5.2 马铃薯根层土壤因子与土壤酶活性、微生物数量冗余分析

不同品种马铃薯土壤酶活性与土壤因子冗余分析结果(图 5、表 8、表 9)表明,RDA 排

表 7 马铃薯土壤因子、产量、品质的相关性分析  
Table 7 Correlation analysis of potato soil factors, yield and quality

	过氧化氢酶 Catalase	脲酶 Urease	蔗糖酶 Sucrase	细菌 Bacteria	真菌 Fungus	放线菌 Actinomycete	含水量 Water content	酸碱度 pH	电导率 Conductivity	碱解氮 Alkali hydrolyzed nitrogen	有效磷 Available phosphorus	速效钾 Available potassium	有机质 Organic matter	淀粉 Starch	蛋白质 Protein	可溶性总糖 Total soluble sugar	维生素 C Vitamin C	褐变强度 Browning intensity	产量 Yield		
过氧化氢酶 Catalase	1.000																				
脲酶 Urease	0.702**	1.000																			
蔗糖酶 Sucrase	0.231*	0.277**	1.000																		
细菌 Bacteria	0.416**	0.565**	0.072	1.000																	
真菌 Fungus	0.267**	0.415**	0.104	0.472**	1.000																
放线菌 Actinomycete	0.221*	0.184	0.095	0.262**	0.463**	1.000															
含水量 Water content	0.209*	-0.013	0.003	-0.1	-0.17	-0.196	1.000														
酸碱度 pH	-0.211*	-0.156	-0.049	0.005	0.037	0.148	-0.469**	1.000													
电导率 Conductivity	0.323**	0.275**	0.175	-0.082	-0.038	-0.19	0.450**	-0.692**	1.000												
碱解氮 Alkali hydrolyzed nitrogen	0.661**	0.735**	0.314**	0.295**	0.198	-0.005	0.206*	-0.329**	0.598**	1.000											
有效磷 Available phosphorus	0.545**	0.651**	0.021	0.477**	0.453**	0.357**	0.131	0.025	-0.016	0.490**	1.000										
速效钾 Available potassium	0.536**	0.655**	0.114	0.474**	0.616**	0.418**	0.11	-0.137	0.054	0.513**	0.784**	1.000									
有机质 Organic matter	0.687**	0.758**	0.286**	0.527**	0.489**	0.344**	0.108	-0.006	0.044	0.523**	0.642**	0.737**	1.000								
淀粉 Starch	-0.027	0.033	-0.209*	0.081	0.146	0.029	-0.02	-0.135	0.072	-0.019	-0.064	0.004	-0.025	1.000							
蛋白质 Protein	0.115	0.052	-0.126	0.103	0.062	0.129	-0.308**	0.11	-0.059	-0.06	-0.051	-0.027	0.159	0.129	1.000						
可溶性总糖 Total soluble sugar	-0.05	-0.048	-0.028	-0.112	-0.044	0.235*	-0.028	-0.074	-0.055	-0.149	-0.059	-0.065	-0.02	0.101	-0.179	1.000					
维生素 C Vitamin C	0.012	0.01	-0.138	0.127	-0.03	-0.173	0.024	-0.155	-0.083	-0.044	0.078	0.048	-0.041	0.051	0.308**	-0.299**	1.000				
褐变强度 Browning intensity	0.017	0.111	-0.209*	0.230*	0.155	-0.289**	-0.286**	0.222*	0.005	0.033	-0.079	-0.055	0.062	0.101	0.320**	-0.340**	0.064	1.000			
产量 Yield	-0.091	0.121	0.021	0.292**	0.044	0.069	-0.319**	-0.106	-0.272**	-0.155	-0.144	0.002	0.026	0.171	0.087	0.198	0.205*	0.002	1.000		

注: \* 在 0.05 水平(双侧)上显著, \*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著。

Note: \* Significant at 0.05 level (bilateral), \*\* Significant at 0.01 level (bilateral).

表 8 马铃薯根层土壤因子与土壤酶 RDA 分析结果

Table 8 RDA analysis results of soil factors and soil enzymes

参数 Parameter	Axis 1	Axis 2
特征值 Eigenvalues	0.2107	0.0231
累积解释变量 Cumulative explained variance/%	21.07	23.39
相关系数 Correlation coefficient	0.5062	0.3668
累积已解释拟合变量 Cumulative explained fit variance/%	89.88	99.73

表 10 马铃薯根层土壤因子与土壤微生物 RDA 分析结果

Table 10 RDA analysis results of soil factors and soil microorganisms in potato root layer

参数 Parameter	Axis 1	Axis 2
特征值 Eigenvalues	0.3549	0.0111
累积解释变量 Cumulative explained variance/%	35.49	36.60
相关系数 Correlation coefficient	0.614	0.452
累积已解释拟合变量 Cumulative explained fit variance/%	96.92	99.94

表 9 马铃薯根层土壤酶相关土壤因子 RDA 结果

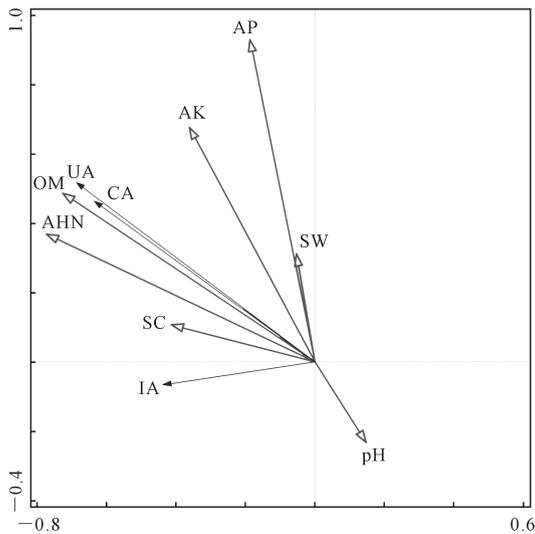
Table 9 RDA results of soil enzyme related soil factors

土壤因子 Soil factor	解释度 Interpretation degree	贡献率/% Contribution rate	F	P
AHN	12.9	55.0	13.9	0.004
OM	3.3	14.1	3.7	0.066
AP	6.5	27.6	7.7	0.006
pH	0.5	2.0	0.6	0.456
AK	0.2	0.7	0.2	0.674
SW	0.1	0.6	0.2	0.750
SC	<0.1	<0.1	<0.1	0.982

表 11 马铃薯根层土壤微生物相关土壤因子 RDA 结果

Table 11 RDA results of soil microbial related factors in potato root layer

土壤因子 Soil factor	解释度 Interpretation degree	贡献率/% Contribution rate	F	P
OM	27.5	75.1	35.6	0.002
AP	3.2	8.9	4.4	0.032
SW	3.1	8.6	4.4	0.03
pH	0.8	2.2	1.1	0.294
SC	0.8	2.2	1.1	0.298
AK	0.7	1.8	0.9	0.324
AHN	0.5	1.3	0.7	0.434

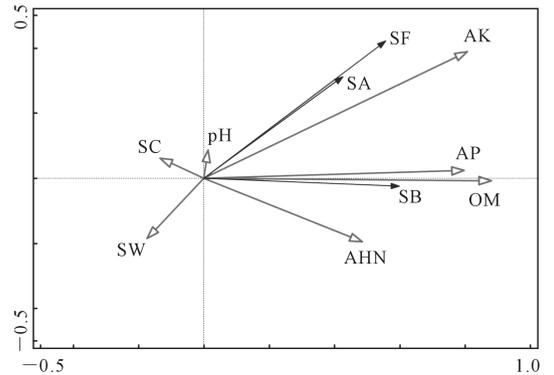


注:SW-土壤含水量,SC-土壤电导率,AHN-土壤碱解氮,AP-土壤有效磷,AK-土壤速效钾,OM-土壤有机质,CA-土壤过氧化氢酶,UA-脲酶,IA-蔗糖酶。下同。

Note:SW-soil water content, SC-soil conductivity, AHN-soil alkali hydrolyzable nitrogen, AP-soil available phosphorus, AK-soil available potassium, OM-soil organic matter, CA-soil H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> enzyme, UA-urease, IA-invertase. The same below.

图 5 马铃薯根层土壤酶活性与土壤因子 RDA 排序

Fig.5 Ranking of soil enzyme activity and soil factor RDA



注:SB-土壤细菌, SF-土壤真菌, SA-土壤放线菌。

Note: SB-soil bacteria, SF-soil fungi, SA-soil actinomycetes.

图 6 马铃薯根层土壤微生物数量与土壤因子 RDA 排序

Fig.6 The number of soil microorganisms in potato root layer and the ranking of soil factors by RDA

序的前两轴保留了土壤酶数据总方差的 23.39%,共解释了土壤酶活性与土壤因子关系总方差的 99.73%,碱解氮的贡献率最高,为 55.0%,其次为有机质。土壤因子对土壤酶活性的影响大小为:碱解氮>有机质>有效磷>pH 值>速效钾>含水量>电导率,土壤碱解氮、有机质对过氧化氢酶、脲酶影响较

大,土壤电导率对土壤蔗糖酶影响较大,pH值与3种酶活性均呈负相关。土壤中碱解氮和有机质是土壤过氧化氢酶和脲酶活性变化的主要驱动因子。

不同品种马铃薯土壤微生物数量与土壤因子冗余分析结果(图6、表10、表11)表明,RDA排序的前两轴保留了土壤微生物数据总方差的36.6%,共解释了土壤微生物数量与土壤因子关系总方差的99.94%。有机质的贡献率最高,为75.1%。土壤细菌与土壤有机质、有效磷显著相关,土壤真菌和放线菌之间呈显著相关,土壤真菌、放线菌与速效钾显著相关。土壤中有有机质和有效磷是土壤细菌数量变化的主要驱动因子,速效钾是土壤真菌、放线菌数量变化的主要驱动因子。

### 3 讨论

在沙质土壤中,土壤养分利用效率低,土壤理化性质、酶活性、微生物数量能够在一定程度上反映土壤质量状况,从而可以更准确地为农田管理提供参考。有研究表明,土壤酶主要来源于土壤微生物、植物和动物,土壤酶是土壤质量的生物活性指标,可以用来评价土壤肥力<sup>[21]</sup>。土壤酶、土壤微生物作为评价土壤肥力的指标,比单纯通过土壤养分来评价土壤肥力更加全面和灵敏<sup>[22]</sup>。本研究表明,不同品种马铃薯土壤过氧化氢酶活性均随土壤深度的增加呈降低的趋势,与孙慧等<sup>[23]</sup>的研究结果相似,土壤脲酶活性呈下降趋势,这与温晓霞等<sup>[24]</sup>研究结果一致。本研究发现,相比0~20 cm土层,在20~40 cm土层T2、T3、T4、T5、T8、T12、T13、T14、T16土壤蔗糖酶活性均出现不同程度升高,土壤蔗糖酶活性随土壤深度的增加呈现先升高后降低的趋势,这与温晓霞等<sup>[24]</sup>的研究结果不同,这可能与不同品种马铃薯对土壤蔗糖酶的影响有关。土壤酶活性的高低,可以直接反映土壤中生物活性以及土壤化学性质的转化能力<sup>[25]</sup>。土壤中不同酶的活性与土壤的理化性质显著相关,但影响土壤酶活性的主要土壤因子却各不相同<sup>[26-27]</sup>。本研究发现,土壤过氧化氢酶、脲酶与土壤碱解氮、有效磷、速效钾、有机质均极显著相关,土壤蔗糖酶与土壤碱解氮、有机质极显著相关。

土壤氮磷钾含量、有机质含量、pH值等化学性状是评价土壤质量的重要指标,土壤微生物数量、酶活性和土壤理化指标密切相关,土壤微生物数量、酶活性对土壤氮磷钾的循环有着重要作用。细

菌是土壤微生物中数量最多的一个微生物类群,参与有机质的分解、氨化作用等<sup>[28]</sup>。真菌在土壤碳素和氮素循环过程中起着巨大作用,主要参与土壤中有有机质的分解、腐殖质的形成、氨化作用以及团聚体的形成等<sup>[29]</sup>。放线菌与土壤肥力以及有机质转化和植物病害防治有着密切关系<sup>[14]</sup>。本研究表明,无论马铃薯品种是否有差异,土壤细菌数量在三类微生物中占绝对优势,其次是放线菌,最后为真菌,这一结论与谭宏伟等<sup>[30]</sup>的研究结论相一致。不同品种马铃薯的三类微生物之间有显著性差异,这说明不同品种马铃薯和土壤养分共同决定了土壤微生物数量的多少。马铃薯土壤细菌、真菌的数量与过氧化氢酶、脲酶活性呈极显著相关,与土壤有机质有效磷、有效钾呈极显著相关,说明这些因素之间相互影响共同促进了马铃薯的生长<sup>[31]</sup>。马铃薯属于喜钾作物,生长发育、块茎中淀粉的积累以及光合产物的运输等都离不开钾。本研究发现,马铃薯土壤速效钾的含量与土壤过氧化氢酶、脲酶、细菌、真菌、放线菌均呈极显著相关,而榆林沙土区土壤中钾含量不足,在农业生产中,建议应考虑土壤钾素输入与输出之间的平衡。

本研究表明,马铃薯块茎产量与土壤细菌呈极显著正相关,可溶性总糖与土壤放线菌呈显著正相关,即较高的土壤细菌、土壤放线菌有利于块茎产量、可溶性总糖含量的提高,农业生产上可通过改变土壤细菌、放线菌的数量的方式来提高土壤养分,从而影响马铃薯块茎品质。本研究中,T11土壤细菌、真菌、放线菌数量相对较多,产量、淀粉、蛋白质、维生素含量也较高,是一个综合指标较好的马铃薯品种。马铃薯块茎褐变强度与土壤细菌呈正相关,其中的原因可能是土壤细菌增多,对土壤质量影响较大,影响马铃薯块茎的褐变强度,农业生产上应该综合考虑土壤细菌丰度的范围。马铃薯品质和土壤微生物、酶的关系是一个相对复杂的问题,在以后的研究中,应着重考虑马铃薯块茎元素含量与土壤养分、土壤酶、土壤微生物之间的关系。

### 4 结论

从酶活性和微生物数量的来看,在0~60 cm土层中,榆林沙土区马铃薯土壤过氧化氢酶和脲酶活性随着土壤深度的增加均呈现降低的趋势,蔗糖酶活性呈现先增加后降低的趋势。在0~40 cm土层中,土壤细菌、真菌、放线菌数量随着土壤深度的增

加均呈现减少的趋势,0~20 cm 土层细菌、真菌、放线菌数量比 20~40 cm 土层高了 29.89%、100.85%、66.05%。土壤过氧化氢酶活性与土壤碱解氮、有机质、有效磷、速效钾含量呈极显著正相关;土壤脲酶与土壤电导率、碱解氮、有效磷、速效钾、有机质含量呈极显著正相关;土壤蔗糖酶活性与土壤碱解氮、有机质含量呈极显著正相关;土壤细菌数量与土壤有机质、有效磷、速效钾、碱解氮含量呈极显著正相关,土壤真菌数量与速效钾、有机质、有效磷含量呈极显著正相关,放线菌数量与土壤速效钾、有机质、有效磷含量呈极显著正相关。榆林沙土区马铃薯根层土壤碱解氮、有效磷、速效钾、有机质含量随土层的加深呈下降趋势,0~20 cm 土层碱解氮含量平均值为  $25.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,比 20~40、40~60 cm 土层含量高 0.43%、51.98%。有效磷、速效钾含量前三的品种分别为:T16>T12>T1、T15>T9>T14。不同品种马铃薯产量、品质和土壤微生物之间存在相互关系,马铃薯块茎产量与土壤细菌呈极显著正相关,可溶性总糖与土壤放线菌呈显著正相关。

#### 参考文献:

- [1] RODRÍGUEZ F, GHISLAIN M, CLAUSEN A M, et al. Hybrid origins of cultivated potatoes [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2010, 121(6): 1187-1198.
- [2] 谢巧珑.马铃薯简介[J].*生物学教学*,2014,39(2):62-63.  
XIE Q L. Introduction to potato[J]. *Biology Teaching*, 2014, 39(2): 62-63.
- [3] WHITE P J, BROADLEY M R. Biofortification of crops with seven mineral elements of ten lacking in human diets-iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine [J]. *New Phytologist*, 2009, 182(1): 49-84.
- [4] 吕巨智,梁和,姜建初.马铃薯的营养成分及保健价值[J].*中国食物与营养*,2009,(3):51-52.  
LV J Z, RAN H, JIANG J C. Nutrients and health value of potato[J]. *Food and Nutrition in China*, 2009,(3): 51-52.
- [5] 原霁虹,韩黎明,童丹,等.甘肃定西马铃薯主粮化品种引种比试及营养品质分析[J].*中央民族大学学报(自然科学版)*,2019,28(1):12-17.  
YUAN J H, HAN L M, TONG D, et al. Introduction and nutritional quality analysis of main grain varieties of Dingxi potato in Gansu Province[J]. *Journal of Minzu University of China(Natural Sciences Edition)*, 2019, 28(1): 12-17.
- [6] 黄爱珍.马铃薯产业发展现状及对策[J].*农业开发与装备*,2021,(8):42-43.  
HUANG A Z. Development status and countermeasures of potato industry[J]. *Agricultural Development and Equipments*, 2021,(8): 42-43.
- [7] CHENG L, ZHANG N F, YUAN M T, et al. Warming enhances old organic carbon decomposition through altering functional microbial communities[J]. *The ISME Journal*, 2017, 11(8): 1825-1835.
- [8] VELASQUEZ E, LAVELLE P, ANDRADE M. GISQ, a multifunctional indicator of soil quality[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(12): 3066-3080.
- [9] 谭周进,冯跃华,刘芳,等.稻作制与有机肥对红壤水稻土微生物及酶活性的影响研究[J].*中国生态农业学报*,2004,12(2):121-123.  
TAN Z J, FENG Y H, LIU F, et al. Effects of rice-based cropping system and organic manure on microbes and enzyme activities in paddy soils derived from red earth[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(2): 121-123.
- [10] TURNER T R, JAMES E K, POOLE P S. The plant microbiome[J]. *Genome Biology*, 2013, 14(6): 209.
- [11] 谭雪莲,郭晓冬,马明生,等.连作对马铃薯土壤微生物区系和产量的影响[J].*核农学报*,2012,26(9):1322-1325, 1321.  
TAN X L, GUO X D, MA M S, et al. Effects of continuous cropping on soil microflora and yield of potato[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2012, 26(9): 1322-1325, 1321.
- [12] 王桂红,何寻阳,苏以荣,等.玉米和牧草典型种植模式下不同土层中土壤微生物量分布差异的研究[J].*山地农业生物学报*,2018,37(4):51-57,65.  
WANG G H, HE X Y, SU Y R, et al. Study on different land uses and soil layers on soil microbial biomass distribution of maize and guimuyihao[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2018, 37(4): 51-57, 65.
- [13] 王理德,姚拓,王方琳,等.石羊河下游退耕地土壤微生物变化及土壤酶活性[J].*生态学报*,2016,36(15):4769-4779.  
WANG L D, YAO T, WANG F L, et al. Soil microbial and soil enzyme activity in a discontinued farmland by the Lower Shiyang River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(15): 4769-4779.
- [14] 王丽红,郭晓冬,谭雪莲,等.不同轮作方式对马铃薯土壤酶活性及微生物数量的影响[J].*干旱地区农业研究*,2016,34(5):109-113.  
WANG L H, GUO X D, TAN X L, et al. Effects of different crop rotations on enzyme activities and microbial quantities in potato soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(5): 109-113.
- [15] BALDRIAN P, TRÖGL J, FROUZ J, et al. Enzyme activities and microbial biomass in topsoil layer during spontaneous succession in spoil heaps after brown coal mining [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(9): 2107-2115.
- [16] FENG C, MA Y H, JIN X, et al. Soil enzyme activities increase following restoration of degraded subtropical forests [J]. *Geoderma*, 2019, 351: 180-187.
- [17] SARDANS J, PEÑUELAS J. Drought decreases soil enzyme activity in a *Mediterranean Quercus ilex* L. forest [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(3): 455-461.
- [18] 刘纪爱,束爱萍,刘光荣,等.施肥影响土壤性状和微生物组的研究进展[J].*生物技术通报*,2019,35(09):21-28.  
LIU J A, SHU A P, LIU G R, et al. Research Progress on the effects of fertilization on soil properties and microbiome [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2019, 35(09): 21-28.
- [19] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000:99-114.  
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing:

- China Agriculture Press, 2000: 99-114.
- [20] 李振高, 骆永明, 滕应. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 395-419.
- LI Z G, LUO Y M, TENG Y. Soil and environmental microbial research method[M]. Beijing: Science Press, 2008: 395-419.
- [21] 刘善江, 夏雪, 陈桂梅, 等. 土壤酶的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(21): 1-7.
- LIU S J, XIA X, CHEN G M, et al. Study progress on functions and affecting factors of soil enzymes [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(21): 1-7.
- [22] 王灿, 王德建, 孙瑞娟, 等. 长期不同施肥方式下土壤酶活性与肥力因素的相关性[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 688-692.
- WANG C, WANG D J, SUN R J, et al. The relationship between soil enzyme activities and soil nutrients by long-term fertilizer experiments [J]. Ecology and Environment, 2008, 17(2): 688-692.
- [23] 孙慧, 张建锋, 胡颖, 等. 土壤过氧化氢酶对不同林分覆盖的响应[J]. 土壤通报, 2016, 47(3): 605-610.
- SUN H, ZHANG J F, HU Y, et al. Research on the response of soil catalase to different forest stand covers [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(3): 605-610.
- [24] 温晓霞, 殷瑞敬, 高茂盛, 等. 不同覆盖模式下旱作苹果园土壤酶活性和微生物数量时空动态研究[J]. 西北农业学报, 2011, 20(11): 82-88.
- WEN X X, YIN R J, GAO M S, et al. Spatiotemporal dynamics of soil enzyme activities and microbes in apple orchard soil under different mulching managements [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2011, 20(11): 82-88.
- [25] 刘建国, 张伟, 李彦斌, 等. 新疆绿洲棉花长期连作对土壤理化性状与土壤酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2): 725-733.
- LIU J G, ZHANG W, LI Y B, et al. Effects of long-term continuous cropping system of cotton on soil physical-chemical properties and activities of soil enzyme in oasis in Xinjiang [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(2): 725-733.
- [26] 朱媛君, 张璞进, 牛明丽, 等. 毛乌素沙地丘间低地主要植物群落土壤酶活性[J]. 生态学杂志, 2016, 35(8): 2014-2021.
- ZHU Y J, ZHANG P J, NIU M L, et al. Soil enzyme activities of the main plant communities in inter-dune lowland of Mu Us Sandy Land [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(8): 2014-2021.
- [27] 于德良, 雷泽勇, 张岩松, 等. 沙地樟子松人工林土壤酶活性及其影响因子[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 621-629.
- YU D L, LEI Z Y, ZHANG Y S, et al. Soil enzyme activity and its affecting factors under *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in sandy land [J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3): 621-629.
- [28] 何志刚, 王秀娟, 董环, 等. 日光温室辣椒连作不同年限土壤微生物种群变化及酶活性研究[J]. 中国土壤与肥料, 2013(1): 38-42.
- HE Z G, WANG X J, DONG H, et al. Study on microbial and enzyme activity of capsicum soil different ages in sunlight greenhouse [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2013(1): 38-42.
- [29] 胡元森, 刘亚峰, 吴坤, 等. 黄瓜连作土壤微生物区系变化研究[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 126-129.
- HU Y S, LIU Y F, WU K, et al. Variation of microbial community structure in relation to successive cucumber cropping soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(1): 126-129.
- [30] 谭宏伟, 杨尚东, 吴俊, 等. 红壤区桉树人工林与不同林分土壤微生物活性及细菌多样性的比较[J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 575-584.
- TAN H W, YANG S D, WU J, et al. Comparison of eucalyptus plantation with and other forests in soil microbial activity and bacterial diversity in red soil region, China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(3): 575-584.
- [31] 董文, 范祺祺, 叶亦心, 等. 施氮和施钾水平对冬播马铃薯生长及产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(4): 392-398.
- DONG W, FAN Q Q, YE Y X, et al. Effect of nitrogen and potassium rates on the growth and yield of winter potato crop [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2021, 47(4): 392-398.