文章编号: 1000-7601(2021)05-0076-08 doi: 10.7606/j.issn.1000-7601.2021.05.10

长期施肥对黄土丘陵坡地农田土壤质量和谷子产量的影响

高小峰[1,2],闫本帅[2],吴春晓[1,2],王国梁[1,3]

(1.中国科学院水利部水土保持研究所,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100;
2. 中国科学院大学,北京 100049; 3. 西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘 要: 以坡地农田生态系统长期定位试验(1995—2019 年)为基础,选取裸地(LD)、对照(CK,不施肥)、单施氮肥(N1、N2 处理分别为:尿素 55.2、110.4 kg·hm^{-2})、氮磷肥配施(N1P、N2P 处理分别为:尿素+过磷酸钙 55.2+90、110.4+90 kg·hm^{-2})6 个处理,研究长期施肥对土壤质量、谷子产量的影响。结果表明:(1)与 CK 相比,长期单施氮肥土壤碱解氮含量提高了 24.81%~39.92%;长期氮磷肥配施土壤有机碳、全磷、碱解氮和有效磷含量分别提高了 7.82%~16.81%、58.18%、21.59%~22.89%、450.5%~660.3%,土壤 pH 值降低了 0.04~0.08。(2)与 CK 相比,长期单施氮肥碱性磷酸酶(AP)活性提高了 13.34%~19.43%;长期氮磷平衡施肥土壤的 β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶与亮氨酸氨基肽酶(NAG+LAP)、葡萄糖苷酶(βG)活性分别显著提高了 16.76%~71.01%、47.12%~59.94%。与裸地相比,长期轮作种植作物使 βG、LAP+NAG、AP 活性显著提高了 68.74%~342.42%,N1P 处理下酶化学计量比最接近 1∶1∶1稳态。(3)与 CK 相比,N1P 处理谷子生物量和产量增加了 105.25%~230.05%。谷子产量与土壤全磷、有效磷呈极显著正相关,而与土壤 pH 值呈显著负相关。总之,长期施肥能显著提高黄土丘陵区坡耕地土壤质量和谷子产量,低氮磷配施(N1P)效果最好。

关键词: 长期定位施肥; 氮磷配施; 土壤质量; 土壤酶活性; 谷子产量

中图分类号: S515; S158 **文献标志码:** A

Effects of long-term fertilization on soil quality and millet yield on slope farmland in loess hilly areas

GAO Xiaofeng[1,2], YAN Benshuai[2], WU Chunxiao[1,2], WANG Guoliang[1,3]

(1. *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;
3. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Based on the long-term positioning experiment of sloping farmland ecosystem (1995-2019), bare land (LD), control (CK, no fertilization), single application of nitrogen fertilizer (N1,N2: urea 55.2 kg·hm^{-2} and 110.4 kg·hm^{-2}), and combined application of nitrogen and phosphorus (N1P,N2P: urea + superphosphate 55.2+90 kg·hm^{-2} and 110.4+90 kg·hm^{-2}) of 6 treatments were designed to research the effect of long-term fertilization on soil quality and millet yield. The results showed that: (1) Compared with CK, the long-term single application of nitrogen fertilizer increased the soil alkaline nitrogen content by 24.81%~39.92%. The long-term combined application of nitrogen and phosphorus fertilizers increased the soil organic carbon, total phosphorus, alkaline nitrogen, and available phosphorus content by 7.82%~16.81%, 58.18%, 21.59%~22.89%, and 450.5%~660.3%, and the soil pH decreased by 0.04~0.08 units. (2) Compared with CK, long-term single application of nitrogen fertilizer alkaline phosphatase (AP) enzyme activity increased by 13.34%~19.43%. In the long-term nitrogen and

收稿日期: 2020-12-03 **修回日期:** 2021-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(K3010217050)

作者简介: 高小峰(1994-),女,河南南阳人,硕士研究生,研究方向为水土保持与生态修复。E-mail: gaoxiaofeng0111@foxmail.com

通信作者: 王国梁(1971-),男,陕西西安人,博士,研究员,主要从事水土保持与生态修复研究。E-mail: glwang@nwsuaf.edu.cn

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

phosphorus balanced fertilization soil, the enzyme activities of β-1,4-N-acetylglucosaminidase and leucine aminopeptidase (NAG+LAP), and glucosidase (βG) were significantly increased by 16.76%~71.01%, 47.12%~59.94%, respectively. Planting millet significantly increased the activities of βG, LAP+NAG, and AP by 68.74%~342.42%. The stoichiometric ratio of enzyme in N1P treatment was closest to the steady state of 1∶1∶1. (3) Compared with CK, the biomass and yield of millet under N1P treatment increased by 105.25%~230.05%. The yield of millet was significantly positively correlated with soil total phosphorus and available phosphorus, and significantly negatively correlated with soil pH. In short, long-term fertilization significantly improved the soil quality and millet yield of slope farmland in loess hilly areas, and the best outcome came from low nitrogen and phosphorus combined application (N1P).

Keywords: long-term location fertilization; combined application of nitrogen and phosphorus; soil quality; soil enzyme activity; millet grain yield

土壤酶是由土壤中植物根系和微生物细胞分泌的一类起催化作用的蛋白质总称[1]。土壤中的生物化学循环过程与土壤酶活性密切相关。因此，土壤酶活性常被作为评价和衡量土壤肥力和土壤生物学性质的重要指标[2]。一方面，土壤酶活性的高低可以反映土壤养分(尤其是氮、磷)周转的快慢[1]；另一方面，目前的研究中常用涉及 C-(β-1,4-葡萄糖苷酶，βG)、N-(β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶与亮氨酸氨基肽酶，NAG+LAP)、P-(碱性磷酸酶，AP)循环的酶化学计量比来表征土壤中碳、氮、磷养分平衡关系，如: ln(βG)/ln(NAG+LAP)(C∶N)、ln(βG)/ln(AP)(C∶P)、ln(NAG+LAP)/ln(AP)(N∶P)[3]。

植物从土壤中吸收氮、磷营养元素以维持其生长。在植物的生长过程中，由于养分含量的匮乏，氮、磷往往是植物生长的主要限制元素。试验表明，长期增施氮、磷肥可显著增加农田土壤中氮、磷储量，从而显著影响了土壤酶活性[4-5]。如: 已有研究发现单施氮肥能明显提高土壤有机质、全氮与碱解氮的含量[6]，而王智慧等[7]认为相较于常规施肥，氮磷肥配施的土壤有机质、全磷、有效磷、有效钾含量均不同程度升高。此外，张敏等[8]认为长期施用氮、磷肥会降低土壤碱性磷酸酶活性，夏雪等[9]认为施用氮肥可以提高碳源酶活性。宋永林等[10-11]和李桃祯等[12]的试验结论同样也证实了这一观点。总之，氮磷肥配合施用不仅增加了土壤全磷和有效磷的含量，可以为作物生长提供养分; 还可以改变土壤营养元素(C、N、P)的计量比，使得土壤微生物养分需求发生变化进而影响土壤酶活性。

长期施肥不仅可直接影响土壤酶活性以及养分利用与积累，还可通过对生态环境的改变进一步影响农作物产量及农业的可持续发展[13-14]。黄土高原地区土壤保水保肥能力较差、土壤有机质含量较低，降雨进一步使土壤养分严重流失。大量施氮虽然提高了作物产量，但是造成土壤板结、酸化和淋溶现象，进而降低土壤肥力，形成恶性循环[15]。科学合理施肥是改善土壤质量、提高作物产量的有效措施[16]。不同氮磷含量配比施肥对作物生长和产量有显著影响，适宜的氮、磷配比及用量可提高作物的生物量和产量，提高作物对氮、磷养分的吸收。目前，长期施肥如何通过影响土壤酶活性进而影响土壤对氮、磷养分的吸收还需深入研究。以往的研究更多是关于长期施肥对小麦、玉米和水稻的产量影响[17-20]，而关于黄土丘陵区谷子产量的研究还比较少。本研究以长期施肥定位试验为基础，探究长期不同施肥(裸地、不施肥对照、单施氮肥、氮磷肥配施)对黄土高原坡地农田土壤理化性质、土壤酶活性和谷子产量的影响，进一步为农田土壤施肥管理提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地点为中国科学院安塞水土保持综合试验站。该站位于陕西省安塞县(107°41′E，35°14′N)，属典型的旱作农业区，海拔 1 200 m，年均降水量 500 mm，无霜期 160 d，年均气温 8.8℃，土壤类型为黄绵土，养分比较贫瘠，氮、磷缺乏，钾富足。试验开始前耕层土壤基本养分含量为有机碳 3.57 g·kg^{-1}，全氮 2.41 g·kg^{-1}，全磷 1.33 g·kg^{-1}，有效磷 19.00 mg·kg^{-1}，速效钾 67.00 g·kg^{-1}，缓效钾 708.00 g·kg^{-1}，pH 值 8.51。

1.2　试验设计

长期定位施肥试验共 6 个处理: 1) 不施肥处理(CK); 2) 低氮施肥处理(N1); 3) 高氮施肥处理(N2); 4) 低氮配施磷肥处理(N1P); 5) 高氮配施磷肥处理(N2P); 6) 裸地(LD)。施肥量分别为: 过磷

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

酸钙 P（P_2O_5）90 kg·hm^{-2}，尿素（N1）55.2 kg·hm^{-2}、（N2）110.4 kg·hm^{-2}。施肥方法为将磷肥作种肥一次施入，尿素施总量的20%作种肥，余下80%的尿素在作物拔节期追施。于1995年开始长期定位施肥试验，试验作物种植制度是谷子-糜子-谷子-大豆轮作，农作制一年一熟，当季作物为谷子。6个试验处理采用随机区组设计，每个处理4次重复（$n=4$），分4个区组，每个区组有6个小区，各小区为3 m×7 m的矩形，坡度15°，实际的投影面积为20 m^2。

1.3 试验方法

2019年10月谷子收获后，利用土钻在每个小区中按"S"形采样法采集5个点的耕层（0~20 cm）土壤混匀，去除杂质，取一半测定土壤酶活性；剩余土样风干保存，测定土壤理化指标。选取10株形态一致的样株，保证根、茎、叶、穗部的完整性，用塑料纸包扎好，写好标签。带回室内脱粒后，将样品按照根、茎、叶、籽粒分类采集。样品清洗后自然干燥，然后在70~80℃下烘干7~8 h，直至样品质量恒定，称量谷子器官烘干质量，准确记录各处理的称量结果作为器官生物量。各有4个重复。

土壤酶活性采用微孔板荧光法[21]分析，利用基质与酶水解4-甲基伞形酮酰-β-D-吡喃葡糖酸苷（MUB）和7-氨基4-甲基香豆素（AMC）进行荧光检测的原理，使用多功能酶标仪（SynergyH4，Bio Teak）测定。亮氨酸氨基肽酶（LAP）以7-氨基4-甲基香豆素（AMC）为底物，β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶（NAG）、葡萄糖苷酶（βG）、碱性磷酸酶（AP）以4-甲基伞形酮酰-β-D-吡喃葡糖酸苷（MUB）为底物。

土壤有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法[22]测定；土壤全磷用高氯酸-浓硫酸法测定；土壤全氮采用全自动凯氏定氮仪测定；土壤速效磷采用分光光度计测定；碱解氮含量采用碱解扩散法测定；有机碳采用TOC仪灼烧测定；土壤含水量采用烘干法测定；土壤pH值采用酸度计测定，水∶土=2.5∶1。器官生物量（g·m^{-2}）=单株生物量（干质量）×株数·m^{-2}，式中株数·hm^{-2}通过每小区的株数换算；谷子成熟后的籽粒干质量为产量，单株生物量、产量为各小区10株典型植株的平均值。

1.4 数据处理

采用SPSS 18.0软件对数据进行单因素方差分析（ANOVA），Duncan多重比较。用Excel 2010软件处理数据和绘图。采用Canoco 5软件对长期不同施肥处理下的土壤理化性质、土壤酶活性和谷子产量、生物量进行冗余分析（RDA）。图表中的数据为4个重复的平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 长期不同施肥处理对土壤理化性质的影响

连续25 a的长期施肥后，土壤理化性质发生了显著的变化（表1）。与裸地相比，长期轮作种植作物的土壤有机碳、全氮和全磷含量显著增加了46.23%~75.00%。此外，在坡地农田中长期单施氮

表1 长期不同施肥处理对土壤理化性质的影响

Table 1 Effects of long-term different fertilization treatments on soil physical and chemical properties

处理 Treatment	pH	含水量 Moisture/%	容重 Bulk density /（g·cm^{-3}）	碱解氮 Alkaline nitrogen /（mg·kg^{-1}）	有效磷 Available phosphorus /（mg·kg^{-1}）
LD	8.71±0.03a	12.01±0.80a	1.27±0.03a	18.19±3.09c	3.38±0.09c
CK	8.68±0.03ab	11.97±0.80ab	1.23±0.06a	20.84±3.98bc	1.17±0.10c
N1	8.70±0.01ab	12.19±0.20a	1.21±0.04a	26.01±1.48ab	1.69±0.19c
N2	8.69±0.02ab	12.05±0.10ab	1.28±0.07a	29.16±2.79a	1.72±0.12c
N1P	8.60±0.04c	11.89±0.20c	1.22±0.05a	25.34±3.32ab	78.43±8.03a
N2P	8.65±0.02b	11.93±0.20b	1.21±0.14a	25.61±5.29ab	53.89±5.58b

处理 Treatment	有机碳 Organic carbon /（g·kg^{-1}）	全氮 Total nitrogen /（g·kg^{-1}）	全磷 Total phosphorus /（g·kg^{-1}）	C/N	C/P	N/P
LD	4.11±0.60c	0.20±0.00b	0.57±0.02b	20.41±2.11b	7.23±1.01b	0.35±0.03b
CK	6.01±0.18b	0.35±0.05a	0.55±0.01b	17.31±0.52c	10.86±0.62a	0.63±0.02a
N1	6.21±0.48ab	0.33±0.01a	0.54±0.01b	19.04±1.63bc	11.42±0.67a	0.61±0.08a
N2	6.05±0.25b	0.32±0.01a	0.57±0.00b	18.91±0.59bc	10.63±0.55a	0.56±0.03a
N1P	7.02±0.18a	0.34±0.01a	0.87±0.01a	20.85±0.33a	8.04±0.30b	0.39±0.02b
N2P	6.48±0.77ab	0.34±0.01a	0.87±0.02a	18.19±1.94bc	7.44±0.88b	0.40±0.04b

注：C/N：有机碳/全氮；C/P：有机碳/全磷；N/P：全氮/全磷。表中数据为平均值±标准差；同列不同小写字母表示处理间差异显著（$P<0.05$）。下同。

Note: C/N: Organic carbon/Total nitrogen; C/P: Organic carbon/Total phosphorus; N/P: Total nitrogen/Total phosphorus. The data in the table are the mean ± standard deviation. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different treatments ($P<0.05$). The same below.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

肥土壤碱解氮含量提高了 24.81%~39.92%,长期氮磷肥配施土壤有机碳、全磷、碱解氮和有效磷含量分别提高了 7.82%~16.81%、58.18%、21.59%~22.89%、450.5%~660.3%,且土壤有机碳、全磷和有效磷均在 N1P 处理达到最大值。与 CK 相比,N1 处理土壤 C/P 增加,其余处理 C/P 均降低,长期施肥显著提高了 C/N,降低了土壤 N/P。同时,长期施肥和种植作物降低了土壤的 pH 值。土壤含水量在长期 N1 施肥处理下最大,N1P 处理下最低。土壤容重在长期不同处理下无显著差异。

2.2　长期不同施肥处理对土壤酶活性的影响

与裸地相比,长期种植作物显著提高了葡萄糖苷酶(βG)、β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶与亮氨酸氨基肽酶(NAG+LAP)、碱性磷酸酶(AP)活性(图 1A~图 1C)。此外,与 CK 相比,长期单施氮肥使 AP 活性提高了 13.34%~19.43%,N2 处理的 AP 活性最大;长期氮磷平衡施肥使 βG、NAG+LAP 活性分别提高了 16.76%~71.01%、47.12%~59.94%,且在 N1P 处理达到最大值。与裸地相比,长期轮作种植作物显著提高了 ln(βG)/ln(NAG+LAP)、ln(βG)/ln(AP)比值,显著降低了 ln(NAG+LAP)/ln(AP)比值(图 1D~图 1F)。与 CK 相比,长期 N1P 施肥处理显著提高了土壤中的 ln(βG)/ln(NAG+LAP)、ln(βG)/ln(AP)、ln(NAG+LAP)/ln(AP);ln(NAG+LAP)/ln(AP)在 N1P 处理中接近于 1∶1 稳态(图 1F)。

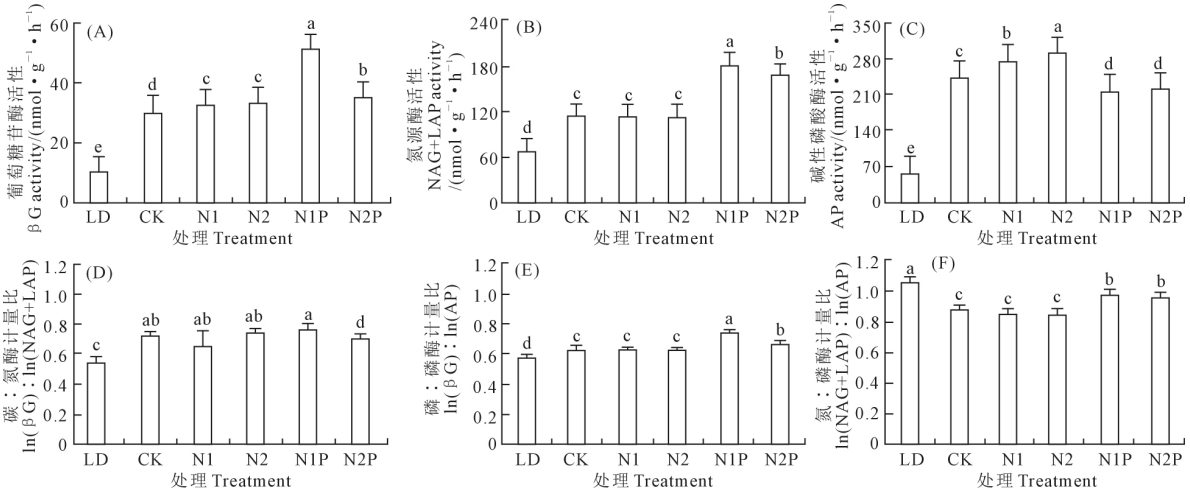
2.3　长期不同施肥处理对谷子产量、冠根比、氮、磷含量和器官生物量的影响

从图 2 可见,长期施肥处理显著提高了谷子的产量,且氮磷配施处理产量显著高于单施氮肥处理,在 N1P 处理达到最大值 1 743.80 kg·hm^{-2}(图 2A)。谷子的冠根比随施肥梯度而增加,长期施肥谷子的冠根比值增加了 16.19%~46.88%(图 2B)。

谷子的氮、磷养分含量对长期施肥响应明显,长期施肥显著提高了植株地上部全氮含量,N1P、N2 处理显著高于其他处理;谷子全磷含量在氮磷配施处理下显著高于单施氮肥和不施肥处理,且在 N1P 处理最高;植株氮、磷含量均表现为在籽粒中最高,根系中最低。长期施肥使谷子的器官(籽粒、叶子、茎秆、根系)生物量显著提高了 105.25%~230.05%。其中不同施肥处理下,籽粒生物量在65.51~216.22 g·m^{-2}之间变化;叶生物量在 47.00~99.40 g·m^{-2}之间变化;茎秆生物量在 30.88~95.29 g·m^{-2}之间变化;根系生物量在 16.63~ 34.13 g·m^{-2}之间变化。而且,不同器官的生物量均在 N1P 处理下达到最大值,具体规律表现为:N1P>N2P>N2>N1>CK(图 2E)。

2.4　土壤性质对谷子生物量、产量的影响

通过对土壤性质和谷子生物量指标做冗余分析(RDA),从图 3 可以看出,土壤理化特性解释了 77.91%长期不同施肥谷子产量的变异。第 1 轴解释了其变异的 54.23%,第 2 轴解释了 23.68%。其中,土壤有效磷(SAP)含量作用最明显,解释了谷子产量变化的 45.5%($F=15.0$,$P=0.002$)。SAP、TP、pH 是最主要的影响因子,土壤有效磷(SAP)、土壤全磷(TP)和根系生物量(RB)、地上部生物量(AB)、产量(CY)呈正相关关系,土壤 pH 与根系生物量(RB)、地上部生物量(AB)、产量(CY)呈负相关关系(图 3)。土壤有效磷、土壤全磷对产量均呈显著($P<0.01$)正相关作用;土壤 pH 值对谷子生物量、产量呈显著负相关作用($P<0.01$)(表 2)。



注:不同小写字母表示不同处理之间的差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ($P<0.05$). The same below.

图 1　长期不同施肥对土壤酶活性及其化学计量比的影响

Fig.1　Effects of long-term different fertilization treatments on soil enzyme activity and stoichiometric ratio

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

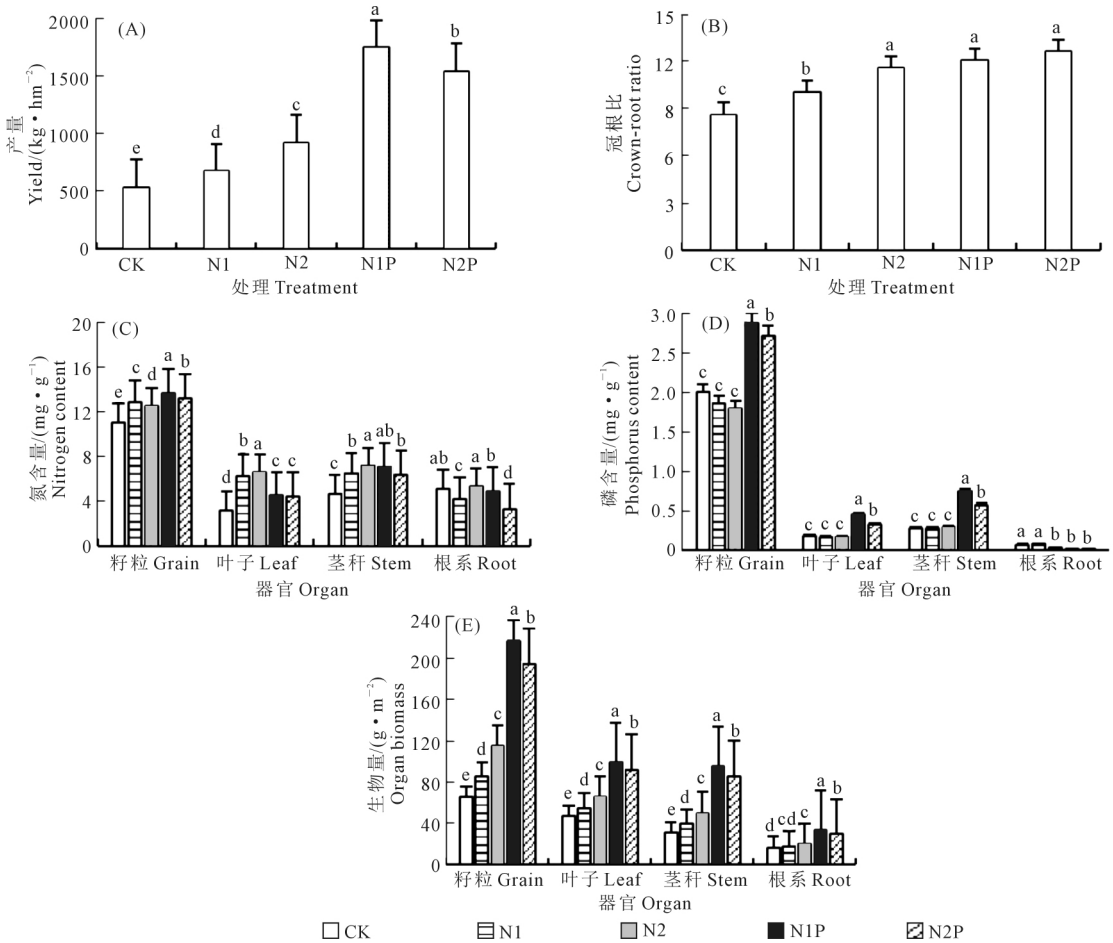
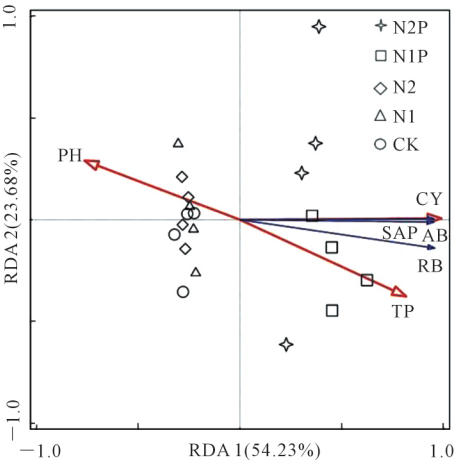


图 2 长期不同施肥处理对谷子产量、冠根比、器官氮、磷含量和生物量的影响

Fig.2 Effects of different long-term fertilization treatments on millet yield, shoot-root ratio, and organ nitrogen and phosphorus and biomass content



注: AB: **地上部生物量**; CY: **产量**; TP: **土壤全磷**; SAP: **土壤有效磷**; RB: **根生物量**。

Note: AB: Above-ground biomass; CY: Crop yield; TP: Total soil phosphorus; SAP: Soil available phosphorus; RB: Root biomass.

图 3 土壤性质与谷子生物量、产量的 RDA 分析

Fig.3 RDA analysis of soil properties and millet biomass and yield

表 2 土壤显著影响因子与谷子生物量、产量的相关关系

Table 2 Correlation between main soil factors and millet biomass and yield

指标 Index	**有效磷** Available phosphorus	**全磷** Total phosphorus	pH
产量 Yield	0.949**	0.743**	−0.751**
地上部生物量 Aboveground biomass	0.958**	0.772**	−0.818**
根系生物量 Root biomass	0.945**	0.743**	−0.730**

注: **表示在 $P<0.01$ 级别(双尾), * 表示在 $P<0.05$ 级别(双尾)相关性显著。**

Note: ** and * indicate that the correlation is significant at $P<0.01$ and $P<0.05$, respectively.

3 讨 论

3.1 长期不同施肥处理对土壤理化性质的影响

本研究发现,长期施氮、磷肥显著增加了土壤有机碳、全磷、碱解氮和有效磷含量。这与孔令聪等[23]对砂姜黑土的研究结果一致。相对于农田,裸地土壤养分含量显著减少,可能是由于长期轮作种

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

植作物有助于减少土壤的水分、养分流失，保持土壤养分含量。本研究发现，长期施肥显著提高了土壤中有机碳含量，且在 N1P 处理的土壤中有机碳含量最高，这是由于施肥有利于提高微生物活性，从而加速土壤中碳的循环，进而提高了有机碳积累。这与廖敏等[25]的研究结果一致，但许咏梅等[26]关于新疆灰漠土的研究表明，施用化肥不能维持土壤有机碳含量，不利于土壤肥力的保持，与本研究部分结果不符，可能是新疆灰漠土与本研究的黄绵土性质不同，黄绵土有机碳含量较低，施肥促进碳源微生物对土壤碳的利用率[9]。张水清等[26]的研究结果表明，长期施用化学氮肥处理，土壤全氮和碱解氮含量均显著增加。在本研究中，与对照相比，土壤中碱解氮对长期不同施肥处理的响应为 N2>N1>N2P>N1P>CK>LD，可能是施氮肥越多土壤碱解氮增量越大，即由原来的 20.84 mg·kg^{-1}上升到 29.16 mg·kg^{-1}，说明长期施肥土壤碱解氮增加，农田土壤肥力增强。此外，当植物缺少磷元素时，蛋白质的合成将会受阻，细胞分裂也会受到限制，导致植物生长缓慢[27]。在本研究中，长期氮磷配施显著提高了土壤全磷和有效磷含量，且在低氮与磷肥配施下显著提高，说明磷肥的施用明显提高了土壤中总磷含量和土壤可利用的磷素含量，并且在 N1P 配施磷素时富集效果最佳，有利于缓解该地区磷素缺乏问题[19]。卢志红等[28]认为在等量氮、磷养分的前提下，长期氮磷配施比无肥或单施氮肥更有利于土壤有机质的积累。本研究发现，与对照相比，长期施肥处理中土壤 C/N 显著提高，且 N1P 处理土壤 C/N 比最高，说明长期施肥提高了土壤的固碳能力，长期 N1P 处理下最有利于土壤有机质积累。习斌等[29]和王淑英等[30]认为磷肥施用不仅造成表层土壤磷素含量积累，还会造成深层土壤磷素积累。本研究发现，长期氮磷配施显著降低了土壤 C/P、N/P，说明长期施用氮磷肥导致土壤磷增加，且土壤磷素比氮素相对富集。孟红旗等[31]和徐宣斌等[32]对哈尔滨黑土和黄土丘陵区黄绵土的研究结果表明，长期施肥农田耕层土壤的 pH 有不同程度的降低。而本研究中随施肥梯度 pH 值降低了 0.01～0.06，说明长期施肥会导致一定程度的土壤酸化，但是对土壤 pH 值的影响不大。总之，长期氮磷施肥降低了土壤 pH 值，提高了土壤有机碳、全磷、碱解氮和有效磷含量。

3.2　长期不同施肥处理对土壤酶活性的影响

在本研究中，与裸地相比，长期轮作种植处理显著提高了土壤葡萄糖苷酶(βG)、β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶与亮氨酸氨基肽酶(NAG+LAP)、碱性磷酸酶(AP)活性。长期单施氮肥提高了碳源酶、磷源酶活性和 ln(βG)∶ln(NAG+LAP)比值，说明长期施氮肥可以提高土壤微生物群落对碳、磷养分的利用率，但碳源酶活性提高幅度大于氮源酶活性提高幅度，马亚娟等[33]对华北人工林的研究结果也证实了这一点。范淼珍等[34]对红壤土的研究表明，长期施用化肥降低了磷酸酶活性。夏雪等[9]对塿土的研究表明，氮肥的施用可以提高土壤微生物群落碳源利用率。本研究发现，长期氮磷肥配施显著提高了土壤碳源酶、氮源酶活性和 ln(βG)∶ln(AP)、ln(NAG+LAP)∶ln(AP)比值，降低了磷源酶活性，说明长期氮磷肥配施显著提高了微生物对碳源、氮源的利用率，抑制了微生物对磷源的利用率。本研究中，长期氮磷配施显著提高土壤全磷含量，长期施用过磷酸钙作为磷肥可以提高土壤中全磷的含量，使得土壤中磷酸根含量相对较高，土壤全磷对碱性磷酸酶(AP)活性有抑制作用[8]，故长期氮磷配施处理的碱性磷酸酶(AP)活性低于长期单施氮肥处理和不施肥处理。Spiers 等[35]的 5 a 试验研究表明，连续 5 a 施钙磷肥土壤中磷酸酶活性减少了约 20%。本试验进行了 25 a，每年以 90 kg·hm^{-2}的量施用磷肥，土壤碱性磷酸酶(AP)活性比对照减少了 23%，说明长期施用无机磷肥，土壤中有充足的速效养分可以利用，微生物不需要分泌更多的磷源酶来获取养分。N1P 施肥和 N2P 处理下的 C、N 和 P 源酶的比值是 1∶0.97∶1.28 和 1∶0.94∶1.36，表明长期氮磷肥配施处理的土壤酶化学计量比值均偏离全球水平 1∶1∶1，对照的比值是1∶0.86∶1.21，氮磷配比施肥偏离程度小于对照，说明长期施肥改变了养分配比，使得微生物在获取 C、N 和 P 源酶资源上有显著不同。换句话说，氮限制和磷限制均存在于黄土高原坡地农田中，在供试条件下，氮磷肥在 N1P(尿素+过磷酸钙=55.2+90 kg·hm^{-2})配施条件下的土壤养分平衡关系最佳。

3.3　长期不同施肥处理对谷子生长及产量的影响

在本研究中，长期施肥显著增加了谷子的器官生物量(籽粒、根系、叶子、茎秆)、冠根比和产量。施肥增加了谷子生长所必需的氮、磷元素含量，有利于干物质的累积，进而提高了生物量和产量。这种现象在长期 N1P 处理下最为明显，这表明均衡施肥条件更有利于谷子生长和产量的提高。这与蔡苗等[18]和张晓云等[36]的研究结果一致，其研究表明氮磷平衡施肥能够促进玉米根生长，提高作物生

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

物量。但是，肖雪玉等[37]和马东辉等[38]研究表明，过量或过高施用氮肥将会降低产量，农作物吸收大量的氮元素，会提高光合产物的消耗，降低干物质积累，导致减产。同样地，过量施氮肥限制了谷子产量，本研究发现 N1P 处理谷子产量显著高于 N2P 处理，同时过量施氮肥可能会造成农田的氮面源污染[39]。此外，冠根比随施肥梯度而增加，长期施肥处理显著提高谷子的冠根比值，氮磷配施处理下冠根比值最大，谷子籽粒全氮、全磷含量显著高于其他器官，这与功能平衡假说[40]一致，Shipley 等[41]发现功能平衡假说可较好地反映光合产物分配对环境因子变化的响应。本研究中，氮磷配施后的养分资源更倾向于地上部分中的籽粒。

土壤理化性质对植物的产量影响作用显著[42]。磷素对蛋白质的合成、细胞分裂有影响作用，这使得植物缺少磷素将会导致生长受限[26,29]。李银水等[43]对油菜的研究表明，施磷促进油菜生长，提高油菜对磷素的吸收和累积，显著增加籽粒需磷量。俄胜哲等[44]的小麦试验结果表明，小麦籽粒产量和土壤有效磷含量显著正相关。叶会财等[19]对水稻的研究表明，水稻产量增加量随土壤有效磷的增加而增加。本研究发现，土壤全磷和土壤有效磷与谷子产量、生物量有显著正相关关系，可能是磷素对蛋白质的合成、细胞分裂有积极影响作用，磷素充足使得植物生长不再受限，极大缓和了土壤本身的磷限制，提高了谷子产量。已有研究[45]表明，土壤 pH 值对作物产量有显著影响。马亚娟等[33]的研究表明，施肥会降低土壤 pH 值，从而影响土壤生物学和化学性质。本研究发现，土壤 pH 值对谷子产量呈显著负相关，可能是土壤 pH 值过高，将会降低谷子器官储藏干物质的转换率，不利于干物质的积累，从而导致减产。

4 结 论

长期施肥显著影响了土壤酶活性、土壤理化性质、谷子器官生物量、冠根比和产量。与 CK 相比，长期单施氮肥(N1、N2)显著提高了土壤有机碳、碱解氮含量和碱性磷酸酶(AP)活性，长期氮磷肥配施(N1P、N2P)显著提高了土壤有机碳、全磷、碱解氮和有效磷含量和土壤 β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶与亮氨酸氨基肽酶(NAG+LAP)活性、葡萄糖苷酶(βG)活性。长期施肥降低了土壤 pH 值。长期轮作种植作物和化学施肥对土壤碳源、氮源、磷源酶活性均有显著提高，且低氮高磷(N1P)处理的土壤酶化学计量比最接近 1∶1∶1 稳态。与 CK 相比，长期氮磷肥配施，尤其是 N1P 处理，显著增加了谷子生物量和籽粒产量。土壤全磷、有效磷对谷子产量、生物量呈显著正相关，土壤 pH 对谷子产量呈显著负相关。与其他处理相比，N1P 处理下土壤全磷、土壤有效磷含量、冠根比、器官生物量和氮源酶活性均是最大值。因此，减施氮肥并配施磷肥(N1P)是本试验中最佳施肥配比，减少氮肥投入、配施磷肥有利于缓解氮素面源污染问题，可以改善黄土高原地区土壤质量，促进谷子综合品质的提高，研究为提高农田土壤质量和谷子产量及合理施肥提供了科学依据。

参 考 文 献:

[1] 田艳洪.简述长期施肥对土壤酶活性的影响[J].现代化农业，2019，8:36-38.

[2] 卢越，张健琳，杨兰芳.不同作物生长和施肥对土壤酶活性的影响[J].环境生态学，2019，6(1):2096-6830

[3] Sinsabaugh R L, Follstad shah J J. Ecoenzymatic stoichiometry of recalcitrant organic matter decomposition: The growth rate hypothesis in reverse[J]. Biogeochemistry，2011，102(1):31-43.

[4] 柳燕兰，宋尚有，郝明德.长期定位施肥对黄绵土酶活性及土壤养分状况的影响[J].土壤通报，2012，43(4):798-803.

[5] 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].生态环境学报，2008，17(2):688-692.

[6] 雷卉，王久照，谭嫣，等.减量施肥和接种 AMF 对盆栽柑桔生长及土壤酶活性的影响[J].中国南方果树，2019，48(2):11-14，17.

[7] 王智慧，唐春双，赵长江，等.生物炭与肥料配施对土壤养分及玉米产量的影响[J].玉米科学，2018，26(6):150-155，163.

[8] 张敏，孙宝利，宋阿琳，等.微生物多样性对土壤氮磷钾转化、酶活性及油菜生长的影响[J].生态学报，2016，36(18):5856-5864.

[9] 夏雪，谷洁，车升国，等.施氮水平对塿土微生物群落和酶活性的影响[J].中国农业科学，2011，44(8):1618-1627.

[10] 宋永林，姚造华，袁锋明.不同肥料配施对土壤主要养分含量及作物氮、磷、钾表观利用率的影响[J].中国土壤与肥料，2002，23(3):23-25.

[11] 宋永林，袁锋明，姚造华.褐潮土条件下不同肥料配合对作物氮、磷、钾表观利用率及产量的影响[J].河北农业科学，2002，6(1):24-28.

[12] 李桃祯，邹清涛，侯小青，等.配方施肥对刨花润楠土壤养分，微生物生物量及酶活性的影响[J].广西林业科学，2019，48(1):71-77.

[13] 焦晓光，魏丹，隋跃宇.长期施肥对黑土和暗棕壤土壤酶活性及土壤养分的影响[J].土壤通报，2011，42(3):192-197.

[14] 梁尧，韩晓增，乔云发，等.小麦-玉米-大豆轮作下黑土农田土壤呼吸与碳平衡[J].中国生态农业学报，2012，20(4):395-401.

[15] 薛长亮，张克强，杨德光，等.RZWQM 模拟小麦-玉米轮作系统氮素运移及损失特征[J].中国生态农业学报，2015，23(2):150-158.

[16] 黄晶.水稻产量对长期不同施肥和环境的响应[J].中国生态农业学报，2015，23(11):1367-1376.

[17] 高瑞，吕家珑.长期定位施肥土壤酶活性及其肥力变化研究[J].中国生态农业学报，2005，13(1):149-151.

[18] 蔡苗，孟延，Mohammad A M，等.长期不同施肥对玉米根茬生物量及养分累积量的影响[J].应用生态学报，2015，26(8):2387-2396.

[19] 叶会财，李大明，黄庆海，等.长期不同施肥模式红壤性水稻土磷素变化[J].植物营养与肥料学报，2015，21(6):1521-1528.

[20] 许咏梅，刘骅，王西和.长期施肥下新疆灰漠土有机碳及作物产量

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

演变 [J].中国生态农业学报,2016,24(2):154-162.
[21] 张丽莉,武志杰,陈利军,等.微孔板荧光法对土壤糖酶活性的测定研究 [J].光谱学与光谱分析,2009,29(5):1341-1344.
[22] 鲍士旦,土壤农化分析 [M],第三版.北京: 中国农业出版社,2000: 268-270.
[23] 孔令聪,曹承富,汪芝寿,等.长期定位施肥对砂姜黑土肥力及生产力的影响研究 [J].中国生态农业学报,2004,12(2):102-104.
[24] 刘瑜,褚贵新,梁永超,等.不同种植方式对北疆绿洲土壤养分和生物学性状的影响 [J].中国生态农业学报,2010,18(3):465-471.
[25] 廖敏,彭英,陈义,等.长期不同施肥管理对稻田土壤有机碳库特征的影响 [J].水土保持学报,2011,25(6):129-133.
[26] 张水清,林杉,郭斗斗,等.长期施肥下潮土全氮、碱解氮含量与氮素投入水平关系 [J].中国土壤与肥料,2017,23(6):23-29.
[27] 李锋,潘晓华.植物适应缺磷胁迫的根系形态及生理特征研究进展 [J].中国农学通报,2002,18(5):65-69,76.
[28] 卢志红,嵇素霞,张美良,等.长期定位施肥对水稻土有机质含量及组成的影响 [J].中国农学通报,2014,30(27):2238-2242.
[29] 习斌,翟丽梅,刘申,等.有机无机肥配施对玉米产量及土壤氮磷淋溶的影响 [J].植物营养与肥料学报,2015,21(2):326-335.
[30] 王淑英,唐小明,樊廷录,等.黄土旱塬黑垆土长期肥料试验土壤磷素和磷肥效率的演变特征 [J].中国生态农业学报,2018,26(7):1038-1047.
[31] 孟红旗,刘景,徐明岗,等.长期施肥下我国典型农田耕层土壤的 pH 演变 [J].土壤学报,2013,50(6):1109-1116.
[32] 徐宣斌,高照良.黄土丘陵区不同施肥下植物对土壤含水率的影响 [J].农业科学与技术: 英文版,2015,16(2):278-280.
[33] 马亚娟,徐福利,王渭玲,等.氮磷提高华北落叶松人工林地土壤养分和酶活性的作用 [J].植物营养与肥料学报,2015,21(3):664-674.
[34] 范淼珍,尹昌,范分良,等.长期不同施肥对红壤碳、氮、磷循环相关酶活性的影响 [J].应用生态学报,2015,26(3):833-838.
[35] Spiers G A, Mcgil W B. Effects of phosphorus addition and energy supply on acid phosphatase production and activity in soils [J]. Soil Biology Biochemistry,1979,38(11):3-8.
[36] 张晓云,吴伯志,吴开贤,等.施肥位置与杂草管理对间作玉米、马铃薯生长和产量的影响 [J].植物营养与肥料学报,2019,25(7):1239-1246.
[37] 肖雪玉,朱文博,杨丹,等.施用控释氮肥对早稻田面水氮素动态变化和水稻产量的影响 [J].生态环境学报,2018,27(12):78-83.
[38] 马东辉,王月福,周华,等.氮肥和花后土壤含水量对小麦干物质积累、运转及产量的影响 [J].麦类作物学报,2007,27(5):847-851.
[39] 肖乾颖,黄有胜,胡廷旭,等.施肥方式对紫色土农田生态系统 N_2O 和 NO 排放的影响 [J].中国生态农业学报,2018,26(2):203-213.
[40] Bloom A J,Chapin F S, Mooney H A. Resource limitation in plants: An economic analogy [J]. Annual Reviews in Ecology and Systematics,1985,16(2):363-392.
[41] Shipley B, Meziane D. The balanced-growth hypothesis and the algometry of leaf and root biomass allocation [J]. Functional Ecology, 2002,16(3):326-331.
[42] 王道中,花可可,郭志彬.长期施肥对砂姜黑土作物产量及土壤物理性质的影响 [J].中国农业科学,2015,48(23):4781-4789.
[43] 李银水,鲁剑巍,廖星,等.磷肥用量对油菜产量及磷素利用效率的影响 [J].中国油料作物学报,2011,33(1):52-56.
[44] 俄胜哲,杨志奇,曾希柏,等.长期施肥黄绵土有效磷含量演变及其与磷素平衡和作物产量的关系 [J].应用生态学报,2017,28(11):3589-3598.
[45] 陈浩,汪玉,袁佳慧,等.太湖稻麦轮作区减施磷肥对土壤供磷和小麦吸收磷的影响 [J].农业环境科学学报,2018,37(4):741-746.

(上接第 70 页)

[7] 胡承伟,张学昆,邹锡玲,等.PEG 模拟干旱胁迫下甘蓝型油菜的根系特性与抗旱性 [J].中国油料作物学报,2013,35(1):48-53.
[8] 王道杰,桂月靖,杨翠玲,等.油菜抗旱性及鉴定方法与指标 Ⅲ.油菜苗期抗旱性及鉴定指标筛选 [J].西北农业学报,2012,21(5):108-113.
[9] 袁闯,许兴,毛桂莲,等.甜高粱成熟期抗旱性指标筛选与评价方法 [J].干旱地区农业研究,2020,38(1):280-289.
[10] 徐银萍,潘永东,刘强德,等.大麦种质资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选 [J].作物学报,2020,46(3):448-461.
[11] 王卫芳.油菜苗期抗旱性评价及生理机制研究 [D].武汉: 华中农业大学,2018.
[12] 李合生.植物生理生化实验原理和技术 [M].北京: 高等教育出版社,2000: 105-261.
[13] 高俊凤.植物生理学实验指导 [M].北京: 高等教育出版社,2006: 142-217.
[14] 何正付,王凤立,柏新盛.PEG 6000 和甘露醇模拟干旱胁迫效应比较研究 [J].安徽农学通报,2019,25(10):19,40.
[15] 左凯峰,郭娜,张冰冰,等.甘蓝型油菜苗期抗旱性鉴定及抗旱生理指标的评价 [J].干旱地区农业研究,2020,38(1):295-300.
[16] 邹原东,韩振芹,李志强.PEG 模拟水分胁迫对玉米苗期生理指标的影响 [J].山西农业科学,2019,47(12):2094-2097.
[17] 周国雁,隆文杰,雷涌涛,等.PEG 处理下小麦种子萌发期的性状变化与品种抗旱性级别划分 [J].西南农业学报,2015,28(6):2348-2354.
[18] 吴奇,周宇飞,高悦,等.不同高粱品种萌发期抗旱性筛选与鉴定 [J].作物学报,2016,42(8):1233-1246.
[19] 杜欢,马彤彤,郭帅,等.大麦近等基因系苗期根系形态及叶片渗透调节物质对 PEG 胁迫的响应 [J].中国农业科学,2017,50(13):2423-2432.
[20] 原小燕,符明联,何晓莹.不同抗旱性油菜种子萌发期抗旱指标比较研究 [J].干旱地区农业研究,2012,30(5):77-81.
[21] Li P P, Zhang W H. Seed Germination of periploca sepium under drought stress and different storage time [J]. Bulletin of Botanical Research, 2012, 32(5): 567-572.
[22] 张日升.彰武元宝枫母树林种子发芽率与抗旱性研究 [J].安徽农业科学,2020,48(15):116-118.
[23] Kele Y, Ünyayar S. Responses of antioxidant defense system of Helianthus annuus to abscisic acid treatment under drought and waterlogging [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2004, 26(2): 149-156.
[24] Seki M, Umezawa T, Urano K, et al. Regulatory metabolic networks in drought stress responses [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2007, 10(3): 296-302.
[25] Verslues P E, Agarwal M, Katiyar-agarwal S, et al. Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status [J]. Plant Journal, 2006, 45(4): 523-539.
[26] 桂月晶.油菜抗旱指标筛选及抗旱相关基因的表达分析 [D].开封: 河南大学,2011.
[27] 谢小玉,张霞,张兵.油菜苗期抗旱性评价及抗旱相关指标变化分析 [J].中国农业科学,2013,46(3):476-485.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net