

# 氮磷肥配施对苦荞根系生理生态及产量的影响

董璐<sup>1</sup>, 张永清<sup>1,2\*</sup>, 杨春婷<sup>1</sup>, 张楚<sup>1</sup>, 路之娟<sup>1</sup>

(1 山西师范大学 生命科学学院, 山西临汾 041004; 2 山西师范大学 地理科学学院, 山西临汾 041004)

**摘要:**以苦荞品种‘迪庆’为材料,在盆栽试验条件下,研究了氮(纯氮用量分别为 0 g/kg、0.1 g/kg、0.2 g/kg)、磷( $P_2O_5$  用量分别为 0.1 g/kg 和 0.2 g/kg)配施对苦荞根系生长、生理指标及其产量的影响,旨在为黄土高原苦荞高产优质栽培提供理论依据。结果表明:(1)在相同施磷量条件下,苦荞幼苗的株高、茎粗、茎叶干重、主根长、根表面积、根系体积、根系直径、根系干重以及壮苗指数等均随施氮量的增加而呈先升后降的趋势,但根冠比随施氮量的增加而呈先降后升的趋势;叶片叶绿素含量以及根系活力、酸性磷酸酶(Apase)活性、可溶性蛋白含量和植株氮积累量随施氮量的增加呈抛物线变化趋势,根系硝酸还原酶(NR)活性和植株氮含量随施氮量的增加而增加;而根系可溶性糖含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、丙二醛(MDA)含量和游离脯氨酸含量等指标均随施氮量的增加而呈先降后升的趋势,0.1 g/kg 施氮处理各指标均显著低于其他处理;成熟期单株粒重、百粒重随施氮量的增加呈先升后降的趋势,0.1 g/kg 施氮处理各指标均显著高于其他处理。(2)在相同施氮量条件下,随着施磷量的增加,苦荞根系酸性磷酸酶(Apase)活性、SOD 活性、POD 活性、MDA 含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白以及游离脯氨酸含量等指标均降低,其余各指标则呈增加趋势。(3)无论施磷量条件如何,0.1 g/kg 的施氮处理下苦荞产量最高,与其他施氮处理相比,在低磷和高磷处理下的增产幅度分别为 7.04%~37.40% 和 14.73%~68.26%;在施氮量一定的情况下,高磷处理比低磷处理增产 15.96%~42.00%。(4)在该试验条件下,适当的氮磷肥配施表现出了明显的正加和效应,但过量施肥也有可能导致增产幅度下降,中氮高磷(施纯 N 量 0.1 g/kg,施  $P_2O_5$  量 0.2 g/kg)配施效果最优。

**关键词:**苦荞;氮磷肥;根系;生理生态;产量

**中图分类号:**Q945.79; S517

**文献标志码:**A

## Root Physio-ecological Indices and Yield of *Fagopyrum tataricum* with Combining Application of Phosphorus and Nitrogen Fertilizer

DONG Lu<sup>1</sup>, ZHANG Yongqing<sup>1,2\*</sup>, YANG Chunting<sup>1</sup>, ZHANG Chu<sup>1</sup>, LU Zhijuan<sup>1</sup>

(1 College of Life Sciences, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041004, China; 2 College of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041004, China)

**Abstract:** In order to provide theoretical basis for high yield and good quality cultivation of *Fagopyrum tataricum* in the Loess Plateau, we determined the effects of combining different nitrogen (N application rates of 0 g/kg, 0.1 g/kg and 0.2 g/kg) and phosphorus fertilizer ( $P_2O_5$  application rates of 0.1 g/kg and 0.2 g/kg) conditions on the root physio-ecological indices and yield during the growing period of *F. tataricum* under experimental pot conditions. The results showed that: (1) under equal phosphorus fertilizer treatments, plant height, stem diameter, shoot dry weight, main root length, root surface area, root vol-

收稿日期: 2018-01-17; 修改稿收到日期: 2018-04-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31571604); 国家自然科学基金青年项目(41601317)

作者简介: 董璐(1993—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事植物生理生态研究。E-mail: donglu1491708397@163.com

\* 通信作者: 张永清, 教授, 硕士生导师, 主要从事土壤及植物生理生态研究。E-mail: yqzhang208@163.com

ume, root average diameter, root dry weight and seedling index initially increased and then decreased with increasing nitrogen application rate while root shoot ratio decreased initially and then increased with increasing nitrogen application rate. Chlorophyll content, root activity, acid phosphatase activity, soluble protein content, plant N accumulation show the parabola changes with the increase of nitrogen application rate. Root NR activity and plant N content increased with increasing nitrogen rate while SOD, POD activities and MDA content in root, soluble sugar content and free proline content decreased initially and then increased with increasing nitrogen application rate. Weights per plant and 100-seed weight initially increased and then decreased with increasing nitrogen application rate. (2) Under equal nitrogen fertilizer treatments, root Apase, SOD and POD activities, soluble sugar, soluble protein and MDA contents decreased with increasing phosphorus application rate. The other above indices increased under high phosphorus treatment compared with low phosphorus treatment. (3) Among the three nitrogen levels, yield of *F. tataricum* was the highest under 0.1 g/kg nitrogen application. It increased respectively by 7.04% and 37.40% compared with 0 g/kg and 0.2 g/kg nitrogen treatments under low phosphorus condition. It also increased respectively by 14.73% and 68.26% compared with 0 g/kg and 0.2 g/kg nitrogen treatments under high phosphorus condition. In addition, the yield of *F. tataricum* was higher in high phosphorus treatment. It also increased, respectively by 15.96% and 42.00% compared with low phosphorus treatment under equally nitrogen fertilizer treatment. (4) In this study, reasonable application of nitrogen and phosphorus fertilizer showed a positive additive effect, but over-application of fertilizer could reduce yield. *F. tataricum* was more suitable for production at suitable nitrogen fertilizer (0.1 g/kg N application) and high phosphorus fertilizer condition (0.2 g/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> application).

**Key words:** *Fagopyrum tataricum*; phosphorus and nitrogen fertilizer; root system; physio-ecological index; yield

氮、磷是作物生长发育所必需的重要元素,它们在很大程度上决定了作物的生命活动和产量。“缺氮,少磷,钾充足”是黄土高原土壤养分含量的真实写照,氮磷的供应更是制约当地作物高产与稳产的限制因子。磷能促进作物根系发达,增强抗瘠薄能力<sup>[1]</sup>,还能促进作物增产<sup>[2]</sup>、作物成熟、穗粒增多及籽粒饱满<sup>[3]</sup>,而氮对土壤中的磷具有一定的活化作用,氮磷之间的合理配施直接关系到作物的正常生长。有关研究表明,氮磷互作促进了玉米植株对养分的吸收能力,进而增加了玉米地上部生物量、氮和磷的累积量,最终促进了产量的提高<sup>[4]</sup>。施用氮肥和磷肥显著促进冬小麦根系的生长,不仅能增加上层根系的数量,而且还能促使根系下扎,进而扩大了作物对土壤中养分的吸收空间<sup>[5]</sup>。适量施用氮磷肥能增加大豆根系长度、根系表面积和根系体积<sup>[6-9]</sup>,提高根系的生物量和根系活力<sup>[10]</sup>,而过量施用氮磷肥则会抑制大豆根系生长发育<sup>[7,10]</sup>。由此可见,研究氮磷肥对作物生长发育的影响,在缺氮、少磷的山西黄土高原丘陵区具有重要的理论与实践意义。

苦荞(*Fagopyrum tataricum* L.)属蓼科荞麦属植物<sup>[11]</sup>,被称为“五谷之王”、“三降食品”,是中国重要的小杂粮之一。苦荞不仅具有生育期短、耐冷凉、耐贫瘠、适应性强等特点,而且具有很高的营养

价值和药用价值<sup>[12-13]</sup>,在中国高寒和高原地区具有明显的区位优势和生产优势<sup>[14]</sup>,是土壤瘠薄地区的理想杂粮作物。然而,由于历史原因,关于杂粮作物的研究远没有达到水稻和小麦等主要粮食作物的研究深度。目前,有关苦荞的研究多集中于药用与营养价值<sup>[15-17]</sup>、栽培技术<sup>[18-19]</sup>以及逆境胁迫对苦荞化学成分及生理方面的影响等<sup>[20-24]</sup>。而有关氮磷肥配施对苦荞生长影响的生理生态机制研究尚不多见,氮磷肥对苦荞根系影响方面的研究更少。为此,本试验拟通过研究氮磷肥对生土栽培的苦荞根系生理指标及产量的影响,探讨各项指标在不同氮磷组合处理下的变化规律,为在起高垫低的小流域治理过程中生土层暴露的黄土高原地区进行苦荞合理的施肥与高产优质栽培提供理论支撑。

# 1 材料和方法

## 1.1 试验设计

试验于2017年5月至10月在山西师范大学塑料防雨棚内进行。盆栽试验采用直径和高均为31 cm的聚乙烯塑料桶为供试用盆,盆栽用土为取自距地表3 m以下的生土(养分含量极少)和沙子的混合物,混合比例为3:1,每桶装沙土混合物13 kg。供试苦荞品种为由山西省农业科学院高寒作

物研究所提供的‘迪庆’。盆栽用沙土混合物的养分含量为:全氮 101 mg/kg,速效磷 3.4 mg/kg,速效钾 92.05 mg/kg。试验采用完全随机设计,根据作者前期研究结果设施氮量和施磷量 2 个因素。施氮量(纯氮)设 0 g/kg(缺氮)、0.1 g/kg、0.2 g/kg 3 个水平,分别用  $N_0$ 、 $N_1$  和  $N_2$  表示;施磷量(五氧化二磷)设 0.1 g/kg 和 0.2 g/kg 2 个水平,分别用  $P_1$  和  $P_2$  表示。共计组成 6 个处理,每个处理重复 6 次。选用的氮肥和磷肥分别为分析纯试剂尿素(含氮 46%)和过磷酸钙(含五氧化二磷 15%),另每千克土分别施  $K_2O$  0.3 g 为肥底,所有肥料均作为底肥一次性施入,施肥试验实施时,选取饱满、均匀的种子,用去离子水冲洗并浸泡 12 h 后,于 5 月 10 日播种,每盆留苗 10 株。播种后等量浇水,于每天 17:00 用电子秤称重,使田间持水量处于等量水平。培养 40 d 后(6 月 20 日),取 3 次重复收苗,收苗时用水浸泡盆土,将带土的苦荞幼苗轻轻取出,用流水冲至土与苗分离,迅速带回实验室进行根系形态指标与生理指标的测定。另外 3 次重复于成熟期(10 月 19 日)收获时测定产量。

## 1.2 测试指标与方法

**1.2.1 生长和产量指标** 培养 40 d 后,从各处理随机选取 3 株幼苗,用直尺测定株高,用游标卡尺测定茎粗,用 LI-3000C 便携式叶面积仪(成都科瑞达有限公司)测定叶面积;采用 Delta-T SCAN 根系分析系统(英国)测定主根长、根系体积、表面积及根系平均直径;植株样品分成地上部和根系两部分,分别烘干后称重,依据公式计算壮苗指数,壮苗指数<sup>[25]</sup>=(茎粗/株高+根系干重/地上部干重)×全株干重。收获时,采用直接称重法测定单株粒重、百粒重和产量。

**1.2.2 生理生化指标** 叶片叶绿素含量采用丙酮-乙醇直接浸提法<sup>[26]</sup>测定;根系活力用 TTC 法<sup>[26]</sup>测定;根系硝酸还原酶和酸性磷酸酶活性分别用对氨基苯磺酸比色法之离体法和对硝基苯磷酸二钠法测定<sup>[26]</sup>;根系丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性和过氧化物酶(POD)活性分别用硫代巴比妥酸法、氮蓝四唑法和愈创木酚比色法测定<sup>[26]</sup>;根系可溶性糖含量用蒽酮比色法测定<sup>[26]</sup>;根系可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定<sup>[26]</sup>;根系脯氨酸含量用酸性茚三酮法测定<sup>[26]</sup>。根系活力及酶活性测定样品部位为根尖,MDA 及渗透调节物质测定样品为距离根尖 3~5 cm 处根组织。

**1.2.3 植株氮磷含量和积累量** 用半微量凯氏定氮法<sup>[27]</sup>测定植株氮含量;用钼钒黄法<sup>[27]</sup>测定植株磷含量。氮(磷)积累量=植株干重×氮(磷)含量。

## 1.3 数据处理

用 Microsoft Excel 2007 软件对试验数据进行处理,用 SPSS 19.0 软件进行统计分析,采用 Duncan's 法进行多重比较,用 Origin Pro 8.5.1 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮磷肥配施对苦荞幼苗相关农艺性状的影响

**2.1.1 地上部生长指标** 首先,在相同施磷条件下,苦荞幼苗株高随着施氮量的增加呈先升高后降低的趋势,并在  $N_1$  施氮处理下达到最高,并与其他施氮处理间差异均达显著水平,但在不同施磷量下的变化幅度不同(表 1)。其中,  $N_1$  施氮处理苦荞株高在低磷( $P_1$ )处理下分别比  $N_0$  和  $N_2$  施氮处理显著增加 31.15% 和 22.04% ( $P<0.05$ ),在高磷( $P_2$ )处理下则分别相应显著增加 43.30% 和 31.64%,在氮磷间表现出了正的加和作用,表明  $N_1$  处理为最佳施氮量,而  $N_2$  处理已属于过量施肥。同时,在相同施氮处理下,苦荞株高均表现为高磷显著高于低磷处理,其在  $N_0$ 、 $N_1$  和  $N_2$  施氮处理下分别比相应低磷处理显著增高 12.91%、23.38% 和 14.38%;尤其值得关注的是在高氮用量( $N_2$ )下,增加施磷量也能显著增加苦荞的生长,表明施磷有利于缓解由于过量施氮而对苦荞株高产生的抑制作用;反过来,在磷素不足的情况下,更应该注意防止氮肥的过量施用。

其次,植株茎粗越大,则植株越壮,抗倒伏能力也就越强。表 1 结果显示,在相同施磷条件下,增施氮肥能够显著增加苦荞幼苗茎粗,但当施氮量增大到一定程度时,反而不利于茎粗的增加,其中又以  $N_1$  处理效果更明显,其茎粗在低磷处理下分别比  $N_0$  和  $N_2$  处理显著高出 17.00%、20.42%,在高磷处理下分别显著高出 19.59%、29.67%。同时,在相同施氮条件下,高磷处理的苦荞茎粗均不同程度高于低磷处理,其中  $N_1$  处理下相应的增幅为 22.49%,且两种施磷处理间差异达显著水平;而在  $N_0$  和  $N_2$  处理下两种施磷处理间差异均未达到显著水平。可见,在  $N_1$  氮肥施用量条件下,增加施磷量对于苦荞茎粗的增加效果较好。

再次,在相同施磷条件下,苦荞幼苗地上部干重对氮肥的施用量响应明显,表现为先增后减,以  $N_1$  施氮处理下效果最明显(表 1),在低磷和高磷处理

下分别比  $N_0$  施氮处理显著高出 135.00% 和 212.50%, 而  $N_2$  施氮处理在低磷和高磷处理下分别比  $N_1$  施氮处理显著降低 23.40% 和 40.00%。在施氮量一定时, 苦荞地上部干重均表现为高施磷量处理显著高于低磷处理, 其间增幅在  $N_1$  施氮处理下最大, 其次为  $N_2$  处理,  $N_0$  处理最小。可见, 磷素是促进苦荞植株地上部生长的重要因素, 而且这种促进作用在具有一定氮肥力水平的土壤中效果更加明显, 氮与磷之间表现出了明显的正加和效应。

2.1.2 根系生长指标 苦荞幼苗主根长、根表面积、根系体积和根系平均直径对氮磷肥的响应表现

表 1 氮磷肥配施下苦荞幼苗地上部植株生长的变化  
Table 1 Shoot growth of *F. tataricum* with combining application of phosphorus and nitrogen fertilizer at seedling stage

处理 Treatment	株高 Plant height /cm	茎粗 Stem diameter /mm	茎叶干重 Shoot dry weight/g
$N_0P_1$	24.40±0.92e	2.47±0.13cd	0.20±0.01e
$N_1P_1$	32.00±0.50b	2.89±0.09b	0.47±0.01b
$N_2P_1$	26.22±0.91d	2.40±0.15d	0.36±0.01c
$N_0P_2$	27.55±0.97d	2.96±0.10b	0.24±0.02d
$N_1P_2$	39.48±1.14a	3.54±0.18a	0.75±0.02a
$N_2P_2$	29.99±0.54c	2.73±0.20bc	0.45±0.02b

注:  $P_1$ , 低磷处理( $P_2O_5$  含量为 0.1 g/kg);  $P_2$ , 高磷处理( $P_2O_5$  含量为 0.2 g/kg);  $N_0$ , N 用量为 0 g/kg;  $N_1$ , N 用量为 0.1 g/kg;  $N_2$ , N 用量为 0.2 g/kg; 表内数据为平均值±标准差; 同一列数据后不同字母表示处理间差异达显著水平( $P<0.05$ ), 下同

Note:  $P_1$ . Low phosphorus condition (0.1 g/kg P application);  $P_2$ . High phosphorus condition (0.2 g/kg P application);  $N_0$ . 0 g/kg N application;  $N_1$ . 0.1 g/kg N application;  $N_2$ . 0.2 g/kg N application. Values in the table are given as mean±SD. Different letters in the same column indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The same as below

表 2 氮磷肥配施下苦荞幼苗根系生长的变化

Table 2 The development of root system of *F. tataricum* with combining application of phosphorus and nitrogen fertilizer at seedling stage

处理 Treatment	主根长 Main root length/cm	根系表面积 Root surface area/mm <sup>2</sup>	根系直径 Root average diameter/mm	根系体积 Root volume /cm <sup>3</sup>	根系干重 Root dry weight/mg	根冠比 Root shoot ratio/%	壮苗指数 Seedling index
$N_0P_1$	17.52±0.16e	1 396.57±92.42f	0.53±0.01c	2.60±0.25d	69.77±1.68d	0.35±0.02a	0.121 5±0.003 4d
$N_1P_1$	21.17±0.37b	2 987.00±117.76b	0.69±0.03b	4.24±0.37b	98.39±4.35b	0.21±0.01cd	0.170 3±0.006 6b
$N_2P_1$	18.96±0.17d	2 220.29±60.10d	0.58±0.06c	3.44±0.25c	82.67±2.80c	0.23±0.01c	0.142 1±0.002 9c
$N_0P_2$	18.45±0.48d	1 747.41±84.57e	0.57±0.02c	2.90±0.12d	75.20±4.27cd	0.32±0.02b	0.132 7±0.006 4cd
$N_1P_2$	24.07±0.26a	3 594.35±129.55a	0.79±0.05a	5.00±0.18a	137.23±7.85a	0.18±0.01d	0.242 0±0.014 0a
$N_2P_2$	20.58±0.39c	2 623.53±114.61c	0.59±0.02c	3.86±0.25bc	92.80±6.84b	0.21±0.02cd	0.161 2±0.007 3b

出一致的趋势(表 2)。在相同施磷条件下, 各指标均随施氮量的增加表现为先增加后减少的单峰曲线变化, 且均在  $N_1$  处理下达到峰值, 并显著高于相应  $N_0$  和  $N_2$  处理。在相同施氮条件下, 主根长、根表面积和根系体积均随着施磷量的增加而增加, 且在两种施磷量处理间差异达显著水平; 根系平均直径在  $N_0$  和  $N_2$  处理下虽然也表现为高磷( $P_2$ )大于低磷( $P_1$ )处理, 但两磷处理间差异并不显著。

同时, 在同一施磷量条件下, 苦荞幼苗根系干重也受到施氮量显著影响(表 2), 其随着施氮量的递增呈抛物线变化趋势, 在  $N_1$  处理下达到峰值, 其在低磷( $P_1$ )和高磷( $P_2$ )处理下分别比  $N_0$  处理显著增加 41.02%、82.49%, 分别比  $N_2$  处理显著增加 19.02%、47.88%。另外, 当氮肥施用量相同时, 低磷处理苦荞根系干重均显著低于高磷处理, 降幅在  $N_0$ 、 $N_1$  和  $N_2$  处理下分别为 7.25%、28.30% 和 10.92%, 即在  $N_1$  施氮处理下增加施磷量更有利于促进苦荞地下部生物量的增加。

2.1.3 根冠比和壮苗指数 表 2 结果还显示, 在同一施磷条件下, 苦荞幼苗根冠比随着施氮量增加呈先减少后增加的单峰曲线变化, 这可能是由于氮肥促进了植株地上部分的生长所致; 在施氮量相同的情况下, 根冠比随着施磷量的增加逐渐降低, 表明磷素的供应加速了植株地上部分生长; 在低磷( $P_1$ )和高磷( $P_2$ )处理下, 且  $N_0$  施氮处理均显著高于  $N_1$  和  $N_2$  处理间, 说明氮素是影响根冠比的主要因素, 并且在氮素亏缺的情况下增施磷肥可以显著降低苦荞的根冠比。同时, 在同一施磷量条件下, 苦荞壮苗指数随施氮量的增加而呈先增加后降低的趋势, 并始终均以  $N_1$  施氮处理下最大, 其在低磷( $P_1$ )和高磷( $P_2$ )处理下分别比  $N_0$  施氮处理显著增加 40.16%、

82.37%, 分别比  $N_2$  处理显著增加 19.85%、50.12%; 当施氮量一定时, 苦荞壮苗指数均表现为低磷处理低于高磷处理, 高低磷处理间差异在  $N_1$  和  $N_2$  施氮处理下达到显著水平, 而在  $N_0$  施氮处理下差异不显著。

2.2 氮磷肥配施对苦荞幼苗生理指标的影响

2.2.1 叶片叶绿素含量 图 1 显示, 各处理苦荞幼苗叶片中叶绿素含量表现出明显差异, 并以  $N_1P_2$  处理组合为最高, 并显著高于其余处理组合。在同一施磷量条件下, 苦荞幼苗叶片叶绿素含量均随着施氮量增加而呈先上升后下降的趋势, 并在  $N_1$  施氮处理时达到最高值, 其在低磷( $P_1$ )处理下比  $N_0$  和  $N_2$  施氮处理分别显著高出 31.99% 和 21.02%, 在高磷( $P_2$ )处理下分别显著高出 45.47% 和 28.15%, 说明氮素在叶片叶绿素合成中起着重要作用, 且无论施磷量条件如何, 增加施氮量均对苦荞幼苗叶片的叶绿素含量产生影响明显。在施氮量相同时, 各高磷处理幼苗叶片的叶绿素含量均不同程度地高于低磷处理, 除  $N_0$  施氮处理外, 高低磷处理差异均达到显著水平, 说明氮素亏缺影响了苦荞根系对磷素的吸收, 氮素与磷素此时表现为明显的协同效应。

2.2.2 根系活力 在相同施磷量条件下, 增施氮肥能够显著提高苦荞幼苗根系活力, 但过量施氮反而不利于根系活力的提高; 在 3 个施氮处理中,  $N_1$  施氮处理对增加苦荞根系活力的作用更为明显, 其在低磷( $P_1$ )和高磷( $P_2$ )处理下分别比  $N_0$  处理显著高出

24.44%、26.53%, 分别比  $N_2$  处理显著高出 14.29%、16.98%(表 3)。即高磷( $P_2$ )处理下苦荞幼苗的根系活力增长幅度更大。在相同施氮条件下, 高磷( $P_2$ )处理的苦荞根系活力均高于低磷( $P_1$ )处理, 并以  $N_1$  处理下相应的增幅最大(10.71%), 但 2 种施磷量处理间差异均未达到显著水平, 说明苦荞的根系活力对施磷量反应不敏感, 进而表明了氮磷合理配施的重要性。

2.2.3 根系硝酸还原酶活性以及酸性磷酸酶活性

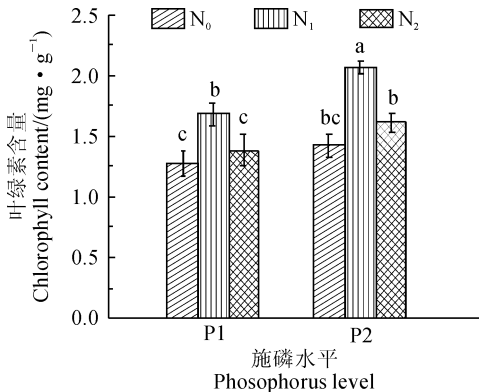
如表 3 所示, 在相同施磷条件下, 苦荞幼苗根系中硝酸还原酶(NR)活性随施氮量的增加而增加, 并在  $N_2$  施氮水平时达到最大值, 其在低磷( $P_1$ )下比相应  $N_0$  和  $N_1$  处理分别显著增加 35.92%、12.43%, 在高磷( $P_2$ )处理下分别显著增加 30.16%、11.48%; 当施氮量一定时, 低磷条件下硝酸还原酶(NR)活性均显著低于高磷条件。同时, 在相同施磷量条件下, 苦荞幼苗根系中酸性磷酸酶活性均随着施氮量的增加呈先升后降的趋势, 并在  $N_1$  施氮水平下达到最大值, 并显著高于其他施氮处理, 但  $N_0$  和  $N_2$  施氮水平之间差异并不显著, 这可能是由于低氮( $N_0$ )和高氮( $N_2$ )对苦荞酸性磷酸酶活性有一定的抑制作用; 在施氮量一定的情况下, 低磷( $P_1$ )水平下的幼苗酸性磷酸酶活性显著高于高磷( $P_2$ )水平, 且两种施磷水平间差异均达到显著水平。

2.2.4 根系抗氧化酶活性及 MDA 含量

表 3 显示, 在相同施磷水平下, 苦荞幼苗根系中 SOD、POD 活性和 MDA 含量随施氮量的增加先降低后增加, 在  $N_1$  施氮水平时达到最小值, 并显著低于其他施氮处理; 当施氮量一定时, 幼苗根系 SOD、POD 活性和 MDA 含量均表现为低磷( $P_1$ )水平高于高磷水平, 且两者间均达到显著性差异。说明在低氮低磷条件下, 适当增加施氮量和施磷量都可以不同程度地增强苦荞幼苗抵抗逆境胁迫能力, 降低其受害程度, 这对于延缓苦荞衰老具有一定作用。

2.2.5 根系渗透调节物质含量

在同一施磷量水平下, 苦荞幼苗根系中可溶性糖和游离脯氨酸含量随施氮量的增加而呈先下降后上升的趋势, 并在  $N_1$  施氮水平下达到最低值并显著低于其余施氮水平(表 4)。其中,  $N_1$  施氮处理幼苗根系可溶性糖和游离脯氨酸含量在低磷水平( $P_1$ )分别比  $N_0$  施氮处理显著降低 33.00%、43.41%, 在高磷( $P_2$ )水平下则分别显著降低 40.23%、44.24%;  $N_2$  施氮处理可溶性糖和游离脯氨酸含量在低磷( $P_1$ )水平下分别比  $N_1$  施氮处理显著增加 29.65% 和 48.59%, 而在高



不同字母表示处理间差异达 0.05 显著水平 ( $P<0.05$ )

图 1 氮磷肥配施下苦荞幼苗叶绿素含量的变化

Different letters above the columns indicate significant differences among treatments at 0.05 level

Fig.1 The chlorophyll content in leaves of *F. tataricum* with combining application of phosphorus and nitrogen fertilizer at seedling stage

磷(P<sub>2</sub>)水平下分别相应显著增加 37.25% 和 38.66%。在同一施氮条件下,可溶性糖和游离脯氨酸含量均表现为低磷水平高于高磷水平,且两种施磷处理间差异均达到显著水平。另外,苦荞幼苗根系可溶性蛋白质含量在相同施磷条件下随着施氮量的增加呈先增加后减少的单峰曲线变化,在 N<sub>1</sub> 施氮水平下达到峰值且显著高于其他施氮处理;而施氮量相同时,高磷处理可溶性蛋白质含量要比低磷处理低,且两种施磷处理间差异均达到显著水平。

**2.2.6 植株全氮含量、氮积累量、全磷含量及磷积累量** 从表 5 可以看出,在相同施磷水平下,苦荞幼苗全氮含量随着施氮量的增加而增加,并在 N<sub>2</sub> 施氮水平下达到最大值,且均显著高于其他施氮水平,其在低磷(P<sub>1</sub>)水平下分别比 N<sub>0</sub> 和 N<sub>1</sub> 施氮水平显著增加 21.45%、9.51%,在高磷(P<sub>2</sub>)水平下则分别增加 27.51%、8.55%;同时,施氮均显著促进苦荞植株的氮积累量,并均在 N<sub>1</sub> 水平下达到峰值且显著高于其他施氮水平;苦荞幼苗植株的磷含量随施氮量增加先降后升,N<sub>2</sub> 显著高于 N<sub>1</sub>,但两者均显著低于相应 N<sub>0</sub>;苦荞幼苗植株的磷积累量在低磷条件下以 N<sub>2</sub> 水平最高,而在高磷条件下以 N<sub>1</sub> 施氮水平最高,并显著高于其他处理组合。当施氮量一定时,

幼苗全氮含量均表现为低磷(P<sub>1</sub>)水平显著高于高磷(P<sub>2</sub>)水平,而幼苗磷含量、氮(磷)积累量却均表现为高磷(P<sub>2</sub>)水平总体上高于低磷(P<sub>1</sub>)水平。可见,磷(氮)素供应的增加对苦荞幼苗氮(磷)含量表现出明显的稀释效应,而氮磷肥量的增加使苦荞幼苗的氮(磷)积累量保持在较高的范围内。

2.3 氮磷肥对成熟期苦荞产量及其构成因素影响

表 6 显示,在相同施磷条件下,苦荞单株粒重和百粒重均随着施氮量的增加而先增加后降低,且均

表 4 氮磷肥配施下苦荞幼苗根系可溶性糖、可溶性蛋白含量和脯氨酸的变化

Table 4 The root soluble sugar, soluble protein and free proline contents of *F. tataricum* with combining application of phosphorus and nitrogen fertilizer at seedling stage

处理 Treatment	可溶性糖 Soluble sugar /(mg · g <sup>-1</sup> )	可溶性蛋白 Soluble protein /(mg · g <sup>-1</sup> )	游离脯氨酸 Free proline /(g · g <sup>-1</sup> )
N <sub>0</sub> P <sub>1</sub>	2.97±0.27a	5.75±0.21c	30.73±0.89a
N <sub>1</sub> P <sub>1</sub>	1.99±0.17c	6.98±0.30a	17.39±0.86e
N <sub>2</sub> P <sub>1</sub>	2.58±0.23b	6.43±0.13b	25.84±0.85c
N <sub>0</sub> P <sub>2</sub>	2.56±0.04b	4.69±0.30d	27.51±0.53b
N <sub>1</sub> P <sub>2</sub>	1.53±0.08d	6.47±0.24b	15.34±0.90f
N <sub>2</sub> P <sub>2</sub>	2.10±0.18c	5.78±0.21c	21.27±0.22d

表 3 氮磷肥配施下苦荞幼苗根系活力、酶活性及 MDA 含量的变化  
Table 3 The root activity, enzyme activities, and MDA content of *F. tataricum* with combining application of phosphorus and nitrogen fertilizer at seedling stage

处理 Treatment	根系活力 Root activity /(mg · g <sup>-1</sup> )	硝酸还原酶活性 NR activity /(μg · g <sup>-1</sup> · h <sup>-1</sup> )	酸性磷酸酶活性 Acid phosphatase activity /(μg · g <sup>-1</sup> · h <sup>-1</sup> )	SOD 活性 SOD activity /(U · g <sup>-1</sup> )	POD 活性 POD activity /(U · g <sup>-1</sup> )	MDA 含量 MDA content /(nmol · g <sup>-1</sup> )
N <sub>0</sub> P <sub>1</sub>	0.45±0.05d	6.32±0.59d	7.91±0.47b	489.95±6.85a	54.92±2.57a	17.60±1.52b
N <sub>1</sub> P <sub>1</sub>	0.56±0.01ab	7.64±0.19c	11.39±0.44a	209.07±7.91e	37.39±2.18d	10.94±0.61d
N <sub>2</sub> P <sub>1</sub>	0.49±0.03cd	8.59±0.40b	8.10±0.51b	306.44±17.11c	42.75±0.71c	19.66±0.94a
N <sub>0</sub> P <sub>2</sub>	0.49±0.03cd	7.46±0.69c	5.94±0.28c	405.71±4.19b	46.90±2.09b	15.37±1.00c
N <sub>1</sub> P <sub>2</sub>	0.62±0.04a	8.71±0.55b	8.06±0.54b	147.11±1.27f	24.20±1.71f	6.97±0.30f
N <sub>2</sub> P <sub>2</sub>	0.53±0.02bc	9.71±0.60a	6.22±0.27c	275.35±6.70d	31.39±1.33e	9.02±0.64e

表 5 氮磷肥配施下苦荞植株苗期全氮含量、氮积累量、全磷含量及磷积累量的变化  
Table 5 The plant N content, N accumulation, P content and P accumulation in *F. tataricum* with combining application of phosphorus and nitrogen fertilizer at seedling stage

处理 Treatment	氮含量 N concentration /(mg · g <sup>-1</sup> )	氮积累量 N accumulation /(mg · plant <sup>-1</sup> )	磷含量 P concentration /(mg · g <sup>-1</sup> )	磷积累量 P accumulation /(mg · plant <sup>-1</sup> )
N <sub>0</sub> P <sub>1</sub>	2.75±0.11c	0.74±0.04d	5.53±0.34b	1.49±0.07d
N <sub>1</sub> P <sub>1</sub>	3.05±0.11b	1.73±0.08b	2.78±0.22d	1.58±0.15d
N <sub>2</sub> P <sub>1</sub>	3.34±0.21a	1.47±0.11c	4.40±0.16c	1.93±0.05c
N <sub>0</sub> P <sub>2</sub>	2.29±0.16d	0.72±0.09d	6.14±0.21a	1.93±0.18c
N <sub>1</sub> P <sub>2</sub>	2.69±0.10c	2.39±0.07a	4.25±0.24c	3.78±0.24a
N <sub>2</sub> P <sub>2</sub>	2.92±0.20bc	1.58±0.10c	5.39±0.20b	2.91±0.21b

表 6 氮磷肥配施下苦荞成熟期产量及其构成因素的变化  
Table 6 The yield and its components of *F. tataricum* with combining application of phosphorus and nitrogen fertilizer at mature stage

处理 Treatment	单株粒重 Seeds per plant/g	百粒重 100-seed weight/g	产量 Yield (g·pot <sup>-1</sup> )
N <sub>0</sub> P <sub>1</sub>	0.95±0.08e	1.85±0.05d	20.24±0.46f
N <sub>1</sub> P <sub>1</sub>	1.78±0.05b	2.95±0.19b	27.81±0.73c
N <sub>2</sub> P <sub>1</sub>	1.26±0.12d	2.06±0.14d	25.98±1.30d
N <sub>0</sub> P <sub>2</sub>	1.26±0.06d	1.98±0.14d	23.47±0.77e
N <sub>1</sub> P <sub>2</sub>	2.04±0.12a	3.35±0.19a	39.49±0.68a
N <sub>2</sub> P <sub>2</sub>	1.58±0.09c	2.49±0.10c	34.42±0.85b

在 N<sub>1</sub> 水平下达到最大值,并显著高于其他施氮水平;在施氮量相同时,高供磷水平下苦荞单株粒重和百粒重均不同程度地高于低磷水平,且单株粒重增幅在各施氮量下均达到显著水平,而百粒重只在 N<sub>1</sub> 和 N<sub>2</sub> 施氮量下增加显著。同时,苦荞产量在相同施磷量条件下均随施氮量的增加呈先增加后降低的趋势,同样以 N<sub>1</sub> 施氮处理产量最高,且与其他施氮处理间差异达显著水平。其中, N<sub>1</sub> 施氮处理产量在高磷(P<sub>2</sub>)水平下比相应 N<sub>0</sub> 和 N<sub>2</sub> 施氮处理分别显著增加 68.26%和 14.73%,而在低磷(P<sub>1</sub>)水平下相应增产幅度分别为 37.40%和 7.04%。当施氮量一定时,增加施磷量也能显著增加苦荞产量,高磷处理在 N<sub>0</sub>、N<sub>1</sub> 和 N<sub>2</sub> 施氮处理下分别比低磷处理增产 15.96%、42.00%和 32.49%。可见,在施磷(尤其是高供磷)条件下,再施入适量的氮肥更有利于提高苦荞产量。

3 讨 论

3.1 苦荞苗期相关农艺性状对氮磷肥配施的响应特征

土壤氮肥和磷肥是影响作物根系生长的重要环境因素,施加氮、磷肥可以显著加速根系生长,提高根干重,从而增加作物对养分的吸收和积累<sup>[8,28]</sup>。苦荞作为主要栽培于黄土高原旱薄地区的杂粮作物,在其生长过程中常会遭受诸如低氮和低磷等逆境,引起形态指标发生一系列的变化,不但直接影响作物对养分的吸收,也可能给作物的生长发育带来不利的影响,导致作物减产。本研究结果表明,在施磷量相同条件下(无论胁迫与否),适量配施氮肥均能够明显促进苦荞幼苗株高、茎粗和地上部干重的增加,有利于苦荞地上部植株的生长,但施氮肥过多时反而会产生抑制作用;同样,在施氮量相同时,苦

荞株高、茎粗和地上部干重也随着施磷量的增加表现为升高的趋势,反映出了磷素对苦荞生长的巨大影响。也进而证明了苦荞虽然耐瘠,但作为喜磷作物,对磷素的需求量较大。

根系是作物吸收水分和养分的主要器官,也是作物接触土壤中营养物质的关键部位之一,其生长发育状况直接影响作物生长与产量的形成<sup>[29]</sup>。主根长、根表面积、根系体积和根系平均直径是表征根系生长发育程度的重要参数,可以在一定程度上反映植株的整体生长状况。研究表明,在低磷条件下适量增加氮肥用量可以在一定程度上增加苦荞主根长、根表面积、根体积和根系平均直径,增大根系与土壤的接触面积,促进根系尽可能多地吸收养分,缓解低磷带来的影响。在低氮条件下,增加施磷量同样可以起到促进根系生长的作用。同时,根系生长发育的快慢与其发达程度相关,而根系的生长发育能力取决于根系干重,因此可以通过对根系干重的分析来衡量植株的基本生长状况<sup>[30]</sup>。研究表明,无论施磷量水平如何,适量施氮可以显著提高苦荞根系干重,而在充足供磷的基础上,提高的效果更为明显;当施氮量一定时,增加施磷量均可以使苦荞地下生物量显著增加,而且在 0.1 g/kg 施氮量(N<sub>1</sub>)下效果最好;根冠比则与根重的变化相反, N<sub>1</sub> 施氮处理下的根冠比明显小于其他施氮处理,这与张定一等<sup>[31]</sup>对小麦的研究结果相一致。另外,对不同氮磷肥处理下的苦荞幼苗壮苗指数的研究表明,在土壤磷肥水平一定的情况下,适量施氮能够显著提高苦荞的壮苗指数,培育出壮苗,为抵抗瘠薄逆境奠定基础,而磷肥是苦荞植株保持健壮的关键因素,尤其在具有一定氮肥水平的土壤中,充足供磷对于提高植株健壮程度的效果更加明显。

3.2 苦荞苗期生理指标对氮磷肥配施的响应特征

植物叶片的叶绿素含量是反映其光合能力的一个重要指标,低氮和低磷会影响叶片叶绿素的合成<sup>[32]</sup>,而根系活力可以在一定程度上反映作物吸收水分和养分能力的强弱,根系活力越高,吸收能力就越强<sup>[33]</sup>。本试验结果表明,在施磷条件一定时,适宜的氮肥刺激可以促进苦荞叶片叶绿素的合成和根系活力的提高;在施氮量一定时,土壤施磷量的增加对于苦荞叶绿素含量和根系活力的促进作用也非常明显。而硝酸还原酶(NR)是参与氮代谢进程的关键酶类<sup>[34]</sup>,它的活性能够在一定程度上反映植株硝化同化的水平<sup>[35]</sup>。曹翠玲等<sup>[36]</sup>研究表明,小麦 NR 活性和施氮水平呈正相关关系,本研究的部分结果



与之相一致,即在相同施磷量条件下,苦荞根系 NR 活性随施氮量的增加而增强,而受到低磷胁迫后,苦荞根系 NR 活性均降低。本研究表明,适当增施氮肥和磷肥可显著提高苗期苦荞的根系 NR 活性,提高根系养分的吸收能力。另外,本研究对苦荞根系酸性磷酸酶活性的测定结果表明,磷素是影响苦荞酸性磷酸酶活性的关键因素,在土壤氮素水平一定时,减少土壤施磷量可以显著提高苦荞的酸性磷酸酶活性,这说明根系中酸性磷酸酶活性直接受磷浓度调节<sup>[37]</sup>,低磷能诱导植株合成并通过根系分泌更多酸性磷酸酶来促进土壤有机磷分解;而在土壤磷素水平一定的情况下,适量施氮可以提高苦荞根系酸性磷酸酶活性。

POD、SOD 是植物保护酶系统中重要的抗氧化酶,是植物体内清除自由基的关键酶;MDA 是膜脂过氧化产物,其含量可以衡量膜脂过氧化程度,评价细胞膜受伤害程度<sup>[38]</sup>。本研究表明,在施磷量相同时,适量施用氮肥可以使苦荞根系 SOD、POD 活性和 MDA 含量降低,减少根系的受损程度,且 0.1 g/kg 施氮量(N<sub>1</sub>)对于缓解根系受害的效果最好。同时,可溶性糖和游离脯氨酸含量作为植物细胞渗透调节物质,也在某种程度上反映了植物遭受逆境胁迫的程度<sup>[39]</sup>。本试验结果表明,在施磷量一定的情况下,适量施氮可以显著降低苦荞根系可溶性糖和游离脯氨酸含量,减少根系细胞的受害程度;而在施氮量一定时,适当增加施磷同样可以显著降低苦荞根系可溶性糖和游离脯氨酸含量,降低对根系细胞造成的伤害,维持细胞正常的渗透势。植物体内的可溶性蛋白质大多数是参与各种代谢的酶类,其含量在一定程度上反映了植物总体的代谢强度<sup>[40]</sup>。本试验结果表明,在施磷量一定时,适量施氮可以增加苦荞幼苗根系中可溶性蛋白质含量,而继续增施氮肥则会起反作用;在施氮量一定时,施磷量的增加不利于苦荞根系中可溶性蛋白质的积累。

参考文献:

[1] 马祥庆,梁 霞. 植物高效利用磷机制的研究进展[J]. 应用生态学报,2004,15(4): 712-716.  
MA X Q, LIANG X. Research advances in mechanism of high phosphorus use efficiency of plants[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(4): 712-716.

[2] 李继云,孙建华,刘全友,等. 不同小麦品种的根系生理特性、磷的吸收及利用效率对产量影响的研究[J]. 西北植物学报, 2000,20(4): 503-510.

植物组织中的养分含量与养分累积量可反映植物的营养状况和养分需要量,与养分的供应浓度有直接的关系<sup>[41]</sup>。一般情况下,当某一营养元素供应水平增加时,会明显促进植物生长和该元素含量的增加,但对其他稳定供应的营养元素的含量造成相对稀释的作用,使其在植物体内的含量降低<sup>[42]</sup>,本试验结果与之一致。另外,本试验研究还表明,合理的氮磷肥配施提高了苦荞植株氮、磷积累量,促进植株吸收更多的氮、磷养分,进而合成更多的同化物以形成较高产量。

3.3 苦荞成熟期产量及其构成因素对氮磷肥配施的响应特征

关于氮磷肥对作物产量影响的研究已有很多,张焕军等<sup>[43]</sup>的盆栽试验结果表明小麦产量随着磷用量的增加而提高,但当氮用量增加到一定程度以后施磷效应反而会降低。刘德平等<sup>[44]</sup>对小麦的研究也表明,施氮量在一定范围时与小麦千粒重(产量)、玉米百粒重(产量)之间表现为正相关,而施氮过多则表现为负相关。本试验研究表明,在施氮条件相同时,磷素是促进苦荞百粒重增加的关键因素,充足的磷素供应可以使苦荞籽粒饱满;在土壤施磷量一定时,施纯氮 0.1 g/kg(N<sub>1</sub>)能够显著提高苦荞产量;在土壤施氮量一定的情况下,通过增加施磷量同样可以提高苦荞产量。

综上,本试验结果表明,在山西黄土高原丘陵区缺氮少磷的情况下,采用中氮高磷(N<sub>1</sub>P<sub>2</sub>),即土壤施纯氮量为 0.1 g/kg,施 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 量为 0.2 g/kg 是较合理的选择。适宜的氮磷配比(N<sub>1</sub>P<sub>2</sub>)显著提高苦荞幼苗叶片叶绿素含量以及幼苗的根系活力和 NR 活性,促进苦荞地上部的生长,改善主根长、根表面积和根干重等根系形态特征,从而保证苦荞幼苗地上、地下部的协调生长,促进植株对氮磷养分的吸收,并最终形成了较高的产量。

LI J Y, SUN J H, LIU Q Y, *et al.* A study on the physiological properties of root systems in various wheat varieties and the effects of their phosphorus uptake and utilization efficiency on the yields[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2000, 20(4): 503-510.

[3] 王 瑜,宁堂原,迟淑筠,等. 不同施磷水平下灌水量对小麦水分利用特征及产量的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(3): 232-237.

WANG Y, NING T Y, CHI S J, *et al.* Effect of irrigation a-



- mount on water use characteristics and grain yield of wheat under different phosphorus application rates[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, **26**(3): 232-237.
- [4] 徐 钧. 施肥对玉米根际土壤特性的影响[D]. 郑州:河南农业大学, 2016:4.
- [5] 张和平, 刘晓楠. 华北平原冬小麦根系生长规律及其与氮磷水分的关系[J]. 华北农学报, 1993, **8**(4): 76-82.  
ZHANG H P, LIU X N. Root growth of winter wheat in the north China plain and its relationship with nitrogen and phosphorus water[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1993, **8**(4): 76-82.
- [6] GRAHAM P H, VANCE C P. Nitrogen fixation in perspective: An overview of research an extension needs[J]. *Field Crop Research*, 2000, **65**(2/3): 93-106.
- [7] 金 剑, 王光华, 刘晓冰, 等. 不同施磷量对大豆苗期根系形态性状的影响[J]. 大豆科学, 2006, **25**(4): 360-364.  
JIN J, WANG G H, LIU X B, *et al.* Effect of different phosphorus regimes on root morphological characteristics of soybean seedling[J]. *Soybean Science*, 2006, **25**(4): 360-364.
- [8] 王树起, 韩晓增, 乔云发, 等. 施氮对大豆根系形态和氮素吸收积累的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, **17**(6): 1 069-1 073.  
WANG S Q, HAN X Z, QIAO Y F, *et al.* Root morphology and nitrogen accumulation in soybean (*Glycine max* L.) under different nitrogen application levels[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, **17**(6): 1 069-1 073.
- [9] 李彦生, 杜 明, 刘晓冰, 等. 氮素用量对菜用大豆生殖生长期根系及鲜荚产量的影响[J]. 大豆科学, 2012, **31**(1): 47-51.  
LI Y S, DU M, LIU X B, *et al.* Effects of different nitrogen dosage on root morphology during reproductive stages and fresh pod yield in vegetable soybean[J]. *Soybean Science*, 2012, **31**(1): 47-51.
- [10] 张含彬, 任万军, 杨文钰, 等. 不同施氮量对套作大豆根系形态与生理特性的影响[J]. 作物学报, 2007, **33**(1): 107-112.  
ZHANG H B, REN W J, YANG W Y, *et al.* Effects of different nitrogen levels on morphological and physiological characteristics of relay-planting soybean root[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, **33**(1): 107-112.
- [11] 陈庆富. 荞麦属植物科学[M]. 北京:科学出版社, 2012.
- [12] 林汝法, 柴 岩, 廖 琴, 等. 中国小杂粮[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2002: 51-67.
- [13] 张耀文. 山西小杂粮[M]. 山西:山西科学技术出版社, 2006: 226-241.
- [14] 张 雄, 王立祥, 柴 岩, 等. 小杂粮生产可持续发展探讨[J]. 中国农业科学, 2003, **36**: 1 595-1 598.  
ZHANG X, WANG L X, CHAI Y, *et al.* Sustainable development of minor crops in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, **36**: 1 595-1 598.
- [15] HUANG K F, SHI Z, SONG Y X, *et al.* Research on variation in sucrose content among different tartary buckwheat genotypes[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2011, **12**(2): 211-213.
- [16] 刘 琴, 张薇娜, 朱媛媛, 等. 不同产地苦荞籽粒中多酚的组成、分布及抗氧化性比较[J]. 中国农业科学, 2014, **47**(14): 2 840-2 852.  
LIU Q, ZHANG W N, ZHU Y Y, *et al.* Comparison of the constitution, distribution, and antioxidant activities of polyphenols from different varieties buckwheat seed produced from different regions of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, **47**(14): 2 840-2 852.
- [17] PEI Y Q, QIANG W, FANG S. Nutritional composition and flavonoids content of flour from different buckwheat cultivars[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2010, **45**(5): 951-958.
- [18] 葛维德, 赵 阳, 刘冠求. 播种期对苦荞主要农艺性状及产量的影响[J]. 杂粮作物, 2009, **29**(1): 36-37.  
GE W D, ZHAO Y, LIU G Q. The effects of planting period on the main agronomic character and yield of tartary buckwheat[J]. *Rain Fed Crops*, 2009, **29**(1): 36-37.
- [19] 万丽英. 播种密度对高海拔地区苦荞产量与品质的影响[J]. 作物研究, 2008, **22**(1): 42-44.  
WAN L Y. Effect of planting density on yield and quality of tartary buckwheat in high altitude region[J]. *Crop Research*, 2008, **22**(1): 42-44.
- [20] LIM J H, PARK K J, KIM B K, *et al.* Effect of salinity stress on phenolic compounds and carotenoids in buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.) sprout[J]. *Food Chemistry*, 2012, **135**(3): 1 065-1 070.
- [21] 胡丽雪. 苦荞幼苗对铅胁迫的生理生化反应及其矫治[D]. 贵阳:贵州师范大学, 2014.
- [22] 董新纯, 赵世杰, 郭珊珊, 等. 增强 UV-B 条件下类黄酮与苦荞逆境伤害和抗氧化酶的关系[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2006, **37**(2): 157-162.  
DONG X C, ZHAO S J, GUO S S, *et al.* Role of flavonoids on stress injury and antioxydative enzymes in *Fagopyrum tataricum* seedlings under enhanced UV-B radiation[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science)*, 2006, **37**(2): 157-162.
- [23] 陈 鹏, 张德玖, 李玉红, 等. 水分胁迫对苦荞幼苗生理生化特性的影响[J]. 西北农学报, 2008, **17**(5): 204-207.  
CHEN P, ZHANG D J, LI Y H, *et al.* Effect of drought stress during seedling stage on physiological and biochemical traits of tartary buckwheat[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2008, **17**(5): 204-207.
- [24] YAO Y N, XUAN Z Y, LI Y, *et al.* Effects of ultraviolet-B radiation on crop growth, development, yield and leaf pigment concentration of tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) under field conditions[J]. *European Journal of Agronomy*, 2006, **25**(3): 215-222.
- [25] 韩素芹, 王秀峰, 魏 珉, 等. 甜椒穴盘苗壮苗指数及其与苗期性状的相关性研究[J]. 山东农业大学学报:自然科学版, 2004, **35**(2): 187-190  
HAN S Q, WANG X F, WEI M, *et al.* Study of plug seeding

index of sweet pepper and relationship between seeding index and characters[J]. *Journal of Shandong Agricultural University*: Natural Science Edition, 2004, **35**(2): 187-190

[26] 张志良, 翟伟菁, 李小芳. 植物生理学实验指导[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2009: 30-227.

[27] 鲍士旦. 土壤农化分析(第2版). 北京: 中国农业出版社, 1986. pp 213-216.

[28] 范秀艳, 杨恒山, 高聚林, 等. 超高产栽培下磷肥运筹对春玉米根系特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, **18**(3): 562-570.

FAN X Y, YANG H S, GAO J L, *et al.* Effects of phosphorus application on root characteristics of super-high-yield spring maize[J]. *Journal of plant nutrition and fertilizer*, 2012, **18**(3): 562-570.

[29] 李鑫, 张永清, 王大勇, 等. 水氮耦合对红小豆根系生理生态及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, **23**(12): 1 511-1 519.

LI X, ZHANG Y Q, WANG D Y, *et al.* Effects of coupling water and nitrogen on root physio-ecological indices and yield of adzuki bean[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, **23**(12): 1511-1519.

[30] 王海茹, 张永清. 水氮互作对拔节期黍稷根系生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2013, **33**(9): 1 859-1 866.

WANG H R, ZHANG Y Q. Effect of water and nitrogen supply on physiological characteristics of broomcorn millet root at jointing stage[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2013, **33**(9): 1 859-1 866.

[31] 张定一, 张永清, 杨武德, 等. 不同基因型小麦对低氮胁迫的生物学响应[J]. 作物学报, 2006, **32**(9): 1 349-1 354.

ZHANG D Y, ZHANG Y Q, YANG W D, *et al.* Biological response of different genotypic wheat to low nitrogen stress[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, **32**(9): 1 349-1 354.

[32] 赵海波, 林琪, 刘义国, 等. 氮磷施肥对“济麦 22”小麦产量及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, **16**(6): 1 325-1 332.

ZHANG H B, LIN Q, LIU Y G, *et al.* Effects of phosphorus and nitrogen fertilization on yield and quality of wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, **16**(6): 1 325-1 332.

[33] 金轲, 汪德水, 蔡典雄, 等. 水肥耦合效应研 I. 不同降雨年型对 N、P 水配合效应的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, **5**(1): 1-7.

JIN K, WANG D S, CAI D X, *et al.* Study on the effect of water and fertilizer coupling on the effect of different rainfall annual types on the effect of N and P on I[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 1999, **5**(1): 1-7.

[34] GUERRERO M G, VEGA J M, LOSADA M. The assimilatory nitrate-reducing system and its regulation[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1981, **32**: 169-204.

[35] 李合生. 现代植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 88-90.

[36] 曹翠玲, 李生秀. 供氮水平对小麦生殖生长期叶片光合速率、NR 活性和酸含量及产量的影响[J]. 植物学通报, 2003, **20**(3): 319-324.

CAO C L, LI S X. Effect of nitrogen level on the photosynthetic rate, NR activity and the contents of nucleic acid of wheat leaf in the stage of reproduction[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2003, **20**(3): 319-324.

[37] 王晶, 韩晓日, 宫亮, 等. 低磷胁迫下不同番茄品种苗期根系生理适应性研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2005, **36**(5): 615-618.

WANG J, HAN X R, GONG L, *et al.* Physiological adaptability of seedling root system of tomato cultivars under low-phosphorus stress[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2005, **36**(5): 615-618.

[38] 王丽燕. NaCl 处理对野大豆生理生化特性的影响[J]. 大豆科学, 2008, **27**(6): 1 067-1 071.

WANG L Y. Effects of NaCl stress on physiological and biochemical characters of *Glycine soja* [J]. *Soybean Science*, 2008, **27**(6): 1 067-1 071.

[39] 叶文斌, 樊亮. 党参和黄芪种植地土壤水浸液对小麦化感作用的研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2013, **48**(5): 6 974.

YE W B, FAN L. Allelopathy of aqueous extract from planting soil of *Codonopsis pilosula* and *A. membranaceus*, var. *mongolicus* on *Triticum aestivum*[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2013, **48**(5): 6 974.

[40] 史树德, 孙亚卿, 魏磊. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国林业出版社, 2011: 88.

[41] PAPONOV I A, POSEPANOV O G, LEBEDINSKAI S, *et al.* Growth and biomass allocation with varying nitrogen availability of nearisogenic pea lines with differing foliage structure[J]. *Annals of Botany*, 2000, **85**(4): 563-569.

[42] 彭少麟. 热带亚热带恢复生态学研究与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 177-180.

[43] 张焕军, 郁红艳, 项剑, 等. 氮磷用量对豫北地区小麦产量的交互效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, **18**(6): 1 163-1 169.

ZHANG H J, YU H Y, XIANG J, *et al.* Interactive influence of nitrogen and phosphorus application rate on wheat yield in North Henan, China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, **18**(6): 1 163-1 169.

[44] 刘德平, 杨树青, 史海滨, 等. 小麦/玉米套作条件下氮、磷配施的肥料效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2014, **22**(3): 262-269.

LIU D P, YANG S Q, SHI H B, *et al.* Effect of combined nitrogen and phosphorus fertilizer application of wheat-maize intercropping system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, **22**(3): 262-269.

(编辑: 裴阿卫)