

氮肥不同施用量及基追比对藜麦根系生理及同化物分配的影响

闫士朋^{1, 2}, 冯焕琴^{1, 2}, 杨宏伟^{2, 4}, 焦润安^{1, 2}, 张舒涵^{1, 2}, 康小华³, 李朝周^{1, 2*}

(1. 甘肃农业大学生命科学技术学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省作物遗传改良和种质创新重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃条山集团农林科学研究所, 甘肃 景泰 730400; 4. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 探究了滴灌模式下藜麦根系生理及农艺性状对氮肥不同施用量及氮肥不同基追比(基追肥施用比例)的响应, 旨在为藜麦生产中氮肥的有效利用提供科学依据。结果显示, 在 60 kg/hm² 施氮量条件下高的基追比提高了根系活力, 60 kg/hm² 施氮量的根系超氧阴离子产生速率和丙二醛含量都显著低于对照; 但高施氮量(90 kg/hm²)高基追比(2:1)条件时丙二醛含量最高, 发挥活性氧清除功能的超氧化物歧化酶活性降低, 根系活性氧积累。整体而言, 60 kg/hm² 施氮量的抗氧化酶活性较低。高氮(60 和 90 kg/hm²)、高基追比(2:1)条件促进了藜麦根系的延伸; 60 kg/hm² 施氮量的藜麦根系总根长和根系表面积整体上高于 30 kg/hm² 施氮量。60 kg/hm² 施氮量的根直径和根体积整体高于其他处理。在 60 kg/hm² 施氮量条件下的产量和单株重整体上均高于其它处理, 并且在 2:1、1:1 和 1:2 基追比分别较不施肥增产 74.6%、40.3% 和 86.8%。施氮 60 kg/hm²、基追比为 1:2 的处理的株高适中, 茎秆较粗壮, 单株重量最大。综上所述, 增施适量氮肥(60 kg/hm²), 并根据藜麦生育阶段给予适当比例的追肥, 可通过根系生理代谢、根系形态适应性调整, 减轻藜麦根系的脂质过氧化程度及细胞膜损伤等伤害, 促进生长发育; 施氮 60 kg/hm², 基追比为 1:2 处理的藜麦农艺形状及产量表现最好。

关键词: 氮肥施用量; 基追比; 藜麦; 根系形态; 根系生理

藜麦(*Chenopodium quinoa*)原产于南美洲安第斯山地区, 在当地已有约 7 000 年的栽培历史^[1]。由于其营养丰富, 食用价值高, 植株在自然肥力低的情况下仍能生长良好, 因此被誉为未来最具潜力的农作物之一^[2]。藜麦具有耐盐、耐寒、耐旱、耐贫瘠等生物学特性^[3], 在恶劣气候条件下也能产生高蛋白质含量的籽实。近年来, 相关研究发现藜麦在预防肥胖、心血管疾病、糖尿病和癌症等方面具有显著的功效, 尤其是从 2000 年以后藜麦的营养价值被众多的营养学家所认可, 以藜麦为原料的食品和保健品得到了消费者的热烈追捧^[4]。

植物根系是吸收水分和矿质元素的主要器官^[5], 执行吸收功能时根系会根据土壤中水肥的含量和状态改变其形态从而适应植株生长。高等植物根系和其他器官一样, 也存在着发生发展到衰老

的过程, 在个体发育的后期阶段, 由于生理原因和外界因素发生改变, 导致死亡的衰退过程。衰老是生物发展进化过程中不可分割的一部分。冯延江^[6]在寒地粳稻生长及养分吸收的研究中, 发现适量施用氮肥能够促进根系抗氧化酶相关基因表达, 提高水稻根系清除活性氧的能力, 可有效延缓根系衰老。有研究表明施肥条件下植物的根冠比、根长、根表面积、根尖数均显著高于不施肥处理^[7], 肥料的配施也极大地提高了根系生物量和粗根细根比^[8]。倪瑞军^[9]采用盆栽试验方法研究了施氮条件下藜麦生理适应机制, 发现在一定范围内施肥根系形态指标呈先升高后降低的变化, 根冠比呈下降趋势, 超氧化物歧化酶、过氧化物酶等保护酶活性呈先降低后升高的变化, 但是变化幅度不同。

氮素是植物体内蛋白质、核酸、叶绿素和一些激素的重要组成部分, 对作物的贡献率达 40% ~ 50%^[10], 被认为是调控植物生长和产量形成的首要因素^[11], 有研究表明同一植物在不同生育阶段对氮素的含量和形态(如铵态氮和硝态氮的区别)要求不同, 即需肥不同^[12]。豆科植物仅苗期要求适当的氮, 此后根瘤形成可固氮^[13], 主要

收稿日期: 2018-09-05; 录用日期: 2018-12-22

基金项目: 国家马铃薯产业技术体系(CARS-09-P14); 甘肃省科技厅科技支撑项目(1604NKCA52-3)。

作者简介: 闫士朋(1989-), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 从事植物生理学研究。E-mail: 976626844@qq.com。

通讯作者: 李朝周, E-mail: licz@gsau.edu.cn。

要求磷肥和钾肥。玉米一般在拔节至抽雄对氮、钾肥要求量约占一生中的 70%^[14]。怀菊花植株在生根前吸氮量不多,生根后则急剧增加^[15]。王梦苒等^[16]研究表明:延胡索的幼苗期至花期末是地上部养分吸收迅速阶段,于花期末达到峰值;初花期至膨大期是地下部对养分吸收高峰期;并建议在前期将全部有机肥和磷肥投入土壤中;氮肥和钾肥可以在前期投入总量的 40% ~ 50%,其余的后期追施,以保证延胡索正常生长,并达到高产目的。魏玉明等^[17]的研究表明了藜麦各生育时期不同器官间营养成分转运差异较大,总体表现为成熟期 > 开花期 > 灌浆期 > 苗期。张建青等^[18]研究了施肥水平对藜麦产量的影响,发现藜麦产量的增加和施肥量、施肥配比有很大关系。故探究作物生长各阶段的施肥比例对农业生产具有重要意义,解决基追比的问题对农业实践活动具有指导作用。

施用氮肥可以使作物得到良好生长,但是施用氮肥过多会使作物晚熟、易倒伏,从而造成减产^[19]。有研究发现,藜麦籽实产量并不一定随氮肥施用比例上升而上升,有时反而会下降,据 Erley 等^[20]报道,在德国南部施用氮肥(N 0、80、120 kg/hm²)的条件下,藜麦产量对施用氮肥的反应明显,氮肥施用量 N 120 kg/hm²时,藜麦产量最高,为 3 500 kg/hm²。施用氮肥不仅可以提高产量,还可以增加籽实蛋白质含量^[21]。合理的施肥措施,影响根系从而控制个体和群体的发育,进而能够推迟衰老的启动期和延缓衰老进程,最终达到高产目的。近年来国内对于藜麦的相关研究不断增加,但由于藜麦在国内种植较晚,多数集中在藜麦的品种选育、种植模式、种植密度、器官间营养的转运等方面^[22],在水分管理和肥料利用方面缺少系统的研究报告,尤其是氮肥施用量及基追比对根系的影响研究较少。本试验通过探究滴灌模式下藜麦根系生理代谢状况、根系形态发育、农艺性状、产量对不同氮肥

施用量及基追比的响应,旨在为本地区藜麦生长、生产过程中氮肥的有效利用和藜麦的高产稳产提供技术支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试藜麦品种为“条黎 1 号”,由甘肃条山集团农林科学研究所提供。供试肥料为尿素(N 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 16%),硫酸钾(K₂O 50%)。

1.2 试验地概况

试验设在甘肃省景泰县条山农场,近 10 年平均降水量 185.6 mm,试验田为砂壤土,种植前五点法取土样采集 0 ~ 30 cm 土壤测定养分状况^[23]:碱解氮 34.65 mg/kg,有效磷 19.04 mg/kg,速效钾 154.55 mg/kg。试验地前茬为玉米,使用滴灌系统进行灌溉和肥料追施。

1.3 试验设计

试验共设 10 个处理,随机区组设计,重复 3 次,小区面积 90 m²,播种密度 111 150 株/hm²。处理 1 为不施肥(CK);处理 2 ~ 10(其中处理 3 为常规施肥,施 N、P₂O₅、K₂O 分别为 30、22.95、55.5 kg/hm²)将 22.95 kg/hm²磷肥、55.50 kg/hm²钾肥作基肥一次性施入,并设 3 个氮肥水平,分别为 30、60、90 kg/hm²,每个施氮水平各设 2:1、1:1 和 1:2 3 个基追比。试验于 2017 年 5 月 3 日播种,5 月 10 日开始出苗,出苗后每 15 d 施追肥一次,不同追肥分 4 次施入,全生育期 95 d。灌溉水源为黄河提灌水,全生育期滴灌 15 次,滴水量 3 000 m³/hm²。在 7 月 19 日 10:00 ~ 10:50 取藜麦根系作为试验材料,将根系用蒸馏水冲洗干净,吸水纸吸干后测定各项生理指标;于收获期(8 月 5 日)前一周测定株高、茎粗、穗长等农艺性状指标,收获时测单株重和小区产量。

表 1 氮肥施用量(N)及基追比

处理	C1 (CK)	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
基肥 + 追肥 (kg/hm ²)	0	30	30	30	60	60	60	90	90	90
基追比	—	2:1	1:1	1:2	2:1	1:1	1:2	2:1	1:1	1:2
基肥 (kg/hm ²)	0	20	15	10	40	30	20	60	45	30
追肥 (kg/hm ²) (滴灌追施)	0	10	15	20	20	30	40	30	45	60

1.4 测定项目与方法

1.4.1 根系含水量和根系活力

根系含水量采用称重法测定；根系活力采用氯化三苯基四氮唑 (TTC) 法^[24]测定。

1.4.2 生物量和根冠比

将藜麦用去离子水洗净,用吸水纸擦干,用剪刀将其剪成地上和地下两部分,分别用托盘天平称量测定,称出地上和地下的鲜重;然后将植株装入牛皮纸袋,105℃杀青0.5 h后,75℃烘干48 h至恒重,称出各部分干重。

根冠比 = 植株的根干重 / 地上部干重。

1.4.3 根系超氧阴离子产生速率和丙二醛含量

超氧阴离子 ($O_2^{\cdot-}$) 产生速率测定采用羟胺氧化法^[25]。丙二醛 (MDA) 含量测定采用硫代巴比妥酸法^[26]。

1.4.4 根系抗氧化酶活性

超氧化物歧化酶 (SOD) 活性采用光照核黄素体系,氮蓝四唑 (NBT) 光还原法^[24]测定;过氧化物酶 (POD) 活性采用愈创木酚法^[26]测定;过氧化氢酶 (CAT) 活性采用紫外法^[23]测定。

1.4.5 根系形态特征

收获时完整的挖出藜麦植株根系,先用自来水冲洗2~3次,再用蒸馏水冲洗2次,用滤纸擦干表面水分,用数字化扫描仪 Espon scanner 对各处理的根系分别进行扫描,扫描完成后运用 WinRHIZO 2008a 根系图像分析软件对扫描后的根系图像进行形态指标的分析。根系扫描后的数量、根长、根表面积、直径以及体积可以通过图片分析直接获得^[27]。

1.4.6 农艺性状

株高、茎粗及穗长测定:每小区标记5株测定植株高度、基径和穗长;株高为植株茎最高部位距土面的高度,用直尺测量;基径以植株与土面的交界处地上茎直径代表,用游标卡尺测量;单株重测定:收获时每小区选取代表性的10株进行单株重的测定,用电子天平称量;产量测定:收获后每小区单收计产。

1.5 数据处理

采用 Excel 2013 软件对数据进行处理和绘图,数据用“平均值 ± 标准误”表示,采用 SPSS 19.0 统计分析软件对数据进行差异显著性分析,取 $P < 0.05$ 为显著差异,各项指标测定重复3~5次。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥施用量及基追比对藜麦根系含水量、根系活力的影响

由图1A可知根系含水量仅在30 kg/hm²施氮量下1:2基追比条件与90 kg/hm²施氮量下1:2基追比条件之间表现出显著差异,各处理与对照之间无显著性差异。不同施氮量及不同基追比对根系活力具有显著影响,根系活力表现为在30 kg/hm²施氮量下1:1基追比显著低于1:2和2:1基追比;在60 kg/hm²施氮量下2:1基追比显著高于1:2和1:1基追比,即在此施氮量条件下高的基肥比例提高了根系活力;在90 kg/hm²施氮量下根系活力表现出基追比1:2>1:1>2:1的趋势,即在施氮量较高的条件下,基肥比例越高则根系活力越低。90 kg/hm²施氮量下1:2基追比和60 kg/hm²施氮量下2:1基追比根系活力最高(图1B)。

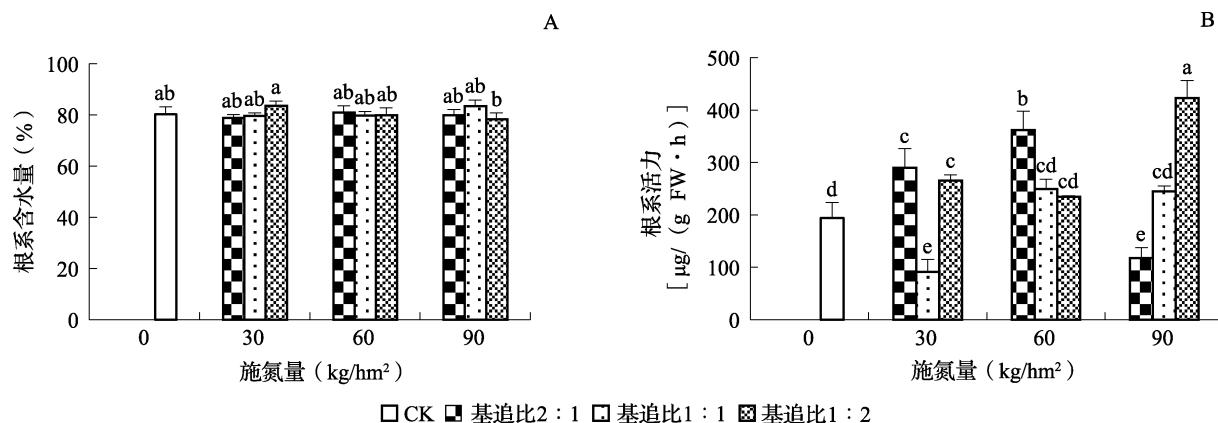


图1 不同氮肥施用量及基追比对藜麦幼苗根系含水量、根系活力的影响

注:不同字母表示数据间差异显著 ($P < 0.05$),下同。

2.2 不同氮肥施用量及基追比对藜麦根系干物质积累和根冠比的影响

由表 2 可知,随着氮肥施用量的增加,藜麦的地上部干重和根干重均呈先升高后降低的趋势,均在施氮量 60 kg/hm² 基追比为 1:2 下达到最大值,分别比不施氮处理 (CK) 提高了 95.40%、54.33%。

根冠比整体呈降低的趋势,在施氮量 90 kg/hm² 基追比为 1:1 下陡然增大为 0.219,但小于不施氮 (CK) 处理;不施氮处理的根冠比大于 C2 ~ C9 施氮处理,说明施氮对藜麦地上部分的增加效应更明显,对地下部的促进作用小于对地上部的促进作用。

表 2 不同氮肥施用量及基追比对藜麦干物质积累和根冠比的影响

处理	施氮量 (kg/hm ²)	基追比	地上部干重 (g/株)	根干重 (g/株)	根冠比
C1 (CK)	0	—	73.10 ± 4.62ef	16.38 ± 2.30d	0.224 ± 0.058 1b
C2	30	2:1	81.77 ± 3.64e	17.60 ± 1.01d	0.215 ± 0.039 0c
C3	30	1:1	106.16 ± 5.87d	21.38 ± 1.00c	0.201 ± 0.052 9cd
C4	30	1:2	108.39 ± 5.24cd	20.94 ± 1.64c	0.193 ± 0.008 1d
C5	60	2:1	118.21 ± 4.96c	22.40 ± 1.44bc	0.190 ± 0.003 7d
C6	60	1:1	130.94 ± 6.25b	23.78 ± 1.49b	0.182 ± 0.006 4de
C7	60	1:2	142.84 ± 5.31a	25.28 ± 0.49a	0.177 ± 0.004 7e
C8	90	2:1	80.83 ± 2.32e	15.18 ± 1.70e	0.188 ± 0.007 3de
C9	90	1:1	73.84 ± 2.00ef	16.18 ± 1.88de	0.219 ± 0.047 4bc
C10	90	1:2	67.82 ± 1.29f	16.92 ± 2.65d	0.250 ± 0.032 6a

注:同列相同水分条件下不同小写字母表示其显著性差异达 $P<0.05$ 水平。下同。

2.3 不同氮肥施用量及基追比对藜麦根系 O₂^{·-} 产生速率和 MDA 含量的影响

由图 2A 可知,在 30 和 60 kg/hm² 施氮量下根系 O₂^{·-} 产生速率在各基追比之间均未表现出显著差异,且都显著低于对照 C1 处理;在 90 kg/hm² 施氮量下根系 O₂^{·-} 产生速率表现为 2:1 基追比高于 1:2 和 1:1 基追比。不施氮 C1 处理的根系 O₂^{·-} 产生速率显著高于其他各处理 (90 kg/hm² 施氮量下 2:1 基追比除外),即施氮削弱了活性氧的积累。从图 2B

可以看出,根系 MDA 含量在 60 和 90 kg/hm² 施氮量的各基追比条件下均显著低于对照;在 30 kg/hm² 施氮量下表现出 1:2 基追比条件显著低于 1:1 和 2:1 基追比条件,在 60 kg/hm² 施氮量下表现出 2:1 基追比高于 1:1 和 1:2 基追比;在 90 kg/hm² 施氮量下表现出 1:2<1:1<2:1 基追比的趋势,高氮 (90 kg/hm²) 高基肥比例 (2:1) 条件 MDA 含量最高,发挥根系活性氧清除功能的 SOD 活性降低,造成根系活性氧代谢紊乱,活性氧积累。

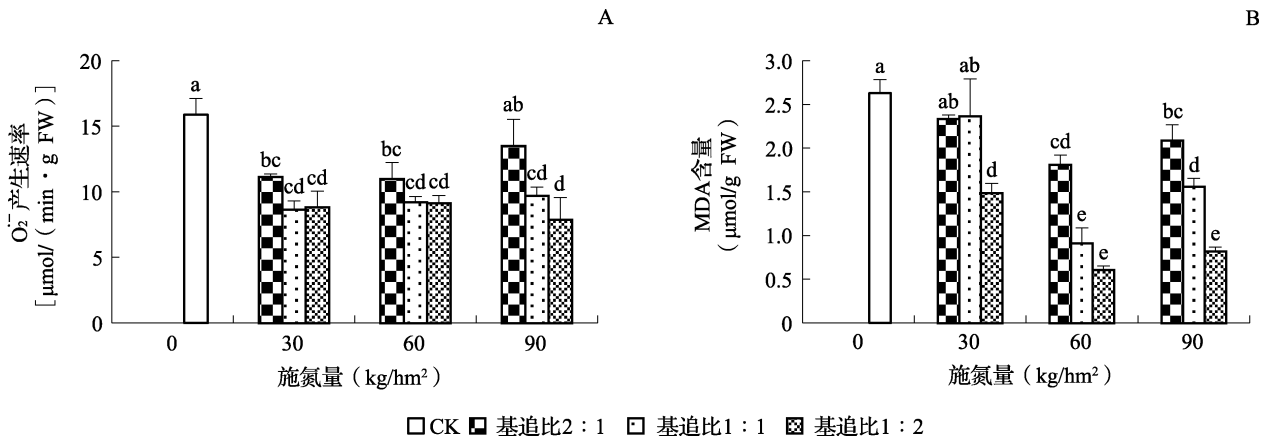


图 2 不同氮肥施用量及基追比对藜麦根系 O₂^{·-} 产生速率和 MDA 含量的影响

2.4 不同氮肥施用量及基追比对藜麦根系抗氧化酶活性的影响

由图 3A 可知,根系 SOD 活性在各处理间表现

出显著性差异 ($P<0.05$),根系 SOD 活性在 30 kg/hm² 施氮量下 1:1 基追比处理显著高于 1:2 和 2:1 基追比处理;在 60 kg/hm² 施氮量下表现出 1:2>2:1>1:1

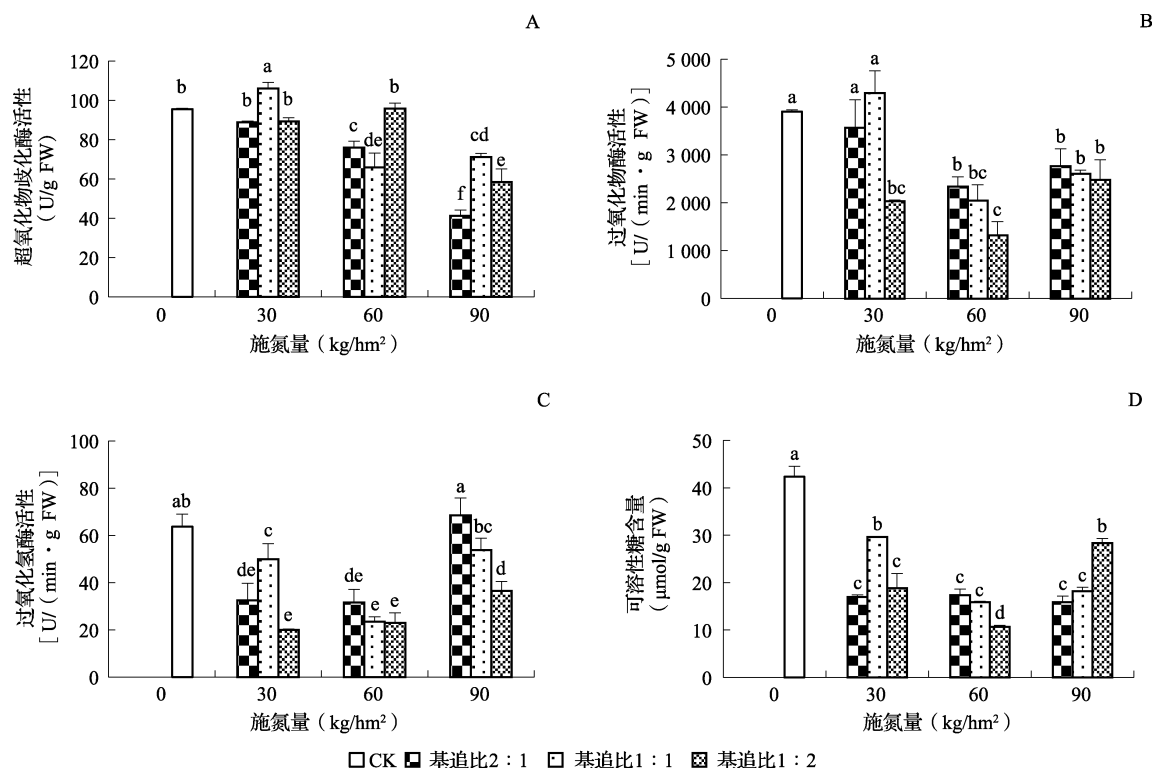


图3 不同氮肥施用量及基追比对藜麦根系抗氧化酶活性以及可溶性糖含量的影响

基追比的趋势；在 90 kg/hm² 施氮量下则表现出 1:1>1:2>2:1 基追比的趋势，即在高氮高基肥比例条件造成发挥根系活性氧清除功能的 SOD 活性下降。对照的根系 SOD 活性低于 30 kg/hm² 施氮量下的 1:1 基追比处理，但高于 60 kg/hm² 施氮量下的 2:1 和 1:1 基追比、90 kg/hm² 施氮量下的 3 个基追比处理。根系 POD 活性在各施氮量下均表现出 1:2 基追比处理最低的趋势，同时 1:1 和 2:1 基追比之间无显著差异；在 60 和 90 kg/hm² 施氮量的各基追比条件下的根系 POD 活性均显著低于对照（图 3B）。根系 CAT 活性在各施氮量下均表现出 1:2 基追比处理最低的现象；在 60 和 90 kg/hm² 施氮量下均表现出 2:1>1:1>1:2 的现象，即基肥比例越高 CAT 活性越高，在 30 kg/hm² 施氮量下则表现为 1:1>2:1>1:2。在 30 和 60 kg/hm² 施氮量的各基追比条件下的根系 CAT 活性均显著低于对照（图 3C）。整体而言，60 kg/hm² 施氮量的抗氧化酶活性较低。

根系可溶性糖含量表现为不施氮处理显著高于施氮处理；在 30 kg/hm² 施氮量的表现为 1:1 基追比显著高于 1:2 和 2:1 基追比处理，在 60 kg/hm² 施氮量下表现为 2:1>1:1>1:2 基追比；在 90 kg/hm² 施氮量下表现为 1:2>1:1>2:1（图 3D）。

2.5 不同氮肥施用量及基追比对藜麦根系形态特征的影响

由图 4 可知，藜麦根系总长度在 60 和 90 kg/hm² 施氮量下均表现出 2:1>1:2>1:1 基追比处理的趋势，即在高氮低追肥比例条件促进了根系的延伸；60 kg/hm² 施氮量的藜麦根系总根长整体上高于 30 kg/hm² 施氮量。整体来看，60 kg/hm² 施氮量的藜麦根系表面积高于其他处理，60 kg/hm² 施氮量的 1:1 和 1:2 基追比的根表面积最高，30 kg/hm² 施氮量的 1:2 和 2:1 基追比、60 kg/hm² 施氮量的 2:1 基追比、90 kg/hm² 施氮量的 3 个基追比与对照之间均未表现出显著差异。根直径和根体积表现较为相似的规律，在 30 kg/hm² 施氮量下表现出 2:1>1:2>1:1 基追比处理的趋势；60 kg/hm² 施氮量下表现出 1:1>1:2>2:1 基追比处理的趋势；90 kg/hm² 施氮量下表现出 1:1>2:1>1:2 基追比处理的趋势，并且 60 kg/hm² 施氮量的根直径和根体积整体高于其他处理。在 30 和 90 kg/hm² 施氮量下 1:2 基追比的根尖数均高于 1:1 和 2:1，即在低氮和高氮水平下高追肥均增加了细根的数目；在 60 kg/hm² 施氮量下 1:2 基追比的根尖数低于 1:1 和 2:1。

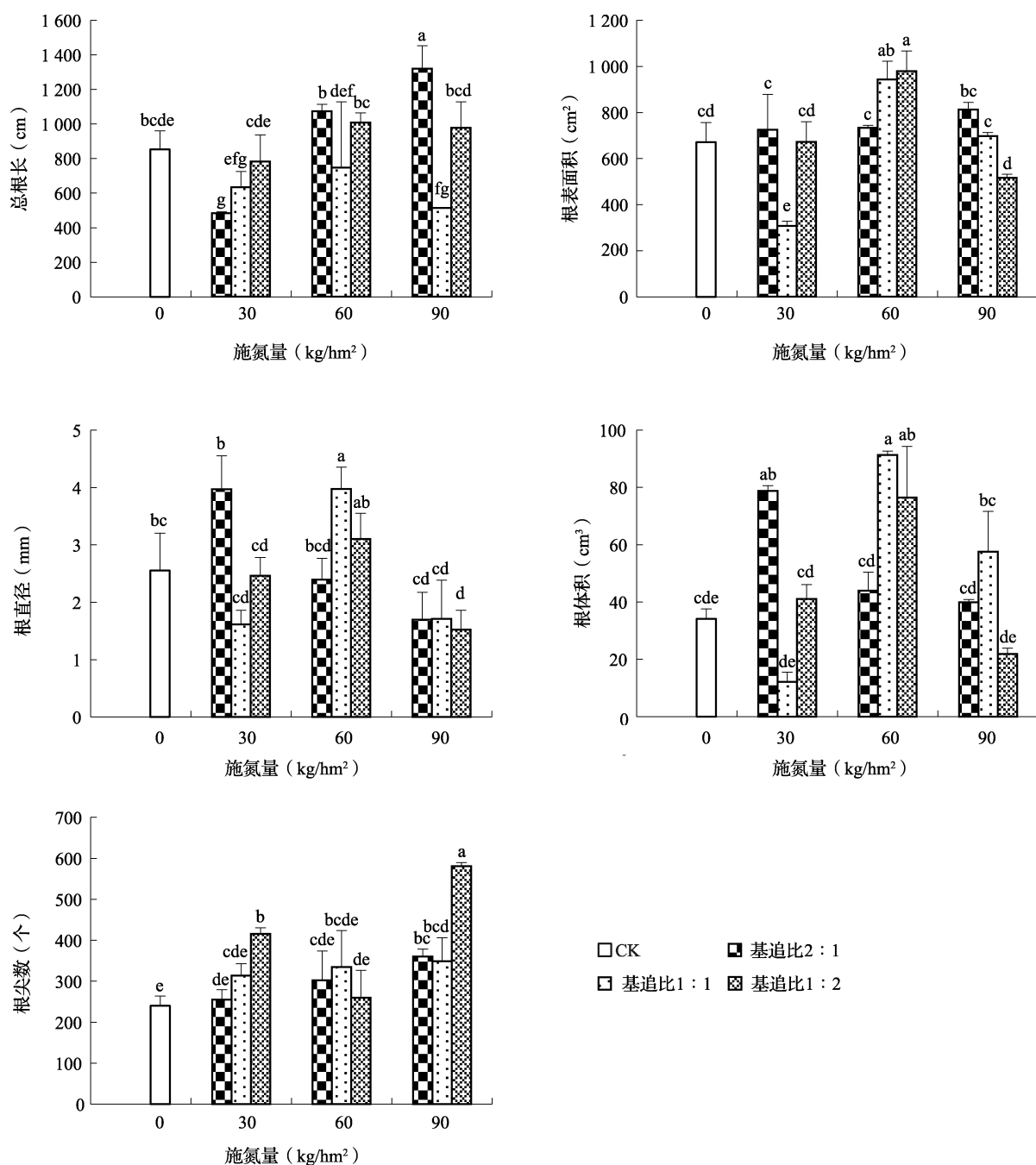


图4 不同氮肥施用量及基追比对藜麦根系形态特征的影响

由表3可知,在2:1基追比条件下施氮量与藜麦总根长呈极显著正相关,与根体积呈显著负相关,与根直径呈极显著负相关;总根长与根表面积、根尖数呈显著正相关,与根直径呈极显著负相关,与根体积呈显著负相关;根直径与根体积呈极显著正相关。在1:1基追比条件下施氮量与根表面积、体积、直径、根尖数之间均呈正相关;根表面积与根直径之间呈显著正相关,与根体积之间呈极

显著性正相关;根直径与根体积呈显著正相关。在1:2基追比条件下施氮量与表面积、体积、直径之间均呈负相关,即适当减少基肥增加追肥促进了根系延伸和根尖生长;根表面积与根直径呈显著正相关,与根体积呈极显著正相关,但与根尖数呈极显著负相关;根直径与根体积呈极显著正相关,但与根尖数呈极显著负相关;根体积与根尖数呈极显著负相关。

表 3 不同基追比条件下施氮量与根系形态指标相关性分析

基追比	变异因素	施氮量	总根长	根表面积	根直径	根体积
2:1	总根长	0.960**				
	根表面积	0.375	0.898*			
	根直径	-0.902**	-0.953**	-0.412		
	根体积	-0.868*	-0.927*	0.093	0.950**	
	根尖数	0.704	0.816*	0.700	-0.683	-0.585
1:1	总根长	-0.410				
	根表面积	0.553	0.424			
	根直径	0.141	0.540	0.898*		
	根体积	0.538	0.240	0.938**	0.980*	
	根尖数	0.472	-0.711	-0.007	0.386	0.368
1:2	总根长	0.588				
	根表面积	-0.246	0.343			
	根直径	-0.590	-0.186	0.831*		
	根体积	-0.261	0.161	0.965**	0.933**	
	根尖数	0.504	0.326	-0.994**	-0.964**	-0.971**

注: *、** 分别表示 0.05 水平显著相关、0.01 水平极显著相关。下同。

由表 4 可知,在低氮施用量条件下,基追比与根直径呈显著正相关,与根尖数、总根长呈显著负相关。表面积与根体积呈显著正相关。在中氮施用量条件下,基追比与根表面积呈极显著负相关,与

体积呈显著负相关;总根长与根直径呈极显著负相关,根体积与根表面积呈显著正相关,与根直径呈极显著正相关。在高氮施用量条件下,基追比与根表面积呈显著正相关,根尖数与根直径呈显著负相关。

表 4 不同施氮量条件下基追比与根系形态指标相关性分析

施氮量 (kg/hm ²)	变异因素	基追比	总根长	根表面积	根直径	根体积
30	总根长	-0.843*				
	根表面积	0.262	0.108			
	根直径	0.726*	-0.544	0.616		
	根体积	0.668	-0.260	0.863*	0.943**	
	根尖数	-0.913*	0.947	0.274	-0.531	-0.435
60	总根长	0.335				
	根表面积	-0.889**	-0.283			
	根直径	-0.618	-0.923**	0.616		
	根体积	-0.788*	-0.758	0.848*	0.938**	
	根尖数	0.194	0.268	-0.159	-0.379	-0.340
90	总根长	0.569				
	根表面积	0.942*	0.411			
	根直径	0.172	0.774	0.546		
	根体积	0.261	-0.568	0.503	0.791	
	根尖数	-0.708	-0.066	-0.768	-0.950*	-0.418

2.6 不同氮肥施用量及基追比对藜麦植株生长发育和藜麦产量的影响

由表 5 可知, 藜麦株高整体上表现出 90 kg/hm² 施氮量低于其他各处理的趋势, 以对照最高, 在施氮处理中 30 kg/hm² 施氮量的 1:2 基追比条件下为最高。茎粗整体上表现出 60 kg/hm² 施氮量高于其他各处理的趋势, 在施氮处理中 60 kg/hm² 施氮量的 1:1 基追比条件下最高, 为 16.1 mm。穗长

整体表现为施氮高于不施氮, 在 60 kg/hm² 施氮量下表现为 1:2>2:1>1:1 的趋势。

由图 5 可知, 在 60 kg/hm² 施氮量条件下的产量和单株重均整体上高于其他处理, 并且 2:1、1:1 和 1:2 基追比分别较不施肥增产 74.6%、40.3% 和 86.8%。由图 5 和表 4 可知, 施氮 60 kg/hm² 基追比为 1:2 的处理表现最好, 株高适中, 茎秆较粗壮, 单株重量最大。

表 5 不同氮肥施用量及基追比对藜麦植株生长发育的影响

处理	施氮量 (kg/hm ²)	基追比	株高 (cm)	茎粗 (mm)	穗长 (cm)
C1 (CK)	0	—	143.6 ± 10.46a	13.9 ± 1.83c	29.7 ± 0.73e
C2	30	2:1	125.4 ± 9.25c	13.2 ± 1.58c	41.8 ± 1.96a
C3	30	1:1	125.6 ± 9.87c	12.8 ± 1.35d	37.4 ± 1.32c
C4	30	1:2	134.4 ± 9.94b	14.8 ± 1.38b	36.3 ± 1.55cd
C5	60	2:1	130.7 ± 8.92bc	15.4 ± 1.14ab	35.8 ± 1.26cd
C6	60	1:1	128.3 ± 8.98bc	16.1 ± 1.57a	33.0 ± 0.84d
C7	60	1:2	128.9 ± 8.65bc	15.6 ± 1.52ab	39.8 ± 1.95b
C8	90	2:1	120.3 ± 9.11c	16.0 ± 1.57a	40.7 ± 1.83ab
C9	90	1:1	123.7 ± 7.88c	12.7 ± 1.89d	29.8 ± 0.85e
C10	90	1:2	111.0 ± 8.60d	13.0 ± 0.70cd	42.2 ± 2.05a

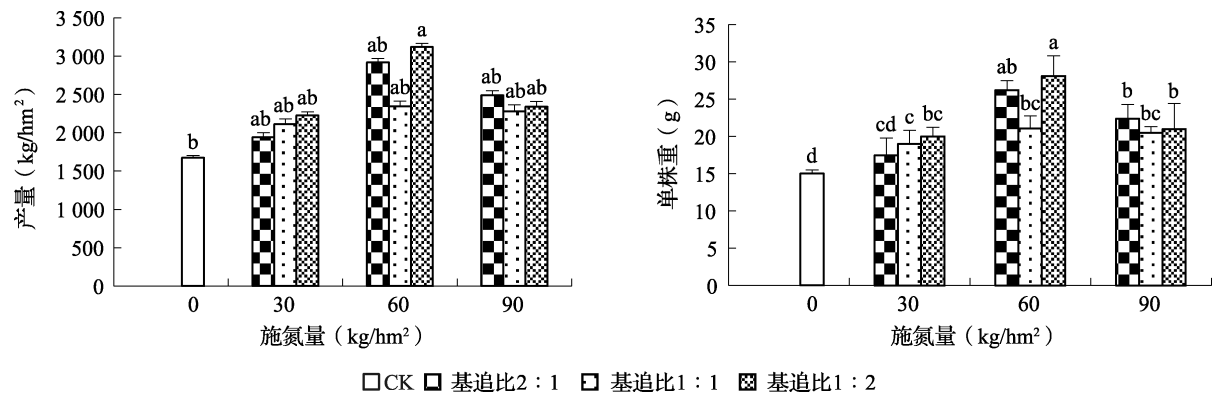


图 5 不同氮肥施用量及基追比对藜麦产量的影响

3 讨论

根系是植物物质吸收的基础, 最早最直接地感受到土壤溶液浓度变化, 从而对水肥吸收作出迅速反应的器官, 其含水量的变化将直接影响植株水分在不同器官间的运输、蒸腾作用、光合作用、呼吸作用等生理过程。在本试验中研究发现, 各处理的根系含水量整体上差异不明显, 可能与根系最早地感受到土壤水分含量的变化而进行调节有关。根系

活力是根系的吸收运输能力、合成分解能力、氧化还原能力等代谢活性的综合体现, 能反映植物根系的生长发育状况及其与土壤水分及其环境之间的反馈调节关系。本研究中发现, 在 60 kg/hm² 施氮量条件下高的基肥比例提高了根系活力, 在施氮量较高 (90 kg/hm²) 的条件下, 根系活力表现出 1:2>1:1>2:1 基追比的趋势。这与李春喜等^[28] 对小麦氮肥基追比的研究结果类似, 可能是由于基肥比例越高易造成烧苗, 同时追肥比例越低, 可

供根系吸收的氮素越少,从而使得根系活力越低。不同氮肥施用量及基追比对作物生长基础营养供给不同,因而对作物整体及根系的生长发育、地上部和地下部产量、根冠比等影响也不同^[29],适量的氮素供应能促进作物根、茎、叶等营养器官生长发育和协调群体发展^[30]。本研究表明藜麦产量对不同氮肥施用量及基追比的响应表现为先增高后降低,根冠比与产量呈现负相关,适量的增施氮肥及适宜的基追比例可明显促进根和地上部分的干物质积累,且施氮量对藜麦地上部产量比地下部产量的增加有更加显著的效应。施氮量对地上部和地下部干物质积累的变化规律相似,皆呈现先升高后降低的趋势,氮肥供应过多容易造成植物奢侈吸收,增产幅度与效益下降。藜麦地上部分在施氮 60 kg/hm² 追肥比例为 1:2 的条件下干物质积累最大,且根冠比最小,此时根系将更多的养分向上输送,满足地上部分的生长,有利于提高藜麦籽粒的产量。

超氧阴离子(O₂⁻)是常见的活性氧自由基(ROS),当植物受到胁迫时,清除系统无法及时清除多余的 ROS,导致清除失衡会对植物造成伤害^[31]。MDA 是生物膜质过氧化强度和酶系统受伤害程度的重要指标,MDA 积累越多,组织受伤害越重^[32]。本研究表明在 30 和 60 kg/hm² 施氮量下根系超氧阴离子产生速率都显著低于对照,即这两种施氮量对应的土壤溶液浓度更适宜于藜麦的根系代谢,根系细胞的水势有利于植株吸收功能的发挥;但高氮(90 kg/hm²)高基肥比例(2:1)条件时造成根系活性氧代谢紊乱,活性氧积累。在 60 和 90 kg/hm² 施氮量的各基追比条件下的根系 MDA 含量均显著低于对照 C1;在 90 kg/hm² 施氮量下根系 MDA 含量表现出 1:2<1:1<2:1 基追比的趋势,即随着基肥比例升高,活性氧的积累量增加,这与根系活力降低相对应。从 Jiang 等^[33]对小麦叶片的研究中可以发现相似规律,追施氮肥对叶片 MDA 的积累有一定的抑制作用,缓解膜脂过氧化,有助于维持生长后期叶片的细胞代谢,延长叶片功能期。

SOD、POD 和 CAT 等组成的抗氧化系统是植物的重要保护机制,抗氧化酶活性的提高可清除或减少自由基和过氧化物,有利于缓解植物的过氧化伤害,但其对植物的保护作用有一定的范围限制^[34-35]。本文的研究表明在高氮(90 kg/hm²)高基肥比例(2:1)时,造成发挥根系活性氧清除

功能的 SOD 活性降低;根系 POD 活性和 CAT 活性在各施氮量下均表现出低基肥高追肥的基追比时最低的现象。这与张倩^[11]对小麦顶三叶抗氧化酶的研究结果一致,CAT、POD 活性均随着氮肥追施比例的增大而增大,60 kg/hm² 施氮量的抗氧化酶活性较低,即相对应的活性氧积累量较少,是针对活性氧代谢较为适宜的施氮量。1:2 基追比下基肥比例低,将更多的氮素分配于藜麦生长的各个阶段,特别是茎快速生长的蛋白质快速生成的阶段。

根系长度、体积、表面积及根尖数是反映根系发育好坏的主要形态指标^[36-37]。现有研究表明,为适应土壤中养分资源供应不均匀,植物根系及根际过程往往表现出较强的可塑性反应^[38]。本研究发现在高氮(60 和 90 kg/hm²)低追肥比例(2:1)条件促进了藜麦根系的延伸;60 kg/hm² 施氮量的藜麦根系总根长和根系表面积整体上高于 30 kg/hm² 施氮量。60 kg/hm² 施氮量的根直径和根体积整体高于其他处理。说明一定范围内提高施氮水平可促进根系生长,而施氮过量则会导致氮素供过于求^[39],无法为植株吸收利用,甚至阻碍作物生长。藜麦根尖数、根直径和根系体积增加扩大了浅层的根系与土壤的接触面积以促进生长。在低氮(30 kg/hm²)和高氮(90 kg/hm²)水平下低追肥比(1:2)均增加了细根的数目,造成这种现象的原因有所差别,低氮情况下低的氮素供应迫使植株产生更多的细根吸收氮素营养,而高氮条件下土壤溶液浓度成为促根的重要原因;在 60 kg/hm² 施氮量下 1:2 基追比的根尖数低于 1:1 和 2:1,可能是因为在此条件下植株将更多的代谢能量用在了提高根系的表面积和体积从而增加根系的吸收能力。

藜麦的产量形成与植株生长发育紧密相关^[40]。本研究发现藜麦植株的株高、茎粗、穗长等对藜麦的经济产量均具有促进作用。在 30 kg/hm² 施氮量的 1:2 基追比条件下株高为最高,但对藜麦而言,过高的株高不仅消耗同化产物,而且易造成倒伏;过低的株高影响生育后期光合产物向籽粒转移的量。施氮 60 kg/hm²,基追比为 1:2 的处理综合经济性状最好;对照的株高过大,徒长了茎秆和枝叶,导致其单株产量较低,影响了最终的产量。综合各处理的经济性状指标来看,经济性状的表现优劣与产量有很大的关系,尤其穗长、单株重等指标,对藜麦产量的贡献较大,是促成藜麦产量提高的重要指标。

本文探究了滴灌模式下藜麦根系生理、农艺性状及同化物的转运对不同氮肥施用量及基追比的响应,结果表明:在 60 kg/hm^2 施氮量条件下高的基肥比例提高了根系活力,当基追肥比例为 1:2 时地上部分和根的干物质积累最大,且根冠比最小,此时根系将更多的养分向上输送满足地上部分的生长,有利于提高藜麦籽粒的产量。整体而言,在 60 kg/hm^2 施氮量下根系 O_2^- 产生速率和 MDA 含量都显著低于对照;根系抗氧化酶活性较低,即相对应的活性氧积累量较少;低追肥比例 (2:1) 条件促进了藜麦根系的延伸;在 60 kg/hm^2 施氮量下根系总根长和根系表面积整体上高于 30 kg/hm^2 施氮量,根直径和根体积整体高于其他处理;并且在 60 kg/hm^2 施氮量条件下的产量和单株重均整体上高于其他处理,1:2 基追比较不施肥增产最多。

4 结论

综上所述,增施适量氮肥,并根据藜麦生育阶段给予适当比例的追肥,可通过根系生理代谢、根系形态适应性调整,同化物的转运,进而有效减缓土壤溶液浓度与根系细胞渗透势之间的不适宜造成渗透胁迫带来藜麦根系的脂质过氧化程度及细胞膜损伤等伤害,促进生长发育。本研究条件下施氮 60 kg/hm^2 ,基追比为 1:2 的处理为综合经济性状最好的处理。

参考文献:

- [1] 冯焕琴,徐雪凤,杨宏伟,等. 藜麦种子皂苷不同提取方法的比较研究 [J]. 食品工业科技, 2016, 37 (21): 216-221, 227.
- [2] 谭斌,谭洪卓,刘明,等. 粮食 (全谷物) 的营养与健康 [J]. 中国粮油学报, 2010, 25 (4): 100-107.
- [3] 杨宏伟,刘文瑜,沈宝云,等. NaCl 胁迫对藜麦种子萌发和幼苗生理特性的影响 [J]. 草业学报, 2017, 26 (8): 146-153.
- [4] 王黎明,马宁,李颂,等. 藜麦的营养价值及其应用前景 [J]. 食品工业科技, 2014, (1): 381-389.
- [5] 孙浩燕,王森,任涛,等. 不同施肥方式下氮肥用量对直播稻根系形态及氮素吸收的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2017, (6): 88-92.
- [6] 冯延江. 水氮互作对寒地粳稻生长及养分吸收影响的研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- [7] 冯云格,陈菁菁,孙小妹,等. 施肥对日光温室香瓜茄根系生长及形态的影响 [J]. 核农学报, 2018, 32 (1): 188-195.
- [8] 张国娟,濮晓珍,张鹏鹏,等. 干旱区棉花秸秆还田和施肥对土壤氮素有效性及根系生物量的影响 [J]. 中国农业科学, 2017, 50 (13): 2624-2634.
- [9] 倪瑞军. 藜麦的生理生态指标及产量对水氮互作的可塑性响应 [D]. 临汾: 山西师范大学, 2016.
- [10] 黄云. 植物营养学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2014.
- [11] 张倩. 氮肥基追比对不同成熟型小麦生长发育及其产量品质的影响 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2015.
- [12] 焦峰,王鹏,翟瑞常. 氮肥形态对马铃薯氮素积累与分配的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2012, (2): 39-44.
- [13] 柴强,胡发龙,陈桂平. 禾豆间作氮素高效利用机理及农艺调控途径研究进展 [J]. 中国生态农业学报, 2017, 25 (1): 19-26.
- [14] 李唯. 植物生理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2012. 68.
- [15] 李丽伟. 怀菊花需肥规律与氮磷钾配施对其产量的影响 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2008.
- [16] 王梦苒,王朝辉,郑险峰,等. 延胡索干物质累积及氮、磷、钾养分吸收规律 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2018, (7): 45-50.
- [17] 魏玉明,杨发荣,刘文瑜,等. 藜麦不同生育期营养物质积累与分配规律 [J]. 草业科学, 2018, (7): 1720-1727.
- [18] 张建青,李猛. 不同施肥水平对藜麦产量及土壤肥力的影响 [J]. 中国农技推广, 2018, (4): 55-57.
- [19] Oelke E A, Putnam D H, Teynor T Mr, et al. Alternative field crops manual: Kenaf [M]. Madison, Wisconsin: University of Wisconsin Cooperative Extension Service, /St paul, Minnesota: Center for Alternative Plant and Animal Products, University of Minnesota Extension Service, 1991.
- [20] Erley G S, Kaul H P, Kruse M, et al. Yield and nitrogen utilization efficiency of the pseudocereals amaranth, quinoa, and buckwheat under differing nitrogen fertilization. [J]. European Journal of Agronomy, 2005, 22 (1): 95-100.
- [21] 阿图尔·博汗格瓦, 希尔皮·斯利瓦斯塔瓦. 藜麦生产与应用 [M]. 任贤兴, 译. 北京: 科学出版社, 2013. 168-184.
- [22] 康小华,沈宝云,王海龙,等. 不同氮肥施用量及基追比对藜麦产量及经济性状的影响 [J]. 农学学报, 2017, 7 (12): 34-37.
- [23] 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2006. 36-41.
- [24] 邹琦. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [25] 王爱国,罗广华. 植物的超氧自由基与羟胺反应的定量关系 [J]. 植物生理学通讯, 1990, 26 (2): 55-57.
- [26] 陈建勋,王晓峰. 植物生理学实验指导 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006.
- [27] 单立山,李毅,段雅楠,等. 红砂幼苗根系形态特征和水分利用效率对土壤水分变化的响应 [J]. 西北植物学报, 2014, (6): 1198-1205.
- [28] 李春喜,杨明达,马守臣,等. 氮肥基追比对冬小麦调亏灌

- 氮的调控作用[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(6): 820–828.
- [29] 肖云华, 吕婷婷, 唐晓清, 等. 追施氮肥量对苤蓝根的外形品质、干物质积累及活性成分含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 30(2): 437–444.
- [30] Karrou M, Maranville J W. Response of wheat cultivars to different soil nitrogen and moisture regimes; I. Dry matter partitioning and root growth[J]. Journal of Plant Nutrition, 1994, 17(5): 729–744.
- [31] 张雪, 李强, 余宏军, 等. 氮胁迫对黄瓜幼苗抗氧化酶系统的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 142–147.
- [32] 谢敏, 回嵘, 刘立超, 等. 降雪对荒漠地区藓类结皮中真菌生理生化的影响[J]. 生态学报, 2017, (3): 1–7.
- [33] Jiang L N, Zheng D Y, Wang Y J, et al. Effects of application time and basal/topdressing ratio of nitrogen fertilizer on leaf physiology and grain yield of wheat in Central Henan[J]. Journal of Triticeae Crops, 2010, 30(1): 149–153.
- [34] Wang H, Zhao S C, Xia W J, et al. Effect of cadmium stress on photosynthesis, lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities in maize (*Zea mays* L.) seedlings[J]. Plant Nutrition & Fertilizer Science, 2008, 14(1): 36–42.
- [35] 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 等. 纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(3): 1189–1200.
- [36] Batten G D. A review of phosphorus efficiency in wheat[J]. Plant & Soil, 1992, 146: 163–168.
- [37] 孙曰波, 赵从凯, 张玲, 等. 氮磷钾营养亏缺对玫瑰幼苗根构型的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013, (3): 43–48.
- [38] 孙蓟锋, 王旭. 土壤调理剂的研究和应用进展[J]. 中国土壤与肥料, 2013, (1): 1–7.
- [39] 银敏华, 李援农, 李昊, 等. 氮肥运筹对夏玉米根系生长与氮素利用的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 129–138.
- [40] 倪瑞军, 张永清, 庞春花, 等. 藜麦幼苗对水氮耦合变化的可塑性响应[J]. 作物杂志, 2015, (6): 91–98.

Effects of nitrogen fertilizer application amount and ratio of base to topdressing fertilizer on physiological traits and assimilate distribution of root of quinoa

YAN Shi-peng^{1, 2}, FENG Huan-qin^{1, 2}, YANG Hong-wei^{2, 4}, JIAO Run-an^{1, 2}, ZHANG Shu-han^{1, 2}, KANG Xiao-hua³, LI Chao-zhou^{1, 2*} (1. College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu 730070; 2. Gansu Key Laboratory of Crop Genetics & Germplasm Enhancement, Lanzhou Gansu 730070; 3. Gansu Tiaoshan Institute of Agricultural and Forestry Sciences, Jingtai Gansu 730400; 4. Faculty of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu 730070)

Abstract: To provide a basis for the effective utilization of fertilizer in the growth and production of quinoa, the effect of different amount of nitrogen (N) fertilizer and different base to topdressing ratio on the root morphological characteristics, physiological metabolism, agronomic trait as well as tuber weight of quinoa were studied under drip irrigation mode. The results showed that, with 2 : 1 base to dressing ratio, 60 kg/hm² N fertilizer application improved the root vigor, the production rate of O₂^{·-} and MDA content were significantly lower than that of control (C1), while the MDA content peaked under 90 kg/hm² N fertilizer application, SOD activity reduced with a reactive oxygen metabolism disorder. As a whole, under the condition of 60 kg/hm² N fertilizer application, the accumulation of reactive oxygen was relatively low. High level of N fertilizer (60 and 90 kg/hm²) with low ratio of N topdressing promoted the extension of quinoa root system. The total root length and root surface area of quinoa under 60 kg/hm² N fertilizer were higher than that of 30 kg/hm². The root diameter and root volume of quinoa under 60 kg/hm² N fertilizer were higher than that of other treatments. The yield and single plant weight of quinoa under 60 kg/hm² N application were higher than other treatments and tuber weight was 74.6%, 86.8% and 40.3% higher than the control respectively. Under the same N application amount and 1 : 2 base to topdressing ratio, the comprehensive performance of quinoa plant was the best, with a moderate plant height, relatively thick stalk and largest plant weight. In conclusion, a moderate amount of N fertilizer application (60 kg/hm²) along with an appropriate ratio of topdressing fertilizer applying during quinoa fertility stage could alleviate the osmotic stress caused by imbalance between the concentration of soil solution and the infiltration potential of root cells through the adjustment in physiological metabolism and root morphology, consequently, reduce the degree of lipid peroxidation and cell membrane damage of quinoa root system, improve the plant growth and development. With 60 kg/hm² N application amount and 1 : 2 base to topdressing ratio, the comprehensive economic characters were the best.

Key words: nitrogen application rate; ratio of base to topdressing; quinoa; root morphological; root physiological traits