

网络出版时间:2024-11-11

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.s.20241108.1414.002

有机肥氮替代化肥氮对青稞生长特性、叶片碳氮平衡和氮代谢酶活性的影响

闫佳会, 翁 华, 何 涛

(青海大学/省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海西宁 810016)

摘 要: 为探讨青藏高原有机肥氮替代化肥氮对青稞生长及碳氮代谢的影响, 在氮磷钾施用量相同条件下, 通过盆栽试验, 比较分析了不同比例有机肥氮替代化肥氮(0%、40%和100%, 分别记为 ORF0、ORF40、ORF100)处理下青稞品种昆仑14号生长特性、叶片碳氮平衡和氮代谢酶活性的差异。结果表明, 与 ORF0 处理相比, ORF40 处理下青稞的根系长度、老叶碳氮比均显著增加($P < 0.05$), 株高及地上部和根系生物量变化不显著; ORF100 处理下株高和地上部生物量均显著降低, 根系长度和生物量均显著增加, 新叶的碳氮比显著提高。与 ORF0 处理相比, ORF40 处理的老叶中谷氨酸合成酶(GOGAT)和谷氨酸脱氢酶(GDH)活性在苗期至扬花期分别增加 1.18%~2.53%和 17.39%~39.40% ($P < 0.05$); ORF100 处理的新叶和老叶 GOGAT 活性无明显变化规律, GDH 活性显著降低。ORF40 处理的新叶谷氨酰胺合成酶(GS)活性在抽穗期和扬花期均高于 ORF0 处理, 新叶中谷草转氨酶(GOT)活性在苗期至扬花期显著增加, 增幅 22.22%~35.29%; ORF100 处理的新叶和老叶 GS 活性均显著下降。综合来看, 与 ORF0 处理相比, ORF40 处理下青稞根长和株高变化较小, 叶片拥有更稳定的碳氮比, 且老叶中谷氨酸合成酶和谷氨酸脱氢酶活性增加, 新叶中 GS 活性和 GOT 增加, ORF40 处理的新叶与老叶都保持了一定的氮代谢能力, 其中老叶的氮代谢能力更为稳定, 说明适宜比例的有机肥替代化肥有助于青稞植株稳健生长和碳氮代谢。

关键词: 青稞; 有机肥替代; 生长特性; 碳氮比; 氮代谢酶

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2025)01-0121-09

Effects of Replacing Chemical Fertilizers Nitrogen with Organic Fertilizers Nitrogen on Growth Characteristics, Leaf Carbon and Nitrogen Balance and Nitrogen Metabolism Enzyme Activities of Hulless barley

YAN Jiahui, WENG Hua, HE Tao

(Qinghai University/ State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Xining, Qinghai 810016, China)

Abstract: To explore the effects of organic fertilizer nitrogen replacing chemical fertilizer nitrogen on the growth, carbon and nitrogen metabolism of hulless barley in the Qinghai Tibet Plateau, pot experiments were conducted under the same nitrogen, phosphorus, and potassium application rates. The differences in growth characteristics, leaf carbon and nitrogen balance, and nitrogen metabolism enzyme activity of hulless barley variety Kunlun 14 were compared and analyzed among different proportions of organic fertilizer nitrogen replacing chemical fertilizer nitrogen (0%, 40%, and 100%, designated as ORF0, ORF40, and ORF100) treatments. The results showed that compared with ORF0, the root length and old leaf carbon to nitrogen ratio of hulless barley significantly increased under ORF40 treatment, while the changes in plant height, aboveground or root biomass were not significant. Under ORF100 treatment, plant height and aboveground biomass significantly decreased,

收稿日期: 2023-09-21

修回日期: 2023-11-17

基金项目: 青海省应用基础研究计划 (2023-ZJ-930M)

第一作者 E-mail: 15209787170@163.com (闫佳会)

通讯作者 E-mail: hetaoxn@aliyun.com (何 涛)

but root length and biomass significantly increased ($P < 0.05$), and carbon to nitrogen ratio of new leaves significantly increased. Compared with ORF0 treatment, the activities of glutamate synthase (GOGAT) and glutamate dehydrogenase (GDH) in old leaves under ORF40 treatment were increased by 1.18%–2.53% and 17.39%–39.40%, respectively, from seedling stage to flowering stage. The GOGAT activity of new and old leaves under ORF100 treatment showed no significant difference, while the GDH activity significantly decreased. The activity of glutamine synthetase (GS) in the new leaves under ORF40 treatment was higher than that under ORF0 treatment during the heading and flowering stages. The activity of glutamine aminotransferase (GOT) in the new leaves was significantly increased by 22.22%–35.29% from seedling stage to flowering stage ($P < 0.05$). The GS activity of both new and old leaves under ORF100 treatment significantly decreased. Overall, compared with the ORF0 treatment, the ORF40 treatment showed less variation in root length and plant height of hulless barley. The leaves showed more stable C/N, and the activities of GS and GDH increased in the old leaves, while the activities of GS and GOT increased in the new leaves. Both the new and old leaves under ORF40 treatment maintained a certain level of nitrogen metabolism ability, with the nitrogen metabolism ability of the old leaves being more stable, indicating that an appropriate proportion of organic fertilizer replacing chemical fertilizers is helpful for the stable growth and carbon and nitrogen metabolism of hulless barley plants.

Keywords: Hulless barley; Organic fertilizer substitution; Growth characteristics; Carbon to nitrogen ratio; Nitrogen metabolism enzymes

从 20 世纪 60 年代开始,中国化肥的使用量呈现逐年上升的趋势,是欧盟和美国化肥使用量的 2.5 倍左右^[1-2]。由于长期过量使用化肥,导致化肥平均利用率仅为 40.2%^[3],远低于国外(50%)^[4]。据调查,中国大部分农业区的化肥投入量均已超过 500 kg·hm⁻²^[5],山东麦类种植区域氮肥平均使用量为 553 kg·hm⁻²^[6],陕西关中平原麦类作物种植区氮肥使用量过高的用户已经超过了 60%^[7]。氮肥的过量施用不仅显著降低氮肥利用效率,增加生产成本,而且氮素会向环境中迁移,引起土壤酸化^[8]、硝酸盐淋溶^[9]、地下水硝酸盐污染^[10]等问题。因此,在降低化肥尤其是氮肥的施用量后,如何实现粮食安全和环境可持续发展的双赢目标,是现今急需解决的现实问题。

农田施用有机肥后能够显著改善土壤理化性状^[11]和土壤微生物群落结构^[12],促进植物根系生长和养分代谢。增施有机肥对于作物的根体积、根长、根尖数有显著的正向效应^[13-14]。与氮代谢密切相关的谷氨酸合成酶(GOGAT)、亚硝酸还原酶(NiR)、谷氨酰胺合成酶(GS)和硝酸还原酶(NR)的活性高低直接影响作物氮素利用率^[15]。研究发现,与化肥相比,基施生物炭后水稻根系 GS 活性增加了 1.38%^[16],施用维生素 C 工业废弃液后结球甘蓝 NiR、GS 和 GOGAT 的

基因表达水平显著上调,促进了结球甘蓝对氮素的同化作用^[17];有机肥替代 20%~60% 的化肥氮能显著提高糯玉米氮肥偏生产力和氮肥农学效率^[18];有机肥替代化肥氮后,棉花氮肥利用率上升了 8.4%~11.0%^[19];长期定位试验中,秸秆还田和有机肥配合替代小麦季 33% 的氮磷钾化肥可显著提高氮肥农学效率^[20]。以上研究结果表明,有机肥部分替代化肥有助于作物氮素利用。

青稞(*Hordeum vulgare* L. var. *nudum* Hook. f.)又名裸大麦,是世界上最古老的谷类作物之一^[21],同时也是青藏高原最重要的粮食作物^[22]。有机肥部分替代化肥可保障青稞出苗率,促进植株生长发育和干物质积累^[23],增加产量^[24]。目前针对有机肥替代化肥在青稞上的效应研究相对较少,且多关注于产量性状,缺乏对青稞氮代谢酶的相关探讨。本研究以青稞品种昆仑 14 号为试验材料,分析了不同比例有机肥氮替代化肥氮对青稞生长参数、叶片碳氮平衡和氮代谢酶活性的影响,以期对青稞合理施肥和绿色生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试青稞品种为昆仑 14 号,来源于青海省农

林科学院作物研究所。有机肥选用史丹利商品有机肥($N:P_2O_5:K_2O=5.89:1.12:0.81$),其有机质含量为 52.33%。试验所用化肥为尿素($N=46\%$),硫酸钾($K_2O=12\%$),过磷酸钙($P_2O_5=12\%$)。基质土样于 2022 年 3 月在青海省农林科学院二十里铺试验站采集($101^{\circ}74'E, 36^{\circ}56'N, H:2\,261\,m$),风干后过 2 mm 筛备用。土壤类型为栗钙土,有机质、全氮、硝态氮、铵态氮、碱解氮、速效钾和速效磷含量分别为 $25.03\,g\cdot kg^{-1}$ 、 $1.36\,g\cdot kg^{-1}$ 、 $12.42\,mg\cdot kg^{-1}$ 、 $5.37\,mg\cdot kg^{-1}$ 、 $144.0\,mg\cdot kg^{-1}$ 、 $136.0\,mg\cdot kg^{-1}$ 和 $28.8\,mg\cdot kg^{-1}$, pH 值 8.22。

1.2 试验设计

试验采用盆栽方式在青海省农林科学院植物保护研究所温室进行,试验期昼/夜气温为 $12.5^{\circ}C/22.0^{\circ}C$,相对湿度为 60.0%。试验设置 0%、40% 和 100% 三个有机肥替代化肥氮比例,分别记为 ORF0、ORF40 和 ORF100。每个处理 N、P、K 总施用量保持一致。其中,ORF0 处理施尿素 357 mg、过磷酸钙 1 545 mg 和硫酸钾 140 mg;ORF40 处理施尿素 215 mg、过磷酸钙 1 443 mg、硫酸钾 122 mg 和有机肥 1 117 mg;ORF100 处理施用过磷酸钙 1 289 mg、硫酸钾 96 mg 和有机肥 2 793 mg。各处理每盆用土均为 3.5 kg,所有肥料与土壤混合均匀后装入塑料花盆(口径 21 cm、底径 14 cm、高 17.5 cm),每个处理 40 盆,共计 120 盆,保持土壤饱和持水量为 60%。2022 年 4 月 10 日种植,出苗后每盆定苗 10 株,每个处理分别在青稞苗期(2022 年 5 月 5 日)、拔节期(2022 年 5 月 21 日)、抽穗期(2022 年 5 月 31 日)、扬花期(2022 年 6 月 13 日)随机选取 10 盆用于生长参数、碳氮含量和氮代谢酶活性研究。

1.3 生长参数的测定

将花盆剪开,带土取出青稞根部放入清水中浸泡至土壤松散后冲洗干净,用滤纸吸干水分,用直尺测量株高、主根和须根累计根长,用天平分别称量地上和地下部分鲜重;于烘箱中 $120^{\circ}C$ 杀青 30 min, $80^{\circ}C$ 烘干至恒重,计算地上和地下部干重。

1.4 碳氮含量测定

参考 Liu 等^[25]的方法定义植株顶部的第一片叶为新叶,植株最底部第一片叶为老叶。将青稞苗期、拔节期、抽穗期和扬花期 4 个生育时期的

新叶与老叶鲜样置于烘箱中 $105^{\circ}C$ 杀青 30 min,后于 $65^{\circ}C$ 烘干至恒重后粉碎,进行全碳和全氮含量测定。全碳含量采用气体稳定同位素质谱仪(Isoprime100)进行测定,全氮含量用元素分析仪(elementar UNICUBE)测定。碳氮比即为全碳含量与全氮含量的比值。

1.5 氮代谢相关酶活性测定

在青稞苗期、拔节期、抽穗期和扬花期 4 个生育时期内分别采集新叶和老叶进行氮代谢相关酶活性测定。谷丙转氨酶(GPT)、GOGAT、谷草转氨酶(GOT)、NR、谷氨酸脱氢酶(GDH)、GS 活性均利用试剂盒(苏州科铭生物技术有限公司)进行测定,各酶的活性计算均按照样本鲜重计算。其中 GOT 和 GPT 以每克组织每分钟催化产生 1 nmol 丙酮酸定义为一个酶活性单位。GOGAT 和 GDH 以每克组织每分钟消耗 1 nmol NADH 定义为一个酶活力单位。NR 以每分钟每克鲜重样品中催化减少 1 nmol NADH 的量为一个酶活性单位。GS 以每克组织在每毫升反应体系中每小时产生 1 μ mol γ -谷氨酰基异羟肟酸定义为一个酶活性单位。

1.6 数据处理

数据的整理和图形的绘制采用 Excel 2016,用 SPSS 21.0 对碳氮含量及氮代谢酶等相关指标进行方差分析,以邓肯新复极差法(DMRT)检验处理间差异显著性。

2 结果与分析

2.1 有机肥氮替代化肥氮对青稞生长的影响

有机肥氮替代化肥氮对青稞的株高和根长均有影响(表 1)。与 ORF0 处理相比,ORF100 处理的株高除了苗期外其余生育时期均显著降低($P<0.05$)降幅 3.9%~17.76%,根长各时期均显著增加,增幅 5.02%~6.62%;ORF40 的株高与 ORF0 处理各时期无显著性差异,根长显著增加(3.60%~4.39%)。ORF100 处理的根长略高于 ORF40 处理,差异不显著。

由图 1 可知,与 ORF0 处理相比,ORF100 处理的各生育期地上部鲜重和干重均显著降低,降幅分别为 14.74%~27.06%和 14.40%~30.34%,地下部鲜重和干重则显著增加,增幅分别为 7.94%~18.95%和 18.67%~51.43%;ORF40 处理的地上部鲜重和干重在苗期、拔节期和抽穗期均下降,降幅分别为 0.35%~1.61%和 2.04%~3.57%,

表 1 不同比例有机肥氮替代化肥氮下青稞株高和根长的差异

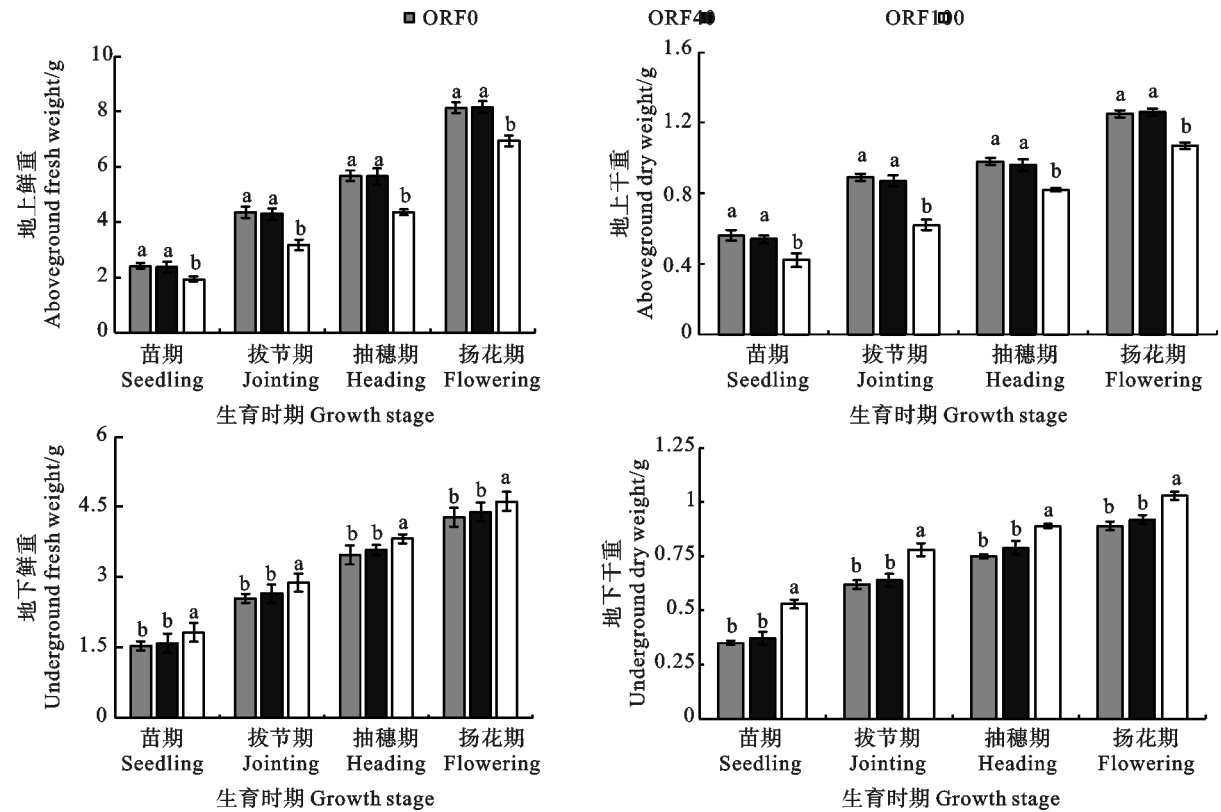
Table 1 Difference of plant height and root length of hulless barley under different organic fertilizer nitrogen substituting chemical fertilizers nitrogen treatments

cm

处理 Treatment	生育时期 Growth stage							
	苗期 Seedling		拔节期 Jointing		抽穗期 Heading		扬花期 Flowering	
	株高 Height	根长 Root length	株高 Height	根长 Root length	株高 Height	根长 Root length	株高 Height	根长 Root length
ORF0	15.4a	9.1b	34.2a	17.4b	58.7a	28.2c	62.5a	39.7b
ORF40	14.9a	9.5a	34.3a	18.2a	57.4a	29.4b	63.2a	41.2a
ORF100	14.8a	9.6a	29.7b	18.4a	49.7b	30.2a	51.4b	41.8a

同列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平下差异显著。下同。

Values marked with different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments at 0.05 level. The same in table 2.



图注上不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平上差异显著。图 2 同。

Different lowercase letters above columns indicate significant differences among treatments at 0.05 level. The same in figure 2.

图 1 不同比例有机肥氮替代化肥氮对不同生育期青稞鲜重及干重的影响

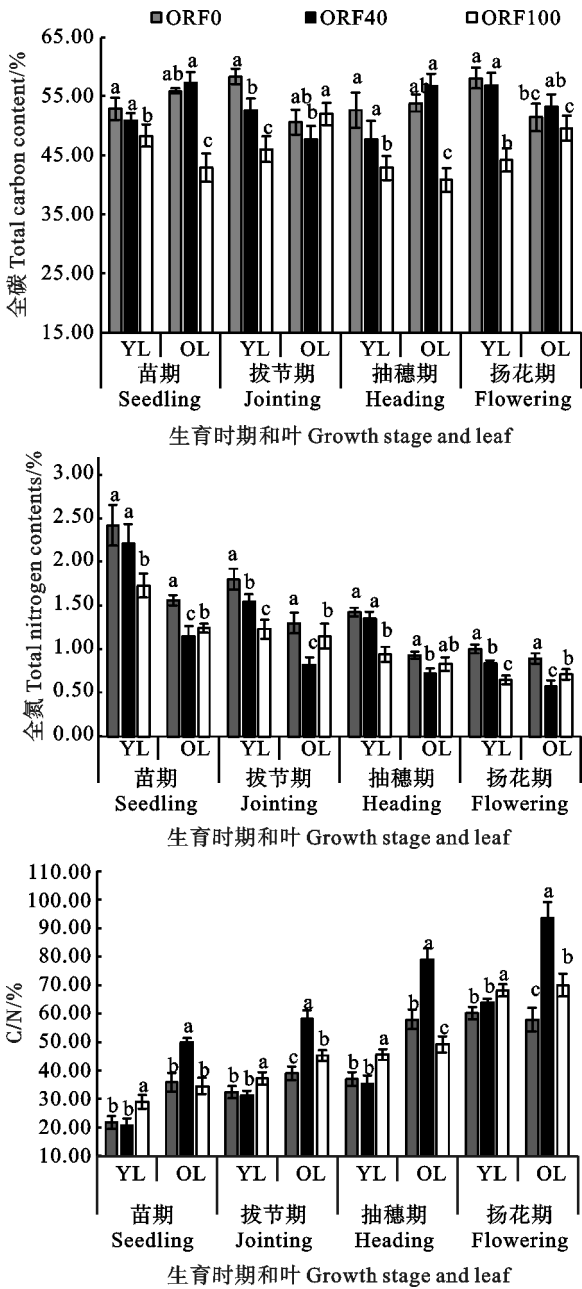
Fig. 1 Effects of different organic fertilizer nitrogen substituting chemical fertilizer nitrogen on the fresh weight and dry weight of hulless barley at different growth stages

在扬花期地下部鲜重和干重均增加,增幅分别为 2.57%~3.92%和 3.23%~5.71%。有机肥氮替代化肥氮比例为 40%时,降低了青稞地上部生物量,增加了根部生物量,但差异均不显著;有机肥氮替代化肥氮比例为 100%时,降低了青稞地上部

生物量($P<0.05$),增加了根部生物量($P<0.05$)。

2.2 不同比例有机肥氮替代化肥氮对青稞碳氮含量的影响

由图 2 可知,与 ORF0 处理相比,ORF100 处理的新叶全氮和全碳含量在 4 个生育时期均显著



YL: 青稞新叶; OL: 青稞老叶。
YL: Young leaves; OL: Old leaves.

图 2 不同比例有机肥氮替代化肥氮对青稞新叶与老叶全碳全氮含量的影响

Fig. 2 Effects of different organic fertilizer nitrogen substituting chemical fertilizer nitrogen on total carbon and total nitrogen contents in young and old leaves of hulless barley

下降,分别下降了 0.35~0.69 个百分点和 2.53~13.8 个百分点;老叶全氮含量下降了 0.10~0.32 个百分点,全碳含量除拔节期外均显著下降。ORF40 处理的新叶的全氮和全碳含量较 ORF0 处理分别下降了 0.07~0.26 个百分点和 1.21~5.65 个百分点,老叶的全氮含量显著下降了 0.21~0.48

个百分点,全碳含量仅在拔节期显著下降,其余时期变化不显著。总体来说,ORF100 处理老叶全氮和全碳含量及新叶全碳含量的下降幅度均大于 ORF40 处理。ORF100 处理的新叶的碳氮比较 ORF0 处理显著增加,增加 4.99~8.55 个百分点,而老叶的碳氮比除苗期外均显著增加或显著降低;ORF40 处理老叶的碳氮比显著增加,增加 13.96~35.73 个百分点,而新叶的碳氮比无显著性变化。这表明,ORF40 处理下青稞新叶具有稳定的碳氮代谢。

2.3 不同比例有机肥氮替代化肥氮对青稞氮代谢酶活性的影响

由表 3 可知,在 4 个生育时期,与 ORF0 处理相比,ORF40 和 ORF100 处理下青稞老叶 NR 活性均显著下降,分别下降 15.63%~24.93% 和 28.53%~36.01%,新叶 NR 的活性则无明显变化规律。ORF100 处理的老叶和新叶的 GS 活性较 ORF0 均显著下降,降幅分别为 29.50%~43.82% 和 22.74%~39.55%;ORF40 处理的老叶 GS 活性下降 5.62%~11.92%,新叶中 GS 活性在苗期和拔节期下降,在抽穗期和扬花期增加,但变化均不显著。ORF100 处理的新叶和老叶 GDH 活性均显著下降,ORF40 处理新叶的 GDH 活性较 ORF0 处理下降不显著,老叶显著增加。ORF100 处理的新叶和老叶 GOGAT 活性无明显规律性变化,ORF40 处理新叶 GOGAT 活性下降,但与 ORF0 处理差异不显著。ORF100 处理的新叶和老叶 GOT 活性增加,但与 ORF0 处理差异不显著;ORF40 处理新叶 GOT 活性显著增加,增幅 22.22%~33.96%。ORF100 处理新叶 GPT 活性较 ORF0 处理显著增加,增加 26.32%~35.29%,ORF40 处理新叶 GPT 活性仅在扬花期增加不显著。

3 讨论

3.1 有机肥氮替代化肥氮对青稞生长发育的影响

研究发现,有机肥氮替代部分化肥氮可以促进玉米、小麦、水稻、大葱、桧柑等作物植株生长发育,但氮替代比例过高,则会产生抑制作用^[26-30]。100% 有机肥氮替代化肥氮后,水稻产量大幅下降^[31],小麦、玉米的穗粒数和氮素吸收利用效率显著降低^[32],玉米籽粒氮素累积量减少^[33]。在有机肥和无机肥比例为 3:7 时,西瓜总根长、比根表面积、根体积和根尖数显著提高^[14]。本研究结果也显示,ORF100 处理下青稞的地上部生物量

表 2 不同比例有机肥替代化肥氮对青稞新叶和老叶氮代谢酶活性的影响
Table 2 Effects of different organic fertilizer substituting chemical fertilizer nitrogen on nitrogen metabolism enzyme activities of young and old leaves of hullless barley

叶片 Leaf	酶 Enzyme	苗期 Seedling stage			拔节期 Jointing stage			抽穗期 Heading stage			扬花期 Flowering stage		
		ORF0	ORF40	ORF100	ORF0	ORF40	ORF100	ORF0	ORF40	ORF100	ORF0	ORF40	ORF100
新叶 Young leaf	NR/ (nmol · min ⁻¹ · g ⁻¹)	45.79b	56.3a	36.55c	47.98c	67.33b	84.76a	83.19a	82.23a	59.12b	30.22c	34.09ab	38.34a
	NADH-GOGAT/ (nmol · min ⁻¹ · g ⁻¹)	126.95b	125.6b	147.86a	145.73a	142.56a	121.35b	151.51a	147.56a	123.47b	210.27a	207.24a	211.06a
	GDH/ (nmol · min ⁻¹ · g ⁻¹)	165.77a	163.45a	154.23b	221.37a	220.45a	184.52b	253.74a	251.51a	214.53b	319.22a	316.25a	276.03b
	GS/ (μmol · h ⁻¹ · g ⁻¹)	11.08a	10.25a	8.56b	6.48a	5.63a	4.12b	4.58a	4.63a	3.12b	8.82a	8.93a	5.32b
	GOT/ (μmol · min ⁻¹ · g ⁻¹)	1.10b	1.35a	1.13b	1.06b	1.31a	1.11b	1.06b	1.42a	1.13b	1.08b	1.32a	1.12b
老叶 Old leaf	GPT/ (μmol · min ⁻¹ · g ⁻¹)	0.17c	0.20b	0.23a	0.19b	0.23a	0.24a	0.14b	0.19a	0.18a	0.19b	0.20b	0.25a
	NR/ (nmol · min ⁻¹ · g ⁻¹)	35.48a	28.56b	25.24c	38.59a	32.56b	27.58c	80.25a	60.24b	52.36c	45.26a	35.45b	28.96c
	NADH-GOGAT/ (nmol · min ⁻¹ · g ⁻¹)	143.52a	145.21a	147.86a	145.73a	147.62a	132.45b	151.51b	155.34b	176.07a	210.27a	214.23a	185.23b
	GDH/ (nmol · min ⁻¹ · g ⁻¹)	172.35b	202.32a	152.31c	223.11b	310.86a	186.23c	253.74b	305.6a	219.56c	319.22b	405.21a	302.5b
	GS/ (μmol · h ⁻¹ · g ⁻¹)	13.56a	12.25a	9.56b	7.86a	6.92ab	5.24c	6.58a	6.21ab	4.56c	9.63a	8.95ab	5.41c
	GOT/ (μmol · min ⁻¹ · g ⁻¹)	1.09a	1.10a	1.12a	1.03a	1.04a	1.05a	1.06a	1.11a	1.12a	1.04a	1.12a	1.08a
	GPT/ (μmol · min ⁻¹ · g ⁻¹)	0.15a	0.14a	0.14a	0.18a	0.17a	0.17a	0.17a	0.18a	0.12b	0.16a	0.17a	0.11b

在各时期及株高除苗期外其余生育时期较 ORF0 处理均显著降低,根长则显著增加,而 ORF40 处理仅根长显著增加,根系生物量变化均不显著。植物的生长发育与根系密切相关,根系长度直接决定了根系与土壤的接触面积,进而影响根系氮素获取能力。在 ORF100 和 ORF40 处理下青稞根系长度的增加,表明青稞通过调节根系伸长生长来适应可吸收氮素的减少,但在 ORF100 处理中根系伸长生长不足以弥补氮素缺损带来的影响,所以导致与 ORF40 处理相比,地上部生长明显受抑。

3.2 有机肥氮替代化肥氮对青稞碳氮平衡的影响

碳代谢为氮素吸收提供能量,而氮代谢产生的关键酶和结构蛋白又为碳代谢提供重要的底物^[34-35]。有机肥中的氮主要以有机的形式存在,释放到土壤中的速度较无机氮慢,能被植物有效利用的少,因此有机肥处理的土壤中储存的氮较多^[36-37]。研究表明,在有机肥氮 100% 替代化肥氮时,玉米植株氮素积累量显著降低,而在有机肥氮替代比例为 20%、40%、60% 时,玉米植株氮素积累量增加,与全化肥处理无差异^[18]。在本研究中也得到了类似的结果,ORF100 处理下青稞新叶和老叶中的全氮含量较 ORF0 处理显著降低,而 ORF40 处理在苗期和抽穗期全氮含量与 ORF0 处理无差异,表明 ORF40 处理较 ORF100 处理更能保持植物体内氮素的稳定。叶片的衰老与碳氮比值紧密相关,碳氮比值增加会导致叶片衰老^[38]。不同比例有机肥氮替代化肥氮中,ORF40 处理下青稞具有更稳定的碳氮比,特别是在新叶中,表明 ORF40 处理可能通过生理代谢的调整来维持青稞碳、氮代谢平衡,保证植株生长。

3.3 有机肥氮替代化肥氮对青稞氮代谢相关酶的影响

有机肥替代化肥条件下水稻老叶 GOGAT 活性显著增加,GS 活性则保持稳定^[16]。而在本研究中也得到了类似的研究结果,ORF40 和 ORF100 处理的青稞叶片 GS 活性受到抑制,特别是 ORF100 处理下老叶的酶活性降低最为明显。在 ORF40 处理下青稞老叶中 GS 活性受抑制程度大于新叶。青稞新叶保持稳定的 GS 活性,是其适应中度有机肥替代条件的一种策略。葛小艺^[17]发现,施用维生素 C 工业废弃液古龙酸母液,甘蓝叶片中与谷氨酸合成相关的基因显著上调。本研究也证实了,青稞新叶 GOGAT 和

GDH 活性在 ORF40 处理下均减少,老叶均增加。这两个关键酶活性变化的趋势相同,也说明了在 ORF40 处理中,不论是新叶还是老叶都在有机氮替代下努力维持内部的碳氮平衡。

4 结论

本试验条件下,有机肥氮替代化肥氮比例为 40% 时,青稞叶片拥有更稳定的 C/N,且新叶与老叶都保持了一定的氮代谢能力,其中老叶的氮代谢能力更为稳定。

参考文献:

- [1] 裴雪霞,党建友,张定一,等. 化肥减施下有机替代对小麦产量和养分吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2020, 26(10): 1768.
- [2] PEI X X, DANG J Y, ZHANG D Y, *et al.* Effects of organic substitution on the yield and nutrient absorption and utilization of wheat under chemical fertilizer reduction [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(10): 1768.
- [3] 裴宇. 饼肥替代不同比例尿素对柑橘产量品质、树体营养及橘园土壤养分的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020: 3.
- [4] PEI Y. The impacts of cake fertilizer replacing different proportions of urea on *Citrus* yield quality, tree nutrients and soil fertility in *Citrus* orchard [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020: 3.
- [5] [3] 中华人民共和国农业农村部. 数据查询[DB/OL]. (2022-01-03), <http://zdcscxx.moa.gov.cn:8080/nyb/pc/search.jsp>. Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Data search module [DB/OL]. (2022-01-03). <http://zdcscxx.moa.gov.cn:8080/nyb/pc/search.jsp>.
- [6] [4] 何舒乐. 有机肥与化肥不同施用水平对矮化苹果生长、结果的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018: 7.
- [7] HE S L. Effect of nitrogen and organic fertilizer application on the dwarf apple [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018: 7.
- [8] [5] CUI Z L, CHEN X P, ZHANG F S. Current nitrogen management status and measures to improve the intensive wheat-maize system in China [J]. *AMBIO*, 2010, 39(5-6): 376.
- [9] [6] 寇长林, 巨晓棠, 张福锁. 三种集约化种植体系氮素平衡及其对地下水硝酸盐含量的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(4): 660.
- [10] KOU C L, JU X T, ZHANG F S. Nitrogen balance and its effects on nitrate-N concentration of groundwater in three intensive cropping systems of North China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(4): 660.
- [11] [7] 常艳丽, 刘俊梅, 李玉会, 等. 陕西关中平原小麦/玉米轮作体系施肥现状调查与评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(8): 51.
- [12] CHANG Y L, LIU J M, LI Y H, *et al.* Investigation and evaluation of fertilization under winter wheat and summer maize

- rotation system in Guanzhong Plain, Shaanxi Province [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2014, 42(8): 51.
- [8] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands [J]. *Science*, 2010, 327 (5968): 1008.
- [9] ZHOU J, GU B, SCHLESINGER W H, *et al.* Significant accumulation of nitrate in Chinese semi-humid croplands [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 25088.
- [10] 张文芮, 张妍, 石雯敏, 等. 渭河流域关中段地下水硝态氮来源解析[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(10): 4758.
- ZHANG W R, ZHANG Y, SHI W M, *et al.* The source identification of nitrate in groundwater in Guanzhong section of Weihe River Basin [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(10): 4758.
- [11] 张久明, 匡恩俊, 刘亦丹, 等. 有机肥替代不同比例化肥对土壤有机碳组分的影响[J]. *麦类作物学报*, 2021, 41 (12): 1534.
- ZHANG J M, KUANG E J, LIU Y D, *et al.* Effect of different proportions of labile organic fertilizer substituted by nitrogen fertilizer on components of soil organic carbon [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(12): 1534.
- [12] 王庆, 海江波, 岳忠娜, 等. 化肥减量对麦田土壤微生物量及微生物区系的影响[J]. *麦类作物学报*, 2012, 32(3): 484.
- WANG Q, HAI J B, YUE Z N, *et al.* Effects of chemical fertilizer reduction on soil microbiological and microbial biomass in wheat field [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2012, 32(3): 484.
- [13] SINGH K N, PRASAD B, SINHA S K. Effect of integrated nutrient management on a typic haplaquent on yield and nutrient availability in a rice-wheat cropping system [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2001, 52(8): 855.
- [14] 王明友, 张红, 李士平. 味精废浆有机肥对西瓜根系特性与根际土壤腐殖质组成的影响[J]. *水土保持通报*, 2015, 35 (5): 205.
- WANG M Y, ZHANG H, LI S P. Effects of monosodium glutamate wastewater manure on root characteristics and humus composition in rhizosphere soil of watermelon [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(5): 205.
- [15] 杨凯, 吴倩, 蒲瑶瑶, 等. 熏蒸条件下有机肥部分替代化肥对西瓜光合和氮代谢酶活性的影响[J]. *土壤通报*, 2020, 51 (4): 905.
- YANG K, WU Q, PU Y Y, *et al.* Effects of partial substitution for chemical fertilizer by organic fertilizer on activities of photosynthetic enzyme and nitrogen metabolism enzyme of watermelon under fumigation [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(4): 905.
- [16] 隋世江, 金丹丹, 战莘晔, 等. 生物炭基肥对水稻根系有机酸积累和氮代谢的影响[J]. *辽宁农业科学*, 2023(1): 18.
- SUI S J, JIN D D, ZHAN S Y, *et al.* Effect of biochar-based fertilizer on organic acid accumulation and nitrogen metabolism in rice roots [J]. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2023 (1): 18.
- [17] 葛小艺, 高明夫, 徐慧. 维C工业废母液对不结球白菜氮素利用及品质的影响[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(8): 2448.
- GE X Y, GAO M F, XU H. Effects of industrial vitamin C production-residue after evaporation on nitrogen utilization and quality of non-heading Chinese cabbage [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(8): 2448.
- [18] 娄菲, 左悺平, 李萌, 等. 有机肥替代部分化肥氮对糯玉米产量、品质及氮素利用的影响[J]. *作物学报*, 2024, 50 (4): 1053.
- LOU F, ZUO Z P, LI M, *et al.* Effects of organic fertilizer substituting chemical fertilizer nitrogen on yield, quality, and nitrogen efficiency of waxy maize [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(4): 1053.
- [19] 杨国江, 陈云, 林祥群, 等. 氮肥减施下有机肥替代对滴灌棉花产量、氮素吸收利用及土壤硝态氮的影响[J]. *新疆农业科学*, 2023, 60(9): 2138.
- YANG G J, CHEN Y, LIN X Q, *et al.* Effects of organic fertilizer replacement on the yield and nutrient absorption of cotton and nitrate nitrogen under chemical fertilizer reduction [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2023, 60(9): 2138.
- [20] 吴金芝, 肖慧淑, 郭锦花, 等. 秸秆还田和有机肥配合替代1/3化肥对旱地玉米产量、蛋白质含量和化肥利用效率影响[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(4): 319.
- WU J Z, XIAO H S, GUO J H, *et al.* Effects of straw returning combined with organic fertilizer replacing 1/3 chemical fertilizer on grain yield, grain protein and chemical fertilizer use efficiency in dryland maize-wheat double cropping system [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(4): 319.
- [21] PANKIN A, VONK M. Co-evolution of methods and thoughts in cereal domestication studies: A tale of barley (*Hordeum vulgare*) [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2017, 36: 15.
- [22] ZENG X, GUO Y, XU Q, *et al.* Origin and evolution of Qingke barley in Tibet [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 5433.
- [23] 马瑞萍, 尼玛扎西, 高雪, 等. 不同有机肥与化肥配施对西藏青稞生长发育与产量的影响[J]. *大麦与谷类科学*, 2018, 35 (5): 17.
- MA R P, NI M Z X, GAO X, *et al.* Effects of organic fertilizers combined with chemical fertilizers on the growth and yield of Tibetan hulless barley [J]. *Barley and Cereal Sciences*, 2018, 35(5): 17.
- [24] 乔颖颖, 胥婷婷, 张洋, 等. 青海高原地区有机肥替代对青稞产量、养分吸收量和土壤肥力的影响[J]. *青海大学学报*, 2022, 40(6): 9.
- QIAO B Y, XU T T, ZHANG Y, *et al.* Effects of organic fertilizer replacement on the yield, nutrient absorption and soil fertility of *Hordeum vulgare* in Qinghai plateau [J]. *Journal of Qinghai University*, 2022, 40(6): 9.
- [25] LIU Y, LI M X, XU J S, *et al.* Physiological and metabolo-

- mics analyses of young and old leaves from wild and cultivated soybean seedlings under low-nitrogen conditions [J]. *BMC Plant Biology*, 2019, 19(1): 389.
- [26] 刘占军, 谢佳贵, 张宽, 等. 有机肥磷替代化肥磷对春玉米干物质积累和磷素吸收的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(2): 123.
- LIU Z J, XIE J G, ZHANG K, *et al.* Biomass accumulation and phosphorus uptake of spring maize as influenced by organic manure substitution for chemical phosphate [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2011, 19(2): 123.
- [27] 张奇茹, 谢英荷, 李廷亮, 等. 有机肥替代化肥对旱地小麦产量和养分利用效率的影响及其经济环境效应[J]. 中国农业科学, 2020, 53(23): 4866.
- ZHANG Q R, XIE Y H, LI T L, *et al.* Effects of organic fertilizers replacing chemical fertilizers on yield, nutrient use efficiency, economic and environmental benefits of dryland wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(23): 4866.
- [28] 陈香碧, 胡亚军, 秦红灵, 等. 稻作系统有机肥替代部分化肥的土壤氮循环特征及增产机制[J]. 应用生态学报, 2020, 31(3): 1033.
- CHEN X B, HU Y J, QIN H L, *et al.* Characteristics of soil nitrogen cycle and mechanisms underlying the increase in rice yield with partial substitution of mineral fertilizers with organic manure in a paddy ecosystem: A review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(3): 1033.
- [29] 闫佳会, 侯璐, 姚强, 等. 有机肥替代化肥对大葱产量、品质和土壤氮淋失的影响[J]. 西北农业学报, 2020, 29(8): 1243.
- YAN J H, HOU L, YAO Q, *et al.* Effect of chemical fertilizer substitution with organic fertilizer on *Allium fistulosum* L. yield, quality and soil nitrogen leaching [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2020, 29(8): 1243.
- [30] 万连杰, 何满, 田洋, 等. 有机肥替代化肥比例对槲栎生长发育、产量和土壤生物学特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(4): 675.
- WAN L J, HE M, TIAN Y, *et al.* Effects of partial substitution of chemical fertilizer with organic fertilizer on Ponkan growth and yield and soil biological properties [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(4): 675.
- [31] 刘红江, 陈虞雯, 孙国峰, 等. 有机肥-无机肥不同配施比例对水稻产量和农田养分流失的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(2): 405.
- LIU H J, CHEN Y W, SUN G F, *et al.* Effects of different organic-inorganic fertilizer combination ratios on rice yield and nutrient loss with surface run off [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(2): 405.
- [32] 吕凤莲, 侯苗苗, 张弘弢, 等. 壤土冬小麦-夏玉米轮作体系有机肥替代化肥比例研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 22.
- LV F L, HOU M M, ZHANG H T, *et al.* Replacement ratio of chemical fertilizer nitrogen with manure under the winter wheat-summer maize rotation system in Lou soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1): 22.
- [33] 谢军, 赵亚南, 陈轩敬, 等. 有机肥氮替代化肥氮提高玉米产量和氮素吸收利用效率[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20): 3934.
- XIE J, ZHAO Y N, CHEN X J, *et al.* Nitrogen of organic manure replacing chemical nitrogenous fertilizer improve maize yield and nitrogen uptake and utilization efficiency [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(20): 3934.
- [34] NUNES-NESE A, FERNIE A R, STITT M. Metabolic and signaling aspects underpinning the regulation of plant carbon nitrogen interactions [J]. *Molecular Plant*, 2010, 3(6): 973.
- [35] BRITTO D T, KRONZUCKER H J. NH_4^+ toxicity in higher plants: A critical review [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2002, 159(6): 567.
- [36] IQBAL A, HE L, KHAN A, *et al.* Organic manure coupled with inorganic fertilizer: An approach for the sustainable production of rice by improving soil properties and nitrogen use efficiency [J]. *Agronomy*, 2019, 9(10): 651.
- [37] DONG D, FENG Q B, MCGROUTHER K, *et al.* Effects of biochar amendment on rice growth and nitrogen retention in a waterlogged paddy field [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(1): 153.
- [38] CHEN D, WANG S, XIONG B, *et al.* Carbon/nitrogen imbalance associated with drought-induced leaf senescence in sorghum bicolor [J]. *PLoS One*, 2015, 10(8): e0137026.