

宁夏六盘山区芹菜栽培对氮肥施用量的响应差异

田伟, 冯海萍

(宁夏农林科学院园艺研究所 银川 750002)

摘要: 为解决宁夏六盘山区芹菜生产过程中由于氮肥施用不当引起的一系列问题, 以芹菜品种皇后为供试材料, 通过单因素多水平随机区组试验设计, 研究不同供氮水平(0、150、300、450、600 kg·hm⁻²)对芹菜产量和品质等方面的影响。结果表明, 适量的氮肥施用有助于芹菜对钾素和磷素的吸收, 在增施氮肥后, 能够提高芹菜的植株高度、植株周长、叶柄长、干物质积累和产量, 且增产范围在 15.65%~33.28%。通过对产量进行回归分析得出, 芹菜取得最高产量时氮肥用量为 394.75 kg·hm⁻², 最佳经济效益氮肥用量为 287.07 kg·hm⁻²。此外, 在一定范围内增施氮肥, 会提高芹菜的硝酸盐、粗纤维、维生素 C 和可溶性固形物含量。采用 TOPSIS 法对芹菜的多项指标进行评价, N450 处理的评分最高, N0 处理最低。综上, 为减少土壤环境污染, 提高氮肥利用率, 推荐宁夏六盘山区种植芹菜时氮肥施用量为 287.07~394.75 kg·hm⁻²。

关键词: 芹菜; 氮肥施用量; 响应差异

中图分类号: S636.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2024)06-126-09

Response difference of celery cultivation to nitrogen fertilizer application rate in Liupan Mountain area of Ningxia

TIAN Wei, FENG Haiping

(Institute of Horticulture, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Science, Yinchuan 750002, Ningxia, China)

Abstract: In order to solve a series of problems caused by improper application of nitrogen fertilizer in the production process of celery in Liupan Mountain area of Ningxia, the celery variety Queen was used as the test material, and the effects of different nitrogen supply levels (0, 150, 300, 450, 600 kg·hm⁻²) on the yield and quality of celery were studied by single factor and multi-level randomized block design. The results showed that the appropriate amount of nitrogen supply was beneficial for celery to absorb potassium and phosphorus. After the application of nitrogen fertilizer, the plant height, perimeter, petiole length, dry matter accumulation, and yield of celery were significantly increased, with an increase ranging from 15.64% to 33.27%. Through the regression analysis of yield, it was concluded that the highest nitrogen fertilizer application for celery was 394.75 kg·hm⁻², and the optimal economic benefit nitrogen fertilizer application was 287.07 kg·hm⁻². In addition, increasing nitrogen fertilizer within a certain range will increase the content of nitrate, crude fiber, vitamin C and soluble solids in celery. TOPSIS method was used to evaluate and analyze several indexes of celery. The results showed that N450 treatment had the highest score and N0 treatment had the lowest score. In summary, in order to reduce soil environmental pollution and improve the utilization rate of nitrogen fertilizer, it is recommended that the amount of nitrogen fertilizer should be 287.07-394.75 kg·hm⁻² when planting celery in Liupan Mountain area of Ningxia.

Key words: Celery; Nitrogen fertilizer application rate; Response difference

芹菜(*Apium graveolens* L.), 又称胡芹, 是一种半耐寒植物, 属伞形科芹属中的重要叶类蔬菜之一, 也是设施栽培中主要的叶类蔬菜^[1-2]。作为历史悠久的传统蔬菜, 芹菜经常出现在人们的餐桌上, 味道鲜美, 营养丰富, 深受消费者喜爱, 因此, 在我

国广泛种植。

芹菜作为浅根系作物, 主要根群分布在 7~20 cm 的土层中, 横向分布直径可达 30 cm, 对土壤中的养分吸收能力相对较弱, 属典型喜肥作物^[3]。氮是影响芹菜产量最重要的元素^[4]。虽然化肥对提

收稿日期: 2023-12-11; 修回日期: 2024-02-02

基金项目: 宁夏农业高质量发展和生态保护科技创新示范项目(NGSB-2021-8-06); 国家大宗蔬菜产业技术体系(CARS-23-G24); 宁夏青年拔尖人才项目

作者简介: 田伟, 男, 硕士, 主要研究方向为蔬菜栽培。E-mail: tianweinxu@163.com

通信作者: 冯海萍, 女, 副研究员, 主要从事蔬菜生理及无土栽培等研究工作。E-mail: fenghaiping2005@163.com

高土壤肥力和作物产量起重要作用,但同时也带来一系列问题,如农业生态系统被破坏、环境污染严重、作物品质和土壤质量下降等^[5-6]。近年来,菜农为了追求产量,大量施用化肥,尤其是氮肥的施用量远超芹菜正常的生长需求,不仅直接造成了芹菜产量和品质下降,还造成了土壤养分比例失调,抗病虫害能力减弱,以及种植地土壤板结、氮积累、环境污染、土壤酸化、土壤有机质减少、水体富营养化等问题^[7-8],对土壤环境和人类健康构成了严重影响^[9]。目前,我国化肥施用量较大,但利用效率偏低。农民为了实现作物高产,盲目增加施肥量、过量施用氮肥的现象十分严重^[10],因此,氮肥污染成为了制约中国蔬菜产业可持续发展的重要因素^[11-12]。研究表明,蔬菜硝酸盐含量与氮肥的施用量呈正相关^[13-14],所以过量的供施氮肥会造成蔬菜中硝酸盐累积,从而导致芹菜品质下降;而缺氮会使芹菜生长缓慢,新叶片细小,老叶片变黄,叶柄容易产生空心^[15];适宜的氮肥供应可以促进作物的光合作用^[16],增加作物干物质的积累量,并最终对产量和品质的提高起到积极的促进作用^[17],同时还可以提高氮肥的利用效率^[18]。在已有的研究中,张丽娟等^[19]提出,黄河上游地区设施芹菜氮素的优化目标供应值为 $449.78 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;张晓娟等^[20]通过试验,验证了施氮量与设施芹菜产量呈典型的抛物线关系,且在宁夏固原市原州区彭堡镇闫堡村施氮量为 $561 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时产量最高,施氮量为 $504 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时经济效益最高;王正福等^[21]通过试验,推荐其所试验的田块最大施肥量为 $362.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。此外,赵广如等^[22]在北京通州区试验研究芹菜肥料量级,结果表明,在高肥力小营地区最高氮肥施用量为 $280.51 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,在中肥力八各庄芹菜氮肥最高施用量为 $310.94 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。孙超等^[23]在北京大兴区研究氮肥对芹菜产量的影响,结果表明,芹菜最高产量时氮肥施入量 $360 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,此时增加氮肥施入量,芹菜产量下降。由此看出,不同区域适宜的氮肥施用量有明显差异,此外,不合理的施氮导致土壤中的氮肥累积,适宜的施氮量在不同区域有所不同。因此,进一步明确芹菜栽培地的需氮量具有重要意义。

目前,我国仍然存在氮肥施用不当的情况,由于各地土壤肥力、肥料种类等不同,很难达到统一施肥的标准。因此,为解决宁夏六盘山区因施氮不当造成的芹菜减产、土壤及水质污染等问题,笔者在磷、钾肥统一施用下,通过研究宁夏六盘山区不同供氮水平对芹菜生产的影响,筛选出在宁夏六盘

山区芹菜种植所需氮肥的适宜用量,为农户种植芹菜供施氮肥提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2022 年 5—8 月在宁夏固原市西吉县硝河乡硝河村露地冷凉蔬菜基地进行,土壤质地为黑垆土, pH 8.09~8.27, EC 0.28~0.48 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, 有机质含量(w , 后同) 14.44%~14.68%。该地属于中温带大陆性半湿润半干旱气候,海拔 1248~2955 m, 气候凉爽,年平均气温为 $6 \text{ }^{\circ}\text{C}$,光照充足,年日照时数 2700~3200 h,环境清洁无污染,具备冷凉蔬菜种植的优越自然气候条件^[24],芹菜是当地种植的主要冷凉蔬菜之一。

试验供试芹菜品种为皇后(西吉绿发蔬菜种植专业合作社提供种苗),供试肥料尿素(宁夏和宁化学有限公司生产,氮含量 46%)为氮肥来源,重过磷酸钙(云南云天化国际化工股份有限公司生产, P_2O_5 含量 46%)为磷肥来源,硫酸钾(中农天津化肥有限公司生产, K_2O 含量 50%)为钾肥来源。

1.2 试验设计

试验采用单因素多水平随机区组设计,因子为供氮水平,分别为 0、150、300、450、600 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 5 个水平,即 N_0 、 N_{150} 、 N_{300} 、 N_{450} 、 N_{600} 共 5 个处理,每个处理 3 次重复,每个小区面积为 100 m^2 , 生长期间磷肥、钾肥统一施用,施肥量分别为 150、450 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,氮肥施用按照试验方案进行,具体施肥方案基肥为磷肥,全部基施,氮、钾肥总量的 40% 做基肥,追肥在移栽后 15、30、45、60 d 均追施 15%,其余田间管理均与当地传统种植方式相同。株行距为 $23 \text{ cm} \times 23 \text{ cm}$ (种植密度 $190\,000 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.3 指标测定

采用游标卡尺和钢卷尺测定芹菜的株高、茎粗和叶柄长;用电子秤测定产量^[25];采用钼蓝比色法测定维生素 C 含量^[26],采用 TD-45 手持式数显糖度计测定可溶性固形物含量;采用蒽酮比色法测定粗纤维含量^[26];采用水杨酸比色法测定硝酸盐含量^[26];采用烘干称质量的方法测定植株的生物量^[27];采用奈氏比色法测定植株中全氮含量^[27];采用钼锑抗比色法测定全磷含量^[27];采用火焰光度法测定全钾含量^[27];收获后,采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消化-钼锑抗比色法测定土壤全氮含量^[28];采用钼锑抗比色法测定土壤全磷含量^[28];采用火焰光度法测定土壤全钾含量^[28],并用公式^[29-31]计算磷肥投入的各项表现。

氮肥偏生产力(PFN_N)/($kg \cdot kg^{-1}$)=施氮区茎叶产量/氮肥用量; (1)

氮肥农学效率(AEP_N)/($kg \cdot kg^{-1}$)=(施氮区茎叶产量-不施氮区茎叶产量)/氮肥用量; (2)

氮肥贡献率(FCR_N)/%=(施氮区茎叶产量-不施氮区茎叶产量)/不施氮区茎叶产量 $\times 100$; (3)

氮肥利用率(REN)/%=(施氮区地上部总吸氮量-不施氮区地上部总吸氮量)/氮肥用量 $\times 100$; (4)

氮素平衡系数(PB_N)=投入土壤氮素量/带出土壤氮素量; (5)

氮素表观平衡(PA_N)/($kg \cdot hm^{-2}$)=氮素投入总量-作物带出氮素总量。 (6)

1.4 数据处理

采用 Office 2010 对数据进行统计,采用 SPSS 26 对数据进行单因素方差分析(LSD)、相关性分析和主成分分析,采用 Excel 和 Origin 2021 作图。

2 结果与分析

2.1 供氮水平对芹菜栽培土壤养分含量的影响

由表 1 可以看出,芹菜土壤养分中的全钾含量随供氮水平的提高呈先增加后减少的变化趋势,在 N300 处理时达到最高,为 $20.47 g \cdot kg^{-1}$,显著高于 N600 处理。全氮含量随着供氮水平的提高而增加,在 N600 处理时达到最大,为 $0.28 g \cdot kg^{-1}$,显著

高于 N0 和 N150 处理。全磷含量与供氮水平之间没有明显关系,含量最高的为 N0 处理,为 $7.32 g \cdot kg^{-1}$,显著高于其他 4 个处理。因此,增加适宜施氮量,不仅可以促进芹菜对磷的吸收,还能提高土壤中的全钾含量。

2.2 供氮水平对芹菜植株养分吸收与分配特征的影响

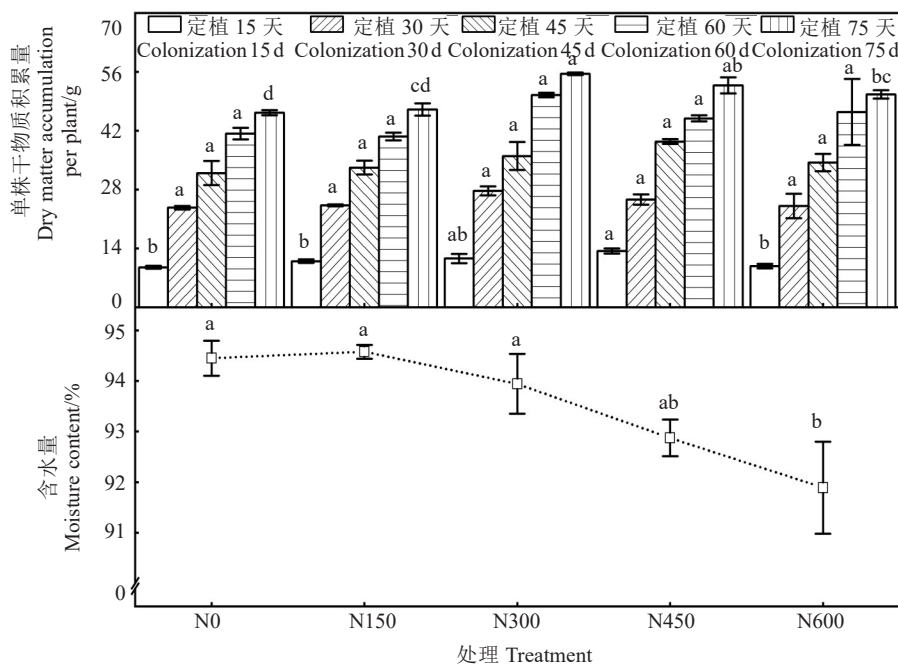
表 1 供氮水平对芹菜栽培土壤养分含量的影响
Table 1 Effect of nitrogen supply level on soil nutrient content of celery cultivation ($g \cdot kg^{-1}$)

处理 Treatment	w(全氮) Total nitrogen content	w(全磷) Total phosphorus content	w(全钾) Total potassium content
N0	0.22 \pm 0.02 c	7.23 \pm 0.11 a	20.06 \pm 0.09 ab
N150	0.24 \pm 0.00 c	6.47 \pm 0.04 c	20.08 \pm 0.13 ab
N300	0.25 \pm 0.00 ab	6.80 \pm 0.06 b	20.47 \pm 0.01 a
N450	0.26 \pm 0.00 ab	6.38 \pm 0.07 c	20.42 \pm 0.07 a
N600	0.28 \pm 0.01 a	6.73 \pm 0.03 b	19.89 \pm 0.20 b

注:同列不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平上差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

2.2.1 供氮水平对芹菜干物质累积量的影响 由图 1 可以看出,随着芹菜的生长,不同供氮水平处理芹菜植株干物质累积量均呈线性增加。至芹菜收获时,不同处理单株干物质质量分别为 46.30、



注:不同小写字母表示同一时间的不同处理在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters indicate significant different among different treatments of the same time at 0.05 level. The same below.

图 1 供氮水平对芹菜干物质累积和含水量的影响

Fig. 1 Effect of nitrogen level on dry matter accumulation and moisture content of celery

47.03、55.53、52.77、50.63 g,其中以 N300 处理干物质质量最大,其次是 N450 处理,分别较 N0 处理显著提高 19.94%和 13.97%。收获时芹菜含水量随着施肥量的增加呈先升后降的变化趋势,变化范围小于 2.67%。

2.2.2 供氮水平对芹菜氮素吸收量的影响 由图 2 可以看出,供氮水平对芹菜氮素吸收量有较大的影响,芹菜茎叶和全株氮素吸收量随供氮水平的提高呈现先增加后减少的变化趋势,芹菜根氮素吸收量随供氮水平的提高而增加。其中茎叶及全株氮素吸收量在 N450 处理达到最大值,分别为 455.84、

486.67 kg·hm⁻²,均显著高于 N0、N150 和 N600 处理,较 N0 处理分别显著增加 72.23%和 80.57%;根氮素吸收量在 N600 处理达到最大值,为 35.02 kg·hm⁻²,其次是 N450 处理,为 30.83 kg·hm⁻²,两处理间无显著差异,但均显著高于其他处理,较 N0 处理分别显著增加 620.85%、534.61%。由此可见,N450、N300 处理可以使芹菜植株最大限度地吸收氮素养分,施肥过量或施肥不足均会导致芹菜对氮素吸收量减少,从而影响芹菜生长。

2.2.3 供氮水平对芹菜氮素积累与分配的影响 由表 2 可知,芹菜收获期茎叶和整株氮素累积量随

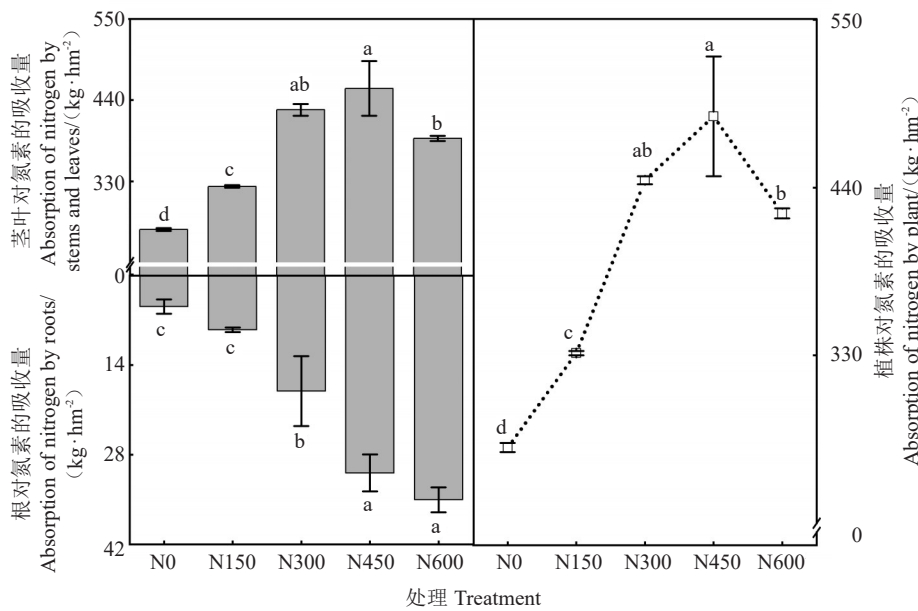


图 2 供氮水平对芹菜氮素吸收量的影响

Fig. 2 Effect of nitrogen level on nitrogen uptake of celery

施肥量的增加呈现先增加后减少的变化趋势,其中以 N450 处理的茎叶和整株的氮素累积量最高,分别为 2.10 和 2.24 g·株⁻¹,其次是 N300 处理,两处理间无显著差异,均显著高于 N0 和 N150 处理。与 N0 处理相比,N450 处理的茎叶和整株氮素累积量

分别显著增加了 72.13%、80.65%。芹菜根部对氮素的累积量随施肥量的增加而增加,在 N600 处理时达到最大,为 0.16 g·株⁻¹。在收获期芹菜各个器官中氮素分配表现为茎叶>根,说明茎叶是氮素的累积中心,且茎叶累积分配率占整株氮素累积量的

表 2 供氮水平对芹菜不同器官氮素累积与分配的影响

Table 2 Effects of nitrogen level on nitrogen accumulation and distribution in different organs of celery

处理 Treatment	根 Root		茎叶 Stem and leaf		整株累积量 Accumulation per plant/g
	单株累积量 Accumulation per plant/g	分配比例 Distribution proportion/%	单株累积量 Accumulation per plant/g	分配比例 Distribution proportion/%	
N0	0.02±0.01 c	1.80	1.22±0.01 d	98.20	1.24±0.01 d
N150	0.04±0.00 c	2.55	1.49±0.01 c	97.45	1.53±0.01 c
N300	0.08±0.03 b	4.06	1.96±0.04 ab	95.94	2.04±0.01 ab
N450	0.14±0.01 a	6.34	2.10±0.17 a	93.66	2.24±0.18 a
N600	0.16±0.01 a	8.28	1.78±0.02 b	91.72	1.94±0.02 b

91.72%~98.20%。

2.3 供氮水平对芹菜形态指标和产量的影响

由表3可知,与N0相比,不同供氮水平对芹菜生长的高度、植株周长、产量等性状都有显著影响,均随着供氮水平的提高呈现先增加后减少的变化趋势,且所有产量性状都是施氮肥处理较不施氮肥处理高。其中,N450处理的植株高度最高,为

79.10 cm,除与N300处理差异不显著外,与其他处理均呈显著差异;植株周长以N300处理最大,为26.87 cm;叶柄长以N450处理最长,不同施氮水平间无显著差异;单株产量和产量均以N300处理最高,分别为1.18 kg·株⁻¹和247.00 t·hm⁻²,除N300和N450处理差异不显著外,其他处理在不同施氮水平间存在显著差异,且施肥处理的产量较不施肥的

表3 供氮水平对芹菜产量性状的影响
Table 3 Effect of nitrogen level on yield traits of celery

处理 Treatment	植株高度 Plant height/cm	植株周长 Plant perimeter/cm	叶柄长 Petiole length/cm	单株产量 Yield per plant/kg	产量 Yield/(t·hm ²)
N0	68.50±0.06 d	22.20±0.72 c	28.73±1.23 a	0.88±0.02 d	185.33±3.38 d
N150	71.80±0.84 c	24.27±0.09 b	29.13±2.26 a	1.02±0.01 c	214.33±1.67 c
N300	77.60±0.67 a	26.87±0.59 a	31.13±2.24 a	1.18±0.02 a	247.00±3.51 a
N450	79.10±1.10 a	25.53±0.41 ab	33.83±2.38 a	1.14±0.00 a	240.33±0.67 a
N600	75.20±0.60 b	25.43±0.19 ab	30.50±3.42 a	1.07±0.01 b	224.33±1.76 b

N0处理增产了15.65%~33.28%。

2.4 芹菜产量与施氮量的回归分析结果

由图3可知,通过对施肥量与芹菜产量的关系进行模拟,得出关系方程如下: $y = -0.0004x^2 + 0.3158x + 183.09$ 。

图3和方程表明氮肥施用量与产量呈抛物线线性关系,符合肥料效应的报酬递减规律。通过

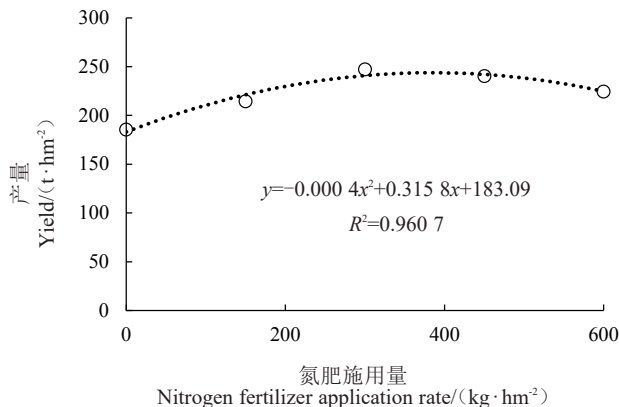


图3 适宜供氮水平和芹菜产量的相关关系

Fig. 3 The correlation between the appropriate nitrogen supply level and yield of celery

对上式求导得出,芹菜取得最高产量的氮肥施用量为394.75 kg·hm⁻²。根据当年芹菜价格2.2元·kg⁻¹,氮肥价格为1.2元·kg⁻¹,上述公式符合一元二次方程 $y = a + bx + cx^2$ 。用Px代表氮肥价格,Py代表芹菜价格,因此,最佳经济效益氮肥施用量可由 $X = |b - Px / Py| / |-2c|$ 求得^[32]。通过计算,最佳经济效益氮肥施用量为287.07 kg·hm⁻²。

2.5 供氮水平对芹菜氮素利用效率的影响

由图4可知,氮肥偏生产力和氮肥农学效率在各处理间具有一定差异,氮肥偏生产力随着氮肥的增加呈先升高后降低的变化趋势,其中以N300处理的氮肥偏生产力最高,为1704.19 kg·kg⁻¹,N150处理最低,二者差异不显著;氮肥农学效率随着氮肥的增加呈显著下降趋势,以N150处理氮肥农学效率最高,为160.08 kg·kg⁻¹,显著高于其他处理。

如图5所示,各处理氮肥贡献率和氮肥利用率存在一定差异,氮肥贡献率和氮肥利用率均随着施氮量的增加呈先升高后降低的变化趋势,氮肥贡献率由高到低依次为N300>N450>N600>N150,以N300处理最高,为18.26%,显著高于N600和N150处理;氮肥利用率由高到低依次为N300>N450>N150>N600,以N300处理最高,其次是N450,分别为46.75%、38.60%,两处理间无显著差异,N300处理氮肥利用率显著高于N600和N150处理,N450处理氮肥利用率显著高于N600处理。

2.6 供氮水平对芹菜品质的影响

硝酸盐含量是蔬菜重要的安全品质指标,叶菜类蔬菜的硝酸盐限量卫生标准低于3 g·kg⁻¹^[33]。从表4可以看出,与不施氮肥相比,供氮水平对芹菜茎叶中硝酸盐含量具有显著影响,但所有处理的芹菜茎叶中硝酸盐含量均在限量标准内,且芹菜茎叶中的硝酸盐含量随施氮量的增加呈增加趋势,其中N600处理的硝酸盐含量最高,N0处理的硝酸盐含量最低,与N0处理相比,施氮后的硝酸盐含量显著增加了24.47%~53.41%。由此说明,施氮量与芹菜

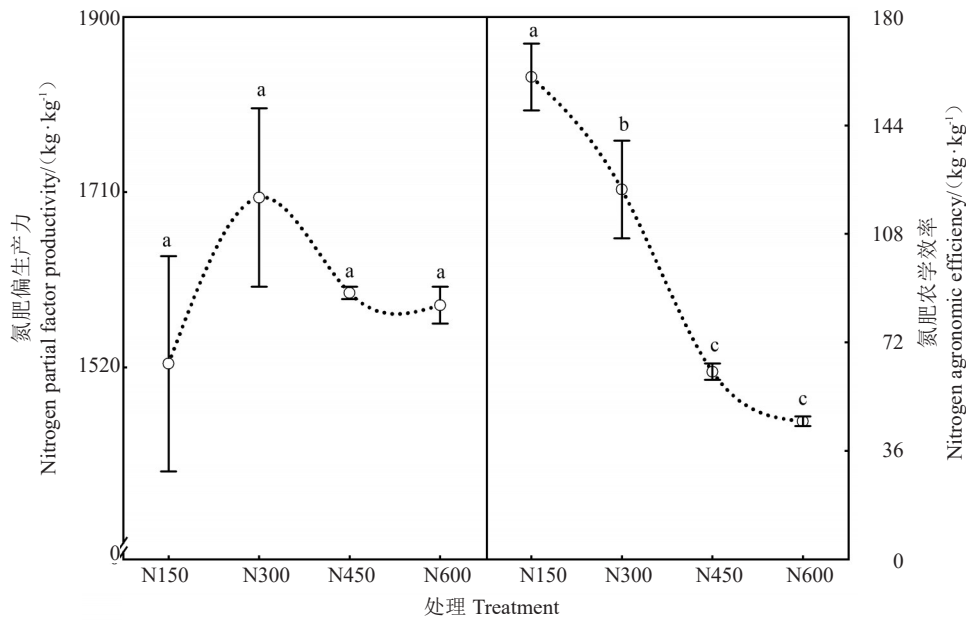


图 4 供氮水平对芹菜氮肥偏生产力和农学效率的影响

Fig. 4 Effects of nitrogen level on partial factor productivity and agronomic efficiency of nitrogen fertilizer in celery

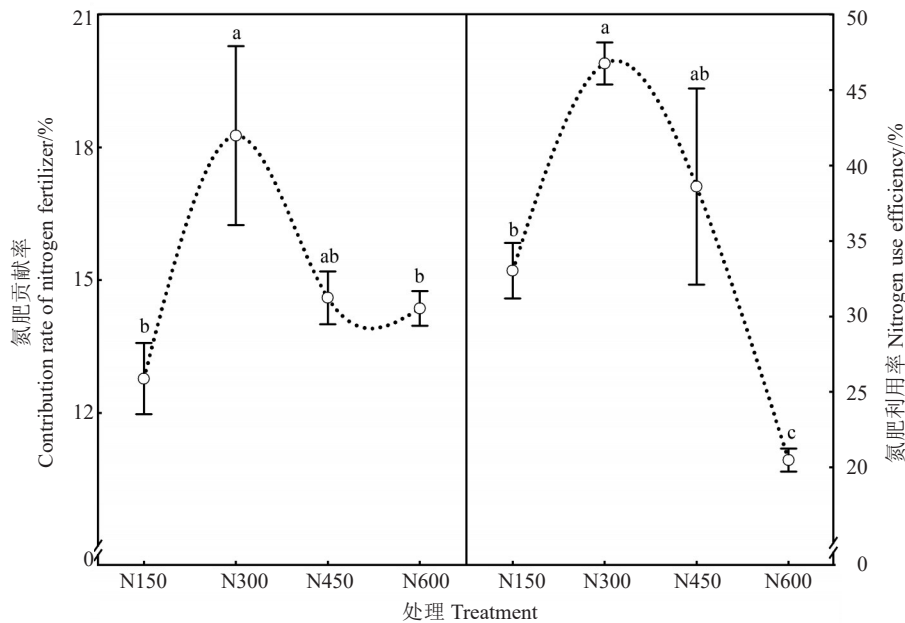


图 5 供氮水平对芹菜氮肥贡献率和氮肥利用效率影响

Fig. 5 Effects of nitrogen level on nitrogen contribution rate and nitrogen use efficiency of celery

茎叶中的硝酸盐含量成正比关系,且是茎叶硝酸盐含量增加的主要原因,因此,合理施用氮肥对食品安全极为重要。各处理维生素 C 含量随着施氮量的增加呈先降低后升高的变化趋势,其中 N600 处理的维生素 C 含量最高,为 $54.82 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$,较不施氮肥 N0 处理显著提高了 17.99%,N300 处理维生素 C 含量最低。可溶性固形物和粗纤维含量均随着施氮量的增加呈先升高后降低的变化趋势,可溶性固形物含量以 N450 处理最高,为 5.18%,较

N0 处理提高了 0.78 个百分点。N450 处理的粗纤维含量最高,为 0.99%,显著高于其他处理。由此说明,适宜的氮肥供应有利于芹菜营养品质的提高。

2.7 供氮水平对氮平衡的影响

氮平衡可以用来评估作物对氮素的利用情况和土壤中氮素的盈亏。由表 5 可知,芹菜氮素输出量随着供氮水平的提高而呈先升高后降低的变化趋势,当供氮水平达到 $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,氮素盈亏由负转正,供氮水平达到 $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,氮素输出量

表4 供氮水平对芹菜品质的影响

Table 4 Effect of nitrogen level on quality of celery

处理 Treatment	w(维生素 C) Vitamin C content/(mg·100 g ⁻¹)	w(可溶性固形物) Soluble solid content/%	w(粗纤维) Crude fiber content/%	w(硝酸盐) Nitrate content/(mg·kg ⁻¹)
N0	46.46±0.01 b	4.40±0.03 d	0.74±0.03 b	1 004.48±26.48 d
N150	46.05±0.31 b	4.37±0.02 d	0.75±0.02 b	1 250.31±11.65 c
N300	32.85±0.29 c	5.01±0.02 b	0.79±0.02 b	1 258.05±18.58 c
N450	46.44±0.02 b	5.18±0.04 a	0.99±0.02 a	1 448.33±12.83 b
N600	54.82±0.15 a	4.82±0.03 c	0.77±0.02 b	1 540.96±24.54 a

表5 供氮水平对氮平衡的影响

Table 5 Effect of nitrogen level on nitrogen balance

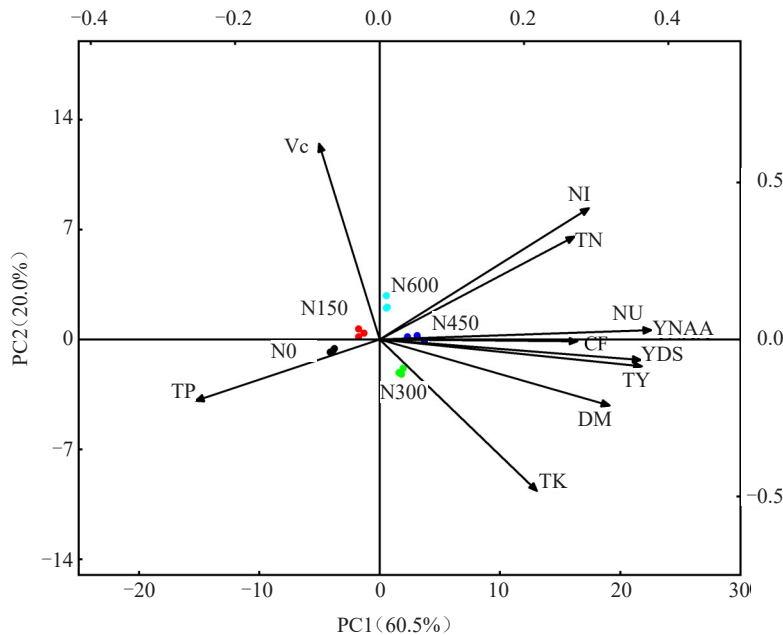
处理 Treatment	氮素输入量 Potassium input/(kg·hm ⁻²)	氮素输出量 Potassium output/(kg·hm ⁻²)	氮素平衡系数 Potassium balance coefficient	氮素表观平衡 Potassium balance/(kg·hm ⁻²)
N0	0	269.52±2.99 d		-269.52
N150	150	331.46±1.47 c	0.45	-181.46
N300	300	444.83±2.70 ab	0.67	-144.84
N450	450	486.67±3.22 a	0.93	-36.67
N600	600	423.14±3.28 b	1.42	176.86

达到最大,随着氮肥投入的越多,氮素输出越少,多余的氮肥就会累积到土壤中。通过数据分析,过量地施用氮肥会抑制芹菜对氮素的吸收。

2.8 主成分分析及 TOPSIS 法评价

为了评估施氮水平对芹菜产量与品质等指标

之间的关系,进行了 PCA 分析(图 6)。在各项指标中,提取的两个主成分共解释了 80.5%的表型变异,其中 60.5%由 PC1 解释,20.0%由 PC2 解释。维生素 C 含量对 PC1 的贡献为负,而 NU、YNAA、YDS、TY 和 DM 对 PC1 的贡献为正。在 PC2 中,



注: TN. 全氮含量; TP. 全磷含量; TK. 全钾含量; TY. 产量; DM. 干物质含量; NU. 氮素吸收量; YNAA. 氮素累积量; Vc. 维生素 C 含量; YDS. 可溶性固形物含量; CF. 粗纤维含量; NI. 硝酸盐含量。

Note: TN. Total nitrogen content; TP. Total phosphorus content; TK. Total potassium content; TY. Yield; DM. Dry matter accumulation; NU. Nitrogen uptake; YNAA. N accumulation; Vc. Vitamin C content; YDS. Dissolved solid content; CF. Crude fiber content; NI. Nitrate content.

图6 土壤全养分、芹菜产量和品质主成分分析

Fig. 6 Principal component analysis of soil total nutrients, celery yield and quality

TK、CF、TP 和 YDS 为负贡献, TN 和 NI 为正贡献。土壤全养分、芹菜产量和品质指标之间的相关性如图 6 所示。全氮与硝酸盐含量、氮素吸收、氮素累积、粗纤维含量、可溶性固形物含量、产量、干物质累积和全钾含量密切相关。原因是在施肥水平升高的增加过程中, 土壤中的氮素升高, 造成芹菜对氮素吸收累积, 使得芹菜产量增加和品质提升。在 PCA 分析中, 所有处理之间存在明显的分离。N0 和 N150 在 y 轴左侧(II 和 III 象限), 是 TP 较高的处理。N300、N450 和 N600 位于 y 轴右侧(象限 I 和 IV), 是产量和品质较高的处理。

为了避免单一指标分析造成的片面性, 笔者采用 TOPSIS 法对芹菜的多项指标进行评价, 反映不同施氮水平对土壤全养分和芹菜生长的影响。由表 6 可以看出, 较不施氮肥的 N0 处理, 施肥处理的贴适度更高。其中 N450 处理的评分最高, N600 处理次之, N0 处理最低。说明施氮量在 $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 有利于芹菜生长和品质提高。同时, 氮素的输出达到最高, 保证了氮素尽可能被芹菜吸收利用, 降低其在土壤中的累积量。这与前面的回归分析结果基本一致。

表 6 TOPSIS 法评价结果及排序

处理 Treatment	D+	D-	S_i	排序 Rank
N0	0.466	0.144	0.236	5
N150	0.345	0.196	0.362	4
N300	0.273	0.342	0.556	3
N450	0.112	0.454	0.802	1
N600	0.178	0.401	0.692	2

注: D+和 D-分别表示各处理的正、负理想解的加权距离; S_i 为最终评分。

Note: D+ and D- represent the weighted distances of the positive and negative ideal solutions of each treatment, respectively; S_i is the final score.

3 讨论与结论

氮素在作物的生长发育过程中具有十分重要的作用, 在生产过程中大量施用。目前, 关于作物施氮水平对产量、品质等性状方面的相关研究相对较多, 但基本停留在施氮量对于作物具有增加产量、提高品质等方面。王顺妮等^[34]通过研究施氮水平对湖南地区秋马铃薯生长、产量及品质的影响, 发现适当增施氮肥有利于提高秋马铃薯的产量和品质, 且适宜施氮量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。张瑜等^[35]在油桃果实膨大期喷施不同水平氮肥, 结果表明, 适宜

的喷施氮肥有助于提高果实的单果质量和产量, 施氮量在 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时提高产量, 继续增施氮肥则增产效果不明显。韦巧云等^[36]通过研究不同施氮量对菠萝产量、品质的影响, 发现菠萝的最佳施氮量为 $375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。上述对不同作物的最佳施氮量的研究与本试验结果一致, 都是施氮量过高会影响作物的产量及品质。本研究表明, 不同的施氮量对宁夏六盘山区的芹菜生产均有增产效果, 增产幅度在 15.65%~33.28%, 通过对供氮水平与芹菜产量的关系进行回归分析, 得出氮肥施用量与芹菜产量呈抛物线性关系。通过计算得出, 最高产量氮肥施用量为 $394.75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 综合考虑氮肥在试验年的价格可得最佳经济效益氮肥施用量为 $287.07 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

相关研究表明, 施氮量与硝酸盐含量呈正相关, 人体摄入的硝酸盐中 80% 以上来源于蔬菜, 而硝酸盐可以在人体中转化成对人体健康有严重危害的亚硝酸盐^[37]。因此, 在追求作物高产的同时, 也要防止施肥过量对硝酸盐的积累。在本试验中, 所有处理的芹菜茎叶中硝酸盐含量均在限量标准内, 且施氮量与芹菜茎叶中的硝酸盐含量成正比关系, 与之前的研究结果一致。

相关研究表明, 合理施用氮肥可以提高作物的干物质积累量^[38-39], 干物质是作物光合产物的最终形态, 而氮素占植物干质量的 1.5% 左右^[40]。在本试验中, N300 处理的单株干物质质量最高, 为 55.53 g , 其次是 N450 处理, 为 52.77 g , 二者较 N0 处理干物质质量分别显著提高了 19.94% 和 13.97%。此外, 本试验中氮素表观平衡随着供氮水平的升高而增加, 在 N600 时实现盈余, 当供氮量持续增加时, 氮素出现奢侈吸收, 氮素输出量降低。芹菜全株吸氮量在 N450 处理下达到最大值, 为 $486.67 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。芹菜氮素累积量最高是 N450 处理, 为 $2.24 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$, 其中, 茎叶氮素分配率占整株氮元素累积量的 91.72% 以上, 各个器官中氮素分配表现为茎叶>根, 说明茎叶是芹菜氮素的积累中心。

我国氮肥的三大来源渠道是碳铵(24%~31%), 尿素(0~35%)和硫酸铵(30.3%~42.7%), 但是氮肥的利用率较低, 利用率较高的三大粮食作物近些年的氮肥利用率也只达到了发达国家 20 世纪 80 年代的平均水平^[41-42]。在本试验中, 氮肥利用率以 N300 处理最高, 其次是 N450 处理, 分别为 46.75%、38.60%; N300 处理的氮肥贡献率和氮素偏生产力最高, 分别为 18.26% 和 $1704.19 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$; N150 处理的氮肥农学效率最高, 为 $160.08 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于

其他处理。综上分析,合理施用氮肥可以有效提高氮肥利用效率,减少氮肥的损失。

综上所述,在一定范围内,芹菜产量、品质、干物质量以及肥料利用率随着氮肥施用量的增加而提高,当供氮水平超过一定范围后,芹菜的产量增加和品质的提升效果将不明显,甚至出现产量和品质下降的趋势,且过多的施用肥料也会造成农户经济收益减少,土壤环境污染等负面影响。综合考虑不同供氮水平对芹菜产量、品质及氮素表现平衡等因素,推荐在宁夏六盘山区种植芹菜的氮肥施用量为 287.07~394.75 kg·hm⁻²。

参考文献

- [1] 方智远. 中国蔬菜作物图鉴[M]. 南京:江苏科学技术出版社, 2011.
- [2] 熊爱生. 伞形科蔬菜种质资源学[M]. 南京:江苏凤凰科学技术出版社, 2019.
- [3] 曹滢麟. 无公害芹菜种植技术的应用[J]. 农家参谋, 2020(17): 286.
- [4] 刘明月, 秦玉芝, 蔡雁平, 等. NPK 施用量与芹菜硝酸盐积累和产量的相关性[J]. 中国蔬菜, 1998(6): 6-9.
- [5] 张文学, 王少先, 刘增兵, 等. 基于土壤肥力质量综合指数评价化肥与有机肥配施对红壤稻田肥力的提升作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(5): 777-790.
- [6] YANG N, WANG Z H, GAO Y J, et al. Effects of planting soybean in summer fallow on wheat grain yield, total N and Zn in grain and available N and Zn in soil on the Loess Plateau of China[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 58: 63-72.
- [7] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783-795.
- [8] 李强. 过量施肥危害大[J]. 农村新技术, 2007(12): 9.
- [9] 侯天荣. 不同氮肥处理对都市市芹菜生长的影响试验[J]. 南方农业, 2023, 17(3): 101-103.
- [10] 蔡焕杰, 李府阳, 赵政鑫, 等. 施氮对中国棉田产量和水分利用效率影响的 Meta 分析[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 316-326.
- [11] 崔元培, 魏子鲲, 王建忠, 等. “双减”背景下化肥、农药施用现状与发展路径[J]. 北方园艺, 2021(9): 164-173.
- [12] 黄绍文, 唐继伟, 李春花, 等. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1480-1493.
- [13] 王冰清, 尹能文, 郑棉海, 等. 化肥减量配施有机肥对蔬菜产量和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(1): 242-247.
- [14] 张绍冰. 化肥与有机肥对蔬菜不同影响的研究[J]. 现代农业科技, 2007(7): 7.
- [15] 陆中. 大棚芹菜的浇水施肥[J]. 农村科学实验, 2007(4): 17.
- [16] 李广浩, 赵斌, 董树亭, 等. 控释尿素水氮耦合对夏玉米产量和光合特性的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(9): 1406-1415.
- [17] 郭丙玉, 高慧, 唐诚, 等. 水肥互作对滴灌玉米氮素吸收、水氮利用效率及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3679-3686.
- [18] BARATI V, GHADIRI H, ZAND-PARSA S, et al. Nitrogen and water use efficiencies and yield response of barley cultivars under different irrigation and nitrogen regimes in a semi-arid Mediterranean climate[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2015, 61(1): 15-32.
- [19] 张晓娟, 冯建萍, 曲继松, 等. 不同施氮量对黄河上游地区设施芹菜产量及土壤中 NO₃-N 残留的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(1): 138-142.
- [20] 张晓娟, 王克雄, 王晓军, 等. 不同施氮量对设施芹菜产量及经济效益的影响[J]. 贵州农业科学, 2016, 44(11): 115-120.
- [21] 王正福, 黄翠菊, 王海波. 氮、磷、钾不同配比施用对芹菜产量的影响[J]. 云南农业科技, 2017(5): 24-27.
- [22] 赵广如, 臧春龙, 吴金为. 北京市通州区芹菜氮磷钾肥料量级研究[J]. 北京农业, 2010(增刊 1): 84-90.
- [23] 孙超, 哈雪姣, 冯文清, 等. 氮肥不同用量对芹菜产量和品质的影响[J]. 北京农业, 2012(12): 79-81.
- [24] 冯海萍, 刘晓梅, 白生虎, 等. 不同娃娃菜品种在宁南山区的适应性评价[J]. 种子, 2021, 40(10): 121-125.
- [25] 张芮, 张海粟, 董博, 等. 陇中黄土高原区不同种植方式对高原夏芹菜品质及产量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2023, 58(6): 48-55.
- [26] 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.
- [27] 金龙范, 金敏, 许广波, 等. 不同栽培方式下氮、磷、钾对水芹菜产量及养分利用率的影响[J]. 延边大学农学学报, 2013, 35(3): 254-258.
- [28] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [29] 杜光辉, 史鹏飞, 聂良鹏, 等. 有机肥替代氮肥对小麦产量、品质及养分积累的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(18): 83-87.
- [30] 陈桂芬, 黄雁飞, 刘斌, 等. 广西稻区不同水稻品种对氮肥施用量的响应差异[J]. 南方农业学报, 2021, 52(1): 137-144.
- [31] 闫湘. 我国化肥利用现状与养分资源高效利用研究[D]. 北京:中国农业科学院研究生院, 2008.
- [32] 余慧. 氮肥用量对宁南山区地膜玉米产量和氮肥利用率的影响[J]. 宁夏农林科技, 2021, 62(4): 13-15.
- [33] JACKLYN J, AMANDA P, LESLEY M D W, et al. Dietary nitrate and diet quality: An examination of changing dietary intakes within a representative sample of Australian women[J]. Nutrients, 2018, 10(8): 1005.
- [34] 王顺妮, 董文, 陈鑫昊, 等. 施氮水平对湖南地区秋马铃薯生长、产量及品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2020, 33(10): 33-38.
- [35] 张瑜, 赵剑波, 任飞, 等. 果实膨大期不同施氮量对油桃产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(3): 581-586.
- [36] 韦巧云, 徐健, 王小媚, 等. 不同施氮水平对“台农 16 号”菠萝生长、果实品质和产量的影响[J]. 中国果树, 2019(3): 71-73.
- [37] 张乃明. 施肥对蔬菜中硝酸盐累积量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2001(2): 37-38.
- [38] 柴继宽, 赵桂琴, 张丽睿, 等. 施氮及间作对燕麦干物质积累、分配和氮素吸收利用的影响[J]. 中国草地学报, 2023, 45(1): 88-98.
- [39] 吴子帅, 李虎, 黄秋要, 等. 施氮量和栽插密度对桂育 11 号产量和稻米品质的影响[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(8): 154-162.
- [40] 孙玉桃, 鲁艳红, 聂军, 等. 施用控释氮肥对油菜产量、农艺性状及土壤肥力的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(30): 83-88.
- [41] 李树军. 浅析氮肥在农业生产中的作用及当前存在的问题[J]. 黑龙江农业科学, 2010(1): 41-44.
- [42] 于飞, 施卫明. 近 10 年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1311-1324.