

网络出版时间:2023-12-12 16:33 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2024.06.013
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1390.S.20231211.1405.001

氮肥减量配施碳基营养肥对大白菜产量和品质及土壤养分的影响

刘学硕,崔佳月,刘光源,岳嘉欣,刘莹,惠麦侠

(西北农林科技大学 园艺学院,陕西 杨凌 712100)

【摘要】【目的】阐明碳基营养肥和化肥对土壤养分及大白菜生长、产量和品质的影响,为大白菜生产中合理施肥提供参考。【方法】以大白菜品种春大白菜 9 号为研究对象,在西北农林科技大学太白蔬菜试验示范站和陕西杨凌的曹新庄试验农场 2 个试验点同时进行大白菜施肥试验。试验共设常规施肥(N、P₂O₅、K₂O 的施用量分别为 300, 120 和 112.5 kg/hm²,CK)、有机-无机复混肥(N、P₂O₅、K₂O 的施用量分别为 360,240 和 120 kg/hm²,OF)、常规施肥基础上减施氮肥 15%(N1)、常规施肥基础上减施氮肥 30%(N2)、N1 处理基础上配施碳基营养肥 2 250 kg/hm²(CN1)、N2 处理基础上配施碳基营养肥 2 250 kg/hm²(CN2)6 个施肥处理,每处理 3 次重复。分别采集 2 个试验点大白菜莲座期、结球期、采收期 0~20 cm 根围土壤,测定土壤养分含量,并于采收期测定大白菜农艺性状、产量和品质,分析不同施肥措施对大白菜种植区土壤养分及大白菜品质和产量的影响。【结果】2 个试验点减施氮肥显著抑制了大白菜生长,降低了大白菜产量,而施用有机-无机复混肥和碳基营养肥对大白菜产量和品质有明显促进作用,其中太白试验点 OF 和 CN1 处理大白菜的产量较 CK 分别显著增加 12.8% 和 7.6%。配施碳基营养肥处理可以显著提高大白菜的营养品质,2 个试验点 CN1 处理大白菜的可溶性蛋白含量较 CK 分别显著增加了 29.6% 和 29.1%,可溶性糖含量较 CK 分别显著增加了 106.9% 和 60.6%,维生素 C 含量较 CK 分别显著增加了 15.5% 和 25.3%。在大白菜的同一生育时期,2 个试验点施肥处理土壤理化性质的变化趋势类似,在大白菜采收期,与 CK 相比,太白与杨凌试验点的 CN1 处理土壤 EC 分别显著下降 19.9% 和 7.0%,而土壤铵态氮含量分别显著增加 25.2% 和 33.1%,土壤硝态氮含量分别显著增加 10.8% 和 17.1%,土壤有效磷含量分别显著增加 23.7% 和 30.7%。【结论】在两种类型土壤上施用有机-无机复混肥与碳基营养肥均取得了较好的表现,其中 OF 和 CN1 处理能够增加土壤养分含量,提高土壤综合肥力水平,进而促进大白菜生长,改善大白菜营养品质。

【关键词】 大白菜;减量施肥;碳基营养肥;土壤养分

【中图分类号】 S634.104

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2024)06-0132-11

Effects of nitrogen fertilizer reduction combined with carbon-based nutrient fertilizer on yield and quality of Chinese cabbage and soil nutrients

LIU Xueshuo, CUI Jiayue, LIU Guangyuan, YUE Jiaxin,
LIU Ying, HUI Maixia

(College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 The effects of carbon-based nutrient fertilizer and chemical fertilizer on soil nu-

【收稿日期】 2023-04-03

【基金项目】 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-23-G22);陕西省重点研发计划项目(2020NY-061,2021LLRH-07);陕西省提升公众科学素质计划项目(2021PSL133)

【作者简介】 刘学硕(1998-),男,河北邢台人,在读硕士,主要从事高山蔬菜施肥技术研究。E-mail:lx58965@163.com

【通信作者】 惠麦侠(1968-),女,陕西渭南人,研究员,博士,博士生导师,主要从事白菜类蔬菜种质创新及新品种选育研究。E-mail:Maixiahui@163.com

rients and growth, yield and quality of Chinese cabbage were clarified to provide reference for rational fertilization in Chinese cabbage production. 【Method】 Taking Spring Chinese No. 9 as the research object, the fertilization experiment of Chinese cabbage was carried out at Taibai Vegetable Experimental Demonstration Station of Northwest A&F University and Caoxinhuang Experimental Farm in Yangling, Shaanxi. Six fertilization treatments of conventional fertilization (N, P_2O_5 and K_2O application rates were 300, 120 and 112.5 kg/hm², CK), organic-inorganic compound fertilizer (N, P_2O_5 and K_2O application rates were 360, 240 and 120 kg/hm², OF), 15% reduction of nitrogen fertilizer on the basis of conventional fertilization (N1), 30% reduction of nitrogen fertilizer on the basis of conventional fertilization (N2), 2 250 kg/hm² of carbon-based nutrient fertilizer on the basis of N1 treatment (CN1) and 2 250 kg/hm² of carbon-based nutrient fertilizer on the basis of N2 treatment (CN2). Each treatment had 3 replicates. The 0–20 cm rhizosphere soil samples were collected from two experimental sites at rosette stage, heading stage and harvesting stage. The soil nutrient content was measured, and agronomic traits, yield and quality of Chinese cabbage were measured at harvesting stage. The effects of different fertilization measures on soil nutrients as well as quality and yield of Chinese cabbage were then analyzed. 【Result】 The reduction of nitrogen fertilizer significantly inhibited the growth of Chinese cabbage and reduced the yield, while the application of organic-inorganic compound fertilizer and carbon-based nutrient fertilizer significantly promoted the yield and quality. The yields of Chinese cabbage treated with OF and CN1 in Taibai area were significantly increased by 12.8% and 7.6%, respectively, compared with CK. The two treatments with carbon-based nutrient fertilizer significantly improved nutritional quality of Chinese cabbage. The contents of soluble protein, soluble sugar and vitamin C in Chinese cabbage in treatment CN1 were significantly increased by 29.6%, 106.9% and 15.5% in Taibai and 29.1%, 60.6% and 25.3% in Yangling. In the same growth periods, the change trends of soil physical and chemical properties of fertilization treatments in two sites were similar. In the harvest period, soil EC of CN1 treatment in Taibai and Yangling decreased significantly by 19.9% and 7.0%, respectively. The content of ammonium nitrogen increased significantly by 25.2% and 33.1%, the content of nitrate nitrogen increased significantly by 10.8% and 17.1%, and the content of available phosphorus increased significantly by 23.7% and 30.7%, respectively. 【Conclusion】 The application of organic-inorganic compound fertilizer and carbon-based nutrient fertilizer achieved good performance in both soil types. OF and CN1 treatments increased nutrient content of soil and improved comprehensive fertility level of soil, and thus promoted the growth and nutritional quality of Chinese cabbage.

Key words: Chinese cabbage; fertilization; carbon-based nutrition fertilizer; soil nutrients

大白菜(*Brassica campestris* L. ssp. *pekinensis*)为十字花科芸苔属作物,原产中国,是我国栽培面积最大的蔬菜作物之一。全国每年大白菜播种面积近 267 万 hm²,产值在 600 亿元以上,占全国蔬菜总播种面积的 15%左右,在农业生产中占据重要地位^[1]。作为农业生产的重要因素,氮肥在提高作物产量和增加农民收入方面起着关键作用^[2]。中国是全球最大的化肥消费国,其中 8.64%耕地消耗了全球约 28%化肥,过量施氮现象在中国实际农业生产中一直普遍存在,过量施肥导致的土壤板结、土壤养分利用效率低等问题,不利于蔬菜生产的持续健康发展,同时还会使土壤与作物硝酸盐积累严重,对人的身体健康不利^[3]。因此,在大白菜生产上如何

科学减少氮肥应用、合理配施生物有机肥以及筛选生物有机肥替代氮肥是大白菜科学施肥亟待解决的重要课题。

为解决过量施用氮肥造成的作物品质下降、减产和环境污染问题,前人研究表明通过增施有机肥、微生物肥、脲酶抑制剂等肥料,或者通过测土配方施肥、调整施肥时期等施肥方式的改进,从而提高肥料利用率,促进作物生长。许多研究已经证实,生物有机肥料可以在改善土壤理化性质以及提高作物产量和品质方面发挥重要作用^[4-6]。Yang 等^[7]和 Brenzinger 等^[8]发现,化肥-有机肥相结合的施肥方式可以通过增加土壤有机质和有效磷含量、转化土壤微生物来提高土壤肥力。通过将生物有机肥料与化学

肥料相结合,可以增加土壤中的有机物与有效养分含量,从而调控土壤微生物群落,影响土壤环境与作物生长^[9]。碳基营养肥是利用人工模拟微生物降解的方式转化天然有机物(畜禽粪便、农作物秸秆、污水、污泥等农业废弃物)而形成的新型生物有机肥^[10],其通过人工方式使天然有机物快速降解转化为水溶性小分子,为土壤微生物直接提供营养物质,加快了微生物的新陈代谢。因此,碳基营养肥在改良土壤以及维持土壤生态系统功能稳定性方面受到越来越多的关注。本研究以抗根肿病品种春大白菜 9 号为对象,通过减施氮肥和配施碳基营养肥,探究不同施肥措施对大白菜生长、产量和品质以及大白菜不同生长期土壤养分的影响,评估减少化学肥料与配施碳基营养肥对大白菜产量、品质及土壤理化性质的影响,以期为建立环境友好型大白菜施肥技术提供依据,为大白菜产业的可持续健康发展提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试大白菜品种为春大白菜 9 号(北京百慕田种苗有限公司)。

供试肥料:碳基营养肥,由西北农林科技大学资源环境学院提供,其以沼液、秸秆等为原料,通过外加催化剂溶解原材料,并在此基础上添加各种更利于植物吸收的有机配位元素,经人工沤制而成,其活性有机黄腐酸 ≥ 120 g/L,中微量元素总含量 ≥ 20 g/L^[4];三元素复合肥(总养分含量 ≥ 450 g/kg, $m(\text{N}) : m(\text{P}_2\text{O}_5) : m(\text{K}_2\text{O}) = 14 : 16 : 15$),湖北新洋丰股份有限公司;尿素(总养分含量 ≥ 460 g/kg),陕西渭河重化工有限责任公司;有机-无机复混肥(总养分含量 ≥ 300 g/kg,有机质含量 ≥ 200 g/kg, $m(\text{N}) : m(\text{P}_2\text{O}_5) : m(\text{K}_2\text{O}) = 15 : 10 : 5$),陕西中衡肥业有限公司。

1.2 试验地概况

试验在西北农林科技大学太白蔬菜试验示范站和曹新庄试验农场 2 个试验点同时进行。太白蔬菜试验示范站位于陕西省宝鸡市太白县(北纬 $34^{\circ}2'36''$,东经 $107^{\circ}17'38''$),土壤为褐土,前茬作物为大白菜。0~20 cm 土层土壤 pH 值为 6.21,有机质 18.83 g/kg,硝态氮 31.09 mg/kg,有效磷 34.14 mg/kg,速效钾 55.02 mg/kg。西北农林科技大学曹新庄试验农场位于陕西省咸阳市杨陵示范区(北纬 $34^{\circ}26'58''$,东经 $108^{\circ}06'19''$),土壤为土,前茬作物为大白菜。0~20 cm 土层土壤 pH 值为 7.43,有机质 20.79 g/kg,硝态氮 28.48 mg/kg,有效磷 33.52 mg/kg,速效钾 105.28 mg/kg。

1.3 试验设计

试验共设置 6 个处理:常规施肥(N、 P_2O_5 、 K_2O 的施用量分别为 300,120 和 112.5 kg/hm²,CK)、有机-无机复混肥(N、 P_2O_5 、 K_2O 的施用量分别为 360,240 和 120 kg/hm²,OF)、常规施肥基础上减施氮肥 15%(N1)、常规施肥基础上减施氮肥 30%(N2)、N1 处理基础上配施碳基营养肥 2 250 kg/hm²(CN1)、N2 处理基础上配施碳基营养肥 2 250 kg/hm²(CN2)。每处理 3 次重复,共计 18 个小区,小区面积 5 m \times 6 m,随机区组排列。

试验于 2021 年 4—12 月进行,太白试验点于 2021 年 5 月 12 日进行大白菜种子播种育苗,6 月 9 日移栽,8 月 10 日收获;杨凌试验点于 2021 年 8 月 14 日育苗,9 月 6 日移栽,11 月 12 日收获。大白菜栽种方式均为半高垄栽培,垄高 10 cm,株距 40 cm,行距 40 cm。移栽前 2 周,所有肥料均作基肥施用,其中有机-无机复混肥、复合肥和尿素撒施,碳基营养肥喷施,然后翻地使肥料与土壤耕层(0~20 cm)充分混合。各处理的施肥方案见表 1,大白菜生长期,各处理小区的除草、浇灌和病虫害防治等田间管理措施均按照当地栽培管理习惯进行。

表 1 大白菜田间施肥试验各处理的氮肥与碳基营养肥用量

Table 1 Amounts of nitrogen fertilizer and carbon-based nutrient fertilizer in

Chinese cabbage field fertilization tests

kg/hm²

处理 Treatment	施肥总量 Total amount of fertilizer applied			
	N	P_2O_5	K_2O	碳基营养肥 Carbon-based nutrient fertilizer
CK	300	120	112.5	0
OF	360	240	120.0	0
N1	255	120	112.5	0
N2	210	120	112.5	0
CN1	255	120	112.5	2 250
CN2	210	120	112.5	2 250

1.4 样品采集及测定项目和方法

1.4.1 大白菜样品采集与测定 在大白菜采收期,避开小区边缘,在每个试验小区随机选取 8 株大白菜植株,其中 5 株用于植株株高、株幅、叶球纵径、叶球横径、外叶长、外叶宽及单株质量的测定,并根据 5 株大白菜的总质量计算小区产量。另外 3 株大白菜的叶球,各取 1/4 用破壁机打成匀浆后测定大白菜的品质指标,其中可溶性糖含量采用蒽酮-硫酸比色法测定,可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G250 比色法测定,维生素 C 含量采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法测定,硝酸盐含量采用酚二磺酸比色法^[11]测定。

1.4.2 土壤样品采集与测定 分别在大白菜的莲座期、结球期、采收期,采用 5 点取样法,用土钻采集 2 个试验点 0~20 cm 土层土壤样品,带回实验室后去除石砾及动植物残渣,其中一部分置于-80℃冰箱保存,用于土壤硝态氮、铵态氮、可溶性碳含量测定;另一部分风干磨细后过孔径 20 目(0.833 mm)筛,用于 pH、电导率(EC)及有效磷、速效钾含量测定。

土壤理化指标中,pH、EC 采用电位法(水土比分别为 2.5:1 和 5:1)测定,土壤可溶性碳含量用水浸提后采用总有机碳分析仪(TOC-L,日本岛津)测定,土壤硝态氮、铵态氮含量用 1 mol/L KCl 溶液浸提后采用连续流动分析仪(AA3,SEAL Company,德国)测定,土壤有效磷含量用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提后采用比色法测定,土壤速效钾含量用 1 mol/L NH₄OAc 溶液浸提后采用火焰光度计

(M410,Sherwood Comoany,英国)^[12]测定。

1.5 试验数据处理

试验数据采用 Excel 2019 和 SPSS 25.0 统计软件进行分析,采用单因素(one-way ANOVA)和图基(T)法进行方差分析和多重比较($P<0.05$)。利用 Origin 2023 软件绘图,结果以“平均值±标准误”表示。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对大白菜农艺性状、产量及营养品质的影响

2.1.1 大白菜农艺性状和产量 表 2 显示,2 个试验点大白菜产量均在 OF 处理时最大,CN1 处理次之。在太白试验点,与 CK 相比,N1 处理大白菜的各生长性状和产量稍有降低,但各指标间差异均不显著;N2 处理大白菜的株幅、叶球横径和产量分别显著下降 28.8%,13.6%和 29.5%;OF 和 CN1、CN2 处理大白菜的各生长性状虽略有变化,但差异均不显著;CN2 处理大白菜产量增加不明显,而 OF 和 CN1 处理大白菜的产量分别显著增加 12.8%,7.6%。在杨凌试验点,与 CK 相比,N1 处理大白菜的株高、株幅、外叶宽和产量分别显著下降 8.4%,11.2%,11.7%和 5.2%;N2 处理大白菜的株高、株幅、叶球横径、外叶长、外叶宽和产量分别显著下降 11.3%,17.2%,29.1%,12.8%,13.9%和 12.5%;OF 和 CN1 处理大白菜的各生长性状和产量略有变化,但差异均不显著;CN2 处理大白菜的株高、外叶宽和产量分别显著降低 5.9%,7.2%和 5.5%。

表 2 不同施肥处理对大白菜农艺性状及产量的影响

Table 2 Effects of different fertilization treatments on agronomic traits and yield of Chinese cabbage

试验点 Experimental site	处理 Treatment	株高/cm Plant height	株幅/cm Plant width	叶球纵径/cm Longitudinal diameter of head	叶球横径/cm Transverse diameter of head	外叶长/cm Length of outer leaf	外叶宽/cm Width of outer leaf	产量/(t·hm ⁻²) Yield
太白 Taibai	CK	62.9±0.6 ab	35.1±1.8 a	27.0±0.3 a	16.2±0.6 a	40.8±0.9 ab	24.4±1.0 a	68.8±2.1 c
	OF	64.3±1.0 a	36.0±1.0 a	26.4±0.3 a	15.3±0.5 ab	41.1±1.0 a	23.2±0.5 a	77.6±1.8 a
	N1	57.9±4.6 ab	34.0±2.5 a	27.0±0.4 a	15.8±0.2 a	39.6±0.3 ab	23.3±1.8 a	66.5±2.7 c
	N2	52.6±5.9 b	25.0±3.7 b	25.7±0.3 a	14.0±0.3 b	35.6±4.0 b	20.4±3.1 a	48.5±1.6 d
	CN1	66.8±2.4 a	34.5±0.5 a	27.0±1.4 a	14.9±0.7 ab	37.0±1.1 ab	21.4±1.3 a	74.0±1.8 ab
	CN2	60.0±4.8 ab	29.1±5.8 ab	26.8±1.3 a	14.8±1.0 ab	39.7±1.9 ab	24.0±0.3 a	70.0±1.9 bc
杨凌 Yangling	CK	54.7±1.6 a	41.8±1.7 a	31.4±0.5 ab	15.8±1.0 a	36.6±1.4 ab	22.3±0.4 a	76.5±0.8 a
	OF	53.1±0.3 ab	42.8±2.2 a	31.2±0.5 ab	15.0±1.0 a	35.7±0.2 ab	21.3±0.9 ab	77.1±1.5 a
	N1	50.1±0.2 cd	37.1±1.7 bc	30.4±0.5 b	15.2±0.8 a	35.7±0.4 ab	19.7±0.5 cd	72.5±1.6 b
	N2	48.5±0.8 d	34.6±1.8 c	30.6±0.4 b	11.2±0.8 b	31.9±0.8 c	19.2±0.6 cd	66.9±2.9 c
	CN1	52.5±1.2 abc	42.0±1.2 a	32.6±1.4 a	15.3±0.9 a	37.3±1.3 a	21.3±0.4 ab	76.8±1.1 a
	CN2	51.5±1.0 bc	39.9±0.5 ab	31.2±0.2 ab	15.0±0.6 a	34.4±1.3 b	20.7±0.6 bc	72.3±1.2 b

注:同列数据后标不同小写字母表示同一试验点不同处理之间差异显著($P<0.05$)。

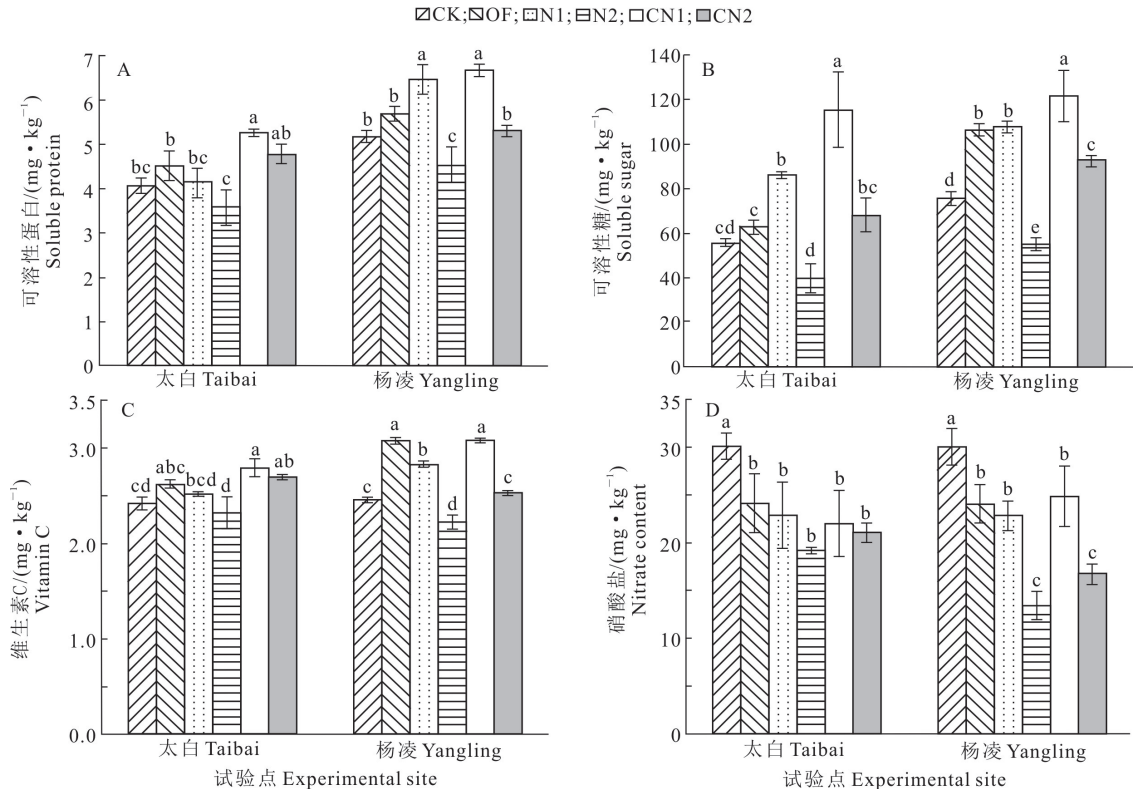
Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments at same test points ($P<0.05$).

2.1.2 大白菜营养品质 由图 1-A 可知,在太白试

验点,大白菜的可溶性蛋白含量以 CN1 处理最高,

较 CK 显著提高了 29.6%；N2 处理的可溶性蛋白含量较 CK 有所降低，其余施肥处理较 CK 均有不同程度提高，但差异不显著。在杨凌试验点，与 CK 相比，N2 处理大白菜的可溶性蛋白含量显著降低

12.2%，而 N1 和 CN1 处理分别显著增加 25.2% 和 29.1%，其余施肥处理均有不同程度提高，但差异不显著。



图柱上标不同小写字母表示同一试验点不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments in same periods ($P < 0.05$).

图 1 不同施肥处理对大白菜营养品质的影响

Fig. 1 Effects of different fertilization treatments on nutritional quality of Chinese cabbage

图 1-B 显示，在太白试验点，与 CK 相比，N1 和 CN1 处理大白菜可溶性糖含量分别显著增加 54.4% 和 106.9%，CN2 处理大白菜可溶性糖含量有所增加，但差异不显著；而 N2 处理大白菜可溶性糖含量有一定程度下降，但差异不显著。在杨凌试验点，与 CK 相比，OF、N1、CN1 和 CN2 处理大白菜可溶性糖含量分别显著增加 42.3%，42.4%，60.6% 和 22.5%；而 N2 处理大白菜可溶性糖含量显著下降 27.1%。

图 1-C 表明，在太白试验点，与 CK 相比，OF、N1、CN1、CN2 处理大白菜维生素 C 含量均有不同程度增加，其中 CN1、CN2 处理显著增加 15.5% 和 11.5%；而 N2 处理有一定程度下降，但差异不显著。在杨凌试验点，与 CK 相比，OF、N1 和 CN1 处理大白菜维生素 C 含量分别显著增加 42.3%，14.8% 和 25.3%，而 N2 处理维生素 C 含量显著降低 9.6%。

由图 1-D 可知，与 CK 相比，太白和杨凌 2 个试验点不同施肥处理大白菜的硝酸盐含量均显著下降，降幅分别为 19.9% ~ 36.3% 和 17.1% ~ 55.2%。大白菜的硝酸盐含量随减氮量增大而降低，以 N2 处理的硝酸盐含量最低。与减氮施肥处理相比，配施碳基营养肥对大白菜的硝酸盐含量无显著影响。

2.2 不同施肥处理对土壤理化性质的影响

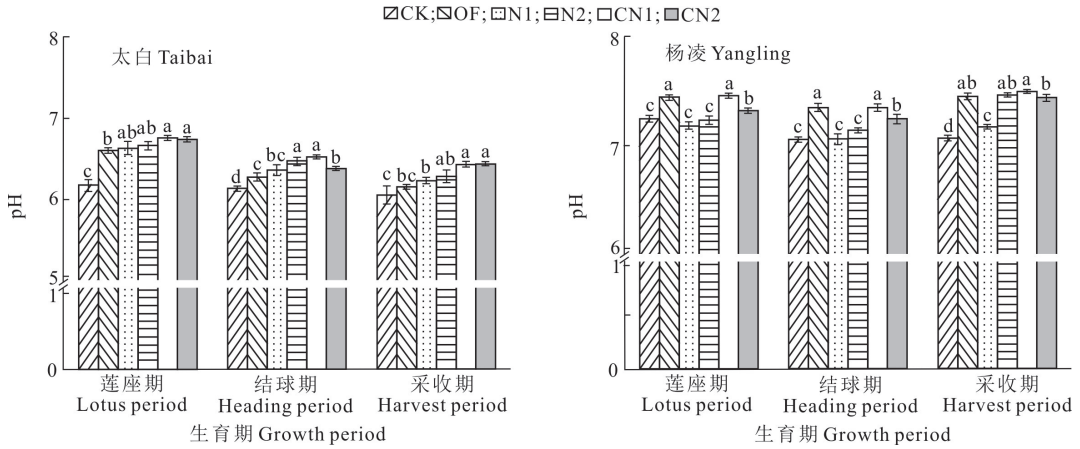
2.2.1 土壤 pH

由图 2 可见，不同施肥处理下，大白菜不同生长期土壤 pH 值变化并不相同。在太白试验点，从大白菜的莲座期至采收期，各处理土壤 pH 整体均呈现下降趋势，土壤 pH 为 6.06 ~ 6.76，属于中性偏酸性土壤。在大白菜的莲座期、结球期、采收期 3 个时期，减氮处理 (N1、N2) 和碳基营养肥处理 (CN1、CN2) 土壤 pH 值较 CK 均显著增加，以 CN1 处理增加幅度最大，分别显著增加 9.4%，6.2% 和 6.1%；施用有机-无机复混肥处理 (OF) 同

样显著增加了大白菜莲座期、结球期土壤 pH 值,分别显著增加 6.8% 和 2.3%。

由图 2 还可以看出,在杨凌试验点,从大白菜的莲座期至采收期,各处理土壤 pH 总体呈先降低后增加的趋势,土壤 pH 为 7.06~7.50,属于中性土壤。从大白菜的莲座期至采收期,有机-无机复合肥

处理(OF)和碳基营养肥处理(CN1、CN2)土壤 pH 值较 CK 均显著增加,其中以 CN1 处理增幅最大,分别显著增加 3.0%,4.1% 和 6.1%;减氮处理(N1、N2)可以显著增加采收期土壤的 pH 值,分别显著增加 1.4% 和 5.7%。



图柱上标不同小写字母表示同一生长时期不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Different lowercase letters indicated significant differences among treatments in same periods ($P < 0.05$). The same below.

图 2 不同施肥处理对土壤 pH 值的影响

Fig. 2 Effects of different fertilization treatments on soil pH value

2.2.2 土壤 EC 由图 3 可知,随着大白菜生长,2 个试验点土壤 EC 值均逐渐降低。在太白试验点,从大白菜的莲座期至采收期,减氮处理(N1、N2)和碳基营养肥处理(CN1、CN2)土壤 EC 值较 CK 均显著降低,N1、N2、CN1、CN2 处理土壤 EC 值较相应生育期对照土壤分别降低 23.2%~36.1%,38.6%~53.9%,19.9%~28.2% 和 30.4%~

38.9%。在杨凌试验点,各处理土壤 EC 值与对照相比均显著降低。从大白菜的莲座期至采收期,与 CK 相比,OF 处理土壤 EC 值降低 9.3%~22.7%,N1、N2 处理土壤 EC 值分别显著降低 10.8%~25.7% 和 29.4%~37.6%,CN1、CN2 处理土壤 EC 值分别显著降低 7.0%~21.0% 和 13.7%~25.9%。

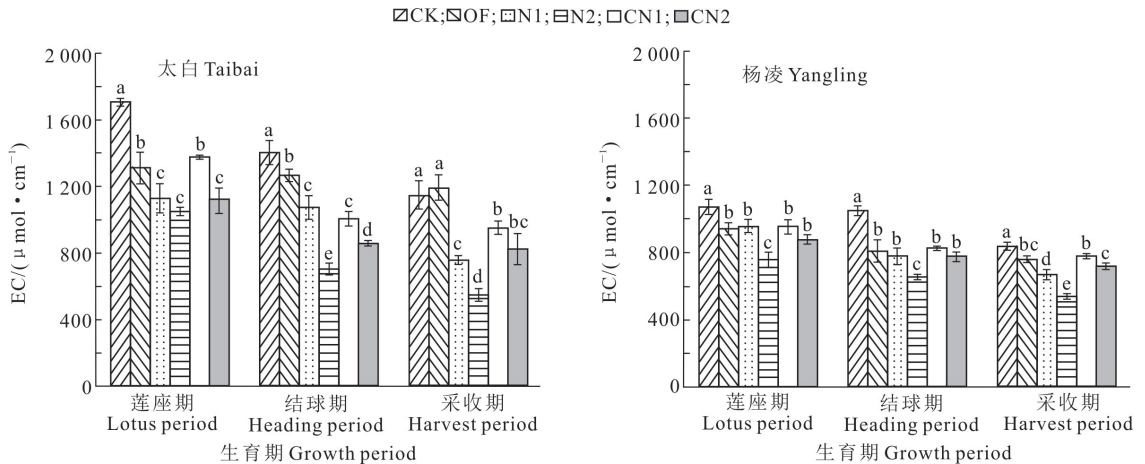


图 3 不同施肥处理对土壤 EC 值的影响

Fig. 3 Effects of different fertilization treatments on soil EC value

2.2.3 土壤可溶性碳 由图 4 可知,在 2 个试验点,大白菜生长期中土壤可溶性碳含量呈现逐渐上升趋势,且均在采收期达到最高值。在太白试验点,

大白菜莲座期 CN1 处理土壤可溶性碳含量较 CK 处理显著增加 69.5%,大白菜结球期 CN1 处理土壤可溶性碳含量较 OF 处理显著增加 38.3%。在杨凌

试验点,与 CK 相比,大白菜莲座期,OF、CN1、CN2 处理土壤可溶性碳含量分别显著增加 16.0%、42.5%和 24.7%,而 N2 处理土壤可溶性碳含量显著降低 17.8%;大白菜结球期,CN1 处理土壤可溶性碳含量显著增加 27.8%,而 N2 处理土壤可溶性

碳含量显著降低 20.1%;大白菜采收期,N1、N2 处理土壤可溶性碳含量分别显著降低 10.8%和 25.3%,而 CN1 处理土壤可溶性碳含量显著增加 27.4%。

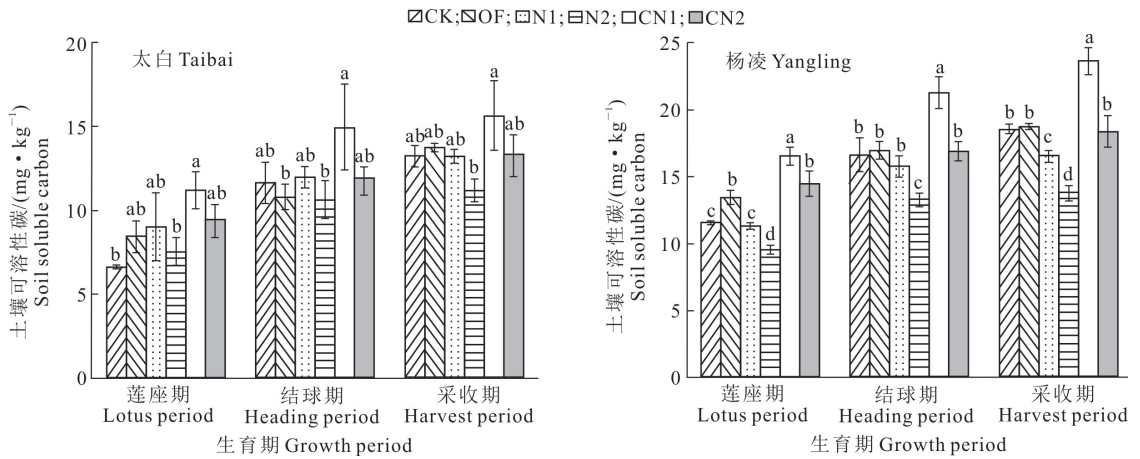


图 4 不同施肥处理对土壤可溶性碳的影响

Fig. 4 Effects of different fertilization treatments on soil soluble carbon

2.2.4 土壤硝态氮 作物吸收氮素形式以硝态氮为主,土壤硝态氮含量可在一定程度上反映作物对氮的吸收情况。由图 5 可知,在太白试验点,大白菜莲座期,N1、N2 处理土壤硝态氮含量较 CK 分别显著降低 34.1%和 50.8%,而 CN1 处理较 CK 显著增加 14.0%;大白菜结球期,N1、N2 和 CN2 处理土壤硝态氮含量较 CK 分别显著降低 39.5%、58.0%和 22.0%,而 CN1 处理较 CK 显著增加 18.3%;大白菜采收期,N1、N2 和 CN2 处理土壤硝态氮含量较 CK 分别显著降低 35.9%、67.3%和 14.4%,而 CN1 处理较 CK 有所增加,但差异不显著。

由图 5 还可以看出,在杨凌试验点,大白菜莲座期,N1、N2 处理土壤硝态氮含量较 CK 分别显著降低 35.0%和 58.4%,而 CN1 处理较 CK 显著增加 27.4%;大白菜结球期,N1、N2 处理土壤硝态氮含量较 CK 分别显著降低 24.0%和 52.0%,CN2 处理较 CK 有所减少,但差异不显著,而 CN1 处理较 CK 显著增加 13.3%;大白菜采收期,OF、N1、N2、CN2 处理土壤硝态氮含量较 CK 分别显著降低 15.8%、44.6%、51.3%和 17.9%,而 CN1 处理较 CK 显著增加 17.1%。

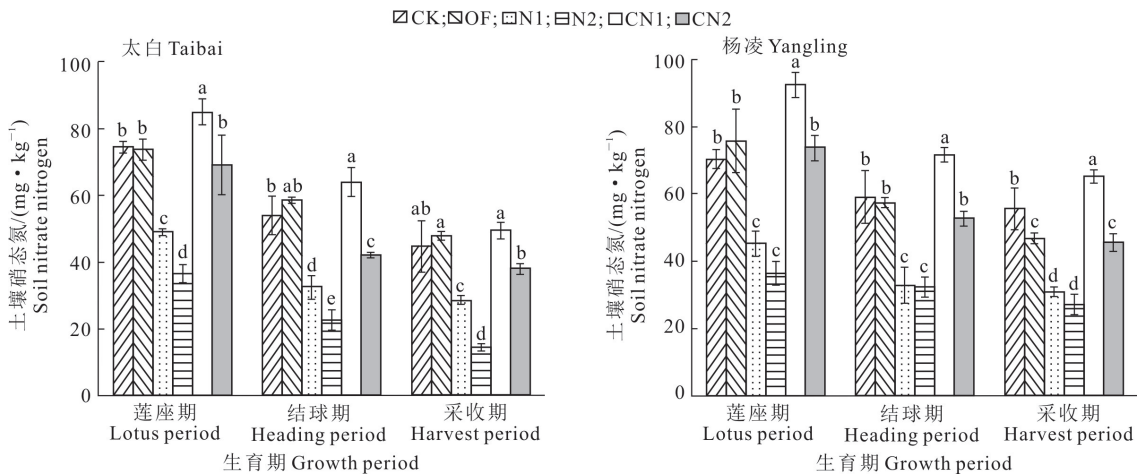


图 5 不同施肥处理对土壤硝态氮的影响

Fig. 5 Effects of different fertilization treatments on soil nitrate nitrogen

2.2.5 土壤铵态氮 铵态氮是土壤中重要的矿化

氮,能直接或经过转化为硝态氮被植物吸收利用,是

土壤肥力的重要衡量指标和作物生长的重要氮源。由图 6 可知,在太白试验点,大白菜莲座期,OF 处理土壤铵态氮含量较 CK 显著增加 20.2%,CN1、CN2 处理较 N1、N2 处理分别显著增加 33.5%和 37.1%,而 N1、N2、CN2 处理较 CK 分别显著降低 31.8%,54.6%和 37.7%;大白菜结球期,所有处理土壤铵态氮含量均较 CK 显著降低,具体表现为 CK>OF>CN1>N1>CN2>N2,其中 CN1、CN2 处理土壤铵态氮含量较 N1、N2 处理显著增加 19.9%和 30.7%;大白菜采收期,OF、CN1 处理土壤铵态氮含量分别较 CK 显著增加 23.1%和 25.2%,CN1、CN2 处理分别较 N1、N2 处理显著增加 155.0%和 73.5%,而 N1、N2 处理分别较 CK 显

著下降 50.9%和 49.5%。在杨凌试验点,大白菜莲座期,所有处理土壤铵态氮含量均较对照显著降低,表现为 CK>CN1>N1>OF>CN2>N2;大白菜结球期,N1、N2 和 CN2 处理土壤铵态氮含量分别较 CK 显著下降 24.0%,52.0%和 25.8%,而 CN1、CN2 处理较 N1、N2 处理分别显著增加 49.1%和 54.6%;大白菜采收期,OF、CN1 处理土壤铵态氮含量分别较 CK 显著增加 16.2%和 33.1%,CN1、CN2 处理分别较 N1、N2 处理显著增加 69.1%和 123.7%,而 N1、N2 处理分别较 CK 显著降低 21.3%和 53.5%。

2.2.6 土壤有效磷 2 个试验点不同施肥处理对土壤有效磷的影响见图 7。

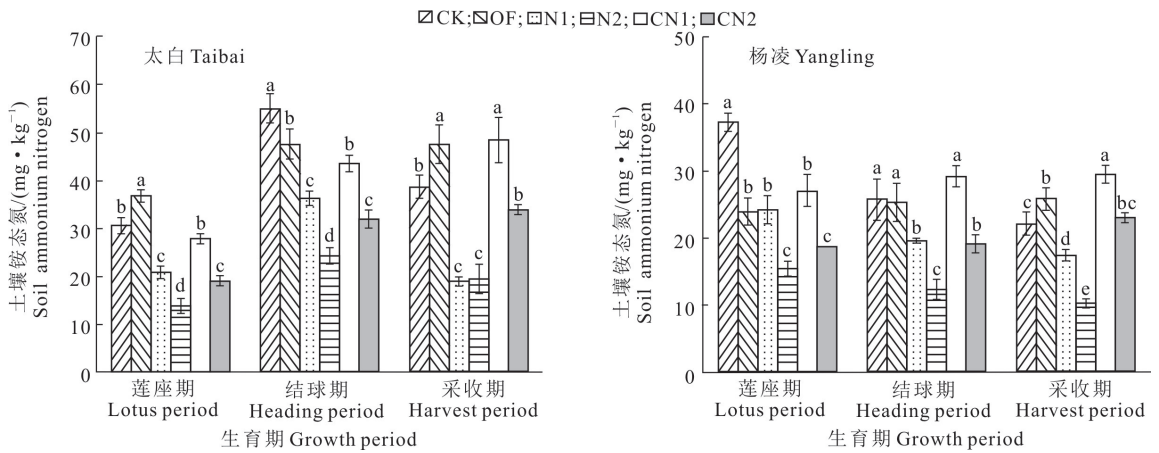


图 6 不同施肥处理对土壤铵态氮的影响

Fig. 6 Effects of different fertilization treatments on soil ammonium nitrogen

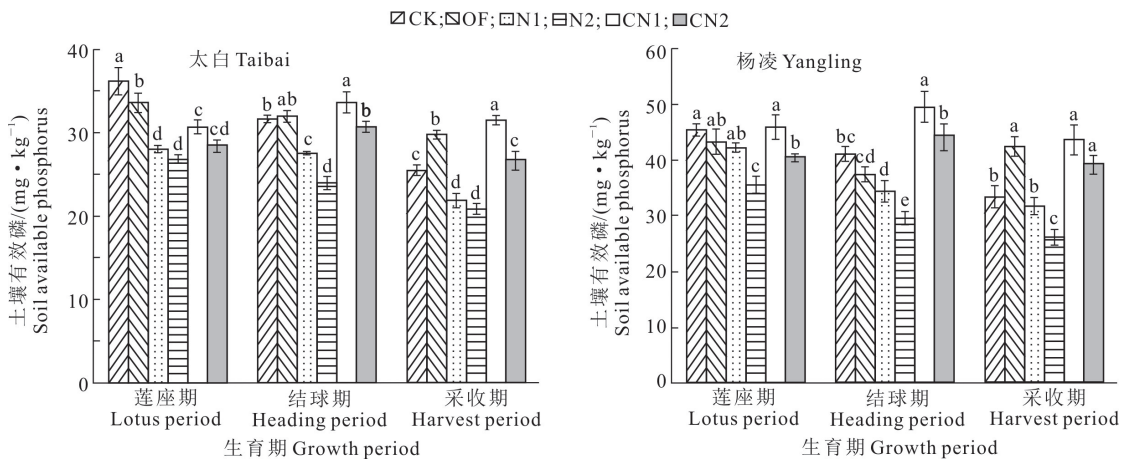


图 7 不同施肥处理对土壤有效磷的影响

Fig. 7 Effects of different fertilization treatments on soil available phosphorus

由图 7 可以看出,在太白试验点,大白菜莲座期以 CK 处理土壤有效磷含量最大,其余各施肥处理土壤有效磷含量均显著降低,表现为 OF>CN1>CN2>N1>N2;大白菜结球期,N1、N2 处理土壤有效磷含量较 CK 显著降低 13.0%和 24.2%,而

CN1 处理较 CK 显著增加 6.2%,CN1、CN2 处理较 N1、N2 处理分别显著增加 22.0%和 27.7%;大白菜采收期,OF、CN1 处理土壤有效磷含量较 CK 显著增加 16.9%和 23.7%,CN1、CN2 处理较 N1、N2 处理分别显著增加 44.1%和 28.4%,而 N1、N2 处

理较 CK 显著降低 14.1% 和 18.1%。

由图 7 还可以看出,在杨凌试验点,大白菜莲座期,N2 和 CN2 处理土壤有效磷含量较 CK 显著降低 21.7% 和 10.8%;大白菜结球期,N1、N2 处理土壤有效磷含量较 CK 显著降低 16.3% 和 28.0%,而 CN1 处理较 CK 显著增加 20.5%,CN1、CN2 处理较 N1、N2 处理分别显著增加 43.9% 和 50.5%;大白菜采收期,OF、CN1 和 CN2 处理土壤有效磷含量较 CK 分别显著增加 27.0%,30.7% 和 18.0%,CN1、CN2 处理较 N1、N2 处理分别显著增加 37.8% 和 50.8%,而 N2 处理较 CK 显著降低 21.8%。

2.2.7 土壤速效钾 如图 8 所示,在太白试验点,大白菜莲座期,CN1 处理土壤速效钾含量与 CK 差异不显著,OF、N1、N2、CN2 处理土壤速效钾含量较 CK 分别显著降低 12.9%,31.4%,33.8% 和 14.8%,而 CN1、CN2 处理较 N1、N2 处理分别显著增加 36.3% 和 28.8%;大白菜结球期,N1、N2 处理

土壤速效钾含量较 CK 显著降低 25.1% 和 29.6%,而 CN1、CN2 处理较 N1、N2 处理分别显著增加 26.2% 和 32.2%;大白菜采收期,减氮处理 N1、N2 土壤速效钾含量较 CK 显著降低 27.2% 和 31.7%,而 CN1、CN2 处理较 N1、N2 处理分别显著增加 38.3% 和 33.1%。在杨凌试验点,大白菜莲座期,OF、CN1 处理土壤速效钾含量较 CK 显著增加 14.1% 和 14.7%,CN1 处理较 N1 处理显著增加 21.9%,而 N2 处理较 CK 显著下降 14.5%;大白菜结球期,OF、CN1 处理土壤速效钾含量较 CK 显著增加 27.9% 和 19.4%,而 N1、N2 处理较 CK 显著下降 11.7% 和 23.3%,CN1 处理较 N1 处理显著增加 35.2%,CN2 处理较 N2 处理显著增加 28.1%;大白菜采收期,OF、CN1 处理土壤速效钾含量较 CK 分别显著增加 25.4% 和 29.4%,而 N1、N2 处理较 CK 分别显著下降 12.5% 和 35.5%,CN1 处理较 N1 处理显著增加 47.9%,CN2 处理较 N2 处理显著增加 59.4%。

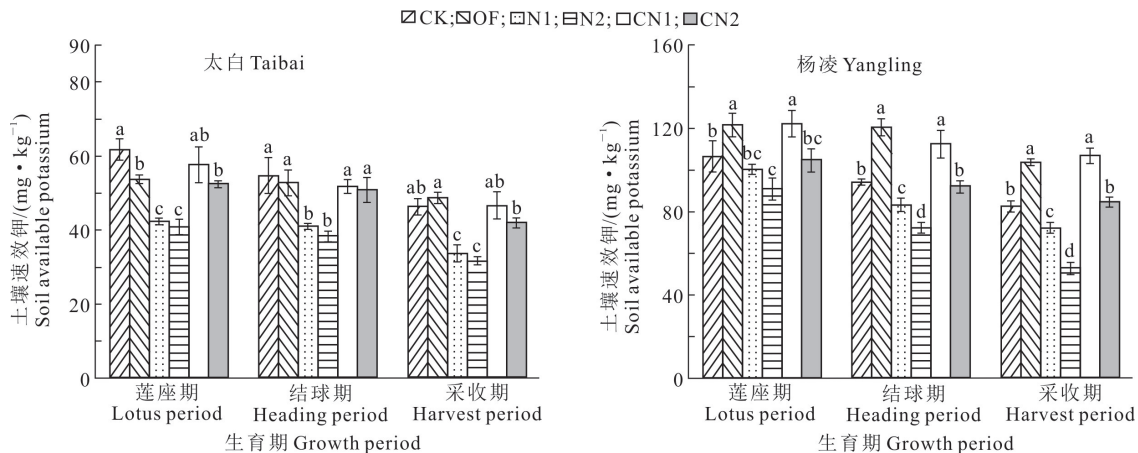


图 8 不同施肥处理对土壤速效钾的影响

Fig. 8 Effects of different fertilization treatments on soil available potassium

3 讨论

3.1 不同施肥措施对大白菜产量和品质的影响

作物的农艺性状与产量能够客观反映其生长情况。本研究结果表明,相较于常规氮肥处理,随减氮量的增大,减施氮肥处理的大白菜产量下降幅度越大,在减氮 30% 时产量显著下降。佟容等^[13]的研究表明,减施氮肥 20% 不会使菠菜产量出现大幅度下降,减施 30% 氮肥的两个菠菜品种产量均显著降低,这与本研究结果相似。Michael 等^[14]的研究表明,有机肥料代替 23%~52% 的氮肥不会造成作物的产量损失。本研究中,施用含 25% 有机物料的有机-无机复混肥代替化肥可以显著增加 2 个试验点

的大白菜产量,并达到最大值。有机肥能够对土壤理化性质产生积极影响,包括调节土壤酸碱度、提高土壤保水保肥能力,从而促进作物生长,提高作物产量^[15]。生物有机肥在活化土壤养分、改善土壤理化性状和提高作物产质量等方面具有重要作用,而碳基营养肥是一种新型生物有机肥,富含多种碳源与矿物质营养。本研究发现,与减氮施肥相比,碳基营养肥处理 CN1、CN2 的大白菜产量在 2 个试验点均显著增加,这与马学森^[16]、何楠^[17]的研究结果基本一致,证明化肥配施碳基营养肥能够有效提高作物产量,且效果显著高于单施化肥。说明施用碳基营养肥在降低化肥施用量方面具有一定潜力。

可溶性糖、可溶性蛋白、维生素 C 和硝酸盐含

量等都是衡量蔬菜营养品质的重要指标。茹朝等^[18]研究发现,减施30%化肥并配施9 000 kg/hm²生物有机肥处理大白菜的可溶性糖、可溶性蛋白和游离氨基酸含量均显著增加。本研究结果也表明,施用255 kg/hm² N配施2 250 kg/hm²碳基营养肥的大白菜可溶性蛋白、可溶性糖和维生素C含量均显著增加。碳基营养肥作为一种人工模拟微生物降解天然有机物的新型生物有机肥料,其中含有的丰富微量元素能够显著提高水果品质、降低酸味物质含量^[19]。高硝酸盐含量的蔬菜会严重危害人体健康,过量施用矿物肥料,特别是氮肥是植物组织中硝酸盐积累水平高的重要原因^[20]。本研究中,所有处理大白菜的硝酸盐含量均显著低于常规化肥处理,但减氮30%处理不仅显著降低了大白菜硝酸盐含量,同时也降低了蔬菜中其他营养品质,这可能与减施氮肥量过大时土壤养分无法满足作物营养物质合成有关^[21]。孙小凤^[22]的研究表明,氮肥用量与硝酸盐含量呈正相关。大量研究表明,适宜的氮肥用量会降低油菜、小白菜、黄瓜、番茄中硝酸盐含量^[23-25]。这可能是由于土壤微生物通过改善硝酸盐还原酶活性来降低土壤硝酸盐含量^[26],或者是碳基营养肥水溶性小分子与多种矿物元素进行配位反应,形成有机配位化合物,无机氮含量较少,不能被植物直接吸收利用,从而降低了大白菜中硝酸盐含量^[17]。

3.2 不同施肥措施对大白菜田土壤基本理化性质的影响

土壤理化性质是土壤质量的评价指标。肖庆礼等^[27]研究发现,有机肥可以降低土壤体积质量和土壤离子浓度,增加土壤通透性,改变土壤结构,对土壤酸化有缓解作用。本研究结果表明,施用碳基营养肥可以提高太白试验点土壤pH,而对杨凌试验点土壤pH影响较小。这可能是由于2个试验点基础土壤pH差别较大,而大多数有机肥料呈碱性,能够中和酸性土壤,而对碱性土壤影响较小^[28]。Elena等^[29]研究结果表明,施用有机肥可以显著增加果园土壤有机质含量和全氮含量,并随着土壤有机质经过一系列微生物分解利用,可以转化成植株生长所需的营养元素,加快土壤中碳氮养分的循环^[30]。生物类肥料中富含微生物,可加快分解或转化土壤有机质,进而提高土壤养分含量^[30]。本研究发现,在大白菜生长的同一生育期,OF和CN1处理土壤的可溶性碳、铵态氮和硝态氮含量与CK相比都处于较高水平。这可能是由于有机肥料由各种天然有

机物制备而成,富含大量有机碳,能够提高土壤有机质含量^[16]。已有研究发现,施用有机肥部分代替化肥能够显著改善土壤N、P、K养分积累^[31]。Jun等^[32]的研究发现,有机与无机肥联合施用可以在一定程度上提高土壤有效养分含量,从而提高作物产量。本试验发现,碳基营养肥部分代替氮肥后,试验地土壤有效磷、速效钾含量较单独减氮施肥显著增加。原因可能是施用有机肥不会导致植物可用养分固定,而是通过提高土壤微生物活性来提高养分利用率^[33]。Liu等^[34]的研究也认为,土壤条件的改善源于土壤有机质和矿化养分的供应,最终可以提高植物生产力。此外,碳基营养肥本身就是由有机物质与化学营养元素组合而成,其本身含有大量的磷、钾元素^[16]。

4 结 论

在太白试验点褐土和杨凌试验点壤土两种类型土壤上进行了大白菜施肥试验,结果表明,与常规施肥相比,有机-无机复混肥与减氮配施碳基营养肥能够显著提高土壤pH值,降低土壤EC值,且减氮配施碳基营养肥处理显著增加了土壤可溶性碳、硝态氮、铵态氮、有效磷和速效钾含量,其中以减氮15%配施碳基营养肥处理(CN1)效果最佳。

[参考文献]

- [1] 山楠,串丽敏,刘继培,等. 基于产量反应和农学效率的白菜推荐施肥方法可行性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(9): 1681-1690.
Shan N, Chuan L M, Liu J P, et al. Availability of fertilizer recommendation based on yield response and agronomic efficiency of Chinese cabbage[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(9): 1681-1690.
- [2] Guo J, Li C, Xu X, et al. Farmland scale and chemical fertilizer use in rural China: new evidence from the perspective of nutrient elements[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 376: 134278.
- [3] Bai X, Jiang Y, Miao H, et al. Intensive vegetable production results in high nitrate accumulation in deep soil profiles in China[J]. Environmental pollution, 2021, 287: 117598.
- [4] 刘正洋,王若斐,乔策策,等. 木霉生物有机肥对白菜和甘蓝产量及土壤微生物区系的影响[J]. 南京农业大学学报, 2020, 43(4): 650-657.
Liu Z Y, Wang R F, Qiao C C, et al. Effects of Trichoderma bio-organic fertilizer application on yield and soil microflora in Chinese cabbage and cabbage rotation system[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2020, 43(4): 650-657.
- [5] 阎世江,柴文臣,王生武. 生物菌肥与化肥配施对青椒生长、产量及果实品质的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(1): 159-163.

- Yan S J, Chai W C, Wang S W. Effect of biological fertilizer and chemical fertilizer on growth, yield and edible portion quality of green pepper [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(1): 159-163.
- [6] 李晓亮, 余小兰, 戚志强, 等. 海南有机肥替代氮肥对辣椒生长和品质的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2021(1): 151-155.
- Li X L, Yu X L, Qi Z Q, et al. Study on the effect of organic fertilizer replacing nitrogen fertilizer on growth and quality of pepper in Hainan province [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(1): 151-155.
- [7] Yang H J, Ma J X, Rong Z Y, et al. Wheat straw return influences nitrogen-cycling and pathogen associated soil microbiota in a wheat-soybean rotation system [J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 1811.
- [8] Brenzinger K, Costa O Y A, Ho A, et al. Steering microbiomes by organic amendments towards climate-smart agricultural soils [J]. Biology and Fertility of Soils, 2021, 57(8): 1053-1074.
- [9] 张庆, 胡春胜, 刘彬彬, 等. 生物有机肥配施化肥对生菜生长和土壤环境的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2023, 31(5): 725-741.
- Zhang Q, Hu C S, Liu B B, et al. Influence of combined application of bioorganic fertilizer and chemical fertilizer on lettuce growth and soil environment [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(5): 725-741.
- [10] Ma X M, Li H X, Xu Y, et al. Effects of organic fertilizers via quick artificial decomposition on crop growth [J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 3900.
- [11] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- Gao J F. Experimental guidance for plant physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [13] 佟容, 王国臣, 乔建磊, 等. 减氮施肥对菠菜生长发育及品质的影响 [J]. 北方园艺, 2021(14): 59-64.
- Tong R, Wang G C, Qiao J L, et al. Effects of nitrogen reduction and fertilization on growth, development and quality of spinach [J]. Northern Horticulture, 2021(14): 59-64.
- [14] Michael T R, To L P, Dang K N, et al. Up to 52% N fertilizer replaced by biofertilizer in lowland rice via farmer participatory research [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2014, 34(4): 857-868.
- [15] 张佳. 草炭和碳基肥对猕猴桃根区土壤及微生物的效应研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- Zhang J. Effects of peat and carboly fertilizer on soil and microorganism in root zone of kiwifruit [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2019.
- [16] 马学森. 碳基营养肥对土壤生物化学性质及白及药材品质影响的研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- Ma X M. Effects of carbon-based nutrients on soil biochemical properties and quality of *Bletilla striata* [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.
- [17] 何楠. 不同有机肥料对猕猴桃土壤微生物生态及产量、品质的影响研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- He N. Effects of different organic fertilizers on soil microecology, yield and quality of kiwifruit [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2019.
- [18] 茹朝, 郁继华, 武玥, 等. 化肥减量配施生物有机肥对露地大白菜产量及品质的影响 [J]. 浙江农业学报, 2022, 34(8): 1626-1637.
- Ru C, Yu J H, Wu Y, et al. Effect of reducing chemical fertilizer and applying bio-organic fertilizer on yield and quality of Chinese cabbage in open field [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2022, 34(8): 1626-1637.
- [19] 余光辉, 张杨珠, 王大娟. 喷施稀土和微肥对小白菜硝酸盐和亚硝酸盐含量及其他品质的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2005(S1): 9-12.
- Yu G H, Zhang Y Z, Wan D J. Effects of spraying rare earth elanent and micronutrient fertilizers on contents of nitrate and nitrite and other qualities in Chinese cabbage [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005(S1): 9-12.
- [20] Zhao H W, Sheng X L, Sukhdev M. Effects of fertilization and other agronomic measures on nutritional quality of crops [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2008, 88(1): 7-23.
- [21] 何东霞, 颀建明, 何志学, 等. 生物有机肥部分替代化肥对韭菜生长生理及肥料利用率的影响 [J]. 西北农业学报, 2020, 29(6): 958-967.
- He D X, Xie J M, He Z X, et al. Effect of partial substitution of chemical fertilizer with bio-organic fertilizer on growth physiological and fertilizer utilization efficiency in Chinese Chives [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2020, 29(6): 958-967.
- [22] 孙小凤. 不同供氮水平对油白菜产量和品质的影响 [J]. 土壤肥料, 2005(4): 11-13.
- Sun X F. Effect of nitrogen level on yield and qualities of pak-choi [J]. Soils and Fertilizer, 2005(4): 11-13.
- [23] 黄俊, 吴震, 郭世荣, 等. 固体肥种类与施肥量对穴盘小白菜生长及产量品质的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2007(1): 45-48.
- Huang J, Wu Z, Guo S R, et al. Effects of types and applying amount of solid fertilizer on growth quality and yield of non-heading Chinese cabbage under container culture [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007(1): 45-48.
- [24] 罗金葵, 陈巍, 张攀伟, 等. 小白菜适当增铵下硝酸盐累积机理研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2005(6): 94-97.
- Luo J K, Chen W, Zhang P W, et al. Mechanism of nitrate accumulation of Chinese cabbage under properly enhanced ammonium [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005(6): 94-97.

- [18] 范子彦,李立君,李宇航,等.基于改进灰狼算法的油茶果采摘机械臂轨迹规划[J].机械设计与研究,2022,38(1):195-201.
Fan Z Y,Li L J,Li Y H,et al. Trajectory planning of *Camellia* fruit picking manipulator based on improved grey wolf optimization[J]. Machine Design and Research, 2022, 38(1): 195-201.
- [19] 李宇航.推摇式油茶果采摘机液压系统仿真及优化[D].长沙:中南林业科技大学,2022.
Li Y H. Simulation and optimization of hydraulic system of push-shake *Camellia* fruit picking machine[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2022.
- [20] 周飞科,高自成,李立君,等.油茶采摘机采摘执行机构负荷应力仿真[J].计算机仿真,2018,35(7):170-174.
Zhou F K,Gao Z C,Li L J,et al. Load stress analysis for *Camellia oleifera* fruit harvesting machine actuator[J]. Computer Simulation, 2018, 35(7): 170-174.
- [21] 马喆,高自成,李立君,等.基于 AMESim 和 Simcenter3D 的齿梳式油茶果采摘机联合仿真[J].西北林学院学报,2021,36(2):289-296.
Ma Z,Gao Z C,Li L J,et al. Co-simulation of toothed comb oil tea fruit picking machine based on AMESim and Simcenter3D[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(2): 289-296.
- [22] 张国忠,陈立明,刘浩蓬,等.荸荠离散元仿真参数标定与试验[J].农业工程学报,2022,38(11):41-50.
Zhang G Z,Chen L M,Liu H P,et al. Calibration and experiments of the discrete element simulation parameters for water chestnut[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(11): 41-50.
- [23] 吴宗泽,高志,落圣国,等.机械设计课程设计手册[M].北京:高等教育出版社,2012.
Wu Z Z,Gao Z,Luo S G,et al. Mechanical design course design manual[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012.
- [24] 余国琮.化工机械工程手册[M].北京:化学工业出版社,2002.
Yu G Z. Process equipment engineering handbook[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [25] 机械设计手册编委会.机械设计手册[M].北京:机械工业出版社,2004.
Editorial Committee of Mechanical Design Manual. Machine design handbook[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [26] 罗时挺.齿梳拔刀式油茶果采摘装置设计与研究[D].南昌:江西农业大学,2017.
Luo S T. Design and research on the *Camellia* fruit picking machine with tooth comb dial knife[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2017.
- [27] 马云海.农业物料学[M].北京:化学工业出版社,2015.
Ma Y H. Agricultural materials science[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.

(上接第 142 页)

- [25] 孙权,高艳明,李建设.氮、磷、钾配合施用对油菜硝酸盐含量的影响[J].中国生态农业学报,2003(3):90-92.
Sun Q,Gao Y M,Li J S. Effects of different proportions of N, P, and K on nitrate contents in rape[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003(3): 90-92.
- [26] Chatterjee J, Tandon P K, Singh R R. Oxidative damages by chromium to growth and metabolism of radish[J]. Indian Journal of Agricultural Biochemistry, 2012, 24(2): 100-104.
- [27] 肖庆礼,陈昆燕,代先强,等.牛粪有机肥对植烟黄壤理化性质及持水能力的影响[J].中国烟草学报,2020,26(2):57-64.
Xiao Q L,Chen K Y,Dai X Q,et al. Effect of cattle manure organic fertilizer on physicochemical properties and water-holding capacity of tobacco-planting yellow soil[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2020, 26(2): 57-64.
- [28] 王晓玲,赵泽州,任树鹏,等.生物炭基肥在我国的制备和应用研究进展[J].中国土壤与肥料,2022(1):230-238.
Wang X L,Zhao Z Z,Ren S P,et al. Research progress on preparation and application of biochar-based fertilizer in China[J]. Soil and Fertilizer in China, 2022(1): 230-238.
- [29] Elena B, Graziella M, Maurizio Q, et al. Erratum to: organic fertilization in nectarine (*Prunus persica* var. *nucipersica*) orchard combines nutrient management and pollution impact[J]. Nutrient Cycling Agroecosystems, 2016, 106(1): 129-130.
- [30] 曲成闯,陈效民,韩召强,等.施用生物有机肥对黄瓜不同生育期土壤肥力特征及酶活性的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):279-284.
Qu C C,Chen X M,Han Z Q,et al. Effects of bio-organic fertilizer on soil fertility and enzymes activities in different growth stages of cucumber[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(6): 279-284.
- [31] Kashif A, Weiyu W, Guangxin R, et al. Changes in soil enzymes, soil properties, and maize crop productivity under wheat straw mulching in Guanzhong, China[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 182: 94-102.
- [32] Jun Z, Tian N, Jing L, et al. Effects of organic-inorganic compound fertilizer with reduced chemical fertilizer application on crop yields, soil biological activity and bacterial community structure in a rice-wheat cropping system[J]. Applied Soil Ecology, 2016, 99: 1-12.
- [33] Cristina L, Maria G, Pedro R, et al. Short-term effects of organic and inorganic fertilizers on soil microbial community structure and function[J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, 49(6): 723-733.
- [34] Liu J, Shu A, Song W, et al. Long-term organic fertilizer substitution increases rice yield by improving soil properties and regulating soil bacteria[J]. Geoderma, 2021, 404: 115287.