中国农业大学学报 2026,31(11):177-191
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

刘菁芳,宋小龙,李玟君,刘瑞强,汪淑芬,刘汉强,惠麦侠,陈书霞. 不同氮磷钾施肥水平对伸长期大蒜生长、产量和品质的影响[J]. 中国农业大学学报,2026,31(11):177-191.

LIU Jingfang, SONG Xiaolong, LI Wenjun, LIU Ruiqiang, WANG Shufen, LIU Hanqiang, HUI Maixia, CHEN Shuxia. Effects of different nitrogen, phosphorus and potassium fertilization levels on the growth, yield and quality of garlic during the vegetative stage[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026,31(11):177-191.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.11.13

不同氮磷钾施肥水平对伸长期大蒜生长、产量和品质的影响

刘菁芳 宋小龙 李玟君 刘瑞强 汪淑芬 刘汉强 惠麦侠 陈书霞*

(西北农林科技大学 园艺学院/陕西省蔬菜工程技术研究中心,陕西 杨凌 712100)

摘 要 为筛选大蒜栽培适宜的氮磷钾施肥水平,以主栽品种'改良蒜'为材料,设置8个不同施肥水平T1(120-24-60 kg/hm^2)、T2(180-36-90 kg/hm^2)、T3(240-48-120 kg/hm^2)、T4(300-60-150 kg/hm^2)、T5(360-72-180 kg/hm^2)、T6(420-84-210 kg/hm^2)、T7(480-96-240 kg/hm^2)、T8(540-108-270 kg/hm^2),以当地常规施肥水平为对照(CK,478-150-150 kg/hm^2),分析不同氮磷钾施肥水平对大蒜伸长期生长、鳞茎产量、品质及土壤理化性质的影响。结果表明:1)生长指标上,T5处理伸长期平均株高、叶长、叶宽和假茎粗最高,比CK分别增加了15.5%、18.8%、39.0%和49.2%;T6处理大蒜假茎高和叶片数最高,较CK提高了8.9%和16.9%。2)鳞茎产量指标上,T5处理的鳞茎横径最大,比CK增加了28.3%;T6处理的鳞茎纵径最大,比CK增加了22.4%;T4处理鳞茎干重和鲜重最高,比CK分别增加了16.2%和20.4%。T4处理的大蒜产量最高,T7处理次之,各处理的产量显著高于CK($P<0.05$)。3)品质指标上,T1处理大蒜素含量和可溶性蛋白含量均较高,分别比对照增加16.3%和24.1%;硝酸盐含量随施肥量增加呈上升趋势。4)土壤理化性质上,施肥增加导致土壤中全氮全磷全钾含量提高。相关性分析表明,大蒜叶宽、假茎粗和产量呈正相关关系。通过熵权TOPSIS分析表明,T5处理综合评分最高,可作为大蒜高产优质施肥管理的依据。

关键词 施肥水平;大蒜;鳞茎产量;品质;熵权TOPSIS分析

中图分类号 S633.4 **文章编号** 1007-4333(2026)11-0177-15 **文献标志码** A

Effects of different nitrogen, phosphorus and potassium fertilization levels on the growth, yield and quality of garlic during the vegetative stage

LIU Jingfang, SONG Xiaolong, LI Wenjun, LIU Ruiqiang, WANG Shufen, LIU Hanqiang, HUI Maixia, CHEN Shuxia*

(College of Horticulture/Shaanxi Vegetable Engineering Technology Research Center, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract To determine the appropriate nitrogen, phosphorus and potassium fertilization levels for garlic cultivation. Using the improved garlic variety as the material, eight different fertilization levels were set: T1 (120-24-60 kg/hm^2), T2 (180-36-90 kg/hm^2), T3 (240-48-120 kg/hm^2), T4 (300-60-150 kg/hm^2), T5 (360-72-180 kg/hm^2), T6 (420-84-210 kg/hm^2), T7 (480-96-240 kg/hm^2), T8 (540-108-270 kg/hm^2), with the local conventional fertilization level as the control (CK, 478-150-150 kg/hm^2). The effects of different nitrogen,

收稿日期:2026-02-01;接受日期:2026-05-22

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD1600200)

第一作者:刘菁芳(ORCID:0009-0004-2988-0299),硕士研究生,E-mail:jingfangliu@nwafu.edu.cn

通讯作者:陈书霞(ORCID:0000-0002-3090-847X),教授,主要从事蔬菜生理与生物技术研究,E-mail:shuxiachen@nwsuaf.edu.cn

phosphorus and potassium fertilization levels on the growth, bulb yield, quality and soil physical and chemical properties of garlic during the growth period were analyzed. The results showed that: 1) In terms of growth indicators, the average plant height, leaf length, leaf width and pseudostem diameter of the T5 treatment were the highest during the growth period, increasing by 15.5%, 18.8%, 39.0% and 49.2% respectively compared to CK. The T6 treatment had the highest garlic pseudostem height and leaf number, increasing by 8.9% and 16.9% respectively compared to CK. 2) In terms of bulb yield indicators, the T5 treatment had the highest bulb cross-diameter, increasing by 28.3% compared to CK. The T6 treatment had the largest bulb longitudinal diameter, increasing by 22.4% compared to CK. The T4 treatment had the highest bulb dry weight and fresh weight, increasing by 16.2% and 20.4% respectively compared to CK. The yield of the T4 treatment was the highest, followed by the T7 treatment, but the yields of all treatments were significantly higher than CK($P<0.05$). 3) In terms of quality indicators, the T1 treatment had higher garlic saponin content and soluble protein content, increasing by 16.3% and 24.1% respectively compared to the control. The nitrate content increased with the increase in fertilization amount. 4) In terms of soil physical and chemical properties, fertilization increased the total nitrogen, total phosphorus and total potassium contents in the soil. Correlation analysis showed that garlic leaf width, pseudostem diameter and yield were positively correlated. Through entropy weight TOPSIS analysis, the T4 treatment had the highest comprehensive score and could be used as the basis for high-yield and high-quality fertilization management of garlic.

Keywords fertilization levels; Garlic; bulb yield; quality; entropy weight TOPSIS analysis

大蒜(*Allium sativum*)属百合科葱属的草本植物,起源于中亚[1-2],在世界各地广泛种植。我国大蒜产量为23.08 t/hm^2,是仅次于洋葱的第二大葱属植物[3-5],居世界首位[6]。大蒜适应性强,具有抗菌、抗氧化、解毒和抗癌等多种药用价值,被广泛应用于医疗、食品和畜牧业等多个领域[7-13]。

近年来,为了提高经济效益,种植户往往大量施用化肥[14]。然而,过度施肥会导致土壤中含有大量的矿物元素残留,导致养分浸出和挥发,加剧土壤板结,进而引发资源浪费、成本增加以及病虫害蔓延,最终导致大蒜产量和质量下降[15-19]。因此,如何提升大蒜产量和品质已成为栽培过程中重要的问题之一。过去20多年,前人已围绕肥料类型、施肥水平和基追肥比例等方面开展了大量研究。研究表明,施肥水平及氮磷钾配比是影响大蒜产量与品质的重要因素。3种大量元素对大蒜鳞茎产量的影响大小表现为氮>钾>磷[20],表明氮素投入对鳞茎生长和产量提高更为突出。虽然施肥推荐用量有所差异,但均表明合理配施能显著促进大蒜生长、提高产量和品质。例如,在化肥减量20%配施400 kg/667 m^{2}生物有机肥后,可溶性蛋白含量提高40.9%,同时株高、假茎粗、假茎长和叶宽分别增加10.5%、24.4%、18.7%和26.9%,投入产出比达1∶2.88[21];当施肥量为N 300 kg/hm^2、P_2O_5 225 kg/hm^2、K_2O 225 kg/hm^2,灌水量为1 350 m^3/hm^{2}时,大蒜生长指标和产量均达到较高水平[22]。也有研究从产量、氮钾肥投入及肥料生产力综合评价认为最优施肥量为氮肥438 kg/hm^2、钾肥189 kg/hm^2[23];施用尿素391.35 kg/hm^2、钙镁磷肥249.95 kg/hm^{2}及硫酸钾720 kg/hm^{2}较当地常规施肥可增产17%[24];施N 270~305 kg/hm^2、K_2O 228~240 kg/hm^{2}时,大蒜生长和产量表现较优,产量可提高19.6%[25];而采用基追肥6∶4的施肥方式,蒜头产量提高10.89%,可溶性蛋白和可溶性糖含量分别提高9.01%和15.75%[26-27]。前人研究一致表明,合理的氮磷钾配比、适宜的施肥量与施肥时期有利于促进大蒜营养生长、鳞茎膨大及品质提升。然而,不同研究中最优施肥量却存在差异。因此,本研究拟通过研究不同氮磷钾配施水平对大蒜鳞茎生长时期的生长、品质、产量及土壤理化性状指标的影响,旨在揭示大田试验中不同肥料处理水平对大蒜生长、品质和产量的影响机制,优化氮磷钾施肥水平,以期为大蒜施肥及提质增效提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试大蒜品种为'改良蒜',由课题组提供。试验采用的肥料:氮肥为尿素(N 46.2%),磷肥为过磷酸钙(P_2O_5 12%),钾肥为硫酸钾(K_2O 50%),购

买于杨凌裕丰种业公司。

试验在西北农林科技大学曹新庄试验站（34°20′ N，108°07′ E）进行。该地年均降雨量为637.6 mm，年均气温12.9 ℃，平均海拔521 m，无霜期220 d，降雨主要集中在7～9月，且多暴雨，秋季则多连阴雨[28]。该地土壤类型为塿土，土壤理化性质为全氮1.05 g/kg，全磷0.63 g/kg，全钾11.06 g/kg，土壤EC值为0.17 dS/m，pH为7.86，前茬作物为小麦。

1.2　试验设计

田间试验设置8个处理，以当地常规施肥水平为对照（CK，N-P-K为478-150-150 kg/hm²），对照参考关中地区‘改良蒜’普遍施用量[29-30]。T1（N-P-K为120-24-60 kg/hm²）、T2（N-P-K为180-36-90 kg/hm²）、T3（N-P-K为240-48-120 kg/hm²）、T4（N-P-K为300-60-150 kg/hm²）、T5（N-P-K为360-72-180 kg/hm²）、T6（N-P-K为420-84-210 kg/hm²）、T7（N-P-K为480-96-240 kg/hm²）、T8（N-P-K为540-108-270 kg/hm²）[31-32]。各试验小区随机排列，每个处理重复6次，每小区面积为8 m²，每小区种植800株，株行距为7 cm×15 cm左右。于2023年9月15日播种，2024年5月30日收获。

肥料用量按小区面积进行计算，氮磷钾比例参考前人为N∶P∶K=1∶0.2∶0.5[32-34]。施肥方式为撒施，将60%作为基肥，40%作为追肥。追肥分3个时期施入，分别为越冬期（2023年12月10日）施追肥量的30%，返青期（2024年3月1日）施追肥量的30%，伸长期（2024年4月1日）施追肥量的40%。田间管理方式按当地常规管理方式进行，所有处理灌水量一致，冬前灌1次越冬水，越冬后1个月1次，返青期15 d 1次，伸长期7 d 1次，使用喷灌进行灌溉，每次1～2 h，具体看田间需水情况。

1.3　样品采集及测定

生长指标测定：于2024年4月中旬到5月上旬（伸长期）进行3次取样测定，取样间隔时期为5 d，各处理随机选取6株进行挂牌标记，2株为1个重复。生长指标的测定包括：株高、叶长、叶宽、假茎高、假茎粗、叶片数、鳞茎鲜重和干重。使用卷尺测株高、叶长和假茎高，使用游标卡尺测量叶宽和假茎粗，使用电子秤测鳞茎鲜重和干重。具体参考《大蒜种质资源描述规范和数据标准》[35]。

产量指标测定：于2024年6月初大蒜收获期，每处理随机收获200株鳞茎风干后测其亩产，选择15株长势一致的鳞茎测定鳞茎纵径和鳞茎横径。鳞茎纵径和鳞茎横径采用游标卡尺进行测量，各处理亩产量由小区产量折算。

品质指标测定：各处理随机选取25株进行挂牌标记，5株为1个重复，于鳞茎收获期进行取样测定。选择饱满且无病虫害的鳞茎，将表面的泥土蒜皮清洗去除，风干后用小型磨样机将鳞茎蒜瓣研磨，直至呈超细粉末状，将其放入滤纸密封保存于－80 ℃超低温冰箱内，用于品质指标的测定。品质指标包括大蒜素、可溶性蛋白、可溶性糖、硝酸盐、总酚和总黄酮。大蒜素采用分光光度法进行测定[36]，可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝G520法测定[37]，硝酸盐含量采用紫外分光光度法测定[38]，可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定[39]，总黄酮和总酚含量采用紫外分光光度法测定[40]。

土壤理化性质测定：试验前和鳞茎收获后每个处理分别采用五点取样法取耕作层土壤进行土壤理化性质测定，土壤理化性质包括全氮、全磷和全钾。具体参照鲁如坤[41]和鲍士旦[42]的方法。

1.4　数据分析

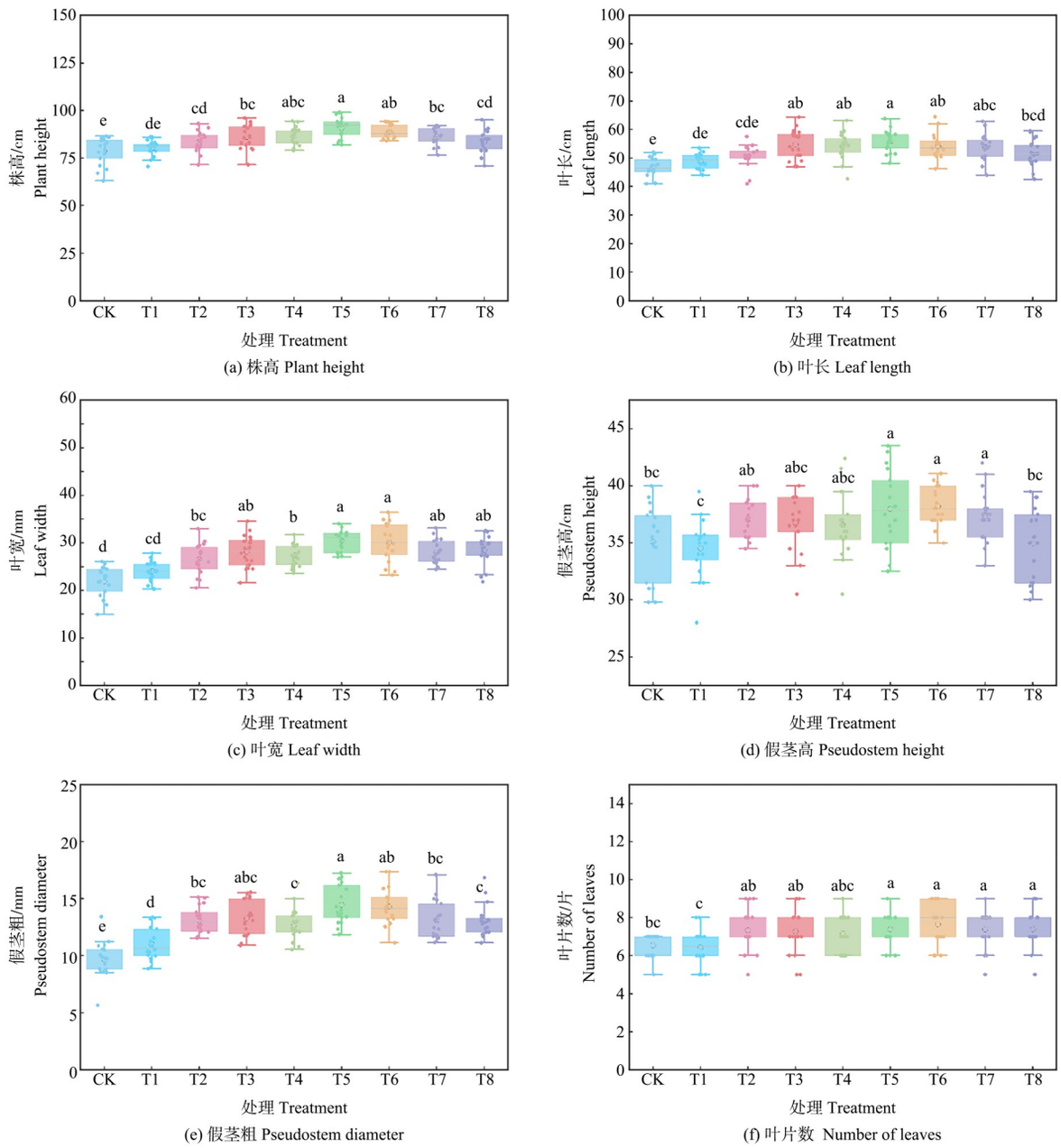
各处理产量（kg/hm²）＝各处理每个重复小区的产量总和/（小区重复数×单个小区面积）×667 m²×15，具体参考文献[43]。

采用Excel和SPSS 26.0软件处理试验数据，采用单因素和LSD法进行方差分析和多重比较，采用Graphpad Prism 9.5、Origin 2021和R Studio软件作图。

2　结果与分析

2.1　不同施肥水平对大蒜伸长期生长指标的影响

T5处理伸长期大蒜株高、叶长、叶宽、假茎高、假茎粗和叶片数等性状显著高于CK（$P<0.05$），分别比CK增加了15.5%、18.8%、39.0%、8.2%、49.2%和12.7%（图1）；T6次之，分别比对照增加了13.0%、15.2%、37.4%、8.9%、47.5%和16.9%；T1最小，但其株高、叶长、叶宽和假茎粗分别比对照增加了2.0%、4.0%、9.8%和13.3%，假茎高和叶片数较对照降低了1.6%和1.8%。说明合理施肥能有效促进大蒜植株的整体生长和大蒜伸长期叶片数的增加。



图中不同小写字母代表处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Different lowercase letters in the figure indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below.

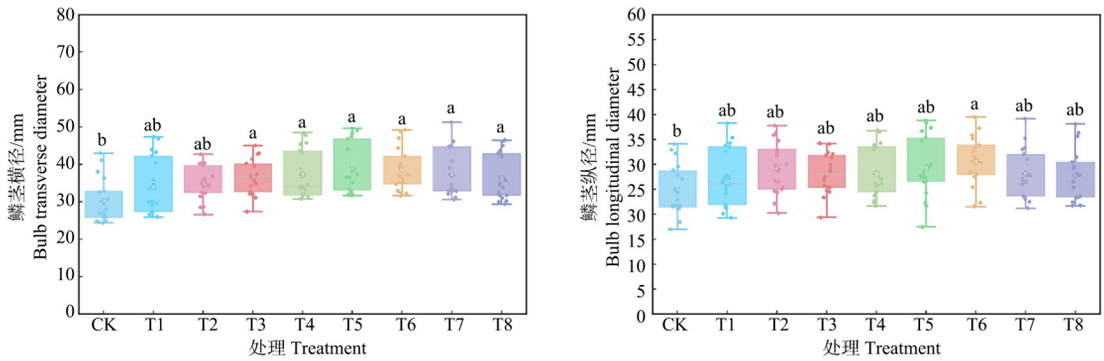
图 1 不同施肥水平对大蒜生长的影响

Fig. 1 Effects of different fertilization levels on garlic growth

2.2 不同施肥水平对大蒜鳞茎产量的影响

2.2.1 不同施肥水平对大蒜鳞茎横径和鳞茎纵径的影响

不同施肥处理对大蒜的鳞茎横径与鳞茎纵径产生了明显影响(图 2)。T5 处理的平均鳞茎横径最大,为 38.73 mm,比对照增加了 28.3%;其次为 T6 处理,较对照增加了 28.0%;T1 处理最低,但比对照仍增加了 12.99%。T6 处理的平均鳞茎纵径最大,为 30.55 mm,比对照增加了 22.4%;其次为 T5 处理,较对照增加了 17.7%;T1 处理最低,但较对照增加了 9.9%。综合来看,T5 与 T6 处理在促进鳞茎膨大方面效果最为突出,其中 T5 处理对增大鳞茎横径方面效果显著($P<0.05$),而 T6 则促进了鳞茎纵径的增加。



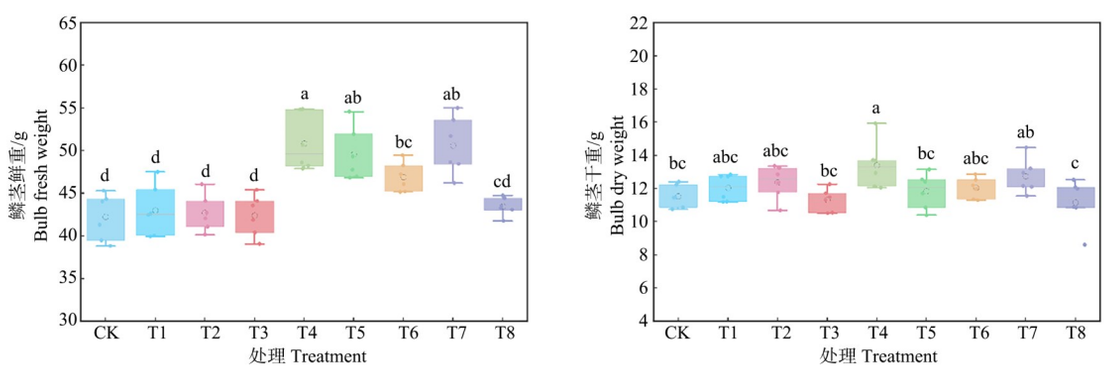
(a) 鳞茎横径 Bulb transverse diameter　　(b) 鳞茎纵径 Bulb longitudinal diameter

图 2　不同施肥水平对大蒜鳞茎横径和鳞茎纵径的影响

Fig. 2　Effects of different fertilization levels on the transverse and longitudinal diameters of garlic bulbs

2.2.2　*不同施肥水平对大蒜鳞茎生物量的影响*

不同施肥处理对大蒜鳞茎干重和鲜重这一指标有显著影响($P<0.05$,图 3)。T4 处理的平均鲜重最高,为 50.83 g,较对照提高 20.4%;其次为 T7 处理,较对照提高 19.8%;T3 处理最低,但也比对照提高了 0.4%。T4 处理的平均干重也最高,为 13.40 g,较对照增加 16.2%;其次为 T7 处理,高于对照 10.5%;T8 处理最低,较对照降低了 3.2%。表明不同施肥处理都能有效促进大蒜的生长与形态建成,但较高浓度肥料的施用导致鳞茎干重和鲜重的下降,说明肥料对鳞茎干重和鲜重这一反映水分含量和干物质相对积累量的关键指标有一定的影响。



(a) 鳞茎鲜重 Bulb fresh weight　　(b) 鳞茎干重 Bulb dry weight

图 3　不同施肥水平对大蒜鳞茎干重和鲜重的影响

Fig. 3　Effects of different fertilization levels on the fresh and dry weights of garlic bulbs

2.2.3　*不同施肥水平对大蒜鳞茎产量的影响*

大蒜产量受施肥影响较大,合理的施肥量能显著提高大蒜产量($P<0.05$,表 1)。与对照相比,各施肥处理下大蒜产量均有显著提高,增产幅度为 11.7%~57.3%。其中,T4 处理大蒜产量最高,为 14 762 kg/hm^2,比对照增加了 57.3%;其次为 T7 处理,产量为 13 267 kg/hm^2,较 CK 增加了 41.38%。不同施肥处理大蒜产量差异显著($P<0.05$)。产量随着施肥量的增加呈现先上升后下降的趋势,T4 处理的肥料施用量对大蒜鳞茎增产效益最明显。

2.3　不同施肥水平对大蒜鳞茎品质的影响

2.3.1　*对大蒜鳞茎中可溶性蛋白和可溶性糖含量的影响*

不同施肥处理对大蒜鳞茎关键品质指标可溶性蛋白和可溶性糖含量均产生了显著影响($P<0.05$)。T7 处理的可溶性蛋白平均含量高达 24.04 mg/g,较对照增加了 54.9%;T5 与 T2 处理次之,较对照增加了 33.57% 和 29.77%;T4 处理的可溶性蛋白最低,为 15.99 mg/g,比对照增加了 3.0%(图 4(a))。对照的可溶性糖含量最高,为 17.23 mg/g;其次为 T4 处理,较对照降低 3.2%;T7 处理含量最

表 1 不同施肥水平对大蒜产量的影响

Table 1 Effects of different fertilization levels on garlic yield

处理 Treatment	产量/(kg/hm²) Yield	增产率/% Yield increment
CK	9 384^{d}	
T1	11 606^{bcd}	23.68
T2	12 044^{bcd}	28.35
T3	13 000^{abc}	38.53
T4	14 762^{a}	57.30
T5	12 506^{abc}	33.27
T6	12 473^{abc}	32.92
T7	13 267^{ab}	41.38
T8	10 480^{cd}	11.68

注:CK:N∶P∶K=478-150-150 kg/hm²;T1:N∶P∶K=120-24-60 kg/hm²;T2:N∶P∶K=180-36-90 kg/hm²;T3:N∶P∶K=240-48-120 kg/hm²;T4:N∶P∶K=300-60-150 kg/hm²;T5:N∶P∶K=360-72-180 kg/hm²;T6:N∶P∶K=420-84-210 kg/hm²;T7:N∶P∶K=480-96-240 kg/hm²;T8:N∶P∶K=540-108-270 kg/hm²。同列数据后不同小写字母代表处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: CK: N∶P∶K=478-150-150 kg/hm²; T1: N∶P∶K=120-24-60 kg/hm²; T2: N∶P∶K=180-36-90 kg/hm²; T3: N∶P∶K=240-48-120 kg/hm²; T4: N∶P∶K=300-60-150 kg/hm²; T5: N∶P∶K=360-72-180 kg/hm²; T6: N∶P∶K=420-84-210 kg/hm²; T7: N∶P∶K=480-96-240 kg/hm²; T8: N∶P∶K=540-108-270 kg/hm². Different lowercase letters after data in a column represent significant difference among treatments ($P<0.05$).

低,较对照降低了40.0%(图4(b))。表明适当增肥促进了鳞茎中蛋白质的积累。T8处理的可溶性蛋白含量较T7处理显著下降($P<0.05$),表明过量施肥不利于可溶性蛋白的持续积累,不同施肥水平对鳞茎碳氮代谢调控存在显著差异($P<0.05$)。试验发现T7处理能有效提升鳞茎的可溶性蛋白含量,但降低了可溶性糖含量。这种蛋白质与糖分积累之间此消彼长的关系揭示了施肥在调控大蒜鳞茎营养品质方面存在复杂平衡,说明在实际生产中需根据品质目标优化施肥策略。

2.3.2 对大蒜鳞茎中总黄酮和总酚含量的影响

不同施肥处理显著影响了大蒜鳞茎中重要次生代谢物总黄酮与总酚含量($P<0.05$)。对照的总黄酮含量最高,达0.53 mg/g;其次为T1、T6和T8处理,均较对照降低了9.4%;T4处理含量最低,较对照降低了24.5%(图4(d))。T6处理的总酚含量最高,达1.61 mg/g,较对照显著提高了24.8%($P<0.05$);其次为T3处理,较对照增加了20.2%;T4处理含量最低,较对照降低了14.0%(图4(e))。说明合理施肥在提升鳞茎总酚含量方面具有潜力,其中T6处理表现最优。但与对照相比所有处理均不同程度地降低了总黄酮含量,表明总黄酮含量对肥料的响应呈现负效应。

2.3.3 对大蒜鳞茎中大蒜素含量的影响

施肥量对不同处理大蒜鳞茎中的大蒜素含量产生了极显著影响,且各处理间表现出显著差异($P<0.05$,图4(c))。T8处理大蒜素含量最高,可达1.47 mg/g,较对照增加了19.5%;其次为T1处理,较对照增加了16.3%;T2处理大蒜素含量最低,较对照下降了23.6%。这说明施肥并非总是正向促进大蒜素这一关键风味与活性物质的积累,不当的施肥处理(如T2)反而会抑制其合成与积累,而适宜的施肥方案(如T8)则能极大地提升其含量。

2.3.4 对大蒜鳞茎中硝酸盐含量的影响

施肥处理对大蒜鳞茎中硝酸盐的积累产生了极为显著的影响($P<0.05$,图4(f))。T1硝酸盐含量最低,仅为628.54 mg/kg,较对照降低了33.20%;而T8处理的含量最高,达到950.19 mg/kg,较对照升高了0.99%。表明鳞茎中硝酸盐含量随施肥量的增加呈现出持续增长趋势,即施肥量越高,硝酸盐的积累量也越高。这一趋势在所有处理间均存在显著差异($P<0.05$),其中硝酸盐含量最高的T8处理较最低的T1处理显著高出51.17%($P<0.05$)。表明过量施肥会直接导致大蒜鳞茎中硝酸盐的显著富集,这可能对产品食用安全性与品质构成潜在风险,但该试验结果的所有鳞

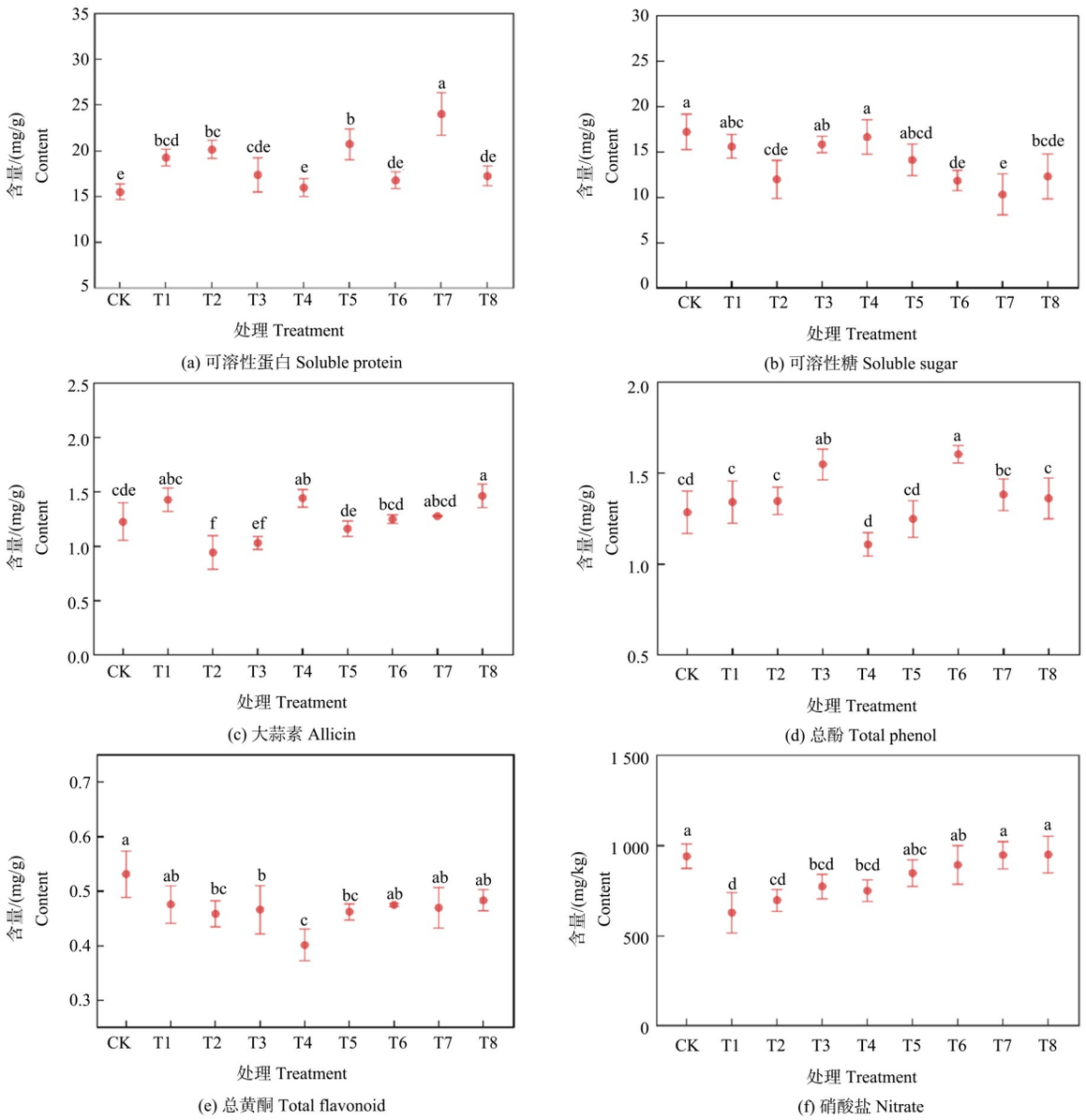


图 4　不同施肥水平对大蒜鳞茎营养物质含量的影响

Fig. 4　Effects of different fertilization levels on the nutrient content of garlic bulbs

茎硝酸盐含量均在食用安全范围内。

2.4　不同施肥水平对土壤理化性质的影响

试验前和鳞茎收获后每个处理分别采用五点取样法取根层土壤进行土壤理化性质测定，以评估施肥对土壤肥力的影响。土壤理化性质包括全氮、全磷和全钾，测定后取其平均值以减小误差，分别做3组重复，土壤前茬作物为小麦。试验前后各处理土壤肥力见表2，试验前土壤肥力为全氮1.05 g/kg、全磷0.63 g/kg、全钾11.06 g/kg。经过一轮大蒜生长季施肥处理后，土壤肥力值较试验前有所提升。T4处理的全氮含量最高，为1.36 g/kg，较CK增加了4.62%；而T7处理的全磷与全钾含量升至最高，分别为0.80与19.33 g/kg，较CK增加了11.11%和22.11%。从整体均值来看，土壤全氮、全磷和全钾含量分别较试验前增加了14.29%、14.29%和53.16%，各处理土壤的全氮、全磷及全钾含量差异未达到显著水平。

2.5　不同施肥处理下大蒜生长指标、品质指标和产量指标权重及其综合评价、相关性分析

为综合评估不同施肥处理对大蒜的影响效果，采用熵权法对大蒜生长、品质和产量指标进行权重计算，并结合TOPSIS分析法和相关性分析进行了

表 2 试验前后土壤理化性质

Table 2 The physical and chemical properties of soil before and after the experiment

试验条件 Test conditions	处理 Treatment	土壤肥力值/(g/kg) Soil fertility			等级 Grade		
		全氮	全磷	全钾	全氮	全磷	全钾
试验前 Before the experiment		1.05^{b}	0.63^{b}	11.06^{a}	三级	三级	四级
试验后 After the experiment	CK	1.30±0.10^{a}	0.72±0.04^{ab}	15.83±1.72^{c}	三级	三级	四级
	T1	1.07±0.27^{a}	0.67±0.06^{b}	15.00±1.55^{c}	三级	三级	四级
	T2	1.17±0.16^{a}	0.66±0.04^{b}	16.33±1.37^{bc}	三级	三级	四级
	T3	1.29±0.17^{a}	0.70±0.072^{ab}	17.00±1.10^{abc}	三级	三级	四级
	T4	1.36±0.14^{a}	0.79±0.11^{a}	18.67±2.73^{ab}	三级	三级	三级
	T5	1.19±0.10^{a}	0.71±0.06^{ab}	15.67±0.58^{c}	三级	三级	四级
	T6	1.07±0.21^{a}	0.71±0.07^{ab}	17.33±1.15^{abc}	三级	三级	四级
	T7	1.08±0.04^{a}	0.80±0.03^{a}	19.33±0.58^{a}	三级	三级	三级
	T8	1.25±0.06^{a}	0.71±0.03^{ab}	17.33±0.58^{abc}	三级	三级	四级

注：土壤肥力等级评定依据全国第3次土壤普查养分分级标准。

Note: The evaluation of soil fertility was based on the nutrient classification standard of the third National soil survey.

综合评价[44]。其中株高、叶长、叶宽、假茎高、假茎粗、叶片数、鳞茎干重和鲜重、鳞茎横径、鳞茎纵径、产量、可溶性蛋白、可溶性糖、大蒜素、总酚和总黄酮为正向指标，硝酸盐为负向指标，各指标权重计算结果见图5。生长、产量和品质各指标权重排序为：硝酸盐(12.21%)>鳞茎干鲜重(10.58%)>可溶性蛋白(9.58%)>产量(7.80%)>假茎高(6.94%)>可溶性糖(6.36%)>株高(5.71%)>大蒜素(5.46%)>叶片数(5.33%)>总酚(5.03%)>叶长(4.97%)>叶宽(4.44%)>假茎粗(4.22%)>总黄酮(3.88%)>鳞茎纵径(3.83%)>鳞茎横径(3.66%)。不同施肥水平生长、产量和品质综合性状评价P_i及其排序见表3，不同施肥处理综合性状评价值由高到低依次为：T5

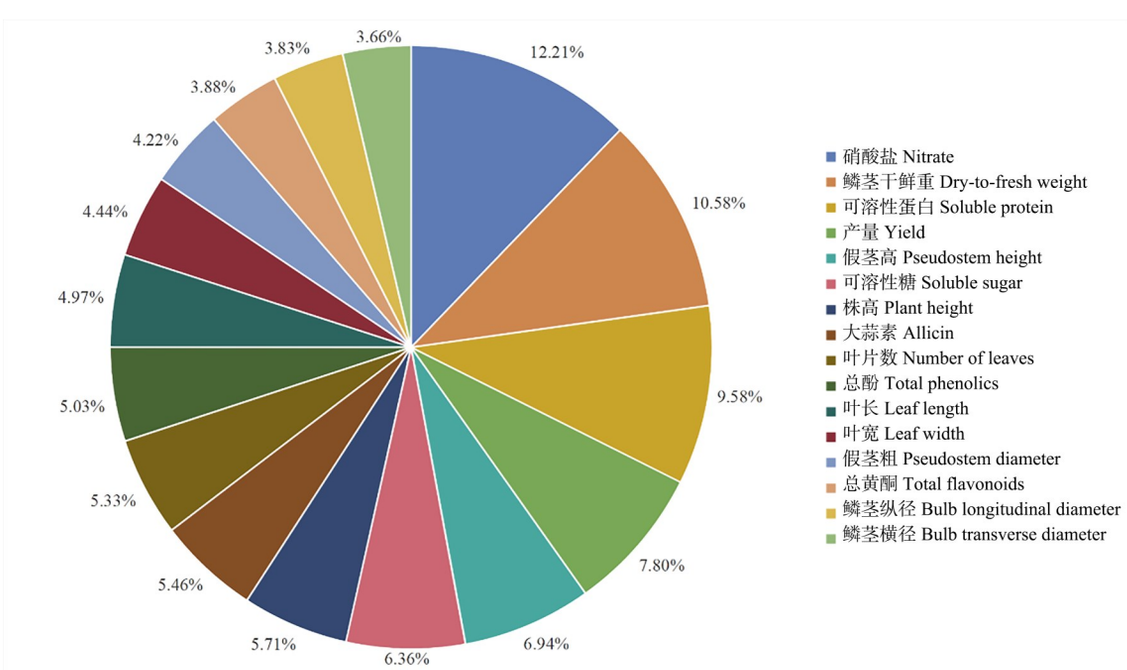


图5 基于熵权法各指标权重分配

Fig. 5 The weight assignment of each indicator based on the entropy weight method

表 3　基于 TOPSIS 法计算的不同施肥处理各性状指标得分及综合评价值排名

Table 3　The scores of different fertilization treatments in rubber traits calculated using TOPSIS method and the ranking of the comprehensive scores

指标 Index	CK	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
株高 Plant height	0.31	0.31	0.33	0.34	0.34	0.36	0.35	0.34	0.33
叶长 Leaf length	0.30	0.31	0.32	0.35	0.34	0.36	0.34	0.34	0.33
叶宽 Leaf width	0.27	0.29	0.32	0.34	0.33	0.37	0.37	0.34	0.35
假茎高 Pseudostem height	0.32	0.32	0.34	0.34	0.33	0.35	0.35	0.34	0.32
假茎粗 Pseudostem diameter	0.25	0.29	0.34	0.35	0.33	0.38	0.37	0.34	0.34
叶片数 Number of leaves	0.30	0.30	0.34	0.34	0.33	0.34	0.36	0.34	0.34
鳞茎干重和鲜重 DW/FW	0.35	0.36	0.36	0.33	0.34	0.31	0.31	0.31	0.32
鳞茎横径 Bulb transverse diameter	0.28	0.31	0.32	0.34	0.34	0.36	0.36	0.34	0.34
鳞茎纵径 Bulb longitudinal diameter	0.29	0.32	0.34	0.33	0.33	0.35	0.36	0.33	0.33
产量/(kg/hm²) Yield	0.27	0.28	0.31	0.36	0.41	0.35	0.34	0.37	0.29
可溶性蛋白 Soluble protein	0.28	0.34	0.36	0.31	0.28	0.37	0.30	0.43	0.31
可溶性糖 Soluble sugar	0.40	0.37	0.28	0.37	0.39	0.33	0.28	0.24	0.29
大蒜素 Allicin	0.32	0.38	0.25	0.27	0.38	0.31	0.33	0.34	0.39
总酚 Total phenolics	0.31	0.33	0.33	0.38	0.27	0.30	0.39	0.34	0.33
总黄酮 Total flavonoids	0.38	0.34	0.33	0.33	0.28	0.33	0.34	0.33	0.34
硝酸盐 Nitrate	0.28	0.42	0.39	0.35	0.36	0.32	0.30	0.28	0.27
D_i^+	0.34	0.24	0.25	0.20	0.23	0.20	0.24	0.25	0.27
D_i^-	0.21	0.26	0.22	0.27	0.30	0.27	0.27	0.27	0.23
P_i	0.38	0.53	0.47	0.57	0.56	0.57	0.53	0.52	0.45
排序 TOPSIS rank	9	5	7	2	3	1	4	6	8

注：D_i^+和D_i^-分别表示各处理与正向理想解和负向理想解的距离；P_i表示贴合度。

Note: D_i^+ and D_i^- represent the distances between each treatment and the positive and the positive and negative ideal solutions, respectively; P_i stands for fit degree.

(0.57)＞T3(0.57)＞T4(0.56)＞T6(0.53)＞T1(0.53)＞T7(0.52)＞T2(0.47)＞T8(0.45)＞CK(0.38)。

从图 6 相关性分析来看，总黄酮与总酚呈现显著正相关，与其余指标均呈现显著负相关或无显著相关；产量与总黄酮呈现显著负相关，与其余指标均呈现正相关或不相关；可溶性糖与大蒜素呈现显著正相关，与其余指标均呈现显著负相关或无显著相关；叶宽和假茎粗与产量呈现显著正相关，表明叶宽和假茎粗可作为高产表型的一个有效表征。

3　讨　论

3.1　不同施肥水平与大蒜生长的关系

氮肥、磷肥和钾肥在大蒜生长发育过程中起着至关重要的作用。适量的氮磷钾肥施用是确保大蒜健康生长和营养价值提升的关键。增施氮肥能够促进植物生长发育，提高作物产量[45]。钾在促进光合作用、光合产物的运输及蛋白质合成等生理生化功能方面发挥着重要作用，增施钾肥对大蒜品级、植株生育性状及抗病有显著影响[46-47]。本研究表明，随着施肥量增加，伸长期大蒜的生长速度会

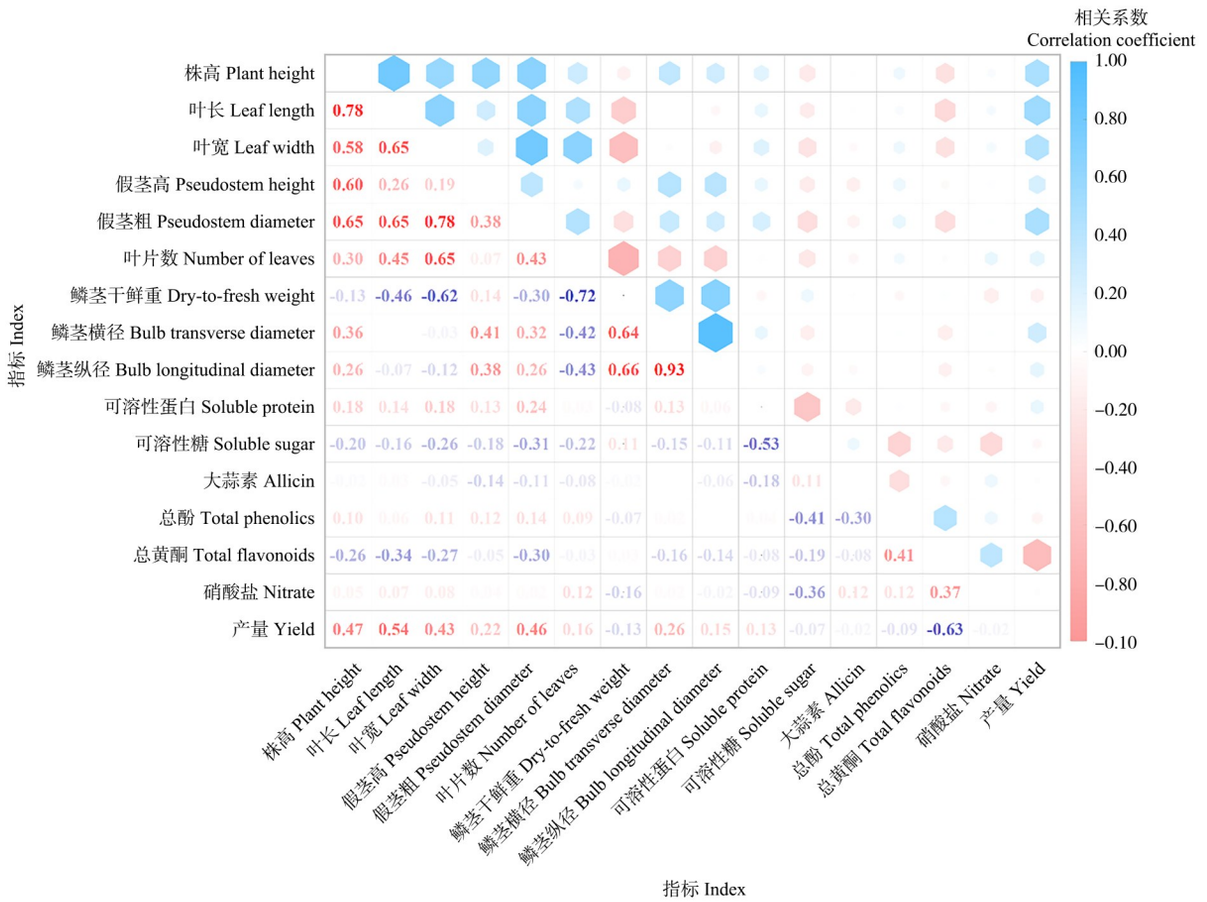


图 6 各指标之间相关性分析

Fig. 6 Analysis of the correlations among different indicators

逐渐加快。当施肥量从 120 增加到 360 kg/hm^{2}时，株高、叶长、叶宽、假茎高和假茎粗提高较为显著，之后随着施肥量的增加呈现下降的趋势。李国瑞等[48]研究发现，施肥量显著影响四季豆农艺性状（株高、分枝数和结荚苔数），随着施肥量的增加，各农艺性状指标表现为先上升后下降的趋势。Farooqui 等[49]研究发现，氮肥的适当应用提高了大蒜的生长特性，包括植株高度、茎粗、鳞茎横径、鳞茎纵径、鳞茎鲜重和鳞茎干重等。这与本试验研究结果一致。推测原因是作物对养分的吸收是有限的，并不是施肥量越大越好。适量施肥有助于作物根系的建成，促进根系对养分的吸收利用，有利于促进作物生长发育和提高产量，过量施肥或者施肥量不足均会导致作物生长受阻。本研究发现大蒜的一些数量性状与产量、叶长之间存在显著的正相关关系。刘正兴[50]的研究发现，茎粗和叶宽是重要的农艺性状，是植物壮弱苗的直观表现。本研究与前人研究结果相似。表明伸长期叶宽和茎粗可作为高产表型的一个有效表征。

3.2 不同施肥水平与大蒜品质的关系

氮、磷、钾肥的施用量显著影响作物品质指标[51]。氮素为影响作物品质的第一元素，钾居第二，磷第三，氮磷钾配施对作物品质的影响大于单施[52]。科学精准施肥作为改善土壤质量、提高作物产量与品质的重要技术，对植物与土壤养分的研究具有重大意义，肥料的过度和不平衡施用都会造成土壤养分的失衡进而影响作物的产量和品质[53-55]。

可溶性蛋白是植物体内的重要物质，其含量常作为衡量蔬菜品质的重要指标之一。本研究表明，施肥均增加了大蒜鳞茎中可溶性蛋白含量，但过高的施肥量则会使这种效果消失，这与吴春燕等[56]和聂金等[57]研究结果一致。在一定的范围内增加施肥量可以提高大蒜鳞茎的可溶性糖含量，随着施肥量的增大，可溶性糖含量增长幅度变缓，这与李金泽等[58]、张建锴等[59]和宋焕忠等[60]的研究结果一致。总黄酮和总酚作为葱蒜类作物重要的活性成

分，具有抗氧化和抗炎的作用，是评价品质的重要指标[61-62]。本研究结果表明，对照的总黄酮含量最高，推测原因可能是磷肥对总黄酮的积累至关重要，而本试验各处理的磷肥施用量均低于CK，因此出现随着磷肥施用量的增多总黄酮积累随之增多，磷肥不足影响总黄酮积累的现象。这与詹昌峰[63]的研究结果相似。这种截然不同的响应规律揭示了施肥在调控大蒜鳞茎次生代谢途径上存在复杂的分流效应，若要同步改善多种生物活性物质成分，需进行更为精细的施肥策略优化。在中高量氮肥处理下大蒜鳞茎总酚含量优于少量氮肥和高量氮肥。这可能是高浓度氮肥会导致合成酚的关键酶——苯丙氨酸解氨酶、酪氨酸解氨酶活性下降进而导致总酚含量下降，这与于娟[64]和马小雯[65]的研究结果一致。本研究发现，随着氮肥施用量的增加，鳞茎中大蒜素含量显著升高，超过一定施用量后，氮肥对大蒜素含量的促进作用虽有所下降，但仍高于对照，这与前人在大蒜[66-67]和洋葱[68]上的研究结果基本一致。硝酸盐含量是衡量蔬菜品质的指标之一，本研究表明，硝酸盐含量与氮使用量呈正相关，这与前人[69-72]研究结果一致。表明不同施肥水平对大蒜不同品质的促进效果具有特异性，在调控鳞茎品质时，可以根据目标调控品质进行选择。

3.3　不同施肥水平与大蒜产量的关系

众所周知，使用肥料有助于生产，并且是实现最大产量的快速方法[73-75]。相关数据显示，我国的施肥量和作物增产量不匹配，施肥用量远超作物增产量，急需提高化肥利用率进而提高作物产量，这对我国农业的可持续性发展及环境保护具有重要意义[76-77]。不同施肥处理对大蒜鳞茎纵茎、鳞茎横径、产量和增产率都会有一定的影响。本研究发现，大蒜产量随施肥量的增加呈先上升后下降的趋势，但与对照相比，适当减少氮肥施用量可以一定程度提升鳞茎的鲜重、干重以及鳞茎总产量。可能是高施氮量抑制了大蒜的生殖生长，而鳞茎产量随施氮量的变化符合肥料报酬递减规律，这与Kindie等[78]、杨明等[79]和张丹[80]的研究结果一致。表明合理的氮磷钾施肥水平有利于提高大蒜鳞茎产量。

3.4　不同施肥水平与土壤理化性质的关系

土壤有机质是影响土壤肥力的重要因素，对作物的生长发育具有重要作用[81]。土壤化学性状与产量的关联度第一位是土壤速效氮含量，其次是土壤全氮、全钾和全磷含量，因此研究土壤全氮、全钾和全磷含量至关重要[82]。本研究发现，随着氮磷钾的施入，土壤中全氮全磷全钾也随之增加。这与刘恩科[83]和樊文娟等[84]的研究结果相似。可能是施氮磷钾肥能够促进大蒜鳞茎根系生长，根系分泌物增加了土壤中微生物活性，一定程度上调节了土壤酸碱度，从而提高了土壤有机质含量。因此合理的氮磷钾施肥量对于土壤和植物之间养分的供需平衡具有重要意义。

4　结　论

不同氮磷钾施肥水平对大蒜伸长期生长、鳞茎产量、品质和土壤理化性质有一定影响。随着施肥量的增加，其伸长期生长指标均呈现先上升后下降的趋势，鳞茎品质指标受施肥量的影响小于生长指标，土壤中全氮、全磷和全钾也随着施肥量的增加逐渐增加。通过相关性分析发现，产量与田间伸长期生长指标均呈显著正相关，与品质指标呈现负相关或无显著相关，表明叶宽和假茎粗可作为高产表型的一个有效表征。利用熵权TOPSIS分析法对16个指标进行综合分析显示，T5处理为本试验最优处理，其最接近理想阈值。T4处理下大蒜鳞茎产量达到最高，为14 762 kg/hm^2。因此过量施肥或施肥量不足均会影响其产量，当施N量为300 kg/hm^2、施P_2O_5量为60 kg/hm^2、施K_2O量为150 kg/hm^{2}时，大蒜鳞茎产量最佳，但其品质效果不理想，因此如何在提高产量的基础上仍能保持甚至提升鳞茎品质有待进一步研究。

参考文献　References

[1] Cheesman E E. Tropical crops: Monocotyledons vols. 1 and 2 by J. W[J]. *Experimental Agriculture*, 1973, 9(3): 287

[2] Tindall H D. *Vegetables in the Tropics*[M]. London: Macmillan Education UK, 1983

[3] Rubatzky V E, Yamaguchi M. World vegetables: Principles, production, and nutritive values[J]. *Fruits*, 1997, 5(51): 381

[4] Hamma I L, Ibrahim U, Mohammed A B. Growth, yield and economic performance of garlic (*Allium sativum* L) as influenced by farm yard manure and spacing in Zaria, Nigeria[J]. *Journal of Agricultural Economics and Development*, 2013, 2(1): 1-5

[5] Hassan A. Improving growth and productivity of two garlic cultivars (*Allium sativum* L) grown under sandy soil conditions[J]. *Middle East Journal of Agriculture Research*, 2015, 4(2): 332-346

[6] Wang M M, Ye Y L, Chu X, Zhao Y N, Zhang S H, Chen H, Qin W, Wang Y. Responses of garlic quality and yields to various types and rates of potassium fertilizer applications[J]. *HortScience*, 2022, 57(1): 72-80

[7] 杨勇锋, 张素华. 大蒜高产栽培技术研究[J]. 河北农机, 2023(15): 148-150
Yang Y F, Zhang S H. Study on high-yield cultivation techniques of garlic [J]. *Hebei Agricultural Machinery*, 2023(15): 148-150 (in Chinese)

[8] Melino S, Sabelli R, Paci M. Allyl sulfur compounds and cellular detoxification system: Effects and perspectives in cancer therapy[J]. *Amino Acids*, 2011, 41(1): 103-112

[9] Seki K, Ishikawa J, Okada Y. Contribution of 2-propenesulfenic acid to the antioxidant activity of allicin[J]. *Journal of Food Science*, 2018, 83(5): 1265-1270

[10] Linzner N, Van Loi V, Fritsch V N, Antelmann H. Thiol-based redox switches in the major pathogen Staphylococcus aureus [J]. *Biological Chemistry*, 2021, 402(3): 333-361

[11] Borlinghaus J, Foerster (née Reiter) J, Kappler U, Antelmann H, Noll U, Gruhlke M C H, Slusarenko A J. Allicin, the odor of freshly crushed garlic: A review of recent progress in understanding allicin's effects on cells[J]. *Molecules*, 2021, 26(6): 1505

[12] Cai P R, Zhu Q H, Cao Q Y, Bai Y N, Zou H, Gu J H, Yuan Y, Liu X Z, Liu Z P, Bian J C. Quercetin and allicin can alleviate the hepatotoxicity of lead (Pb) through the PI3K signaling pathway[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(32): 9451-9460

[13] Tigu A B, Moldovan C S, Toma V A, Farcas A D, Mot A C, Jurj A, Fischer-Fodor E, Mircea C, Pârvu M. Phytochemical analysis and in vitro effects of *Allium fistulosum* L and *Allium sativum* L extracts on human normal and tumor cell lines: A comparative study[J]. *Molecules*, 2021, 26(3): 574

[14] 李卓航, 颜世红, 房纪秀, 李根安, 徐润奇, 刘建鲁, 谭皓天, 于鑫钰, 韩松, 董丽萍, 刘啊凤, 宋林霞, 岳洋, 徐振彪. 不同栽培和施肥方式对大蒜生长性状及产量的影响[J]. 特种经济动植物, 2022, 25(4): 10-12
Li Z H, Yan S H, Fang J X, Li G A, Xu R Q, Liu J L, Tan H T, Yu X Y, Han S, Dong L P, Liu A F, Song L X, Yue Y, Xu Z B. Effects of different cultivation and fertilization methods on growth traits and yield of garlic[J]. *Special Economic Animals and Plants*, 2022, 25(4): 10-12 (in Chinese)

[15] 王冰清, 尹能文, 郑棉海, 黄运强, 罗瑛琳, 陈舜明, 蔡昆争, 王建武. 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
Wang B Q, Yin N W, Zheng M H, Huang Y Q, Luo Y L, Chen S M, Cai K Z, Wang J W. Effects of reduction of chemical fertilizer and organic manure supplement on vegetables yield and quality[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(1): 242-247 (in Chinese)

[16] 周红梅, 李艳霞, 王春兰, 张龙平, 任艳云. 济宁地区覆膜大蒜化肥减施增效技术措施研究[J]. 现代农业科技, 2019(6): 61-63
Zhou H M, Li Y X, Wang C L, Zhang L P, Ren Y Y. Study on fertilizer reduction and efficiency increase of garlic covered with mulch in Jining Region [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2019(6): 61-63 (in Chinese)

[17] 刘晓红. 优化施氮对大蒜生长及产量的影响[J]. 农业工程技术, 2021, 41(20): 26-27, 29
Liu X H. Effect of optimized nitrogen application on garlic growth and yield [J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2021, 41(20): 26-27, 29 (in Chinese)

[18] 刘雪. 设施蔬菜土壤恶化状况分析[J]. 西北园艺, 2022(5): 46-47
Liu X. Analysis on soil deterioration of protected vegetables[J]. *Northwest Horticulture*, 2022(5): 46-47 (in Chinese)

[19] Toor M D, Amin M M, Khan B A, Nadeem A M. Consequence of surplus fertilizers and nutrients: A review on effect on plants and humans[J]. *International Journal of Botany Studies*, 2020, 5(3): 360-364

[20] 李德文, 王少铭, 罗莉斯, 侯颖辉, 冷家归, 李晋华, 汪志燚. 氮磷钾配比对红皮大蒜产量与经济性状的影响[J]. 贵州农业科学, 2021, 49(8): 30-36
Li D W, Wang S M, Luo L S, Hou Y H, Leng J G, Li J H, Wang Z Y. Effects of different NPK ratios on yield and economic characters of red-skin garlic[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2021, 49(8): 30-36 (in Chinese)

[21] 王庆玲, 朱代强, 王成, 牛天航, 毛震宇, 颉建明. 化肥减量配施生物有机肥对蒜苗生理特性、产量及品质的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(4): 69-75, 84
Wang Q L, Zhu D Q, Wang C, Niu T H, Mao Z Y, Xie J M. Effects of chemical fertilizer reduction and bio-organic fertilizer on photosynthesis, yield and quality of garlic seedlings[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2020, 55(4): 69-75, 84 (in Chinese)

[22] 杨录良, 齐广平. 水肥互作对蒜苗生长和品质的影响[J]. 甘肃农业科技, 2018(12): 3-7
Yang L L, Qi G P. Effects of water and fertilizer coupling on soil water status, growth and yield and quality of garlic bolt[J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2018(12): 3-7 (in Chinese)

[23] 温国昌, 刘红耀, 贺维昭, 张清华. 氮钾配施对大蒜鳞茎产量及氮钾利用率的影响[J]. 河北农业科学, 2022, 26(4): 68-71
Wen G C, Liu H Y, He W Z, Zhang Q H. Effect of combined application of nitrogen and potassium on garlic bulb yield and utilization efficiency of nitrogen and potassium[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2022, 26(4): 68-71 (in Chinese)

[24] 司闪闪. 不同氮磷钾施肥配比对大蒜产量及品质的影响[D]. 新乡: 河南科技学院, 2023
Si S S. Effects of different ratio of nitrogen, phosphorus and potassium fertilization on the yield and quality of garlic[D]. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology, 2023 (in Chinese)

[25] 宋家斌. 大蒜氮钾硫需肥规律及独蒜林下种植技术探索[D]. 南京: 南京农业大学, 2023
Song J B. Exploration on nitrogen, potassium and sulfur fertilization requirement of garlic and the cultivation technique of single headed garlic under forest [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2023 (in Chinese)

[26] 齐振宇, 蔡溧聪, 胡卫珍, 蔡盼, 张龙平, 任艳云, 周艳虹. 水肥一体化模式中化肥减施与不同基追肥比例对大蒜产量和品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(8): 1409-1415
Qi Z Y, Cai L C, Hu W Z, Cai P, Zhang L P, Ren Y Y, Zhou Y H. Effects of reduced application of chemical fertilizers and ratio of base and topdressing fertilizers on yield and quality of garlic in integrated mode of water and fertilizer[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2021, 33(8): 1409-1415 (in Chinese)

[27] 齐振宇, 蔡盼, 蔡溧聪, 张龙平, 任艳云, 周艳虹. 化肥减施与有机肥替代对大蒜生长、产量及品质的影响[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(10): 1984-1987, 1990
Qi Z Y, Cai P, Cai L C, Zhang L P, Ren Y Y, Zhou Y H. Effect of fertilizer reduction and substitution of chemical fertilizer by organic fertilizer on growth, yield and quality of garlic[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2021, 62(10): 1984-1987, 1990 (in Chinese)

[28] 庞耀悦, 胡笑涛, 王芳, 查晴, 范晓懂, 王文娥. 不同深蓄储水灌溉量对冬小麦磷素利用和磷素下渗流失风险的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(3): 493-504
Pang Y Y, Hu X T, Wang F, Zha Q, Fan X D, Wang W E. Effects of deep storage water irrigation amount on the phosphorus utilization of winter wheat

and loss risk down to deep soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(3): 493-504 (in Chinese)

[29] 牟思维, 解君, 罗成, 刘铁宁, 杨宝平, 韩清芳, 刘晓雪. 关中地区大蒜临界氮浓度稀释曲线及验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 126-133
Mou S W, Xie J, Luo C, Liu T N, Yang B P, Han Q F, Liu X X. Establishment and verification of critical nitrogen concentration dilution curve of garlic in Guanzhong plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(19): 126-133 (in Chinese)

[30] 王森, 张康柱, 程助国, 王孟刚. 关中大蒜:青贮玉米一年多茬栽培技术[J]. 西北园艺, 2023(1): 13-15
Wang S, Zhang K Z, Cheng Z G, Wang M G. Cultivation techniques of garlic-silage corn in Guanzhong area for more than one year[J]. *Northwest Horticulture*, 2023(1): 13-15 (in Chinese)

[31] 闫童, 刘士亮, 刘洪产, 王永慧. 大蒜土壤养分丰缺及推荐施肥指标体系研究[J]. 中国土壤与肥料, 2013(6): 72-76
Yan T, Liu S L, Liu H C, Wang Y H. Study on abundance or deficiency of soil nutrient and fertilization recommendation index system for garlic[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013(6): 72-76 (in Chinese)

[32] 张文君, 刘兆辉, 江丽华, 陈清, 郑福丽, 王梅, 林海涛. 氮素对大蒜生长及养分吸收的影响[J]. 中国蔬菜, 2006(12): 20-23
Zhang W J, Liu Z H, Jiang L H, Chen Q, Zheng F L, Wang M, Lin H T. Effect of nitrogen fertilization on accumulation of dry matter and nutrient uptake of garlic[J]. *China Vegetables*, 2006(12): 20-23 (in Chinese)

[33] 蔡力, 王文伟, 赵竹青, 王运华. 硼钼对大蒜产量及吸收利用氮磷钾的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(4): 141-147, 163
Cai L, Wang W W, Zhao Z Q, Wang Y H. Effects of boron and molybdenum on yield and NPK uptake and utilization for garlic[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(4): 141-147, 163 (in Chinese)

[34] 樊治成, 郭洪芸, 张曙东, 王秀峰. 大蒜不同品种干物质生产与氮、磷、钾和硫的吸收特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2005(2): 248-253
Fan Z C, Guo H Y, Zhang S D, Wang X F. Characteristics of dry matter production and N, P, K and S absorption for different garlic cuitivars[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005(2): 248-253 (in Chinese)

[35] 李锡香. 大蒜种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006
Li X X. *Specifications for Describing Garlic Germplasm Resources and Data Standards*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006 (in Chinese)

[36] 朱蕤, 应惠芳. 大蒜中大蒜素含量简便测定法[J]. 食品科技, 2008(8): 202-204
Zhu N, Ying H F. Simple for rapid determination of allicin content in garlic[J]. *Food Science and Technology*, 2008(8): 202-204 (in Chinese)

[37] 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
Li H S. *Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000 (in Chinese)

[38] GB 5009.33—2016. 食品安全国家标准 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定[S]. 北京:中国标准出版社,2017
GB 5009.33—2016. National food safety standard determination of nitrite and nitrate in food[S]. Beijing: China Standard Press, 2017 (in Chinese)

[39] 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 (in Chinese)

[40] 黄水金, 徐晖, 余邵辉, 关志宇. 紫外分光光度法测定飞扬草中总黄酮、总酚的含量[J]. 广州化工, 2024, 52(20): 68-71
Huang S J, Xu H, Yu S H, Guan Z Y. Content of total flavonoids and total phenol in Euphorbia hirta linn determined by UV spectrophotometry[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2024, 52(20): 68-71 (in Chinese)

[41] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000
Lu R K. *Methods of Soil Agrochemical Analysis*[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000 (in Chinese)

[42] 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 (in Chinese)

[43] 王彩虹. 有机肥替代部分化肥对小麦生产及土壤理化性质的影响[J]. 安徽农学通报, 2025, 31(9): 31-34
Wang C H. Effects of partial substitution of chemical fertilizer with organic fertilizer on wheat production and soil physicochemical properties[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2025, 31(9): 31-34 (in Chinese)

[44] 毕美月. 基于熵权TOPSIS法的比亚迪集团财务风险评价与控制研究[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2022
Bi M Y. Research on financial risk assessment and control of BYD group based on entropy weight TOPSIS method[D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University, 2022 (in Chinese)

[45] 蒋志敏, 王威, 储成才. 植物氮高效利用研究进展和展望[J]. 生命科学, 2018, 30(10): 1060-1071
Jiang Z M, Wang W, Chu C C. Towards understanding of nitrogen use efficiency in plants[J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2018, 30(10): 1060-1071 (in Chinese)

[46] 陈昆, 刘世琦, 张自坤, 张涛, 孟凡鲁. 钾素营养对大蒜生长、光合特性及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 506-512
Chen K, Liu S Q, Zhang Z K, Zhang T, Meng F L. Effects of potassium on growth, photosynthetic characteristics and quality of garlic seedlings[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(2): 506-512 (in Chinese)

[47] 严根元. 大蒜栽培技术及综合利用[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1989
Yan G Y. *Cultivation Techniques and Comprehensive Utilization of Garlic*[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Literature Publishing House, 1989 (in Chinese)

[48] 李国瑞, 惠安萍, 尹跃斌, 张利军, 鲁开勇. 不同施肥量对四季豆产量的影响[J]. 西北园艺, 2022(5): 53-54
Li G R, Xi A P, Yin Y B, Zhang L J, Lu K Y. Effects of different fertilization rates on the yield of kidney bean[J]. *Northwest Horticulture*, 2022(5): 53-54 (in Chinese)

[49] Farooqui M A, Naruka I S, Rathore S S, Singh P P. Effect of nitrogen and sulphur levels on growth and yield of garlic (*Allium sativum* L)[J]. *Asian Journal of Food and Agro-Industry*, *Special Issue*, 2009, 18-23

[50] 刘正兴. 不同氮肥处理对新疆白皮大蒜生长发育、品质及产量的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2009
Liu Z X. The effect of different nitrogen treatment on development characteristic and quality and yield of Xinjiang white garlic[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2009 (in Chinese)

[51] 鲁泽刚, 卢迎春, 张广辉, 龙光强, 杨生超. 氮磷钾配施对灯盏花产量和品质的影响及肥料效应[J]. 核农学报, 2019, 33(3): 616-622
Lu Z G, Lu Y C, Zhang G H, Long G Q, Yang S C. Effects of combined application of N, P and K on yield and quality of Erigeron breviscapus and its fertilizer interaction[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(3): 616-622 (in Chinese)

[52] 曲环, 赵秉强, 陈雨海. 氮磷钾化肥及有机肥对作物品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(S1): 155-160
Qu H, Zhao B Q, Chen Y H. The effects of nitrogen, phosphorus and potassium chemical fertilizers and organic fertilizers on crop quality[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2002, 8(S1): 155-160 (in Chinese)

[53] 刘占军, 祝慧, 张振兴, 赵家锐, 侯立耀, 翟丙年, 徐新朋, 雷秋良, 朱元骏. 我国苹果园施肥现状、土壤剖面氮磷分布特征及减肥增效技术[J]. 植物营养

与肥料学报，2021，27(7)：1294-1304
Liu Z J，Zhu H，Zhang Z X，Zhao J R，Hou L Y，Zhai B N，Xu X P，Lei Q L，Zhu Y J. Current status of fertilization，distribution of N and P in soil profiles and techniques for reducing fertilizer application and improving efficiency in China's apple orchards[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*，2021，27(7)：1294-1304 (in Chinese)

[54] 袁嫚嫚，邬刚，胡润，孙义祥. 秸秆还田配施化肥对稻油轮作土壤有机碳组分及产量影响[J]. 植物营养与肥料学报，2017，23(1)：27-35
Yuan M M，Wu G，Hu R，Sun Y X. Effects of straw returning plus fertilization on soil organic carbon components and crop yields in rice-rapeseed rotation system[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*，2017，23(1)：27-35 (in Chinese)

[55] 朱浩宇，高明，龙翼，徐国鑫，王富华，王子芳. 化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响[J]. 环境科学，2020，41(4)：1921-1929
Zhu H Y，Gao M，Long Y，Xu G X，Wang F H，Wang Z F. Effects of fertilizer reduction and application of organic fertilizer on soil nitrogen and phosphorus nutrients and crop yield in a purple soil sloping field [J]. *Environmental Science*，2020，41(4)：1921-1929 (in Chinese)

[56] 吴春燕，宋廷宇，韩玉珠，刘爽，程艳，张晓明. 氮肥对辣椒品质的影响[J]. 北方园艺，2016(2)：162-165
Wu C Y，Song T Y，Han Y Z，Liu S，Cheng Y，Zhang X M. Effect of nitrogen fertilizer on quality of pepper[J]. *Northern Horticulture*，2016(2)：162-165 (in Chinese)

[57] 聂金，谭芷，王军伟，戴雄泽，黄科. 氮磷钾配施对辣椒产量、品质的影响[J]. 中国瓜菜，2021，34(10)：80-87
Nie J，Tan Z，Wang J W，Dai X Z，Huang K. Effects of combined application of N，P and K on yield and quality of pepper[J]. *Chinese Cucurbits and Vegetables*，2021，34(10)：80-87 (in Chinese)

[58] 李金泽，唐瑞，侯峥. 水肥耦合对黄花菜产量和品质的影响[J]. 安徽农业科学，2024，52(20)：136-140
Li J Z，Tang R，Hou Z. The combined effect of water and fertilizer on yield and quality of day lily[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*，2024，52(20)：136-140 (in Chinese)

[59] 张建锴，曹红霞，潘小燕，南学平. 基于产量和品质的陕北苹果滴灌水量和追施氮量优化研究[J]. 干旱地区农业研究，2020，38(5)：143-152
Zhang J K，Cao H X，Pan X Y，Nan X P. Optimization of drip irrigation and topdressing nitrogen based on apple yield and quality in Northern Shaanxi[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*，2020，38(5)：143-152 (in Chinese)

[60] 宋焕忠，蒋万，陈琴，郭元元，张力，李洋，覃振普，韦丹，陈振东. 香葱氮、磷、钾施肥模型的建立及肥料效应研究[J]. 湖北农业科学，2022，61(16)：24-29，51
Song H Z，Jiang W，Chen Q，Guo Y Y，Zhang L，Li Y，Qin Z P，Wei D，Chen Z D. Modeling of nitrogen，phosphorus and potassium fertilizer applacation and effects of fertilization on chive[J]. *Hubei Agricultural Sciences*，2022，61(16)：24-29，51 (in Chinese)

[61] 萨茹丽，木其尔，王翠芳，包玲玲，敖长金. 沙葱不同部位提取物总黄酮含量及其体外抗氧化、抗菌活性研究[J]. 食品工业科技，2014，35(22)：124-127，134
Sa R L，Mu Q E，Wang C F，Bao L L，Ao C J. Effect of the different parts of Allium Mongolicum Regel extraction's total flavonoids content and antioxidant，antibacterial effects *in vitro*[J]. *Science and Technology of Food Industry*，2014，35(22)：124-127，134 (in Chinese)

[62] 敖长金. 沙葱及其提取物的抗氧化、抗炎和免疫调节作用[J]. 饲料工业，2021，42(11)：1-6
Ao C J. Effects of *Allium mongolicum* regel and its extracts on anti-oxidant，anti-inflammation and immunomodulation in animals[J]. *Feed Industry*，2021，42(11)：1-6 (in Chinese)

[63] 詹昌峰. 水肥耦合对沙葱产量、品质及土壤理化性质的影响[D]. 延吉：延边大学，2022
Zhan C F. Effects of water fertilizer coupling on yield，quality and soil physical and chemical properties of Allium mongolicum[D]. Yanji：Yanbian University，2022 (in Chinese)

[64] 于娟. 氮肥和CPPU对瓠瓜品质的影响及瓠瓜品种间差异比较[D]. 杭州：浙江大学，2007
Yu J. Effects of nitrogenous fertilizer，CPPU on the quality and the compare on cultivars of Lagenaria leucantha [D]. Hangzhou：Zhejiang University，2007 (in Chinese)

[65] 马小雯. 不同氮磷钾肥施入量对蓝果忍冬叶片及果实品质的影响[D]. 哈尔滨：东北农业大学，2020
Ma X W. Effects of different application rates of nitrogen，phosphorus and potassium on leaf and fruit quality of blue honeysuckle (*Lonicera caerulea* L) [D]. Harbin：Northeast Agricultural University，2020 (in Chinese)

[66] 张雨萌，程智慧，王曦奥，李夏夏，张思语，高京草. 氮硫配施对青蒜大蒜素含量和品质的影响[J]. 中国蔬菜，2022(4)：67-71
Zhang Y M，Cheng Z H，Wang X A，Li X X，Zhang S Y，Gao J C. Effects of nitrogen and sulfur combined application on allicin content and quality of garlic seedling[J]. *China Vegetables*，2022(4)：67-71 (in Chinese)

[67] 许真，王芯媛，张申申，章慧玉. 氮肥和硫肥对大蒜生长、品质成分及GGT基因表达的影响[J]. 核农学报，2025，39(5)：1081-1089
Xu Z，Wang X Y，Zhang S S，Zhang H Y. Growth，quality and expression of GGT gene of garlic (*Allium sativum* L) as affected by nitrogen and sulfur fertilizers[J]. *Journal of Nuclear Agriculture Science*，2025，39(5)：1081-1089 (in Chinese)

[68] Randle W M. Increasing nitrogen concentration in hydroponic solutions affects onion flavor and bulb quality[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*，2000，125(2)：254-259

[69] 王朝辉，李生秀，田霄鸿. 不同氮肥用量对蔬菜硝态氮累积的影响[J]. 植物营养与肥料学报，1998，4(1)：22-28
Wang Z H，Li S X，Tian X H. Influence of nitrogen rates on nitrate accumulation in vegetables[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*，1998，4(1)：22-28 (in Chinese)

[70] 李俊良，陈新平，李晓林，张福锁. 大白菜氮肥施用的产量效应、品质效应和环境效应[J]. 土壤学报，2003(2)：261-266
Li J L，Chen X P，Li X L，Zhang F S. Effect of fertilization on yield，nitrate content and apparent losses of Chinese cabbage[J]. *Acta Pedologica Sinica*，2003(2)：261-266 (in Chinese)

[71] 文廷刚，江雨晴，杜小凤，罗德旭，王连臻，王伟中，吴传万. 不同肥料处理对辣椒产量和品质的影响[J]. 江西农业学报，2013，25(3)：30-32，35
Wen T G，Jiang Y Q，Du X F，Luo D X，Wang L Z，Wang W Z，Wu C W. Effects of different fertilizer treatments on yield and quality of pepper[J]. *Acta Agricultural Jiangxi*，2013，25(3)：30-32，35 (in Chinese)

[72] 孙治强，张楠，赵卫星，高玉红. 氮肥施用量对生菜产量、硝酸盐积累及土壤EC值、pH值的影响[J]. 江西农业学报，2007，19(4)：44-45
Sun Z Q，Zhang N，Zhao W X，Gao Y H. Effects of N application rates on yield，nitrate accumulation of lettuce and EC，pH value of soil[J]. *Acta Agricultural Jiangxi*，2007，19(4)：44-45 (in Chinese)

[73] Naruka I，Dhaka R. Effect of row spacing and nitrogen fertilization on growth，yield and composition of bulb in garlic (*Allium sativum* L) cultivars [J]. *Journal of Spices and Aromatic Crops*，2001，10(2)：111-117

[74] Chesnokov A M. Functions in column-based intelligent systems [J]. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*，2019，

9(2)：5045-5051

[75] Shafoat N, Uktam T, Najimuddin U. Research of the process of obtaining organo-mineral fertilizer based on nitrogen acid decomposition of non-conditional phosphorites of central kyzylkumes and poultry cultivation waste [J]. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 2019, 8(12)：2260-2265

[76] 任世鑫，李二玲，邓晴晴，崔之珍．中国三大粮食作物化肥施用特征及环境风险评价[J]．长江流域资源与环境，2019，28(12)：2936-2947
Ren S X, Li E L, Deng Q Q, Cui Z Z. Characteristics of chemical fertilizer application and environmental risk assessment of three major food crops in China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(12)：2936-2947 (in Chinese)

[77] 葛均筑，展茗，赵明，李建鸽，李淑娅，田少阳．一次性施肥对长江中游春玉米产量及养分利用效率的影响[J]．植物营养与肥料学报，2013，19(5)：1073-1082
Ge J Z, Zhan M, Zhao M, Li J G, Li S Y, Tian S Y. Effects of single basal fertilization on the yield and nutrient use efficiencies of spring maize in the Middle Reaches of Yangtze River[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer science*, 2013, 19(5)：1073-1082 (in Chinese)

[78] Kindie B, Mengistu S. Agro morphological trait evaluation of garlic (*Allium sativum* L) response to fertilizer[J]. *Indian Journal of Advanced Botany*, 2022, 2(1)：1-5

[79] 杨明，张博超，顾世祥，韩焕豪，高蓉，崔远来．洱海流域大蒜水肥综合调控模式及其节水减排效应[J]．中国农村水利水电，2022(9)：55-60
Yang M, Zhang B C, Gu S X, Han H H, Gao R, Cui Y L. Different water - fertilizer control patterns of garlic and its effect on water saving and emission reduction in the Lake Erhai watershed[J]. *China Rural Water Conservancy and Hydropower*, 2022(9)：55-60 (in Chinese)

[80] 张丹．化肥减量配施生物有机肥和灌溉量对大蒜产量和品质的影响[J]．河南农业科学，2022，51(3)：139-145
Zhang D. Effect of reduced application of chemical fertilizer combined with application of bio-organic fertilizer and irrigation amount on yield and quality of garlic[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2022, 51(3)：139-145 (in Chinese)

[81] Mayer M, Rewald B, Matthews B, Sandén H, Rosinger C, Katzensteiner K, Gorfer M, Berger H, Tallian C, Berger T W, Godbold D L. Soil fertility relates to fungal-mediated decomposition and organic matter turnover in a temperate mountain forest[J]. *New Phytologist*, 2021, 231(2)：777-790

[82] 崔江辉．化肥减施对冬小麦—夏高粱系统下土壤肥力的影响[D]．太谷：山西农业大学，2018
Cui J H. Effect of chemical fertilizer reduction on soil fertility under winter wheat-summer sorghum system[D]. Taigu：Shanxi Agricultural University, 2018 (in Chinese)

[83] 刘恩科．不同施肥制度土壤团聚体微生物学特性及其与土壤肥力的关系[D]．北京：中国农业科学院，2007
Liu E K. Microbiological features of soils under different fertilization systems and their related soil fertility[D]. Beijing：Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007 (in Chinese)

[84] 樊文娟，张小娟，鱼小军．氮磷配施对甘肃省武威灌区扁蓿豆种子田土壤养分的影响[J/OL]．草原与草坪，2025，1-18[2026-01-12]．https://link.cnki.net/urlid/62.1156.S.20250508.1738.004
Fan W J, Zhang X J, Yu X J. Effects of combined application of nitrogen and phosphorus on soil nutrients in medicago ruthenica seed fields of Wuwei irrigation district, Gansu province[J/OL]. *Grassland and Lawn*, 2025, 1-18[2026-01-12]. https://link.cnki.net/urlid/62.1156.S.20250508.1738.004 (in Chinese)

责任编辑：董金波



第一作者简介：刘菁芳，硕士，就读于西北农林科技大学园艺学院农艺与种业专业。参与项目：陕西省重点研发计划(2023YFD1600200)。研究生期间参与制定陕西省地方标准2项(DB61/T 1963—2025、DB61/T 1964—2025)、杨凌示范区标准1项(DB6111/T 223—2024)，专利2项。



通讯作者简介：陈书霞，博士，现任西北农林科技大学园艺学院教授、博士生导师，陕西省蔬菜工程技术中心主任，主要从事黄瓜醛类香气形成的分子机理及黄瓜相关防御基因参与生物和非生物胁迫的分子机理等研究。先后主持、参与国家自然科学基金、国家重点研发计划、科技部支撑计划、陕西省农业科技创新驱动项目、葱姜蒜公益性行业专项等国家、省部级项目14项，相关成果已在*Plant Physiology*、*Horticulture Research*、*Scientia Horticulturae*和*Frontiers in Plant Science*等期刊上发表，共获批7项专利，荣获西北农林科技大学2023年度教学成果一等奖等奖励，参与《高级蔬菜生理学》《蔬菜栽培学》等教材的编写。