DOI:10.16861/j.cnki.zggc.2026.0176

不同施肥处理对荸荠产量、品质及土壤理化性质的影响

胡一凤[1],江 文[1],高美萍[1],石益基[1],蒋慧萍[1],赖松新[2],何青石[2],方彦蓉[1]

(1.广西壮族自治区农业科学院蔬菜研究所 南宁 530007; 2.贺州市八步区农业科学研究所 广西贺州 542800)

摘 要:为探究广西贵港荸荠生产的最优施肥方案,采用“3414”肥料效应试验设计,共设置 14 个处理(T1~T14),其中,N、P_2O_5、K_2O 分别为 37.50、37.50、57.50 kg·667 m^{-2} 为常规施肥水平(T1),T7 处理(N、P_2O_5、K_2O 均为 0 kg·667 m^{-2})为不施肥处理,探究氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)不同配比对桂蹄 3 号产量、品质及土壤理化性质的影响。结果表明,T11 处理(N、P_2O_5、K_2O 分别为 37.50、37.50、28.75 kg·667 m^{-2})的株高最高(98.37 cm),T1 处理的茎粗最粗(6.20 mm),T7 处理的匍匐茎最粗(6.32 mm)。T12 处理(N、P_2O_5、K_2O 分别为 18.75、18.75、57.50 kg·667 m^{-2})在球茎表型和产量、经济效益上表现均最优:T12 处理单果质量、球茎纵径、球茎厚度、产量与经济效益均最高,其中产量为 3 859.42 kg·667 m^{-2},较 T1 显著提高了 13.80%,经济效益为 13 012.76 元•667 m^{-2},较 T1 显著提高了 18.76%,施肥成本较 T1 降低了 29.62%,实现了节本增效目的。在品质方面,T5 处理(N、P_2O_5、K_2O 分别为 0、37.50、57.50 kg·667 m^{-2})的可溶性糖和干物质含量(*w*,后同)均最高,分别为 7.26%和 16.47 g·100 g^{-1};T6 处理(N、P_2O_5、K_2O 分别为 37.50、0、57.50 kg·667 m^{-2})的淀粉含量最高,为 4.82 g·100 g^{-1},T5 淀粉含量仅次于 T6,但二者差异不显著。综合比较,T5 处理的球茎品质表现最佳。土壤理化性质分析显示:T12 处理有机质(26.23 g·kg^{-1})、有效磷(11.13 mg·kg^{-1})含量均处于中等水平。通过主成分分析对荸荠生长、产量、品质及土壤指标进行综合评价,T12 处理得分最高,T7 得分最低。综上,在该试验条件下,N、P_2O_5、K_2O 用量分别为 18.75、18.75、57.50 kg·667 m^{-2},能较好地协调荸荠生长、产量形成与收益提升,可作为当地荸荠生产的推荐施肥参考。

关键词:荸荠;产量;品质;理化性质;“3414”试验设计

中图分类号:S645.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-2871(2026)10-184-13

Effects of different fertilization treatments on Chinese water chestnut yield, quality and soil physicochemical property

Hu Yifeng[1], Jiang Wen[1], Gao Meiping[1], Shi Yiji[1], Jiang Huiping[1], Lai Songxin[2], He Qingshi[2], Fang Yanrong[2]

(*1. Vegetable Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, Guangxi, China; 2. Agricultural Sciences Research Institute of Babu District, Hezhou 542800, Guangxi, China*)

Abstract: To determine the optimal fertilization regime for Chinese water chestnut production in Guigang, Guangxi, a “3414” fertilizer-response experiment was conducted with 14 treatments(T1-T14). The conventional fertilization treatment(T1) received N, P_2O_5 and K_2O at rates of 37.50, 37.50, and 57.50 kg per 667 m², respectively, whereas T7 received no fertilizer(0 kg per 667 m² of each nutrient). The effects of different N, P_2O_5 and K_2O application rates and combinations on the yield and quality of Guiti No. 3 and on soil physicochemical properties were evaluated. The results showed that T11(37.50, 37.50, and 28.75 kg per 667 m² for N, P_2O_5 and K_2O, respectively)had the highest plant height(98.37 cm), T1 had the greatest stem thickness(6.20 mm), while T7 had the largest stolon thickness(6.32 mm). T12(18.75, 18.75, and 57.50 kg per 667 m² for N, P_2O_5 and K_2O, respectively)showed the best overall performance in terms of corm phenotype, yield, and economic benefit. It had the highest single corm mass, corm diameter, corm thickness, yield, and economic benefit. The yield was 3 859.42 kg per 667 m², significantly higher than that under T1 by 13.80%, while economic benefit reached 13 012.76 yuan per 667 m², significantly higher than that under T1 by 18.76%. Fertilizer costs were also 29.62%

收稿日期:2026-03-03;**修回日期:**2026-04-29

基金项目:广西农业科学院基本科研业务专项(桂农科 2025YP079);国家特色蔬菜产业技术体系南宁综合试验站(CARS-22-G-22);广西特色八步马蹄试验站(TS202625)

作者简介:胡一凤,女,高级农艺师,主要从事特色水生蔬菜品种选育及高产优质栽培技术研究与推广应用。E-mail:509814541@qq.com

通信作者:江 文,男,研究员,主要从事水生蔬菜新品种选育及示范推广工作。E-mail:416499386@qq.com

lower than under T1, achieving both cost savings and improved efficiency. In terms of quality, T5（0, 37.50, and 57.50 kg per 667 m² of N, P_2O_5 and K_2O, respectively）had the highest soluble sugar content（7.26%）and dry matter content（16.47 g per 100 g）. T6（37.50, 0, and 57.50 kg per 667 m² of N, P_2O_5 and K_2O, respectively）had the highest starch content（4.82 g per 100 g）. Although T5 ranked second in starch content, the difference between T5 and T6 was not statistically significant. Overall, T5 produced corms with the best quality. Analysis of soil physicochemical properties showed that contents of soil organic matter and available phosphorus were at moderate levels（26.23 $g·kg^{-1}$ and 11.13 $mg·kg^{-1}$, respectively）in treatment T12. Principal component analysis of plant growth, yield, quality, and soil attributes produced a high score for treatment T12 and a low score for T7. Under the conditions of this experiment, applying N, P_2O_5 and K_2O at rates of 18.75, 18.75, and 57.50 kg per 667 m², respectively, provided a favorable balance between plant growth, yield formation, and economic benefit. This fertilization regime may serve as a reference for local Chinese water chestnut production.

Key words: Chinese water chestnut; Yield; Quality; Physical and chemical property; “3414” experiment design

荸荠（*Eleocharis dulcis*）作为一种营养丰富、经济价值较高的特色水生蔬菜，近年来在广西稳步发展，年种植面积维持在 2 万 hm^2 以上[1-2]。栽培技术是保障荸荠产量稳定的核心要素之一，而施肥管理则是其中最为关键的环节。氮、磷、钾作为作物生长所必需的营养元素，对作物产量与品质的形成具有重要作用，合理配施氮、磷、钾肥不仅能促进植株生长，还能有效提高产量并改善果实品质[3-6]。相反，若养分比例失调，则可能抑制植株正常生长，导致产量下降，或品质降低，最终影响经济收益[7-8]。

当前在荸荠生产中，种植户多依赖经验进行施肥。一些农户为了追求高产，存在过量施肥现象，“咸马蹄”“半边风”（球茎半边裂烂）现象普遍发生，导致荸荠品质下降、商品率降低，同时加剧土壤盐渍化和连作障碍，严重制约了荸荠产业的绿色优质高效发展。因此，制定科学的施肥方案对荸荠产业的可持续发展具有重要意义。目前关于荸荠施肥的研究，多集中于单一养分或有机肥配施等因素对其生长和产量的影响[2,9-11]，而对氮、磷、钾三要素综合肥效的系统研究较少，难以确定荸荠对氮、磷、钾的最佳需求比例。“3414”试验设计作为国家测土配方施肥工作的关键方法，已在多种作物上得到广泛应用[12-17]，但在荸荠上的研究鲜有报道。为此，本研究以国家主推品种桂蹄 3 号为材料，采用“3414”肥料效应试验设计，系统分析不同氮、磷、钾配比对荸荠产量、品质及土壤理化性质的影响，以期为荸荠高产优质生产中的肥料合理施用提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与试验地概况

试验于 2024 年 7—12 月在广西壮族自治区贵港市覃塘区龙凤村水田进行。供试品种为国家主推品种桂蹄 3 号，由广西农业科学院特色水生作物团队选育。试验肥料分别为尿素[N 含量（*w*，后同）为 46.2%，海洋石油富岛有限公司]、钙镁磷肥（P_2O_5 含量为 12%，云南省个旧市大通磷化工有限公司）和硫酸钾（K_2O 含量为 52%，国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司）。该田块土壤为红壤土，肥力中等；前茬种植作物为水稻，水源丰富。试验前采集耕作层（0~20 cm）土壤样品，测定其基本理化性质，结果见表 1。

表 1　试验土壤理化性质

Table 1　Experimental soil physicochemical properties

指标 Indicator	pH	*w*（有机质）Organic matter content）/（$g·kg^{-1}$）	*w*（全氮）Total nitrogen content/%	*w*（水解性氮）Hydrolyzable nitrogen content/（$mg·kg^{-1}$）	*w*（全磷）Total phosphorus content/（$g·kg^{-1}$）	*w*（有效磷）Available phosphorus content/（$mg·kg^{-1}$）	*w*（全钾）Total potassium content/（$g·kg^{-1}$）	*w*（速效钾）Available potassium content/（$mg·kg^{-1}$）
数值 Value	5.8	27.2	0.151	155	0.746	53.9	9.9	174

1.2　试验设计

采用“3414”肥料效应试验方案，设置氮（N）、磷（P_2O_5）、钾（K_2O）3 个因素，每个因素设 4 个施肥水平，共 14 个处理。各处理具体施肥量见表 2。每个处理小区面积为 40 m^2，采用随机区组排列，3 次重复。施肥水平设置如下：不施肥为 0 水平；当地常规施肥量为 2 水平；减量施肥为 1 水平（为 2 水平的 1/2）；增量施肥为 3 水平（为 2 水平的 3/2）。

全部磷肥及 20%氮肥、20%钾肥作为基肥于 7 月 25 日（种植前）施入；分蘖期追施 20%氮肥和 20%钾肥（第 1 次追肥，8 月 25 日）；结球期追施 30%氮肥和 30%钾肥（第 2 次追肥，10 月 5 日）；球

茎膨大期追施 30%氮肥和 30%钾肥（第 3 次追肥，11 月 5 日）。试验期间的除草、病虫害防控等均参照当地常规栽培管理措施。荸荠组培苗采用两段育苗技术进行育苗，当种苗质量达 2 级以上时定植[18]。本试验于 7 月 27 日定植，株行距为 50 cm×50 cm。

表 2 荸荠施肥试验设计方案

Table 2 Fertilization experiment design scheme of Chinese water chestnut

处理 Treatment	处理组合 Treatment combination	施肥量 Fertilizer application rate/（kg·667 m^{-2}）		
		N	P_2O_5	K_2O
T1	$N_2P_2K_2$	37.50	37.50	57.50
T2	$N_3P_2K_2$	56.25	37.50	57.50
T3	$N_2P_3K_2$	37.50	56.25	57.50
T4	$N_2P_2K_3$	37.50	37.50	86.25
T5	$N_0P_2K_2$	0.00	37.50	57.50
T6	$N_2P_0K_2$	37.50	0.00	57.50
T7	$N_0P_0K_0$	0.00	0.00	0.00
T8	$N_2P_2K_0$	37.50	37.50	0.00
T9	$N_1P_2K_2$	18.75	37.50	57.50
T10	$N_2P_1K_2$	37.50	18.75	57.50
T11	$N_2P_2K_1$	37.50	37.50	28.75
T12	$N_1P_1K_2$	18.75	18.75	57.50
T13	$N_1P_2K_1$	18.75	37.50	28.75
T14	$N_2P_1K_1$	37.50	18.75	28.75

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植株生长指标测定 于荸荠生长旺盛期（9 月 28 日）每个处理选取 3 株长势一致的植株，测定株高、茎粗及匍匐茎粗。株高选取最高叶状茎用直尺测量；茎粗测定叶状茎基部向上 30 cm 处直径；匍匐茎粗测定距顶端 5 cm 处直径。每个处理 3 次重复。

1.3.2 产量及经济效益测定 于翌年 1 月 20 日采收各小区球茎，称质量后换算为单位面积产量（kg·667 m^{-2}）。经济效益的计算方法：鉴于不同处理的田间耕作及管理成本相同，故不纳入计算。以荸荠地头收购价 3.6 元•kg^{-1}，氮（N）肥 4.33 元•kg^{-1}、磷（P_2O_5）肥 8.15 元•kg^{-1}、钾（K_2O）肥 9.23 元•kg^{-1} 的价格，按照以下公式计算单位面积经济效益：

单位面积经济效益/（元•667 m^{-2}）=产量×收购价−施肥量×肥料价格。

1.3.3 品质指标测定 收获后选取新鲜完整球茎，测定其外观品质：球茎的横径、纵径、厚度、单果质量；测定球茎营养品质：参照 NY/T 2742—2015[19]测定可溶性糖含量，参照 GB5009.9—2023[20]测定淀粉含量、参照 GB 5009.3—2016[21]测定干物质含量及水分含量。

1.3.4 土壤理化性质测定 于收获时（翌年 1 月 20 日），参照 NY/T 395—2025[22]采集各处理 0~20 cm 土层土壤，样品经自然风干、过 0.15 mm 筛后，参照 NY/T 1377—2007[23]测定土壤 pH；参照 NY/T 1121.6—2006[24]测定土壤有机质含量；参照 LY/T 1228—2015[25]测定土壤全氮和水解性氮含量；参照 LY/T 1232—2015[26]测定土壤全磷和有效磷含量；参照 LY/T 1234—2015[27]测定土壤全钾及速效钾含量。

1.4 数据分析

采用 WPS 2023 进行试验数据整理、图表绘制，采用 Origin 进行相关性绘图，采用 SPSSAU 在线对各处理的产量、品质、生长指标、土壤理化指标等进行统计分析与主成分分析，得出每个处理的综合排名。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对荸荠植株生长指标的影响

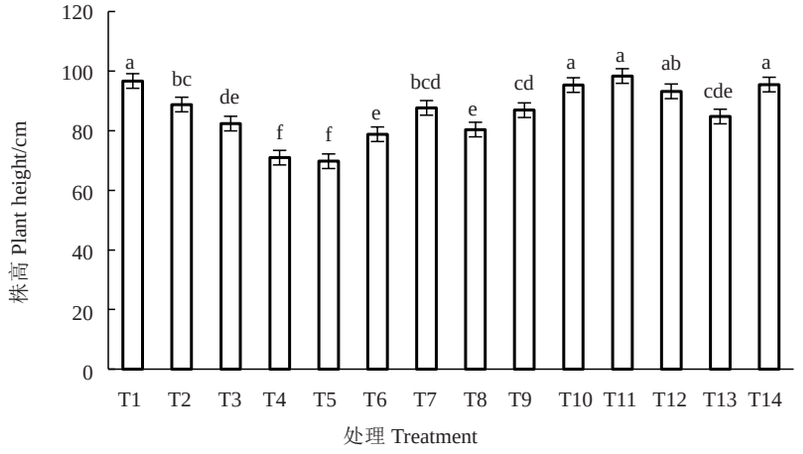
由图 1 可知，不同施肥处理对荸荠植株株高具有显著影响。其中，T11 处理株高最高，达 98.37 cm，但与 T1 差异不显著，T14、T10、T12 处理略低于 T1，但与 T1 差异均不显著；其他处理均显著低于 T1；T5 处理株高最低。由图 2 可知，T1 处理茎粗最粗，为 6.20 mm，显著粗于 T3、T7、T9、T10、T11、T12、T14，但与其他处理差异均不显著；T11 处理茎粗最细，为 5.22 mm。由图 3 可知，T7 处理匍匐茎最粗，为 6.32 mm，与 T2、T4、T12 处理差异均不显著，但显著高于其他处理；施肥处理中除 T3 外，其他处理匍匐茎粗均粗于 T1 处理。综上所述，T1 处理（常规施肥）较利于荸荠植株的地上部分生长。

2.2 不同施肥处理对荸荠产量及经济效益的影响

由表 3 可知，不同施肥处理对荸荠产量与经济效益具有显著影响。T12 处理产量与经济效益均最高，分别为 3 859.42 kg·667 m^{-2}、13 012.76 元•667 m^{-2}，均显著高于其他处理，T12 处理较 T1 增产 13.80%，增收 18.76%，节约成本 29.62%；T7 处理（不施肥）的产量与经济效益均最低，显著低于施肥处理。表明施肥处理可以促进荸荠产量的提高，T12 处理的施肥方案在本地条件下具有显著的节本增收增效特点。

2.3 不同处理对荸荠球茎品质的影响

由图 4 可知，T13 处理荸荠球茎横径最大（40.77 mm），与 T2、T10、T12 差异均不显著，但显著大于其他处理；T9 处理最小（38.79 mm）。由图 5 可知，T12 处理荸荠球茎纵径最大（37.87 mm），与 T2、



注：不同小写字母表示处理间在 0. 05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference among different treatments at 0. 05 level. The same below.

图 1　不同氮磷钾肥配比对荸荠株高的影响

Fig. 1　Effects of different N, P and K fertilizers combination ratios on plant height of Chinese water chestnut

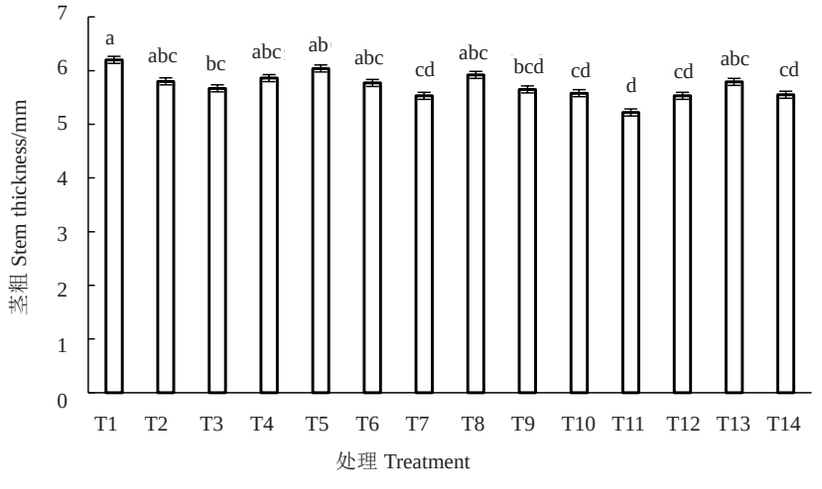


图 2　不同氮磷钾肥配比对荸荠茎粗的影响

Fig. 2　Effects of different N, P and K fertilizers combination ratios on stem thickness of Chinese water chestnut

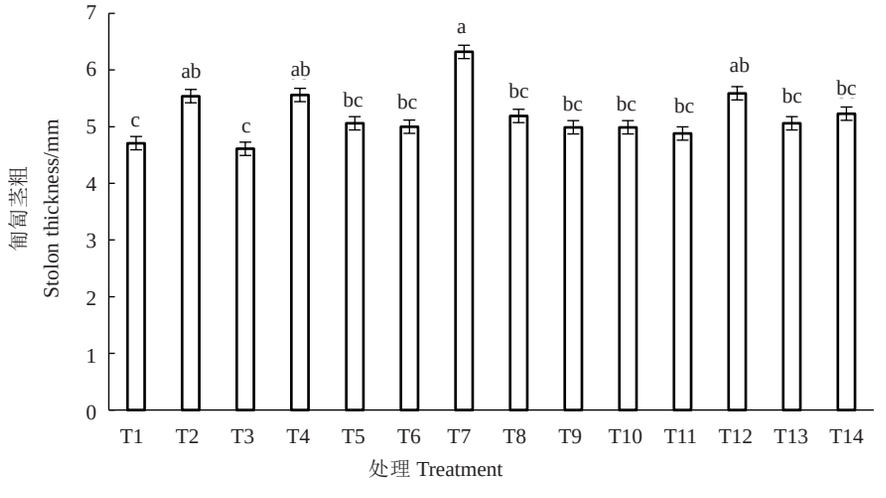


图 3　不同氮磷钾肥配比对荸荠匍匐茎粗的影响

Fig. 3　Effects of different N, P and K fertilizers combination ratios on stolon diameter of Chinese water chestnut

表 3　不同氮磷钾配比对荸荠产量及经济效益的影响

Table 3　Effects of different N, P and K fertilizers combination ratios on yield and economic benefit of Chinese water chestnut

处理 Treatment	施肥成本 Fertilizer cost/（Yuan·667 m^{-2}）	产量 Yield/（kg·667 m^{-2}）	经济效益 Economic benefit/（Yuan·667 m^{-2}）
T1	1 251.97	3 391.50±200.33 d	10 957.41±721.17 d
T2	1 339.87	2 728.32±69.64 f	8 482.07±250.70 g
T3	1 535.02	3 619.31±35.02 b	11 494.48±126.07 c
T4	1 507.09	3 078.76±53.15 e	9 576.43±191.35 e
T5	1 076.26	3 051.64±50.17 e	9 909.63±180.61 e
T6	686.04	2 392.35±31.23 g	7 926.42±112.43 h
T7	0.00	2 109.39±19.45 h	7 593.79±70.02 h
T8	741.65	2 746.68±34.43 f	9 146.41±123.95 f
T9	1 164.12	3 008.51±15.51 e	9 666.51±55.84 e
T10	969.01	3 354.42±12.86 d	11 106.89±46.28 d
T11	996.76	3 333.49±33.45 d	11 003.80±120.42 d
T12	881.15	3 859.42±21.03 a	13 012.76±75.69 a
T13	908.91	2 796.47±43.45 f	9 158.40±156.40 f
T14	713.80	3 506.82±4.09 c	11 910.76±14.73 b

注：同列不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

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

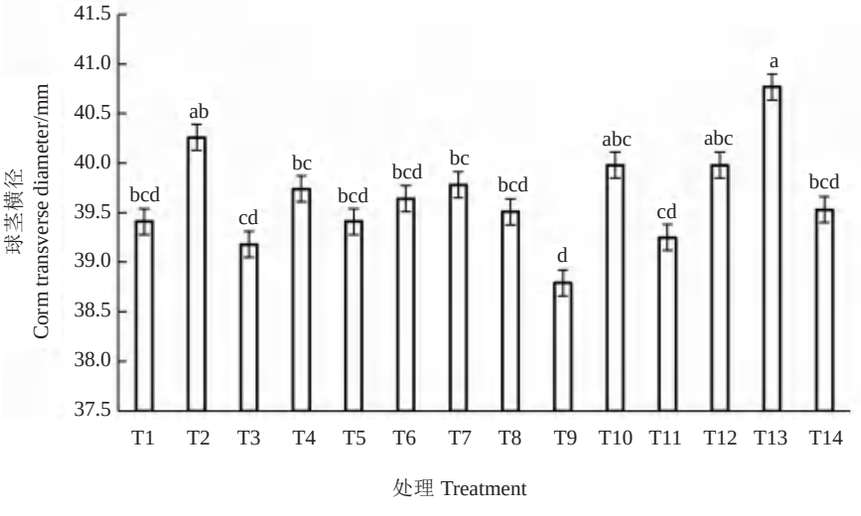


图 4　不同氮磷钾肥配比对荸荠球茎横径的影响

Fig. 4　Effects of different N, P and K fertilizers combination ratios on corm transverse diameter of Chinese water chestnut

T4、T5、T6、T7、T10、T13 处理差异均不显著，但显著大于其他处理；T9 处理最小（36.01 mm）。由图 6 可知，所有施肥处理的球茎厚度均显著高于 T7，其中 T12 球茎厚度最大（26.96 mm）。由图 7 可知，T12 处理单果质量最高（27.43 g），且显著高于其他处理；T7、T9、T5、T11 处理显著低于 T1，其他处理除 T12 处理外，与 T1 差异均不显著。综合来看，T12 处理在球茎表型指标上表现最优。

由表 4 可知，T5 处理球茎可溶性糖含量最高（7.26%），显著高于 T1、T3、T4、T11、T12，但与其他处理差异均不显著；T3 处理最低（4.34%），与 T1 处理差异不显著，但两者均显著低于其他处理。T6 处理球茎淀粉含量最高（4.82 g·100 g^{-1}），与 T1、T4、T5、T8、T10 处理差异均不显著；T7 处理最低（2.84 g·100 g^{-1}）。T5 处理球茎干物质含量最高（16.47 g·100 g^{-1}），与 T1、T6、T8、T9、T13、T14 处理差异均不显著；T7 处理最低（12.30 g·100 g^{-1}）。T7 处理球茎水分含量最高（87.70 g·100 g^{-1}），显著高于其他处理；T6 处理最低（84.10 g·100 g^{-1}），与 T1、T5、T8、T9、T13、T14 差异均不显著。综上，T5 处理

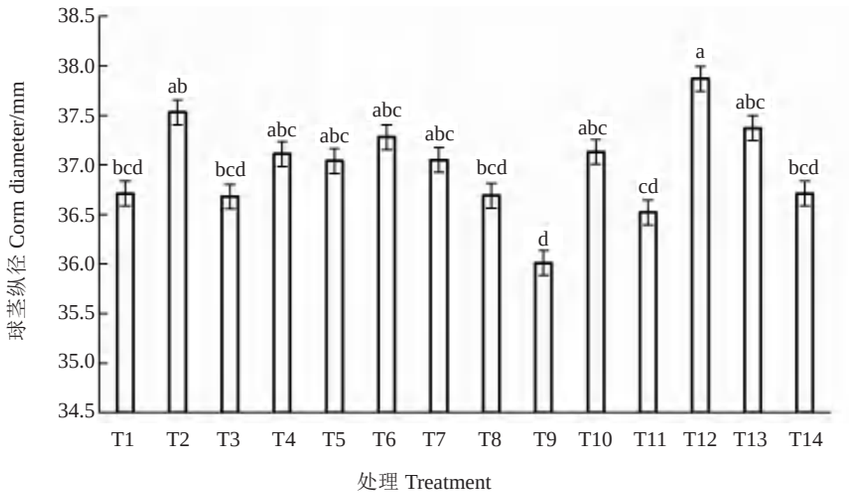


图 5　不同氮磷钾肥配比对荸荠球茎纵径的影响

Fig. 5　Effects of different N, P and K fertilizers combination ratios on corm diameter of Chinese water chestnut

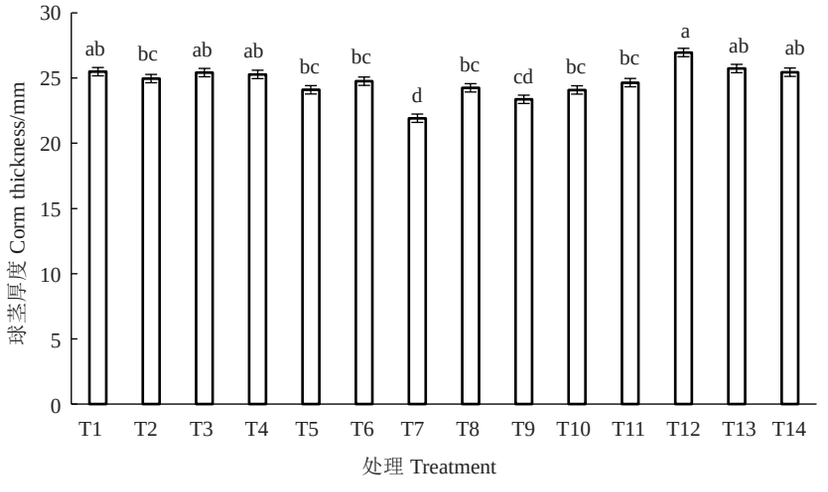


图 6　不同氮磷钾肥配比对荸荠球茎厚度的影响

Fig. 6　Effects of different N, P and K fertilizers combination ratios on corm thickness of Chinese water chestnut

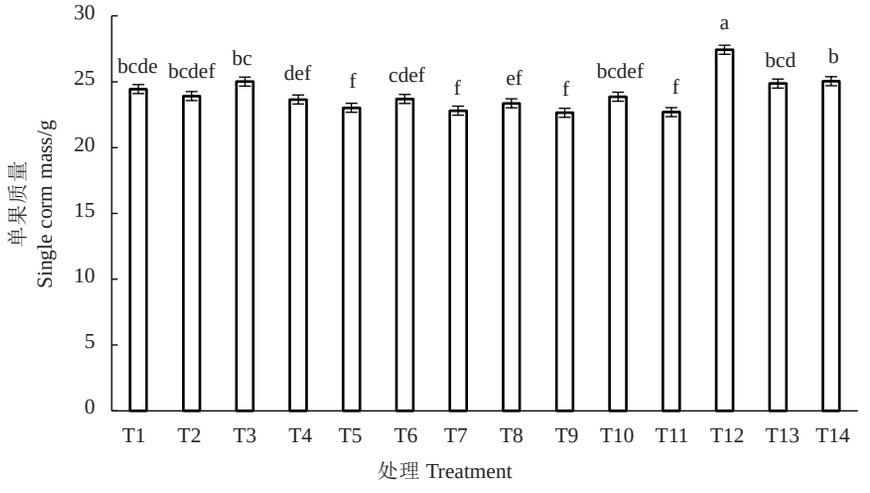


图 7　不同氮磷钾肥配比对荸荠球茎单果质量的影响

Fig. 7　Effects of different N, P and K fertilizers combination ratios on single corm mass of Chinese water chestnut

表 4 不同氮磷钾肥配比对荸荠球茎果实品质的影响

Table 4 Effects of different N, P and K fertilizers combination ratios on corm quality of Chinese water chestnut

处理 Treatment	w（淀粉）Starch content/（g·100 g^{-1}）	w（干物质）Dry matter content/（g·100 g^{-1}）	w（可溶性糖）Soluble sugar content/%	w（水分）Water content/（g·100 g^{-1}）
T1	4.50±0.03 abc	15.43±1.25 ab	4.37±0.60 d	84.57±1.25 bc
T2	3.31±0.05 def	14.50±0.10 b	6.49±0.09 ab	85.50±0.10 b
T3	3.61±0.32 cdef	14.70±0.20 b	4.34±0.94 d	85.30±0.20 b
T4	4.06±0.59 abcde	14.63±0.85 b	5.40±0.36 c	85.37±0.85 b
T5	4.56±0.16 ab	16.47±0.25 a	7.26±0.13 a	83.53±0.25 bc
T6	4.82±0.57 a	15.90±0.82 ab	6.75±0.94 ab	84.10±0.82 c
T7	2.84±0.60 f	12.30±0.20 c	6.79±0.22 ab	87.70±0.20 a
T8	4.19±0.52 abcd	15.90±0.90 ab	6.61±0.09 ab	84.10±0.90 bc
T9	3.69±0.45 bcdef	15.10±0.80 ab	6.46±0.12 ab	84.90±0.80 bc
T10	3.94±0.90 abcde	14.90±0.70 b	6.36±0.15 abc	85.10±0.70 b
T11	3.63±0.60 cdef	14.57±0.95 b	5.86±1.06 bc	85.43±0.95 b
T12	3.18±1.14 ef	14.50±1.90 b	5.79±1.26 bc	85.50±1.90 b
T13	3.35±0.07 def	15.40±0.90 ab	6.37±0.35 abc	84.60±0.90 bc
T14	3.86±0.13 bcde	15.83±0.35 ab	6.68±0.14 ab	84.17±0.35 bc

的多项品质指标表现突出。

2.4 不同施肥处理对土壤理化性质的影响

由表 5 可知，T7 处理土壤有机质含量最高（29.87 g·kg^{-1}），显著高于其他处理，且其他处理间差异均不显著；T2 处理最低（24.63 g·kg^{-1}）。T7 处理土壤 pH 最高（6.23），与 T1、T9、T11、T12、T13 差异均不显著；T4 处理最低（5.10），与 T2、T6 差异均不显著。T2 处理土壤全氮含量最高（0.20%），与 T4 处理差异不显著，但显著高于其他处理。T3 处理土壤全磷含量最高（1.01 g·kg^{-1}），与 T1、T4、T11、T13 处理差异均不显著；T6 处理最低（0.65 g·kg^{-1}），但与 T7、T8、T10、T12 差异均不显著。T4 处理土壤全钾含量最高（10.40 g·kg^{-1}），显著高于 T7 处理，但与其他处理差异均不显著。T8 处理土壤水解性氮含量最高（133.10 mg·kg^{-1}），但与 T2 处理差异不显著；T12 处理最低（101.00 mg·kg^{-1}），但与 T13 处理差

表 5 不同氮磷钾肥配比对荸荠土壤理化性质的影响

Table 5 Effects of different N, P and K fertilizers combination ratios on soil physicochemical properties of Chinese water chestnut

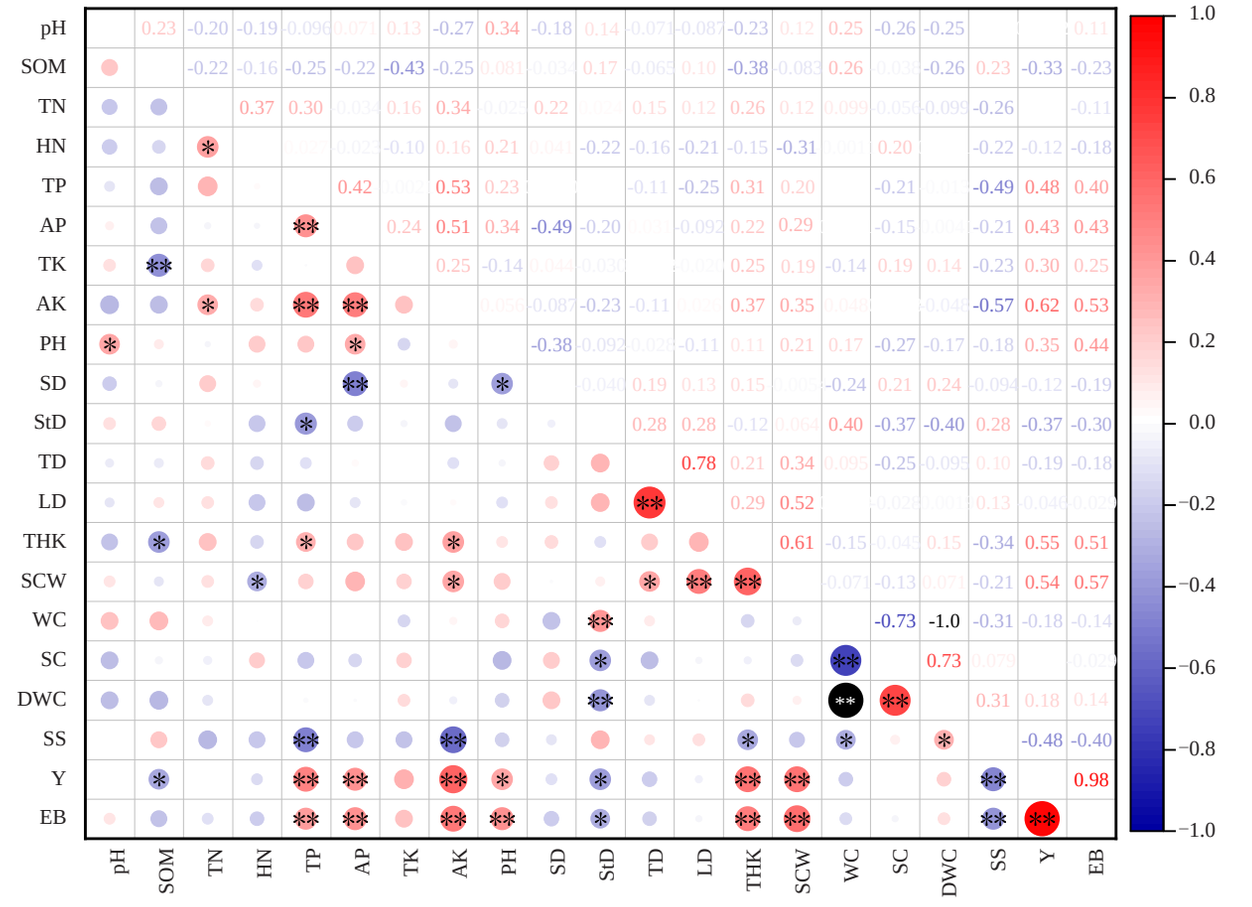
处理 Treatment	pH	w（有机质）Organic matter content/（g·kg^{-1}）	w（全氮）Total nitrogen content/%	w（全磷）Total phosphorus content/（g·kg^{-1}）	w（全钾）Total potassium content/（g·kg^{-1}）	w（水解性氮）Hydrolyzable nitrogen content/（mg·kg^{-1}）	w（有效磷）Available phosphorus content/（mg·kg^{-1}）	w（速效钾）Available potassium content/（mg·kg^{-1}）
T1	5.87±0.47 ab	26.13±0.91 b	0.17±0.01 bc	0.92±0.05 abc	10.31±0.45 ab	128.13±1.90 bc	9.51±0.65 de	185.11±1.86 f
T2	5.30±0.26 cd	24.63±1.38 b	0.20±0.02 a	0.84±0.04 bcdef	9.27±0.56 ab	132.17±1.86 a	10.42±0.58 de	186.10±1.45 f
T3	5.70±0.53 bc	24.67±1.00 b	0.17±0.01 bc	1.01±0.07 a	9.93±1.17 ab	126.03±1.55 c	13.90±1.30 a	300.93±1.00 a
T4	5.10±0.20 d	25.00±2.56 b	0.18±0.02 ab	0.91±0.10 abcd	10.40±1.70 a	115.00±0.20 d	10.60±1.40 de	242.03±2.75 b
T5	5.60±0.20 bc	26.93±1.15 b	0.15±0.02 c	0.78±0.02 def	9.91±0.12 ab	103.97±1.15 e	9.90±0.20 de	144.03±3.25 j
T6	5.33±0.15 cd	26.80±1.30 b	0.16±0.01 bc	0.65±0.07 g	9.82±0.18 ab	126.03±1.25 c	10.70±1.00 de	167.13±2.90 h
T7	6.23±0.21 a	29.87±0.91 a	0.15±0.02 bc	0.72±0.12 fg	9.12±0.97 b	113.90±1.05 d	9.80±0.09 de	121.00±1.10 l
T8	5.60±0.30 bc	24.90±2.31 b	0.16±0.01 bc	0.72±0.03 fg	9.30±0.33 ab	133.10±1.15 a	9.00±0.70 e	101.07±0.70 m
T9	5.80±0.20 ab	25.37±1.30 b	0.16±0.02 bc	0.79±0.01 cdef	9.95±0.79 ab	115.03±1.35 d	10.80±1.30 cde	149.00±2.10 i
T10	5.60±0.10 bc	26.83±1.40 b	0.16±0.01 bc	0.78±0.03 efg	9.83±0.08 ab	129.07±1.30 b	12.80±1.30 ab	216.00±0.30 c
T11	5.80±0.30 ab	25.10±2.09 b	0.15±0.02 bc	0.93±0.08 ab	9.84±0.17 ab	127.00±1.60 bc	13.00±1.30 a	171.00±1.30 g
T12	5.90±0.20 ab	26.23±1.47 b	0.16±0.02 bc	0.77±0.13 efg	10.10±0.36 ab	101.00±0.80 f	11.13±0.95 bcd	194.20±0.82 e
T13	5.80±0.20 ab	25.00±0.89 b	0.15±0.01 c	0.89±0.11 abcde	9.85±0.26 ab	102.90±1.05 ef	12.60±1.10 abc	131.13±1.90 k
T14	5.60±0.20 bc	24.93±2.18 b	0.15±0.01 c	0.88±0.13 bcde	9.64±0.68 ab	114.40±1.73 d	12.70±1.90 ab	208.10±1.25 d

异不显著。T3处理土壤有效磷含量最高（13.90 mg·kg^{-1}），与T10、T11、T13、T14处理差异均不显著；T8处理最低（9.00 mg·kg^{-1}）。T3处理土壤速效钾含量最高（300.93 mg·kg^{-1}），显著高于其他处理；T8处理最低（101.07 mg·kg^{-1}）。综上，土壤全量养分含量基本与施肥量一致（T2、T3、T4处理分别为全氮、全磷、全钾含量最高的处理）；但速效养分含量不完全同步（T3处理的有效磷和速效钾含量均最高），可能与磷钾协同作用有关。

2.5　相关性分析

由图8可知，土壤养分指标间，土壤有机质含量与全钾含量呈极显著负相关；全氮含量与土壤水解性氮、速效钾含量均呈显著正相关；土壤全磷含量与土壤有效磷、速效钾含量均呈极显著正相关；土壤全钾含量与土壤速效钾、有效磷含量均呈正相关，但均未达到显著水平。表明土壤全量养分与速效养分间存在协同变化特征，且磷钾存在协同效应。

土壤养分与植株生长指标间，土壤pH、土壤有效磷含量与株高均呈显著正相关；土壤有效磷含量与茎粗呈极显著负相关；土壤全磷含量与匍匐茎粗呈显著负相关；土壤有机质含量与球茎厚度、产量均呈显著负相关；土壤水解性氮含量与单果质量呈



注：SOM. 土壤有机质含量；TN. 土壤全氮含量；HN. 土壤水解性氮含量；TP. 土壤全磷含量；AP. 土壤有效磷含量；TK. 土壤全钾含量；AK. 土壤速效钾含量；PH. 株高；SD. 茎粗；StD. 匍匐茎粗；TD. 球茎横径；LD. 球茎纵径；THK. 球茎厚度；SCW. 单果质量；WC. 球茎水分含量；SC. 球茎淀粉含量；DWC. 球茎干物质含量；SS. 球茎可溶性糖含量；Y. 产量；EB. 经济效益。*表示在0.05水平显著相关；**表示在0.01水平极显著相关。

Note: SOM. Soil organic matter content; TN. Soil total nitrogen content; HN. Soil hydrolyzable nitrogen content; TP. Soil total phosphorus content; AP. Soil available phosphorus content; TK. Soil total potassium content; AK. Soil available potassium content; PH. Plant height; SD. Stem thickness; StD. Stolon thickness; TD. Corm transverse diameter; LD. Corm diameter; THK. Corm thickness; SCW. Single corm mass; WC. Corm moisture content; SC. Corm starch content; DWC. Corm dry matter content; SS. Corm soluble sugar content; Y. Yield; EB. Economic benefit. * represent significant correlation at 0.05 level; ** represent extremely significant correlation at 0.01 level.

图8　不同施肥处理荸荠各指标间的相关性分析

Fig. 8　Correlation analysis of Chinese water chestnut indicators under different fertilisation treatments

显著负相关；土壤速效钾含量与单果质量呈显著正相关；土壤全磷、速效钾含量与球茎厚度均呈显著正相关；土壤全磷、速效钾含量与球茎可溶性糖含量均呈极显著负相关；土壤全磷、有效磷、速效钾含量与产量、经济效益均呈极显著正相关。综上，土壤养分对荸荠生长、产量和品质具有显著调控作用，其中磷钾养分是影响产量和经济效益的主要因子，生产中应注重磷钾肥适量配施，兼顾产量与品质。

植株生长指标、产量、经济效益、品质指标间也存在显著的相关性。单果质量与球茎横径呈显著正相关，与球茎纵径、厚度及产量、经济效益均呈极显著正相关，说明球茎膨大是单果质量增加的基础，是产量形成的主要因子。株高与茎粗呈显著负相关，与产量呈显著正相关，与经济效益呈极显著正相关。产量与经济效益呈极显著正相关，说明产量是决定经济效益的核心因子。匍匐茎粗与球茎水分含量呈极显著正相关，与球茎淀粉含量、产量、经济效益均呈显著负相关，与干物质含量呈极显著负相关；球茎水分含量与球茎淀粉含量、干物质含量均呈极显著负相关，其中与球茎干物质含量的相关系数为−1.00。球茎干物质含量与球茎可溶性糖含量呈显著正相关。球茎可溶性糖含量与球茎厚度、球茎水分含量均呈显著负相关，与产量、经济效益均呈极显著负相关。

2.6 主成分分析与不同施肥处理的综合评价

为综合评价不同施肥处理的效果，对产量、经济效益以及植株生长指标、品质指标、土壤养分指标等 21 项指标进行主成分分析。由图 8 可知，球茎水分含量与球茎干物质含量呈完全负相关（r=−1.00），二者互为消长，存在信息重叠，因此剔除干物质含量之后再次进行分析，共提取 7 个特征值大于 1 的主成分（表 6），累计贡献率为 78.522%。7 个主成分分别定义为 PC1、PC2、PC3、PC4、PC5、PC6、PC7，各主成分载荷系数显示，PC1 主要反映产量、经济效益、单果质量以及土壤全磷含量、土壤速效钾含量等指标；PC2 主要反映匍匐茎粗以及球茎水分含量、淀粉含量等指标；PC3 主要反映球茎横径、纵径、厚度等指标；PC4 主要反映土壤全氮含量、水解性氮含量、球茎可溶性糖含量等指标；PC5 主要反映土壤全钾含量、有机质含量等指标；PC6

表 6 荸荠指标的主成分载荷矩阵

Table 6 Principal component loading matrix of chinese water chestnut indicators

指标 Index	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
X_1 pH	−0.062	0.387	−0.469	−0.246	−0.247	−0.225	0.487
X_2 土壤有机质含量 Soil organic matter content	−0.444	0.259	−0.278	−0.095	0.432	−0.295	−0.015
X_3 土壤全氮含量 Soil total nitrogen content	0.192	−0.103	0.334	0.711	−0.033	0.069	0.173
X_4 土壤水解性氮含量 Soil hydrolyzable nitrogen content	0.000	−0.471	−0.109	0.513	0.219	0.314	0.480
X_5 土壤全磷含量 Soil total phosphorus content	0.655	−0.121	−0.157	0.328	0.148	−0.127	−0.284
X_6 土壤有效磷含量 Soil available phosphorus content	0.612	0.135	−0.28	−0.050	−0.097	0.519	−0.171
X_7 土壤全钾含量 Soil total potassium content	0.373	−0.084	0.238	−0.150	−0.756	0.055	0.266
X_8 土壤速效钾含量 Soil available potassium content	0.759	−0.092	0.056	0.288	−0.002	0.064	−0.185
X_9 株高 Plant height	0.358	0.266	−0.531	−0.013	0.360	0.168	0.448
X_{10} 茎粗 Stem thickness	−0.136	−0.229	0.596	0.161	0.063	−0.565	0.155
X_{11} 匍匐茎粗 Stolon thickness	−0.403	0.593	0.091	0.143	−0.303	0.030	−0.024
X_{12} 球茎横径 Corm transverse diameter	−0.077	0.596	0.565	0.147	0.122	0.264	0.088
X_{13} 球茎纵径 Corm diameter	−0.029	0.582	0.650	−0.054	0.245	0.157	0.103
X_{14} 球茎厚度 Corm thickness	0.660	0.175	0.451	−0.018	0.059	−0.087	−0.019
X_{15} 单果质量 Single corm mass	0.586	0.527	0.332	−0.221	0.136	−0.067	0.108
X_{16} 球茎水分含量 Corm moisture content	−0.101	0.546	−0.419	0.570	−0.164	−0.185	−0.052
X_{17} 球茎淀粉含量 Corm starch content	−0.048	−0.679	0.339	−0.402	0.107	0.086	0.217
X_{18} 球茎可溶性糖含量 Corm soluble sugar content	−0.628	0.082	0.086	−0.435	0.072	0.340	−0.144
X_{19} 产量 Yield	0.905	−0.005	−0.056	−0.261	0.054	−0.151	0.009
X_{20} 经济效益 Economic benefit	0.850	0.101	−0.137	−0.357	0.082	−0.153	0.045
特征值 Eigenvalue	4.799	2.750	2.604	2.044	1.274	1.192	1.041
贡献率 Contribution rate/%	23.997	13.752	13.019	10.221	6.371	5.958	5.204
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	23.997	37.749	50.768	60.989	67.36	73.318	78.522

主要反映茎粗、土壤有效磷含量等指标；PC7 主要反映土壤 pH、株高等指标。根据主成分特征向量，构建不同施肥处理下 7 个主成分与荸荠产量、经济效益以及植株生长指标、品质指标、土壤养分指标间的线性关系式，分别为 F_1、F_2、F_3、F_4、F_5、F_6、F_7，具体如下：

F_1=− 0.028X_1− 0.203X_2 + 0.088X_3 + 0.000X_4 + 0.299X_5+ 0.279X_6+ 0.170X_7+ 0.347X_8+ 0.163X_9− 0.062X_{10}− 0.184X_{11}− 0.035X_{12}− 0.013X_{13} + 0.301X_{14} + 0.268X_{15}− 0.046X_{16}− 0.022X_{17}− 0.287X_{18} + 0.413X_{19} + 0.388X_{20}；

F_2=0.233X_1+ 0.156X_2− 0.062X_3− 0.284X_4− 0.073X_5 + 0.081X_6− 0.050X_7− 0.056X_8 + 0.161X_9− 0.138X_{10} + 0.358X_{11} + 0.359X_{12} + 0.351X_{13} + 0.106X_{14} + 0.318X_{15} + 0.329X_{16}− 0.409X_{17} + 0.049X_{18}−0.003X_{19}+0.061X_{20}；

F_3=−0.290X_1− 0.172X_2+ 0.207X_3− 0.067X_4− 0.097X_5− 0.174X_6 + 0.147X_7 + 0.035X_8− 0.329X_9 + 0.369X_{10} + 0.056X_{11} + 0.350X_{12} + 0.403X_{13} + 0.280X_{14} + 0.206X_{15}− 0.260X_{16}+ 0.210X_{17}+ 0.053X_{18}− 0.035X_{19}− 0.085X_{20}；

F_4=− 0.172X_1− 0.067X_2 + 0.497X_3 + 0.359X_4 + 0.229X_5− 0.035X_6− 0.105X_7 + 0.201X_8− 0.009X_9 + 0.113X_{10}+ 0.100X_{11}+ 0.103X_{12}− 0.038X_{13}− 0.013X_{14}− 0.155X_{15}+ 0.399X_{16}− 0.281X_{17}− 0.304X_{18}− 0.183X_{19}− 0.249X_{20}；

F_5=− 0.219X_1 + 0.383X_2− 0.029X_3 + 0.194X_4 + 0.131X_5− 0.086X_6− 0.670X_7− 0.002X_8 + 0.319X_9 + 0.055X_{10}− 0.268X_{11} + 0.108X_{12} + 0.217X_{13} + 0.052X_{14} + 0.121X_{15}− 0.145X_{16} + 0.095X_{17} + 0.063X_{18} + 0.047X_{19} + 0.072X_{20}；

F_6=−0.206X_1− 0.270X_2+ 0.063X_3+ 0.288X_4− 0.117X_5 + 0.475X_6 + 0.050X_7 + 0.059X_8 + 0.154X_9− 0.517X_{10} + 0.028X_{11} + 0.242X_{12} + 0.144X_{13}− 0.079X_{14}− 0.061X_{15}− 0.170X_{16} + 0.079X_{17} + 0.311X_{18}−0.138X_{19}−0.140X_{20}；

F_7=0.477X_1− 0.015X_2+ 0.170X_3+ 0.470X_4− 0.279X_5− 0.167X_6 + 0.261X_7− 0.182X_8 + 0.439X_9 + 0.152X_{10}− 0.024X_{11} + 0.086X_{12} + 0.101X_{13}− 0.018X_{14} + 0.106X_{15}− 0.051X_{16} + 0.212X_{17}− 0.141X_{18} + 0.009X_{19} + 0.044X_{20}。

综合得分是方差解释率与成分得分乘积后累加计算得到的，综合评价方程为：

$F_{综}$ =0.306F_1 + 0.175F_2 + 0.166F_3 + 0.130F_4 + 0.081F_5+0.076F_6+0.066F_7。

基于主成分得分计算各处理的综合得分并进行排序，结果如表 7 所示。所有施肥处理的综合得分均高于不施肥处理（T7）。T12 处理得分最高（1.20），排名第 1；T7 处理综合得分最低（−1.19），排名第 14。说明在本试验条件下，T12 处理为最优施肥组合。

3　讨论与结论

3.1　不同施肥处理对荸荠生长的影响

氮、磷、钾是影响作物生长的关键营养元素，其

表 7　不同施肥处理对荸荠生长指标、产量、球茎品质指标及土壤理化性质的综合评价

Table 7　Comprehensive evaluation of different fertilisation treatments on growth, yield, corm fruit quality and soil physicochemical properties of chinese water chestnut

处理 Treatment	主成分得分 Principl component score							综合得分 Comprehensive score	排名 Rank
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7		
T1	1.60	−1.31	0.21	0.42	0.44	−1.79	2.03	0.39	4
T2	−0.75	0.43	1.33	2.63	0.72	1.11	0.29	0.57	3
T3	3.77	−0.82	−0.64	1.35	−0.23	−0.17	−0.61	1.01	2
T4	0.59	−0.68	1.79	1.42	−1.09	−0.35	−1.42	0.33	6
T5	−1.68	−1.16	1.22	−2.00	−0.33	−1.02	−1.06	−0.95	13
T6	−2.15	−1.26	1.44	−0.36	0.35	0.95	0.23	−0.57	10
T7	−4.43	2.64	−2.22	1.01	−0.31	−0.58	0.09	−1.19	14
T8	−2.19	−1.46	0.49	−0.24	0.33	−0.09	0.76	−0.80	11
T9	−0.93	−1.29	−1.62	−0.37	−0.98	−0.36	−0.16	−0.94	12
T10	0.74	0.15	−0.67	−0.20	0.79	1.14	0.59	0.30	7
T11	1.22	−0.44	−2.44	0.03	0.00	1.05	0.17	−0.01	9
T12	2.54	3.32	3.32	−1.67	0.06	−0.87	0.22	1.20	1
T13	−0.12	1.66	1.03	−0.70	−0.19	0.36	−0.68	0.30	7
T14	1.80	0.23	−0.56	−1.33	0.44	0.62	−0.43	0.38	5

配施比例可调控荸荠生长。本试验中，T11 处理的植株最高，达 98.37 cm，其次分别为 T1、T14 和 T10，株高依次为 96.70、95.50 和 95.33 cm；而 T5 处理的株高最低，仅为 69.70 cm，说明在供试条件下，适量配施氮、磷、钾有利于植株保持较高的生长势，而氮素缺乏会显著抑制荸荠的株高。T1 处理的茎粗最粗，为 6.20 mm；T11 处理的茎粗最细（5.22 mm），但与 T7、T9、T10、T12、T14 间均无显著差异。说明均衡施用氮、磷、钾肥对促进茎部增粗作用显著，该响应模式与株高对养分的反应有所差异，反映出不同元素在植株形态生成中的功能分化。值得注意的是，T7 处理的株高、茎粗中等，匍匐茎粗最粗，该结果与高美萍等[28]的研究不一致，可能与试验地基础肥力、气候条件或试验实施方案不同有关，同时也说明本试验的土壤基础肥力在一定程度上可支持荸荠前期的营养生长。

3.2 不同施肥处理对荸荠产量及经济效益的影响

产量和经济效益是农业生产追求的核心目标与最终目标，而施肥管理是直接影响作物产量形成的关键农艺措施。已有大量研究表明，作物产量通常随施肥量的增加呈先上升后下降的趋势，且受氮、磷、钾交互作用的显著调控，唯有三者配比合理才能实现高产目标[29-31]。本试验中，所有施肥处理的产量均显著高于不施肥处理（T7），说明氮、磷、钾的供应对荸荠产量构成至关重要。其中，T12 处理的产量与经济效益均最高，分别为 3 859.42 kg·667 m^{-2}、13 012.76 元·667 m^{-2}，产量较 T1 处理显著提高 13.80%；氮、磷施用量低于当地常规施肥水平（T1）、钾施用量与常规施肥水平持平，表明试验田块的基础氮、磷养分较为充足，在生育后期无需过量补充即可满足球茎膨大与成熟的需求；同时，T12 处理经济效益较 T1 显著提高了 18.76%，施肥成本较 T1 降低 28.48%，具有显著的“减投增效”优势，说明 T12 处理的氮磷钾配比在本试验条件下更利于节本增收增效。与此同时，过量施肥处理（T2、T4）产量均低于常规施肥水平（T1）的产量，符合肥料报酬递减规律；缺乏任一养分元素的处理（T5、T6、T8），产量虽高于不施肥处理（T7），但均显著低于 T1 处理，进一步印证了氮、磷、钾元素对荸荠生长的必要性，以及养分均衡供应在产量形成中的关键作用。此外，T2、T4 处理的成本均高于 T1，但是产量与经济效益均低于 T1，说明并不是增加施肥就可以提高产量；虽然 T3 处理经济效益较 T1 增加了 4.90%，但是施肥成本却只较 T1 提高了 22.61%，说明单靠增加施肥量来提高经济效益是行不通的，因此生产中要计算投入产出比，合理施肥。

3.3 不同施肥处理对荸荠品质的影响

本试验中不同施肥处理对荸荠球茎的外观品质及内在品质均表现出较大的调控作用。外观品质结果表明，T12 处理在获得最高产量的同时，其球茎在大小、厚度及单果质量等方面综合表现也最优，体现了中低氮、中低磷与中高钾配施的协同增效效应。这可能是因为该养分配比在维持荸荠必要生长的同时，有效促进了贮藏器官的发育，这与王丹丹等[5]的研究结果一致。内在品质分析表明，T5 处理的球茎可溶性糖含量与干物质含量均最高，较常规施肥水平（T1）分别提高 2.89 百分点、6.74%，说明在磷钾供应充足的条件下，不施氮肥有利于球茎可溶性糖和干物质的积累。相比之下，高磷处理（如 T3）的球茎可溶性糖含量最低，但与 T1 差异不显著，说明球茎可溶性糖的含量并没有随着磷肥施用量增加而提高，这也和土壤全磷含量、速效磷含量均与球茎可溶性糖含量呈极显著负相关一致。T6 处理球茎淀粉含量最高，但与 T1、T10 差异均不显著；说明在本试验条件下，磷并不是球茎淀粉合成的限制因素。因此当氮钾供应充足时，在本试验条件下，不施磷肥对荸荠球茎的淀粉积累影响不大。可能是因为磷缺乏虽限制了能量代谢过程，但氮与钾的充足供应促进了光合产物的合成与转运，从而增加了淀粉在球茎中的积累。综合来看，T5 处理的内在品质表现最优。但是 T5 处理的产量和经济效益显著低于 T1，说明高产与优质之间存在一定的矛盾关系，这也是生产上面临的难题，需要从不同角度去思考解决。此外，不施肥处理（T7）的球茎水分含量显著高于所有施肥处理，且其干物质含量最低，显著低于所有施肥处理，表明合理施肥有助于提高干物质含量，进而改善荸荠的耐贮性与加工品质。

3.4 不同施肥处理对土壤理化性质的影响

不同施肥处理不仅直接影响荸荠的产量与品质，也对土壤理化性质产生较大影响。T7 处理的土壤 pH 与有机质含量均最高；而过量施肥的 T2、T4 处理土壤 pH 和有机质含量均较低，且并未表现出相应的产量或品质优势。这表明过量施肥不仅造成养分资源浪费，还可能引发土壤酸化，抑制有机质的积累，从而对荸荠的正常生长与品质形成产生不利影响。在产量和球茎表型上表现最佳的为 T12 处理，其土壤 pH（5.90）处于适宜范围，土壤有机质含

量（26.23 g·kg^{-1}）、有效磷含量（11.13 mg·kg^{-1}）处于中等水平，同时土壤速效钾含量（194.20 mg·kg^{-1}）显著高于 T1。这说明，在试验土壤条件下，T12 处理能在维持土壤酸碱度稳定的前提下，有效保障磷、钾养分的供应，从而促进荸荠球茎的膨大与高产的形成。

3.5　基于主成分分析的综合评价

主成分分析法是一种科学、客观的综合评价方法，在农业研究中常被用于整合多项指标，依据其内在关联性确定权重，从而获得反映不同处理综合表现的评价得分[32-34]。对于荸荠生产而言，高产增收是种植者的首要目标，球茎的商品性状（大小、均一度等）直接影响其市场价值，而球茎可溶性糖、淀粉、水分含量等则是评价内在品质的关键指标[28，35-36]。本研究基于荸荠生长指标、产量、球茎品质指标及土壤理化性质指标等，运用主成分分析进行综合评价。结果表明，T12 处理的综合得分最高，而 T7 处理综合得分最低。这说明，在所选指标的综合评价体系下，T12 处理的施肥方案（中低氮、中低磷、中高钾）综合表现最优，T7 处理的综合表现最差。值得注意的是，T5 处理在可溶性糖和干物质含量上表现均最优，但综合得分排名靠后（第 13 名）。因此，在荸荠实际生产中，应根据生产目标（高产、优质或兼顾）选择适宜的施肥方案：若以高产高效为目标，推荐 T12 处理；若以品质为导向，可考虑 T5 处理，但需注意其产量和经济效益较低；若兼顾产量与品质及土壤健康等综合因素，T12 处理在本试验条件下表现最优，可作为当地荸荠生产的推荐施肥配比参考。

综上，适宜的氮磷钾配比不仅能改善土壤养分供应、促进植株生长，还可有效提升产量和球茎品质。本研究中，T12 处理的荸荠产量与经济效益均最高，分别较 T1 处理显著提高 13.80%、18.76%，施肥成本也较 T1 降低 29.62%；在球茎表型方面，T12 处理纵径（37.87 mm）、厚度（26.96 mm）和单果质量（27.43 g）均最高；在土壤理化性质方面，T12 处理有机质（26.23 g·kg^{-1}）、有效磷（11.13 mg·kg^{-1}）含量均处于中等水平，且均与 T1 无显著差异，同时速效钾含量（194.20 mg·kg^{-1}）显著高于 T1，且综合多项指标评价表明，T12 处理综合表现最优，该配比在满足荸荠营养需求的同时，有助于维持土壤健康，避免因单一养分过量导致的土壤酸化或养分失衡问题，从而实现高产与优质的协同提升。因此 T12 处理（N 18.75 kg·667 m^{-2}、P_2O_5 18.75 kg·667 m^{-2}、K_2O 57.50 kg·667 m^{-2}）可作为当地荸荠生产的推荐施肥方案。

参考文献

[1] 张存彦，杨江澜，江文，等.广西贺州荸荠产业现状与高质量发展路径[J].中国蔬菜，2023（6）：109-113.

[2] 高美萍，陶运荣，蒋慧萍，等.不同施氮量对荸荠生长、产量及氮素利用效率的影响[J].中国瓜菜，2024，37（11）：153-157.

[3] 魏全全，苟久兰，张萌，等.氮磷钾配施对贵州高山甘蓝产量、养分吸收及利用的影响[J].中国瓜菜，2022，35（12）：40-46.

[4] 张倩，孔小平，齐晓雨.不同施肥水平对胡萝卜生长发育的影响[J].中国土壤与肥料，2024（11）：98-106.

[5] 王丹丹，李燕，张庆银，等.基于“3414”试验的番茄产量、品质及土壤理化性质的研究[J].中国瓜菜，2022，35（5）：62-67.

[6] 赵恩，杨太新，何雅倩，等.氮磷钾配比施肥对小白嘴山药产量和质量的影响[J].中药材，2025，48（4）：803-808.

[7] 冯爱青，张民，李成亮，等.控释氮肥对土壤酶活性与土壤养分利用的影响[J].水土保持学报，2014，28（3）：177-184.

[8] 焦可君.氮磷钾施肥水平对番茄养分积累及品质的影响[D].合肥：安徽农业大学，2020.

[9] 彭育好，罗燎樱.氮肥施用时期与比例对荸荠产量的影响[J].现代农业科技，2009（18）：88.

[10] 赖小芳，王伯诚，陈伟强，等.饼肥不同施用量及施用方法对荸荠的增产效应[J].江西农业学报，2017，29（9）：56-61.

[11] 赖昌健，高美萍，玉章艳，等.等量肥料不同施用方法对荸荠产量的影响[J].长江蔬菜，2013（12）：35-37.

[12] 王圣瑞，陈新平，高祥照，等.“3414”肥料试验模型拟合的探讨[J].植物营养与肥料学报，2002，8（4）：409-413.

[13] 周镇磊，刘建明，曹东，等.“3414”施肥对呼伦贝尔燕麦产量和品质的影响[J/OL].分子植物育种，1-25[2026-07-08].https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220920.1656.006.html.

[14] 刘新伟，龚德平，巩细民，等.湖北江北农场小麦肥效试验与施肥推荐[J].麦类作物学报，2012，32（2）：338-343.

[15] 董作珍，吴良欢，柴婕，等.不同氮磷钾处理对中浙优 1 号水稻产量、品质、养分吸收利用及经济效益的影响[J].中国水稻科学，2015，29（4）：399-407.

[16] 王湛，李凯，王勇，等.基于“3414”试验的谷子氮磷钾施肥量研究[J].中国土壤与肥料，2025（3）：76-83.

[17] 王艳，许振欣，何明慧，等.氮磷钾配施下赤红壤区粉葛的肥料效应及产量和品质研究[J].核农学报，2022，36（9）：1869-1877.

[18] 江文，高美萍，何芳练，等.荸荠组培苗两段育苗技术规程[J].长江蔬菜，2019（4）：12-14.

[19] NY/T 2742—2015　水果及制品可溶性糖的测定 3，5-二硝基水杨酸比色法[S].

[20] GB5009.9—2023　食品安全国家标准　食品中淀粉的测定[S].

[21] GB 5009.3—2016　食品安全国家标准　食品中水分的测定[S].

[22] NY/T 395—2025　农田土壤环境质量监测技术规范[S].

[23] NY/T 1377—2007　土壤 pH 的测定[S].

[24] NY/T 1121.6—2006　土壤检测　第 6 部分：土壤有机质的测定[S].

[25] LY/T 1228—2015 森林土壤氮的测定[S].
[26] LY/T 1232—2015 森林土壤磷的测定[S].
[27] LY/T 1234—2015 森林土壤钾的测定[S].
[28] 高美萍,陶运荣,蒋慧萍,等.不同氮肥处理对荸荠产量、淀粉积累速率及淀粉合成酶活性的影响[J].作物杂志,2025(6):248-253.
[29] 肖爱萍,马榕,王斌,等.氮磷钾配施对长芒草种子生产性能和发芽特性的影响[J].草业科学,2026,43(2):321-333.
[30] 谭海文,李玉洪,管欢,等.不同氮磷钾肥配施对桂北地区萝卜产量和品质的影响[J].中国瓜菜,2025,38(7):166-171.
[31] 聂金,谭芷,王军伟,等.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.
[32] Guo Q,Wu W,Massart D L,et al.Feature selection in principal component analysis of analytical data[J].Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems,2002,61(1):123-132.
[33] 谢言东,郁继华,吕剑,等.不同施肥处理对露地甘蓝生长、产量及品质的影响[J].中国瓜菜,2021,34(12):52-57.
[34] 朱太富,刘成茸,甲卡拉铁,等.不同施肥处理对草莓产量及果实品质的影响[J].北方园艺,2025(18):54-62.
[35] 郑丹,王晓芳,郭鹏.不同磷肥施用水平和磷肥品种搭配对马蹄产量及品质的影响[J].湖北农业科学,2015,54(16):3880-3883.
[36] 范晓菁,唐刘婧,曾蕊,等.基于主成分分析的荸荠品质综合评价[J].扬州大学学报(农业与生命科学版),2025,46(4):101-108.