DOI:10.16861/j.cnki.zggc.2025.0780

矿源黄腐酸钾肥料对马铃薯生长、品质及光合作用的影响

曾祥飞[1,2],陈 蓉[1,3],陈婉玉[1,2],仝喜萍[1,3],李威康[1,3],陈汝豪[1,2],
林 原[1,2],秦玉芝[1,2],熊兴耀[1,2,3],胡新喜[1,2]

(1.湖南省马铃薯工程技术研究中心•蔬菜生物学湖南省重点实验室•湖南农业大学园艺学院 长沙 410128;
2.岳麓山实验室 长沙 410128; 3.中国农业科学院深圳农业基因组研究所 广东深圳 440307)

摘 要:为探究矿源黄腐酸钾(KFA)施用量对马铃薯兴佳2号生长、光合特性、生物量积累及块茎品质的影响,明确其在南方马铃薯生产中的适宜用量,本研究采用盆栽试验,设置0(CK)、90(KFA1)、180(KFA2)和270 kg·hm^{-2}(KFA3)等4个KFA施用梯度,系统测定植株生长指标、光合参数、叶绿素荧光参数、根系活力、生物量及块茎品质指标。结果表明,适量施用KFA可显著促进马铃薯生长、增强光合作用、提高生物量并改善品质。KFA1处理(90 kg·hm^{-2})在促进植株营养生长和生物量积累方面效果最佳,株高和块茎鲜质量较CK分别显著提高18.9%和75.0%;KFA2处理(180 kg·hm^{-2})在提升光合性能和根系活力方面最为突出,净光合速率和根系活力分别较CK显著提高80.0%和76.0%;KFA1处理还可显著提高块茎可溶性糖含量。过量施用(270 kg·hm^{-2})则对部分生长和光合指标表现出抑制效果。综上,矿源黄腐酸钾对马铃薯生长具有显著促进作用,但其效应存在用量阈值,适宜施用量范围为90~180 kg·hm^{-2},其中90 kg·hm^{-2}更有利于提升生物量、产量和品质。本研究结果为马铃薯优质高产奠定了基础。

关键词:马铃薯;黄腐酸钾;生长发育;光合作用;产量;品质

中图分类号:S532 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-2871(2026)10-146-08

Effects of potassium fulvate fertilizer from mineral sources on growth, quality, and photosynthesis of potato

Zeng Xiangfei[1,2], Chen Rong[1,3], Chen Wanyu[1,2], Tong Xiping[1,3], Li Weikang[1,3], Chen Ruhao[1,2], Lin Yuan[1,2], Qin Yuzhi[1,2], Xiong Xingyao[1,2,3], Hu Xinxi[1,2]

(*1. Hunan Potato Engineering Technology Research Center/Key Laboratory of Vegetable Biology, Hunan Province/College of Horticulture, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, Hunan, China; 2. Yuelu Mountain Laboratory, Changsha 410128, Hunan, China; 3. Shenzhen Institute of Agricultural Genomics, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Shenzhen 440307, Guangdong, China*)

Abstract: To investigate the effects of application rates of potassium fulvic acid(KFA)derived from mineral sources on the growth, photosynthetic characteristics, biomass accumulation and tuber quality of potato cultivar Xingjia No. 2, and determine its optimal application rate for potato production in southern China, a pot experiment was conducted with four KFA application levels: 0(CK), 90(KFA1), 180(KFA2)and 270(KFA3) kg·hm^{-2}. Plant-growth indicators, photosynthetic parameters, chlorophyll fluorescence parameters, root activity, biomass and tuber quality indices were systematically measured. The results showed that appropriate KFA application significantly promoted potato growth, enhanced photosynthesis, increased biomass and improved tuber quality. The KFA1 treatment(90 kg·hm^{-2})produced the best performance in promoting plant vegetative growth and biomass accumulation, with plant height and tuber fresh mass significantly increased by 18.9% and 75.0%, respectively, compared with CK. The KFA2 treatment(180 kg·hm^{-2})exhibited the most remarkable improvement in photosynthetic capacity and root activity, its net photosynthetic rate and root activity were significantly higher than those of CK by 80.0% and 76.0%, respectively. The KFA1 treatment also significantly increased the soluble sugar content in tubers. Excessive application(270 kg·hm^{-2}) exerted inhibitory effects on several growth and

收稿日期:2025-11-16;**修回日期:**2026-03-16

基金项目:湖南省农业农村厅"三分地养活一个人"粮食高产绿色优质科技创新示范工程

作者简介:曾祥飞,男,在读硕士研究生,研究方向为马铃薯生理生态栽培。E-mail:2627565012@qq.com

通信作者:胡新喜,男,教授,主要从事马铃薯生理生态栽培研究。E-mail:Huxinxi163@163.com

photosynthetic indices. In conclusion, mineral-source potassium fulvic acid significantly facilitates potato growth, yet, its effect has a dosage threshold. The suitable application rate ranges from 90 to 180 kg·hm^{-2} among which 90 kg·hm^{-2} is more conducive to improving biomass, yield and quality. These findings provide a theoretical basis for high quality and high yield potato production.

Key words: Potato; Potassium fulvate; Growth and development; Photosynthesis; Yield; Quality

马铃薯（*Solanum tuberosum* L.）是全球第四大粮食作物，兼具粮食、蔬菜和工业原料等多重功能[1]，其产量与品质对保障粮食安全与提升农业经济效益具有重要意义。近年来，我国马铃薯种植面积持续扩大，总产量高达 9023 万 t，稳居世界第一[2]。其中湖南省作为南方马铃薯主产区之一，依托丘陵山地资源大力发展特色马铃薯产业，对优化区域农业结构、促进农民增收具有积极作用[3]。然而，南方地区多分布酸性红壤，普遍存在土壤肥力不均衡、养分利用率低等问题[4]，制约了马铃薯植株的正常生长与块茎品质的提升，成为限制其产业可持续发展的关键因素。

肥料作为作物养分的主要来源，是保障作物产量与品质的基础投入，也是推动粮食安全与农民增收的重要途径[5]。当前，我国化肥施用量远超欧美发达国家，但肥料利用率普遍偏低，因此研发高效、环保的新型绿色肥料已成为农业领域的重要研究方向[6]。在这一背景下，腐殖酸类肥料因具有良好的生物活性和环境友好特性而受到广泛关注。黄腐酸钾（potassium fulvic acid，KFA）作为腐殖酸类物质中的重要组分，具有分子质量小、活性高、易被作物吸收等特点[7]，在农业生产中作为新型有机肥料添加剂被广泛应用。研究表明，黄腐酸钾肥的施用有助于提高土壤通透性和保水保肥能力，提供作物所需的多种营养元素，增加土壤肥力，并增强作物抗逆能力[8]，还能促进植物生长、改善作物品质，已在多种作物中展现出良好的应用效果[9]。在水稻上喷施适量黄腐酸钾可显著提高产量、品质，并促进氮钾养分积累[10]；在甘蔗上施用则能有效增加株高和有效茎数，提升产量与糖分含量[11]；在水培韭菜中，黄腐酸钾可显著提升韭菜产量及维生素 C 和可溶性糖含量，增强植株水培适应性，兼具生长调节作用[9]。然而，黄腐酸钾的施用效果受作物种类、品种特性、施用剂量及环境条件等多种因素影响[12]。目前，关于黄腐酸钾在马铃薯上的研究多集中于大田条件下对生长及产量的影响，有关其影响马铃薯生长、产量的生理机制研究较少。陈焕丽等[13]研究表明，冲施黄腐酸钾可提高马铃薯块茎鲜质量，但未深入探讨不同用量对光合参数与根系活力的协同效应；王利勇等[14]研究了黄腐酸钾对马铃薯可溶性糖含量的影响，但未系统分析其与生物量积累之间的关系。此外，不同马铃薯品种对黄腐酸钾的响应存在基因型差异，兴佳 2 号作为湖南省主推的中早熟马铃薯品种，具有抗病性强、商品性好等优点[15]，但针对该品种的黄腐酸钾合理用量及其生理机制的研究仍较为有限。

光合作用是作物物质生产与生物量形成的基础[16]，根系活力直接影响养分吸收与植株生长势[17]，而块茎中可溶性糖、维生素 C 含量等品质指标则是决定其商品价值的关键。目前，关于黄腐酸钾如何协同影响马铃薯“光合-根系-品质”三者关系的研究尚存不足，尤其是不同施用量对株高、茎粗等生长指标的调控阈值，以及对净光合速率、叶绿素含量等光合参数的作用机制尚未形成系统认识。这些研究空白导致生产中黄腐酸钾施用量难以把控，常出现用量过高造成资源浪费或用量不足效果不佳的问题。鉴于此，笔者以湖南省主栽马铃薯品种兴佳 2 号为材料，在盆栽条件下，设置 0、90、180、270 kg·hm^{-2} 等 4 个黄腐酸钾施用梯度，系统测定植株生长、光合参数、叶绿素荧光、根系活力、生物量积累及块茎品质等指标，旨在明确黄腐酸钾影响马铃薯生长的生理机制，确定黄腐酸钾适宜用量，以期为生产上黄腐酸钾科学施用提供技术参考。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地点位于湖南省长沙市芙蓉区湖南农业大学园艺学院天台大棚内，地势东高西低，呈平缓丘陵地貌，属亚热带季风性湿润气候，雨热同期；年平均气温 19.1 ℃，年平均降水量 1 736.1 mm。盆栽试验的营养钵规格为 35 L，均采用商用无肥基质填充（水洗椰糠+珍珠岩+蛭石），确保养分背景一致，pH 为 6.5 左右，碱解性氮含量（*w*，后同）22.3 mg·kg^{-1}，速效磷含量 5.6 mg·kg^{-1}，速效钾含量 25.1 mg·kg^{-1}。

1.2　材料

以马铃薯品种兴佳 2 号为试验材料，由湖南省马铃薯工程技术研究中心提供，该品种具有抗病性强、

商品性好等特点，适宜南方丘陵地区种植。供试肥料为西洋牌硫酸钾型复合肥（N∶P_2O_5∶K_2O = 15∶15∶15，总养分含量≥45%），购自贵州西洋实业有限公司。黄腐酸钾肥料（KFA）为市售产品（根引牌矿源黄腐酸钾），由乌鲁木齐市黑色生态科技有限公司生产，黄腐酸含量≥50%，K_2O 含量≥12%，水溶性良好，适用于基施。商用无肥基质购于湖南省湘晖农业技术开发有限公司，椰糠、珍珠岩、蛭石体积比为3∶1∶1。

1.3 试验设计

2024年1月21日播种马铃薯，2024年5月16日收获。试验采用单因素完全随机区组设计，共设置4个黄腐酸钾（KFA）施用量梯度，分别为CK：不施用黄腐酸钾；KFA1：每 hm^2 施用90 kg黄腐酸钾肥料；KFA2：每 hm^2 施用180 kg黄腐酸钾肥料；KFA3：每 hm^2 施用270 kg黄腐酸钾肥料。每个处理设10次重复，总共40盆，每盆播种2株马铃薯，随机区组排列。所有处理在播种前一次性基施等量化肥（N∶P_2O_2∶K_2O=15∶15∶15，折合1125 kg·hm^{-2}），KFA按设计用量与基质混匀后施入，种植密度为98 039株·hm^{-2}，换算每盆栽2株的需肥量，营养钵底部放置托盘，防止养分流失。本试验采用统一的水分管理，确保不同黄腐酸钾（KFA）处理间的水分条件一致。自播种后至出苗期，采用带刻度量杯定量浇灌方式，保持基质相对含水量在60%~70%；进入块茎形成期至膨大期，适当增加水分供应，保持相对含水量在70%~80%；收获前10 d停止灌水，以促进块茎成熟与物质积累。试验期间不另外追肥。所有处理的灌溉均在同一时间进行，确保处理间除KFA施用量外的其他条件一致。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 *植株生长指标* 于马铃薯现蕾后15 d左右，每处理随机选取10株，用直尺测量株高，用游标卡尺测量茎粗，并记录主茎数。

1.4.2 *光合参数与叶绿素含量测定* 于现蕾后15 d的晴天10:30—11:00，每处理选取10株，使用PJ-4N叶绿素测定仪测定第4片完全展开叶的SPAD值；采用LI-6400XT便携式光合仪测定净光合速率（P_n）、气孔导度（G_s）、胞间 CO_2 浓度（C_i）和蒸腾速率（T_r）[18]，设定光照度为1000 μmol·m^{-2}·s^{-1}，CO_2 浓度为400 μmol·mol^{-1}。

1.4.3 *叶绿素荧光参数测定* 于现蕾后15 d的晴天10:30—11:00，每处理选取10株，使用FMS-2脉冲调制式荧光仪测定暗适应20 min后第4片完全展开的叶片初始荧光（F_o）、最大荧光（F_m），计算可变荧光（$F_v = F_m - F_o$）、F_v/F_m（最大光化学效率）和 F_v/F_o（PSII潜在活性）。

1.4.4 *根系活力测定* 利用苏州科铭生物技术有限公司试剂盒（货号：DHA-1-G）采用TTC还原法测定根系活力。

1.4.5 *生物量测定* 马铃薯收获时，每个处理随机选取6株，称量其块茎及其他部位鲜质量，随后放入烘箱105 ℃杀青30 min，65 ℃烘干至恒质量，称量其块茎和其他部位干质量。

1.4.6 *块茎品质分析* 采用2,4－二硝基苯肼法测定维生素C含量，采用3,5－二硝基水杨酸法测定还原糖含量，采用BCA法测定可溶性蛋白含量，采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量，利用苏州科铭生物技术有限公司试剂盒测定，货号分别为ASA-1-W、HYT-1-Y、KMSP-1-W和KT-1-Y。干物质含量根据干鲜质量比计算，淀粉含量根据Mepkep干物质含量表换算[19]。

1.5 数据分析

采用Excel 2020初步整理试验数据，采用GraphPad Prism 9.5绘图，采用SPSS 17.0进行单因素方差分析（ANOVA）。

2 结果与分析

2.1 不同处理对马铃薯生理指标的影响

2.1.1 *不同处理对马铃薯生长的影响* 不同黄腐酸钾处理对马铃薯植株生长的影响如表1所示。

表1 不同处理对马铃薯生长的影响

Table 1 Effects of different treatments on potato growth

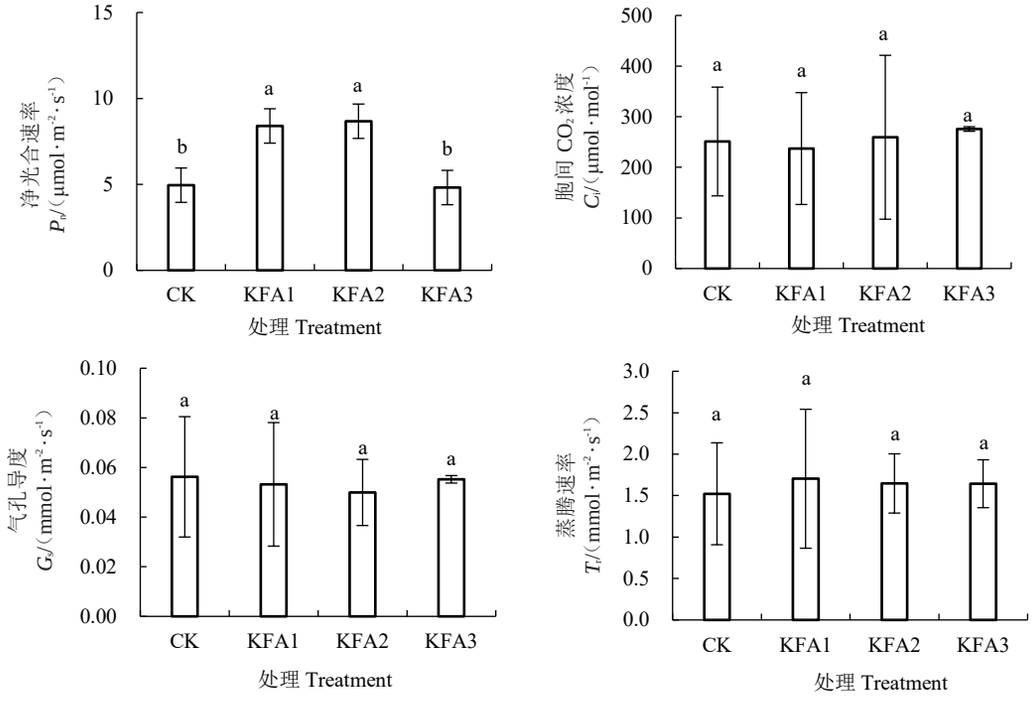
处理 Treatment	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem thickness/mm	主茎数 Number of main stem	SPAD值 SPAD value
CK	61.61±2.59 b	11.49±0.78 a	1.40±0.22 a	49.22±2.99 b
KFA1	73.24±1.94 a	12.68±0.69 a	1.80±0.29 a	60.49±1.59 a
KFA2	68.00±1.30 ab	12.12±0.70 a	1.70±0.21 a	61.73±0.89 a
KFA3	66.88±2.84 ab	11.55±0.96 a	1.70±0.30 a	59.96±1.28 a

注：同列不同小写字母表示在0.05水平差异显著。

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

各处理间株高、茎粗、主茎数和叶片 SPAD 值均呈现不同程度的变化。其中，KFA1 处理（90 kg·hm^{-2}）在株高方面表现最优，达 73.24 cm，较对照显著提高 18.9%，说明低剂量 KFA 能有效促进植株纵向生长。茎粗和主茎数在各处理间虽无统计学差异，但 KFA1 均保持最高，进一步印证了其在营养生长方面的促进作用。叶片 SPAD 值以 KFA2 处理（180 kg·hm^{-2}）最高（61.73），显著高于对照，表明中剂量 KFA 更有利于叶绿素的合成与积累，为光合作用奠定物质基础。KFA3 处理（270 kg·hm^{-2}）的株高、茎粗与 SPAD 值均低于 KFA1 和 KFA2，说明过量施用可能对生长产生抑制效果。

2.1.2　不同处理对马铃薯植株光合参数的影响　光合参数是反映叶片碳同化能力的关键指标。如图 1 所示，KFA2 处理的净光合速率（P_n）最高，达 8.67 μmol·m^{-2}·s^{-1}，较对照（4.82 μmol·m^{-2}·s^{-1}）显著提高 80.0%，且显著高于 KFA3 处理，表明中剂量 KFA 能显著增强马铃薯叶片的光合能力。气孔导度（G_s）在各处理间无显著差异，说明 KFA 对气孔行为的直接影响较小。KFA1 处理的蒸腾速率（T_r）最高（1.70 mmol·m^{-2}·s^{-1}），可能与植株生长旺盛、蒸腾需求增加有关，但与其他处理差异不显著。而 KFA3 处理的胞间 CO_2 浓度（C_i）最高（275.66 μmol·mol^{-1}），但其净光合速率最低，表明高剂量 KFA 可能因非气孔



注：不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference（P<0.05）. The same below.

图 1　不同处理对马铃薯植株光合参数的影响

Fig. 1　Effects of different treatments on photosynthetic parameter of potato plant

限制因素抑制光合效率。总体而言，适量 KFA 处理可提升马铃薯叶片的光合能力。

2.1.3　不同处理对马铃薯植株叶绿素荧光参数的影响　叶绿素荧光参数可反映 PSII 光化学效率及光合机构的运行状态。由图 2 可知，各处理间 F_o（初始荧光）、F_m（最大荧光）、F_v/F_m（最大光化学效率）和 F_v/F_o（PSII 潜在活性）均无显著差异，说明 KFA 处理未对 PSII 反应中心造成明显损伤或光抑制。然而，KFA2 处理的 F_v（可变荧光）显著高于对照和 KFA3 处理，表明中剂量 KFA 有助于提升 PSII 的电子传递活性，激发光能转化潜力，这与其较高的 P_n 表现一致。整体来看，黄腐酸钾主要通过提升光合电子传递链的运转效率来增强光合性能，而非改变光系统的结构稳定性。

2.1.4　不同处理对马铃薯根系活力的影响　根系活力直接影响植株对水分和养分的吸收能力。如图 3 所示，KFA2 处理的根系活力最高（2.13 μg·g^{-1}·min^{-1}），较对照（1.21 μg·g^{-1}·min^{-1}）显著提高 76.0%。KFA1 和 KFA3 处理的根系活力分别为 1.85 和 2.09 μg·g^{-1}·min^{-1}，显著高于对照，但均低于 KFA2 处理。这表明中剂

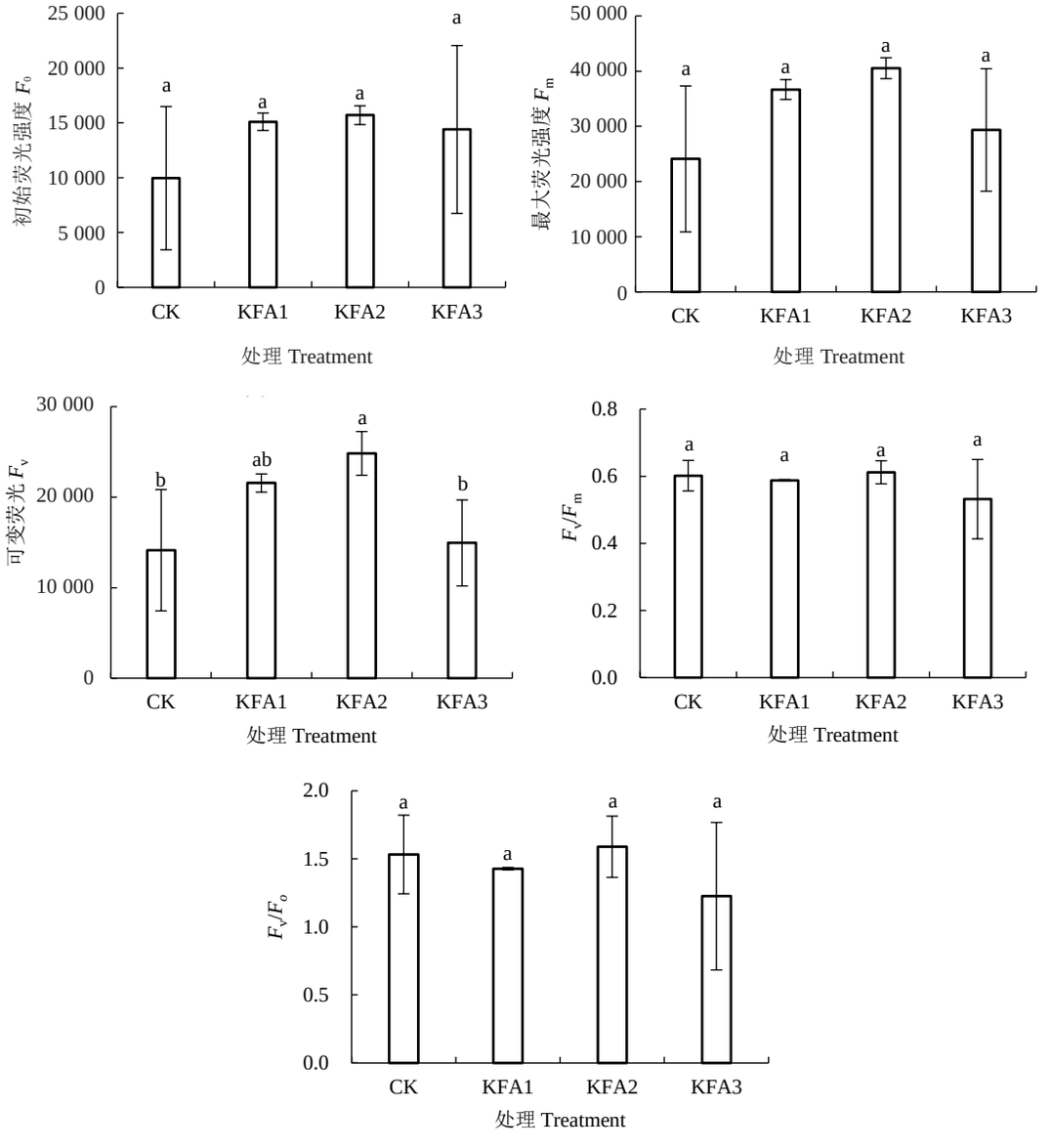


图 2　不同处理对马铃薯植株叶绿素荧光参数的影响

Fig. 2　Effects of different treatments on chlorophyll fluorescence parameters of potato plant

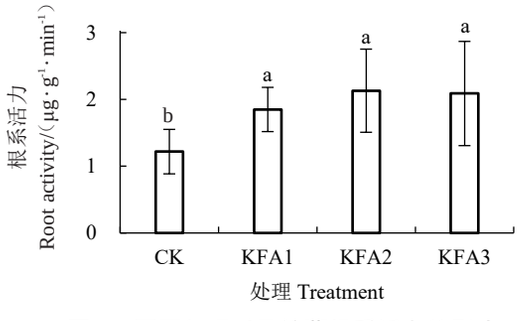


图 3　不同处理对马铃薯根系活力的影响

Fig. 3　Effects of different treatments on root activity of potato

量 KFA 能最有效地激活根系代谢，增强吸收功能。结合光合数据，KFA2 处理在根系活力与净光合速率（P_n）上均表现最佳，说明其可能通过根系吸收能力的提升来增强叶片光合能力。

2.2　不同处理对马铃薯生物量积累与分配的影响

生物量是衡量作物生长和产量的综合指标。如图 4 所示，KFA1 处理在块茎鲜质量上表现最优，达 203.40 g，较对照显著提高 75.0%。其他部位鲜质量及干物质积累也以 KFA1 处理最高，这说明低剂量 KFA 更有利于光合产物向块茎的分配，促进经济产量的形成。相比之下，KFA2 处理虽光合能力强、根系活力高，但其生物量积累略低于 KFA1 处理，推测其光合产物可能更多地用于维持叶片高光合活性和根系代谢需求，导致向块茎的分配比例相

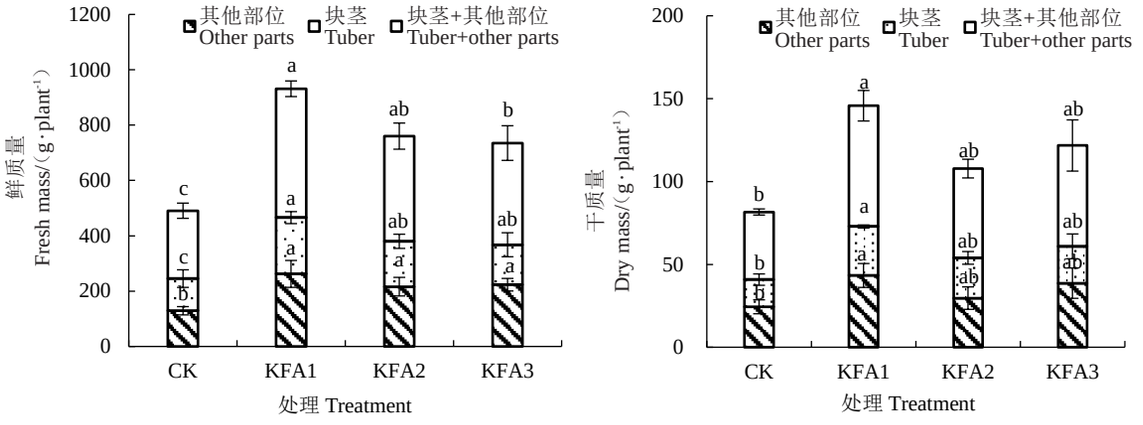


图 4　不同处理对马铃薯植株块茎及其他部位鲜质量、干质量的影响

Fig. 4　Effects of different treatments on the fresh and dry mass of tuber and other parts of potato plant

对较低。这一结果表明,适量施用黄腐酸钾可有效促进马铃薯植株整体生物量的积累,尤其是地下部块茎的发育。

2.3　不同处理对马铃薯块茎品质的影响

块茎品质直接影响营养价值和商品性。如图 5 所示,KFA1 处理的可溶性糖含量最高(13.02 mg·g⁻¹)较对照(7.51 mg·g⁻¹)显著提高 73.4%。维生素 C、可溶性蛋白和还原糖含量在各

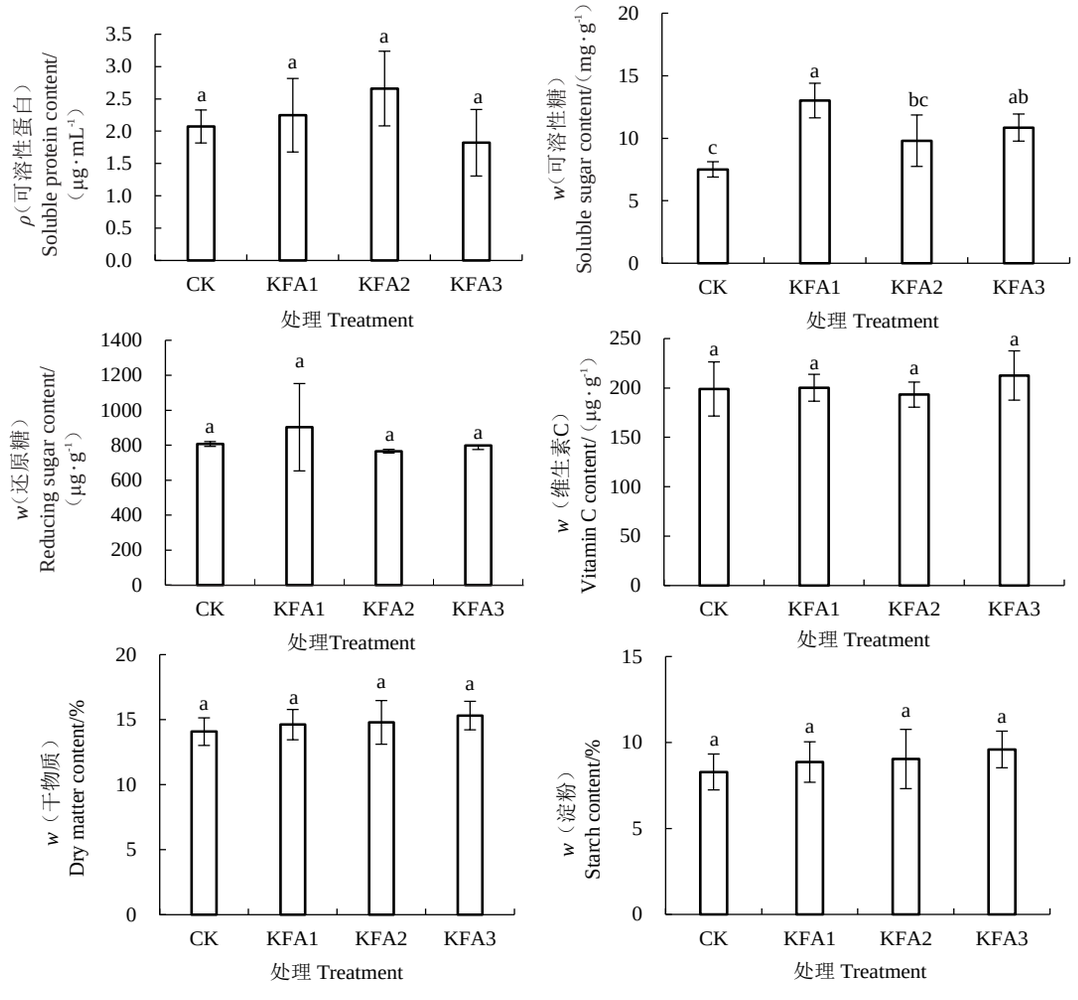


图 5　不同处理对马铃薯块茎品质的影响

Fig. 5　Effects of different treatments on tuber quality of potato

处理间均无显著差异。干物质含量在14.08%~15.31%之间，淀粉含量在8.29%~9.59%之间，各处理间差异不显著。以上结果表明，KFA对马铃薯品质的改善主要体现在糖分积累方面，KFA2与KFA3处理在品质指标上未表现出显著优势，进一步说明低剂量KFA在改善块茎食用品质方面更具潜力。

3 讨论与结论

本研究结果表明，适量施用矿源黄腐酸钾能显著促进马铃薯植株的营养生长，其中以KFA1处理（90 kg·hm^{-2}）效果最为突出，其株高、茎粗及主茎数等性状均优于其他处理，与前人的研究结果一致，即适宜浓度的黄腐酸钾可通过促进株高增长、茎秆增粗和叶片发育来增强作物生长势[20]，其可能机制为在黄腐酸钾中，黄腐酸（FA）是腐植酸中分子质量较小、活性最高的组分，作为一种生物刺激素，可以促进植物生长，提高植株的抗逆性[21]。而当施用量增至270 kg·hm^{-2}（KFA3）时，株高反而低于KFA1与KFA2处理，说明过量施用可能因根际离子浓度过高而产生渗透胁迫，抑制根系对水分和养分的吸收，进而阻碍植株生长。该结果与杨帅等[22]在工业大麻上的研究类似，表明黄腐酸钾存在生理阈值效应，在实际应用中需严格控制施用量。叶片SPAD值作为反映叶绿素相对含量与光合潜力的关键指标，在本研究中以KFA2处理（180 kg·hm^{-2}）最高，且与净光合速率的变化趋势高度一致，说明黄腐酸钾可通过增加叶片叶绿素含量来提高光能捕获效率，为光合碳同化奠定物质基础[23]。各KFA处理的叶片SPAD值均显著高于对照，但KFA3处理略低于KFA2处理，进一步印证了过量施用可能影响叶绿体发育或色素合成代谢。

光合作用是生物量积累的核心驱动力，而根系活力是养分吸收的关键保障[24]，二者的协同作用决定植株生长状态。本研究中，KFA2处理在净光合速率与根系活力方面均表现最佳，分别较对照显著提高80.0%与73.6%，呈现出“根系功能增强-养分吸收效率提高-光合性能提升”的良性循环。这一结果与张宗彩等[25]在绿萝上的研究结论相呼应，即适宜浓度的矿源黄腐酸钾可同步促进根系发育与叶片生长，而高浓度则产生抑制作用。KFA1处理虽在蒸腾速率方面最高，但其净光合速率仍低于KFA2，推测其可能通过增强蒸腾拉力促进CO_2向叶肉细胞扩散，但由于叶绿素含量相对较低，限制了光能转化效率。反观KFA3处理，尽管其胞间CO_2浓度最高，净光合速率却最低，说明光合受抑并非气孔限制所致，而更可能与叶肉细胞中光合酶活性下降或光系统II（PSII）反应中心受损有关。由此可推测，黄腐酸钾对光合与根系系统的调控存在剂量依赖性协同机制，中低剂量主要通过优化气孔行为与根系生理功能来协同调控碳-氮代谢平衡，而高剂量则可能引发活性氧积累或代谢反馈抑制，导致生理功能下降。

生物量的积累与分配直接决定作物经济产量，而块茎品质则是评价其商品价值的重要依据。前人研究发现，添加黄腐酸钾的处理显著提高了小白菜的鲜/干物质质量、叶绿素含量及类胡萝卜素含量[26]。本研究中KFA1处理的块茎鲜质量较对照显著提高75.0%，且其他部位鲜、干质量均最高，表明90 kg·hm^{-2}是促进生物量积累的最佳用量，这可能与KFA1处理下植株生长势强、光合产物向块茎运输效率高有关。而KFA2处理虽光合效率高，但生物量略低于KFA1处理，推测其光合产物可能更多分配至叶片和根系，以维持高光合性能和高根系活力，导致向块茎的分配比例下降，这一假设需通过^{14}C同位素标记进一步验证。在品质指标中，KFA1处理的可溶性糖含量最高，显著高于对照，而维生素C、还原糖含量等指标在不同处理间无显著差异。这与陈亚娟等[27]的研究结论部分一致，即黄腐酸钾可通过调控蔗糖合成酶活性提高可溶性糖含量，但过量可能会出现负面效应，导致可溶性糖含量下降。此外，本研究中品质指标的差异小于生长和光合指标，可能与马铃薯品种特性有关，兴佳2号的品质性状对黄腐酸钾的响应更稳定，或需更长生育期观测才能体现显著差异。本研究未涉及黄腐酸钾对土壤微生物群落及酶活性的影响，而土壤微生物可能通过转化黄腐酸钾间接影响作物响应，这一机制值得深入探讨。未来可结合转录组学分析，揭示黄腐酸钾调控光合性能、根系活力及块茎品质的分子机制，为精准施肥提供理论支撑。

综上所述，矿源黄腐酸钾对马铃薯兴佳2号的生长发育、光合特性及块茎品质具有显著影响，且存在明显的用量依赖性。综合试验结果可知，KFA1（90 kg·hm^{-2}）处理在促进植株营养生长与生物量积累方面优势突出，能显著提高株高和块茎产量；KFA2（180 kg·hm^{-2}）处理则在提升光合性能与根系活力方面表现最佳，通过提高净光合速率和根系吸收能力，为作物高产奠定了坚实的生理基础。此外，适量施用黄腐酸钾（90 kg·hm^{-2}）还能有效提升

块茎可溶性糖含量，改善品质。然而，过量施用（270 kg·hm^{-2}）对部分生长与光合指标表现出抑制效果。综合各项指标，矿源黄腐酸钾用量在90~180 kg·hm^{-2}为适宜施用量范围。本研究推荐矿源黄腐酸钾用量在90 kg·hm^{-2}效果最佳，也可根据“高产”或“壮苗”的不同目标，在推荐用量范围内进行调整，为实现马铃薯绿色高效生产提供科学的施肥依据。

参考文献

[1] 王丽，熊兴耀，蔡柳，等.我国不同产区马铃薯栽培品种的主要品质性状比较分析[J].南方农业学报，2023，54(1)：80-89.

[2] 高玉珠，冯嘉懿，张岱，等.贝莱斯芽胞杆菌HN-Q-8不同剂型及施用方法对马铃薯产量和品质的影响[J].中国瓜菜，2026，39(2)：190-195.

[3] 周婷.湖南省马铃薯产业化发展研究[D].长沙：湖南农业大学，2011.

[4] 邱志腾.生物炭对红壤的降酸效果与毛豆生长的影响[D].杭州：浙江大学，2015.

[5] Cen Y，Guo L Y，Liu M Z，et al.Using organic fertilizers to increase crop yield，economic growth，and soil quality in a temperate farmland[J].PeerJ，2020，8：e9668.

[6] 汪亚龙，钟纯，余赟，等.矿源黄腐酸钾和生物有机肥不同配比对番茄生长和产量的影响[J].腐植酸，2023(3)：51-56.

[7] 包日在，孔海民，李岗，等.基施黄腐酸钾对大棚杨梅营养生长及果实品质的影响[J].中国南方果树，2024，53(3)：171-174.

[8] 候小琴，王莹，余贝，等.黄腐酸钾提高水稻秧苗耐盐性的作用途径分析[J].中国水稻科学，2024，38(4)：409-421.

[9] 黄滕瑶，刘明池，陈婕，等.黄腐酸钾对水培韭菜生长和品质的影响[J].中国瓜菜，2025，38(4)：121-129.

[10] 宋挚，郭新送，范仲卿，等.叶面喷施黄腐酸钾对水稻产量及品质的影响[J].腐植酸，2022(1)：52-55.

[11] 樊仙，全怡吉，代光伟，等.配施黄腐酸钾对甘蔗生长和产量的影响[J].亚热带农业研究，2022，18(1)：7-11.

[12] 朱丽.不同钾肥种类及施用方式对烤烟生长发育及品质的影响[D].郑州：河南农业大学，2015.

[13] 陈焕丽，郭竞，张晓静，等.不同形态钾肥对马铃薯产量及品质的影响[J].中国瓜菜，2021，34(4)：79-82.

[14] 王利勇，汪强，谭金芳，等.滴灌施肥与叶面喷施相结合供肥方式对马铃薯产量和品质的影响[J].江西农业学报，2012，24(5)：121-123.

[15] 杨丹，王中美，李树举，等.常德市冬种马铃薯品种适应性研究初报[J].湖南农业科学，2014(24)：22-24.

[16] 程建峰，沈允钢.作物高光效之管见[J].作物学报，2010，36(8)：1235-1247.

[17] Zhang P J，Zhang H J，Duan Z Q，et al.Dose-dependent application of straw-derived fulvic acid on yield and quality of tomato plants grown in a greenhouse[J].Frontiers in Plant Science，2021，12：736613.

[18] 丁仁，曾祥飞，贡丹敏，等.钾肥种类对缓解马铃薯镉胁迫的影响[J].中国瓜菜，2024，37(6)：147-153.

[19] 贡丹敏，蔡林志，丁仁，等.钾肥种类对马铃薯生长和镉吸收积累的影响[J].园艺学报，2023，50(6)：1332-1342.

[20] 江志阳，于亚男.生物黄腐酸钾在土豆上的应用研究初报[J].腐植酸，2020(4)：99.

[21] 于晟玥，牛银星，王泽平，等.黄腐酸添加量对低氮胁迫下小麦生长和根系形态的影响[J].植物营养与肥料学报，2023，29(2)：323-333.

[22] 杨帅，闫博巍，郭俊娜，等.不同浓度矿源黄腐酸钾对工业大麻生长的影响[J].黑龙江八一农垦大学学报，2025，37(1)：22-30.

[23] 杨江山，陈亚娟，戴子博，等.黄腐酸钾对‘蛇龙珠’葡萄光合特性及果实品质的影响[J].园艺学报，2024，51(12)：2843-2856.

[24] 付锦州，吴寅，周苏玫，等.小麦根系生理活性时空分布与土壤有效养分的关系[J].麦类作物学报，2023，43(7)：893-910.

[25] 张宗彩，肖朋，高进华，等.矿源黄腐酸钾对水培绿萝生根发芽影响的研究[J].肥料与健康，2021，48(3)：67-71.

[26] 张彩虹，冯棣，张敬敏，等.黄腐酸钾对盐胁迫下小白菜发芽及幼苗生长的影响[J].中国瓜菜，2020，33(12)：87-91.

[27] 陈亚娟，金鑫，杨江山，等.黄腐酸钾对‘蛇龙珠’葡萄果实糖酸代谢及香味物质的影响[J].园艺学报，2025，52(2)：406-422.