

冀中平原主栽山药品种的生长发育和养分累积特征

王雪, 苗泽兰, 孙志梅*, 马文奇, 薛澄

(河北农业大学资源与环境科学学院, 河北保定 071001)

摘要:【目的】我国山药种质资源丰富, 生态条件、栽培技术措施等各异, 因此不同产地、不同品种的山药生长发育特性、养分累积及分配特性等均存在较大差异。本研究分析比较了冀中平原3个主栽山药品种的生长发育以及对氮磷钾养分的吸收、累积动态特征, 以期为山药可持续生产中养分资源的高效管理与利用提供理论依据和技术支撑。【方法】以研究区域主栽的棒药、紫药和小白嘴为供试品种, 在农民常规管理的山药田随机设置采样小区, 分别于山药播种后的80 d、110 d、140 d和180 d取样, 测定山药根茎、茎、叶的鲜干重及氮、磷、钾养分含量。【结果】茎叶生物量随生育进程呈现先升后降的变化趋势, 而根茎的生物量在收获期达到最高。棒药根茎鲜生物量显著高于紫药和小白嘴, 但由于棒药栽培密度显著低于紫药和小白嘴, 导致3个品种单位面积根茎的干物质积累量基本相当。对鲜干生物量累积动态特征的分析表明, 与紫药和小白嘴相比, 棒药鲜干生物量最大累积速率差异不大, 但鲜干生物量快速累积持续期明显延长, 最大累积速率出现的时间较晚。不同山药品种各养分的累积分配及养分利用效率不同, 在整个生育期内, 对氮磷钾养分的累积量3个品种均表现为 $K_2O \geq N > P_2O_5$, 根茎 > 叶 > 茎, 其中棒药对氮磷钾的累积量均最高, 氮磷钾养分生产效率也均为最高, 紫药和小白嘴差异不显著。对养分的累积动态特征分析结果表明, 棒药对氮素和钾素的快速累积持续期最长, 且最大累积速率也最高, 但3个品种对磷素的累积动态特征差异不明显。【结论】供试3个品种中, 紫药和小白嘴的生长发育及养分吸收累积动态特征相似, 但与棒药明显不同。棒药的生物量大, 产量高, 养分的生产效率也最高, 形成单位产量的养分需求量显著低于紫药和小白嘴。

关键词: 山药; 主栽品种; 鲜生物量; 干物质量; 生长发育; 养分累积

Growth and nutrient efficiency of the main yam varieties in central Hebei plain

WANG Xue, MIAO Ze-lan, SUN Zhi-mei*, MA Wen-qi, XUE Cheng

(College of Resources and Environmental Science, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071001, China)

Abstract: 【Objectives】 Genotypes, ecological conditions and cultivation techniques resulted in great differences in the growth and nutrient use efficiencies of yams from different habitats. The growth characteristics and nutrient requirement of three main cultivated yam varieties were compared, aiming to provide a support for high-efficient nutrient management in sustainable production of yam. 【Methods】 The main yam varieties were Bangyao, Xiaobaizui and Ziyao in the central Hebei plain. The yam samples were respectively collected at 80 d, 110 d, 140 d and 180 d after sowing in the conventional field. Dry and fresh biomass were weighed, and the N, P and K contents in yam tubers, stems and leaves were determined. 【Results】 The biomass of stems and leaves increased firstly and then decreased with yam growing, while the maximum biomass of tuber appeared at the harvest. The tuber fresh biomass of Bangyao was significantly higher than those of Ziyao and Xiaobaizui, but the tuber dry matter of Bangyao was not higher because of its lower planting density. Compared with Ziyao and Xiaobaizui, the maximal accumulation speed of fresh and dry biomass of Bangyao were not higher, but the fleet accumulation durations of fresh and dry biomass of Bangyao were both longer, and the time reached the maximal accumulation rate was later. In addition, the significant differences in accumulation, distribution and use

收稿日期: 2018-04-09 接受日期: 2018-07-31

基金项目: 河北省重点研发计划项目 (17226912D); 十三五国家重点研发计划项目 (2016YFD0200403) 资助。

联系方式: 王雪 E-mail: daxue15131253791@sina.com; * 通信作者 孙志梅 E-mail: sunzhm2002@163.com

efficiency of nutrients were found among the three yam varieties. The rank of accumulation nutrients was all showed in the order of $K_2O > N > P_2O_5$ and tubers > leaves > stems in the tested three yam varieties. Bangyao had the highest accumulations of N, P_2O_5 and K_2O , and highest production efficiency of nutrients, but no significant difference was found between Ziyao and Xiaobaizui. Bangyao had the longest fleet accumulation duration and the highest maximal accumulation speed of N and K_2O , while the characteristics of accumulation dynamics of P_2O_5 had no significant differences among three varieties. 【Conclusions】 The characteristics of growth and nutrient accumulation had no significant differences between Ziyao and Xiaobaizui, but the biomass, yield and production efficiency of nutrients of Bangyao were significantly higher than those of Ziyao and Xiaobaizui, and the nutrient demand for forming unit yield was significantly lower than those of Ziyao and Xiaobaizui.

Key words: yam; major variety; fresh biomass; dry matter; growth and development; nutrient accumulation

山药 (*Dioscorea opposita*) 具有药、食两用功能, 适应性强、分布广泛, 近年来被广泛用作粮食、蔬菜、药材、饲料和加工原料^[1]。随着市场需求量增长, 山药价格不断上涨, 种植面积也随之迅速扩大。我国山药种质资源丰富, 目前仍不断有生长性状及品质优良的新品种问世^[2-3]。山药的产量、品质受品种遗传特性、环境条件和栽培措施等因素的共同影响, 但在环境条件和栽培措施基本一致的基础上, 遗传特性则成为决定山药生长发育的关键因素。不同品种山药的化学成分和品质差异较大, 这也决定了其品种的经济价值, 而品质之间的差异又与其养分吸收特性密切相关^[4]。因此, 研究不同山药品种的生长发育和养分累积特性对于山药生产中养分资源的高效管理和利用具有重要意义。前人关于山药栽培^[5-7]、品种选育^[8]、营养价值^[9-10]、需肥特性^[11-12]等方面的研究较多, 但由于品种、生态条件和栽培措施等方面的差异, 得出的结论也不尽相同, 特别是在养分需求方面。因此, 不同生态条件下, 不同山药品种的养分需求特性尚待进一步研究。

位于冀中平原的潞龙河流域两岸是我国优质山药生产基地, 已有 3000 多年种植历史, 因其适宜的土质结构和光热条件, 种植面积和产量稳居全国前列, 被誉为“中国山药之乡”。在可观的经济利益驱动下, 农民为了获得高产, 在山药种植过程中过量施肥现象严重。苗泽兰等^[11]研究发现, 在河北山药主产区氮 (N)、磷 (P_2O_5) 和钾 (K_2O) 养分投入平均分别达到了 884、759 和 943 kg/hm², 远远超过山药的最佳养分需求量。同时由于农民主要依据个人经验来决定肥料的配比和施用量, 在施肥时期的掌握上也存在较大盲目性, 难以实现养分供应和作物需求在数量和时间上的相互匹配。这些问题很大程度上限制了山药产业的可持续发展。因此, 明确不同品种山药间的生长发育特性和养分累积特性差异, 对于

制定不同山药品种的最佳养分管理技术方案, 实现山药的优质、高效、绿色生产具有重要意义。本研究采用田间试验方法, 分析比较了冀中平原 3 个主栽山药品种的生长发育和养分吸收累积动态特征, 旨在为山药生产中养分资源的高效管理与利用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验在位于冀中平原的保定市蠡县进行。该区年平均气温 11℃, 年平均降雨量 522 mm。供试土壤类型为潮土, 质地为砂壤, 土层疏松、深厚, 土壤基本理化性状为有机质 8.22 g/kg、碱解氮 28.0 mg/kg、速效磷 15.2 mg/kg、速效钾 93.5 mg/kg、pH 8.39 (水土比 2.5 : 1)。供试肥料基肥用磷酸二铵 (N 18%, P_2O_5 46%) 和硫酸钾 (K_2O 50%), 三次追肥均为三元复合肥, 养分配比分别为 17-5-23、16-8-21 和 16-6-24。供试山药品种为当地主栽的棒药、紫药和小白嘴。

1.2 试验设计

试验于农户生产田进行, 3 个山药品种均随机划定 3 个 30 m² (5 m × 6 m) 的小区进行样品采集和测产。山药全生育期的施肥量为纯 N 440 kg/hm²、 P_2O_5 464 kg/hm²、 K_2O 802 kg/hm², 2014 年 4 月 26 日播种, 10 月 21 日收获。山药生育期较长, 实行一年一季的种植方式, 前茬为休闲地。山药采用人工种植方式, 播深 3~4.5 cm, 棒药每公顷种植 8.25 万株, 小白嘴和紫药每公顷种植 16.5 万株。其他田间管理按照当地农户的生产习惯进行。

1.3 样品采集及分析测定方法

分别在山药播种后的 80、110、140 和 180 d 取样, 每次每个小区取 5 株山药, 分茎、叶和根茎三部分, 洗净后称重, 记录各部分的鲜重, 然后取部

分代表性样品 105℃ 杀青 0.5 h, 65℃ 烘干至恒重, 记录干重, 依此折算干物质积累量。山药干样粉碎后, 用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 凯氏定氮法测定全氮, 钒钼黄比色法测定全磷, 火焰光度计法测定全钾。土壤样品的基本理化性质采用常规农化分析方法^[13]。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 16.0 统计软件进行数据处理和统计分析, 多重比较采用 Duncan 法, 所用各指标的计算方法如下:

氮(磷、钾)累积量(kg/hm²) = 总干物质量 × 植株内氮(磷、钾)含量^[14];

氮(磷、钾)养分生产效率(kg/kg) = 山药产量/植株氮(磷、钾)累积总量^[15]。

山药生物量和养分累积模型: 以播种后的天数作为因子, 生物量和养分累积量分别作为因变量, 先作散点图, 然后用 SPSS16.0 软件拟合 Logistic 方程, 拟合后的方程用 $y = k/(1 + a \times e^{-bt})$ 表示, 其中 y 为生物量或养分累积量(kg/hm²), t 为播种后天数(d), k 、 a 、 b 为模型参数^[14, 16]。

2 结果与分析

2.1 不同山药品种的鲜干生物量及其累积动态

2.1.1 不同山药品种生物量比较 对不同山药品种

的鲜生物量进行比较, 结果表明(表 1), 供试棒药、紫药、小白嘴 3 个品种茎叶生物量均随生育进程呈现先升后降的变化趋势, 而根茎产量则于收获期达到最高。3 个品种间茎鲜重在 80 d 内差异不大, 之后棒药显著高于紫药和小白嘴, 小白嘴则在收获期显著高于紫药。整个生育期内, 棒药叶片鲜重均显著高于紫药和小白嘴, 小白嘴仅在收获期显著高于紫药。棒药根茎的鲜生物量全生育期均显著高于紫药和小白嘴, 后二者的根茎鲜重差异则始终不显著, 收获时棒药的产量分别高出紫药和小白嘴 47.4% 和 56.8%。

干物质量随生育进程的变化趋势与鲜生物量一致, 但 3 个品种间明显不同。收获期棒药茎干物质量显著高于紫药和小白嘴, 叶干物质量显著高于紫药, 其他时期各山药品种茎、叶干物质量差异均不显著。播种后 80 d, 棒药根茎干重显著高于紫药和小白嘴, 110 d 时, 棒药和紫药根茎干重差异不显著, 但显著高于小白嘴, 之后三者根茎干重差异不显著。

干物质在各部位的分配随着山药的生长发育而变化。播种后 80 d 之内, 植株生长缓慢, 干物质积累量仅占全生育期总干物质积累量的 14.6%~21.3%, 且 65.8~85.8% 的干物质分配于茎叶中。此期紫药和小白嘴茎叶的干物质累积比例显著高于棒药, 而根

表 1 不同山药品种鲜生物量和干物质量的累积动态

Table 1 The accumulative dynamics of fresh biomass and dry matter of different yam varieties

指标 Item	播种后天数 Days after sowing	茎 Stem			叶 Leaf			根茎 Tuber		
		棒药 Bangyao	紫药 Ziyao	小白嘴 Xiaobaizui	棒药 Bangyao	紫药 Ziyao	小白嘴 Xiaobaizui	棒药 Bangyao	紫药 Ziyao	小白嘴 Xiaobaizui
鲜生物量(kg/hm ²) Fresh biomass	80	1945.3 a	1951.2 a	1872.6 a	6451.7 a	5692.8 b	5748.8 b	6512.2 a	2172.0 b	1770.0 b
	110	2396.2 a	1995.2 b	2031.1 b	8435.7 a	6717.0 b	6981.3 b	33444.0 a	30289.1 b	27521.3 b
	140	2504.3 a	2221.6 b	2148.7 b	8973.5 a	7194.8 b	7678.4 b	47550.0 a	34055.3 b	31272.0 b
	180	1672.5 a	1142.9 c	1324.6 b	7964.3 a	4969.0 c	6971.8 b	53955.0 a	36596.0 b	34402.5 b
干物质量(kg/hm ²) Dry matter	80	410.3 a	380.2 a	406.0 a	1107.7 a	992.7 a	955.6 a	788.3 a	234.2 b	225.5 b
	110	520.0 a	472.1 a	502.3 a	1656.9 a	1566.3 a	1636.1 a	5241.7 a	5168.9 a	3962.8 b
	140	543.7 a	483.9 a	519.1 a	1875.8 a	1628.1 a	1848.2 a	8208.2 a	7737.0 a	7060.4 a
	180	523.3 a	386.5 b	414.2 b	1836.1 a	1302.7 b	1626.9 a	8466.0 a	8571.3 a	8091.9 a
干物重累积比例(%) Accumulative percentage of dry matter	80	17.8 b	23.7 a	25.6 a	48.0 b	61.8 a	60.2 a	34.2 a	14.6 b	14.2 b
	110	7.0 a	6.6 a	8.2 a	22.3 a	21.7 a	26.8 a	70.7 a	71.7 a	65.0 b
	140	5.1 a	4.9 a	5.5 a	17.7 a	16.5 a	19.6 a	77.2 a	78.6 a	74.9 a
	180	4.8 a	3.5 a	4.1 a	17.0 a	11.9 a	16.1 a	78.2 a	84.6 a	79.9 a

注 (Note): 同行数据后不同小写字母表示品种间差异达 5% 显著水平 (Duncan法) Data followed by different letters in the same row indicate significant differences among the cultivars at the 5% level (Duncan's multiple test).

茎的干物质累积比例棒药显著高于紫药和小白嘴; 80~110 d 为植株生长旺盛阶段, 是根茎干物质形成累积的关键时期, 干物质累积量占全生育期总干物质累积量的比例最高, 达 44.6%~51.0%; 110~140 d 的干物质累积比例下降到了 24.1%~32.8%; 140 d 后的累积比例仅占到了全生育时期的 1.8%~10.3%。80 d 后, 根茎中的干物质质量迅速增加, 分配比例已占到了全株 70% 左右, 是茎叶总累积量的 3.6~5.5 倍, 且 80 d 后供试三个品种各部位的干物质累积量占全株总累积量的比例差异总体也不大。

2.1.2 不同山药品种的生物量累积动态特征分析

不同山药品种的总鲜、干生物量累积依播种后天数的增长可用 Logistic 方程 $y = k/(1 + a \times e^{-bt})$ 描述。表 2 表明, 棒药、紫药和小白嘴鲜、干生物量累积最快时期的起始时间分别出现在播种后的 91、87、85 d 和 86、83、83 d, 干物质快速累积的起始时间比鲜生物量快速累积的起始时间要早, 进一步证实干物质是产量形成的物质基础。棒药鲜、干物质快速累积的结束时间出现在播种后的 143 d 和 121 d, 而紫药和小白嘴分别出现在 122 d、113 d 和 116 d、112 d, 棒药鲜、干生物量快速累积出现的时间晚, 结束的时间也晚, 鲜、干生物量快速累积持续期分别为 52 d 和 36 d, 明显长于紫药 (35 d 和 30 d) 和小白嘴 (31 d 和 29 d)。山药鲜、干生物量最大累积速率出现在播种后的 97~117 d, 是山药生长最旺盛的时期。棒药鲜生物量的最大累积速率出现在播种后的 117 d, 紫药和小白嘴分别出现在播种后的 105 d 和 101 d。棒药最大累积速率最高, 为 709.4 kg/(hm²·d); 紫药其次, 为 698.4 kg/(hm²·d); 小白嘴最低, 为 675.8 kg/(hm²·d)。棒药干物质最大累积

速率出现的时间明显比紫药和小白嘴晚, 但 3 个山药品种的干物质最大累积速率差异不大。

2.2 不同山药品种的养分累积分配及其动态特征

2.2.1 氮素累积分配特征 表 3 结果表明, 不同品种山药氮素累积均表现出随山药生长发育逐渐增加的趋势。播种后 80 d 棒药和紫药氮素累积总量差异不显著, 但棒药显著高于小白嘴。播种后 110 d 紫药和小白嘴氮素累积量相差不大, 但均显著高于棒药。播种后 140 d 棒药和小白嘴氮素累积量差异不显著, 均高于紫药。收获时棒药氮素累积量显著高于紫药和小白嘴, 后两者差异不显著。

不同部位比较发现, 供试 3 个山药品种均在收获期根茎累积量达到最高, 而茎、叶中的氮素累积峰值则出现在播种后 110 d。不同生育时期氮素在植株体内的分配也不同。在播种后 80 d(膨大初期)之前氮主要集中于叶片, 根茎中氮累积分配仅为 9.6%~25.1%, 此时叶片是植株的生长中心; 膨大初期之后, 植株生长中心开始向根茎转移, 此时根茎氮累积分配比例升高; 至收获时, 根茎中的氮累积分配达 84.7%~89.8%。各品种根茎中氮累积量差异与总氮累积量差异趋势一致。可见, 植株总氮累积量主要取决于根茎中氮的累积。

2.2.2 磷素累积分配特征 山药磷素累积总量随着生长发育也呈不断增加的趋势(表 4), 但累积总量远低于氮素累积量。磷素累积与氮素累积特征相似。前 3 个生育期, 棒药和紫药磷素累积量差异不显著, 紫药和小白嘴累积量差异亦不显著, 但棒药累积量显著高于小白嘴, 收获期棒药和紫药磷素累积量差异不显著, 但均高于小白嘴。

表 2 不同山药品种鲜生物量和干物质累积的 Logistic 模型及其特征值

Table 2 Logistic equations and their features of fresh biomass and dry matter accumulation in different yam varieties

指标 Item	品种 Variety	累积方程						
		Equation of fresh biomass and dry matter accumulation	t_1 (d)	t_2 (d)	t_m (d)	V_{max} [kg/(hm ² ·d)]	T (d)	R^2
鲜生物量 Fresh biomass	棒药 Bangyao	$y = 55640.5 / (1 + 338.9e^{-0.051t})$	91	143	117	709.4	52	0.991**
	紫药 Ziyao	$y = 37247.4 / (1 + 2535.3e^{-0.075t})$	87	122	105	698.4	35	0.959**
	小白嘴 Xiaobaizui	$y = 32179.3 / (1 + 4744.5e^{-0.084t})$	85	116	101	675.8	31	0.924**
干物质质量 Dry matter	棒药 Bangyao	$y = 10825.7 / (1 + 2288.9e^{-0.074t})$	86	121	103	200.3	36	0.925**
	紫药 Ziyao	$y = 8975.7 / (1 + 6035.5e^{-0.089t})$	83	113	98	199.7	30	0.990**
	小白嘴 Xiaobaizui	$y = 8779.3 / (1 + 7644.5e^{-0.092t})$	83	112	97	201.9	29	0.982**

注 (Note): t_1 —快速累积期起始时间 The starting time of fleet accumulation period; t_2 —快速累积期终止时间 The terminating time of fleet accumulation period; t_m —最大累积速率出现时间 The time reached maximal rate of accumulation; V_{max} —最大累积速率 The maximal speed of accumulation; T —快速累积持续期 The duration of fleet accumulation. **— $P < 0.01$.

表 3 不同山药品种的氮素累积量 (kg/hm²)
Table 3 N accumulation of different yam varieties

播种后天数 Days after sowing (d)	品种 Variety	茎 Stem	叶 Leaf	根茎 Tuber	整株 Whole plant
80	棒药 Bangyao	6.94 a	30.60 a	12.58 a	50.13 a
	紫药 Ziyao	6.72 a	33.36 a	5.02 b	45.10 ab
	小白嘴 Xiaobaizui	6.77 a	27.81 a	3.66 b	38.24 b
110	棒药 Bangyao	6.69 b	41.71 a	58.96 a	107.36 b
	紫药 Ziyao	7.92 ab	43.41 a	63.38 a	114.70 a
	小白嘴 Xiaobaizui	9.03 a	45.55 a	60.53 a	115.12 a
140	棒药 Bangyao	6.25 a	40.28 a	115.09 a	161.62 a
	紫药 Ziyao	6.48 a	38.14 a	78.45 b	123.07 b
	小白嘴 Xiaobaizui	5.14 a	41.76 a	110.73 a	157.63 a
180	棒药 Bangyao	1.77 b	20.56 a	151.17 a	173.49 a
	紫药 Ziyao	5.16 a	19.78 a	138.02 a	162.96 b
	小白嘴 Xiaobaizui	2.46 b	13.79 b	142.49 a	158.75 b

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示品种间差异达 5% 显著水平 (Duncan 法) Data followed by different letters in the same column indicate significant differences among the cultivars at the 5% level (Duncan's multiple test).

表 4 不同山药品种的磷素累积量 (kg/hm²)
Table 4 P accumulation of different yam varieties

播种后天数 Days after sowing (d)	品种 Variety	茎 Stem	叶 Leaf	根茎 Tuber	整株 Whole plant
80	棒药 Bangyao	0.92 a	3.05 a	2.01 a	5.98 a
	紫药 Ziyao	1.26 a	3.50 a	0.90 b	5.66 ab
	小白嘴 Xiaobaizui	0.99 a	3.34 a	0.65 b	4.98 b
110	棒药 Bangyao	1.08 b	5.04 ab	28.20 a	34.32 a
	紫药 Ziyao	1.49 a	5.90 a	23.83 ab	31.22 ab
	小白嘴 Xiaobaizui	1.29 ab	4.16 b	20.67 b	26.12 b
140	棒药 Bangyao	1.01 a	5.11 a	39.39 a	45.52 a
	紫药 Ziyao	0.28 b	5.74 a	36.68 a	42.70 ab
	小白嘴 Xiaobaizui	1.16 a	4.68 a	33.44 b	39.28 b
180	棒药 Bangyao	0.26 b	2.63 a	45.28 a	48.17 a
	紫药 Ziyao	0.67 a	2.60 a	42.99 a	46.26 a
	小白嘴 Xiaobaizui	0.26 b	1.80 b	40.66 a	42.72 b

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示品种间差异达 5% 显著水平 (Duncan 法) Data followed by different letters in the same column indicate significant differences among the cultivars at the 5% level (Duncan's multiple test).

在整个生育期内, 磷素分配规律与氮素分配相似。根茎内磷的分配量逐渐增大, 由膨大初期的 13.0%~33.7% 增加到收获期的 92.9%~95.2%; 而叶片中的磷由初期的 50.9%~67.1% 下降到收获期的 4.2%~5.6%; 茎所占百分比由初期的 15.6%~22.3% 下降到收获期的 0.6%~1.5%。收获时, 各部位磷素分配量表现为根茎 > 叶 > 茎。与氮累积相同, 植株

总磷累积量也主要取决于根茎中磷的累积。

2.2.3 钾素累积分配特征 不同山药品种钾素累积量亦随山药生长发育逐渐增加 (表 5)。苗期棒药根茎钾素累积量显著高于紫药和小白嘴, 但后 3 个时期三者差异不显著。播种后 80 d 和 110 d, 棒药、紫药和小白嘴钾素累积总量差异不显著, 播种后 140 d, 棒药和小白嘴钾素累积总量差异不大, 且紫药和小

表 5 不同山药品种的钾素累积量 (kg/hm²)
Table 5 K accumulation of different yam varieties

播种后天数 Days after sowing (d)	品种 Variety	茎 Stem	叶 Leaf	根茎 Tuber	整株 Whole plant
80	棒药 Bangyao	8.91 a	17.97 b	13.78 a	40.67 a
	紫药 Ziyao	9.71 a	25.75 a	5.31 b	40.77 a
	小白嘴 Xiaobaizui	11.43 a	23.57 a	4.78 b	39.78 a
110	棒药 Bangyao	12.49 b	16.11 a	98.82 a	127.42 a
	紫药 Ziyao	12.89 ab	16.93 a	81.71 a	111.52 a
	小白嘴 Xiaobaizui	15.02 a	19.50 a	84.86 a	119.38 a
140	棒药 Bangyao	11.27 a	17.04 a	141.45 a	169.75 a
	紫药 Ziyao	5.48 b	13.19 ab	122.82 a	141.50 b
	小白嘴 Xiaobaizui	9.63 a	11.83 b	134.35 a	155.81 ab
180	棒药 Bangyao	1.96 b	18.12 a	177.32 a	197.39 a
	紫药 Ziyao	6.04 a	8.47 b	174.76 a	189.28 a
	小白嘴 Xiaobaizui	1.35 b	2.81 c	156.07 a	160.20 b

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示品种间差异达 5% 显著水平 (Duncan 法) Data followed by different letters in the same column indicate significant differences among the cultivars at the 5% level (Duncan's multiple test).

白嘴差异亦不显著, 但棒药显著高于紫药; 至收获时, 棒药钾素累积量比紫药高, 差异不明显, 但均显著高于小白嘴。

山药进入膨大初期以前, 植株体内的钾主要分配在叶片中, 叶片中钾素分配比例为 44.2%~63.2%; 各品种膨大初期之后吸收的钾主要分配在根茎中, 明显高于茎和叶, 至收获期, 根茎中钾素分配比例占到了 89.8%~97.4%, 利于根茎中淀粉的合成和累积。在整个生育期内, 山药叶片中的钾素累积分配比例始终高于茎, 与氮、磷的分配特征相似。

2.2.4 不同山药品种养分累积动态特征分析 用 Logistic 生长函数对不同品种山药的养分累积量随生育期的变化进行拟合, 表 6 结果表明, 山药氮素最大累积速率出现在播种后的 99~113 d, 氮素累积最快时期出现在播种后的 78~139 d。棒药氮素快速累积起始时间和结束时间均比紫药和小白嘴晚, 快速累积持续期长, 且最大累积速率最高, 这可能就是棒药氮素累积最高的原因所在。小白嘴快速累积期出现得最早, 结束得也较早, 所以快速累积持续期最短, 但最大累积速率与棒药相差不大。

磷素累积同样符合 Logistic 方程, 拟合程度亦达到了极显著水平 (表 6)。与氮相比, 各品种磷素累积最快时期出现在播后的 83~115 d, 出现的时间较氮晚, 结束时间较氮早。因此, 磷素快速累积持续时期较氮短, 仅为 28~30 d。但不同山药品种之间

磷素累积特征没有表现出明显差异。

不同山药品种钾素快速累积期的起始时间出现在播后的 82~131 d, 结束时间比磷晚, 与氮相似。棒药的最大累积速率最高, 且快速累积期持续时间最长, 因此钾素累积量显著高于紫药和小白嘴。而紫药和小白嘴的最大累积速率及快速累积期持续时间相似, 因此钾素的总累积量也没有显著差异。

2.3 不同山药品种形成 1000 kg 产量的养分需求量及养分生产效率比较

由于品种间的差异, 各品种形成单位产量时所需的养分量不同 (表 7)。棒药产量最高, 氮、磷、钾养分累积总量也显著高于紫药和小白嘴 (表 3~表 5), 但形成 1000 kg 产量所需的 N、P₂O₅ 和 K₂O 量却显著低于小白嘴和紫药; 小白嘴与紫药间的养分需求量差异不显著。不同山药品种对 N、P₂O₅ 和 K₂O 的吸收比例均表现为 K₂O ≥ N > P₂O₅, 氮磷钾养分生产效率均表现为 P₂O₅ > N > K₂O, 棒药的氮磷钾养分生产效率均最高, 显著高于紫药和小白嘴, 后二者间差异则均不显著。

3 讨论

最大限度地挖掘品种的遗传潜力并提高产量和养分利用能力, 一直是农业上备受关注的热点^[17-19]。在田间管理一致的情况下, 各供试品种山药产量差异明显, 棒药显著高于紫药和小白嘴, 可见遗传因

表 6 不同山药品种养分积累的 Logistic 模型及其特征值

Table 6 Logistic equations and their features of nutrient accumulation in different yam varieties

养分 Nutrient	品种 Variety	养分积累模型方程 Equation of nutrient accumulation	t_1 (d)	t_2 (d)	t_m (d)	V_{max} [kg/(hm ² ·d)]	T (d)	R^2
N	棒药 Bangyao	$y = 175.2/(1 + 361.8e^{-0.052x})$	88	139	113	2.28	51	0.953**
	紫药 Ziyao	$y = 165.4/(1 + 595.1e^{-0.062x})$	82	124	103	1.94	42	0.912**
	小白嘴 Xiaobaizui	$y = 132.1/(1 + 544.5e^{-0.064x})$	78	119	99	2.01	41	0.894**
P ₂ O ₅	棒药 Bangyao	$y = 52.6/(1 + 9328.8e^{-0.094x})$	83	111	97	1.24	28	0.882**
	紫药 Ziyao	$y = 47.5/(1 + 7635.3e^{-0.089x})$	86	115	100	1.06	30	0.97**
	小白嘴 Xiaobaizui	$y = 45.8/(1 + 8843.4e^{-0.092x})$	84	113	99	1.05	29	0.938**
K ₂ O	棒药 Bangyao	$y = 273.4/(1 + 601.2e^{-0.059x})$	86	131	109	4.03	45	0.947**
	紫药 Ziyao	$y = 192.7/(1 + 1032.2e^{-0.072x})$	83	122	113	3.28	39	0.956**
	小白嘴 Xiaobaizui	$y = 185.6/(1 + 1157.9e^{-0.071x})$	82	119	105	3.29	37	0.909**

注 (Note): t_1 —快速累积期起始时间 The starting time of fleet accumulation period; t_2 —快速累积期终止时间 The terminating time of fleet accumulation period; t_m —最大累积速率出现时间 The time reached maximal rate of accumulation; V_{max} —最大累积速率 The maximal speed of accumulation; T —快速累积持续期 The duration of fleet accumulation.

表 7 各山药品种形成 1000 kg 鲜重所需养分量及养分生产效率

Table 7 Amounts and ratios of N, P₂O₅ and K₂O for forming 1000 kg fresh yield and NPE in different yam varieties

品种 Variety	N (kg)	P ₂ O ₅ (kg)	K ₂ O (kg)	N : P ₂ O ₅ : K ₂ O	养分生产效率 NPE (kg/kg)		
					N	P ₂ O ₅	K ₂ O
棒药 Bangyao	3.22 b	0.89 b	3.66 b	1 : 0.28 : 1.14	312.18 a	1127.37 a	274.14 a
紫药 Ziyao	4.45 a	1.27 a	5.24 a	1 : 0.28 : 1.18	224.56 b	789.19 b	195.72 b
小白嘴 Xiaobaizui	4.62 a	1.24 a	4.65 ab	1 : 0.27 : 1.01	216.68 b	806.58 b	214.92 b

注 (Note): NPE—Production efficiency of nutrients; 同列数据后不同小写字母表示品种间差异达 5% 显著水平 (Duncan 法) Data followed by different letters in the same column indicate significant differences among the cultivars at the 5% level (Duncan's multiple test).

素对产量形成影响显著。作物干物质累积是产量形成的基础, 作物的生长过程实际上就是干物质不断累积并在各器官中分配的过程^[20-21], 分配的多少决定着作物的经济产量^[22]。山药在播种后 140 d 之前生长速率较快, 140 d 之后逐渐减缓, 鲜、干生物量趋于稳定。在各器官干物质分配方面, 80 d 时叶片的干物质分配比例最高, 说明在山药生长前期, 植株干物质累积主要以叶片为主, 叶片是植株光合产物的生产器官和储存器官; 但在 110 d 后根茎的干物质分配比例就达到了 70% 之上, 说明随着生育进程的推进, 根茎成为了干物质的主要储存器官。Logistic 生长函数拟合结果表明, 棒药鲜生物量快速累积出现的时间较紫药和小白嘴分别晚 4 d 和 6 d, 结束时间分别晚 21 d 和 27 d, 快速累积持续期较紫药和小白嘴分别延长了 17 d 和 21 d, 各山药品种鲜生物量最大累积速率差异虽不大, 但鲜生物量最大累积速率出现的时间比紫药和小白嘴晚。因此, 较长的生

物量快速累积持续期和较迟的鲜生物量最大累积速率出现时间可能正是导致棒药鲜生物量比紫药和小白嘴高的原因所在。山药干物质质量累积特征与鲜生物量累积特征相似, 棒药干物质质量快速累积出现的时间较紫药和小白嘴均晚 3 d, 结束的时间分别晚 8 d 和 9 d, 快速累积持续期则分别延长了 6 d 和 7 d。棒药干物质最大累积速率出现的时间比紫药和小白嘴晚, 但各山药品种干物质质量最大累积速率差异也不大。而此动态累积特征并没有导致供试 3 个山药品种间干物质累积量, 特别是单位面积根茎部位干物质累积量和总干物质累积量显著的差异, 这主要是紫药和小白嘴种植密度显著高于棒药的结果。实际上, 尽管棒药根茎的含水量显著高于紫药和小白嘴, 但其鲜生物量也明显高于紫药和小白嘴, 因此, 单株棒药的干物质累积量也是显著高于紫药和小白嘴的。这可能也正是较长的干物质质量快速累积持续期和干物质质量最大累积速率出现时间较迟的结

果。根茎干物质的快速累积主要出现在膨大期, 这与郑顺林等^[23]对马铃薯干物质累积的研究结果一致。

俞凤芳等^[24]研究表明, 科学合理的氮磷钾养分配比可使植株干物质积累量达到最大, 同时根茎产量和品质都有一定程度的提高。作物对氮、磷、钾的吸收特性不仅反映了作物本身的特点, 而且反映了作物的品种特点^[25]。本研究表明, 不同山药品种对氮、磷和钾的养分吸收累积特性在不同生育阶段表现出了各自不同的特征, 但对养分的吸收总量均表现为 $K_2O \geq N > P_2O_5$, 且对养分的吸收高峰均出现在 97~113 d。各供试山药品种对氮磷钾的养分需求特性, 均表现为对钾的需求量最高, 这可能与钾作为最活跃的阳离子, 积极参与根茎内淀粉的合成与积累有关^[25]; 氮其次, 磷最低, 林洪鑫等^[26]对木薯的研究也得出了相似的结果。根茎氮磷钾养分吸收规律同整株的累积规律变化一致, 说明山药对养分的吸收累积主要取决于根茎的吸收累积能力。3 个品种氮磷钾养分在各部位的分配系数不同, 但均表现为生长初期叶片内分配系数最高, 至收获时则为根茎>叶>茎, 对氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)累积量也表现为根茎>叶>茎。棒药的氮磷钾累积量高于紫药、小白嘴, 说明棒药对氮磷钾养分的吸收累积利用能力优于紫药和小白嘴。棒药氮、钾快速累积起始期出现的时间较紫药和小白嘴分别晚 6 d、15 d 和 3 d、4 d, 但结束的时间晚 10 d、20 d 和 9 d、12 d, 快速累积持续期较紫药和小白嘴延长了 9 d、10 d 和 6 d、8 d, 且棒药氮、钾最大累积速率最大。棒药磷快速累积起始期和结束期出现的时间与紫药和小白嘴相差不大, 但最大累积速率最大, 这可能正是棒药养分累积最高的原因所在。养分生产效率(NPE)表示山药吸收养分转化为地下部产量的能力^[27], 结果发现, 棒药的氮磷钾养分生产效率均高于紫药和小白嘴, 而紫药和小白嘴则没有明显差异。因此, 生产中应针对不同品种不同时期对养分的需求特性, 结合土壤养分的时空变异特征, 采取科学管理措施, 以实现山药的高产、高效和绿色生产。

4 结论

棒药、紫药和小白嘴的生长发育和养分累积表现出各自的动态特征。棒药茎、叶鲜重和根茎产量均高于紫药和小白嘴, 而后二者差异则不大。而 3 个品种单位面积的干物质累积量在多数情况下则基本相当。各山药品种鲜干物质最大累积速率差异不

大, 棒药干物质快速累积出现在播种后 86~121 d, 快速累积持续期为 36 d, 紫药和小白嘴干物质快速累积出现在播种后 83~113 d 和 83~112 d, 快速累积持续期仅为 30 d 和 29 d。棒药快速累积持续期较紫药和小白嘴分别延长了 6 d 和 7 d。较长的鲜干生物量快速累积持续期和较迟的最大累积速率出现时间正是棒药生物量累积较高的原因所在。

在整个生育期内, 3 个品种对氮、磷、钾养分的吸收量均表现为 $K_2O \geq N > P_2O_5$, 且根茎 > 叶 > 茎, 其中棒药对氮、磷、钾的累积量均最高, 氮、磷、钾养分生产效率也均为最高, 但形成单位产量的养分需求量显著低于紫药和小白嘴。不同山药品种对养分的快速累积期从播种后 78 d 起, 持续到播种后 139 d 结束。棒药对氮素和钾素的快速累积期持续时间较长, 最大累积速率显著高于紫药和小白嘴。但 3 个品种的磷素累积特征差异不明显。

参 考 文 献:

- [1] 李佳. 长山药的生态配方施肥技术研究[D]. 太原: 山西大学硕士学位论文, 2012. 11.
Li J. Studies on ecological formula fertilization of Chinese yam[D]. Taiyuan: MS Thesis of Shanxi University, 2012.
- [2] 汤洁, 戴兴临, 涂玉琴, 等. 淮山药新品种及栽培新技术研究[J]. 江西农业学报, 2011, 23(9): 57-59.
Tang J, Dai X L, Tu Y Q, et al. Study on new varieties of Chinese yam and their cultivation new technologies[J]. Acta Agricultura Jiangxi, 2011, 23(9): 57-59.
- [3] 李建军, 任美玲, 王君, 等. 铁棍山药新品种选育研究[J]. 中药材, 2015, 38(9): 1787-1791.
Li J J, Ren M L, Wang J, et al. Research on breeding of *Dioscorea opposita* cv. Tiegun[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2015, 38(9): 1787-1791.
- [4] 李月仙, 黄东益, 黄小龙, 等. 山药的研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(9): 91-96.
Li Y X, Huang D Y, Huang X L, et al. Progress of study on *Dioscorea opposita* Thunb[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(9): 91-96.
- [5] 许念芳, 刘少军, 姚甜甜, 等. 覆膜栽培对山药生长、产量及经济效益的影响[J]. 天津农业科学, 2017, 23(10): 65-68.
Xu N F, Liu S J, Yao T T, et al. Effects of film mulching cultivation on growth, yield and economic benefits of yam[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2017, 23(10): 65-68.
- [6] 何小平, 江法源, 邓泽周, 等. 密度和施肥方式对定向槽浅生栽培紫山药产量的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(1): 39-42.
He X P, Jiang F Y, Deng Z Z, et al. Effects of different planting densities and fertilizer methods on yield of purple yam with the directional-notch technology[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(1): 39-42.
- [7] 殷剑美, 闫瑞霞, 韩晓勇, 等. 秸秆套网袋栽培对紫山药产量及品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2014, 26(1): 61-66.
Yin J M, Yan R X, Han X Y, et al. Effect of straw bagged with net cultivation method on yield and quality of purple yam (*Dioscorea*

- alata* L.) [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2014, 26(1): 61–66.
- [8] 王飞, 刘红彦, 鲁传涛, 等. 5个山药品种资源的农艺性状和营养品质比较[J]. *河南农业科学*, 2005, (3): 58–60.
Wang F, Liu H Y, Lu C T, *et al.* Comparison of the agronomical traits and nutrient quality among five yam germplasms[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2005, (3): 58–60.
- [9] Liu Y, Shi S S, Wang C S. Determination of nutrients and diosgenin contents of *Dioscorea batatas* Decne in Zhejiang[J]. *Medicinal Plant*, 2010, 1(2): 21–23.
- [10] 倪伟超, 徐兵兵, 李彪, 等. 紫山药的营养保健价值及产品开发[J]. *中国野生植物资源*, 2016, 35(4): 67–71.
Ni W C, Xu B B, Li B, *et al.* Nutrition and health care value of purple yam and its product development[J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2016, 35(4): 67–71.
- [11] 苗泽兰, 孙志梅, 张新星, 等. 河北省山药产量及施肥现状分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2016, (5): 138–143.
Miao Z L, Sun Z M, Zhang X X, *et al.* Analysis of the status of yield and fertilization in the yam production in Hebei province[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016, (5): 138–143.
- [12] Gani O K. Effects of leguminous plant residues and NPK fertilizer application on the performance of yam (*Dioscorea rotundata* ‘c.v.’ ewuru) in south-western Nigeria[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2013, 59(3): 423–434.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [14] 何文寿, 马琨, 代晓华, 等. 宁夏马铃薯氮、磷、钾养分的吸收累积特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(6): 1477–1487.
He W S, Ma K, Dai X H, *et al.* Characteristics of nitrogen, phosphorus and potassium uptake and accumulation of potato in Ningxia[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(6): 1477–1487.
- [15] 赵满兴, 周建斌, 杨绒, 等. 不同施氮量对旱地不同品种冬小麦氮素累积、运输和分配的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(2): 143–149.
Zhao M X, Zhou J B, Yang R, *et al.* Characteristics of nitrogen accumulation, distribution and translocation in winter wheat on dryland[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Sciences*, 2006, 12(2): 143–149.
- [16] 赵新华, 束红梅, 王友华, 等. 施氮量对棉铃干物质和氮累积量及分配的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4): 888–897.
Zhao X H, Shu H M, Wang Y H, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on accumulation and distribution of dry weight and nitrogen of cotton bolls[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4): 888–897.
- [17] Sinebo W, Gretzmacher R, Edelbauer A. Genotypic variation for nitrogen use efficiency in Ethiopian bailey[J]. *Field Crops Research*, 2004, 85: 43–601.
- [18] Singh U, Ladha J K, Castillo E G, *et al.* Genotypic variation in nitrogen use efficiency in medium and long duration rice[J]. *Field Crops Research*, 1998, 58: 35–53.
- [19] 春亮, 陈范骏, 张福锁, 等. 不同氮效率玉米杂交种的根系生长、氮素吸收与产量形成[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(5): 615–619.
Chun L, Chen F J, Zhang F S, *et al.* Root growth, nitrogen uptake and yield formation of hybrid maize with different N efficiency[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(5): 615–619.
- [20] 齐文增, 陈晓璐, 刘鹏, 等. 超高产夏玉米干物质与氮、磷、钾养分积累与分配特点[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(1): 26–36.
Qi W Z, Chen X L, Liu P, *et al.* Characteristic of dry matter, accumulation and distribution of N, P and K of super-high-yield summer maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(1): 26–36.
- [21] 张萌, 肖厚军, 赵欢, 等. 贵州黄壤区辣椒干物质、氮素积累与分配及氮素利用对新型肥料的响应[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(9): 2983–2990.
Zhang M, Xiao H J, Zhao H, *et al.* Responses of dry matter, nitrogen accumulation and distribution and nitrogen utilization of pepper to new-type fertilizers in Guizhou yellow soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(9): 2983–2990.
- [22] 梁任繁, 李创珍, 张娟, 等. 山药块茎发育中物质积累及相关代谢酶变化[J]. *作物学报*, 2011, 37(5): 903–910.
Liang R F, Li C Z, Zhang J, *et al.* Changes of matter accumulation and relative enzymatic activity during yam tuber development[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(5): 903–910.
- [23] 郑顺林, 李国培, 杨世民, 等. 施氮量及追肥比例对冬马铃薯生育期及干物质积累的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2009, 27(3): 270–274.
Deng S L, Li G P, Yang S M, *et al.* Effect of nitrogen level and top dressing proportion on growing stages and dry matter accumulation in winter potato[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2009, 27(3): 270–274.
- [24] 俞凤芳. 平衡施肥对马铃薯产量和品质的影响[J]. *湖北农业科学*, 2010, 49(8): 1839–1840.
Yu F F. Effect of balanced fertilization on yield and quality of potato[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2010, 49(8): 1839–1840.
- [25] 张阔, 孙志梅, 刘建涛, 等. 冀西北坝上地区不同萝卜品种的养分吸收特性比较[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(1): 191–199.
Zhang K, Sun Z M, Liu J T, *et al.* Comparative studies on nutrient absorption characteristics of different radish varieties in the northwest area of Hebei Province[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(1): 191–199.
- [26] 林洪鑫, 袁展汽, 刘仁根, 等. 不同氮磷钾处理对木薯产量、养分积累、利用及经济效益的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(6): 1457–1465.
Lin H X, Yuan Z Q, Liu R G, *et al.* Effects of different N, P and K treatments on yield, nutrient accumulation and utilization and economic benefit of cassava[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(6): 1457–1465.
- [27] 阳显斌, 张锡洲, 李廷轩, 等. 磷素子粒生产效率不同的小麦品种磷素吸收利用差异[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(3): 525–531.
Yang X B, Zhang X Z, Li T X, *et al.* Differences of phosphorus uptake and utilization in wheat cultivars with different phosphorus use efficiency for grain yield[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3): 525–531.