

子莲采收期干物质累积和氮磷钾养分吸收转运特征

刘冬碧¹, 揭志辉², 朱丹丹¹, 唐记平^{2*}, 杨良波², 张志毅¹, 郑兴汶²,
张富林¹, 夏颖¹, 程子珍¹, 赖克强², 谢世平²

(1 湖北省农业科学院植保土肥研究所 / 国家农业环境潜江观测实验站 / 湖北省农业面源污染防治工程技术研究中心 / 农业农村部潜江农业环境与耕地保育科学观测实验站, 湖北武汉 430064;
2 广昌县白莲产业发展中心, 江西广昌 344900)

摘要:【目的】研究加工通芯莲用子莲的干物质累积和氮磷钾养分吸收转运特征, 为子莲科学施肥提供理论依据。【方法】以太空莲 36 号和建选 17 号为供试品种, 在江西省广昌县开展微区 (3 m²) 试验。分别在子莲移栽后 85 天 (始收期)、103 天 (收获早期)、121 天 (收获盛期)、139 天 (收获中期)、160 天 (收获后期)、180 天 (终收期) 采样, 测定各器官 (部位) 干物质累积量和氮磷钾养分含量, 计算氮磷钾养分累积量, 源器官干物质和氮磷钾转运量, 以及汇器官干物质和氮磷钾累积量增量。【结果】子莲干物质累积总量主要集中在子莲始收期—收获盛期 (移栽后 85~121 天), 其中叶片、根状茎等源器官 (部位) 干物质累积量先增后降, 在移栽后 139 天 (花果期末, 收获中期) 达最高值; 莲蓬和果实干物质累积量持续增加; 膨大茎开始生长后, 干物质累积量迅速增加。叶片、根状茎等源器官氮磷钾含量动态变化相似, 在移栽后 139 天前维持在较高水平, 然后迅速或逐渐下降; 花蕾、果实和膨大茎氮磷钾含量相对稳定; 莲蓬氮、磷含量的动态变化与叶片相似, 钾的变化与果实相似。子莲氮和钾累积量主要集中在移栽后 85~121 天, 磷累积量主要集中在移栽后 85~139 天, 此期间氮、磷和钾累积量分别占其累积总量的 53.9%、61.4% 和 55.9%。移栽后 139~180 天, 子莲汇器官氮累积量增量在莲蓬、果实和膨大茎中的分配比例分别为 3.0%、67.8% 和 29.2%, 磷的分配比例分别为 1.5%、65.0% 和 33.5%, 钾的分配比例分别为 6.7%、40.5% 和 52.8%, 源器官氮磷钾转运量占汇器官累积量增量的比例分别为 88.8%、49.9% 和 77.7%。每生产 100 kg 通芯莲, 子莲植株 N、P₂O₅ 和 K₂O 最大累积量平均分别为 7.50、3.47 和 9.45 kg, N、P₂O₅、K₂O 养分吸收量之比为 1 : 0.46 : 1.26。【结论】收获中期 (花果期末)—终收期, 子莲植株体内氮磷钾的累积有“莲蓬+果实”和“膨大茎”两个汇, 并以果实发育为主, 氮和钾的来源以体内转运为主, 磷的来源体内转运和吸收各约 50%。因此, 保证花果期充足的养分供应和成藕期磷素的持续供应是子莲高产的前提。

关键词: 子莲; 干物质累积; 养分含量; 养分累积量; 养分转运

Dry matter accumulation and NPK nutrient uptake and transfer of seed lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) throughout the harvesting period

LIU Dong-bi¹, JIE Zhi-hui², ZHU Dan-dan¹, TANG Ji-ping^{2*}, YANG Liang-bo², ZHANG Zhi-yi¹, ZHENG Xing-wen²,
ZHANG Fu-lin¹, XIA Ying¹, CHENG Zi-zhen¹, LAI Ke-qiang², XIE Shi-ping²

(1 Institute of Plant Protection and Soil Fertilizer, Hubei Academy of Agricultural Sciences / National Station for Qianjiang Agro-Environment / Hubei Engineering Research Center for Agricultural Non-point Source Pollution Control / Qianjiang Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment and Arable Land Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan, Hubei 430064, China; 2 Guangchang Seed Lotus Industry Development Center, Guangchang, Jiangxi 344900, China)

Abstract: 【Objectives】The characteristics of dry matter accumulation, nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) uptake and transfer in seed lotus were studied, and providing a theoretical basis for scientific fertilization of seed lotus. 【Methods】A micro-plot experiment (3 m²) was conducted in Guangchang, Jiangxi Province, taking two cultivars of Taikonglian 36 and Jianxuan 17 as the tested materials. Plant samples were

收稿日期: 2023-01-16 接受日期: 2023-07-16

基金项目: 广昌县白莲产业发展中心专家工作站项目 (2023-lcyzjz-002); 国家水生蔬菜产业体系项目 (CARS-24-G-09)。

联系方式: 刘冬碧 E-mail: 595049768@qq.com; * 通信作者 唐记平 E-mail: qdun860316@126.com

collected at 85 days (beginning harvesting), 103 days (early harvesting), 121 days (peak harvesting), 139 days (middle harvesting), 160 days (late harvesting), and 180 days (ending harvesting) after transplanting, respectively. The dry matter weight, N, P and K content of different organs (parts) were determined, and the periodical accumulation and transfer of dry matter and NPK were calculated. **【 Results 】** The dry matter of seed lotus was mainly accumulated from the beginning to peak harvesting period (85–121 days after transplanting), and the dry matter accumulation in source organs (leaves, rhizomes, etc.) first increased and then decreased, reaching peaks at the end of flowering. During the period, fruit setting period (139 days after transplanting, middle harvesting). The dry matter accumulation in the receptacle and fruit kept increasing, especially after the developed rhizomes starting. The N, P and K content in source organs maintained at a high level before 139 days and then decreased rapidly or gradually, depending on the cultivars or the organs, while the NPK content in flower bud, fruit and developed rhizome were relatively stable during the whole harvesting period. The dynamics of N and P content in receptacle was similar to those in leaves, and the dynamics of K content in receptacle was similar to those in fruits. N and K mainly accumulated during 85–121 days after transplanting, and P mainly accumulated during 85–139 days, accounting for 53.9%, 61.4% and 55.9% of the total N, P and K accumulation, respectively. During 139–180 days after transplanting, the N accumulation increment was distributed to receptacle, fruit and developed rhizome by 3.0%, 67.8% and 29.2%, respectively, the P and K accumulation increment were distributed to the above three organs by 1.5%, 65.0%, 33.5%, and by 6.7%, 40.5%, 52.8%, respectively. The exportation of N, P and K from the source to sink organs accounted for 88.8%, 49.9% and 77.7% of the total periodical accumulation from 139 to 180 days. The accumulation of N, P_2O_5 , and K_2O for producing 100 kg cotyledon were 7.50 kg, 3.47 kg and 9.45 kg on average, with the N : P_2O_5 : K_2O ratio of 1 : 0.46 : 1.26. **【 Conclusions 】** From the end of flowering and fruit setting period to the end of harvesting, the accumulation of N, P and K in seed lotus can be divided into two sinks, “receptacle + fruit” (reproductive organs) and “developed rhizome” (vegetative organ), with fruit development being the dominant sink. The N and K accumulation in sink organs is mainly transferred from the source organs, while P accumulation is half transferred and from absorption. Therefore, sufficient nutrient supply in flowering and fruit setting period and continuous P supply in rhizome developing period is very important for high yield of both lotus fruit and developed rhizome.

Key words: seed lotus; dry matter accumulation; nutrient content; nutrient accumulation; nutrient transfer

氮、磷、钾对作物生长发育、产量、品质以及养分吸收利用的影响及其调控, 是施肥技术研究的理论依据和工作基础。水稻、小麦、玉米、油菜、番茄、黄瓜、甜瓜等多种大宗作物和大宗蔬菜上, 都已开展了大量、深入的研究^[1-6]。水生蔬菜是中国蔬菜中独具特色的一个分支, 被欧美、日本等国家称为中国特菜^[7], 但其营养特征与施肥技术一直是水生蔬菜产业研究中的薄弱环节, 子莲相关方面的研究几乎是一片空白, 文献极少, 远远滞后于学科均衡发展 and 产业可持续发展的需要^[8-11]。子莲是栽培面积仅次于藕莲的中国第二大水生蔬菜, 全国种植面积约 10 万 hm^2 ^[7], 其主要收获产品莲子是一种“药食同源”的保健食品^[12]。根据地域分布, 子莲通常包括赣莲 (产自江西广昌等地)、建莲 (产自福建建宁等地)、宣莲 (产自浙江武义等地)、湘莲 (产自湖南湘

潭等地) 等几大品系^[12]; 根据莲子收获时期, 可分为鲜嫩莲子、老熟莲子和七八分成熟莲子 3 种类型, 其中江西省主要采收七八分成熟的莲子加工通芯白莲^[12-13], 年均种植面积 2.33~2.67 万 hm^2 ^[7]。江西省广昌县通芯白莲种植面积约 0.73 万 hm^2 , 占全国白莲种植总面积的 30% 以上, 是白莲种植规模最大的县级地区, 被誉为中国“通芯白莲”之乡^[14-15]。近期调研结果表明, 广昌县子莲生产中有机无机氮磷钾养分施用总量, 比全国露地蔬菜 (旱地) 有机无机氮磷钾养分施用总量高出 17.2%, 化肥“减施增效”潜力较大^[5, 16], 广昌县莲田还存在着土壤酸化、镁硼等中微量元素缺乏的问题^[17-18]。因此, 本研究以广昌县 2 个主推通芯白莲品种“太空莲 36 号”和“建选 17 号”为试验材料, 通过微区试验, 研究子莲干物质累积和氮磷钾养分的吸收转运特征, 为进一步研究广

昌白莲优化施肥技术, 发挥良种产量品质潜能, 促进当地莲产业健康发展提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 区域概况

广昌县位于江西省东南部, 隶属抚州市, 丘陵地形, 全县耕地面积 15630 hm^2 。广昌县属亚热带季风气候区, 四季分明, 雨量充沛, 年均降雨量约 1750 mm, 其中 3—6 月降雨量接近全年总降雨量的 60%, 年均日照约 1932 h, 无霜期 273 天。主要粮食作物为水稻, 主要经济作物为白莲, 其种植面积近几年稳定在 0.73 万 hm^2 左右, 接近全县耕地面积的 50%。

1.2 供试材料

试验于 2020 年 3—10 月在江西省广昌县盱江镇小港村莲花科技博览园进行。采用长 $\times$ 宽 $\times$ 深=2.0 m $\times$ 1.5 m $\times$ 0.5 m 的水泥微池开展试验, 每个微池净面积 3.0 m^2 , 填装土壤深度 25 cm。供试土壤采自小港村莲田, 为均质砂潮泥田, 供试子莲品种为太空莲 36 号 (简称“太空莲 36”) 和建选 17 号 (简称“建选 17”)。试验前土壤属性及养分状况为: pH 6.25、有机质 24.5 g/kg、全氮 1.21 g/kg、全磷 0.44 g/kg、全钾 25.3 g/kg、碱解氮 133 mg/kg、速效磷 32.5 mg/kg、速效钾 137 mg/kg、交换钙 1710 mg/kg、交换镁 65.0 mg/kg、有效硫 25.7 mg/kg、有效硼 0.30 mg/kg, 有效锌 2.78 mg/kg, 阳离子交换量 (CEC) 8.14 cmol/kg, 黏粒、粉粒和砂粒含量分别为 9.0%、13.3% 和 77.7%。土壤分析方法均采用常规方法^[19]。

1.3 试验方案

两个品种设置相同的施肥处理, 重复 25 次, 每个试验池种植 1 支重量和芽头数基本一致的健康无损伤“莲种”(即已萌发的膨大茎)。种植前每个微池土壤基施熟石灰 315 g、茶树菇渣肥 1350 g, 化肥追施, 每个微池有机无机养分施用总量为 N 189 g、 P_2O_5 67.5 g、 K_2O 90.0 g、MgO 6.75 g、B 0.43 g。供试茶树菇渣肥理化性状为水分 45.7%、有机质 24.5%、N 0.68%、 P_2O_5 1.97%、 K_2O 1.30% (均以湿基计)。供试化肥为复混肥 (N- P_2O_5 - K_2O 为 17-17-17)、尿素 (N 46%)、氯化钾 (K_2O 60%)、大粒镁 (MgO 25%)、万力硼 (B 12%)。氮肥于 5 月 8 日—8 月 18 日分 7 次追施, 2 次施肥间隔 14~21 天, 根据生育期不同其比例为 6.5%~16.5%; 磷肥在第 3~6 次追氮肥时追施, 各

占总量的 25%; 钾肥在第 3~6 次追氮肥时分次施用, 占总量的比例 10%~30%; 镁肥和硼肥在第 1 次追肥时 (5 月 8 日, 立叶肥) 全部施入。移栽前, 把试验池水位放浅到接近无水层, 先后把石灰、菇渣肥均匀撒施在田面, 耙田 8~10 cm, 使肥料与土壤充分混合, 然后移栽子莲、恢复水位。其他方面为常规管理, 及时防病、虫、草害。

2020 年 3 月 31 日施底肥、移栽子莲。为了获得子莲主要生育时期不同阶段各器官 (部位) 的养分吸收特征, 本研究在子莲始收期—终收期 (历经花果期和成藕期^[20]) 定期采样, 即分别于移栽后 85 天 (6 月 24 日, 始收期)、103 天 (7 月 12 日, 收获早期)、121 天 (7 月 30 日, 收获盛期)、139 天 (8 月 17 日, 收获中期)、160 天 (9 月 7 日, 收获后期)、180 天 (9 月 27 日, 终收期) 采集整池植株样。采样之后的试验池不再施肥, 且堵住进、排水口。

1.4 观测和分析指标

1.4.1 样品采集与数据观测 每次采样前, 调查田间植株长势长相, 采集代表性植株, 第 1 次采样时生物量较低、个体差异较大, 采集 4 次重复, 第 2 次以后采集 3 次重复。参考《莲种质资源描述规范和数据标准》^[21], 记录每个试验池收获的莲蓬数, 按叶片、叶柄、根状茎、膨大茎 (即莲藕)、花蕾 (包括未开放的蕾和已开放的花朵)、花柄、莲蓬 (即花托)、果实 (可能包括未达到通芯莲收获标准的青莲子) 等 8 个部位 (根系很难收集完全且中后期比例极低, 未统计) 分别洗净, 除去多余水分, 准确记录总鲜重, 再根据各器官 (部位) 的总量用“四分法”选取部分或全部样品, 记录鲜重, 烘干之后记录干重, 计算各器官 (部位) 和整株干物质累积总量。在每两次采样的间隔期, 及时收获七八分成熟莲子, 同上记录莲蓬数, 莲蓬和果实的鲜、干重。每个试验池累计收获的莲蓬和果实分别合并保存。

烘干后的样品粉碎, 测定氮、磷、钾含量, 计算各器官 (部位) 和整株养分累积量。

1.4.2 测定方法 植株样品采用硫酸-过氧化氢消煮, SEAL AutoAnalyzer 3 连续流动分析仪测定氮、磷含量, 火焰光度计测定钾含量^[19]。

1.4.3 计算方法 移栽后 139 天为源器官叶片、叶柄、根状茎、花蕾和花柄中氮磷钾含量由较高且稳定水平转为迅速或逐渐降低、干物质累积量由升高转为降低的重要节点, 因此作为计算源器官转运的起点。移栽后 180 天是终收期, 作为计算汇器官莲

蓬、果实和膨大茎养分和干物质累积的终点。几个主要养分特征指标的计算方法如下:

养分累积量 (g/plant)=干物质质量×养分含量;

养分累积比例 (%)=器官 (部位) 养分累积量/同期整株养分累积量×100;

源转运量 (g/plant)=移栽后 139 天源器官干物质或养分累积量-移栽后 180 天源器官干物质或养分累积量^[22];

源转运率 (%)=源转运量/移栽后 139 天源器官干物质或养分累积量×100;

汇增加量 (g/plant)=移栽后 180 天汇器官干物质或养分累积量-移栽后 139 天汇器官干物质或养分累积量;

源对汇的贡献率 (%)=源转运量/汇增加量×100。

1.5 数据处理

试验数据统计分析采用 Microsoft Office Excel 2010, 处理之间差异显著性分析用 SPSS11.5 最小显著性差异法 (LSD), 作图采用 Origin 2018。

2 结果与分析

2.1 干物质累积动态特征

图 1 和图 2 结果表明, 子莲干物质累积总量主要集中在始收期—收获盛期 (移栽后 85~121 天), 此期太空莲 36 和建选 17 干物质累积量分别占其累积总量的 44.1% 和 49.5%。其中, 移栽后 85 天 2 个品种的叶片、叶柄、根状茎、花蕾和花柄干物质累积量均先升高后降低, 移栽后 139 天达最大值 (个别除外); 莲蓬和果实的干物质累积量在移栽后 85 天持续增加; 根状茎前端在移栽后 160 天已开始形成膨大茎, 此后干物质累积量迅速增加。移栽后 139 天

2 个品种的干物质累积量均为叶片>叶柄>果实>根状茎和花柄>莲蓬>花蕾。移栽后 180 天子莲干物质累积总量, 太空莲 36 和建选 17 分别为 4902 和 4383 g/plant, 其中太空莲 36 果实、叶柄、膨大茎、叶片、莲蓬、根状茎和花柄的干物质累积量分别占植株干物质累积总量的 31.4%、18.0%、16.0%、14.4%、9.5%、7.3% 和 3.4%, 建选 17 果实、叶柄、叶片、花柄、膨大茎、根状茎和莲蓬的干物质累积量分别占植株干物质累积总量的 34.2%、15.5%、14.0%、10.3%、9.2%、8.8% 和 8.1%。此外, 建选 17 的膨大茎干物质累积量显著低于太空莲 36, 两个品种的叶片、叶柄、根状茎、花柄和莲蓬的干物质累积量在多数收获期无显著差异 (个别除外), 花蕾、果实和干物质累积总量在各收获期均无显著差异 (表 1)。

2.2 氮磷钾养分含量动态

从表 2 和表 3 可见, 叶片、叶柄、根状茎、花柄和莲蓬氮、磷含量动态变化相似, 即移栽后 85~139 天维持在较高水平, 然后迅速或逐渐降低, 移栽后 139~180 天太空莲 36 各器官 (部位) 含氮量、含磷量分别降低了 15.5%~53.7%、15.9%~41.4%, 建选 17 分别降低了 9.3%~34.7%、11.0%~25.3%, 具体看, 根状茎含氮量和花柄含磷量下降幅度较大, 莲蓬氮磷含量降幅均较小, 花蕾和果实氮磷含量以及膨大茎磷含量一直维持在较高且稳定水平。移栽后 139 天及前期叶片、果实和花蕾氮含量分别为 31.2~35.5、24.7~28.4 和 24.9~27.9 g/kg, 莲蓬、根状茎、花柄、叶柄各部位氮含量分别为 12.1~13.6、6.6~11.5、7.3~10.5 和 4.6~7.3 g/kg; 移栽后 180 天叶片、果实、膨大茎、莲蓬和其他器官氮含量分别为 22.8~25.2、24.4~27.5、12.7~15.1、4.4~

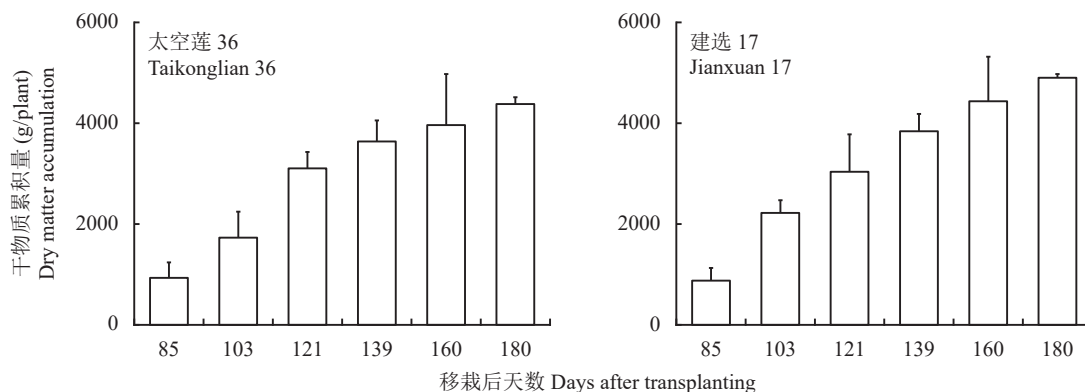


图 1 子莲植株干物质累积总量

Fig. 1 Total dry matter accumulation of seed lotus plant

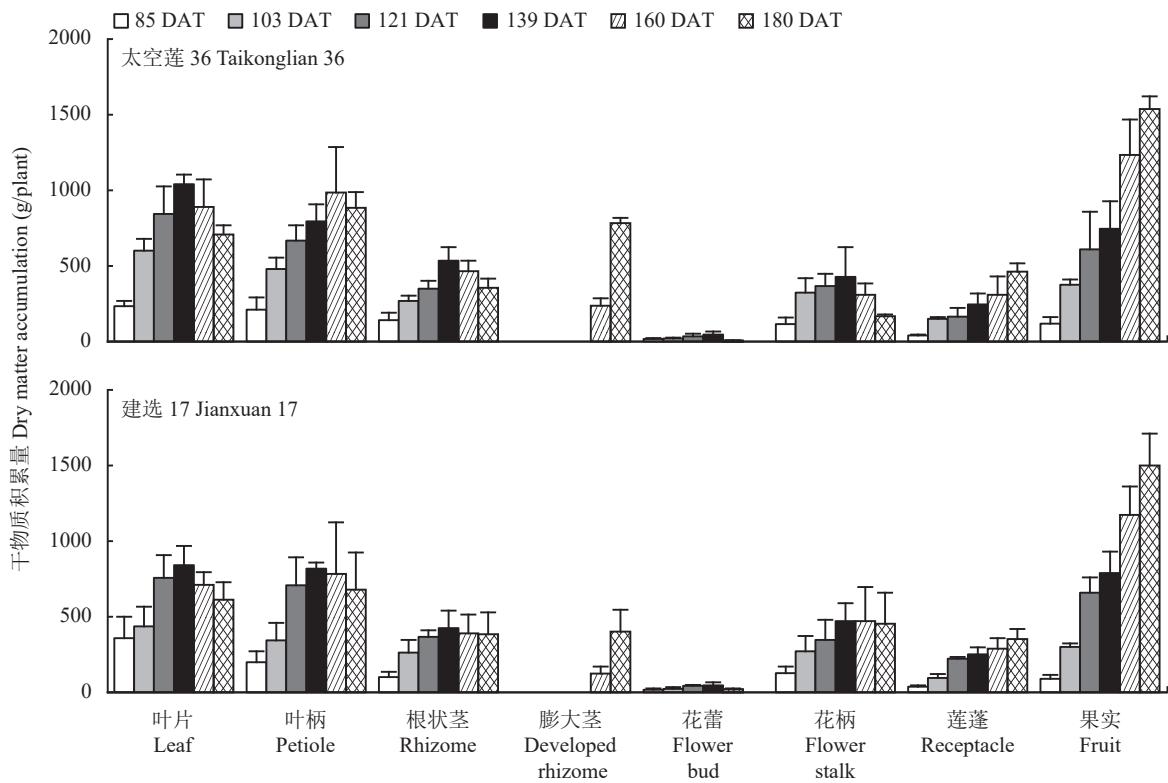


图 2 不同移栽后天数子莲植株各部位干物质累积量

Fig. 2 Dry matter accumulation in various parts of seed lotus plant at different days after transplanting (DAT)

表 1 子莲两个品种植株干物质累积量差异方差检验

Table 1 Variance test for dry matter accumulation between seed lotus cultivar Jianxuan 17 and Taikonglian 36

移栽后天数 Days after transplanting	叶片 Leaf	叶柄 Petiole	根状茎 Rhizome	膨大茎 Developed rhizome	花蕾 Flower bud	花柄 Flower stalk	莲蓬 Receptacle	果实 Fruit	总干物质 Total dry matter
85	*	ns	*			ns	ns	ns	ns
103	*	*	ns		ns	ns	*	ns	ns
121	ns	ns	ns		ns	ns	ns	ns	ns
139	ns	ns	ns		ns	ns	ns	ns	ns
160	ns	ns	ns	*		*	ns	ns	ns
180	ns	ns	ns	*		*	ns	ns	ns

注：*— $P<0.05$ ；ns—无显著差异。
Note: *— $P<0.05$; ns—No significant difference.

11.7 g/kg。子莲磷含量以果实和花蕾较高，分别为 5.0~5.9 和 4.3~4.9 g/kg，其余各部位磷含量较低，各收获期磷含量为 1.3~3.9 g/kg。光合作用和生长发育活跃的器官(叶片、果实、花蕾、膨大茎)其氮和(或)磷含量较高，花柄、叶柄等起支撑作用的部位氮磷含量较低。

与氮和磷不同，不同器官(部位)含钾量动态相对平缓，并分布在一个较小的范围(表 4)。叶片、叶柄和花柄含钾量移栽后 85~139 天维持在较高水

平，然后迅速或逐渐下降至一个低值，根状茎含钾量从更早时期就开始降低，移栽后 139~180 天太空莲 36 不同器官(部位)的含钾量降低了 13.6%~38.3%，建选 17 降低了 9.3%~31.5%，其中叶片下降幅度较大，其他部位下降幅度较小；花蕾、莲蓬、果实和膨大茎的含钾量一直维持在相对稳定水平(个别除外)。从不同器官(部位)看，膨大茎(块茎)、花蕾(代谢活跃)、花柄和叶柄(支撑作用)等部位的含钾量较高，果实等含钾量较低。

表 2 不同取样时期子莲各部位氮含量 (g/kg)

Table 2 Nitrogen content in various parts of seed lotus at different days after transplanting

品种 Cultivar	移栽后天数 Days after transplanting	叶片 Leaf	叶柄 Petiole	根状茎 Rhizome	膨大茎 Developed rhizome	花蕾 Flower bud	花柄 Flower stalk	莲蓬 Receptacle	果实 Fruit
太空莲 36 Taikonglian 36	85	31.4±1.4	4.63±0.08	6.56±0.64		25.3	7.38±0.19	13.4±0.6	27.9±2.7
	103	34.5±2.0	7.00±1.04	9.51±1.49		25.7±0.5	7.33±1.00	12.5±0.9	28.0±2.1
	121	33.0±2.4	6.52±1.17	9.91±0.66		27.6±2.3	8.51±0.80	12.1±0.6	28.0±2.9
	139	33.1±3.3	5.40±0.64	11.5±4.9		26.7±2.1	7.53±1.81	12.6±0.9	28.4±1.3
	160	24.0±1.0	3.93±0.39	5.74±1.08	14.3±0.3	24.7	5.74±0.92	11.8±1.1	29.3±3.3
	180	22.8±1.1	4.39±0.36	5.30±0.38	12.7±0.8		4.64±0.75	10.7±0.9	27.5±0.9
建选 17 Jianxuan 17	85	35.5±1.6*	6.48±0.49*	8.10±0.68*		27.1	8.06±0.59	13.6±0.0	25.1±1.9
	103	31.2±2.5	6.85±0.78	9.94±0.83		24.9±1.2	8.20±1.17	12.9±1.1	26.7±2.4
	121	32.5±3.9	5.31±0.51	9.87±1.38		27.9±1.7	10.5±1.7	12.8±0.4	24.7±3.8
	139	35.3±3.5	7.27±1.35	11.3±1.0		25.7±2.7	8.18±0.82	12.9±0.6	26.8±1.7
	160	22.5±1.8	5.29±0.64*	7.20±0.67	10.7±3.0	26.0	7.04±0.43	12.5±0.2	23.9±1.0
	180	25.2±1.2	4.98±0.07*	7.36±2.13	15.1±2.2		6.28±0.84	11.7±0.2	24.4±1.6*

注: *表示同一收获期、同一部位不同品种之间差异达5%显著水平。
Note: * means significant difference in the same part between two cultivars in the same harvest period at 5% level.

表 3 不同取样时期子莲各部位磷含量 (g/kg)

Table 3 Phosphorus content in various parts of seed lotus at different days after transplanting

品种 Cultivar	移栽后天数 Days after transplanting	叶片 Leaf	叶柄 Petiole	根状茎 Rhizome	膨大茎 Developed rhizome	花蕾 Flower bud	花柄 Flower stalk	莲蓬 Receptacle	果实 Fruit
太空莲 36 Taikonglian 36	85	3.12±0.25	2.11±0.32	2.51±0.17		4.41	2.08±0.15	1.84±0.19	5.57±0.62
	103	3.15±0.12	2.78±0.26	3.55±0.49		4.66±0.15	2.41±0.25	1.62±0.04	5.65±0.49
	121	2.66±0.23	2.03±0.33	2.70±0.17		4.43±0.25	2.19±0.16	1.49±0.09	5.19±0.52
	139	2.73±0.27	1.67±0.24	3.19±0.40		4.74±0.42	2.19±0.32	1.56±0.08	5.45±0.21
	160	2.21±0.18	1.31±0.34	2.28±0.34	3.45±0.28	4.27	1.69±0.44	1.53±0.09	5.89±0.77
	180	1.98±0.12	1.27±0.26	2.27±0.27	3.47±0.05		1.28±0.36	1.31±0.09	5.69±0.14
建选 17 Jianxuan 17	85	3.27±0.24	2.11±0.13	2.49±0.26		4.89	2.49±0.22	1.78±0.16	5.01±0.41
	103	3.07±0.13	2.71±0.51	3.10±0.06		4.45±0.22	2.51±0.11	1.75±0.22	5.59±0.49
	121	2.77±0.21	1.82±0.46	2.94±0.32		4.47±0.55	2.86±0.38*	1.72±0.26	5.16±0.85
	139	3.05±0.29	2.26±0.33	3.67±0.25		4.28±0.69	2.66±0.34	1.79±0.10*	5.79±0.35
	160	2.10±0.05	1.82±0.37	2.51±0.14	3.20±0.43	4.61	2.18±0.33	1.62±0.05	5.01±0.13
	180	2.31±0.06*	2.01±0.37*	2.92±0.18*	3.93±0.61		1.98±0.40	1.55±0.01*	5.31±0.41

注: *表示同一收获期和同一部位不同品种之间差异达5%显著水平。
Note: * means significant difference in the same part between two cultivars in the same harvest period at 5% level.

表 2~表 4 还表明,除了个别收获期或个别器官(部位),大多数条件下,两个子莲品种同一时期、同一部位的氮磷钾养分含量之间无明显差异。

2.3 氮磷钾养分吸收转运特征

2.3.1 氮磷钾累积动态 子莲对氮和钾的累积主要集中在移栽后 85~121 天,对磷的累积主要在移栽

表 4 不同取样时期子莲各部位钾含量 (g/kg)

Table 4 Potassium content in various parts of seed lotus at different days after transplanting

品种 Cultivar	移栽后天数 Days after transplanting	叶片 Leaf	叶柄 Petiole	根状茎 Rhizome	膨大茎 Developed rhizome	花蕾 Flower bud	花柄 Flower stalk	莲蓬 Receptacle	果实 Fruit
太空莲 36 Taikonglian 36	85	18.8±1.2	20.3±2.5	17.4±0.8		23.6	20.8±1.5	17.1±0.3	15.1±0.6
	103	18.6±1.0	23.0±0.2	19.2±2.7		22.8±1.3	20.5±0.9	17.8±1.0	14.9±1.2
	121	19.2±4.0	21.3±2.7	18.9±2.0		22.0±0.8	22.9±1.9	19.2±1.0	15.0±0.4
	139	18.5±0.1	18.1±3.0	19.0±0.9		21.5±2.0	20.6±2.4	19.7±0.4	14.5±0.5
	160	15.2±0.3	15.7±3.6	16.6±1.2	24.4±2.0	23.1	19.6±3.6	20.3±0.4	16.4±0.6
	180	11.4±0.7	15.3±2.4	16.3±1.9	24.2±0.9		17.8±4.4	18.8±0.5	14.2±0.1
建选 17 Jianxuan 17	85	20.3±1.3	28.5±1.3*	21.6±4.0		24.5	25.7±2.9	19.5±0.9*	15.1±0.4
	103	19.2±1.9	24.0±2.3	20.1±1.6		21.8±2.3	25.6±1.5*	18.0±0.1	16.0±0.5
	121	20.1±1.9	25.0±1.7	23.0±2.0		20.5±1.2	28.1±2.4*	20.1±1.2	15.3±1.4
	139	20.1±1.3	24.7±5.8	21.2±2.8		21.5±1.8	24.8±3.5	20.7±1.7	14.0±0.7
	160	13.7±0.3*	22.8±3.0	17.4±1.3	22.5±3.5	27.7	23.9±1.3	20.5±0.5	15.3±0.8
	180	13.8±0.8*	22.0±0.3*	18.7±2.6	26.3±3.5		22.5±2.7	19.6±1.1	14.0±0.8

注：*表示同一收获期、同一部位不同品种之间差异达5%显著水平。
Note: * means significant difference in the same part between two cultivars in the same harvest period at 5% level.

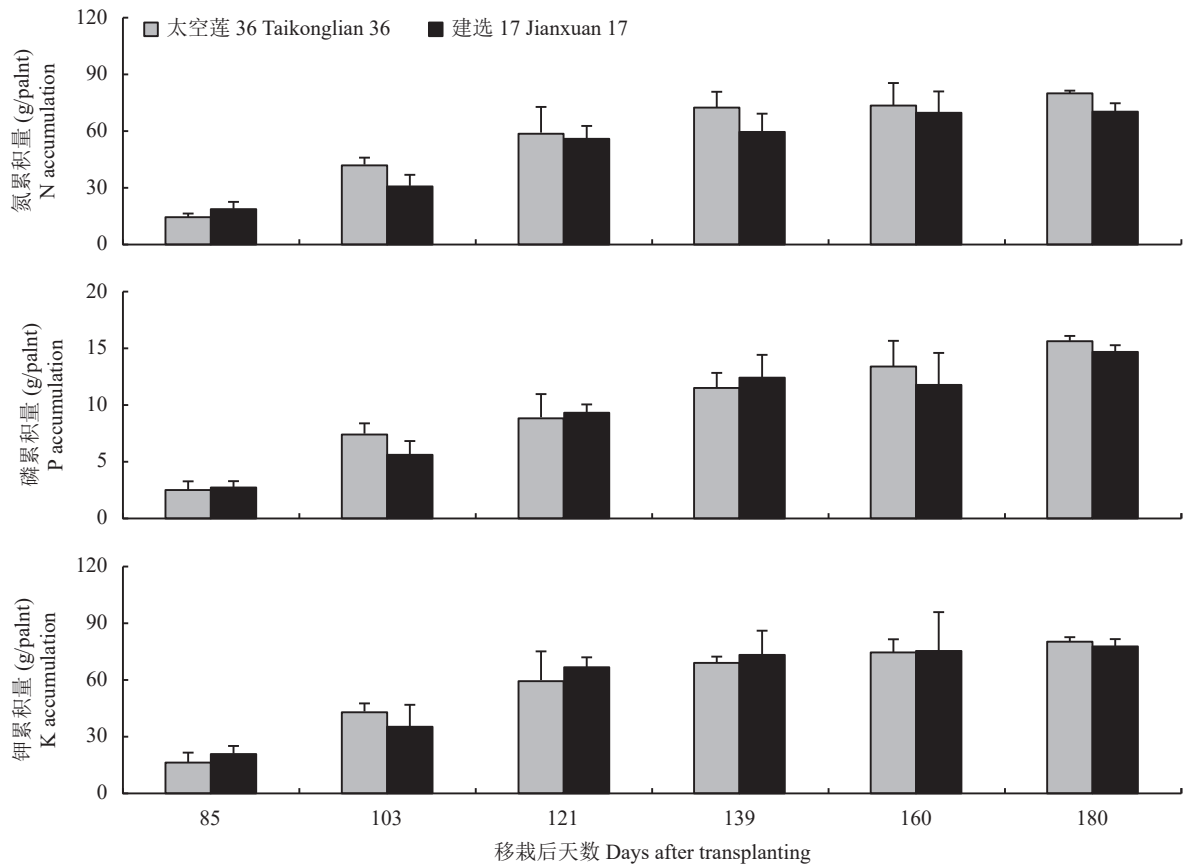


图 3 不同时期子莲氮磷钾养分积累量

Fig. 3 NPK accumulation in seed lotus plant at different days after transplanting

后 85~139 天, 此期间, 氮磷钾累积量分别占其积累总量的 53.9%、61.4% 和 55.9%, 且均在移栽后 180 天达最高值(图 3)。氮、钾累积量占其最高累积量的比例, 移栽后 0~85 天太空莲 36 分别仅为 18.0% 和 20.6%, 建选 17 分别为 27.0% 和 26.8%; 移栽后 85~121 天太空莲 36 的累计比例分别高达 55.4% 和 53.0%, 建选 17 分别为 52.4% 和 58.7%; 此后氮和钾的累积比例明显降低, 移栽后 121~180 天太空莲 36 分别为 26.6% 和 26.4%, 建选 17 分别为 20.6% 和 14.5%。不同阶段子莲磷累积量占其最高累积量的比例, 移栽后 0~85 天太空莲 36 和建选 17 分别仅为 16.7% 和 18.8%, 移栽后 85~139 天分别为 56.9% 和 65.9%, 移栽后 139~180 天分别为 26.4% 和 15.3%。太空莲 36 和建选 17 氮磷钾养分积累总量在各个收

获时期均无显著差异。

根据终收期子莲干物质和养分积累总量, 以及通芯莲对果实的换算系数, 估算每生产 100 kg 通芯莲(相当于当地高产田每 667 m² 平均产量)的养分需求量, 太空莲 36 至少需吸收累积 N 7.88 kg、P₂O₅ 3.53 kg、K₂O 9.46 kg, 养分积累量之比为 1 : 0.45 : 1.20; 建选 17 分别为 N 7.11 kg、P₂O₅ 3.40 kg、K₂O 9.43 kg, 养分积累量之比为 1 : 0.48 : 1.33; 两个品种平均吸收 N 7.50 kg、P₂O₅ 3.47 kg、K₂O 9.45 kg, 养分积累量之比为 1 : 0.46 : 1.26。

2.3.2 氮磷钾在不同部位的分配特征 从图 4 可见, 移栽后 85~139 天子莲中氮的累积主要分配在叶片, 其次是果实, 其他部位较低; 移栽后 139 天后叶片、叶柄、根状茎、花蕾和花柄中氮的累积比

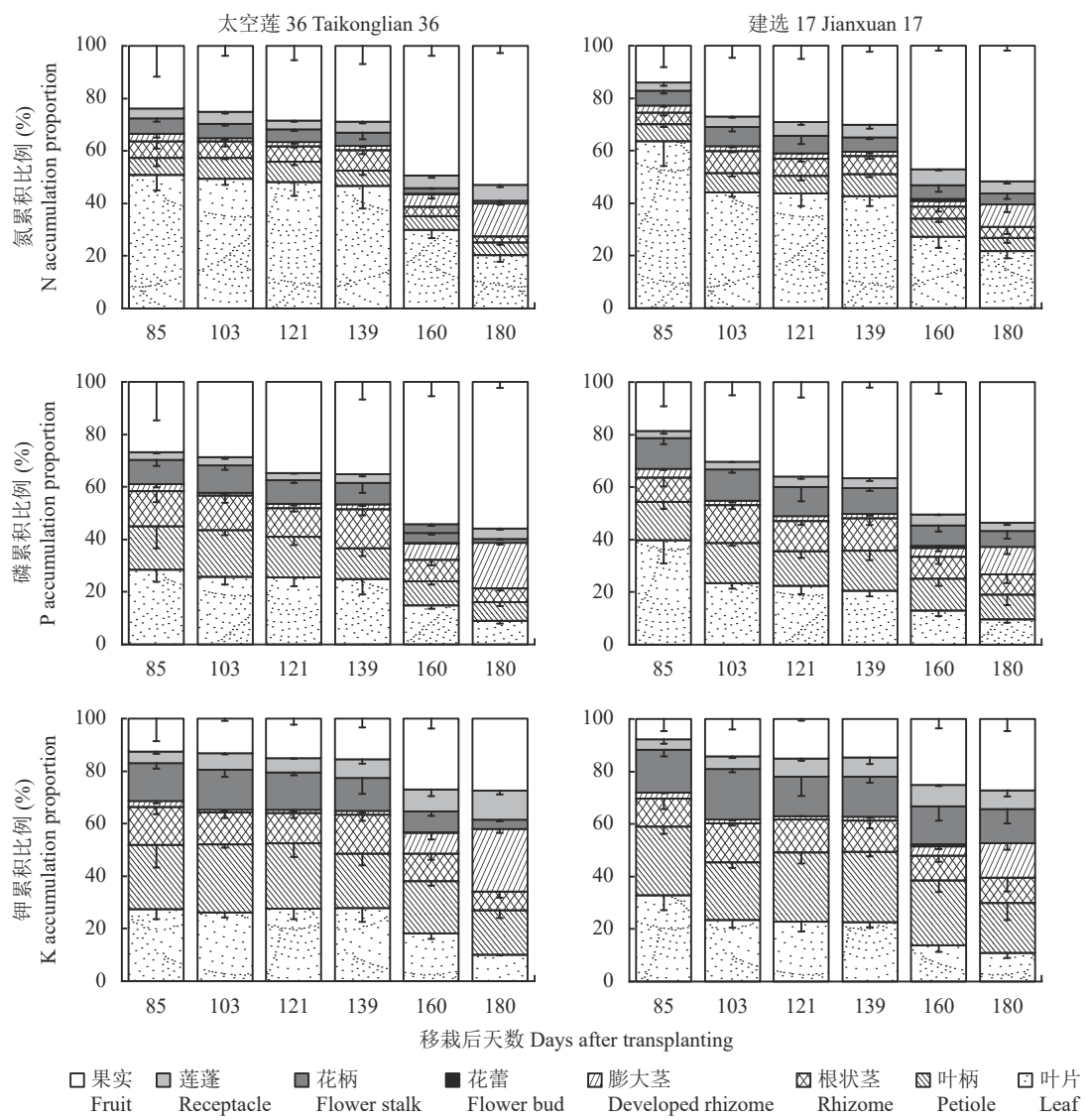


图 4 子莲不同部位中的养分累积比例

Fig. 4 Proportion of nutrient accumulation in various parts of seed lotus

例不同程度降低,果实和膨大茎氮的累积比例快速增加,莲蓬氮的累积比例变化较小;移栽后 180 天各部位氮累积比例为果实 51.6%~52.9%、叶片 20.3%~21.8%、膨大茎 8.7%~12.5%,其他部位(莲蓬、花柄、花蕾、根状茎、叶柄)均在 7% 以下。子莲中磷的累积,移栽后 85 天主要分配在叶片中(图 4),其次是果实,其他部位比例较低;移栽后 103 天果实磷累积比例已超过叶片,成为磷的主要储存器官;移栽后 139 天之后不同部位磷累积比例变化规律与氮相似,移栽后 180 天各部位磷累积比例为果实 54.1%~55.9%、膨大茎 10.5%~17.5%,其他部位(叶片、莲蓬、花柄、花蕾、根状茎、叶柄)均在 10% 以下。

子莲植株中钾的分配特点,与氮和磷有所不同,钾早期主要分配在叶片和叶柄中(图 4)。移栽后 85~139 天不同部位钾的累积比例,叶片和叶柄在 20.8%~32.9%,花柄、果实和根状茎在 7.8%~19.3%,莲蓬和花蕾均在 7% 以下;移栽 139 天之后不同部位钾累积比例变化规律与氮和磷相似;移栽后 180 天钾的累积比例,太空莲 36 为果实 27.5%、膨大茎 23.7%、叶柄 16.9%,其他器官均在 11% 以

下,建选 17 为果实 27.2%、叶柄 19.1%、膨大茎和花柄在 12.8%~13.2%,其他部位均在 11% 以下。

2.3.3 干物质和氮磷钾转运特征 根据子莲不同部位干物质累积、养分含量和养分累积量分配特征可知,移栽后 139~180 天是一个明显的植株体内干物质和养分转运期,将叶片、叶柄、根状茎、花蕾和花柄视作源器官,将莲蓬、果实和膨大茎视作汇器官。计算结果(表 5)表明,源的总转运率在 18.2%~53.9%,干物质、氮、磷和钾的转运率分别平均为 22.0%、49.8%、42.5% 和 37.0%,其中叶片转运率在 27.2%~58.2%,干物质、氮、磷和钾的转运率分别平均为 29.6%、50.5%、47.7% 和 54.3%。汇器官的增加,干物质、氮和磷主要分配到果实,其分配比例分别平均占汇器官增量的 51.4%、67.8% 和 65.0%;其次是膨大茎,其分配比例分别为汇器官增量的 38.4%、29.2% 和 33.5%;莲蓬的分配比例较低,平均分别为 10.3%、3.0% 和 1.5%。钾则主要分配到膨大茎(52.8%),其次是果实(40.5%),莲蓬的分配比例较低(6.7%)。建选 17 汇器官的增量显著低于太空莲 36,其在果实中的分配比例却显著高于太空莲 36。源对汇的贡献率在 38.8%~96.9%,其中干

表 5 子莲植株干物质和养分转运特征
Table 5 Dry matter and nutrient transfer characteristics in seed lotus plant

指标 Index	品种 Cultivar	源转运量 (g/plant) Source transfer amount		源转运率 (%) Source transfer rate		汇增加量 (g/plant) Sink accumulation increment	汇增加量分配比例 (%) Distribution of sink accumulation increment			源对汇贡献率 (%) Contribution of source to sink	
		总量 Total	叶片 Leaf	总量 Total	叶片 Leaf		莲蓬 Receptacle	果实 Fruit	膨大茎 Developed rhizome	总量 Total	叶片 Leaf
干物质 Dry matter	太空莲 36 Taikonglian 36	732.6	333.2	25.7	32.0	1794.1	12.1	44.2	43.7	40.8	18.6
	建选 17 Jianxuan 17	472.7	229.3	18.2	27.2	1216.7*	8.4	58.5*	33.1	38.8	18.8
N	太空莲 36 TaiKonglian 36	26.5	18.2	53.9	52.9	32.9	5.6	64.1	30.3	80.8	55.5
	建选 17 Jianxuan 17	20.7	14.2	45.7	48.0	21.4*	0.4	71.5*	28.1	96.9	66.5
P	太空莲 36 TaiKonglian 36	3.49	1.43	49.6	50.4	7.61	2.9	61.3	35.8	45.9	18.8
	建选 17 Jianxuan 17	2.62	1.15	35.3	44.9	4.87*	0.0	68.7*	31.3	53.9	23.7
K	太空莲 36 Taikonglian 36	23.2	11.2	43.3	58.2	33.9	11.4	32.8	55.8	68.4	33.1
	建选 17 Jianxuan 17	18.0	8.5	30.6	50.4	20.7*	2.0	48.1*	49.9	86.9	41.1

注: *指该指标两个品种之间差异达5%显著水平。
Note: * means significant difference between the two cultivars at 5% level.

物质、氮、磷和钾的贡献率分别平均为 39.8%、88.8%、49.9% 和 77.7%, 叶片中干物质、氮、磷和钾对源器官的相对贡献率分别为 47.0%、68.7%、42.5% 和 47.8%。由此可见, 叶片是最大的源器官, 139~180 天汇器官氮和钾的来源以体内转运为主, 磷的来源体内转运和直接吸收各约 50%, 与此阶段大量果实的发育需要较多的磷有关。

3 讨论

3.1 子莲干物质累积与氮磷钾养分吸收特征

子莲和藕莲(习惯上仍称为莲藕)在植物学分类上同属于睡莲科(Nymphaeaceae)莲属(*Nelumbo* Adans.)莲种(*N. nucifera* Gaertn.), 均为多年生、宿根性大型水生植物^[20], 为中国特色的栽培用水生蔬菜^[7, 12, 23]。莲藕全生育期开花极少, 主要进行营养生长^[20], 根状茎膨大之前干物质和养分主要集中在叶片和叶柄, 膨大茎生长及成熟过程中, 叶片、叶柄和根状茎中的干物质和养分逐渐向膨大茎转移, 成熟后膨大茎干物质和氮磷钾累积量, 分别占植株累积总量的 67%~81%、72%~85%、70%~89% 和 80%~88%^[24-25]。与莲藕不同, 子莲以收获果实(莲子)为主, 是陆续开花、陆续结果, 蕾、花、果和叶并存于同一植株, 花果期长达 3 个月以上^[20]。本研究表表明, 移栽后 85~139 天叶片、叶柄、根状茎、花蕾和花柄等器官(部位)干物质累积量不断增加至最高值, 然后迅速或缓慢降低, 莲蓬和果实干物质累积量持续增加, 膨大茎在移栽后 160 天已开始生长, 干物质累积量迅速增加; 叶片、叶柄、根状茎和花柄的氮磷钾含量动态相似, 即移栽后 85~139 天维持在较高水平, 此后迅速或逐渐下降, 花蕾、果实和膨大茎的氮磷钾含量相对稳定, 莲蓬氮磷的含量动态和叶片等部位相似, 钾与果实等部位相似; 移栽后 160~180 天地上部分干物质累积量仍有所增加, 氮和钾累积量已开始下降, 磷累积量持续增加, 地下部分干物质和氮磷钾累积量均快速增加。由此可见, 子莲收获期前段(花果期^[20])营养生长和生殖生长均很旺盛, 营养生长以叶片等器官形成光合产物为主, 各器官的养分浓度均需维持在较高水平, 这一特征与多次采收的茄果类和瓜类蔬菜^[26-29]十分相似; 在子莲收获期后段进入成藕期^[20], 果实发育和膨大茎生长同时进行, 此阶段与莲藕、马铃薯等块茎类作物^[24-25, 30]既有较多共同之处, 又有所不同。从本研究子莲氮磷钾养分吸收量及其比例来看, 与莲藕

比较, 子莲需要较多的氮和磷, 以及较少的钾^[23]。

子莲膨大茎既可作为次年“种藕”, 也可以收获“子莲藕”鲜销或生产藕粉, 是子莲种植的次要产品^[13]。膨大茎中的养分是次年子莲早期萌发出叶的养分来源。在子莲收获后荷叶尚绿时, 适当追肥可促进膨大茎成熟和养分积累, 提高次年春季萌发前花芽分化的质量, 降低子莲死花、死蕾和空壳率^[31]。由此可见, 子莲全生育期干物质累积与养分吸收特征与其他蔬菜作物明显不同, 目前又少见报道, 因此深入开展相关研究, 通过施肥措施协调子莲的营养生长与生殖生长, 同时提高果实和膨大茎产量和品质, 具有十分重要的意义。

3.2 子莲成藕期干物质和氮磷钾养分转运特征

成藕期是指出现终止叶到地上部分变黄枯萎为止的时段, 即子莲营养生长第二阶段^[20], 本研究子莲植株在移栽后 139~160 天进入成藕期。本研究表表明, 移栽后 139~180 天(即花果期末—子莲终收期)子莲干物质和氮磷钾的累积有“莲蓬+果实”和“膨大茎”两个汇, 其中莲蓬干物质和氮磷钾累积量增加了 25%~65%、果实增加了 86%~99%, 膨大茎干物质、氮、磷和钾累积量增量分别为同期果实增量的 77.8%、43.3%、52.1% 和 137%, 结合表 5 结果可知, 花果期末—子莲终收期子莲植株体内果实的发育仍然起主导作用, 其次是膨大茎生长。越来越多研究证实, 植物非叶绿色器官含有发育良好的叶绿体, 是植物光合作用的重要补充^[32-34], 例如油菜开花之后叶片迅速黄化脱落, 角果皮则成为主要的光合器官^[34-35], 由此可推测, 莲蓬和果实既是源、也是汇。根据这两个器官的形态、功能, 以及移栽后 139~180 天期间干物质增量和氮磷钾含量动态, 莲蓬更多地是作为源, 果实则更多地充当汇的角色。从源对汇的相对贡献率可知, 氮的转运叶片和非叶器官(包括叶柄)分别为 68.7% 和 31.3%, 磷的转运分别为 42.6% 和 57.4%, 钾的转运分别为 47.7% 和 52.3%, 因此在子莲生长发育进入成藕期之后, 非叶器官的养分转运及其对产量形成的贡献值得关注。本研究结果还表明, 果实采收结束时, 建选 17 膨大茎干物质累积量、汇器官干物质和氮磷钾累积总量, 均显著低于太空莲 36, 汇器官干物质和氮磷钾累积量增量在果实中的分配比例却显著高于太空莲 36, 可能与其基因型差异有关, 值得深入研究。

花果期末—子莲终收期, 子莲汇器官氮和钾的来源以体内转运为主, 与油菜角果成熟期籽粒中的

氮素主要来自于营养器官的转移、小部分来自于根系吸收的结论^[36]基本一致；磷的来源体内源器官转运和直接吸收各约占 50%，与此阶段大量果实的发育需要较多的磷有关。在子莲生产中，为了保障采收后期土壤中足够的磷素供应浓度，磷肥施用宜统筹兼顾、多次施用。根据研究区域的生态气候和土壤肥力特征，可在子莲移栽前增施有机类肥料，以不断提高土壤的保肥供肥能力；同时研发含镁硼子莲专用缓控释复合(混)肥，减少施肥次数。其具体施用技术，可作进一步研究。

4 结论

子莲干物质累积总量主要集中在子莲始收期—收获盛期，其中叶片、根状茎等部位干物质累积量在花果期末达最高值，莲蓬和果实干物质累积量持续增加，膨大茎在花果期末开始生长，干物质累积量迅速增加。叶片、根状茎等源器官氮磷钾含量在花果期结束前较高，花果期后下降，花蕾、果实和膨大茎氮磷钾含量相对稳定，莲蓬氮磷含量动态与叶片等部位相似，钾则与果实等部位相似。子莲氮和钾累积量主要集中在子莲始收期—收获盛期，磷主要在始收期—花果期末。花果期末—子莲收获结束，氮磷钾的累积有“莲蓬+果实”和“膨大茎”两个汇，并以果实发育为主，氮和钾的来源以体内转运为主，磷的来源体内转运和吸收各约 50%。每生产 100 kg 通芯莲，子莲植株对 N、P₂O₅ 和 K₂O 的最大累积量分别为 7.50、3.47 和 9.45 kg。

参考文献:

- [1] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915–924.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, *et al.* Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915–924.
- [2] 江立庚, 甘秀芹, 韦善清, 等. 水稻物质生产与氮、磷、钾、硅素累积特点及其相互关系[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(2): 226–230.
Jiang L G, Gan X Q, Wei S Q, *et al.* Accumulation pattern of dry matter, nitrogen, phosphorus, potassium and silicon in rice genotypes and their relationships[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(2): 226–230.
- [3] 李绍长, 胡昌浩, 龚江, 杨管供. 供磷水平对不同磷效率玉米氮、钾素吸收和分配的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(3): 237–240.
Li S C, Hu C H, Gong J, Yang G Y. Effects of phosphorus supply on nitrogen and potassium absorption and distribution of maize with different phosphorus efficiency[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2004, 10(3): 237–240.
- [4] 刘晓伟, 鲁剑巍, 李坤, 等. 冬油菜叶片的物质及养分积累与转移特性研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4): 956–963.
Liu X W, Lu J W, Li X K, *et al.* Study on characteristics of dry matter and nutrient accumulation and transportation in leaves of winter oilseed rape[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2011, 17(4): 956–963.
- [5] 黄绍文, 唐继伟, 李春花, 等. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1480–1493.
Huang S W, Tang J W, Li C H, *et al.* Reducing potential of chemical fertilizers and scientific fertilization countermeasure in vegetable production in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1480–1493.
- [6] 胡国智, 闫森, 熊韬, 吴婷. 适宜有机肥替代化肥氮比例提高甜瓜养分吸收、产量和品质[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(2): 260–268.
Hu G Z, Yan M, Xiong T, Wu T. Optimum chemical fertilizer N substitution with organic manure N improves nutrient uptake, yield, and quality of muskmelon in Xinjiang[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(2): 260–268.
- [7] 柯卫东, 黄新芳, 李建洪, 等. 我国水生蔬菜科研与生产发展概况[J]. *长江蔬菜*, 2015, (14): 33–37.
Ke W D, Huang X F, Li J H, *et al.* Development of aquatic vegetable research and production in China[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2015, (14): 33–37.
- [8] 刘义满, 柯卫东, 黄新芳. 第1–6届“全国水生蔬菜学术及产业化研讨会”论文回顾与分析[J]. *长江蔬菜*, 2013, (18): 1–5.
Liu Y M, Ke W D, Huang X F. Review and analysis on articles from proceedings of 1st to 6th national symposium on aquatic vegetable research and development[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2013, (18): 1–5.
- [9] 刘冬碧, 熊桂云, 范先鹏, 等. 几种水生蔬菜营养特征与施肥技术研究进展[J]. *长江蔬菜*, 2017, (18): 80–84.
Liu D B, Xiong G Y, Fan X P, *et al.* Advances on nutrient characteristics and fertilization techniques for aquatic vegetables[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2017, (18): 80–84.
- [10] 赵帮宏, 宗义湘, 吴曼, 等. 中国水生蔬菜产业发展研究报告(2017)[M]. 北京: 经济管理出版社, 2018.
Zhao B H, Zong Y X, Wu M, *et al.* Development and research report on aquatic vegetable industry in China (2017)[M]. Beijing: Economy and Management Publishing House, 2018.
- [11] 李峰, 周雄祥, 柯卫东, 等. 湖北省莲产业发展调研报告[J]. *湖北农业科学*, 2020, 59(23): 101–106, 109.
Li F, Zhou X X, Ke W D, *et al.* Research report on lotus industry development in Hubei Province[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2020, 59(23): 101–106, 109.
- [12] 齐欢欢, 祖明艳, 杨平仿. 莲子食用价值研究进展[J]. *植物科学学报*, 2020, 38(5): 716–722.
Qi H H, Zu M Y, Yang P F. Progress in studies on nutritional value of *Nelumbo nucifera* Gaertn. seeds[J]. *Plant Science Journal*, 2020,

- 38(5): 716–722.
- [13] 刘义满, 魏玉翔. 水生蔬菜答农民问(13): 常见子莲品种有哪些? 如何提高子莲种植效益?[J]. 长江蔬菜, 2018, (13): 52–54.
- Liu Y M, Wei Y X. Aquatic vegetables answer farmers' questions (13): What are the common seed lotus varieties? How to improve the benefit of seed lotus planting?[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2018, (13): 52–54.
- [14] 王思博, 陈俊红, 李冬冬, 龚晶. 由传统农业向有机农业发展过程中的阶段性生产特征比较研究: 基于广昌白莲产业发展的实证考察[J]. 生态经济, 2021, 37(9): 108–116.
- Wang S B, Chen J H, Li D D, Gong J. A comparative study on the production characteristics of agriculture at different stages in the development process from traditional agriculture to organic agriculture: An empirical study based on the development of Guangchang white lotus industry[J]. Ecological Economy, 2021, 37(9): 108–116.
- [15] 谢克强. 广昌白莲产业的发展及其对中国莲产业的贡献[J]. 长江蔬菜, 2010, (14): 109–112.
- Xie K Q. Development of white lotus industry in Guangchang and its contribution to China lotus industry[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2010, (14): 109–112.
- [16] 刘冬碧, 余延丰, 杨良波, 等. 江西省广昌县子莲生产和施肥中存在问题与技术对策[J]. 中国蔬菜, 2019, (12): 66–71.
- Liu D B, Yu Y F, Yang L B, et al. Problems and technical strategies for seed lotus production and fertilization in Guangchang County, Jiangxi Province[J]. China Vegetables, 2019, (12): 66–71.
- [17] 赵越, 杨良波, 裴佳晨, 等. 江西省广昌县莲田土壤属性和大量元素空间变异特征及评价[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(22): 47–50.
- Zhao Y, Yang L B, Pei J C, et al. Spatial variability and evaluation of soil properties and macro-elements in lotus field of Guangchang County, Jiangxi Province[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2021, 60(22): 47–50.
- [18] 裴佳晨, 杨良波, 刘冬碧, 等. 江西省广昌县莲田土壤中、微量元素含量及空间变异性评价[J]. 中国蔬菜, 2022, (3): 50–57.
- Pei J C, Yang L B, Liu D B, et al. Evaluation of soil content and spatial variability of medium and micro-elements in lotus field of Guangchang County, Jiangxi Province[J]. China Vegetables, 2022, (3): 50–57.
- [19] 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 Agriculture Press, 2000.
- [20] 中国科学院武汉植物研究所. 中国莲[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- Wuhan Botanical Institute, Chinese Academy of Sciences. Lotus in China[M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [21] 柯卫东, 李峰. 莲种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- Ke W D, Li F. Descriptors and data standard for lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [22] 刘晓伟, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 直播冬油菜干物质累积及氮磷钾养分的吸收利用[J]. 中国农业科学, 2011, 44(23): 4823–4832.
- Liu X W, Lu J W, Li X K, et al. Dry matter accumulation and N, P, K absorption and utilization in direct seeding winter oilseed (*Brassica napus* L.)[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(23): 4823–4832.
- [23] 朱红莲, 柯卫东. 优质莲藕高产高效栽培[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.
- Zhu H L, Ke W D. High yield, high quality and high efficiency cultivation for lotus[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2016.
- [24] 刘冬碧, 熊桂云, 范先鹏, 等. 莲藕干物质和氮磷钾养分的累积与分配研究[J]. 植物科学学报, 2011, 29(1): 124–129.
- Liu D B, Xiong G Y, Fan X P, et al. Studies on accumulation and distribution of dry matter, nitrogen, phosphorus and potassium in rhizome lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.)[J]. Plant Science Journal, 2011, 29(1): 124–129.
- [25] 尹静静, 吴小宾, 徐国鑫, 等. 莲藕干物质积累与氮磷钾吸收分配特征[J]. 北方园艺, 2020, (6): 1–8.
- Yin J J, Wu X B, Xu G X, et al. Accumulation and partitioning of dry matter, nitrogen, phosphorus and potassium in lotus[J]. Northern Horticulture, 2020, (6): 1–8.
- [26] 诸海涛, 李建勇, 朱恩, 等. 水肥一体化条件下设施黄瓜的氮磷钾吸收分配规律研究[J]. 上海农业学报, 2017, 33(1): 74–78.
- Zhu H T, Li J Y, Zhu E, et al. Study on the absorption and distribution of nitrogen, phosphorus and potassium of cucumber in protected cultivation of integral control of water and fertilization[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2017, 33(1): 74–78.
- [27] Ramírez-Pérez L J, Morales-Díaz A B, Benavides-Mendoza A, et al. Dynamic modeling of cucumber crop growth and uptake of N, P and K under greenhouse conditions[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 234: 250–260.
- [28] Ronga D, Parisi M, Pentangelo A, et al. Effects of nitrogen management on biomass production and dry matter distribution of processing tomato cropped in Southern Italy[J]. Agronomy, 2019, 9: 855.
- [29] 董洁. 不同施肥处理对大棚番茄养分吸收影响的研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2009.
- Dong J. Study on the effect of different fertilizer treatments on nutrient uptake of tomato in plastics greenhouse[D]. Yangling, Shaanxi: MS Thesis of Northwest A & F University, 2009.
- [30] 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 Fertilizers, 2014, 20(6): 1477–1487.
- [31] 刘义满, 魏玉翔. 水生蔬菜答农民问(14): 子莲为什么会出现死花死蕾和空壳莲籽?[J]. 长江蔬菜, 2018, (15): 46–53.
- Liu Y M, Wei Y X. Aquatic vegetables answer farmers' questions (14): Why the seed lotus appear dead flower, dead bud and empty shell of lotus seed? [J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2018, (15): 46–53.
- [32] Sanchez-Bragado R, Molero G, Reynolds M P, et al. Relative contribution of shoot and ear photosynthesis to grain filling in wheat under good agronomical conditions assessed by differential organ

- $\delta^{13}\text{C}$ [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014, 65(18): 5401–5413.
- [33] Brazel A J, O'Maileidigh D S. Photosynthetic activity of reproductive organs[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2019, 70(6): 1737–1754.
- [34] 李静, 周杨果, 陆志峰, 等. 氮钾配施对冬油菜角果皮光合作用及光合器官氮分配的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(5): 869–879.
- Li J, Zhou Y G, Lu Z F, *et al.* The effects of combined nitrogen and potassium application on photosynthesis and nitrogen allocation in photosynthetic organs of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) silique wall[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(5): 869–879.
- [35] Leng S H, Zuo Q S, Sui D. Study on nitrogen mobilization of senescence leaves under different nitrogen rate in winter rapeseed (*B. napus* L.)[A]. Proceedings of the 12th international rapeseed congress[C]. Wuhan, China, 2007: 223–230.
- [36] Rossato L, Lainé P, Ourry A. Nitrogen storage and remobilization in *Brassica napus* L. during the growth cycle: nitrogen fluxes within the plant and changes in soluble protein patterns[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2001, 52(361): 1655–1663.