

不同施氮时期对红壤旱地花生生物量和氮素累积的影响

刘 佳^{1,2}, 陈静蕊¹, 谢 杰¹, 秦文婧¹, 刘 晖³, 王惠明³, 项兴佳², 张 杰⁴, 徐昌旭^{1*}, 杨成春^{1*}
(1. 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所, 农业部长江中下游作物生理生态与耕作重点实验室, 国家红壤改良工程技术研究中心, 江西 南昌, 330200; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京, 210008;
3. 江西省农业环境监测站, 江西 南昌, 330046; 4. 南昌工程学院, 江西 南昌, 330099)

摘要:以花生品种粤油 256 为供试材料, 采用田间随机区组试验, 设置 6 个处理: 不施氮肥 (CK)、氮肥全部基施 ($N_{10:0:0}$, 当地习惯施氮方式)、氮肥 70% 基施 + 30% 花针期施用 ($N_{7:3:0}$)、氮肥 50% 基施 + 50% 花针期施用 ($N_{5:5:0}$)、氮肥 50% 基施 + 30% 花针期施用 + 20% 结荚期施用 ($N_{5:3:2}$)、氮肥 30% 基施 + 50% 花针期施用 + 20% 结荚期施用 ($N_{3:5:2}$), 研究不同施氮时期对南方红壤旱地花生生物量累积、氮素累积、氮肥利用率和产量的影响。结果表明: 所有处理的花生生生物量累积、氮素累积均可用 Logistic 方程拟合, 施氮时期显著影响花生生物量及氮素的累积特征, 氮肥分次施用并适当后移可显著提高生物量及氮素的最大累积速率 (v_{max})、推迟吸收“峰值”的出现时间 (t_{max}), 延长生物量及氮素快速累积的持续时间 (Δt), 从而有利于提高花生产量及氮肥利用率, 但氮肥后移比例过大 ($N_{3:5:2}$) 也不利于肥效的充分发挥。本试验条件下, 以氮肥 50% 基施 + 30% 花针期追施 + 20% 结荚期追施 ($N_{5:3:2}$) 的效果最好, 其产量达到 $4\,918.5\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较 CK 增产 20.0%, 较当地传统的一次性施肥也可增产 9.8%。合理调控施氮时期是提高我国南方红壤旱地花生产量和氮肥利用率的有效措施, 本研究可为该区域花生的科学合理施肥、高产高效栽培提供理论依据。

关键词:花生; 施氮时期; 生物量; 累积; Logistic
中图分类号:S565.2; S143.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-9084(2017)04-0515-09

Effects of nitrogen application time on biomass and nitrogen accumulation of peanut in upland red soil

LIU Jia^{1,2}, CHEN Jing-rui¹, XIE Jie¹, QIN Wen-jing¹, LIU Hui³, WANG Hui-ming³,
XIANG Xing-jia², ZAHNG Jie⁴, XU Chang-xu^{1*}, YANG Cheng-chun^{1*}

(1. Soil and Fertilizer & Resources and Environment Institute, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences; Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System for the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River; National Engineering & Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang 330200, China;
2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;
3. Jiangxi Province Agriculture Environmental Monitoring Administration, Nanchang 330046, China;
4. Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

Abstract: To explore the effects of nitrogen (N) application time on plant biomass and N accumulation, N utilization efficiency, and peanut yield in upland red soil, a field randomized block experiment, with Yueyou 256 as the test material, was carried out in this study. There were 6 treatments, which were no N fertilizer (CK), 100% N basal application ($N_{10:0:0}$, local traditional N application method), 70% N basal application and 30% N topdressing at flowering stage ($N_{7:3:0}$), 50% N basal application and 50% N topdressing at flowering stage ($N_{5:5:0}$), 50% N basal application and 30% N topdressing at flowering stage and 20% N topdressing at pod setting stage

收稿日期: 2017-03-18
基金项目: 国家公益性行业 (农业) 科研专项 (201503123); 国家科技支撑计划项目 (2012BAD05B04); 江西省科研院所基础设施配套项目 (20133BBA13025); 农业面源污染国土监测点项目 (09162110402229)
作者简介: 刘 佳 (1984-), 男, 安徽六安人, 助理研究员, 博士研究生, 主要从事红壤旱地作物高产栽培及红壤改良研究, E-mail: liujia422@126.com
* 通讯作者: 徐昌旭 (1965-), 男, 江西南昌人, 研究员, 主要从事绿肥利用及红壤改良研究, E-mail: changxux@sina.com
杨成春 (1966-), 男, 江西南昌人, 农艺师, 主要从事红壤旱地作物高产栽培研究, E-mail: yangchengchuntf@sina.com

($N_{5:3:2}$), and 30% N basal application and 50% N topdressing at flowering stage and 20% N topdressing at pod setting stage ($N_{3:5:2}$). The results showed that plant biomass and N accumulation among all treatments could be described by logistic equation, and their accumulation characteristics were significantly affected by N application time. Split application and appropriate delay could significantly accelerate the maximal speed of biomass and N accumulation ($v_{\max}$); the maximal speed ($t_{\max}$) would be postponed and the duration of rapid accumulation (Δt) would be prolonged. Therefore, the N utilization efficiency and peanut yield significantly improved. But it was negative for N efficiency when a large proportion of N application was delayed ($N_{3:5:2}$). In this study, the peanut yield reached maximum under $N_{5:3:2}$ treatment ($4\,918.5\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), which increased 20.0% and 9.8% compared to CK and local traditional N application method ($N_{10:0:0}$), respectively. In conclusion, reasonable N application time was the effective way to increase peanut yield and N utilization efficiency. This study could provide theoretical support for scientific and rational fertilization and high yield and high efficiency cultivation of peanut in upland red soil in South China.

Key words:peanut; N application time; biomass; accumulation; logistic

红壤是我国南方热带、亚热带地区最主要的土壤类型,虽然红壤区耕地面积仅占全国耕地总面积的36%,但却贡献了全国1/2~2/3的粮食、油料、蚕丝、茶叶和肉类等农副产品,对维持我国的粮食安全具有重要意义^[1]。花生(*Arachis hypogaea* L.)是我国南方红壤旱地重要的经济作物和油料作物,种植面积很大,但单产仅相当于华北产区的60%^[2],这既有南、北方气候特征、土壤类型、地力条件的差异,也与当前南方红壤旱地花生生产中管理粗放、施肥技术相对落后有关,增加南方花生生产量、提高农民生产积极性对保障我国油料安全至关重要。

花生作为豆科植物,对氮素需求较高,红壤旱地氮素缺乏是限制花生高产的主要障碍因子^[3],合理施氮是提高花生生产量和品质的有效措施^[4-6]。作物在不同的生育阶段,对养分需求存在明显差异,通常苗期需氮较少,营养生长和生殖生长旺盛期需氮较多,成熟期植株老化,氮素由营养器官向生殖器官转移,因而对氮素的需求减弱^[7]。根据作物不同生育期的需肥规律调控氮肥施用,使养分供应与作物需求尽量吻合,既有利于作物增产、肥料增效,还能根据作物对施肥的响应进一步调整施肥策略,前人在这方面进行了较多研究^[8-13]。近年来南方红壤旱地花生生产中氮肥不合理施用的现象比较突出,尤其是氮肥一次性基施非常普遍^[14],这不仅导致花生生长前期氮肥过量、后期供氮不足,还造成肥料大量流失,对生态环境构成潜在危害^[15-17]。在当前力争化肥农药零增长的大背景下,一定数量的氮肥,如何做到经济施用、充分发挥肥效,是南方红壤旱地花生高产栽培中亟需解决的问题,但目前关于此方面的研究鲜有报道。因此本研究拟布置田间试验,在总施氮量不变的情况下调节花生各生育期的氮肥施用

比例,运用 Logistic 模型进行回归拟合,系统研究花生生物量累积、氮素累积、氮肥利用率和产量的变化状况,旨在为南方红壤区花生的科学合理施肥、高产高效栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2013年在江西省农业科学院赣东北红壤综合试验区进行,该试验区位于江西省抚州市东乡县境内(116°35′11″E、28°10′59″N),属亚热带湿润气候区,2013年花生全生育期内(4~8月)平均温度为25.8℃,总降水量为1 189.6mm。试验地土壤类型为第四纪红粘土母质发育而来的红壤,表层土壤(0~20cm)的基础养分特性为:pH 4.49,有机质13.82g·kg⁻¹,全氮1.11g·kg⁻¹,全磷0.46g·kg⁻¹,全钾11.75g·kg⁻¹,碱解氮90.0mg·kg⁻¹,速效磷18.8mg·kg⁻¹,速效钾130.4mg·kg⁻¹。试验地前茬作物为甘薯。

1.2 试验设计

试验设6个处理,分别为不施氮肥(CK)、氮肥全部基施($N_{10:0:0}$,当地习惯施氮方式)、氮肥70%基施+30%花针期施用($N_{7:3:0}$)、氮肥50%基施+50%花针期施用($N_{5:5:0}$)、氮肥50%基施+30%花针期施用+20%结荚期施用($N_{5:3:2}$)、氮肥30%基施+50%花针期施用+20%结荚期施用($N_{3:5:2}$)。其中施氮处理的氮肥用量为N 135kg·hm⁻²,所有处理的磷、钾肥用量均为P₂O₅ 81kg·hm⁻²、K₂O 135kg·hm⁻²,磷肥和钾肥全部基施。肥料基施方式为株间穴施,追施方式为行间撒施。氮、磷、钾肥料品种分别为尿素(含N 46%)、钙镁磷肥(含P₂O₅ 12%)和硫酸钾(含K₂O 60%)。试验设3次重复,

随机区组排列,小区面积为 $27\text{m}^2 (6\text{m} \times 4.5\text{m})$ 。供试花生品种为粤油 256,于 4 月 14 日播种,条播,行距 40cm,穴距 20cm,每穴播种 2 粒,种植密度约为 $12.5 \text{万穴} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 花生各器官生物量、成熟期考种与测产 在花生苗期(5 月 14 日)、花针期(6 月 8 日)、结荚期(7 月 12 日)和成熟期(8 月 19 日)每小区取长势相对一致具有代表性的花生样品 10 株,带回室内将其按茎(包含根)、叶、果等器官分开,于 105°C 杀青 30min,而后 80°C 烘干至恒重,测定花生不同时期各器官的生物量。成熟期另取 10 株花生样品考察农艺性状,取样后全小区实收计产。

1.3.2 花生各器官含氮量 各生育期所取花生样品在考察完不同器官的生物量后,各器官单独粉碎过 2mm 筛,样品经 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ 消煮后,用半微量凯式定氮法测定各器官的含氮量^[18]。

1.4 数据处理与分析

1.4.1 花生氮肥利用率 花生氮肥利用率的相关计算公式如下^[19]:

各器官吸氮量 = 各器官生物量 $\times$ 各器官含氮量

氮肥收获指数(N harvest index, NHI, %) = 荚果吸氮量 $\div$ 植株总吸氮量 $\times 100\%$

氮肥农学利用率(agronomic efficiency of applied N, AEN, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{N}$) = (施氮区产量 - 不施氮区产量) $\div$ 氮肥用量

氮肥偏生产力(partial factor productivity of applied N, PFPN, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{N}$) = 施氮区产量 $\div$ 氮肥用量

氮肥吸收利用率(N recovery efficiency, REN, %) = (施氮区植株总吸氮量 - 不施氮区植株总吸氮量) $\div$ 氮肥用量 $\times 100\%$

1.4.2 花生生物量和氮素累积模型分析 采用生态学研究经典的 Logistic 模型模拟花生整个生育期内的生物量和氮素累积过程,以花生出苗后的天数 t 为自变量,方程的表达式为

$$Y = \frac{k}{1 + ae^{-bt}} \quad (1)$$

其中: Y 为生物量或氮素累积量, k 为花生生物量或氮素累积量的上限, a 和 b 为常数, k 、 a 、 b 均通过 SPSS 16.0 软件拟合求得。将式(1)方程对时间 t 求一阶导数,可以得到 Logistic 方程的速率函数,即

$$v(t) = \frac{dy}{dt} = \frac{kabe^{-bt}}{(1 + ae^{-bt})^2} \quad (2)$$

此方程可用来描述花生生物量或氮素累积的速

率变化,其函数图形通常为随时间 t 推进速率先升高后降低的“单峰曲线”。对式(2)方程求一阶导数,并令其等于 0,解之可得 $t_{\max}$ (高峰期),其意义为花生生物量或氮素累积最大速率 $v_{\max}$ 出现的时间;进一步对式(2)方程求二阶导数,并令其等于 0,解之可得 t_1 (始盛期)和 t_2 (盛末期),分别代表花生生物量或氮素快速累积的开始时间和结束时间,其差值 $\Delta t (\Delta t = t_2 - t_1)$ 表示花生生物量或氮素快速累积的持续时间。各解得公式如下^[20]:

$$t_{\max} = \frac{\ln a}{b}; v_{\max} = \frac{kb}{4};$$

$$t_1 = \frac{\ln a - 1.317}{b}; t_2 = \frac{\ln a + 1.317}{b}$$

所有试验数据用 Excel 2003 进行处理,各项指标用 SPSS 16.0 进行单因素方差分析(one-way ANOVA)、Duncan 多重比较以及 Pearson 相关性分析,Origin 8.5 作图。

2 结果与分析

2.1 花生生物量累积特征

表 1 是施氮时期对花生生物量累积的影响。可以看出,与 CK 相比,施用氮肥在各生育期均显著提高了花生生物量,但各处理的提高效果存在明显差异。在苗期、花针期和结荚期各施氮处理生物量的大小顺序均为 $N_{10:0:0} > N_{7:3:0} > N_{5:5:0} \approx N_{5:3:2} > N_{3:5:2}$,而在成熟期则以 $N_{5:3:2}$ 处理的生物量最大, $N_{7:3:0}$ 、 $N_{5:5:0}$ 和 $N_{3:5:2}$ 处理的生物量相近,氮肥一次性基施的 $N_{10:0:0}$ 处理的生物量最小。从花生各生育阶段生物量的净累积率来看,其大小顺序为结荚期 $>$ 成熟期 $>$ 花针期 $>$ 苗期,并且各生育阶段生物量的净累积率也受施氮时期的影响。与 CK 相比,施氮处理在苗期和花针期的生物量净累积率均有所提升(除 $N_{3:5:2}$ 处理的苗期),这主要是因为基施氮肥增加了土壤的氮素营养,促进了花生的生长发育,各施氮处理的增幅以 $N_{10:0:0}$ 最为明显,其他处理的增幅则随氮肥施用次数的增多、施用比例的后移而逐渐降低。但结荚期则以 CK 处理的生物量净累积率最高,达到了 66.38%,其原因是在养分供应不足的情况下作物会加快完成生育周期、趋于早熟。成熟期各施氮处理中以 $N_{10:0:0}$ 的生物量净累积率最小,甚至低于 CK,这是因为氮肥全部基施造成生育前期生长旺盛而后期脱氮严重,其余施氮处理的生物量净累积率则随着氮肥施用次数的增多、施用比例的后移而逐渐提高。

表 1 不同施氮时期对花生生物量累积的影响
Table 1 Effects of N application time on biomass accumulation of peanut

处理 Treatment	各生育阶段总累积量/(g·plant ⁻¹) Total accumulation amount in different growth stages				各生育阶段净累积率 Net accumulation rate in different growth stages/%			
	苗期 Seedling	花针期 Flowering	结荚期 Pod setting	成熟期 Mature	苗期 Seedling	花针期 Flowering	结荚期 Pod setting	成熟期 Mature
CK	0.83 d	7.84 c	49.82 c	63.25 c	1.31	11.08	66.38	21.23
N _{10:0:0}	1.30 a	14.59 a	64.64 a	78.25 b	1.67	16.98	63.95	17.40
N _{7:3:0}	1.25 ab	13.40 ab	62.61 ab	86.36 ab	1.45	14.07	56.98	27.50
N _{5:5:0}	1.21 b	12.72 ab	60.70 b	86.64 ab	1.39	13.29	55.38	29.94
N _{5:3:2}	1.21 b	12.72 ab	59.00 b	92.12 a	1.31	12.50	50.24	35.95
N _{3:5:2}	1.04 c	11.33 b	57.95 b	86.52 ab	1.20	11.90	53.88	33.02

注:不同字母表示 5% 水平上差异显著。下同
Note: Different letters represent significant difference at 5% level. Same as below

以花生出苗后的天数 t 为自变量,以花生的生物量 Y 为因变量,对其进行 Logistic 方程拟合(表 2)。可以看出,不同施氮时期下花生的生物量累积与出苗后天数间的关系均符合 Logistic 方程,方程的拟合度良好(R^2 均 >0.999),方程经 F 检验均达到极显著水平(P 均 <0.01)。 t_1 和 t_2 作为生物量累积速率的两个“突变点”,与 $t_{\max}$ 一起将花生的生物量累积过程划分为以下四个阶段,即起步阶段($0 \sim t_1$)、成长阶段($t_1 \sim t_{\max}$)、成熟阶段($t_{\max} \sim t_2$)和饱和阶段($t_2 \sim \infty$),花生的生物量累积主要发生在成长阶段和成熟阶段,即 $t_1 \sim t_2$ 之间,此时为花生生物量累积速率的高峰期。从表 2 可以看出,CK 和 N_{5:5:0} 处理进入生物量快速累积的时间(t_1)相近,大约在第 61.6~61.8d;减少氮肥施用次数(N_{10:0:0})或将氮肥施用比例前移(N_{7:3:0})可使 t_1 提前,而增加氮肥施用次数、将氮肥施用比例后移(N_{5:3:2} 和 N_{3:5:2})有推迟 t_1 的趋势。整体来看,不同施氮时期下花生进入生物量快速累积的时间(t_1)相差不大,在 57.0~63.6d 之间,波动幅度为 6.6d;然而各处理结束生物量快速

累积的时间(t_2)却相差较大,在 86.7~101.0d 之间,波动幅度为 14.3d,其中仅 N_{10:0:0} 处理的 t_2 早于 CK,其余施氮处理相对于 CK 均有不同程度的推迟。从花生生物量快速累积的持续时间 Δt 来看,CK 最短仅为 27.6d,各施氮处理均能延长 Δt ,以 N_{5:3:2} 处理的 Δt 最长,达到了 37.4d。从花生生物量累积速率的最大值 $v_{\max}$ 则可看出,氮肥一次性基施(N_{10:0:0})的 $v_{\max}$ 最高,达到 $1.75\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{plant}^{-1}$,其出现时间也最早(第 71.8d);与 CK 相比其余施氮处理也均能增加 $v_{\max}$ 并使之出现时间有所推迟。然而,虽然所有处理中以 N_{10:0:0} 处理的 $v_{\max}$ 最高,但其出现时间过早,导致生物量快速累积的持续时间 Δt 较短,因此其 v_{mean} 仅为 $0.62\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{plant}^{-1}$;而将氮肥分次施用且施用比例适当后移的 N_{5:3:2} 处理的 $v_{\max}$ 较高、出现时间较晚、 Δt 维持时间最长,因此 v_{mean} 值最高,达到了 $0.73\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{plant}^{-1}$,这也是该处理具有最大理论生物量($k=96.057$)的原因。

表 2 花生生物量累积的 Logistic 方程回归分析
Table 2 Logistic equation analysis for biomass accumulation of peanut

处理 Treatment	回归方程 Regression equation	t_1 /d	t_2 /d	Δt /d	$v_{\max}$ /(g·d ⁻¹ ·plant ⁻¹)	$t_{\max}$ /d	v_{mean} /(g·d ⁻¹ ·plant ⁻¹)
CK	$y = 63.719 / (1 + 1348.309e^{-0.095t})$	61.8	89.4	27.6	1.52	75.6	0.50
N _{10:0:0}	$y = 78.791 / (1 + 590.018e^{-0.089t})$	57.0	86.7	29.7	1.75	71.8	0.62
N _{7:3:0}	$y = 88.132 / (1 + 415.344e^{-0.078t})$	60.5	94.3	33.8	1.72	77.4	0.68
N _{5:5:0}	$y = 88.815 / (1 + 407.544e^{-0.076t})$	61.6	96.1	34.6	1.69	78.9	0.68
N _{5:3:2}	$y = 96.057 / (1 + 327.652e^{-0.070t})$	63.6	101.0	37.4	1.69	82.3	0.73
N _{3:5:2}	$y = 89.086 / (1 + 457.838e^{-0.076t})$	63.4	98.1	34.7	1.69	80.8	0.68

注: t_1 :生物量快速累积的开始时间; t_2 :生物量快速累积的结束时间; Δt :生物量快速累积的持续时间; $v_{\max}$:生物量最大累积速率; $t_{\max}$:生物量最大累积速率的出现时间; v_{mean} :生物量平均累积速率
Note: t_1 :Starting time of biomass rapid accumulation; t_2 :End time of biomass rapid accumulation; Δt :Duration of biomass rapid accumulation; $v_{\max}$:Maximal speed of biomass accumulation; $t_{\max}$:Time reached maximal speed of biomass accumulation; v_{mean} :Average speed of biomass accumulation

进一步对花生生物量累积的 Logistic 方程求导,可得花生生物量累积的速率方程,代入拟合参数 k 、 a 、 b 的值及对应的取样时间 t ,可以得到花生生物量累积速率曲线(图 1)。可以看出,不同施氮时期下花生生物量累积速率的动态变化均呈单峰曲线。苗

期各处理的生物量累积速率都很低,差异较小;花针期 N_{10:0:0} 处理的生物量累积速率明显高于其他处理;结荚期 N_{10:0:0} 处理的生物量累积速率最先达到峰值,之后迅速下降,而其余施氮处理的峰值则出现较晚,达到峰值后的下降趋势也相对缓慢;成熟期

$N_{10:0:0}$ 处理的生物量累积速率与 CK 相似,接近于 0,而其他施氮处理则仍然具有一定的生物量累积速率。整体来看,所有处理中 CK 的曲线较为“平缓”,氮肥一次性基施($N_{10:0:0}$)使得曲线“陡峭”、峰值提前,而氮肥分次施用、施用比例后移则使得峰值“推迟”。

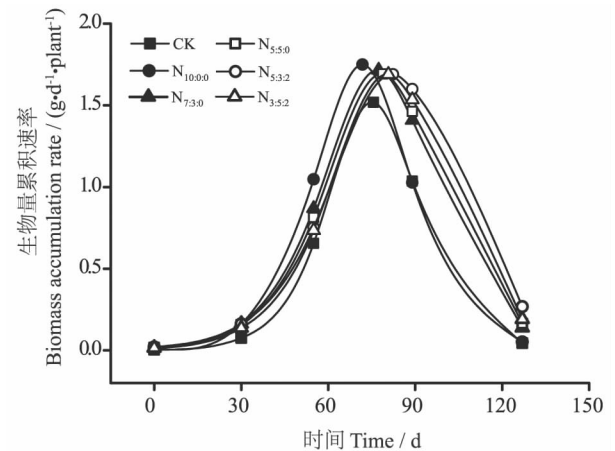


图1 花生生物量累积速率的动态变化
Fig.1 Dynamic speeds of biomass accumulation of peanut

2.2 花生氮素累积特征

表3 是不同施氮时期对花生氮素累积的影响,

表3 不同施氮时期对花生氮素累积的影响
Table 3 Effects of N application time on N accumulation of peanut

处理 Treatment	各生育阶段总累积量/(mg·plant ⁻¹) Total accumulation amount in different growth stages				各生育阶段净累积率/% Net accumulation rate in different growth stages			
	苗期 Seedling	花针期 Flowering	结荚期 Pod setting	成熟期 Mature	苗期 Seedling	花针期 Flowering	结荚期 Pod setting	成熟期 Mature
CK	16.6 d	157.9 d	826.1 c	1 023.7 d	1.6	13.8	65.3	19.3
$N_{10:0:0}$	52.7 a	431.4 a	1 327.0 b	1 493.2 c	3.5	25.4	60.0	11.1
$N_{7:3:0}$	47.2 ab	430.1 a	1 525.6 a	1 850.0 b	2.6	20.7	59.2	17.5
$N_{5:5:0}$	40.5 b	344.8 b	1 487.2 ab	1 917.1 b	2.1	15.9	59.6	22.4
$N_{5:3:2}$	40.5 b	344.8 b	1 419.3 ab	2 383.1 a	1.7	12.8	45.1	40.4
$N_{3:5:2}$	34.7 c	237.1 c	1 284.5 b	1 991.3 b	1.7	10.2	52.6	35.5

同样对不同施氮时期下花生的氮素累积进行 Logistic 拟合,方程的拟合度良好(R^2 均 >0.999),方程经 F 检验均达到极显著水平(P 均 <0.01) (表4)。可以看出,各处理进入氮素快速累积的时间(t_1)在 50.5 ~ 64.8 d 之间,波动幅度为 14.3d;结束氮素快速累积的时间(t_2)在 80.4 ~ 106.2d 之间,波动幅度为 25.8d,这使得各处理花生氮素快速累积的持续时间 Δt 差异较大,其波动范围为 28.8 ~ 41.7d。与 CK 相比,减少氮肥施用次数($N_{10:0:0}$)或将氮肥施用比例前移($N_{7:3:0}$)可使 t_1 、 t_2 明显提前,而增加氮肥施用次数、将氮肥施用比例后移($N_{5:3:2}$ 和 $N_{3:5:2}$)有推迟 t_1 、 t_2 的趋势,但总体上施用氮肥均延长了花生氮素快速累积的持续时间 Δt 。与花生生物量最大累积速率 v_{max} 相同, $N_{10:0:0}$ 处理的氮素累积最大速率 v_{max} 出现最早(第 65.4d),不同的是其数

其规律与花生生物量累积特征大体相似。施用氮肥在各生育期均能显著提高花生氮素累积量,在苗期和花针期提高幅度分别达到 109.0% ~ 217.5% 和 50.25% ~ 173.2%,均以 $N_{10:0:0}$ 处理的提高幅度最大;在结荚期的提高幅度为 55.5% ~ 84.7%,此时增幅的大小顺序为 $N_{7:3:0} > N_{5:5:0} > N_{5:3:2} > N_{10:0:0} > N_{3:5:2}$;而成熟期提高幅度为 45.9% ~ 132.8%,此时增幅的大小顺序为 $N_{5:3:2} > N_{3:5:2} > N_{5:5:0} > N_{7:3:0} > N_{10:0:0}$,可以看出氮肥分次施用、施用比例后移可以明显提高花生生育后期的氮素累积量。从各生育阶段氮素的净累积率来看更加明显,氮肥一次性基施($N_{10:0:0}$)在苗期、花针期和结荚期的氮素净累积率均最高,但在成熟期却明显供氮不足,此阶段氮素净累积率仅为 11.1%;氮肥二次施用($N_{7:3:0}$ 和 $N_{5:5:0}$)在各生育阶段的氮素净累积率均居中;氮肥三次施用($N_{5:3:2}$ 和 $N_{3:5:2}$)在苗期、花针期和结荚期的氮素净累积率均最低,但在成熟期的氮素净累积率却分别达到 40.4% 和 35.5%,可见氮肥的施用时期可以明显调节花生各生育阶段的氮素吸收特征。

值却仅高于 CK,其原因是虽然 $N_{10:0:0}$ 处理的氮肥一次性基施,但花生生长前期植株弱小、吸氮能力有限,而分次施氮、氮肥适当后移的 $N_{5:3:2}$ 处理,其氮素累积最大速率 v_{max} 出现较晚(第 85.4d),可达 $40.31 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{plant}^{-1}$,相对于 CK 提高了 71.0%。所有施氮处理中也以 $N_{5:3:2}$ 处理的氮素累积平均速率 v_{mean} 最高,而后依次是 $N_{3:5:2}$ 、 $N_{5:5:0}$ 、 $N_{7:3:0}$ 和 $N_{10:0:0}$ 。

图2 是对花生氮素累积 Logistic 方程求导并代入相关参数后所得到的氮素累积速率曲线,与生物量累积速率曲线(图1)相比,各处理间的差异更加明显。所有处理中 CK 的氮素累积峰值最低,施用氮肥可以明显提高峰值,并且氮肥分次施用、施用比例后移也会使峰值“推迟”、降幅变缓,成熟期 $N_{5:3:2}$ 和 $N_{3:5:2}$ 处理的氮素累积速率显著高于其他处理。将 Logistic 方程求导得到的花生各生育期氮素累积

速率与生物量累积速率进行相关分析(图3),可以看出二者呈极显著($P<0.001$)的正相关关系,且相关性极强($r=0.950$),因此合理调控氮肥施用、保障

氮素供应对花生生物量的构建具有重要意义,进而可决定花生产量。

表 4 花生氮素累积的 Logistic 方程回归分析
Table 4 Logistic equation analysis for N accumulation of peanut

处理 Treatment	回归方程 Regression equation	t_1 /d	t_2 /d	Δt /d	$v_{\max}$ / (mg · d ⁻¹ · plant ⁻¹)	$t_{\max}$ /d	v_{mean} / (mg · d ⁻¹ · plant ⁻¹)
CK	$y = 1\,031.476 / (1 + 846.470e^{-0.091t})$	59.4	88.2	28.8	23.57	73.8	8.06
N _{10:0:0}	$y = 1\,497.118 / (1 + 318.472e^{-0.088t})$	50.5	80.4	29.9	32.98	65.4	11.76
N _{7:3:0}	$y = 1\,866.030 / (1 + 291.895e^{-0.081t})$	53.9	86.5	32.6	37.70	70.2	14.57
N _{5:5:0}	$y = 1\,943.699 / (1 + 394.050e^{-0.080t})$	57.9	90.6	32.7	39.11	74.3	15.10
N _{5:3:2}	$y = 2\,553.770 / (1 + 219.082e^{-0.063t})$	64.5	106.2	41.7	40.31	85.4	18.76
N _{3:5:2}	$y = 2\,060.342 / (1 + 483.426e^{-0.075t})$	64.8	99.8	35.1	38.69	82.3	15.68

注: t_1 :氮素快速累积的开始时间; t_2 :氮素快速累积的结束时间; Δt :氮素快速累积的持续时间; $v_{\max}$:氮素最大累积速率; $t_{\max}$:氮素最大累积速率的出现时间; v_{mean} :氮素平均累积速率
Note: t_1 :Starting time of N rapid accumulation; t_2 :End time of N rapid accumulation; Δt :Duration of N rapid accumulation; $v_{\max}$:Maximal speed of N accumulation; $t_{\max}$:Time reached maximal speed of N accumulation; v_{mean} :Average speed of N accumulation

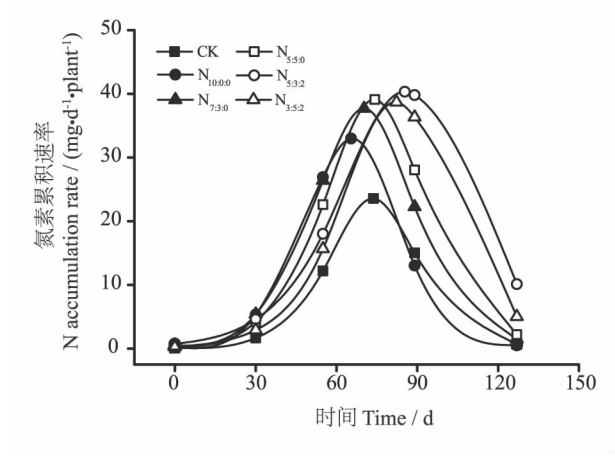


图 2 花生氮素累积速率的动态变化
Fig.2 Dynamic speeds of N accumulation of peanut

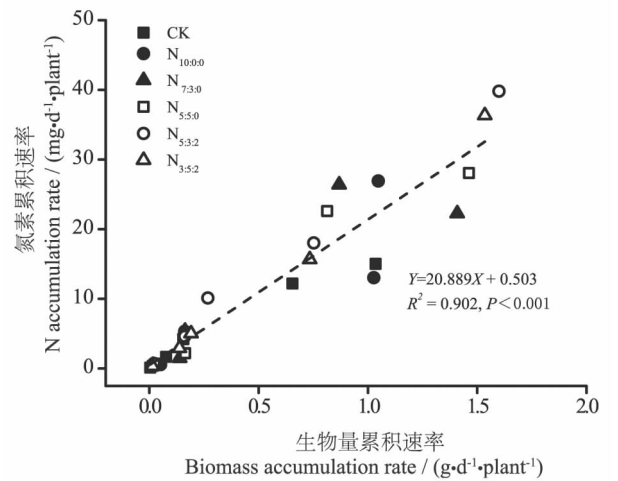


图 3 花生氮素累积速率与生物量累积速率的相关性
Fig.3 Relationship between N accumulation speed and biomass accumulation speed of peanut

表 5 不同施氮时期对花生氮肥利用率的影响
Table 5 Effects of N application time on N utilization efficiency of peanut

处理 Treatment	氮素收获指数 NHI/%	氮肥农学利用率 AEN/(kg · kg ⁻¹)	氮肥偏生产力 PFPN/(kg · kg ⁻¹)	氮肥吸收利用率 REN/%
CK	82.3 a	—	—	—
N _{10:0:0}	76.9 a	2.8 b	33.2 a	32.6 c
N _{7:3:0}	78.8 a	3.7 b	34.1 a	48.2 b
N _{5:5:0}	79.9 a	5.2 a	35.6 a	56.9 ab
N _{5:3:2}	83.5 a	6.1 a	36.4 a	65.9 a
N _{3:5:2}	82.4 a	4.5 ab	34.9 a	55.0 ab

注:NHI,AEN,PFPN 和 REN 分别表示氮素收获指数、氮肥农学利用率、氮肥偏生产力和氮肥吸收利用率
Note:NHI,AEN,PFPN and REN indicate N harvest index, agronomic efficiency of applied N, partial factor productivity of applied N and N recovery efficiency, respectively

2.3 花生氮肥利用率

表 5 反映的是不同施氮时期下花生的氮肥利用率。可以看出施氮处理中,氮素收获指数、农学利用率、偏生产力、吸收利用率等各项指标均随氮肥施用次数的增加、施用比例的后移而提高,各项指标均在 N_{5:3:2} 处理时达到最大值,继续增大氮肥后移比例(N_{3:5:2} 处理)各项氮肥利用率又有所下降,因此要实现高的氮肥利用率不仅要做到氮肥分次施用,还

应合理调控各生育阶段的氮肥投入。

2.4 花生产量及产量构成因子

从表 6 可以看出,施用氮肥并合理调控可改善花生的经济性状,对单株荚果数的影响最为明显,与 CK 相比各施氮处理的单株荚果数提高了 5.9% ~ 33.7%,以 N_{5:3:2} 处理的增幅最大;虽然施氮对百果重和出仁率的影响未达到显著水平($P>0.05$),但仍可看出合理的氮肥施用时期具有一定的改善效

果。从花生产量来看,施用氮肥可增加花生产量,其增产幅度随氮肥施用次数增多、氮肥后移比例加大表现出先增加后降低的趋势,以 $N_{5:3:2}$ 处理的荚果产量最高,达到 $4\,918.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,较 CK 增产 20.0%,较当地传统的一次性施肥也可增产 9.8%。

表 6 不同施氮时期对花生产量及产量构成因子的影响
Table 6 Effects of N application time on peanut yield and yield components

处理 Treatment	产量构成因子 Yield components			秸秆产量 Straw yield /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	荚果产量 Pod yield /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	经济系数 Economic index/%	较 CK 增产 Yield increase than CK/%
	单株荚果数 Plant pod	百果重 100-pod weight /g	出仁率 Kernel rate /%				
CK	25.5 b	138.3 a	78.2 a	2 829.6 c	4 098.7 c	59.2 a	-
$N_{10:0:0}$	27.0 b	141.8 a	77.2 a	3 484.0 a	4 481.5 bc	56.3 a	9.3
$N_{7:3:0}$	32.1 ab	140.3 a	77.9 a	3 496.3 a	4 600.0 ab	56.8 a	12.2
$N_{5:5:0}$	33.8 ab	143.8 a	78.9 a	3 434.6 a	4 800.0 ab	58.3 a	17.1
$N_{5:3:2}$	34.1 a	143.9 a	80.5 a	3 163.0 b	4 918.5 a	60.9 a	20.0
$N_{3:5:2}$	33.8 ab	140.5 a	79.7 a	3 175.3 b	4 707.4 ab	59.7 a	14.9

3 讨论与结论

大量研究表明,作物的优质高产是以良好的生物量累积为前提,在一定范围内作物产量与生物量成正相关关系^[21~24];而生物量累积又以养分吸收为基础,调控氮肥施用时期的本质是调节氮素供给与作物需求的“供需关系”,从而可改变作物生物量及氮素的累积特征,影响其产量的形成与品质的优劣。Logistic 模型是生态学中的经典模型,被广泛运用到作物生物量和养分累积的研究中^[25~28],对其求导得到的速率方程和特征参数可将生物量及养分的累积动态直观显现,对指导合理施肥、调控养分供给具有重要意义,但在花生高产高效施肥技术的研究中运用较少。从本研究可以看出,花生的生物量和氮素累积均可用 Logistic 模型很好拟合,但二者的累积动态及特征参数却存在较大差异,并且受施氮时期的影响显著。综合前人运用 logistic 模型在多种作物上的研究结果可知,生物量累积与氮素累积并非完全同步,协调好二者的关系是获得高产、优产的关键,其最为理想的状态是:

- 1)氮素进入快速累积的时间(t_1)应早于生物量进入快速累积的时间,以保证养分供应、为生物量累积打好基础;
- 2)应适当延长氮素和生物量快速累积的持续时间(Δt),并使二者结束快速累积的时间(t_2)尽量吻合,以避免作物生长后期较早脱氮、还能有效改善产品质量。从本研究可以看出,在总施氮量不变的情况下,一次施氮($N_{10:0:0}$)和二次施氮($N_{7:3:0}$ 、 $N_{5:5:0}$)处理均能满足前者,可促进花生生育前期生物量和氮素的快速累积,但生育后期会出现供氮不

另外也可看出,施用氮肥首先保证的是秸秆产量的增加,表现为经济系数相对于 CK 有所降低(即荚果增幅<秸秆增幅),尤其以氮肥一次性基施的 $N_{10:0:0}$ 处理最为明显,只有当氮肥施用比例适当后移,才能有效保证花生后期的氮素营养,使经济系数有所提高。

足的现象,导致氮素快速累积的结束时间过早;而 $N_{5:3:2}$ 处理可有效协调花生各生育阶段的氮素需求,但氮素后移过多的 $N_{3:5:2}$ 处理不利于花生前期生长,后期施入的氮肥也难以得到有效利用,此外三次施氮处理进入氮素快速累积的时间(t_1)稍晚,在施肥调控上仍需进一步优化。

花生作为豆科植物,其根系可与根瘤菌结瘤形成共生体,根瘤固氮是自然界中最为高效的固氮体系。大量研究表明花生的氮素营养主要来自根瘤固氮,其次才是施肥和土壤供给^[29,30]。虽然施氮对花生氮素营养的贡献相对较小,但却对根瘤固氮产生重要影响。适量的“起爆氮”有利于根瘤菌固氮效能的充分发挥,而过量施氮的“氮阻遏”效应会导致花生少结瘤甚至不结瘤,因此调整氮肥施用时期和比例很大程度上可能通过影响根瘤固氮作用于花生生长与氮素吸收^[4,31]。而花生生育后期,植株趋于成熟、根系逐渐老化,根瘤固氮能力衰减,适量追施氮肥有利于维持氮素营养的持续供应、避免叶片早衰,从而提高产量和品质。传统上作物追氮多集中于花前时期,如张翔^[5]、李波^[6]等人研究中设置的花生追氮时期均为苗期和花针期,吕鹏等^[12]研究发现,即便在玉米的灌浆期适量追氮仍有助于提高产量和氮肥利用率,本研究在花生结荚期追施 20% 氮肥($N_{5:3:2}$)的效果也是如此,而且还能显著提高花生品质,其籽粒含氮量可达 38.7 g/kg ,显著高于其他处理($P<0.05$)。目前我国主要粮食作物的平均氮肥吸收利用率仅为 26%~28%,远低于发达国家的 45%^[19],这既造成了大量的资源浪费,也导致了严重的环境污染。从本研究可以看出,花生一次施氮的氮肥吸收利用率达到了 32.6%(表 5),合理分

施后氮肥吸收利用率仍有较大提升空间,这与成艳红等人^[7]的结果相似,其主要原因是:首先,花生、大豆等豆科作物的氮肥利用率通常高于禾本科等作物;其次,氮肥分次施用既通过优化氮素供给、也通过调节根瘤固氮进一步提高氮肥利用率,但不同施氮方式下花生各生育期的氮素营养来源、根瘤菌的固氮贡献需通过同位素技术进一步明确^[29,31,32]。花生生育期恰逢南方高温多雨季节,氮肥过于集中施用作物难以在短期内有效吸收,部分氮素会随雨水淋失污染土壤或地表水体,将氮肥分次施用、施用比例适当后移也是减轻环境污染的有效措施。

综上所述,不同施氮时期显著影响红壤旱地花生生物量及氮素累积特征,氮肥分次施用并适当后移有利于花生生物量及氮素积累,表现为提高生物量及氮素的最大累积速率($v_{\max}$)、推迟吸收“峰值”出现时间($t_{\max}$),从而延长生物量及氮素快速累积的持续时间(Δt),使得花生增产并提高氮肥利用率,但氮肥后移比例过大($N_{3:5:2}$)也不利于肥效的充分发挥。本试验条件下,以氮肥 50% 基施 + 30% 花针期追施 + 20% 结荚期追施($N_{5:3:2}$)的效果最好,其产量达到 $4\,918.5\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,较 CK 增产 20.0%,较当地传统的一次性施肥也可增产 9.8%。本研究结果对于我国南方红壤旱地花生的科学合理施肥、高产高效栽培具有指导意义。

参考文献:

- [1] 黄国勤,赵其国. 红壤生态学[J]. 生态学报,2014,34(18):5 173–5 181.
- [2] 黄梅梅,骆赞磊,孙明珠. 江西省花生生产现状与发展对策[J]. 江西农业,2013(2):15–16.
- [3] 成艳红,武琳,黄欠如,等. 控释肥配施比例对稻草覆盖红壤旱地花生生产量的影响[J]. 土壤通报,2014,45(5):1 213–1 217.
- [4] 刘佳,张杰,秦文婧,等. 施氮和接种根瘤菌对红壤旱地花生产量、氮素吸收利用及经济效益的影响[J]. 中国油料作物学报,2016,38(4):473–480.
- [5] 张翔,毛家伟,司贤宗,等. 施氮时期对夏花生产量及氮素吸收利用的影响[J]. 中国油料作物学报,2015,37(6):897–901.
- [6] 李波,孙广志,何志刚,等. 不同施氮方式对花生生理特性及产量的影响[J]. 作物杂志,2013(6):129–132.
- [7] 成艳红,武琳,钟义军,等. 控释肥对稻草覆盖红壤花生产量及土壤有效氮平衡的影响[J]. 土壤学报,2014,51(2):306–313.
- [8] 马均,明东风,马文波,等. 不同施氮时期对水稻淀粉积累及淀粉合成相关酶类活性变化的研究[J]. 中国农业科学,2005,38(2):290–296.
- [9] Ata–UI–Karim S T, Liu X J, Lu Z Z, et al. Estimation of nitrogen fertilizer requirement for rice crop using critical nitrogen dilution curve[J]. Field Crops Research, 2017,201(1):32–40.
- [10] 曹丽,王振林,戴忠民,等. 施氮时期对小麦籽粒 HMW–GS 积累及 GMP 粒度分布的影响[J]. 作物学报,2011,37(12):2 241–2 250.
- [11] Weber E A, Graeff S, Koller W D, et al. Impact of nitrogen amount and timing on the potential of acrylamide formation in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Field Crops Research,2008,106(1):44–52.
- [12] 吕鹏,张吉旺,刘伟,等. 施氮时期对超高产夏玉米产量及氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(5):1 099–1 107.
- [13] Jin L B, Cui H Y, Li B, et al. Effects of integrated agronomic management practices on yield and nitrogen efficiency of summer maize in North China[J]. Field Crops Research,2012,134(3):30–35.
- [14] 刘明,翟修彩,李忠佩,等. 碱渣处理的秸秆堆肥对红壤生物功能和花生产量品质的影响[J]. 土壤通报,2014,45(3):679–684.
- [15] 李欠欠,李雨繁,高强,等. 传统和优化施氮对春玉米产量、氮挥发及氮平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(3):571–579.
- [16] 杨宪龙,路永莉,同延安,等. 施氮和秸秆还田对小麦–玉米轮作农田硝态氮淋溶的影响[J]. 土壤学报,2013,50(3):564–573.
- [17] 陈裴裴,吴家森,郑小龙,等. 不同施肥对雷竹林径流及渗漏水中氮形态流失的影响[J]. 生态学报,2013,33(18):5 599–5 607.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- [19] 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.
- [20] 崔党群. Logistic 曲线方程的解析与拟合优度测验[J]. 数理统计与管理,2005,24(1):112–115.
- [21] 王雪,崔少雄,孙志梅,等. 基于生物量和养分积累量的花生品种生态适应性评价[J]. 应用生态学报,2015,26(7):2 023–2 029.
- [22] 黄中文,赵团结,盖钧镒. 大豆不同产量水平生物量积累与分配的动态分析[J]. 作物学报,2009,35(8):1 483–1 490.
- [23] 薛晓萍,陈兵林,郭文琦,等. 棉花临界需氮量动态定量模型[J]. 应用生态学报,2006,17(12):2 363–2 370.
- [24] 周桂生,万树文,董伟伟,等. 施氮量对蓖麻花后干物质积累、产量和产量构成的影响[J]. 中国油料作物

学报,2009,31(1):39-43.

[25] 肖强,闫连波,朱欣宇,等. 夏玉米植株干物质、氮磷钾养分积累速度和时间的动态分析[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(3):606-612.

[26] 向达兵,郭凯,杨文钰. 不同磷钾处理下套作大豆干物质积累及钾肥利用率的动态变化[J]. 中国油料作物学报,2012,34(2):163-167.

[27] 王子胜,徐敏,张国伟,等. 施氮量和种植密度对东北特早熟棉区棉花生物量和氮素累积的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(12):3 243-3 251.

[28] 杨萍,李杰,剡斌,等. 胡麻/大豆间作体系下施氮对胡麻干物质积累和产量的影响[J]. 中国油料作物学报,2015,37(4):489-497.

[29] 孙虎,李尚霞,王月福,等. 施氮量对不同花生品种积累氮素来源和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(1):153-157.

[30] 王月福,康玉洁,王铭伦,等. 施钾对花生积累氮素来源和产量的影响[J]. 核农学报,2013,27(1):126-131.

[31] 孙彦浩,陈殿绪,张礼凤. 花生施氮肥效果与根瘤菌固N的关系[J]. 中国油料作物学报,1998,20(3):69-72.

[32] 吴正锋,陈殿绪,郑永美,等. 花生不同氮源供氮特性及氮肥利用率研究[J]. 中国油料作物学报,2016,38(2):207-213.

(责任编辑:王丽芳)