预估中国大豆养分需求研究

杨富强[1] 徐新朋[1] 王 伟[2] 马进川[1] 魏 丹[2] 何 萍[1]

（1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所，北京 100081；2. 黑龙江省农业科学院土壤肥料与环境资源研究所，黑龙江 哈尔滨 150086）

摘要：本文收集了我国 2001–2015 年与大豆氮（N）、磷（P）和钾（K）养分吸收相关的田间试验数据，评估了大豆产量与养分吸收的关系，并利用 QUEFTS（Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils）模型估算一定目标产量下大豆对 N、P 和 K 的最佳养分需求。随着目标产量的增加（3–6 吨 / 公顷），QUEFTS 模型预估的大豆 N、P 和 K 养分平衡需求规律均为线性 – 抛物线 – 平台曲线。

在我国大豆产量潜力的 60–70% 范围内产量与养分吸收呈线性关系，每生产 1000 公斤籽粒大豆对 N、P 和 K 养分的最佳需求量分别为 55.4、7.9 和 20.1 公斤（N:P:K=7:1:2.5）。同时，QUEFTS 模型模拟的 1000 公斤大豆籽粒移走的 N、P 和 K 养分量分别为 48.3、5.9 和 12.2 公斤，相当于地上部吸收 87% 的 N、74% 的 P 和 61% 的 K 累积在籽粒中并被移出土壤。大豆籽粒产量与养分吸收之间的关系可以用于评价和指导田间施肥，避免了施肥过量或不足。田间试验证明，QUEFTS 模型可以预估我国大豆养分吸收和用于指导田间推荐施肥。

关键词：大豆；养分需求；预估；QUEFTS 模型

大豆（Glycine max L.）是我国重要的经济作物，其籽粒含有丰富的植物油脂和蛋白，可以榨取豆油、制作各种豆制品和提取蛋白质等。由于大豆具有生物固氮功能，所以它也是高产体系中重要的轮作作物，特别是在东北。但近年来，受农业技术的限制，我国大豆产量低且成本高，农民种植积极性不高。肥料是限制我国大豆产量的一个重要因素，然而当前农民并不重视大豆的施肥，导致土壤养分失衡和肥料利用率低下，所以迫切需要针对我国大豆研究其需肥规律和施肥技术，进一步提高大豆产量和肥料利用效率。

目前，国内外有关作物养分管理和推荐施肥已进行了大量研究，并形成了一系列推荐施肥方法，如基于土壤测试的目标产量法、地力分级法和肥料效应函数法等[1, 2]，还有基于作物反应的养分动态模型、作物生长模型和快速叶绿素测定法等实地养分管理方法[3, 4]。这些方法在提高作物产量和养分利用率上都发挥了积极作用，但我国农田以小农户经营为主，土壤养分变异大、土壤类型和气候等差异对科学指导施肥都是挑战。

Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils（QUEFTS）模型应用大量田间试验数据分析作物产量水平与养分吸收量之间的关系，并综合考虑了氮（N）、磷（P）和钾（K）养分之间的交互作用，避免了单一或少量数据点模拟养分吸收规律指导施肥的偏差。QUEFTS 模型已经在东南亚、中国、印度和非洲多个国家应用到水稻、小麦和玉米上[5–7]，但目前世界范围内尚没有关于 QUEFTS 模型应用于大豆的报道。因此，本研究的目的是：（1）确定我国大豆籽粒产量与养分吸收量的关系；（2）预估中国大豆对 N、P 和 K 的平衡需求；（3）评估 QUEFTS 模型对我国大豆的适用性。

1 材料和方法

1.1 数据来源与描述

收集和汇总了 2000–2015 年中国 24 个省（自治区）共计 584 个田间试验，主要包括肥料试验、长期定位试验和耕作措施试验等。数据主要来自于国际植物营养研究所（IPNI）中国项目部和国家现代农业产业技术体系多年来开展的田间试验及公开发表的文献。数据相关指标包括生物产量，籽粒和秸秆中 N、P、K 养分吸收量等。最佳养分需求估算使用的数据同时含有产量和养分吸收数据（至少有氮磷钾三者之一）。田间试验点基本涵盖了我国大豆主要种植区域不同的气候、土壤类型、种植模式以及主栽品种等。

1.2 模型改进

养分内在效率（Internal efficiency，IE，公斤 / 公斤）定义为大豆地上部吸收单位养分所生产的籽粒产量，以用于评估养分向经济产量的转化能力。QUEFTS 模型假设养分内在效率是固定的，直到目标产量达到潜在产量的 70–80%。QUEFTS 模型选择养分内在效率上下 2.5%、5.0% 和 7.5% 百分位数作为最大养分累积边界（Maximum nutrient accumulation，a）和最大养分稀释边界（Maximum nutrient dilution，d）进行最佳养分吸收估

测。但是需要剔除收获指数小于 0.4 公斤 / 公斤的数据，因为这部分数据被认为受到养分以外生物或非生物胁迫[8]。本研究基于 Microsoft Office Excel 的求解程序用于估算不同潜在产量和目标产量下的养分吸收，主要步骤有：（1）选择合适的数据集以满足模型的边界条件；（2）定义不同数据集的 N、P 和 K 的参数 a 和 d 值；（3）估算不同潜在产量和目标产量的最佳 N、P 和 K 养分需求；（4）评估最佳养分吸收曲线是否适合于田间大豆养分需求。

1.3 田间验证

养分为了评价 QUEFTS 模型对大豆养分需求量预估的田间适应性，于 2014 年和 2015 年在黑龙江、吉林、辽宁和内蒙古四省（自治区）进行了 23 个田间验证试验。肥料用量根据目标产量利用 QUEFTS 模型计算，N 肥用量是用地块产量反应除以农学效率，P 和 K 肥用量是利用 QUEFTS 模型计算得出。

收获时，记录每个小区实收籽粒和秸秆产量。将收获后的籽粒和秸秆取部分样品烘干至恒重，然后粉碎测定 N、P 和 K 的养分含量。秸秆和籽粒中的氮、磷和钾含量采用 H_2SO_4–H_2O_2 方法消煮，并分别采用凯氏法、钒钼黄比色法和原子吸收法测定[9]。

将 QUEFTS 模型预估的地上部养分吸收值与实际田间测得的养分吸收值进行比对，分析二者的一致性和差异情况。用到的参数有均方根误差（RMSE）和标准化均方根误差（n–RMSE）。显著性使用 SAS 软件在 0.05 概率水平进行 ANOVA 分析。计算公式如下：

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(s_i - m_i)^2}{n}}, \quad (1)$$

$$\text{Normalized RMSE} = \frac{\mathrm{RMSE}}{\bar{m}}, \quad (2)$$

si 和 mi 分别为预估值和实测值，n 是样本量，$\bar{m}$ 是实测值的平均值[10]。

2 结果与讨论

2.1 模型参数的确定

养分最大累积（a）和最大稀释（d）参数是 QUEFTS

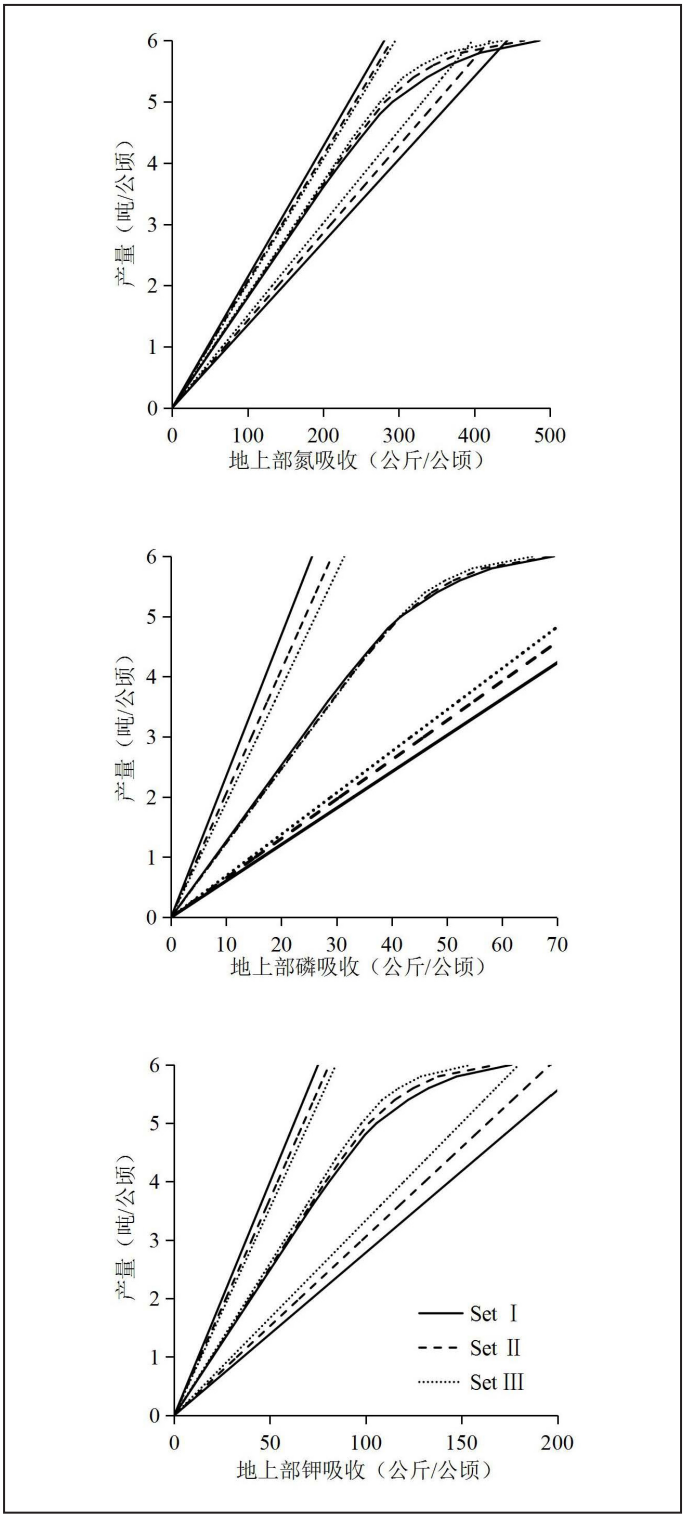

图 1 我国大豆产量与氮磷钾养分吸收的关系

注：YA、YD 和 YU 分别为地上部养分最大累积边界、最大稀释边界和最佳养分吸收曲线。下同。

表 1 我国大豆氮磷钾养分吸收的最大累积和最大稀释边界

养分	参数 I Set I		参数 II Set II		参数 III Set III	
	a（2.5th）	d（97.5th）	a（5th）	d（95th）	a（7.5th）	d（92.5th）
氮	13.5	21.4	14.3	20.6	15.1	20.3
磷	60.4	234.6	65.4	205.7	68.9	191.0
钾	27.8	79.9	30.6	74.1	33.3	71.0

模型估测不同目标产量下作物最佳养分需求量的两个重要指标。数据分析时剔除收获指数小于 0.4 的数据，并去除 IE 值上下 2.5%（Set I）、5%（Set II）和 7.5%（Set III）的数据，计算得到我国大豆 N、P 和 K 吸收的 a 和 d 三组参数值（表 1）。

以三组参数为边界，在潜在产量为 6 吨 / 公顷条件下，应用 QUEFTS 模型模拟大豆地上部养分吸收并进行分析（图 1）。结果显示，三组参数只是缩短了最大累积和最大稀释边界间的距离，对养分吸收曲线影响较小，三组参数的养分吸收曲线非常接近，只是在接近潜在产量时有所差异，因此采用参数 I 即 IE 上下 2.5% 作为估测养分吸收的最终参数，即 N、P 和 K 养分吸收的参数 a 和 d 值分别为 13.5 和 21.4、60.4 和 234.6、27.8 和 79.9 公斤 / 公斤。

2.2 一定目标产量下最佳养分吸收曲线

将去除养分内在效率数值上下限 2.5% 所对应的 a 和 d 值作为参数，应用 QUEFTS 模型对养分吸收进行模拟（潜在产量 3–6 吨），得出 QUEFTS 模型模拟的不同潜在产量下大豆氮磷钾养分的最佳需求量呈线性 – 抛物线 – 平台曲线关系（图 2）。

结果得出，不论潜在产量为多少，当目标产量达到潜在产量的 60–70% 时，每生产 1 吨籽粒产量地上部养分需求是一致的，即目标产量所需的养分在达到潜在产量 60–70% 前呈直线增长。

2.3 预估一定目标产量下的最佳养分吸收

QUEFTS 模型拟合的地上部和籽粒中的养分吸收以潜在产量 6 吨 / 公顷为例，生产 1 吨籽粒产量地上部 N、P 和 K 养分需求量直线部分分别为 55.4、7.9 和 20.1 公斤 / 吨，N:P:K 的比例为 7:1:2.5（表 2）。

大豆籽粒中养分含量比较高，所以计算籽粒所带走的养分量对精准施肥至关重要，可以避免施肥过量或不足对产量造成影响。QUEFTS 模型拟合得出的籽粒养分吸收与地上部养分吸收趋势一致，呈直线增长直到目标产量达到潜在产量的 60–70%。

对于大豆而言，生产 1 吨籽粒产量籽粒中直线部分所需的 N、P 和 K 养分分别为 48.3、5.9 和 12.2 公斤 / 吨；当目标产量达到潜在产量的 80% 时，籽粒中所需的 N、P 和 K 养分占整个地上部养分吸收的比例分别为 86.6%、73.7% 和 60.4%（表 2）。

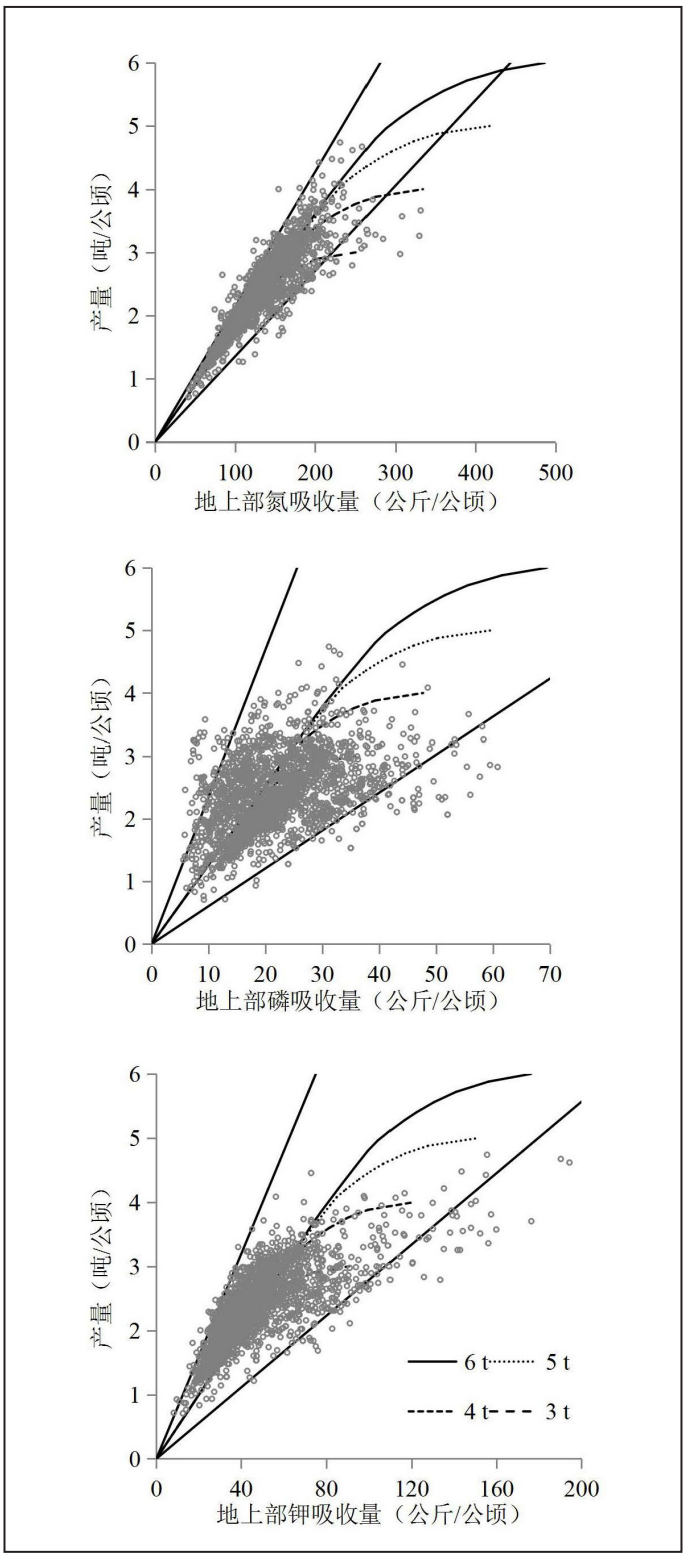

图 2 不同潜在产量下 QUEFTS 模型拟合的大豆地上部最佳养分需求量

2.4 QUEFTS 模型验证

QUEFTS 模型预估养分吸收值和实际测试值分析结果表明，N、P 和 K 三种养分的 RMSE 分别为 24.9、5.8 和 15.1 公斤 / 公顷，相对应的 n–RMSE 分别为 13.7%、24.3% 和 22.4%（均小于 30%）。显著性分析结果显示，N、

表 2 我国大豆不同产量水平下氮磷钾养分需求

产量（吨 / 公顷）	地上部养分需求（公斤 / 吨）			籽粒养分需求（公斤 / 吨）			籽粒移走比例（%）		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.8	55.4	7.9	20.1	48.3	5.9	12.2	87.1	74.1	60.8
1.2	55.4	7.9	20.1	48.3	5.9	12.2	87.1	74.1	60.8
1.6	55.4	7.9	20.1	48.3	5.9	12.2	87.1	74.1	60.8
2.0	55.4	7.9	20.1	48.3	5.9	12.2	87.1	74.1	60.8
2.4	55.4	7.9	20.1	48.3	5.9	12.2	87.1	74.1	60.8
2.8	55.4	7.9	20.1	48.3	5.9	12.2	87.1	74.1	60.8
3.2	55.4	7.9	20.1	48.3	5.9	12.2	87.1	74.1	60.8
3.6	55.4	7.9	20.1	48.3	5.9	12.2	87.1	74.1	60.8
3.9	55.7	8.0	20.2	48.3	5.9	12.2	86.7	73.8	60.5
4.2	56.2	8.0	20.4	48.7	5.9	12.3	86.7	73.7	60.5
4.5	56.7	8.1	20.5	49.1	6.0	12.4	86.7	73.7	60.5
4.8	57.3	8.2	20.7	49.6	6.0	12.5	86.6	73.7	60.4
5.0	58.3	8.3	21.1	50.9	6.2	12.9	87.3	74.3	60.9
5.2	60.2	8.6	21.8	52.6	6.4	13.3	87.3	74.3	60.9
5.4	62.5	8.9	22.6	54.6	6.6	13.8	87.3	74.3	60.9
5.6	65.5	9.4	23.7	57.2	6.9	14.5	87.3	74.3	60.9
5.8	70.2	10.0	25.4	61.3	7.4	15.5	87.3	74.2	60.9
6.0	81.0	11.6	29.4	74.6	9.1	18.9	92.1	78.3	64.2

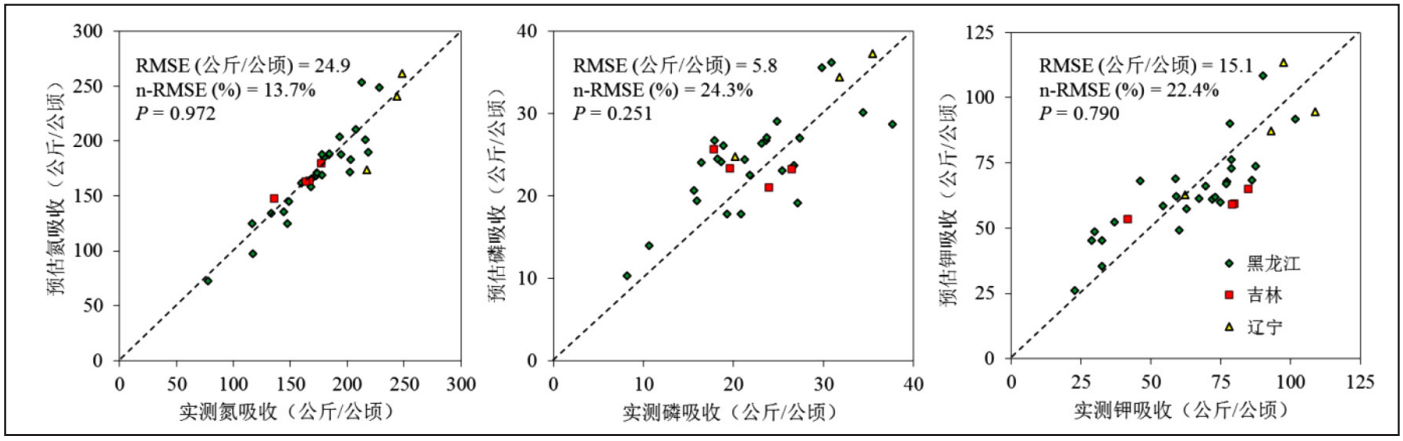

图 3 模型预估 N、P 和 K 吸收值和实测值的比较

P 和 K 三种养分对应的 P 值分别为 0.972、0.251 和 0.790（均大于 0.05），说明 QUEFTS 模型预估值和实际测试值没有显著性差异，误差均在可接受范围内，模型预估值非常接近实测值（图 3）。

3 结论

我国大豆每生产 1 吨籽粒产量其地上部 N、P 和 K 的养分吸收分别为 55.4、7.9 和 20.1 公斤 / 吨，相应的养分内在效率分别为 18.0、126.3 和 49.8 公斤 / 公斤，直线部分 N:P:K 的比例为 7:1:2.5。生产 1 吨籽粒产量所需的 N、P 和 K 分别为 48.3、5.9 和 12.2 公斤 / 吨。当目标产量达到潜在产量的 80% 时，籽粒中所需的 N、P 和 K 占整个地上部养分吸收的比例一季稻的分别为 86.6%、73.7% 和 60.4%。QUEFTS 模型模拟的是最佳养分吸收曲线，估算的 N、P 和 K 的养分吸收与实测值非常相近，可以为优化施肥用量和改善养分管理策略提供科学基础。

参考文献

[1] 朱兆良．推荐氮肥适宜施用量的方法论刍议．植物营养与肥料学报，2006, 12:1–4.

[2] 魏义长，白由路，杨俐苹，等．基于 ASI 法的滨海滩涂地水稻土壤有效氮、磷、钾丰缺指标．中国农业科学，2008, 41:138–143.

[3] 刘立军，桑大志，刘翠莲，等．实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响．中国农业科学，2003, 36:1456–1461.

[4] 姜海燕，朱艳，汤亮，等．基于本体的作物系统模拟框架构建研究．中国农业科学，2009, 42:1207–1214.

[5] Xu XP, Xie JG, Hou YP, et al. Estimating nutrient uptake requirements for rice in China. Field Crops Res. 2015, 180:37–45.

[6] Xu XP, He P, Pampolino MF, et al. Nutrient requirements for maize in China based on QUEFTS analysis. Field Crops Res. 2013, 150:115–125.

[7] Chuan LM, He P, Pampolino MF, et al. Establishing a scientific basis for fertilizer recommendations for wheat in China:yield response and agronomic efficiency. Field Crops Res. 2013, 140:1–8.

[8] Janssen BH, Guiking FCT, van der Eijk D, et al. A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS). Geoderma, 1990, 46:299–318.

[9] 鲍士旦．土壤农化分析（第 3 版）．北京：中国农业出版社，2007.

[10] Liu HL, Yang JY, Drury CF, et al. Using the DSSAT±CERES–Maize model to simulate crop yield and nitrogen cycling in fields under long–term continuous maize production. Nutr Cycl Agroecosyst, 2011, 89:313–328.