

# 基于产量反应和农学效率的小麦推荐施肥理论研究

申丽敏<sup>1</sup> 何萍<sup>1,2,\*</sup> Mirasol F. Pampolino<sup>3</sup> Adrian M. Johnston<sup>4</sup> 金继运<sup>1,2</sup>

徐新朋<sup>1</sup> 赵士诚<sup>1</sup> 仇少君<sup>1</sup> 周卫<sup>1</sup>

(1. 农业部作物营养与施肥重点实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 国际植物营养研究所中国项目部, 北京 100081; 3. International Plant Nutrition Institute Southeast Asia Program, PO Box 500 GPO, Penang 10670, Malaysia; 4. International Plant Nutrition Institute, 102-411 Downey Road, Saskatoon, SK, S7N 4L8, Canada.)

**摘要:** 施肥不合理是中国小麦生产中存在的普遍现象, 其后果是导致养分失衡、肥料效率低下, 大量养分流失到环境中。确定合理的施肥量是科学养分管理的基础。本文利用 2000-2011 年小麦养分相关数据介绍了基于产量反应和农学效率推荐施肥新方法的理论基础。结果显示, 产量反应和土壤基础养分供应之间存在着显著的负指数关系, 和相对产量之间存在着显著的负线性关系, 并且产量反应 ( $x$ ) 和农学效率 ( $y$ ) 之间存在着显著的一元二次函数关系。N 产量反应 ( $x_N$ ) 与 N 农学效率 ( $y_N$ ) 之间的函数关系为:  $y_N = -0.3729x_N^2 + 6.1333x_N + 0.1438$ , P 产量反应 ( $x_P$ ) 与 P 农学效率 ( $y_P$ ) 之间的关系为:  $y_P = -0.5013x_P^2 + 8.3209x_P + 2.3907$ , K 产量反应 ( $x_K$ ) 与 K 农学效率 ( $y_K$ ) 之间的关系为:  $y_K = -1.6581x_K^2 + 9.099x_K + 0.7668$ 。上述相关性是基于产量反应和农学效率进行推荐施肥的重要理论基础, 当产量反应确定, 其对应的养分农学效率也就确定, 进而可以完成施肥推荐。

**关键词:** 施肥推荐; 产量反应; 农学效率; 土壤基础养分供应

## 1 前言

小麦是中国重要粮食作物之一, 播种面积达 2350 万公顷, 占世界小麦生产面积的 10.6%<sup>[1]</sup>。施肥在小麦增产中占有举足轻重的地位。然而, 人们为了满足对粮食高产的追求, 过量施氮现象在小麦生产中较为常见, 进而导致养分施用不平衡、肥料利用效率低下, 使大量氮素损失到环境中。在高产栽培体系, 科学施肥是人们追求高的肥料利用效率时采取的重要方法。但是, 对于中国的小农户经营规模来说, 如何做到推荐施肥仍然是一个挑战。

基于电脑软件的小麦养分专家决策系统是国际植物营养研究所开发的推荐施肥系统, 可以为当地农民、农业技术和推广人员做出施肥推荐。该系统是在热带土壤肥力定量评价 (Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils, QUEFTS) 模型和改良的实地养分管理技术 (Site-Specific Nutrient Management, SSNM) 基础上合并研发。SSNM 在 20 世纪九十年代中期作为可选择的养分管理方法逐渐发展起来, 使特定田块的特定作物养分供应与需求同步<sup>[2]</sup>。QUEFTS 模型最初是由 Janssen et al.<sup>[3]</sup> 提出的通过预估热带地区不施肥土壤的玉米产量进行地力评价的模型, 经过进一步转化和校正, 可以预估一定目标产量时的最佳养分吸收<sup>[4-10]</sup>。施肥后作物达到的产量主要有两部分组成, 一是由土壤基础养分供应所能产生的产量, 另一部分是施肥所能增加的产量 (产

量反应)。将 QUEFTS 模型和 SSNM 相结合的小麦养分专家推荐施肥方法的主线是在多年多点数据库基础上, 基于产量反应和农学效率进行施肥推荐, 在测土或植株诊断分析条件不充分时该方法显得尤为重要。既满足不同大小田块推荐施肥的适用性, 又考虑 N、P、K 养分间的相互作用, 也是与其它施肥方法最重要的区别。所谓产量反应是指施用氮磷钾肥料的小区与不施某种养分的缺素小区的产量差。农学效率是指施入 1kg 该纯养分 (N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 或 K<sub>2</sub>O) 所能增加的籽粒产量。小麦养分专家系统的氮肥推荐是基于 N 的产量反应和 N 的农学效率, 而磷钾肥的推荐则综合考虑了养分内在效率, 可获得的产量、施入某种养分的产量反应以及养分平衡等因素<sup>[11,12]</sup>。根据产量反应做出的推荐施肥量能够充分利用土壤的基础养分供应, 避免过量养分在土壤的累积。该方法已经在亚洲一些国家得到应用<sup>[11-14]</sup>。

目前, 关于多年多点小麦施肥产量反应和农学效率以及两者之间的关系还没有系统研究。本文主要研究以下几点: 1) 确定中国小麦施肥的产量反应、农学效率和土壤基础养分供应; 2) 分析产量反应、农学效率和土壤基础养分供应之间的关系; 3) 为中国基于产量反应和农学效率的小麦养分专家推荐施肥提供理论原则和科学基础。

## 2 数据来源

小麦养分专家系统背后强大的数据库支撑是收集了从2000-2011年已发表的关于小麦养分管理的文献以及国际植物营养研究所已发表或未发表的数据库数据。涉及的试验包括不施肥的对照处理、农民习惯施肥处理、最佳养分管理处理、对应的减氮、减磷和减钾处理，以及肥料的量级试验、长期定位试验等。记录的参数有小麦产量，氮磷钾施肥情况，籽粒和秸秆部位的氮磷钾养分含量、籽粒和秸秆干重及各部位养分累积量和植株地上部的养分总吸收量，土壤pH、全氮、有机质、有效氮、有效磷、有效钾含量等指标。

所收集的数据点遍及中国小麦所有种植区，主要分为华北地区、长江中下游地区和西北种植区(图1)。其中在西北种植区，冬小麦和春小麦均有分布。

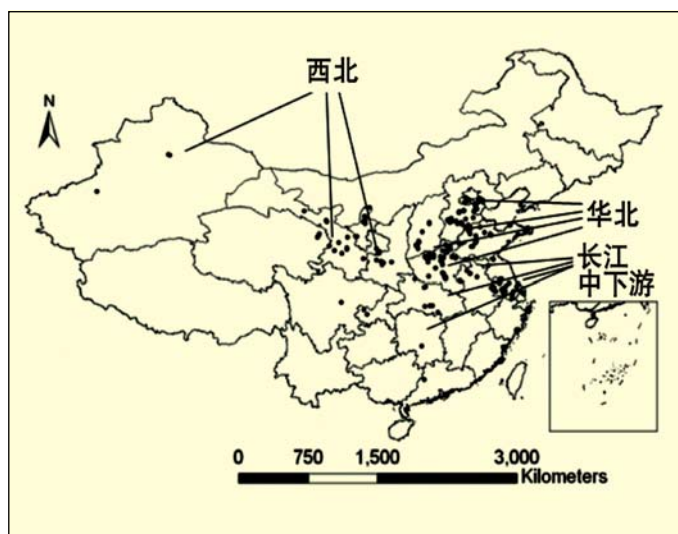


图1 华北地区、长江中下游地区和西北地区试验样点分布

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤基础养分供应

土壤基础养分供应量是不施某种养分而其它养分供应充足的处理植株地上部该种养分的吸收量<sup>[3]</sup>。土壤基础养分来自土壤本身以及外界环境养分的带入，包括上

茬作物有机无机残留，生物非生物固氮，土壤矿化，灌溉水的带入以及大气沉降等<sup>[15]</sup>。当相对产量较高时，意味着该种养分土壤基础供应量较高，施入该肥料的产量反应就低。土壤N、P和K养分的基础供应量分布如图2所示，其中土壤基础N、P和K养分平均供应量分别为122.6、38.0和120.2 kg/ha。小麦季约有40.9%的土壤基础N养分供应量分布在100-150 kg/ha之间，约有68.9%的土壤基础P养分供应以及67.1%的土壤基础K养分供应分布在20-60 kg P/ha和50-150 kg K/ha之间。可见，来自土壤和外界环境的基础养分供应量很高，对于作物生长起到重要作用。同时也表明，当做施肥推荐时，土壤基础养分供应不能忽略，相反，可以将其用于确定最佳的养分需求<sup>[16]</sup>。

### 3.2 产量反应相关分析

产量反应是指施用氮磷钾肥料的处理与不施某种养分处理的产量差。将全部收集的数据做出的各养分产量反应如图3所示。结果显示，氮肥的产量反应平均为1.67 t/ha，约有88%的样本施用氮肥后，产量反应在3 t/ha以下(图3)。施用磷肥和钾肥的产量反应平均分别为1.00和0.80 t/ha，约有62.8%的磷肥产量反应以及72.7%的钾肥产量反应均在1 t/ha以下。

缺素区的产量与施NPK养分区产量的比值称为相对产量，一定程度上表征着土壤基础养分供应能力的高低。相对产量越大，说明土壤该种养分基础供应能力越高。相反，如果相对产量越低，说明土壤该种养分基础供应能力偏低。土壤养分供应量、产量反应以及相对产量均是表征土壤肥力的重要因子，可以用于为实地养分管理技术做施肥推荐<sup>[2, 17-18]</sup>。结果显示(图4)，磷和钾的相对产量较高，达0.85和0.90，而氮的相对产量为0.76。因此，结合N、P、K的产量反应可以看出，氮是能否获得高产的第一限制因子，磷次之，钾最小。

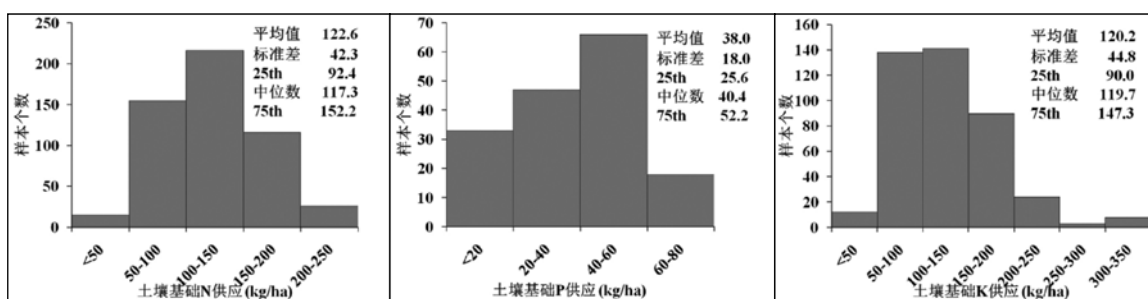


图2 土壤基础N、P和K养分供应量分布

注：25th、中位数和75th分别表示第25百分位、第50百分位和第75百分位所对应的数值。下同。

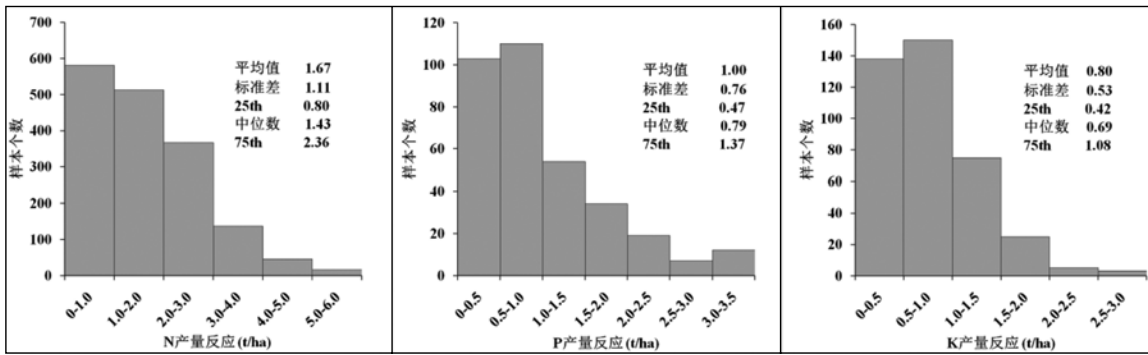


图3 小麦N、P和K产量反应分布

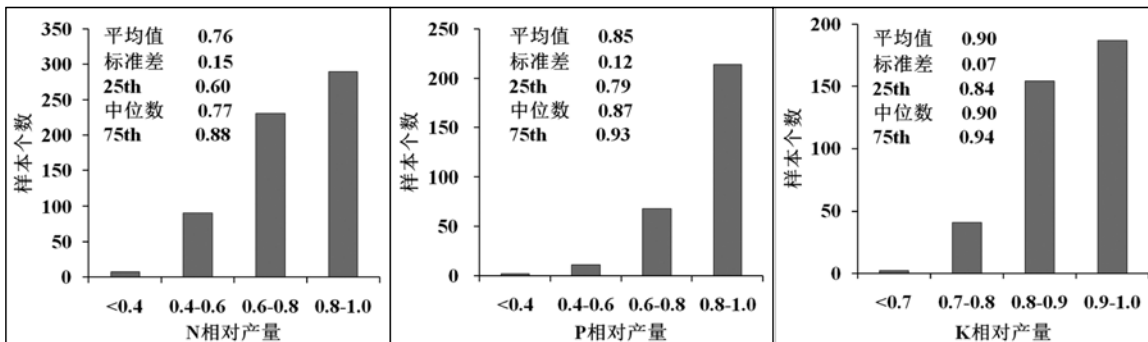


图4 小麦N、P和K相对产量分布

### 3.3 农学效率分析

农学效率是指施入单位纯养分 (N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 或 K<sub>2</sub>O) 所能增加的籽粒产量, 是养分利用效率的一个指标。统计结果表明(图5), 氮、磷和钾肥的农学效率平均分别为9.4、10.2和6.5 kg/kg, 约有61.6%、55.2%和83.9%的氮、磷和钾农学效率分布在10 kg/kg以下。Dobermann<sup>[19]</sup>曾提出, 发达国家氮的农学效率在10-30 kg/kg之间, 如果给予作物较好的管理措施, 或是适当合理的降低施肥量, 氮的农学效率平均应达到25 kg/kg以上。与这一目标相比, 中国还有很大差距。

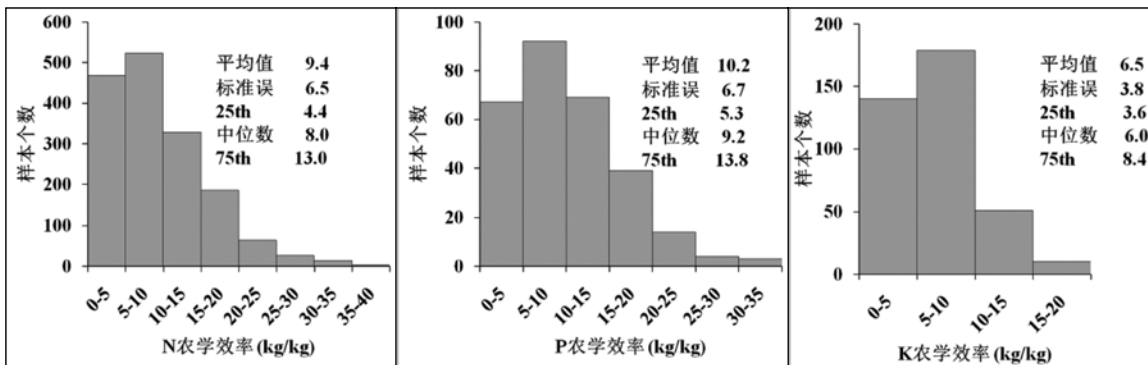


图5 小麦氮、磷和钾农学效率分布

### 3.4 产量反应、相对产量、土壤基础养分供应量以及农学效率相关性分析

氮、磷和钾肥的产量反应与相对产量之间存在着极显

著的负相关关系, 相关系数r分别为0.93、0.90和0.94(图6)。随着产量反应的增加, 相对产量逐渐减小。

N、P和K产量反应与土壤基础供N、供P和供K量的关系如图7所示。随着土壤基础养分供应量的增加, 相对应的产量反应逐渐减小, 两者之间存在着显著的负指数相关关系, 相关系数r分别为0.60、0.53、0.65。

产量反应越大, 说明土壤的基础养分(本底养分)供应越小, 即作物在不施该养分而其它养分供应充足时能从土壤中和外界环境中获取的养分就越少, 基础产量偏低, 与该养分供应充足的处理相比, 产量差偏大。相反, 如果产量反应越小, 说明土壤的基础养分供应强度高, 再施入该种肥料时, 产量增加的幅度偏小。

在不施肥条件下所达到的产量主要有土壤基础养分提供, 该产量与目标产量的差异(产量反应)主要来自肥料。产量反应随着土壤基础养分供应量的改变而变化。土壤基础养分不仅包括土壤本身的养分, 还包括来自大气沉降以及灌溉水中外界代

入的养分, 总体养分数值不易直接测得, 因此需要通过其它途径进一步来确定施肥量, 这也推动了基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法的发展。

N、P和K产量反应(x)与对应的农学效率(y)之间存在着显著的一元二次曲线关系(P<0.05)(图8), 即

氮产量反应(x<sub>N</sub>)和N农学效率(y<sub>N</sub>)对应关系为:

$$y_N = -0.3729x_N^2 + 6.1333x_N + 0.1438;$$



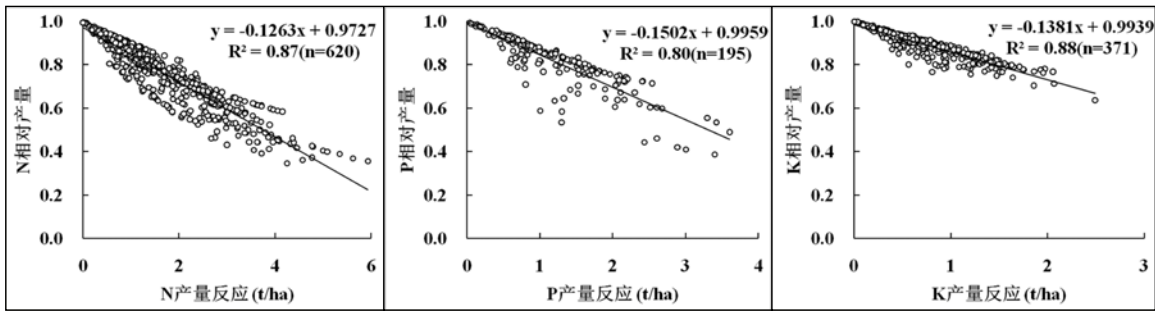


图6 小麦 N、P 和 K 产量反应与相对产量之间的关系

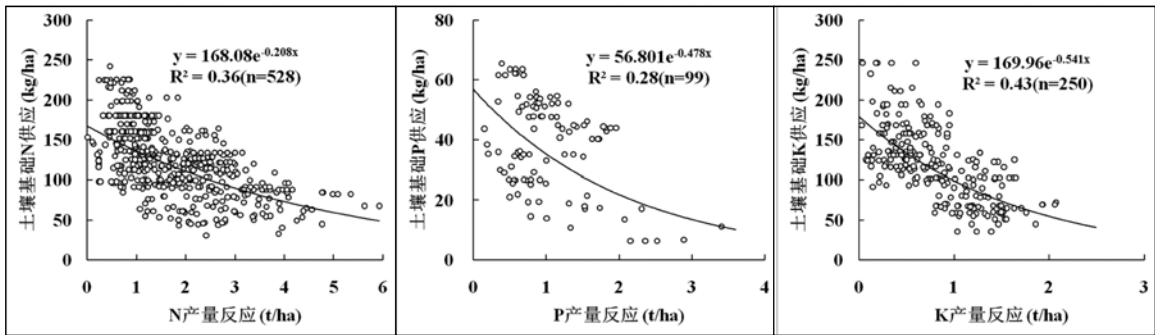


图7 产量反应与土壤基础养分供应之间的关系

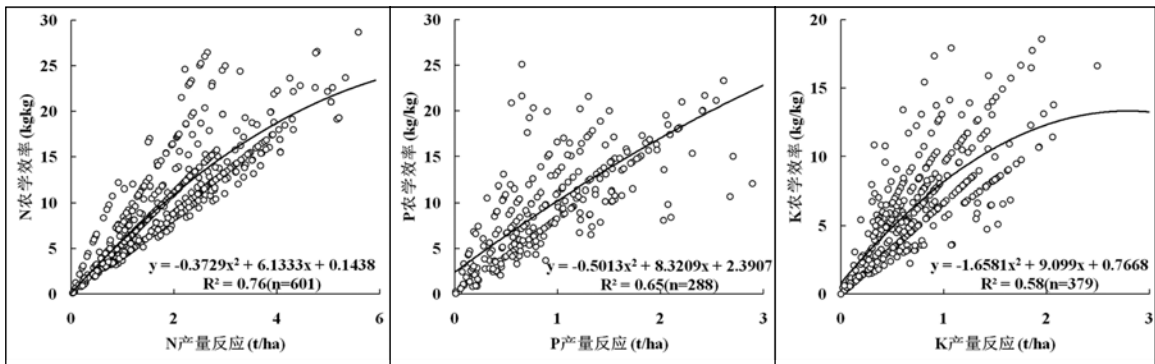


图8 产量反应和农学效率的关系

磷产量反应 ( $x_P$ ) 和 P 农学效率 ( $y_P$ ) 对应关系为:

$$y_P = -0.5013x_P^2 + 8.3209x_P + 2.3907;$$

钾产量反应 ( $x_K$ ) 和 K 农学效率 ( $y_K$ ) 对应关系为:

$$y_K = -1.6581x_K^2 + 9.099x_K + 0.7668.$$

养分农学效率随着产量反应的增加而增加, 只是增加幅度逐渐减小。产量反应越小, 说明土壤基础养分供应量越大, 施用该种肥料的农学效率偏低。相反, 产量反应越大, 说明土壤该种基础养分供应能力越低, 施用该肥料的农学效率相对偏高。基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法

就是以该理论为前提, 在大量数据基础上找出产量反应和农学效率的关系, 依据小麦养分专家推荐施肥决策原理, 进行施肥推荐。

## 4 结论

2000-2011 年小麦施用氮、磷、钾肥的产量反应平均分别为 1.67、1.00、0.80 t/ha, 氮是限制产量的第一因子, 磷次之, 钾最小。

小麦产量反应和相对产量以及土壤基础养分供应量之间均存在显著的负相关关系。

2000-2011 年氮、磷和钾肥的农学效率平均分别为 9.4、10.2 和 6.5 kg/kg。

产量反应 ( $x$ ) 和农学

效率 ( $y$ ) 之间存在着显

著的一元二次曲线关系。N 产量反应 ( $x_N$ ) 和 N 农学效率 ( $y_N$ ) 对应关系为:  $y_N = -0.3729x_N^2 + 6.1333x_N + 0.1438$ ; P 产量反应 ( $x_P$ ) 和 P 农学效率 ( $y_P$ ) 对应关系为:  $y_P = -0.5013x_P^2 + 8.3209x_P + 2.3907$ ; K 产量反应 ( $x_K$ ) 和 K 农学效率 ( $y_K$ ) 对应关系为:  $y_K = -1.6581x_K^2 + 9.099x_K + 0.7668$ 。一旦产量反应确定, 所对应的农学效率也确定, 根据小麦养分专家系统氮磷钾肥的推荐施肥原则可以做出施肥推荐。

## 参考文献 (略)

参见英文版: Field Crops Research, 2013, 140: 1-8.