

预估中国小麦养分需求研究

串丽敏¹ 何萍^{1,2,*} 金继运^{1,2} 李书田^{1,2} Cynthia Grant³ 周卫¹

(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. 加拿大农业与农业食品研究中心, 加拿大 MB R7A 5Y3)

摘要: 本文收集了 2000-2011 年与小麦 N、P 和 K 养分吸收相关的试验数据, 评估小麦产量与养分吸收关系, 并运用 QUEFTS 模型估算一定目标产量下 N、P 和 K 最佳养分需求。随着目标产量的增加, QUEFTS 模型预估的作物养分平衡需求为线性 - 抛物线 - 平台曲线。在产量潜力的 60%-70% 范围内呈线性关系, 生产 1000 kg 籽粒需要的 N、P 和 K 养分最佳需求量分别为 22.8、4.4 和 19.0 kg。QUEFTS 模型模拟的移走 1000 kg 籽粒 N、P 和 K 养分最佳移走量分别为 18.3、3.6 和 3.5 kg, 地上部吸收的 N、P 和 K 养分分别约有 80%、82% 和 18% 的比例累积在籽粒中并被移出土壤。籽粒产量与养分吸收之间的关系可以用于评价和指导施肥, 避免养分过量或不足供应。田间试验证明, QUEFTS 模型可以为小麦养分专家决策系统的施肥推荐奠定理论基础。

关键词: QUEFTS 模型; 小麦; 内在效率; 最佳养分需求

1 前言

小麦是中国重要的粮食作物之一, 通常在华北地区与玉米轮作种植, 在长江中下游地区与水稻轮作种植, 而在西北地区, 春小麦和冬小麦均有种植。在过去几年, 小麦单产有所增加, 但是由于种植面积的逐渐减少, 总产量一直呈现停滞不前甚至有降低趋势。化肥在提高作物产量中起着不可磨灭的作用。由于肥料的施用与作物的需求并不平衡, 从而导致低的养分利用效率^[1]。为了提高肥料利用率, 基于计算机软件技术的小麦养分专家系统 (Nutrient Expert, NE) 是新近发展起来的推荐施肥决策系统。该系统通过改良的精准养分管理技术 (Site-Specific Nutrient Management, SSNM) 和热带土壤肥力定量评价 (Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils, QUEFTS) 模型相结合指导科学施肥, 综合考虑了所有养分的平衡供应。目前该方法已经在南亚、东南亚一些国家应用到水稻和玉米上, 中国小麦和玉米上也逐渐得到应用^[2-4]。

精准养分管理技术是根据作物养分需求, 土壤基础养分供应和目标产量等因素确定施肥量, 关键生育期时在特定田块利用叶绿素仪或叶色卡指导科学施肥, 精确满足作物养分需求^[5]。该技术已经成功应用于水稻^[6-7]、小麦^[8]和玉米^[9]作物上。

养分内在效率 (Internal Efficiency, IE, 地上部吸收单位养分所能生产的籽粒产量) 易受土壤类型、养分供应、作物管理和气候条件的影响, 因此也会导致作物氮磷钾需求量的不确定性, 难以在农田推广^[10]。因此, 实地养

分管理技术的施肥推荐需要基于更广泛更综合的量化指标进行, 例如通过模型预估籽粒产量和养分吸收之间的关系指导施肥^[11-12]。

QUEFTS 模型可以解决这个问题, 其重要特点是考虑了 N、P 和 K 养分间的相互作用, 预估籽粒产量和地上部养分吸收之间呈线性 - 抛物线 - 平台曲线^[13]。该模型还可以拟合出养分最大积累 (即最小养分内在效率, a) 和养分最大稀释状态 (即最大养分内在效率, d) 边界线^[11, 13-14]。QUEFTS 模型已经在亚洲、印度和非洲西部应用到水稻上^[11, 15-17], 在印度和中国应用到小麦上^[18-19], 在中国、非洲、尼日利亚、肯尼亚、内布拉斯加州和东南亚地区也已应用到了玉米上^[13, 19-23]。该模型为主要作物的实地养分管理提供了一种实用工具^[8, 23-25]。

本文收集了 2000-2011 年近 12 年的小麦产量和养分吸收数据, 其土壤类型和气候条件遍及华北、长江中下游和西北地区, 包括了不同的小麦品种, 在此基础上利用 QUEFTS 模型预估小麦产量和养分吸收关系, 并将此作为小麦养分专家推荐施肥系统的背后数据支撑。因此, 本研究的主要目的是预估中国小麦一定目标产量下最佳的 N、P 和 K 养分需求。

2 材料与方法

2.1 数据来源

小麦产量、地上部 N、P、K 养分吸收、收获指数、肥料施用量等数据均来自 2000-2011 年已公开发表的文献以及国际植物营养研究所中国项目部数据库。具体的试验

处理包括在不同的土壤类型和气候条件下的农民习惯施肥处理、减素试验、长期定位试验以及肥料量级试验等。主要包括华北、长江中下游和西北地区，基本覆盖全国的小麦（冬小麦和春小麦）种植区域（图1）。试验所种植的小麦品种均为当地高产栽培下比较常见的品种，在小麦生产区域具有很强的代表性。

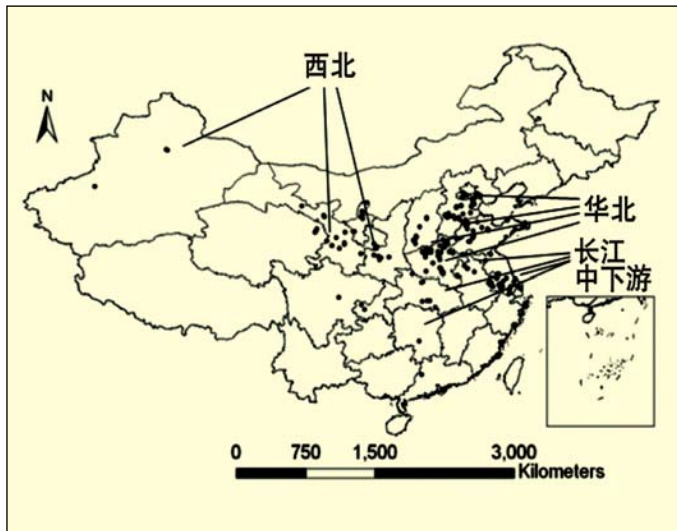


图1 中国华北地区、长江中下游地区和西北地区数据点的分布

2.2 模型介绍

QUEFTS 模型最初是由 Janssen et al.^[13] 提出的土壤地力评价模型，通过预估热带地区不施肥土壤的玉米产量来评价地力，考虑了氮、磷和钾养分之间的相互作用。模型在土壤属性基础上计算了土壤氮、磷和钾三种大量元素的基础供肥量，以及结合作物产量与养分吸收量之间的关系模拟作物最佳 N、P 和 K 养分需求量和养分限制下的生产力，向机理模型又前进了一步^[14]。QUEFTS 模型主要包括以下四个步骤，即：第一步：建立土壤属性和氮、磷、钾基础供肥量的关系式；第二步：建立土壤潜在供肥量和作物氮、磷、钾实际吸收量的关系，该步骤考虑了两两养分之间的相互作用，即在计算 N 素养分吸收时，考虑了 P 和 K 养分限制下的 N 素吸收；在计算 P 素养分吸收时，考虑了 N 和 K 养分限制下的 P 素吸收；同理，在计算 K 养分吸收时，考虑了 N 和 P 养分限制下的 K 养分吸收；第三步：建立作物氮、磷、钾实际吸收量和产量范围之间的关系式；第四步：建立两两养分对应的产量范围和最终的预估产量之间的关系式。以上每一步结果输出将是下一步的参数输入。之后该模型又进行修正，修正后的 QUEFTS 模型可以通过运行 Microsoft Excel 中的 Solver（规划求解）过程，预估一定目标产量下 N、P 和 K 养分的最佳需求量。

关于 QUEFTS 模型更详尽的介绍请参考文献 Janssen et al.^[13] 和 Liu et al.^[19]。

2.3 模型评价

均方根误差 (RMSE) 和标准化均方根误差 (normalized RMSE, n-RMSE) 两个参数可以用来评价 QUEFTS 模型以及实测值和模拟值之间的偏离程度。这两个参数计算公式如下：

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

$$n-RMSE = \frac{RMSE}{\bar{m}} \quad (2)$$

s_i 和 m_i 分别代表模拟值和实测值， n 为样本个数，表示实测值的平均值。均方根误差是模拟值和实测值之间的平均差异，用相同的单位来表示。标准化的均方根误差是去掉单位，可以比较不同单位时的模拟值和实测值的差异程度^[26]。

3 结果与讨论

3.1 预估一定目标产量下的最佳养分吸收

对于每一种养分， a 和 d 值表示该种养分最大累积（即 IE 最小）和最大稀释（即 IE 最大）状态时的参数。小麦地上部氮磷钾养分吸收的最大累积和最大稀释状态参数见图 2。为了表示 a 和 d 值对 QUEFTS 模型敏感度的影响，选取了收获指数 $HI \geq 0.40$ 的数据且去掉其中 IE 数值上下限 2.5th、5th 和 7.5th 的三个系列，将产量潜力设为可获得最高产量^[27-28]，以华北地区设为 12000kg/ha 为例来进行分析比较（图 2）。低的收获指数表明作物产量受到病虫害或涝旱害等生物或非生物因素的影响。就像 Witt et al.^[11] 和 Haefele et al.^[15] 提到的那样，当运用 QUEFTS 模型预估小麦产量和养分吸收关系以及评估养分内在效率时，去除了 $HI < 0.40$ 的数据。

当 a 、 d 参数和产量潜力设定后，利用 QUEFTS 模型可以模拟一定目标产量下小麦 N、P 和 K 养分的最佳需求量（线性-抛物线-平台曲线），即没有养分限制且给予作物最佳管理条件时的理想养分吸收。结果显示，去除养分内在效率值上下限 2.5th、5th 和 7.5th 的三系列，QUEFTS 模型模拟的最佳养分吸收只有在接近产量潜力时才发生较大差异。由于去除养分内在效率上下限 2.5th 时养分最大稀释和最大累积状态边界线包络更大的范围，

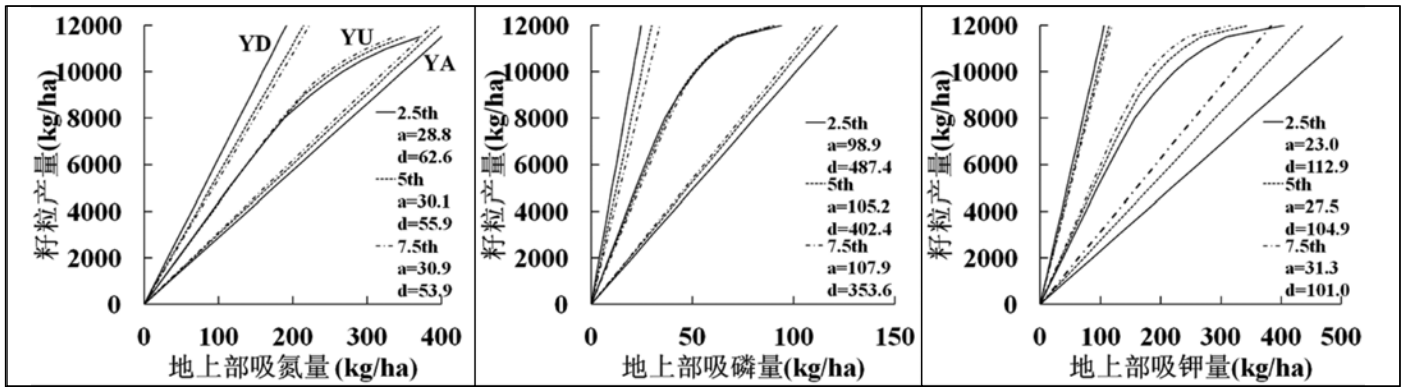


图2 HI ≥ 0.40 数据点去掉其养分内在效率上下限 2.5th、5th 和 7.5th 得出不同 a、d 值及小麦产量和养分吸收关系

注：YD 和 YA 分别表示养分最大稀释和最大累积状态边界线，YU 表示 QUEFTS 模型拟合的最佳养分吸收曲线。2.5th、5th 和 7.5th 分别是利用 Percentile 函数计算的养分内在效率数值，如 2.5th=Percentile (所有 HI ≥ 0.40 样本中养分内在效率数值区域, 0.025)，下同。

因此选用去除养分内在效率上下限 2.5th 对应的 a 和 d 值来预估最佳养分需求以及籽粒产量和地上部养分吸收之间的关系。此时得出的 a 和 d 值分别为 28.8 和 62.6 kg 籽粒/kg N, 98.9 和 487.4 kg 籽粒/kg P 以及 23.0 和 112.9 kg 籽粒/kg K。利用 QUEFTS 模型拟合的直线部分，即当目标产量在产量潜力 60%-70% 范围以内时，生产 1000 kg

12000 kg/ha 之间，但是无论产量潜力设定多少，QUEFTS 模型拟合出来的生产 1000 kg 籽粒产量的氮磷钾最佳养分吸收比例在直线部分是一定的（图 3）。

3.2 预估一定目标产量下的最佳籽粒养分移走量

QUEFTS 模型可以模拟最佳籽粒养分移走量^[23]，有

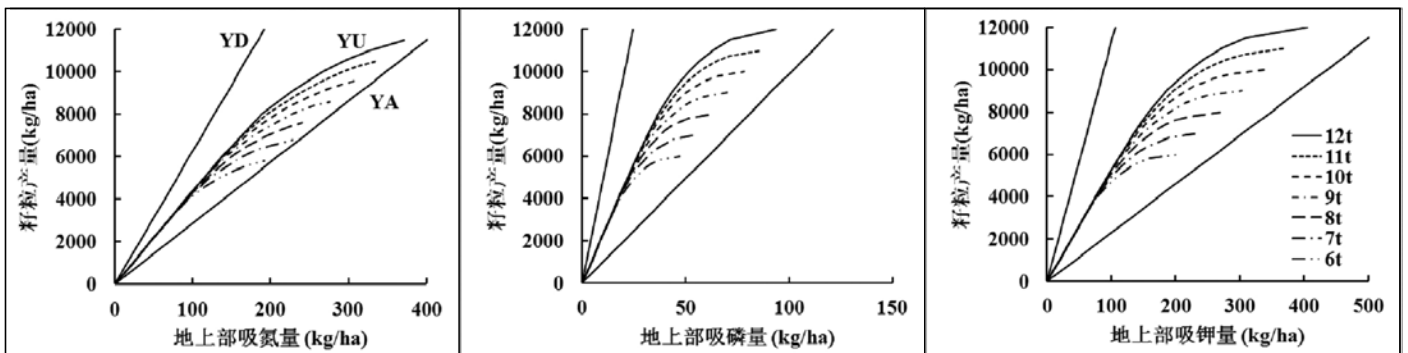


图3 QUEFTS 模型模拟的不同产量潜力下小麦地上部最佳养分需求量

小麦籽粒产量所需要的 N 为 22.8 kg, P 为 4.4 kg, K 为 19.0 kg。氮磷钾吸收比例为 5.18:1:4.32。对应的最佳养分内在效率分别为 43.9 kg 籽粒/kg N, 227.0 kg 籽粒/kg P 以及 52.7 kg 籽粒/kg K。

助于指导科学施肥，使籽粒收获所带走的养分以肥料形式重新归还土壤，避免土壤养分的耗竭。QUEFTS 模型拟合籽粒养分移走量的 a 和 d 值仍然是去除籽粒养分内在效率（籽粒吸收单位养分所对应的籽粒产量）上下限的 2.5th (HI ≥ 0.40) 得出。结果显示，最佳籽粒养分移走曲线

毛振强^[29]曾有研究表明小麦产量潜力处于 6000-

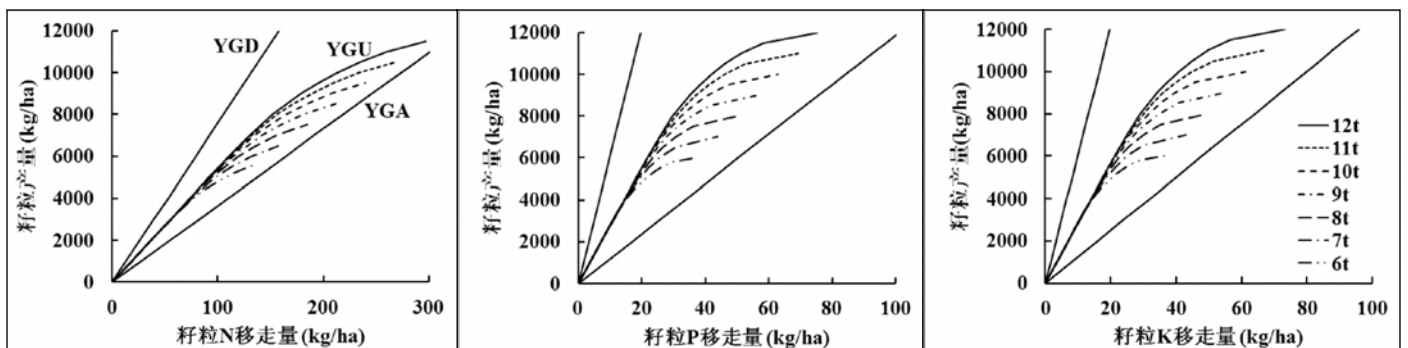


图4 QUEFTS 模型模拟的不同产量潜力下小麦籽粒最佳养分移走量

注：YGD、YGA 分别表示籽粒中养分最大稀释和最大累积状态边界线，YGU 表示 QUEFTS 模型拟合的籽粒最佳养分吸收曲线

与不同目标产量时 (6000-12000 kg/ha) 地上部最佳养分吸收曲线变化趋势非常相似 (图 4)。QUEFTS 模型结果显示, 无论产量潜力设为多少, 在拟合曲线的直线部分, 移走 1000 kg 籽粒所带走的 N、P 和 K 养分分别为 18.3、3.6 和 3.5 kg, 籽粒吸收的氮磷钾比例为 5.08:1:0.97。与模拟的地上部最佳养分吸收相比, 约有 80%、82% 和 18% 的氮磷钾储存在籽粒中并被移出土壤。这些数据可以为保持土壤肥力的推荐施肥方法提供理论依据。

3.3 籽粒产量和养分吸收关系评价

图 5 中的数据点均是来自国际植物营养研究所中国项目部的田间试验以及收集的 2000-2011 年以来已发表文献的数据。华北地区、长江中下游地区和西北地区产量潜力 (设为最大可获得产量) [27-28] 分别为 12000、10000 和 11000 kg/ha。结果显示, 在华北地区, 多数的氮吸收表现过量, 长江中下游地区氮吸收过量与不足共存, 在西北地区, 春小麦和冬小麦的氮多处于奢侈吸收, 表明施肥量仍然存在过量现象, 为了经济和环境效益应适当降低氮肥施用 (图 5a)。

华北地区冬小麦磷素吸收过量与不足现象同在, 表明磷肥施用并不平衡, 磷肥施用可能没有根据土壤的基础养分供应量以及作物需求来确定。长江中下游地区磷素吸收表现出一定的奢侈吸收趋势, 在西北地区磷素吸收表现为不足。磷肥的施用多以过磷酸钙、钙镁磷肥或复合肥形式施入土壤, 与作物所需求的氮磷钾比例相比, 导致了过多的磷肥投入。因此磷肥的施用更需谨慎, 在确定施肥量时应考虑土壤的基础养分供应和作物需求 (图 5b)。

华北地区部分冬小麦钾吸收表现出不足现象, 只有一小部分显示为奢侈吸收。然而春小麦钾吸收与冬小麦明显不同, 多数表现为过量状态 (图 5c)。这主要是由于春小麦的生长环境所致。春小麦主要在中国西北地区种植, 该地区土壤富含钾, 导致过量的钾在作物体中富集。

未施肥小区和减素小区的数据点分布见图 5d-f。接近于最大稀释状态边界线的数据点具有较高的养分内在效率, 但说明存在严重的养分亏缺。仍然有一部分氮素和磷素养分吸收接近于养分最大累积状态边界线, 表明由于不平衡施肥带来的大量有效态氮和磷残留在土壤中导致了养分的奢侈吸收。

3.4 QUEFTS 模型验证

2010-2011 年在河北 (32 户)、河南 (50 户)、山东 (30 户) 和山西 (10 户) 布置小麦田间 OPT 试验, 以验证 QUEFTS 模型的适用性。试验基于小麦养分专家系统推荐最佳的肥料施用量, 并在作物生长过程中给予良好的管理措施。结果显示, 小麦地上部氮磷钾养分实测值与模拟值之间的均方根误差 (RMSE) 分别为 22.7、22.4 和 93.0 kg/ha, 标准化均方根误差 (n-RMSE) 分别为 10.9%、56.9% 和 47.9%, 表明 P 和 K 有较大的变异性。然而, 从所有布置的试验来看, 小麦地上部氮磷钾养分吸收实测值与模拟值非常接近, 两者之间没有显著性差异 (图 6)。该结果也与 Liu et al. [19] 和 Das et al. [16] 研究结果相似, 表明 QUEFTS 模型可以用来预估一定目标产量下的养分吸收并用于推荐施肥。

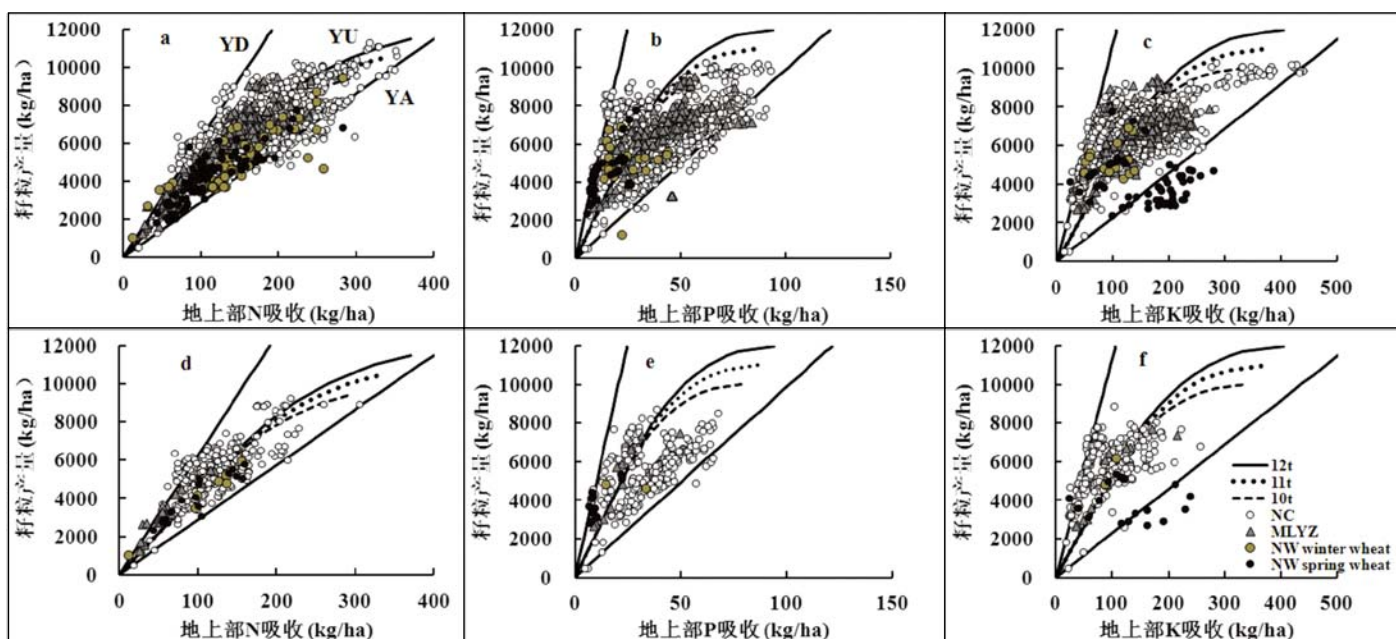


图 5 中国不同区域籽粒产量和氮磷钾养分吸收量之间的关系

注: 图 a-c 是所有试验点, 图 d-f 是只 CK 处理 (不施肥) 或减素试验的数据点。

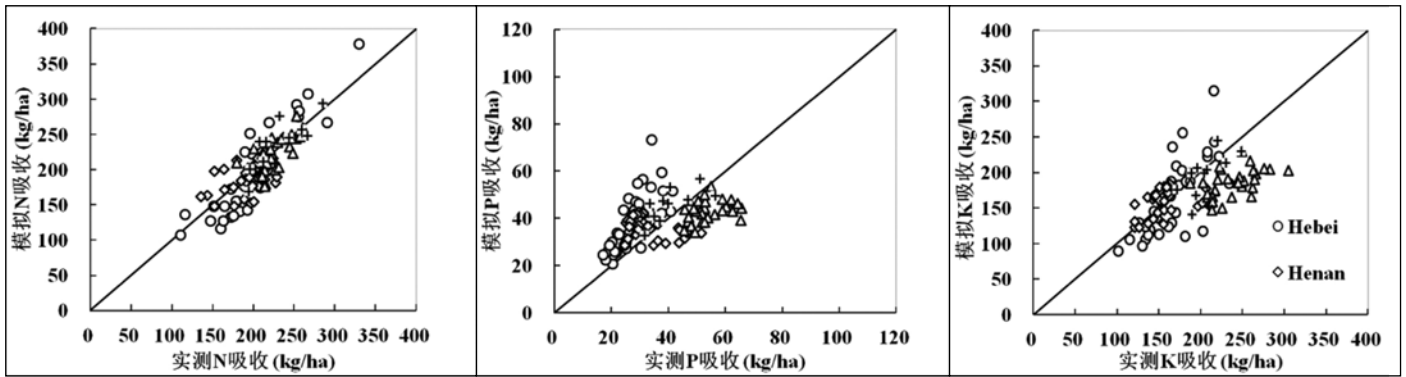


图6 小麦地上部养分吸收实测值和模拟值之间的关系

注：河北省 OPT 处理平均施肥量分别为 135 kg N/ha、23 kg P/ha 和 50 kg K/ha，河南省 OPT 处理平均施肥量为 150 kg N/ha、32 kg P/ha 和 62 kg K/ha，山东省为 140 kg N/ha、34 kg P/ha 和 58 kg K/ha，山西省为 137 kg N/ha、29 kg P/ha 和 65 kg K/ha。

4 结论

收集的 2000-2011 年小麦产量和养分吸收数据显示，小麦养分内在效率具有很大的变异空间。在本研究中，以去除氮磷钾养分内在效率上下限 2.5th 得到的 a 和 d 值作为运行 QUEFTS 模型的参数 ($HI \geq 0.40$)，计算得出 N 养分最小和最大内在效率分别为 28.8 和 62.6kg 籽粒 / kg N，P 最小和最大养分内在效率分别为 98.9 和 487.4kg 籽粒 / kg P，K 最小和最大养分内在效率分别为 23.0 和 112.9kg 籽粒 / kg K。当目标产量低于 60%-70% 的产量潜力时，生产 1000kg 籽粒产量所需的氮磷钾养分分别为 22.8、4.4 和 19.0 kg，氮磷钾养分吸收比例为 5.18:1:4.32，对应的养分内在效率为 43.9、227.0 和 52.7 kg/kg。地

上部移走 1000 kg 籽粒所带走的最佳氮磷钾养分分别为 18.3、3.6 和 3.5 kg，籽粒部分的氮磷钾比例为 5.08:1:0.97，约有 80%、82% 和 18% 的地上部氮磷钾养分转移到籽粒中并被带出农田系统。

当前中国小麦产量和养分吸收之间的关系表现为多数的氮素吸收为过量，P 素吸收过量与不足并存，一些 K 素吸收表现为不足。不同地区具有不同的特征，同时也反映了中国小麦的肥料施用状况，并可以合理指导施肥。

来自河北、河南、山东和山西的试验表明，QUEFTS 模型可以为小麦养分专家推荐施肥系统提供支撑并用于推荐施肥，从而帮助农民获得较高的产量，避免养分的过度吸收和土壤的耗竭，提高养分利用效率和经济效益，保障农田的可持续利用。

参考文献 (略)

参见英文版：Field Crops Research, 2013, 146: 96-104