

# 基于 DSSAT 模型的氮肥管理下华北地区冬小麦产量差的模拟

刘建刚<sup>1</sup>, 褚庆全<sup>1\*</sup>, 王光耀<sup>2</sup>, 陈 阜<sup>1</sup>, 张耀耀<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100193; 2. 加利福尼亚大学沙漠研究与推广中心, 埃尔森特罗 92243)

**摘 要:** 为了评价氮肥管理对华北地区冬小麦产量差的影响, 利用大田试验数据和田间调查的方法, 应用 DSSAT 模型分析了吴桥不同氮肥水平下冬小麦多年平均可获得产量及产量差, 并研究了不同地块产量差和氮肥农学效率差的分布。结果表明, 不同地块冬小麦产量差异显著, 但产量变异较小, 地块间施肥水平存在明显差异, 且变异较大。模型分析确定 222 kg/hm<sup>2</sup> 为最佳施氮量, 对应的最大可获得产量为 7 618 kg/hm<sup>2</sup>, 地块产量与最大可获得产量有较大差距, 当地冬小麦产量具有一定的提升空间。75% 的农户地块的施氮量高于最佳施氮量, 且氮肥农学效率普遍偏低。因此, 生产中应优化氮肥管理方案, 适当减氮并调整施肥时期和改进技术, 提高氮肥农学效率, 以实现冬小麦生产高产高效。在保障国家粮食安全和保护自然环境双重压力的背景下, 通过合理的氮肥管理来缩减冬小麦产量差对提高中国粮食总产及保持农业可持续发展具有重要的意义。

**关键词:** 氮, 肥料, 粮食, 冬小麦, 产量差, DSSAT 模型

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.23.017

中图分类号: S162

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-23-0124-07

刘建刚, 褚庆全, 王光耀, 等. 基于 DSSAT 模型的氮肥管理下华北地区冬小麦产量差的模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 124—129.

Liu Jiangang, Chu Qingquan, Wang Guangyao, et al. Simulating yield gap of winter wheat in response to nitrogen management in North China Plain based on DSSAT model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(23): 124—129. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

从 20 世纪 90 年代以后, 作物产量差研究一直是国际作物学研究方向的一个重要分支。产量差的研究能够揭示产量的提升空间, 以及区域各种限制因子(自然因素、技术因素、经济因素)对产量提高的限制作用<sup>[1]</sup>。在作物生产实践中, 氮肥管理水平是影响作物产量水平的最重要因素之一, 中国粮食作物的施肥水平偏高<sup>[2-3]</sup>, 华北地区化肥投入量持续增加且显著高于全国平均水平, 在大多数地区氮肥用量远高于作物对氮素的需求水平, 导致氮肥利用率低、土壤硝态氮大量残留、氮素损失增加等问题, 对环境产生极大压力<sup>[4]</sup>。由于氮肥对小麦增产效果明显, 因此近年来小麦生产过量施用氮肥问题日益突出<sup>[5]</sup>。作物生长模型采用系统分析方法和计算机模拟技术,

对作物生长发育过程及其与环境和技术动态关系进行定量描述和预测<sup>[6]</sup>, 可以很好的应用到作物产量差研究。前人在用 DSSAT 模型分析不同气候、不同栽培管理条件下作物的产量差等方面已有大量研究<sup>[7-9]</sup>, 并且使用 DSSAT 模型分析氮肥管理对作物产量差的研究也有较多报道<sup>[10-11]</sup>, 但将模型模拟、大田试验及农户调查结合起来分析氮肥管理对华北地区作物产量差影响方面鲜有报道。华北平原是中国最重要的农业生产区, 而冬小麦是华北平原的主要作物, 本研究选择了华北平原冬小麦为研究对象, 试图将作物生长模型、大田试验和田间调查等方法综合应用于产量差的研究<sup>[12-13]</sup>, 充分发挥模拟模型的优势, 以便更精确地量化氮肥管理对冬小麦产量差的影响, 解析其冬小麦产量的限制作用, 探索基于氮肥管理来缩减华北地区冬小麦产量差的技术途径。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概括

吴桥县位于 116°19'~116°24'E, 37°29'~37°47'N 之间, 海拔 14.0~22.6 m。吴桥县地处黑龙港低平原中部地区, 其气候类型属于典型的大陆性季风型暖温带半湿润气候, 全年积温 5 000℃左右, 日照时数 2 100~2 700 h, 可以满足作物一年两熟

收稿日期: 2013-06-20 修订日期: 2013-10-16

基金项目: 国家“973”计划项目(2009CB118608); 公益性行业(农业)科研专项经费(201103001, 200903003)

作者简介: 刘建刚(1988—), 男, 山东青岛人, 博士, 主要从事作物产量差研究, 北京 中国农业大学农学与生物技术学院, 100193。

Email: ljgwr0619@sina.com

\*通信作者: 褚庆全(1969—), 男, 黑龙江人, 副教授, 主要从事作物生长模拟模型和农作制度研究, 北京 中国农业大学农学与生物技术学院, 100193。Email: cauchu@cau.edu.cn

的热量和光照需求,年平均气温在 12~14℃,降雨量年际间变化大,干旱和洪涝等灾害发生频繁,全年降雨量在 400~700 mm,且降雨集中在夏季(6—9 月份)。

### 1.2 数据来源

本研究中模型运行所需数据来自当地农户的地块田间调查和在吴桥进行的水肥试验,调查的范围包括中国农业大学吴桥 2 个试验站周边的 9 个村庄,于 2010 年展开,共调查了 102 个地块。模型所需的吴桥的作物管理数据、土壤数据等来自实验站 2008—2011 年的水分和肥料管理试验,水分试验处理为全生育期内灌 1 水及 2 水,肥料试验为设置不同氮肥施用量,氮肥含量由低到高依次为 0、60、120、180、240 kg/hm<sup>2</sup>。地块调查和试验观测的作物管理数据包括播种日期、品种、施肥量,灌溉时间、灌溉量、收获时间和病虫害发生、防治情况等。逐日气象数据来源于吴桥气象局,包括日最高温度、日最低温度、日平均温度、降雨量、日照时数、相对湿度、平均风速、风速等,模型输入的日总辐射采用彭曼-蒙特斯方法由日照时数计算得出。

### 1.3 研究方法

本研究采用作物生长模拟模型、田间试验和地块调研相结合的方法。文中的模型 DSSAT V4.5 是一个包含 28 种作物模拟模型的应用软件,其运行需要依靠土壤、气候、作物管理及试验数据等的支持。作为土壤—植物—大气的动力学功能模型,DSSAT 可以模拟作物生长,发育动态和产量等。目前 DSSAT 作物模拟模型已被用于许多应用领域,包括从农场的精细化管理到区域气候变异和气候变化的影响评估。在本研究中,主要利用 DSSAT 模型模拟了吴桥连续 30 a (1981—2010) 灌溉条件下不同施氮水平的冬小麦可获得产量的变化。本文定义的产量差是指大田实际产量和最大可获得产量的产量差,这里的可获得产量是指在足墒且生育期内灌溉 2 水条件下不同施氮量获得的模拟产量。数据分析使用 SAS9.2 和 Excel 2010。

在建立作物管理文件、土壤文件和气象数据文件的基础上,采用“试错法”对作物品种参数进行调试,直至模型模拟输出结果与实测值吻合。本研究用归一化均方根差(normalized root mean square error, *NRMSE*)来度量模拟值与实测值的相对差异程度,该指标是分析模拟产量和实际产量差异时的最佳衡量指标<sup>[14-16]</sup>,并用一致性指数 *d* (index of agreement) 检验模拟值和实测值的吻合度,计算方法见式(1)和式(2)。

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - R_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{R}} \quad (1)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - R_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i'| + |R_i'|)^2} \quad (2)$$

式中,  $S_i$  为模拟值,  $R_i$  为实测值,  $S_i' = S_i - \bar{R}$ ,  $R_i' = R_i - \bar{R}$ ,  $\bar{R}$  为实测值平均值,  $n$  为模拟值的样本数。一般认为,  $NRMSE < 10\%$ , 为极好;  $10\% \leq NRMSE \leq 20\%$ , 为好;  $20\% \leq NRMSE \leq 30\%$ , 为中等;  $NRMSE > 30\%$  为差。 $d$  值越接近 1, 说明模拟值和实测值一致性越好, 否则相反。

氮肥农学效率 (agronomic efficiency of applied nitrogen) 是指投入每千克纯氮所增加的经济产量数量, 计算方法见式 (3)

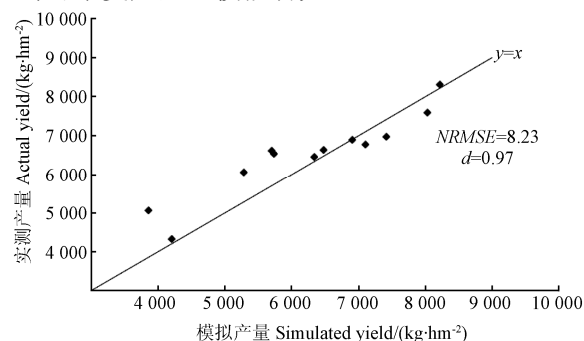
$$AE_N = (Y - Y_0) / N \quad (3)$$

式中,  $AE_N$  为氮肥农学效率, kg/kg,  $Y$  代表氮肥施用下作物的经济产量, kg/hm<sup>2</sup>,  $Y_0$  代表不施氮肥条件下作物的经济产量, kg/hm<sup>2</sup>,  $N$  代表氮肥施用量, kg/hm<sup>2</sup><sup>[17]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型的验证和冬小麦品种参数的校正

将吴桥的气候数据、土壤、栽培管理措施、作物参数输入模型, 运用 DSSAT 模型对济麦 22 进行产量模拟, 通过模拟值与实测值对比分析, 结果表明  $NRMSE$  为 8.23,  $d$  值等于 0.97, 产量模拟结果和实测值的一致性较好, 品种参数能够较为准确地反映作物品种的主要遗传特征, 可用于不同氮肥处理对冬小麦产量差模拟研究。



注:  $NRMSE$  为归一化均方根误差;  $d$  为一致性指数。  
Note:  $NRMSE$  is normalized root mean square error;  $d$  is index of agreement.

图 1 冬小麦模拟产量与实际产量的关系

Fig.1 Relationship of simulated yield and actual yield of winter wheat

### 2.2 不同地块的冬小麦产量和施氮量的评价

通过对不同地块冬小麦的产量和施肥水平的

研究发现,不同地块间冬小麦产量相差较大,但变异性较小,不同地块农户的氮肥施用量差异较明显,且变异较大。调查的地块冬小麦产量在  $5\,250\sim 8\,630\text{ kg/hm}^2$ ,平均值为  $7\,250\text{ kg/hm}^2$ ,变异系数为  $9.19\%$ ,累计概率分布函数表明  $50\%$ 的农户冬小麦产量可以达到  $7\,500\text{ kg/hm}^2$ ,累积分布函数概率为  $75\%$ 时的冬小麦产量与累积分布函数概率在  $25\%$ 时的产量的差距为  $750\text{ kg/hm}^2$ ,这说明农户不同地块间冬小麦产量的变异并不是很大。地块间产量差异的一个主要原因是氮肥管理的差异,如施氮肥方式、施氮肥时间和施氮肥量等。研究表明,不同地块的氮肥施用量分布在  $30\sim 495\text{ kg/hm}^2$ ,平均氮肥施用量为  $260\text{ kg/hm}^2$ ,变异系数为  $35.01\%$ ,累积概率分布函数表明  $50\%$ 的农户氮肥施用量超过  $264\text{ kg/hm}^2$ 。累积分布函数概率为  $75\%$ 时的氮肥施用量与累积分布函数概率在  $25\%$ 时的氮肥施用量的差距为  $114.7\text{ kg/hm}^2$ 。这表明农户间氮肥施用量的变异超过产量的变异。从农户角度看,施氮量的不同主要由栽培管理水平和思想意识不同引起,农户施氮量增加导致产量增加后,便会一直采取高投入的方式生产,而某些气候年型条件下可以减少氮肥投入依然获得高产,但农户并未采取灵活的措施生产。农户间氮肥施用量差异的原因包括土壤初始含氮条件,土壤质地,土壤有机质,前茬作物氮素的残留和氮肥的有效性等<sup>[18]</sup>。

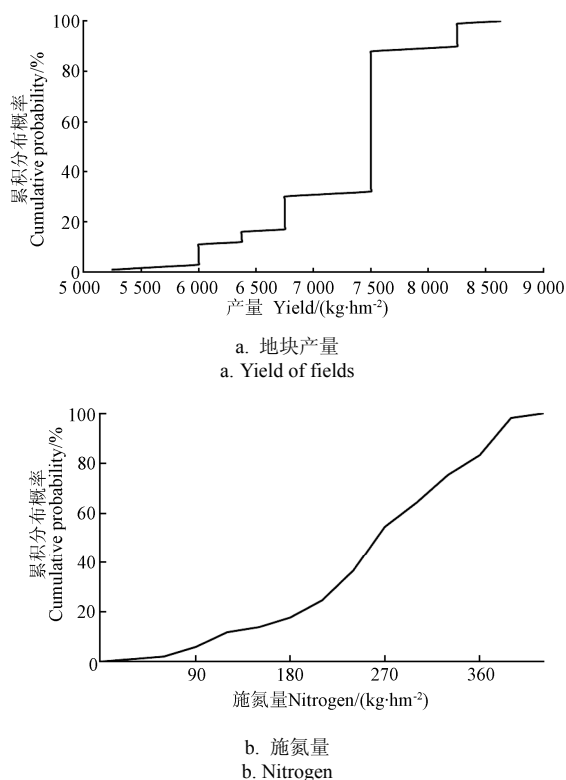


图2 不同地块产量和施氮量的累积概率分布  
Fig.2 Cumulative probability distribution of yield and N fertilizer application in different fields

## 2.3 冬小麦最佳施肥量的比较

使用 DSSAT 模型模拟灌溉条件下连续 30 a 不同施肥量条件下的冬小麦的可获得产量,结果表明在一定施氮量范围,随着施肥量的增加,冬小麦的可获得产量逐渐增加,但是施氮量超过  $222\text{ kg/hm}^2$ 以后,产量不再随施氮量的增加而增加。线性+平台模型可以很好地拟合当地冬小麦可获得产量对施氮量的反应,因此 30 a 平均最大可获得产量为  $7\,618\text{ kg/hm}^2$ ,最佳施氮量为  $222\text{ kg/hm}^2$ 。施氮量和作物产量的关系较为复杂,在一定阈值范围内,其对作物的生长和产量表现为积极的正向作用,施肥量的增加能够提高生物量的积累、LAI 指数的提高等。较高的氮肥施用会导致氮肥吸收和 LAI 的增加,尽管他们之间的关系是间接的。LAI 的增加会导致快速的林冠郁闭,快速林冠郁闭的正面影响包括减少土壤蒸发,抑制杂草等,每单位水的蒸发固定更多的二氧化碳,更多的光截获,可以达到增产的效果<sup>[19]</sup>。

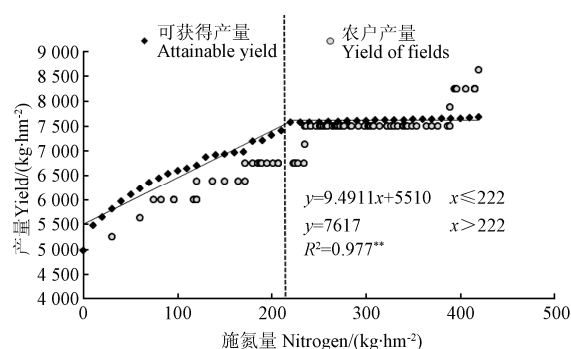


图3 不同施氮水平对冬小麦产量的影响

Fig.3 Impact of different N fertilizer application on yield of winter wheat

## 2.4 不同施氮量对冬小麦产量差的影响

目前华北地区冬小麦的生产中,施氮量已不是限制冬小麦产量的主要限制因子,如何改进施肥技术提高氮肥的利用率是缩减由氮肥管理产生的产量差的关键。最大可获得产量与不同氮肥水平下的地块产量的差距 ( $Y_{Ga}$ ) 介于  $-1\,007\sim 2\,368\text{ kg/hm}^2$ ,随着施氮量的增加, $Y_{Ga}$  逐渐缩小,但是当施氮量超过  $222\text{ kg/hm}^2$ 后,增施氮肥对缩减产量差的贡献逐渐减弱,农户生产水平存在较大差异。在同一产量差距下,不同地块施氮量差异较大,有  $55\%$ 的地块冬小麦产量与最佳施氮量时的产量差距为  $-118\text{ kg/hm}^2$ ,但对应的施氮量分布在  $235\sim 389\text{ kg/hm}^2$ ,表明除氮肥限制外,其他生产条件的不足也会导致实际产量低于最大可获得产量。若当地地块施氮量调整为最佳施氮量,则当地有  $15.85\%$ 的减氮潜力,这为减氮增产提供了现实依据。

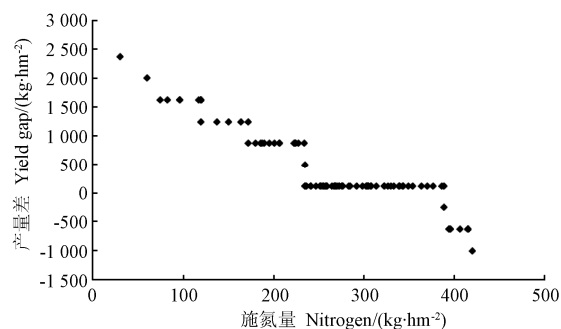


图 4 不同施氮水平下最大可获得产量与地块实际产量的差异  
Fig.4 Change of gap between maximum attainable yield and actual yield of fields in different N fertilizer applications

根据分析, 已知最佳施氮肥量为  $222 \text{ kg/hm}^2$ , 对应的可获得产量为  $7618 \text{ kg/hm}^2$ 。比较最大可获得产量和不同施肥量下冬小麦的可获得产量的差距 ( $Y G_m$ ) (见表 1), 发现二者的差距介于  $0 \sim 2655 \text{ kg/hm}^2$ 。在最佳施氮量  $222 \text{ kg/hm}^2$  时, 冬小麦可获得产量较不施氮可以增加  $2655 \text{ kg/hm}^2$ , 但是施肥量超过  $222 \text{ kg/hm}^2$  时, 冬小麦可获得产量不再随施氮量增加而增加。

表 1 不同施氮量下平均多年模拟可获得产量及产量差的变化  
Table 1 Change of attainable yield and yield gap

施氮量 Nitrogen ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	可获得产量 Attainable Yield( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	产量差 Yield Gap( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )
0	4963	2655
50	6100	1518
100	6587	1031
150	6936	682
200	7305	313
222*	7618	0
250	7618	0
300	7618	0
350	7618	0
400	7618	0

注: \*线性-平台模型确定的最佳施氮量。

Note: \*optimum N application rate obtained by linear platform.

本研究表明, 调研的农户中有 75% 的地块冬小麦施氮量超过最佳施氮量, 农户施氮量存在不合理。根据调查的结果发现, 有 12% 的地块冬小麦产量超过最大可获得产量, 但这些地块的施氮量至少高于最佳施氮量 75% 以上, 这种依赖高投入高产出的生产方式对该地区环境极其不利, 因此当地农户应在减少氮肥投入的条件下通过调整其他农艺措施, 实现农业的可持续发展。

## 2.5 不同施氮量的氮肥农学效率分析

当地农户的氮肥农学效率较低, 仍有较大的提升空间。由于产量不同, 同等施氮量条件下地块、模拟和试验的氮肥农学效率存在不同。当施氮量为  $60$ 、 $120$ 、 $180 \text{ kg/hm}^2$  时, 大田试验的冬小麦氮肥农

学效率均高于所调查的地块的氮肥农学效率, 但是, 由于本研究中采用的是节水灌溉, 较农民常规灌溉次数节省 1 次, 且由于个别地块土壤肥力较高, 灌溉量较多, 大量施用有机肥等措施, 取得的产量较高, 故导致了在施氮量为  $240 \text{ kg/hm}^2$  时出现大田试验中氮肥农学效率低于农户地块氮肥农学效率的现象。通过 DSSAT 模型模拟的冬小麦氮肥农学效率普遍高于农户地块的氮肥农学效率。

随着施氮量的增加, 氮肥农学效率呈现减小趋势, 而农户的氮肥农学效率并不呈现简单的线性下降趋势, 在同一施氮量下由于产量不同, 氮肥农学效率亦也有较大不同, 当地冬小麦氮肥农学效率有一定的提升空间。当农户施氮量为  $30 \text{ kg/hm}^2$  时, 产量仅为  $5250 \text{ kg/hm}^2$ , 其氮肥农学效率为农户水平上最低值  $6.14 \text{ kg/kg}$ 。当施氮量为  $74.25 \text{ kg/hm}^2$  时, 农户地块的产量为  $6000 \text{ kg/hm}^2$ , 其氮肥农学效率为  $12.58 \text{ kg/kg}$ , 为农户水平氮肥农学效率最大值。肥料试验中的氮肥农学效率最大值为施氮量为  $60 \text{ kg/hm}^2$  时的  $16.5 \text{ kg/kg}$ , 对应的冬小麦产量为  $6055 \text{ kg/hm}^2$ , 施氮量为  $120$ 、 $180$ 、 $240 \text{ kg/hm}^2$  时的氮肥农学效率分别为  $12.9$ 、 $9.5$  和  $7.9 \text{ kg/kg}$ 。同等施氮量下, 农户的氮肥农学效率基本都低于试验和模型模拟值, 因此当地农户应在减少氮肥施用量的前提下, 调整品种、改善其他栽培管理措施, 使冬小麦生产达到高效。

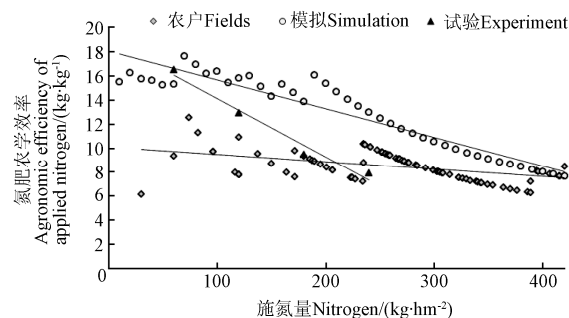


图 5 不同地块、试验和连续多年模拟的冬小麦氮肥农学效率的变化  
Fig.5 Change of agronomic efficiency of applied N fertilizer of different fields, experiment and perennial simulation

## 3 讨论

### 3.1 冬小麦的最佳施氮量

本文研究在足墒生育期灌溉 2 水条件下连续模拟 30 a 冬小麦产量, 结果能很好的说明不同气候条件下同一施氮量对冬小麦产量的平均贡献。本文研究确定的冬小麦的最佳施氮量较中国其他报道的数值偏高<sup>[20-22]</sup>, 当前欧洲国家近年来每季作物的施氮量 (N) 普遍降低到  $120 \text{ kg/hm}^2$  左右, 但单位面积产量相对较低<sup>[23]</sup>。最佳施氮量偏高主要是由于不同地

块的肥力存在差异,且栽培管理措施不同,因此确定的施氮量较试验水平高,但这和华北地区生产实际相符,梁卫理等研究表明河北平原示范田冬小麦平均施氮量为  $233.6 \text{ kg/hm}^2$  [24],马文奇等研究表明河北平原的施氮量为  $272.7 \text{ kg/hm}^2$ ,施氮量应降低或可维持现有,通过综合措施增加冬小麦产量。

### 3.2 不同气候年型和灌溉条件下氮肥对冬小麦的限制作用

华北地区北部小麦生产严重依赖灌溉,尽管本研究模拟了近 30 a 不同氮肥水平下的可获得产量,但未详细分析不同气候年型下氮肥的限制作用,下一步将研究不同灌溉制度和灌溉水平下的氮肥管理对产量差的影响,提出不同灌溉制度的最佳施肥水平和效率,以提高氮肥的利用率,达到高产高效。此外,导致冬小麦产量差的原因很多,除了氮肥管理和灌溉管理以外,气候因素、耕作栽培措施等因素都对作物产量差有影响,而且各种因素是交织在一起,共同影响冬小麦产量,导致产量差,今后的研究中将进一步解析冬小麦产量差的限制因素。

## 4 结 论

1) 不同地块之间冬小麦产量差异明显,但变异并不是很大,不同地块之间施氮量差异明显,且变异较大,氮肥施用量的显著差异是可能导致地块间产量差的原因。调查地块冬小麦产量介于  $5\,250 \sim 8\,630 \text{ kg/hm}^2$ ,平均值为  $7\,250 \text{ kg/hm}^2$ ,变异系数为 9.19%,施氮量介于  $30 \sim 495 \text{ kg/hm}^2$ ,平均为  $260 \text{ kg/hm}^2$ ,变异系数为 35.01%。

2) 农户冬小麦产量与可获得产量存在差距,当地冬小麦产量有一定提升空间。根据模型模拟分析的最佳施肥量及调研的不同地块冬小麦施肥水平,吴桥冬小麦的最佳施氮量为  $222 \text{ kg/hm}^2$ ,对应的最大可获得产量为  $7\,618 \text{ kg/hm}^2$ 。

3) 当地农户施氮量普遍不合理,75%的农户施氮量超过最佳施氮量,氮肥施用量已不是限制产量的主要因素,可在减氮的条件下通过优化施肥方案和提高氮肥技术,从而实现冬小麦的高产高效。在施氮量不变甚至减少的情况下,可通过调整其他栽培管理措施、品种及土壤条件等来提高冬小麦产量,实现冬小麦生产的高产高效。

4) 当地冬小麦氮肥农学效率较低,农户地块的氮肥农学效率还有一定的提升空间。模型模拟和大田试验的氮肥农学效率普遍高于地块,且同一施氮水平下,地块间氮肥农学效率亦存在较大差异,因此,可以通过提高氮肥管理水平优化施肥方案来提高氮肥的农学效率。

### [参 考 文 献]

- [1] David B Lobell, Kenneth G Cassman, Christopher B Field, et al. Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2009, 34(1): 179–204.
- [2] Zhang Fusuo, Chen Xinping, Peter Vitousek. Chinese agriculture: An experiment for the world[J]. Nature, 2013, 497(7447): 33–35.
- [3] 张福锁, 王激清, 张卫峰. 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 Fusuo, Wang Jiqing, Zhang Weifeng, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915–924. (in Chinese with English abstract)
- [4] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科技出版社, 1992: 200–215.
- [5] Nathaniel D Mueller, James S Gerber, Matt Johnston, et al. Closing yield gaps through nutrient and water management[J]. Nature, 2012, 490(7419): 254–257.
- [6] 王纯枝, 李良涛, 陈健, 等. 作物产量差研究与展望[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(6): 1283–1287.  
Wang Chunzhi, Li Liangtao, Chen Jian, et al. Status and perspective of crop yield gap[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(6): 1283–1287. (in Chinese with English abstract)
- [7] Timsina J, Godwin D, Humphreys E, et al. Evaluation of options for increasing yield and water productivity of wheat in Punjab, India using the DSSAT-CSM-CERES-Wheat model[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(9): 1099–1110.
- [8] Lobell D, Ortiz-Monasterio J I. Impacts of day versus night temperatures on spring wheat yields: a comparison of empirical and CERES model predictions in three locations[J]. Agron J, 2007, 99(2): 469–477.
- [9] Ghaffari A, Cook H F, Lee H C. Simulating winter wheat yields under temperate conditions: exploring different management scenarios[J]. Eur J Agron, 2001, 15(4): 231–240.
- [10] Rinaldi M. Water availability at sowing and nitrogen management of durum wheat: A seasonal analysis with the Ceres-Wheat model[J]. Field Crops Research, 2004, 89(1): 27–37.
- [11] Gabriela Abeledo, Roxana Savin, Gustavo A Slafer. Wheat productivity in the Mediterranean Ebro Valley: Analyzing the gap between attainable and potential yield with a simulation model[J]. European Journal of Agronomy, 2008, 28(4): 541–550.
- [12] Benjamin Torabi, Afshin Soltani, Serollah Galeshi, et al. Assessment of yield gap due to nitrogen management in wheat[J]. Australian Journal of Crop Science, 2011, 5(7): 879–884.
- [13] Sadras V, Roget D, O'Leary G. On-farm assessment of environmental and management constraints to wheat yield and efficiency in the use of rainfall in the Mallee[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2002, 53(5): 587–598.
- [14] Willmott Cort J. Some comments on the evaluation of model performance[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1982, 63(11): 1309–1313.
- [15] Willmott J, Ackleson G, Davis E, et al. Statistics for the evaluation and comparison of models[J]. Journal of Geophysical Research, 1985, 90(C5): 8995–9005.
- [16] Ana Iglesias. Use of DSSAT models for climate change impact assessment: Calibration and validation of Ceres-Wheat and CERES-Maize in Spain[R]. Politénica: Universidad Politécnica de Madrid, 2006.

- [17] 班红勤, 周冉, 马文奇, 等. 河北平原冬小麦增产增效潜力分析[J]. 麦类作物学报, 2012, 32(3): 478—483.  
Ban Hongqin, Zhou Ran, Ma Wenqi, et al. Potential to improve the yield and nitrogen use efficiency of on-farm winter wheat in hebei plain[J]. Journal of Triticeae Crops, 2012, 32(3): 478—483. (in Chinese with English abstract)
- [18] James Sumberg. Mind the (yield) gap(s)[J]. Food Security, 2012, 4(4): 509—518.
- [19] Kalra N, Chakraborty D, Kumar R, et al. An approach to bridging yield gaps, combining response to water and other resource inputs for wheat in northern India, using research trials and farmers' fields data[J]. Agricultural Water Management, 2007, 93(1): 54—64.
- [20] 周顺利, 张福锁, 王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏研究 I. 冬小麦[J]. 生态学报, 2001, 21(11): 1782—1789.  
Zhou Shunli, Zhang Fusuo, Wang Xingren. Studies on the spatio-temporal variations of soil  $\text{NO}_3\text{--N}$  and apparent budget of soil nitrogen I. Winter wheat[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(11): 1782—1789. (in Chinese with English abstract)
- [21] 李世娟, 周殿玺, 兰林旺. 不同水分和氮肥水平对冬小麦吸收肥料氮的影响[J]. 核农学报, 2002, 16(5): 315—319.  
Li Shijuan, Zhou Dianxi, Lan Linwang. The fate of fertilizer nitrogen in winter wheat under wheat under different water and nitrogen level[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2002, 16(5): 315—319. (in Chinese with English abstract)
- [22] 薛青武, 陈培元. 土壤干旱条件下氮素营养对冬小麦水分状况和光合作用的影响[J]. 植物生理学报, 1990, 16(1): 49—56.  
Xue Qingwu, Chen Peiyuan. Effects of nitrogen on water status and photosynthesis in wheat under soil drought[J]. Acta Phytophysiological Sinica, 1990, 16(1): 49—56. (in Chinese with English abstract)
- [23] 巨晓棠, 张福锁. 关于氮肥利用率的思考[J]. 生态环境, 2003, 12(2): 192—197.  
Ju Xiaotang, Zhang Fusuo. Thinking about nitrogen recovery rate[J]. Ecology and environment, 2003, 12(2): 192—197. (in Chinese with English abstract)
- [24] Peter S. Carberry, Liang Weili, Stephen Twomlow, et al. Scope for improved eco-efficiency varies among diverse cropping systems[J]. PNAS, 2013, 110(21): 8381—8386.

## Simulating yield gap of winter wheat in response to nitrogen management in North China Plain based on DSSAT model

Liu Jiangang<sup>1</sup>, Chu Qingquan<sup>1\*</sup>, Wang Guangyao<sup>2</sup>, Chen Fu<sup>1</sup>, Zhang Yaoyao<sup>1</sup>

(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Desert Research & Extension Center, University of California, El Centro 92243, United States)

**Abstract:** Yield gap analysis is important to reveal factors that limit crop production and identify management practices that can potentially increase crop yield. Although nitrogen (N) fertilizer played an important role in wheat yield increase in the past 30 years in China, excessive nitrogen application became a common practice in some farms, which increased input by farmers, reduced farm profitability, and caused significant environmental issues in recent years. Due to the complexity of the system, crop growth models such as the DSSAT model (Decision Support System for Agro-technology Transfer) have been widely used by many researchers across the world to analyze crop yield gap and determine the impact of N fertilizer on yield gap. In this study, the DSSAT model was coupled with data from experiments and a farm survey was employed to assess the impact of N fertilizer management on the yield gap of winter wheat in the North China Plain, to determine the average yields and yield gaps under distinct N fertilizer management scenarios over the years, and to identify the distribution of yield gaps and the agronomic efficiency of applied N fertilizer ( $AE_N$ ) among different fields. The field experiments were conducted in Wuqiao, China from 2008 to 2011. Yield and management data were collected from the experiments to calibrate and validate the DSSAT model and the analysis of  $AE_N$  in the experiment. The simulated yields of the DSSAT model were closely correlated to the actual yield in the field experiments with different application levels of N fertilizer, indicating that the model was adequate for analyzing the yield gap of winter wheat in the region. Results from a farm survey, conducted in Wuqiao in 2010, indicated that there were remarkable differences among winter wheat yields in different fields, ranging from 5250 to 8630  $\text{kg}/\text{hm}^2$  with a relatively lower coefficient of variation. The N fertilizer rates ranged from 30 to 495  $\text{kg}/\text{hm}^2$  with significant variations among different fields, indicating a wide range of N fertilizer application rates among farmers in the region and room for improvement in management practices. Based upon the simulation results, the optimum N application rate was 222  $\text{kg}/\text{hm}^2$  with the corresponding maximum attainable yield ( $AY_{\text{max}}$ ) of 7618  $\text{kg}/\text{hm}^2$ . There were considerable differences between  $AY_{\text{max}}$  and crop yields from the survey, ranging from -1007 to 2 368  $\text{kg}/\text{hm}^2$ . The gap narrowed gradually as the N fertilizer rate increased and plateaued at a 222  $\text{kg}/\text{hm}^2$  N fertilizer rate. The N application rates in farmers' fields were commonly higher than the optimum rate with low  $AE_N$ . Almost 75% of the fields in the survey were in the range of relatively high N rates, indicating excessive N fertilizer applications in the wheat crop in the region. The results indicated that winter wheat yield could be significantly improved with better management practices. Possible optimization strategies to achieve both high yields and high N use efficiency in winter wheat in North China Plain should focus on adjusting N fertilizer application rates to an optimal range, improving N fertilizer application timing, and adjusting the practices according to local soil conditions and climates. Greater efforts in education and on-farm demonstration are needed to help farmers in improving N fertilizer management practices.

**Key words:** nitrogen, fertilizer, grain, wheat, yield gap, DSSAT model

(责任编辑: 刘丽英)