

作物产量差研究与展望*

王纯枝¹ 李良涛² 陈健³ 刘明强² 宇振荣²

(1. 国家气象中心 北京 100081; 2. 中国农业大学资源与环境学院 北京 100193;
3. 浙江林学院国际生态中心 临安 311300)

摘要 作物实际产量与潜在产量间存在较大差距, 地区间甚至同一地区不同田块间作物产量也存在显著差异, 这种现象在世界范围内的农业生产中广泛存在。缩小该差距对于提高粮食产量, 确保粮食安全具有重要意义。本文在阐述开展作物产量差研究重要性和必要性的基础上, 从产量差的内涵、研究尺度的扩展及分析方法等方面介绍了目前国内外有关作物产量差的研究进展, 并综述了作物生长模拟模型在产量差研究中的应用, 最后分析了目前作物产量差研究中存在的问题和不足之处, 并探讨了未来作物产量差研究的发展方向。

关键词 作物产量 作物潜在产量 作物产量差 作物生长模型 研究方法

中图分类号: S5/S9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2009)06-1283-05

Status and perspective of crop yield gap

WANG Chun-Zhi¹, LI Liang-Tao², CHEN Jian³, LIU Ming-Qiang², YU Zhen-Rong²

(1. National Meteorological Center, Beijing 100081, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;
3. International Research Center for Spatial Ecology, Zhejiang Forestry University, Lin'an 311300, China)

Abstract There exists a large gap between crop potential yield and actual yield for cultivated farmlands. Variation in crop yield from field to field is a common ubiquitous feature across agricultural landscapes. Closing yield gap plays an important role in increasing food production and ensuring food security. This study introduces the importance and necessity for closing yield gap and summarizes domestic and international research progress in yield gap analysis. The development and definition of yield gap, research method and scale, and data analysis method are documented. The application of crop growth model in yield gap research is also discussed. Finally, the main problems currently limiting yield gap analysis are advanced and research trend discussed.

Key words Crop yield, Crop potential yield, Crop yield gap, Crop growth model, Research method

(Received Sept. 11, 2008; accepted Jan. 10, 2009)

近年来粮食安全问题再次引起人们的重视^[1]。一般而言, 增加粮食总产量的主要途径一是扩大粮食播种面积, 二是提高粮食单产水平。由于人类长时间无限制的开发利用, 有限的水、土地等资源正在走向枯竭。如果继续增加耕地面积就意味着需要开发肥力贫瘠、生态脆弱的土地, 这不仅需要耗费大量的人力、物力, 且对生态环境的稳定也是一种破坏^[2]。因此, 提高粮食单产水平成为解决未来粮食安全问题最重要的途径。1949~2003年间, 中国粮食产量增加近320%, 但30%~50%粮食产量的增加得益于化肥施用量的增加, 28%来源于灌溉, 7%来源于

作物品种改良^[3,4]。化肥和农药的投入及灌溉用水大幅度增加, 在作物产量不断提高的同时也消耗了大量的资源, 不仅增加了生产成本, 还带来了一系列生态环境问题, 并开始对作物产量产生负反馈作用。随着人们对粮食产品质量要求的提高, 这也进一步限制了通过品种改良来提高作物产量的空间^[5]。与之矛盾的是目前作物生产潜力远未得到充分发挥, 实际产量与潜在产量之间存在较大差距, 地区间甚至同一地区不同农户田块之间作物产量也存在较大差距^[6], 而且一些新品种的出现在提高作物产量的同时, 也加大了农民实际田块产量与实验站产量之

* 国家自然科学基金项目(30270776), 国家科技支撑计划(2007BAD87B01-1A)和国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2005CB121103)资助

王纯枝(1976~), 女, 博士, 工程师, 主要从事农业气象与生态模型等方面研究。E-mail: wcz_bj@163.com。

收稿日期: 2008-09-11 接受日期: 2009-01-10

间的差距^[7]。那么,是什么造成了作物实际产量与潜在产量、农户田块间以及农户田块产量与实验站产量之间的差距?这个差距到底有多大?限制其生产潜力发挥的真正因素又是什么?应该采取什么措施来缩小这个差距?回答这些问题,就需要开展作物产量差研究。

1 产量差内涵

作物产量差研究开始于 20 世纪 70 年代中期。国际水稻研究所 1974 年在印度、巴基斯坦和菲律宾等亚洲 6 国开始的水稻限制因子研究拉开了产量差研究序幕。之后,大量的产量差研究在世界各地被广泛开展,特别是在一些发展中国家,如印度和泰国等^[8]。20 世纪 70 年代中期出现了多种“产量差”的概念模型,这些模型一般通过把产量差限制因子分组来寻找引起产量差的因素^[9]。Gomez^[10]把产量差限制因子分为两组,每组用来解释产量差中的一部分。同时,引入了 1 个新的概念,即“田块潜在产量(Potential farm yield)”。相应地把产量差也分为两级:产量差 1 指实验站产量与田块潜在产量之间的差异,该差异是由农田不适环境及不适宜推广的技术因素引起的;产量差 2 指田块潜在产量与农民经营的田块实际产量之间的差异,该差异是由传统经验技术及生物限制因素引起,包括品种、杂草、病虫害、土壤条件及水、肥等。De Datta^[11]于 1981 年首先明确提出了产量差(Yield gap)概念,在此概念中产量差也只被定义为农田实际产量与实验站潜在产量的差距。Fresco^[12]进一步完善了产量差概念模型的内涵,除用“潜在田块产量”的“技术上限产量”概念外,又引入了一个“经济上限产量”的概念。de Bie^[13]2000 年详细总结了不同定义下的各级产量差,并对各级产量差的主要限制因子进行了分类(图 1)。Lobell 等^[14]又定义田块产量差为农户田块最高产量与平均产量的差距。因此,随着研究的逐步深入,产量差研究的内涵也在逐渐丰富。

2 产量差研究进展

2.1 研究方法

总体而言,产量差研究方法大致分为 3 类:(1)针对影响产量的 1 个或几个因子,严格控制其他因子,在实验站或农户田块布置特定处理,然后和 1 个预先设定好的处理进行比较研究。Meertenst 等^[15]于 1990~1991 年在坦桑尼亚选择两个村田块分析了杂草、肥料和病虫害处理对棉花产量的影响;Becker 和 Johanson^[16]在非洲选择 64 块洼地灌溉水田布置试验,分析了水分管理、氮肥施用和杂草管理对水稻产量的影响。宇万太等^[17]利用长期定位肥料试验,分析了不同施肥制度对作物产量的影响。(2)由泰国研究人员首先提出并实践的快速农村评估法(Rapid rural appraisal, RRA)^[18]。在应用农村快速评估过程中,农民只是参加获取数据和讨论发现问题的过程,被排斥在分析过程之外,该方法非常利于研究者快速全面收集数据^[19]。Surabol 等^[20]通过农户调查,结合统计资料,对泰国大豆产量限制因子进行了分析,最后指出不合理的土地利用及杂草和虫害管理方式、整地不充分及不能合理利用先进技术是限制当地作物产量的主要因素。(3)跟踪试验。在农民不知情的前提下,在农户田块中选择代表不同水平的典型田块进行跟踪调查,进行产量差分析。Sumarno 等^[21]采取此方法对爪哇大豆产量差限制因子进行分析,结果发现土壤肥力、不利的灌溉措施、虫害等是大豆产量的主要限制因素。

产量差分析研究方法各有所长,但都是通过试验和 1 个预先设定好的处理进行比较,该预先设定的处理通常代表可能适应先进技术的地区。然而,有限的人力、物力和财力总是限制这些试验的研究数量和质量。快速农村评估法虽然提供了一种很好的思路,但并未量化分析其结果。De Bie^[13]针对快速农村评估法的缺点,提出了利用比较优势分析法(Comparative performance analysis, CPA)来找出作物产量主要限制因子,并对限制因子进行定量化分

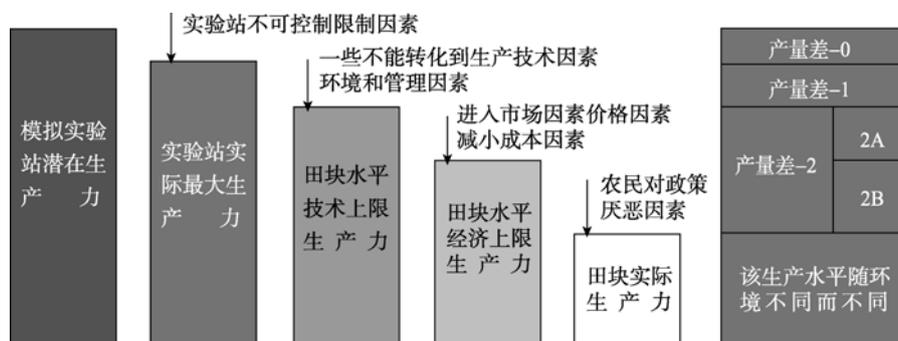


图 1 作物产量差及其主要限制因子分解图

Fig. 1 Crop yield gaps and their dominant constraint factors

析。该方法假定农民有着各自的经营土地和管理作物的手段,而不同的田块实际生产力正是由于这些不同经营手段和管理方法造成的,而且土地利用数据库为 CPA 方法数据收集和处理提供了便利条件。但该方法不能进行外推,即获得的模型只能在建模的本地区应用,若要应用于其他地区,则必须再次进行校正。而且,比较优势分析的核心还是多元线性回归,对因子间相互作用以及因子的空间、时间动态性考虑不够。

2.2 研究尺度

产量差研究最早集中在实验室或田块水平。由于影响作物生长和产量的因素之间往往相互关联,这就需要针对影响产量的 1 个或多个因子,严格控制或半控制其他因子,通过在实验室或农户田块布置不同处理进行比较分析,从而确定指定因子对作物产量的影响^[22]。Calviño 和 Sadra^[23]利用多点试验数据分析了田块尺度气候和农作管理对产量的关系,并建立简单线性产量预测模型,确定了研究区实际产量和可获得产量与潜在产量之间的差距。张定一和张永清^[24]在山西临汾设置了不同钾肥施用量对小麦产量和品质影响的田间试验。田块尺度的研究可以明确特定因子在作物产量形成中的作用,但是在解释空间和时间变异方面能力有限。为更好地理解各因子在产量形成中的作用及因子间的关联性,开展区域尺度的产量差异研究显得尤为必要。

由于作物产量空间数据和产量限制因子空间分布数据的缺乏,目前在很多地区引起作物产量差的准确原因并不清楚。通过农户调查获取农户作物管理信息,辅助于土壤和作物品种信息,是估算区域田块产量差的一种有效手段^[25]。Carruthers 和 Chambers^[18]首先提出并实践了快速农村评估法。但是,进行农户调查需要耗费大量时间,且准确收集土壤和作物管理信息具有一定难度。另外,调查通常都是以提问的方式,这也难免漏掉一些有关引起产量差异的信息,所有这些不利因素限制了该方法的区域推广应用。随着计算机技术的迅速发展,地理信息技术、遥感技术和作物生长模型被越来越多地应用于作物产量差研究,并逐渐成为一种进行区域作物产量差研究的重要方法。利用遥感技术估算实际产量,并与作物生长模型模拟的潜在生产力对比,可以分析出潜在生产力与实际产量间的差距。同时,还可以通过土壤/土地以及遥感反映的地面空间信息的分析,揭示影响产量差的因素。如 Lobell 等^[26]利用遥感数据获取产量的空间分布信息,并分析不同土壤和气候条件及农作管理措施对产量

的影响。

2.3 数据分析

影响作物生长和产量的因素很多,且因素之间相互关联。针对这类问题,自产量差开展以来发展了多种分析方法,归纳起来主要包括以下几种主要分析方法:线性回归分析、通径分析、主成分分析和回归树分析方法等。如, Casanova 等^[27]利用逐步回归方法构建了土壤属性对产量的预测方程,张玉铭等^[28]采用通径分析方法研究了影响玉米产量主要因素之间的相互关系,郭笃发和王秋兵^[29]应用主成分分析方法研究了山东省莒南县小麦产量与表层土壤有机质及其他养分的关系, Lobell 等^[30]利用回归树方法和线性回归方法对比分析了墨西哥 Sonora 灌溉小麦产量限制因子。需要注意的是,不同分析方法都有各自的优点及适用范围,在进行产量差分析时,需要根据数据特征和预期目的选择合适的分析方法,对研究结果的分析和应用也应充分考虑分析方法的限制范围和假设条件。

3 作物生长模型在产量差研究中的应用

作物生长模型是分析土地持续性十分方便的工具,通过对作物不同生产水平模拟的产量与实际产量进行比较,可以进行产量差分析^[31]。定义某一生产投入水平,收集所需数据,运行作物模型就可以估算外界环境因素(天气、土壤)、生物因素(品种)和技术因素(耕作方式、播种密度、施肥、水分调控和病虫害控制等)对作物的影响^[32](图 2)。在实际生产中,可以人为定义管理过程中的不同管理措施(灌溉、施肥、病虫害等),通过模型模拟结果分析定义下的产量水平^[33](图 3),比较各水平间及各水平与实际产量间的差距,可确定生产中的主要问题所在,进而有针对性地进行优化决策^[34]。其中潜在产量指最优管理下的产量,水分、养分则分别指作物生育期内实际投入不足造成的产量差。这部分产量差可很好地揭示通过技术渠道提高作物实际产量的可行性。Muchow 等^[35]利用作物生长模型模拟不同土壤类型作物品种、播期、播种密度、株行距、灌溉、肥料施用量和施用时期对高粱产量的影响,并给出了优化的生产管理决策建议。Verdoodt 等^[36]模拟南非干旱地区作物的光温生产力、水分限制下的生产力和自然生产力,最后得出光温是不同生产系统的重要影响因子,但最大生产潜力往往决定于降雨量,故干旱可能会使系统变得非常不稳定,形成对产量的影响。然而,由于农业生态系统的极端复杂,目前还不可能量化分析系统中的所有因子,以及设定每个因子的不同投入水平。而且,作物模拟模型起源

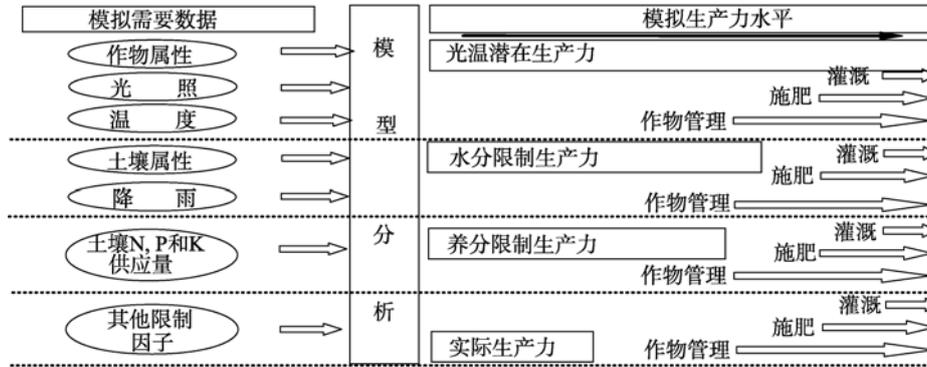
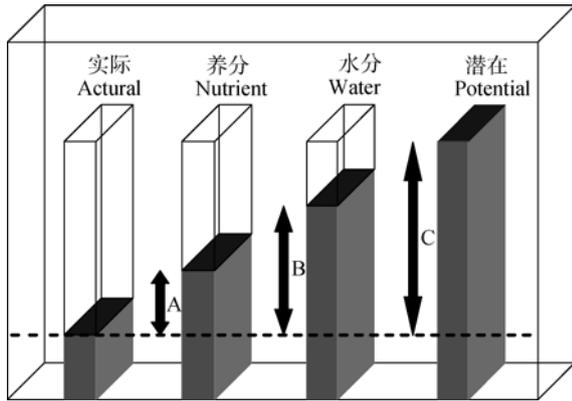


图 2 模型模拟产量水平及其数据需求

Fig. 2 Levels for production assessed by models and required data for its assessment

图 3 定义养分(A)、水分(B)和潜在产量(C)时的产量差
Fig.3 Visualization of three yield gaps distinguished by defining nutrient (A), water (B), and potential yield (C)

于单点试验, 其中许多假设条件都是基于田间均一的生产情形, 而实际上, 气候、土壤、作物和农作管理都存在较大的空间变异性, 这也限制了作物模型的区域产量差诊断应用。近年来, 遥感和地理信息技术的快速发展, 以及作物生长模型的逐步完善, 为开展区域尺度的作物产量差定量研究提供了新的契机^[37,38]。遥感技术可为作物生长模型提供适时的环境参数, 使模拟过程更加贴近实际情况。王纯枝等^[39]将遥感反演的作物冠层温度和作物生长模拟模型结合, 模拟了河北省邯郸地区光温生产力、水分限制生产力和实际生产力状况, 并对各层次的产量差进行了分析。遥感、作物模型和田间调查相结合, 辅助于必要的空间数据, 将进一步加强区域产量差的研究能力, 实现作物生长的动态模拟和预报。

4 展望

目前, 作物产量差研究还存在许多问题。首先, 在我国以农户为基本农作管理单位, 不同农户间农作管理方式差异较大, 如何获取区域范围内的农户实际管理数据并进行产量差分析有待深入研究。其次, 在利用作物模型模拟产量差分析时, 对模型第

一、二层次水平的模拟已相对成熟^[40-42]。但在第二层次水分限制水平下的研究基本上是基于大田试验进行模型校正, 很少针对农户实际管理水平的水分利用情况开展研究^[43,44]。第三, 在作物生长模拟模型研究方面, 对第三、四水平养分限制下的生产潜在计算研究相对比较少, 还处于静态描述或部分动态模拟阶段^[45]。

产量差研究的最终目的是定量化伴随管理措施的改变而引起的作物产量、经济和环境变化。一般来讲, 研究产量的生物学限制因子仅仅是改进农作管理的第一步, 因为食物生产仅仅是农业系统的目的之一。比如, 对农民而言, 他们可能更关心的是经济效益, 如果考虑成本花费问题的话, 通过高肥料投入提高作物产量可能并不合理, 且肥料投入的盲目增加也会对环境造成一定危害。这就要求在根据分析结果制定或调整管理措施时需要同时兼顾经济和环境效益。遥感技术的出现为研究区域作物产量差提供了新的手段。利用遥感技术实时获取区域作物和土壤参数, 耦合作物模型, 同时结合田间试验和实际调查数据, 进一步加强区域作物产量差的研究能力, 也是产量差研究的重要发展方向。

参考文献

- [1] 李忠佩, 李槐成, 张桃林. 土地退化对全球粮食安全的威胁及防治对策[J]. 水土保持通报, 2001, 21(4): 19-23
- [2] Alexandratos N. World Agriculture: Towards 2010[R]. New York: FAO, Wiley, 1995
- [3] Xie J. C., Xing W. Y., Zhou J. M. Current use of nutrients for sustainable food production in China[M]. Johnson A. E., Syers J. K., Eds. Nutrient Management for Sustainable Crop Production in Asia. Wallingford: CAB International, 1998
- [4] Jin J. Strengthening research and technology transfer to improve fertilizer use in China[C]. Proceeding of the IFA Regional Conference for Asia and the Pacific. Hong Kong. 1998: 21-22
- [5] Cassman K. G., Dobermann A., Walters D. T., et al. Meeting cereal demand while protecting natural resources and

- improving environmental quality[J]. *Annual Review of Environmental Resources*, 2003, 28: 315–358
- [6] Calviño P., Sadras V. On-farm assessment of constraints to wheat yield in the south-eastern Pampas[J]. *Field Crops Research*, 2002, 74: 1–11
- [7] Van Tran D. Closing the rice yield gap for food security[C]. International Rice Commission. Food and Agricultural Organization, 2001
- [8] Siddiq E. A. Bridging the rice yield gap in India[C]. Proceedings of Expert Consultation on Bridging the Rice Yield Gap in the Asia-Pacific Region, Bangkok, Thailand. 2000
- [9] Sneep J., Hendriksen A. J. T. Plant breeding perspectives[M]. Wageningen, The Netherlands: Centre for Agricultural Publishing and Documentation (PUDOC), 1979
- [10] Gomez K. A. On-farm assessment of yield constraints: Methodological problems[R]. Constraints to High Yields on Asian Rice Farms: An Interim Report. IRRI, Los, The Philippines, 1977: 1–16
- [11] De Datta S. K. Principles and practices of rice production[M]. New York (USA): Wiley-Interscience Publications, 1981
- [12] Fresco L. O. Issues in farming systems research[J]. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1984, 32: 253–261
- [13] de Bie C. A. J. M. Comparative performance analysis of agro-ecosystems[D]. the Netherlands: Wageningen Agricultural University, 2000
- [14] Lobell D. B., Ortiz-Monasterio J. I. Regional importance of crop yield constraints: Linking simulation models and geostatistics to interpret spatial patterns[J]. *Ecological Modelling*, 2006, 196: 173–182
- [15] Meertens H. C. C., Ndenge L. J., Ensserink H. J. Results of the cotton yield gap analysis on-farm trial, Meatu districts[R]. Field Note No. 27, 1992
- [16] Becker M., Johanson D. E. Rice yield and productivity gaps in irrigated systems of the forest zone of Côte d'Ivoire[J]. *Field Crops Research*, 1999, 60: 201–208
- [17] 宇万太, 姜子绍, 周桦, 等. 不同施肥制度对作物产量及肥料贡献率的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(6): 54–58
- [18] Carruthers I., Chambers R. Rapid rural appraisal: Rational and repertoire[R]. UK: University Sussex, 1981
- [19] Chambers R. Rural Development: Putting the Last First[M]. London: Longmans, 1983
- [20] Surabol N., Virakul P., Potan N., *et al.* Preliminary survey on soybean yield gap analysis in Thailand[R]. CGPRT Centre, Bogor, Indonesia, 1997
- [21] Sumarno F., Dauphin A., Rachim N., *et al.* Soybean yield gap analysis in Java[R]. CGPRT Center, Bogor, Indonesia, 1995
- [22] Sun K. G., Wang L. G. Effect of different fertilization practices on yield of a wheat-maize rotation and soil fertility[J]. *Pedosphere*, 2002, 12(3): 283–288
- [23] Calviño P., Sadras V. On-farm assessment of constraints to wheat yield in the south-eastern Pampas[J]. *Field Crops Research*, 2002, 74: 1–11
- [24] 张定一, 张永清. 施钾量对强筋小麦产量和品质的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(3): 32–37
- [25] White J. W., Corbett J. D., Dobermann A. Insufficient geographic characterization and analysis in the planning, execution and dissemination of agronomic research[J]. *Field Crops Research*, 2002, 76: 45–54
- [26] Lobell D. B., Ortiz-Monasterio J. I., Asner G. P., *et al.* Combining field surveys, remote sensing, and regression trees to understand yield variations in an irrigated wheat landscape[J]. *Agronomy Journal*, 2005, 97(1): 241–249
- [27] Casanova D., Goudriaan J., Bouman J., *et al.* Yield gap analysis in relation to soil properties in direct-seeded flood rice[J]. *Geoderma*, 1999, 91: 191–216
- [28] 张玉铭, 毛任钊, 胡春胜, 等. 华北太行山前平原土壤肥力状况与玉米产量相关关系的通径分析[J]. *干旱区农业研究*, 2004, 22(3): 51–55
- [29] 郭笃发, 王秋兵. 主成分分析法对土壤养分与小麦产量关系的研究[J]. *土壤学报*, 2005, 42: 523–527
- [30] Lobell D. B., Ortiz-Monasterio J. I., Addams C. L., *et al.* Soil, climate, and management impacts on regional wheat productivity in Mexico from remote sensing[J]. *Agricultural and Forest Methodology*, 2002, 114: 31–43
- [31] Rabbinge R. The ecological background of food production[C]. Ciba Foundation Symposium. John Wiley & Sons Ltd. 1993: 2
- [32] Rabbinge R. Simulation and systems management in crop protection[J]. *Plant Growth Regulation*, 1991, 10(2): 169–170
- [33] Bindraban P. S., Stoorvogel J. J., Jansen D. M., *et al.* Land quality indicators for sustainable land management: Proposed method for yield gap and soil nutrient balance[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 81: 103–112
- [34] 林忠辉, 莫兴国, 项月琴. 作物生长模型研究综述[J]. *作物学报*, 2003, 29(5): 750–758
- [35] Muchow R. C., Hammer G. L., Vanderlip R. L. Assessing climatic risk to sorghum production in water-limited subtropical environments: II. Effects of planting date, soil water at planting, and cultivar phenology[J]. *Field Crops Research*, 1994, 36: 235–246
- [36] Verdoodt E., Van R., Van A. W. Modeling crop production potentials for yield gap analysis under semiarid conditions in Guquka, South Africa[J]. *Soil Use and Management*, 2003, 19: 372–380
- [37] Mass S. J. Using satellite data to improve model estimates of crop yield[J]. *Agronomy Journal*, 1998, 80: 655–662
- [38] Moulin S., Bondeau A., Delecolle R. Combining agricultural crop models and satellite observations: From field to regional scales[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19: 1021–1036
- [39] 王纯枝, 宇振荣, 辛景峰, 等. 基于遥感和作物生长模型的作物产量差估测[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(7): 84–89
- [40] 张银锁. 基于作物生长模拟模型的夏玉米可持续生产管理系统的分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2001
- [41] 毛振强. 基于田间试验和作物生长模型的冬小麦持续管理研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003
- [42] 吴绍洪, 靳京, 戴尔阜. 基于 PS123 作物生长模型的黑龙江海伦市玉米生产潜力计算[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(8): 93–97
- [43] 商磊, 赵军, 祁广云, 等. 黑土农田大豆产量形成过程的模拟验证[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(4): 869–873
- [44] 居焯, 李三爱, 严昌荣. 我国北方旱区雨养小麦生产潜力研究[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(3): 728–731
- [45] Janssen B. H., Guiking F. C. T., Van der Eijk D., *et al.* A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS) [J]. *Geoderma*, 1990, 46: 299–318