

赖荣生,余海龙,黄菊莹.作物气候生产潜力计算模型研究述评[J].江苏农业科学,2014,42(5):11-14.

作物气候生产潜力计算模型研究述评

赖荣生¹,余海龙¹,黄菊莹²

(1. 宁夏大学资源环境学院,宁夏银川 750021; 2. 宁夏大学新技术应用研究开发中心,宁夏银川 750021)

摘要:气候生产潜力是指在充分合理利用当地的光、热、水气候资源,而其他条件处于最适宜状况时单位面积土地上获得的最高生物学产量或农业产量。笔者从模型构建、应用范围、运用效果及适用性等方面对作物气候生产潜力经验模型和机理模型进行了详细述评,提出了气候生产潜力模型研究方面存在的问题以及今后应加强研究的领域,为区域粮食生产和农业发展研究提供合理的模型和科学的指导。

关键词:作物气候生产潜力;经验模型;机理模型

中图分类号: S162.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2014)05-0011-04

气候生产潜力是指在充分和合理利用当地的光、热、水气候资源,而其他条件(如土壤、养分、CO₂等)处于最适宜状况时单位面积土地上获得的最高生物学产量或农业产量^[1]。从生态学角度看,气候生产潜力是由气候因素决定的平均生物第一生产力的能力,反映了某地区在特定的气候背景下农业生产所具备的基础潜力。它可定量表征区域气候资源状况及其气候要素的配置。它是科学衡量区域粮食生产力、农业发展和人口承载力的重要指标之一。

国内外许多学者对作物气候生产潜力进行了大量研究^[2-3]。研究作物气候生产潜力,不仅可分析气候要素对生产潜力的影响程度,也可估测生产潜力时空分布与变化特征。笔者通过分析各类气候生产潜力模型的研究进展和应用,旨在为区域农业发展与研究提供科学合理的指导。

1 作物气候生产潜力计算模型研究进展

影响作物气候生产潜力的因素涉及气候、土壤、水分、耕作管理技术等诸多方面。目前,国内外关于作物气候生产潜力估算模型应用比较成熟的有 Miami 模型^[4-7]、Thorntwaite Memorial 模型^[8-10]、Wagenigen 模型^[11]、AEZ 法^[12-13]、WOFOST 模型^[14]等,国内比较成熟的模型有作物生长动态模拟模型、黄秉维模型、逐级订正模型等。曹宏鑫等根据建模目的、采用的方法以及所用资料可靠性等的不同,将模型分为经验模型和机理模型^[15]两类。

1.1 经验模型

经验模型主要是指以试验数据为基础,根据生物量与气候因子的统计相关关系建立的一种数学统计分析模型。它根据作物生产力形成的机理,在考虑光照、温度、水分等自然要素以及施肥、品种、灌溉等农业技术要素基础上,根据作物能量转化和粮食生产形成过程,进行作物气候生产潜力估算。

计算公式^[16]为:

$$\begin{aligned} Y_w &= Q \times f(Q) \times f(T) \times f(W) \\ &= Y_0 \times f(T) \times f(W) \\ &= Y_T \times f(W) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: Y_w 为气候生产潜力; Q 为太阳总辐射量; $f(Q)$ 为光合有效系数; Y_0 为光合生产潜力; $f(T)$ 为温度有效系数; Y_T 为光温生产潜力; $f(W)$ 为水分有效系数。

经验模型是在光合生产潜力基础上发展而来,并逐渐发展应用到光温生产潜力、气候生产潜力和土地生产潜力研究中。

1.1.1 光合生产潜力 光合生产潜力是指在假定温度、水分、土壤肥力、作物群体、农业技术措施等均处于最适宜条件下,以光照作为唯一参考因子,由当地太阳辐射单独决定的产量,是作物生产量的理论上限。计算公式为:

$$f(Q) = \sum_0 \times \varepsilon \times \alpha \times (1 - \rho) \times (1 - r) \times \phi(1 - \omega) \times (1 - \chi)^{-1} \times H^{-1} \quad (2)$$

式中: \sum_0 为投射到单位面积上的年总辐射量(J/m²); ε 为可用于光合作用的光合有效辐射率,一般取 0.49; α 为作物群体的吸收率, $\alpha = 0.83 L_i/L_0$ (其中 L_0 为最大叶面积系数, L_i 为某时段的叶面积系数); ρ 为非光合器官的无效吸收率,取 0.1; r 为光饱和限制率,在自然条件下, $r = 0$; ϕ 为光合作用量子效率,取 0.224; ω 为呼吸作用的耗损率,取 0.3; χ 为含水率,取值为 0.14; H 为形成 1 g 干物质所需热量,取 1.8×10^4 J/g。

光合生产潜力是研究光温生产潜力、气候生产潜力、土地生产潜力的依据和基础。估算区域作物光合生产潜力及其时空变化,分析作物生长发育的热量限制状况,以便调整农业生产和发展规划。但是,光合生产潜力把光照作为作物产量估算的唯一参考因子,结果是在理想条件下获得,缺乏对温度、水分以及作物本身的生理生态特性等的考虑。

1.1.2 光温生产潜力 在光合生产潜力的基础上,考虑到温度对植物光合作用的影响,通过进行温度函数订正,可以得到光温生产潜力,即其他条件均处于最适宜条件下,由光照、温度 2 种因素共同决定的作物生产量,是农业生产的产量理论上限。计算公式为:

$$Y_T = Y_p \times f(T) \quad (3)$$

式中: Y_T 为光温生产潜力; Y_p 为光合生产潜力; $f(T)$ 为温度订

收稿日期:2013-09-10

基金项目:国家自然科学基金(编号:41261068);宁夏自然科学基金(编号:NZ1128)。

作者简介:赖荣生(1989—),男,硕士研究生,主要从事气候变化对农业的影响。E-mail: lairongsheng123@yeah.net。

通信作者:余海龙,副教授,博士。E-mail: yhl@nxu.edu.cn。

正系数。

由于模型的订正系数与气候要素有关,对气温偏好不同的作物采用的温度订正系数不同。李世奎在 Dirceu 等的研究基础上,针对喜温作物和喜凉作物对温度的要求,认为不同作物应采用不同的温度订正系数^[17]。

喜温作物的温度订正系数可以采用 Cehenbauer (莱亨泊) 公式表示:

$$f(T) = \begin{cases} 0.027T - 0.162 & 6\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T < 21\text{ }^{\circ}\text{C} \\ 0.086T - 1.41 & 21\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T < 28\text{ }^{\circ}\text{C} \\ 1 & 28\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T < 32\text{ }^{\circ}\text{C} \\ -0.083T + 3.67 & 32\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T < 44\text{ }^{\circ}\text{C} \\ 0 & T < 6\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ 或 } T \geq 44\text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (4)$$

式中: T 为日平均温度。

相对于喜温作物,喜凉作物的最适温度范围比较小,当环境温度低于或高于最适温度时,光合效率不同。喜凉作物的温度订正系数可用分段函数式表示:

$$f(T) = \begin{cases} e^{-2(\frac{T-T_0}{T_0})^2} & T > T_0 \\ e^{-(\frac{T-T_0}{T_0})^2} & T \leq T_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: T_0 为适度温度, T 为实际温度。

AEZ 农业生态区位法是由联合国粮农组织 (FAO) 建立的一种农业生态区模型^[18]。通过内在函数的形式对光合生产潜力进行订正,把温度作为单一因子内嵌在光温生产潜力表达式中。以标准作物生物量为基础,进行作物种类、温度、叶面积、干物质产量、收获指数等参数订正以估算光温生产潜力,计算公式为:

$$Y_T = 0.5 \times b_m \times C_L \times C_N \times C_H \times G \quad (6)$$

式中: Y_T 为光温生产潜力; b_m 为生育期内平均白天温度及实际天气状况下标准作物总生物量的最大速率 [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$]; C_L 为叶面积订正系数,标准作物的实际最大总生产率和叶面积指数为 5 时的订正系数; C_N 为生育期内平均温度下因呼吸消耗干物质产量的订正系数; C_H 为作物经济系数,也称收获系数,是指收获部分的净重占干物质总产量净重的比率; G 为作物生产期订正系数,对于越冬作物,需扣除日平均气温 $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的休眠期。

AEZ 法可估算光照、温度等气候因素对作物生产量的影响。它所采用的各种参数可以根据作物的特征进行调整,估算结果比较切合实际。王学强等结合多年气象资料,应用 AEZ 法模拟了河南小麦生产的光温生产潜力、气候生产潜力及其空间分布特征^[19]。

1.1.3 气候生产潜力 气候生产潜力是在光合生产潜力和光温生产潜力上分别进行温度、水分影响函数订正发展而来。根据不同作物的需水量和满意程度进行水分影响函数订正,水分订正函数和气候生产潜力表达式为:

$$f(W) = (P + I) / ET_m \quad (7)$$

$$Y_w = Y_T \times f(W) \quad (8)$$

式中: $f(W)$ 为水分订正系数,取值范围为 $0 \sim 1$; P 为作物生育期降水量; I 为作物生育期灌溉水量,无灌溉时 I 取值为 0; ET_m 为充分供水条件下的最大蒸散量; Y_T 为光温生产潜力; Y_w 为气候生产潜力。

气候生产潜力的大小与光合生产潜力和光温生产潜力紧

密相关,它的大小受制于当地的气候要素如降水和气温等要素,还与气候要素在作物生长期的配合协调程度密切相关。

1.2 机理模型

机理模型是一种应用数学概念方法模拟作物生理过程和解释作物整体功能的方法^[20]。机理模型以作物生长模拟模型为主,通过运用数学方法和计算机模拟作物生产、发育作物生理过程来估算作物生产量。机理模型起源于 20 世纪 60 年代的数值模拟方法的运用,发展历程可分为 3 个阶段。

1.2.1 探索阶段 (20 世纪 60 ~ 70 年代) 此阶段主要通过计算机技术模拟作物生理生态过程中要素组合程度,模拟气候因子胁迫作用对作物生长机理的影响并构建模型。

布柯德认为温度对 CO_2 同化速度、转化能力、作物生长速率均有影响,如不考虑温度因素,将会使作物生产力的估算值高于实际产量。Loomis 等在田间试验的基础上,提出了一个估算作物冠层太阳辐射截获量和光合作用的方法,从理论上推算出作物最大光能利用率为 $5\% \sim 6\%$ ^[21]。但他们的研究没有涉及其他因素,估算结果比实际生产量偏高。de Wit 等相继发表了冠层太阳辐射截获与群体光合作用的模型^[22-23],标志着关于作物生理生态过程研究的开始。Duncan 等以冠层光合作用理论为基础,建立了玉米模型^[24]。将冠层分为几个水平层并估算各水平层的光强、 CO_2 浓度、光合速率等。de Wit 等在 ELCROS 模型的基础上,通过对作物的生长、呼吸和蒸腾作用研究,增加了呼吸作用以及作物微气象的描述解释,提出了 BACROS 模型^[25],旨在模拟潜在生产条件下大田作物潜在生产量和蒸腾作用,该模型理论性较强,对作物生理生态过程量化十分细致,但由于模型过于庞大,参数复杂而难以应用于实际研究。van Keulen 在 BACROS 模型基础上研制了 ARIDROP 模型^[26],该模型与水分平衡模型相耦合,可以模拟水分胁迫条件下作物生理生态过程。

1.2.2 实际运用阶段 (20 世纪 80 年代) 此阶段模型侧重于作物生长过程理论的实际应用,所形成的模型统称为基于过程模型,即以作物生长和发育过程为建模基础,把作物生长机制与经验过程相结合,运用一些经验方法对生理过程、参数、变量等进行简化处理以估算作物生产潜力。应用比较广泛的模型有 CERES 谷物系列模型、SUCROS 模型、WOFOST 模型等。

CERES 谷物系列模型采用积温模拟生育期,根据叶面积增长、冠层太阳辐射的截获及利用等方面模拟作物生长。CERES 谷物系列模型具有较强的综合性、应用性和预测性,被广泛应用于不同环境条件下的作物气候生产潜力估算,是目前应用最广泛的模型之一。

SUCROS 模型是建立在 BACROS 模型基础上,它通过参数化的呼吸作用以及作物微气象描述来模拟潜在生产条件下大田作物潜在生产量,通过对作物呼吸作用和微气象的描述来模拟潜在生产条件下大田作物潜在生产量^[27]。通过参数的调整可提高其适用性,可以模拟不同环境下作物生产潜力和生理过程。

WOFOST 模型是在 SUCROS 模型的基础改进而来,具有动态化、解释性等特点。该模型通过参数的调整,可以定量描述特定气候和土壤条件下作物生理过程和干物质积累,并模拟作物的产量及其变化,着重强调气候要素变化对产量的影

响。邹定荣等在通过田间试验,运用该模型模拟了华北地区冬小麦的光温生产潜力和气候生产潜力^[28]。谢文霞等通过田间试验模拟验证了浙江主要水稻品种潜在生长过程,模拟了气候生产潜力^[29]。

本阶段机理模型的发展具有发展迅速、区域性明显等特征。各类机理模型均具有较强的地域性、实用性和经验性强,但通用性差。此外,由于模型侧重于若干主要作物生理生态过程,功能比较单一,难以定量描述和预测作物生长发育的综合过程,估算结果存在一定误差。

1.2.3 综合应用阶段(20 世纪 90 年代以后) 本阶段机理模型不再单一或局限于运用传统和经验方法来模拟作物气候生产潜力,而是向系统化、机理化、多元化发展,注重模型的普遍性、准确性和易操作性。机理模型开始与 3S 技术、农业专家系统、计算机等技术或模型相结合,使之在现代精准农业中发挥出更大的作用。

在模型综合应用方面,美国林肯大学研发的 Hybird Maize 模型^[30]是一个比较成功的模型。该模型在 CERES 玉米模型的基础上,综合 INTERCOM 模型和 WOFOST 模型模拟作物生育期的优点并加入了一些新的要素考虑而研发出来。通过模型的修正和参数的简化,可以更加快速、便捷、准确地模拟作物气候生产潜力。

在模型与计算机技术相结合研究中,高亮之等研制了作物计算机优化决策系统(CCSODS)^[31]。该系统把机理模型与环境资源研究和栽培优化理论相结合,具有机理性、应用性、通用性、预测性等特点,可在不同地区、气候、土壤等条件下进行作物生理过程与产量模拟,并制定出合理的农业对策。

机理模型与专家系统 ES 的耦合研究,使操作环境及便捷性得到改善^[32]。北京农业科学院赵春江等提出了小麦栽培管理计算机专家系统(ESWCM)^[33],该模型基于专家系统的知识规则,根据产量设计程序,通过调节、控制小麦的群体结构和生长环境来增加有效生长和积累。

随着“3S”技术的快速发展,机理模型与之相结合的研究也日趋成熟。通过“3S”技术可快速准确地获取农业生产的信息,提高了作物潜力模型估算结果的精确性。例如通过遥感信息获取大量空间数据可定量描述作物实际生长状况,获取模型参数以模拟生长过程,并可进行调整或订正来提高模型的精度。与常规试验或观测数据相比,具有量大、省时、省力、节约成本等优势。莫兴国等结合遥感信息和气象数据,建立以 GIS 数据库为支撑的冬小麦生长模拟模型^[34],模拟河北平原地区的冬小麦生长状况和产量,分析了研究区冬小麦产量、蒸散量和水分利用效率的空间分布特征。马占云等结合 GIS 技术和 IPCC 模拟的未来气候情景,应用 CERES - 玉米模型完成了我国玉米秸秆产量模拟^[35]。

2 作物气候生产潜力计算模型综合评价

2.1 经验模型

经验模型是在光合生产潜力的基础上进行气候因素函数逐级订正发展而来,从对单因素研究到多因素综合研究,参数大多考虑光照、温度、水分等气候因素。具有描述性强、参数少、实用性强等特点,但忽视了作物本身和作物生长过程中的生理生态机理,如某些特殊环境(如极端天气、气象灾害等)

和大气成分变化(CO₂、O₃、CH₄ 等含量及变化)特殊状况对作物生长和生产潜力的影响。

经验模型中采用的气象、土壤数据是区域平均数据,数据的代表性不足,缺乏大面积多年连续的数据。数据本身以及采集过程受人活动、社会经济环境等影响较大,数据获取和估算过程需要花费大量的人力、物力和财力。估算结果很难真实反映区域作物气候生产潜力的理论上限值。

大多数经验模型是在研究区试验和统计数据的基础上建立,由于区域环境、作物、人类活动的差异,采用的数据区域代表性不足,缺乏区间的假设检验,实证性较差。模型方法难以运用于其他区域。

2.2 机理模型

机理模型从作物的基本生理生态过程入手,详细量化了光照、温度、水分因素对作物生产潜力的影响。具有相对于经验模型更加精确、简单、灵活等特点。但机理模型中的某些作物生长、动态过程等仍然是建立在经验关系之上。在对大尺度、多系统、大范围作物生产潜力模拟中,环境信息的时空变异、模型参数升尺度研究、研究区数据采用等方面都使用了经验关系,缺乏长期系统的试验验证。

机理模型研究是在田间单一一试验上完成,许多参数设定都是基于条件假设下建立。各种模型之间没有统一的标准和方法,对数据采取和参数的设定存在差异,导致模拟结果空间差异性较大,无法准确地模拟作物生长生理生态过程。

机理模型研究主要倾向于作物生理过程和过程的某一阶段或关键时期气候要素变化对作物生产量的影响。考虑主要在某一层次或某些因素,但影响作物生长过程及产量的因素并不是单一或几个要素决定,而是区域各种要素的综合影响。许多模型仍停留在潜在产量和水分限制条件下的生产模拟阶段,缺乏能够应用到多学科、大尺度、多层次模拟的模型。

3 作物气候生产潜力计算模型存在的问题及发展方向

3.1 经验模型

经验模型因所采用的参数的差异,模拟估算结果差异比较大,某些模型中的参数设置具有明显的局限性,很难应用到实际研究中。需结合研究区域特征和技术条件,采用田间观测、遥感等信息对模型和数据进行修正来提高估算结果的准确性。

许多经验模型仍局限于仅参照光、热、水等自然要素进行模拟,没有将经济、社会、气候异常、极端天气、土壤性质等直接或间接因素考虑在内。在今后研究中不仅要考虑自然和生物因素,对技术、政策、人类活动等社会人文因素也应加以考虑。

3.2 机理模型

机理模型多具有区域性、功能单一、参数复杂、侧重性强、操作性不强等特征。需引入计算机、3S 等新技术手段,提高气象、作物、土壤等数据模拟的准确性和便捷性,以直观、形象描述区域作物气候生产潜力的空间分布及动态变化。

机理模型改进应向微观和宏观两个方向发展,微观方面建立作物生长全过程的综合模型,在光能截获、光合作用、呼吸作用等研究基础上模拟作物生长发育、产量全过程动态变化,提高模型的适用性、即时性和动态化;宏观方面通过进行

区域校正、完善模型、处理不完善数据等方法,有效控制或减少作物模型区域化应用的误差,提高模型的适用性、准确性、经济性和通用性。

参考文献:

- [1] 侯西勇. 1951—2000 年中国气候生产潜力时空动态特征[J]. 干旱区地理, 2008, 31(5): 723—730.
- [2] 黄明斌, 李玉山. 黄土塬区旱作冬小麦增产潜力研究[J]. 自然资源学报, 2000, 15(2): 143—148.
- [3] 陈建文, 贺安乾, 杨碧轩, 等. 陕北、渭北及关中气候生产潜力的估算与分布特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 1999, 17(1): 112—117.
- [4] 余海龙, 黄菊莹, 王亭荷. 宁夏中部干旱带 56 年来气候生产潜力变化特征研究——以宁夏中宁县为例[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6): 172—175.
- [5] 高 浩, 潘学标, 符 瑜. 气候变化对内蒙古中部草原气候生产潜力的影响[J]. 中国农业气象, 2009, 30(3): 277—282, 288.
- [6] 罗永忠, 成自勇, 郭小芹. 近 40a 甘肃省气候生产潜力时空变化特征[J]. 生态学报, 2011, 31(1): 221—229.
- [7] 程 曼, 王让会, 薛红喜, 等. 干旱对我国西北地区生态系统净初级生产力的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 1—7.
- [8] 毛裕定, 苏高利, 李发东, 等. 气候变化对浙江省植物气候生产力的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(2): 273—278.
- [9] 李晓冬, 杜 耘, 吴胜军, 等. 湖北作物气候生产力演变及其对气候变化的响应[J]. 农业系统科学与综合研究, 2009, 25(3): 294—298.
- [10] 郭小芹, 刘明春. 河西走廊近 40a 气候生产潜力特征研究[J]. 中国沙漠, 2011, 31(5): 1323—1329.
- [11] 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.
- [12] 王恩利, 韩湘玲. 黄淮海地区冬小麦、夏玉米生产潜力评价及其应用[J]. 中国农业气象, 1990, 11(2): 41—46.
- [13] 赵 安, 赵小敏. FAO—AEZ 法计算气候生产潜力的模型及应用分析[J]. 江西农业大学学报, 1998, 12(4): 120—125.
- [14] 邬定荣, 欧阳竹, 赵小敏, 等. 作物生长模型 WOFOST 在华北平原的适用性研究[J]. 植物生态学报, 2003, 27(5): 594—602.
- [15] 曹宏鑫, 赵锁劳, 葛道阔, 等. 作物模型发展探讨[J]. 中国农业科学, 2011, 44(17): 3520—3528.
- [16] 黄秉维. 自然条件与作物生产——光合潜力[M]//农业现代化概念. 北京: 科学出版社, 1985: 21—22.
- [17] 李世奎. 中国农业气候资源与农业气候规划[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 124—144.
- [18] FAO. Report on the Agro—ecological zones project[R]. Roma: FAO, 1978.
- [19] 王学强, 贾志宽, 李轶冰. 基于 AEZ 模型的河南小麦生产潜力研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(7): 85—90.
- [20] Edwards D, Hamson M. Guide to mathematical modeling[M]. Boca Raton, USA: CRC Press Inc., 1990.
- [21] Loomis R S, Williams W A. Maxiamum crop productivity: an estimate[J]. Crop Science, 1963(3): 67—72.
- [22] de Wit C T. Photosynthesis of leaf canopies, Wageningen, Netherlands. Inst Biol Chen Res Field Crops Herb[J]. Agric Res Rep, 1965, 42: 663—671.
- [23] Duncan W, Loomis R A. A model for simulating photosynthesis in plant comities[J]. Hilgardia, 1967, 38: 181—205.
- [24] Duncan W, Hesketh J D. Net photosynthetic rates, relative leaf growth rates, and leaf numbers of 22 races of maize grown at eight temperatures[J]. Crop Science, 1968, 8: 670—674.
- [25] de Wit C T. Simulation of as simulation, respiretion and transpiration of crops[R]. Wageningen: PUDOC, 1978.
- [26] van Keulen H. Simulation of water use and herbage growth in arid regions [M]//Penning de Vries F W T, Vanloar H H. Simunlation monographs. Wagenningegen Netherlands: PUDOC, 1986.
- [27] van Kenlen H. Crop production under semiarid conditions, as determined by nitrogen and moisture availability[M]//Penning de Vries F W T, van Laar H H. Simulation monographs. Wageningen, Netherlands: PUDOC, 1982: 234—251.
- [28] 邬定荣, 刘建栋, 刘 玲, 等. 华北地区冬小麦生产潜力数值模拟及其自然正交分析[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 35(5): 7—14.
- [29] 谢文霞, 严力蛟, 王光火. 运用 WOFOST 模型对浙江水稻潜在生长过程的模拟与验证[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(3): 319—323.
- [30] Yang H S, Dobermann A, Cassman K G, et al. Features, applications, and limitations of the Hybrid Maize simulation model[J]. Agronomy Journal, 2006, 98: 737—748.
- [31] 高亮之, 金之庆. 水稻栽培计算机模拟优化决策系统[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1992: 48—62.
- [32] 邝朴生, 蒋文科, 刘 刚. 精确农业基础[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 1999: 110—119.
- [33] 赵春江, 诸德辉, 李鸿祥, 等. 小麦栽培管理计算机专家系统的研究与应用[J]. 中国农业科学, 1997, 30(5): 43—50.
- [34] 莫兴国, 林忠辉, 李宏轩, 等. 基于过程模型的河北平原冬小麦产量和蒸散量模拟[J]. 地理研究, 2004, 23(5): 623—631.
- [35] 马占云, 熊 伟, 林而达. 基于 GIS 和作物模型对气候变化影响下的玉米秸秆产量区域模拟研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(13): 6053—6055, 6058.