

甘蔗生长模型研究进展

杨昆^{1,2}, 蔡青^{2,3}, 刘家勇^{1,2}, 毛钧^{1,2}, 范源洪^{1,2*}

(1.云南省农业科学院甘蔗研究所, 云南 开远 661699; 2.云南省甘蔗遗传改良重点实验室, 云南 开远 661699; 3.云南省农业科学院生物技术与种质资源研究所, 云南 昆明 650223)

摘要:作物生长模型在农业生态研究、作物管理、产量预测以及农业技术推广等过程中发挥着重要的作用。对甘蔗作物生长模型的研究与发展进行综述和回顾, 对应用最广泛的2个主要模型(澳大利亚 APSIM-Sugarcane 和南非 CANEGRO)的优势及差异进行了比较分析, 并对 AUSCANE 和 QCANE 等其他甘蔗模型作了介绍。对甘蔗模型在生产应用中存在的问题和今后的发展方向进行了展望。

关键词:甘蔗; 作物生长模型; APSIM-Sugarcane; CANEGRO

中图分类号: S566.1 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2015)01-0029-06

Advances in simulation models of sugarcane growth

Yang Kun^{1,2}, Cai Qing^{2,3}, Liu Jiayong^{1,2}, Mao Jun^{1,2}, Fan Yuanhong^{1,2*}

(1.Sugarcane Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kaiyuan, Yunnan 661699, China; 2.Yunnan Key Laboratory of Sugarcane Genetic Improvement, Kaiyuan, Yunnan 661699, China; 3.Biotechnology & Genetic Resources Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650223, China)

Abstract Crop growth simulation model have played important role in many fields such as agro-ecosystem research, crop management, production prediction and the process of agricultural technology extension, et al. This paper reviewed the development of crop growth simulation models utilized in sugarcane research. Two main sugarcane models, APSIM-Sugarcane from Australia and CANEGRO from south Africa, were compared on the aspects of their advantages and differences. Other models including AUSCANE and QCANE were also briefly summarized. Issues of these models on the application and development trends were also discussed.

Keywords: sugarcane; crop growth simulation model; APSIM-Sugarcane; ANEGRO

作物生长模拟模型(crop growth simulation model)是以作物生理和生态过程为基础, 在作物-土壤-大气组成的系统中, 采用计算机技术, 并借助数学模型对作物的整个生长发育过程与外界环境变化进行动态仿真模拟的模型^[1]。作物动态模拟模型通过综合模拟, 分析环境因子对作物生长的状态变量(干物质积累、养分和水分吸收等)及生长机制(光合作用、呼吸过程等)产生的影响, 可以提高作物产量预测、风险管理和可持续生产等方面的研究效率, 在

农业生产研究中日益受到关注^[2]。自20世纪60年代以来, 作物生长模型经历了模型研制(20世纪60~70年代)、模型开发校验(20世纪80~90年代)、模型综合应用(20世纪90年代以后)^[3-4]的历程。目前, 国际上应用较广泛的作物模型^[5-6]主要有荷兰的 SUCROS、WOFOST、ORYZA、INTERCOM、SWAP、LINTUL, 美国的 DSSAT、CropSyst、EPIC、ALMANAC、CENTURY、AquaCrop、RZWQM, 澳大利亚的 APSIM、OCANE、AUSCAN, 南非的

收稿日期: 2014-06-30

修回日期: 2014-10-16

基金项目: 云南省高端科技人才引进计划项目(2012HA001); 云南省甘蔗产业技术体系建设专项; 云南省甘蔗遗传改良重点实验室开发课题基金项目(ysri201202)

作者简介: 杨昆(1978—), 女, 云南曲靖人, 硕士, 助理研究员, 主要从事甘蔗遗传育种研究; *通信作者, 范源洪, 研究员, 主要从事甘蔗种质资源研究, fyhysri@vip.sohu.com

ACRU、BEWAB、CANEGRO、CERES、PUTU、SAPWAT、SWB)等,这些模型在作物研究中得到了较好的应用。

能成功应用于甘蔗的模型很大程度上依赖于对产量的精确预测和对田间管理的有效规范^[7-11]。目前,除了大多数在特定地点应用的回归模型外,应用较为广泛的甘蔗动态生长模拟模型主要有 APSIM-Sugarcane 和 CANEGRO,此外还有 AUSCANE、OCANE 等少为人知的甘蔗模型^[12-14]。笔者主要针对模型 APSIM-Sugarcane 和 CANEGRO 的研究和发展进行回顾和比较,并对 AUSCANE 和 OCANE 作简要介绍。

1 APSIM-Sugarcane 模型

APSIM-Sugarcane 模型是在 APSIM(agricultural production system simulator)框架基础上发展而来^[2]。该模型由澳大利亚联邦科学院(CSIRO)和昆士兰州农业生产系统研究协作组(APARU)共同开发构建,通过“即插即用”的方法,让用户选择一系列的作

物、土壤以及其他子模块来配置 1 个自己的作物模型^[15-16]。最初开发 APSIM 的目的是希望通过模拟土壤有机质动态、水土流失、土壤盐渍化、土壤酸化和作物品种选择等来确定农业系统的管理措施。目前,APSIM 能模拟的植物包括小麦、玉米、棉花、油菜、甘蔗、紫花苜蓿、豆类以及杂草等^[17],其中,APSIM-Sugarcane 是 APSIM 中开发比较完善的一款甘蔗模块,其基本参数来自于澳大利亚、夏威夷、南非和非洲东南部的斯威士兰的 35 个数据集^[2]。该模型以“天”为时间步长,以生理性状为基础来描述甘蔗的生长,并在一个统一的区域里模拟预测蔗茎产量、蔗糖产量、生物产量、水分利用率、氮素摄入量以及碳、氮在整个甘蔗生长季的分配比例等^[9]。APSIM-Sugarcane 也能模拟甘蔗特定的产物,如宿根蔗的管理和脱落物(衰老叶)的分解;更重要的是结合 APSIM 的其他模块和多年的气象数据,APSIM-Sugarcane 能模拟作物、土壤、气候和管理之间的相互影响,其模拟流程见图 1。

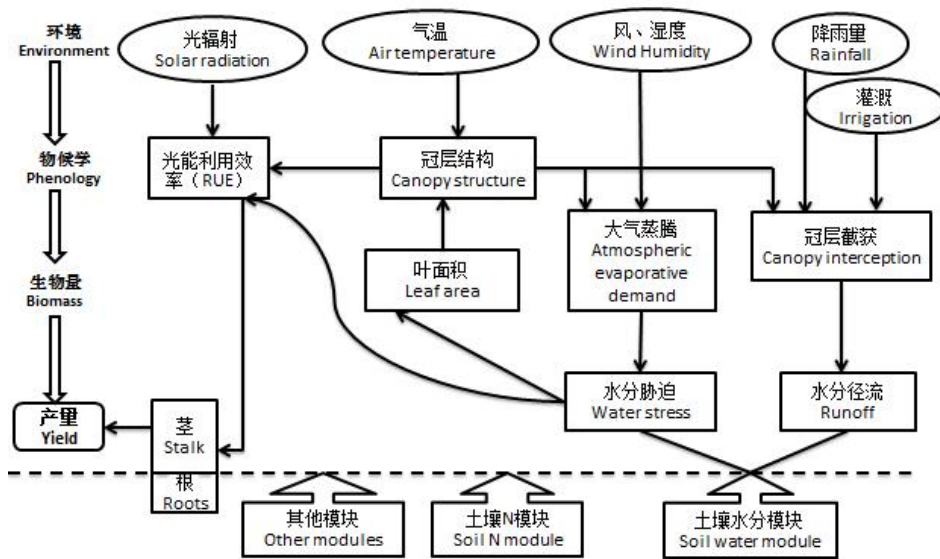


图 1 APSIM-Sugarcane 模拟流程图
Fig.1 Flow chart of APSIM-Sugarcane

APSIM-Sugarcane 模型的基本功能应用最早的为 1999 年 Keating 的报道^[2]。作者将 19 篇已发表和暂未发表的甘蔗文献数据应用于 APSIM-Sugarcane 模型,通过不同年份和地点参数的设定,得到地上部生物量、N 素累积、叶面积指数和蔗糖含量的模拟值与实测值之间的决定系数(R²),如叶面积指数为 0.79,生物量为 0.93,蔗糖含量为 0.83,N 素累

积为 0.86。其结果表明:各主要性状参数模拟值与实测值的拟合程度较高,说明该模型对甘蔗主要性状的模拟准确性较高。Cheeroo 等^[9]用 APSIM-Sugarcane 模拟毛里求斯不同地点甘蔗潜在产量与可获得产量的可行性。该研究首先用试验数据校准模型中的参数,得到模拟值和实测值呈显著的线性相关,再结合 1961—1995 年不同地点的气

象数据模拟干旱和灌溉条件下甘蔗潜在产量与可获得产量的变化。结果显示：干旱条件下模拟的产量比灌溉条件下的有更多变化，年降水量减少时，产量变化增加。Basnayake 等^[18]将 89 份不同基因型材料进行了灌溉与干旱处理试验，将 APSIM-Sugarcane 模型应用于基因与环境互作 ($G \times E$) 试验中，分析不同基因型材料对水分胁迫的响应，从生理机制方面研究引起基因型变化(性状改变)的原因，以形成筛选水分胁迫下高产基因型材料的有效方法。

目前，APSIM-Sugarcane 已经发展成为一款能较好模拟甘蔗生长的工具，广泛应用于澳大利亚制糖产业。在甘蔗整个生长季期间，该模型在水分利用效率^[18-20]、产量预测^[21]、干物质分配^[22]和模拟 N 流失对环境造成的影响等方面^[14, 23-25]得到了较好

的应用。

2 CANEGRO 模型

CANEGRO 是由南非糖业联合试验站(SASEX)研发的一款模型，最初是为了帮助南非蔗农和糖厂通过决定最佳收获期来降低甘蔗螟虫的危害^[26-27]。该模型的早期版本实质上是对 CANESIM 模型的修订^[28-29]，主要作为一个辅助工具加以应用，包含用来模拟碳平衡、冠层、能量平衡和水分平衡的 4 个组成部分，其模拟流程^[29]见图 2。CANEGRO 作为一个模块并入 Decision Support System for the Agrotechnology Transfer(DSSAT Version 3.1)后，形成 DSSAT/CANEGRO(DC)，在美国、南非和泰国被广泛应用^[12, 30]。

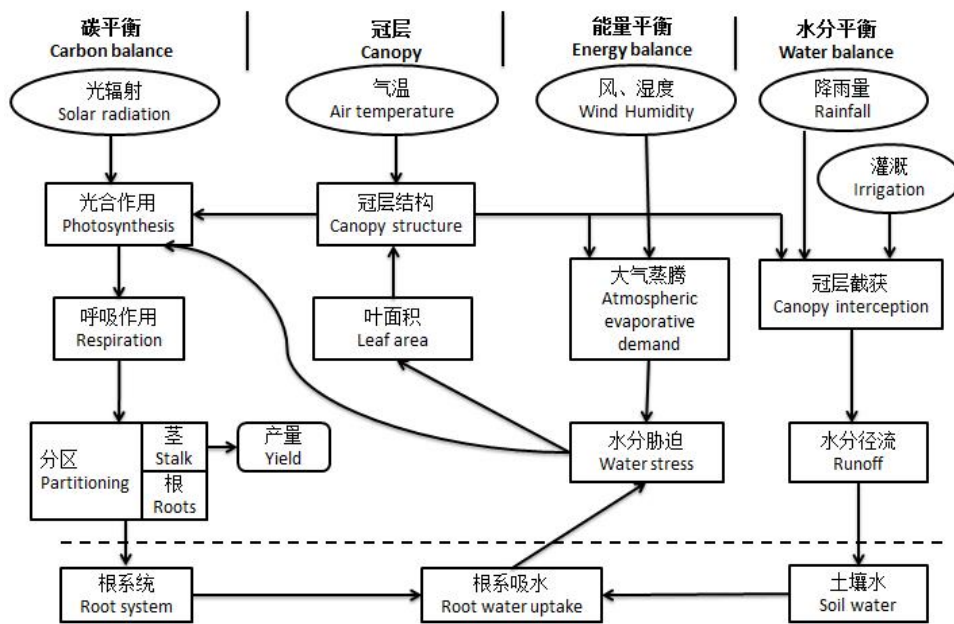


图 2 CANEGRO 模流程图
Fig. 2 Flow chart of CANEGRO

最早应用 CANEGRO 模拟甘蔗产量的报道为文献^[29]。用模型模拟预测出的不同地点的产量与实测值有好的相关性，从而证实了用 CANEGRO 模型预测产量是可行的。在不同土壤水分含量条件下，CANEGRO 被广泛用来模拟预测南非主栽甘蔗品种 NC6376 地上部的生物产量，测试范围为南非甘蔗种植区(南纬 25 ~ 31°，海拔高度 15 ~ 1 067 m)，结果显示，在没有水分和 N 胁迫的条件下，该模型能较好地预测产量^[26, 31-33]。目前，该模型已发展为 DSSAT v4.5-Canegro Sugarcane Plant Module 版本^[34]，

由 7 个国家的 8 个研究机构组成的国际联合研究团队(International Consortium for Sugarcane, ICSM)进行联合研发^[6]，以促进甘蔗模型的应用及知识、信息和数据的共享(<http://sasex.sasa.org.za/misc/icsm.html>)。多国研究人员的不懈努力，使得 CANEGRO 模型得到了较好的完善，可以较好地模拟在水分、N 胁迫以及全球气候变化(CO₂ 浓度、光辐射、降水量、气温等)影响条件下，甘蔗生物产量和蔗糖产量的变化^[35-37]。2011—2017 年，该研究团队的工作目标是模拟世界范围内甘蔗基因与环境

交互($G \times E$)的影响,在美国、津巴布韦、南非和法国留尼汪岛等不同环境条件下种植一套相同的甘蔗品种(4~7个),通过用 CANEGRO 模型监测和模拟关键的植物生长过程,能更好地理解和分析与蔗茎和蔗糖产量方面相关基因对环境影响因子的响应机制。

3 APSIM-Sugarcane 与 CANEGRO 的比较

APSIM-Sugarcane 与 CANEGRO 相比较^[13],其相同点包括模拟生物气候学、冠层伸展、光辐射截获量、地上部生物量分配和植物氮素分配,以及模拟新植期、宿根期、灌溉时间、施氮肥时间、收获期、耕作期和砍后残留物管理等;其不同点包括 APSIM-Sugarcane 能模拟新植蔗和宿根蔗之间的差异,蔗茎含水量和倒伏效应,而 CANEGRO 能模拟蔗茎和根系的动态生长,二者关键性的不同是 APSIM-Sugarcane 通过光能利用效率(RUE)方法模拟甘蔗地上部生物量的积累,而 CANEGRO 采用光合作用和呼吸作用途径进行模拟。另外,在 APSIM-Sugarcane 中,土壤水分和氮素平衡需引入 APSIM 其他相关联的模块进行模拟,而在 CANEGRO 模型中,土壤水分和氮素平衡是作为模型的一部分进行模拟。

4 AUSCANE 模型

AUSCANE 是以 EPIC(erosion-productivity impact calculator)为版本修订的一款模拟甘蔗生长和发育的模型^[38]。该模型是由澳大利亚联邦科学院(CSIRO)下属的热带作物与牧草研究室与澳大利亚糖业试验总局(BSES)联合美国农业部合作研究的,主要针对农业系统(如天气、土壤温度、水文地理、土壤侵蚀、耕作、营养循环、作物生长和产量)中主要的物理和生物过程进行模拟^[39]。AUSCANE 模型是首个在澳大利亚应用的甘蔗模型,于 20 世纪 90 年代在产量预测、农业风险评估等方面得到了一些应用^[40-44],但由于 AUSCANE 对甘蔗生物学方面的模拟较差,且包含了松散的计算机代码^[12],因而未得到广泛的应用与发展。

5 QCANE 模型

QCANE 是澳大利亚糖业试验总局(BSES)研发

的一款甘蔗生长模拟模型^[12],以甘蔗日常的生理过程为研究基础,针对糖分积累,结合光合作用、呼吸作用和部分光合产物等生理指标进行模拟^[45]。QCANE 模型的优势在于它能模拟作为碳源的蔗糖提供作物日常的碳结构以及维护作物对碳的需求。在最近的文献资料中, QCANE 被用来模拟生物量和糖分积累的过程^[46];另外,为完善 QCANE 模型, Liu D.L 等^[47]通过引入子模块,如蔗茎水分含量模块(SWCM),模拟季节性蔗茎水分含量和新鲜蔗茎产量,得到 0.95 的决定系数(R^2)和 15.2%的相对根均方标准误(RMSE),说明通过将 SWCM 模块引入 QCANE 对甘蔗新鲜蔗茎产量进行模拟是可行的^[47]。QCANE 模型还需根据环境的变化和人们的需求不断完善,才能得到广泛的应用。

6 结 语

和大多数作物模型一样,甘蔗生长模型应用于不同地区,首先需要将模型“本地化”,即用当地的实测数据对模型中的一些重要参数,如品种的遗传参数、土壤参数等进行调试和校正,使参数的模拟值与观测值的误差在允许的范围内,再用另一批数据进行检验,从而得到好的模拟结果。对参数的调试需要慎重,避免出现纯数学意义上的多变量优化算法,而忽视其生物学意义和科学意义^[48]。任何甘蔗模型都需要解决和完善如下方面的问题:1)在水分、氮和温度胁迫条件下,光合作用产物分配是如何贮存形成糖分的;2)不同甘蔗品种对胁迫条件的反应;3)新植蔗和宿根蔗光能利用效率和蒸腾效率的差异。甘蔗生长模型是在不同地区管理措施背景下,结合气象数据模拟甘蔗种植区域的土壤 C 和 N 变化,预测甘蔗的产量和糖分。地区间存在的差异是由管理措施和气候因素决定的,还是由土壤本身的有机质差异决定的都还需要进一步研究。

甘蔗生长模型未来的发展趋势,一方面将从宏观上探索与遥感技术、地理信息系统(GIS)的结合^[49],建立更加完善的作物生产计算机决策管理系统,另一方面将从微观上与基因组学结合^[50-51],通过基因信息与数学模型的结合来预测基因对环境的反应。总之,随着不同学科技术的相互交融及深入研究,以甘蔗生理基础为背景的生长模型对产量和糖分的模拟预测将更加准确,用其评估不同管理措施下的

甘蔗生产潜力, 将为农业管理提供更为科学的依据。

参考文献:

- [1] 杨京平, 王兆骞. 作物生长模拟模型及其应用[J]. 应用生态学报, 1999(4): 118–122.
- [2] Keating B A, Robertson M J, Muchow R C, et al. Modelling sugarcane production systems I. Development and performance of the sugarcane module[J]. Field Crop Research, 1999, 61: 253–271.
- [3] 谢云, Kiniry James R. 国外作物生长模型发展综述[J]. 作物学报, 2002(2): 190–195.
- [4] 杨靖民, 杨靖一, 姜旭, 等. 作物模型研究进展[J]. 吉林农业大学学报, 2012(5): 553–561.
- [5] 王文佳, 冯浩. 国外主要作物模型研究进展与存在的问题[J]. 节水灌溉, 2012(8): 63–68.
- [6] Singels A, Annandale J G, De Jager J M, et al. Modelling crop growth and crop water relations in South Africa past achievements and lessons for the future[J]. South African Journal of Plant and Soil, 2008, 27(1): 49–65.
- [7] Inman-Bamber N G, Singels A, Muchow R C. A systems approach to be benchmarking for sugarcane production in Australia and South Africa[J]. Proceeding of the South African Sugar Technologists' Association, 1998, 72: 3–9.
- [8] Singels A, Kennedy A J, Bezuidenhout C N. Weather based decision support through the internet for the agronomic management of sugarcane[J]. Proceeding of the South African Sugar Technologists' Association, 1999, 73: 30–32.
- [9] Cheeroo-Nayamuth F C, Robertson M J, Wegener M K, et al. Using a simulation model to assess potential and attainable sugarcane yield in Mauritius[J]. Field Crop Research, 2000, 66: 225–243.
- [10] Singels A. A new approach to implementing computer-based decision support for sugarcane farmers and extension staff the case of my canesim[C]. XXVI Congress, International Society of Sugar Cane Technologists, Durban, South Africa, 2007: 211–214.
- [11] Mcglinchey M G. Computer crop model application: Development in Swaziland[J]. Proceeding of the South African Sugar Technologists' Association, 1999, 73: 35–38.
- [12] O'Leary G J. A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield[J]. Field Crops Research, 2000, 68: 97–111.
- [13] Lisson S N, Inman-Bamber N G, Robertson M J, et al. The historical and future contribution of crop physiology and modelling research to sugarcane production systems[J]. Field Crop Research, 2005, 92: 321–335.
- [14] Thorburn P J, Meier E A, Probert M E. Modelling nitrogen dynamics in sugarcane systems recent advances and applications[J]. Field Crop Research, 2005, 92: 337–351.
- [15] Mccown R L, Hammer G L, Hargreaves J N G, et al. APSIM: A novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research[J]. Agricultural Systems, 1996, 50(3): 255–271.
- [16] Keating B A, Hochman Z, Mclean G, et al. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3): 267–288.
- [17] Keating B A, Carberry P S, Hammer G L, et al. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation[J]. Journal of Agronomy, 2003, 18: 267–288.
- [18] Basnayake J, Jackson P A, Inman-Bamber N G, et al. Sugarcane for water-limited environments: Genetic variation in cane yield and sugar content in response to water stress[J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63(16): 6023–6033.
- [19] Inman-Bamber N G, Everingham Y, Muchow R C. Modelling water stress response in sugarcane: Validation and application of the APSIM-Sugarcane model[C]. The 10th Australian Agronomy Conference. Hobart, Tasmania, 2001: 1030–1200.
- [20] Inman-Bamber N G, Lakshmanan P, Park S. Sugarcane for water-limited environments: Theoretical assessment of suitable traits[J]. Field Crop Research, 2012, 134: 95–104.
- [21] Everingham Y L, Smyth C W, Inman-Bamber N G. Ensemble data mining approaches to forecast regional sugarcane crop production[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(3/4): 689–696.
- [22] Inman-Bamber N G, Muchow R C, Robertson M J. Dry matter partitioning of sugarcane in Australia and South Africa[J]. Field Crops Research, 2002, 76(1): 71–84.
- [23] Thorburn P J, Biggs J S, Attard S J, et al. Environmental impacts of irrigated sugarcane production: Nitrogen lost through runoff and leaching[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 144(1): 1–12.
- [24] Biggs J S, Thorburn P J, Crimp S, et al. Interactions between climate change and sugarcane management systems for improving water quality leaving farms in the Mackay Whitsunday region, Australia[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2013, 18: 79–89.
- [25] Skocaj D, Hurney A, Inman-Bamber N, et al. Modelling sugarcane yield response to applied nitrogen fertiliser in a wet tropical environment[J]. Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists, 2013, 35: 1–9.
- [26] Inman-Bamber N G. Effect of age and season on components of yield of sugarcane in South African[J]. Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association, 1994, 34: 23–27.

- [27] Inman-Bamber N G . History of the CANEGRO model[C] . Proceedings of International CANEGRO Workshop ,Mount Edgecombe ,South Africa ,2000 :4-7 .
- [28] Inman-Bamber N G . A growth model for sugar-cane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance[J] . South African Journal of Plant and Soil , 1991 , 8(2) : 93-99 .
- [29] Inman-Bamber N G , Culverwell T L , McGlinchey M G . Predicting yield responses to irrigation of sugarcane from a growth model and field records[J] . Proceeding of the South African Sugar Technologists' Association , 1993 , 67 : 66-72 .
- [30] G I N , A K G . CANEGRO 3 . 10 . DSSAT version 3.1 [DB/CD] . 1998 .
- [31] Inman-Bamber N G . Automatic plant extension measurement in sugarcane in relation to temperature and soil moisture[J] . Field Crops Research , 1995 , 42(2) : 135-142 .
- [32] Inman-Bamber N G . Climate and water as constraints to production in the south African sugar industry[J]. Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association , 1995 , 69 : 55-59 .
- [33] McGlinchey M G , Inman-Bamber N G . Effect of irrigation scheduling on water use efficiency and yield[J]. Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association , 1996 , 70 : 55-56 .
- [34] Jones J W ,Singels A .DSSAT v4 .5 - Canegro sugarcane plant module[R] . User documentation . ICSM report , 2008 .
- [35] Singels A , van den Berg M , Smit M A , et al . Modelling water uptake , growth and sucrose accumulation of sugarcane subjected to water stress[J] . Field Crops Research , 2010 , 117 : 59-69 .
- [36] Singels A , Jones M , Marin F , et al . Predicting climate change impacts on sugarcane production at sites in Australia , Brazil and South Africa using the Canegro Model[J] . Sugar Tech , 2014 , 16(4) : 347-355 .
- [37] Marin F R ,Ribeiro R V ,Marchiori P E R .How can crop modeling and plant physiology help to understand the plant responses to climate change? A case study with sugarcane[J] . Theoretical and Experimental Plant Physiology , 2014 , 26(1) : 49-63 .
- [38] Jones C Allan . AUSCANE : Simulation of Australian sugarcane with EPIC[R]. Tropical Crops and Pastures. Australia , CSIRO , 1989 : 99 .
- [39] Wegener M K , Jones C A , Russell J S . Simulating cane growth under Australian conditions[J] . Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists , 1988 , 10 : 99-106 .
- [40] Wegener M K . Analysis of risk in irrigated sugarcane at Mackay[J] . Proceedings of Australian Society Of Sugar Cane Technologists , 1990 , 12 : 45-51 .
- [41] Russell J S . Effect of interactions between available water and solar radiation on sugarcane productivity and the impact of climatic change[J] . Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists , 1990 , 12 : 29-38 .
- [42] Johnson A K L . Use of the AUSCANE model to predict crop yield for land evaluation studies in the herbert river district[J] . Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists , 1992 , 14 : 144-149 .
- [43] Johnson A K L , Cramb R A , Wegener M K . The use of crop yield prediction as a tool for land evaluation studies in Northern Australia[J] . Agricultural Systems , 1994 , 46(1) : 93-111 .
- [44] Wegener M K , Jones C A , Mcleod I M . Development and application of a simulation model for sugarcane[C]. Proceedings XXI Congress of the International Society of Sugar Cane Technologists , Bangkok (Thailand): Kasetsart University Publish , 1995 : 171-187 .
- [45] Liu D L , Allsopp P G . QCANE and armyworms : To spray or not to spray , that is the question[J] . Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists , 1996 , 18 : 106-112 .
- [46] Liu D L , Bull T A . Simulation of biomass and sugar accumulation in sugarcane using a process-based model[J] . Ecological Modelling , 2001 , 144 : 181-211 .
- [47] Liu D L , Helyar K R . Simulation of seasonal stalk water content and fresh weight yield of sugarcane[J] . Field Crops Research , 2003 , 82(1) : 59-73 .
- [48] 王石立 , 马玉平 . 作物生长模拟模型在我国农业气象业务中的应用研究进展及思考[J] . 气象 , 2008 , 34(6) : 3-10 .
- [49] Davis R J , Baillie C P , Schmidt E J . Precision agriculture technologies-relevance and application to sugarcane production[C]//Agricultural Technologies in a Changing Climate :The 2009 CIGR International Symposium of the Australian Society for Engineering in Agriculture. Brisbane, Queensland: Engineers Australia , 2009 : 114-122 .
- [50] Yin X , Struik P C , Kropff M J . Role of crop physiology in predicting gene-to-phenotype relationships[J] . Trends in Plant Science , 2004 , 9(9) : 426-432 .
- [51] Hoogenboom G , White J W , Messina C D . From genome to crop :Integration through simulation modeling[J] .Field Crops Research , 2004 , 90(1) : 145-163 .

责任编辑: 王赛群

英文编辑: 王 库