

作物模型研究进展^①

张均华^{1,2}, 刘建立^{1*}, 张佳宝¹

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国水稻研究所, 水稻生物学国家重点实验室, 杭州 310006)

摘要: 作物模型的研究和应用有利于科研成果的综合集成、作物种植管理决策的现代化和辅助国家决策, 是农业研究中的重要工具。一个完整的作物模型一般包括作物生长模块、水分运动模块与氮素迁移转化模块。这三者相互联系, 相互影响。本文对上述 3 个模块的发展历程以及应用比较广泛、综合性比较强的几个模型进行综述, 对比各自的优缺点, 指出了作物模型今后的发展方向。

关键词: 作物模型; 作物生长模拟; 水分运动模拟; 氮素迁移转化模拟

中图分类号: S126

农田生态系统的动态转化和功能主要是在土壤-作物-大气连续体 (soil-plant-atmosphere continuum, SPAC) 中体现和实现的^[1]。水分和养分供给不足或过量都会影响作物生长, 造成水肥损失和环境污染。传统上通过作物-气候-水肥关系的田间实验获取数据和规律性认识, 作为栽培措施和水肥管理的依据。由于田间实验的复杂性和不确定性, 这种实验方法不仅费时费力, 而且很难整体把握 SPAC 中作物、水分、养分三者的迁移转化关系^[2]。作物模型从系统的角度描述作物及其环境之间的关系, 具有系统性、机理性和效益性等优点, 已越来越受到人们的重视^[3]。作物模型与传统的反映因果关系的统计回归模型有显著差别, 它具有动态性、机制性与预测性, 更重要的是它具有通用性, 适用于不同地区、时间和品种。水氮因子是作物生长的重要决定因素, 所以一个完整的作物模型在结构上一般包含 4 个模块: 作物生长模块、水分运动模块、氮的迁移转化模块以及温度模块。作物生长模块是以系统分析的原理和计算机模拟的技术来定量描述作物生长、发育、产量形成的过程及其与环境的关系, 包括光和、呼吸、蒸腾等一系列生理作用和水、肥、栽培等管理措施对它的影响等。通过对作物生长发育的模拟, 可以预测作物生长、器官建成、产量及品质形成, 提供优化动态目标, 为实施调控与决策提供依据^[4]。水分与氮素迁移转化的模拟可以为田间管理提供依据, 提高效益, 定量评价灌溉用水等

与氮肥的环境效应^[5-6]。而土壤温度模块一般比较简单, 且多用经验关系表示^[7]。故本文对作物模型中的作物生长模块、水分及氮素循环模块的发展历程进行回顾, 介绍了一些主要模型的特点, 以及各个模块在研究和应用中存在的问题, 讨论了作物模型的发展趋势, 以期今后作物模型的深入研究提供一定参考。

1 作物生长模块

1.1 作物生长模拟研究

荷兰和美国是最早开始作物生长模拟研究的国家, 荷兰的 de Wit^[8] 在 1965 年和美国的 Duncan^[9] 在 1967 年相继发表了冠层光能截获与群体光合作用的模型, 成为作物生理生态过程模拟的经典之作, 他们的开拓性工作在国际上产生了重大影响, 极大地推动了世界作物生长模拟研究的发展。到现在大致经历了 4 个发展阶段: 初级模型阶段、综合模型阶段、应用模型阶段及现在的扩展模型阶段^[10]。在初级模型阶段, 模型对植物和土壤中许多基础过程涉及地很少, 大多是纯描述性的理论研究, 主要以 1969 年 de Wit 提出的作物生长过程中碳素平衡的计算机模拟模型 ELCROS (elementary crop simulation) 为代表, 这是国际上第一个农业计算机模型^[11]。它用于探讨不同条件下作物潜在的生产水平, 模型包含了具有机理性的冠层光合作用部分、描述器官生长速率部分及有关呼吸作用的最初设想。20 世纪 70 年代中后期到 80 年代中期, 作

①基金项目: 国家自然科学基金项目 (40871105) 和 973 计划课题项目 (2011CB100506) 资助。

* 通讯作者 (jlliu@issas.ac.cn)

作者简介: 张均华 (1983—), 女, 山东沂水人, 博士研究生, 主要从事土壤水氮运移模拟研究。E-mail: zhangjh@issas.ac.cn

物生长模拟研究进入了综合模型阶段。荷兰 Wageningen 大学的科学家们在 ELCROS 模型基础上先后研制了 BACROS 模型 (basic crop simulation)^[12] 和 SUCROS (simple and universal crop simulator) 模型^[13]。BACROS 模型属于综合模型, 它模拟潜在生产条件下大田作物营养生长阶段的潜在生长和蒸腾, 适用于禾谷类等草本作物, 各种作物自有其特定的参数。SUCROS 模型是 de Wit 系列的第一概要模型, 与 BACROS 一样, 因为其所描述的物理过程和生理过程适用于不同环境条件, SUCROS 模型具有通用性并已用于不同种类的作物, 如小麦、大豆等^[14]。因为研究工作主要是在 Wageningen 进行的, 所以由 de Wit 开创的荷兰作物生长模拟研究统称为荷兰 Wageningen 作物生长模型。Wageningen 模型的一个重要特征是模拟作物生长都是以冠层光合作用为基础, 应用于不同作物, 只需改变作物参数即可。

从 20 世纪 80 年代中后期开始, 作物生长模拟研究进入了应用阶段, 这一时期作物生长模拟研究迅速发展, 进一步趋向系统化、机理化, 从不同生育过程的模拟到完整的生长过程模拟, 作物模拟在深度和广度上同时得到了发展。荷兰 Wageningen 大学科学家在 ELCROS 基础上为半湿润热带作物开发了 MACROS 模型 (modules of an annual crop simulator)^[15]。该模型是 SARP (simulation and systems analysis for rice production) 计划的一部分^[16], 由一系列潜在水分限制情形下的作物生长模拟模块组成。与 SUCROS 相比, MACROS 保留了更多的综合模型特征, 其透明性与模块化结构使人们有可能针对研究的问题选取所需模块进行组合。后来 SARP 计划在 MACROS 的基础上集中研究 6 个方面的应用程序: ①农业生态区划与特征化; ②作物轮作与水分利用优化; ③模型在植物育种中的应用; ④气候变化对水稻生产影响的评估; ⑤氮肥优化调控; ⑥虫害治理。并在 MACROS 和 SUCROS 基础上开发了一系列针对这些应用的水稻模型, 其通用名称为 ORYZA^[17]。ORYZA 完成后, 1997 年曾与 GCM (大气环流模式) 结合评估气候变化对亚洲水稻生产的影响。

这个时期美国科学家研制出了一个重要的作物模拟系列模型, 即 CERES 模型 (crop environment resource synthesis - 作物环境资源综合系统)^[18]。与早期的作物生长模拟模型相比, CERES 在机理性、综合性与应用性等方面都有较大的提高。不仅模拟作物的生理与生产过程, 还模拟土壤与植物的养分平衡 (矿化、硝化、反硝化、固氮、淋溶、吸收和利用等)、土壤与植

物的水分平衡 (有效降水、径流、蒸发、蒸腾、渗流、水分垂直运动等)。与 Wageningen 模型类似, CERES 模型也是先开发由大气环境和土壤水分控制下的作物生长模拟模块, 然后再将氮素循环模块链接到主模块中。而与 Wageningen 模型不同的是, CERES 不是通用模型, 它针对不同作物开发了不同的模型, 包括 CERES-wheat^[19]、CERES-rice^[20]、CERES-maize^[21]、CERES-barley^[22]等。CROPGRO (crop growth) 模型也是这个时期由美国科学家开发的, 模型最初是由大豆模型 SOYGRO^[23]、花生模型 PUNGTRO^[24]和干菜豆模型 BEANGRO^[25]合并形成, 主要模拟籽实豆类作物的生长发育和产量形成过程^[26]。目前模型扩展到能模拟大豆、花生、菜豆、鹰嘴豆等。IBSNAT (international benchmark transfer) 在数据库与模型的基础上建立起一个农业技术转移决策系统 DSSAT (decision support system for agrotechnology transfer)^[27], 该系统集成了多个作物生长模拟模型, 包括 CERES 系列模型和 CROPGRO 系列模型, 称之为 DSSAT 系列模型。DSSAT 系列模型模拟了作物营养生长和生殖生长发育过程, 包括发芽到开花, 叶片出现次序、开花时期、籽粒成熟和收获。模型也模拟作物光合作用、干物质分配和植株生长以及衰老等基本生理生态过程。依据不同的作物类型, 经济产量如籽粒、果实或茎秆产量都能得出。为了将各种作物模拟模型纳入一个统一系统, DSSAT 规定了标准的土壤、气候数据格式和输入输出文件格式, 以便各种作物模拟模型都可以共用数据。由于包括了多种作物模拟模型, DSSAT 可为用户提供多种选择方案。

该时期开始, 全球研究作物生长模拟的主要国家也由原来的美国和荷兰发展到了其他的许多国家和地区。如澳大利亚 APSIM (agricultural production systems simulator) 模型, 与 DSSAT 类似, 它也是把不同的作物生长模拟模型集成到一个公用的平台^[28]。与其他作物模型不同的是, APSIM 模拟系统的核心是土壤而非植被。天气和管理措施引起的土壤特征变量的连续变化被作为模拟的中心, 而作物、牧草等在土壤中的生长、衰老只起到使土壤属性改变的作用。目前 APSIM 模型应用的领域已经包括种植制度、作物管理、土地利用、作物育种、气候变化和区域水平衡等。我国的作物生长模拟研究也是在 80 年代开始, 如高亮之和金之庆^[29]提出的 RCSODS-水稻栽培模拟优化决策系统, 骆世明和郑华^[30]从栽培角度建立的包含经济评价模型的水稻计算机模拟系统-RSM 模型, 曹卫星和罗卫红^[31]建立的基于作物-环境-技术关系的小麦生长模拟模型

等，都对我国作物模拟技术的进一步发展起到了相当大的推进作用。

从 20 世纪 90 年代中期开始，世界范围内的作物生长模拟研究在机理性、广泛性、应用性、综合性与高技术性等方面都得到了长足的发展。具体表现在：①对作物生长发育中一些基本过程的模拟研究，在深度上有了很大的进展。如瑞典科学家皇家技术研究所研制的 COUPMODEL 模型^[32]模拟土壤-植物-大气系统中水汽、热量的生物地球化学过程，饱和与非饱和水的传导机制，冻结与解冻过程，根系发育，植物对水分吸收的调节机制等。②作物生长模型研究大大超过作物模拟的范围，20 世纪 90 年代中期以后几乎遍及农业的各个领域。除作物生长发育与栽培管理外，还包括作物育种、品种适应性、园艺学、土壤学、农业经济学等。③农业专家系统或决策支持系统研制的成功使模拟模型在农业生产中的应用成为可能。典型的应用领域包括农业生态区划、区域产量预报、区域评估环境及社会经济变化对农业的影响等。这时期也利用作物生长模型研究全球气候变化的影响以及农业生产可持续发展的策略等，如美国的 DSSAT 系列模型和 GOSSYM-COMAX 模型^[33]，中国的 CCSODS 系列模型^[34]等。④与前期的作物生长模拟模型相比，20 世纪 90 年代后的作物生长模型一般将各个环节结合起来，形成一种综合性的作物模型系统。一般由若干子模块组成：作物模块、水分模块、养分（氮素）模块等。调整敏感参数，可将模型应用于不同的环境条件与不同的作物。⑤地理信息系统 GIS、全球定位系统 GPS、遥感 RS、网络技术等在信息农业中发挥出更大的作用。作物生长模型与高新技术的结合使精准农业的管理成为可能。

1.2 作物生长模拟研究发展趋势

目前作物生长模拟研究已取得长足进展，其发展前景也十分广阔，但它在实际应用中还处于试验研究阶段^[35-36]。如目前在作物生长模拟中，关于水肥胁迫因子考虑得都较为简化，模拟的作物生长或产量形成对水分和养分胁迫因子或过于敏感或过于迟钝^[36]。加强水分和养分胁迫机理的定量化模型研究，对于提高作物生长模拟的预测能力具有十分重要的意义。未来作物生长模拟研究在成熟期的基础上必然朝着宏观和微观方向发展。宏观上，模拟模型与 3S 技术、专家系统、决策支持系统、网络技术、天气发生器等高新技术或其他领域模型进一步结合；微观上，作物模拟模型的研究进一步趋向细化、具体化、机理化，对作物的品种、个体、器官、细胞以及生理生化过程进

行模拟。

2 农田水分循环模块

农田水文循环包含的过程主要有：降水和灌溉、植物截留、农田径流、蒸散发、入渗、植被的含水等。植物截留与植被含水这两项在林业模型中比较重要，但在作物模型中与其他几项相比，相对较小，往往可以忽略不计。平原地区农田土壤研究区，水分循环以入渗、径流为主，另外还需要考虑植物的根系吸水和叶面蒸腾以及土表蒸发等。径流由于受地形、地貌、土壤性质、降水强度等多种因子的影响，径流量的求算是一个相当复杂的问题，目前并没有一个通用的机理性模型，一般用经验公式来求算。所以本文着重探讨农田水分蒸散发及入渗方面的研究进展。

2.1 农田蒸散发模块

2.1.1 农田蒸散发研究 蒸散发研究包括植物棵间的土面蒸发和植物蒸腾，以及相关的植物-大气界面和土壤-大气界面的水汽交换，植物根系吸水 and 水分在植物体内的运动等过程^[37]。Rosenberg 和 Blad^[38]指出降落到地球表面的降水有 70% 通过蒸发或蒸散作用回到大气中，可见蒸散发是水文循环的一个重要组成部分。自 1802 年 Dalton 提出计算蒸散发的公式以来，蒸散发理论取得了重大进展，监测和估算方法也有很大改进，这些方法从不同角度反映了蒸散发过程的规律和特征^[39]。20 世纪 50、60 年代考虑不同作物在不同气象条件下的蒸散发的监测和计算已经成熟；20 世纪 80 年代大气近地层观测技术与地气间能量和物质交换的研究大大提高了蒸散发的观测和计算精度^[40]。

计算蒸散发的方法主要有区域水平衡法、Penman 与 Penman-Monteith 模型以及 Priestly-Taylor 模型等。其计算方法与计算的时间尺度、空间尺度以及所掌握的水文气象数据及植被土壤参数的多少均有很大关系^[40]，每种方法都是根据一定的对象和条件发展起来的。区域水平衡法是通过水文监测确定除蒸散发外的其他水均衡要素，用余项法推求区域耗水量。该方法的计算不受下垫面和气象条件限制，可以计算较大时间尺度和空间尺度的蒸发量，缺陷是机理性及精度较差。Penman^[41]于 1948 年基于能量平衡和质量传输理论，首次提出利用标准气象观测数据（包括辐射、温度、湿度和风速）计算开阔水面的蒸发量，并通过引入阻力因子将该公式应用于植被表面腾发量计算。Penman 公式揭示了形成农田蒸散发的两个主要因子：热力因子与动力因子，前者由太阳净辐射表述，后者由风速和水汽压所决定。Penman 公式在基本结构上属于机理

与经验相结合的模型,与实测值的吻合度较高,在国际上有很大的影响。Penman 于 1953 年提出了单个叶片气孔蒸腾模型,之后 Covey 把气孔阻力的概念推广到整个植被表面^[40]。1965 年 Monteith^[42]在 Penman 和 Covey 等人的研究基础上,提出了考虑边界层阻力的作物腾发量计算模型,即 Penman-Monteith 模型。该模型既考虑了空气动力学和辐射项的作用,又涉及到作物的生理特征,具有很好的物理基础和较高的计算精度,能清楚地表达腾发的变化过程及其影响机制,为非饱和下垫面腾发量的计算开辟了新途径。与 Penman 模型相比,该模型的经验性明显减少,属于机理性模型。但在 Penman-Monteith 模型中动力阻力与气孔阻抗很难实际测定,在一般的作物模型中应用起来有些困难。所以 Penman 公式至今仍然为许多作物模型所应用。Priestly 和 Taylor^[43]在 1972 年提出了一个半经验的模型, Priestly-Taylor 模型。该模型比 Penman 模型简单,不需要风速与湿度数据,在大面积上应用较为便利。但后来的研究表明 Priestly-Taylor 模型比较适宜于湿润地区。

20 世纪中后期,随着遥感技术的不断发展,国内外相继开展了利用卫星遥感技术估算区域蒸散量的研究^[44]。可见光、近红外和热红外波段的数据反映了植被覆盖于地表温度的时空分布特征,这对能量平衡的模拟非常重要。而能量平衡是蒸散研究方法的理论基础,所以遥感数据中获取的地表面温度、地表光谱反射率和归一化差异植被指数 (NDVI) 等,可以为蒸散模型提供参数,再结合地面气象及植被要素和 DEM 的地形要素,就可以计算或反演研究区的蒸散发通量。自从 Rosenberg 等^[38]最早将热红外遥感温度应用到蒸散发模型中,并提出作物阻抗-蒸散模型以来,至今蒸散发模型已经从简单的经验公式发展到具有物理机制的土壤-植被-大气传输 (SVAT) 模型。目前常用的遥感蒸散模型有基于能量平衡原理的蒸散模型 (包括单层模型和双层模型)、彭曼模型、经验模型以及陆面过程模型。不同模型的适用范围、对地表温度的要求以及应用的难易程度各有不同,在实际应用中要根据需要选择合适的遥感模型^[45]。尽管目前遥感反演还存在很大的不确定性,但大量的研究都表明遥感在区域地表水热通量模拟中的作用是无法替代的。作为遥感模型最主要的信息来源,遥感能提供叶面积指数、植被覆盖度、地表温度等信息,同时新的传感器尤其是多角度热红外波段和微波波段的开发,能提供模型所需要的地表组分温度和土壤水分的初始输入,降低地表通量模拟过程的不确定性。此外,由于区域地表和大

气非均匀性带来的尺度问题,也是遥感模型应用的一个难点。新技术的开发如大孔径闪烁仪等使遥感反演的区域性验证成为可能,同时也会促进不同尺度的水热通量传输机理的深入认识。由于遥感自身的瞬时性,不能提供地表连续的蒸散发过程,而陆面过程模型能连续模拟地表水热过程,因而遥感数据与陆面过程模型的同化是未来的发展方向。

2.1.2 农田蒸散发研究的发展趋势 未来蒸散发的监测研究仍需以完善现有蒸散发模型及方法为主。为加强估算模型中参数的确定及模型率定工作,应把不同区域尺度蒸散的计算方法有机结合起来,综合研究多尺度下蒸散发估算的协调性及有机整合,以及不同尺度间的相互转换途径和方法,以期取得突破性进展。在实际工作中,要不断提高监测仪器的测定精度以降低观测误差,确保所获数据的质量,这也是检验和改进蒸散发估算方法的基础。与估算区域蒸散量的传统方法相比,遥感监测具有时空连续性及跨度大的特点,随着遥感技术的革新,利用遥感估算区域蒸散量具有无可替代的优越性,所以该法将是区域蒸散量估算研究的主要发展方向。

2.2 水分入渗模块

2.2.1 水分入渗过程研究 土壤水分入渗是指水分进入土壤形成土壤水的过程,它是降水、地面水、土壤水和地下水相互转化的一个重要环节。土壤水分入渗过程对田间水分管理、土壤溶质运移等的研究都是至关重要的。水分入渗过程是非饱和土壤水分的运动过程,其理论基础是法国工程师 Darcy 提出的达西定律^[46]。Richards^[47]在 1931 年将达西定律引入非饱和土壤水流运动中,即 Richards 方程。该方程在均质土壤中较易求解,但在非均质土壤,尤其是入渗条件比较复杂的土壤,求解入渗速率比较困难。所以一般会根据研究目的和要求,对求解过程进行适当简化。

随着对土壤水分运动特征研究的不断深入,人们相继提出了各种入渗模型,包括经验-半经验方程。常用的入渗模型有: Kostiakov 模型^[48], Kostiakov-Leiws 模型^[49], Horton 模型^[50], Green-Ampt 模型^[51], Philip 模型^[52], Holtan 模型^[53]等。Kostiakov 经验模型形式简单,模型参数容易通过实测资料或实验获取,因而在农田灌溉、短历时入渗研究和实践中得到普遍应用。Kostiakov-Leiws 模型是在 Kostiakov 模型的基础上建立起来的,能够很好地预测入渗过程,特别是长历时入渗,较其他公式具有更高的预测精度,目前人们应用较多的仍是以 Kostiakov 和 Kostiakov-Leiws 公式为基础的入渗模型。Horton 模型是纯经验性的公式,虽

然缺乏物理基础，但由于其应用方便，至今在许多实验研究中仍然沿用，该模型也是水文产汇流计算中常用的数学模型之一。**Green-Ampt** 模型是 **Green** 和 **Ampt** 在 1911 年提出的基于毛细管理论的入渗模型，是较早具有物理基础的入渗模型。在众多学者的不断完善下，该模型具备了非均质、积水和非积水条件下的水分入渗模拟能力^[54-55]，该模型在应用中的主要困难是如何正确地确定湿润锋处的土壤基质吸力和饱和导水率，不能描述水分实际分布情况。**Philip** 模型是 **Philip**^[52] 在 1957 年求解了特定边界条件下 **Richards** 方程的半解析解，再用数值方法求得 **Philip** 模型的最终解，该公式只适于均质土壤一维垂直入渗的情况，若将 **Philip** 入渗公式应用于非均质土壤，还需进一步研究和完善，且模型只适用于较短历时的入渗研究，在长历时的入渗情况下计算值与实际有较大偏差。**Holtan** 模型表示的是入渗速率与表层土壤储水容量之间的关系，可以用来估算一个流域的降雨入渗，但难以精确地描述一个点的入渗特征。以上各类入渗模型公式，无论是理论的还是经验的，都是建立在一定物理学理论基础上的入渗模型，在一定程度上都反映了土壤水分入渗规律，因而都有其使用价值，关键问题是根据实际条件确定入渗参数。

2.2.2 农田水分入渗研究的发展趋势 由于土壤水分运移过程的非线性、土壤的非均质性和初始边界条件的复杂性，在田间实际运用时，土壤水分运动方程很难用解析法和准解析法求出与实际相符的结果。目前最有效的方法是通过数值运算，数值模拟的结果既建立于严格的科学基础上，又比较接近于田间实际，基本上摆脱了过去静态地或孤立地研究水分形态或几个常数的局面。数值模拟自 20 世纪 60 年代开始发展以来，越来越受到人们的重视，并成为土壤水分研究的主要方法。目前人们对入渗的研究已经从一维发展到多维，从均质、初始含水率均一发展到非均质、初始含水率非均一，所用的数学手段也在不断更新。

3 农田氮素迁移转化模块

3.1 农田氮素循环模拟研究

氮素是影响作物产量的一个重要因子，所以氮素循环模拟是作物模型的一个重要组成模块。氮素模拟研究最早开始于 20 世纪 60 年代。该阶段主要利用回归分析的方法对观测到的氮素迁移转化过程进行拟合^[56]。这种方法需要较少的实验数据，但是不能对同时发生在土壤中的氮素各种转化过程进行系统的表述，也没有考虑水分运动对转化过程的影响。70 年代后溶

质运移理论及数学建模方法被用来描述土壤中氮素迁移转化的过程。根据溶质运移理论，土壤溶液中氮素的两种无机形态硝态氮 (NO_3^-) 和铵态氮 (NH_4^+) 的迁移过程可以通过对流-弥散方程来描述， NO_3^- 和 NH_4^+ 的转化过程如矿化、硝化等则采用一级动力学方程作为对流-弥散方程的源汇项^[57]。80 年代中期后，随着系统分析和计算机的发展，对氮素转化过程的研究不仅局限于水氮系统，并且扩展到土壤-作物-大气连续体中，确定性的数值模型得到广泛应用。这个时期模型更加系统与综合，模型的应用性得到增强^[58]。20 世纪 90 年代，随着人们对大尺度环境问题的关注以及地统计方法的运用和地理信息系统的发展，氮素模型与 GIS 的集成成为研究热点，模型开始反映出环境因素如土壤的物理性质、化学性质等的空间变异性^[59-60]。

近 20 年来，国内外土壤学、农学、生态学的科学家们致力于发展各种生态系统的氮素循环模拟模型。应用比较广泛的有 **NTRM**^[61] 模型、**DAISY**^[62] 模型、**DNDC**^[63] 模型、**EPIC**^[64] 模型、**HYDRUS-1D**^[65] 模型、**COUPMODEL**^[66] 模型等。**NTRM** 模型主要用于评估土壤侵蚀对土壤生产力、植物竞争、作物产量和水质的影响，没有模拟环境因子等对氮素循环过程的影响，只适用于小时空尺度内氮循环过程的定量研究^[67]。**DAISY** 模型主要用于评估农家肥、泥浆等含氮化合物的施用对环境的影响^[62]，模型考虑了氮的矿化、硝化、反硝化、植物吸收，但没有考虑氮挥发。该模型能在不同管理措施和作物轮作制度下进行模拟，并提供了接口方便与其他应用程序连接。**DNDC** 模型主要用于模拟农业生态系统中碳和氮的生物地球化学循环，目前世界上已有很多国家的科学家用 **DNDC** 模型进行应用研究^[68-69]，**DNDC** 侧重模拟氮氧化物和温室气体的排放，适用于点位和区域尺度的任何气候带的农业生态系统，但不能模拟 NO_3^- 的损失。**EPIC** 模型主要用于评估土壤侵蚀、耕作方式对生产力的影响，与其他模型相比，**EPIC** 是个通用模型，已经在亚洲、南美洲和欧洲 60 多个国家使用并校正。但 **EPIC** 不适合模拟土壤中的水分运动和溶质运移。并且 **EPIC** 是个大型的决策管理模型，模拟的时间和空间尺度都比较大，数据量较多，对数据的使用比较复杂，主要用于区域性的生产力评估。**HYDRUS-1D** 模型由美国盐土实验室开发，主要用来模拟饱和-非饱和介质中水热和溶质的运移，模型采用有限元法求解方程，在时间步长、空间步长和边界条件上可以灵活选择。在农田氮素转化过程中，尽管 **HYDRUS-1D** 模拟了土壤水分和

温度变化,但没有考虑水分、温度变化对反应速率常数的影响,并且 HYDRUS-1D 是个点模型,不能应用于区域模拟。COUPMODEL 模型是在 SOILN 的基础上开发的,主要模拟不同类型土壤的水热运动及氮的迁移和转化,对含氮气体的排放作了较详细的模拟,在模型中还考虑了氧气的流动,但是模型没有考虑氮挥发。COUPMODEL 对作物生长模拟有多项选择,既考虑了经验公式也包含了机理模型,方便了应用,但模型是建立在温带农田生态系统中的点尺度模型,在其他地区的应用还需要广泛验证。由于研究目的不同,不同模型往往根据不同假设对所模拟的过程加以简化,而且由于着眼点不同,模型模拟的过程各有侧重。如 DNDC 侧重于含氮气体的排放,DAISY 则强调在土壤—植物系统中氮的转化和吸收。在实际应用中,模型使用者要保证其研究需要与模型性能、模型包含的细节及模型的优点、局限性相匹配,才能使氮模型的模拟结果与实验结果具有较好的一致性。

3.2 农田氮素迁移转化模型发展趋势

由于模型参数求算过程的不确定性、测定资料的不确定性以及过程间相互作用的不确定性,致使目前只有较少的土壤氮素迁移转化模型在田间条件下得到比较充分的验证。近年来,土壤氮素迁移转化模型出现了两大发展趋势:理论模型趋于复杂化、细化化;应用模型趋于简单化,便于用户使用。从理论研究方面来看,土壤氮素迁移转化模型将更加突出系统性,强调各过程间的相互联系。从应用方面来看,3S(地理信息系统 GIS,全球定位系统 GPS,遥感 RS)技术与模型相结合是土壤氮素迁移转化模型发展的趋势,目前已有较多的模型和 GIS 系统相结合,如 CERES-GIS。

4 作物模型研究存在问题及发展趋势

目前作物模型进行不同空间尺度和环境条件下的验证和适用性研究仍然处于起步阶段,模型机理过程研究方面,也存在许多不足。主要包括冠层结构与作物光能截获计算方法、作物水分和养分对生长过程的胁迫机理与定量方法、作物—土壤水—地下水耦合作用机制以及作物模型区域尺度扩展方法等方面还存在简化计算过程等不足。而且目前已有模型即使是机理模型,其模拟作物生长、水氮动态或环境动态的某些过程仍建立在经验关系之上。由于决定作物产量变化的主要因素仍然是天气条件,决策支持系统的成功应用还依赖于预报未来天气的能力,而目前只能进行几天较准确的天气预报。决策支持系统必须利用长期历史

资料进行几率分析或用天气发生器生成天气数据,但现有的天气发生器空间尺度较大,不足以精确反映气象要素的空间变异,这就给作物模型的实际应用造成困难。此外,由于土壤和作物等参数的空间变异性较大,缺乏准确的土壤和作物数据输入,作物模型应用到区域尺度的精度降低。最后,作物模型本身大部分是单点(plot/field specific)模型,其研制中的许多假设条件都是基于田间均一的生产情形,还没有完全普适的用于大尺度模拟的作物模型,这既是目前作物模型的不足,也是促进模型区域应用的动因。

作物生长模块、土壤水分运动模块、氮素迁移转化模块构成了一个有机整体,既相互独立又相互联系,共同反映不同环境因素对作物—土壤—大气系统内物质迁移转化的影响。如水分模块即描述了土壤中水分运动,又为氮素迁移转化提供环境变量;作物生长模块不仅模拟作物产量,也考虑水分和氮素的吸收。作物模型作为农业资源研究的有效工具,加强各个模块的有机联系具有非常重要的现实意义。而加强模型与全球气候变化的结合将能更好地评价气候变化情景下作物产量变化、土壤水氮动态等,为地区和国家制定气候变化的适应政策和环境外交政策提供科学依据。随着 3S 技术的发展,精准数字农业与作物模型相结合可以定时、定位、定量地实施投入的农业生产管理技术,以达到最少量的生产投入和最大化的生产效益,包括实现最高产量、最小污染的目的。最后,提高模型的界面友好化研究才能将模型为普通的农业生产者或管理者所应用。

参考文献:

- [1] 李保国. 农田土壤水的动态模型及应用. 北京: 科学出版社, 2000
- [2] 周明耀. 农田水分高效利用理论与管理技术研究(博士学位论文). 南京: 河海大学, 2009: 5-8
- [3] 张俊. 稻田土壤氮素迁移转化过程的数值模拟研究(博士学位论文). 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2006
- [4] 李三爱, 居辉, 池宝亮. 作物生产潜力研究进展. 中国农业气象, 2005, 26(2): 106-111
- [5] 李培岭. 不同灌溉方式下民勤荒漠绿洲区棉花水氮耦合效应研究(博士学位论文). 杨凌: 西北农林科技大学, 2009: 2-10
- [6] 黄明蔚, 刘敏, 陆敏, 侯立军, 欧冬妮, 林啸. 稻麦轮作农田系统中氮素渗漏流失的研究. 环境科学学报, 2007, 27(4): 629-636
- [7] 马军花, 任理. 冬小麦生育期农田尺度下土壤硝态氮淋失动态的数值模拟. 生态学报, 2004, 24(10): 2289-2301
- [8] de Wit CT. Photosynthesis of Leaf Canopies. Wageningen, The

- Netherlands: Centre for Agricultural Publications and Documentation, 1965
- [9] Duncan WG. A model for simulation photosynthesis in plant communities. *Hilgardia*, 1967, 38(4): 1-32
- [10] 王亚莉, 贺立源. 作物生长模拟模型研究和应用综述. *华中农业大学学报*, 2005, 24(5): 529-535
- [11] de Wit CT, Brouwer R, Penning de Vries FWT. The simulation of photosynthetic systems // Setlik I. Prediction and Management of Photosynthetic Productivity, Proceedings of the International Biological Program/Plant Production Technical Meeting. Wageningen, The Netherlands: Trebon, PUDOC, 1970: 47-70
- [12] de Wit CT. Simulation of Assimilation, Respiration and Transpiration of Crops. Wageningen, The Netherlands: Simulation Monographs, PUDOC, 1978
- [13] Penning de Vries FWT, van Laar HH. Simulation of growth process and the model BACROS // Penning de Vries FWT, van Laar HH. Simulation of Plant Growth and Crop Production. Wageningen, The Netherlands: Simulation Monographs, PUDOC, 1982: 114-135
- [14] van Keulen H, Penning de Vries FWT, Drees EM. A summary model for crop growth // Penning de Vries FWT, van Laar HH. Simulation of Plant Growth and Crop Production. Wageningen, The Netherlands: Simulation Monographs, PUDOC, 1982: 87-98
- [15] Penning de Vries FWT, Jansen DM, ten Berge HFM. Simulation of Ecophysiological Processes of Growth in Several Annual Crops. Wageningen, The Netherlands: Simulation Monographs, PUDOC, 1989: 271
- [16] Penning de Vries FWT, van Laar HH, Kropff MJ. Simulation and Systems Analysis for Rice Production (SARP). Wageningen, The Netherlands: Simulation Monographs, PUDOC, 1991: 369
- [17] ten Berge HFM. Building capacity for systems research at national agricultural research centers: SARP's experience // Penning de Vries FWT, Teng P, Metselaar K. Systems Approaches for Agriculture Development. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1993: 513-538
- [18] Hank RJ, Ritchie JT. Modeling Plant and Soil System. Madison USA: ASA, CSSA, SSSA, 1991: 1-4
- [19] Ritchie JT, Otter S. Description and performance of CERES-Wheat: A user-oriented wheat yield model. US Department of Agriculture, ARS, 1985, 38: 159-175
- [20] Ritchie JT, Alcocija EC, Uehara G. IBSNAT/CERES Rice Model. *Agrotechnology Transfer*, 1986, 3: 1-5
- [21] Jones CA, Kiniry JR. CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development. College Station: Texas A & M University Press, TX, 1986
- [22] Otter Nackle SJ, Ritchie JT, Godwin D, Singh U. A User's Guide to CERES Barley-V2.10. Muscle Shoals, Alabama, USA: International Fertilizer Development Centre, 1991
- [23] Wilkerson GG, Jones JW, Boote K J. Modeling soybean growth for crop management. *Trans. ASAE*, 1983, 26: 63-73
- [24] Boote KJ, Jones JW, Hoogenboom G, Jagtap SS, Wilkerson GG. PNUTGRO V1. 02, Peanut Crop Growth Simulation Model, User's Guide. Florida Agricultural Experiment Station Journal No.8420, Gainesville: University of Florida, 1989
- [25] Hoogenboom G, White JW, Jones JW. BEANGRO, a process-oriented dry bean model with a versatile user interface. *Agronomy Journal*, 1994, 86(1): 82-190
- [26] Hoogenboom G, Jones JW, Boote KJ. Modeling growth, development, and yield of grain legumes using SOYGRO, PNUTGRO, and BEANGRO: A review. *Transactions of the ASAE*, 1992, 35(6): 2043-2056
- [27] Uehara G, Tsuji GY. Overview of IBSNAT // Tsuji GY, Hoogenboom G, Thornton PK. Understanding Options for Agricultural Production. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1998: 1-7
- [28] McCown RL, Hammer GL, Hargreaves JNG, Holzorth DP, Freebairn DM. APSIM: A novel software system for model development, model testing, and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems*, 1996, 50: 255-271
- [29] 高亮之, 金之庆. RCSODS-水稻栽培计算机模拟优化决策系统. *计算机与农业应用*, 1993(3): 14-20
- [30] 骆世明, 郑华. 水稻高产栽培中应用计算机模拟的研究. *广东农业科学*, 1990(3): 14-17
- [31] 曹卫星, 罗卫红. 作物系统模拟及智能管理. 北京: 华文出版社, 2000: 15-25
- [32] Jansson PE, Moon DS. A coupled model of water, head and mass transfer using object orientation to improve flexibility and functionality. *Environment Modeling and Software*, 2001, 16: 37-46
- [33] Watkins KB, Lu YC, Reddy VR. An economic evaluation of alternative pix application strategies for cotton production using GOSSYM/COMAX. *Computers and Electronics in Agriculture*, 1998, 20(3): 251-262
- [34] 曹宏鑫, 金之庆, 石春林, 葛道阔, 高亮之. 中国作物模型系列的研究与应用. *农业网络信息*, 2006(5): 45-48
- [35] 谷冬艳, 刘建国, 杨忠渠, 尹钧. 作物生产潜力模型研究进展. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(5): 90-94
- [36] 罗毅, 郭伟. 作物模型研究与应用中存在的问题. *农业工程学报*, 2008, 24(5): 307-318
- [37] Burman R, Peohop LO. Evaporation, Evapotranspiration and

- Climate Data. The Netherlands: Elsevier Science, 1994
- [38] Rosenberg NJ, Blad BL, Verma SB. Microclimate: The Biological Environment. New York: JohnWiley & Sons, 1983
- [39] 裴步祥. 蒸发和蒸散的测定与计算. 北京: 气象出版社, 1989: 1-28
- [40] 刘钰, 彭致功. 区域蒸散发监测与估算方法研究综述. 中国水利水电科学研究院学报, 2009, 7(2): 96-103
- [41] Penman HL. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceeding of the Royal Society of London, 1948, 193: 120-145
- [42] Monteith JL. Evaporation and environment. Symposia of the society or experimental biology, 1965, 19: 205-234
- [43] Priestley CHB, Taylor RJ. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. Mon. Weather Rev., 1972, 100: 81-92
- [44] Courault D, Seguin B, Olioso A. Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: From empirical to numerical modeling approaches. Irrigation and Drainage Systems, 2005, 19: 223-249
- [45] 易永红, 杨大文, 刘钰, 许迪. 区域蒸散发遥感模型研究的进展. 水力学报, 2008, 39(9): 1118-1124
- [46] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学. 北京: 清华大学出版社, 1988
- [47] Richards LA. Capillary conduction of liquids through porous mudiums. Physics, 1931, 1: 318-334
- [48] Kostiaikov AN. On the Dynamics of the Coefficient of Water Percolation in Soils and on the Necessity of Studying It from a Dynamic Point of View for Purposes of Amelioration. Trans., Sixth Comm. Int. Soil Sci. Soc., Russian Part A, 1932: 17-21
- [49] 方正三. 黄河中游黄土高原梯田的调查研究. 北京: 科学出版社, 1958
- [50] Horton RE. An approach to ward a physical interpretation of infiltration capacity. Soil Science Society of America Proceedings, 1940, 3: 399-417
- [51] Green WH, Ampt GA. Studies on soil physics. Part I. Flow of air and water through soils. Journal of Agricultural Science, 1911, 4(1): 1-24
- [52] Philip JR. The theory of infiltration: 1. the infiltration equation and its solution. Soil Science, 1957, 83(5): 345-357
- [53] Holton HN. A concept for infiltration estimates in watershed engineering. Dept. Agr. Res. Service, 1961, 39: 41-51
- [54] Smith RE, Woolhiser DA. Overland flow on an infiltrating surface. Water Resource Research, 1971, 7(4): 899-931
- [55] Flerchinger GN, Watts FJ, Bloomsburg GL. Explicit solution to Green-Ampt equation for nonuniform soils. Journal of Irrigation and Drainage. Division of ASCE, 1988, 114: 561-565
- [56] Sabey BR, Frederik LR, Barthdomew WV. The formation of nitrate from $\text{NH}_4^+\text{-H}$ in soils IV. Use of the delay and maximum rate phase for making quantitative predictions. Soil Science Society of America Journal, 1969, 33: 276-278
- [57] Addiscott TM, Wagenet RJ. Concept of solute leaching in soils: A review of modeling approaches. Journal of Soil Science, 1985, 36: 411-424
- [58] Johnsson H, Bergstrom L, Jansson PE, Paustian K. Simulated nitrogen dynamics and losses in a layered agricultural soil. Agriculture Ecosystems and Environment, 1987, 18: 333-356
- [59] Wagenet RJ, Hutson JL. Scale-Dependency of solute transport modeling/GIS applications. Journal of Environmental Quality, 1996, 25: 499-510
- [60] Li Y. A spatially referenced model for identifying optimal strategies for managing water and fertilizer nitrogen under intensive cropping in the North China Plain (PhD thesis). Melbourne, Victoria: The University of Melbourne, 2002
- [61] Shaffer MJ, Larson WE. NTRM a soil-crop simulation model for nitrogen, tillage, and crop-residue management. USDA Cons. Res. Rep., 1987, 34(1): 103
- [62] Hansen S, Jensen HE, Nielsen NE, Svendsen H. Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in winter wheat using the Danish simulation model DAISY. Fertilizer Research, 1991, 27: 245-259
- [63] Li CS. User's Guide for the DNDC Model [EB/OL] [http://www.dndc.sr.unh.edu/model/Guide DNDC 91.pdf](http://www.dndc.sr.unh.edu/model/Guide%20DNDC%2091.pdf)
- [64] Williams JR, Jones CA, Kiniry JR. The EPIC crop growth model. Trans. ASAE, 1989, 32: 497-511
- [65] Simunek J, Sejna M, van Genuchten MTh. The Hydrus-1D Software Package for Simulation the One-dimensional Movement of Water, Heat and Multiple Solutes in Variably-saturated Media. U. S. salinity laboratory, 1998
- [66] Jansson PE, Karlberg L. Coupled Heat and Mass Transfer Model for Soil-Plant-Atmosphere Systems. Stockholm: Royal Institute of Technology, Dept of Civil and Environmental Engineering, 2004
- [67] 唐国勇, 黄道友, 童成立, 张文菊, 吴金水. 土壤氮素循环模型及其模拟研究进展. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2208-2212
- [68] 李长生. 陆地生态系统的模型模拟. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(1): 49-57
- [69] 邱健军, 秦小光. 农业生态系统碳氮循环模拟模型研究. 世界农业, 2002(9): 39-41

Advances on Crop Models

ZHANG Jun-hua^{1,2}, LIU Jian-li¹, ZHANG Jia-bao¹

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;*

2 *State Key Laboratory of Rice Biology, China National Rice Research Institute, Hangzhou 310006, China*)

Abstract: Crop models are an important tool in agricultural studies which are beneficial to the comprehensive integration of achievements as well as modernization of decision-making on crops management. Generally, crop model includes three modules, which are crop growth module, water movement module and nitrogen cycle module, they are interrelated and interplayed. This paper reviewed the development of above modules and models which are used widely and comprehensively, compared the advantages and disadvantages of important models and prospected some future trends.

Key words: Crop model, Crop growth simulation, Water movement simulation, Nitrogen transport and transformation simulation