

进入 21 世纪的中国农业气象研究^{*1}

王春乙¹ 张雪芬² 孙忠富³ 吕厚荃⁴ 潘学标⁵

1 中国气象科学研究院, 北京, 100081

2 中国气象局大气探测技术中心, 北京, 100081

3 中国农业科学院, 北京, 100081

4 中国气象局国家气象中心, 北京, 100081

5 中国农业大学, 北京, 100094

摘 要

文中简要回顾了中国农业气象的发展历程, 并将现代农业气象研究划分为 3 个阶段: 20 世纪 50—60 年代初起步阶段、70—80 年代恢复发展阶段及 90 年代以后的快速发展阶段。从作物资源利用、农业气候资源与区划研究、作物产量预报和遥感估产技术、农业气象灾害研究、气候变化对农业与生态影响研究等方面重点介绍了现代农业气象科研工作的主要研究成果和进展; 从未来气候变化带来的问题、农业生产和可持续发展需求、农业气象科研中存在的薄弱环节等方面, 提出了气候变化影响下农业气象灾害防灾减灾技术研究、气候资源高效利用技术研究、有关国家粮食安全关键技术研究、农业气象现代化观测技术研究、作物生态系统模拟与量化评估技术研究、设施与特色农业气象及现代生物技术的环境调控技术研究、农业气象基础理论研究等方面农业气象未来的重点研究领域和发展方向。

关键词: 21 世纪, 农业气象, 发展历程, 发展趋势。

1 农业气象的发展历程

农业气象学是研究环境气象条件与农业生产相互影响及其规律的一个边缘学科, 由农业科学与大气科学交叉、渗透形成。它既是气象科学中应用气象的一个重要分支领域, 又是农业科学重要基础学科之一。农业是对环境气象条件最为敏感和依赖性最强的产业之一^[1]。农业气象既要研究农业生产对环境气象的要求和反应, 研究环境气象对农业生产、农业生态的影响及其反馈机制, 更要不断探索、认识并应用这些科学规律, 发展应用技术, 促进农业的可持续发展和农业生态环境的保护^[2]。

在新中国成立后 50 多年的发展历程中, 虽经曲折, 但经过几代农业气象工作者的努力, 已取得了很大发展, 总体水平稳居发展中国家前列, 某些科研领域处于世界较先进水平, 但基础理论研究仍较薄弱、原创性研究成果缺乏、研究手段和仪器设备不够先

进, 不仅难以满足农业科研与生产的需求, 也难以适应当今现代农业发展的总体趋势。

经过几十年的发展, 农业气象已由单一的学科发展出许多分支, 如作物气象、农业气候、农田小气候、畜牧气象、林业气象、农业气象灾害、农业气象情报预报、农业气象仪器与监测等^[3]。这些分支专业不断发展, 一些新的领域正在出现。21 世纪中国农业气象又面临着新的机遇和挑战, 为了适应新的形势, 促进农业气象蓬勃发展, 本文简要回顾了中国农业气象的主要发展历程, 从多个方面提出了农业气象未来重点研究领域和发展方向, 为广大农业气象科研工作者了解中国农业气象的发展、把握和开拓未来农业气象发展方向, 开展农业气象科研提供参考。

农业气象发展可追溯到远古时代。古代文明积累了农业生产与气象相互关系的知识和经验。中国是一个古老的农业大国, 就农业气象知识的历史而言, 应以中国最早。远在 3000 多年前, 人们就认识

* 初稿时间: 2007 年 8 月 2 日; 修改稿时间: 2007 年 8 月 11 日。

资助课题: “十一五”国家科技支撑计划课题(2006BAD04B09)。

作者简介: 王春乙, 研究方向: 农业气象灾害及防御、气候变化对农业的影响。

到春夏秋冬的季节变化对农业的意义。中国商代甲骨文有天气与灾害影响收成的记载,许多古代书籍和大型农书中早有“春耕、夏耘、秋收、冬藏”的记载,春秋时代孟子提出“不违农时”的论述^[4]。早在 2000 多年前,人们就懂得“凡耕之本,在于趣时”,“顺天时,量地利”,“任情返道,劳而无获”^[5]。《吕氏春秋》谈到农时对作物产量和品质的影响,从春秋战国至西汉已形成完整的二十四节气成为长期指导中国农业生产的主要依据。公元前一世纪的《汜胜之书》记载了区田法和耕作保墒技术。《齐民要术》中已谈到了霜冻发生规律和防霜冻技术;清代大型农书《授时通考》标志着根据农时与气象安排生产的知识已系统化^[1,4]。

19 世纪中叶起西方在中国沿海陆续开展气象观测。1912 年直隶农事试验总场设立农业测候所。中国气象学家陆续发表一批农业气象论文和教材,1922 年竺可桢发表“气象与农业之关系”^[4],涂长望 1944 年发表了“华中之重要作物与气候”^[6],研究了湖南、湖北、安徽和江西四省水稻、小麦、棉花产量和气候条件的关系。

新中国成立后,在竺可桢的倡导下,1953 年 3 月成立华北农业科学研究所农业气象研究组,1957 年扩大为中国农业科学院农业气象研究室,1953 年起各地相继成立农业气象研究机构。1955 年中央气象局台站管理处设立农业气象科,是中国第一个农业气象台站管理机构,1958 年中央气象局成立农业气象研究室。在涂长望的倡议下,1956 年在北京农业大学创建农业气象专业。1957 年起在全国建立了一批农业气象试验站^[7]。至此,中国现代农业气象学研究、业务和教学体系已经基本形成。80 多年来,经过几代农业气象工作者的不懈努力,认识和揭示了大量的农业气象规律,并通过农业气象研究成果的应用,在国民经济建设中发挥着重要作用,无论是理论水平还是应用技术都提高到了一个新的水平,在整个世界农业气象发展中占有一席之地。

2 现代农业气象科研发展

20 世纪 50—60 年代初创起步阶段主要是建立中国农业气象研究和业务结构,建立农业气象观测网,并在几个农业院校中设立农业气象专业。开展了农业气象观测、物候观测、情报预报服务工作;农业气象研究主要集中在作物气象、指标鉴定、霜冻防御、干热风、寒露风及农业气候调查和区划等方面。部分省区探讨编制了粗线条的农业气候区划。1964

年竺可桢发表了“论我国气候的几个特点及其与粮食生产的关系”一文,从气候角度指出了中国粮食生产的潜力,在全国引起了极大关注,对进一步认识农业气象在国民经济发展中的作用十分重要。随着农业气象科研机构建立、农业气象观测网的布设,农业气象研究逐步开始起步。70 年代以来,农业气象研究逐步向广度、深度发展,特别是 80 年代以后,通过引进国外农业气象理论与模拟技术,研究内容丰富多彩,涉及农、林、牧、副、渔等多领域,农业气象研究在理论和应用上逐步成熟^[8-15]。

2.1 作物资源利用潜力理论

20 世纪 50 年代,竺可桢^[16]分别从作物生理和气候角度率先提出了光能潜力理论,农业气象学家进一步提出了作物气候生产潜力理论,在生产实践中深刻影响了耕作与种植制度的改革,指导了多熟种植、间作套复种、合理密植与吨粮田建设,为中低产田作物高产优质做出了重大贡献。至今他们的设计思想与研究方法,已为广大农学、气候、地理学家等专家所接受。1979 年首次在国内将温度效应系数引入到生产潜力估算中。随后一些学者计算了光温生产潜力,不仅涉及光温对作物生长发育的影响,还考虑了作物叶面积动态对作物产量的影响。至此,中国光合、光温生产潜力研究思想体系基本完善。80 年代中期,中国作物生产潜力研究更加广泛。学者们考虑了水分条件,认为水分是作物生长中的一个十分重要和活跃的因素,计算了不同区域光温降水生产潜力,并以此为基础进行农业气候生产潜力区划^[17-19],为中国农业生产提供了远景发展依据。

2.2 农业气候资源与区划

20 世纪 70 年代末,为配合“1978—1985 年全国科学发展规划纲要”的农业自然资源调查和农业区划任务,开展了全国规模的农业气候资源调查和农业气候区划研究。80 年代中后期,通过与农业科研部门及高校的合作,先后完成了中国农业气候资源图集(作物、光、温、水)、中国农业气候区划,中国农林作物气候区划,中国牧区畜牧气候区划,中国农作物种植制度气候区划等系列配套成果。这些区划及其有关资源的分析利用,不仅深化了对中国农业布局 and 农业气候资源利用配置中有关问题的认识,诸如农牧过渡气候带、农业气候资源优势区、农业区域化和专业化生产等,还有利于当前市场经济导向下高新技术的引进,促进农业气候区划由静态向动态,由规划应用向实用技术的转化。

在近 10 年的中国热带亚热带丘陵山区农业气候资源开发利用研究中,提出了山区农业气候资源的立体层次性概念和立体农业气候条件和资源的开发策略,在建立喜温果树和名贵药材基地以及利用坡向种植早熟反季节蔬菜和开发冬季逆温资源等方面均有明显的经济效益。并在上述研究基础上,从资源、环境和可持续发展的角度,应用地理信息系统、卫星遥感等新技术,建立山区农业气候资源信息系统和优质高产气候生态评估模式,进一步开展山区带(基带)、层(垂直分层)、形(地形)、态(生态环境)的农业气候资源高效持续利用的综合开发途径研究,为气候资源高效持续利用,为加速山区农业区域开发、结构调整和西部开发决策提供科学依据,并在资料序列延伸基础上作了修正完善和精细区划与应用开发研究^[20-25]。

一些学者研究了世界农业气候与作物气候,做出世界农业气候图集,计算了世界各国农业气候资源利用效率,并做出世界作物适宜性区划,还利用中国与世界气候、农业气候及生物气候相似原理,开展了中国和世界各地水热条件与土壤相似研究,论证其结果的可靠性与可行性,并用图例表征各类气候相似图的基本特点^[26-27]。

2.3 农业气象产量预报与遥感估产和农业气象情报技术

70 年代,农业气象工作者开始了农业产量预报研究,无论在现代农业气象预报机理研究、还是在模式应用技术以及预报种类上,都取得了重大进展,丰富了农业气象产量预报的基本原理,包括环境气象条件对作物生长发育过程作用的持续-滞后效应原理,各种农业气象条件对农作物生长影响的不等同性、阶段性和综合性原理,作物生长发育的不可逆性及前后关联性原理,以及一定空间地域内作物群体生长和气象条件演变过程的相对稳定性原理等;提出了趋势产量、气象产量和随机(噪声)误差产量的数理解析概念及其具体模拟计算方法;构建了模拟作物光合-呼吸、叶面积生长动态和干物质分配-器官形成等生长发育过程的作物生长动力(态)模拟模型;创新研制了各种气象-产量预测的理论概念模型以及适用于不同作物和各种时空尺度的业务运行模式;还以卫星遥感绿度值与作物长势信息为基础,建立了简单的遥感估产回归统计模型。这些成果从 80 年代中期开始,获得了广泛的应用,在气象部门逐步建立起农业气象产量预报业务,开拓了气象科学为农业服务的新领域。

中国气象科学研究院一直致力于利用作物模型开展农作物产量预报预测的方法研究,利用作物生长模拟模型以光、温、水、土壤等条件为环境驱动变量,运用物理数学方法和计算机技术,对作物生育期内光合、呼吸、蒸腾等重要生理生态过程及其与气象、土壤等环境条件的关系进行逐日数值模拟。它综合大气、土壤、作物遗传特性和田间管理等因素对作物生产的影响,克服了传统的作物-天气统计模型的缺点,通过对作物模型参数的区域化,开展作物生长监测、产量预测等,这为作物模型开始投入农业气象业务应用打下基础。

80 年代中后期,开展了“全国冬小麦遥感综合估产”研究。在利用气象卫星遥感信息进行冬小麦的长势动态监测、种植面积测算和综合估产研究上,取得了明显进展。不仅论证了以电磁波传输、吸收和反射原理为基础的卫星遥感估产理论的科学性、可行性和有效性,还开发研制了多种气象卫星遥感信息的提取、加工和反演处理技术以及遥感综合估产的实用处理技术与软件,包括地面监测综合分层网络技术,作物长势和灾情的动态监测评估技术,像元分解-面积测算技术和绿度指数-气象要素-作物产量预测方法,以及多种预报结果的综合集成技术等,推动了全国气象部门大力发展卫星遥感在农业领域的应用^[28-32]。

80 年代以来,在农业气象为国民经济和农业业务开发应用上取得了重大的进展。在研制农业气象情报信息接收处理自动化系统、建立情报分析评判指标集、主要农业气象灾害判别指标集以及情报预测模式库等关键技术基础上,逐步建立了由监测系统、传输系统、接收处理系统、作物与农业气象灾害分析评价系统和服务系统等组成的国家级农业气象情报服务系统。通过引进先进的计算机软件和 GIS 等技术,数据分析与产品制作技术进一步提高,开发了遥感作物长势与农业气象灾害监测业务应用技术,与此同时,根据社会需求,将农业气象的统计模型与动力模型相结合,通过资料分析与试验,研发了适用于不同区域和时间尺度的农业气象条件动态分析、评估、预报、预警业务技术,在农业气象情报业务中开发新的服务产品,例如:土壤水分预报、作物发育期预报、农业干旱预报、灌溉量预报、作物生长发育气象适宜度评价、冷害和寒害预警等,促进了农业气象情报业务的发展^[33-34]。

2.4 农业气象灾害

中国在农业气象灾害的发生机理、时空分布、气

象指标、诊断预测技术和防御措施途径等方面取得了一系列科研成果,为中国农业生产的趋利避害做出了重要贡献。50年代开始了冬小麦霜冻的研究,70年代末至80年代初,针对小麦干热风、北方低温冷害、南方寒露风、杂交水稻生态适应性等,组织了跨省区的联合试验研究。80年代开展了柑桔冻害和森林火灾(险)以及各种病虫害的蔓延迁飞等方面的研究。还开展了“华北平原作物水分胁迫与干旱研究”,针对华北农业干旱,根据小麦生长发育所需的最佳耗水量指标,干旱指标和适宜水分指标,研制了以土壤水分变化规律为基础的作物干旱预报方法和气象旱度模式,进一步制定了小麦的优化灌溉方案^[35-36]。此后,关于北方旱地农业增产技术与节水技术等方面的研究陆续展开,一直得到了农业部和科技部支持,在北方旱地类型分区、旱地农田水分动态和水分平衡、北方旱农区降水利用率和降水生产潜力、旱地作物水分高效利用、节水生化制剂的研制与应用等方面取得了重要进展和研究成果^[37-38]。

“九五”期间研究了华北农业干旱综合应变防御技术、西北抑蒸集水防旱抗旱集成技术、农业涝渍灾害防御技术、森林火灾防御和补救技术、人工增雨农业减灾技术、农作物低温冷害综合防御技术、人工防雹减灾技术和霜冻灾害综合防御实用技术等。历经野外试验、科研攻坚、集成组装调试和大田示范推广等5年的艰苦努力,取得了8个方面的综合应变减灾集成性防御技术,并在全国进行了大面积的示范试验与推广应用,取得了较好的效果。期间对霜冻和冷害综合防御调控技术进行了研究,针对霜冻害,系统地提出了避霜、抗霜、减霜“三道防线”的基本思想,并将其应用于棉花、玉米的防霜过程中。针对东北玉米低温冷害进行了预报方法等研究。在开展低温灾害研究中,将化学制剂应用于作物的调控,为促进作物早熟、提高作物抗寒性研究提出了新的思路和方法^[39-44]。期间还针对北方旱农区域农业综合开发与示范建设,开展了旱农主要类型区农田水分平衡、水分生产潜力适度开发及调控、农田水肥耦合及高效利用、“抑蒸集水防旱抗旱集成技术研究”等方面的研究^[45-46]。

“十五”期间,结合“九五”的基础对农业气象灾害研究的进一步拓宽,主要研究了农业气象灾害预警技术、农业气象灾害控制技术、农业气象灾害影响评估技术和并发性农业气象灾害影响评估及防御技术等,通过引进作物生长模型,与区域气候模式及遥

感监测信息相联接,开发研制了新一代农业气象灾害动态监测预警技术;并把风险意识引入了农业气象灾害中,研制了由风险辨识、风险估算和风险评价组成的中国主要农业气象灾害的风险评估体系,并用风险概率与风险指数进行了风险区划;利用抗旱节水研究成果,将大地形集水、畦集水、作物根区微集水3种集水技术集成应用,明显提高了雨养农业地区降水的利用效率;通过研制节水抗旱种衣剂,提高了种子在干旱等逆境条件下保持活力的能力,增强了幼苗的抗旱能力,降低旱灾对农作物影响。在此期间,继续针对华北和西北干旱农业地区,开展了高效农牧结合发展模式、华北旱作区节水农业综合技术体系、北方地区干旱规律及抗旱综合技术、北方旱区土壤水分预报评估系统等方面的研究示范,取得了一些重要进展。利用霜冻防御调控技术,重点开展小麦和玉米不同品种抗寒性实验与鉴定评价,为合理选用作物品种和进行作物优化布局提供了科学依据;与此同时,还将生物与化学制剂应用于作物综合防霜抗霜过程中,通过药剂清冰杀核细菌,对提高玉米抗霜冻能力有一定作用^[48-50]。

“九五”至“十五”期间,农业气象灾害监测预警和调控技术研究多是基于地面气象观测信息和田间试验,尚未形成基于天基、空基、地基综合监测预警技术体系,监测预警的准确率和时效性与实际生产的需求尚有较大差距。“十一五”期间,继续加强创新性研究,进一步研制基于天基、空基、地基多元信息的灾害监测技术;发展基于作物生长模型、区域气候模式和“3S”新技术手段的长、中、短期相结合的灾害预警技术;筛选抗灾品种、研制新型减灾制剂的灾害集成调控技术;研究气候变化背景下重大农业气象灾害对国家粮食安全影响的风险评估和定量评估技术。实现重大农业气象灾害的实时监测、动态预警和综合调控及其业务服务,显著提升农业生产气象防灾减灾及保障能力。

2.5 农业生产中重大问题

针对农业生产中的重大问题,农业气象工作者进行了深入研究。解决了农业生产中一些关键技术问题,给中国农业科技和生产带来了明显的进步。

1949年,新中国成立以后,橡胶作为战略物资,被美国列入巴黎统筹委员会禁止向中国出口的战略物资名单。1950年以来,中国在国外历来认为不能种植橡胶的17°N以北的地区,经过30年的艰苦奋斗和辛勤经营,80年代初建成了以海南岛、西双版纳为主的天然橡胶生产基地。另外在接近25°N的

广西、福建一些经过选择的地区,也植胶成功。中国天然橡胶林面积已占世界第 4 位,产量占第 4 位。初步建立了具有中国特色的橡胶科学技术体系,有力支持了国防建设。50 年代中国出现了大规模耕作改制,经过农业气候可行性分析,提出了双季稻可以在长江流域扩大或向北推移,取得了成功,使中国的粮食增产达一个新的水平。水稻杂交技术应用的农业气象条件和花期相遇的研究,为提高中国水稻产量,缓解中国粮食紧张做出了一定的贡献。水资源紧缺是中国农业生产的重大问题,在节水农业研究方向,中国的农业气象工作者做出了重要贡献。90 年代亚热带丘陵山区气候资源考察提出了山区不同作物的种植上限与立体种植模式的防寒避冻技术,扩大了柑橘、茶树等多种经济作物的种植区域,取得丰硕成果和重大经济效益^[51-52]。

2.6 气候变化及对农业与生态影响

由于全球气候变化的影响,中国气候也经历着暖冬、高温、干旱等一系列异常变化,其对中国农业生产的现实和未来影响已毋庸置疑。气候变化对农业的影响主要包括:使农业生产的不稳定性增加,产量波动加大;带来农业生产布局和结构的变动;引起农业生产条件的改变。目前大多数学者认为,气候变化对农业的负面影响总体大于正面影响,气候变化将使农业成本和投资大幅度增加。所以气候变化对农业的影响一直是农业气象重要和热点研究领域。

中国早在 20 世纪 80 年代前后就开始了有关气候变化方面的研究,主要研究任务包括,通过试验和气候分析的方法,评价 CO_2 倍增对中国作物生长、种植制度、农业生产及区域性病虫害发生和流行等方面的影响。1990 年后开始与国际气候谈判接轨、采用了以模型为核心的技术方法,在脆弱性和适应对策,以及温室气体排放及清单编制、减缓对策等方面开展了研究,同时还加强了与气候公约有关的政策密切关联的基础和应用研究。同时,也协助国家主管部门组织了相应的跨部门的合作研究,陆续承担了国家有关气候变化农业方面的重大课题。这些研究建立了全国或区域农业、森林、水资源和沿海地区受气候变化及海平面升高影响的工具性评价模型,以国际通用方法进行了模拟试验,对研究结果绘制了分布图,提出了适应对策,并进行了费用效益分析。

气候变化对农业影响、评估及适应性对策是本研究领域的重要内容。研究气候变化对农业作物产

量的影响,需要建立农作物和气候因子相联系的农作物生长模型。中国科学家与发达国家进行合作,通过对作物模型(如 DSSAT—CERES 模型)的修正和参数的本地化,在研究和预测气候变化对作物生长发育及产量等方面发挥了重要作用。另外,与国外进行合作,利用区域气候模式,模拟了中国区域气候基准年(1961—1990 年)、以及温室气体排放情景下的 2011—2100 年气候变化情景;实现了区域气候模式 RCM 气候情景输出与影响评估模型的嵌套。这些气候情景已经广泛应用于气候变化对不同领域影响及适应性研究中,如气候变化对农业、水资源、林业、自然生态系统、沿海地区社会经济影响,对于提升中国气候变化影响研究能力,降低评估的不确定性有很大推动作用^[53-59]。

众所周知,农业不仅是受气候变化影响最为严重的部门,也是温室气体重要排放源,研究污染排放机理以及摸清排放底细,编制排放清单是减缓温室气体影响的重要措施。中国农业主要排放源包括动物的 CH_4 和 N_2O 排放、稻田 CH_4 排放、农田 N_2O 排放等。在动物排放研究中,得出中国实测的反刍动物 CH_4 排放通量,建立了适合中国国情的动物 CH_4 排放计算方法和数学模型,并编制了 1990 和 1994 年中国动物和动物废弃物温室气体排放清单。引进、开发了测定反刍动物甲烷排放的示踪技术,该技术使在自然条件下成批测定动物甲烷排放量成为可能^[60-61]。

一些学者利用 OTC-1 型开顶式气室系统研究了 CO_2 浓度增加对冬小麦、大豆、棉花、玉米、春小麦、谷子、水稻、大白菜等作物生长发育及产量和品质的影响,在 CO_2 浓度倍增情况下作物产量增加 10%—30%;加强了高 CO_2 浓度、高温和水分胁迫对农作物影响的复合试验研究,揭示了高 CO_2 浓度、高温和水分胁迫对农作物养分效应、光合作用和水分利用效率及对作物生育期、产量和品质的影响。 O_3 对农作物影响的研究又有了新的进展,利用 OTC-1 型开顶式气室研究了 O_3 浓度增加对冬小麦、水稻、菠菜、油菜生长发育和产量的影响,在 O_3 浓度倍增情况下作物产量降低 20%—30%;在此基础上进行了 CO_2 和 O_3 的复合影响试验和模型研究,从生理生态、土壤微生物及碳氮循环角度出发,探讨空气质量变化对农业生态系统功能的可能影响,为评估近地层大气 CO_2 和 O_3 浓度的变化对农业生产以及农业生态系统功能的可能影响提供科学依据^[62-64]。还有学者利用封闭式气室研究了 CO_2

增加对中国主要作物小麦、水稻、豆类等的生长发育和产量的影响,揭示了在闭合状态下 CO_2 的变化对作物影响的事实和机理^[65]。

UV-B 增加对作物植株形态、生育期、总生物量、产量、生理生化特性以及农田生态系统营养物质循环影响的研究成果不断丰富,进一步深化了作物对 UV-B 辐射增加适应机制的认识。还在水稻对 UV-B 辐射增强的抗性遗传研究中,通过对水稻主要性状抗性指标与对照的相应性状进行相关分析,认为应把植株较高、分蘖力强、根数多、叶片较薄等作为水稻抗性育种的重要选择性状,从植株形态角度明确了 UV-B 辐射增加后水稻的育种方向。另外,开展了农田 N_2O 通量测定方法的比较研究,利用在 DNDC 模式基础上将作物生长、碳氮循环和甲烷排放有机耦合建立的模型,对农田生态系统 CH_4 和 N_2O 进行了农业气象数值模拟研究,为监测和调控农田生态系统温室气体排放奠定了一定基础。还研究了大气中气溶胶的增加对中国主要作物小麦、玉米的影响,发现气溶胶增加引起太阳辐射减少,进而影响小麦、玉米发育期和籽粒产量^[66-67]。

2.7 作物生态系统模拟与模式

中国作物生长动力模拟研究虽起步较晚,但自 20 世纪 80 年代中期以来,在连续 10 多年的田间试验和计算机生长模拟基础上,取得了长足的进步。以土壤-植物-大气系统理论为基础,以生态环境中最为活跃的气象因子为主导,先后研制了中国春小麦、冬小麦、水稻、玉米以及与双季稻种植制度相适应的双季稻生长模拟模式,国内还先后自主开发了棉花、油菜、温室西红柿和甜瓜等作物模型。从农田生态系统中的水循环、物质能量输送以及农田光热水气等生态环境因子对生长发育的作用角度,既动态地模拟了作物发育进程、叶面积生长动态、光合同化呼吸和消耗、同化物分配与传输以及籽粒产量的形成等基础生长过程,还包括环境水分的作用与胁迫影响以及土壤矿质营养的吸收及亏缺影响过程的模拟。90 年代末,经过 5 年科技攻关研究,针对中国江南双季稻、东北玉米、华北小麦和新疆棉花等作物主产区,研制了气候异常对作物生产的影响评估模式,通过随机天气发生器与区域气候预测模式相联接,初步建立了可供业务运行的气候异常对江南双季稻和东北玉米区域影响评估系统,为提高气候变化影响的业务评估能力提供了科技储备。有学者提出了“水稻生物钟中的叶龄模型”,进行了模拟验证研究,并利用模型进行水稻产量预测,指导水

稻生产;还开发了棉花模型 COTGROW 用于棉花生长评价^[68-72]。

近年来,作物生长模拟模式在其业务应用开发研究上,又进行了探索试验,以与区域气候模式联接为基础,进一步引入卫星遥感动态监测信息,开发研制了新型的农业气象灾害动态监测预警技术,取得了新的进展。但中国开展的作物模型的研究和应用主要是借鉴国外的模型,是对国外作物模型(如美国的 CERES、荷兰的 WOFOST、美国的农田生态系统碳氮生物化学模型(DNDC)等)的消化吸收、改进升级等,自主研发的作物模型还较少。

3 农业气象未来重点研究领域和发展方向

根据未来气候变化演变带来的问题、当前和未来国家政策、农业可持续发展及农业生产需求,考虑农业气象学科的发展,并针对目前在农业气象科研中存在的薄弱环节,提出了农业气象今后的重点研究领域和发展方向。

3.1 应对气候变化的农业气象防灾减灾技术

由于受全球气候变化的影响,极端气象灾害呈发生频率高、损失重的发展态势,造成农业生态环境恶化,特别是近十年来,全球气候变暖,致使极端气候事件发生更加频繁,农业生产面临着更严重的威胁,部分地区农业生态环境极为脆弱,开展气候变化对农业生产的脆弱性研究,特别是对中国的生态脆弱区研究十分必要。“防灾大于救灾”、“防患于未然”,针对目前单一灾害对作物生长影响信息(或产量)的定量提取及风险管理体系建立的关键技术,研究气候变化条件下主要农业气象灾害对农业生产造成的风险性,为合理安排农业生产和布局提供科学依据^[73]。

利用立体、多元信息加强灾害的监测、预测和防御工作仍是今后研究的重点。地基监测中以固定和流动监测资料为基础,结合空基无人小飞机、微波资料,配合天基不同分辨率的卫星遥感资料,开展以“土壤—作物—大气”多圈层立体监测、多学科融合的农业灾害监测体系,并开发业务应用平台;农业气象灾害预警技术研究对象,将从农业粮食、经济作物,向果树、蔬菜、观赏植物等种植类型拓展;在技术上将进一步综合天基、空基、地基和下垫面的多元信息,通过完善作物生长模式开发与区域应用、改进区域气候预报、充分利用 3S 等先进技术手段,结合考虑地形特点的陆面水文过程模式,通过利用土壤—作物—大气多圈层相配合,气候—生态—遥感多学

科相融合,数值模拟和数值天气预报相结合等先进技术,建立长、中、短期相结合的具有动态化和精准化灾害监测预警系统,加速实现业务化,这是今后发展的必然趋势。在灾害防控方面,将针对不同类型农业气象灾害和作物种类,进一步研究作物抗逆生理机制,并以此为指导探索新型高效调控技术和方法;应用现代生物技术和化学技术,研究开发多功能生化制剂,并与其他各种技术的优化集成提高综合防灾减灾功效。

同时随着全球经济的高速发展,致使气候变暖加快,紫外线、气溶胶、酸雨等明显增加,将带来一系列的环境和农业问题,利用试验、模型相结合方法开展紫外线、臭氧、酸雨、气溶胶等对中国农作物产量和品质的影响,将对中国粮食安全和保障、研究相应农业应对措施等提供科学参考^[74]。

全球气候逐步变暖的趋势,将带来对农业的另外重要影响——病虫害加剧。近年来,中国农林重大病虫害危害日趋严重,而农林病虫害的中长期预警预报技术的研究进展缓慢,现有预警预报技术的准确性、可靠性离实际生产的要求尚有较大的距离。积极开展利用气象卫星、雷达、地面监测网资料以及农林部门的病虫害监测站网资料进行分析,建立农林重大病虫害发生、发展和流行的卫星、雷达识别预警系统和预报模式,是保障农业安全生产的重要举措。重点研究触发农林重大病虫害发展成灾的气候背景及其耦合机制、农林重大病虫害发生地域分布的气候分区、农林重大病虫害气象预报、农林重大病虫害气象预警等关键技术^[75-76]。

3.2 气候资源高效利用技术

根据中国自然资源的时空分布特点,结合国家科研、生态建设以及农业发展的需要,着力建设一批农业气候资源、森林与湿地气候资源、草原气候资源等综合开发示范基地,以及城市化发展气候资源合理开发利用示范基地。根据各地不同的自然条件,加大太阳能直接和间接利用技术的开发力度;扩大风能利用规模,建立大型风力田,逐步提高风能、太阳能在中国能源结构中的比例,同时解决边远地区生活用电等问题。研究气候资源高效利用技术,提高气候资源利用率,开发利用太阳能、风能、水能等“绿色廉价”能源,对缓解资源紧张、保护生态环境意义重大,并大有可为^[76]。

中国是水资源严重缺乏的国家之一,目前人均占有量大约为世界平均水平的 1/4,而且在时间和空间上分配极不均衡,是制约中国中西部农业发展

的主要因素之一,因此研究水资源高效利用和节水技术仍然是农业气象面临的艰巨任务。在提高水资源利用率及其生产效率的节水技术研究中,不仅涉及到与土壤-植物-大气系统(SPAC)的界面过程、水分传输和系统反馈机制、水分调控途径、以及大气、地表、地下和土壤水转化关系等领域内的相关技术,还需要利用现代高新技术对水资源、土壤和作物水分进行监测调控,研究基于作物需水规律进行精量灌溉等关键技术。为此,必须以具有学科交叉性的重大前沿性技术研究为基础,研发与农业节水相关的重要关键技术,探索建立适合国情的现代抗旱节水农业技术体系^[76]。

3.3 作物生态系统模拟与定量化评估技术

由于农业气象条件(特别是灾害)对农业影响评估的复杂性,至今在农业气象业务中还没有形成成熟实用的定量化评估方法。作物模型能对作物重要生理生态过程及其与气象、土壤等环境条件的关系进行数值模拟,人为再现农作物生长发育过程,能够从机理上定量地描述作物生长过程及其与环境因素之间的关系,可以反映作物与气候环境的相互作用,可以在农作物生长评估、精准农业、农业环境调控、农田管理决策、气候变化影响等领域得到应用。今后一段时间,利用作物模型进行生长发育和灾害定量评估研究并业务化仍是定量评估的主要方法。需要根据模型的要求和各地的自然条件,建立模型所需要的标准化参数数据库;农业评估模型与遥控技术和地理信息系统(GIS)结合,建立综合的资源环境分析评价系统;与土壤水分等生态模型结合,建立农业生产优化决策系统;与人工智能知识工程技术结合,建立领域专家知识模型;与数学模型融合形成农业综合评估专家系统;与计算机技术结合,建立具有远程诊断与管理功能的综合服务系统等。随着电子信息技术的迅速发展,数字化技术必然是 21 世纪农业的重要发展趋势。数字化方法将要渗透到农业气象学的各个领域,并促使农业气象学从传统水平向现代化水平迅速发展,将在中国的数字农业与农业现代化的进程中发挥重要作用^[77]。

3.4 有关国家粮食安全关键技术

及时准确的作物产量预报不仅对国家和各级政府部门制订农业宏观政策、国际贸易、农产品购销、储运有重要的参考价值,而且对指导农业生产和国家的粮食安全预警具有非常重要的意义。但是,由于目前业务运行的作物产量预报一般都是在作物收获前 1—2 个月发布,技术上以统计模型为主,不仅

预报对象少,而且预报时效短、预报领域窄、异常气候条件下准确率不高等缺点,难以满足国民经济和社会发展的总体需求。提高长期预报质量,延长农业气象预报时效,是对农业气象情报预报提出的严峻挑战;积极拓展粮、棉、油作物之外的其他农产品产量预报业务;努力发展机理性强的作物产量预报模型,提高异常气候条件下产量预报的准确率。积极研究和开展与中国粮食进出口有关的国外主要作物产量预报,提高中国农产品的国际竞争能力和贸易竞争能力,确保中国粮食安全。随着卫星遥感技术的发展,积极开展利用遥感技术提取作物面积的方法。到 2010 年,建立科学估算作物种植面积的业务系统,克服统计面积的滞后性和人为误差,以提高作物产量预报的时效和准确率;到 2020 年,完善科学估算作物种植面积的业务系统,显著提高作物产量预报的时效和准确率^[76]。

3.5 设施与特色农业及现代生物技术的环境调控技术

随着经济发展和农业科学技术的提高,大力促进了精细农业、特色农业的发展。今后特色农业重点研究温室设施、遮阳网、地膜覆盖等适合国情的设施小气候规律,设施内不同作物各生育期适宜与临界生物气象指标及调控措施。结合各地气候特征与作物对气象条件的要求,分区研究和确定各类设施的结构参数。研究室内外气象环境相互关系,建立设施小气候模式和设施栽培气象咨询业务体系。开展特色农业(如名贵药材、特色花卉等)栽培种植技术与气象条件的关系研究,也是发展区域经济和增加农民收入的重要技术途径。

现代生物技术包括基因工程操作、组织培养、胚胎移植、发酵与酶工程、生物制药等,其研究和开发,均离不开微环境优化与调控技术;现代生物技术成果的气候适应性评价,是提高应用效果的重要保证,农业气象应该在生物技术创新与成果应用方面做出自己的贡献^[1]。

3.6 农业气象现代化观测技术研究

中国农业气象观测网在近几十年内逐步建立,并形成了具有中国特色的农业气象观测业务服务,但农业气象观测和监测手段,包括试验设施、仪器设备、数据采集和分析方法,远比发达国家落后,资料共享性差,自动化、网络化、智能化水平还很低,大部分的观测任务仍以人工观测为主,误差大、频次低,不能满足科研和业务工作的需要。科学观测手段是获取高质量、高密度、高频次科学数据的必要条

件,是提高科学研究水平的重要基础和前提。改善观测条件、扩展观测内容、加大在观测仪器方面的研发投入和力度十分必要。开展农业气象现代化观测技术研发是今后需大力加强的研究领域。

3.7 农业气象基础理论研究

近年来,中国农业气象学在基础理论研究方面,虽然取得了很大进展,但与发达国家相比,还有不小差距。从当前的情况看,应用技术研究多,基础理论研究少;经验总结多,机理分析少。这在一定程度上影响了农业气象学水平的进一步提高,应予加强。在研究方法上,应重视田间试验,加强第一手资料的搜集,并通过与模型、信息技术等相结合,缩短实验周期、提高科研水平。农业气象是一门实验科学,只有通过试验,才能发现规律,探索土壤-植物-大气系统的内在联系。组建跨学科大型农业气象综合试验基地,加强农业气象基础理论研究,增强创新能力势在必行。

4 结语与讨论

本文回顾了中国农业气象的发展历程。较全面、系统地总结了现代农业气象科研的主要研究成果,阐述了未来中国农业气象重点研究领域和发展方向。

中国农业气象发展经过几代农业气象工作者的努力,在科研的许多领域取得了丰硕的成果,研究领域不断扩展和深入,未来还有更多的领域需研究完善和探索。时逢新的形势、新的机遇给中国农业气象提出了更多的任务、更高的要求。要想赶超世界上发达的国家仍需农业气象工作者付出更大的努力和艰辛,今后的工作仍任重而道远。

致谢:本文得到了老一代农业气象工作者崔读昌、王馥棠、沈国权、郑大玮、太华杰等先生的指正,特此感谢!

参考文献

- [1] 中国科学技术协会,中国农学会. 农业科学学科发展报告. 北京:中国科学技术出版社,2007:124-133
- [2] 王馥棠. 中国气象科学研究院农业气象研究 50 年进展. 应用气象学报,2006,17(6):778-785
- [3] 中国农业科学院. 农学基础科学发展战略. 北京:中国农业科技出版社,1993:223-245
- [4] 温克刚. 中国气象史. 北京:气象出版社,2004:1-315
- [5] 竺可桢. 气象与农业的关系 // 竺可桢文集编写组. 竺可桢文集. 北京:科学出版社,1979:527pp
- [6] 涂长望. 农业气象之内容及其研究途径述要. 农报,1945,10(1-9):19-31

- [7] 程纯枢,冯秀藻,高亮之等. 中国的气候与农业. 北京:气象出版社,1991:165pp
- [8] 朱自玺. 农业气象学发展历程的回顾与展望//中国气象学会. 我与新中国气象事业. 北京:气象出版社,2002:332pp
- [9] 中国农业百科全书编辑部. 中国农业百科全书农业气象卷. 北京:中国农业出版社,1996:525pp
- [10] 中国农业科学院. 中国农业气象学. 北京:中国农业出版社,1999:297-310
- [11] 王馥棠,王石立,王春乙等.“九五”期间我国农业气象科技若干进展. 气象科技,2002,30(5):257-261
- [12] 黄寿波. 国内外农业气象研究动态及进展. 湖北气象,1999,(1):20-21
- [13] 高亮之. 21 世纪农业与生物气象学展望. 生态农业气象研究,2000,8(1):91-92
- [14] 中国气象年鉴编写组. 2003 年中国气象年鉴. 北京:气象出版社,2003:463-468
- [15] 王春乙,王石立,霍治国等. 近 10 年来中国主要农业气象灾害监测预警与评估技术研究进展. 气象学报,2005(63):559-671
- [16] 竺可桢. 论我国气候的几个特点及其与粮食作物生产的关系. 地理学报,1964,30:1-13
- [17] 白莉萍,陈阜. 国内外作物生产潜力研究现状与评价. 作物杂志,2002,1:7-9
- [18] 冷石林,韩仕峰. 中国北方旱地作物节水增产理论与技术. 北京:中国农业科技出版社,1996:1-20
- [19] 邓根云. 气候生产潜力的季节分配与玉米的最佳播期. 气象学报,1982,40(2):66-72
- [20] 李世奎,侯光良,欧阳海等. 中国农业气候资源和农业气候区划. 北京:科学出版社,1988:341pp
- [21] 高素华. 中国三北地区农业气候生产潜力及开发利用对策研究. 北京:气象出版社,1995:64pp
- [22] 中国热带亚热带东部丘陵山区农业气候资源及其合理利用研究课题协作组. 中国热带亚热带东部丘陵山区农业气候. 北京:气象出版社,1990:1-105
- [23] 中国热带亚热带西部丘陵山区农业气候资源及其合理利用研究课题协作组. 中国热带亚热带西部丘陵山区农业气候. 北京:气象出版社,1994:203pp
- [24] 张养才,王石立,李文等. 中国亚热带山区农业气候资源研究. 北京:气象出版社,2001:187pp
- [25] 崔读昌. 中国农业气候学. 杭州:浙江科学技术出版社,1999:678pp
- [26] 崔读昌. 世界农业气候与作物气候. 杭州:浙江科技出版社,1994:266pp
- [27] 魏淑秋,刘桂莲. 中国与世界生物气候相似研究. 北京:海洋出版社,1994:42-53
- [28] 王馥棠,冯定原,张宏铭等. 农业气象预报概论. 北京:中国农业出版社,1991:478pp
- [29] 王馥棠,李郁竹,王石立. 农业产量气象模拟与模型引论. 北京:科学出版社,1990:257pp
- [30] W 贝尔. 作物. 天气模式及其在产量鉴定中的作用. 北京:科学出版社,1980:1-60
- [31] 王馥棠. 我国粮食产量气象预测预报研究. 北京:气象出版社,1989:272pp
- [32] 李郁竹,史定珊,汤志成,等. 冬小麦气象卫星遥感动态监测与估产. 北京:气象出版社,1993:247pp
- [33] 太华杰,姚克敏,刘文泽,等. 中国农业气象情报概论. 北京:气象出版社,1994:199pp
- [34] 太华杰,王建林,庄立伟. 中国棉花产量变化及其气象预测. 北京:气象出版社,1996:171pp
- [35] 华北平原作物水分胁迫与干旱研究课题组. 作物水分胁迫与干旱研究. 郑州:河南科学技术出版社,1991:289pp
- [36] 张养才,何维勋,李世奎. 中国农业气象灾害概论. 北京:气象出版社,1991:260pp
- [37] 梅旭荣,严昌荣,牛西午. 北方旱作区节水高效型农牧业综合发展研究. 北京:中国农业科学技术出版社,2005:1-45
- [38] 梅旭荣. 节水农业在中国. 北京:中国农业科学技术出版社,2006:1-25
- [39] 徐祥德,王馥棠,萧永生等. 农业气象防灾调控工程与技术系统. 北京:气象出版社,2002:322pp
- [40] 孙忠富. 霜冻灾害与防御技术. 北京:中国农业科技出版社,2001:84-85
- [41] 孙忠富,董哲生,张建诚等. 化学调控技术的防霜应用研究. 中国生态农业学报,2003,11(4):4-6
- [42] 王春乙,郭建平. 农作物低温冷害综合防御技术研究. 北京:气象出版社,1999:227pp
- [43] 王春乙,郭建平. 玉米抗低温助长剂田间试验研究. 自然灾害学报,2001,11(1):80-85
- [44] 孙福在,赵廷昌,牟丰盛等. 生防菌和药剂防除冰核细菌防御玉米霜冻研究. 自然灾害学报,2003,12(4):97-103
- [45] 陶毓汾,王立祥. 中国北方旱农地区水分生产潜力及开发. 北京:气象出版社,1993:1-50
- [46] 冷石林,韩仕峰. 中国北方旱地作物节水增产理论与技术. 北京:中国农业科技出版社,1996:42-76
- [47] 李育中,程延年. 抑蒸集水抗旱技术. 北京:气象出版社,1999:3-19
- [48] 王石立. 近年来我国农业气象灾害预报方法研究概述. 应用气象学报,2003,14(5):574-581
- [49] 李世奎. 中国农业灾害风险评估与对策. 北京:气象出版社,1999:503pp
- [50] 王春乙. 重大农业气象灾害研究进展. 北京:气象出版社,2007:306pp
- [51] 江爱良. 华南植胶区防护林气象效能的试验考察报告(1954—1957). 北京:科学出版社,1958:82pp
- [52] 章文才,江爱良编. 中国柑桔冻害研究. 北京:农业出版社,1983:177pp
- [53] 丁一汇,石广玉. 中国的气候变化与气候影响研究. 北京:气象出版社,1997:497-504
- [54] 林而达. 中国农业对气候变化的敏感性和脆弱性. 菲律宾:亚太地区气候变化脆弱性和适应评价,1996,1:14-20
- [55] 林而达. 气候变化对农业影响:农业温室气体与水稻. 日本:气候变化情景下亚洲地区水稻生产力变化趋势估测方法研究中期会议,2000,3:18-26
- [56] 王馥棠. 气候变化对我国农业影响的研究. 北京:气象出版社,1996:142pp
- [57] 王馥棠,赵宗慈,王石立等. 气候变化对农业生态的影响. 北京:气象出版社,2003:45-53
- [58] 王馥棠. 近十年来我国气候变暖影响研究的若干进展. 应用气象学报,2002,13(6):755-766
- [59] Xiu Yinlong. Simulations on Potential Impacts of GHG-induced Climate Change on Wheat and Cotton Production in the Middle of the 21st Century in China. Proceedings of NIAES-STA International Workshop 2001: Crop Monitoring and Prediction at Regional Scales,2001.2
- [60] Xiu Yinlong. Impacts of Climate Change on the Potential Yield of Peanut in China. Proceedings of NIAES-STA International Workshop 2001: Crop Monitoring and Prediction at Regional Scales,2001.2

- [61] 谢军飞,李玉娥. 农田土壤温室气体排放机理与影响因素研究进展. 中国农业气象, 2002, 23(4): 47-52
- [62] 李晶,王明星,王跃思等. 农田生态系统温室气体排放研究进展. 大气科学, 2003, 27(4): 740-749
- [63] 王春乙,郭建平,郑有飞. 二氧化碳、臭氧、紫外辐射与农业生产. 北京:气象出版社, 1997: 191pp
- [64] 王春乙,白月明,郑昌玲. CO₂ 和 O₃ 浓度增加对作物影响的研究进展. 气象学报, 2004, 62(6): 875-881
- [65] 王修兰,徐师华,万兆良等. CO₂、气候变化与农业. 北京:气象出版社, 1996: 172pp
- [66] 郑有飞,何雨红,甘思旧. 紫外辐射增加后麦田的小气候特征研究(I). 农业环境保护, 2002, 21(5): 406-409
- [67] 郑有飞,简慰民,李秀芬等. 紫外辐射增强对大豆影响的进一步分析. 环境科学学报, 1998, 18(5): 549-552
- [68] 孙忠富,陈人杰. 温室作物模型研究基本理论与技术方法的探讨. 中国农业科学, 2002, 35(3): 320-324
- [69] 戴剑锋,罗卫红,乔晓军等. 基于模型的温室加温控制目标优化系统研究. 农业工程学报, 2006, 22(11): 187-191
- [70] 马玉平,王石立,张黎等. 基于遥感信息的华北冬小麦区域生长模型及模拟研究. 气象学报, 2005, 63(2): 204-215
- [71] 高亮之. 农业模型学基础. 香港:香港天马图书有限公司, 2004: 1-20
- [72] 《高亮之文选》编辑委员会. 高亮之文选:农业气象农业系统与农业模型研究. 北京:气象出版社, 2006: 26478pp
- [73] 刘燕华,葛全胜,吴文祥. 风险管理—新世纪的挑战. 北京:气象出版社, 2005: 84pp
- [74] 秦大河. 中国自然灾害与全球变化. 北京:气象出版社, 2003: 141pp
- [75] 刘江. 21 世纪初中国农业发展战略. 北京:中国农业出版社, 2006: 6: 817pp
- [76] 秦大河. 中国气象事业发展战略研究. 北京:气象出版社, 2005: 126pp
- [77] 高亮之. 数字化农业气象学. 中国农业气象, 2003, 24(2): 1-4

AGROMETEOROLOGY OF ENTERING 21TH CENTURY IN CHINA

Wang Chunyi¹ Zhang Xuefen² Sun Zhongfu³ lv Houquan⁴ Pan Xuebiao⁵

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Atmospheric Observation Technology Center CMA, Beijing 100081

3 Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081

4 National Meteorological Center, Beijing 100081

5 China Agriculture University, Beijing 100094

Abstract

This paper reviewed development history of agrometeorology in China. Modern agrometeorology experience three development stages, which is the initial stage in the 1950s—1960s, restoration and development stage in the 1970s—1980s, stage of rapid growth since the 1990s respectively. The main research results of modern agrometeorology is discussed based on crops utilization of resources, resources and delimitation of agricultural climate, agrometeorology disasters, forecast of crop yield and remote sensing estimation as well as climate change influence on agriculture and ecology. The future important field and development orientation of agrometeorology were put forward, which is the research on agrometeorological disasters prevention and reduction under climate change, high efficient utilization study of climate resources, key technique about country foodstuff safety, modern observation technique of agrometeorology, crop ecological system simulation and quantificational assessment, establishing and characteristic agriculture as well as environment control of modern biology technique, basis research of agrometeorology etc. considering future climate arising problems, the needing of agrometeorological producing and sustainable development, the weak aspects in research and operation of agrometeorology, in order to provides reference for agrometeorological researchers.

Key words: 21th century, Agrometeorology, Development history, Trend of development.