生态气象: 起源、概念和展望

周广胜^{1,2*}, 周莉^{1,2}

1. 中国气象科学研究院, 北京 100081;

2. 中国气象科学研究院与郑州大学生态气象联合实验室, 郑州 450001

* 联系人, E-mail: zhougs@cma.gov.cn

2020-10-10 收稿, 2020-12-08 修回, 2020-12-10 接受, 2020-12-11 网络版发表

第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0106)和国家重点基础研究发展计划(2018YFA0606100)资助

摘要 生态气象是应人类面临的生存环境危机而兴起的地球系统科学新兴学科, 已经成为大气科学的二级学科。本文阐述了生态气象的学科起源、概念、主要研究内容与特征, 指出生态气象是研究生态系统与气象条件之间相互关系的科学, 是地球系统多圈层相互作用的核心, 服务于人与自然和谐发展; 探讨了生态气象观测的主要指标与可能的业务服务产品; 阐释了生态气象研究与生态文明气象保障、气象防灾减灾和应对气候变化的关系; 指出当前生态气象迫切需要开展的重点研究任务: (1) 生态气象长期观测联网研究; (2) 基于大数据与人工智能的生态气象信息提取与分析技术; (3) 生态系统对气候变化的适应性及其变化归因; (4) 生态系统主要气象灾变机制及其致灾临界气象条件; (5) 陆地生态系统关键物候期对多环境要素响应的生理生态机制与模拟模型研究; (6) 耦合生物-物理-化学-管理过程的生态气象数值模式研发; (7) 陆地生态系统变化对气候系统的反馈作用与可持续发展对策研究。

关键词 生态气象, 起源, 概念, 展望, 重点任务

生态气象是应人类面临的生存环境危机, 即全球环境变化的严峻挑战而兴起, 反映了人类对人-自然界关系的哲学理念。顺应这一科技发展趋势, 国家自然科学基金委员会地球科学部于2020年度率先调整了大气科学学科申请代码, 将生态气象(D0507)设置为二级申请代码, 极大地推进了地球系统多圈层相互作用的研究以及生态学与气象学的交叉融合, 对生态气象学科发展具有重大的促进作用^[1]。本文旨在回顾生态气象学科的起源、厘清生态气象的概念、着重探讨生态气象未来研究的重点, 更好地推进生态气象学科的发展。

1 学科起源

地球是目前宇宙中已知存在生命的唯一天体, 是包括人类在内的上百万种生物的家。衣食住行是人类生存的基础, 人类在解决衣食住行过程中逐渐认识

到生物活动规律及其与环境的关系(生态学), 以及大气中风、雨、雷、电等变化规律(气象学), 反映了人类对自然界的自发认识和地球科学知识的累积。

生态学是研究决定生物分布及其量度的各种因素之间相互关系的科学, 包括生物的分布格局与规律、生物的时空量度(生物量、生产力、生物多样性等)、决定生物分布与量度的内在与外在因素, 以及增加生物生产力、保持生物生产力的稳定性与改善环境的原则与途径^[2]。气象学是研究大气的现象和过程, 探讨其演变规律和变化, 并直接或间接服务于生产实践的科学^[3]。生态学与气象学都源于人类生存的需求, 其起源都可追溯到亚里士多德(Aristotle, 约在公元前350年)和泰奥弗拉斯托斯(Theophrastus, 约在公元前300年)及其著作《天象论》(Meteorologica)^[4]和《植物查询》(Enquiry into Plants)^[5]。17~19世纪, 研究地球的自然主义者

引用格式: 周广胜, 周莉. 生态气象: 起源、概念和展望. 科学通报, 2021, 66: 210–218

Zhou G S, Zhou L. Ecological meteorology: Origin, concept, and prospects (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 210–218, doi: [10.1360/TB-2020-1274](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1274)

与地理学者开展了大量的地理规律研究,发现植被类型与气候关系密切。其中,最著名的是1936年Köppen^[6]提出的生物气候方案。该方案试图直接采用主要植物群落类型为气候类型命名,并力求给出与主要植物群落类型分布界线大体一致的气候界线,如以最热月平均温度10°C的等温线作为北方寒温带针叶林(雪林)与极地苔原的界线,或为山地针叶林(上限)与高山植被带之间的界线。随后,Thornthwaite^[7]基于可能蒸散计算的湿度指标和热量系数研究了气候与植被类型及其与土壤类型的关系;Holdridge^[8]建立了可能蒸散率与生物温度和降水的经验关系,提出了生命地带系统,认为地球表面植被类型及其分布取决于年降水、年生物温度与湿度;Whittaker^[9]给出了基于年均温与年降水的世界主要植被类型图,显示了植被类型按气候梯度递变分布的格局。我国开展植被类型与气候的关系研究相对较晚。陶诗言^[10]最早将Thornthwaite方法引入中国气候分区,该分区与我国自然景观分布相当符合,其以热量与水分状况构建区划指标的思想亦被其后的中国气候分区所采用^[11,12]。为研究气候变化对中国植被分布的影响,Thornthwaite公式^[13]、Penman公式^[14]、Holdridge生命地带分类系统^[15]、吉良(Kira)方法^[16]相继被用作中国植被地理分布的气候指标。周广胜和张新时^[17]还提出了基于区域实际蒸散的中国植被地理分布的气候指标。

在认识到植被地理分布和类型与气候关系密切的同时,作为生物时空量度的植被生产力与气候的关系也引起了人们的关注。1964年,由联合国教育、科学及文化组织(United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO)提出的国际生物学计划(International Biological Program, IBP, 1964–1974)开始实施,有54个国家参加,主要研究自然生态系统的结构、功能和生产力等,是人类大规模研究自然生态系统的开始(www.jstor.org/stable/43646974)。Lieth^[18]于1973年首次估算了全球净初级生产力,发表了首张用计算机模拟的全球净初级生产力分布图,并在其专著《植物的物质生产》中,第一次明确地提出了总生产量(gross production)和净生产量(net production)的概念及其计算公式^[19]。随着气候与植被关系研究的深入,更激起科学界在更高层次对探讨生物与气象关系问题的重视。1956年8月29日,由荷兰地质学家S.W. Tromp博士、德国气象学家H. Ungeheuer博士和几位人类生理学家联合发起成立国际生物气象协会(International So-

cietiy of Biometeorology, ISB), 第一任主席是美国的F. Sargent II博士。ISB的宗旨是广泛开展气象与人类、动物、植物关系的科学研究,以促进气象、生物、医学和其他学科之间的联系^[20]。目前,国际生物气象学会涵盖了4个专业委员会,分别是动物生物气象学委员会(Animal Biometeorology Commission),气候和人类健康委员会(Climate and Human Health Commission),气候、旅游与休闲委员会(Climate, Tourism and Recreation Commission)和物候学委员会(Phenology Commission) (<https://uwm.edu/biometeorology/>)。

尽管生态学与气象学具有相同起源,但在典型学科框架下,生态学与气象学均进入了专门的研究领域。生态学进一步分成动物、植物和微生物,而植物生态学则进一步划分成生理学、种群、群落、生态系统和景观的专题研究^[2,21–23]。同样地,气象学为适应不同类型的生产实践,进一步划分成微气象学、中尺度气象学和全球气候学等学科,以及专题大气过程研究,如边界层、水文气象学、辐射传输、云和全球动力学等^[3,24]。20世纪70年代前,人类经济活动较为缓和,还没有认识到人类活动对区域甚至全球环境的影响,生态学关注的是局地生物有机体与环境之间的关系,作为生态系统主体的植被变化对天气气候的反馈作用还没引起足够重视^[25]。在这一阶段,生态学家认为气候决定着植被的生长过程与地理分布,即植被种类组成、生物量、生产力和有机质分解均响应于气候变化,但未探讨植被变化是否改变气候。气象学家认为气候是由温室气体、气溶胶及太阳辐射的变化引起的行星热力学和大气环流所决定。陆地生态系统结构与功能随气候变化而改变被看作是植被受气候变化影响的结果,而不是气候系统内的反馈作用。

20世纪70年代以后,人类经济活动的迅速发展使得自然环境的变化扩展到越来越广阔的区域,甚至达到全球的规模,人类社会面临资源、环境和发展的严峻挑战。以气候变暖为标志的全球环境变化及其影响已经扩展到全球,并引起了一系列生态安全、粮食安全、水安全、碳安全以及社会经济安全问题,已经严重威胁到人类生存环境及社会经济的可持续发展,引起了各国政府、科学界及公众的强烈关注^[26–28]。针对人类社会面临的资源、环境和发展的严峻挑战,科学界自20世纪80年代中期开始联手实施了一系列重大国际科学计划,包括国际地圈-生物圈计划(International Geosphere-Biosphere Programme, IGBP, 1985–2002)、

全球碳计划(Global Carbon Project, GCP, 2002–2014)和未来地球计划(Future Earth, 2014–2023)等. 这些计划的实施极大地促进了生态学与气象学的融合, 以及地球系统科学的发展. 特别是, 全球气候模式的发展要求用数学方法描述大气下边界层^[29], 即大气与陆地景观的交界面以及陆地与大气之间的能量和物质交换, 而这些过程受陆地生态系统的叶面积指数和气孔导度等的调节, 从而推动了大气科学家从地球物理研究领域扩展到生物地球物理研究领域^[30,31]. 这一发展也让大气科学家认识到应该将地球看作一个系统, 而不是将地球过程划分成独立的学科, 因为这些学科共同形成了一个物理、化学和生物相互作用的有机系统^[32–34]. 同时, 陆地生态系统管理关注的空间尺度也从局地向区域甚至全球拓展, 更加关注天气、气候甚至气候变化等不同时空尺度的影响^[35]. 这突出体现在1995年IGBP和全球环境变化的人文领域计划(International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, IHDP)联合提出的“土地利用/土地覆盖变化”(Land-Use and Land-Cover Change, LUCC)研究计划. 该计划试图通过对人类驱动力-土地利用/覆盖变化-全球变化-环境反馈之间相互作用机制的认识, 从趋利避害的角度寻求人为干预^[36]. 20世纪70年代末期, 大气科学家提出了作为气候学研究的新里程碑“气候系统”^[37], 1983年, 美国国家航天局(NASA)率先提出了地球系统科学概念^[34]. 气候系统由大气圈、水圈、岩石圈、冰冻圈和生物圈组成, 这5个子系统的相互作用控制着气候变化. 地球系统也包含上述5个圈层, 不过气候系统对于岩石圈仅考虑了最上层部分, 即土壤和山脉地形等, 没有考虑深层的地壳和地幔等, 也就是说在地球系统中还包含了地质过程^[37–39]. 1988年, 美国地球系统科学委员会(ESSC)出版了《地球系统科学》专著^[40], 地球系统科学的思想在20世纪90年代逐渐成为地球科学界的共识. 联合国的《21世纪议程》更将地球系统科学作为可持续发展战略的科学基础之一. 地球系统科学致力于对地球的整体探索, 是以传统的地球科学各分支学科的大跨度交叉渗透, 以及与生命科学、化学、物理学、数学、信息科学以及社会科学的紧密结合为特征. 2002年, 美国科学家Bonan^[41]出版的专著*Ecological Climatology: concepts and applications*中指出陆地生态系统是气候的重要决定因素. 政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告的一大特点就是关于气候变化的预估要求气候模式必须耦合碳

循环模型^[28]. 2017年, 由中国气象科学研究院周广胜研究员牵头组织来自中国科学院、教育和行业部门的相关科学家在中国生态学学会申报成立生态气象专业委员会, 经过一年筹备期, 于2019年1月19日被批准正式成立. 2020年, 国家自然科学基金委员会地球科学部大气科学处率先调整了大气科学学科申请代码, 将生态气象(D0507)设置为二级申请代码^[1]. 所有这些标志着生态气象已经作为一门学科受到科学家的高度关注.

中国气象局十分关注生态与气象的关系, 早在2002年就出台了《关于气象部门开展生态监测与信息服务的指导意见》(气发[2002] 367号). 2004年, 《中国气象事业发展战略》明确提出开展生态气象业务^[42]. 2006年, 《国务院关于加快气象事业发展的若干意见》中明确气象部门要重点开展重大生态问题的气象监测评估和预测预报业务服务, 建立和完善国家、省级生态系统气象监测预测和评估业务体系. 2014年, 中国气象局发文要求各省成立“生态气象中心”(气发[2014] 93号), 2017年发布的《中国气象局关于加强生态文明建设气象保障服务工作的意见》(气发[2017] 79号)中明确要求各省成立“生态遥感中心”, 开展生态气象观测业务. 《中国气象局2019年气候变化重点工作计划》(中气函[2019] 44号)明确将生态气象作为中国气象局参与生态文明建设的重点工作, 生态气象数值模式也列为中国气象科学研究院面向2035年关键核心技术. 2019年, 中国气象科学研究院成立生态气象科技创新团队.

2 内涵外延

生态气象是研究生态系统与气象条件之间相互关系的科学, 是气候系统多圈层相互作用的关键环节, 服务于人与自然和谐发展.

生态气象研究的基本单元是生态系统, 它是指在一定的时间和空间范围内, 由生物群落与其环境组成的一个整体. 该整体具有一定的大小和结构, 各组成部分借助能量流动、物质循环和信息传递而相互联系、相互影响、相互依存, 并形成具有自组织和自调节功能的复合体^[43]. 生物圈是最大的生态系统, 是对地球上所有动物、植物和微生物等生物有机体及其能够活动的空间区域的总称, 占据包括大气圈对流层的下部、几乎整个水圈、冰冻圈以及岩石圈表层的薄层范围, 而植被是生物圈最重要的组成部分. 组成生态系统的生物群落是由一定种类的生物所组成的一个生态功能

单位,具有一定的结构、一定的种类组成和一定的种间相互关系,并在环境条件相似的不同地段可以重复出现.生态系统的定义有4点基本含义:(1)生态系统是客观存在的实体,有时间和空间的概念;(2)生态系统是由生物成分和非生物成分所组成;(3)生态系统是以生物为主体;(4)生态系统各组成部分之间有机地联系在一起,具有统一的整体功能^[2,44].生态系统的范围可大可小,取决于研究的目的和对象.

生态气象的研究内容主要包括6个方面: (1) 气象的生态效应格局与规律, 涉及陆地与水生生态(动物、植物与行为生态学)、自然资源生产和管理(森林、农业、园艺、草地、湿地与海洋系统)、人体健康及大气适宜度, 以及生态系统适应性与气候可行性论证(包括城市规划与建筑等构建环境、经济体制与社会活动的行为和管理等); (2) 气象的生态效应时空量度, 涉及气象条件对生态系统的生产功能(生物量、生产力)、生态系统服务以及生物多样性等的影响; (3) 生态变化的气象贡献与归因, 涉及生态系统分布与量度的变化、生态系统的能量流动与物质循环以及气象条件对

生态系统变化的贡献; (4) 生态系统变化的反馈作用, 主要涉及生态系统变化对物理气候系统的反馈作用; (5) 生态气象数值模式, 即采用数值模拟方法模拟生态系统与气象条件之间的相互作用, 包括生态系统类型、地理分布、功能变化及其与天气、气候、气候变化和气象灾害等的相互作用, 为生态保护与修复提供生态系统气候适应性及植被生态质量变化气象条件贡献率的定量描述, 并为天气、气候数值模式准确预报天气、气候、气候变化和气象灾害提供生态系统-大气之间的物质与能量交换的定量描述; (6) 适于人与自然和谐发展的气象与生态系统相互作用关系的途径与原则。

图1给出了生态气象范式,体现了以生态系统为核心的多圈层(生物圈、水圈、岩石圈、冰冻圈与大气圈)的相互作用;同时,它还反映了气候对生态类型及其地理分布的决定作用,以及天气、气候和气候变化对生态系统的多尺度生物-物理-化学-管理过程的影响,和这些影响通过生态系统与大气之间的物质交换与能量传输对大气圈的反馈作用。

图 1 生态气象范式

Figure 1 A conceptual framework of ecological meteorology research

与生态学和气象学相比,生态气象研究具有以下6个特征:(1) 时间尺度,涉及更长时间尺度的生态预测,更短时间尺度的气象预报,以及更长时间尺度的气候变化及其影响预估,时间尺度从秒至千年;(2) 空间尺度,涉及从气孔尺度至全球尺度,既有对地球这个生态系统的大空间尺度的模拟预测,也有微气象的精细研究;(3) 驱动力,不仅包括天气、气候、大气成分、气候变化,而且涉及生态变化(包括自然植被动态、土地利用和土地管理)及环境变化;(4) 研究内容,不仅包括多圈层相互作用的生物-物理-化学-管理过程与定量描述,还涉及灾变(天气、气候、气候变化、大气成分、生态等)过程、识别与灾害风险管理,多尺度(时间、空间)相互作用与耦合;(5) 研究方法和技术,更加注重星-地一体化系统监测与数据-模型融合分析;(6) 研究目标,是基于地球系统可持续发展的人-自然界关系的途径与原则.因此,生态气象研究涉及从生理生态、生态系统至遥感等多尺度的星-地立体监测,需要考虑不同尺度过程之间的耦合关系.

图2给出了生态气象定位观测与区域普查的内容及其与数值模式的关系.生态气象观测包括典型生态类型的生态气象定位观测与区域尺度的生态气象普查.典型类型的生态气象定位观测包括小气候观测、边界层梯度观测、陆-气通量观测以及生态定位观测;而区域生态气象普查主要考察区域的不同生态类型、地理

分布、分布面积、功能(生物量/生产力)、叶面积指数、高度和覆盖度以及气象环境状况等,其分析研究可以与典型类型生态气象定位观测资料相结合.这些观测既服务于生态系统与气象条件之间相互关系与机制的研究,为生态气象监测评估预警提供数据支撑,又通过影响生态系统与大气之间的物质交换与能量传输服务于天气气候数值模式的发展,体现生态变化的反馈作用,还可服务于卫星遥感信息的地面解译与验证.

图3给出了基于生态与气象观测资料以及遥感信息的生态气象监测评估预警业务产品,基于生物地理模型、生物地球化学模型和陆面过程模型等的生态气象预测预估业务产品.这些模型与天气气候数值模式的关系及天气气候数值模式产品释用在生态气象服务中的作用,阐释了生态气象研究服务于中国气象局气象现代化建设的总体任务,即生态文明气象保障、气象防灾减灾和应对气候变化.

3 学科发展展望

生态气象是地球系统科学的新兴学科,是国家生态保护和高质量可持续发展气象保障服务的科技支撑.根据国家生态文明建设,特别是《全国生态系统保护与修复重大工程总体规划(2021–2035年)》中关于生态气象保障任务要求,迫切需要加快推进生态气象观测研究,为提升生态气象监测研究水平和保障服务能

图2 生态气象定位观测与区域普查的内容及其与数值模式的关系
Figure 2 Ecological meteorology observation and numerical model

图3 生态气象业务服务

Figure 3 Ecological meteorology operational services

力,迫切需要强化以下7个方面的研究.

(1) 生态气象长期观测联网研究. 针对当前国家生态保护和高质量可持续发展气象保障服务迫切需要解决的问题,考虑到生态气象的变化是多圈层、多要素和多过程的长期相互作用,许多现象与灾害仅仅依靠短期的试验和观测难以发现,也难以判断生态气象的变化是短期波动还是长期趋势,需要针对国家生态保护和高质量可持续发展,从多圈层、多驱动力、多过程的相互作用出发,建立全国生态气象长期观测网络,并开展生态气象观测联网研究,为全面揭示不同时空尺度上生态气象的发展规律与格局,以及探讨人与自然和谐发展的生态气象范式提供数据支撑.

(2) 基于大数据与人工智能的生态气象信息提取与分析技术研究. 针对当前生态气象监测评估预警和预测预估的业务需求,研究利用大数据与人工智能等技术,提取生态类型、面积、生态过程、生态灾害和生态致灾因子的方法,建立针对不同生态类型的气候资源承载力和生态过程及其气象灾害监测评估预警的分析技术.

(3) 生态系统对气候变化的适应性与脆弱性及其变化归因研究. 阐明气候变化影响下主要类型生态系统(森林、草原、湿地与农田等)结构和功能变化的敏

感指标及其主导气候因子,研发生态系统变化的检测归因分析技术,揭示生态系统对气候变化的适应与脆弱机制,发展生态系统对气候变化的适应性与脆弱性评价技术,构建适于不同类型生态系统变化的气象条件贡献评价理论与方法体系.

(4) 生态系统主要气象灾变机制及其致灾临界条件研究. 研究气候变化背景下主要类型生态系统主要气象灾变的时空演变规律(时间、频率、强度、持续时间、影响、周期性和突变性),揭示生态系统主要气象灾变过程的响应机制(不同类型生态系统、不同生长阶段、不同灾种、不同灾种强度和灾变持续时间),建立生态系统主要气象灾变过程的识别技术(敏感因子筛选、指示指标确定、阈值厘定等),发展生态系统主要气象灾变过程的识别理论与方法,构建主要类型生态系统的主要气象灾害风险评价技术,研发基于灾变过程的生态系统气象监测评估预警技术.

(5) 陆地生态系统关键物候期对多环境要素响应的生理生态机制与模拟模型研究. 研究主要类型生态系统关键物候期(木本植物:展叶与枯黄;草本植物:返青和枯黄;农作物:出苗、拔节、抽穗、成熟)开始与持续时间的变化规律、影响因子识别和生理生态特征;揭示关键物候期对多环境因子(温度、光周期、降水

和氮沉降等)变化及其交互作用响应的规律及其生理生态机制,明确关键物候期发生的环境因子阈值;结合卫星遥感信息与长期物候定位观测资料,构建基于环境要素与生物学特征共同作用的新物候模型,增进物候对环境要素变化响应的认知,实现对关键物候期的动态模拟。

(6) 耦合生物-物理-化学-管理过程的生态气象数值模式研发。研究建立基于光合作用机理、光合产物分配、物候动态与主要气象灾变过程的生态系统动态模型;针对中国独特的季风气候和青藏高原特征,发展植物功能型类型划分体系与气候-植被分类模型;开展适于生态系统动态模型的植物功能型参数化方案研究和生态系统动态模型与气候-植被分类模式耦合研究;分析研究不同管理(放牧、割草、砍伐等)过程对光合、光合产物分配、物候与主要气象灾变的过程影响,

构建耦合生物-物理-化学-管理过程的生态气象数值模式。

(7) 陆地生态系统变化对气候系统的反馈作用与可持续发展对策研究。研究建立生态气象数值模式与大气环流模式的耦合方案,发展适于大气环流模式时空分辨率的下垫面动态参数化方案;揭示陆地生态系统的生理、生态、热力和水分过程之间的耦合作用,模拟分析陆地生态系统对天气、气候、气候变化和极端事件的响应特征及其反馈机制;比较研究未来不同气候变化情景下陆地生态系统的主要类型、地理分布与功能的时空演变格局以及生态系统灾害和致灾因子的变化特征,定量评估植被生态质量变化的气象条件贡献率;探讨未来不同气候变化情景下人与自然和谐发展的生态气象范式及其应对技术,为国家生态保护和高质量可持续发展气象保障服务提供科技支撑。

参考文献

- Liu Z, Ding A J, Zhang R H. Adjusting application codes and optimizing funding layout for the discipline of atmospheric sciences in the National Natural Science Foundation of China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 1068–1075 [刘哲, 丁爱军, 张人禾. 调整国家自然科学基金申请代码, 优化大气学科资助布局. 科学通报, 2020, 65: 1068–1075]
- Li B, Zhang D Y, Wang D H. Ecology: From Individuals to Ecosystems (in Chinese). 4th Ed. Beijing: Higher Education Press, 2016 [李博, 张大勇, 王德华. 生态学: 从个体到生态系统. 第四版. 北京: 高等教育出版社, 2016]
- Bao Y X. Meteorology (in Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2007 [包云轩. 气象学. 北京: 中国农业出版社, 2007]
- Lee H D D. Meteorologica. Cambridge: Harvard University Press, 1952
- Hort A F. Enquiry into Plants. Cambridge: Harvard University Press, 1916
- Köppen W. Das Geographische System der Klimate. In: Köppen W, Geiger R, eds. Handbuch der Klimatologie. Vol. I, Part C. Berlin: Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung, 1936. 46–47
- Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr Rev*, 1948, 38: 55–94
- Holdridge L R. Life Zone Ecology. San Jose: Tropical Science Center, 1967
- Whittaker R H. Communities and Ecosystem. 2nd ed. New York: Macmillan, 1975
- Tao S Y. Water requirement and a new classification of climate in China (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 1949, 20: 43–50 [陶诗言. 中国各地水分需要量之分析与气候区域之新分类. 气象学报, 1949, 20: 43–50]
- Zhu B H. China Climate (in Chinese). Beijing: Science Press, 1962 [朱炳海. 中国气候. 北京: 科学出版社, 1962]
- Zhang J C, Lin Z G. China Climate (in Chinese). Shanghai: Scientific & Technical Publishers, 1985 [张家诚, 林之光. 中国气候. 上海: 科学技术出版社, 1985]
- Zhang X S. The potential evapotranspiration (PE) index for vegetation and vegetation-classification (I)—An introduction of main methods and PEP program (in Chinese). *Chin J Plant Ecol*, 1989, 13: 1–9 [张新时. 植被的PE(可能蒸散)指标与植被-气候分类(一)——几种主要方法与PEP程序介绍. 植物生态学报, 1989, 13: 1–9]
- Zhang X S. The potential evapotranspiration (PE) index for vegetation and vegetation-climatic classification (II)—An introduction of main methods and PEP program (in Chinese). *Chin J Plan Ecol*, 1989, 13: 197–207 [张新时. 植被的PE(可能蒸散)指标与植被-气候分类(二)——几种主要方法与PEP程序介绍. 植物生态学报, 1989, 13: 197–207]
- Zhang X S, Yang D A, Ni W G. The potential evapotranspiration (PE) index for vegetation and vegetation-climatic classification (III)—An introduction of main methods and PEP program (in Chinese). *Chin J Plan Ecol*, 1993, 17: 97–109 [张新时, 杨奠安, 倪文革. 植被的PEP(可能蒸散)指标与植被气候分类(三)——几种主要方法与PEP程序介绍. 植物生态学报, 1993, 17: 97–109]
- Liu C Y. The application of Kira's indices to the study of vegetation-climatic interaction in China (in Chinese). *Chin J Plan Ecol*, 1999, 23: 125–138 [刘春迎. KIRA指标在中国植被与气候关系研究中的应用. 植物生态学报, 1999, 23: 125–138]
- Zhou G S, Zhang X S. Study on Chinese climate-vegetation relationship (in Chinese). *Chin J Plan Ecol*, 1996, 20: 113–119 [周广胜, 张新时. 中国气候-植被关系初探. 植物生态学报, 1996, 20: 113–119]

- 18 Lieth H. Primary production: Terrestrial ecosystems. *Hum Ecol*, 1973, 1: 303–332
- 19 Leith H. Modelling the primary production of the world. In: Leith H, Whittaker R H, eds. *Primary Productivity of the Biosphere*. New York: Springer, 1975. 237–263
- 20 Zhang S Y, Luo B. Recent trends in international biometeorology study—19th international congress summarization of biometeorology (in Chinese). *Adv Meteorol Sci Technol*, 2014, 4: 46–52 [张书余, 罗斌. 国际生物气象学研究的新动态——第十九届国际生物气象学年会综述. *气象科技进展*, 2014, 4: 46–52]
- 21 Qu Z X, Wu Y S, Wang H X, et al. *Phytoecology* (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 1983 [曲仲湘, 吴玉树, 王焕校, 等. *植物生态学*. 北京: 高等教育出版社, 1983]
- 22 Jiang G M. *Plant Ecophysiology*. Beijing: Higher Education Press, 2004 [蒋高明. *植物生理生态学*. 北京: 高等教育出版社, 2004]
- 23 Fu B J, Chen L D, Ma K M, et al. *Principles and Applications of Landscape Ecology* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2011 [傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 等. *景观生态学原理及应用*. 北京: 科学出版社, 2011]
- 24 Qian W H. *Global Climate System* (in Chinese). Beijing: Peking University Press, 2009 [钱维宏. *全球气候系统*. 北京: 北京大学出版社, 2009]
- 25 Yu Z L, Ge J P, Yu G R, et al. *Ecology: Current Knowledge and Future Challenges* (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2016 [于振良, 葛剑平, 于贵瑞, 等. *生态学的现状与发展趋势*. 北京: 高等教育出版社, 2016]
- 26 Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
- 27 Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- 28 Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014
- 29 Zeng Q C, Lin Z H. Progress on the earth system dynamical model and its numerical simulations (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2010, 25: 1–6 [曾庆存, 林朝晖. 地球系统动力学模式和模拟研究的进展. *地球科学进展*, 2010, 25: 1–6]
- 30 Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J, et al. *Biosphere-atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR CCM*. NCAR Technical Note, Boulder, CO, NCAR/TN-275-STR, 1986
- 31 Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, et al. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *J Atmos Sci*, 1986, 43: 505–531
- 32 Yao T D, Liu Y Q, Chen F H, et al. Development and prospect of Earth System Science (in Chinese). In: Chinese Academy of Sciences, ed. *Science Development Report, 2018*. Beijing: Science Press, 2018 [姚檀栋, 刘勇勤, 陈发虎, 等. 地球系统科学发展与展望. 见: 中国科学院, 编. *2018科学发展报告*. 北京: 科学出版社, 2018]
- 33 Leith H, Whittaker R H. *Primary Productivity of the Biosphere*. New York: Springer, 1975. 237–263
- 34 Seitzinger S P, Gaffney O, Brasseur G, et al. International Geosphere-Biosphere Programme and Earth system science: Three decades of co-evolution. *Anthropocene*, 2015, 12: 3–16
- 35 Yu G R. A conceptual framework and the ecological basis for ecosystem management (in Chinese). *Chin J Appl Ecol*, 2001, 12: 787–794 [于贵瑞. 生态系统管理学的概念框架及其生态学基础. *应用生态学报*, 2001, 12: 787–794]
- 36 Geist H J. *The Land-Use and Cover-Change (LUCC) Project. Land Use, Land Cover and Soil Sciences-Volume I: Land Cover, Land Use and the Global Change*. Oxford: Eolss Publishers, 2009. 209
- 37 Zhang D L. An overview of centenary advances and prospects in atmospheric sciences (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 2005, 63: 812–824 [张大林. 大气科学的世纪进展与未来展望. *气象学报*, 2005, 63: 812–824]
- 38 Zhou G S, Zhou L, Yuan W P. *Earth environment and life processes* (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2004, 19: 706–711 [周广胜, 周莉, 袁文平. 地球环境与生命过程. *地球科学进展*, 2004, 19: 706–711]
- 39 Yuan D X. Remarks on earth system science (in Chinese). *Geol J Chin Univ*, 1999, 5: 1–6 [袁道先. 对地球系统科学的几点认识. *高校地质学报*, 1999, 5: 1–6]
- 40 Bretherton F P. *Earth System Science—A Closer View a Program of Global Change*. National Aeronautics and Space Administration Report of the Earth Systems Science Committee. Washington DC: NASA Advisory Council, 1988
- 41 Bonan G. *Ecological Climatology: Concepts and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002
- 42 Qin D H, Sun H L, Sun S, et al. The strategy of Chinese meteorological service and development: 2005–2020 (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2005, 20: 268–274 [秦大河, 孙鸿烈, 孙枢, 等. 2005–2020年中国气象事业发展战略. *地球科学进展*, 2005, 20: 268–274]
- 43 Cai X M, Shang Y C. *General Ecology* (in Chinese). Beijing: Peking University Press, 1995 [蔡晓明, 尚玉昌. *普通生态学*. 北京: 北京大学出版社, 1995]
- 44 Zhou G S, Wang Y H. *Global Ecology* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2003 [周广胜, 王玉辉. *全球生态学*. 北京: 气象出版社, 2003]

Summary for “生态气象: 起源、概念和展望”

Ecological meteorology: Origin, concept, and prospects

Guangsheng Zhou^{1,2*} & Li Zhou^{1,2}¹ Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;² Joint Eco-Meteorological Laboratory of Chinese Academy of Meteorological Sciences and Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China* Corresponding author, E-mail: zhougs@cma.gov.cn

Ecological meteorology is an emerging earth science subject in response to the current environmental crisis and has become a secondary subject of atmospheric sciences. It encompasses meteorological science and technological support for national ecological civilization construction, especially national environmental protection and sustainable development. Accelerating ecological meteorology monitoring and research and establishing an operational brand is critical. The origin, concept, and primary research areas of ecological meteorology are hereby reviewed. Ecological meteorology studies the relationship between ecosystem and meteorological conditions (the core of multiple earth system sphere interactions) and serves the harmonious development of humans and nature. It includes six main aspects: (1) The patterns and laws of meteorologically induced ecosystem types and their geographical distribution; (2) the measurement of ecosystem temporal and spatial changes due to variable meteorological conditions; (3) the meteorological contribution and attribution analyses to ecological changes; (4) the feedback of ecosystem changes to the earth system; (5) the numerical modeling of ecological meteorology; (6) the interaction between meteorological conditions and ecosystems, and the principles that promote the harmonious development of humans and Nature. Compared with ecology and meteorology, ecological meteorology research has the following characteristics: (1) The time scale ranges from seconds to millennia; (2) the spatial scale ranges from the stomatal scale to the global scale; (3) the driving forces include weather, climate, atmospheric composition, climate change, and ecological and environmental changes; (4) the content emphasizes multiple earth system sphere interactions and disaster risk management; (5) the methods and technologies focus on satellite-ground integration monitoring systems and data-model fusion analyses; (6) the goal is to understand the relationship between humans and nature based on the sustainable development of the earth system. Ecological meteorology observations come from typical ecosystem research stations and regional-scale field investigations, and the operational services include assessing the ecological carrying capacity of climate resources and monitoring, evaluating, and warning for ecological meteorology disasters. This paper explains the relationship between ecological meteorology and ecological civilization construction, disaster prevention and mitigation, and how to address climate change. The primary and urgent ecological meteorology research tasks are extracting relevant information for analysis using big data and artificial intelligence, investigating ecosystem adaptations to climate change and their change attributions, exploring an ecosystem's main meteorological disaster processes and critical meteorological conditions, analyzing the eco-physiological mechanisms of key terrestrial ecosystem phenological periods and developing simulation models of them based on multiple environmental factors, developing an eco-meteorological numerical model coupling the biological, physical, and chemical, management processes, and understanding how terrestrial ecosystem changes and sustainable development countermeasures affect the climate system. Ecological meteorology is a new and promising field that is expected to provide valuable information for the future.

ecological meteorology, origin, concept, prospect, research contentsdoi: [10.1360/TB-2020-1274](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1274)