



典型陆地生态系统对气候变化响应的定量研究

岳天祥*, 范泽孟*

中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

* 联系人, E-mail: yue@lreis.ac.cn; fanzm@lreis.ac.cn

2013-05-17 收稿, 2013-07-15 接受, 2013-08-22 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2010CB950904, 2009CB421105)、国家自然科学基金(41023010, 41271406)和国家高技术研究发展计划(2013AA122003)资助

摘要 森林、农田和草地生态系统对气候变化响应定量研究进展的综合分析表明: 近一个世纪以来的森林、农田和草地生态系统对气候变化有很强响应, 诸多生态系统类型的组成、结构和分布已发生了显著变化; 由于病虫害、极端气候频发, 植物物种的死亡率增加、生产力出现下降趋势; 典型陆地生态系统对气候响应的未来情景分析结果表明, 高海拔地区和高纬度地区的生态系统类型的结构、分布、物种和生产力将发生较大变化; 然而, 由于生物群落的相互作用, 各种生态系统对气候变化的响应很复杂, 目前人类对典型陆地生态系统变化的认识仍然处在很初级的阶段. 尤其是在气候变化对植物物种的影响、干旱和极端事件的后果以及病虫害的影响等方面, 还没有明确的结论; 根据目前的研究积累, 还无法给出气候变化对典型陆地生态系统影响的综合定量评估, 需要改进区域气候模拟, 尤其是降水量的模拟, 需要提高植物物种对气候、病虫害和大气成分响应的认识. 以典型陆地生态系统对全球气候变化响应机理研究成果为基础、集成空间对地观测数据和地面实测数据的多尺度生态系统动态模拟分析平台, 到目前为止, 仍是亟待填补的空白.

关键词

全球气候变化
森林生态系统
农田生态系统
草地生态系统
模拟分析平台

全球变化正逐渐改变陆地生态系统固有的自然过程, 进而威胁到人类的生存环境及社会经济的可持续发展^[1,2]. 气候变化导致动植物生境变化, 进而影响物种分布及其生态系统过程^[3,4]; 而气候要素时空分布模式的改变, 则引起水资源和营养物质的时空分布发生变化, 并增加对自然生态系统及其演替过程的干扰程度^[5,6]. 随着社会经济和科学技术的迅速发展、人类活动强度的不断增大、全球气候变暖趋势的日益突显^[7,8]和异常气候突发事件频次的逐渐增多^[9,10], 我国森林、农业及草地生态系统的水源涵养、防风固沙、光合固碳、空气净化、水土保持、养分循环等调节功能的时空分异特征日趋显著. 森林、农田和草地生态系统的平衡与健康发展, 对生态安全、淡水安全、食物安全、人类健康等关乎社会经济快速与

持续发展、社会稳定与和谐发展的关键性因素的重要贡献日趋突显. 这一问题也已成为 21 世纪国内外科学家最为关注的生态环境和科学问题, 并受到全球各国政府、科学界与公众的强烈关注.

1 森林生态系统对全球变化响应

Pastor 和 Post^[11]通过气候模型输出结果驱动森林生产力和土壤过程模型, 对北美东北部森林对暖干气候响应的模拟结果发现, 在冷温带森林边缘区域的森林生产力下降趋势尤为明显. Wright^[12]通过对长期林斑数据分析发现, 热带森林结构正在发生变化, 其立木度、更新率、死亡率和地上生物量都呈增加趋势, 而且全球生态系统过程模型的模拟结果也同样表明, 随着全球气候变暖, 热带森林生产力出现

引用格式: 岳天祥, 范泽孟. 典型陆地生态系统对气候变化响应的定量研究. 科学通报, 2014, 59: 217–231

Yue T X, Fan Z M. A review of responses of typical terrestrial ecosystems to climate change (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2014, 59: 217–231, doi: 10.1360/972013-261

下降趋势^[13,14]. 欧洲环境署^[15,16]研究结果显示, 欧洲变暖高于全球平均水平, 许多地区出现暖干趋势, 尤其是极端天气事件频发, 导致欧洲森林生产力急剧下降、森林火灾频发和材积损失增加. 另外, 由于气候变化引发旱灾发生频次、持续时间和严重性的增加, 许多地区森林的组成、结构和生物地理都发生了根本性变化, 尤其是树的死亡率增加、病虫害暴发成灾、林野火灾频发、冰冻和风暴时有发生^[17]. 有关加拿大北方森林对气候变化响应的研究结果显示^[18], 虽然温度升高延长了北方森林的生长季, 但由于干旱加重和自养呼吸增强, 对森林生长产生了负面影响.

国际上在森林生态系统对气候变化响应的情景研究方面, 同样开展了大量研究. Pitman 等人^[19]关于气候变化对森林火灾影响的未来情景的模拟结果显示, 在高排放情景下, 到 2050 年的火灾发生概率将提高 25%; 而在低排放情景下, 2100 年火灾的发生概率与 2050 年相比, 将提高 20%. Urban 等人^[20]运用林窗模型进行气候变化对太平洋西北部针叶林潜在影响评估的结果表明, 由于森林不同类型区的空间位移, 高海拔林种面临灭种危险. Flannigan 和 Woodward^[21]运用响应曲面模型对 CO₂ 倍增情景下气候变化对北美北部红松分布影响的模拟发现, 红松的分布区将向东北移动 600~800 km, 红松总面积将减小, 但单位面积材积将呈增加趋势. Sykes 和 Prentice^[22]结合林窗模型与生物气候模型对北欧北方森林的气候响应模拟表明, 许多北方林种的分布范围、森林的结构和组分特征, 在未来的不同气候变化情景下将发生显著变化. Dixon 和 Wlsniewski^[23]对全球森林植被对气候变化响应的研究过程中发现, 全球森林植被和土壤的含碳量为 1146 Pg C, 其中低纬度森林占 37%、中纬度森林占 14%、高纬度森林占 49%, 未来气候变化将对高纬度地区森林分布和生产力产生较大的影响. Leathwick 等人^[24]利用非参数回归方法, 运用 14500 个林斑数据, 在对新西兰 41 个树种分布与温度、太阳辐射、水平衡和岩性之间关系进行分析的基础上, 对温度上升 2℃对树种分布的影响进行了综合评估. Iverson 和 Prasad^[25]运用地理信息系统技术和树种回归统计分析模型, 定量分析 CO₂ 倍增时, 气候变化对美国东部 80 个树种空间分布的影响结果显示, 大约 30 个树种的分布范围将会扩大, 36 个树种至少北移 100 km, 4~9 个树种将北移出境进入加拿大. He 等人^[26]结合生态系统过程模型和空间景观模型, 进

行美国威斯康星州北部林种对气候变暖的响应的模拟结果显示, 其北方林种将在 300 年内消失, 并将演替为南方林种. Scheller 和 Mladenoff^[27]结合空间景观动态模拟模型和广义生态系统过程模型, 对气候变化干扰、森林分布、树林生物量和林木死亡率以及林种间和林种内竞争的可行性进行了模拟分析. Alkemade 等人^[28]通过全球环境综合评估模型 (IMAGE) 与气候包络线模型的集成, 对全球变暖与树种分布关系的模拟结果表明, 到 2100 年, 北欧地区树种将发生较大的变化, 届时 35% 以上的树种将是新出现的树种, 现有树种的 25% 以上将在这一地区消失. 另外, 有关研究表明, 在 CO₂ 倍增的情况下, 中国东部地区阔叶林将增加、针叶林将减少^[29], 气候变暖将导致寒温带冷杉林转变为目标广泛分布于西藏高原东部山地的桦林, 寒温带森林将移动到目前为冻原的高寒地区^[30].

虽然气候变化是决定森林类型分布的主要因素, 植被分布规律与气候之间密切相关这一客观事实早被人们所认知, 而且大量研究结果表明在高海拔和高纬度地区的森林分布、树种和生产力对气候变化更具敏感性, 但是, 目前尚处在基于气候与植被物种间的关系来描绘未来气候变化条件下物种和森林分布的阶段. 此外, 由于树木群落的相互作用, 森林对气候变化的响应尤为复杂^[31]. 因此, 目前人类关于森林生态系统变化对气候变化响应的研究与认识仍然处于初级阶段^[32].

国内在森林生态系统对气候变化响应研究方面开展了大量的研究工作, 尤其是进入 20 世纪以来, 在气候变化对森林类型分布的影响、森林生态系统对气候变化的敏感性、气候变化对森林灾害的影响、树木年轮对气候变化的响应, 以及物候对气候变化的响应方面取得了系列研究进展. 方精云^[33]研究分析了气候变化引起的森林光合作用、呼吸作用和土壤有机碳分解等系列森林生态系统的生物物理过程的改变机理, 以及森林生态系统的结构、分布和生产力变化特征. 延晓冬等人^[34]运用自主研发的中国东北森林生长演替模拟模型 (NEWCOP), 对中国东北森林生长演替过程及其气候敏感性的模拟分析表明, 未来东北森林中落叶阔叶树的比重将大幅度增加. 赵宗慈^[35]和刘世荣等人^[36]运用 7 个全球气候模式 (GCMs) 所提供的 2030 年中国气候情景预测数据, 构建了中国森林气候生产力模型, 并对中国森林第一

性生产力的未来情景进行了预测分析,其研究表明,气候变化引起的中国森林第一性生产力变化率从东南向西北递增(递增幅度 1%~10%不等)。根据气候变化引起的森林生产力变化率的地理格局和树种分布状况的预测,揭示了中国主要造林树种生产力的变化是兴安落叶松生产力增益最大(8%~10%)、红松次之(6%~8%)、油松为 2%~6%(局部地区达 8%~10%)、马尾松和杉木为 1%~2%、云南松为 2%、川西亚高山针叶林增加可达 8%~10%;而主要用材树种生产力增加从大到小的顺序为兴安落叶松-红松-油松-云南松-马尾松和杉木,增加幅度为 1%~10%。丁一汇^[37,38]有关气候变化对森林灾害影响的研究结果表明,气候变化引起水热区域和季节分配发生变化,一方面温度升高可以延长生长季,提高森林生产力;另一方面可能引发倒春寒甚至春季冻害的发生。

树木年轮对气候变化响应主要体现在对气温和降水 2 个主要气候要素的响应。有关研究表明,春季降水量与当年树轮宽度呈正相关^[39],干旱半干旱地区树木生长对气温的高低尤为敏感^[40],在当年的生长季节,较高的气温有利于光合作用,温度与年轮宽度显著正相关^[41]。但是,如果生长季节气温过高则容易加快土壤蒸发并提高饱和水汽压差,从而限制树木的生理代谢活动,导致生长季的高温与年轮宽度呈负相关^[42]。另外,其他气候因素与树木生长具有不同程度的相关关系,譬如大气 CO₂ 浓度增加对辽东栋次生木质生长具有明显的正效应^[43]。在物候对气候变化的响应方面,徐雨晴等人^[44]采用统计学方法对北京地区 1963~1988 年 20 种树木芽萌动期及 1950~2000 年 4 种树木开花期的变化及其对气温变化响应的研究表明,北京树木芽萌动的早晚主要受冬季气温的影响,冬季及秋末气温的升高使春芽萌动提前。萌芽早的树木萌动期长,萌芽晚的树木萌动期短,前者对温度的变化反应更敏感,且前者的萌动期长度随着萌动期间(主要在早春)气温的升高而缩短,后者的萌动期长度随着初冬、秋末平均最低气温的升高而延长。始花前 2~9 旬,特别是前 5 旬,气温对始花期影响最显著、始花期对气温变化的响应最敏感。北京春温每升高 1℃,开花期平均提前 3.6 d。

上述综述表明,我国在森林类型、森林生态系统结构与功能、土壤有机质、物候效应、灾害、树木年轮等对气候变化的响应方面均开展了大量的研究工作。而且利用物候观测资料,分析了近 40 年我国木

本植物物候变化及气候变化的响应关系,并建立了不同年代物候期与地理位置之间的关系模式,分析了当前气候增暖背景下物候期地理分布规律变化对气候变化的响应关系。但存在各种森林生态系统类型对气候变化的响应机理和研究对象的广度不够,没有充分利用和发挥过去几十年积累的森林清查数据、长期定位观测和监测数据、遥感数据进行定量模拟和准确分析森林生态系统对气候变化的响应等问题,而且缺乏在不同时空尺度上的森林生态系统对气候变化响应的综合模拟分析。

2 农业生态系统对全球气候变化响应

气温和降水的变化影响植物光合作用、呼吸作用和土壤有机碳的分解^[33,45,46],从而导致农作物的种类、种植结构、生长周期、分布格局及生产力发生变化。针对如何揭示和认知农业生态系统对全球变化的响应机理,国际上开展了大量的研究工作。Katz^[47]关于气候变化对美国堪萨斯州粮食产量影响的研究表明,降雨量是影响小麦产量的最重要因素,气温影响次之。Adams 等人^[48]研究发现,农业生产力对全球气候变化的反应比较敏感,美国农业灌溉面积和区域格局受气候变化影响而发生相应变化。Dai 和 Ding^[49]运用大气环流模型,在 CO₂ 倍增的条件下,模拟气候变化对小麦生产影响的分析表明,气候变暖将引起中国东北和西北地区的小麦种植面积呈现扩大趋势,而且冬小麦种植区呈现向北和向西扩展趋势,但对中国南部和中部的的小麦种植具有负面影响。Smit 和 Cai^[50]在中国农业受气候变化影响的综合分析过程中发现,CO₂ 增加和温度升高虽然有益于中国北方小麦生长,但对春小麦和南方冬小麦具有负面影响;同时,在足够湿润的条件下,气候变暖将会使得黄淮海和北方地区玉米增产、东北大豆受益、北方地区棉花增产、南方棉花减产,另外,柑橘和茶叶也会受益,但会受到霜冻和干旱的威胁。El-Shajxr 等人^[51]研究显示,气候变化将使埃及所有农作物减产 11%~28%、农业需水增加 16%,甚至将导致埃及部分地区的农作系统彻底崩溃。Mizina 等人^[52]研究结果也显示,气候变化将导致哈萨克斯坦小麦减产 70%以上。Reilly 等人^[53]在进行 21 世纪 30 年代和 90 年代美国农业受气候变化影响的对比分析结果显示,尽管美国南部农业产量有可能下降,但气候变化整体上有利于美国作物产量的提高,而且 90 年代比 30 年代

的气候变化更有利于美国作物产量的增加。

在未来情景分析方面, Stuczynski 等人^[54]运用美国戈达德空间研究所(GISS)研发的全球变化模型和美国地球物理流体动力实验室(GFDL)研发的大气模型对波兰农业受未来气候变化影响的模拟分析表明, 波兰东北地区植物的生长季将从 200 d 增长到 260 d, 西南地区将由 220 d 增长到 330 d, 而且气候变化将对作物种植结构、区域分布和作物轮作产生较大影响。根据 GISS 模型, 冬小麦产量将保持目前的水平, 糖用甜菜将增产 3%~10%, 大豆、向日葵和玉米将增产 20%~50%, 土豆将减产 20%~30%。根据 GFDL 模型, 农业将大幅减产, 冬小麦、甜菜和土豆将分别减产 10%, 15% 和 70%。Sivakumar 等人^[55]模拟分析表明, 随着全球平均气温的上升和降雨量的不确定性变化, 将会引起亚洲热带地区作物产量降低, 从而会严重影响到亚洲热带地区、山区和干旱区的食物安全, 将会使得非洲干旱和半干旱地区旱灾频发, 拉丁美洲的农业也将受到极端高温和低温以及干旱和水灾的影响。Motha 和 Baier^[56]在研究过去和未来气候变化对北美温带地区农业影响的过程中发现, 由于南部种植区温度升高和水分减少, 该区域农作物将会大幅度减产; 由于北部种植区生长期变长、CO₂ 浓度增加, 该区域农作物产量将会提高。Thomson 等人^[57]根据英国气象局 Hadley 气候预测研究中心研发的全球气候模式(HadCM3)的气候情景对中国冬小麦产量进行预测的结果表明, 到 2099 年, 中国黄淮海地区的年平均温度将升高 5℃、降雨量将增加 300 mm, 而每公顷冬小麦将增产 800 kg。Mall 等人^[58]在分析印度关于气候变化对农业影响的研究成果时发现, 印度过去每 100 年增温 0.57℃, 作物产量在过去的 50 年中增加了 4 倍多, 夏季季风降雨量与作物产量的相关性非常显著。而且随着气温的升高和降雨量的增大, 到 2050 年, 北纬 25°以南地区最高温度将增加 2~4℃, 以北地区最高温度和最低温度都将增高 4℃以上, 每增温 2℃将使高产区的水稻产量每公顷减少 750 kg, 低产区每公顷减少 60 kg。如果增温 2℃、降雨量增加 7%, 印度水稻产量净收益将下降 8.4%。Olesen 等人^[59]根据 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)所有 SRES 情景关于欧洲农业在 2071~2100 年和 1961~1990 年对气候变化响应的预测分析结果显示, 欧洲适合种植玉米的地区将扩大 30%~50%, 且北欧地区的净初级生产力将提高 35%~54%。

Tingem 和 Rivington^[60]对喀麦隆农作物对气候变化响应的模拟分析发现, 班巴拉花生和黄豆将大幅增产, 而玉米和高粱产量将变化不大。Stöckle 等人^[61]关于未来气候变化对华盛顿东部农业影响的预测评估显示, 其冬小麦产量到 2020 年将增加 2%~8%, 到 2040 年将略有增加, 到 2080 年则将减产 4%~7%; 如果考虑 CO₂ 的影响, 21 世纪 20 年代、40 年代和 80 年代的产量将分别增加 13%~15%, 13%~24% 和 23%~35%。Vano 等人^[62]对气候变化背景下的亚基马河流域灌溉农业变化的模拟分析结果显示, 在 A1B 情景下, 21 世纪 20 年代、40 年代和 80 年代的水资源将分别短缺 27%, 33% 和 68%, 而在 B1 情景下, 则分别是 24%, 31% 和 43%, 这些变化将导致亚基马河流域灌溉农业年产量下降 5%~16%。Al-Bakri 等人^[63]运用作物模拟模型(DSSAT)对约旦干旱盆地旱作农业受气候变化影响的模拟分析结果显示, 在降雨量增加 10%~20% 的情况下, 大麦产量可增加 3%~5%、小麦产量可增加 9%~18%, 而在温度增加 1℃, 2℃, 3℃ 和 4℃ 的情况下, 将会分别导致大麦减产 14%, 28%, 38% 和 46%, 导致小麦减产 17% 和增产 4%, 43%, 113%。Brown 等人^[64]运用区域气候模型和局地气候资料对苏格兰 2050 年之前的农业旱灾进行预测评估的结果显示, 气候变化将大大增加农业旱灾的发生频率。Steffen 等人^[65]研究显示, 澳大利亚东部过去 100 年和未来 100 年都呈现降雨量减少、温度升高的气候变化趋势, 干旱成为澳大利亚农业面临的主要挑战。Bindi 和 Olesen^[66]关于欧洲农业对气候响应的研究表明, 气候变化将使北欧大部分地区增产, 而南欧将出现水分短缺问题加剧和极端气候事件增加。Fiebig-Wittmaack 等人^[67]研究证明, 在智利的埃利河盆地, 平均最低温度的增加可使亚热带水果增产, 大于 30℃天数的增加对水果光合作用过程产生负面影响, 冬天温度的增加会使园艺作物的产量增加, 但蒸散的增加会导致对水的需求增加, 而且温度增加导致农业虫害发生率提高。Petrie 等人^[68]运用 IPCC 的 A1 情景在预测美国中部平原普雷里草原对气候变化响应过程中发现, 草地生长季将会提前, 而生长季的碳通量将增加。Grasso 和 Feola^[69]研究发现, 在未来几十年间, 气候变化将对地中海地区的农业产生负面影响, 尤其对其南部地区的影响更为严重。

随着气候变化和人类活动对陆地生态系统的影响, 我国土地利用的空间格局与分布发生了系列演

替和变化^[70]。目前诸多研究结果显示,在气候变化背景下,中国种植制度可能会产生2种变化,一是作物种植界限北移,变化区域内复种指数提高;另一种是作物品种由早熟向中晚熟发展,作物单产有所增加^[71]。气候变化与气候波动对粮食生产的可能影响不仅在国际上引起了各国学者的强烈关注,而且国内诸多学者也针对这一全球性科学问题开展了系列研究并取得了大量的研究成果。

郝志新等人^[72]研究发现,辽宁省1991~1999年冬小麦的种植北界较20世纪50年代确定的北界(长城沿线)北移了1~2个纬度。金之庆等人^[73]研究显示,预计到2041~2050年东北地区冬小麦的适种面积,将由目前的近乎为零逐步扩大到辽南乃至辽宁省的大部、吉林省的东南部。郭海英等人^[74]通过对甘肃省西峰农业气象站25年冬小麦生育期的长期观测资料的分析显示,冬小麦返青期、拔节期、抽穗期、成熟期等发育期普遍提前。王位泰等人^[75]研究表明,甘肃陇东黄土高原冬小麦越冬期日数与期间负积温具有较好的负相关关系。曹艳芳等人^[76]研究表明,自1980年以来,内蒙古西部河套平原小麦生育期基本表现为提前的显著变化趋势。杨晓光等人^[77,78]研究显示,随着温度升高和积温增加,我国一年两熟制、一年三熟制的种植北界都有不同程度的北移,北方冬小麦的种植北界也将呈现不同程度北移西扩趋势。杨建莹等人^[79]研究表明,华北地区除江苏和安徽2省北部的冬小麦播种期无明显变化外,其他区域的冬小麦播种期普遍推迟;全区冬小麦拔节期提前,尤其是北部地区幅度较大(达5~10 d),抽穗期推迟明显(尤其华北中部和北部推迟达10~15 d);除华南北部胶东半岛外,华北大部分地区冬小麦成熟期推迟,一般在5~10 d。我国西北地区过去50年冬小麦整个生育期缩短8~10 d,而返青开花期天数延长7 d,由于冬季温度升高,越冬天数减少7~8 d,而返青期、拔节期、抽穗期、成熟期等发育期普遍提前,以返青期提前最为显著。

方修琦和盛静芬^[80]研究显示,黑龙江在原属水稻种植次适宜和不适宜地区的北纬47°以北地区,水稻种植面积相对增长比例最大,1993年的水稻种植面积达1985年的2.5倍以上。葛道阔等人^[81]对中国水稻产量的预测估计显示,华中和西南高原的单季稻均将随着气候变暖呈现增产趋势。杨沈斌等人^[82]研究发现,相比基准气候,A2和B2情景下我国

水稻生育期平均缩短了4.5和3.4 d,气候变暖将会加速长江中下游地区水稻的生育进程、缩短水稻生育期。马树庆等人^[83]研究表明,东北地区在正常水分条件下,如果平均气温上升1℃,玉米出苗期则提前3 d左右,而出苗至抽雄期缩短6 d左右、抽雄至成熟期缩短4 d左右,整个生育期缩短9 d左右,并且出苗速度和出苗以后的生长发育速度将提升17%左右,积温增加将导致玉米干物质积累时间延长,使得干物重明显增加。朱大威和金之庆^[84]研究表明,东北地区气候变暖对小麦生产的影响以负面为主,气候变暖对东北地区水稻生产总体上有利,尤其是在北部高寒区与东部湿润区的水稻产量均有明显提高。

通过上述分析可以得出,气候变化对作物生育期和生育进程的影响,因地区差异和作物类型差异而不同。其中,西北和内蒙地区的小麦各生育期基本呈提前趋势,整个生育期天数呈缩短趋势。东北和华北地区玉米生长季长度呈延长趋势。气候变暖将导致水稻各生育期提前、加速水稻生育进程、缩短水稻的生育期。但是,目前在绝大部分有关气候变化对农业影响的研究过程中,主要侧重于气温和CO₂浓度等单一要素变化对作物生长发育和产量形成的影响,缺乏对降雨量变化的精细考虑,而且对未来预测的大多数研究结论,均基于存在着很大不确定性的IPCC气候情景模型^[85~87]。因此,气候变化对农业影响的定量研究中包涵诸多的不确定性,极端气候事件发生频率及对农业的影响程度定量研究基础仍然极为薄弱。

3 草地生态系统对全球气候变化响应

气温和降水等气候要素的时空变化,直接影响草地生态系统的草种类型、结构、生长周期、分布格局及生产力发生变化。Sternber等人^[88]对暖冬多雨夏季和暖冬干旱夏季2种情景下英国钙质草地植物群落动态的研究发现,当冬季降雨量增加时,草地覆盖度和物种丰度明显增加,但枯枝落叶明显减少;在暖冬夏干的气候条件下,枯枝落叶明显增加,植物群落对气候的反应取决于其优势种的生命史属性。Coffin和Lauenroth^[89]模拟北美高草草原、混合草原、矮草干草原和荒漠草原对气候变化响应的结果显示,所有实验区的C₄草种优势度随温度升高而增强,最冷实验区的优势草种由C₃变为C₄,C₄草种生物量与温度有很强的相关性,C₃草种生物量与降雨量相关性较

强. Rounsevell 等人^[90]模拟英格兰和威尔士草地生产力对气候变化响应的结果显示, 在年平均增温不超过 2℃、降雨量变化幅度≤10%的情况下, 草地产草量几乎不发生变化. Grime 等人^[91]在研究英国石灰岩草地生物量和物种组成对气候变化响应的过程中发现, 演替早期草地对气候变暖和变干反应迅速, 成熟草地则对气候变化反应较慢. Silletti 和 Knapp^[92]对 1983~1997 年北美高秆草原优势种(大须芒草和印第安草)受气候变化影响的研究结果表明, 大须芒草覆盖度随着夏季最高温的降低而减小、印第安草覆盖度的年际变化则与年降雨量密切相关. Zha 等人^[93]关于 1980~2000 年中国西部高山草原生产力对气候变化响应的研究结果表明, 在生长季初期, 温度对草地生产力有较重要的影响; 在生长季后期, 降雨量发挥一定的作用; 蒸散量则是间接表达温度对草地生产力的影响的最佳指标. Piao 等人^[94]关于 1982~1999 年中国温带草原归一化植被指数(NDVI)变化的研究显示, 生长季 NDVI 的年增长率为 0.5%, 春季为 0.61%, 夏季为 0.49%, 秋季为 0.6%; 20 世纪 90 年代后期与其初期相比, 中国温带草原植被生产力有所提高. Hopkins 和 Del Prado^[95]关于欧洲草地对气候变化响应研究成果的综合分析显示, 温度升高将有利于草本植物的生长(尤其是豆科植物), 但降雨量的季节性变化将会抵消温度升高所产生的有利条件(尤其在夏季降雨量低的地区), 而旱涝等极端气候事件发生频率的增加将对草地产生较大负面影响. Gao 等人^[96]对 1981~2004 年中国西藏北部高山草原净初级生产力的研究表明大约 89% 的地区没有明显变化, 11.3% 的区域净初级生产力有减小趋势, 净初级生产力增加的区域不超过 0.1%.

Li 等人^[97]关于高山草地植被对气候变化响应的研究表明, 在 1961~2007 年, 青海年均温度平均每年上升 0.035℃和降雨量没有明显变化的情况下, 青海的高山草地植被类型由 1987 年前的 12 种减少为 1987 年后的 11 种. Qian 等人^[98]运用植被指数、草高、干物质和植被覆盖度等指标因子, 对 1994~2006 年青藏高原三江源地区草地生态系统受气候变化影响的分析结果显示, 气候变化使草地的植物生产力明显提高. Ma 等人^[99]运用 1982~2003 年的实验数据对内蒙古草原地上生物量年际变化的研究结果发现, 暖湿春季导致生长季初期生物量增加, 而干旱夏季则引起生长季后期的生物量减少. Di Falco 等人^[100]在埃

塞俄比亚尼罗河流域的研究结果表明, 气候变化适应对食物产量产生了积极影响, 采取适应措施的家庭净收益增加了 10%. 周华坤等人^[101]利用中国科学院北海高寒草甸生态系统定位站多年来积累观测的长时间序列数据, 运用生态系统稳定性直接分析方法, 对高寒草甸生态系统的稳定性及其对环境变化灵敏性分析的研究结果表明, 高寒草甸生态系统的主要气候因子(年降水和年均气温)以 3~4 年的主周期随机低频振荡, 在其作用下生态系统的行为呈现同主周期、振幅比较稳定的随机波动. 在未来情景方面, Epstein 等人^[102]运用未来气候变化情景数据对美洲草地受气候变化的影响进行模拟的结果显示, 随着气候变暖, C₃ 草种的相对丰度将会下降, 而 C₄ 草种的相对丰度将会增加. Xu 等人^[103]对爱尔兰草地的研究表明, 由于温度升高、夏季变干, 在 2021~2060 年, 爱尔兰草地的土壤有机碳将减少 2%~6%. Finger 和 Calanca^[104]对瑞士高原集约经营草地受气候变化影响的预测评估显示, 草地将有 10%~24% 的增产幅度, 但由于温度升高、夏季降雨量减少, 产量不稳定性将会明显增加, 其产量变异系数将会在 21%~50% 变动.

21 世纪以来, 国内在草地生态系统对气候变化响应研究方面取得了系列研究进展. 邓慧平等人^[105]对 1960~1999 年气温、降水变化对松嫩草地的影响进行分析表明, 土壤水分及牧草产量主要由降水变化决定, 在 CO₂ 倍增情况下, 松嫩草地气温将明显增加, 降水增加 10% 左右, 从而引起草地生产力将减少 3%~4%. 戴声佩等人^[106]研究表明, 祁连山地区气温变化对草地植被 NDVI 的影响强于降水, 气温、降水与草地植被 NDVI 的最大相关性滞后期都为 2 旬左右. 春季和秋季 NDVI 对气温和降水响应的滞后期较短, 而夏季响应滞后期较长. 张戈丽等人^[107]分析呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化响应的研究表明, 降水是驱动草地植被年际变化的主要因素, 春季草地植被生长对气温变化的敏感性较降水变化高, 夏季和秋季草地植被的生长对降水变化的敏感性则高于对气温变化的敏感性, 其中以夏季最为显著. 张锐等人^[108]在研究新疆草地气候生产潜力变化特征及对气候响应的预测过程中发现, 水分条件是影响新疆草地生产潜力的主导因素. 如果年平均气温每升高/降低 1℃, 每公顷草地年气候生产力增加/减少 17.309 kg, 而年降水量每增加/减少 1 mm, 每公顷草地年气候生产力将增加/减少 24.392 kg. 王根绪等

人^[109]分析青藏高原三江源区高寒草地生物量对气候变化响应的结果表明,高寒草原植被地上生物量对气候增暖的响应幅度显著小于高寒草甸,而对降水增加的响应程度大于高寒草甸。任继周等人^[110]运用综合顺序分类法(CSCS)分析草地对全球气候变化的响应表明,在全球 IPCC 的 A2a 和 B2a 情景下,中国草地面积将呈现减少态势,全球将呈现草地面积增加态势。而且 2 种情景下中国草地年碳汇潜力将分别提升 14.6% 和 18.5%,全球将分别提升 17.3% 和 16.8%。

4 典型陆地生态系统对气候变化响应的定量模拟方法

虽然国内外诸多学者已经根据当量长期观测资料和 IPCC 未来情景数据,对全球气候变化如何影响森林生态系统、农田生态系统和草地生态系统的类型、结构、功能和格局等进行了大量的分析和研究工作,而且在针对单一气候要素的变化,开展了诸多尝试性的定量分析工作,尤其逐步发展了许多关于森林生态系统对全球变化响应的模型和方法,但均存在着误差较大、综合性较差、普适性较低等问题而没有一个得以广泛运用,因此如何构建一个能够克服上述模型缺陷的综合定量分析模型,仍然是定量分析陆地生态系统对全球气候变化响应的主要挑战。

尽管近年来评估森林碳汇的技术和方法都在进步,但大多数碳储量估算都需要确定森林类型及其空间范围,确认树种和每种树林的立木度,以及计算每种树种的材积和碳含量 3 个步骤,也就是说,目前还无法直接获得森林碳库的地理分布和时间变化^[111]。譬如, Dixon 和 Wlsniewski^[23]研究显示,人们在预测森林分布、组成和生产力的技术和能力方面存在很大的不确定性。Mather 等人^[112]虽然建立了森林砍伐面积与人口密度之间的回归方程,结果显示,在过去相当长的一个时期内,森林砍伐与人口增长有密切关系,然而,由于这种简单化的回归关系没有集成其他社会经济和气候变化等因素,因此,很难用来预测未来森林面积变化趋势。Shafer 等人^[113]运用响应曲面模型模拟分析未来气候变化对北美西部林木影响时发现,响应曲面模型还不能准确预测树种的未来分布范围。Iverson 等人^[114]在模拟森林分布变化对气候响应的过程中发现,由于所使用模型没有集成未来土地利用变化和种间竞争要素,模型存在着很大的

误差问题。

针对上述模型的问题,也有诸多国内外学者通过对多个单一模型进行集成和融合,构建综合模型来模拟森林生态系统对气候变化的响应,但由于这些单一模型存在区域限制、尺度限制和误差不确定性,从而使得模拟结果仍然无法达到理想的准确性和可靠性。譬如,集成了过程模型、数据模型和参数模型的分层贝叶斯方法被用于模拟预测森林的未来状态^[115],然而此方法存在着过程模型产生的误差、量测误差、个体随机误差、初值条件误差和未来情景变量产生的误差。耦合森林景观模型和森林过程模型对森林景观对全球气候变化响应的模拟过程中却发现,森林类型构成预测的不确定性主要根源是温度预测的不确定性,其次是有效光合辐射、CO₂ 和降水量^[116]。虽然各种景观指数描述土地覆被变化的研究已有很长历史,但量化有关景观构成和格局变化过程的定量方法却寥寥无几^[117]。虽然,全球动态植被模型(DGVM)被用于模拟亚马逊地区森林生态系统对气候变化的响应,但其模拟结果分析显示,由于 DGVM 忽视了许多重要过程,它低估了土壤湿度的影响,高估了气温的作用,导致未来 CO₂ 驱动的生物量模拟有很大不确定性^[118],而且运用 DGVM 修订版在美国的案例研究也发现了类似问题^[119]。Alkemade 等人^[28]建立了分析气候变化与生物多样性的关系模型,但由于没有考虑极端天气事件的影响,导致存在很大的不确定性。

科学合理、精确可靠地定量模拟全球气候变化对陆地生态系统的影响机理和过程,不仅需要构建一个能够保证精度和速度的综合定量分析模型,还需要构建能够快速融合和同化地面实测数据、遥感数据和统计数据等多元、多时空分辨率数据,具有高效快速模拟功能的陆地表层模拟方法体系和平台。目前,基于空间对地观测数据和地面实测数据一体化的陆地表层要素建模方法尚处于初级研究阶段,其主要方法过程包括:首先对土地覆被进行监督分类;其次运用遥感数据量化模型的一部分参数或变量,而其余部分参数/变量则由地面实测数据量化;再次通过建立地面实测数据与卫星遥感反演参数的统计关系,实现地球表层环境要素的模拟分析。

描述沿环境梯度(例如,海拔高度、温度、水合养分等)植被分布格局的经典方法都基于地面采样数据。虽然,这种方法给出了采样断面的详细信息,但

不能提供生态过程和空间格局研究所需要的空间连续信息. 卫星遥感虽然可连续地观测植被的空间格局, 但很难观测植被的细节属性信息、不能识别植被群落的许多重要生态属性^[120]. 为了克服地面采样数据和卫星遥感数据在植被空间分布制图中的缺陷, Arieira 等人^[121]运用泊松相关法分析了卫星遥感数据反演变量与地面实测数据的线性关系. Emili 等人^[122]提出了以地面实测值的内插为背景, 并在有卫星遥感数据地区进行更新的方案, 也就是以地面实测数据为辅助数据进行遥感反演的方案. 研究表明, 在地面实测点比较稀疏的情况下, 卫星遥感数据的作用尤为明显.

净初级生产力(NPP)和净生态系统交换(NEE)是认识森林生态系统功能和全球碳循环过程的最基本参数. 因此, 如何准确地模拟这些参数, 一直是森林生态系统对气候变化响应研究的关键科学问题. Chiesi 等人^[123]通过集成陆地生态系统过程模型(BIOME-BGC)和碳固定模型(C-Fix), 实现了运用卫星遥感数据和地面实测数据对总初级生产力和净生态系统交换的模拟分析. 虽然, C-Fix 模型能够通过综合卫星遥感的归一化植被指数和地面实测的气象数据, 计算森林的总初级生产力, 但此模型不能准确估算自养呼吸和异养呼吸. 而 BIOME-BGC 模型则通过运行常规的地面气象数据、土壤肥力和植被条件, 模拟自养和异养呼吸及净生态系统交换.

土壤质量和水资源定量评估不仅是生态安全的重要内容, 也是粮食生产的关键影响因子. Tobin 和 Bennett^[124]分别运用地面雨量测量器数据和卫星遥感降雨量数据运行土壤与水评估模型(SWAT)的模拟结果对比显示: 通过运用卫星遥感降雨量数据可以得到合理的模拟结果; 然而在雨量测量器网足够密的地区, 运行地面雨量测量器数据会得到更好的结果. 但是, 在雨量测量器网密度比较稀疏的地区, 需要地面雨量测量器数据和卫星遥感降雨量数据的集成.

在植物光合作用与呼吸作用分析模型(VPRM)中, 卫星数据提供了总初级生产力的空间和物候变化信息, 模型的参数则由地面通量塔的涡度相关数据确定^[125]. 为了给北方常绿针叶林生态过程模型提供输入数据, 卫星遥感数据和地面实测叶面积指数及林木覆盖度数据被用于生成最大生长季叶面积指数图^[126]. 在叙利亚东南部生物量和产草量估算中^[127], 卫星遥感数据被用于植被分类, 每种植被类型的地

上生物量和产草量通过采样数据插值获取. Virtanen 等人^[128]使用相对稀少的地面参考数据和卫星遥感数据, 通过监督分类方法对北极地区植被和土地覆被进行分类. 通过建立地面实测作物产量与卫星遥感植被指数的统计关系, 实现作物产量空间制图的分析结果表明^[129], 以植被指数为辅助数据的作物产量制图精度远高于仅用地面实测数据内插得到的作物产量图.

5 结论与展望

森林、农田和草地生态系统是我国最主要的三大生态系统类型. 因此, 开展森林、农田和草地生态系统组成、结构及功能对气候变化的响应机理研究, 研发原创性典型陆地生态系统的模拟分析平台, 不仅是国家应对全球变化的科学需求和国家生态系统恢复建设与生态安全保护政策制定的应用需求, 更是国家保障粮食安全的重大战略需求.

5.1 典型陆地生态系统对气候变化响应的定量研究展望

我国在森林、农田和草地生态系统对气候变化响应的定量研究方面, 虽然取得了系列研究成果, 但与国外相比还存在一定差距. 主要表现在研究过程中, 对我国森林、农田和草地生态系统特点及其差异特征认识不足, 缺乏对森林、农田和草地生态系统的代表性和特殊性进行充分考虑, 而且针对不同森林、农田和草地生态系统类型对气候变化响应机理的研究内容和研究对象的广度和深度不够.

(1) 森林生态系统. 对我国过去几十年积累的森林资源清查数据、遥感调查数据、生态定位观测数据和林业生态工程、林火、森林病虫鼠害等监测数据的利用效率不高, 致使关于我国森林生态系统对气候变化响应机理的研究深度和准确性不够; 没有充分发挥我国丰富的森林生态系统类型和气候变化类型的作用, 缺乏不同时空尺度上的森林生态系统对气候变化响应机理的耦合研究, 从而无法实现不同尺度和不同类型的森林生态系统对气候变化响应在时间和空间尺度上的有机耦合.

(2) 农田生态系统. 如果要对农业受气候变化影响及其响应的定量分析模拟, 必须在研究过程中, 充分集成和整合卫星遥感数据、众多野外试验站点数据、广泛的实地调研数据和部门统计数据, 针

对农业生态系统的变化过程和基本特征, 深入分析农作物生产驱动因子对气候变化的响应机理, 定量分析农业生态系统与大气环境之间的地气交互与耦合机理, 以及定量评估极端气候事件对农业生产的影响, 从而定量揭示气候变化作用下农业生态系统的变化规律和农业生态系统对气候变化的响应机理, 最终实现对不同时空尺度上的农业生态系统受气候变化的影响及其响应进行全面的定量模拟和综合评估, 从而为国家建立农业生态补偿和布局优化机制, 以及建立国家粮食安全保障体系提供有力支持。

(3) 草地生态系统. 如果要想实现多尺度草地生态系统对气候变化响应的定量分析, 必须深入开展草地生态系统的草种、光、热、水分、格局、生物量、有机碳库动态平衡及其对气候变化的响应机理研究, 定量评估气候变化对草种分布格局、生长过程及其产量的影响。

(4) 极端天气事件对典型生态系统影响的定量分析. 极端气候事件对森林、农田和草地生态系统影响的定量分析和研究目前更是处于初步认识阶段。极端气候事件频率和强度的增加, 将会引起森林和草地灾害(火灾、病虫害等)发生频率与强度的增加, 从而危及森林生态系统与草地生态系统的安全, 进一步增加陆地温室气体排放^[130]。譬如, 受拉尼娜现象的影响, 2008 年初我国南方雪灾造成南方林区大量树木树枝或树冠折断, 森林中地表易燃、可燃物增加 2~10 倍, 平均地表可燃物载量超过 50 t/hm², 甚至高达 100 t/hm², 导致当年南方林区森林火灾远远多于常年, 其中湖南 2008 年 3 月份的火灾次数超过 1999~2007 年 3 月份火灾次数的总和, 是 3 月份平均火灾次数的 10.86 倍^[131]。

在进行森林、农田和草地生态系统对气候变化响应的定量研究中, 只有分别以全国、区域、局地等不同尺度森林、农田和草地生态系统类型为对象, 以地面调查、遥感观测和模型模拟为主要手段, 结合不同生态系统类型的特点, 采用长期观测与短期调查相结合, 才能够深入了解和认知生态系统关键要素组成与结构、生态系统活力和自然灾害与气候变化的关系, 并构建相应的综合定量评价模型, 从而实现对未来气候变化背景下典型陆地生态系统对生态环境影响的趋势进行定量刻画, 进而定量揭示森林、农田和草地生态系统对气候变化响应机理, 最终为国家应对气候变化、生态安全和粮食安全的重大需求提供辅

助决策依据。

5.2 空地一体化陆表要素建模方法

针对 20 世纪 60 年代后期以来困扰曲面建模的误差问题和多尺度问题, 发展起来了一种基于微分几何学曲面理论的高精度曲面建模(HASM)方法^[132,133]。数值实验和实证研究表明, HASM 方法的模拟精度相对于传统方法有大幅度提高^[134~139]。HASM 方法的进一步完善需要从空间观测数据的类型出发, 针对不同目标曲面和地面实测数据的具体特征差异, 解决陆表本质特征捕捉理论问题; 需要发展基于有限元的自适应方法, 解决处理不规则区域和空间变异较大曲面的理论问题; 需要实现与全球植被动态模型、全球陆地生态系统食物供给动态模型、全球人口增长及其空间分布动态模型的完全耦合。另外, 定量模拟气候变化对陆地生态系统的影响过程是一个超级复杂的科学问题, 牵涉到众多的地学生态参数问题, 而每一个参数都将包括遥感、地面观测、地面监测、统计等多源、多尺度和多分辨率的海量数据, 以及复杂的运算过程。因此, 研发图形处理器(GPU)加速和高性能计算机群标准消息传递界面(MPI)加速的 HASM 并行算法, 将有利于解决复杂计算与实时可视化中面临的计算速度问题。

5.3 典型陆地生态系统模拟分析平台的构建

近几十年来, 随着知识、数据、模型的积累和计算机技术的迅速发展, 出现了许多综合模拟分析平台。然而, 以生态系统对全球气候变化的响应机理为基础、集成空间对地观测数据和地面实测数据的多尺度生态安全和粮食安全综合模拟分析平台, 到目前为止, 仍是亟待填补的空白。譬如, 在法国西南部, 通常使用基于简单农业和自然系统的决策支持系统(RIO)来估算农业灌溉水的需求, 但其只适用于常规年份, 不能在有极端气象事件发生的年份使用。为了弥补 RIO 的缺陷, Leenhardt 等人^[140]通过集成生物决策模型与空间数据库, 发展了用于预测灌溉用需求量的模拟平台(ADEAUMIS)。为了支持城市未来的可持续发展规划, Halatsch 等人^[141]研发了瑞士理工大学(ETH)未来城市模拟平台, 主要用于复杂城市系统的分析、模拟和可视化, 包括理论框架、新型硬件设施和新的软件系统; 由于实现完整生产力试验过程模拟的成本太高、花费时间太长, 一般多采用数值模

拟方法. 但数值模拟只考虑了过程的几个方面, 简化了多个尺度的相互作用, 结果忽略了许多关键要素的作用. 因此, 为了克服数值模拟的这些缺陷, Beer 等人^[142]研发了产量智能模拟平台. 这个平台需要多领域的专家知识, 每个专家至少精通一个模拟工具所对应的领域. 而且在技术层面, 所有模拟模型在语义上相互适应, 数据与各种模拟工具完全匹配. 虽然由于智能体模型可以表达复杂环境相互作用的多个层面, 已在复杂系统研究中得到广泛应用, 但是, 由于缺乏支持建模工作的模拟平台, 在大多数智能体模型中, 只描述简单的离散环境和仅仅考虑了相互作用的一个层面. 为此, Taillandier 等人^[143]开发了集地理信息系统与多智能体建模于一体的模拟平台(GAMA), 集成了地理信息系统和数据挖掘的主要功能.

综上所述, 在建立由长期监测数据、样带调查数据、固定样地实测数据、野外科学实验研究数据等地面实测数据库, 以及长时间序列全球尺度遥感数据、统计数据和模型模拟数据组成的陆地生态系统参数数据库的基础上, 构建和完善全球植被动态模型、全球陆地生态系统食物供给动态模型、全球人口增长及

其空间分布动态模型等陆地生态系统动态模拟的核心模型, 原创性地建立以遥感数据或模拟数据为驱动场、以地面实测数据为优化控制条件的典型陆地生态系统模拟分析平台, 是在全球、区域、国家及局地等不同空间尺度上, 实现定量模拟典型陆地生态系统对气候变化响应的机理和响应过程, 揭示不同时空尺度的森林、农田和草地生态系统与气候变化的相互作用何用和互馈关系, 综合评估全球气候变化背景下的陆地生态系统时空变化和演替亟需解决的科学问题和关键研究内容, 从而为国家制定减缓和适应气候变化政策, 构建生态安全和粮食安全保障体系提供科学技术支撑.

总之, 要实现全球气候变化与我国陆地生态系统的定量研究, 必须深入研究我国森林、农田和草地等典型陆地生态系统的基本特征、变化过程和规律, 定量评估气候变化对生态系统组成、结构和功能的影响, 揭示其对气候变化的响应机理, 构建典型陆地生态系统定量模拟分析平台, 从而实现全球、国家、区域、局地等多尺度陆地生态系统的情景模拟预测. 最终才能够从全球视角为保障国家粮食安全和区域生态安全的技术与政策体系提供科学依据和决策参考.

参考文献

- 1 叶笃正. 中国的全球变化预研究. 北京: 气象出版社, 1992
- 2 叶笃正, 符淦斌, 董文杰. 全球变化科学进展与未来趋势. 地球科学进展, 2002, 17: 467-469
- 3 Emanuel W R, Shugart H H, Stevenson M P. Climatic change and the broad scale distribution of terrestrial ecosystems complexes. Clim Change, 1985, 7: 29-43
- 4 Rik L, Bas E. Another reason for concern: Regional and global impacts on ecosystems for different levels of climate change. Glob Environ Change, 2004, 14: 219-228
- 5 Dobson A P, Bradshaw A D, Baker A J M. Hopes for the future: Restoration ecology and conservation biology. Science, 1997, 277: 515-521
- 6 Adger W N, Brown K. Land Use and the Causes of Global Warming. New York: John Wiley & Sons, 1994
- 7 秦大河, 陈振林, 罗勇, 等. 气候变化科学的最新认知. 气候变化研究进展, 2007, 3: 63-73
- 8 秦大河, 罗勇, 陈振林, 等. IPCC 第四次评估综合报告解析. 气候变化研究进展, 2007, 3: 311-314
- 9 吴国雄, 李建平, 周天军, 等. 影响我国短期气候异常的关键区: 亚印太交汇区. 地球科学进展, 2006, 21: 1109-1118
- 10 王斌, 周天军, 俞永强. 地球系统模式发展展望. 气象学报, 2008, 66: 857-869
- 11 Pastor J, Post W M. Response of northern forests to CO₂-induced climate change. Nature, 1988, 334: 55-58
- 12 Wright S J. Tropical forests in a changing environment. Trends Ecol Evol, 2005, 20: 553-560
- 13 Cramer W, Bondeau A, Woodward F I, et al. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: Results from six dynamic global vegetation models. Glob Change Biol, 2001, 7: 357-373
- 14 Clark D A. Detecting tropical forests' responses to global climatic and atmospheric change: Current challenges and a way forward. Biotropica, 2007, 39: 4-19
- 15 European Environment Agency. Impacts of Europe's changing climate—An indicator-based assessment. Technical Report, EEA&OPOCE, 2004

- 16 Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007
- 17 Allen C D, Macalady A K, Chenchouni H, et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecol Manag*, 2010, 259: 660–684
- 18 Ise T, Moorcroft P R. Simulating boreal forest dynamics from perspectives of ecophysiology, resource availability, and climate change. *Ecol Res*, 2010, 25: 501–511
- 19 Pitman A J, Narisma G T, McAneney J. The impact of climate change on the risk of forest and grassland fires in Australia. *Clim Change*, 2007, 84: 383–401
- 20 Urban D L, Harmon M E, Halpern C B. Potential response of Pacific Northwestern forests to climatic change effects of stand age and initial composition. *Clim Change*, 1993, 23: 247–266
- 21 Flannigan M D, Woodward F I. Red pine abundance—Current climatic control and responses to future warming. *Can J For Res*, 1994, 24: 1166–1175
- 22 Sykes M T, Prentice I C. Boreal forest futures-modeling the controls on tree species range limits and transient responses to climate change. *Water Air Soil Pollut*, 1995 82: 415–428
- 23 Dixon R K, Wlsniewski J. Global forest systems: An uncertain response to atmospheric pollutants and global climate change? *Water Air Soil Pollut*, 1995, 85: 101–110
- 24 Leathwick J R, Whitehead D, McLeod M. Predicting changes in the composition of New Zealand's indigenous forests in response to global warming: A modeling approach. *Environ Softw*, 1996, 11: 81–90
- 25 Iverson L R, Prasad A. Predicting abundance of 80 tree species following climate change in the eastern United States. *Ecol Monogr*, 1998, 68: 465–485
- 26 He H S, Mladenoff D J, Crow T R. Linking an ecosystem model and a landscape model to study forest species response to climate warming. *Ecol Model*, 1999, 112: 213–233
- 27 Scheller R M, Mladenoff D J. A forest growth and biomass module for a landscape simulation model, LANDIS: Design, validation, and application. *Ecol Model*, 2004, 180: 211–229
- 28 Alkemade R, Bakkenes M, Eickhout B. Towards a general relationship between climate change and biodiversity: An example for plant species in Europe. *Reg Environ Change*, 2011, 11(Suppl 1): S143–S150
- 29 Yu M, Gao Q, Liu Y H, et al. Responses of vegetation structure and primary production of a forest transect in eastern China to global change. *Glob Ecol Biogeogr*, 2002, 11: 223–236
- 30 Wang X D, Cheng G W, Zhong X H. Assessing potential impacts of climatic change on subalpine forests on the eastern Tibetan Plateau. *Clim Change*, 2011, 108: 225–241
- 31 Canadell J G, Kirschbaum M U F, Kurz W A, et al. Factoring out natural and indirect human effects on terrestrial carbon sources and sinks. *Environ Sci Policy*, 2007, 10: 370–384
- 32 McMahon S M, Dietze M C, Hersh M H, et al. A predictive framework to understand forest responses to global change. *Ann NY Acad Sci*, 2009, 1162: 221–236
- 33 方精云. 全球生态学: 气候变化与生态响应. 北京: 高等教育出版社, 2000
- 34 延晓冬, 赵士洞, 于振良. 中国东北森林生长演替模拟模型及其在全球变化研究中的应用. *植物生态学报*, 2000, 24: 1–8
- 35 赵宗慈. 模拟温室效应对我国气候变化的影响. *气象*, 1989, 15: 9–13
- 36 刘世荣, 郭泉水, 王兵. 中国森林生产力对气候变化响应的预测研究. *生态学报*, 1998, 18: 178–483
- 37 丁一汇. 人类活动与全球气候变化及其对水资源的影响. *中国水利*, 2008, 2: 21–27
- 38 丁一汇. 季节气候预测的进展和前景. *气象科技进展*, 2011, 1: 14–27
- 39 王亚军, 陈发虎, 勾晓华. 利用树木年轮资料重建祁连山中段春季降水的变化. *地理科学*, 2001, 21: 373–377
- 40 吴祥定. 树木年轮与气候变化. 北京: 气象出版社, 1990
- 41 邵雪梅, 吴祥定. 利用树轮资料重建长白山区过去气候变化. *第四纪研究*, 1997, 1: 76–85
- 42 王婷, 于丹, 李江凤, 等. 树木年轮宽度与气候变化关系研究进展. *植物生态学报*, 2003, 27: 23–33
- 43 梁尔源, 胡玉熹, 林金星. CO₂浓度加倍对辽东栋维管组织结构的影响. *植物生态学报*, 2000, 24: 506–510
- 44 徐雨晴, 陆佩玲, 于强. 近 50 年北京树木物候对气候变化的响应. *地理研究*, 2005, 24: 412–420
- 45 李克让, 陈育峰, 黄玫, 等. 气候变化对土地覆被变化的影响及其反馈模型. *地理学报*, 2000, 20: 57–63
- 46 张志强, 孙成权. 全球变化研究十年新进展. *科学通报*, 1999, 44: 464–477
- 47 Katz R W. Assessing the impact of climatic change on food production. *Clim Change*, 1977, 1: 85–96
- 48 Adams R M, Rosenzweig C, Peart R M, et al. Global climate change and US agriculture. *Nature*, 1990, 345: 219–224

- 49 Dai X S, Ding Y H. A modeling study of climate change and its implication for agriculture in China, Part II: The implication of climate change for agriculture in China. *Adv Atmos Sci*, 1994, 11: 499–506
- 50 Smit B, Cai Y L. Climate change and agriculture in China. *Glob Environ Change*, 1996, 6: 205–214
- 51 El-Shajxr H M, Rosenzweig C, Iglesias A, et al. Impact of climate change on possible scenarios for Egyptian agriculture in the future. *Mitig Adapt Strat Gl*, 1997, 1: 233–250
- 52 Mizina S V, Smith J B, Gossen E, et al. An evaluation of adaptation options for climate change impacts on agriculture in Kazakhstan. *Mitig Adapt Strat Gl*, 1999, 4: 25–41
- 53 Reilly J, Tubiello F, McCarl B, et al. U.S. agriculture and climate change: New results. *Clim Change*, 2003, 57: 43–69
- 54 Stuczynski T, Demidowicz G, Deputat T, et al. Adaptation scenarios of agriculture in Poland to future climate changes. *Environ Mon Assess*, 2000, 61: 133–144
- 55 Sivakumar M V K, Das H P, Brunini O. Impacts of present and future climate variability and change on agriculture and forestry in the arid and semi-arid tropics. *Clim Change*, 2005, 70: 31–72
- 56 Motha R P, Baier W. Impacts of present and future climate change and climate variability on agriculture in the temperate regions: North America. *Clim Change*, 2005, 70: 137–164
- 57 Thomson A M, Izaurralde R C, Rosenberg N J, et al. Climate change impacts on agriculture and soil carbon sequestration potential in the Huang-Hai Plain of China. *Agr Ecosyst Environ*, 2006, 114: 195–209
- 58 Mall R K, Singh R, Gupta A, et al. Impact of climate change on Indian agriculture: A review. *Clim Change*, 2006, 78: 445–478
- 59 Olesen J E, Carter T R, Díaz-Ambrona C H, et al. Uncertainties in projected impacts of climate change on European agriculture and terrestrial ecosystems based on scenarios from regional climate models. *Clim Change*, 2007, 81: 123–143
- 60 Tingem M, Rivington M. Adaptation for crop agriculture to climate change in Cameroon: Turning on the heat. *Mitig Adapt Strat Gl*, 2009, 14: 153–168
- 61 Stöckle C O, Nelson R L, Higgins S, et al. Assessment of climate change impact on Eastern Washington agriculture. *Clim Change*, 2010, 102: 77–102
- 62 Vano J A, Scott M J, Voisin N, et al. Climate change impacts on water management and irrigated agriculture in the Yakima River Basin, Washington, USA. *Clim Change*, 2010, 102: 287–317
- 63 Al-Bakri J, Suleiman A, Abdulla F, et al. Potential impact of climate change on rainfed agriculture of a semi-arid basin in Jordan. *Phys Chem Earth*, 2010, 35: 125–134
- 64 Brown I, Poggio L, Gimona A, et al. Climate change, drought risk and land capability for agriculture: Implications for land use in Scotland. *Reg Environ Change*, 2011, 11: 503–518
- 65 Steffen W, Sims J, Walcott J, et al. Australian agriculture: Coping with dangerous climate change. *Reg Environ Change*, 2011, 11: S205–S214
- 66 Bindi M, Olesen J E. The responses of agriculture in Europe to climate change. *Reg Environ Change*, 2011, 11(Suppl 1): S151–S158
- 67 Fiebig-Wittmaack M, Astudillo O, Wheaton E, et al. Climatic trends and impact of climate change on agriculture in an arid Andean valley. *Clim Change*, 2012, 111: 819–833
- 68 Petrie M D, Brunsell N A, Nippert J B. Climate change alters growing season flux dynamics in mesic grasslands. *Theor Appl Climatol*, 2012, 107: 427–440
- 69 Grasso M, Feola G. Mediterranean agriculture under climate change: Adaptive capacity, adaptation, and ethics. *Reg Environ Change*, 2012, 12: 607–618
- 70 刘纪远, 邵全琴, 延晓冬, 等. 土地利用变化对全球气候影响的研究进展与方法初探. *地球科学进展*, 2011, 26: 1015–1022
- 71 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: 754–766
- 72 郝志新, 郑景云, 陶向新. 气候变暖背景下的冬小麦种植北界研究——以辽宁省为例. *地理科学进展*, 2001, 20: 254–261
- 73 金之庆, 葛道阔, 石春林, 等. 东北平原适应全球气候变化的若干粮食生产对策的模拟研究. *作物学报*, 2002, 28: 24–31
- 74 郭海英, 赵建萍, 索安宁, 等. 陇东黄土高原农业物候对全球气候变化的响应. *自然资源学报*, 2006, 21: 608–614
- 75 王位泰, 黄斌, 张天锋, 等. 陇东黄土高原冬小麦生长对气候变暖的响应特征. *干旱地区农业研究*, 2007, 25: 153–157
- 76 曹艳芳, 古月, 徐健, 等. 内蒙古近 47 年气候变化对春小麦生育期的影响. *内蒙古气象*, 2009, 4: 22–25
- 77 杨晓光, 刘志娟, 陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 I. 气候变暖对中国种植制度北界和粮食产量可能影响的分析. *中国农业科学*, 2010, 43: 329–336
- 78 杨晓光, 刘志娟, 陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 VI. 未来气候变化对中国种植制度北界的可能影响. *中国农业科学*, 2011, 44: 1562–1570
- 79 杨建莹, 梅旭荣, 刘勤, 等. 气候变化背景下华北地区冬小麦生育期的变化特征. *植物生态学报*, 2011, 35: 623–631
- 80 方修琦, 盛静芬. 从黑龙江省水稻种植面积的时空变化看人类对气候变化影响的适应. *自然资源学报*, 2000, 15: 213–217

- 81 葛道阔, 金之庆, 石春林, 等. 气候变化对中国南方水稻生产的阶段性影响及适应性对策. 江苏农业学报, 2002, 18: 1–8
- 82 杨沈斌, 申双和, 赵小艳, 等. 气候变化对长江中下游稻区水稻产量的影响. 作物学报, 2010, 36: 1519–1528
- 83 马树庆, 王琪, 罗新兰. 基于分期播种的气候变化对东北地区玉米(*Zea mays*)生长发育和产量的影响. 生态学报, 2008, 28: 2131–2139
- 84 朱大威, 金之庆. 气候及其变率变化对东北地区粮食生产的影响. 作物学报, 2008, 34: 1588–1597
- 85 McCarl B A. Analysis of climate change implications for agriculture and forestry: An interdisciplinary effort. *Clim Change*, 2010, 100: 119–124
- 86 Piao S L, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 2010, 467: 43–51
- 87 葛全胜, 王绍武, 方修琦. 气候变化研究中若干不确定性的认识问题. 地理研究, 2010, 29: 191–203
- 88 Sternberg M, Brown V K, Masters G J, et al. Plant community dynamics in a calcareous grassland under climate change manipulations. *Plant Ecol*, 1999, 143: 29–37
- 89 Coffin D P, Lauenroth W K. Transient responses of North-American grasslands to changes in climate. *Clim Change*, 1996, 34: 269–278
- 90 Rounsevell M D A, Brignall A P, Siddons P A. Potential climate change effects on the distribution of agricultural grassland in England and Wales. *Soil Use Manage*, 1996, 12: 44–51
- 91 Grime J P, Brown V K, Thompson K, et al. The response of two contrasting limestone grasslands to simulated climate change. *Science*, 2000, 289: 762–764
- 92 Silletti A, Knapp A. Long-term responses of the grassland co-dominants *Andropogon gerardii* and *Sorghastrum nutans* to changes in climate and management. *Plant Ecol*, 2002, 163: 15–22
- 93 Zha Y, Gao J, Zhang Y. Grassland productivity in an alpine environment in response to climate change. *Area*, 2005, 37: 332–340
- 94 Piao S L, Wang X H, Ciais P, et al. Change in satellite derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006. *Glob Change Biol*, 2006, 17: 3228–3239
- 95 Hopkins A, Del Prado A. Implications of climate change for grassland in Europe: Impacts, adaptations and mitigation options: A review. *Grass Forage Sci*, 2007, 62: 118–126
- 96 Gao Q Z, Li Y, Wan Y F, et al. Dynamics of alpine grassland NPP and its response to climate change in Northern Tibet. *Clim Change*, 2009, 97: 515–528
- 97 Li H M, Ma Y H, Bai Y F. Using comprehensive and sequential vegetation classification system to predict the influence of climate change on vegetation succession of alpine grassland of Qinghai Plateau. *Front Earth Sci China*, 2010, 4: 99–104
- 98 Qian S, Fu Y, Pan F F. Climate change tendency and grassland vegetation response during the growth season in Three-River Source Region. *Sci China Earth Sci*, 2010, 53: 1506–1512
- 99 Ma W H, Liu Z L, Wang Z H, et al. Climate change alters interannual variation of grassland aboveground productivity: Evidence from a 22-year measurement series in the Inner Mongolian grassland. *J Plant Res*, 2010, 123: 509–517
- 100 Di Falco S, Yesuf M, Kohlin G, et al. Estimating the impact of climate change on agriculture in low-income countries: Household level evidence from the Nile Basin, Ethiopia. *Environ Resour Econ*, 2012, 52: 457–478
- 101 周华坤, 周立, 赵新全, 等. 青藏高原高寒草甸生态系统稳定性研究. 科学通报, 2006, 51: 63–69
- 102 Epstein H E, Gill R A, Paruelo J M, et al. The relative abundance of three plant functional types in temperate grasslands and shrublands of North and South America: Effects of projected climate change. *J Biogeogr*, 2002, 29: 875–888
- 103 Xu X L, Liu W, Kiely G. Modeling the change in soil organic carbon of grassland in response to climate change: Effects of measured versus modelled carbon pools for initializing the Rothamsted Carbon model. *Agr Ecosyst Environ*, 2011, 140: 372–381
- 104 Finger R, Calanca P. Risk management strategies to cope with climate change in grassland production: An illustrative case study for the Swiss plateau. *Reg Environ Change*, 2011, 11: 935–949
- 105 邓慧平, 刘厚凤, 祝廷成. 松嫩草地 40 余年气温、降水变化及其若干影响研究. 地理科学, 1999, 19: 220–224
- 106 戴声佩, 张勃, 王强, 等. 祁连山草地植被 NDVI 变化及其对气温降水的旬响应特征. 资源科学, 2010, 32: 1769–1776
- 107 张戈丽, 徐兴良, 周才平, 等. 近 30 年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应. 地理学报, 2011, 66: 47–58
- 108 张锐, 刘普幸, 张克新. 新疆草地气候生产潜力变化特征及对气候响应的预测研究. 中国沙漠, 2012, 32: 181–187
- 109 王根绪, 胡宏昌, 王一博, 等. 青藏高原多年冻土区典型高寒草地生物量对气候变化的响应. 冰川冻土, 2007, 29: 671–610
- 110 任继周, 梁天刚, 林慧龙, 等. 草地对全球气候变化的响应及其碳汇潜势研究. 草业学报, 2011, 20: 1–22
- 111 Andersson K, Evans T P, Richards K R. National forest carbon inventories: Policy needs and assessment capacity. *Clim Change*, 2009, 93: 69–101
- 112 Mather A S, Needle C L, Fairbairn J. The human drivers of global land cover change: The case of forests. *Hydrol Process*, 1998, 12: 1983–1994

- 113 Shafer S L, Bartlein P J, Thompson R S. Potential changes in the distributions of Western North America tree and shrub taxa under future climate scenarios. *Ecosystems*, 2001, 4: 200–215
- 114 Iverson L R, Schwartz M W, Prasad A M. Potential colonization of newly available tree-species habitat under climate change: An analysis for five eastern US species. *Landsc Ecol*, 2004, 19: 787–799
- 115 Clark J S, Dietze M, Agarwal P. Resolving the biodiversity debate. *Ecol Lett*, 2007, 10: 647–662
- 116 Xu C G, Gertner G Z, Scheller R M. Uncertainties in the response of a forest landscape to global climatic change. *Glob Change Biol*, 2009, 15: 116–131
- 117 Xu C G, Gueneralp B, Gertner G Z, et al. Elasticity and loop analyses: Tools for understanding forest landscape response to climatic change in spatial dynamic models. *Landsc Ecol*, 2010, 25: 855–871
- 118 Galbraith D, Levy P E, Sitch S, et al. Multiple mechanisms of Amazonian forest biomass losses in three dynamic global vegetation models under climate change. *New Phytol*, 2010, 187: 647–665
- 119 Mao J F, Wang B, Dai Y J, et al. Improvements of a dynamic global vegetation model and simulations of carbon and water at an up-land-oak forest. *Adv Atmos Sci*, 2007, 24: 311–322
- 120 Chambers J Q, Asner G P, Morton D C, et al. Regional ecosystem structure and function: Ecological insights from remote sensing of tropical forests. *Trends Ecol Evol*, 2007, 22: 414–423
- 121 Arieira J, Karssenberg D, de Jong S M, et al. Integrating field sampling, geostatistics and remote sensing to map wetland vegetation in the Pantanal, Brazil. *Biogeosciences*, 2011, 8: 667–686
- 122 Emili E, Popp C, Wunderle S, et al. Mapping particulate matter in alpine regions with satellite and ground-based measurements: An exploratory study for data assimilation. *Atmos Environ*, 2011, 45: 4344–4353
- 123 Chiesi M, Fibbi L, Genesio L, et al. Integration of ground and satellite data to model Mediterranean forest processes. *Int J Appl Earth Obs*, 2011, 13: 504–515
- 124 Tobin K J, Bennett M E. Using SWAT to model streamflow in two river basins with ground and satellite precipitation data. *J Am Water Resour As*, 2009, 45: 253–271
- 125 Matross D M, Andrews A, Pathmathevan M, et al. Estimating regional carbon exchange in New England and Quebec by combining atmospheric, ground-based and satellite data. *Tellus B*, 2006, 58: 344–358
- 126 Berterretche M, Hudak A T, Cohen W B, et al. Comparison of regression and geostatistical methods for mapping Leaf Area Index (LAI) with Landsat ETM+ data over a boreal forest. *Remote Sens Environ*, 2005, 96: 49–61
- 127 Hirata M, Koga N, Shinjo H, et al. Measurement of above-ground plant biomass, forage availability and grazing impact by combining satellite image processing and field survey in a dry area of north-eastern Syria. *Grass Forage Sci*, 2005, 60: 25–33
- 128 Virtanen T, Mikkola K, Nikula A. Satellite image based vegetation classification of a large area using limited ground reference data: A case study in the Usa Basin, north-east European Russia. *Polar Res*, 2004, 23: 51–66
- 129 Dobermann A, Ping J L. Geostatistical integration of yield monitor data and remote sensing improves yield maps. *Agron J*, 2004, 96: 285–297
- 130 朱建华, 侯振宏, 张治军, 等. 气候变化与森林生态系统: 影响、脆弱性与适应性. *林业科学*, 2007, 43: 138–145
- 131 赵凤君, 王明玉, 舒立福, 等. 气候变化对林火动态的影响研究进展. *气候变化研究进展*, 2009, 5: 50–55
- 132 Yue T X, Du Z P, Song D J, et al. A new method of surface modeling and its application to DEM construction. *Geomorphology*, 2007, 91: 161–172
- 133 Yue T X. *Surface Modelling: High Accuracy and High Speed Methods*. New York: Talyor & Francis, 2010
- 134 Yue T X, Song D J, Du Z P, et al. High-accuracy surface modelling and its application to DEM generation. *Int J Remote Sens*, 2010, 31: 2205–2226
- 135 Yue T X, Wang S H. Adjustment computation of HASM: A high-accuracy and high-speed method. *Int J Geogr Inf Sci*, 2010, 24: 1725–1743
- 136 Yue T X, Chen C F, Li B L. An adaptive method of high accuracy surface modeling and its application to simulating elevation surfaces. *T GIS*, 2010, 14: 615–630
- 137 Yue T X, Chen C F, Li B L. A high accuracy method for filling SRTM voids and its verification. *Int J Remote Sens*, 2012, 33: 2815–2830
- 138 Yue T X, Zhao N, Yang H, et al. The multi-grid method of high accuracy surface modelling and its validation. *T GIS*, 2013, doi: 10.1111/tgis.12019
- 139 Yue T X, Zhao N, Ramsey R D, et al. Climate change trend in China, with improved accuracy. *Clim Change*, 2013, doi: 10.1007/S10584-013-0785-5
- 140 Leenhardt D, Trouvat J L, Gonzalès G, et al. Estimating irrigation demand for water management on a regional scale I. ADEAUMIS, a simulation platform based on bio-decisional modelling and spatial information. *Agr Water Manage*, 2004, 68: 207–232

- 141 Halatsch J, Kunze A, Burkhard R, et al. ETH Future Cities Simulation Platform. In: Konsorski-Lang S, Hampe M, eds. *The Design of Material, Organism, and Minds*. Berlin: Springer-Verlag, 2010. 95–108
- 142 Beer T, Meisen T, Reinhard R, et al. The virtual production simulation platform: From collaborative distributed simulation to integrated visual analysis. *Prod Eng Res Devel*, 2011, 5: 383–391
- 143 Taillandier P, Vo D A, Amouroux E, et al. GAMA: A simulation platform that integrates geographical information data, agent-based modeling and multi-scale control. In: Desai N, Liu A, Winikoff M, eds. *Principles and Practice of Multi-Agent Systems*. Berlin: Springer-Verlag, 2012. 242–258

A review of responses of typical terrestrial ecosystems to climate change

YUE TianXiang & FAN ZeMeng

State Key Laboratory of Resources and Environment Information System, Institute of Geographical Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Analyses of ecosystem change trends since the 1920s have indicated that forest, farmland and grassland ecosystems have had strong responses to climate change. Many ecosystems have obviously changed in composition, structure and distribution. Ecosystem productivity has a decreasing trend because of plant disease and insect pests, frequent occurrence of extreme weather, and increasing mortality of plant species. Scenarios of responses of typical ecosystems to climate change show that structure, distribution, species and productivity would greatly change in areas at high altitude and latitude. However, these responses are very complex, because of complex interactions among biotic communities. Understanding of ecosystem change is still very elementary. There is no definite conclusion, especially regarding impacts of climate change on plant species, extreme climate consequences, and plant diseases and insect pests. Comprehensive assessment of climate change effects on typical ecosystems is difficult to accomplish with current knowledge. We need to construct a platform for simulating ecosystem dynamics by integrating remote sensing and ground-truth data, based on studying the mechanisms of ecosystem response to climate change.

climate change, forest ecosystem, farmland ecosystem, grassland ecosystem, simulation platform

doi: 10.1360/972013-261