

DOI: 10.5846/stxb202201270262

倪健, 夏洁, 程琦. 中国植被地理学: 从传统植被地理学到功能植被地理学. 生态学报, 2022, 42(14): 6001-6015.

Ni J, Xia J, Cheng Q. Vegetation geography in China: from traditional vegetation geography to functional vegetation geography. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 6001-6015.

中国植被地理学: 从传统植被地理学到功能植被地理学

倪 健^{1,2,*}, 夏 洁¹, 程 琦¹

1 浙江师范大学, 化学与生命科学学院, 金华 321004

2 浙江金华山亚热带森林生态系统野外科学观测研究站, 金华 321004

摘要: 本文回顾总结了我国植被地理学发展的历史, 展望了其从传统植被地理学到功能地理学的未来研究趋势。作为研究植被地理分布规律的一门科学, 植被地理学在我国经历了与社会经济发展密切相关的四个阶段: 早期起步阶段, 主要是新中国成立前(1920 年代—1949)的植物地理学和植被地理学的零星工作; 初期成长阶段, 主要是新中国成立后至改革开放前(1949—1980)的传统植被地理学研究; 中期迅速发展阶段, 主要包括改革开放后至经济迅速发展时期(1980—2000), 在全球气候变化国际研究背景下的植被地理学研究; 近期转型与拓展阶段, 主要是国民经济平稳发展及信息时代(2000—至今), 面向全球环境变化的植被地理学研究的纵深发展。经过近百年的发展, 在植被综合区划与生态功能区划、中国植被分类系统订正、中国植被图与植被志编纂、古植被地理学、植被地理模拟预测与情景分析、植物功能性状和生态化学计量学的功能植被地理学等 6 个方面取得了可喜成果。今后, 需要在以下 4 个方面开展更广泛的精细与纵深研究: 加强更多精细化的植被地理学研究, 编纂新一代中国植被图与中国植被志; 深入开展人类干扰的植被地理学研究; 以植物性状研究为契机, 拓展宏观功能植被地理学研究; 交叉融合谱系植物地理学, 开展长期功能植被地理学研究。

关键词: 植被地理学; 中国植被; 气候变化; 人类干扰; 功能植被地理学

Vegetation geography in China: from traditional vegetation geography to functional vegetation geography

NI Jian^{1,2,*}, XIA Jie¹, CHENG Qi¹

1 College of Chemistry and Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China

2 Jinhua Mountain Observation and Research Station for Subtropical Forest Ecosystems, Jinhua 321004, China

Abstract: This paper looked back and summarized the history of the vegetation geography development in China, and looked forward its future research tendencies from traditional vegetation geography to functional vegetation geography. As a science of studying the geographical distribution of vegetation, the China's vegetation geography underwent four phases closely related to the country's socioeconomic development. The first phase is an early stage of start-up before the establishment of the new China (1920s—1949). The main works were a small amount of investigations of plant geography and vegetation geography. The second phase is an initial stage of new growth after the buildup of new China and before the reform and open of the country (1949—1980). During this stage the traditional studies of vegetation geography were still the major contents. The third phase is a mid-term development after the reform and open to the eve of the rapid economic progress (1980—2000). In this stage ecologists focused on some new vegetation geographical research under the global

基金项目: 国家自然科学基金项目(31870462); 浙江省“万人计划”项目(2018R52014)

收稿日期: 2022-01-27; **采用日期:** 2022-07-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nijian@zjnu.edu.cn

climate change. The last phase is the recent stage of transformation and prolongation in an information era with steady development of the national economy (2000—present). China's vegetation geography came into a new stage of deep growth facing the worldwide environmental changes. During the nearly 100 years, we have gained fascinating achievements in six aspects: the comprehensive vegetation regionalization and ecological function division; revision of vegetation classification of the Chinese vegetation; compilation of vegetation map and vegetation geography of China; palaeovegetation geography; simulation, prediction and scenario analysis of vegetation pattern; and functional vegetation geography based on analyses of plant functional traits and ecological stoichiometry. Hereafter, more finer and deeper research in the following four aspects needs to be paid more attention: strengthening more detailed and elaborated studies on classic vegetation geography; compiling the next-generation vegetation atlas and vegetation geography of China; carrying out the intensive study of anthropogenic vegetation geography; enhancing the investigation of functional vegetation macro-geography taking the plant trait study as an opportunity; and launching the long-term study of functional vegetation geography along with phylogeography in ways of intersection and fusion.

Key Words: vegetation geography; vegetation of China; climate change; anthropogenic disturbance; functional vegetation geography

自洪堡(Alexander von Humboldt)于19世纪早期创建生物地理学和植物地理学,海克尔(Ernst Haeckel)于19世纪中期提出生态学的概念以来,对植物与植物群落地理分布格局的研究不断发展壮大。生物地理学(Biogeography)是生物学与地理学的交叉学科,是研究地球上的生物群落及其组成成分在时间和空间上地理分布及其形成原因的一门学科,包括植物、动物、微生物等。如果按照研究对象的生物群划分,生物地理学的主要分支学科包括植物地理学、动物地理学、微生物地理学等。其中,植物地理学(Plant geography)是研究植物分布规律的科学,若按其植物学界的狭义定义,主要涉及植物种属与植物区系的地理分布与分区现状和历史变迁,以及现代和地史时期地理环境变迁在物种分布区和植物区系形成中的作用等有关植物区系地理学(Plant floristic geography)研究。若按其生态学界和地理学界的广义理解,植物地理学则包括植物区系地理学和植物生态地理学(Plant ecological geography)。后者主要研究植物种群、群落和植被类型等不同层次的地理分布格局及其驱动机制,尤其是植物群落地理学或地植物学(Plant community geography, Geobotany)与植被地理学(Vegetation geography),或者将植被地理学包括在植物群落地理学之内。总之,植被地理学尚未见清晰、明确的定义,但按照植物地理学的概念,可以定义其是研究植被地理分布规律的科学,该学科不包括物种水平的植物分布格局及其与环境的关系,仅限于植被类型的地理分布格局及其环境影响机制。因此,采用植物地理学的狭义定义,植被地理学不包含在植物地理学中,而是一个与植物地理学平行的植物生态学分支学科。植物地理学只关注物种水平和植物科属区系的地理分布,而植被地理学只关注植被类型水平的地理分布。

自洪堡时代与植被地理学相关的研究至今,经过近2个世纪的发展,全球植被地理学取得了诸多成果。我国的植被地理学研究也有近百年的历史,不仅融入全球学科的发展进程中,也为我国经济与社会发展作出了应有的贡献。因此,本文从植被地理分布的角度来回顾我国植被地理学的发展历史,并展望其未来趋势。但由于植被地理学和植物地理学的研究是交叉的,尤其在学科发展的早期二者难以相互剥离、完全隔离,因此在叙述我国植被地理学的早期发展历史时也会涉及一些植物地理学的工作。

1 中国植被地理学发展历史

中国近代植被地理学的发展大概经历了四个阶段,这些发展阶段皆与国家的经济社会发展和重要历史事件密切相关。需要说明的是,由于作者经历的限制,对于20世纪80年代中期之间的历史事件描述,主要参考两篇重要文献;一是宋永昌先生编著的《植被生态学》(第二版)第一章“绪论”中关于植被生态学在中国的发展^[1],二是中国科学院中国植被图编辑委员会编辑、张新时先生主编的《中国植被及其地理格局》第一篇“总

论”中关于中国植被制图研究简史的介绍^[2]。

1.1 早期起步阶段

我国远在 2000 多年前就有植物群落分布与土壤、地形和水分关系的论述,如《管子·地员》、《尚书·禹贡》和《诗经》等古典名籍^[1],这些早期的萌芽研究,反映了朴素的植被地理学思想。而我国近代植被地理学的工作,主要包括新中国成立前(1920 年代—1949)的植物地理学和植被地理学的零星工作。在此时期,国家战乱,社会动荡,无论是国民经济还是科学研究均非常艰辛,由此植被地理学的工作也较少,缺乏系统性。

我国早期植被地理学的工作通常与植物地理学研究同步开展,最早的植被地理学研究是钱崇澍 1927 年发表的《安徽黄山植被和区系的初步记录》^[3],以及 1932 年发表的《南京钟山之森林》^[4]和《南京钟山岩脊的植被》^[5]。

20 世纪 30 年代的工作较多,包括刘慎谔的一系列论文:《中国北部及西部植物地理概论》^[6]、《河北渤海湾沿岸植物分布之研究》^[7]、《中国南部及西南植物地理概要》^[8]、《黄山植物分布概要》^[9]。同期还有樊庆笙的《安徽九华山植生区之观察》^[10];杨承元的《西山和小五台山的森林植被》^[11];郑万钧和许绍南的《峨边森林调查报告》^[12]以及王启无的《云南植被的初步研究》^[13]等。该时期的研究主要为少数和局部地区的植物群落特征描述,以及植物地理方面的工作,还不是真正意义上的植被地理学研究。

进入 20 世纪 40 年代,科学家们开始关注植被与环境之间的关系,发表了一些较大区域的森林植被地理分布调查结果。如,侯学煜的《贵州中北部植物分布与土壤》^[14],张宏达的《西沙群岛的植被》^[15],郑万钧的《湖南莽山森林之观察》^[16],以及邓叔群《甘肃的森林区及其生态概况》^[17]、《藏东高原的森林地理》^[18]和《中国森林地理纲要》^[19]。

1.2 初期成长阶段

主要是新中国成立后至改革开放前(1949—1980)的传统植被地理学研究。1949 年新中国成立之初,我国面临国民经济全面恢复和发展的挑战,国家发展需求强大,但以高度集中的计划经济体制为典型特征,区域经济发展平衡,科研管理也是计划经济体制下的产物,经费以国家拨款为主。

20 世纪 50 年代新中国成立初期,我国集中开展了多次大规模自然资源综合考察和自然规划工作^[1-2],比如,华南橡胶宜林地勘察(1952—1955),黄河中游水土保持考察(1953—1955),黑龙江流域综合考察(1956—1959),西藏(1951—1976)、新疆(1956—1959)、甘肃、青海(1958—1960)等综合考察,西南(1957—1961)和华南(1958—1961)热带生物资源考察,西北和内蒙古地区沙漠综合考察(1959—1965),内蒙古与宁夏综合考察(1960—1963),以及黑龙江土地资源综合考察(1973—1977)等。

在此期间,曲仲湘等^[20]、曲仲湘和文振旺^[21-22]调查研究了南京地区的森林植被,诸多专著发表,如侯学煜《中国境内酸性土钙质土和盐碱土的指示植物》^[23],以及《植物生态地理学的内容任务概念和研究方法》^[24],钱崇澍等的《中国植被的类型》^[25]以及《中国植被区划草案》^[26],中国科学院自然区划工作委员会主编《中国植被区划》^[27],侯学煜出版《中国的植被》^[28]等著作,该时期可以说是我国植被地理学研究的春天。

而且,一大批研究所和高等院校开始设置专门的研究室,开设地植物学和植物地理学相关专业和课程,举办了一批培训班。1958 年创建《植物生态学与地植物学资料丛刊》,1963 年改为《植物生态学与地植物学丛刊》(现在《植物生态学报》前身),直到 1965 年为止,极大促进了我国植被生态学的发展^[1]。比如,该杂志 1963 年第 2 期发表了 19 篇关于植被分类与分区的论文,1964 年第 1 期发表了 12 篇植被界线问题探讨的论文,1964 年第 2 期发表了 8 篇中国植被分区论文,如侯学煜关于植被分区方案的讨论^[29-30]。还有 1952 年创刊的《植物学报》(现在 Journal of Integrative Plant Biology 前身),20 世纪 50—60 年代也发表了一些植被地理学的研究论文,如刘慎谔等关于中国植被区划的若干原则问题讨论^[31-32]。

20 世纪 60 年代中期,我国植被生态学的研究因人为原因而停滞,但仍有一批科学工作者在十分艰难条件下坚持工作。尤其是台湾地区的植被地理研究仍在进行,20 世纪 60 年代发表了较多论著,如刘棠瑞《台湾森林植物的植物地理学考察》^[33]、章乐民《红桧、台湾扁柏混交林生态之研究》^[34]、《台湾热带雨林生态之

研究》^[35]和《恒春半岛季风林生态之研究》^[36],以及柳楷等《台湾主要林型生态之调查》^[37]和《台湾植物群落分类之研究》^[38]等。直到 20 世纪 70 年代后期,随着经济建设的发展和改革开放政策的执行,我国植被生态学研究又开始了蓬勃的发展,此后 20 世纪 80—90 年代陆续出版的中国植被和各省植被,大部分是 20 世纪 50—70 年代野外调查工作的详细总结。

1980 年以吴征镒为主编的《中国植被》^[39]一书的出版,是该时期的标志性事件,标志着我国植被地理学的工作开始了一个新时代。此前此后,各省区的植被专著陆续问世,配合 20 世纪 80—90 年的一些新植被调查总结,一直延续到 21 世纪初期,如:《广东植被》^[40]、《新疆植被及其利用》^[41]、《四川植被》^[42]、《安徽植被》^[43]、《内蒙古植被》^[44]、《青海植被》^[45]、《云南植被》^[46]、《贵州植被》^[47]、《西藏植被》^[48]、《福建植被》^[49]、《湖南植被》^[50]、《台湾植被》^[51]、《河北植被》^[52]、《陕西植被》^[53]、《山东植被》^[54]、《吉林植被》^[55]、《山西植被》^[56]、《广西植被》(第一卷)^[57]和《广西植被志要》(上、下)^[58]、《海南植被志》(第一卷)^[59],以及《台湾植被志》^[60]等。还有一些区域植被研究,如《中国大兴安岭植被》^[61]、《中国小兴安岭植被》^[62]、《中国东北植被地理》^[63]。同时,不同比例尺的中国植被图(如 1:400 万)和中国植被区划图(如 1:1400 万)^[64],以及在地区性植被专著发行的同时,各省区的植被图和植被区划图也得以编辑出版。

除了全国和区域性的植被专著外,还陆续出版了一些专业性的植被专著,如 1984—2000 年间出版的《中国森林》1—4 卷^[65], 1985—2000 出版的各省森林,以及《中国森林群落分类及其群落学特征》^[66]和最近出版的第二版^[67]。还有专门的植被专著,如《红树林》^[68]、《中国常绿阔叶林》^[69]、《中国沼泽》^[70]、《中国湿地植被》^[71]和《中国的草原》^[72]等。

在这一时期,作为综合自然区划的一部分,植被地理学的植被区划研究,推动了以地理地域分异规律指导全国各地的大农业生产。例如,林学上的“适地适树”概念,就是植被地理学中植被地域分异规律的“因地制宜”式活学活用。另外,将植被地理学中的植被区划与植被分类这两种不同的研究方法进行清晰区分,也是植被地理学研究方法和方法论发展过程中的一大进步。

通过上述植被专著出版及植被制图工作,我国已基本摸清了全国植被资源状况,尤其是主要植被类型及其地理分布规律,以及不同尺度植被格局的环境控制因素,为生态环境保护和资源开发、国民经济发展规划等提供了科学依据。同时,我国学者也将植被地理学研究成果推介到国际学界,如全国植被及其地理分布^[73]、青藏高原植被及其大气环境格局控制和全国植被的关系^[74]。

1.3 中期迅速发展阶段

主要包括改革开放后的经济迅速发展时期(1980—2000),在全球气候变化国际研究背景下的植被地理学研究。1978 年,党的十一届三中全会召开,改革开放序幕拉开,我国经济体制实现了根本性创新转变,由高度集中的计划经济体制,逐步建成了通过市场的供求、价格、竞争等决定社会资源配置的社会主义市场经济体制,重点发展东部沿海地区,全国经济快速发展。1978 年全国科技大会与全国教育工作会议的召开,我国迎来了科学的春天,科技和教育事业发展进入新的历史时期。科技体制逐渐发生转变并不断深化,科学基金制开始实施,科技拨款由单纯的国家拨款,转变为以国家自然科学基金和科技部项目的申报和竞争为主的体制。同时,科研管理水平不断提高,科研评价体制也在发生变革,国家和部门人才计划实施,均对科学发展起到了极大的促进作用。

20 世纪 80 年代至 90 年代中期,传统的植被地理学工作继续延续,除了关注植被地理格局的气候驱动之外,还关注土壤在控制植被地理分布中的作用,以及与生态系统功能的联系。代表性工作有侯学煜的专著《中国植被地理及优势植物化学成分》^[75],这应该是我国生态化学计量学与植物功能性状研究的开篇之作。在《中国自然地理》系列专著中,侯学煜的《中国植被地理》^[76],是对我国植被地理学研究的阶段性集成与总结。为纪念侯学煜先生,以老一辈植被生态学家为主编辑出版了《植被生态学研究—纪念著名生态学家侯学煜教授》^[77],其中第二部分“植被生态”,发表了有关植被地理分区制图和植被分类的 18 篇重要文章。而其“大农业”观点集中体现于《生态学与大农业发展》专著^[78],农、林、牧、渔和多种经营联合统筹发展,则是将植

被地理学原理、生态系统与环境综合关系应用于大农业生产的典范。

在此期间,多部数量生态学译著的出版,包括《数学生态学引论》^[79]、《植物群落分类》^[80]、《植物群落排序》^[81],以及国内生态学家专著的出版,包括阳含熙和卢泽愚《植被生态学的数量分类方法》^[82],张金屯《植被数量生态学方法》^[83],余世孝《数学生态学导论》^[84],促进了我国植被数量生态学的发展,在植物群落排序、分类、格局分析及与环境相互关系等方面取得了重要成果,这也进一步促进了我国植被地理学研究从定性描述迈向定量分析。以张新时院士为主导的中国科学院数量生态学重点实验室(植被与环境演变国家重点实验室的前身)于1993年成立,是我国植被数量生态学发展的里程碑,将中国的植被地理学研究带入了数字化时代。

从20世纪80年代中后期,全球变化研究开始兴起,我国植被地理学工作转向全国植被与气候关系的研究,利用国际上的植被-气候分类指标和分类系统,研究全国和区域植被的地理分布格局与宏观气候的关系,从而为预测未来气候变化对植被的影响奠定基础。代表性工作有,基于Penman的可能蒸散指标^[85]、Thornthwaite的可能蒸散和湿润指数^[86]和Holdridge生命地带分类系统^[87-88],分别分析了我国植被地带的不同气候指标特征,以及基于相关统计所得气候变化背景下净初级生产力的变化。基于Kira的温暖指数、寒冷指数和湿度指数,研究东北地区植被与水热条件的关系^[89-90],中国植被分布与气候的关系及植被类型分布的气候界限^[91-93],以及东亚北纬30°地区垂直植被带地理分异^[94]。另外,方精云还以年均气温和年降水量来刻画东亚地区的植被气候类型^[95]。张新时院士领导和组织在1993年创建的国际地圈-生物圈计划(IGBP)认可的我国两条全球变化陆地样带(中国东北样带NECT和中国东部南北样带NSTEC),实现了中国植被地理学与气候变化研究的重大跨越。

在此期间,生态学定位研究开始起步,尤其是中国科学院最早于1956年建立了沙坡头沙漠研究试验站,20世纪70—80年代不断扩展其野外台站数量,1988年组建成立了中国生态系统研究网络(CERN),逐渐形成一个以农田、森林、草地、荒漠、湿地、湖泊、海洋和城市生态系统为长期监测对象,以水分、土壤、大气、生物、水域生态系统5个学科分中心和1个综合研究中心所组成的野外台站网络,原国家林业局、环保局、海洋局和农业部等部门,也建立了各自的生态系统定位研究站网络。在2005年,国家野外科学观测研究站建设启动,首批选拔了105个国家野外站,包括了53个生态系统国家野外科学观测研究站;2020年经评估调整,又新增69个国家野外科学观测研究站,包括44个生态系统野外站点。由此,一个国家生态系统观测研究网络(CNERN)逐步形成。这些野外台站及其网络的建设,为我国现代植被地理学的长期定位研究奠定了良好基础。

在20世纪末期编辑出版的一些专著或者研究进展综述文章中^[96-101],可散见上述工作的总结。

1.4 近期转型与拓展阶段

主要是国民经济平稳发展及信息时代(2000—至今),面向全球环境变化的植被地理学研究的纵深发展。从20世纪末期开始,国家先后提出了“西部大开发”、“振兴东北老工业基地”、“加快发展中部地区”等战略措施,全国经济稳定、各地区协调发展。科技体制进一步发展完善。在科技机构改革方面,技术开发类院所进行企业转制,公益类科研机构开始分类管理。科研拨款制度再深入,除了国家自然科学基金委员会、科技部等的项目竞争体制,如20世纪末期实施的973计划,近期实施的国家科技重大专项、国家重点研发计划等,科研机构还可以过技术转让、开展社会服务、开发新产品等方式积极增收,科研经费的来源渠道不断拓展。以国家自然科学基金委员会的杰出青年基金和优秀青年基金,教育部的长江学者奖励计划,组织部的国家海外高层次人才引进项目等为代表的人才计划不断完善,研究队伍不断发展壮大。一系列科技政策的调整与完善,深入推进了科技发展与创新。

随着全国经济的迅猛发展,以及数据信息时代的到来,我国植被地理学也在21世纪迎来了绝好的发展机遇,在全球环境变化、生物多样性、可持续发展的全球大背景下,多学科与多领域交叉融合,得到了全面发展与繁荣。主要体现在以下几个方面。

1.4.1 植被综合区划与生态功能区划

在单一考虑植被与气候、土壤等因素的简单植被区划的基础上,生态学工作者从 20 世纪 90 年代末期开始,尝试多种因素综合考虑(包括人类活动干扰)的植被综合区划,在新时期开始了全国生态功能区划的探索。比如,综合考虑气候、土壤、地形、植被、动植物区系等多种因子,开展了以生物多样性为目标的生态地理区划^[102],以及以生态环境建设与生态-生产范式发展为目的的西北干旱区生态区划^[103]。Fang 等^[104]考虑人类活动干扰下的原生和次生植被与气候的综合关系,对我国植被带进行了新的划分,并讨论了几条植被带的界线问题,比如秦岭-淮河不能作为亚热带植被的北界,而根据 Kira 的温暖指数,应该沿长江北岸,从杭州湾到太湖、安徽的宣城和铜陵、大别山南坡,到武汉及其西部;热带植被带仅局限于海南岛东南部和台湾岛南端的局部区域;暖温带划分为落叶阔叶疏林和常绿落叶阔叶混交林区,以秦岭-淮河为界;我国东北地区的地带性植被应为落叶阔叶疏林。

以揭示我国不同生态区单元的生态环境问题及其形成机制,为全国和区域的生态环境整治服务,以及达到社会-经济-环境的可持续发展为最终目标,傅伯杰等^[105]基于我国宏观尺度上的生态地域、生态服务、生态资产、生态敏感性和人类活动对生态环境的胁迫等要素的特点和规律,开展了全国的生态区划。随后,在充分认识区域生态系统结构、过程及生态服务空间分异规律的基础上,环境保护部和中国科学院^[106—107]对我国进行生态功能区划^[108],明确对保障国家生态安全有重要意义的区域,以指导我国生态保护与建设、自然资源有序开发和产业合理布局,推动我国经济社会与生态保护协调、健康发展。

1.4.2 中国植被分类系统订正

植被分类是植被地理学研究的基础。随着学科的发展与知识更新,1980 年出版的《中国植被》中的分类系统需要订正。我国老一辈植被生态学家,以及新生代植被生态学工作者,对全国植被分类系统进行了多次探讨。如,宋永昌对我国东部亚热带常绿阔叶林分类与植被带划分的新认知和新建议^[109—110],并应用于我国常绿阔叶林全面研究中^[69]。在此基础上,他重新考虑我国植被分类的原则和单位,统一了各级单位划分依据,增补了高、中、低各等级分类,对中国植被分类系统进行了再调整^[111—112]。陈灵芝在其著作《中国植物区系与植被地理》^[113]中,也修订了中国植被分类系统,进一步完善了中国植被区划及其划分原则和依据,划分了中国八大植被区域。Guo 等^[114]总结了我国植被分类的发展历史与现状,指出未来需要从我国植被与世界植被分类系统的可比性出发,应用定量指标,在无优势种的情况下选择其他指标,以及考虑更精确的农田植被分类,以综合更新我国的植被分类系统。

1.4.3 中国植被图与植被志编纂

进入 21 世纪,我国传统植被地理学仍有一些全国性的总结与集成工作,如孙鸿烈主编的著作《中国生态系统》^[115],主要以长期生态系统定位研究为基础,综合研究我国陆地生态系统结构和功能的最新研究成果,包括生态系统分类、生态系统结构、生态系统能量与水分和养分循环、生态系统管理与可持续利用等方面。《中国植物区系与植被地理》^[113]则是对中国植物区系分区系统和我国植被分类系统的重大修订,植被地理学理论的应用以及在全球变化背景下的植被响应。而宋永昌等《中国常绿阔叶林:分类、生态、保育》^[69],则是我国区域性植被地理学研究的翘楚;该书详细论述了中国常绿阔叶林在世界植被中的位置、发育的环境条件、区系特征、分类原则与系统,并按典型常绿阔叶林、季节常绿阔叶林和适雨常绿阔叶林分别介绍它们的分类和分布,探讨中国常绿阔叶林的历史变迁以及现状与趋势。

1:100 万中国植被图和 1:600 万中国植被区划图的出版^[2, 116—117],标志着我国植被地理学工作的一个新的里程碑。该图的编纂始于 1983 年,经过以侯学煜院士和张新时院士先后为主编的三届编辑委员会、全国 70 个单位、260 余研究人员耗时近 30 年的努力完成。中国植被图(1:100 万)有 64 幅、75785 个图斑,绘制了全国 868 个基本植被分类单位的分布,详细展示了我国植被的分布状况和地理格局,包括水平分布和垂直分布状况,及其与气候因子和地面环境因子的关系。中国植被区划图(1:600 万)1 幅,刻画了我国 8 大植被区域的 460 个基本植被区划单位的分布,表现出我国植被的区域性分布和地带性分异。该项目“《中华人民共和国植

被图(1:100 万)》的编研及其数字化”荣获 2011 年度国家自然科学二等奖,以表彰其在 7 个方面做出的重要创新和突破:1) 中国植被图(1:100 万)是世界上首部最大和最完备的植被图件;2) 提出以群落外貌、群落优势种及其生态地理特征为指标的植被综合分类原则,是植被生态学和植被制图的新进展;3) 重新调整和修改了中国植被区划的八大植被区域的界限;4) 明确提出青藏高原隆起是导致中国植被类型和分布格局发生巨大变化的根本成因;5) 全面定位中国农业植被的地理分布格局和反映了我国独特的农业植被类型系统;6) 台湾省植被图的编制是中国植被图的重大突破;7) 植被图的数字化引发了制图方法的创新与应用,开启了植被制图新纪元。

然而,现有中国植被图所利用的资料基本上是新中国成立以后到 20 世纪 80—90 年代前的资料,获取资料的手段也主要是大规模区域资源考察的路线调查,制图过程主要依靠人工勾绘方式,从而导致现有中国植被图现实性差、斑块边界不一致等问题,因此亟须开展新一代植被图绘制研究,这就是 2018 年初启动的中国科学院战略性先导科技专项(A 类)“地球大数据科学工程”(CAS-Earth)中的一个重要任务^[118]。利用全国地形、气候、植被资源和长时间序列遥感数据,整合众源海量地面调查数据,结合深度学习和遥感技术,绘制新一代 1:50 万中国植被图,改善现有植被图时效性差、边界不清晰问题,可为我国生态学、地学、资源利用和保护等学科提供重要基础图件^[118]。

2015 年启动的科技部科技基础性工作专项“中国植被志编研”,开启了我国植被地理学工作的新篇章。该项目预期完成 80—100 个植被类型的植被志书及其电子产品,形成各区域主要群落志,建立植被综合数据库、中国植物群落分布图、中国主要植被类型专题样本馆和全国性的标准样地。目前,植被志预编研工作已经取得了重要进展,其中,《中国云杉林》^[119]已经正式出版,《中国水青冈林》、《中国南方灌丛》、《中国北方灌丛》、《中国针茅草原》、《中国小灌木荒漠》、《中国城市植被志》等卷册预编研工作进行顺利。

1.4.4 古植被地理学

在全国和各省区植被的出版物中,绪论部分都会描述地质与历史时期我国植被的变迁,但信息均较破碎。随着我国孢粉学和古植物学的发展,以及孢粉数据库的建立和大尺度古植被定量重建方法的出现,我国古植被地理学也得到了较大发展。自 20 世纪 90 年代中后期开始,我国孢粉学工作者利用较少的全国孢粉记录定量重建了全新世中期和末次盛冰期的古生物群区^[120—122]。随后利用更新的孢粉记录和新的全球植物功能型分类系统与改进的孢粉生物群区化技术,再次重建了我国全新世中期与末次盛冰期的生物群区格局^[123],发现全新世中期和末次盛冰期的古植被格局则与现今有较大的差异;在相对暖湿的全新世中期,我国东部森林北移,森林-灌丛-草原界线和森林-荒漠界线西推,青藏高原冻原面积缩小,树线升高;而在冷干的末次盛冰期,我国东部森林南移,温带落叶阔叶林缺少,热带森林从大陆南部消失,温带干旱灌丛、草原和荒漠强烈南移和东移。利用全国 228 个采样点的高质量地层孢粉数据,定量重建了全国 2 万年来每 500 年的古生物群区格局时空动态变化,以及代表性孢粉类群的植物地理特征^[124],结果显示,响应气候变化的冷暖与干湿趋势的波动,中国陆地生物群区在过去的 2 万年来发生较大改变;森林生物群区分布区界限的南北向摆动与范围的扩展或压缩,以及森林-草原-荒漠界限的东南-西北向移动,伴随着物种组成和生物多样性的巨大变化;人类活动在全新世末期的影响加剧。

而景观尺度的过去土地覆被变化的定量重建,则是近期古植被地理学的研究前沿。为达到全国尺度定量重建的目标,首先需要获取不同植被类型中优势花粉组合的相对花粉产量参数,许青海主持的国家自然科学基金重点项目“基于花粉产量定量重建我国 6ka 以来的土地覆被(1°×1°)变化”在此方面获得了突破性进展,相信未来的几年里,我国古土地覆被将全面得以重建。基于过去与国际上的相对花粉产量估算结果,部分学者也定量重建了我国北方和东部部分地区的古土地覆被变化^[125—126]。

Zhao^[127]全面总结了基于孢粉记录的我国古植被地理研究进展。根据最新的湖泊与泥炭钻孔、高分辨率时间标尺和孢粉记录,我国学者近期也集成分析了(定性描述)全国不同区域过去 2 万年来古植被变化历史,包括东北^[128]、华北平原^[129]和南方地区^[130],发现过去植被的变化受气候条件、地貌景观和人类活动等因素的

共同影响。在南方地区,全新世中期以来人类活动对植被景观的改变显著^[131]。而在我国东部和西部地区,气候变化驱动的古植被变迁格局,因东西地形的差异而造成差异,突显出地形因素对古植被地理格局的控制^[132]。基于早期孢粉记录的青藏高原地区古植被格局的变化也得到很好总结^[133],而最近启动的中国科学院战略性先导科技专项(A类)“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”,正在更新青藏高原及其周边地区的孢粉数据,从而全面集成分析和定量重建该地区的古植被地理分布格局。

1.4.5 植被地理模拟预测与情景分析

在全球变化研究中,植被地理学也拓展到大尺度植被地理分布格局的模拟预测方面。我国学者于20世纪90年代就较早开始了全国自然和农田生态系统的模拟研究,例如,利用多种植被-气候分类系统的全国植被模拟分析^[85-88],2050年未来气候变化对自然植被的影响及种植制度的改变^[134],以及2000—2050年暖干气候情景对我国七大农田区域的脆弱性影响及其适应对策^[135]。

我国学者季劲均创建了一个大气-植被相互作用模型 AVIM^[136],耦合植物生理模型与土壤-植被-大气连续体模型,其改进模型 AVIM2 可很好模拟预测我国陆地生态系统响应气候变化的脆弱性^[137]。延晓东建立了森林林窗模型 FAREAST^[138],成功应用于模拟欧亚大陆东部(包括中国东北地区)森林的演替动态及气候变化对森林物种组成变化的影响。而其它全国陆地生态系统的地理分布格局模拟和情景预测,大都采用国际上常用的陆地生物圈模型开展工作,比如静态生物地理模型 BIOME3^[139-140]和 BIOME4^[141-143]、MAPSS^[144],以及动态全球植被模型 LPJ-DGVM^[145-146]。

基于植被-气候关系模拟的我国潜在植被的地理分布格局,都较好地反映了我国植被地理的总体分布趋势^[140-144]。而基于未来气候变化情景所模拟的生态系统脆弱性,以及预测的我国植被地理分布格局的变化,以及生产力和碳收支功能的变化^[140, 143, 147-149],则为应对气候变化的影响对策分析奠定了科学基础。气候变化也将引起我国农业生态系统的变化,除了粮食产量波动、增加粮食安全风险之外,从植被地理学角度来看,农作物和其它经济植物种植格局的变化,以及种植制度的改变,将影响农业的可持续发展^[150]。

1.4.6 功能植被地理学:植物功能性状和生态化学计量学

作为植物与环境相互作用所形成的内在生理与外在形态特征,植物性状不仅能够客观表达植物对外部环境的响应和适应性,也能反映生态系统的功能特征,从而将环境、植物个体和生态系统结构、过程与功能有机联系起来,因此是注入植被地理学研究的新鲜血液,是全球变化背景下的功能植被地理学的重要方向。

我国植物功能性状的研究起步于约2005年,而在最近的5年内得以爆炸式发展,各种植物性状指标、不同区域的不同生态系统类型、各种环境梯度等均得到涉猎探究,发表了诸多中英文文章,并在全球首次提出了“生态系统性状 Ecosystem traits”的概念^[151],将群落水平的植物功能性状拓展到生态系统水平,将功能性状与宏生态学联结,研究区域和全球尺度的生态系统响应与反馈。在植物叶片氮和磷的生态化学计量学^[152]以及根系功能性状的全球研究^[153]等方面,引领国际研究前沿。在植物性状和生态化学计量学特征的地理格局及其与环境因子的关系或沿环境梯度的格局变化,也作出了积极贡献,包括全国尺度^[154-155]、青藏高原^[156]、中国东北样带^[157]、中国南北样带^[158-163]、北方草原至荒漠区域^[164-165]等,这必将成为传统植被地理学与现代全球变化生态学研究的结合点。而且,以植物功能型为基础的全球植被动态模型正在发展为以植物功能性状为基础的下一代植被模型,植物功能性状的地理分布格局及其与环境关系的深入研究,必将在下一代植被模型的建立过程中扮演关键角色,也必将为功能植被地理学的发展添砖加瓦。

2 结论与展望

经过过去近百年的发展,我国的植被地理学研究取得了可喜的成果,但仍存在基础研究不够精细,与国际前沿尚有差距,后备人才乏力等问题。因此,立足中国多样化的植被类型,精细而深入地开展更广泛的植被地理学研究,仍然是今后需要努力的。笔者建议,可在以下几个方面展开工作。

2.1 加强更多精细化的植被地理学研究,编纂新一代中国植被图与中国植被志

经过近百年、一代又一代生态学工作者的努力,基本摸清了全国植被地理分布格局及其驱动因素,在宏观

尺度上把握了全国植被地理概况,然而,很多工作还有待于进一步的完善。第一,随着气候的变化与人类活动的加剧,全国土地利用和土地覆被发生了很大变化,基于早期调查资料的植被图信息也很可能已经改变,例如在过去的 50 年里,调查发现长芒草(*Stipa bungeana*)草原因农耕和放牧而退缩与片断化^[166]。第二,很多植被地理学的基础性研究开展不足,过去的植被调查和植被制图较为粗糙,斑块边界模糊和实时性较差^[118],限制了对区域性、小尺度上植被地理格局及其自然和人为驱动机制的更好理解。第三,新的遥感技术的发展,以高空间分辨率和高光谱为特征、以激光雷达为前沿发展方向的综合遥感^[167—168],为绘制更加精细、准确的植被图开辟了新途径。因此,更新、编纂新一代植被图,绘制小比例尺的全国与区域植被图,同时尽快建立一套既适合我国植被国情,又与国际接轨的全国植被分类系统^[169],以此为基础编纂《中国植被志》^[170],并开展更多机理性的植被地理学研究,是今后发展的一个重要方向。

2.2 深入开展人类干扰的植被地理学研究

人类活动对自然生态系统的影响越来越大,尤其是进入全新世以来。而从 1700 年至今,人类已经干扰了全球 75% 的陆地面积,形成人类世(Anthropocene)的“人为(干扰)生物群区(Anthropogenic Biome)”^[171—174]。而当今全球环境的变化,包括土地与海洋的利用变化、生物直接利用(包括捕猎、捕鱼与伐木)、气候变化、污染、外来物种入侵等,导致约有 25% 的陆生、淡水和海洋脊椎动物、无脊椎动物和植物群濒临灭绝,并且灭绝速度正在加快^[175]。由此,全球植被地理格局也不可避免地会受到一定的冲击。在全球生物多样性丧失、环境变化的背景下,如何深入开展人类干扰之下的我国植被地理格局变化及其与变化的环境之间的相互关系研究,量化与评估人为干扰生态系统的结构与功能及其与环境变化的驱动机制,恢复和修复受损生态系统,也是现代植被地理学的一个新挑战。

2.3 以植物性状研究为契机,拓展宏观功能植被地理学研究

植物性状对研究物种共存、群落构建、生物多样性和生态系统功能,模拟和预测气候变化和土地利用对生态系统结构与功能的影响,指导生物多样性保护和生态系统管理政策的制定等具有重要的生态学意义。我国具有疆域广阔,地理环境复杂,生物气候带齐全,物种多样性丰富,植被类型完善的优势,为拓展全球植物功能性状谱分析^[176—177]与全球性状制图^[178—179],需要贡献更多的生物群区和物种的性状记录,以快速完善全球和中国区域性状数据库^[180—182]。在以植物功能型为基础的全球植被动态模型^[183]发展为以植物功能性状为基础的下一代植被模型^[184]过程中,植物功能性状正在扮演关键角色^[185—193],中国区域植物性状数据^[182]的加入以及中国学者的贡献,将为全球新一代植被模型的发展添砖加瓦^[194—195]。从单点和少点研究拓展到区域和洲际乃至全球尺度的性状分析,从单个物种性状到生态系统性状,从静态单时间的性状观测到长期定位研究长时间尺度的性状变化,从自然生态系统性状到人为干扰生态系统的性状分析,以及地下根系性状及其与环境和生态系统功能的关系,都是需要重点关注的内容。

2.4 开展长期(定位)乃至网络化的功能植被地理学研究,交叉融合谱系植物地理学

植被的发展是动态变化的,短期植被变化的研究不利于深层次挖掘植被变化的生态学机制。因此,需要跨时间尺度,从实时(Real-time,数月到几十年,关注生物及其与环境相互作用),第四纪(Q-time,百年到千年,关注群落与生态系统演替、迁移、灭绝),最终到深时(Deep-time,万年至十万年之上,百万年到千万年,关注进化、大尺度地理格局变化),将现代生态学的短期变化与古生态学的长期变化相融合,揭示生态系统的真正长期的动态变化^[196—200]。来自孢粉和植物大化石的证据已表明,我国第四纪植被地理格局发生过较大波动^[124, 130—131],野外调查和遥感分析也发现,最近 50 年来我国一些地区的植被格局也在发生变化^[166]。因此,如何将古植被地理学与现代植被地理学糅合在一起,实现真正的长期植被地理学研究,达到预测未来植被地理变化的目的,是新时期、新形势下我国植被地理学工作者值得思考的问题。尤其是站点定位乃至网络化研究,发挥我国地域辽阔,气候类型多样,生态系统复杂的优势,组成一体化的空间协同式研究网络,从不同的时间和空间尺度探讨我国植被的地理格局变迁及其驱动机制分析。

因此,对植被地理学工作来说,也需要开展长期的功能植被地理学定位研究,将古生态学和现代生态学结

合起来,阐述百年、千年和万年时间尺度上我国宏观植被地理格局的过去演化、现代状况并预测未来情景。同时,将传统的植被地理学与新兴的谱系地理学相结合,除了揭示功能植被地理格局及其变化,还要深入探讨植被地理格局及其功能形成与发展的遗传机制。

参考文献 (References):

- [1] 宋永昌. 植被生态学(第二版). 北京: 高等教育出版社, 2017: 14-18.
- [2] 张新时, 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中国植被及其地理格局. 北京: 地质出版社, 2007: 12-16.
- [3] Chien S S. Preliminary notes on the vegetation and flora of Hwang-Shan. Contributions from the Biological Laboratory of the Science Society of China, 1927, 3: 1-85.
- [4] Chien S S. Forest of Chung-shan Nanking. Contributions from the Biological Laboratory of the Science Society of China, 1932, 7: 191-204.
- [5] Chien S S. Vegetation of the rock ridge of Chung-shan Nanking. Contributions from the Biological Laboratory of the Science Society of China, 1932, 7: 215-227.
- [6] 刘慎谔. 中国北部及西部植物地理概论. 国立北平研究院植物学研究所丛刊, 1934, 2(9): 423-451.
- [7] 刘慎谔. 河北渤海湾沿岸植物分布之研究. 国立北平研究院植物学研究所丛刊, 1935, 3(9): 413-431.
- [8] 刘慎谔. 中国南部及西南植物地理概要. 生物学杂志, 1936, 1(1): 21-27.
- [9] 刘慎谔. 黄山植物分布概要. 生物学杂志, 1937, 1(4): 1-18.
- [10] 樊庆笙. 安徽九华山植生区之观察(英文). 金陵学报, 1935, 5(1): 141-147.
- [11] Yang C Y. The forest vegetation of Shi-Shan and Hsiao-Wu-tai-shan. Bulletin of Chinese Botanical Society, 1937, 3(1): 97-118.
- [12] 郑万钧, 许绍南. 峨边森林调查报告 // 四川省政府建设厅. 四川之森林. 成都: 四川省政府建设厅, 1938, 5: 1-66.
- [13] Wang C W. A preliminary study of the vegetation of Yunnan. Bulletin of the Fan Memorial Institute of Biology, 1939, 9(2): 65-125.
- [14] 侯学煜. 贵州中北部植物分布与土壤. 土壤季刊, 1941, 1(3): 8-21.
- [15] Chang H T. The vegetation of the Paracel Islands. Sunyatsenia, 1948, 7(1/2): 75-88.
- [16] 郑万钧. 湖南莽山森林之观察. 科学, 1938, 22(9-10): 395-407.
- [17] Teng S C. The forest regions of Kansu & their ecological aspects. Botanical Bulletin of Academia Sinica, 1947, 1: 187-200.
- [18] Teng S C. Forest geography of the east-Tibet Plateau. Botanical Bulletin of Academia Sinica, 1948, 2: 62-67.
- [19] Teng S C. A provisional sketch of the forest geography of China. Botanical Bulletin of Academia Sinica, 1948, 2(3): 133-146.
- [20] 曲仲湘, 文振旺, 朱克贵. 南京灵谷寺森林现况的分析. 植物学报, 1952, 1(1): 18-49.
- [21] 曲仲湘, 文振旺. 琅琊山林木现况的分析. 植物学报, 1953, 2(3): 349-370.
- [22] 曲仲湘, 文振旺. 南京栖霞山林木现况的观察. 复旦学报: 自然科学, 1955, (1): 123-144.
- [23] 侯学煜. 中国境内酸性土钙质土和盐碱土的指示植物. 北京: 科学出版社, 1954.
- [24] 侯学煜. 植物生态地理学的内容任务概念和研究方法. 北京: 科学出版社, 1956.
- [25] 钱崇澍, 吴征镒, 陈昌笃. 中国植被的类型. 地理学报, 1956, 22(1): 37-92.
- [26] 钱崇澍, 吴征镒, 陈昌笃. 中国植被区划草案//中华地理志编辑部. 中国自然区划草案. 北京: 科学出版社, 1956: 85-142.
- [27] 中国科学院植物研究所. 中国植被区划. 北京: 科学出版社, 1960.
- [28] 侯学煜. 中国的植被. 北京: 人民教育出版社, 1960.
- [29] 侯学煜. 试论历次中国植被分区方案中所存在的争论性问题. 植物生态学与地植物学丛刊, 1963, 1(1/2): 1-23.
- [30] 侯学煜. 论中国植被分区的原则、依据和系统单位. 植物生态学与地植物学丛刊, 1964, 2(2): 153-179, 270-276.
- [31] 刘慎谔, 冯宗炜, 赵大昌. 关于中国植被区划的若干原则问题. 植物学报, 1959, 8(2): 87-105.
- [32] 刘慎谔, 冯宗炜, 赵大昌. 再论“关于中国植被区划的若干原则问题”. 植物学报, 1959, 8(4): 284-286.
- [33] 刘崇瑞. 台湾森林植物的植物地理学考察(英文). 日本植物分类地理, 1962, 30: 149-157.
- [34] 章乐民. 红桧、台湾扁柏混交林生态之研究. 台湾省林业试验所报告, 1963, 91: 1-23.
- [35] 章乐民. 台湾热带雨林生态之研究. 台湾省林业试验所报告, 1965, 111: 1-18.
- [36] 章乐民. 恒春半岛季风林生态之研究. 台湾省林业试验所报告, 1967, 145: 1-23.
- [37] 柳楷, 葛锦昭, 杨柄炎. 台湾主要林型生态之调查. 台湾省林业试验所报告, 1961, 72: 1-65.
- [38] 柳楷. 台湾植物群落分类之研究. 台湾中华农学会报, 1971, 76.
- [39] 中国植被编辑委员会. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1980.
- [40] 广东省植物研究所. 广东植被. 北京: 科学出版社, 1976.
- [41] 中国科学院新疆综合考察队, 中国科学院植物研究所. 新疆植被及其利用. 北京: 科学出版社, 1978.
- [42] 四川植被协作组. 四川植被. 成都: 四川人民出版社, 1980.
- [43] 安徽省植被协作组. 安徽植被. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1983.
- [44] 中国科学院内蒙古宁夏综合考察队. 内蒙古植被. 北京: 科学出版社, 1985.

- [45] 周兴民, 王质彬, 杜庆. 青海植被. 西宁: 青海人民出版社, 1986.
- [46] 《云南植被》编写组. 云南植被. 北京: 科学出版社, 1987.
- [47] 黄威廉, 屠玉麟, 杨龙. 贵州植被. 贵阳: 贵州人民出版社, 1988.
- [48] 中国科学院植物研究所, 中国科学院长春地理研究所. 西藏植被. 北京: 科学出版社, 1988.
- [49] 林鹏. 福建植被. 福州: 福建科学技术出版社, 1990.
- [50] 祁承经. 湖南植被. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1990.
- [51] 黄威廉. 台湾植被. 北京: 中国环境科学出版社, 1993.
- [52] 河北植被编辑委员会, 河北省农业区划委员会. 河北植被. 北京: 科学出版社, 1996.
- [53] 雷明德. 陕西植被. 北京: 科学出版社, 1999.
- [54] 王仁卿, 周光裕. 山东植被. 济南: 山东科学技术出版社, 2000.
- [55] 李建东, 吴榜华, 盛连喜. 吉林植被. 长春: 吉林科学技术出版社, 2001.
- [56] 马子清. 山西植被. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- [57] 苏宗明, 李先琨, 丁涛, 宁世江, 陈伟烈, 莫新礼. 广西植被(第一卷). 北京: 中国林业出版社, 2014.
- [58] 王献溥, 郭柯, 温远光. 广西植被志要(上、下). 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [59] 杨小波. 海南植被志(第一卷). 北京: 科学出版社, 2019.
- [60] 陈玉峰. 台湾植被志. 台中, 台北: 晨星出版社, 前卫出版社, 1995-1999.
- [61] 周以良. 中国大兴安岭植被. 北京: 科学出版社, 1991.
- [62] 周以良. 中国小兴安岭植被. 北京: 科学出版社, 1994.
- [63] 周以良. 中国东北植被地理. 北京: 科学出版社, 1997.
- [64] 中国科学院植物研究所. 中华人民共和国植被图(1:4000000). 北京: 中国地图出版社, 1979.
- [65] 中国森林编辑委员会. 中国森林(1-4卷). 北京: 中国林业出版社, 1997-2000.
- [66] 周荣春. 中国森林群落分类及其群落学特征. 北京: 科学出版社, 1999.
- [67] 蒋有绪, 郭泉水, 马娟. 中国森林群落分类及其群落学特征(第二版). 北京: 科学出版社, 2018.
- [68] 林鹏. 红树林. 北京: 海洋出版社, 1984.
- [69] 宋永昌. 中国常绿阔叶林: 分类、生态、保育. 北京: 科学出版社, 2013.
- [70] 朗惠卿, 祖文辰, 金树仁. 中国沼泽. 济南: 山东科学技术出版社, 1983.
- [71] 中国湿地植被编辑委员会. 中国湿地植被. 北京: 科学出版社, 1999.
- [72] 李博. 中国的草原. 北京: 科学出版社, 1990.
- [73] Hou H Y. Vegetation of China with reference to its geographical distribution. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 1983, 70(3): 509-549.
- [74] Chang D H S. The Tibetan Plateau in relation to the vegetation of China. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 1983, 70(3): 564-570.
- [75] 侯学煜. 中国植被地理及优势植物化学成分. 北京: 科学出版社, 1982.
- [76] 中国科学院《中国自然地理》编辑委员会, 侯学煜. 中国自然地理-下册-植物地理: 中国植被地理. 北京: 科学出版社, 1988.
- [77] 植被生态学研究编辑委员会. 植被生态学研究—纪念著名生态学家侯学煜教授. 北京: 科学出版社, 1994.
- [78] 侯学煜. 生态学与大农业发展. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1984.
- [79] 皮洛. 数学生态学引论. 卢泽愚, 译. 北京: 科学出版社, 1978.
- [80] 惠特克. 植物群落分类. 周纪伦, 译. 北京: 科学出版社, 1985.
- [81] 惠特克. 植物群落排序. 王伯荪, 译. 北京: 科学出版社, 1986.
- [82] 阳含熙, 卢泽愚. 植物生态学的数量分类方法. 北京: 科学出版社, 1981.
- [83] 张金屯. 植被数量生态学方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.
- [84] 余世孝. 数学生态学导论. 北京: 科学技术文献出版社, 1995.
- [85] 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. *植物生态学与地植物学学报*, 1989, 13(1): 1-9.
- [86] 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. *植物生态学与地植物学学报*, 1989, 13(4): 197-207.
- [87] 张新时, 杨莫安, 倪文革. 植被的 PE(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. *植物生态学与地植物学学报*, 1993, 17(2): 97-109.
- [88] 张新时. 研究全球变化的植被-气候分类系统. *第四纪研究*, 1993, (2): 157-169.
- [89] 徐文铎. 吉良的热量指数及其在中国植被中的应用. *生态学杂志*, 1985, (3): 35-39.
- [90] 徐文铎. 中国东北主要植被类型的分布与气候的关系. *植物生态学与地植物学学报*, 1986, 10(4): 254-263.
- [91] Fang J Y, Yoda K. Climate and vegetation in China II. Distribution of main vegetation types and thermal climate. *Ecological Research*, 1989, 4(1): 71-83.
- [92] Fang J Y, Yoda K. Climate and vegetation in China III. Water balance and distribution of vegetation. *Ecological Research*, 1990, 5(1): 9-23.

- [93] 方精云. 我国森林植被带的生态气候学分析. 生态学报, 1991, 11(4): 377-387.
- [94] Fang J Y, Ohsawa M, Kira T. Vertical vegetation zones along 30 °N latitude in humid East Asia. *Vegetatio*, 1996, 126(2): 135-149.
- [95] 方精云. 东亚地区植被气候类型在温度、降水量坐标中的表达. 生态学报, 1994, 14(3): 290-294.
- [96] 马世骏. 中国生态学发展战略研究-第一集. 北京: 中国经济出版社, 1991.
- [97] 徐汝梅. 生态学的现代发展和展望. 生物学通报, 1992, (3): 1-3, 35-35.
- [98] 中国植物学会植物生态学和地植物学专业委员会. 三十年来中国植物生态学和地植物学的回顾和展望. 植物生态学与地植物学丛刊, 1983, 7(3): 169-185.
- [99] 钟章成. 植物生态学研究进展. 重庆: 西南师范大学出版社, 1997.
- [100] 王仁忠, 刘晓强, 马克平. 中国植物生态学研究进展 I. 近十年来中国植物种群生态学研究. 植物学报, 2003, 45(S1): 64-69.
- [101] 梁士楚, 何维明, 戈峰, 钟章成, 苏建伟, 刘海东, 董鸣. 种群/群落生态学//李文华, 赵景柱. 生态学研究回顾与展望. 北京: 气象出版社, 2004.
- [102] 倪健, 陈仲新, 董鸣, 陈旭东, 张新时. 中国生物多样性的生态地理区划. 植物学报, 1998, 40(4): 370-382.
- [103] 倪健, 郭柯, 刘海江, 张新时. 中国西北干旱区生态区划. 植物生态学报, 2005, 29(2): 175-184.
- [104] Fang J Y, Song Y C, Liu H Y, Piao S L. Vegetation-climate relationship and its application in the division of vegetation zone in China. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2002, 44(9): 1105-1122.
- [105] 傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 马克明, 李俊然. 中国生态区划方案. 生态学报, 2001, 21(1): 1-6.
- [106] 环境保护部, 中国科学院. 全国生态功能区划. 北京: 环境保护部, 2008.
- [107] 环境保护部, 中国科学院. 全国生态功能区划(修编版). 北京: 环境保护部, 2015.
- [108] 欧阳志云. 中国生态功能区划. 中国勘察设计, 2007, 1(3): 70-73.
- [109] 宋永昌. 中国东部森林植被带划分之我见. 植物学报, 1999, 41(5): 541-552.
- [110] 宋永昌. 中国常绿阔叶林分类试行方案. 植物生态学报, 2004, 28(4): 435-448.
- [111] 宋永昌. 对中国植被分类系统的认知和建议. 植物生态学报, 2011, 35(8): 882-892.
- [112] 宋永昌, 阎恩荣, 宋坤. 再议中国的植被分类系统. 植物生态学报, 2017, 41(2): 269-278.
- [113] 陈灵芝. 中国植物区系与植被地理. 北京: 科学出版社出版, 2014.
- [114] Guo K, Liu C C, Xie Z Q, Li F Y, Franklin S B, Lu Z J, Ma K P. China vegetation classification: concept, approach and applications. *Phytocoenologia*, 2018, 48(2): 113-120.
- [115] 孙鸿烈. 中国生态系统(上、下册). 北京: 科学出版社, 2005.
- [116] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 1:100000 中国植被图集. 北京: 科学出版社, 2001.
- [117] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中华人民共和国植被图(1:1000000). 北京: 地质出版社, 2007.
- [118] 马克平, 朱敏, 纪力强, 马俊才, 郭庆华, 欧阳志云, 朱丽. 中国生物多样性大数据平台建设. 中国科学院院刊, 2018, 33(8): 838-845.
- [119] 王国宏. 中国云杉林. 北京: 科学出版社, 2017.
- [120] Yu G, Prentice I C, Harrison S P, Sun X J. Pollen-based biome reconstructions for China at 0 and 6000 years. *Journal of Biogeography*, 1998, 25(6): 1055-1069.
- [121] Yu G, Chen X, Ni J, Cheddadi R, Guiot J, Han H, Harrison S P, Huang C, Ke M, Kong Z, Li S, Li W, Liew P, Liu G, Liu J, Liu Q, Liu K B, Prentice I C, Qui W, Ren G, Song C, Sugita S, Sun X, Tang L, Van Campo E, Xia Y, Xu Q, Yan S, Yang X, Zhao J, Zheng Z. Palaeovegetation of China: a pollen data-based synthesis for the mid-Holocene and last glacial maximum. *Journal of Biogeography*, 2000, 27(3): 635-664.
- [122] 中国第四纪孢粉数据库小组. 中国中全新世(6 Ka BP)和末次盛冰期(18 Ka BP)生物群区的重建. 植物学报, 2000, 42(11): 1201-1209.
- [123] Ni J, Yu G, Harrison S P, Prentice I C. Palaeovegetation in China during the late quaternary: biome reconstructions based on a global scheme of plant functional types. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 289(1/4): 44-61.
- [124] Ni J, Cao X Y, Jeltsch F, Herzschuh U. Biome distribution over the last 22, 000 yr in China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 409: 33-47.
- [125] Cao X Y, Tian F, Li F R, Gaillard M J, Rudaya N, Xu Q H, Herzschuh U. Pollen-based quantitative land-cover reconstruction for northern Asia covering the last 40 ka cal BP. *Climate of the Past*, 2019, 15(4): 1503-1536.
- [126] Li F R, Gaillard M J, Cao X Y, Herzschuh U, Sugita S, Tarasov P E, Wagner M, Xu Q H, Ni J, Wang W M, Zhao Y, An C B, Beusen A H W, Chen F H, Feng Z D, Klein Goldewijk C G M, Huang X Z, Li Y C, Li Y, Liu H Y, Sun A Z, Yao Y F, Zheng Z, Jia X. Towards quantification of Holocene anthropogenic land-cover change in temperate China: a review in the light of pollen-based REVEALS reconstructions of regional plant cover. *Earth-Science Reviews*, 2020, 203: 103119.
- [127] Zhao Y. Vegetation and climate reconstructions on different time scales in China: a review of Chinese palynological research. *Vegetation History and Archaeobotany*, 2018, 27(2): 381-392.
- [128] 李小强, 赵超, 周新郢. 末次盛冰期以来中国东北地区特征时期植被格局. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(8): 1213-1230.

- [129] 李曼玥, 张生瑞, 许清海, 肖举乐, 温锐林. 华北平原末次冰盛期以来典型时段古环境格局. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(8): 1269-1277.
- [130] 王伟铭, 李春海, 舒军武, 陈炜. 中国南方植被的变化. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(8): 1308-1320.
- [131] Cheng Z J, Weng C Y, Steinke S, Mohtadi M. Anthropogenic modification of vegetated landscapes in Southern China from 6, 000 years ago. *Nature Geoscience*, 2018, 11(12): 939-943.
- [132] Cheng Y, Liu H Y, Wang H Y, Hao Q. Differentiated climate-driven Holocene biome migration in western and eastern China as mediated by topography. *Earth-Science Reviews*, 2018, 182: 174-185.
- [133] 唐领余. 最近 12000 年来青藏高原植被的时空分布(英文). 植物学报, 2002, 44(7): 872-877.
- [134] Wang F T, Zhao Z C. Impact of climate change on natural vegetation in China and its implication for agriculture. *Journal of Biogeography*, 1995, 22(4/5): 657-664.
- [135] Lin E D. Agricultural vulnerability and adaptation to global warming in China. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1996, 92(1/2): 63-73.
- [136] Ji J J. A climate-vegetation interaction model: simulating physical and biological processes at the surface. *Journal of Biogeography*, 1995, 22(2/3): 445-451.
- [137] 吴绍洪, 戴尔阜, 黄玫, 邵雪梅, 李双成, 陶波. 21 世纪未来气候变化情景(B2)下我国生态系统的脆弱性研究. 科学通报, 2007, 52(7): 811-817.
- [138] Yan X D, Shugart H H. FAREAST: a forest gap model to simulate dynamics and patterns of eastern Eurasian forests. *Journal of Biogeography*, 2005, 32(9): 1641-1658.
- [139] Ni J. A simulation of biomes on the Tibetan Plateau and their responses to global climate change. *Mountain Research and Development*, 2000, 20(1): 80-89.
- [140] Ni J, Sykes M T, Prentice I C, Cramer W. Modelling the vegetation of China using the process-based equilibrium terrestrial biosphere model BIOME3. *Global Ecology and Biogeography*, 2000, 9(6): 463-479.
- [141] Ni J, Herzschuh U. Simulating biome distribution on the Tibetan Plateau using a modified global vegetation model. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2011, 43(3): 429-441.
- [142] Wang H, Ni J, Prentice I C. Sensitivity of potential natural vegetation in China to projected changes in temperature, precipitation and atmospheric CO₂. *Regional Environmental Change*, 2011, 11(3): 715-727.
- [143] Wang H. A multi-model assessment of climate change impacts on the distribution and productivity of ecosystems in China. *Regional Environmental Change*, 2014, 14: 133-144.
- [144] 赵茂盛, Neilson R P, 延晓冬, 董文杰. 气候变化对中国植被可能影响的模拟. 地理学报, 2002, 57(1): 28-38.
- [145] 孙艳玲, 延晓冬, 谢德体, 魏朝富. 应用动态植被模型 LPJ 模拟中国植被变化研究. 西南大学学报: 自然科学版, 2007, 29(11): 86-92.
- [146] 孙国栋. LPJ 模型对 1981—1998 年中国区域潜在植被分布和碳通量的模拟. 气候与环境研究, 2009, 14(4): 341-351.
- [147] Ni J. Impacts of climate change on Chinese ecosystems: key vulnerable regions and potential thresholds. *Regional Environmental Change*, 2011, 11(Suppl. 1): S49-S64.
- [148] 赵东升, 吴绍洪. 气候变化情景下中国自然生态系统脆弱性研究. 地理学报, 2013, 68(5): 602-610.
- [149] Zhao D S, Wu S H. Vulnerability of natural ecosystem in China under regional climate scenarios: an analysis based on eco-geographical regions. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(2): 237-248.
- [150] 吴绍洪, 罗勇, 王浩, 高江波, 李传哲. 中国气候变化影响与适应: 态势和展望. 科学通报, 2016, 61(10): 1042-1054.
- [151] He N P, Liu C C, Piao S L, Sack L, Xu L, Luo Y Q, He J S, Han X G, Zhou G S, Zhou X H, Lin Y, Yu Q, Liu S R, Sun W, Niu S L, Li S G, Zhang J H, Yu G R. Ecosystem traits linking functional traits to macroecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 2019, 34(3): 200-210.
- [152] Tian D, Yan Z B, Niklas K J, Han W X, Kattge J, Reich P B, Luo Y K, Chen Y H, Tang Z Y, Hu H F, Wright I J, Schmid B, Fang J Y. Global leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry and their scaling exponent. *National Science Review*, 2018, 5(5): 728-739.
- [153] Ma Z Q, Guo D L, Xu X L, Lu M Z, Bardgett R D, Eissenstat D M, McCormack M L, Hedin L O. Evolutionary history resolves global organization of root functional traits. *Nature*, 2018, 555(7694): 94-97.
- [154] Zhang S B, Zhang J L, Slik J W F, Cao K F. Leaf element concentrations of terrestrial plants across China are influenced by taxonomy and the environment. *Global Ecology and Biogeography*, 2012, 21(8): 809-818.
- [155] Meng T T, Wang H, Harrison S P, Prentice I C, Ni J, Wang G. Responses of leaf traits to climatic gradients: adaptive variation versus compositional shifts. *Biogeosciences*, 2015, 12(18): 5339-5352.
- [156] He J S, Wang Z H, Wang X P, Schmid B, Zuo W Y, Zhou M, Zheng C Y, Wang M F, Fang J Y. A test of the generality of leaf trait relationships on the Tibetan Plateau. *New Phytologist*, 2006, 170(4): 835-848.
- [157] Prentice I C, Meng T T, Wang H, Harrison S P, Ni J, Wang G H. Evidence of a universal scaling relationship for leaf CO₂ drawdown along an aridity gradient. *New Phytologist*, 2011, 190(1): 169-180.
- [158] 冯秋红, 史作民, 董莉莉, 刘世荣. 南北样带温带区栎属树种功能性状间的关系及其对气象因子的响应. 植物生态学报, 2010, 34(6): 619-627.

- [159] 李东胜, 史作民, 冯秋红, 刘峰. 中国东部南北样带暖温带区栎属树种叶片形态性状对气候条件的响应. 植物生态学报, 2013, 37(9): 793-802.
- [160] Wang R L, Yu G R, He N P, Wang Q F, Zhao N, Xu Z W, Ge J P. Latitudinal variation of leaf stomatal traits from species to community level in forests: Linkage with ecosystem productivity. Scientific Reports, 2015, 5: 14454.
- [161] Tian M, Yu G R, He N P, Hou J H. Leaf morphological and anatomical traits from tropical to temperate coniferous forests: mechanisms and influencing factors. Scientific Reports, 2016, 6: 19703.
- [162] He N P, Liu C C, Tian M, Li M L, Yang H, Yu G R, Guo D L, Smith M D, Yu Q, Hou J H. Variation in leaf anatomical traits from tropical to cold-temperate forests and linkage to ecosystem functions. Functional Ecology, 2018, 32(1): 10-19.
- [163] Liu C C, He N P, Zhang J H, Li Y, Wang Q F, Sack L, Yu G R. Variation of stomatal traits from cold temperate to tropical forests and association with water use efficiency. Functional Ecology, 2018, 32(1): 20-28.
- [164] Meng T T, Ni J, Harrison S P. Plant morphometric traits and climate gradients in northern China: a meta-analysis using quadrat and flora data. Annals of Botany, 2009, 104(6): 1217-1229.
- [165] Liu G F, Freschet G T, Pan X, Cornelissen J H C, Li Y, Dong M. Coordinated variation in leaf and root traits across multiple spatial scales in Chinese semi-arid and arid ecosystems. New Phytologist, 2010, 188(2): 543-553.
- [166] Qiao X G, Guo K, Li G Q, Zhao L Q, Li F Y, Gao C G. Assessing the collapse risk of *Stipa bungeana* grassland in China based on its distribution changes. Journal of Arid Land, 2020, 12(2): 303-317.
- [167] 郭庆华, 胡天宇, 姜媛茜, 金时超, 王瑞, 关宏灿, 杨秋丽, 李玉美, 吴芳芳, 翟秋萍, 刘瑾, 苏艳军. 遥感在生物多样性研究中的应用进展. 生物多样性, 2018, 26(8): 789-806.
- [168] 唐志尧, 蒋旻炜, 张健, 张新悦. 航空航天遥感在物种多样性研究与保护中的应用. 生物多样性, 2018, 26(8): 807-818.
- [169] 郭柯, 方精云, 王国宏, 唐志尧, 谢宗强, 沈泽昊, 王仁卿, 强胜, 梁存柱, 达良俊, 于丹. 中国植被分类系统修订方案. 植物生态学报, 2020, 44(2): 111-127.
- [170] 方精云, 郭柯, 王国宏, 唐志尧, 谢宗强, 沈泽昊, 王仁卿, 强胜, 梁存柱, 达良俊, 于丹. 《中国植被志》的植被分类系统、植被类型划分及编排体系. 植物生态学报, 2020, 44(2): 96-110.
- [171] Ellis E C, Ramankutty N. Putting people in the map: anthropogenic biomes of the world. Frontiers in Ecology and the Environment, 2008, 6(8): 439-447.
- [172] Alessa L, Chapin III F S. Anthropogenic biomes: a key contribution to earth-system science. Trends in Ecology & Evolution, 2008, 23(10): 529-531.
- [173] Ellis E C, Klein Goldewijk K, Siebert S, Lightman D, Ramankutty N. Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000. Global Ecology and Biogeography, 2010, 19(5): 589-606.
- [174] Ellis E C. Anthropogenic transformation of the terrestrial biosphere. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2011, 369(1938): 1010-1035.
- [175] IPBES. Summary for Policymakers of the Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Bonn: IPBES Secretariat, 2019: 1-56.
- [176] Wright I J, Reich P B, Westoby M, Ackerly D D, Baruch Z, Bongers F, Cavender-Bares J, Chapin T, Cornelissen J H C, Diemer M, Flexas J, Garnier E, Groom P K, Gulias J, Hikosaka K, Lamont B B, Lee T, Lee W, Lusk C, Midgley J J, Navas M L, Niinemets Ü, Oleksyn J, Osada N, Poorter H, Poot P, Prior L, Pyankov V I, Roumet C, Thomas S C, Tjoelker M G, Veneklaas E J, Villar R. The worldwide leaf economics spectrum. Nature, 2004, 428(6985): 821-827.
- [177] Díaz S, Kattge J, Cornelissen J H C, Wright I J, Lavorel S, Dray S, Reu B, Kleyer M, Wirth C, Prentice I C, Garnier E, Bönisch G, Westoby M, Poorter H, Reich P B, Moles A T, Dickie J, Gillison A N, Zanne A E, Chave J, Wright J S, Sheremet'ev S N, Jactel H, Baraloto C, Cerabolini B, Pierce S, Shipley B, Kirkup D, Casanoves F, Joswig J S, Günther A, Falczuk V, Rüger N, Mahecha M D, Gorné L D. The global spectrum of plant form and function. Nature, 2016, 529(7585): 167-171.
- [178] van Bodegom P M, Douma J C, Verheijen L M. A fully traits-based approach to modeling global vegetation distribution. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(38): 13733-13738.
- [179] Butler E E, Datta A, Flores-Moreno H, Chen M, Wythers K R, Fazayeli F, Banerjee A, Atkin O K, Kattge J, Amiaud B, Blonder B, Boenisch G, Bond-Lamberty B, Brown K A, Byun C, Campetella G, Cerabolini B E L, Cornelissen J H C, Craine J M, Craven D, de Vries F T, Díaz S, Domingues T F, Forey E, González-Melo A, Gross N, Han W X, Hattings W N, Hickler T, Jansen S, Kramer K, Kraft N J B, Kurokawa H, Laughlin D C, Meir P, Minden V, Niinemets Ü, Onoda Y, Peñuelas J, Read Q, Sack L, Schamp B, Soudzilovskaia N A, Spasojevic M J, Sosinski E, Thornton P E, Valladares F, van Bodegom P M, Williams M, Wirth C, Reich P B. Mapping local and global variability in plant trait distributions. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 114(51): E10937-E10946.
- [180] Kattge J, Díaz S, Lavorel S, Prentice I C, Leadley P, Bönisch G, Garnier E, Westoby M, Reich P B, Wright I J, ..., Wirth C (95 authors). TRY-a global database of plant traits. Global Change Biology, 2011, 17(9): 2905-2935.
- [181] Kattge J, Bönisch G, Díaz S, Lavorel S, Prentice I C, ..., Wirth C (729 authors). TRY plant trait database-enhanced coverage and open access.

- Global Change Biology, 2020, 26(1): 119-188.
- [182] Wang H, Harrison S P, Prentice I C, Yang Y Z, Bai F, Togashi H F, Wang M, Zhou S X, Ni J. The China plant trait database: towards a comprehensive regional compilation of functional traits for land plants. *Ecology*, 2018, 99(2): 500-500.
- [183] Prentice I C, Bondeau A, Cramer W, Harrison S P, Hickler T, Lucht W, Sitch S, Smith B, Sykes M T. Dynamic global vegetation modeling: quantifying terrestrial ecosystem responses to large-scale environmental change//Canadell J, Pataki D E, Pitelka L F, eds. *Terrestrial Ecosystems in a Changing World*. Berlin: Springer, 2007: 175-192.
- [184] Scheiter S, Langan L, Higgins S I. Next-generation dynamic global vegetation models: learning from community ecology. *New Phytologist*, 2013, 198(3): 957-969.
- [185] Webb C T, Hoeting J A, Ames G M, Pyne M I, Poff N L. A structured and dynamic framework to advance traits-based theory and prediction in ecology. *Ecology Letters*, 2010, 13(3): 267-283.
- [186] Van Bodegom P M, Douma J C, Witte J P M, Ordoñez J C, Bartholomeus R P, Aerts R. Going beyond limitations of plant functional types when predicting global ecosystem-atmosphere fluxes: exploring the merits of traits-based approaches. *Global Ecology and Biogeography*, 2012, 21(6): 625-636.
- [187] Fyllas N M, Gloor E, Mercado L M, Sitch S, Quesada C A, Domingues T F, Galbraith D R, Torre-Lezama A, Vilanova E, Ramírez-Angulo H, Higuchi N, Neill D A, Silveira M, Ferreira L, Aymard C G A, Malhi Y, Phillips O L, Lloyd J. Analysing Amazonian forest productivity using a new individual and trait-based model (TFS v.1). *Geoscientific Model Development*, 2014, 7(4): 1251-1269.
- [188] Sakschewski B, von Bloh W, Boit A, Rammig A, Kattge J, Poorter L, Peñuelas J, Thonicke K. Leaf and stem economics spectra drive diversity of functional plant traits in a dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 2015, 21(7): 2711-2725.
- [189] Sakschewski B, von Bloh W, Boit A, Poorter L, Peña-Claros M, Heinke J, Joshi J, Thonicke K. Resilience of Amazon forests emerges from plant trait diversity. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1032-1036.
- [190] Verheijen L M, Brovkin V, Aerts R, Bönisch G, Cornelissen J H C, Kattge J, Reich P B, Wright I J, van Bodegom P M. Impacts of trait variation through observed trait - climate relationships on performance of an Earth system model: a conceptual analysis. *Biogeosciences*, 2013, 10(8): 5497-5515.
- [191] Verheijen L M, Aerts R, Bönisch G, Kattge J, Van Bodegom P M. Variation in trait trade-offs allows differentiation among predefined plant functional types: implications for predictive ecology. *New Phytologist*, 2016, 209(2): 563-575.
- [192] Weng E S, Farrior C E, Dybzinski R, Pacala S W. Predicting vegetation type through physiological and environmental interactions with leaf traits: evergreen and deciduous forests in an earth system modeling framework. *Global Change Biology*, 2017, 23(6): 2482-2498.
- [193] Wang H, Prentice I C, Keenan T F, Davis T W, Wright I J, Cornwell W K, Evans B J, Peng C H. Towards a universal model for carbon dioxide uptake by plants. *Nature Plants*, 2017, 3(9): 734-741.
- [194] Yang Y Z, Zhu Q A, Peng C H, Wang H, Xue W, Lin G H, Wen Z M, Chang J, Wang M, Liu G B, Li S Q. A novel approach for modelling vegetation distributions and analysing vegetation sensitivity through trait-climate relationships in China. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24110.
- [195] Yang Y Z, Zhao J, Zhao P X, Wang H, Wang B H, Su S F, Li M X, Wang L M, Zhu Q A, Pang Z Y, Peng C H. Trait-based climate change predictions of vegetation sensitivity and distribution in China. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 908.
- [196] Jackson S T. Integrating ecological dynamics across timescales: real-time, Q-time, and deep-time. *Palaos*, 2001, 16(1): 1-2.
- [197] Rull V, Vegas-Vilarrúbia T. What is long-term in ecology? *Trends in Ecology & Evolution*, 2011, 26(1): 3-4.
- [198] Rull V. Ecology and palaeoecology: two approaches, one objective. *The Open Ecology Journal*, 2010, 3(1): 1-5.
- [199] Rull V. Time continuum and true long-term ecology: from theory to practice. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2014, 2: 75.
- [200] Reitalu T, Kuneš P, Giesecke T. Closing the gap between plant ecology and Quaternary Palaeoecology. *Journal of Vegetation Science*, 2014, 25(5): 1188-1194.