

防护林学研究现状与展望

朱教君^{1,2,3*}

¹中国科学院沈阳应用生态研究所森林与土壤生态国家重点实验室, 沈阳 110016; ²辽宁省生态公益林经营管理重点实验室, 沈阳 110016; ³中国科学院清原森林生态实验站, 沈阳 110016

摘要 防护林学是研究防护林构建及经营的理论与技术的科学, 其核心内容包括防护林构建理论与技术、防护林经营理论与技术和防护林效益评价。防护林学发展的终极目的是构建与经营防护林, 使其防护功能或生态服务功能高效、稳定并可持续。防护林学是偏重实用的应用基础学科, 其发展始终依托防护林工程建设需求, 特别是以国家运作方式开展的大型防护林工程建设, 对推动防护林学发展做出了巨大贡献。国外著名的防护林工程有美国大平原各州林业工程(罗斯福工程)、前苏联斯大林改造大自然计划、日本的治山治水防护林工程和北非五国“绿色坝”跨国防护林工程等。围绕这些工程, 在防护林规划设计、树种选择、空间配置、造林方法, 结构、抚育、间伐、衰退机制与更新, 以及效益评价等各个方面开展了相关研究, 其中, 以效益评价及效益与结构的关系研究最为广泛与深入。中国幅员辽阔、自然条件复杂、森林资源相对匮乏且分布不均、自然环境恶劣, 对防护林的需求极大, 自“三北”防护林体系建设工程启动以来, 中国防护林建设规模已居世界首位, 防护林学在中国得到了长足发展, 尤其在防护林经营理论与技术研究方面取得突破性进展。防护林学以效益评价为桥梁将防护林构建和经营组合在一起, 效益与结构的关系为防护林构建及现有防护林经营提供了科学依据。未来防护林学研究将以更广泛的生态公益林或防护性森林为对象, 在研究方法上将由以林分尺度为主向更微观和更宏观两个方向拓展; 在防护林构建方面, 仍以林学理论与技术为主体, 并重点与生态系统稳定性原理、景观生态学原理相结合, 开展防护林(体系)区域分异规划设计、营建理论与技术研究; 在防护林经营方面, 将以防护林衰退与恢复机制、带状防护林更新和非带状防护林近自然经营理论与技术为重点开展研究; 在效益评价方面, 将采用遥感等技术, 以防护林(体系)、大规模防护林建设的生态环境效应评价等为主要内容开展研究。

关键词 生态公益林, 防护林, 防护林构建, 防护林经营

A review of the present situation and future prospect of science of protective forest

ZHU Jiao-Jun^{1,2,3*}

¹State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; ²Liaoning Key Laboratory for Management of Non-commercial Forest, Shenyang 110016, China; and ³Qingyuan Experimental Station of Forest Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Abstract

The science of protective forest includes the theories and technologies of creating and managing (using, conserving, repairing and renewing) protective forests in a sustainable manner to meet the desired goals, needs, and values for human benefits. This science is practiced in both plantations and natural stands. Its major goal is to create and manage protective forests to continue a sustainable benefit of protection for the objectives needed to be protected. The development of this science mostly depends on the requirements from the creation of protective forests because it is a related science involving the practice of growing and tending trees and the protective forests. It is an applied art and a technology. The worldwide national-level ecological engineering projects, such as the Great Plains Shelterbelt Project (Roosevelt Engineering) in USA, the Great Plan for the Transformation of Nature in the former Soviet Union, the forestry and water conservation projects in Japan and the Green Dam Engineering Project in the five countries of North Africa, promoted the development of the science of protective forest. The major advances in the science included planning and design, tree species selection, spatial arrangement, planting technologies, structure modeling, thinning and tending, decline and regeneration and benefit assessment. There is much more literature on benefit assessment than other aspects. In China, many areas are influenced by desertification, soil and water loss and windy climate, so protective forests have been created widely, especially the Three North Protective Forest Program (the Green Great Wall) initiated in the west of Northeast China, the north of

North China and Northwest China. Therefore, the science of protective forest has developed greatly as well, especially with significant contributions to management theory and techniques. The science of protective forest generally contains a broad range of concerns on the theories and technologies in creating and managing protective forests, which are linked by the benefit assessment. In fact, all forests, particularly non-commercial forests have protective functions. The methods of studying protective forests range from the stand scale to more microcosmic and to more macroscopic scales. With regard to creation of protective forests, studies should be done on planning and design according to regional differentiation characteristics on the basis of ecosystem stability and landscape ecology. For managing protective forests, studies should include the decline mechanism, the near-natural management and the assessment of protective forests. Benefit assessment of protective forests will be conducted at a large scale with remote sensing technology.

Key words non-commercial forest, protective forest, protective forest establishment, protective forest management

防护林是以发挥防护效应为基本经营目的的森林的总称(姜凤岐等, 2003), 既包括人工林, 也包括天然林(Zagas *et al.*, 2011)。从生态学角度出发, 防护林可以理解为利用森林具有影响环境的生态功能, 保护生态脆弱地区的土地资源、农牧业生产、建筑设施、人居环境, 使之免遭或减轻自然灾害, 或避免不利环境因素危害和威胁的森林(Brandle & Hintz, 1988; 姜凤岐等, 2003; 姜凤岐, 2012a)。实际上, 陆地上所有的森林生态系统均具有一定的防护功能。因此, 广义上, 所有以发挥防护功能为主的森林——生态公益林, 均可归为防护林。依据防护对象, 防护林可分为若干个具体的防护林种, 如农田防护林、防风固沙林、水土保持林/水源涵养林等等(姜凤岐等, 2003); 也有将防护林做更细划分的案例, 如日本将防护林划分为17类(朱教君等, 2002a)。

营建防护林是世界各国应对自然灾害和生态问题而采取的重要防治对策(曹新孙, 1981; Zagas *et al.*, 2011), 随着环境问题的日趋严峻, 森林生态服务功能逐渐为人们所认知, 更加凸显了防护林建设的重要性。美国、前苏联和日本分别于20世纪30年代中期、40年代末和50年代中期实施了美国大平原各州林业工程、斯大林改造大自然计划和日本治山治水防护林工程; 中国则在20世纪50年代初实施了中国东北西部内蒙古东部防护林建设工程。这些以国家运作方式开展的防护林工程, 在世界范围内开创了防护林工程建设的先河(姜凤岐, 2012a)。至20世纪70年代, 北非五国“绿色坝”跨国防护林工程和中国三北防护林工程的实施掀起了大规模防护林建设的高潮。至2008年, 中国仅三北地区的防护林面

积(片状林指乔木林郁闭度 $\geq 30\%$, 灌木林覆盖度 $\geq 40\%$, 精度为 $\pm 400 \text{ m}^2$; 带状林的长度大于20 m)就达到 $3\,413.28 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (片状林 $3\,283.60 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 带状林 $129.68 \times 10^4 \text{ hm}^2$) (郑晓等, 2013a, 2013b), 中国成为名副其实的防护林大国(Moore & Russell, 1990; Li *et al.*, 1999; Zhang *et al.*, 2012)。

防护林科学是一门应用性极强的学科, 防护林建设与工程的需求是防护林学研究的依托和服务归宿(姜凤岐等, 2003; Orth, 2007; 姜凤岐, 2012a)。随着世界范围内防护林建设的发展, 防护林学逐渐发展与完善。在研究内容方面, 防护林结构与效益研究方面的相关文献颇为丰富(曹新孙和陶玉英, 1981; 曹新孙等, 1981; 曹新孙, 1983; Heisler & DeWalle, 1988; Loeffler *et al.*, 1992; 姜凤岐等, 1994a; Dix *et al.*, 1995; Frank & Ruck, 2005; Dzybov, 2007; Mize *et al.*, 2008; Kulshreshtha & Kort, 2009; Tamang *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2013), 在防护林林种方面, 由于农田防护林的特殊重要性(Munns & Stoeckeler, 1946; 曹新孙, 1983; Matson *et al.*, 1997), 发表文献最多。综观国内外防护林学的发展历史, 均与防护林工程建设息息相关。特别是最近30多年来, 中国规模宏大的防护林建设为防护林学研究与发展提供了重要的物质基础, 紧紧围绕防护林建设与经营的理论和技术关键问题开展了大量的防护林研究, 并使防护林学成为颇具特色的综合研究领域。因此, 2000年以来, 中国防护林学的相关研究逐渐增多(Zhu *et al.*, 2002a; Ma, 2004)。

为更好地开展防护林学研究, 笔者在国家自然科学基金(防护林学: 31025007)资助下, 通过查阅大量国内外相关文献, 结合20余年的研究经历, 总

总结了防护林学研究现状,同时展望了未来相关研究领域和方向,以期防护林学发展和防护林建设提供一定参考。

1 防护林学的内涵

防护林学是研究防护林构建及经营的理论与技术科学,核心内容包括:防护林构建理论与技术、防护林经营理论与技术和防护林的效益评价。防护林学的基本内涵(概念)与范畴实际上为林学(尤其是森林培育学,前造林学Silviculture)(沈国舫,2001a)所包涵,林学(Forestry或Forest Science)是研究森林建造、管理、应用、保护及修复,以及与此相关的资源可持续理论与技术的科学,是为人类谋福利的科学(SAF Dictionary of Forestry, 1998; 沈国舫, 2001b);狭义的林学定义为培育和经营森林的科学,包含树木学、森林植物学、森林生态学、林木育种学、造林学、森林保护学、木材学、测树学、森林经理/经营学等诸多学科,即是以技术为主体的营林科学。林学的主要研究对象是森林,既包括自然界保存的、未经人类活动显著影响的原始天然林,也包括原始林经采伐或破坏后自然恢复起来的天然次生林以及人工林;森林既是木材和其他林产品的生产基地,又是调节、改善自然环境,使人类得以生存繁衍的天然屏障,与工农业生产和人民生活息息相关,是一项非常宝贵的自然资源。

由于防护林是以发挥防护效益为基本经营目的的森林,在林学基础上,防护林学重点关注了森林的防护作用,即充分利用森林影响环境服务功能的特性,将防护林限制在为保护生态脆弱区资源、农牧业生产、建筑设施、人居环境等免遭或减轻灾害威胁而培育的人工林或天然林(姜凤岐等, 2003; 姜凤岐, 2012a)。防护林学的研究内容没有林学所涉及的范围广泛,其关注的重点是依托防护林工程建设的防护林构建理论与技术、防护林经营理论与技术和防护林的效益评价。很多国家以防御自然灾害、维护基础设施、促进区域经济发展、改善环境和维持生态平衡等为主要目的进行了林业生态工程建设,其核心主体仍是防护林工程建设(Munns & Stoeckeler, 1946; 曹新孙和陶玉英, 1981; van Deusen, 1978; Baer, 1989; Zhu *et al.*, 2004; Dzybov, 2007; Robert, 2009; Yan *et al.*, 2011)。国际上关于防护林学最早的专著当属《Shelterbelts and Micro-

climate》(Caborn, 1965);之后,系统总结防护林学研究发展内容的专著为《Proceedings of an International Symposium on Windbreak Technology》由《Agriculture, Ecosystems & Environment》专刊发表(Brandle & Hintz, 1988)。我国防护林建设与发展深受前苏联防护林建设思想和学科体系的影响(姜凤岐, 2012a);自《农田防护林学》(曹新孙, 1983)出版发行至今,国内已出版了多部有关“防护林学”的专著,如《水土保持与防护林学》(张金池, 2011)、《农田防护林学》(朱金兆等, 2010)、《防护林经营学》(姜凤岐等, 2003)、《农田防护林生态工程学》(朱廷曜, 2001)、《农田防护林学》(阎树文, 1993)、《农业防护林学》(赵宗哲, 1993)和《防护林学》(向开馥, 1991)。这些专著阐述了防护林学的基本内涵,除防护林学的传统研究内容(林学为主)外,逐渐与生态学相结合,扩展到更为广阔的森林生态领域,标志着我国防护林学科的发展和特色。

2 防护林学的发展历史与世界重大防护林工程

早在1843年,前苏联(欧洲部分)针对严重影响俄罗斯和乌克兰干草原地区农业生产的干旱风害、土壤侵蚀等,在卡明草原(Cumming prairie)营建了农田防护试验林,但直至1931年后才成立了“全苏农林土壤改良科学研究所”(曹新孙和陶玉英, 1981),并建成世界上第一个防护林试验站(曹新孙和陶玉英, 1981; 高志义, 1997)。基于此,积累了防护林研究的众多成果,即成为防护林学发展的起始点(曹新孙和陶玉英, 1981; 高志义, 1997; 姜凤岐等, 2003)。因此,防护林学的发展历史距今约有170年。防护林是以发挥森林的防护功能为目的的林种,其最初概念的形成源于人们对天然森林加速消失的意识。随着19世纪工业革命的兴起,对自然资源,特别是对天然林的无度开发,加剧了生态环境的恶化(高志义, 1997)。19世纪中期,俄罗斯和乌克兰草原区域,由于过度垦伐,“黑风暴”频繁出现。19世纪后期至20世纪30年代,美国大平原地区(密西西比河以西和洛杉矶以东),为获取耕地,人们进行了大范围开发,1934年发生了大范围、长时间的“黑风暴”(Munns & Stoeckeler, 1946; 朱教君, 1993)。人们在遇到自然灾害时,逐渐认识到保护和合理开发利用森林资源的重要性,并开始有规划、有目的地营造

森林,以发挥森林的防护功能(如防治土地风蚀、沙化、水土流失、泥石流,降低强风危害,净化大气、土壤、水体,减少噪音、酸雨等),这便形成了防护林的初始概念(高志义,1997)。

由于防护林学是伴随着防护林工程建设而发展起来的,其发展史基本上沿着国内外重大防护林工程的发展轨迹而展开。以国家形式运作的重大防护工程主要包括:1935–1942年美国大平原各州林业工程(罗斯福工程),1949–1965年前苏联斯大林改造大自然计划,1950–1978年中国东北西部内蒙古东部防护林建设为代表的防护林工程,1954–1983年日本治山治水防护林工程,1970–1986年北非五国“绿色坝”跨国防护林工程,1978–2050年中国三北防护林工程。这些防护林工程的实施,极大地促进了防护林学的发展。

2.1 美国大平原各州防护林工程(1935–1942)

美国大平原各州防护林工程,又称“罗斯福工程”,是指在密西西比河以西和洛杉矶以东地域营建大规模防护林事件。该防护林工程启动之前,来自德国、挪威等国的居民为了改变大平原单调的景观和防风固沙,在河岸、农田及居民点附近植树造林,这便是大平原防护林建设的开端(朱教君,1993; Robert, 2009)。随着中西部大草原地区人口显著增长,高强度放牧和无节制垦殖严重破坏了大平原区域生态系统平衡,沙风暴频繁发生。大规模防护林建设是从20世纪30年代沙风暴席卷大平原后开始的(Roland, 1952)。1934年末,美国总统Franklin D. Roosevelt签署命令,1935年春正式启动了大平原各州以农田防护林工程为主体的“防护林带工程”(van Deusen, 1978)计划。Franklin D. Roosevelt自始至终主持了这项工程的决策、规划和实施。工程范围北起北达科他州,南至得克萨斯州,南北长1 850 km,东西宽161 km,包括大平原6个州3万多农场,至1943年的8年间共营造防护林带29 927 km, 30 223条,保护农田162万hm²,这是美国林业史上最大的防护林工程(朱教君,1993; Orth, 2007; Robert, 2009)。大平原防护林工程主要是在没有森林的土地上造林。

工程造林结束后不久,约有10%的造林消失或因放牧等干扰而严重受损,但80%以上保存良好并发挥了应有的作用(Munns & Stoeckeler, 1946; Roland, 1952); 10年后(1954年)再次调查发现,保存良

好并发挥作用的防护林约为42%。尽管大平原农田尚有90%需要防护林保护,但由于种种原因,防护林建设规模逐年缩小(van Deusen, 1978; Baer, 1989)。至20世纪六七十年代,部分农场为扩大耕地和兴建水利灌溉系统,与防护林带布局产生了矛盾,另外,由于旱灾(很多区域年降水量不足381 mm)、病虫害(林木同作物病虫害寄主交叉感染)及放牧不当等问题,使大面积防护林出现了衰退现象(van Deusen, 1978)。为此,1975年美国国家审计署长提出:应立即采取措施鼓励农民更新和保护现存林带,以避免多年营造的防护林消失使附近的农田再次遭受风灾侵袭(Fewin & Helwig, 1988)。进入20世纪90年代,由于农田防护林耗水及占用农田等问题,部分大平原防护林带经营者出现了摆脱农田防护林的思潮(沈照仁, 2004)。在防护林工程建设初期,主要对防护林的规划设计(林带长度与防护面积、林带行数与株行距、林带方向与带间距离)(Finch, 1988)、营造技术(树种选择、树种生长及适宜性、防护林配置与断面形状、立地条件划分,采种、育苗、植树、补植、防止动物危害)和效益评价(防护林对小气候影响、防护效益与费用)等开展了研究(朱教君, 1993); 工程后期,重点针对防护林生长发育过程中出现的衰退、死亡等问题,开展了防护林抚育、杂草控制、病虫害防治,防护林更新、改造等研究(Baer, 1989; Brandle *et al.*, 2004)。随着全球气候变化的发展及林业发展方向的转变,有关防护林缓解全球变化的作用(Guertin *et al.*, 1997; Hou *et al.*, 2011)、能量保存(DeWalle & Heisler, 1988)、动物保护(Dix & Leatherman, 1988; Dix *et al.*, 1995)及美学效益(Cook & Cable, 1995)等被人们充分认识。

2.2 前苏联时期的斯大林改造大自然计划(1949–1965)

早在1843年,前苏联针对其欧洲部分领土遭受严重的干旱风、土壤侵蚀等灾害,开始营造以农田防护林为主的防护林工程,并开展相关研究,尤其在林带保护区小气候因素与增产效益的关系、林带类型、宽度、密度、结构、带间距离等与防护林营建相关的理论与技术方面取得一些成果(曹新孙和陶玉英, 1981),是防护林建设最早的国家(高志义, 1997; Dzybov, 2007)。基于早期防护林建设经验,第二次世界大战结束后,前苏联政府着手规划了国家运作方式的防护林工程建设——“斯大林改造大自

然计划”。1948年公布了“苏联欧洲部分草原和森林草原地区营造农田防护林, 实行草田轮作, 修建池塘及水库, 以确保农业稳产高产”计划, 实施期为1949–1965年(17年), 规划营造各种防护林570万 hm^2 、8条大型防护林带(总长5 320 km, 总面积76 000 hm^2)。据统计, 至前苏联解体前(1983年)清查, 防护林占其全国森林面积的19% (高志义, 1997; 柏方敏等, 2010)。

该防护林工程在建设过程中, 应用了1843年开始的卡明草原农田防护林试验和当时防护林研究取得的成果, 在防护林学领域提出了防护林规划的综合配套思想, 确定将天然林划归为防护林范畴的理念(姜凤岐等, 2003), 重视森林保护环境和涵养水源的防护功能研究等(高志义, 1997; Korolev *et al.*, 2012), 在防护林结构以及效益评估等方面也做出了重要贡献(姜凤岐, 2012b)。

2.3 日本治山治水防护林工程(1954–1983)

日本山地灾害(土体流失、滑坡、崩塌、泥石流等)频繁, 特别是第二次世界大战后, 由于大面积森林破坏引发严重水土流失, 加剧了山地灾害的发生。早在1897年日本即颁布森林法进行森林保护和防护林营造, 1904年创建了砂防工学(即侵蚀控制工学), 将治山治水、经营防护林确定为主要对策(Fujikake, 2007)。作为国家形式运作的“治山治水防护林工程”始于第二次世界大战结束以后, 是日本防护林建设的第二个时期(朱教君等, 2002a), 1954–1963年以营造控制土壤流失为重点的防护林, 1964–1973年则以水源涵养林建设为主, 1974–1983年由于城市化迅速发展, 以保健林和都市水源涵养林建设为主; 在20世纪80年代至1990年, 防护工程建设以混凝土为主, 在山地灾害区建设了各类砂防坝, 而树木防护林则多以被动保护为主(朱教君等, 2002a)。

日本是防护林林种划分比较细致的国家, 为便于经营管理, 根据防护林不同的防护功能, 将防护林种划分为17种: 水源涵养林、水土保持林、塌方防护林、飞沙防护林、防风林、洪水灾害防护林、潮灾防护林、干旱防护林、防雪林、防雾林、雪崩防护林、落石防护林、防火林、渔业防护林、航标防护林、保健防护林和风景林(朱教君等, 2002a)。这些防护林占全国森林总面积的36% (占国土面积近1/4), 其中, 水源涵养林和水土保持林(包括海岸

防护林)是防护林的主体(占防护林面积的90%以上)(Zhu *et al.*, 2003b; Jung *et al.*, 2009)。防护林造林树种基本为乡土树种(朱教君等, 2002a), 树木容易成活, 成林有保障。治山治水防护林工程在防护林树种选择、更新改造, 促进水源涵养林和水土保持林水文调节防护功能发挥机理研究、防护林公益效应量化表达和相应防护林种经营管理方面取得丰富经验(Zhu *et al.*, 2012)。在防护林经营管理方面, 主要根据不同立地与不同树种和林分特点, 综合考虑防护效益与国民需求制定相应经营方案, 如分流域管理, 抚育、更新及复层林培育等, 同时加强国民防护林经营意识。由于日本防护林70%以上为国有, 且主要分布在山地灾害易发地区, 总体上无人管理。

2.4 北非五国“绿色坝”防护林工程(1970–1986)

北部非洲五国——摩洛哥、阿尔及利亚、突尼斯、利比亚和埃及受世界上最大沙漠撒哈拉沙漠的飞沙影响, 为了防止沙漠北移, 五国政府于1970年决定在撒哈拉沙漠北部边缘联合建设跨国林业工程——北非五国“绿色坝”防护林工程。工程规划20年(1970–1990), 工程基本内容是通过造林、种草, 在东西长1 500 km、南北宽20–40 km范围内营造各种防护林300万 hm^2 。在工程实施过程中, 各国分别做出了具体计划, 如阿尔及利亚的《干旱草原和绿色坝综合发展计划》、突尼斯的《防治沙漠化计划》和摩洛哥的《1970–2000年全国造林计划》等(高志义, 1997; 李世东等, 2003)。

“绿色坝”防护林工程除了传统规划设计、造林树种(物种)选择等技术外, 整体工程从生态学观点出发, 首先保护好当地现有天然植被, 在此基础上, 实施宜林则林、宜草则草的营林方针; 另外, 针对防护林工程受到人为严重干扰的特点, 运用法律限制过度放牧干扰(高志义, 1997)。这种以生态学观点为依据建立的防护林工程为防护林的经营理论与技术发展提供了重要参考。

2.5 中国三北防护林体系工程(1978–2050)

中国营造防护林的历史距今已有100多年(曹新孙, 1983), 开展大规模的防护林建设则是从新中国成立开始。自20世纪50年代初, 我国防护林建设一直没有间断过, 先后启动了东北西部、内蒙古东部、河北、陕西等地的防护林建设, 之后逐渐扩大至西北、豫东防护林(17县)、陕北防护林(6县)、永定河

下游防护林网(4县)、冀西防护林网(8县),以及新疆河西走廊垦区的绿洲防护林营造(高志义, 1997)。20世纪六七十年代后,以农田防护林为主的建设由北部、西部风沙低产区,扩展到华北、中原高产区及江南水网区;与此同时,黄河中、上游各省区水土保持林、水源涵养林,以及中国北方防沙治沙林、黄土高原水土保持林综合防护林建设一直持续发展。该时期防护林建设对防护林学理论和技术应用均做出了重大贡献: 1)防护林营建基础——从灾害种类(风、沙、水等)存在与发生规律、危害程度及防护林所处立地、对应树种适应性,到提出因害设防、因地制宜的防护林工程建设原则等开展研究(曹新孙, 1983; 高志义, 1997; 姜凤岐, 2012a); 2)防护林营建技术——主要借鉴了前苏联时期防护林规划设计、造林技术及抚育技术等成果和经验,结合中国防护林建设历史,提出了适合中国防护林建设的规划设计方案(高志义, 1997; 姜凤岐, 2012a, 2012b); 3)防护林防护效益——特别是对农田防护林(林带)改善农田小气候、提高产量以及生态效益,防风固沙林防沙固沙,水土保持林保持水土的机理等进行了系统研究(曹新孙, 1983; 向开馥, 1991; 朱金兆等, 2010),为防护林规划设计、结构调控等防护林构建与经营提供了基础支撑(高志义, 1997),为1978年三北防护林工程启动奠定了良好基础。

中国东北西部、华北北部和西北大部分地区(简称三北)植被稀少,气候恶劣,风沙危害和水土流失十分严重,木料、燃料、肥料、饲料非常缺乏,农牧业产量低而不稳,人民生活长期处于较低水平(朱教君等, 2003; 姜凤岐等, 2009)。为从根本上改变三北地区的生态环境和区域生产、生活条件,1978年11月国务院正式批准了为期73年(1978–2050)的三北防护林工程建设。三北防护林工程是世界上最大的人工造林工程,是我国以国家运作方式实施的第一个重大林业生态工程,包括中国13个省市自治区,551个县旗区(73°26′–127°50′ E, 33°30′–50°12′ N),涵盖面积达407亿 hm^2 (占国土面积42.4%,包括中国95%以上风沙危害区和40%水土流失区,遥感监测面积为399亿 hm^2),工程分3个阶段、8期工程,计划造林0.377亿 hm^2 ,成为人类历史上规模最大、持续建设时间最长、环境梯度最大的林业生态建设工程。三北防护林工程主要防护林类型:农田防护林、水土保持林、水源涵养林、防

风固沙林等(姜凤岐等, 2003; 刘冰等, 2009)。在三北防护林工程建设的昭示下,中国在近20余年里相继启动了沿海防护林工程、珠江流域综合治理防护林工程、长江中上游防护林工程、辽河流域防护林工程、黄河中游防护林工程等17项林业生态工程,标志着防护林工程进入了全新时代。三北防护林工程建设实施30余年来,对防护林学的深刻影响主要涉及如下三方面: 1)充实了防护林构建基础理论与技术研究内容。由于三北地区具有普遍干旱的特点,属于困难造林区,三北防护林工程建设提出了高效、持续、可操作的径流林业配套技术措施(高志义, 1997)。2)提出生态经济型防护林体系建设理念,并基于此进行防护林系统效益评价。对三北地区主要防护林类型的综合防护林效益进行了科学监测,明确了主要类型防护林的生态效益(Wang *et al.*, 2010)。3)认识到防护林经营理论与技术研究不足,开展了相关研究并取得一定成果。以农田防护林、水土保持林和防风固沙林为对象,提出了防护林防护成熟与阶段定向经营理论并给出各个经营阶段促进或维持防护成熟状态的经营技术(姜凤岐等, 2003; 朱教君等, 2004, 2005; Zhu *et al.*, 2008)。

3 防护林的构建理论与技术

防护林工程的建设推动了防护林构建理论与技术的发展。防护林工程实质上是以森林培育学(造林学)理论与技术为主体,由木本植物材料构成的生物性生态工程(姜凤岐等, 2003)。目前,有关防护林构建理论与技术相对完善,主要包括以下几方面:规划设计、树种选择(立地条件划分)、空间配置(防护林体系)和造林方法(技术)。

3.1 规划设计

防护林建设主要是以人工造林为主,近期已将现有天然林纳入到防护林组成和经营范畴。防护林的规划设计重点在人工造林,如何在没有森林的地区构建具有多样性和稳定性的防护林生态系统,并使其防护功能高效、稳定与可持续,是防护林规划设计中最重要的研究主题(曹新孙, 1983)。经过长期研究,确定了防护林规划设计的原则和主要参数(Caborn, 1965; 曹新孙, 1983)。规划设计的基本原则是“因害设防、因地制宜”(Caborn, 1965; 曹新孙, 1983; Schroeder, 1988; 高志义, 1997)。不同的防护林种要求防护目标不同,因此,各防护林种的设计

参数也不同(Tibke, 1988; Ticknor, 1988)。由于农田防护林的特殊性,对林带的设计原则和林带/林网参数开展了较详细的研究(曹新孙, 1983; Dronen, 1988; Cleugh *et al.*, 2002)。随着防护林建设的发展与扩大,现代防护林规划设计中主要考虑如何突破单一配置模式,实行(林)带、片(林)、(林)网相结合的配置(高志义, 1997);另外,防护林的规划设计已逐渐实现了计算机模拟化(Ellis *et al.*, 2004; Ferreira, 2011)。防护林设计时,除考虑因害设防外,也考虑到美学(Grala *et al.*, 2010, 2012)、应对全球气候变化(Guertin *et al.*, 1997)、系统稳定性(Motta & Haudemand, 2000)以及生物多样性保护(Johnson *et al.*, 1994; Gámez-Virúés *et al.*, 2010)等需要。一些天然林,尤其是以发展水源涵养、水土保持、山体滑坡/塌方/落石防治、雪崩防止以及都市周边综合防护为主的森林,均规划、纳入到防护林组成和经营范畴,使防护林概念更为广泛,即目前的生态公益林(non-commercial forests) (朱教君和李凤芹, 2007)。

3.2 树种选择

树种选择不仅直接影响防护林树木成活、生长、发育,而且对防护林结构、防护效益产生持久性影响(曹新孙, 1983),因此成为防护林构建的最重要基础。重大防护林工程启动之初,树种选择的研究是重点,如美国大平原防护林工程在1935–1942年对常用树种进行筛选,给出了适合大平原地区的主要树种(朱教君, 1993; 柏方敏等, 2010);前苏联的草原防护林建设同样是根据乔、灌木树种根系、生长发育状况及其对不同土壤的适应性进行分类选择(高志义, 1997);中国各地区对主要防护林树种进行了详细筛选(曹新孙, 1983)。研究证明,防护林树种选择必须综合考虑树种的生物学、生态学、林学特性,依据气候土壤条件做出选择。“适地适树”是国内外防护林树种选择中普遍认同的原则(曹新孙, 1981, 1983; Bagley, 1988; 姜凤岐等, 2003; 柏方敏等, 2010)。防护林树种选择要求考虑树种配置、树木成活、生长等对防护林结构的影响(Ritchie, 1988)。另外,随着世界范围内森林经营方向由木材生产为主转向利用森林生态系统其他生态服务功能,防护林的稳定性或抗逆性、持久性和自然更新能力等也是树种选择时应考虑的要素(Motta & Haudemand, 2000)。防护林树种选择应更加注重乡

土树种,慎重考虑外来树种(Fujikake, 2007)。随着生态经济型防护林体系建设的发展,树种选择将生态指标与经济指标相结合也成为需要考虑的要素(柏方敏等, 2010)。

3.3 空间配置

防护林空间配置依据防护目标/目的不同而不同。农田防护林所在农田生态系统中,空间配置较为复杂,因此,林带空间配置理论与技术研究较全面深入(曹新孙和陶玉英, 1981);而以水土保持、水源涵养及防风固沙等非带状防护林的空间配置相对简单(朱教君等, 2004)。

早在1981年,我国农田防护林的创始人曹新孙先生即对林带空间配置研究进行了较为系统的总结(曹新孙和陶玉英, 1981):关于林带空间配置必须与林带结构相结合,即不同的林带结构要求林带宽度及横断面形状不同(曹新孙等, 1981)。林带究竟设置多宽?由于受林带所处地域和保护对象的不同,国内外一直没有统一结论,如欧洲(丹麦、英国)学者认为林带不宜过宽,宽高比超过一定限度,防护效应即受到影响(Caborn, 1965);而前苏联学者通过对不同林带宽度的防风试验得出:增加林带宽度的同时应该增加林带的疏透度,反之亦然(曹新孙和陶玉英, 1981);中国林带宽度的设计则多依据所保护的农田现状、所选树种确定,如三北防护林工程建设的林带宽度多在8–24 m(曹新孙, 1983)。林带横断面形状配置主要受林带结构影响,在通透结构下以矩形最佳(曹新孙等, 1981);林带长度作为空间配置指标之一早有定论,一般不低于林带高度的12倍(曹新孙和陶玉英, 1981);林带走向应垂直于主害风,考虑到与农田作业结合,走向可与主害风方向偏离30°(曹新孙, 1983; 朱教君等, 2003)。林带空间配置的关键要素——由有效防护距离决定的带间距离(曹新孙等, 1981; Wei *et al.*, 1985),早在1935年就有学者开展了相关研究,但研究结果因地域、防护对象不同差别较大,如欧洲(丹麦)以林带高为15 m计,则林带之间的距离应在250 m;而前苏联在草原农田防护林带设计中则根据土壤类型采用带间距离300–400 m(栗钙土)、400–500 m(南方黑钙土)、500–600 m(普通黑钙土)(曹新孙和陶玉英, 1981)。实际上,假设在林带结构最佳状态条件下,决定带间距离大小的关键是保护对象需要降低害风的程度与林带高度,只要这

两个因子确定, 带间距离即可确定。Zhu等(2002a)在以往研究基础上, 通过对林带结构、林带高度量化, 确定了带间距离设计模型: $SIP = \delta L_{tp} H_0$ (SIP 是带间距离; δ 是与林带结构相关的参数, 由林带疏透度表征; L_{tp} 即害风相关参数; H_0 是林带的成熟高度, 与树种、立地相关)。带间距离模型中的关键参数 δ 和 H_0 分别由林带结构试验(曹新孙等, 1981)和林带高度生长变化规律试验(姜凤岐等, 1994b; 朱教君等, 2002b)确定。

其他防护林种(非带状)主要依据防护林保护对象, 遵循因地制宜、因害设防、适地适树和乔灌草结合等原则进行空间配置, 重点考虑植被演替的规律和各树种的生态学和生物学特性(姜凤岐等, 2006, 2009)。对于防风固沙林, 其空间配置的关键是以水量平衡为依据, 造林地区的水分条件必须保证防风固沙林存活、生长与发育成林(Zheng *et al.*, 2012); 因此, 树种配置以低耗水的林种和乡土树种为主, 保证树木充足的水分营养空间; 严格控制乔木树种造林数量与密度, 配置成林的盖度应与当地降水相适应。对于水源涵养林和水土保持林, 早在19世纪30年代, 欧洲各国(如奥地利、德国、法国、瑞士、意大利、匈牙利等国)为山洪、泥石流及滑坡等危险易发区制定了严厉的森林保护法, 在这些区域配置水源涵养林和水土保持林, 禁止森林采伐, 重点考虑如何最大限度地发挥森林的涵养水源、保持水土、调节气候、改善水质等作用(曹新孙和陶玉英, 1981; 高志义, 1997)。

3.4 造林技术

防护林的造林技术与林学(森林培育学)的造林技术相似(沈国舫, 2001b), 整地方式、整地时间一般随造林地具体环境条件的不同而不同。整地方式包括局部与全面整地, 而造林时间依不同林种而异, 尤其是在干旱沙区的防风固沙林和水土流失严重地区的水土保持林, 造林技术的关键是把握土壤含水量和降水季节(曹新孙, 1983)。造林方法大致包括植苗造林(关键技术: 保证苗木含水量)、萌蘖造林(关键技术: 选择萌蘖性强的树种, 成活后的定株)以及大面积飞播造林(属于非常规造林技术, 要求从植物种、播种区选择, 到播种量、播种期设计等一系列技术)(姜凤岐等, 2003)。选择适宜的造林季节也是造林技术的关键, 一般以提高造林成活率, 保证幼苗、幼树生长为标准, 主要包括春季、秋季、

雨季和冬季几个时间段(曹新孙, 1983)。

4 防护林经营的理论与技术

一般认为, 森林经营是森林培育过程的重要环节。然而, 经典的森林经营理论与技术是以适应木材利用为主要需求而提出的, 而经营防护林的主要需求是取得其防护效益, 显然, 传统的森林经营理论与技术很难应用到防护林经营实践中。因此, 依据防护林的特点, 建立适合重点利用森林防护功能的防护林经营理论与技术, 是防护林学发展的必然。由于防护林经营理论与技术没有可供借鉴的前期学科领域, 因此, 防护林经营理论与技术远远落后于防护林构建理论与技术。20世纪80年代末、90年代初, 随着苏联解体, 中国、美国成为世界防护林大国, 而中国则是建立防护林经营理论与技术体系最主要的国家。《防护林经营学》(姜凤岐等, 2003)的出版发行标志着防护林经营理论与技术体系框架的形成(Zhu, 2008)。防护林经营主要包括: 防护成熟与阶段定向经营、结构配置优化与结构调控、衰退机制与更新改造。

4.1 防护成熟与阶段定向经营

防护林经营是对培育防护林各项技术措施和人工作业的统称, 包括从幼林直到采伐更新的全过程所采取的系列定向培育技术, 旨在实现防护林效益的高效、稳定和可持续。防护成熟是指防护林在生长发育过程中达到全面有效的防护状态(姜凤岐等, 1994b), 成熟持续的时间为防护成熟期, 其两个端点分别定义为初始防护成熟龄和终止防护成熟龄(Zhu *et al.*, 2002a; 姜凤岐等, 2003)。经营防护林的目标就是尽量维持防护林的防护成熟状态, 当防护林在非防护成熟状态时, 所有的经营措施均应使防护林向着防护成熟状态发展。以此为依据, 可将防护林的生长发育过程分为3个阶段: 一为成熟前期, 即从幼林到防护成熟到来之前; 二为防护成熟期, 即防护成熟状态持续的时期; 三为更新期, 即林木接近自然成熟开始更新直到更新结束的时期(朱教君和姜凤岐, 1996; 姜凤岐和朱教君, 2002; 朱教君等, 2002b)。对应于这三个阶段的培育措施: 成熟前期以除草、松土、灌溉、施肥、间作、定株、修枝为基本内容的幼林抚育技术, 以及其他有利于林分生长、发育或尽快进入防护成熟状态的技术措施; 防护成熟期以间伐为主要内容的抚育间伐技

术、修枝技术, 以及其他有利于组成、结构处于最佳防护状态的技术措施; 更新期以择伐和渐伐为主要方式的主伐技术及与之相应的天然更新、人工促进天然更新和人工更新等更新技术, 或其他有利于林木更新并尽量维持防护效益不间断的主伐更新方式(姜凤岐等, 2003; Zhu, 2008)。上述经营技术措施主要是针对人工防护林, 天然起源防护林的防护成熟与经营阶段及其对应经营技术则与人工防护林有所不同, 但相关原理与人工防护林是相同的(姜凤岐等, 2003)。

4.2 结构配置优化与结构调控

防护林结构是指林分内树木干、枝、叶的密集程度和分布状态, 由树种组成、林分密度、林分分层(乔、灌、草等)、林木胸径、树高、林龄等众多因子综合决定(Heisler & DeWalle, 1988; 朱教君等, 2003)。防护林结构是发挥防护林效益的决定性要素(Kenney, 1987; Zhou *et al.*, 2002; 姜凤岐等, 2003), 既是防护林规划设计的关键参数, 同时也是防护林经营过程指示防护状态的依据(Zhu *et al.*, 2002a; 姜凤岐等, 2003; Zhou *et al.*, 2004)。为实现防护、经济和社会效益最大化并永续利用, 防护林体系必须具有在空间上布局的合理性及树种、林分的多样性和稳定性特征。结构优化是选择最佳结构并加以保持的过程, 因此, 防护林结构研究一直是该领域的热点与难点。由于防护林的种类不同, 各防护林种的结构表达也不同, 如农田防护林及其他以防御害风为主的带状防护林通常用疏透度(optical porosity)表征其结构(曹新孙等, 1981; Kenney, 1987), 其确定方法则多用数字图像处理法(Bea *et al.*, 1975; Kenney, 1987; 姜凤岐等, 1994a; Nelmes *et al.*, 2001); 而防风固沙林和水土保持林等多以片状形态出现, 其结构的表达同天然林一样, 主要以林分的成层性、郁闭度等指标表达(Zhu *et al.*, 2003a)。无论是带状林的疏透度, 还是片状林的成层性/郁闭度均为林分水平的结构特征, 主要通过防护效益对比优选出结构模式和参数(Heisler & DeWalle, 1988; Zhou *et al.*, 2004; Zhu *et al.*, 2004; Mercer, 2009; Ma *et al.*, 2010), 以达到结构优化的目的。关于农田防护林结构与防风效益的研究文献最为丰富(曹新孙等, 1981; Torita & Satou, 2007; Yeh *et al.*, 2010), 多数认为最佳结构是疏透型, 如杨树疏透度为0.25左右(姜凤岐等, 1994a; 朱教君等, 2003)。

防护林的总体防护效益不仅仅由林分尺度的结构决定, 同时也受到防护林体系(景观尺度)配置(空间布局形式)的影响(Forman & Baudry, 1984; Kristensen & Caspersen, 2002; 朱教君等, 2003; Dzybov, 2007)。对于带状防护林或防护林体系, 其配置布局形式主要包括: 林带方向、树木配置、带间距离和林网空间布局及其连续性等指标(曹新孙等, 1981; Harvey, 2000); 对于非带状防护林(片状), 其空间配置则尽可能以增加系统物种、林种多样性、提高系统稳定性, 达到多层次、多空间利用的合理生态位结构, 使各组分在时空位置各得其所(姜凤岐等, 2003)。防护林结构调控在林分尺度上, 就是要保证每个林分的结构处于最佳防护状态, 对于偏离最佳结构状态的林分进行人为调控, 如对于带状防护林可进行树木分级(朱教君和姜凤岐, 1996)、抚育间伐、修枝(姜凤岐等, 1994b)、增加边行灌木等等; 对于固沙林主要依据水量平衡原理采取密度调控技术, 以保障防护林树种正常生长发育所需的水分营养面积(姜凤岐等, 2003; Zheng *et al.*, 2012), 维持固沙林生态系统的稳定性; 对于水土保持林或水源涵养林, 则重点调控林分郁闭度, 使林冠既能有效地降低降水的冲击, 又可使林下植被层得到良好发育(朱教君等, 2004)。

4.3 衰退机制与更新改造

实现防护林功能高效必须以健康稳定为前提, 然而, 由于种种原因, 各类防护林在生长发育过程中会出现生理机能下降, 生长发育滞缓或死亡, 生产力、地力下降, 林分结构不合理等, 导致防护效能下降等衰退现象(朱教君等, 2005; 姜凤岐等, 2006; 宋立宁等, 2009)。关于防护林衰退的原因, 宋立宁等(2009)总结认为: 树种选择不当, 没有充分考虑树种与当地气候相适应的规律, 所选防护林造林树种不能适应当地的气候条件造成林木生长不良或死亡(沈国舫, 2001b; 朱教君等, 2005; Fujikake, 2007); 防护林结构不合理导致树木生长不良, 尤其是树种结构单一, 生物多样性降低, 病虫害大面积爆发等导致防护林衰退发生(Baer, 1989; 姜凤岐等, 2003); 缺乏应有的经营管理, 造林后不及时抚育, 或抚育过于粗放, 造林密度不合理, 树木生长受到影响且易导致病虫害, 极易形成衰退林分(姜凤岐等, 2003); 频繁的人为与自然干扰, 尤其是不合理的人为干扰导致防护林生态系统结构遭到破坏, 引

起功能降低甚至丧失,成为引起防护林衰退的主要人为干扰因素(陈利顶和傅伯杰,2000;朱教君等,2005;Zheng *et al.*,2012);另外,全球变化对防护林树木带来的高温、水分胁迫,导致树木代谢和调节过程失调,抑制植物生长,促进衰老、枯萎和落叶等(姜凤岐等,2006;Zhu *et al.*,2008)。对衰退防护林的早期诊断是防治衰退的重要措施,通过生态、生物因子衰退早期诊断法,即以单因素实验,判别分析主要土层厚度、有机质含量、氮含量、含水率、微生物总量等生态要素,建立判别函数;同时,对防护林系统各个水平(群落水平(密度、结构、叶面积指数)、个体水平(树木生长过程)、器官水平(叶面积、叶绿素、叶养分、水分等))进行监测,以此对防护林衰退的可能性进行预测(姜凤岐等,2003)。

应对防护林衰退、维持防护林稳定状态的主要措施是对现有防护林进行更新改造(Baer,1989;Zhu *et al.*,2003b)。根据防护林衰退的原因,首先应最大限度地遵从适地适树原则,以采用乡土树种为主替代衰退树种;在单一树种防护林中则需考虑增加适宜树种数量,如中国东北单一杨树带状防护林,用榆树、樟子松、油松等树种更替杨树林带增加了树种多样性(姜凤岐等,2003);对于片带状防护林的衰退,应重点考虑近自然更新技术(Zhu *et al.*,2003b)。

5 防护林效益评价

防护林防护效益/效应评价是检验防护林营建合理与否和未来防护林科学规划设计的关键,是联系防护林构建与经营的纽带。防护林构建后综合效益如何?是否达到规划设计的目标?对于达到目标的防护林如何经营以维持其最佳防护状态?对于没有达到目标的防护林需采取哪些必要的经营技术进行改造与重建(曹新孙,1983)?关于防护林效益评价是防护林中研究最多的内容(姜凤岐等,2003),主要集中在防护结构与效益关系方面。对于片状防护林(如水土保持林、水源涵养林、海岸防护林和防风固沙林),由于其结构具有一般森林的特点,其生态效益评价与森林生态系统的生态服务功能评价研究相似,主要包括涵养水源、保持水土、抑制风沙、改善区域小气候、释氧吸碳、减少噪音及美学休憩等效应(Li *et al.*,1999;姜凤岐等,2003)。对于海岸防护林效益研究多集中在海岸线较

长的国家,确定了海岸林防风(de Zoysa,2008)、阻盐等效益(Zhu *et al.*,2002a)。

由于农田防护林(带状)分布的特殊性和突出的结构问题,国内外开展了大量相关研究。尤其是林带或模拟林带的防风效应研究较为详尽(Caborn,1965;曹新孙,1983;Wang *et al.*,2001;朱廷曜,2001;Ozawa *et al.*,2007;Santiago *et al.*,2007;Sudmeyer & Speijers,2007;Bourdin & Wilson,2008;Park *et al.*,2008;Campi *et al.*,2009;Rosenfeld *et al.*,2010;Ferreira & Lambert,2011;Bitog *et al.*,2012)。除此之外,林带的热力学效应(曹新孙,1983;DeWalle & Heisler,1988;Liu & Harris,2008;He & Hoyano,2009)、水文学效应(曹新孙,1983;Hou *et al.*,2003)和土壤学效应(Szajdak & Gaca,2010;Korolev *et al.*,2012)等方面均开展了研究。在不同林带或模拟林带结构(宽度、高度、树种组成和疏透度)对蒸腾/蒸发(Ryszkowski & Kedziora,2007;Campi *et al.*,2012)、积雪分布(Kort *et al.*,2012)、温度(Onyewotu *et al.*,2004)等影响进行研究,进而研究了林带对农作物产量的影响(Caborn,1965;曹新孙,1983;Baldwin,1988;Kort,1988;Foereid *et al.*,2002)。由于防护林结构研究取得一定成果,基于空气动力学理论的防护林效应评价研究得到发展(McNaughton,1988;Wang & Zhou,2003),尤其是林带立体结构、片状林垂直结构定量化(Zhou *et al.*,2004;Zhu *et al.*,2004)促进了防护林效益研究。随着防护林建设在全球变化中的作用越来越被重视,近年来世界各地开展了有关防护林碳效应的研究(龚维等,2009),包括对防护林林地土壤碳动态影响(Sauer *et al.*,2007)、对防护林树木生物量碳量估计(Zhou *et al.*,2007;Hou *et al.*,2011;Tamang *et al.*,2012),以及应用遥感方法进行大范围防护林地上部分碳评估(Czerepowicz *et al.*,2012)等。另外,随着防护林规模建设与遥感技术的发展,对于区域防护林的生物多样保护(Benton *et al.*,2003)和环境效应(Bentrop & Leininger,2002;Wiseman *et al.*,2009;Yan *et al.*,2011)的研究逐渐增多。

6 防护林学研究展望

综观国内外防护林学的发展历史和研究现状,可以看出:虽然世界范围内启动了很多防护林工程,但针对各个工程开展的相关研究由于地域科学

发展的不平衡详略差异巨大。至今,关于防护林学研究领域的各个方面均取得一定研究进展,但以往研究的重点和学科积累仍偏重于规划设计、树种选择(搭配)、结构对效益的影响和营林技术等方面(姜凤岐等, 2003; 宋立宁等, 2009); 在经营原理与技术方面,近十几年来基于中国三北防护林工程建设的需求形成了基本框架(姜凤岐等, 2003; Zhu, 2008)。另外,由于防护林本身是一个涵盖若干林种的森林生态系统总和,本文所涉及的防护林多为人工防护林,涵盖的重点林种包括农田防护林、防风固沙林、水土保持林/水源涵养林等。随着社会发展与科学进步,尤其是林业定位在世界范围内的转变——从传统的强调木材生产转向更广阔的目标(保护濒危物种、可持续生态系统服务功能发展),防护林构建与经营理念将成为森林管理者关注的焦点问题(Brandle *et al.*, 2004)。因此,基于本文分析及笔者对防护林学相关领域的研究体会,对近期防护林学研究的内容与方向做如下总结。

6.1 研究对象

目前,防护林学主要以狭义防护林(如水源涵养林、农田防护林、水土保持林、防风固沙林等人工防护林)为研究对象。而实际上,所有森林生态系统均具有防护功能,只是在经营过程中人们赋予的关注不同而已。因此,随着林业地位的转变,广义的“防护林”——生态公益林(non-commercial forest)或防护性森林(以发挥森林防护效能或生态功能)应成为未来该领域的主要研究对象。

6.2 防护林构建研究

传统的防护林构建研究多从林分尺度入手。随着防护林建设规模的不断扩大与成果积累,需开展基于生态系统多样性与稳定性原理和景观生态学原理的防护林体系建设研究,即从生态学观点出发开展防护林多样性与稳定性研究,并与防护林规划设计等构建内容相结合,这是防护林学今后的主要研究内容。另外,在防护林构建中,防护林结构及其与防护效益关系的研究是防护林学研究的永恒主题,仍是今后防护林学研究的核心。

6.3 防护林经营研究

在防护林建设实践中,因经营管理不当或疏于管理而造成衰退者屡见不鲜。现有防护林衰退现象严重,需要对其形成机制进行系统研究,为衰退防护林的重建与恢复奠定理论基础。以往关于带状防

护林经营的研究较为详尽,而对片状防护林经营的研究相对薄弱,因此,需开展片状防护林近自然经营研究,包括不间断(连续覆盖)更新、近自然更新经营机理研究、防护林更新障碍要素研究及解除更新障碍的技术措施等,保障防护效益连续发挥。另外,随着生态公益林或防护性森林,尤其是许多天然林纳入防护林经营范畴后,势必导致传统的防护林概念彻底变革(高志义, 1997),其经营理念应与防护林相一致,因此,分别林种、起源、树种组成的生态公益林经营理论与技术系统研究将是防护林经营研究的重要内容。

6.4 防护林体系生态环境效益评价

防护林生态环境效益评价是保证防护林构建与经营科学合理的基础,因此,效益评价仍是防护林学研究的重点。由于防护林建设已经到了从规模建设转向内涵建设的新阶段,防护林效益评价研究应紧紧围绕高效、稳定、可持续的建设目标,不仅仅从林分尺度上开展效益评价,而且应加强探索防护林体系的生态环境效益评价,尤其是利用现代遥感技术与生态学相结合的理念,对大尺度防护林效益进行综合评估;在此基础上提出适合防护林特点的构建与经营理念和观点,完善防护林学的基础理论与技术体系。

6.5 研究方法

在研究方式、方法上,应从定性研究向定量研究方向发展,建立野外定位监测与实验室相结合的研究方法体系,由以林分尺度为主向更微观和更宏观两个方向拓展;由以地面监测为主向地面与遥感有机结合方向发展,必须把防护林学研究从单一的林学观点转变成为生态学和林学交叉的学科,以适应防护林学的发展。

基金项目 国家自然科学基金项目(防护林学: 31025007)和中国科学院战略性先导科技专项(国家重大生态工程固碳量评价——三北防护林工程固碳速率和潜力研究: XDA05060400)。

致谢 闫巧玲、宋立宁、郑晓、张金鑫和闫妍等在本文撰写过程中给予了大力帮助,谨致谢意。

参考文献

- Baer NW (1989). Shelterbelts and windbreaks on the Great Plains. *Journal of Forestry*, 87(4), 32–36.
 Bagley WT (1988). Agroforestry and windbreaks. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 22–23, 583–592.

- Bai FM, Dai CD, Chen CZ, Yang N (2010). Progress of research on worldwide protection-forest. *Hunan Forestry Science and Technology*, 37(5), 8–14. (in Chinese with English abstract) [柏方敏, 戴成栋, 陈朝祖, 杨楠 (2010). 国内外防护林研究综述. 湖南林业科技, 37(5), 8–14.]
- Baldwin CS (1988). The influence of field windbreaks on vegetable and specialty crops. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 22–23, 191–204.
- Bean A, Alperi RW, Federer CA (1975). A method for categorizing shelterbelt porosity. *Agricultural Meteorology*, 14, 417–429.
- Benton TG, Vickery JA, Wilson JD (2003). Farmland biodiversity: Is habitat heterogeneity the key? *Trends in Ecology and Evolution*, 18, 182–188.
- Bentrop G, Leininger T (2002). Agroforestry: mapping the way with GIS. *Journal of Soil and Water Conservation*, 57, 148–153.
- Bitog JP, Lee IB, Hwang HS, Shin MH, Hong SW, Seo IH, Kwon KS, Mostafa E, Pang ZZ (2012). Numerical simulation study of a tree windbreak. *Biosystems Engineering*, 111, 40–48.
- Bourdin P, Wilson JD (2008). Windbreak aerodynamics: Is computational fluid dynamics reliable? *Boundary-Layer Meteorology*, 126, 181–208.
- Brandle JR, Hintz DL (1988). Windbreaks for the future. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 22–23, 593–596.
- Brandle JR, Hodges L, Zhou XH (2004). Windbreaks in North American agricultural systems. *Agroforestry Systems*, 61–62, 65–78.
- Caborn JM (1965). *Shelterbelts and Microclimate*. Faber and Faber Ltd., London. 288.
- Campi P, Palumbo AD, Mastrorilli M (2009). Effects of tree windbreak on microclimate and wheat productivity in a Mediterranean environment. *European Journal of Agronomy*, 30, 220–227.
- Campi P, Palumbo AD, Mastrorilli M (2012). Evapotranspiration estimation of crops protected by windbreak in a Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 104, 153–162.
- Cao XS (1981). Review on research of protective forests in worldwide (2). *Bulletin of the Institute of Forestry and Pedology, Academia Sinica*, 5, 191–214. (in Chinese) [曹新孙 (1981). 农田防护林国外研究概况(二). 中国科学院林业土壤研究所集刊, 5, 191–214.]
- Cao XS (1983). *Shelterbelt for Farmland*. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [曹新孙 (1983). 农田防护林学. 中国林业出版社, 北京.]
- Cao XS, Lei QD, Jiang FQ (1981). Optimum porosity and transversal section (cross sectional shape) for shelterbelts. *Bulletin of the Institute of Forestry and Pedology, Academia Sinica*, 5, 9–19. (in Chinese) [曹新孙, 雷启迪, 姜凤岐 (1981). 防护林带最适疏透度和横断面形状的探讨. 中国科学院林业土壤研究所集刊, 5, 9–19.]
- Cao XS, Tao YY (1981). Review on research of protective forests in worldwide (1). *Bulletin of the Institute of Forestry and Pedology, Academia Sinica*, 5, 177–190. (in Chinese) [曹新孙, 陶玉英 (1981). 农田防护林国外研究概况(一). 中国科学院林业土壤研究所集刊, 5, 177–190.]
- Chen LD, Fu BJ (2000). Ecological significance, characteristics and types of disturbance. *Acta Ecologica Sinica*, 20, 581–586. (in Chinese with English abstract) [陈利顶, 傅伯杰 (2000). 干扰的类型、特征及其生态学意义. 生态学报, 20, 581–586.]
- Cleugh HA, Prinsley R, Bird PR, Brooks SJ, Carberry PS, Crawford MC, Jackson TT, Meinke H, Mylius S, Nuberg I, Sudmeyer R, Wright A (2002). The Australian national windbreaks program: overview and summary of results. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 42, 649–664.
- Cook PS, Cable TT (1995). The scenic beauty of shelterbelts on the Great Plains. *Landscape and Urban Planning*, 32, 63–69.
- Czerepowicz L, Case BS, Doscher C (2012). Using satellite image data to estimate aboveground shelterbelt carbon stocks across an agricultural landscape. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 156, 142–150.
- de Zoysa M (2008). Casuarina coastal forest shelterbelts in Hambantota City, Sri Lanka: assessment of impacts. *Small-Scale Forestry*, 7, 17–27.
- DeWalle DR, Heisler GM (1988). Use of windbreaks for home energy conservation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 22–23, 243–260.
- Dix ME, Johnson RJ, Harrell MO, Case RM, Wright RJ, Hodges L, Brandle JR, Schoeneberger MM, Sunderman NJ, Fitzmaurice RL, Young LJ, Hubbard KG (1995). Influences of trees on abundance of natural enemies of insect pests: a review. *Agroforestry Systems*, 29, 303–311.
- Dix ME, Leatherman D (1988). Insect management in windbreaks. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 22–23, 513–537.
- Dronen SI (1988). Layout and design criteria for livestock windbreaks. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 22–23, 231–240.
- Dzybov DS (2007). Steppe field shelterbelts: a new factor in ecological stabilization and sustainable development of agrolandscapes. *Russian Agricultural Sciences*, 33, 133–135.
- Ellis E, Bentrop G, Schoeneberger MM (2004). Computer-based tools for decision support in agroforestry: current state and future needs. *Agroforestry Systems*, 61, 401–421.
- Ferreira AD (2011). Structural design of a natural windbreak using computational and experimental modeling.

- Environmental Fluid Mechanics*, 11, 517–530.
- Ferreira AD, Lambert RJ (2011). Numerical and wind tunnel modeling on the windbreak effectiveness to control the aeolian erosion of conical stockpiles. *Environmental Fluid Mechanics*, 11, 61–76.
- Fewin R, Helwig L (1988). Windbreak renovation in the American Great Plains. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 22–23, 571–582.
- Finch SJ (1988). Field windbreaks: design criteria. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 22–23, 215–228.
- Foeroid B, Bro R, Mogensen VO, Porter JR (2002). Effects of windbreak strips of willow coppice-modelling and field experiment on barley in Denmark. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 93, 25–32.
- Forman RTT, Baudry J (1984). Hedgerows and hedgerow networks in landscape ecology. *Environmental Management*, 8, 495–510.
- Frank C, Ruck B (2005). Double-arranged mound-mounted shelterbelts: influence of porosity on wind reduction between the shelters. *Environmental Fluid Mechanics*, 5, 267–292.
- Fujikake I (2007). Selection of tree species for plantations in Japan. *Forest Policy and Economics*, 9, 811–821.
- Gómez-Virués S, Gurr GM, Raman N, Nicol HI (2010). Plant diversity and habitat structure affect tree growth, herbivory and natural enemies in shelterbelts. *Basic and Applied Ecology*, 11, 542–549.
- Gao ZY (1997). Development of shelterbelt construction in China. *Journal of Beijing Forestry University*, 19(Suppl. 1), 67–73. (in Chinese) [高志义 (1997). 我国防护林建设与防护林学的发展. 北京林业大学学报, 19(增刊1), 67–73.]
- Gong W, Li J, He Y, Ding F, Yao Y, Zhang HY, Sun YR (2009). Developing forestry carbon sinks to promote the construction of the Three-North Shelter Forest Program. *Chinese Journal of Ecology*, 28, 1691–1695. (in Chinese with English abstract) [龚维, 李俊, 何宇, 丁锋, 姚源, 张浩宇, 孙一荣 (2009). 发展林业碳汇推动三北防护林体系建设. 生态学杂志, 28, 1691–1695.]
- Grala RK, Tyndall JC, Mize CW (2010). Impact of field windbreaks on visual appearance of agricultural lands. *Agroforestry Systems*, 80, 411–422.
- Grala RK, Tyndall JC, Mize CW (2012). Willingness to pay for aesthetics associated with field windbreaks in Iowa, United States. *Landscape and Urban Planning*, 108, 71–78.
- Guertin DS, Easterling WE, Brandle JR (1997). Climate change and forest in the Great Plains: issues in modeling fragmented woodlands in intensively managed landscapes. *BioScience*, 47, 287–295.
- Harvey CA (2000). Colonization of agricultural windbreaks by forest trees: effects of connectivity and remnant trees. *Ecological Applications*, 10, 1762–1773.
- He J, Hoyano A (2009). The effects of windbreak forests on the summer thermal environment in a residence. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 8, 291–298.
- Heisler GM, DeWalle DR (1988). Effects of windbreak structure on wind flow. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 22–23, 41–69.
- Hou QJ, Brandle JR, Hubbard K, Schoeneberger MM, Nieto C, Francis C (2003). Alteration of soil water content consequent to root-pruning at a windbreak/crop interface in Nebraska, USA. *Agroforestry Systems*, 57, 137–147.
- Hou QJ, Young LJ, Brandle JR, Schoeneberger MM (2011). A spatial model approach for assessing windbreak growth and carbon stocks. *Journal of Environmental Quality*, 40, 842–852.
- Jiang FQ (2012a). *Forestry Eco-Engineering Construction and Management*. Liaoning Science and Technology Publishing House, Shenyang. 574. (in Chinese) [姜凤岐 (2012a). 林业生态工程构建与管理. 辽宁省科学技术出版社, 沈阳. 574.]
- Jiang FQ (2012b). *Tsao Sing-Sun Collections*. Liaoning Science and Technology Publishing House, Shenyang. 528. (in Chinese) [姜凤岐 (2012b). 曹新孙文集. 辽宁省科学技术出版社, 沈阳. 528.]
- Jiang FQ, Yu ZY, Zeng DH, Zhu JJ (2009). The Three-North Shelter Forest Program needs ecological civilization. *Chinese Journal of Ecology*, 28, 1673–1678. (in Chinese with English abstract) [姜凤岐, 于占源, 曾德慧, 朱教君 (2009). 三北防护林呼唤生态文明. 生态学杂志, 28, 1673–1678.]
- Jiang FQ, Zeng DH, Yu ZY (2006). Decline of protective forest and its prevention strategies from viewpoint of restoration ecology: taking *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in Zhanggutai as an example. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17, 2229–2235. (in Chinese with English abstract) [姜凤岐, 曾德慧, 于占源 (2006). 从恢复生态学视角透析防护林衰退及其防治对策——以章古台地区樟子松林为例. 应用生态学报, 17, 2229–2235.]
- Jiang FQ, Zhou XH, Fu MH, Zhu JJ, Lin HM (1994a). Shelterbelt porosity model and its application. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 5, 251–255. (in Chinese with English abstract) [姜凤岐, 周新华, 傅梦华, 朱教君, 林鹤鸣 (1994a). 林带疏透度模型及其应用. 应用生态学报, 5, 251–255.]
- Jiang FQ, Zhu JJ (2002). Phase-directional management of protective plantations. I. Fundamentals. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 13, 1352–1355. (in Chinese with English abstract) [姜凤岐, 朱教君 (2002). 防护林阶段定向经营研究(I): 理论基础. 应用生态学报, 13, 1352–1355.]
- Jiang FQ, Zhu JJ, Zeng DH, Fan ZP, Du XJ, Cao YC (2003).

- Management for Protective Plantations*. China Forestry Publishing House, Beijing. 353. (in Chinese) [姜凤岐, 朱教君, 曾德慧, 范志平, 杜晓军, 曹有成 (2003). 防护林经营学. 中国林业出版社, 北京. 353.]
- Jiang FQ, Zhu JJ, Zhou XH, Lin HM (1994b). Protective maturity (PM) and regeneration of shelterbelts. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 5, 337–341. (in Chinese with English abstract) [姜凤岐, 朱教君, 周新华, 林鹤鸣 (1994b). 林带的防护成熟与更新. 应用生态学报, 5, 337–341.]
- Johnson R, Beck M, Brandle J (1994). Windbreaks for people: the wildlife connection. *Journal of Soil and Water Conservation*, 49, 546–550.
- Jung SC, Matsushita N, Wu BY, Kondo N, Shiraiishi A, Hogsu T (2009). Reproduction of a *Robinia pseudoacacia* population in a coastal *Pinus thunbergii* windbreak along the Kujukurihama Coast, Japan. *Journal of Forest Research*, 14, 101–110.
- Kenney WA (1987). A method for estimating windbreak porosity using digitized photographic silhouettes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 39, 91–94.
- Korolev VA, Gromovik AI, Ionko OA (2012). Changes in the physical properties of soils in the kamennaya steppe under the impact of shelterbelts. *Eurasian Soil Science*, 45, 257–265.
- Kort J (1988). Benefits of windbreaks to field and forage crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 22–23, 165–190.
- Kort J, Bank G, Pomeroy J, Fang X (2012). Effects of shelterbelts on snow distribution and sublimation. *Agroforestry Systems*, 86, 335–344.
- Kristensen SP, Caspersen OH (2002). Analysis of changes in a shelterbelt network landscape in central Jutland, Denmark. *Journal of Environmental Management*, 66, 171–183.
- Kulshreshtha S, Kort J (2009). External economic benefits and social goods from prairie shelterbelts. *Agroforestry Systems*, 75, 39–47.
- Li CY, Koskela J, Luukkanen O (1999). Protective forest systems in China: current status, problems and perspectives. *Ambio*, 28, 341–345.
- Li SD, Chen XL, Li JH (2003). Research on the relationship between world key ecological projects and the allocation of forestry organizations. *World Forestry Research*, 16, 7–11. (in Chinese with English abstract) [李世东, 陈幸良, 李金华 (2003). 世界重点生态工程与林业机构设置的关系研究. 世界林业研究, 16, 7–11.]
- Liu B, Gong W, Gong WN, Song LN (2009). Opportunities and challenges in the construction of the Three-North Shelter Forest Program. *Chinese Journal of Ecology*, 28, 1679–1683. (in Chinese with English abstract) [刘冰, 龚维, 宫文宁, 宋立宁 (2009). 三北防护林体系建设面临的机遇和挑战. 生态学杂志, 28, 1679–1683.]
- Liu Y, Harris DJ (2008). Effects of shelterbelt trees on reducing heating-energy consumption of office buildings in Scotland. *Applied Energy*, 85, 115–127.
- Loeffler AE, Gordon AM, Gillespie TJ (1992). Optical porosity and windspeed reduction by coniferous windbreaks in Southern Ontario. *Agroforestry Systems*, 17, 119–133.
- Ma Q (2004). Appraisal of tree planting options to control desertification: experiences from the Three-North shelterbelt programme. *International Forestry Review*, 6, 327–334.
- Ma R, Wang JH, Qu JJ, Liu HJ (2010). Effectiveness of shelterbelt with a non-uniform density distribution. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 98, 767–771.
- Matson P, Parton W, Power A, Swift M (1997). Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science*, 277, 504–509.
- McNaughton KG (1988). Effects of windbreaks on turbulent transport and microclimate. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 22–23, 17–39.
- Mercer GN (2009). Modelling to determine the optimal porosity of shelterbelts for the capture of agricultural spray drift. *Environmental Modelling & Software*, 24, 1349–1352.
- Mize CW, Brandle JR, Schoeneberger MM, Bentrup G (2008). Chapter 3: Ecological development and function of shelterbelts in temperate North America. In: Jose S, Gordon AM eds. *Toward Agroforestry Design: An Ecological Approach*, Springer, Berlin. 27–54.
- Moore R, Russell R (1990). The “Three Norths” forest protection system—China. *Agroforestry Systems*, 10, 71–88.
- Motta R, Haudemand JC (2000). Protective forests and silvicultural stability—An example of planning in the Aosta Valley. *Mountain Research and Development*, 20, 180–187.
- Munns EN, Stoeckeler JH (1946). How are the Great Plains shelterbelts? *Journal of Forestry*, 44(4), 237–257.
- Nelmes S, Belcher RE, Wood CJ (2001). A method for routine characterisation of shelterbelts. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106, 303–315.
- Onyewotu LOZ, Stigter CJ, Oladipo EO, Owonubi JJ (2004). Air movement and its consequences around a multiple shelterbelt system under advective conditions in semi-arid Northern Nigeria. *Theoretical and Applied Climatology*, 79, 255–262.
- Orth J (2007). The shelterbelt project: cooperative conservation in 1930s America. *Agricultural History*, 81, 333–357.
- Ozawa H, Sakamoto T, Hagino H (2007). Influence of thinning on the shelter effect of windbreaks as clarified by a wind tunnel experiment. *Journal of Forest Research*, 12, 222–229.
- Park KH, Ding GD, Wang WW, Wang XY, Chun KW (2008). Windbreak effect on wind speed reduction and sandbreak

- of artificial forest belt of *Caragana korshinskii* Kom in Yanchi County, Ningxia Province, China. *Journal of Korean Forestry Society*, 97, 95–101.
- Ritchie K (1988). Shelterbelt plantings in semi-arid areas. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 22–23, 425–440.
- Robert G (2009). Trees as technology: planting shelterbelts on the Great Plains. *History and Technology*, 25, 325–341.
- Roland R (1952). Forest and shelterbelt planting in the United States—1951. *Journal of Forestry*, 50, 605–608.
- Rosenfeld M, Marom G, Bitan A (2010). Numerical simulation of the airflow across trees in a windbreak. *Boundary-Layer Meteorology*, 135, 89–107.
- Ryszkowski L, Kedziora A (2007). Modification of water flows and nitrogen fluxes by shelterbelts. *Ecological Engineering*, 29, 388–400.
- SAF (Society of American Foresters) Dictionary of Forestry (1998). The Society of American Foresters. Helms, John A. http://en.wikipedia.org/wiki/Forest_Science. Cited 20 Feb. 2013.
- Santiagoa JL, Martin F, Cuerva A, Bezdeneznykh N, Sanz-Andre's A (2007). Experimental and numerical study of wind flow behind windbreaks. *Atmospheric Environment*, 41, 6406–6420.
- Sauer TJ, Cambardella CA, Brandle JR (2007). Soil carbon and tree litter dynamics in a red cedar-scotch pine shelterbelt. *Agroforestry Systems*, 71, 163–174.
- Schroeder W (1988). Planting and establishment of shelterbelts in humid sever-winter regions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 22–23, 441–463.
- Shen GF (2001a). From “Waldbau” to “Siviculture”. *Chinese Science and Technology Terms Journal*, 3, 33–34. (in Chinese with English abstract) [沈国舫 (2001a). 从“造林学”到“森林培育学”. 科技术语研究, 3, 33–34.]
- Shen GF (2001b). *Silviculture*. China Forestry Publishing House, Beijing. 441. (in Chinese) [沈国舫 (2001b). 森林培育学. 中国林业出版社, 北京. 441.]
- Shen ZR (2004). Lessons from American prairie shelterbelt program. *World Forestry Dynamic*, (30), 4–7. (in Chinese with English abstract) [沈照仁 (2004). 从美国大草原防护林工程应借鉴什么. 世界林业动态, (30), 4–7.]
- Song LN, Zhu JJ, Yan QL (2009). Review on the shelter forest decline. *Chinese Journal of Ecology*, 28, 1684–1690. (in Chinese with English abstract) [宋立宁, 朱教君, 闫巧玲 (2009). 防护林衰退研究进展. 生态学杂志, 28, 1684–1690.]
- Sudmeyer RA, Speijers J (2007). Influence of windbreak orientation, shade and rainfall interception on wheat and lupin growth in the absence of below-ground competition. *Agroforestry Systems*, 71, 201–214.
- Szajdak LW, Gaca W (2010). Nitrate reductase activity in soil under shelterbelt and an adjoining cultivated field. *Chemistry and Ecology*, 26, 123–134.
- Tamang B, Andreu MG, Rockwood DL (2010). Microclimate patterns on the leeward side of single-row tree windbreaks during different weather conditions in Florida farms: implications for improved crop production. *Agroforestry Systems*, 79, 111–122.
- Tamang B, Andreu MG, Staudhammer CL, Rockwood DL, Jose S (2012). Equations for estimating aboveground biomass of cadaghi (*Corymbia torelliana*) trees in farm windbreaks. *Agroforestry Systems*, 86, 255–266.
- Tibke G (1988). Basic principles of wind erosion control. *Agricultural, Ecosystems and Environment*, 22–23, 103–122.
- Ticknor KA (1988). Design and use of field windbreaks in wind erosion control system. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 22–23, 123–132.
- Torita H, Satou H (2007). Relationship between shelterbelt structure and mean wind reduction. *Agricultural and Forest Meteorology*, 145, 186–194.
- van Deusen JL (1978). Shelterbelts on the Great Plains: What's happening? *Journal of Forestry*, 76, 160–161.
- Wang H, Takle E, Shen JM (2001). Shelterbelts and windbreaks: mathematical modeling and computer simulation of turbulent flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 33, 549–586.
- Wang HJ, Zhou H (2003). A simulation study on the eco-environmental effects of 3N Shelterbelt in North China. *Global and Planetary Change*, 37, 231–246.
- Wang XM, Zhang CX, Hasi E, Dong ZB (2010). Has the Three Norths Forest Shelterbelt Program solved the desertification and dust storm problems in arid and semiarid China? *Journal of Arid Environments*, 74, 13–22.
- Wei L, Jiang AL, Zhang Y (1985). On the effective protecting distance of shelterbelt. *Science Bulletin*, 30, 1567–1570.
- Wiseman G, Kort J, Walker D (2009). Quantification of shelterbelt characteristics using high-resolution imagery. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 131, 111–117.
- Wu TG, Yu MK, Wang G, Wang ZX, Duan X, Dong Y, Cheng XR (2013). Effects of stand structure on wind speed reduction in a *Metasequoia glyptostroboides* shelterbelt. *Agroforestry Systems*, 87, 251–257.
- Xiang KF (1991). *Protective Forests*. Northeast Forestry University Press, Harbin. 172. (in Chinese) [向开馥 (1991). 防护林学. 东北林业大学出版社, 哈尔滨. 172.]
- Yan QL, Zhu JJ, Hu ZB, Sun JX (2011). Environmental impacts of the shelter forests in Horqin sandy land, Northeast China. *Journal of Environmental Quality*, 40, 815–824.
- Yan SW (1993). *Shelterbelt for Farmland*. China Forestry Publishing House, Beijing. 152. (in Chinese) [阎树文 (1993). 农田防护林学. 中国林业出版社, 北京. 152.]
- Yeh CP, Tsai CH, Yang RJ (2010). An investigation into the sheltering performance of porous windbreaks under various wind directions. *Journal of Wind Engineering and*

- Industrial Aerodynamics*, 98, 520–532.
- Zagas TD, Raptis DI, Zagas DT (2011). Identifying and mapping the protective forests of southeast Mt. Olympus as a tool for sustainable ecological and silvicultural planning, in a multi-purpose forest management framework. *Ecological Engineering*, 37, 286–293.
- Zhang JC (2011). *Soil and Water Conservation and Shelter Belt Forest*. China Forestry Publishing House, Beijing. 342. (in Chinese) [张金池 (2011). 水土保持与防护林学. 中国林业出版社, 北京. 342.]
- Zhang LH, Chen YN, Zhao RF, Li WH (2012). Soil carbon dioxide flux from shelterbelts in farmland in temperate arid region, Northwest China. *European Journal of Soil Biology*, 48, 24–31.
- Zhao ZZ (1993). *The Science of Agricultural Windbreaks*. China Forestry Publishing House, Beijing. 400. (in Chinese) [赵宗哲 (1993). 农业防护林学. 中国林业出版社, 北京. 400.]
- Zheng X, Zhu JJ, Yan QL, Song LN (2012). Effects of land use changes on groundwater table and the decline of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in the Horqin Sandy Land, Northeast China. *Agricultural Water Management*, 109, 94–106.
- Zheng X, Zhu JJ, Yan Y (2013a). Estimation of farmland shelterbelt area in the Three-North Shelter/Protective Forest Program regions of China based on multi-scale remote sensing data. *Chinese Journal of Ecology*, 32, 1355–1363. (in Chinese with English abstract) [郑晓, 朱教君, 闫妍 (2013a). 三北地区农田防护林面积的多尺度遥感估算. 生态学杂志, 32, 1355–1363.]
- Zheng X, Zhu JJ, Yan Y (2013b). Estimation of shelter/protective forest area in Three-North Shelter/Protective Forest Program region using multi-sensor remote sensing data. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24, 2257–2264. (in Chinese with English abstract) [郑晓, 朱教君, 闫妍 (2013b). 基于多元遥感影像的三北地区片状防护林面积估算研究. 应用生态学报, 24, 2257–2264.]
- Zhou XH, Brandle JR, Mize CW, Takle ES (2004). Three-dimensional aerodynamic structure of a tree shelterbelt: definition, characterization and working models. *Agroforestry Systems*, 63, 133–147.
- Zhou XH, Brandle JR, Schoeneberger MM, Awada T (2007). Developing above-ground woody biomass equations for open-grown, multiple-stemmed tree species: shelterbelt-grown Russian-olive. *Ecological Modelling*, 202, 311–323.
- Zhou XH, Brandle JR, Takle ES, Mize CW (2002). Estimation of the three-dimensional aerodynamic structure of a green ash shelterbelt. *Agricultural and Forest Meteorology*, 111, 93–108.
- Zhu JJ (1993). Review: introduction to the Great Plain shelterbelt or windbreak in the U.S.A. *World Forestry Research*, 6(3), 80–85. (in Chinese with English abstract) [朱教君 (1993). 美国大平原防护林的概况. 世界林业研究, 6(3), 80–85.]
- Zhu JJ (2008). Wind shelterbelts. In: Jørgensen SE, Fath BD eds. *Ecosystems. Vol. 5 of Encyclopedia of Ecology*. Elsevier, Oxford. 3803–3812.
- Zhu JJ, Gonda Y, Matsuzaki T, Yamamoto M (2002b). Salt distribution in response to optical stratification porosity and relative windspeed in a coastal forest in Niigata, Japan. *Agroforestry Systems*, 56, 73–85.
- Zhu JJ, Gonda Y, Yu LZ, Li F, Yan Q, Sun YR (2012). Regeneration of a coastal pine (*Pinus thunbergii* Parl.) forest 11 years after thinning, Niigata, Japan. *PLoS One*, 7, e47593, doi:10.1371/journal.pone.0047593.
- Zhu JJ, Jiang FQ (1996). Growth stage and classification of poplar shelterbelt. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 7, 11–14. (in Chinese with English abstract) [朱教君, 姜凤岐 (1996). 杨树林带生长阶段与林木分的研究. 应用生态学报, 7, 11–14.]
- Zhu JJ, Jiang FQ, Fan ZP (2004). Protective maturity and regeneration for water and soil conservation forest (WSCF) of *Robinia pseudoacacia* in Loess Plateau. *Chinese Journal of Ecology*, 23(5), 1–6. (in Chinese with English abstract) [朱教君, 姜凤岐, 范志平 (2004). 黄土高原刺槐水土保持林防护成熟与更新研究. 生态学杂志, 23(5), 1–6.]
- Zhu JJ, Jiang FQ, Fan ZP, Zhou XH (2003). Optimization of spatial arrangements and patterns for shelterbelts or windbreaks. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 14, 1205–1212. (in Chinese with English abstract) [朱教君, 姜凤岐, 范志平, 周新华 (2003). 林带空间配置与布局优化研究. 应用生态学报, 14, 1205–1212.]
- Zhu JJ, Jiang FQ, Matsuzaki T (2002a). Spacing interval between principal tree windbreaks—based on the relationship between windbreak structure and wind reduction. *Journal of Forestry Research*, 13, 83–90.
- Zhu JJ, Jiang FQ, Matsuzaki T, Zeng DH (2002a). Protective forests in Japan. *Chinese Journal of Ecology*, 21, 76–80, 64. (in Chinese with English abstract) [朱教君, 姜凤岐, 松崎健, 曾德慧 (2002a). 日本的防护林. 生态学杂志, 21, 76–80, 64.]
- Zhu JJ, Jiang FQ, Zeng DH (2002b). Phase-directional management of protective plantations. II. Typical protective plantation: farmland shelterbelt. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 13, 1273–1277. (in Chinese with English abstract) [朱教君, 姜凤岐, 曾德慧 (2002b). 防护林阶段定向经营研究(II): 典型防护林种——农田防护林. 应用生态学报, 13, 1273–1277.]
- Zhu JJ, Li FQ (2007). Forest degradation/decline: research and practice. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 18, 1601–1609. (in Chinese with English abstract) [朱教君, 李凤芹

- (2007). 森林退化/衰退的研究与实践. 应用生态学报, 18, 1601–1609.]
- Zhu JJ, Li FQ, Xu ML, Kang HZ, Wu XY (2008). The role of ectomycorrhizal fungi in alleviating pine decline in semi-arid sandy soil of northern China: an experimental approach. *Annals of Forest Science*, 65, 304p1–304p12, doi: 10.1051/forest:2008007.
- Zhu JJ, Matsuzaki T, Gonda Y (2003a). Optical stratification porosity as a measure of vertical canopy structure in a Japanese coastal forest. *Forest Ecology and Management*, 173, 89–104.
- Zhu JJ, Matsuzaki T, Jiang FQ (2004). *Wind on Tree Wind-breaks*. China Forestry Publishing House, Beijing. 235.
- Zhu JJ, Matsuzaki T, Li FQ, Gonda Y (2003b). Effect of gap size created by thinning on seedling emergency, survival and establishment in a coastal pine forest. *Forest Ecology and Management*, 182, 339–354.
- Zhu JJ, Zeng DH, Kang HZ, Wu XY, Fan ZP (2005). *Decline of Pinus sylvestris var. mongolica Plantation Forests on Sandy Land*. China Forestry Publishing House, Beijing. 264. (in Chinese) [朱教君, 曾德慧, 康宏樟, 吴祥云, 范志平 (2005). 沙地樟子松人工林衰退机制. 中国林业出版社, 北京. 264.]
- Zhu JZ, He KN, Wei TX (2010). *Science of Farmland Shelter*. China Forestry Publishing House, Beijing. 211. (in Chinese) [朱金兆, 贺康宁, 魏天兴 (2010). 农田防护林学. 中国林业出版社, 北京. 211.]
- Zhu TY (2001). *Farmland Shelterbelt and Ecological Engineering*. China Forestry Publishing House, Beijing. 360. (in Chinese) [朱廷曜 (2001). 农田防护林生态工程学. 中国林业出版社, 北京. 360.]

责任编辑: 刘世荣 责任编辑: 王 威