

DOI: 10.5846/stxb201307221927

李月辉, 吴文, 吴志丰, 常禹, 陈宏伟. 森林景观的历史变域研究进展. 生态学报, 2015, 35(12): 3896-3907.

Li Y H, Wu W, Wu Z F, Chang Y, Chen H W. Review on historical range of variability in forest landscape. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(12): 3896-3907.

森林景观的历史变域研究进展

李月辉^{1,*}, 吴文^{1,2}, 吴志丰^{1,3}, 常禹¹, 陈宏伟^{1,4}

1 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院生态环境中心城市与区域国家重点实验室, 北京 100085

4 沈阳大学, 沈阳 110044

摘要: 历史变域概念产生于 20 世纪 90 年代, 是森林生态系统管理的重要概念之一, 可以为生态系统管理提供参考和目标。总结了历史变域领域近期的研究热点: 火烧的历史变域研究从量化火烧特征开始, 进而探讨火烧特征的影响因素, 并且从火烧特征的单一影响因素向多影响因素、从单一尺度向多时空尺度研究发展; 森林景观历史变域研究由描述景观的单一结构特征深入到揭示综合结构特征及功能特征。方法的新进展包括: 评估历史数据的误差、探索采样和数据分析方法、重视火疤木数据的多时空特征、以及发掘整合多种来源的历史数据。模拟自然干扰的森林管理是历史变域概念的重要应用之一, 最近的研究集中在为森林管理提供更加全面的模拟自然干扰的干扰参数, 并且强调这些参数的空间异质性; 同时, 该管理模式也面临挑战和质疑: 气候变化条件下历史变域的概念是否仍旧适用? 森林管理是否能够真正达到自然干扰的效果? 分析了我国的研究现状, 提出发展建议。

关键词: 森林景观; 历史变域; 自然干扰; 火干扰; 采伐; 模拟自然的森林管理; 气候变化

Review on historical range of variability in forest landscape

LI Yuehui^{1,*}, WU Wen^{1,2}, WU Zhifeng^{1,3}, CHANG Yu¹, CHEN Hongwei^{1,4}

1 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

4 Shenyang University, Shenyang 110044, China

Abstract: The concept of historical range of variability (HRV) was initiated and developed by many ecologists for ecosystems management in 1990s, providing reference and goal conditions for managed forest ecosystems. The past decade has seen an increasing interest in forest management based on historical or natural disturbance dynamics. This review summarizes the recent trends in theories, methods and applications. The researches focused on initially characterizing historical fire regime indicated by frequent and low-intensity fire occurrence, and later analyzing impacted factors of fire regime involving topography, elevation and fuel loading etc.. Recently, more attention has been paid to natural characteristics of forest ecosystem at multiple spatial and temporal scales instead of a certain single scale in understanding the historical fire regime. The climate change creates up-bottom controls but the topography does bottom-up controls on fire spread. Meanwhile, the historical landscape dynamic has been investigated by more indicators in structure and even function instead of single structural indicator. Generally, the long-term unreasonable management moves the landscape away from the

基金项目: 国家自然科学基金资助(41271201, 40871245, 41201185, 31070422)资助

收稿日期: 2013-07-22; 网络出版日期: 2014-10-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liyh@iae.ac.cn

HRV and it required long time to toward and reach HRV. Methodologically, Scientists focus on the evaluation of errors in historical data, especially those data of Public Land Survey (PLS) used widely in estimating HRV in North American, novel methods for sampling or analyzing and multiple-scale characters of fire scar data. Also, they seek for the multiple historical data resources to better reconstruct the landscape dynamic. Practically, Natural Disturbance Emulation (NDE) is considered as one of important applications of HRV in forest ecosystem management and the research about NDE has been improved to the more precise emulation in multiple parameters including frequency, intensity and size of disturbance. Additionally, the heterogeneity of HRV is emphasized in emulating the natural disturbance, meaning varying historical parameter should be provided in different ecoregions. However, two problems were argued: 1) Will the HRV still be the best option in the context of growing climatic change? Despite of the opposed opinions, some of scientists consider the NDE as a useful concept before reducing the uncertainty of climate change. 2) Will those anthropogenic harvests and fire managements have the same impacts as the natural disturbance? More long-term researches are needed to answer those questions. Furthermore, this review elaborates the existing weak research in China. Most researches are conducted in Great Xing'an Mountains where the fire occurred frequently due mainly to dry climate to demonstrate the human-disturbed fire regime compared to historical range. Then this review seeks for reasons for the gaps with other countries on one hand, we are faced with poor understanding of the nature of the landscape and the absence of strong records of landscape conditions prior to intensive anthropogenic alteration, on the other hand, the forest in our country was explored for hundreds of years and less private forest in large area are maintained, which hinders greatly investigating the HRV. To close this gap, the research should be conducted at multiple scale and strengthen simulation by landscape model while seeking for better historical data.

Key Words: forest landscape; historical range of variability; natural disturbance; fire regime; harvest; Natural Disturbance Emulation (NDE); climatic change

历史变域(Historical Range of Variability, HRV)的概念产生于 1990 年代初期,被定义为没有人类干扰下的生态参数在时间和空间上的变异,因其可以为生态系统管理提供参考和目标,成为森林生态系统管理的重要概念之一,一直受到很多学者尤其北美学者的重视^[1-3]。近年来,该领域研究发展更加迅速、出现新的研究热点。火烧是森林景观中最重要的自然干扰之一,火烧的历史变域研究从定量化火烧特征开始,进而研究火烧特征的影响因素,最近从火烧特征的单一影响因素向多影响因素、从单一尺度向多时空尺度研究发展;同时,景观格局的历史特征研究也取得显著进展。方法的新进展包括评估历史数据的误差、探索采样和数据分析方法、揭示火疤木数据的多时空特征以及发掘和整合多种来源的历史数据。在应用方面,作为该概念的重要应用研究之一——模拟自然干扰的森林管理模式研究,也出现新的趋势,即为管理提供更全面的和空间化的自然干扰参数,同时,这种管理模式也面临挑战和争议。因此,有必要在论述历史变域的概念、描述方法、研究方法、基本应用及面临的普遍性挑战的基础之上^[4],捕捉、总结国际上新近发展趋势,论述我国当前研究现状,为我国未来的森林景观生态的理论和实践提供应对建议。

1 火烧的历史变域研究

火烧是森林景观重要的影响因素之一,除了地域、水热条件和地形地貌等大尺度影响因素外,它在塑造森林景观过程中几乎起到了决定性的作用,因此在 20 世纪 70、80 年代、历史变域概念出现之前对火烧历史就已有研究^[5-6],该概念提出之后,更加受到重视^[7-11]。火烧的历史变域研究最初探究自然火烧的特征,之后,重点研究这些特征与其影响因素之间的关系并逐渐从单一时空尺度向多时空尺度发展。

1.1 火烧历史特征及变化

北美大陆的森林景观受到人类大规模干扰的起始时间明确,研究人类活动出现前后火烧特征变化的案例数量最多、最具代表性。研究一般针对 3 个时段:没有人为干扰时期(1850 年前),欧洲人开始大规模进驻和

定居、且没有火管理的时期(1850—1900年初期),和实施以灭火为主要手段的有目的的火管理时期(1990年)。大量研究表明:火烧特征在1850年前,即在自然状态下,表现为低强度的频繁的地面火烧,且火发生频率较稳定^[7-9],当人类干扰、尤其是有目的的灭火行为出现后,则转变为非自然的低频度的高强度火^[12],具体表现为:

首先,火烧轮回期延长,如加利福尼亚的克拉马斯山地区在1905年之后火烧轮回期从19a延长至238a^[10],在实施灭火政策期间(1905—1992年,21.8a)比定居期(1850—1904年,12.5a)或者没有人类活动时期(1627—1849年)延长^[10],在俄勒冈州中部喀斯特山的麦肯支河地区^[11]以及加拿大安大略省北方林的东西部森林^[13]等都显示同样的变化趋势;澳大利亚也有相似的研究结果:平均火烧频率在土著人时期(1740—1819年)为0.7,移民后(1820—1849年)减少0.4,1850—1909年为0.8—1.2,1910—1989年为1.3—1.7^[14]。也有相反的案例结果,例如俄怀明州某一景观中,目前的轮回期小于历史变域范围^[15]。

其次,高强度和灾难性火的频度、面积和强度显著增加^[7,12]。在科罗拉多州弗兰特山森林,19世纪时高强度火烧斑块的平均面积为170.9 hm²、最大面积为8331 hm²,轮回期248.7a,1984年至2009年间上述参数则分别为90.0 hm²,5183 hm²和431a^[16]。当然,大火发生频率的变化不仅仅人类活动的影响,还受到气候变化的显著影响^[12,17-22],两种影响因素的相对重要性还有待深入研究^[8,23]。

1.2 火烧历史特征的影响因素

火烧历史变域的影响因素研究从某单一因素开始。在大尺度上,自然火烧特征受海拔影响:在美国科罗拉多州落基山脉弗朗特岭北部的黄松林中表现为频繁的地面火,而在相对高海拔、与道格拉斯冷杉伴生的森林中,表现为低频度的林分更新火^[24],在喀斯特山脉,海拔影响火烧频率^[25]。在较小尺度上,坡向和坡位影响火烧特征^[26],在加利福尼亚的太浩湖盆地混合针叶林中,火烧的频率、强度和面积都与坡向和坡位相关^[27]。此外,植被也与地形共同影响火烧历史特征,在俄勒冈州和华盛顿州的蓝山,在地形陡峭且对比强烈、有隔离带阻隔的区域内火烧频率随着坡向而变化,在可燃物连续分布区域内火烧频率则不随坡向而变化^[28]。同时,也有火烧频率未随海拔而变化的案例^[29]。

然而,历史变域是一个与尺度密切相关的概念^[4,30],火烧历史特征的时空异质性是多个变量综合作用的结果,包括气候、可燃物、地形和各个时空尺度的土地利用等,这些因子作用复杂,在不同的生态系统类型中表现不同,具有显著的时空异质性^[31-34]。因此,随着研究方法和手段的进步,研究从初始时单一尺度单因子研究向多因素、多尺度方向发展,各影响因子间的相对贡献率以及这些因子在不同尺度上的作用成为新的研究趋势,多时空尺度、多种要素的作用关系研究有待深入^[14,35]。

目前,火烧特征的多尺度研究表明,不同尺度上影响火烧的主导因子不同^[36]:在区域和亚区域尺度上,火烧与气候变化同步,在局地尺度上,火烧与气候变化不同步,主要受可燃物^[36]和地形^[28,35,37]的影响。学者们将气候称作自上而下的控制因子^[8],主要影响平均火烧概率;将可燃物和地形称作自下而上的控制因子,主要影响火烧概率的空间分布格局^[38-39]。火烧历史特征的自下而上或自上而下的控制规律和机制的研究尤为重要,如自下而上的控制能够显示生物量和可燃物分布对于调节火烧的重要性,可以在缺乏燃料、气候等历史数据的情况下揭示复杂的地形如何控制火的扩散^[35,38],还可以用来区划气候变暖条件下对可燃物处理反映最强烈的区域等等^[39]。同时,这两种控制又往往相互混杂相互作用,例如地形对火烧的控制作用在地形简单的景观中或者在包含极端天气的气候变化条件下减弱^[35],几乎不可能将两者完全区分开^[39]。目前仍旧缺乏定量化的框架来描述和理解不同空间尺度下火烧的地理分布^[36],未来需要在多个尺度上进行深入研究,详细揭示多个空间尺上控制因子的作用^[36]。

2 景观特征的历史变域研究

仅仅以历史数据重构景观历史状态难度较大,所以很多研究利用空间景观直观模型在足够长的时间尺度上模拟景观历史特征,例如LANDIS、LAMPS和LANDISS等,进一步,这些模型还可以模拟和评估不同的采伐

管理条件下景观偏离历史变域的程度。在美国的俄勒冈州、明尼苏达州东部和加拿大安大略省西北部森林景观等进行的多个模拟结果显示:在无人管理或者不灭火但有一定规模的采伐预案下,景观在一段时间以后接近历史变域范围,一般在现行的灭火和采伐预案下,景观远离自然状态,表明不合理的采伐使森林景观偏离历史变域范围^[9,40-41]。同时,也有研究结果表明通过改变采伐方式,例如将采伐轮回期由 50—100a 增加到 200a 以上等措施,可使生态系统回归历史变域范围^[42]。

景观的历史特征原来多用单一的结构特征指数来描述,包括地带性植被、老龄林或其它各树种的面积比例或者年龄结构^[43],如美国华盛顿州喀斯特山森林中老龄林面积比例的历史范围为 38%—63%^[44],新泽西某森林景观中北美脂松面积比例在殖民者进入之前为 53%—58%等^[45]。最近的研究显示两个新的趋势:第一,结构特征由单一向多个发展,除了上述特征,还包括树木和树冠密度,小、大树木数量,密集森林面积、林下植被和灌木等^[46-47],对景观的描述也更加具体,如揭示美国犹他州白松县附近两个研究区的历史景观时,描述了林龄结构复杂、混生长寿耐火树种、具有开放的灌丛群落多方面的结构特征^[48],并利用多种格局指数和多元分析方法综合描述^[42,49];第二,不仅关注结构特征,而且进一步关注功能特征,例如生物量的历史变域,Nonaka 模拟了俄勒冈海岸山脉地区的活生物量和死生物量的历史变域范围,并且和人为干扰景观中的活、死生物量进行比较,确定可燃物的去除量,减少高强度火灾发生频率^[49]。

3 研究方法的进展

3.1 历史数据的误差评估和来源发掘

历史变域研究经过 1990 年代的发展,积累了一定的成果之后,学者们开始追根溯源、重新审视和思考常用历史数据来源的准确性,以及如何更好地利用火疤木信息、发掘其他不同来源的数据,希望在一定程度上缓解历史数据的来源、获取和取样分析方法对历史变域研究发展的制约,新趋势体现在四个方面:

(1) 历史数据的误差评估

在美国,土地调查数据(Public Land Survey, PLS)记录时间长、范围广,成为重构历史特征的常用数据之一,尤其 1800—1850 年间的的历史数据成为描述欧洲人进驻之前植被和火烧特征的最常用数据^[50],但同时也因其存在测量者的偏见误差和未知的测量误差而遭到质疑^[6],因此学者们开始设法评估这些数据的误差。例如,Williams and Baker 证明测量者选择哪一颗树作为测量树的偏见误差不是总体误差的主要来源,不会影响重建结果,但遗漏误差却可能影响总体误差^[51]。Schulte 和 Mladenoff 揭示出土地调查数据在物种组成、树木大小这两个特征上显示出统计学差异,但没有生态学意义上的显著差异。目前可以认为,土地调查数据能够反映历史特征,仍是重构历史特征的重要数据来源^[52]。

除了数据采集过程中的选择误差和测量误差,火疤木年轮能否完全记录和反映火烧特征也是影响重建结果准确性的因素之一,Parsons 等检验了重建的特征对火疤木采样方法和火疤木退化的敏感程度,结果显示最大的误差来源是火疤木的退化,即部分火烧痕迹缺失导致火烧间隔数量减少,但这种误差可以通过增加取样点数量来弥补,并且景观中的火烧间隔规律越复杂要求的取样点也越多^[53]。

(2) 采样和分析方法的探索

利用上述历史数据进行重建时,取样和分析方法怎样影响重建结果?学者们多选择历史火烧间隔(MFI)这一指数,探讨该指数对取样方法和分析方法的响应。Kou 和 Baker 认为,如果找到具有统计意义的取样和分析方法来计算火烧间隔,火烧历史的研究会更有价值^[54],为此,Baker 和 Ehle 强调验证的作用,也就是检验火疤记录怎样取样和分析才能得到没有误差的历史参数,Van Horne 和 Fule 利用亚利桑那州北部 1 km²研究区内的 1479 株火疤木,认为目标取样,随机取样和基于栅格取样都可以较好地估算历史火烧间隔^[55]。这些工作虽不能彻底解决利用火疤木重构火烧历史的固有的局限,但能更深入地解释这些火疤木数据,最大限度的找到最佳方法^[56]。目前,已有研究证明可以通过数据过滤等方法减少偏见误差、提高估算精度^[51,54,56,46],在具体研究中,需依据研究目的来选择数据的空间范围和分析方法^[52],检验数据的误差、寻求更好的取样和

分析方法仍是未来历史变域方法研究中不可缺少的内容。

(3) 火疤木历史数据的多时空特征

单独的火疤木只能提供非连续的离散点的数据,如果没有其它独立来源的历史数据相互比较和验证,这些数据难以准确地重建火烧历史,因此,火疤木样品网络开始受到关注,在北美西部,有记录的火疤样本树木成百上千株,时间延续几百年,空间覆盖成百上千公顷,这些区域和局地尺度的火疤木网络为关注景观和生态系统过程的气候调节的生态学家们创造了一种新的数据类型,例如,这些数据可以用来解释林火发生频率的年际差异^[57-58],为历史变域的多时空尺度研究提供重要条件。

(4) 多种来源历史数据的发掘

用来重建森林景观历史的数据,除了火疤木还有沉积物等,最近有学者将多种来源数据所构建的历史特征相互比较、验证,探索这些数据的可利用性和精确性,力求发现更好的数据来源或者它们之间更好的组合。例如在美国科罗拉多州的杜兰戈,利用年轮和沉积物分别建立历史变域,年轮记录显示,1679—1879 年有频繁的地面火,同时在火烧分布广泛的年份里还有经历高强度火烧的斑块;沉积记录则显示出在过去的 2600 年间火烧为低、中、高混合强度的火烧^[59]。这样,火疤木年轮、火烧历史记录、泥炭中的碳沉积,甚至土壤特征互相补充、支持和验证,给不同地区火烧历史的研究提供更多的选择,非常有助于重建火烧历史^[60-63]。

3.2 模型模拟方法的发展

首先,森林空间景观直观模型发展迅速,为了改进现有的模型或创建新的模型,要求更好的模拟火烧以及植被宏观过程的方法。例如,研究扩散模式(动态渗透,基于面积的最小扩散时间方法和基于持续时间的最小扩散时间方法)和火烧频率(泊森火烧频率模型和异质性火烧频率模型)的双因子实验对火烧格局特征(火烧的频率、面积和斑块形状复杂性)的影响等^[64],很多此类火扩散等方法性的探索都将推进历史变域的模型模拟工作^[65-67]。其次,通过检验模拟结果的影响因子,力求提高历史变域模拟的精确性。Keane 等利用空间直观景观模型研究多种初始条件对历史变域模拟结果的影响,表明研究区形状和大小对模拟结果影响较大,地形和初始植被格局影响较小^[68]。

4 模拟自然干扰的森林管理

在一定的时空尺度下,在生态系统的自然变异范围内最大限度地模拟自然干扰过程^[69],称作模拟自然干扰(主要是火干扰)的森林管理模式(Natural Disturbance Emulation, NDE)^[70-71],该管理模式主要通过火管理和采伐管理来实现,是历史变域在管理实践中的重要应用之一^[72-73]。最近,学者们致力于为管理实践提供更加全面的模拟参数,包括火烧的面积、强度、甚至空间分布,并强调这些参数的时空特征。

计划火烧、机械清除等可燃物管理措施可控制火烧、降低火险和改善长期灭火产生的问题,对此已形成共识^[74]。那么依据什么原则、如何管理可燃物呢?早期就有以自然特征为模板的观点^[75],之后越来越多的文献有力地显示疏伐和(或者)人工火烧与低强度自然火烧有着同样的恢复效果,Fule 等人也以美国西部松林为研究区所发表的 54 篇文献为依据断定疏伐和人工火烧有助于自然火行为的恢复^[76]。最近研究重点在量化更多的参数,使计划火烧的频率、大小和强度等各项特征都符合自然火烧特征。这些参数大多通过研究计划火烧后可燃物变化规律获得^[77],这些研究结果可以为设计计划火烧强度分布格局提供参考依据,例如春季进行 3 种计划火烧处理,3a 之后处理过区域的夏季火烧强度明显低于对照区域^[76];也可以为设计计划火烧频率提供参数,例如,初次计划火烧后如果不控制其更新,之后 10—20a 就会失去作用,即计划火烧间隔如果为 10a,能够保持美国黄松最低的更新幼苗(<1 m 高)密度,如果为 15a,更新苗能够生长到具有一定抗火能力的大小,如果为 20—25a 以上,黄松可生长到超过 2 m 的火焰才能将其烧死的大小^[78]。

采伐管理就是根据自然火的特征进行采伐^[79],例如根据平均火烧频率确定年采伐频率,将火烧轮回期作为采伐轮回期的参考阈值^[70],近年来,为采伐提供的参数也更加全面化,除了火烧间隔和轮回期,一定时间内总的火烧面积、火烧强度、火烧斑块的大小和空间分布等其他特征都纳入模拟体系^[80,71],最终实现有目的地

控制森林景观^[81,43],这些量化的参数是当地火管理的重要参考。

更进一步,提供更加全面化的参数还体现在空间上,即量化这些参数的空间异质性。已有研究证明火烧特征的空间异质性比火烧强度对生态系统的影响更大,所以模拟自然火烧的采伐设计应首先考虑火烧特征的空间异质性^[82-83]。自然火烧通常是混合强度的火烧^[76,84],在可燃物管理时,考虑到空间异质性^[76],应设计成多种火烧强度、多种过火面积林火的组合形式,共同塑造植被的镶嵌结构^[18]。Perera 利用空间直观模型模拟显示,四个生态区域内自然火烧特征各有不同,具有空间异质性,该模拟结果就可以作为各个区域的采伐设计模板,从而改变现行的各区都相同的采伐设计^[71]。

5 自然管理模式研究面临的挑战和争议

环境变化和人类活动干扰使得我们很难构建出严格意义上的森林景观历史特征,同时,未来气候变化又存在着不确定性,因此,应用自然变域的森林管理模式面临质疑和挑战。下述两方面是争议热点,正吸引着更多学者的注意力:

第一,当今气候变化迅速,利用历史数据构建的自然特征是否仍适用于森林景观的管理?肯定观点认为在能够降低气候变化预测的不确定性之前,历史变域仍是最可用的概念之一,结合生态系统历史的景观管理方式可以最大程度地降低当地物种和生态过程所承受的风险^[31],无视历史的管理会很危险^[7]。否定观点认为模仿自然干扰进行管理有一定道理,但气候变化情况下截取历史进程中的一个快照来管理大尺度的景观并不合适^[2,85-86]。甚至有学者几乎彻底否认历史变域的作用,认为需要重新建立新的经营管理目标^[87]。在此争论之下,Keane 提出一种同时考虑历史变域和潜在气候变化的观点,不仅利用历史变域信息来评价景观^[23,88],还要判断人工措施在未来能否创造正常的景观结构或组成^[89],即确定在气候变化条件下未来景观的变化范围,再比较未来管理预案下景观特征与这个范围之间的偏离程度,这种观点兼顾了历史和未来,有助于维持生态系统可持续发展^[90],也成为目前多数学者的观点,因此他们也就更加关注森林对气候变化的响应^[36, 17,91-95]。

第二这些模拟自然干扰的管理是否能够真正替代自然干扰?有观点认为,对大部分变量而言,机械的去除不能完全替代火烧,在可能情况下仍需保留自然或者人工火烧^[87],如在缅甸因州的中部实施基于林窗(Gap-based)的采伐,其强度模拟自然干扰强度(1%),十年后采伐产生的林窗在林分水平上显著影响了其邻近的未采森林的生长更新^[96]。还有观点认为人工措施能够替代自然干扰,例如疏伐、计划火烧等恢复措施能够使森林树木密度维持在欧洲人进入之前的水平^[92]。这两种观点都还需要更长时间的研究来验证^[97]。

除上述两个争论热点外,还有相关问题等待回答,例如模拟自然干扰的管理怎样算成功,即多接近历史变域算近?是否当经营景观和自然景观有同样的物种组成时两者算是足够接近?那么各物种的丰富程度又怎样比较?森林的功能或者结构能否作为评价该种管理方式的最终判断标准?为了回答这些问题,需要设法确定理想状态时的景观干扰特征^[69],探究恢复后的生态系统与原来生态系统的差异,但这些问题目前都尚无定论,有待深入研究。

6 国内研究现状分析及发展建议

6.1 研究现状

相比上述研究成果,我国在历史变域方向的研究基础非常薄弱,明确地以“历史变域”为关键词的研究案例很少。一方面,就火烧历史而言,我国学者从森林火干扰的角度进行了为数不多的林火历史的研究,基本集中在我国重要国有林区且林火高发的大兴安岭地区,主要探索了林火的历史特征:1825 至 1993 年大兴安岭北部的火烧以较大面积、低强度的地表火为主,平均间隔期 37a,轮回期约 30a^[96],例如没有人为干扰时阿龙山的火烧轮回期为 30a^[97]。人为干扰出现后,防火、灭火延长了火烧轮回期:根据郑焕能的资料,在北部地区为 110—120a;瓦拉干、盘古和蒙克山 3 个地区在较弱人为干扰条件下,火烧轮回期为 80—100a^[98];呼中林区在

1961 年到 2001 年期间火烧轮回期延长至 823a^[99]。此外,还有少数案例利用模型模拟火烧特征,例如在呼中林区模拟、比较了当前火烧特征与历史火烧特征之间的差异^[100]、模拟基于自然火烧的采伐管理对森林的影响等^[101],但上述研究都没能完整地描述大兴安岭地区火烧的历史变域特征。另一方面,森林景观原始特征的研究更加薄弱,徐化成研究了满归林业局的原始景观特征,显示其原始组成以针叶林(面积比例为 60%)和成、过熟林为主^[97];吴志丰模拟呼中林区景观组成的历史变域特征,并揭示了在 1990 年和 2000 年该区森林景观特征偏离历史变域范围的方向和程度^[102]。

6.2 发展建议

在我国,一方面历史变域研究基础薄弱,另一方面面临生态恢复的重要任务、迫切需要该领域的研究成果,因此,历史变域的理论 and 实践研究都势在必行。我国和北美等国家在研究背景、景观管理体制和保护措施等方面都差异巨大;在北美地区,人类活动干扰森林的时间起点明确,干扰历史短、强度低,并保持了一定面积的原始森林,为了解区域历史特征提供了宝贵条件,使北美在该领域的研究始终处于前沿,各种森林景观类型的研究成果都很丰富,特别是某些地区有非常深入而详尽的系统研究,例如上述喀斯特山森林、黄石森林公园等地区;同时,也保证了在这些区域应用历史变域进行管理的合理性。在我国,森林开发历史长,人类干扰的起始时间不明确^[4],在这种翻天覆地的环境变化中,历史数据难以获得,利用历史变域理论来管理森林也需要更加严谨的论证。因此,我们要在学习和借鉴国外研究的基础上,发展适合我国国情的理论、进行适合我国国情的实践应用。

在历史数据的获得和处理方面我国和国外差距很大。就历史记录数据而言,自从 19 世纪后期欧洲人进入美洲大陆开始,土地调查就开始进行,火烧、采伐、经营等历史数据记录时间长而完善,这些都成为历史变域研究的重要资料。在我国,大规模的森林勘查都在新中国成立以后才陆续开始,其中,国家森林资源连续清查工作从 1973 年开始,有空间数据记录的调查则出现更晚。就自然历史数据而言,以火疤木为例,在北美相对容易获得,使得利用火疤木估算火烧历史特征的研究在 20 世纪 70、80 年代就迅速发展起来^[5],在我国,长期人为干扰极大地增加了获取火疤木的难度,虽然最近在年轮与历史气候关系研究有所进展,但火烧特征的提取方面与先进国家相比差距很大,需要更多的科研投入。在这种情况下,就要在寻找、研究火疤木的同时,结合古生态学等多学科理论和方法,发掘其他数据来源,例如在不同土壤层中贮存的碳^[103],整合多种来源的数据和方法,有望一定程度上弥补数据方法方面的先天不足之处。同时,最好能充分利用现有的自然保护区研究历史变域,虽然国外学者的观点认为绝对没有受到人为干扰的区域很少,寻找和研究这些区域的历史变域存在一定的困难和问题,但我国的背景下,仍不失为一种好的选择。

历史变域具有尺度特征,我国的森林生态系统类型复杂,要在增加多种森林类型研究案例的同时,注重异质性、多尺度的研究,深入探索多个空间尺度上的控制因子以及各因子的相互作用。

应用历史变域进行森林管理包括火烧管理和采伐经营管理。目前的火烧管理存在两种情况,一种是现实的轮回期小于历史变域,如在俄怀明州某一山艾树林景观,需要采取一定的灭火措施,但案例极少。另一种更为普遍,即长期灭火导致轮回期延长,增加大火灾害的风险,对此,发达国家实施可燃物管理,通过机械方法或计划火烧定期清除可燃物。我国在实践中采取严格的灭火管理,尚未有明确针对可燃物的管理。根据我国国情,计划火烧在近期实现的可能性很小,可燃物的机械去除成为相对可行的方案,历史变域将为可燃物的去除方案提供重要参考。就采伐管理而言,实施过程中需要各种参数,如采伐量、轮回期和空间配置等,历史变域研究结果虽然不能确切地回答这些问题,但无疑具有重要的参考意义,例如在我国的东北大、小兴安岭林区于 2011 年全面停止主伐,那么如何确定抚育采伐的采伐量和轮回期等参数,历史变域研究结果就可以作为重要参考之一。

如前文所述,当今和未来的气候变化与利用历史变域理论进行管理森林之间的辩证关系是目前学术界正努力探讨的问题,在我国,发展历史悠久、人口众多、森林受干扰时间长、强度大,该问题更应受到重视。但我国同其他国家一样,严格意义上重建历史景观是不可能的,在此种情况下,探讨气候变化和人类活动对森林景

观的影响非常重要,既能够参考历史特征,又能够适应现实以及未来气候变化的因素,耦合人类的活动,形成合理的景观管理方式。

7 结语

本文总结了历史变域研究领域新近的发展趋势:研究更加注重历史变域特征的异质性,向着多因素、多时空尺度研究发展;方法方面的进展包括检验常用历史数据的误差,探索更好的采样、分析方法,为多尺度和异质性研究提供支持。近阶段这些历史变域研究的核心热点,也是景观生态学研究的核心概念:动态、尺度和异质性,正因为这一理论特点和森林管理实践共同的强烈需求,加之未来的气候变化比过去更加多变和不确定,围绕历史变域的多因素影响及其空间异质性和多尺度的研究在未来一段时间内仍将强势增长。

在应用研究方面,模拟自然干扰的管理方法正在探索之中,理论研究成果所提供的模拟参数更加全面、精确,并且逐步地验证那些模拟措施是否能够真正地取代自然火,主要通过和其他经营方法比较判断来实现,这一问题仍需更多的研究成果来回答。虽然模拟自然干扰进行森林管理存在着争议,很多问题都尚无定论,但自然历史变域以及模拟该变域的人为管理总归是一种合乎逻辑的探索,正像 Keane 所说,在降低气候变化的若干不确定性之前,历史变域仍是最可用的概念。

在历史变域这一研究议题中,我国与其他国家、尤其是北美相比,研究基础非常薄弱,需尽力追赶,同时,森林开发背景和管理现状差异十分巨大,也不能盲目照搬,就是说,我国的研究既要有选择地借鉴先进成果,又要符合我国国情,即发掘多种来源的历史数据,充分运用模型模拟方法,尽可能利用自然保护区为研究区,增加针对各种森林类型的研究案例的同时,加强多尺度研究;在实践中,根据我国森林管理的实际情况,充分应用理论研究结果,制定合理的管理方案,力求为我国的森林生态系统经营提供有效的参考。

参考文献(References):

- [1] Morgan P, Aplet G H, Haufler J B, Humphries H C, Moore M M, Wilson W D. Historical range of variability: a useful tool for evaluating ecosystem change. *Journal of Sustainable Forestry*, 1994, 2(1/2): 87-111.
- [2] Millar C I, Woollenden W B. The role of climate change in interpreting historical variability. *Ecological Applications*, 1999, 9(4): 1207-1216.
- [3] Karau E C, Keane R E. Determining landscape extent for succession and disturbance simulation modeling. *Landscape Ecology*, 2007, 22(7): 993-1006.
- [4] 吴志丰, 李月辉, 常禹, 胡志斌. 历史变域在森林生态系统管理中的应用现状与展望. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1859-1866.
- [5] Heinselman M L. Fire in the virgin forests of the Boundary Waters Canoe Area, Minnesota. *Quaternary Research*, 1973, 3(3): 329-382.
- [6] Van Wagner C E. Age-class distribution and the forest fire cycle. *Canadian Journal of Forest Research*, 1978, 8(2): 220-227.
- [7] Swetnam T W, Allen C D, Betancourt J. Applied historical ecology: using the past to manage for the future. *Ecological Applications*, 1999, 9(4): 1189-1206.
- [8] Veblen T T, Kitzberger T, Villalba R, Donnegan J. Fire history in northern Patagonia: the roles of humans and climatic variation. *Ecological Monographs*, 1999, 69(1): 47-67.
- [9] Nonaka E, Spies T A. Historical range of variability in landscape structure: A simulation study in Oregon, USA. *Ecological Applications*, 2005, 15(5): 1727-1746.
- [10] Latremouille C, Valeria O, Harvey B D. Historical analysis of landscape change in the eastern boreal mixedwood: A case study in the context of cohort-based management. *The Forestry Chronicle*, 2013, 89(3): 304-314.
- [11] Weisberg P J. Historical fire frequency on contrasting slope facets along the mckenzie river, western oregon cascades. *Western North American Naturalist*, 2009, 69(2): 206-214.
- [12] Turner M G. Disturbance and landscape dynamics in a changing world. *Ecology*, 2010, 91(10): 2833-2849.
- [13] Senici D, Chen H Y H, Bergeron Y, Cyr D. Spatiotemporal variations of fire frequency in central boreal forest. *Ecosystems*, 2010, 13(8): 1227-1238.
- [14] Von Platen J, Kirkpatrick J B, Allen K J. Fire frequency variation in south-eastern Tasmanian dry eucalypt forest 1740-2004 from fire scars. *Australian Forestry*, 2011, 74(3): 180-189.
- [15] Bukowski B E, Baker W L. Historical fire regimes, reconstructed from land-survey data, led to complexity and fluctuation in sagebrush landscapes.

- Ecological Applications, 2013, 23(3): 546-564.
- [16] Williams M A, Baker W L. Spatially extensive reconstructions show variable-severity fire and heterogeneous structure in historical western United States dry forests. *Global Ecology and Biogeography*, 2012, 21(10): 1042-1052.
- [17] Westerling A L, Hidalgo H G, Cayan D R, Swetnam T W. Warming and earlier spring increase western U.S. forest wildfire activity. *Science*, 2006, 313(5789): 940-943.
- [18] Grissino-Mayer H D, Romme W H, Floyd M L, Hanna D D. Climatic and human influences on fire regimes of the southern San Juan Mountains, Colorado, USA. *Ecology*, 2004, 85(6): 1708-1724.
- [19] Qiu J. Arctic ecology: Tundra's burning. *Nature*, 2009, 461(7260): 34-36.
- [20] Girardin M P, Ali A A, Carcaille C, Mudelsee M, Drobyshev I, Hély C, Bergeron Y. Heterogeneous response of circumboreal wildfire risk to climate change since the early 1900s. *Global Change Biology*, 2009, 15(11): 2751-2769.
- [21] Yocom L L, Fule P Z, Brown P M, Cerano J, Villanueva-Diaz J, Falk D A, Cornejo-Oviedo E. El Nino-Southern Oscillation effect on a fire regime in northeastern Mexico has changed over time. *Ecology*, 2010, 91(6): 1660-1671.
- [22] Bowman D M J S, Balch J K, Artaxo P, Bond W J, Carlson J M, Cochrane M A, D'Antonio C M, DeFries R S, Doyle J C, Harrison S P, Johnston F H, Keeley J E, Krawchuk M A, Kull C A, Marston J B, Moritz M A, Prentice I C, Roos C I, Scott A C, Swetnam T W, van der Werf G R, Pyne S J. Fire in the earth system. *Science*, 2009, 324(5926): 481-484.
- [23] Donnegan J A, Veblen T T, Sibold J S. Climatic and human influences on fire history in Pike National Forest, central Colorado. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, 31(9): 1526-1539.
- [24] Veblen T T, Kitzberger T, Donnegan J A. Climatic and human influences on fire regimes in ponderosa pine forests in the Colorado Front Range. *Ecological Applications*, 2000, 10(4): 1178-1195.
- [25] Bekker M F, Taylor A H. Fire disturbance, forest structure, and stand dynamics in montane forests of the southern Cascades, Thousand Lakes Wilderness, California, USA. *Ecoscience*, 2010, 17(1): 59-72.
- [26] Iniguez J M, Swetnam T W, Yool S R. Topography affected landscape fire history patterns in southern Arizona, USA. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(3): 295-303.
- [27] Beaty R M, Taylor A H. Fire history and the structure and dynamics of a mixed conifer forest landscape in the northern Sierra Nevada, Lake Tahoe Basin, California, USA. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(3/4): 707-719.
- [28] Heyerdahl E K, Brubaker L B, Agee J K. Spatial controls of historical fire regimes: A multiscale example from the interior west, USA. *Ecology*, 2001, 82(3): 660-678.
- [29] Taylor A H, Skinner C N. Fire history and landscape dynamics in a late-successional reserve in the Klamath Mountains, California, USA. *Forest Ecology and Management*, 1998, 111(2/3): 285-301.
- [30] Keane R E, Hessburg P F, Landres P B, Swanson F J. The use of historical range and variability (HRV) in landscape management. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258: 1025-1037.
- [31] Cissel J H, Swanson F J, Weisberg P J. Landscape management using historical fire regimes: Blue River, Oregon. *Ecological Applications*, 1999, 9(4): 1217-1231.
- [32] Schulte L A, Pidgeon A M, Mladenoff D J. One hundred fifty years of change in forest bird breeding habitat: Estimates of species distributions. *Conservation Biology*, 2005, 19(6): 1944-1956.
- [33] Abella S R, Denton C W. Spatial variation in reference conditions: historical tree density and pattern on a *Pinus ponderosa* landscape. *Canadian Journal of Forest Research*, 2009, 39(12): 2391-2403.
- [34] Messier M S, Shatford J P A, Hibbs D E. Fire exclusion effects on riparian forest dynamics in southwestern Oregon. *Forest Ecology and Management*, 2012, 264: 60-71.
- [35] Kennedy M C, McKenzie D. Using a stochastic model and cross-scale analysis to evaluate controls on historical low-severity fire regimes. *Landscape Ecology*, 2010, 25(10): 1561-1573.
- [36] Parisien M A, Moritz M A. Environmental controls on the distribution of wildfire at multiple spatial scales. *Ecological Monographs*, 2009, 79(1): 127-154.
- [37] Kellogg L-K B, McKenzie D, Peterson D L, Hessl A E. Spatial models for inferring topographic controls on historical low-severity fire in the eastern Cascade Range of Washington, USA. *Landscape Ecology*, 2008, 23(2): 227-240.
- [38] Ireland K B, Stan A B, Fule P Z. Bottom-up control of a northern Arizona ponderosa pine forest fire regime in a fragmented landscape. *Landscape Ecology*, 2012, 27(7): 983-997.
- [39] Parisien M A, Miller C, Ager A A, Finney M A. Use of artificial landscapes to isolate controls on burn probability. *Landscape Ecology*, 2010, 25(1): 79-93.

- [40] Thompson J R, Johnson K N, Lennette M, Spies T A, Bettinger P. Historical disturbance regimes as a reference for forest policy in a multiowner province: A simulation experiment. *Canadian Journal of Forest Research*, 2006, 36(2): 401-417.
- [41] Shinneman D J, Cornett M W, Palik B J. Simulating restoration strategies for a southern boreal forest landscape with complex land ownership patterns. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(3): 446-458.
- [42] Wallin D O, Swanson F J, Marks B, Cissel J H, Kertis J. Comparison of managed and pre-settlement landscape dynamics in forests of the Pacific Northwest, USA. *Forest Ecology and Management*, 1996, 85(1/3): 291-309.
- [43] Didion M, Fortin M J, Fall A. Forest age structure as indicator of boreal forest sustainability under alternative management and fire regimes: A landscape level sensitivity analysis. *Ecological Modelling*, 2007, 200(1/2): 45-58.
- [44] Agee J K. Historical range of variability in eastern Cascades forests, Washington, USA. *Landscape Ecology*, 2003, 18(8): 725-740.
- [45] Scheller R M, Van Tuyl S, Clark K, Hayden N G, Hom J, Mladenoff D J. Simulation of forest change in the New Jersey Pine Barrens under current and pre-colonial conditions. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(5/6): 1489-1500.
- [46] Williams M, Baker W. Comparison of the Higher-Severity Fire Regime in Historical (A. D. 1800s) and Modern (A. D. 1984-2009) Montane Forests Across 624, 156 ha of the Colorado Front Range. *Ecosystems*, 2012, 15(5): 832-847.
- [47] Brown P M, Wienk C L, Symstad A J. Fire and forest history at mount rushmore. *Ecological Applications*, 2008, 18(8): 1984-1999.
- [48] Kitchen S G. Historical fire regime and forest variability on two eastern Great Basin fire-sheds (USA). *Forest Ecology and Management*, 2012, 285: 53-66.
- [49] Nonaka E, Spies T A, Wimberly M C, Ohmann J L. Historical range of variability in live and dead wood biomass: a regional-scale simulation study. *Canadian Journal of Forest Research*, 2007, 37(11): 2349-2364.
- [50] Liu F, Mladenoff D J, Keuler N S, Moore L S. Broad-scale variability in tree data of the historical Public Land Survey and its consequences for ecological studies. *Ecological Monographs*, 2011, 81(2): 259-275.
- [51] Williams M A, Baker W L. Bias and error in using survey records for ponderosa pine landscape restoration. *Journal of Biogeography*, 2010, 37(4): 707-721.
- [52] Schulte L A, Mladenoff D J. The original US public land survey records: Their use and limitations in reconstructing presettlement vegetation. *Journal of Forestry*, 2001, 99(10): 5-10.
- [53] Parsons R A, Heyerdahl E K, Keane R E, Dörner B, Fall J. Assessing accuracy of point fire intervals across landscapes with simulation modelling. *Canadian Journal of Forest Research*, 2007, 37(9): 1605-1614.
- [54] Kou X J, Baker W L. Accurate estimation of mean fire interval for managing fire. *International Journal of Wildland Fire*, 2006, 15(4): 489-495.
- [55] Van Horne M L, Fule P Z. Comparing methods of reconstructing fire history using fire scars in a southwestern United States ponderosa pine forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 2006, 36(4): 855-867.
- [56] Meador A J S, Parysow P F, Moore M M. Historical Stem-Mapped Permanent Plots Increase Precision of Reconstructed Reference Data in Ponderosa Pine Forests of Northern Arizona. *Restoration Ecology*, 2010, 18(2): 224-234.
- [57] Farris C A, Baisan C H, Falk D A, Yool S R, Swetnam T W. Spatial and temporal corroboration of a fire-scar-based fire history in a frequently burned ponderosa pine forest. *Ecological Applications*, 2010, 20(6): 1598-1614.
- [58] Falk D A, Heyerdahl E K, Brown P M, Farris C, Fule P Z, McKenzie D, Swetnam T W, Taylor A H, Van Horne M L. Multi-scale controls of historical forest-fire regimes: new insights from fire-scar networks. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(8): 446-454.
- [59] Bigio E, Swetnam T W, Baisan C H. A comparison and integration of tree-ring and alluvial records of fire history at the Missionary Ridge Fire, Durango, Colorado, USA. *The Holocene*, 2010, 20(7): 1047-1061.
- [60] Fule P Z, Heinlein T A, Covington W W, Moore M M. Assessing fire regimes on Grand Canyon landscapes with fire-scar and fire-record data. *International Journal of Wildland Fire*, 2003, 12(2): 129-145.
- [61] McEwan R W, Hutchinson T F, Ford R D, McCarthy B C. An experimental evaluation of fire history reconstruction using dendrochronology in white oak (*Quercus alba*). *Canadian Journal of Forest Research*, 2007, 37(4): 806-816.
- [62] Allen C D, Anderson R S, Jass R B, Toney J L, Baisan C H. Paired charcoal and tree-ring records of high-frequency Holocene fire from two New Mexico bog sites. *International Journal of Wildland Fire*, 2008, 17(1): 115-130.
- [63] Di Folco M B, Kirkpatrick J B. Organic soils provide evidence of spatial variation in human-induced vegetation change following European occupation of Tasmania. *Journal of Biogeography*, 2013, 40(1): 197-205.
- [64] Yang J, He H S, Sturtevant B R, Miranda B R, Gustafson E J. Comparing effects of fire modeling methods on simulated fire patterns and succession: a case study in the Missouri Ozarks. *Canadian Journal of Forest Research* 2008, 38(6): 1290-1302.
- [65] Miranda B R, Sturtevant B R, Yang J, Gustafson E J. Comparing fire spread algorithms using equivalence testing and neutral landscape models. *Landscape Ecology*, 2009, 24(5): 587-598.

- [66] Sturtevant B R, Miranda B R, Yang J, He H S, Gustafson E J, Scheller R M. Studying fire mitigation strategies in multi-ownership landscapes: Balancing the management of fire-dependent ecosystems and fire risk. *Ecosystems*, 2009, 12(3): 445-461.
- [67] Tepley A J, Thomann E A. Analytical approximation of a stochastic, spatial simulation model of fire and forest landscape dynamics. *Ecological Modelling*, 2012, 233: 41-51.
- [68] Keane R E, Parsons R A, Hessburg P F. Estimating historical range and variation of landscape patch dynamics: limitations of the simulation approach. *Ecological Modelling*, 2002, 151(1): 29-49.
- [69] Sibley P K, Kreutzweiser D P, Naylor B J, Richardson J S, Gordon A M. Emulation of natural disturbance (END) for riparian forest management: synthesis and recommendations. *Freshwater Science*, 2012, 31(1): 258-264.
- [70] Perera A H, Buse L J, Weber M G. *Emulating Natural Forest Landscape Disturbances: Concepts and Applications*. New York: Columbia University Press, 2004: 265-274.
- [71] Perera A H, Cui W B. Emulating natural disturbances as a forest management goal: Lessons from fire regime simulations. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(7): 1328-1337.
- [72] Kuuluvainen T, Grenfell R. Natural disturbance emulation in boreal forest ecosystem management theories, strategies, and a comparison with conventional even-aged management. *Canadian Journal of Forest Research*, 2012, 42(7): 1185-1203.
- [73] Angelstam P K. Maintaining and restoring biodiversity in European boreal forests by developing natural disturbance regimes. *Journal of Vegetation Science*, 1998, 9(4): 593-602.
- [74] Ford W M, Russell K R, Moorman C E. Proceedings: the role of fire for nongame wildlife management and community restoration: traditional uses and new directions. Gen. Tech. Rep. NE-288. Newtown Square, PA: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station, 2002: 11-23.
- [75] Bergeron Y, Leduc A, Harvey B D, Gauthier S. Natural fire regime: A guide for sustainable management of the Canadian boreal forest. *Silva Fennica*, 2002, 36(1): 81-95.
- [76] Arkle R S, Pilliod D S, Welty J L. Pattern and process of prescribed fires influence effectiveness at reducing wildfire severity in dry coniferous forests. *Forest Ecology and Management*, 2012, 276: 174-184.
- [77] Fule P Z, Crouse J E, Roccaforte J P, Kalies E L. Do thinning and/or burning treatments in western USA ponderosa or Jeffrey pine-dominated forests help restore natural fire behavior? *Forest Ecology and Management*, 2012, 269: 68-81.
- [78] Battaglia M A, Smith F W, Shepperd W D. Can prescribed fire be used to maintain fuel treatment effectiveness over time in Black Hills ponderosa pine forests? *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(12): 2029-2038.
- [79] White P S, Pickett S T A. Natural disturbance and patch dynamics: an introduction // *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics*. New York: Academic Press, 1985: 3-13.
- [80] Gill A M, Allan G. Large fires, fire effects and the fire-regime concept. *International Journal of Wildland Fire*, 2008, 17(6): 688-695.
- [81] Hunter M L. Natural fire regimes as spatial models for managing boreal forests. *Biological Conservation*, 1993, 65(2): 115-120.
- [82] Carlson D J, Reich P B, Frelich L E. Fine-scale heterogeneity in overstory composition contributes to heterogeneity of wildfire severity in southern boreal forest. *Journal of Forest Research*, 2011, 16(3): 203-214.
- [83] Hudec J L, Peterson D L. Fuel variability following wildfire in forests with mixed severity fire regimes, Cascade Range, USA. *Forest Ecology and Management*, 2012, 277: 11-24.
- [84] Liu Z H, He H S, Yang J. Emulating natural fire effects using harvesting in an eastern boreal forest landscape of northeast China. *Journal of Vegetation Science*, 2012, 23(4): 782-795.
- [85] Klenk N, Bull G, Cohen D. What is the "END" (emulation of natural disturbance) in forest ecosystem management? An open question. *Canadian Journal of Forest Research*, 2008, 38(8): 2159-2168.
- [86] Klenk N L, Bull G Q, MacLellan J I. The "emulation of natural disturbance" (END) management approach in Canadian forestry: A critical evaluation. *The Forestry Chronicle*, 2009, 85(3): 440-445.
- [87] Stein B A, Staudt A, Cross M S, Dubois N S, Enquist C, Griffiths R, Hansen L J, Hellmann J J, Lawler J J, Nelson E J, Pairis A. Preparing for and managing change: climate adaptation for biodiversity and ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2013, 11(9): 502-510.
- [88] Landres P B, Morgan P, Swanson F J. Overview of the use of natural variability concepts in managing ecological systems. *Ecological Applications*, 1999, 9(4): 1179-1188.
- [89] Lindner M. Developing adaptive forest management strategies to cope with climate change. *Tree Physiology*, 2000, 20: 299-307.
- [90] Keane R E, Holsinger L M, Parsons R A. Climate change effects on historical range and variability of two large landscape in western Montana, USA. *Forest Ecology and Management*, 2008, 254(3): 375-389.
- [91] Dale V H, Joyce L A, McNulty S, Neilson R P, Ayres M P, Flannigan M D, Hanson P J, Irland L C, Lugo A E, Peterson C J, Simberloff D,

- Swanson F J, Stocks B J, Wotton B M. Climate change and forest disturbances. *BioScience*, 2001, 51(9): 723-734.
- [92] Bailey J D, Covington W W. Evaluating ponderosa pine regeneration rates following ecological restoration treatments in northern Arizona, USA. *Forest Ecology and Management*, 2002, 155(1/3): 271-278.
- [93] Arseneault J E, Saunders M R, Seymour R S, Wagner R G. First decadal response to treatment in a disturbance-based silviculture experiment in Maine. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(3): 404-412.
- [94] Westerling A L, Turner M G, Smithwick E A H, Romme W H, Ryan M G. Continued warming could transform Greater Yellowstone fire regimes by mid-21st century. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(32): 13165-13170.
- [95] Guyette R, Stambaugh M, Dey D, Muzika R M. Predicting Fire Frequency with Chemistry and Climate. *Ecosystems*, 2012, 15(2): 322-335.
- [96] 胡海清. 大兴安岭原始林区林木火疤的研究. *自然灾害学报*, 2003, 12(4): 68-72.
- [97] 徐化成. 中国大兴安岭森林. 北京:科学出版社, 1991.
- [98] 赵致奎. 基于树轮火疤重建大兴安岭北部林区火历史 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010.
- [99] 王明玉, 舒立福, 田晓瑞, 李杰, 杜建华. 林火干扰下的大兴安岭呼中区景观动态分析. *山地学报*, 2004, 22(6): 702-706.
- [100] Chang Y, He H S, Hu Y M, Bu R C, Lia X Z. Historic and current fire regimes in the Great Xing'an Mountains, northeastern China: Implications for long-term forest management. *Forest Ecology And Management*, 2008, 254(3): 445-453.
- [101] Liu Z H, Yang J, Chang Y, Weisberg P J, He H S. Spatial patterns and drivers of fire occurrence and its future trend under climate change in a boreal forest of Northeast China. *Global Change Biology*, 2012, 18(6): 2041-2056.
- [102] 吴志丰, 李月辉, 布仁仓, 熊在平, 常禹, 陈宏伟, 胡远满. 呼中林区森林景观的历史变域模拟及评价. *生态学报*, 2013, 33(15): 4799-4807.
- [103] DeLuca T H, Aplet G H. Charcoal and carbon storage in forest soils of the Rocky Mountain West. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2008, 6(1): 18-24.