

火烧对寒温带湿地生态系统的影响

赵凤君¹, 王立中², 舒立福^{1*}

(1. 中国林科院 森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林保护学重点实验室, 北京 100091;

2. 大兴安岭林业集团公司 农业林业科学研究院, 黑龙江 加格达奇 165000)

摘要:寒温带湿地具有重要的水源涵养作用。火烧会导致寒温带湿地生态功能退化, 甚至永远无法恢复。深入了解火烧对寒温带湿地生态系统的影响, 可为火烧迹地生态恢复模式的提出及生态工程的实施提供理论依据。从植被、土壤、水环境和野生动物等角度综合分析了火烧对寒温带湿地生态系统影响的研究成果, 以期深入了解国内外研究进展, 明确今后的研究方向。

关键词:火; 寒温带; 湿地; 生态系统; 恢复

中图分类号: S762.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2013)02-0136-07

Influences of Fire on Ecosystem of the Wetlands in Cold Temperate Area

ZHAO Feng-jun¹, WANG Li-zhong², SHU Li-fu^{1*}

(1. Key Laboratory of Forest Protection, State Forestry Administration, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Research Institute of Agriculture and Forestry, Daxinganling Forestry Group, Jiagedaqi, Heilongjiang 165000, China)

Abstract: Wetlands in cold temperate zone play important roles in water source conservation. However, ecological functions of wetlands would be degraded or even being unrecoverable if fire occurs. The deep understanding of the influences of fire on the ecosystem of wetlands in cold temperate zone could provide theoretical basis for the ecological restoration and reconstruction of the burned area. Research advances in the influences of fire on the ecosystem of wetlands were reviewed from the aspects of vegetation, soil, water environment and wild animal to clarify the research directions for the future studies.

Key words: fire; cold temperate zone; wetland; ecosystem; restoration

湿地具有明显的地域特色, 寒温带湿地以生境冷湿为特点, 大小兴安岭是我国寒温带湿地主要分布区。大兴安岭湿地主要是沼泽湿地, 包括森林沼泽、灌丛沼泽、草丛沼泽和泥炭藓沼泽^[1-2]。寒温带湿地是在当地气候、地貌和水文条件共同作用下形成的, 严冷气候、平坦地貌、粘重的第四纪沉积物亚粘土和永冻层的天然隔水板作用, 最终导致地表滞水、过湿, 形成独具特色的寒温带湿地^[3]。寒温带湿地在维护当地生态平衡方面起着重要作用, 区域内冻土、地上植被和厚厚的地表枯落物、苔藓地衣层及泥炭层共同贮存着大量的淡水资源, 是发挥水源涵养作用的重要保障; 同时冷湿环境条件下, 碎石山地

受冻土控制, 亦不会发生土壤流失。

寒温带湿地又是一个非常脆弱的生态系统^[4], 火是其重要的干扰因子之一^[5-6]。由于生境冷湿, 有机质分解缓慢, 寒温带湿地具有厚厚的凋落物和苔藓泥炭层。遇到少水的干旱年份时, 这些可燃物非常易于干燥, 极易被引燃, 发生火灾, 特别是大火灾^[7]。1987年“5·6”特大森林火灾中, 位于山缓坡、沟谷和河川岸边的沼泽湿地多为严重过火区, 不仅地表植被焚烧殆尽, 而且土壤中的泥炭层也不同程度地被烧毁^[6]。2003年和2006年发生在南瓮河国家级湿地自然保护区的2起火灾, 中等程度以上火烧的过火面积占到了全部过火面积的53.04%^[8]。

收稿日期: 2012-05-21 修回日期: 2012-08-25

基金项目: 林业公益性行业科研专项经费项目(201004074); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(CAFRIFEEP 201105); “十二五”国家科技攻关研究项目(2011BAD32B05); 国家自然科学基金(30972381)。

作者简介: 赵凤君, 女, 助理研究员, 主要研究方向: 火干扰与火生态。E-mail: zhaofengjun1219@163.com

* 通信作者: 舒立福, 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 火干扰与火生态。E-mail: shulif@caf.ac.cn

火烧可导致寒温带湿地生态功能退化,甚至永远无法恢复。一方面,火烧特别是中等程度以上的火烧,在烧毁地上植被和地表枯落物的同时,由于向生态系统输送了大量热量,会对地面热力状况产生显著影响;另一方面,如果苔藓地衣层也在火灾中被烧毁,湿地对土层的绝缘作用就会遭到破坏,导致土层或山坡风化层裸露,存在严重坡面侵蚀的可能。实际上火烧对湿地生态系统所有组分都会产生影响,影响程度与火烧强度、可燃物载量等因素有关^[9]。鉴于寒温带湿地巨大的生态作用,火烧对其生态系统各组分的影响受到广泛关注。从生态系统内植被、土壤、水环境和野生动物等角度,对国内外相关研究进行综合分析,以助于深入了解火烧对寒温带湿地生态系统影响研究的国内外进展,明确今后的研究方向。

1 火烧对寒温带湿地植被的影响

寒温带湿地植被类型丰富,组成成分复杂,一般沿远离水体方向湿地植被分布呈现一定的规律性^[10];浅水生植被、草丛沼泽植被、灌丛沼泽植被、森林湿地植被。森林湿地指长期或周期性被水淹没的木本群落,它同时具有湿地和森林的特征。

火烧对生态系统内植被的影响与植被类型、可燃物载量、火烧强度、火烧频次、火烧季节、植被的生长状况以及火烧后的气候条件等因素有关^[11]。火烧对植被的影响状况可以通过对火烧后第一个生长季内植物的存活率、地上活体生物量以及植物的分蘖数等来定性分析,并划分不同的等级:存活率低、生物量下降、不受影响、生物量增加等 4 个梯度^[12]。

相较于森林湿地,草丛沼泽和灌丛沼泽中的可燃物由更多比例的细小可燃物组成,它们易干燥、易被引燃、易被火消耗,因此草丛沼泽和灌丛沼泽中发生的火多为快速蔓延的地表火。地表植被很容易被烧毁,但只要不发生地下火,对于土壤中可萌生幼苗的植被繁殖体基本没有太大的伤害。所以,草丛和灌丛沼泽植被火后可快速萌生和生长,而森林湿地植被由于群落层次复杂,可燃物载量大,其在火灾中的受害程度与火强度等火行为因素密切相关,其受害状况可参考森林受害的相关标准。《国家林业局关于颁发全国森林资源连续清查技术规定的通知》(林资发[2004]25 号),按照火后植被受害状况将火灾程度分为轻度、中度、重度和极重度 4 个等级,分级标准为:轻度:受害立木 20% 以下,仍能恢复生长。中度:受害立木 20%~49%,生长受到明显的抑制。重度:受害立木 50%~90%,以濒死木和死亡木为主。极重度:受害立木 90% 以上,剩余活立木达不到

疏林标准。

虽然寒温带湿地生态系统以生境冷湿为特征,但中等程度以上火烧也经常发生^[6,8],这是因为生态系统内有机质分解缓慢,积累了厚厚的枯落物、腐殖质、苔藓地衣及地下泥炭,极端干旱年份这些可燃物极易干燥和燃烧。特别的因地下冻土层的存在,寒温带物种特别是乔木树种多为浅根型树种(如兴安落叶松等),腐殖质等被烧毁后,里面分布的植被根系随之被烧毁,导致地表植被死亡。

2 火烧对寒温带湿地土壤的影响

火烧对生态系统内土壤的影响源于其向土壤输送的热量、残留的灰烬及对土壤原始基质微气候状况等的改变。火烧后土壤最直接的变化就是土壤温度的升高,升温幅度与火强度、火烧持续时间、可燃物类型、土壤含水率等密切相关。在土壤中尚有水分存在的情况下,土壤温度不会超过 95℃^[13];当土壤中的水分完全蒸发掉后,温度会快速升高到 200~300℃^[14];当可燃物载量较大时,土壤温度可升高到 500~700℃,瞬间甚至可达到 850℃^[15]。但在一般情况下,火灾发生时地下 5 cm 处的温度极少超过 150℃,20~30 cm 处的温度基本不会升高^[16]。火烧对土壤的影响程度主要取决于 2 个因素,土壤温度的最高值和土壤高温的持续时间^[17]。高温持续时间越长对土壤的损坏越严重,快速掠过地表火只传递少量的热量到地表下土壤,但慢速蔓延的林火却会传递大量的热量给土壤,导致土壤温度的升高。寒温带湿地生态系统中枯落物层和腐殖质层深厚,且有泥炭层发育,林火一旦发生常会引发地下火^[18],地下火在地表下延烧,蔓延速度缓慢,温度升高幅度大,土壤受损严重。

火对土壤的干扰作用主要表现在:1)对土壤物理性质的影响,如土壤持水量、孔隙度、持水性和径流等;2)对土壤化学性质的影响,如 pH 值、有机质含量、总 C 含量、营养元素可获得性等,营养元素主要包括总 N、总 P、总 K,及速效的 N、P、K 等;3)对土壤内生物的影响,如土壤动物、微生物、酶及根系生物量等^[19]。林火对土壤的影响可以是短期的,也可以是长期的,并且这些变化随着时间的流逝,相应地也发生着正负效应的更替。对于寒温带湿地生态系统来说,火对土壤的干扰还有更重要的一个方面,那就是火烧改变了地表覆盖及向土壤中输送了大量热量,会引起冻土活动层相应的变化。

2.1 土壤冻土层

土壤冻土层有永冻层和季节性冻层之分。多年冻土的活动层是指地表至最大季节融化深度(冻土

上限)之间的部分,是冻土与大气进行物质与能量交换的场所,其变化可以影响到生物、水文、地球物理以及生物地球化学过程,是冻土最基本的特性之一^[20]。1987 年“5·6”大火后,图强林业局奋斗林场观测结果表明,地下 10 cm 处,重度火烧区温度比未烧区高 2.6℃,而轻度火烧区这种现象不明显;未火烧林地,泥炭层下 33 cm 深处出现冻层,而火烧林地挖至 50 cm 深处尚未见冻层出现^[21];至 2000 年时,大兴安岭严重过火区与未火烧区相比,火烧区冻土活动层厚度仍明显大于未火烧区^[22]。

2.2 土壤物理性质

湿地土壤性能受土壤结构、透气性、水分蓄积等多个因素共同影响,其中土壤结构是决定其水文功能的重要因素。结构好的土壤具有大孔隙,可满足水分流动、水分蓄积和根系生长的需要。土壤有机质的存在有利于孔隙的形成,火对土壤结构产生重要影响的一个主要原因是烧除了土壤中的有机质。火烧迹地与对照样地相比,土壤容重增加,土壤孔隙度和土壤持水量减少^[23]。土壤结构退化时,担负渗水功能的大孔隙变得越来越少。火烧对土壤物理性质的影响与火烧强度密切相关,高强度火烧对土壤结构破坏严重,而低中强度火烧对土壤坚实度和孔隙状况影响不大^[24]。由于火烧除了能对雨水起缓解作用的植被及地表枯落物层,减弱了土壤持水力,导致地表径流加剧,特别是高强度火烧明显增加水土流失量^[25],不但减少了土壤的含水量,而且使富集营养的灰分层和 A 层的沉积物受到侵蚀,地力下降,对植物群落的重建不利。火后土壤物理性质的变化,有可能随着时间的推移,地表植被的恢复,逐渐恢复到火烧前的水平^[26]。

对于寒温带湿地生态系统来说,火烧迹地土壤物理性质的变化除以上阐述以外,还有因冻土活动层厚度而引起的特殊变化。冻土融化可能导致低洼地区积水形成新生沼泽,从而改变森林植被的演替方向。刘银良^[27]等认为,大兴安岭森林沼泽区发生火灾后,与未火烧区相比,严重火烧区下垫面蒸散量增高,绝对湿度梯度增大,但由于火烧沼泽区树木全部或大部分死亡,失去了林冠耗水途径,而未火烧沼泽区却有强烈的冠层蒸腾耗水,所以火烧后沼泽面积有进一步扩大的趋势。解伏菊^[28]等研究发现,近几十年来在大兴安岭未火烧区湿地格局发生微弱变化的同时,1987 年“5·6”大火后火烧迹地不仅湿地面积显著增加而且呈现集中连片分布的特点,她们认为火烧强度是湿地格局变化的重要引致因子,火烧强度越大,森林水文调节能力降低幅度越大,湿地面积增加越显著。侯传美^[22]等野外调查中也发现

相似现象,即火烧区沼泽湿地的范围明显扩张,致使立地条件恶化,针叶林林缘后退,取而代之的是灌丛覆盖下的踏头、苔藓相间分布的新生沼泽。赵魁义^[6]等认为火烧区的沼泽化趋势与地貌条件密切相关,在沟谷、低洼地沼泽呈现分布扩大,沼泽化程度加重的同时,较陡的坡地、分水岭上沼泽则显露出分布缩小,沼泽化程度减轻的趋势。

2.3 土壤化学性质

表征土壤化学性质的因子很多,如 pH 值、有机质含量、全 C 含量、全 N 含量、全 P 含量、全 K 含量、速效养分(N、P、K)等,火烧可引起以上所有因子发生或大或小的变化,从而导致土壤化学性质改变。

火烧后土壤 pH 值会升高^[29],这是因为火烧后遗留灰分中 KOH、NaOH、CaCO₃、MgCO₃ 等的积累以及有机物中酸性成分减少的缘故,且土壤 pH 值的升高程度随火烧强度的增加而增强^[30]。

从短期影响看,火烧后土壤有机质含量和全 C 含量大幅度下降^[29],主要原因有以下 3 个方面:1)火烧移除了地表枯落物,减少了有机物的来源;2)因减少了植被覆盖,提高了剩余枯落物的分解速率,减少了有机质的积累;3)火烧致使表土层有机碳大量分解,这种情况主要发生在高强度火烧中。据文献报导,当土壤温度在 200℃ 以下时,土壤有机质没有损失;200~350℃ 之间时,土壤有机质最高可损失 50%;350℃ 以上时,土壤有机质几乎全部被烧毁^[31]。从长期影响来看,可燃物不完全燃烧形成的碳屑进入土壤系统后,会形成土壤黑碳,并改变有机质的组成。

N 是土壤中的重要营养元素,由于 N 的挥发温度低(约 200℃),因此火烧时 N 最易损失,火后土壤中总 N 含量明显下降^[32-34]。土壤中总 P 含量的变化趋势与总 N 相同,但 K 含量却相反,呈增加趋势^[29]。

火烧后短期内土壤中有效态 N、P、K、Ca、Mg 等养分含量会有所上升,增加了养分可利用性^[29,35]。孙明学^[36]等认为,中等强度火烧后土壤养分含量较其他火烧强度的土壤要高。随着时间的推移,土壤中速效养分含量会慢慢下降,趋于火前水平。据文献报道,*Pinus canariensis* 林中,火后 1 a 土壤中铵态氮(NH₄-N)、硝态氮(NO₃-N)和矿质态 N 含量最高,随时间推移 N 元素水平开始回落,5 年后回复到火前水平^[37]。火后土壤中速效养分含量下降的原因,除部分养分被植物根系吸收利用外,另有部分养分则随降雨被淋溶损失掉了。

火烧对土壤化学性质的影响程度取决于火烧的强度,其中起关键作用的 2 个指标是火烧能达到的

最高温度及火烧持续时间;温度越高,持续时间越长,对土壤化学性质的影响越大。G. Certini^[17]认为,虽然火烧会对土壤化学性质产生重要影响,但只要火烧迹地上的植被及时更新起来,通过一段或长或短时间的恢复^[38-39],土壤化学性质都有可能恢复到火前水平。

2.4 土壤内生物

2.4.1 土壤小动物 土壤小动物在生态系统中起着分解有机质、改变土壤理化性质、促进物质循环等重要作用。这些小动物大多栖居在地表有机质层,火后生存种类、数量与火烧强度、火烧频次密切相关。火烧一方面直接烧死土壤小动物;另一方面地表的地被物和枯枝落叶层被烧掉后,土壤有机质数量减少,光照增多,水分减少,其赖以生存的环境受到破坏,间接导致小动物数量减少。火烧强度越大,土壤小动物数量减少越多。火烧后土壤动物的恢复需要一定的条件和时间。一般情况下随着火烧区地表植被的逐渐恢复,当土壤条件达到小动物可以适应的基本生态环境条件时,土壤小动物可从不均质林火燃烧存留的岛状或块状未过火区慢慢扩散到火烧区,使火烧区土壤小动物的种类和数量得以恢复。张雪萍^[40]等研究发现,火烧过后,土壤环境中最先侵入的是运动能力较强的大型土壤动物,之后中小型土壤动物才逐渐得到恢复。火烧后6~7 a是中小型土壤动物发展的盛期,随后土壤动物种类和数量开始减少并趋于稳定。火烧强度对土壤动物群落的恢复有一定的影响,轻度火烧影响地区的土壤动物恢复较快,经过6~7 a,土壤动物种类和数量能超过未受火烧影响的地区;而中、重度火烧地区,土壤动物恢复到正常水平则需要超过16 a的更长的时间。

2.4.2 土壤微生物 土壤是微生物聚集最多的地方,主要有3大类:细菌、真菌和放线菌^[41]。土壤微生物的种类和数量是土壤性质和土壤肥力的良好指示因子。火烧对土壤微生物的影响多集中在土壤表层(0~2.5 cm),土壤温度在50~121℃时微生物将会死亡。火烧后,火烧区短期内土壤微生物数量和生物量低于未火烧区;经过一定时间恢复后,火烧区微生物数量和生物量逐渐升高并超过未火烧区^[42]。对于生境冷湿的寒温带湿地生态系统来说,赵魁义^[6]等研究发现火后森林沼泽土壤上层微生物数量比未过火区明显增加,这非常有利于火后土壤和植被的恢复。赵彬^[30]等在对火后3 a兴安落叶松土壤微生物生物量的研究中发现,重度火烧区的微生物生物量C和微生物生物量N显著高于中度、轻度和未火烧区。

2.4.3 土壤酶 土壤酶直接参与了土壤营养元素

的有效化过程,如枯落物的分解,腐殖质及各种有机化合物的分解和合成,土壤养分的固定与释放以及各种氧化还原反应等,在一定程度上反映了土壤养分转化的动态情况^[43-44]。火烧对土壤酶破坏严重,火后3~4 a,脲酶和蛋白酶活性可恢复到原来水平的50%~80%,而碱性磷酸酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性可恢复到原来水平的20%~40%^[45]。

2.4.4 植物根系 细根系(直径<2 mm)是土壤根系中最活跃的部分,火后细根系的发展变化对于土壤养分的利用和植被的恢复都具有重要意义。张敏^[46]等通过对大兴安岭不同火烧强度、不同火后年份火烧迹地土壤中细根系生物量的研究发现,不管何种火烧强度的当年火烧迹地,雨水过后,细根系生物量增加都非常明显,且高强度火烧后细根系生物量增加最显著。

3 火烧对寒温带湿地水环境的影响

火烧对湿地水环境的最重要影响是影响了湿地水质,这种影响涉及到水的物理性质、化学性质和水中动植物群落特征等多个方面^[47]。火烧对水物理性质的影响主要表现在水温 and 沉积物等方面。火烧后水温升高,刺激水中微生物的活性;微生物活性提高,会导致水中溶解氧含量的下降,这将影响到水生生物的群落特征^[48]。火烧后,由于灰分的施加,水的pH值会增加,这必然会干扰水系统中某些元素的分布和循环过程^[49]。火烧对湿地水环境的影响与火烧类型、湿地类型和可燃物载量等密切相关,在水位较高,积水时间短,地表可燃物载量小的森林沼泽湿地中,火烧对水环境的影响较小;而在水位较低,积水时间长的草甸湿地中,火烧发生频率高,对水环境的影响也较大。

4 火烧对寒温带湿地野生动物的影响

火烧对湿地生态系统的植被、土壤和水环境产生了重要干扰,也给系统中的野生动物带来了不利影响。这种影响主要表现在:1)直接影响:野生动物被火直接烧伤或烧死;2)间接影响:火烧破坏了动物的食物源及栖息环境,致使野生动物在种间竞争、寄生、捕食以及适应性方面都发生相应的改变^[50]。直接影响是一种短期影响,而间接影响是一种后续长期的影响,如2001年扎龙湿地自然保护区发生高强度火灾,导致核心区大片芦苇被烧毁,致使丹顶鹤丧失了必要的隐蔽条件和筑巢所必需的材料;为了生存,丹顶鹤被迫放宽对隐蔽条件和食物资源的标准,选择次适宜的栖息环境,严重影响了丹顶鹤的筑巢和孵化期行为,最终导致丹顶鹤种群数量迅速减少^[51]。

5 研究展望

火烧对寒温带湿地生态系统影响的研究成果可为火烧迹地,特别是大面积重度火烧迹地生态恢复工程的实施提供重要的理论依据。通过对国内外相关研究的综合分析表明,火烧对湿地生态系统的研究尚不充分,而针对寒温带湿地生态系统的研究更显薄弱。虽有一些研究涉及火烧对寒温带生态系统的影响,但研究不够细致深入。今后更加深入的研究工作将包涵以下多个方面。

1)不同强度火烧对寒温带湿地冻土层的影响。冻土与寒温带湿地的存在密切相关。火烧会向土壤输入大量热量,这些热量会对湿地冻土层产生重要影响,导致其分布范围、季节融化深度等发生变化,进而影响地表植被的水分供给。由于立地水分条件的变化,原湿地植被群落的物种组成、结构等都将随之发生变化。

2)不同强度火烧对寒温带湿地土壤理化性质的影响。火烧后土壤理化性质的变化,直接影响着火后湿地植被的恢复。特别是不同强度火烧后,土壤营养元素的可获取性,直接影响着火后湿地植被群落的演替进程。

3)不同强度火烧后土壤内生物的变化(包括土壤动物、土壤微生物、土壤酶、植物根系等)。土壤内生物不仅是土壤营养状况的指示因子,而且是改善土壤营养状况的驱动者。火烧会导致湿地土壤内生物种类和数量的巨大变化。随着时间的推移和地表植被的恢复,土壤内生物的种类和数量也会发生相应的变化。

4)不同强度火烧对不同湿地植被类型(森林湿地、灌丛沼泽、草丛沼泽和泥炭藓沼泽等)的影响。由于立地条件(地形、水分、土壤、光照等)的差异、群落组成的差异,以及可燃物载量大小的差异,不同强度火烧对不同湿地植被类型的影响是显著不同的。

5)长期定位观测。火烧对生态系统的影响是长期的,仅靠少量的观测结果不能深入地表明火烧对湿地生态系统的影响。因此,长期定位观测对于系统研究火烧对生态系统的影响就显得非常必要和重要。

6)火后寒温带湿地生态系统恢复模式研究。寒温带湿地对于维护区域生态平衡发挥着重要的作用,因此研究寒温带湿地生态系统火后恢复模式,促进和加速其自然恢复进程,具有重要的科学和实践意义。

参考文献:

[1] 庄凯勋. 大兴安岭东部林区湿地资源[M]. 哈尔滨:东北林业大

学出版社,2008.

[2] 刘敏,厉悦,杨晓杰,等. 扎龙自然保护区景观格局变化与其驱动机制[J]. 西北林学院学报,2010,25(5):157-162.
LIU M, LI Y, YANG X J, *et al.* Change of landscape pattern and its driving mechanism in Zhalong Nature Reserve [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(5): 157-162. (in Chinese)

[3] 周以良. 中国大兴安岭植被[M]. 北京:科学出版社,1991.

[4] 白军红,邓伟,张勇,等. 扎龙自然保护区湿地生物生境安全保护[J]. 西北林学院学报,2003,18(3):6-9.
BAI J H, DENG W, ZHANG Y, *et al.* Protection for habitat security of biological resources in wetland of Zhalong Natural Reserve[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2003, 18(3):6-9. (in Chinese)

[5] 舒立福,田晓瑞,马林涛. 林火生态的研究与应用[J]. 林业科学研究,1999,12(4):422-427.
SHU L F, TIAN X R, MA L T. The studies and application of forest fire ecology[J]. Forest Research, 1999, 12(4): 422-427. (in Chinese)

[6] 赵魁义,张文芬,周幼吾,等. 大兴安岭森林火灾对环境的影响与对策[M]. 北京:科学出版社,1994.

[7] 舒立福,田晓瑞,马林涛. 我国的森林火灾状况和对策研究[J]. 灾害学,1999,14(3):89-92.
SHU L F, TIAN X R, MA L T. The status and countermeasure research of forest fire disasters in China[J]. Journal of Catastrophology, 1999, 14(3): 89-92. (in Chinese)

[8] 林建军,周宏. 南瓮河国家级湿地自然保护区森林火灾发生情况调查与分析[J]. 内蒙古林业调查设计,2009,32(4):74-77.
LIN J J, ZHOU H. Forest fires in Nanwonghe National Nature Reserve[J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2009, 32(4): 74-77.

[9] 赵红梅,于晓菲,王健,等. 火烧对湿地生态系统影响研究进展[J]. 地球科学进展,2010,25(4):374-380.
ZHAO H M, YU X F, WANG J, *et al.* Effects of fire on wetland ecosystems—A review[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(4): 374-380. (in Chinese)

[10] 张韬,刘佳慧,王炜,等. 内蒙古东部湿地植被演替的初步研究[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(6):145-151.
ZHANG T, LIU J H, WANG W, *et al.* Preliminary research on the succession of the wetland vegetations of the Inner Mongolia east District[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(6): 145-151. (in Chinese)

[11] 王明玉,任云卯,李涛,等. 火烧迹地更新与恢复研究进展[J]. 世界林业研究,2008,21(6):49-53.
WANG M Y, REN Y M, LI T, *et al.* Advances in post-fire recovery research[J]. World Forestry Research, 2008, 21(6): 49-53.

[12] CLARK D L, WILSON W V. Fire effects on wetlands prairie plant species[R]. Oregon: A report submitted to U. S. Fish and Wildlife Service Western Oregon Eefuges Corvallis, 1998.

[13] CAMPBELL G S, JUNGBAUER J D Jr, BRISTOW K L, *et al.* Soil temperature and water content beneath a surface fire [J]. Soil Science, 1995, 159: 363-374.

[14] FRANKLIN S B, ROBERTSON P A, FRALISH J S. Small-scale fire temperature patterns in upland *Quercus* communities

- [J]. Journal of Applied Ecology, 1997, 34: 613-630.
- [15] DEBANO L F, NEARY D G, FFOLLIOTT P F. Fire effects on ecosystems [M]. New York: Wiley, 1998.
- [16] DEBANO L F. The role of fire and soil heating on water repellence in wildland environments: a review [J]. Journal of Hydrology, 2000, 231: 195-206.
- [17] CERTINI G. Effects of fire on properties of forest soils: a review [J]. Oecologia, 2005, 143: 1-10.
- [18] 舒立福, 王明玉, 田晓瑞, 等. 大兴安岭林区地下火形成火环境研究[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(4): 62-67.
- SHU L F, WANG M Y, TIAN X R, *et al.* Fire environment mechanism of ground fire formation in Daxing'an Mountains [J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(4): 62-67.
- [19] DOERR S H, ARTEMI G. Fire effects on soil system functioning: New insights and future challenges [J]. International Journal of Wildland Fire, 2005, 14: 339-342.
- [20] ANISMOV O A, SHIKLOMANOV N I, NELSON F E. Variability of seasonal thaw depth in permafrost regions a stochastic modeling approach [J]. Ecological Modeling, 2002, 153(3): 217-227.
- [21] 周梅. 大兴安岭落叶松生态系统水文过程与规律研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2003.
- [22] 侯传美, 解伏菊, 李秀珍, 等. 火干扰下的大兴安岭冻土活动层变化研究[J]. 济南大学学报: 自然科学版, 2010, 24(3): 277-281.
- HOU C M, XIE F J, LI X Z, *et al.* Changes of permafrost active layer in Greater Khingan Mountains under fire disturbance [J]. Journal of University of Jinan: Nat. Sci. Edi., 2010, 24(3): 277-281. (in Chinese)
- [23] 胡海清, 刘洋, 孙龙, 等. 火烧对不同林型下森林土壤水分物理性质的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 162-165.
- HU H Q, LIU Y, SUN L, *et al.* Effect of fire on Hydro-physical properties under different types of forest land [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(2): 162-165. (in Chinese)
- [24] 张敏, 胡海清, 马鸿伟. 林火对土壤结构的影响[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(2): 138-143.
- ZHANG M, HU H Q, MA H W. Effect of forest fire on soil structure [J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(2): 138-143. (in Chinese)
- [25] CERDA A, LASANTA T. Long-term erosional responses after fire in the Central Spanish Pyrenees: Water and sediment yield [J]. Catena, 2005, 60: 59-80.
- [26] 孙龙, 赵俊, 胡海清. 中度火干扰对白桦落叶松混交林土壤理化性质的影响[J]. 林业科学, 2011, 47(2): 103-110.
- SUN L, ZHAO J, HU H Q. Effect of moderate fire disturbance on soil physical and chemical properties of *Betula platyphylla*-*Larix gmelinii* mixed forest [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(2): 103-110. (in Chinese)
- [27] 刘银良, 阎敏华, 孟宪民, 等. 大兴安岭森林火灾对沼泽土壤的影响[J]. 地理科学, 1995, 15(4): 378-384.
- LIU Y L, YAN M H, MENG X M, *et al.* Effect of forest fire of the Dahinggan Mountain on swamp soil [J]. Scientia Geographica Sinica, 1995, 15(4): 378-384. (in Chinese)
- [28] 解伏菊, 肖笃宁, 李秀珍, 等. 大兴安岭西北坡火烧迹地湿地格局变化及其影响因子研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 175-181.
- XIE F J, XIAO D N, LI X Z, *et al.* Wetland pattern change and affecting factors in the burned area of northern Great Hing'an Mountains [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(2): 175-181. (in Chinese)
- [29] 商丽娜, 吴正方, 杨青, 等. 火烧对三江平原湿地土壤养分状况的影响[J]. 湿地科学, 2004, 2(1): 54-60.
- SHANG L N, WU Z F, YANG Q, *et al.* The effects of fire on the nutrient status of wetland soil in Sanjiang plain [J]. Wetland Science, 2004, 2(1): 54-60. (in Chinese)
- [30] 赵彬, 孙龙, 胡海清, 等. 兴安落叶松火后对土壤养分和土壤微生物生物量的影响[J]. 自然资源学报, 2011, 26(3): 450-459.
- ZHAO B, SUN L, HU H Q, *et al.* Post-fire soil microbial biomass and nutrient content of *Larix gmelinii* Forest in Autumn [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(3): 450-459. (in Chinese)
- [31] VERDES P V, SALGADO J. Changes induced in the thermal properties of Galician soils by the heating in laboratory conditions [J]. Journal of Thermal Analysis Calorimetry, 2011, 104: 177-186.
- [32] GOERGEN E M, CHAMBERS J C. Influence of a native legume on soil N and plant response following prescribed fire in sagebrush steppe [J]. International Journal of Wildland Fire, 2009, 18: 665-675.
- [33] SMITH S M, NEWMAN S, GARRETT P B, *et al.* Differential effects of surface and peat fire on soil constituents in a degraded wetland of the northern Florida Everglades [J]. Journal of Environmental Quality, 2001, 30: 1998-2005.
- [34] GROGAN P, BRUNS T D, CHAPIN F S. Fire effects on ecosystem nitrogen cycling in a Californian bishop pine forest [J]. Oecologia, 2000, 122: 537-544.
- [35] SCHAFER J L, MACK M C. Short-term effects of fire on soil and plant nutrients in palmetto flatwoods [J]. Plant Soil, 2010, 334: 433-447.
- [36] 孙明学, 贾炜炜, 吴瑶. 大兴安岭北部地区林火对土壤化学性质的影响[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(5): 33-35.
- SUN M X, JIA W W, WU Y. Effect of forest fire on soil chemical properties in Northern Daxing'an Mountains [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009, 37(5): 33-35. (in Chinese)
- [37] DURÁN J, RODRÍGUEZ A, FERNÁNDEZ-PALACIOS J M, *et al.* Changes in soil N and P availability in a *Pinus canariensis* fire chronosequence [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 256: 384-387.
- [38] 谷会岩, 金靖博, 陈祥伟, 等. 不同火烧强度林火对大兴安岭北坡兴安落叶松林土壤化学性质的长期影响[J]. 自然资源学报, 2010, 25(7): 1114-1121.
- GU H Y, JIN J B, CHEN X W, *et al.* The long-term impacts on chemical properties of *Larix gmelinii* forest on the northern slope of Great Hinggan Mountains from a forest fire of varying fire intensity [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(7): 1114-1121. (in Chinese)
- [39] DUMONTET S, DINEL H, SCOPA A, *et al.* Post-fire soil microbial biomass and nutrient content of a pine forest soil

from a dunal Mediterranean environment [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1996, 28(10/11): 1467-1475.

[40] 张雪萍, 张淑花, 李景科. 大兴安岭火烧迹地土壤动物生态地理分析[J]. 地理研究, 2006, 25(2): 327-334.

ZHANG X P, ZHANG S H, LI J K. Eco-geographical analysis of soil animals in burned forest areas in Greater Hinggan Mountains[J]. Geographical Research, 2006, 25(2): 327-334. (in Chinese)

[41] 张敏, 胡海清. 林火对土壤微生物的影响[J]. 东北林业大学学报, 2002, 30(4): 44-46.

ZHANG M, HU H Q. The effect of forest fire on microorganism in soil [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2002, 30(4): 44-46. (in Chinese)

[42] 周道玮, 岳秀泉, 孙刚, 等. 草原火烧后土壤微生物的变化[J]. 东北师大学报: 自然科学版, 1999(1): 118-124.

ZHOU D W, YUE X Q, SUN G, *et al.* Changes in soil micro-organism following grassland burning[J]. Journal of North-east Normal University: Nat. Sci. Edi., 1999(1): 118-124.

[43] 徐雁, 向成华, 李贤伟. 土壤酶的研究概况[J]. 四川林业科技, 2010, 31(2): 14-20.

XU Y, XIANG C H, LI X W. Advances in soil enzymology [J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2010, 31(2): 14-20.

[44] BOERNER R E, BRINKMAN J A. Fire frequency and soil enzyme activity in southern Ohio oak-hickory forests[J]. Applied Soil Ecology, 2003, 23: 137-146.

[45] 周瑞莲, 张普金, 徐长林. 高寒山区火烧土壤对其养分含量和酶活性的影响及灰色关联分析[J]. 土壤学报, 1997, 34(1): 89-96.

ZHOU R L, ZHANG P J, XU C L. Effect of burning turf on nutrient contents and enzymatic activities of alpine meadow soil and its grey relationship analysis[J]. Acta Pedologica Sinica, 1997, 34(1): 89-96. (in Chinese)

[46] 张敏, 马鸿伟, 王希才. 林火对土壤细根系生物量影响的研究[J]. 林业科技, 2003, 28(2): 30-33.

ZHANG M, MA H C, WANG X C. Effect of forest fire on fine root in soil[J]. Forestry Science & Technology, 2003, 28(2): 30-33.

[47] WRIGHT H A, FRANCIS M C, CLARK S. Effects of prescribed burning on sediment, water yield, and water quality from Dozed Juniper Lands in Central Texas[J]. Journal of Range Management, 1976, 29(4): 294-298.

[48] BATTLE J, GOLLADAY S W. Prescribed fire's impact on water quality of depressional wetlands in southwestern Georgia[J]. The American Midland Naturalist, 2003, 150: 15-25.

[49] RICHTER D D, RALSTON C W, HARMS W R. Prescribed fire, effects on water quality and forest nutrient cycling[J]. Science, 1982, 215(4533): 661-663.

[50] 李兴华, 王振斌, 翟文涛. 湿地火的产生及火烧对野生动物的影响[J]. 防护林科技, 2010(2): 91-92.

LI X H, WANG Z B, ZHAI W T. Fire occurrence in wetland and effect of burning on wildlife[J]. Protection Forest Science and Technology, 2010(2): 91-92.

[51] 孔博, 张树清, 张柏, 等. 扎龙湿地火烧严重度分析及火灾对丹顶鹤生境的影响[J]. 湿地科学, 2007, 5(4): 348-355.

KONG B, ZHANG S Q, ZHANG B, *et al.* Analysis of burn severity of wetlands in Zhalong Nature Reserve and impact of fire on red crowned crane habitat[J]. Wetland Science, 2007, 5(4): 348-355. (in Chinese)

(上接第 130 页)

[20] 张星耀, 赵仕光, 朴春根, 等. 树木溃疡病原真菌类群分子遗传多样性研究 I. ——小穴壳属、疣壳孢属、壳囊孢属、盾壳霉属分类地位的分子证明[J]. 林业科学, 1999, 35(3): 34-40.

ZHANG X Y, ZHAO S G, PIAO C G, *et al.* Molecular genetic diversity of pathogenic fungal group causing tree canker I [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1999, 35(3): 34-40. (in Chinese)

[21] WHITE T J, BRUNS T, LEE S, *et al.* Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics[M]//PCR Protocols. A guide to methods and applications, San Diego: Academic Press, 1990: 315-322.

[22] 曹支敏, 明玉玲, 陈丹, 等. 花椒干腐病的寄主抗病性与病原菌致病性分化[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(6): 115-118.

CAO Z M, MING Y L, CHEN D, *et al.* Prickly ash resistance to stem rot and pathogenicity differentiation of the pathogenic fungus *Fusarium sambucinum* [J]. Journal of Northwest College of Forestry University, 2010, 25(6): 115-118. (in Chinese)

[23] 何苏琴, 袁忠林, 洪流, 等. 花椒流胶病原疫霉种的鉴定[J]. 西北农业学报, 1997, 6(4): 4-7.

HE S Q, YUAN Z L, HONG L, *et al.* Identification of *pathogenic Phytophthora* species of Chinese prickly ash Gummosis [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 1997, 6(4): 4-7.

[24] SCOTT P M, BURGESS T I, BARBER P A, *et al.* *Phytophthora multivora* sp. nov., a new species recovered from declining *Eucalyptus*, *Banksia*, *Agonis* and other plant species in Western Australia[J]. Persoonia, 2009, 22: 1-13.