

火烧对洞庭湖湿地荻 (*Miscanthus sacchariflorus*) 和苔草 (*Carex brevicuspis*) 群落土壤性质的影响*

李亚芳^{1,2}, 陈心胜¹, 项文化², 谢永宏^{1**}

(1: 中国科学院亚热带农业生态研究所, 洞庭湖湿地生态系统观测研究站, 长沙 410125)

(2: 中南林业科技大学生命科学与技术学院, 长沙 410004)

摘要: 火烧作为调控因子, 对植物群落结构和生态系统功能具有重要影响, 但在湖泊湿地中研究较少。通过野外调查取样与实验室分析, 探讨火烧对洞庭湖湿地主要群落类型——荻 (*Miscanthus sacchariflorus*) 和苔草 (*Carex brevicuspis*) 土壤化学性质的影响。结果表明: 火烧后, 苔草群落土壤硝态氮含量显著减少 64.6%, 有机质含量增加 26.3%; 而荻群落土壤与之相反, 硝态氮含量增加 186.9%, 有机质含量减少 22.9%。火烧后, 苔草群落的全氮、铵态氮、全碳和全磷含量均显著增加, 分别增加了 75.4%、36.3%、102.7% 和 76.9%。而荻群落土壤与对照组间无显著差异。总体上, 火烧对荻群落土壤养分影响不大, 可作为芦苇场的一种管理方式, 但火烧促进苔草群落土壤养分释放, 有助于苔草群落提前萌芽和生长, 并引起牲畜牧食增加。

关键词: 火烧; 湿地植物; 土壤营养; 干扰; 荻; 苔草; 洞庭湖

The effects of burning disturbance on the soil chemical properties of *Miscanthus sacchariflorus* (Poaceae) and *Carex brevicuspis* (Cyperaceae) communities at Lake Dongting wetlands

LI Yafang^{1,2}, CHEN Xinsheng¹, XIANG Wenhua² & XIE Yonghong^{1**}

(1: Dongting Lake Station for Wetland Ecosystem Research, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, P. R. China)

(2: College of Life Science and Technology, Central South Forestry University, Changsha 410004, P. R. China)

Abstract: Fire, as an important regulator of the ecosystem, has significant impacts on plant community structure and ecosystem function, but few studies have been conducted in wetland ecosystems. In this paper, we investigated the impacts of fire on soil properties of the dominant community types—*Miscanthus sacchariflorus* and *Carex brevicuspis* at Lake Dongting wetlands through field survey and laboratory analyses. The results indicated that soil nitrate nitrogen content of *Carex brevicuspis* significantly reduced by 64.6% and organic matter content significantly increased by 26.3% after the burning, which were in contrast with that in *Miscanthus sacchariflorus* communities, whose soil nitrate nitrogen contents significantly increased by 186.9% and organic matter content significantly reduced by 22.9% after the burning. After the burning, total nitrogen, ammonia nitrogen, total phosphorus and total carbon content of *Carex brevicuspis* community significantly increased by 75.4%, 36.6%, 102.7%, 76.9%, respectively, but no significant changes in *Miscanthus sacchariflorus* community. Generally, unreasonable fire is the most common reason for soil properties changes, the burning has little impacts on soil nutrients of *Miscanthus sacchariflorus* community at the Lake Dongting wetland, which suggested that fire could be a management tool for reed fields (mainly *Miscanthus sacchariflorus* communities). Burning can release soil nutrients and stimulate sprouting and growth of *Carex brevicuspis* community, which may aggregate livestock grazing. This study provides a theoretical guidance for management of lacustrine wetland ecosystems. So, the research of this process and mechanism of unreasonable fire is of great significance to the protection of

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07204-003-002) 和国家科技支撑计划项目 (2014BAC09B00) 联合资助。2015-08-25 收稿; 2015-11-10 收修改稿。李亚芳 (1989 ~), 女, 硕士研究生; E-mail: liyafang89509@163.com.

** 通信作者; E-mail: yonghongxie@163.com.

wetlands and the management of ecosystem.

Keywords: Fire; wetland plants; soil nutrients; disturbances; *Miscanthus sacchariflorus*; *Carex brevicuspis*; Lake Dongting

作为生态系统的重要调控因子,火烧对植物群落结构和生态系统功能产生重要影响^[1-4]。土壤是火烧直接影响的环境要素之一,有研究表明,火烧后土壤性质立即发生变化,土壤养分如有机质、全N、全P、全K等含量显著上升^[5-7],但也有研究发现火烧会使土壤养分含量下降,原因是土壤有机质含量的下降及某些元素在高温下的分解及挥发所致^[8]。因此,火烧对植被及土壤的影响程度取决于火烧地的自然条件、火的强度、频率及植被类型等^[9-11]。火干扰在生态保护及植被恢复上常被认为是一种有效因素^[12-13],但当前关于火烧对植被影响的研究多集中在森林、草地等陆地生态系统,对湿地生态系统的研究相对较少^[10,14]。

近年来,湿地的过度开垦致使湿地面积萎缩,水生态过程受阻、格局破坏、防御旱灾能力降低,如黄淮海地区已成为我国灾情最重的干旱中心,成灾面积占全国总成灾面积的50.5%,长江中游湖泊湿地干旱灾害发生的频率和强度逐年增加,伴随着植被的易燃性增加,火灾发生的风险也随之剧增^[15-16]。此外,湖区芦苇场经营者通常会放火烧掉地面凋落物和杂草等,以促进翌年芦苇萌发和生长;农民也有冬季放火烧荒的习惯,把苔草等植被的地上部分烧掉,促进其重新萌芽,以利于牲畜取食;湖区农民放火烧荒的主要动机是促进苔草、芦苇等植物生长,提高放牧或收获效益,但由于缺乏科学依据,往往事与愿违,同时造成湿地退化,威胁生物多样性保护等^[16-17]。因此,科学系统地阐明火烧对湿地生态系统的影响在加强湿地保护和优化生态系统管理等方面具有重要意义。

洞庭湖是长江流域最为典型的通江湖泊,位于湖南省北部,长江中游荆江南岸。自然环境特点为水文变幅大,表现为“夏季湖相、冬季河相”。历年来水旱灾害频繁、多雨则涝、大雨则洪、少雨则旱。覃红燕等^[15]研究表明:从1959-2003年,洞庭湖湿地的干旱灾情一直间断存在,特别是三峡工程运行后,洞庭湖湿地旱灾的发生频率增加,加上人为干扰加剧,火灾发生风险也大为增大。

本文以洞庭湖湿地分布最为广泛的2种植被类型——荻(*Miscanthus sacchariflorus*)和苔草(*Carex brevicuspis*)为对象,通过火烧后的调查取样和实验室分析,并与邻近未受火烧干扰的植被进行对比,以了解火烧对洞庭湖湿地重要植被类型土壤性质的影响,为洞庭湖湿地生态系统管理以及植被的保护和恢复提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区域位于湖南省岳阳市君山区东洞庭湖湿地(28°30′~30°20′N,111°40′~113°10′E),海拔为28~32 m,多年平均气温16.2~17.8℃,年降水量1200.7~1414.6 mm,年蒸发量1270 mm,年辐射总量418.7~455.6 kJ/cm²,年平均风速2.0~3.0 m/s,属于典型的亚热带湿润季风气候区,热量丰富,雨量充沛,水文季节差异明显,其中雨热同季为6-8月,干冷季为12月至次年3月^[18]。植被属多年生草本植物,优势植物为短尖苔草(*Carex brevicuspis*)、荻(*Triarrhena sacchariflora*)、芦苇(*Phragmites australis*)、辣蓼(*Polygonum hydropiper*)和藨草(*Phalaris arundinacea*)等。洞庭湖区土壤类型包括潮土、沼泽化草甸土和底泥土,以潮土为主,由此形成的冲积土是洞庭湖湿地土壤的主要类型^[19]。

1.2 样地布置与样品收集

样地植被群落特征:荻群落广泛分布在海拔29~32.5 m的洲滩上,是洞庭湖洲滩上面积最大、较典型的一类群落类型;苔草群落分布比较广泛,所占面积小于荻群落,是洲滩上又一种重要的群落类型,一般分布在地势比较低,但又不受泥沙淤积的洲滩,海拔一般为26~28 m,以东洞庭湖的小西湖、君山、采桑湖较多。2014年1月,洞庭湖君山芦苇场(主要植被为荻)和小西湖湿地(主要植被为苔草)发生火灾(此火烧非针对性实验,而是在管理部门未知情况下发生)。火烧后1个月,按照典型性和代表性原则,采用空间取代时间方法,分别在火烧后的荻和苔草植被区设立火烧样带,在两侧选择立地条件相似的未过火区域和过火区域设置两条样带,过火区与未过火区样带间隔较近,确保过火前的土壤性质一致性,加上采样区为单优种群落,整体植被变异性小,样带土壤理化性质异质性较小。每条样带长1000 m,宽100 m。在每条样带内设立5个1 m×1 m样方,样方之间的距离为200 m,即荻群落火烧样带5个样方,对照样带5个样方,苔草群落样方

同荻群落,共20个样方。在每个样方,以环刀法多点取表层土壤(0~10 cm),将同一样方的土壤约1 kg混合后用自封袋装好,带回实验室。

1.3 实验室分析

将带回实验室的新鲜土壤仔细除去可见动植物残体,混合均匀后将土样平均分为两份,一份为鲜样,用于测定土壤铵态氮和硝态氮含量;一份为干样,自然风干后用于测定土壤化学特性,其中用于测定土壤pH值的土样过10目孔径筛,用于测定全氮、全碳、全磷、全钾含量的土样过100目孔径筛,彻底混匀后备用。铵态氮和硝态氮含量采用流动注射分析仪(Flastar5000,瑞典福斯公司FOSS)测定,pH值用pH计测定(土壤:蒸馏水为1:2.5),全氮和全碳含量用德国Elementar碳氮分析仪(Vario MAX CN)测定;全磷含量采用氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法测定,全钾含量采用氢氧化钠碱熔-火焰光度法测定^[20]。

1.4 数据处理

采用SPSS 21.0软件对土壤含水量、pH值、铵态氮、硝态氮含量及营养成分等进行统计,具体采用Tukey检验,分析火烧对洞庭湖湿地两种优势物种土壤性质的影响,显著水平为0.05,作图采用Excel软件完成。

2 结果与分析

2.1 火烧对土壤含水量的影响

荻、苔草群落土壤含水量在36.5%~64.05%之间。于荻群落而言,火烧组土壤含水量(36.5%)显著小于对照组(38.93%)($P < 0.05$),苔草群落土壤含水量变化与荻群落一致,火烧组的土壤含水量($59.87\% \pm 1.49\%$)显著小于对照组($64.5\% \pm 0.86\%$)($P < 0.05$)。

2.2 火烧对土壤pH值及养分含量的影响

2.2.1 火烧对土壤pH值的影响 荻、苔草群落pH值在7.48~8.16之间,整体呈弱碱性。无论是荻群落还是苔草群落,火烧组(荻、苔草群落分别为 8.16 ± 0.02 、 7.62 ± 0.04)与对照组(荻、苔草群落分别为 8.14 ± 0.04 、 7.48 ± 0.09)的pH值变化均不显著($P > 0.05$),表明火烧对洞庭湖湿地土壤的pH值的影响不大。考虑到由于洞庭湖湿地土壤含水量较高,导致火烧温度较低,火烧强度不足以引起pH值的大幅度变化。

2.2.2 火烧对土壤有机质含量的影响 荻、苔草群落的土壤有机质含量在4.84%~11.20%之间。荻群落火烧组土壤有机质含量($4.53\% \pm 0.44\%$)显著小于对照组($5.88\% \pm 0.60\%$)($P < 0.05$);苔草群落火烧后土壤有机质含量($9.81\% \pm 1.45\%$)与对照组($7.77\% \pm 0.98\%$)无显著变化($P > 0.05$)。不同的植被类型,火烧后土壤有机质含量与对照组间变化不同,可见火烧对土壤有机质含量的影响与燃烧物的性质有关。

2.2.3 火烧对铵态氮和硝态氮含量的影响 荻群落土壤铵态氮含量火烧组($1.61\% \pm 0.11\%$)与对照组($1.39\% \pm 0.20\%$)间差异不显著($P > 0.05$)。苔草群落土壤铵态氮含量火烧后($2.33\% \pm 0.14\%$)显著大于火烧前($1.71\% \pm 0.05\%$)($P < 0.05$)。此外,同一植物群落下,火烧与否对土壤硝态氮含量影响显著($P < 0.05$),其中荻群落的土壤硝态氮含量火烧组(2.08%)显著大于对照组(0.72%)($P < 0.05$),而苔草群落则是对照组(1.44%)显著大于火烧组(0.51%)($P < 0.05$)。可见,火烧对洞庭湖湿地土壤铵态氮、硝态氮含量的影响较大,且影响程度与植物类型有关。

2.2.4 火烧对土壤全氮含量的影响 荻、苔草群落土壤全氮含量在0.27%~0.50%之间。同一植物群落下,荻土壤全氮含量火烧组($0.27\% \pm 0.02\%$)与对照组($0.27\% \pm 0.02\%$)间无显著差异($P > 0.05$),苔草群落土壤的全氮含量为火烧组($0.50\% \pm 0.05\%$)显著大于对照组($1.29\% \pm 0.04\%$)($P < 0.05$)。可见,火烧对洞庭湖湿地土壤全氮含量的影响因种类不同而有所差异,火烧提高苔草群落下土壤全氮的含量,火烧后全氮含量增加75.4%,而对荻群落的土壤全氮含量则无显著影响。

2.2.5 火烧对土壤全磷含量的影响 洞庭湖湿地荻、苔草群落土壤全磷含量在0.08%~0.14%之间。荻群落土壤全磷含量火烧组($0.11\% \pm 0.01\%$)与对照组($0.11\% \pm 0.01\%$)间无明显差异,火烧过的苔草群落土壤全磷含量($0.14\% \pm 0.02\%$)显著大于对照组($0.08\% \pm 0.01\%$)($P < 0.05$)。由此可知,火烧后苔草群落下土壤全磷含量增加了76.9%,对荻群落土壤全磷含量无显著影响。

2.2.6 火烧对土壤全碳含量的影响 火烧后土壤全碳含量为3.25%~6.59%。同一植物群落下,荻土壤全碳含量火烧与对照组间无显著差异($P > 0.05$),但苔草群落土壤的全碳含量为火烧显著大于对照组($P < 0.05$)。

可见, 火烧对洞庭湖湿地土壤全碳含量的影响因种而异, 火烧提高苔草植物群落下土壤全碳含量, 火烧后全碳含量增加了 102.7%, 而对荻植物群落的土壤全碳含量无显著影响。

3 讨论

3.1 火烧对土壤含水量的影响

火烧后土壤含水量显著减少, 这与火效应的认识普遍一致^[21-22], 原因是火烧导致土壤温度增加, 加之火烧导致地表残留物移除, 地面裸露接受较多的太阳能, 造成较高的蒸发速率, 致使含水量下降。赵凤君等的研究表明, 火烧对土壤含水量的影响与火烧强度密切相关, 高强度火烧明显增加水分流失量^[23]。另外, 无论是对照组还是火烧组, 苔草群落下土壤含水量显著大于荻群落, 其原因是东洞庭湖湿地生态系统中, 苔草多分布于低程区而荻分布于高程区, 加上芦苇场(荻为主要植被)地面凋落物和杂草等常年被火烧, 地表水分蒸发较快, 而苔草群落是洞庭湖的优势物种, 为当地湿地管理者保护对象, 不允许火烧或收割, 因此对照组苔草群落下混夹着各个年份的立枯物, 对表层土壤起到保湿作用。

3.2 火烧对土壤 pH 值及养分含量的影响

3.2.1 pH 值 土壤 pH 值是土壤的一个基本性质, 也是影响土壤理化性质的一个重要化学指标, 它直接影响着土壤中各元素的存在形态、有效性及迁移转化。已有研究表明, 火烧后土壤遗留灰分中 KOH、NaOH、CaCO₃、MgCO₃ 等的积累引起 pH 值升高, 且火烧后土壤 pH 值随着火势的加强而上升, 是因为火烧加速了有机质的矿化, 向土壤中追加了大量的灰分所致^[8, 24]。而本研究发现, 洞庭湖湿地土壤 pH 值总体偏碱性, 无论是荻群落还是苔草群落, 火烧后土壤 pH 值与对照组间差异不显著, 其原因可能是洞庭湖湿地的土壤含水量较大, 火烧强度不足以引起 pH 值的大幅度变化。由此可知, 火烧对土壤 pH 值的影响不仅与植被类型有关, 还与火烧强度密切相关。

3.2.2 有机质 有机质是土壤中的重要组成部分, 在维持土壤结构、供应土壤养分等方面起着重要作用, 是衡量土壤肥力显著的重要指标。据文献记载, 当土温在 200℃ 以下时, 土壤有机质没有损失; 当土温在 200 ~ 350℃ 之间时, 土壤有机质最高可损失 50%; 当土温在 350℃ 以上时, 土壤有机质几乎全部被烧毁^[23]。而本研究发现, 荻群落火烧后土壤有机质含量显著小于对照组, 其下降是由于火烧移除了立枯物和地表枯落物, 减少有机质的来源, 同时提高地表杂物的氧化分解速率, 减少有机质的积累, 这与已有研究结果相符^[10, 25], 但与贺郝钰等^[26]研究荒漠化草原时的结论不一致, 分析原因是火烧植被类型及土壤含水量不同导致; 而苔草群落下土壤有机质含量火烧后与对照组间无显著差异, 因为苔草群落大多数聚集生长, 根系发达交错密集, 土壤含水量较荻植物群落高, 导致火烧温度不足以引起土壤有机质含量的变化。可见, 火烧对土壤有机质含量的影响不仅与火烧强度有关, 还与植被类型及其生境密切相关。

3.2.3 氮元素 在一定程度上, 火烧能调节和改变土壤的氮循环^[27]。研究显示, 高强度火烧引起土壤氮含量减少, 而低强度火烧不会引起氮含量变化^[28]。荻群落下火烧组与对照组土壤全氮含量无显著差异, 这与王谢等^[21]、周瑞莲等^[29]的研究结果不一致, 而苔草群落下火烧组全氮含量显著大于对照组, 这与 Christensen 等^[30]的研究结果一致, 而与周瑞莲等^[29]和商丽娜^[31]的研究结果不一致。

此外, 本研究发现荻群落火烧后土壤铵态氮含量无明显变化, 火烧后硝态氮含量显著增大, 此结果与 Andersson 等^[32]研究热带大草原时发现火烧 90 d 内可溶性有机氮、硝态氮含量大量增加, 而铵态氮含量无显著变化的结论一致。但 Stephen 等^[33]在研究澳大利亚北部大草原火生态时的结论与此相反, 即硝态氮含量不变, 铵态氮含量明显增加。而对于苔草群落而言, 火烧后铵态氮含量明显增大, 硝态氮含量明显减小, 推测可能是燃烧过程及燃烧后的生物与非生物过程影响有机氮向铵态氮和硝态氮转化, 如火烧可以刺激硝化细菌的活性使得硝态氮转化为铵态氮^[29], 这与 Stephen 等^[33]研究澳大利亚北部大草原火生态时的结果一致。由此可知, 火烧对土壤氮元素变化的影响较为复杂, 除了与火烧强度、植被类型及生境有关外, 还与收割相关, 如马华等^[34]研究持续收割对荻生长及土壤全氮含量的影响时发现, 荻收割后土壤全氮含量显著下降等。总体而言, 火烧对洞庭湖湿地土壤氮元素的影响机制有待进一步深入研究和探讨。

3.2.4 全碳 实验结果表明: 火烧对洞庭湖湿地土壤全碳含量的影响, 随着物种的不同而有显著差异, 荻植物群落火烧后土壤全碳含量与火烧前无明显变化, 火烧对苔草群落土壤全碳含量提高, 主要原因是苔草属

于草本植物,即使轻度火烧也能对其破坏严重,此结果与牟长城等^[35]研究的火干扰对大兴安岭兴安落叶松瘤囊苔草湿地生态系统碳储量的短期影响结论一致,火烧提高草本和灌木层的土壤碳储量.原因一方面是本次火烧对苔草群落下土壤有机质含量影响较小,几乎没有破坏土壤中的有机成分,另一方面是火烧可能改变土壤的微环境,影响到土壤微生物的活动导致全碳含量变化.

3.2.5 全磷 土壤全磷包括速效磷、有机磷和微生物磷,大部分以无机磷(缓效磷)状态存在,其含量受成土母质和耕作施肥等人类生产活动的影响较大.本研究结果表明,荻群落火烧后土壤全磷含量没有显著变化,其原因可能是全磷主要由成土母质和人为施肥决定,在土壤中的存在形式较稳定,不易流失^[36],且全磷对温度变化不敏感,火烧强度对全磷含量影响较大,这与已有相关研究结论一致^[37-38].而苔草群落火烧后土壤全磷含量显著增加,其一是灰分中的磷转入土壤中;其二是苔草群落土壤含水量大,火烧强度不大导致地表凋落物燃烧不充分.此结果与周瑞莲等^[29]和田昆^[39]的研究结论相符,目前研究者在森林和草地系统的研究表明,火烧后土壤磷浓度上升^[29,39],而有研究报道火烧后土壤磷的含量减少^[37],还有研究表明火烧后土壤磷含量没有规律性的变化^[38].由此可知,影响土壤全磷含量变化的因素较为复杂,除了与火烧强度有关,还与不同植被环境和类型有关^[29],应进一步深入研究.

4 结论

火烧显著降低湿地土壤的含水量,火烧后湿地土壤的养分状况具有很大变化.首先,火烧加速湿地土壤有机质的分解和矿化,使湿地土壤表层有机质含量明显下降.其次,苔草群落湿地土壤过火后,伴随着有机质含量的升高,铵态氮、全氮和全磷含量也升高,但硝态氮含量有所下降;火烧对荻群落下土壤的影响主要体现在有机质含量的下降和硝态氮含量的增加上,其他土壤养分,如全氮、全磷、铵态氮等含量均无显著变化.第三,火烧提高湿地土壤的pH值,使湿地土壤向偏碱性变化.火烧对洞庭湖湿地土壤养分含量产生显著影响,改善苔草群落的生长环境,促进其重新萌芽,利于牲畜取食,牧食的增加必定对苔草的生长繁殖造成影响,而湖区农民放火烧荒的主要动机是促进苔草、芦苇等植物生长,提高放牧或收获效益,但由于缺乏科学依据,往往事与愿违,同时可能威胁生物多样性保护等,如杂类草及有毒、有害植物种群在不断增加,优良牧草种群在群落中逐渐减少^[40].因此,洞庭湖湿地管理者可以通过加强管理人为火烧措施,如荻火烧是可取的生产方式,而苔草火烧应被禁止,达到资源利用合理化,对加强湿地保护和优化生态系统管理等方面具有重要意义.

火烧对洞庭湖湿地土壤产生的影响因火烧强度、土壤性质及植被类型的不同而有所差异.由于火的复杂性、土壤环境差异及样品数量有限,使得与本文相关问题的探讨还不够完善,如火烧对洞庭湖土壤的短期影响与长期影响的对比研究,以及火烧对洞庭湖典型植被的生长繁殖的影响等问题,有待今后进一步研究.

5 参考文献

- [1] 周道玮. 草地火的生态学意义. 草业科学, 1994, 11(2): 10-14.
- [2] 周道玮, 张宝田, 张宏一等. 松嫩草原不同时间火烧后群落特征的变化. 应用生态学报, 1996, 7(1): 39-43.
- [3] Constanze B, Andrea M, Anke J. The challenge of plant regeneration after fire in the Mediterranean Basin: scientific gaps in our knowledge on plant strategies and evolution of traits. *Plant Ecology*, 2007, 192(1): 1-19.
- [4] William JB, Jon EK. Fire as a global herbivore: the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, 2005, 20(7): 387-394.
- [5] Stephen MS, Susan N, Patrick BG et al. Differential effects of surface and peat fire on soil constituents in a degraded wetland of the northern Floridian everglades. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30: 1998-2005.
- [6] Quinine MK, Maine VN, Jerry MB. Soil phosphorus availability after slash and burn fires of different intensities in rubber agro forests in Sumatra, Indonesia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 92: 37-48.
- [7] 李玉中, 祝廷成, 李建东等. 火烧对草地土壤氮总矿化、硝化及无机氮消耗速率的影响. 应用生态学报, 2003, 14(2): 223-226.
- [8] 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. 湿地科学, 2004, 2(1): 54-60.
- [9] Heike K. How dose fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review. *Biogeochemistry*, 2007, 85: 91-118.

- [10] 赵红梅,于晓菲,王 健等. 火烧对湿地生态系统影响研究进展. 地球科学进展,2010,25(4): 374-380.
- [11] Fynn RWS, Haynes RJ, Timothy GO. Burning causes long-term changes in soil organic matter content of a South African grassland. *Soil Biology and Biochemistry*,2003,35(5): 677-687.
- [12] 王明玉,任云卯,李 涛等. 火烧迹地更新与恢复研究进展. 世界林业研究,2008,21(6): 49-53.
- [13] Abahneh L, Woolfenden W. Monitoring for potential effects of climate change on the vegetation of two alpine meadows in the White Mountains of California, USA. *Quaternary International*,2010,215(1): 3-14.
- [14] Kotze DC. The effects of fire on wetland structure and functioning. *African Journal of Aquatic Science*,2013,38(3): 237-247.
- [15] 覃红燕,谢永宏,邹东生. 湖南农业洪旱灾害演变趋势和成因及防灾减灾措施. 农业现代化研究,2011,32(2): 165-169.
- [16] 王卷乐,胡振鹏,冉盈盈等. 鄱阳湖湿地烧荒遥感监测及其影响分析. 自然资源学报,2013,28(4): 656-667.
- [17] 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. 湿地科学,2007,5(4): 348-354.
- [18] 李有志,谢永宏,李 峰等. 洞庭湖湿地杨树人工林对土壤理化性质的影响. 农业现代化研究,2014,35(2): 234-239.
- [19] Chen XS, Li X, Xie YH *et al.* Combined influence of hydrological gradient and edaphic factors on the distribution of macrophyte communities in Dongting Lake wetlands, China. *Wetlands Ecology and Management*,2015,23(3): 481-490.
- [20] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社,1996: 38-40.
- [21] 王 谢,向成华,李贤伟等. 冬季火烧对川西亚高山草甸土壤理化性质的影响. 草业科学,2014,31(5): 811-817.
- [22] 韩钊龙,胡慧蓉,黄铄淇. 林火干扰对土壤理化性质的影响. 西南林业大学学报,2014,34(3): 46-50.
- [23] 赵凤君,王立中,舒立福. 火烧对寒温带湿地生态系统的影响. 西北林学院学报,2013,28(2): 136-142.
- [24] 赵 彬,孙 龙,胡海清等. 兴安落叶松林火后对土壤养分和土壤微生物生物量的影响. 自然资源学报,2011,26(3): 450-459.
- [25] 王 丽,王兆锋,张镡锜等. 火烧对拉萨地区湿草甸湿地土壤养分特征的影响. 环境科学研究,2013,26(5): 549-554.
- [26] 贺郝钰,李新荣,苏洁琼. 火烧对荒漠化草原土壤性质的影响. 生态学杂志,2013,32(12): 3312-3317.
- [27] Julieta NA, Macko SA, Iris CA *et al.* Nutrient cycling responses to fire frequency in the Kruger National Park (South Africa) as indicated by stable isotope analysis. *Isotopes in Environmental and Health Studies*,2003,39(2): 141-158.
- [28] White EM, Thompson WW, Gartner FR. Heat effects on nutrient release from soils under ponderosa pine. *Journal of Range Management*,1973,26(1): 22-24.
- [29] 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. 土壤学报,1997,34(1): 89-96.
- [30] Christensen NL. Short term effects of mowing and burning on soil nutrient in Big Meadow, Shenandoah national park. *Journal of Range Management*,1976,29(6): 508-509.
- [31] 商丽娜. 火烧对三江平原小叶章湿地土壤性质的影响[学位论文]. 长春: 东北师范大学,2004.
- [32] Andersson M, Michelsehn A, Jensen M *et al.* Tropical savannah woodland: Effects of experimental fire on soil microorganisms and soil emissions of carbon dioxide. *Soil Biology and Biochemistry*,2004,36(5): 840-858.
- [33] Stephen JL, Samantha G, Hutley LB *et al.* Seasonal variation and fire effects on CH₄, N₂O and CO₂ exchange in savanna soils of northern Australia. *Agricultural and Forest Meteorology*,2011,151(11): 1440-1452.
- [34] 马 华,陈秀芝,潘 卉等. 持续收割对上海九段沙湿地芦苇生长特征、生物量和土壤全氮含量的影响. 生态与农村环境学报,2013,29(2): 209-213.
- [35] 牟长城,包 旭,卢慧翠等. 火干扰对大兴安岭兴安落叶松瘤囊苔草湿地生态系统碳储量的短期影响. 林业科学,2013,49(2): 8-14.
- [36] 王 军,傅伯杰,邱 扬等. 黄土高原小流域土壤养分的空间异质性. 生态学报,2002,22(8): 1173-1178.
- [37] 周道玮,姜世成,郭 平等. 草原火烧后土壤养分含量的变化. 东北师范大学学报: 自然科学版,1999,(1): 111-117.
- [38] 李政海,绛 秋. 火烧对草原土壤养分状况的影响. 内蒙古大学学报: 自然科学版,1994,25(4): 444-449.
- [39] 田 昆. 火烧迹地土壤磷含量变化的研究. 西南林学院学报,1997,17(1): 21-25.
- [40] 张淑敏,陈玉福,董 鸣. 匍匐茎草本绢毛委陵菜对局部遮荫的克隆可塑性. 植物学报,2000,42(1): 89-94.