

关于林火对林下土壤理化性质及土壤微生物影响的研究进展 综述

韩吉思¹ 何琬琬¹ 熊子轩¹ 唐丽¹ 权熙茗¹ 洪毓伟¹ 晏召贵*

(1. 华中农业大学园艺林学学院 湖北武汉 430000)

摘要:全球每年发生森林火灾约 20 万次, 烧毁森林面积占全球森林总面积的 1%以上。中国每年约发生 1 万多次森林火灾, 烧毁森林面积占全国森林面积的 5~8%。森林火灾是森林生态系统的重要干扰因素, 对土壤生物和非生物特性、生态系统养分循环和平衡产生深刻影响。因此, 评估林火对森林生态系统的具体影响显得尤为重要。随着气候变化, 全球森林火灾的范围、严重程度和频率都在增加, 对森林生态系统产生实质性持续影响。森林火灾通过直接对土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)施加不同程度的作用, 驱动森林生态系统养分元素在时空上的重新分配。林火对土壤微生物群落产生显著影响, 包括微生物数量的减少、群落结构的改变以及微生物功能的调整。林火可以改变土壤含水率、pH 和土壤元素含量等大部分土壤理化特性。过去几十年, 人们致力于研究森林火灾对土壤的影响及管理全球森林火灾。研究集中在林火蔓延、预测、生态影响、防控技术。尽管已有进展, 但研究仍需深入, 以完善知识体系, 为未来森林火灾管理和生态保护提供科学依据。

关键词: 森林火灾; 土壤; 理化性质; 微生物; 养分循环

Revisiting the Research Progress on the Impact of Forest Fires on Soil Physicochemical Properties and Soil Microorganisms in Understory Soils

Han Jisi¹ He Wanwan¹ Xiong Zixuan¹ Tang Li¹ Quan Ximing¹ Hong Yuwei¹ Yan Zhaogui*

(1. College of Horticulture and Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University Wuhan 430000)

Abstract: Approximately 200,000 forest fires occur globally each year, resulting in the burning of over 1% of the total forest area. In China alone, there are more than 10,000 forest fires annually that destroy between 5-8% of the national forest area. Forest fires represent significant disturbances to ecosystems and have profound impacts on soil biotic and abiotic characteristics, nutrient cycling, and ecosystem balance. Therefore, it is crucial to assess the specific effects of wildfires on forests. With climate change exacerbating global warming trends worldwide, the scope, scale, and frequency of global forest fires are increasing at an alarming rate, resulting in substantial and sustained impacts on forests' ecological systems. Forest fires directly affect carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) redistribution within soils to varying degrees. They also significantly influence soil microbial communities by reducing microbial abundance altering community structure, and adjusting microbial functions. Forest fires can modify most physical and chemical properties of soils such as moisture content, pH levels, and soil element concentrations. In recent decades, research has focused on studying wildfire impact on soils as well as managing global fire incidents. Research efforts have concentrated on fire spread prediction techniques, effects on ecology, and prevention/control technologies. Despite progress made so far, further research is still needed to enhance our knowledge base in order to provide scientific evidence for future management strategies and ecological conservation measures regarding forest fires.

Key words: forest fires; soil; physical and chemical properties; microorganisms; nutrient cycling

全世界每年平均发生森林火灾 20 多万次, 烧毁森林面积约占全世界森林总面积的 1% 以上; 中国每年平均发生森林火灾约 1 万多次, 烧毁森林几十万至上百万公顷, 约占全国森林面积的 5~8%。众所周知, 森林火灾是森林生态系统中的重要干扰之一, 亦是生态系统结构和功能的主要驱动力之一 (Ward *et al.*, 2014; 胡同欣, 2018), 其深刻影响着土壤生物和非生物特性动态变化, 进而影响生态系统养分循环和平衡 (Turetsky *et al.*, 2011)。在气候变化的大背景下, 全球范围内的森林火灾状况正在发生变化, 在许多生态系统中, 野火和规定火灾的范围、严重程度和频率都在增加 (Abatzoglou *et al.*, 2016), 森林火灾导致地上生物量的燃烧, 改变了土壤和植被的营养元素动态, 对森林生态系统产生了实质性的持续影响 (Singh *et al.*, 2017)。森林火灾通过直接对土壤碳 (C)、氮 (N)、磷 (P) 施加不同程度的作用和改变土壤理化性质与生物学性质, 驱动森林生态系统养分元素在时空上的重新分配 (王鼎等, 2017), 进而打破植物、凋落物中 C、N、P 生态化学计量平衡 (贺纪正等, 2009; Guo *et al.*, 2013), 影响森林生态系统养分循环, 特别是对凋落物的分解和养分循环产生了影响 (Pugh *et al.*, 2019)。此外, 林火还会对土壤微生物群落产生显著影响, 包括微生物数量的减少、群落结构的改变以及微生物功能的调整 (Cheng *et al.*, 2024)。鉴于林火对土壤物理、化学及生物性质的短期与长期深远影响, 评估林火对森林生态系统的具体影响显得尤为重要。

在过去的几十年里, 人们为了解森林火灾对土壤产生的影响和管理世界各地的森林火灾做出了大量的努力, 以往的林火研究聚焦于林火蔓延 (Wu Z C *et al.*,)、林火预测 (McNorton *et al.*, 2024)、林火生态影响 (Nimmo *et al.*, 2022)、林火防控技术 (Carta *et al.*, 2023)、林火与气候变化及林火与社会经济的关系 (Lal, 2015; Singh, 2022), 尽管这些研究已经取得了显著进展, 但仍需持续深入探索, 以进一步完善我们的知识体系, 并为未来的森林火灾管理与生态保护提供更为坚实的科学依据。

综上所述, 火烧迹地恢复、森林生产力提高和林业可持续发展需要关注森林火灾对土壤理化性质及微生物的影响。通过深入研究火烧过程中土壤化学元素特征的变化及其环境影响, 可以为火烧迹地恢复提供科学依据。同时, 了解火烧后土壤微生物的恢复过程, 也有助于提高森林生产力, 促进林业可持续发展。在我国, 加强火烧迹地恢复和研究, 有助于提高森林抗御火灾能力, 维护生态安全, 实现林业绿色可持续发展。

1 林火对土壤理化性质的影响

土壤由于其快速退化和缓慢形成的过程, 在时间尺度上被认为是不可再生的自然资源 (Lal, 2015); 且土壤作为生态系统中的重要组成部分, 是生态系统结构与功能的主要载体之一, 对植物生长和微生物多样性具有直接或间接的影响。林火可以改变土壤含水率、pH 和土壤元素含量等大部分土壤理化特性 (Sulwiński *et al.*, 2020), 其影响机理复杂, 主要受林火严重程度、火后恢复时间、土壤采样深度、气候条件、土壤类型等因素的影响而产生较大差异 (胡海清等, 2020)。土壤的生物地球化学特性往往需要几年或几十年才能恢复到火灾前的水平, 自然恢复过程非常缓慢 (Muqaddas *et al.*, 2015), 分析火后土壤理化性质的恢复可提高火后生态系统的恢复管理。

高强度火灾能够显著改变土壤的物理特性, 加剧其因侵蚀而引发的养分流失现象 (Dymov *et al.*, 2022)。火灾后土壤流失量显著增加, 进一步证实了火灾对土壤结构的破坏作用 (Valkanou *et al.*, 2022)。据研究, 高强度林火发生两年后的土壤容重测量结果显示, 土壤容重呈现上升趋势, 这直接导致了土壤压实程度的加剧 (Carrión-Paladines *et al.*, 2022)。此外, 火灾后的土壤结构和稳定性均受到严重影响, 土壤变得紧实, 渗透性显著减弱 (闫思宇等, 2016)。

林火的燃烧会显著减少土壤中的有机质, 因为燃烧过程中, 土壤中的有机物质在高温下被氧化, 转

化为气体逸出（桑义敏等，2021）。火灾发生几年后，土壤总有机碳、氮和磷（TOC、TN、TP）含量下降（Hu *et al.*, 2019）。研究表明，频繁的林火干扰将耗尽土壤 C 库和 N 库（Pellegrini *et al.*, 2018），降低土壤 C/P 和 N/P（Boerner *et al.*, 2006）。土壤是地球生态系统中最大的碳库，火烧是森林火灾改变土壤碳储量的直接变化机制（Holden *et al.*, 2015）。森林火灾对土壤有机碳含量和特性的变化影响很大，这取决于多种因素，包括不同类型火灾、林火强度、土壤类型、植被、气候和地形（Mouteva *et al.*, 2015）。

高强度火灾作用会显著降低土壤养分的含量，并伴随 pH 值的上升（Ondik *et al.*, 2022）。pH 值的变动可能进一步影响土壤中矿质元素的溶解性和有效性，导致土壤结构趋于板结，从而减弱土壤的透气性和透水性（韦自强等，2023）。此外，pH 值的上升还会降低土壤的导电性（Mirzaei *et al.*, 2023）。火灾的严重程度对土壤养分含量、碳的再分配和排放均产生显著影响（Ping *et al.*, 2022），具体表现为高强度火灾后氮和磷的含量明显减少（Lucas-Borja *et al.*, 2022）。值得注意的是，不同生态系统在火灾后土壤碳循环的动态变化及其后续恢复机制上存在差异。相较于草原土壤，森林土壤在碳循环的响应与储量变化方面展现出更为显著的效应（Xu S, 2022）。关于火灾对土壤有机碳（SOC）的长期影响，研究指出其随时间推移而发生变化。具体而言，火灾初期 SOC 含量会明显下降，但随着恢复期的推进，SOC 含量逐渐回升，最终趋近于火灾前的水平（Liu W, 2023）。

综上所述，林火强度对土壤理化性质的影响是多方面的。这种影响不仅体现在宏观的土壤化学和物理性质上，还深入到微生物和生物过程之中。

2 林火对土壤微生物方面的影响

土壤微生物是凋落物的主要分解者和土壤中最活跃的成分，对维护土壤结构、促进有机质分解、土壤养分转化、物质循环等生态过程发挥着重要作用（Zhang *et al.*, 2016）。微生物群落组成及多样性的变化可以反映土壤的肥力状况，并被用作评价许多生态系统过程中土壤质量和土壤扰动强度的重要指标（Van Der Heijden *et al.*, 2008; Zhang C *et al.*, 2016）。然而，土壤微生物在促进养分循环的同时，微生物群落组成和多样性也会受到土壤养分、pH 等因素的影响。此外，微生物对凋落物和残根的分解导致 C、N、P 含量发生变化，并向土壤有机质和微生物生物量聚集，反过来，凋落物和残根 C、N、P 含量的变化影响分解过程和养分循环（Ren *et al.*, 2017）。土壤分解代谢活性和功能多样性的恢复与火灾后植物的发育有关。火灾后，植物利用释放的营养物质再生，释放大量不稳定的有机底物（Hütsch *et al.*, 2002; Hart *et al.*, 2005），为土壤微生物群落提供资源，驱动养分有效性增加，促进微生物群落的恢复及其功能的恢复（Knelman J E, 2015）。越来越多的证据表明，火灾导致了土壤微生物群落的变化，而土壤微生物群落在森林养分循环中起着核心作用。

土壤微生物分解代谢活性和功能多样性的恢复与火灾后植物的发育有关。火灾后，植物利用释放的营养物质再生，释放大量不稳定的有机底物（Hütsch *et al.*, 2002; Hart *et al.*, 2005），为土壤微生物群落提供资源，驱动养分有效性增加，促进微生物群落的恢复及其功能的恢复（Knelman J E, 2015）。越来越多的证据表明，火灾导致了土壤微生物群落的变化，而土壤微生物群落在森林养分循环中起着核心作用。同时，林火导致细菌数量增多也影响了土壤的生物多样性（平晓帆等，2023）。高强度的林火几乎将土壤中的所有微生物消灭殆尽。这些微生物在土壤中发挥着分解有机物质、提供养分等作用（项小燕等，2024）。林火的燃烧不仅直接杀死微生物，还通过改变土壤环境，使得微生物的生存与繁衍变得更加困难。

土壤微生物对于促进凋落物分解、有机质转化、营养循环以及植物养分吸收方面具有非常大的意义，而土壤理化性质、凋落物和根系 C、N、P 化学计量比的变化又影响微生物生物量、群落结构和多样

性。因此,将植物、土壤和土壤微生物联系起来研究它们之间的相互关系,对于深入了解森林生态系统养分循环、植物养分利用以及对土壤环境的适应机制等具有重要意义。目前,林火干扰对土壤微生物及微生物 C、N、P 循环的影响机制也是广大学者研究的热点。微生物作为土壤中最活跃的组成部分之一,在植被生长、土壤理化性质和土壤结构形成等方面都发挥着关键作用(Bucher *et al.*, 2005)。森林火灾通常会导致土壤微生物生物量的立即减少和微生物群落结构的改变(Pereira-Silva *et al.*, 2019)。研究表明,细菌比真菌对火灾干扰更不敏感,也更有适应力(Bárcenas-Moreno *et al.*, 2011)。

3 结论

大规模、周期性的林火,由于其对生态环境和国民经济产生的巨大影响,成为国内外林火生态学领域的研究热点。相比之下,我国南方地区的小规模、高频次林火则较少受到关注,从而使得我们对这类林火的生态学效应了解得相对较少。在以后得研究中将目光聚焦于小规模、不同强度的林火,旨在系统探讨其对生态系统土壤理化性质、土壤微生物、林下物种多样性的影响。

首先,通过对南方地区林火发生频率、强度和生态学效应的文献综述,了解小规模、高频次林火的现状和特点。其次,收集和分析有关森林火灾、土壤养分含量、土壤微生物丰度、林下物种组成等方面的实地调查数据,以揭示林火对生态系统土壤和物种组成的影响。

期望揭示小规模、高频次林火的生态学效应,以及林火对生态系统土壤养分循环和物种组成的影响机制。这将有助于提高我们对林火生态学的认识,为今后林火管理和生态保护工作提供有益参考,有助于填补国内外在这一领域的空白,为林火生态学的发展做出贡献。

通过对林火生态的基础理论研究、火灾对森林生态系统的影响探究,深化对森林火灾发生规律、火行为特性等方面的认识,以期防火策略的制定提供更为科学的依据。积极参与国际林火生态研究合作,与世界各国分享防火经验和科技成果。通过国际交流与合作,推动全球林火生态研究的发展,共同应对全球森林火灾的挑战。积极参与国际组织的相关活动,加强信息共享和经验交流,为全球森林资源保护贡献中国智慧。

参考文献

- Carrión-Paladines V, Hinojosa M B, Jiménez Álvarez L, *et al.* 2022. Effects of the severity of wildfires on some physical-chemical soil properties in a humid montane scrublands ecosystem in southern ecuador. *Fire*, 5(3): 66.
- Carta F, Zidda C, Putzu M, *et al.* 2023. Advancements in forest fire prevention: a comprehensive survey. *Sensors*, 23(14): 6635.
- Cheng Z, Gao M, Pan H, *et al.* 2024. Functional diversity of soil microorganisms in taiga forests in the middle and late stages of restoration after forest fires. *Forests*, 15(7): 1220.
- Dymov A A, Gorbach N M, Goncharova N N, *et al.* 2022. Holocene and recent fires influence on soil organic matter, microbiological and physico-chemical properties of peats in the european north-east of russia. *Catena*, 217: 106449.
- Liu W Z Z L J. Effects of fire on the soil microbial metabolic quotient: a global meta-analysis. 2023: 224: 106957..
- Lucas-Borja M E, de Las Heras J, Moya Navarro D, *et al.* 2022. Short-term effects of prescribed fires with different severity on rainsplash erosion and physico-chemical properties of surface soil in mediterranean forests. *Journal of Environmental Management*, 322: 116143.
- McNorton J R, Di Giuseppe F, Pinnington E, *et al.* 2024. A global probability-of-fire (pof) forecast. *Geophysical Research Letters*, 51(12).
- Mirzaei J, Heydari M, Omidipour R, *et al.* 2023. Decrease in soil functionalities and herbs' diversity, but not that of arbuscular mycorrhizal fungi, linked to short fire interval in semi-arid oak forest ecosystem, west iran. *Plants*, 12(5): 1112.
- Nimmo D G, Andersen A N, Archibald S, *et al.* 2022. Fire ecology for the 21st century: conserving biodiversity in the age of megafire. *Diversity and Distributions*, 28(3): 350-356.
- Ondik M M, Bennell M, Davies R J P, *et al.* 2022. Fire and land use impact soil properties in a mediterranean dry sclerophyll

woodland. *Journal of Environmental Management*, 324: 116245.

Ping X, Chang Y, Liu M, *et al.* 2022. Carbon emission and redistribution among forest carbon pools, and change in soil nutrient content after different severities of forest fires in northeast china. *Forests*, 13(1): 110.

Singh S. 2022. Forest fire emissions: a contribution to global climate change. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5: 925480.

Valkanou K, Karymbalis E, Bathrellos G, *et al.* 2022. Soil loss potential assessment for natural and post-fire conditions in evia island, greece. *Geosciences*, 12(10): 367.

Wu Z C, Wang B, Li M Z, *et al.* Simulation of forest fire spread based on artificial intelligence. *Ecological indicators*, 2022, 136: 108653.: 108653.

Xu S E N P A. Fire frequency and type regulate the response of soil carbon cycling and storage to fire across soil depths and ecosystems: a meta-analysis. Amsterdam: Elsevier Pub.Co, 2022: 2022, 825: 153921..

贺纪正, 张丽梅. 2009. 氨氧化微生物生态学与氮循环研究进展. *生态学报*, 29(1): 406-415.

(He J Z, Zhang L M. 2009. Advances in ammonia-oxidizing microorganisms and global nitrogen cycle. *Chinese Journal of Ecology*, 29(1): 406-415.[in Chinese])

胡海清, 罗斯生, 罗碧珍, 等. 2020. 林火干扰对森林生态系统土壤有机碳的影响研究进展. *生态学报*, 40(6): 1839-1850.

(Hu H Q, Luo S S, Luo B Z, *et al.* 2020. Effects of forest fire disturbance on soil organic carbon in forest ecosystems:a review. *Acta Ecologica Sinica*, 40(6): 1839-1850.[in Chinese])

平晓帆, 魏云敏, 宋小双, 等. 2023. 火干扰对森林和草原土壤影响的研究现状及展望. *中国农学通报*, 39(35): 75-80.

(Ping X F, Wei Y M, Song X S, *et al.* 2023. Research status and prospect of fire disturbance on forest and grassland soil. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 39(35): 75-80.[in Chinese])

桑义敏, 何燎, 余望, 等. 2021. 有机污染土壤热处理过程中的炭化行为及其影响. *环境工程学报*, 15(7): 2181-2190.

(Sang Y M, He L, Yu W, *et al.* 2021. Charring behaviors and their influence of organic contaminated soil during thermal treatment. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 15(7): 2181-2190.[in Chinese])

王鼎, 周梅, 赵鹏武, 等. 2017. 不同更新方式对兴安落叶松林火烧迹地物种组成及多样性的影响. *生态环境学报*, 26(4): 570-575.

(Wang D, Zhou M, Zhao P W, *et al.* 2017. Study on species composition and diversity of burned phytocoenosium after different regenerate modes. *Ecology and Environment Sciences*, 26(4): 570-575.[in Chinese])

韦自强, 伊怀虎, 任鹏, 等. 2023. 大兴安岭重度火烧迹地植被恢复后土壤团聚体稳定性及有机碳特征. *森林工程*, 39(4): 19-28.

(Wei Z Q, Yi H H, Ren P, *et al.* 2023. Soil aggregates stability and organic carbon characteristics after vegetation restoration of burned areas in greater khingan mountains. *Forest Engineering*, 39(4): 19-28.[in Chinese])

胡同欣. 2018. 火干扰对大兴安岭兴安落叶松林土壤氮有效性的影响. 哈尔滨: 东北林业大学.

(Hu T X. 2018. Effects of fire disturbance on dahurian larch forest soil nitrogen availability in da xing'an mountains. Haerbin: Northeast Forestry University.[in Chinese])

项小燕, 阮思睿, 张颖, 等. 2024. 大别山五针松根际微生物和内生菌群落特征及功能多样性. *广西植物*: 1-14.

(Xiang X Y, Ruan S R, Zhang Y, *et al.* 2024. Community characteristics and functional diversity of the rhizosphere microbiota and endophyte from pinus dabeshanensis. *Guihaia*: 1-14.[in Chinese])

闫思宇, 王景燕, 龚伟, 等. 2016. 川南山地林分变化对土壤物理性质和抗蚀性的影响. *长江流域资源与环境*, 25(7): 1112-1120.

(Yan S Y, Wang J Y, Gong W, *et al.* 2016. Effects of forest change on soil physical properties and anti-erodibility in southern sichuan mountains. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 25(7): 1112-1120.[in Chinese])

Abatzoglou J T, Williams A P. 2016. Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western us forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(42): 11770-11775.

Bárcenas-Moreno G, García-Orenes F, Mataix-Solera J, *et al.* 2011. Soil microbial recolonisation after a fire in a mediterranean forest. *Biology and Fertility of Soils*, 47(3): 261-272.

Boerner R E, Waldrop T A, Shelburne V B. 2006. Wildfire mitigation strategies affect soil enzyme activity and soil organic carbon in loblolly pine (pinus taeda) forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(12): 3148-3154.

Bucher A E, Lanyon L E. 2005. Evaluating soil management with microbial community-level physiological profiles. *Applied soil ecology : a section of Agriculture, ecosystems & environment*, 29(1): 59-71.

Guo J, Peng Y, Wang S, *et al.* 2013. Pathways and organisms involved in ammonia oxidation and nitrous oxide emission. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 43(21): 2213-2296.

- Hart S C, Deluca T H, Newman G S, *et al.* 2005. Post-fire vegetative dynamics as drivers of microbial community structure and function in forest soils. *Forest Ecology and Management*, 220(1): 166-184.
- Hart S C, Deluca T H, Newman G S, *et al.* 2005. Post-fire vegetative dynamics as drivers of microbial community structure and function in forest soils. *Forest Ecology and Management*, 220(1): 166-184.
- Holden S R, Berhe A A, K K T. 2015. Decreases in soil moisture and organic matter quality suppress microbial decomposition following a boreal forest fire. *Soil Biology and Biochemistry*, 87: 1-9.
- Hu T, Hu H, Li F, *et al.* 2019. Long-term effects of post-fire restoration types on nitrogen mineralisation in a dahurian larch (*larix gmelinii*) forest in boreal china. *Science of the Total Environment*, 679: 237-247.
- Hütsch B W, Augustin J, Merbach W. 2002. Plant rhizodeposition - an important source for carbon turnover in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 165(4): 397-407.
- Hütsch B W, Augustin J, Merbach W. 2002. Plant rhizodeposition - an important source for carbon turnover in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 165(4): 397-407.
- Knelman J E. 2015. Fire severity shapes plant colonization effects on bacterial community structure, microbial biomass, and soil enzyme activity in secondary succession of a burned forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 90: 161-168.
- Lal R. 2015. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5): 5875-5895.
- Mouteva G O, Czimczik C I, Fahmi S M, *et al.* 2015. Black carbon aerosol dynamics and isotopic composition in alaska linked with boreal fire emissions and depth of burn in organic soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 29(11): 1977-2000.
- Muqaddas B, Zhou X, Lewis T, *et al.* Long-term frequent prescribed fire decreases surface soil carbon and nitrogen pools in a wet sclerophyll forest of southeast queensland, australia. *The science of the total environment*, 2015: 536, 39-47.
- Pellegrini A F A, Ahlström A, Hobbie S E, *et al.* 2018. Fire frequency drives decadal changes in soil carbon and nitrogen and ecosystem productivity. *Nature*, 553(7687): 194-198.
- Pereira-Silva E F L, Casals P, Sodek L, *et al.* 2019. Post-fire nitrogen uptake and allocation by two resprouting herbaceous species with contrasting belowground traits. *Environmental and Experimental Botany*, 159: 157-167.
- Pugh T, Arneeth A, Kautz M, *et al.* 2019. Important role of forest disturbances in the global biomass turnover and carbon sinks. *Nature Geoscience*, 12(9): 730-735.
- Ren C, Chen J, Deng J, *et al.* 2017. Response of microbial diversity to c:n:p stoichiometry in fine root and microbial biomass following afforestation. *Biology and Fertility of Soils*, 53(4): 457-468.
- Singh A K, Kushwaha M, Rai A, *et al.* 2017. Changes in soil microbial response across year following a wildfire in tropical dry forest. *Forest Ecology and Management*, 391: 458-468.
- Sulwiński M, Mętrak M, Wilk M, *et al.* Smouldering fire in a nutrient-limited wetland ecosystem: long-lasting changes in water and soil chemistry facilitate shrub expansion into a drained burned fen. *Science of the Total Environment*, 2020: 746, 141142.
- Turetsky M R, Kane E S, Harden J W, *et al.* 2011. Recent acceleration of biomass burning and carbon losses in alaskan forests and peatlands. *Nature Geoscience*, 4(1): 27-31.
- Van Der Heijden M G A, Bardgett R D, Van Straalen N M. 2008. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 11(3): 296-310.
- Ward C, Pothier D, Paré D. 2014. Do boreal forests need fire disturbance to maintain productivity? *Ecosystems*, 17(6): 1053-1067.
- Zhang C, Liu G, Xue S, *et al.* 2016. Soil bacterial community dynamics reflect changes in plant community and soil properties during the secondary succession of abandoned farmland in the loess plateau. *Soil Biology and Biochemistry*, 97: 40-49.
- Zhang Q, Wu J, Yang F, *et al.* 2016. Alterations in soil microbial community composition and biomass following agricultural land use change. *Scientific Reports*, 6(1).