

经营管理对森林土壤有机碳库影响的研究进展

何 姗^{1,2}, 刘 娟^{1,2}, 姜培坤^{1,2}, 周国模^{1,2}, 王会来³, 李永夫^{1,2}, 吴家森^{1,2}

(1. 浙江农林大学 省部共建亚热带森林培育国家重点实验室, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 杭州 311300; 3. 丽水市莲都区农业技术推广中心, 浙江 丽水 323000)

摘要: 森林土壤有机碳库在全球碳循环及减缓气候变暖中发挥着重要作用。施肥、火烧、采伐、林下植被管理、覆盖等营林措施改变了森林生态系统的生产力, 显著影响了森林土壤的碳输入和碳输出。综述了主要营林措施对森林土壤有机碳库的影响及其机制, 并探讨今后的研究重点。总体而言, 施用有机肥、有机无机肥配施及生物质炭添加均可提高土壤有机碳含量。氮肥对土壤有机碳含量的影响存在增加、降低和无影响3种结果; 火烧对土壤有机碳的影响取决于火烧后恢复时间、火烧温度、火烧强度、土层深度等因素; 皆伐通过改变土壤温度、含水量、有机碳来源等因素, 导致森林土壤有机碳含量下降; 而间伐对土壤有机碳的影响则与间伐强度有关; 去除林下植被及凋落物加快了土壤有机碳的分解, 但林下植被的替代与添加则会提高土壤有机碳含量; 覆盖提高了土壤有机碳含量, 但导致有机碳稳定性下降。随着研究方法和观测手段的不断发展, 今后应深入研究营林措施对土壤碳形态、结构和转化过程的影响; 同时, 更多关注人为管理和气候变化对森林土壤碳库产生的叠加效应。表5参84

关键词: 森林土壤学; 土壤有机碳库; 施肥; 火烧; 采伐; 林下植被管理; 覆盖

中图分类号: S714.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2019)04-0818-10

Effects of forest management on soil organic carbon pool: a review

HE Shan^{1,2}, LIU Juan^{1,2}, JIANG Peikun^{1,2}, ZHOU Guomo^{1,2}, WANG Huilai³, LI Yongfu^{1,2}, WU Jiasen^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 3. Agri-Tech Extension Center of Liandu District, Lishui 323000, Zhejiang, China)

Abstract: Forest soil as an important carbon sink plays a critical role in the global carbon cycle and mitigation of climate warming. Fertilization, fire, cutting, understory management and mulching have changed the productivity of forest ecosystem, which significantly affects the carbon input and carbon output of forest soil. This paper analyzed the effects of different kinds of forest management practices on soil organic carbon pool and proposed important directions for future research, in order to improve the carbon sequestration capacity of plantation soils through forest management practices. Organic fertilizer, organic-inorganic fertilizer and biochar tended to improve the soil active carbon content. N fertilizers reduced the soil active organic carbon content in N-rich forests, but there was an increase or no significant difference in soil active organic carbon content in N-poor forest. The influence of fire on soil organic carbon pool was determined by time length after fire, fire temperature, fire intensity and soil depth. Clear-cut changed the soil temperature, water content and organic matter sources, and thus reduced the organic carbon storage of forest soil. The effect of thinning on soil organic carbon

收稿日期: 2018-08-27; 修回日期: 2018-10-18

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2019C02008-03); 国家自然科学基金资助项目(31700540); 浙江省自然科学基金资助项目(LY15C160004)

作者简介: 何姗, 从事土壤碳汇与全球气候变化研究。E-mail: m18868191676@163.com。通信作者: 刘娟, 副教授, 从事土壤碳汇与全球气候变化研究。E-mail: liujuan@zafu.edu.cn

content was related to the harvesting intensity. Understory weeding enhanced soil temperature which could accelerate the decomposition of soil organic carbon, whereas the replacement and addition of understory vegetation would do the other way around. Mulching of organic residues in forests helped to increase the soil organic carbon content but decreased its stability. With the development of research theory and technology, the impact of forest management practices on soil carbon form and structure on soil carbon form and structure will become the main direction for future research. [Ch, 5 tab. 84 ref.]

Key words: forest soil science; soil organic carbon pool; fertilization; fire; cutting; understory management; mulching

森林覆盖面积约 40 亿 hm^2 ，占地球陆地面积的 31%，是陆地生态系统重要的碳库^[1-2]。森林生态系统储存了陆地生态系统 80% 以上的植被碳库和 70% 以上的土壤有机碳库^[3]。据统计，全球森林生态系统碳储量为 861 Pg，其中土壤碳库占 44%^[4]。森林土壤碳库的微小变化会对陆地生态碳循环和全球气候变化产生深刻影响。森林土壤碳储量是碳输入和碳输出动态平衡的结果。森林土壤碳输入在很大程度上取决于森林生产力、凋落物和植物根系的分解速率，碳输出则通过有机碳的矿化分解、土壤呼吸等方式完成。近几十年来，国内外众多学者极为关注经营管理对森林土壤碳储量与碳过程的影响，在全球范围内不同森林类型中开展了经营管理对森林土壤碳循环的研究，表明提高森林经营管理水平，可以增强森林生态系统地上与地下部分的碳汇潜能^[5]。因气候因子、森林类型、营林措施等不同，经营管理对森林土壤有机碳库影响的研究结果存在很大差异和不确定性；同一种经营措施在不同气候、不同森林类型条件下，对土壤有机碳库的影响也会呈现增加、降低和不变 3 种结果^[6]。因此，为增强生态系统管理对森林土壤碳过程影响不确定性的科学认识，本研究利用中国知网(CNKI)，Scopus，Google Scholar 和 Web of Science 等数据库，系统综述了主要营林措施(施肥、火烧、采伐、覆盖、林下植被管理)对森林土壤有机碳的影响，并试图探讨经营管理对森林土壤有机碳库的影响机制，以期为全球气候变化背景下森林土壤固碳增汇及森林合理经营提供借鉴。

1 施肥对森林土壤碳库的影响

施肥通过改变土壤有机碳来源和植物根系生物量，对土壤有机碳含量和组分产生显著影响。根据土壤有机碳库的周转速度及对外界因素的敏感程度，可将其分为惰性有机碳库和活性有机碳库[包括可溶性碳(DOC)，微生物生物量碳(MBC)，轻组有机碳(LFOC)和可矿化碳(MC)]等^[3]。研究表明：单施有机肥以及有机无机肥配施提高了森林土壤总有机碳和活性有机碳含量(表 1)。有机肥作为半分解的有机质，可为微生物提供充足的碳源与氮源，增加微生物源的溶解性有机化合物含量，同时导致根系生物量与根系分泌物增加，土壤有机碳含量增加^[7-8]。姜培坤等^[9]对雷竹 *Phyllostachys violascens* 林的研究结果表明：有机无机肥配施处理土壤总有机碳、水溶性碳、微生物生物量碳等均显著高于单施化肥处理。张蛟蛟等^[7]对中国亚热带板栗 *Castanea mollissima* 林的研究结果表明：单施有机肥或有机无机肥配施导致土壤可溶性有机碳和微生物生物量碳提高 52%~92%。

氮肥对土壤有机碳及活性有机碳的影响存在增加、降低和无影响 3 种结果(表 1)。涂利华等^[10]对华西雨屏区苦竹 *Pleioblastus amarus* 林的研究表明：氮肥的施用显著增加了苦竹的细根生物量，从而增加了表层土中有机碳以及微生物生物量碳的含量。汪金松等^[11]研究发现：施氮抑制了难分解有机物的分解，导致油松 *Pinus tabulaeformis* 林土壤中的有机碳含量下降 21.8%~31.4%。同时，也有研究表明：氮肥的添加对土壤有机碳或活性有机碳无显著影响^[12-13]。氮肥对有机碳的影响是一个复杂的过程。不仅通过影响凋落物分解和细根周转(土壤碳输入)，土壤呼吸和土壤可溶性有机碳淋失(土壤碳输出)直接影响土壤有机碳含量，还通过影响土壤 pH 值、土壤生物和土壤酶等间接影响土壤有机碳的含量^[14]。因而，未来应开展多种生态系统的长期定位试验，进一步探索氮肥对土壤碳过程的机理研究。

生物质炭是一种具有巨大比表面积、高度芳香环分子结构、富含碳(70%~80%)的新型材料，在土壤固碳增汇方面具有重要作用^[15]。目前，生物质炭添加对土壤碳库影响的研究主要集中在农田土壤，对森林土壤碳库影响的研究相对较少。生物质炭自身能缓慢分解形成腐殖质^[16]，同时生物质炭的添加促进

土壤团聚体的形成,提高土壤碳的稳定性^[17]。尹艳等^[18]研究发现:添加不同热解温度制备的生物质炭均会抑制杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林土壤原有的有机碳矿化。LIU 等^[19]通过 Meta 分析发现:在不同土地利用方式下生物质的添加使得微生物生物量碳的含量增加 18%。

表 1 森林土壤有机碳及活性有机碳含量对施肥的响应

Table 1 Responses of forest soil organic carbon content and active organic carbon content to fertilizer addition

地点	森林类型	肥料类型	土层深度/cm	变幅/%			参考文献
				SOC	DOC	MBC	
波兰	苗圃	有机肥	0~20	+60.2			[20]
中国浙江	板栗林	有机肥	0~20		+58	+42.7	[21]
中国四川	梁山慈林	有机无机复合肥	0~20	+39.1			[22]
中国四川	常绿阔叶林	硝酸铵	0~20	+4.1			[23]
中国山西	油松林	尿素	0~20	-21.8~-38.4			[11]
中国湖南	樟树林	硝酸铵	0~20			-20.1	[24]
美国	红松林	硝酸铵	0~20	无明显影响			[13]
美国	黑云杉林	硝酸铵	0~5			无明显影响	[12]
中国贵州	常绿落叶混交林	生物质炭	0~20	+13.9			[25]
中国山西	油松林	生物质炭	0~20		+44.4	+69.4	[26]

说明: 变幅中“+”表示上升;“-”表示下降。梁山慈 *Dendrocalamus farinosus*, 樟树 *Cinnamomum camphora*, 红松 *Pinus koraiensis*, 黑云杉 *Picea mariana*

2 火烧对森林土壤碳库的影响

据统计,因森林燃烧约有 3.9 Pg·a⁻¹ 碳排放到大气中,约占化石燃料燃烧排放量的 70%^[27]。林火通过直接燃烧植物、有机质高温变性等方式改变了土壤碳含量。但由于火烧后生态系统恢复时间长短、火烧强度、火烧温度及土层深度等因素的不同,火烧对森林土壤有机碳的影响也不尽相同。

多数研究表明:火烧会降低森林土壤表层有机碳含量(表 2)。其主要原因有:(1)树木燃烧过程中释放的高温破坏了表层土壤,土壤结构严重退化,短时间内难以恢复^[28];(2)枯枝落叶层因炭化或氧化导致土壤有机碳的来源减少^[29];(3)火烧导致地表裸露,同时破坏了土壤的团粒结构,土壤的抗水侵蚀能力减弱^[30]。WANG 等^[31]分析了 200 多个火烧后土壤有机碳的含量,发现火烧后土壤有机碳含量显著下降了 20.3%,其中,皆伐火烧及野火导致森林土壤有机碳含量分别下降 25.3%和 16.7%,预定火烧对土壤有机碳含量无显著影响,同时研究还发现,火烧导致微生物生物量碳含量平均下降 40.5%。薛立等^[30]的研究也发现:火灾导致微生物数量下降,其中细菌数量下降最明显。

随着恢复时间的延长,森林土壤碳含量逐渐恢复到未火烧水平,甚至高于原始值^[32]。JOHNSON 等^[33]统计分析了 48 个火烧后的森林土壤有机碳含量,发现火烧 10 a 后森林土壤有机碳含量平均增加了 7%。KÖSTER 等^[34]发现:在芬兰的北方森林中,火烧发生 5, 45, 75, 155 a 后,土壤碳储量从 1 497.8 g·m⁻² 增加到 2 397.9 g·m⁻²。恢复时间延长导致森林土壤有机碳含量增加的原因为:(1)燃烧未尽的残余物与矿质土壤相结合后难以被生物化学分解;(2)随着时间的推移,植被逐渐恢复,加速了土壤有机碳的恢复;(3)固氮物种进入火烧迹地后,土壤碳的螯合作用提高,土壤有机碳的矿化速率

表 2 森林土壤有机碳含量对火烧的响应

Table 2 Responses of forest soil organic carbon content to burning

地点	森林类型	处理	土层深度/cm	不同火烧时间		参考文献
				火烧后	变幅/	
				时间/a	%	
欧洲	温带落叶林	皆伐火烧	0~16	1.00	-5.0	[40]
中国福建	米槠次生林	皆伐火烧	0~10	0.50	-6.0	[41]
中国广东	马尾松林	野火	0~20	4.00	-45.0	[30]
地中海	白松林	高强度野火	0~10		-82.0	[42]
意大利	意大利石松林	野火	0~7	0.92	+25.8	[43]
美国	美国黄松林	春季预定火烧	0~30	5.00	+17.0	[29]
中国内蒙古	落叶松林	野火	0~10	40.00	+101.2	[44]

说明: 变幅中“+”表示上升;“-”表示下降。米槠 *Castanopsis carlesii*, 马尾松 *Pinus massoniana*, 意大利石松 *Pinus pinea*, 美国黄松 *Pinus ponderosa*, 落叶松 *Larix gmelinii*

降低^[35-36]。

此外，火烧显著影响了森林土壤有机碳的组成和结构。其变化主要体现在：(1)烷基化合物(烷烃、脂肪酸)的链长缩短^[37]；(2)芳构化程度增加，火烧将土壤中具有生物活性的物质转变成为无生命的芳香族大分子^[38]；(3)腐殖质转化成溶解性物质，其中胡敏酸会向碱性化合物转变，而富里酸则向酸性化合物转变^[39]；(4)黑炭的形成^[36]。

3 采伐对森林土壤碳库的影响

采伐对森林土壤有机碳库的影响因采伐方式而异^[45-46]。总体而言，皆伐会造成林地土壤有机碳含量急剧下降，下降幅度为 4.6%~45.2%(表 3)。皆伐后土壤裸露，土温升高，土壤有机碳的分解速率加快^[47]；同时皆伐过程中的机械使用破坏了林地表层植被，土壤侵蚀和淋溶作用加强^[48]。相较皆伐而言，间伐因其强度相对较低，并且在林地植被逐渐恢复过程中凋落物数量的增加有利于土壤有机碳的恢复，因而对森林土壤碳库的影响相对较小^[49]。一般而言，间伐强度 >50%，土壤有机碳含量降低；间伐强度 ≤ 50%，土壤有机碳含量增加，并在 30%~45%的间伐强度范围内，土壤有机碳含量达到最高^[50-51]。翟凯燕等^[52]对亚热带马尾松 *Pinus massoniana* 人工林的研究发现：25%的间伐强度和 45%的间伐强度使得表层土壤有机碳含量分别提高了 1.2%和 10.1%，使得表层土壤可溶性有机碳含量分别提高了 15%和 14%，而 60%的间伐强度则降低了土壤有机碳和可溶性有机碳含量。郝凯婕^[53]对云杉 *Picea asperata* 林土壤的研究表明：不同强度的间伐(10%，20%，30%，50%)均增加林地土壤有机碳和微生物生物量碳(除 50%)的含量，并且在 30%的间伐强度下土壤有机碳含量和微生物生物量碳均达到最高。

采伐后林地土壤碳库的变化还与采伐剩余物的保留与移除、土地利用方式、林地类型、土壤类型等因素密切相关^[54-55]。采伐剩余物和枯枝落叶的保留可弥补采伐造成的碳损失^[56]。方晰等^[57]对杉木林研究发现：皆伐后不同土地利用方式土壤有机碳含量大小依次为杉木林、农后撂荒地和自然更新采伐迹地。由此可见，皆伐后及时造林可以有效恢复被破坏的土壤碳库。NAVE 等^[58]对 432 个温带采伐地土壤碳库的分析发现：硬木林采伐后土壤碳含量减少 36%，而针叶林因凋落物中含有较多的木质素，碳/氮比更高，难以被分解，土壤碳含量下降幅度相对较低(20%)。采伐后森林土壤有机碳的变化还受土壤类型影响。采伐后弱育土有机碳含量恢复到原有水平需要 6~20 a，而灰化土由于是在寒温带针叶林植被下发育形成的，其有机碳含量的恢复则需要 50~70 a^[55,58]。

表 3 森林土壤有机碳含量对采伐的响应

地点	森林类型	处理	土层深度/cm	采伐强度/%	变幅/%	参考文献
中国湖南	杉木林	皆伐	0~60	100	-45.2	[57]
中国福建	米槠次生林	皆伐	0~10	100	-24.8	[59]
英国	云杉林	皆伐	0~20	100	-15.0	[60]
中国黑龙江	落叶松林	皆伐	0~20	100	-24.0	[61]
韩国	马尾松林	不同强度间伐	0~30	20(轻度) 30(中度)	+26.8 +77.6	[50]
中国贵州	杉木林	不同强度间伐	0~10	17(轻度) 33(中度) 50(重度)	+43.5 +24.3 +6.6	[62]
意大利	赤松林	不同强度间伐	0~30	25(轻度) 45(中度)	+64.2 +98.8	[63]
中国江苏	杉木林	间伐	0~10	70	-20.6	[64]

说明：变幅中“+”表示上升；“-”表示下降。赤松 *Pinus laricio*

4 林下植被管理对森林土壤碳库的影响

林下植被是森林生态系统的重要组成部分，在维持土壤营养循环过程中发挥着重要作用^[65]。林下植被管理通过改变林下植被的状态与种类直接影响森林土壤有机碳库(表 4)。去除林下植被直接降低了凋落物输入量，减少了土壤有机碳的来源^[66]；其次，降低了森林郁闭度，土壤温度升高，加速有机碳的矿化^[67]；最后，降低了森林土壤表层细根生物量及其分泌物，不利于土壤有机碳的积累^[68]。

林下植被替代或添加会增加土壤有机碳的含量。LI 等^[69]对华南地区混交人工林研究发现：剔除林下灌草种植固氮植物翅荚决明 *Cassia alata*，因固氮植物根系活性强，生产力高，从而凋落物的量增加，土壤有机碳含量增加。ZHANG 等^[70]的研究也指出：在剔除林下灌草后种植绿肥黑麦草 *Lolium perenne* 地 0~20 cm 土层土壤有机碳、土壤水溶性有机碳和微生物生物量碳含量分别增加了 14.2%，18.0% 和 22.4%。

5 覆盖对森林土壤碳库的影响

目前,地表覆盖措施对土壤碳库影响的研究多集中于农田生态系统,对林地土壤碳库影响的研究报道相对较少^[75]。覆盖措施一方面可以增温保湿,有利于提高土壤微生物活性;另一方面,覆盖物经长时间的晾晒和雨水浸泡,被微生物逐步分解进入土壤,增加了土壤有机碳含量(表5)。HUANG等^[76]研究发现:在澳大利亚东南地区的硬木人工林中覆盖木屑1 a后,0~10 cm土层的土壤总有机碳、水溶性有机碳及微生物生物量碳分别增加了45%,69%和23%。

覆盖还显著影响了林地土壤有机碳的化学组成结构。¹³C CPMAS核磁共振波谱分析通过对核磁共振谱峰曲线进行区域积分,可获得土壤有机碳中各种含碳组分的百分比。其中烷基碳/烷氧碳的比值反映土壤中有有机物烷基化程度的高低,芳香度[烷基碳/(烷基碳+烷氧碳+芳香碳)]反映土壤有机物腐殖化程度的高低,这2个指标均可表征土壤碳库的稳定性^[77],但因烷基碳/烷氧碳的比值更易受外界输入有机物的影响,所以芳香度更适于评价土壤有机碳的稳定性^[78]。研究表明:覆盖有机物会降低森林土壤有机碳的稳定性。在澳大利亚昆士兰的硬木人工林中覆盖木屑降低了土壤有机碳芳香度,土壤有机碳稳定性降低^[79]。LI等^[69]的研究也发现:以覆盖为主要经营措施的雷竹林在集约经营15 a后,0~20 cm土层土壤有机碳增加了283.4%,土壤烷基碳/烷氧碳的比值从0.24上升至0.68,而土壤芳香度却从27.8下降到8.0,有机碳稳定性降低。

6 总结与展望

森林土壤碳库是陆地生态系统碳库的重要组分,在全球碳循环中占据重要地位。森林经营管理水平的提高,是“减缓全球变化的一种可能机制和最有希望的选择”^[5]。施用有机肥、有机无机肥配施及生物质炭添加均可提高土壤有机碳及活性有机碳含量。而无机氮肥对土壤有机碳及活性有机碳含量的影响却不尽相同;火烧对土壤有机碳有一定的破坏作用,影响程度取决于火烧后恢复时间、火烧温度、火烧强度、土层深度等因素;皆伐降低森林土壤有机碳含量;间伐对土壤有机碳的影响则与间伐强度有关;去除林下植被及凋落物加快土壤有机碳的分解,但林下植被的替代与添加则趋势相反;覆盖提高土壤有机碳含量但降低其稳定性。

目前有关经营管理对森林土壤有机碳库的影响多聚焦于短期有机碳含量的变化;同时,温度、水分以及土壤氮素状况对土壤碳的周转过程存在显著影响,但近几十年有关全球变化与营林措施对森林生态系统地下部分碳过程的交互影响机制还缺乏深入系统的研究。因此,建议未来加强以下3个方面的研究:(1)开展营林措施对森林土壤有机碳组分及化学结构影响的长期研究,利用微生物学和分子生物学方法探讨经营管理对森林土壤碳过程影响的微生物机制;(2)开展增温、降水格局改变以及增氮控制与营林措施对森林土壤碳库交互影响的研究,明晰人为管理和气候变化对森林土壤碳库产生的叠加效应;(3)森

表4 森林土壤有机碳含量对林下植被管理的响应

Table 4 Responses of forest soil organic carbon to understory management contents

地点	森林类型	林下植被管理方式	土层深度/cm	变幅/%	参考文献
中国浙江	樟树林	剔除林下植被	0~10	-28.0	[71]
中国广东	厚荚相思林	剔除林下植被	0~10	-26.9	[72]
中国广东	桉树林	剔除林下植被	0~5	-20.8	[73]
中国浙江	板栗林	绿肥替代原有植被	0~20	+14.2	[70]
中国浙江	山核桃林	添加固氮植物	0~20	+12.2	[74]

说明:变幅中“+”表示上升;“-”表示下降。厚荚相思 *Acacia cras-sicarpa*, 山核桃 *Carya cathayensis*, 桉树 *Eucalyptus*

表5 森林土壤有机碳含量对覆盖管理的响应

Table 5 Responses of forest soil organic carbon content to coverage management

地点	森林类型	覆盖物种类	土层深度	变幅/%	参考文献
澳大利亚	硬木人工林	木屑	0~10 cm	+45.0	[76]
中国浙江	毛竹林	稻草	0~50 cm	+11.2~+74.2	[80]
中国浙江	油茶林	稻草	0~20 cm	+23.4~+57.5	[81]
美国夏威夷	咖啡树林	木屑	0~20 cm	+33.6	[82]
中国浙江	雷竹林	稻草	0~10 cm	+81.5	[83]
中国河北	核桃林	木屑	0~20 cm	+45.1	[84]

说明:变幅中“+”表示上升;“-”表示下降。毛竹 *Phyllostachys edulis*, 油茶 *Camellia oleifera*, 核桃 *Juglans regia*, 咖啡树 *Leucaena*

林土壤碳库是由土壤、植被和土壤微生物共同组成的一个有机整体, 为深入系统研究营林措施对森林生态系统碳过程的影响, 需加强人为管理对森林生态系统地上-地下碳循环过程耦合机制的研究。

7 参考文献

- [1] LIU Xiang, YANG Tao, WANG Quan, *et al.* Dynamics of soil carbon and nitrogen stocks after afforestation in arid and semi-arid regions: a meta-analysis [J]. *Sci Total Environ*, 2018, **618**: 1658 – 1664.
- [2] KEENAN R J, REAMS G A, ACHARD F, *et al.* Dynamics of global forest area: results from the FAO global forest resources assessment [J]. *For Ecol Manage*, 2015, **352**(7): 9 – 20.
- [3] LAL R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change [J]. *Geoderma*, 2004, **123**(1/2): 1 – 22.
- [4] PAN Yude, BIRDESY R A, FANG Jinyun, *et al.* A large and persistent carbon sink in the world's forests [J]. *Science*, 2011, **333**(6045): 988 – 992.
- [5] LAL R. Forest soils and carbon sequestration [J]. *For Ecol Manage*, 2005, **220**(1/3): 242 – 258.
- [6] NOORMETS A, EPRON D, DOMEQ J C, *et al.* Effects of forest management on productivity and carbon sequestration: a review and hypothesis [J]. *For Ecol Manage*, 2015, **355**: 124 – 140.
- [7] 张蛟蛟, 李永夫, 姜培坤, 等. 施肥对板栗林土壤活性碳库和温室气体排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, **19**(3): 745 – 752.
ZHANG Jiaojiao, LI Yongfu, JIANG Peikun, *et al.* Effect of fertilization on labile carbon pools and emissions of greenhouse gas in soils of Chinese chestnut stands [J]. *Plant Nutri Fert Sci*, 2013, **19**(3): 745 – 752.
- [8] 陈雪双, 刘娟, 姜培坤, 等. 施肥对山核桃林地土壤 N₂O 排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, **20**(5): 1262 – 1270.
CHEN Xueshuang, LIU Juan, JIANG Peikun, *et al.* Effects of fertilization on soil N₂O flux in Chinese *Carya cathayensis* stands [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2014, **20**(5): 1262 – 1270.
- [9] 姜培坤, 徐秋芳. 施肥对雷竹林土壤活性有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(2): 253 – 256.
JIANG Peikun, XU Qiufang. Effects of fertilization on soil active organic carbon under *Phyllostachys praecox* stand [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2005, **16**(2): 253 – 256.
- [10] 涂利华, 胡庭兴, 张健, 等. 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林土壤有机碳和养分的影响[J]. 植物生态学报, 2011, **35**(2): 125 – 136.
TU Lihua, HU Tingxing, ZHANG Jian, *et al.* Response of soil organic carbon and nutrients to simulated nitrogen deposition in *Pleioblastus amarus* plantation, rainy area of west China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2011, **35**(2): 125 – 136.
- [11] 汪金松, 赵秀海, 张春雨, 等. 模拟氮沉降对油松林土壤有机碳和全氮的影响[J]. 北京林业大学学报, 2016, **38**(10): 88 – 94.
WANG Jinsong, ZHAO Xiuhai, ZHANG Chunyu, *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition on soil organic carbon and total nitrogen content in plantation and natural forests of *Pinus tabuliformis* [J]. *J Beijing For Univ*, 2016, **38**(10): 88 – 94.
- [12] ALLISON S D, CZIMCZIK C I, TRESEDER K K. Microbial activity and soil respiration under nitrogen addition in Alaskan boreal forest [J]. *Global Change Biol*, 2008, **14**(5): 1156 – 1168.
- [13] MAGILL A H, ABER J D, CURRIE W S, *et al.* Ecosystem response to 15 years of chronic nitrogen additions at the harvard forest LTER, Massachusetts, USA [J]. *For Ecol Manage*, 2004, **196**(1): 7 – 28.
- [14] 郭亮, 王庆贵, 邢亚娟. 森林生态系统土壤碳库对氮沉降的响应研究进展[J]. 中国农学通报, 2016, **32**(32): 81 – 87.
GUO Liang, WANG Qinggui, XING Yajuan. Response of forest ecosystem soil carbon pool to nitrogen deposition: a review [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2016, **32**(32): 81 – 87.
- [15] NOYCE G L, BASILIKO N, FULTHORPE R, *et al.* Soil microbial responses over 2 years following biochar addition to a north temperate forest [J]. *Biol Fert Soil*, 2015, **51**(6): 649 – 659.
- [16] SUN Liying, LI Lu, CHEN Zhaozhi, *et al.* Combined effects of nitrogen deposition and biochar application on emissions of N₂O, CO₂ and NH₃ from agricultural and forest soils [J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2014, **60**(2): 254 – 265.
- [17] LIANG Biqing, LEHMANN J, SOHI S P, *et al.* Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil [J]. *Organic Geochem*, 2010, **41**(2): 206 – 213.

- [18] 尹艳, 刘岩, 尹云锋, 等. 生物质炭添加对杉木人工林土壤原有有机碳矿化的影响[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(5): 1389 – 1396.
YIN Yan, LIU Yan, YIN Yunfeng, *et al.* Effects of biochar addition on the mineralization of native soil organic carbon in *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2018, **29**(5): 1389 – 1396.
- [19] LIU Shuwei, ZHANG Yaojun, ZONG Yajie, *et al.* Response of soil carbon dioxide fluxes, soil organic carbon and microbial biomass carbon to biochar amendment: a meta-analysis [J]. *Global Change Biol*, 2016, **8**(2): 392 – 406.
- [20] PIASZCZYK W, BŁOŃSKA E, LASOTA J. Study on the effect of organic fertilizers on soil organic matter and enzyme activities of soil in forest nursery [J]. *Soil Sci Ann*, 2017, **68**(3): 125 – 131.
- [21] 姜培坤, 徐秋芳, 鄢奇峰, 等. 施肥对板栗林土壤养分和生物学性质的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2007, **24**(4): 445 – 449.
JIANG Peikun, XU Qiufang, WU Qifeng, *et al.* Effect of fertilization on soil properties under *Castanea mollissima* plantation [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2007, **24**(4): 445 – 449.
- [22] 王伟. 施肥对梁山慈竹林土壤有机碳和酶活性的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2012.
WANG Wei. *The Impact of Fertilization on Organic Carbon and Enzyme Activities of the D. farinosus Chia et H.L. Fung Soil* [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2012.
- [23] 向元彬, 周世兴, 肖永翔, 等. 模拟氮沉降和降雨量改变对华西雨屏区常绿阔叶林土壤有机碳的影响[J]. 生态学报, 2017, **37**(14): 4686 – 4695.
XIANG Yuanbin, ZHOU Shixing, XIAO Yongxiang, *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition and precipitation changes on soil organic carbon in an evergreen broad-leaved forest that is part of the rainy area of western China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37**(14): 4686 – 4695.
- [24] 郑威. 施氮对樟树人工林土壤呼吸的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013.
ZHENG Wei. *Effect of Nitrogen Fertilization of Soil Respiration in Cinnamomum camphora Plantation* [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2013.
- [25] 张明江, 龙健, 李娟, 等. 生物质炭对茂兰喀斯特森林土壤呼吸与有机碳的影响[J]. 土壤, 2018, **50**(2): 333 – 340.
ZHANG Mingjiang, LONG Jian, LI Juan, *et al.* Effects of biochars on soil respiration and SOC content of origin forest soil in Maolan Karst Area of Guizhou, China [J]. *Soils*, 2018, **50**(2): 333 – 340.
- [26] 张岩, 张令珍, 徐美丽, 等. 太岳山油松林土壤活性碳和微生物特性随外源有机物的变化规律[J]. 福建农林大学学报, 2017, **46**(3): 284 – 292.
ZHANG Yan, ZHANG Lingzhen, XU Meili, *et al.* Variations in labile soil carbon and microbial activity by organic matter input in *Pinus* forest in Taiyue mountain [J]. *J Fujian A&F Univ*, 2017, **46**(3): 284 – 292.
- [27] FLORENT M, FIELD C B. Fire history and the global carbon budget: a $1^\circ \times 1^\circ$ fire history reconstruction for the 20th century [J]. *Global Change Biol*, 2010, **11**(3): 398 – 420.
- [28] CHEN H Y H, SHRESTHA B M. Stand age, fire and clear cutting affect soil organic carbon and aggregation of mineral soils in boreal forests [J]. *Soil Biol Biochem*, 2012, **50**(5): 149 – 157.
- [29] HATTEN J A, ZABOWSKI D, OGDEN A, *et al.* Soil organic matter in a ponderosa pine forest with varying seasons and intervals of prescribed burn [J]. *For Ecol Manage*, 2008, **255**(7): 2555 – 2565.
- [30] 薛立, 陈红跃, 杨振意, 等. 火灾对马尾松林地土壤特性的影响[J]. 生态学报, 2011, **31**(22): 6824 – 6831.
XUE Li, CHEN Hongyue, YANG Zhenyi, *et al.* The effect of fire on soil properties in a *Pinus massoniana* stand [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(22): 6824 – 6831.
- [31] WANG Qingkui, ZHONG Micai, WANG Silong. A meta-analysis on the response of microbial biomass, dissolved organic matter, respiration, and N mineralization in mineral soil to fire in forest ecosystems [J]. *For Ecol Manage*, 2012, **271**: 91 – 97.
- [32] 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 Long, ZHAO Jun, HU Haiqing. Effect of moderate fire disturbance on soil physical and chemical properties of *Betula platyphylla-Larix gmelinii* mixed forest [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, **47**(2): 103 – 110.
- [33] JOHNSON D W, CURTIS P S. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis [J]. *For Ecol*

- Manage*, 2001, **140**(2/3): 227 – 238.
- [34] KÖSTER E, KÖSTER K, BERNINGER F, *et al.* Carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes from podzols of a fire chronosequence in the boreal forests in Väriö, Finnish Lapland [J]. *Geoderma*, 2015, **5**: 181 – 187.
- [35] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 等. 火烧对森林土壤有机碳的影响研究进展[J]. 生态学报, 2015, **35**(9): 2800 – 2809.
GUO Jianfen, YANG Yusheng, CHEN Guangshui, *et al.* A review of effects of fire on soil organic carbon in forests [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35**(9): 2800 – 2809.
- [36] 许鹏波, 屈明, 薛立. 火对森林土壤的影响[J]. 生态学杂志, 2013, **32**(6): 1596 – 1606.
XU Pengbo, QU Ming, XUE Li. Effects of forest fire on forest soils [J]. *Chin J Ecol*, 2013, **32**(6): 1596 – 1606.
- [37] ALMENDROS G, MARTÍN F, GONZÁLEZVILA F J. Effects of fire on humic and lipid fractions in a Dystric Xerochrept in Spain [J]. *Geoderma*, 1988, **42**(2): 115 – 127.
- [38] GONZÁLEZ-PÉREZ J A, GONZÁLEZVILA F J, ALMENDROS G. The effect of fire on soil organic matter: a review [J]. *Environ Int*, 2004, **30**(6): 855 – 870.
- [39] ALMENDROS G, GONZÁLEZVILA F J, MARTIN F. Fire-induced transformation of soil organic matter from an oak forest: an experimental approach to the effects of fire on humic substances [J]. *Soil Sci*, 1990, **149**(3): 158 – 168.
- [40] ECKMEIER E, GERLACH R, SKJEMSTAD J O, *et al.* Minor changes in soil organic carbon and charcoal concentrations detected in a temperate deciduous forest a year after an experimental slash-and-burn [J]. *Biogeosciences*, 2007, **4**(2): 377 – 383.
- [41] 吴君君, 杨智杰, 刘小飞, 等. 火烧和保留采伐剩余物对土壤有机碳矿化的影响[J]. 土壤学报, 2015, **52**(1): 203 – 211 .
WU Junjun, YANG Zhijie, LIU Xiaofei, *et al.* Effect of prescribed burning and reservation of logging residues on soil organic carbon mineralization [J]. *Acta Pedol Sin*, 2015, **52**(1): 203 – 211.
- [42] TINOCO P, ALMENDROS G, SANZ J, *et al.* Molecular descriptors of the effect of fire on soils under pine forest in two continental Mediterranean soils [J]. *Organic Geochem*, 2006, **37**(12): 1995 – 2018.
- [43] CERTINI G, NOCENTINI C, KNICKER H, *et al.* Wildfire effects on soil organic matter quantity and quality in two fire-prone Mediterranean pine forests [J]. *Geoderma*, 2011, **167/168**(8): 148 – 155.
- [44] 杨新芳, 鲍雪莲, 胡国庆, 等. 大兴安岭不同火烧年限森林凋落物和土壤 C, N, P 化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(5): 1359 – 1367.
YANG Xinfang, BAO Xuelian, HU Guoqing, *et al.* C:N:P stoichiometry characteristics of litter and soil of forests in Great Xing'an Mountains with different fire years [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2016, **27**(5): 1359 – 1367.
- [45] PAULLIMOGES E, BLACK T A, CHRISTEN A, *et al.* Effect of clearcut harvesting on the carbon balance of a Douglas-fir forest [J]. *Agric For Meteorol*, 2015, **203**: 30 – 42.
- [46] JURGENSEN M E, TARPEY R, PICKENS J, *et al.* Long term effect of silvicultural thinnings on soil carbon and nitrogen pools [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2012, **76**(4): 1418 – 1423.
- [47] 闫美芳, 张新时, 江源, 等. 主要管理措施对人工林土壤碳的影响[J]. 生态学杂志, 2010, **29**(11): 2265 – 2271.
YAN Meifang, ZHANG Xinshi, JIANG Yuan, *et al.* Effects of management practices on forest plantation soil carbon: a review [J]. *Chin J Ecol*, 2010, **29**(11): 2265 – 2271.
- [48] YASHIRO Y, WAN R K, OKUDA T, *et al.* The effects of logging on soil greenhouse gas (CO₂, CH₄, N₂O) flux in a tropical rain forest, Peninsular Malaysia [J]. *Agric For Meteorol*, 2008, **48**(5): 799 – 806.
- [49] ZHOU Decheng, ZHAO Shuqing, LIU Shuguang, *et al.* A meta-analysis on the impacts of partial cutting on forest structure and carbon storage [J]. *Biogeosciences*, 2013, **10**(1): 787 – 813.
- [50] YANG A R, SON Y W, NOH N J, *et al.* Effect of thinning on carbon storage in soil, forest floor and coarse woody debris of *Pinus densiflora* stands with different stand ages in Gangwon-do, central Korea [J]. *For Sci Technol*, 2011, **7**(1): 30 – 37.
- [51] SON Y W, YANG A R, CHUNG H, *et al.* Effect of thinning on soil and forest carbon storage of *Quercus* stands in Gangwon Province, central Korea [J]. *Jpn For Soc Congr*, 2011, **122**: 749 – 749.
- [52] 翟凯燕, 马婷瑶, 金雪梅, 等. 间伐对马尾松人工林土壤活性有机碳的影响[J]. 生态学杂志, 2017, **36**(3): 609 – 615.
ZHAI Kaiyan, MA Tingyao, JIN Xuemei, *et al.* Effects of thinning intensity on soil active organic carbon in *Pinus*

- massoniana* plantation [J]. *Chin J Ecol*, 2017, **36**(3): 609 – 615.
- [53] 郝凯婕. 抚育强度对云杉林土壤有机碳含量的影响[J]. 山西林业科技, 2014, **43**(3): 16 – 18.
HAO Kaijie. Impact of thinning scheme on soil organic carbon in spruce forest [J]. *Shanxi For Sci Technol*, 2014, **43**(3): 16 – 18.
- [54] 雷蕾, 肖文发. 采伐对森林土壤碳库影响的不确定性[J]. 林业科学研究, 2015, **28**(6): 892 – 899.
LEI Lei, XIAO Wenfa. Uncertainty effect of forest harvest on soil carbon pool: a review [J]. *For Res*, 2015, **28**(6): 892 – 899.
- [55] HU Zhenhong, HE Zongming, HUANG Zhiquan, *et al.* Effects of harvest residue management on soil carbon and nitrogen processes in a Chinese fir plantation [J]. *For Ecol Manage*, 2014, **326**: 163 – 170.
- [56] SMOLANDER A, KITUNEN V, KUKKOLA M, *et al.* Response of soil organic layer characteristics to logging residues in three scots pine thinning stands [J]. *Soil Biol Biochem*, 2013, **66**: 51 – 59.
- [57] 方晰, 田大伦, 项文化. 不同经营方式对杉木林采伐迹地土壤 C 储量的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2004, **24**(1): 1 – 5.
FANG Xi, TIAN Dalun, XIANG Wenhua. Effects of different management patterns on soil carbon storage of the deforested lands in Chinese fir plantation [J]. *J Central South Univ For Technol*, 2004, **24**(1): 1 – 5.
- [58] NAVE L E, VANCE E D, SWANSTON C W, *et al.* Harvest impacts on soil carbon storage in temperate forests [J]. *For Ecol Manage*, 2010, **259**(5): 857 – 866.
- [59] 郑永, 刘小飞, 郑蔚, 等. 应用高频观测探讨不同森林经营方式下矿质土壤呼吸的昼夜动态特征[J]. 生态学报, 2017, **37**(1): 93 – 101.
ZHENG Yong, LIU Xiaofei, ZHENG Wei, *et al.* High-frequency analysis of the diel patterns of mineral soil respiration under different forest management [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37**(1): 93 – 101.
- [60] VANGUELOVA E I, PITMAN R, BENHAM S, *et al.* Impact of tree stump harvesting on soil carbon and nutrients and second rotation tree growth in mid-Wales, UK [J]. *Open J For*, 2017, **7**(1): 58 – 77.
- [61] 王文杰, 张文天, 安静, 等. 落叶松人工林、皆伐迹地及农田土壤碳及肥力的差异[J]. 林业科学, 2013, **49**(9): 79 – 88.
WANG Wenjie, ZHANG Wentian, AN Jing, *et al.* Variation of soil carbons and fertilities in larch plantation land, clear-cut site and farmland in northeast China [J]. *Sci Silv Sin*, 2013, **49**(9): 79 – 88.
- [62] 丁波, 丁贵杰, 李先周, 等. 短期间伐对杉木人工林生态系统碳储量的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, **36**(8): 66 – 71.
DING Bo, DING Guijie, LI Xianzhou, *et al.* Effects of short term thinning on the carbon storage in *Cunninghamia lanceolata* plantation ecosystem [J]. *J Central South Univer For Technol*, 2016, **36**(8): 66 – 71.
- [63] SETTINERI G, MALLAMACI C, MITROVIĆ M, *et al.* Effects of different thinning intensities on soil carbon storage in *Pinus laricio* forest of Apennine South Italy [J]. *Eur J For Res*, 2018, **137**(2): 131 – 141.
- [64] 凌宁. 间伐强度对杉木人工林土壤呼吸的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.
LING Ning. *The Impace of Different Thinning Tensity on Soil Respiration in the Chinese fir Plantation* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2012.
- [65] PAN Ping, ZHAO Fang, NING Jinkui, *et al.* Impact of understory vegetation on soil carbon and nitrogen dynamic in aerially seeded *Pinus massoniana* plantations [J]. *PLoS One*, 2018 **13**(1): e0191952. doi: 10.1371/journal.pone.0191952.
- [66] WU Jianping, LIU Zhanfeng, CHEN Dima, *et al.* Understory plants can make substantial contributions to soil respiration: evidence from two subtropical plantations [J]. *Soil Biol Biochem*, 2011, **43**(11): 2355 – 2357.
- [67] WANG Xiaoling, ZHAO Jie, WU Jianping, *et al.* Impacts of understory species removal and/or addition on soil respiration in a mixed forest plantation with native species in southern China [J]. *For Ecol Manage*, 2011, **261**(6): 1053 – 1060.
- [68] KUME A, SATOMURA T, TSUBOI N. Effects of understory vegetation on the ecophysiological characteristics of an overstory pine, *Pinus densiflora* [J]. *For Ecol Manage*, 2003, **176**(1): 195 – 203.
- [69] LI Yongfu, JIANG Peikun, CHANG S X, *et al.* Organic mulch and fertilization affect soil carbon pools and forms under intensively managed bamboo (*Phyllostachys praecox*) forests in southeast China [J]. *J Soils Sediment*, 2010, **10**

- (4): 739 – 747.
- [70] ZHANG Jiaojiao, LI Yongfu, CHANG S X, *et al.* Understory vegetation management affected greenhouse gas emissions and labile organic carbon pools in an intensively managed Chinese chestnut plantation[J]. *Plant Soil*, 2014, **376** (1/2): 363 – 375.
- [71] 吴亚丛, 李正才, 程彩芳, 等. 林下植被抚育对樟树人工林土壤活性有机碳库的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, **24**(12): 3341 – 3346.
- WU Yachong, LI Zhengcai, CHENG Caifang, *et al.* Effects of understory removal on soil labile organic carbon pool in a *Cinnamomum camphora* plantation [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, **24**(12): 3341 – 3346.
- [72] 李海防, 张杏锋. 剔除灌草和添加翅荚决明对厚荚相思林土壤温室气体排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(3): 563 – 568.
- LI Haifang, ZHANG Xingfeng. Soil greenhouse gases emission from an *Acacia crassicaarpa* plantation under effects of understory removal and *Cassia alata* addition [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, **21**(3): 563 – 568.
- [73] WANG Faming, ZOU Bi, LI Haifang. The effect of understory removal on microclimate and soil properties in two subtropical lumber plantations [J]. *J For Res*, 2014, **19**(1): 238 – 243.
- [74] ZHANG Jiaojiao, LI Yongfu, CHANG S X, *et al.* Understory management and fertilization affected soil greenhouse gas emissions and labile organic carbon pools in a Chinese chestnut plantation [J]. *For Ecol Manage*, 2015, **337**: 126 – 134.
- [75] CHATTERJEE S, BANDYOPADHYAY K K, PRADHAN S, *et al.* Effects of irrigation, crop residue mulch and nitrogen management in maize (*Zea mays* L.) on soil carbon pools in a sandy loam soil of indo-gangetic plain region [J]. *Catena*, 2018, **165**: 207 – 216.
- [76] HUANG Zhiqun, XU Zhihong, CHEN Chengrong, *et al.* Changes in soil carbon during the establishment of a hardwood plantation in subtropical Australia [J]. *For Ecol Manage*, 2008, **254**(1): 46 – 55.
- [77] 商素云, 李永夫, 姜培坤, 等. 天然灌木林改造成板栗林对土壤碳库和氮库的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, **23** (3): 659 – 665.
- SHANG Suyun, LI Yongfu, JIANG Peikun, *et al.* Effects of the conversion from native shrub forest to Chinese chestnut plantation on soil carbon and nitrogen pools [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, **23**(3): 659 – 665.
- [78] MATHERS N J, XU Zhihong. Solid-state ¹³C NMR spectroscopy: characterization of soil organic matter under two contrasting residue management regimes in a 2-year-old pine plantation of subtropical Australia [J]. *Geoderma*, 2003, **114**(1/2): 19 – 31.
- [79] HUANG Zhiqun, XU Zhihong, CHEN Chengrong. Effect of mulching on labile soil organic matter pools, microbial community functional diversity and nitrogen transformations in two hardwood plantations of subtropical Australia [J]. *Appl Soil Ecol*, 2008, **40**(2): 229 – 239.
- [80] 赵睿宇, 李正才, 王斌, 等. 毛竹林地表覆盖年限对土壤有机碳的影响[J]. *植物生态学报*, 2017, **41**(4): 418 – 429.
- ZHAO Ruiyu, LI Zhengcai, WANG Bin, *et al.* Duration of mulching caused variable pools of labile organic carbon in a *Phyllostachys edulis* plantation [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2017, **41**(4): 418 – 429.
- [81] 王玉娟. 油茶林地覆盖和间种对土壤理化性质及幼林生长的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2009.
- WANG Yujian. *The Effect of Covering and Interplanting on the Soil Physical, Chemical Properties and Growth Condition of Camellia oleifera Young Forest* [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2009.
- [82] YOUKHANA A, IDOL T. Tree pruning mulch increases soil C and N in a shaded coffee agroecosystem in Hawaii [J]. *Soil Biol Biochem*, 2009, **41**(12): 2527 – 2534.
- [83] 郭子武, 王为宇, 杨清平, 等. 林地覆盖对雷竹林土壤碳氮磷化学计量特征的影响[J]. *广西植物*, 2013, **33** (5): 627 – 632.
- GUO Ziwu, WANG Weiyu, YANG Qingping, *et al.* Effect of mulching management on stoichiometry of soil C, N and P in *Phyllostachys praecox* plantations [J]. *Guihaia*, 2013, **33**(5): 627 – 632.
- [84] 孙萌, 刘洋, 李寒, 等. 有机物覆盖对核桃园土壤有机碳库及酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, **24** (1): 270 – 278.
- SUN Meng, LIU Yang, LI Han, *et al.* Effects of organic mulching on soil organic carbon pool and soil enzyme activity in walnut orchard [J]. *J Plant Nutr Fert*, 2018, **24**(1): 270 – 278.