

采伐对森林土壤呼吸影响的研究进展

朱文见^{1,2}, 张 慧^{1,2}, 王懿祥^{1,2}

(1. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 311300; 2. 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)

摘要: 土壤呼吸是大气二氧化碳(CO₂)重要的来源, 采伐作为森林经营的常规活动之一, 是影响森林土壤呼吸的重要人为干扰措施。开展有关采伐对森林土壤呼吸影响的研究对更好地理解森林碳循环和应对全球气候变化具有重要的科学意义和应用价值。本研究将采伐分为2类: 皆伐和部分采伐(择伐、渐伐、间伐和更新采伐等)。分别综述了皆伐和部分采伐对土壤呼吸影响的代表性研究成果, 讨论了皆伐和部分采伐对土壤呼吸的主要影响机制, 总结了当前采伐对森林土壤呼吸及其组分与土壤温度敏感性(Q₁₀)的影响并对未来研究提出展望。目前采伐对土壤呼吸的研究主要集中于: ①采伐强度对土壤呼吸影响的方向和幅度; ②皆伐或部分采伐后土壤呼吸随时间变化的动态特征及受土壤温度等环境因子的影响; ③皆伐或部分采伐对土壤呼吸组分的影响; ④皆伐或部分采伐对Q₁₀的影响; ⑤皆伐或部分采伐对土壤呼吸的影响机制。主要结论为: ①因采伐强度、采伐措施、采伐剩余物的处理、气候类型、森林类型和植被恢复时间的不同, 采伐的影响效果呈现不同的变化规律; ②采伐往往导致土壤自养呼吸减少, 异养呼吸增加, 土壤总呼吸表现为两者相抵的程度, 这种影响会随植被恢复程度的提高而减小; ③采伐后短期内Q₁₀有不同的变化规律, 长期往往会下降。未来关于采伐对森林土壤呼吸影响的研究应集中于土壤呼吸组分及其温度敏感性对采伐的响应, 同时应结合不同强度采伐、不同植被恢复阶段、其他营林措施和大气CO₂浓度上升等全球变化因子, 探讨采伐对区域土壤呼吸及组分的影响, 更好地理解采伐对森林生态系统碳循环的影响机制。表2参89

关键词: 皆伐; 部分采伐; 土壤呼吸; 土壤呼吸组分; 土壤温度敏感性(Q₁₀)

中图分类号: S714 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2021)05-1000-12

Research progress on effects of cutting on forest soil respiration

ZHU Wenjian^{1,2}, ZHANG Hui^{1,2}, WANG Yixiang^{1,2}

(1. College of Environment & Resources, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: Logging, as one of the routine forest management activities, is an important human interference measure affecting forest soil respiration, an important source of atmospheric CO₂. Therefore, research on the effects of logging on forest soil respiration has important scientific significance and application value for better understanding forest carbon cycle and coping with global climate change. This paper, with logging divided into two types: clear cutting and partial cutting (further classified as selective cutting, gradual cutting, thinning and regeneration cutting, etc.), is aimed to conduct a review of research advances on the effects of clear cutting and partial cutting on soil respiration, a discussion of the main mechanisms of clear cutting and partial cutting on soil respiration as well as a summary of the effects of current cutting on forest soil respiration and its components and soil temperature sensitivity (Q₁₀) with future research prospects put forward. Results showed that the researches on soil respiration are mainly focused on the following aspects: (1) the direction and extent

收稿日期: 2021-05-11; 修回日期: 2021-06-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31770681)

作者简介: 朱文见(ORCID: 0000-0001-6825-7169), 从事森林固碳增汇与减排研究。E-mail: 526259664@qq.com。

通信作者: 王懿祥(ORCID: 0000-0003-0642-195X), 教授, 博士, 从事森林固碳增汇经营和森林生态学
研究。E-mail: 391037046@qq.com

of the effect of clear cutting or cutting intensity on soil respiration; (2) the dynamic characteristics of soil respiration with time and environmental factors such as soil temperature after clear cutting or partial cutting; (3) effects of clear cutting or partial cutting on soil respiration components; (4) the effect of clear cutting or partial cutting on Q_{10} and (5) the effect mechanism of clear cutting or partial cutting on soil respiration. The main conclusions are as follows: (1) the effect of cutting varies with different cutting intensity, cutting measures, treatment of cutting residues, climate types, forest types and vegetation restoration time; (2) the results showed that the soil autotrophic respiration usually decreased and heterotrophic respiration usually increased after logging, and the total soil respiration showed that autotrophic respiration and heterotrophic respiration offset each other, and this effect would decrease with the increase of vegetation restoration. It is proposed that further efforts should be focused on the impact of different intensity of harvesting, different vegetation restoration stages, other forest management measures and rising atmospheric CO_2 concentration on regional soil respiration and components, so as to better understand the impact mechanism of harvesting on forest ecosystem carbon cycle. [Ch, 2 tab. 89 ref.]

Key words: clear cutting; partial cutting; soil respiration; soil respiration components; Q_{10}

全球土壤碳储量约为 1 500 Pg, 超过全球陆地植被碳储量和大气碳储量之和^[1]。土壤呼吸年均释放 80~95 Pg 二氧化碳-碳 (CO_2 -C) 到大气中^[2-3], 是化石燃料燃烧产生二氧化碳排放量的 11 倍以上^[4-5], 是陆地生态系统第二大碳通量。全球范围内, 森林在减缓气候变化方面发挥着重要的作用^[6]。作为地下生态过程的土壤呼吸显著影响着陆地生态系统的碳循环^[7], 其通量过程已成为全球变化生态学研究的核心和焦点之一。一方面, 大气中 CO_2 等温室气体的增加是导致全球气候变化的主要原因。另外一方面, 全球气候变化也会加速土壤呼吸速率, 进一步增加 CO_2 年排放量。 CO_2 排放与全球气候变化的正反馈作用将放大全球气候变化对陆地生态系统的影响, 因此备受学术界和各国政府关注^[5, 8]。森林是陆地生态系统中最大的碳库, 其面积约占陆地面积的 1/3, 对全球碳收支有着重要影响。森林土壤碳储量约占森林生态系统碳储量的 2/3, 约占全球土壤碳储量的 39%^[9-10]。森林土壤不仅是植被生长的基础, 也是 CO_2 的源、汇地之一, 通过土壤呼吸排放到大气中的 CO_2 是大气的重要碳源^[11]。在碳中和背景下, 被关注的重点是非自然变动引起的森林土壤呼吸的增加或减少, 这种变化量才是森林生态系统的有效碳源或碳汇。森林生态系统中的人为干扰 (如森林经营活动) 能在很大程度上影响土壤 CO_2 排放^[12]。其中, 森林采伐作为最重要的经营措施及干扰程度最大的人为干扰活动之一, 通过改变植被组成、林内光照、凋落物质量、数量及土壤温湿度等进而影响着土壤 CO_2 排放。学者们针对不同气候带的森林开展了多种采伐方式对土壤呼吸影响的研究, 但是结论并不一致, 存在很大的不确定性。科学认识采伐干扰下森林土壤 CO_2 排放的特征, 探讨减少土壤呼吸的森林经营措施对于增强森林的固碳减排功能具有重要的科学意义和实践价值。为此, 本研究综述了不同采伐方式对森林土壤呼吸的影响及其机制, 主要包括不同采伐方式处理下、不同森林类型对于森林土壤呼吸总量、土壤呼吸组分及其温度敏感性 (Q_{10}) 的影响, 并总结了采伐对土壤呼吸影响的调控因子, 在此基础上, 提出了该领域的研究前景, 以期为中国选择合理的采伐方式, 降低森林土壤 CO_2 排放, 2060 年实现碳中和提供参考。

1 土壤呼吸的组成

土壤释放 CO_2 的过程称为土壤呼吸, 包括 3 个生物学过程和 1 个非生物学过程^[13]。3 个生物学过程分别是自养呼吸、土壤微生物异养呼吸和土壤动物异养呼吸。植物根系与根际呼吸产生的 CO_2 排放, 称为自养呼吸; 微生物分解土壤有机质产生的 CO_2 排放, 称为土壤微生物异养呼吸; 土壤动物呼吸产生的 CO_2 排放, 称为土壤动物异养呼吸^[13]。非生物学过程是指土壤含碳矿物质化学氧化产生的 CO_2 排放^[13], 其产生的 CO_2 量远少于生物学过程而通常被忽略不计。

土壤呼吸组分因其产生途径、产生部位和所利用碳源的不同有着不同的术语表达, 且经常存在土壤呼吸组分术语混用的问题^[14]。在分析森林采伐对土壤呼吸的影响时, 可以以采伐影响土壤呼吸的产生途

径、产生部位和碳源等某一方面为主进行分析。从土壤 CO_2 排放的产生途径来分析,可以分为自养呼吸 (autotrophic respiration) 和异养呼吸 (heterotrophic respiration)^[8, 15]。从土壤 CO_2 排放的产生部位来分析,可分为根际区、无根系影响的土壤和凋落物层 3 个部位^[16]。从土壤 CO_2 排放所利用的碳源来分析,可以分为土壤有机质源 CO_2 和植物源 CO_2 (包括凋落物源、死根源、活根源)^[17-19]。

2 采伐对森林土壤总呼吸的影响

森林采伐是一种非常普遍的经营作业方式,一般分为针对成熟林或过熟林的皆伐、择伐和渐伐等主伐、针对中幼龄林的间伐以及针对防护林的更新采伐。皆伐是将伐区上的林木一次性全部伐除或几乎伐除(保留部分母树)的主伐方式。择伐、渐伐、间伐、更新采伐都是仅将伐区上的林木移除一部分,为方便叙述,本研究统一称它们为部分采伐。森林采伐要砍伐林分中的所有或部分林木,势必会降低冠层覆盖,去除林分或改变林分结构,影响各种环境因子,进而影响土壤呼吸。

2.1 皆伐对森林土壤总呼吸的影响

目前,关于皆伐影响土壤总呼吸的研究有很多,结果并不一致(表 1),可以分为增加、不变、减少 3 种结论。通常认为皆伐短期内会增加土壤总呼吸^[20]: 锐齿栎 *Quercus aliena* 皆伐 4 个月后土壤总呼吸增加 5%^[21]; 挪威云杉 *Picea abies* 林皆伐后第 2 年土壤总呼吸增加 29%, 第 3 年增加 52%^[22]; 云杉 *Picea asperata* 林皆伐后 2 a 土壤总呼吸增加 50%^[23]。其主要原因有: ①土壤温度升高提升了异养呼吸速率。林地皆伐后土壤受阳光直射,其温度会发生剧烈的变化^[24],从而提升了土壤有机质的分解速率和土壤微生物异养呼吸^[21],大量研究表明土壤温度提升可以解释 85%~98% 的土壤呼吸变化^[25-29]。②土壤有机质增加。皆伐林地内残留的死根、凋落物和伐木残留物的丰富和矿化导致土壤呼吸在皆伐后几年内增加^[23]。③土壤理化性质变化。皆伐会通过影响土壤理化性质,进而影响土壤呼吸。皆伐影响土壤氮含量,土壤氮能加速植物生长,影响土壤根呼吸,同时土壤氮也是土壤微生物的重要影响因子;皆伐还会影响土壤 pH,土壤 pH 通过调控土壤中化学反应的进程和土壤酶活性来间接影响土壤呼吸^[30]。还有研究表明皆伐会影响土壤全碳、全氮、碳氮比、速效氮磷钾和土壤容重等,而这些都是土壤呼吸的影响因子^[31-35]。

也有少数研究认为,皆伐造成的根呼吸降低大于采伐造成的异养呼吸增加,因此皆伐造成土壤总呼吸的降低^[36]。杉阔混交林皆伐第 5 年土壤呼吸减少 48%^[37]。云杉林皆伐 1 a 后土壤呼吸减少 29%^[38]。皆伐减少土壤呼吸的原因主要有: ①皆伐后土壤自养呼吸显著下降。根呼吸占土壤呼吸的 50%^[39],皆伐迹地植被活根的减少会导致土壤自养呼吸速率下降^[40],当自养呼吸下降幅度大于异养呼吸的增加幅度时土壤总呼吸速率表现为降低^[21]。②皆伐后采伐剩余物的清除方式。皆伐后火烧或清除采伐剩余物、清理凋落物等都会减少土壤有机质输入,从而减少碳输入^[41],微生物的异养呼吸会在一段时间后消耗掉大量的土壤碳^[42],减少皆伐迹地土壤碳含量,进而降低土壤呼吸。③皆伐迹地植被恢复的时间不同。从皆伐后立即开展研究到皆伐后若干年开展研究,观察到的皆伐迹地恢复阶段不统一,导致相同气候和人为干扰措施可能因为不同植被恢复阶段而得到不同的研究结论。

还有研究发现皆伐对土壤呼吸无显著影响。例如: 杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林皆伐后第 25 年土壤呼吸未发生明显变化^[43]。杨玉盛等^[25]发现杉木林皆伐后土壤呼吸的变化不显著。皆伐后土壤呼吸变化不大的原因可能有: ①土壤异养呼吸的增加弥补了根呼吸的减少导致了土壤总呼吸基本不变。皆伐后根系呼吸的下降和物质输入的消失可降低土壤自养呼吸,而采伐剩余物的分解增加及新近死亡的根系分解可能促进土壤异养呼吸,两方面综合作用可能导致土壤总呼吸的不变^[25]。也有研究表明,皆伐后土壤微生物呼吸的增加与根呼吸的减少相抵消,从而使得土壤总呼吸未发生明显变化^[44-45]。②研究区微地形的影响和地下潜在因素众多,尤其是皆伐后林区排水能力的变化影响地下水位,进一步影响微生物活性,本应增加的土壤微生物呼吸未发生明显变化,导致土壤呼吸未发生明显变化^[43]。

综上所述,皆伐对土壤呼吸影响的效果因皆伐措施的不同、森林类型的不同和伐后恢复时间的不同呈现显著的时空和地域异质性^[46-47]。

2.2 部分采伐对森林土壤呼吸的影响

部分采伐对森林土壤呼吸影响的研究相对于皆伐较少^[48]。部分采伐收获了部分林木,对林分及其土壤的干扰程度相比皆伐较低。从目前的研究情况(表 2)来看,部分采伐对土壤呼吸影响的研究结果也不一致,有增加^[49-50],减少^[36, 51]和基本不变^[52-54]共 3 类。有关部分采伐对土壤呼吸影响的研究常聚焦于不

同采伐强度的影响上。如马尾松 *Pinus massoniana* 林间伐 15% 和间伐 70% 后 1 a 内土壤呼吸分别为保持不变和增加 17%^[55]; 杉阔混交林间伐 35%、49% 和 68% 第 5 年土壤呼吸分别增加 15%、增加 16% 和减少 10%^[37]。毛竹 *Phyllostachys edulis* 林择伐 24% 第 3~8 个月土壤呼吸减少 16%^[56]。糖枫 *Acer saccharum* 林间伐 35% 第 5~10 个月土壤呼吸减少 19%^[57]。白桦 *Betula platyphylla* 沼泽林渐伐 45% 第 8~13 个月土壤呼吸减少 15%^[58]。

部分采伐增加土壤呼吸的原因有: ①部分采伐减小了森林郁闭度, 林下光照强度增加导致土壤温度增加, 促进土壤有机质分解, 从而增加土壤异养呼吸, 同时也促进植物根系的生长, 增加土壤自养呼吸^[49]; ②部分采伐后采伐剩余物例如木屑和树枝树叶等进入土壤, 为土壤微生物活动提供底物, 增加土壤异养呼吸^[59]。部分采伐降低土壤呼吸可以归因为: ①部分采伐时整株植物被移除, 凋落物减少, 碳底物供应下降导致土壤呼吸减弱^[56]。②部分采伐后乔木层减少, 树木蒸腾作用减弱, 地下水位上升, 土壤孔隙减少, 导致土壤呼吸减小^[58]。部分采伐对土壤呼吸无显著影响可能是因为: ①部分采伐提高了土壤异养呼吸, 但又同时降低了根呼吸, 综合作用下部分采伐对土壤呼吸无影响^[55]。②部分采伐后林地凋落物储量、有机碳储量、土壤总孔隙度及细根生物量仍能维持较高的水平, 与对照相比土壤呼吸未发生显著变化^[37]。

总体上, 部分采伐对土壤湿度、细根生物量和土壤碳储量 (包括土壤总碳含量、土壤有机碳和微生物量碳) 无显著影响。但是部分采伐会导致凋落物等显著减少, 土壤温度升高, 土壤总呼吸上升。轻度和中度部分采伐显著增加土壤呼吸, 尤其是在植被恢复的早期阶段 (≤ 2 a)^[60]。

3 采伐对森林土壤呼吸组分的影响

虽然近些年来对土壤呼吸组分的研究大幅度增加 (表 1 和表 2), 但是与采伐对森林土壤呼吸影响的研究相比, 采伐对土壤呼吸组分影响的研究要少得多。土壤自养呼吸和土壤异养呼吸受到土壤温度、土壤湿度和细根生物量等一系列因素的影响^[44]。

3.1 皆伐对森林土壤呼吸组分的影响

皆伐导致细根大量死亡, 土壤自养呼吸显著下降^[37]。皆伐后森林乔木层消失, 太阳直射地表导致土壤温度升高, 地表水分加速蒸发^[61]。地表温度的上升促进了枯枝落叶层和表层土壤有机质的分解^[29]; 皆伐带来的新鲜采伐剩余物为土壤微生物提供了大量的碳源^[62], 以上 2 点原因导致了皆伐后土壤异养呼吸增加^[63]。但此部分碳源分解较快, 长时间土壤异养呼吸下降会导致土壤异养呼吸短时间内增加长时间内减少, 其他研究也佐证了这一结论。例如苏格兰松 *Pinus sylvestris* 皆伐第 1 年土壤异养呼吸增加 23%, 第 2 年减少 16%, 第 3 年减少 20%^[64]。这是因为皆伐时产生的碎木屑进入土壤, 增加了土壤微生物呼吸的底物, 导致了土壤异养呼吸的增加, 但是这部分底物很少, 在第 2 年和第 3 年时底物分解殆尽, 土壤异养呼吸下降。杉阔混交林皆伐第 5 年土壤自养呼吸减少 48%, 土壤异养呼吸减少 34%^[37]。这是因为皆伐收获了林木, 植物根大量死亡, 土壤自养呼吸显著下降, 同时皆伐后林地凋落物、土壤总孔隙度和土壤有机质都出现了明显的下降, 土壤异养呼吸显著下降。苏格兰松和挪威云杉在皆伐第 22 年土壤异养呼吸减少 10%^[65]。而这可能是因为此研究采用挖掘机收获伐桩, 比起用带有刀片的推土机, 对土壤的扰动更小, 不同收获方式导致土壤呼吸的变化不同。

总体来看, 与对照组相比, 皆伐破坏了森林地上植被, 导致根系死亡, 土壤自养呼吸下降; 皆伐后保留采伐剩余物短时间内土壤异养呼吸增加, 长时间后则土壤异养呼吸会下降。这是因为保留采伐剩余物为土壤微生物呼吸和土壤动物呼吸提供了碳源, 但是这种碳源易分解, 短时间内会释放大量 CO_2 , 长时间后则易分解有机质减少, 土壤异养呼吸下降。同时皆伐砍伐灌木、清除草本和根系分解可能补偿根系和根际呼吸的减少^[66]。

3.2 部分采伐对森林土壤呼吸组分的影响

部分采伐主要通过以下两方面影响土壤呼吸组分: ①不同的采伐剩余物处理方法对土壤微生物底物的供应不同, 影响土壤微生物呼吸, 从而影响土壤异养呼吸。②部分采伐强度不同, 对植物根的破坏程度不同, 对土壤自养呼吸的影响也不同。例如, 马尾松林间伐 15% 和 70% 在 1 a 内 (仅移除树干) 土壤自养呼吸分别减少 14% 和增加 11%, 土壤异养呼吸分别增加 11% 和 22%。这是因为 15% 间伐清除了林下灌木和部分林下树种, 这些植被细根比例大且分布较浅, 清除后可能会显著降低表层土壤根系生物量, 导致土壤自养呼吸减少^[55]; 70% 间伐导致地上植被减少, 但是充足的养分会促进剩余植被的生长,

导致根系生物量增加,进而增加根呼吸,原本应减少的根呼吸无显著变化^[55];2种强度的采伐后林地残留的伐根死亡为土壤异养呼吸增加了底物,同时活立木的减少改变了林木微环境,为土壤微生物活动创造了适宜的条件,导致土壤异养呼吸增加^[67-68]。油松 *Pinus tabulaeformis* 人工林择伐 20%、30% 和 40% 第 2~7 个月(采伐剩余物清除)土壤自养呼吸分别增加 18%、64% 和 290%,土壤异养呼吸分别减少 6%、增加 19% 和增加 30%^[69]。此研究中随着林分密度的递减,林地总活根量密度增大,而总活根量在一定程度上决定根呼吸,故随采伐强度增加,土壤自养呼吸越强。随着采伐强度的增加,进入土壤的枯枝落叶增加,而枯枝落叶层的覆盖对土壤 CO₂ 的排放有一定的阻碍^[70],故对照组异养呼吸低于处理组。毛竹林间伐 24% 第 3~8 个月土壤异养呼吸增加 28%,土壤自养呼吸减少 29%^[56]。这是因为采伐后林地表面温度升高,地上碳供应减少,根基分泌物减少,导致土壤有机碳分解增加,土壤矿质呼吸增加,而根呼吸的下降可能是因为底物供应的下降^[71]。杉阔混交林择伐 35%、49% 和 68% 第 5 年(采伐剩余物长

表 1 土壤呼吸及其组分对皆伐的响应

Table 1 Response of soil respiration and its components to clear cutting

地点	气候带	皆伐更新 方式	剩余物 处理方式	伐后时 间/a	观察时间	森林类型	总呼吸/ %	自养呼吸/ %	异养呼吸/ %	Q ₁₀ /%	参考文献
中国福建省	亚热带	1	5 cm以上收集, 以下归堆清理	5~6	整年	杉阔混交林	-37	-48	-34	-17	[37]
中国黑龙江省	温带	1		1	生长季	白桦沼泽	-6				[58]
中国吉林省	温带	1	主干移除 枝叶未清	12~13	生长季	阔叶红松林	-25			-35	[72]
美国加利福尼亚州	温带	1		1~2	整年	云杉林	-29				[38]
中国甘肃省	暖温带	1		1	4个月后整年	锐齿栎	5				[21]
俄罗斯莫斯科州	温带	1	凋落物保留 剩余物保留	1~2	生长季	云杉林	50 50				[23]
芬兰	温带	1	保留	1	整年		-16			16	[22]
				2	整年	挪威云杉	29			17	
				3	整年		52			25	
美国密苏里州	热带		主干移除 全移除	2~4	整年	栎-山核桃林	-18 -17				[73]
				1	整年				23		
芬兰	温带	1	全部移除	2	整年	苏格兰松			-16		[64]
				3	整年				-20		
加拿大魁北克省	寒带	1					16				[74]
		2		6~7	整年	黑云杉	9				
加拿大新斯科舍省	温带	3		3~4	整年	混合杉木林	-1				[43]
中国浙江省	亚热带	1		25~26	整年	杉木林	17			-15	[75]
瑞典乌普萨拉省	温带	4	树干树桩收获 树冠枝条保留	21~22	整年	苏格兰松 挪威云杉			-10		[65]
五大湖流域	温带			1	生长季	糖枫	-7				[57]
日本	温带	4	保留竹类	1~3	整年	寒温带针阔 混交林	17				[76]
日本	温带	4	保留竹类	1~10	整年	寒温带针阔 混交林	61				[77]
马来西亚	热带	1	树干收获, 其余保留	1~2	5个月	重红婆罗双林 龙脑香林	不变 不变				[44]

表 1 (续)

Table 1 Continued

地点	气候带	皆伐更新方式	剩余物处理方式	伐后时间/a	观察时间	森林类型	总呼吸/ %	自养呼吸/ %	异养呼吸/ %	Q ₁₀ /%	参考文献
韩国	温带	4		1	整年	红松林	41				[78]
中国浙江省	亚热带	1	移除	1	整年	杉木林	-15			-20	[79]
		5	火烧				-27			-27	
中国浙江省	亚热带	1	保留	2	整年	杉木林	13			-10	[79]
		1	保留且翻土				32			-11	
中国浙江省	亚热带	1	保留	3	整年	杉木林	16			-10	[79]
		1	保留且翻土				30			-12	
英国英格兰	温带	1		1	整年	云杉	-22				[80]
				2			-42				
				3			-30				
				4			-10				
马来西亚	热带	1		1~9	隔4周测2周	阔叶混交林	13				[81]
				2			16			14	
				3			11			33	
				4			20			48	
日本	亚热带	1	清除	5	每年5~10月	天然混交林	5			57	[82]
				6			5			67	
				7			20			29	
				8			4			38	

说明：皆伐更新方式中1表示皆伐后自然恢复，2表示皆伐后翻土，3表示皆伐后喷洒除草剂，4表示皆伐后人工种植，5表示皆伐后火烧。
栎*Quercus* spp.，山核桃*Carya* spp.，黑云杉*Picea mariana*，重红婆罗双*Shorea* spp.，龙脑香*Dipterocarpus* spp.，红松
Pinus koraiensis。空白表示无此项观测记录

度 5 cm 以上收集以下归堆清理) 土壤自养呼吸分别增加 14%、增加 13% 和减少 5%，土壤异养呼吸分别增加 15%、增加 17% 和减少 12%^[37]，而这些差异在统计学上并不显著。这是因为择伐后林地凋落物储量、土壤总孔隙度、有机碳储量、有机质和细根生物量仍维持在较高的水平，土壤呼吸组分未发生显著变化。

可以看出，部分采伐对土壤呼吸组分的影响会随着采伐剩余物处理方式的不同而发生显著的变化，保留采伐剩余物短时间内通常会增加土壤异养呼吸；同时林分根系的生长也会随着伐后恢复的程度而得到增强，伐后恢复时间越久，部分采伐对土壤呼吸组分的影响越小。

4 采伐对土壤呼吸温度敏感性的影响

土壤温度是影响土壤呼吸的重要环境因子，土壤呼吸的温度敏感性用 Q_{10} 来表示，是指土壤呼吸随温度每升高 10 °C 所增加的倍数。 Q_{10} 值不仅随地理位置、森林生态系统的不同而不同，也会受到人为干扰活动如采伐的影响。

皆伐对土壤呼吸温度敏感性的影响主要取决于皆伐迹地植被恢复的时间。例如欧洲云杉皆伐 1~3 a Q_{10} 连年上升，第 1 年增加 16%，第 2 年增加 17%，第 3 年增加 25%^[22]，阔叶红松林皆伐 13 a 后生长季 Q_{10} 减少 35%^[72]，但杉木林皆伐 1~3 a 无论是移除还是保留采伐剩余物 Q_{10} 皆下降^[79]。而杉阔混交林皆伐 5 a 后 Q_{10} 减少 17%^[37]。由于皆伐后采伐剩余物管理方式的不同，进入土壤的易分解有机质有多有少，短期内 Q_{10} 也表现出不同的变化规律，但长期后因为皆伐迹地植被的恢复，土壤温度敏感性基本呈现下降的趋势。

部分采伐对土壤温度敏感性的影响主要取决于部分采伐的强度，但是不同研究的结果并不统一。低强度部分采伐下，短时间内 Q_{10} 通常增加，毛竹林 23% 间伐 1 a 后 Q_{10} 增加 3%^[83]，油松人工林 20% 间

表2 土壤呼吸及其组分对部分采伐的响应

Table 2 Response of soil respiration and its components to partial cutting

地点	气候带	部分采伐 强度/%	剩余物 处理方式	伐后时 间/a	观察时间	森林类型	总呼吸/ %	自养呼吸/ %	异养呼吸/ %	Q ₁₀ /%	参考文献
中国湖北省	亚热带	除灌	清理				-17	-17	-18		
		15	移除树干	1	整年	马尾松林		-14	11		[56]
		70	移除树干				17	11	22		
中国山西省	温带	20					-4	18	-6	6	
		30	清除	1	生长季	油松人工林	23	64	19	-30	[69]
		40					52	290	30	-13	
中国湖北省	亚热带	24		1	生长季	毛竹林	-16	28	-29	9	[56]
中国福建省	亚热带	35					15	14	15	52	
		49	5 cm以上收集, 以下归堆	5~6	整年	杉阔混交林	16	13	17	34	[37]
		68					-10	-5	-12	-1	
中国黑龙江省	温带	45		1	生长季	白桦沼泽	-15				[58]
中国陕西省	温带	15					-5			47	
		35	清除采伐剩余物	3~4	生长季	华北落叶松	16			3	[84]
		50					-3			15	
中国陕西	温带	12									
		32		1~4	生长季	华北落叶松	17				[28]
		47									
斯洛文尼亚	温带	50		1~3	生长季	山毛榉林	47				[85]
		100					69				
		20					23				
中国黑龙江省	温带	39					22				
		52	堆腐	1~4	生长季	针阔混交林	24				[59]
		62					27				
挪威	寒带	71					22				
		41		32~33	夏季	挪威云杉	13				[86]
		55					17				
加拿大安大略省	温带	50		2	生长季	耐寒阔叶林	54				[57]
爱尔兰	温带	42		1~2	整年	云杉	13				[87]
日本	亚热带	50		2~4	整年	日本雪松林	46			-	[88]
加拿大安大略省	温带			1			17			-25	
		28		2	生长季	杉阔混交林	18			-6	[50]
				3			16			19	
中国湖北省	亚热带	23	手工除草为对照 除草剂除草为处理	1	整年	毛竹林	-7	20	-13	3	[83]
斯洛文尼亚	温带	50		1~3	生长季	云杉林/冷杉林	26				[85]
		100					48				
中国湖北省	亚热带	15		1~3	全年	马尾松林	29	14	39		[89]
		70	清除				42	19	59		

说明：日本雪松*Cryptomeria japonica*。空白表示无此项观测记录；-表示减少

伐 1 a 后生长季 Q_{10} 增加 6%^[69], 毛竹林 24% 间伐 1 a 后生长季 Q_{10} 增加 9%^[56], 杉阔混交林 35% 和 49% 间伐 5~6 a 内 Q_{10} 分别增加 52% 和 34%^[37], 华北落叶松 15% 间伐 3~4 a 内生长季 Q_{10} 增加 47%^[84]。但是也有结果相反的研究, 例如杉阔混交林 28% 间伐 1、2 a 后 Q_{10} 分别减少 25% 和 6%, 这和此研究中夏季降雨量减小有关。高强度采伐后 Q_{10} 的变化并不统一, 例如油松人工林 40% 间伐 1 a 后生长季 Q_{10} 减少 13%^[69], 杉阔混交林间伐 68% 5~6 a 内 Q_{10} 减少 1%^[37], 华北落叶松 50% 间伐 3~4 a Q_{10} 增加 15%^[74]。这可能是因为高强度部分采伐后林窗面积增大, 其他植物荫蔽林窗的能力受到当地气候等因素的影响。从以上研究中可以看出, 一部分研究结果呈现轻度、中度部分采伐短时间内 Q_{10} 增加的趋势, 随着植被的恢复, Q_{10} 也逐渐接近对照林。但是也有部分研究受到其它因素例如降雨量变化的影响, 结果与上述研究相反。

5 展望

总体上皆伐会破坏森林植被, 造成植物根系大量死亡, 土壤自养呼吸降低, 同时皆伐将更多的枯枝落叶带入土壤, 加上死亡的植物根系, 土壤异养呼吸增加。两者共同作用决定了土壤总呼吸的变化, 如果皆伐后对皆伐迹地进行清理, 土壤总呼吸往往会下降, 如果皆伐迹地内采伐剩余物较多, 土壤总呼吸可能会先上升后下降。与皆伐相比, 部分采伐对森林的干扰程度不同, 一定强度的部分采伐可能会增加土壤总呼吸, 随着部分采伐强度的增大, 土壤呼吸的变化接近皆伐迹地内土壤呼吸的变化。

森林土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的重要组成部分, 在全球气候变化中起着重要的作用。皆伐或部分采伐作为重要的人为干扰经营措施, 对森林林冠、覆盖率、枝叶雨水截流、土壤温度、土壤湿度等土壤理化性质和土壤呼吸有着显著的影响。森林不同强度部分采伐对伐后植被不同恢复阶段土壤呼吸和土壤碳储量的影响尚不清晰, 建议加强土壤呼吸组分对部分采伐强度响应的长期研究。除此之外, 森林采伐和林下除灌、除草、定期打枝等其他经营措施的交互作用以及全球大气 CO_2 浓度上升等全球变化因子对区域森林变化也应纳入考量中。

6 参考文献

- [1] BATJES N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. *Eur J Soil Sci*, 1996, **47**(2): 151 – 163.
- [2] RAICH J W, POTTER C S, BHAGAWATI D. Interannual variability in global soil respiration, 1980–94 [J]. *Global Change Biol*, 2010, **8**(8): 800 – 812.
- [3] BOND-LAMBERTY B, THOMSON A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record [J]. *Nature*, 2010, **464**(7288): 579 – 582.
- [4] XU Ming, SHANG Hua. Contribution of soil respiration to the global carbon equation [J]. *J Plant Physiol*, 2016, **203**: 16 – 28. doi: 10.1016/j.jplph.2016.08.007.
- [5] BONAN G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests [J]. *Science*, 2008, **320**(5882): 1444 – 1449.
- [6] LUYSSAERT S, MARIE G, VALADE A, *et al.* Trade-offs in using European forests to meet climate objectives [J]. *Nat Int Weekly J Sci*, 2018, **562**(7726): 259 – 262.
- [7] 方精云, 王妮. 作为地下过程的土壤呼吸: 我们理解了多少?[J]. *植物生态学报*, 2007, **31**(3): 345 – 347.
FANG Jingyun, WANG Wei. Soil respiration as a key belowground process: issues and perspectives [J]. *J Plant Ecol Chin Version*, 2007, **31**(3): 345 – 347.
- [8] BOND-LAMBERTY B, WANG C, GOWER S T. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration? [J]. *Global Change Biol*, 2004(10): 1756 – 1766.
- [9] DIXON R K, BROWN S, HOUGHTON R A, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. *Science*, 1994, **263**(5144): 185 – 190.
- [10] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [11] SCHLESINGER W H, ANDREWS J A. Soil respiration and the global carbon cycle [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 7 – 20.
- [12] CHENG Lijing, ZHU Jiang. Influences of the choice of climatology on ocean heat content estimation [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2014, **32**(2): 388 – 394.

- [13] PRIES C H, ANGERT A, CASTANHA C, *et al.* Using respiration quotients to track changing sources of soil respiration seasonally and with experimental warming [J]. *Biogeosciences*, 2020, **17**(12): 3045 – 3055.
- [14] 庞蕊, 刘敏, 李美玲, 等. 土壤碳排放组分区分的研究进展[J]. 生态学杂志, 2017, **36**(8): 2327 – 2335.
PANG Rui, LIU Min, LI Meiling, *et al.* Advances in research on the separation of soil carbon emissions [J]. *Chin J Ecol*, 2017, **36**(8): 2327 – 2335.
- [15] HANSON P J, EDWARDS N T, GARTEN C T, *et al.* Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 115 – 146.
- [16] KUZUYAKOV Y, BOL R. Sources and mechanisms of priming effect induced in two grassland soils amended with slurry and sugar [J]. *Soil Biol Biochem*, 2006, **38**(4): 747 – 758.
- [17] SHI Peng, QIN Yanli, LIU Qi, *et al.* Soil respiration and response of carbon source changes to vegetation restoration in the Loess Plateau, China [J]. *Sci Total Environ*, 2020, **707**: 135507. doi: [10.1016/j.scitotenv.2019.135507](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135507).
- [18] 李健铭, 李志宏, 王鹏, 等. 不同碳源对植烟土壤碳平衡的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(1): 124 – 130.
LI Jianming, LI Zhihong, WANG Peng, *et al.* Effects of different carbon sources on carbon balance in tobacco soil [J]. *Soil Fert Sci*, 2021(1): 124 – 130.
- [19] TEMPLER P H, GROFFMAN P M, FLECKER A S, *et al.* Land use change and soil nutrient transformations in the Los Haitises region of the Dominican Republic [J]. *Soil Biol Biochem*, 2004, **37**(2): 215 – 225.
- [20] CONCILIO A, MA Siyan, LI Qinglin, *et al.* Soil respiration response to prescribed burning and thinning in mixed-conifer and hardwood forests [J]. *Can J For Res*, 2005, **35**(7): 1581 – 1591.
- [21] 康永祥, 夏国威, 刘建军, 等. 秦岭小陇山锐齿栎林皆伐迹地土壤呼吸特征[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(2): 342 – 350.
KANG Yongxiang, XIA Guowei, LIU Jianjun, *et al.* Soil respiration characteristics in the clear-cutting site of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest in Xiaolong Mountain in Qinling Mountains [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2014, **25**(2): 342 – 350.
- [22] KULMALA L, AALTONEN H, BERNINGER F, *et al.* Changes in biogeochemistry and carbon fluxes in a boreal forest after the clear-cutting and partial burning of slash [J]. *Agric For Meteorol*, 2014, **188**: 33 – 44.
- [23] MOLCHANOV A G, KURBATOVA Y A, OLCHEV A V. Effect of clear-cutting on soil CO₂ emission [J]. *Biol Bull*, 2017, **44**(2): 218 – 223.
- [24] WEBER M G. Forest soil respiration after cutting and burning in immature aspen ecosystems [J]. *For Ecol Manage*, 1990, **31**(1): 1 – 14.
- [25] 杨玉盛, 陈光水, 王小国, 等. 皆伐对杉木人工林土壤呼吸的影响[J]. 土壤学报, 2005, **42**(4): 584 – 590.
YANG Yusheng, CHEN Guangshui, WANG Xiaoguo, *et al.* Effect of clear-cutting on soil respiration of Chinese fir plantation [J]. *Acta Pedol Sin*, 2005, **42**(4): 584 – 590.
- [26] 刘颖, 韩士杰, 胡艳玲, 等. 土壤温度和湿度对长白松林土壤呼吸速率的影响[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(9): 1581 – 1585.
LIU Ying, HAN Shijie, HU Yanling, *et al.* Effects of soil temperature and humidity on soil respiration rate under *Pinus sylvestris* forest [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2005, **16**(9): 1581 – 1585.
- [27] WANG Chao, HUANG Rong, YANG Zhijie, *et al.* Dynamic changes of soil respiration in *Citrus reticulata* and *Castanea henryi* orchards in Wanmulin Nature Reserve, Fujian Province of East China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, **23**(6): 1469 – 1475.
- [28] CHENG Xiaoqin, HAN Hairong, ZHU Jiang, *et al.* Forest thinning and organic matter manipulation drives changes in soil respiration in a *Larix principis-rupprechtii* plantation in China [J]. *Soil Tillage Res*, 2021, **211**: 104996. doi: [10.1016/j.still.2021.104996](https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104996).
- [29] STRIEGL R G, WICKLAND K P. Effects of a clear-cut harvest on soil respiration in a Jack pine-Lichen woodland [J]. *Can J For Res*, 1998, **28**(4): 534 – 539.
- [30] LUO Yiqi, ZHOU Xuhui. *Soil Respiration and the Environment* [M]. [s.l.]: Academic Press, 2006: 257 – 305.
- [31] BAE K, LEE D K, FAHEY T J, *et al.* Seasonal variation of soil respiration rates in a secondary forest and agroforestry systems [J]. *Agrofor Syst*, 2013, **87**(1): 131 – 139.
- [32] 孙轶, 魏晶, 吴钢, 等. 长白山高山冻原土壤呼吸及其影响因子分析[J]. 生态学杂志, 2005, **24**(6): 603 – 606.
SUN Yi, WEI Jing, WU Gang, *et al.* Soil respiration and affecting factors on the alpine tundra of Changbai Mountain [J]. *Chin J Ecol*, 2005, **24**(6): 603 – 606.
- [33] 李晨华, 唐立松, 李彦. 干湿处理对灰漠土土壤理化性质及微生物活性的影响[J]. 土壤学报, 2007, **44**(2): 364 – 367.

- LI Chenhua, TANG Lisong, LI Yan. Effects of air-drying and rewetting on physico-chemical properties and microbial activity of desert grey soil [J]. *Acta Pedol Sin*, 2007, **44**(2): 364 – 367.
- [34] 徐洪灵, 张宏, 张伟. 川西北高寒草甸土壤理化性质对土壤呼吸速率影响研究[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2012, **35**(6): 835 – 841.
- XU Hongling, ZHANG Hong, ZHANG Wei. Influence of soil physical and chemical properties on soil respiration rate of alpine meadow in the northwestern plateau of Sichuan Province [J]. *J Sichuan Norm Univ Nat Sci*, 2012, **35**(6): 835 – 841.
- [35] 沈征涛, 王宝军, 施斌, 等. 温湿度对土壤 CO₂ 释放影响的试验研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2012, **48**(6): 761 – 767.
- SHEN Zhengtao, WANG Baojun, SHI Bin, *et al.* Experimental study on the influence of temperature and moisture on soil CO₂ release [J]. *J Nanjing Univ Nat Sci*, 2012, **48**(6): 761 – 767.
- [36] TANG Jianwu, QI Ye, XU Ming, *et al.* Forest thinning and soil respiration in a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada [J]. *Tree Physiol*, 2005, **25**(1): 57 – 66.
- [37] 巫志龙, 周成军, 周新年, 等. 不同强度采伐 5 年后杉阔混交人工林土壤呼吸速率差异[J]. *林业科学*, 2019, **55**(6): 142 – 149.
- WU Zhilong, ZHOU Chengjun, ZHOU Xinnian, *et al.* Difference in soil respiration rates of the mixed plantations of *Cunninghamia lanceolata* and broadleaved trees 5 years after harvesting at different intensities [J]. *Sci Silv Sin*, 2019, **55**(6): 142 – 149.
- [38] MORONI M T, CARTER P Q, RYAN D A J. Harvesting and slash piling affect soil respiration, soil temperature, and soil moisture regimes in Newfoundland boreal forests [J]. *Can J Soil Sci*, 2009, **89**(3): 343 – 355.
- [39] KOBZIAR L N, STEPHENS S L. The effects of fuels treatments on soil carbon respiration in a Sierra Nevada pine plantation [J]. *Agric For Meteorol*, 2006, **141**(2/4): 161 – 178.
- [40] NAKANE K, TSUBOTA H, YAMAMOTO M. Cycling of soil carbon in a Japanese red pine forest (II) Changes occurring in the first year after a clear-felling [J]. *Ecol Res*, 1986, **1**(1): 47 – 58.
- [41] 何姗, 刘娟, 姜培坤, 等. 经营管理对森林土壤有机碳库影响的研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2019, **36**(4): 818 – 827.
- HE Shan, LIU Juan, JIANG Peikun, *et al.* Effects of forest management on soil organic carbon pool: a review [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2019, **36**(4): 818 – 827.
- [42] GUO Jianfen, YANG Yusheng, CHEN Guangshui, *et al.* Effects of clear-cutting and slash burning on soil respiration in Chinese fir and evergreen broadleaved forests in mid-subtropical China [J]. *Plant Soil*, 2010, **333**(1/2): 249 – 261.
- [43] BEKELE A, KELLMAN L, BELTRAMI H. Soil profile CO₂ concentrations in forested and clear cut sites in Nova Scotia, Canada [J]. *For Ecol Manage*, 2007, **242**(2): 587 – 597.
- [44] 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, **148**(5): 799 – 806.
- [45] KAARAKKA L, HYVÖNEN R, STRÖMGREN M, *et al.* Carbon and nitrogen pools and mineralization rates in boreal forest soil after stump harvesting [J]. *For Ecol Manage*, 2016, **377**: 61 – 70.
- [46] 周成军, 巫志龙, 周新年, 等. 采伐强度对杉阔混交人工林凋落物及土壤理化性质的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2021. doi: [10.19675/j.cnki.1006-687x.2020.09035](https://doi.org/10.19675/j.cnki.1006-687x.2020.09035).
- ZHOU Chengjun, WU Zhilong, ZHOU Xinnian, *et al.* Impact of cutting intensity on litter and soil physicochemical property of the mixed plantations of *Cunninghamia lanceolata* and broadleaved trees [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2021. doi: [10.19675/j.cnki.1006-687x.2020.09035](https://doi.org/10.19675/j.cnki.1006-687x.2020.09035).
- [47] BAI Yanfeng, CHEN Shiyu, SHI Shuorong, *et al.* Effects of different management approaches on the stoichiometric characteristics of soil C, N, and P in a mature Chinese fir plantation [J]. *Sci Total Environ*, 2020, **723**: 137868. doi: [10.1016/j.scitotenv.2020.137868](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137868).
- [48] 严俊霞, 秦作栋, 张义辉, 等. 土壤温度和水分对油松林土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2009, **29**(12): 6366 – 6376.
- YAN Junxia, QIN Zuodong, ZHANG Yihui, *et al.* Effect of soil temperature and moisture on soil CO₂ efflux in a *Pinus tabulaeformis* forest [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29**(12): 6366 – 6376.
- [49] CHENG Xiaoqin, KANG Fengfeng, HAN Hairong, *et al.* Effect of thinning on partitioned soil respiration in a young *Pinus tabulaeformis* plantation during growing season [J]. *Agric For Meteorol*, 2015, **214/215**: 473 – 482.
- [50] SHABAGA J A, BASILIKO N, CASPERSEN J P, *et al.* Seasonal controls on patterns of soil respiration and temperature

- sensitivity in a northern mixed deciduous forest following partial-harvesting [J]. *For Ecol Manage*, 2015, **348**: 208 – 219.
- [51] SULLIVAN B W, KOLB T E, HART S C, *et al*. Thinning reduces soil carbon dioxide but not methane flux from southwestern USA ponderosa pine forests [J]. *For Ecol Manage*, 2008, **255**(12): 4047 – 4055.
- [52] MA Siyan, CHEN Jiquan, NORTH M, *et al*. Short-term effects of experimental burning and thinning on soil respiration in an old-growth, mixed-conifer forest [J]. *Environ Manage*, 2004, **33**(1): S148 – S159.
- [53] VESALA T, SUNI T, RANNIK Ü, *et al*. Effect of thinning on surface fluxes in a boreal forest [J]. *Glob Biogeochem Cycles*, 2005, **19**(2). doi: [10.1029/2004gb002316](https://doi.org/10.1029/2004gb002316).
- [54] KOBZIAR L N. The role of environmental factors and tree injuries in soil carbon respiration response to fire and fuels treatments in pine plantations [J]. *Biogeochemistry*, 2007, **84**(2): 191 – 206.
- [55] 雷蕾, 肖文发, 曾立雄, 等. 马尾松林土壤呼吸组分对不同营林措施的响应[J]. 生态学报, 2016, **36**(17): 5360 – 5370.
LEI Lei, XIAO Wenfa, ZENG Lixiong, *et al*. Responses of soil respiration and its components to forest management in *Pinus massoniana* stands [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36**(17): 5360 – 5370.
- [56] 唐晓鹿, 范少辉, 漆良华, 等. 采伐对幕布山区毛竹林土壤呼吸的影响[J]. 林业科学研究, 2013, **26**(1): 52 – 57.
TANG Xiaolu, FAN Shaohui, QI Lianghua, *et al*. Effect of cutting on soil respiration in *Phyllostachy edulis* forest, Mubushan, China [J]. *For Res*, 2013, **26**(1): 52 – 57.
- [57] LAPORTE M F, DUCHESNE L C, MORRISON I K. Effect of clearcutting, selection cutting, shelterwood cutting and microsites on soil surface CO₂ efflux in a tolerant hardwood ecosystem of northern Ontario [J]. *For Ecol Manage*, 2003, **174**(1): 565 – 575.
- [58] 孙程坤, 刘霞, 赵伟. 小兴安岭山区白桦沼泽土壤呼吸规律及其对采伐干扰的响应[J]. 林业勘查设计, 2019(1): 128 – 130.
SUN Chengkun, LIU Xia, ZHAO Wei. Regular pattern of soil respiration of *Betula platyphylla* swamps and the response to human disturbance in the Xiao Hinggan Mountains [J]. *For Invest Design*, 2019(1): 128 – 130.
- [59] 孟春, 王立海, 沈微. 择伐对小兴安岭针阔叶混交林土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(4): 729 – 734.
MENG Chun, WANG Lihai, SHEN Wei. Effects of selective cutting on soil respiration in conifer/broad-leaved mixed forests in Xiao-xing'anling [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2008, **19**(4): 729 – 734.
- [60] ZHANG Xinzong, GUAN Dexin, LI Weibin, *et al*. The effects of forest thinning on soil carbon stocks and dynamics: a meta-analysis [J]. *For Ecol Manage*, 2018, **429**: 36 – 43.
- [61] GORDON A M, SCHLENTNER R E, CLEVE K V. Seasonal patterns of soil respiration and CO₂ evolution following harvesting in the white spruce forests of interior Alaska [J]. *Can J For Res*, 1987, **17**(4): 304 – 310.
- [62] CHEN Guangshui, YANG Yusheng, XIE Jinsheng, *et al*. Soil biological changes for a natural forest and two plantations in subtropical China [J]. *Pedosphere*, 2004, **14**(4): 297 – 304.
- [63] EDWARDS N T, ROSS-TODD B M. Soil carbon dynamics in a mixed deciduous forest following clear-cutting with and without residue removal [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1983, **47**(5): 1014 – 1021.
- [64] MÄKIRANTA P, LAIHO R, PENTTILÄ T, *et al*. The impact of logging residue on soil GHG fluxes in a drained peatland forest [J]. *Soil Biol Biochem*, 2012, **48**: 1 – 9.
- [65] PERSSON T, LENOIR L, VEGERFORS B. Long-term effects of stump harvesting and site preparation on pools and fluxes of soil carbon and nitrogen in central Sweden [J]. *Scand J For Res*, 2016, **32**(3): 222 – 229.
- [66] PUMPANEN J. *CO₂ Efflux from Boreal Forest Soil before and after Clear-cutting and Site Preparation*[D]. Helsinki: University of Helsinki, 2003.
- [67] EPRON D, NGAO J, GRANIER A. Interannual variation of soil respiration in a beech forest ecosystem over a six-year study [J]. *Ann For Sci*, 2004, **61**(6): 499 – 505.
- [68] 孟春, 王立海, 沈微. 择伐对小兴安岭地区针阔混交林土壤呼吸温度敏感性的影响[J]. 林业科学, 2011, **47**(3): 102 – 106.
MENG Chun, WANG Lihai, SHEN Wei. Effect of sensitivity of soil respiration to soil temperature in a conifer-broadleaf forest in Xiaoxing'an Mountain after select cutting [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, **47**(3): 102 – 106.
- [69] 刘可, 韩海荣, 康峰峰, 等. 山西太岳山油松人工林生长季土壤呼吸对择伐强度的响应[J]. 生态学杂志, 2013, **32**(12): 3173 – 3181.
LIU Ke, HAN Hairong, KANG Fengfeng, *et al*. Responses of soil respiration to selective cutting intensity in *Pinus tabulaeformis* plantation in Taiyue Mountain of China during growing season [J]. *Chin J Ecol*, 2013, **32**(12): 3173 – 3181.

- [70] 骆士寿, 陈步峰, 李意德, 等. 海南岛尖峰岭热带山地雨林土壤和凋落物呼吸研究[J]. *生态学报*, 2001, **21**(12): 2013 – 2017.
LUO Tushou, CHEN Bufeng, LI Yide, *et al.* Litter and soil respiration in a tropical mountain rain forest in Jianfengling, Hainan Island [J]. *Acta Ecol Sin*, 2001, **21**(12): 2013 – 2017.
- [71] MA Siyan. *Interactions between Microclimate, Soil Respiration, and Disturbances in a Forest Ecosystem: Lessons from the Teakettle Experimental Forest in California's Sierra Nevada*[D]. Swiss Confederation: The University of Toledo, 2003.
- [72] 王旭, 周广胜, 蒋延玲, 等. 长白山阔叶红松林皆伐迹地土壤呼吸作用[J]. *植物生态学报*, 2007, **31**(3): 355 – 362.
WANG Xu, ZHOU Guangsheng, JIANG Yanling, *et al.* Soil respiration in a clear-cut broad-leaved Korean pine forest of Changbai Mountain [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2007, **31**(3): 355 – 362.
- [73] PONDER F. Effect of soil compaction and biomass removal on soil CO₂ efflux in a missouri forest [J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 2005, **36**(9/10): 1301 – 1311.
- [74] ULLAH S, FRASIER R, PELLETIER L, *et al.* Greenhouse gas fluxes from boreal forest soils during the snow-free period in Quebec, Canada [J]. *Can J For Res*, 2009, **39**(3): 666 – 680.
- [75] WANG Yixiang, ZHU Xudan, BAI Shangbin, *et al.* Effects of forest regeneration practices on the flux of soil CO₂ after clear-cutting in subtropical China [J]. *J Environ Manage*, 2018, **212**: 332 – 339.
- [76] TAKAGI K, FUKUZAWA K, LIANG N, *et al.* Change in CO₂ balance under a series of forestry activities in a cool-temperate mixed forest with dense undergrowth [J]. *Glob Change Biol*, 2010, **15**(5): 1275 – 1288.
- [77] AGUILOS M, TAKAGI K, LIANG N, *et al.* Dynamics of ecosystem carbon balance recovering from a clear-cutting in a cool-temperate forest [J]. *Agric For Meteorol*, 2014, **197**: 26 – 39.
- [78] KIM C. Soil CO₂ efflux in clear-cut and uncut red pine (*Pinus densiflora* S. et Z.) stands in Korea [J]. *For Ecol Manage*, 2008, **255**(8/9): 3318 – 3321.
- [79] BAI S, QIU W, ZHANG H, *et al.* Soil respiration following Chinese fir plantation clear-cut: comparison of two forest regeneration approaches [J]. *Sci Total Environ*, 2020. doi: [10.1016/j.scitotenv.2019.135980](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135980).
- [80] XENAKIS G, ASH A, SIEBICKE L, *et al.* Comparison of the carbon, water, and energy balances of mature stand and clear-fell stages in a British Sitka spruce forest and the impact of the 2018 drought [J]. *Agric For Meteorol*, 2021, **306**: 108437. doi: [10.1016/j.agrformet.2021.108437](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108437).
- [81] RIUTTA T, KHO L K, TEH Y A, *et al.* Major and persistent shifts in below-ground carbon dynamics and soil respiration following logging in tropical forests[J]. *Global Change Biol*, 2021, **27**(10): 15522. doi: [10.1111/gcb.15522](https://doi.org/10.1111/gcb.15522).
- [82] SUN Lifei, TAKAGI K, TERAMOTO M, *et al.* Inter-annual variation of soil respiration and its spatial heterogeneity in a cool-temperate young larch plantation in northern Japan [J]. *J Agric Meteorol*, 2020, **76**(3): 119 – 127.
- [83] TANG Xiaolu, GUAN Fengying, DU Manyi, *et al.* A comparison of soil respiration, carbon balance and root carbon use efficiency in two managed Moso bamboo forests in subtropical China [J]. *Ann For Res*, 2016, **59**(1): 3 – 20.
- [84] 彭信浩, 韩海荣, 徐小芳, 等. 间伐和改变凋落物输入对华北落叶松人工林土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2018, **38**(15): 5351 – 5361.
PENG Xinhao, HAN Hairong, XU Xiaofang, *et al.* Thinning treatment and litterfall changes influence soil respiration in a *Larix principis-rupprechtii* plantation [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38**(15): 5351 – 5361.
- [85] MATJAZ Č, EVA D, PRIMOŽ S. Harvesting intensity and tree species affect soil respiration in uneven-aged Dinaric forest stands [J]. *For Ecol Manage*, 2021, **480**: 118638. doi: [10.1016/j.foreco.2020.118638](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118638).
- [86] NILSEN P, STRAND L T. Thinning intensity effects on carbon and nitrogen stores and fluxes in a Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stand after 33 years [J]. *For Ecol Manage*, 2008, **256**(3): 201 – 208.
- [87] OLAJUYIGBE S, TOBIN B, SAUNDERS M, *et al.* Forest thinning and soil respiration in a Sitka spruce forest in Ireland [J]. *Agric For Meteorol*, 2012, **157**: 86 – 95.
- [88] OHASHI M, GYOKUSEN K, SAITO A. Measurement of carbon dioxide evolution from a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forest floor using an open-flow chamber method [J]. *For Ecol Manage*, 1999, **123**(2): 105 – 114.
- [89] LEI Lei, XIAO Wenfa, ZENG Lixiong, *et al.* Thinning but not understory removal increased heterotrophic respiration and total soil respiration in *Pinus massoniana* stands [J]. *Sci Total Environ*, 2018, **621**: 1360 – 1369.