

碳输入方式对森林土壤碳库和碳循环的影响研究进展*

王清奎**

(中国科学院沈阳应用生态研究所会同森林生态实验站, 沈阳 110016)

摘要 凋落物和植物根系是森林土壤有机碳的主要来源. 综述了不同碳输入方式对土壤全碳、微生物生物量碳和可溶性有机碳等碳库组分及土壤呼吸影响的研究进展. 不同地区、不同森林土壤有机碳对碳输入的响应程度不同, 且采用添加和去除凋落物, 以及去除根系方法(DIRT)对土壤碳的影响具有树种差异和区域差异. 目前主要侧重于土壤呼吸和碳库组分的研究, 亟需开展对土壤碳的结构类型和稳定性, 以及土壤生物尤其是土壤动物的响应机制的相关研究.

关键词 凋落物 根系 土壤碳库 土壤呼吸

文章编号 1001-9332(2011)04-1075-07 **中图分类号** S714 **文献标识码** A

Responses of forest soil carbon pool and carbon cycle to the changes of carbon input. WANG Qing-kui (*Huitong Experimental Station of Forest Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(4): 1075-1081.

Abstract: Litters and plant roots are the main sources of forest soil organic carbon (C). This paper summarized the effects of the changes in C input on the forest soil C pool and C cycle, and analyzed the effects of these changes on the total soil C, microbial biomass C, dissoluble organic C, and soil respiration. Different forests in different regions had inconsistent responses to C input change, and the effects of litter removal or addition and of root exclusion or not differed with tree species and regions. Current researches mainly focused on soil respiration and C pool fractions, and scarce were about the effects of C input change on the changes of soil carbon structure and stability as well as the response mechanisms of soil organisms especially soil fauna, which should be strengthened in the future.

Key words: litter; root system; soil carbon pool; soil respiration.

当前, 气候变化问题已成为事关国家长期发展的经济、政治和国家安全问题, 许多发达国家已将应对气候变化战略作为国家战略. 1850年以来, 大气CO₂浓度升高近100 μmol · mol⁻¹, 地球表面温度升高了0.76 °C^[1]. 随着人们对全球气候变化的日益关注, 有关土壤碳在调节气候变化中的作用研究不断增加. 土壤是陆地生态系统最大的碳库, 其碳储量相当于大气碳库的3.3倍和植物碳库的4.5倍^[2-3]. 土壤碳的变化反映了陆地生态系统碳输入和输出之间的平衡关系^[4-5]. 由于土壤碳库巨大, 土壤碳循环过程的微小变化都将对CO₂等温室气体的释放产

生显著影响^[6]. 大气CO₂浓度和气温升高将对陆地生态系统的碳储量和循环产生深刻影响, 如影响植物光合作用产物和生产能力、改变凋落物产量^[1,7]. 而后者的变化又可以通过影响大气中温室气体浓度来加速或减缓全球气候变化的进程^[4,8].

土壤有机碳是陆地生态系统长期积累的结果, 但因其总量巨大, 短期内很难检测到比较明显的变化^[9]. 研究发现, 人为改变有机物质的输入可以增强或降低土壤有机碳转化速率, 能够在短期内观察到土壤碳库和碳循环的变化^[10-11]. 在森林生态系统中, 可以通过添加和去除凋落物, 以及去除根系的方法(detritus input and removal treatments, DIRT)人为地改变土壤碳的输入来研究土壤碳库和碳循环^[5,10-12]. 为此, 本文根据已发表的相关研究结果对

* 国家自然科学基金面上项目(31070436)和国家自然科学基金重点项目(41030533)资助.

** 通讯作者. E-mail: wqkui@163.com

2010-10-26 收稿, 2011-01-06 接受.

此进行综述,分析不同碳输入方式对森林土壤碳库和碳循环的影响,以期进一步加深对全球变化背景下森林土壤碳循环的响应及其机制的理解。

1 DIRT 实验

DIRT 实验是一个控制土壤碳输入来源和速率的长期实验,主要研究凋落物和根系的碳输入对土壤有机质和养分的积累和动态的影响^[10,12]。该实验于 1956 年由 Wisconsin 大学的 Francis Hole 博士在两个森林生态系统和一个草地生态系统中设立,主要是通过添加和去除地表凋落物来控制植物地上部分对土壤的碳输入;通过放置挡板阻止根系向样地内生长,以控制植物地下部分对土壤的碳输入,研究土壤有机质和养分的长期变化(图 1)。DIRT 实验主要包括:加倍添加凋落物、去除凋落物、去除根系、去除凋落物和根系(无碳输入)等处理。虽然该实验的初始目的是研究不同碳输入方式对土壤有机质和养分积累的影响,但是随着同位素等先进技术的成熟和广泛应用,通过这些处理也可以研究土壤碳库组成和碳循环的变化,以及区分土壤呼吸的来源^[13]。目前在美国 Massachusetts 州的 Harvard 森林、Pennsylvania 州的 Bousson 枫树林、Oregon 州的 Andrews 温带针叶林、匈牙利的 Sikkökút 森林和美国 Michigan 州的橡树林中先后进行 DIRT 实验,并且联网研究^[10,13]。2005 年,中国科学院会同森林生态系统实验站在杉木人工林中也进行了该实验,研究凋落物和根系碳输入方式改变后土壤碳库和碳循环的变化,以揭示全球变化背景下我国亚热带人工林土壤碳库和碳循环的影响程度及响应机制。

2 凋落物输入对土壤碳的影响

2.1 凋落物输入对土壤碳库的影响

凋落物作为土壤有机碳的主要来源,其输入数

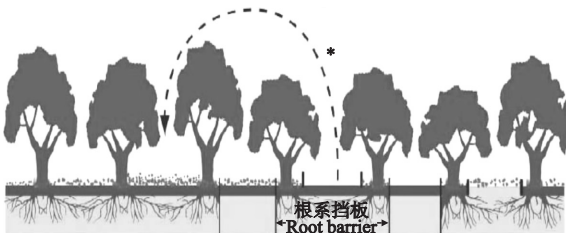


图 1 森林生态系统土壤有机物质输入和去除实验(DIRT)设计^[10]

Fig. 1 Experimental design of detritus input and removal treatments in forest ecosystems^[10].

* 将凋落物从去除小区移至倍量小区 Litter is transferred from no litter to double litter plots.

量和质量的微小改变都可能引起土壤碳循环的巨大变化^[14-16]。凋落物添加和去除可以通过改变凋落物层的数量和分解速率来影响土壤碳库和碳循环。但是关于改变凋落物输入对土壤总有机碳的影响还存在很大争议。已有研究表明,在美国的 Andrews 森林,添加凋落物引起土壤有机碳含量增加^[5,11];在匈牙利 Sikkökút 森林和中国亚热带相思木(*Acacia mangium*)人工林,去除凋落物导致土壤总有机碳降低^[17-18];在加拿大颤杨(*Populus tremuloides*)林,去除枯枝落叶层引起的表层土壤总有机碳的降低作用比去除植物的影响更大^[19]。凋落物对土壤有机碳的影响与树种有关,并受立地土壤质量的影响。van Vuuren 和 Berendse^[20]在荷兰森林的研究表明,去除凋落物降低了 *Erica tetralix* 灌丛土壤有机碳,但对 *Molinia caerulea* 灌丛没有影响;而在美国 Harvard 森林、Bousson 森林和澳大利亚东南部的蓝桉(*Eucalyptus globulus*)人工林,去除和添加凋落物并没有引起土壤总有机碳的变化^[10,16,21];在 Sikkökút 森林,去除凋落物降低了土壤有机碳,但添加凋落物并没有对其产生影响^[17]。在石楠(*Photinia serrulata*)林中,添加凋落物提高了土壤碳氮比^[22]。

根据周转速率和存留时间,可以将土壤碳库分为活性碳库(labile C pool)、慢性碳库(slow C pool)和惰性碳库(passive C pool)^[2]。添加和去除凋落物可以通过改变凋落物层的数量、土壤有机碳和养分的有效性来影响土壤碳库组成^[23-25]。在美国的 Andrews 森林,去除有机层显著降低了土壤中的活性碳库^[26];添加凋落物降低了土壤活性碳,同时增加了土壤惰性碳和稳定性碳^[11]。Crow 等^[16]在美国 Bousson 森林的研究表明,添加新鲜的木质凋落物没有影响土壤不同密度组分间土壤碳氮比和有机碳的分布,但增加了土壤中轻组有机碳含量,提高了土壤碳的矿化潜力。这表明添加到土壤中的碳并不会都变成稳定性的碳。

添加和去除凋落物后,通过增减凋落物层的数量可以改变有机碳向土壤中的淋洗输入。研究表明,在欧洲山毛榉(*Fagus sylvatica*)和无梗花栎(*Quercus petraea*)混交林,添加凋落物引起土壤有机层中可溶性有机质(DOM)显著增加,而去除凋落物则会导致其下降^[24,27]。然而,Yano 等^[21]在 Andrews 森林的研究表明,添加凋落物并没有影响土壤溶液中可溶性有机碳(DOC)的含量。即使在同一林地,不同土层 DOM 对改变凋落物输入响应也不同。在美国 Andrews 森林中的针阔混交林,木质凋落物添加

7 a 后, 30 cm 土壤溶液中 DOC 含量增加, 但是 100 cm 土壤溶液中 DOC 含量并没有变化^[26]. 凋落物输入的变化还能改变土壤溶液的化学组成与性质. 在 Andrews 森林, 添加凋落物降低了 30 cm 土壤溶液中亲水化合物含量, 增加了疏水化合物含量, 提高了土壤溶液中 DOM 的碳氮比^[11, 21, 26]. 这表明添加凋落物可增加土壤有机层已糖和酚酸含量, 刺激微生物活性, 使 DOM 中易分解的组分被消耗^[24, 26]. 添加和去除凋落物也能改变土壤碳库中微生物生物量碳 (MBC) 含量^[23, 25, 28]. Hooker 和 Stark^[28] 对美国 Wyoming 州 3 个不同生态系统 (sagebrush, crested wheatgrass, cheatgrass) 的研究表明, 添加凋落物使土壤 MBC 增加 13%. 也有研究显示, 添加或去除凋落物对土壤 MBC 没有影响^[29]. 这说明不同类型森林生态系统中, 凋落物输入方式变化对土壤碳库的影响存在差异.

2.2 凋落物输入对土壤碳循环的影响

据估算, 全球每年土壤呼吸释放的 CO₂ 约 68 Pg C, 其中 50 Pg C 来源于凋落物和土壤有机碳分解^[30]. 凋落物对土壤呼吸的影响是一个非常复杂的生物学过程, 可以通过多种途径直接和间接地来实现. 添加和去除凋落物可以通过改变有机碳的供应来影响土壤呼吸^[12, 14, 16-17]. 在 Andrews 森林的 DIRT 实验中, 加倍添加或去除针叶凋落物使土壤呼吸显著增加或降低^[11]. 在长沙天际岭国家森林公园, 去除凋落物使土壤呼吸降低 15.0%, 增加凋落物则使其升高 17.0%^[31]. 同样, 在一个热带森林中, 添加凋落物使土壤呼吸增加 43%^[15].

添加凋落物使土壤呼吸的增幅远大于去除凋落物引起土壤呼吸降低的程度, 说明额外的凋落物输入可能刺激了土壤中原有有机碳的分解^[10, 13, 15]. 向土壤中添加简单或复杂的有机基质引起土壤中原有有机物的短期变化, 此现象被称为“激发效应” (priming effect)^[11, 13, 32]. 添加基质引起有机物分解的增加为正激发效应, 反之为负激发效应. 在 Andrews 森林, 添加凋落物产生的正激发效应为 11.5% ~ 21.6%, 即每年多释放 137 ~ 256 g C · m⁻²^[11]. 这种激发效应可以部分解释生态系统间试验结果的差异, 对估计土壤碳储量具有重要意义, 说明不能简单地认为增加的净初级生产力能全部成为土壤碳^[13, 33]. 此外, 凋落物的来源和种类也会对土壤呼吸产生影响. Cleveland 等^[34] 试验发现, 凋落物浸提物中易于被微生物利用的水溶性有机碳对土壤微生物基础呼吸、基质诱导呼吸和微生物代谢熵的影响最大. 但

是, 激发效应多释放的那部分 C 与土壤碳库的哪些组分有关, 与碳的结构类型又有何关系还有待深入研究.

2.3 凋落物输入对土壤生物的影响

添加和去除凋落物可以通过改变土壤有机碳和养分的有效性以及微环境来影响土壤生物, 进而使土壤碳库和碳循环发生变化. 研究表明, 添加凋落物可增加土壤微生物生物量^[22, 28, 35]. 在美国 Wyoming 州 3 个不同生态系统 (sagebrush, crested wheatgrass 和 cheatgrass) 中, 添加凋落物使土壤微生物生物量碳 (MBC) 和微生物生物量氮 (MBN) 分别增加 13% 和 46%^[28]. 也有研究显示, 添加凋落物没有增加土壤微生物生物量^[15, 29], 甚至降低土壤微生物生物量^[36]; 去除凋落物能引起土壤微生物生物量降低^[18, 23, 25]. 例如在热带森林中, 去除凋落物 7 a 后土壤微生物生物量降低了 67% ~ 69%^[23]. 而在加拿大 13 年生白云杉 (*Picea glauca*) 林, 去除凋落物层没有引起表层土壤 MBN 的变化^[37]. 凋落物输入改变不仅可以影响土壤微生物生物量和活性, 还会影响其群落结构. 在 DIRT 实验中, 去除或添加凋落物改变了微生物群落组成, 引起土壤真菌和细菌比例降低或升高, 导致土壤真菌和细菌群落结构的变化^[28-29, 38]. 例如, 加倍凋落物增加了凋落物层的真菌和细菌的总生物量, 去除凋落物则减少了真菌生物量^[10]. 在瑞典的挪威云杉林 (*Picea abies*) 中, 去除凋落物降低菌根根尖数量^[39]. 土壤动物是土壤生物重要组成部分. 但是, 目前还没有见到凋落物输入变化对其影响的研究报道.

3 根系输入对土壤碳的影响

根系是植物将光合产物直接输入到地下的唯一途径. 光合作用产物是如何通过地下部分的碳分配和输入影响土壤碳库及碳循环, 至今尚无明确的结论. 据 Högberg 等^[40] 推测, 光合产物分配到根系的碳 75% 以呼吸方式被释放出来, 表明光合产物是土壤呼吸的关键驱动因子. 过去十几年来, 生态学家利用各种方法来研究这一问题. 在森林生态系统中, 树木环割 (girdling) 和根系排除 (root exclusion) 是两种不破坏土壤结构的可行方法, 前者通过截断树干韧皮部来阻止光合产物向地下部分输入碳, 后者通过阻止根系分泌向土壤输入碳^[25, 40-41].

树木环割和根系去除不仅阻断光合产物向土壤的输入, 还可能增加土壤 DOM 的淋失, 进而降低土壤中碳的含量^[26, 42-43]. 在加拿大颤杨林, 去除根系

引起表层土壤总碳的降低^[19];在 Sífökút 森林,去除根系 5 a 后土壤有机碳和氮含量下降^[17]. 也有研究显示,短期的韧皮部环割或长期的根系去除对土壤总碳没有影响^[10,21,44-45]. 例如,在欧洲栗林 (*Castanea sativa*),环割实验没有引起土壤总碳和 DOC 的变化^[44];在 Andrews 森林的 DIRT 实验中,去除根系虽然降低了 30 cm 土壤溶液中 DOC 含量,但增加了 30 cm 和 100 cm 土壤溶液中总氮和硝态氮含量^[26]. 在中国科学院鹤山丘陵综合开放试验站,环割降低了厚荚相思 (*Acacia crassicarpa*) 林土壤总有机碳和 DOC 含量,而对桉树 (*Eucalyptus* spp.) 林没有影响^[43]. 由此可见,树木环割和根系去除对 DOM 的影响具有树种和区域差异.

近期的实验表明,树木环割显著降低土壤呼吸. 在欧洲赤松 (*Pinus sylvestris*) 林,树木环割 5 d 和 14 d 后,土壤呼吸分别降低了 37% 和 56%^[40];在 120 年生的挪威云杉林,树木环割 2 个月后土壤呼吸降低 53%^[44]. 同样,在巴西的桉树林,树木环割后的 3 个月内,土壤呼吸降低了 16% ~ 24%^[46]. 而在欧洲栗林中,树木环割仅在短期内 (9 ~ 20 d) 影响土壤呼吸^[44]. 在中国科学院鹤山丘陵综合开放试验站,树木环割分别使厚荚相思和尾叶桉 (*Eucalyptus urophylla*) 林土壤呼吸降低 27% 和 14%^[43]. 在德国 Freising 的针阔混交林中,树木环割后的几天内,欧洲山毛榉树下的土壤呼吸降低,但是云杉树下的土壤呼吸直到树木环割 6 周之后才开始降低^[47]. 树木环割对土壤呼吸的降低作用可能因其阻断了光合产物向地下部分输入,使根系活性和分泌物降低,细根中淀粉含量减少^[40,44],从而减少了根系自养呼吸和土壤的异养呼吸. 而 Edwards 和 Ross-Todd^[48] 研究显示,环割并没有降低土壤呼吸.

去除根系降低了土壤呼吸^[23,35,49]. 在热带人工林,去除根系 7 a 后土壤呼吸下降 56%^[50];在实验室培养条件下,去除根系则使土壤呼吸降低了 43%^[10]. 而 Tóth 等^[17] 在 Sífökút 森林发现,去除根系后土壤呼吸先呈增加趋势,5 a 后土壤呼吸才显著降低. 通过 DIRT 实验的不同处理可以区分土壤呼吸的来源^[13-14,51]. Boone 等^[14] 在 Harvard 森林通过 DIRT 实验,将土壤呼吸分为根际呼吸和异养呼吸,发现根际呼吸的温度敏感性高于异养呼吸. Sulzman 等^[13] DIRT 实验发现,在 Andrews 森林中,植物根系呼吸占土壤总呼吸的 23%,显著低于刚果 *Pointe Noire* 地区的桉树林 (59%)^[51]. 在我国东北的 6 种典型森林类型中,根系对土壤总呼吸的贡献率因林

型而异,在 14.4% ~ 51.4% 之间;去除根系实验还发现,根际呼吸占生长季节总土壤呼吸的 52% ~ 83%^[52-53]. 上述研究表明,根系呼吸在森林生态系统中占有重要地位,但不同森林中所占的比例存在差异.

土壤中的活性碳源是土壤微生物,尤其是根际微生物的主要能量来源,树木环割和根系去除所引起活性碳输入的变化必然会对土壤微生物产生影响. 在瑞典北部的欧洲赤松林,树木环割 1 个月后土壤 MBC 降低超过 30%^[40];在挪威云杉林地,树木环割 7 个月后土壤 MBC 降低 40%^[54],但是 Zeller 等^[41] 对同一林地的报道却显示,树木环割对土壤 MBC 的降低作用仅持续 3 个月. 与此相反,在瑞士南部的欧洲栗林,树木环割在短期 (37 d) 内没有引起土壤 MBC 的变化^[44];在美国和匈牙利的 3 个 DIRT 实验中,去除根系也没有影响土壤微生物生物量和细菌生物量^[49]. 而在中国科学院鹤山丘陵综合开放试验站,树木环割 20 d 后厚荚相思林土壤 MBC 增加 25%,随后降低;而桉树林土壤 MBC 没有变化^[43]. 这表明树木环割和根系去除对土壤微生物的影响也存在树种与区域差异.

树木环割和去除根系还可能改变土壤微生物群落结构^[35,38]. 在美国和匈牙利的 3 个 DIRT 实验中,去除根系使土壤真菌数量减少、放线菌数量增加^[49]. 另外,根系去除降低了有机层中真菌生物量、改变了细菌种群结构^[38,54]. 如在德国东南部的挪威云杉林中,树木环割导致有机层真菌数量降低^[54]. 这表明土壤微生物可以通过改变自身区系结构和活性来适应根系去除的影响,增强对非活性有机底物的利用,从而保证生态系统的稳定循环.

4 问题与展望

目前,有关碳输入变化对森林生态系统中土壤碳库,尤其是土壤呼吸的影响研究开展了大量的工作. 但是对土壤碳的结构类型与稳定性变化,以及土壤碳库各个组分和土壤呼吸研究报道较少,限制了对碳输入后土壤碳库组分与土壤碳排放关系的深入理解. 在世界森林总面积持续减少,我国人工林面积不断增加的背景下,深入研究碳输入对我国森林土壤碳库和碳循环的影响及其机理尤其重要. 目前的研究主要集中在欧美地区的森林,所得结论并不能简单地应用到我国森林. 随着全球变化进程的不断加剧,我国森林在全球碳循环中将发挥重要作用,亟待加强这方面的深入研究.

在森林生态系统中,凋落物和根系碳输入在很大程度上影响着土壤有机碳的形成和稳定,以及土壤 CO₂ 通量^[30,55]。但是不同碳源输入对土壤有机碳库和碳循环影响的长期研究一直是森林生态系统碳循环研究的薄弱环节^[16,26]。此外,对土壤碳储量而言,土壤碳的结构类型与稳定性更为重要。随着核磁共振技术的发展与成熟,其在土壤有机碳研究中的应用逐渐增多,已经成为该领域研究的热点。

目前,在森林生态系统中采用根系去除和树木环割实验侧重于研究改变光合产物向地下输入对土壤呼吸的影响,对土壤碳库影响的研究还相当少。碳输入变化一方面可以直接对土壤碳库和碳循环产生影响,另一方面,可以通过改变土壤微生物或土壤动物间接地影响土壤碳库组成和碳循环。已有的研究主要侧重于土壤微生物,而对土壤动物的研究还未见相关报道,今后应加强这方面的研究工作,以更全面地了解全球变化背景下土壤碳库和碳循环的响应机制。

参考文献

- [1] IPCC. IPCC WGI Fourth Assessment Report. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Switzerland, 2007: 12-17
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, **304**: 1623-1627
- [3] Schulze ED, Freibauer A. Carbon unlocked from soils. *Nature*, 2005, **437**: 205-206
- [4] Davidson EA, Janssens IA. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 2006, **440**: 165-173
- [5] Busse MD, Sanchez FG, Ratcliff AW, *et al.* Soil carbon sequestration and changes in fungal and bacterial biomass following incorporation of forest residues. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**: 220-227
- [6] Burton AJ, Pregitzer KS. Field measurements of root respiration indicate little to no seasonal temperature acclimation for sugar maple and red pine. *Tree Physiology*, 2003, **23**: 273-280
- [7] Heath J, Ayres E, Possell M, *et al.* Rising atmospheric CO₂ reduces sequestration of root-derived soil carbon. *Science*, 2005, **309**: 1711-1713
- [8] Cox PM, Betts RA, Jones CD, *et al.* Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 2001, **408**: 184-197
- [9] Bolinder MA, Angers DA, Gregorich EG, *et al.* The response of soil quality indicators to conversion manage-
- ment. *Canadian Journal of Soil Science*, 1999, **79**: 37-45
- [10] Nadelhoffer KJ, Boone RD, Bowden RD, *et al.* The DIRT experiment: Litter and root influences on forest soil organic matter stocks and function// Foster D, Aber J, eds. *Forests in Time: The Environmental Consequences of 1000 Years of Change in New England*. New Haven, CT: Yale University Press, 2004: 300-315
- [11] Crow SE, Lajtha K, Bowden RD, *et al.* Increased coniferous needle inputs accelerate decomposition of soil carbon in an old-growth forest. *Forest Ecology and Management*, 2009, **258**: 2224-2232
- [12] Nielsen GA, Hole FD. A study of the natural processes of incorporation of organic matter into soil in the University of Wisconsin Arboretum. *Wisconsin Academy of Sciences, Arts, and Letters*, 1963, **52**: 213-227
- [13] Sulzman EW, Brant JB, Bowden RD, *et al.* Contribution of aboveground litter, belowground litter, and rhizosphere respiration to total soil CO₂ efflux in an old growth coniferous forest. *Biogeochemistry*, 2005, **73**: 231-256
- [14] Boone RD, Nadelhoffer KJ, Canary JD, *et al.* Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, 1998, **396**: 570-572
- [15] Sayer EJ, Powers JS, Tanner EVJ. Increased litterfall in tropical forests boosts the transfer of soil CO₂ to the atmosphere. *PLoS ONE*, 2007, **2**: 1-6
- [16] Crow SE, Lajtha K, Filley TR, *et al.* Sources of plant-derived carbon and stability of soil organic matter: Implications for global change. *Global Change Biology*, 2009, **15**: 2003-2019
- [17] Tóth JA, Lajtha K, Kotpoczó Z, *et al.* The effect of climate change on soil organic matter decomposition. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 2007, **3**: 75-85
- [18] Xiong Y, Xia H, Li Z, *et al.* Impacts of litter and understory removal on soil properties in a subtropical *Acacia mangium* plantation in China. *Plant and Soil*, 2008, **304**: 179-188
- [19] Kabzems R, Haeussler S. Soil properties, aspen, and white spruce responses 5 years after organic matter removal and compaction treatments. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, **35**: 2045-2055
- [20] Van Vuuren MMI, Berendse F. Changes in soil organic matter and net nitrogen mineralization in heathland soils, after removal, addition or replacement of litter from *Erica tetralix* or *Molinia caerulea*. *Biology and Fertility of Soils*, 1993, **15**: 268-274
- [21] Yano Y, Lajtha K, Sollins P, *et al.* Chemistry and dynamics of dissolved organic matter in a temperate conif-

- erous forest on Andic soils: Effects of litter quality. *Ecosystems*, 2005, **8**: 286–300
- [22] Rinnan R, Michelsen A, Jonasson S. Effects of litter addition and warming on soil carbon, nutrient pools and microbial communities in a subarctic heath ecosystem. *Applied Soil Ecology*, 2008, **39**: 271–281
- [23] Li Y, Xu M, Sun O, *et al.* Effects of root and litter exclusion on soil CO₂ efflux and microbial biomass in wet tropical forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**: 2111–2114
- [24] Kalbitz K, Meyer A, Yang R, *et al.* Response of dissolved organic matter in the forest floor to long-term manipulation of litter and throughfall inputs. *Biogeochemistry*, 2007, **86**: 301–318
- [25] Feng W, Zou X, Schaefer D. Above- and belowground carbon inputs affect seasonal variations of soil microbial biomass in a subtropical monsoon forest of southwest China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**: 978–983
- [26] Lajtha K, Crow SE, Yano Y, *et al.* Detrital controls on soil solution N and dissolved organic matter in soils: A field experiment. *Biogeochemistry*, 2005, **76**: 261–281
- [27] Park JH, Matzner E. Controls on the release of dissolved organic carbon and nitrogen from a deciduous forest floor investigated by manipulations of aboveground litter inputs and water flux. *Biogeochemistry*, 2003, **66**: 265–286
- [28] Hooker TD, Stark JM. Soil C and N cycling in three semiarid vegetation types: Response to an in situ pulse of plant detritus. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**: 2678–2685
- [29] Brant JB, Sulzman EW, Myrold DD. Microbial community utilization of added carbon substrates in response to long-term carbon input manipulation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**: 2219–2232
- [30] Raich JW, Schlesinger WH. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, **44**: 81–99
- [31] Wang G-J (王光军), Tian D-L (田大伦), Yan W-D (闫文德), *et al.* Effects of aboveground litter exclusion and addition on soil respiration in a *Cunninghamia lanceolata* plantation in China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2009, **33**(4): 739–747 (in Chinese)
- [32] Löhnis F. Nitrogen availability of green manures. *Soil Science*, 1926, **22**: 253–290
- [33] Dijkstra FA, Cheng W. Interactions between soil and tree roots accelerate long-term soil carbon decomposition. *Ecology Letters*, 2007, **10**: 1046–1053
- [34] Cleveland CC, Nemergut DR, Schmidt SK, *et al.* Increases in soil respiration following labile carbon additions linked to rapid shifts in soil microbial community composition. *Biogeochemistry*, 2007, **82**: 229–240
- [35] Fisk MC, Fahey TJ. Microbial biomass and nitrogen cycling responses to fertilization and litter removal in young northern hardwood forests. *Biogeochemistry*, 2001, **53**: 201–223
- [36] Jonasson S, Castro J, Michelsen A. Litter, warming and plants affect respiration and allocation of soil microbial and plant C, N and P in arctic mesocosms. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**: 1129–1139
- [37] Matsushima M, Chang SX. Effects of understory removal, N fertilization, and litter layer removal on soil N cycling in a 13-year-old white spruce plantation infested with Canada bluejoint grass. *Plant and Soil*, 2007, **292**: 243–258
- [38] Mahmood S, Finlay RD, Erland S. Effects of repeated harvesting of forest residues on the ectomycorrhizal community in a Swedish spruce forest. *New Phytologist*, 1999, **142**: 577–585
- [39] Siira-Pietikainen A, Haimi J, Kanninen A, *et al.* Responses of decomposer community to root-isolation and addition of slash. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, **33**: 1993–2004
- [40] Högborg P, Nordgren A, Buchmann N, *et al.* Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. *Nature*, 2001, **411**: 789–791
- [41] Zeller B, Liu J, Buchmann N, *et al.* 2008. Tree girdling increases soil N mineralisation in two spruce stands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**: 1155–1166
- [42] Dannenmann M, Simon J, Gasche R, *et al.* Tree girdling provides insight on the role of labile carbon in nitrogen partitioning between soil microorganisms and adult European beech. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**: 1622–1631
- [43] Chen D, Zhang Y, Lin Y, *et al.* Changes in belowground carbon in *Acacia crassicarpa* and *Eucalyptus urophylla* plantations after tree girdling. *Plant and Soil*, 2010, **326**: 123–135
- [44] Frey B, Hagedorn F, Giudici F. Effect of girdling on soil respiration and root composition in a sweet chestnut forest. *Forest Ecology and Management*, 2006, **225**: 271–277
- [45] Högborg P, Bhupinderpal-Singh, Löfvenius MO, *et al.* Partitioning of soil respiration into its autotrophic and heterotrophic components by means of tree-girdling in old boreal spruce forest. *Forest Ecology and Manage-*

- ment, 2009, **257**: 1764–1767
- [46] Binkley D, Stape JL, Takahashi EN, *et al.* Tree-girdling to separate root and heterotrophic respiration in two Eucalyptus stands in Brazil. *Oecologia*, 2006, **148**: 447–454
- [47] Andersen CP, Nikolov I, Nikolova P, *et al.* Estimating ‘autotrophic’ belowground respiration in spruce and beech forests: Decreases following girdling. *European Journal of Forest Research*, 2005, **124**: 155–163
- [48] Edwards NT, Ross-Todd BM. The effects of stem girdling on biogeochemical cycles within a mixed deciduous forest in eastern Tennessee. I. Soil solution chemistry, soil respiration, litterfall and root biomass studies. *Oecologia*, 1979, **40**: 247–257
- [49] Brant JB, Myrold DD, Sulzman EW. Root controls on soil microbial community structure in forest soils. *Oecologia*, 2006, **148**: 650–659
- [50] Hanson PJ, Edwards NT, Garten CT, *et al.* Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 115–146
- [51] Epron D, Nouvellon Y, Deleporte P, *et al.* Soil carbon balance in a clonal *Eucalyptus* plantation in Congo: Effects of logging on carbon inputs and soil CO₂ efflux. *Global Change Biology*, 2006, **12**: 1021–1031
- [52] Yang J-Y (杨金艳), Wang C-K (王传宽). Effects of soil temperature and moisture on soil surface CO₂ flux of forests in northeastern China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2006, **30**: 286–294 (in Chinese)
- [53] Wang C, Yang J. Rhizospheric and heterotrophic components of soil respiration in six Chinese temperate forests. *Global Change Biology*, 2007, **13**: 123–131
- [54] Subke JA, Hahn V, Battipaglia G, *et al.* Feedback interactions between needle litter decomposition and rhizosphere activity. *Oecologia*, 2004, **139**: 551–559
- [55] Trumbore SE, Czimczik CI. An uncertain future for soil carbon. *Science*, 2008, **321**: 1455–1456

作者简介 王清奎,男,1977年生,博士,副研究员.主要从事森林生态系统碳循环与全球变化、土壤有机质过程及凋落物分解等研究,发表论文30余篇,其中SCI论文10余篇. E-mail: wqkui@163.com

责任编辑 李凤琴
