

森林土壤有机层生化特性 及其对气候变化的响应研究进展*

冯瑞芳¹ 杨万勤^{1,2**} 张健¹

(¹四川农业大学林学院园艺学院 四川雅安 625014)

(²中国科学院成都生物研究所 成都 610041)

摘要 森林土壤有机层是指累积在土壤表面未分解到完全分解的有机残余物质,在全球碳循环中具有十分重要的作用和地位. 目前有关森林土壤有机层的生态研究主要集中于土壤有机层的凋落物储量、水土保持功能、生物多样性保育功能及其生化特性等,而有关其对气候变化响应的研究报道还相当少见,且已有的研究主要关于土壤有机层的碳源/汇动态等,有关森林土壤有机层生化特性对气候变化响应的研究还相对较少,这与其在全球气候变化中的作用和地位是极不相称的. 过去 10 a 中,有关土壤有机层生化特性对气候变化响应的研究主要包括土壤有机层的微生物数量、微生物生物量、呼吸作用、有机物质分解动态(凋落物分解)、酶活性等对环境变化的响应等方面. 进一步的控制实验研究被认为是相当重要的. 参 51

关键词 森林土壤有机层; 生化特性; 气候变化; 研究进展

CLC S714.2 + S718.512

Review on Biochemical Property in Forest Soil Organic Layer and Its Responses to Climate Change*

FENG Ruifang¹, YANG Wanqin^{1,2**} & ZHANG Jian¹

(¹ Faculty of Forestry, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, Sichuan, China)

(² Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract Soil organic layer in forest can be defined as a layer of accumulated organic materials including freshly, fragmented and humified litters on the soil surface, which play a key role in the global carbon cycle. In recent 10 years, the studies on forest soil organic layer have mainly focused on microbial counts, microbial biomass, carbon, nitrogen, phosphorus and sulfur, respiration, litter decomposition dynamics and enzymatic activity of this layer to the changing environment. However, the past studies have paid greater attention to litter stock, soil and water conservation, biodiversity nursing, biochemical property, and carbon source/sink dynamics, and biochemical property of this layer, and the responses of biochemical property in the soil organic layer to climate change were not well known, which made difficult to understand the climate change. It needs further study on the responses of biochemical property in soil organic layer to climate change. Ref 51

Keywords forest soil organic layer; biochemical property; climate change; advance

CLC S714.2 + S718.512

以全球变暖为主要特征的全球变化正改变着陆地生态系统的结构和功能,威胁着人类的生存和安全^[1],因而受到各国政府和科学家的普遍关注. 全球范围内 1 m 厚土壤碳贮量为 2 500 GtC,约为植被有机碳储量的 4 倍^[2]. 森林覆盖了 30% 的陆地表面^[3],其生物量和净生产力占了整个陆地生态系统的 86% 和 70%^[4]. 森林植被和土壤的碳贮量约为 1 240 GtC^[5],其中森林土壤碳储量约为 787 GtC,约占全球土壤的 39%,大约为森林生态系统有机碳库的 2/3^[6]. 如果将森林土壤生态系

统中根系的碳储量计算在内,森林土壤有机碳库储量将占全球土壤碳库的 50% 左右^[7]. 可见,森林土壤在全球碳循环中具有举足轻重的作用和地位.

森林土壤有机层(forest soil organic layer)的碳储量约占森林生态系统总碳的 10% 左右,并随着气候和植被类型而发生很大变化^[5]. 由于土壤有机层的生化特性控制着植被-土壤系统的生物元素循环和能量转换,因而被认为是土壤与植被之间进行物质转换和能量交换的最为活跃的生态界面之一^[8]. 特别重要的是,土壤有机层生化特性控制的土壤有机碳固定、碳汇/源动态及通量在全球碳循环中具有十分重要的作用和地位^[7]. 过去 10 a 中,有关土壤生化特性及其对全球气候变化的响应受到了普遍关注,但迄今为止,有关森林土壤有机层生化特性对全球变化响应的研究综述尚未见报道. 本文综述了森林土壤有机层的生化特性及其对气候变化响应的研究等,以期为

收稿日期: 2006-06-16 接受日期: 2006-07-24

* 国家自然科学基金项目(No. 30471378),四川省重大应用基础研究计划项目和四川农业大学人才引进项目. Jointly supported by the National Natural Science Foundation of China (NSFC, No. 30471378), the Key Project of Applied & Basic Research of Sichuan, and the Talent - Recruiting Program of Sichuan Agricultural University

** 通讯作者 Corresponding author (E-mail: yangwq@cib.ac.cn)

森林生态系统过程及其对气候变化的响应研究提供参考。

1 森林土壤有机层的概念

森林土壤有机层是指累积在土壤表面未分解到完全分解的有机残余物质^[8], 包括林地凋落物。根据凋落物分解的程度和颜色, 土壤有机层可以进一步分为新鲜凋落物层 (fresh litter layer, LL), 半分解层 (fragmented litter layer, FL) 和分解层 (humified litter layer, HL) 3 个层次^[10]。其中, LL 主要由新鲜或轻微变色的未分解的凋落物构成, FL 主要由具有菌丝和细根的中度到强度的成片断的凋落物构成, HL 主要由腐殖化的无定形的凋落物构成^[1, 9]。实际上, 森林土壤有机层与枯枝落叶层和土壤腐殖质层密切相关, 但又不同于枯枝落叶层和土壤腐殖质层。首先, 从枯枝落叶层与土壤有机层的联系来看, 土壤有机层包含枯枝落叶层, 枯枝落叶层实际上是土壤有机层中的 LL 和 FL 层, 但枯枝落叶层不包括腐殖化的凋落物层 (HL); 其次, 腐殖化的有机层 (HL) 并不是土壤腐殖质层, 主要区别在于: (1) HL 是凋落物完全分解但并没有与矿质土壤颗粒混和, 没有形成矿质土壤层, 而土壤腐殖质层 (AL) 是腐殖化的有机物质与土壤颗粒充分混和后形成的矿质土壤; (2) HL 的有机碳含量显著高于土壤腐殖质层。例如, 杨万勤等 (2004) 对川西亚高山云杉、冷杉和桦木林土壤生态系统的研究表明, HL 的有机碳储量分别高达 29.37 t hm^{-2} 、 22.7 t hm^{-2} 、 8.63 t hm^{-2} , 而 AL 的有机碳含量分别为 14.45 t hm^{-2} 、 19.44 t hm^{-2} 、 9.01 t hm^{-2} ^[11]。但长久以来, 生态学家和土壤学家对土壤有机层一词的定义各不相同。在多数生态学教材中, 将土壤有机层简单的定义为凋落物层或枯枝落叶层 (litter layer); 而在土壤学教材中, 则将腐殖质层包含于土壤有机层中。在大多数森林土壤研究中, 研究人员常常去除了土壤有机层 (枯枝落叶层), 直接取腐殖质层、淀积层和母质层的土壤样品进行分析。可见, 已有的研究在很大程度上忽略了土壤有机层在森林生态系统结构和功能中的作用与地位, 这很难满足许多原始森林, 尤其是高寒森林生态系统结构和功能研究的需要。

2 控制森林土壤有机层的物质组成和储量的因素

森林土壤有机层受控于气候、植被、地形地貌及人类活动干扰等生物和非生物环境。首先, 温度和水分是影响土壤有机层的最为重要的生态因素。森林土壤有机层的物质组成、厚度和储量随着经纬度、海拔高度和森林植被类型的变化而存在较大的差异。在低纬度和低海拔地区, 由于温度较高, 土壤微生物活性高, 有机物质的分解速率较快, 林地有机物质的累积速率慢, 土壤有机质含量较低, 土壤有机层很薄; 相反, 在高纬度和高海拔地区, 由于受到低温的限制, 微生物活性普遍较低, 凋落物的分解速度较缓慢, 林地有机物质累积量大, 土壤有机层很厚。在一些高山峡谷区 (例如川西亚高山), 由于还受到山地灾害对土壤形成、发育和演替的影响, 土壤剖面上普遍存在一层很厚的有机层和腐殖质层, 可以清晰地分为新鲜凋落物层、半分解层和分解层 3 个层次, 但土壤淀积层发育明显。

其次, 森林生态系统的物种组成和群落结构不同, 土壤有机层的物质组成、厚度和储量存在较大的差异。一般而言, 针叶

林 C/N 比、木质素/N 比、纤维素/N 比以及萜类物质和酚类物质含量较高, 不利于土壤动物和微生物群落的生长繁衍, 凋落物分解缓慢, 有利于土壤有机碳积累, 因而具有较厚的土壤有机层和较高的土壤有机碳密度和储量; 相反, C/N 比较低的阔叶树种虽然可能具有较高的生产力和凋落物输入量, 但由于有机物质的矿化分解速率较快, 因此, 土壤有机层较薄, 有机碳密度和储量相对较低。这主要是因为森林生态系统的树种组成不同, 凋落物的产量和质量差异巨大, 尤其是 C/N 比、木质素/N 比、纤维素/N 比和酚类物质含量的差异较大, 从而对土壤生物群落活性产生不同的影响, 以至形成不同物质组成、厚度和储量的有机层。

第三, 地形地貌通过对物质和能量的分配以及土壤水热动态的影响而调控着森林土壤有机层的物质组成和储量特征。例如, Prichard 等 (2000) 对美国华盛顿州奥林匹克山脉亚高山森林土壤有机碳储量的研究表明, 坡向和坡度对森林土壤有机碳库具有强烈的影响, 东北坡的森林土壤有机碳含量 (变化范围为 $43 \sim 143 \text{ g kg}^{-1}$) 相对高于西南坡的森林土壤 (变化范围为 $27 \sim 162 \text{ g kg}^{-1}$)^[12]。高海拔地区的土壤有机碳含量和储量受永冻层和水系的影响特别显著^[13]。森林土壤有机碳储量远远低于具有相似气候条件的北方森林土壤^[6], 这在很大程度上是由地形地貌决定的土壤厚度有关。川西亚高山地处横断山区, 坡度较大, 而且受地震、滑坡、泥石流和崩塌等山地灾害的影响较大, 土壤发育很不完善, 土体构型简单, 土层浅薄, 有机物质主要储存于土壤有机层和腐殖质层, 因而即使含量很高, 但密度和储量仍然较低。杨万勤等 (2004) 对川西亚高山森林土壤有机碳储量的研究表明, 原始云杉林、冷杉林、白桦林土壤有机碳储量分别为 48.22 、 42.14 、 23.55 t hm^{-2} ^[11]。

第四, 人类活动干扰通过改变植被的结构和水热状况而对土壤有机层物质组成和储量的变化特征产生显著影响。土地的农业利用强度越大, 土壤有机层碳库的碳储量可能就越小。这个过程中, 土壤有机层碳库主要以土壤呼吸 (根系呼吸、微生物呼吸和动物呼吸) 和化学氧化作用的形式释放到大气中, 减少碳库储量。比如, 当森林和草地转变为农地后, 水土流失加剧, 土壤有机层碳和无机碳随地表径流进入江河, 并通过微生物群落的呼吸作用排放到大气中。有研究表明, 水土流失引起土壤有机碳库下降, 削弱了土壤碳汇 (Sink) 在减缓全球气候变化方面的生态功能^[14]。Lal (2003) 研究表明, 土壤侵蚀可能导致全球大约 10% 的有机碳损失 [$4.0 \sim 6.0 \text{ Pg (C) a}^{-1}$] 和有机碳含量下降 2% ~ 3%, 显著影响全球碳循环^[15]。遗憾的是, 迄今为止, 我国有关水土流失引起的土壤有机层碳汇/源功能的变化尚无研究。

3 土壤有机层的碳汇、库、源特征

森林土壤有机层碳库是联系森林植被碳库和森林土壤碳库的重要中间环节。森林土壤的碳输入过程受植物的枯枝落叶与根系的产量和分解所调解, 碳输出过程则主要由土壤呼吸 (包括微生物的异养呼吸、土壤动物的呼吸及根系的自养呼吸) 所决定。而这一系列的生态过程又都是在森林土壤有机层中进行的。因此, 位于土壤表面的丰富的有机层就是森林生态系统碳和氮循环中的一个巨大的动态 C、N 库^[16~17]。其碳循环的快慢直接影响到森林生态系统碳循环的速率, 进而影响到整

个森林生态系统的碳收支. 以川西亚高山为例,除了云杉林、冷杉林和白桦林土壤剖面上的有机碳含量随着土壤深度的增加而降低以外,土壤有机层的有机碳储量在土壤生态系统中所占的比例很大. 3个森林生态系统中土壤有机层的碳储量分别为 (29.38 ± 1.28) 、 (22.7 ± 1.12) 、 $(8.63 \pm 0.95) \text{ t hm}^{-2}$,分别为3个森林土壤剖面上碳储量的62.2%、53.5%和36.6%^[11]. 这意味着土壤有机层的有机碳储量在全球陆地碳库中具有十分重要的地位. 同时,土壤有机层的生化特性不仅控制着森林生态系统中的养分循环格局和有效性^[18],而且对全球变化的响应比矿质土壤层更敏感^[19]. 尽管如此,过去的很多研究都低估或忽略了其作用和地位^[20]. 迄今为止,仍只有少量关于地表有机层中的有机碳和养分库报道^[21].

4 森林土壤有机层的生化特性及其对气候变化的响应

4.1 森林土壤有机层的生化特性

森林土壤有机层为土壤动物和微生物提供了能量、养分和栖息生境^[22],在维护土壤动物和微生物多样性的同时,调控着土壤有机层的微生物数量、生物活性、矿化作用、呼吸作用等生化特性. 过去几年的研究表明,森林土壤有机层的微生物种类、数量、生物量和活性普遍高于矿质土壤层^[23~27]. 例如,杨万勤等(2004)对川西亚高山森林土壤生化特性的研究也表明,高寒森林土壤有机层的微生物数量和生物量均显著高于土壤矿质层,对森林土壤肥力的提高以及生态系统的物质循环和能量转换具有非常重要的作用和地位^[11]. 可见,土壤有机层是森林生态系统进行物质和能量交换的最为活跃的生态界面之一. 通过对土壤有机层生化特性的调控,可能在很大程度上改变森林生态系统的生物元素循环和能量流动过程和通量,增加土壤有机碳固定及碳汇功能,减少碳排放,对于减缓全球变化具有十分重要的作用和地位. 但迄今为止,关于森林土壤有机层生化特性的研究报道还比较少见,而且有关土壤有机层生化特性变化与碳通量的耦合关系研究还未见报道. 因此,研究一些对全球气候变化敏感区域(如高寒森林)的土壤有机层对全球气候变化的响应机制是很有必要的.

4.2 升高大气 CO₂ 浓度对土壤有机层生化特性的影响

升高大气 CO₂ 浓度可能通过改变凋落物质量而影响到土壤生化特性. 大气 CO₂ 浓度增加可能通过直接的途径改变土壤的生化特性. 例如, Curtis 和 Wang (1998)的研究表明,过量的 CO₂ 增加通过刺激光合作用而增加土壤有机 C 的输入,改变土壤有机层的 C/N 比,从而改变了土壤有机层的生化特性^[28]. 大气 CO₂ 浓度增加可能直接抑制好氧性土壤微生物群落的生长,促进厌氧性土壤微生物群落的生长,从而改变土壤微生物群落的结构、组成和功能,改变土壤的生物化学特性. 例如, DeLucia 等(1999)的研究表明,大气 CO₂ 浓度增加降低了树木叶片的 N 含量,降低了凋落物质量,增加了 20%~30% 的凋落物产量^[29]. 但是,也有研究表明,土壤生化特性对升高大气 CO₂ 浓度的响应并不显著. 例如, Kang 等(2001)研究表明,升高 CO₂ 浓度下,土壤 β -葡(萄)糖苷酶、磷酸酶和 N-乙酰基氨基葡萄糖苷酶活性没有明显变化^[30]. 这可能是由于土壤空气中的 CO₂ 浓度本身较高,大气 CO₂ 浓度增加相对于土壤空气

中 CO₂ 浓度的变化来说相当轻微,因而对土壤微生物群落及其酶活性的直接影响并不显著. 这意味着,大气 CO₂ 浓度增加对土壤生物化学特性的间接作用可能比直接作用更加明显. 但迄今为止的研究结果还具有不确定性.

4.3 升高大气温度对土壤有机层生化特性的影响

大气温度升高可能通过直接或间接的方式影响土壤生化特性. Rustad 等(2001)研究表明,温度是调节许多诸如土壤呼吸、凋落物分解、N 矿质化作用、细根动态和植物对养分的吸收等陆地生物地球化学过程的关键因素^[31]. 首先,升高温度可能直接提高了森林土壤有机层微生物群落的数量、生物量和酶系统活性,从而加速了土壤有机层中有机物质的分解,提高了养分的有效性,加速了系统内的生物元素循环;其次,升高温度促进了植物的光合作用,提高了森林群落的生产力和凋落物产量,改变土壤有机层中的 C/N 比,进而改变土壤的生化特性. 但由于受到土壤养分库和其它因素的影响和限制,升高温度对土壤有机层 C/N 比的影响可能存在 3 种情况: (1) 当土壤肥力较高或养分库较大时,升高温度促进了养分(尤其是 N)的有效性,植物体内的 N 含量相对增加,降低了输入到土壤中的有机物质的 C/N 比,从而可能降低土壤 C/N 比,进而改变土壤生物化学特性; (2) 当土壤肥力较低或养分库较小时,升高温度对土壤养分有效性的促进作用不能满足温度升高对光合作用的促进作用所需要的养分,此时,植物体内的 C/N 比可能降低,从而增加土壤有机层的 C/N 比,最终影响到土壤生化特性; (3) 当升高温度对养分有效性的促进作用与升高温度对光合作用的促进作用相抵消时,升高温度对土壤有机层的 C/N 比可能没有显著影响. 但这方面的研究还相当少见,而且研究结果还具不确定性,亟待深入研究.

4.4 升高大气 CO₂ 浓度和温度及其交互作用对土壤有机层生化特性的影响

升高大气 CO₂ 浓度和温度及其交互作用对土壤生化特性的影响最近才受到关注. 这是因为:凋落物分解、碳氮的矿质化速率、碳氮的输入输出等都与全球变化密切相关. 比如, Tschirko 等(2001)的研究表明,在自然环境 CO₂ 浓度下,随着温度升高,土壤蛋白酶和精氨酸脱氨酶活性降低,而 N 的矿质化作用、脲酶和反硝化酶活性升高;但在升高 CO₂ 浓度下,随着温度升高,土壤蛋白酶、脲酶、精氨酸脱氨酶、N 的矿质化作用和反硝化酶活性都升高. 也就是说,升高 CO₂ 浓度和温度提高了与 N 循环有关的土壤酶活性,促进了 N 的矿质化作用^[32]. 可见,升高大气 CO₂ 浓度和温度对土壤生化特性存在着不同程度的影响. 尽管过去的研究结果还具有很多不确定性,但可以肯定的是,升高 CO₂ 浓度和温度对土壤 C/N 比的影响是其对土壤生化特性影响的最为重要的作用机制之一.

4.5 模拟控制实验对土壤有机层生化特性的影响

以大气 CO₂ 增加和温度升高为特征的全球气候变化能够通过凋落物质量的改变而改变土壤的 C/N 比,从而引起土壤生化特性的变化. 现在的问题是,未来气候变化条件下,土壤生化特性究竟会发生什么样的变化? 因此,通过外源 C、N 处理改变土壤的 C/N 比,成为模拟研究全球气候变化对土壤微生物影响的重要手段之一.

Zak 等(1993)的研究表明:受 C 限制、与 N 矿化作用相关

的土壤微生物在外源 C 处理后生长受到刺激,将会增加土壤 N 的有效性^[33-36].而 Gallardo 和 Schlesinger (1994) 的研究则表明,外加 NH_4NO_3 (降低 C/N 比) 增加了一个温带阔叶林有机层的微生物活性和 MBN^[37]. N^{15} 标记的示踪实验也表明,大量的以 $^{15}\text{NH}_4^+$ 和 $^{15}\text{NO}_3^-$ 形式加入的 N 很快转移到微生物中,如果土壤微生物是受 N 限制,那它们将会积累由大气中沉积的 N,缓和了 N 饱和对生态系统的负面作用^[38].这同时也意味着,大气 N 沉降可能引起受 N 限制的土壤微生物对有机物更快的分解,降低土壤中的 C 储量.

可见,通过外源 C、N 处理,研究全球气候变化对元素循环和养分有效性的变化是非常必要的.

4.6 大气 N 沉降对森林土壤生化特性的影响

大气氮沉降量的增加已成为许多森林的新生态因子^[39-41].长期而持续的高氮输入可提高土壤矿化速率,导致森林土壤酸化. Craine 等 (2001) 的研究表明,大气 N 沉降可能通过直接或间接作用对森林土壤及其有机层产生显著影响.随着 N 沉降的增加,植物生长过程中不同营养器官的 C/N 比会作出一定的响应,使得其归还到土壤的碎屑的 C/N 比也发生相应的改变^[42]. Berg 和 Matzner (1997) 研究也表明, N 沉降影响了植被凋落物和有机物的分解率,而且其影响作用因分解阶段不同而异.在新鲜的凋落物层,内部和外部 N 的增加能够加速分解,而在分解后期和木质化的有机物及腐殖质层中, N 沉降则削弱了其分解力.同时, N 沉降也会对土壤中的各种微生物酶活性产生不同程度的影响^[43]. N 沉降能增强凋落物层和土壤中的纤维素酶活性^[44-46],但对土壤中几丁质酶活性的影响是增强或是降低,还具有不确定性^[45, 47-48].在有机层降低 N 的限制,能提高有机质的分解率^[43].随着 N 有效性的增加,几丁质酶的活性在凋落物层和土壤层都有所下降,这与累积的 N 矿化作用有很大的关系^[25, 47-48].因此,大气 N 沉降通过对森林土壤生化特性影响,进而改变森林土壤碳汇、库、源功能.

4.7 水热条件的改变对森林土壤生化特性的影响

气候变化通过多种途径影响森林土壤的生化特性.目前,大多数的研究集中在气温升高和 CO_2 浓度升高而引起的温室效应等方面,但水热条件的变化给森林土壤带来的影响方面的研究却很少.水热条件变化可以引起土壤中水和有机物的有效性、毛管水量、蒸发散消耗、水质及土壤中氮的有效性的变化,从而影响森林土壤的生化特性.张德成等 (2004) 的研究表明,干处理可以减少 N 的分解和矿化,可以使林地固定更多的 N,提高离子的浓度,使土壤养分充足,相反,湿处理则会使土壤养分大大流失,容易导致土壤贫瘠^[49].可见,在未来气候变化下,水热条件的改变将有可能成为影响土壤生化特性的一个重要因子,这有待进一步地研究.

5 研究展望

过去 10 a,由于土壤有机层的生化特性不仅控制着森林生态系统的生物元素循环格局和养分有效性^[18],而且还受到水热动态、凋落物质量以及升高 CO_2 浓度和温度等生物和非生物因素的控制^[50].因此,作为森林生态系统中最为活跃的有机碳和养分的源和汇,对全球气候变化的响应开始受到关注.比如, Lichter 等 (2000) 的研究结果表明,大气 CO_2 浓度增加能引起有

机 C 化合物从叶面淋失速度的加快,引起土壤有机层 C : N 比的改变,改变土壤有机层的生化特性^[51].但是,研究地上部分对全球气候变化响应的较多,而对土壤有机层生化特性对全球变化的响应的研究较少,更缺乏从机理上解释土壤有机层 CN 过程对全球气候变化的响应.

那么,在未来气候变化条件下,土壤有机层的生化特性将发生什么样的变化?最终对森林碳汇功能产生什么影响?这依赖于该森林群落的自然分布位置、树种、土地使用历史和各种环境因子的交互作用.但迄今为止,国内外尚无系统研究,仍有待于进一步的研究.

(1) 进一步研究土壤有机层生化特性对气候变化的响应.主要研究森林土壤有机层的微生物数量、微生物生物量 C、N、P、S、酶活性、硝化与反硝化作用、氨化作用、纤维素分解作用以及土壤呼吸等对大气 CO_2 浓度增加、温度升高及其与其它环境因子交互作用的响应;

(2) 拓宽研究对象和研究范围.重视高寒(高纬度、高海拔、寒冷)森林以及一些地理位置偏僻、监测困难但在全球碳循环中具有重要作用的森林土壤有机层生化特性的研究;

(3) 森林土壤有机层碳氮过程及其对气候变化的响应机制.主要包括土壤生态过程与全球变化的互动、土壤生态过程与植被的互动机制、关键地区土壤生态过程对生态环境的响应以及土壤生态系统碳源、汇、库动态与土壤有机层生化特性的耦合机制;土壤有机层碳源/汇功能的调控机制等;

(4) 有机物质分解过程中的生化特性研究.主要包括凋落物的分解、纤维素半纤维素的降解、土壤有机质的变化及其对气候变化的响应等生态过程.从机理上客观揭示森林生态系统能流、物流等关键生态过程;

(5) 改进控制实验研究的方法和范围.尤其是增强高寒森林土壤有机层生化特性对气候变化与其它环境因素之间交互作用的响应等方面的研究;

(6) 与日益突出的生态环境问题的解决相结合.研究植被恢复与重建过程中土壤有机层及其生化特性的变化以及土壤汇、库、源对未来气候变化下的响应,可为制定退化生态系统恢复与重建的策略及减缓全球变化提供理论依据.

我国已经成为世界上第二大 CO_2 排放国,这将对我国建设全面小康社会的战略目标和国家利益产生显著的影响.以上研究的开展,正是为了更好地探讨全球气候变化对森林土壤有机层生化特性的影响机制.了解森林土壤有机层生化特性对全球气候变化的响应及其反馈,可以为评价森林健康以及生态系统的可持续发展提供依据.这些对于我国积极进行碳减排以及应对全球气候对我国经济、生态和社会的影响具有重要的意义.

References

- 1 Chapin FS III, Matson PA, Mooney HA. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. New York: Springer - Verlag, 2002
- 2 Lal R, Bruce JP. The potential of world cropland soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect. *Environ Sci Policy*, 1999, 2: 177 ~ 185
- 3 FAO. Production Yearbook. Rome, Italy: Food & Agric. Organization, 2006. 1 ~ 348
- 4 Melillo JM, Mc Guire AD, Kicklighter DW, Moore B. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 1993, 353: 234

- ~240
- 5 Dixon RK, Brown S., Houghton RA, Solomon A M, Trexler MC, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, **263**: 185 ~190
 - 6 Lal R. Forest soils and carbon sequestration. *For Ecol & Manag*, 2005, **220**: 242 ~258
 - 7 Yang WQ (杨万勤), Zhang J (张健), HU TX (胡庭兴), Luo CD (罗承德), Sun H (孙辉) eds. Forest Soil Ecology. Chengdu: Sichuan S & T Press, 2006. 488
 - 8 Yang WQ (杨万勤), Wang KY (王开运). Advances in Forest Soil Enzymology. *Sci Silv Sin* (林业科学), 2004, **40** (2): 152 ~159
 - 9 Papamichos N. Forest Soils. Aristotle University of Thessaloniki, 1990. 414
 - 10 Yang WQ, Wang KY, Kellomäki S, Gong HD. Litter dynamics of three subalpine forest in western Sichuan. *Pedosphere*, 2005, **15** (5): 653 ~659
 - 11 Yang WQ (杨万勤), Wang KY (王开运). Dynamics on soil nutrient pool. In: Wang KY (王开运), Yang WQ (杨万勤), Song GY (宋光煜), Hu TX (胡庭兴) eds. Processes of Subalpine Forest Ecosystems in the West of Sichuan. Chengdu (成都): Sichuan S & T Press (四川科技出版社), 2004. 200 ~285
 - 12 Prichard SJ, Peterson DL, Hammer RD. Carbon distribution in sub-alpine forests and meadows of the Olympic Mountain, Washington. *Soil Sci Soc Am J*, 2000, **64**: 1834 ~1845
 - 13 Hobbie L, McGovern M, Hurwitz LR, Pierro A, Liu NY, Bandyopadhyay A, Estelle M. The *atr6* mutants of *Arabidopsis thaliana* define a gene involved in auxin response and early development. *Development*, 2000, **127** (1): 23 ~32
 - 14 OHara SL, Street - Perrott FA, Burt TP. Climate change and soil erosion. *Nature*, 1993, **364**: 197
 - 15 Lal R. Global potential of soil C sequestration to mitigate the greenhouse effect. *Crit Rev Plant Sci*, 2003, **22**: 151 ~184
 - 16 Olsson BA, Staaf H, Lundkvist H, Bengtsson J, Rosen K. Carbon and nitrogen in coniferous forest soils after clear-felling and harvests of different intensity. *For Ecol & Manag*, 1996, **82** (1 ~3): 19 ~32
 - 17 Fin r L, Mannerkoski H, Piirainen S, Starr M. Carbon and nitrogen pools in an old - growth, Norway spruce mixed forest in eastern Finland and changes associated with clear-cutting. *For Ecol & Manag*, 2003, **174**: 51 ~63
 - 18 Quideau SA, Chadwick OA, Benesi A, Graham RC, Anderson MA. A direct link between forest vegetation type and soil organic matter composition. *Geoderma*, 2001, **4**: 41 ~60
 - 19 Currie WS. The responsive C and N biogeochemistry of the temperate forest floor. *Tree*, 1999, **14**: 316 ~320
 - 20 Batjes NH, Dijkshoorn JA. Carbon and nitrogen stocks in the soils of the Amazon Region. *Geoderma*, 1999, **89**: 273 ~286
 - 21 Berg MP, Kniese JP, Verhoef HA. Dynamic and stratification of bacteria and fungi in the organic layers of a Scots pine forest soil. *Biol Fert Soils*, 1998, **26**: 313 ~322
 - 22 Guo LB, Sims REH. Litter production and nutrient return in New Zealand eucalypt short - rotation forests: implications for land management. *Agri, Ecosyst & Environ*, 1999, **73**: 93 ~100
 - 23 Yang WQ (杨万勤), Wang KY (王开运). Advances on soil enzymology. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2002, **8** (5): 564 ~570
 - 24 Criquet S, Tagger S, Vogt G, Iacazio G, Le petit J. Laccase activity of forest litters. *Soil Biol & Biochem*, 1999, **31**: 1239 ~1244
 - 25 Sinsabaugh RL, Antibus RK, Linkins AE, McClaugherty CA, Rayburn L, Repert D, Weiland T. Wood decomposition: nitrogen and phosphorus dynamics in relation to extracellular enzyme activity. *Ecology*, 1993, **74**: 1586 ~1593
 - 26 Sinsabaugh RL, Moorhead DL. Resource allocation to extracellular enzyme production: a model for nitrogen and phosphorus control of litter decomposition. *Soil Biol & Biochem*, 1994, **26**: 1305 ~1311
 - 27 Taylor JP, Wilson B, Mills MS, Burns RG. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface and subsoils using various techniques. *Soil Biol & Biochem*, 2002, **34**: 387 ~401
 - 28 Curtis PS, Wang X. A meta-analysis of elevated CO₂ effects on woody plant mass, form, and physiology. *Oecologia*, 1998, **113**: 299 ~313
 - 29 Delucia E, Sasek TW, Strain BR. Photosynthetic inhibition after long-term exposure to elevated levels of atmospheric carbon dioxide. *Photosynthesis Res*, 1999, **7**: 175 ~184
 - 30 Kang H, Freeman C, Ashendon TW. Effects of elevated CO₂ on fen peat biogeochemistry. *Sci Total Environ*, 2001, **279**: 45 ~50
 - 31 Rustad LE, Campbell JL, Marion GM, Norby RJ, Mitchell MJ, Hartley AE, Cornelissen JHC. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia*, 2001, **126**: 543 ~562
 - 32 Tschenko D, Kandeler E, Jones T H. Effect of temperature on below-ground N-gynamics in a weedy model ecosystem at ambient and elevated atmospheric CO₂ levels. *Soil Biol & Biochem*, 2001, **33**: 49 ~50
 - 33 Zak DR, Pregitzer KS, Curtis PS, Teeri JA, Fogel R, Randlett DL. Elevated CO₂ and feedback between carbon and nitrogen cycles. *Plant & Soil*, 1993, **151**: 105 ~117
 - 34 Anderson T, Domsch K. Determination of ecophysiological maintenance carbon requirements of soil microorganisms in a dormant state. *Biol & Fert Soils*, 1985, **1**: 81 ~89
 - 35 Jonasson S, Vestergaard P, Jensen M, Michelsen. Effects of carbohydrate amendments on nutrient partitioning plant and microbial performance of a grassland-shrub ecosystem. *Oikos*, 1996a, **75**: 220 ~226
 - 36 Jonasson S, Michelsen A, Schmidt IK, Nielsen EV, Callaghan TV. Microbial biomass C, N and P in two arctic soils and responses to addition of NPK fertilizer and sugar: Implications for plant nutrient uptake. *Oecologia*, 1996b, **106**: 507 ~515
 - 37 Gallardo A, Schlesinger WH. Factors limiting microbial biomass in the mineral soil and forest floor of a warm-temperate forest. *Soil Biol & Biochem*, 1994, **26**: 1409 ~1415
 - 38 Aber J, McDowell W, Nadelhoffer K, Magill A, Bernstson G, Kamakea M, McNulty S, Currie W, Rustad L, Fernandez I. Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems. *BioScience*, 1998, **48**: 921 ~934
 - 39 Aber JD, Nadelhoffer KJ, Steudler P, Melillo JM. Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *BioScience*, 1989, **39**: 378 ~386
 - 40 Skeffington RA. Accelerated nitrogen inputs: a new problem or a new perspective? *Plant Soil*, 1990, **128**: 1 ~11
 - 41 Kazda M. Indications of unbalanced nitrogen of Norway spruce status. *Plant Soil*, 1990, **128**: 97 ~101
 - 42 Craine JM, Wedin DA, Reich PB. The response of soil CO₂ flux to changes in atmospheric CO₂, nitrogen supply and plant diversity. *Global Chang Biol*, 2001, **7** (8): 947 ~953

- 43 Berg B, Matzner E. Effect of N deposition on decomposition of plant litter and soil organic matter in forest ecosystems. *Environ Rev*, 1997, **5**: 1 ~ 25
- 44 Carreiro MM, Sinsabaugh RL, Repert DA, Parkhurst DF. Microbial enzyme shifts explain litter decay responses to simulated nitrogen deposition. *Ecology*, 2000, **81**: 2359 ~ 2365
- 45 Saiya - Cork KR, Sinsabaugh RL, Zak DR. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil. *Soil Biol & Biochem*, 2002, **34**: 1309 ~ 1315
- 46 Sinsabaugh RL, Carreiro MM, Repert DA. Allocation of ectracellular enzymatic activity in relation to litter composition, N deposition, and mass loss. *Biogeochemistry*, 2002, **60**: 1 ~ 24
- 47 Ekenler M, Tabatabai MA. β -Glucosaminidase activity of soils: effect of cropping systems and its relationship to nitrogen mineralization. *Biol & Fertil Soils*, 2002, **36**: 367 ~ 376
- 48 Olander LP, Vitousek PM. Asymmetry in N and P mineralization: regulation of extracellular phosphatase and chitinase activity by N and P availability. *Biogeochem*, 2000, **49**: 175 ~ 190
- 49 Zhang DC (张德成), Zhang DW (张东为), Qi TY (祁铁宇). Study on the effect of precipitation on forest leaching. *Inform Soil & Water Conserv* (水土保持科技情报), 2004, **3**: 15 ~ 16
- 50 Michel K, Matzner E. Nitrogen content of forest floor layers affects carbon pathways and nitrogen mineralization. *Soil Biol & Biochem*, 2002, **34**: 1807 ~ 1813
- 51 Lichter J, Lavine M, Mace K, Richter D, Schlesinger W. Throughfall chemistry in a loblolly pine plantation under elevated atmospheric CO₂ concentrations. *Biogeochemistry*, 2000, **50**: 73 ~ 93