

文章编号: 1001-8166(2005)01-0099-07

土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展*

周 莉^{1,2,3}, 李保国¹, 周广胜^{2*}

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094; 2. 中国科学院植物研究所植被数量生态学
重点实验室, 北京 100093; 3. 西华师范大学生物系, 四川 南充 637002)

摘 要: 土壤有机碳库是全球碳循环的重要组成部分, 其积累和分解的变化直接影响全球的碳平衡。理解土壤有机碳蓄积过程对生物、物理和人为因素的响应, 把握关键的控制因子是准确预测土壤有机碳在全球变化情景下对大气 CO₂ 的源/汇方向及准确评估碳收支的关键。综述了土壤有机碳主导影响因子的研究进展, 并针对陆地碳循环特点, 提出未来土壤有机碳研究应加强土壤有机碳过程与状态的量化、土壤有机碳分解对环境因子的敏感性、氮沉降对土壤有机碳的影响、土壤有机碳对气候变率的响应及其反馈作用, 以及土壤有机碳动态的综合模拟 5 个方面的研究, 为准确评估陆地碳收支提供依据。

关 键 词: 陆地碳库; 土壤有机碳; 全球变化; 影响因子

中图分类号: S153 **文献标识码:** A

土壤是陆地生态系统中最大的有机碳库。据估算, 全球 1 m 深度的土壤中贮存的有机碳量约为 1 500 Gt, 超过了植被与大气有机碳储量之和^[1]。在 2~3 m 深度范围的土层中还贮存着约 842 Gt 的有机碳^[4]。土壤有机碳不仅为植被生长提供碳源、维持土壤良好的物理结构, 同时也以 CO₂ 等温室气体的形式向大气释放碳。由于土壤碳的库容巨大, 其较小的变幅即能导致大气 CO₂ 浓度较大的波动, 因而在全球碳循环过程中起着极其重要的作用。以气候变暖为标志的全球变化也必将影响到土壤中有有机碳的滞留与周转, 而这些变化又将对气候变暖产生反馈作用, 加速或减缓全球气温上升的速率。因此, 全面理解土壤有机碳的变化过程及其关键控制因子, 不仅有助于正确评估土壤有机碳的变化方向和速率, 而且有助于正确评估全球碳循环, 对于准确地预测气候变化以及制定应对气候变化的策略和措施具有重要的意义。

土壤有机碳不是一种单纯的化合物, 它包括植物、动物及微生物的遗体、排泄物、分泌物及其部分分解产物和土壤腐殖质。土壤有机碳的储量则是进入土壤的植物残体量及其在土壤微生物作用下分解损失量二者之间平衡的结果^[3], 其库容的大小受气候、植被、土壤理化特性以及人类活动等诸多物理、生物和人为因素的影响, 尤其是这些因子间的相互作用对土壤有机碳的动态变化至关重要。正因为如此, 关于影响土壤有机碳的主导因子及其定量描述一直受到碳循环研究者的高度关注。但目前关于土壤有机碳的主导控制因子及其控制过程仍了解不足, 这制约着大气碳收支的准确评估, 是出现未知碳汇、预测气候变化及其影响不确定性的主要原因。为此, 本文试图综述土壤有机碳主导影响因子的研究进展, 以增进关于生物、物理和人为干扰诸多因子对土壤有机碳的作用的理解, 把握其关键控制因子, 进而针对陆地碳循环特点, 提出未来土壤有机碳研

* 收稿日期: 2003-11-03; 修回日期: 2004-05-17。

* 基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”(编号: KZCX1-SW-01-12); 国家自然科学基金重点
项目“中国东北样带典型生态系统碳循环的过程与机理”(编号: 40231018)资助。

作者简介: 周莉(1975-), 女, 四川人, 硕士研究生, 主要从事土壤有机碳研究。E-mail: jasmine-lz@yahoo.com.cn

* 通讯作者: 周广胜(1965-), 男, 江苏高淳县人, 研究员, 主要从事全球生态学研究。E-mail: zhousg@public2.bta.net.cn

究的重点。

1 气候因子对土壤有机碳的影响

在土壤有机碳的蓄积过程中, 气候因子起着重要的作用。一方面, 气候条件制约植被类型、影响植被的生产力, 从而决定输入土壤的有机碳量; 另一方面, 从土壤有机碳的输出过程来说, 微生物是其分解和周转的主要驱动力, 气候通过土壤水分(同时影响土壤通气状况)和温度等条件的变化, 影响微生物对有机碳的分解和转化^[4, 5]。

在土壤有机碳的输入与分解过程中起作用的气候因子主要是温度和水分。湿热的热带雨林具有最高的净初级生产力, 其年枯枝落叶量也最大, 变化在 $5.5 \sim 15.3 \text{ t/hm}^2$; 而北极的山地森林, 其年枯枝落叶量最小, 为 $0.6 \sim 1.5 \text{ t/hm}^2$ 。但是, 植物碎屑的大量输入未必导致土壤有机碳的大量蓄积, 全球生物群落的土壤有机碳贮量与净初级生产力(NPP)之间的关系极其微弱^[1, 6]。据 Post^[7] 对全球不同生命地带的陆地碳密度研究, 最高碳密度在冻原 (36.6 kg/m^2), 而最低碳密度则在干旱高温的暖温带沙漠 (1.4 kg/m^2)。我国不同气候植被带下土壤碳的分布也有与之相一致的特点: 在寒温带针叶林下土壤有机碳的含量最高, 达到 73 g/kg ; 而在荒漠草原土壤有机碳的含量最低, 仅为 3.6 g/kg ^[8]。温度和水分二者的综合配置决定着土壤有机碳的地理地带性分布。

在干旱半干旱地区, 降水的季节分布差异很大, 由此导致频繁的土壤干湿交替对有机碳在土壤中的蓄积也有重要影响^[5]。干湿交替使得土壤团聚体崩溃, 团粒内受保护的有机碳被暴露于空气中, 土壤呼吸作用强度在极短的时间内被大幅度地提高, 使有机碳的矿化分解量增加。同时, 干燥也将引起部分土壤微生物的死亡。这都将在一定程度上加速或减缓有机碳的分解速率, 改变土壤中有机碳的储量。

全球变暖是全球变化的主要标志, 由此引起的温度与湿度的变化亦必将对土壤有机碳产生重要影响。气候变暖影响土壤有机碳主要有 2 条途径: 一是影响植物的生长, 改变植物残体向土壤的归还量; 二是影响有机碳分解的速率, 改变土壤中有机碳的释放量^[9]。大量研究表明, 全球温度的上升不仅将提高植被的净初级生产力(NPP), 同时也将促进土壤中有机碳的分解。而植物 NPP 和土壤有机碳分解二者对温度的相对敏感性将在很大程度上决定全球变暖下土壤有机碳对大气 CO_2 的源/汇作用^[4, 10]。

全球变暖使植被的生长季延长, 光合作用效率

提高, 从而增加陆地植被的 NPP。气温的上升还促进土壤养分的矿化、增加养分的释放及其对植物生长的有效性, 而许多中纬度森林的生长均在一定程度上受到 N 素供给的限制, 由气候变暖提高的土壤 N 素的有效性将间接地促进植被生物量的增长^[11~13]。但是, 植物 NPP 的增长并不意味着土壤有机碳净储量的增加, 因为温度上升, 一方面可能引起干旱的发生从而限制植物的 NPP; 另一方面在促进植物生长的同时也刺激微生物种群的增长, 从而改变土壤有机碳的分解速率^[11]。而且, 全球变暖导致的永久冻土的融化也加速了土壤中有机碳的分解释放。冻融条件下土壤有机碳库的稳定性将依赖于解冻的深度及其持续的时间^[14]。

一些模型模拟结果表明, 全球变暖将会导致土壤中有有机碳的损失^[9, 15]。但由于其没有区分土壤有机碳各组分间对温度敏感性的差异, 也没有考虑土壤有机碳的分解对温度的敏感性随时间的动态变化, 所以可能高估了全球变暖情景下土壤碳的释放。同时, 大气 CO_2 浓度升高的“施肥效应”也确实部分地补偿了由于气候变暖所导致的土壤有机碳的分解损失^[16]。综合而言, 在今后的几十年到百年的期间土壤有机碳储量的变化可能不大^[10, 16]。

2 大气成分对土壤有机碳的影响

大气中 CO_2 浓度的上升可促进植物光合作用和干物质的积累, 提高生态系统生产力, 特别是光合产物向地下部分分配的比例上升, 植物的根冠比增大; 同时, 根系部分细根的增加比粗根要多^[17], 从而将导致土壤有机碳输入量增加。

大气 CO_2 浓度升高也将影响土壤有机碳的分解过程。大气 CO_2 浓度升高后, 植被的群落结构发生变化, 不仅改变进入土壤的凋落物数量, 而且也改变凋落物的种类组成和化学质量(如 C/N 上升等)。研究表明, 在大气 CO_2 浓度倍增时, 植物的 C/N 可能上升 $20\% \sim 40\%$, 甚至提高 1 倍。当植物残体的 C/N 超过一定数值时, 土壤有机碳的矿化过程会因 N 素营养不足而受到抑制^[17]。大气 CO_2 浓度上升后, 植物残体中酚类化合物含量的上升也将导致分解速率的下降^[18]。从土壤有机碳分解周转的主要驱动力——微生物而言, 大气 CO_2 浓度的增加使得根系 CO_2 的通量增加, 对微生物的碳供应也增加, 进而促进微生物的种群增长、生物活性提高, 导致土壤有机碳的分解加速。

Cao^[15] 利用 CEVSA 模型模拟了在大气 CO_2 浓度

增加及其气候变化情景下陆地生态系统碳循环动态(1861—2070年)。结果表明,在 CO_2 浓度增加(从 288×10^{-6} 增加到 640×10^{-6})、气候变暖(从 12.5°C 上升到 15.5°C)及其降水格局发生变化的条件下,植物NPP和土壤有机碳储量均呈现上升的趋势;而当单独考虑气候变化时,土壤有机碳的储量大幅度下降。这说明应该综合考虑大气 CO_2 浓度变化和气候变化带来的影响,其对土壤有机碳变化的最终贡献量取决于 CO_2 浓度变化、气候变化与其它环境因子(如土壤水分有效性及其土壤养分状态)的变化综合作用。

3 植被对土壤有机碳的影响

(1) 土壤有机碳的输入量。不同植被类型之间光合产物的分配模式相差较大,草原植被光合作用所同化的有机产物中的92%以上分布在地下,而森林植被光合产物分配到地下部分的比例则较低。植被类型间植物的生长方式也有差异,草原植被尤其是一年生草本植物每年均有大量的根系死亡进入土壤碳循环过程;而森林植被土壤有机碳的主要来源多为枯枝落叶。这些差异决定了不同植被类型下土壤有机碳输入量的差异。在气候相同时,草原土壤有机碳约为森林土壤有机碳的2倍^[19]。

不同类型植被将形成特定的土壤表层小气候^[20]。如人工林由于冠层的遮阴和较大的蒸腾速率,其土壤表层一般较草地土壤表层的温度低且较为干燥,从而导致其地表凋落物的分解速率下降。

全球尺度上,土壤有机碳的水平分布特征主要受气候的影响,但其在土壤剖面上的垂直分布则主要受植被类型的影响。据Jobbágy等^[2]的研究,灌木、草原和森林土壤表层20 cm有机碳占1 m深度土层中有机碳的百分比分别为33%、42%和50%,其与植被类型显著相关(定义植被类型为定序变量,灌木=1、草地=2、森林=3), $r^2=0.32$, $P<0.001$ 。根系的垂直分布格局和光合产物的分配共同决定着土壤有机碳的垂直分布特征。根系的垂直分布(如深根系、浅根系)直接影响输入到土壤剖面各个层次的有机碳数量;而且随土层深度的增加分解者的活动减弱,导致植物碎屑在土壤中的位置越深,其分解也越慢^[20]。研究还发现,从全球及生物群区水平来说,植被根系的分布比土壤有机碳的分布要浅^[2],究其原因可能是随着土壤深度的增加,土壤有机碳的周转变慢,而且根组织的化学组成也随深度变化,加之土层较深处的养分含量较低也减缓了有机碳的分

解。对于周转速率缓慢的碳库来说,植被的印记将持续百年到千年。所以,在植被类型发生变化的地点,这些分解缓慢的有机碳库的存在将冲淡植被与土壤有机碳的剖面分布之间的联系。

(2) 输入土壤的有机碳质量。植被的物种组成在某种程度上控制着土壤有机碳分解的速度。土壤有机碳主要来源于植被地上部分的凋落物及其地下部分根的分泌物和根周转产生的碎屑。这些碳水化合物均具有各自的化学特性,从而导致其在土壤中分解速率各不相同。如植物碎屑的分解速度与其木质素和N素的相对含量密切相关。木质素不仅自身难于分解,而且还对易分解的土壤有机碳具有屏蔽保护的作用,因而,随着碎屑中木质素的含量增加,其分解速率呈下降趋势^[3,20]。

4 土壤理化特性对土壤有机碳的影响

土壤理化特性在局部范围内影响土壤有机碳的含量^[5],其中研究最多的是土壤质地与有机碳蓄积的关系。一般认为,土壤中的有机碳量随粉粒和粘粒含量的增加而增加。这主要反映在粉粒对土壤水分有效性、植被生长的正效应及其粘粒对土壤有机碳的保护作用,而粘粒的保护作用则主要是通过有机碳结合形成有机-无机复合体实现的。另外,土壤质地不仅影响土壤中有机碳的蓄积量,还影响其在土壤有机碳的各组分中的分配^[21,22]。但也有研究表明,土壤质地与土壤有机碳量之间没有明显关系,说明质地对土壤有机碳的影响在不同的地区有明显的差异,也体现了当前研究的不足。

其它土壤特性,如粘土矿物类型、pH值、物理结构及其养分状况等均会影响有机碳在土壤中的蓄积。不同类型的矿物对土壤有机碳的保护作用有差异^[23]。土壤微生物的活性要求一定的酸度范围,pH值过高(>8.5)或过低(<5.5)对大部分微生物都不大适宜,会抑制其活动,从而使有机碳分解的速率下降。如在酸性土壤中,微生物种类受到限制而以真菌为主,从而减慢了有机物质的分解^[24]。土壤的物理结构则通过调节土壤中空气和水的运动,影响微生物的活动。就土壤养分来说,不仅其可利用的养分状况影响植被的生长,而且微生物同化1份的N需24份C,土壤中矿质态N的有效性直接控制土壤有机碳的分解速率。

5 人为因素对土壤有机碳的影响

5.1 土地利用方式的变化

土地利用方式的改变将导致覆被类型的变化,

包括森林转换为草地或农田、草地转换为农田以及退耕还林(草)等^[25]。覆被类型的变化不仅直接影响土壤有机碳的含量和分布,还通过影响与土壤有机碳形成和转化有关的因子而间接影响土壤有机碳^[26]。

(1) 森林利用方式的变化。森林土壤中贮存的有机碳约占全球陆地土壤有机碳总量的 40%^[27]。而仅在 20 世纪 90 年代,人口剧增引起的粮食需求增加就使得每年约 1 200 万 hm^2 林地变为耕地、250 万 hm^2 的林地变为草地^[25]。森林转变为农田,土壤碳的损失达 25%~40%,其中耕作层(0~20 cm)的损失量最大(40%)。损失的绝对量还取决于气候条件、管理措施及其原来土壤的初始碳含量。有机碳含量越丰富的土壤,损失量越大^[27,28]。森林转变为牧场(或草地)导致的损失较之转变为耕地导致的损失要少,约为 20%。另外,森林退化也会改变森林的立地结构、微气候和土壤状况,从而影响森林的固碳能力和土壤碳的排放。但目前关于森林退化方面的研究还较少^[29]。

采伐本身对土壤有机碳含量的影响并不大,在多数情况下森林采伐后土壤碳含量没有明显的变化。但个别的研究发现,矿质土壤中的碳含量在采伐后有所增加,这是因为留在林地的采伐残留物,经分解和淋溶作用而使得土壤有机碳增加。采伐后的土地利用方式对土壤有机碳的影响很大:转变为农田会使土壤有机碳含量迅速减少,平均达 21%;转变为牧场,其土壤有机碳的下降比农垦少甚至有所增加。而原始林采伐后营造人工林,其土壤有机碳的恢复过程比次生林要快,其速率还取决于树种和环境因子。凋落物多、根生长快的树种,其林地土壤有机碳的恢复过程相对较快^[29]。

(2) 草地利用方式的变化。草原占陆地生态系统总面积的 16.4%,贮存的碳量为 $3.08 \times 10^{11} \text{ tC}$,其中约 90%贮存在草地土壤中。当草地转变为农田,土壤有机碳的损失达 30%~50%。在 1850—1980 年间,由于草地转变为农田,草地生态系统的碳素净损失量约为 $10 \times 10^9 \text{ t C}$ ^[28]。

过度放牧条件下植被的初级生产力下降,加之动物的采食使得土壤有机碳的输入量下降。放牧还促进土壤呼吸作用、有机碳的分解加快。放牧条件下,群落物种组成的改变不仅影响有机碳输入的数量,也影响输入土壤的有机碳的化学质量,从而影响有机碳在土壤中的蓄积^[28]。我国锡林浩特羊草草原经过 40 年的过度放牧,土壤有机碳的损失达

12.4%^[30]。

(3) 退耕还林草。土地覆被类型的变化也有积极的一面,如退耕还林草。据 FAO 统计,1990—1995 年间发达国家的森林面积增加了 $8.8 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。在农田转变为林地的过程中,土壤中有有机碳的含量逐渐上升,并最终有大幅度增长^[27],其蓄积的速率受到气候、土壤质地、造林前的整地及其造林后的管理措施等因子的影响^[32]。根据 Johnson 等^[29]对一些原来为农地的森林进行的追踪调查,在 15 cm 以内的表土层有机碳含量在造林 83 年后增长了 80%。

5.2 耕作方式与管理

传统的耕作方式破坏土壤的团聚体结构,使土壤有机碳失去保护暴露出来;耕作中表层的土壤充分混合,干湿交替的频度和强度增加,土壤的通气性及孔性变好,土壤水分及其温度状况均得到一定改善,微生物活性提高,加速土壤有机碳的分解^[5]。其次,作物相对于多年生牧草及其林木,光合产物向地下部分分配的比例下降;收割又使得以地面凋落物形式进入土壤的有机碳量下降。耕垦还增加了土壤的易受侵蚀性,也导致了土壤有机碳量的下降。对于不同的地区、不同的土壤类型以及不同的开垦年限,开垦对土壤有机碳含量产生影响的程度有所不同,其下降变化幅度介于 10%~60%之间,其中土壤表土层下降幅度最大(32%~60%)。在土壤管理状况保持不变的前提下,土壤开垦后有机碳水平下降直到达到新的平衡,然后保持相对稳定。达到新平衡的时间对于不同类型的土壤有所不同,而预测开垦后土壤有机碳含量下降后达到新的平衡点的时间,对于调控土壤生态系统转向持续发展的方向具有重要的意义^[33]。

撂荒也即保护性闲置,其目的主要是通过植被的自然演替来恢复土壤肥力。耕地撂荒后土壤有机碳有所增加,增加的速率及其最终达到的稳定水平取决于植被的生产力水平和土壤条件。如果撂荒前的开垦地破坏严重,土壤有机碳含量的恢复将极为有限^[34]。

轮作包括粮草轮作和林粮轮作,选择具有较高的生物量和 C/N 的植物种与作物轮作,辅之以秸秆还田措施,可以增加根系及其残体的数量、改变残体的化学质量影响其矿化固定,从而降低传统种植制度对土壤有机碳的衰减效应。而且,轮作改变了根际的微生物群落组成,有减轻或消除病害的作用^[5]。据李忠佩^[36]对中国东部红壤的研究结果,相对于常规耕作下小于 7 g/kg 的土壤有机碳含量,林粮轮作

下的土壤有机碳含量为 9 ~ 11 g/kg, 达到红壤的中高肥力水平。农林复合, 不仅增加了归还量(林木凋落物、死根、根系脱落物等), 而且降低了水土流失。

免耕也称为零耕作或者直接播种, 不扰动土层, 土壤团聚体的数量和稳定性增加从而减少了团聚体内部有机质的分解作用^[37]。免耕还有效地抑制了土壤的过度通气, 减少了有机碳的氧化降解, 还可以防止土壤侵蚀^[5]。因此, 免耕的土壤有机碳的含量比传统耕作的土壤高。而且, 长期连续免耕使土壤耕层变浅, 植物根系多集中分布于表土层; 植物的残体及连年施入的有机肥也主要积累于表土中, 所以有机碳含量的增加在土壤表层更显著^[37]。

施肥将改变土壤中碳氮的可矿化量、微生物碳氮磷含量及其微生物活性, 施肥对土壤有机碳的影响因肥料的种类而异。一般来说, 施有机肥或与无机肥配合施用, 既补充输入了有机碳源又改善土壤物理性状, 不仅土壤有机碳的总量增加, 而且活性有机碳部分的含量增加; 而长期的单独施用无机肥, 尤其是无机氮肥, 虽然促进了根的生长、增加了植物根茬等的残留, 但由于土壤的 C/N 值下降、土壤微生物的活性提高, 加速了土壤原有碳和新鲜的有机碳的分解矿化, 不仅土壤中有机碳总量下降, 而且轻组有机碳量的减少大大超过重组碳, 结果土壤中难氧化有机碳含量上升、土壤有机质老化^[37~39]。为改善土壤的酸化常施用石灰, 其与酸性土壤中的 H^+ 发生碳酸氢盐平衡反应并释放 CO_2 , 释放的速率随土壤条件和所施用石灰的化合物种类而变化。就作物残留物的管理方式而言, 焚烧秸秆不仅直接释放碳, 还加快土壤有机碳的分解损失; 而秸秆还田则可以缓解土壤有机碳的下降。秸秆焚烧转变为秸秆还田后, 土壤中的颗粒有机质碳上升可达 30%。

土壤有效碳库对农田管理措施变化比总的有机碳库有更大敏感性, 而且土壤有效碳库在调节土壤碳素和养分流向方面有重要作用, 与土壤潜在生产力关系密切, 因而探求全球变化的情景下土壤有效碳库的动态将有更深远的意义。

6 展望

土壤 0 ~ 1 m 土层中以有机质的形式贮存着 1 500 Gt C, 其贡献于大气的 CO_2 年通量约为 50 ~ 76 Pg C, 是燃烧化石燃料贡献量的 10 倍。巨大的库量和年通量使土壤有机碳成为全球碳循环的重要内容。气候、植被、土壤的理化特性及其人类活动等诸多因子影响着有机碳在土壤中的动态平衡。全球变

化情景下土壤有机碳库将会发生如何的变化、对于大气 CO_2 将是源还是汇, 直接决定着将来气候变化预测的准确度。而正确地认识与理解土壤有机碳蓄积过程及其关键影响因子则是准确评估土壤有机碳变化的方向和速率的关键科学问题。

土壤有机碳的贮量不仅与气候变化有关, 而且与其它自然过程(水循环、养分循环、生物多样性等)及人类活动密切相关。尽管关于土壤有机碳的影响因子已经进行了大量研究, 但这些研究或停留在定性的描述研究, 或仅考虑部分因子的影响, 从而制约着对土壤有机碳过程与源汇的理解, 制约着碳收支的准确评估。为此, 未来土壤有机碳须加强以下方面的研究, 从而为准确评估陆地碳收支提供依据。

(1) 土壤有机碳过程与状态的定量描述。主要是从土壤有机碳贮量的饱和性(saturation)、稳定性(stability)、归因(attribution)及其时空尺度(temporal and spatial scales)变异等方面综合研讨土壤有机碳贮量及其变化特征, 提出更恰当的土壤有机碳周转概念模型, 包括影响土壤有机碳贮量重要过程的范围、这些过程相互影响的方式以及分离这些过程的程度等。

(2) 土壤有机碳分解对环境因子, 特别是温度的敏感性研究。这也是目前关于土壤有机碳动态研究中最有争议的课题^[4, 40~42]。

(3) 氮沉降对土壤有机碳的影响研究。目前关于土壤有机碳动态变化的研究大多关注大气 CO_2 浓度的变化及由此引起的气候变化的作用, 而较少考虑“氮沉降”对土壤有机碳的影响。

(4) 土壤有机碳对气候变率的响应及其反馈作用。虽然目前关于土壤有机碳与气候变化的作用有较多研究, 但大多集中于平均状况的研究, 而较少考虑气候干扰频度在时间、空间上的变化以及这些因子间的相互作用对土壤有机碳动态将产生如何的影响。

(5) 土壤有机碳动态的综合模拟。建立基于主导影响因子的土壤有机碳动态模型是理解土壤有机碳变化及其对环境响应的关键。现有的模型大多只是反映了某些影响因子及其未来情景将对土壤有机碳产生的影响, 没有反映综合因子的影响, 特别是对于人类活动影响的定量描述还很不够, 亦没有将土壤有机碳对全球变化的反馈体现出来。

参考文献(References):

- [1] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47: 151-163.

- [2] Jobb gy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. *Ecological Applications*, 2000, 10: 423-436.
- [3] Post W M, King A M, Wullschlegel S D. Soil organic matter models and global estimates of soil organic carbon [A]. In: Powlson D S, *et al* eds. *Evaluation of Soil Organic Matter Models* [C]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1996. 201-224.
- [4] Davidson E A, Trumbore S E, Amundson R. Soil warming and organic carbon content [J]. *Nature*, 2000, 408(14): 789-790.
- [5] Huang Changyong. Pedology [M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000 [黄昌勇主编. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [6] Li Yuning, Wang Guanyu, Li Wei. Soil respiration and carbon cycle [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2): 351-357. [李玉宁, 王关玉, 李伟. 土壤呼吸作用和全球碳循环 [J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 351-357.]
- [7] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, *et al.* Soil carbon pools and world life zones [J]. *Nature*, 1982, 298(8): 156-159.
- [8] Lin Xinxiong. States and management of soil organic matter in China [A]. In: Shen Shannin eds. *Soil Fertility in China* [C]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1998. 111-153. [林心雄. 中国土壤有机质状况及其管理 [A]. 见: 沈善敏主编. 中国土壤肥力 [C]. 北京: 中国农业出版社, 1998. 111-153.]
- [9] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming [J]. *Nature*, 1991, 351(23): 304-306.
- [10] Kirschbaum M U F. Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming? [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 21-51.
- [11] Ni Jian, Zhang Xinshi. Influences of changed CO₂ concentration and climate change on terrestrial ecosystems [J]. *Exploration of Nature*, 1998, 17(1): 1-6. [倪健, 张新时. CO₂ 增浓和气候变化对陆地生态系统的影响 [J]. 大自然探索, 1998, 17(1): 1-6.]
- [12] Luo Yiqi, Wan Shiqiang, Hui Dafeng, *et al.* Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie [J]. *Nature*, 2001, 413: 622-625.
- [13] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, *et al.* Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system [J]. *Science*, 2002, 298: 2 173-2 176.
- [14] Goulden M L, Wofsy S C, Harden J W, *et al.* Sensitivity of Boreal forest carbon balance to soil thaw [J]. *Science*, 1998, 279: 214-217.
- [15] Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change [J]. *Nature*, 1998, 393: 249-252.
- [16] Price D T, Peng C H, Apps M J, *et al.* Simulating effects of climate change on boreal ecosystem carbon pools in central Canada [J]. *Journal of Biogeography*, 1999, 26: 1 237-1 248.
- [17] Zhang Linbo, Cao Hongfa, Gao Jixi, *et al.* Effect of plant changes induced by elevated atmospheric CO₂ on soil Biota [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1998, 17(4): 33-38. [张林波, 曹洪法, 高吉喜, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对土壤微生物的影响 [J]. 生态学杂志, 1998, 17(4): 33-38.]
- [18] Wang Xingfen, Bai Kezhi, Kuang Tingyun. Responses of plant dark respiration to doubled CO₂ concentration [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1997, 9(9): 849-854. [汪杏芬, 白克智, 匡廷云. 大气 CO₂ 浓度倍增对植物暗呼吸的影响 [J]. 植物学报, 1997, 9(9): 849-854.]
- [19] Zhang Fengrong. Pedogeography [M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2001. [张凤荣. 土壤地理学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.]
- [20] Berger T W, Neubauer C, Glatzel G. Factors controlling soil carbon and nitrogen stores in pure stands of Norway spruce (*Picea abies*) and mixed species stands in Austria [J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 159: 3-14.
- [21] Hook P B, Burke I C. Biogeochemistry in a shortgrass landscape: Control by topography, soil texture and microclimate [J]. *Ecology*, 2000, 81(10): 2 686-2 703.
- [22] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, *et al.* Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains Grasslands [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51: 1 173-1 179.
- [23] Jeffrey E Herrick, Michelle M Wander. Relationships between soil organic carbon and soil quality in cropped and rangeland soils: The importance of distribution, composition, and soil biological activity [A]. In: Lal R, *et al* eds. *Soil Processes and the Carbon Cycle* [C]. Boca Raton: CRC Press, 1997. 405-425.
- [24] Li Zhong, Sun Bo, Lin Xinxiong. Density of soil organic carbon and the factors controlling its turnover in east China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2001, 21(4): 301-307. [李忠, 孙波, 林心雄. 我国东部土壤有机碳的密度及转化的控制因素 [J]. 地理科学, 2001, 21(4): 301-307.]
- [25] Zhou Guangsheng, Wang Yuhui, Jiang Yanling, *et al.* Conversion of terrestrial ecosystems and carbon cycling [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(2): 250-254. [周广胜, 王玉辉, 蒋延玲, 等. 陆地生态系统类型转变与碳循环 [J]. 植物生态学报, 2002, 26(2): 250-254.]
- [26] Wang Yanfen, Chen Zuozhong, Lany T. Distribution of soil organic carbon in the major grasslands of Xilinguole, Inner Mongolia, China [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(6): 545-551. [王艳芬, 陈佐忠, 兰玉 T. 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响 [J]. 植物生态学报, 1998, 22(6): 545-551.]
- [27] Thuille A, Buchmann N, Schulze E D. Carbon stocks and soil respiration rates during deforestation, grassland use and subsequent Norway spruce afforestation in the Southern Alps, Italy [J]. *Tree Physiology*, 2000, 20: 849-857.
- [28] Zhou Guangsheng. Global Carbon Cycle [M]. Beijing: Meteorological Press, 2003. [周广胜. 全球碳循环 [M]. 北京: 气象出版社, 2003.]
- [29] Xu Deying. The effect of Human management activities on the carbon in forest soils [J]. *World Forestry Research*, 1994, 5: 26-31. [徐德应. 人类经营活动对森林土壤碳的影响 [J]. 世界林业研究, 1994, 5: 26-31.]
- [30] Li Linghao. Effects of land-use change on soil carbon storage in grassland ecosystems [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(4): 300-302. [李凌浩. 土地利用变化对草原生态系统土壤碳贮量的影响 [J]. 植物生态学报, 1998, 22(4): 300-302.]

- [31] Holt J A. Grassing pressure and soil carbon, microbial biomass and enzyme activities in semiarid northeastern Australia [J]. *Applied Soil Ecology*, 1997, 5: 143-149.
- [32] Paul K I, Polglase P J, Nyakuengana J G, *et al.* Change in soil carbon following afforestation [J]. *Forest Ecology and Management*, 2002 168: 241-257.
- [33] Liang Wenji, Wen Dazhong, Li Weiguang *et al.* Effects of cultivation on soil organic carbon dynamics in agroecosystems[J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2000, 16(4): 241-244. [梁文举, 闻大中, 李维光, 等. 开垦对农业生态系统土壤有机碳动态变化的影响[J]. 农业系统科学与综合研究, 2000, 16(4): 241-244.]
- [34] Tian Hongyan, Zhou Daowei, Guo Ping. The change of soil and vegetation with different years of leaving uncultivated[J]. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 2001, 33(4): 72-77. [田洪艳, 周道玮, 郭平. 不同撂荒年限的草原农田土壤及植被的变化规律研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2001, 33(4): 72-77.]
- [35] Knops J M H, Tilman D. Dynamics of soil nitrogen and carbon accumulation for 61 years after agricultural abandonment [J]. *Ecology*, 2000, 81(1): 88-89.
- [36] Li Zhongpei, Tang Yongliang, Shi Hua, *et al.* Characteristics of C and N accumulation in infertile red soil under different rotation systems[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(10): 1 236-1 242. [李忠佩, 唐永良, 石华, 等. 不同轮作措施下瘠薄红壤中碳氮积累特征[J]. 中国农业科学, 2002, 35(10): 1 236-1 242.]
- [37] Xu Yangchun, Shen Qirong, Ran Wei. Effects of zero-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N, and P after sixteen years of cropping[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(1): 89-96. [徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用化肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 89-96.]
- [38] Ma Chengze, Zhou Qin, He Fang, *et al.* Surplus-deficit distribution of organic carbon in soil under combined fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1996 31(1): 35-41. [马成泽, 周勤, 何方, 等. 不同肥料配合施用土壤有机碳盈亏分布[J]. 土壤学报, 1996, 31(1): 35-41.]
- [39] Shen Hong, Cao Zhihong. Effect of long-term fertilization on soil available carbon pool and available ratio of soil carbon under different agroecosystems[J]. *Tropical and Subtropical Soil Science*, 1998, 7(1): 1-5. [沈宏, 曹志洪. 长期施肥对不同农田生态系统土壤有效碳库及碳素有效率的影响[J]. 热带亚热带土壤科学, 1998, 7(1): 1-5.]
- [40] Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature [J]. *Nature*, 2000, 404(20): 858-861.
- [41] Trumbore Susan E, Chadwick Oliver A, Amundson Ronald. Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature change [J]. *Science*, 1996 272(19): 393-396.
- [42] Valentini R, Matteucci G, Dolman A J, *et al.* Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests[J]. *Nature*, 2000, 404(20): 861-865.

ADVANCES IN CONTROLLING FACTORS OF SOIL ORGANIC CARBON

ZHOU Li^{1, 2, 3}, LI Bao-guo¹, ZHOU Guang-sheng²

(1. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100094, China;
2. Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; 3. Department of Biology, China West Normal University, Nanchong Sichuan 637002, China)

Abstract: Soil organic carbon (SOC) is an important component of the global carbon cycle, and it has direct effects on the global carbon balance. Better understanding of the controlling factors of SOC and how SOC may respond to environmental changes are important to the accuracy for predicting the consequences of SOC under global change and evaluating the carbon budget. In this paper, the effects of climate, atmospheric composition, vegetation, soil property, land use and management practices on soil organic carbon (SOC) are presented. Based on this, some important tasks are also proposed, including (1) quantifying processes and states of SOC; (2) determining the controlling factors; (3) the effects of nitrogen deposition on SOC; (4) the responses and feedback of SOC to climate variability; and (5) the synthetic simulating SOC dynamics.

Key words: Soil organic carbon; Global change; Influence factors.