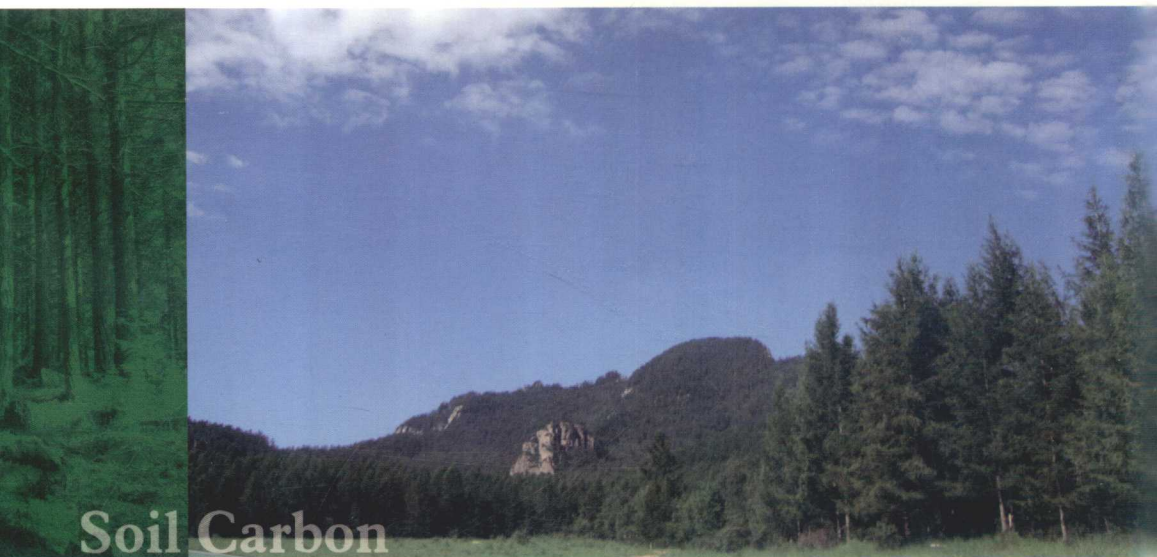


© 武小钢 著

山西省典型森林 及湿地生态系统 土壤碳、氮库研究

Study of Soil Carbon and Nitrogen Storage
in Forest and Wetland Ecosystem in Shanxi Province



Soil Carbon

Nitrogen Storage

中国林业出版社

山西省典型森林及湿地生态系统 土壤碳、氮库研究

Study of Soilcarbon and Nitrogen Storage in Forest
and Wetland Ecosystem in Shanxi Province

武小钢 著

中国林业出版社

图书在版编目(CIP)数据

山西省典型森林及湿地生态系统土壤碳、氮库研究/武小钢著. -- 北京 : 中国林业出版社, 2013. 12

ISBN 978-7-5038-7291-4

I. ①山… II. ①武… III. ①森林生态系统-研究-山西省 ②沼泽化地-生态系统-研究-山西省 IV. ①S718.55 ②P942.257.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 294660 号

出版 中国林业出版社(100009 北京西城区刘海胡同7号)
E-mail liuxr.good@163.com 电话 (010)83228353
网址 <http://lycb.forestry.gov.cn>

印刷 北京北林印刷厂
版次 2013年12月第1版
印次 2013年12月第1次
开本 720mm×1000mm 1/16
印张 8.5
字数 152千字
定价 48.00元

前 言

碳、氮元素是土壤中的两种关键生源要素，土壤中有有机碳和全氮的含量变化显著影响着生态系统的生产力。森林生态系统占据了全球碳收支的重要部分，据估计森林土壤占全球土壤有机碳库的70%~73%，森林碳库尤其是森林土壤碳库的微小变化，都可引起大气CO₂浓度的显著变化(Birdsey, 1993; Sundquist, 1993)。尽管研究者在土壤有机碳方面做了一些研究，然而由于有机碳库和氮库组成的复杂性及影响因素的多样性，在有机碳、氮的研究中增加了更多的不确定性。

由于植被、气候、土壤类型及研究方法等方面的差异，目前还不能正确而充分地认识森林生态系统碳循环的过程，尤其对山地森林土壤SOC贮量、组分、动态以及空间分布规律的研究，仍然是土壤碳循环研究中的需要补充的领域(Fehse, 2002)。湿地是重要的自然资源，湿地土壤性质、植被特征、环境因子和人类活动等直接影响着湿地土壤有机碳和全氮的储存量。

本书以山西省典型森林生态系统芦芽山国家级自然保护区及湿地生态系统长治国家城市湿地公园为研究区域，对芦芽山山地垂直带主要植被类型下土壤碳、氮剖面分布特征、沿海拔梯度土壤有机碳及全氮的分布特征及不同海拔典型植被土壤有机碳和全氮的空间异质性进行了研究；针对长治湿地系统土壤碳、氮距离湿地水域距离远近的土壤碳氮库的水平分布特征、植被和土壤因子与土壤碳氮的关联、在此基础上提出合理的湿地评价体系研究。

本书由山西省青年基金项目“基于关键生态过程的湿地生态安全机理与评价方法研究(2010021027-4)”和“华北落叶松细根构型与土壤有效氮营养的关联性研究(2010021028-6)”、山西农业大学学术骨干项目和山西农业大学博士科研启动基金项目共同资助。

本书实验的外业工作和内业工作都非常辛苦，在此感谢为本次

试验付出辛勤劳动的杨秀云老师、田旭平老师；感谢硕士研究生边俊、朱焯、曹晔、张霞、冯树香、郑丽君和张西茜等；感谢管涔山国家森林公园和长治国家城市湿地公园管理局给予外业的帮助。

本书的研究成果希望能对森林生态系统及湿地生态系统的健康管理提供一些基础的依据。一些科学问题的解释和分析方面存在不足，希望读者能够批评指正。

武小钢

2013年10月4日

目 录

前 言

| | |
|--------------------------------------|----|
| 第 1 章 土壤碳、氮库研究进展 | 1 |
| 1 森林生态系统土壤碳、氮库研究 | 2 |
| 1.1 森林土壤有机碳及其影响因素 | 2 |
| 1.2 森林土壤氮素及其影响因素 | 8 |
| 2 湿地土壤碳、氮库研究 | 19 |
| 2.1 湿地土壤有机碳及其影响因素研究 | 20 |
| 2.2 湿地土壤氮素转化及其影响因素 | 23 |
| 3 研究基础及项目研究意义 | 25 |
| 第 2 章 芦芽山典型植被土壤有机碳、氮剖面分布特征 | 27 |
| 1 研究区概况和研究方法 | 28 |
| 1.1 芦芽山自然保护区自然概况 | 28 |
| 1.2 研究方法 | 29 |
| 2 典型植被类型下土壤理化性质剖面特征 | 31 |
| 2.1 土壤容重的剖面特征 | 31 |
| 2.2 土壤质地的剖面特征 | 32 |
| 2.3 土壤含水量的剖面特征 | 34 |
| 2.4 土壤 pH 值的剖面特征 | 34 |
| 3 典型森林植被类型下土壤有机碳、氮剖面分布特征 | 35 |
| 3.1 土壤全氮含量剖面分布规律 | 35 |
| 3.2 土壤氮储量在剖面上的分布规律 | 35 |
| 4 典型森林植被类型下土壤有机碳剖面分布特征 | 37 |
| 4.1 土壤有机碳含量剖面分布规律 | 37 |
| 4.2 土壤有机碳储量剖面分布差异 | 38 |
| 5 土壤 C/N 的剖面分布特征 | 38 |
| 6 讨 论 | 39 |
| 6.1 不同植被类型下土壤有机碳含量剖面分布特征形成机制探讨 | 39 |

| | | |
|-----|------------------------------|----|
| 6.2 | 有机碳含量与土壤理化因子的相关性 | 40 |
| 6.3 | 不同植被类型土壤有机碳储量变化 | 43 |
| 7 | 结 论 | 44 |
| 第3章 | 芦芽山土壤有机碳和全氮沿海拔梯度变化规律研究 | 45 |
| 1 | 研究方法 | 46 |
| 1.1 | 取样方法 | 46 |
| 1.2 | 数据分析 | 46 |
| 2 | 土壤有机碳含量沿海拔梯度分布规律 | 48 |
| 2.1 | 土壤有机碳含量特征 | 48 |
| 2.2 | 土壤有机碳与海拔之间的关系 | 49 |
| 3 | 土壤全氮含量沿海拔梯度分布规律 | 51 |
| 3.1 | 土壤全氮含量特征 | 51 |
| 3.2 | 土壤全氮与海拔之间的关系 | 51 |
| 4 | 土壤 C/N 含量随海拔梯度分布规律 | 52 |
| 4.1 | 土壤 C/N 含量特征 | 52 |
| 4.2 | 土壤 C/N 与海拔之间的关系 | 53 |
| 第4章 | 土壤有机碳、全氮含量的小尺度空间异质性 | 56 |
| 1 | 研究方法 | 57 |
| 1.1 | 样地基本情况 | 57 |
| 1.2 | 取样方法 | 58 |
| 1.3 | 分析测试方法 | 58 |
| 1.4 | 数据分析 | 58 |
| 2 | 土壤有机碳含量的空间变异性 | 60 |
| 2.1 | 土壤有机碳含量的描述性统计 | 60 |
| 2.2 | 土壤有机碳含量的半方差函数分析 | 60 |
| 3 | 土壤全氮含量的空间异质性 | 61 |
| 3.1 | 土壤全氮含量的描述性统计 | 61 |
| 3.2 | 土壤全氮含量的地统计学分析 | 62 |
| 4 | 讨 论 | 63 |
| 5 | 结 论 | 65 |
| 第5章 | 长治湿地土壤有机碳、氮分布特征 | 66 |
| 1 | 研究区概况及研究方法 | 66 |
| 1.1 | 长治国家城市湿地公园自然概况 | 66 |
| 1.2 | 研究方法 | 67 |

| | | |
|--------------|--------------------------------------|-----------|
| 2 | 湿地公园土壤有机碳、氮水平含量及分布特征 | 69 |
| 2.1 | 土壤有机碳水平含量 | 69 |
| 2.2 | 土壤有机氮水平含量 | 70 |
| 2.3 | 土壤 pH 值的水平含量 | 71 |
| 2.4 | 土壤全磷的水平含量 | 72 |
| 2.5 | 土壤含盐量的水平含量 | 73 |
| 2.6 | 土壤有机碳、氮含量水平分布特征 | 74 |
| 3 | 土壤理化因子对有机碳、氮的影响 | 75 |
| 3.1 | 土壤有机碳与全氮含量的关系 | 75 |
| 3.2 | 土壤理化因子与有机碳、氮相关分析 | 76 |
| 3.3 | 土壤理化因子与有机碳、氮回归分析 | 77 |
| 4 | 主要研究结论 | 77 |
| 第 6 章 | 湿地土壤有机碳、氮与植被生物多样性关系研究 | 80 |
| 1 | 研究方法 | 80 |
| 2 | 不同水分梯度下植被多样性指数的差异性 | 81 |
| 3 | 多样性指数与土壤环境因子的相关性分析 | 82 |
| 4 | 植被多样性与土壤有机碳氮的回归分析 | 83 |
| 5 | 主要结论 | 84 |
| 第 7 章 | 基于土壤碳、氮过程的湿地生态系统健康评价与管理 | 85 |
| 1 | 湿地生态系统健康评价概述 | 85 |
| 1.1 | 湿地生态系统健康评价的概念及内涵 | 85 |
| 1.2 | 湿地生态系统健康评价的国内外研究进展 | 86 |
| 1.3 | 湿地健康评价方法研究 | 86 |
| 1.4 | 湿地健康评价指标体系 | 87 |
| 2 | 研究方法 | 88 |
| 2.1 | 实地调查取样 | 88 |
| 2.2 | 压力—状态—响应(PSR)模型 | 89 |
| 2.3 | 层次分析法 | 90 |
| 2.4 | 综合指数法 | 90 |
| 2.5 | 调查问卷法 | 91 |
| 3 | 长治湿地公园生态系统健康指标体系的构建 | 91 |
| 3.1 | 评价指标体系构建的原则 | 91 |
| 3.2 | 长治湿地公园评价指标体系框架 | 91 |
| 4 | 数据来源及指标诠释 | 92 |

| | | |
|-----|---------------------|-----|
| 4.1 | 实测数据来源及对应指标诠释 | 92 |
| 4.2 | 间接数据来源及对应指标诠释 | 97 |
| 5 | 长治湿地公园综合评价结果 | 99 |
| 5.1 | 层次分析方法确定指标权重 | 99 |
| 5.2 | 评价指标体系标准的确定 | 102 |
| 5.3 | 综合评价 | 104 |
| 6 | 主要结论 | 107 |
| | 参考文献 | 108 |

第1章 土壤碳、氮库研究进展

土壤是陆生生物赖以生存的物质基础，是陆地生态系统中物质与能量交换的重要场所；同时它本身又是生态系统中生物与环境相互作用的产物。土壤有机碳和氮不仅是土壤的重要组成部分，而且是生态系统重要的生态因子。土壤有机碳和氮的含量与分布直接关系到生态系统的生产力和生态系统的规模。同时，土壤有机碳和氮的转化与迁移又直接影响到温室气体的组成与含量，而全球的气候变化又反馈作用于土壤有机碳和氮的转化与迁移。因此，土壤有机碳和氮的分布、转化及其对全球变化的响应与调控的研究对于正确理解碳、氮的生物地球化学循环及应对全球变化的响应策略的制定具有重要意义，成为近年来国际全球变化问题的核心研究内容之一。

土壤碳库是地球表层系统最大的碳库，土壤有机碳(SOC)不是一种单纯化合物，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。土壤有机碳在维持土壤良好的物理结构等方面具有重要作用。作为陆地碳库的主要部分，土壤有机碳在全球碳循环中起着重要作用(Prentice *et al.*, 2001; Zhou *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2003)，土壤有机碳的稳定性及其碳汇增加是目前国际上公认的减缓大气CO₂浓度上升的重要途径之一。

氮是植物体内许多重要有机化合物的组成元素。在自然状态下，土壤中的氮主要来源于植物—大气的固氮过程。在森林生态系统中，生物对氮的需求量往往大于土壤有机氮矿化速率，所以森林生态系统通常表现为氮缺乏型(胡启武等, 2006)。土壤碳氮比是土壤氮素矿化能力的主要标志，其比值低有利于微生物在有机质分解过程中的养分释放和土壤中的有效氮增加；而植物组织中的碳氮比决定了进入土壤中的枯落物的分解速率和分解量(邓小文和韩士杰, 2007)。土壤是一个多相、多界面的复杂系统，土壤碳氮的变化涉及植被类型、气候变化、土壤理化性状、凋落物分解和土壤呼吸等众多相互联系和相互影响的生物化学过程。在生态系统的物质循环中，土壤碳素和氮素被紧密地联系在一起。

1 森林生态系统土壤碳、氮库研究

森林生态系统占据了全球碳收支的重要部分, 据估计森林土壤占全球土壤有机碳库的 70%~73%, 森林碳库尤其是森林土壤碳库的微小变化, 都可引起大气 CO₂ 浓度的显著变化(Birdsey *et al.*, 1993; Sundquist, 1993)。尽管研究者在土壤有机碳方面做了一些研究, 然而由于有机碳库和氮库组成的复杂性及影响因素的多样性, 在有机碳、氮的研究中增加了更多的不确定性。我国许多学者在有关 SOC 的含量及其空间分布方面也进行了系统的总结, 对不同植被下各土类及不同农区主要土类的 SOC 贮量也进行了统计(陈亮中, 2007; 李克让等, 2003; 潘根兴等, 2003; 金峰等, 2000; 林心雄, 1998; 方精云等, 1996)。由于植被、气候、土壤类型及研究方法等方面的差异, 目前还不能正确而充分地认识森林生态系统碳循环的过程, 尤其对山地森林土壤 SOC 贮量、组分、动态以及空间分布规律的研究, 仍然是土壤碳循环研究中需要补充的领域(Fehse, 2002)。

1.1 森林土壤有机碳及其影响因素

根据稳定性不同, 土壤有机碳库一般分为易分解碳和稳定性碳两部分, 前者指易分解的有机物质, 如植物残体和它们初步分解后的产物、微生物体和微生物代谢物; 后者则是指不易分解的植物有机质和被黏粒保护的腐殖质(Biedenbender *et al.*, 2004)。

土壤易分解碳在土壤有机质中所占比例很小, 但由于周转快, 故对土壤碳通量影响很大(Schimel *et al.*, 1994), Biederbeck 和 Zentne(1994)认为, 土壤有机质的短暂波动主要由易分解碳的动态变化所引起。因此, 土地利用变化初期 SOC 的快速变化可能与土壤易分解碳动态紧密相关。一般认为, 土壤易分解碳形成时间较短, 具有较小的密度; 而稳定性碳通常形成时间有几十到几百年, 具有较大的密度及较小的粒径(Biedenbender *et al.*, 2004)。根据不同组分的密度差异和在水中的溶解性不同对土壤有机质进行分离, 可以得到易分解的轻组有机碳(light fraction)与较稳定的重组有机碳(heavy fraction)。研究中用于区分两组分的标准有所不同。Biedenbender 等以 2.0g/cm³作为区分轻组与重组有机碳的界限, 而 Boone(1994)则以 1.20 mg/cm³为标准, 后者认为轻组有机碳包括地上凋落物。

对于易分解碳的分离还有几种不同的方法, 因此得到的易分解组分具有

不同的名称。Schulz(2004)把热水提取碳作为土壤易分解碳,王晶等(2003)则称之为土壤活性有机质,并把这个概念等同于DOM(dissolved organic matter),认为近年文献中常见的轻组有机碳、水溶性有机碳(WSOC)、有效碳、微生物碳(MBC)、潜在可矿化碳(PMC)、易氧化碳(ROC)和热水提取碳(HWC)均属DOC(dissolved organic carbon)范畴,并认为其浓度可以用DOC表示。

1.1.1 土壤碳的输入和输出方式

土壤碳库是C输入和通过土壤呼吸以CO₂的形式输出C两个过程平衡的结果。土壤中的有机碳都来源于植物,根据植物的生理生长过程,输入土壤的碳有两个主要来源,一个是根或枝条在死亡后残体通过腐殖化过程形成土壤有机质。另外一个来源是植物生长过程中向根际释放的根系分泌物或脱离物。如根毛、代谢的细根。在此过程中,由活根向根际土壤释放的所有有机碳,都被称为根际凋落物,这个过程被称为根际沉降(Kuzyakov Schneckenberger, 2004)。

根系周转和根系分泌物来源的C可以直接输入土壤不同剖面层,而凋落物来源的C则通过以下两个途径进入矿质土壤层,①通过DOC淋溶;②通过生物或其他外力的机械混合作用。在肥沃而非酸性的典型草原类型土壤上,由于大量的净初级生产力(NPP)分配到根系,淋溶途径的土壤C输入可能所占比例有限。但针叶林大量的根系聚集在土壤表层,营养归还主要通过酸性凋落物的形式。在这种条件下,DOC对C在不同土层的分配就起着重要作用。

SOC流失的主要途径是土壤呼吸,土壤呼吸是指自然土壤中产生CO₂的过程,它主要由微生物活动和根系呼吸产生,只有很少部分是由土壤动物呼吸和土壤有机物的化学氧化分解而产生(刘绍辉和方精云,1997)。为确定影响土壤呼吸的主要驱动力,精确估计根系呼吸和微生物分解作用的相对贡献是必要的。区分根系与微生物呼吸的方法有多种,程慎玉和张宪洲(2003)对此做了综述。在湿润森林类型土壤中,淋溶是运移并导致大量矿质和营养元素流失的决定性因素。土壤水文特征、有机质化学属性和土壤属性决定了DOC淋溶过程。

1.1.2 影响土壤有机碳的主导因子

土壤有机碳的储量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,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。

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重要原因。

1.1.2.1 气候

在土壤有机碳累积过程中,气候因子起着重要作用。一方面,气候条件影响植被类型和植被生产力,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,气候通过土壤水分和温度等条件的变化,影响微生物对有机碳的分解和转化(Davidson Stahl, 2000; 黄昌勇, 2000)。因此,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。

相对寒冷的区域来说,温暖区域的土壤呼吸和土壤有机质分解率一般较高。这一规律曾被许多田间试验(Lloyd, 1994; Kirschbaum, 1995; Trumbore, 1996)和室内试验(Winkler, 1996; Lomander A, 1998)直接或间接地证实。最近的研究也表明了这点。基于2473个土壤剖面测定数据,Zhou等(2003)用GIS技术分析了中国土壤有机碳的分布特征,发现无论在中国的东部还是西部地区,南北方向上低的区域温度总是对应着高的碳密度。

在凋落物和土壤类型以及气候条件基本一致的情况下,微生物活性强弱也许能解释温度对土壤有机质分解的影响。温度是影响微生物活性重要环境因子之一,在低于最适温度(35~45℃)时,若干模型都预测微生物活性随温度上升而迅速增加(Insam, 1990; Kirschbaum, 1995; Winkler *et al.*, 1996; Kirschbaum, 2000),因此随温度上升其对土壤有机质的分解作用也必将加剧,最终导致温度与土壤碳密度的负相关关系。但Epstein等(2002)研究认为在美国大平原区域,从寒冷的北部到温暖的南部土壤有机质含量下降并不是由于有机质分解率增加,而是由碳输入的减少所引起的。

湿度是影响SOC库的另一重要气候因子。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(黄昌勇, 2000)。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,改变土壤中有有机碳的储量。

植物分配到地下的C多数是经由根呼吸的途径流失,据研究,根呼吸可消耗每日光合产物重量的8%~25%(Lambers *et al.*, 1996),随土壤湿度降低,根呼吸下降(Burton *et al.*, 1998),故土壤湿度降低将有利于SOC积累,又由于土壤湿度降低有利于生物量向地下分配,因此SOC库将有望增加。但也有部分研究不支持这一结论。在极端的环境下,干旱将导致植物死亡,并易引发严重水土流失,造成土壤有机碳减少(Breshears & Allen, 2002)。在中国北部从东到西降水量逐渐减少,植被从湿润温带森林过渡到稀疏的灌木、草地,直至沙漠,土壤碳密度并没有增加,而是随之降低(Zhou & Zhou, 2003)。在内蒙古的研究也表明,主要土地覆被类型的土壤碳密度随降水量减少(陈庆美等, 2003; Wang *et al.*, 2010)。由于缺乏植被覆盖,强降水过程和大风都会严重侵蚀干旱地区富含土壤有机质的表层土壤。系统生物量的减少可能是导致SOC密度减少的另一重要原因。

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两条途径: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,改变土壤中有有机碳的释放量(Jenkinson *et al.*, 1991)。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情况下土壤有机碳对大气CO₂的源/汇作用(Davidson & Stahl, 2000; Kirschbaum, 2000)。

1.1.2.2 土壤

土壤理化特性在局部范围内影响土壤有机碳的含量(黄昌勇, 2000),如土壤质地、黏土矿物类型、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。其中研究最多的是土壤质地与有机碳蓄积的关系。土壤有机碳很少以游离态形式存在于土壤中,而是与土壤矿质颗粒,特别是与黏粒结合形成有机-无机复合体。土壤矿物对有机质的赋存状态及更新特征具有明显控制作用(Torn *et al.*, 1997),黏粒(粒径小于0.002mm)的比表面积较大,易于吸附有机质,从而对有机质起到物理或化学保护。

大量研究表明,土壤有机质与团聚体之间存在密切关系,不同土壤结构体因胶结物不同,其有机碳含量明显不同(张兴昌和邵朋安, 2000; 赵传燕和李林, 2003; 刘毅等, 2006)。不同类型土壤间有机碳分布的差异主要与气候条件、土壤形成过程以及每年输入土壤的有机碳有关(陈庆美, 2003)。

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。土壤养分含量的高低是微生物矿化作用强弱的限制因素,微生物所需的各个营养元素供应充足,微生物活力较高,矿化作用显著,反之则较低(李顺姬等,2010)。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。

1.1.2.3 植 被

植被变化通过两个途径而影响SOC库,一是改变C输入特征,包括地上/地下生物量C的分配,凋落物归还量以及时空变化,凋落物及根系的化学组成;二是改变环境因子,包括微环境的改变,生物区系的改变,以及土壤理化性质的改变(Jobbágy & Jackson, 2001)。植被变化后,SOC输入输出平衡被打破,导致SOC库的波动,直到建立新的平衡。在这个过程中,土壤是源或汇取决于SOC的输入输出比率,其流失与补充的速度取决于原来SOC的性质及植被变化后干扰的强度(Guo & Gifford, 2002)。

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。温带草原平均根冠比高达3~4,而全球范围内温带森林的平均根冠比仅为0.26(Jackson *et al.*, 1996; Cairns *et al.*, 1997)。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,根系是SOC输入的主要形式;而森林植被土壤有机碳的主要来源多为枯枝落叶,土壤形成了明显的有机质层,含有SOC的大部分。这些差异将影响到以凋落物形式输入的碳在SOC输入中的相对数量(Jobbágy & Jackson, 2001)。根系的垂直分布(如深根系、浅根系)将直接影响输入到土壤剖面各个层次的有机碳数量。因此,草本、木本植被类型根系分布格局的差异也是影响SOC垂直分布格局的一个重要因素;另外,与草地相比,森林植被凋落物品质较低(Jobbágy & Jackson, 2001)、土壤表层温度低、湿度小,导致地表凋落物的分解速率下降(周莉等,2005),也造成有机质在近地面层的积累。

1.1.2.4 土地利用方式

SOC的储存和变化与土地利用活动紧密相关。在过去的几个世纪中,土地利用和土地变化改变了1/3~1/2的陆地面积(Vitousek *et al.*, 1997)。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,覆被类型的变化,引起了SOC的显著变化(Wang *et al.*, 2003; Post & Kwon, 2000; McGuire *et al.*, 2001; 王艳芬和陈佐忠, 1998; 周广胜等, 2002)。

有研究认为,森林转化为农田或牧草地会导致土壤碳流失(Veldkamp, 1994; Fearnside & Imbrozio, 1998),但也有研究认为,森林转变为牧草地后可导致地上部分生物量碳减少,然而土壤有机碳则未必一定流失(Post & Kwon, 2000; Hughes *et al.*, 2000)。最近研究表明,森林转化为草地后SOC库是增或减,以及库容变化大小取决于原始土壤条件和当地的其他影响因子变化(如土地利用变化前土壤碳含量、土壤质地、植被生产力、管理活动)(Jennifer & Edzo, 2005; Fuhlendorf *et al.*, 2002)。

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(Thuille *et al.*, 2000),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(Paul *et al.*, 2002)。

1.1.3 土壤有机碳的剖面分布

Jobbágy 和 Jackson(2000)分析了2700多个土壤剖面,发现不同植被类型SOC在土壤剖面上垂直分布显著不同,因此认为植被类型可能是影响SOC垂直分布格局的主要因素。Wang等(2004)也得出了同样结论。Peterson和Neill(2003)研究发现,从森林到草地的植被变化过程中,仅仅经过2年,土壤C垂直分配格局就具有了草地的特征,也证实了植被类型转变对土壤碳垂直分布格局的影响。其形成机理可能与光合产物的地上、地下分配模式,根系分布格局等的差异有关。草本、木本植被类型之间光合产物的地上、地下分配模式相差较大。森林生态系统土壤有机碳输入以地上凋落物为主,土壤形成了明显的有机质层,含有SOC的大部分。

SOC在土壤剖面上垂直分布格局的差异将影响到土壤碳动态。对于不同土层SOC,其分解都受土壤有机质组成的影响(Fang *et al.*, 2005),但影响分解的主导影响因子有所不同。浅层SOC受大气与降水影响强烈,土壤表层0~30cm直接受大气变化影响,且对土地利用变化和森林砍伐极为敏感(Batjes, 1997, 1999)。Batjes和Dijkshoorn(1999)发现,降水和气候可以很好地预测土壤表层20cm内SOC库,但是在土壤深层,SOC则与黏粒含量关系更为密切,这可能与稳定性SOC增加有关。根系在土壤剖面的垂直分布一般较SOC

浅。可能的解释是：①随深度增加 SOC 周转变慢，对于单位 C 输入，深层土壤有更多的 C 沉积；②随深度增加根系周转加快，在土壤深层，单位根系现存生物量对应更多的 C 输入；③淋溶作用；④动物的垂直混合作用 (Jobbágy & Jackson, 2000)。Jobbágy 和 Jackson (2000) 认为解释②缺乏必要的文献支持，Burton 等 (2000) 发现，在同一土壤剖面随着土层加深细根的生命延长，试验结果更是与这一可能解释相左。但其余几个可能解释还是说明了处于不同土层的 SOC 其周转动态具有差异。

对于 SOC 在土壤剖面上垂直分布格局及与气候、植被的关系所知依然甚少。更好地理解 SOC 的分布和控制因子，以及草本、木本植被类型变化如何影响 SOC 在不同土层的分布，有助于提高我们预测并缓解全球变化不利影响的能力 (Jobbágy & Jackson, 2000)。陆地生态系统碳收支计算的一个重要方面是估计土壤碳总量。在做土壤 C 储量调查时，取样深度一般为 1m (Jobbágy & Jackson, 2000)，土壤碳库因此在很大程度上被低估了。Batjes (1996) 发现，当取样深度包括 1~2m 土层时，所测全球 SOC 汇增加了 60%。但土壤深层取样具有技术上的困难，使土壤碳库的精确估计极具挑战性。不过，研究发现，SOC 在垂直土壤剖面上的分布是土层深度的函数，随土层深度增加，SOC 含量呈指数下降 (Elzein & Balesdent, 1995; Bernoux *et al.*, 1998)。因此，可以利用浅层土壤有机碳数据外推得到深层土壤碳密度，这就使土壤碳库的精确估计具有了可能性。

1.2 森林土壤氮素及其影响因素

1.2.1 森林土壤氮贮量

森林土壤是地球氮素循环的重要环节，是最重要的氮库，也是衡量土壤氮素供应状态的重要指标。森林生态系统中土壤氮通常占整个生态系统氮贮量的 90% 以上。由于森林土壤发挥着重要的氮源、汇和库的功能，且氮与碳等元素的循环是相互耦合的，能形成多种温室气体，故一直备受关注。

从氮素形态上看，土壤中氮主要以有机氮和无机氮两种形态存在。无机氮主要以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的形态存在，往往不足全氮的 1%，可被植物直接利用。其可利用性主要取决于土壤微生物对土壤有机质的分解速率和微生物固持、气态损失和淋溶等多种过程的相互竞争 (蔡春轶和黄建辉, 2006)。有机氮是氮在土壤中的主要存在形式，其数量主要取决于森林凋落物的产量 (杨万勤等, 2006)。