

四川盆地森林土壤的有机碳储量及其空间分布特征^{*}

毕 珍¹, 石 辉¹, 许五弟², 刘兴良³

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 西北水資源与生态环境教育部重点实验室, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 建筑学院, 西安 710055; 3. 四川省林业科学研究院, 成都 610081)

摘 要:根据朱鹏飞和李德融编著的《四川森林土壤》(1989)一书中四川盆地 152 个森林土壤剖面数据,估算了该地区森林土壤有机碳密度及储量,并分析气候因素和地形对有机碳密度的影响。四川盆地森林土壤平均有机碳密度为 $(35.492 \pm 21.099) \text{ kg/m}^2$,变异系数为 59.45%,整个盆地森林土壤有机碳储量约为 $6.744 \times 10^{15} \text{ g}$;其中亚高山草甸草原土有机碳密度最高,为 118.477 kg/m^2 ,最低的是草类-马尾松林下黄壤,为 3.145 kg/m^2 ;不同林型下土壤的有机碳含量差异较大。森林土壤有机碳的贮存受到温度、降水和海拔的影响,年均温度与有机碳密度呈极显著的负相关关系,海拔与有机碳密度呈极显著的正相关关系,温度是影响四川盆地森林土壤有机碳密度的关键因子。在年均降雨量 $400 \sim 800 \text{ mm}$ 和年均温度 $0 \sim 4^\circ\text{C}$,可形成有机碳密度的高值区,其有机碳密度可达 80 kg/m^2 ;在年平均温度为 $14 \sim 16^\circ\text{C}$,降水 $1400 \sim 1600 \text{ mm}$,可形成有机碳密度的低值区,其有机碳密度 20 kg/m^2 。

关键词:四川盆地;森林土壤;有机碳密度

中图分类号:S153.61;S714.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2009)05-0083-05

Forest Soil Organic Carbon Storage and Characteristics of Spatial Distribution in Sichuan Basin

BI Zhen¹, SHI Hui¹, XU Wu-di², LIU Xing-liang³

(1. College of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environment and Ecology, Ministry of Education, Xi'an 710055, China; 2. College of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Research Institute of Forest Science Sichuan Province, Chendu 610081, China)

Abstract: Soil organic carbon (SOC) density and storage of forest land in Sichuan Basin were studied based on data of 152 soil profiles, and some factors affecting SOC storage such as climate and landform were analyzed. The average SOC density of forest soil was $(35.492 \pm 21.099) \text{ kg/m}^2$ with C_v 59.45%, and the total SOC storage in forest land is $6.744 \times 10^{15} \text{ g}$ in whole basin. The SOC density in the sub-alpine meadow-grassland soil was the highest with 118.477 kg/m^2 , and the lowest value of SOC density was 3.145 kg/m^2 for yellow soil under the grass-Masson pine vegetation. The SOC density had notably difference for soils under different vegetation types. The temperature, rainfall and elevation were main factors that affect SOC storage, the relationship between average annual temperature and SOC density was a significant negative correlation, and the relationship between elevation and the density of SOC was a significant positive correlation. Among the rainfall, temperature and landform factors, the temperature was a key. That region where the annual average rainfall was $400 \sim 800 \text{ mm}$ and annual average was $0 \sim 4^\circ\text{C}$, was a high-value area of mean SOC density with 80 kg/m^2 . Where the temperature was $14 \sim 16^\circ\text{C}$ and the precipitation was $1400 \sim 1600 \text{ mm}$ had low density of SOC with 20 kg/m^2 .

Key words: Sichuan Basin; forest soil; organic soil carbon (SOC) density

^{*} 收稿日期:2009-06-05

基金项目:国家 973 项目(2002CB111502);国家自然科学基金项目(40471078);国家“十一五”科技支撑计划课题(2006BAD03A10)

作者简介:毕珍(1984-),女,陕西大荔人,硕士研究生,研究方向为环境生态。E-mail: bizhen1984@126.com

通信作者:石辉(1968-),男,陕西眉县人,博士,教授,主要从事水土保持方面的研究。E-mail: shihui@xauat.edu.cn

人们越来越关注 CO₂ 等温室气体浓度的增加及其对全球气候的影响,并开始在各个尺度对生态系统碳循环过程及其特征进行深入研究^[1],全球和区域碳循环已成为全球变化的核心研究内容之一。陆地生态系统碳循环是全球碳循环的重要组成部分,其对大气 CO₂ 浓度变化的影响仅次于海洋^[2]。Eswaran 等的研究表明,土壤中的碳贮量是地上生物量贮存的 3 倍,是大气中的 2 倍^[3]。土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库,对全球气候变化和人类生存环境有着重要的影响。据估计,全球陆地土壤碳库量约为 (1 300 ~ 2 000) × 10¹⁵ g,是陆地植被碳库 (500 ~ 600) × 10¹⁵ g 的 2 ~ 3 倍,是全球大气碳库 750 × 10¹⁵ g 的 2 倍多,因此土壤碳库在全球碳平衡及循环中起着举足轻重的作用^[4]。由于土壤碳库巨大的容量,即使土壤碳库发生极微小的变化,对大气中的 C 含量也会产生很大的影响^[5]。因此土壤碳库贮存对减缓大气 CO₂ 浓度上升具有重要意义。

森林在陆地生态系统碳循环中起着重要的作用。刘国华等根据我国第一次 (1973 - 1976) 至第四次 (1989 - 1993) 森林资源清查资料和建立的不同森林类型生物量和蓄积量之间的回归方程,对我国近 20 a 来森林的碳储量进行了推算,结果表明我国四次森林资源清查中森林的总碳储量分别是 3.75 × 10¹⁵ g、4.12 × 10¹⁵ g、4.06 × 10¹⁵ g 和 4.20 × 10¹⁵ g,总体呈增加的趋势,说明我国的森林起着一个轻微的 CO₂ “汇”的作用^[6]。方精云等利用 1949 年至 1998 年间 7 次森林资源清查资料对中国 50 a 来森林碳库和平均碳密度的变化进行了推算,结果表明 70 年代中期以前主要由于森林砍伐等认为作用,中国森林碳库和碳密度都是减少的,碳储量减少了 0.62 × 10¹⁵ g,年均减少约 0.024 × 10¹⁵ g,之后呈增加趋势^[7]。但是,土地利用变化以后,将会对生态系统的碳贮量产生巨大的影响^[8-9]。

我国学者对土壤碳储量进行了大量的研究,于东升等 (2005) 基于中国 1 100 万土壤数据库研究了中国土壤有机碳密度及储量,发现中国土壤有机碳储量为 89.14 × 10¹⁵ g,土壤平均碳密度 9.60 kg/m²^[10]。解宪丽等基于 1 400 万的《中华人民共和国土壤图》和第二次土壤普查数据,对中国土壤有机碳密度及储量做出估算;1 m 土层内有机碳储量为 84.4 × 10¹⁵ g,占全球 1 m 土壤有机碳储量的 6.05 %^[11]。王绍强等利用全国第二次土壤普查实测 2 473 个典型土壤剖面的理化性质以及土壤各类型分布面积,估算中国土壤有机碳库的储量约为 92.418 × 10¹⁵ g,平均碳密度为 10.53 kg/m²^[12]。李克让等利用气候、土壤和植被数据驱动的生物地球化学模型估算了当前中国植被和土壤的碳贮量,结

果表明中国陆地土壤总碳贮量为 82.65 × 10¹⁵ g,为全球土壤碳贮量的 4 %,平均土壤碳密度为 9.17 kg/m²^[13]。但这些结果是包括农地、林地、草地各种土地利用条件下的总和,不能反映森林土壤碳贮存的情况。

在森林生态系统中,森林土壤是最大的碳库,了解森林土壤碳循环是研究陆地生态系统碳循环的重要前提^[14]。Dixon 等在总结大量文献基础上得到全球森林土壤碳库为 787 × 10¹⁵ g;但在我国主要研究了不同地区^[15-16],不同森林系统下土壤的碳贮量^[17-18],缺少对区域性森林土壤碳贮量的估算。

对森林土壤碳储量进行比较细致的调查,有助于对森林土壤碳存储在全球碳循环中的地位进行准确地评估,也有利于全球大气碳平衡的计算。四川盆地由于地貌、气候、土壤等自然条件变化复杂,形成了多种多样的立地环境,因此植物种类异常丰富,而且形成了多种多样的森林土壤类型,这些森林土壤在碳贮存、水分循环方面具有重要的作用。对于四川盆地森林土壤的研究积累了大量的资料^[19-21]。本研究通过搜集、整理四川盆地森林土壤的剖面资料,估算该地区土壤有机碳存储情况。

1 研究方法

四川盆地森林土壤剖面有机碳含量、海拔等数据来源于朱鹏飞和李德融编著的《四川森林土壤》一书,共有 152 个土壤剖面。土壤容重数据主要来源于李承彪和张万儒的成果,部分数据来源于第二次全国土壤普查结果。气候数据根据采样点的位置,利用四川国土资源规划中提供的数据。土壤有机碳密度计算公式为

$$D_{soc} = \sum_{i=1}^n 0.58 H_i B_i O_i \quad (1)$$

式中: H_i ——第 i 层土壤的厚度 (cm); B_i ——第 i 层土壤的容重 (g/cm³); O_i ——第 i 层土壤有机质含量 (%), 0.58 为国际上通用的土壤有机质中的碳含量比例,数据处理用 SPSS 和 Excel 软件。我们根据剖面描述的地理位置,在四川和重庆的行政区划图上找出相应的位置,确定其经纬度,利用地理信息系统 ArcView 软件进行空间分析。

2 结果与讨论

2.1 森林土壤有机碳密度统计分析

通过对 152 个土壤剖面有机碳密度的计算,得出四川盆地森林土壤有机碳密度范围为 3.135 ~ 118.477 kg/m²,平均有机碳密度为 (35.492 ± 21.099) kg/m²,变异系数为 59.45 %,属于中等变异;峰度为 1.635,偏度为 1.192。这一平均碳密度

大大高于于东升等估算的全国土壤平均碳密度的 9.60 kg/m^2 , 解宪丽等估算的 11.477 kg/m^2 ^[11], 王绍强等估算的 10.53 kg/m^2 ^[12], 方精云等估算的 20.13 kg/m^2 ^[22], 李克让等利用模型估算的 9.17 kg/m^2 ^[13]; 也高于张城等得到的中国东部地区典型森林类型土壤有机碳密度 $4.01 \sim 30.12 \text{ kg/m}^2$ ^[15]。四川盆地森林土壤与全国土壤相比具有较高的碳密度, 原因可能有四: 一是森林土壤有较高的有机碳含量, 而全国土壤中包含了大量的低有机碳含量的农业土壤; 其二是全国土壤中, 包括了大量干旱半干旱地区低有机碳含量的土壤; 其三是上述的估算结果是按照 1 m 土层计算, 而本文是按照土壤的实际剖面深度计算, 有大量的土壤剖面深度超过 1 m ; 其四, 森林植被中包含了大量的原始林, 有利于土壤有机碳的积累。由于四川盆地森林土壤平均有机碳密度高于中国有机碳密度平均水平, 说明四川盆地森林土壤在全国有机碳循环中是一个“碳汇”。

若按照四川盆地森林面积 $1.9 \times 10^{11} \text{ m}^2$ 计算^[21], 可得出四川盆地森林土壤有机碳储量约为 $6.744 \times 10^{15} \text{ g}$ 。约占全国土壤有机碳储量的 7.297% ^[12], 占全国森林土壤有机碳储量的 32.079% ^[23]。说明四川盆地森林土壤在全国森林土壤有机碳储存中具有重要作用。

2.2 森林土壤有机碳密度空间分布

根据 152 个剖面样点的有机碳密度、经纬度, 采用 Kriging 插值方法, 在 ArcView 地理信息系统软件的支持下绘制了四川盆地森林土壤有机碳密度空间分布图等值线图(图 1)。从图 1 可以看出, 川西北高山高原半湿润半干旱森林和草甸草原土壤地区的土壤有机碳密度较高, 基本在 40 kg/m^2 以上, 该地区的土壤类型为山地燥褐土、山地褐土、山地棕壤、山地棕色针叶林土、山地草甸森林土、高山草甸土等, 植被类型主要是油松林、栎林、冷杉林、云杉林、灌丛草甸等, 其中阿坝县、南坪县、若尔盖以及马尔康等地的土壤有机碳密度达到 60 kg/m^2 以上; 川西南山地季节性干湿交替亚热带森林土壤地区的土壤有机碳密度大体在 $30 \sim 40 \text{ kg/m}^2$ 区间内, 达到四川盆地森林土壤有机碳密度平均水平。该地区的土壤类型为山地红壤、山地燥红土、山地黄棕壤、山地暗棕壤等, 植被类型主要是云南松林、杨桦林、长苞冷杉林等; 盆地东缘山地土壤中常绿阔叶落叶混交林和暗针叶林下的土壤有机碳密度较低, 大体在 $10 \sim 30 \text{ kg/m}^2$ 区间内, 低于四川盆地森林土壤有机碳密度平均水平, 该地区的土壤类型为山地黄壤和山地黄棕壤等, 植被类型主要是马尾松林、常绿、落叶阔叶混交林、针阔混交林等。

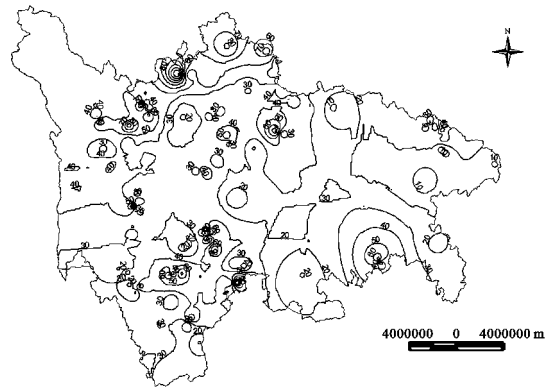


图 1 四川盆地森林土壤有机碳密度空间分布等值线图

2.3 气候条件对土壤有机碳密度的影响

土壤中的有机碳量是进入土壤的植物残体量以及在土壤微生物作用下分解损失的平衡结果^[24]。在大尺度上, 土壤有机碳的空间分布, 取决于气候因素、植被类型、土壤类型和母质以及地形、地貌等条件^[25]。气候因素中的太阳辐射和水热条件对生物和土壤的影响极为深刻。土壤矿物质和有机质的合成与分解、母岩和成土母质的风化强度以及土壤中所进行的物质和能量的转化、交换及运移等过程, 都与水分和热量条件密切相关。因此, 随着水热条件的变化, 土壤的形成特点、理化性质及其肥力状况和生产性能等都将发生显著的差异。土壤有机碳储量也必然有显著差异。

土壤有机碳主要来源于植被的枯落物以及根系分泌物, 温度和降水是影响植被生长的关键因素; 同时温度和降水对于枯落物的分解也有重要影响, 因此降水和温度在土壤有机碳贮存方面起着主导性的作用。从图 2 中可以看出, 土壤有机碳密度随温度的上升而下降, 两者具有极显著的负相关关系 ($P = 0.000^{**}$, $r = 0.361$, $n = 152$)。这可能在研究区域内, 年平均温度为 0 以上, 可以满足森林生长的温度要求; 但随着温度的升高, 土壤中存在的有机碳分解加速, 从而降低了土壤中的碳贮量, 出现了温度与土壤有机碳密度之间的负相关关系。但对降水量分析来看, 土壤有机碳密度随降雨量的上升而下降(图 3), 且两者具有极显著的负相关关系 ($P = 0.000^{**}$, $r = 0.269$, $n = 152$)。这与一般陆地土壤碳密度随降水增加而增加的趋势存在一定的差异。

张城等在东部典型森林类型土壤有机碳研究中发现, 年平均温度与有机碳储量呈负相关、年均降水与有机碳储量呈很微弱的正相关^[15]。王淑平等在东北样带的研究也同样表明了土壤有机碳含量和降水量之间有正相关关系, 与温度之间有负相关关系^[18]。但周涛等的研究表明, 土壤有机碳贮量与温度和降水的关系在不同的气候带下有显著的差异,

在年平均温度 < 10 的情况下,土壤有机碳贮量与温度有较大的负相关,与降水呈正相关^[26];当温度为 $10 \sim 20$,土壤有机碳与温度成弱的正相关,与降水呈正相关^[26]。但他同时认为,在所研究样本中,降水与温度之间存在强的相关性;这种强的相关性,有可能导致土壤有机碳含量与某一因子之间的关系受到第三个因子的影响。在四川盆地,降水与温度之间也存在强的相关性 ($P = 0.000^{**}$, $r = 0.477$, $n = 152$),同时温度对有机碳的影响也大大高于降水的影响,因此出现的土壤有机碳随降水量呈负相关的趋势,有可能是强的温度效应的结果。

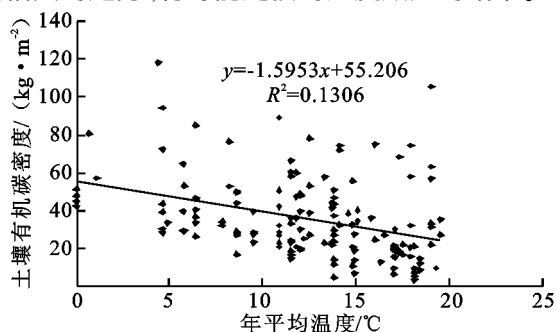


图 2 年均温度与土壤有机碳密度的关系

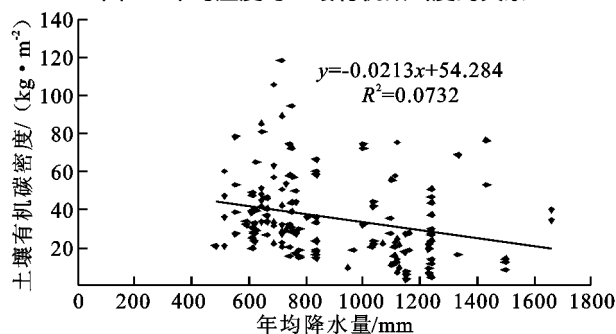


图 3 年均降水量与土壤有机碳密度的关系

四川盆地边缘山地和高原面积广阔,山地气候特点明显,主要表现在气候的垂直变化非常突出。热量条件受复杂的地貌因素所制约,各地差异很大,这不仅对诸多土壤类型的形成和分布产生了深刻的影响,同时也为各种不同生态习性的乔、灌木树种提供了适生环境,因此温度必然对森林土壤有机碳积累量有较大影响。水分条件是有机碳含量的重要影响因素,由于四川盆地处于我国三大自然区的交接地带,深受各种季风气流影响,加上境内大小山脉纵横,地形变化错综复杂,导致了大气降水的地区分布极不均衡。这种水热条件的差异必然导致土壤有机碳的差异。为了解不同水热条件下土壤有机碳密度的特征,做出了不同温度和年均降雨量下的土壤有机碳密度等值线图(图 4)。从图中可以看出,在年均降雨量 $400 \sim 800$ mm 和温度 $0 \sim 4$ 之间,有利于森林土壤有机碳的累积,可形成有机碳密度的一

个高值区,而这一气候条件恰好对应于川西北的高山高原半湿润半干旱森林和草甸草原地区;其有机碳密度可达 80 kg/m^2 ;在年平均温度为 $14 \sim 16$,降水为 $1400 \sim 1600$ mm,可形成有机碳密度的一个低值区,而这一气候条件恰好对应于四川盆地及其周围山地湿润亚热带森林土壤地区;其有机碳密度为 20 kg/m^2 。年均温度和年均降雨量的不同组合,不仅决定了森林植被的类型,而且是四川盆地森林土壤中有机碳密度分布的控制条件。

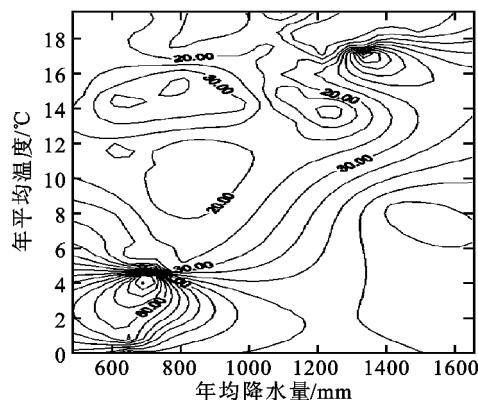


图 4 不同温度和水分下土壤有机碳密度等值线图

2.4 海拔与土壤有机碳密度的关系

四川盆地周围山地面积广阔,地势高差悬殊,森林植被随海拔高度变化而出现的垂直分异现象相当明显。总的地势特征是东南低、西北高,与此相对应,由东南至西北,随着海拔的升高,依次出现常绿阔叶林带(包括常绿、落叶阔叶混交林)、亚高山针叶林带(包括针阔混交林)和高山灌丛草甸带;土壤也由山地红壤、山地燥红土、山地黄棕壤、暗针叶林土直到高山草甸土。土壤有机碳贮存与海拔的关系见图 5,从图中可以看出土壤有机碳密度随海拔的上升而上升 ($P = 0.000^{**}$, $r = 0.518$, $n = 152$),说明在四川盆地,海拔高度也是影响土壤有机碳贮量的关键因素。随着海拔的增高,水热条件发生了变化,森林土壤有机质的矿化作用减慢,有利于土壤有机碳的累积。在四川盆地,海拔也是森林土壤中有机碳密度分布的重要控制条件。

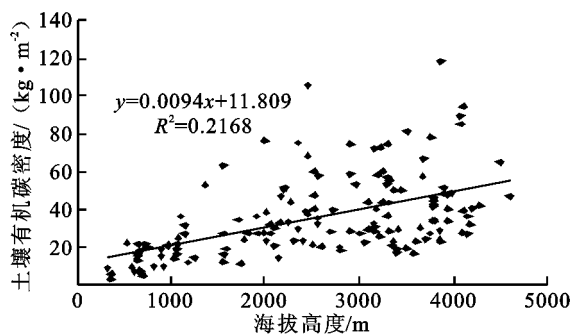


图 5 海拔高度与土壤有机碳密度的关系

3 结论

四川盆地森林土壤 22 个土种有机碳密度变化范围 $3.135 \sim 118.477 \text{ kg/m}^2$, 平均有机碳密度为 35.492 kg/m^2 , 显著高于前人估算的全国土壤碳密度; 整个四川盆地的森林土壤贮存有机碳 $6.744 \times 10^{15} \text{ g}$, 在全国碳循环和森林土壤有机碳储量中占据重要的地位, 是一个重要的“碳汇”。有机碳含量最高的地区为川西北高山高原半湿润半干旱森林和草甸草原土壤地区, 最低的地区为四川盆地东缘常绿阔叶落叶混交林和暗针叶林下的土壤地区。土壤有机碳的贮存受到温度、降水和海拔的影响, 其中温度是影响四川盆地森林土壤有机碳密度的关键因子。

参考文献:

- [1] Jespersen J L, Osher L J. Carbon storage in the soil of a mesotidal gulf of maine estuary[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(2): 372-379.
- [2] Follain S, Walter C, Legout A, et al. Induced effects of hedgerow networks on soil organic carbon storage within an agricultural landscape[J]. *Geoderma*, 2007, 142(1/2): 80-95.
- [3] Eswaran H, Berg E V D, Reich P. Organic carbon in soils of the world[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57: 192-194.
- [4] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 122-146.
- [5] Zhang J B, Song C H, Wang S M. Dynamics of soil organic carbon and its fractions after abandonment of cultivated wetlands in northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 96: 350-360.
- [6] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. *生态学报*, 2000, 20(5): 733-740.
- [7] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J]. *植物学报*, 2001, 43(9): 967-973.
- [8] 杨景成, 韩兴国, 黄建辉, 等. 土地利用变化对陆地生态系统碳贮量的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(8): 1385-1390.
- [9] 吴建国, 张小全, 徐德应. 土地利用变化对土壤有机碳储量的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(4): 593-599.
- [10] 于东升, 史学正, 孙维侠, 等. 基于 100 万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(12): 2279-2283.
- [11] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. *土壤学报*, 2004, 41(1): 34-43.
- [12] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. *地理学报*, 2000, 55(5): 533-544.
- [13] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量[J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(1): 72-80.
- [14] 邵月红, 潘剑君, 孙波. 不同森林植被下土壤有机碳的分解特征及碳库研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 24-28.
- [15] 张城, 王绍强, 于贵瑞, 等. 中国东部地区典型森林类型土壤有机碳储量分析[J]. *资源科学*, 2006, 28(2): 97-103.
- [16] 陈庆美, 王绍强, 于贵瑞. 内蒙古自治区土壤有机碳、氮蓄积量的空间特征[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 699-704.
- [17] 杨万勤, 冯瑞芳, 张健, 等. 中国西部 3 个亚高山森林土壤有机层和矿质层碳储量和生化特性[J]. *生态学报*, 2007, 27(10): 4157-4165.
- [18] 王淑平, 周广胜, 吕育财. 中国东北样带(NECT)土壤碳、氮、磷的梯度分布及其与气候因子的关系[J]. *植物生态学报*, 2002, 26(5): 513-517.
- [19] 李承彪. 四川森林生态研究[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1990.
- [20] 张万儒. 森林土壤生态管理[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1994.
- [21] 朱鹏飞, 李德融. 四川森林土壤[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1989.
- [22] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳库[M]//王庚辰, 温玉璞. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 109-128.
- [23] 周玉容, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 518-522.
- [24] 苏永中, 赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(3): 220-228.
- [25] 许信旺, 潘根兴, 曹志红, 等. 安徽省土壤有机碳空间差异及影响因素[J]. *地理研究*, 2007, 26(6): 1077-1086.
- [26] 周涛, 史培军, 王绍强. 气候变化及人类活动对中国土壤有机碳储量的影响[J]. *地理学报*, 2003, 58(5): 727-734.