

土地利用变化和林业活动碳贮量变化 测定与监测中的方法学问题

张小全¹, 陈先刚², 武曙红³

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境研究所, 北京 100091; 2. 西南林学院, 昆明 650224;

3. 北京林业大学, 北京 100081)

摘要:土地利用、土地利用变化和林业(LULUCF)活动是引起大气温室气体浓度上升的主要因素之一,评价、监测 LULUCF 活动的碳源/汇功能还存在很大的不确定性。近年来我国在该方面开展了一些研究和测定工作,但研究力度还远远不够,研究方法还存在一些问题。针对 LULUCF 活动对碳贮量影响的测定和监测中的碳库选择、监测间隔期、样地数量以及土壤容重影响和校正等有关方法学问题进行了阐述,以期为我国该方面的研究和监测有所裨益。

关键词:碳库选择;监测间隔期;样地数量;土壤容重;方法;碳贮量变化

Methodological issues related to measuring and monitoring carbon stock changes induced by land use change and forestry activities

ZHANG Xiao-Quan¹, CHEN Xian-Gang², WU Shu-Hong³ (1. *Institute of Forest Ecology and Environment, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China*; 2. *Southwest Forestry College, Kunming 650224, China*; 3. *Beijing Forestry University, Beijing 100081, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9): 2068~2073.

Abstract: Human-induced land use, land use change and forestry (LULUCF) activities are believed to be one of the most important factors contributing to rising greenhouse gases in atmosphere and global climate change. To accurately assess the impacts of LULUCF activities on atmospheric carbon is vital for human being to develop, implement and evaluate policies and measures against the climate change. Periodic measuring and monitoring carbon stock changes is a key method to achieve this. However, great uncertainties exist in assessing and monitoring the carbon stock changes caused by LULUCF activities over the world. Although some measuring and studying works have been conducted on this aspect in China in recent years, the quantity is far from needs and the methods used are questionable to some extents. This paper discussed some methodological issues used in measuring and monitoring carbon stock changes of LULUCF activities, including choice of carbon pools, monitoring interval, sampling intensity, soil bulk density effects and its correction, hoping to provide methodological references for related measuring and monitoring in China. We believed that selected carbon pools to be monitored, length of monitoring interval and number of samples are closely linked to both monitored precision and cost. There is a trade-off between the precision and cost. The increase either in carbon pool, monitoring frequency or sample intensity would inevitably raise the monitoring cost. Therefore a balance needs to be found between the precision and cost. This should be determined on the basis of statistic theory through the size of pools, rate and direction of changes, and variations of pools in both time and space dimensions. Moreover, land use changes usually cause changes in soil bulk density, resulting in errors of monitored changes of soil organic carbon. To avoid the errors, it was recommended that soil bulk density should be measured and sampling depth should be calculated before

基金项目:国家“973”资助项目(2002CB412508);国家自然科学基金资助项目(40271109);国家林业局森林生态环境重点实验室资助项目

收稿日期:2004-03-18; **修订日期:**2004-07-12

作者简介:张小全(1965~),男,重庆南川人,博士,研究员,主要从事人类活动与森林碳平衡研究. E-mail: xiaoquan@forestry.ac.cn

Foundation item: National 973 Project (No. 2002CB412508); National Natural Science Foundation of China (No. 40271109) and Supported by Forest Ecology and Environment Laboratory of the State Forestry Administration

Received date: 2004-03-18; **Accepted date:** 2004-07-12

Biography: ZHANG Xiao-Quan, Ph. D., Research professor, mainly engaged in forest carbon budget in relation to human disturbances. E-mail: xiaoquan@forestry.ac.cn

sampling. In case sampling has been implemented with a fixed soil depth, a correction procedure should be conducted to eliminate the impacts of bulk density changes.

Key words: choice of carbon pools; monitoring interval; sampling intensity; soil bulk density; carbon stock change; methodology

文章编号:1000-0933(2004)09-2068-06 中图分类号:Q14,Q948,S718 文献标识码:A

人类活动引起的土地利用变化是导致大气中温室气体浓度上升和气候变化的重要原因之一,仅次于人为化石燃料的燃烧。然而由于陆地生态系统和人类活动的多样性和复杂性,目前对陆地生态系统碳循环包括土地利用变化引起的碳源/汇功能的评估存在极大的不确定性,影响着对未来大气 CO₂ 浓度增加和气候变化及其影响的预测,从而制约人类应付全球气候变化的能力和对策。为此国际社会、各国政府和科学家十分重视陆地生态系统碳源汇功能的研究,其中土地利用变化与生态系统碳源汇功能是研究的重点之一。

同时,为缓解全球气候变化,国际社会于 1992 年签订的“联合国气候变化框架公约”(UNFCCC)第 4.1 和 12.1 条款规定,公约缔约方应定期向公约秘书处递交人为引起的国家温室气体源排放和汇清除清单^[1]。1997 年签订的“京都议定书”第 3.3 和 3.4 条款中规定,造林、再造林、毁林、森林管理、农地管理、牧地管理和植被恢复等人为活动引起的温室气体源排放或汇清除,可通过适当的方式用于抵消附件 I 国家承诺的温室气体减排指标。在其第 6 条和第 12 条中规定,附件 I 国家可通过在其它国家的、包括土地利用变化和林业活动在内的项目活动获得的排放减少或汇清除,来帮助其实现承诺的温室气体减排指标^[2]。但这些活动引起的排放减少或汇清除必须是透明的、可证实和可核查的。这就要求对这些活动引起的排放减少或汇清除进行科学评价和监测。

碳储量变化的测定是研究土地利用变化和林业活动碳源汇功能的主要手段之一,也是计算土地利用变化和林业温室气体清单、评价和监测项目活动汇清除的主要方法。碳储量变化的测定可分为连续动态监测和空间代替时间测定法。在过去十多年中,国内已开展了一些土地利用变化和林业活动与碳源汇功能的研究和测定^[3~10],取得了一些研究结果。然而,我国是一个地域辽阔、地形复杂的多山国家,陆地生态系统和土地利用变化类型多样,加上复杂的社会经济因素,目前的研究还远远不够,而且研究缺乏系统性,研究评价方法和规范不统一,缺乏可比性。

本文针对我国目前有关碳储量变化测定和监测中涉及到的一些方法学问题进行了分析探讨,以期对提高我国有关方面的研究和监测水平有所裨益。

1 碳库选择问题

根据“马拉喀什协定”有关土地利用、土地利用变化和林业(LULUCF)的第 11 号决议,计量的碳库包括地上生物量、地下生物量、枯落物、粗木质残体和土壤有机碳,但如果有透明的、可证实的信息表明某碳库不是净排放源,该碳库可不被计量和报告^[11]。第 9 次缔约方会议(COP9)在有关 CDM 造林和再造林项目活动的方式和程序的决定中也采用了上述碳库分类^[12]。为此,IPCC 好的做法指南给出了这五大碳库的定义^[13]:

地上生物量 土壤层以上以干重表示的所有活生物量,包括干、桩、枝、皮、种子和叶。如果林下植被生物量在总地上生物量中的比例相对较小,可以不予计算,但要保持计算和监测的一致性。

地下生物量 所有活根生物量。由于细根通常很难从土壤有机成分或枯落物中区分出来,因此通常不纳入该部分。

枯落物 矿质土层或有机土壤以上、直径小于 10 cm 或其它规定直径的、处于不同分解状态的所有死生物量,包括凋落物、腐殖质,以及不能从经验上从地下生物量中区分出来的小于一定直径的活细根。

粗木质残体 枯落物以外的所有死生物量,包括枯立木、直径大于或等于 10 cm 或其它规定直径的地表木质残体、死根和树桩。

土壤有机碳 一定深度内矿质土和有机土(包括泥炭土)中的有机碳,包括不能从经验上从地下生物量中区分出来的小于一定直径的活细根。

某一碳库碳储量的减少可被另一碳库碳储量的增加抵消,如干扰后生物量碳储量降低,而枯落物和粗木质残体碳储量则增加,因此单一碳库的变化可能会大于所有碳库的净变化。实际监测和计量中,如果某一碳库不是净排放源,可以不予计算,但一旦选择了某碳库,就要连续测定、监测和评价。要确认某一碳库不是净排放源,可通过:(1)具有代表性的和可证实的采样和分析表明该碳库没有下降,并提供统计可靠性和采样和研究方法说明;(2)被普遍认可的经验或知识,如在农地上造林粗木质残体碳库是不会减少的,因为农地上没有树木,也不可能粗木质残体;(3)文献调研,如有足够文献表明在某地区某一土壤类型的农地上造林后碳储量增加^[14]。

实际监测中的碳库选择,往往取决于多种因素,如碳库变化的大小、方向和速率,监测方法和成本等。不同 LULUCF 活动

可能的碳库选择如表 1。

表 1 监测不同 LULUCF 活动引起的碳储量变化可能的碳库选择^{[15]*}(根据 Brown 等(2004)^[15]调整)

Table 1 The election of carbon pools with C stock change^[15]

LULUCF 活动 LULUCF Activities	碳库 Carbon Pools					土壤有机碳 Soil organic carbon
	活生物量 Living biomass		死有机物 Dead organic matter			
	地上; 树木 Aboveground; trees	地上; 非树木 Aboveground; no tree	地下 Belowground	枯落物 Litter	粗木质残体 Dead wood	
造林/再造林 afforestation/reforestation	必要 ^①	可能	必要	可能	可能	可能
毁林 Deforestation	必要	可能	必要	必要	必要	必要
森林管理 Forest management	必要	可能	必要	可能	必要	可能
农地管理 Cropland management	可能 ^②	可能	可能	可能	不必要 ^③	必要
牧地管理 Grazing land management	可能	必要	可能	可能	不必要	必要
植被恢复 Revegetation	可能	必要	可能	可能	可能	可能

①need; ②may; ③needn't

2 监测时间间隔问题

“马拉喀什协定”要求每年报告“京都议定书”3.3 和 3.4 条款有关活动的源排放和汇清除,但并不意味着必须每年进行测定。事实上,增加测定频率一般可降低不确定性,但不利的一面是增加了年间变异性。年间变异对监测时间间隔具有重要影响,因为生态系统碳吸收或排放受气候类型、气候变异性、管理活动、自然干扰的变异性和其它因素的强烈影响^[16~18],使碳吸收或排放出现强烈的年际变化,甚至在净排放和净吸收之间变化(如图 1)。尽管碳储量总的趋势也许是增加的,但某一时点的碳储量变化可能明显高于或低于平均值。监测间隔期越长,监测到的平均碳储量变化越能代表碳储量变化的平均趋势,监测结果越可靠。不确定性较高的碳库,如土壤有机碳,其年际变化或短期变化是难以检测到的。监测的时间间隔还取决于不同碳库的大小、相对变化速率、空间变异性^[14]。碳储量且相对变化速率较小的碳库,往往要求较长的监测间隔期。空间变异性越大,要求监测间隔时间越长。测定和监测间隔期可通过监测对象的变异性 and 最小可监测的变化量(MDC)来确定^[19]:

$$\Delta = \sqrt{\frac{s^2}{n}(t_{\alpha,v} + t_{\beta,v})} \quad (1)$$

式中, s 为总体方差的估计; Δ 为 MDC,或 1/2 置信区间长度; α 和 β 分别为否定和接受零假设的概率; $t_{\alpha,v}$ 和 $t_{\beta,v}$ 分别为 α 和 β 水平下的临界 t 值; n 为样地数量。通过代表性样地测定得出的方差,即可计算一定数量的监测样地上可监测到的 MDC。对土地利用变化和林业引起的碳储量变化,一般而言,5~10a 的监测间隔是足够的^[20]。

3 样地数量问题

样地数量与测定和监测的精度有直接关系,随着精度的提高,要求的样地数量呈指数增加(图 2)。因此,为降低评价和监测的不确定性,碳储量变化的测定必须保证足够的样地数量。在一定的精度水平下,空间变异性越大和监测间隔期越短,要求的样地数量越多,监测工作量也就越大,成本越高。因此,需要在监测费用与精度水平和监测间隔期之间找到一个恰当的平衡点。我国许多研究者通常采用空间替代时间的办法来研究不同植被类型和人类活动对碳储量的影响^[5,6,8,10],在设定样地数量时,常带有很大的随机性,随意设置重复样地的数量。

样地数量需要根据监测或研究对象碳储量的异质性和所要求的精度确定。要估计在一定可靠性水平下测定和监测所需的样地数量,通常必须首先估计所监测变量(碳储量)的变异性。这可通过监测地区或类似地区的林业清查或土壤普查资料,或在具有代表性的地区开展实际测定来确定。例如要监测退耕还林区 20 年内碳储量的变化,可选择 15~20 个 20 年生代表性林分样地进行实际测定,从而确定其变异性。如果监测区包括不同的类型,需要分类型(层)测定,确定每个类型的变异性。在此基础上,根据每层的变异性、代表的面积和所要求的精度计算样地数量^[15,21]。一些土地利用变化和林业项目,在监测前还需预估或

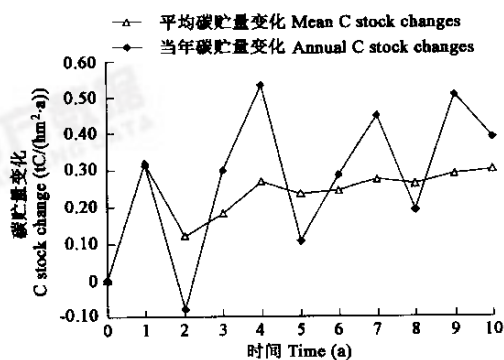


图 1 碳储量变化的年间变异与监测时间间隔示意图

Fig. 1 A hypothetical case of inter-annual variability of carbon stock change in relations to monitoring interval

计量未来碳贮量的变化,一些研究也常采用空间替代时间的办法来估计某活动碳贮量的变化。这时,如果上述代表性林分样地的测定达不到所要求的精度,还需增加一定测定样地,以降低估计的不确定性。将(1)式作变换,即可得到测定和监测碳贮量变化所需样地数量(n)的简单方法:

$$n = \frac{s^2}{\Delta^2} (t_{\alpha,v} + t_{\beta,v}) \quad (2)$$

由于在查 $t_{\alpha,v}$ 和 $t_{\beta,v}$ 时,需要先知道 n ,因此上式还不能真正解决 n 值的确定问题。但从 t 分布表可知,在 0.05 和 0.10 水平上,当 $n > 30$ 时,临界 t 值约等于 2,该临界值对于大于 30 的各个 n 值影响不大。因此可将(2)式近似地表达为:

$$n = \frac{4s^2}{\Delta^2} \quad (3)$$

当计算的 n 值大于 30 时,就可以以该值作为所需样地数量;反之,可采用“试差法”,即用计算出的 n 值查得新的 $t_{\alpha,v}$ 和 $t_{\beta,v}$,代入(3)式重新计算,如此循环下去,直至代入和计算出的 n 值相同或相差很小为止。

4 土壤容重问题

采样分析得到的是单位土壤有机碳(SOC)的含量(%或 gC/kg 土)。而碳贮量通常是单位面积或单位土体 SOC 的量,特别是前者用得比较多。为此需要通过土壤容重将 SOC 含量转换为单位面积或土体 SOC 的量。然而,一些土地利用变化和林业活动会改变土壤容重,例如,森林土壤通常比农业土壤的容重小,频繁的耕作会破坏土壤团聚体并压实土壤,使土壤容重增加。在农地上造林或植被恢复后由于土壤 SOC 输入增加以及土壤干扰的减少,容重将降低。森林转化为农地和牧地平均使土壤容重分别增加 16.9% 和 9.5%^[22]。一些管理活动也会引起土壤容重的变化,如 2 代杉木人工林土壤容重平均比 1 代增加 6.6%,3 代比 2 代平均增加 8.8%^[23]。

土壤容重的变化使计算土地利用变化和林业活动 SOC 贮量的真正变化复杂化。以森林转化为农地 SOC 的变化为例,设有两组样地,一组为森林,一组为从森林转化来的农地。假定土壤剖面的垂直分布及单位质量土壤的含碳量相同,森林和农地在同一层内包含的土壤质量相同,只是由于农地经耕作和压实后容重增加,层次厚度降低。如果土壤样品的采样深度均为 50 cm(每 10 cm 采一个样),农地样品代表的土壤质量会高于林地,如果通过容重计算单位面积 SOC 贮量(如 tC/hm),则容重较小的林地的 SOC 贮量就会被低估,或农地 SOC 贮量被高估,主要原因是在 50 cm 土层内农地包含较多的土壤,而林地包含较少的土壤。在本例中,假定 50 cm 土层内林地和农地土壤容重分别为 1.0 g/cm³ 和 1.2 g/cm³,则 50 cm 土层林地 SOC 贮量为

112.5 tC/hm²,农地为 120 tC/hm²,高于林地,而实际 SOC 并没发生变化。但如果以百分含量来表达,容重较大的农地的 SOC 会被明显低估,50 cm 土层平均为 2.0%,因为 SOC 通常随深度增加呈指数降低,而此时部分土壤样品来自碳含量更低的深层土壤(第 5 层)。此时林地土壤只采样 4 层,平均碳含量为 2.25%(如图 3)。显然这样的采样分析和计算方法是缺乏可比性的。

如果每层中的 SOC 含量发生变化,将会使计算的单位面积 SOC 贮量变化失真。例如,在上面的例子中,如果农地 SOC 含量降低,理论上 SOC 贮量应减少,但由于容重的增加,使农地 SOC 贮量被夸大,抵消了部分 SOC 的实际减少量,使林地转化为农地时 SOC 贮量的降低量被低估,甚至可能出现农地 SOC 贮量高于林地的假象。

以上表明,在估算和监测土地利用变化和林业活动引起的 SOC 贮量变化时,如果监测期内或测定对象之间土壤容重发生明显变化,就需要进行容重校正^[22,23],或根据容重进行采样设计,以保证结果的真实性。我国目前的研究大多忽略了一点^[4,6,10]。

科学的方法应该是,对不同土地利用和林业活动类型 SOC 贮量的研究测定,首先测定不同类型各土层土壤容重,再根据容重计算相同质量土体(如 5000 g/hm²)条件下各类型所需的采样深度^[24],以保证各类型在相同的土壤质量下进行比较。实际工

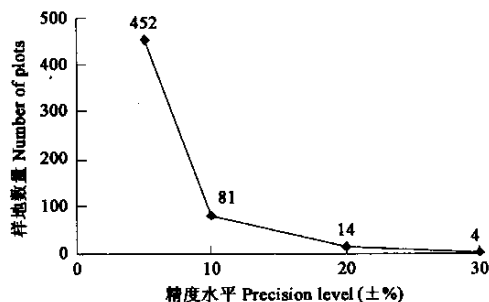


图 2 精度水平与样地数量的关系(活生物量和死生物量总碳贮量的 ±%)^[15]

Fig. 2 The relationship between the number of plots and the precision level (± % of total carbon stock in living and dead biomass)^[15]

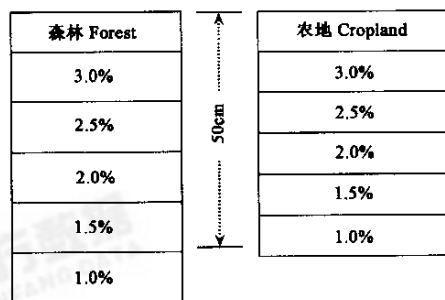


图 3 森林转化为农地土壤容重变化示意图

Fig. 3 A hypothetical case of soil bulk density change under the conversion from forest land to cropland

作中,可以以容重最小的类型的土体质量为参考标准,根据其它类型的容重计算包含相同质量的土壤所需的深度作为采样深度。这样不同类型的采样深度可能不一样,但保证了研究测定结果的可比性。对于固定样地上 SOC 的定期监测,可以根据第一次监测测定的容重和采样深度计算该深度内的土壤质量,以后每次监测时测定土壤容重,根据新的容重来重新计算采样深度。

如果一开始没有按上述方法进行采样设计,即每个类型或每次监测均已按固定深度采样,在这种情况下,可以进行适当的校正。可以以容重最大的土壤的采样层内包含的土壤总质量作为参考标准,为容重较轻的土壤增加一层虚拟层,并计算其 SOC 贮量^[23]。首先,假定土壤容重(BD , t/m^3)随土层深度(L)的增加呈线性降低,即:

$$BD = a + b \cdot L \quad (4)$$

式中, a 和 b 为参数。然后计算虚拟层的土壤质量(ΔM):

$$\Delta M = M_{\max} - M \quad (5)$$

式中, M_{\max} 为上述容重最大的土壤的采样层内包含的土壤总质量(t/hm^2); M 为容重较小土壤的采样层内包含的土壤总质量(t/hm^2)。则虚拟层厚度(t)可通过下式计算:

$$\left(a + b \cdot \left(d + \frac{t}{2} \right) \cdot t \right) = \Delta M \quad (6)$$

式中, d 为已采样深度,整理得:

$$t = \frac{-(a + b \cdot d) + \sqrt{(a + b \cdot d)^2 + 2b \cdot \Delta M}}{2b} \quad (7)$$

根据式(4)和(7)计算虚拟层的容重。假定 SOC 含量随土层增加呈线性(虚拟层以上只有两个采样层时)或指数变化(两个以上采样层时),拟合经验方程,并根据该方程计算虚拟层 SOC 含量,进而计算虚拟层碳贮量。

5 小结

人类活动引起的土地利用变化是引起大气中温室气体浓度上升和气候变化的主要原因之一,准确评价土地利用变化和林业活动对大气碳的影响,对于人类社会制定、实施和评价应对气候变化的政策和措施具有重要意义。碳贮量变化的定期测定和监测是评价这种影响的基本方法。被监测碳库的种类、监测间隔期的长短和监测样地数量大小与监测的成本和监测结果的准确性直接相关。增加碳库的种类、监测频率和样地数量,往往可降低监测的不确定性,但会大大增加监测费用。因此往往需要在监测的成本和准确性之间找到一个恰当的平衡点。这要通过碳库的大小、变化的速率和方向、空间和时间变异性以及监测精度要求,应用科学的统计学原理进行确定。土地利用变化常常引起的土壤容重变化,使准确监测和测定 SOC 的变化变得更为复杂和困难。为剔除容重变化的影响,监测 SOC 变化时,首先需要测定测定对象各土层的土壤容重,在此基础上计算采样深度,再实施采样监测。如果已按相同的固定层次实施了采样,则需要对容重校正,以保证监测对象的可比性。

References:

- [1] United Nations. United Nations Framework Convention on Climate Change. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>, 1992.
- [2] UNFCCC. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>, 1997.
- [3] Li Z P, Tang Y L, Shi H, et al. Characteristics of C and N accumulation in infertile red soil under different rotation systems. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, **35**(10):1236~1242.
- [4] Luo T S, Chen B F, Chen Y F, et al. Variation of the soil carbon and nitrogen for initial stage after the felling in tropical montane rainforest of Bawangling, Hainan Island. *Forest Research*, 2000, **13**(2):123~128.
- [5] Jiang P K, Zhou G M, Xu Q F. Effect of intensive cultivation on the carbon pool of soil in *Phyllostachys praecox* stands. *Scientia Sinica*, 2002, **38**(6):6~11.
- [6] Li Y L, Peng S L, Zhao P, et al. A study on the soil carbon storage of some land use types in Heshan, Guangdong, China. *Journal of Mountain Science*, 2002, **20**(5):548~552.
- [7] Wang S P, Zhou G S, Lu Y C, et al. Distribution of soil carbon, nitrogen and phosphorus along northeast China transect (NECT) and their relationships with climatic factors. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2002, **26**(5):513~517.
- [8] Wu J G, Zhang X Q, Wang Y H, et al. The effects of land use changes on the distribution of soil organic carbon in physical fractionation of soil. *Scientia Sinica*, 2002, **38**(4):19~29.
- [9] Wu J G, Zhang X Q, Xu D Y. The assessment of the impacts of land use change on the ecosystem carbon sink. *Engineer Science*, 2003, **5**(9):65~71.

- [10] Wu J G, Zhang X Q, Xu D Y. Impacts of land use change on soil organic carbon storage. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, **15** (4): 593~599.
- [11] UNFCCC. Report of the Conference of the Parties on its seventh session, Part two: Action taken by the Conference of the Parties. Volume I. <http://maindb.unfccc.int/library>. FCCC/CP/2001/13/Add. 1. 2001.
- [12] UNFCCC. Report of the Conference of the Parties on its ninth session. <http://maindb.unfccc.int/library>. FCCC/CP/2003/6/Add. 2. 2003.
- [13] Freibauer A, Hohenstein W, Makundi W, et al. LUCF Sector Good Practice Guidance. In: *IPCC Good Practice Guidance for LULUCF*. The Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC, Hayama, Kanagawa, Japan. ISBN 4-88788-003-0, 2004. 3. 1~3. 317.
- [14] Boonpragob K, Janzen H, Kurz W, et al. Supplementary methods and good practice guidance arising from the Kyoto Protocol. In: *IPCC Good Practice Guidance for LULUCF*. The Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC, Hayama, Kanagawa, Japan. ISBN 4-88788-003-0, 2004. 4. 9~4. 92.
- [15] Brown S, Masera O, Ambia V, et al. LULUCF Projects. In: *IPCC Good Practice Guidance for LULUCF*. The Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC, Hayama, Kanagawa, Japan. ISBN 4-88788-003-0, 2004. 4. 93~4. 117.
- [16] Griffis T J, Rouse W R, Waddington J M. Interannual variability of net ecosystem CO₂ exchange at a subarctic fen. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, **14**: 1109~1121.
- [17] Tian H, Melillo J M, Kicklighter D W, et al. Effect of interannual climate variability on carbon storage in Amazonian ecosystems. *Nature*, 1998, **396**: 664~667.
- [18] Flanagan L B, Wever L A, Carlson P J. Seasonal and interannual variation in carbon dioxide exchange and carbon balance in a northern temperate grassland. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 599~615.
- [19] Zar J H. *Biostatistical Analysis*, 4th edn. Prentice Hall International, New Jersey, 1999.
- [20] Paciorek N, Rypdal K, Baritz R, et al. Cross-Cutting Issues. In: *IPCC Good Practice Guidance for LULUCF*. The Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC, Hayama, Kanagawa, Japan. ISBN 4-88788-003-0, 2004. 5. 1~5. 75.
- [21] MacDicken K G. *A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects*. Winrock International, Arlington, VA, USA, 87, 1997.
- [22] Murty D, Kirschbaum M U F, McMurtrie R E, et al. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 105~123.
- [23] Zhang X Q, Kirschbaum M U F, Hou Z, et al. Carbon Stock Changes in Successive Rotations of Chinese Fir (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) Plantations. *Forest Ecology and Management*, 2004.
- [24] Ellert B H, Gregorich E G. Storage of carbon, nitrogen and phosphorus in cultivated and adjacent forested soils of Ontario. *Soil Science*, 1996, **161**: 587~603.

参考文献:

- [3] 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. *中国农业科学*, 2002, **35**(10): 1236~1242.
- [4] 骆士寿, 陈步峰, 陈永富, 等. 海南岛霸王岭热带山地雨林采伐经营初期土壤碳氮储量. *林业科学研究*, 2000, **13**(2): 123~128.
- [5] 姜培坤, 周国模, 徐秋芳. 雷竹高效栽培措施对土壤碳库的影响. *林业科学*, 2002, **38**(6): 6~11.
- [6] 李跃林, 彭少麟, 赵平, 等. 鹤山几种不同土地利用方式的土壤碳储量研究. *山地学报*, 2002, **20**(5): 548~552.
- [7] 王淑平, 周广胜, 吕育财, 等. 中国东北丰带(NECT)土壤碳、氮、磷的梯度分布及其与气候因子的关系. *植物生态学报*, 2002, **26**(5): 513~517.
- [8] 吴建国, 张小全, 王彦辉, 等. 土地利用变化对土壤物理组分中有机碳分配的影响. *林业科学*, 2002, **38**(4): 19~29.
- [9] 吴建国, 张小全, 徐德应. 土地利用变化对生态系统碳汇功能影响的综合评价. *中国工程科学*, 2003, **5**(9): 65~71.
- [10] 吴建国, 张小全, 徐德应. 土地利用变化对土壤有机碳贮量的影响. *应用生态学报*, 2004, **15**(4): 593~599.