

# 近30年土地利用变化对新疆森林生态系统碳库的影响

陈耀亮<sup>1,2</sup>, 罗格平<sup>1</sup>, 叶 辉<sup>1,2</sup>, 赵树斌<sup>3</sup>, 王渊刚<sup>1,2</sup>, 韩其飞<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 国家应用软件产品质量监督检验中心, 北京 100193)

**摘要:** 土地利用及其变化是导致森林生态系统碳库变化最重要的因素。以植树造林面积、森林产品收获产量及林地转移面积为基础数据, 采用《LULUCF 指南》中数据分层的碳源汇计量方法, 分析了1975-2005年期间三种土地利用方式对新疆森林碳库的影响。1975年新疆森林总碳库估算值为720.02 Tg, 其中土壤碳库为528.82 Tg。近30年土地利用变化对其碳库的影响总体表现为碳汇, 固碳量为48.15 Tg, 与1975年碳库相比, 森林碳储量增长了6.69%。植树造林表现出强烈的碳汇功能, 总固碳量为54.24 Tg。森林采伐是最主要的碳释放来源, 共释放碳5.42 Tg。林地转移呈现微弱的碳释放特征, 共排放为0.66 Tg。研究结果表明, 土地利用变化对该区域森林碳库具有明显的增汇效应。本研究将有利于进一步深化人类活动对区域碳平衡影响的认识。

**关键词:** 土地利用变化; 森林生态系统; 碳库; 新疆

DOI: 10.11821/dlyj201311002

## 1 引言

土地利用/覆被变化是除了工业化之外人类活动对自然生态系统的最大影响因素<sup>[1-3]</sup>, 同时又是在估测全球碳储量变化中最大的不确定因素<sup>[4,5]</sup>。土地利用/覆被变化往往伴随着大量的碳交换<sup>[6]</sup>, 不同类型的土地利用/覆被变化对生态系统碳循环的作用不同, 例如草地退化通常是碳源的过程<sup>[7]</sup>, 而植树造林过程却可以增加森林生态系统碳贮存<sup>[8-10]</sup>。即使同一类型的土地利用/覆被变化对生态系统碳循环的作用也可能不同, 例如高覆盖度的草地转换为农田的过程通常会导致草地生态系统的碳损失<sup>[11,12]</sup>, 而低覆被的荒漠草地开发为农田通常是碳汇的过程<sup>[13]</sup>。森林生态系统作为陆地生态系统的核心, 在全球碳收支平衡中占主导作用<sup>[14]</sup>。同时森林由于其本身拥有巨大的植被碳库(约占全球植被碳库的86%以上<sup>[15]</sup>), 而且还维持着巨大的土壤碳库(约占全球土壤碳库的73%<sup>[15]</sup>), 森林用地变化会对陆地生态系统的碳储量产生显著影响, 并影响大气中的碳库。许多研究从全球尺度<sup>[16-18]</sup>或

收稿日期: 2013-01-28; 修订日期: 2013-04-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB825105)

作者简介: 陈耀亮(1990-), 男, 江西萍乡人, 硕士研究生, 主要从事遥感与GIS技术在土地利用变化领域的研究。

E-mail: chengis0115@gmail.com

通讯作者: 罗格平(1968-), 男, 研究员, 博士, 主要从事土地变化及其生态效应、地理信息系统与遥感应用研究。

E-mail: luogp@ms.xjb.ac.cn

区域尺度<sup>[15, 19-21]</sup>对土地利用/覆被变化对森林生态系统碳储量的影响进行了估算,但多数研究在计算碳储量的变化时对不同龄级、不同树种的碳密度和氧化速率的差异缺乏详细考虑<sup>[16, 19-21]</sup>。人工林碳储量依林龄、树种的不同而具有很大的差异和不确定性<sup>[22, 23]</sup>。Trouve等的研究发现,在刚果热带稀树大草原的桉树和松树人工林的土壤有机碳增量与时间呈线性相关<sup>[24]</sup>。而Vesterdal等对在丹麦由农田转换过来的人工橡树林和人工挪威云杉林的研究发现,土壤碳储量在0-5cm随林龄的增加而增加,而在5-25cm则随林龄的增加而下降<sup>[25]</sup>。不同类型的森林产品,因为使用寿命的年限不同,氧化速率具有很大差异。在薪材、纸和纸板、人造板和锯材四种林产品中,薪材使用寿命最短,可能当年就全部氧化,而锯材的使用寿命最长,因此其氧化速率最小<sup>[26]</sup>。

干旱区森林在维持整个干旱区生态系统物质和能量平衡的过程中有着至关重要的作用<sup>[27]</sup>,虽然干旱区森林面积小,但极易受到人类活动的干扰,因此而成为全球环境变化最为敏感和最为脆弱的地带之一<sup>[28]</sup>。由于通常认为干旱区林业活动弱,常常忽略干旱区土地利用变化对森林生态系统的影响,这对全面深入认识人类活动对生态系统碳循环的影响是不利的,甚至会产生偏差。新疆作为欧亚大陆干旱区的中心腹地,森林林业活动较为典型。新疆森林土地利用变化类型主要包括植树造林、森林采伐以及林地转移三个方面。自1975年和1999年国家分别实施三北防护林工程和退耕还林工程以来,新疆作为防护林体系建设的重点省(区)之一,进行了大规模的人工造林活动。与此同时,改革开放以来,新疆经济迅速发展,随之而来的是较大规模的商业性采伐活动和林业结构调整。但是这些活动对森林碳库的影响还缺乏深入的认识,不利于干旱区森林可持续发展。因此,本文以土地利用/覆被变化对新疆森林生态系统碳库的影响为研究目标,分析土地利用变化类型对新疆森林碳库的作用,为新疆森林的可持续发展提供参考意见。

## 2 研究区概况与研究方法

### 2.1 研究区概况

新疆深居欧亚大陆腹地,水汽来源匮乏,降水稀少且分布不均。新疆森林面积少,1980年的森林覆盖率为0.96%<sup>[29]</sup>,森林资源主要由针叶林、绿洲人工林和荒漠河谷林三大部分组成。

### 2.2 数据来源

(1) 植树造林数据:1975-2005年期间新疆植树造林统计数据。造林树种主要分为用材林、防护林和经济林三种,由于统计数据中在1986年以前的造林面积是按照成活率40%进行统计的,1986年及以后的造林面积是按照成活率85%进行统计的<sup>[30]</sup>。因此,在1986年以前每年造林的实际成活率 $U$ 的范围为: $40\% \leq U \leq 100\%$ ,1986年及以后每年造林的实际成活率 $U$ 的范围为: $85\% \leq U \leq 100\%$ 。本文在计算实际成活的造林面积时,为了减少误差,对实际成活率采用取平均数的方法,将1986年以前的统计值乘以70%(40%和100%的平均值),1986年及以后的统计值乘以92.5%(85%和100%的平均值),得到本研究各林种实际成活的面积(图1a)。

(2) 森林产品收获数据:1975-2005年期间新疆主要木质林产品产量数据<sup>[31]</sup>。林产品主要分为薪材、纸和纸板、锯材以及人造板四种(图1b)。

(3) 1975年新疆森林面积和植被、土壤碳密度:1975年新疆各类型森林面积数据

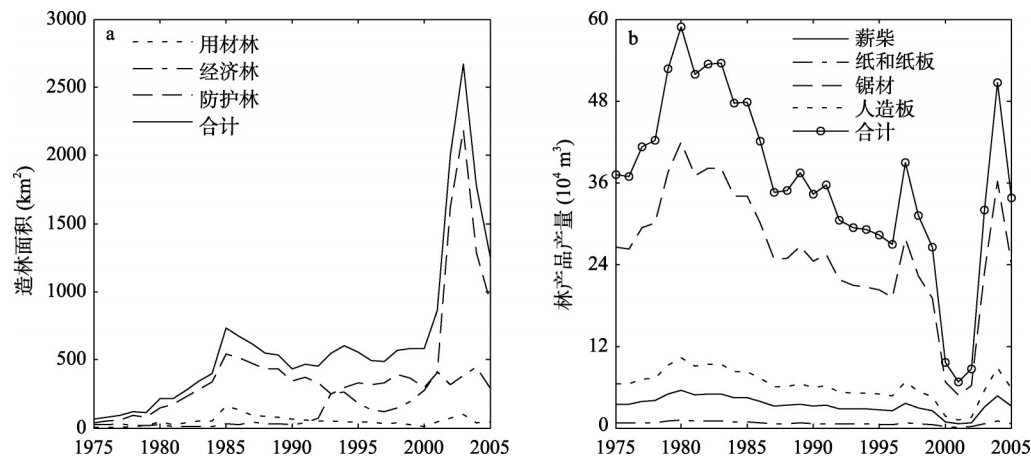


图1 1975-2005年新疆主要造林林种面积 (a) 和主要木质林产品产量 (b)

Fig.1 Area of afforestation (a) and yield of forest products (b) in Xinjiang between 1975-2005

(表1) 来源于1975-1980年新疆森林清查资料<sup>[29]</sup>。新疆各生态系统土壤和植被碳密度数据部分来源于野外的实测值, 部分来源于文献<sup>[7,32-41]</sup>和资料数据(全国第二次土壤普查资料), 其中植被碳密度共有71个样本值, 土壤碳密度共有154个样本值, 取各类型的平均值作为本研究的碳密度(表1)。

(4) 林地转移面积: 采用中国科学院新疆生态与地理所对地观测与模拟实验室“地球系统科学数据共享平台—新疆与中亚科学数据共享平台”的1975年和2005年两期目视解译的土地利用/覆被数据在ArcGIS中进行转移矩阵分析, 得到林地转移的类型和面积(表2)。

2.3 方法

《IPCC土地利用、土地利用变化和林业优良做法指南》<sup>[42]</sup>(以下简称“LULUCF指南”)将温室气体源汇从简单到复杂分为3个层次, 使各国根据其本国的活动水平数据和参数的可获得性, 选择适合的方法。第一层是采用IPCC提供的缺省参数值及其对应的基本方法, 活动水平数据来自国际或国家级的估计或统计数据; 第二层采用较详细的本国活动水平数据和国内获取的参数; 第三层参数和活动水平数据是基于详细的分地区或类型的

表1 各类型森林面积及与林地变化有关的各生态系统植被碳密度和土壤碳密度

Tab.1 Area of forests, vegetation carbon density and soil carbon density of ecosystems relating to forest land use and cover change in Xinjiang

	植被碳密度(kg/m <sup>2</sup> )			土壤碳密度(kg/m <sup>2</sup> )			面积 (10 <sup>8</sup> m <sup>2</sup> )
	样本数	平均值	标准误差	样本数	平均值	标准误差	
针叶林	24	13.81	6.06	34*	37.83	18.86	116.52
荒漠河谷林	10	2.98	1.02	5	9.48	1.57	49.51
平原人工林	5	5.98	1.89	5**	9.48*	1.57	19
灌木林	6*	1.3	0.87	2	7.3	4.56	31.51
荒漠	4*	0.04	0.03	37	3.18	2.08	-
草地	5	0.76	0.47	29	7.71	3.15	-
耕地	17	0.64	0.21	47	8.73	3.27	-

注: \*号表示实测数据, \*\*表示平原人工林土壤碳密度数据极少, 采用荒漠河谷林的样本值。

表2 土地利用转移矩阵中涉及林地的覆被变换类型的面积 (km<sup>2</sup>)

Tab.2 Area of each type relating to forest land in land cover change transfer matrix in Xinjiang between 1975–2005 (km<sup>2</sup>)

1975	2005			
	林地	草地	耕地	裸地
林地	28305.03	2.62	18.43	-
草地	46.48	484893.71	13558.44	512.30
耕地	124.99	97.43	58042.98	10.84
裸地	54.68	285.75	1048.06	1012983.98

数据。其方法体系的实质是对于不同详细程度的数据采用不同的计算公式，以将计算结果的不确定性减少到可行的程度。

“LULUCF指南”中计算土地利用、土地利用变化和林业(LULUCF)碳源汇时，需分别计量植被生物量（地上生物量、地下生物量）、死有机质（凋落物和枯死木）和土壤有机质共5大碳库变化。

(1) 需计算 1975 年新疆森林的碳库以评价土地利用变化导致的碳通量对碳库的影响程度。1975 年新疆森林有机碳库（本文以下所指的碳均为有机碳）采用以下公式进行计算：

$$C=VC+SOC=A\times(VD+SD)$$
 (1)

式中： $C$ 为森林生态系统总碳库； $VC$ 为植被碳储量； $SOC$ 为土壤碳储量； $A$ 为森林面积； $VD$ 为植被碳密度； $SD$ 为土壤碳密度。

(2) 1975-2005 年新疆森林的土地利用及其变化类型主要包括植树造林、森林采伐和林地转移3种，则计算土地利用及其变化导致新疆森林碳储量的变化  $\Delta C$  可用下式表示：

$$\Delta C=\Delta C_{\text{植树造林}}+\Delta C_{\text{森林采伐}}+\Delta C_{\text{林地转移}}$$
 (2)

(3) 采用  $r_{\Delta c}$ 、 $r_{\Delta vc}$  和  $r_{\Delta soc}$  来分别表征各土地利用变化类型的碳源汇通量相对于 1975 年森林总碳库、植被碳和土壤碳的变化幅度。

$$\begin{aligned}r_{\Delta c}&=|\Delta C/C|\\r_{\Delta vc}&=|\Delta VC/VC|\\r_{\Delta soc}&=|\Delta SOC/SOC|\end{aligned}$$
 (3)

式中： $\Delta C$ 、 $\Delta VC$  和  $\Delta SOC$  分别表示各土地利用变化类型导致的总碳储量的变化、植被碳储量的变化和土壤碳储量的变化。

2.3.1 植树造林固碳量计算

(1) 植被固碳量 对于植树造林导致的林地植被固碳量的计量，“LULUCF指南”根据活动水平数据和参数可能详细程度提供以下了3个方程：

$$\Delta VC=(VC_{t_2}-VC_{t_1})/(t_2-t_1)$$

和 (方程 3.2.3)

$$VC_t=A_t\times V_t\times D_t\times BEF_t\times(1+R_t)\times CF$$
$$\Delta VC=A_t\times G_t\times CF \quad \text{(方程 3.2.4)}$$

$$\Delta VC=A_t\times I_t\times(1+R_t)\times CF \quad \text{(方程 3.2.5)}$$
 (6)

式中： $\Delta VC$  为  $t_1$  造林导致的林地中活生物量（包括地上和地下生物量）的年碳储量变

化;  $VC_{t_2}$  为在时间  $t_2$  时林地活生物量中的总碳量;  $VC_{t_1}$  为在时间  $t_1$  时林地活生物量中的总碳量;  $A_t$  为在时间  $t$  时林地的面积 ( $\text{m}^2$ );  $V_t$  为在时间  $t$  时商品材积 ( $\text{m}^3/\text{m}^2$ );  $D_t$  为在时间  $t$  时的基本木材干物质密度 ( $\text{g}/\text{m}^3$ );  $G$  为  $BEF_t$  为在时间  $t$  时将商品材积换算为地上生物量的生物量扩展系数;  $R_t$  为在时间  $t$  时的根茎比率;  $G_t$  为在时间  $t$  时总生物量的年增量 ( $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ );  $I_t$  为在时间  $t$  时地上生物量的年增量 ( $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ );  $CF$  为干物质的含碳率, 在本研究中  $t_2$  为 2005 年,  $t_1$  为造林初始年, 并认为  $VC_{t_1}$  为 0,  $t_1$  从 1975 年开始。

根据收集到的各造林林种的参数详细程度, 分别选择不同的方法计量固碳量。新疆用材林主要分为杨树和云杉两种, 其面积比例约为 17:3<sup>[43]</sup>。防护林主要以杨树为主, 因此对于杨树用材林和防护林, 均采用杨树分林龄阶段的商品材积、木材密度等详细参数 (表 3), 分林龄阶段的杨树生物量扩展系数和根茎比参数采用李建华 (2007) 通过实测模拟的公式获取<sup>[44]</sup> (其中  $BEF$  采用  $BEF=1/(0.809-0.215/AGE)$  进行计算, 采用  $R=1.314\times AGE^{-0.764}$  进行计算, 其中  $AGE$  为造林树种的年龄), 应用公式 (4) 进行计量; 对于云杉用材林, 收集到了其总生物量的年增量参数 (表 3), 故应用公式 (5) 进行计量; 对于经济林, 采用新疆地区落叶阔叶林的地上生物量年均增量 (表 3) 和平均根茎比 (0.21<sup>[33]</sup>), 应用公式 (6) 进行计量。3 种林种的干物质的含碳率均采用 IPCC 的默认值 0.5<sup>[42]</sup>。

(2) 土壤碳固定量 植树造林活动土壤固碳量也是分林种进行计算, 各林种土壤有机碳储量年变化均参照《LULUCF 指南》中方程 3.2.32, 计算公式为:

$$\Delta SOC = \frac{A_t \times (SD_{t_2} - SD_{t_1})}{t_2 - t_1} \quad (\text{方程 3.2.32}) \tag{7}$$

式中:  $\Delta SOC$  为  $t_1$  年造林导致的土壤年固碳量;  $A_t$  为  $t$  年造林面积;  $SD_{t_1}$  为  $t_1$  年转换为林地时林地的土壤碳密度;  $SD_{t_2}$  为转换后至  $t_2$  年时林地的土壤碳密度;  $t_2$  代表计算终止年份, 在本研究中为 2005 年,  $t_1$  从 1975 年开始。

由于植树造林活动是其他土地覆被类型向林地转移的过程, 根据两期土地利用/覆被数据转移矩阵, 有草地、耕地和荒漠三种类型向林地转移, 并且转移的比例分别为 0.21、0.55 和 0.24 (表 2)。因此计算过程中可以根据转移矩阵中各类型向林地转换的面积比例关

表 3 1975–2005 年新疆造林植被固碳量计量参数表

Tab.3 Parameters used in the calculation of vegetation carbon sequestration from afforestation in Xinjiang between 1975–2005

林种	树种	林分结构	林分年龄	商品材积	木材密度	地上生物量年均增量	总生物量年均增量
用材林	杨树	幼龄林	0-5	45.96	0.39	-	-
		中龄林	6-15	33.71			
		成熟林	16-30	168.08			
	云杉	幼龄林	0-40	-	-	-	9.97
防护林	杨树	幼龄林	0-5	45.96	0.39	-	-
		中龄林	6-15	33.71			
		成熟林	16-30	168.08			
经济林	果树	-	-	-	-	6.45	-

注: “-”表示该树种参数计算时并不需要, 各参数参考文献来源: 林分年龄<sup>[45-47]</sup>, 蓄积量<sup>[43]</sup>, 木材密度<sup>[48]</sup>, 地上生物量年均增量和总生物量年均增量<sup>[33]</sup>



系确定它们在统计数据中每年向林地转移的面积。根据这个比例关系可以确定这三种土地覆被类型在统计数据中每年向林地转移的面积。假设造林之后土壤碳密度逐渐增加（造林初期由于土壤扰动导致的土壤碳密度下降较小而忽略不计），当树林成熟之后认为土壤碳密度达到最大值<sup>[22]</sup>，并且认为整个过程的变化与林分年龄呈现性关系<sup>[25]</sup>，那么就根据这个变化计算出 $SD_0$ 。

2.3.2 森林采伐碳排放计算

（1）植被碳释放量 森林采伐后，植被碳库分为两个部分，一部分作为木质林产品释放到大气中，另一部分是砍伐后留在地上的残余物和地下生物量，这些死有机质最终一部分会加入成为土壤碳库，另一部分会直接释放到大气中。进入土壤的这部分碳通过一定的周转时间又会全部释放到大气中。为了简化其过程，认为残余在地上生物量很小而忽略不计，并且地下生物量全部进入土壤碳库，而之后通过土壤碳库排放到大气中的碳属于土壤碳储量变化的范畴。因此只需计算森林产品的碳释放量，其计量公式源自于“LULUCF 指南”中的方程 3.2.7：

$$\Delta VC = \frac{H_t \times D_t \times CF}{T} \quad (\text{据方程 3.2.7 修改}) \tag{8}$$

式中： $\Delta VC$  为  $t$  森林采伐导致的植被年碳释放量； $H_t$  为在时间  $t$  时的采伐材积（ $\text{m}^3$ ）； $D_t$  为在时间  $t$  时的基本木材干物质密度（ $\text{g}/\text{m}^3$ ）； $T$  为木质林产品的使用寿命； $CF$  为干物质的含碳率。本研究计算森林采伐植被碳释放的木材密度、产品使用寿命均采用适合新疆实际情况的参数（表 4）。

（2）土壤碳释放量 森林采伐属于森林管理的过程，并不会导致土地覆被类型的转换，采伐后土壤碳密度会下降，达到最小值之后会恢复到一个稳定的值。森林采伐土壤有机碳变化同样参照《LULUCF 指南》中方程 3.2.32 计量：

$$\Delta SOC = \frac{A_t \times (SD_0 - SD_t)}{t_2 - t_1} \quad (\text{方程 3.2.32}) \tag{9}$$

式中： $\Delta SOC$  为  $t_1$  年森林采伐导致的土壤年碳释放量； $A_t$  为  $t$  年森林采伐面积； $SD_t$  为  $t_1$  年森林采伐时林地的土壤碳密度； $SD_0$  为采伐后至  $t_2$  年时林地的土壤碳密度； $t_2$  代表计算终止年份，在本研究中为 2005 年， $t_1$  从 1975 年开始。

各森林产品的砍伐面积缺乏统计数据，采用以下公式<sup>[21]</sup>进行计算：

$$A_t = \frac{H_t \times D \times BEF \times (1 + R) \times CF}{VD} \tag{10}$$

式中： $H_t$  为  $t$  年木质林产品产量（ $\text{m}^3$ ）； $D$  为基本木材密度（ $\text{t}/\text{m}^3$ ）； $BEF$  为将商品材积换算为地上生物量的扩展系数； $R$  为根茎比； $CF$  为干物质含碳率； $VD$  为植被碳密度（ $\text{g}/\text{m}^2$ ）。

新疆森林采伐主要树种为以云杉为代表的温带常绿针叶林树种和以杨树、刺槐为代表的温带阔叶落叶林树种。温带阔叶落叶林树种和温带常绿针叶林树种采伐的面积按照 17:3 的比例进行估算<sup>[43]</sup>，并假设砍伐之后土壤碳密度降低 50% 之后达到最小值，这个过程需要 10 年，之后恢复到稳定时的碳密度为初始碳密度的 90%，这个

表 4 1975–2005 年新疆森林采伐植被碳释放计量参数表  
Tab.4 Parameters used in the calculation of vegetation carbon emission from wood harvest in Xinjiang between 1975–2005

木质林产品	材积密度 ( $\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$ ) <sup>[26]</sup>	使用寿命 (年) <sup>[49]</sup>	干物质含 碳率 <sup>[42]</sup>
薪材	0.485	1	0.5
纸和纸材	0.9	5	0.5
锯材	0.485	50	0.5
人造板	0.570	20	0.5

过程需要 40 年<sup>[17]</sup>。假设这两个阶段的碳密度年变化是匀速的, 那么可以计算出采伐后 50 年内每一年的土壤碳密度, 即公式 (8) 中的  $SD_{t_2}$ 。公式 (8) 中的  $SD_{t_1}$  为砍伐树种所属生态系统的初始土壤碳密度 (表 1), 公式 (9) 中的  $VD$  为砍伐树种所属生态系统的植被碳密度 (表 1)。通过文献收集, 新疆地区针叶林的  $BEF$  和  $R$  采用的参数值分别为 1.57 和 0.23<sup>[50]</sup>, 落叶林的  $BEF$  和  $R$  均采用的参数值分别为 1.31 和 0.21<sup>[33]</sup>,  $CF$  值采用 0.5<sup>[42]</sup>。

**2.3.3 林地转移碳排放计算** 林地转移是指由林地转为别的土地覆被类型的过程。计算林地转移的植被和土壤碳变量公式为:

$$\Delta VC = A_i \times (VD_i - VD)$$

(11)

$$\Delta SOC = A_i \times (SD_i - SD)$$

(12)

式(11)~(12)中:  $A_i$  为转换类型  $i$  的转移面积;  $VD_i$ 、 $SD_i$  为转换类型  $i$  中转换后的植被类型植被碳密度和土壤碳密度;  $VD$ 、 $SD$  为转换前林地的植被碳密度和土壤碳密度。林地转移是林业结构调整的结果, 其转移类型只有林地转为草地和林地转为农田两类 (表 2)。本研究认为转移的林地类型为阔叶林, 因此植被碳密度数据采用表 1 中阔叶林的碳密度。

3 结果分析

3.1 各土地利用类型碳通量及其变化

(1) 1975-2005 年期间土地利用/覆被变化对新疆森林碳循环的影响总体表现为碳汇效应 (表 5)。总固碳量为 48.15 Tg, 年平均净增碳汇为 1.55 Tg, 与 1975 年碳库相比, 增长幅度为 6.69%, 其中植被固碳量远高于土壤固碳量, 占总碳汇的 75.60%。植树造林活动表现出了强烈的碳汇功能, 总固碳量为 54.24 Tg, 年平均净增碳汇为 1.24 Tg, 其植被固碳量要远高于土壤固碳量, 占植树造林总固碳量的 71.13%, 这表明人工造林活动的植被碳汇效应要明显强于土壤。所有植树造林树种中, 防护林的固碳量最高, 达 36.43 Tg, 占整个造林碳汇的 67.16%。森林采伐是最主要的森林碳释放来源, 共释放碳 5.42 Tg, 其土壤碳释放速率为 0.12 Tg/yr, 高于植被碳释放速率 (0.05 Tg/yr), 这表明森林采伐活动对土壤的干扰强烈。所有采伐林产品中, 锯材的碳释放量最高, 为 3.42 Tg, 占森林采伐总释碳量的 62.99%。林地转移总体呈现微弱的碳释放特征, 共释放 0.66 Tg, 释放速率为 0.02 Tg/yr。

(2) 总体逐年固碳量随时间的变化呈现近似指数型的增长趋势, 逐年固碳量累积随时间变化呈现指数增长趋势 (图 2)。植树造林的植被年固碳量和土壤年碳固定量逐年变化的趋势是一致的, 碳汇呈整体增加趋势, 具体表现为刚开始缓慢增长, 在 80 年代以后快

表 5 1975–2005 年新疆森林土地利用变化导致的碳储量变化量和变化幅度 (Tg)

Tab.5 Change in carbon (Tg) response to forest land–use change in Xinjiang between 1975–2005

	1975 年 碳库	植树造林		森林采伐		林地转移		合计	
		碳通量	变化 幅度	碳通量	变化 幅度	碳通量	变化 幅度	碳通量	变化 幅度
植被	191.2	-38.58	20.18% <sup>*</sup>	1.69	0.88% <sup>*</sup>	0.49	0.26% <sup>*</sup>	-36.40	19.04% <sup>*</sup>
土壤	528.82	-15.66	2.96% <sup>£</sup>	3.73	0.71% <sup>£</sup>	0.17	0.03% <sup>£</sup>	-11.76	2.24% <sup>£</sup>
总计	720.02	-54.24	7.53% <sup>§</sup>	5.42	0.75% <sup>§</sup>	0.66	0.09% <sup>§</sup>	-48.15	6.69% <sup>§</sup>

注: \*是指 | 植被碳储量变化量/1975 年植被碳库 |, £是指 | 土壤碳储量变化量/1975 年土壤碳库 |, §是指 | 总碳储量变化量/1975 年总碳库 |, 正值表示向大气中排放碳。

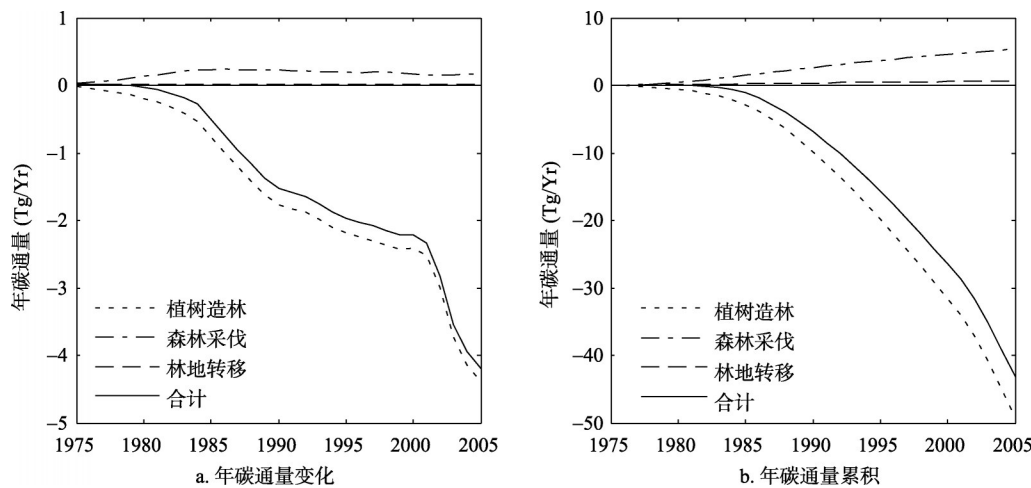


图2 1975-2005年新疆森林土地利用/覆被变化导致的年碳通量逐年变化 (a) 和逐年累积 (b) (正值表示向大气中排放碳)

Fig.2 Change (a) and accumulative change (b) storage in carbon in response to forest land use change in Xinjiang between 1975-2005. Positive values indicate a release of carbon to the atmosphere

速上升,至90年代趋于平缓,然后在2000年左右开始又飞速上升(图3a和图3b)。这正是对国家三北防护林一期工程(1978年开始)和退耕还林工程(1999年开始)的响应。另外,植树造林的年固碳量逐年变化总体趋势和防护林年固碳量逐年变化趋势近乎一致,表明三种造林树种中,防护林的固碳影响最大。防护林的年固碳速率最大,为1.18 Tg/yr,经济林其次(0.32 Tg/yr),用材林最低(0.25 Tg/yr)。森林采伐导致的每年植被和土壤的碳释放量都比较小,植被逐年碳释放量随着时间的变化呈现整体增加的趋势(图3c),但在2000年左右有一个明显的下降趋势,土壤逐年碳释放量随时间的变化呈现先增加后减少的趋势(图3d)。在四种木质林产品中,碳释放主要以锯材为主,年释碳速率为0.11 Tg/yr,人造板其次(0.04 Tg/yr),薪材(0.02 Tg/yr)和纸和纸板(0.01 Tg/yr)最小。林地转移逐年释碳量呈现线性增长的趋势。

3.2 各土地利用类型碳通量统计分析

首先,为了进一步分析不同土地利用类型、不同时段、生态系统不同组分碳储量之间的差异,对植树造林和森林采伐两种土地利用类型进行了多因素方差分析(表6)。结果表明,不同林种、不同时段和不同生态系统组分的植树造林碳通量具有显著差异;不同产品的森林采伐碳通量具有显著差异,而不同时段和不同生态系统组分的碳通量并无显著差异。为了分析显著差异的来源,对多因素方差分析做了Scheffe事后检验(表7)。结果表明,在植树造林碳通量中,防护林与用材林、经济林具有显著差异,时段1976-1985与时段1996-2005有显著差异;在森林采伐碳通量中,锯材与薪材、人造板、纸和纸板具有显著差异。

4 讨论

4.1 与其他估算结果比较

本研究中植树造林的植被固碳量(38.58 Tg)要高于其土壤的固碳量(15.66 Tg),这



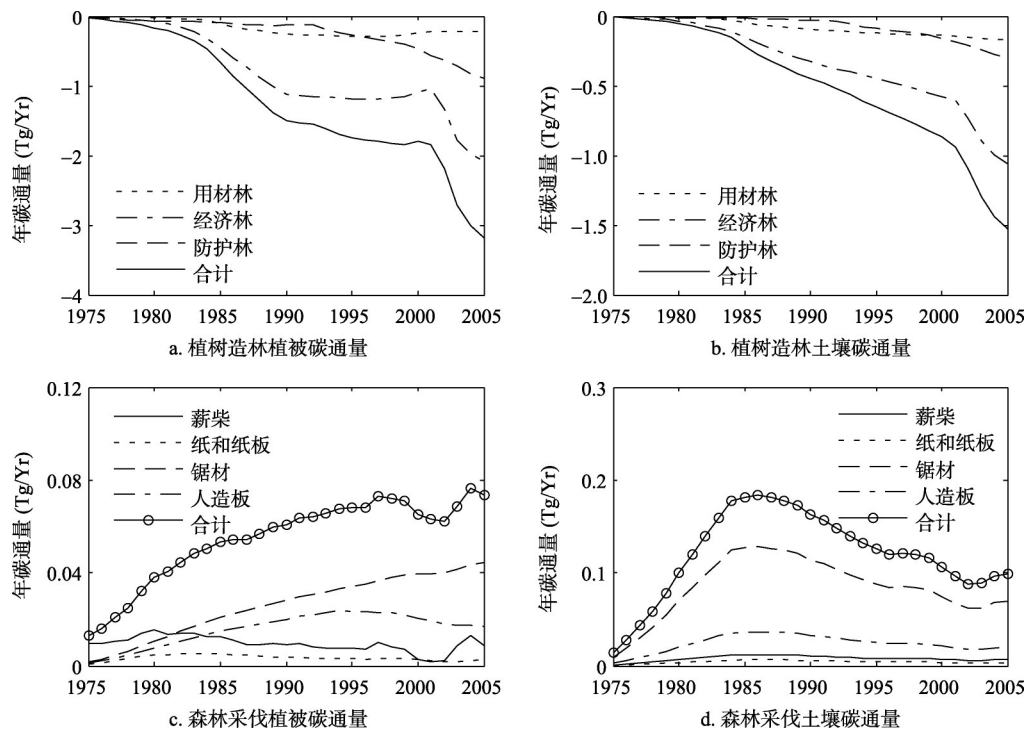


图3 1975-2005年新疆植树造林和森林采伐导致的年碳储量变化(正值表示向大气中排放碳)

Fig.3 Annual flux of carbon from afforestation or deforestation in Xinjiang between 1975-2005. Positive values indicate a release of carbon to the atmosphere.

表6 不同土地利用类型、不同时段和不同生态系统组分的碳通量多因素方差分析

Tab. 6 Multivariate analysis between different land use types, different periods and different compositions of carbon flux

变异来源	植树造林				森林采伐			
	自由度	均方	$F_{0.05}^*$	$P_{0.05}^{**}$	自由度	均方	$F_{0.05}^*$	$P_{0.05}^{**}$
林种/产品	2	42.295	7.776	0.007	3	0.353	11.16	0.000
时段 <sup>c</sup>	2	34.853	6.408	0.013	2	0.015	0.475	0.630
生态系统组分 <sup>d</sup>	1	29.147	5.359	0.039	1	0.116	3.674	0.072

注: £分为1976-1985、1986-1995、1996-2005三个时段, §分为植被和土壤两个生态系统组分。\*指在0.05水平上的F值, \*\*是指在0.05水平上的P值。

表7 多因素方差分析Scheffe事后检验表

Tab.7 Scheffe post hoc test table of multivariate analysis

统计值 <sup>a</sup>	植树造林			森林采伐		
	防护林与用材林	防护林与经济林	1976-1985与1995-2005	锯材与薪材	锯材与纸和纸板	锯材与人造板
$P_{0.05}^{**}$	0.013	0.022	0.013	0.002	0.001	0.007

注: \* 表中统计值只给出P值小于0.05的统计项, \*\*是指在0.05水平上的P值。

是由于植树造林的来源基本为草地和耕地, 荒地比例较少, 并且草地和耕地的土壤碳密度与林地的土壤碳密度差异要比荒地与林地的土壤碳密度差异小得多所造成的。与此相反的是在森林采伐活动中, 其土壤释碳强度(0.12 Tg/yr)比植被释碳强度(0.05 Tg/yr)高。

究其原因,一方面是因为针叶林和阔叶林两种类型森林的土壤碳密度都要大于其植被碳密度,另一方面是干扰后的土壤碳释放速度要比植被作为木质林产品氧化的速度快。在图4d中还可以看出,土壤的年碳释放速度在1985年以后逐渐减小,这是因为森林采伐后土壤碳库并不是一直释放,而是释放到一定程度后会自然恢复到稳定的状态<sup>[17,51]</sup>。

根据方精云的研究结果<sup>[52]</sup>,1977-1998年期间中国森林植被碳库由于植树造林导致的每公顷年碳增量为1.97 t,而本研究中同一时期新疆植树造林导致的每公顷年碳增量为1.85 t,与其结果比较接近。另外,根据张小全的研究结果<sup>[10]</sup>,在1980-2000年期间我国由于毁林活动导致的碳释放量为41.5 Tg/yr,而本研究中同一时期新疆由于森林采伐导致的碳释放量为0.20 Tg/yr,只占全国的0.48%。这是因为一方面所有采伐产品中使用寿命长的锯材产量比重很大,达71.32%;另一方面,期间新疆的采伐面积远远低于全国平均水平。

## 4.2 不确定性分析

**4.2.1 数据的不确定性** 植树造林数据来源于公开的统计数据,1986年以前的统计数据仅包括成活率高于40%的造林面积,而1986年以后仅统计成活率高于85%的造林面积,低于成活率的造林地就没有统计在内。干旱区人工林普遍遭受水分胁迫,低于成活率的造林地可能具有一定的规模,因此本研究估算的造林固碳规模可能偏低。

统计数据和遥感数据的差异也是估算结果的误差来源之一。本研究在碳计量过程中采用统计数据提供的详细的分林种和产品的森林面积和遥感数据提供的土地利用类型转换比例和转换面积。由于遥感数据的分辨率和数据解译的精度有限,在本研究中,统计数据更能体现其详细精确的优势。

在碳库及其动态估算中主要的不确定性来自于各类森林生态系统植被和土壤碳密度。尽管本研究收集了不同森林生态系统土壤和植被碳密度数据,但由于其显著的时空差异以及样本数的限制,获得的部分土壤和植被碳密度数据的代表性尚存不确定性。本研究计算1975年森林碳库时并没有划分龄级,但采用了各林龄碳密度的均值,减少了由于上述原因所带来的误差。

**4.2.2 土地利用变化对碳库动态变化影响机理的不确定性** 土地利用/覆被变化对碳储量的影响最大的不确定性源自于植被和土壤对土地利用/覆被变化的响应机理。首先,造林后土壤碳储量的变化趋势一直存在争议,一些研究发现造林后土壤碳储量下降<sup>[23,53,54]</sup>;也有研究认为造林对土壤碳储量没有较为显著的影响<sup>[55,56]</sup>;多数研究认为温带造林后土壤碳储量是最初下降,然后才开始积累<sup>[22,57,58]</sup>。本研究在具体估算造林以后土壤碳变化时,一方面由于缺乏该地区植树造林后土壤碳储量变化的详细数据,另一方面,新疆植树造林的来源多为土壤碳密度很低的荒地和荒山,因此忽略了其土壤碳变化的机理过程,只考虑变化前后不同覆被类型的土壤碳密度差异,并且认为导致这种差异的过程是匀速的<sup>[20,21,59]</sup>。其次,尽管森林采伐后导致地上生物量和地下生物量下降以及其恢复能力已被大多数学者所认可<sup>[60]</sup>,但是采伐产品的使用寿命、采伐后土壤碳下降的速率以及自然恢复过程中土壤碳和植被碳能恢复的程度都存在不确定性。本研究计算土地利用/覆被变化对植被和土壤碳储量的影响时对不同林种、不同龄级以及不同林产品所使用的碳计算参数一一进行了细化,为进一步改进碳库估算及其动态方法提供了有益的参考。今后应进一步加强植被和土壤碳库对土地利用/覆被变化响应机理的研究,以降低其不确定性。

## 5 结论

本文基于《IPCC 土地利用、土地利用变化和林业优良做法指南》中林业活动的碳源汇计量方法体系, 利用详细的统计数据 and 参数, 分析了近 30 年主要林业活动对欧亚腹地—新疆森林生态系统碳库及其动态的影响, 取得较为满意的研究成果。首先构建了估算森林生态系统碳库及其林业活动对于干旱区森林生态系统碳动态影响的方法体系; 其次量化了干旱区林业活动对森林生态系统碳库动态的影响。由于新疆乃至整个亚洲中部干旱区缺乏对森林生态系统人类活动碳源汇的估算成果, 因此本项研究将有利于进一步深化人类活动对于干旱区生态系统影响的认识。

1975-2005 年期间土地利用/覆被变化对新疆森林碳循环的影响总体表现为碳汇, 总固碳量为 48.15 Tg, 与 1975 年相比, 林业活动使森林碳储量增加了 6.69%。植树造林新增碳储量为 54.24 Tg, 为期间森林碳储量的主要来源。森林采伐和林地转移表现为碳源, 森林采伐为期间森林碳库最主要的碳源, 导致的碳释放不可忽视, 达 5.42 Tg, 是主要的碳源。本项研究成果将为新疆林业生产的可持续发展战略制定提供一定的科学参考。

**致谢** 1975 和 2005 年土地利用/覆被数据来源于中国科学院新疆生态与地理所对地观测与模拟实验室“地球系统科学数据共享平台—新疆与中亚科学数据共享平台”, 特此致谢。

## 参考文献(References)

- [1] Turner B L, Skole D L, Sanderson S et al. land use and land-cover change. *Earth Science Frontiers*, 1997, 4: 26-33.
- [2] Lambin E F, Turner B L, Geist H J. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 2001, 11: 261-269.
- [3] Qin D, Manning M, Chen Z et al. Climate change 2007: the physical science basis. In: Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Solomon, 2007.
- [4] King A W, Emanuel W R, Wullschlegel S D et al. In search of the missing carbon sink: a model of terrestrial biospheric response to land-use change and atmospheric CO<sub>2</sub>. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 1995, 47(4): 501-519.
- [5] Levy P, Friend A, White A et al. The influence of land use change on global-scale fluxes of carbon from terrestrial ecosystems. *Climatic Change*, 2004, 67(2): 185-209.
- [6] Watson R T, Noble I R, Bolin B et al. Land use, land-use change, and forestry: a special report of the intergovernmental panel on climate change: Cambridge University Press, 2000.
- [7] Chuluun T, Ojima D. Land use change and carbon cycle in arid and semi-arid lands of East and Central Asia. *Science in China (Series C)*, 2002, 45(1): 10.
- [8] 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. *生态学报*, 2000, 20(5): 733-740.
- [9] Fang J, Chen A, Peng C et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [10] 张小全, 武曙红, 何英, 等. 森林、林业活动与温室气体的减排增汇. *林业科学*, 2005, 41(6): 150-156.
- [11] Guo L B, Gifford R M. soil carbon stocks and land use change: A meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8: 345-360.
- [12] Qiu L, Wei X, Zhang X et al. Soil organic carbon losses due to land use change in a semiarid grassland. *Plant And Soil*, 2012: 1-11.
- [13] 罗格平, 许文强, 陈曦. 天山北坡绿洲不同土地利用对土壤特性的影响. *地理学报*, 2005, 60(5): 779-790.
- [14] Woodwell G M, Whitaker R, Reiners W et al. Biota and the world carbon budget. *Science (United States)*, 1978, 199 (4325).
- [15] 侯振宏. 中国林业活动碳源汇及其潜力研究. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- [16] Nilsson S, Schopfhauser W. The carbon-sequestration potential of a global afforestation program. *Climatic Change*, 1995, 30(3): 267-293.

- [17] Houghton R, Hobbie J, Melillo J M et al. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: A net release of CO<sub>2</sub> to the atmosphere. *ecological Monographs*, 1983, 53(3): 235-262.
- [18] 张小全, 朱建华, 侯振宏. 主要发达国家林业有关碳源汇及其计量方法与参数. *林业科学研究*, 2009, 22(2): 285-293.
- [19] 阮宇, 张小全, 杜凡. 中国木质林产品碳贮量. *生态学报*, 2006, 26(12): 4212-4218.
- [20] 付超, 于贵瑞, 方华军, 等. 中国区域土地利用/覆被变化对陆地碳收支的影响. *地理科学进展*, 2012, 31(01): 88-96.
- [21] Houghton R A. Sources and sinks of carbon from land-use change in China. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(2): 1-19.
- [22] Paul K, Polglase P, Nyakuengama J et al. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management*, 2002, 168(1): 241-257.
- [23] Zinn Y L, Resck D V S, da Silva J E. Soil organic carbon as affected by afforestation with Eucalyptus and Pinus in the Cerrado region of Brazil. *Forest Ecology and Management*, 2002, 166(1): 285-294.
- [24] Trouve C, Mariotti A, Schwartz D et al. Soil organic carbon dynamics under Eucalyptus and Pinus planted on savannas in the Congo. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(2): 287-295.
- [25] Vesterdal L, Ritter E, Gundersen P. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land. *Forest Ecology and Management*, 2002, 169(1): 137-147.
- [26] 白彦锋, 姜春前, 张守攻. 中国木质林产品碳储量及其减排潜力. *生态学报*, 2009, 29(1): 399-405.
- [27] Rotenberg E, Yakir D. Contribution of semi-arid forests to the climate system. *Science*, 2010, 327(5964): 451-454.
- [28] 陈曦. 中国干旱区土地利用与土地覆被变化. 北京: 科学出版社, 2007.
- [29] 中华人民共和国林业部. 新疆森林. 北京: 中国林业出版社, 1989.
- [30] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆五十年. 北京: 中国统计出版社, 2005.
- [31] 中华人民共和国林业部. 全国林业统计年鉴. 北京: 中国林业出版社, 1975-2005.
- [32] 安尼瓦尔·买买提. 新疆草地生态系统碳、氮储量研究. 北京: 北京大学, 2006.
- [33] 罗天祥. 中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 1996.
- [34] 孟凡德. 耕作对干旱区小麦产量构成与土壤质量影响的研究. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2007.
- [35] 朴世龙, 方精云, 贺金生, 等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. *植物生态学报*, 2004, 28(4): 491-498.
- [36] Hbirkou C, Martius C, Khamzina A et al. Reducing topsoil salinity and raising carbon stocks through afforestation in Khorezm, Uzbekistan. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(2): 146-155.
- [37] 贾海涛. 干旱地区陆地生态系统碳循环规律研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2004.
- [38] 任雪, 褚贵新, 王国栋, 等. 准噶尔盆地南缘绿洲-沙漠过渡带“肥岛”形成过程中土壤颗粒的分形研究. *中国沙漠*, 2009, 29(2): 298-304.
- [39] 王玉刚, 肖笃宁, 李彦, 等. 三工河流域绿洲土壤有机碳的空间分布. *中国沙漠*, 2011, 31(1): 101-107.
- [40] 新疆维吾尔自治区农业厅. 新疆土壤. 北京: 科学出版社, 1996.
- [41] 许文强, 罗格平, 陈曦, 等. 天山北坡绿洲土壤有机碳和养分时空变异特征. *地理研究*, 2006, 25(6): 1013-1021.
- [42] IPCC. Guidelines for land use, land-use change and forestry. Hayama, Japan: IPCC/IGES, 2003.
- [43] 李丕军, 李宏, 马江林, 等. 新疆杨树用材林固碳能力分析. *西南林学院学报*, 2011, 31(3): 41-44.
- [44] 李建华, 李春静, 彭世揆. 杨树人工林生物量估计方法与应用. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2007, 31(4): 37-40.
- [45] 朱教君, 姜凤岐. 杨树林带生长阶段与林木分级的研究. *应用生态学报*, 1996, 7(1): 11-14.
- [46] 刘平, 王宁, 孙清江, 等. 新疆伊犁地区速生杨树生长模型及数量成熟研究. *新疆农业大学学报*, 2004, 26(4): 45-48.
- [47] 冯慧想. 杨树人工林生长特性及生物量研究. 北京: 中国林业科学研究院, 2007.
- [48] 吕妍, 宁虎森, 王让会, 等. 人工防护林碳储量估算: 以新疆墨玉为例. *环境科学与技术*, 2010, 7(33): 28-30.
- [49] 白彦锋. 中国木质林产品碳流动和碳储量研究. 中国林业科学研究院, 2007.
- [50] 王燕, 赵士洞. 天山云杉林生物量和生产力的研究. *应用生态学报*, 1999, 10(4): 389-391.
- [51] Nave L E, Vance E D, Swanston C W et al. Harvest impacts on soil carbon storage in temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(5): 857-866.
- [52] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. *植物学报*, 2001, 43(9): 967-973.
- [53] Groenendijk F, Condron L, Rijkse W. Effects of afforestation on organic carbon, nitrogen and sulfur concentrations in New Zealand hill country soils. *Geoderma*, 2002, 108(1): 91-100.
- [54] Specht A, West P. Estimation of biomass and sequestered carbon on farm forest plantations in northern New South Wales, Australia. *Biomass and Bioenergy*, 2003, 25(4): 363-379.
- [55] Laclau P. Biomass and carbon sequestration of ponderosa pine plantations and native cypress forests in northwest Patagonia. *Forest Ecology and Management*, 2003, 180(1): 317-333.
- [56] Mendham D S, Oconnell A M, Grove T S. Change in soil carbon after land clearing or afforestation in highly weathered lateritic and sandy soils of south-western Australia. *Agriculture, ecosystems & environment*, 2003, 95(1):



143-156.

- [57] Turner J, Lambert M. Change in organic carbon in forest plantation soils in eastern Australia. *Forest Ecology and Management*, 2000, 133(3): 231-247.
- [58] Paul K I, Polglase P J, Richards G P. Sensitivity analysis of predicted change in soil carbon following afforestation. *Ecological Modelling*, 2003, 164(2): 137-152.
- [59] Wu H B, Guo Z T, Peng C H. Land use induced changes of organic carbon storage in soils of China. *Global Change Biology*, 2003, 9: 305-315.
- [60] Houghton R, Skole D, Nobre C A et al. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Nature*, 2000, 403: 301-304.

## Sources and sinks of carbon from forest land use change in Xinjiang, China during 1975–2005

CHEN Yaoliang<sup>1,2</sup>, LUO Geping<sup>1</sup>, YE Hui<sup>1</sup>, ZHAO Shubin<sup>3</sup>, WANG Yuangang<sup>1</sup>, HAN Qifei<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography,  
Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;

3. National Application Software Testing Labs, Beijing 100193, China)

**Abstract:** Changes in forest land use contribute to the carbon source in most tropical regions due to large-scale deforestation but are poorly documented for arid forest ecosystem. According to "Guidelines for Land Use, Land-use Change and Forestry" documented by IPCC, we estimated sources and sinks of carbon from forest land use change between 1975 and 2005 in Xinjiang, China. The results indicated that: (1) the carbon stock of forest ecosystem in Xinjiang is 720.02 Tg in 1975, whereas the vegetation carbon stock is 191.20 Tg, and soil carbon stock is 528.82 Tg; (2) Generally, the effect of forest land use change in Xinjiang performed as a carbon sink, with a total carbon sequestration of 48.15 Tg, and increased by 6.69% compared with the total carbon stock of 1975. The accelerated afforestation led to a strong carbon sequestration (54.24 Tg), while the deforestation showed a main carbon source, releasing 5.42 Tg. The woodland transferring performed as a weak carbon source, releasing 0.66 Tg; (3) We recommend that some efficient measures should be taken on raising the quality and quantity of forest resources in the future to enhance the forestry carbon sequestration in Xinjiang. Therefore, this can offset the carbon loss from industrial activities so as to provide sufficient space for the sustained and healthy economic development in Xinjiang. This study will be conducive to further deepen the understanding of the influence of human activity on regional carbon balance.

**Key words:** land-use change; forest ecosystem; carbon storage; Xinjiang