

# 四川省马尾松人工林土壤有机碳密度研究

黄从德, 张国庆, 唐 宵, 王勇军, 王宪帅  
(四川农业大学 林学院园艺学院, 四川 雅安 625014)

**摘 要:** 人工林是目前陆地碳汇增长最主要的媒介之一。基于森林土壤碳清查方法对四川省马尾松人工林土壤有机碳密度进行了研究。结果表明: 马尾松人工林土壤有机碳含量和碳密度均随土壤深度的增加而降低, 且碳密度的区域性差异较明显, 表现为盆周山地区(150. 9? 13. 3)Mg/ hm<sup>2</sup>> 盆地丘陵区( 101. 4? 6. 2) Mg/hm<sup>2</sup>> 川西平原区(87. 4? 5. 7)Mg/ hm<sup>2</sup>; 马尾松人工林土壤有机碳密度与降水量呈显著正相关关系, 与气温呈显著负相关关系; 在盆地丘陵区, 抚育间伐对马尾松人工林土壤碳密度的影响显著, 间伐后林分土壤碳密度为( 125. 8? 9. 9)Mg/ hm<sup>2</sup>, 比未间伐林分高 54. 0%( 81. 7? 9. 4) Mg/hm<sup>2</sup>。人工林经营对增大森林土壤碳汇功能具有积极的作用。

**关键词:** 四川省; 马尾松人工林; 土壤有机碳密度  
**中图分类号:** S714      **文献标识码:** A      **文章编号:** 10023409( 2009) 02004604

## Study on Soil Organic Carbon Densities of Artificial Pinus massoniana in Sichuan Province

HUANG Congde, ZHANG Guqing, TANG Xiao, WANG Yongjun, WANG xianshuan  
( College of Forestry and Horticulture, Sichuan Agricultural University, Ya. an, Sichuan 625014, China)

**Abstract:** Artificial forest is considered as an important approach to enhance terrestrial carbon sink. Soil organic carbon content and density in artificial pine (Pinus massoniana) forest was investigated in Sichuan, employing the method of forest soil carbon inventory. The content and density of soil organic carbon in the artificial forest both decreased with soil depth, and the soil organic carbon density varied with the subregion, showed the ranked order of lowmountain area (150. 9? 13. 3) Mg/ hm<sup>2</sup>> hilly area ( 101. 4? 6. 2) Mg/ hm<sup>2</sup>> western plain area (87. 4? 5. 7)Mg/ hm<sup>2</sup>. Soil organic carbon density was positively and significantly correlated with precipitation and negatively with temperature, respectively. Soil organic carbon density varied also with different management measures and reasonable thinning could increase soil carbon density from (81. 7? 9. 4) Mg/ hm<sup>2</sup> to (125. 8? 9. 9) Mg/ hm<sup>2</sup> in hilly area. The management of artificial forest would play a positive role in increasing the forest soil carbon sink and mitigating the global change.

**Key words:** Sichuan province; artificial pine forest; organic soil carbon density

土壤有机碳库( Soil organic carbon pool) 是陆地碳库的重要组成部分, 在陆地碳循环中有着重要的作用, 其库容的微小变化, 都会对大气温室气体浓度及全球气候产生巨大的影响<sup>[1]</sup>。土壤固碳研究是土壤生态学的最新前沿, 未来碳减排的关键是如何增强土壤的固碳潜力<sup>[23]</sup>。森林土壤是陆地生态系统最大的有机碳库之一, 在全球碳循环中扮演着源、汇、库的作用<sup>[1]</sup>, 其积累和分解直接影响到全球的碳平衡<sup>[4]</sup>。人工林被认为是用来提高森林覆盖率、实

施碳减排计划最主要的媒介之一<sup>[26]</sup>, 他在评价森林对增大陆地碳汇的贡献中具有重要地位<sup>[7]</sup>。研究表明, 造林及合理的人工林经营都可以成为固定大气中的 CO<sub>2</sub>、防止全球气候变暖的有效途径<sup>[29]</sup>。因此, 开展人工林土壤有机碳密度研究, 探讨人工林经营与土壤碳密度的关系, 可以为预测和维护人工林生态系统长期生产力, 以及未来在京都议定书 (Kyoto Protocol) 的框架范围内进行碳汇贸易谈判提供参考<sup>[5, 8]</sup>。

\* 收稿日期: 20081212  
基金项目: 国家/ 十一五科技支撑项目( 2006BAC01A11); 四川省科技公关项目( 05SG023- 009)  
作者简介: 黄从德( 1969- ), 男, 四川内江人, 博士生, 主要从事林业生态工程研究。E2mail: lyxq100@yahoo. com. cn

马尾松(*Pinus massoniana*)是我国分布面积最广的针叶树种之一,同时也是四川省栽植范围最广的树种,分布面积近 90 万  $\text{hm}^2$ ,其中超过 50% 为人工林。目前,国内有关马尾松人工林碳密度的研究主要集中在东、南部省区<sup>[10]</sup>,而四川省马尾松人工林土壤碳密度及其分布特征的研究还未见报道。此外,有关人工林经营和森林土壤碳汇增长方面的文献资料也比较欠缺。本文对四川省马尾松人工林土壤有机碳密度及其分布特征进行了研究,旨在为人工林土壤有机碳储量及区域人工林土壤碳汇功能研究提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

四川省地处中国内陆西南腹地,位于扬子陆块、秦岭造山带和松藩甘孜造山带的结合部。地理位置介于 97°21'E-108°31'E、26°31'N-34°19'N 之间,面积 48.5 万  $\text{km}^2$ ,人口 8 437 万。全省地质构造复杂,土壤多为黄壤和紫色土。地势由西北向东呈梯状下降,大部分地区海拔在 1 000 m 以上,主要地貌类型有高原、山地、丘陵和平原。气候类型随地貌划分为温带、寒温带气候、亚热带气候和亚热带季风气候。省内水系结构复杂,年降水量 600~1 000 mm,年均温 16~20℃。截止 2006 年止,全省森林面积为

表 2 不同经营措施马尾松人工林标准地设置

| 经营措施    | 林分年龄/a | 海拔/m | 坡度/(°) | 坡向 | 土壤类型 | 样地数 | 剖面数 |
|---------|--------|------|--------|----|------|-----|-----|
| 抚育间伐    | 21     | 380  | 22     | 阳坡 | 黄壤   | 3   | 9   |
| 未抚育、未间伐 | 21     | 410  | 19     | 阳坡 | 黄壤   | 3   | 9   |

### 1.3 土壤容重、有机碳含量的测定及碳密度的计算

采用环刀法和重铬酸钾氧化-外加热法<sup>[13]</sup>测定样品容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ )和有机碳含量( $\text{g}/\text{kg}$ )。

土壤剖面有机碳密度  $\text{SOC}(\text{Mg}/\text{hm}^2) = \sum_{i=1}^k 0.1H_i B_i O_i (1-D)$ , 式中:  $H_i$ ) 第  $i$  层土壤的厚度( $\text{cm}$ );  $B_i$ ) 第  $i$  层土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $O_i$ ) 第  $i$  层土壤有机碳含量( $\text{g}/\text{kg}$ );  $D$ ) 第  $i$  层土壤 > 2 mm 的石砾体积所占的百分比(%); 0.1))) 单位换算系数;  $k$ ))) 土壤层数。

### 1.4 资料来源和数据处理

研究应用的森林资源数据是 2004 年四川省 201 个县(局)森林资源二类调查的汇总数据。数据处理和分析采用 SPSS10.0 软件和 Excel 进行

## 2 结果与分析

### 2.1 不同区域马尾松人工林土壤有机碳密度及其空间分配

四川各区域马尾松人工林各层土壤有机碳含量

1 923 万  $\text{hm}^2$ ,居全国第一。森林覆盖率为 19.21%,居全国第四<sup>[12]</sup>。

### 1.2 标准地设置及样品采集

采用典型选样的方法,在四川省马尾松人工林的主要分布区域设置面积为 30 m @30 m 的标准地(标准地数量由马尾松人工林在各区域的分布面积权重确定,表 1)。同时,在四川省泸县川南林科所马尾松人工林实验林分中,按不同经营措施设置标准地(该马尾松人工林分于 1985 年营造,初植密度为 3 000 株/ $\text{hm}^2$ ,抚育间伐实验于 1995 年进行,间伐强度为 50%,表 2)。在每个标准地内按 S0 型路线挖取土壤剖面 3 个,将每个剖面分为 5 层(0-10 cm)、I 层(10-30 cm)、II 层(30-50 cm)和 III 层(50-100 cm),分别在各层内采集土壤样品,进行物理和化学分析。

表 1 不同区域马尾松人工林标准地设置

| 区域    | 分布面积/<br>万 $\text{hm}^2$ | 林分平均<br>年龄/a | 土壤<br>类型 | 样地数 | 剖面数 |
|-------|--------------------------|--------------|----------|-----|-----|
| 盆周山地区 | 14.2                     | 25           | 黄壤       | 16  | 48  |
| 盆地丘陵区 | 26.1                     | 28           | 黄壤       | 30  | 90  |
| 川西平原区 | 5.1                      | 30           | 黄壤       | 6   | 18  |

注:川西南山地区马尾松人工林面积较小(仅 850.8  $\text{hm}^2$ ),川西北高山高原区无马尾松人工林分布,因此该两区域未设置样本。

在 4.56 ? 0.47( $N=6$ )~48.37 ? 4.63( $N=16$ ) $\text{g}/\text{kg}$  之间,且均由土壤表层向深层依次降低。不同区域土壤剖面平均有机碳含量分别为 22.65 ? 2.03( $N=16$ ) $\text{g}/\text{kg}$ (盆周山地区)、10.42 ? 1.44( $N=30$ ) $\text{g}/\text{kg}$ (盆地丘陵区)、9.84 ? 1.01( $N=6$ ) $\text{g}/\text{kg}$ (川西平原区)。不同区域土壤各层容重在 0.91 ? 0.16( $N=16$ )-1.38 ? 0.19( $N=30$ ) $\text{g}/\text{cm}^3$  之间,并随土壤深度的增加呈增大的趋势。四川不同区域马尾松人工林土壤有机碳密度分别为(150.9 ? 13.3) $\text{Mg}/\text{hm}^2$ 、(101.4 ? 6.2) $\text{Mg}/\text{hm}^2$ 、(87.4 ? 5.7) $\text{Mg}/\text{hm}^2$ (表 3),从大到小排序为:盆周山地区>盆地丘陵区>川西平原区。这一方面可能是因为各区域的气候、环境条件以及土壤理化性质不同造成的;另一方面,盆地丘陵区 and 川西平原区的人口密度大,人类活动的干扰比盆周山地区更为突出,这也可能是这两个区域马尾松人工林土壤碳密度较低的重要原因之一。就空间分配来看,各区域马尾松人工林土壤 10 cm 厚度的平均有机碳密度随土壤深度的增加而降低,

且表层土壤(0- 30 cm)的碳储存能力明显强于其它各层(表 3)。由表 3 可以看出,盆周山地区的表层土壤碳密度要远远高于盆地丘陵区 and 川西平原区,但在 30 cm 以下的土层,特别是在土壤底层(50-100 cm),各区域土壤碳密度的差异不大。这是因为

| 表 3 不同区域马尾松人工林土壤有机碳密度 |             |             |             |             |               | Mg/ hm <sup>2</sup> |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------------|
| 区域                    | $\bar{N}^*$ | $\bar{O}^*$ | $\bar{O}^*$ | $\bar{O}^*$ | 剖面            | 样本数                 |
| 盆周山地区                 | 43. 7? 5. 7 | 26. 6? 4. 1 | 10. 9? 1. 9 | 6. 4? 1. 2  | 150. 9? 13. 3 | 16                  |
| 盆地丘陵区                 | 23. 9? 2. 7 | 14. 1? 2. 3 | 9. 7? 1. 2  | 6. 0? 0. 7  | 101. 4? 6. 2  | 30                  |
| 川西平原区                 | 23. 4? 3. 2 | 10. 6? 1. 4 | 8. 2? 1. 4  | 5. 3? 0. 9  | 87. 4? 5. 7   | 6                   |

$\bar{N}$ 、 $\bar{O}$ 、 $\bar{O}$ 、 $\bar{O}$  层土壤碳密度均为 10 cm 土层厚度的平均值。

## 2.2 气温、降水量与马尾松人工林土壤有机碳密度的关系

将各标准地马尾松人工林土壤平均有机碳密度与标准地所在县年均降水量和年均温进行回归相关性分析(表 4)。四川马尾松人工林土壤有机碳密度与降水量呈线性正相关关系,与温度呈线性负相关关系,且线形关系显著。这是因为在一定的降水范围内,降水量的增多可以充分满足森林土壤的水分

| 表 4 碳密度与气温、降水相关显著性检验(p< 0. 01) |                        |         |                            |       |
|--------------------------------|------------------------|---------|----------------------------|-------|
| 检验对象                           | 回归方程                   | r Rr    | R <sub>0. 01</sub> (N= 52) | 相关显著性 |
| 降水量- 碳密度                       | Y= 0. 0926x+ 12. 569   | 0. 4668 | 0. 3541                    | 显著    |
| 气温- 碳密度                        | Y= - 18. 126x+ 418. 98 | 0. 8512 | 0. 3541                    | 显著    |

## 2.3 抚育间伐与马尾松人工林土壤有机碳密度的关系

在盆地丘陵区,抚育间伐后的马尾松人工林土壤有机碳密度为(125. 8? 9. 9)Mg/ hm<sup>2</sup> (n= 9, 远远高于未间伐林分(81. 7? 9. 4) Mg/ hm<sup>2</sup>; n= 9, 且两者之间存在显著差异(表 5)。马尾松人工林在抚育间伐后,林内光照条件得到改善,林木生长空间增大,林下植物得以良好发育,凋落物的种类、数量增加,有利于土

| 表 5 不同经营方式马尾松人工林土壤碳密度平均值差异显著性检验(p< 0. 01) |        |   |         |                            |       |
|---|--------|---|---------|----------------------------|-------|
| 检验对象                                      | r Fr   | F <sub>0. 005</sub> - F <sub>0. 995</sub> (n= 9, 9) | r Tr    | t <sub>0. 01</sub> (n= 18) | 差异显著性 |
| 间伐- 未间伐                                   | 1. 051 | 0. 133- 7. 500                                      | 24. 577 | 2. 921                     | 显著    |

# 3 讨论

## 3.1 人口密度与森林土壤有机碳密度的空间分布

在当前的社会经济条件下,人口密度大小往往从客观上反映了人类活动对森林生态系统干扰的强弱<sup>[14]</sup>。同时,有研究表明,人类干扰的程度和频度是影响森林植被和土壤碳密度分布的决定性因素之一<sup>[10, 18]</sup>。李红梅等<sup>[19]</sup>通过对西双版纳热带森林的研究证实了这一观点。就国家尺度而言,我国森林碳密度较大的地区主要集中分布在西南和东北人类

植物的根系主要集中在土壤表层,而枯落物和腐殖质层对土壤有机碳积累的影响也会随着土壤深度的增加而降低<sup>[14]</sup>,因而表层土壤的碳储存能力较强。但表层土壤的有机碳最容易因人为破坏而大量流失,进而使整个土壤层的碳密度处于较低水平。

需求,进而减缓土壤有机质的矿化和分解速率,从而加快土壤有机碳的积累,反之,温度升高使植被的蒸散作用增强,加大了森林土壤的水分需求,而土壤有机质的矿化和分解速率也随之加快,因此不利于土壤碳的积累<sup>[15]</sup>。

从表 4 可以看出,温度与土壤碳密度的相关系数要大于降水量,这表明,温度变化对土壤有机碳密度的影响可能比降水量要大。

壤有机碳的积累<sup>[16]</sup>。骆土寿等<sup>[17]</sup>对海南岛霸王岭热带山地雨林不同择伐强度经营试验初期的土壤碳、氮含量及其密度的研究表明,皆伐会减少土壤储存的有机碳,但适当采伐的林分,其结构及功能的变化可在稳定平衡的生态系统阈值内,既能保持系统的平衡,又能调节林内环境因子,有利于系统内的元素转化利用及有机碳的积累。可见,合理的抚育间伐可以有效增强人工林土壤的碳储存能力。

活动影响较少、人口密度相对较低的林区,而在人口密度较大的华北、华中、华南、东部和东南地区,则表现出较小的碳储量和较低的碳密度<sup>[7, 14]</sup>。本研究表明,马尾松人工林土壤碳密度存在区域性差异,分布序列为盆周山地区> 盆地丘陵区> 川西平原区,而四川省人口密度的分布序列与马尾松人工林土壤碳密度相反。这意味着人口密度可能会对人工林土壤碳密度的空间分布产生较为重要的影响。

## 3.2 降水和温度与森林土壤有机碳密度

有关气候变化和森林土壤碳吸存关系的研究很

多,但分歧也较多,一种观点认为,温度上升将提高森林土壤碳的释放能力,全球变暖将使其碳/源0的作用更加明显,因而气候变化对森林土壤碳密度的影响较显著<sup>[20]</sup>,而与之截然相反的观点却认为,森林土壤碳循环对气候变化特别是全球变暖的反应并不明显,即气候变化对森林土壤碳密度的影响十分有限<sup>[21]</sup>。还有学者认为,森林土壤对气候变化的响应并不迅速,未来气候变化及温室气体增加与森林土壤碳密度变化是否相关具有很大的不确定性<sup>[22]</sup>。根据 Brown 等<sup>[23]</sup>的研究结果,当降水量在 400~3 200 mm 内时,降水和植被碳密度之间呈正相关,超过 3 200 mm 时则呈负相关,而这一尺度能否应用于人工林土壤尚无相关试验报道。周涛等<sup>[24]</sup>通过研究发现,气温和降水都在不同程度的影响着森林生态系统碳储量和碳密度变化,且这种影响将随着气候带不同而呈现出较大差异。此外,赵敏等<sup>[25]</sup>也认为森林生态系统碳储量、碳密度变化与气温、降水关系较明显,并在其研究中指出,气温对森林生态系统碳密度的影响大于降水量。本研究表明,气温和降水量都会一定程度影响到马尾松人工林土壤碳密度的分布。但总的说来,以上研究只考虑了降水和气温单方面对森林土壤碳密度的影响,而在气温和降水交互作用下的人工林土壤碳密度会呈现出何种变化规律,仍需进一步研究。

3.3 人工林经营与森林土壤有机碳密度

5京都议定书6允许通过造林、再造林和森林经营管理等活动获得的碳汇用于抵消工业和能源部门的温室气体减限排量,同时还规定可以通过包括林业活动在内的项目活动获得的汇来抵消减限排额度<sup>[5]</sup>。根据目前已有数据分析,在中国进行植树造林来增大碳汇可以作为国际温室气体减量活动中最经济有效的措施之一,极具开发的潜力<sup>[26]</sup>。本文仅从抚育间伐的角度讨论了马尾松人工林经营与土壤碳密度之间的关系,其结果表明抚育间伐能有效提高马尾松人工林土壤的碳储存能力,间伐后的林分土壤有机碳密度增加了 54. 0%。但人工林经营的理论和模式非常丰富,与之相关的研究领域还很广阔。如不同土地利用历史、引进优势树种、完善群落结构以及合理的整地、采伐和施肥等措施都可能影响人工林土壤的碳汇功能<sup>[8]</sup>。胡建忠<sup>[27]</sup>在综合分析了黄河上游地区退耕还林地内多种人工林的碳储存状况后指出,科学有序的退耕还林工作对增大森林碳汇具有非常重要的意义。胡会峰等<sup>[9]</sup>则认为,通过增加人工林面积,加强对现存人工林的肥料、火灾及病虫害管理都可以起到增大森林碳汇的作用。

黄宇等<sup>[28]</sup>在研究杉木、火力楠人工纯林及其混交林生态系统碳、氮储量中发现,混交林土壤碳储量要高于人工纯林。Lal<sup>[4]</sup>也将提高人工林的经营和管理水平,增强人工林土壤碳汇功能称之为一种/双赢策略0(Truly win- win strategy)和/减缓全球变化的一种可能机制和最有可能的选择0。因此,造林及合理的人工林经营都可以成为固定大气中的 CO<sub>2</sub>、增大森林碳汇及减缓全球变化的有效途径。但目前有关人工林经营与土壤碳密度关系的研究实践还较为欠缺,尚有待于进一步加强。

致谢: 本研究在外业调查中得到了四川省各地方林业局及川南林业科学研究所的大力支持,四川省林业勘察设计院为本文提供了 2004 年森林资源清查数据,在此一并表示谢忱。

参考文献:

[1] 杨万勤, 张健, 胡庭兴, 等. 森林土壤生态学[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2006: 3352341.

[2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304: 16231627.

[3] 潘根兴, 周萍, 李恋卿, 等. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 3272337.

[4] Lal R. Forest soil and carbon sequestration[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 220: 242258.

[5] 张小全, 侯振宏. 森林、造林、再造林和毁林的定义与碳计量问题[J]. 林业科学, 2003, 39(2): 14521452.

[6] 张小全, 李怒云, 武曙红. 中国实施清洁发展机制造林和再造林项目的可行性和潜力[J]. 林业科学, 2005, 41(5): 1392143.

[7] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. Science, 2001, 292: 23202322.

[8] 冯瑞芳, 杨万勤, 张健. 人工林经营与全球变化减缓[J]. 生态学报, 2006, 26(11): 38703877.

[9] 胡会峰, 刘国华. 森林管理在全球 CO<sub>2</sub> 减排中的作用[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 7092714.

[10] 于占源, 杨玉盛, 陈光水. 紫色土人工林生态系统碳库与碳吸存变化[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 183721841.

[11] 康冰, 刘世荣, 张广军, 等. 广西大青山南亚热带马尾松、杉木混交林生态系统碳素积累和分配特征[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 13201329.

[12] 刘纪远, 岳天祥. 中国西部生态系统综合评估[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 125.

[13] 中华人民共和国国家标准. 森林土壤分析方法[M]. 北京: 国家标准局, 1988.

## 5 结论与防治建议

综上所述, 受全球气候变暖的影响<sup>[4]</sup>, 川藏公路南线公路两岸冰川都处于退缩阶段, 冰川进退使冰川末端及其终碛之间具有更多的蓄水条件。随着降水的增加, 气温的升高, 地震的频繁发生, 该区域冰湖溃决危险性存在加剧的趋势。通过对所考察的川藏公路南线典型冰湖形态特征及其溃决危险性的分析, 结合冰川终碛湖溃决判别指标, 初步判别光谢错溃决危险性较大, 一旦溃决将给下游地区带来巨大的灾难; 多依错溃决的危险性较小。

同时, 本路段也是整个西藏冰湖和现代冰川分布最广的地区之一, 其独特而又脆弱的自然环境使本路段成为目前川藏公路冰湖溃决泥石流最发育、危害最严重的路段。因此, 应加强这方面的研究, 针对冰湖溃决洪水(泥石流)灾害提出以下建议: (1) 在现在危险性评价的基础上, 针对危险冰湖制定相应的临灾预案, 包括冰湖和下游地区帕隆藏布主河流域, 一旦出现险情, 采取相应的预案来解决, 避免或减轻灾害造成的损失; (2) 设置冰湖监测预警和下游

主河监测预警系统; (3) 大力宣传、推广相关科普、教育, 提高领导和群众的防灾意识。

### 参考文献:

[1] 徐道明, 冯清华. 西藏喜马拉雅山区危险冰湖及其溃决特征[J]. 地理学报, 1989, 44(3): 343-352.

[2] 吕儒仁, 唐邦兴, 朱平一. 西藏泥石流与环境[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999: 69-77.

[3] 朱平一, 何子文, 汪阳春, 等. 川藏公路典型山地灾害研究[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999: 12-53.

[4] 李德基, 游勇. 西藏波密米堆冰湖溃决浅议[J]. 山地研究, 1992, 10(4): 212-224.

[5] 崔鹏, 马东涛, 陈宁生, 等. 冰湖溃决泥石流的形成、演化与减灾对策[J]. 第四纪研究, 2003, 23(6): 621-628.

[6] 程尊兰, 朱平一, 宫怡文. 典型冰湖溃决泥石流的形成机制分析[J]. 山地学报, 2003, 21(6): 716-720.

[7] 陈储军, 刘明, 张帆. 西藏年楚河冰川终碛湖溃决条件及洪水估算[J]. 冰川冻土, 1996, 18(4): 348-352.

[8] 汪阳春, 梁光模, 舒斌. 西藏公路水毁研究[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2001: 74-82.

[9] 罗德富, 毛济周. 川藏公路南线(西藏境内) 山地灾害及防治对策[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 139-145.

[1] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. Nature, 2001, 413: 622-625.

[2] Loehle C, Leblanc D. Model-based assessments of climate change effect on forests[J]. Ecological Modelling, 1996, 90: 12-31.

[3] Brown S, Lugo A E. Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes[J]. Science, 1984, 223: 1290-1293.

[4] 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的影响[J]. 地理学报, 2003, 58(5): 727-734.

[5] 赵敏, 周广胜. 中国森林生态系统植被碳储量及其影响因子分析[J]. 地理科学, 2004, 24(1): 50-54.

[6] 孙丽英, 李惠民, 董文娟, 等. 在我国开展林业碳汇项目的利弊分析[J]. 生态科学, 2005, 24(1): 422-45.

[7] 胡建忠. 黄河上游退耕地人工林的碳储量研究[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(6): 28.

[8] 黄宇, 冯宗炜, 汪思龙, 等. 杉木、火力楠纯林及其混交林生态系统 C、N 贮量[J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3146-3154.

[14] 于贵瑞, 李海涛, 王绍强, 等. 全球变化与陆地生态系统碳循环与碳蓄积[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 119-123.

[15] 陈泮勤, 黄耀, 于贵瑞, 等. 地球系统碳循环[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 214-215.

[16] 杨玉盛, 郭剑芬, 陈银秀, 等. 福建柏和柳杉人工林凋落物分解及养分动态的比较[J]. 林业科学, 2004, 40(3): 12-25.

[17] 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[J]. 林业科学研究, 2000, 13(2): 123-128.

[18] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 13-16.

[19] 李红梅, 马友鑫, 郭宗峰, 等. 西双版纳森林植被的碳储量及影响因素分析[J]. 福建林学院学报, 2005, 25(4): 368-372.

[21] Lenton T M, Huntingford C. Global terrestrial carbon storage and uncertainties in its temperature sensitivity examined with a simple model[J]. Global Change Biology, 2003, 9: 1333-1352.