

四川森林土壤有机碳储量的空间分布特征

黄从德, 张 健*, 杨万勤, 张国庆, 王永军

(四川农业大学林业生态工程省级重点实验室, 四川 雅安 625014)

摘要: 利用森林土壤实测数据与 GIS 相结合的研究方法估算了四川森林土壤有机碳密度和碳储量, 研究了四川森林土壤有机碳密度的空间分布特征。四川森林土壤有机碳储量为 (2394.26 ± 514.15) TgC, 平均碳密度为 $190.45 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 四川不同森林类型土壤有机碳储量和碳密度差异较大, 分别介于 $(5.05 \pm 0.37) \sim (1101.74 \pm 205.40)$ TgC、 $(102.69 \pm 21.09) \sim (264.41 \pm 49.24) \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 其有机碳含量、碳密度和碳储量都随土层厚度的增加而降低。四川森林土壤有机碳密度空间分布特征明显, 总体上表现出随纬度、海拔高度的增加而增加, 随经度的增加而减小。从森林土壤生态系统水平监测森林土壤有机碳储量有助于提高其估算精度。

关键词: 森林土壤; 有机碳密度; 有机碳储量; 空间分布; 四川省

文章编号: 1000-0933(2009)03-1217-09 中图分类号: S718.55 文献标识码: A

Spatial distribution characteristics of forest soil organic carbon stock in Sichuan Province

HUANG Cong-De, ZHANG Jian*, YANG Wan-Qin, ZHANG Guo-Qing, WANG Yong-Jun

Sichuan Provincial Key Laboratory of Forestry Ecological Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, Sichuan

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1217 ~ 1225.

Abstract: Forest soil organic carbon plays an important role in global carbon cycle, as a consequence of which much more attentions have been given to the regional forest soil organic carbon stock. As yet little information was available on the spatial pattern of forest soil organic carbon pool in Sichuan Province, which was difficult to make needs of accurately assessing the regional forest soil organic carbon stock, and managing regional forest soil carbon pool. Forest soil organic carbon stock and distribution traits were therefore analyzed by coupling field investigation and ArcGIS methods with the purpose to assess forest soil carbon storage and spatial distribution in Sichuan Province. The total organic carbon stock of Sichuan forest soil was (2394.26 ± 514.15) TgC with average carbon density of $190.45 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$. Forest soil organic carbon stock varied from (5.05 ± 0.37) TgC to (1101.74 ± 205.4) TgC, depending upon forest types. Meanwhile, soil organic carbon density ranged from $(102.69 \pm 21.09) \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ to $(264.41 \pm 49.24) \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in Sichuan forest, depending upon forest types and the altitude, latitude and longitude. Forest soil carbon content, density and stock declined with the increase of soil depth. Soil carbon density increased with the increase of altitude and latitude, but decreased with longitude. The results implied that the measurement of soil organic carbon stock in the forest ecosystem would benefit to enhance the precision in assessing regional forest soil carbon stock.

Key Words: forest soil; organic carbon density; organic carbon stock; spatial distribution; Sichuan Province

森林土壤是森林生态系统的重要组成部分,也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^[1~3]。森林土壤的有机碳储量约为 787 PgC,约占全球土壤有机碳储量的 39%,大约为

基金项目: 国家教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-07-0592);国家“十一五”科技支撑资助项目(2006BAC01A11)

收稿日期: 2008-07-29; **修订日期:** 2008-11-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: auldkgk@sicau.edu.cn

森林生态系统有机碳库的 $2/3$ ^[3]。如果将森林土壤生态系统中根系的碳储量计算在内,森林土壤有机碳库储量将占全球土壤碳库的 50% 左右,其库容的微小变化,都会对大气 CO_2 浓度及全球气候变化产生巨大的影响^[1],因而森林土壤有机碳储量及空间分布成为全球有机碳循环研究的热点^[4~6]。但目前国内有关区域或国家尺度上森林土壤有机碳储量和碳密度的估算主要基于土壤普查资料和文献数据获得,由于缺乏全面、详细、可靠的实测数据,使得估算结果还存在较大的不确定性^[1,2,6,7],同时对森林生态系统碳储量和碳密度的研究更加关注森林植被,对森林土壤研究还相对不足^[8~14]。

四川森林是西南林区的主体,地处“世界第三极”——青藏高原东缘,是全球气候变化的敏感响应区^[15]。但目前对四川森林土壤有机碳储量及其空间分布特征的研究还未见报道。本文以四川森林土壤为研究对象,通过大量的土壤有机碳密度实测数据,估算了森林土壤有机碳储量,探讨了土壤有机碳密度的空间分布特征,旨在为我国森林土壤有机碳储量研究提供基础数据。

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 $97^{\circ}21' \sim 108^{\circ}31'E$ 、 $26^{\circ}31' \sim 34^{\circ}19'N$ 之间。全省地质构造复杂,地势由西北向东呈梯状下降,大部分地区海拔在 1000m 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、南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 ~ 1000mm,年均温 16 ~ 20℃。截止 2006 年,全省森林面积为 1923 万 hm^2 ,居全国第一,森林覆盖率为 19.21%,居全国第四^[16]。受青藏高原隆升和大气环流的影响,四川省陆地生态系统在气候、植被和土壤等方面具有明显的“三向地带性”,同时又具有多样性的植被类型和土壤类型组合。由于处长江上游地区,四川又是长江防护林工程建设、天然林保护工程、退耕还林(草)工程等一系列大型生态建设工程的主体部分。这些大型工程建设形成的多样化的森林生态系统为研究区域性的森林碳增汇潜力提供了得天独厚的天然实验室。

1.2 资料来源

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。本研究不包括经济林、竹林和疏林。

1.3 标准地设置及土壤样品的采集

按照典型选样的方法,在各森林类型中设置 30 m × 30 m 的标准地(标准地数量按不同森林类型分布的面积权重确定,每种森林类型标准地数量不少于 30 个的原则进行布设,表 1)。在每个标准地内按 S 型挖取 3 个土壤剖面,除去枯落物层后,每个剖面按 I 层(0 ~ 10cm)、II 层(10 ~ 30cm)、III 层(30 ~ 50cm)和 IV 层(50cm ~ 100cm)取制样品,用环刀法测定其容重^[1](表 1)。在各层取鲜土若干,风干、磨碎、过筛(2 mm 和 0.25 mm 筛)后用于含碳量的测定,并同时测定 > 2 mm 的石砾含量(体积分数)。

1.4 土壤有机碳含量的测定

土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定^[1]。

1.5 土壤有机碳储量的估算

土壤层有机碳储量估算采用实测数据与生命带类型法估算(统一计算到 1m 深度)^[17]相结合的研究方法。森林土壤有机碳储量为土壤剖面有机碳密度乘以森林面积。土壤剖面有机碳密度用下列公式计算^[7]:

$$\text{SOC}_n (\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}) = \sum_{i=1}^k H_{ni} B_{ni} O_{ni} (1 - \delta_{ni}) / 10$$

式中, H_{ni} 为第 n 类森林第 i 层土壤厚度(cm), B_{ni} 为第 n 类森林第 i 层土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), O_{ni} 为第 n 类森林第 i 层土壤有机碳含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), δ_{ni} 为第 n 类森林第 i 层土壤 > 2 mm 的石砾体积所占的百分比(%), k 为土壤层数。

1.6 森林土壤有机碳密度图的绘制

用各森林类型土壤的有机碳密度建立数据库,结合四川森林资源分布图,在 ArcGIS 系统中制作出森林土

壤有机碳密度空间分布图。

表 1 不同森林类型的土壤容重

Table 1 Soil bulk densities in different forest types

林分类型 Forest types	土壤容重 Soil bulk densities ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)					样本数 Number of sample
	I (0 ~ 10 cm)	II (10 ~ 30 cm)	III (30 ~ 50 cm)	IV (50 ~ 100 cm)	平均 Mean	
冷、云杉 <i>Abies and Picea</i>	0.91 $\pm$ 0.12	1.04 $\pm$ 0.13	1.11 $\pm$ 0.09	1.15 $\pm$ 0.07	1.04 $\pm$ 0.09	213
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	0.91 $\pm$ 0.17	0.98 $\pm$ 0.17	1.08 $\pm$ 0.18	1.10 $\pm$ 0.16	1.02 $\pm$ 0.14	39
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	1.24 $\pm$ 0.18	1.25 $\pm$ 0.14	1.31 $\pm$ 0.15	1.33 $\pm$ 0.16	1.28 $\pm$ 0.15	69
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	1.20 $\pm$ 0.21	1.21 $\pm$ 0.15	1.22 $\pm$ 0.12	1.23 $\pm$ 0.11	1.21 $\pm$ 0.13	78
柏木 <i>Cupressus funebris</i>	1.17 $\pm$ 0.18	1.25 $\pm$ 0.18	1.25 $\pm$ 0.20	1.30 $\pm$ 0.20	1.24 $\pm$ 0.18	73
柳杉 <i>Cryptomeria fortunei</i>	0.75 $\pm$ 0.12	0.77 $\pm$ 0.19	0.84 $\pm$ 0.23	0.85 $\pm$ 0.18	0.81 $\pm$ 0.16	48
其它松类 Other pines and conifer forests;	1.04 $\pm$ 0.19	1.11 $\pm$ 0.17	1.17 $\pm$ 0.17	1.23 $\pm$ 0.18	1.14 $\pm$ 0.17	60
桉属 <i>Eucalyptus</i>	1.09 $\pm$ 0.16	0.94 $\pm$ 0.16	1.07 $\pm$ 0.13	1.17 $\pm$ 0.12	1.07 $\pm$ 0.10	54
杨属 <i>Populus</i>	1.34 $\pm$ 0.15	1.38 $\pm$ 0.13	1.43 $\pm$ 0.13	1.54 $\pm$ 0.16	1.42 $\pm$ 0.14	63
楠、樟 <i>Phoebe and Cinnamomum</i>	0.99 $\pm$ 0.17	1.07 $\pm$ 0.16	1.14 $\pm$ 0.11	1.22 $\pm$ 0.09	1.11 $\pm$ 0.10	69
栎类、硬阔 <i>Quercus and Hardwood</i>	1.19 $\pm$ 0.19	1.24 $\pm$ 0.18	1.32 $\pm$ 0.15	1.34 $\pm$ 0.12	1.27 $\pm$ 0.14	93
软阔 Softwood	0.97 $\pm$ 0.15	1.03 $\pm$ 0.15	1.13 $\pm$ 0.10	1.21 $\pm$ 0.09	1.12 $\pm$ 0.15	86
合计 Total						945

1.7 数据处理

数据在 Excel 和 ArcGIS 系统中处理。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳含量及垂直分布特征

不同林分类型土壤平均有机碳含量介于(1.06 $\pm$ 0.27)% ~ (3.92 $\pm$ 1.17)% 之间(表 2)。在所有林分类型中,以冷、云杉林土壤平均有机碳含量最大,为(3.92 $\pm$ 1.17)%,以马尾松林土壤平均有机碳含量最低,仅为(1.06 $\pm$ 0.27)%。不同林分类型土壤有机碳含量与林分类型、枯落物现存量以及人为干扰有关^[1,17]。

表 2 不同森林类型的土壤有机碳含量

Table 2 Soil organic carbon content in different forests

林分类型 Forest types	碳含量 Carbon content (C%)				
	I (0 ~ 10 cm)	II (10 ~ 30 cm)	III (30 ~ 50 cm)	IV (50 ~ 100 cm)	平均 Mean
冷、云杉 <i>Abies and Picea</i>	7.24 $\pm$ 2.55	3.98 $\pm$ 1.10	2.42 $\pm$ 0.77	1.15 $\pm$ 0.39	3.92 $\pm$ 1.17
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	2.40 $\pm$ 0.63	1.76 $\pm$ 0.38	1.29 $\pm$ 0.29	0.81 $\pm$ 0.19	1.56 $\pm$ 0.31
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	1.87 $\pm$ 0.44	1.13 $\pm$ 0.31	0.75 $\pm$ 0.23	0.50 $\pm$ 0.17	1.06 $\pm$ 0.27
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	2.35 $\pm$ 0.99	1.35 $\pm$ 0.43	1.00 $\pm$ 0.40	0.67 $\pm$ 0.16	1.34 $\pm$ 0.39
柏木 <i>Cupressus funebris</i>	1.92 $\pm$ 0.70	1.26 $\pm$ 0.34	0.88 $\pm$ 0.28	0.52 $\pm$ 0.18	1.15 $\pm$ 0.33
柳杉 <i>Cryptomeria fortunei</i>	5.56 $\pm$ 0.74	4.18 $\pm$ 0.99	2.68 $\pm$ 0.91	1.85 $\pm$ 0.65	3.57 $\pm$ 0.71
其它松类 Other pines and conifer forests	4.55 $\pm$ 1.71	2.71 $\pm$ 1.17	1.80 $\pm$ 0.83	1.07 $\pm$ 0.49	2.53 $\pm$ 0.98
桉属 <i>Eucalyptus</i>	2.08 $\pm$ 0.36	1.59 $\pm$ 0.29	1.43 $\pm$ 0.38	0.94 $\pm$ 0.18	1.51 $\pm$ 0.19
杨属 <i>Populus</i>	2.31 $\pm$ 0.65	1.61 $\pm$ 0.46	1.10 $\pm$ 0.39	0.66 $\pm$ 0.17	1.42 $\pm$ 0.41
楠、樟 <i>Phoebe and Cinnamomum</i>	5.15 $\pm$ 1.80	2.69 $\pm$ 0.95	1.43 $\pm$ 0.46	0.77 $\pm$ 0.32	2.51 $\pm$ 0.55
栎类、硬阔 <i>Quercus and Hardwood</i>	2.86 $\pm$ 0.10	1.76 $\pm$ 0.50	1.16 $\pm$ 0.29	0.75 $\pm$ 0.28	1.63 $\pm$ 0.36
软阔 Softwood	6.23 $\pm$ 2.51	3.66 $\pm$ 1.10	2.25 $\pm$ 0.77	0.97 $\pm$ 0.32	3.75 $\pm$ 1.38

不同林分类型土壤各层有机碳含量介于(0.50 $\pm$ 0.17)% ~ (7.24 $\pm$ 2.55)% 之间(表 2)。各林分类型土壤层有机碳含量都以表土层(0 ~ 10 cm)最大,并随着土层深度的增加逐渐减小。表层土(0 ~ 10cm)的有机碳含量是亚表层土(10 ~ 30cm)的 1.31 ~ 1.91 倍,是底层土(50 ~ 100cm)的 2.21 ~ 6.69 倍。

2.2 土壤有机碳密度及垂直分布特征

不同林分类型土壤有机碳密度差异较大,介于 $(102.69 \pm 21.09) \sim (264.41 \pm 49.24) \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间(表3)。在所有林分类型中,以冷、云杉林土壤平均有机碳密度最大,为 $(264.41 \pm 49.24) \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$,以马尾松林土壤平均有机碳密度最低,仅为 $(102.69 \pm 21.09) \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。不同林分类型土壤有机碳密度可划分为3个等级,云冷杉、软阔、柳杉和其他松类土壤有机碳密度较高,在 $200.00 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上,硬阔及杨属为中碳密度,碳密度介于 $150.00 \sim 200.00 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间,而其他林分类型土壤有机碳密度相对较低,小于 $150.00 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

表3 不同森林的土壤有机碳密度

Table 3 Organic carbon density in soil layers in different forests

林分类型 Forest types	碳密度 Carbon density ($\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$)				平均 Mean
	I (0 ~ 10 cm)	II (10 ~ 30 cm)	III (30 ~ 50 cm)	IV (50 ~ 100 cm)	
冷、云杉 <i>Abies and Picea</i>	63.91 ± 18.62	81.90 ± 20.86	53.16 ± 16.00	65.14 ± 19.99	264.41 ± 49.24
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	21.53 ± 5.80	34.41 ± 8.59	27.38 ± 5.87	43.50 ± 8.86	126.82 ± 18.49
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	22.76 ± 4.17	27.94 ± 6.64	19.28 ± 4.57	32.72 ± 9.46	102.69 ± 21.09
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	26.80 ± 8.61	32.23 ± 9.00	23.62 ± 8.49	40.61 ± 9.66	123.26 ± 24.81
柏木 <i>Cupressus funebris</i>	21.80 ± 6.64	31.00 ± 7.63	21.47 ± 5.88	33.29 ± 9.35	107.55 ± 22.78
柳杉 <i>Cryptomeria fortunei</i>	41.61 ± 6.63	61.54 ± 9.52	41.85 ± 8.05	75.46 ± 21.59	220.46 ± 34.53
其它松类 Other pines and conifer forests	44.55 ± 8.74	58.14 ± 21.46	40.43 ± 15.19	63.67 ± 24.38	206.79 ± 60.08
桉属 <i>Eucalyptus</i>	22.64 ± 4.77	29.90 ± 7.33	30.03 ± 6.49	54.59 ± 8.18	137.17 ± 10.06
杨属 <i>Populus</i>	30.14 ± 6.65	43.44 ± 9.95	30.51 ± 8.97	49.90 ± 9.60	153.99 ± 33.88
楠、樟 <i>Phoebe and Cinnamomum</i>	50.35 ± 19.67	56.61 ± 20.31	32.39 ± 9.96	47.41 ± 20.19	186.80 ± 60.20
栎类、硬阔 <i>Quercus and Hardwood</i>	33.03 ± 8.89	43.01 ± 9.48	30.31 ± 7.57	50.04 ± 18.00	156.40 ± 28.46
软阔 Softwood	58.38 ± 17.62	73.41 ± 17.67	50.07 ± 15.27	58.14 ± 18.97	240.00 ± 46.22

不同林分类型土壤各层 10 cm 厚度的平均有机碳密度都随土壤深度的增加而降低,以表层土的有机碳密度最大(图1)。这是因为植物的根系主要集中分布在土壤表层,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,因而表层土壤的有机碳储存能力较强,碳密度大。

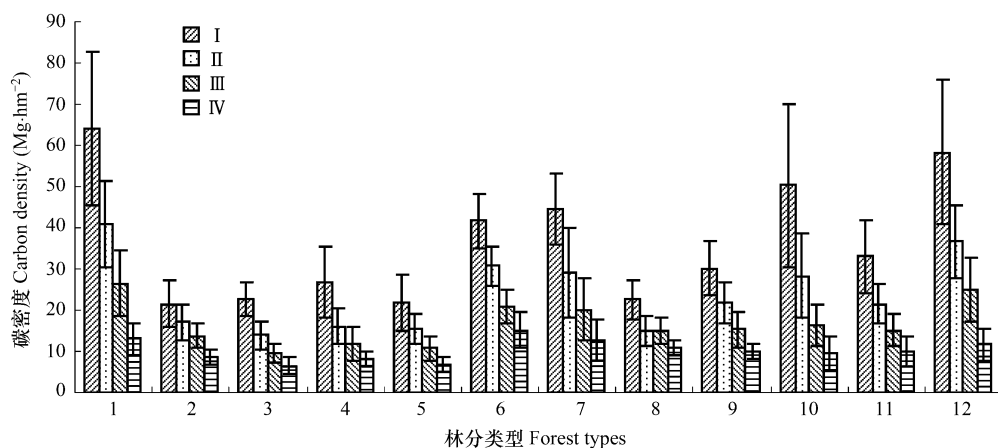


图1 不同森林类型土壤各层 10 cm 厚度的平均有机碳密度

Fig. 1 Mean soil organic carbon density in 10 cm soil layer of different forest types

2.3 森林土壤有机碳库及垂直分布特征

由表4可见,四川森林土壤有机碳总储量为 $(2394.26 \pm 514.15) \text{ TgC}$,平均碳密度为 $190.45 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。不同林分类型土壤有机碳储量差异较大,介于 $(5.05 \pm 0.37) \sim (1101.74 \pm 205.40) \text{ TgC}$ 之间。不同林分类型土壤有机碳储量大小与林分面积大小有关。在所有林分类型中,冷、云杉,云南松,栎类及其硬阔和软阔四种林分类型土壤有机碳储量占土壤总有机碳储的76.93%,表明这4种林分类型在全省森林土壤有机碳储量中

占有重要的地位。同时,这些森林类型土壤有机碳的动态变化将极大地影响到全省整个森林的碳源汇功能。

表 4 不同森林类型土壤层有机碳储量
Table 4 Organic carbon stock in soil layers in different forests

林分类型 Forest types	面积 Area ($\times 10^2 \text{ hm}^2$)	碳储量 Carbon stock (TgC)					碳密度 Carbon density ($\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
		I (0 ~ 10 cm)	II (10 ~ 30 cm)	III (30 ~ 50 cm)	IV (50 ~ 100 cm)	总计 Total	
冷、云杉 <i>Abies</i> and <i>Picea</i>	41715	266.60 $\pm$ 77.67	341.65 $\pm$ 87.02	221.76 $\pm$ 66.74	271.73 $\pm$ 83.39	1101.74 $\pm$ 205.40	
杉木 <i>Cunninghamia</i> <i>lanceolata</i>	4147	8.93 $\pm$ 2.41	14.27 $\pm$ 3.56	11.35 $\pm$ 2.43	18.04 $\pm$ 3.67	52.59 $\pm$ 7.67	
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	8994	20.47 $\pm$ 3.75	25.13 $\pm$ 5.97	17.34 $\pm$ 4.11	29.43 $\pm$ 8.51	92.37 $\pm$ 18.97	
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	16110	43.17 $\pm$ 13.87	51.92 $\pm$ 14.50	38.05 $\pm$ 13.68	65.42 $\pm$ 15.56	198.57 $\pm$ 39.97	
柏木 <i>Cupressus funebris</i>	13946	30.40 $\pm$ 9.26	43.23 $\pm$ 10.64	29.94 $\pm$ 8.20	46.43 $\pm$ 13.04	150.00 $\pm$ 31.77	
柳杉 <i>Cryptomeria</i> <i>fortunei</i>	2052	8.54 $\pm$ 1.36	12.63 $\pm$ 1.95	8.59 $\pm$ 1.65	15.48 $\pm$ 4.43	45.24 $\pm$ 7.09	
其它松类 Other pines and conifer forests	9156	40.79 $\pm$ 8.00	53.23 $\pm$ 19.65	37.02 $\pm$ 13.91	58.30 $\pm$ 22.32	189.34 $\pm$ 55.01	
桉属 <i>Eucalyptus</i>	368	0.83 $\pm$ 0.18	1.10 $\pm$ 0.27	1.11 $\pm$ 0.24	2.01 $\pm$ 0.30	5.05 $\pm$ 0.37	
杨属 <i>Populus</i>	589	1.78 $\pm$ 0.39	2.56 $\pm$ 0.59	1.80 $\pm$ 0.53	2.94 $\pm$ 0.57	9.07 $\pm$ 2.00	
楠、樟 <i>Phoebe</i> and <i>Cinnamomum</i>	468	2.36 $\pm$ 0.92	2.65 $\pm$ 0.95	1.52 $\pm$ 0.47	2.22 $\pm$ 0.94	8.74 $\pm$ 2.82	
栎类、硬阔 <i>Quercus</i> and <i>Hardwood</i>	16101	53.18 $\pm$ 14.31	69.25 $\pm$ 15.26	48.80 $\pm$ 12.19	80.57 $\pm$ 28.98	251.80 $\pm$ 45.82	
软阔 Softwood	12073	70.48 $\pm$ 21.27	88.63 $\pm$ 21.33	60.45 $\pm$ 18.44	70.19 $\pm$ 22.90	289.75 $\pm$ 55.80	
合计 Total	125719	547.53 $\pm$ 153.40	706.25 $\pm$ 181.70	477.72 $\pm$ 142.58	662.76 $\pm$ 204.62	2394.26 $\pm$ 514.15	190.45

森林土壤有机碳储量也随土层厚度的增加而降低(表 4),其中 0 ~ 30 cm 和 0 ~ 50 cm 的土壤有机碳储量分别为(1253.78 $\pm$ 335.10) TgC、(1731.50 $\pm$ 309.83) TgC,分别占土壤层总有机碳储量的 52.37% 和 72.32%。在不同林分类型中,0 ~ 30 cm 和 0 ~ 50 cm 的土壤有机碳储量占整个土壤层有机碳储量的比例在 36.38% ~ 56.48% 和 55.89% ~ 75.94% 之间,这与其他人研究结果基本一致^[18]。

2.4 森林土壤有机碳密度空间分布特征

四川森林土壤有机碳密度空间分布表现出明显的“三向地带性”,即经向地带性、纬向地带性和垂直地带性。从西向东,碳密度从以 180.00 ~ 240.00 $\text{MgC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 > 240.00 $\text{MgC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的斑块为主降低到以 < 120.00 $\text{MgC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的斑块为主,同时以盆周山区为界(碳密度以 120.00 ~ 180.00 $\text{MgC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的斑块为主),碳密度在盆地内、外差异较明显;在西部地区碳密度随纬度和海拔的增加而增加,碳密度从 120.00 ~ 180.00 $\text{MgC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的斑块为主增加到以 > 240.00 $\text{MgC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的斑块为主,但川西北山原区碳密度较低,碳密度以 120.00 ~ 180.00 $\text{MgC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的斑块为主(图 2)。

3 结论与讨论

3.1 森林土壤有机碳储量及垂直分布特征

全球森林土壤的有机碳储量约为 787 PgC,约占全球土壤有机碳储量的 39%,大约为森林生态系统有机碳库的 2/3^[3]。周玉荣等^[17]的研究表明,我国主要森林生态系统土壤有机碳库为 21.023 PgC,占我国森林生态系统碳总量的 74.6%。本项研究表明,四川森林土壤总有机碳储量为 2394.26 TgC,约为森林植被碳储量(523.57 TgC)^[12] 的 4.5 倍。这意味着森林土壤是一个巨大的有机碳库。这是因为森林土壤碳库具有最大的库存量,且土壤有机碳主要以腐殖质形式存在,并受到物理保护,能维持较长时间的碳储存^[1,20]。同时,由于四川森林植被以幼中林为主,因而四川森林植被碳储量偏低^[12],导致较高的森林土壤/植被碳储量比。

Batjes^[18]对全球土壤碳储量的研究表明,在 0 ~ 100 cm 的土壤碳储量中,0 ~ 30 cm 和 0 ~ 50 cm 所占的比

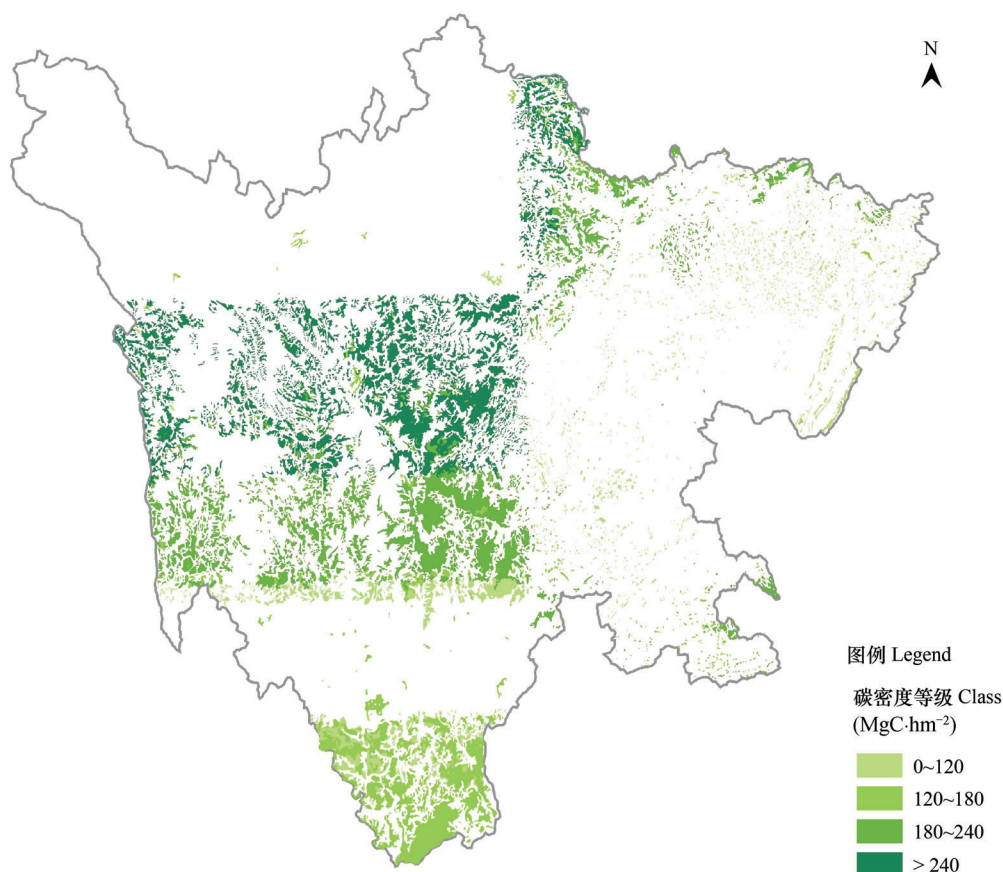


图2 四川森林土壤有机碳密度分布图

Fig. 2 Distribution map of organic carbon density in soil layer of Sichuan forest

例在 37% ~ 59% 和 62% ~ 81% 之间, 平均为 49% 和 67%。张城等^[21]对我国东部地区典型森林生态系统碳储量动态进行了研究, 发现即使在森林类型相同的生态系统中, 其碳储量也会随土壤类型不同而不同, 而且同一类型土壤在不同深度内, 各层碳素密度也有较大差异。本研究表明, 在 0 ~ 100 cm 的土壤有机碳储量中, 0 ~ 30 cm 和 0 ~ 50 cm 所占的比例在 36.38% ~ 56.48% 和 55.89% ~ 75.94% 之间。此外, 单位深度土壤各层平均有机碳含量、有机碳密度和碳储量都以表层土最大, 并随土壤深度的增加而降低。这意味着森林土壤有机碳储量的稳定性较差, 人为活动容易引起表层水土流失从而导致土壤有机碳储量减少。

3.2 不同森林类型的土壤有机碳储量

研究不同森林类型的土壤有机碳储量, 可为最适宜的土地利用方式的制定提供依据, 同时还可以为加强森林植被的保护以维持和增加土壤碳储量提供理论依据^[23]。本研究表明, 不同森林类型土壤有机碳密度差异较大, 介于 $(102.69 \pm 21.09) \sim (264.41 \pm 49.24)$ Mg·hm⁻² 之间, 平均碳密度为 190.45 Mg·hm⁻²。这是因为不同森林类型的树种组成不同, 因而冠层的光合固定能力不同, 引起凋落物的种类、产量和质量也不同, 从而对森林土壤碳汇/源功能产生不同的影响^[1,24]。已有的研究表明, 当凋落物的 C/N 比、木质素/N 比较高时, 土壤微生物活性相对较低, 通过土壤呼吸释放到大气中的 CO₂ 较少, 土壤矿化作用较弱, 土壤有机碳累积明显; 相反, 如果 C/N 比、木质素/N 较低时, 微生物活性相对较高, 土壤矿化作用较强, 通过土壤呼吸释放到大气中的 CO₂ 量较大, 土壤有机碳的累积速率较慢^[22,24]。此外, 不同森林类型的结构不同, 林下的微气候差异较大, 进而影响土壤微生物活性, 对土壤有机碳的累积产生较大影响^[1,24]。可见, 通过对森林植被结构和功能的调控将可能增加土壤有机碳的固定和储量。

3.3 森林土壤有机碳密度空间分布特征

就全球陆地生态系统的碳密度和碳储量而言,地上部分的植物碳密度从苔原到热带雨林随着纬度的降低而增加,而森林土壤有机碳密度和碳储量增加^[3]。李克让等^[25]的研究表明,我国森林土壤有机碳密度总体表现为东部高于西部,最高土壤碳密度出现在东北地区的北部和东部以及青藏高原的东南缘。同时指出出现上述结果的原因主要是这些区域凋落物输入量大,而且受低温和凋落物质量(高的 C/N、木质素/N)的限制,凋落物分解缓慢,土壤生态系统中积累的有机碳较高;而凋落物现存量受人为因素的影响很大。因此,减少人为对森林生态系统的干扰活动,对于维持和增加土壤碳储量有着重要的意义。本研究表明,四川森林土壤有机碳密度的空间分布表现出明显的“三向地带性”,即经向地带性、纬向地带性和垂直地带性,总体上均随着纬度和海拔高度的增加而增加,随着经度的增加而减小。究其原因是在低纬度和低海拔地区,气温较高,雨量充沛,有利于土壤动物和微生物群落的活动,土壤有机物质分解较快,积累缓慢,土壤呼吸(包括根系呼吸、土壤动物呼吸和微生物呼吸)排放量大;同时,由于这一区域是四川主要农业区域,人口密度大,长期人为活动的干扰,许多原生植被常绿阔叶林破坏严重,凋落物输入量减小,从而导致土壤有机碳密度和储量较小。相反,随纬度和海拔逐渐升高,人口密度逐渐减小,对森林的干扰强度减小,而且在高纬度和高海拔区域主要分布着以天然起源的、生物量较高的亚高山针叶林,凋落物输入量大,而且受低温限制,土壤动物和微生物群落的活性相对较低,进入土壤生态系统的有机物质矿化分解缓慢,土壤呼吸排放量较低,土壤有机碳密度和碳储量较大。

3.4 森林土壤有机碳储量估算的不确定性分析

森林土壤在全球碳循环和减缓气候变化中具有举足轻重的作用和地位,而增强森林土壤有机碳固定(Soil carbon sequestration)被认为是减缓全球气候变化最有希望的选择^[3],但目前国内外学者对我国森林土壤有机碳储量和碳密度的估算结果差异较大(表 5)。普遍认为,导致目前对土壤有机碳库估算不一致的原因主要是由于不同估算方法之间的差异(如假设条件、各类参数取值、测定的土壤深度、调查土壤的类型、植被类型全面与否等)以及估算中的各种不确定性造成的^[1,2,6]。除了上述原因以外,从国内外对森林土壤有机碳密度和碳储量的研究来看,缺乏从土壤生态系统的角度来估算土壤有机碳储量和碳密度,可能是影响精确估算森林土壤有机碳储量的一个重要原因^[1]。首先,现有的土壤采样和测定方法常常需要去除表面的土壤有机层(枯枝落叶层),这在很大程度上低估了土壤有机碳密度。特别对于高纬度和高海拔地区的森林生态系统,土壤有机层很厚,矿质土壤层相对较薄,土壤有机层碳密度和碳储量较高。杨万勤等^[26]在研究中国西部云杉林、冷杉林和白桦林 3 个亚高山森林土壤有机碳储量时表明,3 个森林土壤有机层的碳储量分别为 3 个森林土壤剖面上碳储量的 62.2%、53.5% 和 36.6%。第二,有关根系凋落物(Root litter)对土壤有机碳固定的贡献研究较少,但根系凋落物对土壤碳汇的贡献具有十分重要的作用^[24]。Usman 等^[27]研究表明,森林树种的细根在 1a 内死亡约 40%~90%,对土壤碳库的贡献高达 25%~80%。其次,土壤动物群落是土壤生态系统结构和功能的基本组成部分,但迄今为止的土壤有机碳密度和碳储量估计常常忽略了这部分碳的储量和作用^[1]。本研究结果与国内学者研究的结果基本一致(表 5),但本研究采用传统的土壤采样和测定方法来估算的森林土壤有机碳储量和碳密度,没有包括枯枝落叶层、根系凋落物和土壤动物碳储量,其结果与实际相比可

表 5 全国和四川森林土壤有机碳储量及碳密度
Table 5 Forest soil organic storage and density in China and Sichuan

区域 Area	碳储量 Carbon stock (Gt)	碳密度 Carbon density (Mg·hm ²)	文献 References
中国 China	15.8	141.0	[28]
	16.0	136.0	[29]
	17.4	115.9	[30]
	23.2	190.8	[25]
	21.0	193.6	[17]
四川 Sichuan Province	2.394	190.45	本文 This paper

能偏小。因此,未来应从土壤生态系统的角度来研究森林土壤有机碳储量和碳密度,以提高其估算精度。

References:

- [1] Yang W Q, Zhang J, Hu T X, *et al.* Forest Soil Ecology. Chengdu: Sichuan S & T Press, 2006. 1—2.
- [2] Yu G R. Global Change, Carbon Cycle and Storage in Terrestrial Ecosystem. Beijing: Meteorology Press, 2003. 1—460.
- [3] Lal R. Forest soils and carbon sequestration. *For Ecol Manage*, 2005, 220: 242—258.
- [4] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304: 1623—1627.
- [5] Pan G X, Zhou P, Li L Q, *et al.* Core issues and research progresses of soil science of C sequestration. *Acta Pedo Sin*, 2007, 44(2): 327—337.
- [6] Wang S Q, Zhou C H. Estimating soil carbon reservoir of terrestrial ecosystem in China. *Geogr Res*, 1999, 18(4): 349—356.
- [7] Xie X L, Sun B, Zhou H Z, *et al.* Organic carbon density and storage in Soil of China and spatial analysis. *Acta Pedo Sin*, 2004, 41(1): 35—43.
- [8] Fang J Y, Chen A P. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance. *Acta Bot Sin*, 2001, 43(9): 967—973.
- [9] Wang X K, Feng Z W, Ouyang Z Y. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China. *Chin J Appl Ecol*, 2001, 12(1): 13—16.
- [10] Liu G H, Fu B J, Fang J Y. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 733—740.
- [11] Zhao M, Zhou G S. Carbon storage of forest vegetation and its relationship with climatic factors. *Sci Geogr Sin*, 2004, 24(1): 50—53.
- [12] Huang C D, Zhang J, Yang W Q, *et al.* Dynamics on forest carbon stock in Sichuan and Chongqing. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 966—975.
- [13] Jiao Y, Hu H Q. Carbon storage and its dynamics of forest vegetations in Heilongjiang Province. *Chin J Appl Ecol*, 2005, 16(12): 2248—2252.
- [14] Cao J, Zhang Y L, Liu Y H. Changes in forest biomass carbon storage in Hainan Island over the last 20 years. *Geogr Res*, 2002, 21(5): 551—560.
- [15] Zhang X S, Zhang D A. Allocation and study on global change transects in China. *Quat Sci*, 1995, (1): 43—52.
- [16] Liu J Y, Yue T X. Integration evaluation of ecosystem in Western of China. Beijing: Meteorology Press, 2006. 1—5
- [17] Zhou Y R, Yu Z L, Zhao S D. Carbon storage and budget of major Chinese forest types. *Acta Phyto Sin*, 2000, 24(5): 518—522.
- [18] Baties N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Europ J Soil Sci*, 1996, 47: 151—163
- [19] Feng R F, Yang W Q, Zhang J. Artificial forest management for global change mitigation. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11): 3870—3877.
- [20] Galdo I D, Six J, Peressotti A, *et al.* Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fractionation and stable C isotopes. *Glob Chang Biol*, 2003, 9: 1204—1213
- [21] Zhang C, Wang S Q, Yu G R, *et al.* Soil Organic Carbon Storage in Typical Forestland in East China. *Resources Science*, 2006, 28(2): 97—103.
- [22] Huang Y, Feng Z W, Wang S L, *et al.* C and N stocks under three plantation forest ecosystem of Chinese-fir, *Michelia macclurei* and their mixture. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3146—3154.
- [23] Lu C Q, Sun S C. A review on the distribution patterns of carbon density in terrestrial ecosystems. *Acta Phyto Sin*, 2004, 28(5): 629—703.
- [24] Yang W Q, Deng R J, Zhang J. Forest litter decomposition and its responses to global climate change. *Chin J Appl Ecol*, 2007, 28(12): 2889—2895.
- [25] Li K R, Wang S Q, Cao M K. Carbon storage of vegetation and soil in China. *Science in China(Series D)*, 2003, 33(1): 72—80.
- [26] Yang W Q, Feng R F, Zhang J. Carbon stock and biochemical properties in the organic layer and soil under three subalpine forest in Western China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(10): 4155—4165.
- [27] Usman S, Singh S P, Rawat Y S, *et al.* Fine root decomposition and nitrogen mineralization patterns in *Quercus leucotrichophora* and *Pinus roxburghii* forest in central Himalaya. *For Ecol Manage*, 2000, 131: 191—199.
- [28] Ni J. Carbon storage in terrestrial ecosystem of China: Estimates at different spatial resolutions and their responses to climate change. *Climatic Chang*, 2001, 49(3): 339—358.
- [29] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystem. *Science*, 1994, 263: 185—190
- [30] Xie X L, Sun B, Zhou H Z, *et al.* Soil organic carbon storage in China. *Pedosphere*, 2004, 14(4): 491—500.

参考文献:

- [1] 杨万勤, 张健, 胡庭兴, 等. 森林土壤生态学. 成都: 四川科学出版社, 2006. 1~2.

- [2] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积. 北京: 气象出版社, 2003. 1~460.
- [5] 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. 土壤学报, 2007, 44(2): 327~337.
- [6] 王绍强, 周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算. 地理研究, 1999, 18(4): 349~356.
- [7] 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. 土壤学报, 2004, 41(1): 35~43.
- [8] 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.
- [9] 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. 应用生态学报, 2001, 12(1): 13~16.
- [10] 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.
- [11] 赵敏, 周广胜. 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析. 地理科学, 2004, 24(1): 50~53.
- [12] 黄从德, 张健, 杨万勤, 等. 四川省及重庆地区森林植被碳储量动态. 生态学报, 2008, 28(3): 966~975.
- [13] 焦燕, 胡海清. 黑龙江省森林植被碳储量及其动态变化. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2248~2252.
- [14] 曹军, 张德铨, 刘燕华. 近 20 年海南岛森林生态系统碳储量变化. 地理研究, 2002, 21(5): 551~560.
- [15] 张新时, 张奠安. 中国全球变化样带的设置与研究. 第四纪研究, 1995, (1): 43~52.
- [16] 刘纪远, 岳天祥. 中国西部生态系统综合评估. 北京: 气象出版社, 2006. 1~5.
- [17] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518~522.
- [19] 冯瑞芳, 杨万勤, 张健. 人工林经营与全球变化减缓. 生态学报, 2006, 26(11): 3870~3877.
- [21] 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. 资源科学, 2006, 28(2): 97~103.
- [22] 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. 生态学报, 2005, 25(12): 3146~3154.
- [23] 吕超群, 孙书存. 陆地生态系统碳密度格局研究概述. 植物生态学报, 2004, 28(5): 692~703.
- [24] 杨万勤, 邓仁菊, 张健. 森林凋落物分解及其对全球气候变化的响应. 应用生态学报, 2007, 28(12): 2889~2895.
- [25] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量. 中国科学(D 辑), 2003, 33(1): 72~80.
- [26] 杨万勤, 冯瑞芳, 张健. 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. 生态学报, 2007, 27(10): 4155~4165.