

永春县柑橘林生态系统的碳储量及其动态变化

林清山^{1,2}, 洪伟^{3,*}, 吴承祯³, 林勇明³, 陈灿³

(1. 福建农林大学生命科学学院, 福州 350002; 2. 福建省农业厅, 福州 350003;

3. 福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室, 福州 350002)

摘要:通过野外实地调查对永春县天马山柑橘林生态系统碳储量及分布特点进行研究。结果表明:柑橘的树高和基径的相关系数为 0.8933。柑橘各器官生物量回归模型显示,柑橘各器官的生物量与其树高和基径的相关性较好,其中树干、树叶、果实器官的相关系数均大于 0.90。柑橘林生态系统有机碳密度为 $222.796 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中土壤(0—100cm)碳密度为 $200.214 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,占总有机碳密度的 89.864%,果树碳密度为 $22.582 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,占 10.136%。1952—2007 年,永春县柑橘林生态系统碳储量从 445.592t 增加到 $2.205 \times 10^6 \text{ t}$,表现为碳汇。

关键词:柑橘林;生态系统;碳密度;碳储量

Organic carbon storage and its dynamic change in citrus ecosystem in Yongchun, China

LIN Qingshan^{1,2}, HONG Wei³, WU Chengzhen³, LIN Yongming³, CHEN Can³

1 College of Life Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2 Fujian Provincial Agricultural Department, Fuzhou 350003, China

3 Key Laboratory of Forest Ecological System Process and Management of Fujian Universities, Fuzhou 350002, China

Abstract: Organic carbon in citrus ecology was detected by the field investigation and measurement in Yongchun County, Fujian Province. The results showed that citrus organs had a positive correlation with each other based on analyzing of biomass linear regression model. Correlation coefficient of stem, leaf and fruit both exceeded 0.90. The correlation coefficient between height and base diameter was 0.893333. The carbon density in the ecosystem was $222.796 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, in which soil(0—100 cm) carbon density was $200.214 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, vegetation carbon density was of $22.582 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, account for 89.864% and 10.136% of total carbon density, respectively. From 1952 to 2007, the organic carbon storage in citrus ecosystem was increased from 445.592t to $2.205 \times 10^6 \text{ t}$ in Yongchun County, which playing a role of sink.

Key Words: citrus forest; ecosystem; organic carbon density; organic carbon storage

近百年来,全球气候正经历一次以“变暖”为主要特征的显著变化,全球变暖问题已成为各国政府和科学界关心的问题。在过去的 100a 中,地球的表面温度已经上升了 0.3—0.6℃,而且呈现出逐步加剧的趋势^[1]。森林是陆地生态系统中最大的碳库,贮存了陆地生态系统总碳库的 56%^[2]。森林生态系统的碳储量是研究森林生态系统与大气间碳交换的基本参数^[3],也是估算森林生态系统向大气吸收和排放含碳气体的关键因子。目前,前苏联、加拿大、美国等国家对于森林生态系统的植物碳储量的估计研究均有较大进展^[4]。国内许多学者^[5-7]也对森林生态系统的植物碳储量进行了研究,建立了中国主要森林类型的林木蓄积量与生物量之间的相关式,估算了中国森林植被碳储量和碳密度,从某一时间断面上反映了中国森林对全球碳循环的影响。

基金项目:国家教育部博士点学生专项基金资助项目(200803890010)

收稿日期:2009-07-28; 修订日期:2009-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fjhongwei@126.com

但是,在森林碳储量的估算中,由于不同学者所采用的方法不同以及森林生态系统碳储量的空间异质性和时间变化的复杂性,使得森林碳储量的估算仍存在很大的不确定性^[8-11]。

《京都议定书》中将造林、再造林和森林管理等活动作为清洁发展项目,允许发达国家可以通过在发展中国家实施林业碳汇项目抵消其温室气体排放量。人工林的碳汇作用被认为是减缓全球变化的一种可能机制和最有希望的选择而成为全球变化减缓的核心内容^[12]。果园作为一种特殊的经济林植被类型,其碳循环及其过程受地理、气候条件,特别是周期性经营活动的影响而十分复杂。目前,对土地利用方式对陆地生态系统土壤碳储量的影响有较多报道^[13-15],吴志丹等^[16]曾对福州地区7年生柑橘果园生态系统的碳储量及分布特点进行研究,关于其他果树碳储量的研究报道较少。

永春县是我国著名的芦柑产地、福建省芦柑的主产区,其栽培规模居全国各县前茅,享有“中国芦柑之乡”的美誉。2007年,全县柑橘种植面积9897hm²,产量233408t,产值6亿多元,占全县农业总产值的34%。2007年,永春县芦柑共检验检疫出口11.44万t,出口金额7625.7万美元,出口数量和出口金额均占全国芦柑出口量的60%以上^[17]。本文拟以永春县为例,探讨该县柑橘林生态系统碳储量及其在不同时期的分布特点,为福建省柑橘林碳储量的研究、我国森林生态系统碳平衡的估算和动态模拟以及开展经济林碳汇研究提供基础数据。

1 研究区概况

永春县地处福建省东南部,晋江东溪上游,位于东经117°41′55″—118°31′9″,北纬25°13′15″—25°33′45″之间。属南亚热带和中亚热带过度带,气候温和,湿润多雨,全年无霜期320d,平均气温20.4℃,降水量1600—2100mm,年平均日照时数1908h,年平均绝对湿度19.6hPa。山地土壤以红壤、黄壤为主,有小部分为砖红壤,整体属于酸性壤。

试验地天马山柑橘场位于永春县西北部,东经118°16′,北纬25°24′,属高山丘陵,海拔在300—1081m之间,坡度20—35°,土壤pH值4.0—5.0,有机质2.105%,年平均气温19.07℃,≥10℃积温6618℃,年降雨量2068mm,年日照时数1616h。属于典型的南亚热带季风雨林气候区,具有培育优质芦柑生产所具备的得天独厚的自然条件,是芦柑的最佳适栽区。果树种植密度为1350株·hm⁻²。调查时平均树高4.021m,平均基径13.838cm,平均冠幅2.264m×2.188m。

2 研究方法

2.1 样品采集与处理

2.1.1 果树

2008年11月在永春县天马山柑橘场内选取一块400m²(20m×20m)的柑橘园作为试验样地,在样地内进行每木检尺,测定树高、基径、冠幅。在基径最大值(21cm)与最小值(5.1cm)之间,分不同径级,以2—3cm为一个径级取样,共选取8株果树作为标准木调查生物量。将标准木砍倒后以1m为区分段作树干解析,地上部分分为树干、树枝、树叶、果实,分别测其鲜重;地下部分采用全根挖掘法测定鲜重。取样烘干至恒重后测定含水率,其中部分样品经磨粉后供测定碳含量用。

2.1.2 土壤

取样点设于8株已挖出树根的果树坑内,各取样点随机选取3点挖掘土壤剖面,采用土壤环刀法分别采集0—20cm、20—40cm、40—60cm、60—100cm共4个层次土层土壤,测定土壤容重,3次重复,并同时采集相应土层土壤样品风干、过筛。

2.2 碳含量测定

果树有机碳和土壤有机碳均采用重铬酸钾外加热法测定。

2.3 模型选择

2.3.1 生物量模型

根据Huxly提出的相对生长关系法则,林木生长过程中各生长系之间有协调增长的规律,因此要测定林

分某一分量可以通过建立该分量与比较容易测得的分量的回归方程求得。相对生长关系可用如下公式表示:

$$Y = aX^b$$

或

$$\ln Y = \ln a + b \ln X$$

式中, X 和 Y 是林木的各维量, a 、 b 为供试木回归所得的常数。

在实践中, 一组被伐倒并经仔细测定的样本, 其生物量、生产力和其它度量值(因变量 Y) 和林木基径(自变量 X , 用 D 表示) 有对数回归关系。有研究表明, 用胸径作为自变量 X 建立的模型仅适用于立地条件相同的生态系统, 树高(H) 在一定程度上能反映立地条件的差异, 因而用胸径的平方乘以树高作为自变量 X 被认为更为合适。

$$W = a(D^2H)^b \text{ 或 } \lg W = \lg a + b \lg D^2H$$

式中, a 、 b 为供试木回归所得的常数, D 为林木胸径, H 为树高。

由上述回归模型可以建立林木各器官的生物量与测树因子的关系, 从而可以通过林分测树因子的调查值估计森林生态系统乔木层各器官的生物量。这种方法在 Kittredge 成功地拟合了白松等树种的叶量和胸径对数回归方程后被大量地采用。^[18-20] Whitaket 和 Marks^[21] 曾对这种方法进行了深入的探讨, 认为这种方法对生物量的研究是比较合适的。本文也采用这种方法对柑橘林生物量进行研究。

2.3.2 树高模型

根据相对生长关系法则, 可建立柑橘林树高和基径相关关系的模型, 用下式表示:

$$Y = a_1 + b_1 X$$

式中, Y 代表树高(H), X 代表为基径(D), a_1 、 b_1 为供试木回归所得的常数。

吴剑钊采用多方程分析对比法建立地茎与树高的相关数学模型, 结果表明采用这一模型的相关系数为 0.974878, 取得了良好的拟合效果^[22]。

2.4 数据处理

利用 Excel 和 DPS 数据处理软件对数据进行处理, 其公式如下:

$$\text{果树碳储量} = \Sigma[\text{植株各器官生物量} \times \text{各器官碳含量}]$$

$$\text{土壤碳储量} = \text{土壤容重} \times \text{采样深度} \times \text{土壤有机碳} \times \text{面积}$$

3 结果与分析

3.1 生物量回归模型的建立

利用标准木的基径、树高和各器官生物量的数据, 选择相对生长式 $W = a(D^2H)^b$, 建立柑橘单株各器官的生物量与基径和树高的回归方程, 采用改进单纯形法^[23-25], 求得参数 a 、 b 的值, 进而建立柑橘各器官生物量回归模型(表 1)。通过对柑橘树高和基径进行一元线性回归, 也可以求得参数 a_1 和 b_1 的值, 据此可建立树高和基径的回归模型(表 2)。

表 1 的柑橘各器官生物量回归模型显示, 柑橘各器官的相关系数均较高。树干、树叶、果实的相关系数均大于 0.90, 其中树干的相关系数最高, 其值为

0.960193, 树叶和果实的相关系数分别为 0.904597 和 0.902607。树根和树枝的相关系数分别为 0.886002 和 0.885141。从表 2 可以看出, 柑橘果树树高与基径也存在较好的相关性, 其相关系数为 0.893333, 回归方程为 $y = 0.738773 + 0.234835x$ 。表 1 和表 2 表明, 柑橘各器官、柑橘树高和基径间均具有良好的相关性, 可用于计算单株柑橘和柑橘林的生物量。

表 1 柑橘各器官生物量回归模型

Table 1 The organs biomass regression model of citrus		
器官 Organs	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient
树干 Stem	$W = 0.058315(D^2H)^{0.795680}$	0.960193
树枝 Branch	$W = 0.030939(D^2H)^{0.739656}$	0.885141
树叶 Leaf	$W = 0.649611(D^2H)^{0.194067}$	0.904597
树根 Root	$W = 0.019119(D^2H)^{0.915272}$	0.886002
果实 Fruit	$W = 0.033967(D^2H)^{0.726569}$	0.902607

3.2 柑橘林生态系统果树碳密度及分布特点

根据调查的标准地每木调查数据和依据标准木的生物量数据建立的回归方程,将平均基径和平均高分别代入柑橘各器官生物量回归方程,计算出单株柑橘生物量平均值,再乘以种植密度就是柑橘林总生物量,然后再利用实测的各器官碳含量计算出柑橘林各器官碳密度(表3)。由表3可知,柑橘碳密度为 $22.582 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。从碳密度在柑橘果树各器官中的分配来看,树干碳密度占有最重要的位置,其碳密度为 $8.401 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,占总碳密度的37.201%;树根碳密度占26.583%;果实和树枝分别占14.980%和13.783%;树叶的碳密度最小,仅占7.455%。吴志丹等^[16]则认为在柑橘果树各器官中碳密度所占比例的顺序为根系>树枝>果实>树叶>树干。

表2 柑橘树高的回归模型

Table 2 The height regression model of citrus

系数 Coefficient		回归方程	相关系数
a_1	b_1	Regression equation	Correlation coefficient
0.738773	0.234835	$y = 0.738773 + 0.234835x$	0.893333

表3 柑橘林各器官碳密度及分布

Table 3 Carbon density and its distribution of citrus organs

树干 Stem		树枝 Branch		树叶 Leaf		树根 Root		果实 Fruit		合计 Total
碳密度 Carbon Density $\text{/(t}\cdot\text{hm}^{-2})$	占比 Occupy /%	碳密度 Carbon Density $\text{/(t}\cdot\text{hm}^{-2})$	占比 Occupy /%	碳密度 Carbon Density $\text{/(t}\cdot\text{hm}^{-2})$	占比 Occupy /%	碳密度 Carbon Density $\text{/(t}\cdot\text{hm}^{-2})$	占比 Occupy /%	碳密度 Carbon Density $\text{/(t}\cdot\text{hm}^{-2})$	占比 Occupy /%	碳密度 Carbon Density $\text{/(t}\cdot\text{hm}^{-2})$
8.401	37.201	3.112	13.783	1.683	7.455	6.003	26.583	3.383	14.980	22.582

3.3 柑橘林生态系统土壤碳密度及分布特点

根据柑橘林土壤各层含碳率和容重计算出土壤碳密度(表4)。从表4可以看出,0—100cm的土层土壤碳密度为 $200.214 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。从空间分布来看,土壤碳密度随着土层深度的增加而减少,土壤碳密度主要集中在土壤表层。0—60cm土壤土层碳密度为 $148.223 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,占总碳密度的74.033%。其中0—20cm的土壤碳密度最高,其值为 $60.314 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,占30.125%;20—40cm的土壤碳密度($51.139 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)占25.542%;40—60cm的土壤碳密度占18.366%。60—100cm的土层土壤碳密度只有 $51.990 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,仅占25.968%。李正才^[13]研究认为北亚热带灌木林、茶园、农耕地0—100cm土层碳密度分别为 $146.75 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $156.39 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $110.09 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,杨玉盛^[15]则认为中亚热带果园的为 $96.92 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,而吴志丹^[16]计算出福州柑橘果园0—100cm土层碳密度为 $151.734 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,这些数据存在较大差异,可能是由于研究地点所处的地理环境、植被覆盖、耕作方式、耕作水平以及取样位置不同等原因引起的。土壤有机碳的垂直分布规律和各土层碳密度占比与其他学者关于果园土壤的研究结果一致,土壤有机碳均随着土层深度的增加而减少,0—60cm的土壤有机碳占有最重要的位置。本试验中0—60cm的土壤有机碳占比与杨玉盛^[15]关于中亚热带不同土地利用方式中果园土壤有机碳占比(73.34%)接近,小于吴志丹^[16]的数据(85.08%),高于北亚热带的茶园(69.077%)和农耕地(62.930%),但稍低于灌木林(77.765%)^[13]。

表4 柑橘林生态系统土壤碳密度及分布

Table 4 Soil carbon density and its distribution in citrus ecosystem

0—20cm		20—40cm		40—60cm		60—100cm		合计 Total
碳密度 Carbon density $\text{/(t}\cdot\text{hm}^{-2})$	占比 Occupy /%	碳密度 Carbon density $\text{/(t}\cdot\text{hm}^{-2})$	占比 Occupy /%	碳密度 Carbon density $\text{/(t}\cdot\text{hm}^{-2})$	占比 Occupy /%	碳密度 Carbon density $\text{/(t}\cdot\text{hm}^{-2})$	占比 Occupy /%	碳密度 Carbon density $\text{/(t}\cdot\text{hm}^{-2})$
60.314	30.125	51.139	25.542	36.771	18.366	51.990	25.968	200.214

3.4 柑橘林生态系统碳密度及其分配

从表5可见,柑橘林生态系统碳密度为 $222.795 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中土壤是柑橘林生态系统碳密度的主要组成

部分,其值为 $200.214 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 占总碳密度的 89.864% ; 果树的碳密度只有 $22.582 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 仅占 10.136% 。这一现象表明,在柑橘林生态系统中,土壤有机碳密度是柑橘林生态系统碳密度的主体,果树所起到的作用较小。虽然柑橘果树和土壤层碳密度都大于吴志丹等的研究结果,但土壤层在柑橘林生态系统碳密度的分配中占有最重要的地位是一致的,后者研究认为果树和土壤层有机碳分别占柑橘林生态系统有机碳的 3.53% 和 95.86% , 其中的差异可能与试验地点不同以及在本研究中不计算地被杂草和枯枝落叶有关。

表 5 柑橘林生态系统碳密度及其分配

Table 5 Carbon density and its distribution of citrus ecosystem

果树 Fruit		土壤层 Soil		合计 Total	
碳密度 Carbon Density / ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	占比 Occupy/%	碳密度 Carbon Density / ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	占比 Occupy/%	碳密度 Carbon Density / ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	占比 Occupy/%
22.582	10.136	200.214	89.864	222.796	100

3.5 永春县柑橘林生态系统碳储量的动态变化

1952—2007 年间,永春县柑橘林生态系统碳储量总体上呈现出低位高速增长—高位稳定增长—高位小幅回调的曲折上升趋势,从 1952 年的 445.592t 增加到 2007 年的 2205026.939t , 净增加 2204581.347t , 增加了 4948.534 倍(图 1), 这主要得益于解放后永春县柑橘种植面积的迅速扩大并稳定在较高的面积水平(表 6)^[26]。由表 6 可以看出,1952—2007 年,永春县柑橘种植面积大体呈现出低位高速增长—高位快速增长—

表 6 永春县不同时期柑桔林生态系统碳储量^[26]Table 6 Carbon storage of citrus ecosystem at different periods in Yongchun County^[26]

年份 Year	面积 Area/ hm^2	碳储量 Carbon Density/t	年份 Year	面积 Area/ hm^2	碳储量 Carbon Density/t
1952	2.0	445.592	1980	1884.9	419948.180
1953	3.3	735.227	1981	2543.7	566726.185
1954	8.0	1782.368	1982	2635.8	587245.697
1955	16.7	3720.693	1983	2747.1	612042.892
1956	18.4	4099.446	1984	2942.8	655644.069
1957	38.4	8555.366	1985	3670.4	817750.438
1958	31.7	7062.633	1986	4855.7	1081830.537
1959	73.3	16330.947	1987	5937.7	1322895.809
1960	80.0	17823.680	1988	6522.7	1453231.469
1961	76.2	16977.055	1989	6716.5	1496409.334
1962	76.1	16954.776	1990	6713.7	1495785.505
1963	76.4	17021.614	1991	7065.7	1574209.697
1964	34.6	7708.742	1992	7196.3	1603306.855
1965	57.0	12699.372	1993	8041.0	1791502.636
1966	108.6	24195.646	1994	8698.1	1937901.888
1967	159.8	35602.801	1995	9374.6	2088623.382
1968	219.3	48859.163	1996	9469.2	2109699.883
1969	238.4	53114.566	1997	9636.7	2147018.213
1970	291.3	64900.475	1998	9554.5	2128704.382
1971	324.5	72297.302	1999	9620.0	2143297.520
1972	320.6	71428.398	2000	9538.1	2125050.528
1973	325.7	72564.657	2001	9810.1	2185651.040
1974	321.5	71628.914	2002	9918.3	2209757.567
1975	402.1	89586.272	2003	10030.0	2234643.880
1976	491.3	109459.675	2004	10069.0	2243332.924
1977	562.9	125411.868	2005	10139.7	2259084.601
1978	1061.7	236542.513	2006	10131.5	2257257.674
1979	1566.3	348965.375	2007	9897.1	2205026.939

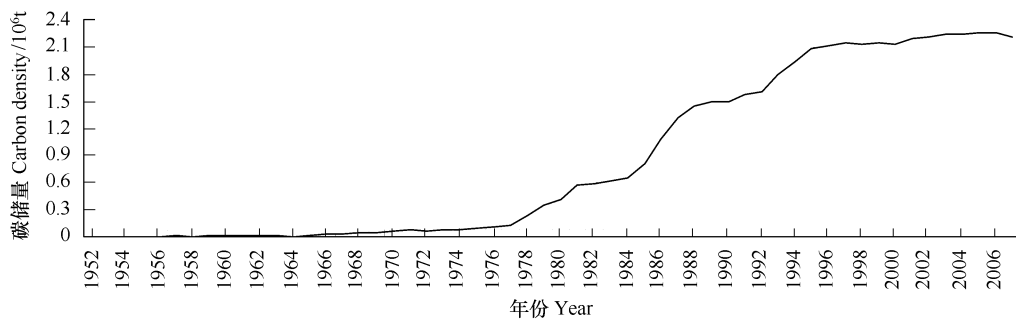


图1 永春县柑橘果园生态系统碳储量的时间变化

Fig. 1 Annual change of organic carbon storage in citrus ecosystem in Yongchun County

高位小幅回调3个阶段。1952—1977年为柑橘种植面积低位高速增长阶段,面积从1952年的 2.0hm^2 增加到1977年的 562.9hm^2 ,增长了281.450倍。在此期间,柑橘林生态系统碳储量也迅速增长,从1952年的 445.592t 增加到1977年的 $1.254 \times 10^5\text{t}$ 。其中1959年首次突破1万t,达到 $1.633 \times 10^4\text{t}$,1976年突破了10万t。1978—2005年为柑橘种植面积高位快速增长阶段,从1978年的 1061.7hm^2 增加到了历史最高面积的 10139.7hm^2 。这一阶段的柑橘林生态系统碳储量同样获得了快速增长,2005年比1976年增加了855.044%。其中的1986年突破100万t,1995年达到了200万t,2005年达到历史最高峰的 $2.259 \times 10^6\text{t}$ 。2006—2007年为柑橘种植面积高位小幅回调阶段。这2a由于种植面积有所下降,2007年的面积下降到 9897.1hm^2 。同样地,这一阶段的柑橘林生态系统碳储量也表现为回调态势,2007年比2005年的最高值下降了2.393%。2006—2007年虽有所回调,但仍保持在历史峰值附近的 $2.205 \times 10^6\text{t}$ 以上。

4 讨论

从1952—2007年,永春县柑橘种植面积从 2.0hm^2 增加到 9897.1hm^2 ,平均每年增加 176.70hm^2 ;柑橘林生态系统总碳储量从 445.592t 增加到 $2.205 \times 10^6\text{t}$,年均增加 39367.524t 。这些数据表明永春县柑橘林生态系统在1952—2007年间均为碳汇。与此不同的是,方精云等^[7]基于中国近50a来的森林资源清查资料对中国森林植被碳库及其变化的研究表明,20世纪70年代中期以前,主要由于森林砍伐等人为作用,中国森林碳库是减少的,之后,呈增加趋势,这种增加主要由人工造林增加所致。由此可知,柑橘林作为经济林的一种,在碳汇中起到了重要的作用。

柑橘林生态系统碳密度及分配比例存在明显的差异。本研究表明,柑橘各器官中树干碳密度最大,树叶的碳密度最小,与吴志丹等的研究结果不太一致。果树碳密度高于亚热带、热带酸性土常绿、落叶阔叶灌丛、矮林和草甸结合的灌丛植被^[27],这主要是由于本研究实测的柑橘各器官碳含量均高于50%(平均值为54.674%),而胡会峰等人则是采用0.5的转换率来转换生物量和碳密度的。0—100cm土壤碳密度高于福州地区7年生柑橘林生态系统土壤碳密度,可能是土壤取样点选择的差异等原因引起的。

柑橘林作为一种典型的农用地型植被类型,其碳循环过程也会受到人类经营管理措施的影响。本实验没有对地被杂草碳储量进行研究,在实际生产过程中,随着人们对柑橘林的管理,进行除草、翻耕和对果实的收获,地被杂草和果实迅速归还土壤或被带走,二者构成了柑橘林生态系统中暂时性或流动性的碳库,因此,永春县柑橘林生态系统实际的碳储量将大于本研究结果。如果能改变柑橘林的经营管理方式,合理套种牧草,增加果园植被覆盖度,将可提高果园生态系统的固碳空间。

致谢:本实验得到福建农林大学林学院黄锦湖、陈虹,永春县农业局、永春县天马山柑橘场有关领导和工作人员的大力支持,在此一并致谢。

References:

- [1] Tang X P. Expanding forestry external space through carbon sinks. *China Forestry*, 2005(11):10-16.

- [2] Wu Q B, Wang X K, Duan X N, Deng L B, Lu Fei, Ouyang Z Y, Feng Z W. Carbon sequestration and its potential by forest ecosystems in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008,28(2):517-524.
- [3] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994,262: 185-190.
- [4] Wang X K, Feng Z W, Ouyang Z Y. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001,12(1):13-16.
- [5] Fang J Y, Wang G C, Liu G H, Xu S L. Forest biomass of China: an estimate based on the biomass-volume relationship. *Ecological Applications*, 1998,8:1084-1091.
- [6] Zhao M, Zhou G S. Carbon storage of forest vegetation and its relationship with climatic factors. *Scientia Geographica Sinica*, 2004,24(1):50-54.
- [7] Fang J Y, Chen A P, Peng C H. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001,292:2320-2322.
- [8] Zhou Y R, Yu Z L, Zhao S D. Carbon storage and budget of major Chinese forest types. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000,24(5):518-522.
- [9] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Biomass and net production of forest vegetation in China. *Acta Ecologica Sinica* 1996,16:497-508.
- [10] Wang S Q, Chen Y F. The study and trends on terrestrial carbon cycle models. *Progress in Geography*, 1998,17(4):64-72.
- [11] Zhang Y L, Zhang W, Ding M J. The difference of computing carbon stocks caused by land use/cover classifications — A case studied in Hainan Province. *Progress In Geography*, 2004, 23(6):63-70.
- [12] Feng R F, Yang W Q, Zhang J. Artificial forest management for global change mitigation. *Acta Ecologica Sinica*, 2006,26(11):3870-3876.
- [13] Li Z C, Xu D Y, Fu M Y, Sun X Z, Xi J R. Effects of land-use change on vertical distribution and storage of soil organic carbon in north subtropical areas. *Forest Research*, 2007,20(6):744-749.
- [14] Li J Y, Yuan X H. A Comparative Study on organic carbon storage in different land-use systems in red earth hilly area. *Resources Science*, 2001, 23(5):73-76.
- [15] Yang Y S, Xie J S, Sheng H, Chen G S, Li X. The impact of land use/cover change on soil organic carbon stocks and quality in mid-subtropical mountainous area of southern China. *Acta Geographica Sinica*, 2007,62(11):1123-1131.
- [16] Wu Z D, Wang Y X, Weng B Q, Cai Z J, Wen S X. Organic carbon and nitrogen storage in 7 years old citrus orchard ecosystem in Fuzhou, China. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Natural Science Edition)*, 2008,37(3):316-319.
- [17] You Y L. The exporting quantity and amount of citrus exceeded 11 million tons during the 2007/2008 production season in Youchun County, and reached the highest level. *The Agricultural Information Network of Quanzhou*, 2008-05-15, <http://www.qznyw.gov.cn/>.
- [18] Feng Z W, Chen C Y, Zhang J W. Biomass measures of *pinus massoniana* forest in Huitong region, Hunan Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 1982,18(2):127-134.
- [19] Fang J Y, Xu S L, Liu G H. The organic carbon pool on terrestrial ecosystems in China. Beijing: Chinese Environment and Scientific Press, 1996: 109-128.
- [20] Prince S D, Goward S N. Global primary production: a remote sensing approach. *Journal of Biogeography*, 1995,22(4):815-835.
- [21] Whitaker R H, Mark P L. Methods of assessing terrestrial productivity // Lirth H, Whittaker R H, eds. Primary productivity of the biosphere. New York: Springer-Verlag, 1975:55-115.
- [22] Wu J Z. Research on the model of ground and breast diameters of slash pine(*Pinus elliotti.*) plantation. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2009, (21):3:22-24.
- [23] Wu C Z, Hong W. A study of optimum fitting logistic curve by modified simplex method. *Journal of Biomathematics*, 1999,14:(1):11-121.
- [24] Wu C Z, Hong W. A study on optimum fitting of Taylor's power law model by modified simplex method. *Journal of Inner Mongolia Forestry College*, 1998,20(2):20-24.
- [25] Yuan X S, Shao D H, Yu S L. Application of LINGO and Excel in the mathematics modeling. Beijing: Science Press, 2007: 162-164.
- [26] Fujian Provincial Bureau of Statistics. *Fujian Economic and Social Statistical Yearbook 2003-2008(Section of Rural Economy)*. Fuzhou: Fujian People's Publishing House, 2004-2009.
- [27] Hu H F, Wang Z H, Liu G H, Fu B J. Vegetation carbon storage of major shrublands in China. *Journal of Plant Ecology(formerly Acta Phytocologica Sinica)*, 2006,30(4):539-544.

参考文献:

- [1] 唐秀萍. 碳汇拓展林业外部空间. *中国林业*, 2005(11):10-16.
- [2] 吴庆标, 王效科, 段晓男, 邓立斌, 逯非, 欧阳志云, 冯宗炜. 中国森林生态系统植被固碳现状和潜力. *生态学报*, 2008,28(2):517-524.
- [4] 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.
- [6] 赵敏, 周广胜. 中国森林生态系统的植物碳储量及其影响因子分析. *地理科学*, 2004,24(1):50-54.

- [8] 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.植物生态学报,2000,24(5):518-522.
- [9] 方精云,刘国华,徐嵩龄.我国森林植被的生物量和净生产量.生态学报,1996,16:497-508.
- [10] 王绍强,陈育峰.陆地表层碳循环模型研究及其趋势.地理科学进展,1998,17(4):64-72.
- [11] 张懿铨,张玮,丁明军.基于土地利用/覆被分类系统估算碳储量的差异——以海南岛森林为例.地理科学进展,2004,23(6):63-70.
- [12] 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):3870-3876.
- [13] 李正才,徐德应,傅懋毅,孙雪忠,奚金荣.北亚热带土地利用变化对土壤有机碳垂直分布特征及储量的影响.林业科学研究.2007,20(6):744-749.
- [14] 李家永,袁小华.红壤丘陵区不同土地资源利用方式下有机碳储量的比较研究.资源科学,2001,23(5):73-76.
- [15] 杨玉盛,谢锦升,盛浩,陈光水,李旭.中亚热带山区土地利用变化对土壤有机碳储量和质量的影响.地理学报,2007,62(11):1123-1131.
- [16] 吴志丹,王义祥,翁伯琦,蔡子坚,温寿星.福州地区7年生柑橘果园生态系统的碳氮储量.福建农林大学学报(自然科学版),2008,37(3):316-319.
- [17] 尤有利.2007/2008年永春芦柑产季出口超11万吨创五个历史之最.泉州农业信息网,2008-05-15,<http://www.qznyw.gov.cn>.
- [18] 冯宗炜,陈楚莹,张家武.湖南会同地区马尾松林生物量的测定.林业科学,1982,18(2):127-134.
- [19] 方精云,徐嵩龄,刘国华.中国陆地生态系统的碳库.北京:中国环境科学出版社,1996:109-128.
- [22] 吴剑钊.湿地松人工林地径与胸径树高模型的研究.亚热带水土保持,2009,(21):3:22-24.
- [23] 吴承祯,洪伟.运用改进单纯形法拟合 Logistic 曲线的研究.生物数学学报,1999,14:(1):11-121.
- [24] 吴承祯,洪伟. Taylor 幂法则模型的改进单纯形法最优拟合.内蒙古林学院学报,1998,20(2):20-24.
- [25] 袁新生,邵大宏,郁时炼主编. LINGO 和 Excel 在数学建模中的应用.北京:科学出版社,2007:162-164.
- [26] 福建省统计局编.福建经济与社会统计年鉴 2003—2008(农村篇).福州:福建人民出版社,2004—2009.
- [27] 胡会峰,王志恒,刘国华,傅伯杰.中国主要灌丛植被碳储量.植物生态学报,2006,30(4):539-544.