

亚热带果园土壤固碳潜力估算——以永春县为例

王义祥, 田娜, 王成己, 翁伯琦*, 黄毅斌*

(福建省农业科学院农业生态研究所, 福建省红壤山地农业生态过程重点实验室, 福州 350013)

摘要: 为了解亚热带果园土壤的固碳潜力, 比较分析了永春县果园土壤有机碳含量在 1982 年到 2010 年的变化, 并估算了现有经营条件下亚热带果园土壤的固碳潜力。结果表明, 近 28 年来, 永春县果园表层土壤有机碳含量总体呈上升的趋势; 不同气候区域的土壤有机碳年均变幅为南亚热带气候区 > 过渡带 > 中亚热带气候区。有机碳年均变幅与初始有机碳含量的相关分析表明, 永春县果园土壤有机碳潜在储存能力估计值为 13.74~21.05 g kg⁻¹。按照 2010 年的土地利用方式、耕作措施、施肥水平和气候条件, 永春县果园土壤的固碳潜力为 64108.77 t。这些有助于认识和评价我国果园土壤碳汇能力和固碳潜力。

关键词: 亚热带; 永春县; 果园; 土壤; 固碳潜力

doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2015.04.010

Estimation of Soil Carbon Sequestration Potential of Orchard in Subtropical China: A Case of Yongchun Xian

WANG Yi-xiang, TIAN Na, WANG Cheng-ji, WENG Bo-qi*, HUANG Yi-bin*

(Institute of Agricultural Ecology, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fujian Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Red Soil Hilly Region, Fuzhou 350013, China)

Abstract: In order to understand the soil carbon sequestration potential in subtropical orchards, the changes in soil carbon storage in Yongchun Xian, Fujian, China were studied, and soil carbon sequestration potential was estimated under existing management condition. The results showed that soil organic carbon content in orchard of Yongchun generally rose from 1982 to 2010. The annual variation in soil organic carbon was in the order of south subtropical zone > transition zone > middle subtropical zone. Based on the correlation analysis between average relative annual increment and the initial value of soil organic carbon, the orchard soil organic carbon storage capacities of Yongchun Xian was estimated from 13.74 g kg⁻¹ to 21.05 g kg⁻¹. Under the conditions of land management and climate in 2010, the soil carbon sequestration potential in Yongchun orchards would be 64108.77 t. These could contribute to evaluation the potential of soil carbon sequestration in orchards of China.

Key words: Subtropical; Yongchun Xian; Orchard; Soil; Carbon sequestration potential

自 20 世纪 50 年代以来, 大气 CO₂ 浓度增加导致的全球气候变暖现象受到了普遍的关注。各国政府和科学家们都在积极寻求可以有效控制温室气体增加的措施。土壤是陆地生态系统中最大的碳库, 也是最活跃的部分。在人类耕种、施肥、灌溉

等活动的影响下, 农业土壤中碳库的质和量都在不断变化。这种变化不仅改变了土壤肥力, 而且对区域乃至全球环境造成重要影响^[1]。在农业应对气候变化的背景下, 准确评价现有传统经营方式下农业土壤有机碳的饱和水平及其固碳潜力, 可为制定相

收稿日期: 2014-07-28

接受日期: 2014-10-16

基金项目: 福建省科技厅公益项目(2014R1017-3); 国家科技支撑课题(2012BAD14B15, 2012BAD14B03)资助

作者简介: 王义祥(1978~), 男, 副研究员, 主要从事恢复生态与红壤保育研究。E-mail: sd_wolong@163.com。

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: wengboqi@163.com, ecohyb@163.com

应的 CO₂ 减排措施提供依据。

近年来,我国对土壤固碳潜力的研究备受关注,并在不同尺度上开展了较多的工作,为区域或全国尺度的土壤固碳潜力的合理评估提供了重要依据。韩冰等在搜集和整理全国典型农业长期定位实验站数据的基础上,通过自建经验公式估算了不同管理措施下我国农田土壤的固碳能力和潜力^[2]。程琨等通过对 299 个国家级耕地土壤监测点 20 余年的数据评价了我国农田表土有机碳含量变化情况和固碳潜力^[3]。覃章才等利用模型估算了河南省农田土壤固碳潜力^[4]。最近还报道了松嫩平原玉米带农田^[5]、下辽河平原耕地土壤^[6]、广东省翁源县表层土壤^[7]以及中国农田耕层土壤^[8-9]等不同尺度的有机碳水平的调查和统计,且多数结果表明我国农田有机碳呈总体增加态势。但这些研究主要是针对农用耕地,而果园的农作方式与耕地存在一定差异,目前我国关于果园土壤固碳潜力的研究还很薄弱。另外,当前预测陆地生态系统固碳潜力的方法有很多,但缺乏统一和标准的方法,不同研究

的结果存在很大的变异性,这限制了在区域尺度上对陆地生态系统固碳潜力的比较^[10]。本研究通过对永春县果园土壤有机碳现状的调查,并结合历史资料,分析 20 多年来永春县果园土壤有机碳的变化情况以及固碳潜力,为果园生态系统的固碳减排技术研究提供科学依据,为我国陆地生态系统的固碳潜力研究提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

永春县位于福建省东南部,北纬 25°13'15"~25°33'45",东经 117°40'55"~118°31'09",地处南亚热带和中亚热带过渡带,境内兼有 3 种气候类型:内半县属中亚热带区,俗称凉区,外半县属南亚热带区,俗称暖区,以及位于中亚热带和南亚热带间的过渡带。全年无霜期为 320 d,年均气温 20.4℃,1 月平均气温 12℃,7 月平均气温 28.2℃,极端最高温 39.3℃,年均降雨量 1708 mm,降水主要集中在

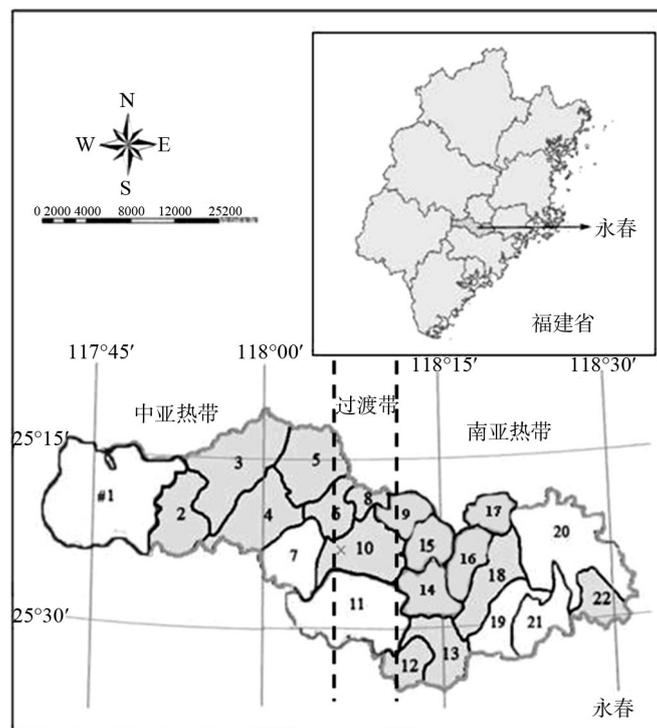


图 1 永春行政区划图。1: 一都镇; 2: 横口乡; 3: 下洋镇; 4: 坑仔口镇; 5: 桂洋镇; 6: 锦斗镇; 7: 玉斗镇; 8: 呈祥乡; 9: 苏坑镇; 10: 蓬壶镇; 11: 达埔镇; 12: 仙夹镇; 13: 岵山镇; 14: 石鼓镇; 15: 吾峰镇; 16: 五里街镇; 17: 介福乡; 18: 桃城镇; 19: 东平镇; 20: 湖洋镇; 21: 东关镇; 22: 外山乡。

Fig. 1 Maps of Yongchun Xian, Fujian Province, China. 1: Yidu; 2: Hengkou; 3: Xiayang; 4: Kengzikou; 5: Guiyang; 6: Jindou; 7: Yudou; 8: Chengxiang; 9: Sukeng; 10: Penghu; 11: Dapu; 12: Xianjia; 13: Hushan; 14: Shigu; 15: Wufeng; 16: Wulijie; 17: Jiefu; 18: Taocheng; 19: Dongping; 20: Huyang; 21: Dongguan; 22: Waishan.

在 3-9 月,占全年雨量的 86%^[11]。

根据 2005 年土地利用变更调查数据,永春县土地总面积为 $1.45 \times 10^5 \text{ hm}^2$,农用地 $1.28 \times 10^5 \text{ hm}^2$,占全县土地总面积的 87.95%;其中园地面积为 $2.07 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占农用地面积的 16.22%。园地中以果园为主,占园地面积的 68.56%。集中分布在湖洋镇、达埔镇、桃城镇、东关镇、玉斗镇等缓坡低丘(图 1)。

1.2 方法

土壤取样与测定 参照全国测土配方施肥项目中土壤采样单元的确定方法。采样前收集永春县土壤图、土地利用现状图、行政区划图等资料,根据土壤类型、土地利用等因素,将永春县划分为 1147 个采样单元,每个采样单元的土壤性状尽可能均匀一致。采样点集中在每个采样单元相应中心位置的典型地块,采样深度为 0~20 cm。全县果园土壤采样点 443 个(图 2)。野外样品采集时,利用 GPS 进行样点定位,多点混合采集约 1 kg 的土壤,将其装到自封袋中带回实验室,经风干过 0.25 mm 筛后备用,同时采用环刀法测定土壤容重。土壤有机碳测定采用重铬酸钾外加热法^[12]。

数据收集与处理 搜集了 1982 年永春县第二次土壤普查的果园土壤剖面数据,共 263 个果园土壤剖面,主要包括成土母质、土壤类型、地理位置、剖面描述、有机质含量、全氮含量、土壤容重等。由于本研究所采取的样本深度是 0~20 cm,而第二次土壤普查典型剖面数据的耕作层深度不一。为了与本研究采样深度一致,本文参考文雅等^[13]的方法对第二次土壤普查典型剖面土壤表层厚度不是

20 cm 的,用厚度加权法求出本土种 20 cm 厚度的平均有机质数据和平均容重。土壤有机碳质量分数采用有机质质量分数乘以 0.58 得到。

果园土壤的固碳潜力估算 目前确定土壤固碳潜力一般可采用 2 种方法:一种是将碳循环模型运行若干年后,用土壤碳趋于稳定时的值减去现有状态的值;另一种是找到土壤碳变化量为 0 时的土壤碳量减去现有状态的值^[14-15]。本研究采用后一种方法。从 1982 年和 2010 年果园土壤剖面数据中筛选出相同位置的果园剖面数据,利用公式(1)计算土壤有机碳年均相对变化幅度。建立有机碳年均变幅与有机碳初始含量(1982 年)的拟合关系曲线,找出有机碳年均变幅为 0 时所对应的土壤有机碳含量,即为果园土壤有机碳的饱和量^[5]。永春县果园土壤的固碳潜力为土壤有机碳达到饱和时的碳储量减去 2010 年的土壤碳储量,土壤总固碳潜力为土壤固碳潜力乘以该土壤类型的面积:

$$VQ(\%) = [\Sigma(SOC_{n+1} - SOC_n) / SOC_n] \times 100 / (n-1) \quad (1)$$
 式中:VQ 为土壤有机碳年平均相对增长率, SOC 为土壤有机碳含量, n 为第 n 年。

2 结果和分析

2.1 有机碳含量的变化

永春县 1982 年和 2010 年的果园土壤有机碳含量总体上呈正态分布,正态性检验达到显著水平(图 3, 4)。由表 1 可见,2010 年果园土壤有机碳含量为 11.99~33.58 g kg^{-1} ,平均为 19.36 g kg^{-1} ,变异系数为 16.63%。1982 年果园土壤有机碳含量为 6.17~18.85 g kg^{-1} ,平均为 10.29 g kg^{-1} ,变异系数为

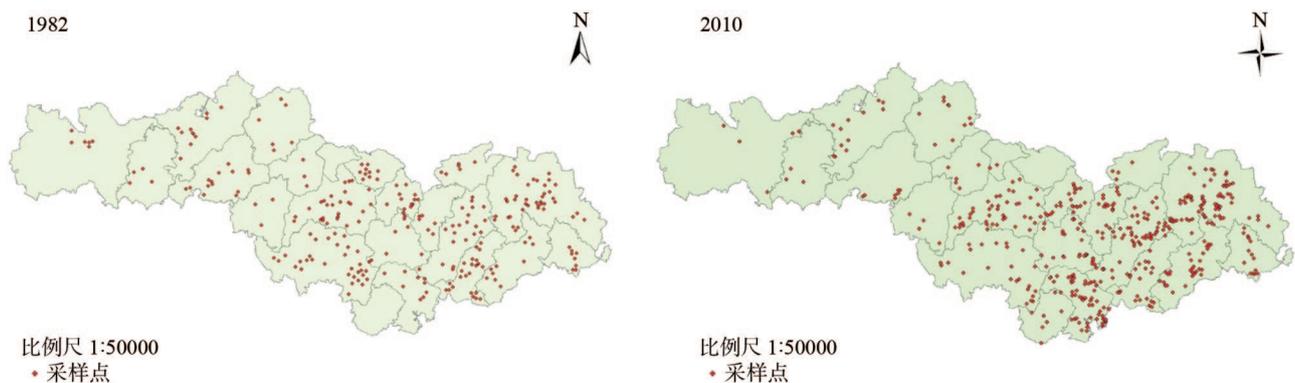


图 2 1982 和 2010 年研究区样点分布图

Fig. 2 Spatial distribution of sample soil profiles in 1982 and 2010

表 1 1982 和 2010 年土壤的有机碳含量

Table 1 Soil organic carbon contents in different years

年份 Year	最小值 Min (g kg ⁻¹)	最大值 Max (g kg ⁻¹)	极差 Range (g kg ⁻¹)	平均值 Mean (g kg ⁻¹)	标准差 Standard deviation	变异系数 (%) Coefficient of variation
1982	6.17	18.85	12.68	10.29	3.29	31.97
2010	11.99	33.58	21.59	19.36	3.22	16.63

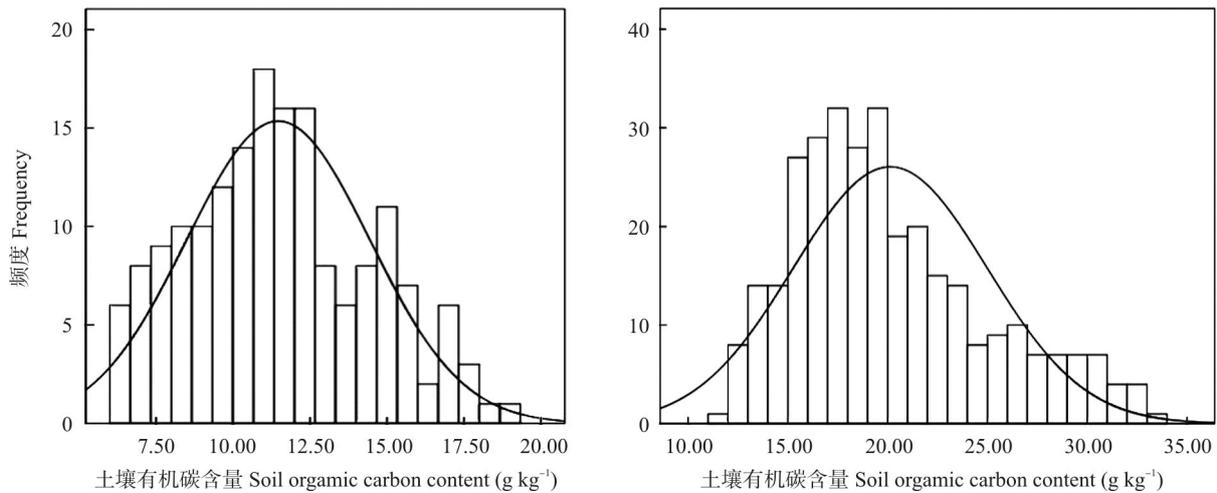


图 3 1982 和 2010 年果园土壤有机碳含量频度分布

Fig. 3 Frequency distribution of SOC content in 1982 and 2010

表 2 不同土壤类型果园 0~20 cm 土壤有机碳含量(g kg⁻¹)

Table 2 SOC (g kg⁻¹) in different soil types at depth of 0–20 cm

类型 Soil type	年份 Year		年均变幅 (%) Annual mean variation
	1982	2010	
红壤 Red soil	10.45±2.13	19.55±2.74	32.5
砖红壤性红壤 Lateritic red soil	9.33±1.30	18.10±1.20	31.3
紫色土 Purplish soil	9.22±0.24	16.51±0.18	26.1
水稻土 Paddy soil	9.98±2.37	18.98±2.73	32.1

31.97%。相比 1982 年，2010 年的土壤有机碳含量变幅较大。从不同土壤类型来看(表 2)，以红壤的平均有机碳含量较高，为 19.55 g kg⁻¹，其次是水稻土、砖红壤性红壤，以紫色土的最低。从年均变幅来看，红壤的有机碳含量较大，为 32.5%，分别比水稻土、砖红壤性红壤和紫色土高出 1.25%、3.84% 和 24.52%。

2.2 不同气候区域的有机碳含量变化

永春县地处南亚热带和中亚热带的过渡带，境内兼有 3 种不同气候类型。故此本研究将永春县划分为中热带气候区(包括 8 个乡镇)、南亚热带气

候区(包括 11 个乡镇)和过渡带(包括 3 个乡镇)3 种气候类型区。由表 3 可以看出，由于气候条件的不同，永春县果园土壤有机碳的变化存在一定差异。中亚热带气候区和过渡带果园的土壤有机碳含量相差不大，分别比南亚热带气候区高 6.78% 和 16.63%。南亚热带气候区的果园土壤有机碳年均变幅分别比中亚热带气候区和过渡带高 22.87% 和 14.03%。Ogle 等^[16]分析了不同气候带土壤有机碳含量的变化，指出有机碳含量变化受气候的影响较大，认为湿热地区有利于有机碳的积累。由表 3 可以看出，果园土壤有机碳的年均变幅为南亚热带气候区 > 过渡带 > 中亚热带气候区。

2.3 土壤有机碳密度的变化

由表 4 可知, 2010 年果园土壤有机碳密度以红壤最高, 为 42.00 t hm^{-2} , 而 1982 年以紫色土最高, 为 22.64 t hm^{-2} 。从不同土壤类型土壤有机碳密度的年均变幅来看, 砖红壤性红壤的有机碳密度最高, 为 9.11%, 紫色土的最低, 为 7.04%。2010 年果园土壤的有机碳密度比 1982 年高 88.18%。

2.4 果园土壤的固碳潜力

将不同土壤类型的有机碳年均变幅与土壤有机碳初始含量进行回归分析, 获得回归方程(表 5)。当有机碳年均变幅为 0 时, 即为土壤有机碳的饱和量。由表 6 看出, 以红壤的有机碳饱和量最高, 为 21.05 g kg^{-1} , 其次是水稻土, 紫色土的最低, 分别比红壤、砖红壤性红壤和水稻土低 34.73%、29.50%

表 3 不同地理区域果园土壤有机碳含量(g kg^{-1})的变化

Table 3 Changes in SOC (g kg^{-1}) of different geographical regions

区域 Geographical region	年份 Year		年均变幅 (%) Annual mean variation
	1982	2010	
中亚热带气候区 Middle subtropical climate zone	11.255±1.670	20.166±3.179	2.907±1.141
过渡带 Transition zone	11.260±1.670	20.165±3.183	3.132±1.262
南亚热带气候区 South subtropical climate zone	9.654±1.614	18.885±2.247	3.572±1.239

表 4 不同土壤类型果园 0~20 cm 土壤有机碳密度(t hm^{-2})的变化

Table 4 Changes in soil organic density (t hm^{-2}) in different soil types at depth of 0–20 cm

土壤类型 Soil type	年份 Year		年均变幅 (%) Annual mean variation
	1982	2010	
红壤 Red soil	22.05±4.86	42.00±5.34	7.21
砖红壤性红壤 Lateritic red soil	18.12±1.35	39.38±2.72	9.11
紫色土 Purplish soil	22.64±5.62	37.54±9.43	7.04
水稻土 Paddy soil	21.87±4.56	41.07±4.53	7.08
平均 Mean	22.17±3.40	41.72±5.37	7.33

表 5 有机碳年均变幅(y)与初始含量(x)的回归方程

Table 5 Regression equation between annual average increment (y) and initial content (x) of soil organic carbon

类型 Type	拟合方程 Equation	R^2
红壤 Red soil	$y = -4.562\ln(x) + 13.900$	0.535*
砖红壤性红壤 Lateritic red soil	$y = -4.265\ln(x) + 13.498$	0.531*
紫色土 Purplish soil	$y = -7.087\ln(x) + 18.568$	0.884*
水稻土 Paddy soil	$y = -4.540\ln(x) + 13.776$	0.586*

表 6 永春县果园土壤固碳潜力(土深 0~20 cm)

Table 6 Soil carbon sequestration potentials at depth of 0–20 cm in Yongchun orchards

土壤类型 Soil type	面积 Area (hm^2)	饱和度 Saturation content (g kg^{-1})	固碳储量 Carbon storage (t hm^{-2})	固碳潜力 Carbon sequestration (t hm^{-2})	总固碳潜力 Total carbon sequestration potential (t)
红壤 Red soil	11519	21.05	42.00	3.37	38842.07
砖红壤性红壤 Lateritic red soil	524	19.49	39.38	3.22	1689.38
紫色土 Purplish soil	4	13.74	37.54	-6.31	-25.22
水稻土 Paddy soil	5802	20.78	41.07	4.07	23602.54
永春 Yongchun	17849	/	41.26	3.59	64108.77

和 33.88%。不同土壤类型果园土壤的固碳潜力有一定的差异,水稻土的固碳潜力最高,分别是红壤和砖红壤性红壤的 1.24 倍和 1.30 倍。紫色土的固碳潜力为 -6.31 t hm^{-2} ,意味着紫色土应释放出一定的碳素才能达到相对稳定的平衡状态。从总固碳潜力来看,以红壤的最高,其次是水稻土。通过估算,在 2010 年的土地利用方式、耕作措施、施肥水平和气候条件下,永春县果园土壤的固碳潜力为 64108.77 t。

3 讨论

土壤有机碳储量的提高是降低大气浓度、缓解温室效应的重要途径。因此,探明土壤有机碳固存的潜力及增加土壤有机碳库储量的途径,对于缓解目前全球变暖问题具有重要的意义。本研究结果表明,相比 1982 年,2010 年永春县果园的土壤有机碳含量、土壤有机碳密度分别增加了 88.44% 和 88.18%。永春县果园土壤的有机碳密度虽然在增加,但又存在极大的不确定性。这些不确定性主要来自对土地利用变化的判别、果业管理的影响、深层土壤有机碳变化的估算、模型的有效性、尺度转换和输入参数的不确定性等。据统计,1982 年永春县的果园面积为 $2.16 \times 10^4 \text{ hm}^2$,2010 年增加到 $1.78 \times 10^5 \text{ hm}^2$,28 年来永春县果园土壤面积增加了 7.2 倍,而且新增果园多数开垦于一些次生乔木或灌丛或旱地,复杂的土地利用变化是引起估算结果不确定性的重要因素,这也是今后需进一步深入研究的方向。韩冰等利用 DNDC 模型预测我国农田生态系统的土壤碳平衡值为 $4.8 \sim 51.4 \text{ g kg}^{-1}$,其中福建省为 14.8 g kg^{-1} ^[2]。根据计算结果,永春县果园土壤的有机碳饱和度约为 $13.74 \sim 21.05 \text{ g kg}^{-1}$,介于韩冰等的预测值范围内。West 等研究表明美国农田土壤的有机碳饱和度为 25 g kg^{-1} ^[14],程琨等报道我国旱地和水田的有机碳潜在储存能力估计值分别为 17.2 和 27.7 g kg^{-1} ^[3]。永春县果园土壤较美国农田和我国水田的固碳容量要低,但红壤、砖红壤性红壤和水稻土类型的果园土壤的固碳容量高于我国旱作农田。本研究估算出永春县果园土壤总的固碳潜力为 64108.77 t,显示出具有较大碳汇潜力。另外,本研究对永春县果园土壤固碳现状和潜力的估算只是针对某一时段的土壤有机碳的变化,没有考虑环境因素对土壤固碳潜力的影响,而

实际上气候和土壤因素会影响土壤的呼吸作用和有机质分解作用,并影响土壤有机碳动态和固碳潜力,从而导致潜力估算存在一定的不确定性。

已有的研究结果表明,土壤对碳的固持不是无限度增加的,而是存在一个最大的保持容量,即饱和量^[17]。初始有机碳含量愈远离饱和量,碳的累积速率则愈快。而随着有机碳含量增长,土壤对碳的保持将变得愈加困难^[18]。同时土壤固碳能力还受经营、土壤特性和自然环境的共同影响^[19]。Purakayastha 等研究指出,不同类型的土壤都有其自身特有的固碳能力,其对外源有机物质输入响应速率自然也存在差异^[20]。本研究结果表明,红壤、砖红壤性红壤和水稻土的有机碳含量、年均变幅以及有机碳的饱和度均显著高于紫色土,这与土壤类型的成土因素有密切的关系。程琨等的研究表明,水稻土、红壤、黑土的初始和终了的有机碳含量均显著高于潮土、褐土、紫色土^[3],这与本研究结果基本一致。另外,气候因子通过植被而影响进入土壤的有机物质数量,同时又强烈地影响着土壤有机质的分解与形成。吴金水等^[21]采用计算机模拟方法对中国亚热带和黄土高原地区耕作土壤有机碳状况进行研究,结果表明亚热带地区耕作土壤有机碳积累量低于北温带地区,而黄土高原地区却略高于北温带地区,揭示不同气候带的土壤有机碳对气候变化的响应存在差异。王淑平等的研究表明,降水量和温度对土壤有机碳的积累具有正交互作用,土壤有机碳是降水量、温度及其它影响因子综合作用的结果^[22]。本研究结果表明,南亚热带气候区内土壤有机碳平均碳含量低于过渡带和中亚热带气候区,但南亚热带气候区果园土壤有机碳年均变幅大于过渡带和中亚热带气候区。

参考文献

- [1] Li C S. Loss of soil carbon threatens Chinese agriculture: A comparison on agroecosystem carbon pool in China and the US [J]. *Quat Sci*, 2000, 20(4): 345-350.
李长生. 土壤碳储量减少: 中国农业之隐患——中美农业生态系统碳循环对比研究 [J]. *第四纪研究*, 2000, 20(4): 345-350.
- [2] Han B, Wang X K, Lu F, et al. Soil carbon sequestration and its potential by cropland ecosystems in China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, 28(2): 612-619.
韩冰, 王效科, 逯非, 等. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力 [J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 612-619.
- [3] Cheng K, Pan G X, Tian Y G, et al. Changes in topsoil organic

- carbon of China's cropland evidenced from the national soil monitoring network [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2009, 28(12): 2476–2481.
- 程琨, 潘根兴, 田有国, 等. 中国农田表土有机碳含量变化特征——基于国家耕地土壤监测数据 [J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2476–2481.
- [4] Qin Z C, Huang Y. Quantification of soil organic carbon sequestration potential: A model approach [J]. *Sci China: Life Sci*, 2010, 53(7): 868–884.
- 覃章才, 黄耀. 基于模型的农田土壤固碳潜力估算 [J]. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40(7): 658–676.
- [5] Zhang Z D, Yang C H. Variations in soil organic carbon storage and the potential for carbon sequestration by topsoil over 25 years [J]. *Resour Sci*, 2013, 35(4): 809–815.
- 张正栋, 杨春红. 近25 a珠江北江上游土壤表层有机碳储量变化及固碳潜力估算——以广东省翁源县为例 [J]. *资源科学*, 2013, 35(4): 809–815.
- [6] Ren C Y, Zhang C H, Wang Z M, et al. Organic carbon storage and sequestration potential in cropland surface soils of Songnen plain maize belt [J]. *J Nat Resour*, 2013, 28(4): 596–607.
- 任春颖, 张春华, 王宗明, 等. 松嫩平原玉米带农田表层土壤有机碳储量和固碳潜力研究 [J]. *自然资源学报*, 2013, 28(4): 596–607.
- [7] Song D. Evolution of soil organic carbon and evaluation of carbon sequestration potential in cultivated land of lower reaches of Liaohe River Plain [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2013: 86–89.
- 宋丹. 下辽河平原耕地土壤有机碳时空变化及固碳潜力估算 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2013: 86–89.
- [8] Schroeder P. Carbon storage benefits of agroforestry systems [J]. *Agrofor Syst*, 1994, 27(1): 89–97.
- [9] Wu L Z, Cai Z C. Estimation of the change of topsoil organic carbon of croplands in China based on long-term experimental data [J]. *Ecol Environ*, 2007, 16(6): 1768–1774.
- 吴乐知, 蔡祖聪. 基于长期试验资料对中国农田表土有机碳含量变化的估算 [J]. *生态环境*, 2007, 16(6): 1768–1774.
- [10] Xu X W, Pan G X, Wang Y L, et al. Research of changing characteristics and control factors of farmland topsoil organic carbon in China [J]. *Geogr Res*, 2009, 28(3): 601–612.
- 许信旺, 潘根兴, 汪艳林, 等. 中国农田耕层土壤有机碳变化特征及控制因素 [J]. *地理研究*, 2009, 28(3): 601–612.
- [11] Tian N. Soil organic carbon dynamics in regional orchards based on GIS: A case study of Yongchun County [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2011: 14–15.
- 田娜. 基于GIS的区域果园土壤有机碳库变化研究——以永春县为例 [D]. 福州: 福建农林大学, 2011: 14–15.
- [12] Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 30–34.
- 鲍士旦. *土壤农化分析* [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30–34.
- [13] Wen Y, Deng N R, Liu X N, et al. Variations of soil organic carbon of cropland topsoil in mountain area of northern Guangdong over 25 years [J]. *Ecol Environ Sci*, 2011, 20(8): 1247–1252.
- 文雅, 邓南荣, 刘晓南, 等. 粤北山区近25年来耕地表层土壤有机碳变化分析 [J]. *生态环境学报*, 2011, 20(8): 1247–1252.
- [14] West T O, Six J. Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity [J]. *Clim Change*, 2007, 80(1/2): 25–41.
- [15] Han B, Wang X K, Ouyang Z Y. Saturation levels and carbon sequestration potentials of soil carbon pools in farmland ecosystems of China [J]. *Rural Eco-Environ*, 2005, 21(4): 6–11.
- 韩冰, 王效科, 欧阳志云. 中国农田生态系统土壤碳库的饱和水平及其固碳潜力 [J]. *农村生态环境*, 2005, 21(4): 6–11.
- [16] Ogle S M, Breidt F J, Paustian K. Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions [J]. *Biogeochemistry*, 2005, 72(1): 87–121.
- [17] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils [J]. *Plant Soil*, 2002, 241(2): 155–176.
- [18] Campbell C A, Bowren K E, Schnitzer M, et al. Effect of crop rotations and fertilization on soil biochemical properties in a thick Black Chernozem [J]. *Can J Soil Sci*, 1991, 71(3): 377–387.
- [19] Smith P. An overview of the permanence of soil organic carbon stocks: Influence of direct human-induced, indirect and natural effects [J]. *Eur J Soil Sci*, 2005, 56(5): 673–680.
- [20] Purakayastha T J, Rudrappa L, Singh D, et al. Long-term impact of fertilizers on soil organic carbon pools and sequestration rates in maize-wheat-cowpea cropping system [J]. *Geoderma*, 2008, 144(1/2): 370–378.
- [21] Wu J S, Tong C L, Liu S L. Responses of soil organic carbon to global climate changes in cultivated soils in the subtropical and the loess plateau regions [J]. *Adv Eart Sci*, 2004, 19(1): 131–137.
- 吴金水, 童成立, 刘守龙. 亚热带和黄土高原区耕作土壤有机碳对全球气候变化的响应 [J]. *地球科学进展*, 2004, 19(1): 131–137.
- [22] Wang S P, Zhou G S, Lü Y C, et al. Distribution of soil carbon, nitrogen and phosphorus along northeast China transect (NECT) and their relationships with climatic factors [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2002, 26(5): 513–517.
- 王淑平, 周广胜, 吕育财, 等. 中国东北样带(NECT)土壤碳、氮、磷的梯度分布及其与气候因子的关系 [J]. *植物生态学报*, 2002, 26(5): 513–517.