

西双版纳不同林茶复合生态系统碳储量*

萧自位^{1,2} 王丽娟^{1,2} 毛加梅³ 朱兴正³ 王小李⁴ 郑丽⁴ 唐建维^{1**}

(¹ 中国科学院西双版纳热带植物园热带植物资源开放实验室, 云南勐腊 666303; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049;

³ 云南省农业科学院茶叶研究所, 云南勐海 666201; ⁴ 云南省科学技术情报研究院, 昆明 650051)

摘要 为了探明上层遮荫树种对茶园碳储量的影响, 根据所建立的茶园上层树种及茶树的生物量模型估算了不同林茶复合生态系统的生物量, 结合植物、土壤样品碳含量的实测值, 对西双版纳州勐海县 4 种茶园组合模式及纯茶园的碳储量进行了分析。结果表明: 樟树 + 茶、樟杉 + 茶 2 种组合模式的碳储量分别比纯茶园碳储量 ($223.442 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 高 22.701 、 $3.871 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 而 4 种遮荫树种 + 茶、6 种遮荫树种 + 茶 2 种组合模式的碳储量则分别比纯茶园低 10.828 、 $5.717 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。各茶园总碳储量以土壤的碳储量所占比例最大, 达 $91.8\% \sim 96.0\%$ 。随上层树种数量的增加而降低, 并在 4 种遮荫树种 + 茶组合模式达到最低; 而植物体的碳储量仅占总碳储量的 $4.0\% \sim 8.2\%$, 呈现随上层树种数量增加而先增加后降低的趋势。表明西双版纳的人工茶园复合生态系统具有很强的碳储存能力。

关键词 碳储量; 林茶复合生态系统; 西双版纳

中图分类号 S571.1 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2012)7-1617-09

Carbon storage of different tree-tea agroforestry systems in Xishuangbanna, Yunnan Province of Southwest China. XIAO Zi-wei^{1,2}, WANG Li-juan^{1,2}, MAO Jia-mei³, ZHU Xing-zheng³, WANG Xiao-li⁴, ZHENG Li⁴, TANG Jian-wei^{1**} (¹Laboratory of Tropical Plant Resource Science, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla 666303, Yunnan, China; ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Tea Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Menghai 666201, Yunnan, China; ⁴Yunnan Academy of Scientific and Technical Information, Kunming 650051, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(7): 1617-1625.

Abstract: In order to understand the effects of shade tree species on the carbon storage of different tree-tea agroforestry systems, three plots with a size of $20 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ were established in each of five different tea gardens, i. e., a monoculture tea garden and four tea gardens with one, two, four, and six shade tree species, respectively in Menghai County, Xishuangbanna. Biomass regression models were constructed by using the DBH of shade trees and the BD (basal diameter) of tea shrubs, soil samples were taken from five layers ($0-20$, $20-40$, $40-60$, $60-80$, and $80-100 \text{ cm}$) in each plot, and the carbon storage was then estimated, based on the carbon contents in different organs of trees and tea shrubs and in soils. The total carbon storage of monoculture tea garden ($223.442 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) was 22.701 and $3.871 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ lower than that of the *Cinnamomum pathenoxylum*-tea and *Cinnamomum pathenoxylum* + *Cunninghamia lanceolata*-tea gardens, but 10.828 and $5.717 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ higher than that of the tea gardens with four and six shade tree species, respectively. Soil carbon storage accounted for $91.8\% - 96.0\%$ of the total carbon storage, being the lowest in the tea garden with four shade tree species. The carbon storage of plants only occupied $4.0\% - 8.2\%$ of the total carbon storage, and increased from the tea gardens with one to four shade tree species but decreased sharply in the tea garden with six shade tree species. Our results suggested that the tree-tea agroforestry systems in Xishuangbanna had a strong capacity of carbon sequestration.

Key words: carbon storage; tree-tea agroforestry system; Xishuangbanna.

* 中国科学院农业项目办公室项目(KSCX2-YW-N-48-06)和西双版纳州科技局项目(YX200902)资助。

** 通讯作者 E-mail: tangjw@xtbg.org.cn

收稿日期: 2011-02-05 接受日期: 2012-04-09

茶树 (*Camellia sinensis*) 起源于中国云贵高原 (宛晓春 2006), 为多年生常绿灌木, 分布在全世界热带及亚热带地区 (Li *et al.* 2011)。茶叶作为热带和亚热带重要的经济作物, 茶园面积发展十分迅猛。据 2010 年《茶叶蓝皮书》统计, 2009 年我国茶园面积已达 186 万 hm^2 , 其中云南省茶园总面积 36.77 万 hm^2 。在过去的 50 年内, 我国的茶园面积增加了 $1.3 \times 10^6 \text{hm}^2$ (Li *et al.* 2011)。然而, 我国大部分茶区的茶园建设主要以纯茶园为主, 这使得茶园的生态环境趋于简单化, 从而导致了茶园水土流失严重、土壤肥力衰退、病虫害多发、产量和品质低下等问题 (吕毅 2002; 余文权和张翠香 2009)。为了解决这些问题, 林茶复合生态系统作为一种可持续性的复合生态系统受到了人们的广泛关注。它不仅可以利用系统内不同物种间的生态互补功能, 提高养分的吸收利用效率、减缓水土流失、维持局部小气候稳定, 而且还能提高系统内的生物多样性、充分利用其水、肥、光、热等资源, 提高系统的生产力、增加碳储量 (Schroeder, 1994; 孟平等, 2004; McNeely & Schroth 2006; 刘兴宇和曾德慧, 2007; Roshetko *et al.* 2007)。近年来, 国内外的众多学者已对林茶复合生态系统进行了多方面的研究, 但主要集中于茶叶产量、品质、土壤肥力、水土保持、茶园养分循环和生态效应等方面 (田永辉和吴德明 2001; de Costa & Atapattu 2001; de Costa & Surenthran 2005; 巩雪峰等 2008; Kamau *et al.* 2008a, 2008b)。作为陆地生态系统的碳库和区域碳储量的重要组成部分, 我国茶园的总碳储量约为 316.2 Tg (Li *et al.*, 2011), 而且其碳储量随着茶园年龄的增加而增加 (Kamau *et al.* 2008b; Li *et al.* 2011), 显示了茶园在固碳增汇方面的功能和潜力。此外, 对不同气候带的农林复合生态系统的固碳量研究发现, 干旱、半湿润、湿润和温带地区农林复合生态系统所固定的碳量分别为 9、21、50、63 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (Montagnini & Nair 2004), 表明不同区域的农林复合生态系统在对大气二氧化碳的吸收及减缓全球气候变化方面发挥着重要作用 (Kürsten & Burschel 1993; Montagnini & Nair 2004; Sharrow & Ismail 2004; Oelbermann *et al.* 2006; Nair *et al.* 2009)。但迄今为止, 对具有同样重要作用的林茶复合生态系统的碳储量及固碳能力等方面的研究尚未见报道。

为了阐明不同林茶复合生态系统的碳储量及其分配特征, 以及不同茶园组合模式中因树种组成和

数量变化对其碳储量的影响, 本研究以纯茶园为对照, 试对不同遮荫树种组成的林茶复合生态系统的碳储量及其分配特征进行分析, 并探索随着上层遮荫树种数量的增加其碳储量的动态变化规律, 以期为进一步掌握不同林茶复合生态系统类型的碳汇功能提供基础数据, 同时也为区域碳储量的估算以及茶园的生态建设和地方生态恢复提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究地点位于西双版纳傣族自治州勐海县境内, 该地区属西南季风气候。一年分为旱季、雨季和雾凉季 3 季, 3—5 月为旱季, 高温少雨; 6—10 月为雨季, 气候湿热, 此时期集中了全年降水的 85%; 11 月—次年 2 月为雾凉季, 少雨多雾, 早晚空气湿度大。土壤类型为赤红壤, 母岩为白垩系砂岩, pH 值在 5.0 左右。

样地主要分布在海拔 1170 ~ 1200 m 的山地丘陵。茶园开垦种植前均为年龄基本相同的次生常绿阔叶林。所种植的茶树品种为佛香 5 号, 其种植规格为双行单株, 行距在 1 ~ 1.5 m, 丛距约为 0.3 m。除刺栲 (*Castanopsis hystrix*)、山苍子 (*Litsea cubeba*) 为茶园开垦后自然萌生生长外, 茶树和其他上层遮荫树种于 2005 年统一种植。5 种不同的茶园类型分别为: 纯茶园, 樟树 (*Cinnamomum pathenoxylum*) + 茶, 樟树-杉 (*Cunninghamia lanceolata*) + 茶, 4 种遮荫树种 (樟树、杉木、刺栲、山苍子) + 茶, 6 种遮荫树种 (樟树、杉木、山苍子、刺栲、杨梅 (*Myrica rubra*)、板栗 (*Castanea mollissima*)) + 茶。各样地的基本特征见表 1。

1.2 研究方法

1.2.1 样地与调查方法 在立地条件、管理方式基本一致的上述 5 种不同茶园类型中分别建立 3 块样地。每块样地面积为 20 m × 25 m。对样地内上层遮荫树种进行每木调查, 测量并记录植株的名称、基径、胸径 (1.3 m)、冠幅和高度等, 并挂牌标号; 茶树测量基径和高度, 并用红油漆在所测的基径或胸径处做标记。

1.2.2 生物量的测定 根据各样地的调查数据, 分别选取不同径级的茶树 18 株, 樟树 12 株, 杉木和山苍子各 10 株作为样木, 采用收获法进行生物量的测定。对伐倒的样木, 地上部分分别测定树干、枝、皮、叶的鲜重; 地下部分的根系全部挖出, 分别称重, 同

表 1 各茶园类型样地的基本特征

Table 1 Characteristics of plots and shade trees in monoculture tea garden and four different integral tree-tea ecosystems

种植模式	样地号	地理位置		海拔 (m)	坡向 (°)	坡度 (°)	坡位	高度 (m)	胸径 (cm)	冠幅 (m × m)	密度 (tress · hm ⁻²)
		N	E								
纯茶园	I-1	21°58'663"	100°25'745"	1136	NE10	5	下	-	-	-	-
	I-2	21°58'290"	100°25'093"	1219	NE10	17	上	-	-	-	-
	I-3	21°58'302"	100°25'136"	1213	NE10	15	下	-	-	-	-
樟树 + 茶	II-1	21°58'455"	100°25'723"	1173	NE10	5	下	3.830	8.680	3.28 × 3.36	200
	II-2	21°58'340"	100°25'226"	1216	NE10	7	上	4.142	9.103	3.18 × 3.24	240
	II-3	21°58'320"	100°25'171"	1214	NE10	7	上	4.293	8.951	3.64 × 3.54	280
樟-杉 + 茶	III-1	21°58'415"	100°25'236"	1193	NE10	10	中	5.313	10.987	3.70 × 3.70	300
	III-2	21°58'443"	100°25'257"	1193	NE10	10	中	4.762	10.804	3.48 × 3.31	260
	III-3	21°58'542"	100°25'720"	1154	NE10	5	下	5.362	12.004	3.73 × 3.58	260
4 种遮荫树种 + 茶	IV-1	21°58'495"	100°25'624"	1195	NW10	10	中	5.805	14.005	3.38 × 3.39	400
	IV-2	21°58'530"	100°25'659"	1183	NW10	5	上	5.564	10.914	2.98 × 3.43	280
	IV-3	21°58'321"	100°25'278"	1206	NE20	10	下	4.393	7.056	2.67 × 2.66	280
6 种遮荫树种 + 茶	V-1	21°58'421"	100°25'256"	1193	NE10	10	中	4.592	9.185	3.52 × 3.49	460
	V-2	21°58'502"	100°25'351"	1190	EW15	6	下	4.606	9.752	3.73 × 3.60	320
	V-3	21°58'525"	100°25'364"	1194	EW15	6	下	5.147	10.594	3.21 × 3.02	300

时取 2 份样品带回实验室,一份样品用作养分元素含量分析之用;另一份样品用于烘干以测定各器官的含水率及干重(干、枝、皮、根在 105 °C、叶在 75 °C 下烘干至恒重称量);以建立不同树种各器官生物量及总生物量与基径(BD)或胸径(D)相关的生物量回归模型。对于样地内个体数量不多的其他树种根据其生物生态学特征的相似性,采用已建立的西双版纳季风常绿阔叶林成熟林的生物量优化回归模型进行计算(李冬 2006)。

1.2.3 样品采集与碳含量测定 采集各树种不同器官的样品,经烘干、粉碎、过筛后用于碳含量测定。同时在各样地的上、中、下 3 个坡位分别挖取 3 个 1 m 深的土壤剖面,按 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80 和 80 ~ 100 cm 分层采集土壤样品,把同一层次土壤按相同重量比例混合,带回实验室于室内自然风干、粉碎、过筛待测。同时用环刀采集原状土,带回实验室测定土壤容重。本研究因受试验条件所限,未对凋落物进行收集。

植物、土壤样品中碳素含量均采用 C-N 分析仪测定。

1.2.4 碳储量的估算 不同茶园类型各物种的碳储量由各自的碳含量与其生物量相乘而得。土壤的碳储量则为 5 层碳储量之和,每一层的碳储量为该层的土壤容重、厚度及碳含量的乘积。

1.3 数据处理

数据使用 SAS 8.1 进行统计分析,采用单因素方差分析进行显著性检验,显著性水平设定为 α = 0.05。采用 Original 8 软件作图,运用 Microsoft Excel 进行数据处理。

2 结果与分析

2.1 上层遮荫树种和茶树生物量回归模型的建立

许多研究表明:乔木生物量与其胸径(D)之间存在着很好的相关关系,而在进行生物量估算时高度(H)并不是一个很好的参数(Brown *et al.*, 1989; Chave *et al.*, 2001-2005)。而以幂函数 $W = aD^b$ 形式建立的生物量回归方程普遍地用于生物量研究(党承林和吴兆录, 1992; 冯志立等, 1998; 吕晓涛等, 2007; 唐建维等, 2009)。本研究根据所测定的茶树和各树种样木的生物量数据,以基径(BD)和胸径(D)作自变量,建立茶树和不同树种各器官及总生物量的幂函数回归模型(表 2),以此作为估算不同茶园类型相应树种的生物量。经统计学检验乔木和灌木的各器官生物量和总生物量回归模型的相关系数都达极显著水平($P < 0.01$)。

2.2 不同茶园类型的生物量

根据各茶园类型的样地调查数据,运用表 2 的相应生物量模型直接推算出各样地所有活体植物的生物量。结果表明,纯茶园的生物量最低,仅为 18.309 t · hm⁻²(表 3)。而其他 4 种林茶组合模式的生物量则随着上层遮荫树种数量的增加而增加,从樟树 + 茶组合模式的 22.026 t · hm⁻²增长到 4 种遮荫树种 + 茶组合模式的最大值 34.687 t · hm⁻²;此后 6 种遮荫树种 + 茶组合模式的生物量则有所下降,为 25.755 t · hm⁻²。4 个茶园组合模式中茶树的生物量均低于纯茶园,并随着上层遮荫树种数量的增加而逐渐下降(表 3)。5 种不同茶园类型活体植物的生物量大小顺序为:4 种遮荫树种 + 茶 > 6 种

表 2 上层主要遮荫树种和茶树生物量回归模型
Table 2 Biomass regression models for major shade trees and tea shrub

树种	直径 (样本数)	器官	回归方程	相关系数
杉木	1 ≤ D ≤ 21 (n = 10)	叶	$W_L = 0.0327D^{2.1229}$	0.984***
		枝	$W_B = 0.0103D^{2.2504}$	0.973***
		茎	$W_S = 0.0524D^{2.0795}$	0.980***
		根	$W_R = 0.0361D^{2.0158}$	0.984***
		皮	$W_K = 0.0143D^{1.8722}$	0.996***
樟树	3 ≤ D ≤ 33 (n = 12)	总	$W_T = 0.1456D^{2.0817}$	0.987***
		叶	$W_L = 0.0231D^{2.0291}$	0.932***
		枝	$W_B = 0.0225D^{2.4836}$	0.967***
		茎	$W_S = 0.2970D^{1.3286}$	0.903***
		根	$W_R = 0.0450D^{1.9674}$	0.973***
山苍子	1 ≤ D ≤ 17 (n = 10)	总	$W_T = 0.2191D^{1.9916}$	0.981***
		叶	$W_L = 0.0498D^{1.1896}$	0.930***
		枝	$W_B = 0.0171D^{2.5165}$	0.987***
		茎	$W_S = 0.0776D^{2.1410}$	0.991***
		根	$W_R = 0.0359D^{2.0937}$	0.982***
茶树	1 ≤ BD ≤ 7 (n = 18)	果	$W_F = 0.0015D^{2.5968}$	0.901***
		总	$W_T = 0.1669D^{2.1346}$	0.996***
		叶	$W_L = 0.0058(BD)^{1.9109}$ $W_B = 0.0049$	0.730**
		枝	$(BD)^{2.7177}$	0.897***
		茎	$W_S = 0.0098(BD)^{2.7255}$ $W_R = 0.0291$	0.957***
根	$(BD)^{1.8100}$	0.758***		
总	$W_T = 0.0438(BD)^{2.3645}$	0.917***		

*** P < 0.001, ** P < 0.01, W(kg): 千克; D(cm): 1.3 处胸径; BD(cm): 基径。

遮荫树种 + 茶 > 樟树-杉 + 茶 > 樟树 + 茶 > 纯茶园。

在 4 种林茶组合模式的生物量组成中,上层遮荫树种的生物量占其总生物量的比例以 4 种遮荫树种 + 茶组合模式最高,是樟树 + 茶组合模式的 1.97 倍;其次是 6 种遮荫树种 + 茶和樟树-杉 + 茶 2 种组合模式,分别比 4 种遮荫树种 + 茶组合模式低 3.7% 和 11.4%;樟树 + 茶组合模式最低,仅占 28.8%。而茶树生物量所占的比例则随着上层遮荫树种数量的增加而逐渐减少(表 3)。

表 3 不同茶园类型的生物量(t · hm⁻²)
Table 3 Biomass and its components in monoculture tea garden and four different integral tree-tea ecosystems

种植模式	茶树		遮荫树种		合计
	生物量	%	生物量	%	
纯茶园	18.309 (0.108)	-	-	-	18.309 (0.108)
樟树 + 茶	15.676 (3.707)	71.2	6.350 (1.150)	28.8	22.026 (2.848)
樟-杉 + 茶	13.741 (0.934)	54.3	11.550 (0.810)	45.7	25.292 (1.600)
4 种遮荫树种 + 茶	14.892 (5.117)	42.9	19.794 (13.374)	57.1	34.6 (9.14)
6 种遮荫树种 + 茶	12.013 (1.691)	46.6	13.742 (2.298)	53.4	25.755 (3.923)

括弧内为标准差,“-”为数据缺失。

表 4 不同茶园类型中植物各器官的碳含量(g · kg⁻¹)
Table 4 Carbon concentration of different plant organs in different tea gardens

器官	遮荫树种				茶树	平均
	樟树	杉木	山苍子	其他树种		
茎	493.63 (14.78)	498.40 (13.49)	482.00 (6.24)	529.60 (15.00)	487.85 (10.12)	490.10
枝	503.45 (9.81)	493.11 (12.56)	505.85 (4.59)	530.30 (21.80)	489.28 (9.96)	494.83
叶	504.72 (14.64)	511.50 (14.84)	501.14 (8.87)	537.70 (40.10)	481.42 (11.37)	493.88
根	490.18 (17.26)	481.00 (21.17)	473.85 (12.22)	519.70 (17.20)	486.85 (12.83)	484.89
皮	-	493.88 (14.32)	-	-	-	493.88
果	-	-	492.42 (9.13)	-	-	492.42
平均	498.00	495.59	491.05	529.40	486.35	490.54

括弧内为标准差,“-”为数据缺失,遮荫树种 29 株;茶树 7 株。

2.3 植物体的碳含量和碳储量

2.3.1 植物体各器官的碳含量 由于植物体组织结构的差异,不仅使不同物种同一器官的碳含量略有差异,而且同一物种各器官间的碳含量也稍有不同(表 4)。其中上层遮荫树种各器官的碳含量,以叶的最高,枝次之,根最低,大小顺序为:叶 > 枝 > 皮 > 果 > 茎 > 根;茶树则以枝的碳含量最高,茎和根分别次之,叶最小。

2.3.2 不同茶园类型植物体的碳储量 4 种不同林茶组合模式中以 4 种遮荫树种 + 茶组合模式的植物体碳储量最高,是纯茶园的 1.95 倍(P < 0.05);其次是 6 种遮荫树种 + 茶和樟-杉 + 茶组合模式,分别高于纯茶园 3.889 和 3.619 t · hm⁻²(P > 0.05),而樟树 + 茶组合模式植物体的碳储量仅比纯茶园高 1.877 t · hm⁻²(P > 0.05)(表 5)。

表 5 不同茶园类型植物体的碳储量(t · hm⁻²)
Table 5 Carbon storage of live plants in monoculture tea garden and four different integral tree-tea ecosystems

种植模式	茶树		遮荫树种		合计
	碳储量	%	碳储量	%	
纯茶园	8.922 a (0.053)	-	-	-	8.922 b (0.053)
樟树 + 茶	7.639 ab (1.807)	70.7	3.160 b (0.573)	29.3	10.799 ab (1.381)
樟-杉 + 茶	6.695 ab (0.456)	53.4	5.845 ab (0.449)	46.6	12.541 ab (0.795)
4 种遮荫树种 + 茶	7.257 ab (2.999)	41.8	10.119 a (6.844)	58.2	17.375 a (4.703)
6 种遮荫树种 + 茶	5.853 b (0.824)	45.7	6.958 ab (1.095)	54.3	12.811 ab (1.885)

括弧内为标准差,“-”为数据缺失,不同小写字母表示不同茶园类型间的碳储量差异显著(P < 0.05)。

在 4 种不同林茶组合模式的植物体碳储量组成中,除 4 种遮荫树种 + 茶与樟树 + 茶组合模式的遮荫树种碳储量有显著差异外 ($P < 0.05$),其他各林茶组合模式中遮荫树种的碳储量并无显著差异 ($P > 0.05$)。上层遮荫树种的碳储量占植物体总碳储量的比例以 4 种遮荫树种 + 茶组合模式最高,为 58.2%;6 种遮荫树种 + 茶组合模式次之,占 54.3%;其次是樟-杉 + 茶组合模式,为 46.6%;樟树 + 茶组合模式最低,仅为 29.3%。而 4 种林茶组合模式的茶树碳储量与纯茶园相比,呈现逐渐降低的趋势,并且 6 种遮荫树种 + 茶组合模式的茶树碳储量显著低于纯茶园的茶树碳储量 ($P < 0.05$) (表 5)。各茶园类型植物体的总碳储量随物种组成和数量的增加均呈先增加后降低的趋势,但 4 种不同林茶组合模式植物体的总碳储量均高于纯茶园植物体的总碳储量(表 5)。

2.3.3 不同茶园类型植物体碳储量的器官分配
结合植物体各器官的生物量与碳含量计算植物体各器官的碳储量,结果表明:4 种林茶组合模式的植物体各器官的碳储量均高于纯茶园的植物体各器官的碳储量(表 6)。4 种林茶组合模式的植物体各器官的碳储量所占比例与纯茶园相比,茎所占比例以 4

种遮荫树种 + 茶组合模式最大,是纯茶园的 1.06 倍;其他 3 种林茶组合模式则低于纯茶园;同时 4 种茶园组合模式根的碳储量所占比例均小于纯茶园,而叶所占的比例则与根所占的比例相反;枝所占的比例,除樟树 + 茶组合模式高于纯茶园外,其他 3 种林茶组合模式均低于纯茶园。各茶园类型不同器官碳储量及其所占比例的大小顺序为:茎 > 根 > 枝 > 叶 > 皮 > 果(表 6)。

2.4 不同茶园类型土壤的碳含量和碳储量

2.4.1 不同茶园类型土壤碳含量 在不同茶园类型中,除 4 种遮荫树种 + 茶的土壤(0 ~ 100 cm)平均碳含量低于纯茶园外,樟-杉 + 茶、樟树 + 茶和 6 种遮荫树种 + 茶组合模式的土壤平均碳含量分别高于纯茶园 3.87、2.14 和 0.65 $g \cdot kg^{-1}$ 。各茶园类型土壤的碳含量的大小顺序为:樟-杉 + 茶 > 樟树 + 茶 > 6 种遮荫树种 + 茶 > 纯茶园 > 4 种遮荫树种 + 茶。从不同茶园类型的土壤各层次的碳含量来看,除樟-杉 + 茶组合模式中表层土(0 ~ 20 cm)的碳含量稍小于中上层土(20 ~ 40 cm)的碳含量外,其他各茶园类型的土壤碳含量均随着土壤深度增加而呈现明显下降的趋势(表 7)。虽然不同茶园类型同层土壤间的碳

表 6 不同茶园类型植物体各器官的碳储量分配 ($t \cdot hm^{-2}$)

Table 6 Allocation of carbon storage of different plant organs in monoculture tea garden and four different integral tree-tea ecosystems

种植模式	植物各器官						合计
	茎	枝	叶	根	皮	果	
纯茶园	3.538 b (39.6)	1.755 c (19.7)	0.669 b (7.5)	2.961 b (33.2)	-	-	8.922 b (100)
樟树 + 茶	3.968 b (36.7)	2.567 ab (23.8)	0.985 ab (9.1)	3.278 b (30.4)	-	-	10.799 b (100)
樟-杉 + 茶	4.543 b (36.2)	2.298 bc (18.3)	1.726 a (13.8)	3.572 b (28.5)	0.378 a (3.0)	0.025 a (0.2)	12.541 b (100)
4 种遮荫树种 + 茶	7.339 a (42.2)	3.078 a (17.7)	1.945 a (11.2)	4.580 a (26.4)	2.449 a (2.3)	0.032 a (0.2)	17.375 a (100)
6 种遮荫树种 + 茶	5.029 b (39.3)	2.255 ab (19.9)	1.222 ab (9.5)	3.517 b (27.5)	0.411 a (3.2)	0.082 a (0.6)	12.811 b (100)

括号内数值为百分数,“-”为数据缺失,表中不同小写字母表示不同茶园类型间各器官的碳储量差异显著 ($P < 0.05$)。

表 7 不同茶园类型土壤碳含量的层次变化 ($g \cdot kg^{-1}$)

Table 7 Carbon concentration of different soil layers in monoculture tea garden and four different integral tree-tea ecosystems

种植模式	土壤深度 (cm)					平均
	0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100	
纯茶园	30.32 (7.77)	25.58 (7.09)	19.09 (5.08)	12.51 (3.23)	10.36 (2.20)	19.57
樟树 + 茶	32.80 (11.30)	29.27 (10.42)	20.50 (5.29)	14.59 (1.71)	11.37 (0.31)	21.71
樟-杉 + 茶	32.06 (13.67)	32.93 (14.75)	25.95 (13.81)	15.20 (4.41)	11.07 (2.02)	23.44
4 种遮荫树种 + 茶	27.87 (9.33)	23.28 (8.01)	17.51 (4.64)	13.13 (2.41)	10.06 (0.41)	18.37
6 种遮荫树种 + 茶	29.84 (1.71)	27.03 (3.61)	20.92 (4.05)	12.91 (1.12)	10.41 (1.24)	20.22

括号内为标准差。

表8 不同茶园类型的总碳储量 ($t \cdot hm^{-2}$)

Table 8 Total carbon storage in monoculture tea garden and four different integral tree-tea ecosystems

种植模式	植物碳储量			土壤碳储量	总碳储量
	茶树	遮荫树种	合计		
纯茶园	8.922 ± 0.053 a (4.0)	-	8.922 ± 0.053 c (4.0)	214.520 ± 26.153 a (96.0)	223.442 ± 26.107 a (100)
樟树 + 茶	7.639 ± 1.807 ab (3.4)	3.160 ± 0.572 b (1.4)	10.799 ± 1.381 bc (4.8)	216.514 ± 36.632 a (95.2)	227.313 ± 37.954 a (100)
樟-杉 + 茶	6.695 ± 0.455 ab (2.7)	5.845 ± 0.449 ab (2.4)	12.540 ± 0.795 ab (5.1)	233.602 ± 32.687 a (94.9)	246.143 ± 32.131 a (100)
4种遮荫树种 + 茶	7.257 ± 2.999 ab (3.4)	10.119 ± 6.844 a (4.8)	17.375 ± 4.703 a (8.2)	195.239 ± 29.462 a (91.8)	212.615 ± 27.518 a (100)
6种遮荫树种 + 茶	5.853 ± 0.824 b (2.7)	6.958 ± 1.095 ab (3.2)	12.811 ± 1.885 ab (5.9)	204.914 ± 5.926 a (94.1)	217.725 ± 6.166 a (100)

平均值 ± 标准差, 括号内数值为百分数, “-”为数据缺失, 表中不同小写字母表示不同茶园类型的碳储量差异显著 ($P < 0.05$)。

含量变化各异, 但多重比较的结果显示各茶园类型同层土壤间的碳含量并无显著差异 ($P > 0.05$)。

2.4.2 不同茶园类型的土壤碳储量 不同茶园类型的土壤碳储量以樟-杉 + 茶组合模式最高(表8), 其次是樟树 + 茶组合模式, 二者分别高于纯茶园 19.082 和 1.994 $t \cdot hm^{-2}$; 6种遮荫树种 + 茶和4种遮荫树种 + 茶组合模式的土壤碳储量则分别低于纯茶园 9.606 和 19.281 $t \cdot hm^{-2}$ 。表明不同茶园组合模式的土壤碳储量并未体现出随物种数量的增加而增长的规律性。

从各茶园类型土壤碳储量的层次分布来看, 除樟-杉 + 茶组合模式 20~40 cm 的土壤碳储量稍高于 0~20 cm 表土层外, 不同茶园类型各层次土壤的碳储量均随着土壤深度的增加而逐渐减少。其中 0~20 cm 表土层的碳储量占土壤碳储量的 27.0%~30.0%, 20~40 cm 土层占 24.7%~27.3%, 这2个土层占土壤总碳储量的 1/2 以上; 而 40 cm 以下 3 个土层则仅占土壤总碳储量的 42.8%~45.8%。与纯茶园相比, 樟树 + 茶组合模式在 20~40 cm 土层、樟-杉 + 茶组合模式在 20~60 cm 2 个土层的碳储量要大于纯茶园, 其他土层则较为相近; 而 4种遮荫树种 + 茶和 6种遮荫树种 + 茶组合模式各层次的土壤碳储量均要低于或稍低于纯茶园, 尤以 0~40 cm 土层最为明显(图1)。虽然各茶园组合模式的土壤碳储量的层次分布与纯茶园有所不同, 但多重比较的结果显示各茶园类型同层土壤间的碳储量并无显著差异 ($P > 0.05$)。

2.5 不同茶园类型的总碳储量及其分配

在各茶园类型的总碳储量中, 以樟-杉 + 茶组合模式的总碳储量最高, 其次是樟树 + 茶组合模式, 二者分别高于纯茶园 22.701 和 3.871 $t \cdot hm^{-2}$; 而 4

种遮荫树种 + 茶和 6种遮荫树种 + 茶两种组合模式则分别低于纯茶园 10.828 和 5.717 $t \cdot hm^{-2}$ (表8)。表明不同的物种组成和数量对茶园的影响程度不同, 从而导致了各茶园类型总碳储量之间的差异。就不同茶园类型总碳储量的组成而言, 土壤碳储量所占比例则均在 91% 以上, 植物仅占 4.0%~8.2%, 其中茶树的碳储量所占比例在 2.7%~3.4%; 遮荫树种所占比例在 1.4%~4.8%。与纯茶园相比, 4种茶园组合模式的植物体碳储量所占比例均较纯茶园高, 其中 4种遮荫树种 + 茶组合模式所占的比例是纯茶园的 2.0 倍, 其他 3 种组合模式是纯茶园的 1.2~1.5 倍。但 4种茶园组合模式土壤的碳储量所占比例均低于纯茶园, 尤以 4种遮荫树种 + 茶组合模式最为明显。

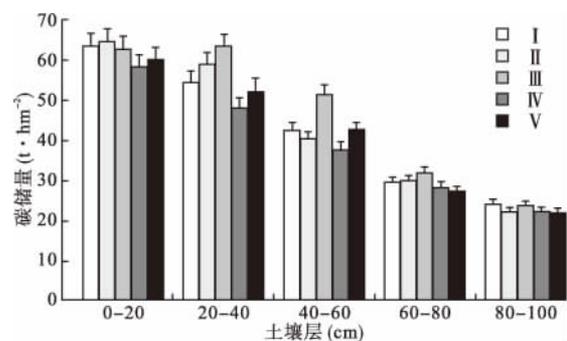
图1 不同茶园类型土壤各层次的碳储量 ($t \cdot hm^{-2}$)

Fig. 1 Carbon storage of different soil layers in monoculture tea garden and four different integral tree-tea ecosystems

I: 纯茶园; II: 樟树 + 茶; III: 樟-杉 + 茶; IV: 4种遮荫树种 + 茶; V: 6种遮荫树种 + 茶。

3 讨论

茶园中上层树种的遮荫不仅能够改善茶园的生

态环境,而且还能提高茶叶的品质(王丽娟等,2011),且在一定范围内遮光率越高茶叶品质提高的效果越明显(肖润林等2007;马跃等2011)。另外,由于不同的物种在生态系统中占据不同的生态位(王春梅等2010),所以随着树种数量的增加,群落层次复杂性的加大,对系统资源的利用更加充分,从而使其具有更高的植物生产力(冯耀宗,2003)。因此,与单一种植园相比农林复合生态系统具有更高的碳储存潜力(Peichl *et al.*,2006;Nair *et al.*,2009;Ruiz-Jaen & Potvin 2011)。本研究发现,由不同遮荫树种加茶组成的各种林茶复合生态系统的活植物体碳储量均高于纯茶园,呈现出随遮荫树种数量的增加而先增加后降低的变化趋势。这表明各林茶组合模式比纯茶园具有更强的碳吸存能力,而且遮荫树种在一定程度上对茶树起到了遮荫的作用,提高了茶叶品质(王丽娟,2011)。但随着植物种类和个体数量的增加,对系统有限资源的利用达到饱和后,会在种内及种间形成了激烈的竞争关系,从而使生态系统生产力下降(张全国和张大勇,2003),而过度的遮荫也会降低茶叶的产量和品质(马跃等2011;王玉花等2011)。本研究亦显示,上层遮荫树种的生物量和碳储量随着树种数量的增加,至4种遮荫树种时达到最大,而到6种遮荫树种时随之下降。导致这种变化的原因可能是6种遮荫树种+茶组合模式随着上层遮荫树种种类和个体数量的增加,形成了密度制约效应,致使其降低了茶园的植物体生物量和碳储量。但就茶叶品质而言,作为其等级分类的主要因子——氨基酸(舒庆龄和赵和涛,1990),却随林茶复合生态系统中植物多样性的增加而增加(王丽娟,2011)。由此可见,合理的物种选择和种植密度对各林茶复合生态系统活植物体碳储量的积累和茶叶品质的提升具有十分重要的意义。

本研究中,5种不同茶园类型植被层碳储量和土壤碳储量随着上层树种多样性的增加都呈现先增加后降低的趋势。与纯茶园相比,除樟树+茶组合模式的植物体碳储量稍高于纯茶园外,其他3种林茶组合模式的植物体碳储量均显著高于纯茶园。这表明在林茶复合生态系统中种植模式的不同是影响茶园植物体碳储量差异的主要因素。另外,土地利用变化所导致的土壤碳储量变化是一个长期而缓慢的过程(Richter *et al.*,1999;Li *et al.*,2011),生态系统的土壤碳储量不仅受原生植被的影响,同时受土

地利用方式的影响(Turner & Lambert 2000;Paul *et al.*,2002;李跃林等,2004)。本研究中各茶园类型间的土壤碳储量并无显著差异,这是因为在茶园开垦种植之前,该区域分布着相同的次生常绿阔叶林,从而使其土壤的碳储量较为相似。而将其开垦为不同的茶园模式后,虽然对土壤碳储量的流失速率、土壤有机质的分解和积累速率有不同的影响,但因各茶园组合模式种植年限相对较短(仅为6年),从而使得土壤碳储量依然无显著差异。由于土壤碳储量是总碳储量的主要组成部分(占90%以上),因此,各茶园类型的总碳储量受土壤碳储量的影响亦无显著差异。

土壤有机碳库作为陆地生态系统碳库的重要组成部分,在与大气二氧化碳交换中发挥着重要作用(Follett 2001)。本研究各茶园类型的土壤碳储量均高于我国森林土壤平均碳储量($193.55 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)和世界土壤平均碳储量($198.00 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$);同时也高于本地区热带季节雨林的土壤平均碳储量($91.089 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)(周玉荣等,2000;吕晓涛等,2006),表现出较大的碳储存潜力。由于土壤碳循环受温度、水分、植被及土壤理化性质等各种气候和生物因素影响(Tilman *et al.*,1997;Davidson & Janssens 2006;徐小锋等2007;Nair *et al.*,2009),所以不同的环境变量对不同生态系统土壤碳储量的影响也不同(解宪丽等2004)。与同一区域内的热带季节雨林相比(吕晓涛等,2006),西双版纳勐海地区不同茶园类型的土壤碳储量则高于热带季节雨林的土壤碳储量,其原因可能是其所处的相对海拔更高,由此所造成的水热差异所导致的生物地球化学循环较慢。此外,茶园生态系统较高的修剪物归还量也是其土壤碳储量较高的另一个重要原因(Li *et al.*,2011)。

物种多样性通过影响碳积累和损失的速率,碳库的大小及其稳定性,而影响多物种组成的复合生态系统的碳储存能力(Catovsky *et al.*,2002;Bunker *et al.*,2005;Diaz *et al.*,2009;Potvin *et al.*,2010)。西双版纳勐海县5种不同茶园类型的总碳储量随着植物种类组成和数量的增加呈现先增加后降低的单峰曲线模式,樟树+茶和樟-杉+茶组合模式的总碳储量均高于纯茶园总碳储量,表现出更强的碳吸存能力和更大的碳汇功能。5种茶园类型的平均碳储量为 $224.808 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,高于全国茶园生态系统的平均碳储量 $193.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (Li *et al.*,2011),低于我国

森林生态系统的平均碳储量 $258.83 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (周玉荣等, 2000), 与该地区热带雨林的平均碳储量 $220.492 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 相当(吕晓涛等, 2006)。这表明西双版纳不同林茶复合生态系统是一个重要的碳库, 对调节区域大气二氧化碳具有重要意义。

参考文献

- 党承林, 吴兆录. 1992. 季风常绿阔叶林短刺栲群落的生物量研究. 云南大学学报(自然科学版), **14**(2): 195 - 207.
- 冯耀宗. 2003. 物种多样性与人工生态系统稳定性探讨. 应用生态学报, **14**(6): 853 - 857.
- 冯志立, 郑征, 张建侯, 等. 1998. 西双版纳热带湿性季节雨林生物量及其分配规律研究. 植物生态学报, **22**(6): 481 - 488.
- 巩雪峰, 余有本, 肖斌, 等. 2008. 不同栽培模式对茶园生态环境及茶叶品质的影响. 西北植物学报, **28**(12): 2485 - 2491.
- 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 2004. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子. 土壤学报, **41**(5): 687 - 699.
- 李冬. 2006. 西双版纳季风常绿阔叶林的碳储量及其分配特征研究(硕士学位论文). 西双版纳: 中国科学院西双版纳热带植物园.
- 李跃林, 胡成志, 张云, 等. 2004. 几种人工林土壤碳储量研究. 福建林业科技, **31**(4): 4 - 7.
- 刘兴宇, 曾德慧. 2007. 农林复合系统种间关系研究进展. 生态学杂志, **26**(9): 1464 - 1470.
- 吕毅. 2002. 生态茶园与可持续发展. 中国茶叶加工, (1): 10 - 12.
- 吕晓涛, 唐建维, 何有才, 等. 2007. 西双版纳热带季节雨林的生物量及其分配特征. 植物生态学报, **31**(1): 11 - 22.
- 吕晓涛, 唐建维, 于贵瑞, 等. 2006. 西双版纳热带季节雨林的 C 贮量及其分配格局. 山地学报, **24**(3): 277 - 283.
- 马跃, 刘志龙, 虞木奎, 等. 2011. 不同郁闭度林茶复合模式对茶树光合日变化的影响. 中国农学通报, **27**(16): 52 - 56.
- 孟平, 张劲松, 高峻. 2004. 中国复合农林业发展机遇与研究展望. 世界林业研究, **17**(6): 30 - 34.
- 舒庆龄, 赵和涛. 1990. 不同茶园生态环境对茶树生育及茶叶品质的影响. 生态学杂志, **9**(2): 13 - 17.
- 唐建维, 庞家平, 陈明勇, 等. 2009. 西双版纳橡胶林的生物量及其模型. 生态学杂志, **28**(10): 1942 - 1948.
- 田永辉, 吴德明. 2001. 人工生态茶园生态效应研究. 茶叶科学, **21**(2): 170 - 174.
- 宛晓春. 2006. 茶叶生物化学. 北京: 中国农业出版社.
- 王春梅, 王汝南, 蔺照兰. 2010. 提高碳汇潜力: 量化树种和造林模式对碳储量的影响. 生态环境学报, **19**(10): 2501 - 2505.
- 王丽娟, 朱兴正, 毛加梅, 等. 2011. 不同遮阴树种对茶园土壤和茶叶品质的影响. 中南林业科技大学学报(自然科学版), **31**(8): 66 - 73.
- 王丽娟. 2011. 不同遮荫树种和多样性变化对茶园土壤、茶叶品质及净生产量的影响(硕士学位论文). 西双版纳: 中国科学院西双版纳热带植物园.
- 王玉花, 秦志敏, 肖润林, 等. 2011. 遮光水平对丘陵茶园茶叶生长指标和品质的影响. 经济林研究, **29**(2): 48 - 53.
- 肖润林, 王久荣, 单武雄, 等. 2007. 不同遮荫水平对茶树光合环境及茶叶品质的影响. 中国生态农业学报, **15**(6): 6 - 11.
- 徐小锋, 田汉勤, 万师强. 2007. 气候变暖对陆地生态系统碳循环的影响. 植物生态学报, **31**(2): 175 - 188.
- 余文权, 张翠香. 2009. 生态茶园的研究进展与思考. 中国茶叶, (10): 10 - 13.
- 张全国, 张大勇. 2003. 生物多样性与生态系统功能: 最新的进展与动向. 生物多样性, **11**(5): 351 - 363.
- 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 2000. 我国主要森林生态系统炭贮量和碳平衡. 植物生态学报, **24**(5): 518 - 522.
- Brown S, Gillespie AJR, Lugo AE. 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science*, **35**: 881 - 902.
- Bunker DE, DeClerck F, Bradford JC, et al. 2005. Species loss and aboveground carbon storage in a tropical forest. *Science*, **310**: 1029 - 1031.
- Catovsky S, Bradford M, Hector A. 2002. Biodiversity and ecosystem productivity: Implications for carbon storage. *Oikos*, **97**: 443 - 448.
- Chave J, Andalo C, Brown S, et al. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, **145**: 87 - 99.
- Chave J, Riéra B, Dubois MA. 2001. Estimation of biomass in a neotropical forest of French Guiana: Spatial and temporal variability. *Journal of Tropical Ecology*, **17**: 79 - 96.
- Davidson EA, Janssens IA. 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, **440**: 165 - 173.
- de Costa WAJM, Atapattu AMLK. 2001. Decomposition and nutrient loss from prunings of different contour hedgerow species in tea plantations in the sloping highlands of Sri Lanka. *Agroforestry Systems*, **51**: 201 - 211.
- de Costa WAJM, Surethran P. 2005. Tree-crop interactions in hedgerow intercropping with different tree species and tea in Sri Lanka. 1. Production and resource competition. *Agroforestry Systems*, **63**: 199 - 209.
- Diaz S, Hector A, Wardle D. 2009. Biodiversity in forest carbon sequestration initiatives: Not just a side benefit. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, **1**: 55 - 60.
- Follett R. 2001. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. *Soil and Tillage Research*, **61**: 77 - 92.
- Kürsten E, Burschel P. 1993. CO₂-mitigation by agroforestry. *Water, Air, & Soil Pollution*, **70**: 533 - 544.
- Kamau D, Spiertz J, Oenema O, et al. 2008a. Productivity and

- nitrogen use of tea plantations in relation to age and genotype. *Field Crops Research* , **108**: 60 – 70.
- Kamau D , Spiertz JHJ , Oenema O. 2008b. Carbon and nutrient stocks of tea plantations differing in age , genotype and plant population density. *Plant and Soil* , **307**: 29 – 39.
- Li S , Wu X , Xue H , *et al.* 2011. Quantifying carbon storage for tea plantations in China. *Agriculture , Ecosystems & Environment* , **141**: 390 – 398.
- McNeely JA , Schroth G. 2006. Agroforestry and biodiversity conservation: Traditional practices , present dynamics , and lessons for the future. *Biodiversity and Conservation* , **15**: 549 – 554.
- Montagnini F , Nair P. 2004. Carbon sequestration: An under-exploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* , **61**: 281 – 295.
- Nair PKR , Kumar BM , Nair VD. 2009. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* , **172**: 10 – 23.
- Oelbermann M , Voroney R , Thevathasan N , *et al.* 2006. Soil carbon dynamics and residue stabilization in a Costa Rican and southern Canadian alley cropping system. *Agroforestry Systems* , **68**: 27 – 36.
- Paul K , Polglase P , Nyakuengama J , *et al.* 2002. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management* , **168**: 241 – 257.
- Peichl M , Thevathasan N , Gordon A , *et al.* 2006. Carbon sequestration potentials in temperate tree-based intercropping systems , southern Ontario , Canada. *Agroforestry Systems* , **66**: 243 – 257.
- Potvin C , Mancilla L , Buchmann N , *et al.* 2010. An ecosystem approach to biodiversity effects: Carbon pools in a tropical tree plantation. *Forest Ecology and Management* , **261**: 1614 – 1624.
- Richter DD , Markewitz D , Trumbore SE , *et al.* 1999. Rapid accumulation and turnover of soil carbon in a re-establishing forest. *Nature* , **400**: 56 – 58.
- Roshetko JM , Lasco RD , Angeles MSD. 2007. Smallholder agroforestry systems for carbon storage. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* , **12**: 219 – 242.
- Ruiz-Jaen MC , Potvin C. 2011. Can we predict carbon stocks in tropical ecosystems from tree diversity? Comparing species and functional diversity in a plantation and a natural forest. *New Phytologist* , **189**: 978 – 987.
- Schroeder P. 1994. Carbon storage benefits of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* , **27**: 89 – 97.
- Sharrow S , Ismail S. 2004. Carbon and nitrogen storage in agroforests , tree plantations , and pastures in western Oregon , USA. *Agroforestry Systems* , **60**: 123 – 130.
- Tilman D , Lehman CL , Thomson KT. 1997. Plant diversity and ecosystem productivity: Theoretical considerations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* , **94**: 1857 – 1861.
- Turner J , Lambert M. 2000. Change in organic carbon in forest plantation soils in eastern Australia. *Forest Ecology and Management* , **133**: 231 – 247.
-
- 作者简介 萧自位 男 ,1986 年生 ,硕士研究生。主要从事农林复合生态系统研究。E-mail: xzw464999488@126.com
责任编辑 王伟
-