

川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤碳库与肥力的变化

龚 伟^{1,2}, 胡庭兴^{1,*}, 王景燕¹, 宫渊波¹, 冉 华¹

(1. 四川农业大学生态林业工程省级重点实验室, 雅安 625014; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要:对川南天然常绿阔叶林及其人工更新成栎木林、柳杉林和水杉林后土壤不同形态碳素含量、碳库管理指数、养分含量和酶活性进行研究,并探讨了土壤不同形态碳素及碳库管理指数与土壤肥力之间的关系。结果表明:各季节土壤有机碳、水溶性有机碳、微生物量碳、活性有机碳、稳定态碳、碱解氮、有效磷和速效钾含量及蔗糖酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性均为天然常绿阔叶林>栎木林>水杉林>柳杉林,土壤碳库管理指数也为天然常绿阔叶林>栎木林>水杉林>柳杉林,且土壤不同形态碳素含量和碳库管理指数与土壤养分含量及酶活性之间存在显著的相关关系。这说明了天然常绿阔叶林人工更新后土壤不同形态碳素含量、碳库管理指数和土壤肥力下降,且各人工林下降程度不同,而且土壤不同形态碳素含量和碳库管理指数的变化能够较好地表征土壤肥力的变化。研究结果为保护天然常绿阔叶林、选择适宜的更新树种和天然常绿阔叶林人工更新后林地土壤的科学管理提供依据,也为退耕还林中树种的选择提供参考。

关键词:天然常绿阔叶林; 人工更新; 土壤碳库; 碳库管理指数; 土壤肥力

文章编号:1000-0933(2008)06-2536-10 中图分类号:Q142, Q145, Q945, Q948 文献标识码:A

Soil carbon pool and fertility under natural evergreen broad-leaved forest and its artificial regeneration forests in Southern Sichuan Province

GONG Wei^{1,2}, HU Ting-Xing^{1,*}, WANG Jing-Yan¹, GONG Yuan-Bo¹, RAN Hua¹

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

2. Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6): 2536 ~ 2545.

Abstract: Soil organic matter (SOM) is a stable and long-lasting carbon source and contains nearly all nutrients for plant growth, therefore is a meaningful index for evaluating soil fertility. The quantity and quality of soil organic carbon influence soil potential productivity and reflect the spatial distribution and succession of plant community. However, the measurement of total SOM is not sensitive enough to detect short and medium term changes, and thus techniques that measure meaningful fractions of SOM should be used. The carbon management index (CMI) calculated from changes in labile and total carbon fractions relative to a reference soil was shown to be a useful technique for describing soil fertility. An investigation was carried out to study the changes of soil carbon fractions and CMI, and their relationships with fertility under natural evergreen broad-leaved forest and its artificial regeneration forests of *Sassafras tzumu*, *Cryptomeria fortunei* and *Metasequoia glyptostroboides* in southern Sichuan Province. Soil samples were collected from each forest to determine soil carbon fractions, available nutrients, enzyme activity and CMI. Regression analysis was used to determine the relationship between

基金项目:国家“十五”科技攻关资助项目(2001BA510B02-03, 2001BA606A-06); 四川省重点学科建设资助项目(SZD2004)

收稿日期:2007-03-15; **修订日期:**2007-10-22

作者简介:龚伟(1980~), 男, 四川崇州人, 博士, 主要从事林业生态工程和土壤生态研究. E-mail: gongwei@sicau.edu.cn

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: hutx001@yahoo.com.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Key Project for the Tenth Five Year Plan (No. 2001BA510B02-03, 2001BA606A-06); Key Subject Constructing Project of Sichuan Province (No. SZD2004)

Received date: 2007-03-15; **Accepted date:** 2007-10-22

Biography: GONG Wei, Ph. D., mainly engaged in ecological forestry engineering and soil ecology. E-mail: gongwei@sicau.edu.cn

soil carbon fractions, *CMI* and fertility. The results showed that the contents of soil organic carbon, water-soluble carbon, microbial biomass carbon, labile carbon, non-labile carbon, hydrolysis-N, available-P and available-K, the activity of invertase, phosphatase and catalase, and *CMI* were ranked with different seasons and followed the order: natural evergreen broad-leaved forest > *Sassafras tzumu* plantation > *Metasequoia glyptostroboides* plantation > *Cryptomeria fortunei* plantation. The soil carbon fractions and *CMI* were positively and significantly ($P < 0.05$) correlated with available nutrients and enzyme activity. Artificial regeneration of natural evergreen broad-leaved forest would result in decrease in all soil carbon fractions, *CMI* and fertility, but the size of change varies with regenerated forest types. The results indicate that soil carbon fractions and *CMI* could be used to evaluate the soil fertility for natural evergreen broad-leaved forest and its artificial regeneration forests, which will lay a solid foundation for protecting natural evergreen broad-leaved forest, tree selection for its artificial regeneration, and soil management, moreover, tree selection during the process of converting farmland to forestland.

Key Words: natural evergreen broad-leaved forest; artificial regeneration; soil carbon pool; *CMI*; soil fertility

土壤有机碳是一种稳定而长效的碳源物质,它几乎含有植物所需要的各种营养元素,是衡量土壤肥力的一个重要指标^[1],而且土壤碳库平衡是土壤肥力保持的重要内容,土壤有机碳的数量和质量影响土壤潜在的生产力,土壤有机碳的含量又反映了地表植物群落的空间分布和时间上的演替^[2]。由于在特定的生物、气候带中,随着森林的生长土壤碳库及碳素形态会逐渐达到稳定状态,因而土壤碳素状况又常可作为生态功能的标志或控制器^[3]。森林转变成耕地和草地后 5a 内土壤有机碳分别损失了 40% 和 25%^[4],天然森林转变成人工林后由于树种不同也会影响土壤有机碳,种植阔叶树对土壤有机碳的影响较小,而种植针叶树导致 15% 土壤有机碳损失^[5]。长期以来学者们认为土壤有机碳含量与土壤肥力具有正相关,但近年来有学者指出高有机碳含量或土壤肥力达到一定水平后,两者之间不一定是正相关^[6],所以必须分析不同形态的碳素含量^[7]。阔叶林冠层较厚,枝叶较浓密,凋落物量大,易分解,归还林地养分大于吸收养分,具有较高涵养水源、改良土壤的能力^[8]。过去由于为了满足木材生产的需求川南林区大部分天然常绿阔叶林转变成了人工林,使得这一区域生态环境破坏较为严重。川南天然常绿阔叶林更新成不同的人工林后土壤碳库及管理指数将发生怎样的变化,及其与土壤肥力的关系如何,目前有关这方面的研究资料尚未见报道,这难以满足该区植被恢复和建设的需要。鉴于此,本文对川南天然常绿阔叶林及其人工更新成檫木林、柳杉林和水杉林后土壤碳库与肥力进行研究,并探讨土壤不同形态碳素含量及碳库管理指数与土壤肥力的关系,以为保护天然常绿阔叶林,科学合理地经营和利用林地资源和选择适宜的造林树种或更新树种提供科学资料,为退耕还林中造林树种选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 样地概况

试验区位于四川省沐川县国有林场,距沐川县城 19.5 km (103°47' ~ 103°49'E, 28°29' ~ 28°54'N)。地处五指山东北尾部,地形起伏大,南北走向,地势南高北低,多陡坡、断岩,海拔在 1100 ~ 1550 m,坡度 25 ~ 35°。属亚热带湿润季风气候,根据沐川县森林经营所气象站(海拔 1097 m)历年气象观测资料统计,全年日平均气温 12.8 °C,最高气温 30 °C,最低气温 -10 °C,全年降水量 1780 mm,年降雨天数 254 d,7 ~ 8 月份为雨季,月平均降雨量 331.6 mm。地带性植被属亚热带常绿阔叶林,土壤以黄壤为主,部分地区有黄棕壤和紫色土。试验地林分为天然常绿阔叶林、檫木(*Sassafras tzumu*)林、柳杉(*Cryptomeria fortunei*)林和水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)林,天然常绿阔叶林乔木层主要由白毛新木姜子(*Neolitsea aurata*)、木荷(*Schima superba*)、总状山矾(*Symplocos botryantha*)、润楠(*Machilus pingii*)、大叶石栎(*Lithocarpus megalophyllus*)、青榨槭(*Acer davidii*)等构成,林下灌木主要有窄叶石栎(*Lithocarpus confinis*)、四川山茶(*Camellia szechuanensis*)、硬斗石栎(*Lithocarpus hancei*)、赛楠(*Nothaphoebe cavaleriei*)、石楠(*Photinia serrulata*)、野牡丹(*Melastoma candidum*)

等,林分密度为 $525 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$,平均树高为 21.2 m,平均胸径为 25.1 cm,郁闭度在 0.9 以上;檫木林、柳杉林、水杉林分别是 1988、1990 和 1992 年天然常绿阔叶林皆伐后于 1989、1991 和 1993 年人工植苗形成的纯林,林分密度分别为 1100 、 $2500 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $2500 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$,平均树高分别为 27.0、23.9 m 和 21.8 m,平均胸径分别为 22.1、19.7 cm 和 18.9 cm,林分郁闭度分别为 0.9、0.8 和 0.8。

1.2 研究方法

在调查试验地的基础上,根据典型性和代表性的原则分别在坡向、坡度、坡位和海拔高度基本一致的天然常绿阔叶林及其人工更新后形成的檫木林、柳杉林和水杉林中建立 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的标准地各 3 个。在每个标准地内采用蛇形 5 点取样混合,按 0~20 cm、20~40 cm 土层取土样,土样带回实验室后分成两份,一份过 2 mm 筛后测定土壤水溶性有机碳(C_{ws})和微生物量碳(C_{mic}),另一份土样自然风干后测定土壤有机碳(C_{T})、活性有机碳(C_{L})、碱解氮、有效磷和速效钾含量及蔗糖酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性。

测定方法: C_{ws} 采用浸提水土比为 5:1,25 °C 蒸馏水恒温振荡 30 min 后,高速离心 10 min ($7000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$),0.45 μm 滤膜抽滤,提取液中的有机碳采用有机碳自动分析仪(Shimadzu, TOC-500)测定^[9]; C_{mic} 采用氯仿熏蒸- K_2SO_4 提取法,根据熏蒸和未熏蒸处理土壤提取液中有机碳之差除以转换系数 K_c 0.45 为微生物量碳含量^[10]; C_{T} 采用重铬酸钾氧化-外加热法(GB7857-87); C_{L} 采用 333 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 高锰酸钾氧化,565 nm 波长比色测定^[6,11]; C_{T} 与 C_{L} 的差值为稳定态碳(C_{NL})。

碳库管理指数计算方法:

$$\text{碳库指数}(CPI) = \text{样品土壤 } C_{\text{T}} / \text{参照土壤 } C_{\text{T}},$$

$$\text{碳库活度}(L) = C_{\text{L}} / C_{\text{NL}},$$

$$\text{碳库活度指数}(LI) = \text{样品土壤 } L / \text{参照土壤 } L,$$

$$\text{碳库管理指数}(CMI) = CPI \times LI \times 100^{[6]}。$$

碱解氮采用碱解-扩散法(GB7849-87),有效磷采用 $0.03 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_4\text{F} - 0.025 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸浸提法(GB7853-87),速效钾采用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙酸铵浸提-火焰光度法(GB7856-87),蔗糖酶采用比色法,磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法,过氧化氢酶采用容量法^[12]。测定时间从 2004 年 4 月至 2006 年 1 月,在每年的 1、4、7 月和 10 月中旬采样测定,以代表每个季节土壤碳库与肥力变化,表中数据为 2a 测定的平均值和标准差。

2 结果与分析

2.1 不同形态土壤碳素变化

水溶性有机碳是土壤微生物活动的有效物源和碳源,在提供土壤养分方面起重要作用^[13],同时对土壤重金属元素的毒理和迁移有深刻的影响^[14];土壤微生物量碳对土壤环境因子的变化极为敏感,可以在相对较短的时间内监测土壤的变化,较早地反映或预示土壤的变化^[15];土壤活性有机碳是土壤中移动快、稳定性差、易氧化、矿化,并对植物和土壤微生物活性较高的那部分有机态碳^[16]。虽然它们只占土壤有机碳总量的较小部分,但由于它们可以在土壤全碳变化之前反映土壤微小的变化,又直接参与土壤生物化学转化过程,同时也是土壤养分的驱动力,对土壤碳库平衡和土壤化学及肥力保持具有重要意义。天然常绿阔叶林及其人工更新后形成的檫木林、柳杉林和水杉林土壤有机碳(C_{T})、水溶性有机碳(C_{ws})、微生物量碳(C_{mic})、活性有机碳(C_{L})和稳定态碳(C_{NL})含量,在各季节均为天然常绿阔叶林 > 檫木林 > 水杉林 > 柳杉林,且各林分 0~20 cm 土层土壤均高于 20~40 cm 土层,而且不同季节各林分土壤不同形态碳素含量也具有相同的变化规律,表现为秋季 > 春季 > 冬季 > 夏季(表 1)。各季节檫木林、柳杉林和水杉林 0~40 cm 土层, C_{T} 含量分别比天然常绿阔叶林降低了 15.4%~23.1% (平均为 18.9%)、56.5%~73.4% (平均为 66.2%) 和 20.2%~40.5% (平均为 29.8%), C_{ws} 含量分别比天然常绿阔叶林降低了 19.7%~62.0% (平均为 36.7%)、53.0%~82.9% (平均为 65.5%) 和 29.0%~65.2% (平均为 47.9%), C_{mic} 含量分别比天然常绿阔叶林降低了 12.7%~24.7% (平均为 16.4%)、64.8%~72.1% (平均为 68.9%) 和 17.2%~40.9% (平均为 25.2%), C_{L} 含量分别比天然常绿阔叶林降低了 22.4%~39.0% (平均为 28.9%)、69.7%~83.6% (平均为 77.7%) 和 33.1%~58.3% (平均

为 43.1%), C_{NL} 含量分别比天然常绿阔叶林降低了 14.4% ~ 22.0% (平均为 18.1%)、55.3% ~ 72.7% (平均为 65.2%) 和 19.1% ~ 39.6% (平均为 28.8%), 且降低的百分比均为 檫木林 < 水杉林 < 柳杉林。这说明了天然常绿阔叶林更新为人工林后导致林地土壤 C_T 、 C_{WS} 、 C_{mic} 、 C_L 和 C_{NL} 含量下降, 由于不同更新树种对林地土壤碳库影响作用不同, 使得 3 种人工林土壤中各形态碳素含量在不同季节均为 檫木林 > 水杉林 > 柳杉林。

表 1 天然常绿阔叶林人工更新后土壤不同形态碳素及碳库管理指数变化

Table 1 Soil carbon fractions and carbon management index under natural evergreen broad-leaved forest and its artificial regeneration forests

林分类型*	季节	土层 Soil layer(cm)	C_T ($g \cdot kg^{-1}$)	C_{WS} ($mg \cdot kg^{-1}$)	C_{mic} ($mg \cdot kg^{-1}$)	C_L ($g \cdot kg^{-1}$)	C_{NL} ($g \cdot kg^{-1}$)	CPI	L	LI	CMI
天然常绿阔叶林	春	0 ~ 20	68.7 ± 4.7	231.6 ± 22.6	243.7 ± 22.5	6.17 ± 0.52	62.53	1.000	0.099	1.000	100
		20 ~ 40	39.2 ± 2.6	123.7 ± 14.2	121.9 ± 15.2	2.99 ± 0.21	36.21	1.000	0.083	1.000	100
	夏	0 ~ 20	67.2 ± 3.9	169.7 ± 14.1	174.8 ± 19.8	4.20 ± 0.39	63.00	1.000	0.067	1.000	100
		20 ~ 40	37.3 ± 2.8	95.2 ± 7.7	87.6 ± 10.4	1.93 ± 0.17	35.37	1.000	0.055	1.000	100
	秋	0 ~ 20	70.7 ± 5.5	287.4 ± 33.9	284.6 ± 23.9	7.16 ± 0.65	63.54	1.000	0.113	1.000	100
		20 ~ 40	40.5 ± 2.4	200.8 ± 14.5	183.5 ± 16.4	3.47 ± 0.39	37.02	1.000	0.094	1.000	100
	冬	0 ~ 20	68.0 ± 4.2	257.5 ± 27.2	217.3 ± 16.2	5.34 ± 0.48	62.66	1.000	0.085	1.000	100
		20 ~ 40	38.1 ± 3.4	149.1 ± 15.1	106.4 ± 7.6	2.45 ± 0.18	35.65	1.000	0.069	1.000	100
檫木林	春	0 ~ 20	56.6 ± 3.5	143.5 ± 15.6	195.2 ± 14.7	4.79 ± 0.34	51.81	0.824	0.092	0.937	77.2
		20 ~ 40	31.5 ± 3.1	89.3 ± 9.7	104.6 ± 9.4	2.07 ± 0.26	29.43	0.804	0.070	0.852	68.4
	夏	0 ~ 20	51.7 ± 3.5	64.5 ± 4.9	151.6 ± 13.5	2.56 ± 0.12	49.14	0.769	0.052	0.781	60.1
		20 ~ 40	30.2 ± 3.0	41.7 ± 5.2	73.9 ± 6.6	1.28 ± 0.09	28.92	0.810	0.044	0.811	65.7
	秋	0 ~ 20	59.8 ± 2.9	230.7 ± 17.6	236.8 ± 19.8	5.43 ± 0.53	54.37	0.846	0.100	0.886	75.0
		20 ~ 40	33.2 ± 2.0	144.0 ± 11.2	138.1 ± 11.1	2.48 ± 0.25	30.72	0.820	0.081	0.859	70.4
	冬	0 ~ 20	54.2 ± 4.5	160.5 ± 12.5	189.7 ± 14.8	4.04 ± 0.34	50.16	0.797	0.081	0.945	75.3
		20 ~ 40	31.3 ± 2.6	113.9 ± 10.3	91.8 ± 6.5	1.75 ± 0.13	29.55	0.822	0.059	0.862	70.9
柳杉林	春	0 ~ 20	22.3 ± 1.4	83.3 ± 12.1	71.3 ± 7.3	1.31 ± 0.19	20.99	0.325	0.062	0.633	20.6
		20 ~ 40	16.0 ± 1.0	45.7 ± 5.7	42.9 ± 6.1	0.75 ± 0.07	15.25	0.408	0.049	0.596	24.3
	夏	0 ~ 20	17.9 ± 1.7	33.9 ± 2.6	53.5 ± 4.9	0.69 ± 0.13	17.21	0.266	0.040	0.601	16.0
		20 ~ 40	10.3 ± 2.6	16.3 ± 1.8	26.6 ± 3.1	0.35 ± 0.04	9.95	0.276	0.035	0.645	17.8
	秋	0 ~ 20	24.4 ± 1.2	135.2 ± 15.9	86.1 ± 10.8	1.77 ± 0.17	22.63	0.345	0.078	0.694	23.9
		20 ~ 40	17.6 ± 1.3	75.4 ± 6.3	51.2 ± 6.7	1.05 ± 0.08	16.55	0.435	0.063	0.675	29.4
	冬	0 ~ 20	20.6 ± 1.9	103.2 ± 8.7	67.5 ± 8.3	1.07 ± 0.18	19.53	0.303	0.055	0.643	19.5
		20 ~ 40	13.2 ± 1.5	61.3 ± 5.3	36.4 ± 2.9	0.56 ± 0.08	12.64	0.346	0.044	0.645	22.3
水杉林	春	0 ~ 20	50.1 ± 3.1	130.8 ± 15.6	178.2 ± 13.9	3.99 ± 0.29	46.11	0.729	0.087	0.877	63.9
		20 ~ 40	28.6 ± 2.0	74.6 ± 8.2	91.7 ± 11.3	1.84 ± 0.17	26.76	0.730	0.069	0.833	60.8
	夏	0 ~ 20	43.6 ± 4.2	59.1 ± 7.6	138.4 ± 13.4	1.75 ± 0.20	41.85	0.649	0.042	0.627	40.7
		20 ~ 40	22.2 ± 3.4	35.7 ± 2.4	72.5 ± 5.2	0.84 ± 0.11	21.36	0.595	0.039	0.721	42.9
	秋	0 ~ 20	51.7 ± 4.9	204.1 ± 16.9	210.8 ± 18.4	4.49 ± 0.59	47.21	0.731	0.095	0.844	61.7
		20 ~ 40	32.3 ± 2.8	132.8 ± 18.6	108.5 ± 12.3	2.32 ± 0.29	29.98	0.798	0.077	0.823	65.7
	冬	0 ~ 20	47.2 ± 4.2	119.8 ± 9.8	163.1 ± 14.8	3.25 ± 0.35	43.96	0.694	0.074	0.868	60.2
		20 ~ 40	26.2 ± 2.8	65.7 ± 7.1	85.2 ± 9.2	1.30 ± 0.20	24.90	0.688	0.052	0.760	52.3

* 天然常绿阔叶林 Natural evergreen broad-leaved forest; 檫木林 *Sassafras tzumu* plantation; 柳杉林 *Cryptomeria fortunei* plantation; 水杉林 *Metasequoia glyptostroboides* plantation; 下同 the same below; C_T : 土壤有机碳 Soil organic carbon, C_{WS} : 水溶性有机碳 Water-soluble carbon, C_{mic} : 微生物量碳 Microbial biomass carbon, C_L : 活性有机碳 Labile carbon, C_{NL} : 稳定态碳 Non-labile carbon, CPI : 碳库指数 Carbon pool index, L : 碳库活度 Lability, LI : 碳库活度指数 Lability index, CMI : 碳库管理指数 Carbon management index

2.2 土壤碳库管理指数变化

以各季节天然常绿阔叶林 0 ~ 20cm、20 ~ 40 cm 土层土壤为参照土壤, 计算求出天然常绿阔叶林人工更新成檫木林、柳杉林、水杉林后相对应季节和土层土壤碳库指数 (CPI)、碳库活度 (L)、碳库活度指数 (LI) 和碳库

管理指数 (*CMI*) 的变化如表 1。从表 1 中可以看出, *CPI*、*L*、*LI* 和 *CMI* 在各季节均为天然常绿阔叶林 > 檫木林 > 水杉林 > 柳杉林, 而且不同季节各林分土壤 *CPI*、*L*、*LI* 和 *CMI* 也具有相同的变化规律, 表现为秋季 > 春季 > 冬季 > 夏季, 这一结果与土壤不同形态碳素含量变化规律相同。各季节檫木林、柳杉林和水杉林 0 ~ 40 cm 土层, *CPI* 分别比天然常绿阔叶林降低了 15.4% ~ 23.1% (平均为 18.9%)、56.5% ~ 73.4% (平均为 66.2%)、20.2% ~ 40.5% (平均为 29.8%), *L* 分别比天然常绿阔叶林降低了 4.7% ~ 22.4% (平均为 13.7%)、31.0% ~ 41.0% (平均为 36.3%)、12.1% ~ 37.3% (平均为 20.9%), *LI* 分别比天然常绿阔叶林降低了 5.5% ~ 21.9% (平均为 13.3%)、30.6% ~ 40.4% (平均为 35.9%)、12.3% ~ 37.3% (平均为 20.6%), *CMI* 分别比天然常绿阔叶林降低了 22.8% ~ 39.9% (平均为 29.6%)、70.6% ~ 84.0% (平均为 78.3%)、34.3% ~ 59.3% (平均为 44.0%), 且降低的百分比均为檫木林 < 水杉林 < 柳杉林。以上结果说明了天然常绿阔叶林人工更新后林地土壤 *CPI* 和 *LI* 下降, 从而导致二者的乘积 *CMI* 下降, 由于不同更新树种对原有林地土壤 *CPI*、*L*、*LI* 和 *CMI* 影响作用不同, 导致 3 种人工林在各季节 *CPI*、*L*、*LI* 和 *CMI* 均为檫木林 > 水杉林 > 柳杉林。

2.3 土壤有效养分和酶活性变化

土壤碱解氮包括无机的矿物态氮和部分有机物质中易分解的、比较简单的有机态氮, 它是铵态氮、硝态氮、氨基酸、酰胺和易水解的蛋白质氮的总和, 反映出近期内土壤氮素的供应状况, 有效磷含量是衡量土壤磷素供应状况的较好的指标, 速效钾是植物根系吸收的直接钾素供应源^[17]。天然常绿阔叶林及其人工更新后形成的檫木林、柳杉林和水杉林土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量, 在各季节均为天然常绿阔叶林 > 檫木林 > 水杉林 > 柳杉林, 且各林分 0 ~ 20 cm 土层土壤均高于 20 ~ 40 cm 土层, 而且不同季节各林分土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量具有相同的变化规律, 表现为秋季 > 春季 > 冬季 > 夏季 (表 2)。各季节檫木林、柳杉林和水杉林 0 ~ 40 cm 土层, 碱解氮含量分别比天然常绿阔叶林降低了 7.9% ~ 25.8% (平均为 17.0%)、57.3% ~ 66.8% (平均为 60.6%) 和 27.5% ~ 49.5% (平均为 36.1%), 有效磷含量分别比天然常绿阔叶林降低 15.5% ~ 43.8% (平均为 30.7%)、42.2% ~ 63.7% (平均为 59.1%) 和 31.9% ~ 45.2% (平均为 40.3%), 速效钾含量分别比天然常绿阔叶林降低了 3.6% ~ 28.4% (平均为 16.3%)、34.9% ~ 54.9% (平均为 42.4%) 和 12.7% ~ 31.0% (平均为 21.3%), 且降低的百分比均为檫木林 < 水杉林 < 柳杉林。这说明了天然常绿阔叶林人工更新后林地土壤养分含量下降, 由于不同更新树种对土壤养分影响作用不同, 使得 3 种人工林土壤养分含量在不同季节均为檫木林 > 水杉林 > 柳杉林。

蔗糖酶是研究得最多的土壤酶类之一, 因为它比其它酶类更能明显地反映土壤的肥力水平和生物活性强度以及各种农业技术措施对土壤熟化的影响; 磷酸酶的酶促作用是能加速有机磷循环速度, 从而提高磷素有效性, 其酶活性能在一定程度上表征土壤有效磷的水平; 过氧化氢酶能促进过氧化氢分解, 形成分子氧和水减少过氧化氢的毒害作用, 其酶活性与土壤有机质的转化速度有密切关系。因此, 有些学者建议蔗糖酶、磷酸酶和过氧化氢酶等活性测定结果可用作评价土壤肥力水平的指标^[18]。天然常绿阔叶林及其人工更新形成的檫木林、柳杉林和水杉林土壤蔗糖酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性, 在各季节均为天然常绿阔叶林 > 檫木林 > 水杉林 > 柳杉林, 且各林分 0 ~ 20 cm 土层土壤均高于 20 ~ 40 cm 土层, 而且不同季节各林分土壤蔗糖酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性具有相同的变化规律, 表现为秋季 > 春季 > 冬季 > 夏季 (表 2)。各季节檫木林、柳杉林和水杉林 0 ~ 40 cm 土层, 蔗糖酶活性分别比天然常绿阔叶林降低了 5.9% ~ 28.1% (平均为 16.9%)、73.0% ~ 86.4% (平均为 79.4%)、23.8% ~ 52.4% (平均为 34.8%), 磷酸酶活性分别比天然常绿阔叶林降低 7.6% ~ 29.3% (平均为 19.8%)、56.2% ~ 72.7% (平均为 63.2%)、23.1% ~ 40.3% (平均为 35.1%), 过氧化氢酶活性分别比天然常绿阔叶林降低 3.1% ~ 13.4% (平均为 8.7%)、29.9% ~ 66.9% (平均为 43.4%)、13.7% ~ 43.4% (平均为 23.0%), 且降低的百分比均为檫木林 < 水杉林 < 柳杉林。这说明了天然常绿阔叶林人工更新后林地土壤酶活性下降, 由于不同更新树种土壤酶活性的影响作用不同, 使得 3 种人工林土壤酶活性在不同季节均为檫木林 > 水杉林 > 柳杉林。

2.4 土壤不同形态碳素及碳库管理指数与土壤肥力的关系

天然常绿阔叶林及其人工更新形成的檫木林、柳杉林和水杉林土壤有机碳 (C_T)、水溶性有机碳 (C_{ws})、微

生物量碳(C_{mic})、活性有机碳(C_L)和稳定态碳(C_{NL})含量及碳库管理指数(CMI)与碱解氮、速效磷和速效钾含量,以及蔗糖酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性之间存在极显著正相关,土壤不同形态碳素之间也存在极显著正相关,且土壤不同形态碳素与碳库管理指数之间也存在极显著正相关(表3)。这说明, CMI 与土壤不同形态碳素、土壤养分含量和酶活性之间关系密切,因此通过对土壤不同形态碳素和 CMI 的研究可以预测天然常绿阔叶林人工更新后土壤肥力的变化。

表2 天然常绿阔叶林人工更新后土壤有效养分和酶活性变化

Table 2 Soil available nutrient and enzyme activity under natural evergreen broad-leaved forest and its artificial regeneration forests

林分类型 Forest type	季节 Season	土层 Soil layer (cm)	碱解氮 Hydrolysis-N ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷 Available-P ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available-K ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	蔗糖酶 Invertase (glucose $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	磷酸酶 Phosphatase (P_2O_5 $\text{mg} \cdot$ $100 \text{ g}^{-1} \cdot 2\text{h}^{-1}$)	过氧化氢酶 Catalase ($0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KMnO}_4$ $\text{ml} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 20 \text{ min}^{-1}$)
天然常绿 阔叶林	春	0~20	259.1 ± 14.9	3.69 ± 0.32	73.3 ± 6.4	36.04 ± 4.20	60.1 ± 5.2	1.201 ± 0.134
		20~40	173.9 ± 12.5	2.26 ± 0.35	54.2 ± 4.9	13.65 ± 1.26	39.2 ± 4.7	0.853 ± 0.063
	夏	0~20	236.9 ± 20.4	2.07 ± 0.19	47.3 ± 5.9	22.12 ± 1.62	40.8 ± 3.5	0.928 ± 0.072
		20~40	157.9 ± 16.8	1.16 ± 0.08	31.9 ± 3.2	7.74 ± 0.75	23.2 ± 1.6	0.685 ± 0.061
	秋	0~20	271.7 ± 12.3	4.33 ± 0.38	82.3 ± 7.1	53.84 ± 4.35	73.5 ± 6.4	1.298 ± 0.118
		20~40	186.4 ± 9.6	2.72 ± 0.24	62.7 ± 5.6	19.73 ± 2.19	48.4 ± 5.6	0.947 ± 0.083
	冬	0~20	248.3 ± 17.8	3.25 ± 0.27	65.4 ± 5.2	31.02 ± 3.53	49.4 ± 3.2	1.037 ± 0.084
		20~40	163.1 ± 10.5	1.86 ± 0.23	46.8 ± 4.3	9.19 ± 0.81	31.7 ± 4.6	0.771 ± 0.059
樟木林	春	0~20	196.3 ± 13.1	2.52 ± 0.21	68.5 ± 5.5	31.10 ± 2.44	45.7 ± 3.5	1.102 ± 0.098
		20~40	157.1 ± 9.2	1.27 ± 0.17	39.7 ± 3.1	10.94 ± 1.29	28.2 ± 2.6	0.739 ± 0.061
	夏	0~20	178.7 ± 12.9	1.62 ± 0.10	45.6 ± 6.3	19.11 ± 2.41	36.5 ± 5.2	0.899 ± 0.094
		20~40	145.4 ± 7.7	0.98 ± 0.15	26.4 ± 2.3	6.08 ± 5.01	19.8 ± 1.8	0.616 ± 0.082
	秋	0~20	208.1 ± 17.4	3.29 ± 0.35	75.6 ± 6.5	44.22 ± 3.39	67.9 ± 4.8	1.169 ± 0.101
		20~40	162.8 ± 12.5	1.84 ± 0.19	45.7 ± 3.4	14.18 ± 1.73	36.8 ± 2.6	0.827 ± 0.076
	冬	0~20	184.3 ± 13.9	2.17 ± 0.18	57.3 ± 4.6	26.38 ± 1.61	39.2 ± 3.2	0.996 ± 0.092
		20~40	149.8 ± 14.8	1.05 ± 0.13	33.5 ± 2.9	8.65 ± 1.11	22.4 ± 1.4	0.705 ± 0.061
柳杉林	春	0~20	105.6 ± 8.3	1.36 ± 0.15	45.1 ± 3.9	8.86 ± 1.08	26.3 ± 1.9	0.774 ± 0.085
		20~40	69.2 ± 5.4	0.92 ± 0.10	25.3 ± 2.3	3.69 ± 0.45	14.9 ± 1.7	0.513 ± 0.049
	夏	0~20	92.7 ± 4.3	0.83 ± 0.08	30.8 ± 3.9	3.29 ± 1.46	15.9 ± 1.3	0.342 ± 0.041
		20~40	52.4 ± 5.0	0.67 ± 0.13	20.6 ± 1.8	1.05 ± 0.51	6.6 ± 0.8	0.227 ± 0.030
	秋	0~20	112.2 ± 7.4	1.62 ± 0.21	53.2 ± 3.2	10.90 ± 1.29	28.5 ± 3.3	0.844 ± 0.059
		20~40	79.5 ± 6.9	1.04 ± 0.09	33.5 ± 2.8	4.30 ± 0.35	13.2 ± 1.5	0.605 ± 0.068
	冬	0~20	98.5 ± 4.7	1.18 ± 0.09	39.2 ± 2.5	6.31 ± 0.45	20.9 ± 3.2	0.727 ± 0.053
		20~40	62.6 ± 3.8	0.74 ± 0.10	21.1 ± 1.7	2.04 ± 0.28	11.6 ± 1.5	0.454 ± 0.060
水杉林	春	0~20	178.7 ± 15.3	2.15 ± 0.17	61.2 ± 4.3	27.48 ± 3.87	39.1 ± 2.9	0.985 ± 0.112
		20~40	105.9 ± 12.5	1.26 ± 0.12	37.4 ± 2.9	7.07 ± 1.05	23.4 ± 3.2	0.654 ± 0.060
	夏	0~20	163.6 ± 10.7	1.29 ± 0.07	41.3 ± 4.6	16.49 ± 3.21	25.3 ± 3.2	0.765 ± 0.062
		20~40	90.3 ± 7.9	0.79 ± 0.05	24.7 ± 1.7	4.71 ± 0.83	14.8 ± 1.7	0.388 ± 0.030
	秋	0~20	196.3 ± 16.7	2.76 ± 0.32	70.6 ± 4.3	37.93 ± 4.23	56.5 ± 7.8	1.079 ± 0.123
		20~40	135.2 ± 9.2	1.59 ± 0.23	43.8 ± 5.1	9.39 ± 1.24	30.3 ± 2.6	0.734 ± 0.051
	冬	0~20	125.4 ± 9.1	1.83 ± 0.22	53.9 ± 3.8	23.62 ± 2.76	33.7 ± 4.1	0.895 ± 0.097
		20~40	97.1 ± 7.6	1.02 ± 0.12	34.7 ± 2.6	5.88 ± 0.47	19.2 ± 2.4	0.547 ± 0.043

表 3 不同形态土壤碳素及碳库管理指数与土壤肥力的关系

Table 3 Relationship between soil carbon fractions, carbon management index and soil fertility

项目 Item	C_{WS}	C_{mic}	C_L	C_{NL}	CMI	碱解氮 Hydrolysis-N	有效磷 Available-P	速效钾 Available-K	蔗糖酶 Invertase	磷酸酶 Phosphatase	过氧化氢酶 Catalase
C_T	0.813 **	0.950 **	0.942 **	0.999 **	0.766 **	0.955 **	0.867 **	0.840 **	0.896 **	0.883 **	0.890 **
C_{WS}	1.000	0.883 **	0.917 **	0.812 **	0.694 **	0.848 **	0.946 **	0.902 **	0.860 **	0.921 **	0.883 **
C_{mic}		1.000	0.976 **	0.950 **	0.697 **	0.920 **	0.944 **	0.934 **	0.968 **	0.961 **	0.931 **
C_L			1.000	0.942 **	0.726 **	0.922 **	0.969 **	0.935 **	0.961 **	0.960 **	0.928 **
C_{NL}				1.000	0.765 **	0.952 **	0.849 **	0.823 **	0.882 **	0.868 **	0.880 **
CMI					1.000	0.832 **	0.681 **	0.588 **	0.567 **	0.683 **	0.657 **

C_T : 土壤有机碳 Soil organic carbon, C_{WS} : 水溶性有机碳 Water-soluble carbon, C_{mic} : 微生物量碳 Microbial biomass carbon, C_L : 活性有机碳 Labile carbon, C_{NL} : 稳定态碳 Non-labile carbon, CMI: 碳库管理指数 Carbon management index; * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

3 结论和讨论

一般认为水溶性有机碳是有机质的淋溶和分解产物,它与土壤有机碳总量及土壤微生物活动有较好的正相关^[13,19],徐秋芳等^[20]对灌木林地土壤的研究也反映了这一现象,但姜培坤等^[9]的研究发现却相反,土壤水溶性有机碳含量与微生物量碳含量之间相关性不显著。本研究发现各人工林土壤有机碳含量和土壤水溶性有机碳含量均下降,且土壤水溶性有机碳含量与土壤微生物量碳呈极显著正相关。有研究发现,土壤水溶性有机碳的含量和地被物多少有直接关系^[21]。土壤微生物量碳是理想的生物学指标,它一方面决定于土壤总有机碳含量并与土壤总有机碳含量有较好的线性相关^[19],另一方面也决定于林地光照、通气状况特别是林木凋落物与根系物质分解过程中诱导形成的微生物区系^[20]。天然常绿阔叶林人工更新后土壤总有机碳、水溶性有机碳、微生物量碳和活性有机碳含量下降,可能也与人工林枯落物对林地土壤的归还作用小于天然常绿阔叶林有关。据调查天然常绿阔叶林枯落物层蓄积量分别是檫木林、柳杉林和水杉林的 2.58、22.73 倍和 1.42 倍^[22],且阔叶树枯落物一般较易于分解,檫木是阔叶树但枯落物形成量较少,柳杉和水杉地表枯落物较少且分解较慢,从而使得更新后的人工林对土壤有机物质的贡献较少,导致土壤不同形态碳素含量降低。

土壤有机碳的活性,氧化稳定性和抗生物降解能力是反映土壤碳库的重要指标,对评价土壤有机质和土壤肥力状况有重要意义^[11]。土壤活性有机碳组分占总有机碳含量的比例总体上不高,但对维持土壤肥力及土壤碳贮量变化方面具有重要的作用^[23]。姜培坤等^[9]的研究发现土壤活性有机碳含量与土壤全氮、水解氮、有效磷和速效钾含量之间呈极显著正相关。本研究中也发现土壤活性有机碳与土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量以及蔗糖酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性之间呈极显著正相关。这一结果进一步证实了土壤有机碳的活性对土壤肥力状况具有一定的指示作用。同时也说明了天然常绿阔叶林人工更新后土壤总有机碳和活性有机碳含量下降,是引起土壤肥力下降的重要原因。

土壤活性有机碳组分包括土壤中微生物生物量和其它一些在土壤中易于氧化分解的游离有机质部分,这些碳的活性主要与其化学组成^[24]或土壤团聚体的保护性有关^[25]。许多研究证明易分解土壤有机质如果在分子或团聚体水平上被结合在土壤团聚体内部则会使其分解受阻而变成非活性部分^[23]。土壤活性有机碳组分主要位于土壤微团聚体的表面或大团聚体之间或处于游离状态^[26]。有研究表明土地利用变化后,一方面使土壤有机质数量发生变化而影响土壤活性有机碳和有机碳含量,另一方面也使土壤有机质的稳定性和质量发生变化而使土壤活性有机碳与非活性有机碳发生转变^[27]。Blair 等^[28]的研究也发现天然次生林变成农田或草地后,虽然土壤活性有机碳含量下降,但由于土壤有机质稳定性和质量下降,使一部分非活性有机碳变成活性有机碳;Nelson 等^[29]发现造林后尽管土壤活性有机碳含量增加,但一部分活性有机碳可能变成非活性的部分,也就如上面所说的在分子或团聚体水平上被结合在土壤团聚体内部使其分解受阻而变成非活性部分。天然常绿阔叶林人工更新成檫木林、柳杉林和水杉林后,土壤活性有机碳含量和稳定态碳含量均明显的下降,

其下降的原因可能也在于土壤有机碳的补充减少,存在稳定态碳向活性有机态碳转化的作用,具体表现在天然常绿阔叶林人工更新后枯落物对林地的归还量减少,使降雨对林地土壤的击溅作用增强,加之枯落物对土壤养分的补充作用减弱,土壤腐殖质含量减少,土壤团聚体的稳定性减弱,使水土流失加剧,同时也使那部分在分子或团聚体水平上被结合在土壤团聚体内部的活性有机碳被释放分解,从而打破原有的活性碳与稳定态碳的平衡,使稳定态碳不断地被转化和分解,从而表现出土壤有机碳含量、活性有机碳和稳定态碳含量均下降的变化趋势。这可能是天然常绿阔叶林人工更新后土壤活性有机碳和稳定态碳含量下降的重要原因。

土壤碳库管理指数(CMI)是土壤管理措施引起土壤有机质变化的指标,它是土壤碳变化的系统的、敏感的监测方法,能够反映土壤质量下降或更新的程度^[7,30],由于它结合了人为影响下土壤碳库指标和土壤中碳库活度,并能反映外界条件对土壤有机碳数量的影响和土壤活性有机碳数量的变化,所以能够较全面和动态地反映外界条件对土壤有机碳性质的影响^[31]。沈宏等^[11]对不同施肥处理土壤碳库管理指数的研究表明,碳库管理指数与全碳、活性有机碳、微生物量碳和氮、矿化碳以及全氮、有效氮、有效磷和速效钾含量之间呈显著或极显著相关。本研究也发现碳库管理指数与有机碳、水溶性有机碳、微生物量碳、活性有机碳、稳定态碳、碱解氮、有效磷和速效钾含量,以及蔗糖酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性之间呈极显著正相关。这进一步说明了由于不同的农业或林业经营管理措施对土壤碳库及碳库管理指数存在明显的影响,同时碳库管指数能够全面和动态地反映不同经营措施对土壤碳库和土壤肥力的影响。天然常绿阔叶林人工更新后由于枯落物形成量减少及对原有林地土壤碳库的补充作用减小,使得土壤有机碳数量和质量降低,同时土壤碳库管理指数和土壤肥力也降低,但不同人工林由于枯落物形成量和分解的难易程度不同,从而导致土壤不同形态碳素、碳库管理指数和土壤肥力均是檫木林>水杉林>柳杉林。因此,保护天然常绿阔叶林,科学合理地经营和利用林地资源和选择适宜的造林树种或更新树种,对稳定土壤碳库、增加不同形态碳素含量和提高土壤肥力具有重要的作用和意义。

References:

- [1] Lin B, Lin J X, Li J K. The changes of crop yield and soil fertility under long-term fertilization. Beijing: Agricultural Science and Technology Press, 1996.
- [2] Su J, Zhao S W, Ma J D, *et al.* Influence of man-made vegetation on carbon pool in southern Ningxia region in the Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(3): 50—52, 179.
- [3] Paul E A. Dynamics of soil organic matter. *Plant and Soil*, 1984, 76: 275—285.
- [4] Delwier R P. Land use change and the global carbon cycle: the role of tropical soils. *Biogeochemistry*, 1986, 2: 67—93.
- [5] Yang J C, Huang J H, Pan Q M, *et al.* Long-term impacts of land-use change on dynamics of tropical soil carbon and nitrogen pools. *Journal of Environmental Science*, 2004, 16(2): 256—261.
- [6] Blair G J, Lefroy R D B. Soil C fractions based on their degree of oxidation and the development of a C management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46: 1459—1466.
- [7] Loginow W W, Wisniewski S G, Ciescinska B. Fractionation of organic C based on susceptibility to oxidation. *Polish Journal of Soil Science*, 1987, 20: 47—52.
- [8] Liu J F, Hong W, Wu C Z. Fractal features of soil clusters under some precious hardwood stands in the central subtropical region, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22: 1998—2005.
- [9] Jiang P K, Zhou G M, Xu Q F. Effects of intensive cultivation on the carbon pool of soil *Phyllostachys praecox* stands. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(6): 6—11.
- [10] Xie Z M, Khan K S, Huang C Y, *et al.* Effect of cadmium, lead and zinc on microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus, nitrogen, and phosphorus in red soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(1): 69—74.
- [11] Shen H, Cao Z H, Xu Z H. Effects of fertilization on different carbon fractions and carbon pool management index in soils. *Acta Pedologica Sinica*,

2000, 37(2): 166—173.

- [12] Guan S Y. Soil Enzyme and its study methods. Beijing: China Agriculture Press, 1996.
- [13] Liang B C, Mackenzie A F, Schnitzer M, *et al.* Management-induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, 26: 88—94.
- [14] Guggenberger G, Glaser B, Zech W. Heavy metal binding hydrophobic and hydrophilic dissolved organic carbon fractions in Spodosol A and B horizon. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1993, 72: 111—127.
- [15] Powlson D S, Brookes P C, Christensen B T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19: 159—164.
- [16] Shen H, Cao Z H, Hu Z Y. Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(3): 32—38.
- [17] Nanjing Soil Sciences Institute, Chinese Academy of Sciences. Physical and chemical analysis methods of soils. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Press, 1978.
- [18] Wang J K, Tang F D, Zhang J H, *et al.* Enzyme activities in fractions of microaggregates in brown earths with different fertility levels in Liaoning province. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2000, 31(2): 185—189.
- [19] Haynes R J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soil in New Zealand. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 211—219.
- [20] Xu Q F, Jiang P K, Shen Q. Comparison of organic carbon pool of soil in bush and broad-leaved forests. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(2): 18—22.
- [21] Hagedom F, Kaiser R, Feyen H, *et al.* Effect of redox conditions and flow processes on the mobility of dissolved organic carbon and nitrogen in a forest soil. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29: 288—297.
- [22] Gong W, Hu T X, Wang J Y, *et al.* Water holding characteristics of litter layer after natural evergreen broad-leaved forest artificial regeneration in southern Sichuan Province. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(3): 51—55.
- [23] Blair G J, Lefroy R D B, Singh B P, *et al.* Development and use of a carbon management index to monitor changes in soil C pool size and turnover rate. In: Cadisch G, Giller K E, eds. *Drive by nature: plant litter quality and decomposition*. Wallingford: CAB International, 1997. 273—281.
- [24] Skjemstad J O, Clarke P, Taylor J A, *et al.* The chemistry and nature of protected carbon in soil. *Australian Journal of Soil Research*, 1996, 34: 251—271.
- [25] Christensen B T. Carbon in primary and secondary organomineral complexes. In: Carter M R, Stewart A B, eds. *Structure and organic matter storage in agricultural soils*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1996. 97—165.
- [26] Tisdall J M. Formation of soil aggregates and accumulation of soil organic matter. In: Carter M R, Stewart A B, eds. *Structure and organic matter storage in agricultural soils*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1996. 57—96.
- [27] Six J, Contant R T, Paul E A, *et al.* Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 2002, 241: 155—176.
- [28] Blair G J, Crocker G J. Crop rotation effects on soil carbon and physical fertility of two Australian soils. *Australian Journal of Soil Research*, 2000, 38: 71—84.
- [29] Nelson P N, Baldock J A, Oades J M. Change in dispersible clay content, organic carbon contents and electrolyte composition following incubation of sodic soil. *Australian Journal of Soil Research*, 1998, 36: 883—897.
- [30] Whitbread A M, Lefroy R D B, Blair G J. A survey of the impact of cropping on soil physical and chemical properties in north western New South Wales. *Australian Journal of Soil Research*, 1998, 36: 669—681.
- [31] Xu M G, Yu R, Sun X F, *et al.* Effects of long-term fertilization on labile organic matter and carbon management index (CMI) of the typical soils of China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(4): 459—465.

参考文献:

- [1] 林葆, 林继雄, 李家康. 长期施肥作物产量和土壤肥力变化. 北京: 农业科技出版社, 1996.
- [2] 苏静, 赵世伟, 马继东, 等. 宁南黄土丘陵区不同人工植被对土壤碳库的影响. 水土保持研究, 2005, 12(3): 50~52, 179.
- [8] 刘金福, 洪伟, 吴承祯. 中亚热带几种珍贵树种林分土壤团粒结构的分维特征. 生态学报, 2002, 22(2): 1998~2005.
- [9] 姜培坤, 周国模, 徐秋芳. 雷竹高效栽培措施对土壤碳库的影响. 林业科学, 2002, 38(6): 6~11.
- [10] 谢正苗, 卡里德, 黄昌勇, 等. 镉铅锌污染对红壤中微生物生物量碳氮磷的影响. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(1): 69~74.
- [11] 沈宏, 曹志洪, 徐志红. 施肥对土壤不同碳形态及碳库管理指数的影响. 土壤学报, 2000, 37(2): 166~173.
- [12] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986.
- [16] 沈宏, 曹志洪, 胡正义. 土壤活性碳的表征及其生态意义. 生态学杂志, 1999, 18(3): 32~38.
- [17] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 科学技术出版社, 1978.
- [18] 汪景宽, 汤方栋, 张继宏, 等. 不同肥力棕壤及其微团聚体中酶活性比较. 沈阳农业大学学报, 2000, 31(2): 185~189.
- [20] 徐秋芳, 姜培坤, 沈泉. 灌木林与阔叶林土壤有机碳库的比较研究. 北京林业大学学报, 2005, 27(2): 18~22.
- [22] 龚伟, 胡庭兴, 王景燕, 等. 川南天然常绿阔叶林人工更新后枯落物层持水特性研究. 水土保持学报, 2006, 20(3): 51~55.
- [31] 徐明岗, 于荣, 孙小凤, 等. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 459~465.