

黄土丘陵区人工柠条林土壤有机碳组分 和碳库管理指数演变

崔 静¹, 陈云明^{2,3}, 曹 扬², 王琼芳¹, 黄佳健⁴, 王琳琳⁵

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西

杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 云南今禹生态

工程咨询有限公司, 昆明 650244; 5. 榆林市绿巨人水利设计有限责任公司, 陕西 榆林 719000)

摘 要:采用时空替代法,探讨了黄土丘陵区人工柠条林地 10, 17, 30, 34, 40, 50 a 时间序列上 0—40 cm 土层内土壤碳组分和碳库管理指数的演变特征。结果表明:(1) 随着林龄的增加,柠条林地中土壤总有机碳和活性有机碳含量增加,均为 10 a 时含量最低,40~50 a 时趋于稳定。但二者出现的峰值年限不同,总有机碳在 34 a 时含量最高,达 4.29 g/kg,而活性有机碳含量在 40 a 时最高,为 0.83 g/kg;(2) 柠条林地碳库管理指数随林龄增加整体呈上升趋势,在 0—20 cm 土层随生长年限的增加明显提高,比 10 a 柠条林地高出 54.2%~153.0%,而在 20—40 cm 土层其增幅不明显,甚至在 17~30 a 期间比 10 a 时下降了 8.0%~16.9%;(3) 相关分析表明,活性有机碳与总有机碳之间存在极显著正相关关系,并且与土壤肥力指标也呈显著或极显著相关;碳库指数和碳库管理指数与土壤碳组分、其他主要肥力指标之间也显著相关。研究表明,在黄土丘陵区植被恢复过程中,柠条种植可增加土壤的有机碳含量,改善土壤肥力。碳库指数与碳库管理指数可以作为反映黄土丘陵区植被恢复的监测因子。

关键词:黄土丘陵区; 柠条; 土壤有机碳; 碳库管理指数

中图分类号: S153.6⁺21

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)01-0052-05

Evolution Characteristics of Soil Organic Carbon Components and Carbon Management Index in *Caragana microphylla* Plantations in Loess Hilly Region

CUI Jing¹, CHEN Yun-ming^{2,3}, CAO Yang², WANG Qiong-fang¹, HUANG Jia-jian⁴, WANG Lin-lin⁵

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi

712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest

A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F

University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Yuman Jinyu Ecological Engineering Consultation Co., Ltd,

Kunming 650244, China; 5. Yulin Green Superman Water Conservancy Design Co., Ltd, Yulin, Shaanxi 719000, China)

Abstract: Based on the spatiotemporal substitution method, the evolution characteristics of soil organic carbon components and carbon management index was investigate in *Caragana microphylla* plantations with age sequence of 10 a, 17 a, 30 a, 34 a, 40 a and 50 a in the loess hilly region. The results showed that; the contents of soil organic carbon and soil labile organic carbon both increased with the growth years of *C. microphylla*, and had similar variation trend with the lowest content in the 10-year plantations and the steady level in 40 to 50-year plantations. But the peak content of soil organic carbon and soil labile organic carbon appeared in different ages, the highest soil organic carbon content was found in the 34-year plantations, with the value of 4.29 g/kg, while the highest soil labile organic carbon content presented in the 40-year plantations, with the value of 0.83 g/kg. Soil carbon management index increased with the *C. microphylla* growth. At the depth of 0—20 cm, the carbon management index of *C. microphylla* plantations had significantly increased from 54.2% to 153.0%

收稿日期: 2012-07-01

修回日期: 2012-08-28

资助项目: 中国科学院战略性先导科技专项“暖温带落叶阔叶混交林区域森林固碳现状、速率和潜力研究”(XDA05050203); 中国科学院百人计划项目“黄土高原半干旱区群落水分平衡与调控机理”(KZCX2-YW-BR-02)

作者简介: 崔静(1986—), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 主要研究方向: 水土保持与荒漠化防治。E-mail: cui.jing1987@163.com

通信作者: 陈云明(1967—), 男, 陕西澄城人, 博士, 研究员, 主要研究方向: 生态恢复与水文。E-mail: ymchen@ms.iswc.ac.cn

compared with that in the 10-year plantations, but at the depth of 20—40 cm, soil carbon management index did not increased greatly, and it even decreased from 8.0% to 16.9% during the 17-year and 30-year plantations. Correlation analysis showed that there was a very significant positive correlation between soil total organic carbon content and soil labile organic carbon content, and soil carbon components also had significant or very significant relationship with soil fertility index. Carbon pool index and carbon management index had significant relationship with soil carbon components and soil fertility indexes. The results indicated that planting *C. microphylla* will improve the soil fertility. Carbon pool index and carbon management index can be used as monitoring factors to reflect vegetation recovery in loess hilly region.

Key words: loess hilly region; *Caragana microphylla*; soil organic carbon; carbon management index

黄土丘陵区水土流失严重,生态环境极其脆弱,以退耕还林还草为主的植被恢复措施是该区生态环境重建的根本措施。植被恢复不仅能有效减少水土流失,还可以通过土壤—植物复合系统功能来提高土壤质量^[1]。土壤有机碳作为土壤的重要组成部分,不仅能直接反映土壤的肥力水平,衡量土壤质量^[2],还能有效反映土地、林地经营管理利用水平,并可用土壤碳库管理指数进行量化^[3],且已有学者将土壤有机碳及碳库管理指数变化用于退化生态系统恢复评价^[1,4-5]。碳库管理指数的概念是 lefroy 等^[4]结合了人为因素影响下土壤碳库指数和碳库活度两方面的内容提出的,既反映了外界管理措施对土壤有机碳总量的影响,也反映了土壤有机碳组分的变化情况,碳库管理指数还能够对土壤的经营和管理是否科学做出评价,其值升高表明该措施有利于土壤的培肥,土壤肥力上升,反之则说明该措施不利于土壤培肥,土壤肥力下降^[6-7]。目前国内外对碳库管理指数的研究,多偏重于不同耕作措施^[8-12],不同施肥情况^[7,13-14]对土壤有机碳及碳库管理指数的研究,较少涉及到林地经营管理方面。在黄土丘陵区植被恢复过程中,种植了大量的柠条林,并且许多研究表明,在黄土丘陵区种植柠条,能够改良土壤性质,恢复和维持土壤肥力^[15-16],提高土壤有机碳含量^[17]。虽然目前已有关于黄土丘陵区人工柠条林对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响方面的报道^[5],但因时间序列短导致其对土壤有机碳及碳库管理指数的变化机制特征还不明确。基于此,本文以 10,17,30,34,40,50 a 较长时间序列人工柠条林为研究对象,分析黄土丘陵区 0—40 cm 土层范围内土壤中有机碳、活性有机碳及碳库管理指数的变化特征,以期阐明黄土丘陵区人工灌木林土壤固碳机制及土壤质量监测提供理论依据。

1 研究区概况

选择陕西省安塞县中国科学院安塞水土保持综合试验站纸坊沟示范区流域作为研究区域,地理位置

109°13'46"—109°16'03"E,36°46'42"—36°46'28"N。该区属黄土丘陵沟壑区,海拔 1 010~1 400 m,暖温带半干旱季风气候;流域面积为 8.27 km²;年均气温 8.8℃,≥0℃的积温 3 733.5℃,干燥度 1.5,无霜期 157~194 d。年均降水量 542.5 mm,且分布不均,7—9 月 3 个月降雨量占年降雨量的 61.1%,多暴雨;年均蒸发量为 1 463 mm。土壤类型为黄绵土,植被类型处于暖温带落叶阔叶林向干草原过渡的森林草原带,其中,天然林已遭破坏;乔木以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和小叶杨(*Populus simonii*)等为主;灌丛主要有柠条(*Caragana microphylla*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等人工林灌丛以及封禁后形成的黄刺玫(*Rosa xanthina*)、狼牙刺(*Sophora viciifolia*)等天然灌丛;主要为铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、芨蒿(*Artemisia giraldii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)等形成的草原和干草原。

2 材料与方法

采用时空替代法,于 2009 年 5—6 月在纸坊沟流域内全面实地踏勘的基础上选取坡度、坡向、坡位等立地条件相似,造林和管理方式相对一致的不同年限的柠条人工林样地 6 块(表 1),生长年限分别为 10,17,30,34,40,50 a(柠条林人工林均是在退耕地进行穴播形成的),并分别在每个样地内设置 3 个 20 m×20 m 样方。在每个样地的 3 个样方内用土钻沿对角线多点混合采样,采样深度为 0—40 cm,每隔 20 cm 取样 1 次,共采集土样 36 个。样品采回后,剔除石块和动植物残体等杂质,风干,磨碎,过筛后装袋备用。

土壤全氮测定采用半微量凯氏法^[18];土壤全磷测定采用硫酸—高氯酸法^[18];有效磷用 0.5 mol/L 碳酸氢钠法^[18]测定;速效钾的测定采用醋酸铵浸提—火焰光度法^[18];总有机碳测定采用重铬酸钾容量法—外加热法^[18];活性有机碳采用高锰酸钾氧化法测定^[19];非活性有机碳含量为总有机碳和活性有机碳含量之

差。土壤碳库管理指数的计算^[2]：以10 a 柠条林地土壤为参考,利用 Excel 和 SPSS 16.0 统计软件对数据进行统计分析。其中:碳库活度=活性碳含量/非活性碳

含量;碳库活度指数=样品碳库活度/参考土壤碳库活度;碳库指数=样品全碳含量/参考土壤全碳含量;碳库管理指数=碳库指数×碳库活度指数×100。

表1 样地详细概况

生长年限/ a	海拔/ m	坡度/ (°)	坡向	坡位	枯落物现存量/ (g·cm ⁻²)	枯落物 厚度/cm	林下植被
10	1142	33	半阴	中	259.64	0.7	铁杆蒿
17	1409	26	半阴	上	473.88	1.5	铁杆蒿—长芒草
30	1240	26	阴	上	1022.52	2.0	铁杆蒿—茭蒿
34	1251	23	半阴	中	1115.37	2.0	铁杆蒿—长芒草
40	1130	30	半阴	中	1063.07	1.8	铁杆蒿—茭蒿
50	1217	31	阴	上	929.29	1.2	铁杆蒿—茭蒿

3 结果与分析

3.1 不同生长年限柠条林地土壤碳组分变化

3.1.1 土壤总有机碳含量 由表2可知,随着柠条生长年限的增加,柠条林地0—40 cm 土层平均土壤有机碳含量先增加后趋于平稳。不同生长年限的柠条林地平均土壤有机碳含量在10 a 时最小,为2.34 g/kg,34 a 时最大,为4.29 g/kg,到40,50 a 时,柠条林地土壤平均有机碳基本处于积累与消耗的相对稳定状态,其值稳定在4.11~4.14 g/kg。图1A 为不

表2 柠条林不同生长年限0—40 cm 土层土壤平均总有机碳、平均活性有机碳含量变化

指标	生长年限/a					
	10	17	30	34	40	50
TOC 含量/(g·kg ⁻¹)	2.34±0.57b	3.14±1.19ab	3.79±0.53ab	4.29±1.47a	4.11±0.20a	4.14±0.50a
LOC 含量/(g·kg ⁻¹)	0.40±0.08c	0.52±0.03bc	0.63±0.07bd	0.72±0.04ad	0.83±0.01a	0.82±0.19a

注:表中数值为均值±标准差,同一行的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$);TOC 为总有机碳;LOC 为活性有机碳,下表同。

3.1.2 土壤活性有机碳含量 随着柠条生长年限的增加,0—40 cm 土层平均活性有机碳含量呈上升趋势,其他林龄的平均活性有机碳含量比10 a 高出30%~107.5%(表2)。由图1B 可以看出,0—20 cm 土层土壤活性有机碳含量变化与0—40 cm 土层土壤平均活性有机碳含量变化一致,在10 a 时最低为0.48

同年限柠条林地各土层土壤总有机碳变化情况。0—20 cm 土层土壤总有机碳的变化与0—40 cm 土层平均土壤有机碳含量变化一致:10 a 最小为2.68 g/kg,34 a 时最大为6.35 g/kg,40,50 a 稳定在5.44~5.45 g/kg。20—40 cm 土层土壤总有机碳也随柠条生长年限的增加不断增加,但其增幅明显低于0—20 cm 土层。柠条林地0—20 cm 土层土壤总有机碳含量是20—40 cm 土层的1.34~2.86 倍,这说明土壤有机碳的分布具有一定的表聚性^[20],且有机碳主要集中在土壤的表层。

g/kg,50 a 最高为1.17 g/kg;20—40 cm 土层土壤活性有机碳含量在17 a 和30 a 时比10 a 下降了6.1%~18.1%,但三者之间差异并未达到显著水平($P<0.05$),40 a 时活性有机碳含量最高为0.51,是10 a 的1.55 倍,50 a 时含量比40 a 时有所下降,但仍比10 a 高出42.4%。

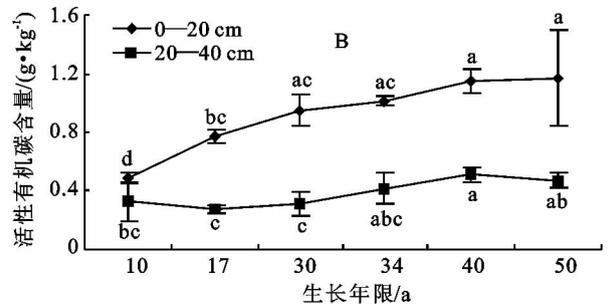
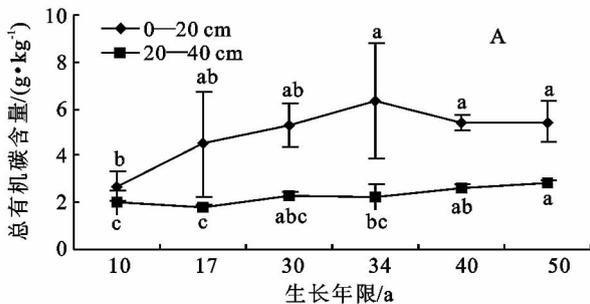


图1 不同生长年限柠条林地不同土层土壤总有机碳、活性有机碳含量变化

3.2 不同生长年限柠条林地土壤碳库管理指数

碳库活度和碳库活度指数都可以用来反映土壤碳素的活跃程度,活度越大,表示有机碳越易被微生物分解,质量也就越高^[3]。由表3可知,不同土层深

度中土壤碳库活度和碳库活度指数均随林龄增加而增加,其中碳库活度在0—20 cm 土层的值高于20—40 cm 土层,而碳库活度指数除了在30 a 和50 a 时0—20 cm 土层的值高于20—40 cm 土层外,其他林

龄均为 20—40 cm 土层的值等于或高于 0—20 cm。总体而言,柠条林地 0—40 cm 土层碳库活度及碳库活度指数随柠条林生长年限的增加整体增加,说明随

柠条林生长,柠条林地土壤碳库活性增大,土壤中的活性有机碳与非活性有机碳处于一种高速周转的动态平衡之中,土壤中碳素质量得到改善。

表 3 不同生长年限柠条林地土壤碳库管理指数

年限/ a	NLOC/(g·kg ⁻¹)		A		AI		CPI		CPMI	
	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm
10	2.19bc	1.67bc	0.22	0.19	1.00	1.00	1.00	1.00	100.00	100.00
17	3.72ac	1.50c	0.21	0.18	0.94	0.94	1.68	0.89	157.15	83.12
30	4.36ac	1.97abc	0.22	0.16	0.99	0.81	1.98	1.13	197.23	92.03
34	5.33a	1.8bc	0.23	0.23	1.05	1.18	2.02	1.11	212.91	131.12
40	4.29ac	2.08ab	0.27	0.24	1.22	1.26	2.04	1.29	247.37	162.58
50	4.28ac	2.37a	0.27	0.20	1.24	1.02	2.04	1.42	253.00	144.71

注:NLOC为非活性有机碳,A为碳库活度,AI为碳库活度指数,CPI为碳库指数,CPMI为碳库管理指数,下表同。

表 3 还说明,柠条林地的碳库指数变化与碳库管理指数的变化一致,随林龄增加均表现为 0—20 cm 土层明显高于 20—40 cm 土层。就碳库管理指数而言,在 0—20 cm 土层,随生长年限的增加,柠条林地的碳库管理指数明显提高,比 10 a 柠条林地高出 54.2%~153.0%;而在 20—40 cm 土层,柠条林地的碳库管理指数提高幅度不及 0—20 cm 土层,甚至在 17~30 a 期间比 10 a 时下降了 8.0%~16.9%。柠条林地各土层碳库管理指数提高幅度的不同可能与土壤表层有机质的来源和土壤微生物活性有关,表层土壤有机质主要来源于植物凋落物和分布在表层根系的凋亡,加上表层有适宜的温度和水分,促进了土

壤微生物活动,使土壤的碳素循环加快。

3.3 土壤碳组分、碳库管理指数与土壤肥力指标之间相关性分析

通过分析活性有机碳与总有机碳、碳库管理指数及土壤肥力因子之间的相关关系发现,活性有机碳与总有机碳和其他肥力指标均呈极显著的正相关关系,详见表 4。由表 4 可以看出,碳库活度与碳库活度指数存在极显著的正相关关系,并与活性有机碳、总有机碳、碳库指数及碳库管理指数达极显著或显著相关,但与土壤肥力指标间的相关性较弱;碳库指数和碳库管理指数与土壤碳组分、其他主要肥力指标之间都表现为显著相关。

表 4 土壤碳组分、碳库管理指数与土壤肥力指标之间的相关性

指标	LOC	TOC	A	AI	CPI	CPMI	TN	TP	AK	AP
LOC	1.000	0.963**	0.800**	0.454	0.980**	0.988**	0.892**	0.766**	0.897**	0.835**
TOC		1.000	0.656*	0.277	0.986**	0.932**	0.941*	0.756**	0.930**	0.932**
A			1.000	0.870**	0.687*	0.845**	0.610*	0.762**	0.539	0.529
AI				1.000	0.321	0.558	0.250	0.611*	0.159	0.135
CPI					1.000	0.959**	0.908**	0.760**	0.859**	0.935**
COMI						1.000	0.862**	0.810**	0.779**	0.864**

注:*表示 0.05 水平显著相关;**表示 0.01 水平显著相关;TN 为全氮;TP 为全磷;AK 为速效钾;AP 为有效磷。

4 结论与讨论

随生长年限的增加,柠条林地 0—40 cm 土层平均总有机碳含量先增加后趋于平稳:10 a 时含量最小,仅为 2.34 g/kg,之后迅速累积,到 34 a 时含量最高,为 4.29 g/kg,比 10 a 时高出 83.3%,40 a 和 50 a 时积累与消耗处于相对稳定状态,其值稳定在 4.11~4.14 g/kg。本研究中柠条林在生长 10~34 a 时有机碳积累迅速,与张晋爱等^[21]在该地区研究得出的 10~22 a 是柠条林土壤有机质快速积累期的研究结论基本一致。

不同生长年限柠条林地土壤平均活性有机碳含量随林龄增加也表现为先增加后趋于平稳:10 a 时含量最小为 0.40 g/kg,40 a 和 50 a 时含量最高,并稳定在

0.82~0.83 g/kg。唐国勇等^[22]人在干热河谷的研究表明,人工林地土壤有机碳活性高于荒地,且碳库处于良性状况,这也间接证明了种植人工林有助于土壤碳库的提高,与本文研究得出的结论相似。薛蕙^[23]等的研究中,分别对黄土丘陵区人工刺槐林总有机碳、活性有机碳与其生长年限进行耦合分析发现,随林龄增加,总有机碳与活性有机碳均线性增加。戴全厚^[5]也得出类似的结论。而在本研究中对柠条林地土壤总有机碳和活性有机碳分别与生长年限进行耦合分析发现,二者变化并不一致,土壤总有机碳随林龄增加呈二次多项式变化: $y = -0.0017x^2 + 0.1451x + 1.0952$, $R^2 = 0.9636$,而活性有机碳随林龄增加呈线性增加: $y = 0.0111x + 0.3189$, $R^2 = 0.9379$ 。

戴全厚等^[5]的研究表明,随林龄增加,碳库指数

和碳库管理指数显著增加。本研究也表明,随着柠条林的生长,土壤碳库指数和碳库管理指数均呈上升趋势,说明在黄土丘陵区种植柠条林能够使土壤肥力上升,促进土壤向良性发展。柠条林地土壤活性有机碳与总有机碳之间及其他肥力指标均极显著正相关,表明不仅总有机碳是衡量土壤质量的评价指标^[1],活性有机碳也可以作为描述土壤质量的重要指标^[24],并能用来反映土壤的肥力状况及指示植被恢复对土壤质量的影响;碳库指数和碳库管理指数与土壤碳组分、其他主要肥力指标之间都显著相关,这与薛蕙等^[25]在黄土丘陵区研究不同农田类型下土壤碳库管理指数得出的结果一致。Sodhi 等^[26]的研究表明,在一个新的生态系统或措施下,碳库管理指数可以用来监测随时间变化土壤质量下降或更新的程度,根据本文研究,说明碳库指数和碳库管理指数也可以作为反映黄土丘陵区植被恢复过程中的监测因子。

参考文献:

- [1] 戴全厚,刘国彬,薛蕙,等. 黄土丘陵区封禁对土壤活性有机碳与碳库管理指数的影响[J]. 西北林学院学报, 2008,23(4):18-22.
- [2] 周国模,姜培坤. 不同植被恢复对侵蚀型红壤活性碳库的影响[J]. 水土保持学报,2004,18(6):68-70.
- [3] Lefroy R D B, Blair G J, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ¹³C natural isotope abundance [J]. *Plant and Soil*,1993,155/156(1):399-402.
- [4] 戴全厚,刘国彬,薛蕙,等. 侵蚀环境人工灌木林土壤活性有机碳与碳库管理指数演变[J]. 西北农业学报,2008,17(5):215-219.
- [5] 戴全厚,刘国彬,薛蕙,等. 不同植被恢复模式对黄土丘陵区土壤碳库及其管理指数的影响[J]. 水土保持研究, 2008,15(3):61-64.
- [6] 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[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(4):459-465.
- [7] 戴全厚,刘国彬,薛蕙,等. 侵蚀环境坡耕地改造对土壤活性有机碳与碳库管理指数的影响[J]. 水土保持通报, 2008,28(4):17-21.
- [8] 罗友进,王子芳,高明,等. 不同耕作制度对紫色水稻土活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 水土保持学报, 2007,21(5):55-58.
- [9] 李琳,李素娟,张海林,等. 保护性耕作下土壤碳库管理指数的研究[J]. 水土保持学报,2006,20(3):106-109.
- [10] 姬艳艳,张贵龙,张瑞,等. 耕作方式对潮土有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 中国农学通报,2012,28(15): 73-77.
- [11] Schiavo J A, Rosset J S, Pereira M G, et al. Carbon management index and chemical attributes of an Oxisol under different management systems[J]. *Pesquisa agropecuaria brasileira*,2011,46(10):1332-1338.
- [12] Vieira F C B, Bayer C, Zanatta J A, et al. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems[J]. *Soil and tillage research*,2007,96 (1/2):195-204.
- [13] 王晶,朱平,张男,等. 施肥对黑土活性有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 土壤通报,2003,34(5):394-397.
- [14] Lou Y, Xu M, Wang W, et al. Soil organic carbon fractions and management index after 20 yr of manure and fertilizer application for greenhouse vegetables [J]. *Soil Use and Management*,2011,27(2):163-169.
- [15] 张飞,陈云明,王耀凤,等. 黄土丘陵半干旱区柠条林对土壤物理性状及有机质的影响[J]. 水土保持研究, 2010,17(3):105-109.
- [16] 安韶山,黄懿梅. 黄土丘陵区柠条林改良土壤作用的研究[J]. 林业科学,2006,42(1):70-74
- [17] 曲卫东,陈云明,王琳琳,等. 黄土丘陵区柠条人工林土壤有机碳动态及其影响因子[J]. 中国水土保持科学, 2011,9(4):72-77.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,1999.
- [20] 安韶山,张玄,张扬,等. 黄土丘陵区植被恢复中不同粒级土壤团聚体有机碳分布特征[J]. 水土保持学报, 2007,21(6):109-113.
- [21] 张晋爱,张兴昌,邱丽萍,等. 黄土丘陵区不同年限柠条林地土壤质量变化[J]. 农业环境科学学报,2007,26(增刊):136-140.
- [22] 唐国勇,李昆,孙永玉,等. 土地利用方式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 林业科学研究,2011,24 (6):754-759.
- [23] 薛蕙,刘国彬,潘彦平,等. 黄土丘陵区人工刺槐林土壤活性有机碳与碳库管理指数演变[J]. 中国农业科学, 2009,42(4):1458-1464.
- [24] 邱莉萍,张兴昌,程积民. 土地利用方式对土壤有机质及其碳库管理指数的影响[J]. 中国环境科学,2009,29 (1):84-89.
- [25] 薛蕙,刘国彬,卜书海,等. 黄土丘陵区不同农田类型土壤碳库管理指数分异研究[J]. 西北农业学报,2011,20 (10):192-195.
- [26] Sodhi G P S, Beri V, Benbi D K. Using carbon management index to assess the impact of compost application on changes in soil carbon after ten years of rice-wheat cropping [J]. *Soil science and plant analysis*, 2009,40(21/22):3491-3502.