

黄土台塬不同土地利用方式对土壤有机碳氧化稳定性及酶活性的影响

刘梦云, 付东磊, 常庆瑞*, 齐雁冰

(西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:以黄土台塬乔木、灌木、乔灌混交、草和农田为对象,进行了不同土地利用方式土壤易氧化态碳、酶活性研究。结果表明:(1)与耕地相比,林地和草地土壤易氧化态碳含量及其分配比例分别提高了 171%~218%、55%~71%,碳库指数、碳库活度指数和碳库管理指数(CPMI)分别提高了 73%~116%、103%~163%和 233%~330%,有机碳氧化稳定系数降低了 15%~21%(0~5 cm 土层)。(2)草地和乔木林地土壤过氧化氢酶活性略高于其他;0~5 cm 土层,草地和林地土壤碱性磷酸酶、蔗糖酶活性分别高于耕地 98%~211%、88%~117%;灌木林地脲酶活性分别高于耕地、天然草地 69%和 144%。(3)0~5、5~20 cm 和 20~40 cm 土层,CPMI 敏感系数为其他参数的 1.29~14.58 倍;各酶活性相比较,土壤脲酶活性能更好地体现有机碳氧化稳定性强弱和碳库活度,碱性磷酸酶和蔗糖酶活性可较好体现土壤有机碳总体水平和转化程度;4 种酶活性与 CPMI 达显著以上正相关水平。因此,土壤 CPMI 可作为土地利用方式对土壤影响和碳固定的评价因子。

关键词:黄土台塬;土地利用方式;易氧化态碳;碳库管理指数;酶活性

中图分类号:S153.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)12-2415-10

Effects of Land-use Type on Soil Organic Carbon Oxidability and Enzyme Activities in the Tablelands of the Loess Plateau

LIU Meng-yun, FU Dong-lei, CHANG Qing-rui*, QI Yan-bing

(Key Laboratory of Northwest Plant Nutrition and Agriculture Environment/Ministry of Agriculture; College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Soil organic carbon sequestration was significantly affected by land-use types in Loess Plateau areas. This study selected five land-use types, namely arbor, shrub, arbor-shrub mixed, grass and farmland to investigate soil easily oxidizable organic carbon and enzyme activities, and to determine evaluation index of soil carbon sequestration. The results showed that: (1) Compared with farmland, soil easily oxidizable organic carbon (EOC) content and its proportions (to total soil carbon) increased significantly for 171%~218% and 55%~71% respectively for forestland and grassland, as well as carbon pool index, activity index and carbon pool management index (CPMI) were enhanced for 73%~116%, 103%~163% and 233%~330% respectively. While soil oxidation stability coefficient decreased for 15%~21% (0~5 cm depth). (2) Slight differences of soil catalase activity were found among 5 land-use types. Soil catalase activity in natural grassland and arbor forestland were slightly higher than that in other land-use types, while these differences became larger gradually with the depth increasing. In the surface layer (0~5 cm), soil alkali-phosphatase and inverse activities in grassland and forestland were higher than farmland for 98%~211% and 88%~117% respectively. Soil urease activity in shrub forestland was higher than that in farmland and grassland for 69% and 144% respectively. Except urease activity, soil enzyme activities in farmland were lower than in other land-use types. (3) The sensitivity of CPMI in the depth of 0~5 cm, 5~20 cm and 20~40 cm were 1.52~13.07 times, 1.29~11.51 times and 1.58~14.58 times of SOC, EOC and oxidability indexes sensitivity respectively. (4) Correlation analysis indicated that soil urease activity could reflect the oxidation stability of soil organic carbon and carbon pool activity than other soil enzyme activities. Soil alkali-phosphatase and inverse activities could represent the

收稿日期: 2012-05-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30872073); 西北农林科技大学基本科研业务费专项资金 (QN2011156)

作者简介: 刘梦云 (1973—), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为土地生态恢复。E-mail: lmy471993@163.com

* 通信作者: 常庆瑞 E-mail: changqr@nwsuaf.edu.cn

overall level of soil organic carbon and organic carbon conversion degree than other soil enzyme activities. CPMI showed significant positive correlations with four enzyme activities. Therefore, CPMI could be used as one of the indicators for land use change assessment, and could be regarded as measurable index for carbon sequestration.

Keywords: tablelands of the Loess Plateau; land-use types; easily oxidizable organic carbon; CPMI; enzyme activities

土壤有机碳(SOC)是全球碳循环中重要的碳库,在土壤生产力和全球碳循环中起着十分重要的作用,但它只是一个矿化分解和合成的平衡结果,其数量不能很好地反映土壤有机碳质量的变化,也不能反映转化速率等。土壤有机碳是由一系列性质不同、分解程度不同的有机化合物构成的,其构成情况决定了土壤有机碳的周转特征和动态变化。根据分解的难易程度,土壤有机碳可分为易氧化有机碳和难氧化有机碳,其中,易氧化有机碳在土壤养分供应方面具有重要作用^[1]。袁可能提出用氧化稳定系数(K_{oc})来衡量土壤有机碳的氧化稳定性, K_{oc} 值越大,氧化稳定性越大,反之则越小^[2]。而且,土壤有机碳的背景值很高和自然土壤分异性大,整个土壤有机碳的微小变化很难发现,因此探求土壤全碳敏感指示因子很有必要^[3]。部分学者认为,土壤有机碳的活性、氧化稳定性、碳库管理指数(CPMI)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^[4]。土壤酶在土壤有机碳循环和转化过程中起着重要作用,土壤酶活性反映了土壤 C、N 等营养元素循环过程的速率,可作为土壤生物功能多样性的指标,也是反映土壤生产力和微生物活性潜力的指标,能够较快反映土壤利用特征^[5-7]。国外研究中,土壤酶活性不仅是评价土壤健康和质量的重要指标^[8],而且被认为是植被恢复中土壤修复的指示剂^[9]。国内则将土壤酶活性作为衡量土壤质量变化的预警和敏感指标,反映了土壤中各种生物化学过程如有机碳的转化强度和方向^[10]。

土地利用方式变化是影响陆地生态系统碳循环的最大因素之一,也是仅次于化石燃烧而使大气 CO_2 浓度急剧增加的最主要的人为活动,所以土地利用变化对土壤碳库的影响已成为国际碳循环和全球气候变化研究的热点。国内外许多研究者报道了土地利用方式对土壤碳的影响,但研究内容多集中在土壤总有机碳的变化^[11-12];目前黄土台塬土地利用方式对土壤的影响研究主要集中在植被覆盖模式对土壤剖面发育和土壤肥力的影响等方面^[13-14],而关于土壤有机碳的氧化稳定性及土壤酶活性研究相对较少。为此,作者研究了黄土台塬不同土地利用方式下土壤易氧化

有机碳、氧化稳定性、碳库管理指数以及酶活性的变化趋势,为深入研究和评价该区土地利用变化对土壤有机碳的影响提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

供试材料采自国家科技攻关项目“黄河中游黄土高原区(永寿)水土保持型植被建设技术与示范”试验基地的永寿县马莲滩林场(E108°05′22.6″~E108°05′39.3″;N34°47′58.4″~N34°48′42.7″)。该区位于黄土高原渭北台塬沟壑区,海拔高度 900~1300 m,塬面地形波状起伏,沟坡破碎,沟谷深切,水土流失严重。研究区属暖温带大陆季风气候,年均气温 10.8 ℃,平均降雨量 601.6 mm,年均风速 2 m·s⁻¹。试区总面积 26.27 km²,其中山地、沟壑面积 8.20 km²,塬面 10.87 km²。“六五”以来,为研究水土保持型植被体系,建设了不同植被类型的人工植被。耕地开垦在 1000 年以上,农田为一年一熟制,常规管理方式;植被恢复前均为农地;造林(草)后采用封山禁牧,自然恢复的管理措施,天然草地恢复已 12 年。

1.2 样品采集与处理

本研究包括农田(小麦)、天然草地(白羊草、芨芨、铁杆蒿、大油芒等)、灌木林地(沙棘、黄刺玫)、乔灌混交林地(刺槐-沙棘、油松-沙棘-枫树、百榆-油松-沙棘以及油松-沙棘-刺槐混交林)和乔木林地(油松、刺槐、侧柏)5 种利用方式。根据立地条件、植被营造模式(混交和纯林)和恢复阶段(均选择恢复年限近 20 年)的不同,选取了 17 个具有代表性的土壤剖面(均采于塬面),在 0~100 cm 土体中分 5 个层次(一般划分深度为 0~5、5~20、20~40、40~60、60~100 cm)进行采样,具体采样环境见表 1。土样阴干后去除根系、可见植物残体和石块,研磨过 2、0.25 mm 筛,供测定用。

1.3 相关指标测定与计算

1.3.1 易氧化态碳测定

采用 5 mL 0.2 mol·L⁻¹ 重铬酸钾和 5 mL 1:3 硫酸在 130~140 ℃的外加热条件下氧化并用硫酸亚铁滴定,测定易氧化态碳。具体过程为:称取土样 0.2~0.6

表 1 土壤采样点基本情况
Table 1 Basic situation of sampling site

用地类型 Land-use type	样本数 Sample number	植被类型 Vegetation type	采样地点 Sampling site	林龄 Age/a	海拔 Altitude/m	经度 Longitude	纬度 Latitude
耕地	2	农田(冬小麦)	马莲滩林场梁顶	多年	1251	E108°05′24.2″	N34°48′22.0″
		农田(冬小麦)	马莲滩林家沟梁顶	多年	1267	E108°05′36.4″	N34°48′42.7″
天然草地	2	天然草地	马莲滩林场北梁顶	12	1225	E108°05′22.6″	N34°48′20.8″
		天然草地	马莲滩林家沟北坡	12	1265	E108°05′39.3″	N34°48′31.6″
灌木林地	5	沙棘纯林	马莲滩林场东北	15	1259	E108°05′29″	N34°48′21″
		纯沙棘林	马莲滩林家沟南坡	16	1258	E108°05′38.6″	N34°48′31.4″
		纯沙棘林	马莲滩林场北	20	1246	E108°05′25″	N34°48′16″
		沙棘纯林	马莲滩林场东北	21	1251	E108°05′28.4″	N34°48′21.1″
乔灌混交林地	5	黄刺玫	马莲滩林家沟西坡	19	1249	E108°05′38.4″	N34°48′32.2″
		侧柏-刺槐-沙棘混交林	马莲滩三岔口	16	1239	E108°05′35.6″	N34°48′07.5″
		刺槐-沙棘混交林	马莲滩林场西	16	1230	E108°05′25.4″	N34°47′58.4″
		油松-沙棘-枫树混交林	马莲滩林场北	16	1258	E108°05′28.5″	N34°48′15.9″
		百榆-油松-沙棘混交林	马莲滩林场梁顶	16	1251	E108°05′24.5″	N34°48′20.3″
乔木林地	3	油松-沙棘-刺槐混交林	马莲滩林场梁顶	16	1247	E108°05′23.9″	N34°48′19.3″
		油松纯林	马莲滩林家沟山梁西坡	16	1254	E108°05′38.2″	N34°48′32.6″
		侧柏纯林	马莲滩三岔口	16	1218	E108°05′35.0″	N34°48′11.1″
		刺槐纯林	马莲滩林场西	28	1225	E108°05′26.9″	N34°47′59.5″

g,放入消煮管,同时,用石英砂作空白,加入 5 mL 0.2 mol·L⁻¹ 重铬酸钾和 5 mL 1:3 硫酸,放在油浴锅中加热 5 min(从管中液体沸腾开始计时),然后将管中液体尽可能全部洗入三角瓶中,三角瓶中的液体在 50~100 mL 之间,滴入二苯胺指示剂,用 0.05 mol·L⁻¹ 左右浓度的硫酸亚铁滴定。计算公式为:

$$EOC=(V_0-V_i)\times N\times 0.003/M\times 1000\times (1+W/100)$$

式中:EOC 为易氧化有机碳含量;V₀ 为空白滴定用的硫酸亚铁体积;V_i 为土样滴定用的硫酸亚铁体积;N 为硫酸亚铁摩尔浓度;M 为称样重;W 为吸湿水百分数。

1.3.2 土壤碳库管理指数的计算^[15]

土壤碳库管理指数(Carbon pool management index, CPMI)=碳库指数(CPI)×碳库活度指数(AI)×100%

其中,碳库指数(Carbon pool index, CPI)=样品总有机碳含量(g·kg⁻¹)/参考土壤总有机碳含量(g·kg⁻¹)

碳库活度指数(Activity index, AI)=样品碳库活度/参考土壤碳库活度

碳库活度(Activity of carbon, A)=活性有机碳含量(g·kg⁻¹)/非活性有机碳含量(g·kg⁻¹)

1.3.3 酶活性的测定

过氧化氢酶活性测定采用 0.02 mol·L⁻¹ 高锰酸钾溶液滴定的方法;脲酶活性测定采用苯酚钠比色法;碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定;蔗糖酶

活性则采用 3-氨基-5-硝基水杨酸比色法测定^[16]。

1.4 数据分析

文中数据均利用 Excel2003 和 SPSS12.0 软件进行数据处理。不同土地利用方式土壤相关指标之间的差异采用单因素方差分析(One-Way ANOVA);如果差异显著,再采用 LSD 法进行多重比较分析,然后经过 t 检验(P<0.05)。土壤有机碳和其他相关参数变化的敏感性采用下式计算:

敏感性指标=(变量最大值-变量最小值)/变量最小值

1.5 基础数据

本文所用基础数据见表 2。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式土壤易氧化态碳特征

2.1.1 土壤易氧化态碳含量的差异

图 1 显示,各土地利用方式之间土壤易氧化态碳(Easily oxidizable organic carbon, EOC)含量的差异主要体现在 0~40 cm 深度。0~5 cm 土层,土壤易氧化态碳含量大小顺序为乔灌混交林地>灌木林地>乔木林地>天然草地>耕地;其中,前四者分别显著高于耕地约 218%、204%、175%和 171%(P<0.05),而它们之间则差异不显著(P>0.05)。5~20 cm 土层,天然草地易氧化态碳含量显著高于耕地、乔灌混交林地分别约

105%和 85%($P<0.05$),而其他用地类型之间差异不显著($P>0.05$)。20~40 cm 土层,天然草地显著高于耕地、灌木林地和乔灌混交林地分别约 142%、80%和 115%($P<0.05$);40~60 cm 和 60~100 cm 乔木林地和天然草地显著高于耕地。

2.1.2 土壤易氧化态碳分配比例的差异

土壤易氧化态碳占总 SOC 的比率被称为易氧化态碳的分配比例,它比该组分有机碳总量更能反映植被对土壤碳行为的影响。不同土地利用方式土壤易氧化态碳分配比例(EOC/SOC)在整个剖面均存在一定差异(图 1)。0~5 cm 土层,EOC/SOC 为乔灌混交林地>灌木林地>乔木林地=天然草地>耕地,前四者分别高出耕地幅度约 71%、62%、56%和 55%,其中乔灌混交林地与耕地之间差异显著($P<0.05$)。5~20、20~40、40~60 cm 和 60~100 cm 土层各用地类型之间易氧化态碳分配比例虽存在一定差异,但均达不到显著水平($P>0.05$)。

2.2 土壤碳库管理指数相关参数与氧化稳定性的差异

2.2.1 土壤有机碳氧化稳定性

不同土地利用方式土壤有机碳氧化稳定性差异

较小(表 3)。0~5 cm 土层,土壤有机碳氧化稳定系数大小顺序为耕地>天然草地=乔木林地>灌木林地>乔灌混交林地,其中耕地显著高于乔灌混交林地 26% ($P<0.05$),而其他各用地类型之间差异不显著($P>0.05$)。5~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 和 60~100 cm 4 个土层各用地类型土壤有机碳氧化稳定系数均差异不显著($P>0.05$)。

2.2.2 土壤碳库指数

不同土地利用方式土壤碳库指数的差异主要体现在 0~20 cm 深度(表 3)。0~5 cm 土层,土壤碳库指数表现为灌木林地>乔灌混交林地>乔木林地=天然草地>耕地,灌木林地显著高于耕地 116%($P<0.05$),而其他两两之间差异不显著($P>0.05$)。5~20 cm 土层,土壤碳库指数表现为天然草地>灌木林地>乔木林地>耕地>乔灌混交林地,其中,天然草地显著高于乔灌混交林地 80%($P<0.05$),其他各用地类型间差异不显著($P>0.05$)。20~40、40~60 cm 和 60~100 cm 3 个土层各用地类型间均差异不显著($P>0.05$),其中 20~40 cm 土层天然草地土壤碳库指数最高,40 cm 以下则乔木林地和乔灌混交林地较高。

表 2 不同土地利用方式土壤有机碳含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 2 Content of soil organic carbon in different land-use types($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

用地类型 Land use type	土层深度 Soil layer				
	0~5 cm	5~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~100 cm
耕地	13.36±1.99	12.22±1.18	9.13±2.57	7.89±1.74	7.19±0.30
天然草地	22.77±1.60	21.07±4.44	12.02±4.48	6.03±1.80	5.56±1.23
灌木林地	26.75±8.32	19.47±6.80	10.76±6.05	8.15±4.73	6.50±3.64
乔灌混交林地	27.61±12.73	11.44±2.36	10.42±3.40	8.56±1.76	8.34±1.94
乔木林地	22.70±4.21	17.89±8.31	11.09±3.33	8.61±1.53	7.97±1.32

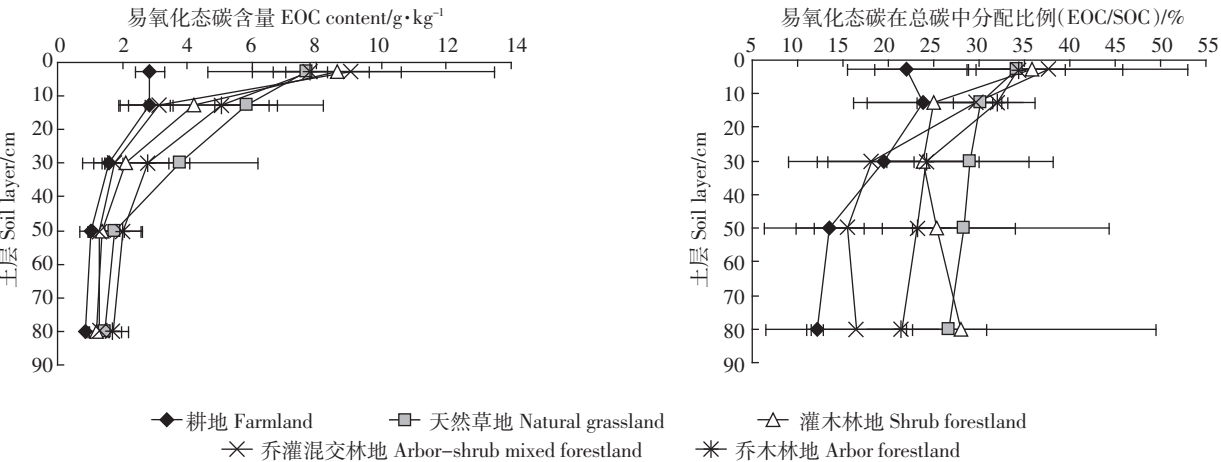


图 1 不同土地利用方式土壤易氧化态碳及其分配比例特征

Figure 1 Soil easily oxidizable organic carbon and its proportion distribution in different land-use types

2.2.3 土壤碳库活度指数

不同土地利用方式土壤碳库活度指数的差异表现在整个剖面(表 3)。0~5 cm 土层,土壤碳库活度指数大小表现为灌木林地>乔灌混交林地>天然草地=乔木林地>耕地,其中,灌木林地和乔灌混交林地与耕地相比分别显著增加了 163%和 145%($P<0.05$),其他各用地类型间则差异不显著($P>0.05$);5~20 cm 土层,表现为乔木林地>天然草地=乔灌混交林地>灌木林地>耕地,前四者与耕地相比分别显著增加了 67%、54%、53%和 22%($P<0.05$),而它们两两之间均差异

不显著($P>0.05$);20 cm 以下各层次均表现为天然草地和灌木林地碳库活度指数较大,耕地最小。

2.2.4 土壤碳库管理指数

不同土地利用方式土壤碳库管理指数在整个剖面上均存在明显差异(表 3)。0~5 cm 土层,天然草地、灌木林地、乔灌混交林地和乔木林地土壤碳库管理指数分别显著高于耕地约 233%、330%、315%和 238%($P<0.05$),而其他各用地类型间差异不明显($P>0.05$);5~20 cm 土层,土壤碳库管理指数大小顺序为耕地<乔灌混交林地<灌木林地<乔木林地<天然草

表 3 不同土地利用方式土壤碳库管理指数
Table 3 Soil carbon pool management index(CPMI) in different land-use types

用地类型 Land-use type	碳库活度 A	碳库指数 CPI	碳库活度指数 AI	碳库管理指数 CPMI/%	氧化稳定系数 K_{oc}
0~5 cm					
耕地	0.29±0.11a	1.00±0.00a	1.00±0.00a	100±0a	0.78±0.07b
天然草地	0.53±0.12a	1.73±0.27ab	2.03±0.85ab	333±90b	0.66±0.05ab
灌木林地	0.68±0.52a	2.16±0.82b	2.63±2.28b	430±233b	0.64±0.17ab
乔灌混交林地	0.63±0.24a	1.87±0.93ab	2.45±1.29b	415±220b	0.62±0.08a
乔木林地	0.53±0.04a	1.73±0.40ab	2.03±0.71ab	338±110b	0.66±0.02ab
5~20 cm					
耕地	0.32±0.13a	1.00±0.00ab	1.00±0.00a	100±0a	0.76±0.08a
天然草地	0.43±0.06a	1.62±0.41b	1.54±0.62b	235±76b	0.70±0.03a
灌木林地	0.35±0.12a	1.37±0.48ab	1.22±0.63b	165±113ab	0.75±0.07a
乔灌混交林地	0.43±0.14a	0.90±0.20a	1.53±0.76b	128±45ab	0.70±0.06a
乔木林地	0.47±0.06a	1.26±0.64ab	1.67±0.66b	216±154b	0.68±0.03a
20~40 cm					
耕地	0.26±0.16ab	1.00±0.00a	1.00±0.00a	100±0a	0.81±0.10a
天然草地	0.43±0.17b	1.40±0.62a	2.38±1.78c	324±260b	0.71±0.09a
灌木林地	0.34±0.20ab	1.25±0.77a	1.91±1.67bc	162±128a	0.76±0.11a
乔灌混交林地	0.22±0.07a	1.21±0.50a	1.25±0.83ab	122±52a	0.82±0.05a
乔木林地	0.32±0.07ab	1.29±0.50a	1.80±1.14bc	211±138ab	0.76±0.04a
40~60 cm					
耕地	0.16±0.05a	1.00±0.00a	1.00±0.00a	100±0a	0.86±0.04a
天然草地	0.40±0.11a	0.79±0.28a	2.74±1.12a	218±114b	0.72±0.05a
灌木林地	0.46±0.50a	1.07±0.65a	3.11±3.64a	168±84ab	0.75±0.19a
乔灌混交林地	0.19±0.05a	1.13±0.32a	1.27±0.50a	132±38ab	0.84±0.04a
乔木林地	0.30±0.06a	1.13±0.30a	2.06±0.72a	226±74b	0.77±0.04a
60~100 cm					
耕地	0.14±0.01a	1.00±0.00a	1.00±0.00a	100±0a	0.88±0.01a
天然草地	0.37±0.07a	0.74±0.17a	2.67±0.57a	202±79b	0.73±0.04a
灌木林地	0.58±0.70a	0.90±0.49a	4.19±5.09a	194±99b	0.72±0.21a
乔灌混交林地	0.20±0.08a	1.16±0.27a	1.46±0.57a	158±44ab	0.84±0.05a
乔木林地	0.28±0.06a	1.11±0.18a	2.01±0.45a	225±65b	0.78±0.04a

注:同一层次同列中不同小写字母代表差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Within columns, values in the same layer followed by the different lowercase letter(a~d)are significantly different($P<0.05$) between different plant types. The same as below.

地,天然草地和乔木林地显著高于耕地分别约 135% 和 116% ($P<0.05$),其他各用地类型间差异不显著 ($P>0.05$);20 cm 以下各层次也表现为乔木林地和天然草地土壤碳库管理指数较高,灌木林地次之。

2.3 土壤酶活性

2.3.1 土壤过氧化氢酶活性

林地和草地土壤过氧化氢酶活性与耕地的差异随着剖面深度的加深而变大(图 2)。0~5 cm 土层,天然草地过氧化氢酶活性显著高于耕地、灌木林地和乔灌混交林地分别约 5%、8% 和 4% ($P<0.05$);5~20 cm 土层,天然草地显著高于耕地、灌木林地、乔灌混交林地和乔木林地 2%~6% ($P<0.05$);20~40 cm 土层,天然草地显著高于耕地和乔灌混交林地分别约 7%、6% ($P<0.05$);40~60、60~100 cm 土层,天然草地、灌木林地、乔灌混交林地和乔木林地显著高于耕地分别为 17%~23% ($P<0.05$) 和 16%~18% ($P<0.05$)。

2.3.2 土壤脲酶活性

不同土地利用方式土壤脲酶活性的差异主要体现在 0~20 cm 深度(图 2)。0~5 cm 土层,灌木林地、乔灌混交林地土壤脲酶活性显著高于耕地,分别约 69%

和 50%,灌木林地显著高于天然草地约 144% ($P<0.05$);5~20 cm 土层,大小顺序为耕地>天然草地>乔灌混交林地>灌木林地>乔木林地,乔木林地显著低于耕地约 53% ($P<0.05$);20~40 cm 土层,各土地利用方式间差异不显著 ($P>0.05$);40~60 cm 土层,灌木林地显著高于耕地、天然草地和乔木林地,分别约 273%、144% 和 130% ($P<0.05$);60~100 cm 土层,乔木林地和灌木林地显著高于耕地,分别约 286%、262% ($P<0.05$)。

2.3.3 土壤碱性磷酸酶活性

不同土地利用方式土壤碱性磷酸酶活性主要表现在 0~40 cm 深度(图 2)。0~5 cm 土层,天然草地、灌木林地、乔灌混交林地和乔木林地土壤碱性磷酸酶活性分别高于耕地约 159%、211%、153% 和 98% ($P<0.05$);5~20 cm 土层,天然草地显著高于耕地、乔灌混交林地、乔木林地,分别约 98%、66% 和 79% ($P<0.05$);20~40 cm 土层,天然草地显著高于耕地、乔灌混交林地,分别约 118%、135% ($P<0.05$);40~60 cm 土层,各土地利用方式间差异不显著 ($P>0.05$);60~100 cm 土层,耕地显著高于乔木林地 45% ($P<0.05$)。

2.3.4 土壤蔗糖酶活性

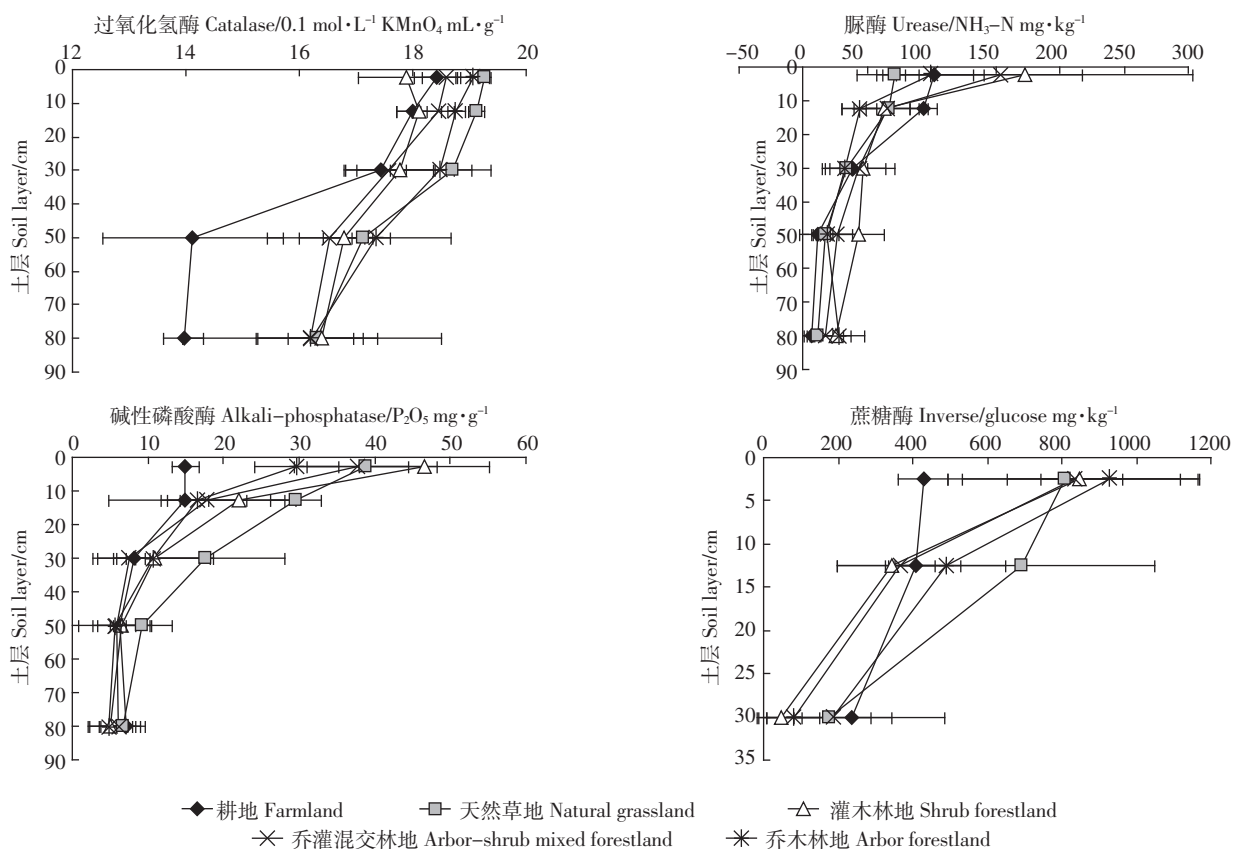


图 2 不同土地利用方式土壤酶活性特征

Figure 2 Soil enzyme activities in different land-use types

不同土地利用方式土壤蔗糖酶活性的差异主要体现在 0~20 cm 深度(图 2)。0~5 cm 土层,天然草地、灌木林地、乔灌混交林地、乔木林地土壤蔗糖酶活性分别高于耕地约 88%、98%、94%和 117%($P<0.05$); 5~20 cm 土层,天然草地显著高于耕地、灌木林地和乔灌混交林地,分别约 71%、101%和 91%($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 不同土地利用方式土壤易氧化态碳及其氧化稳定性参数的差异

本研究中,耕地变为林地和草地均能有效促进土壤易氧化态碳的形成及其分配比例的提高,与唐国勇等^[17]的林地和草地土壤易氧化有机碳含量高于耕地一致。这是由于相比草地和林地,土壤的耕作措施改变了土壤温度、湿度、孔隙度和土壤微生物活性,使得植物残体在土壤内更易分解,加之由于秸秆输出、根系量少、回归土壤的有机物质少,使土壤易氧化态碳含量下降。林地和草地表层土壤有机质的主要来源物(植物凋落物)数量丰富,因而其能有效地恢复和维持土壤有机碳及其易氧化态碳含量。天然草地主要覆盖物为草本植物,根系分布较浅且腐殖转化快,这导致了 20~70 cm 土层天然草地土壤易氧化有机碳及其分配比例在 5 种土地利用方式中最高。这与邱莉萍等^[18]的研究结论一致。在剖面变化上,各土地利用方式土壤易氧化态碳含量及其分配比例均随土层的加深逐渐下降,但下降幅度存在差异,乔灌混交和灌木林地剖面土壤易氧化态碳含量下降幅度最大,天然草地下降幅度较小,耕地下降幅度最小。这主要与不同植被类型植物根系分布、产生凋落物数量和质量及其与土壤易氧化态碳的相关程度有关。

土壤有机质的氧化稳定性是表征土壤有机碳抵抗氧化分解能力的指标,是土壤有机碳的一项重要性质^[2],可反映人类活动措施对土壤形成的影响。土壤有机碳氧化稳定性受气候、土壤母质、植被覆盖、种植年限、农业管理措施等多方面的影响。肥沃的土壤其氧化稳定系数较一般的土壤小,因而可用氧化稳定系数高低表征土壤的供养能力,氧化稳定系数越低其供养能力越强,反之则越弱。于君宝等^[19]发现,黑土开垦后,随着耕作年限的延长,土壤有机碳的氧化稳定系数增大。这与本文的研究结果耕地土壤氧化稳定系数大于林地和草地一致。

土壤碳库管理指数结合了人为影响下土壤碳库指标和碳库活度,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。因此,它能为较为全面和动态地反应外界条件对碳库中各组分在量和质上的变化^[20],从而反应土壤质量的变化和更新的程度。碳库管理指数越大,土壤不稳定有机碳更新速度越快、流通量越大,表示有机碳越易被微生物分解,质量也就越高^[20]。林地、草地与耕地相比,由于年回归土壤的植被凋落物的差异,土壤易氧化态碳含量增加,土壤氧化稳定系数降低,碳库活度增加,碳库活度指数和碳库管理指数也明显增加,尤以天然草地增加幅度最为明显,这与邱丽萍等^[17]的研究结果一致,即不同土地利用方式土壤 CPMI 撂荒地>林地>耕地。而唐国勇等^[18]认为,荒草地活性有机碳比率和碳库管理指数均低于林地,与本文的研究结果稍有出入,其原因还有待于进一步研究。

由此可见,耕地变为林地和草地,经过一段时间的封闭育林不但使土壤有机碳的量发生了很大变化,而且对土壤有机碳的质也产生了较明显的影响,优化了土壤的供养环境。各利用方式相比,天然草地、灌木林地以及乔木林地对于土壤整个剖面的易氧化态碳改善效果较为明显,表层灌木林地突出,表层以下天然草地和乔木林地较佳。在数值上,土壤碳库管理指数之间相差大于其他指标,故而土壤碳库管理指数代替其他因子更能显示土壤之间的差异,更能体现土壤改良的效果。

3.2 不同土地利用方式土壤酶活性及其分布的差异

本研究表明,林地和草地能不同程度地增加土壤酶活性。这是由于林地和草地均是在耕地的基础上转变而来的,开放的生态系统逐步转变为封闭的生态系统,养分物质呈现出流入状态,物质代谢率增加。因此,相对于耕地来讲其土壤酶活性均增加,这与侯雪莹等^[21]的研究结果一致。同时,土地利用类型由于其特殊的物种特性、凋落物的种类数量的差异,表现为土地利用方式对不同种类土壤酶活性影响差异较大。耕地由于培施化肥 0~20 cm 深度土壤脲酶活性表现出较高水平,而乔木林地则较小。不同土壤酶活性反映了不同的土壤生化作用强度,结果说明林地和草地对土壤解毒能力,土壤碳、氮、磷的转化强度,土壤腐殖化强度大小和有机质积累强度均大于耕地。

各用地类型之间的土壤酶活性(除过氧化氢酶活性外)差异主要表现在 0~40 cm 深度的土层,随着剖面层次的增加,各用地类型之间的差异逐渐减小。有部分学者研究表明,不同土地利用方式下荒草类型的土壤酶活性综合指数低于其他林地,这与本研究结果

有一定出入^[22-23]。这是由于本研究区天然草地物种多样性丰富,人为干预活动较少,水土流失较轻,土壤水分等环境因素较好,枯枝落叶等物质就地贮存和分解,使其基本处于封闭的生态系统中,土壤养分和微生物含量高,物质转化速率高,表现出较强的酶活性;同时由于根系在整个剖面上分布均匀,导致整个剖面酶活性变化幅度较小。这与薛莲等的研究结果一致^[24]。乔木林主要是一些较大根系,这些较大根系延伸到较深层次形成其 40 cm 以下较高的酶活性以及剖面变化幅度较小的特点;灌木林地年回归土壤的枯落物丰富且在剖面分布差异较大,故而形成明显的剖面差异。耕地由于耕作及植被特点,20 cm 以内深度酶活性几乎没有差异,整个剖面上变化幅度也较小(除过氧化氢酶活性外);同时,耕作对土壤微生物有一定影响,Gupta^[25]指出耕作降低了微生物生物量及其活性,也降低了土壤酶的活性,但由于耕地在耕作过程中会施用尿素肥料,导致其脲酶活性 0~20 cm 深度较高。这与张海峰等^[26]的研究结果一致。

3.3 土壤有机碳及其氧化稳定指标与酶活性之间的关系

表 4 显示:4 种酶活性均与碳库管理指数达显著以上正相关水平;土壤脲酶活性与土壤氧化稳定系数的相关性大于其他,说明土壤脲酶活性能更好地体现土壤有机碳的氧化稳定性强弱;土壤碱性磷酸酶和蔗糖酶活性与土壤有机碳、易氧化态碳、稳态碳、碳库指

数的相关性高于其他,表明这两种酶活性可以更好地体现土壤有机碳的总体水平和有机碳转化的程度;土壤脲酶活性与碳库活度、碳库活度指数之间的相关系数大于其他,说明其更能体现土壤碳库活度;土壤蔗糖酶活性与碳库指数、碳库管理指数之间的相关系数大于其他,说明其更能体现土壤碳库水平。

3.4 土壤有机碳及其氧化稳定性指标敏感性分析

沈宏等^[15]研究认为,CPMI 可灵敏反映农业生产措施对土壤碳库的影响;而邱莉萍等^[17]认为,LOC(活性有机碳)可以指示土地利用方式对 SOC 和 CPMI 的影响;徐明岗等^[27]则指出,LOC 和 CPMI 均应成为描述土壤质量和评价土壤管理的良好指标;蔡太义等^[28]认为 LOC 和 CPMI 较 SOC 更能快速准确地反映土地管理措施对土壤碳库的影响。与徐明岗等^[27]和蔡太义等^[28]结论类似,本研究中不同土地利用方式土壤碳库管理指数敏感性最高,其次为易氧化态碳,而稳态碳敏感系数较低,氧化稳定系数敏感性最低(0~40 cm 深度),其中 0~5、5~20 cm 和 20~40 cm 土层,碳库管理指数敏感系数分别为其他参数的 1.52~13.07、1.29~11.51 倍和 1.58~14.58 倍(表 5)。因此,土壤碳库活度指数更能体现土地利用方式对土壤的短期影响。

4 结论

(1)林地和草地能明显提高土壤易氧化态碳含量

表 4 不同土地利用方式土壤酶活性与有机碳的相关性
Table 4 Correlation between soil enzyme activities and SOC in different land-use types

酶活性 Soil enzyme activity	SOC	EOC	StOC	A	CPI	AI	CPMI	K_{oc}
过氧化氢酶 Catalase	0.351(*)	0.460(**)	0.255	0.475(**)	0.185	0.304	0.345(*)	-0.554(**)
脲酶 Urease	0.476(**)	0.692(**)	0.316	0.751(**)	0.312	0.587(**)	0.622(**)	-0.720(**)
碱性磷酸酶 Alkali-phosphatase	0.803(**)	0.814(**)	0.694(**)	0.652(**)	0.604(**)	0.422(*)	0.642(**)	-0.634(**)
蔗糖酶 Inverse	0.823(**)	0.768(**)	0.729(**)	0.346	0.707(**)	0.251	0.660(**)	-0.354

注:*0.05 水平显著相关; **0.01 水平显著相关; SOC-土壤有机碳; EOC-易氧化有机碳; StOC-稳态有机碳。下同。
Note: *0.05 horizon significant correlation; **0.01 horizon significant correlation; SOC-Soil organic carbon; EOC-Easily oxidizable OC; StOC-Stable OC. The same as below.

表 5 不同土地利用方式土壤有机碳及其氧化稳定性参数敏感性
Table 5 Sensitivity of SOC and its oxidabilities in different land-use types

土层深度/cm Soil depth	有机碳 SOC	易氧化态碳 EOC	稳态碳 StOC	碳库活度 A	碳库指数 CPI	碳库活度指数 AI	碳库管理指数 CPMI	氧化稳定系数 K_{oc}
0~5	1.12	2.18	0.88	1.34	1.16	1.63	3.30	0.25
5~20	0.79	1.05	0.77	0.47	0.79	0.67	1.35	0.12
20~40	0.32	1.42	0.14	0.90	0.40	1.38	2.24	0.15
40~60	0.42	0.97	0.71	1.86	0.43	2.11	1.26	0.19
60~100	0.56	0.98	0.81	3.17	0.56	3.19	1.25	0.22

及其分配比例、碳库活度、碳库活度指数、碳库指数、碳库管理指数,也能有效降低土壤氧化稳定系数,因而可以有效地改善土壤固碳、供养环境。5种利用方式(耕地、草地、灌木、乔灌混交和乔木)中,0~5 cm 土层灌木林地和乔灌混交林地改变效果较为明显;而5~40 cm 深度天然草地的提高效果较突出。

(2)林地和草地能够有效提高土壤酶活性。土壤过氧化氢酶及蔗糖酶活性表现为天然草地和乔木林地较高;脲酶活性则灌木林地和乔灌混交林地较高;碱性磷酸酶为天然草地和灌木林地较高;除脲酶活性外,3种酶活性均表现为耕地较低。

(3)本研究中土壤碳库管理指数可以作为土地利用方式对土壤有机碳固定的评价指标之一。这是因为0~5、5~20 cm 和 20~40 cm 土层,碳库管理指数敏感系数分别为其他参数的1.52~13.07、1.29~11.51倍和1.58~14.58倍。

(4)相关性表明,土壤脲酶活性能更好地体现土壤有机碳的氧化稳定性强弱和碳库活度,土壤碱性磷酸酶和蔗糖酶活性可以更好地体现土壤有机碳总体水平及其转化程度,土壤蔗糖酶活性更能体现土壤碳库水平;4种酶活性均与碳库管理指数达显著以上正相关水平。

参考文献:

- [1] 徐华君. 阿尔泰山区土壤有机碳氧化稳定性的初步比较分析[J]. 水土保持研究, 2007, 14(6): 27-29.
XU Hua-jun. Comparative analysis of the soil organic carbon oxidation stability in Altai Mountain, Xinjiang[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(6): 27-29.
- [2] 袁可能. 土壤有机矿质复合体的研究 I: 土壤有机矿质复合体中腐殖质氧化稳定性的初步研究[J]. 土壤学报, 1963, 18(2): 286-293.
YUAN Ke-neng. Studies on the organo-mineral complex in soil I: The oxidation stability of humus from different organo-mineral complexes in soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1963, 18(2): 286-293.
- [3] Wang W J, Dala R C, Moody P W. Relationships of soil respiration to microbial biomass, substrate availability and clay content[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35: 273-284.
- [4] Hassink J. Relationship between the amount and the activity of the microbial biomass in dutch grassland soils: Comparison of the substrate - incubation method and the substrate - induced respiration method[J]. *Soil Biochem*, 1993, 25(5): 533-538.
- [5] Bending G D, Turner M K, Jones J E. Interactions between crop residue and soil organic matter quality and the functional diversity of soil microbial communities[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34(8): 1073-1082.
- [6] Sicardi M, García-Préchac F, Frioni L. Soil microbial indicators sensitive to land use conversion from pastures to commercial Eucalyptus grandis (Hill ex Maiden) plantations in Uruguay[J]. *Applied Soil Ecology*, 2004, 27(2): 125-133.
- [7] Bending G D, Turner M K, Wood M, et al. Microbial and biochemical soil quality indicators and their potential for differentiating areas under contrasting agricultural management regimes[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(11): 1785-1792.
- [8] Bossio D A, Fleck J A, Scow K M, et al. Alteration of soil microbial communities and water quality in restored wetlands[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38(6): 1223-1233.
- [9] García C, Hernández T, Roldán A, et al. Organic amendment and mycorrhizal inoculation as a predict in afforestation of soils with *Pinus halepensis* Miller: Effect on their microbial activity[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(8): 1173-1181.
- [10] 姜勇, 梁文举, 闻大中. 免耕对农田土壤生物学特性的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 347-351.
JIANG Yong, LIANG Wen-ju, WEN Da-zhong. Effects of no-tillage on soil biological properties in farmlands: A review[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(3): 347-351.
- [11] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential[J]. *Global Change Biology*, 2000, 6(3): 317-327.
- [12] 张于光, 张小全, 肖焯. 米亚罗林区土地利用变化对土壤有机碳和微生物量碳的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2029-2033.
ZHANG Yu-guang, ZHANG Xiao-quan, XIAO Ye. Effects of land use change on soil organic carbon and microbial biomass carbon in Miyaluo forest area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(11): 2029-2033.
- [13] 庞奖励, 张卫青, 黄春长, 等. 渭北高原土地利用变化对土壤剖面发育的影响: 以洛川-长武塬区耕地转为苹果园为例 [J]. 地理学报, 2010, 65(7): 789-800.
PANG Jiang-li, ZHANG Wei-qing, HUANG Chun-chang, et al. The influence of land use change on soil development and over the loess tablelands in the Northern Weihe River Basin, China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(7): 789-800.
- [14] 张静, 常庆瑞. 渭北黄土高原不同林型植被对土壤肥力的影响[J]. 水土保持通报, 2006, 26(3): 26-28, 62.
ZHANG Jing, CHANG Qing-rui. Effects on soil fertility in different types of forest on loess plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2006, 26(3): 26-28, 62.
- [15] 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[J]. 土壤学报, 2000, 37(5): 166-173.
SHEN Hong, CAO Zhi-hong, XU Zhi-hong. Effects of fertilization on different carbon fractions and carbon pool management index in soils [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(5): 166-173.
- [16] 关松荫, 张德生, 张志明. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 14-142.
GUAN Song-yin, ZHANG De-sheng, ZHANG Zhi-ming. Soil enzymes and their research[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986: 14-142.
- [17] 唐国勇, 李昆, 孙永玉, 等. 干热河谷不同利用方式下土壤活性有机碳含量及其分配特征[J]. 环境科学, 2010, 31(5): 1365-1371.
TANG Guo-yong, LI Kun, SUN Yong-yu, et al. Soil labile organic car-

- bon contents and their allocation characteristics under different land uses at dry-hot valley[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(5):1365-1371.
- [18] 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.
- QIU Li-ping, ZHANG Xing-chang, CHENG Ji-min. Effects of land-use type on soil organic matter and carbon management index in Ziwu-ling area[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(1):84-89.
- [19] 于君宝, 刘景双, 王金达, 等. 不同开垦年限黑土有机碳变化规律[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1):27-30.
- YU Jun-bao, LIU Jing-shuang, WANG Jin-da, et al. Organic carbon variation law of black soil during different tillage period[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(1):27-30.
- [20] 戴全厚, 刘国彬, 薛 蕊, 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.
- DAI Quan-hou, LIU Guo-bin, XUE Sha, et al. Effect of different vegetation restoration on soil carbon and carbon management index in Eroded Hilly Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15(3):61-64.
- [21] 侯雪莹, 韩晓增, 王树起, 等. 土地利用方式对黑土酶活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(2):215-219.
- HOU Xue-ying, HAN Xiao-zeng, WANG Shu-qi, et al. Effect of land-use type on enzyme activity in black soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(2):215-219.
- [22] 徐华勤, 章家恩, 冯丽芳, 等. 广东省典型土壤类型和土地利用方式对土壤酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6):1464-1471.
- XU Hua-qin, ZHANG Jia-en, FENG Li-fang, et al. Effects of typical soil types and land use patterns on soil enzyme activities in Guangdong Province[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6):1464-1471.
- [23] 王月容, 周金星, 周志翔, 等. 洞庭湖退田还湖区不同土地利用方式下土壤微生物数量与酶活性特征 [J]. 生态学杂志, 2010, 29(5):910-916.
- WANG Yue-rong, ZHOU Jin-xing, ZHOU Zhi-xiang, et al. Soil microbial quantity and enzyme activity of different land-use patterns under converting polders back into wetlands in Dongting Lake area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(5):910-916.
- [24] 薛 蕊, 李占斌, 李 鹏, 等. 不同土地利用方式对干热河谷地区土壤酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(18):3768-3777.
- XUE Sha, LI Zhan-bin, LI Peng, et al. Effect of land use on soil enzyme activity in Dry-Hot Valley[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(18):3768-3777.
- [25] Gupta VVSR. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes affected by cultivation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 20(6):777-786.
- [26] 张海峰, 贡 璐, 吕光辉. 塔里木河流域典型绿洲不同土地利用方式对土壤酶活性的影响[J]. 新疆农业科学, 2010, 47(4):770-773.
- ZHANG Hai-feng, GONG Lu, LÜ Guang-hui. Influence of different land use ways on soil enzymatic activities in typical oasis of Tarim River Valley[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2010, 47(4):770-773.
- [27] 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.
- XU Ming-gang, YU Rong, SUN Xiao-feng, et al. Effects of long-term fertilization on labile organic matter and carbon management index (CMI) of the typical soils of China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(4):459-465.
- [28] 蔡太义, 黄耀威, 黄会娟, 等. 不同年限免耕秸秆覆盖对土壤活性有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(9):1962-1968.
- CAI Tai-yi, HUANG Yao-wei, HUANG Hui-juan, et al. Soil labile organic carbon and carbon pool management index as affected by different years no-tilling with straw mulching[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(9):1962-1968.