

DOI: 10.5846/stxb201304010571

蒋婧,王沫竹,宋明华,石培礼,宗宁.牧草种类与耕作时间对拉萨牧草种植地土壤不同组分有机碳的影响.生态学报,2015,35(2):424-433.

Jiang J, Wang M Z, Song M H, Shi P L, Zong N. Effects of grassland species identity and cultivation time on organic carbon in cultivated soil in Lhasa, Tibet, China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2): 424-433.

牧草种类与耕作时间对拉萨牧草种植地土壤不同组分有机碳的影响

蒋 婧^{1, 2}, 王沫竹³, 宋明华^{1, *}, 石培礼¹, 宗 宁^{1, 2}

1 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 拉萨高原生态试验站, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 北京林业大学林学院, 北京 100083

摘要:以中国科学院拉萨高原生态试验站附近天然灌丛草原与站内的牧草种植地为研究对象,分析牧草种类与耕作时间对牧草种植地土壤有机碳的影响。种植地的 5 种牧草种类为:耕作 10a 的鸭茅(*Dactylis glomerata* L.)、耕作 4a 与 10a 的垂穗披碱草(*Elymus nutans* Griseb.)、耕作 3a 与 10a 的苜蓿(*Medicago sativa* Linn.),同时以该区域原生植被天然灌丛草原生长地作为对照。结果表明:与天然灌丛土壤全土有机碳(Total Organic Carbon, TOC)含量相比,耕作 10a 的鸭茅增加了土层 0—5 cm 与 10—30 cm TOC 含量,耕作 10a 的苜蓿与垂穗披碱草分别显著增加与降低了土层 0—5 cm TOC 含量。主要因为耕作不同牧草使种植地土壤不同组分有机碳含量发生变化,耕作 10a 的鸭茅和苜蓿分别使土层 0—5 cm 与 10—30 cm、土层 0—5 cm 与 10—20 cm 的砂粒级(50—2000 μm)颗粒有机碳(POC)含量降低,粉粒与黏粒级(<50 μm)矿物结合态有机碳(MOC)含量升高;耕作 10a 的垂穗披碱草则使土壤表层 0—5 cm 砂粒级 POC 含量显著降低, MOC 无显著变化。与耕作 4a 的垂穗披碱草相比,耕作 10a 显著降低了土层 10—20 cm TOC 含量,主要体现在粗砂粒(250—2000 μm) POC 含量与粉粒(2—50 μm) MOC 含量的降低;与耕作 3a 的苜蓿相比,耕作 10a 的苜蓿显著降低了土层 5—30 cm TOC 含量,主要因为各土层砂粒级 POC 含量、粉粒与细黏粒 MOC 含量均有所降低。说明短期耕作更有利于牧草种植地土壤有机碳库的累积。

关键词:牧草种类;耕作时间;土壤有机碳;种植地土壤;灌丛土壤

Effects of grassland species identity and cultivation time on organic carbon in cultivated soil in Lhasa, Tibet, China

JIANG Jing^{1, 2}, WANG Mozhu³, SONG Minghua^{1, *}, SHI Peili¹, ZONG Ning^{1, 2}

1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Lhasa National Ecological Research Station, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Effects of grassland species identity and cultivation time on soil organic carbon were studied in cultivated soil in Lhasa National Ecological Research Station, Chinese Academy of Sciences in Tibet, China. Soil samples were collected from one type of local original montane shrub soil (control) and five types of cultivated soil with different grassland species and cultivation time, i.e. one type of *Dactylis glomerata* L. soil having been cultivated for 10 years (D10), two types of *Elymus nutans* Griseb. soil having been cultivated for 4 and 10 years (E4 and E10), and two types of *Medicago sativa* Linn. soil

基金项目:国家基础研究计划 973 项目(2010CB951704);中国科学院地理科学与资源研究所 2010 年度资助部署创新项目(201003012);中国科学院地理科学与资源研究所优秀青年人才基金项目(2011RC101)

收稿日期:2013-04-01; 网络出版日期:2014-03-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: songmh@igsnrr.ac.cn

having been cultivated for 3 and 10 years (M3 and M10). Compared with the control (the montane shrub soil), D10 significantly increased total organic carbon (TOC) in soil at both 0—5 cm and 10—30 cm, but did not significantly affect it in soil at 5—10 cm. E10 significantly decreased TOC in soil at 0—5 cm, and M10 significantly increased TOC in soil at both 0—5 cm and 10—20 cm. All these differences in TOC resulted from different responses of organic carbon in soil fractions to species identity and cultivation time. In D10, particulate organic carbon (POC) of coarse sand (250—2000 μm) decreased and mineral-associated organic carbon (MOC) of silt and clay (<50 μm) increased in soil depths of 0—5 cm and 10—30 cm compared to the control. E10 significantly reduced POC of sand (50—2000 μm) and MOC of coarse clay (0.2—2 μm) in soil depth of 0—5 cm, but increased MOC of fine clay (<0.2 μm) at the same soil depth. In M10, POC of coarse sand (250—2000 μm) decreased and MOC of silt (2—50 μm) increased in soil depth of 0—5 cm. In addition, in soil of 10—20 cm in M10, POC of coarse sand (250—2000 μm) decreased, but POC of fine sand (50—250 μm), MOC of silt (2—50 μm) and MOC of fine clay (<0.2 μm) increased. Compared to E4, E10 significantly decreased TOC in soil of 10—20 cm. And E10 reduced POC of coarse sand (250—2000 μm) and increased POC of fine sand (50—250 μm) and MOC (<50 μm) compared to E4. Compared to M3, M10 significantly decreased TOC in soil of 5—30 cm. Although M10 significantly increased POC of fine sand (50—250 μm) and MOC of coarse clay (0.2—2 μm) in soil of 0—5 cm, it significantly reduced MOC of fine clay (<0.2 μm). In soil of 5—10 cm in M10, compared to M3, POC of sand (50—2000 μm) significantly decreased and MOC of coarse clay (0.2—2 μm) increased. M10 significantly increased MOC of coarse clay (0.2—2 μm) in soil of 10—20 cm, but decreased POC of coarse sand (250—2000 μm) and MOC of fine clay (<0.2 μm). Meanwhile, significant decrease in POC of sand (50—2000 μm), MOC of silt (2—50 μm) and fine clay (<0.2 μm) were observed in soil depth of 20—30 cm in M10. The results indicated that short cultivation time were beneficial to the enhancement of soil organic carbon sequestration.

Key Words: cultivated species; cultivation time; soil organic carbon; cultivated soil; shrub soil

土壤有机质(SOM)或土壤有机碳(SOC)在土壤物理、化学和生物学特性中发挥着极其重要的作用,能为作物提供所需的各种营养元素,同时在土壤结构的形成、改善土壤物理性状方面起着决定性作用。在数量上,土壤有机碳储量能超出大气与陆地植物体中碳的3倍多^[1]。随着土地利用方式的变化,预测土壤有机碳库的变化对探测C固持与释放的潜在性具有决定意义^[2]。

已有研究发现,土壤有机碳在较短时间内对农业管理措施引起的土壤质量变化反应不甚敏感^[3],而活性有机碳对不同耕作方式和秸秆还田的响应更为迅速^[4]。所以,在土壤有机碳动态研究中,越来越多的学者关注因人为管理措施引起的土壤颗粒有机碳组分的变化^[5-7]。依据土壤颗粒大小分组的有机碳组分,在结构与功能上存在显著差异^[8],主要是由于土壤矿物粒子在土壤原生结构和次生团聚体结构中形成了对土壤微生物的物理隔离作用,而致使有机质得以保护^[9-10]。与此同时,颗粒分级技术也已经广泛应用于土壤有机碳储量及其稳定性对不同管理措施的响应研究中^[11-13]。土壤颗粒分级过程中,土壤团聚体被破坏,构成其土壤颗粒均分散为原生颗粒。这些原生土壤颗粒根据其大小分为粗砂粒、细砂粒、粉粒、粗黏粒和细黏粒^[14-15]。一般认为砂粒有机碳功能上属于活性有机碳库,被称为颗粒有机碳(POC)^[16],POC是介于新鲜动植物残体与腐殖化有机物之间的暂时或过渡的活性较高的有机碳组分,稳定性较低,周转速度较快,比土壤总有机碳(TOC)更易受人为管理措施的影响^[17-18];粉粒和黏粒具有较大的比表面积,通过配位体交换、氢键及疏水键等作用吸附有机碳,形成惰性矿物结合态有机碳(MOC)^[19-20],它的含量可以间接表征土壤有机碳的抗氧化程度和利用难易程度^[21],是土壤固持有机碳的重要碳库^[22],对土壤有机碳的积累和稳定性起着重要作用。因此,测定不同活性的土壤颗粒有机碳组分指标,对表征因土壤管理措施引起的有机碳质量的改变与固存、了解土壤有机碳库长时间尺度上的动态变化更具重要意义。

西藏是中国5大牧区之一,有天然草地8207万 hm^2 ,约占全国天然草地面积的21%,占西藏土地面积的

68.11%。然而由于自然气候变化和长期超载放牧,西藏天然草原退化严重,部分地区甚至出现了严重的沙化现象。当地藏族牧民的主要经济来源是家畜,放牧是目前唯一的养殖方式,在当地实施禁牧育草等措施有很大难度。所以,必须利用当地的低产田或宜耕地大面积种植高产优质牧草,逐渐推广实行圈养舍饲,这些措施是保持当地经济增长和生态安全协调发展的最有效手段。适宜的牧草管理模式有利于提高牧草初级生产力,同时能够改善土壤质量。作为土壤质量的重要指标,土壤有机碳在土壤物理、化学和生物学特性中发挥着极其重要的作用。那么,牧草管理模式对土壤有机碳库的影响究竟发生在土壤碳库的哪一部分,是活性碳库还是惰性碳库,这方面的工作急需深入研究,因此本研究借助于拉萨站的牧草种植地,揭示牧草种类和耕作时间对土壤有机碳库的影响。本论文拟解决两个问题:(1)牧草种类和耕作时间对种植地土壤各层全土有机碳的影响;(2)牧草种类和耕作时间对种植地土壤各层不同组分有机碳的影响。本研究旨在为拉萨河谷地区草地生态系统碳库潜能的预测以及草地生态系统的科学管理提供一定的科学依据,为优化青藏高原牧草管理模式提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在拉萨河下游河谷的中国科学院拉萨高原生态试验站开展。研究区位于西藏自治区拉萨市达孜县,地处 29°41'N, 91°20'E;地貌属于拉萨河下游宽谷地段,海拔 3680—3690 m。气候属于高原温带半干旱季风气候,年降水 425 mm,90%以上集中在 6—9 月份。年均温 7.5℃,日温差大;太阳辐射强,日照时间长,年日照时数在 3000 h 以上。该地区气候资源配置的总体特征是光资源丰富,热量水平低,水资源匮乏^[23]。拉萨河谷土壤为发育在洪积扇上的灌丛草原土,土壤较为浅薄,土壤深度为 40—100 cm。牧草种植地土壤属于潮土,是在草甸土发育的基础之上,经过培土和长期耕作熟化形成的土壤,由于耕作原因,草毡层已经被耕作层替代。生态试验站土壤为冲洪积物母质;土壤质地为粉砂壤土或轻度砂壤土;土层较薄,约为 40—90 cm,多砂石,粘土含量为 15%—20%;有机质含量较低,一般在 0.76%—1.56%^[24]。

1.2 样品采集与分析

土壤样品采集于 2011 年 8 月,取样地点分别设置在拉萨站附近的天然灌丛草原与拉萨站内的 5 种牧草种植地。天然灌丛草原的优势植物种类有木根香青(*Anaphalis xylorrhiza* Sch.),高山嵩草(*Kobresia pygmaea*),羊茅(*Festuca ovina* L.),直茎蒿(*Artemisia edgeworthii* Balakr.)。5 种牧草种类分别为:连续耕作 10a 的鸭茅(*Dactylis glomerata* L.)、耕作 4a 与 10a 的垂穗披碱草(*Elymus nutans* Griseb.)、耕作 3a 与 10a 的苜蓿(*Medicago sativa* Linn.)。牧草种植地的原生天然植被均为灌丛草原,灌丛草原在不同时期被开垦作为牧草种植地后,只种植牧草,不受放牧的干扰。在天然灌丛草原和 5 种牧草种植地内各选取面积 150 m × 200 m,且植被盖度均匀的区域为实验样地,在各样地内分别设置 3 条 100 m 样带,在每条样带上随机设置 5 个样地,在每个样点用直径为 6 cm 土钻分别收集 0—5 cm、5—10 cm、10—20 cm、20—30 cm 4 个土层的土壤,将同一条样带同一土层的土壤样品混合成一个土壤样品。

对于每一个土样,部分原土立即测定土壤含水量,剩余部分在室内进行风干,去除杂物,过 2 mm 土筛,保存用作测定土壤全土有机碳与不同组分有机碳。

1.3 颗粒分级

土壤颗粒根据其大小分为 5 个粒级:粗砂粒(250—2000 μm)、细砂粒(50—250 μm)、粉粒(2—50 μm)、粗黏粒(0.2—2 μm)、细黏粒(<0.2 μm)^[14-15]。土壤颗粒分级的第一步是分散土壤团聚体,常用的方法是利用超声波在水中将团聚体打碎^[25]。具体方法如下:称取 20 g 风干土样置于 250 mL 烧杯中,加水 150 mL。将烧杯放在冰浴中,用超声波发生器(KQ-500DA 超声波,中国)在 300 W 功率下震荡 8 min(960 J/mL),使土壤颗粒完全粉碎。分散的土壤悬浊液分别过 250、50 μm 湿筛。利用离心机对剩余的土壤悬浊液进行颗粒分级,在土壤有机质分组过程中,对 Anderson 等^[26],Tiessen 和 Stewart^[27]的方法进行改进,使其能在采用倾斜转

子的高速离心机(LG10-2.4A,雷勃尔,中国)上应用^[12]。离心时间主要受离心机转子的型号和离心管中悬浮液的体积决定,可根据 Stokes 公式计算出离心时间^[15, 28]。粒级 250—2000 μm 、50—250 μm 、2—50 μm 、0.2—2 μm 、<0.2 μm 的组分在 60 $^{\circ}\text{C}$ 条件下烘干用球磨机粉碎后备用。

1.4 土壤有机碳分析

采用高温外热重铬酸钾氧化-容重法^[14],分别分析土壤层 0—5 cm、5—10 cm、10—20 cm、20—30 cm 的土壤全土有机碳(TOC),以及土壤各层不同粒级<0.2 μm 、0.2—2 μm 、2—50 μm 、50—250 μm 、250—2000 μm 的组分有机碳(OC)。

1.5 数据统计

实验结果采用 SPSS 软件(SPSS for Windows, Version 14.0, Chicago, USA)进行统计分析。方差分析采用单因素方差分析方法,水平间显著性用 Duncan 多重比较法检验,所有分析其显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 牧草种类对种植地土壤各层全土有机碳的影响

耕作 10a 的不同牧草种植地土壤各层全土有机碳(TOC)含量如图 1 所示。虽然牧草类型不同,但是各土层 TOC 含量的顺序一般都随着土层加深而递减。鸭茅土层 0—5 cm、10—20 cm、20—30 cm 的 TOC 含量均显著高于天然灌丛,分别升高 21%、62%、62%;苜蓿土层 0—5 cm、10—20 cm 的 TOC 含量分别比天然灌丛显著升高 22%、28%;而垂穗披碱草表层土壤(0—5 cm)的 TOC 含量比天然灌丛显著降低 31%。

2.2 牧草种类对种植地土壤各层不同组分有机碳的影响

耕作 10a 的牧草种植地相同土层不同组分有机碳之间存在显著差异(图 2)。虽然牧草种类不同,但是各土层粒级越小的土壤颗粒,组分有机碳含量越高。不同牧草种植下,0—5 cm 土层不同组分有机碳含量存在显著差异($P < 0.001$,图 2)。如,鸭茅种植地,粒级 250—

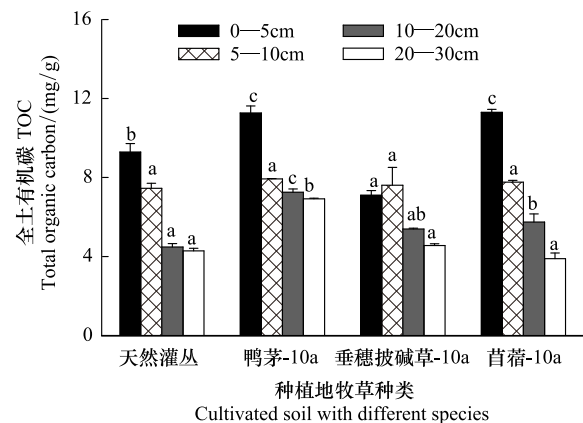


图 1 牧草种类对种植地土壤各层全土有机碳的影响

Fig.1 Effect of cultivated species on soil total organic carbon (TOC) along soil depth

同一土层不同字母表示不同处理在 5% 水平上差异显著 ($P < 0.05$)

2000 μm 有机碳含量显著小于天然灌丛,粒级 2—50 μm 、<0.2 μm 有机碳含量大于天然灌丛;垂穗披碱草粒级 250—2000 μm 、0.2—2 μm 小于天然灌丛,而粒级<0.2 μm 大于天然灌丛;苜蓿粒级 250—2000 μm 有机碳含量同样小于天然灌丛,而粒级 2—50 μm 有机碳含量大于天然灌丛,粒级<0.2 μm 有机碳含量也比天然灌丛高 42%。

5—10 cm 土层,牧草种植地不同组分有机碳含量也不同(图 2)。鸭茅粒级 250—2000 μm 有机碳含量小于天然灌丛,粒级 2—50 μm 、<0.2 μm 有机碳含量大于天然灌丛;垂穗披碱草粒级 250—2000 μm 有机碳小于天然灌丛,但是粒级<0.2 μm 有机碳含量比天然灌丛高了 79%;苜蓿粒级 250—2000 μm 有机碳含量小于天然灌丛,而粒级 2—50 μm 有机碳含量大于天然灌丛,粒级 0.2—2 μm 、<0.2 μm 有机碳含量分别比天然灌丛高 12%、33%。

10—20 cm 土层,牧草种植地不同组分有机碳含量显著不同($P < 0.001$;图 2):鸭茅粒级 250—2000 μm 有机碳含量小于天然灌丛,而其它粒级有机碳含量均大于天然灌丛;垂穗披碱草粒级 250—2000 μm 有机碳含量小于天然灌丛,而粒级 50—250 μm 、2—50 μm 、<0.2 μm 有机碳含量大于天然灌丛;苜蓿粒级 250—2000 μm 有机碳含量小于天然灌丛,而粒级 50—250 μm 有机碳含量大于天然灌丛,其它粒级有机碳含量与天然灌

丛不存在显著差异,

20—30 cm 土层,牧草种植地不同组分有机碳含量如图 2 所示;鸭茅粒级 250—2000 μm 有机碳含量小于天然灌丛,而其他粒级有机碳含量均大于天然灌丛;垂穗披碱草粒级 250—2000 μm 有机碳含量小于天然灌丛,而粒级 2—50 μm 、0.2—2 μm 、<0.2 μm 有机碳含量大于天然灌丛;苜蓿粒级 250—2000 μm 有机碳含量小于天然灌丛,粒级 0.2—2 μm 有机碳含量大于天然灌丛。

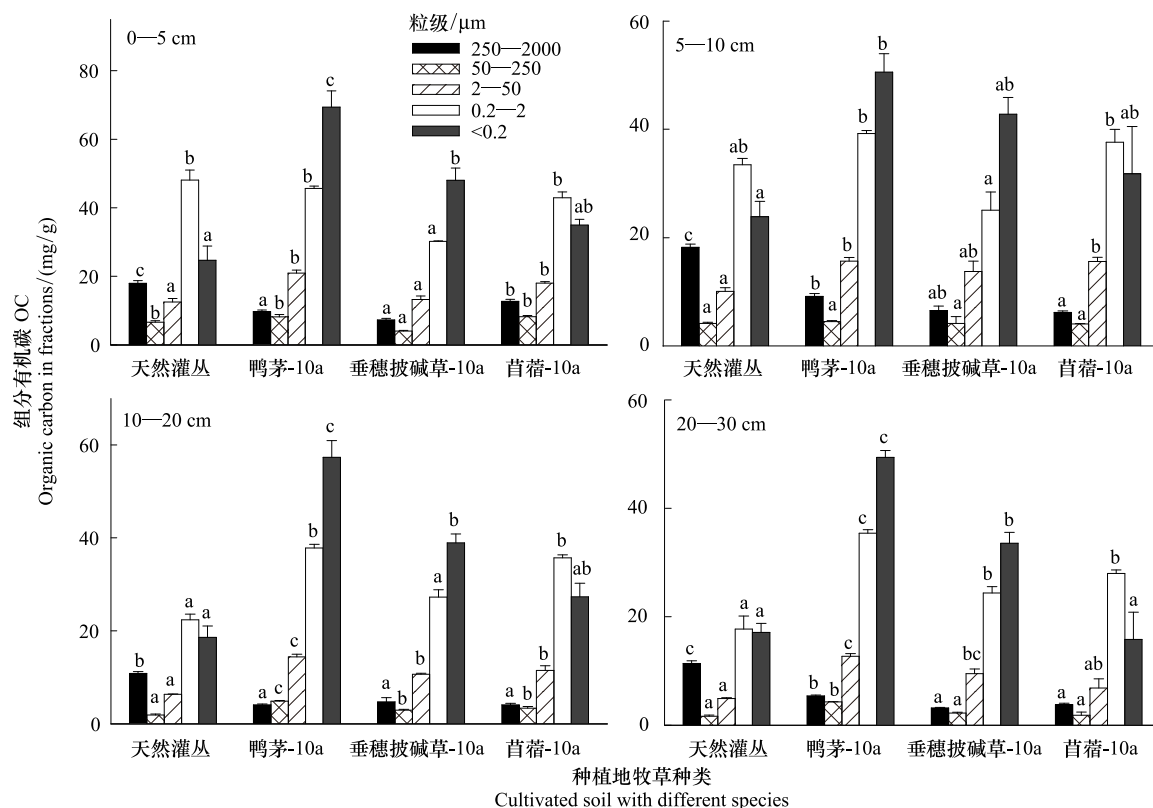


图 2 牧草种类对种植地土壤各层不同组分有机碳的影响

Fig.2 Effect of cultivated species on organic carbon in fractions (OC) along soil depth

同一粒级不同字母表示不同处理在 5% 水平上差异显著 ($P < 0.05$)

2.3 耕作时间对种植地土壤各层全土有机碳的影响

垂穗披碱草土壤各层全土有机碳 (TOC) 含量对耕作时间的响应如图 3 所示。与天然灌丛相比,耕作 4a 与 10a 的垂穗披碱草土层 0—5 cm TOC 含量显著下降 ($F_{2,8} = 14.267, P < 0.05$);而土层 10—20 cm TOC 含量显著升高 (耕作 4a 升高 48%,耕作 10a 升高 20%),且耕作 10a 的垂穗披碱草土层 10—20 cm TOC 含量显著低于耕作 4a 的垂穗披碱草种植地。

耕作时间对苜蓿土壤各层 TOC 含量的影响如图 3 所示。与天然灌丛相比,耕作 3a 和 10a 的苜蓿土层 0—5 cm TOC 含量增加了 10%、22% ($F_{2,8} = 8.139, P < 0.05$),而耕作时间对土层 0—5 cm TOC 含量的影响无差异;耕作时间对苜蓿土层 10—20 cm TOC 含量有显著影响 ($F_{2,8} = 26.352, P = 0.001$),其大小顺序为:苜蓿 (3a) > 苜蓿 (10a) > 天然灌丛;耕作 3a 的苜蓿土层 5—10 cm 与 20—30 cm TOC 含量显著增加 ($P \leq 0.001$),而耕作 10a 的苜蓿土层 5—10 cm 与 20—30 cm TOC 含量没有明显差异。

2.4 耕作时间对种植地土壤各层不同组分有机碳的影响

耕作时间对垂穗披碱草土壤各层不同组分有机碳的影响各不相同 (图 4)。土层 0—5 cm (图 4),随着耕作时间的增加,垂穗披碱草种植地粒级 250—2000 μm 有机碳含量持续显著降低 ($F_{2,8} = 77.287, P < 0.001$);与天然灌丛相比,耕作使粒级 50—250 μm 与 0.2—2 μm 有机碳含量也显著降低 ($P \leq 0.001$),但时间上影响不

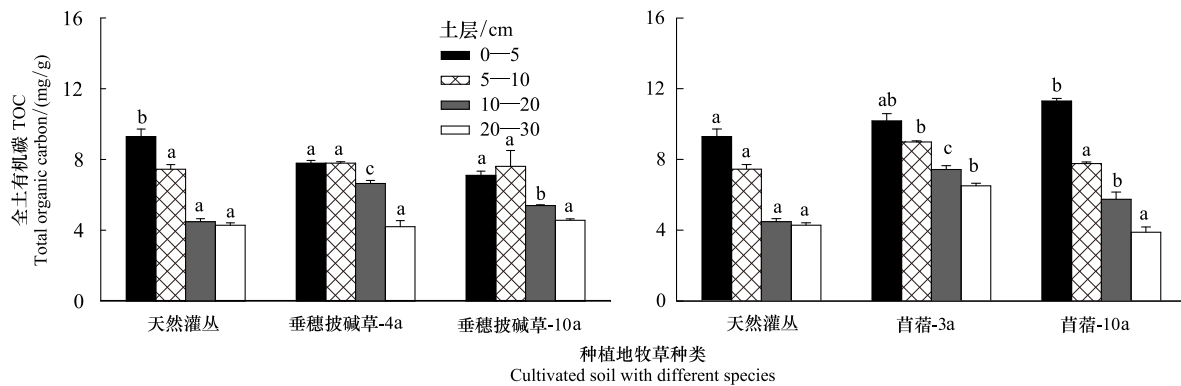


图3 耕作时间对种植地土壤各层全土有机碳的影响

Fig.3 Effect of cultivated time on soil total organic carbon (TOC) along soil depth

同一土层不同字母表示不同处理在 5% 水平上差异显著 ($P < 0.05$)

大;耕作 4a 显著增加粒级 2—50 μm 有机碳含量,而耕作 10a 又无影响 ($F_{2,8} = 7.364, P < 0.05$);粒级 $< 0.2 \mu\text{m}$ 有机碳含量,耕作时间越长,增加作用越显著 ($F_{2,8} = 5.258, P < 0.05$)。土层 5—10 cm,耕作显著降低了垂穗披碱草粒级 250—2000 μm 有机碳含量,而显著升高了粒级 $< 0.2 \mu\text{m}$ 有机碳含量,相同的是,时间上变化不明显 ($P < 0.05$);耕作对粒级 50—250 μm 没有影响 ($F_{2,8} = 1.173, P > 0.05$);粒级 2—50 μm ,耕作会增加其有机碳含量,但是 4a 的影响更为显著 (+65%) ($F_{2,8} = 6.677, P < 0.05$);与天然灌丛相比,耕作 4a 显著增加苜蓿粒级 0.2—2 μm 有机碳含量 (+31%),而耕作 10a 则显著降低 (-34%) ($F_{2,8} = 15.088, P < 0.05$)。土层 10—20 cm (图 4),耕作显著降低了垂穗披碱草的粒级 250—2000 μm 有机碳含量,时间越长,影响越显著 ($F_{2,8} = 26.254, P = 0.001$);在粒级 50—250 μm ,耕作 4a 显著增加有机碳含量,10a 后有所降低 ($F_{2,8} = 9.799, P < 0.05$);在粒级 2—50 μm ,虽然耕作 4a 与 10a 均显著增加了其中有机碳含量,但是随着耕作时间的增长,含量降低 ($F_{2,8} = 132.652, P < 0.001$);耕作显著增加了垂穗披碱草粒级 0.2—2 μm 与 $< 0.2 \mu\text{m}$ 的有机碳含量,但是时间尺度上不显著。土层 20—30 cm 下,耕作显著降低了垂穗披碱草的粒级 250—2000 μm 有机碳含量,耕作 10a 影响更为显著 ($F_{2,8} = 149.44, P = 0.001$);与天然灌丛相比,耕作 4a 与 10a 分别降低与升高了垂穗披碱草粒级 50—250 μm 有机碳含量,时间尺度上变化显著 ($F_{2,8} = 4.972, P = 0.05$);在粒级 2—50 μm 、0.2—2 μm 、 $< 0.2 \mu\text{m}$,耕作均使其有机碳含量显著降低 ($P < 0.05$) (图 4)。

苜蓿土壤各层不同组分有机碳对耕作时间的响应亦不相同 (图 4)。土层 0—5 cm 下,耕作显著降低苜蓿粒级 250—2000 μm 有机碳含量,对耕作时间响应不显著 ($F_{2,8} = 26.754, P = 0.001$);耕作 3a 对粒级 50—250 μm 有机碳含量没有影响,而 10a 有显著地促进作用 ($F_{2,8} = 9.18, P < 0.05$);粒级 2—50 μm ,耕作显著增加了其有机碳含量,时间上变化不明显 ($F_{2,8} = 6.066, P < 0.05$);耕作初期 (3a),粒级 0.2—2 μm 有机碳含量显著降低,而对着耕作时间的延长,10a 耕作影响不显著 ($F_{2,8} = 13.474, P < 0.05$);相反的是,粒级 $< 0.2 \mu\text{m}$ 有机碳含量,在耕作初期显著增加,相同的是,10a 耕作影响也不显著 ($F_{2,8} = 18.678, P < 0.05$)。土层 5—10 cm 下,耕作使苜蓿粒级 250—2000 μm 有机碳含量显著降低,时间越长越明显 ($F_{2,8} = 178.363, P < 0.001$);粒级 50—250 μm ,耕作 3a 会显著增加其有机碳含量,而耕作 10a 没有影响 ($F_{2,8} = 17.252, P < 0.05$);粒级 2—50 μm ,耕作会显著增加有机碳含量,但时间上变化不明显 ($F_{2,8} = 19.296, P < 0.05$);而耕作对粒级 0.2—2 μm 、 $< 0.2 \mu\text{m}$ 有机碳含量没有显著影响 ($P > 0.05$)。土层 10—20 cm 下,耕作显著降低了苜蓿粒级 250—2000 μm 有机碳含量,时间越长,负作用越明显 ($F_{2,8} = 97.847, P < 0.05$);粒级 50—250 μm 与 2—50 μm ,耕作显著增加了有机碳含量,但时间上变化均不明显;粒级 0.2—2 μm ,耕作显著增加了有机碳含量,不同的是,时间越长,效果越显著 ($F_{2,8} = 67.547, P < 0.001$);粒级 $< 0.2 \mu\text{m}$,耕作也显著增加了有机碳含量,不同的是,耕作时间越长,促进作用减弱 ($F_{2,8} = 20.685, P < 0.05$)。土层 20—30 cm,耕作会显著降低苜蓿粒级 250—2000 μm 有机碳含量,影响随着时间的延长越显著 ($F_{2,8} = 81.975, P < 0.001$);耕作对粒级 50—250 μm 、2—50 μm 、 $< 0.2 \mu\text{m}$ 有机碳含量有

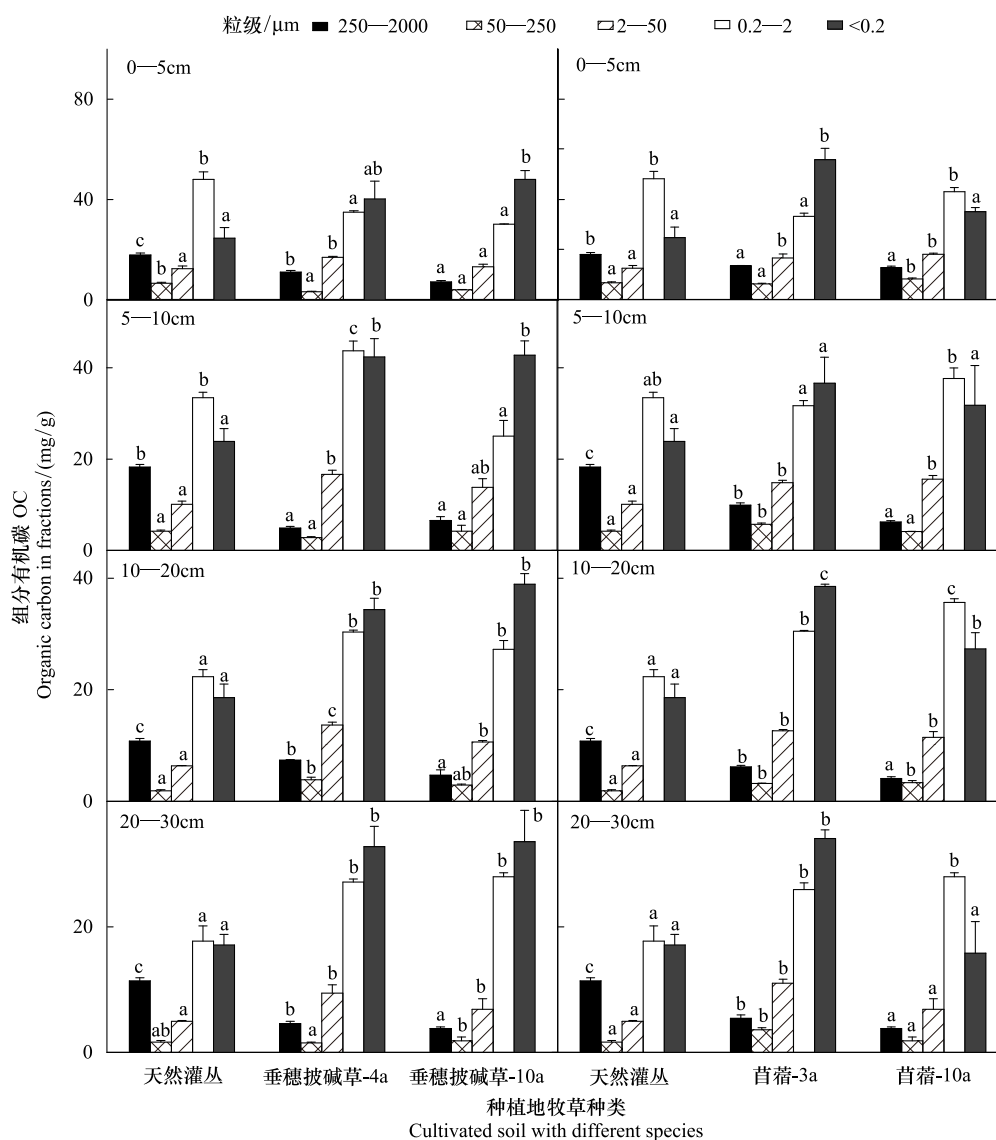


图4 耕作时间对种植地土壤各层不同组分有机碳的影响

Fig. 4 Effect of cultivated time on organic carbon in fractions (OC) along soil depth

同一粒级不同字母表示不同处理在 5% 水平上差异显著 ($P < 0.05$)

同样的影响,耕作 3a 有显著的增加作用,耕作 10a 没有影响 ($P < 0.05$);粒级 $0.2-2 \mu\text{m}$,耕作能显著增加其有机碳含量,但时间尺度上变化不显著 ($F_{2,8} = 10.397, P < 0.05$) (图 4)。

3 讨论

3.1 牧草种类对种植地土壤各层全土有机碳与不同组分有机碳的影响

本研究中,与天然灌丛相比,不同牧草种植地土壤土层 $0-5 \text{ cm}$ 全土有机碳 (TOC) 含量对耕作都有明显响应,主要是土壤表层有机碳含量的变化。这与植物根系分布、产生凋落物数量和质量及其与 TOC 含量的相关程度有关^[29]。具体来说,与天然灌丛相比,禾本科垂穗披碱草的种植显著降低了表层 TOC 含量,禾本科鸭茅和豆科苜蓿的种植较快地增加了 TOC 含量,各土层 TOC 含量都有所增加 (图 1),说明长期耕作对牧草苇状鸭茅与苜蓿的影响显著改善了土壤性状,种植鸭茅或苜蓿更有利于土壤有机碳库的固持。相同结果体现在华北平原农业区^[30],与传统粮田相比,苜蓿栽培明显增加土壤有机碳含量和团聚体稳定性,主要原因可能是苜蓿栽培降低了土壤有机碳中活性有机碳组分的分解速率,从而提高了土壤 TOC 含量。

Hassink^[22]提出土壤中矿物颗粒对有机碳的不同吸附作用是土壤固持有机碳的重要机制之一,所以,研究不同牧草种植对土壤各层 TOC 含量的影响机理,必须考虑土壤颗粒组分有机碳含量对不同牧草种植响应。长期耕作对鸭茅与苜蓿种植地土壤各层 TOC 含量的改善作用在土壤表层(0—5 cm)主要是粉粒与黏粒矿物结合态有机碳(MOC)含量的提高,随着土壤深度的增加,主要是细砂粒颗粒有机碳(POC)与 MOC 含量的增加。由于多数富含碳的有机质初始易于截获在粗砂粒中,随后在生物降解过程中向细砂粒、粉粒迁移,最终在黏粒中积累^[31]。而且,长期耕作容易破坏土壤团聚体,降低粒径较大的 POC 含量^[32]。闫颖等^[33]研究得出相似的结论,棕壤中绝大多数土壤 TOC 包含在粉粒与黏粒中,表明土壤有机质易于在小粒级中富集,土壤有机碳这一分布规律主要是由于粒径小的颗粒比表面积大,具有强大的吸附功能所致。卢英等^[34]提出,牧草及作物的植被恢复显著改善表层土壤团聚体粒组分布,是植被恢复对退化红壤肥力快速恢复的基础。耕作能够增加鸭茅与苜蓿土壤有机碳在小粒级中的含量,所以种植鸭茅与苜蓿更有利于拉萨牧草种植地土壤有机质的积累与稳定。

3.2 耕作时间对种植地土壤各层全土有机碳与不同组分有机碳的影响

耕作显著降低了禾本科垂穗披碱草土层 0—5 cm 土壤 TOC 含量(图 3)。与耕作 4a 相比,耕作 10a 更不利于垂穗披碱草土壤 TOC 的积累,土层 10—20 cm,耕作 10a TOC 含量比耕作 4a 下降了 23%,这种负作用主要体现在 POC 与粉粒 MOC 含量上(图 4)。显然,短期或长期耕作制度均不利于垂穗披碱草土壤有机碳的长期累积。对豆科苜蓿各土层有机碳含量来说,耕作有效提高了其各土层 TOC 含量,且耕作 3a 比耕作 10a 的有效性更高;耕作 3a 后,苜蓿土层 5—10 cm、10—20 cm、20—30 cm 的 TOC 含量均显著高于耕作 10a 后。这主要是耕作 10a 后,POC 含量显著降低(图 4)。

这种趋势与国外许多研究的结果基本一致,如 Blair 等^[35]发现,麦凯地区已耕作 90a 的农田中土壤有机碳含量比邻近天然植被土壤中低,在维多利亚地区耕作 15a 农田中土壤有机碳含量却比天然植被土壤中高。奥地利黑钙土在少耕、免耕下会提高 POC 含量,而常规耕作会降低 POC 含量^[36]。陈伏生等^[37]提出短期耕作没有完全破坏土壤团粒结构,土壤仍具有较高的保肥能力。而长期耕作引起的土壤有机碳的损失主要是由于土壤团粒结构被破坏及土壤温度和湿度状况发生变化所引起的氧化和矿化过程^[9]。综上,耕作时间长短对牧草种植地土壤有机碳含量有较大的影响,短期耕作更有利于维持牧草种植地土壤碳库储量。

基于本研究结果:耕作禾本科鸭茅与豆科苜蓿均显著增加了土壤小粒级组分有机碳,因此我们推测短时间的鸭茅与苜蓿的间作套种可能更利提高土壤有机碳含量。国内外诸多研究已证明禾本科-豆科间作套种的种植制度可大大提高土壤质量。李恋卿等^[38]研究发现,禾本科-豆科轮作可作为退化红壤快速植被恢复与土壤肥力恢复的有效途径。套种在南美大草原也开始应用,仅仅 1a 的玉米-大豆间作套种就大大提高了土壤生化性质^[39]。Diekow 等^[20]也发现,玉米与燕麦或豆类作物轮作均能显著增加土壤不同大小颗粒的有机碳含量。而且,当豆科与非豆科作物整合种植,氮素利用率更高^[40]。为明确最合适的管理模式,保证草地产量满足西藏牧区现在与未来的需求趋势,及最大化草地土壤有机碳固持量,可进一步验证豆科与非豆科间作套种的种植方式是否更有助于保持土壤有机质和土壤肥力水平,以及提高固氮几率。

4 结论

(1)牧草种类对拉萨牧草种植地土壤各层全土有机碳(TOC)含量有较大的影响。与天然灌丛相比,长期耕作鸭茅与苜蓿,土壤 TOC 含量均有显著增加;种植垂穗披碱草,土壤表层 TOC 含量显著下降。这主要因为耕作不同牧草使种植地土壤不同组分有机碳含量发生变化,颗粒有机碳(POC)含量降低,而矿物结合态有机碳(MOC)含量升高。

(2)POC 含量降低与 MOC 含量升高的现象在短期耕作时更为明显,所以短期耕作更有利于牧草种植地土壤有机碳库的累积。

参考文献 (References):

- [1] Schimst M W I, Torn M S, Abiven S, Dittmar T, Guggenberger G, Janssens I A, Kleber M, Kögel-Knabner I, Lehmann J, Manning D A C, Nannipieri P, Rasse D P, Weiner S, Trumbore S E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 2011, 478(7367): 49-56.
- [2] Wiesmeier M, Spörlein P, Geuß U, Hangen E, Haug S, Reischl A, Schilling B, von Lützow M, Kögel-Knabner I. Soil organic carbon stocks in southeast Germany (Bavaria) as affected by land use, soil type and sampling depth. *Global Change Biology*, 2012, 18(7): 2233-2245.
- [3] Bremer E, Janzen H H, Johnston A M. Sensitivity of total, light fraction and mineralizable organic matter to management practices in a Lethbridge soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 1994, 74(2): 131-138.
- [4] Freixo A A, de A Machado P L O, dos Santos H P, Silva C A, de S Fadigas F. Soil organic carbon and fractions of a Rhodic Ferralsol under the influence of tillage and crop rotation systems in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 2002, 64(3/4): 221-230.
- [5] Mikha M M, Rice C W. Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(3): 809-816.
- [6] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 胡锋, 潘根兴, 樊后保. 长期施肥对水稻土颗粒有机碳和矿物结合态有机碳的影响. *生态学报*, 2008, 28(1): 353-360.
- [7] 沈艳, 傅瓦利, 蓝家程, 程辉, 张石棋, 武玲珍. 岩溶山地不同土地利用方式土壤颗粒有机碳和矿物结合态有机碳的分布特征. *水土保持研究*, 2012, 19(6): 1-6.
- [8] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52(3): 345-353.
- [9] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(1): 123-130.
- [10] Six J, Conant R T, Paul E A, Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155-176.
- [11] Solomon D, Fritzsche F, Tekalign M, Lehmann J, Zech W. Soil organic matter composition in the subhumid Ethiopian highlands as influenced by deforestation and agricultural management. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(1): 68-82.
- [12] 武天云, Schoenau J J, 李凤民, 钱佩源, 王方, Malhi S S. 利用离心法进行土壤颗粒分级. *应用生态学报*, 2004, 15(3): 477-481.
- [13] Mertz C, Kleber M, Jahn R. Soil organic matter stabilization pathways in clay sub-fractions from a time series of fertilizer deprivation. *Organic Geochemistry*, 2005, 36(9): 1311-1322.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [15] Kroetsch D, Wang C. Particle size distribution // Carter M R, Gregorich E G, eds. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2007: 713-719.
- [16] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 777-783.
- [17] Franzluebbers A J, Arshad M A. Particulate organic carbon content and potential mineralization as affected by tillage and texture. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(5): 1382-1386.
- [18] Wander M M, Bidart M G. Tillage practice influences on the physical protection, bioavailability and composition of particulate organic matter. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 32(5): 360-367.
- [19] Bayer C, Martin-Neto L, Mielniczuk J, Pillon C N, Sangoi L. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(5): 1473-1478.
- [20] Diekow J, Mielniczuk J, Knicker H, Bayer C, Dick D P, Kögel-Knabner I. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilisation. *Plant and Soil*, 2005, 268(1): 319-328.
- [21] 唐光木, 徐万里, 盛建东, 梁智, 周勃, 朱敏. 新疆绿洲农田不同开垦年限土壤有机碳及不同粒径土壤颗粒有机碳变化. *土壤学报*, 2010, 47(2): 279-285.
- [22] Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and Soil*, 1997, 191(1): 77-87.
- [23] 林日暖. 拉萨地区农业气候资源评价. *气象科技*, 2002, 30(3): 152-157.
- [24] 刘允芬, 欧阳华, 张宪洲, 钟华平, 罗天祥. 青藏高原农田生态系统碳平衡. *土壤学报*, 2002, 39(5): 636-642.
- [25] Christensen B T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *Advances in Soil Science*, 1992, 20: 1-90.

- [26] Anderson D W, Sagar S, Bettany J R, Stewart J W B. Particle size fractions and their use in studies of soil organic matter; I. The nature and distribution of forms of carbon, nitrogen and sulfur. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45(4): 767-772.
- [27] Tiessen H, Stewart J W B. Particle-size fractions and their use in studies of soil organic matter; II. Cultivation effects on organic matter composition in size fractions. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, 47(3): 509-514.
- [28] Jackson M L. *Soil Chemical Analysis: Advanced Course*. Wisconsin: Department of Soils, University of Wisconsin, 1969: 20-65
- [29] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423-436.
- [30] 杨长明, 欧阳竹, 杨林章, 董玉红. 农业土地利用方式对华北平原土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响. *生态学报*, 2006, 26(12): 4148-4155.
- [31] Aita C, Recous S, Angers D A. Short-term kinetics of residual wheat straw C and N under field conditions: characterization by ^{13}C / ^{15}N tracing and soil particle size fractionation. *European Journal of Soil Science*, 1997, 48(2): 283-294.
- [32] 章明奎, 郑顺安, 王丽平. 利用方式对砂质土壤有机碳、氮和磷的形态及其在不同大小团聚体中分布的影响. *中国农业科学*, 2007, 40(8): 1703-1711.
- [33] 闫颖, 何红波, 白震, 解宏图, 张旭东. 有机肥对棕壤不同粒级有机碳和氮的影响. *土壤通报*, 2008, 39(4): 738-742.
- [34] 卢英, 甘海华, 徐盛荣. 红壤及其有机无机复合体有机质和氮素特征的研究. *土壤通报*, 1996, 27(1): 29-32.
- [35] Blair G J, Lefroy R D B, Singh B P, Till A R. Development and use of a carbon management index to monitor changes in soil C pool size and turnover rate // Cadisch G, Giller K E eds. *Drive by Nature: Plant Litter Quality and Decomposition*, Wallingford, UK: CAB International, 1997: 273-281.
- [36] Kandeler E, Palli S, Stemmer M, Gerzabek M H. Tillage changes microbial biomass and enzyme activities in particle-size fractions of a Haplic Chernozem. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(9): 1253-1264.
- [37] 陈伏生, 曾德慧, 陈广生, 范志平. 开垦对草甸土有机碳的影响. *土壤通报*, 2004, 35(4): 413-419.
- [38] 李恋卿, 潘根兴, 张旭辉. 退化红壤植被恢复中表层土壤微团聚体及其有机碳的分布变化. *土壤通报*, 2000, 31(5): 193-195.
- [39] Oelbermann M, Echarte L. Evaluating soil carbon and nitrogen dynamics in recently established maize-soybean inter-cropping systems. *European Journal of Soil Science*, 2011, 62(1): 35-41.
- [40] Inal A, Gunes A, Zhang F, Cakmak I. Peanut/maize intercropping induced changes in rhizosphere and nutrient concentrations in shoots. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2007, 45(5): 350-356.