

黄土高原森林带植被群落下土壤活性有机碳研究

张宏¹, 黄懿梅¹, 安韶山², 邢肖毅¹

(1. 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;

2. 西北农林科技大学 水土保持研究所 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)

摘要:为了探讨植被类型对土壤活性有机碳的影响以及活性有机碳对植被类型的敏感程度,在黄土高原沟壑区安塞县洞子沟流域,选择森林带不同植被类型下0—10 cm和10—20 cm土壤为研究对象,测定了四种表征土壤活性有机碳的指标,并对活性有机碳与植被群落中优势植物的特征指标进行逐步回归分析。结果表明,土壤有机碳以及活性有机碳含量均随土层深度的增加而降低,且含量都以乔灌木群落最大,草本群落最小。微生物生物量碳和溶解性有机碳占有有机碳的比例不随植被类型和土层深度的变化而变化,保持在一个比较稳定的水平上。易氧化有机碳和轻组有机碳占有有机碳的比例则随不同植被而变化。轻组有机碳占有有机碳的比例在上下两层也有明显差异。活性有机碳对优势植物生物量和碳含量的响应,均敏感于总有机碳。而在四种活性有机碳中,微生物生物量碳的响应最为敏感,其次分别为溶解性有机碳,易氧化有机碳,轻组有机碳。

关键词:黄土高原; 植被群落; 优势植物; 活性有机碳

中图分类号: S153.6⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)03-0065-06

Soil Active Organic Carbon with Different Plant Communities on the Loess Plateau

ZHANG Hong¹, HUANG Yi-mei¹, AN Shao-shan², XING Xiao-yi¹

(1. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, College of Resource and Environmental Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to discuss the effects of vegetation type on soil active organic carbon and analyze sensitive degree of active organic carbon to vegetation type. Four indicators regarded as representations of soil active organic carbon were analyzed. In the Dongzigou Basin, Ansai of hilly and gully region of the Loess Plateau, soil samples were collected under different forest vegetation types in the depth of 0—10 cm and 10—20 cm. Then the correlation between soil active organic carbon and indicators of dominant plants among vegetation community were analyzed by stepwise regression analysis. The results show that the contents of both soil organic carbon (SOC) and active organic carbon decrease with the increase of soil depth. The contents in tree-shrub-herb community are the highest among the three vegetation community, while they are the lowest in herbs community. Although soil samples differ in vegetation type and soil depth, the proportion of SOC in microbial biomass carbon (MBC) and dissolved organic carbon (DOC) remain stable. On the other hand, the proportion of SOC in light fraction organic carbon (LFOC) are found varies with vegetation types and soil depth, and the proportion of SOC in the easily oxidized carbon (EOC) were found varies with vegetation types. There is a closer relationship between soil active organic carbon and indicators of dominant plants (biomass and total C) and among these four indicators, MBC has the closest relationship, DOC, EOC and LFOC are followed.

Key words: the Loess Plateau; vegetation community; dominant plant; active organic carbon

收稿日期: 2013-01-09

修回日期: 2013-03-27

资助项目: 国家自然科学基金重点基金(41030532); 国家自然科学基金面上项目(41171226); 西北农林科技大学“优秀人才科研专项(QN2011049)”计划资助

作者简介: 张宏(1987—), 男, 浙江金华人, 在读研究生, 主要研究方向: 环境生物工程、生态修复。E-mail: zhang44hong@163.com

通信作者: 黄懿梅(1971—), 女, 四川省大竹县人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 固体废物资源化处理、生态环境监测与评价。E-mail: ymhuang1971@nwsuaf.edu.cn

黄土高原沟壑区土壤侵蚀模数超过 50 t/(hm²·a),水土流失尤为严重^[1]。而森林带的植被,有着良好的结构、较广的覆盖度、丰富的枯落物和发达的根系,对控制水土流失起着关键作用。因此,研究黄土高原森林带植被及其土壤环境对治理黄土高原有着重要的意义。土壤活性有机碳是指受植物、微生物影响强烈,并具有一定溶解性,在土壤中移动快、稳定性差、易氧化、矿化,而且具有较高植物和土壤微生物活性的那部分有机碳^[2]。土壤的活性有机碳通常可以用微生物生物量碳、易氧化有机碳、溶解性有机碳、轻组有机碳等指标来进行表征。它能直接参与土壤生物化学转换过程,并且能够在总有机碳库变化之前反映环境所引起的微小的土壤变化^[3]。在特定的生物、气候带中,随着地上植被的生长,土壤碳库及碳形态将会达到稳定状态。由于承接的凋落物和根系分泌物的类型不同,不同地面覆盖下土壤形成的活性碳库状况会存在差别。在诸多的环境因子中,土壤理化特性是制约森林带植被恢复的主要限制因子,土壤理化性质的改变,影响着特定群落结构的形成^[4-5]。以往对该区的植被群落与土壤状况的研究多以氮素为主,本文测定土壤活性有机碳的指标,旨在研究黄土高原沟壑区森林带不同植被群落下土壤活性碳含量与分布,揭示不同植被群落下特定植被对土壤碳库的影响,为评价该地区植被类型对土壤活性有机碳的影响提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 野外样品采集

1.1.1 研究区域概况 以陕西省安塞县南部楼坪乡洞子沟流域为研究区域,洞子沟流域位于延河流域一级支流西川流域,流域总面积 20.61 km²,海拔1 166

~1 490 m。属中温带大陆性半干旱季风气候,四季长短不等,干湿分明。年平均气温 8.8℃,年平均降水量 505.3 mm,年日照时数为 2 395.6 h,日照百分率达 54%,总年无霜期 157 d。土壤类型以黄绵土为主,间有复钙红黏土、典型黑垆土和冲积土,土地利用以林地为主,间或有草地。

1.1.2 样品采集方法 于 2011 年 7 月在研究区以最优势植物种群为划分标准选取了 8 种典型的植被群落。根据各个样地最优势建群种命名并分别代表草本、灌草和乔灌草这三种不同的植被群落。茭蒿群落(*Artemisia giraldii* Pamp, AgP)和铁杆蒿群落(*Artemisia sacrorum* Ledeb, AsL)属于草本群落;刺槐群落(*Robinia pseudoacacia*, Rp),丁香群落(*Syzygium aromaticum*, Sa)和狼牙刺群落(*Sophora davidii*, Sd)属于灌草群落;辽东栎群落(*Quercus liaotungensis*, Ql),三角槭群落(*Acer buergerianum* Miq, AbM)和侧柏群落(*Platycladus orientalis*, Po)属于乔灌草群落,其中刺槐林为人工林。采样点地理信息和植被情况如表 1 所示。

在选定的样地内根据植被群落类型设置样方,样方的大小根据植被类型而定(乔木 10 m×10 m,灌木 5 m×5 m,草地 2 m×2 m)。每个样地选取相距 10 m 左右的两个样方做为野外重复。对样方进行植被调查,记录其密度、频度、盖度等指标,采用收获法采集植物地上部分样品,计算单位面积的总生物量和优势植物生物量。每个样方内以 S 形选取 5 个点,去除土壤表层覆盖的枯落物,用土钻按 0—10 cm 和 10—20 cm 分层采集土壤样品,将采集的土样进行混合,密封后带回实验室内,仔细除去其中可见的植物残体及土壤动物,一部分风干,另一部分在 -20℃ 冷冻保存。

表 1 采样点地理信息和植被情况

样地名称	经度/(°)	纬度/(°)	海拔/m	坡向	坡度/(°)	坡位	地貌	群落优势植物
AsL	109.158	36.582	1351	阴坡	30	上	崩顶	铁杆蒿
AgP	109.158	36.582	1348	阴坡	25	中	坡地	茭蒿
Sd	109.166	36.574	1346	阳坡	27	下	坡地	狼牙刺
Sa	109.162	36.570	1284	阳坡	35	中	坡地	丁香
Rp	109.167	36.575	1372	阳坡	8	上	崩顶	刺槐
Po	109.163	36.556	1301	阳坡	30	下	坡地	侧柏
AbM	109.153	36.575	1334	阴坡	21	中	坡地	三角槭
Ql	109.174	36.555	1259	阴坡	28	下	坡地	辽东栎

1.2 分析项目及测定方法

土壤总有机碳(TOC)采用重铬酸钾外加热法测定,土壤和植物全氮用凯氏法测定^[6]。土壤微生物生物量碳(MBC)测定采用氯仿熏蒸—K₂SO₄浸提法^[7],用岛津 TOC-VCPH 仪测定浸提液碳浓度。易

氧化有机碳(EOC)采用 K₂MnO₄ 氧化法分析^[8]。轻组有机碳(LFOC)参照 Janzen 等^[9]的分离方法得到轻组有机质,然后在 60℃ 下烘干,称重,用重铬酸钾外加热法测定有机碳含量。可溶性有机碳(DOC)的测定方法为:取过 1 mm 筛风干土 12.5 g,加 50 ml

0.5 mol/L 的 K_2SO_4 溶液浸提,在振荡机上以 180 rpm 振荡 30 min,过滤,滤液用 TOC 仪测定有机碳,即为 DOC。

1.3 数据处理

数据分析采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 13.0 软件。

2 结果与分析

2.1 不同植被群落下土壤总有机碳特征

从图 1 可知,从铁杆蒿群落到辽东栎群落,土壤的总有机碳含量逐渐升高。在 0—10 cm 土层,3 种乔灌木群落的总有机碳含量明显高于 ($P<0.05$) 其他群落。在 10—20 cm 土层,草本群落的总有机碳含量明显低于 ($P<0.05$) 其他群落。但在 0—10 cm 层,刺槐群落的总有机碳含量 (8.65 g/kg) 甚至低于草本群落中的茭蒿群落 (10.65 g/kg)。除铁杆蒿群落土壤下层总有机碳含量高于上层外,其他群落上层土壤总有机碳含量分别是下层土壤的 1.76, 2.22, 1.69, 1.24, 1.87, 2.30, 1.97 倍。

2.2 不同植被群落下土壤活性有机碳特征

从图 2 可以看出,在土壤上下两层,从铁杆蒿群落到辽东栎群落,4 种活性有机碳的含量均呈增加趋势,除铁杆蒿群落外,均表现为上层显著 ($P<0.05$) 高于

下层。在 0—10 cm 土层,土壤易氧化有机碳、微生物生物量碳、轻组有机碳和溶解性有机碳的含量分别为 0.12~10.63 g/kg, 68.79~659.43 mg/kg, 0.19~9.29 g/kg 和 46.83~483.28 mg/kg。3 种乔灌木群落的活性有机碳含量显著高于 ($P<0.05$) 其他 5 种植被群落。丁香群落的易氧化有机碳含量及微生物生物量碳含量均显著 ($P<0.05$) 高于其他灌木群落以及草本群落,而刺槐群落和茭蒿群落、狼牙刺群落和铁杆蒿群落的易氧化有机碳含量差异不显著 ($P>0.05$)。刺槐群落,狼牙刺群落和茭蒿群落的微生物生物量碳含量差异不显著 ($P>0.05$)。在 10—20 cm 土层,土壤易氧化有机碳、微生物生物量碳、轻组有机碳的含量分别为 0.18~5.11 g/kg, 77.78~305.65 mg/kg, 0.20~2.99 g/kg 和 38.05~173.82 mg/kg, 不同群落间的差异要小于 0—10 cm 土层。

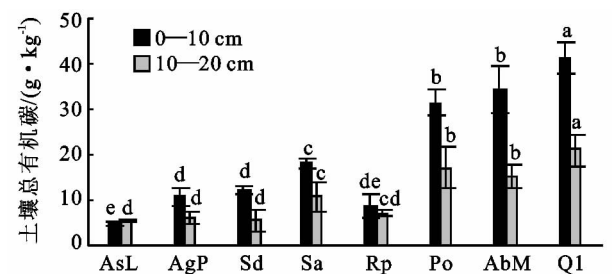


图 1 不同植被群落下土壤总有机碳含量

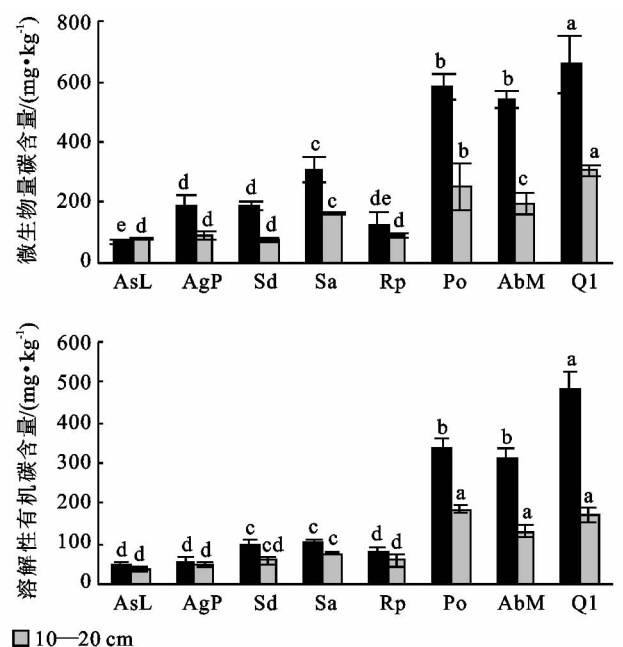
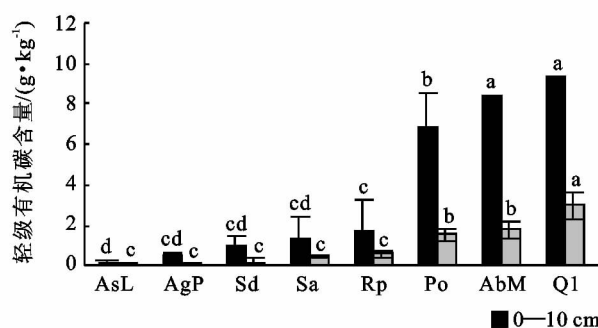
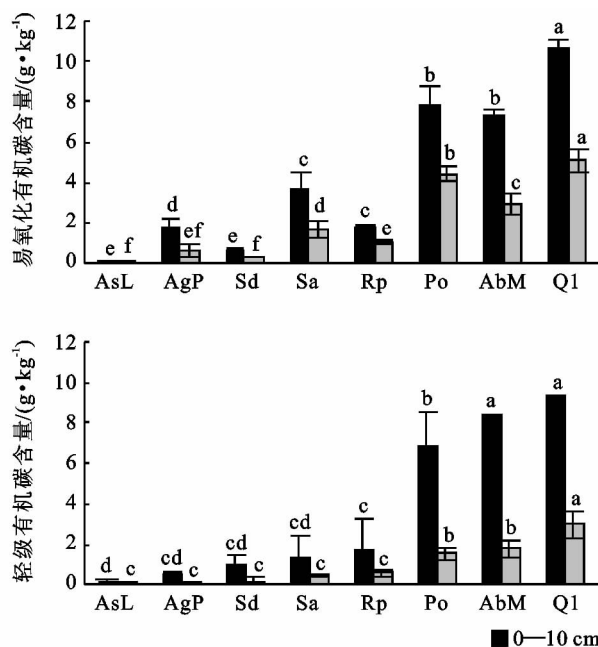


图 2 不同植被群落下土壤易氧化、微生物量、轻组有机碳的含量

注:同一土层不同植被群落间不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

2.3 不同植被群落下土壤活性有机碳分配比例

由图 3 可以看出,土壤易氧化有机碳分配比例随着土层深度的增加变化不显著,在不同植被群落中有明显差异 ($P<0.05$)。微生物生物量碳占总有机碳比

例随土层和不同群落变化均无明显差异。轻组有机碳分配比例在土壤的上下两层存在明显的差异,在乔灌木群落中的差异最显著,并且从铁杆蒿群落到辽东

栎群落,呈现逐渐增加的趋势。而溶解性有机碳占总有机碳的比例在不同植被下波动变化,无明显规律,

且在茭蒿、狼牙刺、丁香和侧柏群落中下层土壤的活性碳分配比例高于上层。

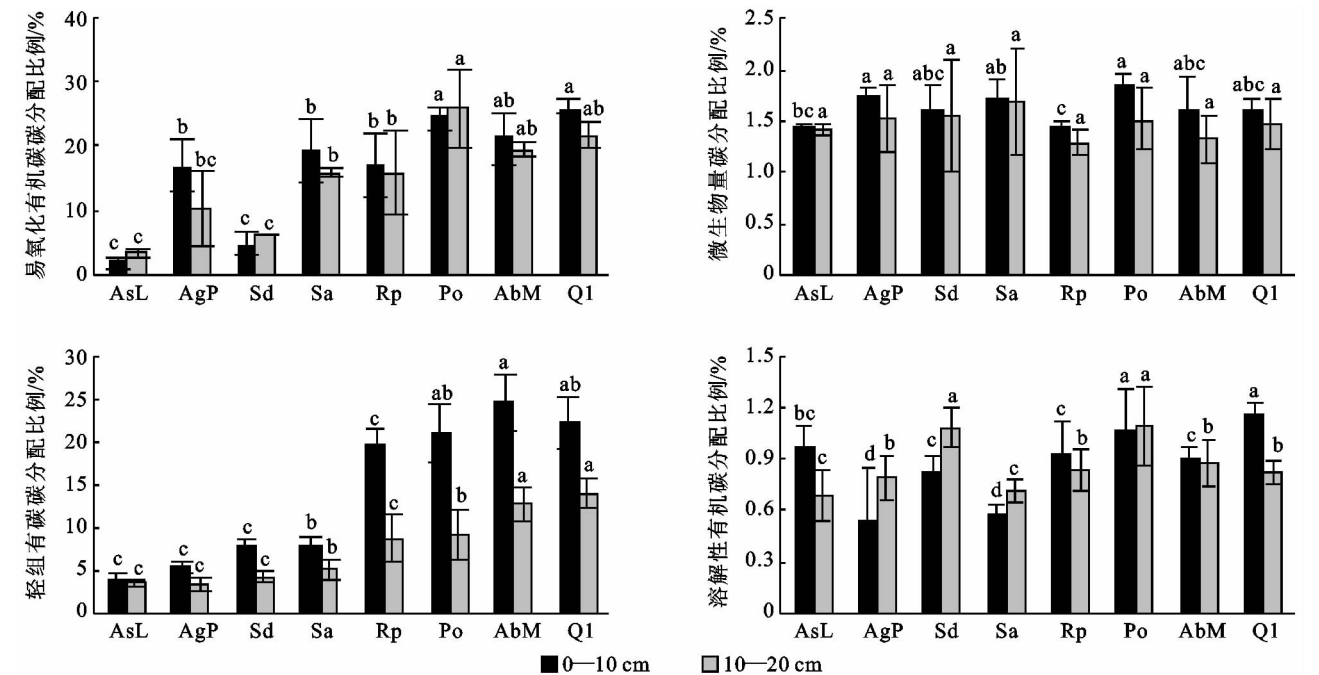


图 3 不同植被群落下土壤易氧化、微生物量、轻组有机碳占总有机碳比例

注:同一土层不同植被群落间不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.4 土壤活性有机碳之间以及碳与植被特性的相关性

对 0—20 cm 土层土壤总有机碳量和 3 种活性有机碳之间进行相关分析(表 2),结果表明,不同类型植被群落下总有机碳含量与易氧化碳、微生物生物量碳、轻组有机碳和溶解性有机碳含量之间的相关性均达到极显著水平($P<0.05$)。易氧化碳含量、微生物生物量碳含量、轻组有机碳含量和溶解性有机碳含量两两之间也均存在着极显著相关关系。分别以 0—20 cm 土层土壤总有机碳和 4 种活性有机碳含量为因变量,对优势植被的生物量、相对生物量、全碳含量、盖度、多度和频率进行逐步多元线性回归分析(表 3)。在这 5 种拟合方程中,优势植物相对生物量、盖度、多度和频率的 Sig 值都高于 0.05,所以未引入拟合方程

中。从表 3 可以看出,5 种拟合方程随着自变量的引入,显著性概率值均远小于 0.01。从拟合优度来看,活性有机碳与植物全碳和优势植物生物量的拟合程度都高于总有机碳,其中微生物生物量碳的拟合优度最高。且在总有机碳和轻组有机碳的拟合方程中,优势植物的全碳含量不做贡献(Sig 值 >0.05)。

表 2 土壤活性有机碳之间的相关关系

项目	SOC	ROC	MBC	LFOC	DOC
SOC	1.000	0.894**	0.951**	0.824**	0.967**
EOC		1.000	0.881**	0.896**	0.868**
MBC			1.000	0.911**	0.845**
LFOC				1.000	0.882**
DOC					1.000

注: ** 表示 $P<0.01$ 。

表 3 土壤活性有机碳与优势植物全碳和生物量的相关关系

因变量(y)	自变量 Sig 值		拟合方程	R^2	Sig 值
	植物全碳(x_1)	生物量(x_2)			
TOC	0.058	0.015	$y=8x_2+9.75$	0.597	0.015
EOC	0.021	0.012	$y=0.06x_1+2x_2-25.417$	0.680	0.012
MBC	0.033	0.011	$y=3.705x_1+121x_2-1479.143$	0.766	0.011
FLOC	0.676	0.010	$y=2x_2+0.669$	0.645	0.010
DOC	0.028	0.003	$y=2.286x_1+96x_2-955.902$	0.741	0.004

3 讨论

3.1 不同植被群落下土壤总有机碳含量变化

黄土高原丘陵沟壑区在植被恢复过程中,由于植

被群落以及地上生物量的变化,使得土壤的碳贮量也发生了相应的改变^[10]。植被较大的归还量能促使土壤积累较多的有机碳^[11]。不同的植被群落,由于植被覆盖度不同,使得植被的归还量有很大的差异,土

壤总有机碳含量亦不尽相同。本研究中,自然恢复条件下的乔灌草群落土壤有机碳含量最高,其次是灌草群落,草本群落最低。且3种乔灌草群落上下两层土壤间差别较大。以往的研究表明,森林群落凋落物一般在地表分解,草本群落土壤有机碳主要来源于残根的分解,且土壤有机碳含量取决于凋落物的输入和有机质分解的综合作用^[12]。

刺槐为黄土高原水土流失区引种最成功的造林树种之一。本研究中,刺槐群落的总有机碳含量在上下两层都明显低于丁香群落和狼牙刺群落,可见虽然人工干扰使得植被类型较快地达到了灌草阶段,但对于土壤有机碳储量的提高效果不明显。有研究表明,人工林通过次生演替在恢复土壤特性和维持土壤肥力方面发挥着重要作用^[13],但其物种多样性的恢复十分缓慢^[14],枯落物层不明显,另外人为干扰会使得土壤持水性能下降^[15],影响有机碳的累积。

3.2 不同植被群落下活性有机碳及其分配比例变化

本研究中不同群落类型4种土壤活性有机碳的含量均随土层深度的增加而递减,且在土壤上下两层,活性有机碳都表现为在草本群落最低,乔灌草群落较高。这主要是因为不同植被群落下,土壤承接的凋落物和生长植被的根系分泌物类型不同^[16]。

本研究中,各植被群落的土壤易氧化有机碳含量范围为0.11~10.26 g/kg(黄土丘陵区刺槐林1.52~9.50 g/kg^[17],海南人工林3.95~7.95 g/kg^[18]),轻组有机碳含量为0.19~9.29 g/kg(落叶松人工林0.54~14.17 g/kg^[19]以及裸地、荒地及草地0.61~1.32 g/kg^[20]),溶解性有机碳含量为46.83~483.28 mg/kg,(岩溶山区不同土地利用方式下土壤溶解性有机碳含量为145.06~425.77 mg/kg^[21])这与已有的相关研究结果较为一致。微生物生物量碳的含量与其他不同地区的研究有一定差异(浙江湖州不同森林的微生物生物量碳含量为282~338 mg/kg^[22]),其原因很可能是由于黄土高原的特定土质、植被类型和气候条件影响了微生物群体的群落类型和数量,从而影响到微生物量和碳的利用效率。

研究表明,活性有机碳占总有机碳的比例对不同群落下植被对土壤碳行为的影响更为敏感^[23]。土壤中易氧化碳被认为是稳定性相对较差的部分^[24],易氧化有机碳占总有机碳的比率越低,说明养分循环的越慢,则利于土壤有机质的积累^[25]。本研究中易氧化有机碳分配比例的变化范围为2.4%~25.7%,低于易氧化有机碳在其他地区的含量,而在黄土高原区的研究表明黄土高原的植被恢复主要是增加了有机碳的非活性部分^[26],从而表现为易氧化有机碳分配

比例较其他地区低。易氧化有机碳占总有机碳比例在不同植被群落下有明显差异,但在土壤上下两层中差异不明显,甚至出现了下层高于上层的情况,说明虽然土壤易氧化有机碳占总有机碳比例在不同植被群落下有差异性,但是随着土层深度的增加而保持稳定。这可能是由易氧化有机碳测定方法的局限造成的,化学氧化法会攻击那些不能被微生物利用的矿质组分颗粒有机质表面,与此同时,一些大颗粒有机质的内部活性成分不能被很好地氧化^[27]。

本研究中,微生物生物量碳占总有机碳比例为1.40%~1.84%(黄土高原耕地石灰性土壤的微生物生物量碳分配比例在1.13%~1.69%之间^[28]),溶解性有机碳占总有机碳比例为0.53%~1.16%(土壤溶解性有机碳含量一般不超过土壤有机碳总量的2%^[29]),与已有的相关研究一致。微生物生物量碳和溶解性有机碳占总有机碳比例在不同群落间差异均不显著,且在土壤的上下层中差异也不显著。其原因可能是因为这两种活性有机碳与土壤有机碳含量的相关性相对其他两种活性有机碳更好。而且从这两种活性有机碳的来源来看,不同植被间的根系相互作用使根系在土壤中镶嵌分布变广,根系的密度增加,在一定程度上弥补了下层土壤微生物生物量碳源的不足^[30],从而减轻了对土壤表面枯落物的依赖。茭蒿群落和铁杆蒿群落的微生物生物量碳分配比例保持在较为稳定的高水平上,其原因可能是根系有利于形成有利于微生物生活的群落环境。

轻组有机碳占总有机碳的比例略低于其他研究(落叶松人工林的29.3%~32.8%^[31],裸地、荒地及草地7.07%~46.65%^[32])。这也可能与黄土高原的独特气候、立地条件、植被类型等有关。本研究中,不同群落中土壤轻组有机碳在不同土壤层次的差异显著。这是因为从来源来看,它是由新近凋落、部分分解、与土壤矿质结合较差的植物残体组成,而土壤表面的有机碳中,这部分植物残体所占的比例很高^[30]。总体来看,轻组有机碳在不同群落间的差异也比较显著,但是在不同土壤层次上表现出不同的敏感性。在乔灌草群落和灌草群落中,上下两层占总有机碳比例差异明显。原因是在黄土高原的特殊生态环境中,轻组有机碳最直接最有效的来源是地上凋落物,而动物残体的部分所占的比例很小,这就意味着轻组有机碳的含量很大程度上取决于植被的密度、盖度和在特定的气候条件下植被的生长情况。这与其他的研究结果一致^[31-32]。

3.3 不同碳形态对植被类型变化的敏感程度

本研究中,通过对4种活性有机碳及总有机碳的

含量之间进行相关性研究发现:活性有机碳很大程度上取决于土壤总有机碳的含量,这与已有的研究结果一致^[27]。说明各种土壤活性有机碳之间的关系十分密切,虽然它们的表述、来源和测定方法均不同,但是它们都在一定程度上表征了土壤中活性较高部分有机碳的含量,在描述植物群落时,有一系列重要的特征指标。植物的残体是土壤有机碳的重要来源,而植物群落中的优势种在群落中占的优势最大,在群落每层中在数量、体积上对生境影响最大。优势种的植被对土壤的有机碳库起着一定的影响。从表2和表3可以看出,虽然4种活性有机碳与总有机碳的相关性都很强,但是在对群落中优势种特征的敏感程度上有不同程度的差异。4种活性有机碳对优势植被生物量和全碳含量的相关程度都高于总有机碳,说明活性有机碳更能指示优势种在植被群落中的主导地位,反之,植被群落优势种对土壤活性有机碳库的贡献要大于对整个有机碳库的贡献。其中,微生物生物量碳对优势植被的指示作用最大,其次分别是溶解性有机碳,易氧化有机碳,轻组有机碳。

4 结论

(1) 土壤有机碳以及活性有机碳,都表现为乔灌草群落>灌草群落>草本群落。均随土层深度的增加而降低。然而,人工建造的刺槐林,土壤有机碳和活性有机碳的含量低于灌草群落,说明人工恢复林在土壤碳素的恢复方面不及自然恢复群落。

(2) 微生物生物量碳和溶解性有机碳占总有机碳比例不随植被类型和土层深度的变化而变化,保持在一个比较稳定的水平上。易氧化有机碳和轻组有机碳占总有机碳比例因植被而异。轻组有机碳占总有机碳比例在上下两层也有明显差异。

(3) 在对群落优势植物的生物量和碳含量的响应方面,活性有机碳均敏感于总有机碳,其中优势植被对微生物量的影响最大,其次分别为溶解性有机碳,易氧化有机碳,轻组有机碳。

参考文献:

- [1] Lu C H, van Ittersum M K, Rabbinge R. Quantitative assessment of resource-use efficient cropping systems: a case study for Ansai in the Loess Plateau of China[J]. *Europ. J. Agronomy*, 2003, 19(2): 311-326.
- [2] 刘荣杰, 吴亚丛, 张英, 等. 中国北亚热带天然次生林与杉木人工林土壤活性[J]. *植物生态学报*, 2012, 36(5): 431-437.
- [3] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development

of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459-1466.

- [4] 彭文英, 张科利, 陈瑶, 等. 黄土坡耕地退耕还林后土壤性质变化研究[J]. *自然资源学报*, 2005, 20(2): 272-278.
- [5] 温仲明, 焦峰, 赫晓慧, 等. 黄土高原森林边缘区退耕地植被自然恢复及其对土壤养分变化的影响[J]. *草业学报*, 2007, 16(1): 16-23.
- [6] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [7] 林启美, 吴玉光, 刘焕龙. 熏蒸法测定土壤微生物量碳的改进[J]. *生态学杂志*, 1999, 18(2): 63-66.
- [8] 沈宏, 曹志洪. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. *生态学杂志*, 1999, 18(3): 32-38.
- [9] Janzen H H, Campbel C A, Brandt S A, et al. Light fraction organic matter in soils from longterm crop rotations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(6): 1799-1806.
- [10] 季志平, 苏印泉, 贺亮. 黄土丘陵区人工林土壤有机碳的垂直分布特征[J]. *西北林学院学报*, 2006, 21(6): 54-57.
- [11] 管东生, Peart M R. 华南南亚热带不同演替阶段植被的环境效应[J]. *环境科学*, 2000, 21(5): 1-5.
- [12] 赵勇, 吴明作, 樊巍, 等. 太行山丘陵区群落演替进程中碳贮量变化特征[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(4): 208-212.
- [13] 谢宝平, 牛德奎. 华南严重侵蚀地植被恢复对土壤条件影响的研究[J]. *江西农业大学学报*, 2000, 22(1): 135-139.
- [14] 周厚诚, 任海, 向言词, 等. 南澳岛植被恢复过程中不同阶段土壤的变化[J]. *热带地理*, 2001, 21(2): 104-107.
- [15] 贾晓红, 李荣新, 李元寿. 干旱沙区植被恢复汇总土壤碳氮变化规律[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(1): 66-74.
- [16] Jiang P K. Soil active carbon pool under different types of vegetation[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(1): 10-13.
- [17] 薛莲, 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.
- [18] 林晓东, 漆智平, 唐树梅, 等. 海南人工林地、人工草地土壤易氧化有机碳和轻组碳含量初探[J]. *热带作物学报*, 2012, 33(1): 171-177.
- [19] 吴建国, 张小全, 王彦辉, 等. 土地利用变化对土壤物理组分中有机碳分配的影响[J]. *林业科学*, 2002, 38(4): 19-29.
- [20] 张璐, 张文菊, 徐明岗, 等. 长期施肥对中国3种典型农田土壤活性有机碳库变化的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(5): 1646-1655.

- [4] Castro C J, Aguiar P P, Mira da Silva L. A system approach for the estimation of the effects of land consolidation projects(LCPs): a model and its application[J]. *Agricultural Systems*, 2001, 68(3): 179-195.
- [5] 张正峰, 赵伟. 农村居民点整理潜力内涵与评价指标体系[J]. *经济地理*, 2007, 27(1): 138-140.
- [6] 杨庆媛, 张占录. 大城市郊区农村居民点整理的目标和模式研究: 以北京市顺义区为例[J]. *中国软科学*, 2003(6): 115-119.
- [7] 高燕, 叶艳妹. 农村居民点用地整理的影响因素分析及模式选择[J]. *农村经济*, 2004(3): 23-25.
- [8] 龙英, 舒晓波, 李秀娟, 等. 江西省安福县农村居民点空间分布变化及其环境因素分析[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(5): 171-175.
- [9] 田光进, 刘纪远, 庄大方. 近 10 年来中国农村居民点用地时空特征[J]. *地理学报*, 2003, 58(5): 651-658.
- [10] 汤国安, 赵牡丹. 基于 GIS 的乡村聚落空间分布规律研究: 以陕北榆林地区为例[J]. *经济地理*, 2009, 20(5): 2-5.
- [11] 李君, 李小建. 综合区域环境影响下的农村居民点空间分布变化及影响因素分析: 以河南巩义市为例[J]. *资源科学*, 2009, 31(7): 1195-1204.
- [12] 李君. 农户居住空间演变及区位选择研究: 以河南省巩义市为例[D]. 河南开封: 河南大学, 2009.
- [13] 陈志文, 李惠娟. 中国江南农村居住空间结构模式分析[J]. *农业现代化研究*, 2007, 28(1): 15-19.
- [14] 张强. 农村居民点布局合理性辨析: 以北京市郊区为例[J]. *中国农村经济*, 2007(3): 65-72.
- [15] 王婷, 周国华, 杨延. 衡阳南岳区农村居民点用地合理布局分析[J]. *地理科学进展*, 2008, 27(6): 25-31.
- [16] Grinnell J. *Geography and Evolution*[J]. *Ecology*, 1924(5): 225-229.
- [17] 尚玉昌. 现代生态学中的生态位理论[J]. *生态学进展*, 1988, 5(2): 77-84.
- [18] 刘建国. 生态位理论的发展及其在农村生态工程建设中的应用[J]. *农业现代化研究*, 1987(6): 30-33.
- [19] 朱春全. 生态位理论及其在森林生态学研究中的应用[J]. *生态学杂志*, 1993, 12(4): 41-46.
- [20] 李自珍, 赵松岭. 生态位适宜度理论及其在作物生长系统中的应用[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 1993, 29(4): 219-224.
- [21] 欧阳志云, 王如松, 符贵南. 生态位适宜度模型及其在土地利用适宜性评价中的应用[J]. *生态学报*, 1996, 16(2): 113-120.
- [22] 曲衍波, 张凤荣, 姜广辉, 等. 基于生态位的农村居民点用地适宜性评价与分区调控[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(11): 290-296.
- [23] 郝仕龙, 曹连海, 李壁成. 生态位理论及在土地利用研究中的应用: 以固原上黄试区为例[J]. *中国水土保持*, 2010(3): 35-37.
- [24] 蒙莉娜, 郑新奇, 赵璐, 等. 基于生态位适宜度模型的土地利用功能分区[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(3): 282-287.
- [25] 李伯华, 曾菊新. 农户居住空间行为演变的微观机制研究: 以武汉市新洲区为例[J]. *地域研究与开发*, 2008, 27(5): 30-35.
- [26] 姜广辉, 张凤荣, 秦静, 等. 北京山区农村居民点分布及其变化与环境关系分析[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(11): 85-92.
- [27] 于婧, 聂艳, 周勇, 等. 生态位适宜度方法在基于 GIS 的耕地多宜性评价中的应用[J]. *土壤通报*, 2006, 43(2): 190-196.
- [27] Vieira F C, Bayer B 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 & Tillage Research*, 2007, 96(6): 195-204.
- [28] 金发会, 李世清, 卢红玲, 等. 黄土高原不同土壤微生物量碳、氮与氮素矿化势的差异[J]. *生态学报*, 2008, 28(1): 227-236.
- [29] 李玲, 肖和艾, 苏以荣, 等. 土地利用对亚热带红壤区典型景观单元土壤溶解有机碳含量的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(1): 122-128.
- [30] 杨刚, 何寻阳, 王克林, 等. 不同植被类型对土壤微生物量碳氮及土壤呼吸的影响[J]. *土壤通报*, 2008, 39(1): 189-191.
- [31] 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[J]. *北京林业大学学报*, 2005, 27(2): 18-22.
- [32] 徐侠, 陈月琴, 汪家社, 等. 武夷山不同海拔高度土壤活性有机碳变化[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(3): 539-544.

(上接第 70 页)

- [21] 蓝家程, 傅瓦利, 段正峰, 等. 岩溶山区土壤溶解性有机碳对土地利用方式的响应及其与土壤养分的关系[J]. *水土保持研究*, 2011, 5(18): 76-86.
- [22] 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.
- [23] 朱志建, 姜培坤, 徐秋芳, 等. 不同森林植被下土壤微生物量碳和易氧化态碳的比较[J]. *林业科学研究*, 2006, 19(4): 523-526.
- [24] 张远东, 赵常明, 刘世荣. 川西亚高山人工云杉林和自然恢复演替系列的林地水文效应[J]. *自然资源学报*, 2004, 19(6): 761-768.
- [25] 吴彦, 刘庆, 乔永康, 等. 亚高山针叶林不同恢复阶段群落物种多样性变化及其对土壤理化性质的影响[J]. *植物生态学报*, 2001, 25(6): 648-655.
- [26] 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[J]. *水土保持研究*, 2005, 12(3): 50-52.