应 用 生 态 学 报 2015 年 8 月 第 26 卷 第 8 期
Chinese Journal of Applied Ecology, Aug. 2015, **26**(8): 2282-2290

黄土高原不同植被带土壤团聚体有机碳和酶活性的粒径分布特征*

李 鑫[1,2] 马瑞萍[1,3] 安韶山[1,2**] 曾全超[4] 李娅芸[1,2]

([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]西藏自治区农牧科学院农业资源与环境研究所, 拉萨 850032; [4]中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西杨凌 712100)

摘 要 为探究土壤中各粒级团聚体不同形态有机碳和酶活性的分布特征,以黄土高原延河流域森林带、森林草原带、草原带土壤为对象,研究了不同粒级团聚体总有机碳、易氧化碳和腐殖质碳含量,以及纤维素酶、β-D 葡糖苷酶、过氧化物酶、蔗糖酶和脲酶活性,分析了土壤团聚体有机碳及其组分与酶活性之间的相关关系.结果表明: 3 种植被带土壤团聚体有机碳及其组分含量表现为森林带>草原带>森林草原带,3 种形态有机碳含量在 0.25~2 mm 粒径均最高;不同植被带土壤团聚体有机碳及其组分含量和酶活性在 0~10 cm 土层大于 10~20 cm 土层;3 种植被带纤维素酶、β-D 葡糖苷酶、蔗糖酶和脲酶活性表现为森林带>草原带>森林草原带,过氧化物酶活性表现为森林带>森林草原带>草原带;3 种植被带土壤中各种酶活性随着粒径的减小呈递增趋势.土壤纤维素酶、过氧化物酶、蔗糖酶和脲酶活性与团聚体各种形态碳含量均呈显著正相关.

关键词 黄土高原; 土壤团聚体; 土壤有机碳; 酶活性; 植被带

文章编号 1001-9332(2015)08-2282-09 **中图分类号** S152.4; S153.6 **文献标识码** A

Characteristics of soil organic carbon and enzyme activities in soil aggregates under different vegetation zones on the Loess Plateau. LI Xin[1,2], MA Rui-ping[1,3], AN Shao-shan[1,2], ZENG Quan-chao[4], LI Ya-yun[1,2] ([1]*College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling* 712100, *Shaanxi, China*; [2]*State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling* 712100, *Shaanxi, China*; [3]*Institute of Agricultural Resources and Environment, Agriculture and Animal Husbandry Sciences of Tibet Autonomous Region, Lasa* 850032, *China*; [4]*Research Center of Soil and Water Conversation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling* 712100, *Shaanxi, China*). *-Chin. J. Appl. Ecol.*, 2015, **26**(8): 2282-2290.

Abstract: In order to explore the distribution characteristics of organic carbon of different forms and the active enzymes in soil aggregates with different particle sizes, soil samples were chosen from forest zone, forest-grass zone and grass zone in the Yanhe watershed of Loess Plateau to study the content of organic carbon, easily oxidized carbon, and humus carbon, and the activities of cellulase, β-D-glucosidase, sucrose, urease and peroxidase, as well as the relations between the soil aggregates carbon and its components with the active soil enzymes were also analyzed. It was showed that the content of organic carbon and its components were in order of forest zone > grass zone > forest-grass zone, and the contents of three forms of organic carbon were the highest in the diameter group of 0.25-2 mm. The content of organic carbon and its components, as well as the activities of soil enzymes were higher in the soil layer of 0-10 cm than those in the 10-20 cm soil layer of different vegetation zones. The activities of cellulase, β-D-glucosidase, sucrose and urease were in order of

* 国家自然科学基金项目(41171226)、国家自然科学基金重点项目(41030532)、"新世纪优秀人才支持计划"项目(NCET-12-0479)和西北农林科技大学"优秀人才科研专项"计划项目(QN2011049)资助.

* * 通讯作者. E-mail: shan@ms.iswc.ac.cn

2014-10-21 收稿,2015-04-20 接受.

forest zone > grass zone > forest-grass zone. The peroxidase activity was in order of forest zone > forest-grass zone > grass zone. The activities of various soil enzymes increased with the decreasing soil particle diameter in the three vegetation zones. The activities of cellulose, peroxidase, sucrose and urease had significant positive correlations with the contents of various forms of organic carbon in the soil aggregates.

Key words: Loess Plateau; soil aggregate; soil organic carbon; enzyme activity; vegetation zone.

土壤酶作为土壤生态系统代谢的重要动力,参与土壤中一切生物化学过程[1],土壤酶主要来源于微生物、动植物残体及其代谢过程中产生的分泌物[2],土壤酶的种类和数量繁多,不同种类的酶参与不同的生物化学反应,与土壤质量和土壤性状有着密切联系.土壤有机碳是土壤团聚体形成的重要影响因素,土壤团聚体的结构和稳定性在一定程度上受土壤有机碳的影响[3],土壤有机碳主要通过有机和无机胶结作用、土壤粘粒的包裹、菌丝和植物根系的缠绕及填充作用等来参与土壤团聚体的形成[4].不同植被带下,由于其生长的植被类型存在差异,导致进入土壤的凋落物性质和数量不同,土壤酶的种类和数量也因此不同,进而影响土壤有机碳组分的转换和循环[5].因此,不同形态有机碳的转变趋势可以用酶活性的高低来判断[6],研究土壤团聚体及其组分以及酶活性随土壤粒径的变化特征对于了解土壤结构十分必要.

目前,在黄土高原土壤有机碳和酶活性的研究中,以不同施肥模式和耕作方式对有机碳和酶活性影响的研究较多[5,7],也有不少研究涉及到土壤有机碳对酶活性的影响[8-10].但是,这些研究不能充分解决黄土高原植被恢复中土壤酶活性的响应与演变、土壤有机碳组分和土壤酶活性随粒径的分布特征等问题.为了更多地了解土壤团聚体有机碳组分及酶活性的粒径分布特征,本文以黄土高原森林带、森林草原带和草原带土壤为对象,研究了不同植被带土壤团聚体有机碳及其组分的粒径分布及酶活性的变化特征,分析土壤有机碳和酶在土壤中的迁移变化及土壤结构的变化特征,旨在为黄土高原不同区域植被恢复的环境影响评价提供科学依据.

1　研究地区与研究方法

1.1　研究区概况

本文以延河流域(36°23′—37°17′ N,108°45′—110°28′ E)为研究区域,该流域总面积为 7687 km^2,全长为 286.9 km,河网密度为 4.7 km · km^{-2},平均坡度为 4.3‰.气候属大陆性气候,年均气温 9 ℃,年均降雨量 500 mm,自西南向西北温度和降雨呈现明显的梯度变化特征,植被分布也以森林、森林草原、草原呈渐次变化[11].森林带样品的采集选在洞子沟流域进行,该流域位于延河流域一级支流西川流域,地处安塞县楼坪乡,总面积约为 20.6 km^2,土壤类型主要是黄绵土,部分为复钙红粘土、冲积土和黑垆土,该区土地利用方式以林地为主,主要植被有辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等乔灌木.森林草原带样品的采集选在小河沟流域,该区位于延河上游干流,地处安塞县谭家营乡,流域总面积约为 10.8 km^2,土壤类型以黄绵土为主,土地主要利用方式为草地和农耕地,兼有少部分林地,主要植物为铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、茭蒿(*A. giraldii*)等.草原带样品采集选在高家沟流域,该流域位于延河上游干流,地处安塞县镰刀湾乡,流域总面积约为 27.3 km^2,主要土地利用方式为草地和农耕地,土壤类型以黄绵土为主,部分为典型黑垆土,主要植物为铁杆蒿、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)等.

1.2　试验设计

2011 年 7 月,在不同植被带,选取具有代表性的植物群落,采样点基本信息见表 1.分别在森林带、森林草原带、草原带设置了大小为 20 m×20 m、10 m×10 m和 5 m×5 m 的样方.以“S”型多点采样,采集 0~10 和 10~20 cm 土层原状土,混合密封后带回实验室,自然风干,去除石块、动植物残体等.用沙维诺夫干筛法[12]将部分风干土依次过 5、2 和 0.25 mm 筛,分别收集<0.25、0.25~2、2~5 和>5 mm 粒级的团聚体土样.

1.3　测定项目与方法　采用重铬酸钾-硫酸外加热法测定土壤总有机碳[13];用 333 mmol · L^{-1}的高锰酸钾氧化土样,在波长 565 nm 下用分光光度计比色法测定易氧化碳含量;用焦磷酸钠提取,重铬酸钾法测定腐殖质碳[14];用甲苯处理土壤样品,加入羧甲基纤维素溶液, 37 ℃、pH 5.5 条件下培养 72 h 后加入显色剂 3,5-二硝基水杨酸,在沸水中水浴 5 min,显色后于波长为 540 nm 下比色测定纤维素酶活性;

表 1 采样点基本信息
Table 1 Basic information of plots

植被带 Vegetation zone	样方数 Number of samples	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude (m)	坡度 Slope (°)	优势物种 Dominant species	总盖度 Total coverage (%)	所属流域 Drainage basin
森林带 Forest zone	11	109°09′29″—109°17′42″	36°34′26″—36°57′54″	1259~1355	8~35	辽东栎、刺槐、铁杆蒿、茭蒿、白羊草等	30~70	洞子沟
森林草原带 Forest-grass zone	13	109°12′43″—109°22′67″	37°00′50″—37°01′69″	1265~1380	1~45	铁杆蒿、长芒草、茭蒿、白羊草等	18~65	小河沟
草原带 Steppe zone	11	108°59′14″—108°98′99″	37°13′05″—37°23′24″	1270~1379	3~43	达胡、铁杆蒿、长芒草、沙棘、茭蒿等	33~62	高家沟

纤维素酶活性以 72 h 后 10 g 土壤生成的葡萄糖的 mg 表示;过氧化物酶活性用比色法测定,以 2 h 后 1 g 土壤中紫色没食子素的 mg 表示;β-D 葡糖苷酶活性用硝基酚比色法测定[15],以 1 h 后每 kg 土壤中生成的 P-硝基酚的 mg 表示;用甲苯处理土壤样品,加入蔗糖基质,在 37 ℃、pH 5.5 条件下培养 24 h,加入 3,5-二硝基水杨酸,在沸水中水浴 5 min 显色后于波长 508 nm 下比色测定蔗糖酶活性,蔗糖酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中含葡萄糖的 mg 表示.

1.4 数据处理

采用 Excel 2013 和 SPSS 20.0 软件对数据进行统计分析.采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)和 Duncan 法进行方差分析和多重比较(α = 0.05),用 Pearson 法对土壤团聚体有机质及其组分与酶活性进行相关分析.利用 Excel 2013 软件作图.图表中数据为平均值±标准差.

2 结果与分析

2.1 不同植被带土壤团聚体总有机碳及其组分分布

如表 2 所示,3 种形态有机碳含量均表现为:森林带>草原带>森林草原带.其中,森林带土壤总有机碳含量是森林草原带土壤总有机碳含量的 2~3 倍;同一植被带相同粒级间,易氧化碳含量>腐殖质碳含量,其中腐殖质碳含量占总有机碳含量的 25%~50%.不同植被带,0~10 cm 土层 3 种形态碳含量均大于 10~20 cm 土层,表明土壤团聚体碳主要集中在浅表层.不同粒级间呈现出 0.25~2 mm 和<0.25 mm 粒级下 3 种形态碳含量略高.

不同粒径下,森林带土壤中 3 种形态有机碳含量差异不显著;森林草原带 0~10 cm 土层 0.25~2 mm 粒径土壤易氧化碳含量、腐殖质碳含量与<0.25 mm

表 2 不同植被带土壤团聚体有机碳组分分布
Table 2 Composition of soil organic carbon in soil aggregates under different vegetation zones ($g \cdot kg^{-1}$)

植被带 Vegetation zone	粒径 Particle size (mm)	总有机碳 Total organic carbon		易氧化碳 Easily oxidized carbon		腐殖质碳 Humus carbon	
		0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm
森林带	>5	7.69±0.91Aa	3.45±0.28Aa	4.58±0.45Aa	1.48±0.12Aa	3.09±0.35Aa	0.88±0.40Aa
Forest zone	2~5	7.52±0.56Aa	3.50±0.24Aa	4.59±0.48Aa	1.54±0.15Aa	2.65±0.30Aa	1.06±0.65Aa
	0.25~2	8.67±1.02Aa	4.13±0.38Aa	6.49±0.61Aa	1.68±0.11Ba	3.46±0.41Aa	1.32±0.89Aa
	<0.25	8.36±1.04Aa	4.53±0.40Aa	5.68±0.49Aa	1.50±0.17Aa	3.57±0.41Aa	1.07±0.95Aa
	全土 Entire solum	8.61±0.54	4.43±0.52	4.74±0.00	2.40±0.01	3.61±0.04	1.27±0.01
森林草原带	>5	2.19±0.12Ba	1.68±0.86Ba	1.19±0.71Bab	0.66±0.37Bab	0.57±0.02Bab	0.39±0.02Ba
Forest-grass	2~5	2.28±0.11Ba	1.51±0.10Ba	1.41±0.94Bab	0.84±0.06Aa	0.58±0.02Bab	0.39±0.02Ba
zone	0.25~2	2.96±0.15Ba	1.87±0.11Ba	1.56±1.24Ba	0.59±0.04Cab	0.74±0.03Ba	0.46±0.04Ba
	<0.25	2.36±0.11Ba	1.76±0.08Ba	0.85±0.06Bb	0.57±0.04Bb	0.55±0.03Bb	0.39±0.03Ba
	全土 Entire solum	2.79±0.34	1.86±0.15	1.32±0.02	1.24±0.00	0.70±0.08	0.44±0.03
草原带	>5	2.19±0.12Ba	2.61±0.17ABa	0.88±0.06Bb	1.67±0.72Ab	0.98±0.07Ba	1.00±0.09Aa
Steppe zone	2~5	2.38±0.12Ba	2.55±0.18ABa	1.72±0.44Ba	1.46±0.86Ab	1.05±0.07Ba	1.05±0.10Aa
	0.25~2	3.00±0.10Ba	3.54±0.15ABa	1.66±0.10Ba	2.34±0.85Aa	1.34±0.07Ba	1.23±0.09Aa
	<0.25	2.30±0.11Ba	2.27±0.10Ba	1.20±0.07Bab	1.48±0.76Ab	1.16±0.06Ba	1.01±0.08Aa
	全土 Entire solum	3.30±0.36	2.83±0.55	2.90±0.03	1.91±0.12	1.29±0.16	1.18±0.11

不同大写字母表示同一粒径不同植被带间差异显著,不同小写字母表示同一植被带不同粒径间差异显著(P<0.05) Different capital letters meant significant difference among different vegetation zones in the same size aggregate, and different small letters meant significant difference among different size aggregates in the same vegetation zone at 0.05 level.

粒径下差异显著，10~20 cm 土层中 2~5 mm 粒径下易氧化碳含量与<0.25 mm 粒径下差异显著；草原带 0~10 cm 土层中 0.25~2 mm 粒径下土壤易氧化碳含量与其他粒径下差异显著.其余土壤中不同粒径下 3 种形态有机碳含量差异均不显著.相同粒径下，3 种形态有机碳含量表现为森林带土壤显著高于其他植被带.

2.2　不同植被带土壤团聚体酶活性分布

2.2.1 土壤团聚体纤维素酶活性　由图 1 可以看出，不同植被带土壤团聚体纤维素酶活性表现为草原带>森林带>森林草原带；0~10 cm 土层土壤团聚体纤维素酶活性高于10~20 cm土层；森林带和森

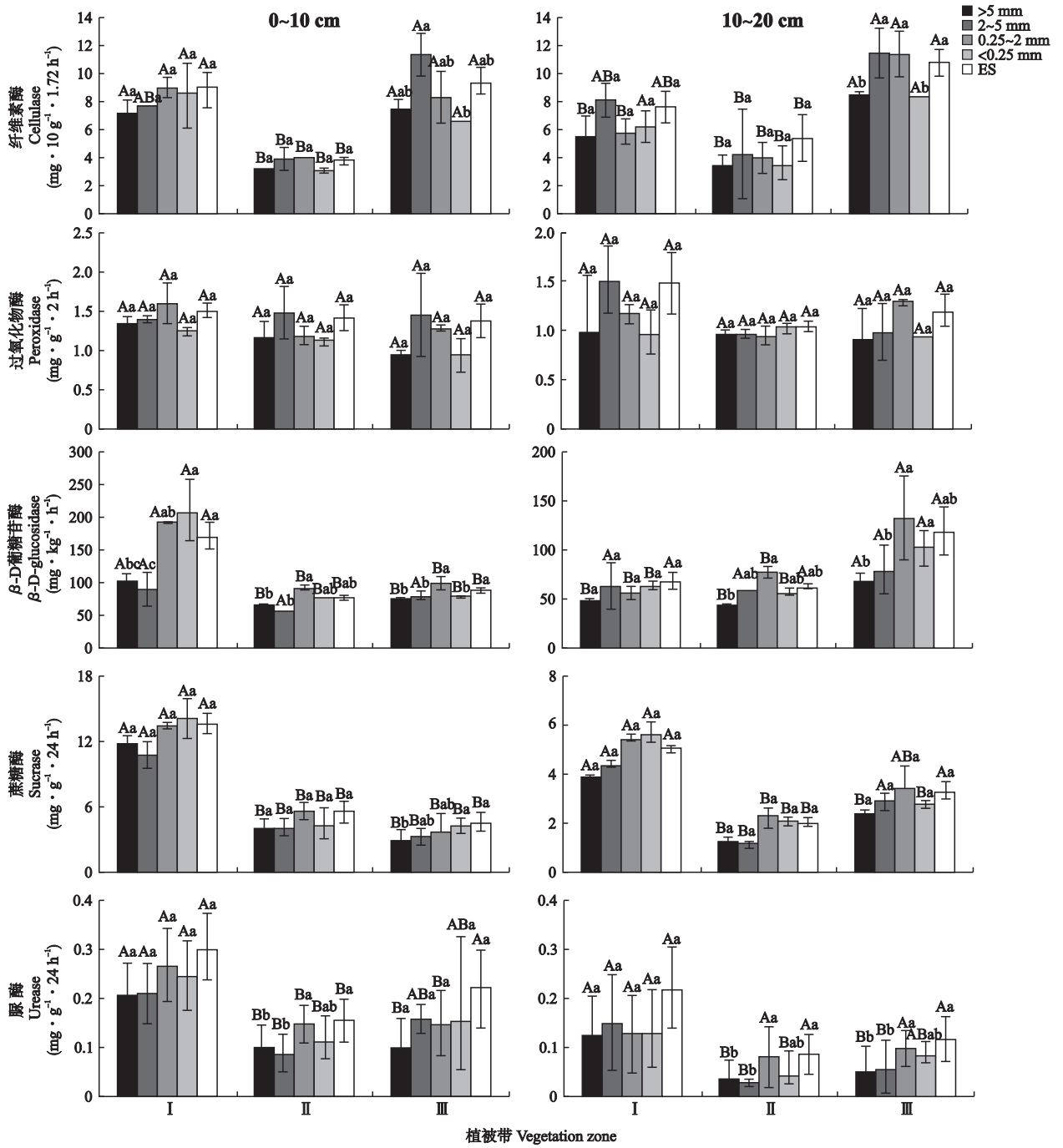


图 1　不同植被带土壤团聚体酶活性

Fig.1　Soil enzyme activities in aggregates under different vegetation types.

ES：全土 Entire solum. Ⅰ：森林带 Forest zone；Ⅱ：森林草原带 Forest-grass zone；Ⅲ：草原带 Steppe zone. 不同大写字母表示同一粒径不同植被带间差异显著，不同小写字母表示同一植被带不同粒径间差异显著（$P<0.05$）Different capital letters meant significant difference among different vegetation zones in the same size aggregate，and different small letters meant significant difference among different size aggregates in same vegetation zone at 0.05 level.

林草原带同一土层土壤团聚体纤维素酶活性差异均不显著,而草原带部分粒径差异显著.其中,草原带土壤团聚体纤维素酶活性在同一土层相同粒径间与森林草原带有显著差异,在 10~20 cm 土层,>5 和 0.25~2 mm 粒径间与森林带土壤团聚体纤维素酶活性差异也显著.森林草原带和草原带土壤中,2~5 和 0.25~2 mm 粒级土壤团聚体纤维素酶活性均大于>5 和<0.25 mm 粒级土壤团聚体纤维素酶活性;森林带和森林草原带土壤在 0~10 cm 土层不同粒级间土壤团聚体纤维素酶活性差异显著;草原带土壤,2~5 mm 粒级土壤团聚体纤维素酶活性在 0~10 和 10~20 cm 土层均最高,分别为 11.47 和 8.24 $mg \cdot g^{-1}$,且与其他粒级差异显著.

2.2.2 土壤团聚体过氧化物酶活性 0~10 cm 土层,土壤团聚体过氧化物酶活性表现为森林带>森林草原带>草原带,相同粒径不同植被带之间以及相同植被带不同粒径之间差异均不显著,其中,森林草原带和草原带土壤团聚体过氧化物酶活性在 2~5 mm 粒级最高,分别为 1.49 和 1.46 $mg \cdot g^{-1}$.10~20 cm 土层,相同粒径不同植被带之间以及相同植被带不同粒径之间差异不显著,其中,2~5 mm 粒级下森林带土壤团聚体过氧化物酶活性最高,为 1.50 $mg \cdot g^{-1}$;0.25~2 mm 粒级下草原带土壤团聚体过氧化物酶活性最高,为 1.27 $mg \cdot g^{-1}$.土壤团聚体过氧化物酶活性平均值表现为森林带大于森林草原带和草原带.

2.2.3 土壤团聚体 β-D 葡糖苷酶活性 土壤团聚体 β-D 葡糖苷酶活性表现为森林带>草原带>森林草原带.在 0~10 cm 土层,森林带<0.25 mm 粒级下土壤团聚体 β-D 葡糖苷酶活性与>5 和 2~5 mm 粒级差异显著,与 0.25~2 mm 粒级差异不显著;森林草原带 0.25~2 mm 粒级下土壤团聚体 β-D 葡糖苷酶活性与>5 和 2~5 mm 粒级差异显著,与<0.25 mm 粒级差异不显著;草原带土壤 0.25~2 mm 粒级下土壤团聚体 β-D 葡糖苷酶活性与其他粒级差异均显著;另外,相同粒径下森林带土壤团聚体 β-D 葡糖苷酶活性与森林草原带和草原带差异显著,其中,0.25~2和<0.25 mm 粒级下森林带土壤团聚体 β-D 葡糖苷酶活性远远高于森林草原带和草原带,分别高达 194.77 和 207.85 $mg \cdot kg^{-1}$.在 10~20 cm 土层,森林带土壤团聚体 β-D 葡糖苷酶活性在不同粒径间差异不显著;森林草原带土壤0.25~2 mm粒级下土壤团聚体 β-D 葡糖苷酶活性与>5 mm 粒径差异显著;草原带土壤 0.25~2 mm 粒级下土壤团聚体 β-D葡糖苷酶活性与>5 和 2~5 mm 粒级差异显著,与 0.25~2 mm 粒级差异不显著;另外,相同粒径下草原带土壤团聚体 β-D 葡糖苷酶活性与森林草原带和森林带整体上差异显著,其中草原带 0.25~2 mm粒级下土壤团聚体 β-D 葡糖苷酶活性最高,为 133.19 $mg \cdot kg^{-1}$.

2.2.4 不同植被带土壤团聚体蔗糖酶活性 同一土层森林带土壤团聚体蔗糖酶活性显著高于同一粒径下森林草原带和草原带,其中,森林带土壤 0.25~2 和<0.25 mm 粒级下土壤团聚体蔗糖酶活性最高,在 0~10 cm 土层分别高达 13.41 和 13.91 $mg \cdot g^{-1}$,同一粒径下森林草原带和草原带之间土壤团聚体蔗糖酶活性差异不显著.0~10 cm 土层,森林带和森林草原带相同植被带不同粒级间差异均不显著,草原带土壤<0.25 和>5 mm 粒级下土壤团聚体蔗糖酶活性差异显著;10~20 cm 土层,相同植被带不同粒级间土壤团聚体蔗糖酶活性差异均不显著.

2.2.5 不同植被带土壤团聚体脲酶活性 土壤团聚体脲酶活性表现为森林带>草原带>森林草原带,0~10 cm 土层土壤团聚体脲酶活性均高于 10~20 cm 土层.0~10 cm 土层森林带与草原带土壤在 2~5 mm 粒级下土壤团聚体脲酶活性差异不显著;10~20 cm 土层森林带与森林草原带土壤 0.25~2 mm 粒级下土壤团聚体脲酶活性差异不显著,与草原带土壤 0.25~2 和<0.25 mm 粒级下土壤团聚体脲酶活性差异也不显著;除此之外,森林带土壤与其他植被带土壤相同粒级下土壤团聚体脲酶活性差异均达显著水平.森林带土壤不同粒径下土壤团聚体脲酶活性差异不显著;森林草原带土壤 0.25~2 mm 粒级下土壤团聚体脲酶活性与>5 和 2~5 mm 粒级差异显著,与<0.25 mm 粒级差异不显著;草原带土壤在 0~10 cm 土层不同粒级下土壤团聚体脲酶活性差异不显著,在 10~20 cm 土层 0.25~2 mm 粒级下土壤团聚体脲酶活性与>5 和 2~5 mm 粒级差异显著,与<0.25 mm 粒级差异不显著.

2.3 土壤团聚体有机碳和酶活性的关系

由表 3 可以看出,土壤团聚体 β-D 葡糖苷酶活性与土壤团聚体纤维素酶和脲酶活性均呈显著正相关,与有机碳含量和土壤团聚体蔗糖酶活性呈正相关趋势,相关性不显著,与过氧化物酶活性、易氧化碳含量、腐殖质碳含量呈负相关趋势,相关性不显著;土壤团聚体蔗糖酶活性与过氧化物酶和纤维素酶活性以及土壤团聚体腐殖质碳含量呈正相关趋势,相关性不显著;土壤团聚体脲酶活性与土壤团聚

表 3　土壤团聚体有机质及其组分与酶活性相关关系
Table 3　Correlation between soil organic carbon and enzymatic activities in soil aggregates

	纤维素酶 Cellulase	脲酶 Urease	β-D 葡糖苷酶 β-D-glucosidase	有机碳 Organic carbon	蔗糖酶 Sucrase	易氧化碳 Easily oxidized carbon	腐殖质碳 Humus carbon
过氧化物酶 Peroxidase	0.150*	0.158*	−0.041	0.132*	0.091	0.155**	0.295**
纤维素酶 Cellulase		0.459**	0.254**	0.280**	0.023	0.067	0.131*
脲酶 Urease			0.289**	0.140*	0.237**	0.029	0.098
β-D 葡糖苷酶 β-D-glucosidase				0.053	0.08	−0.039	−0.065
有机碳 Organic carbon					0.175**	0.122*	0.315**
蔗糖酶 Sucrase						0.117*	0.074
易氧化碳 Easily oxidized carbon							0.343**

* $P<0.05$; ** $P<0.01$.

体易氧化碳和腐殖质碳含量呈正相关趋势,相关性不显著;土壤团聚体过氧化物酶活性与各种形态碳含量均呈显著正相关;土壤团聚体纤维素酶活性与有机碳和腐殖质碳含量呈显著正相关,与易氧化碳呈正相关趋势,但相关性不显著.

3　讨　　论

3.1　不同植被带土壤团聚体有机碳及其组分分布

大量研究表明,枯枝落叶是土壤有机碳的主要来源之一,不同植被带,由于其地上部分生长的植被类型的差异,使得土壤中有机碳的种类和含量有明显差异;不同的气候和水热条件对土壤有机碳也有很大影响.本研究表明,不同植被带下土壤团聚体有机碳及其组分含量均大体表现为:森林带>草原带>森林草原带.森林带物种以辽东栎、刺槐等乔灌木为主,植被总盖度明显高于森林草原带(以刺槐、铁杆蒿等草灌为主)和草原带(以铁杆蒿、茭蒿等草本植物为主),因此森林带进入土壤的枯枝落叶量远大于森林草原带和草原带.大量枯枝落叶进入土壤,为土壤微生物提供了充足的碳源,微生物的生长繁殖有了良好的生长条件,而微生物的剧烈活动大大提高了土壤酶活性,进而促进了土壤中有机碳的转化和分解[16].较高的覆盖度使森林带土壤水分蒸发缓慢,大量的枯落物保证了土壤温度,为土壤有机碳的形成和转化提供了有利条件.土壤有机碳通过分解和转化一部分成为易氧化的小分子碳被植物吸收利用,一部分转化为腐殖质碳,为土壤团聚体的形成提供基础.本研究中,3 种植被带下土壤团聚体易氧化碳含量均大于腐殖质碳含量,这与前人的研究结果相似[17-19].

3 种植被带下,不同的土层土壤团聚体有机碳及其组分含量也有差异,呈现出 0~10 cm 土层略大于 10~20 cm 土层.张宏等[20]研究表明,产生差异主要是因为枯落物的分解主要集中在 0~10 cm 土层,而 10~20 cm 土层土壤有机碳的含量受枯落物的影响相对较小.赵勇等[21]研究也表明,森林带和草原带枯落物的分解对不同土层影响有差异,外部枯落物的输入和土壤中有机质的分解共同影响着土壤有机碳及其组分的含量.

本研究中,3 种植被带下微团聚体(<0.25 和 0.25~2 mm 粒径)土壤团聚体有机碳及其组分含量略大于大团聚体(2~5 和>5 mm 粒径),这是由于大团聚体中这 3 种组分相对不稳定,易分解转化,而微团聚体中这 3 种组分相对稳定[22].以总有机碳为例,由于微团聚体中大多数是高度腐殖质化的惰性组分,使得其不易分解矿化从而大量积累,因此,其含量高于大团聚体中该组分含量.另外,不同植被带下这 3 种形态有机碳含量均在 0.25~2 mm 粒径下较高.马瑞萍等[19]对该地区不同植被群落土壤团聚体有机碳及其组分的研究,以及安韶山等[23]对该地区总有机碳的研究均得出了相同的结论,还有一些研究[24-25]也辅证了这一结果.其原因可能是该粒级下土壤有机碳分解转化率较低,活性有机碳不易被植物吸收利用,腐殖化程度高,惰性组分大量累积.

3.2　不同植被带土壤团聚体酶活性的分布

不同植被带下土壤表层的水分状况和温度差异较大,导致不同植被带土壤酶活性差异较大,不同植被带枯落物的总量不同,导致土壤微生物的种类和数量也不同,进而影响到土壤酶的活性[16].纤维素酶、β-D 葡糖苷酶、蔗糖酶以及脲酶活性在不同植被带之间表现出与土壤团聚体有机碳相同的趋势,即森林带>草原带>森林草原带,而过氧化物酶则表现出森林带>森林草原带>草原带,但森林草原带和草原带相差不大.所有酶活性均表现为森林带较高,其原因可能是森林带土层枯落物相对较高,分解腐殖物的微生物数量和种类也因此较多,加之该区的水

热条件较其他植被带好,最终使得分解有机质的酶活性较高.3 种植被带土壤脲酶和过氧化物酶活性明显低于其他酶类,这可能是因为它们参与了土壤中大量的生物化学反应,脲酶是以稳定的蛋白质形态存在于土壤中的,它是土壤中有机物转化的执行者,脲酶在 0~10 cm 土层明显高于 10~20 cm 土层(图 1).安韶山等[26]研究发现,对黄土丘陵区土壤脲酶活性随土层加深而降低.纤维素酶、蔗糖酶和 β-D葡糖苷酶都是水解酶类,它们可以将土壤中有机碳降解为相对小分子的易氧化有机碳,结合对土壤团聚体有机碳的研究可以发现,这是土壤团聚体易氧化有机碳显著高于腐殖质碳的原因.

不同粒级下土壤中不同酶的活性也有一定差异[27].土壤中纤维素酶、β-D 葡糖苷酶、蔗糖酶、脲酶以及过氧化物酶活性在不同粒级间大体表现为<0.25 mm粒径下最大,>5 mm 粒径最小,0.25~2 和 2~5 mm粒径次之,即酶活性随着土壤团聚体的粒径减小而增大.以往对蔗糖酶活性的研究也显示,小粒径下有较高的蔗糖酶活性[28].土壤中蔗糖酶的产生主要来源于土壤中细菌的分泌[27],而在土壤细小的粘粒中又有丰富多样的细菌[29],因此这可能是<0.25 mm粒径下蔗糖酶活性较高的原因.

3.3 土壤团聚体稳定性与酶活性-有机碳形态的关系

土壤团聚体稳定性与土壤有机碳含量的高低有密切关系,森林带土壤由于具有较厚的枯枝落叶层,土壤有机质含量明显高于其他植被带,土壤有机质的提高能够明显地提高土壤团聚体的稳定性并促进团聚体结构的形成[30],森林草原带土壤和草原带土壤有机质含量较少,因此其团聚体稳定性相对较低.影响土壤团聚体稳定性的因素很多,团聚体的形成过程也较复杂,它不仅受自然条件的影响,还会受到一些人为活动的干扰.土地利用方式、土壤微生物、土壤有机质、植被类型以及人为耕作干扰等[31],都会对土壤团聚体稳定性产生影响,从土壤有机碳含量和土壤上生长的植被类型单方面推断土壤团聚体的稳定性是不准确的.

本研究中,土壤团聚体总有机碳、易氧化有机碳和腐殖质碳含量与土壤团聚体过氧化物酶活性之间均呈显著的正相关,表明过氧化物酶对土壤中各种形态有机碳之间的相互转化起着重要作用;β-D 葡糖苷酶活性与土壤团聚体有机碳含量呈不显著的正相关,与易氧化有机碳和腐殖质碳呈不显著的负相关,这与马瑞萍等[32]的对黄土高原不同植被群落下土壤有机碳和酶活性的研究结果不同,可能是因为不同植被带由于水热条件差异以及各植被带人为干扰程度不同导致 β-D 葡糖苷酶活性相对较低,对各种形态碳的影响也随之较小.蔗糖酶和纤维素酶与土壤中有机碳均呈显著正相关,它们在一定程度上影响着土壤中有机碳含量,特别是易氧化有机碳含量,这是由于蔗糖酶和纤维素酶都属于水解酶类,它们可以将土壤中的蔗糖等多糖转化为单糖,而单糖又是易氧化有机碳的主要组成成分.除了各种土壤团聚体有机碳与各种酶活性存在相关关系外,各种形态有机碳之间以及各种酶活性之间也存在一定的相关关系.土壤团聚体有机碳含量与土壤易氧化碳和腐殖质碳含量均呈显著正相关,这表明土壤有机碳的高低影响着土壤活性有机碳和腐殖质碳的含量,土壤中有机碳经过微生物和各种酶的作用一部分转化为活性有机碳被植物吸收利用,另一部分经腐殖化作用保存在土壤中.纤维素酶活性与脲酶、过氧化物酶和 β-D 葡糖苷酶活性呈显著正相关,脲酶活性和 β-D 葡糖苷酶活性呈显著正相关.

4 结 论

土壤团聚体有机碳及其组分含量在 3 种植被带间表现为森林带>草原带>森林草原带,3 种形态有机碳含量在 0.25~2 mm 粒径下最高;不同植被带土壤团聚体有机碳及其组分含量和酶活性在不同土层间表现为 0~10 cm 土层>10~20 cm 土层;3 种植被带间不同酶活性略有差异,其中,纤维素酶、β-D 葡糖苷酶、蔗糖酶和脲酶活性表现为森林带>草原带>森林草原带,过氧化物酶活性表现为森林带>森林草原带>草原带,但是森林带和森林草原带土壤过氧化物酶活性只存在微小差异.3 种植被带土壤中各种酶活性随着粒径的减小呈现出递增趋势,较高的 β-D 葡糖苷酶、蔗糖酶和纤维素酶等水解酶活性有利于土壤中有机质的分解转化,进而增加土壤肥力;但不同植被带土壤 β-D 葡糖苷酶、蔗糖酶和脲酶活性在 0.25~2 mm 粒级团聚体下最高,这更有利于土壤有机碳的累积.土壤中纤维素酶、过氧化物酶、蔗糖酶以及脲酶活性的升高,有利于土壤团聚体各种形态碳在土壤中的累积;土壤中 β-D 葡糖苷酶活性过高不利于易氧化有机碳和腐殖质碳的累积.

参考文献

[1] Cao H (曹 慧), Sun H (孙 辉), Yang H (杨浩), *et al*. A review: Soil enzyme activity and its indi-

cation for soil quality. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* (应用与环境生物学报), 2003, **9**(1): 105-109 (in Chinese)
[2] Lu X (陆　欣). Soil Fertilizer Science. Beijing: China Agricultural University Press, 2002 (in Chinese)
[3] Stewart BA, Carter MR. Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 1996
[4] Peng X-H (彭新华), Zhang B (张　斌), Zhao Q-G (赵其国). A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2004, **41**(4): 618-623 (in Chinese)
[5] Su J (苏　静), Zhao S-W (赵世伟), Ma J-D (马继东), *et al*. Influence of man-made vegetation on carbon pool in southern Ningxia Region in Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2005, **12**(3): 50-52 (in Chinese)
[6] Jiang Y (姜　勇), Liang W-J (梁文举), Wen D-Z (闻大中). Effects of no-tillage on soil biological properties in farmlands: A review. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2004, **35**(3): 347-351 (in Chinese)
[7] Melero S, López-Garrido R, Murillo JM, *et al*. Conservation tillage: Short- and long-term effects on soil carbon fractions and enzymatic activities under Mediterranean conditions. *Soil and Tillage Research*, 2009, **104**: 292-298
[8] Debosz K, Rasmussen PH, Pedersen AR. Temporal variations in microbial biomass C and cellulolytic enzyme activity in arable soils: Effects of organic matter input. *Applied Soil Ecology*, 1999, **13**: 209-218
[9] Albiach R, Canet R, Pomares F, *et al*. Microbial biomass content and enzymatic activities after the application of organic amendments to a horticultural soil. *Bioresource Technology*, 2000, **75**: 43-48
[10] Moreno JL, Garc AC, Landi L, *et al*. The ecological dose value (ED 50) for assessing Cd toxicity on ATP content and dehydrogenase and urease activities of soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, **33**: 483-489
[11] Cao J-X (曹剑侠), Wen Z-M (温仲明), Li R (李　锐). Comparison of predictive models for representative species distribution Yanhe River basin. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2010, **30**(3): 134-139 (in Chinese)
[12] Liu X-Y (刘孝义). Research Methods of Soil Physics and Soil Improvement. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1982 (in Chinese)
[13] Bao S-D (鲍士旦). Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2007 (in Chinese)
[14] Gao Z-X (高忠霞), Zhou J-B (周建斌), Wang X (王　祥), *et al*. Effects of different fertilizer treatments on content and characteristics of dissolved organic in soil. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2010, **47**(1): 115-121 (in Chinese)
[15] Guan S-Y (关松荫). Soil Enzymes and Its Research Methods. Beijing: Agriculture Press, 1986 (in Chinese)
[16] Wen Q-X (文启孝). Research Methods of Soil Organic Matter. Beijing: China Agriculture Press, 1984 (in Chinese)
[17] Conteh A, Lefroy RDB, Blair GJ. Dynamics of organic matter in soils as determined by variations in $^{13}C/^{12}C$ isotopic ratios and fraction by ease of oxidation. *Australian Journal of Soil Research*, 1997, **36**: 1049-1055
[18] Wu Y-C (吴亚丛), Li Z-C (李正才), Cheng C-F (程彩芬), *et al*. Effects of understory removal on soil labile organic carbon pool in a *Cinnamomum camphora* plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(12): 3341-3346 (in Chinese)
[19] Ma R-P (马瑞萍), Liu L (刘　雷), An S-S (安韶山), *et al*. Soil organic carbon and its fractions in aggregates under different plant communities in the hill-gully region of the Loess Plateau. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2013, **21**(3): 324-332 (in Chinese)
[20] Zhang H (张　宏), Huang Y-M (黄懿梅), An S-S (安韶山), *et al*. Soil active organic carbon with different plant communities on the Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2013, **20**(3): 65-70 (in Chinese)
[21] Zhao Y (赵　勇), Wu M-Z (吴明作), Fan W (樊巍), *et al*. The variation of carbon storage during the community succession processing in hilly region of Taihang Mountain. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2009, **23**(4): 208-212 (in Chinese)
[22] Song X-Y (宋小艳), Zhang D-J (张丹桔), Zhang J (张　健), *et al*. Effects of gaps on distribution of soil aggregates and organic carbon in *Pinus massoniana* plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(11): 3083-3090 (in Chinese)
[23] An S-S (安韶山), Zhang X (张　玄), Zhang Y (张扬), *et al*. Distribution of organic carbon in different soil aggregates size during revegetation in hilly-gully region of Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2007, **21**(6): 109-113 (in Chinese)
[24] Camberdella CA, Elliott ET. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. *Geoderma*, 1993, **56**: 449-457
[25] Wright AL, Hons FM. Carbon and nitrogen sequestration and soil aggregation under sorghum cropping sequences. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, **2**: 95-100
[26] An S-S (安韶山), Huang Y-M (黄懿梅), Zheng F-L (郑粉莉), *et al*. Urease activity in the loess hilly grassland soil and its relationship to soil property. *Acta Agrestia Sinica* (草地学报), 2005, **13**(3): 233-237 (in Chinese)
[27] Niu W-J (牛文静), Li L-Q (李恋卿), Pan G-X (潘根兴), *et al*. Responses of enzyme activities in different particle-size aggregates of paddy soil in Taihu Lake region of China to long-term fertilization. *Chinese Journal*

of Applied Ecology (应用生态学报), 2009, **20**(9): 2181-2186 (in Chinese)
[28] Stemmer M, Gerzabek MH, Kandeler E. Invertase and xylanase activity of bulk soil and particle-size fractions during maize straw decomposition. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, **31**: 9-18
[29] Jastrow JD, Amonette JE, Bailey VL. Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration. *Climatic Change*, 2007, **80**: 5-23
[30] Peng X-H (彭新华), Zhang B (张 斌), Zhao Q-G (赵其国), *et al*. Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetative restoration on severely eroded red soil. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23**(10): 2176-2183 (in Chinese)
[31] Wang Q-K (王清奎), Wang S-L (汪思龙). Forming and stable mechanism of soil aggregate and influencing factors. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2005, **36**(3): 415-421 (in Chinese)
[32] Ma R-P (马瑞萍), An S-S (安韶山), Dang T-H (党廷辉), *et al*. Soil organic carbon and enzymatic activity in aggregates of soil under different plant communities in hilly-gully regions of Loess Plateau. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2014, **51**(1): 104-113 (in Chinese)

作者简介 李 鑫,男,1989 年生,硕士研究生. 主要从事植被恢复与土壤相互作用机制研究. E-mail: leexin0828@126.com

责任编辑 孙 菊

封 面 说 明

封面图片由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胡中民副研究员 2013 年 7 月摄于中国科学院植物研究所多伦恢复生态学试验示范研究站十三里滩实验基地(42°02′ N,116°17′ E).该区气候属于中温带半干旱大陆性季风气候,年均温为 2.1 ℃,年均降水量为 382.2 mm,降雨集中分布在 5—10 月,约占全年降水量的 90%.该区地带性植被类型为温带典型草原,主要优势种为克氏针茅(*Stipa krylovii*)、冰草(*Agropyron cristatum*)和冷蒿(*Artemisia frigida*)等.在全球气候变化的背景下,氮沉降、降水格局变化等对温带典型草原的群落结构和功能、N 循环及生产力等产生重要影响.通过控制试验模拟研究自然因素与人类活动对温带典型草原植物群落结构、生产力、生物地化循环等的影响,有助于揭示其作用机理,可为温带典型草原的可持续利用提供依据,也为全球变化生态学提供新的科学认知.