

黄土高原不同植物群落土壤团聚体中 有机碳和酶活性研究*

马瑞萍^{1,2,3} 安韶山^{1,3†} 党廷辉^{1,3} 戴相林^{3,4}

(1 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, 陕西杨陵 712100)

(2 西藏自治区农牧科学院农业资源与环境研究所, 拉萨 850032)

(3 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨陵 712100)

(4 西藏自治区农牧科学院农业研究所, 拉萨 850032)

摘要 以黄土高原延河流域森林区 3 种典型植物群落为研究对象, 研究了 3 种植物群落土壤团聚体中有机碳的含量、组分及土壤酶活性, 分析了有机碳与酶活性的关系。结果表明: (1) 3 种植物群落, 土壤团聚体各种形态有机碳和酶活性均表现为 0~10 cm 土层含量高于 10~20 cm 土层, 辽东栎群落 0~10 cm 土层土壤多酚氧化酶活性却低于 10~20 cm 土层。(2) 土壤团聚体有机碳含量在植物群落间表现为: 辽东栎群落 > 人工刺槐群落 > 狼牙刺群落, 酶活性在植被群落间的高低表现则不一致。土壤有机碳含量和酶活性在团聚体间均表现为随团聚体粒级的增大而增大, 或先增大再减小的趋势。(3) 蔗糖酶、纤维素酶以及 β -D 葡糖苷酶活性与各种形态有机碳均呈显著的正相关关系, 多酚氧化酶和过氧化物酶与有机碳含量相关性不显著。(4) 辽东栎群落和狼牙刺群落土壤团聚体蔗糖酶、纤维素酶、以及 β -D 葡糖苷酶活性在团聚体中表现为: $| < 0.25 \text{ mm}$ 团聚体 $| > | 2 \sim 0.25 \text{ mm}$ 团聚体 $| > | 15 \sim 2 \text{ mm}$ 团聚体 $| > | > 5 \text{ mm}$ 团聚体 $|$, 其多酚氧化酶和过氧化物酶以及人工刺槐群落各种土壤酶活性均表现为 2~0.25 mm 粒级团聚体中最大。(5) β -D 葡糖苷酶活性增大, 能促进土壤各种有机碳含量增加; 土壤蔗糖酶活性和 β -D 葡糖苷酶活性的提高有助于土壤活性有机碳含量增加; 土壤多酚氧化酶活性的增大, 有利于土壤腐殖质碳的积累。

关键词 黄土高原; 土壤团聚体; 有机碳; 酶活性

中图分类号 S152.4; 153.62 **文献标识码** A

土壤有机碳是土壤的重要组成部分, 是土壤团聚体形成的主要胶结剂, 其含量和质量在一定程度上影响土壤团聚体的形成和稳定^[1], 在土壤肥力和土壤结构的形成中具有重要作用。土壤酶是由微生物、动植物活体分泌及动植物残骸分解释放于土壤中的一类具有催化能力的生物活性物质^[2], 是生态系统物质循环和能量流动中最为活跃的生物活性物质^[3], 土壤中的一切生物化学过程都是在土壤酶系统的作用下进行的。土壤有机碳形态的转化大部分也依赖于土壤酶的作用。不同的土壤酶对于土壤有机碳形态的转化具有不同的作用, 土壤蔗糖酶、纤维素酶、 β -D 葡糖苷酶以及多酚氧化酶和过氧化物酶都是参与土壤有机碳转化与循环的重要

酶类。蔗糖酶、纤维素酶以及 β -D 葡糖苷酶可以酶解土壤中的大分子的糖类使其变成小分子的相对活性的有机碳。多酚氧化酶和过氧化物酶则能够酶促或氧化芳香类物质的转化而对土壤腐殖质碳的形成起重要作用^[4]。酶活性的高低则可以作为预测有机碳形态转变趋势的预警指标^[5]。

目前土壤有机碳含量对于土壤酶活性的影响研究较多^[6-9]; 不同的耕作方式^[4, 10]、施肥模式^[11]和施肥量^[12]以及氮素对于土壤有机碳含量和酶活性的作用方面的研究^[13-14]也较多。但是对于土壤团聚体中与碳转化相关的酶活性的研究则相对较少, 对不同植物群落土壤团聚体有机碳组分及酶活性进行研究, 旨在发现有机碳组分和与碳组分转化相

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

† 通讯作者, E-mail: shan@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 马瑞萍 (1986—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为植被恢复与土壤固碳机制。E-mail: marp0825@126.com

收稿日期: 2013-02-05; 收到修改稿日期: 2013-06-06

关的酶活性在土壤团聚体中的分布状况,预测土壤团聚体中有机碳组分的变化趋势,结合土壤有机碳在土壤团聚体中的相对含量状况,进而推测当地土壤结构的变化。

1 材料与方方法

1.1 研究区概况

研究区域选在延河流域(36°23′~37°17′N、108°45′~110°28′E),流域全长286.9 km,总面积7 687 km²,平均坡度4.3‰,河网密度约4.7 km km⁻²。本流域属大陆性气候,年降雨量500 mm左右,年均气温9℃,立地环境多变,从东南向西北,降雨、温度具有明显的梯度变化特征,植被分布也呈现渐次变化^[15]。本研究样品采集的森林地带,地处安塞县楼坪乡,位于延河流域一级支流西川流域(36°31′13″N~36°35′26″N,109°7′34″E~109°10′34″

E),海拔1 166~1 490 m,流域总面积20.61 km²。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。根据当地实际植被状况,在森林地带选择3种优势植被群落作为研究对象,包括辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、狼牙刺(*Sophora viciifolia*)、人工刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等3种植被群落。辽东栎群落下乔木有自然恢复生长60年的辽东栎、茶条槭,灌木以丁香、六道木、绣线菊为主,草本以苔草、多花、达乌里胡枝子为主,该群落植物种类多样,生长旺盛,位于丘陵阴坡坡底。狼牙刺群落下灌木以自然恢复生长10年的狼牙刺、灌木铁线莲为主,草本植物以白羊草、铁杆蒿、苔草、长芒草等为主,该群落物种较少,生长状况良好,位于丘陵阳坡坡底。人工刺槐群落生长乔木有人工栽植20年的人工刺槐,灌木有杠柳,草本植物有铁杆蒿和长芒草,该群落人工刺槐密度较大,其他伴生物种数量较少,人工刺槐生长良好,位于阳坡坡中部。详细信息见表1。

表1 研究样地概况

Table 1 General situation of sampling plots

植被群落 Vegetation community	经纬度 Longitude and latitude	海拔 Elevation(m)	坡向 Aspect	坡度 Slope(°)	恢复类型 Restoration type
Qu. l	109°10′E, 36°33′N	1 259	北偏东26° North by east 26°	28	自然恢复 Natural restoration
So. v	109°09′E, 36°34′N	1 346	南偏西20° South by west 20°	27	自然恢复 Natural restoration
Ro. p	109°09′E, 36°34′N	1 372	南偏西15° South by west 15°	8	人工恢复 Artificial Afforestation

植被群落 Vegetation community	高度 Height (cm)			枯落物 Litter (g m ⁻²)	
	乔木层 Tree layer	灌木层 Shrub layer	草本层 Herbal layer	鲜重 Fresh weight	干重 Dry weight
Qu. l	1 500	200	30	1 208	601
So. v	—	110	35	80	71
Ro. p	300	100	70	207	181

注: Qu. l表示辽东栎群落, So. v表示狼牙刺群落, Ro. p表示人工刺槐群落。表中“—”表示该植被群落无相应特征值。下同 Note: Qu. l is *Quercus liaotungensis*, So. v is *Sophora viciifolia*, Ro. p is *Robinia pseudoacacia*. In the table, “—” indicates no corresponding-eigen value for the vegetation community. The same below

1.2 样品采集与分析

野外采样于2011年7月进行,分别采集0~10 cm和10~20 cm土层的原状土壤样品,在每个植被类型下,乔木林设置20 m×20 m、灌木林设置10 m×10 m、草地设置5 m×5 m的样区各3个,3个采样区相距大约为100 m。调查采样区植被群落特征(表2),采集土壤样品,每个样区里重复采样两次。待样品风干后,用沙维诺夫干筛法^[16]将其依次过5 mm、2 mm和0.25 mm筛,收集>5 mm、5~

2 mm、2~0.25 mm、<0.25 mm各个粒级的团聚体土样,按照比例取50 g团聚体土样,根据约得法^[16]进行湿筛;其余土样研磨分别过1 mm和0.15 mm的筛用于有机碳组分和土壤酶活性分析。

总有机碳测定用重铬酸钾容量法-外加热法^[17];活性有机碳用浓度为333 mmol L⁻¹ KMnO₄氧化,在565 nm下分光光度计比色测定^[18-19];腐殖质碳总量用焦磷酸钠提取-重铬酸钾法^[20]。蔗糖酶活性用甲苯处理土壤后加入蔗糖基质在pH 5.5、

37 ℃下培养 24 h 后加入 3,5-二硝基水杨酸显色剂,沸水浴 5 min 显色后于波长 508 nm 处比色测定,酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中含葡萄糖的 mg 数表示;纤维素酶活性用甲苯处理土壤后加入羧甲基纤维素溶液在 pH 5.5、37℃下培养 72 h 后加入 3,5-二硝基水杨酸显色剂,沸水浴 5 min 显色后于波长 540 nm 处比色测定,酶活性以 72 h 后 10 g 土壤生成的葡萄糖 mg 数表示;多酚氧化酶和过氧化物酶的活性均用比色法^[4]测定,两种酶活性均以 2 h 后 1 g 土壤中的紫色没食子素的 mg 数表示; β -D 葡糖苷酶活性用硝基酚比色法测定^[4],酶活性以 1 h 后每 kg 土壤中生成的 P-硝基酚的 mg 数表示。

1.3 数据处理与分析

测定数据用 EXCEL 和 SPSS 18.0 软件进行统计分析。

2 结果

2.1 不同植被群落土壤团聚体有机碳组分

由表 2 可知,3 种植被群落相同粒级土壤团聚体总有机碳、活性有机碳以及腐殖质碳的平均含量

均为辽东栎群落 > 人工刺槐群落 > 狼牙刺群落,相同粒级土壤团聚体总有机碳和活性有机碳在 3 种植被群落间差异显著,辽东栎群落与狼牙刺和人工刺槐群落相同粒级土壤团聚体腐殖质碳含量差异显著,狼牙刺群落和人工刺槐群落相同粒级土壤团聚体腐殖质碳含量差异不显著。3 种形态有机碳在土壤团聚体间一般均表现为 2 ~ 0.25 mm 和 < 0.25 mm 团聚体中的碳含量大于 5 ~ 2 mm 和 > 5 mm 团聚体中的碳含量。3 种植被群落土壤团聚体中有机碳含量在团聚体之间差异多不显著。3 种植物群落下土壤有机碳腐殖化率表现为狼牙刺群落 > 辽东栎群落 > 人工刺槐群落,由图 1 ~ 图 4 可以看出,狼牙刺群落土壤蔗糖酶和纤维素酶活性相对较低而多酚氧化酶和过氧化物酶活性却相对高于其他两种植物群落,所以,狼牙刺群落土壤总有机碳含量小但腐殖化率较高,有利于土壤结构的稳定。辽东栎群落 0 ~ 10 cm 土层土壤腐殖化率高于 10 ~ 20 cm 土层,其他两种植物群落 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土层土壤腐殖化差异不大。2 ~ 0.25 mm 和 < 0.25 mm 团聚体土壤腐殖化率较其他两个粒级的高,说明土壤微团聚体中有机碳主要以腐殖质碳的形态存在。

表 2 不同植被群落土壤团聚体有机碳组分分布

Table 2 Composition of soil organic carbon in soil aggregates in soils under different vegetation communities

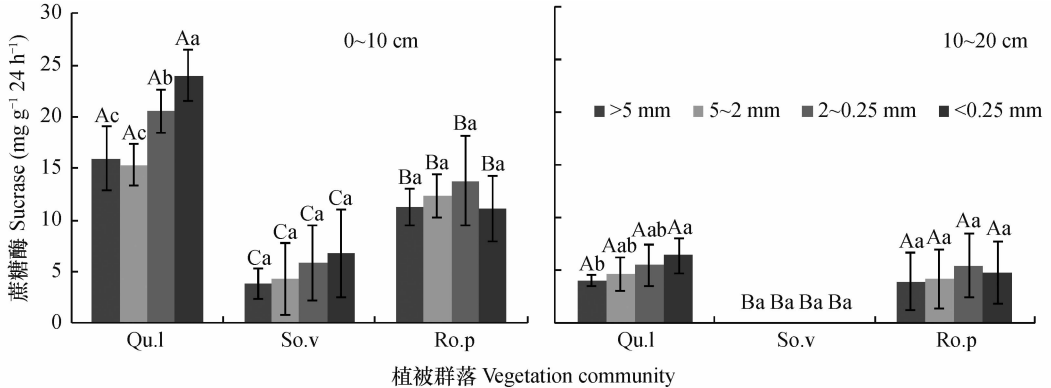
植被群落 Vegetation community	团聚体 Soil aggregate	总有机碳 Total organic carbon (g kg ⁻¹)		活性有机碳 Active organic carbon (g kg ⁻¹)		腐殖质碳 Humus carbon (g kg ⁻¹)		腐殖化率 Humification rates (%)	
		0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm
		Qu. l	> 5 mm	27.19a	9.88a	9.43a	2.31a	6.75a	1.23b
	5 ~ 2 mm	25.55a	10.03a	9.43a	2.53a	5.78a	1.76ab	22.62	17.55
	2 ~ 0.25 mm	29.63a	12.27a	13.95a	2.71a	7.66a	2.41a	25.85	19.64
	< 0.25 mm	29.96a	14.45a	11.93a	2.81a	7.90a	2.12a	26.37	14.67
	全土 Entire solum	28.49	13.08	13.28	2.59	7.31	2.03	25.66	15.52
So. v	> 5 mm	3.78a	2.51a	1.05b	0.75a	1.18a	0.57a	31.22	22.71
	5 ~ 2 mm	3.98a	2.41a	0.98b	0.60a	0.77a	0.64a	19.35	26.56
	2 ~ 0.25 mm	4.40a	2.73a	1.28b	0.70a	0.94a	0.51a	21.36	18.68
	< 0.25 mm	4.13a	3.01a	1.60a	0.37a	1.22a	0.31b	29.54	10.30
	全土 Entire solum	4.17	2.87	1.21	0.68	1.09	0.46	26.14	16.03
Ro. p	> 5 mm	8.77a	5.46a	3.27a	1.39a	1.33a	0.85a	15.17	15.57
	5 ~ 2 mm	9.38a	5.66a	2.14b	1.48a	1.41a	0.78a	15.03	13.78
	2 ~ 0.25 mm	10.84a	6.39a	4.24a	1.62a	1.78a	1.05a	16.42	16.43
	< 0.25 mm	9.15a	5.99a	3.52a	1.31a	1.60a	0.79a	17.49	13.19
	全土 Entire solum	9.65	5.99	3.68	1.38	1.52	0.87	15.75	14.52

注:表中不同字母表示差异达到 Q 检验 5% 显著水平,误差线为标准差 (n = 6) Note: Different letters mean significant difference according to the Student-Newman-Keuls test, $p < 0.05$, the error bars stand for standard deviations (n = 6)

2.2 不同植被群落土壤团聚体酶活性分布

2.2.1 不同植被群落土壤团聚体蔗糖酶活性

土壤团聚体蔗糖酶活性平均值在植被群落间表现为辽东栎群落 > 人工刺槐群落 > 狼牙刺群落 (图 1)。3 种植被群落的 0~10 cm 土层相同粒级土壤团聚体蔗糖酶活性之间具有显著性差异,辽东栎群落和人工刺槐群落 10~20 cm 土层相同粒级土壤团聚体蔗糖酶活性之间差异不显著,但是它们与狼牙刺群落的土壤团聚体蔗糖酶活性之间差异显著。



注: 图中不同大写字母表示不同植被群落同一粒级团聚体间在0.05水平差异显著,不同小写字母表示同一植被群落不同粒级团聚体间在0.05水平差异显著,误差线为标准差($n=6$)。下同 Note: In the figure, different capital letters mean significant difference in organic carbon content between soils under different vegetation communities in the same particle size fraction of aggregates at 0.05 level. Different lowercase letters mean significant difference in organic carbon content between fractions of aggregates in the same soil under the same vegetation community at 0.05 level (according to Student-Newman-Keuls test). Error bars stand for standard deviations ($n=6$). The same below

图 1 不同植被群落土壤团聚体蔗糖酶活性

Fig. 1 Sucrase activity in soil aggregates as affected by vegetation community

2.2.2 不同植被群落土壤团聚体纤维素酶活性

土壤团聚体纤维素酶活性平均值在植被群落间表现为辽东栎群落 > 人工刺槐群落 > 狼牙刺群落 (图 2)。辽东栎群落和狼牙刺群落纤维素酶活性在团聚体间表现为 <0.25 mm 团聚体最大, 2~0.25 mm 团聚体次之, 5~2 mm 和 >5 mm 团聚体较

辽东栎群落和狼牙刺群落蔗糖酶活性在团聚体间表现为 <0.25 mm 团聚体最大, 2~0.25 mm 团聚体次之, 5~2 mm 和 >5 mm 团聚体较小, 人工刺槐群落蔗糖酶活性则表现为 2~0.25 mm 团聚体最大, <0.25 mm 和 2~0.25 mm 团聚体次之, >5 mm 团聚体最小。辽东栎群落 <0.25 mm 团聚体土壤蔗糖酶活性和其他粒级团聚体蔗糖酶活性差异显著, 其他两种植被群落各个粒级土壤团聚体蔗糖酶活性无显著性差异。

小, 人工刺槐群落纤维素酶活性则表现为 2~0.25 mm 团聚体最大, <0.25 mm 和 2~0.25 mm 团聚体次之, >5 mm 团聚体最小。辽东栎群落 10~20 cm 土层土壤团聚体纤维素酶活性在各个粒级之间差异显著, 其他两种植被群落各个粒级土壤团聚体纤维素酶活性无显著性差异。

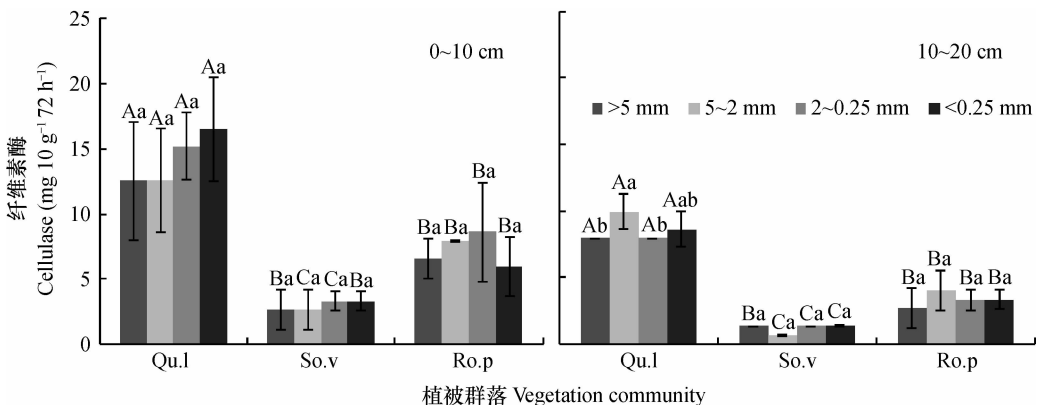


图 2 不同植被群落土壤团聚体纤维素酶活性

Fig. 2 Cellulase activity in soil aggregates as affected by vegetation community

2.2.3 不同植被群落土壤团聚体多酚氧化酶活性

图3可见,3种植被群落土壤团聚体多酚氧化酶活性的分布状况与蔗糖酶和纤维素酶活性的分布表现出较大的差异:辽东栎群落10~20 cm 土层土壤多酚氧化酶活性平均是0~10 cm 土层的1.85倍;人工刺槐群落则未能检测到多酚氧化酶的活性。辽东栎群落和狼牙刺群落0~10 cm 土层土壤团聚体多酚氧化酶活性无显著性差异,而10~

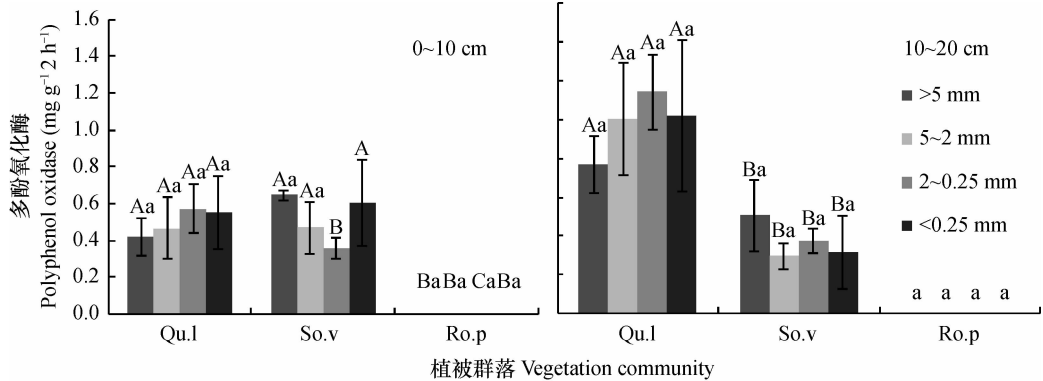


图3 不同植被群落土壤团聚体多酚氧化酶活性

Fig. 3 Polyphenol oxidase activity in soil aggregates as affected by vegetation community

2.2.4 不同植被群落土壤团聚体过氧化物酶活性

如图4所示,土壤团聚体过氧化物酶活性平均值在植被群落间表现为辽东栎群落>狼牙刺群落>人工刺槐群落,辽东栎群落和狼牙刺群落与人工刺槐群落相同粒级土壤团聚体过氧化物酶活性之

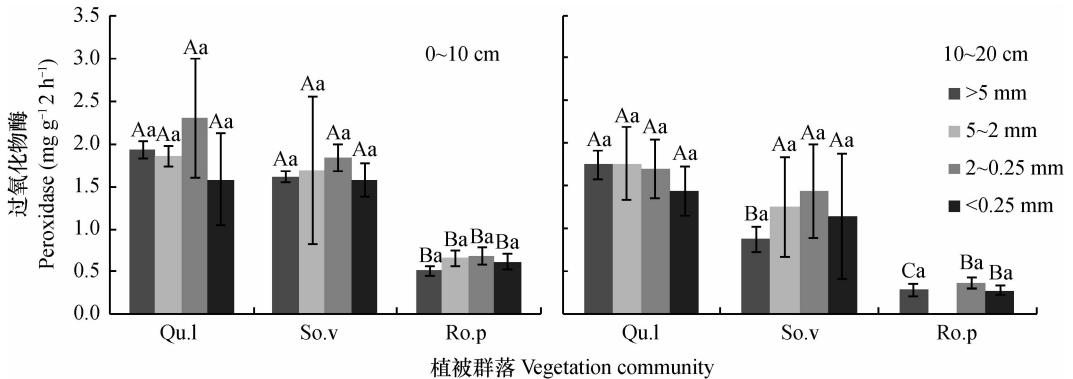


图4 不同植被群落土壤团聚体过氧化物酶活性

Fig. 4 Peroxidase activity in soil aggregates as affected by vegetation community

2.2.5 不同植被群落土壤团聚体β-D 葡萄糖苷酶活性

由图5可知,土壤团聚体β-D 葡萄糖苷酶活性平均值在植被群落间则表现为辽东栎群落>人工刺槐群落>狼牙刺群落。辽东栎群落和人工刺槐群落与狼牙刺群落相同粒级土壤团聚体β-D 葡萄糖苷酶活性之间具有显著性差异,辽东栎群落与人工刺槐群落β-D 葡萄糖苷酶活性之间差异不显著。β-D

20 cm土层两种植被群落土壤团聚体多酚氧化酶活性差异显著。辽东栎群落多酚氧化酶活性在团聚体间表现为2~0.25 mm 团聚体最大,<0.25 mm 团聚体次之,>5~2 mm 团聚体和>5 mm 团聚体较小;狼牙刺群落则是>5 mm 团聚体较大,随团聚体粒级的减小酶活性降低;多酚氧化酶活性在各粒级团聚体间差异不显著。

间具有显著性差异,辽东栎群落与狼牙刺群落过氧化物酶活性之间差异不显著。过氧化物酶活性在团聚体间则表现为:2~0.25 mm 团聚体最大,5~2 mm 团聚体次之,>5 mm 和<0.25 mm 团聚体最小,过氧化物酶在各个粒级团聚体间差异不显著。

葡萄糖苷酶活性在团聚体间表现为<0.25 mm 团聚体最大,2~0.25 mm 团聚体次之,5~2 mm 和>5 mm 团聚体较小,辽东栎群落和人工刺槐群落0~10 cm 土层土壤团聚体β-D 葡萄糖苷酶活性在各个粒级之间差异显著,其他植被群落各个粒级土壤团聚体β-D 葡萄糖苷酶活性无显著性差异。

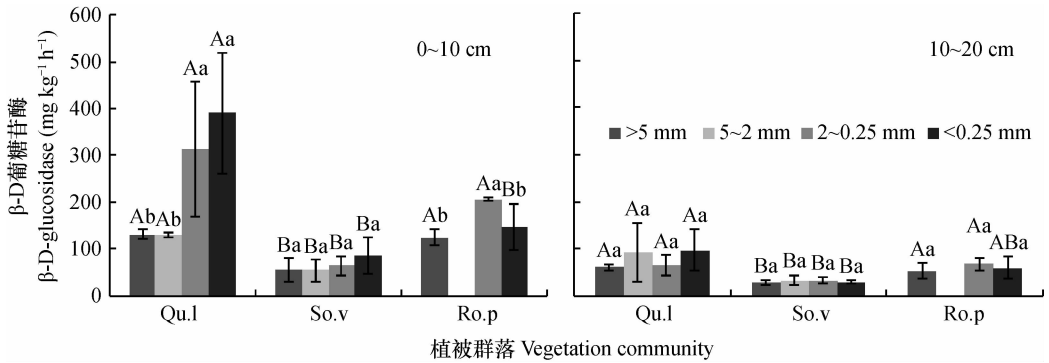


图 5 不同植被群落土壤团聚体 β -D 葡糖苷酶活性

Fig. 5 β -D-glucosidase activity in soil aggregates as affected by vegetation community

2.3 土壤有机碳和酶活性关系分析

对 3 种植被群落下的团聚体有机碳和酶活性进行相关性分析(表 3)表明,土壤团聚体多酚氧化酶活性与过氧化物酶活性呈显著性正相关,相关系数为 0.701,与蔗糖酶活性和 β -D 葡糖苷酶活性呈负相关关系,与其他酶活性和各种形态有机碳含量存

在正相关关系,相关性不显著。过氧化物酶活性与活性有机碳、腐殖质碳、纤维素酶活性、多酚氧化酶活性有显著的正相关关系,与总有机碳、蔗糖酶活性、 β -D 葡糖苷酶活性相关性不显著。其他酶活性与各种形态有机碳两两之间均呈显著正相关关系。

表 3 土壤团聚体碳形态和酶活性的相关关系

Table 3 Correlativity between soil organic carbon and enzymatic activities in soil aggregates

	总有机碳 Total organic carbon	活性有机碳 Active organic carbon	腐殖质碳 Humus carbon	蔗糖酶 Sucrase	纤维素酶 Cellulase	多酚氧化酶 Ployphenol oxidase	过氧化物酶 Peroxidase	β -D 葡糖苷酶 β -D-glucosidase
总有机碳 Total organic carbon	1	0.796 **	0.960 **	0.727 **	0.835 **	0.057	0.196	0.730 **
活性有机碳 Active organic carbon		1	0.896 **	0.825 **	0.863 **	0.116	0.363 *	0.781 **
腐殖质碳 Humus carbon			1	0.786 **	0.864 **	0.115	0.315 *	0.791 **
蔗糖酶 Sucrase				1	0.876 **	-0.058	0.203	0.875 **
纤维素酶 Cellulase					1	0.26	0.364 *	0.797 **
多酚氧化酶 Ployphenol oxidase						1	0.701 **	-0.042
过氧化物酶 Peroxidase							1	0.143
β -D 葡糖苷酶 β -D-glucosidase								1

表 4 土壤各粒级团聚体酶活性和有机碳组分的回归分析方程

Table 4 Stepwise regression equation for analysis of relationships between enzyme activities and soil organic carbon fractions in soil aggregates different in particle size fraction

碳组分 Carbon fractions	线性方程 Linear regression equation	调整的决定系数 Adjusted R Square	检验值 F	显著水平 P
总有机碳 Total organic carbon	$Y = 0.130X_5 - 17.853$	0.674	73.328	0.000
活性有机碳 Active organic carbon	$Y = 0.190X_1 + 0.028X_3 - 4.690$	0.767	58.720	0.001
腐殖质碳 Humus carbon	$Y = 0.114X_1 + 0.962X_3 + 0.020X_5 - 5.238$	0.746	35.335	0.001

以不同植被群落土壤中土壤蔗糖酶活性、纤维素酶活性、多酚氧化酶活性、过氧化物酶活性、 β -D 葡糖苷酶活性作为自变量(依次为 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5)，有机碳组分作为因变量(Y)，进行逐步回归分析，结果见表 4。由分析结果可知： β -D 葡糖苷酶活性增大，能促进土壤总有机碳、活性有机碳和腐殖质碳含量的增加；土壤蔗糖酶活性和 β -D 葡糖苷酶活性的提高有助于土壤活性有机碳积累；土壤蔗糖酶、多酚氧化酶和 β -D 葡糖苷酶活性的增大，有利于土壤腐殖质碳的积累。

3 讨论

地上植物的枯枝落叶是土壤有机碳的主要来源之一，地表植物的生长状况和生物量大小影响土壤有机碳含量。由结果分析可知，3 种植物群落土壤团聚体有机碳含量整体上都表现为：辽东栎群落 > 人工刺槐群落 > 狼牙刺群落。由表 1 可知，辽东栎群落植被总体盖度达 80%，树木高度和进入土壤的枯落物量均远大于狼牙刺群落和人工刺槐群落，大量的植物残体进入土壤为土壤微生物的生长繁衍提供了充足的碳源，微生物的繁衍有利于土壤酶活性的增强，从而促进了土壤有机碳的分解转化^[21]，使土壤中的有机碳降解为活性的小分子有机碳直接为植物根系吸收利用，或转化成腐殖质成为土壤团聚体形成的基础。不同植物群落因为其物种不同，进入土壤的植物残体和枯落物的种类不同，在土壤中分解转化时对土壤性质和土壤中微生物种类和活性的影响不同，导致不同植物群落土壤各种酶活性高低有所差异。辽东栎群落较高的土壤有机碳含量有利于该群落土壤结构的稳定和土壤环境的改善。

辽东栎群落 0~10 cm 土层多酚氧化酶活性低于 10~20 cm 土层，Sebastiana 等^[10]对不同耕作方式下的土壤多酚氧化酶活性的研究也得到相似的结论。由表 1 可知，辽东栎群落地上部分生物量多，进入土壤的枯落物较多，0~10 cm 土层土壤中新鲜的植被残体较多，而利于形成腐殖质的底物则较少，所以多酚氧化酶活性较低；也可能是因为土壤表层水分状况和温度变异性大，不利于土壤多酚氧化酶活性的表现，具体原因还待进一步研究。

蔗糖酶、纤维素酶以及 β -D 葡糖苷酶活性在各种植物群落间表现为辽东栎群落 > 人工刺槐群落 > 狼牙刺群落，而多酚氧化酶和过氧化物酶活性则

表现为辽东栎群落 > 狼牙刺群落 > 人工刺槐群落，即：人工刺槐群落土壤团聚体蔗糖酶、纤维素酶以及 β -D 葡糖苷酶活性相对高于多酚氧化酶和过氧化物酶活性，狼牙刺群落多酚氧化酶和过氧化物酶活性相对高于蔗糖酶、纤维素酶以及 β -D 葡糖苷酶活性。蔗糖酶、纤维素酶以及 β -D 葡糖苷酶均为水解酶类，在它们的作用下，土壤有机碳降解为小分子的活性有机碳，所以正如表 2 所示，狼牙刺群落土壤团聚体活性有机碳含量占总有机碳的 27.15%，腐殖质碳含量占总有机碳的 22.80%，二者差异很小，人工刺槐群落活性有机碳占总有机碳的 30.78%，而腐殖质碳则仅占 15.54%，其土壤团聚体活性有机碳含量显著高于腐殖质碳含量。由图 3 可知，人工刺槐群落土壤团聚体多酚氧化酶活性极低，几乎未检测到，所以其腐殖质碳的合成受阻而含量较低。有研究表明在土壤有机碳的转化很大程度上受到氮素的影响^[22-24]，人工刺槐群落恢复生长正处在较旺盛时期，植被生长对土壤中氮素的消耗量大，使得土壤 C/N 增大，不利于土壤微生物的活动，从而减少了土壤多酚氧化酶的来源使其酶活性降低。此外，多酚氧化酶活性较低还可能和采样时间有关，采样期 7 月份多雨，地表浸水缺氧，抑制了多酚氧化酶的活性。

不同酶活性在土壤各个粒级团聚体中存在差异^[25]。由图 1~图 5 可知，辽东栎群落和狼牙刺群落土壤团聚体蔗糖酶、纤维素酶以及 β -D 葡糖苷酶活性在团聚体间表现为： < 0.25 mm 团聚体 $> 12 \sim 0.25$ mm 团聚体 $> 15 \sim 2$ mm 团聚体 $> > 5$ mm 团聚体，酶活性随着团聚体粒径的减小而增大，Stemmer 等^[26]的研究结果也显示小颗粒具有较高的蔗糖酶活性。这可能是由于蔗糖酶被黏粒组中的土壤有机无机复合体吸附，受到无机矿物-腐殖质复合体的物理保护所致^[25]，土壤中的蔗糖酶主要是由细菌分泌产生的^[27]，黏粒中细菌多样性和丰富度最高^[28]，所以 < 0.25 mm 团聚体中蔗糖酶活性较高。辽东栎群落和狼牙刺群落土壤团聚体多酚氧化酶和过氧化物酶则是 $2 \sim 0.25$ mm 的大团聚体中显示出较高的活性，这与汪景宽等^[29]的研究结果一致。多酚氧化酶主要参与土壤有机质的腐殖化过程，有研究表明：真菌是土壤中多酚氧化酶的主要贡献者^[27]，而真菌大量存在于大团聚体中^[30]，从而促进了多酚氧化酶活性的提高。人工刺槐群落各种土壤酶活性均表现为 $2 \sim 0.25$ mm 粒级团聚体中酶活性最大，可能是因为人工刺槐群落恢复生

长正处在较旺盛时期,大量新鲜有机凋落物进入土壤大团聚体促进了微生物的生长繁殖,提高了微生物对酶活性的贡献^[25]。

由表 3 可知,土壤团聚体各种形态有机碳和土壤团聚体蔗糖酶、纤维素酶以及 β -D 葡萄糖苷酶活性相互之间均存在显著的正相关关系。表 4 的分析结果显示: β -D 葡萄糖苷酶活性增大,能促进土壤总有机碳、活性有机碳和腐殖质碳含量的增加,说明 β -D 葡萄糖苷酶在土壤有机碳的各向转化中均具有重要的作用;土壤蔗糖酶和 β -D 葡萄糖苷酶活性的提高有助于土壤活性有机碳积累,因为蔗糖酶和 β -D 葡萄糖苷酶的作用将土壤中的蔗糖和纤维二糖转化为较简单的单糖,其为土壤活性有机碳的主要组成部分;土壤多酚氧化酶活性增大对土壤腐殖质碳含量的增加有显著的促进作用。多酚氧化酶除与过氧化物酶活性之间存在显著的正相关关系之外,与其他酶活性和有机碳形态之间相关性不显著。Fenner 等^[31]的研究表明:在显著缺氧条件下多酚氧化酶活性受到抑制,致使多酚化合物累积,而酚类物质能够抑制其他不需氧的水解酶的作用^[31-33],如 β -D 葡萄糖苷酶、蔗糖酶,进而抑制土壤有机质的降解速率^[34]。本研究中,多酚氧化酶与蔗糖酶活性和 β -D 葡萄糖苷酶活性呈负相关关系,但相关性不显著,与 Fenner 等的研究结果不符,可能由于本研究所涉及的 3 种植被群落皆是自然条件下的通气和水分状况,水气协调状况不同而导致了研究结果不同。

4 结 论

3 种植物群落土壤团聚体各种形态有机碳和酶活性均表现为 0 ~ 10 cm 土层含量高于 10 ~ 20 cm 土层,辽东栎群落 0 ~ 10 cm 土层土壤多酚氧化酶活性却低于 10 ~ 20 cm 土层。土壤团聚体有机碳在植物群落间表现为辽东栎群落 > 人工刺槐群落 > 狼牙刺群落。辽东栎群落有机碳含量普遍很高,各种酶活性也处于较高水平,植被生长状况良好,对其土壤肥力和土壤结构有着积极的影响;狼牙刺群落蔗糖酶、纤维素酶以及 β -D 葡萄糖苷酶活性较低,而多酚氧化酶和过氧化物酶活性相对高,加之其有机碳含量低,有机碳和酶活性在团聚体间的差异不明显,土壤有机碳累积量少,不利于植被生长和土壤结构的稳定;人工刺槐群落蔗糖酶、纤维素酶以及 β -D 葡萄糖苷酶活性较高,而多酚氧化酶和过氧化物酶活性相对较低,导致其活性有机碳远高于腐殖质

碳,增加土壤肥力,利于植被恢复。蔗糖酶、纤维素酶以及 β -D 葡萄糖苷酶活性与各种形态有机碳均呈显著的正相关关系,多酚氧化酶和过氧化物酶与有机碳含量相关性不显著。辽东栎群落和狼牙刺群落土壤团聚体蔗糖酶、纤维素酶以及 β -D 葡萄糖苷酶活性在团聚体间表现为 | < 0.25 mm 团聚体 | > | 2 ~ 0.25 mm 团聚体 | > | 15 ~ 2 mm 团聚体 | > | > 5 mm 团聚体 |,酶活性随着团聚体粒径的减小而增大,微团聚体中水解性酶活性较高,有利于其中有机碳的活化分解提高土壤肥力;其多酚氧化酶和过氧化物酶以及人工刺槐群落各种土壤酶均表现为 2 ~ 0.25 mm 粒级团聚体中酶活性最大,利于有机碳的累积保存。

参 考 文 献

- [1] Christensen B T. Carbon in primary and secondary organ mineral complexes//Cater M R, Stewart A B. Structure and organic matter storage in agricultural soils. Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc. 1996: 97—165
- [2] 陆欣. 土壤肥料学. 北京: 中国农业大学出版社, 2002. Lu X. Soil fertilizer science (In Chinese). Beijing: China Agricultural University Press, 2002
- [3] 周礼恺. 土壤酶学. 北京: 科学出版社, 1989. Zhou L K. Soil enzymology (In Chinese). Beijing: Science Press, 1989
- [4] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986. Guan S Y. Soil enzymes and its research methods (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1986
- [5] 姜勇, 梁文举, 闻大中. 免耕对农田土壤生物学特性的影响. 土壤通报, 2004, 35(3): 347—351. Jiang Y, Liang W J, Wen D Z. Effects of no-tillage on soil biological properties in farmlands: A review (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(3): 347—351
- [6] Deboz K, Rasmussen P H, Pedersen A R. Temporal variations in microbial biomass C and cellulolytic enzyme activity in arable soils: Effects of organic matter input. Applied Soil Ecology, 1999, 13(3): 209—218
- [7] Albiach R, Canet R, Pomanes F, et al. Microbial biomass content and enzymatic activities after the application of organic amendments to a horticultural soil. Bioresource Technology, 2000, 75(1): 43—48
- [8] Taylor J P, Wilson B, Mills M S, et al. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface and subsoils using various techniques. Soil Biology & Biochemistry, 2002, 34(3): 387—401
- [9] Moreno J L, Garcia C, Landi L, et al. The ecological dose value (ED₅₀) for assessing Cd toxicity on ATP content and dehydrogenase and urease activities of soil. Soil Biology & Biochemistry, 2001, 33(4/5): 483—489
- [10] Sebastiana M, Rosa L-G, Jose M M, et al. Conservation tillage: Sort-and long-term effects on soil carbon fractions and enzymatic

- activities under Mediterranean conditions. *Soil & Tillage Research*, 2009(104): 292—298
- [11] 程东娟, 刘树庆, 王殿武, 等. 长期定位培肥对土壤酶活性及土壤养分动态变化的影响. *河北农业大学学报*, 2003, 26(3): 34—36. Cheng D J, Liu S Q, Wang D W, et al. The effect of long-term experiment improving soil fertility on the dynamical changes of soil nutrient and soil enzyme activities (In Chinese). *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2003, 26(3): 34—36
- [12] 张鹏, 贾志宽, 路文涛, 等. 不同有机肥施用量对宁南旱区土壤养分、酶活性及作物生产力的影响. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(5): 1122—1130. Zhang P, Jia Z K, Lu W T, et al. Effects of organic fertilization on soil nutrient, enzyme activity and crop productivity in semi-arid areas of southern Ningxia (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(5): 1122—1130
- [13] 沈芳芳, 袁颖红, 樊后保, 等. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响. *生态学报*, 2012, 32(2): 517—527. Shen F F, Yuan Y H, Fan H B, et al. Effects of elevated nitrogen deposition on soil organic carbon mineralization and soil enzyme activities in a Chinese fir plantation (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(2): 517—527
- [14] Mark P W, Donald R Z, Robert L, et al. Nitrogen deposition modifies soil carbon storage through changes in microbial enzymatic activity. *Ecological Applications*, 2004, 14(4): 1172—1177
- [15] 曹剑侠, 温仲明, 李锐. 延河流域典型物种分布预测模型比较研究. *水土保持通报*, 2010, 30(3): 134—139. Cao J X, Wen Z M, Li R. Comparison of predictive models for representative species distribution in Yanhe River Basin (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(3): 134—139
- [16] 刘孝义. 土壤物理及土壤改良研究法. 上海: 上海科学技术出版社, 1982. Liu X Y. *Research methods of soil physics and soil improvement* (In Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1982
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2007. Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis* (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2007
- [18] 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. *Australian Journal of Agriculture Research*, 1995, 46(7): 1459—1466
- [19] 刘合明, 杨志新, 刘树庆. 不同粒径土壤活性有机碳测定方法的探讨. *生态环境*, 2008, 17(5): 2046—2049. Liu H M, Yang Z X, Liu S Q. Methods for determining labile orange matter in different sized soil particles of different soils (In Chinese). *Ecology and Environment*, 2008, 17(5): 2046—2049
- [20] 高忠霞, 周建斌, 王祥, 等. 不同培肥处理对土壤溶解性有机碳含量及特性的影响. *土壤学报*, 2010, 47(1): 115—121. Gao Z X, Zhou J B, Wang X, et al. Effects of different fertilizer treatments on content and characteristics of dissolved organic in soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(1): 115—121
- [21] 文启孝. 土壤有机质研究法. 北京: 农业出版社, 1984. Wen Q X. *Research methods of soil organic matter* (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1984
- [22] Weintraub M N, Schimel J P. Interactions between carbon and nitrogen mineralization and soil matter chemistry in arctic tundra soils. *Ecosystems*, 2003, 6(2): 129—143
- [23] Mansson K F, Falkengren-Grerup U. The effect of nitrogen deposition on nitrification, carbon and nitrogen mineralization and litter C:N ratios in oak (*Quercus robur* L.) forests. *Forest Ecology and Management*, 2003, 179(1/3): 455—467
- [24] Neff J C, Townsend A R, Gleixner G, et al. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon. *Nature*, 2002, 419(6910): 915—917
- [25] 牛文静, 李恋卿, 潘根兴, 等. 太湖地区水稻土不同粒径团聚体中酶活性对长期施肥的响应. *应用生态学报*, 2009, 20(9): 2181—2186. Niu W J, Li L Q, Pan G X, et al. Responses of enzyme activities in different particle-size aggregates of paddy soil in Taihu Lake region of China to long-term fertilization (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(9): 2181—2186
- [26] Stemmer M, Gerzabek M H, Kandeler E. Invertase and xylanase activity of bulk soil and particle-size fractions during maize straw decomposition. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31(1): 9—18
- [27] Jastrow J D, Amonette J E, Bailey V L. Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration. *Climatic Change*, 2007, 80(1/2): 5—23
- [28] Zhang P J, Zheng J F, Pan G X, et al. Changes in microbial community structure and function within particle size fractions of a paddy soil under long-term different fertilization treatments from the Tai Lake region, China. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2007, 58(2): 264—270
- [29] 汪景宽, 汤方栋, 张继宏, 等. 不同肥力棕壤及其微团聚体中酶活性比较. *沈阳农业大学学报*, 2000, 31(2): 185—189. Wang J K, Tang F D, Zhang J H, et al. Enzyme activities in fractions of micro-aggregates in brown earths with different fertility levels in Liaoning Province (In Chinese). *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2000, 31(2): 185—189
- [30] Marhan S, Kandeler E, Scheu S. Phospholipid fatty acid profiles and xylanase activity in particle size fractions of forest soil and casts of *Lumbricus terrestris* L. (*Oligochaeta*, *Lumbricidae*). *Applied Soil Ecology*, 2007, 35(2): 412—422
- [31] Fenner N, Freeman C, Reynolds B. Observations of a seasonally shifting thermal optimum in peatland carbon-cycling processes; implications for the global carbon cycle and soil enzyme methodologies. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(10): 1814—1821
- [32] Appel H M. Phenolics in ecological interactions; The importance of oxidation. *Journal of Chemical Ecology*, 1993, 19(7): 1521—1552
- [33] Freeman C, Lock M A, Marxsen J, et al. Inhibitory effects of high molecular weight dissolved organic matter upon metabolic

processes of biofilms from contrasting rivers and streams. Fresh-water Biology, 1990, 24(1): 159—166

[34] Freeman C, Ostle N, Kang H. An enzymic 'latch' on a global carbon store. Nature, 2001, 409(6817): 149—150

SOIL ORGANIC CARBON AND ENZYMATIC ACTIVITY IN AGGREGATES OF SOILS UNDER DIFFERENT PLANT COMMUNITIES IN HILLY-GULLY REGIONS OF LOESS PLATEAU

Ma Ruiping^{1,2,3} An Shaoshan^{1,3†} Dang Tinghui^{1,3} Dai Xianglin^{3,4}

(1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Institute of Resources and Environment, Tibet Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Lhasa 850032, China)

(3 College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(4 Institute of Agriculture Research, Tibet Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Lhasa 850032, China)

Abstract Three different plant communities typical of the forest region of the Yanhe River watershed in the Loess Plateau were selected as subjects in study to explore effects of vegetation community on content and composition of organic carbon and activities of soil enzymes in soil aggregates, and relationships between organic carbon and enzyme activities. Results show that in all the three soils, regardless of vegetation community, soil aggregates in the 0 ~ 10 cm soil layer were higher than those in the 10 ~ 20 cm layer in content of organic carbon regardless of fraction and in activity of all soil enzymes, except for ployphenol oxidase, which was higher in the 10 ~ 20 cm soil layer than in the 0 ~ 10 cm soil layer under the *Quercus liaotungensis* community; that in terms of soil organic carbon content in soil aggregates the vegetation communities displayed an order of *Quercus liaotungensis* community > *Robinia pseudoacacia* community > *Sophora viciifolia* community, while the three vegetation communities did not show any consistent trend in soil enzyme activity, and the content of organic carbon and the activity of oil enzymes increased with increasing particle size of soil aggregates or increased first and then declined afterwards; significant positive relationships were observed of the activities of sucrase, cellulase and β -D-glucosidase with soil organic carbon of all forms, but no such relationships were of the activities of ployphenol oxidase and peroxidase with soil organic carbon; that in the soils under the *Quercus liaotungensis* and Shrub *Sophora* communities, the fractions of soil aggregates displayed an order of | < 0.25 mm | > | 2 ~ 0.25 mm | > | 5 ~ 2 mm | > | > 5 mm | in activities of sucrase, cellulase and β -D-glucosidase, but the fraction of 2 ~ 0.25 mm aggregates was the highest in activities of loyphenol oxidase and Peroxidase in both of the soils and in the soil under Black Locust community the fraction was the highest in activities of all the soil enzymes; and that higher activity of soil β -D-glucosidase contributed to the increase of soil organic carbon of all the forms, that of soil sucrase and β -D-glucosidase did to the increase of soil active organic carbon, and that of soil Ployphenol oxidase did to the accumulation of humus carbon.

Key words Loess Plateau; Soil organic carbon; Soil aggregates; Enzyme activity

(责任编辑:卢萍)