

黄土丘陵区 4 种典型植被对土壤养分及酶活性的影响

闫丽娟¹, 王海燕², 李广², 吴江琪²

(1. 甘肃农业大学农学院, 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学林学院, 兰州 730070)

摘要: 土壤酶积极参与土壤系统的生物化学过程, 是联系“植物—土壤酶—土壤养分”的关键纽带。为探讨植被类型对黄土高原丘陵区土壤养分及酶活性的影响, 以黄土丘陵区 4 种典型植被(荒草地、文冠果林地、柠条灌丛、沙棘林地)为研究对象, 通过采集 0—10, 10—20, 20—40 cm 层土壤样品, 测定和分析土壤养分(碳、氮、磷)及土壤酶活性(蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、淀粉酶)的变化特征。结果表明: 文冠果林地 0—40 cm 层土壤有机碳和全氮含量比荒草地、柠条灌丛、沙棘林地高出了 19.42% 和 35.15%、82.98% 和 40.49%、67.27% 和 24.12%, 土壤全磷含量最大值(沙棘林地)比最小值(柠条灌丛)高出了 12.45%。随着土层深度的增加, 土壤有机碳、全氮、全磷含量在柠条灌丛中呈现“升—降”的变化规律, 在其他 3 种植被类型中均呈逐渐减小的趋势。4 种植被类型下土壤淀粉酶、脲酶和蔗糖酶活性差异显著($P < 0.05$), 土壤酶活性随着土层深度的增加逐渐减弱。其中土壤淀粉酶最大值出现在荒草地, 脲酶和蔗糖酶活性最大值为文冠果林地, 3 种酶的最小值均出现在柠条灌丛。相关分析表明, 土壤有机碳与全氮、蔗糖酶、脲酶极显著正相关($P < 0.01$)。土壤全氮与脲酶在 0.01 水平上极显著正相关, 与全磷、蔗糖酶在 0.05 水平上显著正相关。土壤全磷与硝态氮呈极显著的负相关($P < 0.01$), 与蔗糖酶呈极显著的正相关($P < 0.01$), 与淀粉酶呈显著正相关($P < 0.05$)。因此, 植被类型是影响黄土高原土壤酶活性和养分变化的重要因素。

关键词: 黄土丘陵; 植被类型; 土壤养分; 酶活性

中图分类号: S714.5; S151.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)05-0190-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.05.028

Effects of Four Typical Vegetations on Soil Nutrient and Enzymes Activities in Loess Hilly Region

YAN Lijuan¹, WANG Haiyan², LI Guang², WU Jiangqi²

(1. College of Agriculture, Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070;

2. College of Forestry, Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070)

Abstract: Soil enzymes actively participate in the biochemical processes of soil systems and are the key link to the “plant-soil enzymes-soil nutrients”. In order to investigate the effects of vegetation types on soil nutrient and enzymes activities in the hilly region of the Loess Plateau, four typical vegetations (grassland, *Xanthoceras sorbifolia*, *Caragana korshinskii* shrub, and *Hippophae rhamnoides*) in the loess hilly region were studied. Soil samples of 0—10, 10—20 and 20—40 cm layers were sampled to determine and analyze the changes of soil nutrient (carbon, nitrogen, phosphorus) and soil enzymes activities (sucrose, urease, catalase, amylase). The results showed that the soil organic carbon and total nitrogen contents in the 0—40 cm layer of the *Xanthoceras sorbifolia* were 19.42% and 35.15%, 82.98% and 40.49%, 67.27% and 24.12% higher than those of the grassland, *Caragana korshinskii* shrub, and *Hippophae rhamnoides* respectively. With the increase of soil depth, the contents of soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus showed a “increase first and then decrease” change in *Caragana korshinskii* shrub, but gradually decreased under the other three vegetation types. The soil amylase, urease and sucrase activities were significantly different among the four vegetation types ($P < 0.05$), and the soil enzymes activities decreased with the increase of soil depth. The maximum value of soil amylase was found in the grassland, the maximum values of urease and sucrase activities were in *Xanthoceras sorbifolia*, and the lowest values of the three enzymes were found in *Caragana korshinskii* shrub. Correlation analysis showed that soil organic carbon contents

收稿日期: 2019-04-08

资助项目: 国家自然科学基金项目(31560343, 31660348, 41561022); 甘肃省高等学校协同创新团队项目(2018C-16)

第一作者: 闫丽娟(1974—), 女, 博士, 副教授, 主要从事宏观农业研究。E-mail: yanlj@gsau.edu.cn

通信作者: 李广(1971—), 男, 博导, 教授, 主要从事农业系统工程教学和研究。E-mail: lig@gsau.edu.cn

were significantly positively correlated with total nitrogen, sucrase and urease activities ($P < 0.01$). There was a significant positive correlation between soil total nitrogen contents and urease activities at 0.01 level, and a significant positive correlation between total phosphorus contents and sucrose activities at 0.05 level. Soil total phosphorus contents were negatively correlated with nitrate nitrogen contents ($P < 0.01$), positively correlated with sucrose ($P < 0.01$) and amylase activities ($P < 0.05$). Therefore, vegetation type is an important factor affecting soil enzymes activities and nutrient changes in the Loess Plateau.

Keywords: hilly loess plateau; vegetation types; soil nutrient; enzyme activity

全球气候变暖,季节性雪被减少,正在改变着生态系统的过程。IPCC^[1]预测,到21世纪末,全球平均气温将升高0.3~4.8℃,气候变暖导致水资源短缺,降雨量减小,蒸发量增加,生态系统干旱化程度加剧^[2]。土壤有机碳(SOC)是气候变化的一种敏感指示物,它能够用来指示土壤对气候变化的响应。土壤作为植物氮(N)、磷(P)来源,直接影响植物对N、P的吸收和利用,并进一步影响植物N:P化学计量关系,甚至影响了生物量分配和生态策略选择^[3]。在人类活动与全球变化的双重影响下,土壤系统的N:P正在发生变化,最终可能会导致生态系统结构、过程和功能发生改变^[4-5]。

土壤酶积极参与土壤系统的生物化学过程,是联系“植物—土壤酶—土壤养分”的关键纽带。土壤酶活性与土壤养分作为土壤肥力的重要指标,在土壤生态系统的物质循环和能量转化中具有重要作用^[6],能反映出土壤质量的变化情况^[7],间接影响土壤中碳、氮、磷等元素的循环。已有研究^[8-10]表明,土壤温度升高能增加土壤酶活性,但不同生态系统及不同种类的土壤酶对温度敏感性存在一定差异^[9],且同一种酶在不同植被类型下对土壤温度的敏感性也表现不一致。因此,未来气候变化可能对陆地生态系统中土壤酶系统产生复杂的影响,从而影响相关的土壤SOC、N、P过程。

黄土高原位于中国中北部,为中国四大高原之一,是中华民族古代文明的发祥地之一,也是地球上分布最集中且面积最大的黄土区,总面积 6.4×10^7 hm²,横跨中国青、甘、宁、内蒙古、陕、晋、豫7省,是世界上水土流失最严重和生态环境最脆弱的地区之一,经流水长期强烈侵蚀,逐渐形成千沟万壑、地形支离破碎的特殊自然景观。在自然因素和人为因素作用下,土壤普遍退化,土地的再生性减弱,黄土高原土壤退化面积极其严重。近年来,由于退耕还林还草工程的实施,黄土丘陵地区植被覆盖程度显著增加^[11],有效地控制了土壤侵蚀现象,同时土壤质量也得到了明显的改善^[12]。该区关于退耕地的研究主要集中在土壤渗透性^[13]、水土保持工程^[14]、生物多样性^[15]等方面,缺乏土壤养分对物种变化响应过程的深入分

析,尤其是对不同类型植物是如何影响土壤养分及酶活性特征的研究。因此,本文以黄土丘陵区4种不同植被类型为研究对象,通过对土壤养分含量与酶活性变化特征及相关性关系分析,以期深入认知退耕还林还草工程中植物—土壤—酶活性的互馈与协同恢复机制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

定西市安定区(103°52′—105°13′E,34°26′—35°35′N)是古代“丝绸之路”上的重镇,素有“甘肃咽喉、兰州门户”之称。李家堡乡位于安定区东南部,平均海拔1 947 m,属于大陆性气候,是典型的温带干旱、半干旱地区,年均太阳辐射 141.6×1.48 kJ/cm²,日照时间2 476.6 h,≥10℃的积温为2 239.1℃,被中国特产之乡组委会审定命名为“中国马铃薯之乡”。多年平均降水量390.99 mm,主要集中在农作物收获以后,降水量低而不稳,土壤抵抗侵蚀的能力较弱。

1.2 样地设置与样品采样

2017年3月通过实地考察,选择定西市水土保持科学研究所位于李家堡乡的试验区。在其试验区域内,以荒草地为对照组,选择文冠果林地、沙棘林地和柠条灌丛作为不同的3种典型植被类型(样地植被特征见表1),每种植被类型随机选择10 m×10 m的小样地3个。2017年9月在4种不同植被的样地上按对角线五点法分层(0—10,10—20,20—40 cm)取样,共180个土壤样品,同一样地同一土层样品组合成1个混合土样,捡去土样石块、残根等杂物后,将样品分成2份;1份鲜土样过2 mm筛后,置于4℃冰箱用于土壤硝态氮、铵态氮的测定;1份土样风干后,用于土壤养分及酶活性的测定(重复3次)。

1.3 测定方法

用重铬酸钾氧化—外加热法测定土壤有机碳含量;土壤铵态氮(NH₄⁺—N)、硝态氮(NO₃⁻—N)用2 mol/L的KCl溶液浸提土壤后,采用凯氏定氮仪测定;用H₂SO₄—H₂O₂凯氏法测定全量N、P;土壤过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法^[16]测定;蔗糖酶和淀粉酶采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定;土壤脲酶采用尿素比色法^[17]测定。

表 1 植被特征

植被类型	地理坐标	丰富度	优势种组成	植被盖度/%
荒草地	35°34′54″N,104°37′57″E	9	冰草(<i>Agropyron cristatum</i> (Linn.) Gaertn.)+冷蒿(<i>Artemisia frigida</i> Willd.Sp.Pl.)+大针茅(<i>Stipa grandis</i> P.Smirn.)	>90
文冠果林地	35°35′10″N,104°37′7″E	4	文冠果+冰草+柴胡(<i>Bupleurum chinense</i>)	60
柠条灌丛	35°34′55″N,104°38′1″E	5	柠条+冰草	30
沙棘林地	35°34′45″N,104°39′1″E	3	沙棘+紫花苜蓿(<i>Medicago sativa</i>) +冰草	85

1.4 数据分析

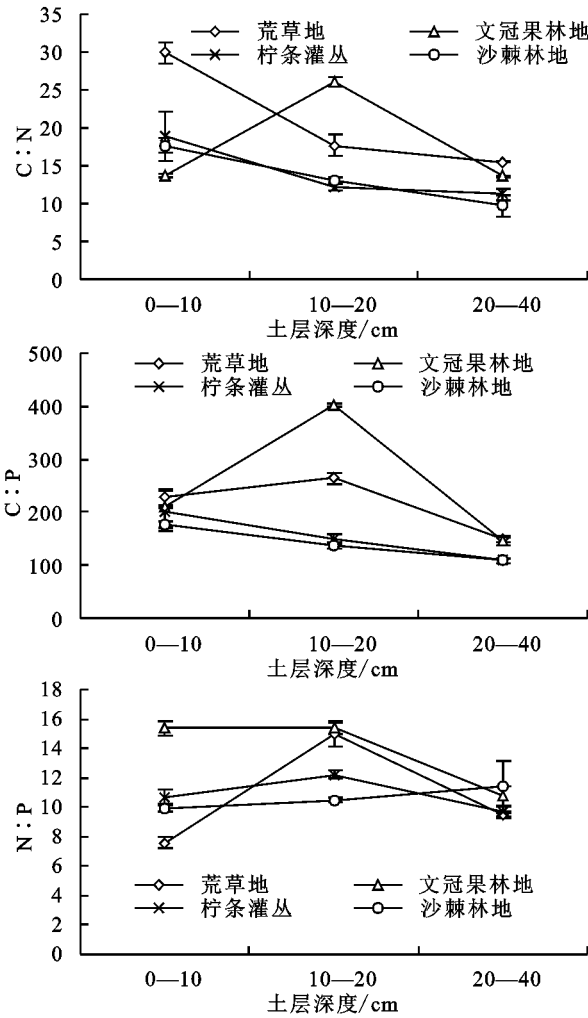
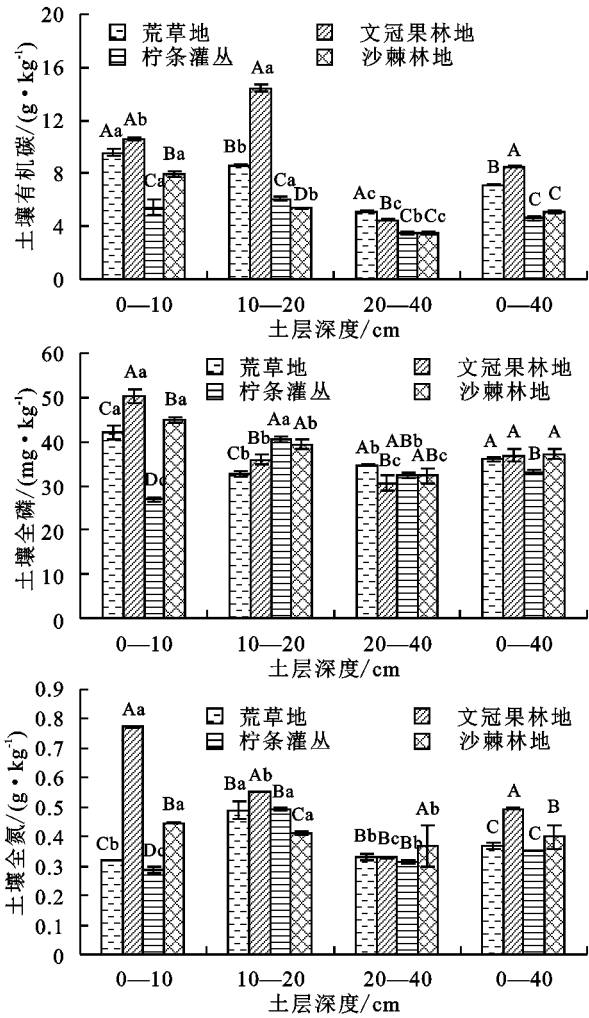
使用 Grandp 软件作图,SPSS 19.0 软件中的单因素方差分析(ANOVA)和最小显著差异法(LSD) 检验了植被类型对土壤养分和酶活性的影响,以 $P<0.05$ 为显著水平。采用 Pearson 相关分析探讨了土壤过氧化氢酶、蔗糖酶、淀粉酶、脲酶与土壤养分间的相互关系。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型对土壤碳、氮、磷及其化学计量比的影响

由图 1 可知,在土壤垂直剖面上,荒草地和沙棘

林地 0—10 cm 土层土壤 SOC 含量分别比 10—20、20—40 cm 土层显著高出了 10.94%和 47.21%、86.74%和 125.10% ($P<0.05$);而文冠果林地和柠条灌丛 10—20 cm 土层土壤有机碳含量分别比 0—10、20—40 cm 土层高出了 36.49%和 11.51%、223.58%和 72.74%,不同土层间土壤有机碳含量差异显著 ($P<0.05$)。4 种植被类型在 0—40 cm 土层表现为文冠果林地和荒草地土壤有机碳显著高于沙棘林地和柠条灌丛 ($P<0.05$),而沙棘林地和柠条灌丛土壤有机碳含量在 0—40 cm 土层差异不显著 ($P>0.05$)。



注:不同大写字母表示相同土层不同植被类型间显著差异 ($P<0.05$);不同小写字母表示相同植被类型下不同土层间显著差异 ($P<0.05$)。下同。

图 1 植被类型对土壤碳、氮、磷及其化学计量比的影响

柠条灌丛 0—40 cm 层土壤全磷含量显著低于其他 3 种植被类型 ($P < 0.05$), 而荒草地、文冠果林地和沙棘林地 0—40 cm 层土壤全磷含量无明显差异。4 种植被类型下土壤全磷含量对土层深度具有明显的影响 ($P < 0.05$)。其中荒草地、文冠果林地、沙棘林地 0—10 cm 层土壤全磷含量比 10—20, 20—40 cm 层分别高出了 28.94%, 40.09%, 14.33% 和 21.77%, 64.75%, 39.08%, 柠条灌丛土壤全磷含量随着土层深度的增加呈倒“V”形变化趋势。文冠果林地 0—40 cm 层土壤全氮含量显著高于其他 3 种植被类型 ($P < 0.05$), 荒草地、柠条灌丛土壤全氮含量随着土层深度的增加呈现“升—降”的变化趋势, 而文冠果林地、沙棘林地土壤全氮含量随着土层深度的增加呈逐渐降低的趋势, 且差异显著 ($P < 0.05$)。

4 种植被类型下 C : N 范围在 9.69 ~ 29.92, C : P 范围在 108.36 ~ 401.77, N : P 范围在 7.59 ~ 15.42。荒草地、柠条灌丛、沙棘林地土壤 C : N 随着土层深度的增加逐渐降低, 柠条灌丛和沙棘林地土壤 C : P 随着土层深度的增加逐渐减小; 荒草地、文冠果林地土壤 C : N、C : P、N : P 随着土层深度的增加呈倒

“V”形变化(荒草地 C : N 除外); 而沙棘林地土壤 N : P 随着土层深度的增加呈现逐渐增大的变化规律。4 种植被类型下 0—40 cm 层土壤 N : P 的范围是 10.39 ~ 13.08, 远高于黄土高原沟壑区土壤 N : P (0.86)。

2.2 不同植被类型对土壤酶活性的影响

植被覆盖度与多样性的改变不仅直接影响土壤酶活性的质和量^[18], 又能通过影响土壤有机质输入间接影响土壤酶活性。由图 2 可知, 柠条灌丛 0—40 cm 层土壤过氧化氢酶活性比荒草地、文冠果林地、沙棘林地分别高出了 5.79%, 4.07%, 9.40%, 无显著性差异 ($P > 0.05$)。而 4 种植被类型下 0—40 cm 层土壤淀粉酶、脲酶、蔗糖酶活性差异显著 ($P < 0.05$), 其中土壤淀粉酶活性最大值出现在荒草地, 最大值是最小值的 1.87 倍, 文冠果林地脲酶和蔗糖酶活性分别比荒草地、柠条灌丛、沙棘林地高出了 122.54% 和 11.17%、274.72% 和 116.32%、136.55% 和 24.42%。4 种植被类型下土壤淀粉酶、脲酶活性随着土层深度的增加逐渐减弱, 而柠条灌丛土壤过氧化氢酶、蔗糖酶随着土层深度的增加逐渐增强, 其他 3 种植被类型下土壤过氧化氢酶、蔗糖酶活性随着土层深度的增加逐渐减弱。

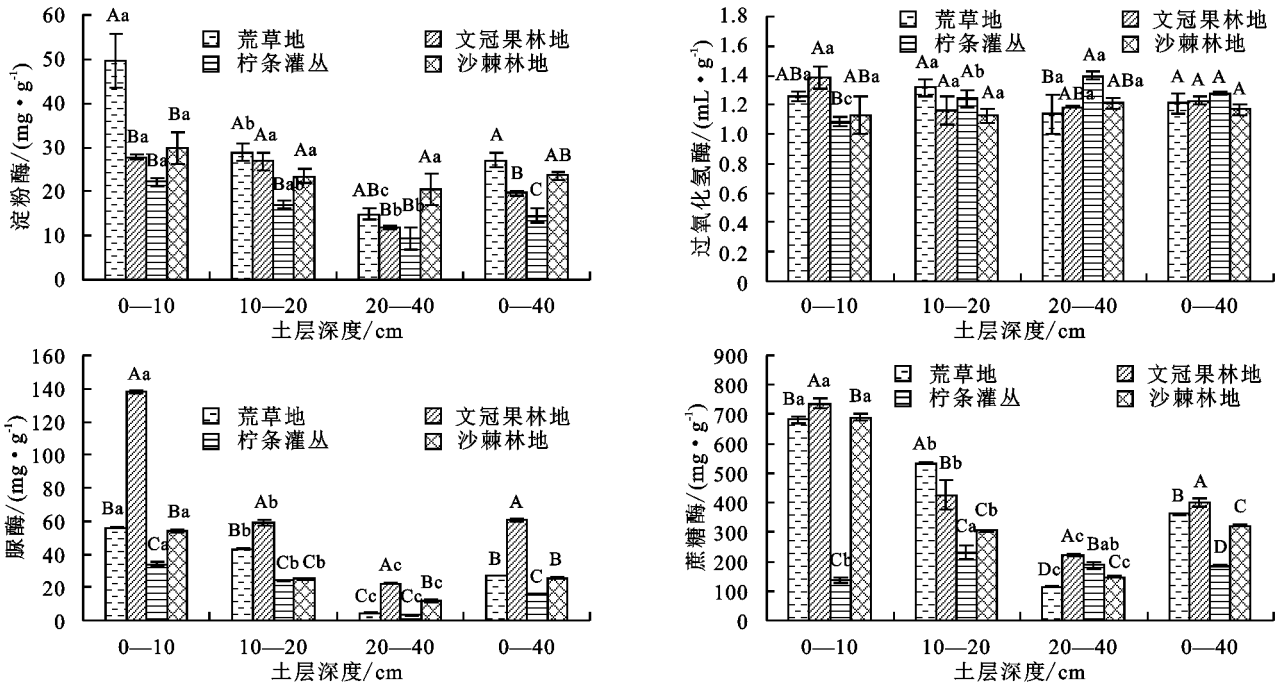


图 2 植被类型对土壤酶活性的影响

2.3 不同植被类型对土壤硝态氮、铵态氮含量的影响

0—40 cm 层土壤硝态氮含量表现为柠条灌丛高于其他 3 种植被类型(图 3), 而 0—40 cm 层土壤铵态氮含量则为荒草地和柠条灌丛高于文冠果林地和沙棘林地, 且方差分析表明差异显著 ($P < 0.05$)。4 种植被类型下土壤硝态氮含量随着土层深度的增加显著降低, 其中荒草地、文冠果林地、柠条灌丛、沙棘

林地 0—10 cm 层土壤硝态氮含量分别比 10—20 cm 和 20—40 cm 层高出了 158.45% 和 442.93%、157.82% 和 321.96%、66.18% 和 89.14%、44.12% 和 106.59%。荒草地土壤铵态氮含量随土层深度的增加逐渐增大, 文冠果林地土壤铵态氮含量随土层深度的增加呈“降低—升高”的变化趋势, 而柠条灌丛、沙棘林地 10—20 cm 层铵态氮含量比 0—10, 20—40 cm 层高出了 35.72% 和 2.91%、17.49% 和 8.29%。

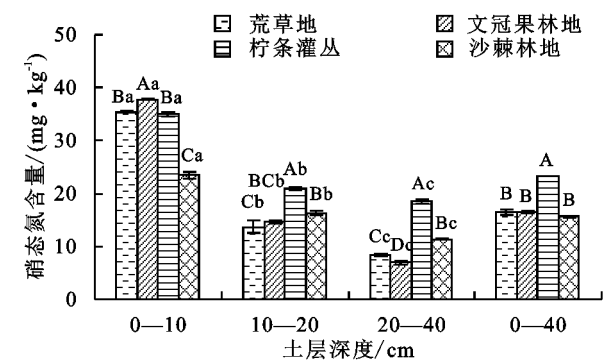
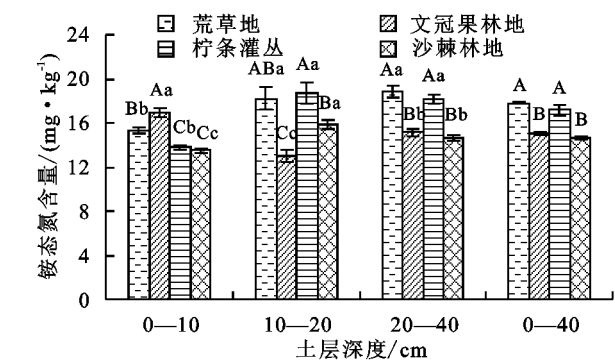


图 3 植被类型对土壤硝态氮、铵态氮的影响

2.4 土壤养分与酶活性的相关关系

黄土高原丘陵区 0—40 cm 层土壤养分含量与酶活性之间存在不同程度的相关性(表 2)。土壤有机碳与全氮、蔗糖酶、脲酶极显著正相关($P<0.01$)。土壤全氮与脲酶在 0.01 水平上极显著正相关,与全磷、蔗糖酶在 0.05 水平上显著正相关。土壤全磷与硝态氮呈极显著的负相关($P<0.01$),与蔗糖酶呈



极显著的正相关($P<0.01$),与淀粉酶呈显著正相关($P<0.05$)。土壤硝态氮与蔗糖酶、淀粉酶呈极显著的负相关关系,土壤铵态氮与淀粉酶呈极显著的负相关关系($P<0.01$)。土壤蔗糖酶活性与脲酶在 0.01 水平上正相关,与淀粉酶在 0.05 水平上正相关。而土壤过氧化氢酶活性与有机碳、氮、磷、蔗糖酶、脲酶均呈负相关,相关系数在 0.061~0.565,未达到显著水平。

表 2 土壤养分与酶活性的相关系数

指标	有机碳	全氮	全磷	硝态氮	铵态氮	蔗糖酶	脲酶	过氧化氢酶	淀粉酶
有机碳	1.000								
全氮	0.729**	1.000							
全磷	0.481	0.597*	1.000						
硝态氮	-0.527	-0.485	-0.838**	1.000					
铵态氮	0.330	0.439	-0.329	0.468	1.000				
蔗糖酶	0.846**	0.677*	0.824**	-0.872**	-0.112	1.000			
脲酶	0.883**	0.932**	0.517	-0.501	0.490	0.771**	1.000		
过氧化氢酶	-0.084	-0.179	-0.565	0.456	0.381	-0.357	-0.061	1.000	
淀粉酶	0.283	-0.017	0.577*	-0.773**	-0.720**	0.619*	0.048	-0.258	1.000

注: * 表示显著相关($P<0.05$); ** 表示极显著相关($P<0.01$)。

3 讨论

3.1 植被类型对土壤碳、氮、磷的影响

土壤有机质作为土壤养分的重要组成物质,是决定土壤肥力最重要的因素之一,对土壤的物理、化学和生物特性都有着深刻的影响^[19]。在本研究中,荒草地和柠条灌丛随着土层深度的加深,土壤有机碳含量逐渐减小。因为植物的枝叶残体和根系大部分分布于表层土壤中,分解后形成的腐殖质在表层土壤中积累,因此荒草地和柠条灌丛土壤有机碳含量具有典型的表聚性。而文冠果林地和沙棘林地土壤有机碳含量在 10—20 cm 层最大,因为文冠果林地和沙棘林地地表生长着一些浅根的伴生植物,根系集中在 0—10 cm 层,而森林区具有相对复杂的微生物环境,大量的植物根系使得土壤容重减小,孔隙度增加,土壤微生物活性较高,提高了表层土壤微生物对有机质的利用率^[20],因此文冠果林地和沙棘林地土壤有机碳在 10—20 cm 层较高。柠条灌丛 0—40 cm 层土壤全

磷含量显著低于其他 3 种植被类型($P<0.05$),而荒草地、文冠果林地和沙棘林地 0—40 cm 层土壤全磷含量无明显差异。与土壤有机质相比,土壤全氮作为诊断土壤肥力水平和指导作物精确施肥所需的重要信息,在一定范围内,土壤氮素更容易得到迅速补充,因此土壤全氮可以代表土壤的短期肥力^[21]。文冠果林地 0—40 cm 层土壤全氮含量显著高于其他 3 种植被类型($P<0.05$),文冠果林地、沙棘林地土壤全氮含量随着土层深度的增加呈逐渐降低的趋势。因为土壤表层通气性好,微生物生物量高,且枯枝落叶较多,有利于有机质的积累;而随着土层深度的增加,土壤通气性下降,微生物生物量减少,不利于土壤结构的发展,养分循环较慢^[22],使得养分含量随着土层深度的增加而降低。而荒草地、柠条灌丛土壤全氮含量在 10—20 cm 层出现升高的趋势,因为 10—20 cm 层植物根系较多,土壤具有较高的水分含量,土壤微生物活性较高,有利于微生物在有机质分解过程中的养分释放^[23]。土壤 C : N : P 是衡量土壤有机质组成

和营养平衡的一个重要指标,本研究表明,沙棘林地0—40 cm 层土壤 C : N 要低于全球的 13.33^[24],其他3种植被类型土壤 C : N 要高于全球土壤 C : N 值。因为 C、N 作为土壤的结构性成分,同时受凋落物养分归还和分解的影响^[25],土壤有机碳随着植被类型的变化幅度较氮含量要大,导致其 C : N 增大。4种植被类型中土壤 C : P 高于中国土壤 C : P 平均值(105),说明土壤微生物对土壤有效磷具有同化趋势,容易出现微生物与作物竞争性吸收土壤有效磷的现象,具有较强的固磷潜力^[26]。而土壤 N : P 可作为衡量 N 饱和的指标,指示植物生长过程中土壤养分元素的供应状况^[27]。本研究中,4种植被类型下0—40 cm 层土壤 N : P 的范围是 10.39~13.08,远高于黄土高原沟壑区土壤 N : P 平均值(0.86),因为土壤氮磷间不存在协同性,土壤全氮主要来源于枯落叶和植物根系分解形成的有机质,而土壤全磷主要来源于岩石风化,由于土壤中磷元素较少,使得土壤 N : P 较高^[28]。

3.2 植被类型对土壤酶活性的影响

土壤酶参与土壤中生物化学过程和物质循环,对土壤有机质的转化起着重要的作用,是反映森林土壤质量高低的重要生物学指标^[29]。本研究表明,4种植被类型下0—40 cm 层土壤淀粉酶、脲酶、蔗糖酶活性差异显著($P<0.05$),其中0—40 cm 层土壤脲酶、蔗糖酶活性最大值出现在文冠果林地,土壤淀粉酶最大值为荒草地,3种酶活性的最小值均出现在柠条灌丛。因为柠条灌丛地表植被单一,枯落物较少,土壤有机碳、全氮、全磷含量均为最低,土壤有机质的输入能力下降,进而影响根际土壤微生物的群落结构、生长数量和生存状况^[30]。4种植被类型下0—40 cm 层土壤过氧化氢酶活性差异不显著,因为过氧化氢酶作为土壤中的氧化还原酶类,能够酶促水解土壤中对植物有害的过氧化氢,促进植物生长^[31],该区土壤类型一致,其中含有的对植物有害的过氧化氢基本一致,因此4种植被类型下0—40 cm 层土壤过氧化氢酶活性无明显变化。4种植被类型下土壤淀粉酶、脲酶、蔗糖酶活性均随土层深度的增加逐渐降低,而土壤过氧化氢酶活性则无明显变化。因为土壤表层有机质含量高,有充分的营养源以利于微生物的生长,加之表层水热条件和通气状况良好,微生物生长旺盛,代谢活跃^[32]。随着土层的加深,地下生物量减少,土壤养分来源减少,土壤熟化程度、肥力水平及土壤营养元素状况等趋向不利于微生物的活动与繁殖^[33],导致土壤酶活性降低。文冠果林地和沙棘林地土壤过氧化氢酶活性随土层深度的增加逐渐下降,而荒草地、柠条灌丛土壤过氧化氢酶活性随土层深度的增加呈先升高后降低的趋势,与土壤全氮含量的变化趋势

一致。因为氮素不仅是土壤酶的组成部分,而且累积在土壤有机质中的氮还决定了酶进入土壤中的数量,同时土壤酶活性能较好地反映土壤氮素状况,土壤酶活性的提高有利于土壤中氮素的释放^[34]。

3.3 土壤养分与酶活性的相互影响

土壤酶与土壤环境之间具有相互作用。土壤酶是土壤分解过程的主要驱动者,非生物因素通过改变微生物活动或者群落结构间接影响土壤酶活性^[35],而土壤碳周转和养分循环又依赖于土壤酶活性^[36]。本研究表明,土壤有机碳与全氮、蔗糖酶、脲酶极显著正相关($P<0.01$)。土壤全氮与脲酶在 0.01 水平上极显著正相关,与蔗糖酶在 0.05 水平上显著正相关。土壤全磷与蔗糖酶呈极显著的正相关($P<0.01$),与淀粉酶呈显著正相关($P<0.05$)。土壤硝态氮与蔗糖酶、淀粉酶呈极显著的负相关关系,土壤铵态氮与淀粉酶呈极显著的负相关关系($P<0.01$)。因为土壤酶直接参与土壤中物质能量的循环,与土壤微生物共同参与完成土壤代谢过程,对土壤演化与形成、物质循环和能量流动具有重要的促进作用^[37],同时土壤有机质的分解提高了土壤酶活性,使得土壤微生物数量增加,其代谢产物提高了土壤酶活性^[38]。因此,土壤酶与土壤养分可以作为评价土壤质量及土壤肥力的重要指标,研究土壤养分与酶活性的关系对理解土壤养分循环机制和能量流动有积极的指示作用。

4 结论

(1)黄土高原丘陵区0—40 cm 层土壤有机碳、全氮、全磷含量的最小值均出现在柠条灌丛(4.64 g/kg、33.10 mg/kg、0.35 g/kg),最大值分别出现在文冠果林地(有机碳、全氮)和沙棘林地(全磷)中,且差异显著($P<0.05$)。随着土层深度的增加,柠条灌丛土壤有机碳、全氮、全磷均呈现“升—降”的变化规律,而其他3种植被类型的土壤有机碳、全氮、全磷均呈逐渐减小的趋势。同时化学计量比显示4种植被类型下0—40 cm 层土壤 C : N 小于中国土壤 C : N 的平均比值,而土壤 C : P 和 N : P 的比值则高于中国土壤 C : P 和 N : P 的平均比值,表明黄土高原丘陵区土壤中较少的磷元素含量是限制植物生长的主要限制因子。

(2)4种植被类型下0—40 cm 层土壤过氧化氢酶活性无显著性差异,土壤淀粉酶表现为荒草地>沙棘林地>文冠果林地>柠条灌丛,文冠果林地土壤脲酶和蔗糖酶活性最大(60.38, 401.18 mg/kg),土壤淀粉酶、脲酶、蔗糖酶最大值比最小值高出了 87.37%, 274.72%, 116.31%,且不同植被类型下土壤酶活性差异显著($P<0.05$);除柠条灌丛土壤过氧化氢酶随

土层深度的增加逐渐增强外,其余酶活性均随土层深度的增加逐渐减弱。

(3)土壤蔗糖酶与有机碳、磷呈极显著的正相关关系($P < 0.01$),与氮呈显著的正相关性($P < 0.05$),与硝态氮呈极显著的负相关关系($P < 0.01$)。土壤脲酶与有机碳、氮呈现出极显著的正相关关系($P < 0.01$),土壤淀粉酶与硝态氮、铵态氮呈极显著的负相关关系($P < 0.01$)。土壤过氧化氢酶与有机碳、氮、磷呈负相关关系,与硝态氮、铵态氮呈正相关关系,但均未达到显著水平,可见土壤酶活性的高低与土壤养分含量多少有紧密联系。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [C]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014: 151.
- [2] Yang K, Ye B S, Zhou D G, et al. Response of hydrological cycle to recent climate changes in the Tibetan Plateau [J]. Climatic Change, 2011, 109(3/4): 517-534.
- [3] Hogan E J, Minnullina G, Smith R I, et al. Effects of nitrogen enrichment on phosphatase activity and nitrogen: Phosphorus relationships in *Cladonia porten-tosa* [J]. New Phytologist, 2010, 186: 911-925.
- [4] Vande W D B, Verschoor A M, Verspagen J M H, et al. Climate-driven changes in the ecological stoichiometry of aquatic ecosystems [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2010, 8: 145-152.
- [5] Sardans J, Rivas-Ubach A, Peuelas J. The C : N : P stoichiometry of organisms and ecosystems in a changing world: A review and perspectives [J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2012, 14: 33-47.
- [6] 李小容, 韦金玉, 陈云, 等. 海南岛不同林龄的木麻黄林地土壤微生物的功能多样性[J]. 植物生态学报, 2014, 38(6): 56-59.
- [7] 赵海燕, 徐福利, 王渭玲, 等. 秦岭地区华北落叶松人工林地土壤养分和酶活性变化[J]. 生态学报, 2015, 35(4): 1086-1094.
- [8] Schindlbacher A, Schneckner J, Takriti M, et al. Microbial physiology and soil CO₂ efflux after 9 years of soil warming in a temperate forest-no indications for thermal adaptations [J]. Global Change Biology, 2015, 21: 4265-4277.
- [9] Allison S D, Treseder K K. Warming and drying suppress microbial activity and carbon cycling in boreal forest soils [J]. Global Change Biology, 2008, 14(12): 2898-2909.
- [10] Brzostek E R, Finzi A C. Seasonal variation in the temperature sensitivity of proteolytic enzyme activity in temperate forest soils [J]. Journal of Geophysical Research, 2012, G1: 117.
- [11] Sun W Y, Song X Y, Mu X M, et al. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 209/210: 87-99.
- [12] 张晓霞, 杨宗儒, 查同刚, 等. 晋西黄土区退耕还林 22 年后林地土壤物理性质的变化[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 416-424.
- [13] 吴江琪, 马维伟, 李广, 等. 黄土高原 4 种植被类型对土壤物理特征及渗透性的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 133-138.
- [14] 李敏, 张长印, 王海燕. 黄土高原水土保持治理阶段研究[J]. 中国水土保持, 2019(2): 1-4.
- [15] 张钦弟, 卫伟, 陈利顶, 等. 黄土高原草地土壤水分和物种多样性沿降水梯度的分布格局[J]. 自然资源学报, 2018, 33(8): 1351-1362.
- [16] Klzlkkaya R, Lzzet A, Aşkn T, et al. Effect of soil contamination with azadirachtin on dehydrogenase and catalase activity of soil [J]. Eurasian Journal of Soil Science, 2012, 1(2): 98-103.
- [17] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [18] Steinauer K, Tilman D, Wragg P D, et al. Plant diversity effects on soil microbial functions and enzymes are stronger than warming in a grassland experiment [J]. Ecology, 2015, 96: 99-112.
- [19] 江玉梅, 谢晶, 曹广泮, 等. 江西退化红壤人工重建森林土壤微生物碳源代谢功能研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 158-165.
- [20] 吴建国, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式对土壤中可溶性有机碳浓度影响的初步研究[J]. 植物生态学报, 2005, 29(6): 945-953.
- [21] 陈开华, 殷恒霞, 刘俊英, 等. 高寒草甸不同植被类型土壤全氮含量变化动态分析[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2321-2325.
- [22] Foote J A, Boutton T W, Scott D A. Soil C and N storage and microbial biomass in US southern pine forests: Influence of forest management [J]. Forest Ecology & Management, 2015, 355: 48-57.
- [23] 肖慈英, 黄青春, 阮宏华. 松、栎纯林及混交林凋落物分解特性研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(5): 763-767.
- [24] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47(2): 151-163.
- [25] 吴鹏, 崔迎春, 赵文君, 等. 喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤化学计量特征[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(3): 80-92.

- 高温闷棚处理对根结线虫种群数量变化的影响[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(4): 52-58.
- [14] 陈传翔, 杨巍, 常义军, 等. 高温闷棚下不同处理对土壤理化性状的影响[J]. 长江蔬菜, 2015(10): 47-52.
- [15] 顾志光, 马艳, 安霞, 等. 麦秸淹水处理对连作土壤性状和辣椒疫病田间防控效果的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(9): 1762-1769.
- [16] 蔡祖聪, 张金波, 黄新琦, 等. 强还原土壤灭菌防控作物土传病的应用研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 469-476.
- [17] 李佳川, 杨瑞平, 张显. 灌水高温闷棚处理对温室连作土壤理化性状变化的研究[J]. 北方园艺, 2016(13): 178-181.
- [18] 徐明喜, 马明, 黄忠阳, 等. 高温闷棚下不同处理防控甜瓜连作障碍效果研究[J]. 长江蔬菜, 2018(18): 27-30.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] Valérie G, Antoun H, Tweddell R J. Growth stimulation and fruit yield improvement of greenhouse tomato plants by inoculation with *Pseudomonas putida* or *Trichoderma atroviride*: Possible role of indole acetic acid (IAA) [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(8): 1968-1977.
- [21] 张荣, 姜子德, 李敏慧, 等. 尖孢镰孢菌致病机理及相关致病基因研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(15): 254-258.
- [22] 蒋军喜, 蔡祝南. 植物病毒的真菌传播及传介体油壶菌研究进展[J]. 江西农业大学学报, 2003, 25(3): 362-365.
- [23] Li X J, Zhang Q, Zhang A L, et al. Metabolites from, *Aspergillus fumigatus*, an endophytic fungus associated with melia azedarach, and their antifungal, antifeedant, and toxic activities [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(13): 3424-3431.
- [24] 申光辉, 薛泉宏, 张晶, 等. 草莓根腐病拮抗真菌筛选鉴定及其防病促生作用[J]. 中国农业科学, 2012, 45(22): 4612-4626.
- [25] Vannacci G, Harman G E. Biocontrol of seed-borne *Alternaria* spp. by *A. brassicicola* [J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 1987, 33: 850-856.
- [26] 朱同彬, 张金波, 蔡祖聪. 淹水条件下添加有机物料对蔬菜地土壤硝态氮及氮素气体排放的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 109-114.
- [27] Momma N, Momma M, Kobara Y. Biological soil disinfection using ethanol: Effect on *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* and soil microorganisms [J]. *Journal of General Plant Pathology*, 2010, 76(5): 336-344.
- [28] Núñez-Zofío M, Larregla, S, Garbisu C. Application of organic amendments followed by soil plastic mulching reduces the incidence of *Phytophthora capsici* in pepper crops under temperate climate [J]. *Crop Protection*, 2011, 30(12): 1563-1572.
- (上接第 196 页)
- [26] 任璐璐, 张炳学, 韩凤朋, 等. 黄土高原不同年限刺槐土壤化学计量特征分析[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 339-344.
- [27] 曹娟, 闫文德, 项文化, 等. 湖南会同 3 个林龄杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. 林业科学, 2015, 51(7): 1-8.
- [28] 马任甜. 黄土高原刺槐、柠条人工林土壤—植物生态化学计量特征研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [29] 周玮, 周运超. 北盘江喀斯特峡谷不同植被类型酶活性[J]. 林业科学, 2010, 46(1): 136-141.
- [30] 吴秀芝, 阎欣, 王波, 等. 荒漠草地沙漠化对土壤养分和胞外酶活性的影响[J]. 生态环境学报, 2018, 27(6): 1082-1088.
- [31] 宫欢欢, 尤一泓, 林勇明, 等. 不同林龄木麻黄纯林土壤酶活性与土壤养分研究[J]. 江西农业大学学报, 2017, 39(3): 516-524.
- [32] 王伟东, 王渭玲, 徐福利, 等. 秦岭西部中幼龄华北落叶松林地土壤养分与酶活性特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 1032-1039.
- [33] Poeplau C, Bolinder M A, Kirchmann H, et al. Phosphorus fertilisation under nitrogen limitation can deplete soil carbon, stocks: Evidence from Swedish meta-replicated long-term field experiments [J]. *Biogeochemistry*, 2016, 13(4): 1119-1127.
- [34] 万忠梅, 宋长春. 土壤酶活性对生态环境的响应研究进展[J]. 土壤通报, 2009, 40(4): 951-956.
- [35] Kivlin S N, Treseder K K. Soil extracellular enzyme activities correspond with abiotic factors more than fungal community composition [J]. *Biogeochemistry*, 2014, 117(1): 23-37.
- [36] Weintraub S R, Wieder W R, Cleveland C C, et al. Organic matter inputs shift soil enzyme activity and allocation patterns in a wet tropical forest [J]. *Biogeochemistry*, 2013, 114(1/3): 313-326.
- [37] Hao Y, Chang Q, Li L, et al. Impacts of landform, land use and soil type on soil chemical properties and enzymatic activities in a Loessial Gully watershed [J]. *Soil Research*, 2014, 52(5): 453.
- [38] 闫钟清, 齐玉春, 李素俭, 等. 降水和氮沉降增加对草地土壤微生物与酶活性的影响研究进展[J]. 微生物学通报, 2017, 44(6): 1481-1490.