

# 宁南山区典型草本植物茎叶分解对土壤酶活性及微生物多样性的影响

李 鑫<sup>1,2</sup> 李娅芸<sup>1,2</sup> 安韶山<sup>1,2\*</sup> 曾全超<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>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; <sup>2</sup>西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

**摘 要** 采用凋落物分解袋法,以宁南山区典型草本植物长芒草、铁杆蒿、百里香为研究对象,分析了3种植物茎叶分解过程中土壤酶活性变化特征和分解后期微生物多样性特征,以及土壤酶活性与初始土壤化学性质的关系。结果表明:植物茎叶分解480 d后,各处理土壤酶活性均有不同程度的增加,且长芒草处理土壤蔗糖酶活性和碱性磷酸酶活性最高,分别为 $32.40$ 和 $1.99 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$ ,百里香处理土壤脲酶活性最高( $2.66 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$ ),铁杆蒿处理土壤纤维素酶活性最高( $1.42 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 72 \text{ h}^{-1}$ )。分解末期土壤纤维素酶活性与土壤初始微生物生物量碳呈显著正相关;分解末期土壤纤维素酶活性与土壤初始硝态氮含量呈显著负相关。添加植物茎叶处理土壤细菌和真菌的Ace指数、Chao指数和Shannon指数均显著大于对照,Simpson指数显著小于对照。植物茎叶的分解显著提高了土壤细菌和真菌的丰度及多样性,进而提高了植物茎叶的分解速率,促进了生态系统营养物质的循环与转化。

**关键词** 草本植物; 土壤酶活性; 微生物多样性

**Effects of stem and leaf decomposition in typical herbs on soil enzyme activity and microbial diversity in the south Ningxia loess hilly region of Northwest China.** LI Xin<sup>1,2</sup>, LI Ya-yun<sup>1,2</sup>, AN Shao-shan<sup>1,2\*</sup>, ZENG Quan-chao<sup>1,2</sup> (<sup>1</sup>State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>2</sup>College of Natural Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China).

**Abstract:** With the method of litter bags, the characteristics of soil enzyme activities, soil microbial diversity at later stage of decomposition, and the relationships between soil enzyme activity and initial soil property were investigated in the process of stem and leaf decomposition of three typical herbs, i.e., *Stipa bungeana*, *Artemisia sacrorum* and *Thymus mongolicus* in the south Ningxia loess hilly region, Northwest China. The results showed that soil enzyme activity increased under different treatments after 480 d during stem and leaf decomposition. Soil sucrose activity ( $32.40 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$ ) and alkaline phosphatase activity ( $1.99 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$ ) were the highest in *S. bungeana* treatment. Soil urease activity ( $2.66 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$ ) was the highest in *T. mongolicus* treatment, and soil cellulase activity ( $1.42 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 72 \text{ h}^{-1}$ ) was the highest in *A. sacrorum* treatment. Soil cellulase activity at later stage of decomposition had significant positive correlation with initial microbial biomass carbon of soil. Soil cellulase activity at later stage of decomposition had significant negative correlation with initial nitrate nitrogen content of soil. Ace index, Chao index and Shannon index of soil bacteria and fungi in plant tissue addition treatments were higher than in the control. However, Simpson index was opposed. The stem and leaf decomposition significantly promoted the abundance and diversity of soil bacteria and fungi, accelerated the decomposition rate of stems and leaves, and promoted the cycle and transformation of soil nutrients.

**Key words:** herb; soil enzyme activity; microbial diversity.

本文由国家自然科学基金项目(41171226)和国家科技支撑计划项目(2015BAC01B01)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41171226) and the National Key Science and Technology Support Program (2015BAC01B01).

2016-04-20 Received, 2016-07-11 Accepted.

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shan@ms.iswc.ac.cn

退耕还林还草政策的实施使黄土高原植被恢复略见成效,不仅提高了植被覆盖率,生态环境也得到了明显改善<sup>[1]</sup>。宁夏南部山区是黄土高原植被恢复略显成效的地区之一,该区地表已产生枯落茎叶的累积,植物茎叶的分解提高了土壤养分含量,促进了该区植被的演替,物种的丰富为土壤提供了更多的枯落茎叶,枯落茎叶的分解改变了该区的微环境,微环境的改变又促进了植物茎叶的腐解和土壤腐殖化过程,增加了土壤养分含量。这种系统的建立促进了该区环境的良性循环,改善了土壤环境,同时也提高了生态环境功能<sup>[2-3]</sup>。植物茎叶枯落后进入土壤,作为土壤中分解者的物质和能量的来源,维持着整个生态系统的功能,是连接土壤和植被的纽带,影响着生态系统的物质和能量循环<sup>[4-5]</sup>。植物茎叶的分解是生态系统物质和能量循环的主要途径,同时也是逐步把养分归还给土壤的主要方式,因此研究植物茎叶分解过程对土壤养分和肥力的提高具有重要作用。

土壤酶是由植物根系和土壤动物分泌、土壤微生物生命活动释放的一类具有高度催化作用以及生物活性的蛋白质<sup>[6]</sup>。土壤酶活性是土壤肥力评价的重要指标之一,同时也是评价土壤自净能力的一个重要指标,它反映了土壤中各种生物化学过程的强度和方向<sup>[7]</sup>。土壤酶活性不仅影响土壤碳、氮循环,还会影响土壤的理化特性。不同种类的酶参与土壤中不同的物质循环过程,通过催化土壤中各种有机无机物质的转化,直接或间接影响着生态系统物质的循环和功能的发挥<sup>[8]</sup>。土壤酶活性的变化在一定程度上可以反映土壤肥力状况、物质转化状况以及土壤环境状况的变化,因此,土壤酶活性常被用作反映土壤生态变化的预警和敏感指标<sup>[9]</sup>。研究土壤酶活性变化特征规律,对改善土壤生态环境、提高土壤质量具有重要意义<sup>[10]</sup>。

本文野外模拟黄土高原宁南山区 3 种草本建群种长芒草、铁杆蒿、百里香的分解过程,研究植物茎叶分解对土壤酶活性及土壤微生物多样性的影响,

分析植物枯落茎叶与土壤微生物的作用机理,为该区域植被恢复工程提供科学依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

试验区域选在宁夏固原市东部的河川乡上黄村(35°59′—36°03′ N, 106°26′—106°30′ E),海拔为 1534~1822 m,气候属半干旱中温带向暖温带过渡季风气候,年均温 7 °C,年均降水量 420 mm,干燥指数 1.55~2.00。该区总土地面积为 7.6 km<sup>2</sup>,由小川河分为东西两部分,东部多为梁状丘陵,西部由西向东依次为梁、坪、台地形,沟坡地所占比例较高,占 90%,平缓台地仅占 8%,该区 51%的土地坡度为 15°~20°。试验区土壤类型为黄土母质上发育而来的黄绵土和淡黑垆土。主要植物类型有作为该区养殖业的饲料供给的人工苜蓿草地、柠条、山杏、山桃等人工灌木林,以长芒草(*Stipa bungeana*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)为建群种的撂荒地,种植小麦、燕麦、荞麦、玉米等的坡耕地。

### 1.2 试验设计

采集 3 种草本植物长芒草、铁杆蒿、百里香的茎、叶,清洗干净后于 105 °C 杀青 0.5 h,70 °C 烘干至恒量。植物样品初始养分含量见表 1。除铁杆蒿有机碳与长芒草和百里香差异显著外,其他元素各处理间差异均不显著。

采用凋落物分解袋法<sup>[11-13]</sup>研究植物茎叶的分解。2015 年 5 月选择一块 30 m×30 m 撂荒地,将地上植被进行清理,除去地表枯落物,用 PVC 板将样地分割成 30 cm×30 cm 的小格,每一格放一个处理。试验设置长芒草、铁杆蒿、百里香和对照 4 个处理,每处理 2 个重复。称取 50 g 的植物茎叶,装入 300 目的尼龙网袋中,该孔径阻止了土壤动物的进入。将尼龙网袋按长芒草、铁杆蒿、百里香的顺序依次放入格子中,紧贴地面,用少量土壤覆盖,另设不放样品的对照。用铁丝网将样地围起,防止人和动物的干扰。

表 1 植物茎叶初始化学性质  
Table 1 Initial chemical property in plant

处理 Treatment	有机碳 SOC (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total P (g·kg <sup>-1</sup> )	全钾 Total K (g·kg <sup>-1</sup> )	木质素 Lignin (%)	纤维素 Cellulose (%)
长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	452.01±5.23a	22.58±1.27a	1.88±0.05a	10.93±0.37a	6.3±0.2a	7.8±0.4a
铁杆蒿 <i>Artemisia sacrorum</i>	534.04±19.22b	20.66±6.97a	1.94±0.77a	12.50±2.69a	6.9±0.4a	8.4±1.8a
百里香 <i>Thymus mongolicus</i>	462.83±11.72a	17.47±1.20a	1.76±0.27a	12.65±0.47a	7.1±1.3a	9.7±0.9a

同列不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ ) Different small letters meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

表 2 土壤初始化学性质

Table 2 Initial chemical property in soil

处理 Treatment	铵态氮 Ammonium nitrogen (mg · kg <sup>-1</sup> )	硝态氮 Nitrate nitrogen (mg · kg <sup>-1</sup> )	有机碳 Soil organic carbon (g · kg <sup>-1</sup> )	速效磷 Available phosphorus (mg · kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total phosphorus (g · kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen (g · kg <sup>-1</sup> )	微生物生物量氮 Microbial biomass nitrogen (mg · kg <sup>-1</sup> )	微生物生物量碳 Microbial biomass carbon (mg · kg <sup>-1</sup> )
长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	17.21±5.04a	5.46±0.65a	6.92±0.26a	14.06±4.62a	0.67±0.04a	0.69±0.02a	20.27±7.38a	174.43±67.93a
铁杆蒿 <i>Artemisiasacrorum</i>	14.06±5.74ab	5.53±0.61a	7.02±0.53a	9.16±1.85a	0.68±0.09a	0.66±0.05a	29.76±12.11a	222.76±128.76a
百里香 <i>Thymus mongolicus</i>	13.29±6.28ab	5.48±0.81a	7.23±0.64a	9.79±2.06a	0.68±0.06a	0.67±0.04a	24.37±7.95a	235.43±101.66a
对照 Control	8.30±2.01b	5.47±0.51a	7.57±0.39a	11.20±6.32a	0.66±0.13a	0.71±0.03a	36.03±9.37a	245.19±45.10a

各处理土壤初始养分含量见表 2,除长芒草和对照土壤铵态氮差异显著外,其他元素在各处理间差异不显著。

每隔 45 d 采样一次,每次将分解袋取出,并取分解袋下 0~5 cm 土壤带回实验室,一部分放入 -20 °C 冰箱保存,剩下的风干后分别过 1 和 0.15 mm 筛,用于土壤全氮、全磷、有机碳含量以及土壤酶活性的测定。

2015 年 8 月 15 日,即分解第 435 天,在试验区取各处理和对照的 0~5 cm 土壤样品,将土壤样品储存于液氮中,用于 DNA 的提取以及土壤微生物多样性的分析。土壤样品 DNA 的提取以及多样性数据的分析由上海美吉生物有限公司完成。

### 1.3 测定项目与方法

**1.3.1 土壤和植物常量指标的测定** 土壤有机碳、硝态氮、铵态氮、速效磷、全氮、全磷以及植物的有机碳、全氮、全磷等指标的测定均参照《土壤农化分析》<sup>[14]</sup>的方法进行。

**1.3.2 土壤酶活性的测定** 蔗糖酶活性用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,结果以 mg 葡萄糖 · g<sup>-1</sup> (37 °C, 24 h) 表示;脲酶活性用苯酚钠-次氯酸钠比色测定,结果以 mg NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N · g<sup>-1</sup> (37 °C, 24 h) 表示;纤维素酶活性用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,结果以 72 h · g<sup>-1</sup> 土壤生成的葡萄糖毫克数表示;碱性磷酸酶活性用磷酸苯二钠比色法测定,结果以酚含量 mg · g<sup>-1</sup> (37 °C, 24 h) 表示<sup>[9]</sup>。

**1.3.3 土壤微生物生物量碳、氮及植物纤维素木质素含量的测定** 土壤微生物生物量碳用氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>浸提法-TOC 仪测定;土壤微生物生物量氮用氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>浸提法-分光光度计测定;植物纤维素、木质素含量用酸性洗涤法测定。

**1.3.4 土壤微生物多样性指数的测定** 序列数为测序时经过优化可用的微生物 DNA 片段。利用高通量测序技术,根据土壤微生物物种的 OTU (operational taxonomic units) 数对土壤微生物多样性进行分析,

对 97% 相似水平下的 OTU 进行生物信息统计分析。

### 1.4 数据处理

Ace ( $S_{ACE}$ )、Chao ( $S_{chao}$ )、Simpson ( $D$ ) 和 Shannon ( $H$ ) 指数能够反映微生物多样性,计算式<sup>[15]</sup>分别为:

$$S_{chao} = S_{obs} + \frac{n_1(n_1 - 1)}{2(n_2 + 1)}$$

$$H = - \sum_{i=1}^{S_{obs}} \frac{n_i}{N} \ln \frac{n_i}{N}$$

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{S_{obs}} n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)}$$

$$S_{ACE} = \begin{cases} S_{abund} + \frac{S_{rare}}{C_{ACE}} + \frac{n_1}{C_{ACE}}, & \text{for } \gamma_{ACE}^2 < 0.80 \\ S_{abund} \frac{S_{rare}}{C_{ACE}} + \frac{n_1}{C_{ACE}}, & \text{for } \gamma_{ACE}^2 \geq 0.80 \end{cases}$$

式中:  $S_{chao}$  为估计的 OUT 数目;  $S_{obs}$  为实际观测到的 OUT 数目;  $n_1$  为只含有一条序列的 OUT 数目;  $n_2$  为只含有两条序列的 OUT 数目;  $n_i$  为含有  $i$  条序列的 OUT 数目;  $N$  为所有序列数;  $S_{rare}$  为含有“abund”序列或者少于“abund”的 OUT 数目; abund 为“优势”OUT 的阈值,默认为 10。

采用 Excel 2013 和 SPSS 20.0 软件对数据进行统计分析。采用单因素 (one-way ANOVA) 和 Duncan 法进行方差分析和多重比较 ( $\alpha = 0.05$ ),用 Pearson 法对数据进行相关性分析。利用 Origin 9.0 软件作图。图表中数据为平均值 ± 标准差。

## 2 结果与分析

### 2.1 植物茎叶分解对土壤酶活性的影响

由图 1 可知,随着分解的进行,土壤脲酶活性呈现出升高、降低、再升高的变化趋势。分解 0~45 d (春季),各处理土壤脲酶活性呈升高趋势,升高幅度为:百里香 > 对照 > 长芒草 > 铁杆蒿;分解 45~135 d (夏季),各处理土壤脲酶活性均降低;345~390 d

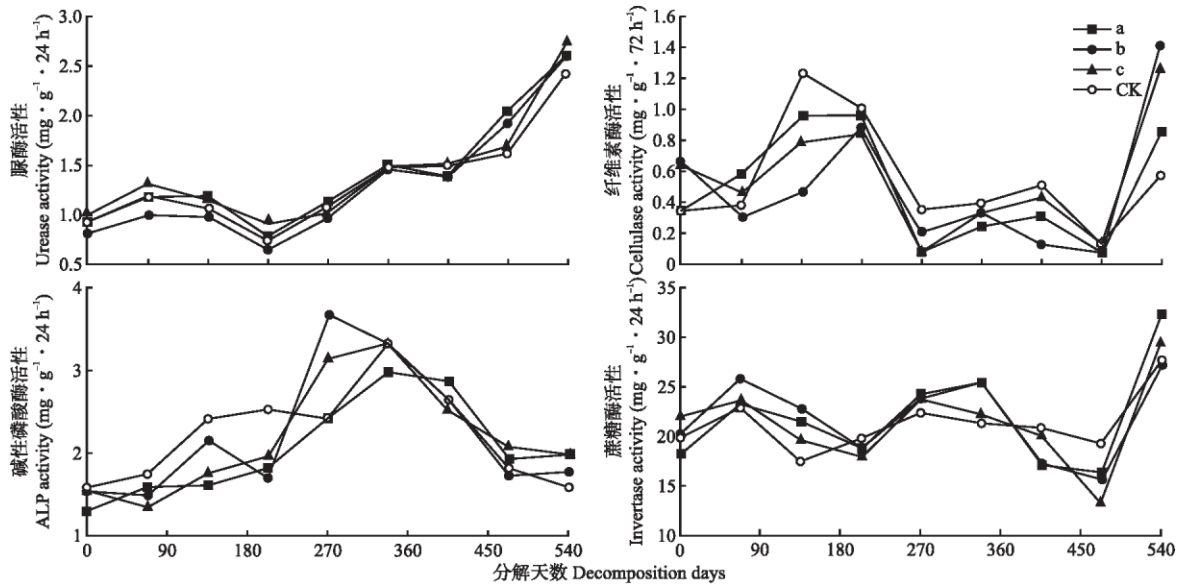


图 1 植物茎叶分解对土壤酶活性的影响

Fig.1 Effects of decomposition of stem and leaf of plants on soil enzyme activity.

a) 长芒草 *Stipa bungeana*; b) 铁杆蒿 *Artemisia sacrorum*; c) 百里香 *Thymus mongolicus*; CK: 对照 Control.

(夏季) 土壤脲酶活性略微降低, 到分解末期(480 d) 呈升高趋势, 土壤脲酶的增加量大小为: 百里香 > 长芒草 > 铁杆蒿 > 对照.

随着分解的进行, 纤维素酶活性呈现出无规律的变化趋势. 在植物茎叶分解的大部分时间(45 ~ 390 d), 对照土壤纤维素酶活性均高于其他处理; 分解 300 ~ 435 d, 各处理土壤脲酶活性呈现出先升高再降低的趋势, 其中, 铁杆蒿处理先于其他处理降低; 分解末期, 各处理土壤纤维素酶活性均提高.

在整个分解过程中, 各处理土壤碱性磷酸酶活性呈现出先升高后降低的趋势. 分解 0 ~ 135 d, 对照土壤碱性磷酸酶活性大于添加植物茎叶处理; 分解 300 d, 铁杆蒿处理土壤碱性磷酸酶活性达到最高, 为  $3.68 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$ , 之后各处理碱性磷酸酶活性开始下降; 到分解末期, 各处理土壤碱性磷酸酶活性均有所增加, 增加幅度大小为: 长芒草 > 百里香 > 铁杆蒿 > 对照.

各处理土壤蔗糖酶活性在整个分解过程中表现为先升高后降低的趋势, 分解末期土壤蔗糖酶活性

均达到最高, 其中, 长芒草最大, 为  $32.40 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$ , 铁杆蒿最小, 为  $27.32 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$ .

### 2.2 植物茎叶分解对土壤微生物多样性的影响

由表 3 可知, 在 3% 分类水平下, 不同处理土壤细菌多样性指数有所差异. 各处理可用序列数一致, 为 13203 条. OTU 数、Ace 指数、Chao 指数、Shannon 指数均表现为 3 个处理间差异不显著, 但均显著大于对照; Simpson 指数表现为 3 个处理间差异不显著, 但均显著小于对照.

由表 4 可以看出, 在 3% 分类水平下, 各处理可用序列数均为 17805. OTU 数在 3 个处理之间差异不显著, 铁杆蒿 OTU 数显著大于对照; Ace 指数和 Chao 指数均表现为 3 个处理之间差异不显著, 并且与对照之间差异也不显著; 3 个处理 Shannon 指数显著大于对照; Simpson 指数表现为 3 个处理之间差异不显著, 但均显著小于对照.

### 2.3 土壤初始化学性质与分解末期土壤酶活性的相关关系

由表 5 可知, 长芒草处理下, 分解末期土壤蔗糖

表 3 不同处理土壤细菌多样性指数

Table 3 Soil bacterial diversity indices in different treatments

处理 Treatment	序列数 Sequence number	OTU	Ace	Chao	Shannon	Simpson
长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	13203	1276±27a	1472±49a	1486±62a	6.18±0.11a	0.0048±0.0011a
铁杆蒿 <i>Artemisia sacrorum</i>	13203	1281±14a	1442±46a	1450±53a	6.26±0.04a	0.0043±0.0003a
百里香 <i>Thymus mongolicus</i>	13203	1272±16a	1451±44a	1462±49a	6.20±0.03a	0.0042±0.0002a
对照 Control	13203	1103±2b	1271±45b	1277±56b	5.84±0.05b	0.0083±0.0007b

表 4 不同处理土壤真菌多样性指数

Table 4 Soil fungal diversity indices in different treatments

处理 Treatment	序列数 Sequence number	OTU	Ace	Chao	Shannon	Simpson
长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	17805	78±0ab	94±16a	103±29a	2.70±0.10a	0.13±0.03a
铁杆蒿 <i>Artemisia sacrorum</i>	17805	90±2a	97±7a	96±7a	2.77±0.14ab	0.12±0.03a
百里香 <i>Thymus mongolicus</i>	17805	80±9ab	92±20a	94±21a	2.93±0.02b	0.09±0.00a
对照 Control	17805	67±0b	81±12a	79±11a	2.31±0.06c	0.21±0.03b

表 5 土壤初始化学性质与酶活性的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between soil initial chemical property and enzyme activity

		铵态氮 Ammonium nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen	有机碳 Soil organic carbon	速效磷 Available phosphorus	全磷 Total phosphorus	全氮 Total nitrogen	微生物 生物量氮 Microbial biomass nitrogen	微生物 生物量碳 Microbial biomass carbon
长芒草	脲酶 Urease	0.809	0.656	-0.920	0.920	-0.272	-0.514	-0.392	-0.582
<i>Stipa</i>	蔗糖酶 Sucrase	0.474	0.814	-0.604	0.156	0.116	-0.985*	0.664	-0.688
<i>bungeana</i>	纤维素酶 Cellulases	-0.878	-0.742	0.963*	-0.860	0.145	0.578	0.354	0.684
	磷酸酶 Phosphatase	0.628	0.295	-0.389	0.094	0.600	0.146	-0.686	-0.481
铁杆蒿	脲酶 Urease	0.714	0.364	-0.595	0.257	0.915	-0.401	0.493	-0.573
<i>Artemisia</i>	蔗糖酶 Sucrase	-0.931	-0.689	0.631	-0.728	-0.595	0.694	0.086	0.926
<i>sacrorum</i>	纤维素酶 Cellulases	-0.891	-0.970*	0.792	-0.998**	-0.351	0.959*	0.166	0.948
	磷酸酶 Phosphatase	-0.529	-0.733	0.376	-0.8740	0.211	0.697	0.606	0.689
百里香	脲酶 Urease	-0.574	-0.503	0.441	-0.441	0.094	0.607	0.333	0.589
<i>Thymus</i>	蔗糖酶 Sucrase	0.797	0.772	-0.658	0.269	0.516	-0.911	-0.519	-0.813
<i>mongolicus</i>	纤维素酶 Cellulases	-0.969*	-0.986*	0.988*	-0.737	-0.842	0.918	-0.236	0.964*
	磷酸酶 Phosphatase	-0.671	-0.705	0.608	-0.049	-0.890	0.788	0.366	0.677
对照	脲酶 Urease	0.463	-0.033	-0.176	-0.130	0.791	0.723	0.821	-0.859
Control	蔗糖酶 Sucrase	-0.572	0.931	0.842	0.846	0.819	0.643	0.173	-0.224
	纤维素酶 Cellulases	-0.938	0.864	0.594	0.953*	0.421	-0.078	0.160	0.464
	磷酸酶 Phosphatase	-0.619	0.311	-0.101	0.503	0.158	-0.486	0.495	0.556

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

酶活性与土壤初始全氮含量呈显著负相关,分解末期土壤纤维素酶活性与土壤初始有机碳含量呈显著正相关;铁杆蒿处理下,分解末期土壤纤维素酶活性与土壤初始硝态氮含量和速效磷含量均呈显著负相关,与土壤初始全氮含量呈显著正相关;百里香处理下,分解末期土壤纤维素酶活性与土壤初始铵态氮和硝态氮含量呈显著负相关,与土壤初始有机碳含量和微生物生物量碳(MBC)均呈显著正相关;对照下,分解末期土壤纤维素酶活性与土壤初始速效磷含量呈显著正相关。

### 3 讨 论

土壤酶参与土壤中复杂的生物化学反应过程,如植物茎叶的分解及各种有机无机化合物的合成与分解。土壤酶直接影响土壤中营养元素的有效化,因此它能够在一定程度上反映土壤中养分的分解转化状况<sup>[16]</sup>。目前,对土壤酶活性和外界环境因子的关系做了大量研究,发现水热条件与土壤酶活性密

切相关<sup>[17-18]</sup>。本研究表明,添加植物茎叶处理的土壤酶活性变化趋势和对照基本相同,说明外界水热条件的变化对土壤酶活性有巨大影响。土壤酶活性与土壤养分的存在状况、形态和含量等相关<sup>[19]</sup>,其中全氮能增加植物地下部分的生物量,促进根际微生物的生长,增强土壤酶活性<sup>[20]</sup>;土壤中有机质通过改变土壤的孔隙度及团粒结构等来提高其缓冲作用和持水能力,为土壤酶的产生提供条件<sup>[21]</sup>;无机磷可以促进植物根系的生长,提高土壤微生物对酶的合成,进而提高土壤酶活性<sup>[9]</sup>。

植物茎叶的分解速率、分解程度及物质传递和转化受其自身物质组成及土壤理化性质的影响,植物茎叶分解过程中营养物质在植物-土壤生态系统中不断循环和传递,土壤的初始理化性质通过改变植物茎叶的分解来改变生态系统的微环境,进而影响分解末期的物质组成,因此土壤初始化学性质对分解末期土壤酶活性存在间接影响。分解后期,土壤性质会影响植物茎叶分解过程中物质在植物-土壤

系统传递的状况,因此对土壤初始化学性质与分解末期酶活性进行相关性分析能更多地了解土壤酶活性的影响因素。侯彦会等<sup>[22]</sup>研究发现,放牧草地土壤脲酶活性与土壤肥力因子(有机碳、全氮、速效氮、速效磷等)呈显著正相关,且土壤全氮是影响土壤脲酶活性的最主要因子。李为等<sup>[23]</sup>研究也表明,土壤中水解酶类的活性与土壤养分水平密切相关。土壤脲酶活性的高低在一定程度上反映土壤的供氮水平<sup>[24]</sup>。本研究中,植物茎叶分解过程中土壤脲酶活性整体呈上升趋势,分解的前中期(45~135 d,夏季)各处理土壤脲酶活性有所下降,分解中后期(345~390 d,夏季)各处理土壤脲酶活性无明显变化,这是因为该期降雨增多,土壤通气性减弱,微生物活性受到抑制,植物茎叶向土壤中输入的营养物质较少,最终导致土壤脲酶活性降低,另一方面 $Fe^{2+}$ 等还原性因子的增多会影响土壤酶的释放,从而影响土壤酶活性<sup>[25]</sup>。植物茎叶的输入使得各处理在分解末期土壤脲酶活性均有所增加,增加量表现为:百里香>长芒草>铁杆蒿>对照。在植物茎叶分解的大部分时间(45~390 d),对照土壤纤维素酶活性均高于其他处理,这可能是因为单种植物在分解时微生物种类和数量减少,不利于土壤纤维素酶活性的增加<sup>[9]</sup>。土壤碱性磷酸酶可以将土壤中磷组分转化为可以利用的无机态磷,在有机物质矿化过程中具有重要作用<sup>[26]</sup>。刘存歧等<sup>[27]</sup>在对湿地土壤酶活性的研究中发现,土壤碱性磷酸酶活性与土壤中无机磷含量呈显著负相关,这与本研究结果相似。分解前期土壤碱性磷酸酶活性低于对照,这可能与碱性磷酸酶矿化土壤磷素使无机磷含量增加有关。

土壤微生物在土壤生态系统循环中起着重要作用,土壤细菌和真菌作为土壤微生物的重要组成部分在土壤营养元素循环、有机质的形成和分解、土壤肥力的提高和保持、改善生态环境等方面起着非常作用<sup>[28-29]</sup>。不同植物类型土壤微生物多样性差异显著,许多研究表明,土壤中细菌>放线菌>真菌<sup>[30-32]</sup>,与本研究结果一致。土壤 Ace 指数和 Chao 指数是计算土壤菌种丰度的指数,Shannon 指数和 Simpson 指数是计算土壤菌种多样性的指数,Simpson 指数值越大,说明群落多样性越低,Shannon 值越大,说明群落多样性越高。土壤样品的微生物多样性分析显示,分解 435 d 后长芒草处理土壤细菌的 Ace 指数和 Chao 指数均比其他处理大,其中对照 Ace 指数和 Chao 指数最小,说明长芒草经过 435 d 的分解使土壤细菌的丰度明显提高。对照 Ace 指数、Chao 指数、

Shannon 指数以及 Simpson 指数均与其他处理差异显著,其他处理间差异不显著,这说明植物茎叶的分解可以提高土壤细菌的物种多样性,增加土壤中细菌的丰度。与土壤细菌多样性相比,各添加植物茎叶的处理土壤真菌的 Ace 指数和 Chao 指数均比对照高,表明植物茎叶的分解提高了土壤真菌的丰度。各处理土壤真菌的 Shannon 指数均大于对照,说明植物茎叶的分解可以提高土壤真菌的多样性,对照土壤 Simpson 指数大于添加植物茎叶处理的土壤,且对照与其他处理差异显著。

#### 参考文献

- [1] Wang C (王超), Zhen L (甄霖), Du B-Z (杜秉贞), et al. Assessment of the impact of Grain for Green project on farmers' livelihood in the Loess Plateau. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2014, 22(7): 850-858 (in Chinese)
- [2] Su J (苏静), Zhao S-W (赵世伟), Ma J-D (马继东). 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)
- [3] Wang X-E (王相娥), Xue L (薛立), Xie T-F (谢腾芳). A review on litter decomposition. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2009, 40(6): 1473-1477 (in Chinese)
- [4] Lin B (林波), Liu Q (刘庆), Wu Y (吴彦), et al. Advances in the studies of forest litter. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2004, 23(1): 60-64 (in Chinese)
- [5] Ma L (马琳), Li X-B (李学斌), Xie Y-Z (谢应忠). The processes and functional study of grassland litter decomposition. *Prataculture & Animal Husbandry* (草业与畜牧), 2011(12): 7-12 (in Chinese)
- [6] Kong A-H (孔爱辉), Wu J-K (吴京科). Research advances for soil hydrolase activity in China. *Modern Agricultural Science and Technology* (现代农业科技), 2012(16): 251-253 (in Chinese)
- [7] Guan S-Y (关松荫), Zhang D-S (张德生), Zhang Z-M (张志明). *Soil Enzyme and Its Study Method*. Beijing: China Agriculture Press, 1986 (in Chinese)
- [8] Rutigliano FA, Castaldi S, D'ascoli R, et al. Soil activities related to nitrogen cycle under three plant cover types in Mediterranean environment. *Applied Soil Ecology*, 2009, 43: 40-46
- [9] Zhou L-K (周礼恺). *Soil Enzymology*. Beijing: Science Press, 1987 (in Chinese)
- [10] Wan Z-M (万忠梅), Wu J-G (吴景贵). Study progress on factors affecting soil enzyme activity. *Journal of Northwest A&F University* (Natural Science) (西北农林科技大学学报: 自然科学版), 2005, 33(6): 87-90 (in Chinese)
- [11] Hobbie SE. Interactions between litter lignin and soil nitrogen availability during leaf litter decomposition in a Hawaiian montane forest. *Ecosystems*, 2000, 3: 484-494
- [12] Wu H-T (武海涛), Lyu X-G (吕宪国), Yang Q (杨

- 青), *et al.* The early-stage litter decomposition and its influencing factors in the wetland of the Sanjiang Plain, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, 27(10): 4027-4035 (in Chinese)
- [13] Lin H (林晗), Chen H (陈辉), Wu C-Z (吴承祯), *et al.* Effects of decomposition of *Aleurites montana* and *Phyllostachys pubescences* mixed foliage litter on activity of soil enzymes. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* (应用与环境生物学报), 2012, 18(4): 539-545 (in Chinese)
- [14] Bao S-D (鲍士旦). Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2005 (in Chinese)
- [15] Wang S-J (王圣洁), Liu J-A (刘君昂), He Y-H (何苑嶸), *et al.* Soil microfauna diversity among *Cunninghamia lanceolata* plantations based on pyrosequencing. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, 25(6): 1661-1668 (in Chinese)
- [16] Cai Y (蔡艳), Xue Q-H (薛泉宏), Hou L (侯琳), *et al.* Microbe population of rhizosphere soil of several arbores-bushes on Loess Plateau. *Shaanxi Forest Science and Technology* (陕西林业科技), 2002(1): 4-9 (in Chinese)
- [17] Martens DA, Johanson JB, Frankenberger WT. Production and persistence of soil enzymes with repeated additions of organic residues. *Soil Science*, 1992, 153: 53-61
- [18] Niu S-Q (牛世全), Li J-F (李君锋), Yang T-T (杨婷婷), *et al.* The relationships of soil microbial biomass, physicochemical factors and soil enzyme activities in Maqu swamp wetland of Gannan prefecture. *Journal of Glaciology and Geocryology* (冰川冻土), 2010, 32(5): 1022-1029 (in Chinese)
- [19] Kandeler E, Luxhel J, Tschirko M, *et al.* Xylanase, intertase and protease at the soil-litter interface of a loamy sand. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31: 1171-1179
- [20] Tu L-H (涂利华), Hu H-L (胡红玲), Hu T-X (胡庭兴), *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition on soil enzyme activities in a *Betula luminifera* plantation in Rainy Area of West China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, 23(8): 2129-2134 (in Chinese)
- [21] Jia M-L (贾曼莉), Guo H (郭宏), Li H-K (李会科). Mineralization of soil organic carbon and its relationship with soil enzyme activities in apple orchard in Weibei. *Environmental Science* (环境科学), 2014, 35(7): 2777-2784 (in Chinese)
- [22] Hou Y-H (侯彦会), Zhou X-H (周学辉), Jiao T (焦婷), *et al.* A preliminary study on the relationship between soil urease activity and soil fertility in the grazing grasslands of Yongchang County, Gansu Province. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2009, 8(6): 111-116 (in Chinese)
- [23] Li W (李为), Yu L-J (余龙江), Li T (李涛), *et al.* Seasonal and spatial dynamics of soil enzyme activities and its relationship to soil fertility in Karst ecosystem: A case study of Guilin Yaji Karst experimental site. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2008, 27(1): 260-266 (in Chinese)
- [24] An S-S (安韶山), Huang Y-M (黄懿梅), Zheng F-L (郑粉莉). 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)
- [25] Kang H, Freeman C. Phosphatase and arylsulphatase activities in wetland soils: Annual variation and controlling factors. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31: 449-454
- [26] Chrost RJ, Siuda W, Halemejko GZ. Long term studies on alkaline phosphatase activity (APA) in a lake with fish-aquaculture in relation to lake eutrophication and phosphorus cycle. *Archiv fur Hydrobiologie*, 1984, 70: 1-32
- [27] Liu C-Q (刘存歧), Lu J-J (陆健健), Li H-P (李贺鹏), *et al.* The landward changes of soil enzyme activities in a tidal flat wetland of the Yangtze River estuary and correlations with physico-chemical factors. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, 27(9): 3664-3669 (in Chinese)
- [28] Zhang J (张晶), Zhang H-W (张惠文), Li X-Y (李新宇), *et al.* Research advances in soil fungal diversity and molecular ecology. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, 15(10): 1958-1962 (in Chinese)
- [29] Liu W-Q (刘玮琦), Mao Z-C (茆振川), Yang Y-H (杨宇红), *et al.* Analysis of soil bacterial diversity by using the 16S rRNA gene Library. *Acta Microbiologica Sinica* (微生物学报), 2008, 48(10): 1344-1350 (in Chinese)
- [30] Bardgett RD, Cook R. Functional aspects of soil animal diversity in agriculture grasslands. *Applied Soil Ecology*, 1998, 10: 263-276
- [31] Zhang C-X (张成霞), Nan Z-B (南志标). Research progress on effect of grazing on soil microbes of grassland. *Pratacultural Science* (草业科学), 2010, 27(1): 65-70 (in Chinese)
- [32] Wang Y-P (王延平), Zhang W-T (张文婷), Lai H-X (来航线), *et al.* Microbial populations in different vegetations in sloping field on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, 28(9): 4229-4243 (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的相互作用机制研究. E-mail: leexin0828@126.com

责任编辑 孙菊

李鑫, 李娅芸, 安韶山, 等. 宁南山区典型草本植物茎叶分解对土壤酶活性及微生物多样性的影响. *应用生态学报*, 2016, 27(10): 3182-3188

Li X, Li Y-Y, An S-S, *et al.* Effects of stem and leaf decomposition in typical herbs on soil enzyme activity and microbial diversity in the south Ningxia loess hilly region of Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(10): 3182-3188 (in Chinese)