

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.032.

赵满兴, 杨帆, 马文全, 等. 黄土丘陵区沙棘人工林土壤养分及酶活性季节变化[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 58-66.

ZHAO Manxing, YANG Fan, MA Wenquan, et al. Seasonal Change of Soil Nutrient and Enzyme Activities in *Hippophae rhamnoides* Plantation with Different Stand Ages in Loess Hilly Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 58-66.

# 黄土丘陵区沙棘人工林土壤养分及酶活性季节变化

赵满兴<sup>1,2</sup>, 杨帆<sup>1</sup>, 马文全<sup>1</sup>, 王俊<sup>1</sup>, 白二磊<sup>1</sup>

(1.延安大学 生命科学学院, 陕西 延安 716000; 2.陕西省区域生物资源保育与利用工程技术研究中心, 陕西 延安 716000)

**摘 要:**为分析不同年限沙棘人工林的土壤养分和酶活性的时空变化规律,采用时空互代法,以志丹县金丁镇不同种植年限沙棘人工林(20年生沙棘林、15年生沙棘林、5年生沙棘林)为研究对象,以谷子地作为对照,研究了土壤养分和酶活性季节变化、空间分布及其相关关系。结果表明:随着种植年限的增加,沙棘人工林显著地增加了土壤有机质、碱解氮、有效磷、有效钾和酶活性。土壤养分和酶活性具有表聚性,随着土层加深含量在下降且土层间差异显著。沙棘人工林和谷子地土壤养分和酶活性均有明显的季节变化特征。0—30 cm 土层土壤有机质表现为春季和秋季较高,夏季和冬季较低。碱解氮和有效磷均为春季最高,秋季最低,而有效钾为冬季最高,夏季最低。土壤脲酶季节变化规律为春夏较高,秋冬季较低。蔗糖酶活性春夏季较高,夏秋季较低。过氧化氢酶呈现出与脲酶和蔗糖酶不同的响应特征。土壤养分与土壤酶相关性密切,土壤脲酶和蔗糖酶可以作为评价土壤肥力的指标。综上,在陕北黄土丘陵区,营造沙棘林年限越长,提高土壤养分和酶活性效果越明显。

**关键词:**黄土丘陵区; 沙棘人工林; 土壤养分; 酶活性

**中图分类号:** S153.6; S154.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2023)02-0058-09

## Seasonal Change of Soil Nutrient and Enzyme Activities in *Hippophae rhamnoides* Plantation with Different Stand Ages in Loess Hilly Region

ZHAO Manxing<sup>1,2</sup>, YANG Fan<sup>1</sup>, MA Wenquan<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>1</sup>, BAI Erlei<sup>1</sup>

(1.College of Life Sciences, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000, China; 2.Shaanxi Engineering and Technological Research Center for Conversation and Utilization of Regional Biological Resources, Yan'an, Shaanxi 716000, China)

**Abstract:** In order to investigate the spatial distribution characteristics of soil nutrients and enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* plantation with different stand ages in loess hilly region, based on the method of spatiotemporal interaction, three different stand ages of *Hippophae rhamnoides* plantation, such as 5-year-old, 15-year-old and 20-year-old were selected in Jinding Town of Zhidan County. The farmland was selected as the control. Soil samples were collected in 0—10 cm, 10—20 cm and 20—30 cm soil layers. The results showed that the measures of returning farmland to forest significantly increased the soil nutrients and enzyme activities, especially in the 0—10 cm soil layer; there were significant differences in the above indexes among different soil layers and between different stand ages of *Hippophae rhamnoides* plantation and farmland; soil organic matter contents in spring and autumn were higher than those in summer and winter; alkaline hydrolysis nitrogen and available phosphorus in spring were the highest and lowest in autumn; available potassium was highest in winter and lowest in summer. Urease activity were higher in spring and summer than that in autumn and winter. Sucrase activity was higher in spring and winter than that in summer and autumn; catalase showed an inverted change trend with seasonal changes; correlation analysis showed that soil

收稿日期: 2021-12-08

修回日期: 2022-01-07

资助项目: 国家自然科学基金“可溶性有机氮在陕北黄土高原植被恢复中氮素转化中的作用”(41761068)

第一作者: 赵满兴(1971—), 男, 陕西合阳人, 博士, 教授, 主要从事植物养分调控研究。E-mail: zhaomanxing@163.com

<http://stbcy.paperonce.org>

nutrients had a positive correlation with urease activity and sucrase activity. To sum up, *Hippophae rhamnoides* plantation is a suitable afforestation model, which can help improve soil nutrient and enzyme activities.

**Keywords:** loess hilly region; *Hippophae rhamnoides* plantation; soil nutrient; enzyme activities

土壤有机质和速效养分是评价土壤自然肥力的主要因素之一<sup>[1]</sup>。土壤酶活性在很大程度上反映土壤物质循环与转化的强度,被用来反映土壤肥力状况<sup>[2]</sup>。土壤养分与土壤酶关系紧密<sup>[3]</sup>,国内外学者们针对土壤养分和酶活性的关系进行了大量研究<sup>[4-7]</sup>。张海鑫等<sup>[8]</sup>研究了黄土高原子午岭林区主要林分化学计量特征,认为与侧柏〔*Platycladus orientalis* (L.) Franco〕、辽东栎(*Quercus wutaishansea* Mary)相比,油松(*Pinus tabuliformis* Carr.)、刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)是黄土高原森林区适宜植被恢复的造林树种。王春燕等<sup>[9]</sup>研究植被演替对土壤养分的影响,认为土壤有机质和全氮有表层聚集效应。刘学彤等<sup>[10]</sup>分析了水蚀风蚀交错带不同退耕模式对土壤有机碳及全氮的影响,认为土壤有机碳和全氮受退耕年限的影响较大。土壤酶活性与生态环境各要素显著相关,对环境变化表现敏感,可作为评价土壤质量及土壤修复状况的重要指标<sup>[11-13]</sup>。季节变化对土壤养分和酶活性产生影响,土壤酶活性随季节是否存在显著变化以及有无变化规律还存在争议,且对于植被恢复区的土壤酶活性动态分析报道也尚不全面。上述研究的人工林林龄差异较大,植被恢复年限差别较大,植被类型多样,得出了一些有意义的结论。

黄土高原地区坡地较多,沟壑纵横,土壤垂直理发育良好,易于发生水蚀<sup>[14-15]</sup>,可能会造成土壤养分和酶活性沿土壤剖面垂直分布及不同季节分布存在差异<sup>[16]</sup>。沙棘是延安北部主要的退耕还林树种之一,有很强的固氮能力<sup>[17]</sup>。1999 年退耕栽植的沙棘人工林对当前土壤养分的改善作用、土壤养分随土层和季节变化的情况受到关注。目前,沙棘人工林与土壤肥力关系密切的土壤养分和酶活性大小及时空变化规律尚不清楚,为了解陕北黄土丘陵区沙棘人工林对土壤养分和酶活性的影响,本文以志丹县金丁镇不同种植年限的沙棘人工林为研究对象,通过研究不同种植年限沙棘人工林土壤养分和酶活性时空变化,以期揭示沙棘人工林土壤肥力的影响机理,为评价生态恢复效果和选择适宜的后续管理提供依据。

## 1 研究区概况

延安市志丹县属半干旱气候区,年平均气温 7.8℃,年平均降水量 450~490 mm,年平均无霜期 140 d,平均海拔 1 300 m,土壤类型为黄绵土,土壤质地为沙壤土。

自 1999 年西部大开发战略实施以来,该县通过人工造林和封山育林等方式加速恢复当地植被,取得明显的效果。

## 2 材料与方法

### 2.1 土样采集与分析

供试土样分别与 2018 年 3 月、6 月、9 月、11 月采集于志丹县金丁镇退耕还林区,在立地条件相似的地段,选择不同种植年限(5 年生、15 年生、20 年生)的沙棘林作为样地,并选取样地周围谷子地作为对照进行样品采集,谷子地种植制度为一年一熟,春季施三元复合肥,用量为 450 kg/hm<sup>2</sup>。样地基本情况见表 1。每个样地按照不同坡位(坡上、坡中和坡下)分别设置 3 个 10 m×10 m 的样方,共计 36 个样方。在样方内随机选取 5 个取样点,采用分层多点混合法取土样。在每个取样点分 0—10,10—20,20—30 cm 土层取样。采集的土壤样品经自然风干,用 2 mm 直径的筛子过筛,捡去杂质,将来自同一样方同一土层的土样混匀,用四分法取样,用于土壤理化性质指标的测定。土壤有机质、碱解氮、有效磷、有效钾,按照《土壤农化分析》<sup>[18]</sup>测定。

表 1 样地基本信息

样地类型	经度 E	纬度 N	坡度/(°)	海拔/m
5 a 沙棘	108°40′60″	36°71′30″	19	1253
15 a 沙棘	108°24′65″	36°43′36″	32	1315
20 a 沙棘	108°40′70″	36°71′36″	24	1241
谷子地	108°40′22″	36°71′31″	19	1249

部分样品于 4℃下保存,测定土壤酶活性。土壤脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定,活性以 24 h 后 1 g 土壤中 NH<sup>3</sup>-N 的毫克数表示;土壤蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法,活性以 24 h 后 1 g 土壤葡萄糖的毫克数表示;过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法测定,活性以 1 g 土壤 1 h 内消耗的 0.1 mol/L 高锰酸钾体积数表示。

### 2.2 数据处理与统计分析

使用 SPSS 软件对数据进行单因素方差分析,多重比较采用最小显著差法,显著性检验水平  $\alpha=0.05$ 。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤有机质季节变化与空间分布特征

土壤有机质含量在不同植被类型、季节和土层间

在 0.05 水平上均存在显著差异性(表 2)。不同植被类型比较,土壤有机质含量大小关系为:20 a 沙棘林>15 a 沙棘林>5 a 沙棘林>谷子地。随着种植年限的增加,土壤有机质含量在显著增加。0—30 cm 土层有机质含量的变化范围为 2.13~18.3 g/kg,相比谷子地,5 a 沙棘、15 a 沙棘和 20 a 沙棘有机质含量分别增加了 20.00%,67.04%,121.84%。

不同土层间比较,各植被类型土壤有机质含量随土层深度变化显著,随着土层加深,土壤有机质含量下降。0—10 cm,10—20 cm 和 20—30 cm 土层有机

质平均含量分别为 11.33,7.06,5.47 g/kg,土壤有机质具有明显的表聚现象。

不同季节比较,4 种植被类型有机质含量的平均值随季节变化不显著( $p>0.05$ )。0—10 cm 土层,土壤有机质含量均呈现先降低(3—6 月),后升高(6—9 月)再升高(9—12 月)趋势。10—20 cm 土层,土壤有机质含量随季节变化呈现先升高(3—6 月),后降低(6—9 月)再升高(9—12 月)的趋势。20—30 cm 土层,土壤有机质含量随季节变化呈现先升高(3—6 月),后降低(6—12 月)的趋势。

表 2 不同种植年限土壤有机质含量 g/kg

土层/cm	样地类型	3 月	6 月	9 月	11 月	平均
0—10	5 a 沙棘	8.87±0.88Bab	7.83±2.77Ab	11.04±1.05Ba	10.48±1.83BCab	9.55
	15 a 沙棘	13.04±2.81ABab	9.93±1.23Ab	15.61±2.35Aa	12.32±2.40Bab	12.73
	20 a 沙棘	18.30±6.06Aa	10.31±0.92Aa	16.70±2.09Aa	16.41±1.44Aa	15.43
	谷子地	7.56±0.87Ba	7.57±0.14Aa	5.08±0.15Cb	7.46±1.20Ca	6.92
	平均	12.11	8.91	12.11	12.17	
10—20	5 a 沙棘	4.98±2.97Ba	6.31±1.83Ba	5.00±0.79BCa	3.98±0.31Ba	5.07
	15 a 沙棘	6.55±0.92Ba	8.07±0.54ABa	6.11±1.31Ba	7.86±1.86Aa	7.15
	20 a 沙棘	12.85±2.12Aa	11.36±3.49Aa	10.61±2.76Aa	4.91±0.48Bb	9.94
	谷子地	6.06±0.76Ba	4.76±0.56Bb	2.86±0.22Cc	3.70±0.51Bbc	4.35
	平均	7.61	7.63	6.15	6.86	
20—30	5 a 沙棘	4.18±1.39Ba	4.43±1.89Ba	3.64±1.59Aa	2.16±0.73Ba	3.60
	15 a 沙棘	4.83±0.60Bb	7.29±0.80Aa	4.87±1.84Ab	4.99±1.21ABab	5.50
	20 a 沙棘	8.51±1.25Aa	9.33±2.09Aa	8.45±3.82Aa	7.01±2.72Aa	8.33
	谷子地	3.77±0.72Ba	4.18±1.11Ba	5.61±1.05Aa	2.13±0.05Ba	3.92
	平均	5.41	6.81	5.65	4.01	

注:表中数据为不同坡位(坡上、坡中和坡下)的平均值±标准差,不同大写字母表示同一季节不同植被间差异性显著( $n=12,p<0.05$ ),小写字母表示同一植被不同季节间差异显著( $n=12,p<0.05$ )。下同。

### 3.2 土壤碱解氮季节变化与空间分布特征

土壤碱解氮含量在不同植被类型、季节和土层间在 0.05 水平上均存在显著差异性(表 3)。不同植被类型比较,土壤碱解氮含量大小关系为:20 a 沙棘林>15 a 沙棘林>5 a 沙棘林>谷子地。随着恢复年限的增加,土壤碱解氮含量在显著增加。0—30 cm 土层碱解氮含量的变化范围为 9.93~60.62 mg/kg,相比谷子地,5 a 沙棘、15 a 沙棘和 20 a 沙棘碱解氮含量分别增加了 15.67%,52.94%,101.94%。

不同土层间比较,各植被类型土壤碱解氮含量随土层深度变化显著,随着土层加深,土壤碱解氮含量下降。0—10 cm,10—20 cm 和 20—30 cm 土层碱解氮平均含量分别为 31.89,24.69,19.11 g/kg,土壤碱解氮具有明显的表聚现象。

不同季节比较,4 种植被类型碱解氮含量的平均值随季节变化显著( $p<0.05$ )。3 个土层均为春季碱解氮含量最高,秋季相对最低。0—10 cm 土层,土壤碱解氮

含量均呈现先降低后升高的趋势,平均含量大小关系为:春季>夏季>冬季>秋季。10—20 cm 土层,土壤碱解氮含量季节间变化趋势与 0—10 cm 土层相同,平均含量大小关系为:春季>夏季>冬季>秋季。20—30 cm 土层,土壤碱解氮含量随季节变化呈现降低的趋势,平均含量大小关系为:春季>夏季>秋季>冬季。

### 3.3 土壤有效磷季节变化与空间分布特征

土壤有效磷含量在不同植被类型、季节和土层间在 0.05 水平上均存在显著差异性(表 4)。不同植被类型比较,土壤有效磷含量大小关系为:20 a 沙棘林>15 a 沙棘林>5 a 沙棘林>谷子地。随着恢复年限的增加,土壤有效磷含量在显著增加。0—30 cm 土层有效磷含量的变化范围为 0.63~16.22 mg/kg,相比谷子地,5 a 沙棘、15 a 沙棘和 20 a 沙棘有效磷含量分别增加了 121.01%,171.74%,212.30%。

不同土层间比较,各植被类型土壤有效磷含量随土层深度变化显著,随着土层加深,土壤有效磷含量

呈现升高趋势。0—10 cm,10—20 cm 和 20—30 cm 土层有效磷平均含量分别为 5.94,6.64,7.60 g/kg。10—20 cm 土层,土壤有效磷含量均呈现先降低后升高的趋势,平均含量大小关系为:春季>冬季>夏季>秋季。20—30 cm 土层,土壤有效磷含量随季节变化呈现先降低后升高再升高的趋势,平均含量大小关系为:春季>冬季>秋季>夏季。

不同季节比较,4 种植被类型有效磷含量的平均值随季节变化显著( $p<0.05$ )。3 个土层均为春季有效磷含量最高,秋季相对最低。0—10 cm 土层和

表 3 不同种植年限土壤碱解氮含量						mg/kg
土层/cm	样地类型	3 月	6 月	9 月	11 月	平均
0—10	5 a 沙棘	50.09±5.01ABa	28.01±6.67Bb	13.58±0.59Ab	17.34±2.25Ab	27.26
	15 a 沙棘	59.42±12.74Aa	35.24±4.04Bab	21.66±8.12Ab	24.07±6.51Ab	35.10
	20 a 沙棘	60.62±19.29Aa	59.57±11.29Aa	26.00±9.69Ab	28.77±8.96Ab	43.63
	谷子地	21.14±6.13Bab	11.20±0.70Cc	14.73±1.76Abc	22.50±3.12Aa	17.39
	平均	47.71	33.50	21.49	24.84	
10—20	5 a 沙棘	14.53±4.14Ba	25.12±8.83BCa	14.84±6.66Aa	13.32±0.88Ca	16.95
	15 a 沙棘	36.87±12.50Aa	29.23±1.73ABab	19.10±7.82Ab	17.29±0.97Bb	25.62
	20 a 沙棘	42.20±3.37Aab	52.23±7.31Aa	17.20±0.84Ac	28.11±2.93Abc	34.93
	谷子地	37.20±3.30Aa	17.47±±0.40Cb	15.17±1.46Ac	18.43±0.40Bb	22.07
	平均	34.37	28.51	16.58	19.29	
20—30	5 a 沙棘	16.09±1.64ABa	18.23±3.00Ba	16.37±4.47Aa	9.99±0.92Bb	15.17
	15 a 沙棘	25.20±5.72Aa	23.68±4.24Ba	12.39±0.30Ab	9.93±0.75Bb	17.80
	20 a 沙棘	24.42±5.82Ab	44.01±8.81Aa	15.71±7.47Ab	16.26±2.86Ab	25.10
	谷子地	11.20±2.12Bab	15.30±3.70Ba	9.80±0.70Ab	11.20±2.10Bab	11.88
	平均	26.56	23.64	13.57	12.68	

表 4 不同种植年限土壤有效磷含量						mg/kg
土层/cm	样地类型	3 月	6 月	9 月	11 月	平均
0—10	5 a 沙棘	13.39±0.45Ba	4.04±0.62Ab	3.18±1.00ABb	3.75±0.89Bb	6.09
	15 a 沙棘	15.72±0.46Aa	4.36±1.66Ab	3.94±0.80ABb	5.18±1.72Bb	7.30
	20 a 沙棘	16.22±0.91Aa	4.89±1.73Ac	4.19±1.17Ac	12.48±2.88Ab	9.44
	谷子地	4.03±0.31Ca	3.73±0.68Aa	2.43±0.21Bb	2.83±0.06Bb	3.26
	平均	10.26	4.17	3.27	6.06	
10—20	5 a 沙棘	12.71±1.12Aa	4.20±0.46ABc	2.20±0.58Bd	10.81±0.02Ab	7.48
	15 a 沙棘	13.62±1.45Aa	4.53±2.32ABb	5.43±2.26Ab	11.47±1.44Aa	8.76
	20 a 沙棘	14.20±1.02Aa	5.23±1.93Ab	5.90±1.17Ab	11.79±1.00Aa	9.28
	谷子地	3.43±0.82Ba	1.53±0.40Bb	1.57±0.32Bb	3.87±1.44Ba	2.60
	平均	10.99	3.38	3.02	9.15	
20—30	5 a 沙棘	9.12±0.35BCa	4.12±0.32Ab	3.28±0.70Ab	9.44±0.85BCa	6.49
	15 a 沙棘	12.17±1.13ABa	4.98±1.13Ab	4.40±3.83Ab	12.85±2.22ABa	8.60
	20 a 沙棘	12.62±2.15Aa	5.60±1.72Ab	4.51±0.06Ab	15.73±5.41Aa	9.62
	谷子地	4.33±1.10Cb	1.30±0.17Bc	0.63±0.15Ac	6.60±0.35Ca	3.22
	平均	9.56	4.00	8.00	8.82	

3.4 土壤有效钾季节变化与空间分布特征

从表 5 可以看出,土壤有效钾含量在不同植被类型、季节和土层间在 0.05 水平上均存在显著差异性。不同植被类型比较,土壤有效钾含量大小关系为:20 a 沙棘林>15 a 沙棘林>5 a 沙棘林。随着恢复年限的增加,土壤有效钾含量在显著增加。春夏季,谷子地土壤有效钾含量高于沙棘林。0—30 cm 土层有

效钾含量的变化范围为 20.22~92.67 mg/kg,相比 5 a沙棘,15 a 沙棘和 20 a 沙棘有效钾含量分别增加了一9.64%,9.80%,38.74%。

不同土层间比较,各植被类型土壤有效钾含量随土层深度变化显著,随着土层加深,土壤有效钾含量呈现减低趋势。0—10 cm,10—20 cm 和 20—30 cm 土层有效钾平均含量分别为 69.30,54.87,44.78 g/kg。



不同季节比较,4种植被类型有效钾含量的平均值随季节变化显著( $p<0.05$ )。3个土层均为冬季有效钾含量最高,夏季相对最低。0—10 cm,10—20 cm 和 20—30 cm 土层,土壤有效钾含量均呈现先降低后升高的趋势,平均含量大小关系为:冬季>春季>秋季>夏季。

表 5 不同种植年限土壤有效钾含量 mg/kg

土层/cm	样地类型	3 月	6 月	9 月	11 月	平均
0—10	5 a 沙棘	27.48±5.89Bb	29.22±7.81Bb	75.00±32.06Aa	84.33±3.76Aa	54.01
	15 a 沙棘	41.22±15.38Ba	63.56±10.67Aa	76.06±31.23Aa	62.00±4.58Ba	60.71
	20 a 沙棘	81.56±13.36Aa	70.89±15.49Aa	80.22±5.87Aa	80.00±7.88Aa	78.17
	谷子地	92.67±2.36Aa	53.67±5.86Abc	45.33±13.80Ac	62.67±6.93Bb	63.58
	平均	76.47	53.50	67.49	79.75	
10—20	5 a 沙棘	27.11±3.82Bc	20.22±4.62Bc	53.89±13.09BCb	72.22±9.67BCa	43.36
	15 a 沙棘	34.22±9.67Bc	45.00±2.29Ac	64.06±3.09ABb	76.33±7.90ABa	54.90
	20 a 沙棘	62.44±8.08Ab	27.89±5.10Bc	76.67±8.09Aab	90.00±1.83Aa	64.25
	谷子地	72.67±2.49Aa	38.33±5.77Ab	43.67±9.07Cb	42.78±12.12Cb	49.36
	平均	54/36	34.86	59.57	70.17	
20—30	5 a 沙棘	26.00±9.81Bbc	21.11±3.36Bc	40.50±9.04Aab	51.11±1.68Ba	34.68
	15 a 沙棘	33.66±6.13Ba	48.33±2.84Aa	51.22±17.06Aa	46.17±4.91Ba	44.85
	20 a 沙棘	58.89±10.46Aab	47.67±3.84Ab	57.11±5.59Ab	77.67±2.37Aa	60.33
	谷子地	27.00±2.45Bbc	22.67±11.50Bc	50.67±3.06Aa	32.44±8.50Cb	33.19
	平均	47.22	34.95	45.10	51.85	

3.5 土壤脲酶季节变化与空间分布特征

除了春季 20—30 cm 土层各植被类型间没有达到显著差异外,土壤脲酶含量在不同植被类型、季节和土层间在 0.05 水平上存在显著差异性(表 6)。不同植被类型比较,土壤脲酶大小关系为:20 a 沙棘林>15 a 沙棘林>5 a 沙棘林>谷子地。随着恢复年限的增加,土壤脲酶在显著增加。0—30 cm 土层脲酶的变化范围为 0.54~45.35 mg/(g·24 h),相比谷子地,5 a 沙棘、15 a 沙棘和 20 a 沙棘脲酶分别增加了 4.98%,65.43%,94.55%。

不同土层间比较,各植被类型土壤脲酶随土层深度变化显著,随着土层加深,土壤脲酶呈现降低趋势。0—10 cm,10—20 cm 和 20—30 cm 土层脲酶分别为 11.17,8.09,5.25 mg/(g·24 h)。

不同季节比较,4种植被类型脲酶平均值随季节变化显著( $p<0.05$ )。3个土层均为春夏季脲酶较高,秋冬季较低。0—10 cm 土、10—20 cm 和 20—30 cm 土层,土壤脲酶均呈现先降低后升高的趋势,平均含量大小关系为:春季>秋季>夏季>冬季。

表 6 不同种植年限土壤脲酶 mg/(g·24 h)

土层/cm	样地类型	3 月	6 月	9 月	11 月	平均
0—10	5 a 沙棘	20.33±6.58Ba	4.50±1.43Bb	7.78±0.99Ab	2.50±1.28Bb	8.78
	15 a 沙棘	28.28±6.82Ba	7.50±2.11Ab	7.03±1.32Ab	5.36±1.90Ab	12.04
	20 a 沙棘	45.35±6.17Aa	7.65±0.62Ab	6.91±1.45Ab	4.88±0.67Ab	16.20
	谷子地	20.80±0.40Ba	5.84±0.76ABb	2.87±0.07Bc	2.39±0.26Bc	7.98
	平均	28.69	5.54	6.65	3.78	
10—20	5 a 沙棘	10.03±1.33Ba	3.57±0.76Ac	5.36±0.43ABb	2.48±0.36Ac	5.36
	15 a 沙棘	22.16±8.27ABa	6.00±1.88Ab	7.89±4.36Ab	3.95±1.76Ab	10.00
	20 a 沙棘	28.67±6.91Aa	7.23±2.21Ab	6.19±0.84Ab	3.34±0.56Ab	11.36
	谷子地	14.14±3.44Ba	3.22±0.24Ab	1.22±0.08Bb	2.99±0.56Ab	5.40
	平均	19.59	4.48	5.17	3.11	
20—30	5 a 沙棘	10.30±0.86Aa	2.54±0.92Bb	3.29±1.68ABb	1.41±0.66ABb	4.39
	15 a 沙棘	16.99±5.22Aa	5.90±1.91Ab	4.20±1.35Ab	1.51±0.55ABb	7.15
	20 a 沙棘	15.70±3.87Aa	5.36±0.51Ab	4.24±0.46Ab	1.80±0.64Ab	6.77
	谷子地	13.41±1.69Aa	1.83±0.18Bb	1.32±0.10Bb	0.54±0.03Bb	4.27
	平均	12.77	3.14	3.60	1.48	

3.6 土壤蔗糖酶季节变化与空间分布特征

除了春季所有土层各植被类型间没有达到显著差异外,土壤蔗糖酶含量在不同植被类型、季节和土层间在 0.05 水平上存在显著差异性(表 7)。不同植被类型比较,沙棘林土壤蔗糖酶高于谷子地。不同恢复年限沙棘林间规律不太一致,基本上呈现随着恢复年限的增加,土壤蔗糖酶增加的趋势。0—30 cm 土层蔗糖酶的变化范围为 1.28~51.78 mg/(g·24 h),相比谷子地,5 a 沙棘、15 a 沙棘和 20 a 沙棘蔗糖酶分别增加了 31.53%,27.20%,16.23%。

不同土层间比较,各植被类型土壤蔗糖酶随土层

深度变化显著,随着土层加深,土壤蔗糖酶呈现降低趋势。0—10 cm,10—20 cm 和 20—30 cm 土层蔗糖酶分别为 19.66,12.52,5.80 mg/(g·24 h)。

不同季节比较,4 种植被类型蔗糖酶平均值随季节变化显著( $p<0.05$ )。3 个土层均为秋冬季蔗糖酶较高,夏秋季较低。0—10 cm 土层,土壤蔗糖酶均呈现先降低后升高的趋势,平均含量大小关系为:春季>冬季>秋季>夏季。0—10 cm 和 20—30 cm 土层,土壤蔗糖酶随季节变化呈现先降低后升高再降低的趋势,平均含量大小关系为:春季>秋季>冬季>夏季。

表 7 不同种植年限土壤蔗糖酶含量 mg/(g·24 h)

土层/cm	样地类型	3 月	6 月	9 月	11 月	平均
0—10	5 a 沙棘	41.53±13.77Aa	5.63±2.65Ab	16.60±0.71Ab	22.81±6.26Ab	21.64
	15 a 沙棘	51.78±18.64Aa	7.32±2.06Ab	9.23±1.84Bb	16.38±5.06Ab	21.18
	20 a 沙棘	30.80±10.64Aa	8.25±4.31Ab	14.32±2.66Ab	15.34±4.33Ab	17.18
	谷子地	33.67±2.50Aa	5.25±0.64Ac	7.28±0.81Bc	19.72±2.98Ab	16.48
	平均	41.11	6.61	13.19	17.73	
10—20	5 a 沙棘	15.87±5.69Aa	2.41±0.98Bc	6.47±0.23Abc	9.43±0.26Bab	8.54
	15 a 沙棘	15.65±6.86Aa	3.32±0.33ABb	7.14±1.76Aab	8.00±1.43BCab	8.53
	20 a 沙棘	20.57±7.86Aa	4.03±0.21Ab	7.35±1.63Ab	6.77±1.76Cb	9.68
	谷子地	15.93±0.52Aa	2.42±0.13Bc	1.87±0.13Bc	13.20±1.02Ab	8.35
	平均	18.50	3.72	18.50	9.35	
20—30	5 a 沙棘	10.20±6.38Aa	1.32±0.19Bb	8.20±3.41Aab	6.70±1.78Aab	6.61
	15 a 沙棘	10.80±5.17Aa	2.24±0.73Ab	5.96±1.26Aab	4.52±0.40Bab	5.88
	20 a 沙棘	10.13±1.74Aa	2.28±0.42Ac	6.59±0.51Ab	3.62±0.59Bc	5.66
	谷子地	8.57±0.21Aa	1.33±0.06Bb	1.28±0.03Bb	1.38±0.12Cb	3.14
	平均	12.60	1.88	5.00	3.72	

3.7 土壤过氧化氢酶季节变化与空间分布特征

除了秋季各土层植被类型间没有达到显著差异外,土壤过氧化氢酶含量在不同植被类型、季节和土层间在 0.05 水平上存在显著差异性(表 8)。不同植被类型比较,土壤过氧化氢酶大小关系为:20 a 沙棘林>15 a 沙棘林>5 a 沙棘林,随着恢复年限的增加,土壤过氧化氢酶在显著增加,谷子地过氧化氢酶高于沙棘林。0—30 cm 土层过氧化氢酶的变化范围为 1.53~14.40 mg/kg,谷子地过氧化氢酶比 5 a 沙棘、15 a 沙棘和 20 a 沙棘分别增加了 31.40%,29.97%,29.13%。

不同土层间比较,各植被类型土壤过氧化氢酶随土层深度变化明显,随着土层加深,土壤过氧化氢酶呈现高一低一中趋势。0—10 cm,10—20 cm 和 20—30 cm 土层过氧化氢酶分别为 2.34,1.98,2.32 g/kg。

不同季节比较,4 种植被类型过氧化氢酶平均值随季节变化不显著( $p>0.05$ )。3 个土层均为夏秋

季过氧化氢酶较高,冬春季较低。0—10 cm,10—20 cm 和20—30 cm 土层,土壤过氧化氢酶均呈现先升高后减低的趋势,平均含量大小关系为:秋季>夏季>冬季>春季。

3.8 土壤养分与土壤酶活性相关性分析

相关性分析(表 9)表明,土壤养分与土壤脲酶、蔗糖酶存在着密切的关系。许多变量之间的直接相关性较强,如:土壤有机质与碱解氮、有效钾、蔗糖酶有显著正相关关系,碱解氮与脲酶、蔗糖酶呈现显著正相关关系,有效钾与蔗糖酶正相关关系,脲酶与蔗糖酶正相关关系。充分说明了土壤脲酶、蔗糖酶是表征土壤肥力水平的重要指标。

4 讨论

4.1 林龄对土壤养分和酶活性的影响

本研究表明,随着沙棘人工林林龄的增加,土壤有

机质、碱解氮、有效磷和有效钾均显著增加,沙棘林土壤养分含量均显著高于谷子地( $p<0.05$ ),植被恢复促进了土壤养分的积累。这是因为自退耕还林以来,坡耕地转变为林地后,植被逐渐恢复,植物的枯落物、根系残体及其分泌物等显著增加,在无人为干扰的条件下成为土壤养分供给的直接来源<sup>[19]</sup>,土壤肥力得到显著改善<sup>[20]</sup>。这与罗蓉等<sup>[21]</sup>的研究结果较为一致。林龄主要通过影响林内小气候、凋落物归还与周转及根系分泌物等间接影响土壤酶活性<sup>[22]</sup>。本研究表明,土

壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性均随沙棘林林龄增加呈现增加趋势,不同林龄间没有达到显著水平。沙棘林土壤脲酶和蔗糖酶活性均高于谷子地。这主要是因为是在植被恢复的过程中,土壤养分的累积为土壤微生物提供了碳源和氮源,提高了土壤酶合成量,沙棘林根系生长也促使其分泌酶量增加<sup>[23]</sup>。本研究中,谷子地土壤过氧化氢酶活性高于沙棘人工林。谷子地由于表层覆被物相对较少,土壤通气性好,大大促进了微生物的繁殖,提高了过氧化氢酶活性<sup>[24]</sup>。

表 8 不同种植年限土壤过氧化氢酶含量 ml/(g·h)

土层/cm	样地类型	3 月	6 月	9 月	11 月	平均
0—10	5 a 沙棘	1.57±0.03Bb	1.79±0.05Bb	3.28±0.47Aa	1.59±0.35Bb	2.06
	15 a 沙棘	1.57±0.03Bb	1.74±0.16Bb	3.32±0.47Aa	1.59±0.36Bb	2.06
	20 a 沙棘	1.73±0.03Ab	1.74±0.07Bb	3.37±0.41Aa	1.75±0.18Bb	2.15
	谷子地	1.59±0.05Bb	3.58±0.11Aa	3.60±0.17Aa	3.54±0.02Aa	3.08
	平均	1.62	2.22	3.39	2.12	
10—20	5 a 沙棘	1.53±0.02Bb	1.76±0.10Cb	3.34±0.46Aa	1.76±0.09Bb	2.10
	15 a 沙棘	1.58±0.02ABc	1.89±0.05Bb	3.60±0.17Aa	1.68±0.22Bbc	2.19
	20 a 沙棘	1.71±0.03ABb	1.72±0.05Cb	3.54±0.34Aa	1.69±0.27Bb	2.17
	谷子地	1.76±0.16Ac	3.58±0.03Ab	3.50±0.04Ab	4.40±0.12Aa	3.31
	平均	1.64	2.24	1.64	2.38	
20—30	5 a 沙棘	1.59±0.08Ab	1.78±0.13Bb	3.43±0.46Aa	1.73±0.13Bb	2.13
	15 a 沙棘	1.58±0.08Ab	1.81±0.07Bb	3.64±0.17Aa	1.70±0.20Bb	2.18
	20 a 沙棘	1.64±0.01Ab	1.74±0.15Bb	3.62±0.25Aa	1.75±0.10Bb	2.19
	谷子地	1.69±0.03Ac	3.62±0.11Aa	3.62±0.05Aa	2.22±0.30Ab	2.79
	平均	1.62	2.24	3.58	1.85	

表 9 土壤养分与土壤酶活性的相关性分析

指标	有机质	碱解氮	有效磷	有效钾	脲酶	蔗糖酶	过氧化氢酶
有机质	1						
碱解氮	0.5757*	1					
有效磷	−0.1764	0.2524	1				
有效钾	0.6614*	0.3845	0.2367	1			
脲酶	0.3837	0.8310**	0.5616	−0.3161	1		
蔗糖酶	0.5857*	0.6735*	0.3777	0.6918*	0.8449**	1	
过氧化氢酶	0.1396	−0.4298	−0.3125	−0.0824	−0.4372	−0.4045	1

注: \*\* 表示差异性极显著( $p<0.01$ ); \* 表示差异性显著( $p<0.05$ )。

4.2 季节对土壤养分和酶活性的影响

在本研究中,不同林龄沙棘人工林土壤养分表现出季节动态变化规律。0—30 cm 土层土壤有机质表现为春季和秋季较高,夏季和冬季较低。春季气候变暖加速了土壤枯落物的分解,增加了有机质和速效氮磷养分的含量,夏季由于植物在生长旺盛期的高消耗,导致有机质含量迅速下降。秋季由于输入大量枯落物和植物残体,土壤有机质含量逐渐上升,这与孔玉华等<sup>[25]</sup>研究结果相似。本研究表明,土壤碱解氮、

有效磷和有效钾均呈现“V”型变化趋势;碱解氮和有效磷均为春季最高,秋季最低,而有效钾为冬季最高,夏季最低。土壤碱解氮和有效磷在夏季和秋季较低可能与夏秋季植物生长消耗、秋季雨水较多导致速效养分淋失有关。本研究中,不同林龄沙棘人工林土壤酶活性随季节变化波动明显。土壤脲酶季节变化规律为春季>夏季>秋季>冬季,可能是因为春季土壤矿质氮释放增加,植物生长需求还较低,秋季植物从土壤吸收氮素较多,对土壤微生物利用氮素造成影

响,导致脲酶活性春季大于秋季<sup>[26]</sup>。蔗糖酶活性春冬季较高,夏秋季较低,这与一些学者的研究结果相左<sup>[27]</sup>,牛小云<sup>[28]</sup>等对辽东山区日本落叶松人工纯林土壤酶活性研究指出,土壤酶活性在春季和秋季高于夏季。本研究中蔗糖酶活性夏季较低的原因有待进一步研究。本研究中过氧化氢酶呈现出与脲酶和蔗糖酶不同的响应特征,过氧化氢酶活性夏秋较高,冬春较低,这是因为过氧化氢酶属氧化还原酶类,土壤环境是重要的影响因素,土壤环境处于还原状态,抑制了土壤过氧化氢酶活性<sup>[24]</sup>。

### 4.3 土层深度对土壤养分和酶活性的影响

本研究表明,土壤养分和酶活性均随土层深度的增加而下降,说明土壤养分具有表聚性的特点。这与闫丽娟等<sup>[29]</sup>研究结果一致。植被恢复后,有机物质在表层土壤积累,显著改善了表层土壤生物学和理化性质,水热状况和透气性均好于深层土壤,微生物活动性强,物质循环快,土壤酶活性较强<sup>[30]</sup>。

### 4.4 土壤养分与土壤酶的相关关系

土壤养分影响着土壤酶活性,土壤养分和酶活性间存在复杂的关系<sup>[31]</sup>。在本研究中,土壤有机质、碱解氮和速效钾与蔗糖酶活性关系密切,说明土壤蔗糖酶在养分循环中发挥了重要作用<sup>[24]</sup>。土壤脲酶与土壤有机质、碱解氮、有效磷呈现正相关关系,与有效磷达到显著正相关水平,可见,土壤酶活性的增强与有机质提高密切相关<sup>[32]</sup>,过氧化氢酶与碱解氮、速效磷和速效钾等呈现负相关关系,这是因为过氧化氢酶活性取决于氧化还原状况、凋落物组成、分解、根系分泌物的消长和土壤环境等因素<sup>[24]</sup>。本研究表明,土壤脲酶与蔗糖酶之间显著正相关,这与它们同属水解酶类有关,两者存在着共性,其总体活性在某种程度上反映着土壤肥力水平的高低<sup>[24]</sup>。脲酶和蔗糖酶与过氧化氢酶呈现负相关关系,这可能与过氧化氢酶的属性不同有关。

## 5 结论

与谷子地相比,沙棘人工林显著增加了土壤有机质、碱解氮、有效磷、有效钾和酶活性,并且随着沙棘人工林种植年限越长,土壤养分和酶活性增加效应越明显。土壤养分和酶活性具有表聚性,随着土层加深含量在下降。

沙棘人工林和谷子地土壤养分和酶活性均有明显的季节变化特征。0—30 cm 土层土壤有机质表现为春季和秋季较高,夏季和冬季较低。碱解氮和有效

磷均为春季最高,秋季最低,而有效钾为冬季最高,夏季最低。土壤脲酶季节变化规律为春夏较高,秋冬季较低。蔗糖酶活性春冬季较高,夏秋季较低。过氧化氢酶呈现出与脲酶和蔗糖酶不同的响应特征。土壤养分与土壤酶相关性密切,土壤脲酶和蔗糖酶可以作为评价土壤肥力的指标。

### 参考文献:

- [1] 赵业婷,常庆瑞,李志鹏,等.黄土高原沟壑区耕地土壤速效养分特征及丰缺状况研究:以陕西省富县为例[J].土壤通报,2012,43(6):1438-1443.
- [2] 王艮梅,罗琳琳,郑聚峰.苏北不同代次和林龄杨树人工林土壤酶活性季节变化特征[J].南京林业大学学报:自然科学版,2014,38(4):45-50.
- [3] 王梅,晏梓然,赵子文,等.黄土高原植被演替过程中相对土壤酶活性的变化特征[J].水土保持研究,2021,35(5):181-187.
- [4] 王涛,马宇丹,许亚东,等.退耕刺槐林土壤养分与酶活性关系[J].生态学杂志,2018,37(7):2083-2091.
- [5] 杨亚辉,赵文慧,蔺鹏飞,等.不同植被对土壤理化性质影响以王东沟小流域为例[J].水土保持通报,2016,36(1):249-252.
- [6] 王正淑,王继军,刘佳.退耕地林草植被碳汇及与农业生态经济系统的关系:以陕西省县南沟流域为例[J].草地学报,2016,24(2):263-269.
- [7] Liu C, Li Z W, Dong Y T, et al. Do land use change and check-dam construction affect a real estimate of soil carbon and nitrogen stocks on the Loess Plateau of China[J]. Ecological Engineering, 2017,101:220-226.
- [8] 张海鑫,曾全超,安韶山,等.黄土高原子午岭林区主要林分生态化学计量学特征[J].自然资源学报,2017,32(6):1043-1052.
- [9] 王春燕,熊霞,顾梦鹤.黄土高原弃耕地植被演替及其对土壤养分动态的影响[J].草业学报,2018,27(11):26-35.
- [10] 刘学彤,魏艳春,杨宪龙,等.水蚀风蚀交错带不同退耕模式对土壤有机碳及全氮的影响[J].应用生态学报,2016,27(1):91-98.
- [11] 陶宝先,张金池,愈元春,等.苏南丘陵地区森林土壤酶活性季节变化[J].生态环境学报,2010,19(10):2349-2354.
- [12] Zhang X Y, Dong W Y, Dai X Q, et al. Responses of absolute and specific soil enzyme activities to long term additions of organic and mineral fertilizer[J]. Science of the Total Environment, 2015,536(12):59-67.
- [13] 舒媛媛,黄俊胜,赵高卷,等.青藏高原东缘不同树种人工林对土壤酶活性及养分的影响[J].生态学报,2016,36(2):394-402.
- [14] 傅伯杰,张立伟.土地利用变化与生态系统服务:概念、方法与进展[J].地理科学进展,2014,33(4):441-446.



- [15] Deng L, Shangguan Z P. Afforestation drivers soil carbon and nitrogen changes in China[J]. Land Degradation & Development, 2017, 28(1):151-165.
- [16] 林雪青,李志,向伟,等.黄土高原沟壑区不同坡位和植被下的土壤硝态氮特征研究[J].环境科学学报, 2017, 37(6):2360-2367.
- [17] 王金成,井明博,周天林,等.黄土高原沟壑区人工沙棘林生长年限对土壤微生物组成的影响[J].干旱地区农业研究, 2015, 33(2):253-260.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社, 2000.
- [19] 郭曼,郑粉莉,和文祥,等.黄土丘陵区不同退耕年限植被多样性变化及其与土壤养分和酶活性的关系[J].土壤学报, 2010, 47(5):979-986.
- [20] 何斌,卢万鹏,唐光,等.桂西北秃杉人工林土壤肥力变化的研究[J].林业科学研究, 2015, 28(1):88-92.
- [21] 罗蓉,杨苗,余旋,等.沙棘人工林土壤微生物群落结构及酶活性的季节变化[J].应用生态学报, 2018, 29(4):1163-1169.
- [22] 葛晓改,肖文发,曾立雄,等.三峡库区不同林龄马尾松土壤养分与酶活性的关系[J].应用生态学报, 2012, 23(2):445-451.
- [23] 赵娜,孟平,张劲松,等.华北低丘山地不同退耕年限刺槐人工林土壤质量评价[J].应用生态学报, 2014, 25(2):351-358.
- [24] 李林海,邱莉萍,梦梦.黄土高原沟壑区土壤酶活性对植物恢复的响应[J].应用生态学报, 2012, 23(12):3355-3360.
- [25] 孔玉华,韩梦娟,张志华,等.3种人工林表层土壤溶解性有机质含量的季节变化[J].中国水土保持科学, 2019, 17(2):48-56.
- [26] 裴丙,朱龙飞,冯志培,等.太行山南麓5个林龄侧柏人工林土壤酶活性季节变化[J].水土保持研究, 2018, 25(2):170-175, 182.
- [27] 曹成有,陈家模,邵建飞,等.科尔沁沙地4种固沙植物群落土壤微生物生物量及酶活性的季节变化[J].生态学杂志, 2011, 30(2):227-233.
- [28] 牛小云,孙晓梅,陈东升,等.辽东山区不同林龄日本落叶松人工林土壤微生物、养分及酶活性[J].应用生态学报, 2015, 26(9):2663-2672.
- [29] 闫丽娟,李广,吴江琪,等.黄土高原4种典型植被对土壤活性有机碳及土壤碳库的影响[J].生态学报, 2019, 39(15):172-180.
- [30] 邹俊亮,邵明安,龚时慧.不同植物和土壤类型下土壤水分剖面的分异[J].水土保持研究, 2011, 18(6):12-17.
- [31] 朱海强,李艳红,李发东.艾比湖湿地典型植物群落土壤酶活性季节变化特征[J].应用生态学报, 2017, 28(4):1145-1154.
- [32] Su Y Z, Li Y L, Cui J Y, et al. Influences of continuous grazing and livestock exclusion on soil properties in a degraded sandy grassland, Inner Mongolia, Northern China[J]. Catena, 2005, 59(3):267-278.

~~~~~  
(上接第57页)

- [25] 陈晓安,蔡强国,张利超,等.黄土丘陵沟壑区不同雨强下坡长对坡面土壤侵蚀的影响[J].土壤通报, 2011, 42(3):721-725.
- [26] 汪晓勇,郑粉莉.黄土坡面坡长对侵蚀-搬运过程的影响研究[J].水土保持通报, 2008, 28(3):1-4.
- [27] 任瑞雪.降雨侵蚀的分离与输移过程对泥沙中有机碳特征的影响研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学, 2019.
- [28] 郝燕芳,佟帆.侵蚀泥沙颗粒特征研究进展[J].水土保持学报, 2020, 34(1):1-7.
- [29] Martinez-Mena M, Rogel J A, Albaladejo J, et al. Influence of vegetal cover on sediment particle size distribution in natural rainfall conditions in a semiarid environment[J]. Catena, 2000, 38(3):175-190.
- [30] 吴凤至,史志华,方怒放,等.不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律[J].环境科学, 2012, 33(7):2497-2502.
- [31] 付兴涛,姚璟.降雨条件下坡长对陡坡产流产沙过程影响的模拟试验研究[J].水土保持学报, 2015, 29(5):20-24.
- [32] 周梦玲,郭建斌,崔明,等.喀斯特坡地侵蚀泥沙养分流失与粒径分布的关系[J].水土保持学报, 2019, 33(6):54-60, 71.
- [33] 廖义善,蔡强国,程琴娟.黄土丘陵沟壑区坡面侵蚀产沙地形因子的临界条件[J].中国水土保持科学, 2008, 6(2):32-38.
- [34] 郭新亚,张兴奇,顾礼彬,等.坡长对黔西北地区坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报, 2015, 29(2):540-44.
- [35] 刘和平,王秀颖,刘宝元.短坡条件下侵蚀产沙与坡长的关系[J].水土保持学报, 2011, 25(2):1-5, 77.
- [36] Kinnell P I A. The Effect of Slope Length on Sediment Concentrations Associated with Side-Slope Erosion[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(3):1004-1008.