

# 黄土高原退耕坡地不同类型林分土壤生物学活性的研究

翟 辉,张 海\*,邱 梅,郝月姣,张 超

(西北农林科技大学 资源环境学院·陕西 杨陵 712100)

**摘要:**选取黄土高原退耕还林树种紫穗槐、油松、侧柏、新疆杨、刺槐和柠条为研究对象,以撂荒坡地为对照,分别测定不同林地土壤微生物量碳、土壤呼吸速率以及土壤酶活性,并通过计算土壤生物学活性综合指数比较不同类型林分土壤生物学活性差异。结果表明,0~60 cm 各土层中不同林地土壤微生物量碳、呼吸速率和酶活性均较对照显著提高。0~20 cm 和 20~40 cm 土层,刺槐林地土壤呼吸速率、脲酶和碱性磷酸酶活性均高于其他林地,柠条林地土壤过氧化氢酶和蔗糖酶活性呈现最大值,而土壤微生物量碳分别以刺槐和紫穗槐林地最大;40~60 cm 土层,刺槐林地土壤呼吸速率和脲酶活性均显著高于其他林地,而土壤微生物量碳、过氧化氢酶和蔗糖酶活性均以柠条林地最大,各林地与对照之间的土壤碱性磷酸酶活性差异不显著( $p < 0.05$ )。土壤生物学活性综合指数表现为柠条>刺槐>油松>侧柏>紫穗槐>新疆杨>对照。在黄土退耕坡地营造人工水保林能够有效提高土壤生物量碳、呼吸速率和酶活性,从土壤生物学活性角度考虑,柠条和刺槐可作为试验区退耕还林的优先选择树种。

**关键词:**黄土高原;退耕坡地;不同树种;土壤生物学活性;土壤生物学活性综合指数

**中图分类号:**S714.3      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2016)04-0033-06

Soil Biological Activity of Different Tree Types on Slope Land Converted from Farmland  
in the Loess Plateau

Zhai Hui, Zhang Hai\*, Qiu Mei, Hao Yue-jiao, Zhang Chao

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

**Abstract:**Compared with the slope land (control), soil microbial biomass carbon, soil respiration rate and soil enzyme activity of six different forest plantations, *Amorpha fruticosa* (I), *Pinus tabulaeformis* (II), *Platycladus orientalis* (III), *Populus* (IV), *Robinia pseudoacacia* (V) and *Caragana korshinskii* (VI), on slope land converted from farmland in the Loess Plateau were measured, and their soil biological activity indexes were calculated to compare the difference of soil biological activity among them. The results showed that there exhibited significant improvements of the soil MBC, soil respiratory rate and soil enzyme activity of all forest plantations at 0—60 cm soil depth. At 0—20 cm and 20—40 cm soil depth, the maximum increase of soil respiratory rate, urease and alkaline phosphatase activity were all in the V site, and the maximum increase of soil catalase and invertase activity were both in the VI site, while soil MBC in the V site and in the I site respectively exhibited the maximum increase. At 40—60 cm soil depth, soil respiratory rate and urease activity in the V site were much higher than those in the other sites, and the maximum increase of soil MBC, catalase and invertase activity were in the VI site, while the difference in soil alkaline phosphatase activity among all sites were not significant ( $p < 0.05$ ). The soil biological activity index was in the or-

收稿日期:2015-08-06 修回日期:2015-10-04

基金项目:国家农业部科技成果转化项目“黄土高原苹果园养分测控及旱地苹果专用肥示范与推广”;陕西省科技攻关“黄土坡地经济林节水抚育及降水利用技术研究”(2013K01-34);杨凌示范区农业科技示范提升项目“渭北苹果园养分测控及旱地苹果专用肥示范推广”(TS-2014-40)。

作者简介:翟 辉,女,硕士研究生,研究方向:生态环境工程。E-mail:zhaizhai2015@nwafu.edu.cn

\*通信作者:张 海,男,教授,研究方向:植被恢复及生态修复。E-mail:yzh6@163.com

der VI>V>II>III>I>IV> control. Considering the soil biological activity, the most suitable cultivation species for the construction of plantations on the slope land converted from farmland in the Loess Plateau were *C. korshinskii* and *R. pseudoacacia*. Soil microbial biomass carbon, soil respiration rate and soil enzyme activity could be improved by building forest plantations on slope land converted from farmland.

**Key words:** Loess Plateau; slope land converted from farmland; different tree types; soil biological activity; soil biological activity index

土壤微生物生物量、土壤呼吸和酶活性等生物学特性比土壤有机质、养分含量等其他理化性状能更敏感地对土壤质量的变化做出响应<sup>[1-2]</sup>。土壤微生物生物量因其能代表参与调控土壤中能量和养分循环以及有机物质转化的对应微生物的数量,常被用于评价土壤的生物学性状<sup>[3]</sup>。土壤呼吸是表征土壤质量和肥力的重要生物学指标,它反映了土壤生物活性和土壤物质代谢的强度<sup>[4]</sup>。土壤酶是土壤中的生物活性物质,直接参与土壤中物质的转化、养分释放和固定过程,与土壤肥力状况和土壤环境质量密切相关<sup>[5]</sup>。蔗糖酶、脲酶以及碱性磷酸酶分别能够表征土壤C、N和P的供应程度;过氧化氢酶活性可以表征土壤的腐质化强度大小和有机质的积累程度。

黄土高原地区是我国水土流失最为严重的区域之一,随着退耕还林(草)工程的不断展开,该地区植被覆盖率有了明显的提高,生态环境得到了明显的改善,但仍具有生态脆弱性和复杂性<sup>[6]</sup>。目前对该地区人工水保林的研究多集中在土壤理化性质以及肥力特征方面<sup>[7-10]</sup>,而对土壤生物量、土壤呼吸以及土壤酶活性等土壤生物学特性的研究较少。因此本试验在黄土高原腹地陕西省米脂县,选取退耕还林中的主栽树种人工乔木林刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)和新疆杨(*Populus alba*)以及人工灌木林柠条(*Caragana korshinskii*)和紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)为研究对象,荒坡地为对照(CK),对土壤生物学活性进行研究,旨在探讨不同类型林分、土壤剖面和土层垂直分布与土壤微生物量碳(MBC)、呼吸速率和酶活性之间的关系,并结合土

壤生物学活性综合指数对该地区的人工林进行评价,为该地区退耕还林树种的选择提供理论依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

试验区位于陕西省米脂县泉家沟(37°46'—38°50'N, 109°49'—110°18'N),属黄土高原峁状丘陵区,平均海拔1 049 m。气候属半干旱大陆性季风气候,年平均气温8.3℃,≥10℃的年平均积温3 400℃,年日照时数2 716 h,无霜期165 d,干燥度1.14,年降雨量450 mm左右,多集中在7—9月,占年降雨量的70%以上,每年有相当一部分降水形成径流流失。土壤为黄绵土,土层深厚,土壤有机质含量2.53 g·kg<sup>-1</sup>,全氮0.24 g·kg<sup>-1</sup>,速效磷3.66 mg·kg<sup>-1</sup>,pH 8.10。

### 1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集方法 于2012年6月下旬选取6块生长状况和立地条件较为一致的造林树种样地,即紫穗槐、油松、杨树、侧柏、刺槐和柠条,林龄均为10 a,同时选取撂荒坡地为对照。每块样地随机设置3个5 m×5 m样方,每个样方用梅花形布点法取5个样点,采集0~20、20~40 cm以及40~60 cm 3个垂直层次的土样,每层取5~6个点的混合样,将每块样地采集15个样点,每5个样点的土壤混合均匀得到3个平行样,装入无菌袋中带回实验室。一部分土壤鲜样置于4℃冰箱保存,用于测定土壤微生物量碳和土壤呼吸速率;剩余土样经风干后剔除杂质,磨碎过筛(孔径2 mm),彻底混匀,装入无菌塑料袋密封,用于测定土壤酶活性。样地土壤基本情况见表1。

表1 试验林地概况

Table 1 Introduction of artificial forests

林分	坡度/(°)	坡向	坡位	密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	郁闭度	平均树高/m	胸径/cm	林下植被覆盖度/%	林下主要植被
紫穗槐	25	E10°N	中	1 236	0.5	1.0	1.5	55	早熟禾,狗尾草
油松	27	E20°N	中	1 203	0.6	4.5	8.8	50	达乌里胡枝子,早熟禾,狗娃花
侧柏	28	E10°N	中	1 150	0.5	2.7	7.3	45	早熟禾,狗娃花
新疆杨	27	E15°N	中	1 201	0.5	7.3	10.5	40	早熟禾,针茅
刺槐	26	E15°N	中	1 325	0.6	6.5	5.6	70	早熟禾,达乌里胡枝子,针茅
柠条	25	E20°N	中	1 592	0.7	1.5	2.3	75	达乌里胡枝子,狗娃花,长芒草
对照	27	W15°N	中	—	—	—	—	60	针茅,早熟禾

1.2.2 土壤性质测定方法 土壤 MBC 含量用熏蒸提取-重铬酸钾容量法<sup>[11]</sup>,以每千克土中碳的毫克数表示;土壤呼吸速率的测定采用静态箱/碱液吸收法,使用该方法过程中严格按照国家林业局发布的国家林业行业标准中森林土壤呼吸强度的测定(LY/T 1220—1999)的实验方法与步骤进行测定,以每天每千克土释放 CO<sub>2</sub> 的毫克数表示。

土壤脲酶采用苯酚钠一次氯酸钠比色法测定,酶活性用 NH<sub>3</sub>-N mg·g<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup> 表示;碱性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法测定,活性用 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> mg·g<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup> 表示;蔗糖酶用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,酶活性以 1 g 土在 37℃ 培养 24 h 分解蔗糖产生葡萄糖的毫克数表示<sup>[12]</sup>。过氧化氢酶采用紫外分光光度法,酶活性用每克风干样品分解 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的毫克数表示<sup>[13]</sup>。

数据统计及图表制作在 Microsoft Excel 2010 中进行,用 SPSS(Statistical Package for Social Science)21.0 统计分析软件进行了方差分析。

1.2.3 土壤生物学活性综合指数法 本研究以不同类型林分土壤的 MBC、呼吸速率以及土壤脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性作为土壤生物学活性指示因子(0~60 cm 土层的平均值)。由于土壤因子变化具有连续性质,故各评价指标采用连续性质的隶属度函数<sup>[14]</sup>,并从主成分因子负荷量值的正负性,确定隶属度函数分布的升降性,这与各因子对植被的效应相符合<sup>[15]</sup>。因子负荷量值为正时用公式(1),反之用公式(2),计算公式如下<sup>[16]</sup>:

$$Q_i = (X_{ij} - X_{i\min}) / (X_{i\max} - X_{i\min}) \quad (1)$$

$$Q_i = (X_{i\max} - X_{ij}) / (X_{i\max} - X_{i\min}) \quad (2)$$

式中:Q<sub>i</sub> 表示各土壤生物学活性因子的隶属度值,X<sub>ij</sub> 表示各因子实测值,X<sub>i<sup>max</sup></sub> 和 X<sub>i<sup>min</sup></sub> 分别表示第 i 项因子中的最大值和最小值。

由于土壤各生物学活性因子对土壤生物学活性综合指数的重要性与贡献不同,所以通常用权重系数来表示各个因子的重要性<sup>[17]</sup>。本研究利用 SPSS 软件计算各因子主成分的贡献率和累计贡献率,通过主成分分析的因子负荷量,计算各因子在土壤生物学活性中的作用大小,确定它们的权重 W<sub>i</sub>:

$$W_i = C_i / \sum_{i=1}^n C_i \quad (3)$$

式中:C<sub>i</sub> 为第 i 个土壤生物学活性因子的因子负荷量。

从实用性角度出发,参考张庆费<sup>[16]</sup>等土壤肥力综合指数公式,对各指标进行加权综合,各林地土壤生物学活性综合指数(Soil Biological Activity Index, SAI)计算公式如下:

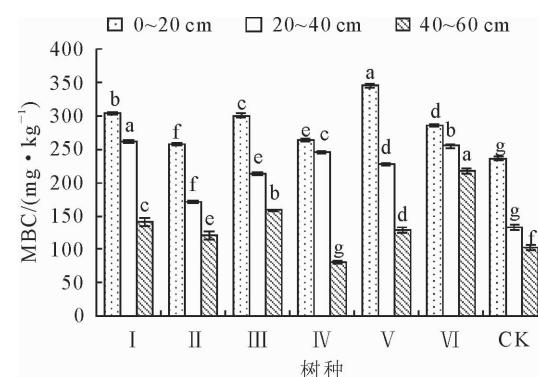
$$SAI = \sum_{i=1}^n W_i \times Q_i \quad (4)$$

SAI 值越大,土壤生物学活性越高;反之,土壤生物学活性越差。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同类型林分土壤微生物量碳的比较

不同类型林分土壤 MBC 均较对照显著提高,且均随土层深度增加而降低(图 1)。在 0~20 cm 土层中刺槐林地表现最为突出,较对照提高 46.5%,其次是紫穗槐林地和侧柏林地,分别提高了 28.6% 和 27.6%,其余林地提高幅度为 9%~21%。20~40 cm 土层中,不同类型林分土壤 MBC 较对照提高顺序为紫穗槐(97.2%)>柠条(92.1%)>新疆杨(84.7%)>刺槐(71.2%)>侧柏(60.5%)>油松(28.8%)。40~60 cm 土层中,除新疆杨林地土壤的 MBC 较对照降低外,其余林地均较对照显著提高( $p < 0.05$ ),表现为柠条(113.3%)>侧柏(55.8%)>紫穗槐(38.2%)>刺槐(26.1%)>油松(18.8%)。在上述同一土层中,各类型林分之间土壤 MBC 含量差异显著( $p < 0.05$ )。综合上述 3 个土层,土壤 MBC 均值大小依次为柠条(252.70 mg·kg<sup>-1</sup>)>紫穗槐(238.69 mg·kg<sup>-1</sup>)>刺槐(233.74 mg·kg<sup>-1</sup>)>侧柏(224.26 mg·kg<sup>-1</sup>)>新疆杨(196.64 mg·kg<sup>-1</sup>)>油松(163.92 mg·kg<sup>-1</sup>)>对照(176.02 mg·kg<sup>-1</sup>)。



注:不同小写字母表示不同林地同一土层之间差异显著( $p < 0.05$ )。

I. 紫穗槐; II. 油松; III. 侧柏; IV. 新疆杨; V. 刺槐; VI. 柠条; CK. 对照,下同。

图 1 不同类型林分 0~20、20~40、40~60 cm 土壤 MBC 含量

Fig. 1 Content of soil MBC of different forest plantations at 0~20, 20~40, and 40~60 cm soil depths

### 2.2 不同类型林分土壤呼吸速率的比较

不同类型林分、不同土层深度土壤呼吸速率存在较大差异(图 2)。各类型林分土壤呼吸速率均随土层深度的增加而减小。0~20 cm 和 20~40 cm 土层除紫穗槐林地土壤呼吸速率较对照降低外,其余林地均较对照显著提高( $p < 0.05$ ),其中 0~20

cm 土层表现为刺槐(30.1%)>侧柏(17.2%)>油松(10.9%)>柠条(7.0%)>新疆杨(0.8%),20~40 cm 土层表现为刺槐(84.5%)>新疆杨(50.1%)>油松(42.8%)>柠条(42.8%)>侧柏(34.7%)。40~60 cm 土层中,各类型林分土壤呼吸速率均较对照显著提高( $p<0.05$ ),尤以刺槐林地提高显著(2.2 倍),柠条林地次之(1.8 倍)。土壤呼吸速率均值大小依次为刺槐(100.46 mg·kg<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>)>柠条(82.38 mg·kg<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>)和油松(82.38 mg·kg<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>)>侧柏(75.52 mg·kg<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>)>新疆杨(73.13 mg·kg<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>)>对照(58.90 mg·kg<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>)>紫穗槐(48.20 mg·kg<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>)。

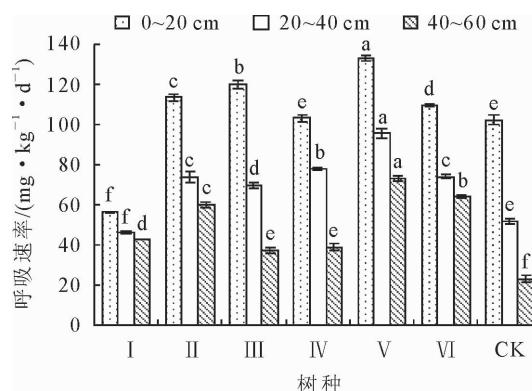


图 2 不同类型林分 0~20, 20~40, 40~60 cm 土壤呼吸速率

Fig. 2 Soil respiration rate of different forest plantations at 0~20, 20~40, 40~60 cm soil depths

### 2.3 不同类型林分土壤酶活性的比较

不同类型林分土壤酶活性随着土壤深度的增加呈降低趋势(表 2)。0~20 cm 土层,刺槐林地土壤脲酶和碱性磷酸酶活性最大,分别较对照提高了1.8 和 1.0 倍;柠条林地土壤蔗糖酶活性最大,较对照提高了 1.1 倍;各林地土壤过氧化氢酶活性较对照均有所提高,其中柠条林地最大,较对照提高了 0.3 倍,但各林地之间土壤过氧化氢酶活性差异不显著( $p>0.05$ )。20~40 cm 土层,土壤脲酶和碱性磷酸酶活性均在刺槐林地呈现最大值,分别较对照提高了 1.8 和 5.6 倍,而过氧化氢酶和蔗糖酶活性均在柠条林地最大,分别较对照提高了 0.7 和 2.9 倍。40~60 cm 土层,各类型林分土壤脲酶活性均较对照有所提高,表现为刺槐>油松>紫穗槐>新疆杨>柠条>侧柏;各类型林分与对照之间的土壤碱性磷酸酶活性差异不显著( $p>0.05$ );柠条、油松、刺槐和新疆杨林地土壤过氧化氢酶活性较对照显著提高( $p<0.05$ ),分别较对照提高了 4.7、3.3、2.3、2.0 倍;紫穗槐、侧柏林地与对照之间土壤过氧化氢酶活性差异不显著( $p>0.05$ );柠条林地土壤蔗糖酶活性较对照显著提高( $p<0.05$ ),其余林地

土壤蔗糖酶活性与对照之间差异不显著( $p>0.05$ )。

不同类型林分土壤脲酶活性均值表现为刺槐>油松>柠条>新疆杨>紫穗槐>侧柏>对照;土壤碱性磷酸酶活性表现为刺槐>柠条>侧柏>油松>紫穗槐>对照>新疆杨;土壤过氧化氢酶活性表现为柠条>油松>紫穗槐>侧柏>刺槐>新疆杨>对照;土壤蔗糖酶活性表现为柠条>刺槐>紫穗槐>油松>对照>新疆杨>侧柏。

### 2.4 土壤生物学活性变化的量化评价

利用公式(1)和(2),计算土壤生物学活性因子的隶属度值,计算结果见表 3。

表 4 给出了不同类型林分土壤生物学活性主成分分析的结果,表明各因子主成分的贡献率和累计贡献率,主成分个数提取原则为主成分对应的特征值 $>1$  的前  $m$  个主成分,因为第 1 主成分特征值 $>1$ ,且贡献率为 74.6%,已足以代表原变量的信息,所以按照第 1 主成分分析因子负荷量,利用公式(3)计算各生物学活性因子的权重系数。

根据公式(4)计算出不同类型林分条件下土壤生物学活性综合指数。由表 5 可以看出,不同树种条件下土壤生物学活性均较荒坡地有不同程度改善,比较结果为:柠条>刺槐>油松>侧柏>紫穗槐>新疆杨>对照。其中柠条林地和刺槐林地条件下土壤生物学活性状况较好,这与土壤 MBC 含量、呼吸速率以及 4 种酶活性的测定结果较一致,而油松林地和侧柏林地之间以及紫穗槐林地和杨树林地之间的改善差异不显著( $p>0.05$ )。

## 3 结论与讨论

黄土高原卵状丘陵区人工水保林的营造有效地提高了土壤 MBC 含量、呼吸速率以及酶活性。不同类型林分土壤 MBC、呼吸速率和酶活性与撂荒坡地相比差异多达显著水平,且在土壤中的分布具明显的层次性,均随着土层深度的增加呈减小趋势。0~60 cm 土层不同类型林分土壤 MBC 平均含量均较撂荒地有不同程度提高,其中柠条林地、紫穗槐林地和刺槐林地土壤 MBC 平均含量显著高于其他林地,说明豆科植物在一定程度上更有利微生物对土壤养分的吸收和利用,以及土壤 MBC 的积累,这与胡婵娟<sup>[2]</sup>等以及孙文艳<sup>[18]</sup>等研究结果一致。植被类型和林分结构的差异影响着凋落物组成、土壤微生物代谢底物和林内小气候,导致即使处于同一气候带,土壤微生物量也有所差异<sup>[19~20]</sup>。

影响土壤呼吸的生态因子主要有土壤温度、土壤湿度、降水、植被类型、叶面积指数、根系生物量、

表2 不同类型林分0~20、20~40、40~60 cm土壤酶活性变化

Table 2 Soil enzyme activity of different forest plantations at 0~20, 20~40, and 40~60 cm soil depths

林分	土层/cm	脲酶活性 /(mg·g⁻¹·d⁻¹)	碱性磷酸酶活性 /(mg·g⁻¹·d⁻¹)	过氧化氢酶活性 /(mg·g⁻¹)	蔗糖酶活性 /(mg·g⁻¹·d⁻¹)
紫穗槐	0~20	2.79±0.08d	3.95±0.47c	0.18±0.01a	3.29±0.13cd
	20~40	1.98±0.03c	0.56±0.03d	0.15±0.029b	1.99±0.02b
	40~60	1.35±0.03c	0.25±0.16ab	0.01±0.00d	0.86±0.11b
	均值	2.04	1.59	0.11	2.05
油松	0~20	4.40±0.33c	4.10±0.25c	0.17±0.02a	3.12±0.10d
	20~40	3.01±0.20b	2.02±0.43c	0.15±0.01b	2.16±0.19b
	40~60	2.87±0.20b	0.33±0.16ab	0.02±0.00b	0.83±0.34b
	均值	3.43	2.15	0.11	2.04
侧柏	0~20	2.56±0.01d	4.26±0.04c	0.17±0.02a	3.10±0.01d
	20~40	1.30±0.05c	2.36±0.04c	0.15±0.00b	2.14±1.33b
	40~60	0.74±0.05e	0.16±0.00b	0.00±0.00d	0.26±0.07c
	均值	1.53	2.26	0.11	1.84
新疆杨	0~20	4.41±0.01c	2.87±0.15e	0.17±0.00a	3.30±0.22cd
	20~40	2.07±0.06c	0.52±0.34d	0.12±0.00cd	1.66±0.53b
	40~60	1.06±0.06d	0.14±0.01b	0.02±0.00c	0.61±0.01b
	均值	2.51	1.175	0.10	1.86
刺槐	0~20	6.37±0.18a	6.72±0.09a	0.18±0.01a	5.71±0.03b
	20~40	4.87±0.09a	5.46±0.12a	0.12±0.01c	1.43±0.10b
	40~60	3.79±0.09a	0.46±0.41ab	0.02±0.00c	0.14±0.01c
	均值	5.01	4.22	0.13	2.43
柠条	0~20	4.81±0.04b	6.09±0.02b	0.18±0.002a	7.26±0.04a
	20~40	2.07±0.04c	3.41±0.09b	0.18±0.01a	6.72±0.01a
	40~60	1.05±0.04d	0.68±0.09a	0.03±0.01a	3.71±0.06a
	均值	2.64	3.40	0.13	5.90
对照	0~20	2.00±0.13e	3.44±0.08d	0.13±0.00b	3.47±0.01c
	20~40	1.74±0.20c	0.83±0.07d	0.10±0.01d	1.73±0.00b
	40~60	0.70±0.20e	0.31±0.01ab	0.01±0.00d	0.84±0.00b
	均值	1.48	1.53	0.08	2.01

表3 土壤生物学活性因子的隶属度值

Table 3 Membership function values of soil biological activity factor

林分	微生物生物量碳	呼吸速率	脲酶活性	碱性磷酸酶活性	过氧化氢酶活性	蔗糖酶活性
紫穗槐	0.805	0.000	0.159	0.135	0.629	0.052
油松	0.000	0.654	0.551	0.321	0.691	0.049
侧柏	0.680	0.523	0.014	0.358	0.538	0.000
新疆杨	0.368	0.477	0.293	0.000	0.451	0.005
刺槐	0.786	1.000	1.000	1.000	0.518	0.145
柠条	1.000	0.654	0.329	0.730	1.007	1.000
对照	0.136	0.205	0.000	0.116	0.009	0.044

表4 土壤生物学活性因子主成分分析

Table 4 Analysis of principal components of soil biological activity factors

主成分	微生物生物量碳	呼吸速率	脲酶活性	碱性磷酸酶活性	过氧化氢酶活性	蔗糖酶活性
特征值	4.476	0.707	0.319	0.196	0.166	0.136
贡献率	74.600	11.780	5.320	3.260	2.770	2.270
累积贡献率	74.600	86.380	91.700	94.960	97.730	100.000
因子负荷量	0.877	0.891	0.780	0.936	0.876	0.813
权重	0.169	0.172	0.151	0.181	0.169	0.157

表5 土壤生物学活性综合指数

Table 5 Soil biological activity index

林分	紫穗槐	油松	侧柏	新疆杨	刺槐	柠条	对照
SAI	0.299	0.378	0.363	0.265	0.747	0.791	0.088

植被凋落物以及人类活动等<sup>[21-24]</sup>。研究表明,人工林可导致植被组成、土壤微生物活性以及土壤物理和化学特性等发生变化,并进一步引起土壤呼吸的改变<sup>[25]</sup>。植物根系呼吸旺盛,且生长过程中产生大量的分泌物可作为微生物代谢活动的养料,从而促进土壤微生物的生物化学过程,提高土壤呼吸速率<sup>[26]</sup>。本研究中不同类型林分土壤呼吸速率差异显著( $p<0.05$ ),其中刺槐和柠条林地土壤呼吸速率平均值最大,原因可能是其根系发达、持水量大以及微生物活性高,促进了根系和土壤微生物的呼吸作用。紫穗槐林地0~40 cm土层中土壤呼吸速率<对照,但40~60 cm土层中其土壤呼吸速率显著高于对照,原因是紫穗槐根系大多分布在60 cm的土层中,所以地下根系生物量大,释放的CO<sub>2</sub>量高。其余林分土壤呼吸速率在0~60 cm土层均较对照显著提高( $p<0.05$ ),说明退耕还林对土壤呼吸速率的提高有促进作用。

土壤酶活性的高低不仅与土壤肥力的高低有关,而且与土壤类型、植被特征、土壤微生物数量、种类、酶类本身的性质有关<sup>[27]</sup>。植物以凋落物、残体和根际分泌物等与土壤相互作用,为微生物提供了生长繁殖的物质和能源,是土壤中微生物活性的主要驱动力<sup>[28]</sup>。本研究中刺槐和柠条林地土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶均表现出较高的活性,反映了其良好的氮素和磷素供应状况以及较强的分解土壤中营养物质的能力,这与侯本东<sup>[29]</sup>等和王凤芹<sup>[30]</sup>等研究结果较一致,原因可能是柠条和刺槐属豆科植物,其根部共生的根瘤菌可以更好地将大气中的氮固定于土壤中,进而改变柠条和刺槐根区土壤系统的物质组成、生物活性及肥力水平。不同类型林分土壤过氧化氢酶活性与对照差异不显著( $p<0.05$ ),说明该区土壤中氧化作用较弱,过氧化氢的分解受到抑制。通过计算土壤生物学活性综合指数可知,不同类型林分土壤生物学活性指数均>对照,其中柠条林地和刺槐林地土壤生物学活性指数最大,表明柠条和刺槐对土壤肥力的改善效果最好,可为该地区今后退耕还林工作中树种的选择提供参考。

## 参考文献:

- [1] DORAN J W, SARRANTONIO M, LIEBIG M A. Soil health and sustainability[J]. Advances in Agronomy, 1996, 56: 1-54.
- [2] 胡婵娟,傅伯杰,刘国华,等.黄土丘陵沟壑区典型人工林下土壤微生物功能多样性[J].生态学报,2009,29(2):727-733.
- [3] 孙波,赵其国.土壤质量与持续环境—III.土壤质量评价的生物学指标[J].土壤,1997,29(5):225-234.
- [4] 张东秋,石培礼,张宪洲.土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J].地球科学进展,2005,20(7):778-785.
- [5] ZHANG D Q, SHI P L, SUN X Z. Some advance in the main factors controlling soil respiration [J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(7): 778-785. (in Chinese)
- [6] PUGLISI E, DEL-RE A A M, RAO M A, et al. Development and validation of numerical indexes integrating enzyme activities of soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38: 1673-1681.
- [7] 李靖,马永禄,罗杰,等.黄土丘陵沟壑区不同林龄刺槐林养分特征与生物量研究[J].西北林学院学报,2013,28(3):7-12.
- [8] LI J, MA Y L, LUO J, et al. Nutrients and biomass of different-aged *Robinia pseudoacacia* plantations in the Loess Hilly region [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28 (3): 7-12. (in Chinese)
- [9] 蔡艳,薛泉宏,侯琳,等.黄土高原几种乔灌木根区土壤微生物区系研究[J].陕西林业科技,2002(1):4-9,15.
- [10] 王凯博,时伟宇,上官周平.黄土丘陵区天然和人工植被类型对土壤理化性质的影响[J].农业工程学报,2012,28(15):80-86.
- [11] WANG K B, SHI W Y, SHANGGUAN Z P. Effect of natural and artificial vegetation types on soil properties in Loess Hilly region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(15): 80-86. (in Chinese)
- [12] 李静,蔚晓燕,唐明.黄土高原纸坊沟流域不同植被对土壤微生物生物量和土壤酶活性的影响[J].西北植物学报,2013,33 (2):387-393.
- [13] LI J, YU X Y, TANG M. Effects of different plants on soil microbial biomass and enzyme activities in Zhifanggou watershed of Loess Plateau [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2013, 33(2): 387-393. (in Chinese)
- [14] 黄琳琳,陈云明,王耀凤,等.黄土丘陵区不同密度人工油松林土壤水分状况研究.[J].西北林学院学报,2011,26 (5):1-8.
- [15] HUANG L L, CHEN Y M, WANG Y F, et al. Soil moisture of artificial *Pinus tabuliformis* stands with different densities in Loess Hilly Region [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(5): 1-8. (in Chinese)
- [16] VANCE E D, BROOKES P C, JENKINSON D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. Soil Biol. Biochem, 1987, 19: 703-707.
- [17] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:中国农业出版社,1986:274-339.
- [18] 杨兰芳,曾巧,李海波等.紫外分光光度法测定土壤过氧化氢酶活性[J].土壤通报,2011,42(1):207-210.
- [19] YANG L F, ZENG Q, LI H B, et al. Measurement of catalase activity in soil by ultraviolet spectrophotometry [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(1): 207-210. (in Chinese)
- [20] 黎孟波,张先婉.土壤肥力研究进展[M].北京:中国科学技术出版社,1991:221-234.
- [21] 刘世梁,傅泊杰,吕一河,等.坡面土地利用方式与景观位置对土壤质量的影响[J].生态学报,2003,23(3):414-420.
- [22] LIU S L, FU B J, LYV Y H, et al. Assessment of soil quality in relation to land use and landscape position on slope[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(3): 414-420. (in Chinese)
- [23] 张庆费,宋永昌,由文辉.浙江天童植物群落次生演替与土壤肥力的关系[J].生态学报,1999,19(2):174-178.

(下转第 72 页)

- WANG Y F, HAN J F, LIN X W. Study on physiological and biochemical responses of Flue-cured tobacco to drought stress during early growth of the plants[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1996, 22(1): 117-122. (in Chinese)
- [20] 周瑞莲, 王刚. 水分胁迫下豌豆保护酶活力变化及脯氨酸积累在其抗旱中的作用[J]. 草业科学, 1997, 6(4): 39-43.
- [21] 许东河, 李东艳, 程舜华. 大豆超氧化物岐化酶(SOD)活性与其抗旱性关系研究[J]. 河北农业技术师范学院学报, 1991, 5(3): 1-3.
- [22] 文建成, 陈学宽, 符菊芬, 等. 质膜透性与丙二醛(MDA)含量的变化评价甘蔗品种抗旱性初报[J]. 甘蔗, 1998, 5(3): 1-5.
- [23] 高怡然, 杨超伟, 陈浩, 等. 干旱胁迫下悬铃木幼苗抗旱性综合评价[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(3): 45-50.
- GAO Y R, YANG C W, CHEN H, et al. Comprehensive evaluation on drought resistance of sycamore seedlings under drought stress[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2015, 30(3): 45-50. (in Chinese)
- [24] 吴涛, 陈少瑜, 彭明俊, 等. 不同种源膏桐在干旱胁迫下生理指标的变化[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(2): 7-11.
- WU T, CHEN S Y, PENG M J, et al. Changes of physiological indices of *Jatropha curcas* from different provenances under drought stress[J]. *Journal of Northwest Forestry University*,
- sity, 2008, 23(2): 7-11. (in Chinese)
- [25] 王兴顺. 黄芩幼苗对干旱胁迫的生理适应性反应[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(1): 55-59.
- WANG X S. Physiological responses of *Scutellaria baicalensis* seedlings under drought stress[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2014, 29(1): 55-59. (in Chinese)
- [26] 钮福祥, 华希新, 郭小丁, 等. 甘薯品种抗旱性生理指标及其价值初报[J]. 作物学报, 1996, 22(4): 392-398.
- NIU F X, HUA X X, GUO X D, et al. Studies on several physiological indexes of the drought resistance of sweet potato and its comprehensive evaluation[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1996, 22(4): 392-398. (in Chinese)
- [27] 覃鹏, 刘叶菊, 刘飞虎. 干旱胁迫对烟草叶片丙二醛含量和细胞膜透性的影响[J]. 亚热带植物科学, 2004, 33(4): 8-10.
- [28] 于同泉, 柴丽娜, 刘宗萍. 水分胁迫下小麦幼苗可溶性蛋白质的表现与小麦抗旱蛋白之初探[J]. 北京农学院学报, 1995, 10(1): 26-30.
- [29] 李妮亚, 高俊凤, 汪沛洪. 小麦幼芽水分胁迫诱导蛋白的特征[J]. 植物生理学报, 1998, 24(1): 65-71.
- [30] 孙国荣, 张睿, 蒋丽芬, 等. 干旱胁迫下白桦实生苗叶片的水分代谢与部分渗透调节物质的变化[J]. 植物研究, 2001, 21(3): 413-415.

(上接第 38 页)

- [17] 尹刚强, 田大伦, 方晰, 等. 不同土地利用方式对湘中丘陵区土壤质量的影响[J]. 林业科学, 2008, 44(8): 9-15.
- YIN G Q, TIAN D L, FAN X, et al. Effects of land use types on soil quality of the hilly area in central Hunan Province[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(8): 9-15. (in Chinese)
- [18] 孙文艳, 廖超英, 李晓明, 等. 毛乌素沙地东南部人工林土壤生物学特性[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(3): 28-33.
- SUN W Y, LIAO C Y, LI X M, et al. Soil biological of different forest plantations on the southeast of the Mu Us sandy land[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2013, 28(3): 28-33. (in Chinese)
- [19] 杨刚, 何寻阳, 王克林, et al. 不同植被类型对土壤微生物量碳氮及土壤呼吸的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(1): 189-191.
- [20] THOMS C, GATTINGER A, JACOB M, et al. Direct and indirect effects of tree diversity drive soil microbial diversity in temperate deciduous forest [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(9): 1558-1565.
- [21] 王光军, 田大伦, 朱凡, 等. 长沙樟树人工林生长季土壤呼吸特征[J]. 林业科学, 2008, 44(10): 20-24.
- [22] 严俊霞, 秦作栋, 李洪建, 等. 黄土高原地区柠条人工林土壤呼吸[J]. 林业科学, 2010, 46(3): 2-8.
- [23] 高会议, 郭胜利, 刘文兆. 黄土旱塬裸地土壤呼吸特征及其影响因子[J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5217-5224.
- [24] 史宝库, 金光泽, 汪兆洋. 小兴安岭 5 种林型土壤呼吸时空变异[J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5416-5428.
- [25] 杨玉盛, 陈光水, 谢锦升, 等. 格氏栲天然林与人工林土壤异养呼吸特性及动态[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 53-61.
- YANG Y S, CHEN G S, XIE J S, et al. Soil heterotrophic respiration in native *Castanopsis kawakamii* forest and monoculture *Castanopsis kawakamii* plantation in subtropical China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 53-61. (in Chinese)
- [26] 贾曼莉, 郭宏, 杜毅飞, 等. 生草对渭北黄土高原苹果园土壤呼吸的影响[J]. 草地学报, 2014, 22(3): 518-527.
- [27] 侯彦会, 周学辉, 焦婷, 等. 甘肃永昌县放牧草地土壤脲酶活性与土壤肥力的关系初探[J]. 草业学报, 2009, 18(4): 111-116.
- HOU Y H, ZHOU X H, JIAO T, et al. A preliminary study on the relationship between urease activity and soil fertility in the grazing grasslands of Yongchang County, Gansu Province [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(4): 111-116.
- [28] 王晓玥, 孙波. 植物残体分解过程中微生物群落变化影响因素研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(3): 353-359.
- WANG X Y, SUN B. Factors affecting change of microbial community during plant residue decomposition: a review [J]. *Soils*, 2012, 44(3): 353-359. (in Chinese)
- [29] 侯本栋, 马风云, 宋玉民, 等. 不同树种对土壤养分、酶活性与微生物影响的研究[J]. 江西农业大学学报, 2006, 28(5): 734-738.
- [30] 王风芹, 田丽青, 宋安东, 等. 华北刺槐林与自然恢复植被土壤微生物量碳、氮含量四季动态[J]. 林业科学, 2015, 51(3): 16-24.