

# 不同林草复合配置对长柄扁桃林地 土壤养分和酶活性的影响

黄 优<sup>1</sup>, 王进鑫<sup>2</sup>, 冯树林<sup>1</sup>, 吕国利<sup>1</sup>, 刘潇阳<sup>1</sup>, 狄 龙<sup>3</sup>, 王怀彪<sup>4</sup>, 王玉宝<sup>4</sup>

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 榆林市林业产业开发办公室, 陕西 榆林 719000; 4. 榆林市榆阳区林业工作站, 陕西 榆林 719000)

**摘 要:** [目的] 揭示不同草本植物对长柄扁桃林地土壤养分和酶活性的影响规律, 为煤矿塌陷区的植被恢复与生态建设提供理论依据。[方法] 以 6 种林草复合配置模式(沙打旺+长柄扁桃(SC)、草木樨+长柄扁桃(CC)、苜蓿+长柄扁桃(MC)、红豆草+长柄扁桃(HC)、小冠花+长柄扁桃(XC)), 长柄扁桃纯林(CK)林地土壤为研究对象, 采用田间小区试验方法, 测定 0—60 cm 土壤养分和酶活性指标。[结果] ①不同复合模式有机质含量比对照均显著增加, 表现为: MC>CC>SC>XC>HC>CK, 全氮、碱解氮、速效磷、速效钾与有机质变化趋势相似, MC, CC 和 SC 模式增加较为明显, XC 和 HC 模式增加较少; ②除脲酶外, 土壤酶活性在不同复合配置模式间差异显著, SC, CC 和 MC 3 种模式明显优于 HC 和 XC; ③土壤蔗糖酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶与有机质、全氮、碱解氮、速效磷呈显著正相关, 脲酶与速效磷显著正相关, 土壤酶活性与养分间关系紧密, 可用来表征土壤改良效果。[结论] 研究区选用沙打旺+长柄扁桃、草木樨+长柄扁桃、苜蓿+长柄扁桃 3 种林草配置模式对土壤养分积累和酶活性促进具有明显改善作用, 因此选用以上 3 种配置模式更有利于榆林煤矿塌陷地植被恢复。

**关键词:** 长柄扁桃; 林草复合; 配置模式; 土壤养分; 土壤酶活性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)04-0054-07

中图分类号: S158.3

**文献参数:** 黄优, 王进鑫, 冯树林, 等. 不同林草复合配置对长柄扁桃林地土壤养分和酶活性的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4): 54-60. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2019. 04. 009; Huang You, Wang Jinxin, Feng Shulin, et al. Effects of different forest and grass compound configurations on soil nutrients and enzyme activities of *Amygdalus pedunculata*[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4): 54-60.

## Effects of Different Forest and Grass Compound Configurations on Soil Nutrients and Enzyme Activities of *Amygdalus Pedunculata*

Huang You<sup>1</sup>, Wang Jinxin<sup>2</sup>, Feng Shulin<sup>1</sup>, Lü Guoli<sup>1</sup>,

Liu Xiaoyang<sup>1</sup>, Di Long<sup>3</sup>, Wang Huaibiao<sup>4</sup>, Wang Yubao<sup>4</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2. College of Resources and Environment, Northwest A&F

University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Forestry Industry Development Office of Yulin,

Yulin, Shaanxi 719000, China; 4. Yuyang Forestry Work Station of Yulin, Yulin, Shaanxi 719000, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of different herbaceous plants on soil nutrients and soil enzyme activities in the *Amygdalus pedunculata* were studied in order to provide a theoretical basis for vegetation restoration and ecological construction in the subsidence area of coal mines. [Methods] 6 kinds of forest and grass combined cropping patterns [*Astragalus adsurgens* + *Amygdalus pedunculata* (SC), *Melilotus suaveolens* + *Amygdalus pedunculata* (CC), *Medicago sativa* + *Amygdalus pedunculata* (MC), *Onobrychis vicii folia* + *Amygdalus*

收稿日期: 2019-01-19

修回日期: 2019-01-22

资助项目: 国家基础研发计划项目“采煤迹地植被重建与保育技术研究”(2017YFC0504402-4); 陕西省科技统筹计划项目“铅锌矿区尾矿库生态修复关键技术与示范”(2016KTCL03-18); 榆林市林业局科技项目“榆林煤矿塌陷区生态修复治理技术与示范”(201503011458)

第一作者: 黄优(1994—), 女(汉族), 山西省平陆县人, 硕士研究生, 研究方向为林草生态工程。E-mail: youhuang572799@163.com.

通讯作者: 王进鑫(1962—), 男(汉族), 甘肃省镇原县人, 教授, 博士生导师, 主要从事旱区人工植被生态恢复与环境生态学理论研究。E-mail: jwang118@126.com.

*pedunculata* (HC), *Coronilla varia* + *Amygdalus pedunculata* (XC), *Amygdalus pedunculata* (CK)] were used as the research objects. The field plot test method analysis was used to determine the nutrient and soil enzyme activity index of 0—60 cm soil. [Results] ① The organic matter content of different configuration modes significantly increased compared with the control, which was characterized by MC>CC>SC>XC>HC>CK, the trends of total nitrogen, alkali nitrogen, available phosphorus, available potassium and organic matter were similar, and the MC, CC and SC was more obvious, and there was a much smaller increase in HC and XC; ② In addition to urease, the soil enzyme activity was significantly different among different compound configuration modes. The three modes of MC, CC and SC were significantly better than HC and XC; ③ Soil sucrase, catalase and alkaline phosphatase positively correlated with organic matter, total nitrogen, alkali nitrogen and available phosphorus. Urease positively correlated with available phosphorus, and soil enzyme activity and nutrients were closely related. It used to characterize soil improvement effects. [Conclusion] The three forest grass configurations modes of MC, CC and SC had improved the soil nutrient accumulation and enzyme activity. The above three modes should be used to carry out certain vegetation restoration in the subsided land of Yulin coal mine.

**Keywords:** *Amygdalus pedunculata*; forest grass compound; configuration mode; soil nutrient; soil enzyme activity

榆林沙区位于毛乌素沙地南缘,是我国北方的自然生态屏障。榆林市榆阳区沙地矿产资源丰富,近年来大规模开发利用使当地经济迅速发展,但开发的同时使许多采矿区出现地面塌陷、土壤养分下降等问题<sup>[1]</sup>,生态破坏日益严重,经济发展与环境资源之间的矛盾日趋突出,生态恢复迫在眉睫<sup>[2;3]</sup>。近年来,有关学者对矿区治理优良树种选择及其空间配置的研究表明榆林矿区乔木层由单一树种杨树变成以樟子松为优势种的群落,灌木层长柄扁桃、沙地柏的优势得到明显体现,改善了植被结构和土壤养分状况。

目前长柄扁桃的研究主要集中在其生物学特性<sup>[4]</sup>、引种栽培<sup>[5]</sup>、生态经济价值<sup>[6]</sup>等方面,关于长柄扁桃与其他植物复合配置的种间关系还未见相关报道。长柄扁桃(*Amygdalus pedunculata*)作为毛乌素沙区优良固沙植物且适宜沙地栽培的木本油料植物<sup>[7]</sup>,其自身价值决定了其在发展生物质能源和保护榆林沙区脆弱生态环境方面上的应用前景<sup>[8]</sup>。目前榆林地区已发展长柄扁桃林约  $6.67 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>,然而由于沙地土壤养分贫瘠,造成人工林生长十分缓慢。已有研究表明不同植被种植模式对土壤的质量和土壤理化性质的影响不同<sup>[9-10]</sup>,不同林草间作模式在一定程度上有利于提高土壤养分含量和营养水平<sup>[11-12]</sup>,通过合理配置植被恢复模式对土壤养分积累和酶活性的促进都有明显改善作用<sup>[13-14]</sup>。为了充分利用物种间的互利共生作用,改善长柄扁桃林地养分状况,我们早期开展了长柄扁桃与当地主要适生草种种间关系的研究,通过室内研究发现,苜蓿、沙打旺等豆科牧草可促进长柄扁桃种子萌发和幼苗生长,适合与长

柄扁桃进行搭配形成林草复合系统<sup>[15]</sup>,但未进一步对其田间试验效果进行研究。因此,研究矿区不同林草复合配置对长柄扁桃林地土壤养分与酶活性的影响具有重要意义。本研究选择榆林市乡土树种长柄扁桃为目的树种,于2013年进行长柄扁桃不同林草复合配置模式的设计与种植,在2018年进行土壤养分与土壤酶活性的调查分析,对比不同复合配置模式对长柄扁桃土壤养分和酶活性的影响,筛选出对土壤改良效果较好的种植模式,为榆林煤矿塌陷区的植被恢复与生态建设提供理论依据。

## 1 研究区概况

研究区位于榆林市煤炭矿区,该地区矿藏资源丰富,煤炭储量  $2.71 \times 10^{11}$  t,占全国的  $1/3$ <sup>[16]</sup>,采空区达 2 925.64 km<sup>2</sup>,塌陷面积 361.93 km<sup>2</sup>;经度 109°6'E,纬度 38°20'N,平均海拔 1 154 m,属毛乌素沙地南缘风沙草滩区,地势平缓,大多为波状起伏的固定、半固定沙地,土壤为风沙土,其表层疏松,沙地降雨可快速渗入地下形成地下水,水质好可作为优质灌溉水,有利于发展沙区经济林产业。该地属于温带半干旱大陆性边缘季风气候,气候干燥,日照充足。年平均气温 8.3℃,年均降水量 365.7 mm,主要集中在 7—9月,年均蒸发量为 1 508~2 502 mm,无霜期 156 d,干湿交替明显。该区主要优势植被有樟子松(*Pinus sylvestris*)、沙柳(*Salix cheilophila*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、沙竹(*Psammochloa villosa*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)等。

## 2 材料与方法

### 2.1 样地设置

在榆林补浪河乡魏家峁村长柄扁桃基地布设 6 种长柄扁桃与草本的配置模式:沙打旺(*Astragalus adsurgens*) + 长柄扁桃(SC)、草木樨(*Melilotus suaveolens*) + 长柄扁桃(CC)、苜蓿(*Medicago sativa*) + 长柄扁桃(MC)、红豆草(*Onobrychis viciifolia*) + 长柄扁桃(HC)、小冠花(*Coronilla varia*) + 长柄扁桃(XC)、长柄扁桃纯林(CK)作空白对照。其中长柄扁桃林龄为 5 a, 平均株高 149.96 cm, 平均冠幅 154.77 cm × 153.97 cm, 株行距 2.0 m × 3.0 m, 草种沙打旺、草木樨、苜蓿、红豆草、小冠花采用条播法, 在长柄扁桃(2.0 m × 3.0 m)行间进行播种, 即果园行间生草, 生草带边缘远离树干约 1.0 m。春季条播, 行距 20~25 cm, 播深 2~3 cm, 播后镇压, 草带宽 1.0 m, 采样时草种覆盖度达 65%~97%, 高度为 30~123 cm。

### 2.2 样品采集和处理

于 2018 年 9 月份进行土壤取样, 土样采集方法按照多点混合采样法, 每个样品由 S 形 6 点样混合而成, 在长柄扁桃行间草带处取样, 深度为 0—20 cm, 20—40 cm 和 40—60 cm, 同时设置纯林为空白对照组, 每种配置模式的土壤样品按四分法留取 500 g 后, 去除植物根系、碎石、动植物残体等杂物装入塑料袋带回实验室, 过筛后储存备用。

### 2.3 指标测定方法

2.3.1 土壤养分指标测定 有机质(OM)采用重铬酸钾容量法; 全氮(TN)采用凯氏定氮法; 碱解氮(AN)采用碱解扩散法; 速效钾(AK)采用醋酸铵浸提火焰光度法; 速效磷(AP)采用碳酸氢钠浸提钼锑抗比色法。每个处理测定 3 个重复, 每个重复测定 3 次, 结果取其平均值<sup>[17]</sup>。

2.3.2 土壤酶活性测定 蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定, 过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定, 脲酶活性采用苯酚一次氯酸钠比色法测定, 碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定。每个处理测定 3 个平行样本, 每个样本测定 3 次, 结果取其平均值<sup>[18]</sup>。

### 2.4 统计分析

采用 Excel 和 SPSS 20.0 软件对试验数据进行处理和统计分析, Origin 9.0 进行作图。用 one-way ANOVA 和 LSD 法进行方差分析和多重比较, 不同字母表示显著性差异, 用 Pearson 进行不同指标相关性分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同复合配置模式的土壤养分特征

土壤养分可以反映土壤性能的优劣, 它既影响植物生长, 又被植物生长反作用从而影响土壤质量状况<sup>[19]</sup>。林草复合种植后, 土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾均有明显增加。土壤有机质主要来源于动植物残体、根系作用和生物作用等。从表 1 可以看出, 不同土壤层有机质随着土层深度的增加, 有机质含量明显增加, 均呈现一定的表聚性特征。与对照相比, SC, CC, MC, HC, XC 处理的 0—20 cm 土层土壤有机质含量分别增加了 230.23%, 208.82%, 358.20%, 104.82% 和 166.67%, 均与对照达到显著水平( $p < 0.05$ ); 在 20—40 cm 土层, 各配置模式与对照相比, 有机质含量分别增加了 157.06%, 210.22%, 310.22%, 129.44% 和 85.40%; 40—60 cm 土层, 增幅分别为 136.41%, 349.49%, 406.67%, 102.31% 和 123.33%; 与表层相似, 20—40 cm 和 40—60 cm 土层土壤有机质含量各配置模式均较对照显著增加( $p < 0.05$ )。

表 1 不同林草复合配置长柄扁桃土壤有机质含量 g/kg

模式	不同土层深度土壤有机质含量		
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
SC	7.99 ± 0.53 <sup>b</sup>	3.52 ± 0.64 <sup>c</sup>	1.54 ± 0.30 <sup>b</sup>
CC	7.47 ± 0.53 <sup>b</sup>	4.25 ± 0.13 <sup>b</sup>	2.92 ± 0.55 <sup>a</sup>
MC	11.09 ± 0.76 <sup>a</sup>	5.62 ± 0.62 <sup>a</sup>	3.29 ± 0.44 <sup>a</sup>
HC	4.96 ± 1.42 <sup>d</sup>	3.14 ± 1.12 <sup>cd</sup>	1.32 ± 0.12 <sup>bc</sup>
XC	6.45 ± 0.39 <sup>c</sup>	2.54 ± 1.06 <sup>d</sup>	1.45 ± 0.69 <sup>bc</sup>
CK	2.42 ± 0.39 <sup>e</sup>	1.37 ± 0.37 <sup>e</sup>	0.65 ± 0.23 <sup>d</sup>

注: SC: 沙打旺 + 长柄扁桃; CC: 草木樨 + 长柄扁桃; MC: 苜蓿 + 长柄扁桃; HC: 红豆草 + 长柄扁桃; XC: 小冠花 + 长柄扁桃; CK: 长柄扁桃对照。不同字母表示同一土层中不同植被恢复模式间差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

全氮含量是衡量土壤氮素储备供应能力的指标, 氮含量越高表明土壤供氮能力越强<sup>[20]</sup>。从图 1 可以看出, 复合配置模式土壤全氮含量平均波动范围在 0.13~0.90 g/kg, 属于中等水平。除表层是 CC 全氮含量最高外, 20—40 cm 和 40—60 cm 土层土壤全氮含量均表现为: SC > CC > MC > HC > XC > CK, 且 SC, CC, MC 均较对照显著增加( $p < 0.05$ ), 20—40 cm 土层分别增加了 78.89%, 68.89% 和 60.00%, 40—60 cm 土层增加幅度分别为 75.76%, 57.58% 和 48.48%。碱解氮含量高低反映了土壤中近期氮素供给水平, 以及植物生长可利用氮素的高低。5 种复合配置模式和长柄扁桃单独种植土壤碱解氮含量都表

现出明显的层次性,不同土层碱解氮含量变化趋势也一致,均表现为:MC>SC>CC>HC>XC>CK。增幅分别为 MC 40.43%~127.54%,CC 26.91%~77.45%,SC 38.83%~114.84%,HC 12.08%~85.16%,XC 4.73%~64.91%,除 XC 外,其他草种与长柄扁桃复合配置均达到显著水平( $p<0.05$ )。土壤速效磷反映土壤供磷能力。从不同土层土壤速效磷含量对比来看,0—20 cm 土层土壤速效磷含量明显高于 20—40 cm 和 40—60 cm,层次差异明显。不同复合配置模式对土壤速效磷含量的增加十分有限,与赵燕娜等<sup>[21]</sup>对榆林沙区灌木固沙林土壤速效磷性质测定结果一致。与对照相比,只有 MC 增加 1.29%(0—20 cm),22.32%(40—60 cm),但增加效果不显著( $p>0.05$ ),20—40 cm SC,CC,MC 均显著增加,增幅分别为 25.33%,23.33%,45.86%。其他

草本与长柄扁桃复合配置土壤速效磷含量较对照均有所降低,说明草本植物的生长对于土壤速效磷含量的增加十分有限。速效钾能够被植物直接吸收利用的钾素,可以判断土壤中钾素的实际供应状态。6 种配置模式不同土层速效钾含量对比表明,随着土壤深度增加,速效钾含量随之降低,表层土壤速效钾含量最高,但 20—40 cm 和 40—60 cm 土层速效钾含量下降不明显。在 0—20 cm 土层土壤速效钾含量较对照分别增加了 47.24%,25.84%,34.10%,11.55%,1.11%;在 20—40 cm 土层,各配置模式与对照相比,速效钾含量分别增加了 74.92%,29.40%,54.41%,24.05%,22.25%;40—60 cm 土层,增幅分别为 75.74%,44.18%,78.99%,45.24%,31.55%;各种配置模式土壤速效钾均较对照显著增加,说明植物对土壤速效钾的含量具有一定的改善作用。

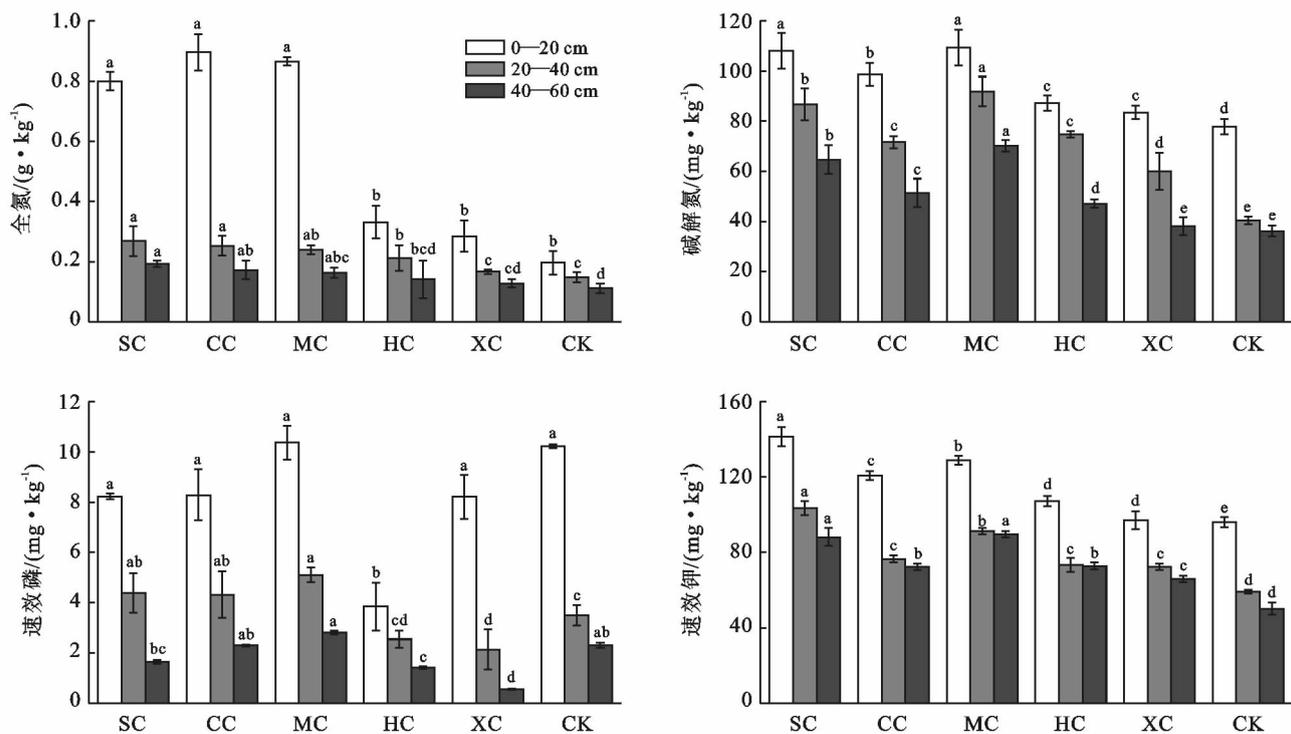


图 1 不同林草复合配置模式长柄扁桃土壤氮磷钾含量变化

注:SC 为沙打旺+长柄扁桃,CC 为草木樨+长柄扁桃,MC 为苜蓿+长柄扁桃,HC 为红豆草+长柄扁桃,XC 为小冠花+长柄扁桃,CK 为长柄扁桃对照;同组不同小写字母为  $p<0.05$  水平下差异显著。下同。

### 3.2 不同复合配置模式土壤酶活性特征

不同复合配置模式长柄扁桃土壤酶活性方差分析结果如图 2 所示。除 XC 外,其余复合配置模式土壤蔗糖酶活性均有所增加,大小顺序依次为:MC>SC>CC>HC>对照>XC,分别较对照增加了 111.21%,75.76%,34.82%,5.30%和 -6.11%,MC 和 SC 达到显著水平( $p<0.05$ );在 0—20 cm 土层,SC、MC 模式土壤蔗糖酶活性最高,XC 模式活性最低,其他模式

间土壤蔗糖酶活性无显著差异( $p>0.05$ );与对照相比,20—40 cm 土层中不同复合配置模式长柄扁桃土壤蔗糖酶活性增幅为 83.33%~485.09%,均达到显著水平( $p<0.05$ ),40—60 cm 土层增幅较小,为 10.49%~240.78%,MC,SC 和 CC 达到显著水平( $p<0.05$ )。在不同复合配置模式中,0—20 cm 和 40—60 cm 土层的土壤过氧化氢酶与对照相比没有显著差异( $p>0.05$ ),20—40 cm 土层虽然差异显著但均

低于对照,这说明本研究中林草配置模式对过氧化氢酶活性影响不大。与过氧化氢酶类似,不同复合配置模式长柄扁桃土壤脲酶活性均无显著差异( $p>0.05$ ),且普遍低于对照,林草复合未增加长柄扁桃土壤过氧化氢酶和脲酶活性。

除 HC 模式外,其余复合配置模式土壤碱性磷酸酶活性均有所增加,大小顺序为  $MC>SC>CC>XC$

$>CK>HC$ ,分别较对照增加了 44.06%,40.62%,17.71%,3.13%和-9.18%,MC 和 SC 达到显著水平;不同复合配置模式碱性磷酸酶活性的方差分析表明,0—20 cm 土层,除 HC 模式外,与对照均无显著差异( $p>0.05$ ),40—60 cm 土层碱性磷酸酶较对照增加 19.17%~204.98%,且不同复合配置模式均达到显著水平( $p<0.05$ )。

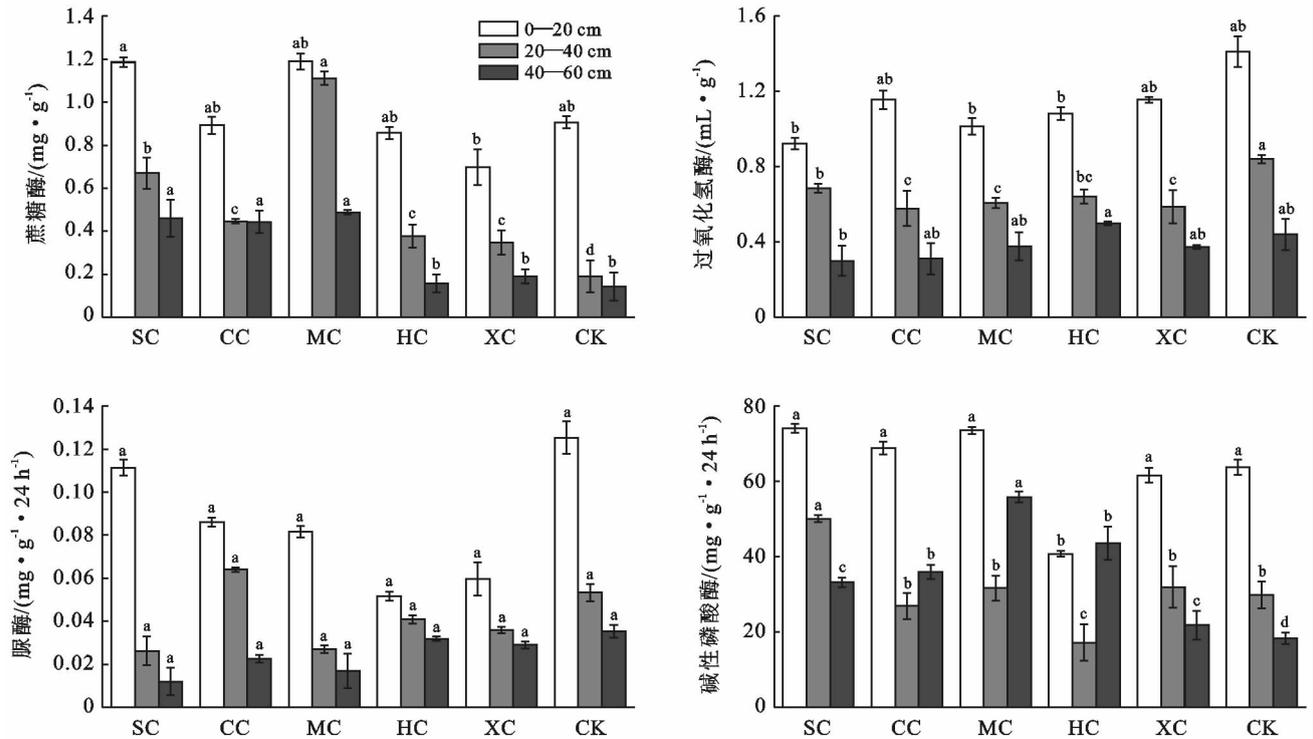


图 2 不同林草复合配置模式长柄扁桃土壤酶活性特征

### 3.3 土壤养分与土壤酶活性的相关性分析

土壤养分含量的高低制约着土壤酶活性的高低,土壤酶活性的反馈作用又会使土壤养分含量发生变化,二者之间相互作用,密不可分<sup>[22-23]</sup>。为了揭示不同复合配置模式长柄扁桃土壤的变化,对土壤酶活性和养分进行了相关性分析,结果详见表 2,蔗糖酶除了在 0—20 cm,20—40 cm 土层与速效钾含量不显著相关( $p>0.05$ )外,与其余养分含量在不同土层间均显著正相关( $p<0.05$ );过氧化氢酶只有在 20—40 cm 土层与速效磷含量呈显著正相关( $p<0.05$ );脲酶在 40—60 cm 土层与土壤有机质、碱解氮、速效钾含量呈显著负相关( $p<0.01$ );碱性磷酸酶与土壤养分普遍具有显著正相关( $p<0.05$ )。整个土层中蔗糖酶除和速效钾外与其它养分指标均呈极显著正相关( $p<0.01$ ),过氧化氢酶、碱性磷酸酶与土壤养分指标均达到极显著正相关( $p<0.01$ ),而脲酶只与速效磷有显著正相关( $p<0.05$ )。由此说明土壤中各种酶和

养分含量之间相互作用共同影响长柄扁桃林地土壤状况。可见,在长柄扁桃林下中种植不同草本,将增强土壤酶活性,从而促进土壤养分的积累。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

各种养分含量在剖面上都具有明显的层次差异性,表层 0—20 cm 土层养分含量最高,向下逐渐降低,不同土层间差异显著。表明土壤养分不仅受植物根系的影响,而且更易受枯枝落叶、气候等其他外界环境影响,同时又反映了植被对土壤养分的表聚效应。在 0—60 cm 土层中,不同草本与长柄扁桃复合种植有机质含量比对照均显著增加,表现为:  $MC>CC>SC>XC>HC>CK$ ,分别比对照增加了 4.50,3.30,2.94,2.35,2.12 倍;全氮、碱解氮、速效磷、速效钾与有机质变化趋势相似,MC,CC,SC 增加较为明显,XC 和 HC 增加较少;具体而言,全氮增加幅度

为 1.29~2.79 倍,碱解氮是对照的 1.18~1.79 倍,速效磷达到 1.33~2.23 倍,速效钾为 1.15~1.62 倍。可以看出,不同草本与长柄扁桃复合配置模式对土壤养分状况改善作用不同,但均高于对照。土壤养分含量高低受多种因素影响,但可归纳为两方面:一方面是输入,即进入土壤的养分,主要包括植物凋落物、地下根系分泌和微生物腐解作用等使土壤酶活性和有机质含量增加,提高土壤肥力;另一方面是输出,即通过淋溶作用等将部分土壤养分带走。植物腐殖质分泌的胡敏酸类物质能促进植物生长发育,同时通过络合作用有助于修复污染土壤<sup>[17]</sup>。单纯种植一种

植物容易造成沙地裸露,有机质含量偏低。对照土壤养分含量较低,可能是由于只有长柄扁桃单一植物,没有草本对下层土壤进行覆盖遮蔽,导致降雨对土壤养分的淋溶更高,更不利于土壤养分积累。林下植物能够促进营养元素在土壤表层富集,且草本植物能够通过减少地表径流量来降低磷、钾元素的流失。各种配置模式中全氮、碱解氮含量的大小顺序不同,说明土壤含氮量高的土壤中真正能被植物吸收利用的氮元素不一定高,但几种配置模式氮素含量均高于对照,可能是由于种植豆科牧草的固氮作用,同时促进土壤有机质的累积<sup>[24]</sup>。

表 2 土壤养分含量与土壤酶活性相关性分析

项目	土层深度/cm	有机质	全氮	碱解氮	速效磷	速效钾
蔗糖酶	0—20	0.332*	0.417*	0.373*	0.483**	0.278
	20—40	0.860**	0.591**	0.787**	0.414*	0.331
	40—60	0.696**	0.750**	0.798**	0.449**	0.698**
	0—60	0.500**	0.466**	0.537**	0.526**	0.195
过氧化氢酶	0—20	0.369	-0.068	0.208	-0.042	-0.510*
	20—40	0.343	0.128	-0.176	0.581*	-0.271
	40—60	0.089	0.256	-0.127	-0.192	-0.397
	0—60	0.697**	0.740**	0.651**	0.614**	0.467**
脲酶	0—20	-0.119	-0.026	0.108	-0.015	-0.020
	20—40	-0.317	-0.082	-0.236	-0.108	-0.152
	40—60	-0.430**	-0.402*	-0.492**	-0.086	-0.462**
	0—60	0.107	0.223	0.200	0.325*	0.179
碱性磷酸酶	0—20	0.428**	0.446**	0.402*	0.407*	0.339*
	20—40	0.331*	0.405*	0.370*	0.318	0.484**
	40—60	0.621**	0.489**	0.523**	0.611**	0.250
小计	0—60	0.459**	0.576**	0.537**	0.594**	0.484**

注: \*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关; \* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

土壤养分和酶活性是林草复合系统的重要组成部分,直接影响林木生长,参与或促进土壤中一系列复杂的生理生化反应,可以客观地反映土壤肥力状况。土壤蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶能很好地表征土壤碳、氮、磷的供应程度与土壤腐殖化程度及有机质的积累程度<sup>[25]</sup>。本研究中不同土层土壤酶活性差异显著,均表现为 0—20 cm 最高。有研究表明红壤丘陵区 0—40 cm 土层的脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性随土层深度的增加而逐渐下降<sup>[26]</sup>。土壤酶活性不仅与土壤理化性质有关,而且与植被类型、土壤微生物数量、种类、酶类本身的性质也密切相关,不同植被类型将产生不同的地被覆盖物,其种类和数量对土壤酶活性的影响也不同<sup>[27]</sup>。本研究不同复合配置模式在不同土层的土壤酶活性对比发现,MC 和 SC 模式蔗糖酶和碱性磷酸酶活性要高于其他

模式,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,这与王凤芹<sup>[28]</sup>等和翟辉<sup>[25]</sup>等研究结果较一致,原因可能是苜蓿、沙打旺等豆科植物其根部共生的根瘤菌可以更好地固定大气中的氮素,进而改善该配置模式长柄扁桃土壤系统的物质组成及肥力水平。复合配置模式物种多样性高于对照,增加了土壤微生物种类和数量,从而促进土壤酶活性的增加,故复合配置模式蔗糖酶和碱性磷酸酶活性高于对照。但过氧化氢酶是氧化还原酶,其活性变化不同于蔗糖酶、脲酶和碱性磷酸酶,在不同复合配置模式中不同于其他酶活性的稳定性,可能是由于参与土壤物质和能量的转化过程,分解土壤中对植物有害的过氧化氢,而不同植被生长,促使土壤有机碳的积累增加,形成的还原条件土壤环境抑制了过氧化氢酶活性的增强。说明不同植物种类的选择对土

壤过氧化氢酶的活性影响不同,而对于过氧化氢酶活性的异常变化需要进一步研究。

土壤养分与酶活性之间存在一定的相关性。有研究表明<sup>[29]</sup>不同植被恢复方式对土壤酶改善作用不同,且土壤全氮与土壤酶活性呈显著或极显著相关,土壤脲酶和碱性磷酸酶活性与土壤养分之间呈显著或极显著相关关系,认为脲酶和碱性磷酸酶可以作为衡量土壤肥力水平的指标。整个土层中,脲酶只与速效磷含量呈正相关( $p < 0.05$ ),蔗糖酶与有机质、全氮、碱解氮和速效磷均呈显著正相关( $p < 0.05$ ),过氧化氢酶和碱性磷酸酶与土壤养分指标呈极显著正相关( $p < 0.01$ )。本研究结果与桑巴叶等<sup>[30]</sup>的研究结果一致,但与其他文献结果不同,研究发现土壤中蔗糖酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性与土壤主要养分因子间均存在极显著或显著的正相关关系,这种结果差异的原因,还需在今后研究中进一步考证。

## 4.2 结论

(1) 草本植物与长柄扁桃的复合种植模式间土壤养分含量与对照相比差异显著。在 0—60 cm 土层中,不同草本与长柄扁桃复合种植土壤养分含量比对照均显著增加,具体顺序为:MC > CC > SC > XC > HC > CK,其中 MC,CC 和 SC 增加较为明显,XC 和 HC 增加较少。

(2) 不同林草复合配置间土壤酶活性差异显著,SC,CC 和 MC 这 3 种模式明显优于其他模式,HC 和 XC 模式不利于土壤酶活性提高。

(3) 土壤酶活性与养分间关系紧密,不同草种的土壤改良作用各异。该地区选用 SC,CC 和 MC 这 3 种林草配置模式对长柄扁桃林地土壤养分积累和酶活性的促进具有明显改善作用。

## 【参 考 文 献】

[1] 张雅馥,王金满,祝宇成. 黄土区采煤塌陷对土壤全氮和有机质含量空间变异性的影响[J]. 生态学杂志,2018,37(6):1676-1684.

[2] 苏帅,杨永刚,黄磊. 矿区生态修复过程中不同立地类型土壤水动力学特性[J]. 水土保持通报,2018,38(1):18-23.

[3] 田淑英,胡虹彦,秦国伟. 采煤塌陷区生态修复制度优化研究:基于公共品供给效率视角[J]. 生态经济,2018,34(8):169-173.

[4] Lu Cairui, Li Cong, Chen Bang, et al. Composition and antioxidant, antibacterial, and anti-HepG2 cell activities of polyphenols from seed coat of *Amygdalus pedunculata* Pall. [J]. Food Chemistry, 2018,265(6):111-113.

[5] 鲁春艳,井赵斌,冯喜兵,等. 植物生长调节剂对长柄扁桃种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 西北林学院学报,

2015,30(5):118-125.

- [6] 罗树伟,郭春会,张国庆,等. 沙地植物长柄扁桃光合特性研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2010,38(1):125-132.
- [7] 郭改改,封斌,麻保林,等. 不同区域长柄扁桃抗旱性的研究[J]. 植物科学学报,2013,31(4):360-369.
- [8] 符雅儒,万子俊. 沙地植物柄扁桃的生物学特性及引种栽培的研究[J]. 西北植物学报,1996,16(5):19-23.
- [9] 王昭艳,左长清,曹文洪,等. 红壤丘陵区不同植被恢复模式土壤理化性质相关分析[J]. 土壤学报,2011,48(4):715-724.
- [10] 张桂霞,杨静慧,刘艳军,等. 4 种乔灌组合栽植方式对盐碱地常见绿化植物生长的影响[J]. 西南大学学报:自然科学版,2016,38(7):82-87.
- [11] 王海明,陈治谏,李贤伟,等. 不同退耕还林林草模式土壤与林草间氮素变化规律研究[J]. 水土保持研究,2006,13(2):124-127.
- [12] 王雅,刘爽,郭晋丽,等. 黄土高原不同植被类型对土壤养分、酶活性及微生物的影响[J]. 水土保持通报,2018,38(01):62-68.
- [13] 杨君珑,李小伟,曹兵,等. 六盘山生态移民迁出区不同植被恢复模式对土壤养分和土壤酶活性的影响[J]. 西南林业大学学报:自然科学,2018,38(5):13-19.
- [14] 张月萌,王倩姿,孙志梅,等. 间作豆科作物对山药田土壤化学和生物学性质的影响[J]. 应用生态学报,2018,29(12):4071-4079.
- [15] 张瑞琦,王进鑫,王秀青,等. 4 种草本植物浸提液对长柄扁桃种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 西北林学院学报,2018,33(5):94-99.
- [16] 张生平. 对榆林市矿区生态环境恢复及发展生态产业的探讨[J]. 现代园艺,2012,4(20):156-156.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京:中国农业出版社. 2000.
- [18] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:中国农业出版社. 1986.
- [19] Fang Shengzuo, Xie Baodong, Liu Jiujun. Soil nutrient availability, poplar growth and biomass production on degraded agricultural soil under fresh grass mulch[J]. Forest Ecology & Management, 2008, 255(5):1802-1809.
- [20] 尹娜,魏天兴,张晓娟. 黄土丘陵区人工林土壤养分效应研究[J]. 水土保持研究,2008,15(2):209-211.
- [21] 赵燕娜,廖超英,李晓明. 毛乌素沙地 4 种固沙植物根际与非根际土壤生物学特性[J]. 干旱区研究,2015,32(4):680-686.
- [22] 刘成刚,吴永波,薛建辉,等. 刺槐滇柏混交林及纯林土壤酶与养分相关性研究[J]. 土壤通报,2012,43(6):1427-1431.

度随着枝条长度的增加其变化特点表现不一致,关于这点还需要结合不同植物种枝条微观结构及其纤维素、半纤维素、木质素等化学组分进行进一步研究。

### [参 考 文 献]

- [1] Bressolier Y F T C. Studies on wind and plant interactions on french atlantic coastal dunes[J]. Journal of Sedimentary Research, 1977,47(1):331-338.
- [2] 刘艳萍,刘铁军,蒙仲举. 草原区植被对土壤风蚀影响的风洞模拟试验研究[J]. 中国沙漠,2013,33(3):668-672.
- [3] 孙艳萍,张晓萍,刘建祥,等. 黄土高原水蚀风蚀交错带植被覆盖度动态变化[J]. 干旱区研究,2013,30(6):1036-1043.
- [4] 赵彩霞,郑大玮,何文清. 植被覆盖度的时间变化及其防风蚀效应[J]. 植物生态学报,2005,29(1):68-73.
- [5] Gartshore I S. Discussion: "An investigation of the forces on three dimensional bluff bodies in rough wall turbulent boundary layers" (Lee, B. E. and Soliman, B. F. 1977, ASME J. Fluids Eng. 99, pp. 503-509)[J]. Journal of Fluids Engineering, 1977, 99(3):510.
- [6] 刘鹏飞. 4种植物侧根分支处抗折力学特性的研究[D]. 内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
- [7] 郑永刚. 4种植物直根抗折力学特性的研究[D]. 内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2015.
- [8] 张欣,刘静,郑永刚,等. 4种植物直根抗折力和抗折强度的研究[J]. 水土保持研究,2016,23(5):338-342.
- [9] 郭维俊,黄高宝. 小麦根系力学性能及微观结构研究[J]. 农业机械学报,2010,41(1):92-95.
- [10] 赵多佳,郭维俊,宋言明,等. 小麦茎秆抗拉性能研究[J]. 安徽农业科学,2008,36(14):5837-5838.
- [11] 陈艳军,吴科斌,张俊雄,等. 玉米秸秆力学参数与抗倒伏性能关系研究[J]. 农业机械学报,2011,42(6):89-92.
- [12] 杨洪昌,范源洪. 甜高粱抗倒伏性状评价及其倒伏系数初探[J]. 作物杂志,2008,18(3):54-56.
- [13] 向波,刘王庆,孙仙奇,等. 水稻节间的弹性模量和拉伸强度极限的研究[J]. 安徽农业科学,2007,35(18):5388-5389.
- [14] 莫永生,杨亲琼,刘王庆,等. 高大籼稻的抗折力与茎秆结构的关系[J]. 作物杂志,2007(2):40-42.
- [15] 向波. 水稻节间的弹性模量和拉伸强度极限及相关性状的研究[D]. 广西南宁:广西大学,2007.
- [16] 蔡中全. 水稻茎秆抗折力及其相关性状研究[D]. 广西南宁:广西大学,2008.
- [17] 薛冬梅. 3种植物枝条生物力学特性的研究[D]. 内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.
- [18] 格日乐,斯琴,刘俊宇. 6种防风植物枝条生物力学特性及影响因素[J]. 中国沙漠,2013,33(5):1333-1339.
- [19] 陈志强. 固沙先锋树种:沙柳[J]. 农民致富之友,2016(18):114-115.
- [20] 王丽丽. 柠条生物学特性及在治沙造林中的应用[J]. 现代农村科技,2015(9):34-34.
- [21] 韩文娟. 科尔沁沙地飞播白沙蒿生理生态适应性研究[D]. 内蒙古呼和浩特:内蒙古师范大学,2012.
- [22] 席德强. 沙棘的生物学特性与开发利用[J]. 生物学通报,2008,43(9):9-10.
- [23] 高明刚,杨军. 杨柴的生理特性及应用的调查分析[J]. 吉林林业科技,2000(4):36-38.
- [24] 何秀平,王保栋,谢琳萍. 柽柳对盐碱地生态环境的影响[J]. 海洋科学,2014,38(1):96-101.
- [25] 格日乐,额尔敦花,宋想斌,等. 6种水土保持植物枝条的数量特征[J]. 中国水土保持科学,2012,10(6):71-76.
- [26] 吕春娟,陈丽华. 华北典型植被根系抗拉力学特性及其与主要化学成分关系[J]. 农业工程学报,2013,29(23):69-78.
- [27] 格日乐,乌仁图雅,左志严. 4种植物枝条与根系生物力学特性及其影响因素研究[J]. 内蒙古农业大学学报:自然科学版,2015,36(1):46-54.

(上接第60页)

- [23] 陈彩虹,叶道碧. 4种人工林土壤酶活性与养分的相关性研究[J]. 中南林业科技大学学报,2010,30(6):64-68.
- [24] 韩东苗,冯茂松,吴韬,等. 柏木低效林改造对土壤微生物、酶活性及养分的影响[J]. 东北林业大学学报,2016,44(5):57-62.
- [25] 翟辉,张海,邱梅,等. 黄土高原退耕地不同类型林分土壤生物学活性的研究[J]. 西北林学院学报,2016,31(4):33-38.
- [26] 张超,刘国彬,薛蕙,等. 黄土丘陵区不同林龄人工刺槐林土壤酶演变特征[J]. 林业科学,2010,46(12):23-29.
- [27] 冯金玲,郑新娟,杨志坚,等. 5种栽培模式对油茶土壤微生物及酶活性的影响[J]. 西南林业大学学报,2016,36(2):10-16.
- [28] 王凤芹,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.
- [29] Gong Qingli, Zhai Bingnian, Zheng Wei, et al. Effects of grass cover combined with different fertilization regimes on soil nutrients and enzyme activities in apple orchard in Weibei dryland, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018,29(1):205-209.
- [30] 桑巴叶,朱玉伟,陈启民,等. 伊犁河谷不同造林模式土壤养分与酶活性的关系[J]. 水土保持通报,2018,38(3):228-232.