

退化草牧场防护林土壤腐殖质碳组分特征及酶活性

陈立新¹, 李刚^{1*}, 李少博^{2,1*}, 宋志韬^{3,1}, 段文标^{1**}

(1. 东北林业大学, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 内蒙古林业科学研究院生态功能与森林碳汇研究所, 内蒙古呼和浩特 010010;
3. 黑龙江省有色金属地质勘查研究总院, 黑龙江 哈尔滨 150046)

摘要: [目的] 探讨不同防护林结构的配置、不同林龄草牧场防护林对土壤腐殖质碳组分特征和酶活性的影响及两者的关系, 寻找最佳草牧场防护林结构的配置方式。 [方法] 采用对比分析的方法, 对草牧场防护林和无林草牧场(对照)土壤腐殖质碳组分特征和土壤酶活性进行了研究。 [结果] 林龄为 15 年距林带 0 m 处, 网格状草牧场防护林的胡敏酸和富里酸总碳量、胡敏酸碳组分、富里酸碳组分和胡敏素的含量以及过氧化氢酶、多酚氧化酶、脲酶、蛋白酶、磷酸酶的活性等测定指标均分别比对照显著提高 70.26%、120.97%、73.76%、139.84%、51.80%、85.00%、42.17%、94.65%、53.77%、49.81%; 与带状、疏林状草牧场防护林相比, 网格状草牧场防护林除土壤有机质、富里酸碳组分、胡敏素、蔗糖酶、蛋白酶、磷酸酶的差异不显著外, 以上 10 个测定指标中的其余指标差异均显著。对于网格状草牧场防护林, 土壤富里酸碳组分、胡敏素、多酚氧化酶、脲酶等测定指标在林龄为 1~5 年时随其增大而增加, 5~15 年缓慢降低, 15 年后下降速度增大; 距离林带 50 m 处土壤有机质含量、胡敏素、多酚氧化酶活性高于距离防护林 0 m 和 100 m, 且 100 m 处较 0 m 处低, 其它测定指标基本上随距离林带距离的增加而减小。距离防护林带 100 m 处时, 部分指标与对照差异不显著, 土壤改良效益基本消失。胡敏酸和富里酸总碳量与过氧化氢酶、多酚氧化酶、脲酶、磷酸酶呈极显著正相关, 胡敏酸与蛋白酶呈极显著正相关; 富里酸与过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶、磷酸酶呈极显著正相关; 胡敏素与蔗糖酶呈显著负相关。 [结论] 林龄为 5 年的网格状防护林土壤富里酸碳组分、胡敏素、多酚氧化酶和脲酶活性等最佳; 对防护林及其多数土壤腐殖质碳组分和酶活性升高的分析表明, 网格状防护林的带间距应小于 200 m。

关键词: 退化草牧场防护林; 配置类型; 土壤腐殖质碳组分; 土壤酶活性

中图分类号: S725.25

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2017)03-0494-09

Characteristics of Carbon Components in Soil Humus and Enzyme Activities in Degraded Pastureland Shelterbelts

CHEN Li-xin¹, LI Gang¹, LI Shao-bo^{1,2}, SONG Zhi-tao², DUAN Wen-biao¹

(1. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China; 2. Research Institute of Ecological Function and Forest Carbon Sink, Inner Mongolia Academy of Forestry, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China; 3. Non-ferrous Metals Geological Exploration Research Institute in Heilongjiang Province, Harbin 150046, Heilongjiang, China)

Abstract: [Objective] This study aims at discussing the effect of the pastureland shelterbelts with different structural configurations and different stand ages on the characteristics of carbon components in soil humus and enzyme activities, and the relationship between them. [Method] Comparative analysis is used to research the characteristics of

收稿日期: 2016-11-23 修回日期: 2017-01-16

基金项目: 国家林业局科技成果推广项目(2012-45)和科技部农业科技成果转化资金项目(2011GB23600010)。

作者简介: 陈立新, 女, 博士, 教授, 博导。研究方向: 森林土壤, 植物营养, 林地养分管理。E-mail: lxchen88@163.com

* 共同第一作者。

** 通讯作者: 段文标, 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事森林与气象、水土保持与荒漠化防治的研究。E-mail: dwbiao88@163.com

soil humus carbon fraction and soil enzyme activity of the degenerated pastureland shelterbelt and the pastureland without forest (control) for different stand age and configuration types (grid-shaped, belt-shaped, and sparse-shaped types). [Result] In the soil at a distance of 0 m from 15-year-old grid-shaped pastureland shelterbelt, the soil organic matter (SOM), total contents of humic acid (HA) and fulvic acid (FA), HA carbon fraction, FA carbon fraction, humin, the activity of catalase, polyphenol oxidase, urease, protease and phosphatase, were 70.26%, 120.97%, 73.76%, 139.84%, 51.80%, 85.00%, 42.17%, 94.65%, 53.77%, 49.81% higher compared with the control; as comparison with belt-shaped, sparse-shaped pastureland shelterbelt, non-significant difference was observed in SOM, FA carbon fraction, humin, saccharase, protease, and phosphatase, but significant difference was found in the other indicators measured. As for the grid-shaped pastureland shelterbelt, the FA carbon fraction, humin, polyphenol oxidase, urease in the soil increased with the stand age in the 1st to 5th year, then slowly decreased in the age of 5 ~ 15, and sharply declined afterward. The SOM, humin, and polyphenol oxidase activity at a distance of 50 m from grid-shaped pastureland shelterbelt were higher than those at a distance of 0 m and 100 m, moreover, lower at a distance of 100 m than those at a distance of 0 m. The other indicators mainly decreased over the increasing distance from grid-shaped pastureland shelterbelt. There was no significant difference for partial indicators as comparison with the control, its soil melioration benefit nearly disappeared. Total carbon contents of HA and FA were significantly positively correlated with the catalase, polyphenol oxidase, urease, and phosphatase. There was a highly significant positive correlation between HA and protease. HA was highly positively correlated with the catalase, saccharase, urease, and phosphatase. There was significantly negative correlation between humin and saccharase. [Conclusion] There is a definite correlation between total carbon content of HA and FA, HA, FA, humin, respectively. The FA carbon fraction, humin, polyphenol oxidase and urease activities in the soil are the best when the stand age of the grid-shaped pastureland shelterbelt is 5. The analysis on the most soil humus carbon components and soil enzyme activities improved by the shelterbelt suggests that the distance between the shelterbelts of the grid-shaped pastureland shelterbelts should be less than 200 m. Therefore, it is suggested that less than 200 m distance between shelterbelts should be used as main configuration type of pastureland shelterbelts when they are established in the future.

Keywords: degraded pastureland shelterbelt; configuration types; soil humus carbon component; soil enzyme activity.

草牧场防护林作为具有特殊功能和意义的防护林林种,不仅可以增加牧草产量,抵御鼠灾和虫害,还可以提高草原生态系统稳定性、物种多样性和景观多样性^[1]。以往国内外学者偏重对农田防护林的研究^[2-7],而对草牧场防护林的研究则相对较少,并且主要侧重于草牧场防护林营造技术^[1]、综合效益^[8]、草地生产力^[9]、碳储量^[10-11],以及对土壤养分、水分的改良效应^[12-14]等方面,而退化草牧场防护林不同结构的配置方式和林龄对土壤腐殖质碳组分特征及其酶活性影响的研究甚少。本试验选择内蒙古赤峰市巴林右旗短角牛场作为研究区域,探讨不同防护林结构的配置、不同林龄草牧场防护林对土壤腐殖质碳组分特征和酶活性的影响及其两者的关系,旨在揭示草牧场防护林土壤性质的变化趋势,为未来选择草牧场防护林结构的配置类型提供基础数据和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区赤峰市巴林右旗短角牛场(43°12'~44°27' N, 118°10'~120°05' E),属巴林右旗中南部及东南部丘陵,丘间有宽广波状冲积平原和沙地,属半干旱大陆性季风气候,年均气温4.9℃,年均无霜期131 d,年均降水量357.6 mm,6—8月降水量平均占年总降水量的75.5%,年均蒸发量为2 103.0 mm,约为年降水量的6倍,平均湿润度0.35。地带性土壤为栗钙土,植被主要为草原植被类型,如草甸草原植被、沙生植被和沙滩草甸植被,造林树种主要有杨树(*Populus* spp.),樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litvin.),红皮云杉(*Picea koraiensis* Nakai.),油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.),白榆(*Ulmus pumila* linn.),胡枝子(*Lespedeza*

bicolor Turcz.)、黄柳 (*Salix gordejvii* Chang et SkV.)、小叶锦鸡儿 (*Caragana micorphylla* Lam.)、沙枣 (*Elaeagnus angustifolia* Linn.)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides* Linn.)、旱柳 (*Salix matsudana* Koidz.)等, 优势植物为羊草 (*Leymus Chinensis* Trin.)。

1.2 样地设置与样品采集

在内蒙古赤峰市巴林右旗大板镇短角牛场, 选择相似立地条件不同林龄、不同结构配置类型(网格状林、带状林、疏林、无林地(对照))的草牧场防护林设置样地。试验样地概况见表1。

表1 试验样地概况

Table 1 General situation of experimental plots

防护林带结构 Shelterbelt configuration	林龄 Stand age/a	形状和规格 Shape and size	林带宽 Shelterbelt width/m	树种组成及株、行距 Tree species composition and spacing
网格状防护林 Grid-shaped shelterbelt	1	矩形, 250 m × 300 m	8.0	其中3行为杨树, 1行为樟子松, 株行距为2.0 m × 2.5 m, 杨树和樟子松之间距离为3.0 m。
	2	矩形, 250 m × 300 m	8.0	其中3行为杨树, 1行为樟子松, 株行距为2.0 m × 2.5 m, 杨树和樟子松之间距离为3.0 m。
	5	矩形, 200 m × 250 m	16.0	其中3行为杨树, 4行为沙棘, 杨树株行距为2.5 m × 2.5 m, 沙棘株行距为2.0 m × 2.0 m, 杨树和沙棘之间的距离为3 m。
带状防护林 Belt-shaped shelterbelt	15	矩形, 250 m × 300 m	10.0	其中3行为杨树, 2行为沙棘, 杨树株行距为2.5 m × 2.5 m, 沙棘株行距为2.0 m × 2.0 m, 杨树和沙棘之间的距离为3 m, 在草牧场防护林庇护下的草场内, 一部分草场有耕作过的痕迹。
	25	矩形, 300 m × 400 m	8.0	其中3行为杨树, 1行为樟子松, 株行距为2.5 m × 2.5 m, 杨树和樟子松之间距离为3.0 m, 在草牧场防护林庇护下的草场内, 也有耕作过和人车践踏以及踩实的痕迹。
疏林状防护林 Sparse-shaped shelterbelt	15	带状	8.0	5行均为旱柳, 株行距为2.0 m × 2.0 m, 带间距为100 m。
	25	带状	5.0	3行均为杨树, 株行距为2.5 m × 2.5 m, 带间距为100 m。
无林草牧场(对照) Pastureland without forest (control)	—	—	—	草场面积约为0.18 km ² , 树种为杨树, 树木生长缓慢, 株间距较远, 且分布不均匀, 共有杨树50余株。 面积约为1 km ² , 与25年生网格状草牧场防护林毗邻和接壤。

在网格状防护林短边的中点处, 按离开其距离0 m(带内)、50 m和100 m分别设置3块样地。带状防护林按防护距离0 m(林内)和50 m分别设置2块样地(图1)。疏林和无林草牧场在其内部不同位置设置3块样地, 采集0~20 cm土壤样品, 并作3

次重复。将野外采集土壤装袋、标号运回实验室后, 分成2份, 一份鲜样捡出石块、根系后, 过筛(2 mm)后储藏于4℃冰箱内保存, 用于土壤酶的测定, 另一份经风干、研磨、过筛(0.25 mm)后装瓶保存, 用于其他指标的测定。

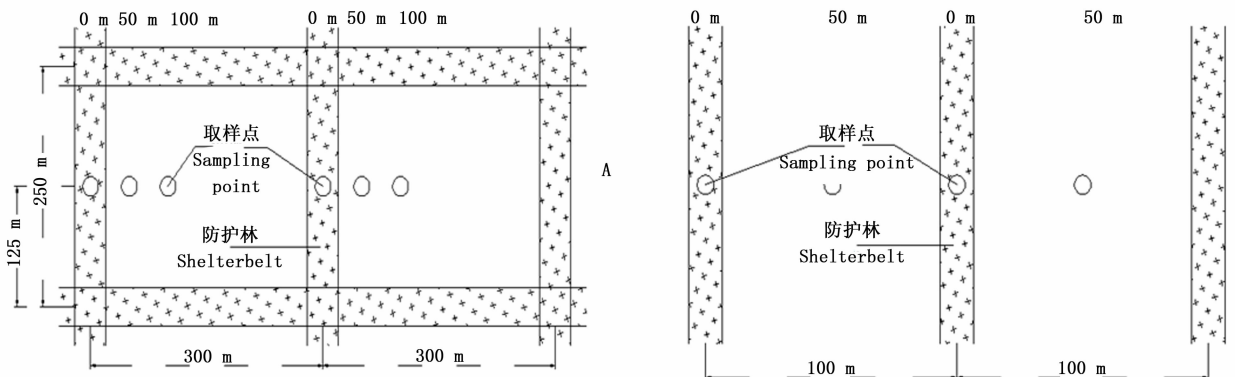


图1 两种结构配置草牧场防护林采样点示意图(A:网格状防护林;B:带状防护林)

Fig. 1 Sample point diagram of pastureland shelterbelts of two structural configuration types

(A: Grid-shaped shelterbelt; B: Belt-shaped Shelterbelt)

1.3 样品测定

土壤有机质含量测定采用重铬酸钾硫酸氧化法^[15];腐殖质分组测定采用熊毅-傅积平改进法^[16];过氧化氢酶测定采用容量法,活性以 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{KMnO}_4 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 表示;多酚氧化酶测定采用碘量滴定法,活性以 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{I}_2 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 表示;蔗糖酶的测定方法采用比色法,活性以葡萄糖 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 表示;脲酶的测定方法采用比色法,活性以 $\text{NH}_3\text{-N} \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 表示;蛋白酶的测定方法采用氨基氮比色法,活性以 $\text{NH}_2\text{-N} \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 表示;磷酸酶的测定方法采用磷酸苯二钠比色法,活性以酚 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 表示^[17-18]。

1.4 数据分析

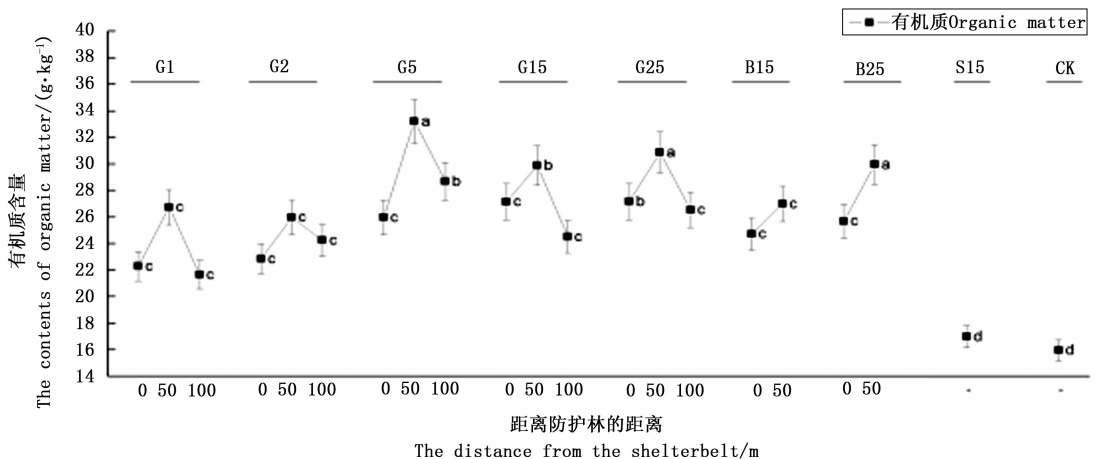
数据均采用 Microsoft Excel 2003 进行整理和统计,采用 IBM SPSS Statistics 18.0 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和相关性分析,采用 AutoCAD 2008 和 origin7.5 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤有机质含量变化特征

从图2可以得出:对于网格状防护林,距林带

0 m处(林内)不同林龄(1、2、5、15、25年)的土壤有机质含量分别显著高于无林草牧场(对照)39.77%、43.29%、62.80%、70.26%、70.33% ($P < 0.05$),且随着林龄的增大而增大;距林带50 m处林龄为5、15、25年的土壤有机质含量分别比0、100 m处提高27.90%、15.77%、10.06%、21.92%、13.66%、16.32% ($P < 0.05$),林龄为1年和2年的土壤有机质含量比0、100 m处的高,但其间的差异未达到显著水平。在带状防护林中,距林带50 m处林龄25年的土壤有机质含量比距离林带0 m处的提高16.63% ($P < 0.05$),林龄为15年的比0 m处的高,但其间差异未达到显著水平。各林龄网格状、带状草牧场防护林土壤有机质含量与无林草牧场相比均显著提高,而疏林草牧场防护林土壤有机质含量有所提高,但未达到显著水平。同林龄网格状防护林土壤有机质含量较带状和疏林状具有明显优势。



HA/FA: 腐殖质组成中胡敏酸与富里酸比值。HA/FA means the ratio of humic acid to fulvic acid in humus components.
G: 网格状防护林 Grid-shaped shelterbelt. B: 带状防护林 Belt-shaped shelterbelt. S: 疏林状防护林 Sparse-shaped shelterbelt. CK: 无林草牧场(对照) Pastureland without forest (control).

同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$). Values with different lowercase in the same column meant significant difference among treatments ($P < 0.05$). 下同 The same below.

图2 不同结构配置草牧场防护林土壤有机质含量

Fig. 2 The contents of soil organic matter for different structural configurations of pastureland shelterbelts

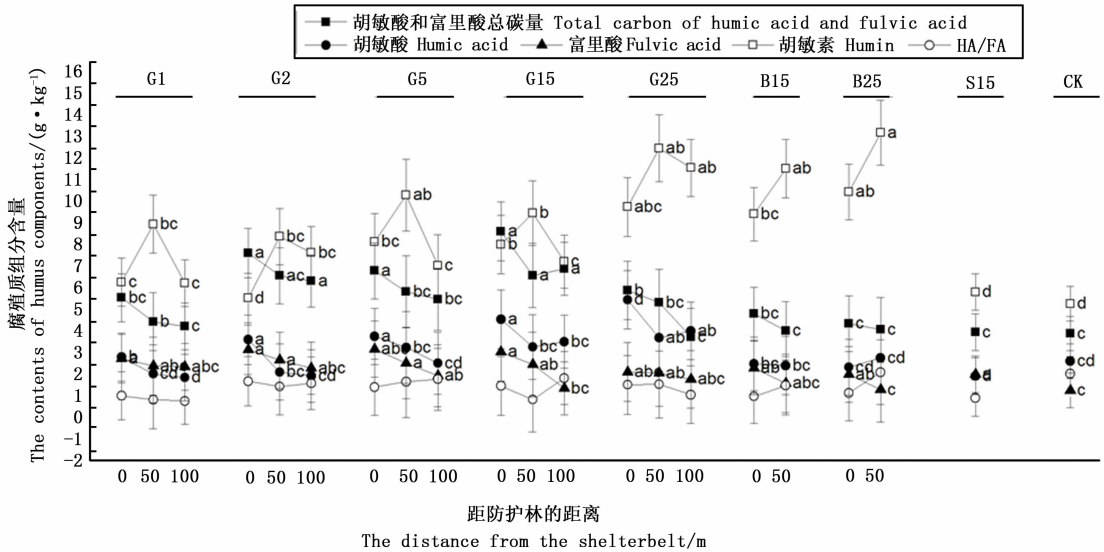
2.2 土壤腐殖质有机碳组分特征

2.2.1 土壤胡敏酸组分 从图3可以得出:对于网格状草牧场防护林,不同林龄(1、2、5、15、25年)距林带0 m处土壤胡敏酸碳组分含量较50 m处分别

提高了37.56%、70.42%、15.95%、38.91%、47.44% ($P < 0.05$);较100 m处分别提高了50.00%、86.15%、48.82%、29.46%、35.73% ($P < 0.05$);林龄为1年和2年距林带50、100 m及林龄

为5年距林带100m处土壤胡敏酸碳组分含量均低于对照,且除林龄为1年100m处土壤胡敏酸碳组分含量与对照差异显著外,其余均未达到显著水平;林龄为5、15、25年距林带0、50、100m处土壤胡敏酸碳组分含量均显著高于对照。带状防护林各处土

壤胡敏酸碳组分含量与对照较接近,其间的差异均未达到显著水平。疏林状防护林土壤胡敏酸碳组分含量显著低于对照。各防护林结构的配置方式中土壤胡敏酸碳组分含量大小排序为网格状>无林地>带状>疏林。



同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Values with different lowercase in the same column meant significant difference among treatments ($P < 0.05$). 下同 The same below.

图3 不同结构配置草牧场防护林土壤腐殖质组分含量

Fig. 3 The contents of soil humus components for different structural configurations of pastureland shelterbelts

2.2.2 土壤富里酸组分 从图3可以看出:对于网格状草牧场防护林,不同林龄(1、2、5、15、25年)距林带0m处土壤富里酸碳组分含量最高,随着距林带距离的增加,土壤富里酸碳组分含量降低,但相同林龄的差异均未达到显著水平;距林带0m处林龄为5年的土壤富里酸碳组分含量最高,较对照提高了149.22% ($P < 0.05$),距林带50m处林龄为2年的最高,较对照提高了109.38% ($P < 0.05$),距林带100m处林龄为1年的最高,但与对照相比,其间的差异未达到显著水平。对于带状草牧场防护林,林龄25年距林带0m处比50m处土壤富里酸碳组分含量显著提高了54.20% ($P < 0.05$),林龄15年距林带0m处高于50m处,但其差异未达到显著水平;不同林龄(15、25年)距林带0m处土壤富里酸碳组分含量比对照显著提高了81.25%、57.81% ($P < 0.05$),距林带50m处也高于对照,但其差异未达到显著水平。疏林状草牧场防护林土壤胡敏酸碳含量比对照显著提高了58.59%。各防护林结构的配置林地中土壤富里酸碳组分大小排序为网格状>带

状>疏林>无林地。

2.2.3 土壤胡敏素 从图3可以看出:对于网格状草牧场防护林,距林带0、50、100m林龄为25年的土壤胡敏素含量最大,较对照分别提高了84.69%、135.92%、118.71% ($P < 0.05$);相同林龄50m处的高于0、100m处,但其差异均未达到显著水平。对于带状草牧场防护林,相同林龄50m处土壤胡敏素含量高于0m处,但其差异未达到显著水平;相同林龄相同位置(0、50m)的带状草牧场防护林土壤胡敏素含量高于网格状草牧场防护林,但其差异均未达到显著水平;距林带0、50m林龄为25年的土壤胡敏素含量最大,较对照显著提高了97.73%、149.53% ($P < 0.05$)。疏林状草牧场防护林略高于对照,但其差异未达到显著水平。各防护林结构的配置林地中土壤胡敏素含量大小排序为带状>网格状>疏林>无林地。

2.2.4 胡敏酸和富里酸总碳量 从图3可以看出:对于网格状草牧场防护林,从林龄1年到林龄25年随着林龄的增长,土壤胡敏酸和富里酸总碳量的变

化呈波动趋势;相同林龄条件下,随距林带距离的增加,土壤胡敏酸和富里酸总碳量减少,但其差异未达到显著水平;距林带0、50、100 m处林龄为15年的均最大,较对照分别显著提高了120.97%、68.80%、76.73% ($P < 0.05$)。带状草牧场防护林各处和疏林状草牧场防护林的土壤胡敏酸和富里酸总碳量略高于对照,但其差异未达到显著水平。

2.2.5 胡敏酸/富里酸(HA/FA) 从图3可以看出:对于网格状草牧场防护林,距林带0 m处林龄为2年的土壤HA/FA最大值为1.70,50 m处林龄为5年时最大值为1.68,100 m处林龄为15年最大值为1.85,且均小于对照(2.05)。对于带状草牧场防护林,距0、50 m处林龄为25年的土壤HA/FA值最大,且距林带50 m处的(2.12)大于对照(2.05)。疏林状草牧场防护林的土壤HA/FA较对照减小了1.12。

2.3 草牧场防护林土壤酶活性

2.3.1 土壤过氧化氢酶活性 从表2可以看出:对于网格状草牧场防护林,距林带0、50、100 m处,随着林龄的增长,土壤过氧化氢酶活性呈增高-降低的趋势,且在2年时达到最大值,较对照显著提高了135.00%、80.00%、50.00% ($P < 0.05$);不同林龄(1、2、5、15、25年)0 m处比50 m和100 m处分别显著增加了15.38%、25.00%;30.56%、56.67%;18.18%、30.00%;32.14%、85.00%;20.00%、87.50% ($P < 0.05$)。对于带状草牧场防护林,不同林龄(15、25年)不同位置(0、50 m)的土壤过氧化氢酶活性较接近,且与对照也较接近,其差异均未达到显著水平。疏林状草牧场防护林较对照显著增加了35.00% ($P < 0.05$)。不同结构的配置草牧场中土壤过氧化氢酶活性大小排序为网格状>疏林>带状>无林草地。

2.3.2 土壤多酚氧化酶活性 从表2可以看出:对于网格状草牧场防护林,距林带0 m处林龄为15年的土壤多酚氧化酶活性在所有林龄中最强,较对照显著增加42.17% ($P < 0.05$);距林带50 m处林龄为5年的在所有林龄中最强,较对照显著增加62.74% ($P < 0.05$);距林带100 m处林龄为2年的在所有林龄中最强,较对照显著增加49.40% ($P < 0.05$)。对于带状草牧场防护林,距林带0、50 m处林龄为15年的土壤多酚氧化酶活性在所有林龄中最强,与对照相比显著增强了20.76%、20.95% ($P < 0.05$);林龄为15年的带状防护林与网格状防护

林相比,0 m处减小了15.06%,50 m处较接近,其差异未达到显著水平。疏林状草牧场防护林的土壤多酚氧化酶活性略强于对照,其差异也未达到显著水平。不同结构的配置草牧场防护林中土壤多酚氧化酶活性大小排序为网格状>带状>疏林>无林草地。

2.3.3 土壤蔗糖酶活性 从表2可以看出:对于网格状草牧场防护林,距林带0 m处林龄为1、2、5年的土壤蔗糖酶活性均较为接近,其间的差异均未达到显著水平,但比对照分别显著增加了18.32%、18.58%、18.48% ($P < 0.05$),林龄为15年的略大于对照、林龄为25年的略小于对照,且其差异均未达到显著水平;距林带50 m处林龄为2、5、15年的相互较为接近,其差异均未达到显著水平,但均比对照分别显著提高24.26%、18.12%、23.10% ($P < 0.05$),林龄为1年和25年的土壤蔗糖酶活性与对照较为接近,其差异未达到显著水平;距林带100 m处林龄为1、2年的也相近,其差异未达到显著水平,但均比对照分别显著增大了24.01%、25.33% ($P < 0.05$),林龄为5、15、25年与对照也较为接近,其差异均未达到显著水平。对于带状草牧场防护林,林龄为15年距林带0 m的土壤蔗糖酶活性强于对照,距林带100 m的小于对照,但两者与对照的差异均未达到显著水平;林龄为25年距林带0、50 m的比对照显著减小52.79%、54.31%。疏林状草牧场防护林的土壤蔗糖酶活性略强于对照,但其差异未达到显著水平。

2.3.4 土壤脲酶活性 从表2可以看出:对于网格状草牧场防护林,距林带0、50、100 m处,随着林龄的增长,土壤脲酶活性呈升高-降低的趋势,且在5年时达到最大值,较对照显著提高了114.85%、101.27%、96.58% ($P < 0.05$);林龄为1年时,随着距林带距离的增加,土壤脲酶活性增强,林龄为2、5、15、25年随着距林带距离的增加,土壤脲酶活性减弱,但所有的网格状草牧场防护林的土壤脲酶活性都显著高于对照。对于带状草牧场防护林,距林带0、50 m处土壤脲酶活性随着林龄的增加表现为降低的趋势,且林龄为25年的土壤脲酶活性与对照接近,其差异未达到显著水平。疏林状草牧场防护林的土壤脲酶活性较同龄网格状的显著降低,与同龄的带状的较接近,其差异未达到显著水平,但比对照显著提高15.38%。

2.3.5 土壤蛋白酶活性 从表2可以看出:对于

网格状草牧场防护林,不同林龄(1、2、5、15、25年)距林带0 m处土壤蛋白酶活性最强,随着距林带距离增加,其活性降低;距林带0 m处林龄为5年最大,较对照显著提高60.57% ($P < 0.05$),距林带50 m处林龄为15年最大,较对照显著提高43.68% ($P < 0.05$),距林带100 m处林龄为25年最大,较对照显著提高了31.99% ($P < 0.05$)。对于带状草牧场防护林,随着林龄的增加,距林带0、50 m处土壤蛋白酶活性表现出降低的趋势;林龄为15年距林带0 m的比对照显著增加了59.72% ($P < 0.05$),距林带100 m的与对照接近,其差异未达到显著水平;林龄为25年距林带0、50 m的比对照分别显著提高64.72%、26.89% ($P < 0.05$)。疏林状草牧场防护林的土壤蛋白酶活性显著低于同林龄的网格状和带状的,与对照较接近,其差异未达到显著水平。

2.3.6 土壤磷酸酶活性 从表2可以看出:对于网格状草牧场防护林,不同林龄(1、2、5、15、25年)距林带0 m处土壤磷酸酶活性最强,随着距林带距离增加,其活性降低;距林带0 m处林龄为2年和5年时期活性相同且最强,较对照显著提高了53.58% ($P < 0.05$)。对于带状草牧场防护林,距林带0 m处林龄为15年和25年的土壤磷酸酶活性与同龄同位置的网格状的较接近,其差异未达到显著水平,与对照分别提高了29.81%、42.64%;距林带50 m处林龄为15年和25年的与对照差异不显著。疏林状草牧场防护林的土壤磷酸酶活性显著低于同林龄的网格状和带状的,比对照显著降低了17.74% ($P < 0.05$)。不同结构的配置草牧场防护林中土壤磷酸酶活性大小排序为网格状 > 带状 > 无林草地 > 疏林。

表2 不同结构配置草牧场防护林土壤酶活性

Table 2 Soil enzyme activities for different structural configurations of pastureland shelterbelts

防护林带配置 Shelterbelt configuration	离防护林		酶活性 Enzyme activities					磷酸酶 Phosphatase Phenol /(mg · g ⁻¹)
	林龄 Stand age/a	距离 Distance from the shelter/m	过氧化氢酶 Catalase 0.1 mol · L ⁻¹ KMnO ₄ /(mL · g ⁻¹)	多酚氧化酶 Polyphenol oxi- dase 0.01 mol · L ⁻¹ I ₂ /(mL · g ⁻¹)	蔗糖酶 Saccharase C ₆ H ₁₂ O ₆ /(mg · g ⁻¹)	脲酶 Urease NH ₃ - N /(mg · g ⁻¹)	蛋白酶 Protease NH ₂ - N /(mg · g ⁻¹)	
网格状防护林 Grid-shaped shelterbelt	1	0	0.30 ± 0.17d	11.88 ± 1.99f	23.31 ± 1.17a	39.98 ± 1.99d	9.73 ± 1.17d	3.37 ± 1.17abc
		50	0.26 ± 0.06e	13.53 ± 2.09e	21.24 ± 1.06ab	41.77 ± 2.09	8.31 ± 1.06de	3.47 ± 1.06abc
		100	0.24 ± 0.12efg	11.83 ± 2.19f	24.43 ± 1.22a	43.82 ± 2.19	7.36 ± 1.22e	2.84 ± 1.22abc
	2	0	0.47 ± 0.17a	14.88 ± 2.42d	23.36 ± 1.17a	48.39 ± 2.42c	13.29 ± 1.17b	4.07 ± 1.17a
		50	0.36 ± 0.22b	16.01 ± 2.32bc	24.48 ± 1.22a	46.53 ± 2.33cd	11.94 ± 1.13bc	4.19 ± 1.22a
		100	0.30 ± 0.25cd	16.12 ± 1.64bc	24.69 ± 1.23a	32.80 ± 1.64fg	11.31 ± 1.23c	3.41 ± 1.23ab
	15	0	0.39 ± 0.167a	14.15 ± 2.78d	23.34 ± 1.17a	55.86 ± 2.79a	15.11 ± 1.17a	4.07 ± 1.16a
		50	0.33 ± 0.16d	17.56 ± 2.61a	23.27 ± 1.16a	52.33 ± 2.62b	13.21 ± 1.16b	3.97 ± 1.15a
		100	0.30 ± 0.06cd	15.60 ± 2.56c	21.19 ± 1.06ab	51.11 ± 2.56bed	11.23 ± 1.06c	3.09 ± 1.06abc
		0	0.37 ± 0.08b	15.34 ± 2.53cd	20.39 ± 1.02ab	50.61 ± 2.53bc	14.47 ± 1.02a	3.97 ± 1.02a
		50	0.28 ± 0.09d	12.4 ± 2.47ef	24.25 ± 1.21a	49.33 ± 2.47c	13.52 ± 1.21ab	3.85 ± 1.21a
		100	0.20 ± 0.08g	13.02 ± 2.38e	19.26 ± 0.96b	47.54 ± 2.38cd	11.39 ± 0.96c	3.66 ± 0.96ab
25	0	0.30 ± 0.09d	14.88 ± 1.79d	17.86 ± 0.89b	35.78 ± 1.79e	14.47 ± 0.89a	3.56 ± 0.89abc	
	50	0.25 ± 0.08f	13.02 ± 1.71e	17.90 ± 0.90b	34.28 ± 1.71fg	13.05 ± 0.89b	3.31 ± 0.90abc	
	100	0.16 ± 0.11g	13.53 ± 1.68e	22.10 ± 1.11ab	33.57 ± 1.68fg	12.42 ± 1.11bc	3.15 ± 1.11abc	
带状防护林 Belt-shaped shelterbelt	15	0	0.22 ± 0.15g	13.03 ± 1.64e	23.00 ± 1.15ab	32.70 ± 1.64fg	15.03 ± 1.15a	3.44 ± 1.15a
		50	0.19 ± 0.07g	13.05 ± 1.51e	17.40 ± 0.87b	30.14 ± 1.50g	9.97 ± 0.87d	2.21 ± 0.87bc
	25	0	0.21 ± 0.17g	11.23 ± 1.31f	9.3 ± 0.47c	26.12 ± 1.31h	15.50 ± 0.47a	3.78 ± 0.47a
50	0.19 ± 0.05g	13.02 ± 1.29e	9.00 ± 0.45c	25.80 ± 1.29h	11.94 ± 0.45bc	2.43 ± 0.45b		
疏林状防护林 Sparse-shaped shelterbelt	15	-	0.27 ± 0.14d	11.81 ± 1.50f	20.8 ± 1.04ab	30.03 ± 1.50g	8.94 ± 1.04d	2.18 ± 1.04c
无林草牧场(对照) Pastureland without forest (control)	-	-	0.20 ± 0.09g	10.79 ± 1.30f	19.70 ± 0.99b	26.04 ± 1.31h	9.41 ± 0.99d	2.65 ± 0.97b

2.4 土壤腐殖质有机碳组分与土壤酶活性相关性

为了更好地探讨防护林土壤酶活性与土壤腐殖质有机碳组分之间的关系,将6种土壤酶与各腐殖质组分进行相关性分析(表3)。结果表明,过氧化氢酶分别与(胡敏酸和富里酸)总碳量、富里酸呈极显著正相关,分别与胡敏酸、胡敏素呈不显著的正相关、负相关。多酚氧化酶与(胡敏酸和富里酸)总碳量呈极显著正相关,与胡敏酸、富里酸和胡敏素均呈不显著正相关。蔗糖酶分别与富里酸、胡敏素呈极

显著正相关、显著负相关,分别与(胡敏酸和富里酸)总碳量、胡敏酸呈不显著的正相关、负相关。脲酶分别与(胡敏酸和富里酸)总碳量、富里酸呈极显著正相关,分别与胡敏酸、胡敏素呈不显著的正相关、负相关。蛋白酶分别与(胡敏酸和富里酸)总碳量、胡敏酸呈显著、极显著正相关,分别与富里酸、胡敏素呈不显著正相关。磷酸酶与(胡敏酸和富里酸)总碳量、富里酸均呈极显著正相关,分别与胡敏酸、胡敏素呈不显著的正相关、负相关。

表3 土壤酶活性与土壤腐殖质组分的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between soil enzyme activity and its humus component

项目 Items	过氧化氢酶 Catalase	多酚氧化酶 Polyphenol oxidase	蔗糖酶 Saccharase	脲酶 Urease	蛋白酶 Protease	磷酸酶 Phosphatase
(胡敏酸和富里酸)总碳量 Total carbon of HA and FA	0.772 **	0.560 **	0.365	0.725 **	0.470 *	0.765 **
胡敏酸 HA	0.249	0.261	-0.062	0.276	0.592 **	0.391
富里酸 FA	0.857 **	0.422	0.560 **	0.657 **	0.317	0.690 **
胡敏素 Humin	-0.420	0.091	-0.533 *	-0.304	0.386	-0.076

** 和 * 表示极显著($P < 0.01$)和显著($P < 0.05$)相关。* * and * mean significant and highly significant correlation at 0.01 and 0.05, respectively.

3 讨论

本研究结果表明,所有草牧场防护林的土壤有机质含量均高于对照;林龄为1年到5年网格状草牧场防护的土壤富里酸碳组分、胡敏素含量随林龄的增大而增加,林龄5年以后降低,这与已有的研究结果,草牧场防护林下土壤水稳性团聚体和有机质质量分数增加^[13],增加防护林带后根系碳储量和土壤碳储量增加^[19];胡敏酸和胡敏素在幼龄林到近成熟林增加,富里酸和胡敏素在近成熟林到成熟林降低^[20]的结论基本一致,不同的是1~25年生距离防护林50 m处土壤有机质含量高于0和100 m的。同林龄防护林土壤有机质含量网格状大于带状,各林龄网格状、带状和疏林草牧场防护林土壤有机质含量均高于对照。分析认为,退化草牧场本身的有机质和腐殖质含量很低,在营造防护林后,短期内为退化草牧场输入较多的有机质,并且积累形成腐殖质,随着防护林生长年限的延长,林冠郁闭度增大,根系愈加密集,枯落物多且周转快,其分解及利用程度大于输入的养分量,造成其防护林根系周围一段距离内(<50 m)有机质和腐殖质量的降低,稍远的距离(>50 m而<100 m)林木根系无法吸收与利用,导致有机质和腐殖质的积累。超过一定距离后,防护林的凋落物无法到达,因此有机质缺乏。网格状防护林四周树木的遮挡及其防风效应有效防止凋

落物随风飘散,因此林内养分分布相对比较均匀,生物量高,而带状防护林凋落物因风等自然因素的搬作用而比较分散,因而在一定情况下网格状防护林养分高于带状防护林。

土壤酶活性可以作为衡量土壤生物学活性、土壤生产力、土壤肥力和土壤退化的重要指标^[17,21-24],也可以间接地了解或预测某些营养物质的转化情况^[25-28]。本研究表明,5年生到25年生网格状草牧场防护林土壤脲酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶活性随着林龄的增加而减小;蔗糖酶活性变化不明显,与对照相比,未达到显著水平;土壤脲酶、过氧化氢酶活性随防护林距离的增大而降低。带状草牧场防护林土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶和多酚氧化酶活性为林龄15年高于25年;土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性0 m高于50 m处。带状草牧场防护林土壤多酚氧化酶和过氧化氢酶活性高于对照;疏林草牧场防护林土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性均高于对照。因此由土壤酶活性做为衡量指标来说,防护林在一定程度上可以提升草牧场的土壤生物学活性、土壤生产力、土壤肥力等,且5年生网格状防护林的提升效果最佳。

本研究结果表明:不同结构配置类型土壤酶活性与胡敏酸和富里酸总碳量、胡敏酸组分、富里酸组分、胡敏素组分均有相关性。胡敏酸和富里酸总碳量与过氧化氢酶、脲酶、磷酸酶呈极显著正相关,这

说明利用酶来标识土壤肥力存在信息上的重叠^[29]。胡敏酸与蛋白酶呈极显著正相关,这与张晓曦^[30]的研究结果胡敏酸与蛋白酶呈显著正相关相似。富里酸与过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶、磷酸酶呈极显著正相关,与矫丽娜^[31]的研究结果富里酸与脲酶显著正相关,与蔗糖酶极显著正相关相似。不同的是胡敏素与蔗糖酶呈极显著负相关,且胡敏素与过氧化氢酶、脲酶、磷酸酶也表现出较小的负相关。可能与退化草牧场独特的环境因素有关,但具体原因还有待进一步深入探讨。

4 结论

防护林在一定程度上可以提升草牧场土壤有机质、腐殖质的含量及酶活性,对比分析不同结构的配置类型和林龄发现,林龄为5年的网格状防护林的提升效果最佳。对防护林及其多数土壤腐殖质碳组分和酶活性的分析表明,网格状防护林的带间距应小于200 m。

参考文献:

- [1] 段文标,陈立新. 草牧场防护林营造技术的研究[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3):13-18.
- [2] 杨雨春,赵珊珊,包广道,等. 吉林水田防护林防风效能及其影响因子分析[J]. 西北林学院学报,2015,30(1):132-136.
- [3] 陈作州,张宇清,吴斌,等. 山东省农田防护林生态系统服务功能价值核算[J]. 生态学杂志,2012,31(1):59-65.
- [4] 赵新风,徐海量,阎江平,等. 塔里木河下游灌区灌溉方式转变对农田及其防护林土壤水盐动态的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(6):1116-1124.
- [5] 耿相国,吴斌,张宇清,等. 农田防护林树种中林46杨不同器官碳含量的研究[J]. 林业科学研究, 2011, 24(2):267-271.
- [6] 王翠,雷加强,李生宇,等. 和田地区绿洲外围农田防护林带的防护效益[J]. 水土保持通报,2014,34(1):98-103,122.
- [7] 王葆芳,赵英铭,王志刚,等. 干旱区人工绿洲不同农田防护林模式防护效应及相关性[J]. 林业科学研究, 2008, 21(5):707-712.
- [8] 段文标,赵雨森,陈立新. 草牧场防护林综合效益研究综述[J]. 山地学报,2002,20(1):90-96.
- [9] 李永华,杨文斌,卢琦. 草牧场防护林对草地上生产力和地下生物量的影响[J]. 中国草地学报,2008,30(5):85-89.
- [10] 闫德仁,闫婷,赵春光. 草原天然植被和草原造林固碳储量的对比研究[J]. 内蒙古林业科技,2011,37(1):5-8.
- [11] 庄洋,赵娜,赵吉. 内蒙古草地碳汇潜力估测及其发展对策[J]. 草业科学,2013,30(9):1469-1474.

- [12] 于建权,肖映秋,陈新,等. 半干旱风沙区疏林式草牧场防护林的土壤改良效应[J]. 东北林业大学学报,2001,29(2):55-58.
- [13] 王凯,王道涵,张成龙,等. 辽西北防护林对林下土壤理化性状的影响[J]. 东北林业大学学报,2014,42(10):77-79,99.
- [14] 袁春良,吴德东. 沙地草牧场防护林对土壤水分变化的影响[J]. 防护林科技,2008,84(3):3-13.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000:106-108.
- [16] 傅积平. 土壤结合态腐殖质的分组测定[J]. 土壤通报,1983, 14(2):36-37.
- [17] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京:农业出版社,1986.
- [18] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京:科学出版社,1987:239-254.
- [19] 张新厚,范志平,孙学凯,等. 半干旱区土地利用方式变化对生态系统碳储量的影响[J]. 生态学杂志,2009,28(12):2424-2430.
- [20] Chen L X, Duan W B, Wang J H, et al. Soil humus compositions and the influence on soil acidity in *Larix olgensis* plantation of NE China [J]. Advanced Materials Research, 2013, 610: 3075-3079.
- [21] 陈立新. 落叶松人工林施肥对土壤酶和微生物的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(6):1000-1004.
- [22] 孙双红,陈立新,李少博,等. 阔叶红松林不同演替阶段土壤酶活性与养分特征及其相关性[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(2):20-28.
- [23] 吉艳芝,冯万忠,陈立新,等. 落叶松混交林根际与非根际土壤养分、微生物和酶活性特征[J]. 生态环境学报, 2008, 17(1):339-343.
- [24] 邱权,李吉跃,王军辉,等. 西宁南山4种灌木根际和非根际土壤微生物、酶活性和养分特征[J]. 生态学报,2014,34(24):7411-7420.
- [25] 王灿,王德建,孙瑞娟,等. 长期不同施肥方式下土壤酶活性与肥力因素的相关性[J]. 生态环境,2008,17(2):688-692.
- [26] 陈立新. 施肥对落叶松人工林根际土壤生化活性的影响[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3):133-136.
- [27] 陈立新,杨承栋. 落叶松人工林土壤磷形态、磷酸酶活性演变与林木生长关系的研究[J]. 林业科学, 2004, 40(3):12-18.
- [28] Steinweg J M, Dukes J S, Paul E A, et al. Microbial responses to multi-factor climate change: effects on soil enzymes[J]. Frontiers in Microbiology, 2013, 4: 146-146.
- [29] 张文霖. 主成分分析在SPSS中的操作应用[J]. 市场研究, 2005, 12(9):31-34.
- [30] 张晓曦,刘增文,朱博超,等. 半干旱黄土丘陵区纯林土壤腐殖质异化特征及与其他性质的关系[J]. 生态学报,2015,6(3):1779-1787.
- [31] 矫丽娜,李志洪,殷程程,等. 秸秆还田深度对黑土腐殖质和酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015, 2(4):17-21.

(责任编辑:彭南轩)