

库布齐沙漠不同林龄沙柳林对土壤酶活性的影响

安花¹, 蒙仲举¹, 李浩年¹, 徐志明²

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2.鄂尔多斯市腾达勘察设计有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017010)

摘要: [目的] 揭示库布齐沙漠灌木林营造对沙区土壤作用的生物机制, 为建立合理有效的沙漠防护林体系提供理论支撑。[方法] 以不同林龄(6, 12 和 15 a)沙柳为研究对象, 于2023年7月初采集库布齐沙漠沙柳林下0—10, 10—20, 20—30 cm 土层深度土壤, 对土壤主要理化性质及酶活性进行分析, 分析该区植被恢复对土壤的作用机制。[结果] ①随着林龄的增加, 与对照相比, 细颗粒含量逐渐增多, 土壤容重和 pH 值呈降低趋势。②土壤养分和酶活性在垂直方向上呈现较明显的表聚现象; 土壤养分和酶活性在不同沙柳林龄下差异显著($p < 0.05$), 12 a 沙柳林下土壤碱解氮、速效磷、速效钾、碱性磷酸酶、过氧化氢酶分别为裸沙的 316.4%, 420.3%, 134.6%, 164.5% 和 94.8%, 15 a 沙柳林下的有机碳、脲酶、蔗糖酶较对照增长了 186.2%, 145.3%, 2 703.4%。③土壤酶活性与不同林龄恢复阶段土壤碱解氮、速效磷、速效钾、有机碳密切相关。[结论] 库布齐沙漠沙柳防护林建成后, 对土壤养分和酶活性具有显著的改良作用。

关键词: 库布齐沙漠; 沙柳; 土壤酶活性; 土壤理化性质

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0077-09

中图分类号: S714

文献参数: 安花, 蒙仲举, 李浩年, 等. 库布齐沙漠不同林龄沙柳林对土壤酶活性的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 77-85. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20240718.001; An Hua, Meng Zhongju, Li Haonian, et al. Effects of different ages of *Salix psammophila* Forest on soil enzyme activity in Hobq Desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 77-85.

Effects of Different Ages of *Salix Psammophila* Forest on Soil Enzyme Activity in Hobq Desert

An Hua¹, Meng Zhongju¹, Li Haonian¹, Xu Zhiming²

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Ordos Tengda Survey and Design Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 017010, China)

Abstract: [Objective] The biological mechanisms underlying the effect of shrub forest development on soil in the Hobq Desert was analyzed in order to provide theoretical support for the establishment of a reasonable and effective desert shelter forest system. [Methods] Soil from 0—10, 10—20 cm, and 20—30 cm soil layers in a *Salix psammophila* forest system with different forest ages (6, 12, and 15 years) in the Hobq Desert was collected in early July 2023. The main physical and chemical properties and enzyme activities of the soil were analysed to reveal the mechanism of vegetation restoration on soil in this area. [Results] ① The fine particle content increased gradually with increasing forest age, whereas the soil bulk density and pH value decreased. ② Soil nutrients and enzyme activity levels clearly indicated surface aggregation in the vertical direction. There were significant differences in soil nutrients and enzyme activity levels among the different *S. psammophila* forest ages ($p < 0.05$). The soil alkali-hydrolysable nitrogen, available phosphorus, available potassium, alkaline phosphatase activity, and catalase activity in the 12-year *S. psammophila* forest were 316.4%, 420.3%, 134.6%, 164.5%, and 94.8% higher than those of bare sand, respectively. Organic carbon, urease activity, and invertase activity under 15-year *S. psammophila* were 186.2%, 145.3%, and

收稿日期: 2023-01-17

修回日期: 2024-03-01

资助项目: 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费“荒漠生态系统保护与修复创新团队”(BR22-13-03); 内蒙古自治区科技计划项目“库布齐沙漠沿黄段流动沙丘综合治理技术与示范”(2021GG0073)

第一作者: 安花(2000—), 女(汉族), 甘肃省白银市人, 硕士研究生, 研究方向为荒漠化防治。Email: 3553694722@qq.com。

通信作者: 蒙仲举(1980—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事荒漠化防治研究。Email: mengzhongju@126.com。

2 703.4% higher than those of CK, respectively. ③ Soil enzyme activity was closely related to soil alkali-hydrolysable nitrogen, available phosphorus, available potassium, and organic carbon in different forest age restoration stages. [Conclusion] The establishment of the *S. psammophila* shelter forest in the Hobq Desert significantly improved soil nutrient levels and enzyme activity.

Keywords: Hobq Desert; *Salix psammophila*; soil enzyme activity; soil physical and chemical properties

建立合理有效的防护林体系,可以稳定沙丘并降低荒漠化的危害,有效地调节降水和增强水源涵养能力^[1]、改变土壤粒径、干扰周边气流以减缓风速^[2]、拦截风蚀物质、改善土壤养分状况^[3]、调节地表径流及调控气候等,除此之外植物适应性、土壤理化性质、土壤养分供给等也会发生变化^[4]。沙柳是我国北方沙漠地区的一种具有快速生长繁殖、抗旱能力强、抗风沙侵蚀能力强等优点的优良树种。沙柳也是一种常见的沙障,它可以控制风沙流的走向、流动速度以及其内部结构,改变土壤侵蚀状况,推动植物的正向演替^[5],起到防风固沙的作用。许多研究关注于库布齐沙漠灌木林生物量模型构建^[6]、灌木光合生理特征与土壤含水量的关系^[7]、耐旱灌木的蒸腾耗水情况^[8]。在土壤质量方面,研究了库布齐沙漠灌木根际土壤微生物和土壤化学性质^[9],张立欣等^[10]研究了库布齐沙漠不同植物种的土壤理化性质和微生物量间的关系,聂素梅等^[11]研究了库布齐 3 种不同沙丘类型上人工种植的植被与土壤养分特征变化。但目前对于库布齐沙漠地区不同林龄沙柳林土壤理化特性和酶活性的变化情况及相互关系研究较少。

土壤酶在生态系统中具有重要作用,可以促进物质循环和能量流动等^[12]。由动植物残体分解、微生物活动与植物根系分泌产生^[13-14],在土壤中涉及了众多的生物化学及物质的循环机制^[15],与微生物共同推动营养成分的矿化和有机物的转化^[16-18]。在某种程度上揭示了土壤中营养物质的循环与新陈代谢机制,可以清晰地展示土壤中营养物质的转换过程,为全面评估土壤质量提供科学依据。因此,本研究以库布齐沙漠的沙柳为研究对象,研究不同林龄沙柳土壤酶活性与土壤理化性质的变化规律,探究其与土壤养分间的互馈关系,揭示灌木林营造对沙区土壤作用的

生物机制。

1 研究区概况

该研究区位于库布齐沙漠北部边缘的试验区,归属于鄂尔多斯市杭锦旗独贵塔拉镇,其地理位置位于 108°40'29"E,40°30'38"N,属于典型的温带大陆性季风气候,强风多发生于 1—5 月、11—12 月,多以西北风为主,常伴有沙尘暴。该区域的年平均温度在 6~7.5 °C,年光照时间在 3 000~3 200 h,无霜期在 122~160 d。年降水约为 200~400 mm,年平均蒸发 2 162 mm,降水分布不均匀,土壤类型主要以风沙土为主。地貌类型为固定沙丘、半固定沙丘和流动沙丘。主要植被有沙柳(*Salix psammophila*)、沙鞭(*Psammochloa villosa*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)等。

2 试验方法

2.1 样地选择及设置

样地位于库布齐沙漠营造的沙柳防护林生态修复区,经过前期实地勘测,选取营造 6、12、15 a 这 3 种不同林龄的典型沙柳林样地,样地地势平坦,立地条件一致,无其他管护措施。于 2023 年 7 月进行采样,同时选取 1 块周边裸沙地作为对照(CK),在不同林龄的样地内分别设置 5 块 20 m×20 m 样方,在样方内进行每木检尺,并选择 5 株生长状况良好、植株完整的沙柳作为标准株,共 75 株。同时各布设 1 m×1 m 的样方进行草本植被调查,调查出各样地草本植物以沙蓬(*Agriophyllum pungens*)、虫实(*Corispermum hyssopifolium*)、沙鞭(*Psammochloa villosa*)、雾冰藜(*Grubovia dasyphylla*)为主。样地基本情况详见表 1。

表 1 不同林龄柳沙林下植物特征

Table 1 Characteristics of understory plants in different ages of *Salix psammophila* forest

林龄/ a	平均 基径/cm	株高/ m	东西 冠幅/m	南北 冠幅/m	草本植物种	生物量 (kg/株)	灌草层 盖度/%	经纬度
6	1.9	1.9~2.1	2.9	3	沙蓬、虫实	6.17±0.69	20~30	108°41'17"E, 40°30'15"N
12	2.2	2.5~2.6	5.9	5.9	沙鞭	13.80±1.25	30~40	108°40'29"E, 40°30'31"N
15	2.5	2.6~2.8	3.5	4.3	雾冰藜、虫实	12.11±0.93	35~40	108°40'41"E, 40°30'27"N

2.2 土壤样品采集

于 2023 年 7 月初进行土壤样品采集。在不同林龄(6, 12 和 15 a)沙柳林内按品字状随机布设 3 个采样区域,选取沙柳林附近无植被生长的裸沙地作为对照(CK),在每个取样区域内采用五点采样法,每个样点挖取 0—30 cm 深土壤垂直剖面,采集 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm 土层深度的土壤(共 3 层),将同一土层进行混合,共采集 36 个土壤样品。在每个取样区域内使用环刀采集用于测定土壤容重和含水率的土壤样品。此外,再采集两部分土壤样品,一部分装于无菌试管内放置在低温保温箱内保存用于土壤酶活性的测定,一部分带回实验室放置室内通风阴干,去除植物根系残留、碎石后研磨使之全通过 2 mm 孔径的筛子,用于土壤理化性质的测定。

2.3 土壤样品制备与测定

土壤容重—环刀法、含水率—烘干法,将环刀放置烘箱内在 105 °C 条件下烘 8 h 后取出,称量并计算土壤容重和含水率;土壤粒径组成依据美国制(USDA)标准划分为黏粒($<2\ \mu\text{m}$)、粉粒($2\sim 50\ \mu\text{m}$)、极细砂($50\sim 100\ \mu\text{m}$)、细砂($100\sim 250\ \mu\text{m}$)、中砂($250\sim 500\ \mu\text{m}$)、粗砂($500\sim 1\ 000\ \mu\text{m}$)、极粗砂($1\ 000\sim 2\ 000\ \mu\text{m}$)—激光粒度分析仪测定法^[19]。速效磷、有机碳、碱解氮、pH、速效钾分别用钼蓝比色法、硫酸重铬酸钾法、碱解扩散法、电位测定法(其中土水比为 1:2.5)、 NH_4OAc 浸提—火焰光度法测定。采用苯酚钠比色法测定脲酶活性^[13],其活性用 24 h 内 1 g 土壤中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的毫克数(mg)表示;碱性磷酸酶活性用磷酸苯二钠比色法测定,以 24 h 内 1 g 土壤中释放出来的酚的毫克数(mg)表示;过氧化氢酶活性用高锰酸钾滴定法测定,以过氧化氢酶作用下 1 g 土壤 24 h 所消耗的 0.1 mol/L KMnO_4 的体积表示(ml/g);蔗糖酶活性用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,以蔗糖酶作用下 24 h 内 1 g 土壤中葡萄糖的毫克数表示(mg)。

2.4 数据处理

采用 Excel 2019 整理数据并进行土壤酶活性和理化因子的平均值和标准差计算,数据统计分析运用 SPSS 22.0,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)法对库布齐沙漠沙柳林不同林龄、土层的土壤酶活性、理化因子的差异是否显著进行检验($p<0.05$),采用 LSD 法进行多重比较;使用 Origin 2021 软件进行沙柳林土壤酶活性和理化因子的主成分分析,确定影响酶活性的关键因子;采用 Person 法进行土壤酶与理化因子的相关性分析;并借助 Origin 2021 进行了相关图形的绘制工作。

3 结果与分析

3.1 不同林龄沙柳林下土壤物理性质

由表 2 可知,随着林龄的增加,含水率都呈先增加后减少的趋势,土壤含水率在不同土层下存在显著差异($p<0.05$),且随着土层深度的增加而增加,可能原因是沙漠地区的温度高、蒸发强烈,致使土壤表层含水率消耗较快。各林龄和土层间土壤容重变化幅度不大,随着林龄的增加,各土层土壤容重总体上呈减小的趋势,且各土层间土壤容重存在显著差异($p<0.05$);随着土层的加深,土壤容重总体上呈增加的趋势,且各土层中裸沙(CK)含量总体上最高。

表 2 不同林龄沙柳林下土壤含水率、容重的变化特征
Table 2 Changes of soil moisture content and bulk density under *Salix psammophila* forest at different ages

恢复年限/a	土层深度/cm	土壤含水率/%	土壤容重/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
6	0—10	$2.6\pm 0.4^{\text{Ab}}$	$1.54\pm 0.03^{\text{Ab}}$
	10—20	$2.7\pm 0.2^{\text{Ab}}$	$1.56\pm 0.02^{\text{Aa}}$
	20—30	$2.9\pm 0.2^{\text{Ab}}$	$1.57\pm 0.02^{\text{Aa}}$
12	0—10	$2.8\pm 0.3^{\text{ABb}}$	$1.57\pm 0.01^{\text{Aa}}$
	10—20	$2.7\pm 0^{\text{Bb}}$	$1.54\pm 0.03^{\text{Ba}}$
	20—30	$3.0\pm 0.1^{\text{Ab}}$	$1.56\pm 0.02^{\text{Aba}}$
15	0—10	$1.6\pm 0.1^{\text{Bc}}$	$1.50\pm 0.05^{\text{Ab}}$
	10—20	$2.1\pm 0.1^{\text{Ac}}$	$1.57\pm 0.03^{\text{Aa}}$
	20—30	$2.1\pm 0.1^{\text{Ac}}$	$1.52\pm 0.05^{\text{Aa}}$
CK(裸沙地)	0—10	$3.4\pm 0.1^{\text{Aa}}$	$1.57\pm 0.03^{\text{Aa}}$
	10—20	$3.4\pm 0.2^{\text{Aa}}$	$1.56\pm 0.05^{\text{Aa}}$
	20—30	$3.5\pm 0.1^{\text{Aa}}$	$1.55\pm 0.06^{\text{Aa}}$

注:相同林龄不同土层的差异用不同的大写字母表示,相同土层不同林龄的差异用不同的小写字母表示 $p<0.05$ 。下同。

由表 3 可知,随着林龄的增加,黏粒的含量先上升后逐渐下降,而粉粒的含量则持续上升,这两种变化共同作用导致了土壤的细粒化现象,0—10 cm 土层中粉粒含量呈相较于裸沙显著增加($p<0.05$),各土层中极细砂和细砂含量相对于裸沙显著增加,各土层中的中砂含量相较于裸沙显著减少;除黏粒外,其他粒径的不同林龄间存在显著差异($p<0.05$)。随着土层深度的增加,黏粒、粉粒、极细砂含量逐渐减少,细砂、极粗砂含量逐渐增加,中砂、粗砂呈先增后减的变化趋势。

3.2 不同林龄沙柳林下土壤养分和 pH 值的变化

从图 1 可知,沙柳防护林的 pH 值范围为 8.39~8.79,土壤呈碱性状态。pH 值自表层而下呈先增加后减小的趋势,且 12 和 15 a 林龄的沙柳中,各土层间存在显著差异($p<0.05$)。在 0—10 cm 土层,随着林龄的逐渐增长,pH 值逐渐减小,且不同林龄沙柳林下的 pH 值间存在显著差异($p<0.05$);在 10—20 cm

和 20—30 cm 土层中,土壤 pH 值差异不显著且随着林龄的增加呈现先降低再增加的趋势。沙柳林的栽植及林下植物的培育相较于 CK 显著提高土壤养分含量($p < 0.05$)。不同林龄沙柳林下土壤养分在 0—10 cm 土层表现出:12 a > 15 a > 6 a。在 0—10 cm 土层中,生长 12 a 的沙柳林下土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量显著高于对照和其他年份,与 12 a 的沙柳相比,15 a 沙柳林的土壤中碱解氮、速效磷、速效钾的含量相对较低,说明 15 a 的沙柳对土壤中的氮、磷、钾的消耗较少,同时微生物对凋落物层的分解效率也较低^[20]。有机碳含量在 15 a 沙柳林下最高;随着林龄

的增加,土壤碱解氮、速效钾含量表现出:12 a > 15 a > 6 a > CK,有机碳含量逐渐增加,且不同林龄间存在显著差异($p < 0.05$)。在 10—20 cm,20—30 cm 土层中,随着林龄的增加,碱解氮含量的变化趋势与 0—10 cm 土层的一致,有机碳含量表现为 6 a > 15 a > 12 a;各土层中的速效磷与速效钾变化趋势一致,在 10—20 cm 土层中,随着林龄的增加,速效磷和速效钾含量逐渐降低,在 20—30 cm 土层中,其含量随着林龄的增加呈现出先增后减的变化趋势,且各林龄间存在显著差异($p < 0.05$)。不同林龄沙柳林下土壤养分具有表聚现象,土壤养分随着土层深度的增加而减少。

表 3 不同林龄沙柳林下土壤粒度组成

Table 3 Soil particle size composition under *Salix psammophila* forest of different ages

恢复年限/a	土层深度/cm	黏粒	粉粒	极细砂	细砂	中砂	粗砂	极粗砂
6	0—10	0.10±0 ^{Ab}	0.70±0.10 ^{Ad}	2.40±0 ^{Ab}	70.03±0.40 ^{Bb}	23.93±0.67 ^{Bc}	1.33±0.38 ^{Aa}	1.53±0.21 ^{Aa}
	10—20	0.10±0 ^{Ab}	0.63±0.06 ^{Ab}	2.10±0 ^{Bb}	68.93±0.64 ^{Cc}	25.13±0.45 ^{Ac}	1.60±0.46 ^{Aa}	1.50±0.36 ^{Aab}
	20—30	0.07±0.06 ^{Ab}	0.70±0.10 ^{Ac}	2.43±0.06 ^{Aa}	71.63±0.45 ^{Ac}	21.90±0.46 ^{Cb}	1.53±0.25 ^{Aa}	1.73±0.12 ^{Aab}
12	0—10	0.37±0.06 ^{Aa}	1.70±0.10 ^{Ab}	3.03±0.15 ^{Aa}	82.67±0.58 ^{Aa}	11.93±0.42 ^{Cd}	0±0 ^{Bc}	0.30±0.26 ^{Bb}
	10—20	0.10±0 ^{Bb}	0.87±0.06 ^{Bab}	1.17±0.06 ^{Cc}	67.27±0.42 ^{Bb}	28.73±0.35 ^{Ab}	0.73±0.23 ^{Ab}	1.13±0.25 ^{Ab}
	20—30	0.10±0.10 ^{Bb}	0.87±0.06 ^{Bc}	2.27±0.06 ^{Bb}	83.00±0.92 ^{Aa}	13.00±0.69 ^{Bc}	0.10±0.17 ^{Bc}	0.67±0.21 ^{ABc}
15	0—10	0.33±0.06 ^{Aa}	2.90±0 ^{Aa}	2.03±0.06 ^{Bc}	62.17±0.76 ^{Cc}	30.53±0.49 ^{Ab}	0.57±0.25 ^{Ab}	1.47±0.15 ^{Aa}
	10—20	0.10±0 ^{Bb}	1.10±0.10 ^{Bab}	2.40±0.10 ^{Aa}	70.10±0.50 ^{Ba}	24.00±0.72 ^{Bd}	0.83±0.31 ^{Ab}	1.47±0.25 ^{Aab}
	20—30	0.07±0.06 ^{Bb}	1.10±0.10 ^{Bb}	1.83±0.06 ^{Cc}	73.30±0.26 ^{Ab}	21.47±0.23 ^{Cb}	0.70±0.10 ^{Ab}	1.57±0.25 ^{Ab}
CK	0—10	0.30±0 ^{Aa}	0.90±0 ^{Ac}	0.50±0 ^{Bd}	59.33±0.21 ^{Bd}	36.33±0.15 ^{Aa}	0.77±0.12 ^{ABb}	1.87±0.25 ^{Aa}
	10—20	0.33±0.12 ^{Aa}	1.33±0.59 ^{Aa}	0.43±0.06 ^{Bd}	59.00±0.53 ^{Bd}	36.57±0.15 ^{Aa}	0.53±0.15 ^{Ab}	1.8±0.3 ^{Aa}
	20—30	0.37±0.06 ^{Aa}	1.4±0.1 ^{Aa}	0.57±0.06 ^{Ad}	60.9±0.17 ^{Ad}	33.97±0.29 ^{Ba}	0.8±0.26 ^{Ab}	2±0.1 ^{Aa}

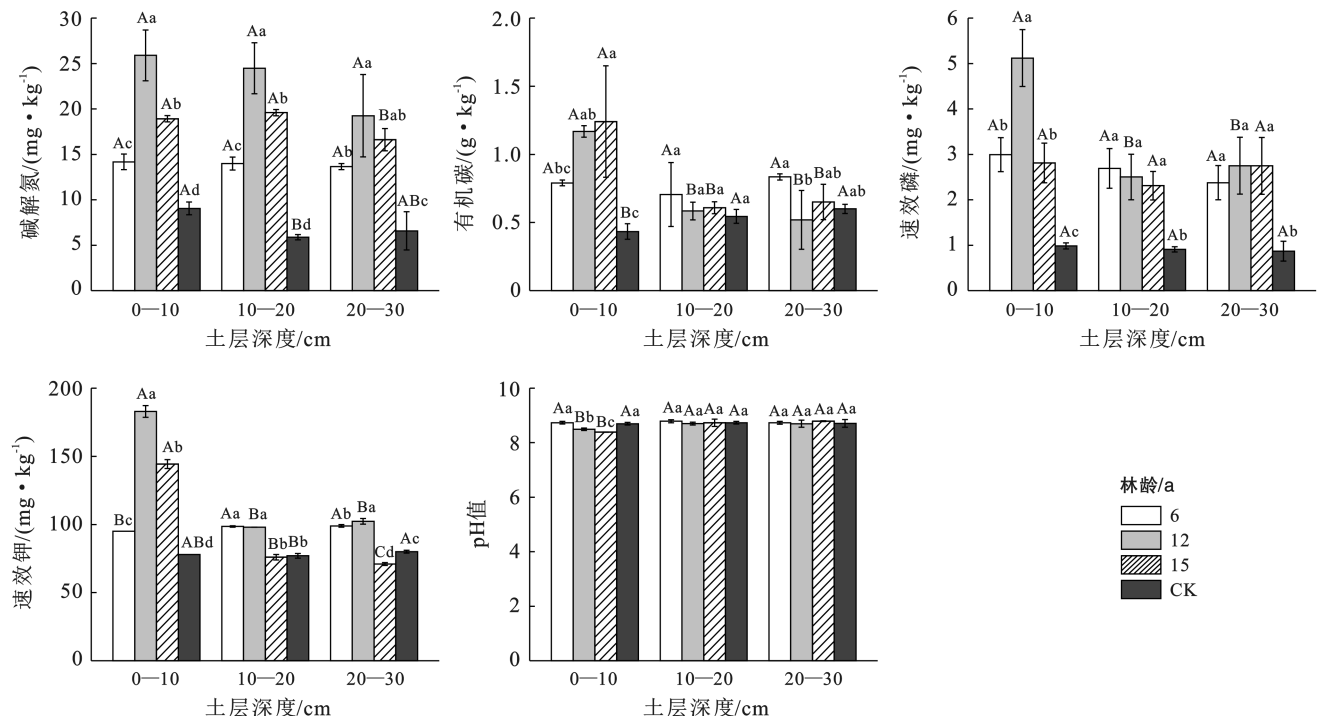


图 1 不同林龄沙柳土壤养分和 pH 值分布特征

Fig.1 Soil nutrient and pH value distribution characteristics of *Salix psammophila* at different ages

3.3 不同林龄沙柳林下土壤酶活性变化

由图2可以看出,在0—10 cm,20—30 cm土层中,随着林龄的增加脲酶含量表现为:15 a>6 a>12 a>CK,且各林龄间存在显著差异($p<0.05$),沙柳防护林地各土层中的脲酶含量显著高于对照(CK)($p<0.05$)。12和15 a的沙柳林沿土层垂直方向呈先增后减的趋势,随着土层深度的增加,各林龄的土壤脲酶含量整体上呈降低趋势,且在6和15 a的沙柳林中,各土层间存在显著差异($p<0.05$)。土壤磷酸酶对提高有机磷的利用效率和推动土壤中磷素的循环是至关重要的,经常被用来揭示土壤中有效磷的转化趋势和其强度^[21]。随着沙柳林龄的增大,土壤碱性磷酸酶含量逐渐增加,但0—10 cm土层的碱性磷酸酶呈先增后减的变化趋势,且各林龄间差异显著($p<0.05$)。12和15 a的沙柳林的碱性磷酸酶含量在0—10 cm土层中最高,碱性磷酸酶含量沿土壤剖面总体上呈下降态,且不同土层间的碱性磷酸酶含量存

在显著差异($p<0.05$)。

蔗糖酶能对土壤中的有机质分解产生直接的影响,并在提高土壤中的可溶性营养成分方面发挥着重要作用^[22]。随着林龄增大,各土层蔗糖酶含量逐渐增加,在0—10 cm的表层土壤中,蔗糖酶的含量明显高于其他土层和对照,且沙柳防护林不同林龄间存在显著差异($p<0.05$)。不同林龄沙柳林的蔗糖酶含量沿土层垂直方向由上至下逐渐减小,与裸沙(CK)相比,沙柳防护林地的土壤蔗糖酶的含量明显更高($p<0.05$),且各土层间存在显著差异($p<0.05$)。各林龄土壤过氧化氢酶含量变化较稳定,随着林龄增大,10—20 cm,20—30 cm土层中过氧化氢酶含量呈先减后增的趋势,10—20 cm土层各林龄间存在显著差异($p<0.05$)。6和12 a林龄的沙柳林地过氧化氢酶含量沿土壤垂直剖面自上而下呈先减后增趋势,且沙柳防护林地土壤过氧化氢酶含量显著高于对照(CK)($p<0.05$)(图2)。

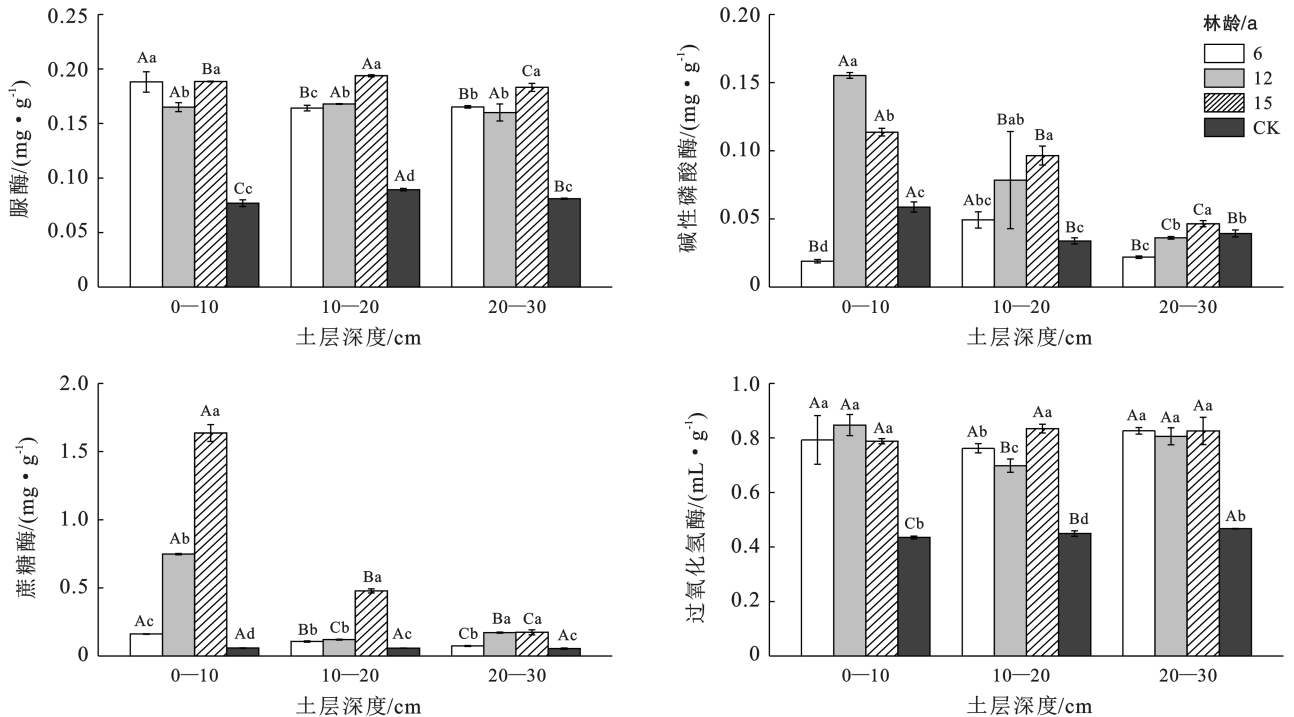


图2 不同林龄沙柳林下土壤酶活性的变化特征

Fig.2 Changes of soil enzyme activity in *Salix psammophila* forest at different ages

3.4 土壤理化性质与酶活性的关系特征

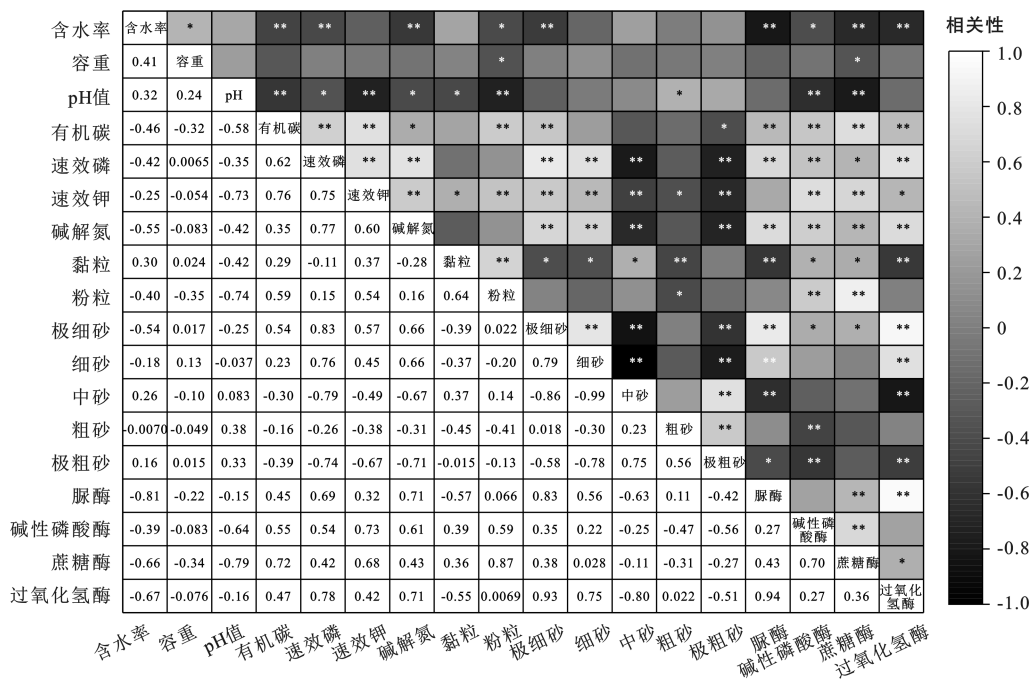
由图3可以看出,沙柳林土壤含水率、容重、pH值与有机碳、速效磷、速效钾、碱解氮显著负相关($p<0.05$),与脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶、过氧化氢酶也显著负相关($p<0.05$);有机碳、速效钾、速效磷、碱解氮与中砂、粗砂、极粗砂呈显著负相关($p<0.05$),而有机碳、粉粒、速效钾、极细砂、速效磷、细砂、碱解氮与脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶、过氧化氢酶活性呈显

著正相关关系($p<0.05$)。

由图4可知,通过对4种土壤酶活性和14个土壤指标进行主成分分析,PCA₁轴可解释这些土壤指标与酶活性差异的45.9%,PCA₂轴可解释土壤指标与酶活性差异23.0%,前2个主成分的累计贡献率达68.9%。通过和该轴的夹角和投影长度显示,土壤酶活性和土壤理化性质存在明显的差异性。蔗糖酶、碱性磷酸酶、脲酶、过氧化氢酶与中砂、及粗砂、含水率、

容重、pH 值、粗砂间夹角呈现为钝角,表明这 4 种酶与这些指标呈负相关;蔗糖酶、碱性磷酸酶与粉粒、有机碳、速效钾、速效磷、碱解氮间的夹角呈锐角,表明

蔗糖酶、碱性磷酸酶与这些土壤指标呈正相关;脲酶、过氧化氢酶与土壤养分、极细砂、细砂间夹角为锐角,表明脲酶、过氧化氢酶与其呈正相关。



注: * 表示显著相关($p < 0.05$); ** 表示极显著相关($p < 0.01$)。

图 3 沙柳林土壤酶活性与理化因子的相关性分析热图

Fig.3 Heat map of correlation analysis between soil enzyme activity and physicochemical factors in *Salix psammophila* forest

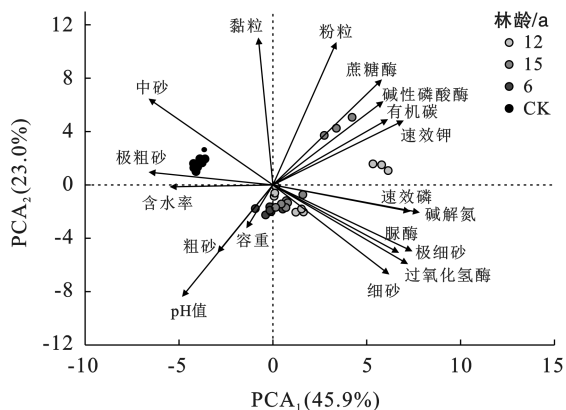


图 4 沙柳林土壤酶活性与理化因子的主成分分析

Fig.4 Principal component analysis of soil enzyme activity and physicochemical factors in *Salix psammophila* forest

4 讨论

4.1 不同林龄沙柳林下土壤理化性质的变化

随着沙柳林龄的增加,植物根系的生长会促进土壤微生物的活动,有利于土壤结构的改善,增加土壤的通气性和渗透性,减小土壤容重;残体的分解和有机质的积累会导致土壤中有机酸和其他酸性物质的增加,从而土壤的 pH 值有轻微的降低,该研究结果与刘江等^[23]的一致。随着土层深度的增加,表层细

颗粒(黏粒和粉粒)含量较下层增加,但变化不显著,该结论与王永兵等^[24]的研究结果一致。

随着林龄的增加,在 10—20 cm, 20—30 cm 土层中有机碳含量呈先减后增的变化趋势,与刘顺等^[25]的研究结果一致。林下地表土层中的凋落物含量和微生物的活跃度随着林龄的增加而增加,为有机质的生长创造了有利条件^[26],导致表层有机碳含量增加。幼龄林生长阶段,林分密度高,而净生产力低,使其根系有机碳输入大于其所需,导致了土壤中的含量相对较高;沙柳林在 12 a 生长速度加快,从土壤中吸收的养分超过了微生物分解枯枝落叶层所释放的养分,导致有机碳含量下降;沙柳林在 15 a 时的生长速度减慢,对营养物质的利用率降低,植物根系分泌物、枯落物等在不断地分解,促进了植物根际碳的积累。

不同林龄沙柳防护林表层土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量随林龄的增大均呈先增后减的趋势。在 12 a 时达到顶峰,与张月欣等^[27]对大青山榆林的研究结果一致。进入 12 a 之前,沙柳在生长过程中对氮、磷、钾的消耗量要小于微生物分解凋落物所获得的营养物质的量,这导致了土壤营养物质不断增加。沙柳林下不同林龄的土壤养分随土层深度的加

深逐渐降低,土壤养分呈现出明显的表聚性。这与董生健等^[28]的研究结果类似。

4.2 不同林龄沙柳土壤酶活性的变化

土壤脲酶活性在不同林龄内表现为:15 a>6 a>12 a,随着林龄的增加呈先降低再升高的趋势,这与郭辉等^[29]的研究结论相反,其可能是树种和地区差异过大。林龄为6~12 a时,存在于土壤中的尿素经过脲酶的作用,转变为植物生长所必需的氮元素,土壤中的底物含量急剧下降,从而引发了土壤脲酶活性显著下降;12 a后,可能是土壤表层中枯枝等凋落物及根系代谢释放的酶类物质,促进了土壤脲酶含量的增加。

随着林龄的增加,土壤中的碱性磷酸酶活性有了明显的提升。与罗蓉等^[30]对沙棘人工林的磷酸酶活性的研究结果一致。可能原因是这一阶段的含磷有机物是持续的累积,而在磷酸酶的催化作用下,生化反应的强度也随之增加,从而使磷酸酶的活性呈现上升的趋势。参加酶促反应的有机质含量随着林龄的增加而增加,促进了蔗糖酶活性的提高;此外,随林龄的增大,土壤pH值呈现轻微的下降,表明土壤中有机质的分解作用加强了,酸性物质的生成增多,蔗糖酶的活性也随之提高,与赵燕娜等^[31]的研究结果一致。

随着林龄增大,表层土壤中过氧化氢酶活性呈先增后减的趋势,与于德良等^[32]的研究结果一致。6~12 a内沙柳林逐渐成熟,新陈代谢速度加快,有机质含量也逐渐增加,同时产生的过氧化氢的量也会增加,过氧化氢酶的活性随底物的增加和土壤理化性质的提高而提高。12~15 a林龄的沙柳生长速度减慢,但有机质随林龄的增加也有所积累,其降解产生的过氧化氢的浓度超过了酶促反应的最佳浓度,抑制了其活性,导致土壤过氧化氢酶活性降低。

王素娟等^[33]研究表明,在不同的地区和植被条件下,土壤酶的活性都随土层深度的增加而降低。本研究得出相同结论,表层土壤中有有机物和营养物质丰富,为酶促反应提供了充足的基质。有机质和底物含量随土层深度的增加而降低,且土壤性状和根系分泌物对土壤酶活性有一定的影响,受到多种因素的共同影响,沙柳林地内土壤酶随着土层深度的增加,活性逐渐下降。

4.3 不同林龄沙柳林下土壤酶活性与土壤养分间的相关性

土壤酶活性与不同林龄恢复阶段土壤碱解氮、速效磷、速效钾、有机碳呈显著、极显著的正相关关系,与已有研究结果一致^[34]。土壤酶活性与含水率、容重、pH值间呈显著负相关,与李永涛等^[35]的研究结果一致。随着沙柳林龄的逐渐增长,林下土壤中的凋

落物含量增多,微生物的呼吸速率和分解速率加快,增加了土壤养分,为酶促反应提供充足的底物,微生物会分泌酶来分解有机物和矿物质,从而促进土壤酶活性的增加。充足的土壤养分可以促进土壤中微生物的生长和活动,从而增加土壤酶活性,促进土壤中的有机物分解和养分循环。

5 结论

(1) 沙柳林的建设增加了土壤细颗粒物,降低了土壤容重和pH值。随着林龄的增加,细颗粒含量逐渐增多,0—10 cm土层中粉粒含量相较于裸沙显著增加,各土层中的中砂含量相较于裸沙显著减少($p<0.05$)。

(2) 随着林龄的增长,沙柳林下的土壤养分和酶活性较裸沙地都有不同程度的提高。不同林龄沙柳林下土壤有机碳、碱解氮速效磷和速效钾相对于裸沙分别提高了7.3%~186.2%,56.6%~316.4%,154.8%~420.3%,21.8%~134.6%,脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶相对于裸沙分别提高了83.7%~145.3%,34.8%~2703.4%,18.1%~185.0%,55.4%~94.8%,库布齐沙漠沙柳防护林营建后,对土壤养分和酶活性的改良作用较显著,且各养分指标和酶活性均表现出不同程度的表聚效应。

(3) 4种土壤酶与碱解氮、有机碳、速效磷、速效钾呈显著、极显著的正相关关系,表明这些土壤酶活性可作为评价库布齐沙漠沙柳防护林土壤改良效果的重要指标。

参考文献(References)

- [1] 王涛,蒙仲举,党晓宏,等.库布齐沙漠人工防护林林下枯落物及土壤水文效应研究[J].生态环境学报,2021,30(4):700-707.
Wang Tao, Meng Zhongju, Dang Xiaohong, et al. Study on litter and soil hydrological effects of artificial understor shelterbelts in Kubuqi Desert [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021,30(4):700-707.
- [2] 安志山,张克存,谭立海,等.论沙漠—绿洲过渡带的风沙防护效应[J].干旱区研究,2017,34(5):1196-1202.
An Zhishan, Zhang Kecun, Tan Lihai, et al. Effect of protection against wind-drift sand over desert-oasis ecotone [J]. Arid Zone Research, 2017,34(5):1196-1202.
- [3] 管雪薇,汪季,丁延龙,等.吉兰泰盐湖防风固沙林体系土壤理化性状特征[J].水土保持学报,2019,33(5):114-120.
Guan Xuewei, Wang Ji, Ding Yanlong, et al. Characteristics of soil physical and chemical properties in the wind-breaking and sand-fixing forest system in Jilantai salt lake [J]. Journal of Soil and Water Conservation,

- 2019,33(5):114-120.
- [4] 雷虹.科尔沁沙地主要防护林碳氮磷化学计量特征[D].辽宁阜新:辽宁工程技术大学,2019.
Lei Hong. Carbon, Nitrogen and phosphorus stoichiometry of main protective forests in Horqin Sandy Land [D]. Fuxin, Liaoning: Liaoning Technical University, 2019.
- [5] 任余艳,胡春元,贺晓,等.毛乌素沙地巴图塔沙柳沙障对植被恢复作用的研究[J].水土保持研究,2007,14(2):13-15.
Ren Yuyan, Hu Chunyuan, He Xiao, et al. The influence of *salix* sandy barrier to vegetation restoration in sandy region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007,14(2):13-15.
- [6] 郭玉东,张秋良,陈晓燕,等.库布齐沙漠地区人工灌木林生物量模型构建[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2022,50(4):74-82.
Guo Yudong, Zhang Qiuliang, Chen Xiaoyan, et al. Establishment of biomass models for artificial shrubbery in the Kubuqi Desert area [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2022,50(4):74-82.
- [7] 秦景,贺康宁,朱艳艳.库布齐沙漠几种常见灌木光合生理特征与土壤含水量的关系[J].北京林业大学学报,2009,31(1):37-43.
Qin Jing, He Kangning, Zhu Yanyan. Relationship between photosynthetic physiological characteristics of several common shrub species and soil water content in Hobq Desert of Inner Mongolia, Northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009,31(1):37-43.
- [8] 王晓江,贺康宁,唐道峰.库布齐沙漠几种旱生灌木耗水特性研究[J].干旱区资源与环境,2010,24(10):116-121.
Wang Xiaojiang, He Kangning, Tang Daofeng. Water consumption characteristics of several shrubs in Kubuqi Desert [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010,24(10):116-121.
- [9] 戴雅婷,侯向阳,闫志坚,等.库布齐沙地两种植被恢复类型根际土壤微生物和土壤化学性质比较研究[J].生态学报,2016,36(20):6353-6364.
Dai Yating, Hou Xiangyang, Yan Zhijian, et al. Soil microbes and the chemical properties of the rhizosphere and non-rhizosphere soil under two types of vegetation restoration in the Hobq Sandy land of Inner Mongolia, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(20):6353-6364.
- [10] 张立欣,段玉玺,王博,等.库布齐沙漠不同人工固沙灌木林土壤微生物量与土壤养分特征[J].应用生态学报,2017,28(12):3871-3880.
Zhang Lixin, Duan Yuxi, Wang Bo, et al. Characteristics of soil microorganisms and soil nutrients in different sand-fixation shrub plantations in Kubuqi Desert, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017,28(12):3871-3880.
- [11] 聂素梅,高丽,闫志坚.库布齐沙漠植被特征与土壤营养状况的研究[J].草业科学,2010,27(8):23-28.
Nie Sumei, Gao Li, Yan Zhijian. Study on vegetation characteristics and soil nutrition of Kubuqi Desert [J]. Pratacultural Science, 2010,27(8):23-28.
- [12] 杨万勤,王开运.森林土壤酶的研究进展[J].林业科学,2004,40(2):152-159.
Yang Wanqin, Wang Kaiyun. Advances in forest soil enzymology [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2004,40(2):152-159.
- [13] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.
Guan Songyin. Soil Enzyme and Its Research Method [M]. Beijing: Agricultural Press, 1986.
- [14] Burns R G. Soil Enzymes [M]. New York: Academic Press, 1978.
- [15] 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.
Niu Xiaoyun, Sun Xiaomei, Chen Dongsheng, et al. Soil microorganisms, nutrients and enzyme activity of *Larix kaempferi* plantation under different ages in mountainous region of eastern Liaoning Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015,26(9):2663-2672.
- [16] 周礼恺.土壤酶学[M].北京:科学出版社,1987:239-254.
Zhou Likai. Soil Enzymology [M]. Beijing: Science Press, 1987:239-254.
- [17] Johansson E, Krantz-Rülcker C, Zhang B X, et al. Chlorination and biodegradation of lignin [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000,32(7):1029-1032.
- [18] Zhang Yongmei, Zhou Guoyi, Wu Ning, et al. Soil enzyme activity changes in different-aged spruce forests of the eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Pedosphere, 2004,14(3):305-312.
- [19] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2005.
Bao Shidan. Soil Agrochemical Analysis [M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2005.
- [20] 张可可,蒋德明,余海滨,等.接种菌根菌剂对科尔沁沙地4种造林幼苗生长特性的影响[J].生态学杂志,2017,36(7):1791-1800.
Zhang Keke, Jiang Deming, Yu Haibin, et al. Impacts of mycorrhizal fungi inoculum on growth characteristics of four kinds of afforestation seedlings in Horqin sandy land, China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2017,36(7):1791-1800.
- [21] 余娜,刘济明,张超,等.不同沙生植被土壤酶活性分异特征研究[J].水土保持研究,2010,17(1):77-81.
Yu Na, Liu Jiming, Zhang Chao, et al. Study on the differentiation characteristics of different sandy vegeta-

- tion soil enzyme activities [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010,17(1):77-81.
- [22] 叶存旺,翟巧绒,郭梓娟,等.沙棘一侧柏混交林土壤养分、微生物与酶活性的研究[J].西北林学院学报,2007,22(5):1-6.
- Ye Cunwang, Zhai Qiaorong, Guo Zijuan, et al. Soil nutrient, microorganism and enzyme activity of *Hippophae rhamnoides* and *Platycladus orientalis* mixed forests [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007,22(5):1-6.
- [23] 刘江,袁勤,张立欣,等.库布齐沙漠北缘不同人工灌木林地土壤肥力质量状况[J].西北林学院学报,2021,36(2):46-53.
- Liu Jiang, Yuan Qin, Zhang Lixin, et al. Soil quality assessment in different artificial shrub plantations in northern margin of kubuqi desert, China [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021,36(2):46-53.
- [24] 王永兵,李亚萍,古尔班通古特沙漠南缘梭梭固沙林土壤粒度的分异规律[J].水土保持通报,2020,40(3):75-80.
- Wang Yongbing, Li Yaping. Soil particle size differentiation of *Haloxylon ammodendron* sand-break forest in southern margin of Gurbantunggut Desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(3):75-80.
- [25] 刘顺,盛可银,刘喜帅,等.陈山红心杉根际土壤有机碳、氮含量及根际效应[J].生态学杂志,2017,36(7):1957-1964.
- Liu Shun, Sheng Keyin, Liu Xishuai, et al. Contents of soil organic carbon and nitrogen forms in rhizosphere soil of *Cunninghamia lanceolata* and the rhizosphere effect [J]. Chinese Journal of Ecology, 2017,36(7):1957-1964.
- [26] 黄雅茹,郝玉光,董礼隆,等.乌兰布和沙漠东北缘典型固沙林土壤养分特征研究[J].西北林学院学报,2018,33(2):1-9.
- Huang Yaru, Hao Yuguang, Dong Lilong, et al. Comparative study on soil chemical properties of typical sand-fixing forests in Ulanbuh Desert [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018,33(2):1-9.
- [27] 张月欣,麻云霞,马秀枝,等.大青山不同林龄榆树林的土壤酶和养分特征[J].中国农业科技导报,2023,25(12):168-176.
- Zhang Yuexin, Ma Yunxia, Ma Xiuzhi, et al. Soil nutrient characteristics of *Ulmus pumila* L. forest at different ages in Daqingshan [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023,25(12):168-176.
- [28] 董生健,何小谦,黄土丘陵区不同林龄人工刺槐林下植被及土壤系统演变特征[J].水土保持通报,2016,36(5):20-27.
- Dong Shengjian, He Xiaoqian. Evolution of undergrowth vegetation and soil properties with development of artificial *Robinia pseudoacacia* in Loess Hilly Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016,36(5):20-27.
- [29] 郭辉,唐卫平.不同林龄华北落叶松根际与非根际土壤酶和土壤微生物研究[J].生态环境学报,2020,29(11):2163-2170.
- Guo Hui, Tang Weiping. Enzyme activity and microbial community diversity in rhizosphere and Non-rhizosphere soil of *Larix principis-rupprechtii* [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020,29(11):2163-2170.
- [30] 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.
- Luo Rong, Yang Miao, Yu Xuan, et al. Seasonal dynamics of soil microbial community and enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* plantation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018,29(4):1163-1169.
- [31] 赵燕娜,廖超英,李晓明,等.毛乌素沙地不同林龄樟子松人工林土壤酶活性变化特征[J].西北林学院学报,2014,29(2):1-5.
- Zhao Yanna, Liao Chaoying, Li Xiaoming, et al. Evolution of soil enzyme activities of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation at different ages in Muus sandland [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014,29(2):1-5.
- [32] 于德良,雷泽勇,赵国军,等.土壤酶活性对沙地樟子松人工林衰退的响应[J].环境化学,2019,38(1):97-105.
- Yu Deliang, Lei Zeyong, Zhao Guojun, et al. Response of soil enzyme activity to the decline of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations on sand land [J]. Environmental Chemistry, 2019,38(1):97-105.
- [33] 王素娟,高丽,苏和,等.内蒙古库布齐沙地土壤蛋白酶初步研究[J].草业科学,2009,26(9):13-17.
- Wang Sujuan, Gao Li, Su He, et al. The preliminary research of soil prolease on Khobqi sand area of Inner Mongolia [J]. Pratacultural Science, 2009,26(9):13-17.
- [34] 张江伟,李慧,柴晓甜,等.玉米深松分层施肥和小麦限水灌溉对土壤微生物量碳、氮及酶活性的影响[J].水土保持学报,2022,36(6):346-355.
- Zhang Jiangwei, Li Hui, Chai Xiaotian, et al. Effects of fertilization with subsoiling of maize and limited irrigation of wheat on soil microbial biomass carbon, nitrogen and enzymes activities [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(6):346-355.
- [35] 李永涛,王振猛,李宗泰,等.黄河三角洲不同林龄柽柳人工林土壤养分及生物学特性研究[J].干旱区资源与环境,2018,32(4):89-94.
- Li Yongtao, Wang Zhenmeng, Li Zongtai, et al. Soil nutrients and biological characteristics of *Tamarix chinensis* plantations with different ages in the Yellow River Delta [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018,32(4):89-94.