

毛乌素沙地飞播造林植被恢复过程土壤酶活性的变化

钱洲^{1,2}, 俞元春¹, 俞小鹏¹, 高捍东¹, 吕荣³, 张文英⁴

(1. 南京林业大学 森林资源与环境学院, 南京 210037; 2. 南京市水土保持管理中心, 南京 210008;
3. 鄂尔多斯市林业局, 内蒙古 鄂尔多斯 017000; 4. 包头市林业局林业工作站, 内蒙古 包头 014030)

摘要:以内蒙古自治区毛乌素沙地飞播造林地为对象,研究了不同植被恢复年限样地土壤酶活性的变化。结果表明:经过 17 a 的植被恢复,土壤表层(0—10 cm)脲酶、蔗糖酶和磷酸酶显著增加,土壤过氧化氢酶活性在植被恢复初期上升趋势明显;土壤脲酶、蔗糖酶和磷酸酶活性与土壤养分之间有一定的正相关性,而这种相关性在土壤表层(0—10 cm)中要强于中下层(10—40 cm);土壤表层(0—10 cm)土壤脲酶、蔗糖酶和磷酸酶三种水解酶之间呈极显著相关($p < 0.01$)。表明毛乌素沙地飞播造林植被恢复过程中土壤脲酶、蔗糖酶和磷酸酶活性的增强和土壤养分的改善相互促进,土壤酶活性能在一定程度上反映沙地植被恢复过程中土壤肥力水平,沙地表层土壤中氮素的转化、多糖的转化和有机磷的转化之间关系密切并且相互影响。

关键词:毛乌素沙地; 飞播造林; 植被恢复; 土壤养分; 土壤酶活性

中图分类号:S156

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)06-0095-06

Changes of Soil Enzyme Activities in Mu Us Sandy Land with Aerial Seeding Afforestation

QIAN Zhou^{1,2}, YU Yuan-chun¹, YU Xiao-peng¹, GAO Han-dong¹, LÜ Rong³, ZHANG Wen-ying⁴

(1. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. Soil and Water Conservation Management Center of Nanjing, Nanjing 210008, China; 3. Forestry Bureau of Ordos, Ordos, Inner Mongolia 017000, China; 4. Forestry Workstation of Baotou, Baotou, Inner Mongolia 014030, China)

Abstract: The soil enzyme activities in different vegetation restoration periods by aerial seeding afforestation in Mu Us sandy land of Inner Mongolia Autonomous Region were studied. The results revealed that soil urease, sucrase and phosphatase activities increased remarkably after 17 years of revegetation, and soil catalase activity increased at the early stage of vegetation restoration. At the same time, soil urease, sucrase and phosphatase enzyme activities showed stronger correlations with soil nutrients, while this correlation in the surface soil (0—10 cm) is stronger than in the lower layer (10—40 cm). In addition, there was a highly significant correlation among soil urease, soil invertase and soil phosphatase activities ($p < 0.01$) of surface soil (0—10 cm). These indicated that in the process of vegetation restoration, soil urease, invertase, phosphatase activities and soil nutrient promoted each other due to afforestation in Mu Us Sand land by aerial seeding. This result showed soil enzyme activity could reflect soil nutrient in the process of vegetation restoration. Indeed, there was a close relationship between the transformation of nitrogen, polysaccharide and organic phosphorus in the surface soil.

Key words: Mu Us sandy land; aerial seeding; vegetation restoration; soil nutrient; soil enzyme activity

土壤酶是土壤的重要活性组成成分,参与土壤许多重要的生物化学反应,对土壤肥力具有重要影响,与植被生长有密切联系^[1]。在沙地植被恢复过程中,

土壤酶与沙丘结皮的形成、养分的转化、沙丘的土壤化、成土的发育以及促进沙丘的固定和评价沙地土壤的肥力等密切相关^[2]。土壤酶是监测流动人工恢复

收稿日期:2013-12-03

修回日期:2014-01-27

资助项目:国家林业局“948”引进项目(2008-4-22);内蒙古自治区林业厅重点科研项目(2010-01);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介:钱洲(1987—),男,江苏江阴人,助理工程师,硕士,从事水土保持研究。E-mail:qianchao112233@163.com

通信作者:俞元春(1961—),男,江苏南京人,教授,博士生导师,从事森林土壤研究。E-mail:yeyu@njfu.com.cn

沙漠生态工程及土壤发育动态的一种重要指标,可以较好地反映土壤恢复过程的动态变化。

飞播造林作为沙漠化地区植被恢复的重要手段,在毛乌素沙地沙漠化治理工程中得到了广泛运用。王博等^[3]、李维等^[4]对毛乌素沙地植被恢复过程中植被恢复效果做了相关研究,但关于毛乌素沙地植被恢复过程土壤性质变化的相关研究却极少。笔者通过对毛乌素沙地飞播造林植被恢复过程中土壤脲酶、蔗糖酶、磷酸酶、过氧化氢酶、pH 以及养分的变化进行研究,探讨沙地植被恢复对土壤酶活性的影响及土壤酶活性在反映土壤质量变化演变过程中的作用。

1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市乌审旗,是毛乌素沙地的腹地。该地区属温带极端大陆性气候,年平均气温 7.4℃,极端最低气温 -35.2℃,极端最高气温 38.0℃,年降雨量 350~400 mm,降雨季节性很强,夏秋季雨水集中,冬春季降水稀少;土壤以风沙土分布最广,约占全旗土地面积的 78.3%,结构松散,易就地

起沙;植被以沙生植物为主,地带性植被破坏殆尽。

飞播造林区位于乌审旗境内(38°19′52.6″—38°51′50.5″N,108°26′29.4″—108°59′31.0″E),海拔最高 1 393 m,最低 1 217 m,使用杨柴(*Astragalus mongolicum*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、籽蒿(*Artemisia sphaerocephala krasch*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall)、沙米(*Agriophyllum squarrosum* Moq)等植物的丸粒化种子从 1995 年开始陆续飞播在规定区域内,多年施行封育、补植等措施。

2 研究方法

2.1 样地设置

采用空间代替时间的方法,选择飞播造林植被恢复不同年限(5 a, 7 a, 9 a, 11 a 和 17 a)飞播区设立调查样地,样地规格为 20 m×20 m,重复 3 次,在每块样地中,随机选取 2 m×2 m 的样方,以未飞播区作为对照,进行植被、土壤调查和样品采集,重复 3 次。样地概况见表 1。

表 1 样地概况

项目	植被恢复年限/a					
	0	5	7	9	11	17
主要植物种类	沙打旺、沙米	杨柴、柠条、籽蒿、沙打旺	杨柴、油蒿、沙打旺、沙米	杨柴、籽蒿、油蒿、沙打旺	杨柴、籽蒿、油蒿、沙米	杨柴、油蒿、沙米、沙打旺
植被盖度/%	2.9	32.3	41.4	55.7	64.7	82.3
地上生物量/(g·m ⁻²)	16.83	295.33	394.57	526.43	806.83	963.83
地下生物量/(g·m ⁻²)	25.40	579.00	760.67	941.83	1397.23	1741.67
海拔/m	1388	1393	1357	1306	1333	1217
纬度	38°51′50.5″	38°47′30.7″	38°47′51.3″	38°37′02.1″	38°33′55.0″	38°19′52.6″
经度	108°26′29.4″	108°35′21.6″	108°45′57.9″	108°59′31.0″	108°47′25.3″	108°57′01.6″

2.2 样方调查和样品采集

在选取的植被调查样方内,按照 0—10 cm, 10—20 cm 和 20—40 cm 分层多点采集土壤混合样品,用于土壤 pH 值、有机质、全氮、全磷、水解氮、有效磷、速效钾和土壤酶活性的测定。

2.3 土壤测定方法

土壤 pH 值用电位法、有机质用重铬酸钾—外加热法、全氮用半微量凯氏定氮法水解性氮用碱解扩散法、有效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法、速效钾用醋酸铵浸提—火焰光度法测定^[5]。

土壤脲酶活性测定采用苯酚次氯酸钠比色法,以尿素溶液和甲苯做培养液,用 pH 值 6.7 的柠檬酸盐作缓冲液,于 37℃ 恒温箱中培养 24 h 后,用 1 g 土壤中 NH₃-N 毫克数表示;蔗糖酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法,结果以 37℃ 恒温培养 24 h 后,1 g 土壤中葡萄糖毫克数表示;磷酸酶采用磷酸苯二钠比色

法,结果以 37℃ 恒温培养 2 h 后每 100 g 土样生成的 P₂O₅ 的毫克数表示;过氧化氢酶采用 0.1 mol/L 的 KMnO₄ 滴定法,单位用 1 g 土样 20 min 所消耗的 0.1 mol/L 的 KMnO₄ 毫升数表示^[6]。

2.4 数据分析

利用 Excel 2007 和 SPSS 17.0 对数据进行方差分析、差异显著性和相关性分析。

3 结果与分析

3.1 飞播造林植被恢复过程中土壤 pH 值和养分变化

相关研究表明,随着沙漠化逆转时间的增加,土壤受到的扰动减少,地表植被种类和数量增加,输入到土壤中的有机物质增多,导致土壤有机碳积累增多^[7-8]。同时,土壤全氮、水解氮、有效磷和有效钾也会在沙漠化逆转过程中显著增加^[9-11]。

由表 2 可以看出,随着植被恢复年限的增加,毛

乌素沙地的土壤养分也发生着相应变化,尤其是 0—10 cm 层土壤,变化最为明显。与植被恢复初期比较,经过 17 a 植被恢复的样地 0—10 cm 层土壤有机质、全氮、水解氮、有效磷和速效钾分别增加了 700.54%,254.55%,248.33%,234.84%和 203.30%。其中,0—10 cm 层土壤有机质和水解氮含量在 6 种不同年限样地的差异性达到了显著水平($p < 0.05$)。相比于 0—10 cm 层土壤,10—20 cm 与 20—40 cm 层土壤养分变化幅度相对较小,20—40 cm 层土壤,除了全氮和有效钾经过 17 a 植被恢复后增长了 100.00%和 46.34%,有机质、水解氮和有效磷的变

化不明显,这说明植被恢复给土壤带来的改良效应在土壤表层表现最为明显。随着植被恢复年限的增加,土壤 pH 值变化趋势不明显,这与相关研究有所不同^[12-13]。

各样地不同层土壤纵向对比,除了植被恢复初期样地,各样地 0—10 cm 土壤有机质、全氮、水解氮、有效磷和速效钾含量均高于 10—20 cm,20—40 cm 层土壤,经过 9 a 植被恢复的样地 0—10 cm 土壤有机质、全氮、水解氮、有效磷和速效钾含量显著高于 10—20 cm 和 20—40 cm。不同土层深度之间 pH 值的变化不明显。

表 2 飞播造林植被恢复过程中土壤 pH 值和养分变化

指标	土层深度/cm	植被恢复年限/a					
		0	5	7	9	11	17
pH	0—10	8.14±0.03a	8.43±0.06c	8.28±0.04b	8.15±0.04a	8.20±0.02a	8.39±0.05c
	10—20	8.31±0.04b	8.39±0.01c	8.19±0.03a	8.07±0.08a	8.13±0.03a	8.26±0.05b
	20—40	8.36±0.03b	8.35±0.02b	8.42±0.02b	8.53±0.03c	8.25±0.04a	8.22±0.02a
有机质/ (mg·g ⁻¹)	0—10	0.52±0.03a	0.80±0.03b	0.92±0.06c	1.52±0.10d	1.90±0.18e	4.22±0.39f
	10—20	0.50±0.04a	0.60±0.04b	0.73±0.05c	0.83±0.06c	0.76±0.07c	0.82±0.03c
	20—40	0.51±0.03a	0.62±0.04a	0.56±0.04a	0.62±0.05a	0.53±0.06a	0.55±0.05a
全氮/ (mg·g ⁻¹)	0—10	0.10±0.01a	0.12±0.01a	0.12±0.01a	0.19±0.02b	0.21±0.01b	0.39±0.02c
	10—20	0.10±0.01a	0.10±0.01a	0.11±0.00a	0.18±0.02b	0.17±0.02b	0.23±0.01c
	20—40	0.10±0.00a	0.11±0.01a	0.12±0.01a	0.15±0.01a	0.14±0.01a	0.20±0.02b
水解氮/ (mg·kg ⁻¹)	0—10	13.51±0.31a	19.13±0.56b	20.65±0.76c	23.80±0.85c	26.90±1.63c	47.06±3.48d
	10—20	14.03±0.21a	14.93±0.22b	16.10±0.57c	18.20±0.55d	19.65±1.34d	20.07±1.34d
	20—40	14.18±0.28a	14.63±0.43a	16.15±0.65b	16.83±0.64b	16.35±0.68b	16.57±0.56b
有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	0—10	3.10±0.11a	3.39±0.28a	4.55±0.55b	8.06±0.54c	7.45±0.88c	10.38±1.04d
	10—20	3.03±0.06a	3.39±0.29a	4.27±0.35b	5.12±0.39c	5.20±0.54c	5.46±0.62c
	20—40	3.05±0.08a	3.46±0.10b	4.08±0.10c	4.08±0.23c	4.02±0.17c	3.97±0.15c
速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	0—10	81.02±3.31a	90.05±3.89b	106.78±6.13c	168.75±22.74d	175.31±19.91d	245.73±23.51e
	10—20	70.87±2.08a	72.19±1.24a	98.35±4.22b	116.85±7.96c	123.44±10.47c	152.58±15.72d
	20—40	71.13±2.21a	73.46±3.29a	91.13±5.58b	97.71±6.15b	104.29±7.83b	104.09±10.07b

注:表中数字为平均值±标准差,同行不同字母表示不同植被恢复年限样地同一层次土壤的显著性差异($p < 0.05$)。

3.2 飞播造林植被恢复过程中土壤酶活性变化

3.2.1 脲酶 土壤脲酶对提高土壤氮素的利用率和促进土壤氮素循环具有重要意义^[14]。随着植被恢复年限的增加,0—10 cm 土壤的脲酶活性呈上升趋势,并在植被恢复到达 7 a 后快速上升,17 a 后脲酶活性已为最初的 3.05 倍,而中下层土壤脲酶活性变化趋势不明显;土壤纵向剖面对比,0—10 cm 土壤脲酶活性始终大于 10—20 cm,20—40 cm 土壤,在植被恢复年限达到 17 a 时,土壤纵向剖面酶活性差异达到最大,0—10 cm 土壤脲酶活性是 10—20 cm 土壤的 2.62 倍,是 20—40 cm 土壤的 2.98 倍(图 1a)。这可能是由于随着植被恢复年限的增加,土壤表层的植物枯落物以及含氮有机体分解的中间产物开始增加,土壤表层良好的通风状况又提高了土壤肥力的利用率,使得

表层土壤脲酶活性在植被恢复 7 a 后保持稳固快速上升。

3.2.2 蔗糖酶 蔗糖酶能催化多种低聚糖的水解,在土壤碳循环中起着重要作用,它比其他酶类更能反映土壤肥力水平和生物学活性强度^[15]。随着植被恢复年限的增加,0—10 cm,10—20 cm 土壤蔗糖酶活性稳步上升,其中不同年限样地 0—10 cm 土壤蔗糖酶活性呈显著差异($p < 0.05$),经过 17 a 植被恢复后蔗糖酶活性为最初的 105.57 倍,10—20 cm 土壤蔗糖酶活性在植被恢复 11 a 后增长明显加快,经过 17 a 植被恢复后蔗糖酶活性为最初的 18.57 倍,增长幅度很大;土壤纵向剖面对比,0—10 cm 土壤蔗糖酶活性始终大于 10—20 cm,20—40 cm 土壤,在植被恢复年限达到 17 a 时,0—10 cm 土壤蔗糖酶活性是 10—20

cm 土壤的 5.74 倍,是 20—40 cm 土壤的 21.67 倍(图 1b)。这可能是由于随着植被恢复年限的增加,土

壤表层枯落物的增加促进了土壤蔗糖酶活性的增强,并逐步影响到中下层土壤。

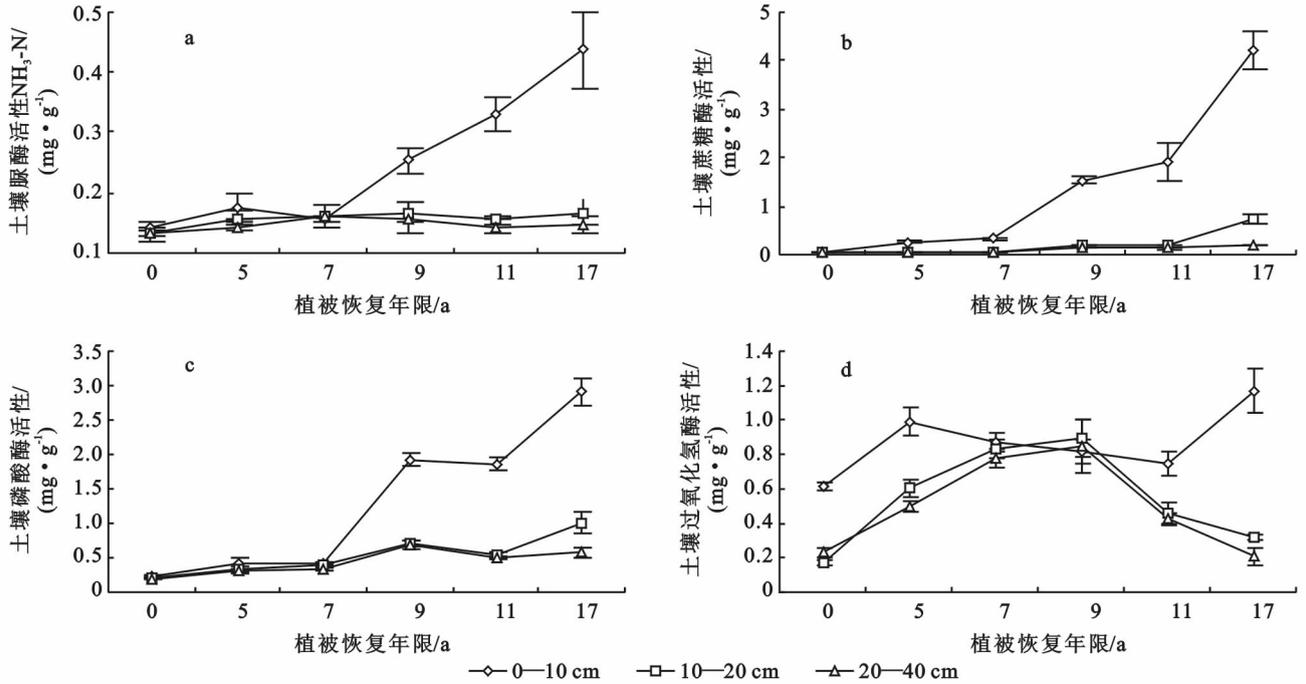


图 1 飞播造林植被恢复过程中土壤酶活性变化

3.2.3 磷酸酶 磷酸酶是土壤中广泛分布的一种水解酶,能够催化磷酸酯的水解反应,其活性的高低直接影响着土壤中有磷的生物转化方向和有效性。随着植被恢复年限的增加,0—10 cm,10—20 cm 土壤磷酸酶活性总体呈上升趋势,在 17 a 时达到最大,分别为最初的 12.65 倍和 4.73 倍;土壤纵向剖面对比,0—10 cm 土壤磷酸酶活性始终大于 10—20 cm,20—40 cm 土壤,在植被恢复年限达到 17 a 时,0—10 cm 土壤蔗糖酶活性是 10—20 cm 土壤的 2.88 倍,是 20—40 cm 土壤的 5.05 倍(图 1c)。表层土壤磷酸酶活性在植被恢复 7 a 后快速增长,具备了一定有机磷生物转化的条件。

3.2.4 过氧化氢酶 过氧化氢酶活性高低可以反映分解土壤呼吸过程中产生的过氧化氢的能力,在一定程度上反映了土壤微生物学过程的强度。随着植被恢复年限的增加,0—10 cm 土壤过氧化氢酶活性总体呈上升趋势,前 5 a 增加幅度明显,在 5 a 是达到最初的 1.61 倍,在 17 a 时达到最大值,为最初的 1.91 倍,而 10—20 cm 土壤和 20—40 cm 土壤变化趋势均为先上升后下降;土壤纵向剖面对比,除恢复年限为 9 a 的样地,其余样地 0—10 cm 土壤过氧化氢酶活性均大于 10—20 cm,20—40 cm 土壤,在植被恢复年限达到 17 a 时,0—10 cm 土壤蔗糖酶活性是 10—20 cm 土壤的 3.66 倍,是 20—40 cm 土壤的 5.66 倍(图 1d)。土壤过氧化氢酶活性在植被恢复初期上升趋势

明显,9 a 后中下层土壤过氧化氢酶活性呈下降趋势,原因有待进一步探究。

3.3 土壤酶活性与土壤 pH 值及养分的相关性

相关分析表明,土壤脲酶、蔗糖酶、磷酸酶、过氧化氢酶与土壤养分有密切的关系:0—10 cm 土壤脲酶、蔗糖酶、磷酸酶分别与土壤有机质、全氮、水解氮、有效磷、速效钾呈极显著正相关($p < 0.01$),土壤过氧化氢酶与土壤 pH 值、有机质、全氮、水解氮呈极显著正相关($p < 0.01$);10—20 cm 土壤脲酶与土壤有机质、有效磷呈极显著正相关($p < 0.01$),土壤蔗糖酶与土壤全氮、水解氮、有效磷、速效钾呈极显著正相关($p < 0.01$),土壤磷酸酶与土壤有机质、全氮、水解氮、有效磷、速效钾呈极显著正相关($p < 0.01$);20—40 cm 土壤脲酶与土壤水解氮、有效磷呈极显著正相关($p < 0.01$),土壤蔗糖酶、磷酸酶分别与土壤全氮、水解氮、有效磷、速效钾呈极显著正相关($p < 0.01$),土壤过氧化氢酶与土壤 pH 值呈极显著正相关($p < 0.01$)。(表 3)

总体看来,在沙地植被恢复过程中,土壤酶活性与土壤养分相关性明显,说明土壤酶活性是评价土壤生物活性较为稳定和灵敏的一个指标,能在一定程度上反映沙地植被恢复过程中土壤肥力水平,这与一些相关研究结论吻合^[16-17];土壤酶活性与土壤养分在土壤表层的相关性强于中下层土壤,这说明在沙地植被恢复过程中,参与土壤的复杂生物化学过程,包括

植被枯落物的分解、腐殖质及各种有机物的合成、土壤碳、氮、磷的固定和释放,较集中的土壤表层;相对

于土壤脲酶和过氧化氢酶,土壤蔗糖酶和土壤磷酸酶与土壤养分的相关性更强。

表3 土壤酶活性与土壤 pH 值及养分的相关系数

土壤酶	土层深度/cm	pH	有机质	全氮	水解氮	有效磷	速效钾
脲酶	0—10	0.254	0.949**	0.948**	0.935**	0.918**	0.960**
	10—20	-0.272	0.603**	0.509*	0.514*	0.640**	0.558*
	20—40	0.280	0.544*	0.283	0.629**	0.610**	0.429
蔗糖酶	0—10	0.270	0.986**	0.988**	0.971**	0.927**	0.961**
	10—20	-0.088	0.567*	0.872**	0.719**	0.666**	0.851**
	20—40	-0.220	0.076	0.898**	0.719**	0.600**	0.809**
磷酸酶	0—10	0.087	0.899**	0.925**	0.880**	0.963**	0.953**
	10—20	-0.378	0.794**	0.944**	0.843**	0.848**	0.939**
	20—40	0.110	0.356	0.746**	0.814**	0.731**	0.789**
过氧化氢酶	0—10	0.804**	0.687**	0.666**	0.748**	0.491*	0.557*
	10—20	-0.489*	0.412	-0.063	0.047	0.207	0.000
	20—40	0.800**	0.446	-0.191	0.342	0.463	0.109

注:自由度 $n=18$; * 表示显著相关($p<0.05$), ** 表示极显著相关($p<0.01$)。

3.4 土壤酶活性之间的相关性

从表4可以看出,0—10 cm 土壤脲酶、蔗糖酶和磷酸酶三种水解酶之间呈极显著正相关($p<0.01$),表明表层土壤中氮素的转化、多糖的转化和有机磷的转化之间关系密切并且相互影响,表层土壤酶活性之间的相关性强于中下层土壤;0—10 cm,10—20 cm 和 20—40 cm 土壤蔗糖酶与磷酸酶均呈极显著正相关($p<0.01$),这说明了沙地植被恢复过程中,土壤蔗糖酶与磷酸酶在进行不同的酶促反应时,不仅具有自身的专一特性,同时也存在着一些共性,这与相关研究相似^[18]。

表4 土壤酶活性之间的相关系数

土壤酶	土层深度/cm	脲酶	蔗糖酶	磷酸酶	过氧化氢酶
脲酶	0—10	1.000	0.962**	0.923**	0.576*
	10—20	1.000	0.414	0.635**	0.387
	20—40	1.000	0.207	0.455	0.470*
蔗糖酶	0—10	0.962**	1.000	0.947**	0.621**
	10—20	0.414	1.000	0.915**	-0.299
	20—40	0.207	1.000	0.900**	-0.079
磷酸酶	0—10	0.923**	0.947**	1.000	0.465
	10—20	0.635**	0.915**	1.000	0.032
	20—40	0.455	0.900**	1.000	0.287
过氧化氢酶	0—10	0.576*	0.621**	0.465	1.000
	10—20	0.387	-0.299	0.032	1.000
	20—40	0.470*	-0.079	0.287	1.000

注:自由度 $n=18$; * 表示显著相关($p<0.05$), ** 表示极显著相关($p<0.01$)。

4 结论

毛乌素沙地飞播造林植被恢复过程中不同土壤

深度养分得到了不同程度改善,其中土壤表层最为明显,经过 17 a 的植被恢复,0—10 cm 层土壤有机质、全氮、水解氮、有效磷和速效钾分别增加了 700.54%, 254.55%, 248.33%, 234.84% 和 203.30%;不同剖面酶活性也有了不同程度的增加,其中土壤表层增长幅度最为明显,0—10 cm 层土壤脲酶、蔗糖酶和磷酸酶分别增长为最初的 3.05 倍、105.57 倍和 12.65 倍。

土壤脲酶、蔗糖酶和磷酸酶活性与土壤养分之间呈一定正相关,表明土壤脲酶、蔗糖酶和磷酸酶活性的增强和土壤养分的改善相互促进,土壤酶活性在一定程度上能反映沙地植被恢复过程中土壤肥力水平。而这种相关性在土壤表层中要强于中下层,这说明在沙地植被恢复过程中,参与土壤的复杂生物化学过程较集中的土壤表层,这很有可能和沙地植物的生长特性有关。相对于土壤脲酶和过氧化氢酶,土壤蔗糖酶和土壤磷酸酶与土壤养分的相关性更强。

0—10 cm 土壤脲酶、蔗糖酶和磷酸酶三种水解酶之间呈极显著正相关($p<0.01$),表明沙地表层土壤中氮素的转化、多糖的转化和有机磷的转化之间关系密切并且相互影响;不同土层深度土壤蔗糖酶与磷酸酶均呈极显著正相关($p<0.01$),说明沙地植被恢复过程中,土壤中多糖的转化和有机磷的转化之间存在着一定的相互促进机制。

参考文献:

- [1] 林娜,刘勇,李国雷,等.森林土壤酶研究进展[J].世界林业研究,2010(4):21-25.
- [2] Quilchano C, Marañón T. Dehydrogenase activity in Mediterranean forest soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002,35(2):102-107.

- [3] 王博,丁国栋,顾小华,等.毛乌素沙地腹地植被恢复效果初步研究:以内蒙古乌审旗为例[J].水土保持研究,2007,14(3):237-238.
- [4] 李维,张强.毛乌素沙地植被恢复措施[J].林业调查规划,2007,32(5):76-78.
- [5] 中华人民共和国林业部科技司.林业标准汇编(三)[S].北京:中国林业出版社,1991.
- [6] 钱嘉渊译.酶的测定方法[M].北京:中国轻工业出版社,1992.
- [7] 王蕴忠,孙和国.飞机播种造林种草治理毛乌素,库布齐沙漠(地)成效及评价[J].内蒙古林业科技,1999(3):24-29.
- [8] 马帅,赵世伟,李婷,等.子午岭林区不同植被恢复阶段土壤有机碳变化研究[J].水土保持通报,2011,31(3):94-98.
- [9] 李玉强,赵哈林,李玉霖,等.科尔沁沙地不同生境土壤氮矿化/硝化作用研究[J].中国沙漠,2009,29(3):438-444.
- [10] 蒋德明,曹成有,李雪华,等.科尔沁沙地植被恢复及其对土壤的改良效应[J].生态环境,2008,17(3):1135-1139.
- [11] He N, Wu L, Wang Y, et al. Changes in carbon and nitrogen in soil particle-size fractions along a grassland restoration chronosequence in northern China[J]. *Geoderma*, 2009,150(3):302-308.
- [12] Cao C, Jiang D, Teng X, et al. Soil chemical and microbiological properties along a chronosequence of *Caragana microphylla* Lam. plantations in the Horqin sandy land of Northeast China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008,40(1):78-85.
- [13] Zuo X, Zhao H, Zhao X, et al. Spatial pattern and heterogeneity of soil properties in sand dunes under grazing and restoration in Horqin Sandy Land, Northern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008,99(2):202-212.
- [14] Baligar V C, Wright R J, Smedley M D. Enzyme activities in hill land soils of the Appalachian region[J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 1988,19(4):367-384.
- [15] Nausch M, Nausch G. Stimulation of peptidase activity in nutrient gradients in the Baltic Sea[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000,32(13):1973-1983.
- [16] 苏永中,赵哈林.农田沙漠化演变中土壤质量的生物学特性变化[J].干旱区研究,2002,19(4):64-68.
- [17] 章家恩,刘文高,陈景青,等.刈割对牧草地下部根区土壤养分及土壤酶活性的影响[J].生态环境,2005,14(3):387-391.
- [18] 曹成有,朱丽辉,富瑶,等.科尔沁沙质草地沙漠化过程中土壤生物活性的变化[J].生态学杂志,2007,26(5):622-627.

(上接第94页)

参考文献:

- [1] 徐学强,周一星.城市地理学[M].高等教育出版社,1997.
- [2] 王雨晴,宋戈.城市土地利用综合效益评价与案例研究[J].地理科学,2006,26(6):743-748.
- [3] 赵安周,李英俊,卫海燕,等.西安市城市化与城市生态环境耦合协调发展研究[J].水土保持研究,2012,19(6):152-156.
- [4] 董雯,杨宇,周艳时.干旱区绿洲城市土地利用效益研究:以乌鲁木齐为例[J].干旱区地理,2011,34(4):679-685.
- [5] 梁红梅,刘卫东,刘会平,等.深圳市土地利用社会经济效益与生态环境效益的耦合关系研究[J].地理科学,2008,28(5):636-641.
- [6] 刘耀彬,李仁东,宋学锋.中国区域城市化与生态环境耦合的关联分析[J].地理学报,2005,60(2):237-247.
- [7] 朱珠,张琳,叶晓雯,等.基于TOPSIS方法的土地利用综合效益评价[J].经济地理,2012,32(10):139-144.
- [8] 李栓,丁冠华,王红梅,等.基于DEA的哈尔滨市土地利用经济效益评价[J].中国人口·资源与环境,2010(S1):329-333.
- [9] 袁丽丽.武汉市土地利用效益演变及问题分析[J].地理与地理信息科学,2006,22(2):92-96.
- [10] 叶敏婷,王仰麟,彭建,等.深圳市土地利用效益变化及其区域分异[J].资源科学,2008,30(3):401-408.
- [11] 谭峻,苏红友.北京城市功能区土地利用协调度分析[J].地域研究与开发,2010,29(4):117-121.
- [12] 徐金哲,陶军德,汤永玲.哈尔滨市土地利用社会经济效益与生态环境效益相关分析[J].经济研究导刊,2011(36):142-144.
- [13] 李冠英,张建新,刘培学,等.南京市土地利用效益耦合关系研究[J].地域研究与开发,2012,31(1):130-134.
- [14] 韩璐,谢俊奇.小波神经网络在土地利用效益分析中的应用:以兰州市为例[J].资源科学,2011,33(1):153-157.
- [15] 马晓婧,刘学录,张丽萍.庆阳市西峰区土地利用效益研究[J].吉林农业科学,2012,37(2):59-64.
- [16] 黄木易,吴次芳,岳文泽.城市用地综合效益评价及其时空变异分析:以浙江省为例[J].中国土地科学,2008(6):17-23.
- [17] 王筱明.基于熵权法的济南市土地利用效益评价研究[J].水土保持研究,2008,15(2):96-98.
- [18] 吴玉鸣,张燕.中国区域经济增长与环境的耦合协调发展研究[J].资源科学,2008,30(1):25-30.