

科尔沁沙质草地沙漠化过程中土壤生物活性的变化^{*}

曹成有^{1*} 朱丽辉² 富瑶¹ 陈家模¹ 崔振波¹ 高恩亮¹

(¹ 东北大学理学院, 沈阳 110004; ² 辽宁林业职业技术学院, 沈阳 110101)

摘要 选择相邻地段的固定沙丘、半固定沙丘和流动沙丘为对象,研究了科尔沁西部沙质草地沙漠化过程中土壤微生物量、土壤酶活性和土壤养分的变化特征以及三者之间的相关关系。结果表明:土壤养分含量、土壤酶活性和微生物量均随土壤深度的增加而逐渐降低;沙漠化过程中土壤养分严重丧失,土壤微生物量碳、氮、磷,以及土壤脲酶、蛋白酶、蔗糖酶、磷酸单酯酶、脱氢酶、多酚氧化酶和硝酸还原酶的活性均随沙漠化程度的加剧而大幅度下降;土壤生物活性对土壤沙漠化比较敏感,在固定沙丘到半固定沙丘的转化过程中土壤生物活性下降最快;土壤微生物量、土壤酶活性以及土壤养分之间均存在显著的相关关系。

关键词 沙漠化; 土壤酶; 土壤微生物量; 生物活性; 科尔沁沙地

中图分类号 Q938 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2007)05-0622-06

Changes of soil biological activity in desertification process of Horqin sandy grassland.

CAO Cheng-you¹, ZHU Li-hui², FU Yao¹, CHEN Jia-mo¹, CUI Zhen-bo¹, GAO En-liang¹

(¹ College of Sciences, Northeastern University, Shenyang 110004, China; ² Liaoning Forestry Technology College, Shenyang 110101, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(5): 622–627.

Abstract: With the adjacent plots of fixed, semi-fixed, and moving sand dunes in west Horqin sandy land as test objects, this paper studied the change characteristics of soil microbial biomass, enzyme activities and nutrients as well as the relationships among the three indices in the process of desertification. The results showed that soil nutrient contents, microbial biomass, and enzyme activities all decreased gradually with increasing soil depth. In the process of desertification, soil nutrient contents had a heavy loss, and soil microbial biomass C, N and P as well as the activities of urease, protease, saccharase, phosphatase, dehydrogenase, polyphenol oxidase, nitrate reductase decreased significantly. Soil biological activity was very sensitive to desertification, and its decrease was the quickest in the phase from fixed- to semi-fixed sand dune. There existed significant correlations among soil microbial biomass, enzyme activities and nutrient contents.

Key words: desertification; soil enzyme; soil microbial biomass; biological activity; Horqin sandy land.

1 引言

沙漠化是人为因素和气候变化引起的,主要发生于干旱半干旱地区的土地退化(朱震达和陈广庭,1994),其过程十分复杂,包括地质过程、物理和化学过程、生物过程,还涉及社会经济与人文地理景观的变化过程。关于沙漠化地质和物理化学过程,国内外早有研究,并已取得较大进展(李保生等,1990;陈渭南等,1994;赵哈林等,2002)。对沙漠化

生物过程及生物化学过程研究,国内外还处于起步阶段。科尔沁沙地地处半干旱与半湿润气候过渡带,主要分布在内蒙古自治区东部的赤峰和通辽,总面积 $5.17 \times 10^4 \text{ km}^2$,是中国北方典型的农牧交错地区(姜凤岐等,2002)。历史上曾是湖泊众多、林草繁茂的森林-草原景观,是传统的宜牧地区。20世纪以来由于受干旱多风等气候条件和滥垦、滥伐、滥牧等人为活动的影响,生态环境发生了急剧变化,土地沙漠化现象十分突出(刘新民等,1996;姜凤岐等,2002;蒋德明等,2003)。近几十年来,中国在科尔沁沙地进行了长期、大量的植被恢复试验示范和定位观测,在沙地退化的原因、特征及恢复重建的可

^{*} 国家“十五”科技攻关项目(2005BA517A08)和辽宁省科技基金资助项目(20031013)。

^{**} 通讯作者 E-mail: caochengyou@163.com

收稿日期: 2006-08-25 接受日期: 2007-01-12

行途径等方面取得了大量的科研成果(姜凤岐等, 2002; 蒋德明等, 2003, 2006; 曹成有等, 2004; Su *et al.*, 2004; 赵存玉和王涛, 2005)。但总体来看, 宏观表征研究较多, 生态过程作用机理研究较少, 尤其是土地退化的生物学过程及植被恢复过程中土壤与植物的相互关系等方面的研究尚显不足。

土壤质量是土壤的许多物理、化学和生物学性质的综合体。土壤生物学性质能敏感地反映出土壤质量和健康的变化(孙波等, 1997)。因此, 近几年来运用微生物量、微生物群落组成及酶活性等土壤生物学特性参数来表征土壤质量变化及其动态已日益受到重视(Badiane *et al.*, 2001; 苏永中等, 2002; 曹慧等, 2003; 薛冬等, 2005)。开展沙漠化过程中土壤生物活性变化规律的研究, 对于从生物学和生态学角度分析沙漠化的形成发展过程, 揭示沙漠化的自然规律和动力学机制, 制定有效的生物防治措施均具有重要意义。本文在沙漠化较为严重的科尔沁沙地西部选取典型样地, 研究不同沙漠化阶段中土壤养分、微生物量和土壤酶活性等指标的变化规律以及相互关系, 旨在深入探讨沙质草地沙漠化的机制和生物反馈过程。

2 研究地区与研究方法

2.1 研究区概况

研究区位于科尔沁沙地西部翁牛特旗乌兰敖都地区(43°02'N, 119°39'E)。地形属于河湖相冲积盆地, 该区沙地起伏, 坳甸相间, 为广阔的沙地景观, 沙地和甸子地呈东西排列。该地区属温带大陆性半干旱气候, 气候干燥, 风沙大且频繁。年均风速 $4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 每年起风沙日数 200 d 以上。年均降水 340.5 mm, 多集中在 7—8 月, 年蒸发量 2 500 mm 左右。年平均温度 $6.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 无霜期约 130 d。其原生植被属于森林向草原的过渡类型, 为蒙古植物区系、华北植物区系和长白植物区系的交接地带, 其中分布最广、种类最多的是蒙古植物区系植物。目前原生植被已被破坏殆尽, 大部分已演变为沙生植被和草甸植被(姜凤岐等, 2002)。地带性土壤主要为沙质栗钙土, 在风的作用下目前大部分退化为风沙土。

2.2 样地设置与样品采集

选择保存相对较好的榆树疏林内的固定沙地作为退化的起点, 把相邻地段的半固定沙地和流动沙地分别作为沙漠化的不同阶段(曹成有等, 2005)。每种类型分别设 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 样地 4 个。固定沙地

样地植被平均盖度为 60%, 植物种数为 39 种, 主要包括小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、白草(*Penisetum flaeidum*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、兴安胡枝子(*Lespedeza davurica*)、狗尾草(*Setaria viridis*)和花苜蓿(*Trigonella korshinskyi*)等; 半固定沙地样地植被平均盖度为 35%, 植物种数为 9 种, 主要为小叶锦鸡儿、差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*)、狗尾草、白草和虫实(*Corispermum thelegium*)等; 流动沙地则只有沙蓬(*Agriophyllum arenarium*)分布, 盖度 <5%。

每个样地的取样点在距灌丛 1.5 m 外随机布设, 按多点混合法(同一地点采集 5~7 个样品, 采用四分法就地混合为 1 个样品)分别采集 0~10、10~20、20~30、30~40 和 40~50 cm 的土壤样品。每个土壤样品分成 2 份, 一份风干后用于测定理化性质; 另一份装于密闭自封袋, 取回后于 $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存, 用于测定土壤微生物量和各种酶的活性。

2.3 室内分析

土样风干后磨碎, 过 100 目土筛, 供土壤碳、氮、磷、钾含量分析。土壤有机碳(SOC)采用干烧法, TOC-5000 型 TOC 分析仪测定(Shimadzu Corporation, 1993); 全氮采用半微量凯氏法; 速效氮采用碱扩散法; 土壤水分含量采用烘干法; 全磷采用 Na_2CO_3 熔融法, 有效磷采用 NaHCO_3 法(林大仪, 2004)。

鲜土样除去植物残体等杂物, 过 100 目不锈钢筛, 置于 $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中冷藏, 供土壤微生物量和酶活性分析。土壤微生物量碳、氮(MBC、MBN)的测定采用氯仿熏蒸法, 以 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ K}_2\text{SO}_4$ 浸提, 用 TOC 分析仪测碳, 用凯氏法定氮, 转换系数 K_c 和 K_n 分别采用 0.45 和 0.57(林大仪, 2004)。土壤微生物量磷(MBP)采用氯仿熏蒸培养后 NaHCO_3 提取法测定, 同时用外加无机磷的方法测定磷的提取回收率, 以熏蒸土样与不熏蒸土样提取磷的差值并校正提取回收率后, 除以转换系数 K_p (0.4) 计算 MBP(Brookes *et al.*, 1982)。

脲酶的测定采用氨释放量比色法(林大仪, 2004); 蔗糖酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法(周礼恺, 1987); 磷酸单酯酶活性采用对硝基苯磷酸盐法(Tabatabai, 1994); 硝酸还原酶采用 Kandler 方法测定(Abdekmagd & Tabatabai, 1987; Fu & Tabatabai, 1989); 脱氢酶采用氯代三苯基四氮唑(TTC)法(周礼恺, 1987); 多酚氧化酶、蛋白酶分别采用 Perucci

等(2000)和 Tabatabai(1994)方法测定。

3 结果与分析

3.1 沙漠化过程中土壤微生物量的变化

土壤微生物是土壤中物质循环的调节者,同时微生物量也是有机质库和速效养分的一部分。微生物量虽然只占土壤有机质库的很小部分,但却是控制土壤中碳、氮和其它养分流的关键,对植被的正常生长发育、土壤有机质的分解转化和供应起着极其重要的作用。同时微生物量对环境变化敏感,能够较早地指示土壤系统功能的变化(Ladd *et al.* , 2004; 范君华等, 2005)。由图 1 可以看出,固定沙地向流动沙地退化过程中, MBC、MBN 和 MBP 的含量均大幅度下降,尤其是 0 ~ 20 cm 土层变化更为明显。固定沙地 0 ~ 20 cm 土壤 MBC、MBN 和 MBP 平均值为 247. 1、8. 26 和 0. 4 mg · kg⁻¹, 半固定沙地分

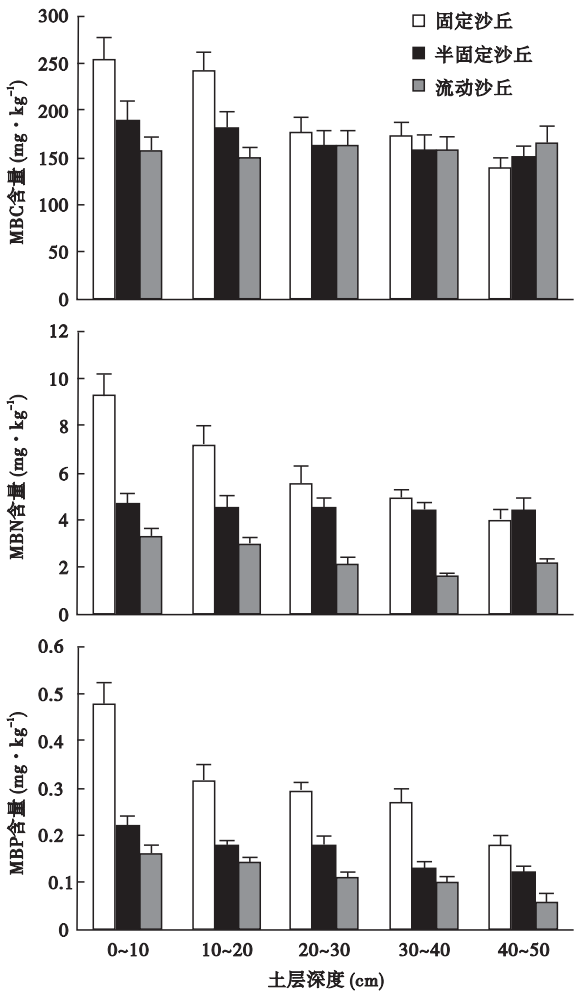


图 1 沙漠化过程中土壤微生物量碳、氮、磷含量的变化
Fig.1 Change of microbial biomass C, N and P contents in the process of desertification

别为 185. 5、4. 59 和 0. 2 mg · kg⁻¹, 分别下降了 24. 9%、44. 4% 和 50. 0%; 流动沙地 MBC、MBN 和 MBP 平均值为 152. 2、3. 11 和 0. 150 mg · kg⁻¹, 比固定沙地下降了 38. 4%、62. 4% 和 62. 5%。20 cm 以下土壤 MBC、MBN 和 MBP 在沙漠化过程中也出现了下降的趋势, 只是下降的幅度不及 0 ~ 20 cm 土壤。

随着土壤沙漠化程度的加剧, 植被发生逆向演替, 植被盖度、高度和生物量都会明显下降, 最终甚至会导致植被的衰亡(赵哈林, 1993; 李胜功等, 1997; 赵哈林等, 1999)。根据赵哈林等(2002)在本地区的相关研究, 沙漠化对生态系统初级生产力的影响较大, 轻度沙漠化时生产力水平即已下降 41. 1% ~ 50. 6%, 严重沙漠化时生产力只有非沙漠化的 3. 3% ~ 10. 4%。土壤环境的恶化及降落到地面的枯落物数量的减少, 威胁到土壤微生物和生存与繁衍, 数量明显减少(赵哈林等, 1997; 吕桂芬, 1999; 邵玉琴等, 2005)。因而沙漠化程度越大, 微生物量越低。从整个土壤剖面来看, 各沙丘类型中均出现随着土壤深度增加土壤微生物量逐渐减少的趋势。这是因为土壤表层有地上植物凋落的有机和无机物质可为各种微生物提供能量和营养, 有利于微生物的生长和繁殖。土壤微生物是有机物质的分解者, 对保持土壤肥力和生态系统的物质循环具有重要意义, 其数量的减少意味着生态系统物质转换和能量循环过程的受阻。

土壤微生物量对土壤中碳、氮、磷的循环和植物有效性的作用表现在 2 方面: 1) 土壤微生物量中所含的碳、氮和磷是植物养料的储备库, 且与土壤有机碳、有效氮和磷之间存在一定的平衡关系, 对土壤碳、氮、磷和植物有效性在一定程度上起着支配作用; 2) 土壤微生物对土壤有机质的矿化和转化作用是土壤有效氮和磷的重要来源(Ladd *et al.* , 2004)。对于科尔沁地区风沙土来说, 从矿物释放的养分十分有限。因此, 微生物量对土壤中氮、磷的植物有效性及循环的影响作用就更大。在沙漠化过程中微生物量的降低, 一方面使土壤中的养分含量降低; 另一方面也使土壤养分的可利用性降低, 土壤条件更加不利于植物的生长。

3.2 沙漠化过程中土壤酶活性的变化

土壤酶系统是土壤中生物活性最强的部分, 尽管积累在土壤中的酶以质量计的数量很小, 但是作用颇大, 其与植物生长之间存在必然的内在联系

(王光华等,2006)。在固定沙地到流动沙地的退化过程中,土壤水解酶如脲酶、蛋白酶、磷酸单酯酶、蔗糖酶和土壤氧化还原酶如多酚氧化酶、脱氢酶和硝酸还原酶的活性都表现出下降趋势,即固定沙地 > 半固定沙地 > 流动沙地,而且 0 ~ 50 cm 内各层土壤变化趋势一致(表 1),特别是表层土壤下降趋势更加明显,随着土层深度的下降,各种酶活性下降幅度降低。从不同阶段酶活性变化来看,在固定沙地到半固定沙地的转化过程中各种酶活性下降速度最快。如流动沙地与固定沙地相比,0 ~ 10 cm 土层中脲酶下降了 80.0%,其中在固定沙地到半固定沙地阶段下降了 73.5%,半固定沙地到流动沙地阶段下降了 6.5%;10 ~ 20 cm 土层中下降了 65.0%,其中在固定沙地到半固定沙地阶段下降了 54.6%,在半固定沙地到流动沙地阶段下降了 10.3%;20 ~ 30、30 ~ 40 和 40 ~ 50 cm 土壤中脲酶下降特点基本相同。其余 6 种酶的活性变化特点也与脲酶类似。表明土壤酶系统对土壤沙漠化非常敏感,土壤一经活化各种水解酶和氧化还原酶类活性迅速降低。其中最为敏感的是硝酸还原酶和脱氢酶,在固沙沙地到半固定沙地的转化过程中,0 ~ 10 cm 土层中 2 种酶的活性分别降低了 97.8% 和 83.7%,说明沙漠化对土壤氧化还原反应影响较大。

土壤酶参与了土壤中腐殖质的合成与分解,参与了动植物和微生物残体的水解与转化以及土壤有机、无机化合物的各种氧化还原反应等一切复杂的

生物化学过程(赵吉和邵玉琴,1997;Badiane *et al.*, 2001;曹慧等,2003;薛冬等,2005;Sardans & Penuelas, 2005)。研究表明,在沙漠化过程中土壤各层的酶活性发生明显的变化,各种酶的活性均出现逐渐降低的趋势,预示着沙漠化过程中土壤的有机质分解,碳、氮、磷等养分的转化强度逐渐减弱,这与微生物量的变化规律是一致的。

3.3 沙漠化过程中土壤养分变化

沙质草场在沙漠化过程中,土壤有机质和无机养分都会在吹蚀、搬运和堆积过程中遭到破坏和损失。固定沙地、半固定沙地和流动沙地相同土壤层次有机碳和各种无机养分均为固定沙地 > 半固定沙地 > 流动沙地。沙漠化过程中损失最严重的是有机碳,流动沙地 0 ~ 10 和 10 ~ 20 cm 土壤有机碳含量只相当于固定沙地同一层次的 1/20 和 1/16,沙漠化使有机碳损失近 94% 以上(表 2)。土壤中有有机质是微生物、土壤酶和矿物质的有机载体,它能增强土壤孔隙度、通气性和结构性,有显著的缓冲作用和持水力,同时土壤中有有机质是酶促底物的主要供源,其含量的多少显著影响着土壤酶的活性(苏永中等,2002;赵哈林等,2002)。土壤有机碳在沙漠化过程中的大量丧失,必然会显著影响着土壤微生物的生长繁殖和各种酶活性的发挥。土壤全量和速效氮、磷等养分含量在沙漠化过程中也有明显的损失。从土壤剖面来看,各沙丘类型中土壤有机碳和其它养分含量均随着剖面深度的加深而降低。

表 1 沙漠化过程中土壤酶活性的变化
Tab.1 Change of soil enzyme activities in the process of desertification

土层深度 (cm)	沙漠化 阶段	脲 酶 ($\mu\text{g} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \cdot$ 24 h^{-1})	磷酸单酯酶 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot$ h^{-1})	蛋白酶 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot$ 2 h^{-1})	蔗糖酶 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	多酚氧化酶 ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$)	脱氢酶 ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot$ h^{-1})	硝酸还原酶 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot$ 24 h^{-1})
0 ~ 10	固定沙丘	88.0c	94.3c	46.90c	69.10c	2.87b	68.5b	5.18b
	半固定沙丘	23.3b	40.6b	12.70b	37.60b	0.87a	11.2a	0.12a
	流动沙丘	17.6a	18.5a	7.51a	0.49a	0.79a	10.3a	0.05a
10 ~ 20	固定沙丘	48.5b	73.2c	21.50b	38.40c	1.95b	21.7b	0.69b
	半固定沙丘	22.0a	30.0ab	7.44a	2.45b	0.75a	10.4a	0.11a
	流动沙丘	17.0a	18.5a	6.42a	0.25a	0.71a	9.1a	0.07a
20 ~ 30	固定沙丘	39.8b	69.6b	20.00b	29.90b	1.62b	12.1a	0.11b
	半固定沙丘	21.8a	28.7ab	4.54a	0.70a	0.71a	9.9a	0.11b
	流动沙丘	16.7a	16.0a	2.81a	0.21a	0.70a	8.9a	0.07a
30 ~ 40	固定沙丘	29.4b	69.5c	17.70b	21.90b	1.60b	9.7a	0.13b
	半固定沙丘	21.3ab	27.9b	4.10a	0.15a	0.72a	9.5a	0.10b
	流动沙丘	16.5a	15.2a	2.09a	0.14a	0.70a	8.7a	0.03a
40 ~ 50	固定沙丘	22.9b	66.5b	17.10b	19.90b	1.57b	8.3a	0.12c
	半固定沙丘	20.4ab	28.6ab	3.99a	0.18a	0.67a	9.4a	0.09b
	流动沙丘	15.3a	14.8a	1.05a	0.18a	0.53a	8.2a	0.05a

4 次重复的平均值,每 1 土层深度同一列的不同小写字母表示差异显著(P≤0.05)。下同。

表 2 沙漠化过程中土壤养分的变化
Tab.2 Change of soil nutrients in the process of desertification

土层深度 (cm)	沙漠化 阶段	有机碳 (g· kg ⁻¹)	全氮 (g· kg ⁻¹)	全磷 (mg· kg ⁻¹)	碱解氮 (mg· kg ⁻¹)	速效磷 (mg· kg ⁻¹)
0~10	固定沙丘	1.32c	0.094b	18.54b	2.24c	1.02b
	半固定沙丘	0.59b	0.068a	5.82a	1.33b	0.31a
	流动沙丘	0.06a	0.053a	4.50a	0.97a	0.24a
10~20	固定沙丘	0.97c	0.077b	10.1b	1.88b	0.55b
	半固定沙丘	0.48b	0.062b	4.68a	0.97a	0.24a
	流动沙丘	0.06a	0.047a	4.06a	0.74a	0.19a
20~30	固定沙丘	0.74c	0.062b	7.57b	1.65b	0.39b
	半固定沙丘	0.34b	0.049a	4.60a	0.77a	0.25a
	流动沙丘	0.06a	0.044a	3.84a	0.58a	0.18a
30~40	固定沙丘	0.57c	0.047a	5.83b	1.43b	0.26b
	半固定沙丘	0.27b	0.042a	4.57ab	0.60a	0.23ab
	流动沙丘	0.06a	0.039a	3.65a	0.51a	0.19a
40~50	固定沙丘	0.44b	0.039a	4.25a	1.36b	0.20a
	半固定沙丘	0.23ab	0.031a	4.49a	0.45a	0.25a
	流动沙丘	0.06a	0.032a	3.39a	0.38a	0.17a

3.4 沙漠化过程中土壤酶活性与土壤微生物量和土壤养分的关系

土壤养分含量,尤其土壤有机质是土壤微生物重要的碳源和氮源,而土壤微生物的种类和数量又在某种程度上决定土壤酶的来源。为了探讨土壤养分与土壤微生物量以及酶活性之间的关系,将上述土壤性质间的相关系数矩阵列于表 3。

从表 3 可以看出,脲酶、磷酸单酯酶、蔗糖酶、蛋白酶、多酚氧化酶、脱氢酶和硝酸还原酶的活性与土

壤有机碳、全氮、全磷以及速效氮和速效磷的相关系数均达到显著或极显著水平,表明各种土壤酶活性在沙漠化过程中的大幅度降低与土壤养分的丧失有直接的关系。土壤酶主要来自土壤微生物和植物根系,参与土壤中一切复杂的生物化学过程,包括枯落物的分解、腐殖质及各种有机化合物的分解与合成、土壤碳、氮、磷的固定与释放,是土壤生物活性较为稳定和灵敏的一个指标,在一定程度上反映了土壤养分转化的动态情况(范君华等,2005;李俊等,2005)。因而土壤的肥力水平在很大程度上受土壤酶活性的影响。本研究结果与一些有关学者的研究结论相似(苏永中等,2002;周智彬和徐新文,2004;章家恩等,2005)。

土壤酶活性之间、土壤酶活性与土壤微生物量碳、氮、磷之间以及微生物量与土壤养分之间也存在密切关联。各种土壤酶之间的相关关系均达到极显著水平,其中相关系数最高的为硝酸还原酶和脱氢酶(0.99)。表明酶活性之间存在着相互刺激机制,在进行酶促反应时,不仅具有自身的专一特性,同时也存在着一些共性。酶的专一性能反映土壤中与某类酶相关的有机化合物的转化进程,而有共性关系的土壤酶的总体活性在某种程度上反映着土壤肥力水平的高低(Badiane *et al.*,2001)。土壤酶与微生物量及土壤养分之间的相关关系也均达到显著或极显著水平。

表 3 土壤酶、微生物量及土壤养分之间的相关系数
Tab.3 Correlation coefficients among soil enzymes,microbial biomass and nutrients

项目	脲酶	磷酸单酯酶	蛋白酶	蔗糖酶	多酚氧化酶	脱氢酶	硝酸还原酶	MBC	MBN	MBP	全氮	碱解氮	全磷	速效磷	有机碳
脲酶	1														
磷酸单酯酶	0.83**	1													
蛋白酶	0.95**	0.91**	1												
蔗糖酶	0.89**	0.88**	0.94**	1											
多酚氧化酶	0.92**	0.94**	0.97**	0.90**	1										
脱氢酶	0.94**	0.64*	0.87**	0.79**	0.80**	1									
硝酸还原酶	0.91**	0.61*	0.85**	0.76**	0.78**	0.99**	1								
MBC	0.86**	0.67*	0.77**	0.83**	0.51*	0.80**	0.74**	1							
MBN	0.90**	0.85**	0.88**	0.85**	0.57*	0.78**	0.74**	0.83**	1						
MBP	0.93**	0.90**	0.96**	0.92**	0.61*	0.82**	0.77**	0.83**	0.93**	1					
全氮	0.83**	0.67*	0.81**	0.84**	0.74**	0.77**	0.71**	0.89**	0.83**	0.88**	1				
碱解氮	0.84**	0.93**	0.93**	0.92**	0.92**	0.68**	0.65*	0.76**	0.86**	0.95**	0.85**	1			
全磷	0.99**	0.98**	0.94**	0.89**	0.89**	0.96**	0.93**	0.88**	0.89**	0.92**	0.86**	0.83**	1		
速效磷	0.98**	0.95**	0.92**	0.88**	0.87**	0.96**	0.93**	0.89**	0.89**	0.91**	0.86**	0.80**	0.99**	1	
有机碳	0.91**	0.92**	0.92**	0.93**	0.90**	0.76**	0.72**	0.86**	0.95**	0.96**	0.86**	0.93**	0.85**	0.88**	1

* P<0.05, ** P<0.01。

4 结 论

科尔沁沙质草地在沙漠化过程中,不但土壤物理性质发生变化,导致养分严重丧失,而且土壤的生物学属性也发生了明显的变化。土壤微生物量碳、氮、磷以及土壤脲酶、蛋白酶、蔗糖酶、磷酸单酯酶、脱氢酶、多酚氧化酶和硝酸还原酶的活性均随着沙漠化程度的加剧和土壤养分含量的降低而大幅度下降。土壤生物活性对土壤沙漠化比较敏感,在固定沙丘到半固定沙丘的转化过程中土壤生物活性下降最快。土壤养分含量、土壤酶活性和微生物量均随土壤深度的增加而逐渐降低。

土壤微生物量(碳、氮、磷)、土壤酶活性(水解酶和氧化还原酶)以及土壤养分(碳、氮、磷)之间均存在着显著的相关性。土壤生物活性能更为敏感地指示着沙漠化过程中土壤质量的变化。

参考文献

- 曹 慧, 孙 辉, 杨 浩, 等. 2003. 土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展. 应用与环境生物学报, **9**(1): 105 - 109.
- 曹成有, 蒋德明, 骆永明, 等. 2004. 小叶锦鸡儿防风固沙林稳定性研究. 生态学报, **24**(6): 1178 - 1185.
- 曹成有, 朱德华, 耿 莉, 等. 2005. 小叶锦鸡儿放牧场沙漠化过程中植物多样性的变化. 水土保持学报, **19**(5): 166 - 169.
- 陈渭南, 董光荣, 董治宝. 1994. 中国北方地区风蚀问题研究进展与趋势. 地球科学进展, **9**(5): 6 - 11.
- 范君华, 刘 明, 高疆生, 等. 2005. 塔里木河上游不同林地土壤养分和微生物以及酶活性变化初探. 中国农学通报, **21**(1): 184 - 188.
- 姜凤岐, 曹成有, 曾德慧, 等. 2002. 科尔沁沙地生态系统退化与恢复. 北京: 中国林业出版社.
- 蒋德明, 刘志民, 曹成有, 等. 2003. 科尔沁沙地荒漠化过程与生态恢复. 北京: 中国环境科学出版社.
- 蒋德明, 宗文君, 李雪华, 等. 2006. 科尔沁西部地区荒漠化土地植被恢复技术研究. 生态学杂志, **25**(3): 243 - 248.
- 李 俊, 舒为群, 陈济安, 等. 2005. 垃圾填埋场土壤酶活性与化学性质和微生物数量的关系研究. 生态学杂志, **24**(9): 1043 - 1047.
- 李保生, 董光荣, 丁同虎, 等. 1990. 塔克拉玛干沙漠东部风沙地貌的几个问题. 科学通报, **35**(23): 1815 - 1818.
- 李胜利, 赵爱芬, 常学礼. 1997. 科尔沁沙地植被演替的几个问题. 中国沙漠, **17**(增刊): 25 - 33.
- 林大仪. 2004. 土壤学实验指导. 北京: 中国林业出版社.
- 刘新民, 赵哈林, 赵爱芬. 1996. 科尔沁沙地风沙环境与植被. 北京: 科学出版社.
- 吕桂芬. 1999. 科尔沁沙地土壤微生物区系季节动态的初步研究. 中国沙漠, **19**(增刊): 107 - 109.
- 邵玉琴, 敖晓兰, 宋国宝, 等. 2005. 皇甫川流域退化草地和恢复草地土壤微生物生物量的研究. 生态学杂志, **24**(5): 578 - 580.
- 苏永中, 赵哈林, 张铜会, 等. 2002. 农田沙漠化演变中土壤质量的生物学特性变化. 干旱区研究, **19**(4): 64 - 68.
- 孙 波, 赵其国, 张桃林. 1997. 土壤质量与持续环境

Ⅲ——土壤质量评价的生物学指标. 土壤, (5): 225 - 234.

- 王光华, 金 剑, 徐美娜, 等. 2006. 植物、土壤及土壤管理对土壤微生物群落结构的影响. 生态学杂志, **25**(5): 550 - 556.
- 薛 冬, 姚槐应, 何振立, 等. 2005. 红壤酶活性与肥力的关系. 应用生态学报, **16**(8): 1455 - 1458.
- 章家恩, 刘文高, 陈景青, 等. 2005. 刈割对牧草地下部根区土壤养分及土壤酶活性的影响. 生态环境, **14**(3): 387 - 391.
- 赵 吉, 邵玉琴. 1997. 库布齐沙地土壤的生物学活性研究. 内蒙古大学学报(自然科学版), **28**(5): 197 - 200.
- 赵存玉, 王 涛. 2005. 沙质草原沙漠化过程中植被演替研究现状和展望. 生态学杂志, **24**(11): 1343 - 1346.
- 赵哈林, 根本正之, 大黑俊哉. 1997. 内蒙古科尔沁沙地放牧草地的沙漠化机理研究. 中国草地, **17**(增刊): 15 - 21.
- 赵哈林, 张铜会, 常学礼. 1999. 科尔沁沙质放牧草地植被分异规律的研究. 中国沙漠, **19**(增刊): 40 - 44.
- 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 等. 2002. 北方农牧交错区沙漠化的生物过程研究. 中国沙漠, **22**(4): 309 - 316.
- 赵哈林. 1993. 科尔沁沙地两种主要群落的沙漠化演变特征研究. 中国沙漠, **13**(3): 47 - 52.
- 周礼恺. 1987. 土壤酶学. 北京: 科学出版社.
- 周智彬, 徐新文. 2004. 塔里木沙漠公路防护林土壤酶分布特征及其与有机质的关系. 水土保持学报, **15**(5): 10 - 15.
- 朱震达, 陈广庭. 1994. 中国土地沙质荒漠化. 北京: 科学出版社.
- Abdekmagd HM, Tabatabai MA. 1987. Nitrate reductase activity of soil. *Soil Biology & Biochemistry*, **19**: 421 - 427.
- Badiane NNY, Chotte JL, Pate E, et al. 2001. Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions. *Applied Soil Ecology*, **18**: 229 - 238.
- Brookes PC, Powlson DS, Jenkinson DS. 1982. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. *Soil Biology & Biochemistry*, **14**: 319 - 329.
- Fu MH, Tabatabai MA. 1989. Nitrate reductase activity in soil effects of trace element. *Soil Biology & Biochemistry*, **21**: 943 - 946.
- Ladd JN, Amato M, Veen HA. 2004. Soil microbial biomass: Its assay and role in turnover organic matter C and N. *Soil Biology & Biochemistry*, **36**: 1369 - 1372.
- Perucci P, Casucci C, Dumontet S. 2000. An improved method to evaluate the o-diphenol oxidase activity of soil. *Soil Biology & Biochemistry*, **32**: 1927 - 1933.
- Sardans J, Penuelas J. 2005. Drought decreases soil enzyme activity in a Mediterranean *Quercus ilex* L. forest. *Soil Biology & Biochemistry*, **37**: 455 - 461.
- Shimadzu Corporation. 1993. Solid Sample Module SSM-5000A for TOC-5000(A)/5050(A) Total Organic Carbon Analyzer. Shimadzu Corporation, Japan.
- Su YZ, Zhao HL, Zhang TH, et al. 2004. Soil properties following cultivation and non-grazing of a semi-arid sandy grassland in northern China. *Soil & Tillage Research*, **75**: 27 - 36.
- Tabatabai MA. 1994. Soil enzymes// Weaver RW, ed. *Methods of Soil Analysis (Part 2): Microbiological and Biochemical Properties*. SSSA Book Series No. 5. Madison WI: Soil Science Society of America: 775 - 833.

作者简介 曹成有,男,1969年生,博士,副教授,硕士生导师。主要从事生态工程、荒漠化防治等研究,发表论文50余篇,合作出版专著3部。E-mail: caochengyou@163.com

责任编辑 刘丽娟

