科尔沁沙地不同年代小叶锦鸡儿人工林植物群落特征及其土壤特性

苏永中 赵哈林 张铜会 李玉霖

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘 要 研究了科尔沁沙地小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla*) 人工固沙林在 0、5、13、21 和 28 年的一个时间序列上土壤理化性状和植物群落特征及其恢复动态。结果表明: 1) 土壤肥力随着人工植被建立时间的延长而逐渐恢复, 表现为土壤粘粉粒含量、持水性能、土壤有机碳 (SOC) 和全氮 (N) 含量、潜在土壤呼吸在时间梯度上的增加, 以及土壤容重和 pH 值的下降; 2) 0 ~ 5 cm 表层土壤的恢复显著高于 5 ~ 20 cm 土壤; 3) 在人工植被建立和发育的早期阶段 (0 ~ 13 年), 土壤肥力恢复的速率明显高于群落后期的演替阶段 (13 ~ 28 年); 4) 灌丛对土壤肥力有明显的富集效应, 随着人工群落发育时间的延长, 肥岛面积扩展, 富集率降低; 5) 随着土壤环境条件的改善, 侵入的草本植物种类数量、植被盖度增加, 简单的人工植被向复杂的灌草群落演变。

关键词 小叶锦鸡儿 土壤性状 植物群落 恢复动态 科尔沁沙地

CHARACTERISTICS OF PLANT COMMUNITY AND SOIL PROPERTIES IN THE PLANTATION CHRONOSEQUENCE OF *CARAGANA MICROPHYLLA* IN HORQIN SANDY LAND

SU Yong-Zhong ZHAO Ha-Lin ZHANG Tong-Hui and LI Yu-Lin

(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract Horqin sandy land (42°41' - 45°15' N, 118°35' - 123°30' E) is one of the typical areas of seriously degraded ecosystem characterized by sandy desertification in northern China. Reestablishing artificial vegetation on shifting sand dunes is one of the effective measures to control desertification in this region. *Caragana microphylla* (a leguminous shrub) artificial sand-fixing forest planted in different periods of time provides an opportunity for studying the patterns and mechanisms of restoration of soil and vegetation in seriously degraded ecosystems. In this paper, characteristics in soils and plant communities in an age sequence of 0, 5, 13, 21, and 28-year-old *C. microphylla* plantations were examined to assess the processes and mechanisms of restoration in soil fertility and plant species following shrub establishment. Soil samples were taken from two depths (0 - 5 cm and 5 - 20 cm) under the shrub canopy and in the mid-row location between shrubs. Some selected soil properties were measured and plant species was investigated. The results showed the following:

1) Shrub establishment and development improved soil texture and water-holding capacity (WHC), enhanced organic C and total N accumulation, decreased pH and bulk density, and improved microbial activity as reflected by potential soil respiration. In an age sequence of 0 - 28-year-old *C. microphylla* plantations, silt and clay contents and WHC at the 0 - 5 cm depth in soils significantly increased with increasing restoration time. Soil organic carbon buildup in soils of the 0 - 5 cm depth under the shrub canopy increased 4.6, 13.3, 16.5, and 20.5 fold, respectively, from the non-vegetated mobile sand dunes (0.284 g·kg⁻¹, age 0) after 5, 13, 21, and 28-years of occupancy, and in the alley, this increase was 1.9, 8.1, 11.1, and 13.3 fold, respectively. Total N accumulation followed the same pattern with respect to the plantation age. At the 5 - 20 cm depth, silt and clay contents, and organic C and total N levels were significantly lower than those at the 0 - 5 cm depth, but they were still higher than those found at corresponding depth in the non-vegetated mobile sand land (age 0).

2) The incremental rates in soil organic C and total N were faster in the early establishment stages (0 - 13 year) than in the late successional stages (13 - 28 year).

3) *C. microphylla* exhibited significant enrichment effect with higher C and N contents under their canopies. With increased plantation age, the area of 'islands of fertility' expanded and enrichment ratios decreased.

4) Shrub establishment and development facilitated the colonization and development of herbaceous species by ameliorating stressful environmental conditions. With the increase of restoration time, the simple artificial shrub community developed towards a complex shrubby-grass community.

The restoration of soil fertility induced by re-vegetation is a complicated ecological process that is simultaneously affected by many biotic and abiotic variables. In erosion-prone Horqin sandy land, shrub establishment and development not only offered an important safeguard against soil erosion by wind, but also leaves of shrubs trapped dust materials enriched with nutrients and deposited them under the shrub canopies. The litter input and root turnover to the soil, and N fixation by *C. microphylla* contributed to C and N accumulation. Also, the improved microbial activity enhanced the release of nutrients from litter. Accordingly, the amelioration of soil and environmental conditions with shrub development facilitated the increase of plant species.

Key words *Caragana microphylla*, Soil properties, Plant community, Plantation chronosequence, Restoration, Horqin sandy land

对于一个严重退化的生态系统,其恢复程度,可以通过土壤肥力和物种多样性的恢复两个方面进行表征(Fang & Peng, 1997)。土壤是生态系统诸多生态过程(如营养物质循环、水平衡、凋落物分解)的参与者,与载体,土壤结构与养分状况对于植物的生长起着关键性的作用,直接影响植物群落的组成与生理活力,决定着生态系统的结构、功能和生产力水平(Vitousek *et al.*, 1989),是生态系统功能恢复与维持的关键指标之一(吴彦等, 2001)。物种多样性的恢复是提高生态系统功能的一个重要方面(Tilman *et al.*, 1996),另外,物种多样性的衰减和恢复也是沙漠化正逆过程的一个表征(常学礼等, 1997)。

地处中国北方半干旱农牧交错带的科尔沁沙地是以沙漠化为特征的严重退化生态系统典型类型之一(中国荒漠化/土地退化防治研究组, 1998)。在流动沙丘上建植小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)和黄柳(*Salix scoparia*)等灌木固沙林是该区域多年来生态环境整治的一项有效措施。不同年代种植的灌木林为研究严重退化沙地生态系统的恢复动态提供了很好的样地。该文以时空转换的方法,研究了0~28年的一个时间序列上的小叶锦鸡儿人工固沙林土壤性状及植物群落特征,旨在从土壤结构和养分以及植被变化的角度,探讨严重退化沙地生态系统的恢复机理和沙漠化逆转的生物学过程。

1 研究区自然概况

研究区位于科尔沁沙地东南部的奈曼旗尧勒甸子村(42°55' N, 120°41' E)。该地区属温带半干旱气候,年平均气温 6.4 °C,年平均降水量 362 mm,其中 6~8 月的降水占全年降水的 65%;年平均风速 3.5 m·s⁻¹,大风日数 20~60 d。地貌以平缓起伏的固定沙丘、半固定沙丘、流动沙丘和丘间低地相间分布为特征,为广阔的沙地景观。土壤类型主要为风

沙土,原生植被为稀疏榆树林草原,现已破坏殆尽,代之以沙生灌木、半灌木为优势种,伴生有一年生和多年生杂草的沙生植被。代表性的植物种有小叶锦鸡儿、差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*)、黄柳、狗尾草(*Setaria viridis*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、黄蒿(*Artemisia scoparia*)、胡枝子(*Lespedeza davurica*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)和扁蓿豆(*Melilotus ruthenicus*)等。

2 研究方法

2.1 研究方法和样地设置

尧勒甸子村在 20 世纪 70 年代中期开始在流动沙丘上种植小叶锦鸡儿,种植的行距一般为 1.5~2 m,株距为 0.5 m,带与主风向垂直。经多年种植,村子周围的平缓沙丘基本被小叶锦鸡儿林覆盖,沙漠化发生了逆转,流动沙丘面积由 70 年代中期占全村面积的 72% 下降到了目前的 13%(中国荒漠化/土地退化防治研究组, 1998)。在本项研究中,选择不同年代种植的小叶锦鸡儿人工群落为研究对象,以相邻的流动沙丘为对照,形成 0、5、13、21 和 28 年的一个年代序列。由于各个年代的小叶锦鸡儿,在种植前均为平缓的流动沙丘,对同时期测定的流动沙丘土壤粒级分布和有机质含量的分析表明(徐斌等, 1993;冯仲云, 1993;苏永中等, 2002a),各个时期流动沙丘土壤性状基本相似,可以认为小叶锦鸡儿种植前有基本相同的土壤基质条件,因此可以用现存的流动沙丘土壤进行表征,并以此为参照,对不同年代人工林植物群落特征及其土壤特性进行恢复状况的比较和动态分析。对每个年代的小叶锦鸡儿林,选择 3 个分布在不同沙丘上的 20 m×20 m 的小区为研究样地,同时选择邻近的 3 个流动沙丘为对照样地。

2.2 植被调查

2002 年 4 月,在每个小区内选择 3 个小叶锦鸡儿带,每个带上标记 5 株相邻的个体,测定植株高度、冠幅和枝条数(表 1)。2002 年 8 月,在选择的流动沙丘和每个人工林小区标记的小叶锦鸡儿行内,调查 1 m×1 m 的草本样方 15 个,记录种类组成、高度、植株密度和植被盖度。

表 1 不同年代种植的小叶锦鸡儿形态特征

Table 1 Morphological trait of different old *Caragana microphylla*

特征 Trait	种植年限 Plantation age (a)			
	5	13	21	28
平均株高 Mean height (cm)	77	108	82	93
冠幅 Crown diameter (cm×cm)	75×71	88×82	87×90	89×85
枝条数 Number of shoots (n)	21.8	38.8	69.4	55.2

2.3 土壤取样和分析

2002 年 4 月,在每个流动沙丘,沿 3 条样线各取 3 个 0~5 cm 和 5~20 cm 深度的混合样(每个样由一条样线上的 5 个点均匀混合而成)。每个小叶锦鸡儿林小区,在标记过的带内取样,同样按 0~5 cm 和 5~20 cm 深度分两个部位取样:灌丛下(A)和行中间部位(B)。每个灌丛带上分别取标记的 5 株个体灌丛下样组成一个混合样(A)和相应行中 5 个点组成混合样(B)。土样带回奈曼沙漠化研究站实验室,经风干处理后用吸管法测定土壤机械组成,用 1:1 水土比的悬液和 1:5 土水比的浸提液测定土壤 pH 值和电导率(德国产 Multiline F/SET-3 分析仪直接测定)。部分土样进一步过筛、研磨后,用重铬酸钾氧化-外加热法测定土壤有机碳(C),凯氏法测定土壤全氮(N)(意大利产 DK6,UDK140 分析仪)(中国科学院南京土壤研究所,1978)。

同时,在每个取样点用环刀(100 cm³ 体积)取 0~5 cm 和 5~20 cm 原状土测定土壤容重和饱和含水量(严旭升,1988)。并在 2002 年 8 月调查植被时在每个小区灌丛下和行中间部位取 0~5 cm 混合样进行室内培养(10 d)测定潜在土壤呼吸(Potential soil respiration, PSR)(Mazzarino *et al.*, 1991)。

2.4 数据处理

用 SPSS 软件对数据进行处理。单因子方差分析(ANOVA)和 LSD 用于各处理相同土层相同取样部位土壤性状之间的比较和差异显著性检验($p = 0.05$)。

灌丛下(A)和行间(B)土壤性状的差异采用富集率值(E , $E = A/B$)进行表征(Wezel *et al.*, 2000;

苏永中等, 2002b), E 值的大小反映了灌丛对土壤资源的富集效应。不同年代种植的小叶锦鸡儿土壤性状 E 值的差异用单因素方差分析(ANOVA)进行显著性检验。

3 结 果

3.1 土壤物理性状的变化

流动沙丘在建立小叶锦鸡儿人工群落后,经多年的固定,土壤物理性状逐渐得以改善,表现为表层(0~5 cm)土壤粘粉粒含量随种植年限的增加而显著增加,相应地,持水性能提高,而容重显著降低(表 2)。在 5~20 cm 土层,土壤物理性状的改善效应明显低于 0~5 cm 表层,但土壤容重和沙粒含量种植区仍明显低于流动沙丘。随着固定时间的增加,效应逐渐增加。结果也表明,灌丛下土壤物理性状的改善明显高于灌丛行间。

3.2 土壤化学性状的变化

小叶锦鸡儿的定植和发育导致了土壤有机 C 和全 N 的显著积累(图 1)。在定植 5、13、21、28 年后,灌丛下 0~5 cm 表层土壤有机 C 含量分别比流动沙地土壤(有机 C, 0.284 g·kg⁻¹)增加了 4.6、13.3、16.5、20.5 倍,而在锦鸡儿行中间部位也相应提高了 1.9、8.1、11.1、15.3 倍。土壤全 N 的积累与土壤有机 C 有相同的趋势,但增加值低于有机 C,种植 28 年后,灌丛下和行间分别比流动沙地土壤全 N (0.062 g·kg⁻¹)提高 13.6 和 11.1 倍(图 1B)。在 5~20 cm 土层,有机 C 和全 N 的积累显著低于 0~5 cm 表层土壤。图 1 也反映出,在 0~28 年的时间序列上,土壤有机 C 和全 N 的含量随种植年限的增加而显著增加,但在早期的发育阶段(0~13 年),土壤 C、N 积累的速率高于后期的演替阶段(13~28 年)(图 2)。结果也表明,流动沙地土壤有很窄的 C/N,灌木种植后,随凋落物的迅速积累,土壤 C/N 逐渐增加,21 年后趋于恒定(图 1C)。灌木的发育也导致了 pH 值的降低(图 1D),种植 28 年后,土壤 pH 值由流动沙丘的 7.8 下降到了 7.52(0~5 cm)和 7.24~7.48(5~20 cm)。而土壤电导率随种植年限的增加而显著提高,尤其在 0~5 cm 的表层土壤中(图 1E),电导率的变化与土壤有机 C 的变化有相同的趋势。

3.3 土壤呼吸的变化

经室内土壤培养(10 d)测定的潜在土壤呼吸显示了随人工灌木林种植时间的增加而显著提高的变化动态(图 3)。种植 28 年灌丛下和行间 0~5 cm 表层土壤释放的 CO₂-C 比流动沙丘土壤(38 μg CO₂-

表 2 不同年代种植的小叶锦鸡儿固沙林土壤物理性状
Table 2 Soil physical properties in different old *Caragana microphylla* sand-fixing forest

土壤性状 Soil properties	土层 Depth (cm)	取样部位 Sampling location	种植年限 Plantation age (a)					LSD _{0.05}
			0	5	13	21	28	
土壤粒级分布 Soil particle size distribution								
沙粒 %	0 ~ 5	A	97.3 ± 1.1 ^a	93.7 ± 0.6 ^b	87.8 ± 1.3 ^c	85.6 ± 0.7 ^d	83.3 ± 1.3 ^c	1.85
Sand %	0 ~ 5	B	97.3 ± 1.1 ^a	93.4 ± 1.2 ^b	89.7 ± 0.4 ^c	87.4 ± 1.1 ^d	85.7 ± 0.6 ^d	1.72
1 ~ 0.05 mm	5 ~ 20	A	95.8 ± 1.5 ^a	95.5 ± 0.6 ^{ab}	92.6 ± 1.6 ^{bc}	90.5 ± 2.2 ^c	89.8 ± 2.0 ^c	2.97
	5 ~ 20	B	95.8 ± 1.5 ^a	95.7 ± 1.4 ^a	93.0 ± 1.9 ^{ab}	90.1 ± 2.6 ^b	89.9 ± 1.6 ^b	3.37
粉粒 %	0 ~ 5	A	2.0 ± 0.8 ^d	4.6 ± 0.6 ^c	8.3 ± 0.3 ^b	11.1 ± 1.5 ^a	12.2 ± 2.1 ^a	2.22
Silt %	0 ~ 5	B	2.0 ± 0.8 ^d	4.6 ± 1.1 ^c	7.9 ± 0.3 ^b	10.5 ± 1.4 ^a	11.1 ± 1.0 ^a	1.79
0.05 ~ 0.002 mm	5 ~ 20	A	2.6 ± 1.1 ^c	3.3 ± 0.5 ^{bc}	5.4 ± 1.0 ^{ab}	6.7 ± 1.8 ^a	7.2 ± 2.3 ^a	2.66
	5 ~ 20	B	2.6 ± 1.1 ^b	3.0 ± 1.7 ^b	4.5 ± 0.8 ^{ab}	5.8 ± 2.2 ^a	6.8 ± 1.1 ^a	2.64
粘粒 %	0 ~ 5	A	0.6 ± 0.3 ^c	1.7 ± 0.5 ^{bc}	3.9 ± 1.1 ^a	3.3 ± 1.7 ^{ab}	4.5 ± 1.1 ^a	1.95
Clay %	0 ~ 5	B	0.6 ± 0.3 ^c	2.0 ± 0.9 ^b	2.5 ± 0.3 ^{ab}	2.1 ± 0.7 ^{ab}	3.3 ± 0.7 ^a	1.14
< 0.002 mm	5 ~ 20	A	1.6 ± 0.4 ^c	1.2 ± 0.4 ^{bc}	1.7 ± 0.8 ^{bc}	2.8 ± 0.9 ^{ab}	3.0 ± 0.4 ^a	1.25
	5 ~ 20	B	1.6 ± 0.4	1.3 ± 0.3	2.5 ± 1.3	4.1 ± 1.9	3.3 ± 0.8	NS
容重	0 ~ 5	A	1.70 ± 0.02 ^a	1.54 ± 0.02 ^b	1.45 ± 0.05 ^c	1.38 ± 0.06 ^d	1.31 ± 0.05 ^e	0.062
Bulk density	0 ~ 5	B	1.70 ± 0.02 ^a	1.57 ± 0.04 ^b	1.51 ± 0.07 ^{bc}	1.48 ± 0.07 ^c	1.51 ± 0.07 ^{bc}	0.074
(g · cm ⁻³)	5 ~ 20	A	1.68 ± 0.04 ^a	1.60 ± 0.03 ^b	1.51 ± 0.07 ^c	1.54 ± 0.05 ^{bc}	1.60 ± 0.04 ^b	0.063
	5 ~ 20	B	1.68 ± 0.04 ^a	1.59 ± 0.03 ^c	1.61 ± 0.04 ^c	1.61 ± 0.02 ^{bc}	1.58 ± 0.02 ^b	0.038
最大持水量 %	0 ~ 5	A	20.5 ± 0.4 ^c	23.0 ± 1.6 ^c	26.8 ± 0.7 ^b	28.8 ± 1.8 ^b	32.0 ± 3.6 ^a	2.59
WHC %	0 ~ 5	B	20.5 ± 0.4 ^b	21.4 ± 0.7 ^b	23.0 ± 0.07 ^{ab}	26.1 ± 4.2 ^a	25.4 ± 3.3 ^a	3.29
	5 ~ 20	A	19.9 ± 1.0 ^c	21.0 ± 0.9 ^{bc}	21.4 ± 1.9 ^{abc}	23.3 ± 2.7 ^{ab}	23.6 ± 1.9 ^a	3.83
	5 ~ 20	B	19.9 ± 1.0 ^{bc}	19.6 ± 0.7 ^c	19.9 ± 1.0 ^{bc}	21.3 ± 1.1 ^a	20.8 ± 0.5 ^{ab}	3.45

A :灌丛下 Beneath the shrub canopy B :行间 In the mid-row location between shrub belts a , b , c :同一行中数据后不同字母表示处理间差异显著 Values within a row followed by different letter differ significantly (*p* < 0.05) NS :差异不显著 No significant difference

C·g⁻¹ soil·10 d⁻¹)提高 7.2 倍和 5.7 倍。方差分析表明 ,潜在土壤呼吸在种植 5 年的行间略高于流动沙丘外(*p* = 0.065) ,其余各时间序列之间均表现出显著的差异(*p* < 0.000 1)。土壤呼吸值与有机 C 含量有显著的相关。

3.4 灌丛效应

灌木对沙地土壤肥力的改善效应在灌丛下显著高于灌丛外行间。用富集率值(*E*)可以很好地表征灌木对养分的聚积效应(Wezel *et al.* , 2000 ;苏永中等 , 2002b)。表 3 反映出 ,在 0~5 cm 表层 ,土壤有机 C 和全 N 含量在灌丛下比行间分别高 1.3~2.6 和 1.3~1.6 倍 ,电导率高 1.3~3.1 倍 ,土壤微生物呼吸高 1.3~1.7 倍 ,而 pH 值并无差异 ,这与我们在另一项研究中的结果是一致的(苏永中等 , 2002b)。在小叶锦鸡儿种植的时间序列上 ,尽管各土壤性状值的富集率表现出不同程度的差异显著性 ,但随着人工灌木林的发育 ,富集率值下降的趋势很明显。定植 5 年的小叶锦鸡儿林有最高的 *E* 值 ,定植 28 年后 *E* 值最小。在 5~20 cm 土层 ,灌丛下和行间土壤性状也存在显著的差异 ,但最大的 *E* 值出现在定植 13 年的灌木林 ,而定植 5 年的灌木林 *E* 值最小。

3.5 物种的发育

随着小叶锦鸡儿的发育 ,流动沙丘逐渐被固定 ,土壤环境得到一定程度的改善 ,为物种的侵入创造了条件。一些一年生的先锋植物首先侵入 ,随着灌木发育时间的增长 ,物种数量、植被盖度增加 ,群落经历了由简单到复杂的演变过程(表 4)。在未种植小叶锦鸡儿的流动沙丘上 ,只有沙米(*Agriophyllum squarrosum*)和狗尾草。建植小叶锦鸡儿后 ,沙面基本固定 ,人工植物群落环境开始形成 ,在 5 年的小叶锦儿林中 ,一些浅根型的一年生植物种如小画眉草(*Eragrostis pilosa*)、雾冰黎(*Bassia dasyphylla*)、狗尾草和猪毛菜侵入 ,但这些种主要存在于灌丛下 ,行间仍处于裸露状况 ;在 13 年的群落中 ,物种数达到了 8 种 ,仍以一年生的浅根型植物为主 ,种植 21 年后 ,物种数增加到了 13 种 ,多年生的胡枝子、扁蓿豆等出现 ,个体数达到最大 ,建植 28 年的群落 ,侵入的草本植物种有 15 种 ,多年生的胡枝子和糙隐子草占一定的优势。

4 讨论与结论

4.1 建立小叶锦鸡儿人工群落后土壤肥力的恢复动态

在半干旱的科尔沁沙地 ,通过人工植被的建立

图1 土壤化学性状在小叶锦鸡儿种植年龄序列上的变化
Fig.1 Changes of soil chemical properties in an age sequence of *Caragana microphylla* plantation

以及合理的土地利用和管理,沙漠化是可以逆转的(赵哈林等,2000)。一些沙生灌木由于对干旱贫瘠风沙环境有很强的适应性,作为沙丘植被重建的优良树种,在沙漠化的防治中起着重要的作用。该项研究的结果表明,在流动沙丘定植小叶锦鸡儿后,土壤理化性状随着种植时间的增长而得到明显的改善。土壤恢复的过程与于云江等(2002)在沙坡头人

图2 土壤C、N在小叶锦鸡儿发育的不同时期的积累速率
Fig.2 Incremental rates of soil organic C and N in different stages of *Caragana microphylla* development

图3 不同年龄的小叶锦鸡儿人工固沙林潜在土壤呼吸
Fig.3 Potential soil respiration in different age of *Caragana microphylla* sand-fixing forest

工植被区的研究以及曹成有等(2000)在科尔沁沙地翁牛特旗的研究有一致的结论。

植被重建对土壤肥力的改善效应是生物和非生物因素共同作用的一个复杂的生态学过程(Liu *et al.*, 1998)。在科尔沁沙地,由于强烈的风蚀作用,沙丘土壤呈现出高度的粗粒化和单一化特征,以及很高的土壤容重、极低的持水性能和贫瘠的营养状况而不利于植物的生存。随着灌木的建立和发育,风沙流活动减弱,细粒物质在灌木周围沉积,灌木叶片对降尘的截获又通过灌丛雨和灌丛茎流在灌丛下沉积(Wezel *et al.*, 2000)。这是由于表层土壤粘粉粒含量的增加,进而使持水性能等物理性状得以改善,土壤有机C和养分含量的提高;灌木的生长使光合作用固定的C通过叶片凋落物和根系的周转进入土壤(Fisher, 1995)和C、N的根际沉积(Rhizodeposition)(苏永中等, 2002b),以及小叶锦鸡儿的固N作用是土壤有机C和N的含量随人工灌木群落演

表 3 不同年代小叶锦鸡儿固沙林土壤性状的富集率值(E , $E = A/B$)
Table 3 Enrichment ratios (E) of soil properties in different old *Caragana microphylla* sand-fixing forest

变量 Variable	土层深度 Depth (cm)	种植年限 Plantation age (a)				方差分析 ANOVA (p)
		5	13	21	30	
有机 C	0 ~ 5	2.64 ± 0.83 ^a	1.71 ± 0.47 ^b	1.47 ± 0.46 ^b	1.35 ± 0.34 ^b	0.006 ^{**}
Organic C	5 ~ 20	1.26 ± 0.26 ^b	2.61 ± 0.65 ^a	1.37 ± 0.22 ^b	1.69 ± 0.57 ^b	0.001 ^{**}
全 N	0 ~ 5	1.62 ± 0.71	1.61 ± 0.13	1.31 ± 0.31	1.26 ± 0.31	0.393
Total N	5 ~ 20	1.23 ± 0.08	1.82 ± 0.54	1.51 ± 0.40	1.49 ± 0.63	0.291
pH	0 ~ 5	1.05 ± 0.02	0.99 ± 0.04	1.02 ± 0.02	1.03 ± 0.03	0.548
	5 ~ 20	1.01 ± 0.02 ^{ab}	1.03 ± 0.02 ^a	1.00 ± 0.02 ^{ab}	0.99 ± 0.02 ^b	0.056
电导率	0 ~ 5	2.31 ± 1.10 ^a	1.48 ± 0.36 ^{ab}	1.42 ± 0.46 ^b	1.23 ± 0.18 ^b	0.068
EC	5 ~ 20	0.94 ± 0.4 ^b	1.66 ± 0.36 ^a	1.41 ± 0.35 ^a	1.46 ± 0.32 ^a	0.024 [*]
土壤呼吸 PSR	0 ~ 5	1.73 ± 0.24 ^a	1.33 ± 0.17 ^b	1.4 ± 0.06 ^b	1.27 ± 0.08 ^b	0.027 [*]

* : $p < 0.05$ ** : $P < 0.01$

表 4 不同年龄小叶锦鸡儿人工群落植物种类组成
Table 4 Species composition of artificial community of *Caragana microphylla* in different age

种名 Species name	生活型 Life form	种植年限 Plantation ages (a)														
		0			5			13			21			28		
		种数 N	高度 H	频度 K (%)	种数 N	高度 H	频度 K (%)	种数 N	高度 H	频度 K (%)	种数 N	高度 H	频度 K (%)	种数 N	高度 H	频度 K (%)
沙米																
<i>Agriophyllum squarrosum</i>	AF	6	32	40												
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	AG	4	18	30	38	12.4	100	51.8	7.2	100	133.6	5	100	8	5	13
猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	AF				0.3	5	13	93	8.8	100	37.4	7.8	100	21	8.8	100
五星蒿 <i>Bassia dasyphylla</i>	AF				5	9.4	80	0.6	14	30	0.3	8	6.5	1	5	13
小画眉草 <i>Eragrostis pilosa</i>	AG				26	6	52	194	5.2	100	206	4.6	100	65	5	65
虎尾草 <i>Chloris virgata</i>	AG							18	6	52	4.5	6	13	2.3	8	26
虫实																
<i>Corispermum macrocarpum</i>	AF							0.3	9	13	7.4	6.3	26	3	5	13
黄蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	AF													2	21	60
地锦 <i>Euphorbia humifusa</i>	AF							2.2	1	26	1	2	39	3	1	78
地梢瓜																
<i>Cynanchum thesioides</i>	AF													0.6	9	13
马齿苋 <i>Portulaca oleracea</i>	AF							33	5.2	26	58	4.2	13			
苦买菜 <i>Ixeris chinensis</i>	PF										0.5	15	26			
三芒草 <i>Aristida adscensionis</i>	AG										8.4	13	78	3	16	52
胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>	PL										0.3	5	13	17	7	100
扁蓿豆 <i>Melissitus ruthenicus</i>	PL										4	18	13	0.3	10	13
糙隐子草																
<i>Cleistogenes squarrosa</i>	PG													2	11	26
蒺藜 <i>Tribulus terrestris</i>	AF													4.2	8	26
灰绿藜 <i>Chenopodium glaucum</i>	AF										6	13	39	4	12	13
总个体数 Total number of individuals		10	50	70	69.3	32.8	245	392.9	56.4	447	467.4	107.9	566.5	136.4	131.8	611
种数 Total number of species		2			4			8			13			15		
盖度 Coverage (%)		10			10			60			80			80		

AF : 一年生杂草 Annual forbs AG : 一年生禾草 Annual grass PF : 多年生豆科 Perennial legume PG : 多年生禾草 Perennial grass N : Number
H : Height F : Frequency

替而显著提高的重要原因 ;另外 ,随着人工群落建立时间的增加 ,草本层的发育也是土壤肥力恢复的一个重要方面 ,草本植物迅速生长和死亡促进了土壤有机 C 和养分的循环(Mun & Whitford , 1998)。 C/N 的变化表明了人工群落建立后有机 C 比全 N 有更

快的积累 ,在 21 年后趋于恒定 ,表明营养物质和能量循环趋于平衡(Singh *et al.* , 2001) ,预示着群落的稳定性在增加。

人工群落凋落物的积累、有机质含量增加以及根系的发育也使土壤 pH 值和电导率发生变化 ,因

为根系分泌的有机酸,以及凋落物分解过程和微生物呼吸释放的 CO_2 可以导致 pH 值的降低(Tornquist *et al.*, 1999),而 pH 值的降低可促进养分有效性的提高。电导率值与土壤有机 C 含量呈高度的相关,随种植年限的增加而显著提高,反映了土壤营养离子通过凋落物分解释放的增加而增加。

沙丘土壤有极低的土壤微生物活性,建立人工植被后显著提高(陈祝春,1995),随固沙时间的增加,土壤微生物得以较好发育(李新荣等,2000)。该项研究的结果也表明,表征土壤微生物活性的潜在土壤呼吸随灌木种植年限的增加而显著提高。这主要是由于灌木的发育改变了土壤和空气温度及表层土壤湿度条件,使得微气候发生变化(Holmgren & Scheffer, 2001),进而创造了一个促进微有机体活性和微生物生长的有利环境。

该项研究也涉及了灌木对土壤 C、N 积累的空间分布的影响。在灌木建立和发育的初期阶段,凋落物主要聚集在灌丛下,草本植物尚未发育,行间仍处于裸露状态,因而土壤 C、N 的积累起始于灌丛下,空间分布的异质性增加。随着人工植被建立时间的延长,灌木冠幅增加,根系发育,行间草本层盖度增加,“肥岛”(Islands of fertility)区域向行间扩展,灌丛富集效应(E)降低。这种养分异质性分布的变化反映了土壤和植被恢复的过程和动态以及土壤与植被的相互作用。

4.2 草本植物的侵入和发育

植被调查的结果表明,在各年龄的小叶锦鸡儿群落中,种类丰富度明显低于常学礼等(1997)和曹成有等(2000)在科尔沁沙地的研究结果。这与近三年来该区域持续的干旱有关。一些侵入的一年生草本种类在长期干旱胁迫下消失。但是从一个时间序列上的变化动态分析,尽管仅有一年的调查数据,但种类组成随人工群落发育时间而变化的一般性结论可以得出,从表 4 可以看出,建植灌木后,群落从流沙裸地上的发育过程(0~28 年)是沙生的一年生植物、多年生植物顺序侵入、种类数量逐渐增加的过程。在不同的时间尺度上,随着植被演替进行,群落结构由单一的人工灌木演变为灌木和一年生、多年生草本组成的多层次的复杂结构。

在流动沙丘上建立人工灌木后,草本植物侵入和发育的机制在于:1)种源聚集(Seed accumulator),灌木建立后,一些植物的种子在风力扩散过程中被灌丛截获,为其在灌丛下的定居和发育提供了可能;2)保育效应(Nursing effect),在自然条件恶劣的流动

沙丘上,只能适合于先锋沙生植物(如沙米、狗尾草)的生长,其它物种很难生存,而在灌木的遮荫下,微环境的土壤和空气温度降低,表土层含水量趋于增加,降低了物种发育受干旱胁迫的程度。因此,由灌木创造的温和的微气候条件促进了侵入种的萌发和生长(Holmgren & Scheffer, 2001; Shumway, 2000)3)“肥岛”效应(Effect of “islands of fertility”),在养分贫瘠的环境下,固 N 灌木会显著提高土壤 N 的水平,进而促进其它种的发育和生长(Shumway, 2000),而有机质的不断积累,微生物活性的增加,促进了养分的有效性,为物种的发育和长期生存提供了物质和能源保障。实际上,沙地植物群落的发育和演替过程,也是物种对其生境土壤肥力的不断适应不断改造以及不同物种在不同肥力梯度上相互竞争和替代的过程。

4.3 退化生态系统恢复的时间效应

退化生境的恢复受气候因素和立地生态条件的影响(Thorhaug, 1980)。流动沙丘是沙地土壤和植被退化的极点(曹成有等,2000)。极低的植被盖度、风蚀严重、极不稳定的基质条件以及极度贫瘠的养分状况决定了其自然恢复能力十分微弱。在种植豆科的小叶锦鸡儿灌木后,极大地加速了恢复的进程。该项研究通过 0~28 年的一个种植时间序列上土壤和植被特征,很好地揭示了土壤肥力恢复的动态和植被进展演替的过程。研究表明,土壤肥力的恢复经历了灌木发育的早期阶段(0~13 年)较快的恢复过程和后期演替阶段(13~28 年)相对较慢的恢复过程。这种恢复动态在其它地域退化生态系统恢复的相关研究中已有较多的报道(Singh *et al.*, 2001; Bhojvaid & Timmer, 1998)。结果也表明,C、N 的积累速率在早期阶段,灌丛下明显高于行间,而在后期阶段,由于草本层的发育以及灌木根系和冠幅的扩展,不同部位积累速率并无差异。应当指出,经 28 年的恢复,土壤肥力得到了一定程度的改善,但 C、N 含量仍处于较低的水平,且主要集中在很浅的土壤表层,尚处于不稳定状况,一旦受到外来的强度干扰和破坏,系统将很难维持。从物种的恢复分析,虽保持了一定程度的植被盖度,但在生活型结构上仍以一年生植物占主导地位,说明系统达到稳定尚需较长时间的演替。

参 考 文 献

- Bhojvaid, P.P. & V.R. Timmer. 1998. Soil dynamics in an age sequence of *Prosopis juliflora* planted for sodic soil restoration in India. *Forest Ecology and Management*, **106**: 181~193.

- Cao, C.Y. (曹成有), D. M. Jiang (蒋德明), Alamsa (阿拉木萨), Y.M.Luo (骆永明) & Z.W. Kou (寇振武). 2000. Ecological process of vegetation restoration in *Caragana microphylla* sand-fixing area. Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报), **11**: 349 ~ 354. (in Chinese with English abstract)
- Chang, X.L. (常学礼) & J.G.Wu (邬建国). 1997. Species diversity during desertification on Horqin sandy land. Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报), **8**: 151 ~ 156. (in Chinese with English abstract)
- Chen, Z.C. (陈祝春). 1995. The biological characteristic of afforested sand dunes in Southwestern Horqin Sandy Land of semi-arid zone. Journal of Desert Research (中国沙漠), **15**: 283 ~ 287. (in Chinese with English abstract)
- Fang, W. & S.L. Peng. 1997. Development of species diversity in the restoration process of establishing a tropical man-made forest ecosystem in China. Forest Ecology and Management, **99**: 185 ~ 196.
- Feng, Z.Y. (冯仲云). 1993. Primary analysis of soil nutrient dynamics in the desertified area of the middle part of Naiman Banner, Inner Mongolia. In: Liu, X.M. (刘新民) & H.L. Zhao (赵哈林) eds. Comprehensive control of eco-environments in Horqin Sandy Land. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press. 65 ~ 72. (in Chinese)
- Fisher, R. F. 1995. Amelioration of degraded rain forest soils by plantations of native trees. Soil Science Society of America Journal, **59**: 544 ~ 549.
- Holmgren, M. & M. Scheffer. 2001. El Niño as a window of opportunity for the restoration of degraded arid ecosystems. Ecosystems, **4**: 151 ~ 159.
- Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences (ISSCAS) (中国科学院南京土壤研究所). 1978. Physical and chemical analysis methods of soils. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press. 7 ~ 59. (in Chinese)
- Li, X.R. (李新荣), J. G. Zhang (张景光), L. C. Liu (刘立超), H. S. Chen (陈怀顺) & Q. H. Shi (石庆辉). 2000. Plant diversity in the process of succession of artificial vegetation types and environment in an arid desert region of China. Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报), **24**: 257 ~ 261. (in Chinese with English abstract)
- Liu, S.R., X.M.Li & L.M. Niu. 1998. The degradation of soil fertility in pure larch plantations in the northeastern part of China. Ecological Engineering, **10**: 75 ~ 86.
- Mazzarino, M.J., L. Oliva, A. Abril & M. Acosta. 1991. Factors affecting nitrogen dynamics in a semiarid woodland (Dry Chaco, Argentina). Plant and Soil, **138**: 85 ~ 98.
- Mun, H.T. & W.G. Whitford. 1998. Changes in mass and chemistry of plant roots during long-term decomposition on a Chihuahuan Desert watershed. Biology Fertility Soils, **26**: 16 ~ 22.
- Research Groups of "Study on Combating Desertification/ Degradation in China" (中国荒漠化/土地退化防治研究组). 1998. Study on combating desertification/degradation in China. Beijing: Environmental Science Press. 69 ~ 75. (in Chinese)
- Singh, K. P., T. N. Mandal & S. K. Tripathi. 2001. Patterns of restoration of soil physicochemical properties and microbial biomass in different landslide sites in the sal forest ecosystem of Nepal Himalaya. Ecological Engineering, **17**: 385 ~ 401.
- Shumway, S. W. 2000. Facilitative effects of a sand shrub on species growing beneath the shrub canopy. Oecologia, **124**: 138 ~ 148.
- Su, Y.Z. (苏永中), H.L.Zhao (赵哈林) & H.Y. Wen (文海燕). 2002a. Cultivation and enclosure effects on soil physicochemical properties of degraded sandy grassland. Journal of Soil and Water Conservation (水土保持学报), **16**(4): 5 ~ 8. (in Chinese with English abstract)
- Su, Y.Z. (苏永中), H.L.Zhao (赵哈林) & T.H. Zhang (张铜会). 2002b. Influencing mechanism of several shrubs and subshrubs on soil fertility in Horqin sandy land. Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报), **13**: 802 ~ 806. (in Chinese with English abstract)
- Thorhaug, A. 1980. Recovery pattern of restored major plant communities in the United States: high to low altitude, desert to marine. In: Cairns, J. J. ed. The recovery process in resource development. Vol. 2. New York: Pergamon Press. 541 ~ 649.
- Tilman, D., D. Wedin & J. Knops. 1996. Production and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems. Nature, **379**: 718 ~ 720.
- Tomquist, C.G., F.M.Hons & S.E. Feagley. 1999. Agroforestry system effects on soil characteristics of the Sarapiquí region of Costa Rica. Agriculture, Ecosystem and Environments, **73**: 19 ~ 20.
- Vitousek, P.M., P.A. Matson & K. van Cleve. 1989. Nitrogen availability and nitrification during succession, primary, secondary and older field series. Plant and Soil, **115**: 229 ~ 239.
- Wezel, A., J. L. Rajot & C. Herbrig. 2000. Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agro-ecosystems in semi-arid Niger. Journal of Arid Environments, **44**: 383 ~ 398.
- Wu, Y. (吴彦), Q. Liu (刘庆), Y. K. Qiao (乔永康), K. W. Pan (潘开文), C. M. Zhao (赵常明) & Q. H. Chen (陈庆恒). 2001. Species diversity changes in subalpine coniferous forests of different restoration stages and their effects on soil properties. Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报), **25**: 648 ~ 655. (in Chinese with English abstract)
- Xu, B. (徐斌) & X. M. Liu (刘新民). 1993. Soil properties and soil improvement in the experimental district of Yaoledianzi village. In: Liu, X. M. (刘新民) & H.L. Zhao (赵哈林) eds. Comprehensive control of eco-environments in Horqin Sandy Land. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press. 65 ~ 72. (in Chinese)
- Yan, X. S. (严旭升). 1988. Soil fertility research method. Beijing: China Agriculture Press. (in Chinese)
- Yu, Y.J. (于云江), Q. G. Lin (林庆功), Q. H. Shi (石庆辉) & J.Q. Liu (刘家琼). 2002. Changes of habitat and vegetation in man-made vegetation area of Shapotou section along Baotou-Lanzhou railway. Acta Ecologica Sinica (生态学报), **22**: 433 ~ 439. (in Chinese with English abstract)
- Zhao, H.L. (赵哈林), X.Y. Zhao (赵学勇) & T. H. Zhang (张铜会). 2000. Causes, processes and countermeasures of desertification in the interlocked agro-pastoral area of North China. Journal of Desert Research (中国沙漠), **20** (Suppl.1): 22 ~ 28. (in Chinese)