

干旱半干旱地区人工固沙灌木林生态系统演变特征

王新平, 李新荣, 肖洪浪, 张景光, 张志山

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙坡头沙漠试验研究站, 兰州 730000)

摘要:应用实验生态学方法分析了沙坡头地区栽植于 1956、1964、1981、1987 年的无灌溉人工植被固沙群落浅层土壤分形特征、植被盖度、物种特征、生物量、土壤水分、土壤微生物, 以及群落土壤物理和土壤养分特征, 并与流动沙丘进行比较。结果表明, 在干旱半干旱的草原化荒漠地区, 首先利用半隐蔽式草方格沙障对流动沙丘进行固定, 然后栽植灌木柠条、花棒等和半灌木油蒿, 经过 40 多年的稳定演变, 该区域逐渐形成由矮灌木与草本植物覆盖, 以及隐花植物与微生物土壤结皮复合的固定沙丘景观。在人工植被固沙防护体系稳定演变过程中, 浅表层土壤的细粒化和养分富集化特征, 微生物土壤结皮与亚表层土壤厚度, 以及浅表层土壤体积含水率均随固沙年限的延长趋于显著增加。而土壤微生物数量、植被盖度、植物种数等生物群落学属性在固沙年限达 40a 左右时, 已趋于最大, 尔后呈缓慢下降趋势。随着固沙年限的增加, 灌木树种不断衰退减少, 当固沙年限逾 17a 之后, 群落生物量增至峰值后略有下降。土壤分形维数与土壤粘粒含量呈显著正相关关系, 流动沙丘被人工植被固定年代越久远, 浅表层(0~3cm)土壤粘粒含量(4.50%)越高, 其分形维数越大($D=2.4083$), 表明人工植被固沙防护体系浅表层土壤结构变得越紧实, 流动沙丘($D=2.0484$)在人工植被的固定作用下, 发生逆转的趋势越显著, 沙丘日趋固定。

关键词: 草原化荒漠; 荒漠植被; 分形维数; 土壤性状

文章编号: 1000-0933(2005)08-1974-07 中图分类号: Q149, Q151 文献标识码: A

Evolution characteristics of the artificially re-vegetated shrub ecosystem of arid and semi-arid sand dune area

WANG Xin-Ping, LI Xin-Rong, XIAO Hong-Lang, ZHANG Jing-Guang, ZHANG Zhi-Shan (Shapotou Desert Experimental Research Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 260 Donggang West Rd., Lanzhou 730000, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 1974~1980.

Abstract: The artificially established rainfed vegetation for stabilizing the shifting sand dunes in Shapotou area since 1956, using mainly the shrubs of *Caragana korshinskii*, *Hedysarum scoparium* and *Artemisia ordosica* at Shapotou Desert Experimental Research Station near Lanzhou has established a dwarf-shrub and microbiotic soil crust cover on the stabilized sand dunes. Soil particle size getting thinner and fertility, the depth of microbiotic soil crust as well as the subsoil, and the volumetric soil moisture in the shallow soil profiles increased remarkably associated with the process of sand dune stabilization. On the other hand, the number of microbe, the vegetation cover and the plant species attained a maximum degree when the dunes stabilized for 40 years. The shrub numbers and the community biomass decreased when the dunes stabilized for 17 years. There is a significant positive correlation between soil particle fractal dimension and the clay content of the shallow soil profile in the artificially stabilized sand dunes, the longer the dune being stabilized, the greater the soil clay content in the shallow soil profiles (0~3 cm), the greater the soil particle fractal dimension ($D=2.4083$). It reflects the fact that during the re-

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40301008, 90202015); 中国科学院“西部之光”人才培养计划资助项目; 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX3-SW-324)

收稿日期: 2004-04-26; **修订日期:** 2004-09-19

作者简介: 王新平(1969~), 男, 甘肃通渭人, 博士, 研究员, 主要从事干旱区水文和水资源学研究. E-mail: xpwang@lzb.ac.cn

致谢: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所土壤实验室贾慧兰高工协助完成土样分析, 特致谢忱!

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 40301008, 90202015), the Talent Training Program in West China of Chinese Academy of Sciences, the Innovation Foundation of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX3-SW-324)

Received date: 2004-04-26; **Accepted date:** 2004-09-19

Biography: WANG Xin-Ping, Ph. D., Professor. mainly engaged in hydrology and water resources in arid areas. E-mail: xpwang@ns.lzb.ac.cn

vegetation processes, the soil structure is strengthening and tightening in the shallow soil profiles. Hence, the shifting sand dune ($D=2.0484$) getting more stabilized. Therefore, the fractal model could be used to describe the texture and fertility states, and the stability degree of the formerly shifting sand dune, and it could be used as an integrated quantitative index to evaluate the re-vegetation practice in the sand dune areas and its stabilization.

Key words: steppe desert; desert vegetation; fractal dimension; soil properties

土壤是由形状与大小各异的土壤颗粒组成的多孔介质,尽管在表观上表现为不规整的几何形体,但是其结构性状在统计意义上具有自相似性。因此,土壤是具有分形特征的系统^[1]。

在设置草方格沙障及栽植固沙植物对流动沙丘固定过程中,植被覆盖度的变化有限,流沙成土过程和微生物土壤结皮成为生物固沙程度的主要指标之一。腾格里沙漠东南缘沙坡头地区包兰铁路两侧的流动沙丘在草方格沙障与人工植被的影响作用下,沙面不断沉降大气中的粉尘,为成土过程和微生物土壤结皮发育提供了细粒物质。Fearnehough^[2]等对沙坡头人工固定沙丘区降尘的时空格局研究表明,该地区每年的降尘量达到 $372\text{g}/\text{m}^2$,其在固定沙丘区的空间格局主要取决于本地区的主风方向、地形因子和灌丛的水平分布和垂直结构特点。“灰砂”(风积粉尘)在固定沙丘表面平均每年以 1.6mm 的厚度堆积。而大气降尘($d<0.063\text{mm}$)每年以 0.144mm 的厚度堆积^[3]。人工植被区建立后经过 40 余年的演变,使该地区的生态环境得到了改善,在人工植被作用下,流沙成土过程已经开始,沙层表面土壤微生物结皮层厚度逐年增厚,伴随着流沙成土过程而大量侵入一些 1 年生植物和苔藓、藻类等隐花植物,土壤微生物种群数量增加,促使生态环境向草原化荒漠的地带性方向发展。植物种除了人工种植的灌木柠条(*Caragana korshinskii*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)、黄柳(*Salix gordejewii*)、乔木沙拐枣(*Calligonum arborescens*)、沙木蓼(*Atraphaxis bracteata*)、籽蒿(*Artemisia sphaerocephala*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)和沙拐枣(*Calligonum arborescens*)外,有天然繁衍的小画眉草(*Eragrostis poaeoides*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)、狗尾草(*Setaria ruthenica viridis*)、刺沙蓬(*Salsola ruthenica*)、虎尾草(*Chloris virgata*)、三芒草(*Aristida adscensionis*)、虫实(*Corispermum declinatum*)、沙蓝刺头(*Echinops gmelinii*)和油蒿等。由于大量物种的繁殖和定居,使原有的流沙演变成稳定复杂的人工-天然荒漠植被景观。已有的研究对人工植被固沙区浅表层土壤的理化性质变化与流动沙丘区土壤进行比较^[4, 5]。苏永中^[6]对沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征的研究认为分形维数能表征农田沙漠化演变中土壤结构和养分状况以及沙漠化程度,但是对流沙固定过程中人工植被固沙群落浅层土壤水分、群落土壤物理和土壤养分特征,以及土壤分形特征的变化研究显得不足。

本文试图应用杨培岭等^[1]提出的土壤颗粒分形模型,对流动沙丘固定过程中土壤颗粒的分形维数变化进行研究,进一步分析群落土壤物理、土壤养分状况,同时调查固沙林生态系统群落学特征,为人工植被固定流沙过程中的土壤演变特征描述和土壤固定程度的量化分析提供新的参考依据。从而通过分析沙漠化逆转过程中土壤理化性质的变化来揭示沙漠化发生逆转的机理,探索干旱半干旱地区人工固沙灌木林生态系统演变途径。

1 研究方法

1.1 研究区生态气候特征

试验在中国科学院沙坡头沙漠试验研究站人工植被固定沙丘上进行($37^{\circ}32' \text{N}$, $105^{\circ}02' \text{E}$),海拔高度约为 1300m 。格状沙丘由西北向东南倾斜,呈阶梯状分布。沙丘主梁呈新月型沙丘链形态,走向为西北-东南方向,相对高差 $15\sim 20\text{m}$ 。本区域主风方向为西北风和西北西风,年均风速 $2.1\text{m}/\text{s}$ (2m 高度)。

沙坡头地区土壤类型有风沙土、灰钙土、灰棕荒漠土、草甸土、沼泽土、耕作土等,以风沙土及灰棕荒漠土分布范围最广。流动沙丘区风沙土 $0\sim 5\text{m}$ 剖面内土壤容重在 $1.45\sim 1.63\text{g}/\text{cm}^3$ 之间变化,平均为 $1.52\pm 0.04\text{g}/\text{cm}^3$,平均田间持水量为体积的 6.70% 。

试验区生态气候特征见图 1。由 48a(1956~2003 年)月均气温与降水量统计资料分析可知,本区雨热同期,植物生长季节中仅在 7 月底至 8 月初表现为短暂的相对湿润期,而每年 11 月中旬至翌年 2 月中旬的湿润期对该区群落特征的演变影响甚微,其它时段均为干旱期,多年月平均气温为 10.4°C ,7 月平均最高气温 24.7°C ,1 月平均最低气温 -6.1°C ,年均降水量仅为 184.4mm ,降水量变率高达 45.7% 。降水是该地区水文循环中唯一的补给源,其中补给于表层下 3.4m 深度内流动沙丘沙层稳定贮水量占年平均降水量的 10.5% ^[7],补给于稳定湿沙层或渗入深处的水量占年平均降水量的 16.6% ^[4]。在该区域内受年降水量波动制约的土壤含水量多寡支配、限制人工植被固沙群落植物种的数量和规模^[8]。

1.2 试验样地描述

自 1956 年开始,几代沙漠科学工作者先后于 1956、1964、1965、1966、1973、1981、1982、1984、1987 年与 1989 年数年内,沿包(头)-兰(州)铁路两侧逐步向北、向南及东西方向推进,对移动沙丘经由半隐蔽式草方格沙障($1\text{m}\times 1\text{m}$)固定后,在固定沙丘表面沿东北-西南方向栽植黄柳、乔木沙拐枣、沙木蓼、柠条、油蒿和花棒等灌木幼苗,防护林呈条带状,垂直于盛行风西北风方

向。累年固定以后,在沿铁路走向以北形成 16000m 长、500m 宽,南侧 200m 宽的人工固沙植被区。研究者按人工植被初始栽种年代选择设置固定观测样方,样方编号依次为 1956、1964、1981 和 1987 年。

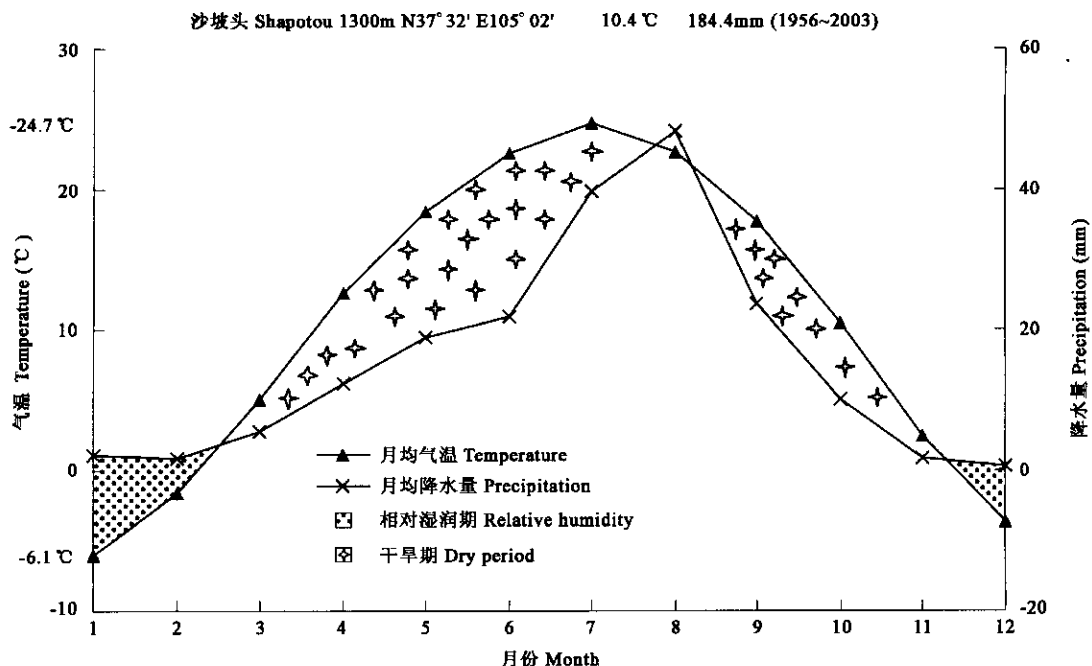


图 1 腾格里沙漠南缘沙坡头地区生态气候图解

Fig. 1 The eco-climate diagram of Shapotou region in south fringe of the Tengger Desert

1.3 土壤取样与分析

2003 年 9 月下旬,在 1956、1964、1981 年和 1987 年建立的固沙植被区固定观测样地中分别选择调查样方 18~58 个(表 1),总计 142 个,流沙区样方 1 个。田间直接测定项目包括:微生物土壤结皮与亚土层厚度;土壤容重用石蜡固定法测定;0~15cm 土壤体积含水率用 Trase 时域反射仪测定(美国 Soilmoisture 仪器有限公司)。然后取 0~3cm,3~5cm 浅表层土样,均匀混合后,带回中国科学院寒区旱区环境与工程研究所土壤实验室分析。土壤颗粒分析用 MS-S 激光粒度分析仪(英国马尔文 Malvern 仪器有限公司);有机质的测定用重铬酸钾氧化-外加加热法;全氮用凯氏定氮法 Kjeltac 1026(瑞典 Foss Tecator 公司);土壤 pH 值测定用 1:1 土水比悬液,由 PHS-4 智能酸度计测定(江苏江都市电分析仪器有限公司);电导率(EC)测定用 1:5 土水比浸提液,由 Cole-Parmer 19820-20 手持式电导分析仪测定(美国 Cole-Parmer 仪器公司)。

1.4 群落调查

在始植于 1956、1964、1981 年和 1987 年的固沙植被区固定观测样地中分别选择植物群落调查样方 10 个(10m×10m),总计 40 个,其中在每个样方内对草本植物的调查面积为 1m×1m,分别调查始植于不同年代固沙区植物种组成及群落学特征;土壤微生物各类群数量测定按照许光辉的分析方法^[9]。

1.5 土壤分形维数计算

土壤颗粒分形维数的计算与确定应用杨培岭等提出的用粒径的重量分布表征的土壤分形模型^[1],由于土壤是具有自相似结构的多孔介质,土壤颗粒的重量分布与平均粒径之间的分形关系式可表示为:

$$(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})^{3-D} = W(d < \bar{d}_i)/W_0 \quad (1)$$

式中, $\bar{d}_i$ 为两筛分粒级 d_i 与 d_{i+1} 之间粒径平均值, $\bar{d}_{\max}$ 为最大粒级土粒的平均直径, $W(d < \bar{d}_i)$ 为粒径小于 $\bar{d}_i$ 的累积土粒重量, W_0 为土壤各粒级重量总和。由(1)可知,式中各土壤颗粒的粒径及小于某一粒径土壤重量可以通过土壤颗粒机械分析来确定,然后分别以 $\lg(W_i/W_0)$, $\lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})$ 为纵、横坐标,用散点图绘出所研究土壤的粒径分布数据,(3-D)是散点线性拟合方程的斜率,D 为土壤颗粒分形维数。

2 结果与分析

2.1 人工植被区生境特征

始植于 4 个不同年代人工植被固定沙丘区生境变化情况列于表 1,流动沙丘为对照区。人工植被固定沙丘微生物土壤结皮

与亚土层厚度随着固沙时间的延长逐渐增厚,增加最大厚度为 5.01cm,不同固沙时段内累年平均增厚 3.8cm。同时,0~15cm 土壤体积含水率亦呈明显增加趋势。固定沙丘区植物种类较之流动沙丘区明显增多,由原来的 5 种增至 10 种以上,不同年代初始固沙区之间物种数量变化不大,植物种类稍有差异。

表 1 不同年代人工植被固定沙丘生境变化

Table 1 Characteristics of eco-environmental changes in the stabilized sand dune areas since revegetation in different years								
固沙年限(a) (固沙时间) YAR*(year revegetated)	植被盖度 Total vegetation cover(%)	植物种 Plant species	群落生物量 Community biomass (g/100m ²)	结皮与亚土	0~15cm 体	土壤微生物数量		
				层厚度	积含水率	Soil microbes total		
				Soil crust and subsoil thickness ^c (cm)	Volumetric soil moisture (%) at 0~15 cm depth	(10 ³ individual/g)		
						细菌	放线菌	真菌
						Bacteria	Actinomyce	Fungi
48(1956)	31.4±0.52	11 ^d	14608.4±776.3	5.01±1.91	3.26±0.21	32200.82	48.33	4.34
40(1964)	33.4±0.61	10 ^e	15238.9±668.8	4.41±2.19	3.17±0.50	63752.76	35.89	6.23
23(1981)	31.5±0.34	10 ^f	35992.6±863.5	3.92±2.16	2.51±0.11	20213.79	44.09	5.22
17(1987)	28.0±0.87	14 ^g	39268.2±927.1	2.08±2.05	2.08±0.19	19119.38	29.82	1.71
0(流动沙丘 ^b)	<1.0	5 ^h	0.0	0.0	2.03±0.04	15698.12	1.57	0.11

a: YAR, years after revegetation;b: shifting sand dune;c: 1956 年样方样本数 $n=18$; 1964 年样方样本数 $n=58$; 1981 年样方样本数 $n=37$; 1987 年样方样本数 $n=29$;d: 油蒿、花棒、柠条、雾冰藜、小画眉草、狗尾草、虎尾草、刺沙蓬、三芒草、叉枝鸦葱、蓝刺头 *Artemisia ordosica*, *Hedysarum scoparium*, *Caragana korshinskii*, *Bassia dasyphylla*, *Eragrostis poaeoides*, *Setaria ruthenica viridis*, *Chloris virgata*, *Salsola ruthenica*, *Aristida adscensionis*, *Scorzonera divaricata*, *Echinops gmelinii*;e: 油蒿、花棒、柠条、雾冰藜、小画眉草、狗尾草、虎尾草、刺沙蓬、叉枝鸦葱、蓝刺头 *A. ordosica*, *H. scoparium*, *C. korshinskii*, *B. dasyphylla*, *E. poaeoides*, *S. ruthenica viridis*, *C. virgata*, *S. ruthenica*, *Scorzonera divaricata*, *E. gmelinii*;f: 油蒿、花棒、柠条、沙枣、黄柳、雾冰藜、小画眉草、刺沙蓬、蝶果虫实、沙米 *A. ordosica*, *H. scoparium*, *C. korshinskii*, *Elaeagnus rhamnoides*, *Salix gordejewii*, *B. dasyphylla*, *E. poaeoides*, *S. ruthenica*, *Corispermum patelliforme*, *Agriophyllum squarrosum*;g: 油蒿、花棒、柠条、沙木蓼、沙冬青、蒙古莠、梭梭、中国柽柳、中亚紫菀木、雾冰藜、小画眉草、百花蒿、蝶果虫实、沙米 *A. ordosica*, *H. scoparium*, *C. korshinskii*, *Atraphaxis bracteata*, *Ammopiptantus mongolicus*, *Caryopteris mongolica*, *Haloxyylon Ammodendron*, *Tamarix chinensis*, *Asterothamnus centrali-asiticus*, *B. dasyphylla*, *E. poaeoides*, *Stilpnolepis centiflora*, *C. patelliforme*, *A. squarrosum*;h: 花棒、沙米、沙芥、蝇虫实、百花蒿 *H. scoparium*, *A. squarrosum*, *Pugionium calcaratum*, *Corispermum declinatum*, *S. centiflora*

需要说明的是,各固沙区灌木种的选择起初由人为确定,如 1956、1964 年的初始固沙区曾分别栽植乔木(小叶杨(*Populus pseudo-simonii*)、榆树(*Ulmus pumila*)、沙枣等)、灌木(梭梭、乌丹沙蒿(*Artemisia sphaerocephala*)、油蒿、花棒、柠条等)等树种达 18 种之多,而目前仅存活灌木各 3 种,均为油蒿、花棒、柠条。其物种数的增加实为 1 年生草本累年大量入侵所致,致使群落生物量比较小,分别为 14608.4g/100m²,15238.9g/100m²。1981 年初始固沙区灌木与草本植物种数各占一半,群落生物量仅次于 1987 年初始固沙区,为 35992.6g/100m²。流动沙丘固定后,浅表层土壤剖面 0~15cm 体积含水率由 2.03%增加至 3.26%,增幅达 60.6%。原来零星分布于流动沙丘的草本植物沙芥、百花蒿完全消失,沙米、虫实逐渐消亡,退出该生态系统。而雾冰藜、小画眉草等 1 年生草本植物大量繁衍。人工固沙灌木林生态系统日趋复杂,其组成成分(物种)与环境(土壤水分、养分)之间的互馈机制逐渐建立起来,表现为相对动态平衡状态。

2.2 浅层土壤理化性状特征

流动沙丘的人工固定过程,也是浅层土壤颗粒的细粒化和养分富集化(表 2)的过程。随着固沙年限的延长,浅层土壤粉粒、粘粒含量明显增高,容重降低。当流沙固定 17a 时,0~3cm 土壤剖面的粉粒与粘粒含量平均为 14.77%,2.04%,分别是流动沙丘的 134 倍和 11 倍。当固沙年限长达 48a(1956 年样区)之久以后,其粉粒与粘粒含量平均又分别增加为 37.98%,4.50%,是流动沙丘的 345 倍和 25 倍,土壤剖面 0~3cm 范围内粉粒(0.05~0.002mm)增幅显著。流动沙丘固定 40a 以上时,沙粒含量已降低到低于 65%,说明浅层土壤质地发生明显变化,由沙土变为沙壤土。从而使土壤容重大幅度降低,土壤容重由 1.53g/cm³(流沙)减小至 1.39g/cm³(1956 年样区),土壤结构性得到提高。

表 2 也表明,随着固沙区细粒物质的不断积累,大量草本植物生息繁衍以及微生物活动的加强,土壤有机质与全 N 含量都显著增加。当流沙固定年限分别是 17,23,40,48a 时,0~3cm 土壤有机质逐年平均增加速率依次为 0.10,0.16,0.11,0.17g/kg。对 4 个始植于不同年代(1956、1964、1981、1987 年)的固沙样区取平均,则土壤有机质增加速率平均为 0.13g/kg。0~3cm 土壤全 N 逐年平均增加速率依次为 0.21,0.22,0.18,0.20mg/kg。同样,对 4 个始植于不同年代(1956、1964、1981、1987 年)的固沙样区取平均,则土壤全 N 的增加速率平均为 0.20mg/kg。土壤养分状况的改善是人工固沙灌木林生态系统生物地球化学循环日益活跃的结果,又作为贡献性生态因子促使该系统物质循环过程加快,土壤理化性状的改善趋势将逐渐向土壤深层扩展。

表 2 研究区浅表层(0~3cm, 3~5cm)土壤部分物理化学特性统计

Table 2 Average values and standard error of soil characteristics (0~3cm, 3~5cm depth of soil profile) in the stabilized sand dune areas revegetated in different years

固沙年限(a) (固沙时间) YAR ^a (year revegetated)	剖面层次 Soil profiles (cm)	粒径分布 Soil particle size (mm) distribution(%)			容重 Bulk density (g/cm ³)	pH	电导率 Electric conductivity (ms/cm)	土壤有机质 Soil organic matter (g/kg)	全 N Total Nitrogen (mg/kg)
		沙粒 Sand (1~0.05)	粉粒 Silt (0.05~0.002)	粘粒 Clay (<0.002)					
48(1956)	0~3	57.53±1.26	37.98±1.11	4.50±0.21	1.39±0.13	8.03±0.73	0.15±0.01	8.89±1.33	10.19±2.71
	3~5	76.40±1.19	21.26±1.31	2.34±0.16	—	8.12±0.10	0.06±0.01	2.59±1.10	—
40(1964)	0~3	64.30±1.03	31.50±1.24	4.20±0.27	1.44±0.20	8.02±0.06	0.15±0.02	5.39±1.02	7.37±1.79
	3~5	88.59±1.17	9.86±0.71	1.54±0.11	—	8.17±0.11	0.06±0.01	2.33±1.03	—
23(1981)	0~3	67.31±1.43	29.16±1.11	3.52±0.60	1.39±0.16	7.81±0.13	0.12±0.02	4.46±0.96	5.37±2.31
	3~5	76.79±1.10	20.57±1.30	2.64±0.33	—	8.04±0.06	0.06±0.02	1.46±0.95	—
17(1987)	0~3	83.19±1.21	14.77±0.14	2.04±0.09	1.47±0.11	7.60±0.41	0.14±0.03	2.48±0.22	3.82±1.02
	3~5	94.65±1.43	4.40±0.54	0.95±0.02	—	8.14±0.12	0.06±0.01	0.81±0.03	—
0(流动沙丘 ^b)	0~3	99.71±1.12	0.11±0.01	0.18±0.00	1.53±0.17	7.49±0.13	0.14±0.05	0.86±0.09	0.31±0.04
	3~5	99.72±1.91	0.11±0.01	0.17±0.01	—	7.80±0.10	0.01	0.04±0.01	—

a: YAR, years after revegetation;b: shifting sand dune;n=10, mean±se

始植于不同年代的固沙区浅层(0~3cm)土壤 pH 略有增加,但是逐年波动较大。电导率并未发生明显变化,可能是由于土壤水溶性养分离子并未在浅表层(0~3cm)土壤中积累的缘故所致。

2.3 土壤颗粒分形特征

由(1)式计算得流动沙丘及始植于不同年代的固定沙丘区土壤颗粒分形维数值见表 3。回归分析所得的相关系数在 0.6404~0.9907 之间变化,除了流动沙丘较显著($p<0.05$)外,线性相关达到极显著水平($p<0.01$)。由表 1 可知,土壤颗粒分形维数随固沙年限的延长而增大,0~3cm 增幅明显。人工植被固定沙丘 40a 以上,0~3cm 土壤剖面土壤颗粒的分形维数大于 2.40。与 3~5cm 土壤剖面比较,始植于 1964 年的样区内此二值差异最大(0.1452),始植于 1981 年的样区内此二值差异最小(0.0344),对 4 个始植于不同年代的固沙样区取平均,其差值为 0.0904。表明人工植被固沙区土壤颗粒分形维数的变化,不仅与固沙时间有关,而且也受微地形特征的影响,比如 1964 年初始固沙区多位于沙丘丘间低地。

表 3 人工植被固沙不同年限沙丘浅表层(0~3cm, 3~5cm)土壤粒级分布及土壤颗粒的分形维数

Table 3 Soil particle composition and fractal dimension of soil particle in the stabilized sand dune areas

固沙年限(a) (固沙时间) YARa (year revegetated)	剖面层次 Soil profiles (cm)	粒径分布 Soil particle size (mm) distribution(%)									分形维数 Fractal dimension	相关系数 Correlation coefficients
		0.5 ~0.25	0.25 ~0.1	0.1 ~0.05	0.05 ~0.02	0.02 ~0.01	0.01 ~0.005	0.005 ~0.002	0.002 ~0.001	<0.001		
48(1956)	0~3	5.07	27.90	24.55	23.12	6.88	4.26	3.71	1.56	2.93	2.4083	0.9817
	3~5	12.19	46.36	17.85	12.29	4.13	2.70	2.14	0.81	1.53	2.3155	0.9907
40(1964)	0~3	7.27	36.05	20.98	18.28	6.01	3.75	3.45	1.46	2.75	2.4059	0.9887
	3~5	17.45	59.77	11.37	5.79	1.89	1.10	1.08	0.57	0.97	2.2607	0.9666
23(1981)	0~3	3.93	36.39	26.99	18.82	4.72	2.82	2.81	1.30	2.23	2.3634	0.9830
	3~5	7.92	46.46	22.41	12.47	3.63	2.29	2.17	0.91	1.73	2.3290	0.9853
17(1987)	0~3	13.70	55.19	14.30	7.80	3.19	2.05	1.74	0.70	1.34	2.3046	0.9846
	3~5	21.42	67.50	5.74	2.76	0.68	0.39	0.57	0.26	0.69	2.2154	0.9035
0(流动沙丘 ^b)	0~3	23.70	75.65	0.36	0.07	0.02	0.01	0.01	0.01	0.17	2.0484	0.6410
	3~5	19.84	79.54	0.33	0.07	0.02	0.01	0.01	0.01	0.16	2.0369	0.6404

a: YAR, years after revegetation;b: shifting sand dune

流动沙丘土壤颗粒分形维数仅在 2.04~2.05 之间变化,表征了其相对松散、结构性差的特征。而且也反映出流沙质地均一、土壤颗粒分布均匀的特性。

在人工植被固沙防护体系稳定演变过程中,浅层土壤颗粒分形特征的变化趋势,反映了土壤粉粒与粘粒含量相继增高的过程。随着固沙年限的延长,分形维数逐渐增加,从流动沙丘向固定沙丘演变,沙丘更加固定,分形维数由 2.0484 增加到 2.4083。

对同一固沙时段不同地表覆被状况下(图 2)土壤颗粒分形维数的分析可知(表 4),不同层次土壤剖面内土壤颗粒分维值仅在 2.2217 与 2.3230 之间变化,地表有微生物土壤结皮与灌丛覆盖的固定沙丘区(b)分形维数略高($D=2.3230$),而其它地表覆被类型区(a,c)差异较小。与 1987 年初始固沙区(表 3)比较,土壤颗粒分形维数值在同一区间变化。因此,地表微生物土壤结皮的形成是决定土壤分维特征的主要因素,固沙植物灌丛的存在次之。

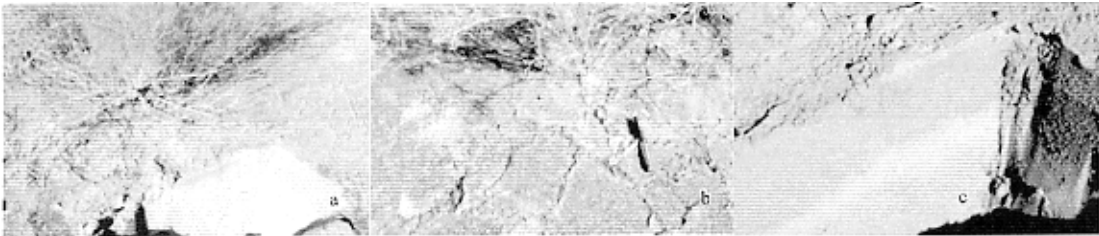


图 2 人工植被固沙区地表覆被状况类型

Fig. 2 The surface cover types of the artificially stabilized sand dune

- a 地表无微生物土壤结皮灌丛固定沙丘区 under shrubby canopy without microbiotic soil crusts present
- b 地表有微生物土壤结皮灌丛固定沙丘区 under shrubby canopy with microbiotic soil crusts present
- c 地表无微生物土壤结皮无灌丛固定沙丘区 fixed sand dunes with neither vegetation nor microbiotic soil crust present

表 4 人工植被固沙区(1989 年固定样方)不同地表覆被状况影响下沙丘浅表层(0~3cm, 3~5cm)土壤颗粒的分形维数

Table 4 Fractal dimension of soil particle in the re-vegetation sand dunes (stabilized in 1989) of different ground surface cover												
地表覆被 Ground surface cover	剖面层次 Soil profiles (cm)	粒径分布 Soil particle size (mm) distribution(%)									分形维数 Fractal dimension	相关系数 Correlation coefficients
		0.5	0.25	0.1	0.05	0.02	0.01	0.005	0.002	<0.001		
		~0.25	~0.1	~0.05	~0.02	~0.01	~0.005	~0.002	~0.001			
a	0~3	13.27	68.47	8.36	4.81	1.77	1.11	0.85	0.37	0.98	2.2539	0.9500
	3~5	13.20	68.00	8.48	4.99	1.62	1.12	1.10	0.46	1.03	2.2700	0.9527
b	0~3	13.72	54.76	13.08	8.60	3.23	2.29	2.06	0.80	1.46	2.3230	0.9871
	3~5	20.16	70.59	4.28	2.09	0.77	0.59	0.57	0.25	0.70	2.2277	0.8958
c	0~3	17.77	71.17	4.59	2.64	1.27	0.85	0.68	0.26	0.76	2.2329	0.9213
	3~5	16.77	72.11	5.41	2.33	1.07	0.71	0.62	0.26	0.72	2.2217	0.9144

a,b,c 见图 2 See fig. 2

3 结论

通过设立草方格沙障并栽植沙生灌木对流动沙丘的固定过程中,随时间推移,人工固沙灌木林生态系统特征发生系列演变,区域沙漠化逆转过程开始。

固沙区荒漠植物种类与数量发生明显变化。由于固定沙丘微生境改变,致使荒漠灌木种类减少,由固定初期的 18 种(人为确定)之多,减少为目前生长状况良好、表现稳定的 3 种(油蒿、柠条和花棒)。而荒漠草本植物大量增加,但种类组成发生了显著变化,由适于流动沙丘生长的 4 种演变为稳定的 9 种,且均为新侵入种类。

当人工固沙植被区微生境条件获得明显改善时,在保持一定的植被覆盖状态下(在 28%~33.4%之间变化),固定沙丘区浅表层土壤微生物大量繁衍,土壤体积含水率不断增高,人工植被固沙系统内植物群丛生物地球化学循环过程加强,随着大气降尘等细粒物质的不断积累,生物土壤结皮逐渐形成,亚表层土壤厚度也逐年增加,使得浅表层土壤颗粒细粒化和土壤养分(土壤有机质、土壤全 N)富集化特征明显。

浅表层土壤分形维数可以描述和表征沙丘固定程度,与原始流动沙丘土壤比较,栽植于 1956、1964、1981、1987 年的人工固定沙丘区植被区群落土壤粒径的分形维数普遍升高。而且固沙年限越久远,土壤颗粒分形维数值越大,表明人工植被防护体系的稳定性越高。

References:

[1] Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Fractal feature of soil on expression by weight distribution of particle size. *Chinese Sci. Bull.*, 1993, **38** (20):1896~1899.

[2] Fearnough W, Fullen M A, Mitchell D J, *et al.* Aeolian deposition and its effects on soil and vegetation changes on stabilized desert dunes in northern China. *Geomorphology*, 1998, **23**:171~182.

[3] Ling Y Q, Qu J J, Hu M. Formation of sand surface crust and micro-environmental changes. *J. Appl. Ecol.*, 1993, **4**(4):393~398.

[4] Zhao X L. Problems of revegetation on sand dunes in Shapotou area. In: Shapotou Desert Experimental Research Station, Chinese Academy of Sciences, eds. *Study on shifting sand control in Shapotou region of the Tengger Desert* (2). Yinchuan: Ningxia People's Publishing House, 1991. 27~57.

[5] Duan Z H, Wang G, Xiao H L, *et al.* Abiotic soil crust formation on dunes in an extremely arid environment: a 43-year sequential study. *Arid Land Res. Manage.*, 2003, **17**:43~54.

[6] Su Y Z, Zhao H L. Fractal features of soil particle size distribution in the desertification process of the farmland in Horqin Sandy Land. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(1):71~74.

[7] Chen W R. Water balance in the revegetated area along the railway in Shapotou area. In: Shapotou Desert Experimental Research Station, Chinese Academy of Sciences, eds. *Study on shifting sand control in Shapotou region of the Tengger Desert* (2). Yinchuan: Ningxia People's Publishing House, 1991. 66~75.

[8] Berndtsson R, Nodomi K, Yasuda H, *et al.* Soil water and temperature patterns in an arid desert dune sand. *J. Hydrol.*, 1996, **185**:221~240.

[9] Xu G H ed. *Handbook of soil microbe analysis*. Beijing: Chinese Agricultural Press, 1986.

参考文献:

[1] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征. 科学通报, 1993, **38**(20):1896~1899.

[3] 凌裕泉, 屈建军, 胡玫. 沙面结皮形成与微环境变化. 应用生态学报, 1993, **4**(4):393~398.

[4] 赵兴梁. 沙坡头地区植物固沙问题的探讨. 见: 中国科学院沙坡头沙漠试验研究站编著. 腾格里沙漠沙坡头地区流沙治理研究(二). 银川: 宁夏人民出版社, 1991. 27~57.

[6] 苏永中, 赵哈林. 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征. 生态学报, 2004, **24**(1):71~74.

[7] 陈文瑞. 沙坡头地段铁路两侧 29 年人工植被区的水量平衡. 见: 中国科学院沙坡头沙漠试验研究站编著. 腾格里沙漠沙坡头地区流沙治理研究(二). 银川: 宁夏人民出版社, 1991. 66~75.

[9] 许光辉著. 土壤微生物分析手册. 北京: 中国农业出版社, 1986.