

# 退化沙质草地自然恢复过程中 土壤—植物系统的变化特征

张 华<sup>1</sup>, 伏乾科<sup>2</sup>, 李锋瑞<sup>3</sup>, Yasuhito Shirato<sup>4</sup>

(1. 辽宁师范大学 城市与环境学院, 辽宁 大连 116029; 2. 辽宁师范大学, 辽宁 大连 116029;

3. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000

4. National Institute for Agro-Environmental Sciences, Tsukuba, Ibaraki, Japan)

**摘 要:** 研究了科尔沁沙地封育 5 a 后退化沙质草地自然恢复过程中土壤—植物系统的变化特征, 同时分析了土壤性状与植物特征之间的相互影响程度。(1) 从流动沙地恢复到固定沙地, 沙质草地植物群落的物种多样性、植被盖度、地下根量和地表枯落物残留量均趋于增大。U 多样性测度值表明, 在半流动沙地恢复到半固定沙地阶段, 植物种周转速率大, 群落结构变化明显。(2) 在退化沙质草地的自然恢复过程中, 表层土壤的结构性能明显改善, 土壤养分的有效性相应提高。(3) 相关分析显示, 沙质草地表层土壤的理化性状与植物特征值之间存有密切的相关性 ( $R^2 = 0.33 \sim 0.84$ ,  $P < 0.01$ ,  $n = 20$ ), 表明退化沙质草地的恢复过程实质上是土壤—植物系统协同演变的过程, 在该过程中, 植物多样性的关键恢复期滞后于土壤环境的关键恢复期。

**关键词:** 科尔沁沙地; 退化沙质草地; 自然恢复; 土壤—植物系统; 土壤理化性质; 植物群落特征

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2003)06-0001-06

中图分类号: S812-05

## Features of Soil-Plant System Changes in Different Restorative Stages of Degraded Sandy Grasslands

ZHANG Hua<sup>1</sup>, FU Qian-ke<sup>2</sup>, LI Feng-rui<sup>3</sup>, Yasuhito Shirato<sup>4</sup>

(1. College of City and Environment, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning Province, China;

2. Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning Province, China; 3. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu Province, China; 4. National Institute for Agro-Environmental Sciences, Tsukuba, Ibaraki, Japan)

**Abstract** The variation features of soil-plant system in the natural restoration processes of degraded sandy grassland in the Horqin sandy land after 5 years of exclusive grazing by animals are studied. In the meantime, the interacting degree between soil properties and plant characteristics are analyzed. The results show that (1) As moving sand was turned into fixed sandy land, the species diversity in plant communities, vegetation cover, underground root volume and surface litter residue tended to increase. The measured values of  $\beta$  diversity demonstrate that as semifluid sand was restored to semifixed sand, The turnover rate of plants increased and the changes in plant community structure became evident. (2) In the natural restoration processes of degraded sandy grassland, the structure of surface soil layer significantly improved and the availability of soil nutrients correspondingly enhanced. (3) Correlation analyses show that there is a close correlation between topsoil physiochemical properties and plant characteristic values of the sandy grassland. This shows that the restoration processes of degraded sandy grassland are virtually a synergistically evolutionary processes of soil-plant system, the key restoration phase of plant diversity lags behind the key restoration phase of soil environment in the processes.

**Keyword** Horqin sandy land; degraded sandy grassland; natural restoration; soil-plant system; soil physiochemical properties; plant community features

收稿日期: 2003-06-15

基金项目: 辽宁师范大学博士启动基金项目; 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所知识创新工程项目 (210097)

作者简介: 张华 (1965-), 女 (汉族), 山东省东明县人, 理学博士, 现主要从事旱区恢复生态学和植物生态学研究。电话 (0411) 4259059,

E-mail: zhanghua0323@ sina.com

草地沙漠化指草地生态系统在不合理的人为因素干扰下,在其背离顶级的逆向演替过程中,表现出的植物生产力下降、土壤性状恶化等现象<sup>[1]</sup>,其实质是草地土壤—植物系统的退化过程,而土壤—植物系统乃是维持草地生产力和草地生态系统结构、功能的载体和基础。诸多研究揭示,过度放牧和盲目垦殖是草地沙漠化的主要人为因素<sup>[2-3]</sup>,因此引起的沙漠化草地面积占全国沙漠化土地总面积的 29.4%<sup>[4]</sup>。

过牧、开垦不仅破坏了沙质草地的土壤原始结构、生草层和地表结皮,并且使草地群落植物组成趋于简单,植被盖度和草层高度大幅度下降,裸地率增加,风蚀作用增强。因此,禁止盲目地草地开垦,对草地实行禁牧封育,是促进退化沙质草地生态系统自然修复的行之有效的措施。科尔沁沙地地处我国半干旱农牧交错带,由于距离海洋较近,受湿润气流的影响,多年平均降水量可达 300—500 mm,该降水条件为封育草措施的成功实施提供了保证。本文以科尔沁沙地封育 5 a,正处在不同恢复阶段的退化沙质草地为对象,采用空间序列代替时间序列的研究方法,分别以流动沙地、半流动沙地、半固定沙地和固定沙地表征沙质草地的 4 个恢复阶段,即严重沙漠化阶段、强烈发展中沙漠化阶段、正在发展中沙漠化阶段和潜在沙漠化阶段<sup>[4]</sup>,系统探讨了退化沙质草地整个生态恢复过程中土壤性状及植被特征的变化动态,同时分析了土壤与植物之间的相互影响程度,旨在为退化沙质草地生态系统自然恢复、重建及管理提供理论依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区自然概况

研究区位于科尔沁沙地中南部的奈曼旗境内。该区属温带半干旱大陆性季风气候,区内年平均太阳总辐射 5 200 MJ/m<sup>2</sup>,年平均日照时数 2 946 h,年平均气温 6.3℃,年平均降水量 366 mm,年平均蒸发量 1 935 mm,年平均风速 3.5 m/s。

研究区地带性土壤为沙质栗钙土,但因长期的风蚀作用已退化为风沙土。区内沙丘、缓起伏沙地、丘间低地和冲积平原等地貌类型镶嵌分布。隐域型沙地植被中的乔木层基本消失,草本层也急剧退化<sup>[5]</sup>。沙地草场植被主要由小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla*)、黄柳 (*Salix gordejewii*)、差巴嘎蒿 (*Artemisia halodendron*)、冷蒿 (*Artemisia frigida*)、扁蓿豆 (*Melissitus ruthenicus*)、糙隐子草 (*Cleistogenes squarrosa*)、狗尾草 (*Setaria viridis*)、猪毛菜 (*Salsola collina*) 和沙米 (*Agriophyllum squarrosum*) 等组成。

### 1.2 研究方法

在封育 5 a 的缓起伏沙质草地上,选择具有典型代表性的流动沙地、半流动沙地、半固定沙地和固定沙地来表征退化沙质草地的 4 个恢复阶段,并分别在流动、半流动、半固定和固定沙地上设置固定观测点。

1.2.1 植物群落特征观测 于 2001 年 8 月下旬即植物生物量达最大时期,采用样方法 (1 m×1 m) 分别测定每个固定观测点的植物种组成、总盖度及各植物种的分盖度、株高、密度,每个样点 5—10 个重复;同时采用样圆法 ( $H=36.5\text{ cm}$ )<sup>[6]</sup> 测定各植物种的频度,每个样点 35 个重复;采用收获法测定地上生物量 (烘箱内 75℃~80℃ 温度下烘干 24 h 后的重量,每个样点 5 个重复),采用土钻法<sup>[7]</sup> 测定地下 0—30 cm 层内的根量 (烘箱内 80℃ 温度下烘干 24 h 后的重量,每个样点 5 个重复)。于翌年风季过后,仍然采用样方收获法测定每个样点残留的枯落物重量 (风干重,样方面积 1 m×1 m,每个样点 5 个重复)。

1.2.2 土壤样品的采集与分析 8 月份,采用土钻法取样 (3 次重复的混合样) 测定每个固定观测点表层 (0—20 cm) 土壤的理化性质。土壤粒度组成采用筛分法测定,土壤全 C 采用干烧法测定,全 N 采用凯式定氮法测定,速效 P 采用 Bray 法测定,EC 采用电导仪测定。

### 1.3 数据分析

采用物种丰富度、T 多样性测度值 Shannon—Wiener 指数 ( $H$ )<sup>[8]</sup> 分析退化沙质草地不同恢复阶段植物群落内的物种多样性;采用 U 多样性二元属性数据测度值 Jaccard 指数 ( $CJ$ )<sup>[9]</sup> 分析群落的物种多样性沿生境梯度 (即恢复梯度) 变化的速率。

$$H = - \sum P_i \ln P_i \quad (i = 1, 2, \dots, s) \quad (1)$$

$$CJ = j / (a + b - j) \quad (2)$$

$$U_CJ = 1 - CJ \quad (3)$$

式中:  $P_i$ ——各个植物种的 4 度重要值 ( $I$ );  $j$ ——相邻生境群落 A 和群落 B 的共有种数;  $a, b$ ——群落 A 和群落 B 的物种数。

$$I = (D_i / D + C_i / C + F_i / F + B_i / B) / 4 \quad (4)$$

式中:  $I$ ——能够反映群落中物种的优势度;  $D_i, C_i, F_i, B_i$ ——每一观测点调查样方中第  $i$  个种的平均密度、平均盖度、出现频率和平均生物量;  $D, C, F, B$ ——每一观测点调查样方中的总平均密度、总平均盖度、总样圆数和总平均生物量。

不同恢复阶段沙质草地植物群落特征值之间的差异用单因素方差分析 (ANOVA) 和 LSD 法进行显著性检验;退化沙质草地恢复过程中土壤性状与植物

群落特征值之间的相互作用关系采用 Pearson 相关系数表示。具体统计分析均采用 SPSS10.0 for windows 软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 退化沙质草地不同恢复阶段植物系统变化特征

2.1.1 群落结构特征 表 1 为退化沙质草地不同恢复阶段植物群落的种类组成、生活型及重要值。可以看出,随着沙漠化的逆转,草地群落植物种组成数量逐渐增加,同时对群落生境的优劣具有指示作用的一些种成为不同恢复阶段的优势种。

在流动沙地上,固沙先锋 1a 生草本植物沙米率先定居并占据优势,随着流沙的固定和环境条件的改善,群落中又有狗尾草和虫实 (*Agriophyllum squarrosum*) 等广布种入侵定居并成为群落的伴生种。在半流动沙地上,耐沙埋的半灌木差巴嘎蒿成为

群落的优势种,伴生种仍为虫实、狗尾草和猪毛菜等,沙米逐渐衰退。在半固定沙地上,差巴嘎蒿的长势有所衰退,但仍和虫实相伴生,构成了该立地条件中群落的优势种,同时群落内已有灌木小叶锦鸡儿、半灌木山竹岩黄耆 (*Hedysarum fruticosum*)、多年生草本植物达乌里胡枝子 (*Lespedeza davurica*)、扁蓿豆 (*Melissitus ruthenicus*) 和糙隐子草及 1a 生草本植物画眉草 (*Eragrostis pilosa*)、三芒草定居。在固定沙地上,差巴嘎蒿基本衰退,达乌里胡枝子、画眉草和狗尾草成为群落的优势种,糙隐子草、三芒草、山竹岩黄耆和 2a 年生草本植物牛儿苗 (*Erodium stephanianum*) 等成为群落的伴生种,同时又有多年生根茎型草本植物赖草 (*Leymus secalinus*)、多年生草本植物米口袋 (*Gueldenstaedtia stenophylla*) 和 1a 生草本植物虎尾草 (*Chloris virgata*)、黄蒿 (*Artemisia scoparia*) 等定居。

表 1 退化沙质草地不同恢复阶段植被种类组成及重要值

植被种类	生活型	流动沙地	半流动沙地	半固定沙地	固定沙地
芦苇 ( <i>Phragmites australis</i> )	G	0.0942	—	—	—
糙隐子草 ( <i>Cleistogenes squarrosa</i> )	H	—	—	0.0074	0.1544
画眉草 ( <i>Eragrostis pilosa</i> )	T <sub>h</sub>	—	—	0.0156	0.2356
赖草 ( <i>Leymus secalinus</i> )	G	—	—	—	0.0631
虎尾草 ( <i>Chloris virgata</i> )	T <sub>h</sub>	—	—	—	0.0631
三芒草 ( <i>Aristida adscensionis</i> )	T <sub>h</sub>	—	—	0.0990	0.1639
狗尾草 ( <i>Setaria viridis</i> )	T <sub>h</sub>	0.2836	0.3068	0.2074	0.4052
马唐 ( <i>Digitaria ciliaris</i> )	T <sub>h</sub>	0.0493	0.0513	0.1139	0.1512
猪毛菜 ( <i>Salsola collina</i> )	T <sub>h</sub>	0.0388	0.1451	0.1546	0.0638
沙米 ( <i>Agriophyllum squarrosum</i> )	T <sub>h</sub>	0.7998	0.1244	—	—
虫实 ( <i>Corispermum macrocarpum</i> )	T <sub>h</sub>	0.2038	0.3738	0.5456	0.1772
雾冰藜 ( <i>Bassia dasyphylla</i> )	T <sub>h</sub>	0.0618	—	0.0816	0.0341
灰绿藜 ( <i>Chenopodium glaucum</i> )	T <sub>h</sub>	—	—	—	0.0075
绿藜 ( <i>Kochia scoparia</i> )	T <sub>h</sub>	—	0.0108	—	0.0363
差巴嘎蒿 ( <i>Artemisia halodendron</i> )	G <sub>h</sub>	—	0.5402	0.4839	0.0908
黄蒿 ( <i>Artemisia scoparia</i> )	T <sub>h</sub>	—	—	—	0.0479
沙蓝刺头 ( <i>Echinops gmelini</i> )	T <sub>h</sub>	—	—	0.0425	—
地梢瓜 ( <i>Cynanchum thesioides</i> )	H	0.0601	0.0412	0.0243	—
扁蓿豆 ( <i>Melissitus ruthenicus</i> )	H	—	—	0.0080	—
小叶锦鸡儿 ( <i>Caragana microphylla</i> )	P <sub>h</sub>	—	—	0.0161	—
米口袋 ( <i>Gueldenstaedtia stenophylla</i> )	H	—	—	—	0.0086
山竹岩黄耆 ( <i>Hedysarum fruticosum</i> )	G <sub>h</sub>	—	—	0.0707	0.1701
达乌里胡枝子 ( <i>Lespedeza davurica</i> )	H	—	—	0.0508	0.2885
牛儿苗 ( <i>Erodium stephanianum</i> )	T <sub>h</sub>	—	—	—	0.1375
地锦 ( <i>Euphorbia humifusa</i> )	T <sub>h</sub>	—	—	0.1792	0.1086
防风 ( <i>Saposhnikovia divaricata</i> )	H	—	—	0.0500	0.0104

注: G——地下芽植物; T<sub>h</sub>——1a 生植物; H——地面芽植物; P<sub>h</sub>——高位芽植物; G<sub>h</sub>——地上芽植物。

2.1.2 群落物种多样性特征 从表 2 可见,沙质草地从严重沙漠化阶段逆转到潜在沙漠化阶段,植物种由 8 种逐渐增加到 20 种, $T$ 多样性测度值 Shannon-Wiener 指数由 1.03 逐渐增加到 2.73 其中流动沙地和半流动沙地的植物种数虽然相同,但 Shannon-Wiener 指数差异很显著,表明半流动沙地的种间均匀度显著高于流动沙地;另外,半固定沙地的植物种数和 Shannon-Wiener 指数明显高于半流动沙地,而固定沙地的植物种数和 Shannon-Wiener 指数略高于半固定沙地

表 2 退化沙质草地不同恢复阶段植被物种多样性的变化

恢复阶段	种丰富度	$H$	$U_{CJ}$
流动沙地	8	1.03±0.66 a	0.40
半流动沙地	8	1.6±0.21 b	0.68
半固定沙地	17	2.64±0.24 c	0.46
固定沙地	20	2.73±0.18 dc	

注:① 数据有不同字母者为差异显著;②  $H$  含意同公式 (1)

$U$ 多样性是指沿着某一环境梯度物种替代的程度,常称之为物种周转速率 (species turnover rate) 或物种替代速率 (species replacement rate) 和生物变化速率 (rate of biotic change)。 $U$ 多样性可以反映生境变化的程度或指示生境被物种分隔的程度,可用来比较不同地段上的生境多样性,可与  $T$ 多样性一起构成群落的总体多样性或一定地段的生物异质性<sup>[10-11]</sup>。由此, $U$ 多样性的测定可以与时空尺度相结合,有益于认识生物群落的时空结构和功能过程<sup>[11-12]</sup>。

表 2 数据表明, $U$ 多样性的二元属性数据测度值在半流动沙地与半固定沙地间相对较高,表明退化沙

质草地植被在整个恢复演变过程中,空间序列上在半流动沙地恢复到半固定沙地阶段,物种的周转速率较高,物种组成的差异性较大,群落结构变化明显。虽然半流动沙地和半固定沙地的群落都有半灌木和草本 2 个层片,但半固定沙地中已入侵了较多的 1 a 生和多年生草本植物,草本逐渐成为优势层片,群落结构较为复杂。

2.1.3 植被的盖度、高度、生物量及枯落物量的变化特征 从表 3 看,不同恢复阶段沙质草地植物群落的盖度、高度、生物量及枯落物量有着一定的差异。在退化沙质草地的恢复过程中,植物群落的覆盖度逐渐增大,地下根量和风季过后地表残留的枯枝落叶量也依次增加。其中从流动沙地到半流动沙地,植被盖度、根量和植物有机残留量的增幅较大,分别为 46%, 370% 和 185%,从半流动沙地到半固定沙地,3 个特征值的增幅分别为 17%, 63% 和 20%,从半固定沙地到固定沙地,3 个特征值的增幅较小,分别为 16%, 27% 和 16%。植被的高度和地上生物量则受群落建群种或优势种的个体生态学特性的影响更多一些,比如半流动沙地上的建群种和半固定沙地上的优势种差巴嘎蒿是一种沙地先锋植物,具有喜适度沙埋和能形成灌丛的特性。当一定程度的沙漠化导致沙质草地群落内草本植物种类急剧减少,密度和盖度急剧下降时,却有利于差巴嘎蒿的生长并形成较大的灌丛。由此,差巴嘎蒿对群落的高度和地上生物量的贡献很大,使得半流动沙地上的植物高度和地上生物量都高于其它恢复阶段,也导致半固定沙地的生物量高于固定沙地

表 3 不同恢复阶段草地植被的盖度、高度、生物量及枯落物量

植被特征	流动沙地	半流动沙地	半固定沙地	固定沙地
盖度 /%	35.4±2.4a	51.6±3.9bc	60.6±9.3bd	70.1±11.0d
高度 /cm	18.8±2.8a	26.4±5.4b	13.8±2.3c	18.7±1.3a
地上生物量 /( $g \cdot m^{-2}$ )	68.9±12.6a	630.8±207.2b	287.2±177.0c	175.8±32.5ac
$\theta$ -30 cm 土层根量 /( $g \cdot m^{-2}$ )	42.8±16.9a	201.2±83.2ab	328.4±259.3bc	416.6±113.8c
地表枯落物量 /( $g \cdot m^{-2}$ )	45.3±33.2a	129.2±39.3b	154.5±22.0bc	178.4±14.9bd

注:表中同一行数据有不同字母者为差异显著,  $P < 0.05$

## 2.2 退化沙质草地恢复过程中土壤系统的变化特征

2.2.1 土壤粒度组成的变化特征 粒度组成是土壤结构和生产力的重要方面<sup>[13]</sup>。图 1 为各观测点 0-20 cm 层土壤的粒度组成分析数据。可以看出,从流动沙地恢复到固定沙地,退化沙质草地表层土壤中粒径 1.0-0.25 mm 的粗颗粒含量呈下降趋势,粒径 0.25-0.05 mm 的细颗粒含量则呈上升趋势,粒径 < 0.05 mm 的粉、黏粒含量亦呈上升趋势。从流动沙地恢复

到半流动沙地、从半流动沙地恢复到半固定沙地、从半固定沙地恢复到固定沙地 3 个阶段,表层土壤中粗颗粒含量的降幅分别为 16%, 38% 和 17%,细颗粒含量的增幅分别为 5%, 9% 和 2%,粉、黏粒含量的增幅较大,分别为 91%, 73% 和 31%。由此可见,在退化沙质草地的恢复过程中,表层土壤中粉沙和黏粒的含量呈明显累积态势,这对于改善风沙土壤的结构和质地,有效增加土壤的养分含量都具有重要的作用。

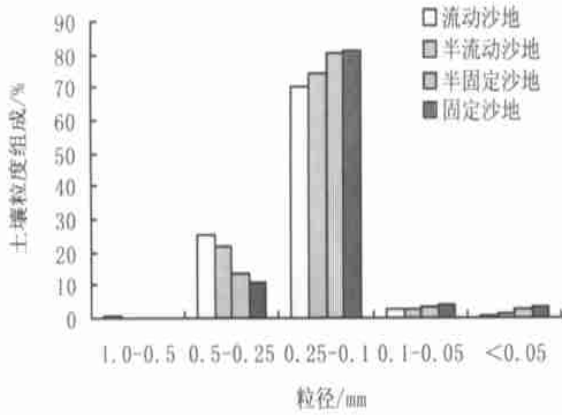


图 1 退化沙质草地不同恢复阶段 0—20 cm 层土壤粒度组成

### 2.2.2 土壤化学性状的变化特征

表 4 为各观测点 0—20 cm 土层土壤的化学特性分析结果。从表中数据看,从流动沙地恢复到固定沙地,表层土壤中的速效 P 含量有所增加,全 C 全 N 含量明显增加,土壤电导率 EC 亦有所提高。从流动沙地恢复到半流动沙地、从半流动沙地恢复到半固定沙地、从半固定沙地恢复到固定沙地 3 个阶段,表层土壤中速效 P 含量的增幅分别为 14%、23% 和 7%,全 C 含量的增幅分别为 84%、48% 和 76%,全 N 含量的增幅分别为 100%、30% 和 69%,土壤电导率的提高率分别为 88%、13% 和 22%。

土壤养分的变化动态表明,在退化沙质草地的恢复过程中,表层土壤全 C 全 N 含量的增幅很大,尤其是从流动沙地恢复到半流动沙地的过程中,土壤全 C 全 N 含量增加得更快,土壤电导率的提高率也更大。不同恢复阶段土壤全 C 全 N 含量的变化特征

与前述的土壤粉沙、黏粒含量的变化特征基本吻合,可见,从流动沙地恢复到半流动沙地的过程是土壤结构细化、土壤肥力上升最快的时期。

表 4 退化沙质草地不同恢复阶段 0—20 cm 层土壤化学特性

项目	流动沙地	半流动沙地	半固定沙地	固定沙地
全 C %	0.044	0.081	0.120	0.211
全 N %	0.005	0.010	0.013	0.022
速效 P / (mg · kg <sup>-1</sup> )	13.20	15.09	18.49	19.72
电导率 / (m s <sup>-1</sup> · cm <sup>-1</sup> )	0.017	0.032	0.036	0.044

### 2.3 沙质草地植被特征与表层土壤性状的相关关系

在退化沙质草地的自然恢复过程当中,群落的物种多样性指数、覆盖度、根量及地表枯落物量分别与其生境中表土层的全 C 全 N 有效 P 含量以及土壤 EC 均有显著正相关关系;分别与其生境中表土层的粗颗粒含量呈显著负相关关系,与细颗粒含量和粉、黏粒含量呈显著正相关关系(表 5)。

上述结果表明,沙质草地植被与其着生的土壤基质之间的相互影响关系非常密切,其相互影响过程为:在退化沙质草地恢复的初期,沙米、差巴嘎蒿等固沙先锋植物的不断入侵、定居,增大了地表粗糙程度,改变了近地层风沙流结构,有效减轻或抑制了地表风蚀,减少了土壤细颗粒和土壤养分的流失,从而创造并维持一个良好的土壤环境,以利于其它物种的入侵;大量其它物种的入侵和定居又会产生较多的根量和残存较多的枯枝落叶量,反过来促进土壤的进一步发育和改良,从而有利于更多物种尤其是多年生植物和灌木的入侵,最终演替为种类繁多、结构复杂、食物链较长、稳定性较高的生境顶级植物群落。

表 5 植物特征值与表层土壤性状的相关系数

项目	植物特征值				土壤性状						
	盖度	H <sup>①</sup>	根量	枯落物	全 C	全 N	有效 P	土壤 EC	粗颗粒	细颗粒	粉黏粒
盖度	1.000										
H	0.79 <sup>②</sup>	1.000									
根量	0.54 <sup>①</sup>	0.574 <sup>②</sup>	1.000								
枯落物量	0.81 <sup>②</sup>	0.838 <sup>②</sup>	0.65 <sup>②</sup>	1.000							
全 C	0.83 <sup>③</sup>	0.794 <sup>②</sup>	0.57 <sup>②</sup>	0.80 <sup>②</sup>	1.000						
全 N	0.84 <sup>③</sup>	0.796 <sup>②</sup>	0.578 <sup>②</sup>	0.82 <sup>②</sup>	0.99 <sup>②</sup>	1.000					
有效 P	0.86 <sup>③</sup>	0.897 <sup>②</sup>	0.60 <sup>②</sup>	0.86 <sup>②</sup>	0.93 <sup>③</sup>	0.929 <sup>②</sup>	1.000				
土壤 EC	0.88 <sup>②</sup>	0.848 <sup>②</sup>	0.60 <sup>③</sup>	0.91 <sup>③</sup>	0.93 <sup>③</sup>	0.95 <sup>②</sup>	0.95 <sup>③</sup>	1.000			
粗颗粒	-0.85 <sup>②</sup>	-0.90 <sup>③</sup>	-0.60 <sup>③</sup>	-0.85 <sup>②</sup>	-0.91 <sup>③</sup>	-0.916 <sup>②</sup>	-0.99 <sup>②</sup>	-0.94 <sup>②</sup>	1.000		
细颗粒	0.85 <sup>②</sup>	0.902 <sup>②</sup>	0.598 <sup>②</sup>	0.85 <sup>②</sup>	0.90 <sup>②</sup>	0.905 <sup>②</sup>	0.99 <sup>②</sup>	0.94 <sup>②</sup>	-1.00 <sup>②</sup>	1.000	
粉黏粒	0.86 <sup>②</sup>	0.878 <sup>②</sup>	0.60 <sup>②</sup>	0.85 <sup>②</sup>	0.96 <sup>②</sup>	0.966 <sup>②</sup>	0.99 <sup>②</sup>	0.96 <sup>②</sup>	-0.98 <sup>②</sup>	0.984 <sup>②</sup>	1.000

注:① H 为 α 多样性测度值 Shannon - Wiener 指数;② 代表 P < 0.05;③ 代表 P < 0.01

### 3 结 论

(1) 研究区植物生物量达最大时期时,植物群落的层次结构、物种多样性以及生物量都处于相对稳定状态,能够综合反映其生境的优劣程度。在退化沙质草地从严重沙漠化阶段恢复到潜在沙漠化阶段的过程中,植物种逐渐增多,种间均匀度也不断提高,植物群落结构从简单逐渐变为复杂,其中从流动沙地恢复到半流动沙地阶段,植被盖度、根量和植物有机残留量的增幅较大,而从半流动沙地恢复到半固定沙地阶段,物种多样性恢复最快。在退化沙质草地植被逐渐恢复的同时,土壤环境也发生了良性演化,表现为表层土壤中的粗沙粒含量呈下降趋势,细沙粒及粉、黏粒含量则呈上升趋势,表层土壤中的速效 P 含量有所增加,全 C 全 N 含量明显增加。尤其是从流动沙地恢复到半流动沙地阶段,表层土壤中粉沙、黏粒含量的增幅较为显著,全 C 和全 N 含量的增幅也最大,可见,这一过程是退化沙质草地整个恢复过程中土壤细化最显著、土壤肥力上升最快的时期。

(2) 在退化沙质草地的自然恢复过程中,其植物物种多样性指数、盖度、地下生物量和枯落物量与土壤基质中的养分含量及粒径组成之间存有密切的相关性( $R^2$  值为 0.33~0.84),基本是随土壤粗颗粒含量的减少、细微颗粒含量和土壤养分含量的增加,植物多样性指数提高,植被盖度增大,地表枯落物量和地下生物量增加。因此,沙化草地的自然生态恢复过程实质上是沙质草地土壤—植物系统协同演化的过程,在这一过程中,从流动沙地到半流动沙地阶段是土壤环境的关键恢复期和植被盖度、根量和植物有机残留量的显著增大期,而从半流动沙地到半固定沙地阶段是植被物种多样性增加最快的时期。可见,植被多样性的关键恢复期滞后于土壤环境的关键恢复期。

(3) 科尔沁沙区退化沙质草地封育 5 a 后的植物多样性指数测度值仍较低,这说明在较短的自然恢复期内,草地植被仍呈现出群落结构相对简单、群落稳定性相对较低的态势,对干扰反应的敏感性仍然很

强。一般而言,在降水条件较好的半干旱沙区,采取封沙育草措施,植被完全能够自然恢复,但其演替进程较长,约需 10~15 a 的时间<sup>[14]</sup>。由此,只有以大面积封沙育草为主,同时结合人工种草的辅助措施,才能加快半干旱沙区沙化草地植被的恢复进程。

#### [参 考 文 献]

- [1] 任海,彭少麟.恢复生态学导论[M].北京:科学出版社,2002.36-40.
- [2] 赵哈林,根本正之,等.内蒙古科尔沁沙地放牧草地的沙漠化机理研究[J].中国草地,1997(3):15-23.
- [3] 乌兰图雅,包玉海,香宝.科尔沁地区的垦殖与荒漠化[J].中国草地,1998(6):65-69.
- [4] 朱震达,刘恕.中国北方地区沙漠化过程及其治理区划[M].北京:中国林业出版社,1981.1-56.
- [5] 刘新民,赵哈林.科尔沁沙地生态环境综合整治研究[M].兰州:甘肃科学技术出版社,1993.12-26.
- [6] 沈禹颖,阎顺国,朱兴运.河西走廊盐化草甸主要植物群落分布特点及其土壤环境特征[J].植物生态学报,1994,18(1):95-102.
- [7] 赵爱芬,赵学勇,常学礼.奈曼旗沙丘植被根系特征研究[J].中国沙漠,1997,17(增刊1):41-45.
- [8] 常学礼,邬建国.科尔沁沙地沙漠化过程中的物种多样性[J].应用生态学报,1997,8(2):151-156.
- [9] Whittaker R H. Evolution and measurement of species diversity[J]. Taxon, 1972, 21: 213-251.
- [10] Wilson M V, Schmida A. Measuring beta diversity with presence-absence data[J]. Journal Ecology, 1984, 72: 1055-1064.
- [11] 马克平,刘灿然,刘玉明.生物群落多样性的测度方法 II.  $U$ 多样性的测度方法[J].生物多样性,1995,3(1):38-43.
- [12] 李新荣,张景光,刘立超,等.我国干旱沙漠化地区人工植被与环境演变过程中植物多样性的研究[J].植物生态学报,2000,24(3):257-261.
- [13] 赵文智,刘志民,程国栋.土地沙质荒漠化过程的土壤分形特征[J].土壤学报,2002,39(6):877-881.
- [14] 刘新民,赵哈林,赵爱芬.科尔沁沙地风沙环境与植被[M].北京:科学出版社,1996.58-60.