

赵啸龙, 谢玉鸿, 马旭君, 等. 科尔沁沙质草地不同恢复年限草本层群落结构及其与土壤理化性质的关系[J]. 中国沙漠, 2022, 42(2): 134–141.

科尔沁沙质草地不同恢复年限草本层群落结构及其与土壤理化性质的关系

赵啸龙¹, 谢玉鸿¹, 马旭君², 王少昆²

(1. 兰州大学 草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院 奈曼沙漠化研究站/ 乌拉特荒漠草原研究站/ 甘肃省寒区旱区逆境生理与生态重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 草本植物在沙地植被恢复过程中具有重要作用, 研究自然恢复沙质草地草本层植物群落组成变化规律及其与土壤因子之间的关系, 对植被与土壤恢复具有重要的意义。本研究对科尔沁严重退化沙地封育12、17年和20年的自然恢复沙质草地植物组成和土壤理化性质进行研究, 同时分析了植物组成与土壤因子的相关关系。结果表明: 随着恢复年限的增加, 土壤有机质、全氮、速效氮、速效钾和缓效钾含量显著升高, 群落物种丰富度逐渐增加, 禾本科植物所占比例升高, 菊科和藜科植物比例降低; 一年生和二年生植物占比下降, 多年生植物占比上升; 草本层植物高度、盖度与地上生物量显著增加, 物种丰富度、优势度和多样性指数分别增加30.16%、10.86%和21.81%; 沙质草地植被恢复过程中植物群落特征主要受土壤含水量(贡献率为30.77%)和土壤速效养分(速效氮、速效磷和速效钾的贡献率分别为16.67%、13.74%和7.69%)的影响, 说明土壤含水量和土壤速效养分是影响科尔沁沙质草地退化植被恢复的主要影响因素。

关键词: 科尔沁沙地; 沙质草地; 群落结构; 物种多样性; 土壤养分

文章编号: 1000-694X(2022)02-134-08

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00111

中图分类号: Q948.11

文献标志码: A

0 引言

科尔沁沙地处于中国北方典型的农牧交错带, 由于过去几十年不合理的农、工、矿、牧活动及全球气候变化, 科尔沁沙地原始的温带疏林草原植被遭到破坏, 草地严重退化^[1-2]。近年来随着禁牧和禁伐等措施的实施, 科尔沁沙地的植被得到恢复, 群落物种多样性逐步增加, 沙漠化土地治理已经取得一定成效, 出现整体逆转的趋势^[3-6]。研究科尔沁沙地自然恢复过程中植物群落变化特征, 对沙质草地退化生态系统恢复、草地生产力提高和物种多样性保护具有重要意义^[7-10]。在退化草地恢复过程中, 植物群落的演替与土壤养分密切相关, 植被恢复对土壤具有改良效应, 表现为土壤有机质含量、土壤种子库和土壤微生物量和多样性会随植被丰富度和多样性提升而增加^[11-15]。气候与土地利用变化等因

子通过影响草本层结构从而影响群落物种多样性^[9]。因此, 研究沙质草地恢复过程中草本层植物变化对于阐明草地生态系统演变规律和恢复趋势预测具有重要的理论和现实意义。本文采用“时空转换”的方法^[16], 即通过空间梯度变化反演时间序列变化的方法, 研究不同恢复年限退化沙质草地中草本层植物群落组成和多样性特征及其与土壤理化性质之间的关系, 为定量评估沙地退化植被的恢复与重建提供理论依据。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区通辽市奈曼旗境内的中国科学院奈曼沙漠化研究站(42°41'N、120°55'E,

收稿日期: 2021-04-17; 改回日期: 2021-08-27

资助项目: 国家自然科学基金项目(41771117); 中国科学院“西部之光”项目(Y829921001)

作者简介: 赵啸龙(2000—), 男, 内蒙古五原人, 本科生, 专业为草地生态学。E-mail: zhaoxl2018@lzu.edu.cn

通信作者: 王少昆(E-mail: wangsk@lzb.ac.cn)

海拔358 m),处于科尔沁沙地腹地,属于温带半干旱大陆性季风气候,多年平均气温为6.4℃,≥10℃的积温大于3 000℃,无霜期约150 d,年降水量366 mm。土壤类型为风沙土、沙质栗钙土和草甸土。植被组成主要有沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、大果虫实(*Corispermum macrocarpum*)、差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、黄蒿(*Artemisia scoparia*)、砂蓝刺头(*Echinops gmelini*)和糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)等^[17-18]。

1.2 样地选择和采样设计

取样来自中国科学院奈曼沙漠化研究站不同恢复年限的沙质草地,调查取样时间为2017年8月。分别选择恢复年限为12、17、20年的沙质草地为研究对象,在每个恢复年限的样地中分别设置10个面积为1 m×1 m的样方,调查每个样方中的草本层植物组成,包括植物种类以及每种植物的盖度和高度,统计样方内各种植物的科属与生活型,并用收获法测定草本植物地上生物量。在收获生物量后的每个样方内,用直径为4 cm的土钻钻取0—5、5—10、0—10、10—20 cm的土样各3份,按常规方法分析0—10、10—20 cm土样的土壤有机质、全氮、速效氮、速效磷、速效钾和缓效钾,测定0—5、5—10 cm土样的土壤含水量、pH值和微生物生物量碳,土壤理化性质的测定方法见《土壤农化分析》^[19-20]。

1.3 数据分析

基于植物群落的物种数、高度、盖度、生物量等计算草本层草本植物重要值、群落种属结构和群落多样性指数。

重要值(important value, IV)

$$IV = \frac{RH + RC + RB}{3} \quad (1)$$

式中:RH为植物种的相对高度;RC为相对盖度;RB为相对生物量

Patrick 丰富度指数(R):

$$R = S \quad (2)$$

Shannon-Wiener 多样性指数(H):

$$H = -\sum P_i \ln P_i \quad (3)$$

Pielou 均匀度指数:

$$J = \frac{H}{\ln S} \quad (4)$$

式中:S为每个样方的物种总数; P_i 为第*i*个物种的

相对重要值。

基本数据分析和绘图采用Microsoft Excel和Origin 8.0软件,差异性分析和逐步回归分析采用SPSS 20软件,显著性差异采用One-way ANOVA和LSD检验, $P < 0.05$ 为显著水平,数值以平均值±标准差的形式表示。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

土壤有机质、全氮、速效氮、速效钾和缓效钾含量均随着沙地恢复年限的增加而显著升高(表1);速效磷含量在恢复20年时显著低于恢复12年和17年;土壤pH值均显弱碱性,不同恢复年限无显著差异;土壤含水量表现出17年>20年>12年的变化趋势,17年的土壤含水量显著高于20年和12年;土壤微生物生物量碳在3个恢复阶段差异不显著。在0—10 cm土壤深度,从恢复12年到恢复20年,土壤有机质、全氮、速效氮、速效钾和缓效钾含量分别增加了10.63、20.25、2.46、2.59、1.36倍;在10—20 cm土壤深度,各土壤养分含量分别增加了6.50、6.97、2.31、0.71、0.98倍(图1)。

2.2 植物科属分布及物种重要值

表2—3显示,试验区恢复12年的物种数为12,藜子朴为优势种,重要值为0.447,光梗蒺藜草、沙米、狗尾草和蒺藜为亚优势种,重要值分别为0.198、0.124、0.108和0.104,薄翅猪毛菜、地锦、野糜子、大果虫实、地梢瓜、苦苣菜和狭叶苦苣菜为伴生种;恢复17年的物种数为14,薄翅猪毛菜、砂蓝刺头为优势种,重要值分别为0.247、0.219,尖头叶藜、白草、画眉草和黄蒿为亚优势种,重要值分别为0.120、0.112、0.139和0.146,地锦、二裂委陵菜、狗尾草、冠芒草、蒺藜、大果虫实、地梢瓜、雾冰藜为伴生种;恢复20年的物种数为15,黄蒿、白草和芦苇为优势种,重要值分别为0.242、0.213、0.208,尖头叶藜、二裂委陵菜、糙隐子草、牻牛儿苗为亚优势种,重要值分别为0.114、0.155、0.167和0.188,薄翅猪毛菜、地锦、狗尾草、冠芒草、蒺藜、米口袋、田旋花、野糜子为伴生种。随着恢复年限的增加,物种数逐渐增加,多年生植物占比上升38.08%,一年生与二年生植物占比下降40.34%;禾本科所占优势逐渐增加,菊科、藜科

表 1 沙地不同恢复年限土壤理化性质

Table 1 Soil physicochemical properties in different restoration stages

项目	土壤深度 /cm	恢复年限/a		
		12	17	20
土壤有机质/(g·kg ⁻¹)	0—10	0.42±0.08 ^c	1.13±0.41 ^b	4.86±0.93 ^a
	10—20	0.43±0.04 ^b	0.97±0.32 ^b	3.26±0.66 ^a
全氮/(g·kg ⁻¹)	0—10	0.024±0.02 ^b	0.065±0.04 ^b	0.517±0.1 ^a
	10—20	0.025±0.01 ^b	0.079±0.06 ^b	0.198±0.16 ^a
速效氮/(mg·kg ⁻¹)	0—10	10.71±3.05 ^b	13.14±4.26 ^b	37.02±7.32 ^a
	10—20	6.88±3.67 ^b	9.43±9.23 ^b	22.75±4.73 ^a
速效磷/(mg·kg ⁻¹)	0—10	9.83±0.24 ^a	9.97±0.18 ^a	9.55±0.17 ^b
	10—20	9.92±0.25 ^a	9.78±0.11 ^a	9.32±0.06 ^b
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	0—10	41.28±4.89 ^c	71.78±13.50 ^b	148.17±30.96 ^a
	10—20	44.83±6.66 ^b	59.44±10.76 ^{ab}	76.78±17.09 ^a
缓效钾/(mg·kg ⁻¹)	0—10	191.17±17.63 ^c	260.06±42.19 ^b	452.06±56.44 ^a
	10—20	197.22±15.7 ^b	210.22±14.84 ^b	389.78±48.68 ^a
pH值	0—5	7.93±0.03 ^a	7.82±0.15 ^a	8.34±0.08 ^a
	5—10	7.95±0.09 ^a	7.94±0.21 ^a	8.44±0.02 ^a
土壤含水量/%	0—5	0.37±0.08 ^c	1.92±0.37 ^a	0.95±0.30 ^b
	5—10	0.82±0.45 ^c	2.03±0.24 ^a	1.4±0.36 ^b
土壤微生物生物量碳/(g·kg ⁻¹)	0—5	34.73±33.21 ^a	53.88±41.73 ^a	53.41±40.23 ^a
	5—10	47.87±26.91 ^a	57.21±13.69 ^a	77.31±62.24 ^a

同一行数数值不同字母表示不同生境之间差异显著, $P<0.05$ 。

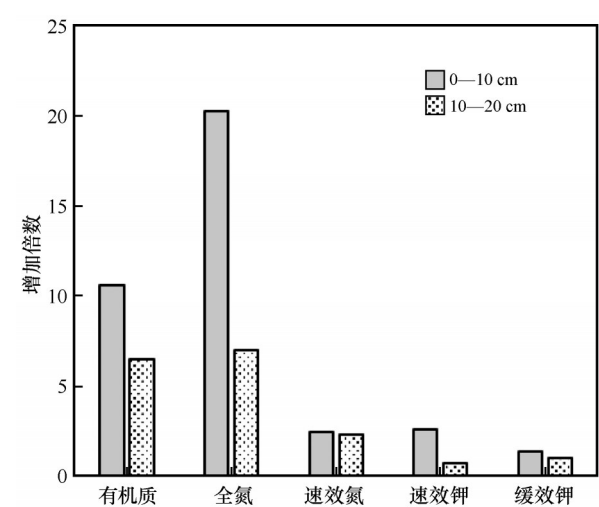


图 1 沙地恢复 12 年到恢复 20 年土壤养分增加倍数

Fig.1 The increase of soil nutrients from 12-year to 20-year sandy land restoration

植物所占比例降低(图 2)。随着退化沙地的恢复, 藜子朴、沙米等固沙先锋植物减少, 多年生禾本科植物增加; 薄翅猪毛菜、地锦、狗尾草和蒺藜在不

同恢复阶段均存在, 生态幅较广, 但均不占主导地位。

表 2 不同恢复年限下沙质草地植物科属分布

Table 2 Distribution of plant families and genera along sandy land restoration

序号	恢复 12 年		恢复 17 年		恢复 20 年	
	科名	属数	科名	属数	科名	属数
1	禾本科	3	禾本科	4	禾本科	6
2	菊科	2	苋科	2	豆科	1
3	藜科	2	菊科	2	苋科	1
4	苋科	1	藜科	2	菊科	1
5	葡萄科	1	豆科	1	藜科	1
6	蒺藜科	1	葡萄科	1	葡萄科	1
7	萝藦科	1	蒺藜科	1	蔷薇科	1
8			萝藦科	1	蒺藜科	1
9					牻牛儿苗科	1
10					旋花科	1

表 3 不同恢复年限沙质草地植物群落主要物种重要值
Table 3 Important values of main plant species along sandy land restoration

植物种	恢复年限/a		
	12	17	20
苦苣菜(<i>Sonchus oleraceus</i>)	0.088±0.030		
蓼子朴(<i>Inula salsoloides</i>)	0.447±0.100		
沙米(<i>Agriophyllum squarrosum</i>)	0.124±0.065		
狭叶苦苣菜(<i>Ixeris chinensis</i>)	0.068±0.030		
光梗蒺藜草(<i>Cenchrus incertus</i>)	0.198±0.118		
大果虫实(<i>Corispermum macrocarpum</i>)	0.050±0.026	0.075±0.054	
地梢瓜(<i>Cynanchum thesioides</i>)	0.058±0.034	0.070±0.146	
野糜子(<i>Panicum ruderales</i>)	0.044		0.085±0.028
蒺藜(<i>Tribulus terrester</i>)	0.104±0.045	0.045±0.020	0.082±0.081
狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)	0.108±0.047	0.079±0.038	0.082±0.074
地锦(<i>Euphorbia humifusa</i>)	0.023	0.024±0.007	0.020±0.005
薄翅猪毛菜(<i>Salsola pellucida</i>)	0.037	0.247±0.135	0.077±0.094
尖头叶藜(<i>Chenopodium acuminatum</i>)		0.120±0.087	0.114±0.079
黄蒿(<i>Artemisia scoparia</i>)		0.146±0.052	0.242±0.122
白草(<i>Pennisetum centrasaticum</i>)		0.112	0.213±0.029
冠芒草(<i>Eneapogon borealis</i>)		0.042	0.040±0.010
扁蓿豆(<i>Medicago ruthenica</i>)		0.162	
画眉草(<i>Eragrostis pilosa</i>)		0.139±0.114	
砂蓝刺头(<i>Echinops gmelini</i>)		0.219±0.109	
雾冰藜(<i>Bassia dasyphylla</i>)		0.065±0.042	
糙隐子草(<i>Cleistogenes squarrosa</i>)			0.167±0.059
二裂委陵菜(<i>Potentilla bifurca</i>)			0.155±0.074
芦苇(<i>Phragmites australis</i>)			0.208±0.059
牻牛儿苗(<i>Erodium stephanianum</i>)			0.188±0.111
米口袋(<i>Gueldenstaedtia stenophylla</i>)			0.019
田旋花(<i>Convolvulus arvensis</i>)			0.030±0.002

2.3 植物群落组成特征

随着恢复年限的增加,科尔沁沙地草本层植物群落叶层高度、盖度与生物量显著增加(表 4)。恢复 20 年的沙质草地中植物高度、盖度和生物量显著大于恢复 12 年和 17 年的沙质草地,恢复 20 年的植物高度、盖度和生物量分别比恢复 12 年的高 0.78、1.34、1.95 倍;草本层植物物种丰富度、优势度和多样性指数表现出恢复 20 年和 17 年显著高于恢复 12 年的沙质草地,恢复 17 年和恢复 20 年的物种多样性指数差异不显著;随着恢复年限的增加,物种均

匀度指数无显著差异。

2.4 植物群落组成与土壤理化性质的关系

采用逐步回归分析了植物群落特征与土壤理化性质的相关关系(表 5)。植物高度与土壤含水量和速效磷含量显著相关;植被盖度与速效氮 AN 显著相关;地上生物量与 pH 值和速效磷含量显著相关;丰富度指数与土壤含水量显著相关;优势度指数与土壤含水量缓效钾含量和有机质含量显著相关;多样性指数与土壤含水量、缓效钾含量、有机质

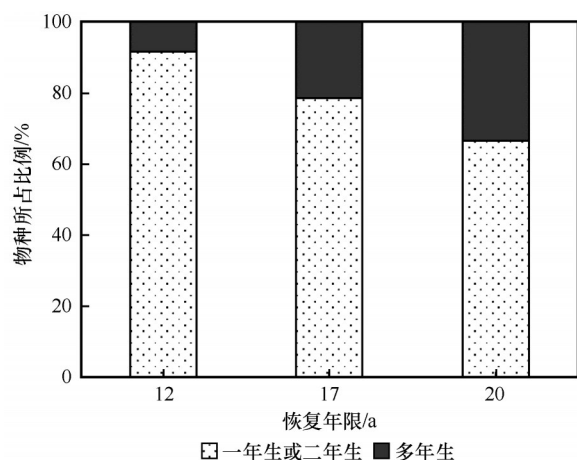


图2 不同恢复年限沙质草地植物不同生活型物种所占群落总物种百分比

Fig.2 Percentage of different life form species in total species

和速效钾含量显著相关。逐步回归方程模型表明：植物群落特征主要受土壤含水量（贡献率为30.77%）和土壤速效养分（速效氮、速效磷和速效钾的贡献率分别为16.67%、13.74%和7.69%）的影响，说明土壤含水量和土壤速效养分是影响沙地退化植被自然恢复的主要影响因素。

3 讨论

沙地生态系统中，土壤和植被是两个相互依存

的因子，植被演替影响土壤的发育，土壤养分制约植物的生长^[21]，退化沙地土壤环境的改变是植物恢复的结果，也是植被演替的动力^[22]。随着退化草地恢复年限的增加，植被盖度增加，减弱了风沙对地表的侵蚀，有利于土壤养分的积累；同时植物物种丰富度增加，进入土壤的枯枝落叶及根系残留物的量增加，大幅提高了土壤有机质含量，同时也会促进地表结皮层的形成，使土壤基稳性进一步加强，使植被演替向正向发展^[15,23-25]。另一方面，植被恢复过程中土壤微生物和土壤动物增加，从而促进了土壤中有机质的转化、分解与供应，土壤的养分利用率提高，有利于植被生长，从而促进植被的演替^[13,26]。土壤因子对沙地植物物种多样性具有直接作用，土壤养分、水盐状况和酸碱度的变化及其相互关系共同决定着科尔沁疏林草地群落物种多样性的变化^[27]；在半干旱沙地生态系统中，沙漠化的发展或逆转强烈影响着植被的动态，进而影响着有机碳的丧失和固存^[15,28]。

植物高度和盖度是反映植被对地面保护功能的重要指标^[29]，随着恢复年限的增加，沙质草地叶层高度和盖度均显著增加。群落生产力是表示草地生态系统恢复进程最直接的指标^[30]，地上生物量显著提高，物种多样性增加，生态系统逐渐趋于稳定。沙质草地退化植被恢复的初始阶段，地表植被

表4 不同恢复年限的沙质草地草本层植物群落特征变化

Table 4 Changes of vegetation community along sandy land restoration

恢复年限/a	群落特征						
	高度/cm	盖度/%	生物量/(g·m ⁻²)	丰富度指数R	优势度指数FD	多样性指数H	均匀度指数E
12	9.66±2.31 ^a	23.1±7.8 ^a	23.51±5.21 ^a	6.3±1.62 ^a	0.73±0.08 ^a	1.47±0.18 ^a	0.82±0.07 ^a
17	8.81±4.81 ^a	30.78±10.65 ^a	24.79±8.91 ^a	8.67±1.49 ^b	0.79±0.05 ^b	1.84±0.18 ^b	0.86±0.04 ^a
20	17.23±6.86 ^b	54±7.76 ^b	69.47±27.28 ^b	8.2±0.98 ^b	0.79±0.06 ^b	1.79±0.23 ^b	0.85±0.07 ^a

同一列数值不同字母表示不同生境之间差异显著， $P<0.05$ 。

表5 植物群落特征指数与土壤理化性质的逐步回归方程

Table 5 Stepwise regression models between vegetation community and soil physicochemical properties

植物群落特征	逐步回归方程	显著性
植物高度	Hight=10.85×SWC-10.45×AP+108.24	$R^2=0.845$, $F=18.786$, $P<0.001$
植被盖度	Cover=1.17×AN+8.97	$R^2=0.863$, $F=46.523$, $P<0.001$
地上生物量	Biomass=67.39×pH-33.77×AP-182.06	$R^2=0.911$, $F=36.708$, $P<0.001$
丰富度指数	$R=1.49\times SWC+5.66$	$R^2=0.590$, $F=8.524$, $P=-0.01$
优势度指数	$FD=0.11\times SWC+0.002\times SK-0.09\times SOC+0.33$	$R^2=0.806$, $F=8.655$, $P=0.002$
多样性指数	$H=0.33\times SWC+0.01\times SK-0.48\times SOC+0.01\times AK-0.29$	$R^2=0.916$, $F=17.051$, $P<0.001$

逐步回归方程中各字母缩写分别代表土壤理化性质，SWC：土壤含水量；AP：速效磷；AN：速效氮；pH：pH值；SK：缓效磷；SOC：有机质。

建植难度较大,当裸沙地表被固定后,植物种子被截存并在适宜的条件下萌发生长,植物开始由一年生或二年生物种向多年生物种演替^[4, 16]。沙质草地植被恢复过程中,植物的物种丰富度增加,禾本科优势种所占比例增加,菊科和藜科植物所占比例减少,这主要因为禾本科植物多为营养生长,储存营养物质能力较强且具有较强的萌蘖性,并使其种群快速扩张^[31]。

通过20年的自然恢复,科尔沁沙地流动沙丘被逐渐固定,植被盖度和组成发生显著变化,土壤养分含量逐渐升高,碳氮储量随之升高^[25, 32-33]。科尔沁沙地严重退化的流动沙丘植被盖度低,优势物种为沙米、狗尾草和虫实等^[9, 33-34],流动沙丘自然恢复12年,沙米的优势度降低,蓼子朴和光梗蒺藜草等一年生草本为优势种,恢复17年以后,沙米消失,一年生草本的比重逐渐降低,白草、糙隐子草和芦苇等多年生草本的优势度逐渐升高。由于风沙吹蚀,流动沙丘土壤中黏粉粒含量、有机质和氮含量较低^[32, 35-37],恢复12、17、20年后,土壤有机碳含量分别是流动沙丘的1.23、2.81、12.04倍,土壤全氮分别是流动沙丘的2.22、6.02、47.87倍。可见,科尔沁沙地退化土地自然恢复过程中,前期的植被恢复较快,在恢复12年后,植被组成已有显著变化;然而,土壤的恢复相对缓慢,直到恢复20年后,土壤碳氮等养分含量才有显著的提升。

科尔沁沙质草地植被恢复能改善土壤理化性质,提高土壤养分含量,土壤性状的改善反过来促进植物的生长和植被演替。水分是影响干旱半干旱地区植物生长发育和群落稳定性的关键限制因子^[38],土壤速效养分是植物直接获取的营养物质^[39-40],沙质草地植被恢复过程中,土壤含水量和速效养分是影响植物群落组成的主要土壤因子。因此,可以通过适当增加土壤含水量和施加速效养分的措施促进沙质草地的恢复进程。

4 结论

对于科尔沁退化沙质草地不同恢复年限(12、17、20年)草本层群落结构、土壤理化性质及其相互关系进行研究,发现:①随着沙质草地恢复年限的增加,土壤养分含量显著增加;表层土壤(0—10 cm)养分含量的增加速率高于底层土壤(10—20 cm);②退化草地恢复过程中,草本层群落物种多样性和生物量逐渐增加,禾本科植物和多年生植物所占比

例升高,菊科、藜科等植物以及一年生植物占比降低;③退化沙质草地植被恢复过程中,植物群落组成主要受土壤含水量和土壤速效养分的调控,说明土壤含水量和土壤速效养分是影响沙地退化植被恢复的主要影响因素。

致谢:感谢中国科学院奈曼沙漠化研究站的老师和学生在植被调查和土壤分析过程中提供的帮助,并为本研究提供相关共享数据(<http://nmd.cern.ac.cn/meta/metaData>)。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 赵哈林,赵学勇,张铜会.科尔沁沙地沙漠化过程及其恢复机理[M].北京:海洋出版社,2003.
- [3] 嵇萍.科尔沁沙地生态修复成效与物种适宜性评估[D].南京:南京信息工程大学,2016.
- [4] 赵学勇,张春民,左小安,等.科尔沁沙地沙漠化土地恢复面临的挑战[J].应用生态学报,2009(7):1559-1564.
- [5] 赵哈林,周瑞莲,赵学勇,等.科尔沁沙地沙漠化正、逆过程的地面判别方法[J].中国沙漠,2008,28(1):8-15.
- [6] 王涛.中国沙漠与沙漠化[M].石家庄:河北科学技术出版社,2003.
- [7] 陈晨,王寅,王健铭,等.科尔沁沙地植物群落物种多样性及其主要影响因素[J].北京林业大学学报,2020,42(5):106-114.
- [8] 郭铁瑞,赵哈林,赵学勇,等.科尔沁沙质草地物种多样性与生产力的关系[J].干旱区研究,2007(2):198-203.
- [9] 左小安,赵学勇,赵哈林,等.科尔沁沙地草地退化过程中的物种组成及功能多样性变化特征[J].水土保持学报,2006(1):181-185.
- [10] 王明明,刘新平,何玉惠,等.科尔沁沙地封育恢复过程中植物群落特征变化及影响因素[J].植物生态学报,2019,43(8):672-684.
- [11] 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(3):1135-1139.
- [12] 赵丽娅,李兆华,李锋瑞,等.科尔沁沙地植被恢复演替进程中群落土壤种子库研究[J].生态学报,2005(12):3204-3211.
- [13] Wang S, Zuo X, Zhao X, et al. Responses of soil fungal community to the sandy grassland restoration in Horqin Sandy Land, northern China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(1):21.
- [14] 王少昆.科尔沁沙地不同生境中土壤微生物群落分布特征研究[D].兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,2018.
- [15] Zuo X, Zhang J, Zhou X, et al. Changes in carbon and nitrogen storage along a restoration gradient in a semiarid sandy grassland[J]. Acta Oecológica, 2015, 69:1-8.
- [16] 赵哈林,赵学勇,张铜会.沙漠化的生物过程及退化植被的恢复机理[M].北京:科学出版社,2007.

- [17] 吕朋,左小安,张婧,等.放牧强度对科尔沁沙地沙质草地植被的影响[J].中国沙漠,2016,36(1):34-39.
- [18] Zuo X, Zhao X, Wang S, et al. Influence of dune stabilization on relationship between plant diversity and productivity in Horqin Sand Land, Northern China [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 67(5): 1547-1556.
- [19] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2005.
- [20] 刘光崧.土壤理化分析与剖面描述[M].北京:中国标准出版社,1996.
- [21] 孙小丽,康萨如拉,张庆,等.荒漠草原物种多样性、生产力与气候因子和土壤养分之间关系的研究[J].草业学报,2015,24(12):10-19.
- [22] 赵哈林,苏永中,周瑞莲.我国北方沙区退化植被的恢复机理[J].中国沙漠,2006,26(3):323-328.
- [23] 李玉强,赵哈林,移小勇,等.沙漠化过程中科尔沁沙地植物-土壤系统碳氮储量动态[J].环境科学,2006(4):635-640.
- [24] Li Y, Zhao X, Zhang F, et al. Accumulation of soil organic carbon during natural restoration of desertified grassland in China's Horqin Sandy Land [J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(3): 328-340.
- [25] Yuan J, Ouyang Z, Zheng H, et al. Ecosystem carbon storage following different approaches to grassland restoration in south-eastern Horqin Sandy Land, northern China [J]. Global Ecology and Conservation, 2021, 26: e1438.
- [26] Liu R, Zhao H, Zhao X, et al. Soil macrofaunal response to sand dune conversion from mobile dunes to fixed dunes in Horqin Sandy Land, northern China [J]. European Journal of Soil Biology, 2009, 45(5): 417-422.
- [27] 左小安,赵学勇,赵哈林,等.科尔沁沙质草地群落物种多样性、生产力与土壤特性的关系[J].环境科学,2007(5):945-951.
- [28] 苏永中,赵哈林,张铜会,等.不同退化沙地土壤碳的矿化潜力[J].生态学报,2004(2):372-378.
- [29] 赵哈林,张铜会,赵学勇,等.内蒙古半干旱地区沙质过牧草地的沙漠化过程[J].干旱区研究,2002(4):1-6.
- [30] 孙一梅,田青,吕朋,等.科尔沁沙地沙质草地与固定沙丘植物群落结构对极端干旱的响应[J].中国沙漠,2021,41(1):129-136.
- [31] 周欣,左小安,赵学勇,等.科尔沁沙地中南部34种植物叶功能性状及其相互关系[J].中国沙漠,2015,35(6):1489-1495.
- [32] 吕朋,左小安,孙珊珊,等.科尔沁沙地退化植被恢复过程中碳氮化学计量特征的变化[J].干旱区地理,2019,42(3):606-614.
- [33] 钟韩珊,李元哲,张晓雨,等.不同类型沙地植物群落特征及多样性研究[J].湖北大学学报(自然科学版),2019,41(4):349-355.
- [34] 吕朋,左小安,岳喜元,等.科尔沁沙地封育过程中植被特征的动态变化[J].生态学杂志,2018,37(10):2880-2888.
- [35] 杨欢,李玉强,王旭洋,等.半干旱区不同类型沙丘风沙流结构特征[J].中国沙漠,2018,38(6):1144-1152.
- [36] 尚雯,李玉强,韩娟娟,等.围封对流动沙丘表层土壤有机碳、全氮和活性有机碳的影响[J].水土保持学报,2012,26(6):147-152.
- [37] 尚雯,李玉强,王少昆,等.科尔沁沙地流动沙丘造林后表层土壤有机碳和轻组有机碳的变化[J].应用生态学报,2011,22(8):2069-2074.
- [38] 赵文智,程国栋.干旱区生态水文过程研究若干问题评述[J].科学通报,2001,46(22):1851-1857.
- [39] 庞凤,李廷轩,王永东,等.土壤速效氮、磷、钾含量空间变异特征及其影响因子[J].植物营养与肥料学报,2009,15(1):114-120.
- [40] Carlson M, Forcella F, Wortman S, et al. Organic fertilizer abrasive grits increase soil available nitrogen, plant height, and biomass [J]. Agrosystems, Geosciences & Environment, 2020, 3(1): e20091.

Vegetation structure and its relationship with soil physicochemical properties in restoring sandy grassland in Horqin Sandy Land

Zhao Xiaolong¹, Xie Yuhong¹, Ma Xujun², Wang Shaokun²

(1. College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Naiman Desertification Research Station / Urat Desert-Grassland Research Station / Key Laboratory of Stress Physiology and Ecology, Northwest Institute Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Herbs play an important role in the process of vegetation restoration in sandy land ecosystem. It is very important to study the vegetation changes and its relationship with soil factors in natural sandy land restoration. This study focused on the vegetation composition and its relationship with soil physicochemical properties along 12-year, 17-year and 20-year restoration gradient in Horqin sandy grassland. The results showed that: with the restoration processing, soil organic matter, total nitrogen, available nitrogen, available potassium and slow-acting potassium increased significantly; plant species richness increased gradually; the proportion of Gramineae increased, while the proportions of Compositae and Chenopodiaceae decreased; The proportion of annual and bi-annual plant species decreased, while the proportion of perennial plant species increased; the vegetation height, coverage and above-ground biomass of herbaceous plants increased significantly; the species richness, dominance and diversity indices increased by 30.16%, 10.86% and 21.81% from 12-year to 20-year restoration, respectively; The plant community composition were mainly affected by soil water content (contribution rate of 30.77%) and soil available nutrients (contribution rates of available nitrogen, available phosphorus, and available potassium are 16.67%, 13.74%, and 7.69%, respectively) along sandy grassland restoration gradient. The results indicated that soil water content and soil available nutrients are the main factors affecting the restoration procedure of degraded sandy grassland in Horqin Sandy Land.

Key words: Horqin Sandy Land; sandy grassland; community structure; species diversity; soil nutrients