

慕宗杰,刘果厚,桂荣,等. 浑善达克沙地飞播区不同恢复阶段植物群落结构动态变化[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(4): 46-56.

DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2020.04.007

浑善达克沙地飞播区不同恢复阶段植物群落结构动态变化

慕宗杰^{1,2}, 刘果厚¹, 桂荣³, 苏海林⁴, 李红颖¹, 刘利红⁵, 曹瑞¹, 姜莹¹, 王亚东¹

1. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 呼和浩特 010011; 2. 内蒙古自治区农牧业科学院, 呼和浩特 010031;

3. 内蒙古正蓝旗林业工作站, 内蒙古正蓝旗 027200; 4. 内蒙古正蓝旗五一种畜场, 内蒙古正蓝旗 027200;

5. 内蒙古正蓝旗草原工作站, 内蒙古正蓝旗 027200

摘要 为研究浑善达克沙地飞播区不同恢复阶段植物群落结构动态变化, 揭示飞播后浑善达克沙地植被恢复的特点和变化规律, 于 2013—2017 年在浑善达克沙地 11 个飞播区进行了植被调查试验, 并从功能型角度出发, 结合对应分析、关联度分析以及 Mann-Kendall 趋势分析等数据分析方法探讨了飞播区植被恢复的阶段性以及各功能型植物在群落中的地位和作用。结果显示: 浑善达克沙地飞播区 19 a 恢复时间共分为 3 个恢复阶段, 且飞播后, 伴随恢复时间的推移, 乔木、灌木半灌木、多年生杂类草、一/二年生杂类草、多年生豆科牧草、多年生禾草、一/二年生禾草 7 个功能型植物间的相互依赖程度逐渐减弱; 随着恢复年限的增加, 群落的稳定性逐渐增大。不同恢复阶段, 植被恢复的主导功能型并不唯一, 可在不同阶段进行适时管理, 从而使植物群落的演替阶段和整体发展趋势更有利于退化沙地的植被恢复与重建。

关键词 浑善达克沙地; 植被恢复与重建; 沙漠化逆转; 植物群落; 飞播; 功能型植物; 群落演替; 群落层次; 植被动态

中图分类号 S 727.23; S 725.72 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2020)04-0046-11

浑善达克沙地位于京津地区的西北部, 20 世纪 60 年代以后, 该地区严重的沙漠化使其成为京津冀地区最主要的沙尘源之一^[1]。随着浑善达克沙地生态环境的急剧恶化, 其沙尘暴天气发生频率也在不断加大, 这不仅导致该地区流动沙地、半固定沙地所占比重迅速增加^[2], 也给京津地区人民的生产、生活带来了严重危害^[3]。飞播作为一项现代化的沙地植被恢复与重建技术^[4], 具有新型、快速、高效的特点, 利用飞播技术加快浑善达克沙地的植被恢复与重建, 对于减少当地风沙危害、提高人民生活水平和实现该地区可持续发展具有重要意义。自京津风沙源治理工程启动实施以来, 内蒙古锡林郭勒盟正蓝旗旗委、旗政府对浑善达克沙地的生态保护建设工作给予高度重视, 并将飞播技术作为浑善达克沙地植被恢复与重建的重要手段。植被恢复过程是一个不断演替的过程, 既存在不同的演替阶段, 也存在演替的发展方向^[5]。乌云娜等^[6]对科尔沁沙地植被恢复的研究表明, 每一演替阶段均对应一个优势种, 即

一/二年生植物和旱生植物功能群在演替早期对群落生态功能的发挥和维持起着重要作用, 而多年生植物则随着演替的进行会逐渐在群落功能维持中占据重要地位。近年来, 随着浑善达克沙地治理工作的逐渐加强, 学者们也开始针对人为促进下该地区的植被恢复和沙漠化逆转过程进行研究。研究表明, 人为促进下浑善达克沙地的土壤有机质含量和全氮量会随着恢复年限的增加而逐渐增加^[7]; 且种植羊柴等沙生灌丛不仅可以改善沙地土壤的肥力指标, 还能够加快沙地植被的恢复^[8]。浑善达克沙地自 1999 年开始采用飞播技术恢复与重建沙地植被, 经过多年的飞播作业, 浑善达克沙地飞播区的植被恢复取得了明显成效。研究表明, 随着飞播年限的延长, 浑善达克沙地植物群落的物种丰富度指数、多样性指数、均匀度指数逐渐增加, 同时多年生植物的优势地位也逐渐升高^[9]; 飞播措施下, 浑善达克沙地的植被能够快速恢复, 且随着演替时间的增加, 多年生植物种类增加, 并逐渐取代一/二年生草本植物优

收稿日期: 2019-12-10

基金项目: 内蒙古自治区科技创新引导奖励资金项目(20121607)

慕宗杰, 博士研究生, 副研究员. 研究方向: 生物多样性保护与利用. E-mail: muzongjie@126.com

通信作者: 刘果厚, 教授. 研究方向: 生物多样性保护和荒漠化植被恢复与重建. E-mail: guohouliu@imau.edu.cn

势地位^[10]。植物功能型(plant functional types, PFTs)是确定植物功能特征的植物组合,也是研究植被随环境动态变化的基本单元^[11-12],具有相似的形态和生理特性,能够利用相同的资源,在生态系统中起相似的作用^[13]。从植物功能型的角度对浑善达克沙地飞播区植物群落进行研究,不仅可以分析各植物功能型在沙地植物群落中的作用,还可以揭示浑善达克沙地飞播过程中群落结构的时空变异和动态变化。为探讨浑善达克沙地飞播区不同恢复阶段植物群落结构动态变化,本研究于2013—2017年对浑善达克沙地11个飞播区进行了植被调查,并采用固定样地观测与空间差异代替时间变化^[14]相结合的方法对该地区飞播后的植被状况进行了研究,旨在明确飞播后浑善达克沙地飞播区植被在19 a恢复过程中的特点和变化规律,以及不同功能型植物在不同恢复阶段的地位和作用,从而为退化沙地植被恢复与重建提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

浑善达克沙地的自然条件独特,地势西南高、东北低,海拔在1 000~1 400 m,总面积2.14万km²^[15]。该地区属中温带半干旱、干旱大陆性季风气候区,年平均气温2~4℃,3、4月气温在10℃以上,夏季平均气温为18.6℃^[16];东部年均降水量为350~400 mm,西北部为100~200 mm;年均蒸发量为2 000~2 700 mm;干燥度1.2~2.0^[17]。全年无霜期为104~120 d,年平均风速为4.3~5.2 m/s。浑善达克沙地的地带性土壤以褐土、栗钙土为主,非地带性土壤以风沙土为主^[18]。

该试验的调查区域位于浑善达克沙地腹地正蓝旗境内,其地带性植被以草原植被为主,其中,灌木植物有黄柳(*Salix gordejvii*)、小红柳(*Salix microstachya* var. *bordensis*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、褐沙蒿(*Artemisia intramongolica*)等,多年生草本植物有细叶扁蓿豆(*Melilotoides ruthenica* var. *oblongifolia*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、羊草(*Leymus chinensis*)、大针茅(*Stipa grandis*)、沙鞭(*Psammochloa villosa*)等,一/二年生草本植物有

猪毛菜(*Salsola collina*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)、大籽蒿(*Artemisia sieversiana*)、狗尾草(*Setaria viridis*)等。

1.2 调查样地及样地基本情况

本研究调查地点为内蒙古锡林郭勒盟正蓝旗境内的浑善达克沙地飞播区,所选调查区域分别为2013年播区(那日图苏木查干敖包嘎查)、2012年播区(桑根达来镇额日登夏营地)、2011年播区(那日图苏木白音门都嘎查夏营地)、2009年播区(桑根达来镇额日登达来飞播区)、2008年播区(正蓝旗五一种畜场总场飞播区)、2007年播区(宝绍岱苏木查干淖尔嘎查)、2005年播区(赛音胡都嘎苏木幸福飞播区)、2002年播区(桑根达来镇宝力根查干飞播区)、2001年播区(贺日斯台苏木白音胡硕飞播区)、2000年播区(那日图苏木高格斯台嘎查夏营地)、1999年播区(乌日图苏木古日图嘎查)内具有代表性的典型样地,共计11个样地,样地基本情况见表1。该试验的调查样地在飞播前均为流动沙地,立地条件基本一致;飞播时间均为每年的6月,这是由于该时期风力较弱,飞播种子可均匀分布且易覆沙,飞播后又恰好进入雨季,对飞播植物生长极为有利;飞播当年有苗频度约80%。浑善达克沙地1999—2013年飞播所用的植物种子共有8种,分别为沙地榆(*Ulmus pumila* var. *sabulosa*)、沙蓬(*Agriophyllum pungens*)、草木樨(*Melilotus suaveolens*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、沙打旺(*Astragalus adsurgens* 'Shadawang')、细枝岩黄芪(*Hedysarum scoparium*)、塔落岩黄芪(*Hedysarum laeve*)、白沙蒿(*Artemisia sphaerocephala*),其中,草木樨为2000年飞播所用植物种,本次试验调查时,飞播的草木樨已完全从飞播群落中衰退。试验调查时间为2013—2017年的6—8月。空间差异代替时间变化法所获得的飞播后的恢复年限见表2。

1.3 植被调查

每个样地均设置3条长300 m、宽10 m的样带(样带内的植被调查起止点均统一按照从沙丘迎风坡到沙丘背风坡的方向进行),即设为3次重复。然后在每条样带内各设置5个10 m×10 m灌木样方,样方间隔均为50 m(调查区内的沙地榆为飞播植物,因生长年限较短,其植株高度、盖度、冠幅均较小,故将其列入灌木样方统一进行调查)。再按照对

角线的方向在每个灌木样方内各设置 5 个 1 m × 1 m 的草本样方。调查内容包括植物种类、自然高度、盖度、多度、频度等。

1.4 数据分析方法

1) 综合指数计算。植物功能型乔木 (tree,

TR)、灌木半灌木 (shrubs/subshrubs, SS)、多年生豆科牧草 (perennial leguminous forage, PLF)、多年生禾草 (perennial gramineous forage, PGF)、多年生杂类草 (perennial weeds, PW)、一/二年生禾草 (annual/biennial gramineous forage, ABG) 和一/二年

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic situation of sample plot

飞播样地 Aerial seeding of sample plot	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔/m Altitude	飞播前 沙地类型 Types of sandy land before aerial seeding	主风向 Prevailing wind direction	年平均 降水量/mm Average annual precipitation	年平均 气温/°C Average annual temperature
2013 年播区 Seeding region in 2013	N42°57'08.5"	E115°42'17.3"	1 275	梁窝状沙丘链 Dimple dune chain	西北风 Northwest wind	330.0	1.5
2012 年播区 Seeding region in 2012	N42°36'49.6"	E116°21'12.1"	1 368	梁窝状沙丘链 Dimple dune chain	西北风 Northwest wind	330.0	1.5
2011 年播区 Seeding region in 2011	N43°07'45.5"	E115°54'13.6"	1 292	梁窝状沙丘链 Dimple dune chain	西北风 Northwest wind	330.0	1.5
2009 年播区 Seeding region in 2009	N42°33'04.0"	E116°27'55.4"	1 339	梁窝状沙丘链 Dimple dune chain	西北风 Northwest wind	330.0	1.5
2008 年播区 Seeding region in 2008	N42°25'19.1"	E116°14'55.8"	1 314	梁窝状沙丘链 Dimple dune chain	西北风 Northwest wind	330.0	1.5
2007 年播区 Seeding region in 2007	N42°47'54.7"	E115°28'53.4"	1 287	梁窝状沙丘链 Dimple dune chain	西北风 Northwest wind	330.0	1.5
2005 年播区 Seeding region in 2005	N42°48'06.8"	E116°22'14.3"	1 369	流动沙地及半固定沙地 Mobile sand and semi fixed sand	西北风 Northwest wind	370.0	1.5
2002 年播区 Seeding region in 2002	N42°37'44.5"	E116°15'47.4"	1 375	以流动、半流动沙丘为主, 多呈复合型沙丘 Mainly mobile and semi mobile sand dunes, mostly compound sand dunes	西北风 Northwest wind	377.0	1.5
2001 年播区 Seeding region in 2001	N42°54'49.9"	E116°03'07.6"	1 321	以流动、半流动沙丘为主, 多呈复合型沙丘 Mainly mobile and semi mobile sand dunes, mostly compound sand dunes	西北风 Northwest wind	377.0	1.5
2000 年播区 Seeding region in 2000	N43°01'38.8"	E115°44'43.0"	1 265	流动、半流动沙地 Mobile and semi mobile sand	西北风 Northwest wind	377.0	1.5
1999 年播区 Seeding region in 1999	N43°06'58.3"	E116°06'06.9"	1 302	流动、半流动沙地 Mobile and semi mobile sand	西北风 Northwest wind	377.7	1.5

表2 调查时间及恢复年限对照表

Table 2 The comparison between survey time and restoration year

飞播年份 Aerial-seeding year	调查年份 Survey year				
	2013	2014	2015	2016	2017
2013	Y01	Y02	Y03	Y04	Y05
2012	Y02	Y03	Y04	Y05	Y06
2011	Y03	Y04	Y05	Y06	Y07
2009	Y05	Y06	Y07	Y08	Y09
2008	Y06	Y07	Y08	Y09	Y10
2007	Y07	Y08	Y09	Y10	Y11
2005	Y09	Y10	Y11	Y12	Y13
2002	Y12	Y13	Y14	Y15	Y16
2001	Y13	Y14	Y15	Y16	Y17
2000	Y14	Y15	Y16	Y17	Y18
1999	Y15	Y16	Y17	Y18	Y19

注:Y01~Y19为空间差异代替时间变化法所获得的飞播后的恢复年限。Note:Y01-Y19 is the recovery period after aerial seeding by spatial difference instead of time variation method.

生杂类草(annual/biennial weeds, ABW)综合指数计算式如下:

$$I_i = \frac{H+C+P+D}{4}$$

式中, I_i 为第*i*个功能型综合指数,其值大于0小于1,其值越接近于1表明该功能型在群落中越占有优势, H 、 C 、 P 、 D 分别代表功能型在19 a间的相对高度、相对盖度、相对频度和相对密度。为了能将大小样方数据整合到一起,乔木、灌木半灌木的频度和密度均事先除以100,以便匹配草本样方数据。群落综合指数为各功能型综合指数的累加和:

$$I = \sum_{i=1}^n I_i$$

式中 I 值 ≥ 1 。

2)对应分析。在SAS9.2(SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)中调用CORRESP过程,分析恢复年限与植物功能型综合指数的对应关系,并在Excel 2010(Microsoft Inc.)中绘制对应分析图。根据对应分析结果,判断各功能型在19 a间恢复过程对应的阶段性。

3)方差分析。根据恢复时间划分的阶段性,对物种数、植物功能型及群落综合指数进行方差分析,判断其在不同恢复阶段的数量差异。此分析过程在SAS9.2中调用ANOVA过程,进行单因素方差分析。根据方差分析结果在Excel 2010中整理出多重比较结果,并形成相关的图表。

4)趋势性分析和突变点检验。对于植物群落物种数、各功能型和群落时间序列的综合指数,进行Mann-Kendall趋势检验;根据相关文献^[19-20],在Excel 2010中采用VBA编程,计算时间序列物种数

或综合指数的正态统计量 Z_c 、倾斜度 β ,并在DPS进行Pettitt检验。

2 结果与分析

2.1 调查样地不同功能型植物及其种类

通过实地踏查,在试验样地内共调查到112个物种,按照植物功能型的划分标准^[21-23],将其划分为以下几类:乔木(TR)、灌木半灌木(SS)、多年生杂类草(PW)、一/二年生杂类草(ABW)、多年生豆科牧草(PLF)、一/二年生豆科牧草(annual/biennial leguminous forage, ABL)、多年生禾草(PGF)、一/二年生禾草(ABG)。由于在试验样地中调查到的一/二年生豆科牧草仅有草木樨(*Melilotus suaveolens*)1个物种经分析认为此次调查到的草木樨为沙地原生植物种,而非飞播物种,但因调查过程中得到的植株数极少,因此,本试验只对另外7个功能型的111个物种进行了分析(表3)。由表3可知,浑善达克沙地飞播区内调查到的乔木仅沙地榆(*Ulmus pumila* var. *sabulosa*)1个物种,灌木半灌木有黄柳(*Salix gordejewii*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、塔落岩黄芪(*Hedysarum laeve*)、白沙蒿(*Artemisia sphaerocephala*)、褐沙蒿(*Artemisia intramongolica*)等16个物种,多年生杂类草有麻叶荨麻(*Urtica cannabina*)、叉歧繁缕(*Stellaria dichotoma*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、丝叶山苦荚(*Ixeris chinensis* var. *graminifolia*)等35个物种,一/二年生杂类草有篇蓄(*Polygonum aviculare*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、兴安虫实(*Corispermum chinganicum*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)等32个物种,多年生豆科牧草有披针叶黄华(*Thermop-*

sis lanceolata)、细叶扁蓊豆(*Melilotoides ruthenica* var. *oblongifolia*)、沙打旺(*Astragalus adsurgens* ‘Shadawang’)、砂珍棘豆(*Oxytropis gracillima*)等 9 个物种, 多年生禾草有达乌里羊茅(*Festuca dahurica*)、沙地雀麦(*Bromus ircutensis*)、毛稈沙生冰草(*Agropyron desertorum* var. *pilosiusculum*)、沙芦草(*Agropyron mongolicum*)等 15 个物种, 一/二年生禾草有画眉草(*Eragrostis pilosa*)、止血马唐(*Digitaria ischaemum*)、狗尾草(*Setaria viridis*) 3 个物种。

表 3 浑善达克沙地飞播区物种组成

Table 3 Species composition of aerial seeding of Otindag Sandy Land

功能型 Functional types	植物种名 Plant name
乔木 Tree	沙地榆(<i>Ulmus pumila</i> var. <i>sabulosa</i>)
灌木 Shrubs	黄柳(<i>Salix gordejewii</i>)、小红柳(<i>Salix microstachya</i> var. <i>bordensis</i>)、稜斗叶绣线菊(<i>Spiraea aquilegifolia</i>)、三裂绣线菊(<i>Spiraea trilobata</i>)、土庄绣线菊(<i>Spiraea pubescens</i>)、金露梅(<i>Potentilla fruticosa</i>)、小叶锦鸡儿(<i>Caragana microphylla</i>)、柠条锦鸡儿(<i>Caragana korshinskii</i>)、胡枝子(<i>Lespedeza bicolor</i>)
半灌木 Subshrubs	细枝岩黄芩(<i>Hedysarum scoparium</i>)、塔落岩黄芩(<i>Hedysarum laeve</i>)、阴山胡枝子* (<i>Lespedeza inschanica</i>)、白沙蒿(<i>Artemisia sphaerocephala</i>)、蒙古沙地蒿(<i>Artemisia klementze</i>)、褐沙蒿(<i>Artemisia intramongolica</i>)、黑沙蒿(<i>Artemisia ordosica</i>)
多年生杂类草 Perennial weeds	麻叶荨麻(<i>Urtica cannabina</i>)、叉分蓼(<i>Polygonum divaricatum</i>)、叉歧繁缕(<i>Stellaria dichotoma</i>)、毛萹麦瓶草(<i>Silene repens</i>)、展枝唐松草(<i>Thalictrum squarrosom</i>)、星毛委陵菜(<i>Potentilla acaulis</i>)、二裂委陵菜(<i>Potentilla bifurca</i>)、菊叶委陵菜(<i>Potentilla tanacetifolia</i>)、狼毒(<i>Euphorbia fischeriana</i>)、沙茴香(<i>Ferula bungeana</i>)、二色补血草(<i>Limonium bicolor</i>)、地稍瓜(<i>Cynanchum thesioides</i>)、并头黄芩(<i>Scutellaria scordifolia</i>)、车前(<i>Plantago asiatica</i>)、阿尔泰狗娃花(<i>Heteropappus altaicus</i>)、亚洲蓍(<i>Achillea asiatica</i>)、冷蒿(<i>Artemisia frigida</i>)、蒙古蒿(<i>Artemisia mongolica</i>)、驴欺口(<i>Echinops latifolius</i>)、草地风毛菊(<i>Saussurea amara</i>)、鳍菊(<i>Olgaea leucophylla</i>)、麻花头(<i>Serratula centauroides</i>)、拐轴鸦葱(<i>Scorzonera divaricata</i>)、华蒲公英(<i>Taraxacum sinicum</i>)、苣荬菜(<i>Sonchus arvensis</i>)、乳苣(<i>Mulgedium tataricum</i>)、丝叶山苦葵(<i>Ixeris chinensis</i> var. <i>graminifolia</i>)、山丹(<i>Lilium pumilum</i>)、野韭(<i>Allium ramosum</i>)、细叶韭(<i>Allium tenuissimum</i>)、矮韭(<i>Allium anisopodium</i>)、山韭(<i>Allium senescens</i>)、黄花葱(<i>Allium condensatum</i>)、兴安天门冬(<i>Asparagus dauricus</i>)、细叶鸢尾(<i>Iris tenuifolia</i>)
一/二年生杂类草 Annual/biennial weeds	萹蓄(<i>Polygonum aviculare</i>)、猪毛菜(<i>Salsola collina</i>)、碱蓬(<i>Suaeda glauca</i>)、辽宁碱蓬(<i>Suaeda liaotungensis</i>)、沙蓬(<i>Agriophyllum pungens</i>)、绳虫实(<i>Corispermum declinatum</i>)、毛果绳虫实(<i>Corispermum declinatum</i> var. <i>tylocarpum</i>)、兴安虫实(<i>Corispermum chinganicum</i>)、雾冰藜(<i>Bassia dasyphylla</i>)、刺藜(<i>Chenopodium aristatum</i>)、灰绿藜(<i>Chenopodium glaucum</i>)、尖头叶藜(<i>Chenopodium album</i>)、藜(<i>Chenopodium album</i>)、马齿苋(<i>Portulaca oleracea</i>)、沙芥(<i>Pugionium cornutum</i>)、小花花旗竿(<i>Dontostemon micranthus</i>)、无腺花旗竿(<i>Dontostemon glandulosus</i>)、播娘蒿(<i>Descurainia sophia</i>)、牻牛儿苗(<i>Erodium stephanianum</i>)、劲直鹤虱(<i>Lappula stricta</i>)、异刺鹤虱(<i>Lappula heteracantha</i>)、细叶益母草(<i>Leonurus sibiricus</i>)、列当(<i>Orobanche coerulescens</i>)、鞑靼狗娃花(<i>Heteropappus tataricus</i>)、碱菀(<i>Tripolium vulgare</i>)、苍耳(<i>Xanthium sibiricum</i>)、大籽蒿(<i>Artemisia sieversiana</i>)、黄花蒿(<i>Artemisia annua</i>)、黑蒿(<i>Artemisia palustris</i>)、猪毛蒿(<i>Artemisia scoparia</i>)、砂蓝刺头(<i>Echinops gmelini</i>)、飞廉(<i>Carduus crispus</i>)
多年生豆科牧草 Perennial leguminous forage	披针叶黄华(<i>Thermopsis lanceolata</i>)、扁蓊豆(<i>Melilotoides ruthenica</i>)、细叶扁蓊豆(<i>Melilotoides ruthenica</i> var. <i>oblongifolia</i>)、草木樨状黄芩(<i>Astragalus melilotoides</i>)、沙打旺(<i>Astragalus adsurgens</i> ‘Shadawang’)、多叶棘豆(<i>Oxytropis myriophylla</i>)、砂珍棘豆(<i>Oxytropis gracillima</i>)、东北棘豆(<i>Oxytropis mandshurica</i>)、达乌里胡枝子(<i>Lespedeza davurica</i>)
多年生禾草 Perennial gramineous forage	达乌里羊茅(<i>Festuca dahurica</i>)、沙地雀麦(<i>Bromus ircutensis</i>)、冰草(<i>Agropyron cristatum</i>)、毛稈沙生冰草(<i>Agropyron desertorum</i> var. <i>pilosiusculum</i>)、沙芦草(<i>Agropyron mongolicum</i>)、西伯利亚冰草(<i>Agropyron sibiricum</i>)、羊草(<i>Leymus chinensis</i>)、赖草(<i>Leymus secalinus</i>)、拂子茅(<i>Calamagrostis epigeios</i>)、大针茅(<i>Stipa grandis</i>)、克氏针茅(<i>Stipa krylovii</i>)、沙鞭(<i>Psammochloa villosa</i>)、糙隐子草(<i>Cleistogenes squarrosa</i>)、多叶隐子草(<i>Cleistogenes polyphylla</i>)、白草(<i>Pennisetum centrasiaticum</i>)
一/二年生禾草 Annual/biennial gramineous forage	画眉草(<i>Eragrostis pilosa</i>)、止血马唐(<i>Digitaria ischaemum</i>)、狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)

注: * 阴山胡枝子为草本状半灌木。Note: * *Lespedeza inschanica* is herbaceous subshrubs.

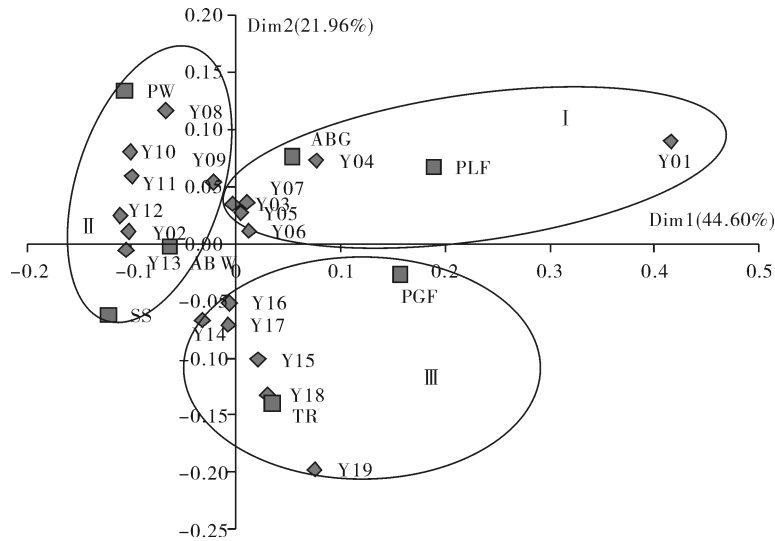
2.2 不同功能型植物在恢复过程中的对应分析

浑善达克沙地飞播区植被在恢复过程的 19 a 间, 各功能型存在不同的动态变化模式(图 1)。一/二年生禾草和多年生豆科牧草分布在第 I 恢复阶段(图 1 中 Y01、Y03~Y07); 多年生杂类草、灌木半灌木以及一/二年生杂类草分布在第 II 恢复阶段(图 1

中 Y02、Y08~Y13); 乔木和多年生禾草分布在第 III 恢复阶段(图 1 中 Y14~Y19)。由此可见, 浑善达克沙地由于植物种类多样, 恢复过程中不同植物功能型变化特点和规律不同, 使得植被恢复呈现出阶段性的变化; 同时也可以看到 Y02(2012 年)划归到第 II 阶段内的原因可能是受飞播当年浑善达克沙地

温度和降水的影响,使其更有利于多年生杂类草、灌木半灌木和一/二年生杂类草的生长,但从整体来看,这并不影响植被恢复过程中形成的阶段性特点。因此,乔木和多年生禾草在植被恢复过程中需要相

对较长的年限,一/二年生禾草和多年生豆科牧草在植被恢复过程中需要的年限相对较短,灌木半灌木、多年生杂类草以及一/二年生杂类草在植被恢复过程中需要的恢复时间居于前两者之间。



TR,SS,PLF,PGF,PW,ABG,ABW 分别表示乔木、灌木半灌木、多年生豆科牧草、多年生禾草、多年生杂类草、一/二年生禾草和一/二年生杂类草。I、II、III 分别表示飞播后植被恢复的第 I 阶段、第 II 阶段和第 III 阶段。Dim1 表示第一特征向量,其方差贡献值为 44.60%; Dim2 表示第二特征向量,其方差贡献值为 21.96%。TR, SS, PLF, PGF, PW, ABG, ABW means tree, shrubs/subshrubs, perennial leguminous forage, perennial gramineous forage, perennial weeds, annual/biennial gramineous forage, annual/biennial weeds, respectively. I, II, III means first, second, and third restoration stages after aerial seeded treatment, respectively. Dim1 means first eigenvector with a variance contribution value of 44.60%; Dim2 represents the second eigenvector with a variance contribution value of 21.96%.

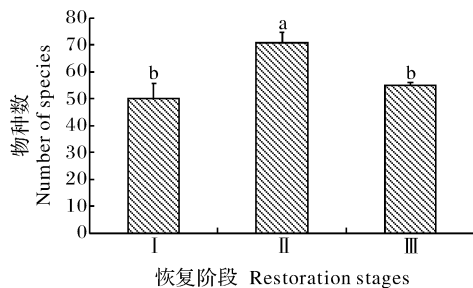
图 1 各功能型植物与不同恢复年限的关系

Fig.1 The relationship between different functional type plants and different recovery years

2.3 在恢复过程中群落的物种数变化

由于植被恢复存在一定的阶段性,因此,物种数变化也可能存在阶段性,经方差分析发现,物种数在第 II 阶段显著高于第 I 阶段和第 III 阶段,物种数分别为 71 种、52 种和 55 种(图 2)。同时可以看到,误

差线伴随恢复年限的增加,其长度在变短,说明物种数的年际间波动在减小。因此,物种数的变化在不同恢复阶段存在显著性差异,即阶段性明显;但是,物种数的波动性在减弱,物种数的稳定趋势在增强。



图中小写字母不同代表不同恢复阶段物种数存在显著性差异 ($P < 0.05$), 误差线为标准误。The significant differences in species number of restoration stages are indicated by different lower-case letters ($P < 0.05$), and error bars are SE.

图 2 不同恢复阶段群落物种数差异

Fig.2 The differences in community species at different restoration stages

2.4 不同功能型植物及群落在各个阶段的综合指数变化

由表 4 可知,灌木半灌木、一/二年生禾草和一/二年生杂类草的综合指数在不同恢复阶段无显著性差异 ($P > 0.05$)。多年生豆科牧草和多年生禾草的综合指数均表现为第 I 阶段显著高于第 II 阶段 ($P < 0.05$),第 III 阶段与前 2 个阶段无显著性差异 ($P > 0.05$)。乔木的综合指数呈现出随恢复年限的增加而增大的变化趋势,但方差分析结果显示第 III 阶段综合指数显著高于第 I 阶段和第 II 阶段 ($P < 0.05$),前 2 个阶段之间无显著性差异 ($P > 0.05$)。群落综合指数呈下降的变化趋势,即第 I 阶段显著高

于第Ⅱ阶段和第Ⅲ阶段($P < 0.05$),且第Ⅱ阶段和第Ⅲ阶段间无显著性差异($P > 0.05$)。由此可见,不同功能型植物在同一群落中伴随恢复年限的增加,其变化特点并不一。

就年际间波动情况来看(表 4 中的标准误),伴随恢复年限的增加,乔木和一/二年生禾草的标准误在第Ⅱ阶段时有所增加,在第Ⅲ阶段时又有所降低,说明乔木和一/二年生禾草在第Ⅱ阶段时波动性较

大;灌木半灌木、多年生豆科牧草、多年生禾草和一/二年生杂类草的标准误在 3 个阶段呈下降趋势,说明其稳定程度逐渐增加;多年生杂类草的标准误在 3 个阶段内的变化较小,说明其在整个恢复过程中较为稳定;群落整体表现为第Ⅱ阶段波动性较大。由此可见,不同功能型植物在不同恢复阶段的波动性差别较大,共同影响了群落的波动性情况。

表 4 群落及不同功能型植物综合指数变化

Table 4 The changes of composite index of community and different functional type plants

功能型及群落 Function types and community	第Ⅰ阶段 The first stage	第Ⅱ阶段 The second stage	第Ⅲ阶段 The third stage
乔木 TR	0.093 2±0.004 6b	0.108 0±0.005 2b	0.133 9±0.007 0a
灌木半灌木 SS	0.217 8±0.018 8a	0.237 5±0.010 0a	0.245 7±0.004 9a
多年生豆科牧草 PLF	0.106 6±0.009 6a	0.078 2±0.008 7b	0.088 0±0.002 1ab
多年生禾草 PGF	0.201 3±0.015 4a	0.158 8±0.008 9b	0.187 5±0.006 8ab
多年生杂类草 PW	0.142 0±0.005 8b	0.184 5±0.005 4a	0.122 0±0.006 6c
一/二年生禾草 ABG	0.130 4±0.008 3a	0.124 1±0.009 7a	0.109 7±0.002 7a
一/二年生杂类草 ABW	0.204 1±0.016 1a	0.189 7±0.006 1a	0.191 3±0.005 3a
群落 Community	1.095 4±0.001 8a	1.080 8±0.004 7b	1.078 1±0.001 3b

注:表中不同恢复阶段小写字母不同代表存在显著性差异($P < 0.05$),数据为均值±标准误。Note: The significant differences in species number of restoration stages are indicated by different lower-case letters ($P < 0.05$), data are means±SE.

2.5 不同恢复阶段各功能型植物及群落之间的关联度分析

浑善达克沙地植被恢复的第Ⅰ阶段,其他功能型植物对乔木的依赖程度高于乔木对其他功能型植物的依赖程度(如灌木半灌木对乔木的关联度为 0.622 9,乔木对灌木半灌木的关联度为 0.562 9),但是乔木与群落的相互关系则与之相反(群落对乔木的关联度为 0.681 0,乔木对群落的关联度为 0.742 9),且灌木半灌木与乔木关联度的差值为 0.060 0,群落与乔木关联度的差值为 0.061 9。在第Ⅱ阶段,灌木半灌木对乔木的关联度为 0.525 2,乔木对灌木半灌木的关联度为 0.480 1;群落对乔木的关联度为 0.674 9,乔木对群落的关联度为 0.673 4;其差值分别为 0.045 1 和 0.001 5。在第Ⅲ阶段,灌木半灌木对乔木的关联度为 0.497 4,乔木对灌木半灌木的关联度为 0.535 3;群落对乔木的关联度为 0.475 9,乔木对群落的关联度为 0.580 7;其差值分别为 0.037 9 和 0.104 8。因此,不同恢复阶段,乔木与灌木半灌木的依赖关系在发生变化,植被恢复的

第Ⅰ阶段和第Ⅱ阶段,乔木和灌木半灌木的关系表现为后者依赖于前者,在第Ⅲ阶段则表现为前者依赖于后者;乔木与群落之间的相互关系表现为第Ⅰ阶段和第Ⅲ阶段前者依赖于后者,而第Ⅱ阶段二者的依赖程度较为接近,差值仅为 0.001 9(表 5)。

2.6 在恢复过程中各功能型植物及群落的变化趋势

由表 6 可知,物种数、群落、多年生豆科牧草、多年生禾草、多年生杂类草、一/二年生禾草、一/二年生杂类草的综合指数均呈下降的变化趋势($\beta < 0$);乔木、灌木半灌木的综合指数呈上升的变化趋势($\beta > 0$)。乔木、多年生豆科牧草和一/二年生禾草的综合指数及群落的综合指数均达到显著水平($P < 0.05$)。在显著的变化趋势中,乔木、一/二年生禾草及群落的综合指数具有明显的突变点(Pettitt 检验结果小于 0.05)。由此可见,群落整体向灌丛化趋势发展,群落的稳定程度在逐渐提高(结合表 4 和表 5,综合指数趋近于 1,各功能型植物之间的总体关联度下降)。

表 5 不同恢复阶段各功能型植物间及其与群落间的相互关系

Table 5 Relationships between different functional type plants and community at different restoration stages

恢复阶段 Restoration stages	功能型及群落 Functional types & community	TR	SS	PLF	PGF	PW	ABG	ABW	群落 Community
第 I 阶段 The first stage	TR	1.000 0	0.562 9	0.645 2	0.680 2	0.723 2	0.794 2	0.698 6	0.742 9
	SS	0.622 9	1.000 0	0.592 9	0.608 4	0.646 6	0.659 6	0.662 7	0.708 9
	PLF	0.702 8	0.592 9	1.000 0	0.794 9	0.585 8	0.695 2	0.614 6	0.706 1
	PGF	0.718 0	0.588 0	0.777 0	1.000 0	0.656 3	0.727 3	0.617 6	0.714 1
	PW	0.713 8	0.563 9	0.503 0	0.606 6	1.000 0	0.604 1	0.673 7	0.718 6
	ABG	0.806 1	0.622 0	0.652 4	0.708 1	0.635 1	1.000 0	0.647 7	0.722 1
	ABW	0.725 4	0.642 5	0.595 3	0.619 4	0.717 3	0.665 3	1.000 0	0.720 5
	群落 Community	0.681 0	0.591 7	0.584 6	0.611 5	0.663 0	0.643 3	0.623 7	1.000 0
第 II 阶段 The second stage	TR	1.000 0	0.480 1	0.535 8	0.468 7	0.729 9	0.482 0	0.774 6	0.673 4
	SS	0.525 2	1.000 0	0.449 5	0.699 7	0.580 7	0.642 4	0.581 4	0.685 6
	PLF	0.608 0	0.482 9	1.000 0	0.529 9	0.592 8	0.486 0	0.618 0	0.569 3
	PGF	0.552 7	0.725 8	0.529 9	1.000 0	0.628 9	0.530 7	0.637 2	0.688 7
	PW	0.723 6	0.527 6	0.504 0	0.545 1	1.000 0	0.583 7	0.774 6	0.766 7
	ABG	0.526 1	0.644 9	0.454 6	0.496 9	0.627 6	1.000 0	0.575 0	0.611 1
	ABW	0.761 4	0.521 9	0.524 5	0.544 7	0.767 3	0.515 5	1.000 0	0.692 9
	群落 Community	0.674 9	0.649 1	0.497 8	0.623 7	0.774 4	0.569 2	0.711 5	1.000 0
第 III 阶段 The third stage	TR	1.000 0	0.535 3	0.508 0	0.746 9	0.449 1	0.609 5	0.516 0	0.580 7
	SS	0.497 4	1.000 0	0.761 2	0.604 2	0.398 7	0.637 9	0.655 8	0.785 4
	PLF	0.475 3	0.762 3	1.000 0	0.502 0	0.470 0	0.677 2	0.731 3	0.679 0
	PGF	0.747 7	0.638 3	0.541 3	1.000 0	0.470 4	0.620 7	0.584 5	0.666 6
	PW	0.450 1	0.442 1	0.511 9	0.470 4	1.000 0	0.528 2	0.524 7	0.528 4
	ABG	0.564 6	0.614 7	0.655 6	0.564 8	0.459 4	1.000 0	0.642 3	0.726 5
	ABW	0.500 3	0.677 9	0.748 6	0.568 9	0.506 4	0.682 8	1.000 0	0.721 7
	群落 Community	0.475 9	0.739 2	0.607 7	0.563 9	0.410 7	0.688 9	0.643 7	1.000 0

注：表中纵列表征以其为母序列，其他功能型植物或群落与之计算得到的关联度。Note: Tandem in the table are the parent sequence, and other functional type plants or community are correlated with it.

表 6 群落及各功能型植物在恢复过程中的趋势性分析和突变点检验

Table 6 Trend analysis and mutation point test of community and different functional type plants during recovery process

参数 Parameters	物种数 Species	TR	SS	PLF	PGF	PW	ABG	ABW	群落 Community
Z_c	-0.209 9	3.358 6	1.399 4	-2.099 1	-0.139 9	-1.119 5	-2.658 9	-1.399 4	-3.778 4
β	-0.143 6	0.003 3	0.002 2	-0.001 6	-0.000 1	-0.001 6	-0.001 3	-0.001 2	-0.001 4
$P_r > \mu $	$P > 0.05$	$P < 0.01$	$P > 0.05$	$P < 0.05$	$P > 0.05$	$P > 0.05$	$P < 0.01$	$P > 0.05$	$P < 0.01$
Petitt	0.565 0	0.000 8	0.494 7	0.090 8	0.899 9	0.602 4	0.014 5	0.494 7	$8.590 6 \times 10^{-5}$

3 讨论

为了取得更好的飞播效果，在选择飞播植物时，不仅选择了具有耐风蚀、耐沙埋、抗旱、生长迅速、繁殖能力强、固沙能力强的植物，同时还遵循了乔、灌、草混合播种的原则。飞播后，灌木植物的迅速生长，不仅会对草本植物起到一定的保护作用，也可使一些非先锋草本植物能够在流动沙地中保存下来。群落生境的变化是群落发生变化的重要机制之一，而飞播后经过一定时间的植被恢复，浑善达克沙地的流动沙地逐渐演变为半固定沙地或固定沙地，故而其地表风蚀减弱、土壤有机质和肥力提高、小气候得到改善，这就使得各个植物种在群落中的地位也不断地发生着变化。经调查可知，浑善达克沙地飞播

区的植物种类组成随生境的不同而有较大的差异，但仍以草原植被为主。通过对浑善达克沙地飞播区植物群落物种数与群落综合指数的分析可知，二者的变化趋势并不一致，且没有呈现出群落稳定增加与群落物种数一致的变化规律。由此可见，浑善达克沙地植被恢复的整体趋势为群落逐渐趋于稳定。

植物功能型是联系植物生理、群落和生态系统的一座桥梁^[24]，是比种群更容易识别的实体^[25]，能够对环境条件表现出相似的反应，且对主要生态过程有相似影响^[26]。本试验用功能型代替具体的植物种进行研究，旨在明确这些植物组群在沙地植物群落中的作用和地位及其在沙地环境中的生存能力。研究结果表明，浑善达克沙地飞播区植被恢复在 19 a 共分为 3 个阶段。第 I 阶段内，禾草和多年

生豆科牧草起主导作用,但群落物种数最少,此时各功能型植物对群落环境条件(包括生物和非生物环境)依赖较大,功能型植物之间的相互关联度较大;第Ⅱ阶段内,灌木半灌木、多年生杂类草和一/二年生杂类草起主导作用,群落物种数最大,此时各功能型植物对群落环境条件的依赖程度较第Ⅰ阶段有所下降,群落内各功能型植物之间的关联度也有所下降。在恢复期的第Ⅲ阶段内,乔木和多年生禾草起主导作用,物种数相对第Ⅰ阶段有所提高(但在统计学上并未达到显著性水平, $P > 0.05$),各功能型植物之间的关联度进一步减小,对群落的依赖作用变化不大。由此可见,浑善达克沙地飞播区植被恢复具有明显的阶段性,且各阶段内的物种数及功能型植物间的关系具有较大差别。杨波等^[27]进行退化羊草草原轻耙处理后 30 a 植物群落恢复演替规律研究时指出,轻耙处理下退化羊草草原群落 30 a 恢复演替可划分为 4 个阶段,从物种组成考虑其第 1 阶段和第 2 阶段一共经历了 3 a。本研究表明第Ⅰ阶段经历了 7 a,这是因为本研究采用功能型综合指数进行数量分析得到的结果,而不是基于草原管理学^[5]角度划分产生的差异。

由表 5 可以看出,各功能型植物在第Ⅰ阶段相互依赖性较大,此时刚刚飞播结束,面对浑善达克沙地相对恶劣的环境条件,各功能型植物之间的协同作用占主导地位,共同抵御不良影响;第Ⅱ阶段,各功能型植物之间的相互协同作用减弱,但是群落其他功能型植物对多年生杂类草和一/二年生杂类草的依赖度仍然保持在较高水平,且其对其他功能型植物的依赖程度也较高,其原因可能与该阶段沙地群落的物种多样性有关;第Ⅲ阶段,各功能型植物之间的相互依赖关系进一步减弱,多年生杂类草和一/二年生杂类草与群落其他功能型植物的相互依赖程度下降幅度较大,其原因可能是因为该阶段二者的物种数急剧下降,且综合指数也比较低的缘故。各功能型植物对群落的依赖程度在第Ⅰ阶段和第Ⅲ阶段均显示出其依赖于群落整体功能,第Ⅱ阶段乔木、多年生杂类草、一/二年生杂类草对群落的关联度大于群落对它们的关联度。这一结果对于乔木来讲,其正好处于恢复阶段的 10 a 左右,生长发育处于旺盛阶段,对群落的影响作用较大;多年生杂类草的物种数在该阶段同样处于高峰期,且综合指数较大,对群落的影响作用也较大;一/二年生杂类草在该阶段的物种数也处于高峰期,三者最终的变化规律支配着群落的动态变化。因此,表现出群落

对三者的关联度大于其对群落的关联度。

本研究发现,在浑善达克沙地飞播区的植被恢复过程中,其植物群落存在演替阶段,其中,乔木综合指数呈增加的变化趋势,而灌木半灌木综合指数增加趋势未通过显著性检验($P > 0.05$),将二者统一起来,其增加趋势却达到了显著性水平($P < 0.05$),且概率水平较乔木有增大的变化特点,而草本植物功能型(包含所有草本层功能型)综合指数均呈下降趋势。因此,本研究认为,在浑善达克沙地飞播区的植物群落中,灌木半灌木植物仍占主导地位。基于功能型对应时间序列进行数量划分,不仅考虑物种组成和功能上的差异,也能将同一区域作为一个整体考量群落演替的阶段性,因此,本研究采用不同功能型植物结合恢复阶段来探讨浑善达克沙地飞播区植被恢复过程,不仅可以考量群落层次的物种多样性和物种间的关系,还能够通过功能型植物变化趋势的数量关系来探讨群落的演替方向,同时还应结合不同恢复阶段植物群落主导功能型的不同来进行适当的管理,才能使植物群落的演替阶段和整体发展趋势更有利于沙地植被的恢复与重建。草地灌丛化^[28]问题一直是草地研究持续关注的问题之一,而本研究结果表明,灌木半灌木植物占主导地位对于浑善达克沙地飞播区植物群落的稳定作用还有待于进一步探讨。浑善达克沙地飞播区的植被在 19 a 的恢复时间里共存在 3 个恢复阶段,伴随恢复阶段的推移,群落各功能型植物的相互依赖程度逐渐减弱;随着恢复年限的增加,群落的稳定性逐渐增大。

参考文献 References

- [1] 丁国栋,蔡京艳,王贤,等.浑善达克沙地沙漠化成因、过程及其防治对策研究——以内蒙古正蓝旗为例[J].北京林业大学学报,2004,26(4):15-19.DING G D, CAI J Y, WANG X, et al. Causes, process and countermeasures of desertification in Hunsandake Sand land; taking Zhenglan Banner, Inner Mongolia as an example[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2004, 26(4):15-19 (in Chinese with English abstract).
- [2] 武健伟,赵廷宁,鲁瑞洁.浑善达克沙地现代土地沙漠化发展动态与成因分析[J].中国水土保持科学,2003,1(4):36-40.WU J W, ZHAO T N, LU R J. Development and reasons of sandy desertification in Otindag Sandy Land during the modern period [J]. Science of soil and water conservation, 2003, 1(4):36-40 (in Chinese with English abstract).
- [3] 董建林.浑善达克沙地(局部)沙化土地动态变化分析[J].林业资源管理,2000(5):25-29.DONG J L. Analysis of dynamic change of desertification land in Otindag Sandy Land (local)

- [J].Forestry resources management,2000(5):25-29 (in Chinese with English abstract).
- [4] 沈渭寿,李海东,张涛,等.西藏高寒风沙化土地飞播可行性分析[J].生态与农村环境学报,2009,25(1):106-111.SHEN W S,LI H D,ZHANG T,et al. Feasibility study of air-seeding on alpine aeolian desertified land in Tibet,China[J].Journal of ecology and rural environment,2009,25(1):106-111 (in Chinese with English abstract).
- [5] 内蒙古农牧学院.草原管理学[M].2版.北京:中国农业出版社,1999.Agriculture and Animal Husbandry of Inner Mongolia Institute. Rangeland management[M].2nd ed. Beijing:China Agricultural Press,1999 (in Chinese).
- [6] 乌云娜,裴浩,冉春秋,等.科尔沁沙地植被恢复演替过程中群落结构及土壤理化性状的变化[J].安徽农业科学,2008,36(15):6471-6475.WUYUNNA,PEI H,RAN C Q,et al.Change of the community structure and soil physical and chemical property during vegetation restoration succession in Kerqin Sandland[J].Journal of Anhui agricultural sciences,2008,36(15):6471-6475 (in Chinese with English abstract).
- [7] 范宁宁,王树力.浑善达克沙地植被恢复对土壤理化性质的影响[J].安徽农业科学,2014,42(30):10736-10737,10776.FAN N N,WANG S L.Effects of vegetation restoration on physical and chemical characteristics of the soil in Hunshandake Sand [J].Journal of Anhui agricultural sciences,2014,42(30):10736-10737,10776 (in Chinese with English abstract).
- [8] 王树力,梁晓娇,马超,等.基于结构方程模型的羊柴灌丛与沙地土壤间耦合关系[J].北京林业大学学报,2017,39(1):1-8.WANG S L,LIANG X J,MA C,et al. Coupling relationship between *Hedysarum mongdicum* shrub plantation and sand soil based on structural equation model[J].Journal of Beijing Forestry University,2017,39(1):1-8 (in Chinese with English abstract).
- [9] 田海晨.浑善达克沙地不同飞播年限植物群落特征分析——以正蓝旗为例[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2014.TIAN H C. Analysis of plant community characteristics of different sowing period in Hunshandake Sand:taking Zhenglan Banner for example[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2014 (in Chinese with English abstract).
- [10] 曹瑞,刘果厚,兰庆,等.浑善达克沙地飞播区植被动态[J].中国沙漠,2018,38(3):94-103.CAO R,LIU G H,LAN Q,et al. Change of plant community in air-seeding area of the Hunshandake Sandy Land[J].Journal of desert research,2018,38(3):94-103 (in Chinese with English abstract).
- [11] SMITH T M,SHUGART H H,WOODWARD F I. Plant functional types:their relevance to ecosystem properties and global change[M].Cambridge:Cambridge University Press,1997.
- [12] WOODWARD F I,CRAMER W. Plant functional types and climatic changes:introduction[J].Journal of vegetation science,1996,7(3):306-308.
- [13] GOLLUSCIO R A,SALA O E. Plant functional types and ecological strategies in Patagonian forbs[J].Journal of vegetation science,1993,4(6):839-846.
- [14] 李瑞.北方农牧交错带草地植被动态研究——以宁夏盐池为例[D].北京:北京林业大学,2008.LI R. Grassland vegetation dynamics in the farming-pastoral ecotones in the north of China:taking Yanchi County in Ningxia as an example[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2008 (in Chinese with English abstract).
- [15] 李鸿威,杨小平.浑善达克沙地近30年来土地沙漠化研究进展与问题[J].地球科学进展,2010,25(6):647-655.LI H W, YANG X P. Advances and problems in the understanding of desertification in the Hunshandake Sandy Land during the last 30 years[J].Advances in earth science,2010,25(6):647-655 (in Chinese with English abstract).
- [16] 王树力,范宁宁.浑善达克沙地植被恢复特征研究[J].安徽农业科学,2014,42(2):546-548.WANG S L,FAN N N. Study on the vegetation restoration characteristics of Hunshandake Sand [J].Journal of Anhui agricultural sciences,2014,42(2):546-548 (in Chinese with English abstract).
- [17] 吴新宏.浑善达克沙地植被快速恢复[M].呼和浩特:内蒙古大学出版社,2003.WU X H. The rapid vegetation restoration of Otindag Sandy Land[M]. Hohhot: Inner Mongolia University Press,2003 (in Chinese).
- [18] 王石英,蔡强国,李忠武,等.中国浑善达克沙地生态环境变化研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2006,33(2):110-113.WANG S Y,CAI Q G,LI Z W,et al. Research on eco-environmental changes in Otindag Sandy Land,China[J].Journal of Hunan University(natural sciences),2006,33(2):110-113(in Chinese with English abstract).
- [19] 唐启义. DPS 数据处理系统[M].2版.北京:科学出版社,2007.TANG Q Y. DPS data processing system[M].2nd edition. Beijing:Science Press,2007 (in Chinese).
- [20] 曹洁萍,迟道才,武立强,等. Mann-Kendall 检验方法在降水趋势分析中的应用研究[J].农业科技与装备,2008(5):35-37,40.CAO J P,CHI D C,WU L Q,et al. Mann-Kendall examination and application in the analysis of precipitation trend[J].Agricultural science & technology and equipment,2008(5):35-37,40 (in Chinese with English abstract).
- [21] 李博.生态学[M].北京:高等教育出版社,2000.LI B. Ecology [M].Beijing:Higher Education Press,2000 (in Chinese).
- [22] 刘晓强.京北农牧交错区植物功能型研究[D].北京:中国科学院研究生院(植物研究所),2006.LIU X Q. Study on plant functional types from North-Beijing agro-pastoral ecotone[D]. Beijing:Institute of Botany,Chinese Academy of Sciences,2006 (in Chinese with English abstract).
- [23] 秦浩,董刚,张峰.山西植物功能型划分及其空间格局[J].生态学报,2015,35(2):396-408. QIN H, DONG G, ZHANG F. Classification of plant functional types and spatial pattern in Shanxi Province[J].Acta ecologica sinica,2015,35(2):396-408 (in Chinese with English abstract).
- [24] 李荣平,刘志民,蒋德明,等.植物功能型及其研究方法[J].生态学杂志,2004,23(1):102-106.LI R P,LIU Z M,JIANG D M, et al. Plant functional types and research methods[J].Chinese journal of ecology,2004,23(1):102-106 (in Chinese with Eng-

- lish abstract).
- [25] MILCHUNAS D G, LAUENROTH W K. Quantitative effects of grazing on vegetation and soils over a global range of environments[J]. *Ecological monographs*, 1993, 63: 327-366.
- [26] DAZ S, CABIDO M. Plant functional types and ecosystem function in relation to global change: an multiscale approach[J]. *Journal of vegetation science*, 1997, 8(4): 463-474.
- [27] 杨波, 宝音陶格涛. 退化羊草草原轻耙处理后 30 年植物群落恢复演替规律研究[J]. *中国草地学报*, 2014, 36(2): 36-42. YANG B, BAOYIN Taogetao. Study on restoration succession of plant community in degenerated *Leymus chinensis* steppe after harrowing for thirty years[J]. *Chinese journal of grassland*, 2014, 36(2): 36-42 (in Chinese with English abstract).
- [28] VAN-AUKEN O W. Shrub invasions of North American semi-arid grasslands[J]. *Annual review of ecology and systematics*, 2000, 31(1): 197-215.

Dynamic changes of plant community structure at different recovery stages of aerial-seeding region in Otindag Sandy Land

MU Zongjie^{1,2}, LIU Guohou¹, Guirong³, SU Hailin⁴, LI Hongying¹,
LIU Lihong⁵, CAO Rui¹, JIANG Ying¹, WANG Yadong¹

1. College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010011, China;

2. Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China;

3. Forestry Working Station of Zhenglan Banner in Inner Mongolia, Zhenglan Banner 027200, China;

4. Wuyi Pedigree Station of Zhenglan Banner in Inner Mongolia, Zhenglan Banner 027200, China;

5. Grassland Working Station of Zhenglan Banner in Inner Mongolia, Zhenglan Banner 027200, China

Abstract The dynamic changes of plant community structures at different restoration stages in the aerial-seeding region in Otindag Sandy Land were studied, aiming to understand the restoration characteristics and change rules of vegetation restoration. From 2013 to 2017, vegetation survey tests were conducted in 11 aerial seeding areas in the Otindag Sandy Land. Correspondence analysis, correlation analysis, and Mann-Kendall trend analysis were used to analyze stages of vegetation restoration in the aerial seeding area and to discuss the status and role of each functional plant in the community based on a functional perspective. The results showed that it was divided into three recovery stages across 19 years. Moreover, after aerial seeding, the degree of dependence among the following seven functional plants of tree, shrubs/subshrubs, perennial weeds, annual/biennial weeds, perennial leguminous forage, perennial gramineous forage and annual/biennial gramineous forage, was decreased gradually. Community stability was increased by the number of recovery years. Dominant function type of vegetation restoration was not consistent in different restoration stages, resulting in timing management could be employed at different stages. Consequently, the succession stage and overall development trend of plant community are more conducive to the recovery and reconstruction of the vegetations in degraded sandy land.

Keywords Otindag Sandy Land; vegetation restoration and reconstruction; reversal of desertification; plant community; aerial seeding; functional types plant; community succession; community level; vegetation dynamics

(责任编辑:张志钰)