

DOI: 10.5846/stxb201712292353

吴汪洋,张登山,田丽慧,张明远,周鑫.近 10 年青海湖东沙地人工植被群落特征研究.生态学报,2019,39(6): - .

Wu W Y, Zhang D S, Tian L H, Zhang M Y, Zhou X. Features of artificial plant communities from the east sand region of the Qinghai Lake over the last 10 years. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6): - .

## 近 10 年青海湖东沙地人工植被群落特征研究

吴汪洋<sup>1</sup>, 张登山<sup>1,2,\*</sup>, 田丽慧<sup>3</sup>, 张明远<sup>1</sup>, 周 鑫<sup>2</sup>

1 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875

2 青海大学农林科学院 青海, 西宁 810016

3 青海大学省部共建三江源生态和高原农牧业国家重点实验室, 西宁 810016

**摘要:** 植物治沙是高寒沙地植被重建与生态恢复的重要措施, 人工植被群落特征的研究揭示了植被对高寒沙地生态环境的适应性与改良性, 有益于筛选高寒沙地治沙物种。2008—2017 年, 通过对青海湖东沙地人工治理沙丘上的 11 种人工植被(沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、乌柳(*Salix cheilophila*)、樟子松(*Pinus sylvestris*)、小叶杨(*Populus simonii*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、沙地柏(*Sabina vulgaris*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)、青海云杉(*Picea crassifolia*)和金露梅(*Potentilla fruticosa*))进行植被调查和群落特征分析, 结果显示:(1)除怪柳、金露梅之外, 各人工物种均能保持 80% 以上的当年成活率和 50% 以上的保存率, 总盖度以每年 6.4%—8.8% 的速度增加, 乌柳、小叶杨、柠条和花棒林地群落的丰富度指数、多样性指数和均匀度指数相对较高, 而沙棘和樟子松的群落优势度较高;(2)前 3—5 年通常为各物种成活与生长的关键期, 也是群落形成与多样性增加的快速期;(3)沙棘、乌柳、樟子松、花棒和小叶杨的群落防风固沙效益和土壤水分与养分的改良效益显著, 为高寒沙地典型优良的固沙物种。

**关键词:** 高寒沙地; 人工物种; 生长特征; 群落多样性; 年变化

## Features of artificial plant communities from the east sand region of the Qinghai Lake over the last 10 years

WU Wangyang<sup>1</sup>, ZHANG Dengshan<sup>1,2,\*</sup>, TIAN Lihui<sup>3</sup>, ZHANG Mingyuan<sup>1</sup>, ZHOU Xin<sup>2</sup>

1 School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 Qinghai Academy of Agricultural Forestry Sciences, Xining 810016, China

3 State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, China

**Abstract:** Artificial introduced plants played an important role in alpine and sandy vegetation reconstruction and recovery. Research on these artificial plant communities has helped in the development of sand-fixing mechanisms and ecological improvements; especially in the optimization of adaptive vegetation species. From 2008 to 2017, we selected 11 artificially transplanted species in the east sand area of Qinghai Lake to study. Vegetation sample surveys were performed every summer, and plant growth and community forming features were calculated and analyzed with the following three main results: (1) The majority of species, with the exception of *Tamarix chinensis* and *Potentilla fruticosa*, showed high survival rates above 80 percent and conservation rates of over 50 percent through the entire study period. Some species, e.g., *Hippophae rhamnoides*, *Salix cheilophila*, *Pinus sylvestris*, *Populus simonii*, and *Hedysarum scoparium*, with their fast-growing heights and canopy diameters, exhibited strong adaptability to alpine-sand ecology. Also, the coverages of all plant

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41461002, 41661001); 青海省自然科学基金项目(2018-ZJ-966Q); 青海省科学技术厅项目(2016-HZ-822); 青海省“高端创新人才千人计划”项目

收稿日期: 2017-12-29; 网络出版日期: 2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dshzhang@bnu.edu.cn

communities increased significantly, at a rate of 6.4 percent to 8.8 percent a year, with obvious benefits to the recovery of the sand ecosystem. In species diversity, *Caragana korshinskii*, *S. cheilophila*, *H. scoparium*, and *P. simonii* all had a relatively high diversity indexes including the Simpson's index, the Shannon-Weiner index, the Margalef richness index and Pielou evenness index. *H. rhamnoides* and *P. sylvestris* had remained dominant and constructive in the plant community. (2) The first three to five years were key to plant survival and growth. This period also displayed rapid growth of the forming community and increasing plant diversity. (3) *H. rhamnoides*, *S. cheilophila*, *P. sylvestris*, *H. scoparium*, and *P. simonii* should be selected as pioneer species to control desertification and recover plant ecosystems because of their strong benefits in terms of wind-sand prevention and soil amelioration. Other species could be subsidiary plants during vegetation reconstruction and recovery in all alpine-sand areas.

**Key Words:** alpine sand; artificial introduced plants; growth feature; community diversity; annual change

植被群落的生态特征是研究土地退化地区生态环境特征和生态功能恢复的重要指针,也是土地荒漠化地区沙地植被恢复与重建的重要研究内容<sup>[1-2]</sup>。其中,沙地植被群落多样性的研究对于评价沙地生态功能、优化生物治沙技术和恢复沙地生态环境具有重大的指导意义。对比森林、草原、湿地等生态系统的植被群落研究,沙地植被群落研究存在起步晚、物种少、基础不足等弱点<sup>[3-4]</sup>。当前人工植被群落研究以浑善达克、科尔沁和毛乌素等干旱半干旱沙区的不同类型沙丘为主,研究重点在不同沙地植被群落的结构组成、阶段演替和生态响应方面,研究群落的建群种或优势种则以油蒿(*Artemisia ordosica*)、樟子松(*Pinus sylvestris*)和柠条(*Caragana korshinskii*)为主<sup>[5-8]</sup>。高寒沙区的物种多样性研究主要应用于沙地植被的恢复与重建,通过观测不同人工植被群落的多样性变化来筛选优良固沙物种,通过研究群落多样性与土壤、气候、地形等因子的相互关系来探究人工固沙植被的生态改良机制与效益<sup>[9-10]</sup>。在共和盆地、柴达木盆地和青海湖盆地的沙区,乌柳(*Salix cheilophila*)、柠条和沙蒿(*Artemisia desertorum*)群落的阶段演替揭示了物种多样性不断增加的同时,有效地发挥了防风固沙功能<sup>[11-13]</sup>。当前沙地人工植被群落特征缺乏长期动态的研究,且可供观测的人工移植试验物种不足,因此加强对人工植被群落特征的长年对比观测有助于深化对高寒物种群落演替的认识。

固沙植物的群落特征直接反映了物种的沙地生态适应性,群落内部植被的形态结构、生理特征和生境变化一方面反映固沙植被对寒旱、风沙、盐碱等环境胁迫的抗逆能力,另一方面揭示固沙植物防风固沙和土壤改良等生态效益<sup>[14-16]</sup>。目前,对于干旱半干旱沙区固沙植物的生态适应性研究颇多,以樟子松、云杉(*Picea crassifolia*)为代表的针叶物种通过降低地上生物量,提高蒸腾速度与水势来适应沙地干旱贫瘠的环境<sup>[17-18]</sup>,以沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、乌柳、柠条为主的灌木物种主要通过加强地下根系木质化,减少细根分化和调节植被蒸腾速率来减少水分养分流失,以小叶杨为代表的高大乔木通过降低光合速率和气孔导度增强干旱区的水力适应性<sup>[19-20]</sup>。在高寒沙地治沙过程中,固沙物种同时面临低温干旱和风蚀沙埋危害,长势相对缓慢且死亡率较高,其生态适应性与改良性需要通过群落的生态特征进行验证。同时群落特征的变化是植被恢复效益的根本体现,群落的风沙防护、土壤改良等生态修复效益也是群落生态功能评估的基本因子。当前对高寒沙区试验物种的生态修复效益缺乏长期定点观测,人工造林工程缺乏植被修复的长期效益评估。因此,加强对不同固沙植被的群落特征与生态修复效益评析,有利于为高寒生物治沙工作提供理论指导。本文通过监测青海湖沙地近 10 年的人工植被群落变化来探究高寒治沙物种的群落发展特征,探讨沙地植被的生态适应性及改良性,从而实际指导植物治沙中的物种筛选和优化配置工作。

## 1 研究区概况

青海湖湖东克土沙地位于 100°47'—100°50'E, 36°47'—36°50'N, 海拔 3176—3340 m (图 1), 地处三大自然环境区域的交汇地带, 是高寒半干旱典型生态脆弱区<sup>[21]</sup>。本区年均气温为 0.7℃, 年均降水量约 370 mm, 冬季盛行 W-NW 风, 年均风速约 4.5 m/s, 全年 N-NE 方位风频最高, 约占全年 35%。2007 年起, 流动沙区进

行了大面积的麦草方格沙障(1.5 m×1.5 m 规格)铺设与生物造林工程<sup>[22-23]</sup>。至 2016 年,已形成近 100 hm<sup>2</sup>的防沙治沙试验示范区,引进的物种有:沙棘、乌柳、樟子松、小叶杨(*Populus simonii*)、柠条、沙蒿、花棒(*Hedysarum scoparium*)、沙地柏(*Sabina vulgaris*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)、青海云杉、金露梅(*Potentilla fruticosa*)等,涉及胡颓子科、菊科、豆科、蔷薇科、杨柳科等 12 科 23 属,加之其它自然植被共计有 27 科 58 属 71 种<sup>[24]</sup>。2008—2017 近 10 年间,各林地形成了以人工植被为主的植被群落,大面积流动沙丘逐渐转化成半固定或固定沙丘。

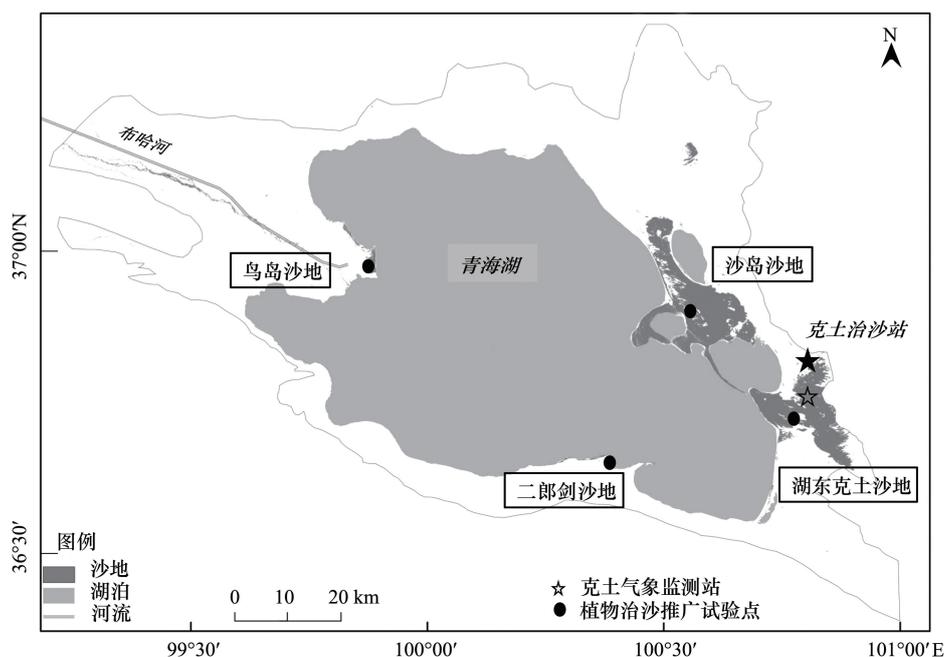


图 1 青海湖周沙地分布图

Fig.1 Map of sand land distribution around the Qinghai Lake

## 2 研究方法

### 2.1 样地选取与测量

2008—2017 年,在青海湖东克土防沙治沙试验示范区选取 10 处固沙植物林地观测点(表 1)。在人工植被移植之前,各点均为几无植被覆盖流动沙丘,沙丘走向(NE-SW)、坡向(W 坡)、坡度( $<5^\circ$ )、海拔(3186—3188 m)和形态(新月形沙丘链)相近。物种移植当年的沙丘土壤环境也具有高度相似性,沙地剖面(0—60 cm)平均粒径为 370  $\mu\text{m}$ ,以中砂(46%)和细砂(41%)为主,分选性较好;土壤容重为 1.55—1.61  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,体积含水率约为 2.88%,有机质含量约为 1.5  $\text{g}/\text{kg}$ 。各人工物种作为各自沙丘群落的建群种,在移植 1—3 年内促进了群落单层灌木纯林或灌丛草地的形成。2008—2017 年每年 7 月,在各林地观测沙丘的迎风坡至丘顶部位各选取 4 个 5 m×5 m 规格的灌木样方,并在灌木样方内的四角与中心位置选取 5 个 1 m×1 m 的草本样方。根据每木检尺,观测样方内植被种类( $S$ )、数量( $N_i$ )和物种存活状况,测量各植株株高和冠径,并对不同林地群落的植被生长指标与群落多样性指标进行平均统计。统计方法均采用 SPSS 中的单因素方差分析与相关性分析,制图主要在 Excel 软件中完成。

群落生境特征揭示群落生态修复效益及其群落发展动力条件,是植物治沙中物种筛选和混交配置的理论基础,其指标主要包括风沙活动和土壤性质两类,前者主要包括地表粗糙度( $z_0, \text{cm}$ )、输沙率( $TR, \text{g cm}^{-2} \text{min}^{-1}$ )、防风效益( $F_w, \%$ )和固沙效益( $F_s, \%$ ),后者包括土壤平均粒径  $\varphi$  值、土壤容重( $q, \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )、土壤体积含水量( $W, \%$ )、土壤有机质( $TC, \text{g}/\text{kg}$ )和速效氮( $AN, \text{g}/\text{kg}$ )、速效磷( $AP, \text{g}/\text{kg}$ )、速效钾( $AK, \text{g}/\text{kg}$ )等养分

含量。其中风速和输沙量观测通过 CR1000 型梯度风速仪(9 个高度层)和平口式梯度集沙仪(60 cm 高,分 30 层,各进沙口规格为 2 cm×5 cm)同步开展(2010—2016 年每年 3—4 月连续观测 10—30 d),风速观测于每年春季 4 月中下旬进行,数据采集频率为 1 次/1 min,连续 10 min 数据进行平均。以流沙地的旷野风速为参照点,对比各林地沙丘 8—9 m/s 旷野风速条件下 2 m 高度风速特征,每年各林地风场观测场数 5—10 场,每场持续观测 30 min。梯度集沙仪同样以流沙地为参照点,同步观测 10 min 内林地输沙量,每点每次设置两台集沙仪进行重复观测,每点在 8—9 m/s 旷野风速下至少集沙 3 次。2010 年和 2016 年 8 月,在各林地分层采集株下 60 cm 深剖面土样(0—5 cm、5—10 cm、10—20 cm、20—40 cm、40—60 cm),并于当年完成土壤理化性质测定。其中土壤粒径采用马尔文激光粒度仪测试法,土壤容重与含水量采用环刀法,土壤有机质与养分在青海大学分析测试中心完成,各指标测试样本不少于 3 个。

表 1 试验区观测林地的基本情况

Table 1 Basic condition of different plant forests in experimental area

观测林地 Forests	林相 Forest form	移植年份 Afforested year	造林密度/(株/hm <sup>2</sup> ) Afforested density	种植方法 Afforestation techniques
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	灌木纯林	2007	4500	实生苗栽植
乌柳 <i>Salix cheilophila</i>	灌木纯林	2009	5000	高杆深栽
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i>	乔木纯林	2009	4500	实生苗栽植
小叶杨 <i>Populus simonii</i>	乔木纯林	2007	2500	高杆深栽
柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	灌木纯林	2009	9200	种子直播
沙蒿 <i>Artemisia desertorum</i>	灌丛沙堆	2009	10000	种子直播
花棒地 <i>Hedysarum scoparium</i>	灌草混交林	2009	12000	种子直播
沙地柏 <i>Sabina vulgaris</i>	灌草混交地	2009	4000	实生苗栽植
怪柳 <i>Tamarix chinensis</i>	灌木纯林	2009	4500	枝条扦插
青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	乔木纯林	2013	10000	实生苗栽植
金露梅 <i>Potentilla fruticosa</i>	灌草混交地	2009	4500	实生苗移植

## 2.2 统计指标与方法

根据样方内所有物种每木测量,统计群落生长特征指标与多样性指标( $\alpha$ 多样性测度法)<sup>[25]</sup>,具体包括:

(1)建群种的成活率( $R_1, \%$ )与保存率( $R_2, \%$ )是决定物种是否适应沙地环境与筛选优良固沙物种首要指标,关乎物种的生态改良效益和经济成本。

$R_1$ :样方内某物种所有植株的成活数量占总调查株数的百分比。

$R_2$ :标记物种当年成活株数  $N_i$ 占原来(移植当年)总株数的百分比。

(2)株高( $H, m$ )与冠径( $P, m$ )揭示植株的三维生长的形态和速度,是物种生态适应能力的根本体现,也是物种防风固沙能力的直观体现,也是物种防风固沙能力的直观体现。

$H$ :植株冠顶到根径沙面的垂直距离; $P$ :冠盖的直径,为植株冠幅中最大幅度(南北向长度  $l_{N-S}, m$ )和最小幅度(东西向长度  $l_{W-E}, m$ )之间的平均值。

$$P = \frac{l_{W-E} + l_{N-S}}{2}$$

(3)群落总盖度( $C, \%$ )是指所有植株总冠幅面积占样方面积的百分比。总盖度是群落兴衰的外在直观体现,也是评价物种生态修复效益的关键指标。根据单株植物的南北长和东西长所覆盖的冠幅面积,统计其和值占样方面积的百分比。

$$C = \frac{\sum_i^n (l_{W-E} \times l_{N-S})}{25} \times 100\%$$

(4)Margalef 丰富度指数( $M$ )

$$M = \frac{S - 1}{\ln N}$$

式中, $S$  为群落中物种的总数目, $N$  为群落中全部物种的个体数。

(5) Simpson 多样性指数( $D$ )

$$D = 1 - \sum_{i=1}^s \left(\frac{N_i}{N}\right)^2$$

式中, $N_i$  为种  $i$  的个体数, $N$  为群落中全部物种的个体数。

(6) Shannon-wiener 多样性指数( $H'$ )

$$H' = - \sum \left(\frac{N_i}{N} \times \ln \frac{N_i}{N}\right)$$

(7) Pielou 均匀度指数( $E$ )

$$E = \frac{H'}{\ln S}$$

(8) 重要值( $Z$ ) = 相对密度( $RD$ ) + 相对频度( $RF$ ) + 相对盖度( $RC$ )

$RD = (\text{某种植被的密度} / \text{全部植被的总密度}) \times 100\%$ ;  $RF = (\text{该种的频度} / \text{所有种的频度总和}) \times 100\%$ ;  $RC = (\text{某一物种的分盖度} / \text{所有分盖度}) \times 100\%$ 。

(9) 粗糙度( $z_0$ , cm)

$$\lg z_0 = \frac{\lg z_2 - A \lg z_1}{1 - A}, A = u_2 - u_1$$

式中, $u_2, u_1$  分别为  $z_2$  和  $z_1$  高度下的风速值(m/s)。

(10) 防风效益( $F_w$ , %) 与固沙效益( $F_s$ , %)

$$F_w = \frac{V' - V}{V'} \times 100\%$$

$$F_s = \frac{Q' - Q}{Q'} \times 100\%$$

式中, $V$  与  $V'$  分别为人工林地与流沙对照地 2 m 高度的平均风速(m/s),  $Q$  与  $Q'$  分别为人工林地与流沙地近地面 60 cm 高的总输沙量(g)。

### 3 结果与分析

#### 3.1 群落建群种生长特征

##### 3.1.1 成活率( $R_1$ )与保存率( $R_2$ )

图 2 显示,除怪柳之外,其余物种每年成活率均大于 80%,乌柳、柠条和樟子松则大于 90%,5—10 年生的各物种保存率为 30%—80%。3—5 年生长期间,各物种每年成活率为 70%—95%,总体上升。但除柠条、青海云杉与沙地柏之外,其它物种保存率均低于 60%。2012 与 2013 年各物种成活率与保存率均遭遇“低谷”,植株死亡量较大。2013 年后,随着植株的生长与繁殖,各物种的成活率维持在 95%—100%,保存率处于稳定状态,仅怪柳、小叶杨和金露梅每年存在 5%—20%的死亡率。物种差异上,8—10 年生的沙棘、乌柳、樟子松和花棒的保存率稳定在 50%—60%,5—8 年生的柠条、沙地柏和青海云杉保存率最高(>70%),为高保存率、短减幅期的快速定居物种;沙蒿和小叶杨保存率较小(30%—40%)但新枝和种子繁殖后的成活率逐年提升;怪柳( $R < 5\%$ )和金露梅( $R < 15\%$ )则是较低保存率和长减幅期的脆弱性物种。综合分析,前 3 年是物种成活的关键期,年减幅大,中间 3—4 年则是减幅低速波动期,7—8 年后大部分物种进入零减幅稳定期。

##### 3.1.2 株高( $H$ )与冠径( $P$ )

由图 3 可知,8—10 年生的沙棘、乌柳、樟子松、小叶杨和花棒均为株高大于 1 m 的灌乔木物种,且株高的

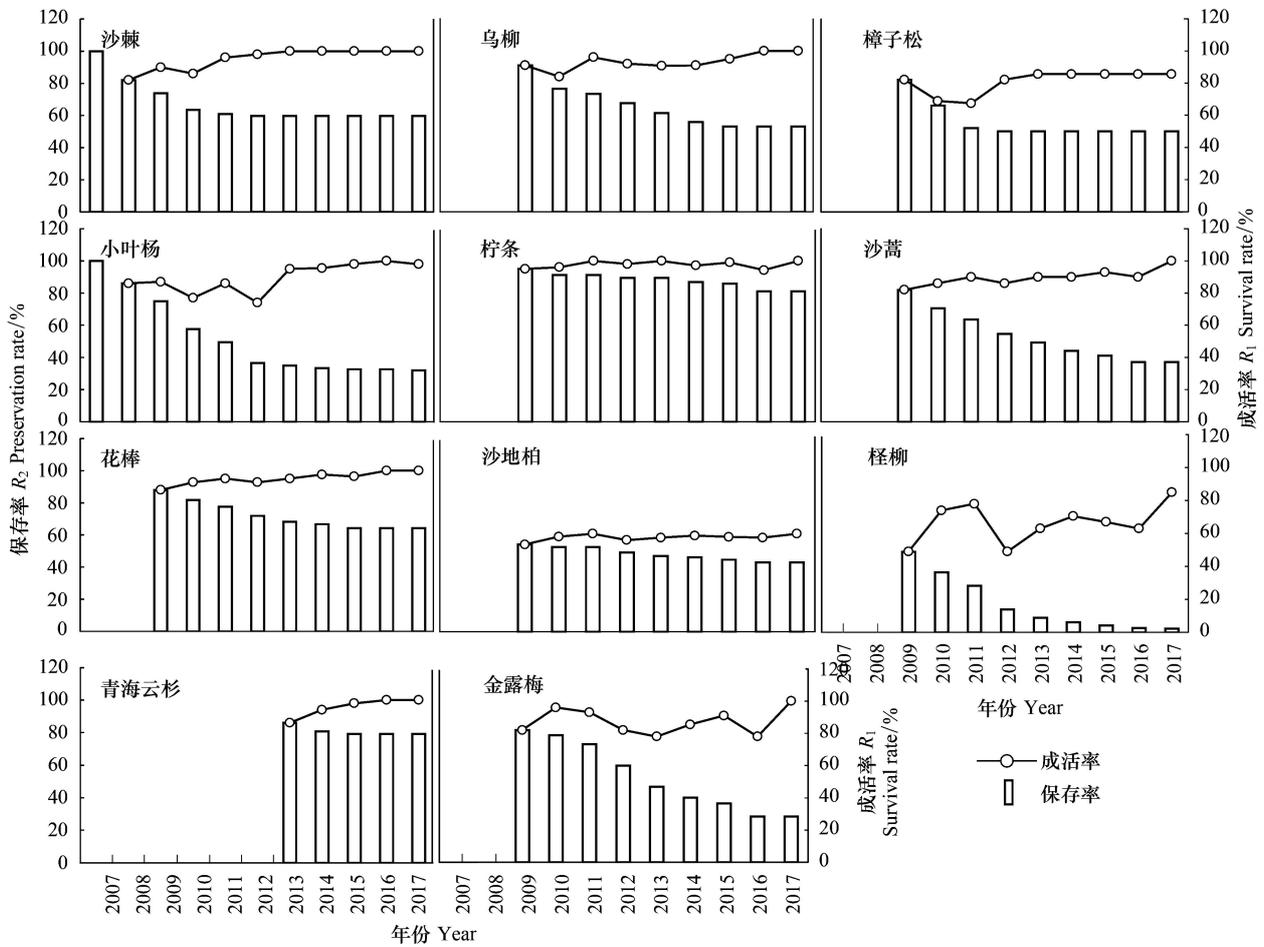


图2 2008—2017年不同人工植被的成活率与保存率/%

Fig.2 Survival rate and conservation rate change of different artificial plants in 2008—2017

年变化表现显著的线性递增趋势( $R^2 > 0.85$ )。沙蒿、柠条和金露梅则是株高低于0.5 m的低矮灌木或半灌木,表现出波动式递增变化。水平匍匐生长的沙地柏的株高年变化最小,而怪柳和金露梅每年干梢现象严重,株高后期出现逐年递减现象。在物种增速差异上,沙棘、柠条、小叶杨和青海云杉前期生长快,后期增幅趋于稳定;乌柳、樟子松、花棒的后期增速大于前期,指数增长模式更为显著( $R^2 > 0.96$ )。总体上,每年的高生长表现为:乔木>半乔木或灌木>草本。

表2显示,株高较大物种均具有较大冠径( $P > 0.8$  m),沙棘、乌柳和小叶杨最为突出( $P > 1.0$  m)。2013—2017年,各物种冠径增长较快,沙地柏、云杉和柠条年增幅(35%)最高,樟子松、沙棘、乌柳次之(23%—27%),小叶杨与花棒的增幅约为12.6%,沙蒿、金露梅与怪柳则出现负增长现象。

### 3.2 群落生态特征

#### 3.2.1 群落总盖度(C)

以人工先锋物种建立起来的群落盖度逐年增加,除沙地柏、怪柳和金露梅沙丘之外,其余人工植被沙丘的夏季覆盖度均超过65%,沙棘、沙蒿、乌柳、樟子松和花棒沙丘总盖度超过75%(图4)。在盖度的年增幅上,各物种前期(1—5年生)增幅约为后期(6—10年生)的3—20倍,且前2—3年增速最快。6—10年生的植被群落(沙蒿、沙地柏、金露梅沙丘群落除外)盖度保持年均5%—10%的速度增加。在近10年盖度增速上,沙棘/乌柳/樟子松/花棒>柠条/沙蒿/小叶杨/青海云杉>沙地柏>怪柳/金露梅。

#### 3.2.2 群落多样性指数

近10年,各人工植被群落的物种多样性均有一定程度的增加(表3),各沙丘除建群种之外,也出现部分

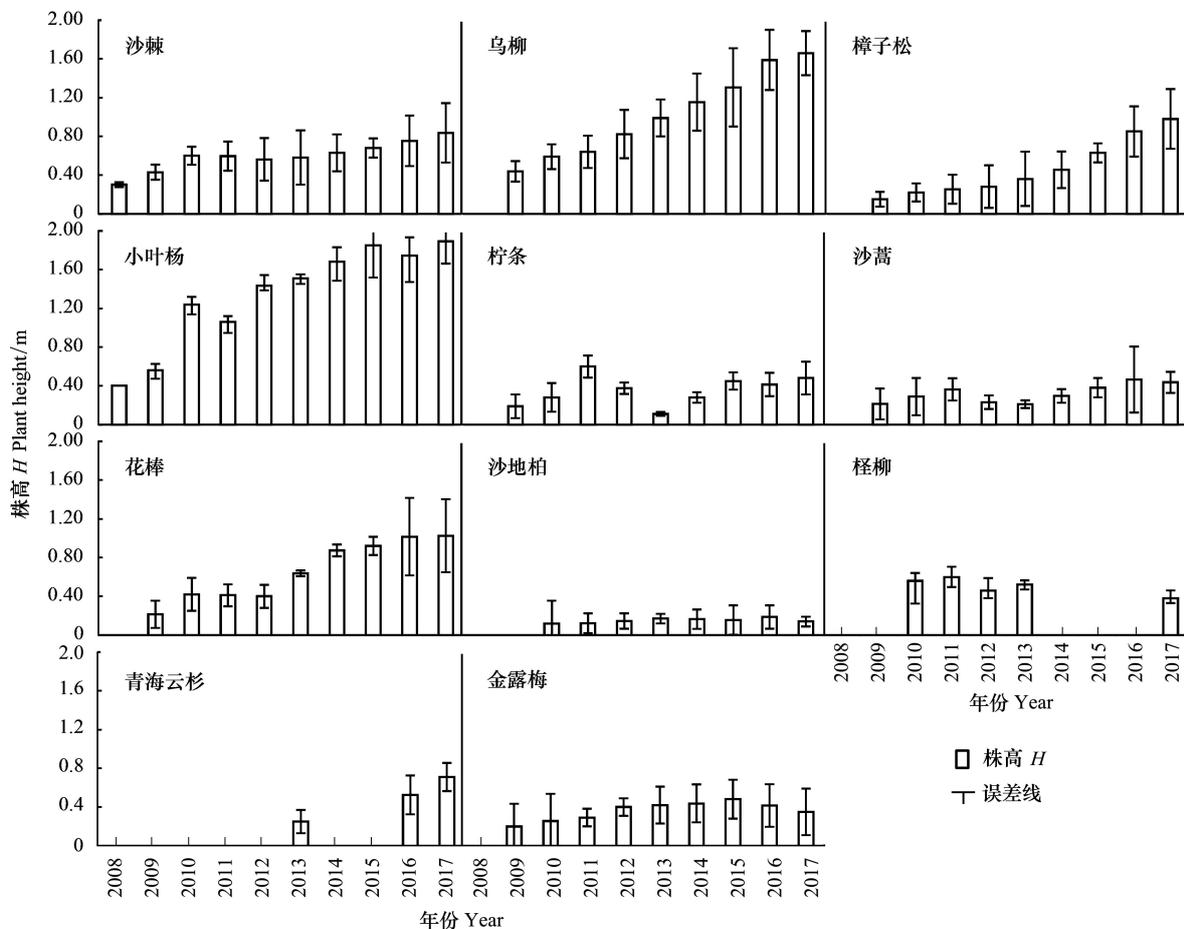


图3 2008—2017年不同人工植被的株高/m

Fig.3 Average height change of different artificial plants in 2008—2017

表2 2009—2017年不同人工植被平均冠径/m

Table 2 Crown diameter change of different artificial plants in 2009—2017

人工林地 Artificial forests	2009	2011	2013	2015	2017
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	0.42±0.14	0.6 ± 0.18	0.61±0.14	0.81±0.29	0.93±0.37
乌柳 <i>Salix cheilophila</i>	0.24 ± 0.08	0.42±0.12	0.88±0.14	1.28±0.51	1.29±0.39
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i>	0.28 ± 0.05	0.54±0.06	0.54±0.16	0.66±0.22	0.84±0.39
小叶杨 <i>Populus simonii</i>	0.58±0.07	0.81±0.33	1.05±0.57	1.53±0.39	1.32±0.56
柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	0.08±0.05	0.22±0.10	0.48±0.18	0.89±0.29	0.83±0.36
沙蒿 <i>Artemisia desertorum</i>	0.25±0.16	0.46±0.29	0.66±0.24	0.94±0.30	0.84±0.34
花棒地 <i>Hedysarum scoparium</i>	0.22±0.20	0.55±0.36	0.68±0.27	0.60±0.29	0.61±0.22
沙地柏 <i>Sabina vulgaris</i>	0.24±0.10	0.30±0.18	0.35±0.14	0.48±0.30	0.61±0.22
怪柳 <i>Tamarix chinensis</i>	-	-	0.26±0.11	0.42±0.17	0.45±0.19
青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	-	-	0.38±0.12	0.39±0.11	0.38±0.15
金露梅 <i>Potentilla fruticosa</i>	0.10±0.12	0.29±0.13	0.36±0.11	0.31±0.21	0.32±0.16

跨界繁殖与扩张的其它人工物种(如萌孽能力较强的沙棘、柠条、沙地柏),以及大量一年生与多年生的自然物种,如沙蒿、猫儿刺(*Ilex pernyi*)、棘豆(*Oxytropis imbricata*)、赖草(*Leymus secalinus*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)等。2008—2017年间,各林地物种增加数量为3—6种,柠条地和沙的增数较少。受群落株数影响,群落丰富度指数并非与物种种类数成正比,群落排序为:乌柳林/柠条地>小叶杨林/花棒林>沙棘林/樟子松

林>沙蒿地,且柠条地、花棒林年增速最大,小叶杨林与沙蒿地最小,沙棘林与沙蒿地的年变化最小。

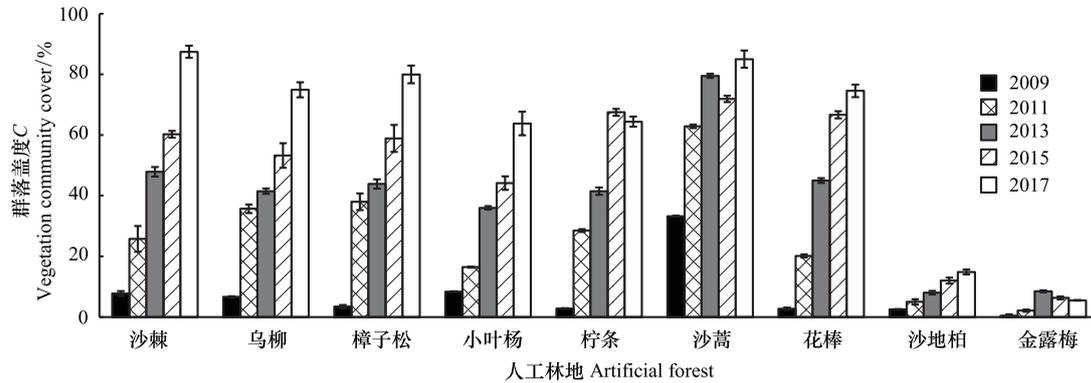


图4 2009—2017 不同植被群落的盖度变化/%

Fig.4 Coverage change of different plant community in 2009—2017

表3 2009—2017 年不同植被群落多样性参数统计表

Table 3 Statistics of different plant community diversity parameters in 2009—2017

人工林地 Artificial forests	年份 Year	S	M	D	H'	E	Z
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	2009	2	0.6838	0.3865	0.6647	0.6589	245.00
	2011	3	0.7018	0.5103	0.7978	0.7262	186.41
	2013	3	0.9331	0.5523	0.8604	0.5346	139.36
	2015	5	1.0000	0.5489	1.2534	0.7788	149.57
	2017	6	1.0090	0.5902	1.4720	0.8215	196.08
乌柳 <i>Salix cheilophila</i>	2009	3	1.2712	0.5777	0.9986	0.6089	155.56
	2011	4	1.2568	0.7011	1.2998	0.7376	61.28
	2013	4	1.1159	0.7353	1.2223	0.8817	86.98
	2015	5	1.7724	1.0360	1.3536	0.8410	105.31
	2017	7	1.5796	0.7419	1.4821	0.7617	131.98
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i>	2009	3	0.4332	0.4328	0.6749	0.6539	218.00
	2011	3	0.5283	0.5278	0.8230	0.7110	178.77
	2013	4	0.7486	0.7480	1.1663	0.8413	126.15
	2015	5	1.0228	0.5975	1.3822	0.7714	135.60
	2017	6	0.9944	0.6796	1.4611	0.7509	152.10
小叶杨 <i>Populus simonii</i>	2009	2	1.2511	0.4025	0.3604	0.5200	282.55
	2011	2	1.2121	0.6400	0.3065	0.4422	257.55
	2013	3	1.3211	0.2975	0.4741	0.4316	115.94
	2015	4	1.4300	0.6027	1.2075	0.75	120.07
	2017	6	1.3923	0.7929	1.6494	0.9206	124.19
柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	2009	2	0.5332	0.3392	0.2738	0.7811	202.92
	2011	3	0.8633	0.5491	0.4432	0.7666	125.33
	2013	3	1.1900	0.7569	0.6110	0.5561	90.93
	2015	4	1.6608	1.1013	0.9937	0.6174	52.44
	2017	4	1.5869	0.7319	1.4850	0.8288	130.64
沙蒿 <i>Artemisia desertorum</i>	2009	3	0.6375	0.5160	0.8150	0.4481	138.33
	2011	3	0.4289	0.4792	0.9638	0.3795	197.82
	2013	4	0.5761	0.6037	1.0431	0.4740	88.98
	2015	4	0.8862	0.7947	1.0286	0.3555	90.22

续表

人工林地 Artificial forests	年份 Year	S	M	D	H'	E	Z
	2017	4	0.8354	0.6388	1.1660	0.8411	101.22
花棒	2009	2	0.6380	0.5057	0.5386	0.7821	210.00
<i>Hedysarum scoparium</i>	2011	3	0.7789	0.6175	0.6576	0.6406	172.00
	2013	3	0.8058	0.6388	0.6803	0.6192	166.27
	2015	5	1.3429	1.3659	1.37	0.3515	149.72
	2017	6	1.3521	0.7347	1.5008	0.8376	125.54

S:物种数,species number;M:Marglef 丰富度指数,Marglef richness index;D:Simpson 多样性指数,Simpson diversity index;H':Shannon-Wiener 多样性指数,Shannon-Wiener diversity index;E:Pielou 均匀度指数,Pielou evenness index;Z:重要值,Important value

由 D 与 H' 可知,小叶杨林>乌柳林/柠条地/花棒林>樟子松林/沙棘林/沙蒿地,柠条地、小叶杨林与花棒林的年增速最快,这与丰富度指数的年变化趋势基本一致。各林地群落均匀度指数随各物种前期死亡率的增加而迅速降低,5—7 年后,各林地物种进入稳定生长期。随着物种丰富度和多样性的提升,群落均匀度则缓慢增加,增速最为显著的为小叶杨林与沙蒿地。乌柳林,樟子松林与沙棘林的均匀度有所下降,但年变化相对最小。怪柳地与金露梅地由于长势较差,沙丘环境改良效果小,各多样性指数近年均处于低值,而青海云杉林生长期相对较短,生境相对独特,缺乏连续数据观测。

虽然各群落多样性不断增加,但群落建群种的优势整体下降(表 3)。2009 年,除沙蒿与乌柳林外,其余群落建群种的重要值均大于 200。2017 年,除沙棘之外,其余林地建群种普遍低于 150。2011—2015 年,各群落的建群种重要值均出现大幅度的下降,反映该时段其余物种得到大量新生与快速生长。在近 10 年建群种重要值的年均降幅上,小叶杨降幅达到每年 17%,其次是花棒与柠条(9%),沙棘与乌柳的重要值降幅小且近年上升趋势显著。

### 3.3 群落生态修复特征

对于 5—10 年生的人工林地,高大灌木和乔木种的群落内出现了显著的风沙活动特征和表土理化性质变化。沙地柏、金露梅作为低矮型的混播物种,近 10 年防风作用小于 10%,地表固沙效益低于 60%,而表土理化性质与流沙地几无差异;怪柳由于死亡率较高、长势较差,群落衰退严重,防风固沙作用在 2012 年后逐渐减弱;青海云杉由于生态观测数据匮乏,故以下主要分析其余物种的群落风沙活动和土壤性质的年变化。

#### 3.3.1 群落风沙活动特征

随着群落覆盖度与多样性的增加,群落对风沙危害的防护作用不断加强,根据近 10 年不同林地地表粗糙度与输沙率观测(图 5),2016 年的地表粗糙度约为 2010 年的 2—11 倍,而输沙率则为 1/10—1/2(降幅 40%—85%),其中地表粗糙度的林地比较为:乌柳>沙棘>樟子松>沙蒿>小叶杨;输沙率则为沙蒿>小叶杨>樟子松>沙棘>乌柳。粗糙度的增加和输沙率的降低最终体现在各人工林地的防风固沙效益上。在旷野风速为 8.5—9.0 m/s 时,除沙蒿地之外,各林地防风与固沙效益在近 6 年分别增加了 25%—345%和 10%—30%,沙棘、樟子松和小叶杨在 2012 年前的增速快于后四年,而乌柳与沙蒿则是后期快于前期。综合比较,乌柳、沙棘与小叶杨群落的防风(>30%)固沙效益(>90%)最为显著。此外花棒和柠条地表年输沙率(2015—2017 年)为流沙地的 13%—20%,固沙效益为 80%—90%。

#### 3.3.2 群落土壤环境特征

群落的发展对立地土壤结构的改良总体较为缓慢,但固沙植被的根系和枯枝落叶为群落土壤提供了养分来源,茎叶与根系有效地防止了地表水与地下水的流失。根据各林地 2016 年与 2010 年的土壤特征变化值统计(表 4),各林地土壤粒径具有一定细化趋势,但仍以中砂( $1.6 < \phi < 2.2$ )为主。土壤体积含水量近 6 年增幅均小于 2%,物种差异较大,乌柳、小叶杨和花棒的土壤含水量( $3\% < W < 5\%$ )增幅较大,沙棘与沙蒿则出现一定降幅。土壤有机质( $8 < TC < 18$  g/kg)与主要速效养分含量整体表现出增长趋势,有机质与速效钾( $0.03 < AK < 0.20$  g/kg)增幅显著,速效磷( $AP < 0.003$  g/kg)的年变化微弱,速效氮( $0.01 < AN < 0.03$  g/kg)的物种差异性最小。物

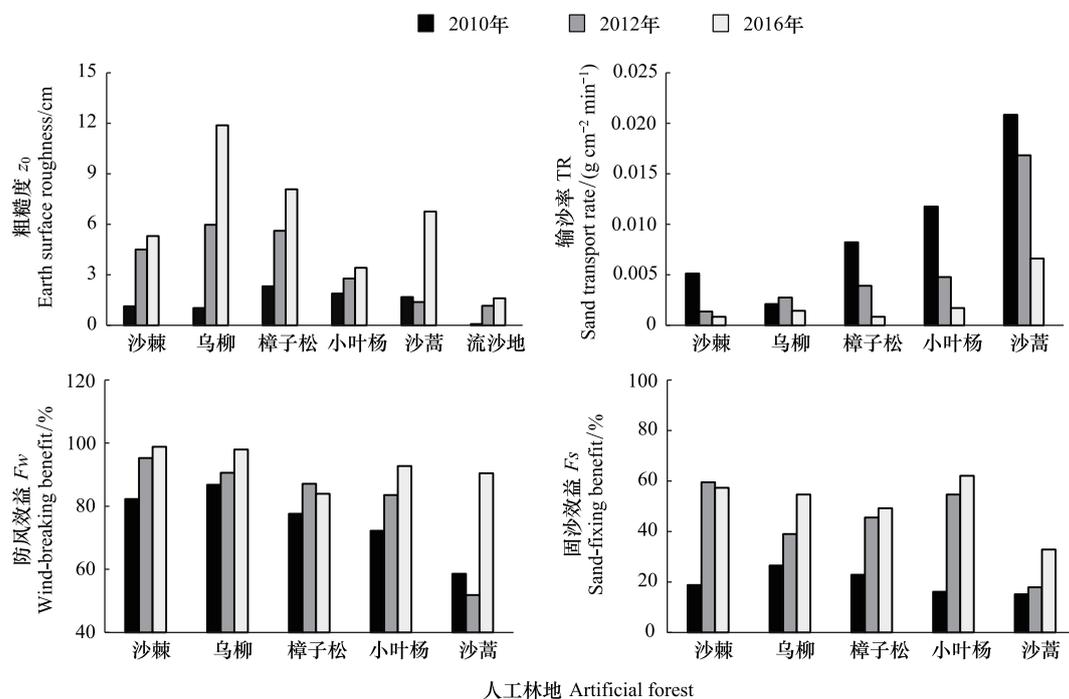


图5 2010、2012和2016年主要人工植被林地的风沙活动与防护特征

Fig.5 Wind-sand protection features of typical artificial forests in the years of 2010、2012 and 2016

种间,樟子松、乌柳、柠条和沙蒿的各养分含量增长显著,花棒林和柠条地分别在有机质与速效氮指标上增幅最大。

表4 不同人工林地2010年与2016年的土壤特征指标的变化值

Table 4 Variations of different soil property indexes from 2010 to 2016

人工林地 Artificial forests	$\Delta\varphi$	$\Delta\rho$	$\Delta TC$	$\Delta W$	$\Delta AN$	$\Delta AP$	$\Delta AK$
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	-0.1523	0.0098	0.9900	-0.0232	0.0018	0.0024	0.0468
乌柳 <i>Salix cheilophila</i>	-0.0536	0.0516	1.4200	0.7856	0.0029	0.0023	0.0716
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i>	-0.3717	-0.0700	2.0167	0.3411	0.0090	0.0024	-0.0073
小叶杨 <i>Populus simonii</i>	-0.0506	-0.0368	0.3800	1.5502	0.0033	0.0029	-0.0096
沙蒿 <i>Artemisia desertorum</i>	-0.1655	-0.0175	1.6033	-0.0895	0.0081	0.0029	0.1516
柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	-0.3627	0.0447	1.1100	0.2568	0.0162	0.0030	0.1246
花棒 <i>Hedysarum scoparium</i>	-0.2916	0.0743	3.0000	0.8225	-0.0028	0.0030	0.0406

$\varphi$ : 平均粒径( $\mu\text{m}$ ), average grain diameter;  $\rho$ : 土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), bulk density;  $TC$ : 有机质含量( $\text{g}/\text{kg}$ ), organic matter content;  $W$ : 土壤体积含水量(%), soil volumetric moisture content;  $AN$ : 速效氮( $\text{g}/\text{kg}$ ), available nitrogen;  $AP$ : 速效磷( $\text{g}/\text{kg}$ ), available phosphorus;  $AK$ : 速效钾( $\text{g}/\text{kg}$ ), available potassium;  $\Delta$ 代表2016年减去2010年的差值

## 4 讨论

### 4.1 群落物种的生态适应差异

不同人工物种的生长形态与群落特征差异反映了各固沙物种的高寒沙地生态适应能力,在立地条件相似、生长期相近的前提下,群落多样性的物种差异一方面是由物种本身的生理生态适应机制决定,另一方面是受制于人工造林的方法和结构形态<sup>[26-27]</sup>。沙棘、乌柳、樟子松、花棒、柠条和沙地柏具有较高的成活率和保存率主要基于这些物种发达的栅栏组织、叶片旱生解剖结构和水分利用效率,表现出极强的耐寒耐旱、耐风沙、耐贫瘠的生长习性<sup>[15-16]</sup>,而怪柳、金露梅、云杉对沙地水分、风沙、庇荫等环境胁迫的抗逆性较弱。沙棘、乌

柳、花棒和沙地柏的枝条和根系萌孽能力强,沙蒿、柠条、花棒等种子传播繁殖能力强,因而这些群落表现出较高的覆盖度与多样性<sup>[28-29]</sup>。同时,沙棘、乌柳、樟子松、小叶杨等实生苗深栽的造林方法便于幼苗获取地下水、抵抗风吹沙打,对比花棒、柠条、沙蒿的种子直播方法,具有更好的风沙环境适应能力。造林密度与形态影响草本、灌木、半乔木林的资源竞争和环境胁迫的抗逆性,基于 1.5 m 或 2 m 间距的麦草方格沙障搭配实生苗造林的方法能保障植株足够的生长空间与水肥资源。试验区中沙蒿、柠条、花棒条带直播密度相对较大,虽然 10 年生群落盖度与多样性指数较高,但保存率、株高与建群种优势度不及沙棘、乌柳、樟子松等灌木半乔木,后者因适宜的方格形态与种植密度,在增加群落多样性的同时也保持了自身主导的群落优势。

#### 4.2 群落发展与生态修复关系

不同阶段的群落特征是群落演替与沙地生态恢复的直观表现,同时,群落所处的沙地生态环境的改良程度与恢复速度影响群落物种的生长和多样性的增加<sup>[30-32]</sup>。根据 2010—2016 年典型固沙植被群落生长特征与当年风沙活动特征的相关性分析(表 5),各物种群落生长特征与地表粗糙度、防风效益和固沙效益主要表现为正相关性,与输沙率表现出负相关性,尤以乌柳、樟子松和小叶杨群落表现显著。但是,沙棘群落的株高、冠径和多样性,沙蒿群落的冠径、盖度指标与各风沙活动指标的相关性相对较弱。此外樟子松群落的株高、冠径与防风固沙效益的正相关性、乌柳群落与输沙率的负相关性均表现较弱。由此可见固沙植被群落的演替特征深受风沙活动强度影响,同时群落风沙环境与植被的防风固沙效益更多地受到群落综合指标的交互影响。

表 5 典型固沙植物生长特征与风沙活动特征的相关性

Table 5 Correlation indexes between wind-sand activities and plant community features

风沙特征 Wind-sand features	群落特征 Plant community features	沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	乌柳 <i>Salix cheilophila</i>	樟子松 <i>Pinus sylvestris</i>	小叶杨 <i>Populus simonii</i>	沙蒿 <i>Artemisia desertorum</i>
$z_0$	$R_2$	0.98 **	1.00 **	0.90 **	0.96 **	0.86 **
	$H$	0.50	0.97 **	0.87 **	0.97 **	0.98 **
	$P$	0.69 *	1.00 **	0.82 **	0.99 **	-0.06
	$C$	0.82 **	0.98 **	1.00 **	0.93 **	0.54
	$H'$	0.71 *	0.72 *	1.00 **	0.88 **	0.90 **
$TR$	$R_2$	-0.99 **	-0.63	-0.91 **	-0.99 **	-0.98 **
	$H$	-0.44	-0.74 *	-0.86 **	-0.94 **	-0.87 **
	$P$	-0.64 *	-0.49	-0.81 **	-0.97 **	-0.27
	$C$	-0.79 *	-0.37	-1.00 **	-0.88 *	-0.78 *
	$H'$	-0.66 *	-0.98	-1.00 **	-0.81 *	-0.99 **
$F_w$	$R_2$	1.00 **	1.00 **	0.99 **	1.00 **	0.94 **
	$H$	0.29	0.97 *	0.67	0.87 *	0.93 **
	$P$	0.50	1.00 **	0.60	0.92 **	0.14
	$C$	0.67 *	0.97 **	0.97 **	0.80 *	0.70 *
	$H'$	0.53	0.73 *	0.94 **	0.71 *	0.97 **
$F_s$	$R_2$	0.98 **	1.00 **	0.94	0.95 **	0.79
	$H$	0.52	0.99 **	0.27	0.98 **	1.00 **
	$P$	0.70 *	0.98 **	0.18	1.00 **	-0.17
	$C$	0.84 **	0.94 **	0.77 *	0.95 **	0.44
	$H'$	0.73	0.81	0.69	0.89	0.85

$z_0$ : 地表粗糙度 (cm), surface roughness;  $TR$ : 地表输沙率 ( $\text{g cm}^{-2} \text{min}^{-1}$ ), surface sediment transport rate;  $F_w$ : 防风效益 (%) wind-breaking benefit;  $F_s$ : 固沙效益 (%), sand-fixing benefit;  $R_2$ : 保存率 (%), preservation rate;  $H$ : 植株高度 (m), plant height;  $P$ : 植株冠径 (m), crown diameter;  $C$ : 群落盖度 (%), vegetation community cover;  $H'$ : Shannon-Wiener 多样性指数, Shannon-Wiener diversity index

此外,不同植被群落的沙丘土壤环境具有显著差异,由于沙棘、乌柳、樟子松、沙蒿、花棒等物种早期较高的防风固沙效益和根系的土壤改良效益,群落沙丘 3—5 年内由流动形态转为固定、半固定形态,地表风蚀危

害显著下降<sup>[22]</sup>。而小叶杨、沙地柏、柽柳、云杉等沙地固沙效益较慢,近 10 年仍处于半固定或半流动形态,强劲的风沙流不仅造成地表水分养分流失,也直接带来沙埋危害。群落多样性特征与群落的土壤水肥含量是互相促进的,沙蒿、沙棘的土壤耗水能力强,但容易生成较厚的物理结皮,加强养分的表聚;乌柳与樟子松对土壤水分的调节能力和根系养分的凝聚力强,因而对沙地表土的改良作用显著<sup>[33-35]</sup>。

#### 4.3 植被治沙技术的完善

基于不同人工植被群落的形成演变和生态修复特征,植被治沙技术可以根据不同立地条件与治沙目的进行物种筛选、结构搭配和模式创新。沙棘和乌柳为各类型沙丘的固沙先锋物种,物种保存率高、群落发展快、防风固沙效益最为显著;生态适应能力与风沙防护能力强的小叶杨适宜于流动沙丘背风坡至丘间地地带,为其它小灌木和草本定居创造适宜生境;樟子松与青海云杉则适宜于固定半固定沙丘和丘间平沙地,在发挥高效固沙与自然植被恢复功能的同时形成景观林;沙蒿、花棒和柠条的种子直播技术适宜在半固定沙丘与流动沙丘推行,其快速的生长特征与繁殖能力极大地提高了群落多样性与稳定性;沙地柏与金露梅则为优良的混交搭配物种,适宜移植在人工固定沙丘和半固定沙丘的林地间,增强地表固沙能力的同时促进群落多样性;柽柳则适宜在流动沙丘或半固定沙丘的活化斑块中,以条带活沙障形式进行快速固沙与生态修补。根据各物种的生态适应与修复能力,物种间的合理配置既能加速沙地生态群落的形成与发展,也能提高风沙防护与土壤改良效益。沙棘、乌柳和小叶杨为该区竞争力强、主体风沙防护效益好的优势种,2—3 年后配置沙蒿、花棒、柠条与沙地柏等繁殖能力强的草本或小灌木物种,这种混交模式的群落发展与生态修复速度显著高于纯林地。

## 5 结论

(1) 2008—2017 年,群落建群种的生长特征具有显著的物种差异与年变化。沙棘、乌柳和樟子松具有较高的保存率、株高和冠径;同时,各物种总盖度和多样性不断增加,前 3—5 年增幅最大,植被盖度恢复效益超过 70%。沙棘林、乌柳林和樟子松林在群落中始终维持较高的重要值,群落较为稳定。

(2) 各人工植被群落风沙危害不断减弱,8—10 年生的沙棘、乌柳、小叶杨、樟子松等林地的防风固沙效益 ( $F_w > 50\%$ ,  $F_s > 85\%$ ) 最为显著,土壤有机质 (8—18 g/kg) 与速效养分含量增长较快。各物种群落生长特征与地表粗糙度、防风固沙效益主要表现出正相关性,与输沙率表现出负相关性。

(3) 主要高大型的乔木和灌木物种的生态修复作用强于小灌木和草本物种,沙棘、乌柳、樟子松和小叶杨群落植被恢复快,治沙效益强,均为优良的先锋固沙物种,花棒、柠条、沙蒿和沙地柏宜为混交物种,青海云杉、柽柳与金露梅在该区生态幅较窄,可为特殊地类(丘间地、固定沙丘、风沙路段等)的修复、养护和景观林种。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 汪殿蓓, 暨淑仪, 陈飞鹏. 植物群落物种多样性研究综述. 生态学杂志, 2001, 20(4): 55-60.
- [ 2 ] 彭少麟. 恢复生态学与植被重建. 生态科学, 1996, 15(2): 28-33.
- [ 3 ] 常兆丰. 沙漠人工植被的生态学取向及其途径. 生态学杂志, 2004, 23(6): 167-170.
- [ 4 ] 李新荣, 张景光, 刘立超. 我国干旱沙漠地区人工植被与环境演变过程中植物多样性的研究. 植物生态学报, 2000, 24(3): 257-261.
- [ 5 ] 宋创业, 郭柯, 刘高焕. 浑善达克沙地植物群落物种多样性与土壤因子的关系. 生态学杂志, 2008, 27(1): 8-13.
- [ 6 ] 李玉霖, 孟庆涛, 赵学勇, 张铜会. 科尔沁沙地流动沙丘植被恢复过程中群落组成及植物多样性演变特征. 草业学报, 2007, 16(6): 54-61.
- [ 7 ] 曹成有, 蒋德明, 阿拉木萨, 骆永明, 寇振武, 刘世岩. 小叶锦鸡儿人工固沙区植被恢复生态过程的研究. 应用生态学报, 2000, 11(3): 349-354.
- [ 8 ] 王庆锁, 董学军, 陈旭东, 杨宝珍. 油蒿群落不同演替阶段某些群落特征的研究. 植物生态学报, 1997, 21(6): 44-51.
- [ 9 ] 高瑞如, 赵瑞华. 干旱荒漠区植被恢复与重建的探讨. 新疆环境保护, 2004, 26(1): 21-24.
- [ 10 ] 王新平, 李新荣, 肖洪浪, 张景光, 张志山. 干旱半干旱地区人工固沙灌木林生态系统演变特征. 生态学报, 2005, 25(8): 1974-1980.
- [ 11 ] 尹书乐, 王学全. 共和盆地不同人工灌木群落生态特性分析. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(7): 31-35.

- [12] 刘海涛,贾志清,颜守保. 高寒沙地不同林龄乌柳林下植物物种多样性. 安徽农业大学学报, 2015, 42(5): 761-768.
- [13] 赵以莲,陈桂琛,周国英,彭敏. 青海湖鸟岛沙地植物群落物种多样性研究. 中国沙漠, 2003, 23(3): 295-299.
- [14] 曾凡江,雷加强,张希明. 策勒绿洲:荒漠过渡带环境特征与优势植物适应性. 北京:科学出版社, 2010.
- [15] 韩建国. 沙地植被恢复与利用技术(草业与生态环境建设丛书). 北京:化学工业出版社. 环境科学与工程出版中心, 2010.
- [16] 朱志梅,杨持. 沙漠化过程中植物的变化和适应机理研究概述. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2003, 34(1): 103-114.
- [17] 柴源,徐程扬,袁士保,陈华,段树生. 大兴沙地中 11 个树种基于根系形态的适应性. 东北林业大学学报, 2012, 40(4): 18-22.
- [18] 李银科,刘世增,康才周,李得禄,满多清. 沙地云杉在河西地区的适应性及发展潜力. 水土保持通报, 2017, 37(1): 325-328.
- [19] 蔡海霞,吴福忠,杨万勤. 干旱胁迫对高山柳和沙棘幼苗光合生理特征的影响. 生态学报, 2011, 31(9): 2430-2436.
- [20] 陈佳村,李秧秧,左力翔. 陕北沙地小叶杨“小老树”的水力适应性. 生态学报, 2014, 34(15): 4193-4200.
- [21] 李林,王振宇,秦宁生,汪青春. 环青海湖地区气候变化及其对荒漠化的影响. 高原气象, 2002, V21(1): 59-65.
- [22] 张登山,高尚玉,石蒙沂. 青海高原土地沙漠化及其防治. 北京:科学出版社, 2009.
- [23] 张登山,石昊,魏殿生,鲁瑞洁,赵爱斌. 青海湖流域人工治沙措施防风固沙效益初步研究. 地球环境学报, 2010(3): 239-242.
- [24] 赵以莲,周国英,陈桂琛. 青海湖区东部沙地植被及其特征研究. 中国沙漠, 2007, 27(5): 820-825.
- [25] 马克平,钱迎倩. 生物多样性保护及其研究进展[综述]. 应用与环境生物学报, 1998, 4(1): 96-100.
- [26] 杨文斌,郭建英,胡小龙,刘艳萍,邢恩德. 低覆盖度行带式固沙林带间植被修复过程及其促进沙地逆转效果分析. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1291-1295.
- [27] 代青格乐,赵国平,王新星,邓继峰,丁国栋. 林分密度对毛乌素沙地樟子松人工林林分结构和林下植被的影响. 水土保持通报, 2015, 35(6): 86-91.
- [28] 董鸣. 风沙移动与植物生物量的关系以及植物固沙能力研究. 植物学报, 2001, 43(9): 979-982.
- [21] 于云江,辛越勇,刘家琼,于志勇. 风和风沙流对不同固沙植物生理状况的影响. 植物学报, 1998, 40(10): 83-89.
- [22] 姚国龙,王涛,宗世祥. 不同演替阶段沙地植物群落物种多样性研究. 中国农学通报, 2009, 25(24): 167-170.
- [23] 李清雪,朱雅娟,贾志清,王永胜,于洋. 沙丘不同部位中间锦鸡儿人工林土壤养分特性及植物群落特征. 林业科学研究, 2014, 27(5): 677-682.
- [32] 李少华,王学全,高琪,等(2016). 植被恢复对高寒沙区土壤性质的影响. 林业科学研究, 29(4): 553-559.
- [33] 陈晓光,李剑萍,李志军,韩颖娟,陈葆德. 青海湖地区植被覆盖及其与气温降水变化的关系. 中国沙漠, 2007, 27(5): 797-804.
- [34] 鲁瑞洁,刘小楝,李金凤,赵超. 青海湖地区典型固沙植物对根下土壤改良作用的初步研究. 水土保持学报, 2015, 29(04): 177-181.
- [35] 慕宗杰. 固沙植物的生态适应性及其与生长环境间的相互关系. 畜牧与饲料科学, 2013, 34(12): 49-51.