

刘丹一,冯伟,王涛,等.低覆盖治沙理论下人工与自然耦合的植被修复机理综述[J].中国沙漠,2024,44(1):170-177.

## 低覆盖治沙理论下人工与自然耦合的 植被修复机理综述

刘丹一<sup>1</sup>,冯伟<sup>2</sup>,王涛<sup>3,4</sup>,杨文斌<sup>1,4,5</sup>,朱斌<sup>1</sup>,邹慧<sup>1</sup>,周密<sup>1</sup>

(1.中国治沙暨沙业学会,北京 100714; 2.锡林郭勒职业学院,内蒙古 锡林浩特 026000; 3.中国科学院西北生态环境资源研究院,甘肃 兰州 730000; 4.内蒙古低覆盖治沙科技开发有限公司,内蒙古 呼和浩特 010010; 5.中国林业科学研究院,北京 100091)

**摘要:**低覆盖度治沙理论的核心是乔灌木覆盖度控制在15%~25%,内涵是疏林、疏灌的格局演变,外延是格局演变的风沙物理、近地层水文、小气候、界面生态以及人工治理与自然植被修复的耦合作用等多项机理。在分析了风沙物理与水文机理的基础上,进一步明确了植被修复机理:(1)低覆盖度治沙优化组合了边行优势和界面生态机理,优化的带间距使得自然修复的物种数量增加2~5倍;(2)人工治理与自然修复能够形成耦合作用,优化的带间距使得土壤、植被与微生物的修复速度加快19%~27%;(3)初步提出低覆盖度固沙林不同建植林种的优化带间距分别为:针叶乔木15~40 m、阔叶乔木15~36 m、灌木12~28 m、半灌木5~12 m;(4)降水渗漏补给地下水既能支持地下水位的稳定、又能维持正向的耦合作用,支撑人工固沙林及带间土壤、植被、微生物的稳定性与可持续性。综述低覆盖度治沙理论耦合的植被修复机理及其相关参数,对降低防沙治沙工程成本、提升固沙植被稳定性具有重要的理论指导意义和实践应用价值。

**关键词:**低覆盖度治沙;界面生态学;边行优势;土壤水分渗漏;植被修复;耦合机理

**文章编号:**1000-694X(2024)01-170-08

**DOI:**10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00079

**中图分类号:**X171.4

**文献标志码:**A

### 0 引言

植物固沙是荒漠化防治的重要生物措施,植被覆盖度大于40%为固定沙丘这一标准被广泛应用于沙区植被建设,成为中国防沙治沙工程中最重要的作用指标<sup>[1-2]</sup>。长期以来,中国按照覆盖度大、治沙效果好的原则,营造了大面积固沙林,但因密度过大,超出了干旱、半干旱区的水分承载力,从而改变了原有近地层水文循环过程,导致固沙林出现大面积衰退或死亡现象;同时,地下水位持续下降、河道断流以及湖泊萎缩等生态问题也接踵而来,已经成为严重生态问题<sup>[3-4]</sup>。干旱、半干旱区是一个疏林和稀疏灌丛分布区,天然分布的植被能够维持水量平衡,并实现稳定生长。为此,近20年来,按照尊重自然的理念,中国科学工作者研究找到了覆盖度在

15%~25%的能够固定流沙的固沙林,并通过格局演变与防风固沙机理的研究,探索出了能够确保降水渗漏到土壤深层或者补给地下水的近地层土壤水文机理,最后提出了低覆盖度治沙理论,并在干旱、半干旱区得到了广泛应用<sup>[4-6]</sup>。

在实践中,低覆盖度人工固沙林覆盖度为15%~25%,剩余的地块为自然修复植被带,适宜的带宽和配置格局使得低覆盖度行带式固沙林每一行都处于边行,形成了一个林带与自然植被修复带相间组合而成的生态界面,利用界面生态作用和边行优势<sup>[7-8]</sup>,可以实现林分优势互补、相互衔接、持续发育,进而促进带间植被恢复和生态系统恢复<sup>[9-13]</sup>。这不仅可以使固沙林在整个存活期内都能充分发挥长效的固沙作用,还可为带间原生植被的入侵和

收稿日期:2023-02-13; 改回日期:2023-08-30

资助项目:中国林业科学研究院荒漠化研究所课题结余经费新立项(IDS2022JY-08, IDS2022JY-09);内蒙古自治区科技重大专项(2019ZD003)

作者简介:刘丹一(1988—),女,甘肃天水人,工程师,主要从事林业和荒漠化防治工作。E-mail: liudanyi2008@163.com

通信作者:王涛(E-mail: wangtao@lzb.ac.cn)

自然恢复提供稳定而适宜的生境,从而使带间植被自然恢复成接近地带性的原初植被的稳定群落<sup>[5,14-18]</sup>。这就是在低覆盖度格局演变理论基础上延伸出的复合理论——林学边行优势与生态学界面效益组合的人工治理与自然修复耦合的荒漠生态修复理论。

## 1 生态界面植被自然修复特征

疏林是分布广泛且稳定的自然植被,在林学上,当植被覆盖度为15%~30%时属于疏林,其林间空地一般还会分布长势良好的草本、灌木、半灌木等地带性植被。低覆盖度行带式固沙林是在干旱、半干旱区总结疏林植被生长模式的基础上,以近自然林业的思路,将固沙林按照疏林的特征组合,使得林带与林带之间自然留下较宽的带间<sup>[19-20]</sup>。带间在林带的保护下,不仅可以促进自然地带性植被的修复,还可以形成乔、灌、草的复合植被,产生界面生态效应,促进固沙植被的稳定生长与土壤修复<sup>[9,21]</sup>。

### 1.1 界面对植物多样性的影响

通过对海拉尔区巴音岱林场不同分布格局的樟子松固沙林带间植物多样性恢复的研究发现,樟子松低覆盖度行带式固沙林林分在发育过程中,能够形成小尺度的景观界面,且在界面边缘上物种多样性有增加的趋势<sup>[12]</sup>。樟子松林带间距为24 m时,带间物种多样性变化曲线会出现两个高峰,位于距离林带的8~14 m处;带间距为12 m时,带间物种多样性变化曲线只出现了一个高峰。这说明该地区樟子松带间距配置应该大于12 m。不同带间距樟子松林带间的物种多样性和丰富度、均匀度、生物量变化不大,表现为 $12\text{ m} < 24\text{ m} < \text{原初植被}$ ,这是一个典型的群落演替机理,说明低覆盖度林分能充分发挥界面生态效应,人工治理可以加速促进群落演替进程。即在原生群落被破坏后,可以通过人工治理加之界面边际效应促进自然植被恢复,加速群落的恢复演替<sup>[12-14,16]</sup>。例如樟子松林带间植被在恢复过程中,原初植被中没有的地榆得到了生长,且地榆和羊草在带间生存环境具有优于其他草种的竞争优势<sup>[12]</sup>。

### 1.2 行带式固沙林带间自然修复效应

通过对不同带宽柠条行带式固沙林的自然修

复效应研究发现<sup>[13]</sup>,随着固沙林带宽的减小,带间恢复植被的优势种也会表现出减小的态势。当带宽为18 m时,恢复植被的物种多样性指数变化曲线出现两个高值,为6 m时只出现单峰值,且带宽为12~16 m时带内的草本物种多样性达到最大;同时,18 m带宽时带间生物多样性和生物量与对照样地接近,相似度最大高达0.833,是最为接近原初植被的一种配置,而6 m时丰富度指数最低,进一步说明当带宽为18 m时,可以为更多物种的侵入提供栖息地,为群落演替提供了合适生存环境,生物多样性指数相对较高,也有利于地上植被生物量的积累,固沙林生态系统更加稳定<sup>[9,13]</sup>。

低覆盖度行带式固沙林带间的多年生草本植被会明显增加,促进了固沙林的稳定发展和植被恢复<sup>[13]</sup>。对杨树固沙林研究也有类似的结果,20 m带宽时带间草本物种多样性变化曲线也出现了双峰现象,而15 m和10 m带宽时仅出现了单峰值;其中,20 m带宽时植被恢复最为接近对照样地,相似度最大高达0.769,恢复效果优于15 m和10 m带宽,得出该区域杨树固沙林如果带间距小于15 m时,会明显减小物种多样性,优势物种替代率相对较低,环境异质性较小,带间植被恢复缓慢。结果表明:带间距越宽(至少20 m),随着植被的自然恢复,密度逐渐变小,但其带间自然恢复植被的多样性指数会增大,促进了自然植被恢复过程,且较宽的带间距会更有利于恢复植被中草本生物量的积累。同时,杨树较宽的带间距更适合植被自然恢复,有利于自然恢复植被根系的生长。研究发现杨树20 m带宽对植被的恢复促进效果要优于15 m和10 m带宽<sup>[4,14]</sup>。

### 1.3 界面效应的影响域及适宜带间距

群落边际效应研究具有非常重要的理论意义,因为群落与外界交流的主要区域是固沙林的边缘,物种渗透、物质能量流动以及其他信息的交流都是通过这个区域来完成。自然群落的边缘结构和边缘区的发展变化动态,反映了在特定的生态环境条件下群落通过演替与发展而出现的相互作用及扩散特性<sup>[12,16]</sup>。在低覆盖度行带式固沙林中,形成了多个林草界面,界面效益与固沙林的带间距大小紧密相关,研究发现,当带间距小于10 m时,在中幼龄林期间就会严重制约带间自然植被的修复。因此,确定合理带间距会充分发挥界面生态效益的优势,

促进带间植被及土壤快速发育,是低覆盖度行带式固沙林研究的最重要内容<sup>[4,14]</sup>。

带间距的宽窄受到造林树种以及当地立地条件的影响,结合多年研究与实践经验,得出不同树种的适宜带间距为:柠条、梭梭等灌木行带式固沙林配置的优化带间距为12~28 m;杨树等阔叶乔木行带式固沙林配置的优化带间距为20~36 m;樟子松等针叶乔木行带式固沙林配置的优化带间距为16~40 m;油蒿等半灌木行带式固沙林配置的优化带间距为5~8 m。在实际的造林中,我们更加希望营造混交林,在低覆盖度条件下,由于拉大了带间距,减少了两个种或者是两个生活型的乔灌木之间的种间抑制作用,非常有利于营造隔带混交的混交林,特别是乔灌混交,由于树冠在空间的位置不同,增加防风固沙效果,根系在土壤中分布的土层深度不同,有利于提高土壤水分和养分的利用效率。加之带间修复的草本植被形成了乔灌草有机结合的林分,会显著提高固沙林的稳定性,促进土壤、植被的快速修复<sup>[4,14]</sup>。

低覆盖行带式固沙林适宜带间距按不同林种可分为:阔叶乔木15~36 m;针叶乔木15~40 m;灌木12~28 m;半灌木5~12 m。带间距的优化不仅可充分发挥固沙林界面生态效益,还可以避免固沙林

中幼龄林衰败死亡现象。不仅如此,“两行一带”式配置林分,林带因林木边行优势,断带现象显著减少,防风固沙效益显著提高<sup>[4,22-26]</sup>。

## 2 林学边行优势特征及其效果

低覆盖度行带式人工固沙林的每一行林分都具备边行特征,能充分发挥边行优势,使得林分结构合理、生长优势明显、稳定性高。低覆盖度行带式配置模式是适宜于干旱、半干旱地区固沙造林的一种适宜配置模式<sup>[17,25]</sup>。

### 2.1 促进降水的渗漏补给与高效利用

针对干旱、半干旱区人工林的边行优势明显优于湿润区的现象,研究人员对不同气候区主要造林树种的片林及其边行外侧林分和行列式分布林分带间的沙土水分利用特征分析发现,林木生长降低了边行外侧8~10 m处土壤含水率,并形成一个土壤湿度梯度,促使8~10 m及其以外区域土壤中的水分向林木基部方向渗透,这些侧渗的水分能够在干旱年份提供给边行供其林木正常生长,这说明处于边行的林分外侧是存在一个土壤水分渗漏补给带和土壤水分主要利用带<sup>[20,27]</sup>。低覆盖度行带式固沙林是能够保证每一行林分都存在这种水分机制的(图1)。

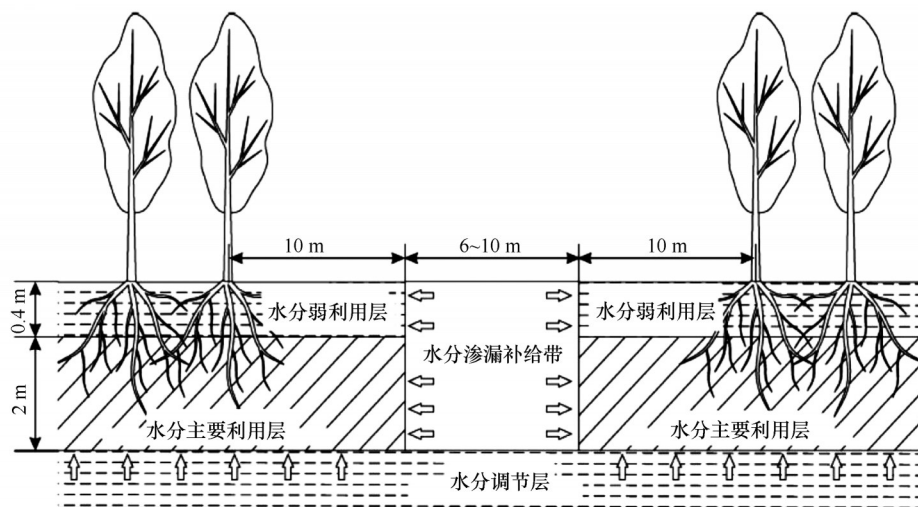


图1 低覆盖度行带式配置的固沙林土壤水分利用示意图

Fig.1 Schematic diagram of soil water use of sand fixation forest in low coverage row belt configuration

在降雨量正常情况下,低覆盖度固沙林的水分利用和深层土壤水分的补给是通过水分渗漏补给带对水分调节层和水分主要利用层补给和调节来实现的。在降雨量严重不足的情况下,水分调节层发挥着不可或缺的重要作用,其通过减弱林带间水

分渗漏的补给作用,然后再通过根系吸收将水分调节层的水分补充给水分主要利用层,从而保证固沙林正常生长所需水分,使得固沙林可以抵御20年一遇的极端干旱。这就是低覆盖度固沙林水分利用格局和机制的核心,保证了固沙林的长期稳定性和



可持续性<sup>[4,15,21]</sup>。

## 2.2 促进林木生长

边行优势表现极为明显的区域在干旱、半干旱区,林木光照、水肥、通风条件等各项因子会在林分中所处位置不同而出现差异,从而造成林木在存活、生长及营养空间等方面也出现差异<sup>[7,18]</sup>。因边行优势和界面效应,低覆盖度行带式配置固沙林与同密度下均匀配置的造林方式相比,林分稳定性更强,生长优势更加明显,如植株生长、胸高比、林分的生物量均占优势<sup>[26]</sup>。通过对1970s中期在典型草原区营造的30 a白榆人工林中不同密度、配置格局的草牧场防护林的林分生长研究,发现白榆防护林带的边行优势明显,边行木的叶量较林内高152.5%~162.0%,边行木的单株材积量和平均胸径分别比林内平均值高54.4%~81.7%和28.8%~42.8%,且随着造林密度的变小,边行优势表现得更加明显,密度为1 050株·hm<sup>-2</sup>的边行木的材积和胸径生长量分别比密度为2 100株·hm<sup>-2</sup>的高118.1%和41.2%,并且低密度林分的边行木到30 a后,生长量依然表现出增加的趋势<sup>[28-29]</sup>。

对敖汉旗不同配置下的赤峰-36杨树固沙林的调查显示<sup>[7]</sup>,在相同的立地条件、相同密度配置下,行带式配置的固沙林平均胸径、平均株高、单株材积量、单位材积量、单位材积量百分比、单位生物量均高于均匀分布的固沙林。

## 3 改善带间小气候

改善沙区小气候的一种有效途径是营造防风固沙林,林带间各种气象要素可以通过造林模式的改变而改变。低覆盖度行带式固沙林与随机分布的自然林分相比,更能有效降低风速和减少带间蒸发量。同时,林分营造后带内明暗相间导致辐射势能形成梯度,这样的光气候环境对林带间循环过程和水热输送均有影响,对带间的太阳辐射有减弱作用、相对湿度有增加作用、气温有降低作用<sup>[18]</sup>。低覆盖度行带式固沙林带间小气候环境更接近自然修复后的小气候环境。低覆盖度行带式固沙林对风场和风速具有显著改变作用,例如低覆盖度行带式固沙林风速微弱降低区出现在带间的中央区域,风速显著降低区出现在带后2~3H和下一带带前2H处。当带间距足够宽的时候,风速显著降低区和风速微弱降低区在带间可出现多个,这样便会在低覆

盖行带式固沙林内形成一种特殊的随着林带而波浪变化的流场特征<sup>[30]</sup>。风速的阻碍和降低随着连续的行带式分布而累加,从而对疏林内局部风速的抬升现象起到有效的制约作用。而在低覆盖度行带式配置固沙林内,因摩擦速度和地表粗糙度较高,且拥有相对稳定的风蚀规律,从而对风蚀的抑制作用更加凸显<sup>[23]</sup>。

行带式是一种带状分布格局,林冠层遮阴使带间太阳辐射减弱,对于东西走向的林带,林冠层遮阴作用集中在林带北侧0.5~1H,透过林冠进入林地的太阳辐射会随着行带式带间距的减小而减少。太阳辐射的变化使得行带式固沙林带间空气湿度、温度及蒸发呈现出规律的梯度变化趋势,即随距林带的距离增加,相对湿度不断减少,气温和蒸发不断增大<sup>[17]</sup>。

## 4 增加生物多样性和稳定性

生物多样性可以为生态系统功能的维持提供支撑条件,为种群的正常运行提供种源基础,是群落生态系统稳定以及度量群落结构和功能复杂性的重要指标<sup>[31]</sup>,可以说,群落的组成、变化和发展可以通过对物种多样性的研究来探知<sup>[16,32]</sup>。对低覆盖度行带式固沙林不同恢复年限林带植被研究结果显示(图2,表1),在恢复初期多样性指数变化呈明显增加趋势,随着带间植被恢复年限的延长,16~20 a多样性指数变化小,表明群落逐渐趋于稳定。再从生活型组成看,在群落恢复初期,群落组成中占据绝对优势的是一年生草本植物,随着演替时间延长,一年生草本种类逐渐减少,多年生植物的种类逐渐增加,生活型组成也逐渐趋于多样化;到10 a时,多年生植物种数比一年生草本植物明显要占优

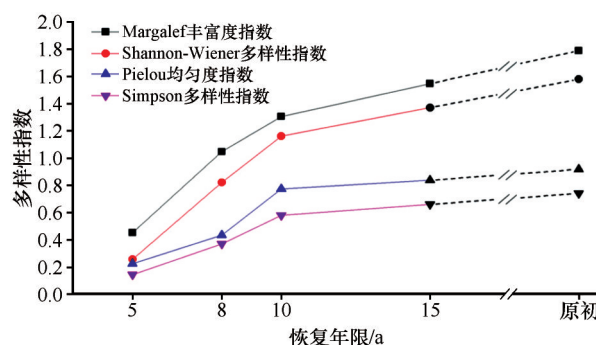


图2 20 m带宽的固沙林内带间植被的物种多样性修复趋势  
Fig.2 species diversity restoration trend of vegetation within and between sand fixation forests with a bandwidth of 20 meters

表 1 不同恢复年限林带间植被特征

Table 1 Characteristics of inter forest vegetation in different restoration years

项目		2 a		5 a		10 a		16 a		20 a	
		数量	比例/%	数量	比例/%	数量	比例/%	数量	比例/%	数量	比例/%
生态型	中生	2	40	8	57.1	11	68.8	13	72.2	15	71.4
	旱生	3	60	6	42.9	5	21.2	5	27.8	6	28.6
生活型	一年生草本	5	100	9	64.3	7	43.7	7	38.9	5	23.8
	多年生草本	0	0	5	35.7	9	56.3	11	61.1	16	76.2

势;到20 a时,多年生植物占绝对优势,占比达76%。这表明植被演替和群落环境演变占主导地位的是多年生植物,维持群落内生态功能稳定的也是多年生植物。从水分生态型组成来看,随着带间植被恢复年限的延长,优势植被逐渐演替成中生植物(恢复10 a后),植被生存的小环境也得到了改善。在植被恢复过程中,生态系统的功能与结构的变化特征主要通过物种生态型、生活型组成上的变化来反映,稳定的群落结构具有更强的生态功能<sup>[4]</sup>。

另外,低覆盖度行带式固沙林可以通过枯枝落叶残体而使地表覆盖物增加,从而促进土壤微生物数量和土壤养分的增加。在植被恢复和群落演替过程中,最重要的正反馈是植物-土壤间的相互作用,低覆盖度行带式固沙林由于可以很好地利用草、灌、乔及微生物之间的相互促进作用,加快土壤和植被的修复速度<sup>[14,16]</sup>。

## 5 人工治理与自然修复耦合机理

在干旱、半干旱区不可替代的地带性植被是草原,除了草原,还有各种非地带性植被。如在地带性地段,随着植被的成熟度降低,旱生灌木便会入侵和生长,直到最后被草本群落自然替代<sup>[16,33-35]</sup>。营造固沙林,终极目标是为地带性植被恢复提供保障,当营造的固沙林造林密度大于40%时,初期的防风固沙效果非常明显,但是由于密度过大,耗水量超过当地水分承载力,加上遮阴面积过大,反而阻碍了地带性草本植被的自然恢复。然而,在沙化地区若没有固沙林的保护,难以使沙化土地固定,导致地带性植被无法完成自然修复<sup>[36]</sup>。因此,营造固沙林首先要选择适宜的造林密度,再在此基础上进行合理规划布局,才能促进植被完成自然恢复<sup>[37-38]</sup>。低覆盖度行带式灌木固沙林可以取得良好的防风固沙效果<sup>[7]</sup>。

防风固沙与生态恢复不是对立的,也不是完全

等同,是一个密切相关且相互促进的过程。人工固沙林营造后对自然恢复植被的生物多样性的影响是必须考虑的问题,生物多样性与生态系统退化或恢复有着重要的关系。在研究中,评价固沙林恢复进程的指标公认是草本植物的覆盖度和多样性。当行带式固沙林建植于退化生态系统后,其周围的条件,如光照、风、风沙流及土壤养分和水分等均会受其影响而发生相应的变化<sup>[16,39-40]</sup>,这些条件的变化与林带间植被有着密切关系<sup>[41]</sup>。通过对物种多样性和生物量变化的研究得出,在一定范围内,行带式固沙林的生物量和物种多样性指数与宽带呈现正相关趋势,即随带宽的增加而显著增加,这与前人的研究也是一致的。植物繁殖体的输入、萌发等生长和存活过程以及光合作用、呼吸作用、水分代谢、矿质代谢等生态过程或生理均会因空间不同而表现出差异,这在固沙林层次上可以表述为物种多样性和植物盖度的空间差异<sup>[36]</sup>。随着固沙林带间距离的增大,达到适宜带间距后发育的植被会更加接近或优于地带性植被。这说明人工固沙林的带间距影响着带间恢复植被的生境,进而影响生态系统的稳定状态。

通过对于干旱、半干旱区营造的行带式灌木林和乔木林在退化草原与沙地修复重建方面的作用研究,了解到固沙林的生态作用,指导了低覆盖度行带式固沙林的合理规划和构建,从而最大限度地促进了草原区土壤植被的修复。低覆盖行带式固沙林起到沙障的作用,可以形成人工治理与自然耦合的机制,充分发挥林草复合植被优势互补的作用。也就是说,固沙林能充分发挥长效的沙障作用,适宜的林带带宽和配置格局是基础,这样可以加速植物与土壤的正反馈作用,从而提高种群的竞争力,使固沙林在存活期间为带间植被的自然恢复提供稳定的生存环境,使其逐渐恢复成稳定的群落。

合理配置的低覆盖度乔灌木林分是人为优化



组合后形成的一个人工固沙林配置模式,可以在低覆盖度或低密度条件下,在维持天然植被密度的基础上,合理应用自然规律,同时,在人为调控基础上,使固沙林实现水分持续利用,林分正常生长,从而使林分防风固沙等生态效益达到最佳。简而言之,就是低覆盖度行带式固沙林在实现防风固沙效益的同时,为自然植被入侵和定居提供了适宜的环境,进而促进了带间植被和土壤自然修复过程。例如,杨树并不适合在干旱地区栽植,但经过低覆盖度和低密度的合理配置,杨树不仅可以在沙区实现快速生长,还可以加速当地的土壤-植被系统的自然修复。土壤理化性质也在行带式固沙林造林后的短短十几年内便得到明显的改善;同时,群落演替过程也随着土壤的变化而加快。低覆盖度行带式林带内自然恢复的植被又为林带提供了养分和水分补给带,达到林草复合植被优势互补、相互衔接持续发育的效果。而行带式固沙林正是通过带宽的变化来影响和调节这种植物与土壤之间的相互作用,窄带间距固沙林土壤与植被的相互作用则由于造林密度大而受到抑制。植物都有自己的生理寿命,作为林分中的一株植物,最终都会死亡。充分调查中国近50年建植的人工生态林后发现人工生态林达到过熟林(也包括死亡或衰退的中幼林)死亡后,只能人工更新,直到目前,还没有方法能够使人工固沙林到达寿命后自然修复。

我们认为,低覆盖度行带式固沙林是一种能够利用带内自然植被快速修复和发育土壤的功能,使沙地土壤、植被向地带性土壤与植被演变,从而促进自然植被恢复、加快土壤快速修复、提高生物生产力,使带间自然修复的植被和土壤接近地带性,修复植被能够稳定持续生长,从而达到长久固碳的长寿命生物沙障。因此,行带式固沙林能够很好地弥补人工治理林不能向自然植被更新的缺陷,还会促进地带性植被的恢复,形成稳定群落,使固沙效果实现可持续。

土壤含水率受林分密度和营林时间的影响程度比较大,即密度越大,营林时间越长,土壤含水率降低越显著。特别是在干旱半干旱地区,由于土壤水资源十分有限,高密度造林后虽然可以快速获得固沙效果,但时间一长不仅会使有限的土壤水资源过度消耗,还会使降雨对地下水或者土壤深层的补给也降低,造成地下水位下降,从而影响人工林的存活率和固沙群落的稳定。通过对干旱半干旱区

天然分布的稀疏灌丛和疏林调查发现,降水都能够渗漏到土壤深层或者补给地下水,覆盖度为20%~30%时,林木生长稳定<sup>[42-43]</sup>。通过对近自然植被覆盖度的人工固沙林(半固定沙地)调查研究,也发现了同样的结果,降水都能够渗漏到土壤深层或者补给地下水。而覆盖度超过自然植被覆盖度的固定沙地则基本没有降雨渗漏到土壤深层或者补给地下水。在低覆盖度格局理论下形成的格局演变的地表生态水文机理,既保证了有降水渗漏到土壤深层或者补给地下水这一自然过程,又实现了固定流沙的目的,其中,低覆盖度行带式林分形成边行优势的重要水分条件是土壤水分主要利用带<sup>[17,44-45]</sup>。可以说低覆盖度治沙是一种不仅能节约生态用水、还能实现固沙林可持续发展的新型治沙模式。

营造防风固沙林会拦截随风携带而来的沙尘、枯落物和风播植物的种子,这些都是退化生态系统恢复不可或缺的土壤和繁殖体<sup>[46-48]</sup>。可以说,营造防风固沙林是有效固定流沙、防止风沙灾害的一种有效措施,也是中国干旱、半干旱区生态建设的重中之重,营造防风固沙林最初的目的是控制地表风蚀,终极目标是通过流沙的固定,进而实现土壤和植被修复,使其恢复成接近地带性的稳定植被和发育良好的土壤。然而这是一个漫长的过程,因为涉及植被的原生演替过程<sup>[49]</sup>。

截至目前,还是有很多学者对在干旱、半干旱地区营造乔木或灌木固沙林,以及其发挥的固沙作用持有怀疑态度。他们认为,干旱、半干旱地区水分是限制因素,再建植乔木或灌木固沙林,不仅会造成有限的水资源匮乏,而且还会出现与地带性植被竞争水分、光照和养分的情况,阻碍固沙林正常生长,这样不仅起不到固沙作用,还会造成地带性植被不能正常恢复<sup>[50]</sup>。鉴于以上问题,中国学者在对干旱、半干旱地区天然林研究的基础上,通过控制造林密度和合理规划布局,探索出的低覆盖度行带式固沙林,很好地解决了上述问题,防风固沙也取得明显成效<sup>[7]</sup>。然而,如何将人工建植的低覆盖度行带式固沙林更好地应用于生态建设工程中,尚需进一步研究。合理规划和构建低覆盖度行带式固沙林,并最大限度发挥其促进带间土壤植被修复的作用,最重要的一点是确定合理适宜的带间距,现提出的适宜带间距是一个初步范围,仅为下一步的固沙造林及不同树种的深入研究提供一定参考和

方向。低覆盖度治沙理论的人工治理与自然耦合的植被修复机理为沙区植被建设的生产实践提供了理论指导,具有重要的实践价值。

### 参考文献:

- [1] 高尚武. 治沙造林学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1984.
- [2] 朱震达, 吴正, 刘恕, 等. 中国沙漠概论[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [3] 韩德儒, 杨文斌, 杨茂仁. 干旱、半干旱地区灌木(乔木)的水分动态及其应用[M]. 北京: 中国科技出版社, 1996.
- [4] 杨文斌, 李卫, 党宏忠, 等. 低覆盖度治沙: 原理、模式与效果[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [5] 杨文斌, 王涛, 冯伟, 等. 低覆盖度治沙的理论与沙漠科技进步[J]. 中国沙漠, 2017, 37(1): 1-6.
- [6] 杨文斌, 王涛, 冯伟, 等. 低覆盖度治沙理论及其在干旱半干旱区的应用[J]. 中国沙漠, 2017, 31(1): 1-5.
- [7] 杨文斌, 卢琦, 吴波, 等. 杨树固沙林密度、配置与林木生长的关系[J]. 林业科学, 2007, 43(8): 54-59.
- [8] 杨文斌, 王晶莹, 王晓江, 等. 科尔沁沙地杨树固沙林密度、配置与林分生长过程初步研究[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(4): 33-38.
- [9] 姜丽娜, 杨文斌, 卢琦, 等. 低覆盖度柠条固沙林不同配置对植被修复的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(2): 186-193.
- [10] 姜丽娜, 杨文斌, 姚云峰, 等. 行带式固沙林带间植被恢复及土壤养分变化研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(1): 98-102.
- [11] 姜丽娜, 杨文斌, 姚云峰, 等. 不同配置的行带式杨树固沙林与带间植被修复的关系[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(2): 88-92.
- [12] 姜丽娜, 杨文斌, 姚云峰, 等. 樟子松固沙林带间植被恢复及其对林草界面作用的响应[J]. 中国沙漠, 2011, 31(2): 372-378.
- [13] 姜丽娜, 杨文斌, 卢琦, 等. 低覆盖度行带式固沙林对土壤及植被的修复效应[J]. 生态学报, 2013, 33(10): 3192-3204.
- [14] 姜丽娜. 低覆盖度行带式固沙林促进带间土壤植被修复的过程与机理[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.
- [15] 杨文斌, 冯伟, 李卫. 低覆盖度治沙的原理与模式[J]. 防护林科技, 2016(4): 1-5.
- [16] 杨文斌, 潘宝柱, 阎德仁, 等. “两行一带式”杨树丰产林的优势及效益分析[J]. 内蒙古林业科技, 1997(3): 5-8.
- [17] 杨文斌, 王晶莹. 干旱、半干旱区人工林边行水分利用特征与优化配置结构研究[J]. 林业科学, 2004, 40(5): 3-9.
- [18] 杨文斌, 王涛, 熊伟, 等. 低覆盖度治沙理论的核心水文原理概述[J]. 中国沙漠, 2021, 41(3): 75-80.
- [19] 杨文斌, 郭建英, 胡小龙, 等. 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[J]. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1291-1295.
- [20] 杨文斌, 赵爱国, 王晶莹, 等. 低覆盖度沙蒿群丛的水平配置结构与防风固沙效果研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(1): 108-112.
- [21] 李显玉. 半干旱杨树用材林“两行一带”配置造林技术研究[M]//内蒙古跨世纪青年林业研究文选. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1997.
- [22] 杨文斌, 任居平. 农牧林复合轮作系统治沙模式及其效益分析[J]. 中国沙漠, 1998, 18(增刊1): 113-118.
- [23] 杨文斌, 卢琦, 吴波, 等. 低覆盖度不同配置灌丛内风流结构与防风效果的风洞实验[J]. 中国沙漠, 2007, 27(5): 791-796.
- [24] 吴雪琼. 低覆盖度行带式固沙林的生长优势与界面效应研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- [25] 王玉魁, 杨文斌, 卢琦, 等. 半干旱典型草原区白榆防护林的密度与生物量试验[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(11): 144-150.
- [26] 石星, 李卫, 杨文斌, 等. 低覆盖度行带式固沙林对带间小气候的影响区[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 10(29): 117-121.
- [27] 杨红艳, 戴晟懋, 乐林, 等. 不同分布格局低覆盖度油蒿群丛防风效果[J]. 林业科学, 2008, 44(5): 12-16.
- [28] 边巴多吉, 郭泉水, 次柏, 等. 西藏冷杉原始林林隙对草本植物和灌木树种多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(2): 191-194.
- [29] 盛伟彤. 我国人工用材林发展中的生态问题及治理对策[J]. 世界林业研究, 1995, 8(2): 51-55.
- [30] 于立忠, 朱教君, 史建伟, 等. 辽东山区人工阔叶红松林植物多样性与生产力研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2225-2330.
- [31] 牛建明. 内蒙古主要植被类型与气候因子关系的研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(1): 47-52.
- [32] 李新荣, 马凤云, 龙立群, 等. 沙坡头地区固沙植被土壤水分动态研究[J]. 中国沙漠, 2001, 21(3): 217-222.
- [33] Rietkerk M, Boerlijst M C, Langevelde F van, et al. Self-organization of vegetation in arid ecosystems[J]. American Naturalist, 2002, 160: 524-530.
- [34] 肖洪浪, 李新荣, 段争虎. 流沙固定过程中土壤-植被系统演变[J]. 中国沙漠, 2003, 23(6): 605-611.
- [35] 阿拉木萨, 蒋德明, 骆永明. 半干旱区人工固沙灌丛发育过程土壤水分及水量平衡研究[J]. 水土保持学报, 2005 19(4): 107-110.
- [36] Gustafson E J, Parker G R. Relationships between landcover proportion and indices of landscape spatial pattern[J]. Landscape Ecology, 1992, 7(2): 101-110.
- [37] 高永, 邱国玉, 丁国栋. 沙柳沙障的防风固沙效益研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(3): 365-370.
- [38] 钱迎请, 甄仁德. 生物多样性进展[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1994.
- [39] 李裕元, 邵明安. 子午岭植被自然恢复过程中植物多样性的变化[J]. 生态学报, 2004, 24(2): 252-260.
- [40] Zhang J T, Chen T G. Effects of mixed *Hippophae rhamnoides* on community and soil in planted forests in the Eastern Loess Plateau, China[J]. Ecological Engineering, 2007, 31: 115-121.
- [41] 向开霞. 防护林学[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1991.
- [42] Cheng Y B, Li Y L, Zhan H B, et al. New comparative experiments of different soil types for farmland water conservation in

- arid regions[J]. *Water*, 2018, 10(3): w10030298.
- [43] 吴丽丽, 程一本, 杨文斌, 等. 毛乌素沙地流动沙丘不同深度土壤渗漏特征[J]. *生态学报*, 2018, 38(22): 7960–7967.
- [44] 康泓林, 李卫, 冯金超, 等. 科尔沁沙地典型固沙人工林地土壤水分时空特征及其对环境因子的响应[J]. *生态学报*, 2021, 41(20): 8256–8265.
- [45] 李卫, 冯伟, 杨文斌, 等. 低覆盖度行带式固沙林带间土壤水分动态特征[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(2): 163–167.
- [46] 刘志民, 蒋德明, 阎巧玲, 等. 科尔沁草原主要草地植物传播生物学简析[J]. *草业学报*, 2005, 14(6): 23–33.
- [47] Zhao H L, Zhou R L, Su Y Z, et al. Shrub facilitation of desert land restoration in the Horqin Sand Land of Inner Mongolia[J]. *Ecological Engineering*, 2007, 31: 1–8.
- [48] 王继和, 马全林, 刘虎俊, 等. 干旱区沙漠化土地逆转植被的防风固沙效益研究[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(6): 903–909.
- [49] Clewell A F, Aronson J. *Ecological Restoration: Principles, Values, and Structure of an Emerging Profession* [M]. Washington D C, USA: Island Press, 2007: 19–32.
- [50] 曹世雄, 陈军, 陈莉, 等. 退耕还林项目对陕北地区自然与社会的影响[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(5): 972–979.

## Characteristics of vegetation restoration based on the theory of low vegetation coverage for desertification control

Liu Danyi<sup>1</sup>, Feng Wei<sup>2</sup>, Wang Tao<sup>3,4</sup>, Yang Wenbin<sup>1,4,5</sup>, Zhu Bin<sup>1</sup>, Zou Hui<sup>1</sup>, Zhou Mi<sup>1</sup>

(1. *China Sand Control and Sand Industry Society, Beijing 100714, China*; 2. *Xilingol Vocational College, Xilinhot 026000, Inner Mongolia, China*; 3. *Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*; 4. *Inner Mongolia Low Coverage Sand Control Technology Development Co., Ltd., Hohhot 010010, China*; 5. *Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China*)

**Abstract:** The purpose of low vegetation coverage for desertification control is to control the vegetation coverage of trees and shrubs in a specific area to a lower level at about 15%–25%, which can also fix the sand and keep vegetation alive. Through the coupling study of wind and sand physics, near-surface hydrology, microclimate, interface ecology and artificial vegetation planting pattern with native vegetation, we changed the pattern of sparse forest and irrigation to achieve desertification control, and obtained an optimal pattern of sparse woodland and sparse shrubs. The low coverage for desertification control mechanism is further clarified: (1) Low coverage for desertification control optimizes the combination of edge row dominance and interface ecological mechanism, and the optimized band spacing increases the number of species naturally restored by 2–5 times. (2) Artificial treatment and natural restoration can form a coupling effect, and the optimized band spacing accelerates the restoration of soil, vegetation and microorganisms by 19%–27% compared to the control plot. (3) The optimized spacing of the low coverage for desertification control forest zones initially explored is 5–12 m for semi-shrubs, 12–28 m for shrubs, 15–36 m for broad-leaved trees, and 15–40 m for pines. (4) The precipitation recharged groundwater and support the stability of the groundwater level and maintain the positive coupling effect, which supports the stability and sustainability of the artificial sand-fixing forest and the soil, vegetation, and microorganisms between the zones. The low coverage for desertification control mechanism and its related parameters research has important theoretical and practical guidance value to reduce costs and promote the stability of sand-fixing vegetation in the future sand control projects.

**Key words:** low vegetation coverage sand control; interface ecology; edge row dominance; soil water leakage; vegetation restoration; coupling mechanism