

# 干旱区退化固沙林修复的理论基础与技术模式

报告人：马全林

甘肃省林业科学研究院

银川 2024.7.9



# 内容提纲

---



- 一、干旱区和退化固沙林的界定
- 二、干旱区固沙林退化现状及其原因
- 三、干旱区退化固沙林修复的理论基础
- 四、干旱区退化固沙林修复的技术模式

# 一、干旱区和退化固沙林的界定



## ➤ 干旱区分布

- 世界干旱区约占全球陆地总面积的20%，主要分布在非洲，其面积占世界干旱区总面积的1/3左右，亚洲干旱区面积位居世界第二，中国、蒙古干旱区是亚洲中部干旱区的重要组成部分，是世界上最典型的干旱地区。
- 据年降水量小于200mm，干燥度大于3.5的划分标准，中国干旱区是指贺兰山-乌鞘岭以西的中国西北地区，位于35°N-50°N，连绵2500多公里，横跨30个经度，总面积约占全国土地面积的22%；在行政区划上，包括新疆维吾尔自治区全部、内蒙古自治区西部和甘肃省的河西走廊地区及宁夏回族自治区贺兰山以西的地区。

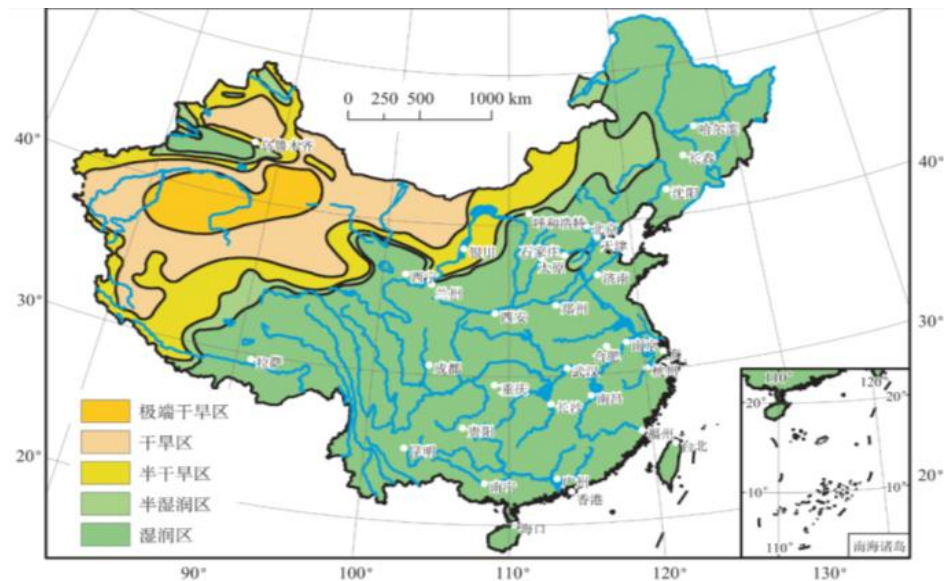
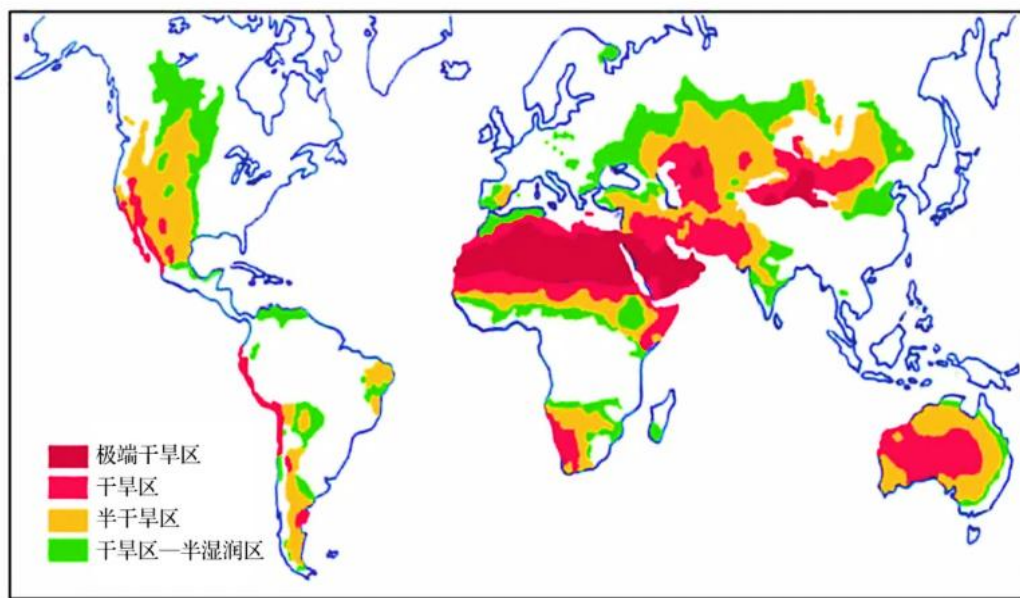
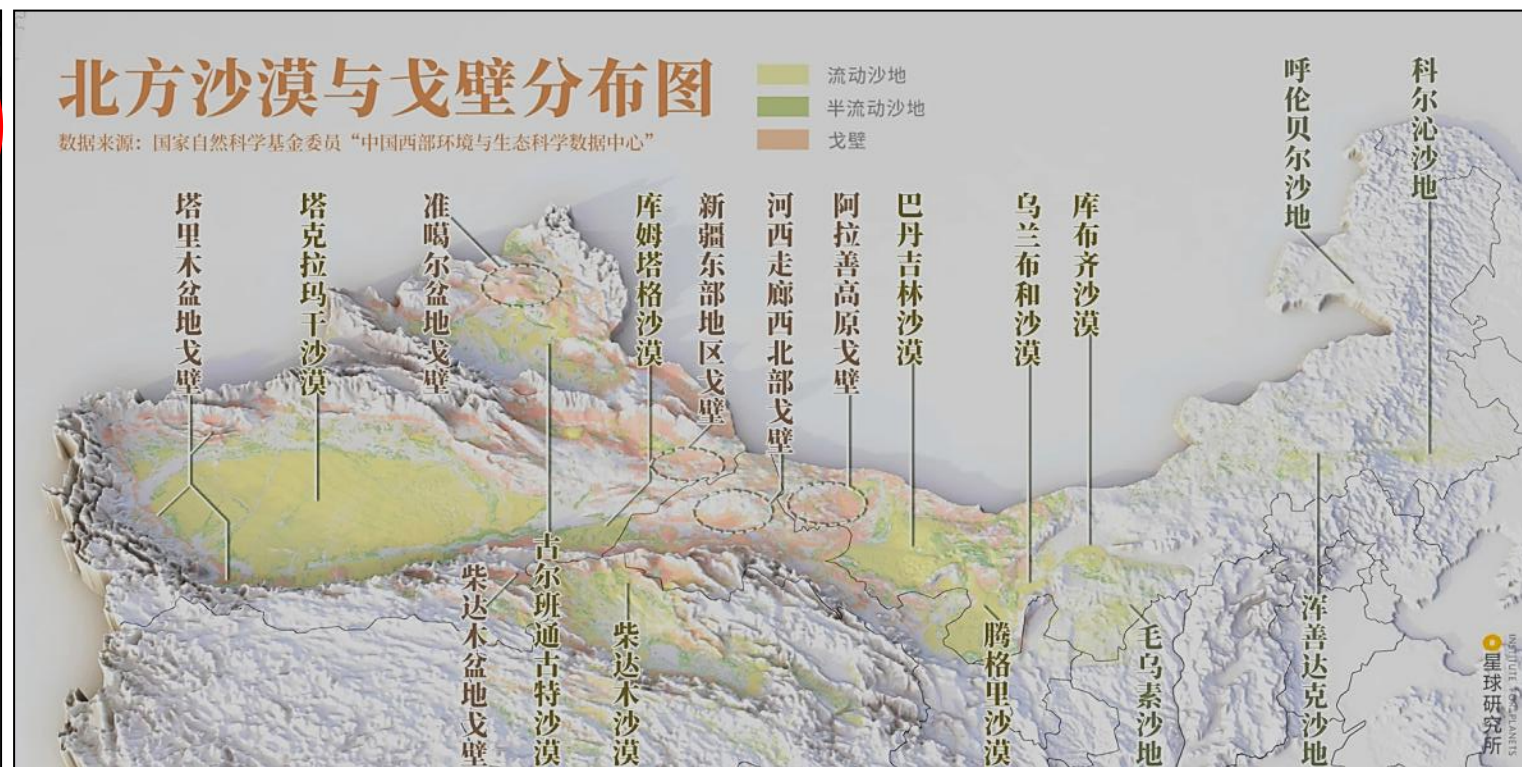


图 0.2 中国干旱、半干旱区的分布 (慈龙骏, 1994)



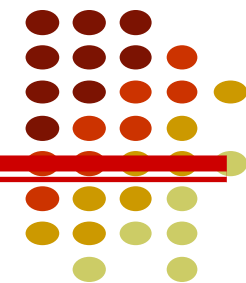
## ➤ 我国干旱区的沙漠戈壁

- 中国境内主要有8大沙漠4大沙地，总面积68.8万km<sup>2</sup>，其中干旱区有7大沙漠，总面积约56万km<sup>2</sup>，分布在新疆、内蒙、甘肃、青海、甘肃和宁夏6个省，主体在新疆（74.4%）。
- 中国戈壁总面积约57万km<sup>2</sup>，约占中国陆地总面积的6%，与蒙古境内戈壁共同组成全球最北的戈壁荒漠（130万km<sup>2</sup>）。





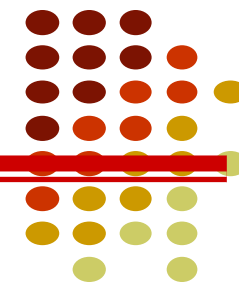
## ➤ 干旱区固沙林



- 在干旱区，防风固沙林体系一般由天然植被封育带、防风固沙林带及绿洲内部农田林网组成。
- **防风固沙林**：在流动、半固定沙地和潜在土地沙漠化地区及沿海岸线等受风沙危害的城镇、村庄、农田、牧场、工矿区、公路、铁路、水利、特殊设施等周围，为治理和防止风沙侵害蔓延，国土整治而营造的由不同适生树种组成、具有一定结构、空间配置类型、能发挥固沙阻沙效能的森林（**防风固沙林工程设计规范 GB/T 51085-2015**）。
- 干旱区防风固沙林类型包括防风林、固沙林、绿洲防护林。
- **固沙林 forest for sand fixation**：一种防止风蚀沙化、固定流沙的防护林。作用在于抗御风沙侵袭为害农田、牧场、铁路、公路、渠道、水库和其他设施，防止沙化扩展。一般利用乔、灌木和多年生草组成片状、带状或块状人工植被；如辅以沙障，可改变和调节近地层空气动力状况，保护乔、灌木存活（**《中国大百科全书》第三版网络版（林业卷）：张守攻主编**）。



## ➤ 退化固沙林

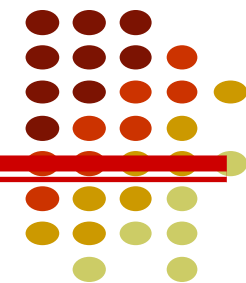


- ❑ **退化林degraded forest**: 受到人为干扰或自然灾害影响，森林结构发生逆向改变，森林生态系统服务功能或生产力持续性明显下降，依靠自然力短期内难以恢复的森林（《退化林修复技术规程（试行）》国家林业和草原局办公室〔2023〕80号）。
- ❑ **退化林分 degraded stand**: 因自然、生理和人为干扰等因素，导致林木生长衰退，林分结构不合理，防护功能下降的人工起源乔木林、灌木林和林带（三北防护林退化林分修复技术规程 LY/T 2786-2017）。
- ❑ **退化防护林**: 因环境变化、造林和经营不当、遭受自然灾害、林业有害生物危害等因素影响，林分提前或加速进入生理衰退阶段，出现林木枯死、濒死、生长不良等现象，稳定性降低，生态防护功能退化甚至丧失，难以通过自然能力更新恢复的防护林（退化防护林修复技术规程 LY/T 3179-2020）。

**退化固沙林**: 受到人为干扰或自然因素影响，林分出现大量枯死、濒死、生长不良等现象，且稳定性降低，固沙林系统的防风固沙功能退化甚至丧失，难以通过自然能力更新修复的固沙林。



## ➤ 固沙林修复



- ❑ **林分修复 stand restoration**: 通过营造林措施改善退化林分的结构，提高林分质量和防护功能的修复过程，包括更新修复、间伐、林(冠)下造林、萌芽、伐桩嫁接、渐进、补造修复、抚育修复(抚育复壮、平茬壮)等方式（**三北防护林退化林分修复技术规程 LY/T 2786-2017**）。
- ❑ **退化林修复 remediation and restoration of degraded forest**: 通过采取科学的人工措施，改善退化林森林结构，提高森林质量，恢复森林功能，促进森林正向演替的活动或过程（**《退化林修复技术规程（试行）》国家林业和草原局办公室〔2023〕80号**）。
- ❑ **退化防护林修复**: 对退化防护林采取人工干预措施，改善林分结构和生境，提高林分质量，恢复和提升生态防护功能的过程（**退化防护林修复技术规程 LY/T 3179-2020**）。

**退化固沙林修复**: 基于水资源的植被承载力，对退化固沙林采取人工干预措施，改善固沙林结构和生境，提高固沙林质量，恢复和提升防风固沙功能的过程（**退化防护林修复技术规程 LY/T 3179-2020**）。



# 退化灌木林标准：



- 遭受严重自然灾害，死亡木和濒死木株数比例大于 20%，或发生林业检疫性有害生物灾害，短期内难以恢复健康（一般：20% < 死亡木和濒死木株数比例 ≤ 40%，无检疫性灾害；重度：死亡木和濒死木株数比例 > 40%，或发生检疫性灾害）。
- 未及时平茬，或过度放牧、啃食等因素，造成生长势衰弱，生态功能持续性下降。（《退化林修复技术规程（试行）》国家林业和草原局办公室〔2023〕80号）

根据退化程度，主要分三类





## 二、干旱区固沙林退化现状及其成因





# 固沙林营造是沙漠治理最有效、最经济、最持久的措施



- 固沙造林历史悠久，规模化固沙林营造始于三北工程实施，党的十八大以来固沙林营造在规模、质量和标准上全面提升。
- 1959年4月3日，中国科学院治沙队民勤、磴口、灵武、榆林、格尔木、托克逊等6个治沙综合试验站，开启了科学防沙治沙研究的序幕。筛选出梭梭、花棒、柠条、沙拐枣、沙柳、沙木蓼、怪柳等固沙植物，并解决了育苗造林技术，有力推进了固沙林营造。

民勤县老虎口



2009年



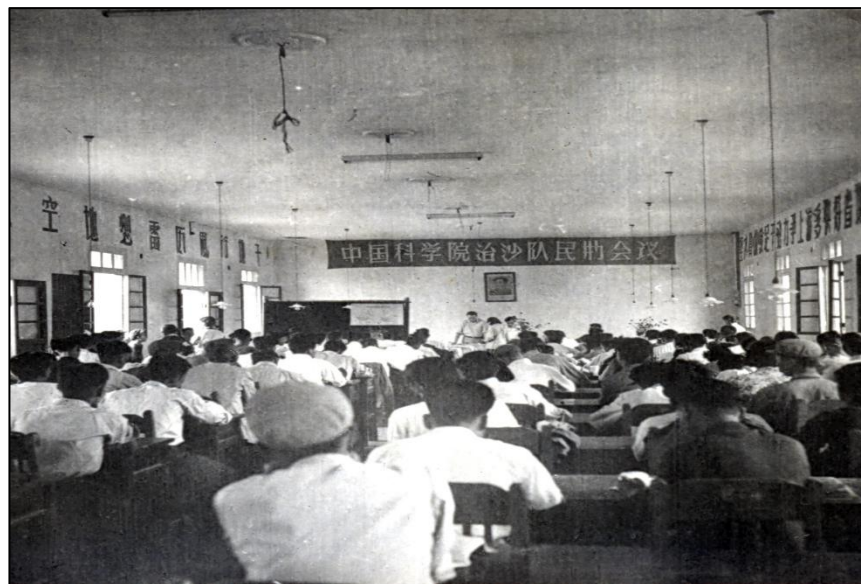
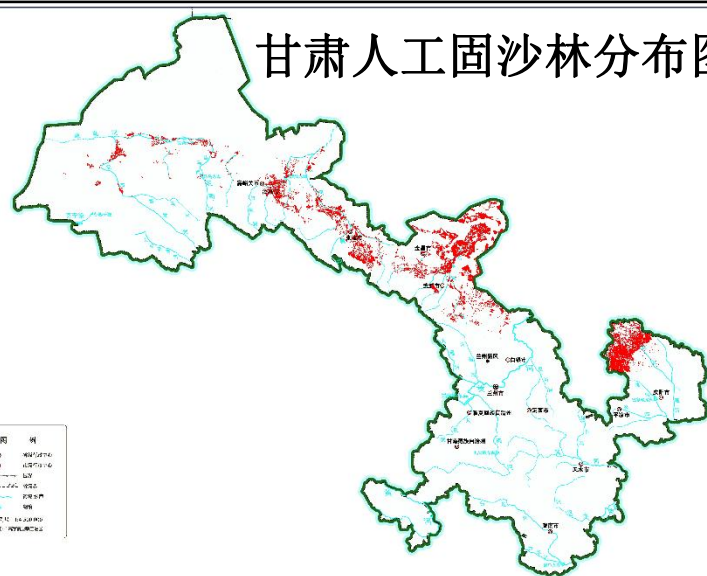
2010年



2014年

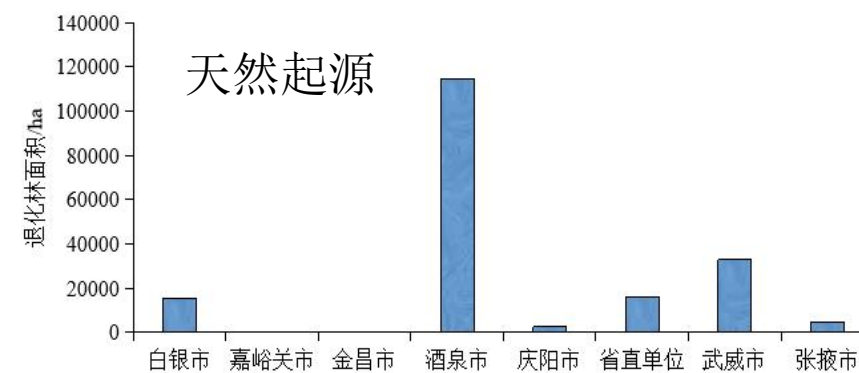
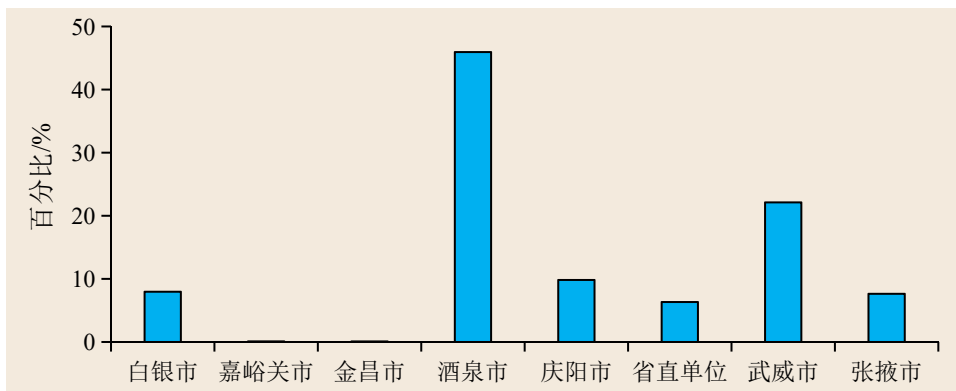
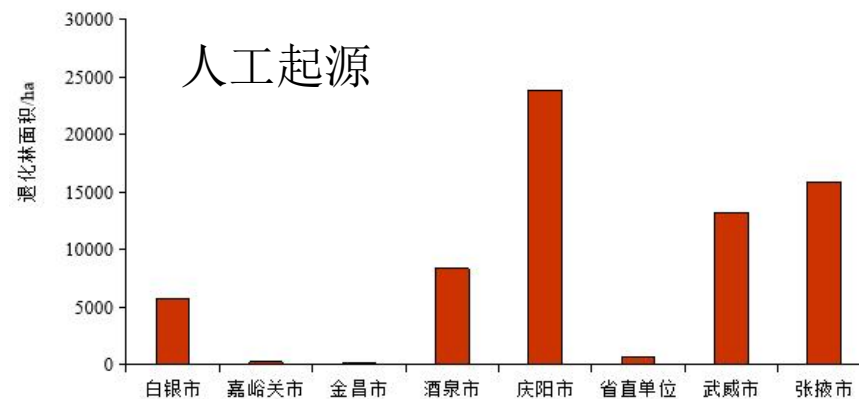
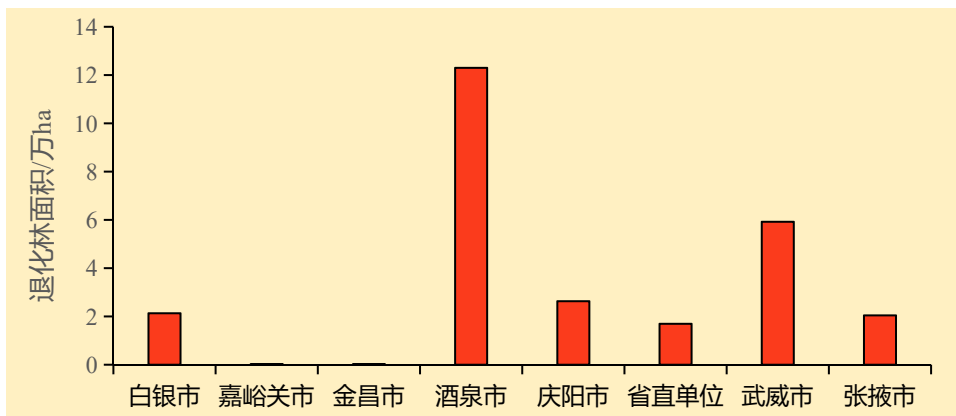
甘肃省地图

甘肃人工固沙林分布图



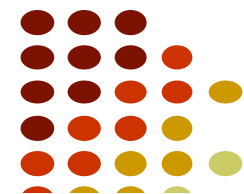
## 退化固沙林面积大、退化程度重

- 甘肃八十年代中后期开始出现退化，并持续恶化。甘肃沙区退化林达到**26.8万ha**，其中人工起源退化林面积**8.2万ha**，占到退化林的**30.4%**；天然起源退化林面积**18.6万ha**，占到退化林的**69.6 %**。

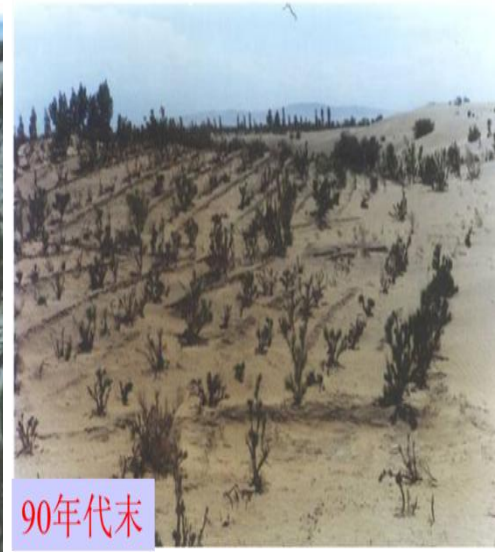
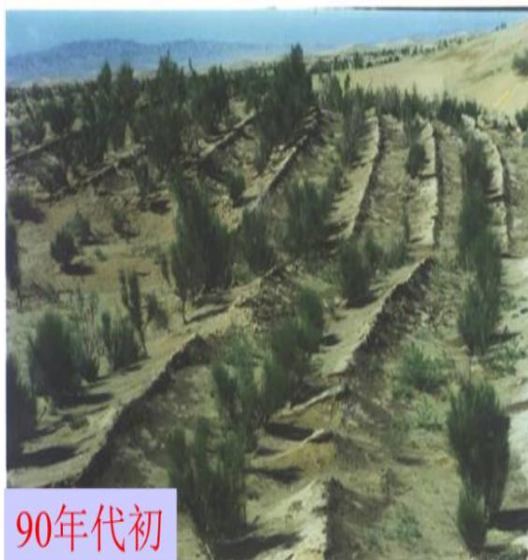
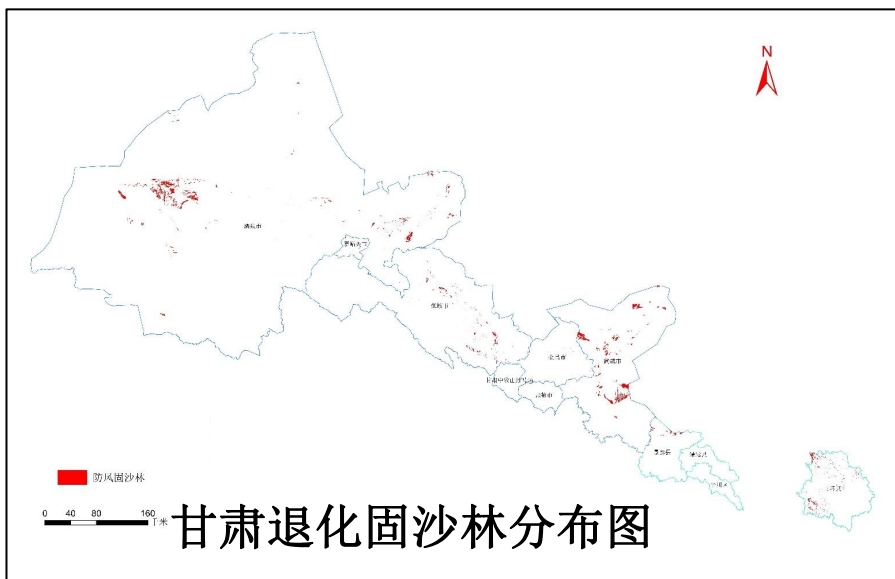
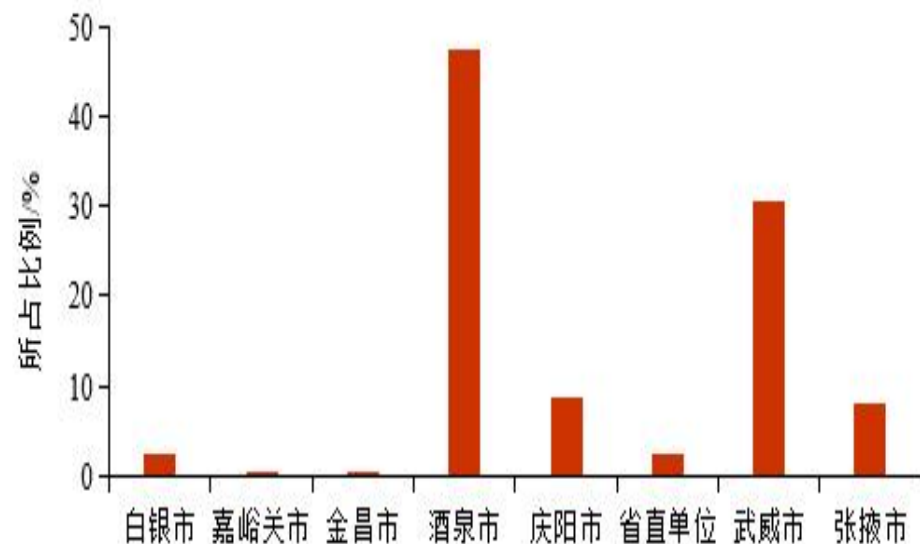
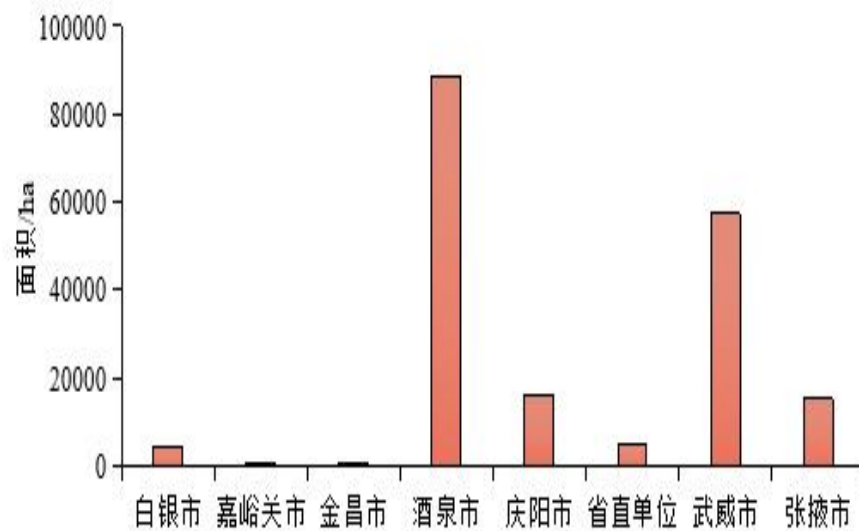




# 固沙林退化尤为严重



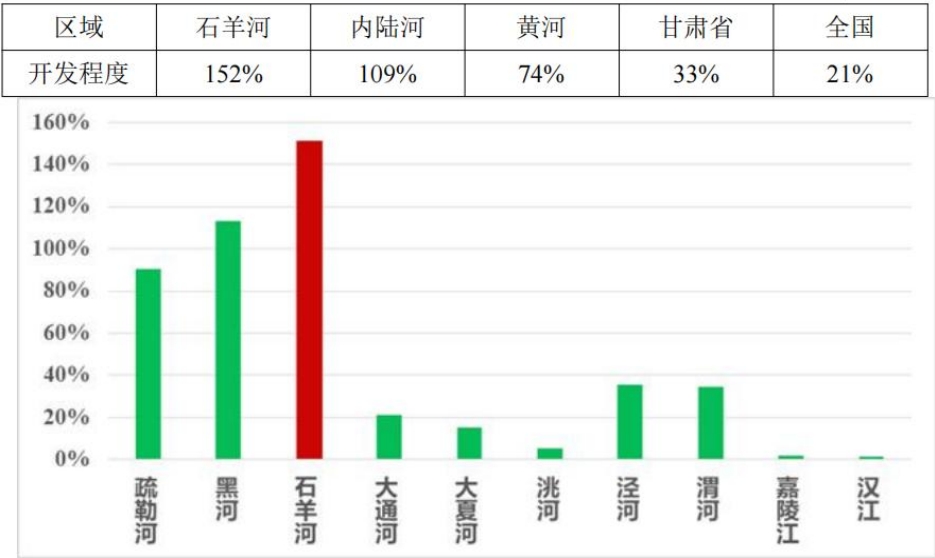
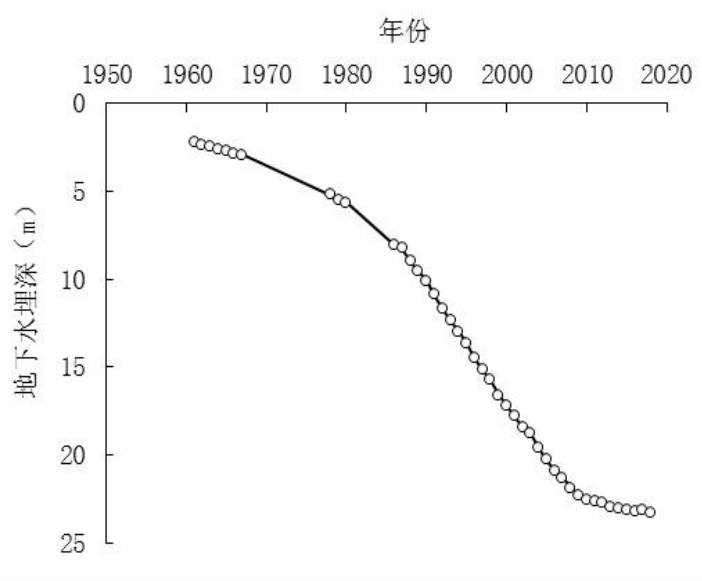
➤ 甘肃退化固沙林面积达到**18.6万ha**，占到同区域退化林分的**69.7%**，主要分布在酒泉（**47.4%**）、武威市（**30.3%**）。



# 人为活动是甘肃固沙林退化的主要因素

- 地表水资源过度利用导致河流断流，下游水文环境恶化。
- 过度抽取地下水引起水位下降，降水量不足以支撑高覆盖固沙林。
- 生理原因，自然成熟和衰败。
- 造林密度过大引起土壤含水率下降，土壤干旱加速固沙林衰败死亡。
- 正常的自然演替。结皮发育加速了深层土壤干旱，促进深根植物死亡。

年代	地下水位(m)	下降速率(m/a)
1961-1971	2.24-3.39	0.115
1972-1987	3.58-8.23	0.339
1988-2004	9.00-20.036	0.649
2005-2010	20.74-22.77	0.505
2011-2020	23.15-23.28	0.028
1961-2020	2.24-23.28	0.369



梭梭、怪柳				
地下水位	<4 m	4-7 m	7-10 m	>10 m
生长情况	正常	出现枯梢	出现枯死植株	大部分植株死亡
风蚀程度	无风蚀	轻度	中度风蚀	严重风蚀



## 退化林修复受到高度重视

- 早在**2014**年出台《关于做好退化防护林改造工作的指导意见》，之后制定出台《三北工程退化林修复实施意见》；
- 于**2017**年印发《退化防护林修复技术规定（试行）》
- **2015**年，国家林业局在山西、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、陕西、甘肃、青海、宁夏等**9**个省区选择了**50**个县，启动了三北防护林体系建设工程退化林分修复试点工作。**2019**年，为落实习近平总书记等中央领导同志关于加强退化林分修复改造的重要批示精神，国家发展改革委在中央预算内投资中安排启动了退化林修复任务，退化林修复和改造范围几乎覆盖了整个三北工程区。
- “十三五”期间，全国完成退化林修复改造任务**735**万亩。退化林修复成为国土绿化的主体工程，**2022**年退化林修复（**142万ha**）占到造林绿化面积（**383万ha**）的**38.2%**，**2023**年占到**37%**（中国国土绿化状况公报）。



胡杨林



怪柳灌丛



沙枣林



### 三、干旱区退化固沙林修复的理论基础







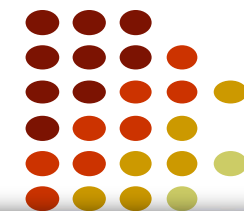




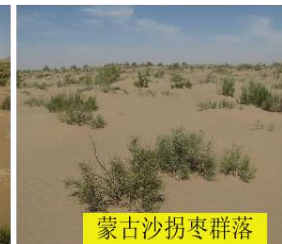
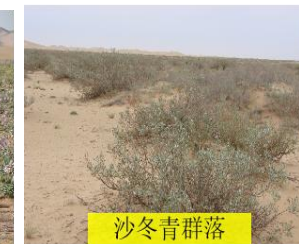
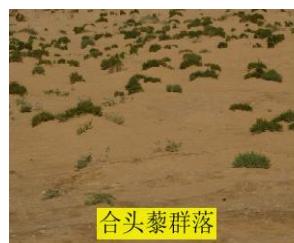
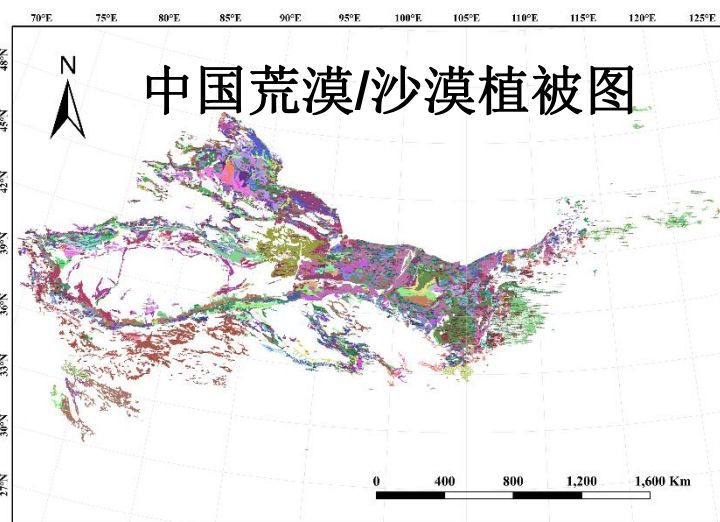
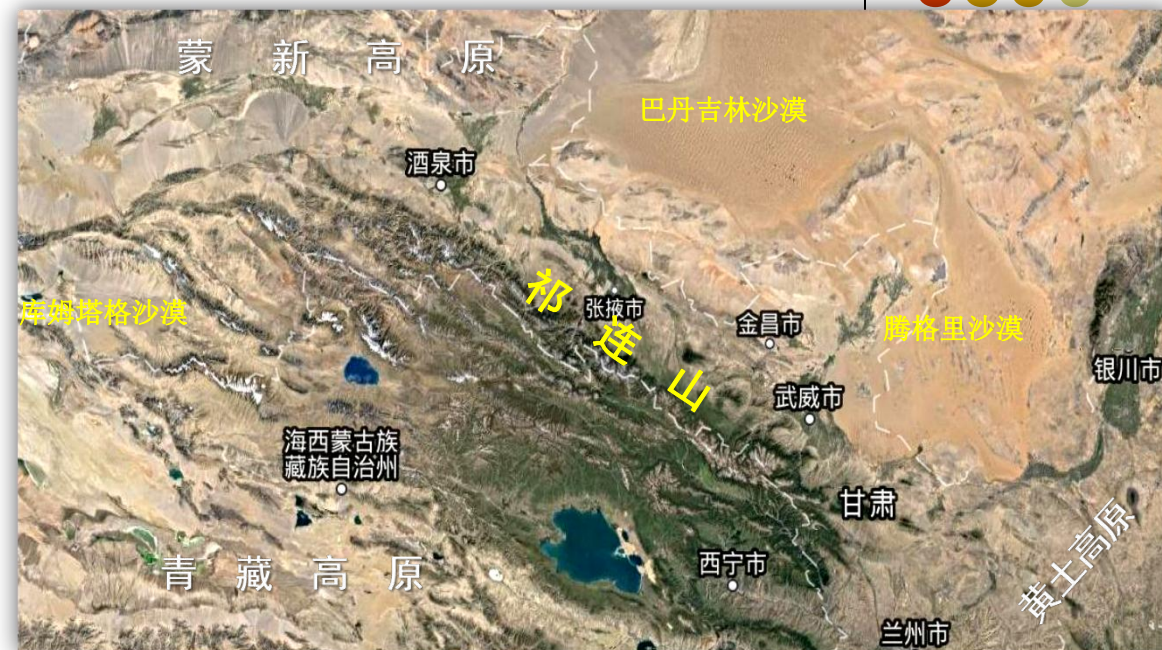
王天昌（右）和王银吉父子



# 1. 基于自然地带性和气候适应性选择修复植物



- 我国沙漠地区的植被类型自东向西，由沙质草甸、沙地疏林灌丛草原、沙质草原，向沙质荒漠草原和荒漠演变，呈现明显的经度地带性变化。
- 干旱区7大沙漠，从乌兰布和沙漠塔克拉玛干沙漠，植被类型表现为半荒漠、典型荒漠、极端干旱荒漠的经度地带性变化。





# 1. 基于自然地带性和气候适应性选择修复植物

植被的建群种或优势种随地带性变化依次更替。不同的替代种在不同地带的发生、发展和死亡的规律基本相同，只是不同物种对水分需求或其耐旱性有很大区别，是降水的指示植物。

- 豆科锦鸡儿属的**小叶锦鸡儿**仅分布于科尔沁沙地、松嫩沙地、呼伦贝尔沙地及浑善达克沙地东部，从浑善达克沙地西部开始被**中间锦鸡儿**所替代，到甘肃河西走廊和新疆南疆又依次被**柠条**所替代。
- **差巴嘎蒿**仅分布于东部科尔沁沙地、松嫩沙地、呼伦贝尔沙地和浑善达克沙地东部，至毛乌素沙地被**油蒿**替代，至甘肃河西走廊和新疆又依次被**沙蒿**和**喀什蒿**替代。这些不同地区同属植物的替代种都具有相似的生态习性和繁殖特点。

中温草原带 (科尔沁沙地西部)	暖温草原带 (毛乌素为例)	干旱荒漠带 (甘肃河西走廊)	极干荒漠带 (新疆南疆)
小叶锦鸡儿	中间锦鸡儿	柠条	黄刺条
山竹子	羊柴	花棒	
差巴嘎蒿	油蒿	沙蒿	喀什蒿
贝加尔针茅	本氏针茅	沙生针茅	长羽针茅
大针茅	克氏针茅	戈壁针茅	新疆针茅





# 三北工程常用植物

卢琦 褚建民 马全林 ◆ 主编



中国林业出版社  
CHINA FORESTRY PUBLISHING HOUSE

## 甘肃省造林乡土树种

GAN SU SHENG ZAO LIN XIANG TU SHU ZHONG

主编 马全林 莫保儒 柴春山

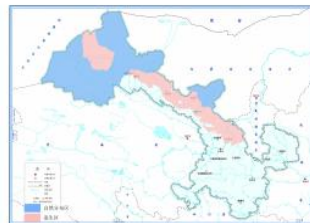


苋科  
Amaranthaceae

梭梭属 *Haloxylon*

梭梭 *Haloxylon ammodendron* (C.A.Mey.) Bge.

别名: 梭梭柴、琐琐



**形态特征:** 灌木或小乔木, 高 1-9 米, 树杆直径达 50 厘米。树皮灰白色。枝条粗短, 开展; 当年生枝条鲜绿色, 光滑。叶鳞片状, 宽三角形, 稍开展, 先端钝, 腋间具绵毛。花两性, 单生于二年生枝条的侧生短枝叶腋; 小苞片舟状, 宽卵形, 与花被近等长, 边缘膜质; 花被片矩圆形, 先端钝, 背面先端之下 1/3 处生翅状附属物; 花被片在翅以上部分稍内曲并围抱果实; 花盘不明显。胞果黄褐色, 果皮不与种子贴生; 种子黑色, 直径约 2.5 毫米。花

期 5-7 月, 果期 9-10 月。

**生态适应性:** 耐风, 耐旱, 较耐盐碱, 耐沙质贫瘠土壤, 喜光恶涝; 适于半荒漠和荒漠地区的沙漠中, 其生境多为地下水较高的沙丘间低地、干河床、湖盆边缘、山前平原或石质砾石地, 以含有一定量盐分 (含盐量 20 克 / 千克) 的土壤或沙地生长最好, 沙埋后形成沙丘。

**分布范围:** 产于民勤、金塔、肃北、阿克塞、玉门、敦煌等地, 在黄河以西其他各县 (区) 适宜栽植。宁夏西北部、青海北部、新疆及内蒙古等地有分布。

**育苗技术:** 采用播种育苗。10-11 月采种, 苗圃地选择沙质土, 早春 3 月上中旬播种, 条播或撒播, 播种量 30-38 千克 / 公顷, 播后覆盖风沙土, 厚度 1 厘米以下。播种后及时灌溉, 全年灌溉 2-3 次。

**造林技术:** 采用植苗造林。秋季或雨季均可, 定根水下渗, 地表干燥后, 用沙填埋定植坑, 造林密度 625-1250 株 / 公顷。







## 2. 基于植被演替规律及其阶段选择固沙植物种



### 半荒漠区 固沙林演 替阶段

**第一阶段：**流动沙丘，水分条件好，有一年生沙米、虫实，但不起固沙作用；另有籽蒿和花棒，有一些阻沙作用；植被盖度**1-2%**。

**第二阶段：**沙丘逐渐变缓，先锋植物增多，沙层变干、紧实，这时较耐旱的油蒿和柠条侵入，流沙半固定，植被盖度**20-30%**。

**第三阶段：**沙地趋于固定，沙层继续变干，有机质增加，出现更加耐旱的植物针茅、驼绒藜等，向地带性土壤发育。

上述情况表明，天然植被演替的第二阶段是当地固定流沙相对比较稳定的一个必经阶段，其中油蒿和柠条起着重要作用。



油蒿  
(*Artemisia ordosica*)



花棒  
(*Hedysarum scoparium*)

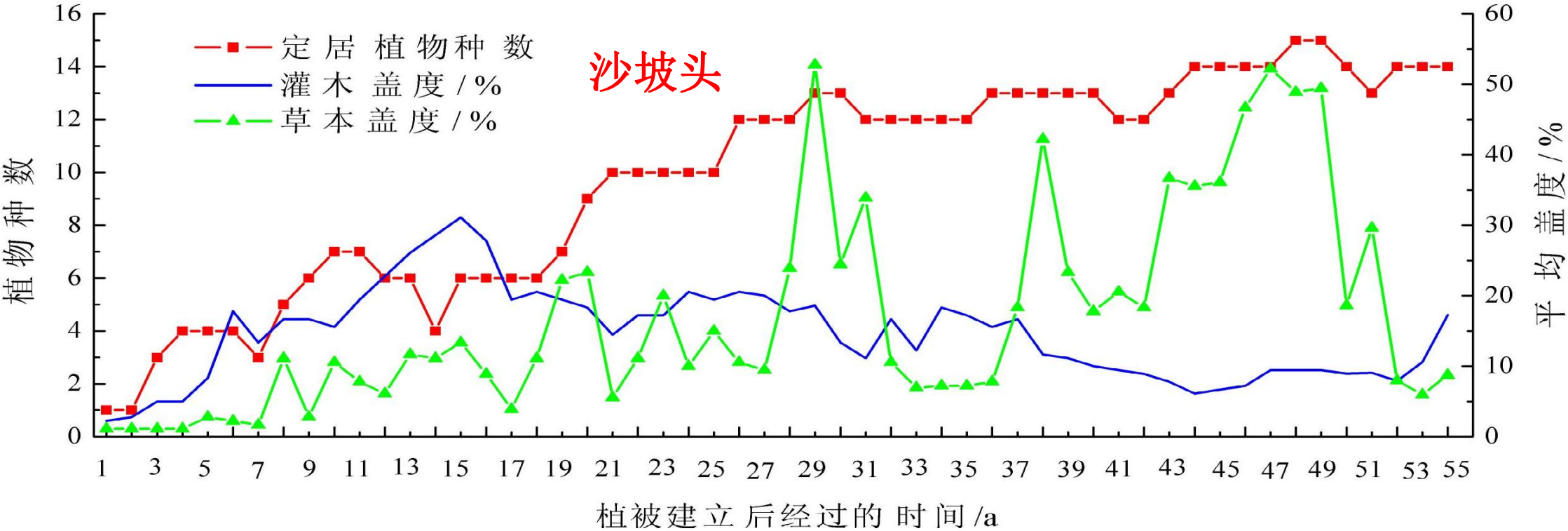


柠条  
(*Caragana korshinskii*)

## 2. 基于植被演替规律及其阶段选择固沙植物种



沙坡头固沙林建立 15 年后灌木层的最大盖度达到 33%，随着进一步的演变，一些灌木种逐渐退出，灌木的盖度逐渐下降并稳定到10%-20%。草本盖度随着降水量的年际变化而呈现波动状态。物种丰富度数随着时间的植被的演替逐渐增加，生态系统逐渐由以灌木为主的人工固沙植被演变为以隐花植物、草本和灌木为主的半天然生态系统。





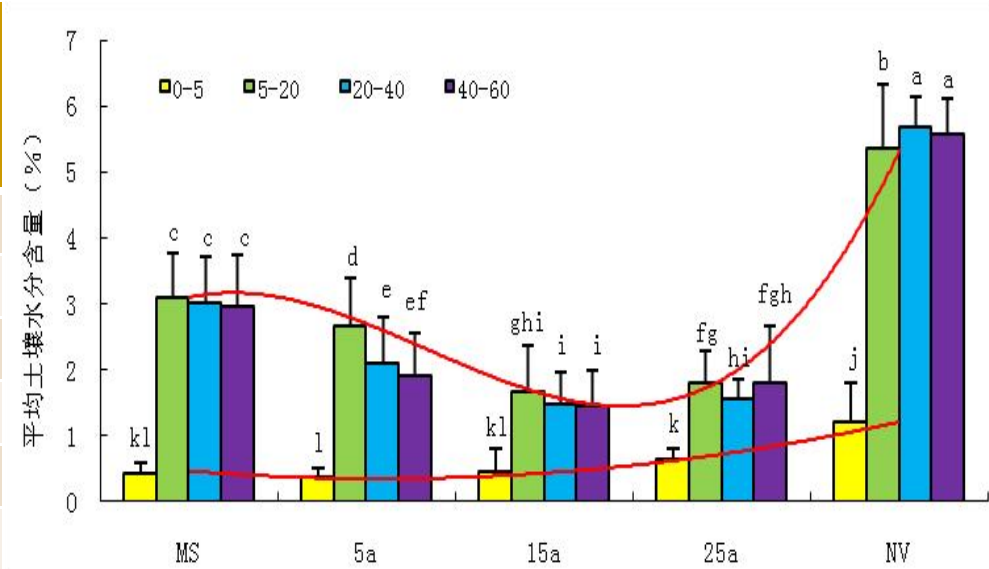
### 3. 基于土壤水分平衡调控固沙林密度



土壤含水量变化=(降水+吸附水+地下水)—(地表蒸发+植物蒸腾+渗漏水)

- 土壤水分的平衡还取决于植物种类的耗水特性。如果栽植密度较高，一些植物属于高耗水植物，人工固沙林容易导致土壤水分平衡失调。
- 人工林演替过程中，一般表层土壤持水能力逐渐增强，深层土壤水分显著降低，土壤水分浅层化。

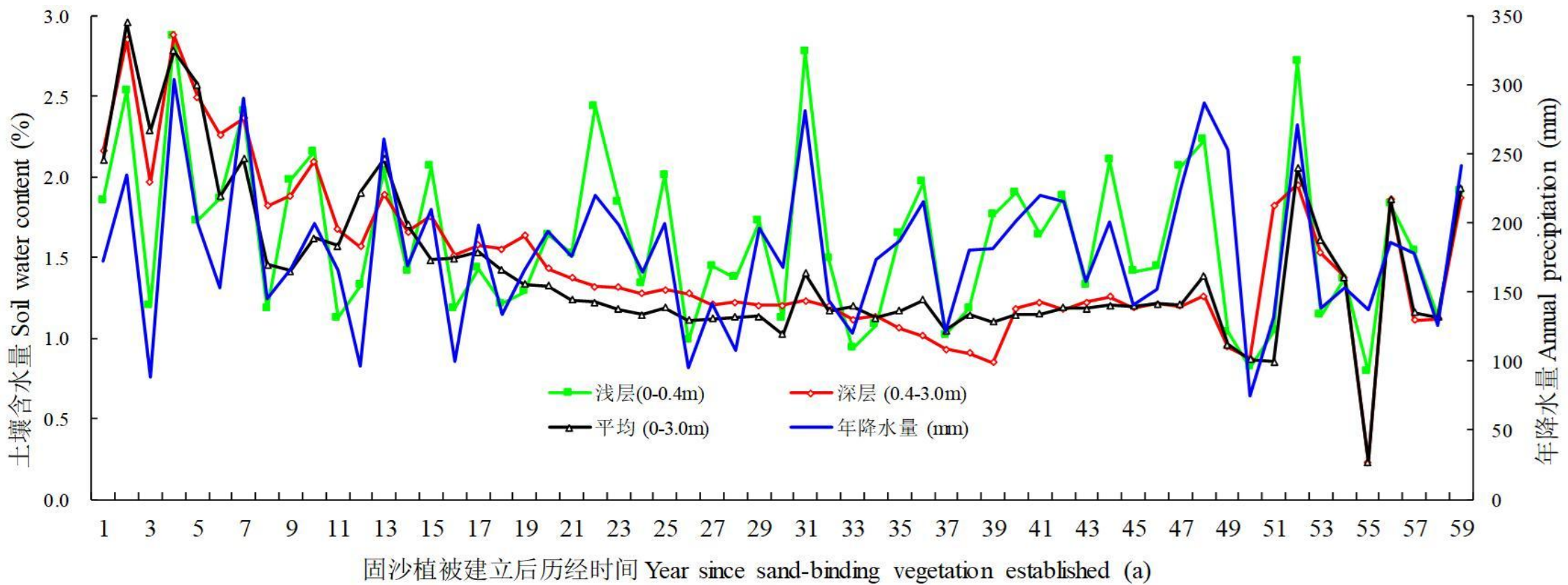
梭梭年龄	收入量	支出量		下渗量（S）	贮水变化量（△R）
	降水量（P）	蒸散量（E）			
		蒸发量（E <sub>1</sub> ）	蒸腾量（E <sub>2</sub> ）		
流沙	115.1	104.6	0	10.5	0
3	115.1	120.94		/	-5.84
8	115.1	119.96		/	-4.86
13	115.1	115.75		/	-0.65
18	115.1	114.87		/	+0.23
23	115.1	114.94		/	+0.16



### 3. 基于土壤水分平衡调控固沙林密度



在降水 180 mm 的沙坡头地区，固沙植被建立 9-10 年后土壤含水量迅速下降，土层越深含水量越低，40 年后土壤含水量一直稳定在较低的水平(1.2%左右)；降水量与植被区表层土壤含水量呈明显的正相关关系，而与深层无显著相关。

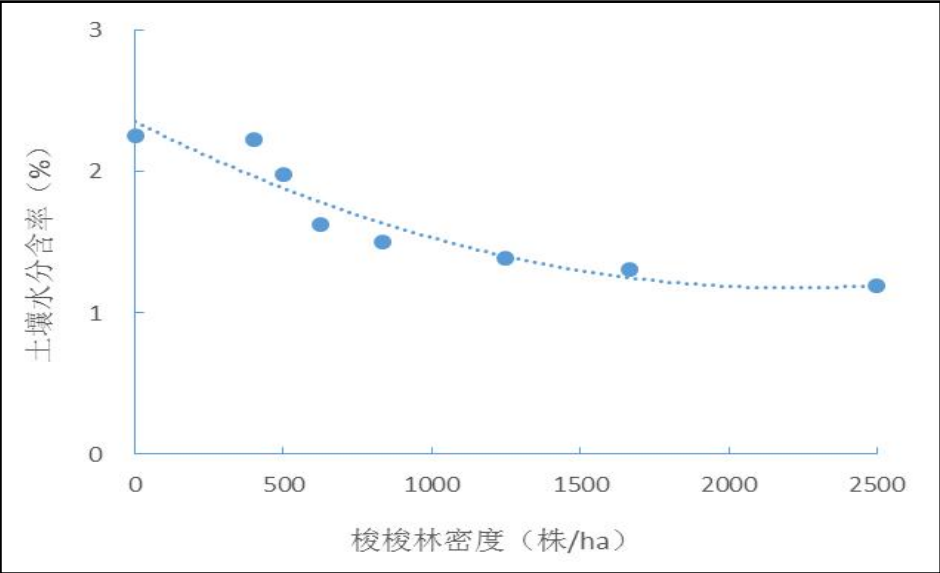
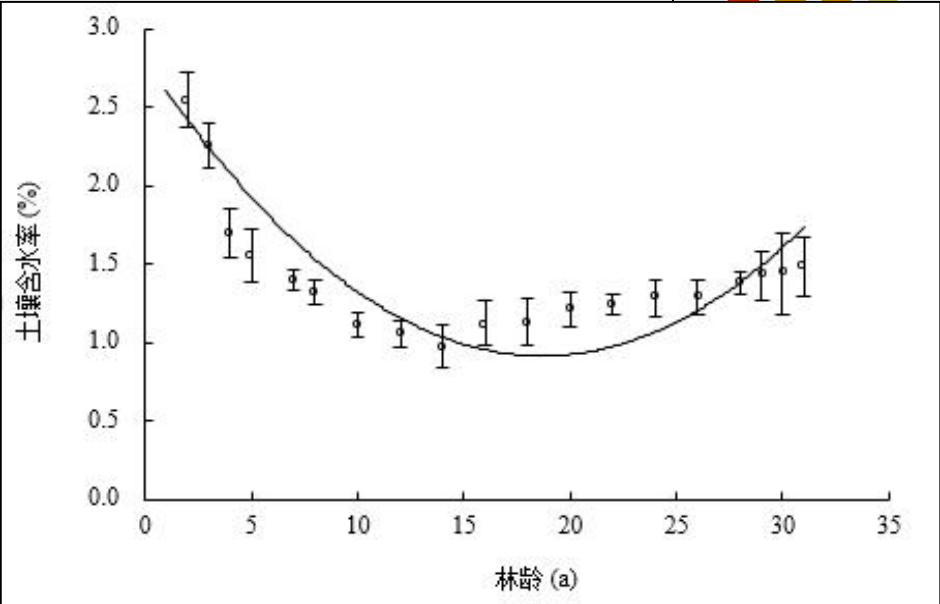




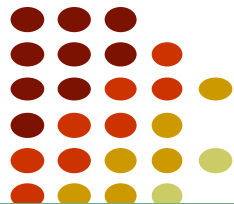
### 3. 基于土壤水分平衡调控固沙林密度

民勤县人工梭梭林造林密度1650株/ha（2 m×3 m）梭梭林，3年后林地土壤含水率下降到2.25%，5年后降低到1.55%，到30年后恢复到1.30%并保持稳定，残存梭梭生长趋于正常。110mm降水区域（民勤）的可承载密度约为600株/ha，150mm区域（凉州）可承载密度约为1200株/ha。

指标	0a	3a	10a	25a	35a	白刺
梭梭密度（株/hm <sup>2</sup> ）	0d	1650a	650a	625a	400a	0d
梭梭高度（cm）	0d	103.2a	315.1a	172.5b	216.7a	0e
梭梭盖度（%）	0d	20.7b	29.0b	14.1c	10.7c	0d
植被盖度（%）	7.6b	22.2b	30.3b	18.1c	23.3bc	36.8ab
种群盖度占比（%）	0d	93.2a	95.7ab	77.9b	45.9b	0d
物种丰富度	2c	4c	8b	8c	12c	9b
沙粒（%）	94.0a	92.9a	84.1ab	82.8b	78.2b	86.8a
粉粒（%）	4.4b	5.3c	12.0b	13.0c	16.8c	10.1b
粘粒（%）	1.6c	1.8c	3.9c	4.2d	5.0cd	3.1c
容重（g/cm <sup>3</sup> ）	1.59c	1.54a	1.49c	1.44d	1.29d	1.42c
有机质（%）	0.09d	0.34d	0.49d	0.73e	0.81e	0.39c
全氮（%）	0.09d	0.10d	0.13d	0.25e	0.25e	0.21c



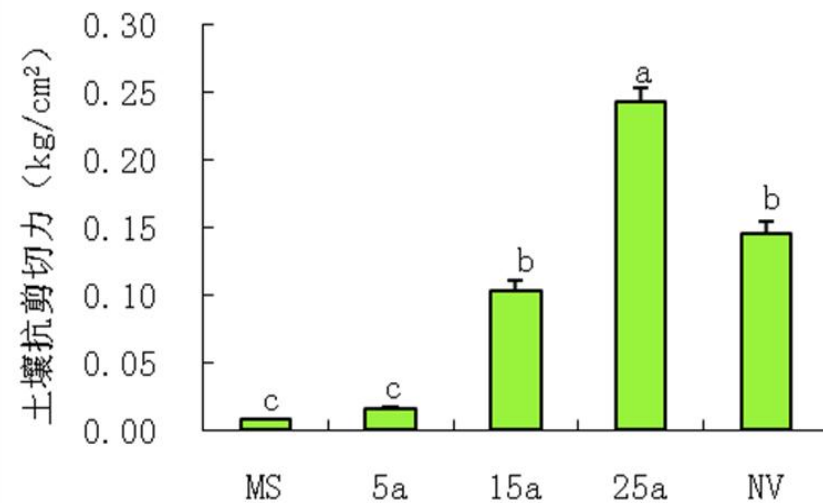
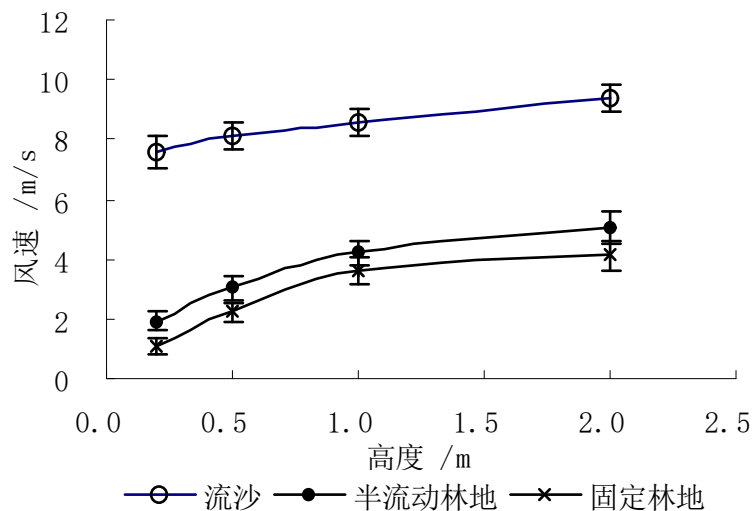
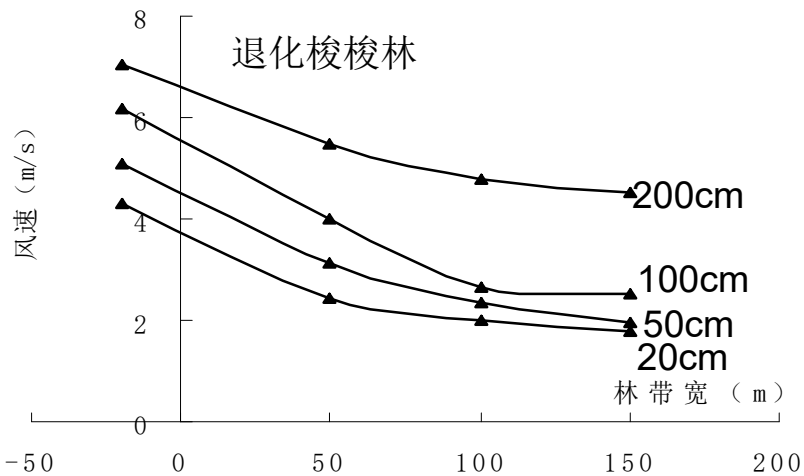
# 4. 基于防风固沙阻沙功能采取综合措施



- 防风固沙是固沙林的首要功能，功能衰减是其固沙林退化的基本特征，50m林带20-200cm层的平均风速降低35%，150m林带降低54%。
- 固沙林能提高地面粗糙度，从而提高起沙风速。流沙起沙风速为5m/s，而覆盖良好的固沙林区可达6~10m/s，当固沙林盖度达到60%时，起沙风速可以提高到21~22m/s，相当于8级大风风速。结皮发育进一步提高了土壤的抗剪切力，从而提高起沙风速。

不同固沙植被盖度和风速下0~5min内平均风蚀率					
植被盖度/(%)	起沙风速/(m/s)	侵蚀率/(kg/m·min)			
		10m/s	15m/s	20m/s	25m/s
45	10.94		0.01720	0.0384	0.06930
40	9.85	0.00113	0.03238	0.11543	0.19090
30	9.34	0.00645	0.06366	0.16023	0.28905
20	8.23	0.01208	0.17990	0.42686	0.77617
10	7.67	0.01738	0.30258	0.64172	1.17199

资料来源：张春来等，2003





## 4. 基于防风固沙阻沙功能采取综合措施



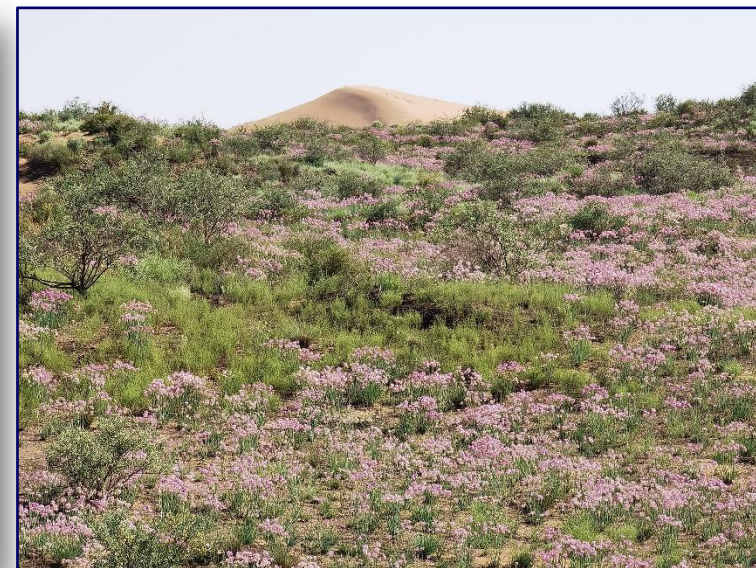
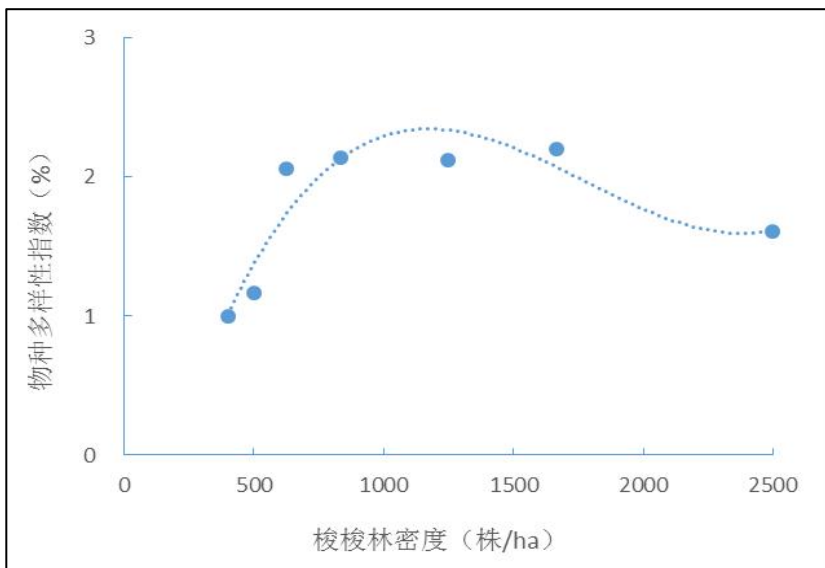
风沙流主要集中于近地表，流沙裸地**0-4cm**输沙率可达**58%**。退化梭梭林有效降低输沙量，并改变风沙流的结构。

立地类型	指 标	近地面层0-20cm										
		0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	0-20
退化较轻梭梭林	输沙率	0.09	0.07	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.36
	百分率	24.65	19.16	12.84	9.96	9.07	5.56	6.32	4.02	5.94	2.49	100
中等退化有沙障梭梭林	输沙率	0.033	0.109	0.106	0.215	0.140	0.058	0.035	0.021	0.000	0.000	0.717
	百分率	4.60	15.20	14.78	29.99	19.53	8.09	4.88	2.93	0.00	0.00	100
中等退化无沙障梭梭林	输沙率	0.306	0.382	0.364	0.234	0.172	0.170	0.084	0.054	0.023	0.027	1.816
	百分率	16.85	21.04	20.04	12.89	9.47	9.36	4.63	2.97	1.27	1.49	100
退化严重梭梭林	输沙率	5.03	3.92	1.90	1.09	0.62	0.38	0.27	0.19	0.15	0.10	13.65
	百分率	36.88	28.71	13.94	7.95	4.53	2.80	1.95	1.39	1.09	0.77	100
流 沙	输沙率	7.41	5.25	2.62	2.45	1.58	0.96	0.55	0.33	0.24	0.18	21.57
	百分率	34.35	24.34	12.15	11.36	7.32	4.45	2.55	1.53	1.11	0.83	100

## 5. 基于生态系统的生物多样性增加物种组成

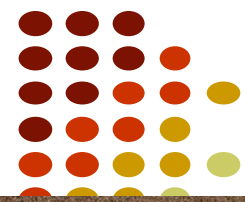


生物多样性是生态系统稳定性的基本保障，生物多样性越高，生态系统自我调节能力、抗干扰能力和抵御逆境能力就越强，稳定性就越高。现有的人工固沙林普遍存在树种单一，造林密度大，限制了其他物种的入侵，人工林系统稳定性差。如人工梭梭林，造林初期促进了盐生草、五星蒿、沙米和虫实等一年生植物的生长，提高了物种多样性。随梭梭林优势度和竞争力提升，土壤持续干旱，其他物种难以侵入人工梭梭林系统，物种多样性进一步降低。

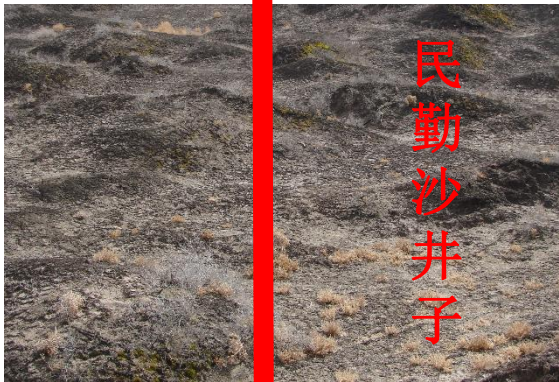
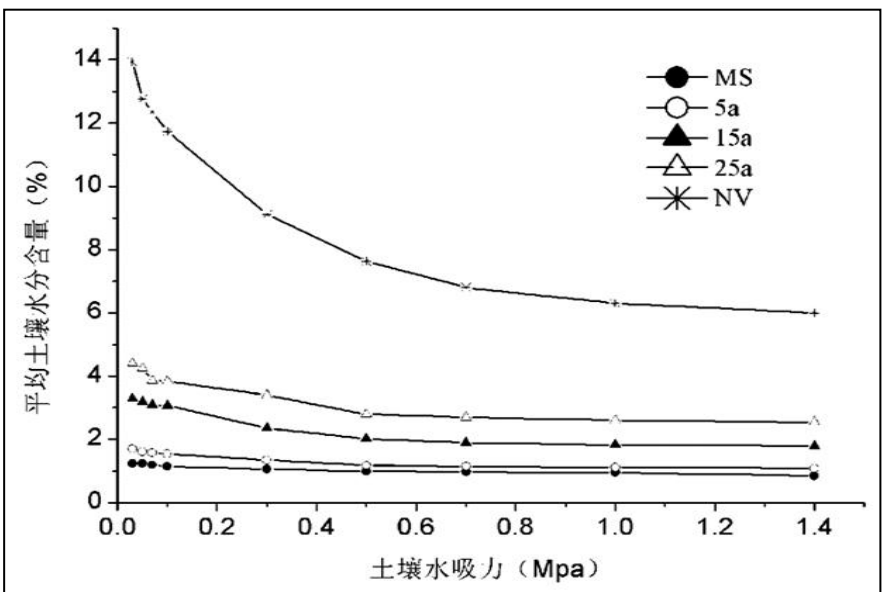
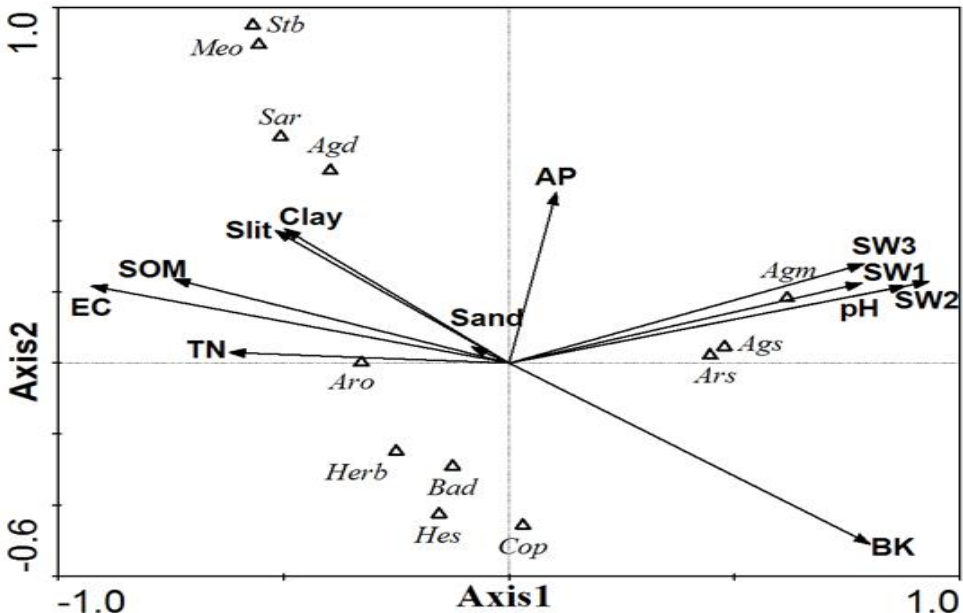
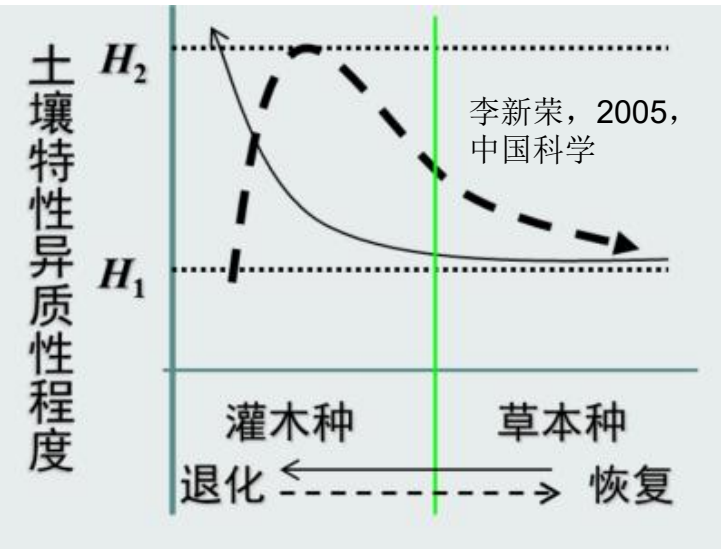




## 6. 基于植被—土壤系统的耦合关系优化植物配置



土壤与植物之间具有一定的对应关系，沙地土壤演变既是植被恢复的结果，又反馈于植被的演变，决定着植被演变阶段和植被类型。土壤结皮增强了表层土壤持水力，引起土壤水分浅层化，驱动了深根系植物的衰亡和浅根性草本植物的发展，退化林修复必须考虑土壤发育阶段，选择适应性植物。



民勤沙井子











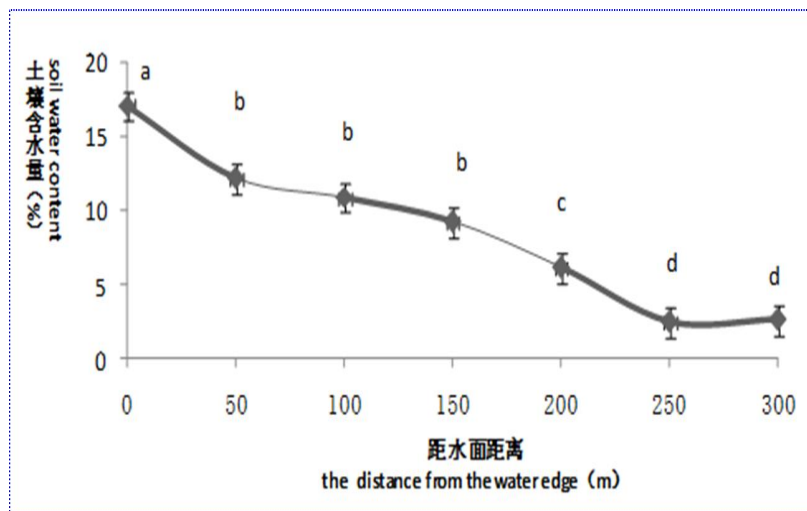
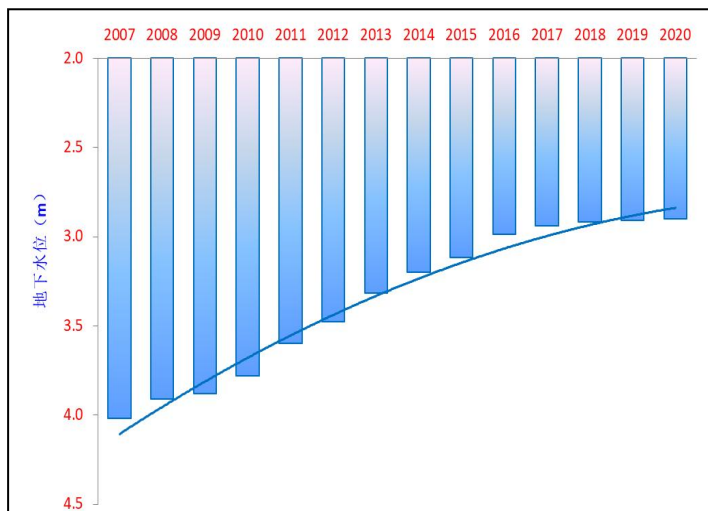
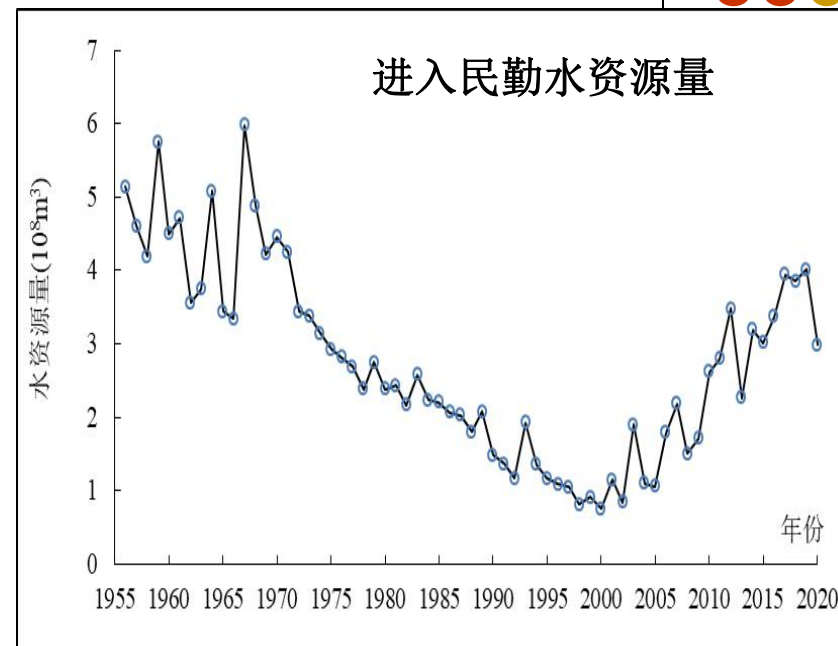
## 四、干旱区退化固沙林修复技术模式





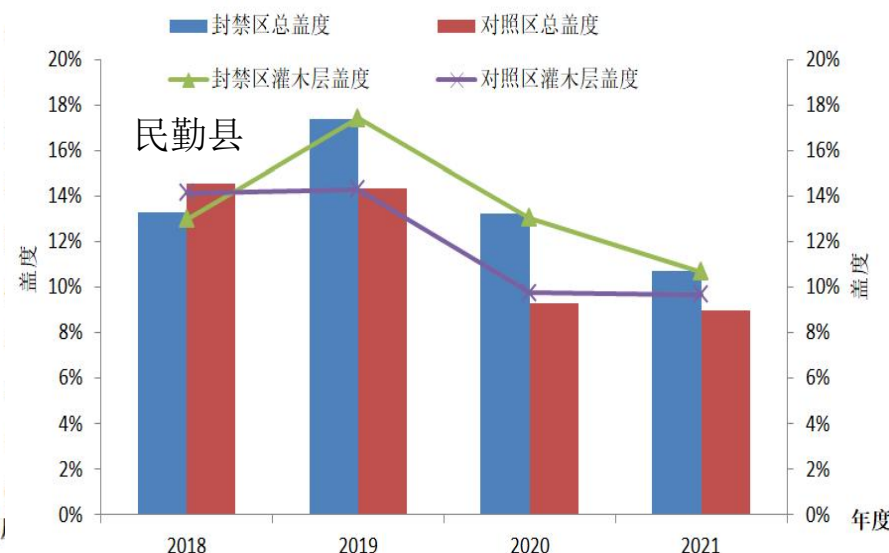
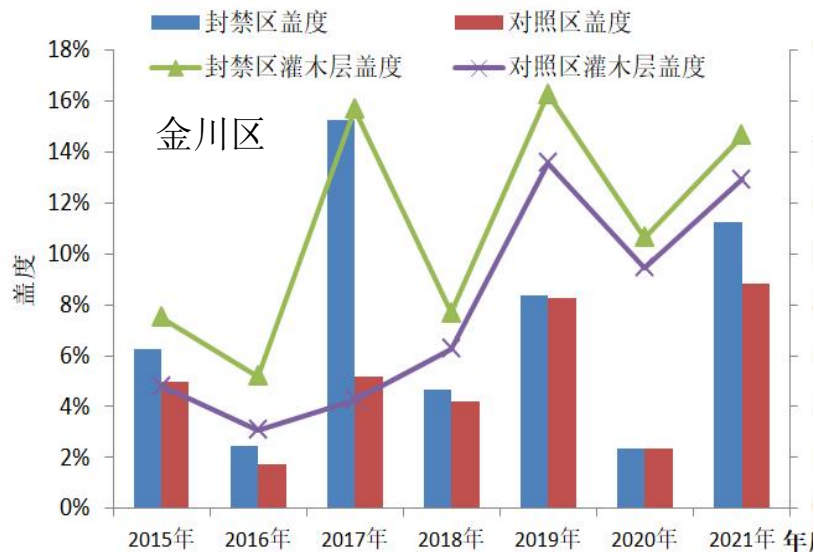
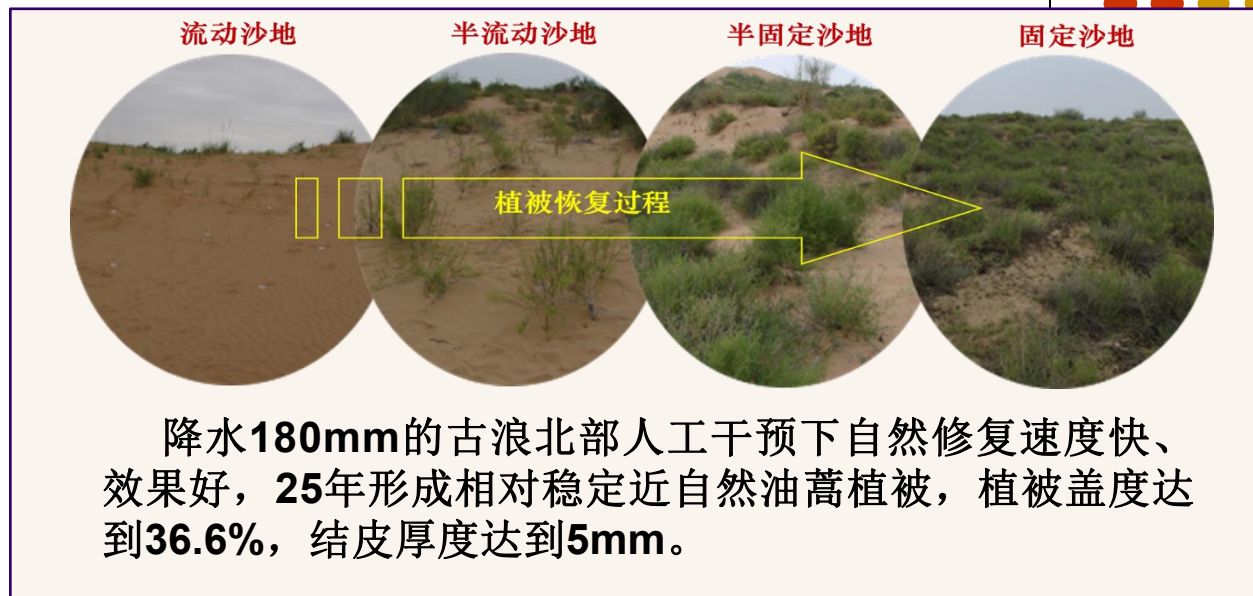
## 恢复水文环境

恢复水文环境是大尺度保护和修复固沙林的最根本措施，但是成本高、难度大、时效慢。黑河和石羊河流域的综合治理有效缓解了下游地区水文环境，促进了固沙林的恢复。在石羊河流域，2019年起进入民勤水量突破4亿 $\text{m}^3$ ，已累计向青土湖下泄生态水量超过3亿 $\text{m}^3$ ，尾间湖区形成了106 $\text{km}^2$ 的旱区湿地，该区域地下水埋深由治理前的4.02m上升到2.91m（年提高8.5cm），土壤水分也明显提高，芦苇等湿生植物面积达到20多万亩。



## ➤ 封禁保护与自然修复

- 封禁保护与自然修复具有大规模、低成本、稳定健康等优点，截止**2023**年全国沙化土地封禁保护面积达到**2707.65**万亩。
- 在降水大于**150mm** 的地区效果较好；小于**150mm** 区域自然修复的作用有限，受一年生植物影响年际波动大，同时受地下水位、沙丘流动程度等的影响。





河西走廊荒漠植物种类					地区	种数	共有种	相似系数 (%)
植物类型		科	属	种	塔里木盆地	165	129	36.7
裸子植物		3	5	13	准噶尔盆地	245	141	35.8
被子植物	单子叶植物	6	43	81	阿拉善地区	606	323	56.2
	双子叶植物	64	180	449	柴达木盆地	255	146	36.6
合计		73	228	543				

- 选用耐旱乡土植物，采用梭梭、柠条、沙蒿、油蒿和红砂、膜果麻黄等多种分层配置。
- **流沙区**：采用行带式低密度模式，以低覆盖度（20-25%）实现最大防护功能。**固定沙地**：人工促进红砂、针茅。

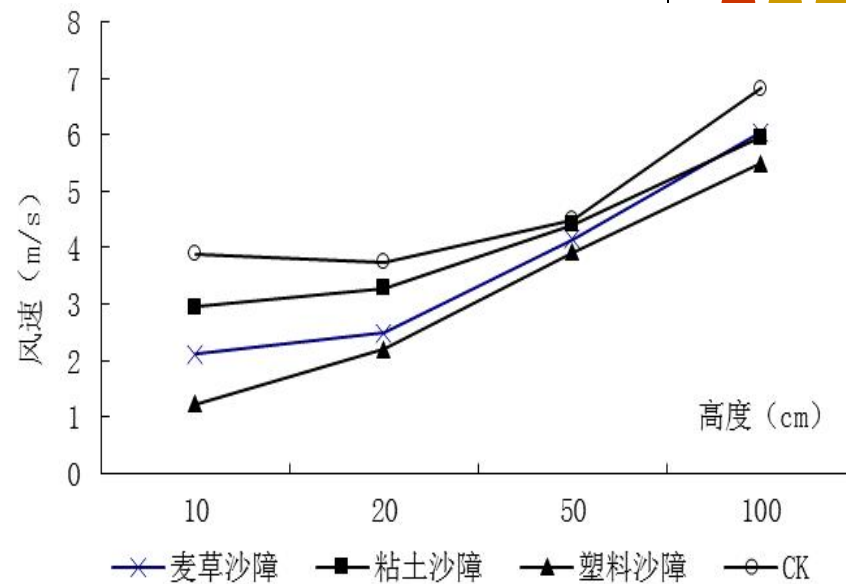
风速(m/s)	3-4		4-5		5-6		6-7		<7	
柠条配置	行列式	随机	行列式	随机	行列式	随机	行列式	随机	行列式	随机
200cm	2.94	3.81	3.55	4.63	3.88	5.07	4.68	6.23	4.98	6.96
	77.2	100	76.7	100	76.5	100	75.1	100	71.6	100
50cm	1.59	2.16	1.75	2.76	1.86	3.11	2.02	3.73	2.12	4.18
	73.6	100	65.5	100	59.8	100	54.2	100	50.7	100





## ➤ 补设沙障(典型荒漠区)

在退化固沙林内设置PLA、尼龙、草方格沙障1-1.5m×1-1.5m、2m-3m粘土沙障。以起沙风速**5.0 m/s**为临界风速，以近30年的最大风速（**23 m/s**）为防护标准，需要降低**78.3%**的风速；而以多年最大风速均值（**17.43 m/s**）、冬春季最大风速均值（**12.77 m/s**）为防护标准，需要降低**71.3%**和**60.8%**的风速。残存密度为**270-525株/ha**的人工梭梭林，设置尼龙、麦草和粘土沙障后，**林内10cm高度风速降低45.9%-68.5%**。





## 补设沙障(典型荒漠区)

沙障设置后，可降低风蚀**80%以上**，也促进了林地土壤水分的恢复，塑料和黏土沙障促进结皮形成和自然植被的恢复。



机械沙障+退化梭梭林林地土壤含水率											
类型	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-160	160-180	180-200	平均值
麦草方格沙障	2.03	1.65	2.53	1.88	1.47	1.40	1.28	1.04	1.00	0.89	1.52
塑料方格沙障	1.30	1.19	1.28	1.32	1.22	1.26	1.37	1.35	1.68	1.61	1.36
粘土沙障	2.02	2.31	2.87	2.09	0.93	1.18	1.06	1.10	1.06	0.96	1.56
对照梭梭林	1.02	1.28	1.64	1.38	1.29	1.14	1.13	1.20	1.32	1.28	1.27
原生流动沙丘	2.52	2.82	2.49	2.14	2.18	2.50	2.55	3.07	2.76	2.52	2.56

类型		近地面层 0-20cm											
		0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	0-20	
塑料沙障区	输沙率	0.282	0.211	0.367	0.175	0.085	0.076	0.197	0.0986	0.1657	0.0941	1.752	
	百分率	19.21	14.33	25.00	11.89	5.79	5.18	13.41	6.71	11.28	6.40	100.00	
麦草沙障区	输沙率	0	0	0.0002	0.0029	0.0010	0.0163	0.0239	0.0102	0.009	0.0106	0.0741	
	百分率	0	0	0.23	3.97	1.40	21.96	32.24	13.79	12.15	14.25	100	
粘土沙障区	输沙率	2.568	1.785	1.520	1.350	1.150	0.958	0.949	0.802	0.669	0.646	12.397	
	百分率	20.71	14.40	12.26	10.89	9.28	7.73	7.65	6.47	5.39	5.21	100	
CK	输沙率	31.714	12.761	7.175	4.709	2.895	1.793	1.257	0.885	0.557	0.443	64.187	
	百分率	49.41	19.88	11.18	7.34	4.51	2.79	1.96	1.38	0.87	0.69	100	

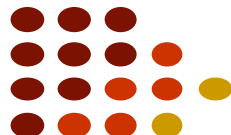
备注：对照 2m 高度风速为 6.28m/s，输沙率 g/cm·h，百分率%。

类型	时间	0m	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	平均
塑料沙障区	2003.6	-1	-1	0	0	0	0	0	1.3	0	-0.08
	2004.4	-10	-7	-1	-1	0	0	-1	2.5	1.3	-1.80
麦草沙障区	2003.6	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.11
	2004.4	-2.5	-1	0	0	0	0	0	0	0	-0.39
粘土沙障区	2003.6	0	0	0	0	2.5	3.5	13.5	10.5	9.5	4.39
	2004.4	0	-2	0	5	5	11	14	21	18	8.00
CK	2003.6	0	0	0.5	2	2.5	2	5	3.5	7	2.50
	2004.4	0	0	0	2.5	3	3	7	4	13	3.61

备注：“-”表示积沙，即沙埋。



## 灌溉修复



➤ 利用洪水资源进行灌溉：灌水3年后，梭梭固沙林物种组成由对照区4种增加到14种；优势种个体冠幅及高度生长量是对照区的2-3倍；林下植被盖度更是对照区2倍，林内的输沙量只占对照区的3.6%。



指标	类型	主要组成物种								
		黄花矶松	五星蒿	刺蓬	白茎盐生草	甘草	沙米	冰草	虫实	总盖度
盖度	补灌区	16.47	12.5	7.8	10.7	4	1.87	0.52	0.3	56.16
	对照区	2.5	6.5	2.2	17.5					28.7
	补灌/对照	6.59	1.92	3.55	0.61					1.96
平均高度 cm	补灌区	36.0	33	38	34.5	49	20	41	34	
	对照区	16	15	11.5	13.6					
	补灌/对照	2.25	2.20	3.30	2.54					
平均冠径 cm	补灌区	54.7	21.3	37.5	33	64.5	47	25.25	31.5	
	对照区	17	19.4	18	15.95					
	补灌/对照	3.22	1.10	2.08	2.07					

风速 10 m /s 时 春灌林地近地面层输沙率变化

类型	项目	近地面层高度 cm										0-20cm
		0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	合计
对照区	输沙率	13.563	17.82	13.221	10.569	8.556	7.779	7.023	6.441	5.487	4.332	94.791
	百分率	14.31	18.80	13.95	11.15	9.03	8.21	7.41	6.79	5.79	4.57	100
补灌区	输沙率	0.432	0.507	0.504	0.348	0.327	0.279	0.129	0.138	0.357	0.402	3.423
	百分率	12.62	14.81	14.72	10.17	9.55	8.15	3.77	4.03	10.43	11.74	100

备注：对照 2m 高度风速为 10.0m/s，输沙率 g/cm•h，百分率%。

27.7 倍

春季补灌后林地含水率变化

处理		土壤深度层次 cm					平均值
		0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	
灌水	2 天	6.36	12.08	14.5	16.89	9.83	11.94
	年底	1.40	2.94	6.42	6.82	7.48	5.01
对照		1.07	1.78	1.23	1.50	8.66	2.85

处 理		高生长 cm	新梢生长 cm	横向生长 cm	
				长径	短径
补灌	>2m	12.6	30.1	45	11.8
	1-2 m	16.8	33.8	11.6	16.4
	<1m	25.25	31.8	11.4	4.4
	平均	18.22	31.90	22.67	10.87
对照	>2m	10	28.1	12.4	8.4
	1-2 m	10	24.4	3	1.2
	<1m	8	22.9	8.2	-4
	平均	9.33	25.13	7.87	1.87
补灌/对照		2.0	1.3	2.9	5.8

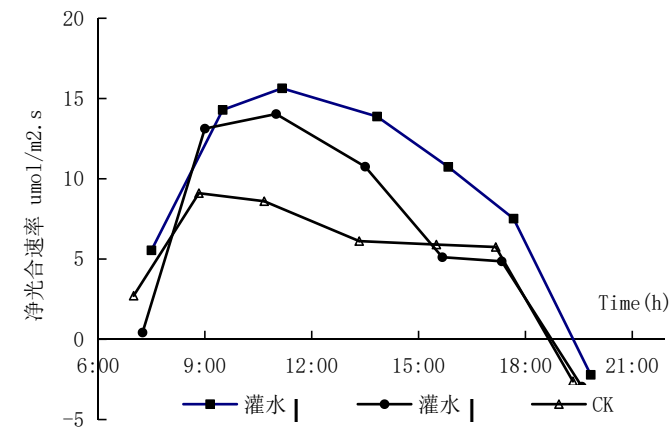
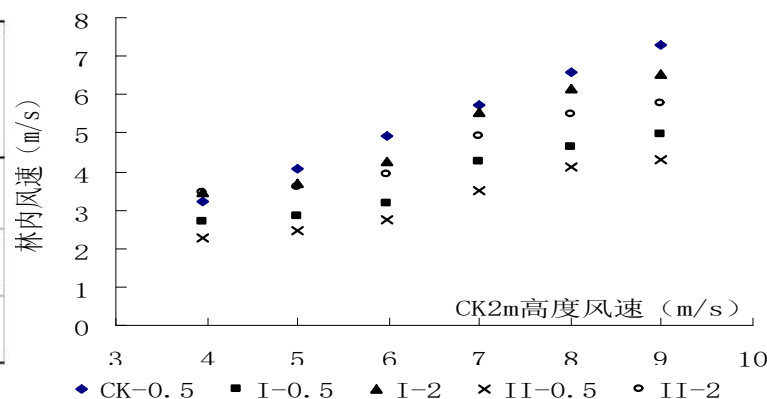


## 灌溉修复

- 滴灌2年后，梭梭林物种数由7种增加到11种，盖度由28.7%增加到42%；50cm高度风速较对照降低45%。
- 梭梭光合速率由 $5.08\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ 提高到 $9.34\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ 、 $6.48\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ 。

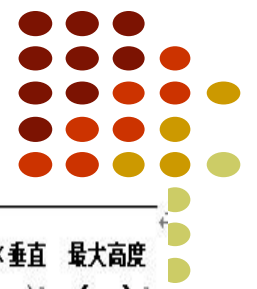


处理	灌水次数	一次灌水量 $\text{m}^3/\text{ha}$	灌水量 $\text{m}^3$	0-200cm 林地土壤含水率 %
灌水 I	6	90	540	1.86
灌水 II	6	150	900	2.82
CK (免灌)	0	0	0	0.74





➤ 平茬复壮+自然修复（半荒漠区）



平茬复壮是干旱和半干旱地区防风固沙灌木利用和修复的常用措施。

- 平茬时间：晚春（3月下旬-4月中旬）、秋季（9月下旬-10月中旬）。
- 平茬高度：沙拐枣 → 25-30cm，柠条 → 40-45cm，沙木蓼 → 10-15cm，花棒→ 15-20cm。
- 平茬效果：平茬1a沙拐枣平均冠幅和高度的生长量达到270.5cm×280.0cm和156.7cm。

植物名称	栽植年限	平茬时间	调查时间	留茬高度 (cm)	平均萌枝数 (条)	当年新枝平均生长量 (cm)	冠幅最大长度×垂直最大长度值 (cm)	最大高度 (cm)
沙木蓼	8a	4月20日	9月20日	5	8.50	70.35	78.50×46.66	67.33
	8a	4月20日	9月20日	10	14.33	69.52	83.65×56.73	95.00
	8a	4月20日	9月20日	15	11.22	65.52	78.80×76.40	73.00
	8a	-	-	对照	-	30.87	114.00×70.00	76.50
沙拐枣	8a	4月20日	9月20日	10	37.00	131.41	202.00×167.00	134.00
	8a	4月20日	9月20日	25	88.00	146.80	270.50×280.00	156.66
	8a	4月20日	9月20日	30	92.00	142.60	245.00×196.77	147.00
	8a	4月20日	9月20日	40	44.00	91.67	126.00×78.91	130.67
柠条	8a	-	-	对照	-	67.87	247.50×199.00	165.00
	8a	4月20日	9月20日	30	47.24	72.50	96.67×78.78	101.21
	8a	4月20日	9月20日	40	63.57	69.25	106.67×85.78	105.70
	8a	4月20日	9月20日	45	205.31	64.67	105.72×72.33	107.67
花棒	8a	-	-	对照	-	54.55	180.00×168.97	217.50
	8a	4月20日	9月20日	45	205.31	64.67	105.72×72.33	107.67



花棒

柠条

柠条平茬



## ➤ 光伏+修复技术

在难以修复的干旱地区退化林区，  
发展光伏新能源，发挥发电+种植+治沙  
综合效益，实现产业与生态的持续融合  
发展。

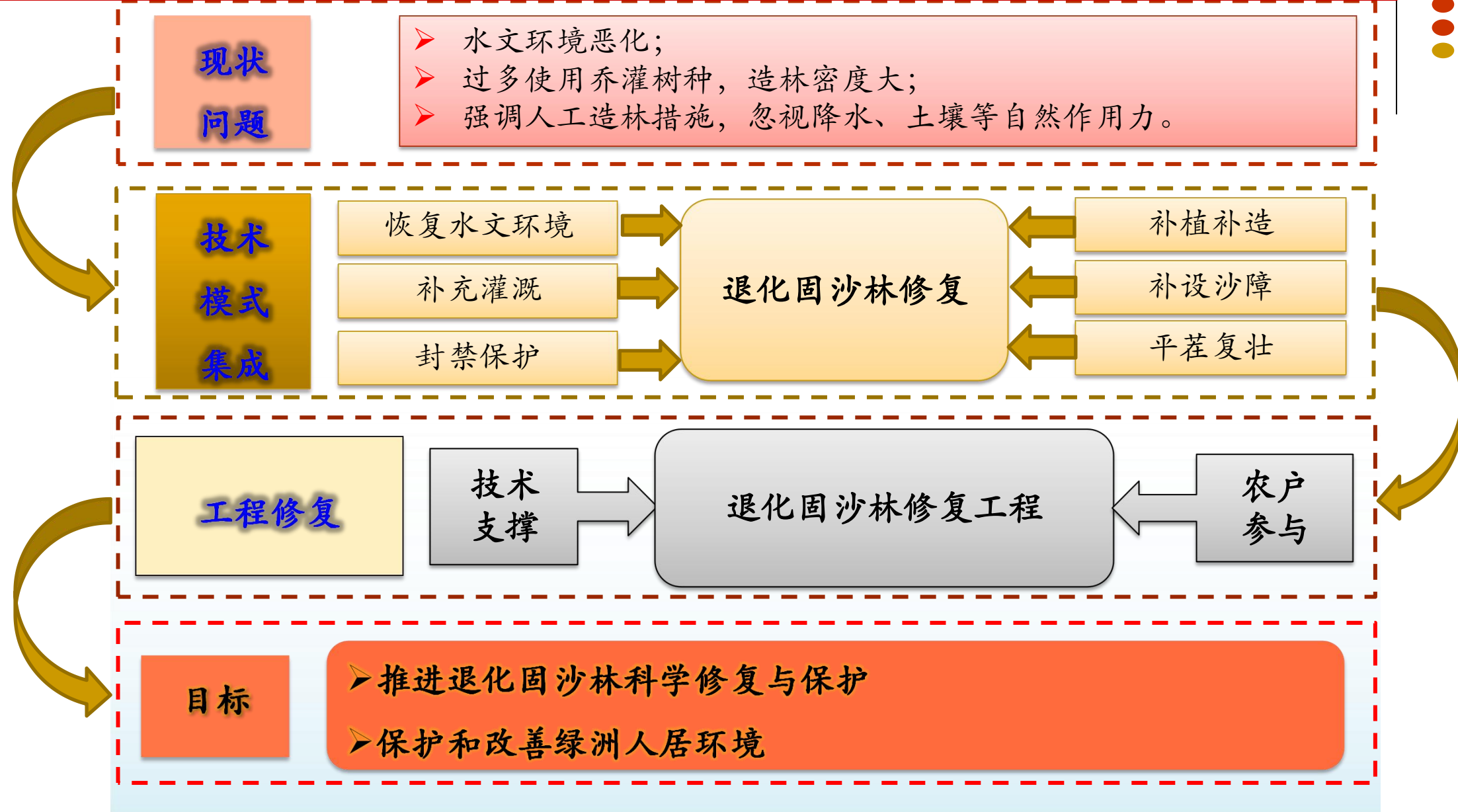


甘肃古浪实施1年



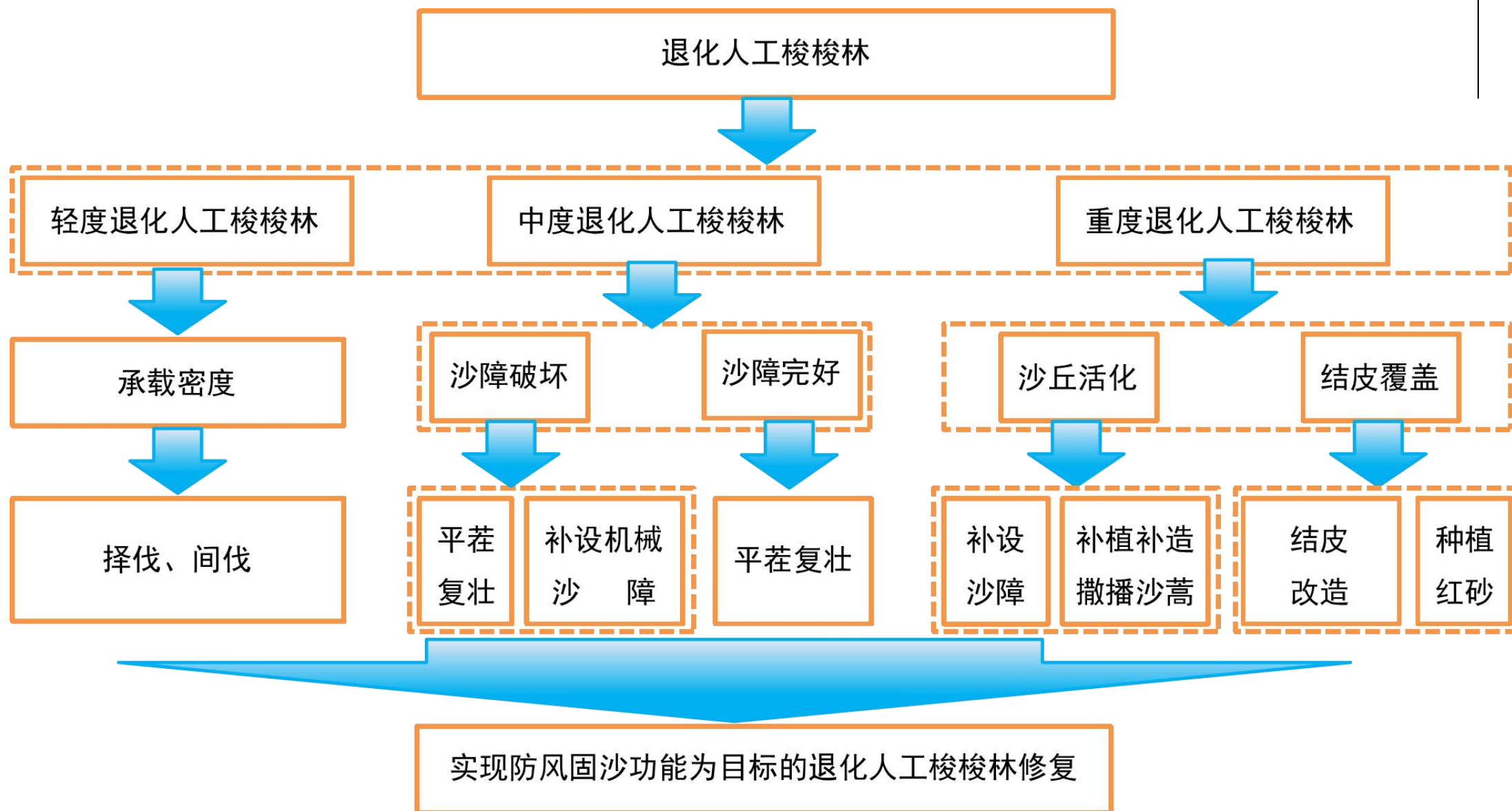


## 退化固沙林修复模式





## 退化人工梭梭林雨养修复模式





## ➤ 绿洲边缘防风固沙林体系修复模式

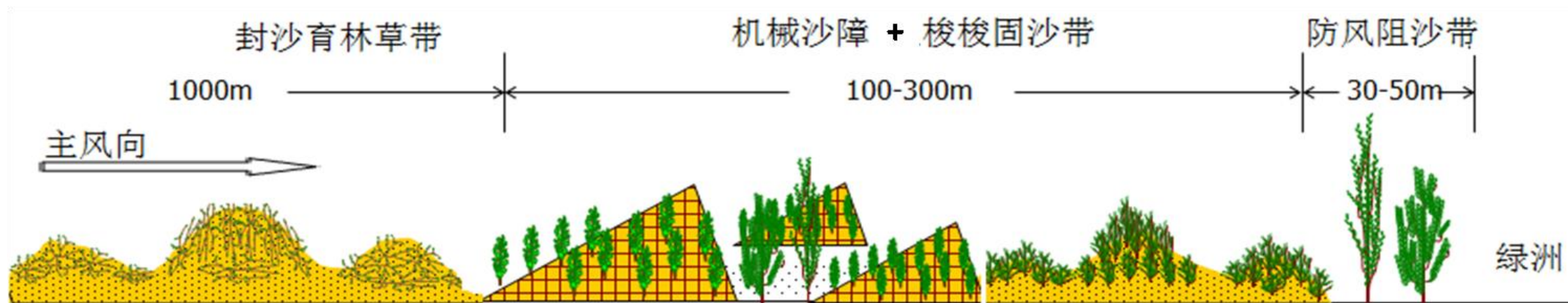


固、阻、输、封  
工程治沙技术

机械沙障+植被  
修复技术

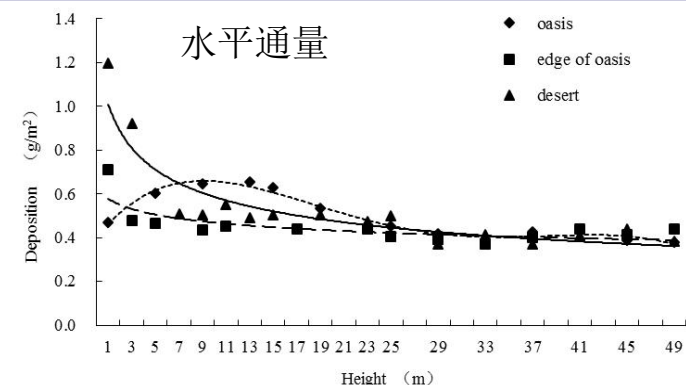
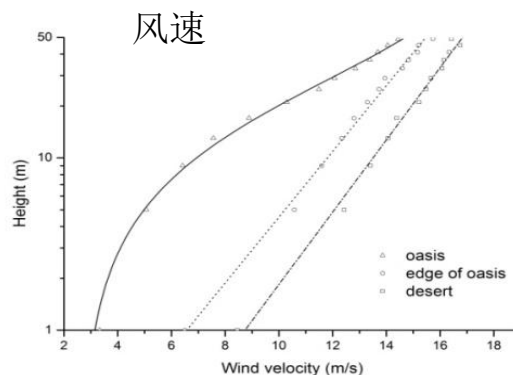
人工促进自然  
植被恢复技术

### 绿洲边缘固沙林体系修复模式



- 近地面20cm高度风速较带前降低42.9%~83.1%，输沙量降低99.8%，水平沙尘通量降低42%（绿洲内降低74%）。

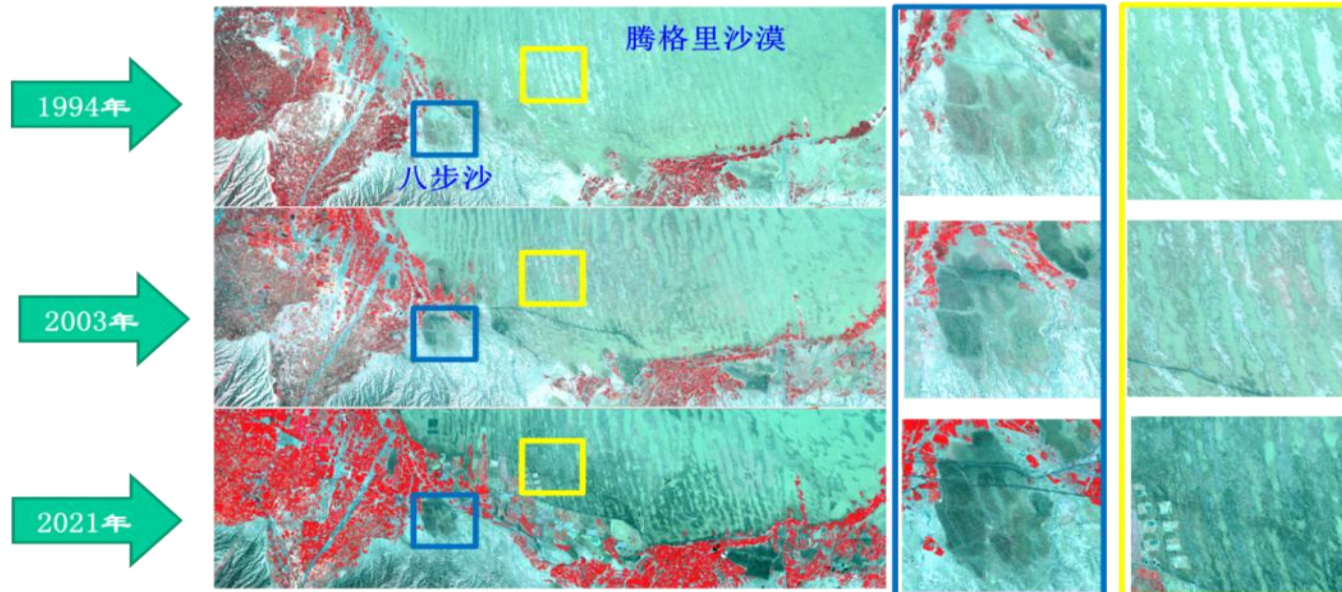
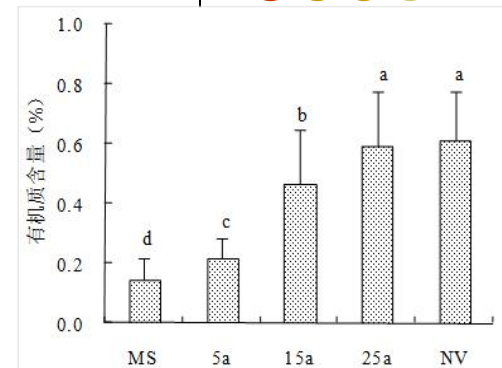
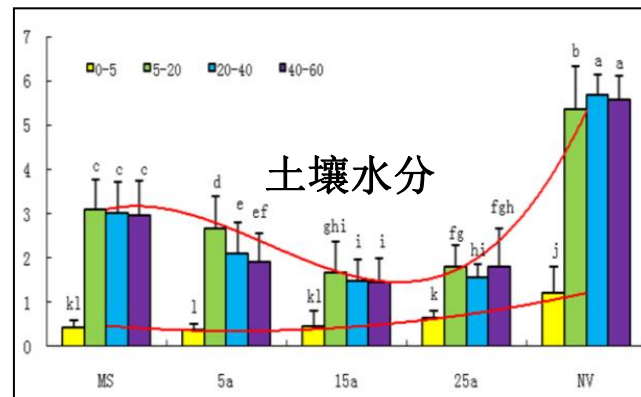
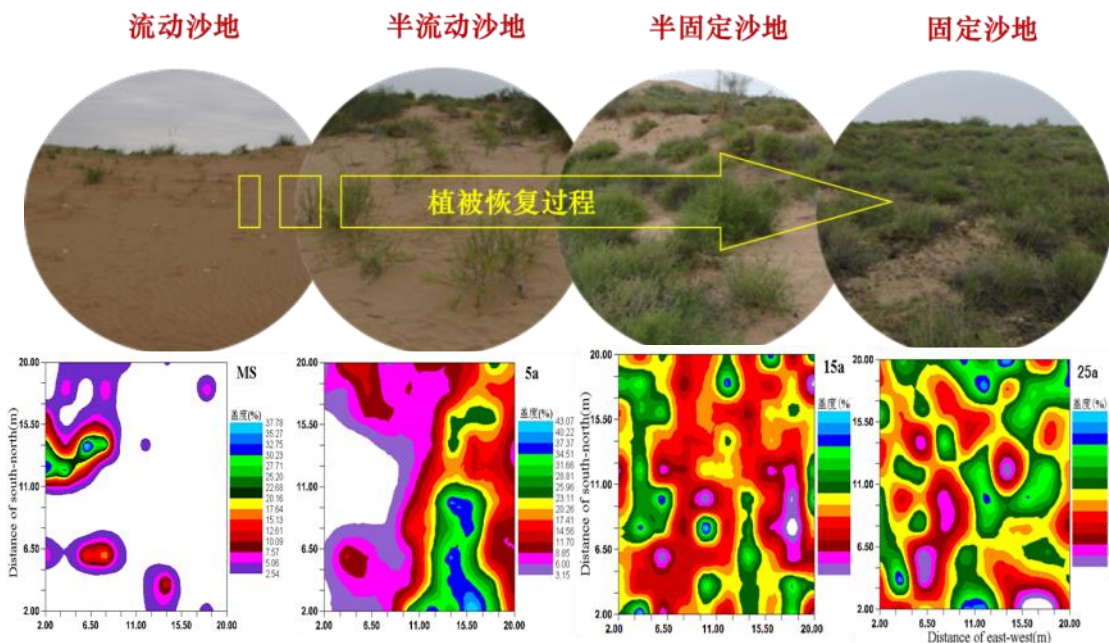
- 适用于干旱区绿洲边缘区域。





# ■ 八步沙固沙林修复模式

- 选用典型沙生灌木花棒、柠条，设置沙障固沙，建立低密度人工固沙林带（<1650株/ha）。
- 模拟固定沙地土壤种子库，应用无人机，在雨季在人工灌木林及下风向沙地撒播半灌木植物沙蒿、油蒿和草本植物沙米。
- 25年后土壤结皮达5mm，植被覆盖度达到36.6%。





# 感谢聆听!

马全林: [mql925@126.com](mailto:mql925@126.com) /13609389728