

DOI: 10.20103/j.stxb.202310072143

邹慧, 杨文斌, 朱斌, 刘丹一, 周密, 杨波. 低覆盖度治沙理论及实践. 生态学报, 2025, 45(3): 1070-1076.

Zou H, Yang W B, Zhu B, Liu D Y, Zhou M, Yang B. Low-coverage desertification control: theory and practice. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(3): 1070-1076.

低覆盖度治沙理论及实践

邹 慧¹, 杨文斌^{1,2}, 朱 斌¹, 刘丹一¹, 周 密¹, 杨 波¹

¹ 中国治沙暨沙业学会, 北京 100714

² 中国林业科学研究院, 北京 100091

摘要: 沙漠化是我国乃至全球面临的重大生态问题, 沙区水资源问题十分突出。低覆盖度治沙理论依据天然稀疏林密度, 提出在降低固沙林覆盖度的基础上, 通过改变分布格局能够保持防沙治沙的效益, 为沙漠化防治提供了新的思路。给出 8 种低覆盖度治沙的原理和不同气候区低覆盖度固沙体系典型设计, 提出了低覆盖度治沙理论在与传统技术模式结合、羽翼袋沙障、沙地林田草沙水分利用与近自然生态恢复等方面的几种创新实践。实践表明, 低覆盖度治沙是用覆盖度 15%—25% 的固沙林带(沙障)构建的一种复合型固沙植被恢复模式, 留有 75%—85% 的空地或者地带性自然恢复植被带, 能够确保沙区的水分平衡和雨养植被的稳定持续发育, 对于解决目前沙区水资源承载力不足, 固沙林稳定性、可持续性差等问题具有重要意义。今后将进一步加强基于低覆盖度理论的治沙、沙产业相结合的技术示范研究。

关键词: 低覆盖度治沙; 实践模式; 固沙稳定性; 水分平衡; 覆盖格局

Low-coverage desertification control: theory and practice

ZOU Hui¹, YANG Wenbin^{1,2}, ZHU Bin¹, LIU Danyi¹, ZHOU Mi¹, YANG Bo¹

¹ China National Sand Control and Desert Industry Society, Beijing 100714, China

² Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: Desertification is a significant ecological problem that affects our country and the world with water being the crucial issue. In arid and semi-arid sandy lands, soil water carrying capacity should be fully considered in vegetation species selection, land cover patterns (i.e., the spatial distribution of different vegetation types) configuration, and planting density design when carrying out afforestation for desertification control. The low-coverage desertification control theory provides a new perspective for desertification control, and it is of great importance to address the conflict between water demand of revegetation and the limited water resources carrying capacity in these areas and enhance the stability and sustainability of sand-fixing forests in the drylands. Based on the density of natural sparse forests in arid regions, the theory of low coverage desertification control suggests that by reducing the current coverage of sand-fixing forests and altering the land cover distribution pattern, the benefits of desertification prevention and control can be maintained. The composite sand-fixing and vegetation restoration model based on low-coverage desertification control theory constructs sand-fixing shelterbelts (i.e., forests, barriers) at a coverage rate of 15% to 25% while allowing 75% to 85% of the area to be bare land or natural recovery zonal vegetation thus ensuring water balance in sandy areas and the stable and sustainable development of rain-fed vegetation. Based on the low-coverage desertification control theory, we have designed sand-fixing systems such as “one row-one band” composite sand barrier laying model, “two row-one band” laying model, “two row-one band” trees and shrubs mixed planting laying model, “two row-one band” agroforestry laying model for different climate zones. Moreover,

基金项目: 国家林业和草原局揭榜挂帅项目(202401-20); 中国林业科学研究院荒漠化所课题结余经费新立项(IDS2022JY-9)

收稿日期: 2023-10-07; **网络出版日期:** 2024-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nmlkyywb@163.com

several innovative practices of the low-coverage desertification control theory are introduced, including combinations with traditional technical models, wing bag sand barriers, and the optimal allocation and regulation of the spatial pattern of forests, farmlands, grasslands and sands based on water balance and near-nature ecological restoration. Practice results indicate that in the low-coverage sand-fixing forests/barriers, soil water consumption of plantations decreased due to the reduction in the density of plantings. Meanwhile, the remaining soil seepage and recharge zone in the banded land cover pattern can effectively maintain the dynamic water cycling of precipitation, soil water, groundwater, and finally solve the problem of recession and death of sand-fixing forests caused by soil water deficit. The banded vegetation can also support local agriculture and livestock production, providing significant ecological and economic benefits. In the future, the demonstration research of the combination of desertification control and sand industries based on the low-coverage desertification control theory should be strengthened.

Key Words: low-coverage desertification control; practice models; sand-fixing stability; water balance; land cover pattern

三北地区干旱缺水,风沙灾害和水土流失严重,是典型的生态脆弱区,生态问题是制约该区域经济社会发展的主要因素。在过去的几十年里,以“三北”防护林体系工程建设等一批重点生态工程为主的大规模植被恢复以来,该区域水土流失和风沙危害得到有效控制,生态面貌发生根本性改变,截至 2020 年底,“三北”工程区森林覆盖率由 1978 年的 5.05%,提高到了 13.84%,在改善生态环境的同时,为全球增绿也做出了突出贡献^[1-2]。在取得巨大成就的同时,也伴随着一些困难和问题,比如大规模造林和植被恢复可以提供多种生态系统服务,如荒漠化防治、碳封存和气候变化减缓^[3-8]。但同时,研究也表明,与天然林相比,人工林可能消耗更多的水分用于蒸散发^[9],甚至可能引起土壤干层^[10]、林分衰败或死亡^[11-12]。大规模植被恢复过程中植被与水资源之间存在权衡关系^[13-15]。因此,在植被恢复过程中,需考虑造林的生态水文影响及其对旱地当地水资源的影响^[16-17],特别是在气候变化的情况下^[18]。

2023 年 6 月 6 日,习近平总书记在内蒙古巴彦淖尔主持召开加强荒漠化综合防治和推进“三北”等重点生态工程建设座谈会并发表重要讲话,深刻阐明了加强荒漠化综合防治,深入推进“三北”等重点生态工程建设的重大意义,并指出:“要坚持科学治沙,全面提升荒漠生态系统质量和稳定性。要合理利用水资源,坚持以水定绿、以水定地、以水定人、以水定产,把水资源作为最大的刚性约束,大力发展节水林草。要科学选择植被恢复模式,合理配置林草植被类型和密度,坚持乔灌木相结合,营造防风固沙林网、林带及防风固沙沙漠锁边林草带等。要因地制宜、科学推广应用行之有效的治理模式。”低覆盖度治沙打破传统植被覆盖度越高,治沙效果越好的理念,依据天然稀疏林密度,提出在降低固沙林覆盖度的基础上,通过改变分布格局,能够保持防沙治沙的效益,并维持区域水文循环平衡^[19-20],主要包括:(1)合理的植被覆盖度应根据降水条件和当地自然环境来确定。植被类型应以当地植物种类为主。(2)旱地生态恢复应遵循准自然密度,采用宽带间距而非高密度。(3)低盖度的行带状造林模式,即林带覆盖率为 15%—25%,剩余空间覆盖率为 75%—85%,是未来较为适宜的固沙植被恢复策略^[21-22]。

1 低覆盖度治沙原理与典型设计

1.1 低覆盖度治沙原理

格局与过程密切相关^[23-25],研究了覆盖度小于 30%时,随机分布、均匀分布与集群分布 3 种格局的防风固沙效果,发现在低覆盖度条件下,集群分布的一个类型——行带式格局可以显著提高防风固沙效益^[26]。行带式中行是指人工营造一行或多行乔灌木(占地 15%—25%),带是指多行乔灌木之间的空地或植被修复带(占地 75%—85%)。从多年风流结构与防风效果的研究结果来看,行带式格局中带后 2—3 倍树高处到下一带的带前 2 倍树高处有一个风速显著降低区,在两个带间有一个风速微弱降低区,形成的波状风流结构能有效的阻碍和降低风速,覆盖度在 15%—30%时,配置成行带式格局的固沙林或灌丛均能完全固定流沙^[27-29]。

1.2 不同气候区低覆盖度治沙典型设计

低覆盖度固沙体系可根据区域风向、水分特点配置行带式格局或网格式格局,其中行带式格局用于单风向区域,网格式格局用于多风向地区。对于不同气候区,主要根据区域水分条件及环境立地特点,选择不同的树种、乔灌比例和配置模式。在低覆盖度固沙体系达到固定流沙的目的后,可根据不同区域的气候、水文、土壤等特点发展不同的生态林业体系^[30—32]。

1.2.1 极端干旱区

在极端干旱区,主要针对工程防护区和绿洲等局部采用低覆盖度治沙技术。综合考虑造林、灌溉成本及灌溉可行性,在工程防护区,可选择低覆盖度“单行一带”复合沙障配置模式(图1)。在没有灌溉条件的区域,采用长久性机械沙障固沙压沙,达到防风固沙的效果。在有灌溉条件的区域,采用“单行一带”式造林模式,造林树种选择低耗水的灌木或半灌木,在设置固沙林前需铺设沙障,带宽范围为半灌木 5—12m 和灌木 12—28m,株距为 1—3m 左右。

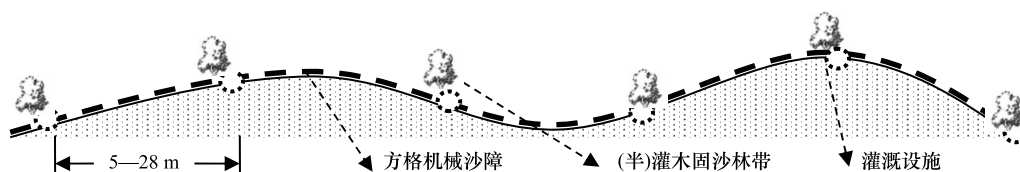


图1 低覆盖度“单行一带”复合沙障配置模式截面示意图

Fig. Sectional schematic diagram of laying model of “one row-one band” composite sand barrier of low-coverage desertification control

在绿洲区,可选择低覆盖度“两行一带”配置模式或者“两行一带”乔灌混交配置模式(图2—3)。根据具体立地类型、立地条件、环境特点选择适宜的乔灌木树种,株距以 2m 为宜,行距 3—5m;带间距可根据不同树种搭配的具体情况而定,一般为 12—40m;行间设置灌溉设施,可进行沟灌或滴灌,这样即减少了生态用水,又提高了灌溉水的使用效率。

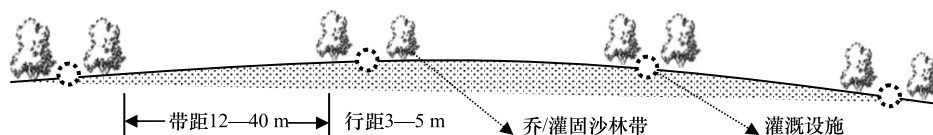


图2 低覆盖度“两行一带”配置模式截面示意图

Fig.2 Sectional schematic diagram of “two row-one band” laying model of low-coverage desertification control

1.2.2 干旱区

在干旱区,在沙漠扩展区或退化植被区上,与极端干旱区类似,采取“单行一带”复合沙障配置模式(图1),种植初期可进行穴灌,保证造林成活率;在绿洲与沙漠之间过渡带的沙化荒漠植被区,可选择低覆盖度“两行一带”配置模式(图2),造林初期可进行沟灌或穴灌,保证造林成活率。在绿洲区,可选择低覆盖度“两行一带”乔灌混交配置模式(图3),选择一带乔木、一带灌木的混交配置,或多带乔木/多带灌木的混交配置模式,特别注意乔灌树种搭配设置,行距以 3—5m 为宜,带间距根据不同树种搭配的具体情况而定,一般为 12—40m;造林初期可进行沟灌或穴灌,保证造林成活率。

1.2.3 半干旱区

半干旱区降水条件优于极端干旱区、干旱区,天然降水能够满足植物的生长需求,基本不用采用任何灌溉措施。在半干旱区重度、严重沙化土地地区,可选择低覆盖度“两行一带”配置模式(图2);在中度沙化土地地区,可选择低覆盖度“两行一带”乔灌混交配置模式(图3)。在半干旱区轻度沙化土地地区,若水分条件较好,可实行农林兼作,采用低覆盖度“两行一带”农林复合配置模式营造固沙林(图4),固沙林带间距为 30—40m,行距

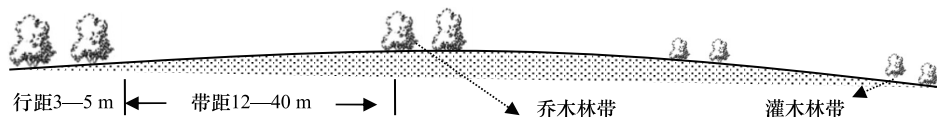


图3 低覆盖度“两行一带”乔灌混交配置模式截面示意图

Fig.3 Sectional schematic diagram of laying model of “two row-one band” trees and shrubs mixed planting of low-coverage desertification control

3—5m,株距 2m,带间可播种多年生草本或种植经济林或经济作物,实现农林有机结合,达到生态、经济、社会效益三统一。若选择种植当地一年生作物,应实行保护性耕作。

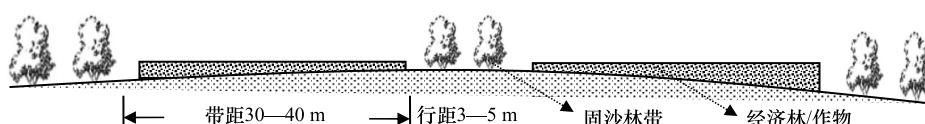


图4 低覆盖度“两行一带”农林复合配置模式截面示意图

Fig.4 Sectional schematic diagram of “two row-one band” agroforestry laying model of low-coverage desertification control

2 低覆盖度治沙解决的问题

依据“密度大、治沙效果好”理念营造的固沙林出现了中幼龄林大面积衰败死亡现象,特别是固沙林稳定性、可持续差,过度利用水分的问题等,引起了国内外学者的广泛重视^[33—37]。实际上,这是高覆盖度导致固沙林水分利用超出当地水资源承载力的问题^[38—40]。

2.1 固沙林水分利用的问题

多年的治沙实践和研究结果表明:(1)天然分布稳定的沙生植被,覆盖度一般低于 30%,降水均能够渗漏到土壤深层或者补给地下水;(2)人工营造的固沙林,当林分的覆盖度大于 40%后,林下土壤含水率逐步降低,降水不能够渗漏到土壤深层或者补给地下水,林木出现衰败或者死亡;(3)低覆盖度固沙林设计出了带间的土壤渗漏补给带,确保了降水能够渗漏到深层或者补给地下水,固沙林及其带间植被能够稳定持续发育;(4)在极端干旱区,基本上没有降水能够渗漏到土壤深层,灌溉才能保证林分的稳定持续;在干旱区,深层渗漏水量占年降雨量的 1%—13%,半干旱地区的深层渗漏水量占年降雨量的 11%—23%,亚湿润干旱区的深层渗漏水量占年降雨量的 15%—45%,能够确保沙区的水分平衡和雨养植被的稳定持续发育^[19]。低覆盖度治沙降低了固沙造林密度,因而减少了植被对土壤水分的消耗,同时留有的带间土壤渗漏补给带能有效维系降水、土壤水和地下水的动态转化过程,就基本解决了水分亏缺导致的固沙林过早衰败死亡的问题。

2.2 固沙林稳定性、可持续性的问题

任何植物(包括乔木、灌木)都有生命周期,到了一定的时间就会衰败死亡。充分调查我国近 50 年来建植的人工生态林后发现:人工生态林(除经济林)衰败死亡后,只能人工更新,到目前为止,还没有能够使人工固沙林到达寿命后自然修复的方法。营造低覆盖度行带式固沙林,能够充分发挥林分边行优势和界面生态效益,促进带内自然植被和土壤的修复,并使沙地土壤、植被向地带性土壤与植被演变,形成乔灌草复合、生物多样性增加的复合植被系统,可以显著提高植被的稳定性^[41—43]。当行带式人工固沙林衰败死亡后,自然修复的植被和土壤能够继续稳定生长发育。这样,能够较好地实现人工植被向自然植被的过渡,在一定程度上弥补人工林不能自然更新的缺陷,达到可持续固定流沙的目的。

3 低覆盖度治沙理论的创新实践

低覆盖度治沙通过优化行带式固沙林的带间距,在发挥防风固沙功能的同时,能够使降水下渗到土壤深

层和补给地下水,维持降水-土壤水-地下水的连通性^[44],避免了固沙林中幼龄林衰败死亡现象。同时,能够充分发挥林分边行优势和界面生态效益,明显提高了固沙林生产力,以及带间植被、微生物和土壤修复的速度^[45]。低覆盖固沙林营造技术在防沙治沙工作中已经得到了广泛的应用,实践表明,低覆盖度治沙能有效提升荒漠生态系统稳定性和水分利用效率。目前还开展了基于低覆盖度治沙理论的技术创新实践。

3.1 与传统技术模式结合

低覆盖度治沙理论与传统技术结合,可以显著提升锁边林、前挡后拉等多项经典治沙技术的稳定性和可持续性。如“前挡后拉”技术,传统的配置是:在沙丘背风方向的丘间地营造四行或者六行的林带构成前挡,在沙丘迎风坡方向的丘间地上营造四行或者六行的林带构成后拉;如果沙丘的宽度小于 15m,用这个“前挡后拉”技术营造的固沙林,成林后降水就不能下渗到土壤深层和补给地下水,固沙林就会出现衰败死亡现象;如果,前挡和后拉的林带均营造两行一带的林带,沙丘宽度在 25m 以上的营造乔木林,25m 以下的营造灌木林或者乔灌木混交,成林后降水就能够下渗到土壤深层和补给地下水,固沙林就不会出现衰败死亡现象。类似的,“固底削顶”、“锁边固沙”等,只要降低造林密度或者成林后的覆盖度小于 25%,降水就能够下渗到土壤深层或补给地下水,固沙林就不会出现衰败死亡现象。

3.2 羽翼袋沙障

以降低成本,提高效益,实现沙障机械化、自动化铺设为目标^[46],依据低覆盖度理论,增加降水的入渗面积,提高水分的有效利用率的思路,研发出了羽翼袋沙障,一种底袋固沙、袋顶的羽翼波动阻风削弱风能的复合型沙障(图 5)。与网格沙障相比,羽翼袋沙障降低材料成本 30%—50%;与袋状沙障相比,羽翼袋沙障降低风速的效果增加 35%—40%。并在此基础上,研发出了羽翼袋沙障铺设一体机,主要由取沙单元、制袋单元、充沙单元和铺设单元组成,实现了取沙、制袋、充沙和铺设的连续作业,可极大的提高铺设效率,降低铺设费用 40%—50%。正在进一步研发自动化羽翼袋沙障铺设装备,与羽翼袋沙障铺设一体机相比,能进一步降低铺设成本 10%—15%^[47]。

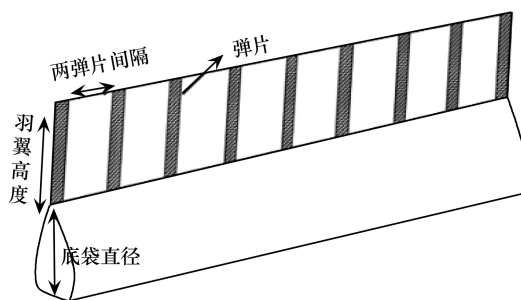


图 5 羽翼袋沙障示意图

Fig.5 Schematic diagram of wing bag sand barrier

3.3 沙地林田草沙水分利用与近自然生态恢复

以毛乌素沙地和科尔沁沙地为对象,针对水资源有限载荷与林、田、草、沙等格局水分利用之间严重失衡所引起的水资源短缺加重,沙地生态系统退化严重,防沙治沙工程施工难、慢且稳定性差,水资源利用效率不高以及沙区社会经济发展可持续性低等突出问题,基于低覆盖度治沙理论和区域水分平衡过程,开展了沙地生态系统近自然修复技术研究,在分析林、田、草、沙等主要土地利用类型天然降水-土壤水分-深层渗漏特征的基础上,提出通过林田草沙空间格局优化配置及调控,增加土壤储水和深层渗漏补给地下水,维持区域水量平衡,形成“林田草沙”互补的可持续发展目标,具体内容包括:一是要大力倡导以低覆盖度理论为核心的固沙植被的构建经营与生态修复技术;二是在确保区域水资源与生态安全的前提下,适当调整区域内林、田、草、沙各类土地利用类型的现存面积及其占比;三是充分考虑气候变化和人为活动对于未来水资源有效性的双重影响,以“尊重自然、顺应自然、保护自然”为原则,综合低覆盖防沙治沙理论、区域水资源消耗与补给平衡,林、田、草、沙各个子系统的规模与功能之间的权衡,最终实现沙地生态系统的近自然修复与社会经济的可持续发展^[48—50]。

4 结语

在干旱半干旱沙地,开展防沙治沙,进行固沙造林树种选择、配置方式、造林密度设计时,要充分考虑林地

的水资源承载力使降水、土壤水和地下水处于一种平衡的动态转化过程,才能构建和经营更加稳定的人工防护林生态系统,达到可持续发展的目的^[51-53]。低覆盖度治沙理论下的行带式固沙林配置模式构建了以15%—25%的防护带(林带/沙障)保护占地75%—85%的地带性植被自然恢复带的复合型固沙植被恢复模式^[54-55]。这种模式下,有明显的水分主要利用层、渗漏补给层和水分调节层,节省降水约30%—60%渗漏到土壤深层或者补给地下水,有利于维持当地的水量平衡和雨养植被的稳定持续发育;同时,带间植被还可以支持当地农业和畜牧业生产,具有显著的生态效益和经济效益。目前,基于低覆盖度理论,在传统技术模式结合、羽翼袋沙障新装备、沙地林田草沙水分利用与近自然生态恢复新技术等方面,开展了创新模式研究。下一步,将进一步加强基于低覆盖度理论的生态治沙、生态产业相结合的技术示范研究,同时完善生态监测评价体系^[56],支撑沙区高质量发展。

参考文献(References):

- [1] 卢琦,肖春蕾,包英爽,崔梦淳,曹晓明,却晓娥,杨柳,崔桂鹏. 打赢“三北”攻坚战,再造一个“新三北”:实现路径与战略规划. 中国科学院院刊, 2023, 38(7): 956-965.
- [2] 杨文斌. 我国防沙治沙成就与科技进步. 内蒙古林业, 2017(10): 27.
- [3] 程磊磊,郭浩,卢琦. 荒漠生态系统服务价值评估研究进展. 中国沙漠, 2013, 33(1): 281-287.
- [4] 荒漠生态系统服务功能监测与评估技术研究项目组. 荒漠生态系统功能评估与服务价值研究. 北京: 科学出版社, 2014.
- [5] Liu J G, Li S X, Ouyang Z Y, Tam C, Chen X D. Ecological and socioeconomic effects of China's policies for ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(28): 9477-9482.
- [6] 傅伯杰,吕一河,高光耀. 中国主要陆地生态系统服务与生态安全研究的重要进展. 自然杂志, 2012, 34(5): 261-272.
- [7] 纪平,邵全琴,王敏,刘华,王晓慧,凌成星,侯瑞霞. 中国三北防护林工程第二阶段生态效益综合评价. 林业科学, 2022, 58(11): 31-48.
- [8] Li W, Xiong W, Yang W B, Wang T, Lian H L, Liu Y L, Han Y Q, Yu H J, Ao T S, Zhang M L. Poplar trees do not always act as a water pump: Evidence from modeling deep drainage in a low-coverage-mode shelterbelt in China. *Journal of Hydrology*, 2022, 605: 127383.
- [9] Yu Z, Liu S R, Wang J X, Wei X H, Schuler J, Sun P S, Harper R, Zegre N. Natural forests exhibit higher carbon sequestration and lower water consumption than planted forests in China. *Global Change Biology*, 2019, 25(1): 68-77.
- [10] 邵明安,贾小旭,王云强,朱元骏. 黄土高原土壤干层研究进展与展望. 地球科学进展, 2016, 31(1): 14-22.
- [11] 杨文斌. 风成沙丘上梭梭林衰亡的水分特性研究. 干旱区研究, 1991, 8(1): 30-34.
- [12] 韦景树,李宗善,冯晓珂,张园,陈维梁,伍星,焦磊,王晓春. 黄土高原人工刺槐林生长衰退的生态生理机制. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2433-2444.
- [13] 郭忠升,邵明安. 雨水资源、土壤水资源与土壤水分植被承载力. 自然资源学报, 2003, 18(5): 522-528.
- [14] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [15] Zhao M, Geruo A, Zhang J, Velicogna I, Liang C Z, Li Z Y. Ecological restoration impact on total terrestrial water storage. *Nature Sustainability*, 2021, 4: 56-62.
- [16] Chen L D, Wang J P, Wei W, Fu B J, Wu D P. Effects of landscape restoration on soil water storage and water use in the Loess Plateau Region, China. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(7): 1291-1298.
- [17] Schwärzel K, Zhang L L, Montanarella L, Wang Y H, Sun G. How afforestation affects the water cycle in drylands: a process-based comparative analysis. *Global Change Biology*, 2020, 26(2): 944-959.
- [18] Ostad-Ali-Askar K, Su R D, Liu L M. Water resources and climate change. *Journal of Water and Climate Change*, 2018, 9(2): 239.
- [19] 杨文斌,王涛,熊伟,邹慧,冯伟,程一本,廉泓林. 低覆盖度治沙理论的核心水文原理概述. 中国沙漠, 2021, 41(3): 75-80.
- [20] He L, Guo J B, Xiong W, Yang W B, Cheng Y B, Wang L, Lin X W. Sand-fixing vegetation regulates deep percolation and soil water dynamics in semiarid sandy land: Evidence from a deep percolation recorder and in situ test. *CATENA*, 2023, 232: 107467.
- [21] 杨文斌,李卫,党宏忠,冯伟,卢琦,姜丽娜. 低覆盖度治沙:原理、模式与效果. 北京: 科学出版社, 2016.
- [22] 杨文斌,王涛,冯伟,李卫,李艳丽. 低覆盖度治沙的理论及沙漠科技进步. 中国沙漠, 2017, 37(1): 1-6.
- [23] 傅伯杰. 地理学综合研究的途径与方法: 格局与过程耦合. 地理学报, 2014, 69(8): 1052-1059.
- [24] 高光耀,傅伯杰,吕一河,刘宇,王帅,周继. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展. 生态学报, 2013, 33(1): 12-22.
- [25] 傅伯杰. 景观生态学原理及应用. 北京: 科学出版社, 2001.

- [26] 杨文斌, 丁国栋, 王晶莹, 姚建成, 董智, 杨红艳. 行带式柠条固沙林防风效果. 生态学报, 2006, 26(12): 4106-4112.
- [27] 杨红艳, 戴晟乐, 林林, 王林和, 杨文斌, 王晶莹, 胡小龙. 不同分布格局低覆盖度油蒿丛防风效果. 林业科学, 2008, 44(5): 11-16.
- [28] 梁海荣, 王晶莹, 董慧龙, 杨文斌, 卢琦, 赵爱国. 低覆盖度下两种行带式固沙林内风速流场和防风效果. 生态学报, 2010, 30(3): 568-578.
- [29] 杨文斌, 董慧龙, 卢琦, 王晶莹, 梁海荣, 姜丽娜, 赵爱国. 低覆盖度固沙林的乔木分布格局与防风效果. 生态学报, 2011, 31(17): 5000-5008.
- [30] 梁海荣, 姚冬梅. 低覆盖度治沙理论及其在不同气候区的应用. 内蒙古林业科技, 2016, 42(4): 1-5.
- [31] 杨文斌, 王涛, 冯伟, 姚冬梅, 李卫. 低覆盖度治沙理论及其在干旱半干旱区的应用. 干旱区资源与环境, 2017, 31(1): 1-5.
- [32] 张炜, 杨文斌. 精准治沙思路研究. 北京: 中国林业出版社, 2020.
- [33] 程立平, 刘文兆, 李志, 韩晓阳. 长武黄土塬区土地利用变化对潜水补给的影响. 水科学进展, 2016, 27(5): 670-678.
- [34] 王晶, 赵文武, 张骁. 地球关键带水文土壤学与自然资源可持续利用—2016 年水文土壤学国际会议述评. 生态学报, 2016, 36(22): 7501-7504.
- [35] D'Odorico P, Caylor K, Okin G S, Scanlon T M. On soil moisture—vegetation feedbacks and their possible effects on the dynamics of dryland ecosystems. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2007, 112(G4): G04010.
- [36] Seyfried M S, Wilcox B P. Soil water storage and rooting depth: key factors controlling recharge on rangelands. *Hydrological Processes*, 2006, 20(15): 3261-3275.
- [37] 刘江华, 刘国彬, 侯禧禄, 李登武. 刺槐林地土壤水分与林下植物群落生物量的关系. 水土保持学报, 2008, 22(3): 43-46.
- [38] 王晗生. 旱区经营人工植被对土壤干化过程的调控. 自然资源学报, 2011, 26(4): 562-577.
- [39] 蒋德明, 张娜, 阿拉木萨, 李雪华, 周全来, 押田敏雄, 郭守业. 我国固沙植物抗旱性及基于水量平衡的沙地造林合理密度研究进展. 西北林学院学报, 2013, 28(6): 75-83.
- [40] 崔国发. 固沙林水分平衡与植被建设可适度探讨. 北京林业大学学报, 1998, 20(6): 89-94.
- [41] 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. 林业科学, 2004, 40(5): 3-9.
- [42] 吴雪琼, 杨文斌, 李卫, 乌志颜, 张丽, 王红霞, 李向晨, 陈学勋, 常伟东. 低覆盖度行带式种植模式下赤峰杨根系分布特征. 林业科学研究, 2015, 28(2): 255-260.
- [43] 刘丹一, 冯伟, 王涛, 杨文斌, 朱斌, 邹慧, 周密. 低覆盖治沙理论下人工与自然耦合的植被修复机理综述. 中国沙漠, 2024, 44(1): 170-177.
- [44] 杨文斌, 唐进年, 梁海荣, 党宏忠, 李卫. 我国典型沙漠(地)流动风沙土的深层渗漏量及动态变化. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(9): 2052-2061.
- [45] 杨文斌, 郭建英, 胡小龙, 刘艳萍, 邢恩德, 赵杏花. 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.
- [46] 徐先英, 赵鹏, 唐进年, 纪永福, 马新兵. 我国治沙机械研发现状与展望. 林业和草原机械, 2020, 1(2): 21-25.
- [47] 高天笑, 王涛, 杨文斌, 赵爱国, 倪海渊, 吴丽丽, 高永. 低覆盖度羽翼袋沙障防风积沙效应的风洞试验. 中国沙漠, 2019, 39(6): 177-183.
- [48] Petheram C, Walker G, Grayson R, Thierfelder T, Zhang L. Towards a framework for predicting impacts of land-use on recharge: 1. A review of recharge studies in Australia. *Soil Research*, 2002, 40(3): 397.
- [49] Silburn D M, Tolmie P E, Biggs A J W, Whish J P M, French V. Deep drainage rates of Grey Vertosols depend on land use in semi-arid subtropical regions of Queensland, Australia. *Soil Research*, 2011, 49(5): 424.
- [50] Robinson J B, Silburn D M, Rattray D, Freebairn D M, Biggs A, McClymont D, Christodoulou N. Modelling shows that the high rates of deep drainage in parts of the Goondoola Basin in semi-arid Queensland can be reduced with changes to the farming systems. *Soil Research*, 2010, 48(1): 58.
- [51] 吕一河, 傅伯杰. 旱地、荒漠和荒漠化: 探寻恢复之路—第三届国际荒漠化会议述评. 生态学报, 2011, 31(1): 293-295.
- [52] 李新荣, 赵洋, 回嵘, 苏洁琼, 高艳红. 中国干旱区恢复生态学研究进展及趋势评述. 地理科学进展, 2014, 33(11): 1435-1443.
- [53] Cong Wang, Shuai Wang, Bojie Fu, Yihe Lü, Yuanxin Liu, Xing Wu, Integrating vegetation suitability in sustainable revegetation for the Loess Plateau, China. *Science of The Total Environment*, 2021, 759: 143572.
- [54] 管文轲, 赵忠久, 吴天忠, 海妮肯山台. 浅谈和田地区低覆盖度治沙造林模式的应用成效. 防护林科技, 2019(2): 71-72, 77.
- [55] 牟瑞. 低覆盖度治沙和工程与生物治沙模式相结合在荒漠化治理中的探索应用. 温带林业研究, 2019, 2(1): 59-62.
- [56] Wang Z Z, Fu B J, Wu X T, Li Y J, Feng Y H, Wang S, Wei F L, Zhang L W. Vegetation resilience does not increase consistently with greening in China's Loess Plateau[J]. *Communications Earth & Environment*, 2023, 4:336.