

顿耀权,屈建军,康文岩,等.包兰铁路沙坡头段防护体系研究综述[J].中国沙漠,2021,41(3):66-74.

# 包兰铁路沙坡头段防护体系研究综述

顿耀权<sup>1,2</sup>, 屈建军<sup>1</sup>, 康文岩<sup>3</sup>, 王 涛<sup>1</sup>

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院 敦煌戈壁荒漠生态与环境研究所, 甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.中国铁路兰州局集团有限公司 中卫工务段, 宁夏 中卫 755000)

**摘要:** 包兰铁路是中国第一条穿越沙漠的铁路,其中沙坡头段风沙危害最严重,防护体系对铁路的建设和安全运营至关重要。在综合分析相关文献的基础上,从研究区防沙措施及效果、防护体系结构特征、合理宽度设计等方面,总结了60余年来包兰铁路沙坡头段防护体系的研究成果,并指出防护体系当前存在的问题(生态环境脆弱,局部地段土壤水分条件恶化、人工固沙植被退化、防沙措施破损、风蚀“活化斑”现象严重等),据此提出了相应的对策建议及今后的研究重点,以期防护体系的养护、完善及可持续管理提供科学参考。

**关键词:** 包兰铁路; 防护体系; 治沙措施; 结构特征; 防护效益

**文章编号:** 1000-694X(2021)03-066-09

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00018

**中图分类号:** X169

**文献标志码:** A

## 0 引言

道路交通是文明和生产力的重要标志,与人类的生存紧密相关<sup>[1]</sup>,是区域经济发展的主要基础。但在沙漠或戈壁等地,强烈的风沙活动可造成路基风蚀、路面积沙、车辆和道路设施机械磨损,影响道路的建设及安全运营<sup>[2-5]</sup>。因此,道路沙害防治工作至关重要。

包兰铁路是中国第一条穿越沙漠的铁路干线<sup>[6]</sup>,其中腾格里沙漠东南缘的沙坡头路段受到的风沙危害最严重。这里地处草原化荒漠,气候干旱,降水少而集中,蒸发强烈,沙丘高大密集,风沙活动频繁,植被盖度仅1%左右,地下水很难被植被利用,自然条件恶劣<sup>[7-10]</sup>。铁路沿线强劲的风力、松散的地表物质及风旱同期的气候特征为风沙危害的形成提供了动力条件和物质基础<sup>[11]</sup>。风沙危害主要表现为近地面流场变异而产生的风蚀与堆积以及格状沙丘的移动,尤其是副梁沿主风向的迅速前移和大幅度的左右摆动<sup>[12-13]</sup>。如何固定该段铁路两侧的流沙,防止路线遭受风蚀和沙埋,是保证包兰铁路顺利通行的前提条件和急需解决的问题。为此,中国科学院和铁道部等单位的研究工作者本着

“因地制宜,就地取材,因害设防,综合防治”的原则,开展了大量的沙害防治工作,最终建立了“以固为主,固阻结合”的综合防护体系(图1),不仅解决了铁路沿线两侧流沙的固定问题,还改善了沙坡头地区的生态环境条件,创造的经济效益逾百亿<sup>[14-16]</sup>,成为中国流沙环境区道路风沙危害防治首个成功案例<sup>[17]</sup>。

鉴于防护体系的特殊地位,国内外众多学者围绕防沙措施、防护体系结构配置、防护宽度、防护效益等开展了广泛的研究。本文在综合分析现有研究成果的基础上,提出包兰铁路沙坡头段防护体系当前存在的问题及未来的研究重点,从而加深对防护体系作用机制的认识,为维护和稳定防护体系提供理论基础,同时也为同类道路沙害防治措施的选择和合理布局提供借鉴。

## 1 包兰铁路沙坡头段防护体系研究现状

### 1.1 防沙措施及效果

为了铁路风沙防治的需要,在沙坡头地区沙漠路段的铁路两侧,先后设置了各种防风固沙、阻沙

收稿日期:2020-12-30; 改回日期:2021-02-02

资助项目:中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA23060201); 中国铁路兰州局集团有限公司2018年科技发展计划项目(201844-1)

作者简介:顿耀权(1995—),女,重庆巫山人,博士研究生,研究方向为风沙物理与风沙工程。E-mail: dunyaquan@niecr.ac.cn

通信作者:屈建军(E-mail: qujianj@lzb.ac.cn)

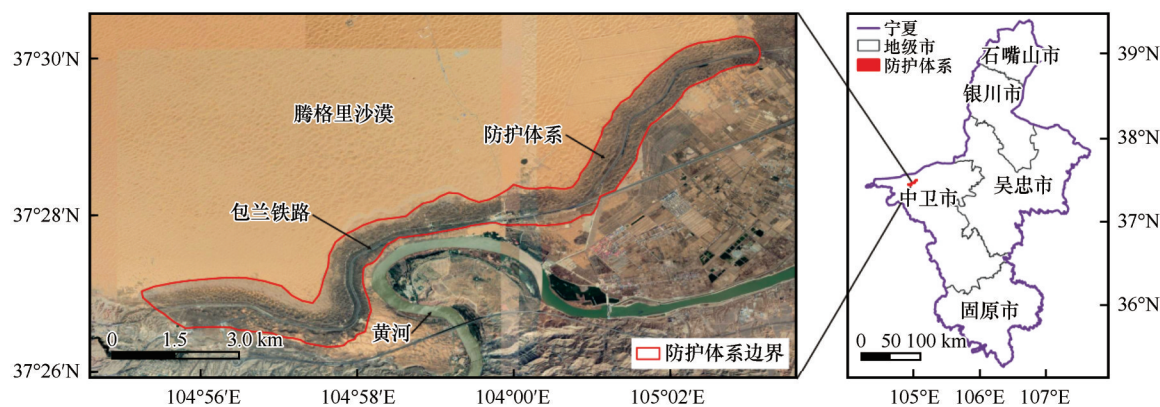


图1 研究区地理位置

Fig.1 Geographical location of the study area

措施,主要包括高立式阻沙栅栏、半隐蔽式草方格沙障和植物固沙措施。

### 1.1.1 高立式阻沙栅栏

高立式阻沙栅栏作为防沙系统的首道屏障,使风沙流中大部分沙粒沉降在阻沙区,不仅阻止了沙丘前移,而且使进入毗邻的防护工程主体固沙区的流沙减少<sup>[18]</sup>。沙坡头地区阻沙栅栏的防护效果随栅栏孔隙度、高度、设置部位、与主风向夹角、风况、沙源等因素的变化而变化,孔隙度0.3—0.4,高0.8—1.0 m、设置在迎风坡中上部且与主风向交角70°—90°的栅栏,防护效果较好<sup>[19]</sup>。另外,栅栏的阻沙效果受编制结构影响,与横向枝条阻沙栅栏相比,竖向阻沙栅栏的综合防沙效果更优,且制作简单<sup>[20]</sup>。栅栏阻沙效率70%—80%,且随着积沙体的增长而减小<sup>[19]</sup>。1982—2001年,防护体系前沿阻沙栅栏的阻沙量相当于总输沙量的25%<sup>[13]</sup>。

阻沙栅栏建立后,栅栏前后低风能区不断积沙,积沙宽度相当于栅栏高度的18—20倍<sup>[21]</sup>,在几十年连续布设并不断更新维护的情况下,逐渐形成连绵高大的聚沙堤,马晓洁等<sup>[22]</sup>将其称为“栅栏沙丘”。与天然沙丘相比,“栅栏沙丘”更高大且断面形态更对称,背风侧低能区分布的水平范围和高度范围更广,能够大幅削弱下风向10倍沙丘高度范围内的近地表风速,使其普遍低于起沙风速,有效降低防护体系内部输沙率<sup>[22-24]</sup>,栅栏沙丘已成为防护体系的重要防护要素。

### 1.1.2 草方格沙障

草方格沙障是不可缺少的先行固沙措施,可为人工植被的建立创造条件,其防风固沙作用的关键在于障内原始沙面在气流涡旋作用下充分蚀积形成稳定的凹曲面,进而达到蚀积平衡状态<sup>[25]</sup>。草方

格沙障防风固沙效果受沙障规格、草头出露高度及布设位置等因素影响<sup>[26-27]</sup>。数值模拟与野外观测结果显示,沙坡头地区草方格沙障规格设置为1 m×1 m,草头出露10—20 cm时安装成本和防护效果最好<sup>[28]</sup>。防护体系前沿沙丘迎风坡草方格沙障内部的流场和沉积特征研究表明,迎风坡中部的草方格沙障更易形成稳定凹曲面,不易造成掏蚀或沙埋,而在迎风坡坡脚和丘顶,沙粒易堆积在草方格周围,压埋沙障<sup>[29]</sup>。

沙坡头流动沙丘上建立草方格沙障之后,空气动力学粗糙度比原来高2—3个数量级,输沙通量垂直分布模式改变<sup>[30]</sup>。与流沙地段相比,1 m×1 m草方格沙障地段2 m高度风速相对削弱10%,0.5 m高度削弱20%—40%,而0—10 cm高度输沙量不及流沙地表的1%<sup>[6]</sup>。草方格沙障能够增强沙丘系统粉沙和黏粒的积累,增加土壤有机质和养分含量,加速物理结皮的形成演变,同时能截留降水,减缓沙面水分蒸发,改善土壤生境条件,从而为沙障内栽植的固沙灌木、半灌木的存活、生长以及一年生草本的入侵、定居提供有利的环境条件<sup>[15,21,31-33]</sup>。但是麦草方格沙障扎设4—5年后由于倒伏、腐朽、吹失、沙埋等问题,难以持续控制风蚀,需定期维护甚至重新扎设。

### 1.1.3 植物固沙措施

植物措施是一种根本且有效的固沙措施,可使流沙逐步变为半固定或固定沙丘,进而达到永久固沙的效果<sup>[34]</sup>。沙坡头地区年降水量不足200 mm,在中国西北荒漠地区无灌溉条件下植物固沙的临界线附近,非灌溉条件下植物固沙能否成功,存在很多争论。但多年的研究和大规模的实践最终证明,沙坡头地区无灌溉的植物固沙是可行的,且投资成

本更低<sup>[15]</sup>。

植物种选择和植被类型配置是人工植被建设的基础<sup>[35-36]</sup>,决定了植物固沙措施成败及防护效益。经过大量的植物引种试验工作,中国科学院沙坡头沙漠研究试验站最终筛选出8种抗风蚀、耐沙埋、易于繁殖、生长迅速且固沙性能良好的植物种,其中油蒿(*Artemisia ordosica*)、花棒(*Hedysarum scopari-*

*um*)、柠条(*Caragana korshinskii*)被选为防护体系建设的主要植物种<sup>[6]</sup>。基于野外栽植试验与植物生理生态特性研究,人工植被结构不断得到优化,全面栽植变为带状栽植,栽植行向由平行主风向变为垂直,并依据植物根系分布特点对其进行合理配置<sup>[18,37]</sup>(图2)。人工植被盖度在建立8—9年后即可达到20%—30%<sup>[38]</sup>。

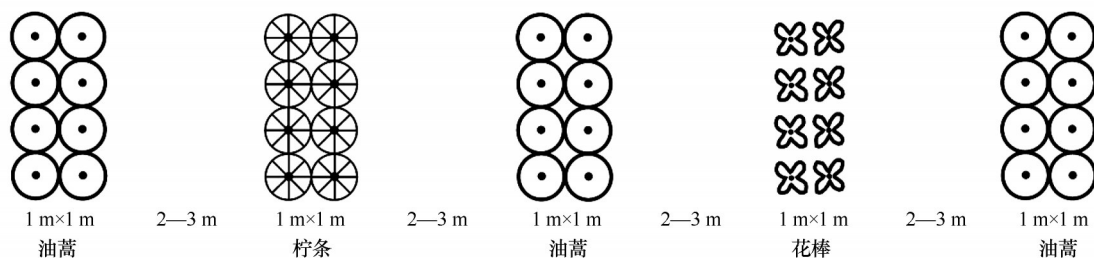


图2 植被最佳方案配置图<sup>[15]</sup>

Fig.2 The best arrangement scheme of plants<sup>[15]</sup>

在草方格沙障辅助下建立的人工植被,能有效削弱风速,降低风沙危害。随着植被盖度的增大,人工植被区地表粗糙度增大,对风速和输沙量的削弱作用逐渐增强<sup>[39]</sup>。有学者认为,固沙区内植被的整个形态大小(盖度×高度)才是影响其防风效应的决定因素<sup>[40]</sup>。植被区20 cm高度处的平均风速为流沙区的49.1%,输沙量仅为流沙区的2.5%,若在破坏地段补扎草方格沙障,风沙流活动将更加微弱<sup>[41]</sup>。表面结皮层的形成大幅加强土壤的抗侵蚀能力<sup>[42-44]</sup>,在植被和结皮的共同保护下,地面一般不再发生风蚀。

## 1.2 防护体系结构配置与防护宽度

依据防风固沙原理对机械固沙和植物固沙措施进行有机组合,在沙坡头段铁路沿线初步建立由固沙防火带、灌溉造林带、草障植物带、前沿阻沙带、封沙育草带组成的“五带一体”防护体系<sup>[45-46]</sup>(图3),取得了一定的成效,但缺陷也逐步显现:①强烈的风沙活动使得封沙育草无法实现;②灌溉造林带受水资源限制,牵引水源费用高<sup>[15-16]</sup>。经过长期野外试验和观测,防护体系结构不断改进,由五带简化为二带,最终形成由前沿阻沙栅栏和草障植物带组成的“以固为主,固阻结合”的防护体系。

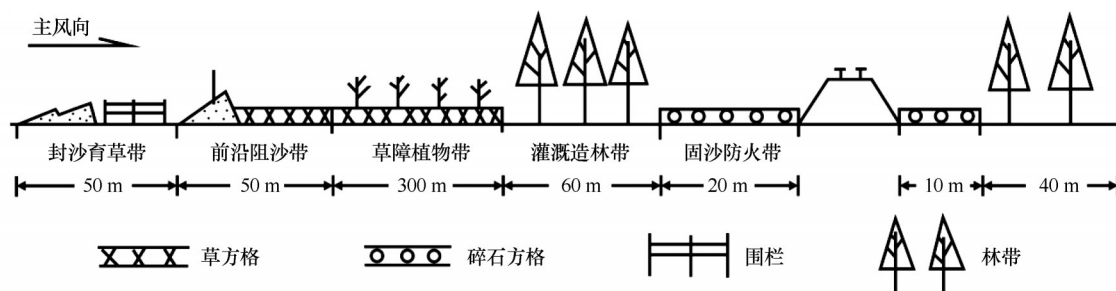


图3 包兰铁路沙坡头段“五带一体”防护体系示意图<sup>[45]</sup>

Fig.3 Schematic diagram of the “Five-Belts-One” Protective System of Shapotou Section of the Baotou-Lanzhou Railway<sup>[45]</sup>

对于防护体系而言,防护带宽度至关重要,决定了防护工程的成本、效果及可靠性<sup>[47-48]</sup>。包兰铁路沙坡头段建设初期,国内外专家曾提出铁路两侧防护带总宽度5 500 m的设计方案,随着研究工作的深入及防沙工程的实施,科技工作者三易方案,最终将防护带设计宽度修订为路北500 m,路南

200 m,与南北起沙风频次(1:2.2)相适应<sup>[6]</sup>。防护体系建设后,不同学者对其合理的防护宽度进行了大量的理论研究。凌裕泉<sup>[49]</sup>综合考虑铁路运营特点、风沙活动规律、现有防护体系宽度和防护效果后,认为包兰铁路沙坡头段防护体系的有效宽度约为130 m。徐峻龄等<sup>[50]</sup>通过分析风沙流掩埋防护带



的方式和速度、麦草方格沙障有效使用年限、预留安全宽度等相关因素,建立了草方格沙障防护带宽度理论模型,并以此确定合理宽度为105—125 m。胡孟春等<sup>[51]</sup>根据野外实测资料、风洞模拟实验和系统仿真对3种配置结构的防护体系的宽度进行了定量研究,发现输沙量与防护体系阻沙量达到理论平衡时,3种配置结构下防护体系草障植物带宽50—105 m。但上述宽度只是就铁路主风向一侧的平均情况而言,实际上它并非一个固定不变的常数,将随着路线走向、沙丘起伏程度、下垫面物质结构的不同而有所改变<sup>[47]</sup>,因此,应根据实际情况确定防护体系适宜宽度。

### 1.3 防护体系整体功能

沙坡头防护体系的建立和完善,有效控制了区域内的风沙活动<sup>[52]</sup>。沿主风向自流沙至铁路,等风速线密度逐渐减小,各高程风速总体上呈递减趋势,风力损耗逐渐增大<sup>[40,53-54]</sup>。野外输沙观测结果显示,经固沙带到砾石平台的全部沙量仅占流沙区的1.1%<sup>[49]</sup>,防护体系每年由防风固沙功能产生的价值高达 $5.93 \times 10^8$ 元<sup>[55]</sup>。

地表形态及区域环境在固沙措施的影响下显著改变。前沿阻沙带形成沿栅栏延伸的、与主风向大致垂直的高大沙垄<sup>[22]</sup>,固沙区内沙丘则在风、人工植被、施工等因素的影响下变得更为平缓,逐渐向蜂窝状沙丘转变<sup>[56]</sup>。稳定的沙面物理环境使大气降尘不断积累,表土层粉沙和物理性黏粒含量显著增加<sup>[57-58]</sup>。不断积累的细粒物质和植被凋落物,在水热及微生物的作用下,逐步改善流沙的理化性质,土壤从流动风沙土向钙积旱成土发育,生物结皮广泛发育<sup>[59-61]</sup>。格状沙丘上初始建立的结构单一的灌木-半灌木人工植被逐渐演变成复杂的多片层结构的人工-天然复合植被,为鸟类、昆虫和土壤动物的定居提供了有利条件<sup>[62-64]</sup>,土壤种子库密度增加<sup>[65-66]</sup>,生态系统稳定性增强。与流动沙丘相比,植被区地表温度、近地层气温、湿度变化范围增大,小气候效应显著<sup>[67]</sup>。

## 2 防护体系当前存在的问题

### 2.1 生态环境脆弱

防护体系建立后,原本相对贫瘠的沙丘环境逐渐转变为结构、成分、功能相对复杂的荒漠生态系

统,但相对恶劣的自然条件以及有限的生态恢复时间,使得防护体系整体生态环境仍然十分脆弱,抗扰动能力差,气候变化影响下,生态系统脆弱性可能会进一步加剧。大量研究表明,沙坡头人工植被区的植被覆盖度、土壤理化性质、土壤含水量、结皮层厚度、可培养微生物数量、酶活性、苔藓物种多样性和生态系统稳定性等均随着固沙年限的延长而增强,但仍然显著低于固沙年限超过100年的从未被沙埋破坏的天然植被区(表1),人工植被区生态恢复仍需经历很长一段时间<sup>[62,68-71]</sup>。沙坡头铁路沿线防护体系脆弱性评估表明该地区属于高脆弱区<sup>[72]</sup>。

### 2.2 土壤水分条件恶化,人工固沙植被退化

人工固沙植被区,灌木层盖度与深层土壤水分之间存在互馈互调作用,深层土壤含水量随着固沙年限的延长逐渐降低<sup>[73-74]</sup>,灌木层盖度在植被建立9—10年后达到最高33%,随后逐步下降至9%左右<sup>[75]</sup>。深层土壤含水量在干旱年份易突破生态水文阈值下限2.1%<sup>[76]</sup>,灌木植被有可能在未来持续退化<sup>[77-79]</sup>,均潜在威胁着人工植被区的稳定性和可持续性。而新的土壤-植被系统带来不同的防风固沙效益,与灌木主导的群落相比,以草本植物为主的群落结构抗干扰能力相对较弱,且依赖于高度变化的季节性降雨,无法提供一致的地表保护,尤其是在干旱年份或者一年生草本植物枯死或刚刚萌发的冬春季节<sup>[57,80-82]</sup>。然而土壤从流沙到表层土壤生物结皮的发育过程中,土壤抗风蚀能力增强,对地表有一定的保护作用。不过土壤生物结皮的结构属性较弱,容易被人类活动、侵蚀、动物挖洞等破坏,严重时将造成沙面裸露,尤其是在脆弱的沙丘顶部和迎风坡中上部<sup>[83-84]</sup>。在干旱条件下或扰动后,风蚀现象很可能会再次出现。

### 2.3 风沙危害严重

防护体系经常遭受风沙危害,在发挥其功能的同时也是逐步丧失其功能的过程<sup>[85]</sup>,主要体现在以下几个方面:①麦草方格沙障及高立式阻沙栅栏老化腐朽(图4A),高温、强烈的紫外线、降水、风等因素会加速这一过程<sup>[85]</sup>。②防护体系迎风边缘风沙危害:高立式沙障掏蚀倒伏(图4B)、断裂、沙埋以及草方格沙障自边缘向内部逐渐积沙、埋没<sup>[22,86]</sup>,流沙逐渐向内推进(图4C)。③防护体系内部风蚀和沙埋:土壤含水量下降、植被特征变化、动物活动(蚂

表 1 不同年限固沙植被区表层土壤的理化性质<sup>[68]</sup>

| 土壤性质  | 固沙年限/a |       |       |       |       | 天然<br>植被区 |
|---|--------|-------|-------|-------|-------|-----------|
|   | 0      | 22    | 32    | 49    | 57    |           |
| 沙粒含量/%  | 99.67  | 78.87 | 71.54 | 68.28 | 66.39 | 13.54     |
| 粉粒含量/%  | 0.12   | 15.60 | 23.59 | 24.79 | 22.59 | 72.00     |
| 黏粒含量/%  | 0.21   | 4.54  | 4.87  | 6.93  | 11.01 | 14.45     |
| 有机碳含量/(g·kg <sup>-1</sup> )   | 0.37   | 1.65  | 4.32  | 7.59  | 7.74  | 20.54     |
| 全氮含量/(g·kg <sup>-1</sup> )  | 0.17   | 0.22  | 0.52  | 0.74  | 1.02  | 2.07      |
| 全磷含量/(g·kg <sup>-1</sup> )  | 0.40   | 0.44  | 0.71  | 0.75  | 0.77  | 1.38      |
| 结皮层及亚土层厚度/cm  | 0      | 0.72  | 1.40  | 2.20  | 2.50  | 4.87      |
| 藻-地衣结皮盖度/%  | 0      | 6.9   | 11.8  | 31.2  | 39.0  | 41.4      |
| 藓类结皮盖度/%  | 0      | 49.8  | 54.0  | 57.5  | 56.5  | 56.7      |
| 藻-地衣结皮下细菌数量/(×10 <sup>4</sup> cfu·g <sup>-1</sup> )                   | 0.45   | 5.30  | 5.98  | 6.44  | 8.18  | 9.92      |
| 藓类结皮下细菌数量/(×10 <sup>4</sup> cfu·g <sup>-1</sup> )                     | 0.39   | 5.03  | 6.39  | 6.58  | 8.52  | 12.29     |
| 藻-地衣结皮下土壤基础呼吸 CO <sub>2</sub> /(mg·g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> ) | 0.008  | 0.016 | 0.016 | 0.018 | 0.020 | 0.021     |
| 藓类结皮下土壤基础呼吸 CO <sub>2</sub> /(mg·g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )   | 0.008  | 0.018 | 0.020 | 0.021 | 0.021 | 0.023     |



图 4 防护体系风沙危害类型示例

Fig.4 Examples of sandstorm hazard types of protective systems

蚁、蜥蜴、老鼠等)或风蚀的影响下,人工植被区结皮层易遭到破坏形成“活化斑”(图4D),尤其是在沙丘顶部或迎风坡上部<sup>[87]</sup>,尽管“活化斑”面积只占防护体系的1.56%<sup>[38]</sup>,但易在风力持续作用下扩大,裸露出的流沙扩散蔓延,埋压四周地段,在防护体系内部形成新的沙源。



### 3 展望

包兰铁路沙坡头段防护体系历来备受科研工作者的关注,经过半个多世纪的研究,对防护体系的结构组成、固沙原理、合理宽度、防护效果以及人工生态系统的形成演变有了较为深入的了解。防护体系建立以后,风沙危害得到了很好的治理,环境条件也得到了改善。但随着固沙年限的延长,生态环境脆弱,水分条件恶化、人工固沙植被退化,风沙危害导致防沙工程措施损坏、“活化斑”大量发育等问题逐渐显现。鉴于目前防护体系面临的问题和研究的不足,未来还需从以下几方面开展工作。

加强现有体系管理维护力度,使其防护效益长久可持续。可结合地形和风况资料,全面调查防护体系内风沙危害类型、特点、程度及原因,并分析目前养护工作中存在的问题,如养护队伍力量薄弱、费用短缺等,从而有针对性地提出相应的维护建议。同时基于“3S”技术对风沙危害进行定期的长期监测,便于及时养护,尤其是对于风沙危害严重区域可优先养护。

加强新技术、新材料的研发及应用,降低防护体系维护成本。当前在对防护体系进行维护时多采用枝条、麦草等易腐烂老化的材料,存在使用寿命短,维护难度大、成本高的缺点。研发利用耐辐射、耐腐蚀、稳定性好、便于施工的新型代用材料,以克服原有固沙材料的不足。其次,加强可根据风沙危害实际状况进行移动或重置的新型固沙技术的研发,提高材料的重复利用率。

加强人工植被区生态系统稳定性的研究。强化沙丘植被-土壤系统生态水文过程及作用机理的系统认识,构建一个综合植被、土壤和水分等多因子的定量的稳定性评价指标体系,以此量化生态系统稳定程度,预测未来发展趋势,进而提出人工固沙植被-土壤系统可持续发展的生态管理对策,在充分考虑现阶段水分状况和植物种的生理生态特征前提下,引进新的植物物种。

综合分析防护体系的组成、结构和功能,构建沙区交通干线防沙理论。尽管防护体系存在一些问题,但其历经60余年的考验,仍稳定、可靠地保障着铁路的安全运营,是道路防沙的成功案例。综合分析、评价不同固沙措施防沙原理和效果,结合整个防护体系的观测、模拟及数值计算等研究,构建沙区交通干线综合防沙理论及技术模式,为沙漠地

区道路沿线区域的流沙治理和生态建设提供参考文献。

#### 参考文献:

- [1] 中国公路交通史编审委员会.中国古代道路交通史[M].北京:人民交通出版社,1994:1.
- [2] 谢胜波,屈建军.青藏铁路主要沙害路段治理技术及成效[J].干旱区资源与环境,2014,28(7):105-110.
- [3] Bergstrom D J, Boucher K M, Derksen D. Wind flow over an elevated roadway[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 44(Sup1/3): 2697-2698.
- [4] Khier W, Breuer M, Durst F. Flow structure around trains under side wind conditions: a numerical study[J]. Computers & Fluids, 2000, 29(2): 179-195.
- [5] 李鑫,艾力·斯木吐拉,陈正奇,等.沙漠公路交通事故特征及成因分析[J].长沙交通学院学报,2006(2):51-55.
- [6] 兰州沙漠研究所沙坡头沙漠科学研究所.包兰铁路沙坡头段固沙原理与措施[M].银川:宁夏人民出版社,1991.
- [7] 王新平,张景光,李新荣,等.沙坡头地区多年降水分布特征、趋势及其变率[J].中国沙漠,2001,21(3):46-50.
- [8] 吕萍,董治宝,张正偲,等.腾格里沙漠近地面层风、气温、湿度特征[J].中国沙漠,2009,29(5):977-981.
- [9] 李守中,肖洪浪,罗芳,等.沙坡头植被固沙区生物结皮对土壤水文过程的调控作用[J].中国沙漠,2005,25(2):86-91.
- [10] Zhang K C, Qu J J, An Z S. Characteristics of wind-blown sand and near-surface wind regime in the Tengger Desert, China[J]. Aeolian Research, 2012, 6: 83-88.
- [11] 李金贵.沙坡头地区风况与流沙运动[J].中国沙漠,1988,8(3):44-55.
- [12] 赵性存.包兰铁路中卫至干塘段沙漠路基的修筑[M]//中国科学院兰州沙漠研究所沙坡头沙漠科学研究所.腾格里沙漠沙坡头地区流沙治理研究.银川:宁夏人民出版社,1991:1-7.
- [13] 屈建军,凌裕泉,井哲帆,等.包兰铁路沙坡头段风沙运动规律及其与防护体系的相互作用[J].中国沙漠,2007,27(4):529-533.
- [14] 沈吉庆,林庆功,张林旺.沙坡头铁路防护体系综合分析评价[J].内蒙古林业调查设计,2003(4):6-8.
- [15] 刘焯心.包兰铁路沙坡头地段铁路防沙体系的建立及其效益[J].中国沙漠,1987,7(4):4-14.
- [16] 张克存,屈建军,鱼燕萍,等.中国铁路风沙防治的研究进展[J].地球科学进展,2019,34(6):573-583.
- [17] 屈建军,凌裕泉,刘宝军,等.我国风沙防治工程研究现状及发展趋势[J].地球科学进展,2019,34(3):225-231.
- [18] 刘恕.沙坡头铁路防沙工程的系统特征[M]//中国科学院兰州沙漠研究所沙坡头沙漠科学研究所.腾格里沙漠沙坡头地区流沙治理研究.银川:宁夏人民出版社,1991:8-12.
- [19] 凌裕泉,金炯,邹本功,等.栅栏在防止前沿积沙中的作用:以沙坡头地区为例[J].中国沙漠,1984,4(3):20-29.
- [20] 康文岩,王立,屈建军,等.包兰铁路沙坡头段不同编制结构

- 的枝条阻沙栅栏防护效应风洞模拟[J]. 中国沙漠, 2020, 40(2): 94-99.
- [21] 中国科学院兰州沙漠研究所沙坡头沙漠科学研究所. 腾格里沙漠东南缘铁路沿线流沙固定的原理与措施[J]. 中国沙漠, 1986, 6(3): 4-22.
- [22] 马晓洁, 张春来, 张加琼, 等. 包兰铁路沙坡头段防护体系前沿栅栏沙丘形态与近地面流场[J]. 中国沙漠, 2013, 33(3): 649-654.
- [23] 李建国, 屈建军, 李芳, 等. 不同类型防沙堤流场的风洞实验模拟研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(2): 291-299.
- [24] 周娜, 张春来, 邹学勇, 等. 地形对包兰铁路沙坡头段防护体系的影响[J]. 地理科学, 2014, 34(7): 889-896.
- [25] Qu J J, Zu R P, Zhang K C, et al. Field observations on the protective effect of semi-buried checkerboard sand barriers [J]. *Geomorphology*, 2007, 88(1/2): 193-200.
- [26] Bo T L, Ma P, Zheng X J. Numerical study on the effect of semi-buried straw checkerboard sand barriers belt on the wind speed[J]. *Aeolian Research*, 2015, 16: 101-107.
- [27] Xie Y H, Dang X H, Zhou Y J, et al. Using sediment grain size characteristics to assess effectiveness of mechanical sand barriers in reducing erosion [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 14009.
- [28] Qiu G Y, Lee I B, Shimizu H, et al. Principles of sand dune fixation with straw checkerboard technology and its effects on the environment [J]. *Journal of Arid Environments*, 2004, 56(3): 449-464.
- [29] 周娜, 张春来, 田金鹭, 等. 半隐蔽式草方格沙障凹曲面形成的流场解析及沉积表征[J]. 地理研究, 2014, 33(11): 2145-2156.
- [30] Zhang C L, Li Q, Zhou N, et al. Field observations of wind profiles and sand fluxes above the windward slope of a sand dune before and after the establishment of semi-buried straw checkerboard barriers[J]. *Aeolian Research*, 2016, 20: 59-70.
- [31] Li X R, Xiao H L, He M Z, et al. Sand barriers of straw checkerboards for habitat restoration in extremely arid desert regions [J]. *Ecological Engineering*, 2006, 28(2): 149-157.
- [32] Fang H Y, Cai Q G, Chen H, et al. Mechanism of formation of physical soil crust in desert soils treated with straw checkerboards[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 93(1): 222-230.
- [33] 王逸敏, 刘康, 屈建军. 沙障对流沙地植被和土壤养分的影响[J]. 中国沙漠, 2019, 39(3): 56-65.
- [34] 杨丽雯. 沙坡头人工固沙植被生态系统服务功能价值评价[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2007.
- [35] 刘硕, 李品, 冯兆忠. 京津冀防风固沙植被生态修复研究进展与对策[J]. 生态学杂志, 2019, 38(1): 267-274.
- [36] Lu F, Li Z Z. A model of ecosystem health and its application [J]. *Ecological Modelling*, 2003, 170(1): 55-59.
- [37] 刘家琼. 草原与荒漠交界地区流沙的固定: 以沙坡头铁路防护体系旱路固沙为例[J]. 中国沙漠, 2002, 22(5): 88-91.
- [38] 于云江, 林庆功, 石庆辉, 等. 包兰铁路沙坡头段人工植被区生境与植被变化研究[J]. 生态学报, 2002(3): 433-439.
- [39] 王康富. 沙坡头地区流沙固定的研究[M]//中国科学院兰州沙漠研究所沙坡头沙漠科学研究所. 腾格里沙漠沙坡头地区流沙治理研究. 银川: 宁夏人民出版社, 1991: 13-26.
- [40] 邹本功, 丛自立, 刘世建. 沙坡头地区风沙流的基本特征及其防治效应的初步观测[J]. 中国沙漠, 1981(1): 37-43.
- [41] 陈世雄. 沙坡头地区铁路两侧流沙上人工植被的生态效果[J]. 中国沙漠, 1983, 3(4): 39-46.
- [42] Zhang Z, Dong Z, Zhao A, et al. The effect of restored microbiotic crusts on erosion of soil from a desert area in China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(5): 710-721.
- [43] Hu C X, Liu Y D, Song L R, et al. Effect of desert soil algae on the stabilization of fine sands [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2002, 14(4): 281-292.
- [44] 于云江, 林庆功, 邵永贵, 等. 从植被演替和抗风性研究包兰线沙坡头段人工植被稳定性[J]. 自然资源学报, 2002(1): 63-70.
- [45] 徐峰. 铁路沙害整治及其研究方向[J]. 中国沙漠, 1994, 14(2): 69-74.
- [46] 孔丽娟. 关于加强包兰线治沙工程建设的思考[J]. 林业科技通讯, 2001(7): 28-29.
- [47] 金昌宁, 张玉红. 塔克拉玛干沙漠公路机械防沙体系成本最小化探讨[J]. 中外公路, 2014, 34(5): 4-8.
- [48] Zhao W Z, Hu G L, Zhang Z H, et al. Shielding effect of oasis-protection systems composed of various forms of wind break on sand fixation in an arid region: a case study in the Hexi Corridor, northwest China [J]. *Ecological Engineering*, 2008, 33(2): 119-125.
- [49] 凌裕泉. 铁路沙害治理体系的风沙物理学原理: 以包兰铁路为例[M]//中国科学院兰州沙漠研究所沙坡头沙漠科学研究所. 腾格里沙漠沙坡头地区流沙治理研究. 银川: 宁夏人民出版社, 1991: 297-308.
- [50] 徐峻岭, 裴章勤, 王仁化. 半隐蔽式麦草方格沙障防护带宽度的探讨[J]. 中国沙漠, 1982, 2(3): 20-27.
- [51] 胡孟春, 屈建军, 赵爱国, 等. 沙坡头铁路防护体系防护效益系统仿真研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2004(2): 140-147.
- [52] 李生宇, 雷加强, 徐新文, 等. 中国交通干线风沙危害防治模式及应用[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(6): 665-674.
- [53] 张春来, 邹学勇, 程宏, 等. 包兰铁路沙坡头段防护体系近地面流场特征[J]. 应用基础与工程科学学报, 2006(3): 353-360.
- [54] Zhang C L, Zou X Y, Pan X H, et al. Near-surface airflow field and aerodynamic characteristics of the railway-protection system in the Shapotou region and their significance[J]. *Journal of Arid Environments*, 2007, 71(2): 169-187.
- [55] 杨丽雯, 王大勇. 沙坡头人工植被防护体系防风固沙功能价值评价[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2009, 23(4): 94-98.
- [56] 甄计国. 腾格里沙漠东南缘沙坡头地区流沙治理后地表形态的变化[J]. 中国沙漠, 1987, 7(1): 12-20.
- [57] Fearnough W, Fullen M A, Mitchell D J, et al. Aeolian depo-

- sition and its effect on soil and vegetation changes on stabilised desert dunes in northern China[J]. *Geomorphology*, 1998, 23(2/4): 171-182.
- [58] 张春来, 邹学勇, 杨硕, 等. 沙坡头铁路防护体系内风沙沉积的粒度特征[J]. *地理研究*, 2007(1): 75-82.
- [59] 肖洪浪, 李新荣, 段争虎, 等. 流沙固定过程中土壤-植被系统演变[J]. *中国沙漠*, 2003, 23(6): 2-8.
- [60] Lan S B, Wu L, Zhang D L, et al. Analysis of environmental factors determining development and succession in biological soil crusts [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 538: 492-499.
- [61] Duan Z H, Xiao H L, Li X R, et al. Evolution of soil properties on stabilized sands in the Tengger Desert, China [J]. *Geomorphology*, 2004, 59(1/4): 237-246.
- [62] Li X R, Xiao H L, Zhang J G, et al. Long-term ecosystem effects of sand-binding vegetation in the Tengger Desert, northern China [J]. *Restoration Ecology*, 2004, 12(3): 376-390.
- [63] Li X R, Chen Y W, Su Y G, et al. Effects of biological soil crust on desert insect diversity: evidence from the Tengger Desert of northern China [J]. *Arid Land Research and Management*, 2006, 20(4): 263-280.
- [64] 李新荣, 张志山, 刘玉冰, 等. 长期生态学研究引领中国沙区的生态重建与恢复[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(7): 790-797.
- [65] 陈孟晨, 张景光, 冯丽, 等. 沙坡头地区生物结皮覆盖区土壤种子库组成及垂直分布特征[J]. *生态学报*, 2017, 37(22): 7614-7623.
- [66] Chen Y W, Li X R. Spatio-temporal distribution of nests and influence of ant (*Formica cunicularia* Lat.) activity on soil property and seed bank after revegetation in the Tengger Desert [J]. *Arid Land Research and Management*, 2012, 26(4): 365-378.
- [67] 刘树华, 辛国君, 陈荷生, 等. 沙漠人工植被和流动沙丘的小气候特征观测研究[J]. *干旱区地理*, 1994(1): 16-23.
- [68] 杨航宇, 刘艳梅, 王廷璞, 等. 生物土壤结皮对荒漠区土壤微生物数量和活性的影响[J]. *中国沙漠*, 2017, 37(5): 950-960.
- [69] Li X R, He M Z, Duan Z H, et al. Recovery of topsoil physico-chemical properties in revegetated sites in the sand-burial ecosystems of the Tengger Desert, northern China [J]. *Geomorphology*, 2007, 88(3/4): 254-265.
- [70] Pan Y X, Wang X P, Zhang Y F, et al. Spatio-temporal variability of root zone soil moisture in artificially revegetated and natural ecosystems at an arid desert area, NW China [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 79: 100-112.
- [71] Huang L, Zhang Z S. The stability of revegetated ecosystems in sandy areas: an assessment and prediction index [J]. *Water*, 2015, 7: 1969-1990.
- [72] 吴洪斌, 刘荣国, 王原, 等. 宁夏沙坡头自然保护区气候变化脆弱性评价[J]. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(增刊2): 30-34.
- [73] 肖洪浪, 李守中, 罗芳, 等. 干旱区生物防沙工程的生态水文学研究[C]//中国治沙暨沙产业研究: 庆贺中国治沙暨沙业学会成立10周年(1993-2003)学术论文集, 2003: 83-87.
- [74] Chen N, Wang X P, Zhang Y F, et al. Ecohydrological effects of biological soil crust on the vegetation dynamics of restoration in a dryland ecosystem [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 563: 1068-1077.
- [75] Li X R, Kong D S, Tan H J, et al. Changes in soil and vegetation following stabilisation of dunes in the southeastern fringe of the Tengger Desert, China [J]. *Plant and Soil*, 2007, 300 (1/2): 221-231.
- [76] 张定海, 李新荣, 张鹏. 生态水文阈值在中国沙区人工植被生态系统管理中的意义[J]. *中国沙漠*, 2017, 37(4): 678-688.
- [77] 李青丰, 王建光, 徐军. 沙坡头铁路北侧人工植被区油蒿苗和小画眉草的分布格局[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(6): 106-109.
- [78] 徐军, 李青丰, 王建光, 等. 沙坡头人工植被区中的油蒿种群动态与稳定性[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(6): 69-75.
- [79] Li T, Xiao H L, Li X R. Modeling the effects of crust on rain infiltration in vegetated sand dunes in arid desert [J]. *Arid Land Research and Management*, 2001, 15(1): 41-48.
- [80] Zhang J G. Ecological adaptation strategies of annual plants in artificial vegetation-stabilized sand dune in Shapotou region [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2004, 47: 50-60.
- [81] 徐彩琳, 李自珍. 干旱荒漠区人工植物群落演替模式及其生态学机制研究[J]. *应用生态学报*, 2003(9): 1451-1456.
- [82] 王艳莉, 刘立超, 高艳红, 等. 人工固沙植被区土壤水分动态及空间分布[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(4): 942-950.
- [83] Li S Z, Xiao H L, Cheng G D, et al. Mechanical disturbance of microbiotic crusts affects ecohydrological processes in a region of revegetation-fixed sand dunes [J]. *Arid Land Research and Management*, 2006, 20(1): 61-77.
- [84] Zhang J Q, Zhang C L, Zhou N, et al. Spatial pattern of grain-size distribution in surface sediments as a result of variations in the aeolian environment in China's Shapotou railway protective system [J]. *Aeolian Research*, 2011, 3(3): 295-302.
- [85] 姚正毅, 陈广庭, 韩致文, 等. 机械防沙体系防沙功能的衰退过程[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(2): 226-231.
- [86] 邵永贵, 林庆功. 高立式移动沙障应用技术试验研究[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(5): 790-794.
- [87] 吴玉哲, 林庆功, 黄磊, 等. 腾格里沙漠南缘固定沙丘活化斑的空间分布特征[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(6): 776-782.



## Progress and prospect of research on the protective system of Shapotou section of the Baotou-Lanzhou Railway

Dun Yaoquan<sup>1,2</sup>, Qu Jianjun<sup>1</sup>, Kang Wenyan<sup>3</sup>, Wang Tao<sup>1</sup>

(1. Dunhuang Gobi and Desert Ecological and Environmental Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Zhongwei Section, Lanzhou Bureau Group Co., Ltd., China Railway, Zhongwei 755000, Ningxia, China)

**Abstract:** The Baotou-Lanzhou Railway is the first railway in China to cross the desert, among which the Shapotou section suffered from the most severe aeolian sand hazard. The protective system is vital to the construction and safe run of this railway. Based on literature comprehensive analysis of the protective system of Shapotou section of the Baotou-Lanzhou Railway during the last 60 years, we summarized the research results from the sand-fixing measures and their efficiency, the structural characteristics of the protection system, and the design of reasonable width. At present, the ecological environment in this area is fragile, and there are some problems in part of the area, such as the deterioration of soil moisture conditions, the degradation of artificial sand-fixing vegetation, the damage of measures of sand drift control, and the extensive development of sandy patches caused by wind erosion. Finally, we proposed corresponding strategies and future research priorities, which could provide a scientific reference for the maintenance, improvement and sustainable management of the protective system.

**Key words:** Baotou-Lanzhou Railway; protective system; sand-fixing measures; structural characteristics; protecting efficiency