

张克存,安志山,何明珠,等.中国沙区公路风沙危害及防治研究进展[J].中国沙漠,2022,42(3):222-232.

中国沙区公路风沙危害及防治研究进展

张克存¹,安志山¹,何明珠¹,肖建华¹,张宏雪^{1,2}

(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/沙漠与沙漠化重点实验室,甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要: 本文聚焦公路风沙问题,回顾了中国沙区公路的发展历程、现状与特点,围绕公路沿线风动力环境、沙害特征、致灾机理、风沙防治措施、防护体系结构组成和防护效益等,系统总结了我国沙区公路风沙防治取得的成果以及存在的问题。针对公路沿线流沙和戈壁地表以及区域自然特征差异,兼顾风沙防治、绿色廊道建设与景观功效,确保沙区公路防护体系持续稳定和效能发挥,系统梳理了中国沙区公路3种典型风沙防治模式。基于中国公路网络骨架体系日益完善的切实需求和沙区公路安全运营面临的挑战,侧重加强高速公路风沙防治工程技术的提升,提出了中国沙区公路未来的研究重点和发展趋势。

关键词: 沙区公路; 风沙危害; 防治措施; 风沙防护体系

文章编号: 1000-694X(2022)03-222-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00048

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

由荒漠化引起的风沙危害是全球性的生态环境问题,风沙防治是伴随人类在干旱半干旱地区社会经济活动而展开的^[1]。中国受到风沙危害及可能产生沙害的范围高达164万km²,占国土面积的17%。在风沙环境下开展经济建设和生产实践,都会涉及风沙问题^[2-4]。风沙物理学研究各种风沙现象的物理机制及其利用与控制原理,是风沙防治的理论基础和重要支撑。风沙问题一直制约沙区道路勘察选线、施工和安全运营,直接影响工程的总投资和工程建设的成败^[5-9]。随着中国“一带一路”倡议推进和公路交通网络体系日臻完善,穿越沙区公路里程逐年增加,沿线风沙危害日益加剧,部分线路行车安全已受到影响^[10-12]。近年来,风沙科学研究得到国内外学者广泛关注,尤其在风沙物理和防沙工程研究领域取得了诸多成果^[13-17]。但针对沙区公路风沙过程与致灾机理研究仍需加强,尤其是沙区公路风沙灾害理论研究与工程防沙实践联系不够紧密,一定程度上阻碍了公路风沙防治措施的选择和合理布局。

随着西部开发战略推进和国家高等级公路建设步伐加快,西部沙区公路纵横结构网络体系日益完善,公路沿线风沙问题愈加突出^[18-19]。目前,中国已修建的沙漠公路多为普通公路,沙区高等级公路风沙危害及防治面临新的挑战(图1)。传统普通公路风沙防治多根据沿线风沙危害现状和特点,借鉴已有风沙治理经验和模式,采取的防护措施和技术相对单一,缺乏完善的公路风沙防护体系,且未综合考虑全寿命周期和绿色低碳环保理念,风沙防护措施寿命相对有限,且景观效果不佳,导致公路服役性能降低,增大风沙环境下行车的安全隐患。

本文针对公路沿线下垫面类型和地域环境的差异,从风动力环境、沙害形成机理、风沙防护体系及效益评价等方面,系统总结了我国沙区公路风沙危害及防治研究进展,凝练和提出了未来沙区公路的研究动态和发展趋势。研究成果不仅可阐明沙区公路风沙动力过程、完善风沙灾害理论体系、提升沙区道路工程风沙防治水平,更有利于典型地域环境公路风沙防治技术和模式的推广应用,为丝绸之路经济带沿线沙区道路工程建设及其互联互通提供重要保障,具有重要的理论意义和实践价值。

收稿日期:2022-04-14; 改回日期:2022-04-29

资助项目:国家自然科学基金项目(41871016, 42171083)

作者简介:张克存(1978—),男,甘肃民勤人,研究员,主要从事风沙灾害与防沙工程研究。E-mail: kecunzh@lzb.ac.cn



图1 沙区公路风沙危害

Fig.1 Sand damages along highways in sandy region

1 中国沙区公路发展及风沙危害防治历程

国外最早开始公路沙害防治的是前苏联的土库曼共和国,采用机械沙障,种植沙生植物,喷洒乳化沥青、原油等化学固沙剂,以削弱风速,增加地表粗糙度,固定流沙,避免风蚀或风沙入侵^[20-23]。风沙灾害与防沙工程的发展是与道路交通建设、工矿开发、文化遗址的保护以及城镇等建筑物的防护而协同发展^[24-29]。1880年在修建里海东岸铁路时,在紧靠路基处采用芦苇和旧枕木阻挡风沙入侵,防止路基风蚀;在沙丘表面用碎石、黏土或喷洒石油、海水进行覆盖。19世纪40年代,前苏联在中亚荒漠地区修筑铁路时,在沙丘的2/3以下部位设置半隐蔽式沙障,利用风力拉平沙丘,并用草方格固定流沙,促进方格内植物的萌发和生长。

纵观中国沙区公路建设和发展历程,自20世纪50年代中国科学院治沙队成立,沙漠研究的倡导者竺可桢先生明确指出了“改造沙漠是我们的历史任务”,要求沙漠研究和治理与国家经济建设和生产实践密切联系^[30]。在沙区边缘修筑零星的道路以发展经济和农业生产,为了防治道路沙害和保障通行,当地群众就地取材采用柴草、树枝和篱笆等进行简单的沙害防治。20世纪70年代,吴正等^[31]参与了青新公路(G315国道)的选线及沙害防治研究,获得了塔克拉玛干沙漠南缘风沙危害类型、程度和空间分布等数据,并于1981年出版了《沙漠地区公路工程》。该书从公路风沙危害、沙区公路选线和路基设计、公路沙害防治原则与方法、沙漠公路施工和养护等5个方面,初步总结了建国30年来沙区公路建设和取得的科研成果,为后期沙区公路风沙防治提供了借鉴。

20世纪90年代,中国在塔克拉玛干沙漠中修筑了一条连续穿越流动沙丘达446 km的沙漠公路,建立了以半隐蔽式芦苇方格沙障和高立式阻沙栅栏相结合的机械防护体系,攻克了流动沙漠公路风沙危害防治技术的诸多难题^[32-33],彰显中国在沙漠公路设计、施工和防护方面的理论和实践水平^[34-36]。塔里木石油公路筑路技术和风沙防护成果助推中国沙区公路建设发展进入新高潮,相关研究成果成功应用于铁路、公路以及农田的沙害防治^[37-40]。迄今,已有多条公路穿越或毗邻中国八大沙漠和四大沙地,这些穿沙公路不仅改变了之前环绕沙漠边缘的通行状况,缩短了沙漠两地之间的行车时间,极大地完善了中国公路交通网络体系^[41](表1)。其中,横跨巴丹吉林、腾格里、乌兰布和三大沙漠的京新高速(G7)建设,是世界上穿越沙漠最长的高速公路,被誉为“一带一路”上的超级工程^[42]。随着中国交通骨架体系的完善和公路建设的快速发展,部分线路不得不延伸或穿越沙漠地区^[43-45],沿线风沙危害日益加剧,已影响行车安全。

2 沙区公路沿线风动力环境与公路沙害形成机理

沙区公路在选线、筑路和运维过程中必将涉及风沙问题,公路风沙危害防治至关重要^[46-49]。公路沙害时空分布和危害程度受控于沿途路段下垫面性质、沙源多寡和区域风况等外部环境^[50-52]。在公路选线初期,针对特殊地表、复杂地形和沙害分布集中且严重路段,根据区域风况与沙源分布,可适当地通过调控线路局部走向或者改变路基形式来减弱或规避沙害。风动力环境多采用野外实测或多年气象资料,通过起沙风玫瑰、输沙势和最大可能输沙量等参数表征风沙活动强度的时空变化特征。

表1 中国部分沙漠公路信息统计
Table 1 Base information of highways in sandy region

公路名称	途径/毗邻沙漠	里程/km	公路等级	通车时间
轮南-民丰公路	塔克拉玛干沙漠	522	二级	1995年
阿拉尔-和田公路	塔克拉玛干沙漠	424	二级	2008年
阿拉尔-塔中公路	塔克拉玛干沙漠	136	二级	2019年
尉犁-且末公路	塔克拉玛干沙漠	334	二级	2022年
京新高速公路	乌兰布和沙漠、腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠	2 800	高速	2021年
榆林-靖边公路	毛乌素沙地	116	高速	2003年
锡乌公路	库布齐沙漠	115	三级	1998年
迎闫公路	腾格里沙漠	40	一级	2014年
通额穿沙公路	腾格里沙漠	208	二级	2016年
石河子-北屯公路	古尔班通古特沙漠	251	高速	在建

沙区公路风沙危害类型与风动力环境特征：
①通过地质勘测和实地调查，阐明了公路沿线沙害类型、分布区段和危害程度等，分析了公路沙害成因，揭示了公路沿线地表物质组成与潜在输沙量之间的关系，确定了沙害防治原则^[53-54]；②基于公路沿线气象资料和风沙观测数据，阐明了公路两侧风沙运动规律，制定了公路沙害防治区段和治理措施，为沙漠公路运营和后期养护提供科学依据^[55-58]；③通过公路沿线系统采样和土壤理化性质测定，揭示了公路两侧沉积物理化特征和空间分布规律，尤其针对一些特殊环境和复杂地表，利用元素示踪、端元分析和复合指纹等方法，定量分析了公路沿线沙物质来源及其贡献率，为公路风沙防护措施的精准确选择和合理布局提供了有力支撑^[59-61]；④利用遥感影像和生态因子的实测数据，分析了公路沿线风沙灾害发育的环境容量，包括沙丘类型、植被条件、土壤水分和下垫面特征等，为评估和预测公路沿线风沙危害动态演变和发展趋势提供基础资料^[62-65]；⑤从降雨、地形、风况和温、湿度等环境参数入手，研判了沙区公路风沙危害态势及其与环境要素之间的关系，制定了公路风沙危害的防治措施和技术方案，提出了综合防护体系的结构组成，并对其防护效益进行了评价，为沙区公路防风固沙林的营造提供科学依据及实践经验^[66-69]。

公路沙害形成机理：基于风洞模拟实验、计算流体动力学(CFD, Computational Fluid Dynamics)和数学模型等，取得了如下成果。①通过制作不同结构形式的路基模型，分析了路基两侧流场结构、风速廓线和风动力环境参数的递变规律；路基附近

流场主要受路基高度、宽度以及与风向夹角的影响，在相同风速条件下，坡角越大，路基两侧积沙范围越大，导致防护宽度和距离相应地增加；在公路两侧沙源丰富地段，公路边坡的坡角应小于40°，从微观上揭示沙区公路风沙危害的形成机理和防治原则^[70-71]；选择路堑和路堤两种典型路基断面，通过野外实测和数学建模，对不同形式路基沙害程度进行了对比分析，厘定了影响路基沙害的主要参数并对其进行了优化^[72-73]。②基于粒子图像技术(PIV, Particle Image Velocimetry)和空气动力学参数的测试设备，开展公路沙害形成机理的数值模拟和模型研究^[74]。利用欧拉流体模型、PIV和CFD数值模拟技术，模拟特定工况环境下路基附近风沙运移过程以及公路两侧风沙流场和典型路基断面气流速度廓线分布特征，通过模型验证、筛选和优化设计，为精确揭示沙区公路沿线复杂断面沙害形成机理奠定了良好的基础^[75-77]。

3 沙区公路风沙防治措施、结构配置与效益评价

风沙流在公路沿线运移过程中，由于地形、风速以及障碍物等突变，发生遇阻堆积或风沙沉积，产生片状或舌状积沙，导致路面覆沙，甚至沙丘入侵迫使公路改线，直接影响道路通行和行车安全。针对公路沿线沙害特点、地域环境和风沙防治的切实需求，在沙区公路风沙防治领域取得成果。

开展了公路沙害防治理论与工程技术措施研究，根据沙害类型和空间分布特征，提出了公路沙

害防治的技术措施。采用固、阻、输、导模式进行工程机械防沙,在防治初期取得了一定成效^[78-80]。以机械措施为主,在公路迎风侧设置阻沙栅栏切断或阻截外围沙源,有效防护距离可达栅栏高度的18倍以上^[81]。在公路两侧扎设草方格沙障稳定沙面,防止就地起沙,抑制或削弱风沙危害,增加表层细沙物质和有机质含量,促进生物结皮的发育,形成有利于沙生植物生长的环境^[82]。在公路走向和主害风向大角度相交路段,为防治沙丘前移和风沙流侵袭埋压公路,采用机械固沙措施和生物措施相结合的综合防护体系,确保公路畅通^[83]。对公路沿线部分由于防沙措施设置部位不当或措施选择不合理,引发的沙埋、倒伏、甚至失效等案例进行了剖析,并有针对性地提出改进的技术要点和优化方案,为后续防护体系的合理配置和科学布局提供支撑^[84]。

基于沙区公路不同地域气候环境,充分利用局地地形、降雨、土壤类型和水分等条件,开展了生物和化学防沙措施试验,为沙区公路防护体系的建立奠定了基础,防护效益更加稳定持久^[85-86]。初步分析了化学固沙剂在公路沿线沙害防治中的适宜性和可行性,指出温度、风速和光照等气候因素的影响,强调与机械防沙和生物防沙措施相结合^[87]。根据公路沿线沙害特点及其动态演变趋势,加强风沙综合防护体系组成与结构配置研究,凝练出典型路域风沙防护体系模式以及可供沙区公路全线推广的范式。针对特定风沙防护体系,沿公路两侧设置风沙监测断面,利用野外定位监测、三维激光扫描以及无人机航测技术,评价公路沿线风沙防护体系的防护效益^[88-91]。

公路沿线风沙防治新工艺、新技术以及防护体系优化组合,早期在公路风沙防治中多以麦草、芦

苇、棉秆或树枝等机械沙障为主。随着对公路沿线风沙危害机理与沙害特点的深入研究,基于孔隙度、高度、防护间距等工程参数,选择适当的防沙措施并进行优化组合^[92]。研发了替代性防沙材料,并对相关工艺进行了改进和提升,延长了防护体系的防护年限,尼龙网、植物纤维网和复合化学材料等成功应用于公路风沙防治中^[93]。沙区抗逆植物种筛选培育、节水技术以及微生物材料在风沙防治中日益成熟,公路风沙防护体系由单一的机械防护为主过渡到以生物、机械和化学相结合的综合防护模式,相关装配化防沙材料和智能化防沙工艺也陆续涌现^[94-96]。以上工艺和技术主要侧重降低风沙防治成本、提高防护效益和延长防护年限,为实现沙区公路风沙防治提质增效储备了基础理论与技术。

4 中国沙区公路代表性风沙防治模式

4.1 塔里木沙漠公路风沙防治模式

为了开发塔里木盆地油气资源和优化南疆地区的交通网络体系,1995年在塔克拉玛干沙漠中部腹地成功建成世界上最长的流动沙区公路,公路两侧风沙防治技术与模式成为沙区公路风沙防治的典范^[55]。在公路防沙治沙过程中遵循因害设防、因地制宜的原则,运用阻、固、输、导的方法设置防护体系。在公路建设的同时设置了宽70—300 m的机械防沙体系,确保了沙漠公路的顺利修建和早期运营^[11,18]。风沙防护体系自公路路基向两侧依次为(图2):①公路边坡防护带,用0.5 m×1.0 m的草方格固定;②沙基防火平台,宽度为2.0 m;③流沙固沙带,采用1.0 m×1.0 m草方格沙障,出露高度18—20 cm,迎风侧宽70—110 m,背风侧宽30—70 m;④空留积沙带,宽度10—15 m;⑤阻沙带,位于防护

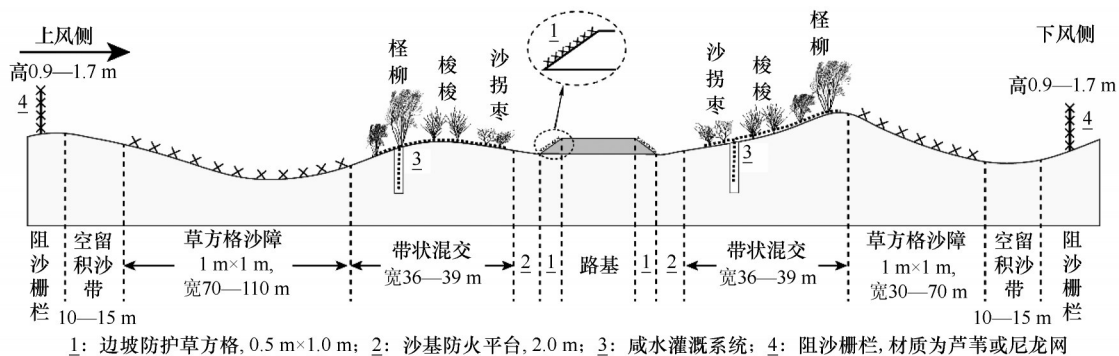


图2 塔里木沙漠公路风沙防护体系结构组成

Fig.2 Structure and configuration of sand control system along the Tarim Highway

体系最外侧,平行于公路布置芦苇或尼龙网阻沙栅栏,根据流动沙丘的地形起伏、区域风况以及与公路走向,设置高度0.9—1.7 m、疏透度34%—64%的阻沙栅栏^[9,97]。

在塔里木沙漠公路运营初期,机械防沙体系发挥很好的防护效果。但由于沙漠腹地风沙活动非常强烈,随防沙材料的老化,防护效益逐年下降,甚至引发沙埋公路。为了确保塔里木沙漠公路的畅通并使其沿线生态环境得以全面改善,建立沙漠公路生物防护体系势在必行^[98]。在沙漠腹地建立试验基地,开展植物引种、滴灌技术和土壤改良等方面的试验研究,筛选出了40种耐盐、耐旱抗逆性沙生植物,最终确定沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、柽柳(*Tamarix chinensis*)和梭梭(*Haloxylon ammo-*

dendron)3种优良灌木作为公路沿线防护林生态工程建设的主要树种^[99-101]。根据沙丘地貌形态、地形条件、风况和地下水环境等,构建了3种防护林体系结构模式。其中,高大沙丘区以沙拐枣和梭梭为主;垄间以柽柳为主,并且在地下水位浅的路段选用刚毛柽柳(*Tamarix hispida*)和长穗柽柳(*Tamarix elongate*)等耐盐能力强的柽柳种^[102]。研发了咸水灌溉技术、形成了沙漠公路防沙和绿色走廊建设的体系,建成了436 km的沙漠公路防护林生态工程,公路两侧林带总宽度72—78 m^[103-104](图3)。塔里木沙漠公路防护林生态工程防沙固沙效益显著,绿色长廊穿越塔克拉玛干沙漠,先后获中国十大科技进展新闻、国家十大环境友好工程和国家科学技术进步二等奖。

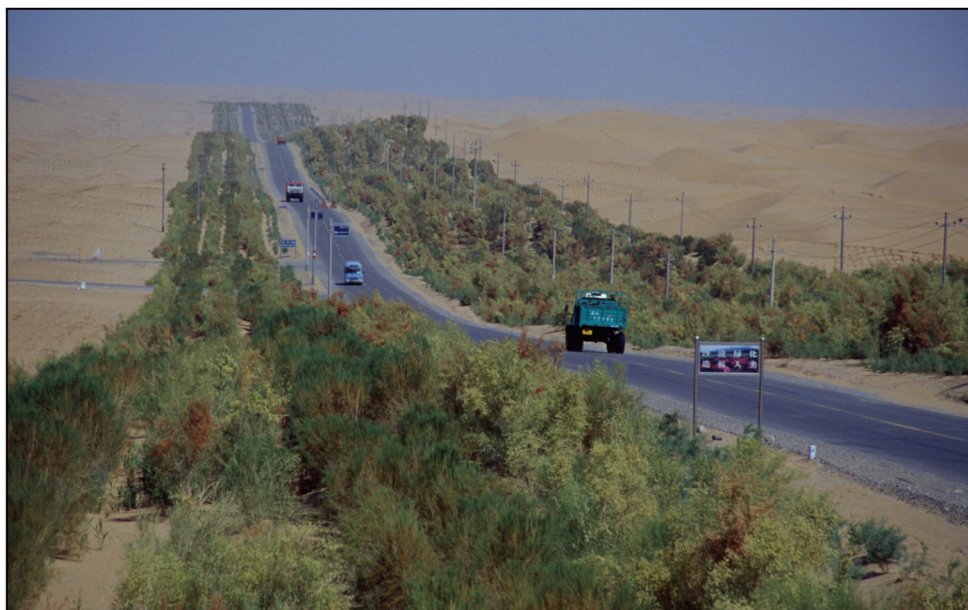


图3 塔里木沙漠公路防护林生态工程

Fig.3 Shelter-forest project along the Tarim Highway

4.2 策达公路风沙防治模式

策达公路是连接内蒙古额济纳旗达来呼布镇与策克口岸及蒙古国的交通运输干线,通车运营对推进中蒙贸易协调发展及策克口岸建设,加强民族团结,促进经济社会发展和维护边疆稳定具有重要意义。策达公路途径居延海,沿线多为干湖盆、戈壁、剥蚀丘陵和灌丛沙堆等,风力强劲、沙害类型多样,成因复杂。公路沿线以NW和SE为盛行风向,与公路走向基本垂直,尤其是每年4—5月,沙害异常严重。公路上风向地形开阔,沙源富集,导致风沙防治难度大,路面大量积沙,往往中断交通

或引发行车事故,对口岸建设和商贸发展负面影响很大。

基于公路沿线风沙活动特征及沙害空间分布,考虑高等级公路建设标准以及公路中间隔离设施的影响,采取远阻、中固、近疏导的防治思路和模式,沿公路路基至外围依次设置固沙方格、高立式大网格和前沿阻沙栅栏(图4)。阻沙栅栏设置于防护带的最外缘,其作用是阻截前沿沙源和降低风速;高立式大网格设置在阻沙栅栏和固沙网格之间,是一种兼阻沙、固沙功能为一体的高效防沙措施,防沙功效持久;固沙方格设置在公路路基两侧,

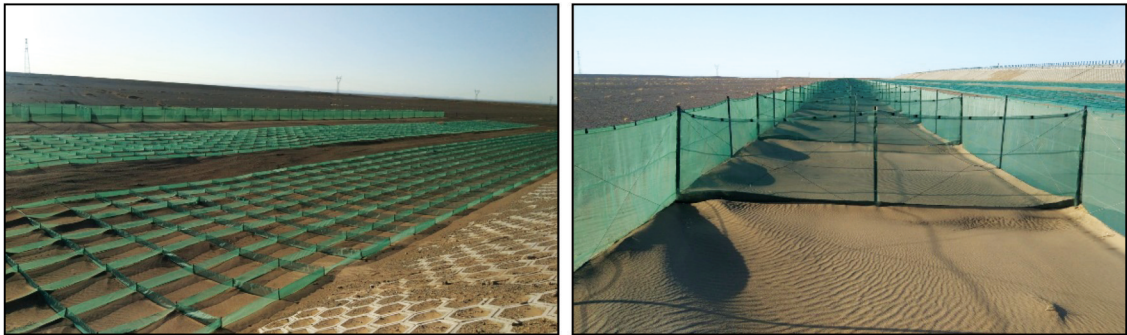


图4 策达公路沿线风沙防治措施

Fig.4 Sand control measures along the Ceke-Dalaihubu Highway

出露高度 20—30 cm, 主要防止就地起沙。策达公路防护体系建成后路面积沙量显著降低, 风沙防护效益达 90% 以上, 保障了公路的安全运营。

4.3 乌玛公路风沙防治模式

乌玛公路从内蒙古乌海至青海玛沁, 在途经宁夏中卫时有 21 km 穿越腾格里沙漠腹地。该路段线路两侧格状沙丘和新月形沙丘链分布密集, 降水稀少, 年均风沙天气多达 200 d, 风沙危害严重。根据腾格里沙漠腹地风沙活动规律, 遵循工程防护为先

导、植物防护为核心和绿色低碳的设计理念, 兼顾生态防护与景观打造的双重功能, 提出了阻沙先行、固沙为主、固阻结合的公路风沙防治模式, 最终构建生物措施替代工程措施的绿色生态廊道综合防护体系。为了达到公路外围阻沙, 公路两侧固沙并兼顾生态景观功效, 在公路外围至路基依次设置了高立式阻沙栅栏、高立式大网格沙障、防风固沙林带、生态景观林带、常绿灌木林带和砾石输沙带“六带一体”防护体系, 迎风侧防护体系宽 200 m, 背风侧宽 112 m (图 5)。

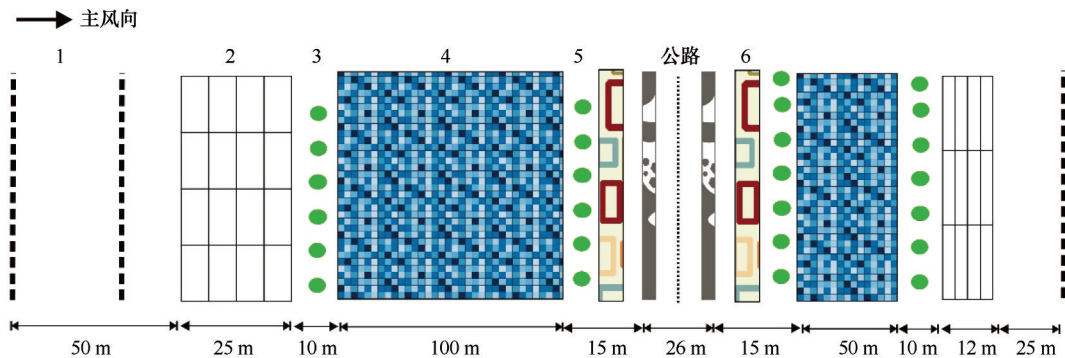


图5 乌玛公路沿线风沙防护体系结构组成

Fig.5 Structure and configuration of sand control system along the Wuhai-Maqen Highway

根据公路沿线风沙活动和自然环境特征, 提出雨养型、低密度生态景观林带的建植模式, 筛选出柠条 (*Caragana korshinskii*)、花棒 (*Corethroedendron scoparium*)、杨柴 (*Hedysarum mongolicum*)、沙拐枣和油蒿 (*Artemisia ordosica*) 等优势植物种, 兼顾风沙防治、生态防护和绿色廊道建设的多重功效 (图 6)。乌玛公路风沙防护体系融合绿色低碳和生态防护理念, 拓展了中国沙区公路风沙防治的内涵, 对于推进区域生态文明建设和山水林田湖草沙综合治理发挥着重要作用, 为沙区高等级公路的风沙

防治和生态防护提供了可供借鉴的范式。

5 中国沙区公路风沙防治研究趋势

沙区公路风沙危害及防治不仅与公路走向和路基断面形式等工程参数有关, 更多地受局地风况、沙源类型和地形条件等诸多外部环境的影响。在沙区公路风沙危害防治中, 单一措施顾此失彼, 很难起到持续稳定的防护效果, 需要针对公路沿线沙害特点, 科学规划、合理布局 and 综合防治。综上所述, 沙区公路风沙研究在诸多领域成果丰硕, 但



图6 乌玛公路沿线防风固沙林

Fig.6 Wind and sand break forest along the Wuhai-Maqen Highway

以下方面仍需深入研究:①系统研究沙区公路风场特征以及风沙动力环境的时空变化,强化公路风沙过程与致灾机理研究。通过工程防沙措施多相流场的风洞实验与数值模拟,阐明沙区公路风沙致灾关键过程与灾变特征,研究公路沿线不同地表风蚀产沙机理、风沙输移过程和沉积规律。②根据公路沿线地域差异和风沙活动时空分布特征,辨识复杂地形和特殊地表公路沙害的致灾因子,并进行风险评估。分析沙区公路防沙措施的合理结构与功能,根据沙源分布、地形条件和风况差异,提出沙害防治具体措施和公路稳定性适应对策,开展复杂地形路段风沙防治措施选择、结构优化和效益评价。③随着沙区交通骨架体系日臻完善和地域工程容量的限制,沙区公路与铁路往往相伴而行,尤其在复杂地形和特殊环境下,由于受工程开发规模、环境条件和工程容量等限制,公路、铁路毗邻交错,而这些复杂地形和脆弱环境地段又是沙害频发或集中路段。在多条道路交错并行区段,各线路工程体之间势必会对区域风沙流场产生影响,造成公路两侧风沙迁移的空间分异,易引发二次沙害,势必增加了公路风沙防治的难度。④风沙同步数据动态监测与防护体系的科学管护。沙区公路建成后,针对不同路段的沙害情况如何进行科学的养护是保障沙漠公路畅通无阻的重要举措。沙区公路途经路段自然环境脆弱、地形复杂,地表类型大多为广袤的戈壁、流沙或沙质地表,植被条件差、沿线风沙活动强烈。对公路两侧风沙防护体系的维护以及植

物的后期管护和补植更新等需要加强,特别是公路沿线生态治理以及公路绿化体系的运维面临很大的挑战。

近年来,京新高速公路(北京至新疆)、榆靖高速公路(陕西榆林至靖边)和乌玛高速公路(内蒙古乌海至青海玛沁)等部分区段穿越或毗邻沙漠环境,均不同程度遭受风沙威胁。基于中国沙区路网体系日益完善和高速公路快速发展态势,迫切需要有快速、高标准的风沙防治工程技术保障高等级公路的安全运营,以加强高速公路风沙防治工程技术基础和提升风沙灾害防治能力。①沙区高等级公路风沙防治措施需要进一步完善和科学布局。按照高速公路的设计标准,行车速度要达到 $100\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,对风沙防治、生态治理和行车安全有更高的要求,路面不能有任何覆沙,以免车辆侧滑或倾覆。这与沙区普通公路的建设标准存在很大差异,增加了公路沿线风沙防治的难度。尤其是穿越沙漠腹地的高速公路,沿线沙丘类型复杂、各种沙丘星罗棋布,针对不同沙丘地貌、需要考虑地形因素、风向、风速、输沙量等诸多参数,才能提出科学合理的防护措施。因此,对高速公路两侧风沙防护体系的布局 and 合理配置提出了更高的要求。②将沙区公路工程施工、生态防护、运营维护和绿色景观等有机链接起来,创新公路发展模式和建立绿色交通运输体系,形成集风沙防治、树种筛选、林带配置、景观规划等为一体的绿色公路和生态廊道理念,助推区域生态、经济和社会协同发展,是沙区高等级公路风

沙防治与健康运营的发展趋势。

致谢:感谢王海峰博士提供塔里木沙漠公路照片!

参考文献:

- [1] 王涛. 中国防沙治沙实践与沙漠科学发展的70年: I. 初创篇[J]. 中国沙漠, 2022, 42(1): 1-4.
- [2] 朱震达, 赵兴梁, 凌裕泉. 治沙工程学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998: 1-3.
- [3] Kim J, Dorjsuren M, Choi Y, et al. Reconstructed aeolian surface erosion in southern Mongolia by multi-temporal insar phase coherence analyses[J]. *Frontiers Earth Science*, 2020, 8: 531104.
- [4] 王涛. 中国北方沙漠与沙漠化图集[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [5] Raffaele L, Bruno L. Windblown sand mitigation along railway megaprojects: a comparative study[J]. *Structural Engineering International*, 2020, 30(3): 355-364.
- [6] Jabbar A Z. Investigation on railway track maintenance in sandy-dry areas [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2012, 8(2): 135-140.
- [7] 李楠. 戈壁沙漠地区高速公路线路设计[J]. *道路桥梁*, 2021, 48(12): 137-138.
- [8] Xie S B, Qu J J, Han Q J, et al. Experimental definition and its significance on the minimum safe distance of blown sand between the proposed Qinghai-Tibet Expressway and the existing Qinghai-Tibet Railway[J]. *Science China Technological Sciences*, 2020, 63(12): 2664-2676.
- [9] 王振清. 中国公路防沙治沙[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2000.
- [10] Mao X S, Wang F C, Wang B G. Nationwide desert highway assessment: a case study in China[J]. *International Journal Environmental Research and Public Health*, 2011, 8: 2734-2746.
- [11] 雷加强, 王雪芹, 王德. 塔里木沙漠公路风沙危害形成研究[J]. *干旱区研究*, 2003, 20(1): 1-6.
- [12] Li C J, Wang Y D, Lei J Q, et al. Damage by wind-blown sand and its control measures along the Taklimakan Desert Highway in China[J]. *Journal of Arid Land*, 2021, 13(1): 98-106.
- [13] Lv P, Narteaub C, Dong Z B, et al. Direct validation of dune instability theory[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118(17): e2024105118.
- [14] Tan L H, Qu J J, Wang T, et al. Field observation evidence for kink points in the vertical kinetic energy flux profiles of wind-blown sand over gobi and its significance[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48: e2020GL091224.
- [15] Wang T, Qu J J, Niu Q H. Comparative study of the shelter efficacy of straw checkerboard barriers and rocky checkerboard barriers in a wind tunnel [J]. *Aeolian Research*, 2020, 43: 100575.
- [16] Bruno L, Horvat M, Raffaele L. Windblown sand along railway infrastructures: a review of challenges and mitigation measures [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 177: 340-365.
- [17] Ewing R C, Hayes A G, Lucas A. Sand dune patterns on Titan controlled by long-term climate cycles[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8: 5-19.
- [18] Lei J Q, Li S Y, Fan D D, et al. Classification and regionalization of the forming environment of windblown sand disasters along the Tarim Desert Highway[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(2): 1-7.
- [19] Jin A F, Maimtimin G, Yang Z C. Numerical simulation of sand cover phenomenon on the desert highway using SPH method [J]. *Advanced Materials Research*, 2008, 33: 1075-1082.
- [20] 刘畅. G111线公路内蒙古科右中旗段沙害防治技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [21] Gumaay Y T, Haffar I, Al-Afii M A. Financial appraisal of date-frond mat fence systems for wind erosion control and sand dune stabilization in the arid region of the United Arab Emirates [J]. *Journal of Arid Environments*, 1998, 39: 549-557.
- [22] Misak R F, Draz M Y. Sand drift control of selected coastal and desert dunes in Egypt: case studies[J]. *Journal of Arid Environments*, 1997, 35: 17-28.
- [23] Kidron G J, Barzilay E, Sachs E. Microclimate control upon sand microbiotic crusts, western Negev Desert, Israel [J]. *Geomorphology*, 2000, 36: 1-18.
- [24] 刘嫫心. 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): 1-11.
- [25] 凌裕泉, 屈建军, 樊锦诗, 等. 莫高窟顶防沙工程的效益分析 [J]. *中国沙漠*, 1996, 16(1): 13-18.
- [26] Xie S B, Qu J J, Lai Y M, et al. Formation mechanism and suitable controlling pattern of sand hazards at Honglianghe River section of Qinghai-Tibet Railway[J]. *Natural Hazards*, 2015, 76(2): 855-871.
- [27] 屈建军, 董光荣, 文子祥, 等. 敦煌莫高窟的风沙危害与防治问题[J]. *中国科学D辑: 地球科学*, 1997, 27(1): 82-88.
- [28] Zhang C L, Zou X Y, Cheng H, et al. Engineering measures to control windblown sand in Shiquanhe Town, Tibet [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007, 95: 53-70.
- [29] Liu B L, Zhang W M, Qu J J, et al. Controlling windblown sand problems by an artificial gravel surface: a case study over the gobi surface of the Mogao Grottoes [J]. *Geomorphology*, 2011, 134: 461-469.
- [30] 董治宝. 中国风沙物理研究五十年(I) [J]. *中国沙漠*, 2005, 25(3): 293-305.
- [31] 吴正, 彭世古, 洪占山, 等. 沙漠地区公路工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 1981.
- [32] Dong Z B, Chen G T, He X D, et al. Controlling blown sand along the highway crossing the Taklimakan Desert [J]. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57: 329-344.
- [33] 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): 667-674.

- [34] 徐新文,胡玉坤,潘伯荣.塔里木沙漠公路防沙体系的防护效益[J].干旱区研究,1998,15(1):21-26.
- [35] Lei J Q, Wang X Q, Wang D, et al. The blown sand disaster to the Tarim Desert Highway in Xinjiang, China [J]. Science In China, 2002, 45: 165-173.
- [36] 金昌宁.塔克拉玛干沙漠流动沙丘分布区公路修筑及沙害防治研究[D].兰州:兰州大学,2006.
- [37] 韩致文,王涛,孙庆伟,等.塔克拉玛干沙漠公路风沙危害与防治[J].地理学报,2003,58(2):201-208.
- [38] 左合君,董智,魏江生,等.沙漠地区高速公路防沙体系效益分析[J].水土保持研究,2005,12(6):222-225.
- [39] Cheng J J, Lei J Q, Li S Y, et al. Disturbance of the inclined inserting-type sand fence to wind-sand flow fields and its sand control characteristics[J]. Aeolian Research, 2016, 21: 139-150.
- [40] 屈建军,肖建华,韩庆杰,等.青藏铁路高寒风沙环境特征与防治技术[J].中国科学:技术科学,2021,51(9):1011-1024.
- [41] 邓友生,彭程谱,刘俊聪,等.沙漠公路灾害防治方法及其工程应用[J].公路,2021,6:345-353.
- [42] 彭文顺.京新高速公路内蒙沙漠段综合防沙体系设计[J].公路,2021,3:314-317.
- [43] 韩致文,陈渭南,陈广庭,等.塔里木沙漠公路试验段防沙工程效益分析[J].中国沙漠,1993,13(4):44-51.
- [44] 董浩军.穿沙公路路基风沙流场特征的风洞试验研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2021:1-3.
- [45] 赵性存.包兰铁路中卫至甘塘段沙漠路基的修筑[M]//流沙治理研究(二).银川:宁夏人民出版社,1988:1-7.
- [46] Shi L, Wang D Y, Li K C. Windblown sand characteristics and hazard control measures for the Lanzhou-Wulumuqi high-speed railway[J]. Natural Hazards, 2020, 104: 353-374.
- [47] 王雪芹,雷加强,黄强.塔里木沙漠公路风沙危害分异规律的研究[J].中国沙漠,2000,20(4):438-442.
- [48] Dalziel E, Nicholson A. Risk and impact of natural hazards on a road network [J]. Journal of Transportation Engineering, 2001, 127: 159-166.
- [49] 杨发相,穆桂金,雷加强,等.新疆地貌及其过程对公路交通建设的影响[J].干旱区地理,2004,27(4):525-529.
- [50] 尤全刚,薛嫻,王涛,等.戈壁地区风沙活动对公路影响的初步研究[J].中国沙漠,2011,31(1):9-15.
- [51] Cheng H, He J J, Xu X G, et al. Blown sand motion within the sand-control system in the southern section of the Taklimakan Desert Highway[J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(5): 599-611.
- [52] 汪言在,魏殿生,伍永秋,等.塔克拉玛干沙漠沙垄区公路防护带内风场特征研究[J].中国沙漠,2012,32(5):1216-1223.
- [53] 李生宇,雷加强,徐新文,等.塔里木沙漠公路对近地表风沙运动过程的影响[J].干旱区研究,2007,24(2):247-254.
- [54] 胡正超,吐尔逊·哈斯木,王慧玲,等.台特玛湖干涸湖盆区S214省道风沙灾害探讨[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2018,39(6):48-60.
- [55] 李生宇,王德,雷加强.塔克拉玛干沙漠腹地路面沙害的空间分布研究[J].干旱区地理,2005,28(1):93-97.
- [56] 马韞娟,马志福,马淑红,等.阿拉尔-和田沙漠公路风沙运动若干规律监测研究[J].干旱区地理,2014,37(1):97-105.
- [57] 孙贵杰.沙漠油田公路养护调查研究[J].中外公路,2017,37(2):307-309.
- [58] Li S Y, Lei J Q, Xu X W, et al. Topographical changes of ground surface affected by the shelterbelt along the Tarim Desert Highway[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53 (Supp.2): 8-21.
- [59] 王世杰,李生宇,徐新文,等.阿拉尔-和田沙漠公路机械防沙体系内风沙沉积的粒度特征[J].干旱区资源与环境,2014,28(6):130-135.
- [60] 俞祥祥,李生宇,马学喜,等.沙漠公路防护林影响下近地表风沙流粒度特征的空间分异[J].水土保持研究,2017,24(1) 334-341.
- [61] 沈芳宇,王永东,李生宇,等.塔里木沙漠公路防护林土壤团聚体特征[J].干旱区研究,2015,32(5):910-917.
- [62] Jordan T E, Lohman R B, Tapia L. Surface materials and landforms as controls on InSAR permanent and transient responses to precipitation events in a hyperarid desert, Chile [J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 237: 11544.
- [63] Zhang J G, Xu X W, Zhao Y, et al. Effect of shifting sand burial on soil evaporation and moisture-salt distribution in a hyper-arid desert [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75: 1417.
- [64] 王雪芹,雷加强.塔里木沙漠公路风沙危害评估指标体系[J].干旱区地理,1999,22(1):81-86.
- [65] Zhou H W, Li S Y, Sun S G, et al. Effects of natural covers on soil evaporation of the shelterbelt along the Tarim Desert Highway [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53 (Supp.2): 137-145.
- [66] 俞祥祥,李生宇,王海峰,等.沙漠公路防护林不同林带位置的风沙结构[J].干旱区研究,2017,34(3):707-715.
- [67] Wang Y D, Xu X W, Lei J Q, et al. The dynamics variation of soil moisture of shelterbelts along the Tarim Desert Highway [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53 (Supp.2): 102-108.
- [68] 赵晓彬,党兵,符亚儒,等.半干旱区沙地高速公路防风固沙林营造技术及其效益研究[J].中国沙漠,2010,30(6):1247-1255.
- [69] 吴彦,马淑红,陈晓光,等.阿拉尔至和田沙漠公路防风阻沙效应参数分布特征[J].沙漠与绿洲气象,2008,2(4):12-17.
- [70] 鱼燕萍,肖建华,屈建军,等.不同坡角公路路基流场的风洞实验[J].中国沙漠,2018,38(3):464-472.
- [71] 尤全刚,薛嫻,王涛,等.戈壁地区公路防沙措施防沙效应的风洞试验[J].中国沙漠,2011,31(3):550-557.
- [72] 党兵,符亚儒,施智宝,等.基于缓解沙漠高速公路风沙危害的路基参数优化:以榆靖高速公路为例[J].中国沙漠,2007,27(6):946-954.
- [73] 杨三强,刘涛,郝培文.沙漠公路路堤输沙性能风洞试验[J].中国公路学报,2010,23(1):7-12.
- [74] Ablimit A, Geni M, Xu Z H, et al. Numerical study on aeolian sand ripples forming and moving process in desert highway [J]. Key Engineering Materials, 2011, 462/463: 1032-1037.
- [75] 谢虎雄,马发跃,武生智.风沙环境中公路风沙灾害的数值模拟[J].中国沙漠,2019,39(2):151-157.

- [76] 张兴鑫,张凯,史博源,等. 流动沙丘区公路路基风沙流场数值模拟及路面沙害形成机制[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1184-1191.
- [77] 李驰,高瑜,黄浩. 沙漠公路风蚀破坏规律的数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊): 642-647.
- [78] 武俊瑛,高永. 浑善达克沙地公路机械沙障防风固沙效益分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(12): 161-166.
- [79] 邹学勇,刘玉璋,张春来,等. 西藏八一镇-邛多江公路沙害成因与治理[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(6): 15-24.
- [80] 蔡东旭,李生宇,王海峰,等. 新疆S214公路台特玛湖干涸湖盆段风沙危害及防治[J]. 中国沙漠, 2020, 40(1): 1-11.
- [81] 王训明,陈广庭,韩致文,等. 塔里木沙漠公路沿线机械防沙体系效益分析[J]. 中国沙漠, 1999, 19(2): 120-127.
- [82] 李生宇,雷加强. 草方格沙障的生态恢复作用: 以古尔班通古特沙漠油田公路扰动带为例[J]. 干旱区研究, 2003, 20(1): 7-10.
- [83] 胡春元,杨茂,杨存量,等. 库布齐沙漠穿沙公路沙害综合防治技术[J]. 干旱区资源与环境, 2002, 16(3): 71-77.
- [84] 金昌宁,李志农,董治宝,等. 塔克拉玛干沙漠公路固沙措施存在问题研究[J]. 公路交通科技, 2007, 24(5): 1-5.
- [85] Huang Y, Wang Y D, Zhao Y. Spatiotemporal distribution of soil moisture and salinity in the Taklimakan Desert Highway Shelterbelt[J]. Water, 2015, 7: 4343-4361.
- [86] 裴志永,乔敬伟,秦伟,等. 穿沙公路沙柳防护带平茬恢复期辅助沙障设置模式优选[J]. 林业工程学报, 2019, 4(4): 127-134.
- [87] 韩致文,胡英娣,陈广庭,等. 化学工程固沙在塔里木沙漠公路沙害防治中的适宜性[J]. 环境科学, 2002, 21(5): 86-88.
- [88] Cui W, Li S Y, Li Z N, et al. Effects of windblown sand damage on desert highway guardrails[J]. Natural Hazards, 2020, 103: 283-298.
- [89] 左合君,董智,魏江生,等. 沙漠地区高速公路防沙体系效益分析[J]. 水土保持研究, 2005, 12(6): 222-225.
- [90] 马淑红,刘涛,薛洁,等. 沙漠地区公路路基横断面阻沙性能研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2008, 2(1): 5-11.
- [91] 张广,武俊瑛,惠彦君,等. 浑善达克沙地公路综合防护技术及其效益分析[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(5): 189-196.
- [92] Cronelis W M, Gabriels D. Optimal windbreak design for wind-erosion control[J]. Journal of Arid Environments, 2005, 61: 315-332.
- [93] 张帅,丁国栋,高光磊,等. 风沙区公路防积沙新型防护栏研究[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(2): 90-97.
- [94] 周智彬,徐新文,雷加强,等. 塔里木沙漠公路防护林生态稳定性研究[J]. 科学通报, 2006, 51(增刊1): 126-132.
- [95] 张建国,徐新文,雷加强,等. 咸水滴灌对沙漠公路防护林土壤环境的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 34-39.
- [96] He J Y, Liu G H. Study on stability of highway subgrade slope in desert region[J]. Advanced Materials Research, 2013, 639/640: 974-977.
- [97] 张建国,徐新文,雷加强,等. 塔里木沙漠公路风沙危害与防护体系研究进展[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(2): 50-54.
- [98] 李丙文,徐新文,雷加强,等. 塔里木沙漠公路防护林生态工程立地类型划分[J]. 科学通报, 2008, 53(增刊II): 25-32.
- [99] 李红忠,李生宇,雷加强,等. 塔克拉玛干沙漠不同矿化度水灌溉造林试验研究[J]. 干旱区地理, 2005, 28(3): 305-310.
- [100] 何兴东,高玉葆,段争虎,等. 塔里木沙漠公路植物固沙灌溉方式比较研究[J]. 地理科学, 2002, 22(2): 213-218.
- [101] 徐新文,徐海量,王艳玲,等. 盐胁迫对沙漠公路防护林主要固沙植物叶绿素含量的影响[J]. 科学通报, 2008, 53(增刊II): 96-99.
- [102] 相建民,李生宇,买光荣,等. 塔里木公路防护林生态工程营建与维护[J]. 水土保持通报, 2006, 26(5): 39-42.
- [103] 雷加强,李生宇,靳正忠,等. 塔里木沙漠公路防护林生态工程的综合生态环境效应[J]. 科学通报, 2008, 53(增刊II): 169-178.
- [104] 徐新文,李丙文,王小静. 塔克拉玛干沙漠腹地咸水灌溉技术研究[J]. 科学通报, 2006, 51(增刊I): 133-136.

Progress of research on wind-blown sand prevention and control along highways in China

Zhang Kecun¹, An Zhishan¹, He Mingzhu¹, Xiao Jianhua¹, Zhang Hongxue^{1,2}

(1. Dunhuang Gobi and Desert Ecological and Environmental Research Station / Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This study focuses on wind-blown sand problems along highways, reviews the development history, current situation and characteristics of highways in sand region, and systematically summarizes wind-blown sand damage and achievements of sand control in China's sandy highways, according to wind-dynamical environments along highways, sand damage characteristics, disaster-causing mechanisms, wind-blown sand prevention and control measures along highway, structural composition and benefits of sand-control system. Considering that the drifting sands environments on both sides of the highway, gobi surface and the regional differences in natural environments, while taking into account the sand controlling, green corridor construction and landscape efficacy, and ensuring the continuous stability and functional perfection of road protection systems in sandy areas, three representative sand-control mode have been systematically sorted out to ensure the continued stability and functional perfection of the protection system for highways in sandy areas. Based on the practical needs of the increasing improvement of highway network skeleton system and the challenges of safe operation of highways in sandy areas, the focus is on strengthening the engineering and technical foundation of highway wind-blown sand control and improving the capacity of blown sand hazards control, and condensing and proposing the future research focus and development trend of sandy roads.

Key words: highways in sand region; wind-blown sand damage; sand-control measures; wind-blown sand control system