青藏铁路高寒风沙环境特征与防治技术

屈建军^{1,2}, 肖建华^{1*}, 韩庆杰¹, 张克存¹, 谢胜波¹, 姚正毅¹, 庞营军³, 王进昌⁴

1. 中国科学院西北生态环境资源研究院沙漠与沙漠化重点实验室/敦煌戈壁荒漠研究站, 兰州 730000;

2. 宁夏大学西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021;

3. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091;

4. 中国铁路青藏集团有限公司, 西宁 810006

* E-mail: xiaojh@lzb.ac.cn

收稿日期: 2020-04-10; 接受日期: 2021-03-31; 网络版发表日期: 2021-09-02

国家自然科学基金重点项目(批准号: 40930741)资助

摘要 自青藏铁路格尔木-拉萨段(简称格拉段)修建伊始, 沙害问题就是危害铁路正常运营的一个不容忽视的问题, 而对于高寒风沙活动规律及其防治等科学问题亟待研究. 通过近年来持续对青藏铁路格拉段风沙环境及防沙工程的系统研究, 本文分析了青藏铁路格拉段风沙危害特征, 提出了防治思路与防护体系配置, 进而分析了工程实施后的防护效益. 通过对青藏铁路风沙灾害特征及其防治的系统总结, 填补了高寒区风沙危害防治研究的盲区, 更为青藏高原及类似地区铁路工程的风沙危害防治提供科学依据和技术支撑.

关键词 风沙危害, 高寒环境, 防治措施, 青藏铁路

1 引言

青藏铁路格尔木-拉萨段(简称格拉段)由北向南跨越著名的“世界屋脊”——青藏高原腹地(图1), 全长1142 km, 其中, 海拔超过4000 m路段为960 km(图2), 多年冻土路段为550 km. 沿线的戈壁、季节性河床、湖滨及退化草场为风沙活动提供了丰富的沙物质来源, 强大的风力和稀疏低矮的植被, 也为风沙活动提供了充足的动力和地表条件^[1-3]. 特别是位于生态环境脆弱区的青藏高原对全球气候变化的响应极为明显, 20世纪50年代以来, 其变暖趋势超过北半球及同纬度地区, 在气候变化和工程影响下^[4,5], 多年冻土热状态发

生改变, 使得多年冻土退化加剧^[6]. 因此, 青藏高原沙漠化土地分布广泛^[7], 类型众多, 加之, 在该区由于铁路建设的严重干扰, 改变了风沙的临界起动速度与原有的输移路径, 致使风沙危害具有突发性强、速度快、破坏性大等特点^[8]. 由于地表强烈的风沙活动及铁路修建后对输沙通道的影响, 铁路沙害正呈现出迅速增长趋势^[9]. 据中国铁路青藏集团有限公司统计, 青藏铁路格拉段严重沙害地段从开通运营初期的24处(累计长度13.97 km)发展到目前的57处(累计长度达78.8 km). 风沙危害成为继冻土问题后青藏铁路面临的又一重大难题, 而且比预想的要严重^[10].

为了防治沙害, 在青藏铁路格拉段建设初期, 工程

引用格式: 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. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 1011–1024

Qu J J, Xiao J H, Han Q J, et al. Characteristics and prevention and control technology of blown sand environment with high altitude and cold temperature on Qinghai-Tibet Railway (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 1011–1024, doi: 10.1360/SST-2020-0155

图 1 (网络版彩图)青藏铁路及其沙害分布示意图
Figure 1 (Color online) Distribution diagram of Qinghai-Tibet Railway and its sand damage.

图 2 青藏铁路纵断面示意图
Figure 2 Profile diagram of Qinghai-Tibet Railway.

人员借鉴低海拔地区防沙经验, 在沙害明显路段布设了阻沙及固沙措施, 但这些措施防沙效果都不理想, 大部分都遭积沙危害, 部分已经完全失去防沙功能. 这迫使我们重新考虑青藏铁路的沙害问题: 为什么在低海拔干旱、半干旱地区已经相当成功的防沙措施在青藏铁路会效果不佳? 高寒环境下风沙活动究竟有什么特殊规律? 对青藏铁路沙害防治应该采取什么思路和防

治模式? 目前, 国内海拔4000 m以上高寒环境下铁路风沙危害及防治没有现成的理论研究成果, 国外也未见相关报道, 更没有可借鉴的技术和经验. 为此, 近年来, 本研究团队对青藏铁路格拉段风沙环境及防沙工程进行了全面考察和系统观测研究, 填补了高寒区风沙危害防治理论研究的盲区, 更为青藏铁路及地区铁路风沙灾害的有效防治提供科学依据和技术支撑.

2 研究区风沙活动特征与风沙危害方式

根据2012年调查, 在全长1142 km的格拉段, 受到风沙灾害威胁的路段有269.7 km, 占全路段的23.62%, 其中严重沙害路段78.8 km, 主要集中在红梁河、秀水河-北麓河、沱沱河、扎加藏布、措那湖等路段; 轻度沙害路段主要集中在格尔木-西大滩、五道梁、通天河等路段. 风沙对铁路线路的危害特征表现为: (1) 风沙流在路基迎风侧和背风侧遇阻堆积; (2) 道床积沙尤其是冬季会形成板结; (3) 桥涵积沙严重, 直接危及行车安全. 由于低海拔区气压高、干旱、对降水敏感, 而高海拔区气压低、冻融交替、对温度敏感, 二者环境要素差异较大(图3)^[11], 因此, 风沙运动规律差异较大. 由于对高寒区风沙运动规律认识不清楚, 青藏铁路修通之初借鉴了低海拔地区铁路防沙措施, 结果发现防沙效果欠佳, 严重影响了路基安全, 导致列车停运时有发生(图4). 风沙活动特征主要表现为如下4个方面.

2.1 干旱少雨、旱风同季、海拔高、风速大

青藏高原旱风同季, 年降水量在250~300 mm

图3 高寒环境风沙运动的特殊性

Figure 3 Particularity of aeolian sand movement in cold plateau environment.

(图5), 集中在6~9月, 冬半年为旱季, 且河流处于枯水期, 大部分河床、湖岸变干、地表裸露, 疏松的广袤沙质地表及退化的荒漠草原, 都成为铁路沙害的沙源地^[12]. 尤其是线路大部分风沙路段海拔高度在4000 m以上, 处于西风带, 多偏西风. 沱沱河路段年大风日数约167.8 d a⁻¹, 最大定时风速为30.0 m s⁻¹, 瞬时风速达40.0 m s⁻¹; 措那湖路段最大风速为38.0 m s⁻¹, 年大风日数为148.8 d a⁻¹; 五道梁路段年大风日数135.5 d a⁻¹, 最大定时风速为31 m s⁻¹, 最大瞬时风速达40 m s⁻¹. 大

图4 (网络版彩图)青藏铁路格拉段沙害照片. (a) 2005年沱沱河路段道床积沙; (b) 2005年扎加藏布路段路基坡脚积沙; (c) 2006年扎加藏布路段路基边坡积沙; (d) 2006年措那湖路段桥梁西侧积沙

Figure 4 (Color online) Sand damage photos of Golmud-Lhasa section of Qinghai-Tibet Railway. (a) Sand accumulated in ballast bed of Tuotuohe section in 2005; (b) sand accumulated at subgrade slope toe of Za'gya Zangbo section in 2005; (c) sand accumulated at the subgrade slope of Za'gya Zangbo section in 2006; (d) sand accumulated on the west side of the bridge of Cuonahu section in 2006.

图5 (网络版彩图)青藏铁路格拉段多年平均降水量
Figure 5 (Color online) Perennial average precipitation in Golmud-Lhasa section of Qinghai-Tibet Railway.

风集中在冬春季(12~5月)占全年大风日数的63%, 3月有2/3以上日数为大风天。年平均风速 $3\sim 4\text{ m s}^{-1}$, 超过临界起沙风($\geq 5\text{ m s}^{-1}$)的日数180天以上(图6), 远大于低海拔(如宁夏沙坡头)地区, 从而为地表风蚀、风沙活动提供了动力条件(图7)。从输沙势玫瑰图可以看出, 青藏铁路格拉段沿线合成输沙风向以W风为主(图8)。

2.2 风水两相侵蚀营力时空交错叠加

青藏铁路沙害极严重区段主要集中在红梁河、沱沱河、秀水河-北麓河、措那湖等路段。调查发现, 该区域现代地表侵蚀外营力主要表现为风力侵蚀和水力侵蚀时空交错^[13]。夏秋季节, 降雨集中, 易产生严重的水力侵蚀, 河流搬运大量的泥沙沉积在湖岸与河道边滩、阶地及冲洪积扇上; 冬春季节, 干旱且多大风天气, 峡谷及干河谷成为风沙的天然通道, 由于河流峡谷大多为东-西走向, 与南-北走向的铁路近于垂直, 河谷穿越铁路成为天然风口和风沙通道, 致使路堤、桥

图6 青藏铁路格拉段多年平均年大风日数
Figure 6 Average gale days over the years in Golmud-Lhasa section of Qinghai-Tibet Railway.

梁破坏原来流场而成为阻挡风沙流的障碍物, 从而在线路及桥下极易造成风沙堆积^[14], 形成严重沙害(图4)。

2.3 地表冻融交替、抗风蚀能力差

青藏高原气候严酷, 生态脆弱, 地表沙物质丰富, 微小的扰动也会促使其生态系统产生强烈变化^[15]。而且, 在目前全球变暖的背景下, 青藏高原多年冻土融化趋势增强^[16], 导致地表土壤结构离散分解, 进一步加剧地表风蚀沙漠化过程^[17]。据地表风沙活动监测表明, 由于冻融交替作用^[18], 趋于稳定的戈壁地表每年风蚀量仍可达 $1.5 \times 10^5\text{ kg km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。

2.4 路基对风沙的扰动作用

由于青藏铁路(格拉段)大致呈南-北走向, 沙源主要源于铁路西侧, 主风向与铁路走向近似垂直, 路基的出现扰动了风沙的输移^[19]。根据风洞模拟实验结果, 路基明显改变近地表风沙流的流场, 在路基表面及两

图7 (网络版彩图)青藏铁路格拉段沱沱河路段风况
Figure 7 (Color online) Wind regime of Tuotuohe section in Golmud-Lhasa section of Qinghai-Tibet Railway.

侧依次形成明显的遇阻抬升区、集流加速区、减速沉降区和消散恢复区^[20]。同时,路基高度、坡度和走向对风沙也有明显影响,高度越高、坡角越大,路基两侧的风沙堆积范围越大^[21,22],线路走向与合成风向的夹角越大,所受风沙危害的程度越严重^[23,24]。

3 基于移动风洞的不同海拔风沙运动特征野外实验

观测实验使用中国科学院西北生态环境资源研究院敦煌戈壁荒漠研究站的野外移动风洞(图9)。该风洞

为直流吹气式,风洞全长11.7 m,试验段长6 m,截面积为63 cm×63 cm,风速在0~20 m s⁻¹连续可调,边界层厚度约为10 cm。为满足不同气压下的实验环境和对比效果,运用风洞从我国海拔最低的艾丁湖(海拔-155 m)至青藏铁路唐古拉车站(海拔5076 m)选择9个不同海拔高度开展风沙运动现场实验(图9),实验点海拔整体落差5231 m,气压差498 hPa,空气密度最大相差1倍左右,不同海拔位置的观测温差最大为7℃。实验中均使用青藏铁路西大滩段干燥沙丘沙,以确保所有实验中下垫面一致。实验沙平均粒径为0.19 mm,沙粒起动使用高速摄影机配合激光片状光源,在电脑屏幕上来确定床面

图 8 青藏铁路格拉段沿线输沙势玫瑰图

Figure 8 Rose diagram of sand transport potential along Golmud-Lhasa section of Qinghai-Tibet Railway.

图 9 (网络版彩图)野外移动风洞在新疆艾丁湖(左)和青藏铁路唐古拉车站(右)观测

Figure 9 (Color online) Field mobile wind tunnel observation at Aiding Lake of Xinjiang (left) and Tanggula Station of Qinghai-Tibet Railway (right).

沙粒的起动. 风速用毕托管测定, 沙床下风向边缘不同高度的跃移输沙用直立式集沙仪测定, 实验结果如下.

(1) 高海拔低气压环境沙粒具有较高的起动摩阻风速. 无论是流体起动还是冲击起动过程, 流体密度降低会衰减流体本身的能量以及冲击沙粒从气流中获取的能量, 要使同等沙粒克服阻力起跳就必需增加流速, 以补偿流体密度降低导致的整体能量下降部分, 因而, 其起动摩阻风速较之低海拔地区大(图10).

(2) 高海拔低气压环境沙粒具有较高跃移高度. 海拔每增加1000 m, 沙粒平均跃移高度增加0.6 cm, 当风速超过 10 m s^{-1} , 高海拔地区大部分(90%)的沙粒均在10~14 cm高度层内运动, 而低海拔仅为6~8 cm高度层, 沙粒跃移高度整体高出4~6 cm, 因此, 流体密度降低会导致沙粒跳跃高度增加(图11). 实验得到空气密度和沙粒平均跳跃高度(50%跃移高度)间大致呈如下关系:

$$Z_{50\%} = 0.002 \frac{\rho_s}{\rho} - 1.6, R_2 > 0.8.$$

当海拔和风速增高, 相对衰减率 k 和蠕移比例 P_c 均降低, 更多的沙粒会在更高处传输. k 和 P_c 具有极好的线性关系(图12). 因而, 借鉴低海拔地区的传统防沙措施高度偏低, 难以适用于青藏铁路.

4 防护思路与防护体系配置

青藏铁路格拉段建设初期由于缺乏风沙观测资料, 加之缺乏对青藏高原特有的高海拔低气压风动力所形成的风沙流机理的研究, 对风沙运动规律和风沙流结构的判断仅凭低海拔地区的经验^[25], 传统的防沙措施难以满足高寒环境防沙要求^[26,27], 路堤阻碍原有的风沙流场^[28], 造成风蚀和新的积沙. 设置的防沙措施防沙效果欠佳(图13). 根据青藏铁路沿线风沙危害特征^[29], 与低海拔沙区相比, 青藏高原低气压环境下沙粒起动风速增高、跃移高度增加, 根据青藏高原这一风沙运动规律及风沙流结构的特征性的新发现提

图10 (网络版彩图) 起动摩阻风速分别与海拔(a)、气压(b)和空气密度(c)间的数量关系. U_{*t} 为起动摩阻风速; H 为海拔; P 为气压; ρ_a 为空气密度; A, A_1, B, t_1, y_0 为拟合系数

Figure 10 (Color online) The quantitative relationship between the starting friction wind speed and altitude (a), air pressure (b) and air density (c). U_{*t} is the starting friction wind speed; H is altitude; P is air pressure; ρ_a is air density; A, A_1, B, T_1 and Y_0 are the fitting coefficients.

图 11 (网络版彩图)50%(a)和90%(b)输沙特征高度与海拔的关系

Figure 11 (Color online) Relationship between the 50% (a) and 90% (b) characteristic height of sediment transport and altitude.

图 12 (网络版彩图)相对衰减率与蠕移比例的关系

Figure 12 (Color online) Relation between relative decay rate and creep rate.

出, 高海拔路段防护总的思路是增加铁路沿线工程防沙措施的布设高度, 进而达到降低风速、抑制流沙的目的。为此, 专门研发了高立式大方格沙障等防沙关键技术。根据沙害类型, 青藏铁路沿线沙害包括流动沙丘型、河谷型和干湖盆型三种典型类型, 分别提出了相应的防治模式和工程应用。

针对流动沙丘型沙害的红梁河路段^[30], 采用以阻(沙)、固(沙)为主, 远阻近固, 输导为辅的防治思路(图14)。大面积流沙上设置PE(Polythene)网高立式大方格沙障; 铁路两侧外缘保留原有的高立式混凝土阻沙栅栏和新设置PE网阻沙栅栏, 内缘设置固沙带, 前期采用半隐蔽式PE网方格状沙障, 后期培育植被固沙; 外缘和内缘之间的区域设置阻固结合带, 前期采用高立式沙障工程措施进行阻沙, 后期培育植被固沙; 河床两岸设置

夹角小于30°纵向导沙墙, 从而形成综合防护体系。

针对河谷型沙害采用岸坡阻沙、岸面固沙的思路。以沱沱河路段为例, 坡缘设置T字型阻沙墙, 岸坡坡面采用PE网大方格固沙, 坡顶采用固沙障+植物措施阻截河谷沙源, 固定坡顶, 形成以工程措施为先导, 生物措施为最终目的的综合防护体系(图15)。

针对以季节性干湖盆型沙害为主的措那湖路段, 铁路两侧外缘设置阻沙带, 采用高立式混凝土阻沙栅栏和PE网阻沙栅栏(或阻沙堤); 内缘设置固沙带, 采用半隐蔽式方格状沙障和砾石、PE网覆盖压沙(隐蔽沙障); 铁路西侧防护带宽度大于东侧; 季节性干湖盆平沙地修建U形拦水防沙堤工程以水压沙; 湖岸周边退化草地进行禁牧封育, 辅助人工植被修复技术, 加速植被恢复; 形成一个集阻沙、固沙、压沙、封育为一体的综合防护体系(图16)。

5 防护效益分析

5.1 高立式大方格沙障防护效益

通过对孔隙度为50%, 材质为植物纤维网的高立式大方格沙障(高1 m, 长×宽=8 m×8 m)野外防风效益的观测(图17)(2013年在青藏铁路伏沙梁风沙路段实施, 持续至今、稳定性好), 结果表明: (1) 高立式大方格沙障显著削弱了地表风速: 越接近地表, 风速削弱效果越明显; 沙障内2 m高处风速平均减弱了33.0%, 而0.2 m高处风速平均减弱了81.5%; (2) 高立式大方格沙障顶部以下的风速廓线偏离对数曲线; 沙障顶部以上风速廓线保持对数曲线, 其风速梯度明显大于对照组(图18); (3) 高

图 13 (网络版彩图)青藏铁路格拉段已基本失效的防沙措施
Figure 13 (Color online) Sand prevention measures that have basically failed in Golmud-Lhasa section of Qinghai-Tibet Railway.

图 14 红梁河路段防沙体系示意图
Figure 14 Sand prevention system of Honglianghe section.

立式大方格沙障地表粗糙度比对照组增大了44倍^[31].

5.2 阻沙栅栏防护效益

阻沙栅栏是2005年在青藏铁路全线沙害路段实施

的,持续至今.通过野外调查发现,阻沙栅栏防沙效益明显.在红梁河路段,四道栅栏的总积沙量为 $26.5\text{ m}^3\text{ m}^{-1}$,除了第一道栅栏基本失效外,其他三道栅栏积沙量尚未达到第一道栅栏的1/2,还可以继续使

图 15 沱沱河路段防沙体系示意图. (a) 平面图; (b) 立面图

Figure 15 Diagram of sand prevention system of Tuotuohe section. (a) Top view; (b) side view.

图 16 措那湖路段防沙体系示意图

Figure 16 Diagram of sand prevention system of Cuonahu section.

用. 四道栅栏的积沙量呈指数递减, 从这个规律可以计算出一道阻沙栅栏的阻沙效率约为50%. 若四道栅栏的积沙量都达到第一道栅栏的量, 则总积沙量可达到 $52.0 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$. 在措那湖路段, 铁路西侧的四道栅栏总的积沙量为 $150.9 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$, 其中, 靠近湖边的三道栅栏积沙厚度接近或达到2 m, 这三道栅栏总积沙量达到 $149 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$. 显示出栅栏巨大的拦截、阻滞沙物质的作用, 其防沙效益得到充分发挥.

5.3 石方格防护效益

石方格是2005年在青藏铁路全线沙害路段实施

的, 持续至今, 方格内已形成稳定的凹曲面. 与阻沙栅栏相比, 石方格拦截、阻滞的沙量较少. 在红梁河路段, 靠近红梁河大桥南侧185 m, 石方格的宽度为75 m, 积沙厚度为10~25 cm, 平均积沙厚度为14.97 cm, 由此计算出石方格总积沙量: $75 \text{ m} \times 0.1497 \text{ m} \times 1.26(\text{系数}) = 14.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$. 从积沙状况可以看出, 四道栅栏的总积沙量是石方格总积沙量的1.88倍, 考虑到还有三道栅栏的阻沙作用尚未发挥到最大, 如果四道栅栏完全发挥阻沙作用, 则四道栅栏的可能总积沙量是石方格总积沙量的3.68倍. 在措那湖路段, 铁路西侧四道栅栏的总积沙量是石方格总积沙量的4.25倍. 但石方格的阻

图 17 (网络版彩图)高立式大方格状沙障防风观测
Figure 17 (Color online) Wind prevention observation of tall-vertical large grid sand barrier.

图 18 高立式大方格沙障风速廓线. (a) 风速实测值与高度关系; (b) 风速实测值与自然对数高度线性拟合关系
Figure 18 Wind speed profile of tall-vertical large grid sand barrier. (a) Relationship between measured wind speed and height; (b) linear fitting relationship between measured wind speed and natural logarithm height.

沙效率较高, 野外监测表明, 在阻沙栅栏配合作用下, 石方格可以削减风沙活动强度到原来的1/30, 即输移出石方格的沙量仅为原来的1/30, 表明石方格有较高的阻沙效率. 因此, 青藏铁路的半隐蔽式方格状沙障, 石方格使用最多、应用最广.

5.4 主要沙害路段防沙体系的防护效益

根据中国铁路青藏集团有限公司统计, 青藏铁路格拉段防沙体系建立后, 线路清沙次数及年清沙量明显减少, 2007~2009年间, 每年累计清沙超过 $11 \times 10^4 \text{ m}^3$. 治理以来, 尤其从2010年冬季以来, 清沙次数显著减少, 年累计清沙量减少到 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3$. 严重沙害地段风沙得到控制, 重点路段沙害防治取得了良好

效果.

(1) 红梁河路段距离线路50 m范围内的石方格和低立式防沙网格内, 天然植被覆盖度已恢复到30%~40%, 挡沙墙前后积沙区植被也全面恢复, 桥头不再积沙. 特别是自2010年沙源治理后(图19), 迎风向路基坡脚30 m范围低立式防沙网内天然植被目前已恢复到40%, 该段往年路基边坡大量积沙的情况已得到控制.

(2) 沱沱河路段的主要风沙区占地面积 1.4 km^2 , 在综合防沙体系作用下, 该区域风力逐渐减小, 因而使线路附近积沙区不再积沙, 原来积沙趋于固定; 在低立式防沙网营造的小环境下, 积沙区天然植被开始恢复, 以前沱沱河桥头上沙掩埋道床和岔区的情况得到控制. 通过人工种草, 目前沱沱河路段主要风沙区植被覆盖

图 19 (网络版彩图)红梁河沙源治理. (a) 2008年治理前情况; (b) 2010年治理后情况

Figure 19 (Color online) Sand source control of Honglianghe section. (a) The situation before control in 2008; (b) the situation after sand control in 2010.

度已恢复到40%~45%(图20).

(3) 措那湖路段, 采用以水压沙思路. 通过低立式固沙障对沟沿坡面进行锁边; 在其适当位置利用已有风积沙建造U形拦水防沙堤+砾石压沙, 通过水漫沙面方法固定干季湖面沙源, 防止湖内淤积和就地起沙; 对湖岸流动、半固定沙丘采用覆网法和化学材料等固沙措施进行固定; 在湖周边设立禁牧网围栏, 针对退化草地进行封育, 辅助人工植被修复技术, 加速植被恢复. 构建了一个集防治坡面细沟侵蚀、阻沙、固沙与压沙为一体的综合防护体系(图21). 工程实施后, 由于人工水面以水压沙作用, 该路段940#桥下人工围堰形成小水面, 不再起沙. 在原先设置的阻沙栅栏、石方格及PE网状方格内, 天然植被也开始恢复(图22).

6 总结与展望

青藏铁路格拉段沙害问题是除冻土问题外又一个

重大的科学和技术问题, 严重影响了铁路的安全运营, 针对高寒区风沙活动规律及其防治等方面科学问题亟待研究. 通过持续对青藏铁路格拉段风沙环境及防沙工程的系统研究, 本文分析了青藏铁路格拉段风沙活动特征与风沙危害方式, 基于移动风洞对不同海拔风沙运动特征进行野外实验, 然后提出了防治思路与防护体系配置, 并进而分析了工程实施后的防护效益. 本项目研究成果成功应用到青藏铁路格拉段风沙防治工程中, 风沙危害程度逐渐减轻, 沿线沙区天然植被逐渐恢复, 风沙蔓延情况已得到有效控制, 风沙防治成效非常明显.

本研究填补了高寒区风沙危害防治研究的盲区, 更为青藏高原及类似地区铁路工程的风沙危害防治提供科学依据和技术支撑. 本研究针对高寒区风沙运动规律及其防治的研究将为拟建青藏高原高速公路(格拉段)奠定基础, 下一步将针对拟建青藏高原高速公路(格拉段)风沙灾害防治进行. 另一方面, 本研究中提出的PE材质的高立式大方格沙障等新技术防沙效果明显, 但青

图 20 (网络版彩图)沱沱河桥头及岔区治理后防沙网内植被恢复情况

Figure 20 (Color online) Vegetation restoration in the sand control net after treatment of the Tuotuohe bridge head and bifurcation area.

图 21 (网络版彩图)措那湖路段防沙体系设计示意图. (a) 平面图; (b) 立面图
Figure 21 (Color online) Sand prevention system design of Cuonahu section. (a) Top view; (b) side view.

图 22 (网络版彩图)措那湖路段阻沙栅栏和防沙网格内植被恢复情况(2013年)
Figure 22 (Color online) Vegetation restoration within the sand barrier and sand control grid in Cuonahu section (2013).

藏高原紫外线强烈, PE材质易老化, 影响使用寿命. 因此, 将继续研发基于青藏高原高寒高紫外线区的防沙新材料, 既具有高效的防沙性能, 还要能抗紫外线, 同时要绿色环保无污染.

致谢 感谢中国科学院西北生态环境资源研究院董光荣研究员在试验阶段提供帮助, 感谢审稿专家提出的宝贵意见.

参考文献

- 1 Sjursen H, Michelsen A, Holmstrup M. Effects of freeze-thaw cycles on microarthropods and nutrient availability in a sub-Arctic soil. *Appl Soil Ecol*, 2005, 28: 79–93
- 2 Liu Z M, Zhao W Z. Shifting-sand control in central Tibet. *AMBIO-A J Human Environ*, 2001, 30: 376–380
- 3 Zuo X Y, Li S, Zhang C L, et al. Desertification and control plan in the Tibet Autonomous Region of China. *J Arid Environ*, 2002, 51: 183–198
- 4 Wang G X, Yao J Z, Guo Z G, et al. Changes in permafrost eco-system under the influences of human engineering activities and its enlightenment

- to rail-way construction. *Chin Sci Bull*, 2004, 49: 1741
- 5 Wu Q B, Shi B, Fang H Y. Engineering geological characteristics and processes of permafrost along the Qinghai-Xizang (Tibet) Highway. *Eng Geol*, 2003, 68: 387–396
 - 6 Nan Z T, Li S X, Cheng G D. Prediction of permafrost distribution on the Qinghai-Tibet Plateau in the next 50 and 100 years. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2005, 48: 797–804
 - 7 Yang M X, Wang S L, Yao T D, et al. Desertification and its relationship with permafrost degradation in Qinghai-Xizang (Tibet) plateau. *Cold Regions Sci Tech*, 2004, 39: 47–53
 - 8 Feng L C, Lu J Q, Di Y Q. Review on the prevention of sand damages to railway line in desert areas of China (in Chinese). *J Desert Res*, 1994, 14: 47–53 [冯连清, 卢继清, 邸耀全. 中国沙区铁路沙害防治综述. 中国沙漠, 1994, 14: 47–53]
 - 9 Li S Y, Lei J Q, Xu X W, et al. Patterns of blown-sand hazard control for traffic arteries in China and its application (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2020, 35: 665–674 [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. 中国科学院院刊, 2020, 35: 665–674]
 - 10 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. *Sci China Tech Sci*, 2020, 63: 2664–2676
 - 11 Zhang K C, Qu J J, Yu Y P, et al. Progress of research on wind-blown sand prevention and control of railways in China (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2019, 34: 573–583 [张克存, 屈建军, 鱼燕萍, 等. 中国铁路风沙防治的研究进展. 地球科学进展, 2019, 34: 573–583]
 - 12 Xie S B, Qu J J. The effects of landform and the climatic and hydrological characteristics on the sand hazards along Qinghai-Tibet railway (in Chinese). *J Arid Land Resour Environ*, 2014, 28: 157–163 [谢胜波, 屈建军. 青藏铁路沿线地形、气候、水文特征及其对沙害的影响. 干旱区资源与环境, 2014, 28: 157–163]
 - 13 Dong R K, Xu Z Y, Yang C Y. Dynamic and characteristic of freezing-thawing erosion on Qinghai-Tibet plateau (in Chinese). *J Soil Water Conserv*, 2000, 31: 12–16 [董瑞琨, 许兆义, 杨永成. 青藏高原冻融侵蚀动力特征研究. 水土保持学报, 2000, 31: 12–16]
 - 14 Li L Y, Shi L, Jiang F Q, et al. Analysis of formation causes of sand disasters on Basuoqu bridge of Qinghai-Tibet railway (in Chinese). *J China Rail Soc*, 2016, 38: 111–117 [李良英, 石龙, 蒋富强, 等. 青藏铁路巴素曲特大桥沙害形成原因分析. 铁道学报, 2016, 38: 111–117]
 - 15 Shen W S, Zhang H, Zou C X, et al. Approaches to prediction of impact of Qinghai-Tibet Railway construction on alpine ecosystems alongside and its recovery. *Chin Sci Bull*, 2004, 49: 834–841
 - 16 Wang S L. Study of permafrost degradation on the Qinghai-Xizang plateau (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 1997, 12: 164–167 [王绍令. 青藏高原冻土退化的研究. 地球科学进展, 1997, 12: 164–167]
 - 17 Xie S B, Qu J J, Wang T. Wind tunnel simulation of the effects of freeze-thaw cycles on soil erosion in the Qinghai-Tibet Plateau. *Sci Cold Arid Regions*, 2016, 8: 0187–0195
 - 18 Yang M X, Yao T D, Gou X H, et al. Diurnal freeze/thaw cycles of the ground surface on the Tibetan Plateau. *Chin Sci Bull*, 2007, 52: 136–139
 - 19 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. *Nat Hazards*, 2015, 76: 855–871
 - 20 Zhang K C, Niu Q H, Qu J J, et al. Study on the characteristics of flow field and the mechanism of wind-blown sand disasters in the Tuotuohe Region along the Qinghai-Tibet Railway (in Chinese). *Arid Zone Res*, 2010, 27: 303–308 [张克存, 牛清河, 屈建军, 等. 青藏铁路沱沱河路段流场特征及沙害形成机理. 干旱区研究, 2010, 27: 303–308]
 - 21 Yu Y P, Xiao J H, Qu J J, et al. Wind tunnel test on flow field of highway subgrade with different slope angles (in Chinese). *J Desert Res*, 2018, 38: 464–472 [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. 中国沙漠, 2018, 38: 464–472]
 - 22 Yu Y P, Xiao J H, Qu J J, et al. Wind tunnel simulation of aeolian sand process in subgrade section of two typical high-grade highway (in Chinese). *J Desert Res*, 2019, 39: 68–79 [鱼燕萍, 肖建华, 屈建军, 等. 两种典型高等级公路路基断面风沙过程的风洞模拟. 中国沙漠, 2019, 39: 68–79]
 - 23 Wang X M, Chen G T. Efficiencies and reasonable width for the mechanical sand-prevention system along the Tarim desert highway (in Chinese). *J Arid Land Resour Environ*, 1997, 11: 28–35 [王训明, 陈广庭. 塔里木沙漠公路沿线机械防沙体系效益评价及防沙带合理宽度的初步探讨. 干旱区资源与环境, 1997, 11: 28–35]
 - 24 Li S Y, Wang D, Lei J Q. Spatial distribution of sand drift disasters on road surface in the hinterland of the Taklimakan Desert (in Chinese). *Arid Land Geogr*, 2005, 28: 93–97 [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. 干旱区地理, 2005, 28: 93–97]
 - 25 Ling Y Q, Jin J, Zou B G, et al. Effect of fence techniques in levelling sand accumulation around sandbreaks—Case study in Shapotou district (in Chinese). *J Desert Res*, 1984, 4: 16–25 [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. 中国沙漠, 1984, 4:

- 16–25]
- 26 Qu J J, Liu X W, Lei J Q, et al. Simulation experiments on sand-arresting effect of nylon net fence in wind tunnel (in Chinese). *J Desert Res*, 2001, 21: 276–280 [屈建军, 刘贤万, 雷加强, 等. 尼龙网栅栏防沙效应的风洞模拟实验. *中国沙漠*, 2001, 21: 276–280]
- 27 Wu Z. *Aeolian Landform and Sand Control Engineering* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2003. 298–306, 418–420 [吴正. *风沙地貌与治沙工程学*. 北京: 科学出版社, 2003. 298–306, 418–420]
- 28 Sun X L, Zhang Y Q, Zhang J T, et al. Numerical simulation on the influence of subgrade of Qinghai-Tibet railway on wind-sand movement (in Chinese). *Sci Sin*, 2018, 54: 73–83 [孙兴林, 张宇清, 张举涛, 等. 青藏铁路路基对风沙运动规律影响的数值模拟. *林业科学*, 2018, 54: 73–83]
- 29 Xie S B, Qu J J, Pang Y J. Dynamic wind differences in the formation of sand hazards at high- and low-altitude railway sections. *J Wind Eng Industrial Aerodyn*, 2017, 169: 39–46
- 30 Xie S B, Yu W B, Qu J J, et al. Dynamic environment of blown sand at Honglianghe river of Qinghai-Tibet plateau (in Chinese). *J Desert Res*, 2018, 38: 219–224 [谢胜波, 喻文波, 屈建军, 等. 青藏高原红梁河风沙动力环境特征. *中国沙漠*, 2018, 38: 219–224]
- 31 Pang Y J, Qu J J, Xie S B, et al. Windproof efficiency of upright checkerboard sand-barriers (in Chinese). *Bull Soil Water Conserv*, 2014, 34: 11–14 [庞营军, 屈建军, 谢胜波, 等. 高立式格状沙障防风效益研究. *水土保持通报*, 2014, 34: 11–14]

Characteristics and prevention and control technology of blown sand environment with high altitude and cold temperature on Qinghai-Tibet Railway

QU JianJun^{1,2}, XIAO JianHua¹, HAN QingJie¹, ZHANG KeCun¹, XIE ShengBo¹, YAO ZhengYi¹, PANG YingJun³ & WANG JinChang⁴

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

² Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

³ Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

⁴ China Railway Qinghai-Tibet Group Co., Ltd., Xining 810006, China

Since the beginning of the construction of the Golmud to Lhasa section of the Qinghai-Tibet Railway, sand damage has been a serious problem that cannot be ignored because it threatens the normal operation of the railway. Thus, alpine blown sand activity and its prevention and control must be studied urgently. Through continuous, systematic research on the blown sand environment and sand control engineering of the Golmud to Lhasa section of the Qinghai-Tibet Railway in recent years, we analyzed the characteristics of the blown sand hazards, proposed prevention and control concepts and a protection system configuration, and analyzed the protection benefits after the project was implemented. In this paper, the characteristics of a blown sand disaster and its prevention and control are summarized systematically, which fills the research gaps in terms of blown sand hazards in high altitude and cold regions, and provides a scientific basis and technical support for the prevention and control of blown sand hazards of railway projects in the Qinghai-Tibet Plateau and similar regions.

blown sand hazards, high elevation and cold temperature environment, prevention and control measures, Qinghai-Tibet Railway

doi: [10.1360/SST-2020-0155](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0155)