

# 塔克拉玛干沙漠复合型纵向沙垄顶部 高立式沙障防沙效应长久性探讨

金昌宁

(佛山科学技术学院,广东 佛山 528000)

**摘要:**以布设在塔克拉玛干沙漠腹地复合型纵向沙垄顶部的高立式沙障为对象,在多年对比观测的基础上,从长久性角度探究防沙效应。结果分析表明:除了公认的阻沙作用外,高立式沙障还有更为重要的“定沙”作用,即能将原来的沙丘整体性移动转变成只有落沙坡前移,迎风坡基本上被固定;即使被风沙掩埋,“定沙”作用仍然会长期存在,由此导致风沙运动规律明显地发生变化,造成落沙坡前移的速度越来越慢,平均运移速度从开始半年左右时约0.99 m/y,到16年后降至0.49 m/y左右。“定沙”作用不仅能大幅度延缓“沙丘前移,埋压公路”的时间,而且在沙害防治方面也具有极大的效率。因此,在流动性沙丘分布区的道路沙害防治体系中,高立式沙障是必不可少的,尤其是上风侧。

**关键词:**道路工程;高立式沙障;防沙效应;长久性;复合型纵向沙垄;塔克拉玛干沙漠

**中图分类号:**U416

**文献标志码:**A

## 0 引言

20世纪90年代初起,在塔克拉玛干沙漠,沙漠公路从无到有<sup>[1]</sup>,建设里程累计已超1 000 km,同时建成的机械防沙体系也是世界上规模最大的<sup>[2]</sup>。机械防沙体系虽然规模巨大,可在技术领域进展缓慢<sup>[3]</sup>。主要原因在于,体系造价低,即使因技术不尽完善导致防护成本上升,却增幅不大,从工程管理角度来

看,完全可以承受<sup>[4-10]</sup>。但随着社会经济发展,世界上的沙漠工程建设越来越多,机械防沙体系的规模亦将越来越大<sup>[11-13]</sup>。鉴于此,即使相关研究进步微小,也会有较大的经济效益及明显的社会与生态效益<sup>[14-15]</sup>。

在塔克拉玛干沙漠公路沿线设置的“阻、固、输”相结合的、完整的机械防沙体系中,最外侧的高立式沙障(也称防沙栅栏等)主要起阻沙作用,以防止外侧来沙侵入到内侧的固沙带中<sup>[1,3]</sup>。基于此,专业人

- [8] 杨利民,郭进军,韩易辰,等.下伏采空区对路基稳定性的影响研究[J].郑州大学学报,2018,39(1):42-46.
- [9] 武崇福,刘东彦,方志.FLAC<sup>3D</sup>在采空区稳定性分析中的应用[J].河南理工大学学报,2007,26(2):136-140.
- [10] 张飞,刘德峰,王滨,等.FLAC在采空区稳定性分析中的应用[J].有色金属,2013,65(2):28-39.
- [11] 何国清,杨伦,等.矿山开采沉陷学[M].徐州:中国矿业大学出版社,1991.
- [12] 邹友峰,邓喀中,马伟民.矿山开采沉陷工程[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003.
- [13] 唐亚明,冯卫,李政国.黄土滑塌研究进展[J].地球科学进展,2015,30(1):26-36.
- [14] 张永双,曲永新.陕北晋西砂黄土的胶结物与胶结作用研究[J].工程地质学报,2005,13(1):18-28.
- [15] 谢定义.试论我国黄土力学研究中的若干新趋势[J].岩土工程学报,2001,23(1):3-13.
- [16] 张永双,曲永新,何锋.陕北砂黄土区公路地质灾害与防治对策[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(2):35-38.
- [17] 王兵,杨为民,王辉,等.路基下煤矿采空区地表塌陷特征及其形成机理[J].公路,2007,52(10):101-105.

收稿日期:2022-06-25

基金项目:交通运输部西部交通建设科技项目(编号:200131879709)

作者简介:金昌宁,男,博士,研究员.E-mail:xjjcnalt@163.net

员强调当沙障被埋至一定程度后应拔起或重设,以恢复其阻沙功能,并常常将风沙上路问题最终归咎于沙障没有被及时维护<sup>[5,7]</sup>。但是,笔者在多年野外观察的基础上,认识到在沙丘顶部设置的高立式沙障,即使沙埋后,仍能使沙丘的运移速度低于正常速度,并且沙丘越高大表现得越明显。为了能查证事实、探究机理、利于应用,特在野外现场进行对比观测试验。

## 1 试验简述

(1) 试验地点选定在由石油部门修建的、1996年9月竣工的塔中四井—塔中—一井沙漠公路K21+200北侧150 m处(E83°47′21.68″, N38°54′26.24″)。该路段的防沙工程自建成后没有再进行维护,3~4年后开始有风沙上路,此后越来越严重,以致交通部门在2002年10月修建了塔中—且沙漠公路(塔中—一井—且末)后,不得不于2004年在此路段南侧约300 m处另修平行路与塔中四井(现称塔中镇)相接<sup>[7]</sup>。这样的试验地点能够有效地避免其他人为因素的影响,如测量控制点被破坏、重新设置高立式沙障等。试验地点位于沙漠公路机械防沙体系的上风侧之外(以避免受其影响),地貌为塔克拉玛干沙漠腹地复合型纵向沙垄的顶部,此处的次一级沙丘高大,效应会更加显著;次一级沙丘对称性好,有利于试验与分析;

此外,受复合型纵向沙垄迎风坡或背风坡的地形、风况等因素的影响也较小,定性分析时可忽略。

(2) 两个次一级沙丘的大小相近,上风侧的沙丘(图1中沙丘Ⅰ)高度(以落沙坡的最大高度为准)、迎风坡长度、落沙坡长度分别为14.39 m、69.61 m、32.35 m,下风侧的沙丘(图1中沙丘Ⅱ)则为15.49 m、68.14 m、34.31 m。由芦苇制作的疏透型(孔隙度30%左右)高立式沙障(出露于地表的高度1.2 m)布设在沙丘Ⅱ的顶部(E83°47′21.68″, N38°54′26.24″),在迎风坡与落沙坡的交界处,距离落沙坡的坡顶2.1 m。

(3) 观测内容主要为轴线(沙丘对称面与地表的交线,与主要起沙风方向平行)处的地表高程变化(图1)。首次工作内容包括确定轴线、设立控制桩、指示桩、水准点等(① 为了防止桩志被沙掩埋或风蚀倒伏后失效,首先增加桩志数量,如设置3个水准点等;② 采用1.5 m的长桩志,加大埋深;③ 在桩旁用长达3 m的细竹竿既深插又外露较多,以能在地形变化后仍能起到示位作用;④ 将水准点等可灵活选位的桩志设置在风积风蚀都相对较小的地貌部位,利于找寻与使用),以确保每次测量的轴线位置不变(虽然轴线位置不变,但除高立式沙障外,每次在轴线上测量的点位并不一定相同,不需要较多桩志),高程基准不变。测量仪器为经纬仪,测量时除了明显的变坡点外,测量间距一般控制在5 m以内,以保证必要的精确性。

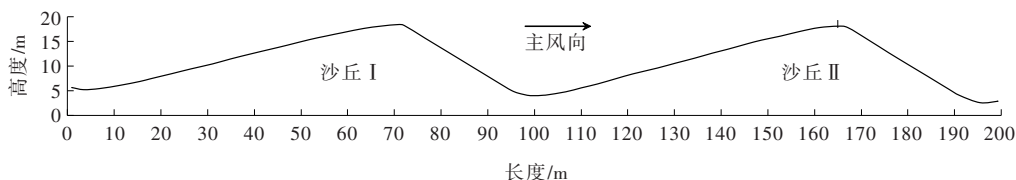


图1 沿轴线的沙丘地表轮廓及试验布置示意图

(4) 考虑到轴线处的地表高程变化只有在相当长的时间累积后才会明显,再加上经费等客观因素影响,测量时间间隔先短后长,一般在1年以上,时间间隔并非完全固定。2001年4月17日进行了初次测量,最后一次测量时间为2017年7月28日,时间跨度16年多(因进行高立式沙障防沙效应长久性探讨,故未对其进行维护,后期其上部逐渐受风蚀损坏,最高达43 cm,约为初设时外露高度的1/3)。测量数据基本能够满足定性分析的需要。

## 2 观测结果与分析

多年的观测结果见图2及表1。可以看出:

(1) 作为试验对比的沙丘Ⅰ,其上并没有设置高立式沙障,保持了天然状态,最为明显的特点是在风力作用下整体性前移,具体表现为:① 迎风坡的风蚀具有整体性特点,从水平方向看,从迎风坡底部至顶部,同一段时间内的风蚀程度(长度)基本一致,使得

不同时期的地表(沙表)轮廓线基本近于平行,形状也大致保持不变;② 背风坡(落沙坡)的风积也具有整体性特点,从水平方向看,从背风坡顶部至底部,同一段时间内的风沙堆积程度(长度)基本一致,使得不同时期的地表(沙表)轮廓线基本近于平行,形状也大致保持不变;③ 迎风坡与背风坡的整体前移速度基本同步,在不同的年份有快有慢,但相差不大,平均速度1.1 m/y。这种同步性,导致沙丘Ⅰ的整体形状多年来基本保持稳定,没有明显的变化,也说明该沙丘背风坡处的积沙主要来自该沙丘迎风坡处的风蚀。

(2) 高立式沙障的阻沙作用最为明显,也最为直

观,以至于不少学者认为它主要起阻沙作用,故而要求沙埋后应立即拔起或重设;否则,将失去防沙的效能<sup>[12,14]</sup>。但图2显示:从阻沙作用来看,高立式沙障被埋时的阻沙量并不大,导致其容易被沙埋没。设置在沙丘Ⅱ顶部的高立式沙障不到1年就已经被积沙埋没。鉴于此,有学者认为高立式沙障不宜设置在容易被沙掩埋的沙丘顶部,而宜设置在不易被沙掩埋的迎风坡底部或下部等(使得从高立式沙障设置到被掩埋的时间间隔会更长,也意味着能够更为长久地发挥其应当起到的阻沙作用)<sup>[13,15]</sup>。类似观点在工程界有认同,也有其合理的一面,但笔者有不同的认识,分析见后文。

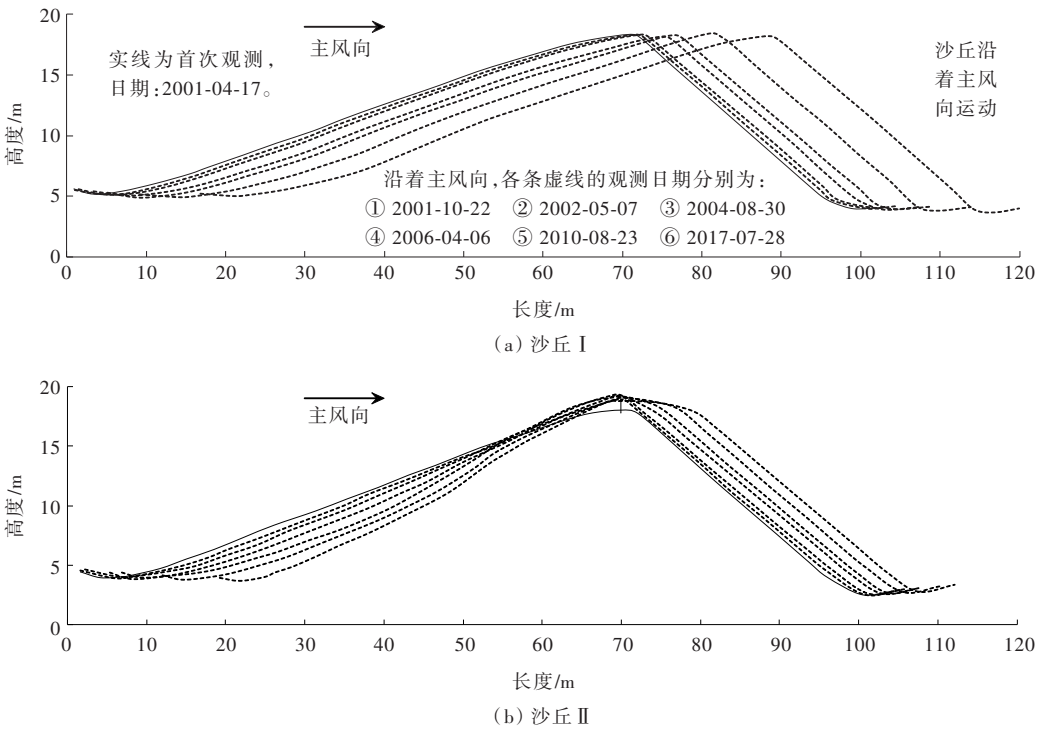


图2 轴线处的地表高度变化曲线  
表1 两个沙丘的落沙坡前移速度对比

序次	观测日期	天数累 积/d	距前次测 量天数/d	沙丘Ⅰ				沙丘Ⅱ			
				运移总量 /m	平均运移 速度/ (m·y <sup>-1</sup> )	时段运移 量 /m	时段运 移速度/ (m·y <sup>-1</sup> )	运移 总量/ m	平均运 移速度/ (m·y <sup>-1</sup> )	时段运 移量/ m	时段运 移速度/ (m·y <sup>-1</sup> )
0	2001-04-17	0	0								
1	2001-10-22	188	188	0.57	1.11	0.57	1.11	0.51	0.99	0.51	0.99
2	2002-05-07	385	197	1.43	1.36	0.86	1.59	1.14	1.08	0.63	1.16
3	2004-08-30	1 231	846	4.00	1.19	2.57	1.11	2.78	0.83	1.65	0.71
4	2006-04-06	1 815	584	5.71	1.15	1.71	1.07	4.03	0.81	1.25	0.78
5	2010-08-23	3 415	1 600	10.86	1.16	5.14	1.17	6.14	0.66	2.10	0.48
6	2017-07-28	5 946	2 531	17.71	1.09	6.86	0.99	8.01	0.49	1.88	0.27

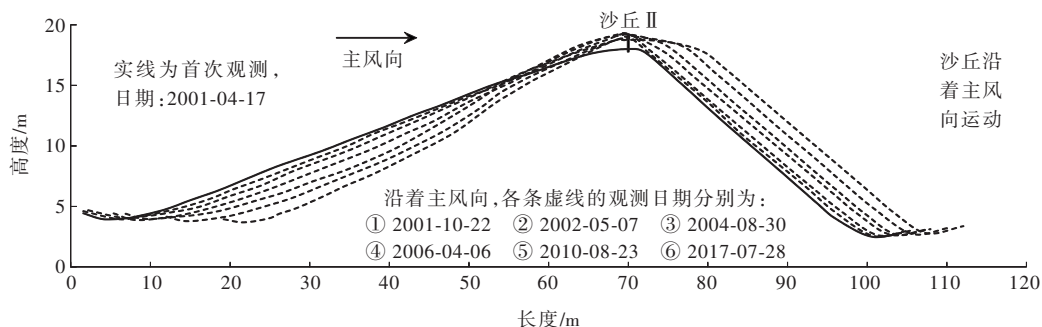


图3 高立式沙障处沿轴线的地表高度变化曲线

(3) 从长久性角度看,高立式沙障除了公认的阻沙作用外,还有更为重要的“定沙”作用,原因分析如下:

① 高立式沙障所在处的地表变化见图3(图2的局部放大)。未被沙埋之前,在高立式沙障处,堆积于两侧的积沙存在倾向于沙障的小落沙坡,原因在于沙障对风的阻挡引起了气流回旋;外侧的来沙停积在沙障处及其附近,上风侧的积沙范围10 m左右,下风侧的积沙到达落沙坡后,会因重力影响,从落沙坡顶滑落,但在沙障被埋没之前,滑落的沙量并不大。由此,在高立式沙障刚好被全部掩埋,也就是所谓的积沙达到饱和时,停积在高立式沙障处及其附近的积沙量约为 $7.5 \text{ m}^3/\text{m}$ ,比较小,使得设置在此处的高立式沙障会在不到1年的时间里就被积沙完全掩埋。虽然很快被沙埋,但在沙埋之后的很多年,高立式沙障所在处及其附近的地表不再有较大变化,如同“固定”了一般,具体表现为:原来的上风侧积沙范围、沙障所在处、下风侧积沙范围的地表变化很小,变化明显的只是原来的下风侧积沙范围之外的落沙坡仍然在不断地向前运移。图3显示:在长期受风力吹蚀之后,由芦苇制作的高立式沙障从顶部开始逐渐毁坏,阻沙作用越来越低,但“定沙”作用却一直存在。

② 迎风坡的地表变化。初期,变化很快的是迎风坡顶部,在高立式沙障的影响范围内,表现为不断地积沙。而在高立式沙障被埋后,这一区段的地表形态反而不再有较大变化,变化最大的是迎风坡底部,表现为不断地风蚀。从底部往上逐渐地过渡到基本上没有变化,由此导致整个迎风坡在缓慢地变形,一方面变短,从开始的68.14 m,16年后变短至52.27 m,减幅达23.3%;另一方面变陡,从开始的 $12.0^\circ$ 左右逐渐地变陡,16年后变陡至 $17.4^\circ$ 左右,而不

像沙丘I那样在风力的作用下整体性前移。

③ 落沙坡的地表变化。初期,变化很快的是迎风坡顶部,在高立式沙障的影响范围内,表现为不断地积沙,但外侧来沙到达落沙坡的不多,落沙坡基本上稳定不变或变化不大。而在高立式沙障被埋后,外侧来沙的堆积也到达了落沙坡处,在风力及重力的共同影响下,开始从落沙坡的顶部不断地吹落或滑落,由此导致落沙坡能够在风力作用下整体前移,并一直保持稳定的落沙坡形态。这点与沙丘I相似,但其整体前移的速度却明显低于前者,并且表现出越来越慢的趋势,平均运移速度从开始半年左右约 $0.99 \text{ m/y}$ ,到16年后降至 $0.49 \text{ m/y}$ 左右,而时段运移速度(表1)则从第一次观测时的 $0.99 \text{ m/y}$ 左右,到最后一次观测时降至 $0.27 \text{ m/y}$ 左右,降幅更为明显。

④ 表征的风沙运动规律的变化。沙丘I、沙丘II的上述变化清晰表明:在沙丘顶部设置高立式沙障后,沙丘的运动形式从整体前移变成了只有落沙坡前移,也就是高立式沙障除了阻沙作用外,还有更为重要的“定沙”作用。同时也表明,沙丘II背风坡处的积沙主要来自该沙丘迎风坡处的风蚀。此外,从落沙坡的前移速度来看,沙丘I基本是稳定的;沙丘II却在变化,初期较复杂,后期则有越来越慢的趋势,多年积累之后,其前移的距离已非常明显低于沙丘I。倒推原因可认为:落沙坡前移速度的减少←从坡顶的来沙量减少←迎风坡上风蚀量的减少←迎风坡面积减少(沙丘I的落沙坡向前运移,从底部开始,逐步埋压沙丘II的迎风坡;而沙丘II的迎风坡没有向前运移,导致迎风坡不断地变短,面积也不断地减少)、迎风坡变陡(开始时 $12.0^\circ$ 左右,16年后变陡至 $17.4^\circ$ 左右,对风蚀有阻碍作用)、气流场发生变化(原理尚不清楚,可能为:自然状态下形成的沙丘迎



风坡形态有利于整个坡面的风蚀,形态被改变后将导致整个坡面的风蚀能力降低。风蚀能力的降低意味着贴近地表的风速降低,高于地表的风速增加,使得气流场结构发生变化)等←高立式沙障的“定沙”作用。

高立式沙障的“定沙”作用初期不明显,随着时间的积累越显突出,具有效应的长久性。对沙漠公路而言,威胁最大的沙害莫过于“沙丘前移,埋压公路”,尤其是高大沙丘。但是,高立式沙障的“定沙”作用能够大幅度延缓“沙丘前移,埋压公路”的时间,并且还是一次设置,长久受益,长时间地让外侧(迎风坡)的来沙呈立体状(斜立状)停积在落沙坡处,而不至于迅速蔓延至固沙带,呈平面状埋压固沙方格,在沙害防治方面具有极大的效率。正因为如此,对于塔克拉玛干沙漠腹地的流动性沙丘分布区,在沙漠公路的沙害防治体系中,无论是机械防沙体系,还是生物防沙体系,高立式沙障都应当是必不可少的,尤其是上风侧。

### 3 结论

(1) 塔克拉玛干沙漠腹地复合型纵向沙垄顶部的次一级沙丘表现出在风力下整体性前移的特点,迎风坡与背风坡(落沙坡)都在整体性前移且又基本上同步,平均速度约1.1 m/y,沙丘整体形状多年保持稳定,没有明显变化。表明该沙丘背风坡处的积沙主要来自该沙丘迎风坡处的风蚀。

(2) 高立式沙障的阻沙作用最为明显、最为直观,但阻沙量不大,容易被沙埋。实践中有观点认为其宜设置在不易沙埋的部位,以能更为长久地发挥其应当起到的阻沙作用。这种观点有其合理的一面,也存在误区。

(3) 高立式沙障有更为重要的“定沙”作用,即能将原来的沙丘整体性前移转变成只有落沙坡前移,逐渐变陡、变短的迎风坡基本上被固定,尤其是高立式沙障位置所在的高大沙丘顶部;即使被风沙掩埋,“定沙”作用仍会长期存在,由此导致风沙运动规律逐渐发生变化,使得其落沙坡前移的速度有越来越慢的趋势,平均运移速度从开始半年左右时的约

0.99 m/y,到16年后降至0.49 m/y左右,时段运移速度则从第一次观测时约0.99 m/y,到最后一次观测时降至0.27 m/y左右,降幅更为明显;在多年积累之后,其前移距离已明显地低于不设高立式沙障的沙丘。

(4) 高立式沙障的“定沙”作用能够大幅度延缓“沙丘前移,埋压公路”的时间,并且一次设置,长久受益,在沙害防治方面具有极大的效率。故在流动性沙丘分布区的沙漠公路沙害防治体系中,高立式沙障应当是必不可少的,尤其是上风侧。

### 参考文献:

- [1] 中国石油天然气总公司塔里木石油勘探开发指挥部.塔里木沙漠石油公路[M].北京:石油工业出版社,1996.
- [2] 屈建军,凌裕泉,刘宝,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.
- [3] 金昌宁,董治宝,李吉均,等.高立式沙障处的风沙沉积及其表征的风沙运动规律[J].中国沙漠,2005,25(5):652-657.
- [4] 罗万银,董治宝,钱广强,等.栅栏绕流减速效应风洞实验模拟[J].中国沙漠,2010,30(1):1-7.
- [5] 安志山,张克存,谭立海,等.不同高度阻沙栅栏蚀积过程及防沙效益研究[J].水土保持通报,2011,31(6):37-41.
- [6] 刘世海,冯玲正,许兆义.青藏铁路格拉段高立式沙障防风固沙效果研究[J].铁道学报,2010,32(1):133-136.
- [7] 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.
- [8] 王志锐,张永杰.风积沙边坡旋喷防护分析[J].中外公路,2021,41(5):99-101.
- [9] 周子豪,苏占东,吴成龙,等.风积沙改性土试样压实度控制方法[J].中外公路,2021,41(5):264-268.
- [10] 苏跃宏,吕川,王晓敏,等.固化风积沙底基层路用性能研究[J].中外公路,2021,41(6):271-275.
- [11] 江兴旺,张婷,杨大余,等.京新高速公路内蒙沙漠戈壁段总体设计[J].中外公路,2016,36(1):1-5.
- [12] 金昌宁,李森,刘健,等.塔克拉玛干沙漠腹地典型路段沙害调查与分析[J].中外公路,2008,28(4):20-24.
- [13] 康向光,李生字,王海峰,等.高立式沙障不同叠加模式的阻沙量对比分析[J].干旱区研究,2013,30(3):550-555.
- [14] 王爽,崔晓宁,梁柯鑫.格库铁路青海段沙害成因及防治措施[J].铁道建筑,2019,59(7):97-101.
- [15] 王睿,周立华,陈勇,等.库布齐沙漠机械防沙措施的防护效益[J].干旱区研究,2017,34(2):330-336.