

塔里木沙漠公路防护林影响下地表形态的变化

李生字^①, 雷加强^①, 徐新文^①, 王海峰^{①②}, 范敬龙^{①②}, 谷峰^③, 邱永志^③, 许波^③, 巩庆^④, 郑伟^④

① 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049;

③ 中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司, 库尔勒 841000;

④ 且末县塔中气象站, 且末 841000

E-mail: lishy_hb@163.com

2007-09-02 收稿, 2008-06-02 接受

中国科学院知识创新工程重要方向性项目(编号: KZCX3-SW-342)、国家自然科学基金项目(批准号: 40701019)、新疆维吾尔自治区重大科技专项(编号: 200733144-3)、中国科学院西部行动计划项目(编号: KZCX2-XB2-13)、中国科学院“西部之光”人才培养计划项目(编号: 20052118)和中国科学院新疆生态与地理研究所绿洲学者“博士人才”计划项目资助

摘要 为了探讨防沙工程对现代风沙地貌的影响, 通过在塔中地区的野外实地沙面蚀积测量, 分析了塔里木沙漠公路防护林影响下地表形态变化的类型、分布和强度. 研究发现: (1) 在防沙体系内部以风积地貌为主, 形成了小尺度的灌丛积沙堆, 中尺度的片状积沙和较大尺度的垄状积沙体. 在防沙体系内的林间也一定程度地形成了风蚀地貌, 但在垄间地一般难以大规模发育, 而在地形起伏的沙垄区的次级沙丘迎风坡中部, 则可较大规模地发育; (2) 在防沙体系的上风侧, 阻沙林带及其形成的垄状积沙体使垄间的低矮流动沙丘在移动过程中发生形态和走向变化. 阻沙林带垄状积沙体迎风坡形成稳定积沙坡面, 但前移沙丘可造成其短时间的破坏, 而后逐渐恢复成稳定坡面; (3) 在防沙体系下风侧沙面, 可形成较大范围的风蚀, 在垄间地形成风蚀凹地, 在地形起伏区沙丘被风蚀削平, 地形起伏度降低. 因此, 防沙林带对上风侧风沙流具有巨大的消能截沙作用, 到下风侧随着风力的逐渐恢复, 风沙流逐渐趋于不饱和, 造成沙面风蚀.

关键词

风沙地貌
沙面蚀积
防护林
塔里木沙漠公路

风沙运动与风成床面之间相互促进, 最终达到动态平衡^[1]. 风是决定沙漠地表形态的主要动力^[2,3], 但下垫面对地表的风沙流场和风沙运动具有很大的反作用, 最终使地表形态相应变化. 关于流沙地的蚀、积变化, 前人已进行了较多的野外实地研究^[4-7]. 沙漠公路是最为常见的大型沙漠工程. 前人研究主要集中于公路沙害防治^[8-12]和防沙体系的防护效益^[13-15]等方面, 但对于大型沙漠工程影响下的地表形态变化研究很少^[16-18]. 沙漠公路沿线地表形态的长期变化将使公路沙害的孕灾成灾环境发生变化. 因此, 研究防沙体系影响下地表形态变化, 对于了解人为活动影响下的现代风沙地貌环境发展过程有一定的科学意义, 而且对塔里木沙漠公路沙害的发展变化规律和公路的可持续性研究也具有实际应用价值.

1 研究区域的风沙环境背景

塔里木沙漠公路位于塔里木盆地, 它北起轮台, 南抵民丰, 南北纵贯塔克拉玛干沙漠, 全长 562 km, 其中穿越沙漠段长 446 km, 是世界上穿越流动沙漠最长的等级公路(图 1). 它 1993 年动工, 1995 年竣工. 公路沿线以高大复合型纵向沙垄地貌区段为主(占沙漠段的 50%左右), 高大沙垄与宽广垄间地相间分布为区域的大地貌格局. 鉴于塔克拉玛干沙漠强烈的风沙活动, 与塔里木沙漠公路同步建立了“前阻后固”的机械防护体系^[10]. 但随着防沙体系防沙效益的衰减, 风沙危害呈迅速发展态势^[11,12], 从而对沙漠公路正常运行构成了巨大威胁. 实践证明, 只有生物固沙才是从根本解决风沙危害问题的防治措施. 围绕生物

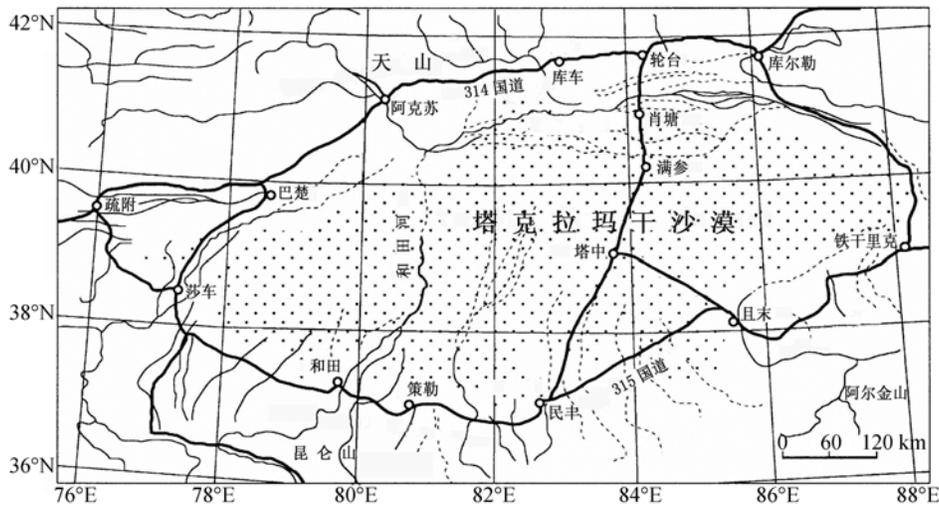


图1 塔里木沙漠公路位置图

防沙林带建设,在“八五”和“九五”期间进行了大量的科学实验,解决了沙漠腹地人工防沙林带建设关键技术问题,并利用地下咸水灌溉建成了30.8km的塔中油田基地路生物防沙实验示范区,防沙效果明显.为确保塔里木公路长久安全运行,基于长达10余年的实验研究成果,2003年国家立项实施塔里木公路防护林生态工程,2005年工程完工.塔里木公路防护林生态工程全长436 km,林带宽度72~78 m,林带面积3128 hm².防护林带采取3种布局模式,即垄间和小沙丘分布区四带布局模式、高大复合沙丘沙垄区两带布局模式以及高大复合沙垄与垄间结合区两侧三带布局模式.植物种为沙拐枣、怪柳和梭梭.种植方式:行间混交,行距2 m,株距1 m.塔里木公路防护林生态工程建成不仅从根本上抑制了风沙对公路的危害,而且使公路沿线生态环境得到改观.

本文以塔克拉玛干沙漠腹地的塔中四地区为研究区域.区域内沙垄平均走向北东50°~60°^[19],高度30~70 m,上覆次级沙丘链高5~15 m;垄间地宽1~3 km,分布有沙丘链、新月形沙丘和小沙垄等^[11];地表以流沙为主,沙物质机械组成以细沙和极细沙(0.1~0.05 mm)为主,丘间地表层粗化,含有0.5 mm甚至>2 mm的细砾成分^[19].起沙风频繁,风力强劲,年起沙风频数(6.0 m·s⁻¹,地面10 m高)达500次以上,年平均风速2.5 m·s⁻¹,最大瞬时风速达20.0 m·s⁻¹.年起沙风向以北东东、北东、北北东和东的风向组合为主,北东东风时长、强度大,个别年份偏北风强度

很大,年内风沙活动主要集中于3~9月份^[20].

2 实验布置和研究方法

本文以塔中油田基地路防护林为研究区域(图2),其林龄达5~8年,地表形态变化明显.监测断面于防护林建成后设置.No.1实验地位于垄间平地,观测断面按照林带结构设置,包括固沙林带,一道阻沙林带+固沙林带,三道阻沙林带+固沙林带,芦苇阻沙栅栏+固沙林带.No.2实验根据不同地貌部位设置,包括垄间平地两道阻沙林带+固沙林带,沙垄顶部次级沙丘区固沙林带,沙垄与垄间地过渡区次级沙丘区阻沙林带+固沙林带.断面蚀积观测采用钎法,插钎初始设置时外露高度 H ,每年定期测量钎外露高度 h ,计算各点的蚀积深度 $D=H-h$ ($D>0$ 为堆积, $D<0$ 为风蚀).2005和2006年用全站仪测量各钎点的相对高度 E' ,然后计算断面原始设置时的相对高度 $E=E'-D$.No.3实验地位于塔中植物园北东侧(植物2003年定植),2007年用全站仪测量植物灌丛积沙形态,并用Surfur8.0绘制了三维等值线图.

防沙林带迎风边缘,基本都位于原机械防沙体系的阻沙栅栏的积沙体之上,其对流动沙丘移动和形态的影响与机械防沙体系类似,因此采用2004年两个实验地(I号实验地位于一号公路垄间平地,II号实验地位于塔里木沙漠公路K364)的观测资料.

在沙丘的不同地貌部位,采用多点风速廓线仪测量流动沙丘断面的风速廓线变化.同期气象数据,采用塔中气象站观测数据.

3 结果与讨论

3.1 防护林带内风沙地貌的变化

(i) 风积微地貌. (1) 植物灌丛堆状积沙. 灌丛沙堆(Nebkhas)是干旱、半干旱及半湿润荒漠地区风沙流遇到灌丛阻拦, 沙物质在灌丛及其周围堆积而形成的一种的风积地貌类型^[20,21], 它是植被防风固沙作用的重要体现形式. 2007年4月, 在No.3实验地内调查发现, 林内梭梭、怪柳、沙拐枣植株基部都普遍形成了灌丛沙堆, 形态都相似. 图3为实验地内一个梭梭灌丛沙堆积沙厚度的三维等值线图. 可见, 灌丛沙堆形态浑圆, 近似半椭球体, 形态比较对称(图3(a), (b)), 越靠近梭梭基部, 积沙厚度越大, 反之则越小, 最大积沙厚度可达0.18 m, 体积为0.346 m³,

平均每年堆积沙物质 0.0865 m³. 沙堆的垂直投影近似椭圆形, 长轴呈北东→南西走向, 与当地主导风向基本一致; 短轴呈北西→南东走向(图3(a)), 这与学者们在其他研究区域的结论一致^[22,23]; 长、短轴的长度分别为1.6和1.5 m, 与植株冠幅(1.60 m×1.52 m)相近(图3(b)). 由于林带株、行距较小, 因此不能通过灌丛沙堆形态说明沙物质堆积范围、风场变化与植物株高的关系^[21,24]. 同时发现, 一般梭梭基部的灌丛沙堆体积最大(平均直径(165.85±13.76) cm, 平均最大积沙厚度(15.02±4.09) cm), 沙拐枣其次(平均直径(149.38±15.98) cm, 平均最大积沙厚度(14.25±2.76) cm), 而怪柳则最小. 灌丛积沙体的大小与植物的长势和冠形特征密切相关: 梭梭枝条密集, 枝下高较小,

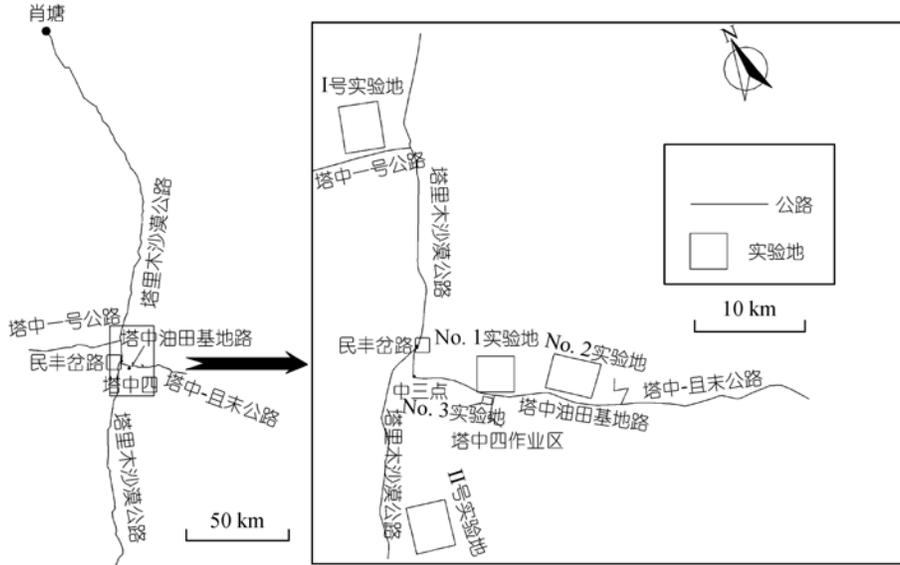


图2 实验区域位置和实验场地分布图

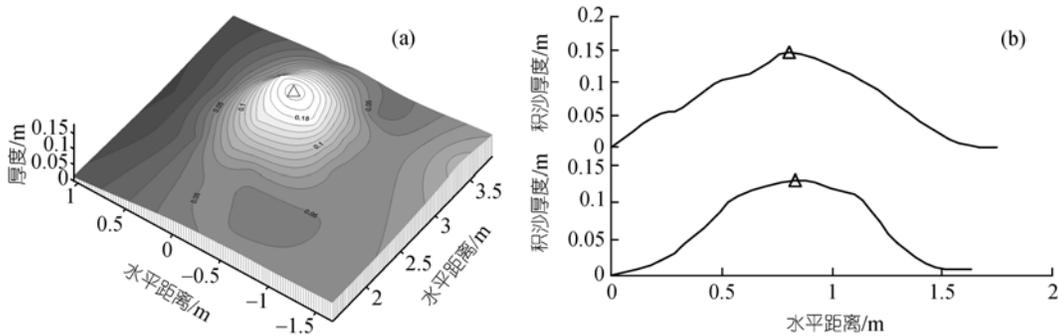


图3 梭梭灌丛沙包的积沙三维等值线图(a)和沙堆的纵断面形态(b)

而沙拐枣则枝条稀疏,枝下高相对较大;虽然怪柳枝条密集,但生长缓慢,植株高度远小于梭梭和沙拐枣。

对 No.2 实验地垄间阻沙林带调查发现,多数植物周围形成尺度很大的沙包,尤其以梭梭的积沙体为最大,这与局地沙源丰富度有关。区域内风沙流主要顺主风向迁移,沙物质首先在阻沙林带内大量沉积,而只有少量悬移的沙物质能够达到固沙林带内部,因此阻沙林带的沙源供应远较固沙林带内部充足。防护林能够极大地削弱近地表风力,在林带内部沙物质基本以堆积为主,植物枯落物也多数被保存在林下,它们增加了积沙层的结构稳定性,使灌丛沙堆得以持续发育。因此植物枯落物在林下良好的保存促进了植物灌丛沙堆的发育。本次测量结果也进一步印证了前人关于“风况、沙源供应的丰富程度、灌丛的植被类型是灌丛沙堆形成和形态塑造的重要影响因素”^[25,26]的论断。

按照学者们对灌丛沙堆的组合形式的分类^[27],目前研究区内固沙林带内的灌丛沙堆多属于独立型,而阻沙林带内的灌丛沙堆则属于复合型(相邻灌丛沙堆连接起来)。由于林带株、行距为 1m×1m,随着植株灌丛沙堆的发育,固沙林带内相邻的灌丛沙堆也逐渐互相连接起来,形成复合型灌丛沙堆,它们整体使林地地面高度增加。(2) 林缘垄状积沙。No.1 实验地位于公路上风侧,防沙林带包括一道阻沙林带和固沙林带(1999年设置)。2006年10月进行了测量,在阻沙林带前后形成了垄状积沙体。图4中可见其纵断面与新月形沙丘的纵断面相似(受南西风影响落沙坡向迎风坡侧偏转),垄状积沙体迎风坡较缓,呈凹形坡,坡下坡度较小(3.36°),坡中坡度增大(14.81°),坡上坡度最大(20.05°),落沙坡较陡(25~29°),积沙最高点位于阻沙林带背风边缘处。同时,在固沙林带迎风边缘也形成了垄状积沙体,纵断面也与新月形沙丘

相似,但其高度较小(1.27 m),积沙最高点在林带内部,这与刘钰华等人^[28]研究结果一致。这是由于防沙林带对地表风场的削弱,沙物质最先在林带迎风边缘堆积。随着沙物质逐渐累积,积沙高度逐渐增加,积沙体的背风端逐渐向林带内部缓埋移动,而迎风端则迅速延长,最后形成迎风坡长而稍平缓、背风坡短而陡峻的沙丘状积沙体。图4中可见,由于阻沙林带栽植于原有尼纶网阻沙栅栏和芦苇阻沙栅栏积沙体上,垄状积沙体发育尺度很大,最高可达 3.87 m,水平宽度可达 38 m,其中迎风侧宽度(31 m)大于背风侧(7 m)。

调查发现,在公路下风侧林缘也有一定的积沙量,但积沙量较少,这是由于反风向风沙活动较弱。受地形影响,在地形起伏较大的沙垄和沙垄与垄间过渡区,风沙流在林带迎风边缘堆积量较少,而多数沙物质在林带内部形成堆积,这也与林缘没有机械防沙体系有关。(3) 林内片状积沙。图5为No.1实验地的三道阻沙林带+固沙林带(1999年设置)的积沙纵断面图。可见,第一道阻沙林带(设置在原有的两道阻沙栅栏的积沙体上)拦截了大量的沙物质,形成高大的垄状积沙体,最大厚度达 3.5 m;在第二道、第三道阻沙林带和固沙林带的积沙厚度则相对较小,其最大积沙厚度分别为 1.04, 0.99 和 0.67 m。林间的积沙厚度则更少,第二、三道阻沙林带间的林间最大积沙厚度为 0.46 m,第三道阻沙林带与固沙林带之间的最大积沙厚度为 0.54 m。因此,在防沙林带内部积沙体厚度较小,整体呈层片状堆积形态。这是由于风沙流最先在防沙林带迎风边缘处风速急速降低,气流挟沙绝大部分在此受阻堆积,而只有少量沙物质能随气流到达防沙林带内部时,形成少量堆积;同时,在防沙林带内部堆积的沙物质颗粒较细,多属悬移质(也含有一定量的跃移质),其堆积过程较缓慢,因此

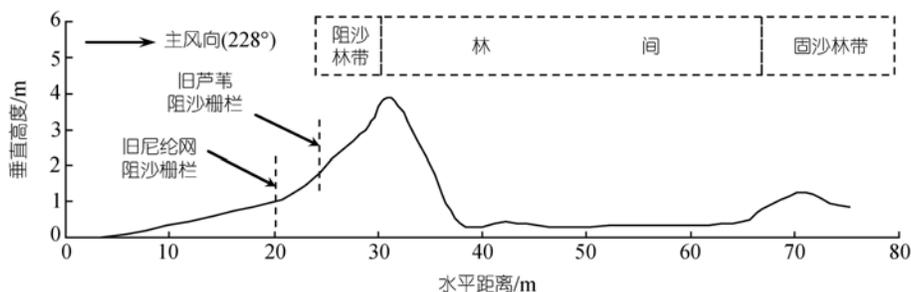


图4 垄间平地防沙林带积沙断面图

积沙厚度空间差异较小(主要受灌丛影响影响),呈层片状覆盖于原地表。

在 No.2 实验地公路上风侧的垄顶区,观测断面覆盖了次级沙丘,沙丘迎风坡设置有草方格固沙带,丘顶和落沙坡建设了固沙林带(2001 年定植)。2005 年测量结果见图 6,落沙坡上部积沙量最大,而迎风坡和落沙坡中下部积沙量则较小,但空间分布比较均匀。可见,受沙丘形态的影响,风沙流在落沙坡形成涡流系统,气流挟沙多在沙丘落沙坡上部形成堆积,而在地形平坦的垄间平地,风沙流挟沙则主要在林带边缘堆积。

(ii) 风蚀微地貌。

(1) 林间风蚀坑。在阻、固型防沙林带中,阻沙林带与固沙林带之间,以及多道阻沙林带之间,一般空留一定宽度不作防护,作为积沙带,该区域一般宽 10~20 m。

在 No.2 实验地的垄间平地区,防沙林带为两道阻沙林带+固沙林带(2001 年定植)。在林带建设后,在第二道阻沙林带与固沙林带间的林间逐渐形成风蚀坑,2005 年测量发现风蚀坑深度达到 0.62 m(图 7(a))。这是由于过境气流对阻沙林带极大的削弱,风沙流挟沙大部分就地卸载堆积,而随着风速在阻沙林带下风侧

的逐步恢复,风沙流趋于极度不饱和状态,相对挟沙能力增加,使林间地表形成风蚀。随着阻沙林带背风侧积沙范围的扩大,风蚀坑的位置也逐渐向下风向移动,原来的风蚀坑逐渐被积沙压埋。因此,由于阻沙林带积沙前移压埋以及固沙林带的沙面固定作用,风蚀坑一般难以大规模发展,逐渐将为积沙所掩埋。

在 No.2 实验地的沙垄与垄间过渡区,防沙林带覆盖了一个次级沙丘,沙丘迎风坡林间发育了风蚀坑。2006 年测量结果(图 7(b))显示,风蚀坑的深度达到 0.25~0.29 m。邻近区域调查发现,部分坡中的林间风蚀坑深度甚至可达到 1.2 m,造成林缘植物根系大面积裸露。沙丘迎风坡林间风蚀坑的强烈发育与沙丘迎风坡对气流的抬升加速有关,使阻沙林带背风侧的风速恢复速度快于地形平坦区。随着沙丘迎风坡林间风蚀坑逐渐发育,受林间空间的限制,其发育面积逐渐稳定,发育深度最终也将达到动态平衡。

(2) 株间风蚀槽。在防沙林带迎风边缘的垄状积沙体顶部,经常形成条带状的浅槽状的微地貌形态,它们与林带植株的间隙相对应而存在,走向顺主风向,一般与林带垂直,与林带的群体组合形态似梳状,它们的形成与植物株间风蚀有关,我们称其为株间风蚀

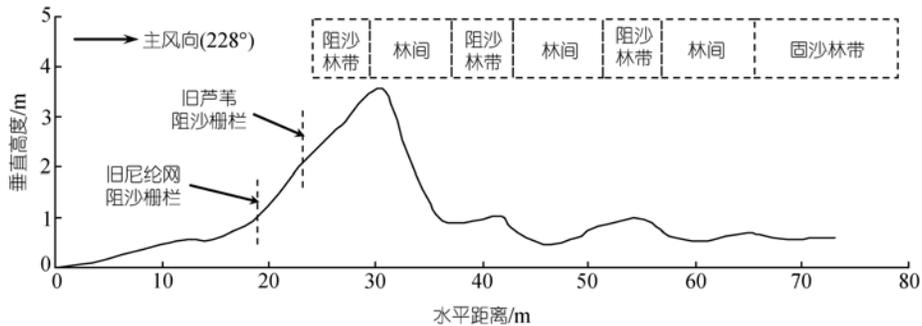


图 5 垄间地三道阻沙林带的积沙断面图

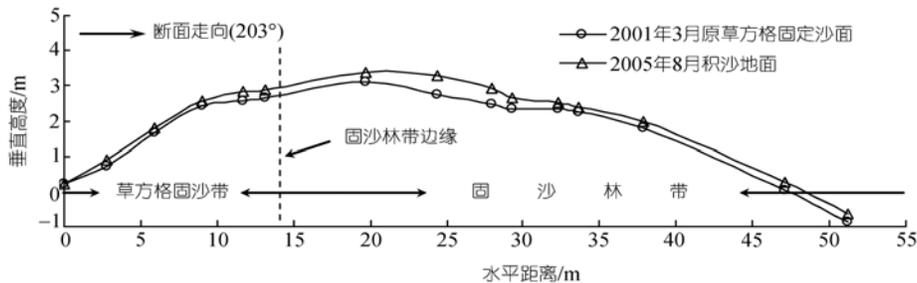


图 6 垄顶防沙林带内次级沙丘的积沙纵断面

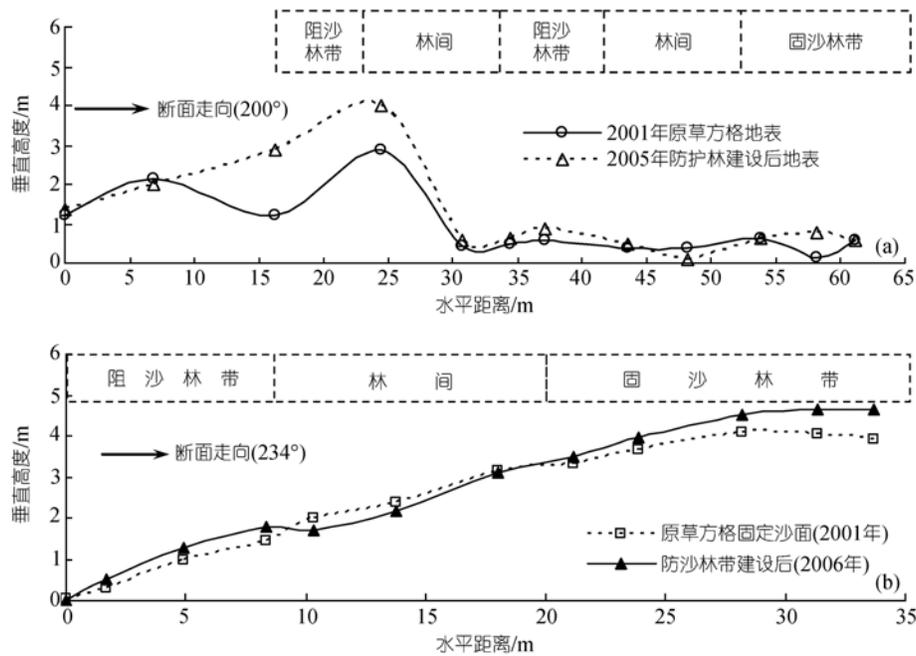


图7 防沙林带间的风蚀地貌图

(a) 垄间平地, (b) 沙垄与垄间过渡区次级沙丘迎风坡

槽。林带是一孔隙度不均一的高立式沙障, 林冠层枝条茂密, 孔隙度小, 而冠层以下枝条稀疏, 孔隙度很大, 因此在林带株间下部形成气流易通过区。当气流经过林带时, 气流多绕流通过这里, 速度大为增加(窄管效应)。此外, 由于林带垄状积沙体最高部位都深入到林带内部, 因而林带边缘都处于积沙体的迎风坡中上部, 地形阻碍也一定程度上使风速加大。因此, 在垄状积沙体迎风坡中上部和顶部株间风蚀槽普遍发育。

株间风蚀槽的尺度一般较小, 深度在 30 cm 以下, 长度在 100 cm 左右。株间风蚀槽的尺度与植株间隙的大小有关, 其宽度、深度、长度与株间间隙大小呈线性正相关($n=40$), 相关系数(R^2)分别为 0.897, 0.6003 和 0.2936, 而且株间风蚀槽的深度、宽度、长度相互之间也呈线性正相关。林带植株死亡或者被人为破坏使株间间隙增大, 风蚀槽也随之大规模发育, 甚至将垄状积沙体吹蚀成平坦沙面。通过此缺口, 风沙流可长驱直入, 林带的整体防沙效益将极大降低(图 8)。因此, 在林带维护管理过程中, 必须及时发现林带的防沙漏洞并维护。

3.2 防护林上风侧邻近沙面的风沙地貌变化

(i) 前移流动沙丘的变形。防沙林带及其下伏

的垄状积沙体实际是一沙障组合体。根据李生宇等人^[29]对阻沙栅栏上风侧流动沙丘移动过程中的形态变化规律, 可知当沙丘与阻沙林带距离大于 $15H$ (林带与垄状积沙体高度之和) 时, 沙丘不受林带影响; 当沙丘与林带距离大于 $10H$ 而小于 $15H$ 时, 随着沙丘向下风向的移动, 沙丘形体趋于高大(高度、宽度、迎风坡度、体积增加), 沙物质趋于集中(长度、底面积减小); 当沙丘与林带的距离小于 $10H$ 时, 虽然沙丘形体仍向高大发展, 但沙物质空间分配趋于分散(长度、底面积增加); 当沙丘与林带或其阻沙体接触相连后, 受林带和积沙体高度所限, 沙丘高度逐渐降低, 并与林带或阻沙体高度趋于一致; 当栅栏积沙尚少时, 沙丘体的大部分沙物质为阻沙林带所俘获, 而当阻沙林带迎风侧的积沙量已过饱和时, 沙丘大部沙物质以风沙流的形式搬运到阻沙林带下风侧积沙带内或继续向下风向搬运。当一段时间内的主风向或合成输沙风向与阻沙林带近于垂直(夹角 $>70^\circ$) 时, 由于阻沙林带对近地表风速的削弱, 期间沙丘走向变化微小; 当一段时间内的主风向或合成输沙风向与阻沙林带大角度相交时($70^\circ > \alpha > 45^\circ$) 时, 随着沙丘向阻沙林带的逐渐靠近, 其走向也逐渐发生偏转, 与阻沙林带趋于垂直; 当一段时间内的主风向或合成输沙方向与阻沙林带小角度相交($\alpha < 45^\circ$) 时, 随着沙

丘向阻沙林带的靠近,其走向也逐渐发生偏转,与阻沙林带趋于平行。

(ii)林带边缘积沙形态的变化. 由于塔里木沙漠公路防护林最外侧的阻沙林带多设置在原有阻沙栅栏的积沙体之上,阻沙林带拦截的沙物质加积在原有积沙体上,形成形体庞大的垄状积沙. 对 No.1 实验地测量发现(图 9),阻沙林带的积沙断面基本类似沙丘的纵断面,其迎风坡为凹形,坡脚坡度平缓(约 2~6°),坡中较陡(坡度 9~22°),坡上平缓(坡度 9~14°);背风坡较陡,呈流沙的休止角. 在风季中,积沙断面的明显变化是积沙高度逐渐增加、脊线和落沙坡脚逐渐向下风向推移,而积沙体的迎风坡形态则非常稳定. 可见,垄状积沙体的迎风坡已经处于蚀积平衡状态,气流在迎风坡抬升加速,风沙流形成非堆积搬运,沙物质在迎风坡顶部和落沙坡形成堆积. 观测也发现,前移沙丘体可叠置在垄状积沙体迎风坡之上,迎风坡形态可产生一定变化,但在风沙流的

长期作用下,沙丘体逐渐被分解成风沙流,而迁移堆积到落沙坡,坡面形态将恢复至稳定状态. 当然这种稳定形态也是暂时的,当阻沙林带生长高度增加后,坡面形态将再度进行调整以适应新的环境条件.

当新月形沙丘前移并逐渐靠近防沙林带边缘的垄状积沙体时,沙丘前区与垄状积沙体的迎风坡重叠,垄状积沙体的迎风坡逐渐被风蚀,形成风蚀坑,甚至导致林带植物根系风蚀出露,植株倒伏. 这是由于气流经过迎风坡抬升加速和落沙坡减速后,风沙流挟沙绝大部分卸载堆积,随着在沙丘前区气流的株间恢复加速(图 10),风沙流逐渐趋于极度不饱和状态,因此在沙丘前区表现为风蚀. 但随着沙丘前移,沙丘体逐渐与垄状积沙体融为一体,风蚀坑也被沙丘掩埋.

3.3 防护林带下风侧邻近沙面的风沙地貌变化

(i) 垄间平地. No.2 实验地垄间公路防护林带

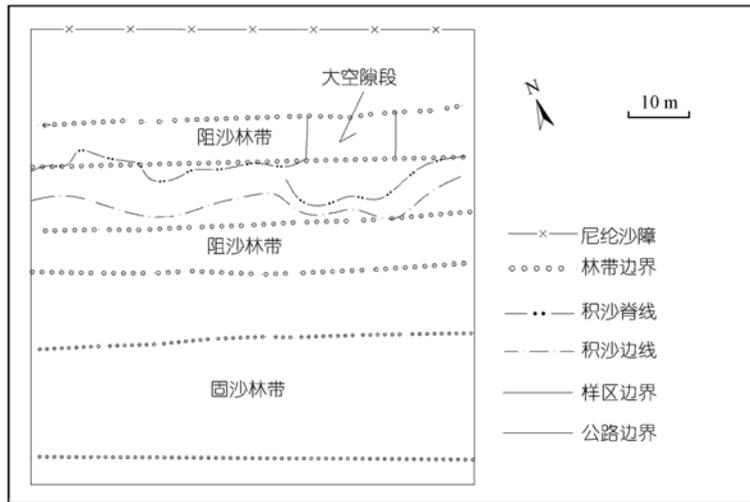


图 8 垄间阻沙林带死亡区段对林带积沙体推移的影响

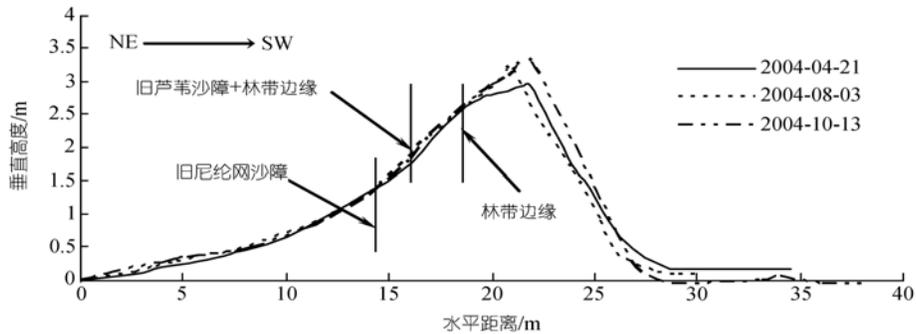


图 9 垄间阻沙林带积沙断面的动态变化

布局如图 11. 公路防沙体系上风侧包括尼纶网沙障(旧)、两道阻沙林带(宽 6~7 m)和固沙林带(宽 20 m), 下风侧包括固沙林带(宽 18 m)和草方格固沙带(旧, 宽 36 m), 防沙体系总宽度为 142 m, 防护林带的总宽度为 90 m(包括林带间隙、路面和路肩). 2004 年 4 月, 在防护林带下风侧的草方格固沙带和流沙地上布置了插钎观测断面, 钎走向与林带垂直, 钎间距为 2 m. 在风季中初期、中期和末期, 进行了 4 次测量.

草方格固沙带位于固沙林带外, 呈沙埋状态(外露 2~5 cm). 在风季中, 地面形态不断变化, 在测量区形成了位置较稳定 5 个风蚀区和 5 个堆积区, 风蚀

深度一般为 1~4 cm, 最大可以达到 6.5 cm, 积沙厚度一般为 0~4 cm, 最大为 7.3 cm. 在 4 次测量中, 草方格固沙带中的积沙量基本保持不变, 而风蚀量波动较大, 但在风季末(10月 7 日)固沙带处于净风蚀状态(表 1, 图 12(a)).

草方格固沙带外流沙地较平坦, 地表沙物质粒度粗化. 风季中测区内形成了位置较稳定的 4 个风蚀区和 5 个堆积区. 地表堆积区的积沙厚度一般都较小, 而且随着时间的延长, 积沙厚度逐渐减小; 测区的风蚀深度和风蚀范围随时间不断加大(图 12(b)), 在风季末, 所有地表都呈风蚀或蚀积平衡状态, 最大风蚀

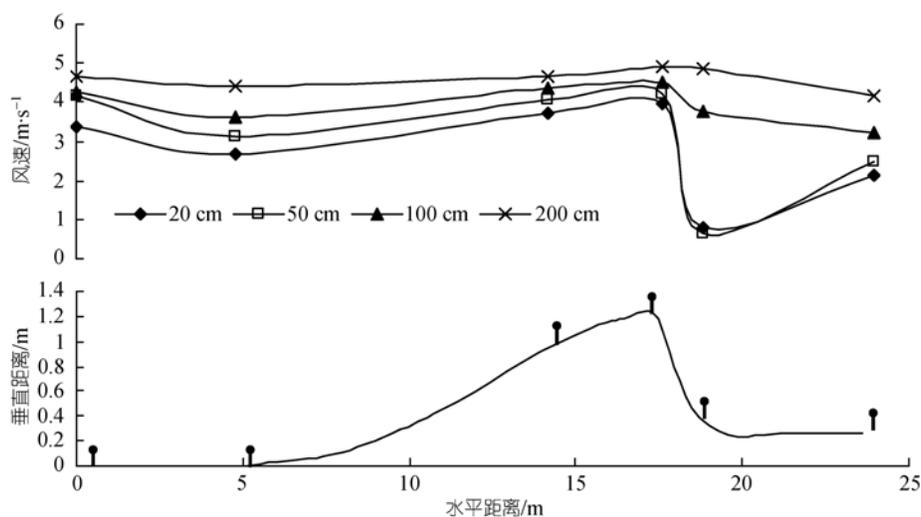


图 10 低矮新月形沙丘近地表风场

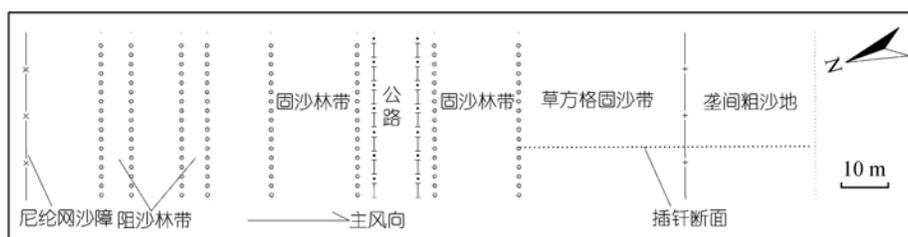


图 11 垄间平地防沙体系结构和观测断面布设平面图

表 1 垄间平地防沙林带下风侧地面蚀、积量的动态变化

区域	蚀积量/ $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$	2004-05-02	2004-05-25	2004-08-01	2004-10-07
草方格固沙带(36 m 长)	净变化	0.217	-0.156	0.024	-0.065
	风蚀量	-0.041	-0.42	-0.245	-0.318
	积沙量	0.258	0.264	0.269	0.253
原始地面(28 m 长)	净变化	0.04	-0.194	-0.43	-0.555
	风蚀量	-0.028	-0.198	-0.425	-0.544
	积沙量	0.068	0.004	0.005	-

深度达到 4.2 cm. 测区总积沙量随时间逐渐减小, 而风蚀量随时间逐渐增加(表 1). 除 5 月 2 日外, 在其他 3 次观测中流沙地都呈净风蚀状态.

因此公路防沙林带建设后, 风沙流输移沙物质大部分在林带内堆积, 使风沙流含沙量降低, 随着风速在防沙体系下风侧的不断恢复, 风沙流逐渐趋于极度不饱和状态, 因而产生地表风蚀. 从理论上分析,

随着远离防沙体系, 下风侧地表逐渐由风蚀向蚀积平衡状态转变. 在风季中后期, 防沙林带下风侧 64 m 的范围内都呈风蚀状态, 可见防沙林带下风侧的风蚀范围较大, 应大于 64 m.

(ii) 沙垄区. 在 No.2 实验区的垄顶区, 公路横断面为路堑式, 观测断面的防护体系布置如图 13. 在防护林带布置前(2001 年), 公路下风侧林带外侧小型

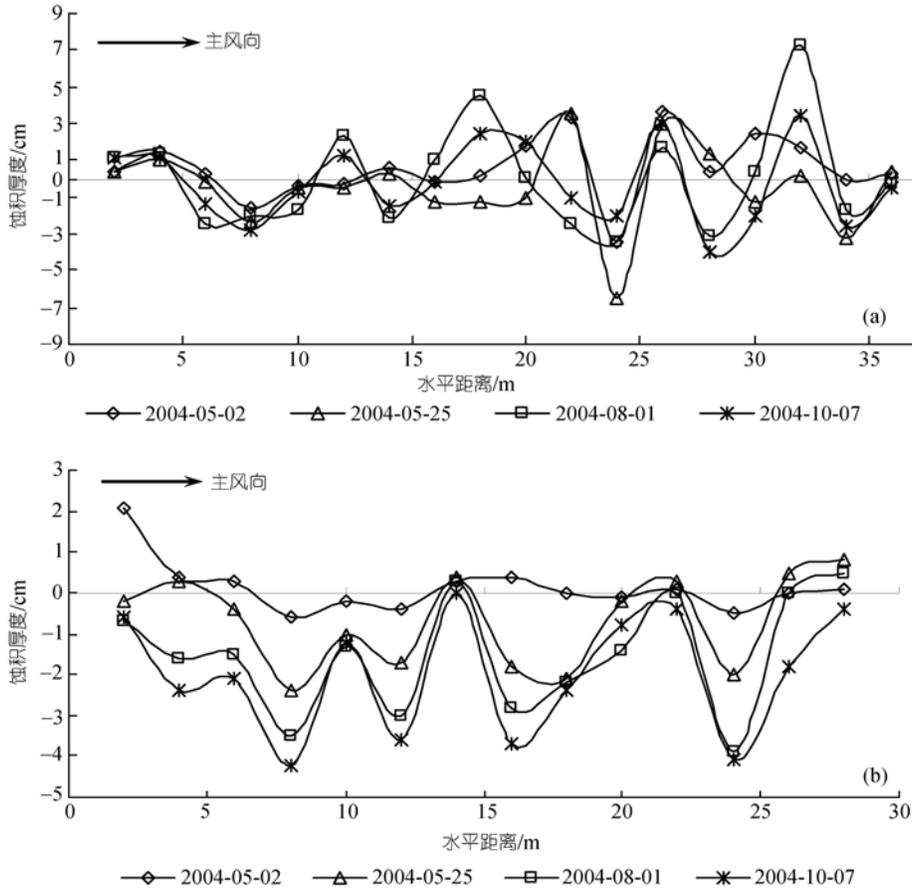


图 12 垄间平地防沙林带下风侧地面蚀、积分布和动态变化图

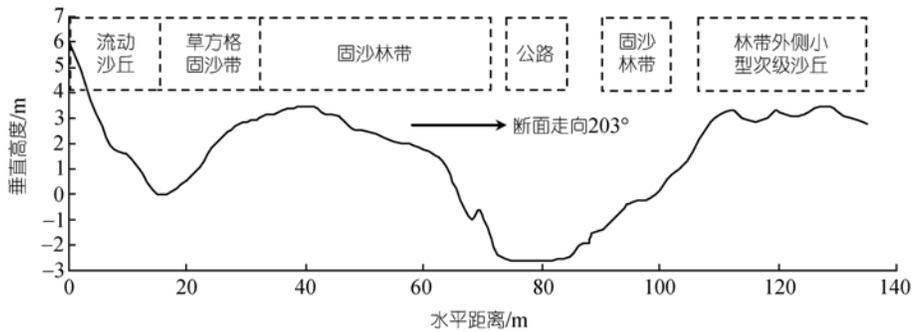


图 13 沙垄顶部路堑式公路横断面和林带外侧小型沙丘位置示意图

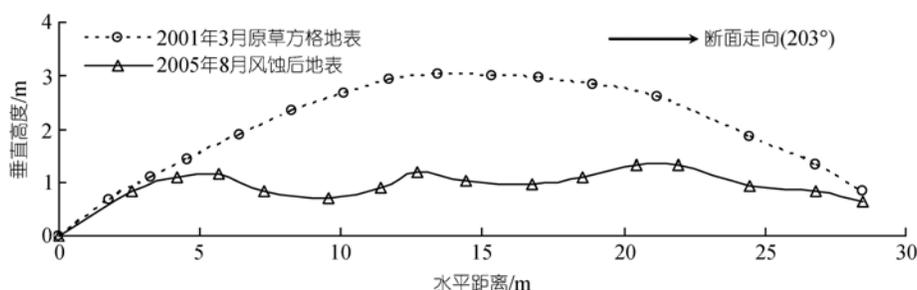


图 14 公路下风侧防护林带外围沙丘纵断面变化

次级沙丘为凸起形态,而防护林建设5年后,沙丘被强烈风蚀,呈平坦略微下凹的形态,最大风蚀深度可达1.5 m(图14),这表明,在沙垄顶部,风沙流挟沙绝大部分为固沙林带拦截,同时一部分沙物质也在深路堑(深5 m)中沉积.气流经过路堑迎风坡逐渐加速,到达林带外侧时,气流处于极度不饱和状态,对地表可形成强烈风蚀,使地表起伏度下降,地表形态趋于平缓.

4 结论

塔里木沙漠公路防护林建成后,极大地改变了该区域近地表的风沙运动条件,造成地表的风蚀和堆积,使地表形态发生变化,而在防护体系的不同位置这种变化的形式和强度也不同:(1)在防沙体系内部以堆积为主,形成了小尺度的灌丛积沙堆,中尺度的片状积沙和较大尺度的垄状积沙体.在林间也一定程度地形成风蚀,但在垄间一般难以大规模发育,而在沙垄区次级沙丘的迎风坡可较大规模地发育;(2)在防沙体系上风侧的自然沙面中,阻沙林带及其形

成的垄状积沙体使垄间的低矮流动沙丘在移动过程中发生形态和走向变化.在阻沙林带垄状积沙体的迎风坡,将形成稳定的积沙坡形,但前移沙丘可造成其短时间的变形,而后逐渐恢复;(3)在防沙体系下风侧自然沙面中,可形成较大范围的风蚀,在垄间区可形成风蚀凹地,在地形起伏区则使沙丘夷平,地形起伏度降低.可见,防沙林带对过境风沙流具有巨大的消能截沙作用,到下风侧随着风速的逐渐恢复,风沙流逐渐趋于不饱和状态,造成沙面风蚀.

在塔里木沙漠公路防护林影响下,地表形态的变化不仅影响局域风沙环境,而且在一定程度上也影响防护林的持续稳定发展.主要存在以下问题:(1)积沙压埋影响灌溉系统的正常工作,使维护成本增加,积沙和风蚀影响树木的生长发育;(2)林带内长久积沙改变公路原有横断面形式,多形成路堑断面,使路面更易积沙,影响交通.但林带积沙也有益处,如积沙层覆盖可减少土壤水分的蒸发损耗,增加树木可吸收水分,同时也使林地表层不易形成盐结皮层,降低突发性降雨植物盐害.

参考文献

- 1 马世威,马玉民,姚红林,等.沙漠学.呼和浩特:内蒙古人民出版社,1998.17—18
- 2 Skidmore E L. Soil erosion by wind: An overview. In: Farouk El-Baz, eds. Physics of Desertification. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, 1986. 261—273
- 3 朱震达,赵兴梁,凌裕泉,等.治沙工程学.北京:中国环境科学出版社,1998.26—36
- 4 Bagnold R A. 钱宁,林秉南译.风沙和荒漠沙丘物理学.北京:科学出版社,1959.172—218
- 5 朱震达,陈治平,吴正,等.塔克拉玛干风沙地貌研究.北京:科学出版社,1981.27—80
- 6 Wang X M, Dong Z B, Qu J J, et al. Dynamic processes of a simple linear dune—A study in the Taklimakan Sand Sea, China. Geomorphology, 2003, 52(3—4): 233—241
- 7 Dong Z B, Wang X M, Chen G T. Monitoring sand dune advance in the Taklimakan Desert. Geomorphology, 2000, 35(3—4): 219—231
- 8 董治宝,陈广庭,韩致文,等.塔里木沙漠石油公路风沙危害.环境科学,1997,18(1): 4—9
- 9 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.中国沙漠,1999,19(4): 438—442

- 10 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. 北京: 石油工业出版社, 1996. 535—549, 612—616
- 11 雷加强, 王雪芹, 王德. 塔里木公路风沙危害形成研究. 干旱区研究, 2003, 20(1): 1—6
- 12 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异研究. 干旱区地理, 2005, 28(1): 93—97
- 13 韩致文, 陈渭南, 陈广庭, 等. 塔里木沙漠公路实验段防沙工程效益分析. 中国沙漠, 1993, 13(4): 44—51
- 14 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. 干旱区研究, 1998, 15(1): 21—26
- 15 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. 中国沙漠, 1999, 19(2): 120—127
- 16 甄计国. 腾格里沙漠东南缘沙坡头地区流沙治理后的地表形态的变化. 中国沙漠, 1987, 7(1): 10—17
- 17 杭树亮. 防风固沙林带对沙丘形态结构的影响. 内蒙古林业科技, 1998, 27(1): 42—44
- 18 黄强, 雷加强. 塔里木沙漠公路不同地貌部位的高立式阻沙栅栏的阻沙特征. 干旱区地理, 2000, 23(3): 227—232
- 19 王训明, 董治宝, 陈广庭. 塔克拉玛干沙漠中部部分地区风沙环境特征. 中国沙漠, 2001, 21(1): 56—61
- 20 李恒鹏, 陈广庭, 薛东前. 塔克拉玛干沙漠腹地复合沙垄的流场和上覆沙丘组合及动态特征. 干旱区地理, 2001, 24(1): 80—85
- 21 武胜利, 李志忠, 海鹰. 新疆和田河流域单株柽柳灌丛流场的实验研究. 干旱区研究, 2006, 23(4): 539—543
- 22 Qong M, Takamura H, Hudaberdi M. Formation and internal structure of Tamarix cones in the Taklimakan Desert. *J Arid Environ*, 2002, 50: 81—97
- 23 Tengberg A. Nebkha dunes as indicators of wind erosion and land degradation in the Sahel zone of Burina Faso. *J Arid Environ*, 1995, 30: 265—282
- 24 凌裕泉, 屈建军, 金炯. 稀疏天然植被对输沙量的影响. 中国沙漠, 2003, 23(1): 12—17
- 25 Langford R P. Nabkha (coppice dune) fields of south-central New Mexico, U. S. A. *J Arid Environ*, 2000, 46: 25—41
- 26 Nickling W G, Wolfe A S. The morphology and origin of Nabkhas region of Mopti, Mali, West Africa. *J Arid Environ*, 1994, 28: 13—30
- 27 岳兴玲, 哈斯, 庄燕美, 等. 沙质草原灌丛沙堆研究综述. 中国沙漠, 2005, 25(5): 738—743
- 28 刘钰华, 张纯. 新疆防沙林带优化模式的研究. 干旱区研究, 1992, 9(2): 13—26
- 29 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. 干旱区研究, 2007, 24(2): 47—254