

塔里木沙漠公路影响下的地表形态变化

李生宇^{①②③} 雷加强^① 徐新文^① 王立新^② 周智彬^① 李红忠^{①③}

(^① 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; ^② 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; ^③ 中国科学院研究生院, 北京 100039. E-mail: lishy_hb@163.com)

摘要 通过野外试验、调查和实地测量, 对塔里木沙漠公路防沙体系内外的地表形态变化进行了分析。研究表明, 在防沙体系影响下, 地表蚀积具有明显的空间分布规律, 改变了原有的地表形态格局。防沙体系内部以积沙为主, 地表高度逐渐增加, 阻沙区(包括落沙带)形成顺沙垄走向延伸的横向沙垄, 固沙带区则以一定厚度的积沙体加积于原有地形之上。在防沙体系设置初期, 落沙带、固沙带内部和固沙带内沙丘迎风坡都形成风蚀, 而在防沙体系下风侧原始地面中, 整体表现为风蚀状态。

关键词 塔里木沙漠公路 防沙体系 地表形态变化

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。对于流沙地表的蚀、积变化, 前人已进行了较多的野外实地研究^[4-7], 但关于大型沙漠工程影响下的地表形态变化研究很少^[8-10]。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^[11,12]和防沙体系的防护效益^[13-15]等方面。

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, 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), 于 1995 年建成通车。塔里木沙漠公路沿线以高大复合型纵向沙垄地貌区段为主(占沙漠公路沙漠段的 50%左右), 高大复合沙垄与宽广的垄间地构成了大尺度的地貌格局。沙漠公路采用前阻后固的机械防沙体系, 其中阻沙栅栏以芦苇和尼龙网为原料, 高约 1.1 m, 孔隙度 30%~40%, 布置于防沙体系最外侧, 走向与公路平行; 草方格固沙带以芦苇为原料, 规格为 1m×1m, 设置在靠公路两侧, 东侧固沙带宽度多为 50~70 m, 西侧多为 40~60 m;

阻沙栅栏和固沙带之间为 10~20 m 宽的积沙带。1997 年以来, 在塔中油田基地路建设了生物防护林带, 防护林带一般包括阻沙林带和固沙林带。

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°^[16], 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^[17]; 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^[16]; 起沙风频繁, 风力强劲, 年起沙风频数(6.0 m/s, 地面 11.4 m 高)达 500 次以上, 年平均风速 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大瞬时风速达 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。年起沙风向以东北东、北东、北北东和东的风向组合为主, 东北东风时长、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^[18]。

2 试验布置和研究方法

在研究区域内, 垄间地地表起伏程度小, 是沙漠公路沿线最为简单和普遍(约占沙漠段 70%)的下垫面类型, 因此布置在该区域的试验干扰因素少, 接近理想状态, 而且在沙漠公路沿线具有很大的代表性。我们在垄间平地建立了机械防沙体系和生物防沙体系试验场地, 采用定点插钎测量法和全站仪地形测量法, 多次测量地表的形态。此外, 也选择了纵向沙垄区域防沙体系内的次级沙丘, 测量了其形态。

3 结果与讨论

由于地表的蚀积变化, 相对于原始地表形态, 防沙体系内外普遍发育了风蚀和风积微地貌, 而这些地貌形态的变化方式及其强度具有明显的空间分布

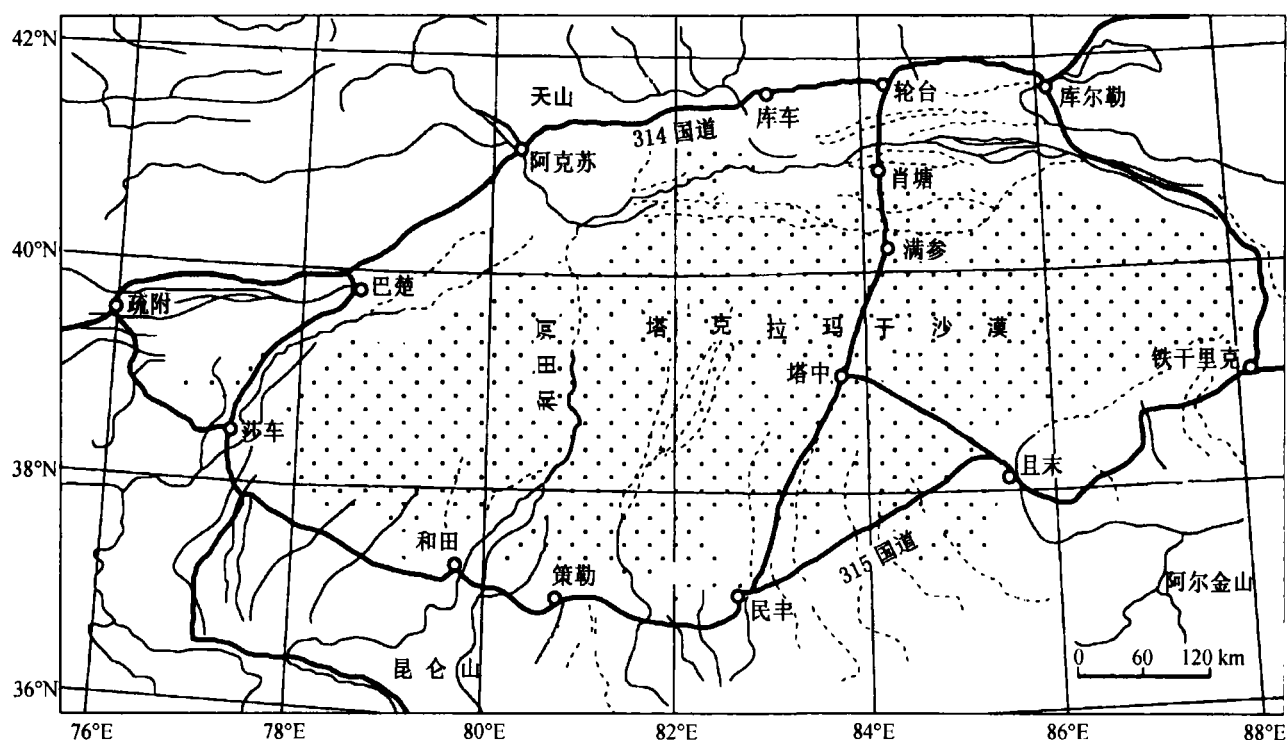


图1 塔里木沙漠公路位置图

规律。

3.1 积沙微地貌

风速变弱或遇到障碍物和地面结构以及下垫面性质改变都可引起风沙堆积^[19]。公路防沙体系增加了气流运行的障碍,在防沙体系内外广泛发育风积微地貌,按照积沙微地貌的形态变化尺度,可以分为垄状积沙和片状积沙。

(1) 垄状积沙。尼纶网阻沙栅栏(1.1 m)设置初期,栅栏前后约 $15H$ (H 为栅栏高度)的范围内,地表都呈积沙状态,而且栅栏背风侧积沙范围随时间逐渐扩大,在第二个风季初期达到 20m,在风季末积沙体已侵入草方格固沙带;积沙高度随时间也逐渐增加,积沙体最高点位于阻沙栅栏处或稍微向下风侧偏移,高度与阻沙栅栏同高或稍高;在两个风季中,栅栏前后积沙量基本随时间呈线性增长,但在第二个风季中后期,积沙量稳定在 $11 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ 左右(图 2),可见栅栏积沙量不可能无限制地增长,最终稳定在某一水平。

在 2003~2004 年两个风季中,栅栏积沙体的横断面不断发生变化,在积沙初期,横断面呈双峰,两峰分别位于阻沙栅栏的迎风侧和背风侧,两个底角较小;在积沙中期,积沙横断面呈三角形或梯形,峰值

位于阻沙栅栏的背风侧,两个底角增大,形成明显的落沙坡;在积沙后期,积沙断面形态基本呈三角形,迎风坡形态非常稳定,而背风坡变化频繁(图 2)。塔里木沙漠公路沿线调查也发现,阻沙栅栏的稳定积沙形态为顺栅栏走向延伸的垄状积沙体,其形态规整,横断面一般呈三角形,迎风坡较缓、背风坡较陡,迎风坡和背风坡的坡度分别为 $10^\circ \sim 20^\circ$ 和 $20^\circ \sim 30^\circ$;积沙体依附于栅栏而存在,不能像沙丘一样移动变化,当栅栏被破坏后,积沙体逐渐分解消失。

在林带边缘一般也形成垄状积沙,但积沙形态及其发展变化不同于阻沙栅栏。林带积沙断面形态类似新月形沙丘的纵断面形态,迎风坡较缓,背风坡呈明显的落沙坡;由于林带孔隙度较大,最大积沙高度小于林带高度;由于林带是一面状阻沙措施,因此积沙体不依附于林带边缘而存在,积沙体随时间逐渐向林带内部推移(图 3)。

(2) 片状积沙。在 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 草方格固沙带设置早期,迎风边缘内外最先形成积沙,积沙断面呈三角形,有明显的积沙峰值,迎风坡坡度较缓,背风坡较陡;在积沙初期,固沙带的积沙范围逐渐扩大,积沙峰值也不断向固沙带内部推移,积沙断面呈梯形,顶部平缓,呈微小起伏,两坡坡度也变缓;在风季中后期,

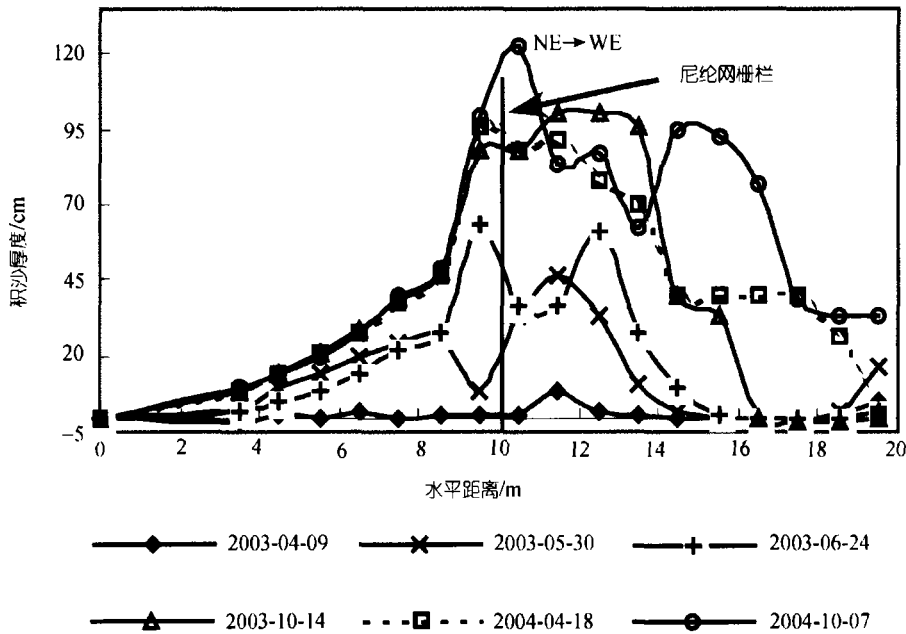


图 2 尼龙网阻沙栅栏积沙断面的动态变化

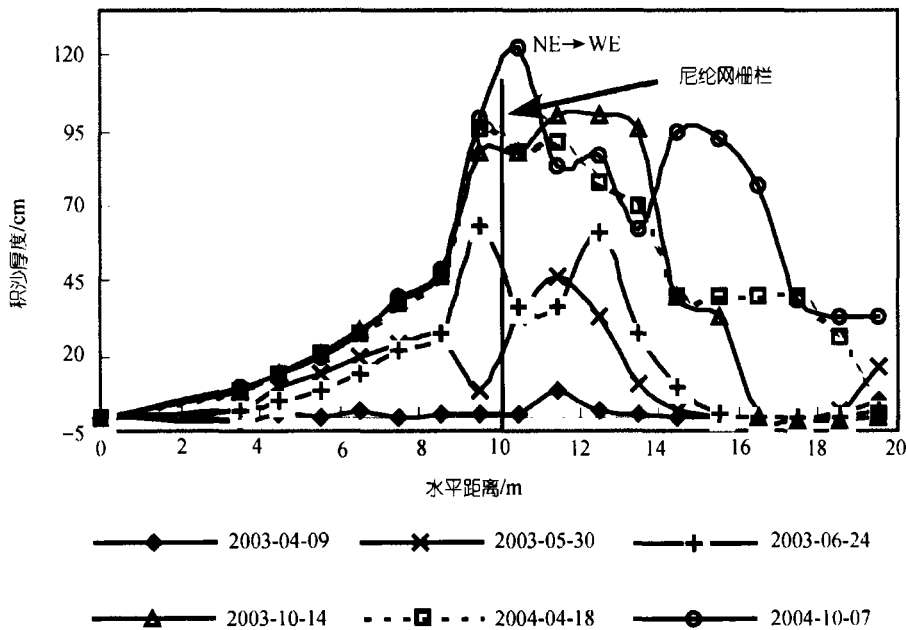


图 3 固沙林带边缘积沙断面的动态变化

积沙范围进一步扩大, 积沙断面呈梯形, 顶部平坦, 积沙峰值趋于均值. 在第一个风季末期, 积沙范围已达到 38 m, 而在第二个风季初期, 积沙范围已达 45 m. 固沙带被全埋后(草头外露高度约 5 cm 左右), 在风沙流长期作用下, 沙面逐渐形成有规律分布的蚀积平衡面(图 4). 固沙带积沙体加积于垄间平地之上, 使地表抬高了 20~30 cm.

图 3 中也可发现, 在固沙带迎风边缘外 5 m 范围内, 地表也呈积沙状态, 在风季中积沙断面较稳定, 最大积沙厚度 4~10 cm; 由于反向风的影响, 在风季中, 固沙带背风边缘内 5 m 范围内形成厚约 15 cm 左右的稳定积沙体, 积沙断面呈三角形, 当固沙带全部积沙时, 背风边缘外 5 m 范围内的积沙体与固沙带积沙体融为一体.

在风沙流长期作用下,草方格内将形成稳定凹曲面,凹曲面的平均最大深度与草方格的边长之比约为 1:10^[20].在肖塘试验段中调查也发现,1m×1m 草方格内广泛发育了凹曲面,而且凹曲面形态也表现出一定空间变化规律.在垄间平沙地,凹曲面光滑,最大深度为 5~6 cm,约等于边长的 1/20;而沙丘迎风坡中,凹曲面不光滑,凹曲面的深度较大,平均为 6~8 cm,最大可达到 13.8 cm,大于边长的 1/10;背风坡的凹曲面的深度较小,平均最大深度为 3~4 cm;两翼的风蚀深度也较小,平均为 5~6 cm.从迎风坡脚到坡中,凹曲面的深度逐渐增加,从坡中至坡顶风蚀深度逐渐减小.这反映了各地貌部位的风力、风沙流饱和度的差异.在塔中多数路段的调查中,并没有发现草方格有稳定凹曲面的形成.这可能与沙漠腹地的沙源丰富、风沙流异常活跃有关.

在地形起伏较大的垄间稀疏沙丘区或沙垄区,自然沙丘的落沙坡坡度较稳定,都呈流沙的休止角(30°~33°),沙丘迎风坡中下部的坡度约 10°~15°,而中上部的坡度约 7°~11°;但在草方格固沙带中,由于沙丘表面草方格内的积沙以及各地貌部位积沙量的不均匀分布,迎风坡中下部坡度有所增加,约 10°~19°,迎风坡中上部的坡度也有轻微的增加,约

8°~12°;落沙坡坡度略有减小.

在固沙林带中,林带边缘部分最先形成积沙,并逐步向林带内部缓慢推移,只有悬移态细粒粉物质能在林带中部形成沉积,因此林带边缘积沙厚度大于林带内部.4个风季后,垄间固沙林带的积沙厚度仅 7.5~14 cm(图 5(a)).在垄顶与垄间的过渡区,林带断面覆盖了一个完整的沙丘.受地形的影响,主要积沙区并不在林带边缘部分,而是在落沙坡和丘顶,落沙坡的最大积沙厚度达到 70 cm,丘顶达到 28 cm,而迎风坡仅 24 cm(图 5(b)).

3.2 风蚀微地貌

风蚀产生的原因即为风沙流由不饱和状态向饱和状态的变化.由于在防沙体系内一定部位风沙流达到过饱和,挟沙卸载堆积;风速在下风向逐渐恢复增加,而沙源匮乏,使得防沙体系内的落沙带、固沙带内部和防沙体系下风侧的风沙流饱和度降低,地表以风蚀为主.

(1) 落沙带区. 阻沙栅栏和阻沙林带的背风侧区域为落沙带.风速一般在落沙带中部降至最低,风沙流挟沙绝大部分沉积下来,随后风速开始恢复,风沙流逐渐趋于不饱和,形成地表风蚀.公路上风侧落沙带中的风蚀强度(深度)一般不大,阻沙栅栏落沙带

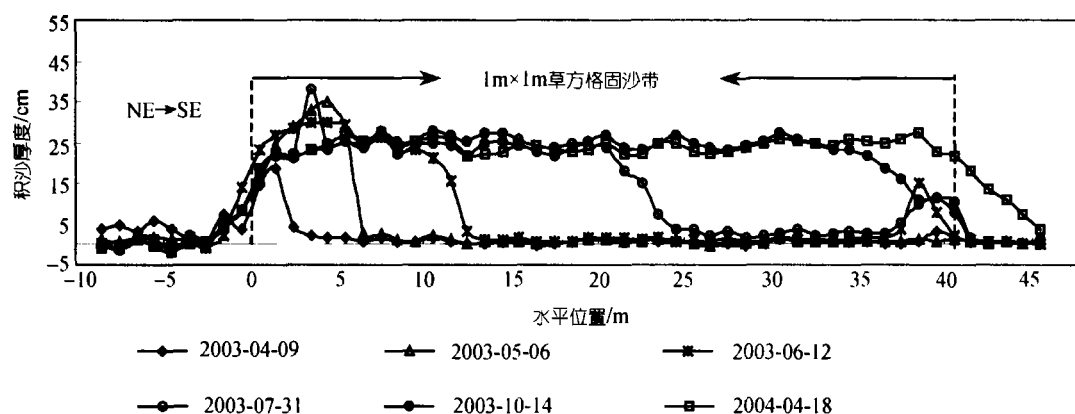


图 4 1m×1m 草方格固沙带的积沙断面的动态变化

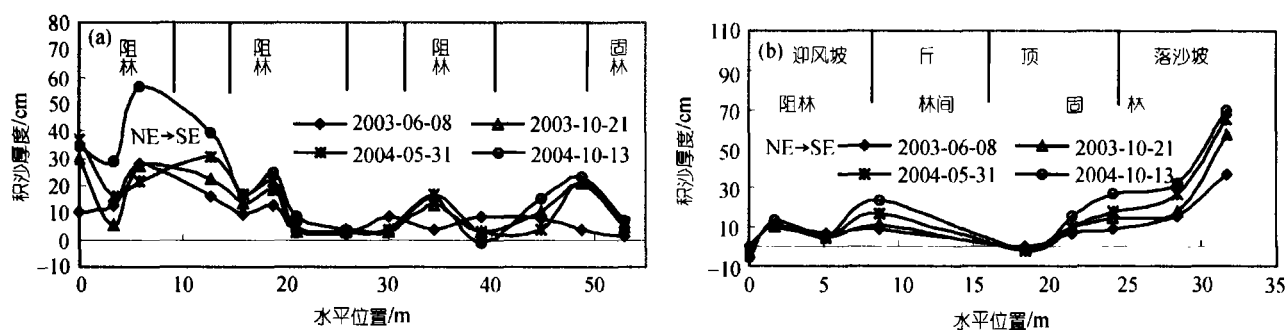


图 5 垄间(a)和过渡区(b)防沙林带的积沙量的动态变化

约 1~3 cm, 林间约 7~30 cm. 由于积沙体前移压埋和固沙带对沙面的固定, 风蚀微地貌一般难以大规模地发展, 最后逐渐消失. 但在公路的下风侧, 积沙带受主风向和反风向的交替作用, 积沙带中风蚀微地貌可以大规模地发展. 调查发现, 在塔里木沙漠公路横向沙垄区(K110 km 处), 垄间地落沙带的风蚀深度达 0.5 m 以上(图 6(a)), 而垄顶可达到 1 m 以上, 使埋设的输油管线出露地表(图 6(b)); 而且在反向风的作用下, 固沙带边缘也形成大面积风蚀, 风蚀区的最大宽度可达 10~16 m.

(2) 固沙带内部. 在草方格固沙带迎风边缘部分, 由于风沙流达到过饱和, 大部分挟沙卸载堆积; 而固沙带内部沙源较少, 风沙流趋于不饱和, 造成草方格内部的风蚀. 试验区观测发现, 在被积沙掩埋之前, 5 种草方格固沙带内部一般都形成风蚀, 但风蚀强度(深度)不大, 一般 1 cm 左右, 风蚀范围也较小, 一般 4~12 m 左右(受偏北风的影响, 1 m 行列式最大风蚀范围和强度分别达到 31 m 和 1.9 cm), 各规格之间的差异不明显(表 1). 随着积沙范围的扩大, 风蚀区逐渐被积沙掩埋, 在第一个风季末固沙带内部都不存在风蚀区(表 1). 王训明等^[15]也发现了在设置初期固沙带内部的风蚀现象.

由于沙丘自身形态对近地表风动力的分异, 部分区域风力加强, 草方格被风蚀, 致使沙丘形态发生变化. 塔里木沙漠公路沿线调查发现, 在固沙带内, 沙丘迎风坡普遍形成大范围的风蚀, 沙丘落沙坡顶部和沙丘前区也形成风蚀, 尤其在公路下风侧固沙

带中, 落沙坡和坡顶风蚀广泛发育. 且末路 K6 km 处调查发现, 在公路上风侧固沙带中, 沙丘的迎风坡中下部风蚀宽度达 12.6 m, 风蚀坑内的坡度达到 25°~32°, 较原始增加了 15°~21°(图 7(a)); 在公路下风侧的固沙带中, 由于主风向和反向风的交替作用, 迎风坡草方格被全埋, 坡度达到 13°~25°, 背风坡草方格被全部风蚀, 呈流沙状态, 坡度变缓, 中下部 11°~26°, 沙丘形态趋于对称, 断面呈等腰三角形(图 7(b)).

(3) 防沙体系下风侧临近沙面. 塔里木沙漠公路沿线主导风向明显, 沙物质被源源不断地向下风向搬运, 而公路沿线的过境风沙流挟沙绝大部分被防沙体系所拦截. 在防沙体系的下风向临近沙面, 由于垄间粗沙平地粗沙层的覆盖, 地表沙源极度匮乏, 而随着近地表风速的逐步恢复, 风沙流趋于极度不饱和, 相对挟沙能力极强, 可造成垄间粗沙地的风蚀. 因此, 防沙体系下风向一定范围内地表以风蚀为主.

观测发现, 阻固型防沙体系(尼纶网阻沙栅栏+20 m 宽 1 m × 1 m 草方格固沙带)设置当年, 其下风侧地表不断发生蚀、积变化. 整个风季中, 在固沙带下风侧 2.5~19.5 m 范围内, 约 83% 的地面处于风蚀状态, 其余呈积沙或蚀积平衡状态; 风蚀区的位置较固定, 两风蚀区的水平距离一般为 5 m. 风蚀强度一般不大, 最大风蚀深度为 2 cm, 而且距离固沙带越远, 风蚀强度越小; 风蚀强度随时间而变化, 10 月 7 日的平均风蚀深度大于 5 月 25 日, 但 I 和 III 两个风蚀区中心的风蚀深度变化很小(图 8(a)). 计算表明, 在约一个风季中, 固沙带背风外侧 2.5~19.5 m 的地表风蚀量 0.103

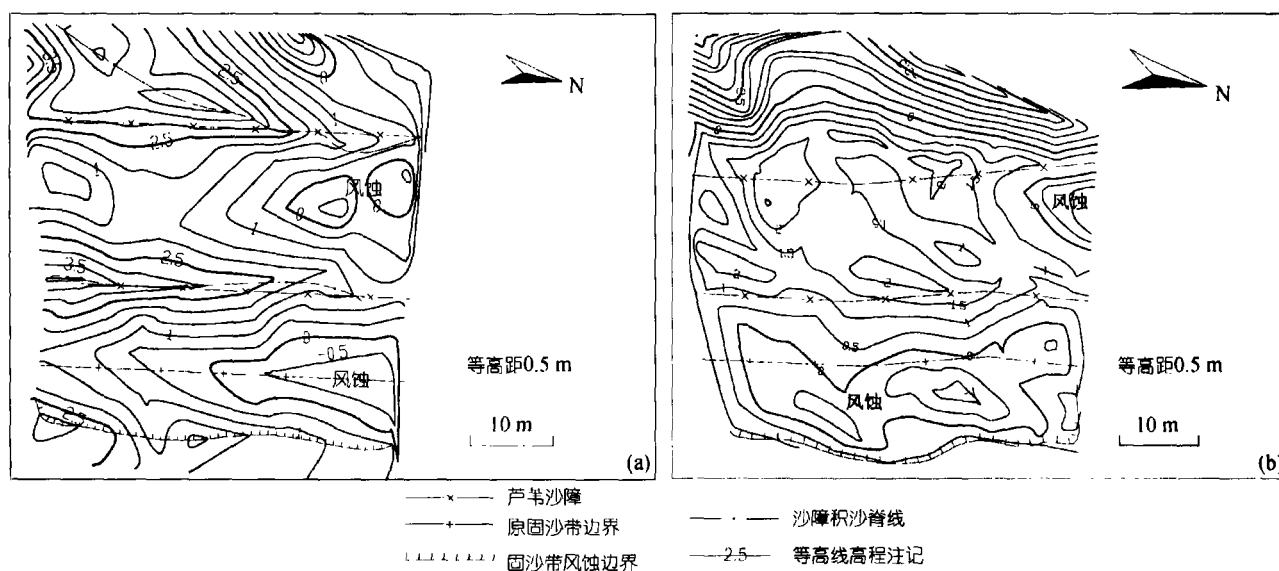


图 6 垄间(a)和垄顶(b)区域公路下风侧阻沙栅栏落沙带的风蚀微地貌

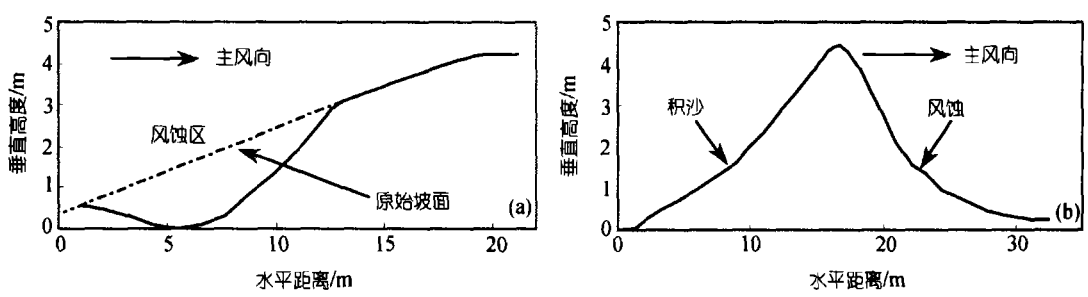


图7 固沙带内沙丘纵断面形态的变化
(a) 防沙体系上风侧; (b) 防沙体系下风侧

表1 固沙带内风蚀区的动态变化(2003年)

时间		4月9日	4月20日	5月6日	5月30日	6月12日	6月24日	7月31日	10月31日
规格									
1m×1m	范围/m	3	4	1	1	-	-	-	-
	强度/cm	-0.4	-0.3	-0.4	-0.2	-	-	-	-
1m行列式	范围/m	31	30	28	19	16	17	4	-
	强度/cm	-1.9	-1.9	-1.7	-1	-0.9	-1.1	-0.6	-
1.5m×1.5m	范围/m	4	5	4	4	-	-	-	-
	强度/cm	-0.3	-0.4	-0.2	-0.1	-	-	-	-
2m×1m	范围/m	2	5	4	3	2	1	-	-
	强度/cm	-0.5	-0.4	-0.5	-0.2	-	-	-	-
2m×2m	范围/m	12	12	11	10	7	-	-	-
	强度/cm	-0.5	-0.5	-0.6	-0.4	-0.8	-0.3	-	-

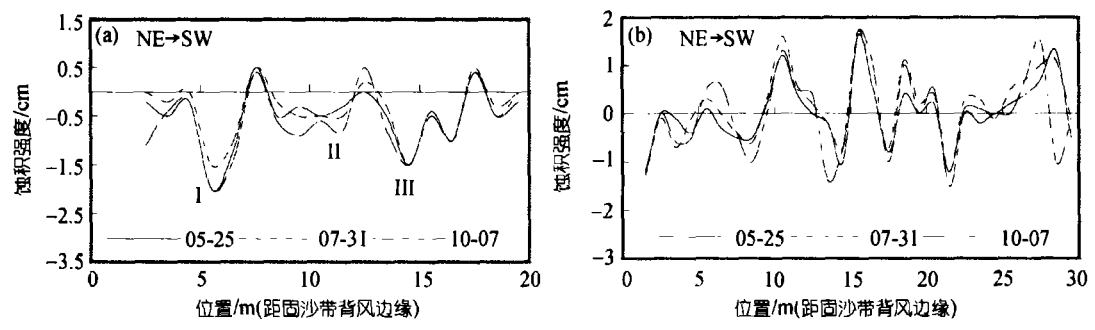


图8 垄间平地机械防沙体系下风侧地表的风蚀微地貌(2004年)
(a) 阻固型; (b) 固沙型

$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$, 折合 $155.74 \text{ t} \cdot \text{km}^{-1}$, 且风季末的风蚀量大于风季初. 对固沙型防沙体系 $1\text{m} \times 1\text{m}$ (图 8(b)), 1m 行列式, $2\text{m} \times 1\text{m}$, $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ 和 $2\text{m} \times 2\text{m}$ 等 5 种规格的固沙带(80 m 宽)观测也发现, 背风侧地表也以风蚀为主, 且风蚀范围约 20 m, 20 m 以外呈蚀积平衡状态.

在塔中垄间平地观测区, 公路上风侧防护林带的结构布局为旧尼纶网阻沙栅栏+两道阻沙林带+固沙林带, 阻沙林带宽 6~7 m, 固沙林带宽 20 m; 公路下风侧为固沙林带+林带外围全埋草方格固沙带, 固沙林带宽 18 m, 草方格固沙带宽 36 m; 从上风侧的尼纶网阻沙栅栏到下风侧的草方格固沙带, 防沙体系总覆盖范围达 142 m(包括林带间、路面和路肩). 对

防护林带下风侧的草方格固沙带和原始粗沙地进行了插钎测量(图 9)表明, 在风季中, 草方格固沙带的积沙量基本保持不变, 而风蚀量的波动较大, 最大风蚀深度为 6.5 cm, 5 月 25 日和 10 月 7 日地表都呈净风蚀状态. 在风季中, 原始粗沙地的积沙厚度较小, 且随时间逐渐减小; 而风蚀强度和范围随时间不断加大, 在 10 月 7 日, 观测范围内所有地表都呈风蚀或蚀积平衡状态, 最大风蚀深度达 4.2 cm, 总风蚀量达 $0.544 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ (28 m 长), 折合 $822.5 \text{ t} \cdot \text{km}^{-1}$, 而草方格固沙带仅为 $0.318 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ (36 m 长), 折合 $480.8 \text{ t} \cdot \text{km}^{-1}$. 因此在风季后期, 防沙林带下风侧 64m 的范围内都呈风蚀状态. 从理论上分析, 随着远离防沙

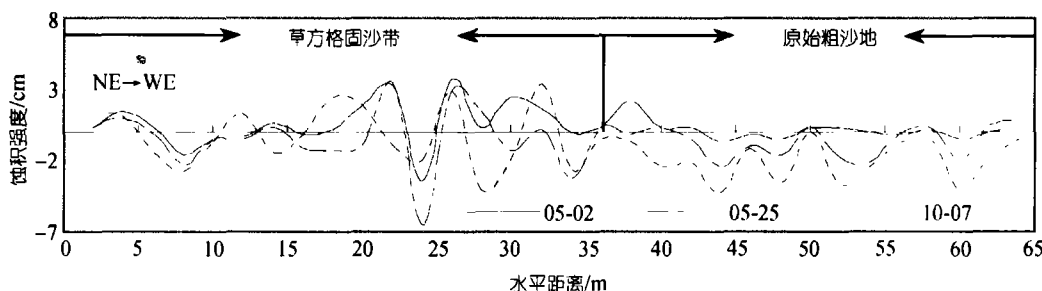


图 9 垄间平地防沙林带下风侧地表的风蚀地貌(2004 年)

体系, 地表风蚀量逐渐增加, 风沙流逐渐趋于饱和, 沙面逐渐由风蚀向蚀积平衡状态转变. 因此, 防沙林带下风侧的风蚀范围大于 64 m. 与机械防沙体系相比, 防沙林带下风侧沙面的风蚀范围和风蚀强度较大.

4 结论

由于防沙体系对近地表风沙运动过程的影响, 防沙体系内外地表微形态也发生了规律性的变化: (1) 防沙体系内多形成积沙微地貌, 地表高度增加; 不同防沙措施内的积沙形态不同, 其中尺度较大的阻沙措施前后形成了垄状积沙, 而尺度较小的草方格固沙带内以及防沙林带内部则形成片状积沙; 在沙源匮乏的区域, 草方格内稳定积沙形态为凹曲面, 而在沙源丰富的区域则凹曲面形态不发育. (2) 防沙体系内外的部分区域形成风蚀微地貌, 地表高度降低, 其中在防沙体系设置的初中期, 落沙带和草方格固沙带内部形成强度较小的风蚀, 存在时间也较短; 而在公路下风侧防沙体系的落沙带和防沙体系下风侧临近沙面中, 沙面的风蚀可以较大规模地发展, 存在时间也较长. (3) 在固沙带内, 沙丘的落沙坡呈积沙状态, 而沙丘的迎风坡可形成大范围的风蚀, 使流沙出露地表; 在防沙体系中的位置也影响沙丘的形态变化.

随着公路防沙体系的不断维护更新, 防沙体系内的持续的蚀积变化将改变公路的横断面形态, 进一步导致公路沙害的形成过程的变化; 因此可以利用防沙体系内外地表形态的变化来模拟预测将来的沙害发展状况. 防沙体系下风侧一定范围存在风蚀地貌, 为了公路路基的稳定性, 当公路与主导风向大角度相交时, 公路下风侧必须设置一定宽度的固沙带.

致谢 本工作为中国科学院重要方向项目(KZCX-SW-342)和西部开发科技行动项目(2005BA901A21)及中国科学院“西部之光”人才培养计划项目(20052118)资助.

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: Fourouk E1-130z, ed. 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 Xunming Wang, Zhibao Dong, Jianjun Qu, 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 Zhibao Dong, Xunming Wang, Guangting Chen. Monitoring sand dune advance in the Taklimakan Desert. Geomorphology, 2000, 35(3-4): 219—231
- 8 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
- 9 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
- 10 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
- 11 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
- 12 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
- 13 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. 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 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
- 17 雷加强, 王雪芹, 王德. 塔里木沙漠公路风沙危害形成研究. 干旱区研究, 2003, 20(1): 1—6
- 18 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
- 19 吴正. 风沙地貌学. 北京: 科学出版社, 1987. 59—61
- 20 凌裕泉. 草方格沙障的防护效益. 见: 中国科学院兰州沙漠所沙坡头沙漠研究站编著. 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, 1980. 96—97

(2005-07-20 收稿, 2006-01-16 收修改稿)