

新疆策勒县固定沙地骆驼刺带状平茬对地表蚀积变化的影响

毛东雷^{1,2,4}, 雷加强^{2,4}, 庞营军², 王翠^{2,3,4}, 周杰^{2,3,4}, 薛杰^{2,3,4}

(1. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054;

2. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 中国科学院大学,

北京 100049; 4. 新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 新疆 策勒 848300)

摘要: [目的] 在对新疆策勒绿洲—沙漠过渡带绿洲边缘的固定沙地风蚀风积变化研究基础上, 结合地表风速变化分析, 探讨骆驼刺带状平茬和地形等对地表蚀积变化影响及其规律。[方法] 采用插钎法、地形测量法、风速野外观测等方法。[结果] 春季骆驼刺平茬初期, 由于地表植被覆盖度大量减少, 平茬带和保留带内地表主要以风蚀为主。夏季随着植被覆盖度的增加, 地表主要以风积为主, 地势较低、植被稀疏地表以轻微风蚀为主, 秋季地表植被盖度基本保持最大和稳定, 同时风力的减弱明显地减少了地表的风蚀量和风积量, 地表主要以风积为主。[结论] 春季骆驼刺带状平茬 4 m 保留 3 m 宽度利用方式不能有效地抵御地表风蚀危害, 而夏秋季具有较好的防护效益。

关键词: 蚀积变化; 骆驼刺; 带状平茬; 覆盖度; 新疆策勒县

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)05-0173-07

中图分类号: S727.23

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.05.098

Influences of *Alhagi Sparsifolia* Stumping on Sand Surface Erosion and Deposition in Cele County of Xinjiang Uygur Autonomous Region

MAO Donglei^{1,2,4}, LEI Jiaqiang^{2,4}, PANG Yingjun², WANG Cui^{2,3,4}, ZHOU Jie^{2,3,4}, XUE Jie^{2,3,4}

(1. College of Geography Sciences and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi,

Xinjiang 830054, China; 2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences,

Urumqi, Xinjiang 830011, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Cele National Station of Observation and Research for Desert-Grassland Ecosystem in Xinjiang, Cele, Xinjiang 848300, China)

Abstract: [Objective] Based on previous research of wind erosion and deposition in oasis-desert zone, we aimed to explore the influences of *Alhagi sparsifolia* stumping and topography on sand surface erosion and deposition in Cele County of Xinjiang Uygur Atonomous Region. [Methods] Erosion pins were used and topographic surveys and wind velocity observations were conducted. [Results] The surfaces of stumping belts and reservation belts were dominated by wind erosion due to the large decreasing of vegetation coverage at the beginning of *A. sparsifolia* stumping in spring. Wind deposition occurred on the surfaces of *A. sparsifolia* quadrates due to the increased vegetation coverage in summer. Slight wind erosion mainly occurred on the surface with sparse vegetation and low topographic position. In autumn, as the vegetation coverage on the land surface maintained maximum and stable, wind erosion and deposition decreased, and the sand surface was dominated by wind deposition. [Conclusion] *A. sparsifolia* stumping with width of 4 m and 3 m for stumping belt and preserving belt, respectively, may not effectively prevent wind erosion in spring, but can

收稿日期: 2014-07-21

修回日期: 2014-08-23

资助项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项项目子课题“绿洲外围节水型生物防护体系构建及可持续经营技术开发与示范”(201130106-1); 新疆师范大学地理科学与旅游学院地理学博士点支撑学科和新疆维吾尔自治区重点实验室“新疆干旱区湖泊环境与资源实验室”基金项目; 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106025)

第一作者: 毛东雷(1975—), 男(汉族), 新疆维吾尔自治区石河子市人, 博士, 讲师, 主要研究方向为风沙地貌及荒漠化防治。E-mail: donglei6325@sina.com。

通信作者: 雷加强(1961—), 男(汉族), 陕西省高陵县人, 博士, 研究员, 主要从事荒漠化防治及风沙物理等方面的研究。E-mail: desert@ms.xjb.ac.cn。

effectively prevent wind erosion in summer and autumn.

Keywords: changes of wind erosion and wind deposition; *Alhagi sparsifolia*; stripe stumping; vegetation coverage; Cele County of Xinjiang Uygur Autonomous Region

风蚀和沙尘暴对地表土壤的大量搬运和堆积作用,是导致干旱半干旱地区土地沙化和荒漠化进程最重要、最直接的过程之一^[1]。Wolfe 和 Nickling^[2]研究表明植被具有覆盖地表免受直接吹蚀、分散地表风动量、阻止被蚀物质运动 3 种形式影响风蚀。曾凡江等^[3]研究表明骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)是生长于荒漠、半荒漠区的多年豆科木质化草本植物,尤其在塔里木盆地骆驼刺既是防风固沙的重要自然植被,又是草食家畜不可缺少、也无法替代的饲草种之一。董志国、热合木都拉、李瑞年等^[4-7]研究了骆驼刺的改土治沙、经济价值及其利用,指出骆驼刺是牧草、草药、防风固沙的经济物种。黄彩变等^[8]对留茬高度对骆驼刺生长发育和产草量影响进行了研究,指出骆驼刺的生长季(5—9月)和起沙风的频发期相吻合,建议在 9 月份后对骆驼刺进行齐地面刈割。李海峰等^[9]研究了不同干扰方式对疏叶骆驼刺形态特征及地上生物量的影响。王雪芹等^[10]、李振武等^[11]研究了骆驼刺群落的防风阻沙作用及绿洲外围植被生态防护效益。策勒绿洲边缘具备可靠防护功能骆驼刺植被群落盖度 $\geq 30\%$ ^[12]。赵彩霞等^[13]研究指出在防风蚀的作用效应中灌木 $>$ 多年生牧草 $>$ 林木 $>$ 作物 $>$ 1 年生牧草。

上述研究多针对骆驼刺经济、生态价值、有效生态恢复、防风蚀效应等开展的,而针对天然骆驼刺合理的带状平茬人为干扰方式对骆驼刺资源合理使用和地表蚀积变化影响研究鲜有报道。骆驼刺植被尤其在新疆南疆地区具有重要的牧草价值和防风固沙功能。本文针对风沙危害十分严重的策勒地区,选取靠近绿洲农田的天然骆驼刺固定沙地为研究对象,探讨春季骆驼刺齐地面带状平茬对地表风蚀、风积变化影响及其规律,从而为合理利用骆驼刺资源、绿洲—沙漠过渡带生态环境的恢复、防止绿洲农田免受大面积的风蚀危害提供一定理论支撑和科学依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

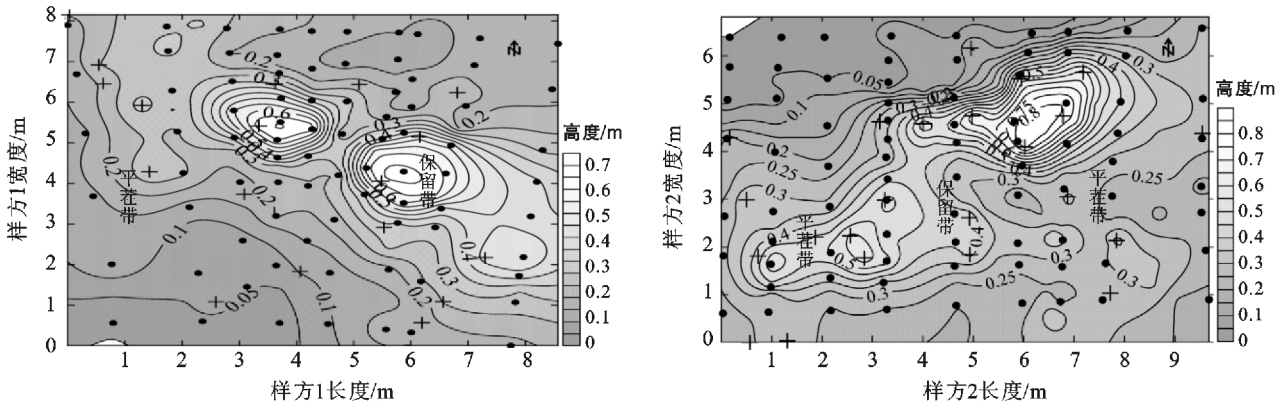
策勒县位于塔克拉玛干沙漠南缘与昆仑山北麓之间,地理位置 $80^{\circ}03'24''$ — $82^{\circ}10'34''$ E, $35^{\circ}17'55''$ — $39^{\circ}30'00''$ N,属典型内陆暖温带荒漠气候,夏季炎热,干旱少雨,光热充足,昼夜温差大,极端最高气温 41.9°C ,极端最低气温 -23.9°C 。多年平均降水量

为 35.1 mm ,年潜在蒸发量 $2\ 600\text{ mm}$ 。由于地处塔里木盆地两大主导风向(NW,NE)的下风区域,风沙灾害频繁,多年平均沙尘日数 25.2 d ,最多年高达 59 d ,每年 8 级以上大风 $3\sim 9$ 次^[14]。在历史上策勒县城曾 3 次因风沙淹没而被迫迁移,风沙灾害天气严重制约着当地社会经济的发展。研究区风向以 WNW, W 风为主,频率占 $62.43\%\sim 76.25\%$,NW 风次之,频率占 17.75% ^[15];策勒绿洲区流动沙丘沙粒度平均值以极细沙为主,其中极细沙含量多在 70% 左右,粉沙含量 20% ,细沙含量较低^[16]。策勒绿洲—沙漠过渡带绿洲边缘的天然固定沙地地表主要分布骆驼刺群落,地势相对较为平缓,骆驼刺沙堆形态多不发育,总体植被盖度 67% 。

1.2 野外试验设计及研究方法

在固定沙地选取 2 块植被盖度和地形不同样方和一条长约 130 m 的自西向东断面线样带,2010 年 4 月初进行骆驼刺人工带状齐地面平茬,带状平茬宽度和保留宽度分别为 4 m , 3 m (图 1)。平茬样方 1 东西长 8.5 m ,南北宽 8 m ,样方 2 东西长 9.5 m ,南北宽 7 m 。地表形态主要以丘状突起骆驼刺灌丛沙堆和丘间裸平沙地为主,相对高差在 $0\sim 1.2\text{ m}$ 之间。样方和样带内平均 $0.5\sim 1.5\text{ m}$ 间距插一根风蚀钎,风蚀钎直径约为 3 mm ,长 60 cm ,首次插钎插入地表以下 30 cm 、出露地表高度为 30 cm 。在样地附近安装一个气象观测站,气象站型号为 HOB0U30,观测指标有风速、风向等,观测时间间隔为 1 min 。平茬前的骆驼刺平均干重为 305.77 g/m^2 ,由于骆驼刺植被呈斑块状分布,2 个观测样方平茬前地表植被盖度都小于 40% ,平茬 4 个月后盖度有所恢复,样方 1 和样方 2 植被盖度分别为 28.26% , 35.22% 。根据每次观测阶段样地内风蚀钎的高度差,利用 Surfer 8.0 软件计算地表蚀积变化量,插钎前用全站仪测定每个样地和样带的原始地形。骆驼刺平茬样带断面线地形起伏较大,有 4 个起伏较大的骆驼刺灌丛沙堆,地势自西向东整体逐渐升高(图 2)。观测日期为 2010 年 4 月 16 日至 2010 年 11 月 4 日,半个月至 1 个月观测 1 次,共有春季、夏季、秋季 7 个连续观测阶段。研究区位于塔克拉玛干沙漠南缘,其 2 m 高起沙风速取 5 m/s ^[17-19]。

所有蚀积数据及气象数据采用 Excel 2003, Surfer 8.0, Origin 8.0 软件分析并制图。



注: · 代表风蚀钎所在位置; + 代表植被根部位置。下同。

图 1 骆驼刺平茬样方植被及风蚀钎分布

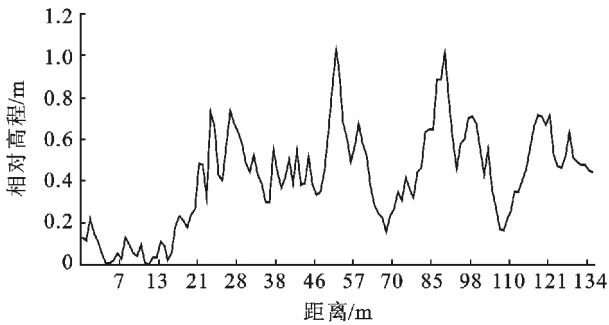


图 2 骆驼刺平茬样带地形线(从左到右为自西向东)

2 结果与分析

2.1 骆驼刺平茬样方蚀积变化

在 4 月 16 日至 5 月 12 日和 5 月 12 日至 5 月 21 日观测阶段,骆驼刺样方 1 平茬带内以轻微风蚀为主,保留带内地表主要以局部风蚀和风积为主,这是因为保留带内植被分布较少且稀疏,保留带西侧存在一个风蚀凹地。第一个阶段风蚀量大于第二个阶段风蚀量,最大风蚀深度 6 cm,在 5 月 21 日至 6 月 4 日和 6 月 4 日至 7 月 20 日 2 个阶段地表发生轻微的蚀积变化(图 3)。骆驼刺平茬样方 2 在 4 月 16 日—5 月 12 日阶段平茬带地表主要以风蚀为主,前 2 个观测阶段保留带内裸平沙地表面也以风蚀为主,这是因为在春季裸露沙堆顶部风速较大,植被盖度的减小有利于地表风蚀的加剧。进入夏季后风蚀量逐渐减少,地势较低和植被盖度稀疏的地表表现出相对较大的风蚀量,最大风蚀深度 1.3 cm(图 4)。4 月 16 日至 5 月 12 日观测阶段,样方 1 地表堆积率和侵蚀率分别为 34.67%, 65.33%(表 1),样方 2 地表堆积率和侵蚀率分别为 39.44%, 60.56%(表 2),都主要以风蚀为主,风蚀和风积主要分别发生在平茬带和保留带,说明植被盖度和地形都会对地表风蚀和风积量产生一定影响。

在 7 月 20 日至 8 月 22 日、8 月 22 日至 10 月 4 日 2 个观测阶段,2 个样方内地表植被盖度都有所恢复,同时这 2 个观测阶段近地表风力有所减弱。在 7 月 20

日至 8 月 22 日观测阶段,2 个样方内地表主要以风积为主,样方 1 平茬带内灌丛沙堆南部低地上出现了风蚀,最大风蚀深度 0.6 cm,最大风积深度 1.5 cm,样方 1 地表风积深度大于样方 2 地表风积深度。样方 2 保留带南侧裸沙地出现了轻微风蚀,最大风蚀深度 0.8 cm,风积主要发生在植被根部及背风坡处。在灌丛沙堆侧翼裸平沙地上表现出一定程度的风蚀(图 5)。在 8 月 22 日至 10 月 4 日观测阶段,样方 1 地表整体以风积为主,样方 2 地表整体表现出轻微的地表风蚀,保留带北侧风蚀深度大于其余地表(图 5)。7 月 20 日至 8 月 22 日观测阶段,2 个样方内平茬带地表主要以风积为主,裸露沙地表面有轻微风蚀现象,且平均风积深度在一年内表现出最大。在此观测阶段,平茬样方 1 地表堆积率和侵蚀率分别为 80.34%, 19.66%(表 1),平茬样方 2 地表堆积率和侵蚀率分别为 79.77%, 20.23%(表 2),说明春季对骆驼刺进行带状平茬 3~4 个月,地表植被盖度达到最大,其阶段骆驼刺等灌草防风固沙的能力也达到全年最强。

骆驼刺平茬样方 1 和样方 2 在平茬后第一个阶段地表单位面积风蚀量最大,分别为 0.003 85 和 0.002 51 m³/m²,然后又逐渐减小,随着观测时间间隔的延长和起沙风时间的增加,地表风蚀量又有所增加。地表风积量呈逐渐增大趋势,然后夏季过后又大幅度下降并基本保持稳定(表 1—2),这说明了骆驼刺平茬后的 1 个月内地表风蚀量显著增加,随着新生骆驼刺从平茬根部不断萌发生长,地表植被覆盖度逐渐增加,其防风固沙能力也逐渐增强。天然骆驼刺的平茬一定程度上有利于骆驼刺的萌发和生长,增加地表生物量。策勒春夏季是沙尘暴和扬沙天气频发的季节,春季天然植被盖度低,抵御风沙能力不如夏季,易对天然骆驼刺荒漠区周边新开垦的农田造成风沙危害。春季骆驼刺带状平茬初期易造成地表风蚀量加剧,但骆驼刺萌发迅速,随植被盖度的恢复又增加了骆驼刺群落防风固沙的能力。

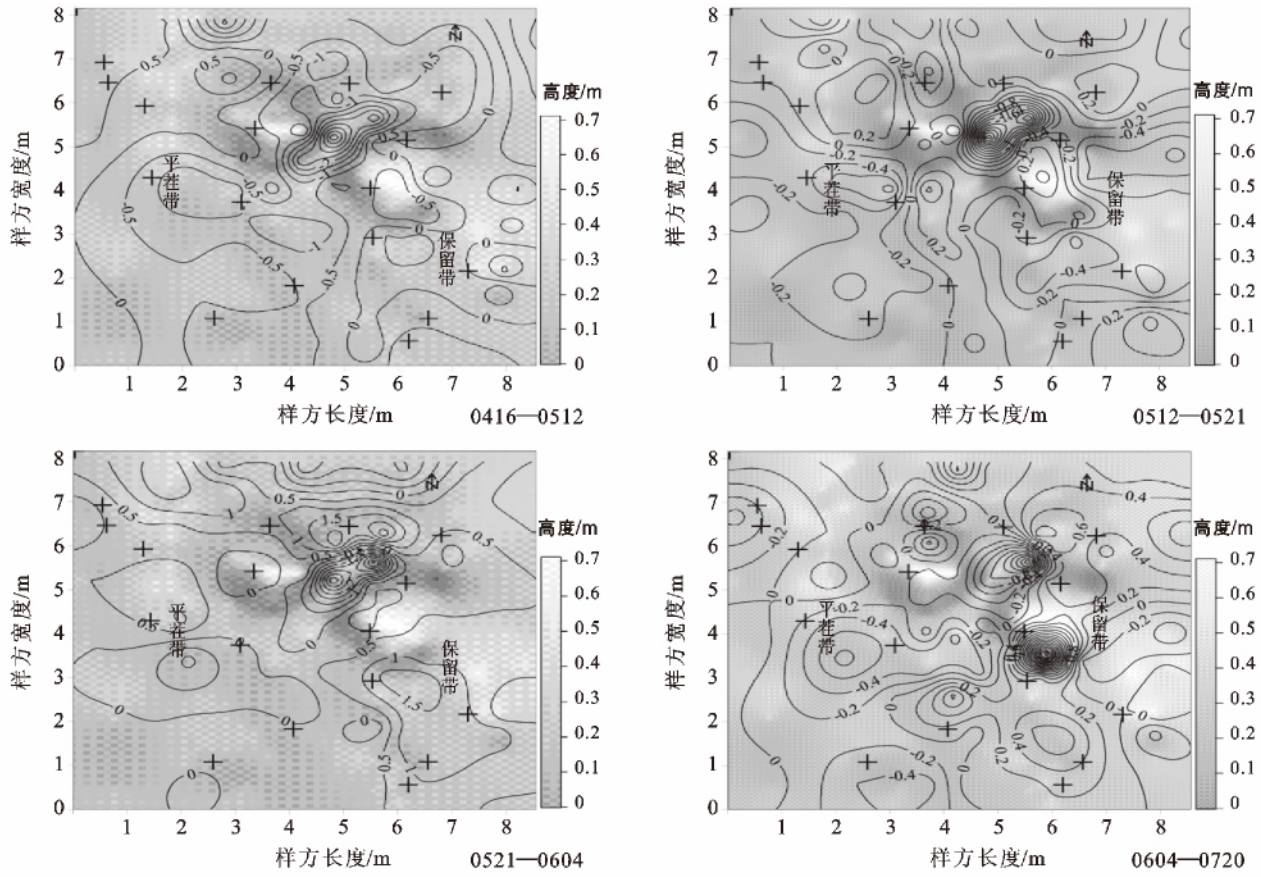


图 3 骆驼刺平茬样方 1 蚀积变化

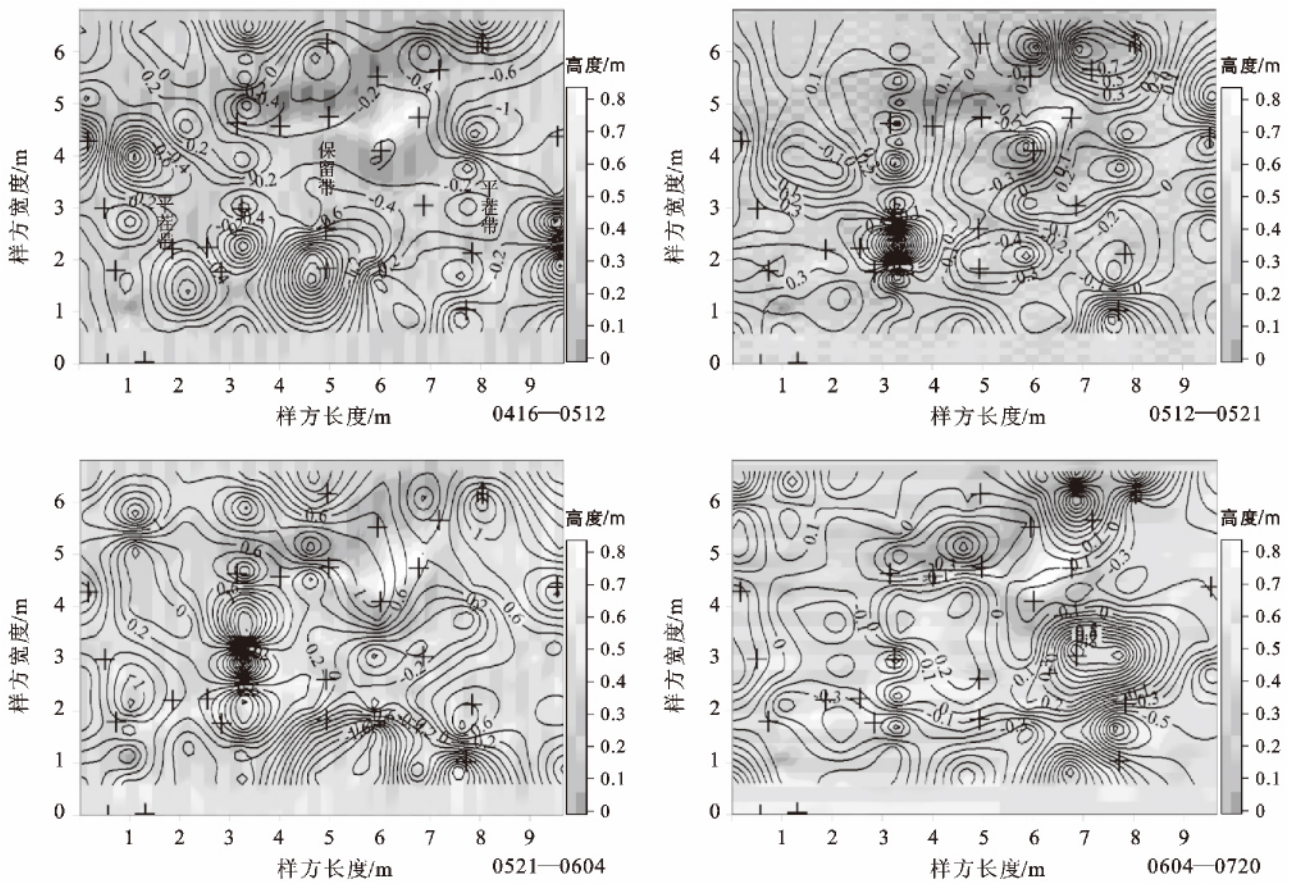


图 4 骆驼刺平茬样方 2 蚀积变化

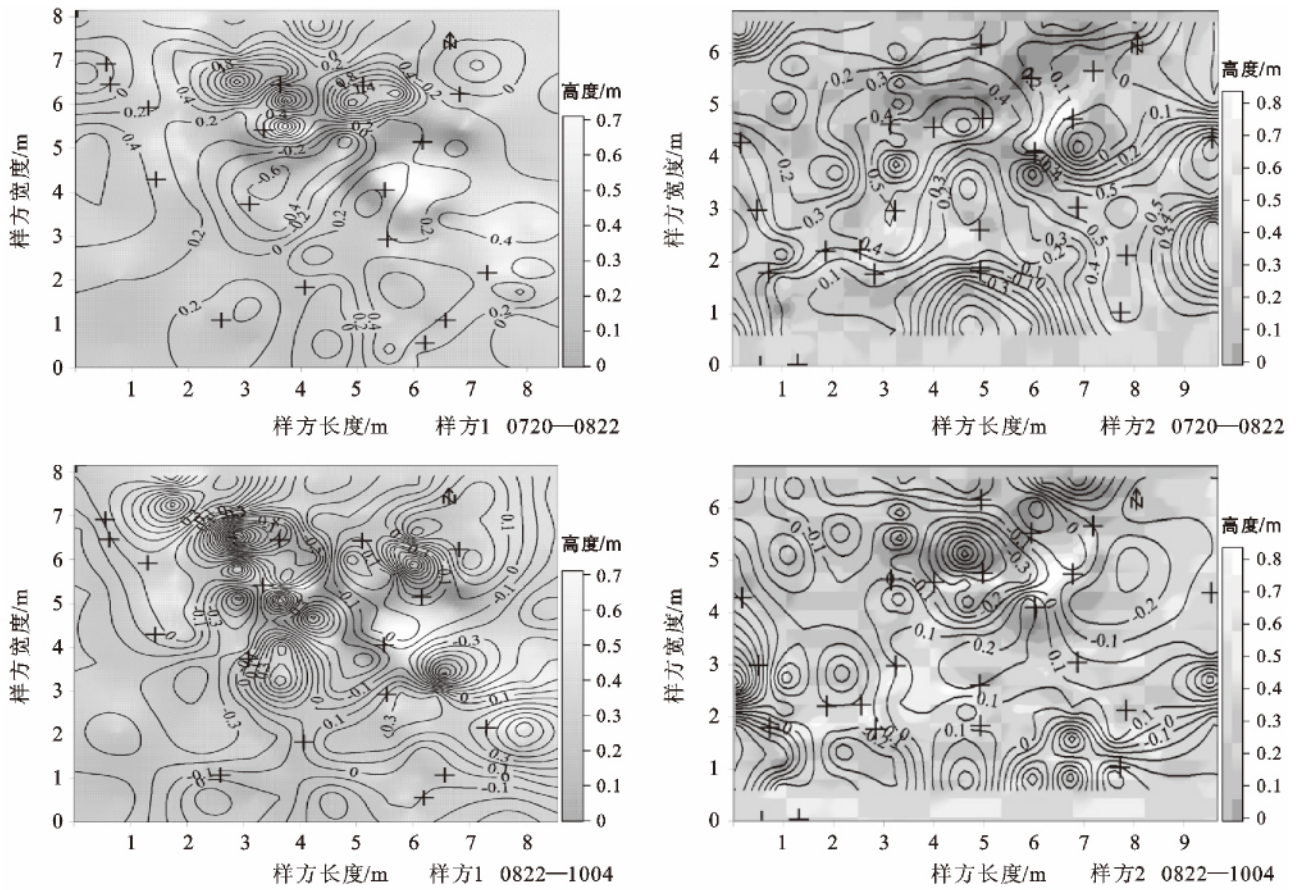


图 5 骆驼刺平茬样方 1 和样方 2 蚀积变化

表 1 样方 1 观测阶段风速及蚀积变化量

时间段	平均风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	最大风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	起沙时间/ min	堆积量/ m^3	侵蚀量/ m^3	净蚀积量/ m^3	堆积率/ %	侵蚀率/ %
0416—0512	5.874	7.99	483	0.081 1	-0.261 0	-0.179 9	34.67	65.33
0512—0521	5.866	10.28	155	0.039 7	-0.127 6	-0.087 9	33.88	66.12
0521—0604	6.062	9.90	744	0.304 0	-0.061 1	0.242 9	79.46	20.54
0604—0720	5.772	7.99	635	0.099 7	-0.085 4	0.014 3	50.15	49.85
0720—0822	5.854	7.99	1 171	0.171 2	-0.029 0	0.142 2	80.34	19.66
0822—1004	5.728	8.38	587	0.043 5	-0.113 0	-0.069 5	33.00	67.00
1004—1107	6.809	10.28	513	0.202 0	-0.038 0	0.164 0	78.94	21.06

注:正数代表堆积,负数代表侵蚀。下同。

表 2 样方 2 观测阶段风速及蚀积变化量

时间段	平均风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	最大风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	起沙时间/ min	堆积量/ m^3	侵蚀量/ m^3	净蚀积量/ m^3	单位面积 净蚀积量/ m^3	堆积率/ %	侵蚀率/ %
0416—0512	5.874	7.99	483	0.120 1	-0.201 0	-0.080 9	-0.001 0	39.44	60.56
0512—0521	5.866	10.28	155	0.155 4	-0.047 2	0.108 2	0.001 4	67.87	32.13
0521—0604	6.062	9.9	744	0.328 1	-0.139 8	0.188 3	0.002 4	70.43	29.58
0604—0720	5.772	7.99	635	0.074 0	-0.129 3	-0.055 3	-0.000 7	39.82	60.18
0720—0822	5.854	7.99	1 171	0.184 1	-0.037 2	0.146 9	0.001 8	79.77	20.23
0822—1004	5.728	8.38	587	0.034 6	-0.116 5	-0.081 9	-0.001 0	32.77	67.23
1004—1107	6.809	10.28	513	0.178 9	-0.061 4	0.117 5	0.001 5	75.11	24.89

2.2 骆驼刺平茬样带蚀积变化

骆驼刺平茬后的第一个观测阶段,平茬样带地表

整体以风蚀为主,且风蚀量表现出最大。5月12日至5月21日观测阶段,平茬样带地表整体风蚀量大于风

积量,且风蚀程度有所减弱。骆驼刺根部地形较高的部位主要以风积为主,地势较低的裸沙地表主要以微风蚀为主。随着平茬骆驼刺根部新生骆驼刺的萌发生长,5月21日至6月4日观测阶段骆驼刺平茬样带地表整体以风积为主,风积主要分布在骆驼刺根部、根后和根前部位,只有在裸沙地表少量发生风蚀。6月4

日至7月20日观测阶段,由于观测周期和起沙风时间较长,地表整体风蚀量略大于风积量。7月20日至8月22日观测阶段,地表起沙风时间最长,平茬后恢复的骆驼刺冠幅也达到了最大并且相对稳定,8月22日至10月4日秋季观测阶段,风力有所减弱,骆驼刺平茬样带地表风蚀量和风积量都明显减弱(图6)。

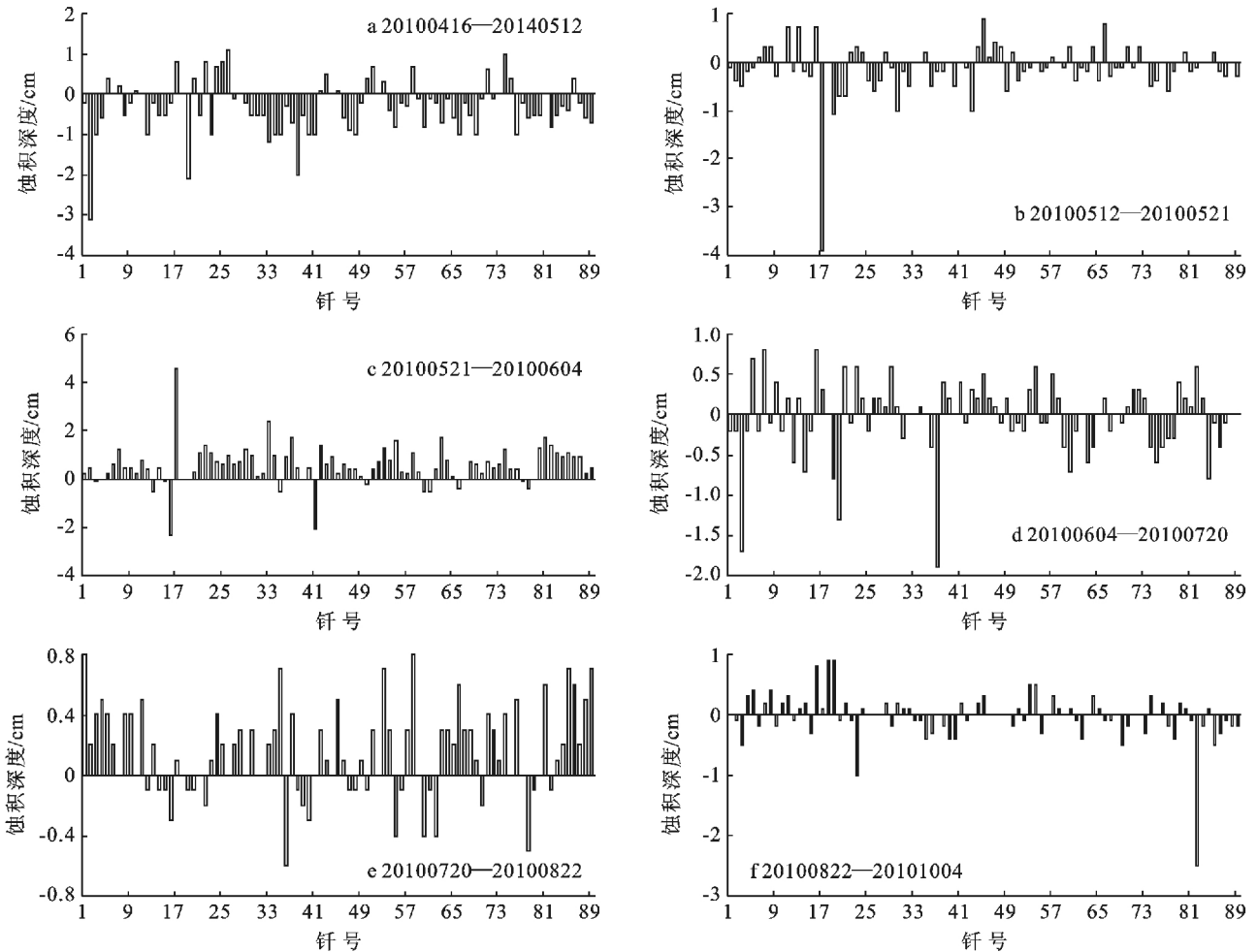


图6 骆驼刺条状平茬样带地表蚀积变化

3 讨论

本文研究表明春季平茬4 m保留3 m的利用方式并不能有效地抵御春季风蚀危害。李海峰等^[9]研究指出春季砍伐使疏叶骆驼刺株高、冠幅和生物量降低,叶片生物量、刺的长度和直径增加。秋季砍伐使疏叶骆驼刺株高和冠幅降低,但分枝数量和生物量增加,秋季适度的砍伐有利于塔克拉玛干沙漠南缘疏叶骆驼刺的保护。从经济的角度来说秋季砍伐有利于骆驼刺的保护,能使骆驼刺分枝和生物量增加,但是否有利于减少春季地表风蚀危害,还需要进一步通过秋季骆驼刺的不同宽度带状平茬试验来验证。李小明等^[12]研究指出策勒绿洲边缘骆驼刺群落植被盖度

≥30%才能有效地抵御风沙。固定沙地地表总体植被盖度为67%,骆驼刺分布多呈斑块状,采取合理的带状平茬方式使地表植被盖度不小于30%,是否能使骆驼刺群落起到较好的防风阻沙作用还需要进一步野外验证。另外,骆驼刺平茬的宽度、骆驼刺合理的排列方式、平茬季节等影响因素在以后试验中都应该充分对比研究。

4 结论

(1) 春季对骆驼刺带状平茬,有利于平茬根部骆驼刺的快速萌发、生长和增加骆驼刺生物量,在平茬后3~4个月后地表植被盖度达到最大,其阶段骆驼刺等灌草对沙质地表防风固沙的能力也达到最大。

(2) 骆驼刺带状平茬后的第一个观测阶段,平茬样带地表整体以风蚀为主,且风蚀量表现出最大。在第二个观测阶段,骆驼刺平茬样带地表整体风蚀量大于风积量,且风蚀程度有所减弱。随着平带骆驼刺植被盖度的恢复,平茬带沿主风向在夏秋季地表主要表现为风积,且风蚀量大大减少。

(3) 春季骆驼刺带状平茬 4 m 保留 3 m 宽度利用方式并不能有效地抵御春季的地表风蚀危害,植被恢复后在夏秋季具有较好的防风固沙效益。

[参 考 文 献]

- [1] McTainsh G H, Lynch A W, Tews E K. Climate controls upon dust storm occurrence in eastern Australia[J]. *Journal of Arid Environments*, 1998,39(3):457-466.
- [2] Wolfe S A, Nickling W G. The protective role of sparse vegetation in wind erosion[J]. *Progress on Physical Geography*, 1993,17(1):50-68.
- [3] 曾凡江,张希明,李小明. 骆驼刺植被及其资源保护与开发的意义[J]. *干旱区地理*, 2002,25(3):286-288.
- [4] 董志国. 干旱荒漠区骆驼刺的经济价值及其利用[J]. *塔里木农垦大学学报*, 2000,12(3):58-60.
- [5] 董志国,张苏江. 干旱荒漠区骆驼刺资源及利用[J]. *中国草地*, 2000(4):73-75.
- [6] 热合木都拉. 吐鲁番地区骆驼刺群落资源及其开发利用[J]. *干旱区研究*, 1994,11(1):62-66.
- [7] 李瑞年. 巴音郭楞蒙古自治州的骆驼刺及其开发利用[J]. *干旱区研究*, 1993,10(3):48-50.
- [8] 黄彩变,曾凡江,雷加强. 留茬高度对骆驼刺生长发育和产草量的影响[J]. *草地学报*, 2011,19(6):948-953.
- [9] 李海峰,曾凡江,桂东伟,等. 不同干扰方式对疏叶骆驼刺形态特征及地上生物量的影响[J]. *应用生态学报*, 2012,23(1):23-28.
- [10] 王雪芹,胡永峰,杨东亮,等. 绿洲—沙漠过渡带骆驼刺群落的防风阻沙作用[J]. *干旱区地理*, 2011,34(6):919-925.
- [11] 李振武,夏阳. 绿洲外围植被防护效益的研究[J]. *干旱区研究*, 1995,12(4):20-24.
- [12] 李小明,张希明. 策勒绿洲边缘自然植被恢复重建的盖度指标[J]. *干旱区研究*, 2002,19(2):12-16.
- [13] 赵彩霞,郑大玮,何文清. 植被覆盖度的时间变化及其防风蚀效应[J]. *植物生态学报*, 2005,29(1):68-73.
- [14] 张鹤年. 塔克拉玛干沙漠南缘:绿洲过渡带生态环境区综合治理技术与试验示范研究[J]. *干旱区研究*, 1995,12(04):1-9.
- [15] 杨佐涛. 戈壁与绿洲内的风向风速关系:以新疆策勒县为例[J]. *中国沙漠*, 1990,10(3):33-39.
- [16] 钱亦兵,张希明,李晓明. 塔克拉玛干沙漠南缘绿洲沙物质粒度特征[J]. *中国沙漠*, 1995,15(3):132-134.
- [17] 陈渭南,董治宝,杨佐涛,等. 塔克拉玛干沙漠的起沙风速[J]. *地理学报*, 1995,50(4):360-367.
- [18] 李振山,陈广庭. 塔克拉玛干沙漠起沙风况[J]. *中国沙漠*, 1999,19(1):43-45.
- [19] 杨兴华,何清,霍文,等. 塔克拉玛干沙漠南缘风沙跃移运动研究:以策勒县为例[J]. *中国沙漠*, 2012,32(4):910-913.
- [7] 刘勇,王玉杰,王红霞,等. 长江三峡库区 6 种退耕还林模式涵养水源与保育土壤效益及其价值估算[J]. *中国水土保持科学*, 2014,12(6):50-58.
- [8] 孔繁文,何乃蕙. 森林资源核算与国民经济核算体系[M]. 北京:人民中国出版社,1993:21-22.
- [9] 侯元兆. 中国森林资源核算研究[M]. 北京:中国林业出版社,1995.
- [10] 姜文来. 森林涵养水源的价值核算研究[J]. *水土保持学报*, 2003,17(2):34-36.
- [11] 刘晓清,张振文,沈炳岗,等. 秦岭生态功能区森林水源涵养功能的经济价值估算[J]. *水土保持通报*, 2012,32(1):177-180.
- [12] 薛立,彭耀强,王汉忠,等. 广东省生态公益林水土保持和水源涵养效益估算[J]. *水土保持通报*, 2011,31(6):165-167.
- [13] 董茹茹. 贺兰山西坡退牧还林封育工程水源涵养效益分析研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.
- [14] 石小亮,张颖. 基于时空变域的森林生态系统管理研究概述[J]. *林业科技开发*, 2014,28(6):10-14.
- [15] 牛香,宋庆丰,王兵,等. 吉林省森林生态系统服务功能[J]. *东北林业大学学报*, 2013,41(8):36-41.
- [16] 李文华,张彪,谢高地. 中国生态系统服务功能研究的回顾与展望[J]. *自然资源学报*, 2009,24(1):1-10.
- [17] 邓坤枚,石培礼,谢高地. 长江上游森林生态系统水源涵养量与价值的研究[J]. *资源科学*, 2002,24(6):68-73.
- [18] 司今,韩鹏,赵春龙. 森林水源涵养价值核算方法评述与实例研究[J]. *自然资源学报*, 2011,26(12):2100-2109.
- [19] 周芸芸,冯金朝,冯亚磊. 神山森林涵养水源的生态学解读[J]. *中央民族大学学报:自然科学版*, 2013,22(2):92-96.
- [20] 刘璐璐,邵全琴,刘纪远,等. 琼江河流域森林生态系统水源涵养能力估算[J]. *生态环境学报*, 2013,22(3):451-457.

(上接第 172 页)