

河北坝上低山区坡地灌丛沙堆形态与沉积特征

胡国云¹, 郭中领¹, 王仁德², 邹学勇³, 邱梦如¹,

王红营¹, 彭帅¹, 魏立涛¹, 常春平¹

(1. 河北师范大学 资源与环境科学学院 河北省环境演变与生态建设省级重点实验室,

石家庄 050024; 2. 河北省科学院 地理科学研究所, 石家庄 050011; 3. 北京师范大学

地表过程与资源生态国家重点实验室 北京师范大学 防沙治沙教育部工程研究中心, 北京 100875)

摘要:通过野外调查和室内试验分析的方法对河北坝上康保县北部低山区坡地小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla* Lam.)灌丛沙堆形态及沉积特征进行了研究,结果表明:从坡顶到坡脚,灌丛沙堆形态参数(长、宽、高、水平尺度、长宽比和底面积)趋于增加;迎风坡坡顶、坡中、坡脚的灌丛沙堆形态参数大于背风坡相应坡位沙堆形态参数;从坡脚到坡顶,沙堆表层沉积物粒径($>0.1\text{ mm}$)的百分含量趋于减少,坡地迎风坡相应坡位沙堆沉积物粒径 $>0.1\text{ mm}$ 的百分含量大于背风坡;灌丛沙堆表层土壤含水率及硬度从坡脚到坡顶逐渐变大,坡地迎风坡相应坡位沙堆表层土壤水分和硬度均小于背风坡;而容重从坡脚到坡顶趋于减小,且迎风坡相应部位沙堆容重大于背风坡。因此,低山坡地灌丛沙堆形态发育过程中除受风力强度、沙源和灌丛植被因素影响外,坡位和坡向也是一个重要的影响因素。

关键词:河北坝上; 灌丛沙堆; 坡地; 形态和沉积特征

中图分类号:P931.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)04-0251-06

Morphology and Sediment Characteristics of Nebkhas on Slopes in Bashang Region, Hebei Province

HU Guoyun¹, GUO Zhongling¹, WANG Rende², ZOU Xueyong³, QIU Mengru¹,

WANG Hongying¹, PENG Shuai¹, WEI Litao¹, CHANG Chunping¹

(1. College of Resources and Environment Sciences, Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 2. Institute of Geographic Science, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050011, China; 3. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, MOE Engineering Research Center of Desertification and Blown-Sand Control, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The morphology and sediment characteristics of nebkhas on slopes were studied by means of field observation and sampling in Bashang region, Hebei Province. The results show that: (1) from the top to the foot of the investigated hills, the morphology parameters of nebkhas gradually increase, and the morphology parameters of nebkhas for the windward slope is greater than those for the leeward slope; (2) from the foot to the top of the investigated hills, the percentage of the coarse grain (diameter $>0.1\text{ mm}$) of the surface sediments of the nebkhas gradually decreases, the percentage of the coarse grain (diameter $>0.1\text{ mm}$) of the surface sediments in the windward slope is greater than that in the leeward slope; (3) from the foot to the top of the investigated hills, the surface soil moisture and the soil hardness of the nebkhas become greater, and the surface soil moisture and hardness of the windward slope are less than those of the leeward slope; (4) from the foot to the top of the investigated hill, the bulk density becomes less, and the bulk density of the windward slope is greater than that of the leeward slope. In addition to the three main factors of cover, wind strength, and sand, the site condition is an important factor which influences the formation and evolution of nebkhas on slopes.

Keywords: Bashang region; Hebei Province; nebkhas; slope location and slope aspects; morphological and sediment characteristics

灌丛沙堆是分布在干旱、半干旱地区的一种风积地貌,是土壤风蚀物在遇到植被阻拦后逐渐堆积而成^[1]。灌丛沙堆既有削弱风力、截留风沙、维护区域生态安全的作用,也是土壤风蚀和土地荒漠化的标志^[2],对土地退化有指示意义。近年来,国内外学者针对灌丛沙堆开展了大量研究,主要聚焦于灌丛沙堆形成和发育机制^[2-7]、空间分布格局^[8-11]、沉积物粒度特征^[12-13]、“沃岛效应”^[14-17]、动力机制^[18]、生态学^[19-18]及土壤水分等^[19-22]。但是这些研究主要是在平缓地带区进行如沙地、干湖盆,对坡地上生长的灌丛沙堆关注较少。河北坝上坡地灌丛沙堆是农牧交错带土地沙漠化突出的风沙地貌特征,其形成、演化是与气候旱化和人类的活动,特别是放牧强度和不合理的开垦的加大导致的土壤风蚀有关。坡地灌丛沙堆形成、演化研究在解释半干旱、干旱区低山坡地草地环境演变过程方面有重大意义。本研究以半干旱区典型的坡地小叶锦鸡儿灌丛沙堆为研究对象,通过野外调查和室内试验分析,对该地区坡地灌丛沙堆的形态和沉积特征进行初步探讨。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于河北坝上地区康保县境内($41^{\circ}25'—42^{\circ}08'N$, $114^{\circ}11'—114^{\circ}56'E$),境内北部分布大面积低山坡地,占全县总面积的27%^[23]。区域属中温带大陆性季风气候,冬春季节风大沙多,风向以偏西风为主,每年6级以上风日平均60 d左右。冬季寒冷干燥;夏季凉爽且短促;年平均降水量约306.3~409.6 mm。土壤类型以沙质、沙砾质栗钙土为主,结构松散、质地较粗、土层较薄,土地生产力低下。区域内灌木有小叶锦鸡儿、枸杞、沙棘等,其中小叶锦鸡儿分布最广泛。小叶锦鸡儿高为40~70 cm,最高者可达1 m,具有耐干旱、耐盐碱、抗风蚀等特点。小叶锦鸡儿作为优势灌木,主要分布在草地上和低山荒坡上^[7]。其中,在北部低山坡地上发育了的大面积野生的小叶锦鸡儿灌丛沙堆,非常具有代表性。

1.2 研究方法

1.2.1 野外调查及采样 2014年4—5月对研究区的小叶锦鸡儿灌丛沙堆分布情况进行大范围的野外调查。在此基础上,确定康保县北部照洋河镇后照阳村南500 m和西五福堂村西500 m附近的两座低山坡地作为典型样地进行深入研究。该地区冬春季盛行风向为西北风,因此本研究中将两座山丘的西北坡定义为迎风坡,东南坡定义为背风坡。在山坡

迎风坡和山坡背风坡的坡脚、坡中和坡顶各设置1个25 m×25 m样方,测量样方内每个灌丛沙堆的长、宽、高等形态参数。本次调查共测量灌丛沙堆620个(表1)。

同时,在每个25 m×25 m的样方中选取一个中等级别的典型灌丛沙堆作为沉积物采样对象,共选取12个典型灌丛沙堆。在每个灌丛沙堆的迎风坡坡脚、迎风坡坡中、坡顶、背风坡坡中、背风坡坡脚、侧坡坡中、侧坡坡脚分别采集表层土样,采样厚度为表层5 cm,共采集84个土样,用来分析土壤粒度。同时,还采集了灌丛沙堆每个地貌部分的土壤湿度和容重样品,并利用土壤紧实度仪TYD-1测定了土壤硬度,每个测试点重复测量10次,取其平均值。

1.2.2 土壤物理性质测试方法 土壤粒度测定采用振筛法,振筛孔径大小分别为:1, 0.85, 0.5, 0.25, 0.1, 0.05 mm。沙堆土壤表层含水率测定采用铝盒烘干称重法。土壤容重采用环刀法,每个采样点做三个重复,取其平均值。

2 结果与分析

2.1 坡地灌丛沙堆形态特征

在低山坡地上典型小叶锦鸡儿灌丛沙堆总体形态呈凸起的椭圆形沙包,沿山坡走向为沙堆长轴,垂直山坡走向为沙堆短轴,沙堆坡度较缓,几乎被小叶锦鸡儿覆盖。

根据野外测量结果(表2),不同坡位下所发育的灌丛沙堆长、宽、高有明显的差异,从山脚到山顶,灌丛沙堆形态参数逐渐变小。其中沙堆的长、宽和高尺度高度的变化范围较大。这是由于坡脚沙源供应充足,沙堆充分发育;坡中和坡顶沙堆沙源受到限制。随着海拔升高,坡度增大、风速增大、气流加强,对沙堆侵蚀也加强,导致坡中和坡顶处沙堆发育小且缓慢。

坡地迎风坡与背风坡相应坡位上的灌丛沙堆大小也有所不同,迎风坡相应坡位的灌丛沙堆形态参数都要大于背风坡。迎风坡坡脚分别是背风坡坡脚沙堆长度的1.8, 1.7和2.1倍,迎风坡坡中是背风坡坡中沙堆长度的3.4, 3.2, 6.3倍,迎风坡坡顶是背风坡坡顶沙堆长度的2.2, 2.42, 6.0倍。因此迎风坡灌丛沙堆比背风坡相应部位发育的灌丛沙堆形态参数尺度大的现象很明显。这主要是风沙流在迎风坡受到阻挡,风速降低致使沙粒首先在迎风坡沉降堆积,为迎风坡发育的灌丛沙堆提供了较丰富的沙源,当风绕过山丘到达背风坡时,携带的沙尘已经减少,因此背风坡发育的灌丛沙堆发育规模较小。

表 1 样地基本情况

位置	坡向	经纬度	海拔/m	坡度	沙堆特征	沙堆个数	采样数
后照阳村南	背风坡坡脚	42°5′12.34″N、 114°36′40.60″E	1436	10°	沙堆形态小于背风坡， 数量少，高度较小	28	30 个
	背风坡坡中	42°5′13.15″N、 114°36′38.38″E	1451	15°	数量多，形态小， 高度小，发育不好	80	18 个
	背风坡坡顶	42°5′13.57″N、 114°36′34.01″E	1455	10°	坡顶有大量裸露的石块， 沙堆小，稀疏	50	6 个
	迎风坡坡顶	42°4′22.73″N、 114°34′59.94″E	1422	10°	形态变小，稀疏	40	30 个
	迎风坡坡中	42°4′25.30″N、 114°34′59.67″E	1407	15°	沙堆形态比坡脚小， 但是数量比坡脚多	63	33 个
	迎风坡坡脚	42°4′27.97″N、 114°34′58.73″E	1391	5°	灌丛沙堆形态大，密集	28	33 个
	背风坡坡脚	42°5′1.58″N、 114°38′28.99″E	1421	5°	沙堆形态小，但均匀	55	30 个
西五福堂村西	背风坡坡中	42°5′3.85″N、 114°38′29″E	1415	15°	数量多，形态小	102	18 个
	背风坡坡顶	42°5′5.68″N、 114°38′26.60″E	1423	18°	有裸露的石块， 沙堆稀疏，形态小	80	18 个
	迎风坡坡脚	42°4′53.83″N、 114°35′21.17″E	1391	3°	灌丛沙堆大， 很多灌丛连在一起	31	39 个
	迎风坡坡中	42°4′51.17″N、 114°35′28.93″E	1402	10°	沙堆形态变小， 数量增多	43	39 个
	迎风坡坡顶	42°4′49.10″N、 114°35′32.74″E	1420	20°	形态变小， 数量减少	38	30 个

表 2 坡地灌丛沙堆形态参数统计

项目		长/m	宽/m	高/m	水平尺度/m	长宽比/m	底面积/m ²
迎风坡坡脚	最大值	4.5	4.1	1	4.3	1.10	16.83
	最小值	1.2	1.1	0.3	1.15	1.09	0.22
	平均值	3.09	2.14	0.42	2.62	1.44	2.06
迎风坡坡中	最大值	3.9	3	0.5	3.45	1.3	4.67
	最小值	0.9	0.5	0.1	0.7	1.8	0.19
	平均值	2.25	1.65	0.25	1.95	1.36	1.82
迎风坡坡顶	最大值	2.4	1.8	0.2	2.1	1.33	2.14
	最小值	0.4	0.2	0.05	0.3	2	0.03
	平均值	1.41	1.16	0.18	1.29	1.22	0.98
背风坡坡顶	最大值	1.9	1.1	0.1	1.5	1.73	1
	最小值	0.1	0.1	0.02	0.1	1	0.01
	平均值	0.64	0.48	0.03	0.56	1.33	0.18
背风坡坡中	最大值	2.2	2	0.2	2.1	1.1	1.7
	最小值	0.1	0.1	0.02	0.1	1	0.01
	平均值	0.66	0.52	0.04	0.59	1.27	0.21
背风坡坡脚	最大值	4.1	3.4	0.6	3.75	1.21	5.52
	最小值	0.5	0.5	0.1	0.5	1	0.2
	平均值	1.72	1.26	0.2	1.49	1.37	1.10

注：水平尺度=(长+宽)/2，底面积=1/2×π×[1/4(长+宽)]²。

2.2 坡地灌丛沙堆表面粒度组成特征

对坡地不同坡位和坡向下 12 个灌丛沙堆的 84 个沙堆表面沉积物样品的粒度测试结果进行统计分析,把粗砂、中砂和细砂划为沙堆表面沉积物的粗粒组分,将极细砂和粉砂划为细粒组分,粗细粒组分的分界线为 0.1 mm。结果表明:从坡脚到坡顶,粒径

＞0.1 mm 粗颗粒含量呈现有规律地变化:坡脚＞坡中＞坡顶。这是因为在坡脚压力值与风速值均较小,风速降低致使较粗的颗粒首先在坡脚发生沉降堆积,导致坡脚灌丛沙堆表层粗砂、中砂、细砂 3 个较粗粒级的含量较之坡中和坡顶高(图 1)。

坡地迎风坡的沙堆表面＞0.1 mm 粒径含量大于

背风坡相应坡位的沙堆含量。这是因为迎风坡的表面压力和流场中风速等值线均比背风坡相应坡位的高,且坡地的背风坡为负压区和涡流区。因此迎风坡相应坡位的沉积物粒径比背风坡的粗。可见,坡位和坡向可以明显改变其周围的风速及风向,使风力分选作用在不同坡位和坡向之间也都出现不同程度的差异。

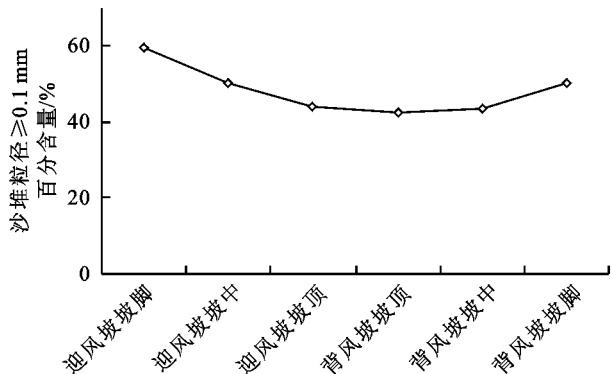


图 1 不同坡位和坡向上灌丛沙堆粒度含量变化特征

2.3 坡地灌丛沙堆表面含水率特征

对坡地不同坡位和坡向上灌丛沙堆含水率分析表明(图 2),灌丛沙堆表层含水率从山脚到山顶呈现有规律地变化:坡脚<坡中<坡顶。这是因为研究区冬春季节气温较低,时常有降雪,积雪在坡顶沉积,造成坡顶湿度明显偏大。另外,坡顶处沙堆细颗粒含量大,持水性强,坡中和坡脚处细颗粒含量依次减少,持水性变差,所以坡顶处灌丛沙堆表层含水率高。

坡地迎风坡沙堆含水率小于背风坡相应坡位沙堆的含水率。原因是研究区冬春季节主导风向为西北风,迎风坡空气流动快,蒸发强,沙堆土壤含水率低,背风坡冬春季太阳辐射少,空气流动慢,蒸发弱,且细颗粒含量大于迎风坡,持水性好。

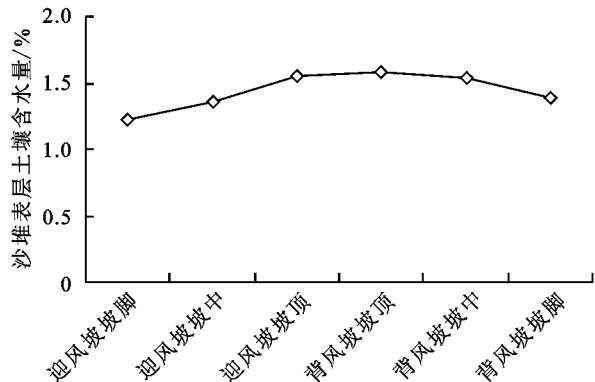


图 2 不同坡位和坡向灌丛沙堆表层土壤含水量变化特征

2.4 坡地灌丛沙堆表面容重特征

对坡地不同坡位和坡向上灌丛沙堆容重分析表明(图 3),灌丛沙堆表层容重从山脚到山顶呈现有规律地变化:坡脚>坡中>坡顶。原因是坡脚处灌丛沙堆粗颗粒含量大于坡中和坡顶,粗粒径密度要明显高于细粒径,从而造成粗颗粒含量较高的坡脚的沉积物

容重较大。坡地迎风坡相应坡位灌丛沙堆容重大于背风坡相应坡位上沙堆的容重。这是因为迎风坡相对坡位灌丛沙堆粗颗粒含量大于背风坡,迎风坡沙粒粒度密度大,造成迎风坡相应坡位灌丛沙堆容重大于背风坡容重。

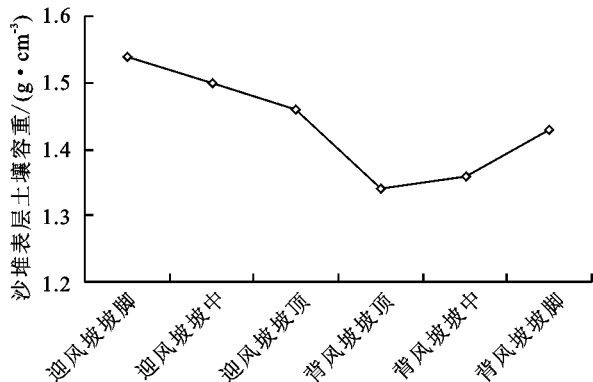


图 3 不同坡位和坡向灌丛沙堆表面土壤容重变化特征

2.5 坡地灌丛沙堆土壤表层硬度特征

对坡地不同坡位和坡向上灌丛沙堆硬度分析表明(图 4),灌丛沙堆表层硬度从山脚到山顶呈现有规律地变化:坡脚<坡中<坡顶。这是因为坡脚灌丛沙堆沉积物中细颗粒含量少,粗颗粒含量大,颗粒之间的粘结力较弱,沉积物较松散,造成土壤硬度较小。坡中和坡顶细颗粒增多,土壤粘结性强,土壤紧实度大。

坡地迎风坡灌丛沙堆硬度小于背风坡相应坡位上沙堆的硬度。背风坡灌丛沙堆粗颗粒含量小于迎风坡灌丛沙堆,颗粒之间空隙小,紧实度大,造成迎风坡灌丛沙堆硬度小于背风坡相应坡位的灌丛沙堆。

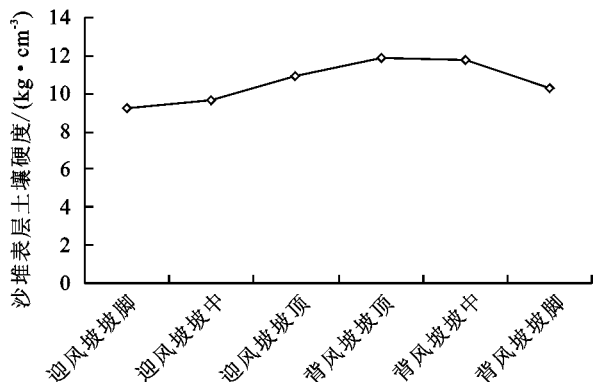


图 4 不同坡位和坡向灌丛沙堆表面硬度变化特征

3 讨论

3.1 坡位对坡地灌丛沙堆形态及沉积物特征的影响

在低山坡地不同坡位发育的灌丛沙堆,在形态和沉积物特征上存在明显差异。从坡脚到坡顶,灌丛沙堆的形态参数逐渐变小,沉积物粒度逐渐变细,土壤含水率和土壤硬度逐渐增大,土壤容重逐渐减小。造成这种变化的原因,很可能与坡位不同导致灌丛沙堆

的沙源供应发生变化有关。大风携带的沙尘颗粒物首先在坡脚处受到灌丛的阻挡沉积下来。由于坡脚距离沙源地最近,沙源最丰富,容易形成较大的灌丛沙堆,并且由于搬运距离较短,海拔高度较低,沉积物的粒径相对较粗。从坡脚到坡中、坡顶,随着高度及坡度的逐渐变大,粗沙粒因为重力作用和植物的拦截作用无法继续爬升,大部分在坡脚沉积下来。细颗粒因为重量轻,可以被搬运到更远的距离和更高的高度,从而被风携带向坡中,甚至坡顶,但由于沙尘的量是有限的,距离沙源地距离越远,海拔越高,可供应的沙尘量越少,粒径越细,从而形成了灌丛沙堆形态参数从坡脚到坡顶逐渐变小,沉积物粒度逐渐变细的变化趋势,这一研究结论与岳兴玲^[24]等在阴山北麓内蒙古高原上灌丛沙堆得到的结论是一致的。

不同坡位下灌丛沙堆沉积物粒度组成的不同,进一步导致了不同地貌部位沉积物湿度、硬度和容重的差异。坡脚灌丛沙堆沉积物颗粒较粗,粗沙粒含量高,保水能力较差,因此,土壤含水率相对较低。坡脚灌丛沙堆沉积物中细颗粒含量少,导致颗粒之间的粘结力较弱,沉积物较松散,造成土壤硬度较小。由于粒径较粗的沙粒的密度要明显高于粒径较细的细粉沙和黏土,从而造成粗颗粒含量较高的坡脚的沉积物容重较大。随着高度和坡度的增加,灌丛沙堆沉积物中粗颗粒的含量逐渐减少,细颗粒的含量逐渐增加,沉积物的保水能力增加,土壤颗粒之间的粘结力增加,导致土壤含水率和土壤硬度增大;随着高度和坡度的增加,沉积物中密度较大的粗沙的含量减少,密度较细的细粉沙和黏土的含量增加,导致总体密度减小,相应的土壤容重降低。

3.2 坡向对坡地灌丛沙堆形态及沉积物特征的影响

在灌丛沙堆形成和发育过程中,坡向通过影响风速大小,造成不同坡向上发育的灌丛沙堆形态及沉积物特征的差异。迎风坡正对风的来向,大风由于受到山坡的阻挡,风速有所降低,其携带的大量沙尘,尤其是粒径较大的粗颗粒,由于风的搬运能力减小而降落地面,为迎风坡提供了较丰富的沙源,因此,迎风坡发育的灌丛沙堆相对较大。当风绕过山丘到达背风坡时,其携带的沙尘已经减少,并且多是粒径较细,易于搬运的细颗粒,因此背风坡发育的灌丛沙堆规模较小,沉积物粒径比迎风坡也明显偏细。

由于坡向对风的影响,也影响了不同坡向上沙堆表面的含水率。迎风坡空气流动快,蒸发大,导致迎风坡灌丛沙堆表面土壤含水率比背风坡总体偏低。同时,与坡位影响灌丛沙堆沉积物特征的原因相似,迎风坡灌丛沙堆沉积物的粒径比背风坡偏粗,也会导致迎风坡土壤的含水率和硬度小于背风坡,容重大于背风坡。

4 结论与建议

植被、沙源和风力等因素对灌丛沙堆的发育过程起至关重要的影响,但在不同的区域条件下,主导因素则有一定的差异^[25],在山坡上的灌丛沙堆由于受到不同坡向和坡位的影响,形成的形态规模大小和沉积物有如下的特征:

(1) 灌丛沙堆由于坡位和坡向影响造成气流、沙源等因子改变,使沙堆形态参数从坡脚到坡顶趋于变小,同时迎风坡相应坡位的形态参数大于背风坡。

(2) 研究区北部低山坡地对沙源和风速的影响,对沙堆表层土壤粒径组成、含水率、容重和硬度等沉积特征产生影响,主要表现为①沙堆表层沉积物土壤粒径组成中粒径 $>0.1\text{ mm}$ 的百分含量从坡脚至坡顶逐渐减少;背风坡相应坡位沙堆粒径 $>0.1\text{ mm}$ 的百分含量小于迎风坡。②沙堆表层含水率和硬度变化规律为:坡顶 $>$ 坡中 $>$ 坡脚;同时背风坡相应坡位的沙堆含水率和硬度大于迎风坡。③沙堆表层容重变化规律为:坡脚 $>$ 坡中 $>$ 坡顶;同时迎风坡相应坡位的沙堆容重大于背风坡。

总之,在分析坡地不同坡位和坡向上沙堆的形态特点和沉积特征,可以得出以下推断:坡地灌丛沙堆生态景观环境不但在防风固沙方面具有重要意义,也影响坡地植物多样性。首先,坡地灌丛沙堆增加了坡面粗糙度,风沙流在移动过程中遇到的阻力增大,大幅度降低风速和输沙率。其次,沙堆的存在,使坡地的自然环境产生了很大的分异,背风坡(阳坡)的温热条件得以加强,干燥性有所增强;迎风坡(阴坡)蒸散强度下降,干旱度有所缓解;而由沙堆围起来的丘间地,则温湿度都有所增加。生存条件的改变,必定会引起别的植物繁殖生长。这种作用对典型草原地区的防止沙漠化,恢复生态环境具有更重要的意义。在发育条件好的沙堆地上利用沙堆所造成的微环境差异建立草地植被,实现生物固沙,如在坡地的坡脚和背风坡可以人工种植灌丛或草地,这不但可以防风固沙,也可以起到提高土地的利用价值。

参考文献:

- [1] 杜建会,严平,董玉祥. 干旱地区灌丛沙堆研究现状与展望[J]. 地理学报, 2010, 65(3): 339-350.
- [2] 唐艳,刘连友,哈斯,等. 毛乌素沙地南缘3种灌丛形态与阻沙能力的对比研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(2): 44-48.
- [3] Hesp P A. The formation of shadow dunes[J]. Journal of Sedimentary Research, 1981, 51(1): 101-112.
- [4] Hesp P A. A review of biological and geomorphological processes involved in the initiation and development of

- incipient foredunes[J]. Proceedings of the Royal Society of Edinburgh. Section B. Biological Sciences, 1989, 96: 181-201.
- [5] 武胜利, 李志忠, 惠军, 等. 和田河流域灌(草)丛沙堆的形态特征与发育过程[J]. 地理研究, 2008, 27(2): 314-322.
- [6] 高永, 党晓宏, 虞毅. 乌兰布和沙漠东南缘白沙蒿(*Artemisia sphaerocphala*)灌丛沙堆形态特征与固沙能力[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 1-7.
- [7] 王乐, 李改欣, 王仁德, 等. 半干旱农田灌丛沙堆形态及沉积特征[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 76-80.
- [8] 杜建会, 严平, 俄有浩. 甘肃民勤不同演化阶段白刺灌丛沙堆分布格局及特征[J]. 生态学杂志, 2007, 26(8): 1165-1170.
- [9] 张展赫, 来风兵, 陈蜀江, 等. 和田河西侧胡杨沙堆的三维形态特征及空间自相关性[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 137-149.
- [10] 贾晓红, 李新荣. 腾格里沙漠东南缘不同生境白刺(*Nitraria*)灌丛沙堆的空间分布格局[J]. 环境科学, 2008, 29(7): 2046-2053.
- [11] 杨帆, 王雪芹, 何清, 等. 绿洲—沙漠过渡带怪柳灌丛沙堆形态特征及空间分布格局[J]. 干旱区研究, 2014, 31(3): 556-563.
- [12] 夏训诚, 赵元杰, 王富葆, 等. 罗布泊地区红柳沙包年层的环境意义探讨[J]. 科学通报, 2005, 50(19): 2176-2177.
- [13] 刘海霞, 李晋昌, 苏志珠, 等. 毛乌素沙地西南缘灌丛沙堆沉积物的粒度和元素特征[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 24-31.
- [14] 崔楠, 吕光辉, 刘晓星, 等. 胡杨、梭梭群落土壤理化性质及其相互关系[J]. 干旱区研究, 2015, 32(3): 476-482.
- [15] 苏永中, 赵哈林, 张铜会. 几种灌木、半灌木对沙地土壤肥力影响机制的研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(7): 802-806.
- [16] 陈鸿洋. 荒漠区红砂灌丛“肥岛”效应及其固碳特征[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [17] 杜建会, 严平, 丁连刚, 等. 民勤白刺灌丛沙堆演化过程中的土壤理化性质研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(2): 248-253.
- [18] 孙秋梅, 李志忠, 武胜利, 等. 和田河流域绿洲荒漠过渡带土地荒漠化过程研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(6): 136-141.
- [19] Hesp P, McLachlan A. Morphology, dynamics, ecology and fauna of *Arctotheca populifolia* and *Gazania rigens* nabkha dunes[J]. Journal of arid environments, 2000, 44(2): 155-172.
- [20] 张玮, 韩磊, 解李娜, 等. 不同生境狭叶锦鸡儿灌丛沙堆的土壤微生物数量、养分含量及酶活性的比较研究[J]. 天津师范大学学报: 自然科学版, 2014, 34(4): 68-71.
- [21] 杨自辉, 高志海. 荒漠绿洲边缘降水和地下水对白刺群落消长的影响[J]. 应用生态学报, 2000, 11(6): 923-926.
- [22] 韩胜利, 叶冬梅, 秦佳琪, 等. 乌兰布和沙漠白刺灌丛土壤水分及物理特性的研究[J]. 干旱区地理, 2006, 28(4): 506-510.
- [23] 康玉梅. 河北坝上缓坡耕地土壤风蚀特征研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2013.
- [24] 岳兴玲, 哈斯, 庄严美, 等. 沙质草原灌丛沙堆研究综述[J]. 中国沙漠, 2005, 16(4): 360-363.
- [25] 郎丽丽, 王训明, 哈斯, 等. 灌丛沙丘形成演化及环境指示意义研究的主要进展[J]. 地理学报, 2012, 67(11): 1526-1536.

(上接第 250 页)

- [8] Kaczan D, Swallow B M, Adamowicz W L. Designing a payments for ecosystem services (PES) program to reduce deforestation in Tanzania: An assessment of payment approaches[J]. Ecological Economics, 2013, 95(11): 20-30.
- [9] 蔡银莺, 余亮亮. 重点开发区域农田生态补偿的农户受偿意愿分析: 武汉市的例证[J]. 资源科学, 2014, 36(8): 1660-1669.
- [10] 施翠仙, 郭先华, 祖艳群, 等. 基于 CVM 意愿调查的洱海流域上游农业生态补偿研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(4): 730-736.
- [11] 杨欣, 蔡银莺. 基于农户受偿意愿的武汉市农田生态补偿标准估算[J]. 水土保持通报, 2012, 32(1): 212-216.
- [12] 刘军弟, 霍学喜, 黄玉祥, 等. 基于农户受偿意愿的节水灌溉补贴标准研究[J]. 农业技术经济, 2012(11): 29-40.
- [13] 姜宏瑶, 温亚利. 基于 WTA 的湿地周边农户受偿意愿及影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(4): 489-494.
- [14] 冯琳, 徐建英, 邸敬涵. 三峡生态屏障区农户退耕受偿意愿的调查分析[J]. 中国环境科学, 2013, 33(5): 938-944.
- [15] 韩鹏, 黄河清, 甄霖, 等. 基于农户意愿的脆弱生态区生态补偿模式研究: 以鄱阳湖区为例[J]. 自然资源学报, 2012, 27(4): 625-642.
- [16] 许恒周. 基于农户受偿意愿的宅基地退出补偿及影响因素分析: 以山东省临清市为例[J]. 中国土地科学, 2012, 26(10): 75-81.
- [17] 李国平, 李潇, 萧代基. 生态补偿的理论标准与测算方法探讨[J]. 经济学家, 2013(2): 42-49.
- [18] 姜亮亮, 包安明, 刘海隆, 等. 玛纳斯流域生态需水变化与景观格局的响应关系研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 144-149.