

巴丹吉林沙漠南缘近流沙区白刺灌丛沙堆形态特征与空间分布

马 瑞, 赵锦梅, 马彦军, 卢 嘉

(甘肃农业大学林学院, 兰州 730070)

摘要: 白刺灌丛沙堆是风沙塑造的荒漠景观, 研究白刺灌丛沙堆形态特征和分布格局对沙源的响应, 可为进一步研究其形成演化提供依据。研究通过野外调查测定, 对巴丹吉林沙漠南缘近流沙区白刺灌丛沙堆集中分布区的沙堆形态特征及其空间分布进行了研究。结果表明: 雏形阶段和发育阶段的沙堆分别占沙堆总数的 24.0% 和 42.2%。该区域相邻沙堆平均间距仅为 9.8 m, 沿主导风向, 相邻沙堆的间距呈现由大快速减小, 维持小间距一段距离后, 再缓慢增大的分布格局, 密度变化与此相反。受高沙源供给及由此带来的强蚀积转换的影响, 白刺灌丛沙堆稳定化进程减缓, 各项形态特征值均较小。相关性分析表明, 白刺灌丛沙堆的高度、长轴长、短轴长、迎风坡长、背风坡长和底面积间均显著相关($P < 0.01$)。研究结果说明, 在丰富沙源供给条件下, 研究区白刺灌丛沙堆处于发育的中早期阶段, 在景观上表现出密度大而体型小的特点。

关键词: 白刺灌丛沙堆; 沙源供给; 形态特征; 分布格局

中图分类号: Q944; P931.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)04-0217-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.04.030

Morphological Characteristics and Spatial Distribution of *Nitraria tangutorum* Nebkhas Near Shifting Sand of Southern Margin of Badain Jaran Desert

MA Rui, ZHAO Jinmei, MA Yanjun, LU Jia

(Forestry College, Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070)

Abstract: *Nitraria tangutorum* nebkhas is a desert landscape which was shaped by aeolian sand. Study on response of morphological characteristics and distribution of *Nitraria tangutorum* nebkhas to sand supply can provide a basis for further study of its formation and evolution. This study was conducted at an area where had a massive *Nitraria tangutorum* nebkhas at the southern margin of the Badain Jaran Desert. The morphological characteristics and distribution pattern of the nebkhas were investigated and analyzed. The results showed that the nebkhas in early stage and developmental stage accounted for 24.0% and 42.2%, respectively, of the total nebkhas. The mean distance between adjacent nebkhas was only 9.8 m. Along prevailing wind direction, the distances between adjacent nebkhas changed rapidly from big to small, keeping it for a distance and then enlarged slowly. The densities changed conversely. Under the influence of high sand supply and resulted strong soil erosion and deposition transformation, the stabilization process of *Nitraria tangutorum* Nebkhas was slowed down, the parameters of all the morphological characteristics were small. Correlation analysis showed that there were significant correlations between nebkhas height, length, width, windward slope length, leeward slope length, and basal area ($P < 0.01$). The results indicate that under the abundant supply of sand, the *Nitraria tangutorum* nebkhas in this area were in its early and middle stage of the whole growth phase, and showed big density with small shape landscape traits.

Keywords: *Nitraria tangutorum* nebkhas; sand supply; morphological characteristics; distribution pattern

白刺耐旱、喜沙埋, 茎秆根系化明显, 沙埋后枝节生出不定根, 逐渐发育成灌丛沙堆。灌丛沙堆是干旱、半干旱及半湿润荒漠区风沙流遇到灌丛阻拦, 沙物质在灌丛及其周围堆积形成的一种风积地貌^[1-3]。

白刺灌丛沙堆是西北荒漠区主要的灌丛沙堆类型, 适度沙埋是白刺灌丛沙堆发育和沙堆上白刺不断更新的保证, 这种发育模式使得白刺灌丛沙堆在空间分布上没有明显的界限, 凡是常年有风沙流形成的地区,

收稿日期: 2021-01-17

资助项目: 国家自然科学基金项目(31760244); 甘肃农业大学青年导师扶持基金项目(GAU-QDFC-2020-09)

第一作者: 马瑞(1977—), 女, 博士, 副教授, 主要从事荒漠生态研究。E-mail: mr031103@126.com

通信作者: 马彦军(1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事荒漠植物种质资源收集与开发研究。E-mail: lxsys01@126.com

在其下风向均会出现白刺灌丛沙堆,而密集分布区一般则出现在沙漠边缘,且密度在特定的风沙环境下大体上是确定的,为区域性特征^[4]。对黑河流域^[5]、腾格里沙漠南缘^[6]、金塔和临泽^[7-8]、民勤绿洲外围^[9]、吉兰泰绿洲外围^[10]、阿拉善戈壁区^[11]等不同研究区白刺灌丛沙堆形态特征及其空间分布格局的研究表明,在不同生境条件下,白刺灌丛沙堆的形态参数并不一致,而是表现出与当地风沙环境相适应的特征。对异源灌丛沙堆的研究^[7-8,12-13]表明,沙源供给丰富度影响沙堆的空间尺度,如泡泡刺灌丛沙堆在临泽沙漠生境的平均高度、体积、斑块数量均大于金塔戈壁^[7];农牧交错区洪积扇下风向、农耕地下风向、残积地的小叶锦鸡儿灌丛沙堆的水平尺度依次减小^[13]。然而,在异源沙堆的对比性研究中,沙堆空间尺度的差异不仅与区域沙源供给有关,还与各自的水环境、周围植物环境等有较大关系。有研究^[14-16]表明,在同一观测区域,不同的下垫面条件对沙粒的起动风速、跃移高度和能量衰减的影响程度不同,使得风沙流流量和结构沿风向呈现出明显的空间差异。那么,在沙漠边缘区,风沙流活动强度大、频率高,而白刺灌丛沙堆个体距沙源的距离有远有近,风沙流在行进过程中其输沙量和风沙流结构的变化势必会对白刺灌丛沙堆的个体发育和群体特征产生影响。基于这一判断,本研究拟在巴丹吉林沙漠东南缘白刺灌丛沙堆集中分布区,对白刺灌丛沙堆的环境特征、发育状况、形态特征及分布进行分析,旨在揭示白刺灌丛沙堆形态特征和分布对沙源供给的响应,进而为深入研究白刺灌丛沙堆的形成演化提供依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于巴丹吉林沙漠南缘靠近流动沙丘的白刺灌丛沙堆集中分布区,该区具有西北干旱荒漠区的典型特征,干旱少雨,年平均降水量 116 mm,蒸发

量 2 380 mm,地下水埋深在 22 m 以下^[4]。当地主导风向为西北风,多年平均大风日数 26.3 天,年平均风速 2.5 m/s, >5.0 m/s 的起沙风占全年有风日数的 13.08%。在 9 m/s 起沙风作用下,白刺灌丛沙堆丘间地上的沙粒运动以跃移为主,主要分布在近地表 15 cm 的高度范围内^[14-15]。

1.2 野外调查

1.2.1 研究区环境特征调查 环境特征调查内容包括:(1)估测白刺灌丛沙堆沿主导风向的分布宽度;(2)记录周围地貌及植被状况;(3)测定输沙量,分析风沙流结构。输沙量采用 10 孔阶梯式集沙仪测定(单孔规格 2 cm×2 cm),共设 3 个测定点,测定点 1 布设在白刺灌丛沙堆集中分布区的上边缘,测定点 2 布设在白刺灌丛沙堆集中分布区中部的丘间地,测定点 3 位于白刺灌丛沙堆集中分布区的下边缘。3 个点的测定同步进行,计算单宽输沙率,计算公式为:

$$Q = W / (2\Delta T)$$

式中:Q 为单宽输沙率(g/(cm·h));W 为集沙量(g); ΔT 为收集时间(m)。

1.2.2 白刺灌丛沙堆形态特征调查 采取样方调查法。在白刺灌丛沙堆集中分布区沿主风向(WN→ES)每 50 m 取 20 m×20 m 的样方 2 个,沙堆顶部位于样方内的沙堆计入样方。调查及测定内容包括:(1)目估沙堆表面结皮率、裸沙率、白刺盖度与生长状况。(2)以积沙高度、沙面结皮状况和白刺生长状况为依据对白刺灌丛沙堆发育阶段进行判断,判断依据见表 1。(3)测定相邻两沙堆间的距离。沙堆间距是指相邻两沙堆顶部,即最高点的最小直线距离。(4)测定沙堆高度、长轴长、短轴长,以沙堆长、短轴轴交叉点为控制点测定迎风坡长、背风坡长。本研究中,当相邻沙堆有 2/3 发生重叠时,视为兼并,统计时记为 1 个沙堆,测定基点定为各沙堆顶部连线的中点,空间尺度测定时记合并后的最大尺度。

表 1 白刺灌丛沙堆发育阶段划分及各阶段特征认定

发育阶段	沙堆特征
雏形阶段	白刺根部出现明显积沙,积沙高度<白刺目估平均高度,沙堆背风侧有风影区形成
发育阶段	积沙高度>白刺目估平均高度,新生枝发育良好,白刺盖度占沙包表面积的 30%以上
稳定阶段	白刺生长良好,裸露部位表土紧实,形成了结皮发育的基础或已形成结皮
退化阶段	结皮破损,沙堆侧位出现实质性风蚀缺口,白刺生长不良,枯死枝覆盖面积占白刺总盖度 30%以上

2 结果与分析

2.1 环境特征分析

白刺灌丛沙堆分布区在上风向的边缘相对容易确定,而在远离沙漠一侧的下风向,因受早期造林活动扰动较大,边缘难于分辨。若将相邻沙堆间平均距离<25 m 的区域定义为白刺灌丛沙堆集中分布区,则该区的白刺灌丛沙堆沿主风向的分布宽度在

200~250 m。在其西北,即主导风的上风向为流动沙丘,沙丘形态呈新月形,高度 3~6 m,间距在 120 m 左右。沙丘迎风坡的下部有成片生长的沙米和少数芦苇,丘间地为沙砾质地表。部分外围沙丘的丘间地早期进行过开荒造田,受此影响,不同沙丘间的空地上植被盖度差异较大,目估盖度在 5%~30%。白刺灌丛沙堆集中分布区的东南,即主导风的下风向,

地貌以半固定沙丘为主,部分区域分布有退化的人工梭梭林。在无林区也有一定的白刺灌丛沙堆分布,但体型相对较大,整体上处于发育的稳定阶段。

从输沙量测定结果可知,测点 1,2,3 处 0~20 cm 的总输沙量分别为 205,192,170 g/(cm·h)。测点 1 自下而上单宽输沙率呈单调递减,测点 2 和测点 3 在 2~8 cm 各层的单宽输沙率均大于测点 1,单宽输沙率最大值在高度 2~4 cm 处(图 1)。

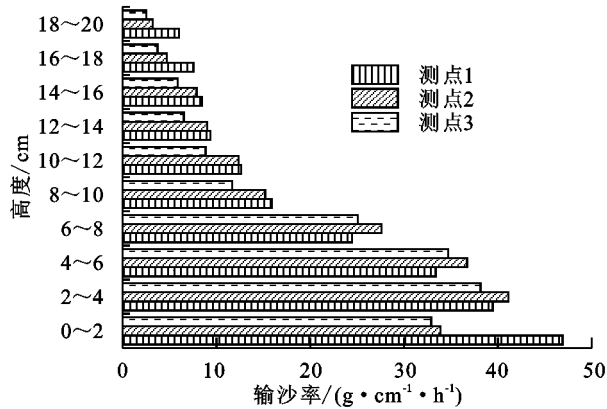


图 1 各测点输沙率垂直变化

2.2 白刺灌丛沙堆空间分布格局

调查数据表明,相邻白刺灌丛沙堆顶部的平均距离为 9.8 m,最大间距和最小间距分别为 23.15,3.54 m,空间变异系数达 0.57。由表 2 可知,37.14%的沙堆间距在 10~15 m,其次是 5~10 m,占 28.57%,其余沙堆间距处于 0~5,15~25 m。

表 2 研究区白刺灌丛沙堆不同间距出现频率

沙堆间距/m	频率/%	标准差
0~5	20.00	0.46
5~10	28.57	1.45
10~15	37.14	1.39
15~25	14.29	3.08

为了分析与流动沙丘不同距离处沙堆的间距情况,本研究沿主风向将调查区划分为 0~50,50~100,100~150,150~250 m 共 4 个区段,分别为区段 1、区段 2、区段 3 和区段 4。沙堆间距在区段 1 出现由大快速减小,在区段 2 和区段 3 维持小间距,至区段 4 再缓慢增大的分布格局。0~5 m 的小间距主要出现在区段 2 和区段 3,而 15~25 m 的大间距主要出现在区段 1 和区段 4。密度与间距的变化过程相反,表现为由小到大再变小,最大处位于距上风向边缘 50~100 m 的范围,为 13.6 个/100 m²(图 2)。

野外踏查还发现,在调查范围外的上风向,当出现早期开荒遗留下的民房或两相邻流动沙丘距离较近时,白刺灌丛沙堆会出现位置向民房或其中 1 个沙丘靠拢的情况,且个别相邻沙堆合并接叠,形成体积较大的叠置沙堆。如非偶然现象,则依据对横向沙丘

表面气流湍流特征的研究结果^[17-19],出现这一现象的原因很可能是由于障体引起的湍流强度、气流丰富度和三维起沙风的局地变化造成的。

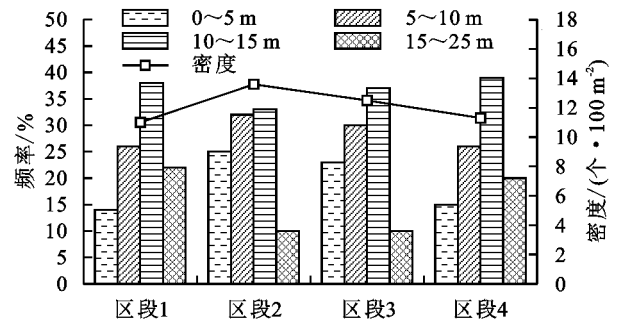


图 2 各区段白刺灌丛沙堆不同间距出现频率

2.3 白刺灌丛沙堆发育状况

研究区锥形阶段的白刺灌丛沙堆数量占总白刺灌丛沙堆总数的 24.0%,主要分布在较为空旷、周围沙堆密度较低的区域,沉积沙在沙堆背风侧拖曳成沙舌,使得沙堆长度(1.95~4.73 m)明显大于其宽度(1.20~3.32 m);发育阶段的白刺灌丛沙堆占比较大(约 42.2%),且多分布在距上风向 50~150 m 的范围内,沙堆上白刺生长良好,盖度在 35%左右;稳定阶段的白刺灌丛沙堆约占 33.0%,沙堆表面白刺平均覆盖面积占沙堆总表面积的 49.2%,其余为裸沙所覆盖,因风沙流发生频次高、蚀积转换频繁使得沙面无结皮形成,但表层土壤紧实,白刺生长良好。个别稳定阶段的白刺灌丛沙堆的侧位底部出现小范围的白刺裸根,但不构成促使沙堆解体的实质性风蚀缺口。从沙堆风蚀及白刺发育来看,退化阶段的白刺灌丛沙堆仅为个别现象,主要出现在下风向受林带影响的区域。由此判断,该区白刺灌丛沙堆整体上处于发育的中早期阶段。

2.4 白刺灌丛沙堆形态特征

2.4.1 形态特征参数统计 白刺灌丛沙堆的形态为凸起的半椭球状,迎风坡短而陡,背风坡长而缓,除风影区外均被白刺所覆盖。由表 3 可知,研究区白刺灌丛沙堆的高度、轴长、坡长、水平尺度(水平尺度=(长轴+短轴)/2)、底面积等形态参数的变化幅度均较大,变异系数均在 0.5 以上,这与研究区白刺灌丛沙堆处于发育的中早期阶段有关。相比于其他研究区^[5-11],本研究区内白刺灌丛沙堆各形态特征参数的平均值均较小,沙堆的平均间距也只有 9.8 m,在景观上呈现出密度大而体型小的特点。

2.4.2 形态特征参数间的关系 由沙堆形态特征参数间的相关性分析(表 4)可以看出,白刺灌丛沙堆长轴长与短轴长存在显著相关性($P < 0.01$),二者间呈线性关系(图 3a),这表明长轴与短轴是协同变化的,沙堆沿风向拉伸的同时,沙堆宽度也在同步增加,但短轴变化幅度小于长轴。在白刺灌丛沙堆水平尺度

扩大的同时,沙堆的迎风坡坡长与背风坡坡长之间也在协同变化,二者间在 0.01 水平上表现为显著的相关关系(表 4),但迎风坡坡长的变化幅度小于背风坡坡长(图 3b)。尽管长轴与短轴之间、迎风坡长与背风坡长之间均显著相关,但长轴长/短轴长和迎风坡长/背风坡长之间并无显著相关性(表 4),说明该区沙堆向着椭圆半球体发展的过程中,水平面上的拉伸与沙堆的不对称发育并非协同发展。

表 3 白刺灌丛沙堆形态特征参数

特征参数	灌丛高/m	长轴长/m	短轴长/m	迎风坡长/m	背风坡长/m	水平尺度/m	底面积/m ²
最大值	1.83	14.02	9.98	5.78	9.41	12.00	109.83
最小值	0.03	0.47	0.37	0.10	0.20	0.42	0.14
平均值	0.70	5.82	3.99	2.23	3.39	4.91	12.77
变异系数	0.59	0.53	0.51	0.55	0.58	2.51	0.94

表 4 白刺灌丛沙堆形态参数间的相关性分析

项目	长轴长	短轴长	高度	底面积	迎风坡长	背风坡长	长轴长/ 短轴长	迎风坡长/ 背风坡长
长轴长	1							
短轴长	0.938**	1						
高度	0.835**	0.904**	1					
底面积	0.938**	0.933**	0.842**	1				
迎风坡长	0.921**	0.907**	0.844**	0.857**	1			
背风坡长	0.940**	0.904**	0.832**	0.902**	0.852**	1		
长轴长/短轴长	0.140	-0.157	-0.127	0.019	0.017	0.066	1	
迎风坡长/背风坡长	-0.004	0.034	-0.010	-0.056	0.219*	-0.239*	-0.111	1

注: **表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; *表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

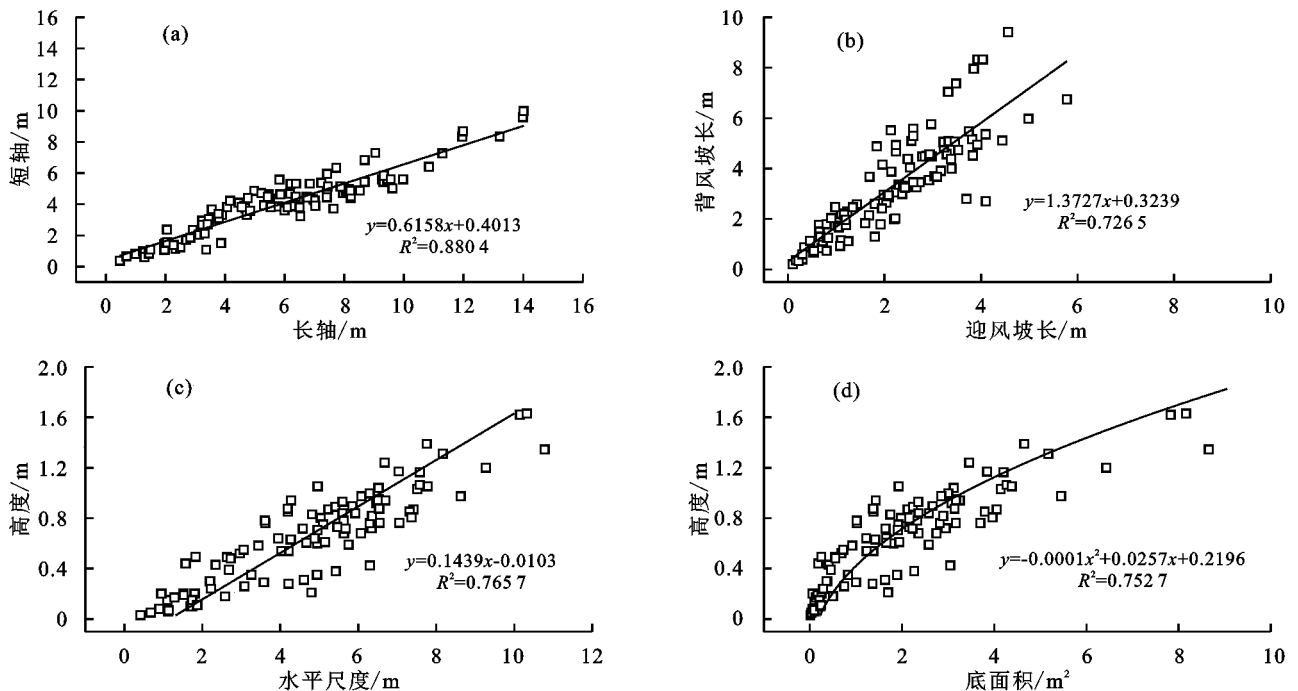


图 3 白刺灌丛沙堆形态参数之间的关系

3 结论与讨论

白刺灌丛沙堆是白刺与风力短距离搬运、分选的沉积物共同构建的特殊风成地貌。本研究中,调查区位于

高度是白刺灌丛沙堆的重要形态参数,其与沙堆的发育阶段密切相关,从相关性分析(表 4)可以看出,白刺沙堆的高度、长轴长、短轴长、迎风坡长、背风坡长、底面积间在 0.01 水平上均表现为显著的相关关系。从拟合的方程来看,沙堆高度与沙堆水平尺度之间成线性关系(图 3c),但与沙堆底面积之间成二次函数关系(图 3d),即随着沙堆底面积的增大,沙堆高度的增加幅度减小并趋于稳定,沙堆进入发育的稳定阶段。

巴丹吉林沙漠南缘流动沙丘的下风向,沙源供给充足,区域风力强劲,在这一生境条件下,白刺灌丛沙堆表现出其区域性形态特征和分布格局,主要表现为:

(1)从不同发育阶段白刺灌丛沙堆所占的比重来看,研究区发育阶段的白刺灌丛沙堆数量最多,占总数的42.2%,其次是稳定阶段(33.0%)和锥形阶段(24.0%),而退化阶段的灌丛沙堆数量仅占0.8%,这说明在这一生境条件下,白刺灌丛沙堆处于发育的中早期阶段。而在调查区下风向沙源供给相对欠缺的固定、半固定沙丘分布区,白刺灌丛沙堆则主要是以稳定阶段为主,占总数的50.1%^[20],这说明高沙源供给加速了沙物质在沙堆上输入、输出的频率和强度,从而延缓了沙堆的稳定化进程。

(2)在研究区高沙源供给条件下,白刺灌丛沙堆空间分布的变异性较大,相邻白刺灌丛沙堆顶部的距离在3.54~23.15 m不等,以5~10,10~15 m的间距为主,出现的频次分别占28.57%,37.14%。空间分布上,间距沿风向呈现由大快速减小,维持小间距一段距离后,再缓慢增大的分布格局,反映在密度上则是沿主导风向呈先增大后减小的变化趋势。从张进虎等^[21]对包括本研究区在内的整个绿洲荒漠过渡带的白刺灌丛沙堆的分析结果来看,二者在密度分布上有相通之处。该研究表明,过渡区白刺灌丛沙堆分布密度较大,呈聚集分布,而荒漠区及绿洲区沙堆分布密度较小,均呈随机分布。究其原因,笔者认为可归因于边界效应,即由边界区环境因子或干扰因子的复杂性决定。

(3)尽管研究区高沙源供给促进白刺灌丛沙堆在数量上的增加,而水分亏缺对白刺生长的限制作用^[4],以及当地强劲的风力与蚀积转换很可能是促使沙堆矮小化的关键因素。与分布在宁夏盐池北部流沙边缘的白刺灌丛沙堆(平均高1.75 m,长轴长6.90 m,短轴长5.74 m,区域年均降水量280 mm,无地下水埋深限制)^[22]相比,本研究区白刺灌丛沙堆的特征尺寸明显偏小,仅高度、长轴和短轴就较盐池北部的白刺灌丛沙堆分别降低60.19%,15.73%和30.57%。此外,通过对不同地区白刺灌丛沙堆的对比可知,形态参数,如沙堆的高度、长轴、短轴、迎风坡长、背风坡长、底面积等之间的关系在不同生境条件下基本保持一致^[6-7,9-11,20-23],这说明沙源供给丰富度及区域环境因子影响的主要是灌丛沙堆的数量和形态参数,而对各形态参数间协同变化规律的影响不大。

(4)本研究中,笔者并没有在3个测点的输沙率和风沙流结构与白刺灌丛沙堆的形态参数和间距之间建立起相关关系,但对本研究区测定的输沙率与王自龙等^[14-15]对整个过渡带不同立地条件下测定的输沙率和风沙流结构的对比可知,白刺灌丛沙堆集中分布区的输沙率明显大于其他非流沙区域的输沙率,风沙流结构亦不同,而该区域白刺灌丛沙堆的个体尺寸又明显小于过渡带其他区域^[9,20-21],其原因应与空旷

的环境条件、沙堆发育的中早期阶段、强劲的风力以及高频率的蚀积转换等多个因素有关。

参考文献:

- [1] Tengberg A, Chen D. A comparative analysis of nebkhas in central Tunisia and northern Burkina Faso[J]. *Geomorphology*, 1998, 22(2): 181-192.
- [2] El-Bana M I, Nijis I, Kockelbergh F. Microenvironmental and vegetational heterogeneity induced by phytogenic nebkhas in an arid coastal ecosystem[J]. *Plant and Soil*, 2002, 247: 283-293.
- [3] Cabrera-Vega L L, Cruz-Avero N, Hernandez-Calvento L, et al. Morphological changes in dunes as an indicator of anthropogenic interferences in arid dune fields[J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, 65: 1271-1276.
- [4] 马瑞,王继和,屈建军,等.民勤绿洲—荒漠过渡带植被梯度特征及其土壤水环境[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(6): 1-7.
- [5] 何志斌,赵文智.黑河流域荒漠绿洲过渡带两种优势植物种群空间格局特征[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(6): 947-952.
- [6] 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.
- [7] 刘冰,赵文智.荒漠绿洲过渡带泡泡刺灌丛沙堆形态特征及其空间异质性[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2814-2820.
- [8] 李秋艳,何志斌,赵文智,等.不同生境条件下泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)种群的空间格局及动态分析[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(4): 484-488.
- [9] 彭飞,王涛,刘立超,等.民勤荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆演化阶段及其空间格局[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(3): 593-599.
- [10] 魏亚娟,汪季,党晓宏,等.不同生境白刺(*Nitraria tangutorum*)灌丛沙堆形态特征[J]. *干旱区研究*, 2019, 36(1): 253-261.
- [11] 左合君,杨阳,张宏飞,等.阿拉善戈壁区白刺灌丛沙堆形态特征研究[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(1): 263-269.
- [12] 岳兴玲,哈斯,庄燕美,等.沙质草原灌丛沙堆研究综述[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(5): 738-743.
- [13] 张萍,哈斯额尔敦,杨一,等.小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)灌丛沙堆形态对沙源供给形式和丰富度的响应[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(6): 1453-1460.
- [14] 王自龙,赵明,王立,等.民勤绿洲外围不同下垫面条件下风沙流结构的观测研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(4): 72-75.
- [15] 王自龙,赵明,王立,等.民勤绿洲外围不同下垫面条件下风沙流流量的观测[J]. *湖北农业科学*, 2009, 48(4): 851-856.
- [16] 李得禄,满多清,朱国庆,等.丘间低地不同部位风沙流结构特征[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(5): 1210-1215.

- [16] 田昌,周旋,谢桂先,等.控释尿素减施对双季稻田径流氮素变化、损失及产量的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):21-28.
- [17] 王晓巍,蒯佳林,郁继华,等.不同缓/控释氮肥对基质栽培甜瓜生理特性与品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(3):847-854.
- [18] 王晓巍,蒯佳林,刘晓静,等.4种缓控释氮肥在不同环境条件下的养分释放特性的研究[J].草地学报,2013,21(2):332-337.
- [19] 杜建军,廖宗文,毛小云,等.控/缓释肥在不同介质中的氮素释放特性及其肥效评价[J].植物营养与肥料学报,2003,9(2):165-169.
- [20] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [21] 曹建康,姜微波,赵玉梅.果蔬采后生理生化实验指导[M].北京:中国轻工业出版社,2007:24-54.
- [22] Gallardo M, Padilla F M, Pena-Fleitas M T, et al. Crop response of greenhouse soil-grown cucumber to total available N in a nitrate vulnerable zone[J]. European Journal of Agronomy, 2020, 114:125993.
- [23] 王晨琿,李婷玉,马林,等.日本化肥减量增效实现途径及启示[J].土壤通报,2020,51(3):725-732.
- [24] Department for Environment Food and Rural Affairs (Defra). Fertiliser Manual (RB209)[M]. 8th Edition. TSO, Norwich, 2010.
- [25] 弓晓峰,张静,张振辉,等.鄱阳湖南矶山自然保护区沼泽湿地土壤对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 吸附能力的研究[J].农业环境科学学报,2006,25(1):179-181.
- [26] 崔思远,朱新开,张蓁茜,等.水稻秸秆还田年限对稻麦轮作田土壤碳氮固存的影响[J].农业工程学报,2019,35(7):115-121.
- [27] NE 养分专家系统.[2021-04-19].<http://www.nutrientexpert.cn/>.
- [28] 康利允,常高正,高宁宁,等.不同氮、钾肥施用量对甜瓜养分吸收、分配及产量的影响[J].中国农业科学,2018,51(9):1758-1770.

(上接第 221 页)

- [17] Stam J M T. On the modeling of two-dimensional Aeolian dunes[J]. Sedimentology, 1997, 44(1):127-141.
- [18] McKenna N C, Lancaster N, Nickling W G. The effect of unsteady winds on sediment transport on the stoss slope of a transverse dune[J]. Silver Peak, NV, USA, Sedimentology, 2006, 47(1):211-226.
- [19] 张正偲,董治宝.横向沙丘表面气流湍流特征野外观测[J].地理科学,2015,35(5):652-657.
- [20] 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.
- [21] 张进虎,唐进年,李得禄,等.民勤荒漠绿洲过渡带灌丛沙堆形态特征及分布格局[J].中国沙漠,2015,35(5):1141-1149.
- [22] 谢国勋,罗维成,赵文智.荒漠草原带沙源及灌丛对灌丛沙堆形态的影响[J].中国沙漠,2015,35(3):573-581.
- [23] 孙涛,贾志清,刘虎俊,等.绿洲荒漠过渡带不同演替阶段白刺灌丛植被和沙堆形态特征相关性分析[J].兰州大学学报(自然科学版),2020,56(3):396-403,411.

(上接第 229 页)

- [18] 钱进,郑浩,朱月明,等.干湿交替对河岸带环境效应的影响机制研究进展[J].水利水电科技进展,2016,36(1):11-15,22.
- [19] 张素,熊东红,校亮,等.干湿交替对土壤性质影响的研究[J].土壤通报,2017,48(3):762-768.
- [20] 辛星.干湿交替作用下鄱阳湖湿地土壤氮磷变化特征模拟研究[D].河南 开封:河南大学,2017.
- [21] 钱进,沈蒙蒙,王沛芳,等.河岸带土壤磷素空间分布及其对水文过程响应[J].水科学进展,2017,28(1):41-48.
- [22] 王明.干湿交替驱动下土壤微生物量 N_2O 变化规律[D].北京:中国农业科学院,2013.
- [23] 夏建国,仲雨猛,曹晓霞.干湿交替条件下土壤磷释放及其与土壤性质的关系[J].水土保持学报,2011,25(4):238-248.
- [24] Young E O, Ross D S. Total and labile phosphorus concentrations as influenced by riparian buffer soil properties[J]. Journal of Environmental Quality, 2016, 45(1):294-304.
- [25] 梁士楚,苑晓霞,卢晓明,等.漓江水陆交错带土壤理化性质及其分布特征[J].生态学报,2019,39(8):2752-2761.
- [26] Li S L, Gang D G, Zhao S J, et al. Response of ammonia oxidation activities to water-level fluctuations in riparian zones in a column experiment[J/OL]. Chemosphere, 2021, 269. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128702>.