

旱区荒漠灌丛沙堆研究进展及展望

孙涛^{1,2}, 唐进年^{1,2}, 韩福贵¹, 张锦春¹, 郭树江³, 段晓峰³, 张裕年¹, 张莹花¹

(1. 甘肃省治沙研究所 甘肃省荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室培育基地, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091; 3. 甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 甘肃 民勤 733300)

摘要: [目的] 对于旱荒漠区灌丛沙堆的发育过程、形态特征、生态效益及环境演变等方面的研究进展进行总结和展望, 以期对荒漠区灌丛沙堆生态机理、灌丛群落生态稳定性等方面研究提供支持。[方法] 从干旱荒漠区灌丛沙堆的形成发育过程和机制出发, 采用文献综述的方法进行分析和总结。[结果] 总结了灌丛沙堆地貌形态特征、空间格局分布、沙物质沉积特征, 阐述了灌丛沙堆所具有的多种生态效应和区域环境演变之间的响应关系, 并对今后灌丛沙堆的研究方向和动态进行了展望。[结论] 对灌丛沙堆演变过程的研究有助于更深入地了解区域生态环境变化过程与全球气候变化间的内在联系。

关键词: 灌丛沙堆; 荒漠区; 发育过程; 生态效应; 环境演变

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)04-0351-06

中图分类号: P931.3

文献参数: 孙涛, 唐进年, 韩福贵, 等. 旱区荒漠灌丛沙堆研究进展及展望[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 351-356. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.04.060

Progress and Prospects of Desert Nebkhas Research in Arid Areas

SUN Tao^{1,2}, TANG Jinnian^{1,2}, HAN Fugui¹, ZHANG Jinchun¹,
GUO Shujiang³, DUAN Xiaofeng³, ZHANG Yunian¹, ZHANG Yinghua¹

(1. Gansu Desert Control Research Institute, State Key Laboratory of Desertification and Aeolian Sand Disaster Combating, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. Minqin National Research Station for Desert Steppe Ecosystem, Minqin, Gansu 733300, China)

Abstract: [Objective] Nebkhas, a kind of dune that is commonly distributed in arid desert areas. In this article, its forming process, morphological characteristics, ecological effects and environmental evolution were reviewed and summarized to provide knowledges for the research of its ecological mechanism and the ecological stabilization. [Method] Literatures were reviewed and summarized with regard to the development process and the formation mechanism of the nabkhas in the arid desert region. [Results] The formation and development of nebkhas, the morphology, spatial distribution, sediment characteristics were reviewed. And various ecological effects of nebkhas and the related regional environmental evolution were described. The trend of nebkhas research was prospected. [Conclusion] Research of nebkhas evolution in arid land was expected to help us to understand more about the interior relationship between the process of regional environmental change and global climate change in the future.

Keywords: nebkhas; desert region; development process; ecological effect; environmental evolution

灌丛沙堆是干旱、半干旱、半湿润荒漠地区以及沙质海岸带广泛分布的一种生物风积地貌类型^[1], 是由于风沙流遇到灌丛阻拦, 沙物质、风沙颗粒物在灌丛及其周围堆积而形成的。尤其在干旱、半干旱区荒

漠过渡带、绿洲边缘地带极易出现, 是一种特有的生物地貌类型, 也称之为植物沙丘^[2]或是沙堆。在我国, 干旱、半干旱地区面积广大, 灌丛沙堆主要分布于农牧交错带、荒漠草原、沙漠边缘、荒漠绿洲过渡带及

收稿日期: 2015-12-04

修回日期: 2015-12-23

资助项目: 国家自然科学基金青年项目“干旱区白刺灌丛沙堆发育过程的土壤呼吸时空变化特征及其影响因素”(31300595); 国家自然科学基金地区项目“库木塔格沙漠第四纪地层沉积特征记录的沙漠演化过程”(41262008); 甘肃省基础研究创新群体项目(1506RJIA155)

第一作者: 孙涛(1978—), 男(汉族), 甘肃省永昌县人, 博士研究生, 副研究员, 主要从事荒漠生态、荒漠植被恢复及荒漠化防治研究工作。E-mail: suntaosuny@163.com。

河床河谷地带等,类型有锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、怪柳(*Tamarix ramosissima*)、白刺(*Nitraria*)、蒿类(*Artemisia frigid*)等^[3]。这些灌丛沙包在防风固沙、保护物种多样性及维持区域生态平衡等方面有着十分重要的作用。20世纪80年代以来,随着风沙地貌和沙漠化过程研究的不断深入,国内外学者对灌丛沙堆的形态特征、形成演变及过程、沙物质沉积特征、沙堆分布特征及空间格局以及沙堆与区域气候响应等方面进行了深入探讨和研究。

灌丛沙堆的外部形态特征从力学角度讲是一种动力平衡的状态,是在特定发育阶段过程中植物、风力和沙源3种因素相互作用共同形成的。这种形态特征可以反映分布区域的风沙环境特点和土地沙漠化发展的阶段性特征。灌丛沙堆的形成发育与气候变化和人类活动的关系十分密切,它的退化演替过程主要是由自然因素和人为活动两种因素共同对区域生态系统所产生的一种综合作用的结果,同时它的出现又会对土地生产力、生态环境产生极大的影响^[1,4]。本文对灌丛沙堆的发育过程、形态特征、生态效益及环境演变等方面的研究进展做了总结和阐述,并对今后的研究方向做了展望,以期对进一步认识荒漠区灌丛沙堆生态机理、维持灌丛群落生态稳定性等方面有所借鉴。

1 灌丛沙堆研究进展

1.1 灌丛沙堆发育过程研究

灌丛沙堆形成和演化过程中最主要的3个因素被认为是荒漠植被盖度、风力强度和沙源供应量^[5]。这3者相互作用又相互影响,灌丛沙堆中植物本身是其重要组成部分,灌丛沙堆起源于植物对近地面风沙流运动的干扰,在形成与发展过程中与植物的密度、枝条分布、高度、盖度以及风速和输沙率大小密切相关^[6-7]。因此,灌丛沙堆是荒漠植被与风沙沉积物共同作用而构建的特殊的的风成地貌类型,如荒漠区的怪柳沙堆、白刺灌丛沙堆都是沙物质围绕植株沉积形成的典型灌丛沙丘。荒漠植物结构本身具有通透性,是一种特殊类型的固沙或集沙障碍物,通过植物生长和沙丘发育之间的相互作用,导致植物背风侧风速递减、风沙加积,植物在加积的风沙上持续生长,因此逐步发育成灌草丛沙堆,当植被覆盖率足够大时风蚀就会停止,灌丛沙堆的形成过程也就终止^[8]。灌丛沙堆尺度和形态是沙堆形态发育和塑造的重要因素,但是其所在的地理环境、土壤质地和是否具有丰富的沙源和风积作用是沙堆快速形成并扩展的外部因素^[9]。灌丛沙堆在发育过程中经历四个阶段:开始发育时的

雏形阶段、发育过程中的增长阶段、发育成熟期的稳定阶段和发育后期的衰退阶段。每一阶段,均以不同的沙堆形态特征表现出来^[10],这是因为不同的植物种类、形态特征直接影响到了沙堆发育的过程和形态形成。每一个发展阶段均是植物、风力、沙源三者相互作用的动力平衡状态^[7]。

将野外观测和室内风洞模拟结合起来可以很好地阐述各类灌丛沙堆不同发育过程中风沙流与植物在灌丛沙堆形成中的相互作用和沙堆发育的过程响应。对沙堆的风洞模拟研究表明,植物在沙堆发育过程中起着十分重要的作用,是因为沙堆顶部的植物及植株密度可以改变沙堆表面的粗糙度,进而影响周围流场的分布。无论沙堆基本形态如何变化,沙堆与植物和沙物质沉积之间存在着相互联系又相互作用的反馈效应:即一方面植物生长越好,越能阻滞气流,沙质沉积就会越多,这样促使和刺激沙生植物根系和植株的生长,另一方面,长势良好的灌丛植物增强了沙堆表面的粗糙度,进一步使得表层沙物质沉积在周边,使灌丛沙堆逐步的增大,引起外部形态的变化。

1.2 地貌形态特征研究

灌丛沙堆基本的形态学指标被认为是用来进行区域沙漠化监测和评价的最重要的示量特征之一。灌丛沙堆的几何形态反映了特定区域的风沙环境特点和土地荒漠化的阶段性特征。沙漠边缘的灌丛沙堆在形成、发展和演变的动态过程中与周边环境因素密不可分,不同类型地貌、不同盖度的灌丛沙堆可以反映区域环境、水分、以及荒漠化状况。因此,通过研究不同类型灌丛沙堆的地貌形态特征和基本的形态指标来反映区域环境的变化具有重要的意义。处于不同生境中的灌丛沙堆形态特征存在很大差异^[11-12],而沙堆基本形态参数、面积、体积、高度等之间的相关关系在表明沙堆所处的阶段和环境状况^[13]的同时也能反映其生物量的多少。对荒漠草地、沙漠和戈壁分布的白刺灌丛沙堆基本形态和尺度的研究表明相互间差异明显,戈壁生境的沙堆单体规模最小,荒漠草地的最大,沙漠居中^[14]。不同演化阶段灌丛沙堆形态参数及其变化趋势、植被盖度等存在很大的差异,处在发育阶段和活化阶段的灌丛沙堆的高度随水平尺度的变化规律不尽相同^[15],但是沙堆体积大小随植株高度和盖度的逐渐增加而显著的增大^[16],说明环境变化可以通过灌丛沙堆的地貌特征和形态反映出来,而对沙漠中不同类型的灌丛沙堆的地貌特征和形态的研究也反映了沙漠化的发展趋势。

1.3 空间格局研究

通过格局分析可揭示出种群个体空间分布的数

量特征及与各种环境因子的相互关系,反映环境空间结构的异质性和植物选择生境的内在特性。空间异质性在不同尺度上具有不同的格局特征,其生物学特征及生态学过程随之也产生了异质性,通过对灌丛沙堆小尺度上空间分布格局的研究可以为大尺度上的生态学格局特征与发育过程提供机制方面的一些解释^[17]。黄河河岸与库布齐沙漠之间生态过渡带上的白刺灌丛沙包空间格局分布呈逐渐破碎化,表明遭受到了不同程度的破坏,沙堆表现出一定程度的退化^[18]。不同的生境中,环境因素对空间异质性产生较大的影响,灌丛沙堆的格局分布不尽相同。例如,处于沙漠低地和固定沙地的白刺灌丛沙堆的斑块大小和空间格局分布就存在明显的差异;生长在戈壁生境中的怪柳沙堆相互分隔呈斑块状分布,而在沙漠生境中则呈沙丘链状分布,格局较明显。不同演化阶段灌丛沙堆的水平空间分布、表层土壤水分及灌丛形态特征的差异可以揭示不同演化阶段灌丛沙堆的变化趋势,也可用来作为沙堆不同发育阶段^[19]的指示指标。天然降水和地表径流对大尺度上空间格局的影响作用不言而喻,但是局地微地形的环境因子对灌丛沙堆的空间格局塑造也起着非常重要的作用,土壤表层水分、地下水位埋深、沙埋、风蚀和植被盖度等导致局地微地形的差异,进而影响土壤水分局地变异,影响植物的分布和生长状况,而植物根系、枝条密度等因素有导致了灌丛沙堆的空间异质性。

野外开展植被调查工作,调查面积小且具有局限性,而大面积的调查工作需要依靠目前比较成熟的遥感技术。通过图像处理结合数学模型,对植物个体的空间信息进行提取进而对其空间格局进行分析,这种方法比较适合干旱半干旱地区植物沙堆空间格局的研究,并具有较好的效果^[20]。因此,遥感技术被广泛的运用到旱区灌丛沙堆空间格局的研究中是一种非常有效的研究手段。

1.4 沙物质沉积特征研究

沉积物粒度分布特征可以综合反映沉积区域物质来源、沉积区水动力环境、微粒输移能力和输移路线等特征。长期以来,对黄土、湖泊沉积物粒度的研究结论表明沉积粒度的变化对气候干湿变化的指示作用较为明显^[21]。风积物的粒度是恢复古环境和古气候状况的重要指标^[22],粒度参数与沉积物的形成环境有很好的相关性^[23],因此,通过对沉积物粒度分布特征的研究可以为我们了解和认识历史时期沉积物所处的沉积环境提供很好的参数指标。

灌丛沙堆不同部位的粒度组成与其周围的风况条件和物质来源有很大关系,而植被盖度、地形等也

会对沙堆的土壤物理性质产生影响^[24]。灌丛沙堆沉积物来源于沙堆附近丘间地或周边地区,经过风力的初步分选、打磨和吹蚀,在植物灌丛的阻挡下逐渐形成沙堆,随着灌丛沙堆的逐渐形成其前后流场结构发生变化,进而在灌丛沙堆的不同部位呈现出相应的粒度特征。灌丛沙堆的沉积物粒度相对与丘间地平均粒径较粗,磨圆度和分选性较差,但是其沙堆沉积物矿物成分与附近周边的沙源物质成分基本一致,因此,风沙流携带的沙物质在丘间地和沙堆之间的重新分布是灌丛沙堆形成的一个重要过程^[25-26]。灌丛沙堆表面不同部位沉积物的粒度参数在沙堆断面呈现出有规律的变化,迎风坡各部位的粒径比背风坡相应部位的粗,而顶部的粒径细,这种变化是沙堆形态、气流和植物共同作用的结果,并受制于主风和次主风的交替作用。灌丛沙堆沉积物属短距离风力搬运、分选产物。沙堆表层沉积物平均粒径由迎风坡脚至背风坡脚趋于变细,由沙堆顶部垂直向下至底部趋于变粗,这些沙粒度特征参数以及粒径分布曲线变化等可反映部分环境要素的变化过程^[22]。

1.5 灌丛沙堆的生态效益

1.5.1 灌丛“肥岛”效应,增加了土壤养分 在干旱、半干旱区灌木或乔木冠幅下所形成的灌丛沙堆“肥岛”(fertile islands)效应显著^[27]。“肥岛”的实质是土壤资源水平分布的局部异质性显著的表现,其形成和发展是一个资源逐渐自生的动态过程,这种自生的过程是由灌木的扩散过程形成的,两者之间是一种正反馈作用^[28]。干旱荒漠生态系统中灌丛下和灌丛间土壤养分的时空动态是探讨“肥岛”养分过程及其形成机制的重要依据。在空间分布上,灌丛下土壤较灌丛间土壤具有更高的养分含量(C, N, P等)及阳离子;在时间尺度上,灌丛群落发育的时间愈长,土壤养分的空间自相关愈明显^[29-30];尤其在以水分为限制因子的荒漠生态系统中,由于水分匮乏导致土壤养分元素不能被植物充分吸收利用而产生富集,使得土壤养分的空间异质性分异明显,这种分异也使得灌丛植物,如白刺根系产生了适应性的空间分化,使其适应不同流动的沙堆^[31-32]。随着灌丛向沙漠逐步过渡,肥岛效应逐渐削弱直至消失,但是肥岛的存在也为该地区群落演化提供了必要的条件。因此,研究不同灌木植物对土壤养分的利用特征和养分在根际微域环境中的变化,对揭示灌丛沙堆中土壤养分的保护和有效利用机制,以及植被的恢复重建等都有重要的生态学意义。

1.5.2 灌丛“庇护”效应,增加了物种多样性 灌丛沙堆“肥岛”效应逐渐显现的过程中周围的微环境也

随之发生变化,灌丛提高了水分入渗率,而土壤水分异质性的加强在利于自身的生存和繁衍的同时也为草本植物在灌丛下的侵入、蓄积、生存提供了良好的条件,从而有利于草本植物在灌丛内的定居和恢复,这就是灌丛的“庇护”效应。在流动沙地中由于没有阻挡物,种子很难停留在沙层表面,但是在灌草丛的“庇护”效应下停留在灌丛内,因此,灌丛内与灌丛外相比灌丛内植物在盖度、高度、密度、物种数以及土壤种子库等方面明显高于灌丛外围,并由灌丛内向灌丛外呈现出明显下降的趋势^[33-34]。正因为灌丛对下层草本植物的这种“庇护”作用,不仅丰富了沙地植物的多样性,为退化植被的恢复提供了重要的物种资源,也对维系沙地植被的稳定具有重要的作用。

1.5.3 灌丛防风固沙功效,维护了沙地生态平衡与稳定 在干旱荒漠地区,灌丛沙堆改变了沙地表面地貌特征,增加了下垫面粗糙度,对气流产生了障碍,通过自身起到降低风速、阻止流沙迁移、截获凋落物、防风固沙的作用。民勤绿洲边缘地带天然白刺灌丛沙堆可以使风速连续降低,在背风面可降低达 40% 以上,具有明显的防风固沙作用,而由不同灌木构成的灌木群落则具有明显的保护和改善沙地生态环境的良好功效。灌丛植物对风沙活动的影响十分复杂,从植物自身角度来讲其分布方式、疏透度、植株形态特征等与风沙流密切相关,而环境因素如风向、微地形、水文特征等也与风沙活动密切相关^[35],因此,需要大量的野外观测和研究才能更深入了解灌丛植物对风沙活动的影响。

1.6 灌丛沙堆与环境演变研究

随着对灌丛沙堆研究的不断深入,沙堆“年层”由于蕴含着丰富的环境信息可以作为干旱区风沙气候、环境演变历史的一种良好的载体日益被国内外学者所关注^[36-37]。对灌丛沙堆沉积剖面中的古风成沙、柽柳叶层、炭化层等沉积特征的研究可以恢复区域古环境演变历史。靳建辉等^[38]利用风沙沉积粒度和地球化学元素两个环境代用指标,初步建立了风沙气候环境演变序列,表明灌丛沙堆记录的风沙气候环境演化序列与北疆其他全新世沉积记录有较好的一致性。

沙包纹层沙粒度特征可以较为明确的反映沉积动力结果,进而反演出历史时期的环境状况。用柽柳沙包沉积物年层的粒度特征和矿物组成等可以研究区域环境变化状况^[36];沙层沉积厚度较薄表明这段时间风力较弱,下垫面状况良好,输沙量较低,这一时段气候相对湿润,土壤水分含量较好;当沙层沉积较厚时,表示该时段风力较强,风沙流含量高,输沙量大,气候相对干旱,降水少,地表干燥,易于被风蚀形

成风沙流。在沙包发育过程中受到植被条件、大气温湿度变化等环境因素的影响,使得粒度分布变化的关系存在不确定性,在研究过程中还需借助其它指标如枯枝落叶的 C, H, N, C/N 和稳定¹³C 值等进行综合分析,以此恢复不同时期区域环境气候要素的演变过程。

2 灌丛沙堆研究展望

综上所述,目前对我国干旱荒漠地区灌丛沙堆的研究已经取得了很大进展,研究理论正逐步趋向完善,研究层面和深度也在逐步的拓展和深入。从灌丛沙堆当前研究内容和趋势分析,今后仍需从以下几个方面做进一步的研究和探讨。

2.1 灌丛沙堆形成与演变过程的内部机制研究

灌丛沙堆的形成、发展与演化受到多种因素的影响与制约,虽然通过风洞模拟的手段完善了灌丛沙堆的动力学及形成演化规律,但是仅停留在表面气流特征和风蚀堆积平衡等某一因素作用下定性的描述以及推理阶段。加强对灌丛沙堆演化过程中的土壤、植被、水分的变化特征及其不同影响因素耦合关系过程的研究,将进一步完善灌丛沙堆动力学形成的机理与机制。灌丛沙堆是较为复杂的土壤—植被—大气连续体(SPAC),土壤温度和水分变化因沙堆形态特征差异和沙堆部位的不同而空间异质性较强,因此土壤水热迁移与转化过程较为复杂,尽管对柽柳和白刺灌丛沙堆 SPAC 系统水热传输和蒸散特征的变化规律进行了分析和模拟研究^[39],但对灌丛沙堆内部水热结构特点、发生原理和动态变化机制仍需要更深入的认识,因此,今后对灌丛沙堆内部变化机制与机理的研究将对进一步加深对灌丛沙堆演变过程的研究具有重要的意义。

2.2 灌丛沙堆的环境指示作用研究

草地灌丛化可作为草地环境退化的标志之一,但是其可靠度和灵敏度仍需定量的研究。灌丛沙堆与环境因素密不可分,不同类型地貌的灌丛沙堆可以反映区域环境状况。随着草地生产力的下降,草原生态的逐步退化伴随着灌丛沙堆的逐渐出现表现出草地植被和土地的退化,很多学者探讨利用灌丛沙堆对区域土地沙漠化和草原退化进行监测和评价。但是在极端干旱荒漠环境中灌丛沙堆的广泛发育和分布可能表明该区域生态环境的稳定,在沙漠过渡地带又代表了流动沙丘趋于稳定、土地绿洲化或者指示水土条件较好的环境变化趋势^[11-12]。灌丛沙堆是野外易于观测的地貌形态,如何将灌丛沙堆的发育与土壤风蚀和土地荒漠化相联系,如何去界定这种指示作用,它

的可靠度和灵敏度怎样还需要进一步的去验证和研究。

2.3 荒漠灌丛群落维持与更新机理研究

当前,在自然因素和人为干扰下灌丛沙堆面积在逐渐的减少。在自然条件下灌丛植被的生长、发育和衰退是一个渐进缓慢的过程,而人类对荒漠土地的开发导致了沙堆快速解体。当前对灌丛沙堆更新机理的研究较少,对灌丛沙堆采取的人工辅助保育措施和方法仅限于围栏、放牧或人工平茬等较为简单的层面,这些恢复研究工作显然与灌丛沙堆在中国干旱区分布面积的广阔性不相称。灌丛植被群落稳定和更新与光、热、水、气、土等多种生态因子密切相关,哪一种生态因子在维持灌丛群落稳定和更新过程中起主导作用,其驱动作用机理仍然不太明确,因此进行荒漠灌丛群落维持与更新机理研究,开展不同恢复保育模式与技术体系研究,是当前对灌丛沙堆保育技术研究与实践较为迫切的需要,同时也可作为荒漠化防治实践工作提供较为深入的理论依据。

2.4 灌丛沙堆对区域环境演变和生态稳定作用的响应机制研究

灌丛沙堆的形成发育与气候变化和人类活动的关系十分密切,灌丛沙堆尤其是柽柳沙堆年层粒度时空变化反应了区域风沙环境的多样性变化,在重建百年尺度上的温度降水时空变化过程获得了更为客观、可信的气候环境变化信息^[40],使得灌丛沙堆在风沙环境变化中的指示作用进一步凸显。灌丛沙包年层所蕴含的气候环境变化序列较为短暂(近百年),通过“年层”计年可以从当前年份推知过去的某个年代,但是缺少一个明确的“标准”年份,即过去的某个时间点,这就使得年限界定较为模糊,年代误差较大,不能明确界定过去某个时间段,因此,今后结合地质学方法对灌丛沙堆“标准”年代年层的确定、建立更大尺度内沙包形成过程反映的气候环境演变和在全球气候变化条件下灌丛沙堆对区域环境和生态稳定作用的响应机制如何将会受到更多研究的关注。灌丛沙堆在发生和发展的演变过程中碳源/汇功能在当前全球气候变暖的背景下日益受到重视,对不同类型灌丛沙堆变化过程中内部水热因子的响应、土壤碳通量变化的研究将有助于了解区域生态过程和与全球气候变化的内在联系^[41],而对灌丛沙堆研究也将从对沙堆个体的小尺度研究逐渐的拓展到与环境因素、气候变化和生态演变等相结合的大尺度研究的层面上来。

[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] Nickling W G, Wolfe S A. The morphology and origin of Nabkhas, Region of Mopti, Mali, West Africa[J]. *Journal of Arid Environments*, 1994, 28(1): 13-30.
- [3] 武胜利,李志忠,肖晨曦,等. 灌丛沙堆的研究进展与意义[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(5): 734-738.
- [4] Langford R P. Nabkha(coppice dune) fields of south-central New Mexico, USA[J]. *Journal of Arid Environments*, 2000, 46(1): 25-41.
- [5] 李志忠,武胜利,肖晨曦,等. 新疆和田河流域灌丛沙堆风洞流场的实验研究(D)[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(1): 9-14.
- [6] 王彦阁,杨晓晖,于春堂,等. 白刺属植物现状、生态功能及保护策略[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(3): 74-78.
- [7] Hesp P. Morphodynamics of incipient foredunes in New South Wales, Australia [C] // Brookfield M E, Ahlbrandt T S. *Aeolian Sediments and Processes*. Amsterdam: Elsevier, 1983.
- [8] 董治宝, Fryrear D W, 高尚玉. 直立植物防沙措施粗糙特征的模拟实验[J]. *中国沙漠*, 2000, 20(3): 260-264.
- [9] 韩磊,张媛媛,马成仓,等. 狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*)灌丛沙堆形态发育特征及固沙能力[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(5): 1305-1309.
- [10] 李志忠,武胜利,王晓峰,等. 新疆和田河流域柽柳沙堆的生物地貌发育过程[J]. *地理学报*, 2007, 62(5): 462-470.
- [11] 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.
- [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, 16(5): 738-743.
- [13] 刘冰,赵文智,杨荣. 荒漠绿洲过渡带柽柳灌丛沙堆特征及其空间异质性[J]. *生态学报*, 2008, 28(4): 1446-1455.
- [14] 张萍,哈斯,岳兴玲,等. 白刺灌丛沙堆形态与沉积特征[J]. *干旱区地理*, 2008, 31(6): 926-932.
- [15] 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.
- [16] 高永,党晓宏,虞毅,等. 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.
- [17] Wiens J A, Kotliar N B. Multiple Scales of Patchiness and Patch Structure: A Hierarchical Framework for the Study of Heterogeneity[J]. *Oikos*, 1990, 59(2): 253-260.
- [18] 于春堂,杨晓晖,尹伟伦,等. 鄂尔多斯高原北缘唐古特白刺灌丛沙包的空间分布格局分析[J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(5): 39-44.

- [19] 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):594-599.
- [20] 杨晓晖,于春堂,慈龙骏.基于栅格数据的沙漠—河岸过渡带白刺沙堆空间格局分析[J].林业科学,2009,45(8):1-8.
- [21] 鹿化煜,安芷生.洛川黄土粒度组成的古气候意义[J].科学通报,1997,42(1):66-69.
- [22] 赵元杰,夏训诚,王富葆,等.罗布泊地区红柳沙包纹层沙粒度特征与环境指示意义[J].干旱区地理,2007,30(6):791-796.
- [23] 肖晨曦,李志忠.粒度分析及其在沉积学中应用研究[J].新疆师范大学学报:自然科学版,2006,25(3):118-123.
- [24] 毛东雷,雷加强,李生宇,等.新疆策勒绿洲沙漠过渡带地表沙物质理化性质空间差异[J].中国沙漠,2015,35(1):136-144.
- [25] Khalaf F I, Misak R, Al-Dousari A. Sedimentological and morphological characteristics of some nabkha deposits in the northern coastal plain of Kuwait, Arabia [J]. *Journal of Arid Environments*, 1995, 29(3): 267-292.
- [26] Dougill A J, Thomas A D. Nebkha dunes in the Molo-po Basin, South Africa and Botswana; formation controls and their validity as indicators of soil degradation [J]. *Journal of Arid Environments*, 2002, 50(3): 413-428.
- [27] Valiente B A, Bolongaro C A, Briones O, et al. Spatial relationships between cacti and nurse shrubs in a semi-arid environment in central Mexico [J]. *Journal of Vegetation Science*. 1991, 2(1): 15-20.
- [28] Schlesinger W H, Reynolds J F, Cunningham G L, et al. Biological feedbacks in global desertification [J]. *Science*, 1990, 47(4946): 1043-1048.
- [29] Schlesinger W H, Cross A F. On the spatial pattern of soil nutrients in desert eco-systems [J]. *Ecology*, 1996, 77(2): 364-374.
- [30] Xie G, Steinberger Y. Temporal patterns of C and N under shrub canopy in a loessial soil desert ecosystem [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33(10): 1371-1379.
- [31] 张莉燕,盛建东,武红旗,等.新疆怪柳立地土壤养分的空间变异特征[J].林业科学,2009,45(3):54-60.
- [32] 刘耘华,杨玉玲,盛建东,等.北疆荒漠植被梭梭立地土壤养分“肥岛”特征研究[J].土壤学报,2010,47(3):545-554.
- [33] 左小安,赵学勇,赵哈林,等.沙地退化植被恢复过程中灌木发育对草本植物和土壤的影响[J].生态环境学报,2009,18(2):643-647.
- [34] Maestre F, Cortina J. Remnant shrubs in Mediterranean semi-arid steppes: effects of shrub size, abiotic factors and species identity on understorey richness and occurrence [J]. *Acta Oecologica*, 2005, 27(3): 161-169.
- [35] 王升堂,邹学勇,张春来,等.民勤绿洲边缘带灌丛沙丘防风作用研究[J].地理科学,2007,27(1):104-108.
- [36] 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.
- [37] Wang Xunming, Xiao Honglang, Li Jinchang, et al. Nebkha development and its relationship to environmental change in the Alaxa Plateau, China [J]. *Environmental Geology*, 2008, 56(2): 359-365.
- [38] 靳建辉,曹相东,李志忠,等.艾比湖周边灌丛沙堆风沙沉积记录的气候环境演化[J].中国沙漠,2013,33(5):1314-1323.
- [39] 王兵.绿洲荒漠过渡区水热平衡规律及其耦合模拟研究[D].北京:中国林业科学研究院,2002.
- [40] 张锦春,姚拓,刘长仲,等.库姆塔格怪柳沙包年层稳定碳同位素与气候环境变化[J].生态学报,2014,34(4):943-952.
- [41] 靳虎甲,马全林,张有佳,等.石羊河下游白刺灌丛演替发育过程的土壤呼吸及其影响因素分析[J].中国沙漠,2012,32(1):140-147.