

中国干旱半干旱区灌丛沙丘的形成 演化及其对环境变化的响应

王训明 李晋昌 郎丽丽 著



科学出版社

中国干旱半干旱区灌丛沙丘形成 演化及其对环境变化的响应

王训明 李晋昌 郎丽丽 著

国家杰出青年科学基金项目(41225001)资助

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者近十年来关于中国干旱半干旱区灌丛沙丘研究成果的总结。全书共8章,基于年代测定和环境代用指标的分析,系统论述了我国塔克拉玛干沙漠、阿拉善高原、坝上高原和毛乌素沙地灌丛沙丘形成发育过程与环境变化的关系,揭示了这些区域几个世纪以来的水分条件、风沙环境和沙漠化过程等气候环境变化历史。本书成果不仅有助于完善风沙地貌学和沙漠化科学理论,而且对丰富全球变化领域的研究具有重要意义,也可为区域开发和治理提供可靠依据和借鉴。

本书可供地理、地质、环境、生态、防沙治沙和国土规划等部门的科研人员使用,也可作为地理、荒漠化防治等相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

中国干旱半干旱区灌丛沙丘形成演化及其对环境变化的响应 / 王训明, 李晋昌, 郎丽丽著. —北京: 科学出版社, 2017.6

ISBN 978-7-03-053074-5

I. ①中… II. ①王… ②李… ③郎… III. ①干旱区-沙丘-研究-中国 IV. ①P942.073

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 121650 号

责任编辑: 祝 洁 白 丹 / 责任校对: 赵桂芬

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年6月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2017年6月第一次印刷 印张: 9 3/8 插页: 2

字数: 190 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



前 言

灌丛沙丘是风沙流被灌丛阻挡后,沙物质在灌丛内部及其周围堆积而成的风积生物地貌类型,是风力作用下沙物质近距离运动的产物。灌丛沙丘广泛发育于全球大部分干旱半干旱地区,其中,北美洲、南美洲、非洲和中东地区均有大规模分布。在我国,超过7%的广阔沙漠、沙地和沙漠化土地中也有大范围灌丛沙丘的存在,是主要风沙地貌类型之一。就其分布而言,灌丛沙丘是风沙地貌研究的重要内容。

随着风沙地貌、沙漠化及全球变化研究的深入,对灌丛沙丘的研究在国内外受到越来越多的关注,但主要集中在形态描述、空间格局、沉积物理化特征、生态特性和生态功能,以及气流和风沙流控制下的形态动力学过程方面。然而,灌丛沙丘形成发育除与风况、沙源和植被有关外,还受地形地貌、降水和地下水等因素影响,因此灌丛沙丘包含了丰富的区域环境变化信息。在大多数区域,即使在风沙活动最强的季节,植被覆盖度较高的灌丛沙丘表面也很少有风蚀现象发生,即从雏形至发育成熟,其内部沉积相对连续,独特的发育和沉积特征使其成为研究干旱半干旱地区风沙活动、干湿状况、水文特征和生态环境及其演化的理想载体。此外,由于与戈壁、干涸河道和干湖盆动态变化密切相关,干旱半干旱地区灌丛沙丘形成发育过程也记录了区域地貌演化历史。因此,对灌丛沙丘形成发育及其与环境变化间关系的研究不仅有助于完善风沙地貌学和沙漠化科学理论,而且对丰富全球变化领域的研究具有重要意义。

全书共8章,分区域分别论述我国塔克拉玛干沙漠、阿拉善高原、坝上高原和毛乌素沙地灌丛沙丘形成发育过程与环境变化的关系。全书由王训明统稿,各章编写分工如下:

第1章 绪论 王训明执笔

第2章 研究区自然环境特征 李晋昌、郎丽丽执笔

第3章 灌丛沙丘沉积物的测试方法和内容 郎丽丽执笔

第4章 塔克拉玛干沙漠灌丛沙丘形成发育及其对环境变化的响应 王训明执笔

第5章 阿拉善高原灌丛沙丘形成发育及区域环境变化重建 王训明执笔

第6章 坝上高原灌丛沙丘形成发育及其对沙漠化的指示 郎丽丽执笔

第7章 毛乌素沙地灌丛沙丘形成发育揭示的区域风沙活动变化 李晋昌执笔

第8章 主要结论与展望 郎丽丽、李晋昌执笔

感谢中国科学院西北生态环境资源研究院董治宝研究员、李孝泽研究员提供的实验条件；感谢北京师范大学邹学勇教授、哈斯教授在本书写作过程中的指导；感谢中国科学院西北生态环境资源研究院张彩霞、花婷、刘冰等助理研究员在野外和实验分析中的帮助；感谢国家杰出青年科学基金项目（41225001）对本书的资助。

由于成稿时间仓促及作者水平所限，书中不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 灌丛沙丘分布与形态特征	1
1.1.1 灌丛沙丘分布特征	1
1.1.2 灌丛沙丘形态特征	2
1.2 灌丛沙丘形成发育过程	5
1.2.1 灌丛演替过程	5
1.2.2 灌丛沙丘形成条件与动力	6
1.2.3 灌丛沙丘年代序列建立	8
1.2.4 灌丛沙丘形成时代与环境	9
1.2.5 灌丛沙丘发育模式	11
1.3 灌丛沙丘沉积物指示的环境意义	13
1.3.1 沉积物粒度特征指示的环境意义	13
1.3.2 沉积物碳酸盐含量指示的环境意义	15
1.3.3 沉积物 TOC 含量、TN 含量及 C/N 值指示的环境意义	15
1.3.4 沉积物有机碳同位素特征指示的环境意义	16
1.4 本书主要研究内容	17
参考文献	18
第 2 章 研究区自然环境特征	25
2.1 塔克拉玛干沙漠	25
2.1.1 构造特征	25
2.1.2 气候特征	26
2.1.3 植被、土壤和水文特征	29
2.2 阿拉善高原	29
2.2.1 地质构造、地貌及古生物地理区系	30
2.2.2 气候、植被、土壤与水文特征	31
2.3 坝上高原	34
2.3.1 地质与地貌特征	34
2.3.2 气候、植被、土壤与水文特征	35

2.3.3 土地退化状况	37
2.4 毛乌素沙地	37
参考文献	39
第3章 灌丛沙丘沉积物的测试方法和内容	43
3.1 加速器质谱 ^{14}C 测年	43
3.2 粒度组成分析	43
3.3 碳酸盐含量分析	44
3.4 地球化学元素分析	44
3.5 TOC 含量、TN 含量、有机质含量和 C/N 值分析	45
3.6 有机碳同位素分析	45
参考文献	45
第4章 塔克拉玛干沙漠灌丛沙丘形成发育及其对环境变化的响应	47
4.1 塔中灌丛沙丘剖面描述	47
4.2 塔中灌丛沙丘形成发育过程	48
4.3 塔中灌丛沙丘年代序列建立	49
4.4 塔克拉玛干沙漠腹地近 700 年来的风沙环境演变	50
4.4.1 灌丛沙丘剖面粒度和碳酸盐含量的环境指示意义	50
4.4.2 灌丛沙丘剖面粒度与碳酸盐含量结果分析	54
4.4.3 灌丛沙丘沉积物揭示的塔克拉玛干沙漠腹地风沙环境	57
4.5 塔克拉玛干沙漠腹地近 500 年来的水分条件变化	60
4.5.1 灌丛沙丘剖面有机碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 环境指示意义	60
4.5.2 灌丛沙丘沉积物揭示的塔克拉玛干沙漠腹地水分条件	61
4.5.3 塔克拉玛干沙漠腹地与周边水分条件变化的差异性	64
参考文献	67
第5章 阿拉善高原灌丛沙丘形成发育及区域环境变化重建	73
5.1 额济纳灌丛沙丘剖面描述	73
5.2 额济纳灌丛沙丘年代序列建立	73
5.3 阿拉善高原风沙环境变化过程重建	74
5.3.1 灌丛沙丘剖面粒度结果分析	74
5.3.2 灌丛沙丘沉积物揭示的阿拉善高原风沙环境变化	76
5.4 阿拉善高原水分条件演化史重建	78
5.4.1 灌丛沙丘剖面有机碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 结果分析	78

5.4.2 灌丛沙丘沉积物揭示的阿拉善高原水分条件变化	80
5.5 阿拉善高原灌丛沙丘形成发育过程	82
参考文献	83
第 6 章 坝上高原灌丛沙丘形成发育及其对沙漠化的指示	85
6.1 化德灌丛沙丘剖面描述	85
6.2 化德灌丛沙丘年代序列建立	85
6.3 化德灌丛沙丘剖面沉积物环境代用指标分析	86
6.3.1 灌丛沙丘剖面粒度结果分析	86
6.3.2 灌丛沙丘剖面 TOC 含量、TN 含量和 C/N 值分析	88
6.3.3 灌丛沙丘剖面粒度与 TOC 含量、TN 含量和 C/N 值相关性分析	90
6.3.4 灌丛沙丘剖面元素结果分析	92
6.4 坝上高原近 80 年来风沙活动变化过程	97
6.4.1 灌丛沙丘剖面各代用指标的环境指示意义	97
6.4.2 灌丛沙丘沉积物揭示的坝上高原风沙活动和沙漠化过程	101
参考文献	103
第 7 章 毛乌素沙地灌丛沙丘形成发育揭示的区域风沙活动变化	109
7.1 毛乌素沙地灌丛沙丘剖面描述	109
7.2 毛乌素沙地灌丛沙丘丘间地及剖面粒度结果分析	110
7.2.1 灌丛沙丘丘间地及剖面粒度组成特征分析	110
7.2.2 灌丛沙丘剖面粒度频率分布和敏感组分提取	114
7.2.3 灌丛沙丘丘间地及剖面粒度参数特征分析	117
7.3 毛乌素沙地灌丛沙丘丘间地及剖面有机质含量分析	120
7.4 毛乌素沙地灌丛沙丘丘间地及剖面地球化学元素组成分析	121
7.4.1 灌丛沙丘丘间地地球化学元素组成分析	121
7.4.2 灌丛沙丘剖面地球化学元素组成分析	123
7.4.3 不同沉积物化学元素组成的对比分析	124
7.5 毛乌素沙地灌丛沙丘丘间地及剖面化学风化强度分析	128
7.5.1 灌丛沙丘丘间地化学风化强度分析	128
7.5.2 灌丛沙丘剖面化学风化强度分析	129
7.5.3 不同沉积物化学风化强度的对比分析	130
7.6 毛乌素沙地风沙活动变化过程	131
7.6.1 灌丛沙丘剖面环境代用指标变化特征	131
7.6.2 灌丛沙丘沉积物揭示的毛乌素沙地风化活动变化过程	134

参考文献	136
第 8 章 主要结论与展望	139
8.1 主要结论	139
8.1.1 塔克拉玛干沙漠腹地风沙环境及水分条件变化过程	139
8.1.2 阿拉善高原灌丛沙丘形成发育与区域气候环境变化过程	140
8.1.3 坝上高原近 80 年来的风沙活动变化及沙漠化过程	140
8.1.4 毛乌素沙地灌丛沙丘沉积物特征及风沙活动变化过程	141
8.2 问题与展望	141

彩图

第 1 章 绪 论

灌丛沙丘（灌丛沙堆、灌丛沙包、灌草丘）是风沙流被灌丛阻挡后，沙物质在灌丛内部及其周围堆积而形成的一种风积生物地貌类型（Khalaf and Al-Awadhi, 2012; 刘冰等, 2007; Tengberg and Chen, 1998），是风力作用下沙物质近距离运动的产物（Khalaf et al., 1995; Langford, 2000; Wang et al., 2010b）。灌丛沙丘形成发育除与风况、沙源和植被有关外，还受地形地貌、降水和地下水等因素影响（Wang et al., 2010b, 2006b; 王涛, 2003; Tengberg and Chen, 1998），因此灌丛沙丘包含了丰富的区域环境变化信息。在大多数区域，植被覆盖度较高（如大于 14%）的灌丛沙丘即使在风沙活动最强的季节，表面也很少有风蚀现象发生（Kuriyama and Mochizuki, 2005; Wiggs et al., 1995; Pye and Tsoar, 1990），即从雏形至发育成熟，其内部沉积相对连续（Wang et al., 2010b, 2008b, 2006b），独特的发育和沉积特征使其成为研究干旱半干旱地区风沙活动、干湿状况、水文特征和生态环境及其演化的理想载体。此外，由于与戈壁、干涸河道、干湖盆动态变化密切相关，干旱半干旱地区灌丛沙丘形成发育过程也记录了区域地貌演化历史。例如，通过对沉积物粒度、碳酸盐含量、总有机碳（TOC）含量、总氮（TN）含量和有机碳同位素（ $\delta^{13}\text{C}$ ）等指标解析，Wang 等（2010b, 2008b, 2006b）重建了阴山北麓和阿拉善高原风沙环境演化史，探讨了区域水分条件及物源等变化；Seifert 等（2009）通过对灌丛沙丘不同方位物源丰度研究，探讨了美国中南部古风向变化；Xia 等（2005）和赵元杰等（2011b）利用 TOC 含量、TN 含量、C/N 值和有机残体 $\delta^{13}\text{C}$ 等代用指标，结合怪柳灌丛沙丘年纹层，重建了罗布泊地区近百余年气候冷/暖、干/湿变化过程。在草原农垦区，灌丛沙丘是农田土壤风蚀的产物，它的出现是区域土壤风蚀和沙漠化发生的主要标志（Li et al., 2014; Quets et al., 2013），其发育过程也与草原开垦过程有关，是判断土地沙漠化程度的直接标志之一（Tengberg, 1995）。因此，对灌丛沙丘形成发育及其与环境变化间关系的研究，不仅有助于完善风沙地貌学和沙漠化科学理论，而且对丰富全球变化领域的研究具有重要意义。

1.1 灌丛沙丘分布与形态特征

1.1.1 灌丛沙丘分布特征

灌丛沙丘广泛发育于全球大部分干旱半干旱和亚湿润地区的冲积扇前缘（潜

水位深 1~3m) (King et al., 2006; Wang et al., 2006b; Parsons et al., 2003)、退化草地和农田、荒漠绿洲过渡带、农牧交错带、沙漠边缘和深入到沙漠中的河流两岸、冲积平原、湖盆洼地、干三角洲、干河床沿岸(潜水位深 2~5m)及部分沙质海岸带(武胜利等, 2008, 2006; Qong et al., 2002; Dong, 2001), 在海拔 4000~5000m 以上的高山河谷、高原盆地等高寒荒漠地区也有分布(吴正, 2003; 朱震达, 1999, 1998), 甚至是人类活动负面影响(如过垦、过牧)严重的一些干旱与半干旱荒漠地区唯一的风积地貌(岳兴玲等, 2005)。上述区域不仅水分和植物生长条件较好(武胜利等, 2006), 也具有大量易侵蚀物质, 为灌丛沙丘发育提供了有利条件(Xia et al., 2005; Qong et al., 2002; Khalaf et al., 1995; Hesp, 1981)。灌丛沙丘在美国西南部(Seifert et al., 2009; Parsons et al., 2003; Langford, 2000; Rango et al., 2000)、非洲(Dougill and Thomas, 2002; Tengberg and Chen, 1998; Tengberg, 1995; Nickling and Wolfe, 1994)和中东(El-Bana et al., 2003; Khalaf et al., 1995; Warren, 1982)均有大规模存在, 也是我国主要的风沙地貌类型之一(彩图 1)(朱震达, 1998, 1999), 覆盖全球大约 5% 的陆地面积(Thomas et al., 2005)。就其分布而言, 灌丛沙丘也是风沙地貌研究的重要内容。

1.1.2 灌丛沙丘形态特征

灌丛沙丘可孤立分散分布, 也可集聚成群分布(彩图 1), 可能与灌丛类型有关, 如怪柳多孤立分布而白刺多集聚成群分布。灌丛沙丘典型形态是一个凸起沙包, 丘顶浑圆, 坡度较缓(图 1.1)(岳兴玲等, 2005), 除早期盾形和晚期不规则形态外, 大体可划分为圆锥形、半球形和穹状等三类。垂向生长、分枝少、植株密度高的灌丛常形成较高的近似圆锥形的沙丘, 匍匐生长、分枝少、植株密度低的则常形成相对较矮近似半球形或穹状的沙丘(Hesp, 1981)。例如, 在南非南部海岸, 勋章菊(*Gazania rigens*)和海滩雏菊(*Arctotheca populifolia*)分别形成圆锥形和半球形灌丛沙丘(Hesp and McLachlan, 2000); 在科威特北部海岸, 白刺(*Nitraria retusa*)和碱蓬(*Suaeda vermiculata*)等灌丛沙丘在形态上普遍具有穹状特征(Khalaf et al., 2014, 1995); 在塔里木盆地, 怪柳灌丛沙丘形态为半球形, 芦苇和骆驼刺灌丛沙丘则为半椭球体(武胜利等, 2008)。此外, 不同发育阶段灌丛沙丘也具有不同形态。例如, 朱震达和陈广庭(1994)通过风洞模拟实验指出在单一风向作用下, 灌丛沙丘形态经历了直线型沙条—等腰三角形沙嘴—剖面为流线型的卵形沙堆—近似圆形/椭圆形沙堆四个阶段, 具体如下: ①实验开始后, 在灌丛下风向形成长度为灌丛本身宽度数十倍的沙条, 即为沙条阶段; ②由于风影区内沙粒堆积和影区外的风蚀作用, 沙条逐渐缩短, 并形成平面形态呈等腰三角形的沙嘴; ③沙嘴继续缩短, 高度增加, 形成具有沙丘形态特征的雏形灌丛沙丘; ④雏形灌丛沙丘高度不断增长, 最后发育为近似圆形/椭圆形的沙丘。

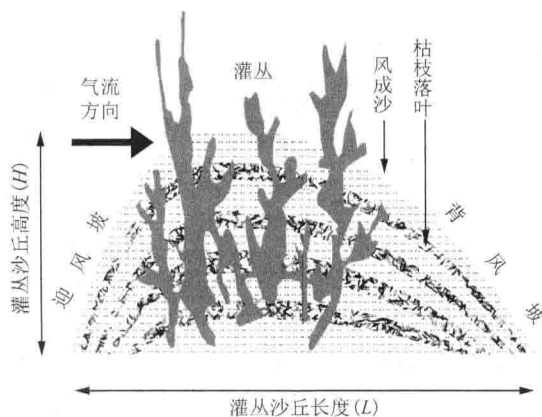


图 1.1 灌丛沙丘形态学特征

灌丛沙丘高度主要受演化阶段、植被类型、沙源丰富程度及水量供需平衡影响 (Wang et al., 2010b; Tengberg and Chen, 1998; Rhodes and Pownall, 1994), 如小叶锦鸡儿形成的灌丛沙丘高度为 0.4~1.8m, 白刺形成的为 0.13~4.5m, 怪柳形成的为 1~15m (杜建会等, 2010), 主要与其丛冠高度有关 (Khalaf et al., 1995); 不同演化阶段的高度表现为衰退阶段>稳定阶段>增长阶段, 主要与该演化阶段的植被特征及其侵蚀堆积平衡有关 (武胜利等, 2008; 杜建会等, 2007) (表 1.1)。一般而言, 在大多数地区, 如科威特、西奈半岛 (埃及)、突尼斯、马里、布基纳法索、南非—博茨瓦纳的 Molopo 盆地、博茨瓦纳、美国新墨西哥州、美国—墨西哥的 Mesilla 盆地、冰岛和澳大利亚等, 灌丛沙丘高度基本在 5m 以内。在一些区域几个灌丛沙丘一起生长形成聚合沙丘, 这些聚合沙丘经常形成圈或者在下风向延伸形成链 (王涛, 2003; Lancaster and Baas, 1998; Tengberg and Chen, 1998; Hesp, 1981)。通常, 灌丛沙丘迎风坡因受到侵蚀而稍显陡峭, 植被生长差, 背风坡坡度较缓, 植被生长相对较好 (Xia et al., 2005)。

表 1.1 不同地区、不同植被类型下发育的灌丛沙丘形态学特征

区域	下垫面	长度/m	宽度/m	高度/m	样本数
小叶锦鸡儿 (<i>Caragana microphylla</i>)					
阴山北麓地区	农田、草地 (Wang et al., 2006b)	1.0~5.0	—	0.4~1.8	—
	草原农垦区 (岳兴玲等, 2005)	?~14.0 (2.70)	?~14.0 (2.70)	?~2.0 (0.40)	—
鄂尔多斯地区	戈壁 (Zhang et al., 2011)	0.6~2.0 (0.80)	0.5~1.8 (0.50)	0.2~0.6 (0.20)	185

续表

区域	下垫面	长度/m	宽度/m	高度/m	样本数
柽柳 (<i>Tamarix chinensis</i>)					
阿拉善高原	戈壁、沙漠 (刘冰等, 2008)	0.7~46.5 (5.74)	0.5~20.5 (3.48)	1.05~8.5 (1.76)	245
	干河床、耕地 (Wang et al., 2008b)	6.0~10.0	—	3.0~10.0	—
	干河床、干盐湖 (Wang et al., 2010b)	2.0~6.0	—	2.0~9.0	—
塔里木盆地	沙漠边缘、河道两岸、古河道 (Qong et al., 2002; Xia et al., 2005)	5.0~50.0	—	3.0~15.0	—
	河漫滩、冲积扇 (Li et al., 2010; Wu et al., 2009)	1.3~25.0 (8.95)	1.2~25.0 (8.52)	0.2~9.4 (3.34)	223
新疆艾比湖地区	入湖口、泉水区、山麓冲积扇 (李万娟, 2009)	6.4~36.0 (16.42)	2.9~19.2 (9.00)	0.8~3.0 (1.66)	≥20
白刺 (<i>Nitraria tangutorum</i> , <i>N. sphaerocarpa</i> , <i>N. retusa</i>)					
河套地区	草原农垦区 (岳兴玲等, 2005)	?~30.0 (10.00)	?~30.0 (10.00)	?~3.0 (1.30)	—
鄂尔多斯地区	荒漠草地 (张萍等, 2008)	3.3~37.0 (8.88)	2.2~17.0 (6.44)	0.2~2.8 (1.02)	68
腾格里沙漠地区	沙漠边缘 (湖盆、山前冲积扇) (贾晓红和李新荣, 2008)	—	—	0.2~3.6	~180
河西走廊地区	绿洲荒漠带 (杜建会等, 2008)	0.7~7.0	0.4~6.5	0.1~1.3	24
	绿洲边缘 (沙漠) (张萍等, 2008; 李秋艳等, 2004)	1.1~13.0 (4.11)	0.7~7.2 (3.07)	0.1~2.5 (0.80)	101
	绿洲边缘 (戈壁) (张萍等, 2008; 李秋艳等, 2004)	0.6~6.2 (2.30)	0.5~3.8 (1.70)	0~0.7 (0.31)	142
	荒漠绿洲过渡带 (何志斌和赵文智, 2004)	—	—	0~1.2 (0.18)	—
新疆艾比湖地区	湖边戈壁、山前平原、沙砾地 (刘金伟等, 2009)	2.4~15.6 (6.10)	1.2~12.8 (4.22)	0.2~2.0 (0.88)	>60
科威特	滨海盐滩 (Khalaf et al., 1995)	4.1~29.9 (18.43)	—	0.6~1.8 (1.02)	18
其他植被类型					
塔里木盆地	河漫滩、冲积扇 (Li et al., 2010; Wu et al., 2009)	2.4~12.8 (5.71)	1.8~9.4 (4.45)	0.4~2.4 (1.15)	120
		1.1~6.4 (1.95)	0.6~4.7 (1.38)	0.1~1.1 (0.37)	123
新疆艾比湖地区	湖边戈壁 (李万娟, 2009)	1.0~5.7 (2.76)	0.5~3.7 (1.71)	0.1~0.9 (0.41)	—
西奈半岛	湖边沙地 (El-Bana et al., 2003)	— (3.67)	— (2.51)	— (1.16)	30

续表

区域	下垫面	长度/m	宽度/m	高度/m	样本数
其他植被类型					
Molopo 盆地	草原、农田 (Dougill and Thomas, 2002)	— (1.42)	— (1.11)	— (0.44)	34
		— (5.92)	— (4.34)	— (1.35)	32
		— (4.29)	— (3.16)	— (0.60)	34
美国新墨西哥州	草地 (Nield and Baas, 2008; McGlynn and Okin, 2006)	2.0~10.0	—	<2.4	—
非洲马里地区	三角洲、弃耕地 (Nickling and Wolfe, 1994)	1.5~17.9 (5.45)	0.9~12.5 (3.45)	0.4~0.7 (0.57)	608
非洲布基纳法索地区	山麓侵蚀面、荒漠草原 (Tengberg, 1995)	1.1~8.5	—	0.2~1.3	74
		0.7~6.5	—	0.1~1.1	135
Mesilla 盆地	沙漠盆地 (Langford, 2000)	?~40.0	—	0.2~4.3	—
科威特	海岸 (Brown and Porembski, 2000, 1997)	?~2.5	?~1.0	0.1~0.4	—
	滨海盐滩, 古滨海盐滩 (Khalaf and Al-Awadhi, 2012)	2.1~7.9 (4.40)	1.0~3.0 (1.87)	0.4~1.2 (0.78)	60
		1.1~5.1 (2.31)	0.6~1.9 (1.17)	0.4~0.7 (0.52)	60
冰岛南部	海岸 (Mountney and Russell, 2006)	0.7~11.9	0.6~7.8	0.1~2.5	~100
澳大利亚	海岸 (Hesp, 1981)	5~30	—	0.3~0.5	—

注：“—”表示无数据；括号内数字表示平均值。

1.2 灌丛沙丘形成发育过程

1.2.1 灌丛演替过程

灌丛是灌木占优势的植被类型，其在干旱半干旱区的存在是灌丛沙丘形成的首要条件。全球干旱半干旱区约占陆地总面积的 41%，其中，10%~20%的区域分布有灌丛 (Eldridge et al., 2011; van Auken, 2000)。灌丛不仅通过覆盖地表、分解风力和拦截风沙来影响灌丛沙丘形成发育，且因其形状、密度和结构等不同影响灌丛沙丘形态。准确认识灌丛演替过程有助于揭示灌丛沙丘形成发育过程。全球干旱半干旱区灌丛主要分布在典型草原区、农牧交错区和干旱荒漠区。

干旱半干旱区灌丛分为原生灌丛和次生灌丛。原生灌丛在长期进化过程中已形成一套完备机制，可适应当地生境 (黄海霞等, 2010)，其在典型草原区和农牧交错区主要分布在地下水位较低、水分条件相对较差地带，在干旱荒漠区主要分

布在地下水位较高、水分条件相对较好的地带。次生灌丛存在两种相反的演替过程。第一种是因区域水分条件恶化，草本植物生长受阻而灌木因根系较深在竞争中取胜所致，称为草原灌丛化 (Harte et al., 2015)，是干旱半干旱草原的普遍现象。该过程中，灌丛主要发育于地下水位较低、水分条件相对较差的草原退化地带，当水分条件恶化到无法满足灌木生长所需最低要求时，灌丛将衰退。第二种是在部分植被严重退化区域，当水分条件好转时，灌丛因适应性较强而先于草本植物发育 (赵婷婷等, 2014)。该过程中，灌丛主要位于地下水位较高，水分条件相对较好的地带。当水分条件持续好转，草本植物恢复，灌丛则因与草本植物竞争而衰退 (赵婷婷等, 2014)。野外考察结合已有研究，干旱半干旱区灌丛演替过程总结如图 1.2 所示，水分条件是控制该过程的关键因素 (Wang et al., 2015; Li et al., 2013)。

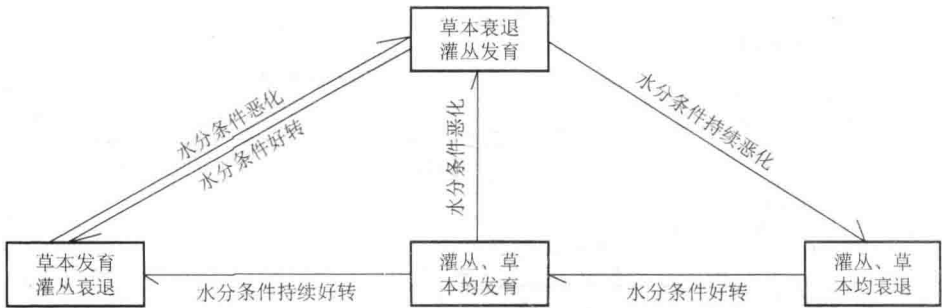


图 1.2 干旱半干旱区灌丛演替与水分条件的关系

1.2.2 灌丛沙丘形成条件与动力

1. 灌丛沙丘形成条件

干旱半干旱区发育或保留适应性较强的灌丛是灌丛沙丘形成的首要条件，上风向沙源的存在是其形成的物质条件，强劲风力是其形成的动力条件，其中，风力连通了沙源与灌丛间的作用。此外，要有效拦截风沙流，灌丛高度最少要在 10~15cm 以上 (Hesp, 1981)。目前，在灌丛沙丘形成发育过程中起主导作用的三个因素都得到了较为深入的分析。

1) 植被的作用

植被是阻碍风沙运动，使沉积物堆积，形成灌丛沙丘的首要条件 (Tilk et al., 2011; Zhang et al., 2011; Herrmann et al., 2008; Leenders et al., 2007; Lancaster and Baas, 1998; Cooke et al., 1993; Ash and Wasson, 1983)。耐沙埋和耐风蚀的特性使植被在强烈的风沙活动中继续生长，成为灌丛沙丘内核，在此基础上沉积物不断加积；而发达的根系可满足植被生长所需的水分等条件，进而导致灌丛沙丘形成。

此外,植被盖度在灌丛沙丘形成发育过程中也有不可忽视的影响,其与风沙活动中沙丘表面堆积或侵蚀关系密切,且两者存在一个临界值,当植被覆盖度大于临界值时,风沙活动中沙丘表面主要发生堆积,固定程度较高,不同地区或不同植被种类这一临界值不同。例如,Wiggs等(1995)认为,当非洲南部卡拉哈里沙漠地区沙丘体植被盖度达到14%时,堆积将大于侵蚀;澳大利亚等地区植被盖度达30%时,沙丘则处于连续堆积状态(Wang et al., 2008b; Dech and Maun, 2006; Kuriyama and Mochizuki, 2005; Pye and Tsoar, 1990; Ash and Wasson, 1983);而在毛乌素沙地该临界值为40%。此外,干燥的风沙沉积有利于灌丛沙丘内部枯枝落叶保存,并为区域环境变化重建提供信息载体(Xia et al., 2004; Qong et al., 2002)。

2) 物源变化

物源是灌丛沙丘形成的物质条件,包括远源和近源两个部分,但最主要的是来自邻近地区的风成物质。例如,美国—墨西哥 Mesilla 盆地 Phillips Hole 地区分布有大量灌丛沙丘,其主要物源是附近宽阔的平地以及沙丘丘间地(Langford, 2000);在阴山北麓地区,灌丛沙丘主要物源则来自邻近耕地和草地(Wang et al., 2006b);在阿拉善高原,则来自弃耕地、干河床及戈壁地表(Wang et al., 2008b)。在其他区域,为灌丛沙丘发育提供物源的下垫面各不相同,物源丰富度等也均有一定差异(表 1.1)。

3) 风力条件

区域风沙活动是灌丛沙丘形成的动力基础。一方面,风沙活动使物质得以搬运并沉积于灌丛沙丘表面;另一方面,过于强烈的风沙活动会使灌丛沙丘产生局部活化。在阴山北麓地区,当输沙势大于 410VU (VU 为向量单位)后,灌丛沙丘顶部可能活化,因此较低风能环境有利于灌丛沙丘形成发育(Wang et al., 2006b)。目前,在灌丛沙丘形成发育过程研究中,学者不约而同地强调风力作用。例如,在阿拉善高原,柽柳灌丛沙丘发育的不同阶段风力条件有所变化(Wang et al., 2010b, 2008b);在非洲 Mopti 地区,灌丛沙丘形成与频次较低的东南风系有关(Nickling and Wolfe, 1994);在塔里木盆地,强烈的风沙活动是风成沙—枯枝落叶交互层形成的必要条件(Qong et al., 2002)。

植被、沙源和风力三个条件同时具备,灌丛沙丘才能形成。彩图 2(a)和(b)为发育在农牧交错区的灌丛,沙源和植被条件均已具备,但可能因灌丛发育过于密集,导致近地表风力不足而未形成灌丛沙丘。彩图 2(c)和(d)为发育在典型草原区的灌丛,风力和植被条件均已具备,但可能因灌丛周围草本植物盖度仍较高,导致沙源不足而未形成灌丛沙丘。

如果风力强度与频度均充分,则灌丛沙丘形成区域既要有良好水分条件满足灌丛发育,又要有干燥地表保证沙源充足。显然,这两个条件构成一对矛盾,这就导致许多灌丛生长旺盛区域因沙源缺乏而不能形成灌丛沙丘[彩图 2(c)和(d)],

而沙源充足地带因水分限制而不能生长灌丛。区域能否形成灌丛沙丘,取决于该区域水分条件和沙源供应能否达到动态平衡。因此,干旱、半干旱区灌丛沙丘仅形成于水分条件和沙源供应易达到动态平衡的区域,如前文提到的荒漠绿洲过渡带、沙漠边缘、深入到沙漠中的河流两岸、冲积扇前缘、冲积平原、湖盆洼地、干河床沿岸、退化草原及部分沙质海岸带等,这些区域不仅水分和植物生长条件较好,也具有大量易侵蚀物质。

2. 灌丛沙丘形成动力

综合国内外风洞和野外实验,灌丛沙丘形成动力机制可简单描述如下:野外灌丛发育后,其前方和两侧一定范围内虽为气流减速区,但风速仍较高,表现为轻微风蚀,其上方一定范围内为气流加速区,后方一定范围内为弱涡流区和气流明显减速区(Gillies et al., 2014; Cornelis and Gabriels, 2005);越过和穿过灌丛的风沙流迅速从不饱和转为饱和状态,沙物质开始沉积,逐渐形成拖着长尾的锥形风影沙丘;随着沙物质沉积量增加,全通透灌丛变为下部不透风的灌丛沙丘(张萍等, 2013),灌丛增加了沙丘表面的粗糙度,既消除了裸露沙丘顶部常见的强风侵蚀区域,其下密上疏的结构也可使背风坡气流减速区范围减小及迎风坡和两侧气流明显减速,造成沙丘顺风向长度缩短而高度和两侧宽度增加,最终演变成垂直投影,为椭圆或近圆形形态(张萍等, 2013; Li et al., 2010)。

1.2.3 灌丛沙丘年代序列建立

灌丛沙丘年代序列可通过其垂直剖面年代学研究确定,这是揭示其形成发育过程的前提。目前,灌丛沙丘年代学研究主要有纹层计数(赵元杰等, 2011a; Xia et al., 2004)、加速器质谱(Accelerator Mass Spectrometric, AMS) ^{14}C (Weems and Monger, 2012)和光释光(Optically Stimulated Luminescence, OSL)(Forman and Pierson, 2003)等定年方法,适用性各不相同,也各有优缺点(表 1.2)。虽然灌丛沙丘形成时代较短,但在一定条件下利用 OSL 测年可实现年代序列建立(Ballarini et al., 2003; Bailey et al., 2001)。由于灌丛沙丘沉积物主要源于邻近地区,搬运距离较短(Khalaf et al., 1995),未必得到充分光晒退,且各地石英亮度不同,因此在某些地区,OSL 定年难免有较大误差(Hanson et al., 2009; Rhodes and Pownall, 1994)。但对大多数灌丛沙丘而言,沉积体内埋藏的当年生落叶为 AMS ^{14}C 定年提供了非常优良的材料,借此建立的年代序列相对准确(Weems and Monger, 2012; Wang et al., 2010b, 2008b)。但在部分场合,由于物种差异或保存不好等因素,部分沙丘中不存在理想的、满足 AMS ^{14}C 测年的材料。因此,应根据区域实际情况,选用较为合适的定年方法,或不同方法相结合,建立可信的年代序列。