

# 中纬度荒漠区河西走廊沙丘地貌的演化特征 及其环境指示

朱秉启

(中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 北半球中纬度地区的沙丘地貌变化和粉尘活动历史是探索全球环境变化与景观响应问题的良好档案。本文从风沙地貌学、粒度沉积学、地球化学和气候学等方面综合分析了中纬度典型荒漠区河西走廊的典型沙丘动态变化、物质来源、粉尘活动历史及其影响因素等。结果表明, 20世纪60年代以来研究区典型新月形沙丘和新月形沙丘链等发生了较大的移动或摆动, 平均移动速度介于0.8~6.2 m/a之间。沙丘的动态变化主要受年降水量、年平均风速和年大风日数的影响, 表明气候是沙丘地貌变化的首要影响因素。沙丘沙(三段式)与戈壁沉积物的两段式粒度曲线模式明显不同, 揭示了后者在沉积学上的“不成熟性”而前者经历了高效的风成分异作用且非局地起源。古地理、沉积学和地球化学综合证据揭示沙丘沙的母源物质主要是冲洪积物和古河流沉积物等, 包括南北山麓剥蚀带的碎屑沉积等。地表细颗粒物质的比例、表层盐结皮的覆盖率和可蚀性砂质物质含量等指标指示了西部戈壁区不是中东部风尘的主要来源区。沙丘移动方向与区域性主导风向在空间分布上具有相似性, 表明河西走廊东、西部间之间在沙丘地貌动态演化上的差异应受控于区域尺度的环流风系, 即受控于动力机制而不是物质来源上的差异。区域气候的暖湿化是对全球增温和亚洲夏季风增强的同步响应, 也是研究区沙尘暴减少的主要原因, 同期河西走廊潜在的逆沙漠化过程亦受控于气候变化; 但绿洲区沙漠化过程还是起因于人类活动影响的地下水波动。

**关键词:** 沙丘地貌; 戈壁; 粒度沉积学; 地球化学; 全球变暖; 沙漠化; 中纬度荒漠

DOI: 10.11821/dlxb202111009

## 1 引言

风沙地貌及其沉积地层记录了沙源地或荒漠区的环境变化及其对全球气候变化和人类活动的响应, 是旱地景观演化的独特而重要的环境档案<sup>[1-5]</sup>。中国大约有56.6万km<sup>2</sup>的陆地面积被风成沙覆盖, 涵盖了从低于海平面155 m到高于海平面5000 m的多种地貌和构造背景<sup>[6]</sup>; 其中以活动沙丘为主的沙漠景观主要分布在年平均降水量小于200 mm的干旱和极端干旱地区, 而以半固定沙丘和植被沙丘(固定沙丘)为主的沙地景观则主要出现在年平均降水量介于200~400 mm的半干旱地区<sup>[7]</sup>。这些荒漠性的地貌景观是地球系统的内营力(如构造运动)和外营力(如气候等)在长期和短期尺度上的相互作用及其变化的产物, 反过来这些荒漠又可能通过风尘物质循环(如粉尘释放和迁移)直接影响全球的气候和生态系统<sup>[1, 6]</sup>。因此对荒漠景观演化的了解将增加我们对地球系统的认知。

收稿日期: 2020-07-29; 修订日期: 2021-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41930640, 41771014); 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK1003)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41930640, No.41771014; The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research, No.2019QZKK1003]

作者简介: 朱秉启(1976-), 男, 安徽濉溪人, 研究员, 主要从事自然地理学、地貌与第四纪地质学研究。

E-mail: zhubingqi@igsrr.ac.cn

对于北半球中纬度典型地区—中国内陆荒漠景观的形成和演化，来自沙漠外围的黄土高原黄土—古土壤沉积序列的古环境记录表明：中国西北部的沙漠可能早在 22 Ma 前就已经存在<sup>[8-9]</sup>，但在沙漠内部发现的地貌学和沉积学证据却表明，这些沙漠的现代规模的地貌景观形成年代可能要年轻得多<sup>[6, 10-11]</sup>。目前，由于缺乏足够长的、连续性“气候”地层剖面的研究，第三纪沙漠与现今沙漠之间的地貌联系尚不清楚。而在中国西北部的许多沙漠地区，沙丘下部埋藏着晚更新世甚至全新世时期的湖泊相和河流相沉积物，表明这些沙漠地区在晚第四纪时期的环境发生了突变<sup>[6, 12]</sup>。例如中国中纬度地区的河西走廊及其北缘的巴丹吉林沙漠，尽管那里的巨型沙丘——“沙山”的形成机制在人们的理解中至今存在着“气候控制论”“构造/地貌控制论”与“地下水控制论”等方面的争议，但地貌调查对于解决这一争议仍至关重要。可以想象，沙丘的动态成因过程，即区域的沙漠化/荒漠化过程，对理解这一问题将是关键性的，因为这里的“古/今沙漠化”过程几乎涵盖了所有涉及地球系统参数的重要的信息档案。

中国北方旱区风沙物质的迁移以及沙丘地貌的形成和演变，是中纬度地区沙质沉积物在多种气候系统和下垫面等因素作用下运动和积累的结果，是地表沙漠化的直接原因<sup>[5, 7, 10, 13]</sup>。如中国北方被流沙掩埋的古城遗址和一些历史上著名的草原现今却呈现沙丘起伏的荒漠景观，即是近 2 ka 以来土地沙漠化的佐证<sup>[13]</sup>。沙丘的流动不仅影响农业和交通运输的发展和安 全，而且反映了大陆干旱区地貌形成和发展的现代过程及其对全球变化的环境响应。因此，研究全球不同地区各类沙丘地貌的形成和动力学特征，对揭示旱地沙漠化和环境变化具有重要的指示意义。

近半个世纪来，中国北方频繁的风尘暴便被认为是其环境变化的突出表现和直接恶果，河西地区更被认为是中国乃至北半球沙尘暴的主要策源地和加强源区<sup>[14-16]</sup>。所以河西走廊的沙漠化问题是半个世纪以来甘肃省乃至中国北方都亟待解决的重大环境问题之一。

审视一个区域风成地貌的演化问题，无疑需要长时间尺度的证据<sup>[17-18]</sup>，河西走廊地区的风沙地貌便是如此，因为它们很多是在晚更新世以来形成的<sup>[7, 19]</sup>；这里的风成沉积地层也几乎都是晚第四纪以来的产物，且存在显著的东、西部差异<sup>[19]</sup>。来自地质年代学和沉积地层学的证据表明，河西走廊地区风成地貌（包括沙丘、黄土、类黄土等）的沉积过程主要发生在更新世—全新世过渡期（约 12 ka 前），而全新世时期则主要发生了风蚀过程；但全新世各时期的风沙活动远不如更新世—全新世过渡期那样稳定，而是发生了频繁的沉积再循环<sup>[19]</sup>。由于缺乏有力的沉积/侵蚀再循环营力，河西走廊西部得以保存了第四纪晚冰期（晚更新世）以来的冰川沉积和风成沉积地层，而河西走廊东部地区的表层地层则主要是全新世发育的风沙地层且盛行多期的沉积改造<sup>[19]</sup>。因此总体上，晚更新世以来，区域水文条件的变化和地表过程制约着河西走廊地区风沙地貌的形成和演化，尤其彰显了季风降水和河流过程对它的影响。不过在近代时间尺度上，如近半个世纪以来，许多证据均表明河西走廊地区的风沙活动和风成地貌也发生了剧烈的变化，而其环境背景，除了气候变化（全球增温）外，还有 1949 年后河西地区剧烈的土地利用和社会经济等人类活动的变化，那么上述这种地貌变化的原因何在？基于沉积过程的证据主要聚焦于自然环境变化过程下的地貌演化问题，很难探讨自然与人为因素叠加背景下的差异性机制问题，而这正是本文的出发点。

本文基于河西走廊地区近几十年来广泛的沙丘地貌的动态调查、沙丘沉积物的沉积学和地球化学分析以及区域气象记录的气象学分析等综合证据，理解河西走廊地区近半个世纪以来的沙丘地貌成因、动态变化及其影响因素，并探讨区域地貌演化的环境指示意义。

## 2 研究区自然背景与研究方法

### 2.1 河西走廊的地理、地貌、气候与水文背景

河西走廊位于中国西北部甘肃省的中西部地区(图1),总面积大约5100 km<sup>2</sup>。在区域地貌上,河西走廊处于祁连山脉和阿拉善高原之间的低地部位。北部的阿拉善高原分布着中国北方大型的活动性沙漠景观,如巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠和乌兰布和沙漠。南部的祁连山山脉高海拔处的冰雪融水发育了数条向北流动的大型河流进入河西走廊,如黑河、石羊河、疏勒河等。流经河西走廊的这些河流的中游和下游,洪积扇或冲积扇地貌发育,在水文学上也是各大流域的主要的泉水溢出部位。绿洲广泛发育在这些冲洪积扇的扇缘部位,是中国西北干旱区的主要的农业开发区和人口汇聚区。

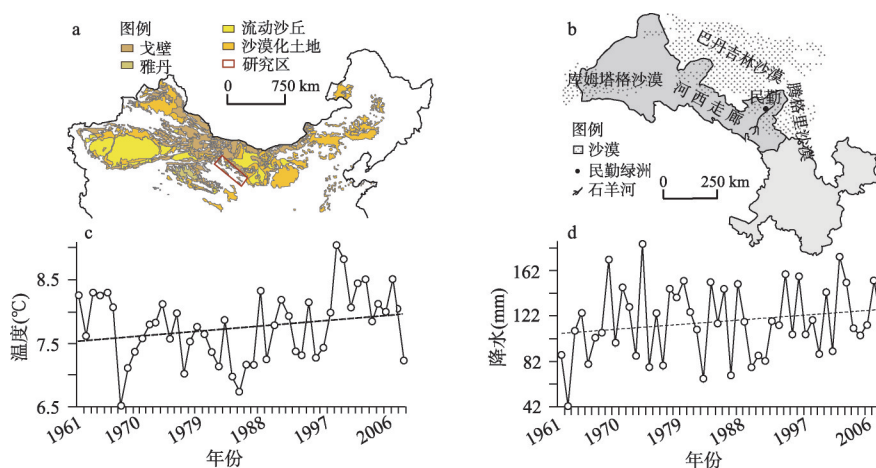


图1 河西走廊在中国北方的地理位置及典型荒漠区1960—2010年气候变化

Fig. 1 The geographical location of the Hexi Corridor (HXC) in northern China and the related changes in climate parameters of typical desert areas in HXC in 1960-2010

气候上,河西走廊地处北半球中纬度的温带荒漠带中心,除南部山地中高山以上地段有森林草原分布外,绝大部分为荒漠性气候,发育与之匹配的荒漠地貌。荒漠地貌类型以戈壁和沙漠为主,两者约占区域土地总面积的46.64%。

河西走廊的沙丘或沙丘地等风成地貌主要分布在乌鞘岭以西,古玉门关以东,祁连山和合黎山之间的走廊地带。与临近地区的巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠的沙丘地貌相比,两大沙漠的沙丘往往在空间分布上是完整的一片,而河西走廊则不同,这里的沙丘几乎都是零星分布的,主要分布在一些河流沿岸的绿洲附近、绿洲之中或戈壁荒漠区上。

整个河西走廊沙丘地的面积约有754 km<sup>2</sup><sup>[7]</sup>,在绿洲边缘发育着大量的大型新月形沙丘和新月形沙丘链。民勤盆地是河西走廊地区发育沙丘的典型地区,它处于石羊河的下游,腾格里沙漠的西缘,年平均降水量约为116.4 mm,年平均温度约为7.8 °C(图1),年平均风速约2.25 m/s。

### 2.2 分析方法与数据

不少研究者在河西走廊不同地区的沙丘地野外系统考察了诸如新月形沙丘、新月形沙丘链、金字塔沙丘、抛物线沙丘和沙垄等不同的沙丘地貌类型和地貌单元,并根据野外观测和不同时期的卫星遥感影像资料获取了它们的地貌学形态参数和特征<sup>[20-24]</sup>。部分新月形沙丘及其他沙丘的地貌学参数等数据分别见表1和Nottebaum等研究结果<sup>[21]</sup>。

表 1 河西走廊不同沙丘的地貌参数特征<sup>[20-21]</sup>  
Tab. 1 The locations, heights, movement directions, and lengths of different sand dunes in the Hexi Corridor<sup>[20-21]</sup>

沙丘类型	沙丘编号	地理位置		沙丘高度(m)	沙丘移动方向 (直角坐标系, 正东向为0°)	沙丘坡面长度(m)	
		纬度(N)	经度(E)			迎风坡	背风坡
新月型沙丘	1	38°37'52"	102°55'16"	9.8	48°	438.5	252
	2	38°38'00"	102°55'13"	11.2	48°	163.3	492.7
	3	38°36'06"	102°55'05"	9.5	48°	129.2	163.3
	4	38°37'51"	102°55'02"	3.7	48°	304.2	484.1
	5	38°32'11"	102°56'34"	7.9	45°	271.7	229.4
	6	38°31'59"	102°56'43"	7.6	46°	762.3	430.1
	7	38°25'47"	102°54'37"	3.9	45°	295.9	80.8
	8	38°25'17"	102°52'56"	5.9	87°	42.6	52
	9	39°57'41"	98°49'44"	5	51°	350.4	254.5
	10	39°58'07"	98°49'59"	2.6	54°	222.8	437.9
新月型沙丘链	11	40°00'41"	98°49'18"	7.2	57°	184.6	197.3
	12	38°37'46"	102°54'53"	6.4	54°	726.9	752.8
	13	38°37'48"	102°55'55"	5.8	54°	443.4	406.7
	14	38°37'24"	102°54'46"	11.1	50°	794.8	658.4
	15	39°57'59"	98°51'17"	13.8	53°	413.6	361.1
	16	39°57'31"	98°51'31"	8.7	54°	501.8	466.2
	17	39°58'50"	98°48'04"	9.6	53°	554	445
金字塔型沙丘	18	40°05'16"	94°42'23"	25.8	西南—东北	—	—
	19	40°05'14"	94°42'10"	90.3	西南—东北	—	—
	20	40°05'11"	94°41'47"	76.6	西南—东北	—	—
	21	40°05'11"	94°40'53"	121.8	西南—东北	—	—
	22	40°05'09"	94°40'43"	114.1	西南—东北	—	—
	23	40°05'24"	94°40'12"	88.9	西南—东北	—	—
抛物线型沙丘	24	38°36'27"	102°57'15"	4.6	—	286.1	35.3
	25	38°36'26"	102°57'42"	4.4	—	228.9	188
	26	38°36'10"	102°58'15"	3.3	—	133.3	198.5
	27	38°37'08"	93°59'40"	3.7	—	396	302.2
	28	41°35'64"	98°41'36"	4.4	—	59.9	0
	29	40°08'51"	98°41'20"	4.1	—	15.7	17.7
积沙带(纵向沙 沙垄)	30	38°47'57"	103°12'36"	15.2	—	70.4	—
	31	38°48'36"	103°13'30"	17.1	—	44	—
	32	39°02'12"	103°32'03"	18.6	—	811.7	—
	33	39°02'10"	103°31'29"	5.6	—	707.7	—
	34	39°02'34"	103.29°49"	12.2	—	1557.6	—
	35	39°02'20"	103°26'19"	9.4	—	207.1	223.4

除了上述直观的地貌参数调查，量化近地表风沙流的结构与沙丘的移动速率，也是解释沙丘动态变化与地貌演化最直接有效的手段<sup>[25-31]</sup>。研究沙丘移动速度的方法通常有两种，一种是原位定位高分辨率观测<sup>[24-25, 27, 32]</sup>，另一种是基于遥感图像的解译<sup>[26, 28, 31]</sup>。基于上述两种方法的研究工作都已在河西走廊的沙丘地广泛开展过。本文将在此基础上集成并整理河西走廊沙丘移动速度等的动态观测数据，探讨河西走廊沙丘的地貌演化。

此外，风成沙丘沉积物颗粒的粒度沉积学特征也是了解沙丘形成和发展的一个重要



因素<sup>[1-2, 33, 34]</sup>。这是因为沙颗粒的粒度参数不仅可用于判别沉积物的沉积环境（风成或水成），还可以用于识别沉积物的运移模式（蠕变、跃移或悬浮）。目前，已有研究工作针对河西走廊地区的风成沉积物和相关沉积物（冲洪积扇、湖相沉积、河流相沉积等）的粒度沉积学开展了广泛研究<sup>[35-40]</sup>，本文在此基础上系统收集和整理了这些沉积学证据，进而开展了河西走廊不同区域的沙丘地貌的沉积学对比研究。

可蚀性的碎屑沉积物及其来源是沉积地貌景观形成的物质基础<sup>[41-42]</sup>，因此识别干旱环境下风成物质的来源是认识沙丘地貌形成的前提条件<sup>[7, 18, 43]</sup>。其中，基于碎屑沉积物的地球化学组成的元素分析，如稀土元素在内的微量和主量元素组成分析，已成为检测沙漠沉积物来源的可靠手段<sup>[44-54]</sup>。其依据是稀土元素等微量元素在不同沉积物地化组合特征和浓度上的差异，很大程度上受控于母源成分的控制，因为这些元素只存在于特定的矿物中且难以在搬运过程中被损失掉<sup>[41-42]</sup>；再结合主量元素和粒度特征所表征的沉积物在侵蚀—沉积再循环以及风化作用中的“改造”或“分异/变异”信号，可以有效识别风成沉积物的母质来源。在河西走廊地区，利用主量和微量元素地球化学方法分析风成沉积物物质组成特征的案例研究已有初步成果<sup>[39-40, 55-56]</sup>，为本文综合理解和识别研究区不同沙丘的物质来源提供了基础数据。

此外，1960—2010年河西走廊地区不同气象站的连续气象参数记录，不仅是本文探讨全球变暖背景下区域气候响应的依据，也是基于地貌参数与气候参数数据在长时间尺度上的统计学关系来探讨区域景观地貌对气候变化响应的依据。

### 3 分析结果

#### 3.1 河西走廊沙丘的地貌学参数特征及其动态变化

由表1和Nottebaum等研究结果<sup>[21]</sup>可知，河西走廊地区典型的新月形沙丘的平均高度约为6.75 m，最大值为11.20 m，最小值仅为2.60 m。其他类型的典型沙丘的平均高度则分布在4.08 m（抛物线型沙丘，3.38~4.60 m）、9.23 m（新月型沙丘链，5.80~13.80 m）、13.02 m（累积沙带或沙垄，5.60~18.6 m）、86.25 m（金字塔型沙丘，25.8~121.8 m）之间。

关于研究区沙丘地貌的动态变化，早在1959—1964年，民勤治沙综合试验站就在河西走廊地区开展了沙丘地风沙流的定位观测研究<sup>[7, 13, 58-60]</sup>，后期的研究工作则持续对河西走廊的不同地区开展了相关研究<sup>[7, 20-21, 32, 38, 61-67]</sup>。综合上述研究成果，在河西走廊地区，风沙流中约有80%的沙颗粒是在近地表20~30 cm的高度范围内流动的，其中约一半的沙颗粒在近地表0.3~0.5 cm的高度内流动；在7 m/s的风速下，10 cm高度内的沙粒占总体的75%；而75~200 cm高度内的沙粒仅占总体的0.035%。

根据野外实地观测（电子全站仪测量）和不同时期的卫星影像（谷歌地球）资料，本文获取了不同沙丘的地貌参数和移动速度<sup>[20, 68]</sup>，如表1所示。

新月形沙丘的平均移动速度约为6.62 m/a，最大值可达12.51 m/a，最小值仅为1.01 m/a。新月形沙丘链的平均移动速度约为6.54 m/a，最大值达到8.30 m/a，最小值仅为5.34 m/a。与新月形沙丘相比，新月形沙丘链的移动相对缓慢，且移动速度变化不大。总体上，河西走廊地区的新月形沙丘和新月状沙丘链沿NW—SE方向移动，走廊东段的运动方向约为NE—W，走廊西段的金塔移动角度则增加（表1）。金字塔沙丘顶部的平均摆动速度约为6.32 m/a，最大可达97.37 m/a，最小值仅为1.14 m/a。金字塔沙丘的移动方向也会发生变化，但其主要运动方向为SW—NE。

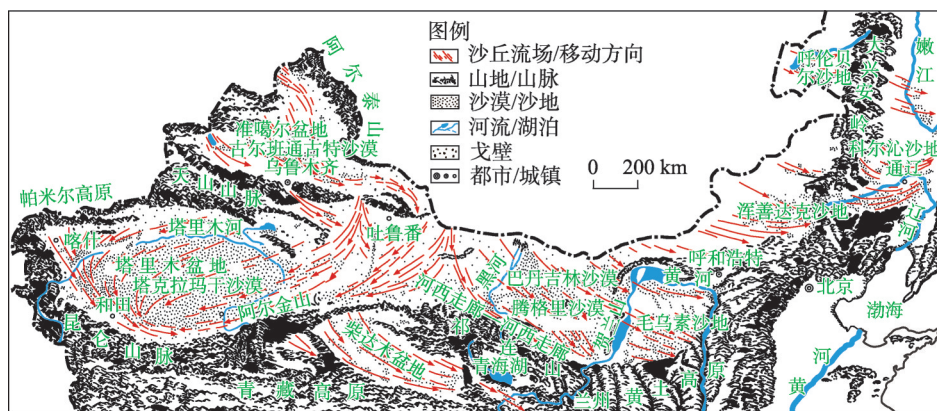
在风沙地貌学上，按照沙丘平均移动速度的大小，沙丘地貌类型可以分为4类：慢

速型 ( $\leq 1$  m/a)、中速型 (1~5 m/a)、快速型 (6~10 m/a) 和特快型 ( $\geq 20$  m/a) [58]。Zhu 等研究结果表明 [57], 河西走廊地区的沙丘移动速度, 除了敦煌  $< 1.0$  m/a 外 (慢速型), 主要介于 1.4~6.2 m/a 之间, 属于中速型或快速型。

从中纬度沙漠分布的大尺度范围来看, 在沙丘走向和移动方向上, 河西走廊地区几乎正处于中国北方沙区 2 种沙丘走向的分界线处 (图 2), 即大致在古玉门以东的区域沙丘呈现 NW—SE 或是 W—E 的走向, 而古玉门以西的区域沙丘呈现 NE—SW 或 E—W 走向 (图 2)。究其原因, 中国北方沙区冬半年主要的盛行风向在河西走廊西部呈 NE—SW 或 E—W 走向, 而在东部呈 NW—SE 或是 W—E 走向 (图 3), 即研究区东、西部之间不同的沙丘移动方向与区域的主导风向分异大体是一致的。沙丘走向与主导风向在空间分布上的相似性关系表明, 河西走廊东、西部间之间在沙丘地貌演化上的差异, 应受控于区域尺度主导风系或环流风向的格局, 即受控于动力机制, 而不是物质来源上的差异。即在沙丘的动态变化成因上, 合成输沙风向控制着区域近地表的输沙过程进而控制着沙丘的走向和移动。

本文将河西走廊沙丘与中国西北干旱区其他沙丘的移动速度进行了对比。对塔克拉玛干沙漠输油公路沿线数个新月形沙丘的观测结果表明, 1991—1992 年 10 月的沙丘移动为 4.81~10.87 m (平均 7.29 m), 1992—1993 年 10 月的沙丘移动为 3.33~8.89 m (平均 5.56 m) [25], 表明塔克拉玛干沙漠主要为中速型和快速型移动沙丘。根据 2010 年、2013 年和 2014 年基于高分辨率遥感图像的腾格里沙漠沙丘移动速度解译结果 (假定高分辨率遥感图像能够反映一年内沙丘的变化), 2010—2013 年腾格里沙漠的沙丘平均移动速率约为 4.36 m/a, 2013—2014 年沙丘平均移动速度约为 2.43 m/a [27], 表明腾格里沙漠主要为中速型移动沙丘。基于 Google Earth 影像数据解译的毛乌素沙地新月形沙丘移动规律的研究显示, 这里的沙丘移动速度在 3.5~9.5 m/a 之间, 表明毛乌素沙地主要为中速型和快速型沙丘 [29]。此外, 毛乌素沙丘的宽度与背风坡水平长度显著相关, 在移动过程中沙丘的宽度和背风坡的水平长度减小, 而迎风坡的水平长度增大; 沙丘的移动速度和宽度之间存在良好的相关性 [29], 表明沙丘的动态变化不仅受控于风场的动力机制, 也受控于沙丘本身的形态因素。

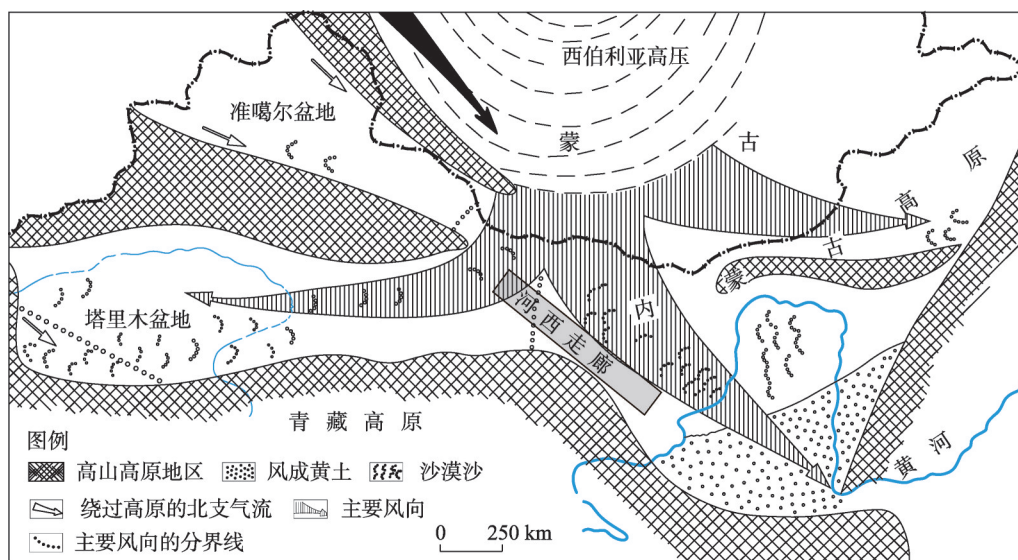
与上述不同沙地的沙丘动态过程相比, 河西走廊地区的新月形沙丘在动态变化上也具有明显的空间差异性。2006—2015 年受风速、大风日数等因子的影响, 民勤地区的绿



注: 修改自文献[25]。

图 2 中国北方沙丘形成的流场和沙丘移动方向

Fig. 2 Sand-flow field and movement direction of sand dunes in northern China



注：修改自文献[25]。

图3 中国沙区冬半年主要风向示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the main wind direction in sandy deserts of China in the winter half year

洲边缘沙丘移动最快，移动速度约为 6.2 m/a；受主风向等因子的影响，敦煌地区的绿洲边缘沙丘移动最慢，移动速度约为 0.8 m/a；受不同气象要素的影响，2015 年与 2006 年相比，河西走廊大多数地区的沙丘迎风坡水平长度增加，而背风坡水平长度减小<sup>[57]</sup>。由此可以看出，影响河西走廊地区沙丘动态变化的 3 个主要因子分别为年降水量、年平均风速和年大风日数。因此，气象（或气候）因子对河西走廊地区沙丘的动态变化有着重要的影响，且这种影响既有正向作用（促进效应），也有逆向作用（抑制效应）。

### 3.2 河西走廊沙丘的粒度沉积学特征

综合来自河西走廊地区不同风成沉积物及相关沉积物（如冲洪积扇、湖相沉积、河流相沉积等）的粒度沉积学研究结果<sup>[35-40]</sup>，河西走廊不同地区的沙丘沙有着不一样的粒度组成，即沙粒尺寸存在明显的空间差异性。这反映了沙丘形成和发展的物质来源和搬运模式的不同。

在河西走廊的中东部酒泉—高台地区，沙丘表面的迎风坡尖角、坡面、坡顶以及背风坡尖角等不同地貌部位的沙丘沙粒度参数（平均值，标准偏差，偏斜和峰度等）表明，这里的沙丘表面沙物质（简称沙丘表沙）的粒度频率曲线多数为单峰分布，少部分为双峰<sup>[37]</sup>；沙丘表沙多为细砂和极细砂粒级，平均粒径为 $(0.07 \pm 0.01) \sim (0.24 \pm 0.06)$  mm，与世界沙漠的平均沙丘粒径相近；同中国多数沙漠一样，这里的沙丘沙也具有粒度越细分选性越好、平均粒径随偏度值增大而增大，随峰度值得增大而减小等特征<sup>[36]</sup>；从上风向至下风向，沙丘沙变细，沙丘沙的中砂组分减少，细砂、极细砂、粉砂和粘粒组分增加。根据 Sahu 的粒度判别函数和上述粒度参数<sup>[69]</sup>，可识别出研究区碎屑沉积物的沉积环境主要包括风成相、湖积相和冲洪积相 3 种，其中以风成沉积为主（约占 50%）<sup>[37]</sup>。在研究区域，沙丘单元尺度上的粒径分布模式有 3 种类型：沙丘顶峰较粗（坡面和丘间地较细），沙丘顶峰较细（坡面和丘间地较粗），以及顶部、迎风坡和背风坡无明显差异<sup>[35-37]</sup>。其中，峰顶较粗是最常见的类型，占有沙丘的 69%；而峰顶较细则是第二常见的（占 24%）<sup>[37]</sup>。



河西走廊中西部的金塔—嘉峪关—花海地区的戈壁以及古湖平原地貌上发育的新月型沙丘的粒度沉积学研究显示<sup>[39]</sup>, 河西走廊中西部的新月型沙丘表层沙的粒度以中砂为主(21.7%~57.4%), 其次是细砂(23.2%~53.0%); 平均粒径为0.27~0.43 mm, 明显粗于古湖相沉积物(0.10~0.21 mm)<sup>[39]</sup>, 表明该地的古湖沉积不是沙丘沙主体颗粒的来源。比较来看, 该地的沙丘沙比河西走廊中东部酒泉—高台地区的沙丘沙平均粒径要大, 也大于其他地区的沙漠沙。这里的新月型沙丘表沙的粒度分选性以中等较好为主, 粒度曲线近对称, 峰度中等; 沙丘沙粒度特征与沙丘形态、戈壁地表的下垫面属性等有关<sup>[39]</sup>。

风成沉积物的粒度概率累计曲线有一个特征, 即通常显示为斜率值不同的2~4段具有拐点的独立线段, 表明其迁移过程中会出现2~4种运动方式<sup>[70]</sup>。河西走廊沙丘沙的粒度概率累计曲线基本呈现3段线模式, 指示了这里的沙丘沙在风力作用下以“跃移式”运动为主, 并叠加着少量以“悬移式”和“蠕移式”运动为主的颗粒物质。这个特征在河西走廊不同地区的沙丘沙中都被观察到<sup>[37-39]</sup>, 包括河西走廊地区附近的黑河流域下游沙丘<sup>[36]</sup>。上述河西走廊沙丘沙在粒度沉积学上的单峰态和3段式分布模式, 表明研究区的沙丘沙为典型的风成成因, 其近似正态分布的单峰态特征是一种高“粒度成熟度”和“单一化”的体现, 是经历了风力分选作用后的高效混合过程的典型特征, 在某种程度上是风成分异作用在较长时间尺度和较大空间尺度(源区距离)上的函数<sup>[35]</sup>。沙丘沙这种高效的混合特征和程度较高的风成分异(单一化)特征, 显然不是“局地起源”机制可以充分解释的, 因为局地起源的沉积物难以在较短时间内和较小搬运距离内实现粒度沉积学上的高成熟度(高效混合和高度分选)。与沙丘沙相比, 河西走廊地区的戈壁沉积物、湖相沉积物和河流沉积物其粒度沉积学所揭示的碎屑物质运动方式则分别以“蠕移—跃移”和“跃移—悬移”为主<sup>[35, 38]</sup>, 呈现典型的二段线模式。此外, 戈壁沉积物以及河流相和湖相沉积物的频率累计曲线通常是双峰或多峰分布<sup>[35, 38, 71]</sup>, 很少呈现风成沙的单峰分布特征, 这表明河湖相沉积和戈壁沉积物不仅运动方式与沙丘沙不同, 来源也不相同, 前者为“就地/近地”或“局地”起源, 而后者则经历了广泛和高效的物质混合, 非局地起源。

### 3.3 河西走廊沙丘的地球化学特征及其指示的沙物质来源

关于河西走廊沙丘沙等风成沉积物的来源问题, 民勤治沙综合试验站早在1959—1964年就对沙区的物源进行了调查研究<sup>[7, 32, 66]</sup>, 基于不同方法的相关研究一直持续到今天<sup>[37-38, 40, 55, 66, 72-73]</sup>。

由于近年来质谱地球化学方法的广泛应用, 使得更精细化的沉积物物源识别研究成为可能<sup>[55, 39-40, 56, 74]</sup>。这里, 我们以河西走廊西部嘉峪关以西以北的戈壁地区、河西走廊中部金塔—高台地区和河西走廊东部民勤盆地等具有代表性的区域所发育的风成沙丘研究为例, 基于地球化学证据来探讨它们的物质来源。

民勤盆地以绿洲景观为主, 它位于河西走廊的东部, 黄土高原的北部边缘, 并与中国北方的两大沙漠接壤, 分别是民勤西北部的巴丹吉林沙漠和东南部的腾格里沙漠(图1)。民勤盆地被认为是阻止这2大沙漠汇聚的天然障碍<sup>[7]</sup>。从较大尺度的地理和地貌学上来说, 确定民勤绿洲及其邻近沙漠地区的风成沉积物的来源和运移将有助于更好地理解中国黄土与沙漠的关系<sup>[17, 55, 75-76]</sup>。

已有研究工作从民勤绿洲及其周围沙漠地区系统采集了沙丘沙等风成沉积物样品, 通过质谱地球化学分析并结合区域气象学风场资料和统计学聚类分析方法, 探讨了民勤绿洲及其邻近沙漠(巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠)沙丘沙中主量元素和微量元素的空间分布特征, 以及这些地区风成沙的物源及其迁移途径<sup>[55, 73, 77]</sup>。综合上述地球化学数据, 民



勤盆地及其周边不同地区(巴丹吉林沙漠B、巴丹吉林沙漠—民勤过渡带BM、腾格里沙漠东北缘TNE、腾格里沙漠—民勤过渡带TM、腾格里沙漠西南部TSW)的沙丘沙全岩样品主量元素组成中,  $\text{SiO}_2$  的含量很高, 达到72.2%~88.9%之间, 平均值约为83.3%; 相比之下, 大多数微量元素的含量则相对较低, 只有Ba、Ce、Co、Mn、Sr的含量达到 $> 100 \text{ mg/L}$ <sup>[55]</sup>。与上陆壳的平均成分(UCC, 代表陆壳表层未风化的、初始物质的平均组成, 数据来自文献[42])相比, 民勤盆地及周边不同沙漠沙的Ba、 $\text{SiO}_2$ 、Rb、Sr、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{K}_2\text{O}$ 相对均匀/均一<sup>[55]</sup>, 表明这些元素丰度的空间差异性不大(相对均质), 而其他元素则有一些明显的隆起和凹陷变化<sup>[55]</sup>, 表明这些元素丰度的空间差异较大(非均质)。由于这些均质的和非均质的元素组成分别代表了碎屑物质来源上的相似性和差异性, 因而可以作为较好的地球化学指标来识别沙丘沙的不同来源。常量元素组成上, 只有 $\text{SiO}_2$ 相对于UCC富集, 其他都相对亏损; 在微量元素丰度上, 除Cr和Ni在B、BM亚区富集以及Cr在TNE富集外, 绝大多数元素都是亏损的。这表明研究区沙丘沙与初始的上陆壳物质(源岩)相比, 经历了明显的“母源信息的改造”过程。在沙丘沙地球化学元素的空间分布上来看, Cr、Ni、Cr/V、Y/Ni、Al、V、Zr、Hf、Zr/Hf等的元素二元图和常量、微量元素三元图揭示了民勤盆地西部(B—巴丹吉林沙漠、BM—巴丹吉林与民勤绿洲之间的沙丘带、民勤绿洲东北缘的沙丘地)和民勤盆地东南侧(TSW—位于民勤绿洲东南缘的沙丘地)的沙丘沙具有不同的物质来源; 而民勤盆地(M)和南缘沙丘地(TM)的沙组成则分别与两个沙漠有关<sup>[55]</sup>。这些地球化学证据表明, 巴丹吉林沙漠的风成沙可以穿过山脉经西北风长距离输送到民勤盆地绿洲的西侧, 腾格里沙漠的风成沙则为民勤绿洲的东部提供了沙源, 但两大沙漠的风成沙却不能直接到达也不能绕过绿洲的另一侧(即跨越绿洲障碍实现两个沙漠的汇合)。这表明, 民勤盆地的沙丘沙具有多源性, 且民勤绿洲是阻隔巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠沙丘迁移与汇合的有效屏障; 但是民勤盆地绿洲风成沙丘的大量出现也表明, 绿洲地貌景观在干旱区作为一种生态屏障在防止风沙侵蚀中的作用也是有局限性的。

与东部相比, 河西走廊西部发育的新月形沙丘等风成沉积物, 其常量和微量元素地球化学特征也受到了广泛关注<sup>[39, 78]</sup>。这些沙丘主要位于嘉峪关以北和以西的戈壁地区, 沙丘类型主要为新月形沙丘、新月形沙丘链和不对称新月形沙丘<sup>[39, 78]</sup>。经过上陆壳平均物质组成UCC的标准化后, 河西走廊西部戈壁地表的新月形沙丘沙显著富集主量元素CaO和 $\text{SiO}_2$ (分别占全岩总量的5.55%和66.12%); CaO、MgO、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 等的元素含量从西北向东南逐渐富集, 即顺主导风向富集程度逐渐增加;  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 的UCC标准化值均显著小于1, 表明碱金属元素显著亏损或被淋溶<sup>[39, 78]</sup>。微量元素的含量在不同沙丘的沙样品之间有所差异, 亦反映了研究区沙丘沙物源的复杂性; 但在同一沙丘的不同地貌位置, 微量元素的变化较为相似<sup>[39]</sup>, 表明地貌单元尺度上的沙丘沙具有相对一致性。与UCC比较, 微量元素除Co、As、La、Nd显著富集外, 其他大多数微量元素则处于亏损状态。表明河西走廊西部沙丘与东部相似, 都经历了明显的“母源信息改造”。与腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠的地化元素相比<sup>[79]</sup>, 研究区的 $\text{SiO}_2$ 含量较低,  $\text{K}_2\text{O}$ 含量相似, 其余微量元素含量偏低。

来自河西走廊中东部金塔—高台地区的沙丘等风成沉积物也获得了系统的主量和微量元素地球化学分析<sup>[40, 56, 72, 80]</sup>。比较不同的研究结果可以发现, 地化元素分析结果与基于矿物学分析所观察到的结果相类似。如研究区的沙丘沙与相邻区域腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠的沙丘沙有类似的矿物学组成(云母、石英、伊利石、白云母和钠长石等矿物组成)<sup>[72]</sup>, 而主量和微量元素分析结果也揭示了这一特征<sup>[40, 56]</sup>。这表明河西走廊及其相邻地

区的风成沙沉积物在地球化学和矿物学特征上具有区域相似性。相对于上陆壳物质组成(UCC)，河西走廊中部金塔—高台地区的沙丘沙也富集CaO，此特点不仅与河西走廊西部相似，也与塔克拉玛干沙漠、巴丹吉林沙漠附近的河流、湖泊沉积物以及戈壁沙漠风成沙的物质组成相似，但它们与库姆塔格沙漠和腾格里沙漠的风成沙略有不同<sup>[40]</sup>。通过多维标度(MDS)和主成分分析(PCA)方法，以及区域地形分析，河西走廊可能不仅是祁连山沉积物的沉积汇，也是北山沉积物的沉积汇<sup>[40]</sup>。

综合以上地球化学证据，干涸的河流沉积、冲洪积沉积物是河西走廊地区沙丘沙的初始物质来源；这些碎屑沉积物则主要来源于走廊西南部的祁连山和北部的北山山脉的侵蚀和风化物质。由于上述粒度沉积学特征所揭示的河西走廊沙丘沙具有典型的风成成因和高效混合以及高效分异(单一化)特征，因而它们在某些主量元素和微量元素组成上的相似性也就可以得到解释。这种物质组成上的相似性还可以通过区域对比得到证明。如对比中国北方不同沙漠沙的常量元素丰度(表2)，河西走廊沙丘沙与中国西北部的沙漠(如库姆塔格沙漠、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、塔克拉玛干沙漠等)或风成黄土(黄土高原)都有着一定的相似性。此外，区域比较结果同时也显示了明显的局部差异性。如河西走廊沙丘沙的Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量达到3.50%，此元素丰度普遍高于其他沙漠；此外走廊沙丘沙的Co元素含量也显著高于其他地区<sup>[55]</sup>；这表明河西走廊地区的沙丘沙富集铁元素和钴元素。但其他元素的含量则与其他沙漠相类似。

表2 河西走廊沙丘与其他沙漠风成沙或上陆壳平均组成的元素含量对比(%)  
Tab. 2 The average element contents of sandy dunes in the Hexi Corridor and other deserts and the average composition of the upper continental crust (%)

地区	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	文献出处
河西走廊	3.5	5.55	2.07	66.12	9.24	2.45	2.00	[39, 78]
巴丹吉林沙漠	1.93	2.06	1.19	80.27	7.78	1.90	2.00	[53]
腾格里沙漠	1.96	1.30	1.12	80.94	8026	1.88	2.25	[53]
库姆塔格沙漠	2.88	4.64	2.19	70.13	9.59	2.52	1.98	[81]
塔克拉玛干沙漠	3.10	7.88	2.2	62.05	10.60	2.58	2.11	[53]
黄土高原黄土	4.56	8.62	2.31	58.65	11.86	1.68	2.44	[81]
黄土高原古土壤	5.12	0.83	2.21	65.18	14.79	1.41	3.15	[81]
上陆壳平均组成	5.00	4.20	2.22	66.00	15.20	3.90	3.40	[42]
陆相页岩	7.22	1.30	1.20	62.80	18.90	1.20	3.70	[42]

4 讨论

4.1 河西走廊地区沙丘地貌的成因机制

总体上，河西走廊地区的沙丘地貌以流动沙丘占绝对优势。这些沙丘的形成，在早期研究工作中被认为有3种成因机制：① 由于绿洲中固定的灌丛沙堆植被被破坏所导致的；② 由于河西走廊地区中的砾质戈壁及风蚀地等提供了丰富的沙源引起风成沙堆积从而形成沙丘；③ 由于河流变迁改道后，废弃的沙质干河床受风力吹扬起沙，风成沉积物进而在附近堆积形成沙丘<sup>[7]</sup>。上述几种风成沙丘地貌的形成机制，都可以解释河西走廊地区沙丘零星或片状分布的特点，特别是沙丘往往沿着干河床蜿蜒曲折地呈现断续分布和散布于绿洲边缘的砂砾质戈壁上的分布特点。从空间尺度来看，上述3种成因机制都可以看作为“局地或近地驱动”机制。但近年来随着研究的深入，与中国北方其他地区的沙漠化相比，有学者认为祁连山冰川和积雪控制的向下游输送的水资源量的变化(源区

水源供应), 是河西走廊沙丘形成演化和沙漠化的关键因素<sup>[82]</sup>; 此外还有研究认为, 中国北方乃至北半球大尺度风力活动的减弱和区域尺度的水循环加速 (水源供应的增加), 两者共同制约了河西地区的沙丘动态及沙漠化过程<sup>[83-85]</sup>。

再进一步综合来看, 上述几种沙丘地貌的成因, 不管是局地尺度、区域尺度乃至半球尺度, 从本质上都可以归因为一种自然机制, 即河西地区的沙丘是自然成因的。然而即使如此朴素的观点, 也受到了很多的质疑<sup>[85-86]</sup>。如有不少研究者认为, 河西走廊地区的沙丘形成并非都受控于自然因素的影响, 其中很多沙丘应是历史时期形成的, 是人类活动影响的结果<sup>[7, 10, 59-60, 87-88]</sup>。例如目前在一些荒漠沙丘地中还可以见到汉、唐及明朝等时期的废墟和长城遗址, 如敦煌南湖的寿昌废墟, 张掖以西的西城驿站沙丘中的废墟, 民勤一带沙丘中的明长城遗址等<sup>[7, 59-60]</sup>。

综合上述来看, 关于河西走廊地区的沙丘地貌, 目前至少存在两方面的问题在学术界还没有达成一致。一方面, 由于沙丘地貌的形成在本质上是风力堆积 (而非侵蚀) 作用的结果, 基于动力学过程和物质平衡原理的理解, 处于上风向的河西走廊西部 (戈壁风蚀地及其风蚀产物) 因而一直被认为是河西走廊中部和东部粉尘活动和地貌变化的原因之一<sup>[7, 38, 63]</sup>, 因为前者可能为后者提供了沙丘形成的物质基础。然而, 上述来自粒度沉积学和地球化学的证据却表明, 河西走廊中部和东部地区的沙丘不仅是多源的、高度混合和均一化的, 还和大尺度的外围沙漠扩张、南北山脉的侵蚀风化有关, 那么仅仅西部戈壁与风蚀区及其晚冰期沉积的存在, 就可以解释河西走廊中东部的沙漠化么? 换句话说, 西部沙漠化在驱动中东部么? 第二个方面, 近半个世纪以来, 河西走廊地区的沙丘动态变化, 是自然成因还是人为成因为主? 针对这两个问题, 下文做了一些初步的讨论。

#### 4.2 河西走廊地区的沙漠化: 西部驱动?

事实上, 前已述及, 从大尺度上来看, 河西走廊西部和东部之间的沙丘移动有着截然不同的方向 (图2), 与区域的主导风向大体一致 (图3)。这表明两个地区间的沙丘移动的动态模式与区域间主导风向的格局是耦合的, 即在动力机制上由合成输沙风向控制着区域近地表的输沙过程进而控制着沙丘的动态演化。所以, 河西走廊西部和东部之间的沙丘地貌在动态演化规律上可以说是脱耦的关系。因此, 这种风场环流的差异决定了两个地区之间的沙漠化在动力机制上应该不存在西部驱动东部的关系。

此外, 有不少研究从沉积物的侵蚀搬运和物质平衡方面开展了河西走廊西部的戈壁地表土壤、风蚀地貌和风蚀潜力的研究<sup>[7, 38, 61-65, 67]</sup>, 以期从侵蚀—堆积的耦合过程和物质平衡基础 (物质循环和物源供应) 的角度来探讨区域地貌的演化问题。由于潜在输沙量 (地表细颗粒物质的可蚀性)、砾石覆盖率 (地表粗糙度) 和表层沉积物的平均粒径, 是影响粉尘释放的主要因素<sup>[34, 89-90]</sup>, 上述3个因素决定了河西走廊西部戈壁地表沉积物的可蚀性是否对其他区域的沙漠化具有潜在贡献。

从侵蚀过程上看, 风蚀地在河西走廊的西部广泛分布, 地表风蚀形成了与风向大致平行的长条状风蚀残丘和风蚀洼地。这些风蚀地貌一般高约1~3 m, 少数达5 m<sup>[7]</sup>, 大致都分布在疏勒河下游沿岸和敦煌绿洲的西部等。这种侵蚀地貌的存在, 表明河西走廊西部戈壁地区对下风向地区的风沙地貌形成具有潜在的物源供应条件。然而, 从地表碎屑物质的可侵蚀性上看, 来自河西走廊西部砾质荒漠 (戈壁) 的地表性质及其对风尘排放的影响研究显示, 砾质戈壁与沙质荒漠 (沙丘地) 有着非常明显的区别, 就在于地表沉积物的粒度组成以及细颗粒物质的赋存状态 (可蚀性) 完全不同<sup>[38, 61, 64, 67]</sup>。戈壁地表通常由砾石、沙、细砂和粘土物质组成, 粗、细物质混杂, 而沙丘沙则主要由中砂物质组成, 不存在或很少有粗颗粒的砾石和细颗粒的粉砂与粘土物质<sup>[38, 65]</sup>。另外, 多数戈壁地



表存在着盐结皮, 细颗粒物由于胶结物(碳酸钙等)的存在而固结起来, 风力可蚀性弱, 而沙丘沙则是松散的, 可蚀性强<sup>[38]</sup>。

另外, 基于野外调查并利用ImageJ软件和高分辨率影像资料分析, 有研究<sup>[38]</sup>估算了河西走廊西部不同戈壁地区的砾石覆盖率和地表盐结皮状态, 确定了砾石(直径> 2 mm)占地表沉积物总重量的比例, 并分析了不同地表沉积物的粒度沉积学分布。研究结果表明: ①在河西走廊西部, 戈壁地表的砾石覆盖度主要为中等程度覆盖, 砾石覆盖率主要介于40%至70%之间(平均52%, SD = ±17%)不等。研究已证明, 这种数值范围的砾石比例, 完全可以在地表产生最大的空气动力学粗糙度<sup>[91-97]</sup>, 阻止粉尘的释放。②大部分戈壁区域(面积占75%)的地表砾石碎屑颗粒之间形成了盐壳或盐结皮, 只有河西走廊北部输沙风势较高的地区及沙漠边缘没有地表结皮。③戈壁地表的易蚀性物质(砂, 粉砂和粘土)的含量有清晰的空间差异性分布。砾石表层沉积物多数为中砂和细砂(分别占总数的52.5%和25.0%); 而粉砂和粘土含量为9.8%至40.1%, 多数含量(约73%样品)介于10%至30%之间。④在大多数的戈壁区域, 潜在的沙物质可迁移量> 200个向量单位, 但这些区域有75%的地表存在实体的土壤结皮, 难以迁移<sup>[38]</sup>。

综合上述分析, 细颗粒粉尘物质的比例、地表盐结皮的覆盖率、潜在的沙物质可迁移量等指标的量化结果, 均表明戈壁地区这种很高的砾石覆盖度和地表结皮率能有效减少地表的粉尘释放和沙物质迁移。因此, 在物质基础上, 河西走廊西部的戈壁地区应该不是河西走廊中部和东部沙尘暴的主要来源区, 而河西走廊北部则可能是主要的粉尘来源区。因此, 从动力机制和物质基础两个方面来看, 河西走廊西部都无法满足驱动河西走廊中东部地区沙漠化的条件。

#### 4.3 河西走廊区域性沙漠化的潜在因素: 气候变暖?

表征一个区域的沙漠化过程, 除了解其风沙地貌参数及其动态变化外, 另外一个能够指示区域沙漠化程度的潜在指标。它来自气象学事件中的沙尘暴, 如大风天数和沙尘暴日数等<sup>[66]</sup>。沙尘暴是指风速≥起沙风速、水平能见度< 1000 m的一种风沙天气现象。

在气象学上, 河西走廊被认为是中国西北部沙尘暴和大风天的多发区之一<sup>[59-60]</sup>。从河西走廊地区近半个世纪以来的气象数据来看<sup>[98-99]</sup>, 自1956年以来, 河西走廊地区本地沙尘暴的发生日数约为11.20 d/a, 大风天(> 8级风/d)日数平均约18.39 d/a<sup>[98]</sup>, 但沙尘暴总体上表现为减少趋势, 递减速率为0.677次/a。近半个世纪以来, 河西走廊(如民勤地区)的沙尘暴日数总体呈减少趋势, 并在此期间存在3种变化趋势, 即频率和次数都迅速降低(1956—1969年), 频率高而稳定(1971—1987年), 频率低而缓慢降低(1987—2008年)<sup>[99]</sup>。

大尺度空间范围对比来看, 同时期整个中国北方的沙尘暴频率也都是在减小的<sup>[14, 16]</sup>。但从全球尺度来看, 它与全球的沙尘暴发生情况却相反, 因为近几十年来全球的沙尘暴次数由于全球增温是在增加的<sup>[100-101]</sup>。这表明河西走廊乃至整个中国北方地区的沙尘暴过程并没有响应全球性的沙尘暴变化, 这里的沙尘暴事件或潜在沙漠化过程的原因可能与全球其他地区不同。

近半个世纪以来河西走廊荒漠地区的气温逐渐增高<sup>[99]</sup>, 与全球变暖一致。这表明研究区的气候在响应着全球气候变化。但是, 在全球性和区域性增温背景下, 河西走廊地区沙尘暴事件的发生频率为何没有像全球沙尘暴一样是增加的, 反而是减少呢? 难道气候变暖不是主导因素么? 回答这一问题, 还需要分析中国北方乃至河西走廊地区在这一时期以来的多因素气候变化。即在增温背景下, 中国北方和河西走廊荒漠区的区域性气候是如何变化并响应全球变暖的?

有关中纬度干旱区近半个世纪以来的区域性气候变化问题,有研究已在中国北方和河西走廊等干旱地区开展过<sup>[99, 101-104]</sup>,简单概括如下:① 1961—2008年,民勤地区的年平均气温在增加,其抬升速率高于20世纪全球气温的抬升速率和中国近100a的气温抬升速率;其中,2月份的气温增高幅度最大,月平均气温增高3.01℃。② 从20世纪全球最暖的80—90年代开始,民勤地区的极端最高气温变幅明显增大,极端最低气温则间歇式下降,极端最高气温和极端最低气温的不稳定性增大,主要表现:1月份和4月份的月平均气温的不稳定性增大;2月份的等温日期提前10.36 d;12月份和1月份的极端最高气温的不稳定性增大;5月份的极端最低气温的变异系数达287%。③ 1961—2008年,民勤荒漠区在气温升高的同时,降水量也表现为增加趋势,空气湿度亦显著增大。④ 民勤地区1月份降水量的不稳定性增大,年降水量的稳定性增强。⑤ 总体来看,同中国北方大尺度区域气候变化一样,民勤地区的气温不稳定性问题,应比气温变暖问题更值得人们关注<sup>[99, 101-104]</sup>。⑥ 1961—2008年,民勤地区的风速持续降低。⑦ 沙尘暴的多年分布和季节分布均与空气相对湿度之间存在显著负相关关系。

由上可以看出,虽然河西走廊地区的气温升高(响应全球变暖),但降水增加(响应亚洲夏季风的增强),空气相对湿度增加,风速减小。这种环境变化的结果,一方面会使得沙尘释放过程的动力减小(因为风速降低),另一方面会使得沙面的粘滞性增大(因为湿度增大),其后果将导致沙尘事件的频率降低。因此,1961年以来,河西走廊地区沙尘暴发生日数的减少趋势,原因主要是空气相对湿度的增大,即当地气候的暖湿化是导致沙尘暴减少的主要原因之一。也就是说,近半个世纪以来,河西走廊地区具有潜在的逆沙漠化趋势,其控制因素主要是气候暖湿化变化。

#### 4.4 河西走廊的绿洲区沙漠化:自然还是人为因素?

河西走廊地区的区域性沙漠化状况在近半个世纪以来具有逆沙漠化趋势,受控于自然因素的影响。但是,广泛分布在河西走廊绿洲区的局地沙漠化是否也是如此?

事实上,河西走廊地区的绿洲沙漠化问题,远比区域沙漠化问题更受关注。半个多世纪以来,针对河西走廊地区的绿洲沙漠化问题,当地政府和组织开展了系统的沙漠化防治工程建设与环境理论研究。在沙漠化的生态防治方面尤为显著,如沙漠旱生植物的水分生理生态研究,荒漠植物的物候研究,绿洲边缘的积沙带研究等<sup>[59-60]</sup>。半个世纪以来,伴随着区域性的气候变化和地貌变化(沙漠化),河西走廊绿洲地区的自然环境也发生了巨大的变化,突出表现在水环境和植被生态环境2个方面,如:

(1) 河西走廊地区的地下水水位普遍下降,区域水资源减少。如民勤绿洲区中部和边缘区的26眼机井显示:在1985—2001年间,民勤绿洲中部的地下水水位下降速率达到0.54 m/a<sup>[66]</sup>;而民勤绿洲区边缘的机井则指示,1985—2017年民勤绿洲边缘地区的地下水水位的下降速率达到了0.56 m/a<sup>[66]</sup>。

(2) 河西走廊地区的天然林面积衰退。由于地下水位的下降,民勤地区的天然固沙植被大面积衰退,荒漠草场沙化。如1981年民勤地区的天然固沙林面积为203951 hm<sup>2</sup>,但到2002年,天然固沙林面积已降低到197353 hm<sup>2</sup><sup>[66]</sup>;20世纪80年代初民勤境内有373 hm<sup>2</sup>的胡杨林,但目前已消失殆尽<sup>[66]</sup>。

上述这些生态环境和地下水环境变化表明,在干旱的河西走廊绿洲区植被持续减少的原因并不是区域降水的变化或相对湿度的变化,也不是造林少,而是受制于绿洲地下水和土壤水等“有效水分”的变化<sup>[66]</sup>。表明在河西走廊地区,区域性的沙漠化和绿洲区的沙漠化两者之间的原因并不相同。

前已述及,河西走廊沙丘的动态变化主要受控于年降水量,即区域性的沙漠化主要受控于气候的相对暖湿化。因此可以说,在河西走廊地区,区域沙漠化主要受控于大气的“有效水分”(相对湿度),而绿洲区沙漠化则受控于土壤的“有效水分”。也就是说,有效水分是绿洲生态环境中的最大限制性因子;具体来说,这个有效水分既不是大气降水,也不是地表水,而是土壤水和地下水。

近半个世纪以来,尽管全球增温,但处于中纬度干旱带的河西走廊地区的气候是相对更加湿润化的,并非全球增温背景下“湿的越湿干的越干”<sup>[105-107]</sup>。然而,河西走廊区域性气候的湿润化显然与绿洲区同时期地下水的退化<sup>[66]</sup>和天然林的衰退不相符。这表明,河西走廊绿洲区的沙漠化是受控于人类活动的影响,而不是自然因素的影响。

基于上述分析,在河西走廊地区乃至中国北方甚至全球的中纬度干旱带,绿洲区沙漠化的防治问题应遵循“以土壤有效水分的平衡”为中心。地下水的合理利用是绿洲沙漠化防治的关键<sup>[66]</sup>。

综合上述,水环境的变化是制约干旱区绿洲沙漠化的重要因素。河西走廊民勤地区的生态环境退化过程是很好的例证。而从更大的空间尺度来看,中国北方干旱、半干旱地区普遍水资源不足,因此所有的绿洲景观都可能面临着类似的、潜在的沙漠化问题。

目前,有不少研究认为从外流域(如黄河流域、长江流域)调水可适当减缓河西走廊内陆河流域严重缺水 and 沙漠化的问题。然而,从干旱区大范围的资源配置来看,一方面,从外流域调水可能并不是解决旱区缺水问题的根本办法,因为中纬度干旱区缺水是地质历史时期的新生代全球变冷、中纬度季风—西风大气环流调整、全球冰量和海平面变化等的改变所导致,因而在人类世尺度上可能是永久性的缺水;而且外流域调水很可能造成其他流域的生态问题,因为干旱环境下几乎每个流域都是缺水或潜在缺水的。其次,大规模调水在经济上可能也是不现实的。由于河西走廊地区的社会经济条件和财力等因素的限制(如水费问题等),至少外流域调水在近期是不太可行的。另外,在土壤非饱和状态下(不受盐分积累的胁迫),或者在避免出现由于盐分累积和风成盐土扩散而导致下一个类似中纬度干旱区的咸海生态危机<sup>[108]</sup>、楼兰生态危机<sup>[109]</sup>或本地的“青土湖生态危机”<sup>[110]</sup>等水环境问题的出现,外流域调水如何实现区域水环境安全(盐渍化问题)和有效补给土壤水和地下水而不是地表水等方面尚缺乏理解。此外,河西走廊的内陆河流域并不是绝对的“资源型缺水”,而是“资源型缺水”与“技术型缺水”并存<sup>[111]</sup>。这意味着综合性防治是河西走廊绿洲沙漠化防治的必须措施。

## 5 结论

河西走廊地区沙丘地貌的形成与动态变化是北半球中纬度地区出现的典型的土地荒漠化问题,研究该地区风成沙丘地貌的形成与演化,对于揭示当地的沙漠化过程和机制以及区域的环境变化具有重要意义。以往的认识多基于对长时间尺度如地质历史层面自然背景的变化理解,而在近半个世纪以来河西走廊地区的风沙地貌和粉尘活动有怎样的变化特征且是否响应区域或全球的气候变化,上风向的戈壁地区是否中东部沙尘暴的源区和策源地,自然和人类活动如何影响区域的沙漠化进程等问题,学术界尚缺乏全面的理解。

研究结果表明,近半个世纪以来在年际和年代际尺度上,研究区典型新月形沙丘和新月形沙丘链等发生了较大的移动或摆动;沙丘的动态变化主要受年降水量、年平均风速和年大风日数的影响,表明沙丘动态变化的首要影响因素是气候因素。河西走廊沙丘



沙的粒度频率累积曲线基本呈现三段式模式,与戈壁沉积物的两段式沉积学模式明显不同,表明前者经历了高效的风成分异和混合作用而非局地起源,后者在沉积学上的“不成熟性”表明为“就地/近地”或“局地”起源。古地理、沉积学和地球化学证据表明沙丘沉积物的母源物质主要是冲洪积物和古河流沉积物等,包括古湖沉积、南北山麓剥蚀带的碎屑沉积和周边沙漠沉积物等。在主量和微量元素地球化学组成上,河西走廊新月型沙丘沙与中国北方沙漠沙丘沙或风成黄土都有着一定的相似性和差异性,指示了风成物质的高效混合性特征;河西走廊沙丘沙相对富集铁、钴元素。综合考虑地表细颗粒物物质的比例、表层盐结皮的覆盖率和可蚀性砂质物质含量等指标,河西走廊西部戈壁区不是中东部沙地沙尘暴的主要来源区,而北部才可能是主要的粉尘源区。近半个世纪以来研究区局地气候的增温、增湿是对全球气候变化和亚洲夏季风增强的同步响应,也是研究区沙尘暴减少(粉尘活动减弱)的主要原因;而同时期河西走廊具有潜在的逆沙漠化趋势,亦受控于气候变化而非人类活动;但在绿洲地区,沙漠化过程还是受控于人类活动影响下的地下水变化。

### 参考文献(References)

- [1] Goudie A. Great Warm Deserts of the World: Landscapes and Evolution. New York: Oxford University Press, 2002.
- [2] Lancaster N, Yang X, Thomas D. Spatial and temporal complexity in Quaternary desert datasets: Implications for interpreting past dryland dynamics and understanding potential future changes. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 78: 301-302.
- [3] Lancaster N, Wolfe S, Thomas D, et al. The INQUA Dunes Atlas chronologic database. *Quaternary International*, 2016, 410: 3-10.
- [4] Williams M. Climate Change in Deserts: Past, Present and Future. New York: Cambridge University Press, 2014.
- [5] Yang X, Liang P, Zhang D, et al. Holocene aeolian stratigraphic sequences in the eastern portion of the desert belt (sand seas and sandy lands) in northern China and their palaeoenvironmental implications. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62: 1302-1315.
- [6] Yang X. Desert research in northwestern China: A brief review. *Geomorphologie: Relief, Processus, Environment*, 2006, 4: 275-284.
- [7] Zhu Z, Wu Z, Liu S, et al. An Outline of Chinese Deserts. Beijing: Science Press, 1980.
- [8] Guo Z, Ruddiman W, Hao Q, et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 2002, 416: 159-163.
- [9] Guo Z, Peng S, Hao Q, et al. Late Miocene-Pliocene development of Asian aridification as recorded in the Red-earth Formation in northern China. *Global and Planetary Change*, 2004, 41: 135-145.
- [10] Yang X, Rost KT, Lehmkuhl F, et al. The evolution of dry lands in northern China and in the Republic of Mongolia since the Last Glacial Maximum. *Quaternary International*, 2004, 118-119: 69-85.
- [11] Yang X, Preusser F, Radtke U. Late Quaternary environmental changes in the Taklamakan Desert, western China, inferred from OSL-dated lacustrine and aeolian deposits. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25: 923-932.
- [12] Chen F, Zhang J, Liu J, et al. Climate change, vegetation history, and landscape responses on the Tibetan Plateau during the Holocene: A comprehensive review. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 243: 106444. DOI: 10.1016/j.quascirev.2020.106444.
- [13] Zhu Zhengda, Wang Tao. Theory and practice on sandy desertification in China. *Quaternary Sciences*, 1992(2): 97-106. [朱震达, 王涛. 中国沙漠化研究的理论与实践. 第四纪研究, 1992(2): 97-106.]
- [14] Zhang Li, Ren Guoyu. Change in dust storm frequency and the climatic controls in northern China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 61(6): 744-750. [张莉, 任国玉. 中国北方沙尘暴频数演化及其气候特征成因分析. 气象学报, 2003, 61(6): 744-750.]
- [15] Pu Zhongyuan. For the lost oasis: A review of studies on desertification in the Hexi Corridor during the historical period. *Collections of Essays on Chinese Historical Geography*, 2005, 20 (1): 157-158. [濮仲远. 为了失去的绿洲—河西走廊历史时期的沙漠化研究评介. 中国历史地理论丛, 2005, 20(1): 157-158.]
- [16] Li Yaohui, Zhang Shuyu. Review of the research on the relationship between sand-dust storm and arid in China. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(11): 1169-1176. [李耀辉, 张书余. 我国沙尘暴特征及其与干旱关系的研究进展. 地球科学进展, 2007, 22(11): 1169-1176.]

- [17] Yang X, Scuderi L, Paillou P, et al. Quaternary environmental changes in the drylands of China: A critical review. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30: 3219-3233.
- [18] Yang X, Li H, Conacher A. Large-scale controls on the development of sand seas in northern China. *Quaternary International*, 2012, 250: 74-83.
- [19] Nottebaum V, Lehmkuhl F, Stauch G, et al. Late Quaternary aeolian sand deposition sustained by fluvial reworking and sediment supply in the Hexi Corridor: An example from northern Chinese drylands. *Geomorphology*, 2015, 250: 113-127.
- [20] Chang Z, Zhu S, Shi X, et al. Comparisons between movement speed of main types of dunes: A case study of desert areas in Hexi region of Gansu Province. *Journal of Landscape Research*, 2016, 8(6): 36-40.
- [21] Chang Zhaofeng, Li Ya, Zhang Jianhui, et al. Stability mechanisms of barchan sand dunes: A case study in the Hexi Desert in Gansu. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(13): 4375-4383. [常兆丰, 李亚, 张剑挥, 等. 新月形沙丘稳定性机理: 以甘肃河西沙区为例. *生态学报*, 2017, 37(13): 4375-4383.]
- [22] Lang Lili, Wang Xunming, Zhu Bingqi, et al. Nebkha formation and variations in sediment availability and wind-energy regime of the western Hexi Corridor over the past several decades. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(4): 611-620. [郎丽丽, 王训明, 朱秉启, 等. 河西走廊西端灌丛沙丘发育过程及其对沙漠化的指示意义. *中国沙漠*, 2017, 37(4): 611-620.]
- [23] Zhang Zhengchai, Dong Zhibao. Dune field patterns and wind environments in the middle reaches of the Heihe Basin. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(2): 332-341. [张正偲, 董治宝. 黑河流域中游沙漠风能环境与风沙地貌. *中国沙漠*, 2014, 34(2): 332-341.]
- [24] Lv P, Narteau C, Dong Z, et al. Direct validation of dune instability theory. *PNAS*, 2021, 118(17): e2024105118. DOI: 10.1073/pnas.2024105118.
- [25] Dong Zhibao, Chen Guangting, Yan Changzhen, et al. Movement laws of dunes along oil transportation highway in the Tarim Desert. *Journal of Desert Research*, 1998, 18(4): 328-333. [董治宝, 陈广庭, 颜长珍, 等. 塔里木沙漠石油公路沿线沙丘移动规律. *中国沙漠*, 1998, 18(4): 328-333.]
- [26] Chen F, Liu Y. Secular annual movement of sand dunes in Badain Jaran Desert based on geographic analyses of remotely sensed imagery. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(4): 501-507.
- [27] He Jingli, Guo Jianying, Xing Ende, et al. Structure of wind-sand flow and law of dune movement along bank of Yellow River in Ulan Buh desert. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(17): 71-77. [何京丽, 郭建英, 邢恩德, 等. 黄河乌兰布和沙漠段沿岸风沙流结构与沙丘移动规律. *农业工程学报*, 2012, 28(17): 71-77.]
- [28] Dong Y, Huang D. Preliminary observation of movement of coastal dunes in Feicui Island in Changli, Hebei Province. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(2): 486-492.
- [29] Wang J, Liu L, Shen L. Research of movement laws of barchan dunes in the Mu Us sandy land based on Google Earth software. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, 28(6): 1094-1100.
- [30] Hu X, Wang M, Liu Y. Analysis of movement of dunes in the Tengger Desert based on high-resolution remote sensing images. *China Science and Technology Review*, 2016, 2: 337. <http://zgbl.qikan.com/ArticleView.aspx?titleid=zgbl201602329>.
- [31] Mao Donglei, Lei Jiaqiang, Zhou Jie, et al. Movement rules of different shifting dunes and semi-shifting dunes in Cele, Xinjiang Uygur Autonomous Region. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(3): 278-282. [毛东雷, 雷加强, 周杰, 等. 新疆策勒不同类型流动和半流动沙丘运移规律. *水土保持研究*, 2016, 23(3): 278-282.]
- [32] MDCES (Minqin Desert Control Experiment Station). *Deserts and Control in Gansu*. Lanzhou: Gansu People's Publishing house, 1975: 33-38. [民勤治沙综合试验站. *甘肃沙漠与治理*. 兰州: 甘肃人民出版社, 1975: 33-38.]
- [33] Bagnold R A. *Physics of Sand and Dunes in Desert*. Beijing: Science Press. 1959.
- [34] Pye K. *Aeolian Dust and Dust Storms*. Gainesville: Academic Press, 1987.
- [35] Zhu B, Yu J. Aeolian sorting processes in the Ejina desert basin (China) and their response to depositional environment. *Aeolian Research*, 2014, 12: 111-120.
- [36] Zhu B, Yu J, Rioual P, et al. Particle size variation of aeolian dune deposits in the lower reaches of the Heihe River basin, China. *Sedimentary Geology*, 2014, 301: 54-69.
- [37] Zhang Z, Dong Z. Grain size characteristics in the Hexi Corridor Desert. *Aeolian Research*, 2015, 18: 55-67.
- [38] Zhang Z, Dong Z, Li J, et al. Implications of surface properties for dust emission from gravel deserts (gobis) in the Hexi Corridor. *Geoderma*, 2016, 268: 69-77.
- [39] Pan Kaijia, Zhang Zhengcai, Dong Zhibao, et al. Physicochemical characteristics of surface sediments of crescent-shaped sand dunes in the Hexi Corridor, Gansu, China. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(1): 44-51. [潘凯佳, 张正

- 偲,董治宝,等.河西走廊新月形沙丘表层沉积物的理化性质.中国沙漠,2019,39(1):44-51.]
- [40] Zhang Z, Pan K, Zhang C, et al. Geochemical characteristics and the provenance of aeolian material in the Hexi Corridor Desert, China. *Catena*, 2020: 104483. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104483.
- [41] Pettijohn F J, Potter P E, Siever R. *Sand and Sandstone*. New York: Springer-Verlag, 1972.
- [42] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. London: Blackwell Scientific Publications, 1985.
- [43] Zhu Z, Chen Z, Wu Z, et al. *Study on the Geomorphology of Wind-drift Sands in the Taklamakan Desert*. Beijing: Science Press, 1981.
- [44] Muhs D, Bush C, Cowherd S, et al. Geomorphic and geochemical evidence for the source of sand in the Algodones dunes, Colorado Desert, southeastern California//Tchakerian V. *Desert Aeolian Processes*. London: Chapman & Hall, 1995: 37-74.
- [45] Muhs D, Stafford T, Cowherd S, et al. Origin of the Late Quaternary dune fields of northeastern Colorado. *Geomorphology*, 1996, 17: 129-149.
- [46] Pease P, Tchakerian V, Tindale N. Aerosols over the Arabian Sea: Geochemistry and source areas for aeolian desert dust. *Journal of Arid Environments*, 1998, 39: 477-496.
- [47] Honda M, Shimizu H. Geochemical, mineralogical and sedimentological studies on the Taklimakan Desert sands. *Sedimentology*, 1998, 45: 1125-1143.
- [48] Wolfe S, Muhs D, David P, et al. Chronology and geochemistry of Late Holocene eolian deposits in the Brandon Sand Hill, Manitoba, Canada. *Quaternary International*, 2000, 67: 61-74.
- [49] Pease P, Tchakerian V. Geochemistry of sediments from Quaternary sand ramps in the southeastern Mojave Desert, California. *Quaternary International*, 2003, 104: 19-29.
- [50] Zimbelman J, Williams S. Geochemical indicators of separate sources for eolian sands in the eastern Mojave Desert, California, and western Arizona. *Geological Society of America Bulletin*, 2002, 114: 490-496.
- [51] Muhs D. Mineralogical maturity in dunefields of North America, Africa and Australia. *Geomorphology*, 2004, 59: 247-269.
- [52] Yang X, Zhu B, White P D. Provenance of aeolian sediment in the Taklamakan Desert of western China, inferred from REE and major-elemental data. *Quaternary International*, 2007, 175: 71-85.
- [53] Zhu B, Yang X. Chemical Weathering of Detrital Sediments in the Taklamakan Desert, Northwestern China. *Chemical Weathering of Detrital Sediments in the Taklamakan Desert, Northwestern China*. *Geographical Research*, 2009, 47(1): 57-70.
- [54] Jiang Q, Yang X. Sedimentological and geochemical composition of aeolian sediments in the Taklamakan Desert: Implications for provenance and sediment supply mechanisms. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 2019, 124: 1217-1237.
- [55] Ren X, Yang X, Wang Z, et al. Geochemical evidence of the sources of aeolian sands and their transport pathways in the Minqin Oasis, northwestern China. *Quaternary International*, 2014, 334-335: 165-178.
- [56] Wang Liqiang, Wang Qin. Elemental compositions of surface deposits in the Hexi Corridor and its adjacent areas, northwestern China. *Northwestern Geology*, 2013, 46(2): 69-80. [王力强, 王亲. 河西走廊地区及其毗邻地区地表物沉积元素特征. *西北地质*, 2013, 46(2): 69-80.]
- [57] Shi Xuegang, Li Guang, Liu Shizeng, et al. Dynamic changes of barchans dunes and its relationship with meteorological factors along oasis fringe in Hexi Corridor. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2018, 2: 86-93. [石学刚, 李广, 刘世增, 等. 河西走廊绿洲边缘新月形沙丘的动态变化及其与气象因子的关系. *甘肃农业大学学报*, 2018, 2: 86-93.]
- [58] Wang Tao. *Desert and Desertification in China*. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Press, 2003. [王涛. *中国沙漠与沙漠化*. 石家庄: 河北科技出版社, 2003.]
- [59] Zhu Z, Chen G. *Sandy Desertification in China*. Beijing: Science press, 1994.
- [60] Zhu Z. *Deserts, Desertification, Land Degradation and Strategies for Rehabilitation in China*. Beijing: Environmental Press, 1999.
- [61] Zhang Kecun, Qu Jianjun, Zu Ruiping, et al. Wind tunnel simulation about the effects of the different underlying surfaces on the features of drifting sand current. *Arid Land Geography*, 2004, 37(3): 352-355. [张克存, 屈建军, 祖瑞平, 等. 不同下垫面对风沙流特性影响的风洞模拟研究. *干旱区地理*, 2004, 37(3): 352-355.]
- [62] Qu Jianjun, Huang Ning, Ta Wanguan, et al. Structural characteristics of Gobi sanddrift and its significance. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(1): 19-23. [屈建军, 黄宁, 拓万全, 等. 戈壁风沙流结构特性及其意义. *地球科学进展*, 2005, 20(1): 19-23.]



- [63] Wang Xunming, Lang Lili, Hua Ting, et al. Gravel cover of Gobi desert and its significance for wind erosion: An experimental study. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(2): 313-319. [王训明, 郎丽丽, 花婷, 等. 戈壁砾石覆盖度与风蚀强度关系实验研究. *中国沙漠*, 2013, 33(2): 313-319.]
- [64] Yin Daiying, Qu Jianjun, Zu Ruiping, et al. Impact of disturbing on amount of wind erosion of sandy Gobi. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(1): 1-8. [殷代英, 屈建军, 祖瑞平, 等. 不同扰动方式对沙砾质戈壁地表风蚀量的影响. *中国沙漠*, 2014, 34(1): 1-8.]
- [65] An Fubo, Zhang Dekui, Zhao Jinmei, et al. Physical and chemical properties of soils in different types in the Gobi areas of the Hexi Corridor. 2019, 6: 42-47. [安富博, 张德魁, 赵锦梅, 等. 河西走廊不同类型戈壁土壤理化性质分析. *中国水土保持*, 2019, 6: 42-47.]
- [66] Chang Zhaofeng. Problems and solutions to desertification combating in the Hexi, Gansu for 60 years. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(9): 152-159. [常兆丰. 甘肃河西 60 年防沙治沙的问题及出路. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(9): 152-159.]
- [67] Hu Fei, Zhang Kecun, An Zhishan, et al. Composition of wind dynamic environment among desert, oasis and gobi. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(4): 113-119. [胡菲, 张克存, 安志山, 等. 敦煌沙漠、绿洲和戈壁地表风动力环境特征同步对比. *中国沙漠*, 2020, 40(4): 113-119.]
- [68] Ren Xiaozong, Liu Tao, Wang Zhengting. Characters of geomorphologic parameter about barchans dunes. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(1): 163-166. [任孝宗, 刘陶, 王振亭. 河西沙区新月形沙丘形态参数观测. *水土保持研究*, 2010, 17(1): 163-166.]
- [69] Sahu B K. Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments. *Journal of Sedimentary Research*, 1964, 34(1): 73-83.
- [70] Visser G. Grain size distributions and depositional processes. *Journal of Sedimentary Research*, 1969, 39(3): 1074-1106.
- [71] Zhu B. Geochemistry, hydrochemistry and sedimentology of the Taklamakan Desert in Tarim Basin, NW China [D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [72] Ferrat M, Weiss DJ, Strekopytov S, et al. Improved provenance tracing of Asian dust sources using rare earth elements and selected trace elements for palaeomonsoon studies on the eastern Tibetan Plateau. *Geochimica & Cosmochimica Acta*, 2011, 75: 6374-6399.
- [73] Ren Xiaozong, Wang Zhengting. The provenance of eolian sediments in Minqin Oasis, Gansu Province. *Journal of Ningxia University: Natural Science Edition*, 2010, 31(1): 88-92. [任孝宗, 王振亭. 民勤绿洲沙源分析. *宁夏大学学报自然科学版*, 2010, 31(1): 88-92.]
- [74] Wang Liqiang. Surface deposits in the Hexi Corridor and its adjacent areas and implications for provenance of Asian dust [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011. [王立强. 河西走廊及其毗邻地区地表沉积与亚洲粉尘源区示踪[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.]
- [75] Liu T. Loess and the Environment. Beijing: China Ocean Press, 1985.
- [76] Sun J. Provenance of loess material and formation of loess deposits on the Chinese Loess Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 203: 845-859.
- [77] Ren Xiaozong. Element analysis of surface sediments from active dunes in the Minqin Oasis and its adjacent deserts [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010. [任孝宗. 民勤绿洲及其毗邻沙漠流动沙丘表面沉积物的元素分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.]
- [78] Zhang Z, Dong Z, Zhang C, et al. The geochemical characteristics of dust material and dust sources identification in northwestern China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, 175: 148-155.
- [79] Li Enju. Comparative Study on Characteristics of Aeolian Sediments between the Badanjilin and Tengeli deserts [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2011. [李恩菊. 巴丹吉林沙漠与腾格里沙漠沉积物特征的对比研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2011.]
- [80] Wang X, Hua T, Zhu B, et al. Geochemical characteristics of the fine-grained component of surficial deposits from dust source areas in northwestern China. *Aeolian Research*, 2018, 34: 18-26.
- [81] Dong Zhibao, Su Zhizhu, Qian Gugangqiang. Aeolian landforms in the Kumtag Desert. Beijing: Science Press, 2011. [董治宝, 苏志珠, 钱广强. 库姆塔格沙漠风沙地貌. 北京: 科学出版社, 2011.]
- [82] Xie Yaowen, Chen Fahu, Wang Naiang. Spatial change of Minqin Oasis in Gansu over the last 2000 years. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(5): 662-670. [颉耀文, 陈发虎, 王乃昂. 近 2000 年来甘肃民勤盆地绿洲的空间变化. *地理学报*, 2004, 59(5): 662-670.]
- [83] Wang J, Li W, Song D, et al. The analysis of land desertification changing of Minqin County in recent 30 years. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 8: 282-288.
- [84] Wang X, Li J, Dong G, et al. Responses of desertification to variations in wind activity over the past five decades in arid

- and semiarid China. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53: 426-433.
- [85] Wang X, Chen F, Hasi E, et al. Desertification in China: An assessment. *Earth-Science Reviews*, 2008, 88: 188-206.
- [86] Wang X, Chen F, Dong Z. The relative role of climatic and human factors in desertification in semi-arid China. *Global Environmental Change (Part A)*, 2006, 16: 48-57.
- [87] Chang Zhaofeng, Han Fugui, Zhong Shengnian, et al. Natural and artificial factors and their transfer on sandy desertification of lower reaches of Shiyang River Basin. *Arid Land Geography*, 2005, 28(2): 150-155. [常兆丰, 韩福贵, 仲生年, 等. 石羊河下游沙漠化的自然因素和人为因素及其位移. *干旱区地理*, 2005, 28(2): 150-155.]
- [88] Li Bingcheng. The oasis in the lower reaches of the Shiyang River has become the "the second Loulan" before the mid-Tang Dynasty. *Research and Development*, 2007, 2: 153-157. [李并成. 石羊河下游绿洲早在唐代中期就已演变成了"第二个楼兰". *开发研究*, 2007, 2: 153-157.]
- [89] Gillette D A, Stockton P H. The effect of nonerodible particles on wind erosion of erodible surfaces. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(12): 885-893.
- [90] Raupach M R, Gillette D A, Leys J F. The effect of roughness elements on wind erosion threshold. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98(D2): 3023-3029.
- [91] Lyles L, Tatarko J. Soil wind erodibility index in seven northern central states. *Transactions of the ASAE*, 1988, 31(5): 1396-1399.
- [92] Wolfe S A, Nickling W G. Shear stress partition in sparsely vegetated desert canopies. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21: 607-619.
- [93] Dong Z, Qu J, Liu X, et al. Experimental investigation of the drag coefficients of gobi surfaces. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2002, 45(7): 609-615.
- [94] Dong Z, Liu X, Wang X. Aerodynamic roughness of gravel beds. *Geomorphology*, 2002b, 43(1-2): 17-31.
- [95] Liu X, Dong Z. Aerodynamic roughness of gravel bed. *Journal of Desert Research*, 2003, 23(1): 40-47.
- [96] Uno I, Wang Z, Chiba M, et al. Dustmodel intercomparison (DMIP) study over Asia: Overview. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: D12213. DOI: 10.1029/2006JD006575.
- [97] Rostagno C M, Degorgue G. Desert pavements as indicators of soil erosion on aridic soils in north-east Patagonia (Argentina). *Geomorphology*, 2011, 134: 224-231.
- [98] Chang Z, Wang Q, Zhang J, et al. Environmental conditions of barchans dune and barchans chain: A case study from the Hexi Desert area of Gansu. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2015, 7(6): 383-388.
- [99] Chang Zhaofeng, Han Fugui, Zhong Shengnian. Response of desert climate change to global warming in Minqin, China. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(2): 505-510. [常兆丰, 韩福贵, 仲生年. 民勤荒漠区气候变化对全球变暖的响应. *中国沙漠*, 2011, 31(2): 505-510.]
- [100] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. *Climate Change 2001: The scientific Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 15-108.
- [101] Ding Y. Global climate change. *World Environment*, 2002, 6: 9-12.
- [102] Sha Wanying, Shao Xuemei, Huang Mei. Climate warming and its impact on natural regional boundaries in China since 1980s. *Science in China Series D*, 2002, 32(4): 317-326. [沙万英, 邵雪梅, 黄玫. 20世纪80年代以来中国的气候变暖及其对自然区域界限的影响. *中国科学D辑*, 2002, 32(4): 317-326.]
- [103] Ding Yihui. Prediction of environmental changes in Western China//Qin Dahe. *Assessment of Environmental Evolution in Western China*. Beijing: Science Press, 2002. [丁一汇. 中国西部环境变化的预测//秦大河. *中国西部环境演变评估*. 北京: 科学出版社, 2002.]
- [104] Chang Zhaofeng, Ma Zhonghua, Wang Dawei, et al. Instability of climate change in the Minqin desert area. *Arid Zone Research*, 2016, 33(3): 601-608. [常兆丰, 马中华, 王大为, 等. 民勤荒漠气候变化的不稳定性研究. *干旱区研究*, 2016, 33(3): 601-608.]
- [105] Greve P, Orlowsky B, Mueller B, et al. Global assessment of trends in wetting and drying over land. *Nature Geoscience*, 2014, 7. DOI: 10.1038/NGEO2247.
- [106] Feng H, Zhang M. Global land moisture trends: Drier in dry and wetter in wet over land. *Scientific Reports*, 2015, 5: 18018. DOI: 10.1038/srep18018.
- [107] Jensen L, Eicker A, Dobslaw H, et al. Long-term wetting and drying trends in land water storage derived from GRACE and CMIP5 models. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, 2019, 124: 9808-9823.
- [108] Micklin P. The Aral Sea disaster. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2007, 35(1): 47-72.
- [109] Mischke S, Liu C L, Zhang J F, et al. The world's earliest Aral-Sea type disaster: The decline of the Loulan Kingdom in the Tarim Basin. *Scientific Reports*, 2017, 7: 43102. DOI: 10.1038/srep43102.
- [110] Chunyu X Z, Huang F, Xia Z Q, et al. Assessing the ecological effects of water transport to a lake in arid regions: A

case study of Qingtu lake in Shiyang river basin, Northwest China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(1): 145. DOI: 10.3390/ijerph16010145.

- [111] Chang Zhaofeng, Liu Hujun. Desertification control in Hexi inland river basins of Gansu Province (II). *Protection Forest Science and Technology*, 2003, 2: 28-32. [常兆丰, 刘虎俊. 甘肃省河西内陆河流域荒漠化防治(II). *防护林科技*, 2003, 2: 28-32.]

## The recent evolution of dune landforms and its environmental indications in the mid-latitude desert area (Hexi Corridor)

ZHU Bingqi

(Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The history of dune landform changes and dust activity at mid-latitudes is a good archive for exploring environmental changes and related landscape response. In this study, the dynamic changes, material sources, dust activity history and the influencing factors of typical sand dunes in the Hexi Corridor were comprehensively analyzed from the aspects of aeolian geomorphology, grain-size sedimentology, geochemistry and climatology. The results show that in the past half century, the typical crescent-shaped dunes and chains of crescent-shaped dunes in the study area have moved or swayed greatly, with an average speed ranging from 0.8 m/a (Dunhuang) to 6.2 m/a (Minqin). The dynamic changes of sand dunes are mainly affected by annual precipitation, annual average wind speed and annual gale days, which indicates that climate is the primary influencing factor of dune landform changes. The three-stage grain-size curve model of dune sands is obviously different from that of gobi sediments (two-stage), revealing the "immaturity" of the latter in sedimentology, while the former has experienced efficiently aeolian differentiation and non-local origin. The comprehensive evidences of paleogeography, sedimentology and geochemistry reveal that the source materials of sand dunes are mainly alluvial/proluvial and palaeo-fluvial sediments, including clastic sediments in the denudation/erosion zones of the north and south piedmonts. Indicators such as the proportion of surface fine particles, the coverage of surface salt crusts, and the content of erodible sandy materials indicate that the western gobi areas are not the main source areas of wind-blown dust in the central and eastern parts of the Hexi Corridor. The spatial distribution of the movement direction of sand dunes is similar to that of the regional dominant wind direction, which indicates that the difference in the dynamic evolution of dune landforms between the east and west of the Hexi Corridor should be controlled by the regional-scale wind system, that is, controlled by the dynamic mechanism rather than the difference in material sources. The warming and humidification of the Hexi climate is a synchronous response to the global warming and the strengthening of the Asian Summer Monsoon. It is also the main reason for the reduction of dust storms in the study area, which means that a potential inverse desertification process exists in the Hexi Corridor during the same period and it is also controlled by climate change. However, the process of desertification in the oasis areas during the period is caused by groundwater fluctuation affected by human activities.

**Keywords:** dune landform; Gobi landform; grain size sedimentology; elemental geochemistry; global warming; desertification; mid-latitude deserts