

# 从动力地质作用原理探讨沙漠化成因<sup>①</sup>

郭福生<sup>1,2</sup>, 曾爱花<sup>1</sup>, 叶张煌<sup>1</sup>, 陈建平<sup>2</sup>, 段怡春<sup>2,3</sup>

(1 东华理工学院地球科学系, 江西抚州 344000)

(2 中国地质大学, 北京 100029)

(3 中国地质博物馆, 北京 100034)

**摘要** 大规模沙漠化从岩石记录中可以追溯到中生代中期, 第四纪以来南北两半球各存在一条中纬度沙漠带, 中国的沙漠化是这个全球沙漠化进程的一个组成部分。沙漠化是在地质演化过程中受内、外动力地质作用联合控制的地质事件, 是岩石圈与大气圈、生物圈及水圈强烈作用在地壳表层形成的一种特殊地质现象。这种现象的形成与演化是漫长的和具有周期性的, 不会因为局部的条件变化而发生整体意义上的突变。人类活动是局部的, 在整个地球沙漠化进程中只是起到一个加速剂的作用。沙漠化过程可分为3个阶段, 即物理风化与沙源积聚阶段、风沙作用阶段和沙漠化阶段。沙漠期后沙丘沙经过固生化草、胶结成岩阶段后即形成风成砂岩。

**关键词** 沙漠化 沙丘岩 动力地质作用 演化模式

中图分类号: X14

文献标识码: A

沙漠化问题已引起国际社会广泛关注, 但对于其科学定义、成因机理和演化过程却一直存在分歧。本文从沙漠的时、空分布特征出发, 根据内外动力地质作用原理探讨沙漠化成因及其地质作用过程。

## 1 沙漠化的地学定义

对沙漠化的定义目前存在多种观点。1949年法国作者 A. Aubreville<sup>[1]</sup>提出的“Desertification”一词, 汉译为“沙漠化”, 或译为“荒漠化”。人们在使用“沙漠化”、“荒漠化”、“荒漠”、“沙质荒漠”、“沙漠”等概念时常常界限模糊, 甚至混为一谈。因此, 在论述沙漠化成因机理之前, 有必要对这些概念的含义及其相互关系加以厘定。

在地理学中, 把气候干旱、降水稀少、蒸发量大、植被贫乏、土地十分贫瘠的自然地带称为荒漠(Desert), 意为“荒凉”之地。荒漠按照地貌形态和地表物质组成不同, 可分为岩漠、砾漠、沙漠和泥漠四类<sup>[2,3]</sup>。

Aubreville 把热带-亚热带森林向草原转化、并最终演变成类似荒漠景观的过程称为荒

① 收稿日期: 2003-4-11

万方数据

第一作者简介: 郭福生(1962~), 男, 教授, 主要从事沉积地质学教学和研究工作。

漠化<sup>[1,2]</sup>。1994年10月《联合国防治荒漠化公约》对荒漠化(Desertification)作了更全面的表述:“荒漠化是指在干旱、半干旱和亚湿润干旱地区<sup>①</sup>,由包括气候变化和人类活动在内的种种因素而导致的土地退化过程<sup>[3]</sup>”。该表述将气候变化和人类活动作为沙漠化的主导因素予以强调,同时辅以“种种因素”表明沙漠化成因的复杂性,给出了荒漠化产生的背景条件和分布范围,即干旱、半干旱和亚湿润干旱地区,将荒漠化置于全球土地退化的框架内,包括风蚀、水蚀和次生盐渍化等多种因素的环境退化过程。

沙漠化(Sand desertification)是风蚀作用下的荒漠化,是指在干旱、半干旱和部分亚湿润干旱地区,由于气候变化和人类活动等因素作用下所产生的以风沙活动为主要标志的环境退化过程。其实质就是土地风蚀,出现流沙和产生沙漠的过程,也包括原来固定和半固定沙丘活化再度演变为流动沙丘的过程<sup>[2]</sup>。

朱震达等<sup>[3-6]</sup>指出:“沙漠化是在干旱、半干旱(包括部分半湿润)地区脆弱生态条件下,由于人类过度的经济活动,破坏了生态平衡,使原非沙漠的地区出现了以风沙活动为主要特征的类似沙质荒漠环境的退化。”他们将沙漠化发生的空间范围定为原非沙漠的地区,时间上是发生在有人类活动以来。在成因上,强调“沙漠”或“荒漠”主要以自然因素为主,而“沙漠化”和“荒漠化”则是潜在自然因素基础上的人为作用所致。

事实上,沙漠化是地球演化过程中的一种地质事件,它在内动力地质作用制约下与物理风化作用、风的地质作用和水循环等外动力地质作用相关联。沙漠化既可以发生在人类历史时期,也可以发生在地质历史时期。研究表明,国内外中生代以来广泛存在的古沙丘岩<sup>[7-12]</sup>就是古沙漠环境的产物,这种沙漠化完全是自然因素作用的结果。因此,沙漠化在空间上既可发生在原非沙漠地区,又可以发生在原系沙漠的地域<sup>[13-15]</sup>。原来固定和半固定沙丘的活化,地表由土壤层因地表环境的改变成为流动沙丘的过程无疑是沙漠化的一种重要类型。显然,沙漠化与沙漠这两个概念是紧密相关的,它们之间应该是一种因果关系。沙漠化是沙漠环境的产生和发展,是沙漠的形成和扩张过程,而沙漠就是沙漠化的最终结果。无论是初始沙漠化还是古沙丘活化,干旱缺水的自然环境因素和自然沙漠化过程总是第一位的,人为因素和人为沙漠化过程处于相对次要地位。

## 2 全球中纬度沙漠化进程分析

世界各大沙漠集中分布在北非、亚洲中部、北美中西部、西南非、澳大利亚和南美西南部6大区域,分别构成南北半球的两条中纬度近纬向沙漠带<sup>[16]</sup>。这两条沙漠带位于南、北纬 $15^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 之间的亚热带干燥气候带,或位于温带内陆地区,如中亚、我国西北和美国西部等。后者由于深居内陆,远距海洋,特别是四周高山阻止了海洋湿润气流的伸入,形成了温带内陆干旱区。

20世纪80年代以来,全球沙漠发展速度非常迅速。近年来,撒哈拉沙漠每年向南推进万余 $\text{km}^2$ ,每年印度和巴基斯坦的塔尔沙漠的扩大使数万公顷的肥沃土地沦为沙漠。据联合国环境规划署1992年估计,从1984年到1991年,全球沙漠化土地增长了 $3.4\%$ <sup>[3]</sup>。我国是世界沙漠分布最多的国家之一。从西北,经华北北部到东北西部形成一条南北宽

① 根据《联合国防治荒漠化公约》的界定,“干旱、半干旱和亚湿润干旱地区”是指湿润系数(也称干旱指数 $AI = P/ETP$ ,P为年降水量,ETP为年潜在蒸散量)在0.05至0.65之间的地区,但不包括极区和副极区。

600 km、东西长 4000 km 的弧形沙漠带,面积达 70 多万  $\text{km}^2$ 。1950s ~ 1970s 中期、1970s 中期 ~ 1980s 中期和 1980s 中期 ~ 1990s,沙漠化土地年均增长率分别为 1.01%、1.47% 和 1.75%。统计数据表明,1990s 以来,土地沙漠化推进速率已发展到每年 2460  $\text{km}^2$ 。

由此可见,中纬度地区的沙漠化是一种全球趋势,中国的沙漠化是这个全球沙漠化进程的一个组成部分。尽管人类活动大大加剧了沙漠化进程,但沙漠化首先是地球演化过程中的自然现象。沙漠化地质作用是一种缓慢过程,更难以用人类的时间尺度和普通的思维方式来理解,因而往往容易被人们所忽视。但是,这种自然过程是长期性的,具有自身周期性和趋势性,它决定着包括地表在内的整个地球的演变进程。

对古沙丘或沙丘岩的研究表明,世界各大沙漠经历漫长的地质演变过程中,都有原来曾经存在的历史。随着全球性气候变化,沙漠也相应地发生扩张和收缩。撒哈拉沙漠是一个典型的例子<sup>[3,16]</sup>。在 20 Ma 前(早中新世)左右,北非就存在一个充分发育的沙漠区,末次冰期的极盛时期(大约 20 000 ~ 18 000 a 前),出现了最大干燥期,撒哈拉沙漠的活动加强了,当时沙漠的南边界线纬度比现在的界线南移了  $6^\circ$ ,达 450 km 之远。在 20 世纪 60 年代末到 70 年代初发生干旱时,撒哈拉沙漠界线向南移动了几百千米,热带稀树草原有些地方已经消失了。

这表明,气候变化是影响沙漠形成演变的主要因素。观测资料表明:近几十年来,我国北方地区的气候有明显的干旱化趋势,地表湿润指数和土壤湿度明显变小。多个全球气候模式以及区域模式的分析结果表明,未来几十年内,在全球变暖的影响下,北半球中纬度内陆地区,降雨量变化不大,但温度显著增高,地表蒸发加大,土壤变干<sup>[17]</sup>。全球已进入一个新的百年干旱期,中国北方地区的干旱化只是其中的一个响应。

### 3 地质演化历史中沙漠化事件分析

沙漠化本身是一种地质作用过程,它的发生发展将留下其特有的产物,运用地质学“将今论古”思维方法,可以通过地史时期的物质记录来探索地质历史。沙漠的发育与消亡受气候等因素制约。当气候变为温暖潮湿时,降水增多,植被生长,表层逐步土壤化,沙丘沙被掩埋甚至胶结成为沙丘岩。古风成沙或风成砂岩常与河湖相沉积物构成韵律层,它们是沙漠兴衰变迁的见证者。因此,研究地层中的风成沙质沉积物或沙丘岩,是探索沙漠发生发展最为直接可靠的标志。古沙丘岩中的层理产状还是恢复古风向的直接依据。本文力图通过古沙丘岩的综合分析与研究,来探讨地质历史时期的沙漠形成问题。

#### 3.1 国外古沙漠分布

国外沙丘岩研究论著较多,以美国西部的研究最为深入,已恢复的古沙漠最早见于寒武纪,古生代以来各个地质时期都有分布<sup>[7]</sup>。

#### 3.2 白垩纪鄂尔多斯古沙海

我国已报道的古代风成沙丘最早见于侏罗系<sup>[8]</sup>,而下白垩统风成砂岩则广泛分布于塔里木盆地西南、鄂尔多斯盆地、甘肃靖远等地<sup>[10~12]</sup>。可见,中国的沙漠形成和演化,从中生代中期就开始了,比人们常认为的始于第三纪末和更新世初<sup>[3]</sup>要早得多,更不应该把沙漠化限定为人类活动的结果。

上述三地的沙丘岩在层理构造、粒度分布和砂粒表面显微特征等方面表现出惊人的相似性,并与现代内陆沙丘沙特征基本一致,表明白垩纪以来以风为主的外动力作用及其产物

具有很好的一致性。鄂尔多斯志丹群沙丘岩发育大型交错层理,以细砂组分为主,砂粒磨圆度高,分选性好,与现代毛乌素沙漠砂主要特征一致。砂粒表面常见风沙撞击坑,普遍发育褐色氧化铁被膜。据李孝泽等<sup>[11]</sup>研究,这套沙丘岩广泛分布于鄂尔多斯高原及其临近地区,以毛乌素沙地为核心,向北伸入库布齐沙漠之下,向南伏于黄土高原之下,东西宽约300 km,南北长约600 km,总面积达 $18 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。在纵向上,多层沙丘岩与多层河湖相沉积构成互层状多旋回沉积。沙丘内部未见类似现代固定型沙漠沙丘内的古土壤痕迹,反映了古沙丘流动性强,植被影响微弱。斜层理反映的主风向是变动的,表现为北风和东风的交替作用。这套沙漠沉积体系表明,早白垩世存在一个巨大的鄂尔多斯沙海。董光荣等<sup>[18]</sup>曾根据古风成砂和风成岩的时空分布论证了在晚白垩世时期,我国大陆存在一条断续横贯西北-东南的宽阔红色沙漠带。因此,古鄂尔多斯沙海可能在白垩纪时期持续存在。

### 3.3 毛乌素沙漠南界五十万年进退史

相对于白垩纪鄂尔多斯古沙海而言,现代毛乌素沙漠可谓是小巫见大巫了。在人类历史时期,该区还可能经历过非沙漠发展阶段。据史籍记载,在十六国至南北朝时期,毛乌素是一片“水草丰美,景物宜人”、“青山绿水”的好地方,流沙主要是唐代以后大规模开垦等人为活动影响逐渐发展起来的<sup>[19,20]</sup>。一些学者据此断定人类是沙漠化的导致者。

董光荣等<sup>[21]</sup>对鄂尔多斯地区及毛乌素沙地进行第四纪地质调查时,发现数层第四纪古风成沙与黄土及古土壤构成互层沉积系列,其分布范围在鄂尔多斯南缘和东缘均已超过现今沙漠的范围。这表明鄂尔多斯地区毛乌素沙漠化在有史记载以前第四纪时期就已断续存在。孙继敏等<sup>[22]</sup>进一步在位于沙漠-黄土边界带的石峁剖面进行研究,发现在覆于中生代砂岩之上的76.7 m厚的沉积物中,有13层古风成砂,最老的风成砂约形成于0.5 Ma B. P.。毛乌素沙漠直接与黄土高原相接,两者过渡区的风成砂是在毛乌素沙漠南侵时堆积下来的,代表了极为干旱的气候条件,古土壤是沙丘被植被固定后发育的,代表了湿润的气候条件,沙漠北退,黄土则代表了一种介于两者之间的气候条件。由此可见,毛乌素沙漠在五十万年来至少有13次大规模的沙漠南侵。毛乌素沙漠几经扩张与退缩、活化与固定的正、逆变迁过程,而人类历史时期以来出现的沙漠化,只是沙漠长期演变过程中新近经历的一个发展阶段。

## 4 沙漠化成因及其地质作用过程

### 4.1 沙漠化成因

对于沙漠化成因,目前争论的焦点是,沙漠化过程究竟有多少是自然因素所致,多少则是人类活动所为。持人为作用观点者<sup>[3,19,23-26]</sup>以沙漠化只发生在人类历史时期为前提,强调沙漠化的成因是以人类活动为主要因素,人是沙漠化的导致者。其主要例证是毛乌素地区的流沙主要是唐代以后大规模开垦等人为活动影响逐渐发展起来的。另有学者<sup>[13,27]</sup>则认为,沙漠化并不是人类活动的唯一和必然结果。

人类出现最早可上延到300万年,但在5000年前,人类改造自然的能力很弱,总体上处于与大自然和谐相处阶段。我们认为,沙漠的发展史是以数亿年计的,在地质历史时期的沙漠化和沙漠的变迁是一种“纯”自然的过程,即气候-地貌过程。在人类历史时期,自然环境条件的变化仍居首位,即气候变化导致的旷日持久的干旱是沙漠化的主导因素。

从地质演化进程而言,导致沙漠化发生与发展的基本条件,一是气候背景,即干旱气候

条件,二是物质基础,即丰富的沙源条件。在沙漠化的具体发展过程中还会参与诸多复杂因素的约束,其中包括人类活动的作用。在地质历史时期和人类历史时期都有沙漠扩张与退缩、活化与固定的正、逆变迁过程,正是地球各圈层多旋回耦合与解耦的动态反映。

因此,从全球变化的角度可将沙漠系统视作一种类生命的非线性动力系统。沙漠化缘于地球表层系统各圈层之间复杂的相关与耦合作用。其中,气候变化是控制沙漠进退的首要因素,陆表水持续亏损则是导致干旱、半干旱地区沙漠化发展的直接原因。岩石圈构造运动塑造了不同的地形地貌单元,也就奠定了沙漠分布的地理格局。而由于人类的不当活动和气候变化引起的生物生产力的衰退及土地覆盖的破坏,则对现代沙漠化的快速扩张负有不可推卸的责任。

#### 4.2 地球外部圈层对沙漠化的影响

大气圈的干湿变化是控制沙漠化正逆过程的首要因素。持续干旱是沙漠化正过程的必要气候背景。董光荣等<sup>[15]</sup>从第四纪不同时间尺度上提出中国北方沙漠化的成因观点:①更新世时期万年以上尺度沙漠化正逆过程的主要原因是地球轨道要素控制的全球气候变化;②全新世时期千年和百年尺度沙漠化正逆过程主要是气候干湿波动主宰,人类活动在气候变化基础上起着一定的加速、加剧作用;③现代时期数十年至数年尺度的沙漠化正逆过程,则是在脆弱的生态系统与气候干湿波动、人类活动与气候变化、人类活动与沙漠化土地之间复杂的相互反馈作用下形成的。沙漠化的加剧反过来又会影响气候变化<sup>[28,29]</sup>。因为沙漠化地区的湿度小,很少的水分可供太阳能蒸发,多余的太阳能只有通过加热地表和低层大气达到辐射平衡。与此同时,沙漠化地区大气中的浮尘及扬沙吸收太阳能或反射太阳能,使得大气层垂向温差减小,导致降雨减少而进一步加剧干旱的趋势。这表明沙漠化过程中地表与气候系统之间存在着双向耦合的关系,气候的变化与沙漠的进退在一定程度上是互相制约的。

在生物圈中,植被对沙漠化的影响具有直接与间接两方面。其直接作用是防风固沙,遏制沙漠的扩展;其间接影响是通过气候—植被相互作用,实现对气候干湿变化的调节。植物在进行光合作用时可消耗大量的 $\text{CO}_2$ ,这无疑对缓解温室效应,减慢全球气候变暖速率具有重要意义。植被演替阶段往往与沙漠化程度互为前提<sup>[30]</sup>。植被的退化既是沙漠化的原因又是沙漠化的后果。人类活动对沙漠化的影响主要表现在不合理利用土地,过度开垦、过度放牧和滥用水资源导致气候干旱和水土流失。中国在远古时代,森林覆盖率曾达49%,到80年代初,因过量砍伐而降至12%以下,损失森林达 $3/4$ <sup>[31]</sup>。森林急剧减少的结果同时造成了土地退化和气候系统失衡,从而加剧了现代沙漠化的发展趋势。

水圈对生态系统的影响是最直接的<sup>[32]</sup>。陆表水持续亏损是造成沙漠化的根本原因之一。在干旱、半干旱地区,陆表水资源主要由地下水和地表水组成,其中地下水对沙漠化的进程具有更加重要的控制作用。水的影响首先表现为潜水面面对风蚀作用的制约。Nash<sup>[33]</sup>在研究地下水与风沙作用过程时指出,由于孔隙水的表面张力作用,靠近潜水面附近的湿润沙粒粘合力增大,不易被风力吹移。贺大良等(1988)所作的风洞试验也表明,只有在沙的含水率小于1%时,沙粒才能起动。而在这种情况下,风总是先吹干地面,再将沙粒吹离地面产生迁移<sup>[3]</sup>。另外,较高的潜水面在强蒸发作用下,有助于胶结物聚集形成胶结硬化层,抵御风蚀作用。因此,潜水面也是沙漠区的风蚀基准面。

#### 4.3 岩石圈构造与演化对沙漠化的控制作用

#### 4.3.1 地貌影响气候和风化作用类型

干旱气候是沙漠形成的动力条件,而地壳运动形成的各种构造地貌直接影响着气候系统,从而间接地控制沙漠化进程。温带内陆沙漠的形成,是由于这些地区四周高山阻隔,海洋湿润气流难以进入,造成干旱少雨、植被稀少,风化作用主要表现为物理风化(机械破碎),化学风化和生物风化非常微弱。青藏高原的隆升对东亚乃至世界的气候格局带来重大影响<sup>[34]</sup>。刘晓东<sup>[35]</sup>认为新生代以来中亚和北非之所以都经历了长期的干旱化过程,主要是由于青藏高原隆升造成的,特别是高原隆升的晚期,地形的差异增加导致干旱化程度明显加剧。我国塔克拉玛干沙漠正是青藏高原隆升的构造背景下,受构造—气候系统的耦合作用发育形成的一个典型范例<sup>[36]</sup>。

#### 4.3.2 岩石的风化特性影响沙源

丰富的沙源是沙漠形成的物质基础,气候干旱但无沙源的地方不会形成沙漠。沙源的积聚除与地形地貌有关外,地表出露岩石的风化特性也是重要因素。不同岩石类型有不同的风化反应。陆源碎屑岩、花岗岩及其相应变质岩类在经受物理风化过程中易于破碎成沙粒,而碳酸(盐)岩类的破碎产物难以长期搬运或磨蚀,它们极易化学溶解而流失。

#### 4.3.3 地壳演化直接控制沙漠的分布与演化

高原与盆地的分布是地壳长期演化的结果,新构造运动铸就了现今大陆构造格局。因此,岩石圈对沙漠化的影响最主要表现在地壳运动对沙漠化发生与演化的控制。构造运动塑造了沙漠盆地的宏观格局,包括形态、走向和规模。地壳的升降控制着沙漠形成过程中的剥蚀、搬运与沉积作用,决定着沙漠内部河流水系、冲积平原或洪积扇等地貌景观。从这一意义上讲,构造运动对沙漠形成具有奠基性作用。

Rendell<sup>[37]</sup>把世界上的沙漠划分五种构造类型:克拉通型、活动大陆边缘及新生代造山带型、古老造山带型、克拉通之间或造山带之间型、被动大陆边缘型。如澳大利亚沙漠属克拉通型,而中国的几大沙漠主要是古老造山带型。

#### 4.3.4 岩石圈内部热流可能是干旱气候的主要控制因素

岩石圈对干旱沙漠化的作用可能还有更深层次的内涵。地球作为一个开放的自组织系统,各个圈层在自身运动变化的同时,彼此发生物质与能量的交流<sup>[38]</sup>。从地球和其它行星的早期演化史中可清楚地看出岩石圈与大气圈的相互作用,而这种相互作用从未停止过。孙国武<sup>[39]</sup>研究发现,近百年来气候干旱有从非洲向亚洲扩展趋势,干旱向东扩展的速度为400.7 km/a。全球特大地震的迁移优势方向也为由西向东,迁移速度为670 km/a<sup>[40]</sup>。马宗晋<sup>[40]</sup>指出,近代地震与干旱定向迁移方向 and 速度的一致性表明,发生在大气圈的现象和发生在岩石圈的现象并不是彼此无关的,两类现象存在共同的动力源。他认为这种动力源来源于地球深部热流体。深部热流体上涌使地温升高,进而影响大气环流异常,导致一些地区干旱。汤懋苍<sup>[41]</sup>也认为短期气候变化的根本原因在地球的固体部分,地壳上升中心区是地热流的密集区,气候变化与地壳内部物质运动和变化有关。看来,岩石圈在全球变化和沙漠化过程中可能具有根本性的作用与意义。

### 4.4 沙漠化地质作用过程

沙漠化是一个漫长的地质演化过程,大致可划分为3个阶段,即物理风化与沙源积聚阶段、风沙作用阶段和沙漠化阶段。沙漠期后沙丘沙经过固化生草、胶结成岩阶段后即形成风

成砂岩。5个阶段的基本特征简述如下:

(1)物理风化和沙源积聚阶段。在干旱、半干旱地区,降雨量低、高蒸发率。温度的日变化和季节变化都很大,植被稀少,风力作用强,因而风化作用强烈,且主要表现为机械破碎。地表堆积有大量残积-坡积碎屑物,或偶然降落的暴雨可将风化沙搬运到低洼处积累成层。特别是在高原山间盆地,具有该阶段长期发展的条件。在山间盆地四周的高山上,气候严寒,冰雪皑皑,昼夜温差大,极易使山地岩石风化破碎。间歇性的冰雪融水可将碎屑物搬运到盆地中形成河湖沉积物,为日后的沙漠化提供丰富的沙源。而盆地山麓地带则常常是被切割的裸露基岩(岩漠)或砾石遍布的戈壁(砾漠)。

(2)风沙作用阶段。风沙作用包括风和风沙流对地表物质的侵蚀、搬运和堆积作用。风沙流就是含沙的气流,它是沙粒在风力作用下的运移过程。

我国《气象观测规范》<sup>[42]</sup>将沙尘天气分为浮尘、扬沙和沙尘暴3个等级。浮尘是指在无风或风力较小的情况下,尘土、细沙均匀地悬浮在大气中,使水平能见度小于10 km;扬尘是由于风力较大,将地面沙尘吹起,使空气相当混浊,水平能见度在1~10 km之间;沙尘暴则是指强风将地面大量沙尘卷起,空气特别混浊,水平能见度小于1 km。强烈的沙尘暴可使地面水平能见度低于50 m,俗称“黑风”。

沙尘主要是来源于干旱、半干旱地区沙漠沉积中的微小颗粒,或飘浮在空中或沉降于地表<sup>[43,44]</sup>。Bagnold<sup>[45]</sup>认为,沙尘粒径一般小于0.08 mm,传输距离在数km~100 km的沙尘粒径则小于0.02 mm,而Jackson<sup>[46]</sup>等人认为在0.002~0.01 mm之间,这种沙尘能在对流层中以气溶胶状态悬浮数天甚至一周以上。叶笃正等<sup>[17]</sup>认为我国北方沙尘颗粒粒径多在0.063~0.002 mm之间。沙尘粒径与风力性质有关。地面沙尘的起动取决于风、土壤或沉积物性质以及地表障碍等要素。土壤的泥沙比、湿度、沉积物的压实程度以及表面板结程度均影响沙尘的起动。最有利于起尘的地表层当然是荒芜、松散、沙多泥少的沉积层。从地貌单元来看,洪积平原、干河谷、干盐湖、活动沙丘、黄土等地带往往是沙尘的重要源区<sup>[47]</sup>。

风沙作用在沙漠或沙化地区易于发生,两者之间有着十分密切的联系。风沙作用把地面沉积物中的细粒部分剥蚀并搬运走,使地面逐渐沙化(水土流失也起到加速作用),进一步发展可发生原地沙漠化;另一方面,风沙作用又是沙丘移动导致沙漠迁移的驱动力。

(3)沙漠化阶段。在干旱气候区,物理风化产生的残积物、坡积物、松散沉积层和古沙丘,经过风和风沙流作用下,发生剥蚀、搬运和沉积作用。风沙堆积形态有沙流(或沙影)、沙盖和沙丘。当风沙堆积厚度较大,构成连绵起伏的沙丘时,就发展成为沙漠了。

吴正<sup>[16]</sup>根据植被特点、地面物质组成和地貌形态,将沙漠化程度分为潜在沙漠化、轻度沙漠化、中度沙漠化和强度沙漠化4类,从地表斑点状流沙到密集的流动沙丘大面积分布。

(4)固化生草阶段。气候温暖潮湿时,降水相对增多,风沙活动减弱,流沙趋向稳定,植被生长迅速,表层逐步土壤化。如果雨量充沛持续时间长,地下水位将会上升,以致在丘间区域汇集成湖泊或沼泽地。

(5)胶结成岩阶段。当上覆沉积层增厚时,较深处的沙丘沙将经历压实、胶结成岩作用形成沙丘岩。沙丘岩往往呈红色,这是由于岩石中石英颗粒表面普遍染有红色氧化铁所致。在后期暖湿气候条件下,或间歇性河湖覆盖时,地表水沿空隙度较高的沙体下渗,有利于水解作用使含铁硅酸盐矿物释放出铁质,浸染在石英颗粒表面上。水溶液中的铁质与少量钙质及由长石、云母等矿物风化形成的粘土矿物一起对砂粒起着胶结作用,中生代以来的沙丘

岩一般胶结较松散。气候环境的周期性变化,盆地相对周边下陷,地层加积过程中河流的摆动,会导致风成砂岩与河湖相沉积物构成韵律层,这是鉴别古沙漠环境的特殊沉积组合。

## 5 结论与讨论

(1)在地质演化历史中,大规模沙漠化从岩石记录中可以追溯到中生代中期,美国西部在早古生代就有古沙漠存在。第四纪以来,南北两半球各存在一条近纬向沙漠带,这些地区或位于南、北纬 $15^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 之间的亚热带干燥气候带,或位于四周高山阻隔,远距海洋的温带内陆干旱区。因此,中纬度地区的沙漠化呈现出一种全球化趋势,中国的沙漠化是全球沙漠化进程的一个组成部分。

(2)自然条件失衡是荒漠化(包括沙漠化)的根本条件,它不仅提供荒漠化演化驱动力,而且控制和影响了土壤质地的改变。水蚀与风蚀作用是荒漠化主要驱动力,失水少雨是荒漠化发育的最基本条件。

(3)沙漠化是一个漫长的地质演化过程,需经历物理风化与沙源积聚阶段、风沙作用阶段和沙漠化阶段。沙漠期后沙丘沙经过固结生草、胶结成岩阶段后即形成风成砂岩。

(4)沙漠化作为在地质演化过程中受内、外动力地质作用联合控制的地质事件,是岩石圈与大气圈、生物圈和水圈强烈作用在地壳表层特殊(异常)的地质现象。这种演化是漫长和具有周期性的,不会因为局部的条件变化而发生整体意义上的突变。

(5)在以自然营力为主的沙漠化演化过程中,人为因素可以在局部范围起到加快和缓解沙漠化进程的作用。围绕21世纪资源环境与可持续发展,人们普遍关注的是人类活动对于沙漠化的影响,这对于合理利用土地和水资源、规范人类行为,学会与大自然和谐共处,实现社会经济可持续发展都具有积极意义。鉴于近几十年来,我国北方地区气候有明显的干旱化趋势,而在全球增暖的影响下,未来几十年都会受到进一步干旱的威胁,因而必须做好北方地区科学的还林还草工作,大面积提高植被覆盖率,减缓沙漠化进程,减轻和防止强沙尘天气对北京等重要城市的影响。

## 参考文献

- [1] Aubreville A. Climats, Forêts et désertification de l'Afrique tropicale [M]. Paris: Soc d'éditions géographiques maritimes et coloniales, 1949.
- [2] 吴正主编. 地貌学导论 [M]. 广州: 广东高等教育出版社, 1999: 131-153.
- [3] 朱俊凤, 朱震达. 中国沙漠化防治 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1999: 1-8, 72, 457-461.
- [4] 朱震达, 刘恕. 关于沙漠化的概念及其发展程度的判断 [J]. 中国沙漠, 1984, 4(3): 2-8.
- [5] 朱震达. 中国土地荒漠化的概念、成因与防治 [J]. 第四纪研究, 1998, 2: 143-155.
- [6] 朱震达, 崔书红. 中国南方的土地荒漠化问题 [J]. 中国沙漠, 1996, 16(4): 331-337.
- [7] M. L. Porter. The sand - desert deposit stratigraphy [J]. Geology, 1986, 14: 497-500.
- [8] 任明达, 王乃梁. 现代沉积环境概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1981: 115-126.
- [9] 刘宝珺, 曾允孚主编. 岩相古地理基础和工作方法 [M]. 北京地质出版社, 1985: 94-96.
- [10] 陈荣林, 朱宏发, 陈跃, 等. 塔里木盆地西南拗陷下白垩统风成砂岩的发现及其意义 [J]. 科学通报, 1994, 39(1): 58-60.
- [11] 李孝泽, 董光荣, 靳鹤龄, 等. 鄂尔多斯白垩系沙丘岩的发现 [J]. 科学通报, 1999, 44(8): 874-877.
- [12] 佟再三. 甘肃靖远白垩系风成砂岩特征 [J]. 兰州大学学报, 1989, 25(4): 113-117.
- [13] 吴正. 浅议我国北方地区的沙漠化问题 [J]. 地理学报, 1991, 46(9): 266-275.

- [14] 董光荣,金炯,申建友,等. 晚更新世以来我国陆生生态系统的沙漠化过程及其成因[A]. 刘东生,黄土. 第四纪地质. 全球变化(2)[C]. 北京:科学出版社,1990.91-111.
- [15] 董光荣,靳鹤龄,陈惠忠,等. 中国北方半干旱和半湿润地区沙漠化的成因[J]. 第四纪研究,1998,2:136.
- [16] 吴正. 风沙地貌学[M]. 北京:科学出版社,1987:1-17,210-265.
- [17] 叶笃正,丑纪范,刘纪远,等. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策[J]. 地理学报,2000,55(5):513-521.
- [18] 董光荣,王贵勇,陈惠忠,等. 中国沙漠形成、演化与青藏高原隆升的关系[A]. 见:中国青藏高原研究会编. 中国青藏高原研究论文集[C]. 北京:气象出版社,1995:13-29.
- [19] 侯仁之. 从红柳河上的古城废墟看毛乌素沙漠的变迁[J]. 文物,1973,1:35-41.
- [20] 史念海. 两千三百年来鄂尔多斯高原和河套平原农林牧地区的分布及变迁[J]. 北京师范大学学报(哲学社会科学版),1980,6:1-14.
- [21] 董光荣,李保生,高尚玉,等. 鄂尔多斯第四纪古风成沙[J]. 地理学报,1983,38(4):341-347.
- [22] 孙继敏,刘东生,丁仲礼,等. 五十万年来毛乌素沙漠的变迁[J]. 第四纪研究,1996(4):359-365.
- [23] 朱震达,刘恕,邱醒民. 中国的沙漠化及其治理[M]. 北京:科学出版社,1989.1-109.
- [24] 朱震达,王涛. 中国沙漠化研究的理论与实践[J]. 第四纪研究,1992,2:97-106.
- [25] Dregne H. Desertification – present and future[J]. International Journal for Development Technology,1984,2:255-259.
- [26] 孙继敏,丁仲礼. 中国东部沙区的荒漠化过程与起因[J]. 第四纪研究,1998,2:156-163.
- [27] 吴正,钟德才. 中国北方地区沙漠化的现状与趋势之窥见[J]. 中国沙漠,1993,13(1):9-13.
- [28] 董光荣,申建友,金炯. 试论全球气候变化与沙漠化的关系[J]. 第四纪研究,1990,1:91-98.
- [29] UNCCD. Desertification, global change and sustainable development[J]. Desertification Control Bulletin,2000,20: Fact Sheet 2,10.
- [30] 吴薇. 沙漠化遥感动态监测的方法与实践[J]. 遥感技术与应用,1997,12(4):73-89.
- [31] 毛文永,文剑平. 全球环境问题与对策[M]. 北京:科学出版社,1993:36-56,134-170.
- [32] 卢耀如. 岩溶水文地质环境演化与工程效应研究[M]. 北京:科学出版社,1999:16.
- [33] Nash D J. Groundwater as a geomorphological agent in dryland[A]. Thomas D S. Arid Zone Geomorphology[C]. New York:John Wiley & Sons Ltd. 1997:319-348.
- [34] 施雅风,李吉均,李炳元. 青藏高原晚新生代隆升与环境变化[M]. 广州:广东科技出版社,1998:381-382.
- [35] 刘晓东,李力,安芷生. 青藏高原隆升与欧亚内陆及北非的干旱化[J]. 第四纪研究,2001,21(2):114-120.
- [36] 吴正. 中国沙漠与海岸沙丘研究[M]. 北京:科学出版社,1997:44-55.
- [37] Rendell H M. Tectonics frameworks[A]. Thomas D S. Arid Zone Geomorphology[C]. New York:John Wiley & Sons Ltd. 1997:13-22.
- [38] 高庆集,马宗晋,苏桂武. 环境、灾害与地学[J]. 地学前缘,2001,8(1):9-14.
- [39] 孙国武,俞亚勋,冯建英. 近百年来中国西北和亚非其他地区干旱的分析和诊断[A]. 见:孙国武主编. 中国西部干旱气候研究[C]. 北京:气象出版社,1997:7-15.
- [40] 马宗晋,杜品仁. 地震和干旱的定向迁移及其机制[J]. 第四纪研究,1999,5:397-403.
- [41] 汤懋苍,高晓清. 1980-1993年我国“地热洞”的若干统计特征-I;“地热洞”的时空分布[J]. 中国科学(B辑),1995,25(11):1186-1192.
- [42] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京:气象出版社,1979.22.
- [43] Pewe T L. Desert dust[J]. Geological Society of America,1981,Special Paper:186.
- [44] Prospero J M,Glaccum R A,Nees R T. Atmospheric transport of soil dust from Africa to south America[J]. Nature,1981,289:570-572.
- [45] Bagnold R A. The physics of blown sand and desert dunes[M]. London:Methuen,1941.
- [46] Jackson M L,Levett T W,Syers J K,et al. Geomorphological relationships of tropospherically derived quartz in the soils of the Hawaiian Islands[J]. Proceedings of the Soil Science Society of America,1971,35:515-525.
- [47] Yaalon D H. Saharan dust and desert loess: effect of surrounding soils[J]. Journal of African Earth Sciences. 1987,6:569-571.

## Research on geneses of sand desertification from dynamic geological processes

GUO Fu-sheng<sup>1 2</sup>, ZENG Ai-hua<sup>1</sup>, YE Zhang-huang<sup>1</sup>, CHEN Jian-ping<sup>2</sup>, DUAN Yi-chun<sup>2 3</sup>

(1 *East China Institute of Technology, Fuzhou 344000, China*)

(2 *China University of Geosciences, Beijing 100029, China*)

(3 *The Geological Museum of China, Beijing 100034, China*)

### Abstract

Rock records indicate that large-scale sand desertification dates back to middle Mesozoic Era, that there has existed a middle latitude sand desert zone in the south and north hemispheres respectively since Quaternary Period, and that sand desertification in China is a part of global sand desertification process. Sand desertification, controlled by internal and external dynamic geological processes in the geological evolution, is a special geological phenomenon imposed by the interaction of lithosphere, atmosphere, biosphere, and hydrosphere on the surface layer of the earth's crust. The evolution of sand desertification, which is long and periodic, won't undergo a sudden change in a whole sense because of partial condition change. Human activity is regionally restricted, serving as an accelerator in the global sand desertification. The process of sand desertification can be divided into 3 stages: physical weathering and accumulation of sand source stage; windblown and sandblast stage; sand desertification stage. The wind-formed sandstone was formed by the dune after solidification and cementation-diagenesis stages.

**Key words** sand desertification; dune rock; dynamic geological process; evolution model