

沙尘暴形成史初步研究 ——中国沙漠几个典型地质学记录的实证

李保生^{1,2}, 安芷生², 祝一志², 靳鹤龄³, 周卫健²,
董光荣³, 高尚玉⁴, 吕玉晓¹, 余雪飞¹, 高全洲⁵

(1. 华南师范大学 地理系, 广东 广州 510631;
2. 中国科学院 地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安 710075;
3. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000;
4. 北京师范大学 资源科学研究所, 北京 100875 5. 中山大学 地理系, 广东 广州 510275)

摘要 以位于沙漠-黄土边界带的榆林、阿羌和米浪沟湾地层剖面为典型例证, 讨论了1 100 ka B P以来中国沙漠沙尘暴的形成、发展和演化过程。提出在过去的1 100 ka中该区总共记录了42个沙尘暴时期, 并与41个间沙尘暴时期构成比较连续且交替进行的一系列沉积演化历史。其中, 最强烈的沙尘暴期发生时间大致在620 ka B P和680 ka B P前后, 最温暖的间沙尘暴期出现在590500 ka B P和15070 ka B P。研究认为, 1 100 ka B P以来因沙尘暴期与间沙尘暴期交替出现而形成的沉积旋回是自那时以来在冰期、间冰期气候波动影响下冬夏古代季风相互对峙、交替演化形成气候旋回的结果。

关键词 过去1 100 ka; 中国沙漠; 沙尘暴典型记录; 42次沙尘暴期; 41次间沙尘暴期; 演化历史; 成因

中图分类号 P531; P532; P931.3 文献标识码 A 文章编号 1005-2321(2002)03-0189-12

沙尘暴是一种常见的强对流天气现象。在松散的沙粒和粉尘富集的干燥地带, 当风速>5 m / s并持续增长时, 此种现象即应运而生。显然, 约占全球大陆三分之一、面积大致为4 800万 km²的广袤分布的世界干旱、半干旱区域^[1], 是滋生和堆积沙尘暴物质最为直接的自然地带。

我国是世界沙尘暴的多发国家之一。当今在世纪更替时, 从春季至春夏之交, 沙尘暴曾多次强烈地席卷了我国西北、华北、黄淮地区, 向东南更可驰至长江中下游流域之苏、皖、鄂、浙东各省区并以“浮尘”天气形式沉落^[2]。近几年来沙尘暴来势之猛、影响范围之大且造成的环境灾害之强, 遂使众说纷

纭, 对其未来形势更是迷惑难解。明了沙尘暴的物质来源、形成历史及其成因机制、并采取积极的防治措施, 不仅是科学意义上的事情, 亦是国家对环境和资源可持续发展战略规划过程中亟待解决的一个重大问题。

近半个世纪, 特别是最近20余年, 国内外学者从地质、古生物和古气候学等多学科角度进行的许多有关研究, 都隐含着沙尘暴形成历史的思想。包括将沙漠^[3]或者黄土^[4]作为一个独立地质体对其时代和演变过程所进行的探讨, 大洋中粉尘事件记录^[5]以及古代季风变迁^[6]的讨论等。直接探讨沙尘暴形成的历史过程则以最近几千年这一时段的研究较详。例如对近2 000 a以来10 a滑动的高分辨率降尘频数序列的建立^[7]、依据历史记录的风、尘、雨、旱等资料重建最近1 000 a来定量的气候序列和编制古环境事件年表^[8]以及通过冰芯中尘粒、δ¹⁸O记录恢复小冰期以来的干湿冷暖变化^[9]等。除此以外, 近年来有关学者还从未次间冰期黄土的堆积记录出发对沙尘暴进行了探讨^[10]。然而, 对于史前更长地质时期以来沙尘暴过程的直接讨论, 至今仍

收稿日期 2002-03-04, 修订日期 2002-05-13

基金项目 国家自然科学基金资助项目(49971009); 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室基金资助项目(SKLLQG0008); 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX2-SW-118)

作者简介 李保生(1951—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 多年来在中国干旱、半干旱地区从事晚新生代地质、地貌、沙漠形成演变和沙漠化及防沙治沙的科学考察与研究。

甚少见。这或许与沉积岩石学分类中一直没有明确定义沙尘暴所形成的关联沉积类型有关。事实上, 若从其发生机理和沉积学特征角度来看, 将沙漠与黄土视为沙尘暴事件长期历史过程的两个最明确的响应物是合宜的。而在这两个沉积单元的区域分野地带, 也即所谓沙漠—黄土边界带位置, 则是追索沙尘暴沉积序列进而探讨其形成史的理想之地。经过 20 多年来作者和同行对中国沙漠形成演变与气候变化的考察与研究, 认为就世界荒漠地区而言, 中国沙区具有较长地质时代且颇为完整的沙丘沉积学记录, 是研究沙尘暴形成历史的良好材料, 对其认识亦日臻成熟。下文将阐述我国沙漠—黄土边界带几个具有代表意义的第四纪地层剖面作为历史实证, 据此并结合有关研究结果对沙尘暴形成史提出一个初步看法。

1 中国沙区沙尘暴形成的历史实证

中国沙区(沙漠和沙地)及受风沙流影响的戈壁区域广泛分布于 $75^{\circ}\text{--}125^{\circ}\text{E}$ 、 $35^{\circ}\text{--}50^{\circ}\text{N}$ 的北方内陆盆地与高原, 其总面积约为 $1\ 282\ 400\text{ km}^2$, 其中沙漠、沙地和戈壁区域分别为 $710\ 000.29\text{ km}^2$ 和 $569\ 500\text{ km}^2$ ^[11], 形成一条西迄喀什噶尔、东迄东北平原西部、东西长 $4\ 500\text{ km}$ 、南北宽 600 km 的横亘

于中国北方的断续延展的风成沙质荒漠沉积带(图 1), 横跨极端干旱荒漠、干旱荒漠、干旱荒漠草原、半干旱干草原和半湿润森林草原 5 个生物气候亚带, 是我国中纬度脆弱生态区域的主要组成部分, 亦是沙尘暴易发散的主要策源地。大致从阴山山脉西端之狼山起, 北至中蒙国境、南经贺兰山、乌鞘岭、都兰、青海湖抵扎陵湖, 此界线以东的沙漠沙地称之为东部沙区。以西再以天山及其东支的博格达山为界, 其北和其南的沙漠分别称西北部沙区和西部沙区。弱水以东、狼山—贺兰山以西、河西走廊及其以北的沙漠系中部沙区。因东亚夏季风对东部沙区影响显著, 而其它几个沙区几乎难以受到此种风系波及, 故本文笼统将其分别以季风沙区和非季风沙区称之^[12]。

榆林和阿羌地层剖面分别记录了季风沙区 1 100 ka B P 和非季风沙区 770 ka B P 以来较为连续的万年尺度沙尘沉积系列, 可视为说明沙尘暴形成历史的两个代表性剖面。

榆林剖面位于鄂尔多斯高原毛乌素沙漠东南部边缘的沙漠—黄土边界地带(图 1), 榆林城以南约 17 km 的罗家塬蔡家沟, 地理坐标大致在 $109^{\circ}32'\text{E}$, $38^{\circ}07'\text{N}$ 。该地塬面海拔高度约 $1\ 200\text{ m}$, 沟深 100 m 之多, 沟底出露侏罗纪灰绿色砂页岩, 其上覆第四纪堆积近 100 m 。剖面共计 46 层, 在早更新世

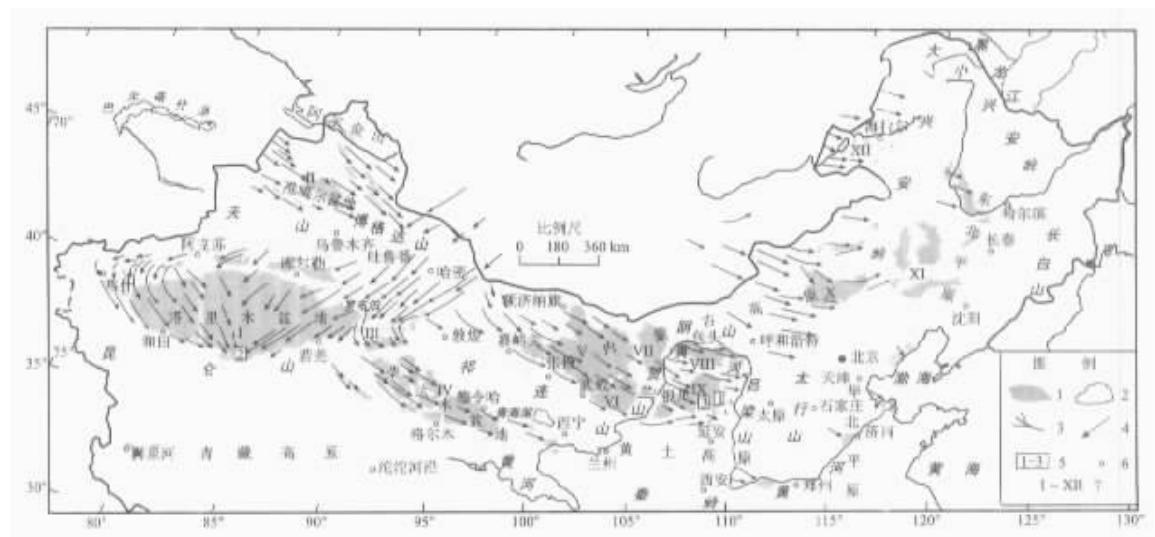


图 1 中国沙区分布及本文中有关地层所在位置

Fig. 1 Distribution of the deserts and sandy lands in China and locations of the sections concerned in the paper

1—沙漠或沙地 2—湖泊 3—河流 4—冬季风盛行方向 5—地层剖面所在位置(图中方框内 1、2、3 分别是榆林、阿羌和米浪沟湾地层剖面) 6—城市 7—中国沙漠和沙地: I. 塔克拉玛干沙漠; II. 古尔班通古特沙漠; III. 库姆塔格沙漠; IV. 柴达木沙漠; V. 巴丹吉林沙漠; VI. 腾格里沙漠; VII. 乌兰布和沙漠; VIII. 库布齐沙漠; IX. 毛乌素沙漠; X. 浑善达克沙地; XI. 科尔沁沙地; XII. 呼伦贝尔沙地
万方数据

胶结砾石层 45 G 之上含 18 层风成砂、8 层黄土和 18 层古土壤, 三者相互叠覆, 沉积基本连续(图 2)。在数千米范围内, 榆林剖面风成砂在地层走向上有时可见相变为砂质黄土, 数层古土壤叠合为一。后一种现象以 8S—12S 和 20S—24S 层序表现明显。两者均含 3 层棕褐色土, 其间为风成砂或黄土, 在水平方向分别都合并为一厚度较大的复合型古土壤。此外, 在褐色土、黑垆土和固定-半固定砂丘层中还不同程度地含有植物根系、根管; 风成砂层的古砂丘构造形态明显, 具有显著的风成加积纹层、前积纹层和扫描电镜下呈现的由风暴撞击作用形成于石英颗粒表面的碟形坑等^[16]。

根据野外观察和对粒度分析资料的研究, 作者^[17]曾将榆林剖面的风成砂层按沉积类型划分为现代流动沙丘(1MD), 古流动砂丘(2D, 4D, 6D, 13D, 19D, 25D, 28D, 31D, 33D, 44D)和古固定-半固定砂丘(9FD, 11FD, 15FD, 23FD, 35FD, 40FD, 42FD)。由图 2 不难看出, 风成砂丘层尤其是古流动砂丘是该剖面最为显著的岩性和沉积相特征, 其次是古土壤(3S, 8S, 10S, 12S, 14S, 16S, 18S, 20S, 22S, 24S, 27S, 30S, 32S, 34S, 36S, 38S, 41S, 43S)和黄土(5L, 7L, 17L, 21L, 26L, 29L, 37L, 39L)。古流动砂丘层中粉砂和粘粒成分缺乏, 所含粗砂(1-0.5 mm)亦甚少。以 Md(中位数)或者颗粒众数为依据, 分为以中砂(0.50-0.25 mm)细砂(0.25-0.1 mm)和极细砂(0.10-0.05 mm)3 种流动砂丘层。古固定-半固定砂丘主要由粉砂质细砂和粉砂质极细砂组成, Md 显示为细砂-极细砂, 但粗粉砂(0.050-0.01 mm)细粉砂(0.01-0.005 mm)和粘粒(<0.005 mm)含量亦占一定比例。此外, 根据岩性和粒度分析, 古土壤还可以进一步分为砂质古土壤和粉砂质古土壤。

据刘椿(1984)和高尚玉(1991)的磁性年代研究结果^[13], 榆林剖面风成砂、黄土-古土壤序列的下限为 1 100 ka B.P.。这是迄今已知最早时间的一个比较完整的沙漠沉积演化序列(表 1)。

阿羌地层剖面位于塔克拉玛干沙漠南缘亚砂土带与昆仑山北麓黄土带的交界位置(见图 1), 新疆于田县阿羌乡西南约 4 km, 81°56' E, 36°28' N, 海拔高度约为 2 420-490 m。剖面总厚 72.5 m, 含 29 层黄土(粉砂)、12 层亚砂土(粉砂质极细砂)、2 层砂砾石层和 1 层生草层(见图 2)。其中黄土与亚砂土主要系风成的沙尘堆积, 厚度达 66.20 m, 覆于由早更

新世西域组冲洪积砂砾石构成的 T₃ 阶地上。

表 1 榆林剖面记录的沙尘暴阶段(St)和古土壤及其与阿羌和洛川剖面堆积序列对比

Table 1 Sand-dust storm stages(St) and paleosoils recorded in Yulin section and their correlation with the depositional sequences in Aqiang and Luochuan sections

榆林剖面与万年尺度沙尘暴阶段(St)	阿羌剖面 ^[18]	洛川剖面 ^[14]	时间 t/(ka B.P.)
3S	1PE	S ₀	11
4D+5L+6D	2A-27A	L ₁	80
8S+7L		S ₁₋₁	
9FD	28G-29FGL	S ₁₋₁ /S ₁₋₂	
10S		S ₁₋₂	
11D	28G-29FGL	S ₁₋₂ /S ₁₋₃	
12S		S ₁₋₃	140
13D-St28	30SL	L ₂	200
14S	31FGL	S ₂	245
15FD-St29	32SL	L ₃	305
16S	33FGL	S ₃	352
17L-St30	34SL	L ₄	412
18S	35FGL	S ₄	435
19D-St31	36SL	L ₅	498
20S		S ₅₋₁	
21L-St32	37FGL	S ₅₋₁ /S ₅₋₂	
22S		S ₅₋₂	
23FD-St33		S ₅₋₂ /S ₅₋₃	
24S		S ₅₋₃	589
25D+26L-St34	38SL	L ₆	620
27S	39FGL	S ₆	647
28D+29L-St35	40A+41SL	L ₇	678
30S	42FGL	S ₇	714
31D-St36	43A	L ₈	752
32S		S ₈	782
33D-St37		L ₉	860
34S		S ₉	882
35D-St38		L ₁₀	900
36S		S ₁₀	940
37L-St39		L ₁₁	963
38S		S ₁₁	970
39L+40FD-St40		L ₁₂	990
41S		S ₁₂	1 004
42FD-St41		L ₁₃	1 035
43S		S ₁₃	1 045
44D-St42		L ₁₄	1 088

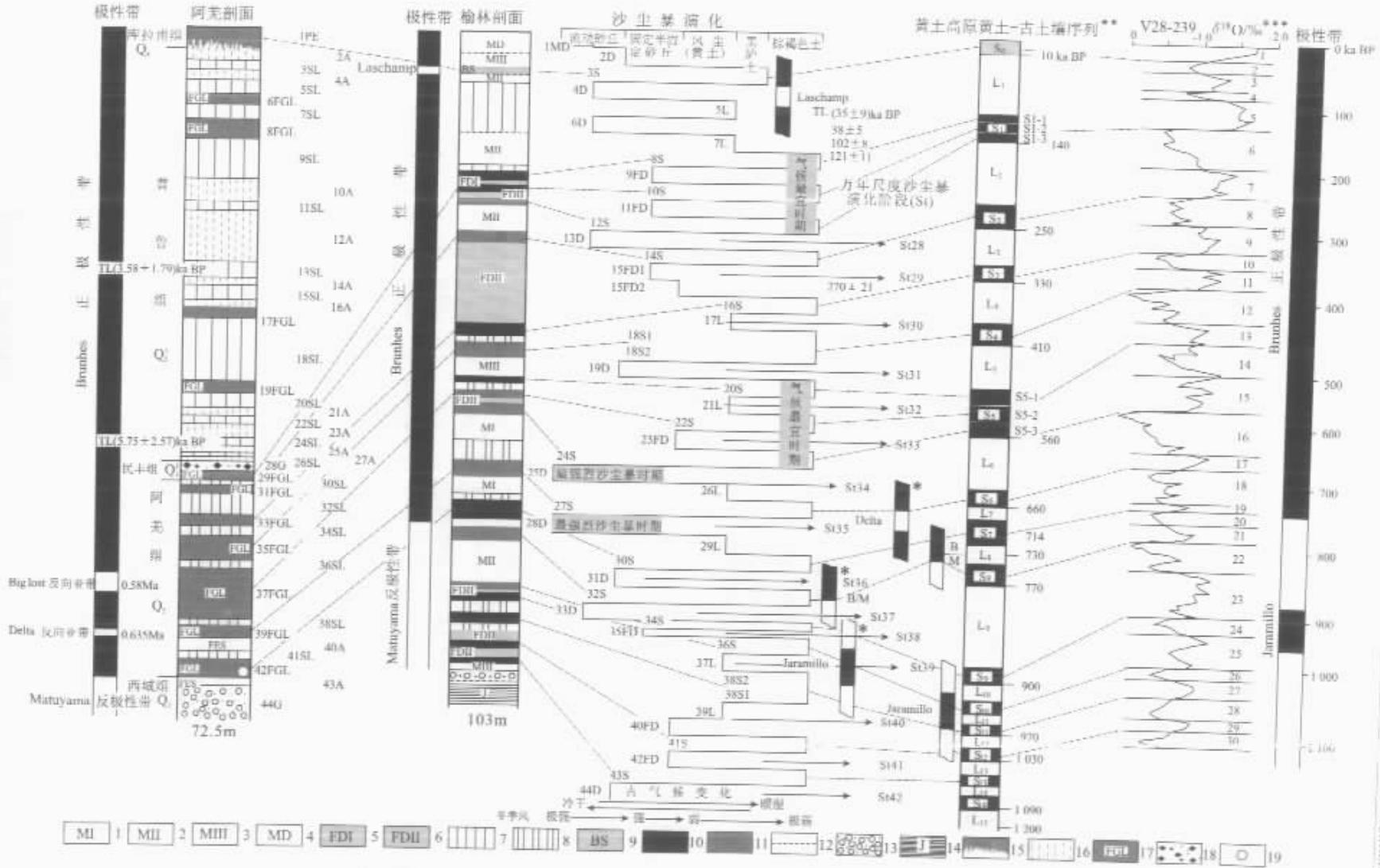


图2 榆林、阿羌和洛川剖面沙尘暴系列及其与V28-239岩芯 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线的对比关系

1—古流动砂丘砂(中砂);2—古流动砂丘砂(细砂);3—古流动砂丘砂(极细砂);4—现代流动砂丘砂;5—古固定·半固定·半流动砂丘砂(粉砂质细砂);6—古固定·半固定砂丘砂(粉砂质极细砂);

7—马兰黄土或粗粒黄土;8—离石黄土或粉粒黄土;9—黑垆土;10—粉砂质棕褐色土;11—砂质棕褐色土;12—剥蚀带;13—胶结砾石层;

14—侏罗系砂页岩;15—生草层;16—亚砂土;17—细粒黄土;18—冲积冲积砾石层;19—宇宙尘; *据文献[13]; **据文献[14]; ***据文献[15]

这是沙尘暴的典型沉积。经研究^[18], 差不多每一层都包含风成的沙尘堆积, 其 Md 几乎都是变化于极细砂与粗粉砂之间。亚砂土极细砂含量在 50% 以上, 其次为粗粉砂, 而黄土的粗粉砂含量则在 50% 以上, 其次为极细砂。按黄土的粒度组分还可以进一步划分为粗粒黄土和细粒黄土。前者指粉砂与粘土之和在 60% 以下之层位; 后者则在此含量以上。风成的亚砂土(2A, 4A, 10A, 12A, 14A, 16A, 21A, 23A, 25A, 27A, 40A, 43A), 粗粒黄土(3SL, 5SL, 7SL, 9SL, 11SL, 13SL, 15SL, 20SL, 22SL, 24SL, 26SL, 30SL, 32SL, 34SL, 36SL, 38SL, 41SL)与细粒黄土(6FGL, 8FGL, 17FGL, 19FGL, 29FGL, 31FGL, 33FGL, 35FGL, 37FGL, 39FGL, 42FGL)构成相互叠覆的沉积序列。

磁性年代结果显示, 阿羌剖面砂尘序列底部 42FGL/43A 恰处在 Brunhes/Matuyama 的界面位置, 故可以将这套风积层系近似视为整个 Brunhes 时堆积。按照 W. Bian Hariad 等^[19]制定的磁性地层年表, 这一界面的年代为 770 ka B P, 大致相当阿羌砂尘堆积的起始年代。

由图 2 和表 1 可以看出: 剖面风成砂和部分黄土与黄土高原如洛川^[14]、西峰^[20]、兰州^[21]等黄土—古土壤序列在过去 1 100 ka 具有良好对应关系。以洛川剖面为例, 用“ \Leftarrow ”表示等时沉积为: 4D + 5L + 6D + 7L \Leftarrow L₁, 9FD \Leftarrow S₁₋₁/S₁₋₂, 11D \Leftarrow S₁₋₂/S₁₋₃, 13D \Leftarrow L₂, 15FD \Leftarrow L₃, 17L \Leftarrow L₄, 19D \Leftarrow L₅, 21L \Leftarrow S₅₋₁/S₅₋₂, 23FD \Leftarrow S₅₋₂/S₅₋₃, 25D + 26L \Leftarrow L₆, 28D + 29L \Leftarrow L₇, 31D \Leftarrow L₈, 33D \Leftarrow L₉, 35D \Leftarrow L₁₀, 37L \Leftarrow L₁₁, 39L + 40FD \Leftarrow L₁₂, 42FD \Leftarrow L₁₃, 44D \Leftarrow L₁₄。不仅如此, 穿插于其中的土壤化阶段亦一一映照: 3S \Leftarrow S₀, 8S \Leftarrow S₁₋₁, 10S \Leftarrow S₁₋₂, 12S \Leftarrow S₁₋₃, 14S \Leftarrow S₂, 16S \Leftarrow S₃, 18S \Leftarrow S₄, 20S \Leftarrow S₅₋₁, 22S \Leftarrow S₅₋₂, 24S \Leftarrow S₅₋₃, 27S \Leftarrow S₆, 30S \Leftarrow S₇, 32S \Leftarrow S₈, 34S \Leftarrow S₉, 36S \Leftarrow S₁₀, 38S \Leftarrow S₁₁, 41S \Leftarrow S₁₂, 43S \Leftarrow S₁₃。唯这两地一个砂相一个黄土相, 即使是古土壤亦因成壤母质和物源上的不同而显示出类似差异。这一点, 恰恰说明风成的砂与黄土是沙尘暴天气过程的同期异相的一对孪生地质体^[22]。

榆林和阿羌剖面所记录的晚第四纪风成砂、黄土与古土壤和粗细砂尘系列的演替, 还远不足说明业已被证实的沙漠^[23]和黄土区^[24]存在的相同时期的多层次沉积。在这一点上, 我们从认识沙尘暴形成史目的出发, 将“米浪沟湾地层剖面”晚第四纪

或大致 150 ka B P 以来的沉积层序应该是一个最好的补充。

米浪沟湾地层剖面位于萨拉乌苏河中游流域滴哨沟湾至大石砭之间的米浪沟湾村 NE 约 500 m 的河流左岸^[25], 108°32'E, 37°46'N, 剖面底部海拔高度在 1 200 m 以上, 厚度约 83 m。含 29 层风成的古流动砂丘砂、3 层古固定—半固定砂丘砂和 1 层现代流动砂丘砂, 灰黄色, 有时可见棕红—桔红色, 9 层河流相, 灰绿、锈黄和暗灰黄色; 19 层湖相—沼泽相, 黄绿、青灰、深灰等色; 5 层棕褐色土, 浅褐、浅棕褐和灰褐色; 4 层黑垆土, 暗褐—灰黑色; 2 层黄土, 浅灰黄色和 3 层湖沼相沉积后发育的冻融褶皱层, 诸层位的岩性标示于图 3。地层包括中更新统离石组、上更新统萨拉乌苏组、城川组、全新统大沟湾组和滴哨湾组。由图 3 不难看出, 风成砂丘尤其是古流动砂丘层是米浪沟湾剖面最为显著的沉积相特征, 其次为河湖相和古土壤。古流动砂丘层与该区及其周围现代流动砂丘^[17]一样, 几乎全部是由以细砂粒级为主的砂物质组成, 松散且分选都比较均匀, 其 M_x(平均粒径)和 σ(标准离差)的分布范围分别为 2.333–4.48φ 和 0.260–0.90。古固定—半固定砂丘所含层数较少, 以细砂—极细砂沉积物占优势, 亦有一定含量的粉砂和粘土, 致密且分选中等, 垂直节理发育, 无层理并可见植物根系, M_x 和 σ 分别为 3.08–3.45φ 和 0.771–2.27。河湖相和古土壤主要由极细砂—粉砂粒级组成, 并有含量不等的粘土成分, 松软—致密, 分选较差, 常见植物根系, 偶见植物根叶残体化石, M_x 分别为 3.045–0.06φ 和 3.385–0.06φ, σ 分别为 0.611–1.51 和 0.691–1.77。(……)总的看来, 风成砂 M_x 较河湖相和古土壤颗粒粗, σ 显示的分选亦较好。在剖面垂直方向, 前者与后两者呈现为粗—细反复交替的波动式变化。虽然, 并不排除河湖相和古土壤堆积与发育时亦有风成沉积参与, 即使如此, 这种波动式变化至少可说明风力在其地质过程中存在强弱的反复交替作用。通常, 在河湖相和古土壤底部发育有成层的钙质结核或钙板, 其下覆地层往往是风成的砂丘层。剖面中的古土壤具有明显的土壤发生层次, 即上部为粘化层, 中部为富含碳酸盐新生体的钙积层, 下部常为分选比较均匀的风成砂, 有时为河湖沉积构成的母质层。相对而言, 棕褐色土粘化层质地较黑垆土粘重。镜下分析与实验结果表明, 无论棕褐色土还是黑垆土, 其胶斑状微结构都很明显。其中的土壤基质, 前者以粘粒、碳酸

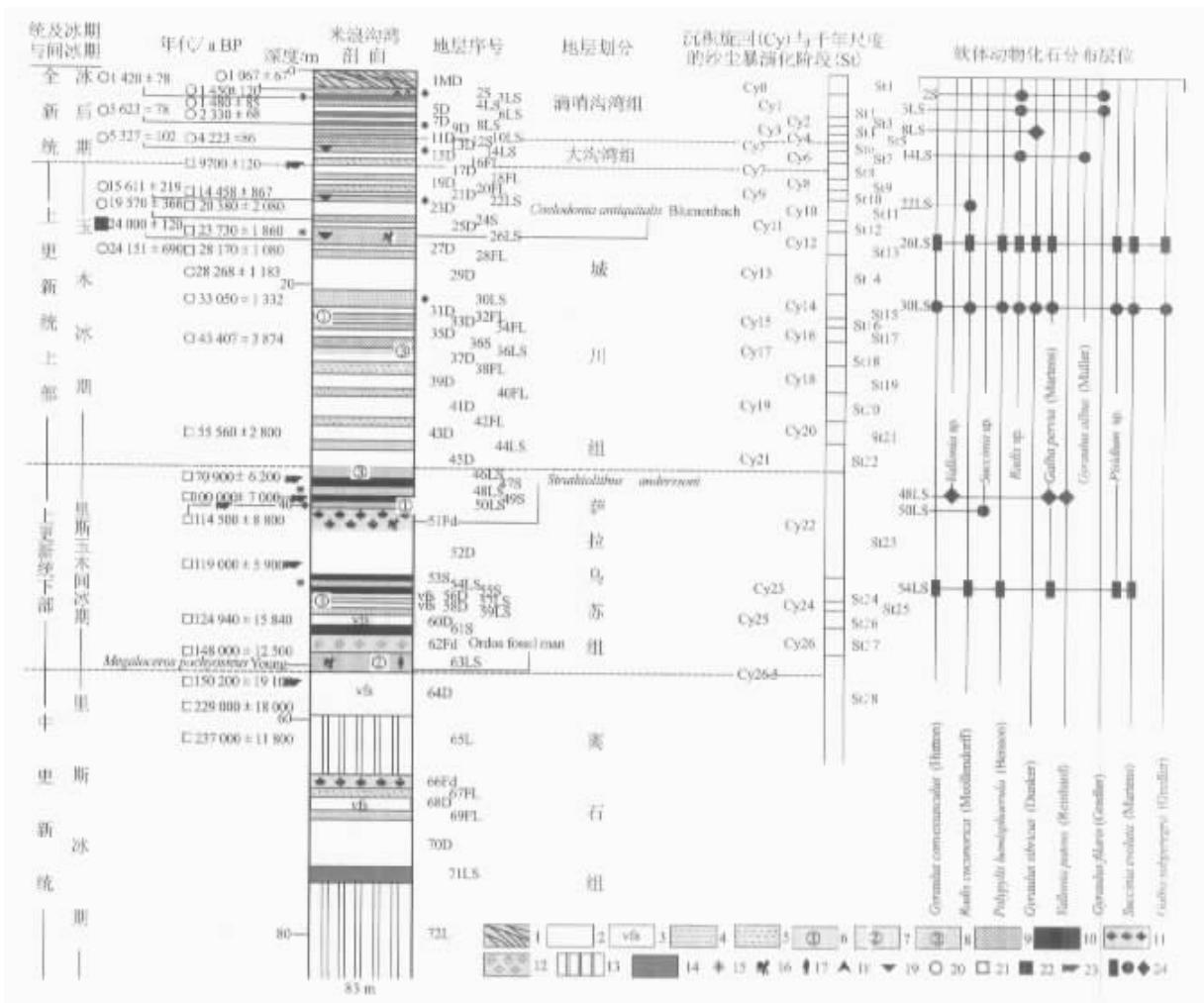


图3 米浪沟湾地层剖面及其反映的千年尺度的沙尘暴演化阶段

Fig.3 Milanggouwan stratigraphical section and the millennium-scale sand-dust storm evolutionary stages revealed from it
 1—现代流动沙丘 2—古流动砂丘(细砂) 3—古流动砂丘(极细砂) 4—粉砂质极细砂 5—粉砂质细砂 6—粘土质细砂(河流相);
 7—粘土质-粉砂质细砂 8—粘土质极细砂 9—黑垆土 10—棕褐色土 11—古固定-半固定砂丘(粉砂质细砂);
 12—古固定-半固定砂丘(粉砂质极细砂) 13—离石黄土 14—粉砂-粘土质粉砂 15—软体动物化石 16—脊椎动物化石;
 17—河套人化石 18—新石器 19—冻融褶皱 20— ^{14}C 年代 21—热释光年代 22—铀系年代;
 23—通过与萨拉乌苏河地区有关地层对比获得的年代 24—分别表示软体动物化石分布非常多、较多和很少

盐及铁质氧化物较多,后者则是由粘粒与部分碳酸盐复合而成并具灰白色钙质假菌丝、钙膜等。为了便于阐述本文将现代流动砂丘砂、古流动砂丘砂、古固定-半固定砂丘砂、河流相、湖相-沼泽相、古土壤和黄土分别以 MD,D,Fd,FL,LS,S 和 L 表示之,置在该剖面层序号阿拉伯数码后并显示于图 3 之上。

2 沙尘暴演化序列

榆林剖面风成砂和部分黄土与黄土高原黄土—

古土壤序列^[14, 20, 21]可视为 1 100 ka B P 以来沙尘暴堆积的颇为连续的地质体。若以榆林剖面风成砂或黄土与上覆古土壤构成的沉积旋回来计，则总共有 18 个从沙尘暴发生发展到成壤固定的此类旋回。这表明，自那时以来，至少在鄂尔多斯高原及其南邻的黄土高原范围内曾发生过 18 个阶段沙尘暴沉积与成壤的正逆交替演变过程。

阿羌剖面(图2和表1)770 ka B P以来风成亚砂土和粗粒黄土或这两者为主的层段2A—27A, 30SL 32SL 34SL 36SL 38SL 40A+41SL 43A 可依次与榆林剖面3S—31D 和黄土高原 S₀—L₈ 系列

中风成砂、黄土之主要阶段进行对比,而其间的细粒黄土 1PE, 28G-29FGL, 31FGL, 33FGL, 35FGL, 37FGL, 39FGL, 42FGL 则分别与此系列中古土壤之主要阶段一一对应。从中不难理解沙尘暴形成历史过程中季风沙区与非季风沙区之间的同异之处,即季风沙区沙尘暴形成之时,非季风沙区亦然,而季风沙区成土成壤之时,非季风沙区则不尽然。这表明,770 ka B P 以来,非季风沙区似乎一直处在一种沙尘暴沉积之疾之缓相互交替的演化过程。

米浪沟湾剖面若按其风成的砂相与之上覆河湖相或/和古土壤视为一沉积旋回,则自 150 ka B P 以来此类旋回总计达 27 个(1MD 和 63LS 均按 0.5 个旋回来计)。代表了自那时以来以风沙流形式表现出来的 27 个时期的沙尘暴的发生、发展和被嗣后的河湖相覆盖或者是土壤化作用替代的一系列反复交替的过程。

为了制定一个反映 1 100 ka B P 以来沙尘暴堆积的高分辨率历史记录,如果将米浪沟湾剖面 150 ka B P 以来的沉积层序即 1MD—63LS 连接在榆林剖面 12S/13D 界面(140 ka B P)之上,并按米浪沟湾剖面 64D 与榆林剖面 13D 为等时沉积来处理,应该是再现历史真实完整性的一个最好体现。由此可以归结 1 100 ka B P 以来沙尘暴堆积为 42 个时期的沉积演变历史,包括了 150 ka B P 至现今的 27 个时期千年尺度(图 3 的 St1—St27)和 1 100—150 ka B P 的 15 个时期万年尺度(图 2 的 St28—St42)的沙尘暴波动。以下我们将这两个剖面合称为榆林—米浪剖面。需要指出的是,时段的这种移接,除了充分考虑到黄土高原黄土—古土壤系列万年尺度的变化外,还着重参考了近年对我国 150 ka B P 以来高分辨率沉积波动的若干研究结果^[26,28]。当然,这种移接亦考虑了年代误差的时间范围。

3 问题讨论

从中国沙区及其南侧黄土地区现代沙尘暴活动的一般时空特点来看,此种现象主要与冬春季气温降低、西伯利亚—蒙古反气旋增强并进而触发亚洲冬季风自北向南和自西北向东南侵入有关,形成所谓“冷锋型沙尘暴”^[29]。在这样一种季节,持续数天的风沙风尘活动便可使流沙的前移与堆积具有显著的增长^[30]。而风尘物质往往随干旱风力作用继续向东南漂移,^{14C} 数据^[31] 沉积落在黄土高原、黄淮地区^[32]乃至

长江以南地区^[33]。一个季节内仅持续数天的风沙风尘活动尚且如此,若是旷日持久的一个以低温为主导的地质时代,冬季风多次叠加频率之高,干寒气候影响之巨,延续时间之长,从而形成上述 1 100 ka B P 以来的砂丘砂、黄土堆积这样一种因果关系是不难想象的。相反,现代风沙风尘活动减弱乃至停止,常常与夏秋季节气温增高、亚洲夏季风自南而北和自东南而西北的渗入有关。这一季风活动不仅为该区带来更多的水泽,导致河湖发育、成土成壤过程增强,同时还抑制了砂丘活化与扩展^[34]。可以设想,若 1 100 ka B P 以来气温增高且持续时间较长,所受夏季风的影响就会更大、频率就会更高。这说明,地质时期一个成因单位的河湖相或古土壤是多次夏季风叠加影响的后果。榆林—米浪剖面共计 41 序次的河湖相和古土壤则是 41 个时期亚洲夏季风在中国沙区及其南侧黄土地区形成主导季风的具体体现。

于是,我们可以将榆林—米浪剖面记录的 1 100 ka B P 以来所发生的 42 个沙尘暴沉积旋回归结为自那时以来在冰期间冰期气候波动影响下冬夏古代季风相互对峙、交替演化的一种结果。在这一点上,过去和一些新近的研究结果似乎都表明气候与沉积存在着的明显的因果关系。如榆林剖面氧化物比值—— $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$, CaO/MgO 和($\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)/ Al_2O_3 在风成砂或黄土与上覆古土壤的高低节奏变化^[35],米浪沟湾剖面颗粒特征数^[36]、 CaCO_3 ^[37] 和一些微量元素 P, Pb, Rb, Mn, Nb, Zr^[38] 在风成砂与上覆河湖相或古土壤所呈现的由低含量到高含量值的变化等。也许正是因为这种原因,才使得本文图 2 那样显示,即榆林剖面、黄土高原剖面、阿羌剖面万年尺度的沉积相变化与数十年来比较公认的过去全球变化“标准记录”——太平洋 V28-239 岩芯氧同位素阶段^[15]彼此之间存在着的耦合关系(见图 2),主要体现在中国沙区古风成砂、亚砂土、粗粒黄土和黄土高原黄土与 $\delta^{18}\text{O}$ 所谓“低谷期”——偶数氧同位素阶段的对应,体现在中国沙区古土壤、细粒黄土和黄土高原古土壤与 $\delta^{18}\text{O}$ “高峰期”——奇数氧同位素阶段的对应。

基于上述认识,本文将风成砂丘砂、亚砂土、粗粒黄土与河湖相、古土壤、细粒黄土分别作为沙尘暴期(冰期)和间沙尘暴期(间冰期)产物。于是,榆林—米浪剖面自 1 100 ka B P 以来总共记录了 42 个沙尘暴期,并与 41 个间沙尘暴期构成比较连续且交

替进行的沉积—气候演化历史。

榆林—米浪剖面粒度分析结果^[17-36]揭示, 沙尘暴期的干旱风力强度是介于 Md 或者其多数为中砂粒级与粉砂粒级之间。也就是说, 沙尘暴期的风力强度摆动于强烈的沙暴与相对静态的大气降尘之间。不过, 由于剖面所在的特殊地理位置, 大多数沙尘暴活动的主体是以沙暴或风沙流的形式体现的, 古风成砂丘即是直接的见证。不言而喻, 最强烈沙暴发生的层位, 如图 2 所示, 应属榆林剖面 Md 为中砂粒级的 25D 和 28D, 时间分别大致发生在 620 ka B P 和 680 ka B P 前后(见表 1)。

在 1 100 ka B P 以后直至 70 ka B P 以前的诸间沙尘暴期, 从棕褐色土发育的现代土壤环境条件来看, 大多是代表了过去至少是暖温带气候的万年尺度的事件过程。其中, 分别与黄土高原 S₅ 和 S₁ 等时的榆林剖面 20S—24S 和 8S—12S(时代对应于米浪沟湾剖面萨拉乌苏组时期)可能是成土成壤最为强烈的时期(见图 2), 时间分别大致在 590500 ka B P 和 15070 ka B P。这两地都显示出“红三条”式复合古土壤类型 S₅ 记录了第四纪以来的气候最宜时期^[39]。至于 S₁ 时期的 8S—12S, 从同期萨拉乌苏组层段发现的一些古生物生态特征来看, 亦当属气候最宜时期。例如萨拉乌苏组中就产出喜暖湿—温热的诺氏象(*Palaeoloxodon naumannii*)、王氏水牛(*Bubalus Wansjocki*)等化石^[40]。

然而, 第四纪末期阶段, 即自 150 ka B P 尤其是 70 ka B P 以来, 沙尘暴的发生频次越来越高, 而且成壤强度也越来越差。过去 70 ka B P 发育的黑垆土和棕褐色土不复存在的地史揭示, 末次冰期以前长期持续的暖温带气候在此后已经发生了几乎难以逆转的演化。但无论哪一种土类, 其发生发展时期都在很大程度上抑制或削弱了沙尘暴在时间和空间上的“延续”。20S—24S 和 8S—12S 时期就更是如此。

从区域气候地层学来看, 榆林—米浪剖面所指示的间沙尘暴期暖湿气候对于说明其所在的季风沙区具有广泛的代表性。该区第四纪河湖相、古土壤的古气候信息亦反映当时是温暖潮湿的^[41-43]; 对于说明非季风沙区西北部的沙漠也较适合^[44], 唯该地古土壤的发育程度不及季风沙区。但对于以连绵起伏的高大复合型流动砂丘为基本特征且甚少发育古土壤的非季风沙区之广大中西部沙漠, 则此种情形显著不同。^{万有数据}间沙尘暴期时这里以流动砂丘为主体的

广袤沙漠依然存在, 仅在沙漠中河湖沿岸^[45]、风蚀洼地^[46]、丘间凹地^[47]和沙漠边缘的近山足区之冲洪积扇三角洲^[48]出现洪泛堆积或河湖相覆盖流砂现象, 在邻近山地冰雪区出现风成砂与黄土地上“草地化”^[49]。在现代夏季风尾闾地带出现流砂地上发育的弱成土^[50]或者是由钙质富集而成的钙化层^[51, 52]。然而, 这些地点河湖层系中普遍烙印着干燥气候作用, 尤其是“荒漠漆”、“楔状石膏”等^[48]现象, 似表明间沙尘暴期时非季风沙区之广大中西部总体上处于沙质荒漠广阔活化、气候干燥炎热的环境背景。说明间沙尘暴期时广大非季风沙区由于在时空上降水和冰雪融水分布的不均匀性、多变性以及河流变迁与湖泊游移, 在总体干旱形势下也有并存于沙质荒漠中的局部草地^[53]、绿洲^[54]、河湖等景观^[46, 55, 56]。或许当时当地气候曾出现“瞬间”的潮湿现象。然而, 这些远不足以改变中西部沙区干旱—极度干旱的“流动沙海”基本特征。即使大规模的洪积期洪水可纵横泛入沙漠腹地, 亦被限于砂丘带间风蚀洼地中之水流故道, 其间又为古流砂体构成的“古泛洪岛”和“残砂梁”与之分隔^[46]。因而, 洪积期形成的地层, 无论是在沙漠腹地^[57]还是在如“罗布古湖”的区域范围^[55], 其孢粉差不多都显示以 *Artemisia*、*Chenopodiaceae*、*Leguminosae*、*Ephedra* 等含量占绝对优势的荒漠植被组合, 不是偶然的现象。

应该指出的是, 还不能认为间沙尘暴期即是沙尘暴处于一种沉积间断的阶段。事实上, 在极端干旱区边缘绿洲^[54]和非季风沙区东南边缘^[50]的地层以及在北太平洋钻孔^[5]中都有间冰期时的沙尘暴记录。而最为系统者莫过于阿羌剖面中与榆林和黄土高原古土壤一一对应的细粒黄土。由此至少可以这样认为, 间沙尘暴期在中国沙区依然存在多次瞬间的或季节性的乃至极为短时的沙尘暴活动。在这样一种时期, 炎热干旱的非季风沙区其发生频率远高于温暖潮湿的季风沙区, 而沙尘暴物质堆积后所受到的生物化学风化作用又远不及季风沙区者。这样一来, 历次间沙尘暴期之沙尘暴物质的叠合, 遂成为阿羌剖面若干细粒黄土层序。这种黄土显示出间沙尘暴期时西伯利亚—蒙古反气旋仍然可在中国沙区进行微弱颤动^[18]。阿羌剖面砂尘颗粒堆积的连续性以及粗细韵律变化, 说明最迟在 770 ka B P 以来非季风沙区一直在一种沙尘暴堆积的时疾时缓交替演变过程, 其波动节奏与万年尺度的冰期间冰

期基本合拍。

上述种种证据,更可说明我国季风沙区与非季风沙区之间在沉积-气候演变模式上的同异之处。沙尘暴期时,无论季风沙区还是非季风沙区,都同样受到西伯利亚—蒙古反气旋的强烈影响。反之在间沙尘暴期,季风沙区受海洋气流向西北推移之影响,东亚夏季风给该区带来更多的水汽,江河湖泽横溢、成土成壤加强,大部流砂趋于固定。间沙尘暴期时广大非季风沙区中西部因地处中亚腹地,南侧横亘的青藏高原、西接帕米尔、北临天山及其东延山地和蒙古高原戈壁,东南侧又有贺兰山、吕梁山和太行山,特别是第四纪以来青藏高原^[58]与其它一些山原不同程度的持续上升形势,构成夏季风漂移至非季风沙区东南部边缘时就已呈强弩之末的颓势,因而此时基本处于高温干旱的环境中。这种情势,在很大程度上抑制了生物化学风化作用,从而使得瞬间的或季节性的或极为短暂的沙尘暴物质得以积累,成就为细粒黄土。间沙尘暴期非季风沙区西北部与季风沙区情形也有差异,这里除受到增温引起山地冰雪消融于沙漠中产生的河湖堆积外,亦可能受到西风带水汽影响下形成的降水作用。但从古土壤成熟度较低的现象来看,当时该区的水热条件不及季风沙区,这是由于海陆对比差异以及可能同时受到向南渗透的北冰洋冷湿气团影响之故。

1 100 ka B P 以来多发性沙尘暴事件的历史记录真实地揭示,其发生、发展及演变是一个不以人们的意志为转移的自然现象。无论在旧石器时代、新石器时代乃至最近几千来的历史过程皆是如此。只是近半个世纪来,人类对于自然干预能力的空前增强,往往作出对沙尘暴成因问题的模糊判断。诚然,应该接受现代沙尘暴是人与自然叠加作用的看法,也是无可厚非的,但如果将此种现象的发生归结为人与自然起到了平分秋色的作用乃至前者扮演了“主角”则是值得商讨的。只要我们仅察视一下风沙流和降尘的天气行为和人烟罕至、流沙广袤的中国沙漠以及与之比邻的大范围戈壁和岩漠区域分布,就不难作出这样的判断,当今沙尘暴形成的根本原因仍然是自然的。人类不合理的经济活动对沙尘暴的出现不过是在这种总体自然背景下的一种局部现象。在今后的沙尘暴防治工作中,除了应该保护好沙区已有的优化生态环境外,还应该切实搞清楚以往干旱风力所循的主要路径。在这些路径上的一些适宜或可行地段设置机械沙障和生物防沙系统,这

将有利于缓解沙尘暴的发生强度。

撰写过程中,中国地质大学刘本培教授对本文提出宝贵的建议和修改意见,在此表示衷心的谢意!

References [参考文献]:

- [1] WU Zheng, *Wind-Drift Sand Geomorphology* [M]. Beijing : Science Press , 1987. 1-17 (in Chinese). [吴正 . 风沙地貌学 [M]. 科学出版社 , 1987.1-17.]
- [2] GAO Qingxian , LI Lingjun , ZHANG Yungang , et al. A study of the dust storm in the spring in China [J]. *China Environmental Science* , 2000 , 20 (6) : 495-500 (in Chinese). [高庆先 , 李令军 , 张运刚 , 等 . 我国春季沙尘暴研究 [J]. 中国环境科学 , 2000 , 20 (6) : 495-500.]
- [3] DONG Guangrong , ZHU Zhenda , LI Baosheng , et al. On the origin and evolution of the modern gobi-desert in North China [J]. LIU Tungsheng. *Quaternary Geology and Environment in China , the Series of the 13th INQUA Congress* [C]. Beijing : Science Press , 1993.34-40.
- [4] LIU Tungsheng , et al. *Loess and the Environment* [M]. Beijing : Science Press , 1985 (in Chinese). [刘东生 , 等 . 黄土与环境 [M]. 北京 科学出版社 , 1985.]
- [5] PYE K , LI Pingzhou. Late Pleistocene and Holocene Aeolian dust deposition in North China and the Northwest Pacific Ocean [J]. *Palaeogeography , Palaeoclimatology , Palaeoecology* , 1989 , 73 : 11-23.
- [6] AN Z S , KUKLA G J , PORTER , S C , et al. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the loess Plateau [J]. *Quaternary Research* , 1991 , 36 (1) : 29-36.
- [7] ZHANG De-er. Synoptic-climatic studies of dust fall in China since the historic times [J]. *Scientia Sinica* , 1984 , 27 (8) : 825-836.
- [8] ZHANG De-er. High resolution records available from Chinese historical document [J]. *Quaternary Sciences* , 1995 (1) : 75-81 (in Chinese). [张德二 . 中国历史文献中的高分辨率古气候记录 [J]. 第四纪研究 , 1995 (1) : 75-81.]
- [9] YAO Tandong , WANG Ninglian , SHI Yafeng. Climate and environment changes derived from ice core records [A]. SHI Yafeng. *Glaciers and Their Environments in China—The Present , Past and Future* (Chapter 10) [M]. Beijing : Science Press , 2000. 285-319 (in Chinese). [姚檀栋 , 王宁练 , 施雅风 . 冰芯记录所揭示的气候环境变化 [A]. 施雅风 . 中国冰川与环境——现在、过去和未来 (第十章) [M]. 北京 科学出版社 2000. 285-319.]
- [10] DAI Xuerong , LI Jijun , YU Lizhong , et al. The evolution of dust storms since last interglacial in Gansu as reconstructed from loess record [J]. *Acta Geographica Sinica* , 1999 , 54 (5) : 445-453 (in Chinese). [戴雪荣 , 李吉均 , 俞立中 , 等 . 末次间冰期甘肃沙尘暴演化历史的黄土记录分析 [J]. 地理学报 , 1999 , 54 (5) : 445-453.]

- [11] WU Zheng. *Deserts in China* [M]. Beijing : Business Affairs Press, 1982. 1-25 (in Chinese). [吴正. 我国的沙漠 M]. 北京 : 商务印书馆, 1982. 1-25.]
- [12] LI Baosheng, WU Zheng, ZHANG D D, et al. The environment and change in the monsoon sandy region of China during Late Pleistocene and Holocene [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(1): 125-137 (in Chinese). [李保生, 吴正, ZHANG D D 等. 中国季风沙区晚更新世以来环境及其变化 J]. 地质学报, 2001, 75(1): 125-137.]
- [13] GAO Shangyu. *Preliminary Studies on the Desert Evolution in the Northwestern Margin of the Monsoon, China* [D]. Lanzhou : Geography Department of Lanzhou University, 1992 (in Chinese). [高尚玉. 中国季风区西北边缘沙漠演化初步研究 D]. 兰州 : 兰州大学地理系, 1992.]
- [14] LIU Tungsheng, YUAN Baoyin. Paleoclimatic cycles in northern China : Luochuan loess section and its environmental implication [A]. LIU Tungsheng. *Aspects of Loess Research* [M]. Beijing : China Ocean Press, 1987. 3-26.
- [15] SHACKLETON N J, OPDYKE N D. Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific core V28-238 : oxygen isotope temperatures and ice volume on a 10^5 year and 10^6 year scale [J]. *Quat Res*, 1973, 3(1): 39-55.
- [16] DONG Guangrong, LI Baosheng, GAO Shangyu, et al. Discovery of the Quaternary ancient eolian sands in Ordos Plateau and its significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1983, 28(16): 998-1001 (in Chinese). [董光荣, 李保生, 高尚玉, 等. 鄂尔多斯高原第四纪古风成砂的发现及其意义 J]. 科学通报, 1983, 28(16): 998-1001.]
- [17] LI Baosheng, DONG Guangrong, GAO Shangyu, et al. Analysis and discussion on the grain size of the Quaternary stratum profile in Yulin area of the Northern Shanxi [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1988, 43(2): 127-133 (in Chinese). [李保生, 董光荣, 高尚玉, 等. 陕北部榆林第四纪地层剖面的粒度分析与讨论 J]. 地理学报, 1988, 43(2): 127-133.]
- [18] LI Baosheng, LI Sen, WANG Yue, et al. Geological age of the sand and dust deposits of the Aqiang section in the extremely arid region of China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1988, 72(1): 83-92 (in Chinese). [李保生, 李森, 王跃, 等. 极端干旱区边缘阿羌砂尘堆积剖面的地质时代 J]. 地质学报, 1988, 72(1): 83-92.]
- [19] HARIAD W B, ARMSTRONG R L, COXT A V, et al. *A Geologic Time Scale* [M]. Cambridge University Press, 1989. 150-151.
- [20] KUKLA G J. Loess stratigraphy in central China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1987, 6: 197-219.
- [21] CHEN Fahu, ZHANG Weixin, et al. *Loess Stratigraphy and Quaternary Glacier Problems in Gansu and Qinghai, China* [M]. Beijing : Science Press, 1993. 9-46 (in Chinese). [陈发虎, 张维信, 等. 甘青地区的黄土地层学与第四纪冰川问题 M]. 北京 : 科学出版社, 1993. 9-46.]
- [22] DONG Guangrong, GAO Shangyu, JIN Jiong, et al. The formation, evolution and cause of the Mu Us Desert in China [J]. *Science in China (Series B)*, 1989, 32(7): 859-872.
- [23] LI Baosheng, JIN Heling, LU Haiyan, et al. Processes of the deposition and vicissitude of Mu Us Desert, China since 150 ka B P [J]. *Science in China (Series D)*, 1998, 41(3): 248-254.
- [24] AN Zhisheng, PORTER S C, CHAPELL J, et al. Climatic records of Luochuan Loess sequence and ice core in Greenland During the last 130ka [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 39(24): 2254-2256 (in Chinese). [安芷生, PORTER S C, CHAPELL J, 等. 最近 130ka 洛川黄土堆积序列与格陵兰冰芯记录 J]. 科学通报, 1994, 39(24): 2254-2256.]
- [25] LI Baosheng, ZHANG D D, JIN Heling, et al. Paleo-monsoon activities of Mu Us Desert, China since 150ka B P—a study of the stratigraphic sequences of the Milanggouwan section, Salawusu River area [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000, 162: 1-16.
- [26] GUO Zhengtang, LIU Dongsheng, WU Naiqin, et al. Heinrich-rhythm pulses of climates recorded in loess of the last two glaciation [J]. *Quaternary Sciences*, 1996(1): 21-30 (in Chinese). [郭正堂, 刘东生, 吴乃琴, 等. 最后两个冰期黄土中记录的 Heinrich 型气候节拍 J]. 第四纪研究, 1996(1): 21-30.]
- [27] PORTER S C, AN Zhisheng. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation [J]. *Nature*, 1995, 375: 375-308.
- [28] AN Zhisheng, KUKLA G J, PORTER S C, et al. Late Quaternary dust flow on the Chinese Loess Plateau [J]. *Catena*, 1991, 18: 125-132.
- [29] BRAZEL A J, NICKING W G. The relationship of weather types to dust storm generation in Arizona (1965-1980) [J]. *Climatology*, 1986, 6(3): 255-275.
- [30] MA Shiwei. Study on structure of wind-sand flow [J]. *Journal of Desert Research*, 1988, 8(3): 8-22 (in Chinese). [马世威. 风沙流结构的研究 J]. 中国沙漠, 1988, 8(3): 8-22.]
- [31] YANG Dongzhen, JI Xiangming, XU Xiaobin, et al. The process analysis on a yellow sand weather [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1991, 49(3): 334-342 (in Chinese). [杨东贞, 纪湘明, 徐晓斌, 等. 一次黄沙天气过程的分析 J]. 气象学报, 1991, 49(3): 334-342.]
- [32] GOUDIE A S. Dust storms in space and time [J]. *Prog Phys Geog*, 1983, 7: 502-530.
- [33] LIU Tungsheng, AN Zhisheng, YUAN Baoyin. Eolian process and dust mantle (loess) in China [J]. *Quaternaria Sinica*, 1985, 6(1): 113-125 (in Chinese). [刘东生, 安芷生, 袁宝印. 中国的黄土与风尘堆积 J]. 中国第四纪研究, 1985b, 6(1): 113-125.]
- [34] SHI Peijun. *Theory and Practise of Research into Geography Environment Changes—Research into Geographical Environment Change During Late Quaternary Period in the Ordos Region*

- gion of North China [M]. Beijing : Science Press , 1991 . 66-107 (in Chinese). [史培军 . 地理环境演变研究的理论与实践——鄂尔多斯地区晚第四纪以来地理环境演变研究 [M]. 北京 : 科学出版社 , 1991 . 66-107 .]
- [35] GAO Shangyu , DONG Guangrong , LI Baosheng . The content changes of chemical elements in the loess section of eolian sands and the climatic environments in Yulin region , Shaanxi Province [J]. *Journal of Desert Research* , 1985 , 5(3) : 25-30 (in Chinese). [高尚玉,董光荣,李保生 . 陕西榆林地区古风砂地层中化学元素变化与气候环境 [J]. 中国沙漠 , 1985 , 5(3) : 25-30 .]
- [36] ZHANG Yuhong , LI Baosheng , JIN Heling , et al . Grain-size cycles in Salawusu River Valley since 150 ka BP [J]. *Acta Geographica Sinica* , 2001 , 11(4) : 461-472 .
- [37] LUO Kaili , LI Baosheng , JIN Heling , et al . CaCO₃ cycles in Salawusu River Basin since 150ka B P [J]. *Chinese Geography of Science* , 2001 , 11(4) : 336-342 .
- [38] YAO Chunxia , LI Baosheng , JIN Heling , et al . Sedimentary cycles of trace elements in Salawusu River Valley since 150ka B.P. [J]. *Acta Geographica Sinica* , 2002 , 12(1) : 65-71 .
- [39] WANG Yongyan . Quaternary paleoclimatic changes in the loess area in China [J]. *Science in China (Series B)* , 1987 , 17 (10) : 1099-1106 (in Chinese). [王永炎 . 中国黄土区第四纪古气候变化 [J]. 中国科学 (B) , 1987 , 17(10) : 1099-1106 .]
- [40] LI Baosheng , DONG Guangrong , WU Zheng , et al . The establishment of the Upper Pleistocene Chengchuan Formation in Northern China [J]. *Geological Review* , 1993 , 39 (2) : 91-100 (in Chinese). [李保生,董光荣,吴正,等 . 我国北方上更新统城川组的建立 [J]. 地质论评 , 1993 , 39(2) : 91-100 .]
- [41] JIA Huilan , LI Baosheng . Chemical element distribution and palaeoclimate in the Late Pleistocene - Holocene strata in East Gonghe Basin [J]. *Journal of Desert Research* , 1991 , 11(2) : 27-32 (in Chinese). [贾惠兰,李保生 . 青海共和盆地东部晚更新世—全新世地层中元素分布与古气候 [J]. 中国沙漠 , 1991 , 11(2) : 27-32 .]
- [42] DONG Guangrong , JIN Jiong , LI Baosheng , et al . Several problems on the desertification of Korqin Sandy Land , Northeast China—a case study on its south area [J]. *Journal of Desert Research* , 1994 , 14 (1) : 1-9 (in Chinese). [董光荣,金炯,李保生,等 . 科尔沁沙地沙漠化的几个问题——以南部地区为例 [J]. 中国沙漠 , 1994 , 14(1) : 1-9 .]
- [43] LI Sen , SUN Wu , LI Xiaoze , et al . Sedimentary characteristics and environmental evolution of Otindag Sandy Land in Holocene [J]. *Journal of Desert Research* , 1995 , 15(4) : 323-331 (in Chinese). [李森,孙武,李孝泽,等 . 浑善达克全新世沉积特征与环境演变 [J]. 中国沙漠 , 1995 , 15(4) : 323-331 .]
- [44] CHEN Huizhong , JIN Jiong , DONG Guangrong . Holocene evolution processes of Gurbantunggut Desert and climatic changes [J]. *Journal of Desert Research* , 2001 , 21(4) : 331-339 (in Chinese). [陈惠忠,金炯,董光荣 . 全新世古尔班通古特沙漠演化和气候变化 [J]. 中国沙漠 , 2001 , 21 (4) : 331-339 .]
- [45] LI Baosheng , YAN Mancun , MILLER B B , et al . Late Pleistocene and Holocene palaeoclimate records from the Badain Jaran Desert , China [J]. *Current Research* , 1998 , 15 : 129-131 .
- [46] LI Baosheng , DONG Guangrong , DING Tonghu , et al . Some problems on wind-drift sand geomorphy in East Taklimakan Desert [J]. *Chinese Science Bulletin* , 1991 , 36 (14) : 1194-1198 .
- [47] HOFMANN J . The lakes in the SE part of Badain Jaran Shamo , their limnology and geochemistry [J]. *Geowissenschaften* , 1996 , 14(Heft 7.8) 275-278 .
- [48] LI Baosheng , DONG Guangrong , ZHU Yizhi , et al . Sedimentary environment evolution on the desert and loess in Tarim Basin since the last glacial age [J]. *Science in China (Series B)* , 1993 , 23 (6) : 644-651 (in Chinese). [李保生,董光荣,祝一志,等 . 末次冰期以来塔里木盆地沙漠、黄土沉积环境与演化 [J]. 中国科学 (B) , 1993 , 23(6) : 644-651 .]
- [49] LI Baosheng , DONG Guangrong , ZHANG Jiashen , et al . Aeolian facies belts in the Taklimakan Desert [J]. *Acta Geologica Sinica* , 1995 , 8 (3) : 317-328 .
- [50] GAO Quanzhou , DONG Guangrong , LI Baosheng , et al . Evolution of southern fringe of Badain Jaran Desert since Late Pleistocene [J]. *Journal of Desert Research* , 1995 , 15 (4) : 345-352 (in Chinese). [高全洲,董光荣,李保生,等 . 晚更新世以来巴丹吉林南缘地区沙漠演化 [J]. 中国沙漠 , 1995 , 15 (4) : 345-352 .]
- [51] YAN Maucun , DONG Guangrong , LI Baosheng . Terrace development of Yellow River and geomorphic evolution in Shapotou area [J]. *Journal of Desert Research* , 1997 , 17 (4) : 369-376 (in Chinese). [阎满存,董光荣,李保生 . 沙坡头地区黄河阶地发育与演化 [J]. 中国沙漠 , 1997 , 17(4) : 369-376 .]
- [52] YAN Mancun , WANG Guangqian , LI Baosheng , et al . Formation and growth of high megadunes in Badain Jaran Desert [J]. *Acta Geographica Sinica* , 2001 , 56 (1) : 83-91 (in Chinese). [阎满存,王光谦,李保生,等 . 巴丹吉林沙漠高大沙山的形成发育研究 [J]. 地理学报 , 2001 , 56(1) : 83-91 .]
- [53] SHAO Yajun , LI Baosheng . Sporo-pollen assemblage in the loess of Upper Reach of the Keriya River and its environment [J]. *Journal of Desert Research* , 1995 , 15(1) : 37-41 (in Chinese). [邵亚军,李保生 . 克里雅河上游流域黄土中孢粉组合与环境 [J]. 中国沙漠 , 1995 , 15(1) : 37-41 .]
- [54] LI Baosheng , YUAN Baoyin , ZHOU Xinjia , et al . The evolution of the Yutian-Hotan Oasis since 13 500 a B P [J]. *Chinese Journal of Arid Land Research* , New York : Allerton Press , Inc , 1996 , 9 (2) : 137-145 .
- [55] WANG Wenxian . A study on the development history of the Quaternary deposits of the Lop-Nur Lake and its adjacent area [J]. *Quaternaria Sinica* , 1986 , 7 (2) : 75-86 (in Chinese). [汪文先 . 罗布泊及邻近地区第四纪与湖泊发育史研究简况 [J]. 中国第四纪研究 , 1986 , 7 (2) : 75-86 .]

- [56] WEN Qizhong , QIAO Yulou. The palaeoclimatic records in sediments of the northern slope of Kunlun Mt. since the late Pleistocene [A]. China & s Society of the Qinghai-Tibetan Plateau Research. *Qinghai-Tibetan Plateau and Global Variations—Proceedings of Symposia(1993 and 1994)* [C]. Beijing : Meteorological Press , 1995 . 96-104 (in Chinese)[文启忠, 乔玉楼 . 昆仑山北坡晚更新世以来沉积物的古气候记录 . 中国青藏高原研究会. 青藏高原与全球变化研讨会论文集[C]. 北京 : 气象出版社 , 1995 . 96-104.]
- [57] JIN Heling , DONG Guangrong , JIN Jiong , et al. Environmental and climatic changes in the interior of Taklimakan Desert since late glacial age [J]. *Journal of Desert Research* , 1995 , 14 (3):31-37 (in Chinese). [靳鹤龄, 董光荣, 金炯, 等 . 塔克拉玛干沙漠腹地晚冰期以来的环境与气候变化 [J]. 中国沙漠 , 1995 , 14 (3):31-37.]
- [58] LI Jijun , WEN Shixuan , ZHANG Qingsong , et al. Discussion on the rise period , rise range and type of Qinghai – Xizang Plateau [J]. *Scientia Sinica* , 1979 , 22 (22):1314-1328.

A PRELIMINARY STUDY ON THE FORMATION HISTORY OF SAND-DUST STORM—TAKING THE TYPICAL GEOLOGY RECORDS IN DESERT OF CHINA AS A DEMONSTRATION

LI Bao-sheng^{1,2} , AN Zhi-sheng² , ZHU Yi-zhi² , JIN He-ling³ ,
ZHOU Wei-jian² , DONG Guang-rong³ , GAO Shang-yu⁴ ,
LÜ Yu-xiao¹ , YU Xue-fei¹ , GAO Quan-zhou⁵

- (1. Department of Geography , South China Normal University , Guangzhou 510631 , China ;
2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology , Institute of Earth Environment , Chinese Academy of Sciences , Xi'an 710075 , China ;
3. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute , Chinese Academy of Sciences , Lanzhou 730000 , China ;
4. Institute of Resources Sciences , Beijing Normal University , Beijing 100875 , China ;
5. Department of Geography , Zhongshan University , Guangzhou 510275 , China)

Abstract : Taking the stratigraphical sections of Yulin , Aqiang and Milanggouwan sections located in the desert and loess transitional belt as typical examples , we have discussed the formation of the sand-dust storm in the desert of China since 1 100 ka B P and its development and evolutionary processes. It is put forward that in the past 1 100 ka , there were historical records of 42 periods of sand-dust storms in the desert ; these periods of sand-dust storms , together with the 41 periods of inter-sand and dust storms , constituted a history that comprised a series of comparatively continuous and alternately sedimentary and evolutionary processes ; the strongest periods in sand-dust storms occurred ca. 620 ka B P and 680 ka B P , and the optimal warm stages in the inter-sand and dust storm periods appeared in 590500 ka B P and 15070 ka B P. The study result suggests that the sedimentary cycles formed by the alternations of sand-dust storm and inter-sand and dust storm periods were radically induced by the climate cycles that were formed by the mutual growth and decline , and the confrontation and evolution between the winter and summer monsoon under the influence of the climate fluctuations over the glacial and interglacial periods.

Key words : past 1 100 ka ; desert of China ; typical sand-dust storm records ; 42 periods of sand-dust storms ; 41 periods of inter-sand-dust storms ; evolution history ; cause