马里萨赫勒地区风成沙特征、来源与发育时代*

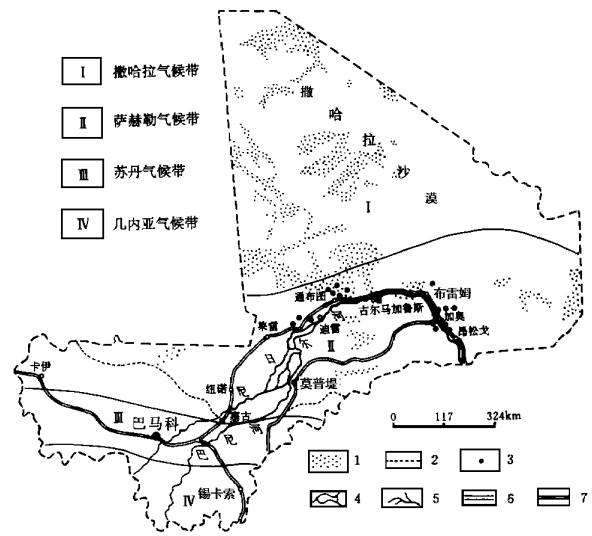
李 森[1,2] 夏训诚[1] 肖洪浪[1] 杨根生[1]

1(中国科学院 林 业 部兰州沙漠研究所 兰州 730000)
2(中国科学院西安黄土与第四纪地质国家重点实验室 西安 710054)

提 要 马里萨赫勒地区是全球荒漠化强烈发展的区域之一,广泛分布于地表的各类风成沙是沙质荒漠化发生发展的物质基础。本区风成沙的粒度组成以细沙为主,极细沙次之,各类型沙丘沙的粒度特征有一定差异;重矿物组分以稳定矿物和极稳定矿物占绝对优势,并具有高稳定度和成熟度。风成沙主要来源于古沙丘活化供沙、现代流水作用供沙、干涸湖泊和河流故道供沙等。上新世以来,本区经历了上新世至第四纪初期、末次冰期、全新世和现代等4个风成沙发育的主要时期。

关键词 马里萨赫勒 风成沙 物源 发育时期
分类号 中图法 P941.73

萨赫勒(Sahel)生物气候带横贯非洲北部,界于17°N至13°N间,其北为撒哈拉沙漠,以南为苏丹草原带,是全球一个重要的脆弱生态带。自70年代非洲大旱以来,荒漠化已给该地区人民造成悲惨的后果,地处西非的马里共和国是受干旱与荒漠化威胁最严重的萨赫勒国家之一。据中国科学院兰州沙漠研究所专家组1996年调查,马里北方萨赫勒地区总面积46.088 × 10^4 km^2,沙质荒漠化(简称沙漠化)土地面积达25.488 × 10^4 km^2,占该地区总面积的55.3%,其中轻度、中度、严重和极严重的4个等级沙漠化土地分别占沙漠化土地总面积的34.09%,28.18%,14.98%和22.75%。沙漠化区域广泛分布着各种形态的沙丘,主要有线形沙丘(垄)、缓起伏沙丘(地)、新月形沙丘链、格状沙丘、复合型沙丘链、灌丛沙丘、平沙地和蚀平沙丘等,气候属热带半干旱类型(图1)。全年分为旱季和雨季二个季节,年降水量从南部的600 mm向北减少到130 mm左右,降水在时间和空间上变率较大。植被为热带稀树、荆棘灌丛干草原,灌木主要是合欢类(*Acacia type*),草本以一年生种属为主,土壤类型主要为旱成土和新成土。马里萨赫勒地区面积广阔的退化土地和近似沙漠的自然景观,反映该地区荒漠化正处在强烈发展过程之中。



1. 沙漠 2. 古沙丘分布南界 3. 采样点
4. 湖泊 5. 河流 6. 公路 7. 铁路
图1 马里萨赫勒气候带及风成沙采样点分布图
Fig. 1 Climatic zones and sampling points in Sahel region of Mali

1 风成沙的特征

马里萨赫勒地区堆积着不同厚度的第四纪松散沉积物,在沙漠化区域风成沙广泛分布。风成沙一般呈桔红色、微红色,在湖滨、河岸亦有少量发育不成熟的灰白色风成沙。

收稿日期:1998-04-28;修回日期:1998-11-10
第一作者简介:李森,男,1948年12月生,研究员,主要从事风沙地貌与沙漠第四纪研究。
* 中国援外项目"马里沙漠化治理考察"成果之一。

1.1 风成沙粒度特征

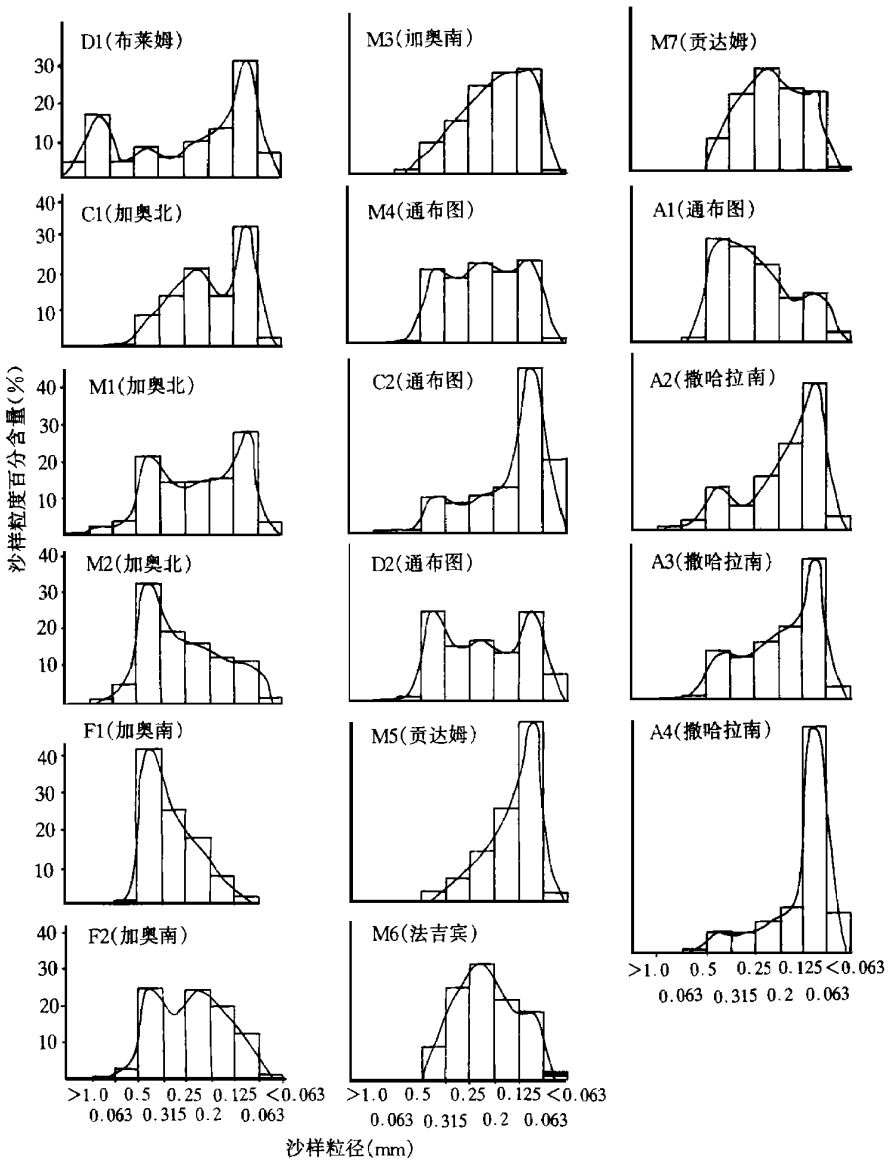
对萨赫勒地区不同类型沙丘部分风成沙样品的粒度分析结果表明(表 1, 图 2): 风成沙颗粒级配总体上以细沙(0.25~ 0.1 mm)为主, 极细沙(0.1~ 0.05 mm)次之, 二者重量百分比的平均值则分别为 48.34% 和 19.7%, 合计含量一般占 60%~ 80%。中沙(0.5~ 0.25 mm)含量较少, 除丘间地样品外, 其重量百分比平均值为 14.29%。在其它组分中, 粗沙(1.0~ 0.5 mm)含量很少, 细粉沙和粘土(< 0.01 mm)基本没有。不同区域和不同类型沙丘沙的粒度分布与平均粒径有明显的分异规律。

表 1 马里萨赫勒地区不同类型沙丘沙粒度参数

Table 1 Indices of grain size from different types of sand dunes in Sahel region of Mali

采样沙丘类型	平均值 (Mz)Φ	标准偏差 (σ_1)	偏度 (SK)	峰态 (KG)
流动沙丘沙	2.377	0.841	0.193	0.898
灌、草丛沙丘沙	2.812	0.961	-0.038	1.038
丘间地沙	2.238	1.138	0.057	0.768
古沙丘沙	2.618	0.776	-0.075	0.965

首先, 在区域分布上, 风成沙顺风向搬运距离愈长, 分选程度愈趋成熟, 粒径逐渐变细, 频率曲线趋于单峰, 偏态趋于正偏。发育在上风向戈壁及其边



M. 流动沙丘沙 C. 灌、草丛沙丘沙 D. 丘间地沙 A. 古沙丘沙 F. 草方格沙障沙

图 2 马里萨赫勒地区风成沙粒度分布直方图及频率曲线

Fig. 2 Grain size distribution and frequency of aeolian sand in Sahel region of Mali

缘的风成沙, 粒度分布较宽, 平均粒径(Mz) 介于 2.01~ 2.31Φ, 平均为 2.28Φ, 且峰态多为双峰。发育在下风向尼日尔河内陆三角洲的风成沙, 粒度分布较窄, 平均粒径变化于 2.32~ 2.92Φ 之间, 分选性也较上风地区为好。

其次, 不同类型沙丘沙的粒径及分选参数因沙丘形态、植被状况和风力蚀积作用强度而发生变化。灌草丛沙丘属加积型沙丘, 沙物质在沉积时, 由于植被的保护作用一般不再发生风的分选作用, 因此该类型风成沙的粒径最细, M_z 为 2.81Φ, 但粒径分布范围较宽。根据 Folk and word 粒度参数的分选标准, 平均标准差(σ_1) 为0.961, 分选性属中等偏差; 频率曲线呈双峰宽平, 偏度(Sk) 属对称或微正偏。流动沙丘沙因风力分选作用的持续进行, 粒径粗于灌丛沙丘沙, M_z 为 2.47Φ, 但粒径分布较窄, 分选性较灌草丛沙丘好, σ_1 为 0.841, 属分选中等; 频率曲线变为单峰中等或尖窄, 峰态(KG) 为 0.791~ 1.199, 偏度为正偏, SK 介于- 0.306~ 0.448, 平均为 0.193, 具有典型风成沙丘的粒度特征。反映在风力作用下较粗颗粒残留于上风向丘间地, 较细颗粒被吹扬、搬运到下风地区, 风力分选过程仍在进行。至于分选性中等, 则与沙丘群发育时间较短有关。丘间地作为风沙流传输带, 较粗颗粒在吹扬、搬运过程中多残留原地, 故风成沙粒径最粗, Mz 则为 2.238Φ。同时由于粗颗粒在表面富集使下伏的颗粒组分得到保护, 分选也最差, σ_1 为 1.138, 频率曲线呈双峰或多峰。古沙丘沙因发育时间长, 平均粒径较细, Mz 为 2.618Φ, 分选性较现代风成沙好, σ_1 为 0.776, 属中等偏好, 频率曲线多为单峰, 偏态呈负偏。古沙丘沙的粒度参数特征反映了风成沙形成时风力作用较强、分选历时较长的事实, 当然这也与古沙丘保存过程中生草成壤作用有关。

从风成沙平均粒径和标准偏差、偏度与峰态之间的关系来看, 分选中等者占样品总数的 83%, 分选差的占 17%, 分选性总体上呈中等—差, 多数样品的偏度为正偏—负偏, 大部分样品峰态为中等—宽平, 各类型沙丘沙都具有明显的风成特征, 且类型之间无明显界线, 说明它们可能属同一物源, 但因受下伏物质、沉积条件、发育历史的影响, 各类风成沙的粒度特征又有一定差异。

1.2　矿物组成特征

马里萨赫勒地区的风成沙中有 26 种矿物, 轻矿物主要是石英、正长石和斜长石, 玉髓和岩屑很少, 其中石英含量占 71.0%~ 86.0%, 长石的含量占 14.0%~ 28.5%, 石英与长石平均比值为 3.69。重矿物有 21 种, 含量为 0.1%~ 2.0%, 优势矿物为不透明矿物(50.25%~ 79.75%)、锆英石类矿物则为(8.0%~ 30.25%) 和帘石类矿物(0.75%~ 3.0%), 闪石类矿物和辉石类矿物的含量都< 1%。此外, 石榴子石、红柱石、独居石、兰晶石和白云母等矿物仅见于部分样品中, 含量也都较低。标型矿物为锆英石、电气石和石榴子石类矿物。

对比不同类型沙丘的重矿物组分、含量和有关参数(表 2), 具有以下特征: ①各类型沙的重矿物种类基本相同, 仅在百分含量上略有差异, 平均含量 0.89%, 没有数量级差别。优势重矿物为不透明矿物—锆英石类—帘石类组合。(2) 重矿物各组分的百分含量, 以稳定矿物和极稳定矿物占绝对优势, 二组分平均含量合计达 97.88%, 而较稳定矿物和不稳定矿物含量很少, 仅分别为 1.939% 和 0.169%。稳定矿物与不稳定矿物的含量相差数百倍, 具有明显的数量级差异。(3) 不稳定矿物含量和较稳定矿物含量在不同类型沙丘中呈现出相反变化的规律。(4) 风成沙的重矿物稳定系数(W) 界于 33.78%~

表 2　不同类型沙丘沙重矿物含量与特征参数

Table 2　Heavy mineral contents and their characteristic indices　　单位(%)

风成沙类型	重矿物含量	不稳定矿物含量	较稳定矿物含量	稳定矿物含量	极稳定矿物含量	稳定系数[1)]	ZTR[2)]
流动沙丘沙	1.39	0.178	1.571	73.536	25.714	56.18	20.68
灌草丛沙丘沙	0.695	0.375	1.375	77.75	20.50	56.14	16.75
丘间地沙	1.00	0.0	2.875	75.25	21.875	33.78	21.00
古沙丘沙	0.475	0.125	1.937	66.023	31.875	47.47	30.50
平均含量	0.89	0.169	1.939	73.139	24.741		

1)　重矿物稳定系数(W) = (稳定矿物+ 极稳定矿物) / (较稳定矿物+ 不稳定矿物)

2)　ZTR = (锆英石+ 电气石+ 金红石) 3 种矿物百分含量之和。

56.18%, *ZTR* 值界于 16.75%~ 30.50%, 表明在物理风化与化学风化过程中重矿物稳定度与成熟度总体上都比较高。稳定度以流动沙丘沙和灌草丛沙丘沙高, 古沙丘沙较高, 丘间地沙稍低; 成熟度则以古沙丘沙高, 依次为丘间沙地、流动沙丘沙和灌草丛沙丘沙。

对以上特征分析认为, 本区地处热带稀树、灌丛草原, 不同类型沙丘沙虽然堆积环境各有差异, 但共同的沙源和相似的物理风化和化学风化过程, 使其重矿物成份基本相同而百分含量略有差异。同时, 本区气候炎热, 在高水热条件下化学风化作用强烈, 不稳定矿物和较稳定矿物极易风化、流失, 稳定矿物和极稳定矿物则相对富集并占绝对优势。一般来说, 流动沙丘沙处在高能环境中, 能较完全地接受物理风化和化学风化; 灌丛沙丘沙能较长期的在原地接受风化, 但在植被保护下不稳定矿物和较稳定矿物可能未完全风化, 从而使二类型沙丘沙重矿物都有高稳定度, 但后者的成熟度稍低于前者。处于低洼部位的丘间地沙时常受到具有较高机械动能的风水两种营力交替作用, 地表物质交换频繁, 物理风化与化学风化的过程与强度都不太稳定, 重矿物稳定度因此而偏低。此外, 由于化学风化作用不仅需要一个能在原地接受风化的稳定环境, 而且还需要足够的时间作用, 古沙丘沙的重矿物具有高成熟度和较高稳定度, 正是其在高水热条件下和稳定环境中, 经历了长时间作用的结果。

2 风成沙的来源

2.1 古沙丘活化供沙

古风成沙系地质一历史时期形成的风成沙质沉积物, 它是表征沙漠存在最为直接可靠的地质标志[1]。分布于撒哈拉沙漠南缘和尼日尔河内陆三角洲的古风成沙, 一是被较新沉积物覆盖的埋藏古沙丘, 其原始形态、地层结构相对保存较完整; 二是直接暴露于地表的残留古沙丘, 其形态、结构都受到后期不同程度破坏。这些古沙丘的形成可以追溯到 1 800 a B. P. 以前, 由于当时气候干旱, 风成沉积发育, 在今天的北苏丹一萨赫勒地区遗留了许多古沙丘, 其后因气候变化沙漠北撤, 一部分古沙丘因水蚀或风蚀而被夷平, 一部分古沙丘则以埋藏古沙丘和残留古沙丘形态保存下来, 然而这无疑成为本区现代沙漠化的隐患。近几十年来, 随着本区人口的迅速增加和资源的过度利用, 人类对土地的压力日益增大, 加之 70 年代以来萨赫勒地区大旱连年, 地表植被与土壤结构遭到空前破坏, 导致古沙丘活化, 使之成为现代风成沙的物源地。

2.2 现代流水作用供沙

马里萨赫勒地区中东部是一个辽阔的冲积平原, 穿越平原的尼日尔河、巴尼河等河流的沿岸及其泛洪区是本区风成沙的主要物源地。尼日尔河中游河段自库里科罗至马里与尼日尔国境处, 全长 1 428 km, 河道呈一向北弯曲的大弧形, 南岸有巴尼河在莫普提附近汇入干流, 大弧形内侧河网密布; 外侧是北部沙漠区, 分布着许多间歇河和干河床。过库利科罗后河床由石质变为沙质, 河宽而不稳定。因这段蒸发强烈, 弧形河道内侧湖沼滞蓄大量的河水, 使干流水量到下游逐渐减少, 在库里科罗站多年平均径流量为 1 550 m^3/s, 到迪雷站则减至 1 180 m^3/s。河床纵比降小, 在莫普提以上约为 5×10^{-5}, 以下减至$(3\sim1)\times10^{-5}$, 水流缓慢, 泥沙易于沉积, 从而形成面积达 8×10^4 km^2 的尼日尔河内陆三角洲。据尼日尔河中游测站输沙量推算, 三角洲地区每年泥沙沉积量在 100×10^4t 以上。同时, 由于萨赫勒地区雨季旱季分明, 使尼日尔河洪、枯水季节径流量差异十分悬殊(图 3), 洪水期与枯水期水位变幅较大, 库利科罗历年最大日流量变幅则为 4 010~ 9 700 m^2/s, 相应水位变幅亦达 3.05 m。每逢汛期, 河水漫溢, 形成长约 400 km, 宽约 100 km 的泛洪区, 而在旱季时洪水消退, 水位下降, 河漫滩与洪泛区大面积出露, 大量沙物质在风力作用下不断向岸输移, 为冲积平原上沙丘、沙地的形成, 提供了充足的沙物质。

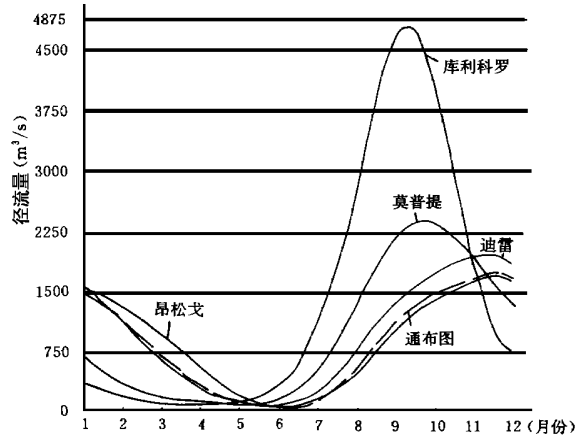


图 3 尼日尔河内陆三角洲主要测站河川径流量

Fig. 3 Runoff of Niger River in inland delta

2.3　干涸湖泊和河流故道供沙

位于本区中西部的尼日尔河中游流域是一个典型的内陆浅湖盆, 马西纳(亦称阿勒万) 古湖盆是盆地的主体, 分布于通布图以南的湖群即是古湖盆的遗迹。上新世以来气候几度干湿交替, 该湖盆也几经扩展和退缩[2]。70 年代大旱以来, 上游来水明显减少。许多湖泊日渐萎缩或干涸, 部分河道断流。干涸湖泊和干河床的河湖相沙物质即成为沙漠化土地形成发展的物质基础。例如面积达530 km^2 的法吉宾湖, 因上游来水量锐减, 入湖河道被沙丘堵塞而全部干涸, 湖滨三角洲、湖滩地表在风蚀沙化过程中向沙漠景观演变。同样, 尼日尔河也因水量变化和侵蚀堆积过程的变化, 河道曾有较大幅度的摆动。如通布图原是一个滨河城市, 由于尼日河不断向南迁徙, 现今城市距河已有 11.5 km 之遥。河流故道上大量的沙物质在风力作用下“就地起沙”, 成为沙漠化扩展的又一物源地。

3　风成沙发育时代

据前人研究和本次考察资料分析, 上新世以来, 马里萨赫勒地区至少经历了 4 个风成沙发育的主要时期。

3.1　上新世—第四纪初期风成沙发育期

中新世中晚期全球进入新生代大冰期, 西非广泛干旱化, 随着南极冰盖冰量迅速积累, 扩展到现在的规模, 发展为全冰盖时期。在发生于 6.4~ 4.6 Ma B.P. 期间的麦西尼亚盐度危机事件中, 海平面下降约 70 m, 气候进一步旱化, 影响范围扩大到北非、南欧和东非[3]。受气候恶化的影响, 原为塞内加尔河上源的尼日尔河也在这一时期因水量减少、河床淤塞, 受索科洛沙丘带的阻挡改向东北流入马西纳湖盆[2]。在上新世—第四纪初堆积了深厚的河湖相沉积物, 形成尼日尔河内陆三角洲。与此同时, 随着极地寒带的形成、扩张, 北半球出现与现今大致相似的行星气候带, 撒哈拉荒漠生物气候带逐渐形成并稳定于副热带[4]。尼日尔河内陆三角洲处在副热带动力高压控制的范围内, 干旱多风, 地表部分河湖相沉积物被风力吹扬、改造形成古沙丘。据分析, 河湖相与风成沙在横向呈交互沉积状, 在空间上构成沙丘、河流、湖泊相间分布的格局。至第四纪早期最适宜期, 气候湿润, 尼日尔河内陆湖水量增加, 向东南漫溢并下切出一条河道, 在加奥附近与北部高原南下的河流汇合形成外流河后, 这一早期风成沙发育时期便告结束。

3.2　末次冰期风成沙发育期

末次冰期是本区风成沙发育的主要时期, 尤其在末次盛冰期风成沙广泛发育。据 Petitmail 等研究, 萨赫勒地区在 35~ 21 ka B.P. 小沼泽广泛发育; 21 ka B.P. 后, 本区北部的浅湖蒸发变干, 撒哈拉境内的河流干涸, 沙漠向南扩张; 15 ka B.P. 沙漠曾扩展到它目前边界以南 400 km 地方, 整个撒哈拉—萨赫勒地区干旱化的面积大约比现今多 250×10^4 km^2, 与末次温暖期相比约多了 650×10^4 km^2, 100 mm 等雨线南移至 13°N, 金合欢属草原推进至 10°N[5,6], 末次冰消期撒哈拉沙漠北撤。由通布图以北沙丘丘间地普遍发育的下伏灰白色细粉沙, 中部是厚 30~ 40 cm 的灰色粘土(顶部 ^{14}C 年龄为 10 230±130 a B.P.), 上覆流动风成沙的地层序列可知(图 4a), 冰消期马里萨赫勒北部洼地发育了河网和湖泊, 在 11.2~ 10.2 ka B.P. 的新仙女木(younger dryas) 阶段, 本区又经历了一次明显的冷湿事件, 河湖淤浅, 丘间洼地广泛沼泽化, 发育了富含钙质泥的湖沼相沉积。由灰色粘土的岩性、结构推测, 在沉积期内本区降温幅度达 5~ 7 ℃。

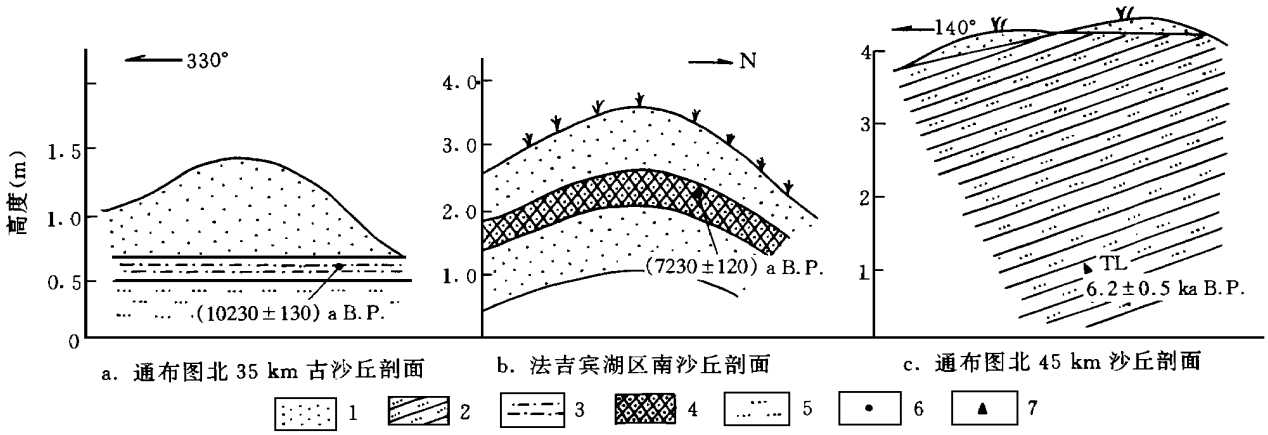
3.3　全新世风成沙发育期

全新世是全球气候频繁变化的时期, 在南撒哈拉—萨赫勒地区干旱与湿润事件不断发生, 期间本区经历了 3 个风成沙发育阶段:

1) 全新世早期风成沙发育阶段　10.3~ 9.2 ka B.P. 本区进入全新世升温期, 虽然气温回升, 但降水仍然偏少, 据 Durand A① 等对萨赫勒中部湖泊岩芯研究, 此时该区年降雨量小于 20 mm。本区降水虽略多一些, 但仍很干旱, 造成湖泊干涸, 风成沙广为蔓延。

2) 全新世中期风成沙发育阶段　9.2~ 3.5 ka B.P. 本区进入全新世湿润期。其中在 9.2~ 6.8 ka B.P. 气候适宜, 降水剧增, 出现永久湖和大面积沼泽地, 撒哈拉植被及大型哺乳动物群退至 22° N 附近, 通布图以北撒哈拉沙漠流沙大面积固定, 植被发育, 多有长颈鹿、羚、犀牛、河马出没[7]。在法吉宾湖南部发育的弱沙质古土壤(^{14}C 年龄 7 230±120 a B.P.) 正是湿润气候环境下形成的土壤层(图4b)。

① Durand A, Larg J. Bull Soc. Geol, 1986, Fr, 2~ 2



1. 风成沙 2. 古风成沙 3. 灰色湖沼相粘土 4. 弱沙质古土壤 5. 灰色河相粉细沙 6. ^{14}C 采样点 7. TL 采样点

图 4 马里萨赫勒地区沙丘沉积剖面

Fig. 4 Sediment section of sand dune in Sahel region of Mali

6.8~ 5.8 ka B.P. 马里萨赫勒地区出现显著的气候变化, 降雨量减少, 干旱频繁, 风成沙堆积旺盛。通布图城北的古沙丘剖面中, TL 测年为 6.2±0.5 ka B.P. 的厚层棕黄色风成沙(图 4C), 以及湖相系列中的含盐地层[8], 正是这次干旱和盐化事件的记录。这一风成沙发育阶段持续了约 1 000 多年, 至 5.8 ka B.P. 后又进入第二个不显著湿润阶段。

3) 全新世后期风成沙发育阶段 3.5~ 1.8 ka B.P. 马里北部气候干旱, 降雨急速减少, 撒哈拉沙漠向南扩展了 10 多个纬度。萨赫勒地区风沙堆积发育, 古沙丘分布的南界进入苏丹草原带, 到达塞古一线①(见图 1)。1.8 ka B.P. 至今, 萨赫勒北界逐渐到达现今 17°N 的位置。

3.4 现代风成沙发育时期

20 世纪以来马里萨赫勒—苏丹草原遭受了 1910~ 1915 年、1940~ 1944 年和 1968~ 1990 年 3 次特大干旱的袭击。以本区东部加奥为例, 1961~ 1995 年平均降雨量为 185.7 mm, 34 年中仅有 1/3 年份降雨量超过 150 mm, 其余均为少雨年, 1987 年最少, 仅 54.6 mm, 降水距平百分率达- 70.59%。干旱之年降雨量减少, 等雨线大约向南摆动 100~ 200 km, 植被覆盖度大幅度下降, 土壤结构遭到破坏, 使环境系统的结构稳定态严重失衡, 导致现代风成沙广泛发育, 沙漠化土地广为发生发展。

4 结论

综上所述, 马里萨赫勒地区位于全球一条重要的脆弱生态带上, 区域沙漠化土地面积达 25.488×10^4 km^2, 占该区总面积的 55.3%, 沙漠化呈强烈发展的态势。广泛分布于地表的各类风成沙是沙漠化发生发展的物质基础。风成沙在粒度组成、矿物组分、沙物质来源和发育时代等方面有其自身的特征和规律。

1) 风成沙的粒度组成以细沙为主、极细沙次之, 二者含量一般占总重的 60%~ 80%。风成沙的分选性总体上呈中等—差, 偏度为正偏—负偏, 峰态为中等—宽平, 其中流动沙丘沙的 $\overline{M}_Z$ 为 2.277Φ、$\overline{\sigma}_1$ 为 0.841, 灌草丛沙丘 $\overline{M}_Z$ 为 2.812Φ, $\overline{\sigma}_1$ 为 0.961。受沙物质来源、堆积条件和发育历史的影响, 各类型沙丘沙的粒度特征又有一定差异。

2) 风成沙有 26 种矿物, 其中重矿物有 21 种, 含量为 0.1%~ 2.0%, 优势重矿物为不透明矿物—锆英石类—帘石类矿物组合, 重组分以稳定矿物和极稳定矿物占绝对优势, 稳定系数(W) 和 ZTR 值分别为 33.78%~ 56.18% 和 16.75%~ 30.50%, 表明重矿物具有高稳定度与成熟度。由于本区地处热带, 具有高动能和高水热条件, 物理风化和化学风化作用很强烈, 因此, 气候条件是形成风成沙矿物组成特征的主要原因。

3) 现代风成沙主要有古沙丘活化供沙、现代流水作用供沙、干涸湖泊和河流故道供沙等 3 个来源。这与中国北方农牧交错带等全球其它区域现代风成

① 中国科学院兰州沙漠研究所. 马里绿色屏障可行性研究报告. 1998

沙的来源大致相同。但由于本区大部位于缓慢沉降的冲积平原区, 风成沙亦主要由现代河湖相沉积物经风力改造后形成。

4) 据初步研究, 本区至少曾经历了上新世—第四纪初期、末次冰期、全新世和现代等 4 个风成沙发育主要时期, 其中在全新世风成沙发育时期又出现全新世早期(10. 3~ 9. 2 ka B. P.)、中期(6. 8~ 5. 8 ka B. P.) 和后期(3. 5~ 1. 8 ka B. P.) 3 个风成沙发育阶段。现代则因气候变异和人为活动日益加剧, 沙漠化正处在强烈发展阶段。这一事实说明, 在全球干旱化的发展进程中, 萨赫勒生物气候带受全球气候干旱与湿润交替变化的影响, 经历了风成沙发育、扩展⇄风成沙固定、成壤的有序波动演变过程, 并且本区与中国北方农牧交错带等研究区域[9~11]的演变过程基本同步。

致谢　　文中粒度和矿物分析分别由兰州沙漠所吉启慧、张焕新二位先生和兰州冰川所马正海先生完成; ^{14}C 年代和 TL 分别由兰州沙漠所胡智育先生和西安黄土室张景昭先生、赖忠平同志测定。谨此致谢。

参 考 文 献

1　董光荣, 李保生, 高尚玉, 等. 鄂尔多斯高原的第四纪古风成沙. 地理学报, 1983, **38**(4) : 1~ 8

2　苏世荣, 沈汝生, 张耀曾, 等. 非洲自然地理. 北京: 商务印书馆, 1983. 130~ 132

3　陈明扬. 中国风尘堆积与全球干旱化. 第四纪研究, 1991, (4) : 362~ 369

4　Le Houerou H N. Outline of the biological history of the Sahara. J. of Arid Environment, 1992, 22: 3~ 30

5　Petit-Maire N(editor) . Paleo-environments du Sahara lacsholocenes a taoudenni (Mali) . CNRS, Marseille, 1991, 239

6　Sarnthein M. et al. Glacial and interglacial wind regimes over the eastern subtropcal Atlantic and Northwest Africa. Nature, 1981, 293: 193~ 196

7　Petit-Maire, Le Sahara A L. Halocene: Mali, Imprime en France par l' Institut Geographique National. 1988

8　Fabre J, Petit-Maire N. Holocene climatic evolution at 22~ 23° N from two palaeolakes on the Taoudenni area (northern Mali) . Paleo-geoger Paleoclimatol. Paleoecol, 1988, 65: 133~ 148

9　董光荣, 李森, 李保生, 等. 中国沙漠形成演化的初步研究. 中国沙漠, 1991, **11**(4) : 28~ 31

10　董光荣, 陈惠忠, 王贵勇, 等. 150 ka 以来中国北方沙漠、沙地演化和气候变化. 中国科学(B 辑) , 1995, **25**(12) : 1306~ 1311

11　浦庆余. 末次冰期以来中国自然环境变迁及其与全球变化的关系. 第四纪研究, 1991(3) : 245~ 258

CHARACTERISTICS, ORIGIN AND DEVELOPMENT ERA OF EOLIAN SAND IN SAHELIAN REGION, MALI

Li Sen[①②] Xia Xuncheng[①] Xiao Honglang[①] Yang Gensheng ②

①(*Institute of Desert Research, Chinese Academy of Sciences and Minstry of Forest, P. R. of China, Lanzhou* 730000)

②(*Xi' an Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi' an* 710054)

ABSTRACT

The Sandy desertified land in Sahelian region of Northern Mali amounts to 254 880km^2, occupying 55.3% of the area, and the sandy desertification is still in the intensely developing stage. Various eolian sands spreading widely on the surface is the material base for the occurrence and development of sandy desertification. The grain-size composition of eolian sand in the region is dominated by fine sand, followed by very fine sand. Bacause of the impacts of sand origin, accumulation condition and development course, there are some differences in the features of grain size of various dune sand. The eolian sand consists of 26 minerals, among which 21 are heavy minerals, Occuprging 0.1– 2.0 percent. The stable and very stable minerals are dominating in these heavy minerals, and the heavy minerals have high stability and maturity.

The eolian sand in this region mainly originates from reactivation of ancient sand dunes, modern fluvial action, dry lake deflation and older river courses. According to preliminary study, there are at least 4 major periods of eolian sand development in the region, i.e. Pliocene– early Quaternary, last glacial period, Holocene and modern times; among them the Holocene has 3 aeolian stages, namely early Holocene (10.3– 9.2 ka B.P.), mid-Holocene (6.8– 5.8 ka B.P.) and late Holocene (3.5– 1.8 ka B.P.). In the orderly fluctuated courses of alternately dry-humid changes in the global climate the eolian sand underwent development, expansion ⇄fixation and soil formation in the region.

Key Words: Sahel Mali; Eolian sand; Sand source; Development period