

# 塔克拉玛干沙漠南缘红柳沙包沙物质 粒度特征与风沙环境变化

高辰晶<sup>1</sup>, 刘 倩<sup>1</sup>, 王艳欣<sup>2</sup>, 赵元杰<sup>1</sup>, 高伟明<sup>1</sup>, 夏训诚<sup>3</sup>

(1. 河北师范大学 资源与环境科学学院, 河北省环境演变与生态建设实验室, 石家庄 050016;

2. 石家庄新奥燃气有限公司, 石家庄 050035; 3. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

**摘 要:**清晰的红柳沙包沉积纹层,不仅可以计数其年代,同时对还原区域历史气候环境有重要的指示意义。选取塔克拉玛干沙漠南缘地区三个采样点红柳沙包沉积纹层沙物质粒度参数、距平值和萨胡判别指数等指标,结合 SPSS 17.0, Sigma Plot 和 Excel 2007 等软件进行计算分析,目的在于还原该地区百年来的风沙环境变化情况。分析结果表明,塔克拉玛干沙漠南缘的红柳沙包沉积纹层沙物质以细沙占绝对优势,沙物质的粒度参数、粒级分布、粒度概率累计特征等都具有较强的相关性。从粒度数据中还可分析得出,B 采样点风沙搬运动力最强,沉积物质以跃移和蠕移为主,说明 B 采样点的沉积环境更加稳定。C 采样点的沉积物质则以悬移为主。通过采样点位置关系判断该地区红柳沙包的沙源主要是风成沙。沙物质粒度变化序列表明,近二百余年来该地区的气候从干旱逐渐转向湿润。塔克拉玛干沙漠南缘地区风沙环境变化阶段包括:1801—1872 年,风沙作用较弱;1872—1902 年,风沙作用明显变强;1903—1984 年,风沙作用强度一般;1985—2010 年,风沙作用明显回落。

**关键词:**红柳沙包; 粒度; 环境; 塔克拉玛干沙漠南缘

中图分类号:P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)03-0041-06

## Grain-size Characteristics of Sand Materials in Tamarix Cone Sedimentary Veins and Wind Sandy Environment Change in the Southern Region of Taklimakan Desert

GAO Chen-jing<sup>1</sup>, LIU Qian<sup>1</sup>, WANG Yan-xin<sup>2</sup>, ZHAO Yuan-jie<sup>1</sup>, GAO Wei-ming<sup>1</sup>, XIA Xun-cheng<sup>3</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Normal University, Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Shijiazhuang 050016, China; 2. Shijiazhuang Xinao Gas Co., Ltd, Shijiazhuang, 050035, China; 3. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

**Abstract:** The clear sedimentary veins of Tamarix Cone, can not only date the age, but also has important instruction significance to restore regional historical climate environment. This paper selects three sample points' grain size parameters, sand material anomaly values and Sahu discriminant function which are in Tamarix Cone sand materials in the south margin of Taklimakan Desert. We combined with the software of calculation and analysis such as SPSS 17.0, Sigma Plot and Excel 2007, aimed to restore the region hundreds years of wind sandy environment changes. The analysis results of sand material grain size characteristics we got are as followings. The sand transport power of sample point B is the strongest, and the sedimentary materials are dominated by saltating and slow-moving, which means that the sedimentary environment of the sample point B is more stable. On the other hand, sample point C of deposition is given priority to with suspended matter. Through the sample points location relations and determination, the Tamarix Cone of this region mainly consists of eolian sand. The sand material granularity sequences show that the region climate gradually from drought to wet in two hundred of years. The change phase of wind sandy environment includes that the weaker wind-sandy action was from 1801 to 1872; the significantly stronger action was from 1872 to 1902; the normal strength was from 1903 to 1984; the significant decline of wind-sandy action was from 1985 to 2010.

**Key words:** Tamarix Cone; grain-size; environment; southern region of Taklimakan Desert

收稿日期:2013-09-02

修回日期:2013-10-06

资助项目:国家自然科学基金项目(41071133);河北省高校重点学科建设项目

作者简介:高辰晶(1988—),女,河北滦县人,硕士研究生,从事区域生态与环境变化研究。E-mail:dorakao@live.cn

通信作者:赵元杰(1965—),男,河北新乐人,教授,博士生导师,研究方向为区域生态与环境变化。E-mail:ecoenvir@163.com

红柳沙包属于灌丛沙丘,广泛分布于塔克拉玛干沙漠南缘地区(塔南地区)以及位于塔克拉玛干沙漠中河流下游的河道两岸和三角洲地带,也成群分布在沙漠内的古河道与洼地中<sup>[1]</sup>。其中一些红柳沙包如同树木年轮,具有清晰的沉积纹层,可以作为荒漠地区恢复古气候和古环境的计年手段和气候环境信息载体<sup>[2]</sup>。沉积物粒度特征是古气候环境演变的良好标志之一<sup>[3-4]</sup>,可用于研究不同时期沙物质来源和风况变化<sup>[5]</sup>。本文通过塔南地区不同地点的红柳沙包沉积纹层沙物质粒度特征,分析风沙环境变化,对促进本地区生态建设和环境保护有重要的指导意义。

## 1 研究区概况

塔南地区位于昆仑山和塔克拉玛干沙漠的交接地带,属降水量稀少、蒸发量高、昼夜温差大的极端干旱暖温带大陆性气候,年均降水量小于 100 mm,而年蒸发量可达 2 500~3 400 mm,多风沙和浮尘天气,风沙危害严重。植被主要为旱生和超旱生的极端稀疏的荒漠植被,以半灌木和灌木为主,种类稀少,群落组成简单,覆盖度较低,大部分地方是裸露沙地<sup>[6]</sup>。年径流量较大的河流主要有叶尔羌河、玉龙喀什河、喀拉喀什河、克里雅河以及且末河等。其中,安迪尔故城自唐代中后期逐渐被废弃,目前遗址区内多为流动沙丘,分布有红柳、芦苇等;安迪尔牧场为现代绿洲,位于安迪尔河下游三角洲,分布有胡杨、红柳、芦苇、骆驼刺等;达玛沟乡也为现代绿洲,位于达玛沟河下游三角洲,分布有胡杨林、红柳、芦苇等。

## 2 样品采集与分析

### 2.1 沙物质样品采集

2011年6月18—20日,在民丰县安迪尔故城(A采样点)、安迪尔牧场(B采样点)和策勒县达玛沟乡(C采样点),选择典型红柳沙包后,对红柳沙包剖面进行清理和固定。对于清晰、连续的沉积纹层,按照沉积纹层层理,从顶层到底部逐层采集<sup>[7]</sup>;对于纹层不清晰层段,按照一定厚度从上向下分层采集。其中,A采样点,地理坐标 37.83°N,83.71°E,海拔 1 300 m,共采集沉积纹层样品 88 个,剖面深度约 1.5 m;B采样点,地理坐标 37.72°N,83.82°E,海拔 1 223 m,共采集沉积纹层样品 107 个,剖面深度约 5 m;C采样点,地理坐标 37.09°N,81.08°E,海拔 1 318 m,共采集沉积纹层样品 151 个,剖面深度约 4.5 m。

### 2.2 样品处理与分析结果

将样品中的沙物质和红柳枯枝落叶分离后,对沙

物质进行预处理:①采用浸提法去除盐分;②采用氧化法( $H_2O_2$ )去除有机质;③采用溶蚀法(HCl)去除钙质胶结物;④采用超声波振荡法分散样品<sup>[8]</sup>。用 Malvern 2000 激光粒度仪测定粒级组成<sup>[7]</sup>。其测定范围在 0.02~2 000  $\mu m$ ,粒级分辨率达 1 mm。粒度分析结果见图 1。

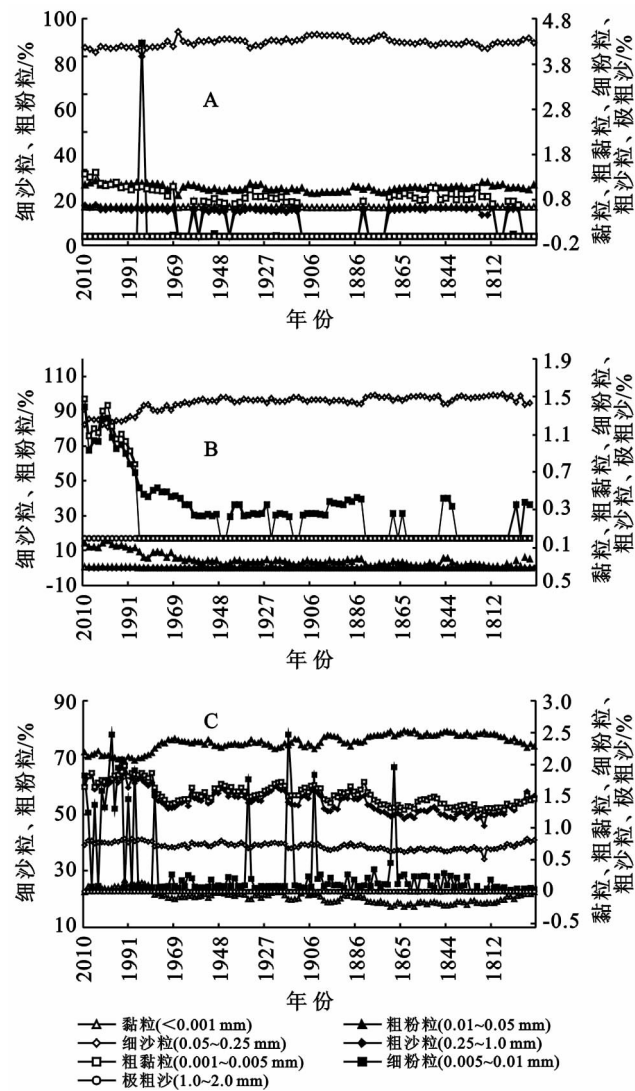


图1 不同样点红柳沙包沉积纹层沙物质粒度组成

图1中A采样点以细沙为主,含量为83.62%~91.4%;粗粉沙次之,含量7.69%~12.72%;黏粒、粗黏粒和细粉沙较少,分别为0~0.63%,0~1.23%,0.84%~1.22%;而除了1994年、1985年、1967年、1938年和1803年这五层含有粗沙外,其余纹层均无出现。

B采样点以细沙为主,含量为82.91%~98.54%;粗粉沙次之,含量1.46%~13.89%;黏粒、粗黏粒以及细粉沙含量较少,分别为0~0.6%,0~1.3%,0~1.19%;而粗沙含量所占比例也很小,平均含量仅为0.02%左右。

C 采样点主要为细沙,其含量为 69.4%~78.83%;粗粉沙含量较多,占 17.87%~25.05%;黏粒、粗黏粒以及细粉沙含量较少,其含量分别为 0.63%~0.8%,1.16%~1.75%,1.32%~1.88%;而粗沙所占比例很少,除了 1989—2010 年、1966—1986 年、1916—1917 年、1909 年所占比例稍大(1%左右)外,其余平均在 0.2%左右。

2.3 沉积纹层的年代序列

采用<sup>210</sup>Pb CIC 模式<sup>[9]</sup>,依据沙物质<sup>210</sup>Pbex 随深度变化的对数拟合曲线方程,计算各采样点沉积纹层的平均沉积速率,再根据各采样点的平均沉积速率和样品沉积的深度估算其年代。并结合纹层计年、<sup>137</sup>Cs 测年和<sup>14</sup>C 测年数据进行校正,最终建立各采样点红柳沙包沉积纹层的年代序列,其中 A 采样点序列时段为 1792—2010 年,B 采样点序列时段为 1600—2010 年,C 采样点序列时段为 1590—2010 年(图 2)。

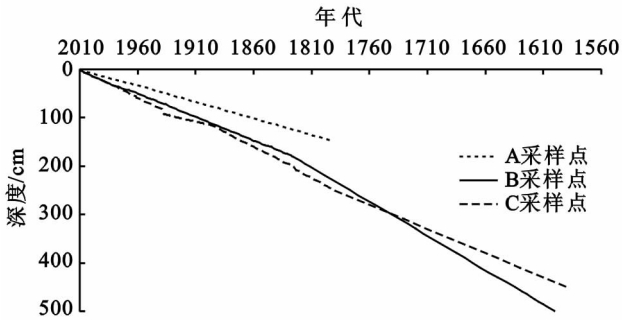


图 2 塔南地区红柳沙包沉积纹层的年代序列

3 结果与分析

3.1 粒度参数特征

根据粒度参数计算方法<sup>[4,10]</sup>,分别对三个采样点沉积纹层沙物质粒度数据进行处理,采用 SPSS 17.0 软件进行间断年份粒度参数的线性插值,最后用 Sigma Plot 软件绘制粒度参数变化图(图 3)。

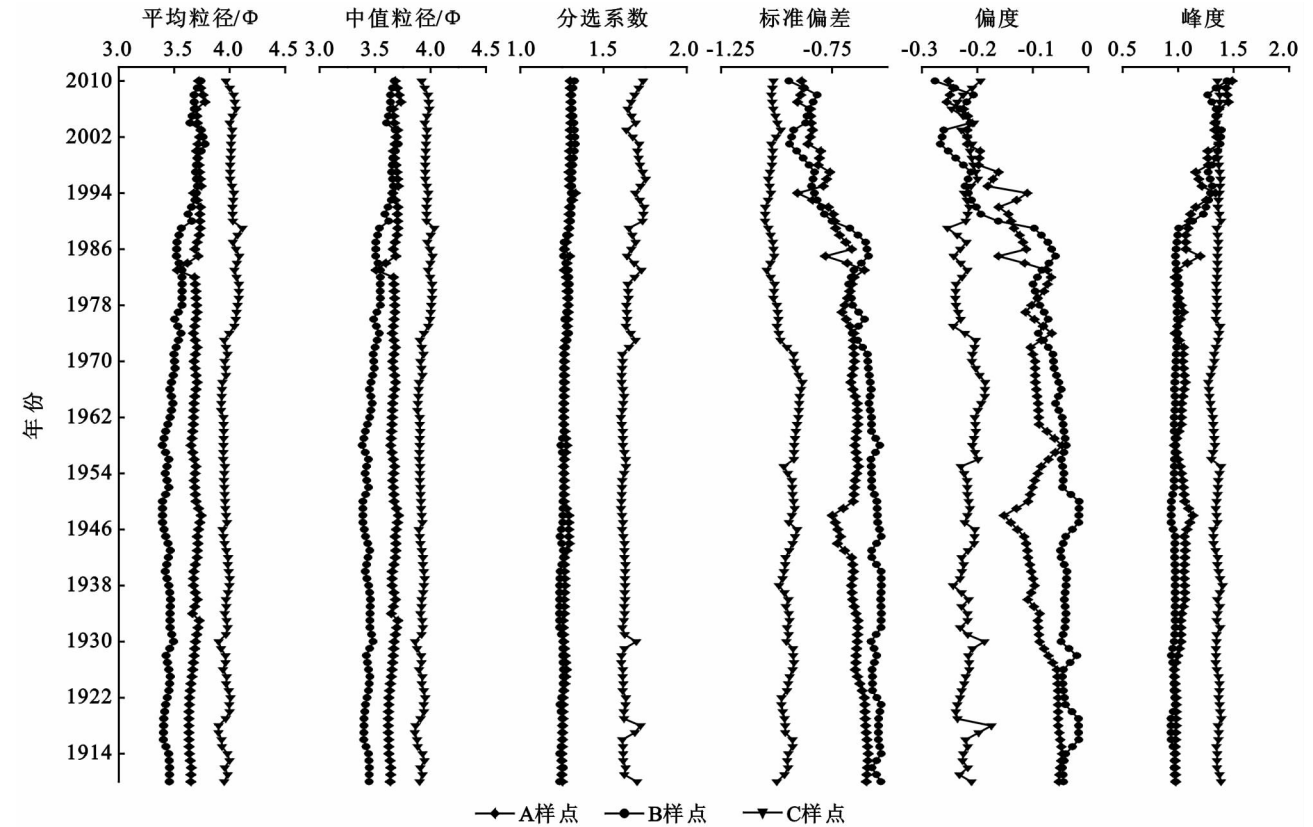


图 3 不同采样点红柳沙包沉积纹层沙物质粒度参数

图 3 中 A 采样点沙物质粒径主要分布在 $0.16\phi \sim 11.13\phi$ 之间,粒径平均值为 $3.71\phi$ ,中值粒径为 $3.69\phi$ 。分选系数为 $1.25 \sim 1.34$ ,平均值为 $1.27$ ,表明该采样点沙物质粒度分选性较好。偏度值为 $-0.25 \sim -0.05$ ,平均值为 $-0.11$ 。其中,44.6%的偏度值为 $-0.3 \sim -0.1$ ,属于负偏态;55.4%的偏度值为 $-0.1 \sim 0.1$ ,呈近对称分布,说明沙物质粒度以

细组分为主,且沙物质粒度的分选性有变差趋势。峰度值为 $0.96 \sim 1.49$ ,平均值为 $1.08$ 。其中,78.2%的峰度值为 $0.9 \sim 1.11$ ,属中等(正态)型;21.8%的峰度值为 $1.11 \sim 1.56$ ,属尖型。

B 采样点沙物质粒径主要分布在 $1.99\phi \sim 11.13\phi$ ,粒径平均值为 $3.47\phi$ ,中值粒径为 $3.46\phi$ 。分选系数为 $1.23 \sim 1.33$ ,平均值为 $1.26$ ,表明该采样点沙物质

粒度分选性较好。偏度值为 $-0.27\sim-0.01$ ,平均值为 $-0.06$ 。其中,11.9%的偏度值为 $-0.3\sim-0.1$ ,属于负偏态;88.1%的偏度值为 $-0.1\sim0.1$ ,呈对称分布。峰度值为 $0.93\sim1.45$ ,平均值为 $1.00$ 。其中,88.1%的峰度值为 $0.9\sim1.11$ ,呈中等(正态)分布;11.9%的峰度值为 $1.11\sim1.56$ ,属尖锐型。

C 采样点沙物质的粒径主要分布在 $0.16\varphi\sim11.13\varphi$ ,粒径平均值为 $3.95\varphi$ ,中值粒径为 $3.90\varphi$ 。分选系数为 $1.58\sim1.76$ ,平均值为 $1.64$ ,表明该采样点沙物质分选性较好。偏度值为 $-0.25\sim-0.17$ ,平均值为 $-0.22$ ,属负偏态。峰度值为 $1.26\sim1.41$ ,平均值为 $1.35$ ,属尖锐型。

### 3.2 粒级分布与概率累计特征

3.2.1 粒级分布特征 根据粒度组成和粒度参数,采用 Excel 2007 软件处理后,得到 3 组沙物质的粒级分

布规律,3 个采样点沙物质粒度分布整体呈现负偏态,而 B 采样点粒级分布所指向的 1846 年、1972 年、1977—1982 年、1988—2010 年的沉积纹层明显不同于其他纹层,其原因为该部分沙物质中含有较多的粗沙粒。

3.2.2 概率累积特征 依据粒度组成和粒度参数,并使用相关软件处理后,得到 3 组沙物质粒度概率累计曲线。3 个采样点红柳沙包沉积纹层沙物质粒度概率累积曲线的类型基本一致,均呈“S”型分布,且具有很高的相似性,反映其沉积动力环境相对一致。

## 4 讨论

### 4.1 不同采样点粒度参数的差异及形成原因

表 1 列出了塔南地区 3 个采样点红柳沙包沉积纹层沙物质的平均粒径、中值粒径、分选系数、偏度以及峰度五个粒度参数特征<sup>[11-12]</sup>。

表 1 塔南地区红柳沙包沉积纹层沙物质粒度参数特征

采样点	平均粒径/ $\varphi$	中值粒径/ $\varphi$	分选系数范围	偏度范围	峰度范围
A	3.71	3.69	1.25~1.34	$-0.25\sim-0.05$	0.96~1.49
B	3.47	3.46	1.23~1.33	$-0.27\sim-0.01$	0.93~1.45
C	3.95	3.90	1.58~1.76	$-0.25\sim-0.17$	1.26~1.41

根据表 1 数据得出,沙物质平均粒径:B 采样点>A 采样点>C 采样点,说明在 B 采样点周围的风沙搬运动力最强;中值粒径:B 采样点>A 采样点>C 采样点,说明在 B 采样点沉积物质以跃移和蠕移为主,而在 C 采样点以悬移为主;分选系数:B 采样点的分选性明显好于 A 采样点和 C 采样点,说明 B 采样点的沉积环境更加稳定;另外,偏度系数表现为:B 采样点>A 采样点>C 采样点;峰度系数表现为:C 采样点>A 采样点>B 采样点。

对比采样点位置及相关结果得出,从东北到西南排列的 3 个采样点的沙物质在粒度参数上表现出较强的相关性。并且 3 个红柳沙包都位于塔南地区,可以判断该地区红柳沙包的沙源主要是风成沙。这里常年刮东北风,而塔克拉玛干沙漠沙就成为了塔南地

区红柳沙包沙物质的沙源地。A 样点接近沙漠内部,影响沙物质特征的人为因素较少,主要是风力;B 采样点位于民丰县安迪尔乡新修的沙漠公路支路一侧,因为受到强风的影响,沙物质粒径相对较粗,分选性也较好,峰度范围较宽;C 采样点位于策勒县达玛沟乡,离绿洲最近,周围还有开垦的农田。由于绿洲植被阻滞沙物质的移动,粒径相对较细,分选性变差,峰度范围变窄<sup>[12]</sup>。3 个采样点沙物质粒度参数与塔克拉玛干沙漠南缘的其他灌丛沙丘基本一致<sup>[13-14]</sup>,细沙含量较高,极细沙和粉沙也较多。

### 4.2 不同类型沙丘沙物质粒度特征对比

塔南地区红柳沙包沉积纹层沙物质粒度特征,由于所形成环境条件不同,与其他地区沙丘沙相比仍有其独特性(表 2)。

表 2 不同类型沙丘沙物质粒度特征

参数值	海岸沙丘 <sup>[15]</sup>	米兰红柳沙丘 <sup>[2]</sup>	罗布泊红柳沙丘 <sup>[5]</sup>	塔克拉玛干流动沙丘 <sup>[13]</sup>	安迪尔牧场(A)	安迪尔古城(B)	策勒达玛沟(C)
平均粒径/ $\varphi$	2.00	3.40	3.54	3.34	3.71	3.47	3.95
分选系数	0.32	0.05	1.11	0.93	1.27	1.26	1.64
偏度	0.00	0.19	0.29	0.06	$-0.11$	$-0.06$	$-0.22$
峰度	1.06	1.03	1.51	0.94	1.08	1.00	1.35

4.2.1 与塔克拉玛干流动沙丘沙、海岸沙丘沙粒度的差异 从表 2 中看出,塔南地区红柳沙包沙物质粒径最细,塔克拉玛干沙漠流动沙丘沙物质粒径较细,海岸沙丘的沙物质粒径相对较粗,其原因在于塔南地区红柳沙包的沙物质来源于塔克拉玛干沙漠流动沙

丘沙,并经过较长距离搬运;而海岸沙丘沙主要靠海滩沉积,搬运距离较短。偏度对比结果显示,塔南地区红柳沙包沙物质粒度呈负偏态,其原因可能是其中部分沙物质来源于河流沉积物。塔克拉玛干沙漠流动沙丘沙粒度的正偏态是长时间风沙作用分选的结果。

果;而海岸沙丘沙物质粒度多呈对称分布,由于受到海滩的影响,部分样品表现出负偏态<sup>[8]</sup>。

4.2.2 与罗布泊红柳沙包沉积纹层沙物质粒度的差异 对比相关数据可以得出,塔南地区红柳沙包与罗布泊红柳沙包沙物质粒径相近,表明两地的沉积环境相对一致。从偏度上看,塔南地区 3 组红柳沙包沙物质粒度均为  $S_{k1} < 0$ ,说明沙物质以细组分为主,可能由于塔南地区的沙物质大部分来源于经长距离搬运的沙漠沙,其中 C 采样点位于绿洲附近,受人为影响较大。

4.2.3 不同位置红柳沙包沙物质粒度变化 根据前文数据看出,各采样点红柳沙包沙物质粒度组成具有一致性和继承性,且具备明显的风成沙特征。不同位置的红柳沙包沙物质粒度变化因受沙源和风力影响,呈现出规律性变化,即采样点周围水分和植被条件较好时,沙物质粒度细组分较之沙漠中就地起沙的沙物质相对要多。

4.3 粒度参数与年平均风速相关性分析

位于荒漠地区的风成沉积沙层的厚度,与沙源、风速和物质组成状况相关;而风沙起动临界风速的大小,与沙物质起动方式、沙颗粒级配、植被条件以及沙层湿度等因素不可分离<sup>[16]</sup>。

使用 SPSS 17.0 软件对 3 个采样点沙物质粒度的偏度、峰度与安迪尔、民丰和策勒气象站记载的年平均风速数据进行相关分析。结果显示,A 采样点和 B 采样点的偏度值和峰度值与年平均风速在 0.01 水平时表现为显著相关,其中 A 采样点相关系数分别为 0.528 和 -0.550,B 采样点相关系数分别为 0.602 和 -0.623;但是分析结果中,C 采样点的相关性不显著,其原因可能为绿洲阻碍了沙物质的移动和沉积。

4.4 风沙环境变化

细粒沉积物粒度特征可以判别风成、水成沉积物成因类型<sup>[17-18]</sup>。本文依据偏度值、峰度值及标准偏差等粒度参数,并利用砂岩粒度的萨胡判别函数值  $Y_{\text{风成;海滩}}$ ,对沉积环境进行鉴别<sup>[18]</sup>。结果显示,3 个采样点函数  $Y_{\text{风成;海滩}}$  的平均值分别为 -7.79, -7.86, -6.14,均满足风成沉积环境条件鉴别值  $Y < -2.7411$ ,说明塔南地区 3 个采样点的红柳沙包沙物质均以风成沙为主。

4.4.1 峰度距平值与大风天气 粒径、偏态和峰度等均与风况有关。本文将峰度距平值分为四级:距平值大于 25%,表示大风天气较多;距平值在 0~25% 之间,表示大风天气正常偏多;距平值在 0~-25% 之间,表示大风天气正常偏少;距平值小于 -25%,表示大风天气较少。将塔南地区三个采样点红柳沙包

沙物质峰度距平值变化(图 4)代表的转折年份进行拟合后发现,1801—1871 年峰度值相对较低,大风天气正常偏少;1872—1902 年,峰度值升高,大风天气正常偏多;1903—1984 年,峰度值变低,大风天数明显回落,基本对应于偏干期(1919—1986);1985—2010 年,峰度值升高,大风天气偏多,基本对应于偏湿期(1987—2010)<sup>[19]</sup>,与策勒气象站记录的降水增多趋势相一致。

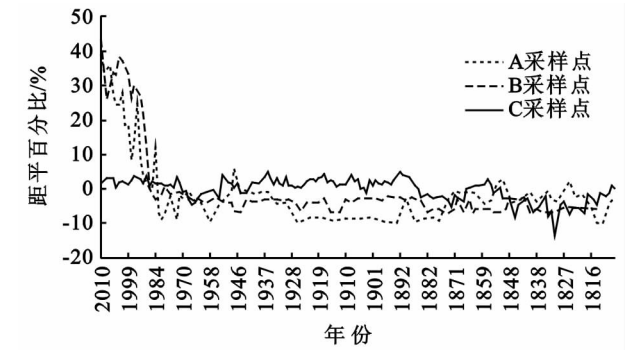


图 4 塔南地区三个采样点沙物质峰度距平值变化

4.4.2 沙尘物质与浮尘天气 沙尘物质(粒径  $< 0.005 \text{ mm}$ )所占比例代表浮尘天气的多少<sup>[20]</sup>,将沙尘物质所占比例依据距平值分为四级:距平值大于 25%,表示浮尘天气较多;距平值为 0~25%,表示浮尘天气正常偏多;距平值为 0~-25%,表示浮尘天气正常偏少;距平值小于 -25%,表示浮尘天气较少。三个采样点红柳沙包沙尘物质含量的距平值变化如图 5 所示,1801—1871 年,浮尘天气正常偏多;1872—1902 年,浮尘天气正常偏少;1903—1984 年,浮尘天气变多;1985—2010 年浮尘天气大幅增加,而 C 样点因受绿洲影响,浮尘天气明显少于 A、B 两采样点。

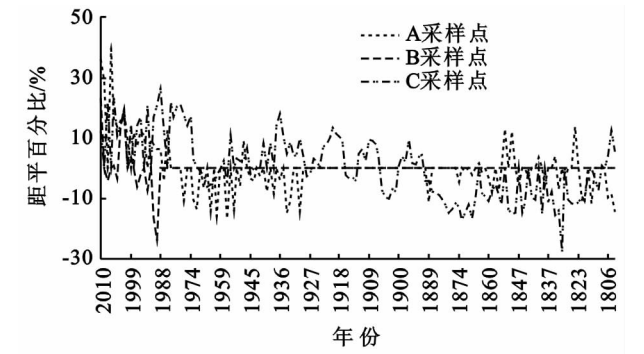


图 5 塔南地区三个采样点红柳沙包沙尘物质含量距平值变化 通过红柳沙包沉积纹层沙物质粒度分析,可将塔南地区 1801 年来的风沙环境变化划分为 4 个阶段:第一阶段:1801—1872 年,风沙作用变弱趋势明显,多浮尘天气。第二阶段:1872—1902 年,风沙作用明显变强,风沙天气逐渐增多,1876—1884 年达到峰值。第三阶段:1903—1984 年,风沙作用强度一般,

风沙天气较多。第四阶段:1985—2010年,风沙作用较弱,浮尘天气出现频繁,相对来说风沙天气出现较少,风沙天气与浮尘天气交替出现。

## 5 结论

(1) 塔克拉玛干沙漠南缘地区的红柳沙包沙物质主要来源于沙漠腹地,沙物质组成以细沙为主。沙物质的粒度参数、粒级分布、粒度概率累计特征等都具有较强的相似性。

(2) 沙物质粒度变化序列表明,1801年以来该地区的气候从干旱逐步转向湿润。

(3) 塔南地区的风沙环境变化阶段包括:1801—1872年,风沙作用较弱;1872—1902年,风沙作用明显变强;1903—1984年,风沙作用强度一般;1985—2010年,风沙作用明显回落。

### 参考文献:

- [1] 夏训诚,赵元杰,王富葆,等.红柳沙包的层状特征及其可能的年代学意义[J].科学通报,2004,49(13):1337-1338.
- [2] 夏训诚,赵元杰,王富葆,等.罗布泊地区红柳沙包年层的环境意义探讨[J].科学通报,2005,25(20):2176-2177.
- [3] 成都地质学院陕北队.沉积岩(物)粒度分析及其应用[M].北京:地质出版社,1976.
- [4] 吉启慧.粒度分析在塔克拉玛干沙漠研究中的应用[J].中国沙漠,1996,16(2):173-179.
- [5] 赵元杰,宋艳,夏训诚,等.近150年来罗布泊红柳沙包沉积纹层沙物质粒度特征[J].干旱区资源与环境,2009,23(12):103-107.
- [6] 张立运,夏阳.塔克拉玛干沙漠南缘生态环境的特点及治理问题[J].干旱区资源与环境,1994,8(1):72-79.
- [7] 宋艳.罗布泊红柳沙包沙物质粒度特征及其环境信息记录[D].石家庄:河北师范大学,2008.
- [8] 赵元杰,夏训诚.新疆罗布泊红柳沙包与环境研究[M].北京:科学出版社,2011.
- [9] Appleby P G, Oldfield F. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  to the sediment[J]. Catena, 1978, 5(1): 1-8.
- [10] 吴正.风沙地貌学[M].北京:科学出版社,1987.
- [11] 刘源鑫,焦峰.黄土高原丘陵区景观特征与景观指数粒度效应研究[J].水土保持研究,2013,20(3):26-27.
- [12] 霍文,何清,杨兴华,等.中国北方主要沙漠沙尘粒度特征比较研究[J].水土保持研究,2011,18(6):7-11.
- [13] 朱震达,陈治平,吴正,等.塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究[M].北京:科学出版社,1981.
- [14] 穆桂金.塔克拉玛干沙漠的形成时代及发展过程[J].干旱区地理,1994,17(3):1-9.
- [15] 王宵月.昌黎黄金海岸沙丘沉积特征及形成演变[J].地理学与国土研究,1996,12(3):60-64.
- [16] 陈渭南,董治宝,杨佐涛,等.塔克拉玛干沙漠的起沙风速[J].地理学报,1995,50(4):360-367.
- [17] 殷志强,秦小光,吴金水,等.中国北方部分地区黄土、沙漠沙、湖泊、河流细粒沉积物粒度多组分分布特征研究[J].沉积学报,2009,27(2):343-351.
- [18] 朱筱敏.沉积岩石学[M].北京:石油工业出版社,2008.
- [19] 孙增英.利用红柳落叶  $\delta^{13}\text{C}$  揭示塔克拉玛干沙漠南缘地区气候变化[D].石家庄:河北师范大学,2013.
- [20] 李玄姝,常春平.承德沙尘天气空间分布特征、成因及防治措施[J].水土保持研究,2012,19(4):271-273.
- [7] 张萍,查轩.崩岗侵蚀研究进展[J].水土保持研究,2007,14(1):170-176.
- [8] 林敬兰,黄炎和.崩岗侵蚀的成因机理研究与问题[J].水土保持研究,2010,17(2):41-44.
- [9] 魏多落.南方花岗岩区崩岗剖面特征研究[D].福州:福建农林大学,2009.
- [10] 林敬兰,黄炎和,蒋芳市,等.崩岗土体的渗透性能机理研究[J].水土保持学报,2013,27(2):53-56.
- [11] 王维勇.鄂东南花岗岩崩岗区土壤水分特征研究[D].武汉:华中农业大学,2012.
- [12] 任兵芳,丁树文,吴大国,等.鄂东南崩岗土体特性分析[J].人民长江,2013,44(3):93-96.
- [13] 刘目兴,聂艳,于婧.不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程[J].生态学报,2012,32(3):871-878.
- [14] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [15] 依艳丽.土壤物理研究法[M].北京:北京大学出版社,2009.
- [16] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,1993,38(20):1896-1899.
- [17] 袁东海,陈明亮.红壤水分扩散率和入渗性能的研究[J].安徽农业大学学报,1994,21(2):161-166.
- [18] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988.
- [19] 肖长来,梁秀娟,王彪.水文地质学[M].北京:清华大学出版社,2010.
- [20] 阮伏水.福建崩岗沟侵蚀机理探讨[J].福建师范大学学报:自然科学版,1999:24-31.
- [21] Perfect E, Kenst A B, Diaz-Zorita M, et al. Fractal analysis of soil water desorption data collected on disturbed samples with water activity meters[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(4): 1177-1184.
- [22] 李思平.广东省崩岗侵蚀规律和防治的研究[J].自然灾害学报,1992,1(3):68-74.

(上接第40页)