

# 塔克拉玛干沙漠及其大气降尘点粒度特征分析

霍文<sup>1,2</sup>, 何清<sup>1,2</sup>, 刘新春<sup>1,2</sup>, 秦贺<sup>4</sup>, 邢江燕<sup>3</sup>

(1. 中国气象局 乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002; 2. 塔克拉玛干沙漠大气环境观测试验站, 新疆塔中 841000; 3. 尉犁县铁干里克气象站, 新疆 巴州 841000; 4. 新疆气象台, 新疆 乌鲁木齐 830002)

**摘要:**对塔克拉玛干沙漠及其大气降尘点的粒度参数进行了分析计算, 结果表明: 风沙天气过程中, 塔中沙漠地区平均粒径 值较小, 标准偏差较小; 肖塘沙漠过渡带平均粒径 值较大, 标准偏差较大。肖塘沙漠过渡带粒度曲线分布形态左偏; 塔中沙漠地区曲线分布形态右偏。肖塘沙漠过渡带的峰度值较大, 塔中沙漠地区较小。塔里木盆地及其周边地区平均粒径 值为 2~6, 为细沙、极细、粗粉沙、中粉沙或者是其混合物。

**关键词:**塔里木盆地; 大气降尘; 平均粒径; 标准偏差; 偏度; 峰度

中图分类号: P425.55

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)04-0207-05

## Characteristic of Grain Sizes Atmospheric Dust and Sand in Taklimakan Desert

HUO Wen<sup>1,2</sup>, HE Qing<sup>1,2</sup>, LIU Xin-chun<sup>1,2</sup>, QIN He<sup>4</sup>, XING Jiang-yan<sup>3</sup>

(1. Institute of Desert and Meteorology, CMA, Urumqi 830002, China; 2. Desert Atmosphere and Environment Observation Experiment of Taklimakan Station, Tazhong, Xinjiang 830001, China; 3. Tieganklike Weather Station, Weili, Bazhou, Xinjiang 841000, China; 4. Xinjiang Meteorological Bureau, Urumqi 830002, China)

**Abstract:** Analysis on the grain sizes of atmospheric dust and sands in the Taklimakan Desert. The results showed that values and standard deviation in sandy and dust weather in Tazhong was lower. However, those of Xiaotang transition zone was higher. The distribution shape of Xiaotang transition zone was left deviated, and that of Tazhong was right deviated. The kurtosis of Xiaotang transition zone was higher than that of Tazhong desert area. The mean grainsize ( value) of Tarim basin and its surrounding area is 2~6, consisting of fine silt, very fine silt, coarse silt, medium silt and their mixture.

**Key words:** Tarim basin; atmospheric dust; mean grainsize; standard deviation; skewness; kurtosis

粒度测试是通过特定的仪器和方法对粉体粒度特性进行表征的一项实验工作。粒度是一个比较成熟的古环境指标,它具有易于采样、前处理过程相对简单、测量速度快等特点,因而应用范围很广,尤其是在深海沉积物和黄土研究方面起了很重要的作用<sup>[1-8]</sup>。前人对于粒度这一恢复古环境的指标的研究已经相当深入,并提出了很多表征粒度的参数来进行古环境的恢复;粒度分布是很多应用领域中最受关注的一项指标,所以客观真实地反映粉体的粒度分布是一项非常重要的工作<sup>[9]</sup>。就沙尘暴及其源区而言,粒度研究工作开展相对较少。钱亦兵等对淮噶尔中南部沙尘暴源区艾比湖地区、克拉玛依农

业开发区和古尔班通古特沙漠地表沉积物粒度组成、传统粒度参数及分维值进行了分析<sup>[10]</sup>,姚济敏对典型干旱区沙尘气溶胶光学厚度及粒度谱分布做了初步分析<sup>[11]</sup>,刘树林、李玉霖、杨前进等也开展过有关粒度特性的相关工作<sup>[12-14]</sup>。而沙尘暴形成的 3 个基本条件,一是沙尘源,它是沙尘暴形成的物质基础;二是天气条件,这是形成沙尘暴的动力条件;三是下垫面状态,包括植被、积雪覆盖状况以及土壤的疏松状态等。沙尘物质的物理特性,尤其是粒度组成,对它的起动与迁移有着重要影响。沙尘颗粒能否被搬运,很大程度上取决于其粒度组成。因此,研究塔里木盆地及其周边地区的土壤粒度组成,对深

\* 收稿日期: 2009-01-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(40775019); 新疆自治区科技攻关项目(200833119); 中国气象局新技术推广项目(CMATG2007M27); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(IDM2006002, IDM200807, IDM200806, IDM200809); 国家“十一五”科技支撑计划项目(2008BAC40B05-01); 干旱气象科学研究基金项目(IAM200814); 新疆气象局项目(200723)

作者简介: 霍文(1981-), 男, 陕西绥德人, 助理研究员, 从事沙漠气象工作。E-mail: huowenpet@idm.cn

入了解这一区域沙尘暴发生的机理及其防治将具有重要意义。

### 1 土壤样品的采集

分别于 2007 年在塔中大气环境监测实验站 (TZ) 及其校准站 (东面站 Ta、西面站 Tb)、肖塘本站 (Xa) 及其自动站 (Xb) 布置集沙仪 5 套, 梯度 (20, 50, 100 cm) 观测采集沙尘暴样品, 并由南向北间隔 20 km, 采样点分布在沙漠公路沿线范围内, 采集土壤样品 25 个 (S1 - S25), 并在若羌、精河、阿克苏、阿拉尔、巴楚、策勒、克拉玛依、库尔勒、柯坪、喀什、轮台、莎车、铁干里克、吐鲁番、乌兰乌苏、乌苏、叶城、哈德油田、莫索湾、民丰、且末、皮山、雅通古斯乡 (以上 24 采样点均已拼音缩写表示) 大气降尘点采集土壤样品。

### 2 粒度分析方法与原理

#### 2.1 样品的预处理

不同前处理过程会对粒度结果产生重要影响, 前处理过程中加 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 是为了除去有机质, 加 HCl 是为了除去碳酸盐及其形成的胶结作用, 而分散剂 Na<sub>2</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>6</sub> 起到防止颗粒胶结的作用。目前常规处理方法是加双氧水, 盐酸, 分散剂, 超声波振荡和进行粒度分析。我们采用的前处理步骤为: 首先将样品低温烘干, 过粗筛, 去除较大的石块以及草根、树叶等; 取适量的样品 (0.2 - 0.5 g) 放入烧杯中, 根据有机质含量的多少加入 10 ~ 30 ml 的双氧水 (1:3), 加热煮沸至反应无细小气泡为止, 以便除去样品中的有机质; 待冷却后, 在烧杯中加入 10 ml 的盐酸 (1:3), 加热到不产生气泡为止, 去除样品中的碳酸盐及有机质胶结; 向烧杯中加满蒸馏水, 静置直至溶液清亮, 所有颗粒沉降下来为止; 抽去上层清液, 加入 10 ml 分散剂 Na<sub>2</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>, 36 g/L, 摇匀以形成分散的颗粒悬浮液供激光粒度仪测定。

#### 2.2 激光粒度分析

粒度分析实验在中国气象局树木年轮理化研究重点开放实验室进行, 使用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪进行测量, 测量范围为 0.02 ~ 2 000 μm, 误差 < 3%, 并给出每一粒级的百分含量, 同时可提供粒度分布曲线和累积曲线。该型粒度仪是目前粒度测量中最普遍使用的粒度分析仪器之一, 具有测量范围广、精度高、速度快的优点。激光粒度仪测定的是根据光学衍射或散射原理的等效直径, 反映的是颗粒的横截面积, 粒度软件可以换算成表面积平均粒径和体积平均粒径等。

该法的特点是: (1) 测试速度快, 自动化程度高, 应用范围广; (2) 测试结果不受人为因素干扰, 具有良好的重现性; (3) 适用粒度范围较广。

#### 2.3 粒度分析参数

2.3.1 粒度参数的计算 粒度参数包括平均粒径、标准偏差、偏度和峰度。其计算方法包括图解法和矩值法。矩值法是将粒度曲线划分成 100 个数量级, 将每个数量级都考虑在内, 所以更能反应粒度曲线的真实特征。矩值法是将样品的平均粒径、标准偏差、偏度和峰度分别定义为粒度分布的一次矩、二次矩、三次矩和四次矩, 并根据式 (1) - (4) 求得。

$$\text{平均粒径 } X = (f_i \times m_i) / 100 \quad (1)$$

$$\text{标准偏差} = [ f_i (m_i - X)^2 / 100 ]^{1/2} \quad (2)$$

$$\text{偏度 } SK = f_i (m_i - X)^3 / [100 \times \quad ] \quad (3)$$

$$\text{峰度 } KG = f_i (m_i - X)^4 / [100 \times \quad ] \quad (4)$$

式中:  $f_i$  —— 每个粒级的权重;  $m_i$  —— 各粒级的平均粒径。

2.3.2 粒度参数的意义 中值粒径为累积频率达到 50% 的粒径值。平均粒径代表粒度分布的集中趋势。标准偏差提供了沉积物粒度相对于均值散布远近的信息, 反映了土壤样品的分选情况, 其值越大, 说明颗粒分布范围越大, 其值越小, 说明颗粒的分布越集中, 偏度表现了曲线的对称程度, 正态分布的偏度为零, 正偏差表明在频率曲线上细颗粒偏多, 而负偏差表示粗颗粒偏多。峰度反映了频率曲线上峰值的高低。标准偏差和峰度分别表示了颗粒的分选状况和峰值高低, 标准偏差越大说明颗粒的分选性越差, 而峰度越大说明颗粒的峰值越高, 因此两个参数表示的意义是相反的。

2.3.3 不同粒级的百分含量 粒级根据不同的用途的有不同的划分方法, 目前国际上通用标准为: 平均粒径  $= - 1b d, < - 1$  (粒径 > 2 000 μm) 为砾,  $- 1 < < 4$  (63 ~ 2 000 μm) 为砂,  $4 < < 8$  (4 ~ 63 μm) 为粉砂,  $> 8$  (粒径 > 4 μm) 为黏土 4 个等级。由于 < 10 μm 的细颗粒在疏松干燥的条件下极易被风吹起, 我们选择选用砂 (> 63 μm) 的百分含量代表粗物质来进行分析。

### 3 粒度分析结果

#### 3.1 塔中及肖塘风沙天气样品分析

风沙天气过程中, 塔中平均粒径 值在 3 ~ 4 之间, 属于极细沙范围 (0.062 5 ~ 0.125 0 mm), 标准偏差基本在 1 以下, 表明分布相对集中, 分选情况好, 且分布范围小, 表明风沙来源具有单一性, 主要成份来自塔克拉玛干沙漠, 沙源的均一性较好。肖塘沙漠过

渡带的平均粒径 值大于塔中,平均粒径范围 3~7,属于极细沙 3~4(0.062 5~0.125 0 mm),粗粉沙 4~5(0.031~0.062 5 mm)中粉沙 5~6(0.015 6~0.031 mm)混合体。风沙来源具有多样性,有来自塔克拉玛干沙漠的沙源成份,同时也有沙漠过渡带的粗粉沙以及中粉沙成份。标准偏差基本在 1 以上,较塔中而言分布范围较大,标准偏差波动性不大,分选情况较差,

从单样的粒径分布曲线上看,塔中和肖塘均属于单峰分布。塔中沙漠地区的沙尘天气较多,除了春季的系统性沙尘暴以外,夏季也常常发生局地性沙尘暴,在风力的长期作用下,细颗粒被风力搬运流失,遗留粗颗粒较多,因此,分选情况良好。肖塘过渡带附近有国家胡杨林自然保护区,对于风力的营运和风化作用具有减弱效果,因此,分选情况较差。

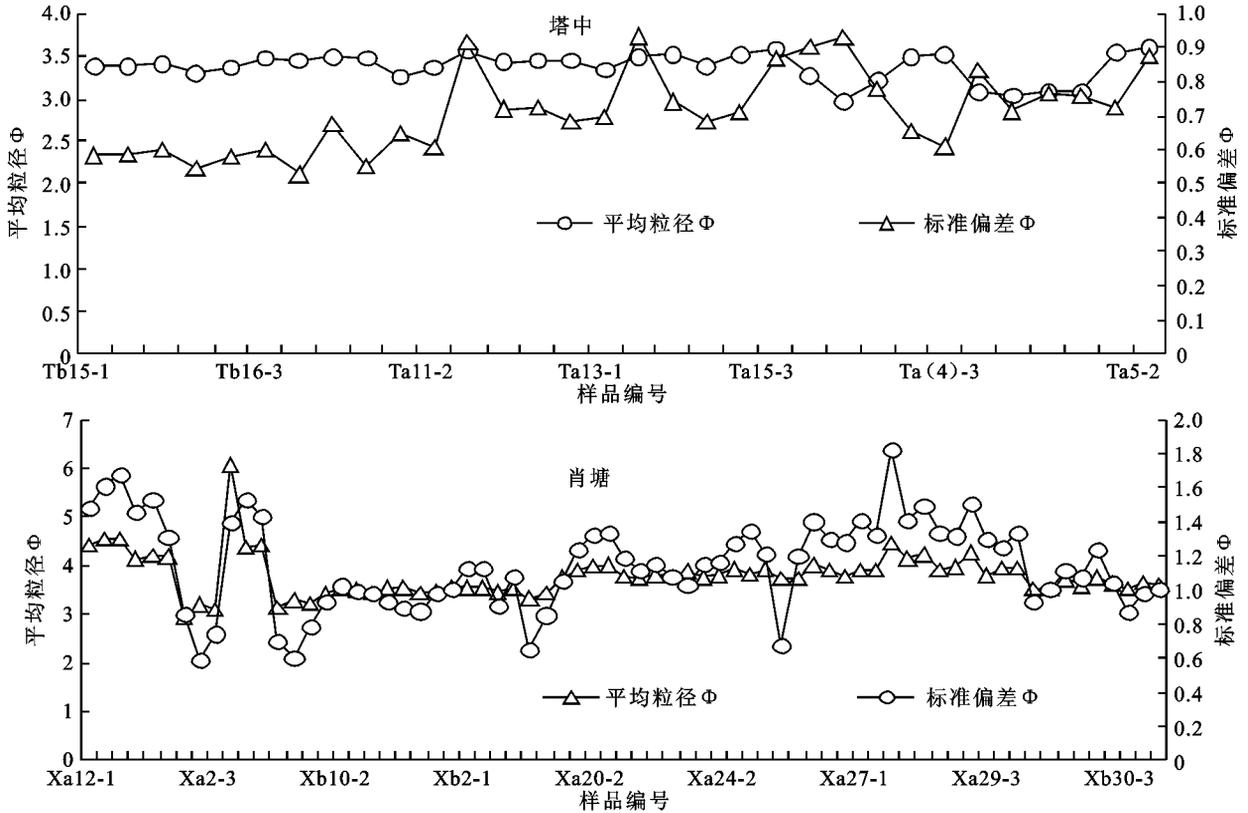


图 1 塔中风沙天气样品平均粒径/标准偏差变化

偏度和峰度是描述分布形态的指标,偏度量度数据的一侧较另一侧更为扩展的趋向,依据统计学原理,均值对称的数据偏度为 0;在左侧更为扩展的数据,其偏度为负;在右侧更为扩展的数据,其偏度为正。

风沙天气过程中,肖塘沙漠过渡带的偏度值大部分为正值,粒度曲线分布形态左偏。且偏态程度较高,表明在频率曲线上细颗粒较多,(1)成份之中有源于粒径较大的塔克拉玛干沙漠,均一性较差。(2)肖塘附近的塔里木河古河床的沉积土粒径为 70~80 μm 之间,所以细颗粒较多。相对于塔中沙漠地区偏度值大部分为负值,粒度曲线分布形态右偏。但是偏态程度较小,表明塔中风沙天气主要成份来源于塔克拉玛干沙漠,近年来,除了温度偏高时段引起的局地性沙尘暴,系统天气引起的沙尘暴往往成份混杂,例如东灌天气引起的范围较大,持续时间较长的沙尘天气。

风沙天气过程中,肖塘沙漠过渡带的峰度值较

大,反映了频率曲线上的峰值较高,标准偏差较大,分选情况较差;塔中峰度值较小,反映了频率曲线上的峰值较低,标准偏差较小,分选情况较好。造成这种情况的主要原因是肖塘过渡带下垫面的均一性较塔中流动性沙漠而言较差。肖塘平均粒径的震荡最大幅度也要大于塔中亦可以佐证。

### 3.2 沙漠公路和大气降尘点的样品分析

沙漠公路沿线一带采样点平均粒径 值较小,均值 3~4,标准偏差较小,说明各级粒径分布标准偏差较小,分布较为集中,分选情况较好。周边采样点的平均粒径 值较大,均值 4~6,标准偏差较大,各级粒径分布标准偏差比较大,分布较为分散,分选较差。其中,塔里木盆地周边采样点以及 S1、S18-1、S22、S23、S24、S25 标准偏差大于 1,沙漠公路沿线其他采样点标准偏差均小于 1。说明历史上沙漠腹地的风沙天气要明显多于周边地区,且受到人为因素的影响较小。

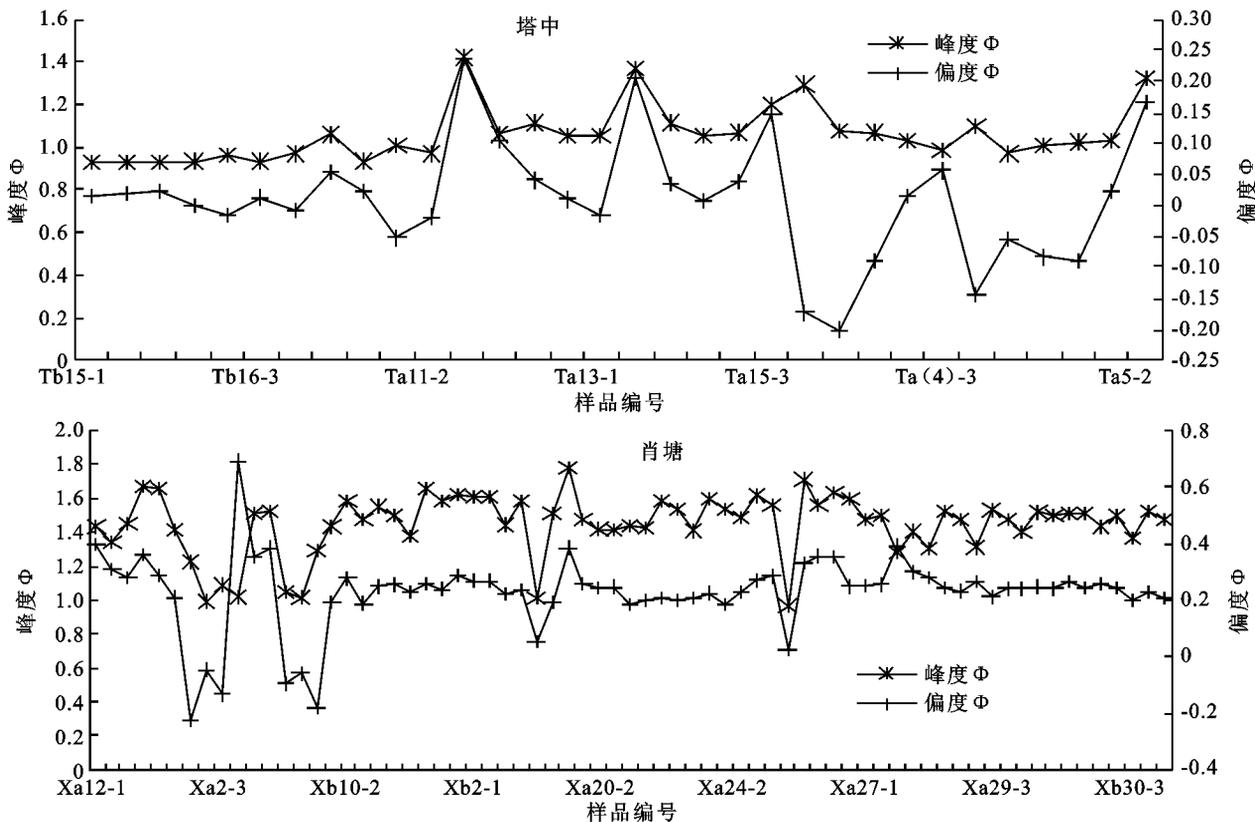


图 2 风沙天气样品样品偏度/峰度变化

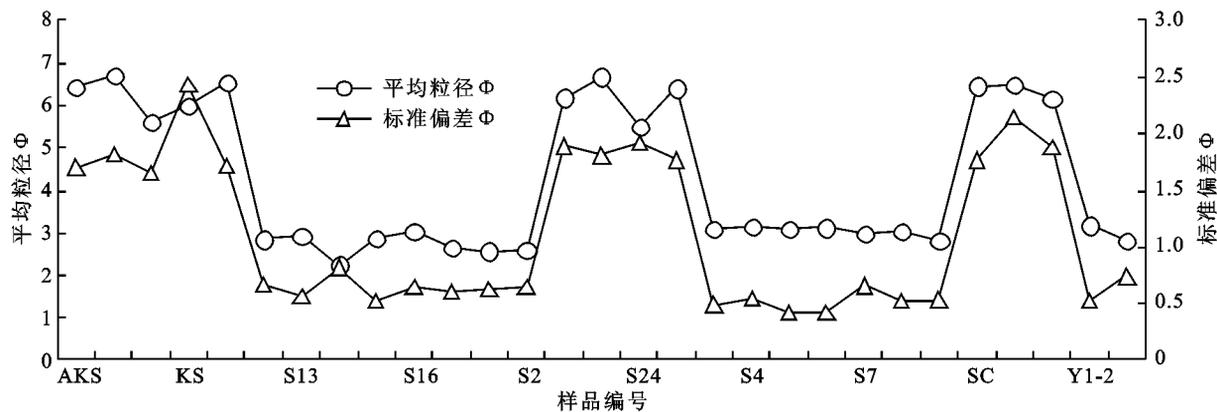


图 3 沙漠公路和塔里木盆地周边站点样品平均粒径/标准偏差变化

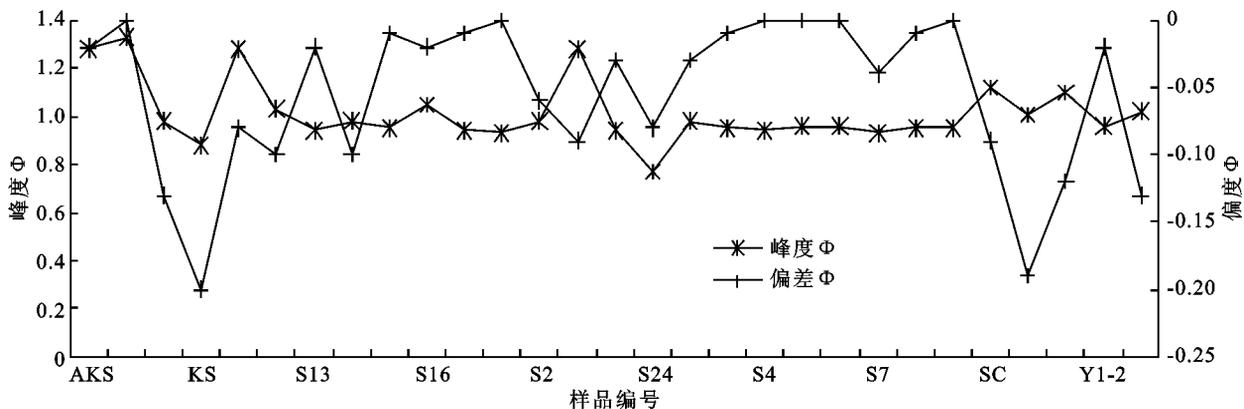


图 4 沙漠公路和塔里木盆地周边站点样品偏度/峰度变化

阿克苏、库尔勒、喀什、轮台、吐鲁番、雅通古斯、S24、S25 偏度值为负值, 粒度曲线分布形态右偏。  
 乡、S2 - S10、S13、S14、S15、S16、S17、S20、S23、余下若羌、精河、阿拉尔、巴楚、策勒、克拉玛依、柯

坪、等 30 多个采样点的偏度值为正值,粒度曲线分布形态左偏。

阿克苏、策勒、轮台、莫索湾、皮山、吐鲁番、乌兰乌苏、S1、S10、S12、S16、S18 - 1、S19、S21、雅通古斯乡、莎车峰度值 1.01,其他各个采样点峰度值较低。

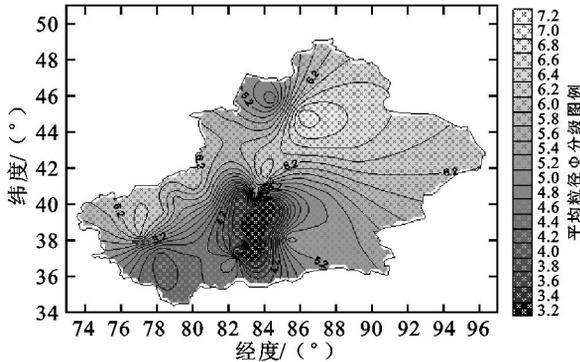


图 5 全疆平均粒径 插值分布图

### 3.3 全疆平均粒径 空间分布分析

塔克拉玛干沙漠及其大气降尘点平均粒径值为 2 - 6,为细沙 2 ~ 3(0.125 ~ 0.25 mm),极细沙 3 ~ 4(0.062 5 ~ 0.125 mm),粗粉沙 4 ~ 5(0.031 ~ 0.062 5 mm),中粉沙 5 ~ 6(0.015 6 ~ 0.031 mm)或者是其混合体。准葛尔盆地及其周边地区平均粒径较 值为 6 ~ 8,属于细粉沙 6 ~ 7(0.007 8 ~ 0.015 6 mm)或者极细粉沙 7 ~ 8(0.003 9 ~ 0.007 8 mm)的混合体。

塔克拉玛干沙漠统计的 380 个沙丘沙的平均粒度 0.121 mm,颗粒集中分布在 0.25 ~ 0.063 mm,沙丘沙均不含粗沙(只见少数沙丘的迎风坡上有粗沙)和黏粒。河流冲积淤积平原上的沙丘含粉沙较多,沙漠腹地高大沙丘含粉沙极少。沙丘沙较下伏沙、冲积沙平均粒径粗、粉沙含量少,其原因是沙丘沙经风长期作用后粉沙被吹走,颗粒分布趋于均匀<sup>[15]</sup>。

准噶尔盆地中南部大面积沙质、黏土质、盐土荒漠区,特别是春季翻耕的大面积裸露农田是沙尘暴的物源区。叶笃正等人也指出产生沙尘的地表物质以粉尘为主,其颗粒直径多在 0.063 ~ 0.002 mm 之间<sup>[16]</sup>。艾比湖地区除流动、半流动沙丘外,样品中均有小于 0.063 mm 的粉砂和黏土,含量大于 50 %以上<sup>[10]</sup>。

## 4 结论

(1) 风沙天气过程中,塔中平均粒径 值在 3 ~ 4 之间,分布相对集中,分选情况好,且分布范围小,平均粒径变幅范围较小,风沙来源均一性较好。肖塘沙漠过渡带的平均粒径 值大于塔中,平均粒径范围 3 ~ 7,变幅范围较大,风沙来源具有多样性,标准偏差较大,分布范围较大。

(2) 风沙天气过程中,肖塘沙漠过渡带的偏度值大部分为正值,粒度曲线分布形态左偏。且偏态程度较高,表明在频率曲线上细颗粒较多;塔中沙漠地区偏度值大部分为负值,粒度曲线分布形态右偏。但是偏态程度较小。

(3) 风沙天气过程中,肖塘沙漠过渡带的峰度值较大,反映了频率曲线上的峰值较高,分选情况较差,塔中峰度值较小,反映了频率曲线上的峰值较低,分选情况较好。

(4) 阿克苏、策勒、轮台、莫索湾、皮山、吐鲁番、乌兰乌苏、S1、S10、S12、S16、S18 - 1、S19、S21、雅通古斯乡、莎车峰度值较大,沙漠公路沿线采样点各级粒径分布标准偏差较小,分布较为集中。分选情况较好,大气降尘点各级粒径分布标准偏差比较大,分布较为分散。

### 参考文献:

- [1] 刘东生,安芷生.黄土与环境[M].北京,科学出版社,1985.
- [2] 鹿化煜,安芷生.黄土高原黄土粒度组成的古气候意义[M].中国科学D辑,1998,28(3):278-283.
- [3] 鹿化煜,安芷生.洛川黄土粒度组成的古气候意义[J].科学通报,1997,42(1):66-69.
- [4] 鹿化煜,安芷生.黄土高原红黏土与黄土古土壤粒度特征对比:红黏土风成成因的新证据[J].沉积学报,1999,17(2):226-232.
- [5] Sun Donghuai, An Zhisheng, Su Ruixia, et al. Eolian sedimentary l-ecordsfor the evolution of monsoon and westerly circulations of northern China in the last 2.6 Ma[J]. Science in China (Series D), 2003, 46 (10): 1049-1059.
- [6] Poaer S C, An Zhisheng. Correlation between climate events in theNoah Atlan tic and China during the last glaciation[J]. Nature, 1995, 375:305-308.
- [7] Ding Zhengli, Yu Zhiwei, Rutter N W, et al. Towards an orbital timescale for Chinese loess deposits [J]. Quaternary Sciences Review, 1994, 13:39-70.
- [8] Lu Huayu, Li Li, Huang Xiangping, et al. East Asia winter monsoonoscillation an d its correlation with the Noah Atlantic Heinrich events during the last glaciation[J]. Progress in Natural Science, 1996, 6(6):711-717.
- [9] 雷国良,张虎才,张文翔,等. Mastersizer2000 型激光粒度仪分析数据可靠性检验及意义:以洛川剖面 S4 层古土壤为例[J]. 沉积学报, 2006, 23(4):531-538.
- [10] 钱亦兵,吴兆宁,陈冬梅,等.准噶尔中南部沙尘暴源区地表沉积物粒度特征[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 831-837.

业收入得到 4 万元,远远超过了退耕前 2.80 hm<sup>2</sup> 耕地的直接经济产出。

### 3 各驱动因素对农村经济的贡献率分析

为比较上述驱动因素对农村经济发展和农民收入的贡献率大小,区别各因素的相对贡献率,引入灰色关联度分析。两个系统或因素之间的关联性大小的量度称为关联度。灰色关联度分析是对于一个系

统发展变化态势的定量描述。分析研究系统或要素之间的这种关系,为解释和区分影响系统各类因素的作用性质提供了依据。以各驱动因素为子序列,并分别以农村经济总收入和农民年收入为母序列,对基本数据标准化后计算各因素与农村经济总收入和农民年收入的关联系数,以各影响因素关联系数大小所占比例计算得到各因素对农村经济总收入和农民年收入的相对贡献率(表 5)。

表 5 各驱动因素与农村经济发展的关联系数和相对贡献率

驱动因素	农村经济总收入		农民人均年收入	
	关联系数	相对贡献率	关联系数	相对贡献率
非农行业就业人数占总人数的比例/ %	0.9646	33.64	0.9687	33.30
农业中间物质消耗	0.9224	32.17	0.9670	33.24
肉类产量/t	0.9807	34.19	0.9731	33.46

在所分析的 3 个驱动因素中,后续产业的发展对农村经济的发展和农民人均收入的提高的驱动力度最大,相对贡献率分别达到了 34.19% 和 33.46%,其次是就业结构的改变,相对贡献率分别为 33.64% 和 33.30%。

### 4 结论与讨论

通过以上分析,并结合典型农户调查,退耕还林(草)工程实施以后,吴起县劳动就业结构、耕地种植方式及后续产业都发生了不同程度的改变和发展,同时,农村经济和农民收入都有了较高的发展和提高。通过相关性分析,非农行业就业人数占总人数的比例、农业中间物质消耗、以及作为后续产业发展代表的肉类产量与农村经济的发展有着高度的相关性,在 0.01 检验水平上,相关系数分别达到了 0.969,0.922 和 0.981。3 个驱动因素对农村经济发展的相对贡献率分别为 33.64%、32.17% 和 34.19%。同时,对农民收入提高的相对贡献率分别为:33.30%、33.24% 和 33.46%。由此可见,退耕还林(草)工程尽管大幅度的减少了吴起县耕地面积,但同时,通过就业结构的调整、耕地种植方式的

改变以及后续产业的发展等途径对农村经济产生了巨大的驱动作用。

同时也应看到,由于非农收入与农业收入的悬殊性,导致了在就业结构转变过程中部分农田撂荒,在后续产业中,由于封山禁牧,导致饲草利用不充分,舍饲养殖业特别是食草牲畜发展缓慢,因此,在鼓励农村富余劳动力转移的同时,应加大对农业生产的补贴,以实现有限基本农田的充分利用,在发展后续产业过程中应对舍饲养殖户进行直接的补贴,同时轮换开放部分草地,在实现草场饲草的充分利用的同时,提高养殖收入,丰富农村经济。

#### 参考文献:

[1] 汪淼,李娜. 影响我国农村经济发展因素的实证分析[J]. 辽宁经济管理干部学院学报, 2007(4): 79-80.  
 [2] 韦幼玲. 新农村建设中制约农民增收的主要因素分析[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(14): 6122-6123.  
 [3] 白菊红,李旻. 农户家庭人均纯收入影响因素再分析[J]. 河南农业大学学报, 2006, 40(4): 414-417.  
 [4] 任永魁,张清平. 土石山区退耕还林还草对农村经济的影响[J]. 山西水土保持科技, 2008(3): 28-29.

(上接第 211 页)

[11] 姚济敏,张文煜,袁九毅,等. 典型干旱区沙尘气溶胶光学厚度及粒度谱分布的初步分析[J]. 中国沙漠, 2006, 26(1): 77-80.  
 [12] 刘树林,王涛,郭坚. 浑善达克沙地春季风沙活动特征观测研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(3): 356-361.  
 [13] 李玉霖,拓万全,崔建垣. 兰州市沙尘和非沙尘天气降尘的粒度特征比较[J]. 中国沙漠, 2006, 26(4): 644-647.

[14] 杨前进. 沙尘暴沉降物的粒度特征及其环境意义[J]. 中国沙漠, 2004, 24(1): 47-50.  
 [15] 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.  
 [16] 叶笃正,丑纪范,刘纪远,等. 关于我国华北沙尘天气的成因及治理对策[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 513-521.