

帕米尔高原东部表层沉积物粒度特征及其迁移路径

李汉林¹, 何清¹, 赵权威², 马明杰¹

(1.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所/新疆塔克拉玛干沙漠气象国家

野外科学观测研究站/中国气象局塔克拉玛干沙漠气象野外科学试验基地/新疆沙漠气象与沙尘暴重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830002; 2.新疆维吾尔自治区气象服务中心, 新疆乌鲁木齐 830002)

摘要: [目的] 研究帕米尔高原东部表层沉积物粒度特征及来源, 为提高中国西部高原地区沉积环境认知及生态环境建设提供科学依据。[方法] 利用激光粒度仪对帕米尔高原东部表层沉积物粒度进行分析, 并通过后向轨迹模型探讨远源风成沉降对其表层沉积物组成的影响。[结果] 研究区表层沉积物以砂粒为主, 表层沉积物粒径随海拔的逐渐升高而减小。初步推测表层沉积物主要为湖相沉积, 远源风成沉降主要受中亚西风气流和塔克拉玛干沙漠西侧沙尘颗粒物影响。[结论] 帕米尔高原东部处于生态环境脆弱区, 应因地制宜制定土地利用规划, 同时需防范中亚沙尘颗粒对其生态环境的影响。

关键词: 表层沉积物; 粒度参数; 后向轨迹模型; 帕米尔高原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)02-0082-07

中图分类号: P512

文献参数: 李汉林, 何清, 赵权威, 等. 帕米尔高原东部表层沉积物粒度特征及其迁移路径[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 82-88. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.02.012; Li Hanlin, He Qing, Zhao Quanwei, et al. Grain size characteristics and transport pathways of surface sediments in Eastern Pamir Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 82-88.

Grain Size Characteristics and Transport Pathways of Surface Sediments in Eastern Pamir Plateau

Li Hanlin¹, He Qing¹, Zhao Quanwei², Ma Mingjie¹

(1. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration/National

Observation and Research Station of Desert Meteorology, Taklimakan Desert of Xinjiang/Taklimakan

Desert Meteorology Field Experiment Station of CMA/Xinjiang Key Laboratory of Desert Meteorology and

Sandstorm, Urumqi, Xinjiang 830002, China; 2. Xinjiang Meteorological Service Center, Urumqi, Xinjiang 830002, China)

Abstract: [Objective] The grain size characteristics and sources of surface sediments in the Eastern Pamir Plateau were analyzed in order to provide a scientific basis for improving the understanding of the sedimentary environment and ecological environment construction in the western plateau of China. [Methods] The particle size characteristics of surface sediments in the Eastern Pamir Plateau were analyzed using a laser particle size analyzer. The influence of remote aeolian sedimentation on the composition of surface sediments was analyzed by use of a backward trajectory model. [Results] The surface sediments in the study area were mainly sand particles. Particle size of the surface sediments decreased with the gradual increase of altitude. It was preliminarily speculated that the surface sediments were mainly lacustrine sediments, and the far-source aeolian settlement was mainly affected by westerly air flow in Central Asia and sand dust particles in the Western Taklimakan Desert. [Conclusion] The Eastern Pamir Plateau is located in a fragile ecological environmental area. Land use planning should be formulated according to local conditions. At the same time, it is necessary to prevent the impact of dust particles on the ecological environment of Central Asia.

Keywords: surface sediments; grain size parameters; backward trajectory; Pamir Plateau

收稿日期: 2021-10-06

修回日期: 2021-11-27

资助项目: 国家自然科学基金项目“青藏高原夏季热源‘北扩’与塔里木盆地‘滞空’沙尘气溶胶辐射加热的关联及对区域降水变异的影响”(42030612); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK010206)

第一作者: 李汉林(1994—), 男(汉族), 安徽省宿州市人, 硕士研究生, 研究方向为生态环境演变及修复。Email: lihanlin5016@163.com.

通讯作者: 何清(1965—), 男(汉族), 四川省成都市人, 博士, 研究员, 主要从事沙漠气象与荒漠化防治方面的研究。Email: qinghe@idm.cn.

土壤粒度特征是环境研究中的重要课题,其作为土壤最基本的物理属性之一,对土壤水分运动、生产力和土壤风蚀等有重要影响^[1-2]。中国西北干旱区是全球土壤风蚀最严重的区域之一。已有研究表明,昆仑山脉北坡土壤细粒度随着海拔的逐渐升高而增加^[3];在准噶尔盆地西南缘的艾比湖湿地,随着土壤盐渍化程度的加剧,黏粒含量不断增加,也越容易被侵蚀^[4];伊犁河谷地区表层土壤以粉沙和黏粒为主,土壤理化性质随着海拔升高,由西南向东北明显改善^[5-6];柴达木盆地东北部哈勒腾河流域表层沉积物主要由细沙组成,河流冲积物和山前风化剥蚀产物为其主要物源^[7]。表层沉积物粒度特征是研究风动力变化的良好载体,然而,众多研究中缺少对帕米尔高原东部地区表层土壤粒度特性的分析。

1 研究区概况

帕米尔高原地区海拔较高,气候干旱,成壤作用弱,常年的风力侵蚀和人类活动对该区域表层沉积物产生重要影响^[8-9]。帕米尔高原毗邻干旱半干旱沙漠地带,该地区是全球粉尘主要排放源区,生态系统退化,水土沙化严重,容易发生大规模起沙现象^[10-11],沙漠表层沉积物可通过气流搬运在帕米尔高原东部地表进行沉积,并对其地表特征、植被覆盖度、土壤黏土含量等有重要影响,因此有必要对其表层沉积物的来源路径进行解析。表层沉积物粒度特征是最为直观的高原特征之一,是影响高原地区表面空气动力学的主要因子,也是高原发育环境和发育历史的重要证据。帕米尔高原作为“中巴经济走廊”建设重点区域之一,在“丝绸之路经济带”中具有十分重要的地位和作

用。本研究探讨帕米尔高原东部表层沉积物粒度特征及来源,旨在提高对中国西部高原地区沉积环境认知、判定物质运输方式,为国家生态环境建设提供参考。

2 材料与方方法

2.1 研究区概况及资料来源

帕米尔高原位于亚欧大陆中部(73°40′—96°18′E, 34°25′—48°10′N),其东部位位于中国境内的最西端,属高寒干旱气候,面积约 2.00×10^4 km²,平均海拔 4 000 m,年平均气温 3.5 °C,年平均风速 2.0 m/s,年平均降水量 68.1 mm,北部为喀什噶尔和叶尔羌河冲击成的绿洲平原,东部为塔克拉玛干沙漠,南邻喀喇昆仑山。主要为高山寒漠景观,主要植被为矮小灌木以及刺雪属和刺豆属的垫状植物,主要土壤类型为山地棕钙土、山地棕漠土、山地栗钙土、高寒草甸土和草甸沼泽土等,地形开阔,已有中巴公路通过,是“中巴经济走廊”的关键区域^[12-13]。

本研究所用土壤样品系沿国道 314,从位于帕米尔高原东部的喀什市至帕米尔高原中部的红其拉普口岸(中巴公路),据帕米尔高原东部的生态环境景观特征,选取有代表性的平原绿洲区、绿洲戈壁过渡带及高原寒旱区等景观,每隔 10 km 布设 1 个样点,取样点海拔高度为 1 441~4 706 m,共计 40 个土壤样品,位置如图 1a 所示。采集样品前,利用 GPS 记录该样点的经纬度,采样深度为 0—5 cm,采样面积为 20 cm×20 cm,用采样铲刮取地表松散层沉积物,每个样品重量均在 0.5 kg 以上,分别进行密封包装与记录,并将土样带回中国气象局树木年轮理化研究重点开放实验室进行测量。

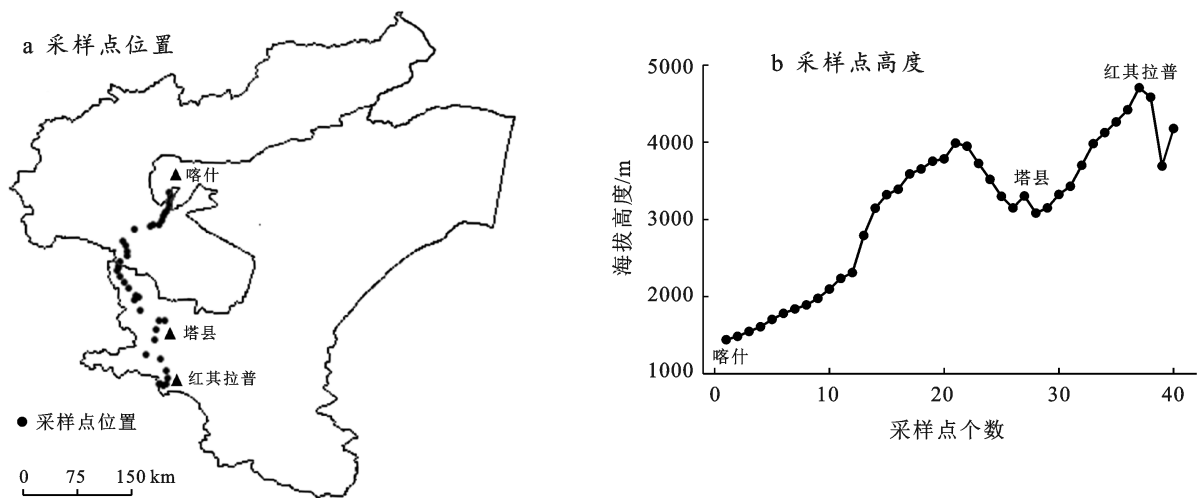


图 1 帕米尔高原东部采样点分布及其海拔高度

后向轨迹模型所用帕米尔高原东部高原寒旱区 PM₁₀ 逐时数据来源于帕米尔高原大气成分观测站

(2019 年 3 月至 2020 年 2 月),该站建于中国新疆喀什地区塔什库尔干塔吉克自治县(75.22°E, 37.77°N;

3 100 m),简称“塔县”。平原绿洲区 PM₁₀ 逐时平均数据来自喀什市(75.99° E,39.47° N,1 289 m)3 个环境监测站点逐时浓度的算术平均值(2019 年 9 月至 2020 年 8 月),喀什市与塔县海拔高度相差 1 811 m,相距约 300 km(图 1b)。后向轨迹模型所用气象再分析资料来源于美国气象环境预报中心(NCEP)提供的全球资料同化系统(GDAS)气象再分析资料,空间分辨率为 1°×1°,分为 00:00,06:00,12:00,18:00 h UTC(世界时)4 个时次,高度层为 23 层,气象要素包括温度、气压、水平和垂直风速等。

2.2 研究方法

表层沉积物粒度分析所用激光粒度仪为英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000,测量范围为 0.02~2 000 μm,重复测量误差小于 3%。该仪器采用光学衍射或散射原理,具有测量范围广、精度高、速度快的优点^[14]。文中粒径单位采用 Φ 值,该值是克鲁宾(Krumbein)根据伍登温德华(Udden-Wenworth)粒级标准,再通过 Folk 和 Ward 方法计算粒度参数^[15-18]。其中,土壤的粒度分布(soil particle size distribution, PSD)依据国际制土壤质地分级标准,即黏粒(粒径<2 μm),粉粒(粒径 2~20 μm)和砂粒(粒径 20~2 000 μm)。

后向轨迹模式全称为混合单粒子拉格朗日综合轨迹模式(HYSPLIT),是美国国家海洋大气管理局(NOAA)和澳大利亚气象局联合研发的一种用于计算和处理大气污染物传输和扩散轨迹的专业模型,是具有处理多种气象要素输入场、多种物理过程和不同类型污染物排放源的综合模式系统^[19-20]。

3 结果与分析

3.1 粒度参数分布特征

帕米尔东部表层沉积物 40 个样品的采集区域按照海拔高度及下垫面类型共分为 A,B,C,D 这 4 组,其中 1—2 号为 A 组(平原绿洲区:1 441.0~1 485.7 m),3—13 号为 B 组(绿洲戈壁过渡区:1 548.7~2 792.0 m),14—27 号为 C 组(戈壁高原过渡区:3 145.0~3 989.3 m),28—40 号为 D 组(高原寒旱区:3 082.5~4 706.3 m),每组样品数分别为 2,11,14,13 个。由图 2 可知,帕米尔高原东部所采集所有表层沉积物样品平均粒径为 3.62Φ(81.28 μm),粒径范围为 2.12Φ(229.78 μm)~5.63Φ(20.13 μm),粒级跨度较大,依据国际制土壤质地分级标准,其表层沉积物粒径较粗,主要为砂粒,是构成该地区土壤固相骨架的基本颗粒^[21-23]。帕米尔高原东部不同区域表层沉积物平均粒径由大到小分别为:A>C>B>D,A 组土样平

均粒径为 2.64Φ(160.67 μm),其粒径范围为 2.38Φ(191.50 μm)~2.89Φ(134.81 μm);B 组土样平均粒径为 3.72Φ(75.81 μm),其粒径范围为 2.17Φ(221.66 μm)~5.37Φ(24.24 μm);C 组土样平均粒径为 3.24Φ(106.15 μm),其粒径范围为 2.12Φ(229.78 μm)~5.23Φ(26.72 μm);D 组土样平均粒径为 4.10Φ(58.24 μm),其粒径范围为 2.70Φ(154.02 μm)~5.63Φ(20.13 μm)。帕米尔高原东部表层沉积物粒度组成是常年受风化侵蚀、堆积等地表过程与干旱多风的气候环境共同作用的结果,该地区的平原绿洲区的平均粒径最大,高原寒旱区的平均粒径最小,戈壁高原过渡区和戈壁绿洲过渡区的平均粒径居中,该地区表层沉积物粒径随海拔的逐渐升高而减小。由于帕米尔高原寒旱区海拔较高,表层沉积物常年受西风和东北风的风化分选,气流中携带的细小颗粒易在此受阻并沉降堆积,导致其平均粒径最小;平原绿洲区海拔最低,风沙天气活动频繁,当大风经过时,会携带表层小粒径沉积物,留下粒径相对较大的土壤,且绿洲地区的植被能够降低近地层风速,减少土壤风蚀量并拦截气流中的沙尘粗颗粒,导致其表层沉积物粒径相对较大^[3]。帕米尔高原东部所有表层沉积物样品的标准偏差约为-1.79,范围为-2.58~-0.77,其中 A 组样品标准偏差范围为-1.64~-1.14;B 组样品标准偏差范围为-2.39~-1.16;C 组样品标准偏差范围为-2.58~-0.77;D 组样品标准偏差范围为-2.27~-1.25。标准偏差可表征沉积物粒度相对于均值散布的远近,根据 Folk 和 Ward 分选性等级标准划分^[21-23],4 组表层沉积物粒度标准偏差皆属于分选极好。帕米尔高原东部所有表层沉积物样品的偏度约为-0.31,范围为-0.64~-0.09,其中 A 组样品偏度范围为-0.29~-0.27,属于极负偏;B 组样品偏度范围为-0.51~-0.14,属于极负偏至负偏;C 组样品偏度范围为-0.64~-0.13,属于极负偏至负偏;D 组样品偏度范围为-0.38~-0.09,属于负偏至近对称。偏度可定量表征沉积物粗细分布的对称程度,帕米尔高原东部表层沉积物粒度皆是负偏,表明在频率曲线上粗粒度端形成长尾,粗颗粒偏多,且分布更集中^[21-23]。帕米尔高原东部表层沉积物样品平均峰度为 1.18,峰度范围为 0.77~1.78。4 组表层沉积物样品平均峰度分别为 1.54,1.15,1.24,1.09,取值范围分别为 1.53~1.54,0.88~1.60,0.77~1.78,0.91~1.36。峰度可表征频率曲线上峰值的高低,根据 Folk 和 Ward 分选性等级标准划分^[21-23],A 组全部属于尖锐型,B 组属于平坦至尖锐型,C 组属于平坦至很尖锐型,D 组属于中等至尖锐型,所有样品多为尖锐峰。

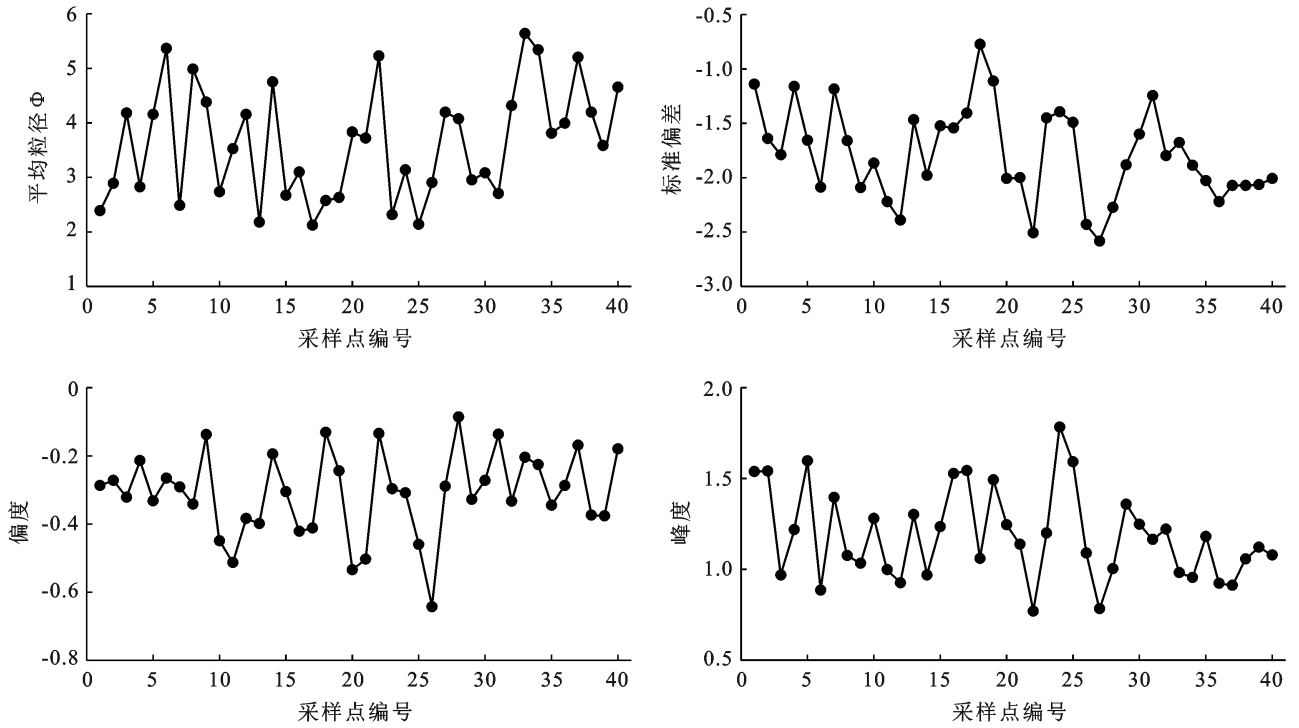


图 2 帕米尔高原东部表层沉积物粒度特征

3.2 粒度所反映的沉积环境分析

Sahu 判别式^[24]是萨胡通过对大量的砂石、砾石等碎屑物质进行分析建立的一系列判别公式。本文采用 Sahu 判别式(表 1)对帕米尔高原东部表层沉积环境进行判别,将帕米尔高原东部表层沉积物粒度数据代入判别式中计算,以此检验其风成可能性。公式(1)计算结果显示 $-6.22 < Y_1 < 16.21$,沉积环境复杂,其中 92.5%的表层沉积物样品 $Y_1 > -2.74$,为海滩沉积环境,7.5%的表层沉积物样品 $Y_1 < -2.74$,为风成沉积环境;公式(2)计算结果显示 $96.72 < Y_2 < 513.81$,即所有样品 $Y_2 > 65.37$,为浅海沉积环境;公式 3 计算结果 $-55.89 < Y_3 < -3.81$,即所有样品 Y_3

< -7.42 ,为河流或三角洲沉积。

由于 Sahu 判别式缺少湖相沉积环境判别式,而浅海环境与湖泊环境相似,区别在于沉积物的矿物成分和碳酸盐含量。从粒度的角度分析沉积环境,并没有涉及到沉积物的矿物成分和碳酸盐含量。塔县盆地位于帕米尔高原东部的塔什库尔干塔吉克自治县,该盆地第四纪覆盖严重,主要以晚第四纪以来发育的冲、洪积物,冰碛物和湖相沉积物为主,湖相地层主要以黏土、黏土质粉砂和粉砂组成,并在湖相地层中部发现含有贝壳和炭屑的薄层,沉积环境相对稳定^[25-26]。因此,可以推测帕米尔高原东部表层沉积物主要为湖相沉积。

表 1 沉积环境鉴别公式(Sahu 判别式)及标准^[27-28]

公式	鉴别环境	公式表达	判别标准
1	风成和海滩	$Y_1 = -3.57 M_z + 3.70\sigma^2 - 2.08 S_k + 3.11 K_g$	$Y < -2.74$ 为风成沉积环境; $Y > -2.74$ 为海滩沉积环境
2	海滩和浅海	$Y_1 = 15.65 M_z + 65.71\sigma^2 + 18.11 S_k + 18.50 K_g$	$Y < 65.37$ 为海滩沉积环境; $Y > 65.37$ 为浅海沉积环境
3	浅滩和河流	$Y_1 = 0.28 M_z - 8.76\sigma^2 - 4.89 S_k + 0.05 K_g$	$Y > -7.42$ 为浅海沉积环境; $Y < -7.42$ 为河流或三角洲沉积

3.3 来源路径分析

帕米尔高原东部地表风蚀严重,植被覆盖度较低,其表层沉积物主要是砂粒,是沙漠的近源沉积,受搬运动力的作用强烈,可通过风力跃迁和悬移并沉积,从而影响其粒度组成。表层沉积物对局地大气粉尘载荷具有明显贡献,是研究风动力变化的良好载

体。因此有必要通过气流轨迹探讨风成沉降对其表层沉积物组成的影响^[29-30]。

本文分别以帕米尔高原东部高原寒旱区的塔县和平原绿洲区的喀什市为受点,模拟全年每日逐时(00:00—23:00 北京时)到达两个受点的 48 h 后向气流轨迹进行聚类分析,由于粗颗粒 PM_{10} 是沙尘天气

主要大气颗粒物,其传输高度通常高于1 000 m,因此模拟高度选择为距地面1 000 m。将模拟的后向轨迹和沙尘颗粒中的主要成分 PM_{10} 逐小时浓度数据结合进行统计分析,以定量表征不同轨迹对帕米尔高原东部 PM_{10} 浓度的贡献水平,以此探讨不同输送路径对帕米尔高原表层沉积物的影响。从图3可以看出,到达帕米尔高原东部平原绿洲区的气流轨迹主要呈东西分布,各类气流所携带的 PM_{10} 浓度从高到低依次为:轨迹2>轨迹6>轨迹1>轨迹4>轨迹3>轨迹5,大气颗粒物污染是制约喀什市发展的重要环境因素,污染性沙尘浓度较高,其中来自新疆西南部的气流(轨迹2和轨迹4),在全年总气流轨迹中占比达41.5%,携带 PM_{10} 浓度较高,分别为304.2和226.4 $\mu g/m^3$,气流源地和途经区域是中国沙尘暴的

主要源地塔克拉玛干沙漠,在浮尘、扬沙和沙尘暴等频发的沙尘天气下,可随动能较高的气流向喀什地区近距离搬运高浓度沙尘颗粒,且轨迹2和轨迹4轨迹较短,风速较小,移动速度较慢,区域气象条件稳定,不利于 PM_{10} 稀释扩散,是影响帕米尔高原东部平原绿洲区 PM_{10} 浓度的主要输送路径;其次是来自土库曼斯坦东部的气流(轨迹6),携带 PM_{10} 浓度较高,中亚地区的大沙漠卡拉库姆沙漠位于土库曼斯坦境内,沙漠地表是高浓度沙尘气溶胶源区,导致轨迹6同样是影响帕米尔高原东部平原绿洲区 PM_{10} 浓度的主要输送路径;轨迹1,3在总轨迹中占比达42%,气流主要途经中亚干旱半干旱沙漠地带,裸露的地表常年受风化影响,有利于沙尘天气发生,故对应 PM_{10} 浓度较高值(表2)。

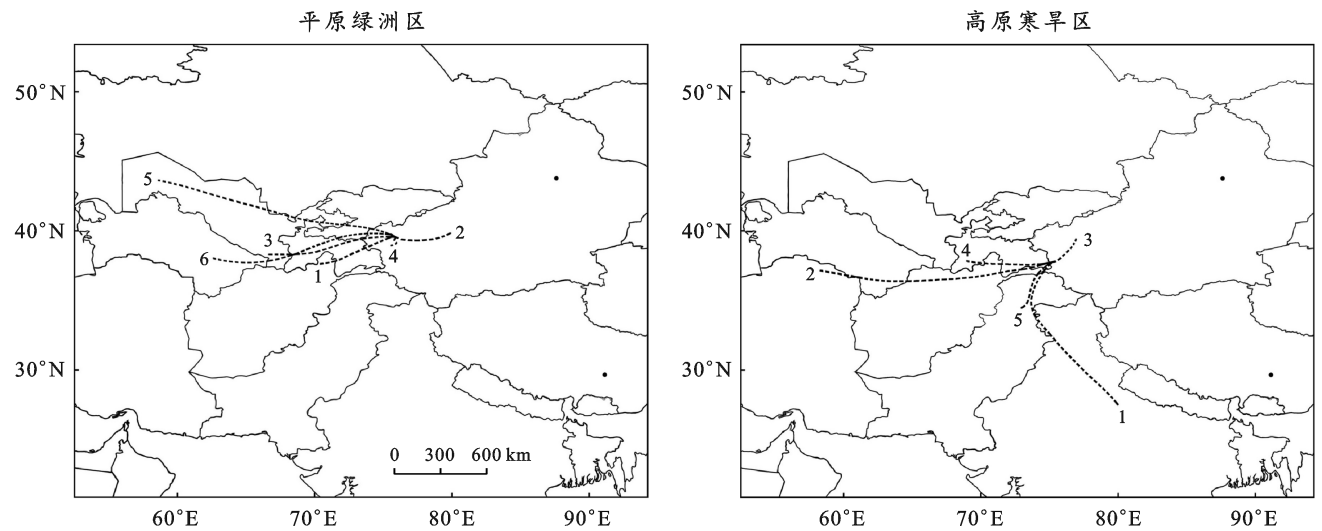


图3 帕米尔高原东部平原绿洲区与高原寒旱区全年后向轨迹聚类分布对比

表2 帕米尔高原东部各类沉积物轨迹对应的 PM_{10} 浓度统计结果

地区	类型	途经区域	总轨迹	
			轨迹比例/%	$PM_{10}/(\mu g \cdot m^{-3})$
平原 绿洲 区	1	阿富汗东北部、塔吉克斯坦东部	24.1	231.7
	2	中国新疆西南部	18.2	304.2
	3	乌兹别克斯坦东南部、塔吉克斯坦中部	17.9	196.8
	4	新疆西南部	23.3	226.4
	5	乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦南部	5.7	157.7
	6	土库曼斯坦东部、乌兹别克斯坦东南部、塔吉克斯坦中部、吉尔吉斯斯坦南部	10.8	261.2
高原 寒旱 区	1	印度北部、巴基斯坦东北部、塔吉克斯坦南部	3.3	5.2
	2	伊朗北部、土库曼斯坦南部、阿富汗北部、塔吉克斯坦南部	9.7	25.5
	3	中国新疆西南部	29.8	25.6
	4	阿富汗北部、塔吉克斯坦南部	27.3	36.9
	5	巴基斯坦东北部、塔吉克斯坦南部	29.9	23.3

到达帕米尔高原东部高原寒旱区的气流主要向西南方向呈散射状分布,全年分布特征与其“西风—

季风”协同作用相对应,各类气流所携带的 PM_{10} 浓度从高到低依次为:轨迹4>轨迹3>轨迹2>轨迹5>

轨迹 1,其中来自中亚地区,途经塔吉克斯坦南部的气流(轨迹 4,轨迹 2),在全年总气流轨迹中所占比例达 37.0%,携带 PM_{10} 浓度较高,盛行的西风急流易将中亚干旱半干旱沙漠地区的表土与细沙扬起,受高原独特地形影响,进一步抬升到达帕米尔高原东部,并与空气中的水蒸气凝结成核,发生湿沉降至地表形成积聚^[31-33];来自新疆西南部的气流(轨迹 3),携带 PM_{10} 浓度较高($25.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$),帕米尔高原的存在对塔里木盆地内的局地环流形势有重要作用,塔里木盆地中央的塔克拉玛干沙漠是高浓度沙尘气溶胶源地,受近地面风场和昆仑山北坡高海拔地形的影响,在大风天气的起沙过程中,较强的东灌沙尘带可驱动弱沙尘带向帕米尔高原方向输送,随着大气的上升运动,在对流层中跨距离输送沙尘,通过沉降过程进入地表^[19];来自南亚方向的海洋气流(轨迹 1,5),携带 PM_{10} 浓度较低,分别为 5.2 和 $23.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$,气流可携带灰尘和海盐颗粒沉降于帕米尔高原东部地表,对其表层沉积物的粒度组成造成一定影响。

4 结论

(1) 帕米尔高原东部表层沉积物平均粒径为 $3.62\Phi(81.28 \mu\text{m})$,质地以砂粒为主,且粒径随海拔的逐渐升高而减小。

(2) 粒度标准偏差皆属于分选极好,粒度皆是负偏,分布更集中,峰度多为尖锐峰;通过 Sahu 判别式结合地质构造背景,初步推测该地区表层沉积物主要为湖相沉积。

(3) 帕米尔高原东部高原寒旱区表层沉积物远源风成沉降主要受来自中亚地区的西风气流影响,平原绿洲区主要受来自塔克拉玛干沙漠西侧沙尘颗粒物影响。

(4) 帕米尔高原东部处于生态环境脆弱区,应因地制宜制定土地利用规划,同时需防范中亚沙尘颗粒对其生态环境的影响。

[参 考 文 献]

[1] 杨兴华,康永德,周成龙,等.塔克拉玛干沙漠土壤粒度分布特征及其对粉尘释放的影响[J].农业工程学报,2020,36(5):167-174.

[2] 阳利永,吴献花,赵斌,等.滇池柴河流域不同土地利用方式土壤养分剖面分异[J].水土保持研究,2012,19(5):95-99.

[3] Gui Dongwei, Lei Jiaqiang, Zeng Fangjiang, et al. Ordination as a tool to characterize soil particle size distribution, applied to an elevation gradient at the north slope of the Middle Kunlun Mountains [J]. Geoderma, 2010,

158(3):352-358.

[4] 王敬哲,丁建丽,王飞,等.艾比湖湿地不同盐渍化土壤粒度组成及可蚀性研究[J].土壤,2018,50(3):598-605.

[5] 靳建辉,李志忠,凌智永,等.伊犁河谷新垦绿洲表层土壤粒度特征[J].水土保持通报,2010,30(6):7-11,16.

[6] 张雪琪,崔东,夏振华,等.伊犁河谷不同土地利用方式下土壤粒度特征[J].水土保持研究,2017,24(5):162-167.

[7] 田敏,钱广强,杨转玲,等.柴达木盆地东北部哈勒腾河流域风成沉积物粒度特征与空间差异[J].中国沙漠,2020,40(2):68-78.

[8] Trifonov V G, Sokolov S Y, Bachmanov D M, et al. Neotectonics and the upper mantle structure of Central Asia [J]. Geotectonics, 2021,55(3):334-360.

[9] 刘健,史杰,姚鑫,等.帕米尔高原东北缘活动构造对塔什库尔干盆地地热控制作用[J].中国地质,2018,45(4):681-692.

[10] 周成龙,杨兴华,杨帆,等.基于野外试验对临界起沙风速的计算解析[J].干旱气象,2018,36(1):90-96.

[11] 高卫东,袁玉江,刘志辉,等.新疆沙尘源状况及其沙尘气溶胶释放条件分析[J].中国沙漠,2008(5):968-973.

[12] 许善洋,薛治国.东帕米尔高原高寒土壤有机质含量特征及分析[J].重庆文理学院学报(社会科学版),2016,35(5):84-87.

[13] 毛炜峰,姚俊强,陈静,等.1961—2017 年东帕米尔高原极端升温过程气候变化特征[J].干旱区研究,2019,36(6):1368-1378.

[14] 舒霞,吴玉程,程继贵,等.Mastersizer 2000 激光粒度分析仪及其应用[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2007,30(2):164-167.

[15] Folk R L, Ward W C. Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1957,27(1):3-26.

[16] 蒙仲举,王猛,高永,等.基于土壤粒度参数的荒漠草原地表粗粒化过程[J].水土保持研究,2017,24(6):22-28.

[17] 陈艳,王延华,叶斌,等.滇池流域宝象河水库沉积物粒度分布特征及其环境记录[J].水土保持研究,2021,28(3):7-12.

[18] 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):6-11.

[19] Yerramilli A, Dodla V B R, Challa V S, et al. An integrated WRF/HYSPLIT modeling approach for the assessment of $PM_{2.5}$ source regions over the Mississippi Gulf Coast region [J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2012,5(4):401-412.

[20] Li Hanlin, He Qing, Liu Xinchun. Identification of long-range transport pathways and potential source regions of $PM_{2.5}$ and PM_{10} at Akedala Station, Central Asia [J]. Atmosphere, 2020,11(11):1183.

[21] 高君亮,吴波,庞营军,等.内蒙古狼山东麓堆积戈壁表

- 层沉积物粒度特征[J].干旱区资源与环境,2020,34(11):97-103.
- [22] 何清,杨兴华,霍文,等.库姆塔格沙漠粒度分布特征及环境意义[J].中国沙漠,2009,29(1):18-22.
- [23] 韩鑫,来风兵,王海潇,等.玛纳斯湖湿地土壤粒度分布特征分析[J].新疆环境保护,2019,41(4):38-45.
- [24] Sahu B K. Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments [J]. Journal of Research,1964,34(1):2-24.
- [25] 刘健,史杰,姚鑫,等.帕米尔高原东北缘活动构造对塔什库尔干盆地地热控制作用[J].中国地质,2018,45(4):681-692.
- [26] 张飏,李乐意,刘向东,等.晚中新世以来帕米尔高原生长过程及其与塔里木盆地气候变化可能的联系[J].地球环境学报,2016,7(4):346-356.
- [27] 刘剑刚,张华,朱岩,等.辽东山地冰缘地貌表层土壤粒度特征[J].中国水土保持科学,2016,14(1):36-45.
- [28] 安庆,安萍,徐汝汝,等.青藏高原不同地区沉积物的粒度特征与沉积环境判别公式适用性对比研究[J].聊城大学学报(自然科学版),2017,30(4):37-47.
- [29] 柳加波,温仰磊,赵爽,等.昆仑山北坡黄土粒度特征与环境意义初探[J].地球环境学报,2014,5(2):76-84.
- [30] 王莉娜,杨丽丽,杨燕萍,等.基于多源资料的西北地区一次沙尘暴天气过过程综合分析[J].大气与环境光学学报,2021,16(5):392-403.
- [31] 段时光,姜楠,杨留明,等.郑州市冬季大气 PM_{2.5} 传输路径和潜在源分析[J].环境科学,2019,40(1):86-93.
- [32] 丁铨,于兴娜,侯思宇.西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析[J].环境科学,2020,41(2):647-655.
- [33] 姚青,蔡子颖,刘敬乐,等.气象条件对 2009—2018 年天津地区 PM_{2.5} 质量浓度的影响[J].环境科学学报,2020,40(1):65-75.

(上接第 81 页)

- [40] 郑刘根,丁帅帅,刘丛丛,等.不同类型煤矸石中环境敏感性微量元素淋滤特性[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(2):703-710.
- [41] 吴文涛,冉祥滨,李景喜,等.长江水体常量和微量元素的来源、分布与向海输送[J].环境科学,2019,40(11):4900-4913.
- [42] Camur D, Topbas M, İltter H, et al. Heavy metals and trace elements in whole-blood samples of the fishermen in Turkey: The fish/ermen heavy metal study(FHMS) [J]. Environmental Management,2021,193(9):567.
- [43] Caggiano R, Sabia S, Speranza A. Trace elements and human health risks assessment of finer aerosol atmospheric particles(PM₁) [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019,26(36):36423-36433.
- [44] 吕占禄,张晗,张金良,等.沟塘水及其周边浅层地下水中重金属污染特征与健康风险评估[J].环境工程技术学报,2020,10(6):971-978.
- [45] Chen Guangzhou, Wang Xingming, Wang Ruwei, et al. Health risk assessment of potentially harmful elements in subsidence water bodies using a Monte Carlo approach: An example from the Huainan coal mining area, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019,171(4):737-745
- [46] 黄宏伟,肖河,王敦球,等.漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评估[J].环境科学,2021,42(4):1714-1723.