

胡杨, 周雷, 冀宏杰, 龙怀玉, 廖超子, 徐爱国, 徐孟泽. 影响塔里木河流域土壤颗粒组成的环境因素及空间分布特征[J]. 土壤学报, 2026,

HU Yang, ZHOU Lei, JI Hongjie, LONG Huaiyu, LIAO Chaozi, XU Aiguo, XU Mengze. Environmental Factors Influencing Soil Particle Composition and Their Spatial Distribution Characteristics in the Tarim River Basin[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

影响塔里木河流域土壤颗粒组成的环境因素及空间分布特征*

胡 杨, 周 雷, 冀宏杰, 龙怀玉[†], 廖超子, 徐爱国, 徐孟泽

(北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所), 北京 100081)

摘 要: 土壤颗粒组成直接影响土壤质地、肥力、生态功能及农业生产潜力。本研究基于塔里木河流域 107 个典型土壤剖面(0~100 cm)样点, 合计 383 个土层的土壤颗粒组成, 通过非参数检验、相关性分析与随机森林算法, 分析了环境因素对其的影响, 并预测了其空间分布。结果表明: (1) 流域土壤的颗粒组成以砂粒和粉粒为主, 砂粒、粉粒和黏粒的含量分别为 44.23%、45.26%和 10.51%。砂粒与粉粒、黏粒均呈极显著负相关, 粉粒与黏粒呈极显著正相关。塔里木河流域成土过程弱, 物理风化相对较强、化学风化相对较弱。(2) 地貌、土壤类型、≥3h 日照天数、≥10℃活动积温、高程、年蒸发量等环境变量对流域土壤颗粒组成的空间分布具有重要影响, 其中地貌的影响最大, 在各土层中均超过 20%; 土壤类型次之, 在各土层中均超过 10%。(3) 剖面垂直分布上, 0~25 cm 和 25~50 cm 层砂粒含量在沙漠区相对最高, 50~75 cm 和 75~100 cm 层砂粒含量则降低, 西昆仑山脉全层砂粒含量较高; 沙漠区 0~25 cm 和 25~50 cm 层粉粒和黏粒含量低于沙漠外围的环状山麓带, 50~75 cm 和 75~100 cm 层与之相反。(4) 在宏观尺度上, 流域土壤颗粒组成的空间分布特征受“两山夹一盆”的环状地貌格局的控制, 地貌格局影响着土壤母质、土壤类型、气候等环境因素的空间分布, 进而影响颗粒组成的空间分布。本研究结果为流域土壤资源精准管理提供依据, 有助于保障绿洲农业的可持续发展和生态环境建设。

关键词: 土壤颗粒组成; 塔里木河流域; 空间分布; 环境因素

中图分类号: S152

文献标志码: A

Environmental Factors Influencing Soil Particle Composition and Their Spatial Distribution Characteristics in the Tarim River Basin

HU Yang, ZHOU Lei, JI Hongjie, LONG Huaiyu[†], LIAO Chaozi, XU Aiguo, XU Mengze

(State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arable Land in China (Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences), Beijing 100081, China)

Abstract: 【Objective】 Soil particle composition directly influences soil texture, fertility, ecological functions, and agricultural productivity. Therefore, investigating the environmental factors affecting soil particle composition and its spatial distribution characteristics in the Tarim River Basin is of great significance for soil resource management and ecological environment construction in arid regions. 【Method】 This study analyzed soil particle composition data from 383 soil layers within 107 typical soil profiles (0~100 cm) in the Tarim River Basin. The Kruskal-Wallis

*第三次新疆综合科学考察项目-塔里木河流域土地资源开发与农业资源调查基金项目(2021xjkk0200)资助 Supported by the Third Xinjiang Comprehensive Scientific Survey Project-Land Resource Development and Agricultural Resource Survey in the Tarim River Basin (No. 2021xjkk0200).

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: longhuaiyu@caas.cn

作者简介: 胡 杨(2000-), 女, 河北张家口人, 硕士研究生, 研究方向为土壤资源利用。E-mail: hufuhao@163.com

收稿日期: ; 收到修改稿日期: ; 网络首发日期 (www.cnki.net) :

test was used to determine inter-group differences, Spearman's correlation analysis was employed to examine relationships between climatic factors and soil particle composition, and the random forest algorithm was applied to analyze the influence of environmental factors on the spatial distribution. Model accuracy and variable importance were assessed using R^2 (coefficient of determination), RMSE (root mean square error), ME (mean error), and %IncMSE (percentage increase in mean squared error) to predict the spatial distribution characteristics. **【Result】** The results showed that: (1) The soil particle composition within the 1-meter soil profile was dominated by sand and silt particles, with contents of 44.23%, 45.26%, and 10.51% for sand, silt, and clay, respectively. A highly significant negative correlation was found between sand content and both silt and clay contents, while a highly significant positive correlation existed between silt and clay. This suggests weakened pedogenesis in the Tarim River Basin, characterized by relatively strong physical weathering and relatively weak chemical weathering. (2) Environmental variables, including landform, soil type, sunshine duration day (≥ 3 hours), active accumulated temperature ($\geq 10^\circ\text{C}$), elevation, and annual evaporation, significantly influenced the spatial distribution of soil particle composition. Variable importance analysis from the random forest model indicated that landform had the greatest influence, contributing over 20% to the model explanation across all soil layers, followed by soil type, which consistently exceeded 10%. (3) In terms of vertical profile distribution, sand content was higher in the 0~25 cm and 25~50 cm layers within the Tarim Basin (central Taklimakan Desert) but lower in the surrounding annular piedmont zone. In the 50~75 cm and 75~100 cm layers, sand content decreased in the central desert area, while the West Kunlun Mountains maintained high sand content throughout all layers. The silt and clay contents in the 0~25 cm and 25~50 cm layers were lower in the desert area than in the surrounding annular piedmont zone, with the opposite pattern observed in the 50~75 cm and 75~100 cm layers. (4) On a macro scale, the spatial distribution characteristics of soil particle composition are controlled by the annular geomorphological pattern of "a basin flanked by two mountain ranges". This geomorphological pattern influenced the spatial distribution of environmental factors such as soil parent material, soil type, and climate, which consequently governs the spatial distribution of soil particle composition. **【Conclusion】** This study provides a scientific basis for the precise management and sustainable utilization of soil resources in the Tarim River Basin, offering support for ensuring the sustainable development of oasis agriculture and ecological environment construction.

Key words: Soil particle composition ; Tarim River Basin ; Spatial distribution ; Environmental factors

塔里木河流域是我国西北典型内陆干旱区生态系统,其土壤颗粒组成影响着土壤质地和肥力,控制着区域植被演替^[1]、水文循环及土地退化^[2]。人类活动,如灌溉和过度放牧分别加剧盐碱化和沙漠化,改变了土壤颗粒组成与质地,进而引发流域沙尘暴频发与盐渍化扩展等生态问题^[3]。

土壤颗粒组成是成土母质^[4-5]、气候^[6]、地形^[7]及生物因素^[8]综合作用下长期成土过程的结果^[9]。不同区域的土壤颗粒组成受不同环境因素的影响,鞠兵^[10]发现河南的风积黄土母质、冲积物母质发育的土壤以粉粒为主,但前者各发生层间的颗粒组成的不均匀性要高。徐加盼等^[4]的研究也表明,母质类型显著地影响不同发生层的土壤颗粒组成的均匀性。Xi等^[11]发现沙丘的砂粒含量高,而湖滨阶地、湿地的粉粒、黏粒含量高。周雷等^[12]发现西北地区热量越丰富,砂粒含量越高;风速越大,黏粒含量越低。王燕^[13]和Pan等^[14]分别在内蒙古武川县和磴口县观测到风蚀过程中细颗粒的流失和粗颗粒的残留现象。陈晓燕等^[15]的人工模拟降雨研究证明了降雨对 25° 陡坡地上坡、中坡和下坡的各粒级含量存在不同影响。Li等^[16]通过设置 2° 、 5° 、 12° 三种坡度发现不同坡度通过调节水蚀搬运能力而显著影响细颗粒的再分配过程,缓坡地中细粒含量更高。Bufebo和Elias^[17]在埃塞俄比亚的申科拉流域研究表明耕地砂粒含量高于牧场和林地,Dong等^[18]在内蒙古锡林浩特市发现与中度和重度放牧相比,禁牧和轻度放牧的土壤细颗粒含量增加。上述结果表明,土壤

颗粒组成受多种环境因素共同影响，且主导因子在不同区域存在显著差异。

明确塔河流域土壤颗粒组成的环境影响因素及空间分布特征，是解析干旱区地表过程的关键科学问题，能为优化生态修复策略提供数据支撑。因此，本文的研究目标是：（1）明确土壤颗粒组成的剖面层次特征；（2）分析影响土壤颗粒组成的不同环境因素；（3）预测土壤颗粒组成的空间分布特征。旨在为流域土壤资源精准管理提供科学依据，为保障绿洲农业的可持续发展和生态环境建设提供支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

塔里木河流域位于中国西北新疆的南部，介于 34°55'-43°08'N，73°10'-94°05'E 之间，总面积达 10.2×10⁵ km²，是中国最大的内陆河流域，呈现“两山夹一盆”的环状地貌格局：南北分别为海拔 5 500 m 左右的昆仑山脉与海拔 4 000 m 左右的天山山脉，中部为海拔 1 100 m 左右的世界第二大流动沙漠塔克拉玛干沙漠。流域属于温带干旱大陆性气候，干旱少雨，年平均降水量为 117 mm；年均蒸发量高达 1 800~3 000 mm；光热资源丰富，昼夜温差大。流域内水资源极度短缺，主要靠山区冰雪融水。流域成土母质类型多样，分为灌淤物、风积物、洪冲积物、湖积物、残坡积物和冰碛物等类型。植被以典型荒漠植被为主，兼有盐生草甸、胡杨林及柽柳灌丛等绿洲植被。流域土壤类型主要是盐碱土、风沙土、草甸土和灌淤土^[19]，绝大部分土壤呈强碱性或盐碱复合特征。

1.2 样品采集与分析

本研究区布设样点的具体流程如下：利用 ArcGIS 10.8 对土壤类型、土地利用、地貌与母质等进行空间叠加分析。选择各类土壤中分布面积最大且地貌单元最具代表性的图斑，确定调查采样单元类型。将图斑的几何中心预设为初步采样点位，选取了 107 个可覆盖塔河流域所有土壤类型的代表性样点（图 1，每个土壤类型 2~3 个点）。于 2023 年 6—8 月调查采样，采样时通过 GPS 定位，按发生学层次采集土壤样品，并记录经纬度、海拔、地形地貌、母质类型等环境信息。土壤颗粒组成采用吸管法测定，按美国农业部(USDA)制划分粒级（砂粒 2~0.05mm、粉粒 0.05~0.002 mm、黏粒<0.002 mm）。

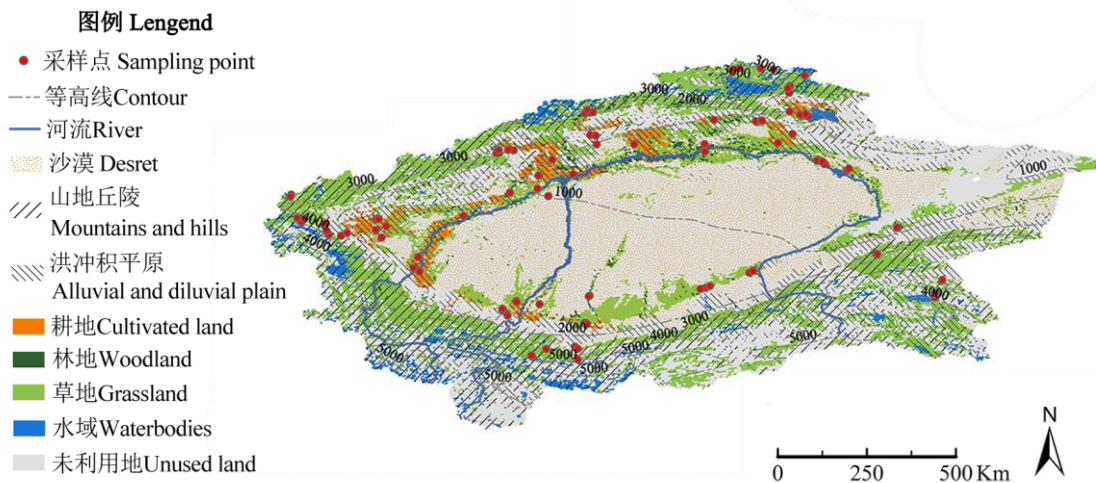


图 1 塔里木河流域土壤样点图（以彩图发表）

Fig. 1 Soil sampling sites in the Tarim River Basin

1.3 环境协变量来源及数据处理

数字高程模型 (DEM) 数据来源于地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>)，空间分辨率为 30 m。基于原始 DEM 数据，采用 ArcGIS Pro 进行地形分析，依次提取坡度 (Slope)、坡向 (Aspect) 和曲率 (Curvature) 等参数，统一栅格分辨率以保证数据一致性。所有空间数据处理均采用 Krasovsky_1940_Albers 投影坐标系。研究区域范围内， $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温 (ACT)、年蒸发量 (EVP)、 $\geq 3\text{h}$ 日照天数 (SED)、年日照时数 (SSD)、年均气温 (MAT)、太阳年总辐射量 (TSR) 等数据来源于第三次新疆综合科学考察专项“塔里木河流域土地开发与农业资源调查 (2021xjkk0200)”，空间分辨率均为 1 km；地貌图比例尺为 1:100 万，数据源于中国科学院地理科学与资源研究所；土壤类型图比例尺为 1:100 万，数据源于新疆农业大学；土地利用图比例尺为 1:10 万，数据源于第三次新疆综合科学考察专项“塔里木河流域土地开发与农业资源调查 (2021xjkk0200)”。母质、地形地貌、土地利用、土壤类型的确定以国务院第三次全国土壤普查领导小组办公室《土壤外业调查与采样技术规范 (试行)》为指导。

由于各剖面的发生层数量和深度存在差异，为了确保土壤颗粒组成数据的可比性，对采样数据进行了标准化处理，重新划分深度层级为：0~25 cm、25~50 cm、50~75 cm 和 75~100 cm。土壤颗粒组成 PC_{t-b} 在标准化深度层 $t-b$ 内的计算方法如下：

$$PC_{t-b} = \sum_{i=1}^n PC_i \times H_i \quad (1)$$

式中， PC_{t-b} 表示标准化深度层 $t-b$ 内某一颗粒组分的厚度加权平均含量； n 代表该深度范围内的剖面层数； PC_i 为第 i 层的颗粒组成含量； H_i 代表该层在标准化深度层内的厚度比例。经过标准化处理后，不同深度层的样本数量如下：有 105 个 0~25 cm 样本、98 个 25~50 cm 样本、89 个 50~75 cm 样本、78 个 75~100 cm 样本。

土壤颗粒数据经 Microsoft Excel 2016 预处理后，因数据呈非正态分布，统计检验选用非参数方法：克鲁斯卡尔-沃利斯检验 (Kruskal-Wallis H test)。各层次土壤颗粒组成的相关性和气象因子相关性通过 Spearman 秩相关分析。通过 ArcGIS Pro 3.6 (Esri Inc., Redlands, CA, USA) 绘制土壤样点图和颗粒组成空间分布预测图，其他图片使用 Origin 2024 (OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA) 绘制。所有分析在 IBM SPSS Statistics 27.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA) 中完成。

1.4 利用环境变量预测颗粒组成

本研究采用随机森林 (Random Forest, RF) 模型来预测塔里木河流域土壤颗粒组成的空间分布。基于 R 语言的 randomForest 包构建 RF 模型。为确保训练集和测试集中土壤颗粒组成值的分布特征基本一致而采用分层抽样：先将各粒级按四分位数离散化为四个等级，分别创建其分组变量；随后将这三个分组变量形成一个综合分组变量；最后以此综合分组变量作为分层依据使用 caret 包进行分层随机抽样，将原始数据集按 8:2 的比例划分为训练集和测试集。变量重要性通过 RF 的“均方误差增量” (Percentage Increase in Mean Squared Error, %IncMSE) 指标进行衡量。具体原理为：对于森林中的每一棵决策树，在其袋外数据上随机置换某个特定变量的值，而保持其他变量不变，计算均方误差 (Mean Squared Error, MSE) 的增加比例。%IncMSE 值越高，表明该变量对模型预测精度的影响越大。

本研究为确定各深度的最佳环境变量组合，分别在四个土层 (0~25 cm、25~50 cm、50~75 cm 及 75~100 cm) 执行变量筛选，使用 car 包计算所有环境变量的方差膨胀因子 (VIF)，剔除 $VIF > 10$ 的环境变量，并基于保留的变量进行建模^[20]。随后，采用网格搜索方法^[21]优化 RF 的超参数，包括 mtry (分裂变量数)、ntree (决策树数量) 和 nodesize (叶节点最小样本数)，通过寻找能够使袋外误差 (OOB Error) 的均方根误差最小的参数组合，来确定 RF 模型的最佳参数配置。

采用决定系数 (Coefficient of determination, R^2)、均方根误差 (Rootmean square

error, RMSE) 和平均误差 (Mean error, ME) 等 3 个指标来评价模型的预测精度。其中, R^2 越接近 1, RMSE 越小, ME 接近 0, 模型的预测精度越高。通过 10 折交叉验证 (Ten-fold cross-validation, cv) 检验模型稳定性。最终, 将优化后的模型进行预测, 并通过归一化处理确保砂粒、粉砂和黏粒含量预测值之和为 100%。具体计算公式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \tag{2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \tag{3}$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \tag{4}$$

$$\%IncMSE = \left(\frac{MSE_{shuffled} - MSE_{original}}{MSE_{original}} \right) \times 100 \tag{5}$$

式中, P_i 为第 i 个样本的预测值, O_i 为实测值, $\bar{O}$ 为实测均值。MSE_{original} 表示模型在原始 OOB 数据上的均方误差, MSE_{shuffled} 为扰乱某一变量后所得误差。

2 结果

2.1 塔里木河流域样点土壤颗粒组成的统计特征

表 1 的统计数据表明: 塔河流域 1m 土体的砂粒、粉粒和黏粒的含量分别为 44.23%、45.26%、10.51% (样本数 $n=383$)。砂粒的均值 75~100 cm 层较 0~25 cm 层增加了 7.92%; 粉粒的均值在各层保持相对稳定; 黏粒的均值随深度降低, 最强变异系数高达 118.43%。以上结果表明: 塔河流域样点土壤的颗粒组成以砂粒和粉粒为主, 而且具有明显的垂直分异特征, 随土层加深砂粒含量增高, 粉粒在各层含量稳定且分布均匀, 黏粒含量随深度降低但在剖面上分布极不均匀。

表 1 塔里木河流域样点土壤颗粒组成的统计特征

Table 1 Statistical characteristics of soil particle composition at sampling sites in the Tarim River Basin

土壤 层次 Soil layer/cm	土壤颗粒组 成 Soil particle composition	样本数 Sample number	最小值 Minim/ %	最大值 Maximu m/%	平均值 Mean/%	标准差 Standard deviation/%	极差 Range/ %	偏度 Skewne ss	峰度 Kurtosis	变异系数 CV/%
0~25	砂粒 Sand	105	1.28	95.03	41.09	25.12	93.75	0.59	-0.68	61.15
	粉粒 Silt	105	0.99	78.82	44.56	20.12	77.83	-0.62	-0.50	45.15
	黏粒 Clay	105	0.62	47.96	14.35	9.64	47.34	0.82	0.72	67.18
25~50	砂粒 Sand	98	2.64	98.62	44.62	24.97	95.98	0.27	-0.92	56.00
	粉粒 Silt	98	0.80	79.72	44.91	20.01	78.92	-0.31	-0.76	44.56
	黏粒 Clay	98	0.58	49.03	10.47	9.76	48.45	1.31	1.79	93.22
50~75	砂粒 Sand	89	1.00	96.67	42.53	24.53	95.67	0.40	-0.75	57.70
	粉粒 Silt	89	3.33	83.06	46.84	20.13	79.73	-0.47	-0.61	42.98
	黏粒 Clay	89	0.70	35.93	10.63	10.03	35.23	1.06	0.03	94.36
75~100	砂粒 Sand	78	5.67	97.36	49.00	26.10	91.69	-0.001	-1.02	53.27
	粉粒 Silt	78	2.64	86.26	45.42	21.92	83.62	-0.09	-0.83	48.26
	黏粒 Clay	78	0.74	29.37	5.58	6.62	28.63	1.78	2.51	118.43
总体 Total	砂粒 Sand	383	1.28	98.62	44.23	25.12	97.34	0.32	-0.92	56.82
	粉粒 Silt	383	0.80	86.26	45.26	20.37	85.46	-0.36	-0.69	45.01
	黏粒 Clay	383	0.58	49.03	10.51	9.60	48.45	1.13	0.90	91.34

从表 2 可看出塔河流域样点土壤各层次各粒级之间均存在显著相关性: 砂粒与粉粒呈极显著负相关 ($r=-0.97\sim-0.87$, $P<0.01$), 粉粒与黏粒呈极显著正相关 ($r=0.36\sim0.82$,

$P<0.01$)。以上结果一定程度上说明塔里木河流域成土过程弱, 物理风化相对较强、化学风化相对较弱。

表 2 塔里木河流域样点各层次土壤颗粒组成的相关性

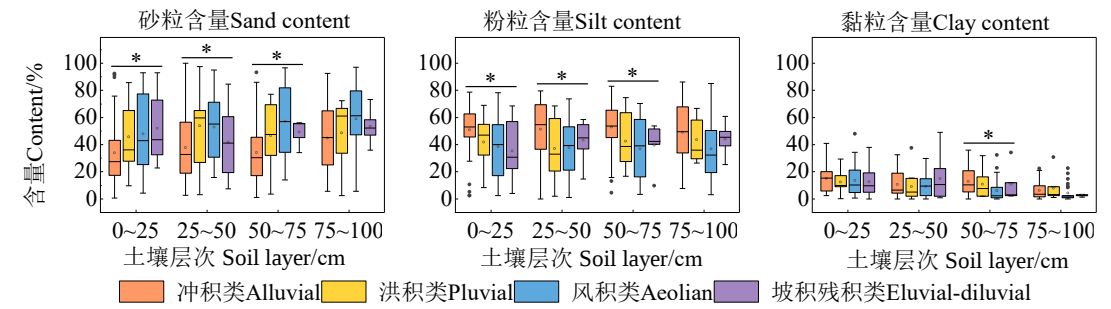
Table 2 Correlation analysis of soil particle composition across different depths at sampling sites in the Tarim

River Basin				
土壤层次	Soil layer/ cm	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay
0~25	砂粒 Sand	1		
	粉粒 Silt	-0.87**	1	
	黏粒 Clay	-0.73**	0.36**	1
25~50	砂粒 Sand	1		
	粉粒 Silt	-0.92**	1	
	黏粒 Clay	-0.72**	0.46**	1
50~75	砂粒 Sand	1		
	粉粒 Silt	-0.90**	1	
	黏粒 Clay	-0.71**	0.41**	1
75~100	砂粒 Sand	1		
	粉粒 Silt	-0.97**	1	
	黏粒 Clay	-0.90**	0.81**	1

注: *表示 $P<0.05$, **表示 $P<0.01$, ***表示 $P<0.001$ 。下同。Note: Significance levels: * $P<0.05$; ** $P<0.01$; *** $P<0.001$. The same below.

2.2 母质对塔里木河流域土壤颗粒组成的影响

塔河流域 383 份土壤分层样品包含 4 类母质: 冲积类、洪积类、风积类、坡积与残积类(图 2)。在 0~25 cm、25~50 cm 层, 母质类型对砂粒、粉粒有显著影响; 在 50~75 cm 层中, 母质类型对砂粒、粉粒和黏粒均有显著影响。其中风积母质在 0~25 cm、50~75 cm、75~100 cm 层, 砂粒中位数高于其他母质, 粉粒、黏粒中位数低于其他母质; 冲积母质各土层粉粒中位数均高于其他母质。



注: “—”表示同一深度下, 不同母质间存在显著差异。下同。Note: “—”indicates that there is a significant difference among different parent materials at the same depth The same below.

图 2 塔里木河流域不同母质下的土壤颗粒组成(以彩图发表)

Fig. 2 The soil particle composition under different parent materials in the Tarim River Basin

2.3 地貌对塔里木河流域土壤颗粒组成的影响

根据地表坡度划分样点地形地貌(图 3), 塔河流域 383 份土壤分层样品分布在平原与阶地、沙地与沙漠、丘陵与山地^[22]。在 25~50 cm 层, 地貌类型对粉粒有显著影响。其中, 在 0~25 cm、25~50 cm、50~75 cm 层沙地与沙漠的砂粒中位数较另外两种地貌类型高, 粉粒中位数较另外两种地貌类型低; 平原与阶地粉粒中位数高于另外两种地貌类型, 黏粒中位数随深度波动递减。

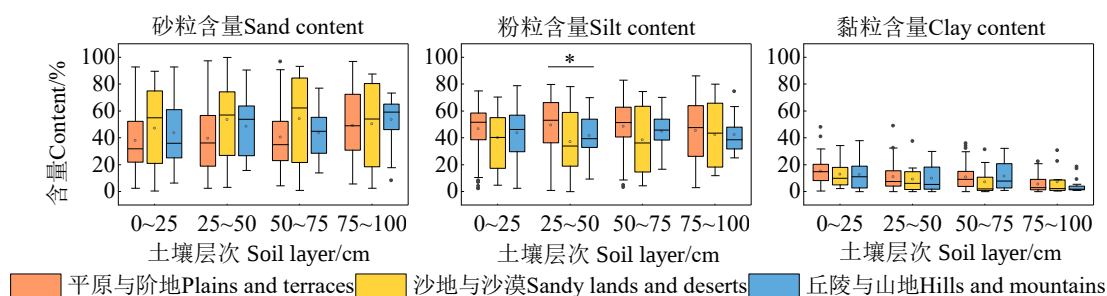


图3 塔里木河流域不同地貌下的土壤颗粒组成（以彩图发表）

Fig. 3 The soil particle composition under different landforms in the Tarim River Basin

2.4 土地利用类型对塔里木河流域土壤颗粒组成的影响

依据 LUCC 分类体系，塔河流域 383 份土壤分层样品的土地利用类型主要包含耕地、草地、果园（图 4）。在 0~25 cm、50~75 cm 层，土地利用类型对砂粒、粉粒和黏粒均有显著影响；在 25~50 cm 层，土地利用类型对砂粒、粉粒有显著影响；在 75~100 cm 层，不同土地利用类型下砂粒、粉粒和黏粒无显著差异。其中，耕地粉粒中位数高于其他类型，砂粒中位数低于其他类型。

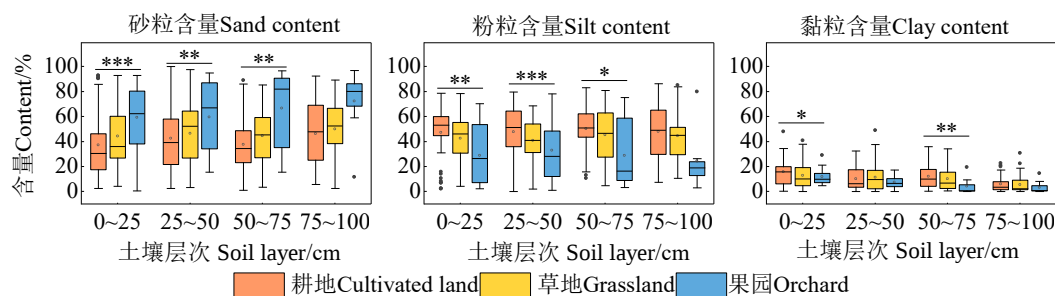


图4 塔里木河流域不同土地利用类型下的土壤颗粒组成（以彩图发表）

Fig. 4 The soil particle composition under different land use types in the Tarim River Basin

2.5 土壤类型对塔里木河流域土壤颗粒组成的影响

土壤类型本质上是表征成土环境背景的综合因子。在塔河流域 383 份土壤分层样品中选择数量较多的五种土壤类型，即灌淤土、潮土、风沙土、草甸土、冷钙土进行分析（图 5）。在 25~50 cm 层和 50~75 cm 层，土壤类型对砂粒、粉粒和黏粒均有显著影响；75~100 cm 层，土壤类型对粉粒有显著影响。其中，灌淤土和潮土的粉粒、黏粒中位数在 0~25 cm、25~50 cm、50~75 cm 层高于其他土壤类型，风沙土砂粒中位数高于其他土壤类型，冷钙土 0~25 cm 层黏粒中位数高于 25~50 cm、50~75 cm、75~100 cm 层。

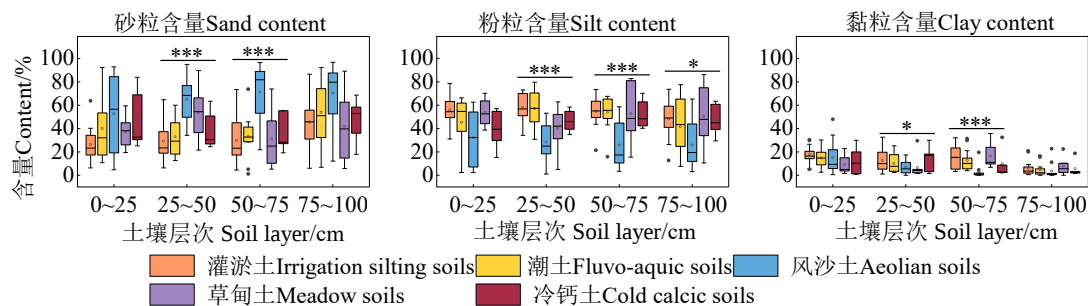
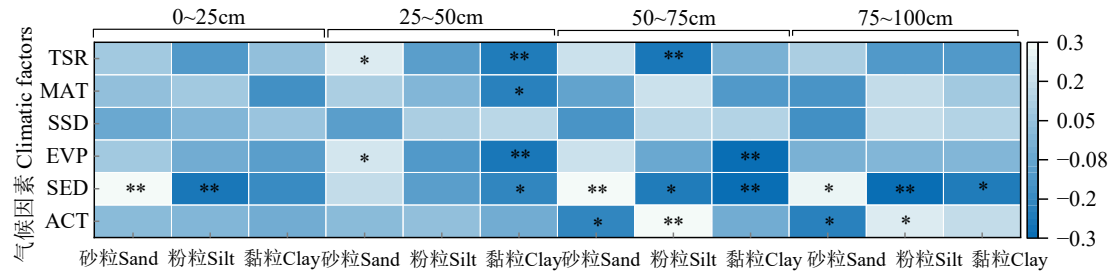


图5 塔里木河流域不同土壤类型下的土壤颗粒组成（以彩图发表）

Fig. 5 The soil particle composition under different soil types in the Tarim River Basin

2.6 气候因素对塔里木河流域土壤颗粒组成的影响

在塔河流域 383 份土壤分层样品中，气候因子对土壤颗粒组成的影响随土层深度变化（图 6），砂粒与日照天数呈正相关，粉粒与日照天数及年总辐射量呈负相关，黏粒与日照天数及年蒸发量呈负相关。在 0~25 cm 层，砂粒与≥3h 日照天数（SED）显著正相关，粉粒则负相关；25~50 cm 层砂粒与年蒸发量（EVP）、太阳辐射（TSR）正相关，黏粒与 SED、EVP、TSR 及年均温（MAT）均负相关；50~75 cm 层砂粒与 SED 正相关但与积温（ACT）负相关，粉粒与 ACT 正相关而与 SED、TSR 负相关，黏粒与 SED、EVP 负相关；75~100 cm 层砂粒与 SED 正相关而与 ACT 负相关，粉粒与 ACT 正相关而与 SED 负相关，黏粒与 SED 负相关。



注：ACT：≥10℃活动积温，SED：≥3h 日照天数，EVP：年蒸发量，SSD：年日照时数，MAT：年均气温，TSR：太阳年总辐射量。Note: ACT: Accumulated temperature ≥10℃, SED: Sunshine days with ≥3 hours, EVP: Annual evaporation, SSD: Annual sunshine duration, MAT: Mean annual temperature, TSR: Total solar radiation.

图 6 塔里木河流域土壤颗粒组成和气候因素的相关性（以彩图发表）

Fig. 6 Correlation between soil particle composition and climatic factors in the Tarim River Basin

2.7 塔里木河流域土壤颗粒组成的影响因素及其空间分布特征

研究结果表明（表 3），土壤颗粒组成的预测精度在不同土层深度存在差异。砂粒的预测性能在 50~75 cm 层达到最佳预测效果，其决定系数 R^2 最高，为 0.590，RMSE 和 ME 最低。粉粒则在 0~25 cm 层 R^2 最高，为 0.38。粉粒各土层 R^2 、RMSE 和 ME 值变化较小。黏粒在 25~50 cm 层 R^2 最高，为 0.41，在 75~100 cm 深层的 RMSE 达到最小值（5.49），但该层的 R^2 也最低（0.21），表明模型解释力较弱。从 10 折交叉验证（cv）的结果看出，模型具有较好的稳定性。

表 3 塔里木河流域土壤颗粒组成预测的准确性评估

Table 3 Accuracy evaluation of soil particle composition prediction in the Tarim River Basin

土壤颗粒 组成 soil particle composition	土壤层次 Soil layer/cm	决定系 数 R^2	均方根 误差 RMSE	平均误 差 ME	10 折交叉 验证决定 系数 R^2 (cv)	10 折交叉 验证均方根 误差 RMSE (cv)	10 折交叉 验证平均 误差 ME (cv)
砂粒 Sand	0~25	0.36	22.27	1.26	0.38	21.63	1.14
	25~50	0.37	21.67	1.09	0.41	20.85	0.96
	50~75	0.59	20.00	-0.65	0.65	17.12	-0.51
	75~100	0.34	22.83	1.52	0.31	23.78	1.39
粉粒 Silt	0~25	0.38	17.12	-0.75	0.41	16.24	-0.63
	25~50	0.25	14.89	-0.82	0.20	18.67	-0.97
	50~75	0.35	18.47	0.85	0.39	16.59	0.73
	75~100	0.36	23.75	-0.78	0.32	25.91	-0.91
黏粒 Clay	0~25	0.37	9.91	-0.50	0.35	9.28	-0.43
	25~50	0.41	9.63	-0.26	0.47	8.41	-0.18

50~75	0.33	10.81	-0.21	0.23	16.47	-0.44
75~100	0.21	5.49	-0.75	0.25	5.21	-0.68

基于 RF 模型，通过%IncMSE 量化地貌、土壤类型、土地利用类型、高程、坡度、坡向、曲率、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温、年蒸发量、 $\geq 3\text{h}$ 日照天数、年日照时数、年均气温和太阳年总辐射量等 13 个环境变量对塔河流域土壤颗粒组成空间分布的影响（图 7），研究发现不同深度土壤颗粒组成空间分布预测的最优变量数量存在差异。

各土层中地貌的变量重要性最高（ $>20\%$ ），其次为土壤类型，其重要性在各土层均超过 10%。可见，地貌与土壤类型是影响塔里木河流域土壤颗粒组成空间分布的重要预测因子，二者的变量重要性在各层始终较高。除地貌与土壤类型外，对于 0~25 cm 层，年均温和 $\geq 3\text{h}$ 日照天数是影响砂粒、粉粒和黏粒空间分布的重要环境变量，坡向是影响粉粒的重要环境变量；对于 25~50 cm 层，年蒸发量是影响砂粒和粉粒分布的重要环境变量，影响黏粒分布的环境变量还有年总辐射量；对于 50~75 cm 层，高程也是影响土壤颗粒组成空间分布的重要环境变量，年蒸发量是影响黏粒分布的重要环境变量。对于 75~100 cm 层，积温也是影响土壤颗粒组成空间分布的重要环境变量。

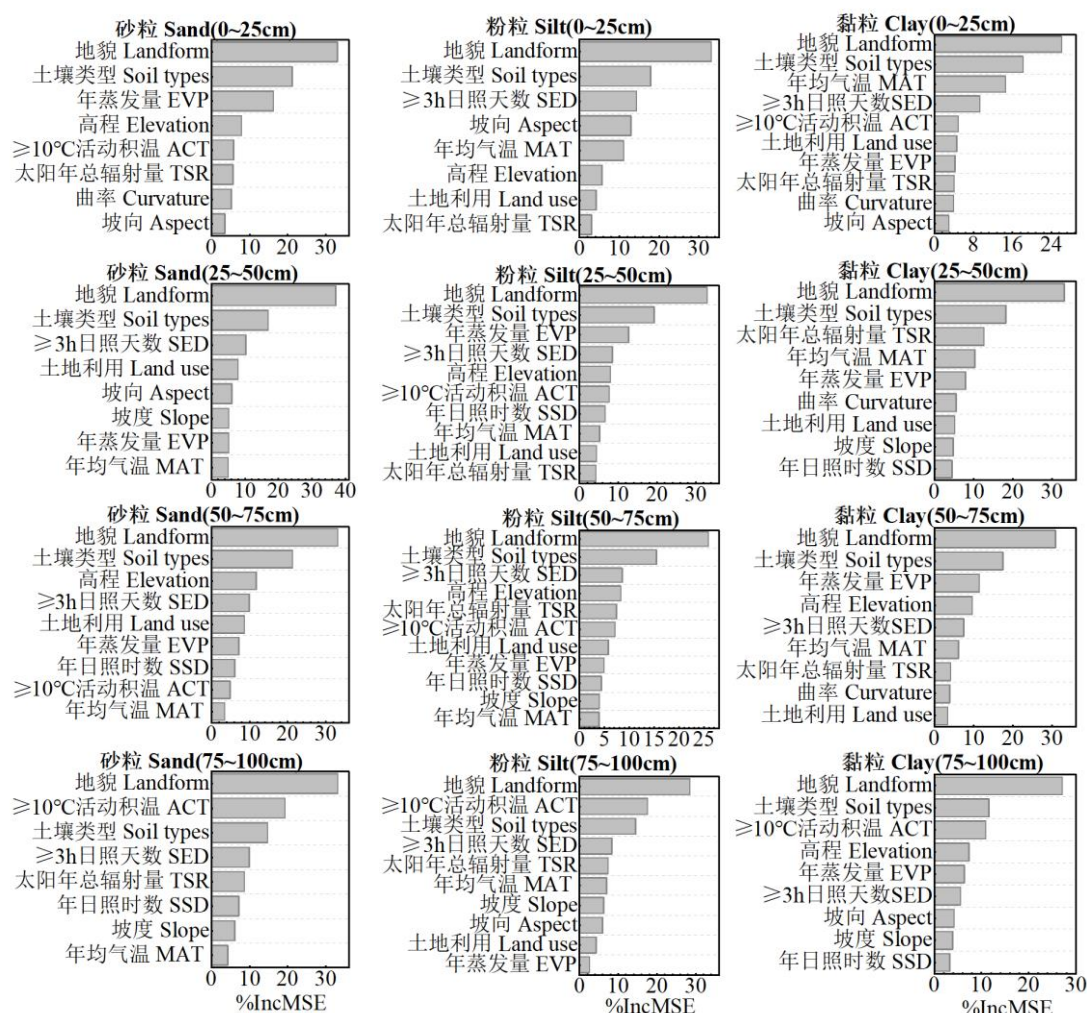


图 7 砂粒、粉粒和黏粒的预测变量的相对重要性

Fig. 7 The relative importance of predictor variables for sand, silt, and clay

塔里木河流域土壤颗粒组成表现出一定的空间变化趋势（图 8），总体上与塔里木河流域的“两山夹一盆”的环状地貌特征相吻合。对于砂粒，0~25 cm、25~50 cm 层砂粒在塔里木盆地（中部为塔克拉玛干沙漠）含量高，而在沙漠区外部的环状山麓带（即北部的

天山山脉的南坡、南部的昆仑山脉的北坡和东南部的阿尔金山山脉的北坡)含量较低; 50~75 cm、75~100 cm 层相反,砂粒在环状山麓带含量较高;西昆仑山脉砂粒含量在不同土层深度均较高。对于粉粒,0~25 cm、25~50 cm 层粉粒在环状山麓带含量较高,在沙漠区和西昆仑山脉含量较低;50~75 cm 层粉粒在沙漠区含量较高(北缘最高),而在南部山区(昆仑山脉和阿尔金山山脉)含量较低;75~100 cm 层粉粒在沙漠区含量高,在其他地区含量均较低。对于黏粒,0~25 cm 层黏粒在北部天山山脉及阿尔金山山脉含量较高,在中部沙漠区、西昆仑山脉、罗布泊地带含量较低;25~50 cm 层黏粒在北部天山山脉含量高,其余地区均较低;50~75 cm、75~100 cm 层黏粒在沙漠区含量较高而环状山麓带含量低,其中75~100 cm 层黏粒含量相对最低。总体来看,塔河流域砂粒含量高于粉粒、黏粒,黏粒含量最低。

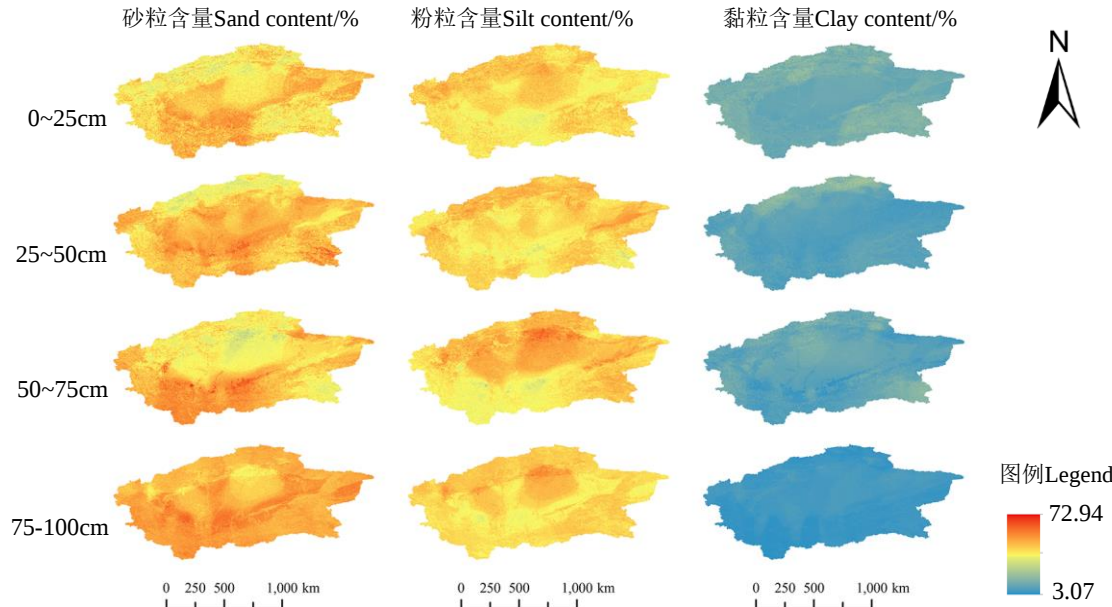


图 8 塔里木河流域不同土壤层次的颗粒组成空间分布预测图(以彩图发表)

Fig. 8 Spatial distribution prediction of soil particle composition at various depths in the Tarim River Basin

3 讨论

本研究表明砂粒与粉粒呈极显著负相关性,粉粒与黏粒呈极显著正相关。若化学风化强烈,粉粒会作为中间产物转化为黏粒,导致二者呈负相关。然而在表 2 的结果中二者呈显著正相关,这一结果说明它们可能具有相同的物质来源和搬运过程(如风力),而非在本地由化学风化生成^[23-24]。李红丽等^[25]的研究发现与未设沙障的流动沙丘相比,设置沙柳方格沙障的沙丘粉砂和黏粒成分增加。沙障降低风速,拦截固定了随风力迁移的外来细粒物质,从而证明风力输入可能是导致粉黏粒含量增多的原因。此外,若化学风化强烈,粉粒会大量转化为黏粒,那么粉粒与砂粒的相关性会减弱,与表 2 中的数据不符。以上结果一定程度上说明塔里木河流域成土过程弱,物理风化相对较强、化学风化相对较弱。

塔河流域北依天山山脉南坡,南靠昆仑山脉北坡,西部为两山交界处,中部为塔里木盆地(含塔克拉玛干沙漠)。北西南三面环山,东部相对开放,整体好似两个同心椭圆,即中心的沙漠区和外围的环状山麓带。塔河流域土壤颗粒组成的空间分布存在区域尺度上的空间分布规律(图 8),总体上与塔里木河流域的“两山夹一盆”的环状地貌特征相吻合。本研究中环境变量影响预测精度重要性分析也表明(图 7),地貌是影响塔里木

河流域土壤颗粒组成空间分布的最重要环境变量。

母质是形成土壤的物质基础，直接决定了土壤的初始矿物组成和颗粒大小^[4]。地貌单元一方面决定了该区域母质的类型，另一方面又通过地形起伏与空间配置调控地表营力的类型、强度与方向，从而影响母质的分选性和土壤颗粒组成特征^[26]。

在塔里木盆地的不同地貌单元中，以风力为主导营力的沙漠区的母质为风积物，以水力为主导营力的山前冲积平原的母质为冲积物。张辉等^[27]对东柳沟流域的研究表明，风积沙土（沙地）以细砂为主，含量为 56.59%~86.65%；而河道沉积物因水力分选作用，平均粒径自上游向下游逐渐减小，分选性增强，表明冲积过程可能富集细颗粒物质。本研究表明风积母质砂粒含量高于其他母质，Liu 等^[28]也发现沙漠表层砂粒平均含量高达 50%，其原因是空气介质的低密度与低黏度特性，导致空气悬浮能力薄弱，粉粒、黏粒因易进入悬移态被迁出源地，更粗的颗粒因起动风速阈值限制而滞留源区^[29]，因此风积母质砂粒含量高于其他母质。本研究中，冲积母质粉粒含量高于其他母质，这可能是在冲积平原环境中，地表水力营力能量衰减，坡度减小、流速降低，搬运能力减弱，因此粉粒优先沉降，含量高于其他母质。

在塔河流域环状山麓带的不同地貌单元中，天山和昆仑山山脉坡中母质主要为坡积物，而山脚洪积扇母质为洪积物，其中陡坡区的主导营力为重力，坡中则为重力和水力耦合，洪积扇的主导营力又变成水力。鞠兵^[10]在河南地区发现在坡积物和洪积物母质发育的土壤中，由于其所在的景观单元处于不同地形部位，而出现不同的质地类型。本研究发现 0~25 cm 和 25~50 cm 层粉粒在环状山麓带的含量较其余土层高，但 50~75 cm 和 75~100 cm 层粉粒含量降低，砂粒含量升高（图 8）。其原因可能是不同阶段演替的结果，陡坡时受重力影响，细颗粒被地表径流带走粗颗粒留存，因此下层砂粒含量较高；随时间推移，坡度减缓，重力势能转化的动能较低，粉粒迁移缓慢，覆盖于早期的残积层之上，因此上层粉粒含量较高^[30]。本研究中洪积母质砂粒和粉粒含量相差较小（图 2），这可能是高密度泥石流的特殊流变学性质打破了常规的水力分选规律，其中粘塑性基质的支撑力搬运砂粒，屈服应力搬运粉粒^[31]，当流体流变强度骤降（ $\tau < \tau_0$ ）时，粗细颗粒因“冻结效应”同步堆积，破坏了常规水力分异^[32]。

气候因子主要通过影响土壤侵蚀与沉积^[13]、水分平衡和化学过程^[6]进而影响土壤颗粒组成。塔河流域的“两山夹一盆”的地貌对气候产生深刻影响，气候因子又影响了土壤颗粒组成。天山和昆仑山拦截了来自大西洋的残余水汽，气流在迎风坡抬升降水（脱水），翻越山脉变干，在背风坡下沉增温^[33]，使得盆地腹地降水量极低。形成了环状山麓带湿润寒冷而沙漠区极端干旱、蒸发远大于降水、日照强烈的气候特征。研究区数据显示 0~25 cm 和 25~50 cm 层粉粒在沙漠外围环状山麓带的含量较高，这与乔永^[34]和 Chen 等^[35]研究的天山地区随海拔升高土壤表层细颗粒含量升高的结论一致。原因在于：这些高海拔山麓带（尤其北部的天山山区）气候相对湿润寒冷，植被覆盖度高，一方面增强了化学风化作用，利于粉粒及黏土矿物生成，另一方面减弱了水力、风力侵蚀动力，有利于细颗粒物质的积累保存。因此，粉粒含量显著高于干旱的盆地腹地。本研究中表层砂粒与日照天数呈正相关，其原因可能是沙漠区热容量低，升温快，因此吸收的太阳辐射强^[36]。地表受热，空气膨胀上升，近地面形成热低压，周围空气向低压区补充，形成强风，加剧了蒸发。而在风力作用下细颗粒迁移，砂粒残留，因此表层砂粒与日照天数呈正相关。本研究表明黏粒与年蒸发量呈负相关，而与砂粒呈正相关，这一结果与 Zhang 等^[37]提出的土壤水分与黏粒含量呈正相关相吻合：湿润条件下化学风化相对强烈，促进了黏粒形成和迁移淀积。而在干旱的盆地腹地，土壤水分因素驱动的化学风化、淋溶影响微弱，加之强烈的蒸发耗散，土壤长期处于干旱状态。因此，蒸发量越高，土壤水分越匮乏越不利于黏粒的形成与保存，蒸发量与黏粒形成呈负相关。

同样,塔河流域的“两山夹一盆”的地貌对土壤类型产生了深刻影响,进而影响了土壤颗粒组成。不同的地貌单元塑造了土壤的形成环境,土壤类型被视为表征成土环境背景的综合因子,划分土类的根本依据是土壤本身的性质和功能^[38]。本研究表明,土壤类型是影响土壤颗粒组成的重要环境变量,其中灌淤土和潮土粉粒和黏粒含量高,风沙土砂粒含量最高。灌淤土和潮土主要分布于盆地绿洲及低洼河漫滩区域,母质为冲积物,经过长期灌溉淤积或周期性地下水升降及耕作,其粉粒和黏粒含量较高;风沙土广泛分布于沙漠及受风蚀强烈影响的区域,其母质为风积物,砂粒含量较高,体现了风力的分选作用。周雷等^[15]也发现宁夏地区不同土壤类型下表层和表下层土壤颗粒组成含量存在显著差异。表明这些具有特定发生过程和理化性质的土壤类型,最终决定了其内在的颗粒组成特征及其在剖面中的分布规律。

综上,在宏观尺度上,塔河流域土壤颗粒组成的空间分布特征受“两山夹一盆”的环状地貌格局控制。

4 结 论

塔河流域土壤颗粒组成以砂粒和粉粒为主。各土层砂粒与粉粒、黏粒均呈极显著负相关,粉粒与黏粒呈极显著正相关。地形地貌、土壤类型、 $\geq 3\text{h}$ 日照天数、 $\geq 10^\circ\text{C}$ 活动积温、高程、年蒸发量等环境变量对土壤颗粒组成的空间分布具有重要影响。其中,地貌的影响最高,土壤类型次之。空间分布上,0~25 cm 和 25~50 cm 层砂粒含量在沙漠区相对最高,50~75 cm 和 75~100 cm 层砂粒含量则降低,西昆仑山脉全层砂粒含量较高;沙漠区0~25 cm 和 25~50 cm 层粉粒和黏粒含量低于沙漠外围的环状山麓带,50~75 cm 和 75~100 cm 层与之相反。

参考文献 (References)

- [1] Wang Q, Meng Z J, Wang J, et al. Response of the vegetation soil under almost-natural restoration in the Xilamuren grassland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(4): 1159-1167. [王琴, 蒙仲举, 汪季, 等. 希拉穆仁草原近自然恢复状态下植被-土壤响应特征[J]. *生态学报*, 2017, 37(4): 1159-1167.]
- [2] Ding W B, Jiang G Y, Shi D M, et al. Effect of different soil properties on plow-layer soil quality of sloping farmland in purple hilly areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(19): 6480-6493. [丁文斌, 蒋光毅, 史东梅, 等. 紫色土坡耕地土壤属性差异对耕层土壤质量的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(19): 6480-6493.]
- [3] Zhang J J, Hao X M, Li X W, et al. Evaluation and regulation strategy for ecological security in the Tarim River Basin based on the ecological footprint[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 435: 140488.
- [4] Xu J P, Li J H, Wei Y J, et al. Fractal characteristics of particle composition for soils developed from different parent materials[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(5): 1197-1205. [徐加盼, 李继洪, 魏玉杰, 等. 不同母质类型发育土壤颗粒组成分形特征[J]. *土壤学报*, 2020, 57(5): 1197-1205.]
- [5] Plaza C, Zacccone C, Sawicka K, et al. Soil resources and element stocks in drylands to face global issues[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 13788.
- [6] Gelybó G, Tóth E, Farkas C, et al. Potential impacts of climate change on soil properties[J]. *Agrokémia és Talajtan*, 2018, 67(1): 121-141.

- [7] Peng Y, He G J, Wang G Z. Spatial-temporal analysis of the changes in *Populus euphratica* distribution in the Tarim National Nature Reserve over the past 60 years[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, 113: 103000.
- [8] Zhang T J, Chen Y N, Ali S. Abiotic stress and human activities reduce plant diversity in desert riparian forests[J]. Ecological Indicators, 2023, 152: 110340.
- [9] Song X D, Yang F, Wu H Y, et al. Significant loss of soil inorganic carbon at the continental scale[J]. National Science Review, 2021, 9(2): nwab120.
- [10] Ju B. Characteristics of calcareous soils from Henan Province and their basic categories in Chinese soil taxonomy[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016. [鞠兵. 河南石灰性土壤积钙特征及其土系划分研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.]
- [11] Xi C, Zuo H J, Yan M, et al. Grain size characteristics of different types of surface sediments around Qixing Lake in Kubuqi Desert[J]. Frontiers in Environmental Science, 2024, 12: 1409260.
- [12] Zhou L, Qu X L, Zhou T, et al. Analysis of the characteristics and influencing factors of soil particle composition in Ningxia[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(21): 4272-4287. [周雷, 曲潇琳, 周涛, 等. 宁夏土壤颗粒组成特点及其影响因素分析[J]. 中国农业科学, 2023, 56(21): 4272-4287.]
- [13] Wang Y. Soil wind erosion characteristics and wind erosion estimation in dry farming areas of Wuchuan County[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019. [王燕. 武川县旱作农区土壤风蚀特征研究及风蚀量估算[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.]
- [14] Pan X, Wang Z Y, Gao Y. Effects of compound sand barrier for habitat restoration on sediment grain-size distribution in Ulan Buh Desert[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 2566.
- [15] Chen X Y, Niu Q X, Zhou J, et al. Study on spatial variability characters of steep purple soil particles under rainfall simulation condition[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(5): 163-168. [陈晓燕, 牛青霞, 周继, 等. 人工模拟降雨条件下紫色土陡坡地土壤颗粒分布空间变异特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 163-168.]
- [16] Li J W, Luo B L, Wei X H, et al. Transportation of fine particles controlled by particles flocculation is a key feature of soil erosion on gentle slope land[J]. Catena, 2023, 232: 107382.
- [17] Bufebo B, Elias E. Effects of land use/land cover changes on selected soil physical and chemical properties in Shenkolla watershed, south Central Ethiopia[J]. Advances in Agriculture, 2020, 2020(1): 5145483.
- [18] Dong L, Wang J, Li J R, et al. Assessing the impact of grazing management on wind erosion risk in grasslands: A case study on how grazing affects aboveground biomass and soil particle composition in Inner Mongolia[J]. Global Ecology and Conservation, 2022, 40: e02344.
- [19] Zhou L. Study on soil genesis, development and profile characteristics in Tarim River Basin[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2024. [周雷. 塔河流域土壤发生发育及剖面特征研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2024.]
- [20] Wang Q, Wang S H, Tao Q, et al. A comparative study of farm-scale digital mapping methods for soil attributes in the typical black soil region[J]. Soils, 2025, 57(2): 430-444. [王奇, 王世航, 陶勤, 等. 典型黑土区农场尺度土壤属性数字制图方法对比研究[J]. 土壤, 2025, 57(2): 430-444.]
- [21] Zhang X T, Huang W, Fu P H, et al. Research on digital soil mapping based on feature selection algorithm[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(3): 635-647. [张晓婷, 黄魏, 傅佩红, 等. 基于特征筛选算法的数字土壤制图研究[J]. 土壤学报, 2024, 61(3): 635-647.]
- [22] Zhou C H, Cheng W M, Qian J K, et al. Research on the classification system of digital land

- geomorphology of 1: 1 000 000 in China[J]. Journal of Geo-Information Science, 2009, 11(6): 707-724. [周成虎, 程维明, 钱金凯, 等. 中国陆地 1: 100 万数字地貌分类体系研究[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(6): 707-724.]
- [23] Zhang Z C, Pan K J, Liang A M, et al. Progress on process and mechanism of sand and dust emission on Gobi[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(9): 891-900. [张正偲, 潘凯佳, 梁爱民, 等. 戈壁沙尘释放过程与机理研究进展[J]. 地球科学进展, 2019, 34(9): 891-900.]
- [24] Mao D L, Cai F Y, Fang D X, et al. Fractal characteristics of grain size of sand and dust in aeolian sand movement in Cele oasis-desert ecotone in Xinjiang, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(1): 88-99. [毛东雷, 蔡富艳, 方登先, 等. 新疆策勒绿洲—沙漠过渡带风沙运动沙尘物质粒径分形特征[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 88-99.]
- [25] Li H L, Wan L L, Dong Z, et al. Effects of sand barriers of *Salix psammophila* on soil particle size and fractal dimension[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(3): 540-545. [李红丽, 万玲玲, 董智, 等. 沙柳沙障对沙丘土壤颗粒粒径及分形维数的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(3): 540-545.]
- [26] Chai H X, Rao S, Wang R, et al. The effect of the geomorphologic type as surrogate to the time factor on digital soil mapping[J]. Open Journal of Soil Science, 2015, 5(6): 123-134.
- [27] Zhang H, Li P, Lu K X, et al. Grain size distribution characteristics and research on wind erosion possibilities of topsoil in Dong Liu Gou watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5): 272-278, 285. [张辉, 李鹏, 鲁克新, 等. 东柳沟流域表土粒度分布特征及可风蚀性研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 272-278, 285.]
- [28] Liu B, Sun A J, Zhao H, et al. Physicochemical properties of surface sediments in the Taklimakan desert, northwestern China, and their relationship with oasis-desert evolution[J]. Catena, 2022, 208: 105751.
- [29] Jerolmack D J, Mohrig D, Grotzinger J P, et al. Spatial grain size sorting in eolian ripples and estimation of wind conditions on planetary surfaces: Application to Meridiani Planum, Mars[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2006, 111(E12): 2005JE002544.
- [30] Zhang Q Z, Pan Q, Chen Y, et al. Characteristics of landslide-debris flow accumulation in mountainous areas[J]. Heliyon, 2019, 5(9): e02463.
- [31] Major J J, Pierson T C. Debris flow rheology: Experimental analysis of fine-grained slurries[J]. Water Resources Research, 1992, 28(3): 841-857.
- [32] Iverson R M. The physics of debris flows[J]. Reviews of Geophysics, 1997, 35(3): 245-296.
- [33] Ming Q Z, Shi Z T. New discussion on dry valley formation in the Three Parallel Rivers region[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(1): 99-104. [明庆忠, 史正涛. 三江并流区干热河谷成因新探析[J]. 中国沙漠, 2007, 27(1): 99-104.]
- [34] Qiao Y. Forest soil genetic properties and taxonomy on the northern slope of middle Tianshan[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011. [乔永. 天山中段北坡森林土壤发生特性及系统分类研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.]
- [35] Chen F H, Jia J, Chen J H, et al. A persistent Holocene wetting trend in arid central Asia, with wettest conditions in the late Holocene, revealed by multi-proxy analyses of loess-paleosol sequences in Xinjiang, China[J]. Quaternary Science Reviews, 2016, 146: 134-146.
- [36] Chestovich P J, Saroukhanoff R Z, Moujaes S F, et al. Temperature profiles of sunlight-exposed surfaces in a desert climate: Determining the risk for pavement burns[J]. Journal of Burn Care & Research, 2023, 44(2): 438-445.
- [37] Zhang X, Zhao W W, Wang L X, et al. Relationship between soil water content and soil

particle size on typical slopes of the Loess Plateau during a drought year[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 648: 943-954.

[38] Long H Y, Lu C A, Ji H J, et al. A retrieval system for great soil groups from China's provisional soil classification system for the 3rd National Soil Census[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(21): 4264-4275. [龙怀玉, 卢昌艾, 冀宏杰, 等. 《第三次全国土壤普查暂行土壤分类系统》土类检索系统构建[J]. *中国农业科学*, 2024, 57(21): 4264-4275.]

(责任编辑: 檀满枝)