

砭砂岩区典型坡面土壤颗粒组成空间分布特征研究

胡 健¹, 辛军伟¹, 唐 梅¹, 甄 庆^{1,2,3}, 郑纪勇^{1,2,3}, 张兴昌^{1,2,3}

(1.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨陵 712100;2.西北农林科技大学水土保持研究所,
陕西 杨陵 712100;3.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨陵 712100)

摘要:为揭示土壤颗粒组成在垂直和水平方向上的分布规律,采集砭砂岩区典型坡面 0—100 cm 剖面的土壤,运用经典统计学测定其颗粒组成。结果表明:坡面 0—100 cm 土壤质地主要为砂壤土(59.21%)和壤砂土(36.40%)。随土层深度增加,砂粒含量增加,粉粒和黏粒含量减少,土壤逐渐呈现粗粒化的趋势;坡面尺度上,表层 0—10 cm 砂粒为弱变异,其余各层各粒级均为中等程度变异,且随土层深度增加变异性增强,不同粒级的变异系数表现为砂粒<粉粒<黏粒。沿坡面等高线方向,样带 B 粗粒化程度最弱,10 cm 土层以下,样带 B 粗粒化程度最强。沿垂直坡面等高线方向,坡中砂粒含量(73.60%)相比于坡上和坡下分别增加 6.90% ($p<0.05$) 和 11.66% ($p<0.05$),坡下粉粒(31.85%)和黏粒(3.10%)含量相比于坡上和坡中分别增加 13.13% ($p<0.05$), 23.59% ($p<0.05$) 和 4.36%, 51.70% ($p<0.05$),坡中粗粒化程度最强,坡下是细颗粒堆积的主要区域。研究结果可加强对砭砂岩区坡面土壤颗粒空间分布规律的认识。

关键词:砭砂岩区;坡面;颗粒组成;空间分布

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)03-0095-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.03.013

Spatial Distribution Characteristics of Soil Particle Composition on Typical Slopes in the Pisha Sandstone Area

HU Jian¹, XIN Junwei¹, TANG Mei¹, ZHEN Qing^{1,2,3}, ZHENG Jiyong^{1,2,3}, ZHANG Xingchang^{1,2,3}

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;

2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: To reveal the distribution pattern of soil particle composition in vertical and horizontal directions, soils from 0—100 cm layer profiles of typical slopes in the Pisha sandstone area were collected and their particle composition was determined by using classical statistics. Results showed that the soil texture of 0—100 cm layer on the slope was mainly sandy loam (59.21%) and loamy sandy soil (36.40%). With the increase of soil depth, the content of sand increased, the content of silt and clay decreased, and the soil gradually showed a trend of coarse graining. On the slope scale, the sand content in the soil surface layer of 0—10 cm were weakly variable, and the variability of all grain classes in the remaining layers was moderate, and the variability increased with depth, and the coefficients of variation of different grain classes showed that sand < silt < clay. Along the slope contour direction, the coarseness of sample zone B was the weakest, and below the 10 cm layer, the coarseness of sample zone B was the strongest. Along the vertical slope contour direction, the content of sand (73.60%) increased by 6.90% ($p<0.05$) and 11.66% ($p<0.05$) in the middle of the slope compared with the top and bottom of the slope, respectively, while the content of silt (31.85%) and clay (3.10%) increased by 13.13% ($p<0.05$), 23.59% ($p<0.05$) and 4.36%, 51.70% ($p<0.05$) in the bottom of the slope compared with the top and middle of the slope. The coarse granulation was the strongest in the middle of the slope, and the bottom of the slope was the main area for the accumulation of fine particles. The results of the study can strengthen the understanding of the spatial distribution pattern of soil particles on the slope of Pisha sandstone area.

收稿日期:2022-09-28

资助项目:国家自然科学基金项目(42107363)

第一作者:胡健(1996—),男,硕士研究生,主要从事土壤水分入渗研究。E-mail:1760031480@qq.com

通信作者:甄庆(1989—),男,博士,硕士生导师,主要从事土壤物理研究。E-mail:zhenqing10@nwfau.edu.cn

Keywords: Pisha sandstone area; slope; particle composition; spatial distribution

土壤颗粒根据粒径大小分为砂粒、粉粒和黏粒,不同粒径颗粒在土壤中的比例构成土壤颗粒组成(即土壤质地)。自 19 世纪后期,世界各国开始测定土壤颗粒组成并确定土壤质地,我国于 1975 年制定适合我国的土壤质地分类标准^[1]。土壤颗粒组成是土壤的基本属性之一,它影响着土壤的保水性^[2]、保肥性^[3]和抗侵蚀能力^[4],决定着诸多土壤物理化学过程^[5]。同时,土壤颗粒组成也是路面过程模拟、水文模型和环境评价中的重要参数^[6]。

土壤颗粒空间分布受多种因素共同影响,成土母质因母质类型和发育程度不同决定着土壤颗粒的初始分布^[7-8],王舒菲等^[9]研究黄土露天矿区排土场重构土壤质地的空间变异特征发现,由于植被对表层土壤的改良作用,导致表层 0—20 cm 土壤质地空间变异程度小于深层(20—60 cm)。气候^[10]、地形^[11]、植被类型^[12]等外在因素影响土壤颗粒在空间上的再分布。陈晓燕等^[10]研究人工降雨条件下紫色土陡坡地坡位对土壤颗粒空间分布的影响发现,降雨强度的变化会明显改变坡面上土壤颗粒含量;邹心雨等^[13]利用地统计与 GIS 相结合的方法分析河北坝上地区坡面尺度土壤颗粒组成的三维空间变异发现,坡形和坡位是影响土壤颗粒组成空间分布的主要因素,随土层深度增加,砂粒含量波动增加,粉粒含量波动下降,黏粒含量则比较稳定;王淮亮等^[12]结合数字图像处理技术和地统计学方法探究戈壁灌丛堆周边地表的土壤颗粒空间分布,推断灌丛堆附近风沙流特征是造成土壤颗粒空间异质性的主要因子。因此,研究土壤颗粒组成及其空间分布规律,可以为土地利用、管理和改良及生态恢复措施提供重要依据。

砒砂岩主要分布于黄土高原北部晋陕蒙接壤地区的鄂尔多斯高原,区内由于表土厚度差异,形成层状土岩结构,土壤结构层次相对复杂,同时,受冻融风化、降水等多种外界条件影响^[14],极易发生侵蚀退化,进而导致砒砂岩区土壤颗粒的时空变化。砒砂岩区坡面尺度土壤颗粒空间分布特征及影响因素尚不明确。鉴于此,以砒砂岩区典型坡面土壤颗粒为研究对象,探究土壤颗粒在坡面垂直和水平方向上的空间分布规律,旨在更精确地理解该区土壤持水性能及水分运移过程,为该区植被恢复和水土保持提供数据基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗暖水镇圪塔沟流域(110°25′—110°48′E, 39°42′—39°50′N),流域内土壤类型主要以白垩纪及侏罗纪发育的砂岩和

石岩为主^[15],覆盖面积为 96 km²,处于裸露砒砂岩的核心区,地形高低起伏大。研究区年降水量约 400 mm,主要集中在 6—9 月,年均潜在蒸发量为 2 093 mm,约为降雨量的 5 倍,年均气温 6.2~8.7 °C,气候类型为温带半干旱大陆性季风气候^[16]。年均日照时间 2 900~3 100 h,春季风力大,年均风速为 3.2 m/s,最大风速达 32 m/s^[17]。植被以自然草地和人工栽植的沙棘、油松、柠条、山杏为主^[18]。

1.2 样品采集与分析

选择典型坡面作为采样区域,坡长约 200 m,坡宽约 50 m。坡面土地利用类型是山杏、柠条随机栽种的灌草地,坡上和坡中植被生长稀疏,坡下灌草植被生长较茂密,坡面坡度为 7°~10°。

在坡面上,沿等高线方向间隔 15 m 布设 3 条样带(样带 A、B、C),每条样带间隔 15 m 依次布设 1 个采样点,受地形影响,样带 A、B、C 分别有 13, 13 和 12 个采样点,并用 GPS 精确定位样点的经纬度和海拔,海拔高度 1 145~1 189 m。为研究土壤颗粒组成随坡位的变化,将 1~5 号样点作为坡上代表性样点,6~9 号作为坡中代表性样点,10~13 号作为坡下代表性样点,具体分布见图 1。

2019 年 7—8 月用土钻分 6 层(0—10, 10—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100 cm)采集土壤样品,装入塑封袋并带回实验室进行分析。风干去除石块和植物根系,研磨后过 2 mm 筛备用。使用 Mastersizer 2 000 激光粒度仪测定土壤颗粒组成,采用美国农业部制土壤粒级划分标准分别计算砂粒(>0.05~2 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)和黏粒(<0.002 mm)的百分含量并确定土壤质地。

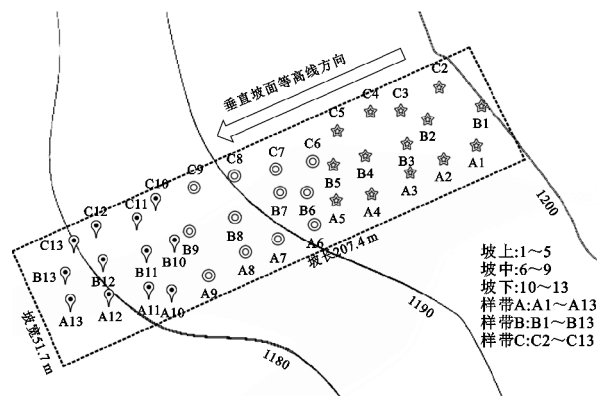


图 1 研究区样点分布

1.3 数据分析

采用 Excel 2016 软件对数据进行分类整理;采用 SPSS 24.0 软件进行数据统计分析,各处理间比较采用单因素方差分析(One-way anova),均值的多重比较采用 Duncan 法,显著性水平设为 0.05;采用

Arcmap 10.2 和 Origin 2017 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 坡面各层土壤质地分布

坡面 0—100 cm 土层土壤质地主要为砂壤土 (59.21%) 和壤砂土 (36.40%), 砂土 (3.07%) 和粉壤土 (1.32%) 占比较小 (表 1)。坡面 0—100 cm 土层水平方向上, 砂土样点分布于坡上和坡中, 坡上分布范围最大 (2.19%); 砂壤土和壤砂土样点分布于整个坡面上, 砂壤土在坡中分布范围最小 (10.96%), 壤砂土在坡中分布范围最大 (19.74%); 粉壤土样点分布于坡上和坡下, 坡下分布范围最大 (0.88%)。随土层深度增加, 砂壤土样点数逐渐减小, 壤砂土样点数转而增加, 并在 20—40 cm 土层砂土和粉壤土开始出现, 但 20—40 cm 土层以下, 无粉壤土样点出现。

2.2 土壤颗粒组成的垂直分布特征

砂粒、粉粒和黏粒含量在坡面 0—100 cm 土层的变化范围依次为 40.40%~92.25% (均值为 69.13%), 7.15%~53.70% (均值为 28.12%) 和 0.60%~6.95% (均值为 2.75%) (表 2)。除 20—40, 80—100 cm 土层外, 砂粒含量随土层深度增加而增加, 粉粒和黏粒则呈下降趋势 (表 2)。20—40 cm 土层黏粒含量 (3.26%) 最多, 相比

于 20—40 cm 土层, 60—80 cm 土层黏粒含量均值显著减少 31% ($p<0.05$)。除 20—40, 60—80 cm 土层外, 其余土层间各粒级含量差异不显著 ($p>0.05$)。

表 1 不同土层土壤质地分布情况

土层深度/ cm	砂土/ %	壤砂土/ %	砂壤土/ %	粉壤土/ %	样点数/ 个
0—10	—	15.79	84.21	—	38
10—20	—	36.84	63.16	—	38
20—40	2.63	36.84	52.63	7.89	38
40—60	7.89	31.58	60.53	—	38
60—80	5.26	55.26	39.47	—	38
80—100	2.63	42.11	55.26	—	38
0—100	3.07	36.40	59.21	1.32	228

注: “—”表示无数据。

砂粒、粉粒和黏粒含量在垂直方向上的变异系数分别为 8.91%~19.17%, 17.96%~39.36%, 28.39%~55.44%, 表现为砂粒<粉粒<黏粒 ($p<0.05$) (表 2)。根据 Nielsen 等^[19]对变异系数的分类标准, 除 0—10 cm 土层砂粒表现出弱变异外, 其余各层各粒级含量在坡面上均表现为中等程度变异。各层各粒级颗粒含量变异系数均随土层深度增加呈先增后减再增的波动增加趋势, 深层 (20 cm 以下) 变异系数始终高于表层 (0—20 cm), 最强的变异层均出现在 20—80 cm 土层。

表 2 不同土层土壤砂粒、粉粒、黏粒含量垂直变化特征

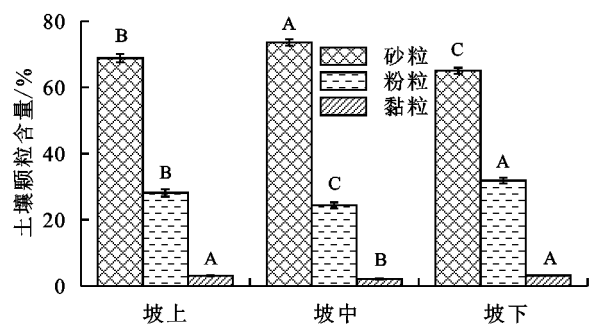
粒级	土层深度/cm	样点数/个	最小值/%	最大值/%	平均值/%	标准差	变异系数/%
砂粒	0—10	38	58.10	84.55	67.47a	6.01	8.91
	10—20	38	47.80	85.10	68.73a	8.36	12.17
	20—40	38	40.40	87.25	66.34a	12.72	19.17
	40—60	38	48.45	92.25	69.43a	10.97	15.80
	60—80	38	45.25	88.55	72.14a	11.19	15.52
	80—100	38	46.05	87.50	70.69a	10.32	14.60
粉粒	0—10	38	14.35	37.80	29.65a	5.33	17.96
	10—20	38	13.50	49.25	28.45a	7.63	26.83
	20—40	38	11.20	53.70	30.40a	11.46	37.71
	40—60	38	7.15	46.00	27.76a	9.60	34.59
	60—80	38	10.60	49.00	25.60a	10.08	39.36
	80—100	38	11.80	48.45	26.86a	9.35	34.79
黏粒	0—10	38	1.10	4.55	2.88ab	0.82	28.39
	10—20	38	1.35	5.25	2.82ab	0.94	33.33
	20—40	38	1.10	6.95	3.26a	1.46	44.61
	40—60	38	0.60	6.50	2.81ab	1.56	55.44
	60—80	38	0.70	5.75	2.26b	1.22	53.88
	80—100	38	0.70	5.50	2.44ab	1.09	44.67

注: 同列不同小写字母代表同一粒径不同土层间土壤颗粒含量具有显著性差异 ($p<0.05$)。

2.3 土壤颗粒组成的水平分布特征

2.3.1 土壤颗粒组成沿垂直坡面等高线方向分布特征 纵向坡位显著影响土壤颗粒在坡面上的分布 ($p<0.05$) (图 2)。整体来看, 坡上和坡中侵蚀程度不同, 坡中砂粒最多 (73.56%), 坡下发生泥沙沉积, 粉粒 (31.85%) 和黏粒 (3.13%) 含量最多。各粒级含

量在坡位间变化程度不一致, 坡上到坡中, 砂粒含量显著增加 6.9% ($p<0.05$), 粉粒和黏粒含量显著降低 13.6% 和 31.2% ($p<0.05$), 坡中到坡下, 砂粒含量显著减少 11.7%, 粉粒和黏粒含量显著增加 30.9% 和 51.7% ($p<0.05$), 说明各粒级含量在坡上至坡中的变化程度小于坡中至坡下。



注：不同大写字母代表相同粒径不同坡位间差异显著($p<0.05$)。

图 2 垂直等高线方向不同坡位 0—100 cm 砂粒、粉粒和黏粒的变异特征

比较同一土层上不同坡位间颗粒含量的差异(表 3),表层 0—10 cm 坡中砂粒含量($70.38\% \pm 5.18\%$)高于坡上($p>0.05$)和坡下($p<0.05$),坡下粉粒含量($32.38\% \pm 3.89\%$)高于坡上($p>0.05$)和坡中($p>0.05$),坡下黏粒含量($3.46\% \pm 0.87\%$)高于坡上($p>0.05$)和坡中($p<0.05$);其余各层坡中砂粒含量均高于坡上和坡下(除 40—60 cm),坡下粉粒(除 80—100 cm)

和黏粒含量(除 60—100 cm)均高于坡上和坡中。
比较同一坡位上不同土层间颗粒含量的差异(表 3),坡上和坡中各粒级含量在土层间没有显著差异($p>0.05$),坡下各粒级含量在土层间呈现出一定的显著差异性($p<0.05$),说明坡下土壤颗粒组成相对复杂。坡上和坡下在 20—40 cm 土层的砂粒含量最少($66.30\% \pm 13.21\%$, $57.93\% \pm 10.09\%$),粉粒($29.97\% \pm 11.68\%$, $38.11\% \pm 9.41\%$)和黏粒($3.73\% \pm 1.65\%$, $3.96\% \pm 0.92\%$)含量相对最多;坡中在 80—100 cm 土层的砂粒含量最多($77.81\% \pm 6.14\%$),粉粒($20.58\% \pm 5.70\%$)和黏粒($1.61\% \pm 0.51\%$)含量最少。

各层砂粒、粉粒和黏粒含量随纵向坡位的变异系数范围分别为 3.69%~12.72%, 7.64%~24.59% 和 17.18%~32.74%,弱变异层相对增多(大部分砂粒层和粉粒表层),但却都表现出随土层深度呈先增后减再增的波动增加趋势,表层(0—20 cm)的变异程度普遍低于深层(20—100 cm),且最强的变异层均出现在 20—40 cm 土层。

表 3 垂直等高线方向不同坡位各土层砂粒、粉粒、黏粒含量分布情况

土壤颗粒	土层深度/cm	土壤颗粒含量/%			变异系数/%
		坡上	坡中	坡下	
砂粒	0—10	67.80±6.59ABa	70.38±5.18Aa	64.16±4.70Babc	4.64
	10—20	69.78±8.29Aa	70.46±9.08Aa	65.78±7.56Aab	3.69
	20—40	66.30±13.21ABa	74.80±8.98Aa	57.93±10.09Bc	12.72
	40—60	72.59±14.65ABa	72.04±8.33Aa	63.13±4.30Bbc	7.67
	60—80	70.20±13.33Aa	76.07±10.59Aa	70.48±8.63Aa	4.58
	80—100	66.38±12.73Ba	77.81±6.14Aa	68.61±6.75Bab	8.54
粉粒	0—10	29.43±5.94Aa	27.19±4.88Aa	32.38±3.89Aabc	8.78
	10—20	27.24±7.38Aa	27.27±8.66Aa	31.03±6.78Abc	7.64
	20—40	29.97±11.68Ba	23.18±8.36Ba	38.11±9.41Aa	24.59
	40—60	24.72±12.78BCa	25.64±7.13Ba	33.43±3.83ACab	17.13
	60—80	27.04±11.79Aa	22.19±9.74Aa	27.33±8.00Ac	11.30
	80—100	30.54±11.43Aa	20.58±5.70Ba	28.85±6.50Abc	20.01
黏粒	0—10	2.77±0.74ABa	2.43±0.48Ba	3.46±0.87Aa	18.25
	10—20	2.98±1.09ABa	2.27±0.55Ba	3.20±0.87Aabc	17.18
	20—40	3.73±1.65Aa	2.02±0.76Ba	3.96±0.92Aa	32.74
	40—60	2.69±1.98Aa	2.32±1.30Aa	3.44±1.05Aab	20.26
	60—80	2.76±1.6Aa	1.74±0.90Aa	2.20±0.73Ac	22.97
	80—100	3.08±1.39Aa	1.61±0.51Ba	2.54±0.45Abc	30.77

注：表中数据均为平均值±标准差；同行不同大写字母表示土壤颗粒含量在坡位间差异显著，同行不同小写字母表示土壤颗粒含量在土层间差异显著($p<0.05$)。下同。

2.3.2 土壤颗粒组成沿坡面等高线方向分布特征
样带 A、B、C 在 0—100 cm 土层的砂粒、粉粒、黏粒含量差异不显著($p>0.05$)(图 3),说明土壤颗粒在坡面上的分布受横向坡位(沿等高线方向)的影响较小。整体来看,从样带 A 到 C,砂粒含量先增加后减少,样带 B 砂粒最多(70.16%),粉粒和黏粒含量先减少后增加。从样带 A 到 B,砂粒含量增加 2.71%,粉粒和黏粒含量分

别降低 5.72%和 4.52%,从样带 B 到 C,砂粒含量减少 1.77%,粉粒和黏粒含量分别增加 4.52%和 0.59%,表明各粒级含量沿坡面等高线方向变化程度很小。
由表 4 可知,各层各粒级含量在横向坡位间差异不显著。表层 0—10 cm 砂粒含量从样带 A 至 C 先减少后增加,粉粒和黏粒含量先增加后减少;在深层(除 40—60 cm),砂粒含量先增加后减少,粉粒和黏

粒(除 80—100 cm)含量先减少后增加。此外,各粒级含量在土层间的差异不显著($p>0.05$)。各层砂粉黏含量的变异系数范围为 1.66%~3.05%,3.54%~7.04%,1.08%~9.18%,所有土层均为弱变异层,随深度增加呈先增后减再增的波动增加趋势,最弱的变异层出现在 20—40 cm 层。

3 讨论

3.1 土壤母质对土壤颗粒组成的影响

研究区上层黄土、下层砒砂岩的二元分布模式导致土壤颗粒上细下粗的格局。已有研究^[20-21]表明,砒砂岩土壤颗粒将近 85%集中在砂粒,而黄绵土的砂粒含量≤50%,砒砂岩粗颗粒含量高于黄绵土。研究区不同坡位土层厚度差异较大,砒砂岩埋藏深度不同,坡上大面积砒砂岩出露,坡中土层厚度为 10—40 cm,坡下为 10—100 cm,因此,随样品采集深度增加,

各层砒砂岩逐渐显露,土壤逐渐粗粒化(表 2)。此外,坡面 20—40 cm 土层各粒径含量变异系数高于其他土层(表 3),可能是因为该层为黄土向各类砒砂岩过渡的活跃层。

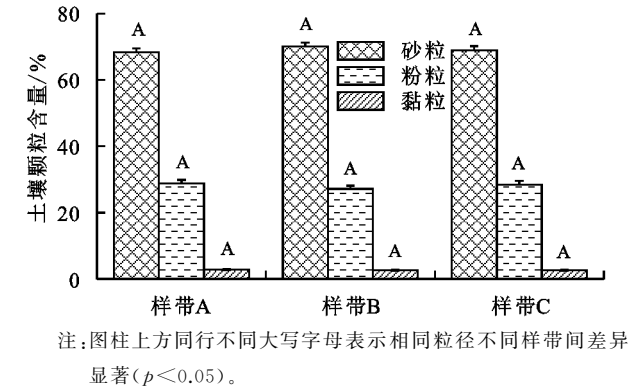


图 3 等高线方向不同样带 0—100 cm 砂粒、粉粒和黏粒的变异特征

表 4 等高线方向不同样带各层砂粒、粉粒、黏粒含量分布

土壤颗粒	土层深度/cm	土壤颗粒含量/%			变异系数/%
		样带 A	样带 B	样带 C	
砂粒	0—10	68.09±7.60Aa	66.06±5.04Aa	68.32±5.22Aa	1.84
	10—20	67.20±7.25Aa	71.10±7.97Aa	67.82±9.92Aa	3.05
	20—40	66.88±12.06Aa	67.00±13.35Aa	65.04±13.72Aa	1.66
	40—60	67.56±12.92Aa	70.22±9.16Aa	70.60±11.18Aa	2.39
	60—80	71.59±11.62Aa	74.27±8.16Aa	70.43±13.88Aa	2.73
	80—100	68.55±11.53Aa	72.31±9.04Aa	71.27±10.73Aa	2.75
粉粒	0—10	29.02±6.65Aa	30.92±4.41Aa	28.97±4.80Aa	3.74
	10—20	29.80±6.47Aa	26.25±7.16Aa	29.36±9.25Aa	6.79
	20—40	29.83±10.91Aa	29.78±11.88Aa	31.67±12.46Aa	3.54
	40—60	29.42±11.18Aa	27.02±7.82Aa	26.77±10.11Aa	5.27
	60—80	26.07±10.32Aa	23.66±7.32Aa	27.19±12.62Aa	7.04
	80—100	28.75±10.37Aa	25.37±8.24Aa	26.42±9.76Aa	6.45
黏粒	0—10	2.89±1.04Aa	3.03±0.75Aa	2.71±0.63Aa	5.48
	10—20	3.00±0.90Aa	2.65±0.94Aa	2.82±1.03Aa	6.27
	20—40	3.28±1.36Aa	3.22±1.62Aa	3.29±1.50Aa	1.08
	40—60	3.03±1.91Aa	2.75±1.52Aa	2.63±1.26Aa	7.19
	60—80	2.34±1.40Aa	2.07±0.92Aa	2.38±1.37Aa	7.42
	80—100	2.70±1.25Aa	2.32±0.99Aa	2.31±1.06Aa	9.18

注:同行不同大写字母表示土壤颗粒在样带间差异显著($p<0.05$)。

3.2 环境要素对土壤颗粒组成的影响

坡面表层(0—10 cm)土壤颗粒组成变化主要受多种外界营力(水力、风力、冻融等)的复合侵蚀影响。各粒级含量在坡面的变异系数表现为砂粒<粉粒<黏粒,颗粒粒径越小,变化程度越大,与先前的研究^[22-23]结果类似,可能因为表层细颗粒易受外界条件(风力、水力或人为)的影响进行远距离迁移,质地较重的粗颗粒在搬运过程中则更易就近沉积,故细颗粒的空间变异性更大。

在垂直坡面等高线方向上,坡中粗粒化严重,坡下是细颗粒主要堆积的区域(图 2、表 3)。先前研究^[24-25]表明,不同坡位因下垫面不同,产流产沙过程也存在差别。

坡上大面积裸露的砒砂岩在雨滴击溅作用下极易受到水蚀,产生的细颗粒易堵塞表层空隙^[26],降低裸露砒砂岩的入渗能力,缩短地表径流的形成时间,质量较小、粒径较小的粉粒和黏粒优先受到地表径流的侵蚀和搬运^[27],并向坡中迁移。坡中下垫面为黄绵土,自然降雨条件下,坡面上粉粒和黏粒向坡下迁移最为明显^[21]。坡中径流与坡上径流汇集后,流速增大,动能增大,搬运侵蚀能力增强,大量粉粒和黏粒随径流向坡下迁移。坡下黄土层较厚,入渗能力相对较高,植被生长茂密^[17],坡中径流与坡下径流汇集后,受到植被茎秆、枯枝落叶和植物根系的多重阻滞作用^[28-30],土壤颗粒(尤其是携带含量较高的细颗粒)开始发生沉积。

坡面土壤颗粒含量随坡位的变化特征因受土壤类型的影响而不同。在红壤丘陵区坡地,坡上至坡下砂粒含量逐渐增大,与本研究结果不一致。红壤质地偏黏重,在高强度的人为翻耕后,使黏结力较差的砂粒更加松散,故在同等搬运动力条件下,砂粒先被搬运并向坡下堆积^[31]。紫色土坡地降雨后坡中粉粒和砂粒含量没有明显变化特征,与本研究坡中砂粒含量变化不一致。坡中位置同时受雨滴击溅、径流搬运的侵蚀影响,土壤颗粒不断沉积和搬运,沉积量和搬运量此消彼长造成坡中粉粒和砂粒含量变化不明显^[10]。黄绵土坡地表层粉粒降雨后随径流迁移并在坡下沉积,黏粒则被径流迁出坡面^[21]。裸露砒砂岩坡面在 6 次降雨后坡上和坡中黏粒大量流失,随径流在坡下堆积^[32],与本研究结果一致。本研究中,坡上出露大面积的砒砂岩,主要成分以蒙脱石和方解石为主,在水蚀和风蚀作用下极易溃散风化,黏粒易大量流失^[33];坡中和坡下表层以黄土为主,在径流同等搬运动力条件下,粒径及质量较小的细颗粒先于被搬运^[21]。经过长期积累,坡中砂粒含量相对增加,粉粒和黏粒含量降低,坡下则刚好相反。

4 结论

(1) 砒砂岩区典型坡面 0—100 cm 土层土壤质地主要为砂壤土和壤砂土。

(2) 在垂直方向上,随土层深度增加,砂粒含量增加,粉粒和黏粒含量减小,变异系数表现为砂粒 < 粉粒 < 黏粒,除 0—10 cm 土层砂粒表现出的弱变异外,其余各层各粒级含量在坡面上均表现为中等程度变异。

(3) 在水平方向上,从坡上至坡下,砂粒含量先增加后减小,粉粒和黏粒含量先减小后增加;不同样带间土壤颗粒组成没有显著差异,说明土壤质地沿等高线方向变化不明显。

参考文献:

- [1] 吴克宁,赵瑞.土壤质地分类及其在我国应用探讨[J].土壤学报,2019,56(1):227-241.
- [2] Gao Z Y, Niu F J, Liu Z J, et al. Fractal and multifractal analysis of soil particlesize distribution and correlation with soil hydrological properties in active layer of Qinghai-Tibet Plateau, China[J].Catena,2021,203:e105373.
- [3] Han W Y, Li Y, Yin H. The influence of mechanical composition and mineral composition of calcareous soil on slope farmland on phosphorus fixation[J].Appl Science Basel,2021,11(9):15-26.
- [4] 张振国.土壤抗侵蚀指标的建立及初步应用[D].陕西 杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2010.
- [5] 杨金玲,张甘霖,李德成,等.激光法与湿筛一吸管法测定土壤颗粒组成的转换及质地确定[J].土壤学报,2009,46(5):772-780.
- [6] 申哲.不同尺度下宁夏南部黄土区表层土壤质地空间分布的预测及成因分析[D].北京:中国农业科学院,2020.
- [7] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [8] Gveric Z, Rubinic V, Kampic S, et al. Clay mineralogy of soils developed from miocene marls of medvednica Mt, NW croatia: Origin and transformation in temperate climate[J].Catena,2022,216:13-25.
- [9] 王舒菲,曹银贵,白中科,等.黄土露天矿区排土场重构土壤质地空间特征研究[J].西北林学院学报,2020,35(6):40-51.
- [10] 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.
- [11] 林正雨,高雪松,邓良基,等.微地形土壤颗粒分形维数的空间变异特征研究[J].土壤通报,2009,40(3):471-475.
- [12] 王淮亮,高君亮,原伟杰,等.戈壁灌丛堆周边地表土壤颗粒的空间异质特征[J].植物生态学报,2013,37(5):464-473.
- [13] 邹心雨,张卓栋,吴梦瑶,等.河北坝上地区坡面尺度土壤机械组成的空间变异[J].中国水土保持科学,2019,17(5):44-53.
- [14] 张攀,姚文艺,肖培青,等.黄河流域砒砂岩区多动力侵蚀交互叠加效应研究[J].水利学报,2022,53(1):109-116.
- [15] 王嘉元.砒砂岩区典型流域土壤侵蚀演变过程及人工林格局优化[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.
- [16] 辛军伟.砒砂岩区典型坡面土壤理化性质空间变异特征[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [17] 辛军伟,尚振坤,王俊鹏,等.砒砂岩区典型坡面土壤水分空间分布特征[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(1):52-59.
- [18] 尉迟文思,姚云峰,郭月峰,等.砒砂岩地区 3 种主要树种边材液流动态特征[J].水土保持学报,2017,31(5):203-207,214.
- [19] Nielsen D R, Bouma J. Soil spatial variability: Proceedings of a workshop of the ISSS and the SSSA, Las Vegas, USA, 30 November - 1 December, 1984[M]. Wageningen, the Netherlands: Center Agricultural Puband Document, Pudoc,1985.
- [20] 李晓丽,苏雅,齐晓华,等.高原丘陵区砒砂岩土壤特性的实验分析研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2011,32(1):315-318.
- [21] 李裕元.坡地土壤磷素与水分迁移试验研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2002.

(下转第 108 页)

- model at a national scale[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 569/570: 1418-1426.
- [14] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2): 213-224.
- [15] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment; Part I, Model development[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(1): 73-89.
- [16] 郭屹立, 卢训令, 丁圣彦. 伊洛河河岸带生态系统草本植物功能群划分[J]. *生态学报*, 2012, 32(14): 4434-4442.
- [17] 贺瑞敏, 王国庆, 张建云. 环境变化对黄河中游伊洛河流域径流量的影响[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(2): 297-298.
- [18] 胡庆芳, 杨大文, 王银堂, 等. Hargreaves 公式的全局校正及适用性评价[J]. *水科学进展*, 2011, 22(2): 160-167.
- [19] 国家地球系统科学数据中心. 国家科技基础条件平台[R/OL]. (2022-12-02) <http://www.geodata.cn>.
- [20] 周文佐. 基于 GIS 的我国主要土壤类型土壤有效含水量研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2003.
- [21] Zhang L, Hickel K, Dawes W R, et al. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration[J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(2): 1-14.
- [22] 余新晓, 周彬, 吕锡芝, 等. 基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估[J]. *林业科学*, 2012, 48(10): 1-5.
- [23] Allen R G. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56[M]. Rome: FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [24] Cosby B J, Hornberger G M, Clapp R B, et al. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils[J]. *Water Resources Research*, 1984, 20(6): 682-690.
- [25] 顾铮鸣, 金晓斌, 沈春竹, 等. 近 15 年江苏省水源涵养功能时空变化与影响因素探析[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(11): 2453-2462.
- [26] 刘树锋, 陈记臣, 关帅, 等. 基于 InVEST 模型的未来土地利用变化对水源涵养功能的影响: 以杨溪河流域为例[J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(15): 67-70.
- [27] 刘宥延, 刘兴元, 张博, 等. 基于 InVEST 模型的黄土高原丘陵区水源涵养功能空间特征分析[J]. *生态学报*, 2020, 40(17): 6161-6170.
- (上接第 100 页)
- [22] 高君亮, 高永, 吴波, 等. 戈壁地表土壤颗粒的空间变异特征研究[J]. *土壤*, 2019, 51(1): 135-141.
- [23] 曹媛, 孟明, 王磊, 等. 宁夏中部干旱带天然草地土壤颗粒空间分布特征[J]. *中国水土保持*, 2021(2): 56-59.
- [24] 杨振奇, 秦富仓, 李旻宇, 等. 砒砂岩区不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(4): 733-739.
- [25] 杨振奇, 秦富仓, 李龙, 等. 砒砂岩区小流域土壤有机质空间分布特征及其影响因素[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(17): 154-161.
- [26] 王晨洋. 不同近地表土壤水文条件下黄壤坡面细沟间侵蚀过程机理[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [27] 张合兵, 聂小军, 程静霞. ¹³⁷Cs 示踪采煤沉陷坡土壤侵蚀及其对土壤养分的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 137-143.
- [28] 高光耀, 傅伯杰, 吕一河, 等. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展[J]. *生态学报*, 2013, 33(1): 12-22.
- [29] 于国强, 李占斌, 李鹏, 等. 不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究[J]. *水科学进展*, 2010, 21(5): 593-599.
- [30] 余新晓, 张晓明, 武思宏, 等. 黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J]. *山地学报*, 2006(1): 19-26.
- [31] 王冬冬, 高磊, 陈效民, 等. 红壤丘陵区坡地土壤颗粒组成的空间分布特征研究[J]. *土壤*, 2016, 48(2): 361-367.
- [32] 钱秋颖, 秦富仓, 李龙, 等. 自然降雨条件下坡面侵蚀地表粗糙度的空间异质性[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3): 46-52.
- [33] 石建省, 叶浩, 王强恒, 等. 水岩作用对内蒙古南部砒砂岩风化侵蚀的影响分析[J]. *现代地质*, 2009, 23(1): 171-177.