

马尾松人工林地浅沟表层土壤颗粒的空间分布特征

杨文利, 朱平宗, 程洪, 闫靖坤, 陈宝生, 杨俊

(南昌工程学院水利与生态工程学院, 南昌 330099)

摘要: 为研究马尾松林地浅沟侵蚀对地表特征的影响, 选取南方红壤区马尾松人工林地发育完整的浅沟为研究对象, 采用野外调查与室内试验分析相结合的方法, 研究浅沟表层(0—5 cm)土壤颗粒分布的空间差异性。结果表明:(1)研究区内表层土壤颗粒中石砾含量较高, 约占 78.68%, 土壤为多砾质沙土, 土壤水蚀使得浅沟表层土壤粗化。(2)浅沟不同部位间表层土壤颗粒分布差异明显, 其中石砾含量表现为沟底<沟坡<沟缘, 沟底的石砾含量极显著小于沟坡和沟缘的含量($P<0.01$);极粗砂、中粗砂、细砂粒、粉粒和黏粒含量均表现为沟底>沟坡>沟缘, 且沟底的含量均极显著大于沟坡和沟缘的含量($P<0.01$);而沟坡和沟缘土壤颗粒含量差异不显著($P>0.05$)。(3)沿沟长方向从沟头到沟口, 沟底表层土壤中粗颗粒含量呈减小趋势, 细颗粒含量呈增大趋势;而沟坡和沟缘趋势正好相反, 说明在浅沟沟底中上部主要为侵蚀作用, 而在中下部主要为沉积作用。(4)不同粒级土壤颗粒含量最优半方差函数理论模型均为高斯模型, 土壤颗粒含量的块金系数最大仅为 0.36%, 远小于 25%, 不同粒级土壤颗粒含量表现出强烈的空间自相关性。本研究可为南方红壤区人工林地土壤侵蚀治理提供理论支持。

关键词: 红壤区; 浅沟侵蚀; 马尾松林地; 土壤颗粒分布; 空间异质性

中图分类号: S152.3; S791.248

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)04-0158-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.04.025

Spatial Difference of Soil Particle Size Distribution in an Ephemeral Gully Under *Pinus Massoniana* Forest

YANG Wenli, ZHU Pingzong, CHENG Hong, YAN Jingkun, CHEN Baosheng, YANG Jun

(School of Water Resources and Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099)

Abstract: A well-developed ephemeral gully, which located in *Pinus massoniana* forests, was selected as study slope. Then, the spatial distribution characteristics of soil particle size in surface layer (0—5 cm) were studied. The results showed that: (1) The gravel content was higher in topsoil, which texture belonged to sandy. The water erosion led to the coarse soil surface. (2) Soil particle size distributions varied with the different topographic position of ephemeral gully, the content of gravel (>2 mm) showed that the groove $<$ gully slope $<$ gully edge, and the gravel content in groove was significantly less than these in gully slope and edge ($P < 0.01$). All the Extremely coarse sand, coarse sand, fine sand, silt and clay contents were characterized by groove $>$ gully slope $>$ gully edge, and the contents in groove were significantly greater than the gully slope and edge ($P < 0.01$). The difference between soil particle contents in gully slope and edge were not significant ($P > 0.05$). (3) With the gully length direction from head to mizoguchi, the coarse particle contents decreased in groove, but the fine particle contents increased. And the opposite results were found in gully slope and edge. (4) All the optimal semi-variance functions for different graded soil particles were gaussian model, the largest nugget coefficient of soil particles content is only 0.36%, far less than 25%, showing a strong spatial correlation.

Keywords: red soil region; ephemeral gully erosion; *Pinus massoniana* forest; soil particle distribution; spatial heterogeneity

土壤颗粒分布(soil particle size distribution, PSD)特征作为土壤物理性质的基本组成部分,对土壤水分运移、溶质迁移等物理过程有着重要的作用,同时与土体结构、土壤肥力、土壤侵蚀特征及土地退

化等密切相关,被认为是重要的土壤特性之一^[1-3]。侵蚀过程是影响表层土壤颗粒分布的重要因素,土壤颗粒分布也可作为表征土壤侵蚀过程与强度的重要指标,目前已有一定的研究。如张辉等^[4]在东柳沟流

域表土粒度分布特征的研究表明,从流域上游到中游,表土粒度表现出明显的粗化现象;张保华等^[5]通过对丘陵区各地形部位土壤颗粒组成特征的研究发现,随高程降低粗粒物质有减小的趋势,而细粒物质有增加的趋势。以上研究表明,表层土壤颗粒分布受土壤侵蚀的影响较大,主要表现为土壤侵蚀发生后,外在因素对土壤剥蚀、搬运和沉积过程的影响导致土壤颗粒的再分布,而土壤颗粒的再分布是土壤中普遍存在的过程^[6-9]。因此,通过对土壤颗粒空间分布特征的研究,可直观地反映区域土壤侵蚀的规律^[10]。

浅沟主要是由地表径流冲刷坡面形成的侵蚀沟,而不同学者对浅沟的定义也不相同,一般可分为两种:其一是认为浅沟是分布于坡面上的没有明显沟边的槽型地^[11];其二是认为浅沟是指径流在其底部冲刷所形成的侵蚀沟槽^[12],而本文所指的浅沟是第一种。南方红壤区由于其区域自然地理环境(降雨量大且多以暴雨形式出现、地形破碎且坡度变化大、土壤风化程度高)和强烈的人为干扰共同导致了严重的土壤侵蚀,使其成为我国水土流失范围最广,严重程度仅次于黄土高原的地区^[13],且林下浅沟发育^[14]。

研究^[15]结果表明,在中国黄土高原区,浅沟侵蚀量通常占坡面总侵蚀量的26.6%~100%,而浅沟侵蚀会对表层土壤颗粒分布造成一定的影响,从而使土壤颗粒分布表现出一定的空间异质性,并进一步影响土壤侵蚀过程。王冬冬等^[16]在江西省鹰潭市孙家农田小流域研究了红壤坡地橘园和花生地土壤颗粒的空间分布特征;夏江宝等^[6]在福建省长汀县研究了红壤区不同植被类型土壤颗粒分形与水分物理特征。但现有研究主要集中在红壤丘陵区的小流域尺度和不同植被类型下土壤颗粒分布特征,而对林下侵蚀浅沟的土壤颗粒分布特征鲜见报道。本文以马尾松纯林地发育的浅沟表层(0—5 cm)土壤为研究对象,分析浅沟表层土壤颗粒空间分布特征,对揭示南方红壤区林下浅沟侵蚀的发生、发展规律以及林下水土流失的治理等具有一定的意义。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于江西省吉安县登笼乡大塘村附近的马尾松林地,地理坐标为27°00′24″—27°00′27″N, 114°46′34″—114°46′37″E。海拔70~150 m,缓坡低丘地貌,地面坡度5°~30°。多年平均气温18.1℃,多年平均降水量1518.8 mm,降水量年内分配不均,主要集中在4—7月,多以暴雨形式出现。土壤类型为红壤,成土母质以花岗岩风化物为主。植被以马尾松纯林为主,种植密度650株/hm²,树龄为25年,由于林下草灌缺乏,土壤侵蚀严重,浅沟发育。

1.2 采样点布设与土壤样品采集

2016年9月20—21日,选取发育完整的浅沟(沟长50 m,沟宽4~13 m,沟深0.2~1.6 m,沟底平均纵坡10.01%)为对象,以沟底线为中心,分别在沟底、沟坡、沟缘设置采样线,按2 m×2 m的间隔设置采样点(图1),共设置采样点138个,每个采样点设置3个重复进行采样,采集表层(0—5 cm)土壤,每个点取土样约1 kg,将每个点3个土样充分混合后带回实验室内,在自然状态下风干后进行颗粒分析。

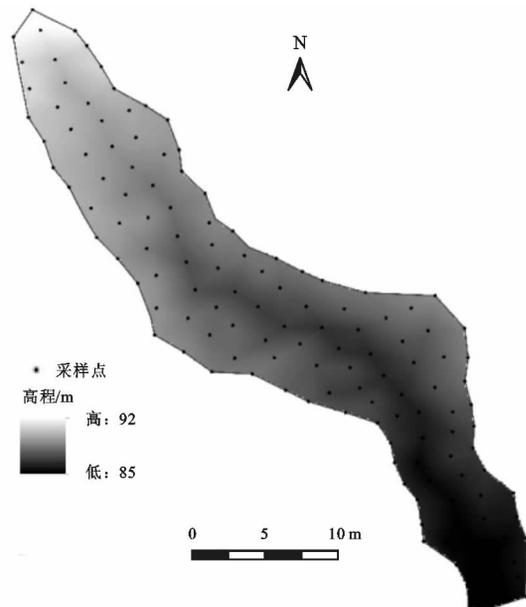


图1 采样点布设示意

为获取浅沟微地貌特征,土壤采样前期用南方S86系列高精度差分GPS(水平精度:±1 cm+1 ppm,垂直精度:±2 cm+1 ppm)对浅沟进行地形测量,其中数据采集点以1 m为间隔,当局部地形变化较大时,对采集点进行适当加密。将采集的地形数据导入ArcGIS中生成浅沟DEM(图1)。

1.3 土壤样品测定

将去除根系及枯落物等的土样,用南京土壤仪器厂生产的SZS型三维振筛机震动5 min,分析出石砾(>2 mm)、极粗砂(2~1 mm)、中粗砂(1~0.25 mm)的土壤颗粒含量。用BT9300H激光粒度仪测量细砂粒(0.25~0.05 mm)、粉粒(0.05~0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm)的土壤颗粒含量。

1.4 数据处理

采用SPSS 21.0和Excel 2016软件进行数据处理和制图,浅沟不同部位间土壤颗粒含量的差异性采用单因素方差分析(One-way ANOVA)中的LSD法进行分析;不同粒级土壤颗粒含量的空间异质性采用GS+9.0进行分析。

2 结果与分析

2.1 浅沟表层土壤颗粒组成特征

由表1可知,浅沟表层土壤颗粒组成中,石砾(>2

mm)含量高达 78.68%，砂粒(0.05~2 mm)含量为 14.47%，粉粒和黏粒含量分别为 3.49%和 0.36%，表层土壤为多砾质沙土。说明马尾松纯林地浅沟表层由于长期遭受雨滴击溅与地表径流冲刷作用，使表层土壤粗化严重。

表 1 浅沟表层土壤颗粒含量描述性统计特征值

土壤 粒级	平均值/ %	标准差	极小值/ %	极大值/ %	变异 系数/%	峰度	偏度
石砾	76.68	14.83	25.29	93.66	19.34	-1.45	1.86
极粗砂	3.72	1.25	1.31	9.81	33.56	1.72	4.85
粗砂	13.54	10.28	2.52	57.30	75.96	2.22	5.41
细砂	0.21	0.22	0.01	0.97	104.67	1.54	1.92
粉粒	3.49	2.87	0.60	19.83	82.10	2.32	7.69
黏粒	0.36	0.29	0.07	1.62	80.56	1.79	3.15

2.2 浅沟不同部位间土壤颗粒分布差异

由图 2 可以看出，浅沟不同部位间表层土壤颗粒含量差异明显。其中石砾含量表现为沟底<沟坡<沟缘，且沟底含量极显著小于沟坡和沟缘的含量($P<0.01$)；而极粗砂、中粗砂、细砂、粉粒和黏粒含量均表现为沟底>沟坡>沟缘，且沟底含量均极显著大于沟坡和沟缘的含量($P<0.01$)；黏粒含量在沟底、沟坡和沟缘呈显著减小的趋势($P<0.05$)；而极粗砂、中粗砂、细砂和粉粒含量在沟坡和沟缘差异不显著($P>0.05$)。其原因主要是南方红壤区降雨量大，且多以暴雨形式出现，马尾松林下缺乏灌草覆盖，雨滴击溅和坡面地表径流共同作用，使林下土壤层逐渐分离、搬运，多年侵蚀的结果使得表层土壤丧失，土壤颗粒粗化严重。沟缘、沟坡与沟底的差异主要是侵蚀方式不同而造成表层土壤颗粒含量差异显著。

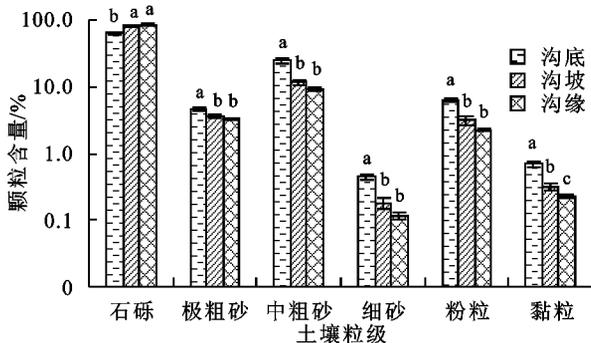


图 2 浅沟不同部位表层土壤颗粒分布差异分析

由于沟缘部位主要受雨滴击溅侵蚀和布局的地表漫流冲刷，使表层土壤中的细颗粒(细砂、粉砂、黏粒等)被分离、搬运，并在重力和地表径流的共同作用下，随水流搬运到沟底，从而使沟缘表层粗颗粒含量比沟底高；沟坡部位由于坡度较大，表层土壤中的细颗粒很容易流失到沟底，致使沟坡表层土壤粗颗粒含量较高；而进入沟底水流中的细颗粒，主要受水流剪切力，以悬移和跃移的方式随水流做相对运动。土壤分离速率的大小与水流流量、坡度相关，而当水流挟沙能力降低

时，随水流运动的部分泥沙颗粒，就会发生沉积，从而使沟底的细颗粒含量显著高于沟坡和沟缘。

2.3 沿沟长方向土壤颗粒分布特征

从表 2 可以看出，随着采样点距沟头部位距离的增加，石砾含量总体上表现为极显著的减小趋势($P<0.01$)；极粗砂、中粗砂、粉粒和黏粒含量均表现为增大的趋势，其中极粗砂和黏粒含量呈极显著的增大趋势($P<0.01$)，而中粗砂和粉粒含量呈显著的增大趋势($P<0.05$)；细砂含量则没有明显的变化趋势，主要是由于沟底水流对表层土壤颗粒侵蚀分选的结果。其变化规律见图 3。

表 2 沿沟长方向土壤颗粒含量趋势分析

土壤 粒级	沟底表层		沟坡表层		沟缘表层	
	U 值	趋势判断	U 值	趋势判断	U 值	趋势判断
石砾	-2.34	极显著	0.21	不显著	1.09	不显著
极粗砂	2.82	极显著	0.77	不显著	-0.24	不显著
中粗砂	2.17	显著	-0.02	不显著	-1.08	不显著
细砂	-0.11	不显著	-1.42	不显著	-3.06	不显著
粉粒	2.21	显著	-1.10	不显著	-1.22	不显著
黏粒	2.85	极显著	-0.58	不显著	-1.02	不显著

浅沟沟坡表层土壤颗粒含量沿沟长方向的变化趋势(表 2)可知，随着采样点距离沟头距离的增加，石砾含量和极粗砂含量呈微弱的增大趋势，但增大趋势均没有达到显著差异；而中粗砂、细砂、粉粒和黏粒含量均表现为一定的减小趋势，减小的趋势也没有达到显著差异。其主要原因可能细颗粒沿坡面发生迁移，大颗粒多留在原地，大颗粒没有明显的变化规律^[17]；主要与成土母质的风化速率有关；而浅沟上部沟坡较缓，降雨产生的地表径流汇流速度小、侵蚀搬运能力弱，剥蚀的土壤较少；到了沟坡中部沟深加大、沟坡加长、坡度变陡，水流汇流能量增加，细颗粒冲刷较多；浅沟下部，沟深较小、沟坡较短，一部分细颗粒转移到沟底。试验数据说明在垂直于侵蚀沟的坡面上，发生剥离和搬运的土壤以中粗砂、细砂、粉粒和黏粒为主。

由浅沟沟缘表层土壤颗粒含量沿沟长方向趋势分析(表 2)可知，随着采样点距离沟头距离的增加，石砾含量总体上呈一定的增大趋势，但增大趋势没有达到显著差异；其余颗粒含量总体上均呈一定的减小趋势，其中细砂含量减小趋势最大，但减小趋势也没有达到显著差异。其原因可能是浅沟沟缘上部和下部坡度均大于沟缘中部坡度，而坡度越大形成的坡面径流流速越大，越容易搬运土壤中的细颗粒，使得极粗砂、中粗砂、细砂、粉粒和黏粒含量在浅沟沟缘中部的颗粒含量高于其他位置。

降雨产生的地表径流对土壤颗粒的剥离、搬运、沉积与沟底水流的流速、水深和沟底纵坡等有关^[18-19]，在沟底上部，由于汇水面积小，沟底径流流量小，流速相对

也小,径流的挟沙能力较弱,细颗粒更容易被剥蚀、搬运;而到达沟底中部,虽然径流量在增大,但沟底坡度变缓,水深增加,径流流速减小,水流挟沙能力变弱并逐渐达到饱和,部分颗粒开始沉积,到了沟底部,沟底纵坡更缓,水流流速更慢,水流携带的泥沙沉积量则更大^[20],导致了在浅沟沟底石砾含量从上部到下部呈减小的趋势,而极粗砂、中粗砂、细砂、粉粒和黏粒含量则呈增大的趋势,说明在浅沟沟底的中上部主要发生侵蚀作用,而在中下部则主要发生沉积作用。

2.4 土壤颗粒分布的地统计学分析

变异函数(半方差函数)是地统计学中研究空间变异性的关键函数,它既能描述区域化变量的结构性变化,又能描述随机性变化^[21]。变异函数曲线的结构用块金值(C_0)、基台值($C_0 + C$)和变程 A 来描述,其中块金值(C_0)表示由误差及最小取样尺度内的随机因子导致的随机变异;基台值($C_0 + C$)反映了区域化变量的异质性程度;变程 A 反映了区域化变量的最大相关距离,在变程之内,空间自相关存在;在变程之外,空间自相关消失^[21-23]。空间变异性的强弱还可通过块金系数即块金值(C_0)与基台值($C_0 + C$)比值的大小来表示,块金系数表示随机因素引起的空间变异性占总体变异(包括随机变异和结构性因素引起的变异)的比例,而结构性因素如气候、母质、地形等则是土壤具有空间相关性的根本原因,若块金系数 $< 25\%$,说明变量有很强的空间自相关性; $25\% \sim 50\%$ 说明变量有明显的空间自相关; $50\% \sim 75\%$ 时变量有中等空间自相关;而块金系数 $> 75\%$ 时变量空间自相关弱,变异主要由随机变异组成。

由不同粒级土壤颗粒含量半方差函数理论模型及相关参数(表3)可知,浅沟不同粒级土壤颗粒含量的半方差函数理论模型均为高斯模型,拟合结果显示决定系数 R^2 均大于 0.86,拟合结果具有较高的可靠性,可以用半方差模型模拟土壤颗粒的空间结构特征;浅沟表层土壤各粒级颗粒含量块金值均大于 0.01,表明采样误差和随机因素引起的土壤颗粒变异很小,本试验所得结果能够说明土壤颗粒的空间分布特征;不同粒级土壤颗粒含量的空间异质性差异很小,中粗砂的块金系数最大仅为 0.36%,而粉粒的块金系数最小仅为 0.03%,均远小于 25%,表现出强烈的空间自相关性,说明浅沟不同粒级土壤颗粒的空间变异主要由结构性因素(气候、母质、地形、土壤侵蚀等非人为因素)作用引起的,而受随机性因素的影响很小;不同粒级土壤颗粒的变程各不相同但相差不大,其中石砾的变程最大为 15.93 m,而粉粒的变程最小为 10.26 m,这可能是浅沟上存在的微地形和不同粒级土壤颗粒受径流搬运差异等因素共同作用下造成的,而本文的

采样间隔是 2 m,远小于分析得到的最小变程 10.26 m,因此在以后类似的采样过程中可以适当扩大采样间隔,使采样更加科学合理。

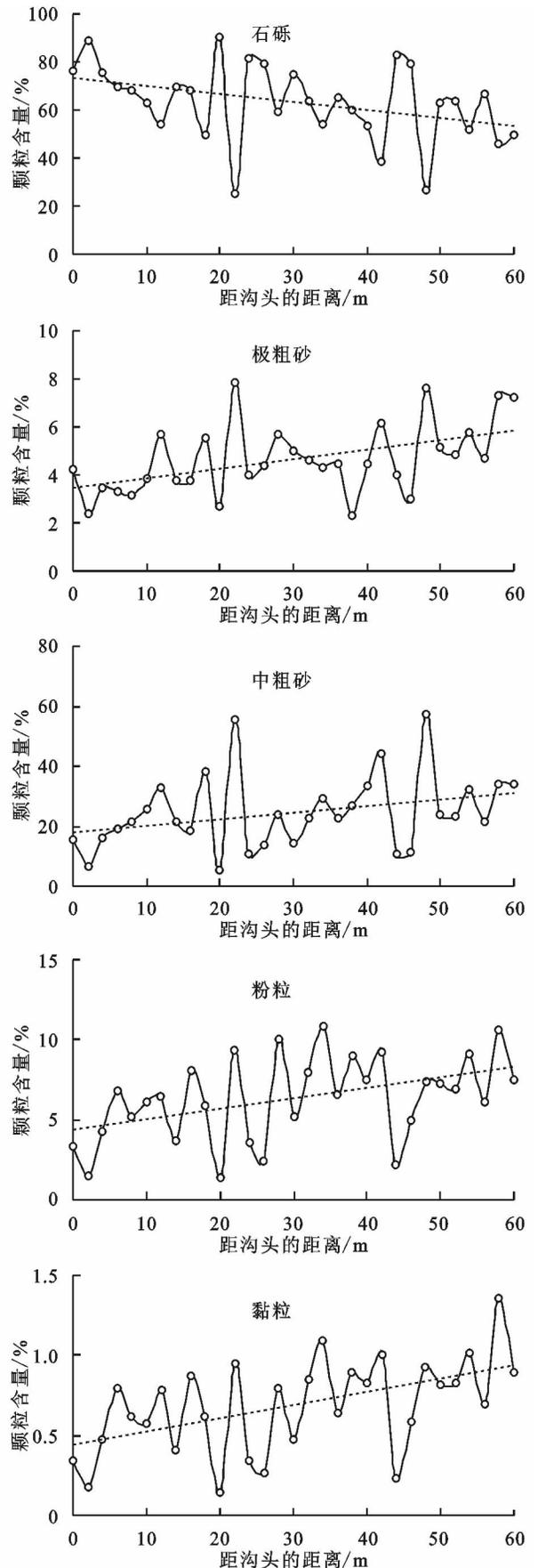


图3 沿沟长方向沟底表层土壤颗粒含量分布特征

表 3 不同粒级土壤颗粒半方差函数理论模型及相关参数

土壤粒级	最优模型 ($r(h)$)	块金值 (C_0)	基台值 (C_0+C)	块金值/基台值 [$C_0/(C_0+C)$]/%	变程 A/ m	决定系数 (R^2)	残差平方和 (RSS)
石砾	高斯模型	0.010	3.988	0.25	15.93	0.860	4.510
极粗砂	高斯模型	0.010	4.029	0.25	11.63	0.981	0.299
中粗砂	高斯模型	0.011	3.032	0.36	13.68	0.941	0.236
细砂	高斯模型	0.010	4.029	0.25	11.27	0.987	0.184
粉粒	高斯模型	0.001	3.012	0.03	10.26	0.968	0.406
黏粒	高斯模型	0.010	4.029	0.25	11.27	0.987	0.163

3 结论

(1) 马尾松人工林地地表裸露, 长期受雨滴击溅和地表径流侵蚀, 浅沟表层土壤颗粒中石砾含量较高, 土壤为多砾质沙土, 表层土壤粗化严重。

(2) 由于受不同水流侵蚀方式(漫流、集中水流)影响, 水流的挟沙能力差异, 使浅沟不同部位间表层土壤颗粒含量差异明显。其中石砾含量在沟缘、沟坡部位相对较多, 砂粒、粉粒、黏粒含量在沟底部位较多。

(3) 沿浅沟长度方向, 随着沟长的增加, 沟底表层土壤中粗颗粒含量逐渐减小, 细颗粒含量逐渐增大; 而沟坡和沟缘部位表层土壤颗粒含量分布趋势正好相反, 说明在浅沟沟底中上部主要为侵蚀作用占主导, 在中下部沉积作用占优势。

(4) 不同粒级土壤颗粒含量最优半方差函数理论模型均为高斯模型, 土壤颗粒含量的块金系数最大仅为 0.36%, 远小于 25%, 不同粒级土壤颗粒含量表现出强烈的空间自相关性。

(5) 进一步解释浅沟表层土壤颗粒分布的空间差异性, 需研究马尾松林下浅沟侵蚀过程及表层土壤分离能力的空间差异性。

参考文献:

[1] 吴煜禾, 张洪江, 程金花, 等. 重庆四面山不同林地土壤颗粒特征及其与土壤侵蚀的关系[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 219-223.

[2] 苏里坦, 宋郁东, 陶辉. 不同风沙土壤颗粒的分形特征[J]. 土壤通报, 2008, 39(2): 244-248.

[3] 齐雁冰, 常庆瑞, 惠洪河. 人工植被恢复荒漠化逆转过程中土壤颗粒分形特征[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 566-570.

[4] 张辉, 李鹏, 鲁克新, 等. 东柳河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.

[5] 张保华, 何毓蓉, 徐佩, 等. 紫色丘陵区小流域侵蚀沉积断面构型及土壤颗粒分形特征[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 136-139.

[6] 夏江宝, 顾祝军, 周峰, 等. 红壤丘陵区不同植被类型土壤颗粒分形与水物理特征[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(5): 9-15.

[7] 朱丽东, 谷喜吉, 叶玮, 等. 洞庭湖周边地区第四纪红土粒度特征及环境意义[J]. 地理科学进展, 2014, 33(1):

13-22.

[8] 毛丽丽, 于静洁, 张一驰, 等. 黑河下游土壤的细土颗粒粒径组成和质地类型的空间分布规律初步研究[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 52-58.

[9] 张秦岭, 李占斌, 徐国策, 等. 丹江鹦鹉沟小流域不同土地利用类型的粒径特征及土壤颗粒分形维数[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 244-249.

[10] 茹豪, 张建军, 李玉婷, 等. 黄土高原土壤粒径分形特征及其对土壤侵蚀的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 176-182.

[11] 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类[J]. 土壤学报, 1956(2): 99-115.

[12] 陈永宗, 景可, 蔡强国, 等. 杏子河流域的侵蚀地貌[J]. 水土保持通报, 1984(5): 6-9.

[13] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7615-7622.

[14] 汪邦稳, 段剑, 王凌云, 等. 红壤侵蚀区马尾松林下植被特征与土壤侵蚀的关系[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(5): 9-16.

[15] 郭明明, 王文龙, 李建明, 等. 黄土区坡耕地耕作对浅沟径流产沙及其形态发育特征的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 114-123.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 吴淑芳, 吴普特, 宋维秀, 等. 黄土坡面径流剥离土壤的水动力过程研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(2): 223-228.

[19] 吴冰, 邵明安, 毛天旭, 等. 模拟降雨下坡度对含砾石土壤径流和产沙过程的影响[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 54-58.

[20] 王晓燕, 尹洁. 坡面小区土壤流失过程中粒径组成变化及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 113-118.

[21] 胡广录, 樊立娟, 王德金, 等. 荒漠-绿洲过渡带斑块植被表层土壤颗粒的空间异质性[J]. 兰州交通大学学报, 2013, 32(6): 159-164.

[22] 张正德, 董治宝. 土壤风蚀对表层土壤粒度特征的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(12): 86-89.

[23] 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.