朱溪流域土壤容重空间分异与地形和土地利用的关系

潘宗涛[1], 陈志强[1,2], 陈志彪[1,2]

(1. 福建师范大学 地理科学学院, 福建 福州 350007; 2. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福建 福州 350007)

摘 要: [目的] 分析朱溪流域土壤容重与地形和土地利用之间的关系,为南方红壤侵蚀区水土保持提供相关理论依据。[方法] 以福建省长汀县朱溪流域为基础,基于 GIS 和地统计分析原理,并结合经典统计学方法分析土壤容重的空间变异性。采用拟合度最好的球状模型拟合土壤容重的半变异函数,并采用普通 Kriging 空间插值法,对研究区土壤容重空间分布进行预测。在此基础上利用 ArcGIS 空间分析功能统计高程和坡度各分区内的土壤容重均值,并利用栅格叠加分析,分析不同土地利用下土壤容重分布情况。[结果] ①朱溪小流域土壤容重具有从东北向西南增大的趋势,容重低值区主要分布在东部和东北部,高值区主要分布在西南部和中部。②流域土壤容重具有随海拔和坡度增大而降低的趋势,坡位和坡向则对该地区土壤容重空间分布影响不明显。③居民点及工矿用地和交通用地土壤容重均值明显大于林地、草地等植被盖度较好的区域。[结论] 地形和土地利用是影响朱溪小流域土壤容重的重要因子,而高程和坡度是主要地形影响因子;不同土地利用类型土壤容重差异显著,植被覆盖好的区域土壤容重显著低于其他土地类型,因此应加强植被保护,以改善土壤结构。

关键词: 朱溪流域; 地形; 土地利用; 土壤容重; 空间分异; 地统计分析

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2018)03-0263-06 **中图分类号**: S157.1, U412.1^{+}4

文献参数: 潘宗涛, 陈志强, 陈志彪. 朱溪流域土壤容重空间分异与地形和土地利用的关系[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 263-268. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.03.042. Pan Zongtao, Chen Zhiqiang, Chen Zhibiao. Relationships between soil bulk density spatial heterogeneity and terrain factors and land use in Zhuxi watershed[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3): 263-268.

Relationships Between Soil Bulk Density Spatial Heterogeneity and Terrain Factors and Land Use in Zhuxi Watershed

PAN Zongtao[1], CHEN Zhiqiang[1,2], CHEN Zhibiao[1,2]

(1. *College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian* 350007, *China*; 2. *Key Laboratory for Subtropical Mountain Ecology, Ministry of Science and Technology and FuJian Province Funded, Fuzhou, FuJian* 350007, *China*)

Abstract: [Objective] In order to provide appropriate theoretical foundation for conservation of water and soil in southern red eroded soil region, the relationships between topography, land use and soil bulk density were analyzed in Zhuxi watershed. [Methods] The study was conducted in the area of Zhuxi watershed in Changting County, Fujian Province. Based on classical statistics and the geostatistics methods, the article analyzed the spatial variability of soil bulk density. The spherical model was selected as the best option for semivariogram. Ordinary Kriging interpolation was applied to predict the spatial distribution of bulk density. Zonal statistics function of ArcGIS was used to analysis the relationship between mean value of bulk density and elevation and slop, and raster overlay analysis was applied to calculate the area of bulk density in different land use types. [Results] ① The soil bulk density in watershed increased from northeast to southwest, and the lower bulk density area was located in west, and northwest and the higher bulk density area was located

收稿日期: 2017-10-24 **修回日期**: 2017-12-17

资助项目: 福建省自然科学基金项目"南方稀土矿区芒萁的生态化学计量特征及其稀土迁移阻控效应"(2017J01462)

第一作者: 潘宗涛(1990—),男(汉族),湖北省十堰市人,硕士研究生,研究方向为水土保持与 GIS 应用。E-mail: 977844370@qq.com。

通讯作者: 陈志强(1978—),男(汉族),福建省福州市人,博士,教授,主要从事水土保持、资源与环境等方面的研究。E-mail: soiltuqiang061@163.com。

in southwest and central region. ② The bulk density decreased with the increase of elevation and slope, in contrast, slope position and slop aspect had little impact on spatial heterogeneity of bulk density in Zhuxi watershed. ③ Residential land and traffic land had a higher mean value of bulk density than the area covered by forests and grass. [Conclusion] Topography and land use were important factors which influence soil bulk density, while elevation and slope were regarded as the main terrain factors for spatial heterogeneity of bulk density in study area. There was a significant difference among different land use types, and the area with a good vegetation cover had a lower value of bulk density than other types. Therefore, to improve the soil structure in study area, vegetation conservation should be strengthened.

Keywords: Zhuxi watershed; topography; land use; soil bulk density; spatial heterogeneity; geostatistic analysis

土壤容重是一定容积的土壤(包括土粒及粒间的孔隙)烘干后的重量与同容积水重的比值。土壤容重是衡量土壤养分状况的重要指标之一,对土壤的肥力、透气性、入渗性能、持水性能、溶质迁移特征、土壤抗侵蚀能力以及生物生长具有重要影响[1-2]。相关研究表明,随土壤容重的增加,植物根系生长受到抑制,当土壤容重达 1.8 g/cm^3 时,植物根系基本不能生长[3]。

影响土壤容重空间分布的因素众多,如土地利用方式[4]、植被盖度[5]以及地形(包括海拔、坡度、坡位、坡向)[6]等。地形通过影响坡面土壤侵蚀以及人类活动而直接或间接影响土壤容重的空间分异。连纲等[7]在黄土高原小流域土壤容重研究中发现,土壤容重与复合地形指数 CTI 正相关,并且不同土地利用类型土壤容重变异较小。李卓等[8]在土壤容重对土壤水分蓄持能力的研究中表明,土壤各吸力段水分蓄持能力均随容重增大递减,比水容量值也随容重增大递减。沈奕彤等[2]研究发现,土壤容重是影响坡地溶质迁移以及坡面降雨产流产沙的重要因素。然而,目前国内对于中国南方红壤侵蚀区土壤容重与地形及土地利用关系的研究较为少见。

本文拟基于地统计分析等空间分析方法,在小流域尺度内分析南方红壤侵蚀区土壤容重的空间分布,探讨高程、坡度、坡位和坡向等地形因子以及土地利用对朱溪流域土壤容重分布的影响,以期为该流域及类似区域水土流失治理提供一定的理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

朱溪流域位于福建省西南部长汀县境内,面积约为 4 495.65 hm^2。流域地势自东北向西南倾斜,海拔 270～680 m,地貌以低山丘陵为主。该区域属于中亚热带季风性湿润气候,湿热多雨,多年平均气温 18.3 ℃,年降水量 1 700～2 000 mm,雨季较长,降雨集中[9]。湿热气候下生成了抗蚀性差的酸性红壤,其风化壳较厚,一般可达 10～20 m。天然植被受到破坏,现植被以次生马尾松(*Pinus massoniana*)为主,树种单一,结构简单,林下灌木主要为散生的小叶赤楠(*Syzygium buxifolium*)、黄瑞木(*Adinandra millettii*)、石斑木(*Rhaphiolepis indica*)等,草类包括芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、鹧鸪草(*Eriachne pallescens*)等[10]。该流域曾是福建省土壤侵蚀最严重的地区之一,也是中国亚热带花岗岩丘陵地区水蚀荒漠化的一个典型代表[11]。

1.2 数据获取与处理

本研究数据来自 2009 年对整个朱溪流域土壤野外调查工作,共收集 118 个采样点(附图 4),涉及到草地、耕地、水域、林地、居民点及工矿用地、园地、交通用地及未利用地等用地类型。运用删格采样法确保采样点分布相对均匀,以满足地统计分析需要。样品取自表层 0—20 cm 土壤,容重的测量采用环刀法。

利用 SPSS 20.0 对数据进行描述性统计,得到结果(表 1)。运用 ArcGIS 10.2 地统计分析模块对数据进行预处理,主要包括数据正态分布检验、趋势分析、全局异常值与局部异常值的剔除[12]。从采样点中剔除 3 个异常点,剩下的分为 2 部分。100 个采样点用来建立变异函数模型以及插值分析,另外 15 个样点用于验证插值结果。根据处理后的采样点数据,选用普通 Kriging 空间插值法对朱溪流域土壤容重进行空间插值。利用 SPSS 20.0 分别对采样点土壤容重值与高程和坡度做 Pearson 相关性分析。在相关性分析的基础上,运用 Origin 9 将采样点数据进行处理后,拟合土壤容重与坡度,容重与高程的散点关系。通过 0/1 赋值,0 表示不存在,1 表示存在,将坡位转化为 5 个虚拟变量,将其与土壤容重进行相关性分析。通过求取坡向的正弦和余弦值,将原始坡向转化为南北向和东西向 2 个虚拟变量($\sin\alpha>0$,表示坡向偏北,$\cos\alpha>0$,表示坡向偏东)[13],并将土壤容重与 2 个虚拟变量进行相关性分析。

表 1　土壤容重的描述性统计

土壤采样点	极小值/(g·cm^{-3})	极大值/(g·cm^{-3})	均值/(g·cm^{-3})	标准差	偏度	峰度	变异系数
115	0.93	1.55	1.24	0.14	−0.43	−0.39	0.11

1.3　研究方法

1.3.1　地统计分析基本理论　半变异函数是地统计分析的基本工具,其基本公式如下[14]:

$$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[Z(x_i)-Z(x_i+h)]^2 \quad (1)$$

式中:$\gamma(h)$——半变异函数;h——步长,即采样点空间间隔距离;$N(h)$——间隔为 h 的采样样点对数;$Z(x_i)$和 $Z(x_i+h)$——变量在 x_i 和 x_i+h 空间位置上的实测值。

半变异函数主要有以下主要参数即基台值(Sill)、块金值(Nugget)、变程(Range)和结构方差(Partial Sill)。结构方差也称为块金系数即块金值与基台值的比值,可表示系统变量的空间相关性程度[15]。

根据计算出的半变异函数值,建立相应理论模型。模型的块金系数反映了随机性因素引起的变异占系统总变异的比例。当块金系数小于 25%时,说明系统具有很强的空间相关性,大于 75%时说明系统空间相关性很弱[16]。半变异函数最常用的是球状模型、高斯模型和指数模型[17]。利用 ArcGIS 地统计分析模块选取最优模型。模型的选择标准为:标准平均值最接近于 0,均方根最小,平均误差最接近均方根误差,平均标准误差最接近 1[18]。根据所选最优模型,采用 Kriging 空间插值方法生成土壤容重的空间分布图。

Kriging 空间插值法是地统计学重要内容之一,它是建立在变异函数及结构分析基础上对区域化变量的无偏最优估计。Kriging 法相对于普通估计方法的不同之处是它不仅考虑了待估样点与邻近样点的空间位置,而且把邻近样点的位置关系考虑进去[19]。Kriging 法运用的前提是区域化变量存在空间相关性。因此,Kriging 插值的实质是一个实行局部估计的加权平均值[20]。Kriging 估计法的线性组合公式为:

$$Z_v(x)=\sum_{i=1}^{n}\lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

式中:$Z_v(x)$——待估点的内插估计值;λ_i——权重;$Z(x_i)$——在点 x 附近观测点上得到的实测值。

1.3.2　ArcGIS 空间分析　以覆盖朱溪流域的 1∶1 万地形图为底图,在 ArcGIS 10.2 中经过底图扫描,图像校正,投影(Beijing_1 954_3_Degree_GK_CM_117 E)以及矢量化等高线,并创建不规则三角网(TIN)生成高精度数字地形图(DEM)[21]。运用 ArcGIS 空间分析模块,从 DEM 中提取高程、坡度等地形因子,并进行高程和坡度分级。将高程分为 0～300,300～350,350～400,400～450 和＞450 m 这 5 个等级,将坡度分为 0°～10°,10°～20°,20°～30°,30°～40°,40°～50°和＞50°共 6 个等级。利用区域分析功能将重分类后得到的分级图进行分区统计。将土壤容重空间插值图转换为删格数据后进行重分类,并将其作为分区统计的赋值栅格,进行分区统计,最后分别得到以高程和坡度为基础的土壤容重分区统计值。将土地利用类型图进行重分类并与土壤容重重分类图进行叠加运算,得到不同土地利用类型下的容重面积分布关系图[22]。

2　结果与分析

2.1　土壤容重空间分异

当变异系数 $0.1<C_v<1$ 时,数据为中等变异,表明均值对样本总体具有较好的代表性[23]。由表 2 可知,采样点土壤容重变异系数为 0.11,为中度变异。数据偏度为−0.43,表明数据呈左偏态分布。对朱溪流域土壤采样点进行半变异函数分析,根据交叉验证结果,选用拟合最好的球状模型进行分析。由表 2 可知,朱溪流域土壤容重的块金系数为 53.49%,介于 25%～75%,表明该流域土壤容重值具有中等的空间自相关性。

表 2　朱溪流域土壤容重的理论模型和相应参数

模　型	方向/(°)	块金值(C_0)	基台值(C_0+C)	块金系数(C_0/C_0+C)	变程/m
球状模型	无	0.006 9	0.012 9	0.534 9	213

由附图 5 可以看出:土壤容重具有从东北向西南增大的趋势。土壤容重值大于 1.28 g/cm^3 的高值区主要分布在中部和南部地区。容重值小于 1.14 g/cm^3 的地区主要分布于东部和东北部。容重值大于 1.35 g/cm^3 的高值区主要零星分布在西南部。容重次高值的区域大致呈“人”字型成片分布,并出现由其两侧向远处逐渐递减的趋势。

2.2　地形与土壤容重空间分异

2.2.1　坡度、坡向和坡位与土壤容重空间分异　通过相关分析,得到坡度与容重的相关系数($r=-0.66$,$p<0.05$),表明坡度与容重相关性良好。如图 1 所示,土壤容重随坡度增加大致呈线性递减的趋势($R^2=0.410$)。

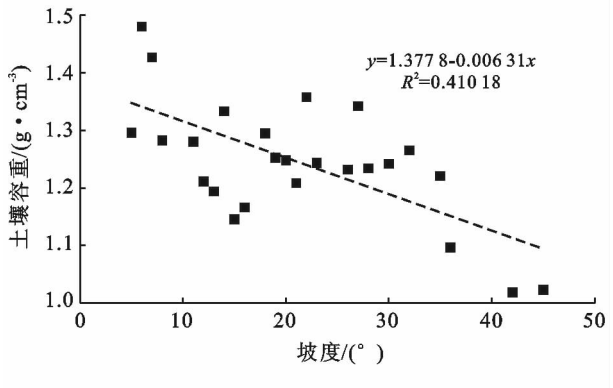


图1 土壤容重随坡度增加的变化情况

由附图6可以看出，研究区域坡度大致由东向西降低，西部河流下游地区以及中部河谷地区坡度较小均小于10°。由坡度分区统计(表3)可以分析出，各分区内土壤容重均值随坡度值增大而减少，这与以上拟合曲线变化趋势基本一致。坡度小于20°的区域占研究区面积比重达62.07%，其土壤容重均值介于1.23～1.25 g/cm³，容重值相对较大。坡度值大于40°的地区主要分布于东部和东北部，占面积比重仅为2.18%，区域内土壤容重均值介于1.14～1.17 g/cm³，容重值相对西部较小。

表3 朱溪流域土壤容重坡度分区统计

项目	坡度分级/(°)					
	<10	10～20	20～30	30～40	40～50	>50
占面积比/%	41.54	20.53	20.56	15.19	2.17	0.01
容重均值/(g·cm⁻³)	1.25	1.23	1.21	1.18	1.17	1.14

土壤容重分别与坡向虚拟变量和坡位的虚拟变量相关分析(表4)。坡位虚拟变量与土壤容重相关系数为正，则表明其容重值大于其他位置，为负则相反，绝对值越大说明不同部位容重值差异显著。sin(坡向)和cos(坡向)与土壤容重相关系数为正值，表示容重值在偏北坡大于偏南坡或者偏东坡大于偏西坡，负值则相反。

经过数据处理后，发现研究区土壤容重在不同坡位和坡向上存在一定差异，但是容重空间变异与坡位和坡向相关性并不明显($p>0.05$)。

表4 朱溪流域土壤容重与坡位和坡向的相关性分析

项目	容重						
	坡顶	中上坡	中坡	中下坡	坡脚	sin(坡向)	cos(坡向)
相关系数	−0.066	−0.057	0.152	0.191	−0.157	−0.116	0.097
显著性	0.548	0.608	0.167	0.082	0.154	0.394	0.476

2.2.2 高程与土壤容重空间分异 通过分析，得到高程与土壤容重的相关系数($r=-0.53$，$p<0.05$)，高程与容重拟合函数的决定系数$R^2=0.280$。从附图7可以看出，高程与坡度具有相似的变化趋势，即由东部向西部逐渐降低。将土壤容重空间插值图与高程分级图进行分区统计，得到表5。从表5可以分析得出，土壤容重均值随高程增加而减少的趋势较为明显。高程小于300 m的区域占研究区面积比重为27.38%，主要分布于西部和中部部分地区，其区域内的土壤容重均值为1.27 g/cm³，大于采样点均值1.24 g/cm³。而在高程大于450 m的区域，土壤容重均值为1.16 g/cm³，明显小于总体均值。人类活动也是土壤容重分布影响因素之一，而居民点及工矿用地是人类活动较为集中的区域。通过将DEM与居民点及工矿用地面积进行叠加分析，发现居民点及工矿用地面积随海拔增加而显著下降，分别在0～300，300～350，350～400 m占该用地类型总面积比重为77.5%，19.6%和2.9%，而在海拔为400～450和大于450 m区域的面积总和，占总面积比却小于0.1%。

表5 朱溪流域土壤容重高程分区统计

项目	高程分级/m				
	<300	300～350	350～400	400～450	>450
占面积比/%	27.38	32.27	17.44	11.06	11.85
容重均值/(g·cm⁻³)	1.27	1.25	1.21	1.17	1.16

2.3　土地利用方式与土壤容重空间分异

如表 6 所示,研究区域林地占总面积的 62.5%,林地主要以次生马尾松林为主,林下分布着多种杂草。根据土样分析发现,在该地区土地利用中,林地土壤容重均值最小,为 1.21 g/cm^3。草地占流域总面积的 0.2%,容重均值为 1.23 g/cm^3。容重均值较大的土地利用类型分别是居民点及工矿用地和交通用地,其均值分别为 1.37,1.35 g/cm^3。其中耕地主要分布在河流沿岸的河谷盆地,占区域总面积 22.5%,其土壤容重均值为 1.25 g/cm^3,耕地以水稻田种植为主,其土壤容重受人为影响明显。居民点及工矿用地、交通用地、水域以及未利用地等土壤容重最小值均大于 1.07 g/cm^3,并且在容重值较大的 1.28～1.35 g/cm^3 范围内占比重分别为 38.3%,32.7%,35.4%和 56.6%,明显大于其他土地利用类型。未利用地土壤容重值最小值大于 1.21 g/cm^3,而林地、园地和草地等植被覆盖良好,受人类活动影响相对较小的区域,土壤容重最小值均小于 1.07 g/cm^3。

表 6　土地利用类型与土壤容重空间分布面积　　hm^2

土地类型	容重/(g·cm^{-3})						合计
	<1.07	1.07～1.14	1.14～1.21	1.21～1.28	1.28～1.35	>1.35	
耕 地	0.30	31.37	190.54	459.77	324.48	5.29	1 011.75
园 地	0.05	0.84	38.03	142.70	87.53	6.51	275.66
林 地	10.67	508.21	792.80	1 058.03	425.96	13.92	2 809.59
草 地	0	0	0.29	9.71	0.14	0	10.14
居民点及工矿用地	0	1.38	31.17	94.33	79.95	1.84	208.67
交通用地	0	0.87	13.96	33.10	23.54	0.60	72.07
水 域	0	0	3.47	54.38	32.24	1.14	91.23
未利用地	0	0	0	4.40	9.36	2.79	16.55
合 计	11.02	542.67	1 070.26	1 856.42	983.20	32.09	4 495.66

3　讨 论

3.1　地形对朱溪流域土壤容重空间分异的影响

朱溪小流域土壤容重均值随坡度增大而减小,并且坡度与容重相关性较大。主要是因为该流域坡度小的区域为农业生产区域、高速公路和国道由此经过,各种活动对土壤的踩踏造成土壤的紧实,从而导致土壤容重值较高[24]。而坡度较大的区域,海拔相对较高,人为影响小,植被覆盖良好,从而降低了土壤容重值。

土壤质地是影响土壤容重的重要因素[25],低海拔区域位于河流的下游地区,高程和坡度较低,从高海拔表土冲刷而来的细土粒在低海拔沉积。因此,随海拔的升高,土壤黏粒与粉粒含量降低,而砂粒含量相对增加,土壤质地随海拔的这种变化造成土壤容重随海拔的升高而降低[26]。此外,人类活动较为活跃的地带主要分布于低海拔区域,且随海拔升高而影响逐渐减小,从而在一定程度上影响土壤容重随海拔升高而产生的空间变异。

3.2　土地利用方式对朱溪流域土壤容重空间分异的影响

朱溪流域不同土地利用类型下的土壤容重均值存在明显差异,该结果与连纲等[7]在黄土高原区不同土地利用下土壤容重分析结果并不一致,可能与研究区域差异以及植被类型差异和样本数量等有关。该流域中下游地区是人口聚居区域,有关研究表明,在该区域以居民点建立缓冲区,土壤容重值在缓冲区内大于缓冲区外[27]。因此,人类活动在一定程度上破坏了该流域土壤容重的结构性,因而随机性因素扩大。居民点及工矿用地、未利用地、交通用地等土地利用类型人类活动较为活跃,容重均值相对较大。林地、草地和园地等土地利用类型,由于该区域植被覆盖相对较好,土壤平均孔隙度相对较大,土壤容重因此相对较低,土壤容重均值明显小于其他土地利用类型。由于历史人为破坏严重以及土壤抗蚀性差等原因,该流域曾经是中国南方水土流失较为严重地区,经过一系列综合治理与开发,朱溪流域生态环境得到很大改善,形成以林地为主的土地利用格局,有效改善了土壤结构。因此,应继续坚持水土保持工作,加大植被保护力度,以保证该流域土壤结构的持续性改善。

4　结 论

(1) 朱溪流域土壤土壤容重值大致存在由东北

向西南逐渐增加的趋势，土壤容重高值区域主要分布在河流下游的中部和西南部，低值区主要分布在东部、东北部和西北部等区域。

(2) 研究区土壤容重值的变化与高程和坡度变化存在负相关关系，即土壤容重值随海拔和坡度的增加而降低。高程和坡度是影响该流域土壤容重空间分异的主要地形因子，而坡位和坡向等因子对于研究区土壤容重的空间分异相关性不明显。

(3) 不同土地利用类型土壤容重分布存在明显差异，相似土地利用类型的土壤容重均值差异较小。居民点及工矿用地、未利用地、交通用地和水域土壤容重均值较大，且在容重高值区域，占面积比重大于其它土地利用类型。耕地土壤容重均值为1.25 g/cm^3，接近该区域容重均值，土壤结构良好。林地、草地和园地等土地利用类型土壤容重相对较低，土壤容重均值明显小于其他土地利用类型，说明植被覆盖可以有效改善该流域土壤结构。

[参 考 文 献]

[1] 郑纪勇，邵明安，张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J]. 水土保持学报，2004，18(3)：53-56.

[2] 沈奕彤，郭成久，金珊，等. 土壤容重对黑土坡面养分流失的影响[J]. 水土保持学报，2016，30(1)：26-30.

[3] 邹奇，王学臣. 地下菌丝桥的功能及其意义[M]. 北京：科学出版社，1994.

[4] Fu Bojie, Chen Liding, Ma Keming, et al. The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the loess plateau in Northern Shaanxi, China[J]. Catena, 2000, 39(1): 69-78.

[5] 冯强，段宝玲，姜硕. 小流域尺度土壤容重及其影响因素的空间变异[J]. 山西农业大学学报：自然科学版，2016，36(1)：39-45.

[6] 葛翠萍，赵军，王秀峰，等. 东北黑土区坡耕地地形因子对土壤水分和容重的影响[J]. 水土保持通报，2008，28(6)：16-19.

[7] 连纲，郭旭东，傅伯杰，等. 黄土高原小流域土壤容重及水分空间变异特征[J]. 生态学报，2006，26(3)：647-654.

[8] 李卓，吴普特，冯浩，等. 容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J]. 土壤学报，2010，47(4)：611-620.

[9] 岳辉，陈志彪. 朱溪河小流域水土流失治理与生态环境效应[J]. 福建地理，2003，18(1)：6-8.

[10] 郑宗沧. 南方红壤侵蚀区芒萁散布与坡位的关系：以朱溪小流域为例[J]. 安徽农业科学，2015，43(29)：250-254.

[11] 朱鹤健. 我国亚热带山地生态系统脆弱区生态恢复的战略思想：基于长汀水土保持11 a研究成果[J]. 自然资源学报，2013，28(9)：1498-1506.

[12] 于占超. 基于地貌信息的土壤养分空间变异性研究[J]. 地下水，2013，35(2)：169-170.

[13] Gilley J E, Doran J W. Tillage effects on soil erosion potential and soil quality of a former conservation reserve program site[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1997, 13(5): 617-622.

[14] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京：高等教育出版社，2002.

[15] 马黄群，胡玉福，徐柱，等. 运用地统计学的土壤有机碳含量空间分布研究[J]. 地理空间信息，2012，10(3)：75-77.

[16] Burgess T M, Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties(I): The semi-variogram and punctual kriging[J]. European Journal of Soil Science, 1980, 31(2): 333-341.

[17] 陈志强，陈健飞. 闽台土地利用/覆被人为影响指数的地统计分析[J]. 热带地理，2008，28(6)：518-522.

[18] 汤国安，杨昕. ARCGIS地理信息系统空间分析试验教程[M]. 北京：科学出版社，2012.

[19] 王正权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京：科学出版社，1999.

[20] 江厚龙，王新中，刘国顺，等. 烟田土壤质地的空间变异性研究[J]. 中国生态农业学报，2010，18(4)：724-729.

[21] 陈海滨，陈志彪，陈志强. 南方红壤侵蚀区地形对土壤有机质空间分布的影响：以长汀县河田地区为例[J]. 福建农业学报，2010，25(3)：369-373.

[22] 魏建兵，肖笃宁，张兴义，等. 侵蚀黑土容重空间分异与地形和土地利用的关系[J]. 水土保持学报，2006，20(3)：118-122.

[23] 李灵智，王磊，刘健，等. 大西洋金枪鱼延绳钓渔场的地统计分析[J]. 中国水产科学，2013，20(1)：199-205.

[24] 陈志彪，陈志强，岳辉. 花岗岩红壤侵蚀区水土保持综合研究：以福建省长汀朱溪小流域为例[M]. 北京：科学出版社，2013.

[25] Bernoux M, Arrousys D, Cerri C, et al. Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties [J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(3): 743-749.

[26] 傅伯杰，陈利顶，邱扬，等. 黄土丘陵小流域土壤物理性质的空间变异[J]. 地理学报，2002，57(5)：587-594.

[27] Chen Zhiqiang, Chen Zhibiao, Chen Haibin. The relationship between forestland soil fertility and gathering firewood in the Zhuxi Watershed in the red soil hilly region of China [J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10(1): 75-83.