

基于地统计学和GIS的江西省森林 土壤养分空间分布特征

张志坚^{1,3}, 刘苑秋¹, 吴春生¹, 李晓东¹, 刘亮英¹, 李应文²

(1. 江西农业大学 林学院, 南昌 330045; 2. 中国科学院华南植物园,
广州 510520; 3. 宜春市林业科学研究所, 江西 宜春 336000)

摘要:土壤作为一种形态和演化过程都十分复杂的自然综合体,在成土过程中,受到不同的自然、环境条件因素的影响,使得土壤养分的分布具有高度的差异性。研究基于江西省340个森林土壤剖面5个土层(0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—50 cm 和 50—100 cm)土壤养分数据,运用地统计学方法和GIS技术对江西省森林土壤有机质(SOM)、全氮(TN)及全磷(TP)空间变异特征进行研究,并分析了三种土壤养分在江西省的空间分布特点。结果表明:(1)垂直方向上看,江西省森林土壤SOM、TN均随土层深度增加而减少,而TP变化趋势不明显;水平方向上看,土壤SOM总体丰富,高值区主要在东北部和西部;TN具有明显的南北分异,赣北地区森林土壤TN含量较高,赣南地区较为缺乏;全省各地磷素较为缺乏,各方向无明显分异;(2)江西省森林土壤养分受植被类型、土壤类型影响大,土壤养分含量总体表现为棕壤>黄壤>红壤,竹林>阔叶林>针叶林;(3)SOM具有强烈变异性,各土层变异系数为77.88%~123.73%,产生了严重的“贫富差距”,TN和TP具有中等程度的变异;(4)球状模型、指数模型、高斯模型能较好地描述江西森林土壤养分空间变异特征,TN和TP的空间自相关性在垂直方向上具有“上下强,中间弱”的规律,SOM表现为“上强下弱”的规律,植被因素和取样方式均为造成较大的随机性变异的主因;表层土壤中SOM和TN变程在100 km以内,深层土壤变程均大于200 km,TP自相关距离相对较小,为19~75 km;(5)江西省山地森林土壤养分含量显著高于丘陵森林,土壤养分形成由江西省边界山区向吉泰盆地等中部地区递减的趋势。

关键词:森林; 土壤养分; 空间变异; 地统计学; GIS

中图分类号:S714.8

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)01-0038-09

Spatial Distribution Characteristics of Forest Soil Nutrients in Jiangxi Province Based on Geostatistics and GIS

ZHANG Zhijian^{1,3}, LIU Yuanqiu¹, WU Chunsheng¹, LI Xiaodong¹, LIU Liangying¹, LI Yingwen³

(1. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;

2. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650,

China; 3. Yichun City Forestry Research Institute, Yichun, Jiangxi 336000, China)

Abstract: The soil was a natural complex with complicated morphological and evolutionary processes. In the process of soil formation, the nutrient of soil was highly different due to different natural and environmental factors. Based on the soil nutrient data of 5 soil layers (0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—50 cm and 50—100 cm) in 340 forest soil profiles in Jiangxi Province, the study used geostatistical methods and GIS techniques to analyze the spatial variability and the spatial distribution characteristics of SOM, TN and TP in forest soils of Jiangxi Province. The results showed that: the soil SOM and TN decreased with the depth of soil layer, while the trend of TP was not obvious; the soil SOM high-value area is in the northeast and west, but TN has obvious north-south differentiation, the content of TN in the northern forest soil was higher than that in the south; the phosphorus is very deficient, there is no significant difference across the province. The soil nutrient contents in the forest soils of Jiangxi Province were influenced by the vegetation types and soil types, and the soil nutrient contents decreased in the order: brown soil>yellow soil>red soil, bamboo>

收稿日期:2017-02-16

修回日期:2017-03-05

资助项目:中国科学院战略性先导科技专项项目(XDA05050205);“赣鄱英才”555工程领军人才培养计划”

第一作者:张志坚(1990—),男,江西安福人,硕士研究生,主要从事森林生态方向研究。E-mail:1246364918@qq.com

通信作者:刘亮英(1977—),女,江西南昌人,硕士,实验师,主要从事森林生态方向研究。E-mail:358570062@qq.com

broad-leaved forest>coniferous forest. The coefficients of variation of SOM ranged from 77.88% to 123.73%, leading to strong dispersibility and variability. But the data for TN and TP showed moderate variability. The spatial variability of forest soil nutrients in Jiangxi Province can be well described by spherical model, exponential model and Gauss model. The spatial autocorrelation of TN and TP in top soil and deep soils was stronger, and was weaker in the middle soil layer. While the spatial autocorrelation of SOM decreased with the increase of soil depth. According to the analysis, differences in vegetation factors and sampling methods may lead to large random variation. The autocorrelation distances of SOM and TN in top soil do not exceed 100 km, but they were greater than 200 km in 50—100 cm layer, resulting in greater similarity. For TP, the autocorrelation distance is small throughout the soil and remains between 19~75 km. In the vertical direction, the contents of SOM and TN in the soil layer are obviously fading, which are rich in 0—10 cm soil layer and moderate in 50—100 cm soil layer. TP content in the soil layer was not obvious. And phosphorus deficiency in forest soil is very significant in Jiangxi Province. The soil nutrient contents of mountainous forest in Jiangxi Province were significantly higher than those in hilly forest, and the soil nutrients were decreasing from the border mountainous area of Jiangxi Province to the middle part of Jitai Basin.

Keywords: forest; soil nutrients; spatial variation; geological statistics; GIS

土壤作为一种形态和演化过程都十分复杂的自然综合体,在成土过程中,受到不同的气候、物理、化学、生物、母质、地形等因素的影响,使得土壤理化性质具有高度的差异性,这种属性称为土壤特性的空间变异性^[1]。已有研究表明,即使在土壤类型和质地均相同的区域内,同一时刻土壤特性在空间上也能产生明显差异,而且,不论在大尺度上还是在小尺度上观察,这种属性均存在^[2]。目前,有关土壤特征空间变异的研究在耕地、草地中体现较多,在森林生态系统中,大区域性的土壤空间变异研究相对缺乏。森林土壤是森林环境下形成的一种土壤资源,海拔、森林类型、土壤类型等都是影响森林土壤理化特性空间变异的主要因素^[3-6],森林土壤养分的空间分布特征直接影响到林地生产力的高低以及生态恢复的方向与途径,因此,森林土壤理化特征分布状况及地位具有其自身独特性,对其空间异质性的研究具有理论和现实的意义。

地统计学已被广大学者作为空间分析的一项有用工具,是分析土壤空间特性和研究其变异规律的有效方法之一^[7]。学者利用地统计学方法和GIS技术在土壤养分空间异质性方面已经做了许多工作,杨美玲等^[8]对库车县耕层土壤养分的空间变异特征的研究表明:不同养分在空间分布上具有不同的变异特征,其变异来源主要为土壤类型、土壤质地以及施肥等人为因素。董士伟等^[9]对北京市大兴区土壤养分进行空间克里格插值,结果表明:大兴区土壤养分含量氮>有机质>钾>磷,高值区主要分布于东北部,低值区主要产生在西南部和中部。孙梨萍等^[10]研究陕西镇安县农田土壤土壤养分的空间分布情况,结果

表明:镇安县农田土壤养分在空间上具有中间低、四周高的特点。相关研究集中在县市级尺度的农田土壤,大尺度采样受跨度大、取样量大、定位难等因素影响,森林土壤养分空间变异研究缺乏,因而大尺度上的森林土壤养分具有怎样的空间变异特征?其空间分布格局如何?成为亟待研究的课题。

有关研究显示,土壤母质、土壤类型和土壤质地等较大尺度的变化,对大范围的森林格局具有决定性作用^[11],较大尺度上的土壤变异受到越来越广泛的关注^[12]。江西省拥有63.1%的森林覆盖率,对江西省域大尺度范围下森林土壤养分空间变异进行研究,探索江西森林土壤养分的变异规律,能够为大区域下的科学造林提供指导意见,是土地管理和现代林业经营的重要依据,为可持续林业发展提供最基础的资料,在生态文明建设中具有重要的意义。

1 研究区概况

江西省位于中国东南部,北纬24°29'14"—30°04'41",东经113°34'36"—118°28'58"。全省气候温暖,雨量充沛,全年平均气温18.9℃,日照时数1686.3h,降雨量1438.1mm;无霜期长,为亚热带湿润气候。江西省的地形地貌以丘陵、山地为主;盆地、谷地广布。其中,山地大多分布于省境边缘,成为江西与邻省的界山和分水岭,山脉走向以东北—西南向为主体,控制着省内主要水系和盆地的发育;丘陵大多分布于赣中赣南地区。江西土壤资源丰富,包括红壤、黄壤、山地黄棕壤、山地草甸土、紫色土、潮土、石灰土、水稻土八个土类。其中,红壤和黄壤成为江西分布最广、面积最大的地带性土壤,是江西最重要的土壤资源。根

据江西省森林资源调查资料的分类及森林经营的需要,全省森林类型划分为常绿阔叶林、杉木林(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松林(*Pinus massoniana*)、阔叶林、针阔混交林、毛竹林(*Phyllostachys heterocycla*)和灌木林^[13-14],而据第 8 次全国森林资源清查江西省森林资源清查成果数据显示,杉木林、马尾松林、阔叶林、针阔混交林占江西森林面积的 79.0%,是江西省森林碳汇功能的主体^[15]。

2 材料与方法

2.1 样品采集及分析

布点原则以江西省森林资源清查数据资料为依据,根据森林类型、各类森林的面积、蓄积及构成及其地域分布权重,在全省范围内分配,结合地形图进行土壤样点的布设,并于 2011—2013 年夏季采用 GPS 定位技术进行野外定点采样,共 340 个取样点。每个取样点记录包括地形地貌、坡向坡位、土壤类型、植被类型、郁闭度等样地信息,各样点选择 1 个未受人为干扰、植被结构和土壤具代表性的地段,挖掘 1 个土壤剖面,深至 100 cm,不够 100 cm 至基岩为止。对剖面进行修整后沿剖面按 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—50 cm, 50—100 cm 分层并做好标记,每个土层采集理化性质分析土样 200 g,将土样装入自封袋中并编号,带回实验室经过风干、碾碎、过筛之后参考依据森林土壤测定标准进行化学分析,其中土壤有机质(SOM)采用重铬酸钾氧化外加加热法测定,全氮(TN)采用半微量凯氏法测定,全磷(TP)采用氢氧化钠碱熔—钼锑抗比色法测定。

2.2 数据处理

采样点坐标信息及各养分数据整理于 Excel 2003 中进行,在 ArcGIS 9.3 中加载江西省矢量化地图,利用“Add XY Data”工具通过指定字段对坐标信息进行添加,生成土壤剖面取样点土层(图 1),通过字段联结将土壤养分数据进行添加,形成地理坐标数据的土壤养分信息数据库。图层经投影变换后由地理坐标系转换成平面坐标系,剔除异常值和缺失值,导出投取样点图层的属性数据(包括取样点平面坐标、取样点对应的各土层养分数据),为地统计学分析及空间插值做准备。

利用 SPSS 17.0 进行描述性统计分析,得出相关指标的极小值、极大值、均值、标准差、变异系数等,并对各指标数据进行 K-S 正态分布检验;利用 GS+9.0 软件进行地统计学分析,确定半方差函数各种特征参数,具体参数有块金值(Nugget)、基台值(Sill)、结构方差比、变程(Range)等;利用 ArcGIS 9.3 的地统

计模块中的普通 Kriging 插值方法绘制土壤养分空间插值图。

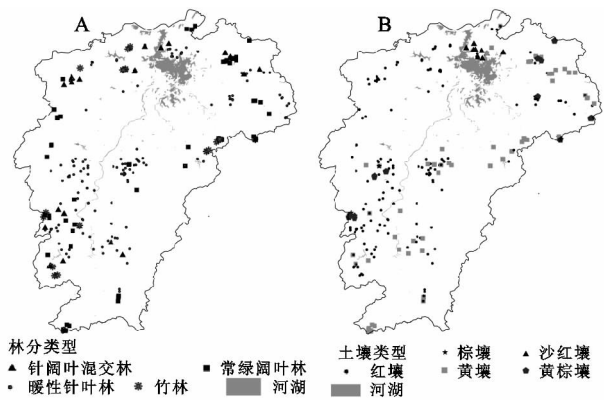


图 1 江西省土壤剖面采样点分布

3 结果与分析

3.1 江西省森林土壤养分特征

3.1.1 不同植被类型下的森林土壤养分特征 根据样地调查结果,将取样点分为四类,其中竹林 23 个、针阔叶混交林 34 个、常绿阔叶林 89 个、针叶林 194 个,对各植被类型土壤养分求平均值,情况见表 1。由表 1 可知,四种植被类型的 SOM, TN 均随土层深度增加而显著降低, TP 含量也一定程度上随土层深度增加而降低的趋势,但变化不明显。从植被类型上来看, SOM 含量在 0—30 cm 土壤中表现为竹林>针阔混交林>常绿阔叶林>针叶林,而 30—100 cm 土壤中无此规律,可能是竹林根系较浅,在 0—30 cm 分布集中,根系的死亡残体、分泌物等主要对上层土壤产生影响,对深层土壤影响较小; TN 含量表现为竹林>常绿阔叶林>针阔叶混交林>针叶林; TP 含量表现为常绿阔叶林>竹林>针阔叶混交林>针叶林。三种土壤养分在针叶林中均含量较低,可能是由于江西省针叶林以湿地松、马尾松、杉木等为主^[15],为速生树种,对土壤养分消耗较大。

3.1.2 不同土壤类型森林土壤养分特征 本次取样调查涉及五类土壤,各土类的样点数为棕壤 10 个、黄棕壤 22 个、黄壤 80 个、红壤 217 个、沙红壤 11 个,各类型土壤养分情况见表 2。由表 2 可知, SOM 含量在不同土壤类型中变异性较为明显,表现为棕壤>黄棕壤>黄壤>红壤>沙红壤,其中含量最低的是沙红壤,为 7.98~21.89 g/kg,最高的是棕壤,为 58.32~128.52 g/kg,同一土层中棕壤 SOM 含量是沙红壤的 6~8 倍。表层土壤与深层土壤 TN 含量具有不同的变异格局,表层土壤表现为棕壤>黄棕壤>黄壤>红壤>沙红壤,深层土壤表现为棕壤>黄棕壤>黄壤>红壤>沙红壤。TP 含量表现为棕壤>黄棕壤>黄壤>红壤>沙红壤。

3.1.3 江西省森林土壤养分总体特征分析 对 340 个森林土壤养分数据进行经典统计分析,结果见表 3。各土层 SOM 含量变化范围为 16.25~41.34 g/kg,TN 含量为 0.84~1.79 g/kg,TP 含量为 0.32~0.37 g/kg,其中 SOM 和 TN 较为丰富,TP 比较贫乏^[12]。三种养分含量均具有随土层深度的增加而减小的趋势,但 TP 含量变化趋势比较微弱,可能与整个土体 TP 含量较低,土层间差异较难体现有关。三种土壤养分变异系数表现为 SOM>TP>TN。土壤 SOM 的变异系数为

77.88%~123.73%,具有较强程度变异,养分丰缺差距较大,各土层 SOM 最大值在 169.42~304.20 g/kg,而最小值在 3 g/kg 以内,土层越深数据离散越明显。土壤 TN 和 TP 含量变异系数均维持在 60%左右,TP 含量略高于 TN,两种养分均表现出中等程度变异性,且变异程度在土层间的变化不明显。经过正态分布检验,土壤 TN 数据能较好的符合正态分布类型,而 SOM,TP 数据则产生了不同程度的偏态,经过对数转换后,数据能很好地符合正态分布。

表 1 江西省不同森林类型土壤养分情况

土壤养分	土层/cm	竹林	针阔叶混交林	常绿阔叶林	针叶林
SOM/(g·kg ⁻¹)	0—10	58.63±16.66Aa	52.41±18.55Ba	43.86±11.62Ca	34.36±10.34Da
	10—20	43.55±12.37Ab	37.01±15.87Bb	31.64±13.06Cb	22.39±6.99Db
	20—30	35.50±9.99Ac	29.77±9.71Bc	26.70±7.27Bb	17.36±6.15Cc
	30—50	24.89±6.23Ad	25.58±13.82Ac	24.95±11.18Ab	14.62±6.14Bc
	50—100	19.41±6.42Ad	22.72±8.62Ac	18.71±9.71Ac	12.24±6.08Bc
TN/(g·kg ⁻¹)	0—10	3.18±1.15Aa	1.88±0.70Ba	1.97±0.91Ba	1.50±0.82Ba
	10—20	2.33±0.71Ab	1.35±0.49Bb	1.47±0.61Bb	1.06±0.61Cb
	20—30	1.99±0.73Ab	1.12±0.39Bb	1.34±0.54Bb	0.87±0.53Cb
	30—50	1.63±0.63Ab	0.95±0.36Bb	1.15±0.53Bb	0.76±0.47Cb
	50—100	1.42±0.68Ab	0.82±0.30Bb	0.96±0.43Bb	0.70±0.47Bb
TP/(g·kg ⁻¹)	0—10	0.40±0.11Aa	0.40±0.23Aa	0.45±0.27Aa	0.31±0.18Ba
	10—20	0.38±0.11Aa	0.34±0.16Ab	0.41±0.27Aa	0.30±0.18Ba
	20—30	0.37±0.10Aa	0.35±0.18Ab	0.39±0.26Aa	0.28±0.17Ba
	30—50	0.34±0.10Aa	0.33±0.16Ab	0.38±0.26Aa	0.28±0.19Ba
	50—100	0.32±0.10Aa	0.33±0.14Ab	0.37±0.26Aa	0.28±0.18Ba

注:不同小写字母表示同一林分类型、同一土壤养分类型不同土层间差异显著性,显著水平为 0.05;不同大写字母表示同一土壤养分类型、同一土层不同林分类型间差异显著性,显著水平为 0.05。下表同。

表 2 江西省不同土壤类型土壤养分情况

土壤养分	土层/cm	棕壤	黄棕壤	黄壤	红壤	沙红壤
SOM/(g·kg ⁻¹)	0—10	128.52±41.34Aa	59.82±26.28Ba	55.69±15.38Ba	36.43±12.90Ca	21.89±5.21Da
	10—20	102.22±32.36Ab	47.55±22.59Bb	38.26±12.70Cb	23.76±8.64Db	16.58±2.30Eb
	20—30	92.01±34.20Ac	39.51±19.72Bc	27.79±10.92Cc	18.45±7.72Dc	12.64±2.28Db
	30—50	76.94±25.59Ad	31.69±19.60Bd	32.12±15.69Bb	14.91±7.02Cc	9.17±2.89Cb
	50—100	58.32±27.75Ae	27.77±16.96Bd	14.95±10.18Cd	12.48±6.89Cc	7.98±2.50Cb
TN/(g·kg ⁻¹)	0—10	2.35±0.60Aa	2.06±1.29Ba	2.22±0.90Aa	1.72±0.92Ba	1.19±0.45Ca
	10—20	1.87±0.71Ab	1.45±0.73Bb	1.64±0.73Ab	1.23±0.65Bb	0.94±0.28Ca
	20—30	1.78±0.40Ab	1.33±0.75Bb	1.28±0.63Bb	1.01±0.57Bb	0.80±0.30Bb
	30—50	1.68±0.38Ab	1.07±0.69Bc	0.88±0.57Bc	0.88±0.49Bc	0.68±0.30Bb
	50—100	1.30±0.45Ac	0.95±0.57Bc	0.84±0.46Bc	0.79±0.49Bc	0.64±0.27Bb
TP/(g·kg ⁻¹)	0—10	0.89±0.43Aa	0.34±0.19Ba	0.44±0.20Ba	0.34±0.17Ba	0.21±0.04Ca
	10—20	0.87±0.43Aa	0.29±0.17Ba	0.36±0.17Ba	0.32±0.17Ba	0.19±0.04Ca
	20—30	0.79±0.47Ab	0.28±0.18Ba	0.36±0.16Ba	0.31±0.16Ba	0.19±0.05Ca
	30—50	0.77±0.45Ab	0.27±0.18Ba	0.33±0.16Ba	0.30±0.18Ba	0.19±0.05Ca
	50—100	0.68±0.49Ab	0.26±0.13Ba	0.33±0.16Ba	0.31±0.16Ba	0.19±0.06Ca

表 3 江西省森林土壤养分描述性统计特征

土壤养分	土层/cm	极小值/ (g · kg ⁻¹)	极大值/ (g · kg ⁻¹)	均值/ (g · kg ⁻¹)	标准差/ (g · kg ⁻¹)	变异 系数/%	偏度	峰度	分布 类型
SOM/(g · kg ⁻¹)	0—10	2.36	244.20	41.34	32.19	77.88	2.82	15.05	对数正态
	10—20	1.30	221.53	28.04	24.93	88.91	3.20	15.76	对数正态
	20—30	1.35	236.51	22.83	23.31	102.13	4.04	25.66	对数正态
	30—50	1.38	176.97	19.83	23.32	117.61	3.34	13.98	对数正态
	50—100	1.17	169.42	16.25	20.06	123.73	3.73	19.54	对数正态
TN/(g · kg ⁻¹)	0—10	0.04	7.74	1.79	1.01	56.54	0.32	0.65	正态
	10—20	0.08	3.8	1.28	0.69	53.78	0.78	0.54	正态
	20—30	0.02	3.6	1.09	0.62	56.60	1.10	1.48	正态
	30—50	0.03	2.96	0.94	0.55	58.32	1.07	1.18	正态
	50—100	0.02	3.41	0.84	0.51	60.46	1.05	1.39	正态
TP/(g · kg ⁻¹)	0—10	0.07	1.53	0.37	0.22	60.55	2.15	7.14	对数正态
	10—20	0.05	1.55	0.34	0.21	61.59	1.74	5.28	对数正态
	20—30	0.06	1.52	0.33	0.20	62.01	2.63	8.29	对数正态
	30—50	0.01	1.99	0.32	0.21	66.40	2.06	6.51	对数正态
	50—100	0.01	1.71	0.32	0.20	63.82	1.74	5.00	对数正态

3.2 江西省森林土壤养分空间变异特征分析

对江西省森林土壤养分数据进行半方差函数分析,得出结果见表 4。块金值(C_0)表示由试验误差以及小于取样尺度内产生的如耕作措施、施肥管理、种植制度等人为干预而引起的变异,也称随机性变异,随机性因素使得土壤朝着均一性的方向变异;除此之外,还有由土壤自身结构上的差异而引起的变化,如土壤母质、地形地貌等引起的变异,也称结构性变异^[16]。随机性变异和结构性变异构成了土壤养分空间变异的总和,基台值(C_0+C)的大小表示这种总的变异大小。块金值和基台值之比 $C_0/(C_0+C)$ (也称块金系数)反映了空间变异性的程度,块金系数的大小表示由随机因素引起的空间异质性所占的比例。一般认为块金系数小于 25% 时,说明空间变量具有强烈的空间自相关性;若块金系数在 25%~75% 之间时,变量具有中等程度空间自相关;若比值大于 75%,则表示该变量空间相关性弱。由表 4 可知,各土层中 SOM 的块金系数 5.22%~34.19%,且随土层增加而升高(图 2),在 0—30 cm 土层中呈强烈的空间自相关性,在 30—100 cm 中呈中等程度空间自相关,土层越深,SOM 分布的结构性反而越差,可能是由于 SOM 在土层间差异较大,30—50 cm 和 50—100 cm 土层中不同取样部位仍有一定的差异,而各取样点在垂直方向上的取样部位难以统一,造成的人为取样误差影响了深层土壤 SOM 分布的结构性,增加了随机性。土壤 TN 块金系数为 19.08%~42.11%,TP 为 13.62%~27.78%。虽然 TN 和 TP 含量在土层间差

异相对较小,取样等人为因素造成的误差较小,但 TN 和 TP 的块金系数在垂直方向上仍产生了一定的规律性,均随土层增加表现为先升高后降低的趋势,强烈的空间自相关性表现在表层和深层土壤,中部土壤呈中等程度空间自相关,可能是由于森林植被丰富,植被的根系主要影响中层土壤,从而弱化了剖面中部土壤的 TN 和 TP 分布结构性。

变程表示的是空间变异尺度的范围大小,变程范围内间隔越近的两点具有更强的相似性,超过变程范围的两个样点之间则不存在空间相关性。由表 4 可以看出,SOM 的变程随土层深度增加而升高,在 0—30 cm 土层中,变程为 73~79 km,在深层土壤达到了 545 km 以上;TN 和 TP 则随土层先增后减,其中 TN 在 0—10 cm 土层中变程为 88 km,在 10—100 cm 土层中均超过 200 km,而 TP 变程则保持在 14~28 km。三种养分均在表层土壤中具有较小的变程,可能是植被的存在影响了土壤化学性质,导致土壤变量相似范围的减小。

对土壤养分进行半方差分析时需要拟合成最佳模型,模型选择以决定系数最大、残差最小原则进行^[17],模型拟合的好坏对养分空间插值具有大的影响。由表 4 可以看出,SOM,TP 在 0—30 cm 土层中可以很好的拟合成球状模型,在 30—100 cm 土层中拟合成指数模型(SOM 决定系数 0.493~0.598,TP 决定系数 0.663~0.856);TN 在 0—10 cm,30—50 cm 中拟合成球状模型(决定系数分别为 0.765,0.853),在 10—30 cm 中拟合成指数模型(决定系数为 0.821,0.865),在 50—100 cm 土

层中拟合成高斯模型(决定系数为 0.856)。SOM,TN 和 TP 不同土层数据拟合的最佳模型并不一致,这可能

是植被根系在不同土层造成影响导致养分在不同土层中造成了分配差异。

表 4 江西省森林土壤养分半方差函数特征

养分	土层/ cm	块金值	基台值	空间异质 性比/%	变程/ km	模型	决定 系数	残差
SOM/(g·kg ⁻¹)	0—10	0.0053	0.1016	5.22	73	球状	0.589	2.93 E—03
	10—20	0.0148	0.1026	14.42	74	球状	0.539	3.23 E—03
	20—30	0.0229	0.1118	20.48	79	球状	0.493	4.51 E—03
	30—50	0.0764	0.2428	31.47	545	指数	0.598	6.51 E—03
	50—100	0.0811	0.2372	34.19	793	指数	0.514	4.72 E—03
TN/(g·kg ⁻¹)	0—10	0.125	0.655	19.08	88	球状	0.765	0.0547
	10—20	0.243	0.577	42.11	202	指数	0.821	0.021
	20—30	0.2054	0.5058	40.61	264	指数	0.865	0.0106
	30—50	0.147	0.527	27.89	911	球状	0.853	0.0121
	50—100	0.134	0.629	21.30	621	高斯	0.856	6.64 E—03
TP/(g·kg ⁻¹)	0—10	0.0094	0.0485	19.38	58	球状	0.678	4.03 E—04
	10—20	0.01	0.0446	22.42	69	球状	0.768	1.79 E—04
	20—30	0.0135	0.0486	27.78	75	球状	0.663	3.53 E—04
	30—50	0.0064	0.047	13.62	21	指数	0.663	2.59 E—04
	50—100	0.0064	0.0457	14.00	19	指数	0.677	1.94 E—04

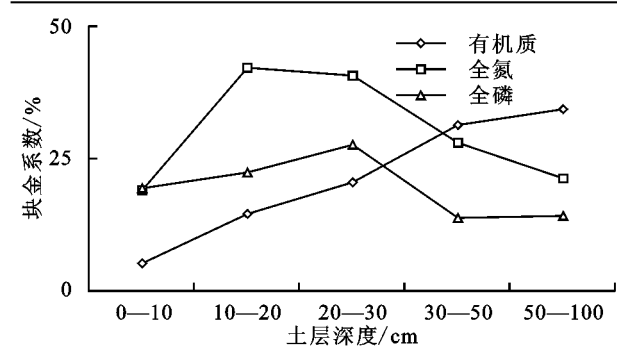


图 2 不同土层土壤养分块金系数

3.3 江西省森林土壤养分空间分布格局研究

结合全国第二次土壤普查养分分级标准^[18](表 5),在 ArcGIS 9.3 中,利用 Geostatistics analysis 模块进行土壤养分空间插值分析。数据剔除二阶趋势效应并考虑各向异性,经过交叉验证选取选取普通克里格插值方法并结合半方差分析拟合模型进行插值,各养分插值结果附图 1。

江西省森林土壤 SOM 总体处于丰富水平,但水平和垂直分布上均具有明显的空间异质性。在水平分布上,高值区主要在赣东的铅山、资溪和黎川、赣东北部的景德镇和上饶、赣西北的武宁、赣西的萍乡和井冈山以及赣南的全南和龙南等地,中部地区含量较低,表现出由江西省边界向中部递减的规律,可能是由于江西东部的武夷山脉、东北部的怀玉山、南部的大庾岭和九连山、西北部的幕阜山脉、九岭山和西部的罗霄山脉等山地森林存在于江西边界,植被条件较

好,海拔较高,温度较低,而低温不利于有机碳的矿化,因而积累较多^[19]。而中部地区多为丘陵森林,且人口密度大,对森林的樵采等人为干扰大。同时高值区多为竹林或阔叶林,对有机质积累贡献较大。从土层间变化来看,SOM 含量沿土层方向变化明显,土层越深,含量越低,且低度及低值区的广度均大大增加;表层土壤 SOM 具有南北方向上条带状分布的特征,到了深层土壤中则表现出高值区呈条带状、低值区成斑块状的特点。

江西省森林土壤氮素较为丰富,山地森林丰富程度更为明显,其空间分布产生了明显的南北分异特征,以吉安地区为分界线,北部含量较高,赣南地区森林土壤氮素则相对缺乏,低值区以吉泰盆地及赣州市为主。温度成为影响氮素分布的重要因素,赣南与赣北年平均气温相差近 4℃,而高温促进了氮素的分解^[20]。

全省森林土壤磷素相当缺乏,根据统计情况,土壤磷素含量大多在 0.33 g/kg 左右,比较贫乏,在分布上具有十分广的低值区,除东北部和西部小部分区域外,全省大部分地区处于贫乏或极缺乏水平之中。从垂直方向看,各土层间分布特征十分相似,且含量相差不大,可能由于 TP 含量整体水平偏低,导致土层间变化不明显。由图 3 可以看出,三种养分在江西省中南部地区均具有明显的低值区斑块,养分含量比较低,可能是由于该地区为土壤为退化红壤,植被类型为针叶林居多,对土壤的消耗导致土壤养分比较缺乏。

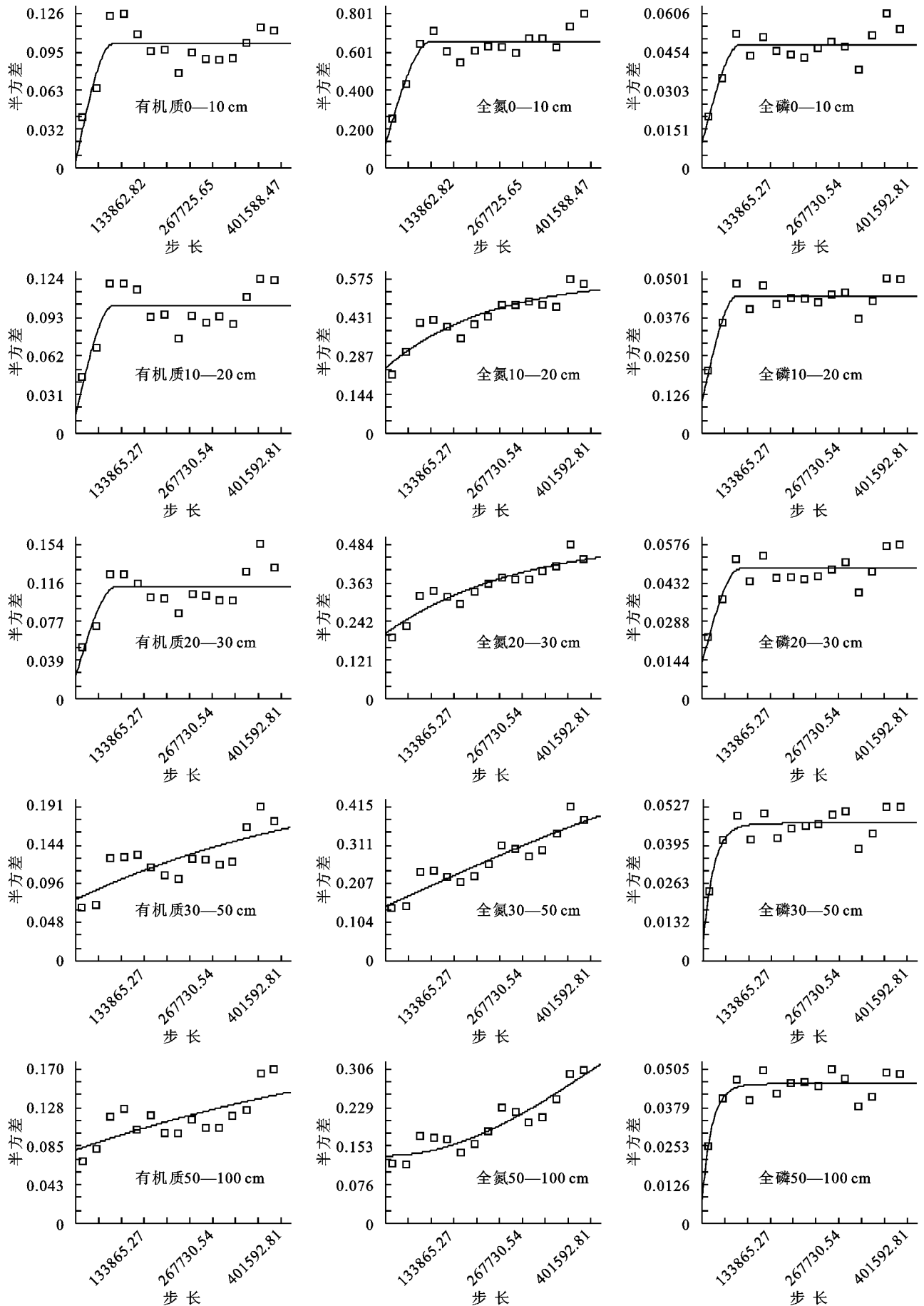


图 3 江西省森林土壤养分半方差函数

表 5 第二次土壤普查养分分级标准

土壤养分	分级标准					
	极贫乏	贫乏	中等	较丰富	丰富	极丰富
SOM/(g·kg ⁻¹)	<6	6~10	10~20	20~30	30~40	>40
TN/(g·kg ⁻¹)	<0.5	0.5~0.75	0.75~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	>2.0
TP/(g·kg ⁻¹)	<0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0	>1.0

4 结论与讨论

江西省森林土壤养分受植被类型、土壤类型影响大。本研究中,从植被类型上看,竹林、阔叶林对土壤养分贡献较大,而针叶林中土壤相对贫瘠;另外,由于不同森林类型林内凋落物量的不同,以及不同凋落物分解和养分周转也会存在一定的差异,这些环境条件都会影响本研究的试验结果;吴春生等^[21]发现江西凋落物碳储量最大的是常绿阔叶林 1.725 t/hm²,且其连接凋落物与土壤养分周转的细根周转率是最快的;宋庆妮等^[22]研究发现大岗山毛竹林凋落物生物量(2.77 t/hm²)高于常绿阔叶林(2.16 t/hm²);从这些研究结果中,我们可以看出江西省毛竹林和常绿阔叶林凋落物量及其养分含量都是相对较大的,这就为其对土壤养分提供较大贡献提供了前提条件;且之前的研究表明,阔叶树凋落物分解速率要大于针叶树^[23],这就也进一步说明了本研究的研究结果。从土壤类型上看,棕壤、黄壤具有良好的养分条件,而红壤特别是沙红壤中养分状况极差,该研究结果与程先富等^[24]研究江西丘陵山区林地土壤养分全 N、有机质、全 P 含量在马尾松纯林中最低,在阔叶林中最高,全 N 和有机质含量由黄壤、黄红壤、棕红壤到红壤依次降低一致。

土壤 TN 符合正态分布类型,而 SOM 和 TP 具有明显的偏态,符合对数正态分布类型。TN 和 TP 具有中等程度的变异,而 SOM 离散程度较高,具有强变异性,产生了严重的“贫富差距”。本研究结果,养分数据可以较好地拟合成球状模型、指数模型和高斯模型,与郭旭东等^[25]研究河北省遵化市 5 种养分要素的空间变异规律和于婧等^[26]研究江汉平原有机质、全氮养分空间变异的研究结果一致。陈彦等^[27]研究结果表明,全氮、有机质均具有中等的空间相关性,但研究的尺度不同,本研究结果表明,江西森林土壤养分具有明显的空间变异特征,受植被、取样方法等因素影响,TN 和 TP 均在表层土壤和深层中具有强烈的空间自相关性,在中间土层程度有所减弱,呈“上下强,中间弱”的规律,SOM 则表现为表层土壤空间自相关强烈,下层具有中等自相关性,呈“上强下弱”的规律。变程同各养分的空间相关性规律相反,TN 和 TP 自相关距离在中间土层中较大,上下土层中较小,SOM 自相关距离则随土层增加而增大。张敏等^[28]研究了新郑市土壤有机质、全氮的空间变

异情况,其有机质、全氮的变异系数在 29%~45%,有效磷变异系数最大为 75%;有机质和全氮空间变异性具有中等空间相关性,有效磷空间相关性最弱。史利江等^[29]研究发现土壤五种养分的变异系数 8.30%~84.45%,其中有效磷的变异系数最高,为 84.45%。有机质的变异都属于中等变异。有机质、有效磷的 C₀/(C₀+C)为 25%~75%,表明其具有中等的空间相关性。贾树海等^[30]研究辽宁省凌源市 1 042 个土壤表层样,发现土壤养分的变异系数为 29.45%~67.25%。有机质 C₀/(C₀+C)比值均为 49.7%~49.90%,都具有中等的相关性,而有效磷的 C₀/(C₀+C)的比值为 100%,空间的相关性较弱。本研究中,各土层中 SOM、TN 和 TP 的变异系数分别为 5.22%~34.19%,19.08%~42.11%和 13.62%~27.78%,相比于上述研究要小,说明本研究各养分的空间自相关性更强。

从垂直方向上看,森林土壤 SOM、TN 总体含量在土壤剖面上具有明显的渐弱性,分别由 0—10 cm 的 41.34 g/kg,1.79 g/kg 下降到 50—100 cm 土层的 16.25 g/kg,0.84 g/kg;而 TP 含量在土层间变化不明显,维持在 0.33 g/kg 左右。由于植被类型、地理条件、土壤类型等差异,造成了江西森林土壤 SOM、TN、TP 在水平空间分布上表现出一定的差异,该研究结果与曾伟等^[31]研究浙江省龙游县的低丘红壤地区表层土壤的有机质和有效氮的空间变异特征研究结果一致。江西省森林土壤 SOM 整体含量较为丰富,高值区主要出现在江西省西部边界山区和东北部山区,可能是由于山地人为干扰较小,有利于枯枝落叶的积累,该研究结果与赵建华等^[32]研究甘肃省榆中县区域土壤有机质空间变异性的结果一致。TN 具有明显的南北分异,赣北地区森林土壤 TN 含量较高,赣南地区较为缺乏,且低值区主要表现在吉泰盆地,主要是因为赣南地区光照充足,温度较高,加速了氮素的分解,加上丰富的雨水冲刷,使得赣南地区 TN 低于赣北地区^[20]。全省森林土壤磷素普遍缺乏严重,大部分地区 TP 含量均处于贫乏水平。三种土壤养分均具有山地森林含量显著高于丘陵森林的共性,正因为江西省以山为界的特点,造成了土壤养分由江西省边界地区向以吉泰盆地为主的中部地区递减的趋势。

本文研究对象为森林土壤,由于前期布点时无法了

解拟定样地情况,各森林类型、土壤类型样地最终样点数分配并不均一,同时人为取样误差的存在,都会对结果造成一定的影响。因此,增加样点数量,减小人为随机误差影响,能更好地揭示江西省森林土壤养分的分布特征。由于没有非林地的土壤养分数据,研究结果只能说明江西省森林土壤养分分布特征,只能在林业生产、研究中提供参考,而对于农田、湿地等区域不具有说服力,若需要则应增加数据进行分析说明。

参考文献:

- [1] 程先富,史学正,于东升,等. 江西省兴国县土壤全氮和有机质的空间变异及其分布格局[J]. 应用与环境生物学报,2004,10(1):64-67.
- [2] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [3] Tateno R, Takeda H. Forest structure and tree species distribution in relation to topography-mediated heterogeneity of soil nitrogen and light at the forest floor[J]. Ecological Research, 2003,18(5):559-571.
- [4] 张继平,张林波,王凤玉,等. 井冈山国家级自然保护区森林土壤养分含量的空间变化[J]. 土壤,2014,46(2):262-268.
- [5] 宋满珍,刘琪璟,吴自荣,等. 江西森林植被土壤有机碳储量估算及空间分布特征[J]. 江西农业大学学报,2009,31(3):416-421.
- [6] 袁芳,赵小敏,乐丽红,等. 江西省表层土壤有机碳库储量估算与空间分布特征[J]. 生态环境,2008,17(1):268-272.
- [7] 郭旭东,傅伯杰,马克明,等. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究:以河北省遵化市为例[J]. 应用生态学报,2000,11(4):557-563.
- [8] 杨美玲,王雪梅,罗梦媛. 基于 GIS 的库车县耕层土壤养分空间变异研究[J]. 水土保持研究,2015,22(1):61-65.
- [9] 董士伟,李红,孙丹峰,等. 北京市大兴区土壤养分空间结构及影响因素分析[J]. 水土保持研究,2015,22(2):32-35.
- [10] 孙梨萍,常庆瑞,赵业婷,等. 陕南丘陵区县域农田土壤养分的空间分布格局[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2015,43(3):162-168,174.
- [11] 韩有志,王政权. 森林更新与空间异质性[J]. 应用生态学报,2002,13(5):615-619.
- [12] 文雅,黄宁生,匡耀求. 广东省山区土壤有机碳密度特征及空间格局[J]. 应用基础与工程科学学报,2010,18(S):10-17.
- [13] 李鑫,欧阳勋志,刘琪睨. 江西省 2001—2005 年森林植被碳储量及区域分布特征[J]. 自然资源学报,2011,26(4):655-665.
- [14] 张志云,蔡学林,杜天真,等. 江西森林立地分类、评价及适地适树研究[J]. 江西农业大学学报,1997,19(6):1-30.
- [15] 邓清华,张邦文,金苏蓉,等. 江西省 4 种主要森林类型土壤有机碳特征比较[J]. 江西农业大学学报,2014,26(11):87-89.
- [16] 曹祥会,龙怀玉,周脚根,等. 河北省表层土壤有机碳和全氮空间变异特征性及影响因子分析[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22(4):937-948.
- [17] Wang Y, Shao M A, Liu Z, et al. Regional spatial pattern of deep soil water content and its influencing factors [J]. Hydrological Sciences Journal, 2012, 57(2):265-281.
- [18] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京:中国农业出版社,2002.
- [19] 黄湘,李卫红,陈亚宁,等. 塔里木河下游荒漠河岸林群落土壤呼吸及其影响因子[J]. 生态学报,2007,27(5):1951-1959.
- [20] 杨东,刘强. 基于 GIS 和地统计学的张掖市甘州区土壤全氮、有机质的空间变异特征分析[J]. 土壤通报,2011,42(3):593-597.
- [21] 吴春生,刘苑秋,魏晓华,等. 亚热带典型森林凋落物及细根的生物量和碳储量研究[J]. 西南林业大学学报,2016,36(5):45-51.
- [22] 宋庆妮,杨清培,欧阳明,等. 毛竹扩张的生态后效:凋落物水文功能评价[J]. 生态学杂志,2015,34(8):2281-2287.
- [23] Wesemael B, Veer M. Soil organic matter accumulation, litter decomposition and humus forms under mediterranean-type forests in southern Tuscany, Italy[J]. Soil Sci., 1992,43:133-144.
- [24] 程先富,史学正,于东升,等. 丘陵山区林地土壤养分状况研究:以江西省兴国县为例[J]. 水土保持学报,2003,17(2):28-30.
- [25] 郭旭东,杨福林. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究:以河北省遵化市为例[J]. 应用生态学报,2000,11(4):557-563.
- [26] 于婧. 基于 GIS 和地统计学方法的土壤养分空间变异及应用研究[D]. 武汉:华中农业大学,2007.
- [27] 陈彦,吕新. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究:以新疆农七师 125 团为例[J]. 中国农学通报,2005,21(7):389-391.
- [28] 张敏,贺鹏飞,陈伟强. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异分析[J]. 东北农业大学学报,2010,41(3):53-58.
- [29] 史利江,俞立中,贺宝根. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究[D]. 上海:上海师范大学,2006.
- [30] 贾树海,张琦,孟维军,等. 基于 GIS 与地统计学土壤养分空间变异特征研究:以辽宁省凌源市 6 个乡镇为例[J]. 水土保持通报,2009,29(3):197-201.
- [31] 曾伟,陈雪萍,王珂. 基于地统计学和 GIS 的低丘红壤养分空间变异及其分布研究:以龙游县低丘红壤为例[J]. 浙江林业科技,2006,26(3):1-6.
- [32] 赵建华,盖艾鸿,陈芳,等. 基于 GIS 和地统计学的区域土壤有机质空间变异性研究[J]. 甘肃农业大学学报,2008,43(4):103-106.