

县域农田土壤有机质空间变异及其影响因素分析^①

宋莎, 李廷轩, 王永东, 张锡洲

(四川农业大学资源与环境学院, 四川雅安 625014)

摘要: 研究县域农田空间变异特征可以为培肥地力, 增加作物产量提供指导。本文运用地统计学和 GIS 相结合的方法, 研究了四川省双流县土壤有机质的空间变异特征及其影响因素。结果表明: ①研究区域土壤有机质含量处于中等偏高水平, 平均值为 29.72 g/kg, 变异系数为 30.11%, 属中等变异强度。②有机质变异函数的理论最佳模型为球状模型, 块金值与基台值之比为 12.67%, 表明有机质含量具有强烈的空间相关性, 空间相关距离为 91.10 km, 普通 Kriging 插值表明土壤有机质含量呈现北部向东南部减少的趋势。③影响有机质空间变异的主要因素为土壤类型、地貌类型等结构性因子, 而土地利用方式、施肥等随机性因子也对有机质空间变异产生重要影响, 其中秸秆还田是有机质含量普遍升高的原因。

关键词: 土壤有机质; 空间变异; 影响因素; 地统计学; GIS

中图分类号: S158.2

土壤是一个时空连续的自然变体, 具有高度的空间变异性。地统计学已被证明是分析土壤空间变异特性及变异规律的最为有效的方法之一。从 20 世纪 80 年代至今, 国内外学者运用地统计学进行大尺度下土壤特性空间变异性研究, 初期主要集中在对土壤物理性质的定性描述, 之后结合 GIS 技术采用 Kriging 内插定量描述土壤理化性质, 并进行土壤制图, 使得土壤空间变异性研究变得更加广泛和深入。

有机质作为土壤重要的组成部分, 不仅是评价土壤肥力和质量的重要指标, 也是大气 CO₂ 的潜在碳源和汇, 是全球碳平衡过程中非常重要的碳库, 被认为是影响全球“温室效应”的主要因素之一。土壤有机质的空间变异研究是农用地质量评价、植物生长和农业潜力分析预测的基础^[1]。目前运用地统计学和 GIS 相结合的方法, 一方面研究了农田尺度下土壤有机质的空间变异性^[2-5], 从随机性因素方面分析了土壤有机质变化的影响因素; 另一方面研究了区域尺度下(黄淮海平原区、黄土高原小流域、干旱荒漠区、东北平原区和丘陵红壤区)土壤有机质的空间分布特点及其变异规律^[6-10], 揭示了结构性因素对有机质空间变异特征的影响, 而对于城市近郊土壤有机质空间变异及其影响因素的研究鲜见报道。本文选择位于成都西南近郊的农业大县——双流县作为研究对象, 该县在传统农业生产的基础上逐渐向农业现代化和生态农业模式发展, 农用地集约化程度的提高、土地利用类型的变

化和耕作管理措施的调整等因素影响了土壤有机质的空间变异, 因此掌握该区域土壤有机质分布状况, 分析其空间变异特征, 通过探讨影响因素寻找维持土壤有机质平衡和增加有机质含量的农业生产管理方式, 对加强土壤肥力综合管理具有一定的指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

双流县位于成都平原南东隅的龙泉山西侧, 东经 103°47'51"~104°15'33", 北纬 30°13'32"~30°40'12", 县城距成都市区 13 km, 幅员面积 1 067 km², 农田面积 4.25 万 hm², 其中水田 3.34 万 hm², 旱地 0.91 万 hm²。海拔 435~967 m, 平原、丘陵、山地分别占全县总面积的 28.60%、63.49%、7.91%, 其中县区北部、西北部地区为平原区, 西南部及中部为丘陵区, 东南部低山区呈东北至西南条带状分布。土壤类型以水稻土、黄壤、紫色土为主。县境内气候温和, 雨量充沛, 年降水量 921 mm, 水源充足, 灌溉方便, 无明显土壤侵蚀现象, 耕作制度多为一年两熟, 主产水稻、小麦、油菜。全县农业经济全面发展, 2007 年全县实现农业增加值 25.59 亿元, 粮食总产达 29.17 万 t, 蔬菜总产达 47.86 万 t, 水果总产达 17.35 万 t。双流县已成为成都市蔬菜生产重点基地。

1.2 土壤样品采集

参照四川省测土配方施肥技术规程, 按照“随机、

^①基金项目: 四川省青年科技基金项目 (06ZQ026-020), 四川省教育厅重点项目 (2006A008) 和四川农业大学校科技青年创新基金项目 (2005年) 资助。

* 通讯作者 (litinx@263.net)

作者简介: 宋莎 (1984—), 女, 四川成都人, 硕士研究生, 主要从事县域农田施肥信息系统研究。E-mail: tianshu528@yahoo.com.cn

等量、多点混合”的原则采用S形布点采样，在保证土壤样品具有代表性的前提下，平均每 45 hm² 布设 1 个采样点，在人为活动强烈的平原地区，加密布点，并用 GPS 记录中心点位置。每个土样以一个取土点为中心，取 0~20 cm 深度 5 点混合而成，共 564 个样点（图 1），其中水稻土取样 386 个，紫色土 86 个，黄壤 92 个，从地貌类型看，平原区取样 285 个，丘陵区 264 个，山地区 15 个。为尽量避免施肥对样品的影响，采样时间选在作物收获后的 2007 年 10 月。

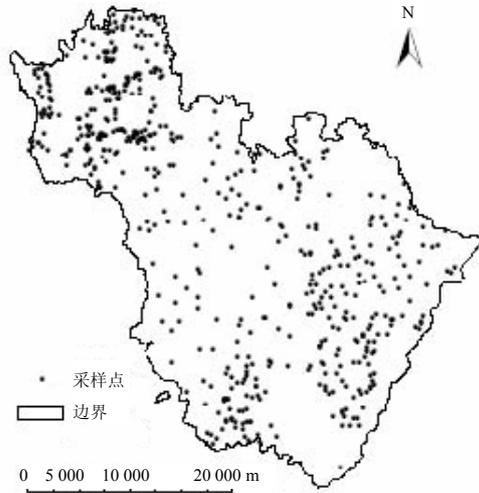


图 1 土壤采样样点分布图
Fig. 1 Distribution of soil samples

1.3 测定项目及方法

土壤有机质的测定用重铬酸钾外加热法^[11]。

1.4 数据处理

数据常规统计分析采用 SPSS13.0，半方差函数分析在 GS+5.3 中完成。为减小特异值对数据分析的影响，本文采用域法识别特异值^[12]。以 ArcGIS9.0 作为 GIS 平台，对收集到的所有图件资料进行配准和数字化，利用地统计分析功能中的普通克里格方法进行 Kriging 插值，生成双流县土壤有机质含量分布图，并进行含量等级的面积统计。

2 结果与分析

2.1 土壤有机质的空间变异特征

2.1.1 土壤有机质的描述性分析 由表 1 可知，研究区域土壤有机质含量总体水平较高，平均含量为 29.72 g/kg，变异系数为 30.11%，属于中等变异性。从土壤类型看，水稻土有机质变异强度最小（CV = 22.33%），紫色土有机质变异强度最大（CV = 36.62%）；从地貌类型看，平原区土壤有机质变异强度最小（CV = 20.37%），山区最大（CV = 45.65%），其原因主要是平原区内以水稻土为主，土壤质地较黏重，有利于有机质积累，同时地势平坦和人类影响的均衡性使其变异系数较小^[13]，而低山区成土母质多为泥岩和砂岩，长期的侵蚀作用使土壤有机质含量较低，地形和人类活动的差异性导致其变异系数较大。

空间数据的正态分布是区域化变量进行空间分析的前提。用 SPSS 软件对土壤有机质进行分析后发现其符合正态分布（图 2），再对原始数据用 K-S 正态分布检验概率（ P_{K-S} ）进行检验，检验时取显著水平 $\alpha = 0.05$ ，土壤有机质 $P_{K-S} > 0.05$ ，可认为数据的正态分布达到显著水平，表明所测有机质数据满足地统计学分析要求。

表 1 土壤有机质描述性统计 (g/kg)
Table 1 Descriptive statistics of soil organic matter

项目	样本数	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	偏度检验	峰度检验	K-S 值
全样本	564	5.54	53.88	29.72	8.95	30.11	-0.108	-0.316	0.570
土壤类型									
水稻土	386	11.27	53.88	33.18 A	7.41	22.33	-0.072	0.263	0.559
黄壤	92	5.54	41.89	23.66 B	6.63	28.02	0.162	0.112	0.468
紫色土	86	8.50	39.82	20.67 C	7.57	36.62	0.478	-0.502	0.607
地貌类型									
平原	285	13.47	53.88	34.21 A	6.97	20.37	-0.089	0.478	0.746
丘陵	264	5.54	53.88	25.61 B	8.20	32.02	0.345	0.016	0.738
山地	15	8.50	33.39	16.56 C	7.56	45.65	1.028	0.104	0.781
土地利用									
轮作地	395	5.54	53.88	31.83 A	8.36	37.82	0.066	-0.247	0.919
方式									
菜地	19	17.71	44.45	30.47 A	6.13	26.74	-0.012	1.528	0.646
果园	150	8.50	53.88	24.08 B	8.33	36.10	0.304	-0.570	0.728

注：不同大写字母表示各统计大项目下土壤有机质含量差异显著（ $p < 0.01$ ）。

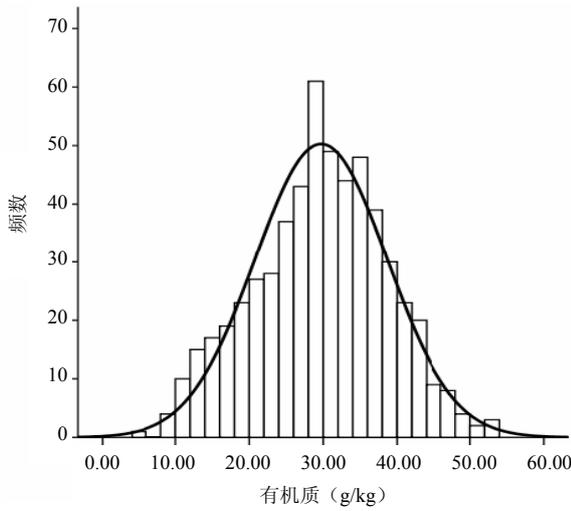


图 2 土壤有机质频数分布图

Fig. 2 Distribution frequency of soil organic matter

2.1.2 半方差函数分析 土壤有机质分布状况是由结构性因素和随机性因素共同决定的^[14]。拟合精度较高的半方差函数模型是分析土壤特性空间变异性的关键，也是进行精确 Kriging 插值的基础^[15]。由图 3 可知，土壤有机质含量在全步长变化域（51 062 m）内各向同性半方差函数理论模型为指数模型。在 42 552 m 步长变化域内其实验半方差函数变化相对平稳，当步长变化域大于 42 552 m 时，实验半方差函数变化不稳定，其散点图逐渐分散，这是土壤有机质含量空间变异的各向异性导致的。

在 42 552 m 步长变化域内，对土壤有机质含量在不同步长间距下的半方差函数模型进行拟合，得到土壤有机质含量在 700 m 步长下的最佳模型为指数模型（图 4），其块金效应 $C_0/(C_0+C)$ 为 12.67%，表明有机质在取样尺度下具有强烈的空间相关性，即结构性因子是影响其空间变异的主要因素，而随机性因子的影响次之。土壤有机质含量在最佳模型中所得变程为

91.10 km（表 2）。这与姜勇等人^[16]报道的有机质具有较强空间自相关性，且空间相关距离较大结论相似。

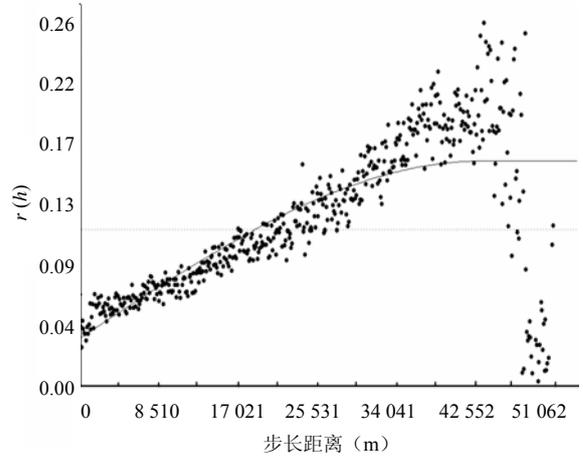


图 3 全域土壤有机质各向同性半方差

Fig. 3 Semivariograms of soil organic matter at the full extent of data

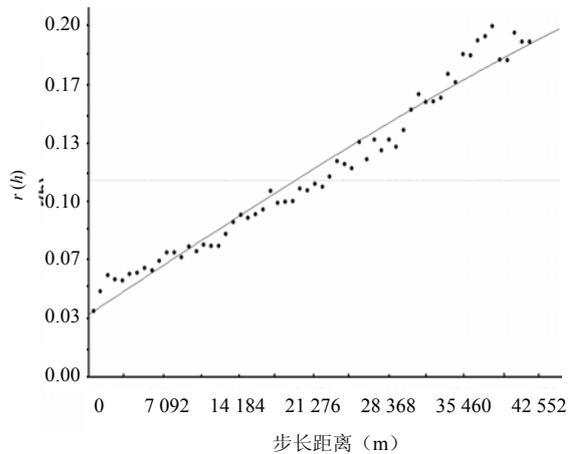


图 4 42 552 m 步长域土壤有机质各向同性半方差

Fig. 4 Semivariograms of soil organic matter at a lag distance of 42 552 meters

表 2 土壤有机质半方差函数理论模型及有关参数

Table 2 Parameters of theoretical model of soil organic matter

理论模型	块金值 (C_0)	基台值 (C_0+C)	变程 (km)	块金值/基台值	决定系数	残差
球状	0.035	0.275	91.10	12.67	0.965	4.34E-03

2.1.3 土壤有机质的空间分布 从图 5 可以看出，土壤有机质含量由正北方向至东南方向递减，各含量等级大致呈片状分布。高值区出现在北部地势平坦、经济较为发达的东升街道办事处，双流国际机场坐落

境内；而低值区则主要出现在地势起伏较大，经济相对落后的东部太平镇及东南部合江镇、永兴镇。这种变化趋势与区域内土壤类型和地形地貌变化的方向较一致。有机质含量集中分布在 20 ~ 40 g/kg 范围内，其

中在 25~30 g/kg 之间的面积最大 (256.47 km²)，占研究区面积的 20.40%；而有机质含量 <20 g/kg 和 >40 g/kg 的面积分别为 70.44 km² 和 2.04 km²。根据全国第二次土壤普查养分分级标准，该县 58.23% 的土壤有机质含量达到中等水平，34.22% 的有机质含量属于高等水平，另有 0.16% 的为极高水平。与第二次土壤普查该县的结果相比，有机质含量有了明显增加，>20 g/kg (即中等水平以上) 的范围从 1980 年占土地总面积的 79.71% 上升至 92.61%，其中高等水平一级增幅达 23.60%，表明该研究区域土壤有机质含量在随机因素的促使下有了相应的提高。

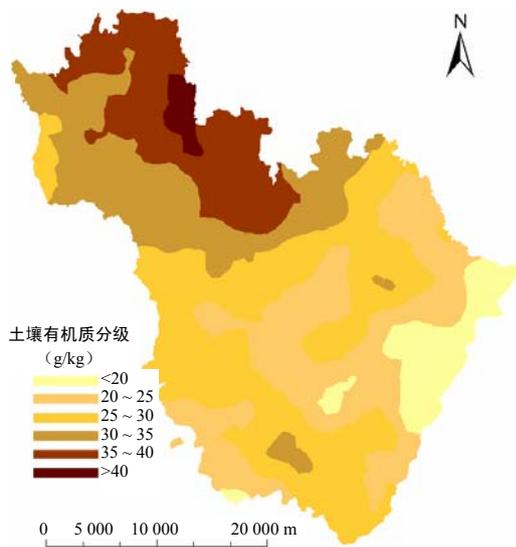


图 5 土壤有机质含量空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution of soil organic matter

2.2 土壤有机质空间变异影响因素分析

影响土壤有机质空间变异的因素较复杂，本文从土壤类型、地形地貌等结构性因素及土地利用方式、耕作管理、秸秆还田等随机性因素方面分析了双流县土壤有机质空间变异的影响因素。

2.2.1 土壤类型 双流县土壤类型主要包括水稻土、紫色土和黄壤，土壤类型分布并不具有连续性，特别是黄壤的分布很分散，水稻土分布最广，多集中在北部地区，总面积约为 836.16 km²，占研究区面积的 78.33%。统计分析表明，土壤有机质含量表现为水稻土>紫色土>黄壤，其差异达到极显著水平 (表 1)。土壤类型对有机质含量的影响一方面体现在成土母质的背景有机质含量有所差异，另一方面表现为土壤自身的理化性质影响有机质的含量，与紫色土和黄壤相

比，水稻土的淹水条件有利于有机质的积累。研究区紫色土有机质含量高于黄壤，这与以往研究结果相反，表明在农业集约化程度较高区域，土壤类型不是影响土壤有机质空间变异的唯一因素。

2.2.2 地貌类型 研究区地貌多样，地域差异较明显，平原、丘陵、山地的土壤有机质含量分布各异，平原、丘陵、山地土壤有机质含量差异均达到极显著水平。东南边界为龙泉山环亘的低山地区，是全县地形最高部位，海拔 600~988 m，该区土壤有机质含量最低 (16.56 g/kg)；龙泉山大背斜与正兴短轴背斜之间形成了一个北东高、南东低的丘陵地带，海拔 435~600 m，土壤有机质含量为 25.62 g/kg；县区北部、北西部的广大地区为成都平原的一部分，地势北西高、南东低，地势起伏不大相对平坦，海拔 435~514 m，土壤有机质含量最高 (34.21 g/kg)，这与插值图所显示土壤有机质空间分布较为一致。平原区地势平坦，水源充足，交通便利，人口密集，农业经济发展较快，对土壤的管理力度大于其他地区，故有机质含量高，而山地地区交通不便，雨水冲刷易导致土壤表层有机质流失，区域社会经济条件相比县内其余区域差，导致农业投入不足，农业生产管理水平低下，因此土壤有机质含量较低。

2.2.3 土地利用方式 在不同土地利用方式下，由于管理措施不同、凋落数量和作物根茬数量的差异，致使有机质含量存在明显差异^[17]。受地形和土壤类型因素的影响，研究区土地利用方式主要为水田、旱地、菜地和果园，兼有林地、牧业用地及建设用地。从分析结果可以看出 (表 1)，轮作地与菜地有机质含量差异不显著，但两者与果园有机质含量差异均达到极显著水平，表明土地利用方式不是影响有机质空间变异的主要因子。研究区轮作地和菜地有机质含量明显高于果园，这与农户的施肥水平及管理方式密切相关。

从表 3 的统计分析结果可以看出，同一种土地利用方式下，不同土壤类型有机质含量之间差异显著程度不同。轮作条件下，3 类土壤的有机质含量差异均达显著水平，果园中紫色土有机质含量与其余两种土壤有机质含量差异达显著水平，而菜地中不同土壤类型间有机质含量不存在显著差异。同一种地貌类型下，只有平原区不同土地利用方式土壤有机质含量间存在显著差异，说明地形因素对有机质空间变异的影响大于土地利用方式的不同对有机质的影响，与半方差函数分析结论一致。

表 3 不同土地利用方式下土壤有机质描述性统计

Table 3 Descriptive statistics of soil organic matter on different land use

项目	样点数	有机质 (g/kg)	
轮作地	水稻土	331	33.18 ± 7.13 Aa
	紫色土	35	19.97 ± 6.28 Bc
	黄壤	29	22.97 ± 7.24 Bb
菜地	水稻土	15	31.33 ± 3.02 Aa
	紫色土	4	26.81 ± 9.99 Aa
	黄壤	63	23.97 ± 6.32 Aa
果园	水稻土	40	24.20 ± 8.38 Aa
	紫色土	47	20.65 ± 7.94 Ab
	黄壤	63	23.97 ± 6.32 Aa
平原区	轮作地	264	34.39 ± 6.95 Aa
	菜地	9	33.00 ± 4.98 Aab
	果园	12	28.58 ± 8.57 Ab
丘陵区	轮作地	127	26.75 ± 8.23 Aa
	菜地	10	28.08 ± 6.36 Aa
	果园	127	24.06 ± 7.97 Aa
低山区	轮作地	4	16.71 ± 7.61 Aa
	果园	11	16.42 ± 7.55 Aa

注: 不同小写字母表示各统计大项目下土壤有机质含量在 $p < 0.05$ 水平下差异显著; 大写字母表示在 $p < 0.01$ 水平下差异显著。

2.2.4 施肥 据双流县农业局 2006 年 12 月统计数据, 该县 2006 年氮肥施用量为 10 343 t (折纯), 磷肥 5 241 t, 钾肥 2 622 t, 复合肥 5 902 t, 合计施肥量为 24 109 t。化肥的施用提高了农作物的生物产量, 增加了作物残茬量, 有利于土壤有机质的积累。

地区经济发展的需求决定着农业经济发展政策, 间接影响土壤有机质空间变异性。成都双流国际机场位于双流县北部, 为解决焚烧秸秆造成的烟雾影响机场正常运转, 全县开展了大规模的秸秆还田工作, 秸秆综合利用面积超过 80%, 2006 年全县大约有 85% 的农户实现了秸秆还田, 尤其在机场附近, 每年机械秸秆还田是农业工作首要任务。从有机质含量分布图 (图 5) 也可以看出, 随着距机场距离的增大, 有机质含量减小, 这可能与秸秆还田数量有关。

2.2.5 其他因素 研究区北部东升街道办事处是县政府所在地, 与其他地区相比其城镇化水平较高, 因此消纳了大量的城镇粪便、垃圾和生活污水, 此区有机质含量最高。此外, 水源条件也间接影响土壤有机质空间变异, 双流县西部和北部的平原区由于良好的灌溉使得作物产量不断提高, 有机质含量随之增加, 而东部地区的永兴镇、合江镇和白沙镇处于低山、丘陵的上中部, 农业用水主要靠水库、水坝等水利工程, 每到干旱年就会出现生产用水困难, 粮食减产甚至绝

收的情况, 因此该地区土壤有机质含量属全县最低。

3 结论与讨论

(1) 研究区域土壤有机质含量较高, 变异系数为 30.11%, 属于中等变异强度。有机质的半方差变异函数模型以球状模型为最佳拟合模型, 空间自相关程度强烈, 相关距离为 91.10 km, 远远大于胡克林等人^[18]的相关研究结论 (空间相关距离为 49.00 km), 而土壤有机质具有强烈空间相关性这一点也与其他研究报道^[13,19]中有机质具有中等强度的空间相关性结论不一致, 说明本研究区域特殊的结构性因素对有机质空间变异影响较明显。

(2) Kriging 插值的结果显示土壤有机质分布格局为北部高, 东南部低, 各含量等级大致呈片状分布, 这种变化趋势与该区域地形变化趋势较一致。与全国水平相比, 土壤有机质含量达到中等水平的面积占研究区域面积的 58.23%, 达到高等水平的面积占 34.22%, 其余 7.55% 的面积有机质含量属于极高或极低水平。

(3) 影响土壤有机质含量变化的因素很多, 本研究结合区域发展特色, 对两方面的影响因子均进行了研究。结果表明土壤有机质空间变异主要受土壤类型、地形、农业集约化程度的影响, 在北部地区, 施用有机肥、秸秆还田、现代化管理等措施, 使有机质含量有较大幅度的增加。随着双流县各地区特色产业的逐渐形成, 影响有机质含量变化的因素也更为复杂, 因素之间存在的交互作用对有机质的影响有待进一步研究。

(4) 由于采样密度和范围的限制, 对更小尺度下的空间结构特征并未深入研究, 今后研究类似区域条件下土壤有机质空间变异特征时可以适当缩小研究范围, 增加采样点数量, 减小采样点间距, 进一步研究小尺度下的变化规律, 弥补中尺度分析的不足。

参考文献:

- [1] Frogbrook ZL, Oliver MA. Comparing the spatial predictions of soil organic matter determined by two laboratory methods. *Soil Use and Management*, 2001, 17(4): 235-244
- [2] Yanai J, Mishima A, Furakawa S, Akshalov K, Kosaki T. Spatial variability of organic matter dynamics in the semi-arid croplands of northern Kazakhstan. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2005, 51(2): 261-269
- [3] 胡克林. 农田土壤养分的空间变异性特征. *农业工程学报*,

- 1999, 15(3): 33-38
- [4] 黄绍文, 金继运. 土壤特性空间变异研究进展. 土壤肥料, 2002(1): 8-14
- [5] 张淑娟, 何勇, 方慧. 基于 GPS 和 GIS 的田间土壤特性空间变异性的研究. 农业工程学报, 2003, 19(2): 39-44
- [6] 张世榕, 黄元仿, 李保国, 高峻. 黄淮海冲积平原区土壤有机质时空变异特征. 生态学报, 2002, 22(12): 2 041-2 047
- [7] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 陈利顶. 黄土高原小流域土壤养分的时空变异及其影响因子. 自然科学进展, 2004(14): 294-29
- [8] 黄元仿, 周志宇, 苑小勇, 张红艳. 干旱荒漠区土壤有机质空间变异特征. 生态学报, 2004, 24(12): 2 776-2 781
- [9] 王宗明, 张柏, 宋开山, 刘殿伟, 黄健, 张惠琳. 东北平原典型农业县农田土壤养分空间分布影响因素分析. 水土保持学报, 2007, 21(2): 73-77
- [10] 黄智刚, 李保国, 胡克林. 丘陵红壤蔗区土壤有机质的时空变异特征. 农业工程学报, 2006, 22(11): 58-63
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 1999
- [12] 张朝生, 章申, 何建邦. 长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究——地统计学方法. 地理学报, 1997, 52(2): 185-192
- [13] 蒋勇军, 袁道先, 谢世友, 李林立. 典型岩溶流域土壤有机质空间变异—以云南小江流域为例. 生态学报, 2007, 27(5): 2 040-2 047
- [14] Gupta RK, Brann DE. Modeling spatial variability of soil chemical parameters for site-specific farming using stochastic methods. Water, Air, and Soil Pollution, 1999, 110: 17-21
- [15] 冯娜娜, 李廷轩, 张锡洲, 王永东, 夏建国. 不同尺度下低山茶园土壤有机质含量的空间变异. 生态学报, 2006, 26(2): 349-356
- [16] 姜勇, 张玉革, 梁文举, 闻大中, 陈文波. 沈阳市苏家屯区耕层土壤养分空间变异性研究. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1 673-1 676
- [17] 王清奎, 汪思龙, 高洪, 刘艳, 于小军. 土地利用方式对土壤有机质的影响. 生态学杂志, 2005, 24(4): 360-363
- [18] 胡克林, 余艳, 张凤荣, 王茹. 北京郊区土壤有机质含量的时空变异及其影响因素. 中国农业科学, 2006, 39(4): 764-771
- [19] 程先富, 史学正, 于东升, 潘贤章. 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. 应用与环境生物学报, 2004, 10(1): 64-67

Spatial Variability of Soil Organic Matter and Its Influencing Factors at County Scales

SONG Sha, LI Ting-xuan, WANG Yong-dong, ZHANG Xi-zhou

(College of Environmental and Resource Science, Sichuan Agricultural University, Yaan, Sichuan 625014, China)

Abstract: Study on the spatial variability of soil organic matter can provide useful information for promoting land productivity. In this investigation method of geostatistics combined with GIS was used to analyze the spatial variation characteristics of soil organic matter and its influencing factors in Shuangliu County of Sichuan Province, China. The results indicated that soil organic matter was 29.72 g/kg which was more than middle level, and its coefficient of variation was 30.11%. The spherical variogram model fitted the sample variograms very well, and it was highly spatial correlated, the spatially dependent range was 91.10 km, $C_0/(C_0+C)$ was 12.67%. Through ordinary Kriging interpolation, the soil organic matter in the north was highest and was reducing towards the southeast. SSR test indicated that the soil organic matter was significantly different depending on soil types and terrain conditions. The land use and fertilization application rate strongly affected soil organic matter, and its increasing trend was attributed to straw manure.

Key words: Soil organic matter, Spatial variability, Influential factors, Geostatistics, GIS