

基于多元分析的岷江下游土壤有机碳密度空间分布及影响因素研究^①

赖晶晶^{1,2}, 张世熔^{1*}, 刘艳婷¹, 李 婷², 徐小逊¹, 姚 苹^{1,2}, 蒲玉琳²

(1 四川农业大学环境学院, 成都 611130; 2 四川农业大学资源学院, 成都 611130)

摘 要:采用传统统计、灰色关联度、逐步回归和通径分析相结合的多元分析方法对岷江下游 1 138 个样点的表层 (0~20 cm) 土壤有机碳密度及其影响因素进行研究。结果表明, 该区表层土壤有机碳密度在 0.89~6.49 kg/m² 之间, 均值为 3.24 kg/m²。其在空间上呈不规则的斑块状分布, 具中等空间相关性, 表现出中部浅丘区高而西北和东部高丘区低的分布趋势。土地利用类型、土壤酸碱度 (pH)、成土母质、地貌类型、坡度和土壤质地均是影响土壤有机碳密度的主要因素。其中, 土地利用类型、pH、地貌类型、坡度和土壤质地与有机碳密度呈极显著相关。灰色关联度的分析表明与土壤有机碳密度关联最为密切的是地貌类型, 其次是 pH 和成土母质, 逐步回归和通径分析的结果均表明地貌类型是最主要因素, 成土母质和 pH 次之。综合比较以上方法, 得出地貌类型、成土母质和 pH 为影响岷江下游研究区表层土壤有机碳密度的主要因素。

关键词:有机碳密度; 影响因素; 灰色关联度; 逐步回归; 通径分析

中图分类号: S159

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库, 土壤有机碳是土壤碳库的重要组成部分^[1]。土壤有机碳不仅直接影响土壤肥力和作物产量, 其与大气中碳的周转对全球碳平衡格局及气候变化也有重要影响^[2]。通过研究表层土壤有机碳密度的空间分布和影响因素可以更为有效地为土壤有机碳的评价提供科学依据^[3-4], 这对环境监测、生产管理和预测陆地生态系统与气候变化之间的反馈效应都有一定的参考价值^[5]。

近年来, 灰色关联度法因其计算量小且适用样本量少或无规律的样本数据, 已在土壤质量评价方面得以应用^[6-7]; 逐步回归分析是通过明确各因素影响研究主体的相对重要性筛选出主要因素, 构造“最优”回归方程的一种方法^[8]; 而通径分析是回归分析的拓展, 可用于分析多个自变量与因变量的线性关系, 判断回归模型是否存在多重共线性及其多重共线性的来源和强弱, 明确各影响因素间的相互重要性^[9]。采用传统统计、灰色关联度、逐步回归和通径分析相结合的多元分析方法研究土壤有机碳密度的空间分布和影响因素, 将更全面地揭示其空间变异规律。

目前, 已有研究采用传统统计和地统计学相结合

的方法对土壤有机碳密度的影响因素进行探讨^[10-12], 但在流域尺度下将传统统计、灰色关联度、逐步回归和通径分析相结合分析土壤有机碳密度影响因素的研究还鲜见报道。岷江下游地区以丘陵地貌为主, 人口稠密, 是四川经济发展速度较快的区域之一。本文采用多元分析方法对该流域表层土壤有机碳密度的影响因素进行分析, 揭示其空间变异规律, 以期为该区的土壤生产管理和环境监测提供基础数据和决策依据, 也为综合分析表层土壤有机碳密度影响因素提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

岷江下游流域 (103°40'~104°03'E, 30°06'~30°27'N) 位于四川盆地与川西北丘状高原山地过渡地带前缘, 地处古隆中新陷雁行褶皱带内。该区地势西北高、东南低, 岷江由北向南纵贯区境, 东西两侧多为圆状浅丘, 中部构成冲积平原。其地貌两侧是丘陵, 中部为平原。区内东西两侧土壤由侏罗系和白垩系页岩、砂岩坡残积物发育而成, 中部土壤主要由第四系河流冲

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401328)和四川省科技支撑计划项目(2014NZ0044)资助。

* 通讯作者(rsx01@163.com)

作者简介: 赖晶晶(1990—), 女, 江西赣州人, 主要从事土壤肥力评价研究。E-mail: Lcici1031@163.com

积物和老冲积物发育而成。土壤类型主要有水稻土、潮土、紫色土和黄壤。土地利用类型主要为耕地、林地和园地,其中耕地以水田和旱地为主。区内作物主要是水稻、玉米、小麦、油菜,为岷江下游的典型农业区。区域属亚热带湿润季风气候,冬无严寒,夏无酷暑,年均温 16.8°C ,无霜期长,年平均降水量 955.2 mm ,年日照时数 $1\ 106.8\text{ h}$ 。研究区域面积为 705 km^2 ,境内有一条铁路,两条高速公路(成雅、成乐)和一条省级公路。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集及分析 结合研究区卫星影像图、地形图、成土母质分布图、第二次土壤普查的土壤类型分布图及其 67 个原样点分布图和剖面记载表等资料,在考虑样点代表性和空间分布均匀性的基础上,按网格法和分层抽样法进行区域尺度下的样点设计,于 2007 年调查样点 1 138 个(图 1)。采样同时记录每个采样点的地理坐标、海拔、土壤类型、土地利用方式等信息。每个样点土样由同一地块的 3 个表层土壤(0~20 cm)样品混合组成。土壤样品经自然风干,去掉植物残体和石块,研磨过 2 mm 筛,采用重铬酸钾容量法-外加热法测定其有机碳含量。

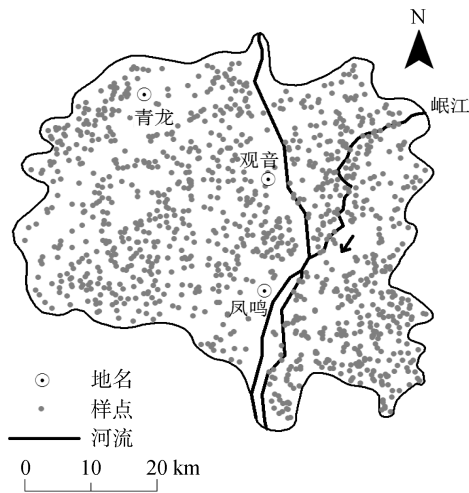


图 1 样点分布图

Fig. 1 Distribution map of sampling points

1.2.2 有机碳密度计算 某一土层 i 的有机碳密度(SOCD_i , kg/m^2)的计算公式为^[13]:

$$\text{SOCD}_i = (1 - \delta\%) C_i \times B_i \times L_i / 100 \quad (1)$$

式中: $\delta\%$ 为直径大于 2 mm 的石砾含量(体积百分比), C_i 为土壤有机碳含量(g/kg), B_i 为土壤体积质量(g/cm^3), L_i 为土层厚度(cm)。

1.2.3 数据统计分析 运用 SPSS19.0 软件对研究区 1 138 个表层土壤样本的 SOCD 进行描述性统计,采用 K-S 检验分析土壤有机碳密度分布的正态性,

通过方差分析、相关回归分析、逐步回归分析和通径分析,研究岷江下游流域土壤有机碳密度实测值与土地利用类型、土壤酸碱度、成土母质、地貌类型、坡度和土壤质地等因素及各因素之间的相关性。其中平均数的比较采用最小显著差数法(LSD)。土地利用类型、成土母质、地貌类型和土壤质地为定性分类变量,研究中采用哑变量进行赋值。在 ArcGIS 10.0 平台上绘制样点分布图,利用 DEM 计算获取坡度数据。在 ArcGIS 10.0 平台上,制作样点分布图;利用 DEM 计算坡度;进行趋势效应分析,获得最佳变异函数模型,通过普通克里格插值获取土壤有机碳密度空间分布图。

1.2.4 灰色关联度分析 灰色关联度分析根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密,通过定量各序列之间的联系,确定相关程度最大的因素。序列作为系统行为的映射量,间接地表征系统行为。本研究采用区域土壤有机碳密度实测值作为参考序列 X_0 ,将相关影响因素的赋值作为比较序列 X_i ,计算公式如下^[14]:

$$X_i(K) = (X_i'(K) - \bar{X}_i) / S_i \quad (2)$$

式中: $X_i'(K)$ 为各影响因素的原始数据, $\bar{X}_i$ 为同一因素的平均值, S_i 为同一因素的标准差, $X_i(K)$ 为各影响因素原始数据的标准化结果。根据标准化处理结果 X_i 与 X_0 的绝对值,求得灰关联差异信息空间($\Delta_{oi}(K)$)。

$$\Delta_{oi}(K) = |X_0'(K) - X_i'(K)| \quad (3)$$

$$\gamma_{oi}(K) = [\min \min \Delta_{oi}(K) + \xi \max \max \Delta_{oi}(K)] / [\Delta_{oi}(K) + \xi \max \max \Delta_{oi}(K)] \quad (4)$$

$$\gamma_{oi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_{oi}(K) \quad (5)$$

根据公式(4)求得灰关联系数 $\gamma_{oi}(K)$ 。式中: $\min \min \Delta_{oi}(K)$ 、 $\max \max \Delta_{oi}(K)$ 分别为差异空间的最小值和最大值, ξ 为分辨系数(取 $\xi = 0.5$)。再根据公式(5)计算出各影响因素的灰色关联度。

1.2.5 逐步回归分析 土壤有机碳密度受多个因素的共同影响,但众多影响因素并非都能进入线性回归模型,逐步回归分析将每个影响因素不断进入回归方程,再次判断是否存在刻意剔除出方程的影响因素,从而筛选出对有机碳密度影响最大的因素。多元线性回归的数学模型是:

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_p X_p + B \quad (6)$$

式中: a 为模型中的未知参数, B 为随机误差。

1.2.6 通径分析 通径分析通过分解自变量与因变量之间的表面直接相关性,研究自变量对因变量的

直接和间接重要性,是一种用于分析多个自变量与因变量之间的线性关系的多元统计分析方法,是回归分析的拓展^[15]。

$$R_{iy}=P_{iy}+I_{iy}$$

(7)

$$I_{iy}=\sum_{i\neq j}R_{ij}\times P_{jy}$$

(8)

式中： R_{iy} 为自变量 X_i 与 Y 之间的简单相关系数， P_{iy} 为 X_i 与 Y 之间的直接通路系数，即 X_i 与 Y 标准化后的偏相关系数，表示 X_i 对 Y 的直接影响效应； I_{iy} 为间接通路系数，表示 X_i 通过其他变量对因变量 Y 的总间接影响效应。

表 1 土壤有机碳密度统计特征

Table 1 Descriptive statistical characteristics of soil organic carbon density

样点数(<i>n</i>)	分布类型	最小值(kg/m ²)	最大值(kg/m ²)	均值(kg/m ²)	标准差	偏度	峰度	<i>P</i>
1 138	正态	0.89	6.49	3.24	1.06	0.29	-0.47	0.06

2.2 空间分布特征

利用 ArcGIS10.0 软件的地统计分析功能对土壤有机碳密度进行趋势效应分析，结果表明研究区土壤有机碳密度分布在南-北方向和东-西方向皆呈二阶趋势效应。通过变异函数的套合模型模拟，得到的最优模型为指数模型（表 2）。结果表明，该区土壤有机碳密度的分布长轴方向约为北-南向，具有显著的异向性特征，随机变异所占比例为 47.96%，土

2 结果与讨论

2.1 土壤有机碳密度的描述性统计特征

运用 SPSS19.0 软件对土壤样本的有机碳密度值进行描述性统计，经单一样本 K-S 检验，结果表明研究区 1 138 个样点的表层土壤有机碳密度呈正态分布（ $P > 0.05$ ），从偏度值和峰度值可知其分布呈右偏态且较为平缓，土壤有机碳密度值在 0.89 ~ 6.49 kg/m² 之间，均值为 3.24 kg/m²（表 1）。根据 20 世纪 80 年代第二次土壤普查的有机质含量分级标准，该区表层土壤有机碳含量属于中上水平（20.1 ~ 30.0 g/kg）。

壤有机碳密度具有中等空间相关性，空间变异以随机变异为主。采用指数模型拟合结果的参数进行普通克里格插值，得到土壤有机碳密度的空间分布图（图 2）。结果表明，土壤有机碳密度总体上呈不规则的斑块状分布，高值区（> 4.00 kg/m²）主要位于中部低丘区，低值区（<2.50 kg/m²）位于西北和东部高丘区域，这表明其受结构性因素和随机性因素的双重影响。

表 2 土壤有机碳密度半方差函数模型及相关参数

Table 2 Theory model and parameters of semi-variogram for soil organic carbon density

模型	变程 (km)		长轴方位角 (°)	块金值 <i>C</i> ₀	基台值 <i>C</i> ₀ + <i>C</i>	块金值/基台值 <i>C</i> ₀ /(<i>C</i> ₀ + <i>C</i>)
	长轴	短轴				
指数	20.12	10.97	13.2	0.601	1.253	47.96%

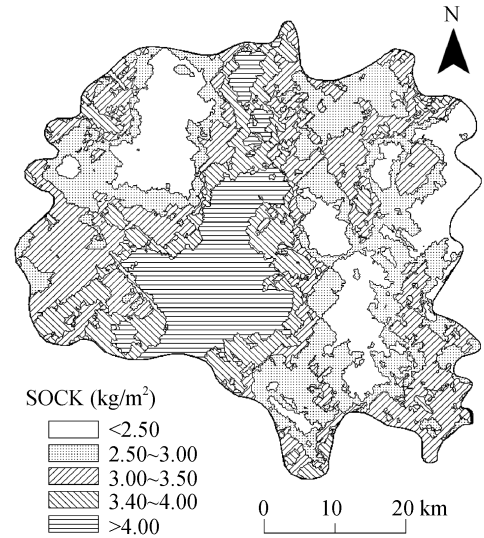


图 2 土壤有机碳密度空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of topsoil organic carbon density

2.3 影响因素分析

土壤有机碳密度的变化实质是其碳输入和输出动态平衡的结果，它受结构性因素和随机性因素的共同影响，其影响因素随空间尺度的不同而改变^[16]。岷江下游地区社会经济和农业生产发展迅速，土地利用方式和土壤酸碱度是自然条件和人类活动的综合反映，直接影响土壤有机碳密度的分布。区内地貌以丘陵为主，样点在低丘、中丘和高丘皆有分布，成土母质、地貌类型、坡度和土壤质地都与该区土壤有机碳密度有一定关系。本文根据研究区的实际情况主要探讨土地利用类型、土壤酸碱度、成土母质、地貌类型、坡度和土壤质地对土壤有机碳密度的影响。

2.3.1 土地利用类型 土地利用类型主要通过控制有机碳的输入来源及其积累和分解速率影响土壤有机碳密度^[17]。研究区 4 种不同土地利用类型的土

壤其有机碳密度存在极显著差异 ($P < 0.05$), 主要表现为水田的土壤有机碳密度 (4.68 kg/m^2) 显著高于菜地、果园和旱地, 但菜地、果园和旱地之间均无显著差异 ($P > 0.05$)。这是由于该区菜地、果园和旱地因在轮作方式下土壤透水通气性好, 长期处于好氧状态下土壤有机质易于分解^[13], 因此尽管其有机肥施用量较高, 但土壤有机碳不易累积; 水田因长期处于淹水的嫌气状态, 土壤有机质分解缓慢, 因而有机碳易于累积使其含量较高。菜地、果园和旱地在区内分布较集中, 其土壤理化性质、地表植被覆盖情况、人为干扰程度相似, 土壤有机碳密度无显著差异^[18]。

2.3.2 土壤酸碱度 土壤酸碱度 (pH) 是土壤的重要化学性质, 对土壤微生物的活性和有机质的形成及分解均有着重要作用, 与土壤有机碳密度关系密切^[19]。研究区土壤 pH 范围在 4.34 ~ 9.01, 现将它们按 < 5.0 、 $5.0 \sim 6.5$ 、 $6.5 \sim 7.5$ 、 $7.5 \sim 8.5$ 、 > 8.5 分为强酸性、酸性、中性、碱性、强碱性土壤。结果表明, pH 与土壤有机碳密度呈极显著相关 ($P < 0.001$), 酸性和中性土壤之间的有机碳密度差异不显著, 但均显著高于其他的 pH 范围 (表 3)。

表 3 不同 pH、成土母质和土壤质地下土壤有机碳密度值与方差分析

Table 3 Mean and variance analyses of soil organic carbon densities in different pH values, parent materials and textures

影响因素	划分	样点数	密度值 (kg/m^2)
pH	< 5.0	5	$2.41 \pm 0.47 \text{ bc}$
	$5.0 \sim 6.5$	353	$3.46 \pm 1.03 \text{ a}$
	$6.5 \sim 7.5$	225	$3.53 \pm 1.01 \text{ a}$
	$7.5 \sim 8.5$	467	$3.15 \pm 1.04 \text{ b}$
	> 8.5	88	$2.15 \pm 0.62 \text{ c}$
成土母质	老冲积物	285	$3.44 \pm 1.06 \text{ a}$
	河流冲积物	384	$3.31 \pm 1.07 \text{ a}$
	砂质泥岩	352	$3.09 \pm 1.01 \text{ b}$
	泥质砂岩	116	$2.98 \pm 1.09 \text{ b}$
土壤质地	砂壤	78	$2.90 \pm 0.98 \text{ c}$
	轻壤	150	$2.92 \pm 1.08 \text{ c}$
	中壤	117	$3.07 \pm 1.09 \text{ bc}$
	重壤	439	$3.24 \pm 1.02 \text{ b}$
	黏土	354	$3.51 \pm 1.05 \text{ a}$

注: 密度值采用平均值 $\pm$ 标准差表示。多重比较采用最小显著差数法, 同一影响因素下数据小写字母不同表示差异达到 $P < 0.05$ 显著水平。

2.3.3 成土母质 成土母质作为土壤形成的物质基础直接影响着土壤的成土过程, 是决定土壤结构和有机碳最初含量与分布特征的主要因素, 与土壤的通气性、保肥保水性及耕作难易性关系密切, 不同成土

母质的土壤其有机碳密度存在差异^[20]。该区土壤主要由第四系成土母质发育而成, 统计结果表明 (表 3), 老冲积物和河流冲积物上发育的土壤其有机碳密度值差异不明显, 但均显著高于砂质泥岩和泥质砂岩上发育的土壤 ($P < 0.05$)。产生这种差异的原因主要是该区砂质泥岩和泥质砂岩上发育的土壤保肥保水能力较差, 有机质易分解, 土壤有机碳储量少且难积累, 而更新统老冲积物和全新统近代河流冲积物上发育的土壤养分含量丰富且质地黏重, 土壤黏粒及其吸附的有机质所形成的团粒结构有利于有机碳的长期积累^[21], 因而土壤有机碳密度较大。在相同母质下, 不同质地间表层土壤有机碳密度也存在差异。例如, 同为河流冲积物上发育的土壤, 黏土表层土壤有机碳密度为 3.63 kg/m^2 , 显著高于重壤 (3.31 kg/m^2)、中壤 (3.11 kg/m^2)、轻壤 (3.04 kg/m^2) 和砂壤 (3.02 kg/m^2), 而中壤、轻壤和砂壤间无显著差异 ($P < 0.05$)。显然, 在同类母质下, 质地亦可能影响土壤有机碳密度。

2.3.4 地貌类型 地貌类型支配着地表和土壤中水热资源的重新分配, 影响土壤生态系统的物质循环过程, 对土壤有机碳密度有着深远影响^[22]。研究区地貌主要以丘陵为主, 样点在低丘、中丘和高丘皆有分布。分析结果表明 (图 3), 不同地貌条件下土壤有机碳密度差异极显著 ($P < 0.01$), 低丘、中丘和高丘的土壤有机碳密度分别为 3.70 、 3.25 、 2.38 kg/m^2 。土壤有机碳密度随着海拔的升高而降低, 这与不同海拔条件下植被覆盖、土壤侵蚀、耕作制度、成土物质的再分配和景观单元内水分分配差异等有一定关系。土壤侵蚀使研究区内高丘区大量肥沃表土流失, 土壤肥力和植物量降低导致有机碳输入量较低。低丘区多为农用地, 在人为管理下有机肥料投入量大, 土壤有机碳含量较高。

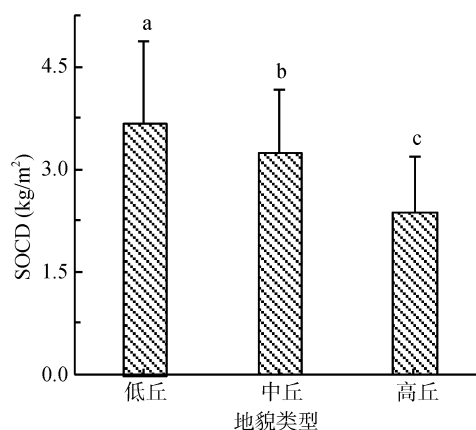


图 3 不同地貌类型下土壤有机碳密度均值与方差分析
Fig. 3 Statistical characters of soil organic carbon densities in different terrains

2.3.5 坡度 坡度通过影响微地形的水土平衡和太阳辐射,一定程度上使不同坡度土壤有机碳密度产生差异^[23]。将坡度用Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ级分别表示 0~5°、5~10°、10~15°、15~20°、20~25°、>25°。分析结果表明,在不同的坡度条件下土壤有机碳密度存在极显著差异 ($P<0.01$)。随着坡度的增加,土壤有机碳密度呈现出在Ⅰ级~Ⅲ级坡度先降低,Ⅲ级~Ⅵ级坡度再升高的趋势(图 4),这是由于在 0~25° 坡度级别内,研究区土壤侵蚀使坡面流失的土壤、水肥集中下坡位,使该位置土壤的有机物质质量增大,利于有机碳的积累,因而土壤有机碳密度随着坡度的增加呈下降趋势;Ⅲ级~Ⅵ级为坡度>25° 区域,农用地较少,多为植被覆盖率高且人类活动少的林地,有机碳密度相对较高。多重比较表明,Ⅰ级(0~5°)与Ⅱ级(5~10°)和Ⅲ级(10~15°)的土壤有机碳密度差异极显著 ($P<0.01$),这和Ⅰ级坡度区域多水田有一定关系,表明土壤有机碳密度受坡度和土地利用类型的共同影响。

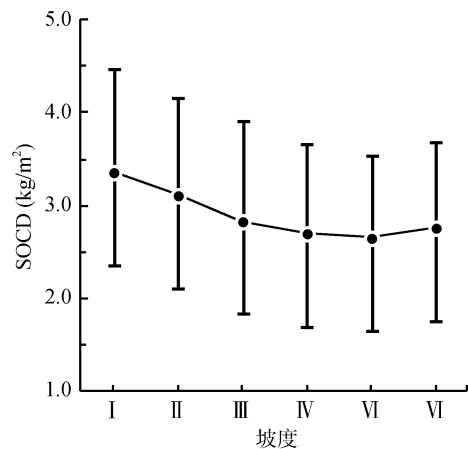


图 4 不同坡度下的土壤有机碳密度均值
Fig. 4 Soil organic carbon densities in different slope gradients

2.3.6 土壤质地 土壤质地对有机碳密度的影响与土壤矿物颗粒组合状况关系密切^[24]。该区土壤质地主要包括砂壤、轻壤、中壤、重壤和黏土。土壤有机碳密度均值比较为黏土>重壤>中壤>轻壤>砂壤(表 3),其中有机碳密度在轻黏土中显著高于其他 4 种质地类型 ($P<0.05$)。这是由于黏土中黏粒矿物含量高,土壤孔隙度相对较小、通气性差,从而缓解有机碳的分解,同时土壤碳与黏粒矿物的相互作用形成如团聚体结构的物理保护,使土壤有机碳不易被微生物或酶分解^[25],因此能够较长期蓄积在土壤中;另一方面,土壤中较高的黏粒含量和粉粒含量增强了土壤的保水能力^[26],促进植物生长,使更多的碳输入到土壤中。此外,研究区内黏土多由老冲积物及河流

冲积物发育而来,用作耕地后因施用有机肥多而土壤有机碳密度高。

2.4 不同因素对土壤有机碳密度的影响程度

土壤有机碳密度受到众多因素的共同影响,土地利用、pH、成土母质、地貌类型、坡度和质地都在不同程度下影响着岷江下游流域的土壤有机碳密度,但传统统计方法难以反映各影响因素的主次性和重要性,因此本文将采用灰色关联度法和逐步回归分析法进一步探讨各影响因素对土壤有机碳密度的影响程度,运用通径分析法研究各因素间的相互重要性及其对土壤有机碳密度的直接和间接重要性。

2.4.1 灰色关联度分析 为探讨影响土壤有机碳密度的主要因素,剔除次要因素,首先采用灰色关联度分析法进行研究。根据公式(1~5)求得土壤有机碳密度与各影响因素的灰色关联度,并进行排序。从表 4 可以看出,在所选取的影响因素中,与土壤有机碳密度关联最为密切的是地貌类型,其次是 pH 和成土母质。地貌类型在研究区内很大程度上影响着人类活动、土地利用类型、pH、成土母质和土壤质地的差异,因其反映的环境信息量大,对土壤有机碳密度产生的空间分布差异解释能力较强^[27]。岷江下游研究区频繁的农业活动受到成土母质的限制较大,同时人类活动对土壤 pH 产生了深刻影响,因此 pH 和成土母质也是该区影响土壤有机碳密度的主要因素。

表 4 土壤有机碳密度与影响因素的灰色关联度及排序
Table 4 Gray correlation degrees and sorting of soil organic carbon densities with influence factors

影响因素	关联度	排序
土地利用类型	0.736	6
pH	0.851	2
成土母质	0.815	3
地貌类型	0.856	1
坡度	0.813	4
土壤质地	0.738	5

2.4.2 逐步回归分析 本文主要选择了土地利用、pH、成土母质、地貌类型、坡度和土壤质地 6 个影响因子进行研究,分别设为 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 和 X_6 ,采用逐步回归分析法建立逐步回归方程(表 5)。为了充分反映回归模型的可靠性,确定建立逐步回归方程的显著性水平需要达到 0.05。按照所设定的 $P<0.05$ 一定进入方程, $P>0.1$ 一定不进入方程的原则, X_2 、 X_3 和 X_4 先后进入方程,最终的回归方程中常数项、 X_2 、 X_3 和 X_4 的偏相关系数 t 的显著性分别为 0.000、0.000、0.003 和 0.006,偏相关系数是 X_4

表 5 土壤有机碳密度与影响因素逐步回归方程
Table 5 Stepwise regression equations of soil organic carbon densities with influence factors

逐步回归方程	<i>F</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
$Y = 4.113 - 0.269X_2$	76.584	0.251	0.000
$Y = 4.294 - 0.246X_2 - 0.113X_3$	44.608	0.270	0.000
$Y = 4.423 - 0.241X_2 - 0.098X_3 - 0.125X_4$	32.417	0.281	0.000

(-2.742)> X_3 (-2.950)> X_2 (-7.695),表明 X_2 (pH)、 X_3 (成土母质) 和 X_4 (地貌类型) 都是影响有机碳密度的重要因素,而又以地貌类型为影响土壤有机碳密度的最主要因素,成土母质和 pH 次之。

表 6 影响因素对土壤有机碳密度值的途径分析
Table 6 Path analysis of relative values to soil organic carbon densities under influence factors

影响因素	相关系数	途径系数	间接途径系数			合计
			X_2	X_3	X_4	
X_2	-0.251**	-0.225	-	-0.018 7	-0.007 7	-0.026 4
X_3	-0.150**	-0.087	-0.048 4	-	-0.014 7	-0.063 1
X_4	-0.117**	-0.080	-0.021 6	-0.016 0	-	-0.037 6

综合比较灰色关联度分析、逐步回归分析和途径分析 3 种方法,得出 6 个影响因素中以 pH、成土母质和地貌类型为主。灰色关联度的分析表明,与土壤有机碳密度关联最为密切的是地貌类型,其次是 pH 和成土母质。逐步回归和途径分析的结果均表明地貌类型是影响表层土壤有机碳密度的最主要因素,成土母质和 pH 次之。由于进行灰色关联度分析时仅通过比较参考序列和比较序列的曲线几何形状的相似程度定量关联程度,而逐步回归和途径分析在考虑数据的分布特征后进行计算,因此灰色关联度分析与逐步回归和途径分析在对成土母质和 pH 的影响程度大小上有不同的分析结果^[14],但均以地貌类型、成土母质和 pH 为表层土壤有机碳密度的主要影响因素。

3 结论

1) 本研究区位于人口稠密的岷江下游,1 138 个表层(0 ~ 20 cm)土壤样本中有机碳密度呈正态分布,其值为 3.24 kg/m²,空间上呈不规则的斑块状分布,具有中等空间相关性,表现出中部浅丘区高而西北和东部高丘区低的分布趋势。

2) 该区土壤有机碳密度受到结构性因素和随机性因素的共同影响,土地利用类型、土壤酸碱度、成土母质、地貌类型、坡度和土壤质地与其关系密切,其中土地利用类型、土壤酸碱度、地貌类型、坡度和土壤质地与有机碳密度呈极显著相关,成土母质对表

2.4.3 途径分析 对各影响因素进行逐步回归分析后,再对 pH、成土母质和地貌类型与土壤有机碳密度进行途径分析。由表 6 可知, X_4 (地貌类型)是对有机碳密度直接影响中作用最大的因素, X_3 (成土母质)次之, X_2 (pH)的直接作用最小。分析各个间接途径系数发现, X_2 (pH)通过 X_4 (地貌类型)对有机碳密度的间接作用最大,其间接途径系数 $R_{24} \times P_{4Y} = -0.007 7$ 。这可能是因为土壤 pH 受人类活动的影响较大,而不同地貌条件下的土壤受到的人为干扰程度差异较明显,因此土壤 pH 在不同的地貌类型区对土壤有机碳密度的影响较大^[28]。

层土壤有机碳密度的影响达显著水平。

3) 灰色关联度的分析表明,与土壤有机碳密度关联最为密切的是地貌类型,其次是 pH 和成土母质。逐步回归和途径分析的结果均表明地貌类型是影响土壤有机碳密度的最主要因素,成土母质和 pH 次之。综合比较以上 3 种方法,得出土地利用类型、pH、成土母质、地貌类型、坡度和质地中以地貌类型、成土母质和 pH 为影响岷江下游研究区表层土壤有机碳密度的主要因素。

参考文献:

- [1] Perruchoud D, Walthert L, Zimmermann S, et al. Contemporary carbon stocks of mineral forest soils in the Swiss Alps[J]. Biogeochemistry, 2000, 50(2): 111-136
- [2] Puget P, Lal R. Soil organic carbon and nitrogen in a Mollisol in central Ohio as affected by tillage and land use[J]. Soil and Tillage Research, 2005, 80(1-2): 201-213
- [3] Korsath A. Relations between nitrogen leaching and food productivity in organic and conventional cropping systems in a long-term field study[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2008, 127(3): 177-188
- [4] Bajcs N H. Total carbon and nitrogen in soils of the world[J]. European Journal of Soil Science, 2014, 65(1): 10-21
- [5] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. Ecological Applications, 2000, 10(2): 423-436
- [6] Gau H S, Hsieh C Y, Liu C W. Application of grey correlation method to evaluate potential groundwater recharge sites[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2006, 20(6): 407-421

- [7] 张同娟, 杨劲松, 刘广明, 等. 基于灰色关联度法河口地区土壤盐分影响因子分析[J]. 土壤通报, 2010, 41(4): 793–796
- [8] Shacham M, Brauner N. Application of stepwise regression for dynamic parameter estimation[J]. Computers and Chemical Engineering, 2014, 69(1 016): 26–38
- [9] 刘广深, 徐冬梅, 许中坚, 等. 用通径分析法研究土壤水解酶活性与土壤性质的关系[J]. 土壤学报, 2009, 40(5): 756–762
- [10] Zhang C S, McGrath D. Geostatistical and GIS analyses on soil organic carbon concentrations in grassland of southeastern Ireland from two different periods[J]. Geoderma, 2004, 119(3): 261–275
- [11] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. 土壤学报, 2004, 41(5): 687–699
- [12] Selma Y K. Effects of afforestation on soil organic carbon and other soil properties[J]. Catena, 2014, 123(10): 62–69
- [13] Scott N A, Tare K R, Giltrap D J. Monitoring land-use effects on soil carbon in New Zealand: Quantifying baseline soil carbon stocks[J]. Environmental Pollution, 2002, 116(1): 167–186
- [14] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 5 版. 北京: 科学出版社, 2010: 62–63
- [15] 刘广深, 徐冬梅, 许中坚, 等. 用通径分析法研究土壤水解酶活性与土壤性质的关系[J]. 土壤学报, 2003, 40(5): 756–762
- [16] 姜春, 吴志峰, 钱乐祥, 等. 广东山区土壤有机碳空间变异的尺度效应[J]. 生态学报, 2013, 33(16): 5 118–5 125
- [17] 张勇, 史学正, 于东升, 等. 滇黔桂地区土壤有机碳密度变异的影响因素研究[J]. 土壤学报, 2009, 46(3): 526–531
- [18] Nishimura S, Yonemura S, Sawamoto T, et al. Effect of land use change from paddy rice cultivation to upland crop cultivation on soil carbon budget of a cropland in Japan[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2008, 125(1–4): 9–20
- [19] David M, Zhang C S. Spatial distribution of soil organic carbon concentrations in grassland of Ireland[J]. Applied Geochemistry, 2003, 18(10): 1 629–1 639
- [20] Tan Z X, Lal R, Smeck N E, et al. Relationships between surface soil organic carbon pool and site variables[J]. Geoderma, 2004, 121(3–4): 187–195
- [21] 唐晓红, 邵景安, 高明, 等. 保护性耕作对紫色水稻土团聚体组成和有机碳储量的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(5): 1 027–1 032
- [22] 李林海, 郜二虎, 梦梦, 等. 黄土高原小流域不同地形下土壤有机碳分布特征[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 179–187
- [23] Nelson J D J, Schoenau J J, Malhi S S. Soil organic carbon changes and distribution in cultivated and restored grassland soils in Saskatchewan[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2008, 82(2): 137–148
- [24] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. Plant and Soil, 2002, 241(2): 155–176
- [25] Syswerda S P, Corbin A T, Mokma D L, et al. Agricultural management and soil carbon storage in surface vs. deep layers[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 75(1): 92–101
- [26] Gruneberg E, Ziche D, Wellbrock N. Organic carbon stocks and sequestration rates of forest soils in Germany[J]. Global Change Biology, 2014, 20(8): 2 644–2 662
- [27] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 川中丘陵县域土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 177–185
- [28] Xiao K C, Xu J M, Tang C X, et al. Differences in carbon and nitrogen mineralization in soils of differing initial pH induced by electrokinesis and receiving crop residue amendments[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 67 (1 016): 70–84

Spatial Distribution and Its Influence Factors of Soil Organic Carbon Density of Lower Reaches of Minjiang River Based on Multivariate Analysis Method

LAI Jingjing^{1,2}, ZHANG Shirong^{1*}, LIU Yanting¹, LI Ting², XU Xiaoxun¹, YAO Ping^{1,2}, PU Yu-lin²

(1 *College of Environment Sciences, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China;*

2 *College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China*)

Abstract: Spatial distribution and its influence factors of topsoil (0-20 cm) organic carbon density (SOCD) of the Lower Reaches of Minjiang River were studied by the combination of traditional statistical analysis, gray related analysis, stepwise regression analysis and path analysis. SOCD ranged from 0.89 to 6.49 kg/m² with a mean value of 3.24 kg/m². Its overall distribution displayed irregular plaque-shaped, with a moderate spatial correlation, and SOCD was higher in the central low hilly than northeastern and eastern high hilly area. Among the influence factors, it showed extremely significant correlations with the land use, soil pH, topography, slope gradient and soil texture. Gray related analysis indicated that the highest correlation degree of SOCD with terrain, and followed by soil pH and soil parent material. Stepwise regression analysis combined with path analysis showed that terrain was the most significant influence factor, followed by soil parent material and pH. Therefore, terrain, soil parent material and pH were the main influence factors of topsoil organic carbon density in the lower reaches of Minjiang River.

Key words: Soil organic carbon density; Influence factor; Gray related analysis; Stepwise regression analysis; Path analysis