

唐亮,何明珠,白光祖,等.甘肃省中药材主产区陇西县土壤有机碳空间分布[J].中国沙漠,2020,40(6):212-222.

# 甘肃省中药材主产区陇西县 土壤有机碳空间分布

唐亮<sup>1,2</sup>,何明珠<sup>1</sup>,白光祖<sup>1</sup>,赵鹏善<sup>1</sup>,任建新<sup>3</sup>,许华<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院,甘肃兰州730000;2.中国科学院大学,北京100049;3.甘肃农业大学,甘肃兰州730070)

**摘要:**在2018年8月对陇西的200个采样点进行调查,利用相关性分析、方差分析、主成分分析、地统计分析,对采样点进行分析,探讨了陇西县土壤有机碳密度及其储量的空间分布特征,以及气候、地形、土地利用与土壤有机碳密度的关系。结果表明:(1)陇西县土壤0~50 cm层有机碳总量为 $6.29\pm 2.41$  Tg,有机碳密度为 $2.67\pm 1.02$  kg·m<sup>-2</sup>。其中0~10、10~30、30~50 cm土层的有机碳密度分别为 $0.63\pm 0.17$ 、 $1.10\pm 0.38$ 、 $0.93\pm 0.48$  kg·m<sup>-2</sup>,有机碳储量分别为 $1.49\pm 0.41$ 、 $2.58\pm 0.90$ 、 $2.21\pm 1.11$  Tg。(2)气温、降水量、海拔、汇流动力指数与各土层土壤有机碳密度都具有显著相关性;坡度、地形起伏度、地表粗糙度随着土壤深度的增加与土壤有机碳密度相关性逐渐减小,以至在30~50 cm土层土壤中不具有相关性;随着土壤深度的增加,地形湿度指数与有机碳密度的相关性逐渐增强,并在30~50 cm土层土壤中表现出显著负相关性。(3)土壤有机碳密度的空间分布特征为:从中部渭河平原到北部的丘陵地带和南部的山地区域,随着海拔的升高而逐渐升高,并且北山的土壤有机碳密度比南山高,渭河流域形成的河谷平原有机碳密度较低,各土层各等级土壤有机碳密度在各个乡镇中的分布表现出显著差异性。人均耕地面积较大的乡镇土壤有机碳密度较低,经济作物播种面积占比较大的乡镇土壤有机碳密度较高,中药材种植区单位面积投入较大的乡镇土壤有机碳密度较高。

**关键词:**有机碳密度;有机碳储量;主成分回归克里金模型;复合地形因子

文章编号:1000-694X(2020)06-212-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00081

中图分类号:S151.9

文献标志码:A

## 0 引言

土壤有机碳库是陆地生态系统的重要碳库,可以有效地对温室效应和全球气候变化作出调控<sup>[1]</sup>。土壤有机碳含量是反映土壤肥力的重要指标,对于提高土壤质量、维持和改善农作物生产、减少大气二氧化碳浓度具有重要作用,是维持土壤肥力可持续发展的重要保证<sup>[2]</sup>。而农田土壤有机碳库是各个生态系统中最活跃和最重要的土壤有机碳库,不仅能维持碳循环平衡,还能对人类活动的干扰做出调节,可以起到协调土壤养分和水分的功能,是农作物优质、高产的物质保障<sup>[3]</sup>。中国农业利用土壤有机碳库约为15 Pg<sup>[4]</sup>。近20年中国大陆农田土壤中53%~59%的有机碳含量呈增加趋势,30%

呈下降趋势,4%~6%基本持平<sup>[5]</sup>。虽然目前对于农用地土壤有机碳含量的研究较多,但是对于农用地中各个作物区的土壤有机碳的研究较少,对于中药材种植区的研究更少。土壤是中药材生长的基础,土壤中营养元素含量是中药材质量的保证,2002年国家食品药品监督管理局颁布了《中药材生产质量管理规范(试行)》,对中药材产地的土壤环境方面提出了严格的要求,而掌握中药材种植区土壤的质量状况,是中药材产量和品质稳定提升的重要前提。

陇西县是甘肃省乃至全国重要的中药材主产区。独特的气候、土壤和地理优势,为黄芪、党参等中药材的产业种植和发展提供了自然条件。土壤

收稿日期:2020-04-22; 改回日期:2020-08-24

资助项目:国家自然科学基金项目(41671103);宁夏公路建设管理局项目(WMKY1)

作者简介:唐亮(1994—),男,甘肃白银人,硕士研究生,主要从事生态学研究。E-mail: tangliangdyx@163.com

通信作者:何明珠(E-mail: hmzecology@lzb.ac.cn)

肥力是保证陇西县农业与中药材种植业可持续发展的保证,研究该区域的土壤有机碳密度及碳储量有助于制定合理的农业政策,保障该区中药材产业的可持续发展。本文基于该区200个采样点600份土样的有机碳数据,分析土壤有机碳密度及储量的空间分布特征及其影响因素,以期对陇西县中药材主产区的土壤肥力管理和中药材种植业的健康发展提供科学指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

陇西县地处甘肃省东南部、定西市中部、渭河上游,位于 $34^{\circ}50'—35^{\circ}23'N$ 、 $104^{\circ}18'—104^{\circ}54'E$ ,地处陇中黄土高原中部,属典型的大陆性气候,多属温和半干旱区,兼有温寒半湿润区,为农牧气候过渡带,因受地形的影响,可分为温和半干旱区、温凉半干旱区和温寒半湿润区,年平均气温 $6.54^{\circ}C$ (图1)。地貌形态分山地、黄土丘陵地和河谷平原,其中以黄土丘陵所占面积最大。陇西县盛产中药

材70余种,其中野生药材50余种,人工种植20余种,普遍种植的中药材有党参、黄芪、黄芩、甘草、柴胡等<sup>[6]</sup>。

### 1.2 数据采集

土壤数据来自于2018年8月陇西县200个调查点,其中样地布设基于甘肃省测土配方施肥项目在陇西县17个乡(镇)134个自然村已有的200个长期监测样地(图1)。采用GPS仪确定每个样地的经纬度以S形布设4个土壤采样点,两个样点间隔不小于2 m。在每个采样点分别采集0~10、10~30、30~50 cm深度土样,并将4个采样点的分层土壤样品混合装袋并编号,共采集土壤样本600份。在实验室对样本点的土样进行预处理,剔除土样中的杂草、根、砾石,自然风干后,经过2 mm筛,利用重铬酸钾滴定法测定土壤有机碳(SOC)的含量。

$$SOC = \frac{\frac{c \times 5}{V_0} \times (V_0 - V) \times 10^{-3} \times 3.0 \times 1.1}{m \times k} \times 1000 \quad (1)$$

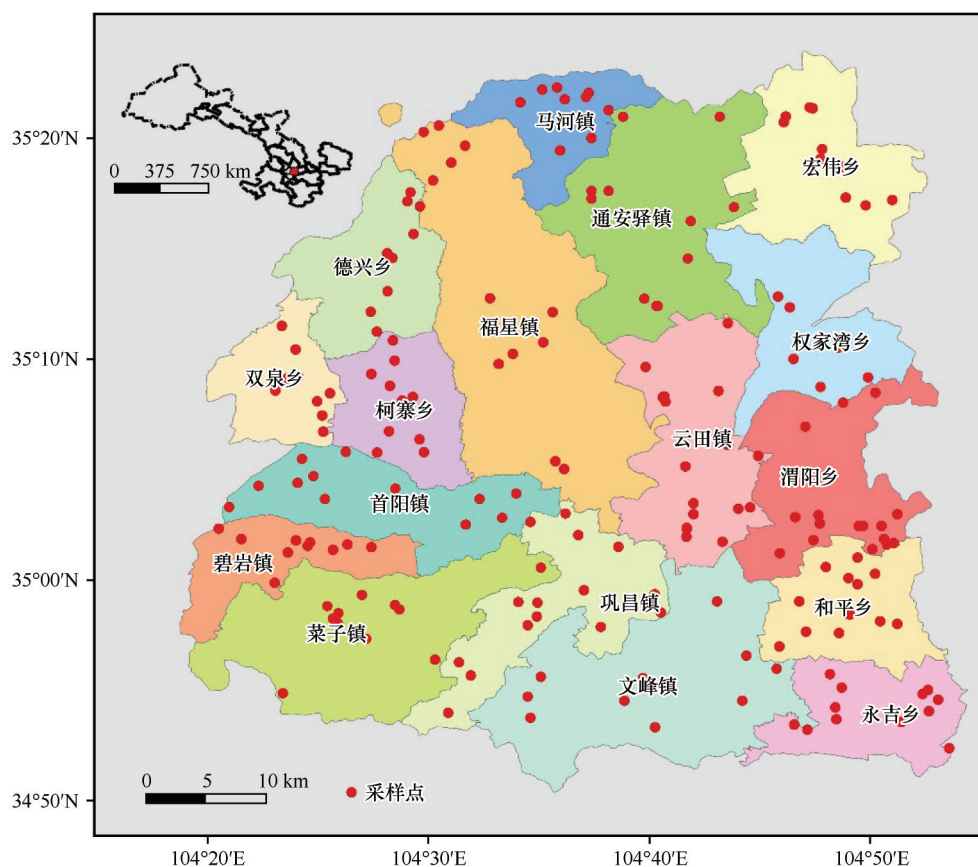


图1 陇西县行政区划及采样点空间分布图

Fig.1 Administrative divisions and spatial distribution of sampling points in Longxi county

式中:  $SOC$  为土壤有机碳含量,  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $c$  为  $0.8000 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \left( \frac{1}{6} \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \right)$  标准溶液的浓度;  $5$  为加入的重铬酸钾标准溶液体积 ( $\text{mL}$ );  $V_0$  为空白滴定的  $\text{FeSO}_4$  体积,  $\text{mL}$ ;  $3.0$  为  $1/4$  碳原子的摩尔质量,  $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;  $10^{-3}$  为将  $\text{mL}$  换算成  $\text{L}$ ;  $1.1$  为氧化修正系数;  $m$  为风干土样质量,  $\text{g}$ ;  $k$  为烘干土换算系数。

$$SOC D_i = SOC_i \times D_i \times E_i \times 10 \quad (2)$$

式中:  $SOC D_i$  为土壤有机碳密度,  $10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;  $SOC_i$  为土壤有机碳含量,  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $D_i$  为容重,  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $E_i$  为土层厚度,  $\text{cm}$ ;

$$SOC D R_i = \sum_{i=1}^n SOC D_i \times S_i \quad (3)$$

式中:  $SOC D R_i$  为各个土层的有机碳储量,  $\text{kg}$ ;  $S_i$  为像元面积,  $\text{m}^2$ 。

气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.nmic.cn>) 提供的 1958—2018 年均值数据。包括气温 (AT) 和降水量 (PR) 2 个因子的数据, 由于在陇西县只有一个气象站点的数据, 不能完全代表整个陇西县的气温和降雨的空间分布。因此采用陇西县周边的 14 个气象站点的数据, 建立气象因子与海拔 (ALT)、经度 (LON)、纬度 (LAT) 之间的回归关系 (式 4、5), 推算每个采样点的气象数值, 之后采用克里金插值方法插值得到陇西县整个区域的气温和降雨的空间分布数据。

$$AT = -0.0058ALT - 0.174LON - 0.429LAT + 51.88 \quad (R^2 = 0.88) \quad (4)$$

$$PR = 0.14ALT + 15.38LON - 43.26AT + 104.78 \quad (R^2 = 0.87) \quad (5)$$

DEM 数据来源于地理空间数据云 ([www.gscloud.cn/](http://www.gscloud.cn/)) 平台下载的 GDEM 30m 空间分辨率的陇西县海拔数据。在获取陇西县的 DEM 海拔数据之后, 利用 ArcGIS 10.6 软件得到整个陇西县基本地形要素数据, 包括海拔、坡度、坡向、地表粗糙度、地形起伏度、平面曲率 (SOA), 复合地形变量包括汇流动力指数 (SPI)、沉积物运移指数 (STI)、地形湿度指数 (TWI)。汇流动力指数是表征径流量对坡面物质搬运能力的指标; 沉积物运移指数是反映地表沉积物运移状况的指标; 地形湿度指数是描述土壤水分分布情况的指标<sup>[7]</sup>。

$$TWI = \ln \frac{A_s}{\tan \left( \beta \times \frac{3.14}{180} \right)} \quad (6)$$

$$SPI = \ln (A_s \times \tan (\beta \times 3.14/180) \times 100) \quad (7)$$

$$STI = \left( \frac{A_s}{22.13} \right)^{0.6} \times \left( \frac{\sin (\beta \times 3.14/180)}{0.0896} \right)^{1.3} \quad (8)$$

式中:  $A_s$  是地表任意一点的比汇水面积 (SCA);  $\beta$  是该点的坡度。以上数据的处理过程利用 ArcGIS 10.6 软件中空间分析、栅格计算器以及水文分析模块综合计算实现。

陇西县经济数据来源于陇西县 2018 年的统计年鉴。

### 1.3 数据处理

利用 R 语言对陇西县土壤有机碳密度进行统计分析。利用单因素方差分析比较不同乡镇、不同土层土壤有机碳密度的差异性; 利用柯尔莫洛夫-斯米诺夫检验 (k-s 检验) 进行土壤有机碳密度的正态分布检验, 利用 Box-Cox() 函数包计算正态性转换系数, 利用 bcPower() 函数包进行正态性转换。

$$NSOC D_i = (SOC D_i^{\lambda_i} - 1) / \lambda_i \quad (9)$$

式中:  $NSOC D_i$  为正态转换后的各个土层土壤有机碳密度;  $SOC D_i$  为各土层土壤有机碳密度;  $\lambda_i$  为各土层转换系数。

首先对环境变量进行标准化处理, 以此来剔除量纲的影响, 之后用 Person 相关系数分析土壤有机碳与气候要素和地形因子之间的相关性, 利用主成分分析对具有相关性的因子进行降维, 利用多元线性回归方程建立有机碳密度与降维之后的主成分变量之间的回归模型。利用 ArcGIS 10.6 地理统计分析工具, 对主成分回归分析的残差值进行克里金插值。

$$PCR K = [(PCA + REKR) \times \lambda + 1]^{1/\lambda} \quad (10)$$

$$PCA = a + b_i \times F_i \quad (11)$$

式中:  $\lambda$  代表正态性转换系数;  $PCR K$  表示基于主成分回归克里金模型预测的土壤有机碳密度值;  $PCA$  表示通过主成分回归模型预测的土壤有机碳密度值;  $REKR$  表示主成分回归残差值经克里金插值预测的土壤有机碳密度值。  $a$  代表回归系数;  $b_i \times F_i$  代表  $n$  个主成分的加权和;  $F_i$  代表第  $i$  个主成分值;  $b_i$  代表主成分回归系数;  $n$  代表主成分数。

在 200 个采样点中随机抽取 30 个样本数据作为验证数据集, 其余的 170 个样本作为训练数据集, 并利用主成分回归克里金插值方法与克里金插值方法进行比较。采用平均误差 (ME)、平均绝对误

差(MAE)、均方根误差(RMSE)以及相对精度(RA)评价模型的预测精度。ME 值大于 0 表示预测值低于实测值,小于 0 代表预测值高于实测值,MAE 和 RMSE 值可以评价模型的预测精度,值越小精度越高,RA 可以反映模型的模拟准确程度,越小模拟准确程度越高。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳密度及其垂直分布特征

陇西县各乡镇 0~50 cm 土层土壤有机碳密度  $15.68\times10^3\sim34.68\times10^3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (表 1)。其中,马河镇最高,其次是碧岩镇、福星镇、宏伟乡、首阳镇、柯寨乡,而菜子镇、永吉乡、双泉乡、渭阳乡、通安驿镇、巩昌镇、文峰镇、德兴乡、和平乡比较低,云田镇、权家湾乡最低,且碧岩镇、福星镇、马河镇分别与权家湾乡土壤有机碳密度之间的差异达到显著水平( $P<$

0.05),马河镇与巩昌镇、和平乡、云田镇、权家湾乡土壤有机碳密度之间达到显著水平( $P<0.05$ )。陇西县 0~10 cm 土层平均土壤有机碳密度为  $6.60\pm1.79\times10^3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 10~30 cm 为  $11.52\pm3.67\times10^3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 30~50 cm 为  $10.18\pm3.86\times10^3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。各土层有机碳密度范围  $4.55\times10^3\sim15.43\times10^3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,除福星镇、双泉乡、通安驿镇外,各乡镇(镇)土壤有机碳密度 10~30 cm 土层最高,是 30~50 cm 土层的 1.07~1.44 倍,是 0~10 cm 土层的 1.28~2.03 倍;30~50 cm 次之,是 0~10 cm 土层的 1.15~1.58 倍;0~10 cm 最小,其中碧岩镇、德行乡、宏伟乡、柯寨乡、首阳镇、双泉乡、通安驿镇、云田乡 0~10 cm 与 10~30 cm、30~50 cm 之间达到差异显著( $P<0.05$ ),菜子镇各个土层之间存在显著差异性( $P<0.05$ ),巩昌镇 10~30 cm 与 0~10 cm、30~50 cm 之间存在显著差异性( $P<0.05$ ),和平乡、渭阳乡、文峰镇 0~10 cm 与 10~30 cm 土层之间存在显著差异性( $P<0.05$ ),福星镇、权家湾乡各

表 1 土壤有机碳密度(平均值±标准差,  $10^3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )  
Table 1 Soil organic carbon density (mean±standard deviation,  $10^3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )

乡镇	土层/cm			
	0~10	10~30	30~50	0~50
碧岩镇(12)	8.10±1.25 <sup>ca</sup>	14.08±4.19 <sup>cdB</sup>	12.50±3.39 <sup>bdB</sup>	34.68±7.78 <sup>bd</sup>
菜子镇(11)	7.15±2.37 <sup>bcA</sup>	12.76±2.91 <sup>bdC</sup>	9.95±2.62 <sup>adB</sup>	29.86±5.84 <sup>ad</sup>
德兴乡(9)	5.13±1.64 <sup>abA</sup>	10.40±2.84 <sup>adB</sup>	9.51±3.98 <sup>adB</sup>	25.04±7.83 <sup>ad</sup>
福星镇(12)	7.35±2.92 <sup>acA</sup>	13.08±7.22 <sup>bdA</sup>	13.15±7.63 <sup>cdA</sup>	33.59±17.39 <sup>cd</sup>
巩昌镇(17)	6.52±1.59 <sup>bcA</sup>	11.40±7.22 <sup>adB</sup>	7.91±3.50 <sup>abcA</sup>	25.84±6.42 <sup>abc</sup>
和平乡(12)	6.38±1.31 <sup>bcA</sup>	9.09±3.27 <sup>abcB</sup>	7.50±2.56 <sup>abcAB</sup>	22.98±6.50 <sup>abc</sup>
宏伟乡(12)	6.79±2.05 <sup>bcA</sup>	12.84±4.27 <sup>bdB</sup>	11.98±5.49 <sup>adB</sup>	31.61±11.60 <sup>ad</sup>
柯寨乡(11)	6.68±1.87 <sup>bcA</sup>	12.60±5.61 <sup>adB</sup>	11.64±4.02 <sup>adB</sup>	30.92±10.04 <sup>ad</sup>
马河镇(10)	8.47±2.09 <sup>ca</sup>	15.43±3.81 <sup>dB</sup>	14.31±3.87 <sup>dB</sup>	38.20±9.57 <sup>d</sup>
权家湾乡(7)	4.55±0.82 <sup>abA</sup>	5.86±2.00 <sup>aA</sup>	5.27±1.74 <sup>aA</sup>	15.68±4.04 <sup>a</sup>
首阳镇(11)	6.80±1.64 <sup>bcA</sup>	12.96±2.76 <sup>bdB</sup>	11.67±3.46 <sup>adB</sup>	31.44±7.68 <sup>ad</sup>
双泉乡(9)	6.41±1.49 <sup>bcA</sup>	11.44±2.10 <sup>adB</sup>	11.63±6.70 <sup>adB</sup>	29.48±9.02 <sup>ad</sup>
通安驿镇(10)	5.80±1.05 <sup>bcA</sup>	10.26±2.09 <sup>adB</sup>	10.47±2.35 <sup>adB</sup>	26.54±5.12 <sup>ad</sup>
渭阳乡(15)	6.62±1.83 <sup>bcA</sup>	11.75±5.95 <sup>adB</sup>	10.54±5.12 <sup>adAB</sup>	28.91±12.61 <sup>ad</sup>
文峰镇(12)	6.97±2.19 <sup>bcA</sup>	10.60±2.87 <sup>adB</sup>	8.20±2.79 <sup>adAB</sup>	25.76±6.98 <sup>ad</sup>
永吉乡(12)	7.63±2.61 <sup>acA</sup>	12.73±5.18 <sup>bdB</sup>	9.42±4.28 <sup>adAB</sup>	29.79±10.62 <sup>ad</sup>
云田镇(18)	4.81±1.64 <sup>ba</sup>	8.56±1.99 <sup>abB</sup>	7.43±2.08 <sup>abB</sup>	20.80±4.81 <sup>ab</sup>
平均值	6.60±1.79	11.52±3.67	10.18±3.86	28.30±8.46

括号内的数据为土壤样本数,不同小写字母表示同一土层不同乡镇差异显著( $P<0.05$ ),不同大写字母表示同一乡镇不同土层差异显著( $P<0.05$ )。

个土层之间无显著差异性。平均标准差( $\sigma$ )随着土层深度增加逐渐增加,表明随着深度的增加土壤有机碳密度的差异越来越明显。

## 2.2 土壤有机碳密度空间分布及有机碳储量估算

对各个土层的 SOCD 进行正态性验证,结果表明各个土层的 SOCD 都表现出非正态性的特征,其正态性转换系数  $\lambda$  分别为  $\lambda_{10}=0.7$ 、 $\lambda_{30}=0.25$ 、 $\lambda_{50}=0.3$ ,利用公式(9)进行正态性转换。气温、降水量、海拔、地形湿度指数与 NSOCD 表现出显著相关性( $P<0.05$ ),而 NSOCD<sub>10cm</sub> 还与坡度、地表粗糙度、地形起伏度表现出显著相关性( $P<0.05$ ),NSOCD<sub>30cm</sub> 与坡度表现出显著相关性( $P<0.05$ ),NSOCD<sub>50cm</sub> 与地形湿度指数表现出显著相关性( $P<0.05$ ,表2)。

表2 各土层有机碳密度与环境变量相关性

Table 2 The correlation between organic carbon density and environmental variables in soil layer

环境因子	土层/cm		
	0~10	10~30	30~50
气温	-0.1580*	-0.1692*	-0.3109**
降水量	0.1928*	0.1645*	0.2650**
海拔	0.1667*	0.1747*	0.3099**
坡度	-0.1590*	-0.1555*	-0.1129
坡向	-0.1373	-0.1075	-0.0663
地表粗糙度	-0.2070**	-0.1103	-0.0837
地形起伏度	-0.1759*	-0.1302	-0.0661
平面曲率	0.1468	0.1478	0.0710
汇流动力指数	-0.1804*	-0.2149**	-0.2700**
沉积物运移指数	-0.1099	-0.1029	-0.1093
地形湿度指数	-0.0310	-0.0913	-0.2329**

\*\*在 0.01 水平(双侧)上显著相关,\*在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

8 个环境变量与 NSOCD 相关,其中 NSOCD<sub>10cm</sub> 与 7 个环境变量有关,NSOCD<sub>10cm</sub> 与 5 个环境变量有关,NSOCD<sub>50cm</sub> 与 5 个环境变量有关,但是在众多的信息中存在信息相互重叠、相互影响的现象。为了消除这种现象,采用主成分分析对数据进行转换,将原始的变量降维到少数新的变量,并尽可能多地将原始变量蕴含的信息包含进去,提取主成分采用 Kaiser-Harris 准则,保留特征值大于 1 的主成分。与各个土层具有相关性的环境变量的前 2 个主成分的特征值大于 1,与 NSOCD<sub>10cm</sub> 有关的前 2 个主成分共

包含了 89.41% 的信息,与 NSOCD<sub>30cm</sub> 有关的前 2 个主成分共包含了 91.38% 的信息,与 NSOCD<sub>50cm</sub> 有关的前 2 个主成分共包含了 89.41% 的信息。用  $F1_i$ 、 $F2_i$  代表各个土层的 2 个主成分,根据各个主成分上环境变量的得分系数,可以得到各个主成分变量与环境变量的线性回归表达式。将计算得到的  $F1_i$ 、 $F2_i$  各主成分变量作为新的自变量,纳入主成分与 NSOCD 的回归建模过程中,从而在综合了主要环境变量信息的基础上建立主成分回归拟合模型(式 10、11、12)。

$$NSOCD_{0-10cm} = -0.0078F1_{10cm} - 0.1631F2_{10cm} + 3.8499 \quad (R^2=0.0941) \quad (10)$$

$$NSOCD_{10-30cm} = 0.0321F1_{30cm} + 0.1180F2_{30cm} + 3.2704 \quad (R^2=0.0827) \quad (11)$$

$$NSOCD_{30-50cm} = -0.0809F1_{50cm} + 0.1290F2_{50cm} + 3.1764 \quad (R^2=0.1201) \quad (12)$$

通过相关分析、主成分分析实现了环境变量的降维,利用主成分回归模型对环境变量与土壤有机碳密度间的关系进行了充分的挖掘,但是回归模型只考虑数据的结构性,对土壤有机碳密度的解释程度较低,残差部分未能得到充分解释。因此对回归模型的残差进行克里金插值,然后将残差结果和回归模型的拟合结果相加,得到主成分回归克里金模型(PCRK),以此来预测土壤有机碳密度的空间分布特征。

主成分回归克里金模型结果 ME 值都大于 0(表 3),表明预测值低于实测值,并随着土层的加深其值加大;随着土层的加深 MAE、RMSE 以及 RA 的值越来越大,表明模型预测的精度逐渐降低,准确度也逐渐降低。但主成分回归克里金模型考虑环境变量对 SOCD 的影响,所以可以更好地反映随着气象因子和地形因素的变化 SOCD 的空间分布特征。本文在计算陇西县各土层土壤有机碳储量时采用主成分回归克里金模型的插值结果,并根据四分位

表3 主成分回归克里金模型(PCRK)精度验证

Table 3 Accuracy verification of principal component regression Kriging model

土壤有机碳密度	平均误差 ME	平均绝对误差 MAE	均方根误差 RMSE	相对精度 RA
0~10 cm	0.2338	1.3304	1.7310	1.7152
10~30 cm	0.5605	2.8115	3.8061	3.7646
30~50 cm	0.7764	3.6756	4.8037	4.7405

数分类方法,将各个土壤有机碳密度分为4个等级(图2、3)。结果表明陇西县0~50 cm土层土壤有机碳密度为 $2.67\pm 1.02\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,储量为 $6.29\pm 2.41\text{ Tg}$ ,其中0~10 cm土层的土壤有机碳密度为 $0.63\pm 0.17\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,

$\text{m}^{-2}$ ,储量为 $1.49\pm 0.41\text{ Tg}$ ,10~30 cm土层的土壤有机碳密度为 $1.10\pm 0.38\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,储量为 $2.58\pm 0.90\text{ Tg}$ ,30~50 cm土层土壤有机碳密度为 $0.93\pm 0.48\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,储量为 $2.21\pm 1.11\text{ Tg}$ 。

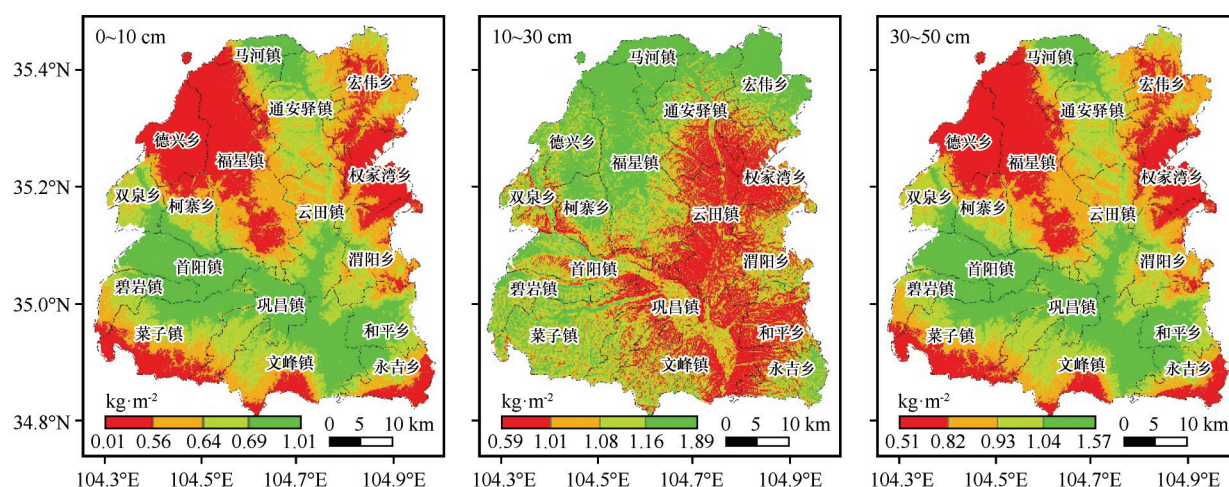


图2 主成分回归克里金模型插值结果

Fig.2 Interpolation results of principal component regression Kriging model

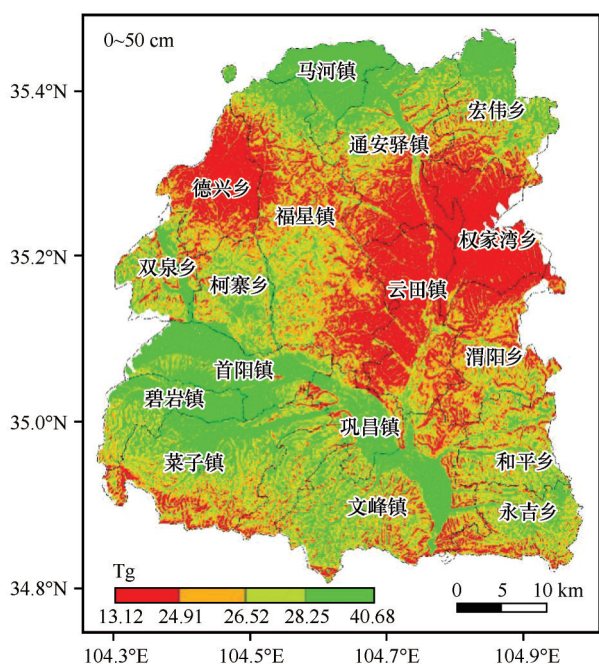


图3 各乡镇土壤(0~50 cm)有机碳储量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of soil organic carbon storage in 0~50 cm soil layer

### 2.3 各乡镇土壤有机碳密度空间分布特征

通过四分位数的分类方法,把每一层的土壤有机碳密度分为4个等级,其中0~10 cm第I等级为 $0.01\sim 0.56\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,第II等级为 $0.56\sim 0.64\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,第III等级为 $0.64\sim 0.69\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,第IV等级为 $0.69\sim 1.01\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ;

10~30 cm第I等级为 $0.59\sim 1.01\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,第II等级为 $1.01\sim 1.08\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,第III等级为 $1.08\sim 1.16\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,第IV等级为 $1.16\sim 1.89\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ;30~50 cm第I等级为 $0.59\sim 1.01\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,第II等级为 $1.01\sim 1.08\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,第III等级为 $1.08\sim 1.16\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,第IV等级为 $1.16\sim 1.89\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。在0~10 cm土层,马河镇、碧岩镇、菜子镇、永吉乡、巩昌镇在第III、IV等级所占的比重较大,分别为0.97、0.95、0.84、0.77、0.74,而渭阳乡、通安驿镇、德兴乡、权家湾乡、云田镇在第III、IV等级所占比重较小,分别为0.25、0.23、0.13、0.01、0.001。在10~30 cm土层,碧岩镇、德兴乡、福星镇、宏伟乡、马河镇在第III、IV等级所占的比重较大,分别为0.78、0.91、0.87、0.998,而和平乡、权家湾乡、渭阳乡、文峰镇、云田镇在第III、IV等级所占比重较小,分别为0.14、0.099、0.25、0.24、0.05。在30~50 cm土层,碧岩镇、巩昌镇、和平乡、马河镇、首阳镇、双泉乡、文峰镇在第III、IV等级所占的比重较大,分别为0.77、0.84、0.87、0.71、0.996、0.77、0.72,而德行乡、福星镇、宏伟乡、权家湾乡在第III、IV等级所占比重较小,分别为0.004、0.075、0.11、0.05。而对于0~50 cm土层,碧岩镇、巩昌镇、柯寨乡、马河镇、首阳镇、双泉乡在第III、IV等级所占的比重较大,德兴乡、权家湾乡、渭阳乡、云田镇在第III、IV等级所占比重较小,分别为0.08、0.02、0.21、0.11(图4)。

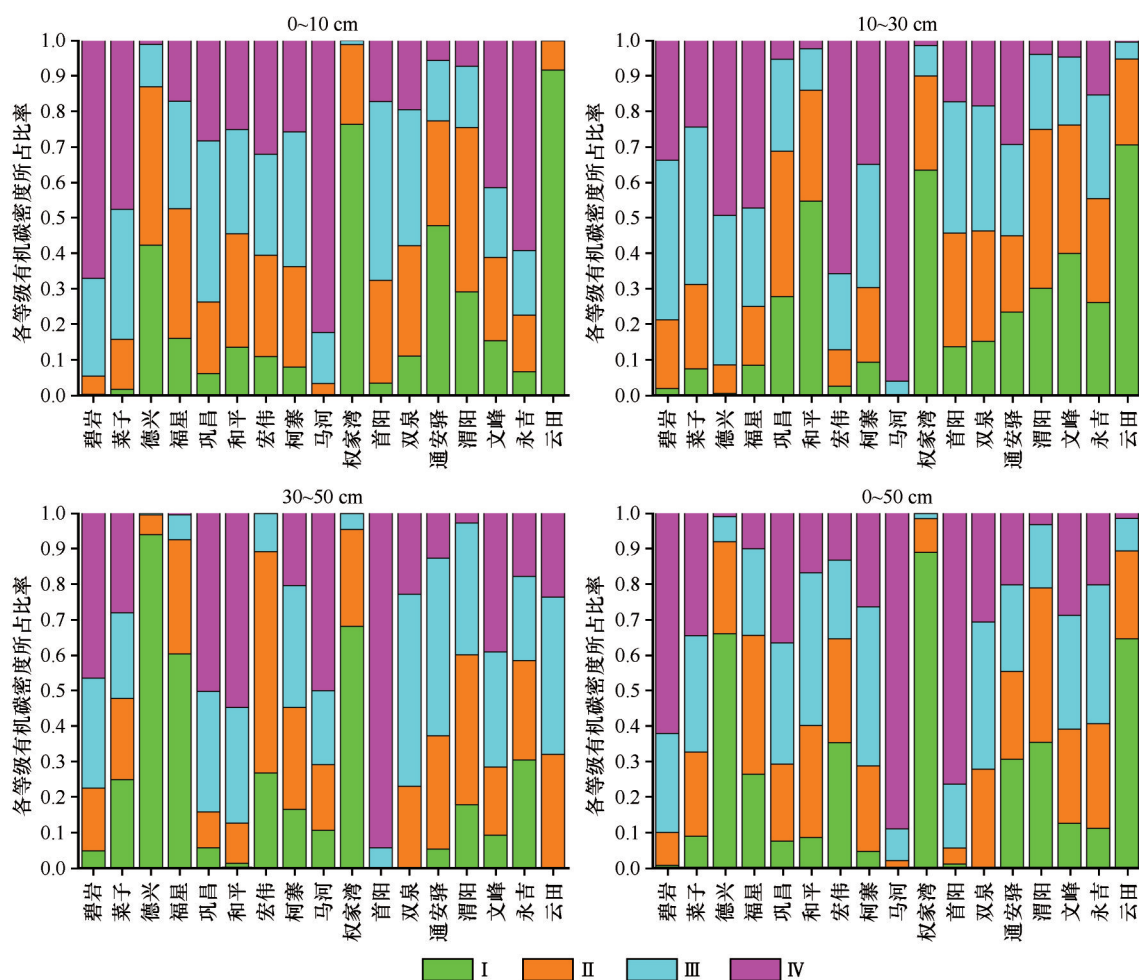


图4 各乡镇各土层各等级土壤有机碳密度面积占比分布

Fig.4 The proportion of soil organic carbon density area in each soil layer of each township

### 3 讨论

#### 3.1 甘肃省中药材种植区耕作层土壤有机碳密度与其他地区比较

与甘肃省其他地区相比,陇西县的耕作层(0~20 cm)土壤有机碳密度比较低,低于兰州、白银的土壤有机碳密度,比张掖、永昌部分区域的值高。与其他地区(0~20 cm 土层)相比,陇西县的土壤有机碳密度比广西、青海、内蒙古、山东、江西、吉林的值低,并且与青海省相差较大,为0.26倍,与山东省的相差较小,为0.53倍,是全国平均水平的0.44倍。陇西县地处黄土高原区域,是甘肃省最主要的农业与中药材种植区域,但是其有机碳密度却比黄土高原平均农田土壤有机碳密度低  $1.09 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,比全国平均农田土壤有机碳密度低  $2.05 \sim 2.17 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (表4)。黄绵土、黑垆土、潮土、灰褐土、红黏土是陇西县的主要土壤类型,占全县面积的82.99%,而黄绵

表4 陇西县和其他地区土壤有机碳密度比较

Table 4 Comparison of organic carbon density in Longxi Country and other regions

区域	有机碳密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	资料来源
甘肃陇西	1.18	本研究
中国	2.67	[8]
甘肃兰州、白银	1.52~7.73	[9]
甘肃张掖、永昌	0.16~19.17	[10]
广西	3.88	[11]
青海	4.51	[12]
内蒙古	3.68	[13]
山东	2.22	[14]
江西	3.84	[15]
吉林	3.95	[16]
黄土高原农田	2.27	[17]
中国农田	3.23~3.35	[17]

土、黑垆土、潮土的质地较粗,耕作性较差,漏水漏肥严重,不利于根系发育,导致土壤有机质含量低。中国耕作层黄绵土有机碳密度为  $1.14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,黑垆土有机碳密度为  $1.86 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,潮土有机碳密度为  $1.61 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  [8]。陇西县黄绵土、黑垆土、潮土的面积占全县面积的 75.16%,这是陇西县耕作层平均土壤有机碳密度较低的重要原因。

陇西县是农业与中药材种植区域,提高土壤有机碳密度是实现该区域农业中药材产业可持续发展的保障,在该区域应该加大对德兴乡、通安驿镇、权家湾乡、渭阳乡等人少地多区域的耕地开发强度,加大对该区域的土地投入力度,对耕地进行精细化管理,提升该区域的土壤有机碳含量。

### 3.2 陇西县土壤有机碳密度分布特征

陇西县土壤有机碳密度总体特征表现出渭南山地、渭北黄土丘陵的乡镇土壤有机碳密度值较高,中部渭河平原的土壤有机碳密度普遍偏低,各土层各等级土壤有机碳密度值在各个乡镇中的分布表现出显著差异性。陇西县经济作物以中药材为主,陇西县各乡镇土壤有机碳密度呈显著性差异可能与各个乡镇的农业活动强度和对土地的投入力度有关。人均耕地面积较大的乡镇有机碳密度较低,经济作物播种面积占比较大的乡镇有机碳密度较高,中药材种植区单位面积投入较大的乡镇有机碳密度较高(图5)。原因可能是人均耕地面积较大的乡镇人少地多,耕地粗放经营,对土地的投入

较少,管理经验不足,导致有机碳密度较低。而经济作物播种面积较大的区域,农民收入较高,对土地进行精细化管理,并且对土地的投入较多,土地的利用强度较大,农业生产活动频繁,导致土壤有机碳密度值较高。在未来的农业活动中重点治理人均耕地面积较大乡镇的耕地,通过合理、可持续的耕作方式来提高该区域的土壤肥力,并严格治理这些区域的土地撂荒。

### 3.3 环境变量对各层土壤有机碳密度的影响

气候因素(气温、降水)、地形因素(海拔、坡度、地表粗糙度等)是影响土壤有机碳含量的重要因素,它们通过影响有机碳的矿化速率、微生物活性、地上生物量、土壤侵蚀状况以及人类活动来影响有机碳的空间分布,导致有机碳的空间异质性 [18-21]。在一定的温度范围内,土壤有机碳密度与温度呈显著负相关性,随着温度的升高异养呼吸增加,  $\text{CO}_2$  的排放量增多,从而导致土壤有机碳密度的降低 [22]。降雨是土壤水分的主要来源,影响着土壤的湿度、通透性以及土壤氧化还原反应,土壤中的矿化作用、有机物的合成与分解等过程都需要土壤水的参与 [23]。土壤有机碳含量和降雨量的大小有关 [24],而且不同的地区土壤有机碳密度与年降雨量之间相关性不同 [24]。陇西县各层土壤有机碳密度与年降雨量呈现显著正相关性,主要是因为该区属于半干旱地区,降雨量的增多促进了植被生长和凋落物的分解,而这有利于有机碳的输入和累积。

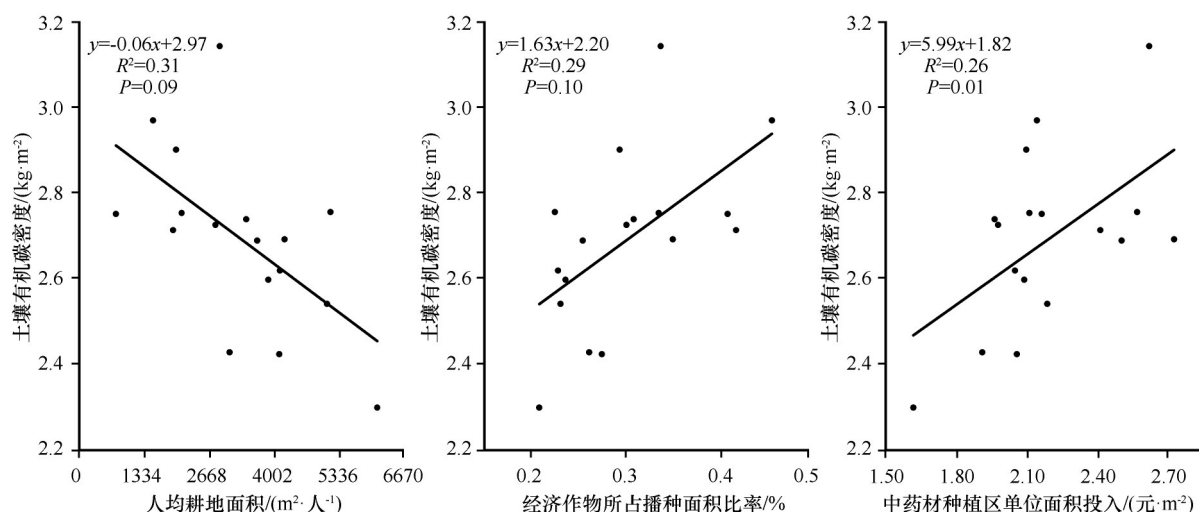


图5 土壤有机碳密度随人均耕地面积、经济作物占播种面积比率、中药材种植区单位面积投入的变化特征

Fig.5 Distribution characteristics of soil carbon density with arable land per capita and the ratio of economic crop to planting acreage and investment of Chinese medicinal materials growing area

地形因子影响土壤水热资源再分配以及土壤生态系统物质循环的过程和强度,从而影响土壤中有机碳含量<sup>[19]</sup>。本研究中,海拔、汇流动力指数在各个土层中与土壤有机碳密度都呈现显著相关性,其中与海拔呈显著正相关性,并随着土层的加深,相关性增强,与汇流动力指数呈显著负相关性,随着土层的加深相关性也不断增强。这主要是由于海拔导致区域性气候差异,海拔越高,温度越低,使得土壤中微生物活性降低,碳的分解速率降低,碳的含量增高<sup>[25]</sup>,汇流动力指数也称水流强度指数,是描述地表水流的侵蚀力<sup>[7]</sup>,汇流动力指数越大,表明土壤的侵蚀程度越大,水土流失越大,有机碳含量越低。而坡度、地形起伏度、地表粗糙度可以表征表层土壤的侵蚀状况以及土壤表面的扰动和微地貌的不规则变化<sup>[26-28]</sup>。表层土壤受人类活动的影响较大,表层土壤上的枯落物、作物残茬、定期施加有机肥料以及一年中定期的耕作影响表层土壤的侵蚀状况以及土壤表面的微地貌变化,从而引起坡度、地形起伏度、地表粗糙度随着土壤深度的增加与土壤有机碳密度的相关性逐渐减小,以至在深层土壤中不具有相关性。地形湿度指数可以表征土壤的干湿状况,衡量土壤的含水量,地形湿度指数越大,表示土壤湿度越大<sup>[29]</sup>。本研究结果表明随着土壤深度的增加,地形湿度指数与有机碳密度的相关性逐渐增强,并在深层土壤中表现出显著负相关性,可能由于深层土壤含水量越高,其通透性越差,土壤中含氧量越低,土壤的分解速率降低,使得土壤有机碳密度降低<sup>[30]</sup>。

### 3.4 土壤有机碳空间分布的不确定性分析

土壤有机碳含量是反映土壤肥力的重要指标,对于提高土壤质量、维持和改善农作物生产、维持土壤肥力的可持续发展具有重要作用<sup>[8]</sup>,精确计算土壤有机碳含量及其空间分布对于农用地的科学管理具有重要意义。现在对土壤有机碳空间分布及其碳库估算普遍采用的方法主要有两类,一类是采用回归模型与地统计模型相结合的方法,一类是利用土壤类型、植被类型或生命带类型的方法。对于研究区较小、环境较为复杂的区域,一般采用第一类方法,而对于研究区域较大或者特定用途的土壤采用第二类的方法<sup>[7,31-34]</sup>,而导致结果差异性的原因主要是由于估算方法之间的差异。除上述原因外,在采样的过程中去除枯枝落叶层,而这可能造

成对土壤有机碳含量低估的可能;其次根系凋落物以及土壤动物对于土壤中碳含量影响较大,但是迄今为止对于这方面的研究较少,而这也是造成估算结果与实际含量相差较大的原因<sup>[35-36]</sup>;再次,对于农用地而言人类的生产活动对于土壤的影响较大,尤其在中药材种植区,不同的栽植密度与技术、不同化肥使用量以及连作和轮作的耕作方式都会影响土壤养分的变化<sup>[37-40]</sup>,而在对土壤有机碳估算的时候往往会忽视这方面的因素也是造成结果差异较大的原因。本文采用主成分回归模型与地统计模型相结合的方法来对土壤有机碳密度空间分布以及碳储量进行估算,而没有考虑植被生长状况、枯枝落叶层以及根系凋落物、土壤动物以及生产活动等因素的影响,其结果与实际相比可能存在一些误差,在未来充分考虑这些因素,以提高研究结果的精度。

## 4 结论

陇西县土壤有机碳 0~50 cm 土层有机碳总量为  $6.29 \pm 2.41$  Tg,有机碳密度为  $2.67 \pm 1.02$  kg·m<sup>-2</sup>。其中 0~10、10~30、30~50 cm 土层的有机碳密度分别为  $0.63 \pm 0.17$ 、 $1.10 \pm 0.38$ 、 $0.93 \pm 0.48$  kg·m<sup>-2</sup>,有机碳储量分别为  $1.49 \pm 0.41$ 、 $2.58 \pm 0.90$ 、 $2.21 \pm 1.11$  Tg。

气温、降水量、海拔、汇流动力指数与各个土层土壤有机碳密度都具有显著相关性;坡度、地形起伏度、地表粗糙度随着土壤深度的增加与土壤有机碳密度相关性逐渐减小,以至在 30~50 cm 土层土壤中不具有相关性;随着土壤深度的增加,地形湿度指数与有机碳密度的相关性逐渐增强,并在 30~50 cm 土层中表现出显著负相关性。

从中部渭河平原到北部的丘陵地带和南部的山地区域,土壤有机碳密度随着海拔的升高而逐渐升高,并且北山的土壤有机碳密度比南山高,渭河流域形成的河谷平原有机碳密度较低,各土层各等级土壤有机碳密度分布在各个乡镇中的分布表现出显著差异性。由于受人类活动的影响,造成人均耕地面积较大的乡镇有机碳密度较低,经济作物播种面积占比较大的乡镇有机碳密度较高,中药材种植区亩均投入较大的乡镇有机碳密度较高。

### 参考文献:

- [1] 安玲玲,吕晓男,麻万诸,等.浙江省土壤有机碳密度与储量的初步研究[J].浙江农业学报,2014,26(1):148-153.

- [2] Tiessen H, Cuevas E, Chacon P. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility[J]. *Nature*, 1994, 371: 783–785.
- [3] Loveland P, Webb J. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review[J]. *Soil & Tillage Research*, 2003, 70(1): 1–18.
- [4] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. *地理学报*, 2000, 55(5): 533–544.
- [5] Huang Y, Sun W J. Changes in topsoil organic carbon of croplands in mainland China over the last two decades[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(15): 1785–1803.
- [6] 陇西县志编纂委员会. 陇西县志[M]. 兰州: 甘肃人民出版社, 1990.
- [7] 陈可. 基于复杂环境区域的土壤有机质空间预测研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [8] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. *土壤学报*, 2004, 41(1): 35–43.
- [9] 刘文辉, 李春亮, 吴永强. 甘肃省兰州-白银地区土壤有机碳库储量估算与空间分布特征[J]. *物探与化探*, 2012, 36(3): 367–371.
- [10] 刘文辉. 甘肃省张掖-永昌地区土壤有机碳密度估算及其空间分布特征[J]. *物探与化探*, 2013, 37(3): 552–556.
- [11] 陈曦. 广西土壤有机碳储量估算及与全国部分省区的比较研究[J]. *地理科学*, 2014, 34(10): 1247–1253.
- [12] 钟聪, 杨忠芳, 夏学齐, 等. 青海省土壤有机碳储量估算及其源汇因素分析[J]. *现代地质*, 2012, 26(5): 896–909.
- [13] 傅野思, 夏学齐, 杨忠芳, 等. 内蒙古自治区土壤有机碳库储量及分布特征[J]. *现代地质*, 2012, 26(5): 886–895.
- [14] 代杰瑞, 庞绪贵, 曾宪东, 等. 山东省土壤有机碳密度的空间分布特征及其影响因素[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(9): 1449–1458.
- [15] 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.
- [16] 于沙沙, 窦森, 黄健, 等. 吉林省耕层土壤有机碳储量及影响因素[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(10): 1973–1980.
- [17] 张圣民. 黄土高原农田土壤有机碳储量及固碳能力研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [18] 孙忠祥, 李勇, 赵云泽, 等. 旱作区土壤有机碳密度空间分布特征与其驱动力分析[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(1): 255–262.
- [19] 江叶枫, 饶磊, 郭熙, 等. 江西省耕地土壤有机碳空间变异的主控因素研究[J]. *土壤*, 2018, 50(4): 778–786.
- [20] 解文艳, 周怀平, 杨振兴, 等. 黄土高原东部潇河流域农田土壤有机质时空变异及影响因素[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, 36(1): 96–104.
- [21] 钟聪, 杨忠芳, 胡宝清, 等. 河北平原区土壤有机碳及其对气候变化的响应[J]. *农业现代化研究*, 2016, 37(4): 809–816.
- [22] 张城, 王绍强, 于贵瑞, 等. 中国东部地区典型森林类型土壤有机碳储量分析[J]. *资源科学*, 2006, 28(2): 97–103.
- [23] 曾希柏. 耕地质量培育技术与模式[C]. 北京: 中国农业出版社, 2014.
- [24] 刘书田. 中国农田土壤有机碳时空分布规律及影响因素研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2016.
- [25] Silver W L, Lugo A E, Keller M. Soil oxygen availability and biogeochemistry along rainfall and topographic gradients in upland wet tropical forest soils[J]. *Biogeochemistry*, 1999, 44(3): 301–328.
- [26] 林维, 崔晓阳. 地形因子对大兴安岭北端寒温带针叶林土壤有机碳储量的影响[J]. *森林工程*, 2017, 33(3): 1–6.
- [27] 赵西宁, 吴发启, 王万忠. 黄土高原沟壑区坡耕地土壤入渗规律研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2004, 18(4): 109–112.
- [28] 牛伊宁, 南志标, 沈禹颖. 陇东黄土高原地表粗糙度对耕作土壤径流的影响[J]. *干旱区研究*, 2011, 28(3): 389–393.
- [29] 肖林林. 山地丘陵区耕地土壤有机碳密度空间变异特征分析及预测[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [30] 丛山. 温度和水分对吉林省主要耕作土壤有机质矿化影响的模拟研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2016.
- [31] 郭晓伟, 骆土寿, 李意德, 等. 尖峰岭热带山地雨林土壤有机碳密度空间分布特征[J]. *生态学报*, 2015, 35(23): 7878–7886.
- [32] 李斌, 方晰, 李岩, 等. 湖南省森林土壤有机碳密度及碳库储量动态[J]. *生态学报*, 2015, 35(13): 4265–4278.
- [33] 王鹏程, 邢乐杰, 肖文发, 等. 三峡库区森林生态系统有机碳密度及碳储量[J]. *生态学报*, 2009, 29(1): 97–107.
- [34] 于建军, 杨锋, 吴克宁, 等. 河南省土壤有机碳储量及空间分布[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 1058–1063.
- [35] Yang W Q, Deng R J, Zhang J. Forest litter decomposition and its responses to global climate change[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12): 2889–2895.
- [36] Usman S, Singh S P, Rawat Y S, et al. Fine root decomposition and nitrogen mineralisation patterns in *Quercus leucotrichophora* and *Pinus roxburghii* forests in central Himalaya[J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 131(1/2/3): 191–199.
- [37] 高石曼, 刘久石, 孙恬, 等. 不同栽培措施对党参药材化学质量的影响[J]. *中国中药杂志*, 2016, 41(20): 3753–3760.
- [38] 张琳, 王晓, 史国玉, 等. 中药连作障碍形成及其时空效应理论探讨[J]. *现代中药研究与实践*, 2014, 28(5): 78–83.
- [39] 龚成文, 赵欣楠, 冯守疆, 等. 配方施肥对党参生产特性的影响[J]. *西北农业学报*, 2013, 22(11): 130–136.
- [40] 李振方, 杨燕秋, 谢冬凤, 等. 连作条件下地黄药用品质及土壤微生物特性分析[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(2): 217–224.

## The spatial distribution of soil organic carbon in the main producing areas of traditional Chinese medicine in Longxi, Gansu, China

Tang Liang<sup>1,2</sup>, He Mingzhu<sup>1</sup>, Bai Guangzu<sup>1</sup>, Zhao Pengshan<sup>1</sup>, Ren Jianxin<sup>3</sup>, Xu Hua<sup>1,2</sup>

(1. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In August 2018, 200 samples were surveyed in Longxi County. Using correlation analysis, analysis of variance, principal component analysis, and geostatistical analysis, we analyze sampling point data explored the spatial distribution characteristics of soil organic carbon density and reserves in Longxi County, and the relationship with climate, topography, and land use. The results showed that: (1) the total amount of organic carbon in soil from 0 to 50 cm was  $6.29 \pm 2.41$  Tg, and the SOCD was  $2.67 \pm 1.02$  kg·m<sup>-2</sup>. The SOCD in the 0–10 cm, 10–30 cm soil layers and 30–50 cm were  $0.63 \pm 0.17$ ,  $1.10 \pm 0.38$  and  $0.93 \pm 0.48$  kg·m<sup>-2</sup>, the organic carbon storagewere  $1.49 \pm 0.41$ ,  $2.58 \pm 0.90$  and  $2.21 \pm 1.11$  Tg, respectively. (2) Significant correlatios were observed between temperature, precipitation, elevation and Stream Power Index with SOCD in each soil layer. With the increase of soil depth, the correlations between slope, topographic relief and surface roughness with SOCD were gradually decreased, and no significant correlation was found in 30–50 cm soil layer. The correlation between topographic wetness index and SOCD was gradually increased and showed a significant negative correlation 30–50 cm soil layer. (3) The spatial distribution of SOCD as follows: the SOCD ratchet up from the central plains of the Wei River to the northern foothills and southern mountain areas with the rising of altitude. SOCD of Northern Mountain was higher than that of the Southern Mountain. The river valley plain formed by Wei River Basin has a lower organic carbon density. The distribution of soil organic carbon density in different soil layers and grades was markedly different. Due to the influence of human activities, the SOCD of the townships with large per capita cultivated land area was relatively low; the SOCD of the towns with large planted area of cash crops was relatively high; and SOCD of the towns with large per-mu investment in Chinese medicinal planting areas was relatively high. The SOCD was lower in the towns with larger arable land area per capita, higher in the towns where the planting area of cash crops was larger, higher in the towns with higher input per mu.

**Key words:** organic carbon density; organic carbon storage; principle component regression Kriging Model; composite terrain factor