

甘肃陇西中药材种植区土壤有机质分布特征

高顺平¹,何明珠²,白光祖²,赵鹏善²,管青霞¹

(1.陇西县农业技术推广中心,甘肃 陇西 748000; 2.中国科学院西北生态环境资源研究院,甘肃 兰州 730000)

摘要:通过采集和分析甘肃省陇西县17个乡镇200个中药材种植区的土壤有机质含量数据,对陇西县中药材主产区的土壤有机质水平及储量空间分布格局进行研究。结果表明:县域各乡镇土壤有机质密度水平在 $27.03 \times 10^3 \sim 65.87 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围之间,变异系数在19.30%~51.78%之间,属中等变异强度。陇西县土壤有机质含量的分布表现出自西向东逐渐减少的变化规律,并且局部地区具有聚集效应。土壤有机质密度随土壤深度增加呈现先上升后下降的整体趋势,其中表层0~10 cm的土壤有机质密度水平最低,为 $10.76 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,10~30 cm土层最高,为 $18.93 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。土壤有机质空间分布受到纬度、坡度、海拔、坡向的影响,纬度、海拔的影响程度最大。土壤有机质密度与降雨量、蒸发量、气温、相对湿度4个气象因子之间存在显著相关性,其中与降雨量、相对湿度之间呈显著、极显著负相关,与气温和蒸发量之间呈显著、极显著正相关。

关键词:土壤有机质;分布特征;中药材种植区;GIS;影响因素;甘肃陇西

中图分类号:S158 **文献标志码:**A

Spatial distribution characteristics of soil organic matter in Chinese herbal medicine planting area in Longxi County

GAO Shunping¹, HE Mingzhu², Bai Guangzu², Zhao Pengshan², Guan Qingxia¹

(1. Longxi County Agrotechnical Extension Center, Longxi, Gansu 748000, China;

2. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: The spatial distribution pattern of soil organic matter level and storage in the main producing areas of traditional Chinese medicine in Longxi County was studied by collecting and analysing the datas of soil organic matter storage in 200 herbal medicine planting fields in 17 townships of Longxi County to provide scientific basis for soil management, soil testing, fertilization and healthy development of traditional Chinese medicine industry in the planting areas. The results showed that the soil organic matter density in Longxi County ranged from $27.03 \times 10^3 \sim 65.87 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, and the coefficient of variation was 19.30%~51.78%, which belonged to moderate variation intensity. The different contents of soil organic matter in different villages and towns in Longxi County were due to the differences in topographic conditions. With increasing soil depth, the content of organic matter first increased then decreased. The soil organic matter density in the surface layer of 0~10 cm was the lowest ($10.76 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), and the soil organic matter density in 10~30 cm was the highest ($18.93 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$). The soil organic matter density in the traditional Chinese medicine growing area of Longxi County was of moderate variation intensity, and its spatial distribution was affected by latitude, slope, elevation, and slope direction, especially, latitude and elevation had the greatest influence on organic matter. There was a significant correlation between soil organic matter density and precipitation, evaporation, temperature, and relative humidity, and the relationship with relative humidity and evaporation reached an extremely significant level, showing a significant negative correlation with rainfall and relative humidity, and a significant positive correlation with temperature and evaporation.

Keywords: soil organic matter; distribution characteristics; Chinese herbal medicine planting area; GIS; influencing factors; Longxi County in Gansu Province

土壤有机质(Soil organic matter, SOM)是衡量土壤肥力和质量的一个重要指标^[1-4]。SOM 是植物必须营养元素的主要来源,也在维持农业生态系统的稳定性和作物稳产高产发挥方面起着重要作用^[5-6]。陇西县是甘肃省重要的中药材主产区,由于中药材的连作种植,一定程度上引发了土壤肥力水平下降、病虫害滋生等土壤环境和病害问题。研究表明土壤有机质和氮、磷养分含量等会随药材种植年限增加而降低,其中轮作单调、施肥不合理、药材大部分有机质输出农田生态系统等是造成土壤肥力衰退的主要原因^[7]。因此,精准掌握区域内的 SOM 空间分布特征及其影响因素是合理规划 and 保障中药材可持续种植的重要前提。已有研究通过多种方法有效地预测土壤有机质的空间分布特征^[8-10]。段丽君等^[11]通过分析 SOM 空间分布的 5 种主要影响因子,以插值结果为参照,分别建立 SOM 及其主要影响因子间的多元线性回归(MLR)、偏最小二乘回归(PLSR)、地理加权回归(GWR)、 GWR_{MLR} 和 GWR_{PLSR} 模型,探讨它们对 SOM 含量及空间分布的预测效果,得出 GWR_{PLSR} 模型预测研究区 SOM 含量具有最高的预测精度, GWR_{MLR} 其次。陈慕松等^[12]使用 ArcGIS 的统计分析模块研究了福安市耕地土壤有机质含量的空间变异情况,发现其空间变异主要受土壤母质、地形、气候等结构性因素作用的影响;同时利用 Ordinary Kriging 绘制了福安市耕地土壤有机质含量分布图,直观地显示了福安市耕地土壤有机质的空间分布情况及丰缺状况。徐苏源等^[13]以南长山岛为研究区,采用样方法进行调查,通过试验测定土壤和植被的各项指标,基于 SPSS 进行正态分布检验、相关性分析、方差分析和多重比较,发现影响南长山岛土壤理化因子空间分布的因素有地形、植被和人类活动等,其中地形和植被是主要影响因素。目前,基于第二次全国土壤普查资料,已有学者对甘肃省土壤有机碳储量及空间分布^[14]和陇西县耕地土壤养分状况^[15]开展了前期研究,但是,针对中药材主产区土壤有机质水平及储量的相关研究非常有限。鉴于此,本研究采用了 ArcGIS 的统计分析以及用 SPSS 进行正态分布检验,对陇西县 17 个乡镇 200 个中药材种植区的土壤样品有机质进行分析,以期明确陇西县中药材主产区的土壤有机质储量空间分布格局,为种植区的土壤管理、测土配方施肥及中药材产业的健康发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陇西县($104^{\circ}18' \sim 104^{\circ}54'E$, $34^{\circ}50' \sim 35^{\circ}23'N$)位于甘肃省东南部、定西市中部、渭河上游,地处陇中黄土高原中部。县域总面积 $2\ 408\ km^2$,下辖 17 个乡镇^[13]。该县因地处中纬内陆,为温带季风气候;主要有山地、黄土丘陵地、河谷平原三大地貌形态,其中以黄土丘陵所占面积最大,在全国地貌区划中属于甘肃黄土高原黄土丘陵沟壑区。县境内土壤类型主要包括黄绵土、黑垆土、灰褐土、潮土、红粘土,由于县境所跨经、纬度和海拔高差较小,土壤的垂直、水平分布不甚明显;主要的植被多为阔叶落叶树,其中杨、榆、柳、槐等易成活。陇西县是中药材种植的主要区域,其盛产的中药材种类较多,共 70 余种,其中野生药材的种类约为 50 余种,人工种植药材约 20 余种,其中普遍种植的中药材有党参、黄芩、黄芪、甘草、柴胡等^[16]。

1.2 数据来源与研究方法

1.2.1 数据采集 土壤数据来自于 2018 年 8 月份在陇西地区实地采集的 200 个样点数据,其中样地布设采用分区简单随机抽样的方法,样本量是根据成本费用、所期望达到的精度要求以及当地实际情况确定的,采用多点混合法进行典型样点采样。其采样点分布如图 1 所示。在每一采样点上采用分层抽样的方法,去除土壤表层上面的植被和凋落物,抽取每一个样点的 0~10 cm、10~30 cm、30~50 cm 土层的土样,总共采集土壤样本 600 份,将所采集的土样装袋并编号。土壤有机质测定采用重铬酸钾容量法(水合热法)^[17]。

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 2018 年的日均数据。利用克里金插值获取采样点的 2018 年气温、相对湿度、累计蒸发量与累计降水量信息。DEM 数据来源于地理空间数据云(www.gscloud.cn/)平台下载的 GDEM 30 m 空间分辨率的陇西县高程数据。在获取陇西县的 DEM 高程数据之后,利用 ArcGIS 10.6 软件得到整个陇西县的高程、坡度以及坡向影像数据,并提取每一个采样点的高程、坡度和坡向的数据。

1.2.2 数据处理 通过 ArcGIS 10.6 软件对各个数据进行数字化并作图。利用空间分析中插值工具得到整个研究区的土壤有机质空间分布变化,利用整理的可以覆盖研究区的 14 个气象站 2018 年的观测数据,使用空间插值方法得到研究区的年均温和年降水

量的空间分布数据,利用获得的 DEM 遥感影像数据提取研究区的高程、坡度和坡向信息,并对坡度和坡向进行分类,划分为 $0^\circ \sim 5^\circ$ 、 $5^\circ \sim 15^\circ$ 、 $15^\circ \sim 25^\circ$ 、 $25^\circ \sim 35^\circ$ 、 $35^\circ \sim 45^\circ$ 、 $>45^\circ$,共 6 个等级,分别为平坡、缓坡、斜坡、陡坡、急坡、险坡。利用 ArcGIS 的空间分析技术,得出不同海拔、不同坡度的有机质空间分布状况。

1.2.3 插值方法 采用简单克里金插值方法对气象数据进行插值,采用局部多项式的方法对陇西县土壤有机质密度进行插值,从而得到整个陇西县域内的有机质密度空间分布状况。

1.3 土壤有机质密度计算方法

土壤有机质密度(SOMD)是指一定土壤深度土层中单位面积土壤有机质的存储量,计算公式如下:

$$\rho_k = C_k \times D_k \times E_k \times (1 - G_k) / 100 \quad (1)$$

$$\rho_{0-50} = \sum_{k=1}^3 \rho_k \quad (2)$$

式中, ρ_k 为第 k 层 SOM 密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$); k 为土层深度(cm); C_k 为第 k 层 SOM 含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); D_k 为第 k 层土壤密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); G_k 为第 k 层土层中直径 $> 2 \text{ mm}$ 石砾占土层体积的百分比(%); ρ_{0-50} 为 $0 \sim 50 \text{ cm}$ 土层中有机质密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$); E_k 为土层厚度(cm)。

1.4 统计分析

利用 JMP 10 进行描述性统计分析,利用 Pearson 相关分析土壤有机质与经纬度、海拔、坡度因子之间的相关性,探索导致土壤有机质空间异质性的因子;并利用回归分析的方法构建 SOM 与各个因子之间的回归模型,分析各个因子对土壤有机质的影响程度;利用单因素方差分析比较不同地区土壤有机质含量差异。

2 结果与分析

2.1 陇西县各乡镇土壤有机质密度(SOMD)分布特征

通过对陇西县各乡镇 SOMD 进行统计分析(表 1),发现马河镇、碧岩镇、福星镇的 SOMD 在整个县域中较高,分别为 65.87×10^3 、 59.79×10^3 、 $57.90 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中马河镇的有机质含量最高;权家湾乡、和平乡、云田镇的 SOMD 较低,分别为 27.03×10^3 、 32.59×10^3 、 $35.86 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;其他乡镇的 SOMD 在 $43.17 \times 10^3 \sim 54.20 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间。变异系数可以反映数据分布的离散程度,从各个乡镇采集样点的有机质含量的变异系数可以判断出在各个乡镇中有机质含量的变化幅度不尽相同。其中福

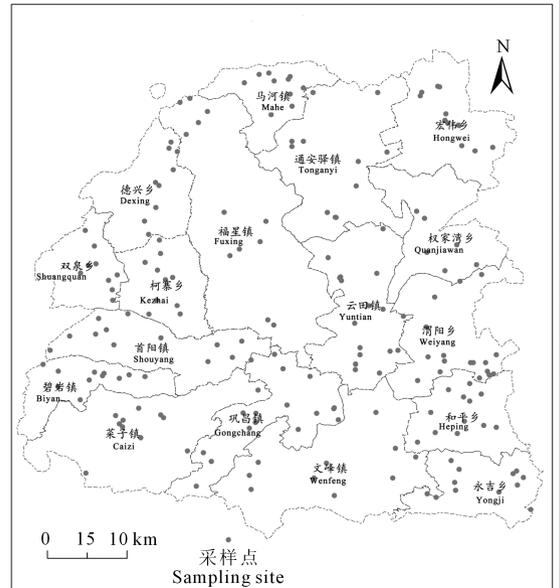


图 1 采样点空间分布

Fig.1 The spatial distribution of sampling locations

表 1 陇西县各乡镇土壤有机质密度(SOMD)分布特征

Table 1 The distribution characteristics of SOMD in Longxi County

乡镇 Town	样点数 The number of samples	均值±标准差 Mean±standard error ($10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	95%置信区间 Confidence interval		变异系数 CV/%
			上限 Upper	下限 Down	
碧岩镇 Biyan	12	59.79±3.87a	68.31	51.27	22.43
菜子镇 Caizi	11	51.48±3.04abc	58.25	44.72	19.57
德兴乡 Dexing	9	43.17±4.50abc	53.55	32.79	31.28
福星镇 Fuxing	12	57.90±8.66a	76.95	38.85	51.78
巩昌镇 Gongchang	17	44.55±2.68abc	50.23	38.86	24.82
和平乡 Heping	12	32.59±4.50bc	42.49	22.69	47.82
宏伟乡 Hongwei	12	52.67±6.05abc	65.98	39.37	39.77
柯寨乡 Kezhai	11	53.31±5.22abc	64.94	41.67	32.49
马河镇 Mahe	10	65.87±5.22a	77.67	54.07	25.04
权家湾乡 Quanjiawan	7	27.03±2.63cd	33.47	20.59	25.76
首阳镇 Shouyang	11	54.20±3.99ab	63.10	45.30	24.44
双泉乡 Shuangquan	9	50.83±5.18abc	62.78	38.88	30.59
通安驿镇 Tonganyi	10	4.58±0.28d	5.21	3.94	19.30
渭阳乡 Weiyang	15	48.67±5.81abc	61.12	36.21	46.21
文峰镇 Wenfeng	12	44.42±3.47abc	52.07	36.77	27.09
永吉乡 Yongji	12	51.36±5.29abc	62.99	39.72	35.67
云田镇 Yuntian	18	35.86±1.96bc	39.98	31.73	23.13

注:同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$), the same below.

星镇、和平乡、渭阳乡的有机质含量变化幅度较大,变异系数分别为 51.78%、47.82%、46.21%,而菜子镇、通安驿镇的变化幅度较小,变异系数分别为 19.57%、19.30%,其他乡镇的变异系数在 20%~40%之间。因此,陇西县 SOMD 的离散程度属于中等变异程度。陇西县不同乡镇的土壤有机质含量不同,是由于各乡镇的地形条件不同,陇西县土壤有机质含量的分布表现出自西向东逐渐减少的变化规律,并且局部地区具有聚集效应(图 2,见 196 页)。

2.2 陇西县中药材种植区土壤有机质的空间变化特征

2.2.1 SOMD 随土层深度的变化特征 SOMD 随土壤深度的变化统计结果(表 2)表明,表层 0~10 cm 的 SOMD 水平最低,为 $10.76 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;10~30 cm 土层 SOMD 最高,为 $18.93 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;不同土层之间具有显著差异($P < 0.05$),表现为 10~30 cm 土层土壤有机质含量显著高于 0~10 cm 和 30~50 cm 土层,30~50 cm 土层显著高于 0~10 cm 土层($P < 0.05$)。随着土层深度的增加,SOMD 呈先上升后下降的趋势。

2.2.2 SOMD 随经、纬度及海拔的变化特征 通过对陇西县土壤有机质密度与经度和纬度进行相关性分析,并利用最小二乘法进行拟合,发现陇西县土壤有机质密度与经度存在显著负相关性,与纬度存在极显著正相关性,表现出土壤有机质密度自西向东、自南向北含量逐渐增大的趋势(图 3)。陇西

县土壤有机质含量与海拔存在极显著正相关性,随着海拔的升高,土壤有机质含量逐渐增加。研究区海拔落差为 1 590~2 572 m,以 200 m 为区间,把海拔分为 6 个等级,陇西县土壤有机质密度含量在 $42 \times 10^3 \sim 62 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间,按照 $2 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,间隔分为 10 个等级(图 4)。由于陇西县地势中间低四周高,并且在西北、西南区域海拔最高,所以其有机质密度最高,在中间渭河平原区域,海拔较低,其有机质密度值也比较低。

SOMD 随着坡度的增加呈现逐渐降低的趋势,但是趋势较缓。陇西县平坡区域较少,其有机质密度变化范围较大,在 $41.9 \times 10^3 \sim 62.73 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间,同样由于海拔的影响,表现出从东向北、西北、西、西南、南方向呈现逐渐增加的放射状分布模式;陇西县缓坡区域所占面积较大,其 SOMD 变化范围在 $41.9 \times 10^3 \sim 61.9 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间,大部分区域在 $48.9 \times 10^3 \sim 52.3 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间,南部区域在 $45.4 \times 10^3 \sim 48.9 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间(图 5);陇西县斜坡区域所占面积也比较大,其有机质含量变化范围在 $41.9 \times 10^3 \sim 62.99 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间,在斜坡区域土壤有机质含量表现出明显的放射性分布规律,以权家湾乡、和平乡、渭阳乡、云田镇为中心向四周辐射,随着海拔逐渐升高,土壤有机质含量也逐渐升高;陡坡区域与斜坡区域表现出相似的分布规律,但是陇西县陡坡区域较少。

表 2 不同土层土壤有机质密度统计特征
Table 2 SOMD statistical characteristics of different soil layers

土层深度 Soil depth /cm	样点数 The number of samples	均值±标准误 Mean ± standard error /($10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	95%置信区间 Confidence interval		变异系数 CV/%
			上限 Upper	下限 Down	
0~10	200	$10.76 \pm 0.31c$	11.37	10.15	40.63
10~30	200	$18.93 \pm 0.61a$	20.14	17.73	45.79
30~50	200	$16.33 \pm 0.62b$	17.56	15.11	53.74

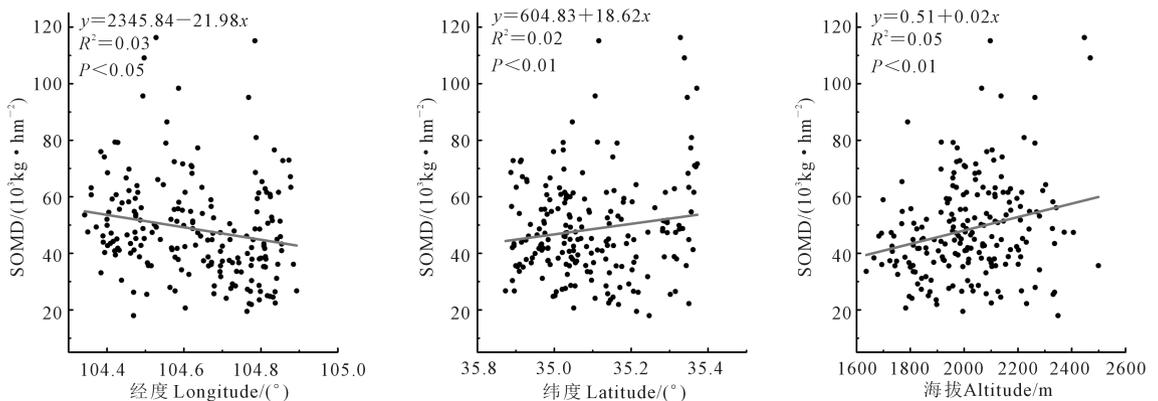


图 3 土壤有机质密度随经、纬度及海拔的变化特征

Fig.3 Variation characteristics of SOMD with longitude, latitude, and altitude

2.2.3 SOMD 随气象因子的变化特征 通过对陇西县土壤有机质密度与降雨量、蒸发量、气温、相对湿度 4 个气象因子进行相关性检验,并利用最小二乘法进行回归拟合,发现陇西县土壤有机质密度与降雨量、蒸发量、气温、相对湿度 4 个气象因子之间存在显著相关性,并且与相对湿度和蒸发量之间达极显著差异。土壤有机质密度与降雨量、相对湿度之间呈显著负相关,随着降雨量的增多以及相对湿度的增大,有机质密度降低;与气温和蒸发量之间呈显著正相关,即随着气温的升高、蒸发量增大,有机质密度升高。虽然降雨量、蒸发量、气温、相对湿度与土壤有机质密度之间存在显著相关性,但是其各个因子对土壤有机质密度的解释水平较低(图 6)。

3 讨论

本研究表明,陇西县土壤有机质含量在空间上呈现出自西向东逐渐减少的变化规律,且局部地区具有聚集效应,而造成这一分布规律的原因是陇西县的地形因子。地形因子通过影响土壤水热资源的再分配和土壤生态系统的物质循环过程与强度来影响土壤有机质的空间变异^[4]。从地质构造看,陇西县是一个构造盆地,四周隆起,中间凹陷。地貌格局可以概括为渭南山地,渭北黄土丘陵,中部渭河平原,总体的海拔趋势为自东向西、西南与西北逐渐升高,随着海拔的升高,植物分布逐渐密集,且人类活动减少,对土壤扰动程度减少,土壤有机质含量增加^[16, 18]。

本研究中,土壤有机质含量随着土层深度的增加呈现出先上升后下降的特征。孙忠祥等^[19]研究表明,随着土层深度的增加,土壤有机质含量逐渐降低。与本研究有所不同,可能是因为当地中药材的连作种植及人类活动的干扰,致使生物环境恶化,土壤养分减弱,从而表层土壤有机质含量低于中层土壤,而在 10 cm 以下符合垂直分布规律,随着土层深度的逐渐增加,植物根系数量减少,分解者的活动减弱,有机质含量降低。随着经纬度以及坡度的增大,土壤有机质含量逐渐降低。大量研究表明气温是导致土壤有机质发生变化的重要因素^[20],

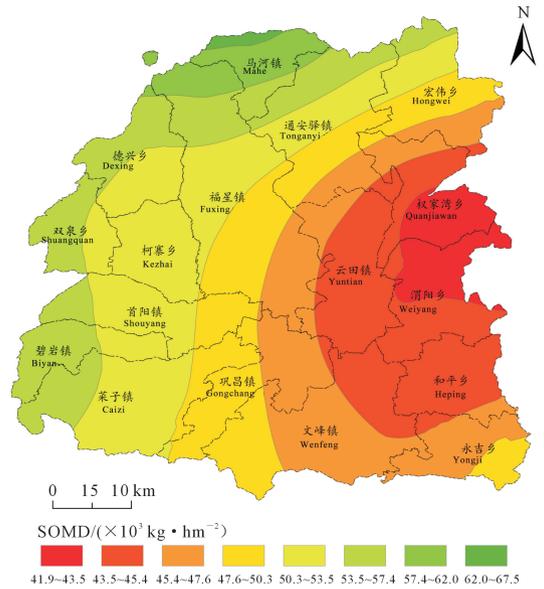


图 2 陇西县各乡镇土壤有机质密度空间(SOMD)分布特征
Fig.2 The spatial distribution characteristics of SOMD in each township of Longxi County

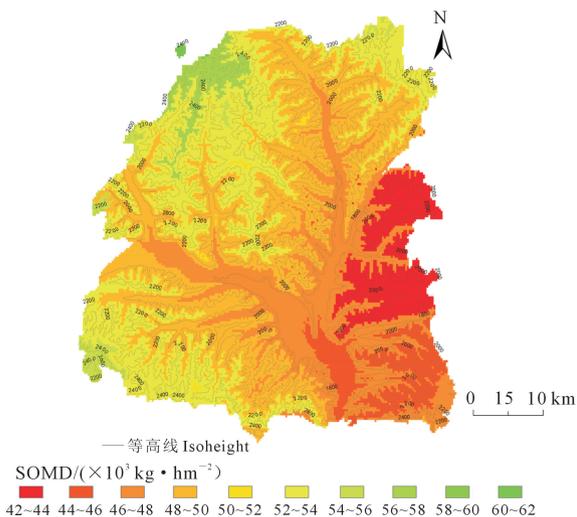


图 4 不同海拔高度土壤有机质密度空间分布
Fig.4 Spatial distribution of SOMD at different elevations

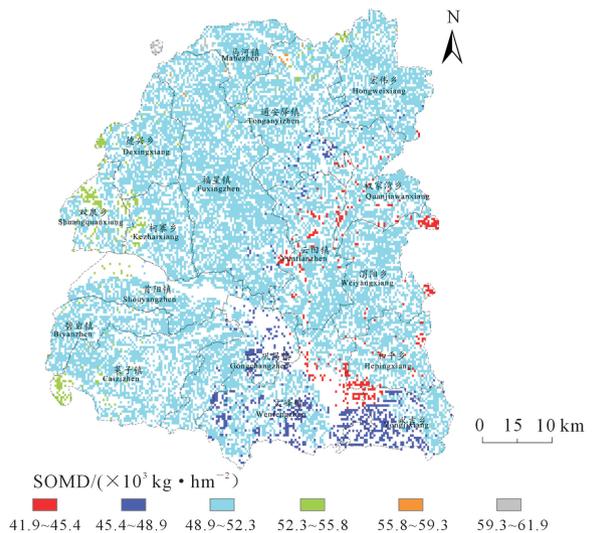


图 5 缓坡区域土壤有机质密度空间分布
Fig.5 SOMD spatial distribution in the gentle slope region

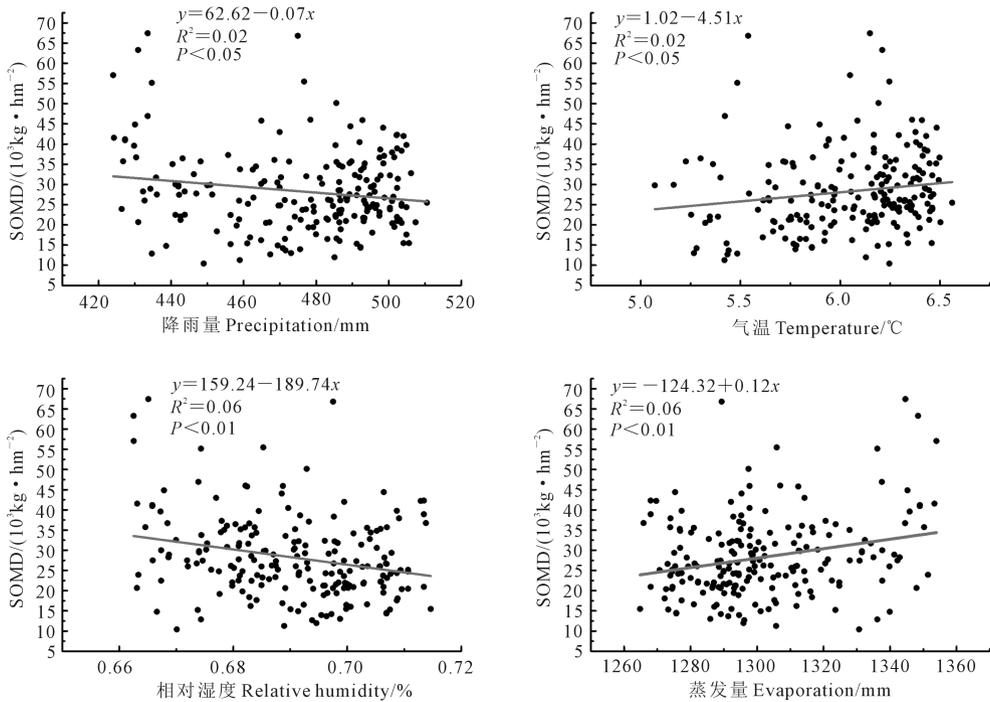


图6 土壤有机质密度随气象因子的变化特征

Fig.6 Variation characteristics of SOMD with meteorological factors

随着纬度的逐渐升高,年平均气温逐渐降低,植物生长速度变慢,微生物活性减弱,有机质输入大于输出;微生物是土壤有机质分解和转化的主要驱动力,对有机质的分解量远大于输入量,在一定温度范围内,随着气温的升高土壤微生物分解土壤有机质的速度加快,因此土壤有机质含量与经纬度呈负相关。刘立文等^[21]的研究中得出,随着坡度的增大,土壤有机质含量降低;与本研究结果相同。可是由于随着坡度的增加,土壤侵蚀逐渐增加,地表径流的流量增加,导致凋落物的积累变少,从而导致土壤有机质的含量逐渐减少。

研究表明在一定的温度范围内,土壤有机质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,CO₂的排放量增多,从而导致土壤有机质密度降低^[22]。降雨是土壤水分的主要来源之一,它影响着土壤的湿度、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]。由于陇西县土壤类型主要为黄绵土、黑垆土、潮土,其占全县面积的75.16%,而黄绵土、黑垆土、潮土的质地较粗、耕作性较差、漏水严重,随着降雨量的增多及蒸发量的减少,土壤的含水量增多,加快了土壤的矿化作用,加速了土壤有机质的分解,导致土壤有机质含量降低。而随着温度的升高,土壤酶活性增强,加快了土壤有机质的分解速率,但同时土壤的湿度逐渐降低,又

限制了有机质的分解速率。而本研究表明土壤有机质密度与气温之间呈显著正相关,随着气温的升高,土壤有机质密度逐渐升高,也即随着气温的升高,土壤有机质的分解速率逐渐降低,其原因可能是在陇西县影响土壤有机质分解速率的首要限制因素为土壤水分,虽然温度升高可以提高分解速率,但是会导致土壤湿度的降低;而陇西县的土壤类型主要为黄绵土、黑垆土、潮土,保水性差,其有机质总分解速率降低,所以提高陇西县土壤有机质含量首先要解决的是土壤的保水性问题。

4 结论

陇西县各乡镇 SOMD 在 $27.03 \times 10^3 \sim 65.87 \times 10^3$ kg · hm⁻² 之间,变异系数在 19.30% ~ 51.78% 之间,属中等变异强度。在空间上自西向东呈逐渐减少的趋势,且局部聚集;随土层深度增加,有机质含量先上升后下降;与经纬度、坡度呈负相关关系,与海拔呈正相关。SOMD 的空间分布受到纬度、坡度、海拔的影响,尤其海拔对有机质的影响程度最大。陇西县土壤有机质密度与降雨量、蒸发量、气温、相对湿度 4 个气象因子之间存在显著相关性,并且与相对湿度和蒸发量之间相关性达到极显著水平,与降雨量、相对湿度之间呈显著负相关,与气温和蒸发量之间呈显著正相关。

(下转第 251 页)