

甘肃省陇西县中药材产区耕作土壤 养分空间变异研究

何明珠¹, 任建新¹, 白光祖¹, 赵鹏善¹, 李承义^{1,3}, 唐 亮^{1,3}

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000; 2. 哈密市农产品质量安全检验检测中心, 新疆 哈密 839000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:【目的】基于中药材种植区土壤养分及其空间分布的高精度数据分析, 探究县域尺度土壤养分空间变异特征并类比和优化评价方法。【方法】类比经典统计学、地统计学以及 GIS 评价方法, 对中药材种植区土壤养分及综合肥力空间分布格局进行研究。【结果】①研究区土壤呈碱性 ($\text{pH} = 8.50$), 有机质、全氮、全磷、全钾平均含量分别为 7.54 g kg^{-1} 、 0.73 g kg^{-1} 、 0.73 g kg^{-1} 、 17.96 g kg^{-1} , 电导率为 $108.63 \text{ ms cm}^{-1}$; 从变异系数来看, 除 pH 为弱变异外, 有机质、全氮、全磷、全钾、电导率均属中等变异。②土壤养分的空间分布特征表现为, 土壤有机质含量总体呈现西南部高于东北部分布; 全氮含量呈斑块状分布, 主要表现为南部高东部低的特征; 全磷含量空间变异中等, 在研究区西南侧有岛状高含量点分布; 全钾含量呈中部略高四周低的分布趋势; 电导率空间异质性大, 呈斑块状分布。③土壤综合肥力空间分布呈现西高东低, 中部向南、北部降低的趋势。此外, 根据内梅罗综合指数法、主成分分析法和模糊综合评价法综合评价得分可将该区土壤肥力分成 5 级, 三种评价方式中, 肥力等级为 III 等级及以下的区域分别占研究区总面积的 74.97%、43.28% 和 67.57%。【结论】中药材长期不合理的种植会降低土壤整体肥力; 增施有机肥、氮磷钾平衡施肥、轮作、休耕和培肥土壤等措施有助于当地中药材的可持续种植。

关键词: 中药材; 土壤养分; 综合评价; 空间分布

中图分类号: S151.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2022)03-0001-09

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2021081502

何明珠, 任建新, 白光祖, 赵鹏善, 李承义, 唐 亮. 甘肃省陇西县中药材产区耕作土壤养分空间变异研究 [J]. 土壤通报, 2022, 53(3): 1-9

HE Ming-zhu, REN Jian-xin, BAI Guang-zu, ZHAO Peng-shan, LI Cheng-yi, TANG Liang. Spatial Distribution Patterns of Soil Fertility in Producing Area of Traditional Chinese Medicine of Longxi County, Gansu Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(3): 1-9

【研究意义】中药材具有道地性, 在我国经济农业发展中占有重要地位。作为特殊的经济作物, 中药材的产量和品质是地区经济发展重要保障^[1-2]。实践证明, 随着中药材栽培年限的延长, 中药材栽培土壤肥力逐渐衰退, 直接导致中药材产量与品质的下降^[3]。所以准确客观评价中药材栽培土壤养分及综合肥力空间分布格局对当地中药材可持续发展具有重要作用。【前人研究进展】近年来诸多学者针对中药材栽培的土壤养分及综合肥力空间分布格局进行了研究, 发现不同中药材种植地的土壤肥力状况和空间分布影响了中药材的质量, 如云南三七种植区^[4], 广藿香等中药材 GAP 基地^[5], 亳州市中药材产地^[6]等。虽然目前已对诸多中药材种植地土壤养分

及综合肥力的空间分布格局进行了探索, 但对于旱和半干旱区中药材种植地土壤肥力的研究却报道较少, 且关于中药材种植基地土壤肥力评价方法多为内梅罗综合指数法等^[4-9], 少有运用多种方法进行比较评价。

【本研究切入点】甘肃省陇西县作为西北典型的半干旱区域, 其降水稀少, 日照时间充足。作为甘肃省乃至全国重要的道地药材产区之一, 以“千年药乡”著称的陇西县近年来中药材种植面积一直呈扩大趋势。但由于部分药农过于依靠化肥, 加上农药的超量使用和有限的耕地资源上连作、轮作, 使得药材质量下降且土壤和生态环境遭到破坏^[10]。【拟解决的问题】本研究以甘肃省中药材产区陇西县为

收稿日期: 2021-08-15; 修订日期: 2022-04-28

基金项目: 中国科学院西北研究院科技服务网络计划 STS 项目资助

作者简介: 何明珠 (1979-), 男, 甘肃省天水市, 博士, 主要从事恢复生态学研究。E-mail: hmzecology@lzb.ac.cn

研究对象, 通过对比分析多种评价方法的结果, 结合地统计学精准评价研究区土壤肥力状况, 揭示土壤养分指标与综合肥力空间分布规律。以期为陇西县中药材种植区的科学施肥及其养分管理, 提高中药材产量和品质提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陇西县位于甘肃省东南部, 定西市中部, 是古丝绸之路和新亚欧大路桥的必经之地 (34°50' ~ 35°23' N, 104°18' ~ 104°54' E)。海拔范围介于 1612 ~ 2762 m 之间, 为温带季风气候。四季分明, 日照充足, 气候温和。年平均降水量 445.8 mm, 蒸发量 1440 mm, 年平均日照时间 2292 h, 年平均无霜期 146 d。该区位处西北黄土高原边缘与秦岭支脉丘陵地带之间, 为黄土梁峁与河谷地形, 构成南山 (二阴地区)、川区 (渭河水川地区) 和北山 (干旱地区) 三类条件明显差异的区域; 其地势西北高、东南低。受东亚大气环流和青藏高原外围特殊地形的

影响, 川区和北山为温和干旱区, 南山为温寒半湿润区; 县境内土壤类型主要有黄绵土、黑麻垆土、灰褐土、潮土、红土。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、甘草和柴胡等^[11], 种植区域现已覆盖全县 17 个乡镇的 250 个行政村。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与分析 2018 年 8 月, 选取甘肃省测土配方施肥项目在陇西县 17 个乡镇 134 个自然村设置的 200 个长期监测样地开展土壤样品采集, 利用 GPS 确定每个样地地理坐标, 记录经纬度、海拔、坡度、坡向、土壤类型等环境要素 (图 1)。每个样方面积为 100 m² (10 m × 10 m), 以“S”形采样法采集 4 个重复采样点 (间隔大于 2 m) 的分层土壤样品, 采用混合取样的方法分别采集表层 (0 ~ 10 cm)、中层 (10 ~ 30 cm) 和底层 (30 ~ 50 cm) 土壤样品, 土样带回实验室后, 经自然晾晒, 剔除杂物, 研磨, 过筛后测定土壤养分含量。共采集土壤样品 600 份。

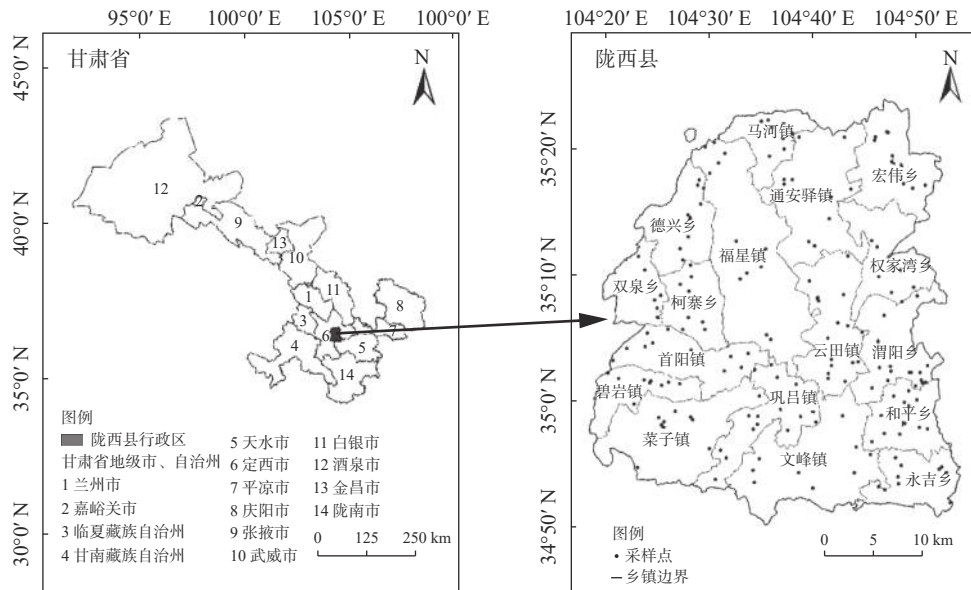


图 1 陇西县行政区划及采样点空间分布
Fig.1 Spatial distribution of sampling sites in Longxi County

因目前中药材种植基地土壤肥力综合评价缺乏统一的评价方法及指标, 同时速效养分易受施肥措施及季节性变异的影响^[3]。本文依据前人研究^[4,12-15]及结合陇西县中药材栽培土壤特点确定有机质、全氮、全磷、全钾、pH 和电导率 6 项评价指标。土壤有机质采用重铬酸钾氧化—外加热法测定; 全氮含量采用半微量凯式定氮法测定; 全磷含量用高氯酸—

硫酸消解—钼锑抗比色法测定; 全钾含量用氢氧化钠熔融—火焰光度法测定; pH 用电位法 (水土比为 5 : 1); 电导率用电导仪测定。

1.2.2 地统计学分析 运用土壤学中最常用的克里格方法 (Kriging)^[16-18], 又称空间局部插值法, 是建立在半变异函数理论和结构分析的基础上, 对未采样点进行估测。克里格方法在考虑未知样点的形状、

大小和空间方位后, 还要考虑其他采样点的空间位置信息以及变异函数提供的结构信息, 是对未知样点进行的一种线性无偏最优估计。半方差函数的计算见公式 (1)。

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i+h) - Z(X_i)]^2 \quad (1)$$

式中: $\gamma(h)$ 为半方差值; h 为样本间距; $N(h)$ 为间距为 h 的样本对数; $Z(X_i+h)$ 、 $Z(X_i)$ 分别为 X_i+h 、 X_i 处的实测值^[11]。

1.2.3 土壤肥力评价方法 (1) 内梅罗综合指数法。采用改进的内梅罗综合指数法进行综合评价, 首先对各个参数进行标准化计算, 以消除各参数间的差别, 然后对土壤综合肥力进行计算和分级。

参数的标准化参照第二次全国土壤普查标准^[19], 消除各参数间的差别后获得各肥力指标的系数, 用公式 (2)^[20] 的方法进行评价土壤肥力指标的标准化处理。

$$IFI_i = \begin{cases} \frac{x_i}{x_{ia}} & x_i \leq x_{ia} \\ 1 + \frac{x_i - x_{ia}}{x_{ic} - x_{ia}} & x_{ia} < x_i \leq x_{ic} \\ 2 + \frac{x_i - x_{ic}}{x_{ip} - x_{ic}} & x_{ic} < x_i \leq x_{ip} \\ 3 & x_i > x_{ip} \end{cases} \quad (2)$$

式中, i 为 6 个土壤肥力评价指标 (即有机质、全氮、全磷、全钾、pH 和电导率), IFI_i 为第 i 指标的分肥力系数, x_i 为第 i 指标的测定值, x_{ia} 、 x_{ic} 、 x_{ip} 为第 i 分级指标。当 $IFI_i \leq 1$ 表明分肥力水平属于差一级, 当 $1 < IFI_i \leq 2$ 表明分肥力水平属于中等一级, 当 $2 < IFI_i \leq 3$, 表示较好一级。

土壤综合肥力的计算: 采用改进的内梅罗公式计算综合肥力系数公式, 见公式 (3)。

$$IFI_1 = \sqrt{\frac{(IFI_{i\text{平均}})^2 + (IFI_{i\text{最小}})^2}{2}} \cdot \left(\frac{i-1}{i}\right) \quad (3)$$

式中, IFI_1 为土壤综合肥力值, $IFI_{i\text{平均}}$ 为土壤各属性分肥力系数的平均值, $IFI_{i\text{最小}}$ 为各分肥力系数中的最小值。采用 $IFI_{i\text{最小}}$ 代替原内梅罗公式中的 $IFI_{i\text{最大}}$, 是为了突出土壤属性中最差一项指标对肥力的影响, 即突出限制性因子; 增加修正项 $\left(\frac{i-1}{i}\right)$ 是为了反映可信度, 即参评土壤属性项目越多, 可信度越高^[21]。

(2) 主成分分析法。主成分分析法是一种利用

降维的思想, 把多指标转化为少数几个含主要信息指标的统计分析方法, 可以达到因子维数简化的目的, 其优点在于简单, 无参数限制^[22-23]。

原始数据利用公式 (4) 进行标准化处理。

$$X_{ik} = \frac{(X_{ik} - \bar{x}_i)}{S_i} \quad (4)$$

式中: x_{ik} 为土壤肥力指标的含量; \bar{x}_i 为养分 i 在各土壤样品的含量均值; s_i 为养分在各土壤样品中含量的标准差^[22]。

计算特征向量及方差贡献率: 在对各个指标数值进行标准化处理后, 计算特征值、特征向量; 贡献率和累计贡献率, 这一步由软件自动完成。

计算主成分得分和综合得分^[24]: 分别利用公式 (5) 和公式 (6) 计算。

$$Z_j = \sum a_i^j X_{ik} = a_1^j X_{1k} + a_2^j X_{2k} + \dots + a_i^j X_{ik} \quad (5)$$

$$IFI_2 = \sum W_j F_j \quad (6)$$

式中: z_j 为第 j 种主成分的得分; a_i^j 为第 i 种主成分中养分指标 i 的因子负荷; x_{ik} 为样品编号为 k 的土样中养分指标 i 的标准化值; w_j 为各主成分贡献率, F_j 为各主成分得分。

(3) 模糊综合评价法。在进行土壤肥力综合评价时, 由于各评价因子在优劣之间是渐变的, 即对各评价因子的评价具有模糊性。所以采用模糊数学方法评价各个评价因子, 可以获得科学的评价结果^[25]。

土壤肥力指标权重计算: 利用相关系数法能够比较准确的揭示指标间的相互作用关系, 进而避免人为主观的影响^[26]。应用相关系数法计算指标权重首先计算各项肥力指标之间的相关系数, 获得某单项指标与其余指标相关系数绝对值的平均值, 不包括肥力指标自身的相关系数, 将该平均值占有所有肥力指标相关系数平均值总和的比值作为该肥力指标的权重^[27]。

肥力指标数据初始化: 构建隶属度函数 [公式 (7) ~ (9)] 对指标进行标准化处理。根据各评价指标对作物产量的响应, 分别构建 S 型、抛物线型和 Z 型隶属度函数并计算其隶属度值^[25]。

$$f(x) = \begin{cases} 1.0 & x \geq x_2 \\ 0.9(x - x_1)/(x_2 - x_1) + 0.1 & x_1 \leq x < x_2 \\ 0.1 & x < x_1 \end{cases} \quad (7)$$

$$f(x) = \begin{cases} 0.9(x_4 - x)/(x_4 - x_3) + 0.1 & x_3 \leq x < x_4 \\ 1.0 & x_2 < x < x_3 \\ 0.9(x - x_1)/(x_2 - x_1) + 0.1 & x_1 < x \leq x_2 \\ 0.1 & x \leq x_1 \text{ 或 } x \geq x_4 \end{cases} \quad (8)$$

$$f(x) = \begin{cases} 1.0 & x \leq x_1 \\ 0.1 + 0.9(x - x_1)/(x_2 - x_1) & x_1 < x \leq x_2 \\ 0.1 & x > x_2 \end{cases} \quad (9)$$

土壤综合肥力计算^[26]：利用公式(10)将各养分指标的隶属度值乘以权重系数后进行累加，可得到每个土壤样品基于模糊综合评价法的肥力综合指数。

$$IFI_3 = \sum_{i=1}^n (q_i w_i) \quad (10)$$

式中， IFI_3 为土壤肥力综合指数， q_i 为第*i*个评价指标的隶属度值， w_i 为第*i*个评价指标的权重系数。

(4) 土壤综合肥力等级划分。根据陇西县土壤肥力基本状况以及结合陇西县土壤肥力综合指数(IFI)实际情况，为避免人为主观因素的影响，将所有样点相对应的 IFI 得分作为变量，采用K-均值聚类的方法进行聚类分析^[28]并进行等级划分。

1.2.4 数据处理及分析 利用JMP 10.0和SPSS 26.0软件对土壤肥力各指标进行统计分析。应用内梅罗

综合指数法、主成分分析法、模糊综合评价法对研究区进行土壤肥力综合评价。运用地统计学方法对土壤肥力的空间变异进行分析，绘制土壤肥力指标和综合肥力指数的空间分布图。随后以综合评价方法的综合肥力指标值为新的评价指标，将研究区土壤肥力状况进行分级。

2 结果与分析

2.1 土壤养分含量变化

通过对陇西县200个采样点的600份土样数据进行描述性统计分析，了解陇西县土壤养分整体变化特征(表1)。有机质、全氮平均含量分别为 7.54 g kg^{-1} 、 0.73 g kg^{-1} ，根据全国第二次土壤普查养分分级标准，均属于第五级水平，含量较低；有机质、全氮各个样点含量差异较大，其变化范围分别为 $0.49 \sim 20.42 \text{ g kg}^{-1}$ 、 $0.25 \sim 2.01 \text{ g kg}^{-1}$ 。全磷、全钾平均值分别为 0.73 g kg^{-1} 、 17.96 g kg^{-1} ，均属于全国养分标准的第三级标准。pH分布范围为 $7.07 \sim 9.75$ ，平均值为 8.50 ，土壤呈碱性。从变异系数看，pH变异系数为 3.84% ，为弱变异；有机质、全氮、全磷、全钾和电导率变异系数均在 $10\% \sim 100\%$ 之间，属中等变异程度。可以看到，陇西县土壤养分含量整体较低，平时应加强培肥管理，通过增施有机肥，有机肥化肥配施等方式提高土壤养分含量。

表1 2018年土壤肥力指标统计
Table 1 Changes in soil fertility index in 2018

肥力指标 Fertility index	最大值 Maximum	最小值 Minimum	均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数(%) Coefficient of variation
有机质(g kg^{-1})	20.42	0.49	7.54	3.48	46.15
全氮(g kg^{-1})	2.00	0.25	0.73	0.31	41.69
全磷(g kg^{-1})	1.35	0.12	0.73	0.19	25.57
全钾(g kg^{-1})	38.12	3.15	17.96	4.42	24.62
电导率(ms cm^{-1})	342.00	56.26	108.63	37.56	34.58
pH	9.75	7.07	8.50	0.33	3.84

2.2 土壤肥力空间分布格局

2.2.1 土壤养分含量空间分布格局 依据半变异函数分析得到的最优拟合模型，利用普通克里格插值方法对各个土壤养分含量进行空间插值预测(图2)，根据全国第二次土壤普查养分分级标准对土壤养分空间分布图进行等级划分，随后用栅格图层统计各个土壤养分含量不同等级的面积以及所占比例。由图2和表2可知，陇西县中药材种植区有机质含量总体呈现西南部高于东北部，含量低于 10 g kg^{-1} 的土壤面积占研究区总面积的 94.50% ，陇西县有机质

含量整体处于缺乏水平。全氮含量整体呈斑块状分布，主要表现为南高东低的特征；处于第四、五、六级标准土壤面积占到研究区总面积的 96.20% ，全氮含量也处于整体缺乏水平，高值区零星分布于首阳镇、和平乡。全磷含量在研究区西南部首阳镇有岛状高含量点存在，归类为第三级标准($0.60 \sim 0.80 \text{ g kg}^{-1}$)分布面积最大，占到总面积的 51.56% ，主要分布在权家湾乡、渭阳乡、巩昌镇一带。陇西县土壤全钾含量呈中部略高四周低的趋势，高值区零星分布于文峰、马河与通安驿镇，处于第三级标

准 (15 ~ 20 g kg⁻¹) 分布面积占到总种植药材面积的 75.25%, 在陇西县广泛分布。此外, 陇西县土壤整体呈碱性, pH 范围在 7.5 ~ 8.5 的区域占到总面积的 45.87%, 在 8.5 ~ 9.5 范围占到总面积的 54.13%, 主

要分布在宏伟、权家湾乡一带。陇西县电导率主要呈斑块状分布, 其范围为 100 ~ 120 ms cm⁻¹, 主要分布在云田镇、通安驿镇和渭阳乡一带。

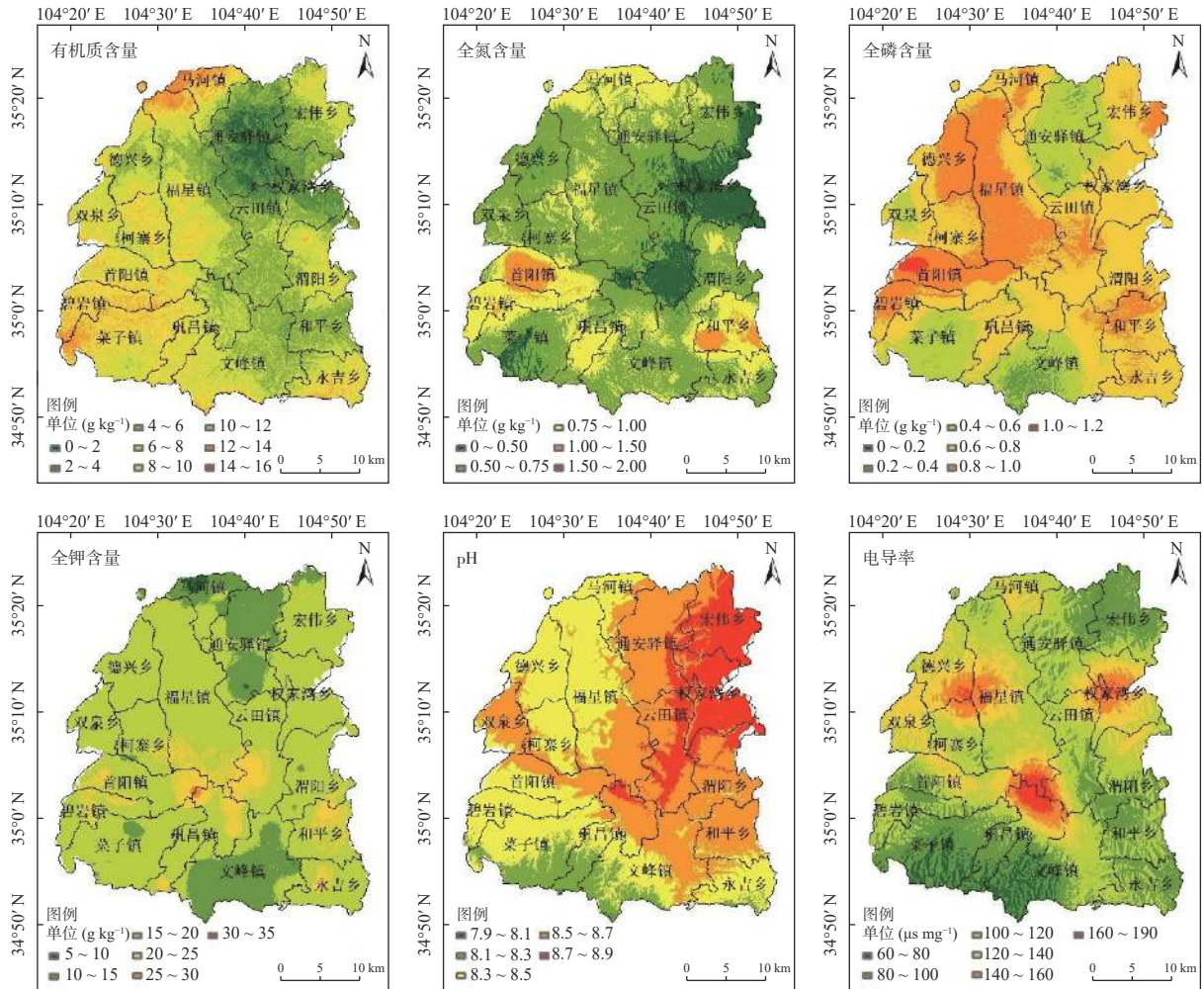


图 2 土壤养分空间分布
Fig.2 Spatial distribution of soil nutrients

2.2.2 土壤综合肥力指数空间分布格局 从图 3 可知, 陇西县中药材种植区土壤综合肥力空间分布图主要呈西部高, 东北部低, 中部向南北部降低的趋势。三种综合评价结果相似, 由此证明三种综合评价方法均能对陇西县土壤综合肥力进行准确评价。但由于三种综合评价方法的计算原理不同, 在空间分布及各等级所占比例上呈现出差异性。*IFI*₁、*IFI*₂ 和 *IFI*₃ 的 I、II 等土壤分别占研究区总面积的 25.03%、56.72% 和 32.43%, 主要分布于首阳镇、福星镇和柯寨乡等地; IV、V 等土壤 *IFI*₁、*IFI*₂ 和 *IFI*₃ 分别占总面积的 29.81%、17.30% 和 16.64%, 主要分布于通安驿镇、菜子镇和文峰镇一带。*IFI*₁ 在 III 等所占面积

最大, 占研究区总面积的 45.16%。而 *IFI*₂ 肥力等级评价在 II 等的面积最大, 占研究区总面积的 54.47%。*IFI*₃ 肥力等级评价为 III 等的所占面积最大, 占研究区总面积的 50.93% (表 3)。三种综合肥力等级主要集中在 II、III、IV 等级, I、V 等所占比例均较小, 肥力等级为 III 等及以下的 *IFI*₁、*IFI*₂ 和 *IFI*₃ 分别占研究区总面积的 75.00%、43.30% 和 67.60% (表 3)。综上所述, 三种综合评价结果存在差异, 但均能对土壤综合肥力进行准确评价, 三种综合评价结果显示陇西县土壤肥力整体偏低, 在今后的中药材种植土壤培肥管理工作中, 一方面应增加有机肥投入, 施肥时应采用有机肥与化肥配施, 氮磷钾肥平衡施

表 2 土壤养分含量等级面积比例
Table 2 Ratio of the area in soil nutrient content classification

养分 Nutrient	项目 Item	等级 Level					
		一级 Level 1	二级 Level 2	三级 Level 3	四级 Level 4	五级 Level 5	六级 Level 6
有机质	标准 (g kg ⁻¹)	> 40	40 ~ 30	30 ~ 20	20 ~ 10	10 ~ 6	< 6
	面积 (km ²)				130.11	1390.60	842.04
	面积比例 (%)				5.50	58.86	35.64
全氮	标准 (g kg ⁻¹)	> 2.0	2.0 ~ 1.5	1.5 ~ 1.0	1.0 ~ 0.75	0.75 ~ 0.5	< 0.5
	面积 (km ²)		0.42	92.22	639.67	1390.18	288.53
	面积比例 (%)		0.02	3.82	26.53	57.66	11.97
全磷	标准 (g kg ⁻¹)	> 1	1.0 ~ 0.8	0.8 ~ 0.6	0.6 ~ 0.4	0.4 ~ 0.2	< 0.2
	面积 (km ²)	10.12	563.38	1219.81	512.75	59.50	0.13
	面积比例 (%)	0.43	23.81	51.56	21.67	2.52	0.01
全钾	标准 (g kg ⁻¹)	> 25	25 ~ 20	20 ~ 15	15 ~ 10	10 ~ 5	< 5
	面积 (km ²)	2.92	200.37	1777.94	371.16	10.36	
	面积比例 (%)	0.12	8.48	75.25	15.71	0.44	
电导率	标准 (g kg ⁻¹)	190 ~ 160	160 ~ 140	140 ~ 120	120 ~ 100	100 ~ 80	80 ~ 60
	面积 (km ²)	39.65	133.92	431.63	1011.17	695.70	98.95
	面积比例 (%)	1.64	5.55	17.90	41.94	28.85	4.10
pH	级别	碱性	强碱性				
	标准 (g kg ⁻¹)	7.5 ~ 8.5	8.5 ~ 9.5				
	面积 (km ²)	1085.23	1280.46				
	面积比例 (%)	45.87	54.13				

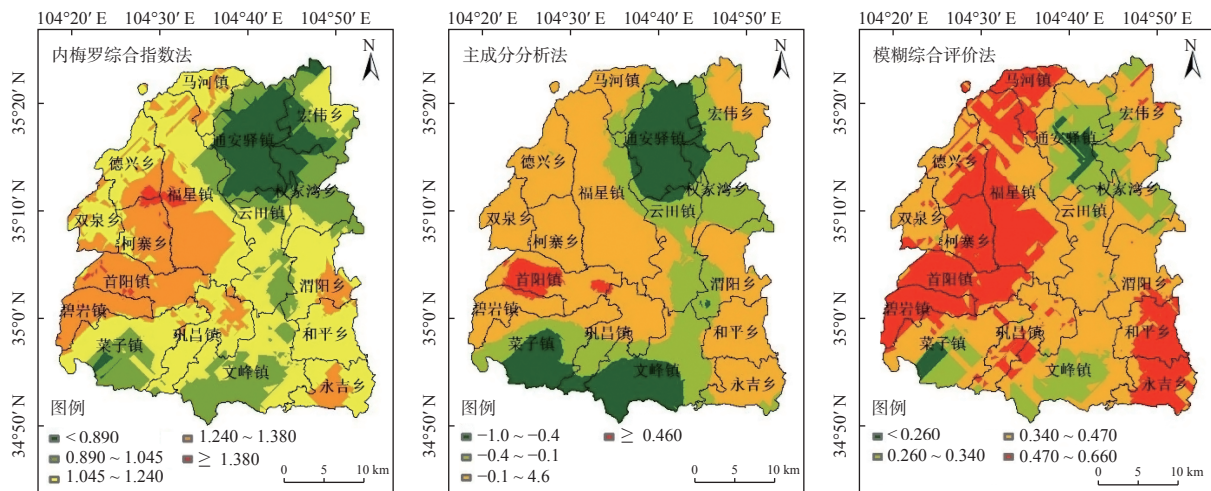


图 3 土壤肥力指数的空间分布
Fig.3 Spatial distribution of soil fertility index

表 3 土壤综合肥力指数各等级面积比例
Table 3 Percentages of the area of soil comprehensive fertility index in classification

综合指数 comprehensive index	项目 Item	肥力等级 Fertility level				
		I	II	III	IV	V
IFI ₁	标准	≥ 1.38	1.38 ~ 1.24	1.24 ~ 1.05	1.05 ~ 0.89	< 0.89
	面积 (km ²)	21.92	581.93	1089.69	542.16	177.10
	面积比例 (%)	0.91	24.12	45.16	22.47	7.34
IFI ₂	标准	≥ 0.46	0.46 ~ -0.10	-0.10 ~ -0.40	-0.40 ~ -1.00	< -1.00
	面积 (km ²)	54.44	1314.17	626.75	417.43	
	面积比例 (%)	2.25	54.47	25.98	17.30	
IFI ₃	标准	≥ 0.66	0.66 ~ 0.47	0.47 ~ 0.34	0.34 ~ 0.26	< 0.26
	面积 (km ²)		782.526	1228.704	351.633	49.934
	面积比例 (%)		32.43	50.93	14.57	2.07

肥的方式来提高土壤肥力。另一方面除应注意提高土壤肥力外, 还应采取土地休耕、轮作等方式来减缓农地利用强度。这样既减少土传病害的发生又可以培肥土壤, 防止土地退化, 进而可以实现中药材的可持续种植。

3 讨论

研究结果显示陇西县土壤养分含量整体偏低。从变异系数来看, 除却 pH 为弱变异外, 其余均为中等变异程度, 这与王幼奇等^[29]和高露等^[30]研究一致, 说明养分指标受到农业活动的显著影响。从养分含量来看, 有机质含量仅为 7.54 g kg^{-1} , 显著低于毛鸡骨草种植基地^[9], 三七种植区^[25], 亳州中药材产区^[6]和商洛中药材基地^[2, 8] (表 4)。主要原因是陇西县因中药材种植面积的不断扩大, 使得耕地粗放经营,

对土地的投入相对变少, 且农户的科学管理经验也不足, 导致有机质含量偏低^[7]。因此, 为了改善这一不利状况, 农户在平时应加强土壤培肥管理工作, 提高土壤有机质含量, 进而改善土壤物理性状, 控制土壤的水土流失^[31]。此外, 土壤氮素作为农业生态系统生产中的重要营养元素, 对植物生长发育具有重要影响。而陇西县土壤全氮含量为 0.73 g kg^{-1} , 与民勤干旱区耕地中全氮含量相差不大, 显著低于同区域自然草地和高纬度区农田^[32-33], 这主要是由于高频率的土壤翻耕等人为农业活动对土壤全氮施加了主要影响。陇西县全氮含量较低, 在今后的耕作施肥过程中, 增施有机肥, 提高土壤养分含量, 如施用农家肥等可以作为一种有效的管理方式。同时, 亦可以应进行测土配方施肥, 进行有机肥及化肥的合理施用。

表 4 陇西县与其他中药材种植区土壤养分含量比较

Table 4 Comparison in soil nutrient contents between Longxi and other areas of producing Chinese medicine

区域 Area	有机质 (g kg^{-1}) Organic carbon	全氮 (g kg^{-1}) Total nitrogen	全磷 (g kg^{-1}) Total phosphorus	全钾 (g kg^{-1}) Total potassium
陇西县中药材产区 (本研究)	7.54	0.73	0.73	17.96
毛鸡骨草种植基地 ^[9]	21.20	1.20		
三七种植区 ^[25]	34.84	1.45	6.08	21.25
亳州中药材产区 ^[6]	18.94	0.46	0.86	
商洛中药材基地 ^[28]	12.53	0.85		

磷作为中药材植物细胞核的重要成分, 是植物体内生理代谢活动必不可少的一种元素, 它对中药材的生长发育具有重要作用^[34]。钾素作为品质元素, 对中药材的质量也贡献了重要作用。而陇西县土壤全磷和全钾含量分别为 0.73 g kg^{-1} 和 17.96 g kg^{-1} , 属第三级标准, 含量较低。且陇西县全磷含量相对缺乏, 仍需要加强磷肥的补充, 特别是在菜子镇、文峰镇、通安驿镇和双泉乡一带, 在平时应加强追施磷肥, 并注意施肥方式及施肥时间。根据全国第二次土壤普查, 陇西县主要的土壤类型为黄绵土与黑麻垆土, 分别占县域总面积的 52.40% 和 39.40%, 分布在陇西县各个乡镇。黑麻垆土在中耕熟化过程中, 心土层有明显的钙积层, 使得土块变硬, 水分下渗快, 蒸发量大, 易干燥, 不抗旱, 从而致使作物低产。而黄绵土土壤养分贫瘠, 易发生脱水脱肥现象, 属于低产土壤^[35]。另外, 导致陇西县土壤养分含量偏低的另一个主要原因可能是由于近年来随着陇西县中药材种植面积的不断扩大, 对于土地的携带支出, 农户对于农田养分投入相对变少, 导致土

壤养分含量偏低。

在该研究区, 结果显示各个土壤养分指标空间分布差异较大, 表明各个土壤养分含量受到农业活动影响的程度及作物对养分的吸收程度不一样, 致使各个养分含量无明显规律。王军^[21]研究发现土壤有机质含量斑块的空间分布与土地利用、地形及农业管理措施有密切关系。潘超美等^[5]在针对广藿香等中药材基地的研究中也发现各个养分因子分布不平衡, 限制了在中药材的生长特点和生长期对养分的需求。此外, 在农户对中药材进行施肥管理时, 由于农户对各个土壤养分和施用肥料的认识不足, 往往依靠经验或者照搬农作物施肥方法如大量的撒施化肥^[41], 导致了土壤质地遭到破坏。同时, 无差别的灌水施肥增加了土壤肥力指标空间分布的异质性, 造成各个土壤养分的空间分布的显著差异^[29]。因此, 在今后对中药材种植地的施肥管理中, 应增加有机肥的施用, 如采用有机肥与化肥配施, 提高作物产量的同时培肥土壤。

基于三种综合评价方法 (IFI_1 、 IFI_2 和 IFI_3) 对

半干旱区陇西县中药材产区耕作土壤养分进行了肥力综合评价,结果表明土壤综合肥力整体偏低, IFI_1 、 IFI_2 和 IFI_3 为 III 等以下的土壤分别占研究区总面积的 75.00%、43.30% 和 67.60%。造成此现象的主要原因是由于人为的农业活动所导致。陇西县中药材种植面积近年来一直在呈扩大趋势,然而随着中药材种植面积的扩大,农户无法在对每块土地进行精细化管理,加之滥用化肥,施入的养分没有得到合理利用后又快速流失,造成土壤肥力的下降。刘德辉等研究发现长期种植中药材会使土壤肥力衰退,主要原因是由于轮作单调加之中药材药用部分被农户带出农田,中药材种植地养分循环总是处于入不敷出的状态^[36]。

三种综合评价方法对半干旱中药材产区耕作土壤养分的肥力评估得出了一些有效的结果,但结果之间存在一定差异。因此我们建议在后续的研究中应结合三种综合评价和野外试验等多种方法确定出最适的评价方法,以期为中药材的可持续发展提供理论支撑。

4 结论

陇西县半干旱区中药材种植土壤有机质、全氮、全磷和全钾平均含量分别为 7.54 g kg^{-1} 、 0.73 g kg^{-1} 、 0.73 g kg^{-1} 和 17.96 g kg^{-1} , pH 平均值为 8.50, 电导率平均值为 $108.63 \text{ ms cm}^{-1}$, 土壤养分含量整体偏低。变异系数显示 pH 为弱变异, 有机质、全氮、全磷、全钾和电导率属于中等变异。该区全磷含量有岛状高含量点存在; 电导率主要呈斑块状分布。另外, 种植区土壤综合肥力空间分布主要呈西高东北部低, 中部向南北部降低的趋势。高值区主要分布于陇西县西部, 低值区主要集中于陇西县通安驿镇、菜子镇、文峰镇一带。内梅罗综合指数法、主成分分析法和模糊综合评价法表明该半干旱区土壤肥力整体偏低, 应通过增施有机肥, 氮磷钾平衡施肥, 轮作和休耕等方式改良和培肥土壤。

参考文献:

[1] 索风梅, 陈士林, 任德权. 道地药材的产地适宜性研究[J]. *中国现代中药*, 2005, 7(9): 4-6,9.

[2] 张向东, 翟丙年, 张晓虎. 商洛中药材种植区土壤肥力诊断与综合评价[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(6): 135-142.

[3] 蒋靖怡, 杨婉珍, 康传志, 等. 中药材栽培地土壤肥力评价[J]. *中*

国中药杂志, 2018, 43(4): 847-852.

- [4] 杜彩艳, 张乃明, 姜蓉, 等. 云南三七种植区土壤主要养分含量特征研究与评价[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(3): 599-605.
- [5] 潘超美, 黄海波, 詹若挺, 等. 广藿香等中药材GAP基地土壤肥力诊断与综合评价[J]. *中药材*, 2002, 25(3): 157-159.
- [6] 魏俊岭. 亳州市典型中药材产地土壤肥力与环境质量评价[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2012.
- [7] 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.
- [8] 张向东. 商洛中药材基地土壤肥力分析与重金属含量评价[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2009.
- [9] 陈乾平, 董青松, 白隆华, 等. 毛鸡骨草GAP基地土壤肥力综合评价与供肥能力研究[J]. *安徽农业科学*, 2008, (17): 7326-7327+7334.
- [10] 陈玉武, 张海星, 高晓昱, 等. 陇药种植产业发展现状及对策研究[J]. *中国药学杂志*, 2020, 55(6): 486-490.
- [11] 任建新, 唐亮, 何明珠, 等. 陇西县土壤氮储量的空间分布特征及其影响因素研究[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(6): 318-324.
- [12] 王子龙, 付强, 姜秋香. 土壤肥力综合评价研究进展[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2007, 23(1): 15-18.
- [13] 刘东海. 县域尺度农田养分空间变异与肥力综合评价——以深州市为例[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- [14] Bo S, Zhou S, Zhao Q. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China[J]. *Geoderma*, 2003, 115(1-2): 85-99.
- [15] Zhong W L, Huang J Q, Li Y Y, et al. Assessment on soil fertility of Dongting Lake wetland area (China) based on GIS and fuzzy evaluation[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2011, 18(5): 1465-1472.
- [16] Umakant M, Rattan L, Liu D-S, et al. Predicting the Spatial Variation of the Soil Organic Carbon Pool at a Regional Scale[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(3): 1-9.
- [17] Melvin LK, Alejandro NF, Toni JS, et al. A simplified approach for estimating soil carbon and nitrogen stocks in semi-arid complex terrain - ScienceDirect[J]. *Geoderma*, 2011, 165(1): 1-11.
- [18] Hengl T, Heuvelink G, Stein A. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging[J]. *Geoderma*, 2004, 120(1/2): 75-93.
- [19] 裴蓓. 上海市杨浦区城市道路绿地土壤肥力分级及评价[J]. *上海农业学报*, 2020, 36(3): 41-46.
- [20] 罗敏强. 枣树压砂地土壤肥力评价及肥力指标空间变异规律研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
- [21] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 等. 黄土高原小流域土壤养分的空间分布格局-Kriging插值分析[J]. *地理研究*, 2003, 22(3): 373-379.
- [22] 杨文娜, 任嘉欣, 李忠意, 等. 主成分分析法和模糊综合评价法判断喀斯特土壤的肥力水平[J]. *西南农业学报*, 2019, 32(6): 1307-1313.
- [23] 宋苏苏. 土壤肥力评价方法研究[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2011.
- [24] 许仙菊, 马洪波, 陈杰, 等. 基于养分丰缺诊断和主成分分析

- 相结合的桑园土壤肥力评价[J]. *土壤*, 2013, 45(3): 470 - 476.
- [25] 刘义, 何忠俊, 陈中坚, 等. 三七种植区土壤肥力特征研究与评价[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2014, 29(2): 262 - 268.
- [26] 孙晓兵, 张青璞, 孔祥斌, 等. 华北集约化农区耕地土壤肥力时空演变特征——以河北省曲周县为例[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(12): 1857 - 1869.
- [27] 王远鹏, 黄晶, 柳开楼, 等. 东北典型县域稻田土壤肥力评价及其空间变异[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(2): 256 - 266.
- [28] 高宏艳, 索全义, 郑海春, 等. 内蒙古平原灌区耕地土壤肥力评价方法研究——以土默川平原灌区为例[J]. *土壤通报*, 2019, 50(4): 794 - 799.
- [29] 王幼奇, 白一茹, 赵云鹏. 宁夏砂田小尺度土壤性质空间变异特征与肥力评价[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(23): 4566 - 4575.
- [30] 高露, 张圣微, 赵鸿彬, 等. 退化草原土壤理化性质空间异质性及其对土壤水分的影响[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(3): 70 - 80.
- [31] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵沟壑区县域土壤有机质空间分布特征及预测[J]. *地理科学进展*, 2006, 25(2): 112 - 122.
- [32] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2015, 36(2): 652 - 660.
- [33] 刘志鹏. 黄土高原地区土壤养分的空间分布及其影响因素[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2013.
- [34] 林振清. 建瓯市毛竹林土壤有机质及氮磷钾含量的空间分布[J]. *竹子研究汇刊*, 2010, 29(4): 21 - 26.
- [35] 刘金兰. 浅谈几种不同土壤类别的改良利用方法[J]. *农业科技与信息*. 2014, (14): 15-16.
- [36] 刘德辉, 郭巧生, 孙玉华, 等. 苏北中药材种植地土壤肥力衰退原因及其恢复对策[J]. *土壤通报*, 2000, 31(2): 76 - 78, 97.

Spatial Distribution Patterns of Soil Fertility in Producing Area of Traditional Chinese Medicine of Longxi County, Gansu Province

HE Ming-zhu¹, REN Jian-xin¹, BAI Guang-zu¹, ZHAO Peng-shan¹, LI Cheng-yi^{1,3}, TANG Liang^{1,3}

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

2. Hami Agricultural Product Quality and Safety Inspection and Testing Center, Hami 839000, Xinjiang, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract: [Objective] Soil fertility has an extremely important influence on the yield and quality of medicinal plants in semi-arid areas, and soil fertility will gradually decline with the increase of planting years of Traditional Chinese medicine. This paper takes the traditional Chinese medicine planting area in Longxi County as the research area to explore the influence of long-term planting of traditional Chinese medicine on spatial variation of soil nutrients. [Method] Based on the statistics, geo-statistics and GIS, the spatial distribution pattern of tillage soil nutrients and comprehensive fertility was studied. [Result] ① Here soil electrical conductivity and pH were 108.63 ms cm⁻¹ and 8.50. Average contents of organic matter, total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and total potassium (TK) in the study region were 7.54 g kg⁻¹, 0.73 g kg⁻¹, 0.73 g kg⁻¹ and 17.96 g kg⁻¹, respectively. Meanwhile, the variable coefficient illustrated soil pH was the weak variation but organic matter, TN, TP, TK and electrical conductivity were moderate variation. ② Soil organic matter was high at the southwest and low at the northeast. TN content of soil presented the patch distribution, which was characterized by high at the south and lower at the east. Interestingly, soil TP content of this region ranged from 0.60 - 0.80 g kg⁻¹, and TP showed a climax at the southwest in the study region. Soil TK was higher at the center of the county than that in other directions. Soil electrical conductivity also presented the patch distribution. ③ The spatial distribution of soil fertility in the Longxi County illustrated a trend of high at the west and low at the northeast, and soil fertility of the center was higher than that in the north and the south. Furthermore, according to the comprehensive scores of Nemerow Comprehensive Index (*IFI*₁), Principal Component Analysis (*IFI*₂) and Fuzzy Comprehensive Assessment (*IFI*₃), soil fertility of the Longxi County was distinguished as five levels. Across three methods, we found that land area in the soil fertility lowering to the III level accounted for 74.97%, 43.28%, and 67.57% of the total area in the study region. [Conclusion] Long-term and unscientific planting of Chinese medicine decreased the total soil fertility. Lower soil fertility of the Longxi County can be improved by adding organic fertilizer and the mixed fertilizer of N:P:K in a scientific ratio, crop rotation and unplanted and so on.

Key words: Chinese medicines; Soil nutrient; Comprehensive evaluation; Spatial distribution

[责任编辑: 韩春兰]