

基于最小数据集的道地药材产地土壤养分质量评价^①

陈平峰¹, 夏飞强¹, 陶春军², 余晓红¹, 宋 词¹

(1 安徽省地球物理地球化学勘查技术院, 合肥 230022; 2 安徽省地质调查院(安徽省地质科学研究所), 合肥 230022)

摘 要: 为构建道地药材产地土壤养分质量的最小数据集(MDS), 以亳州市谯城区白芍、丹皮、菊花、白芷 4 种药材地土壤为研究对象, 基于 125 个样品的 17 项理化指标, 采用主成分分析法筛选关键指标并构建 MDS, 系统评价了不同药材地土壤养分质量差异。结果表明: 不同药材地土壤养分特征存在显著差异。白芍地氮、钾、铜、锌元素含量较高, 但速效钾含量轻度缺乏; 丹皮地速效钾含量及锰、铜、锌元素含量最低; 菊花地钙、铜、锌元素含量偏低, 而速效钾含量较高; 白芷地有机质、碱解氮和有效磷含量最高, 而速效钾含量严重不足。针对不同药材地构建的土壤养分质量评价 MDS 包含的指标因药材不同而异, 且基于 MDS 的评价结果与基于全量数据集(TDS)的评价结果显著正相关($R^2=0.686\sim0.821$)。不同药材地基于 MDS 的土壤养分质量指数表现为白芍地(0.503)>白芷地(0.494)>丹皮地(0.483)>菊花地(0.414)。综上, MDS 能够有效代表 TDS 对道地药材产地土壤养分质量进行评价, 建议对不同药材地实施分类管理与精准施肥, 以促进道地药材产地土壤养分提升与可持续发展。

关键词: 最小数据集; 主成分分析; 土壤养分质量; 道地药材

中图分类号: S158.3 **文献标志码:** A

Soil Nutrient Quality Evaluation of Genuine Medicinal Material Producing Areas Based on Minimum Data Set

CHEN Pingfeng¹, XIA Feiqiang¹, TAO Chunjun², YU Xiaohong¹, SONG Ci¹

(1 Anhui Institute of Geophysical and Geochemical Prospecting Technology, Hefei 230022, China; 2 Geological Survey of Anhui Province (Anhui Institute of Geological Sciences), Hefei 230022, China)

Abstract: To establish a minimum data set (MDS) for evaluating soil nutrient quality in genuine medicinal material producing areas, this study focused on soils of four medicinal plants: *Paeonia lactiflora*, *Paeonia suffruticosa*, *Chrysanthemum morifolium*, and *Angelica dahurica*, located in Qiaocheng District, Bozhou City. Utilizing 17 physicochemical indicators derived from 125 samples, key indicators were selected through principal component analysis to construct the MDS, allowing for a systematic evaluation of differences in soil nutrient quality among various medicinal plant cultivation areas. The results revealed significant variations in soil nutrient characteristics: *Paeonia lactiflora* fields exhibited higher total levels of nitrogen, potassium, copper, and zinc, but mild deficiency in available potassium (AK); *Paeonia suffruticosa* fields had the lowest concentrations of AK, total manganese, total copper, and total zinc; *Chrysanthemum morifolium* fields displayed reduced total levels of calcium, copper, and zinc, yet elevated AK; whereas *Angelica dahurica* fields showed the highest amounts of organic matter (SOM), alkali-hydrolyzable nitrogen (AN), and available phosphorus (AP), but suffered from severe AK deficiency. The MDS indicators varied by medicinal plant type and demonstrated a significant positive correlation with the total data set (TDS) in evaluation results ($R^2 = 0.686\sim0.821$). The soil nutrient quality index based on the MDS was ranked as follows: *Paeonia lactiflora* (0.503) > *Angelica dahurica* (0.494) > *Paeonia suffruticosa* (0.483) > *Chrysanthemum morifolium* (0.414). In conclusion, the MDS effectively represents the TDS in evaluating soil nutrient quality in genuine medicinal material producing areas. It is recommended that categorized management and precision fertilization be implemented in different medicinal cultivation areas to enhance soil nutrients and promote sustainable development.

Key words: Minimum data set; Principal component analysis; Soil nutrient quality; Genuine medicinal materials

①基金项目: 安徽省公益性地质工作项目(2023-g-1-14, 2024-g-1-15)资助。

作者简介: 陈平峰(1992—), 男, 安徽舒城人, 工程师, 主要从事地球化学勘查和土地质量调查评价工作。E-mail: 775387655@qq.com

道地药材的品质与产地的环境密切相关^[1],其中土壤的物化特性和养分质量对药材的有效成分积累和道地性形成至关重要^[2]。作为“中华药都”的亳州市谯城区,中药材种植历史悠久,白芍、丹皮、菊花、白芷是区域内四大主栽品种。近年来,虽然标准化种植基地建设不断推进,但土壤理化性质变化及养分失衡问题仍然制约着药材的质量和产量^[3]。因此,开展道地药材产地土壤养分质量评价工作,对实现土壤可持续利用和药材高质量发展具有重要意义。

传统的土壤质量评价方法存在冗余度高、分析成本大等问题^[4]。通过最小数据集(MDS)筛选土壤关键指标表征土壤质量特征已被广泛应用^[5]。Xing 等^[6]基于 MDS-SQI 模型,选取土壤有机质、速效钾及有效磷作为核心指标,明确了有机质为区域养分限制因子,并提出优化施肥深度的管理建议。王晓婷等^[7]采用主成分分析法构建 MDS,结合非线性评分评价长期不同施肥处理对潮土质量的影响,发现有机肥与化肥配施处理显著改善了土壤理化生特性及作物产量。李瑞荣等^[8]从 21 项土壤指标中筛选出硝态氮、速效磷、有效铁、有效镁、有效镉和全铁 6 个指标,对四川川芎产区的土壤肥力质量进行评价,指出速效磷和有效铁是影响川芎品质形成的关键因子。马琳等^[9]在湖北蕲春蕲艾种植区的研究中,构建了包含 pH、速效钾、有效铁、有效锌、有效锰、有效铜和有效镁 7 个指标的 MDS,评价发现各产区土壤碱解氮、速效钾、有效镁和有效钙普遍缺乏,并提出增施氮、钾、镁、钙肥及有机肥的建议。综上可见,利用主成分分析法构建不同药材地土壤质量评价 MDS,可简化土壤质量评价过程,为区域药材生产和土壤养分管理提供参考。

目前,针对亳州市谯城区道地药材产区多种药材地土壤养分质量的对比研究相对匮乏。而通过以往的土地质量地球化学调查,现已获取了大量的土壤养分指标数据,但关于土壤养分的综合评价仅局限于氮、磷、钾^[10],未能全面反映土壤的多指标特性。因此,本研究以谯城区道地药材地土壤为研究对象,基于谯城区土地质量地球化学调查评价项目的根系土调查数据,分析不同药材地的土壤养分特征,系统构建和对比了 4 种药材地(白芍地、丹皮地、菊花地、白芷地)土壤养分质量评价 MDS,以揭示不同药材种植区土壤养分质量的共性与差异,为高效评估和精准监测药材地土壤养分提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

亳州市谯城区位于安徽省西北部,拥有全国平原区连片种植最集中、面积最大的中药材基地,尤以白芍、丹皮等道地药材规模化种植著称。研究区为典型的暖温带半湿润季风气候,四季分明、气候湿润、降水量适中,为多种药材的生长提供了优越的生态环境。研究区被第四纪沉积物广泛覆盖,土壤构成相对单一,北部区域受现代黄河泛滥冲积作用影响,形成了典型的潮土;而南部地区则以晚更新世黄土为母质,发育形成了砂姜黑土。

1.2 土壤样品采集

本研究在中药材种植区兼顾不同土壤类型共采集药材地根系土样品 125 件,包括白芍地 52 件、丹皮地 22 件、菊花地 24 件、白芷地 27 件(图 1)。具体采样方法为:以预设采样点为中心,采用“X”或“S”形布点法,在根系附近挖掘采样坑,采集耕作层原状土柱,每个样品由 5 个子样等量混合组成。现场剔除植物残根及砾石等杂质,保留净重 ≥ 1.5 kg,装袋运回。样品自然风干后,采用木质工具轻击,恢复其自

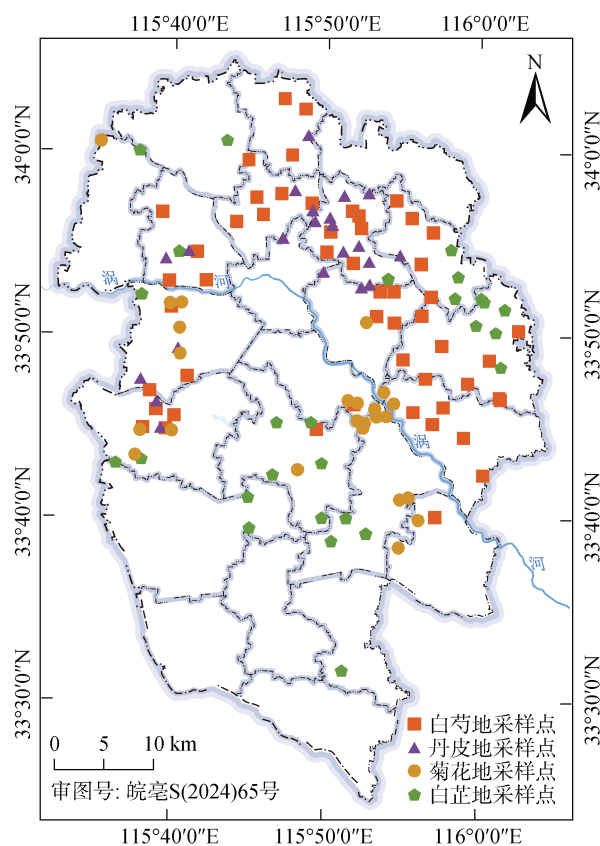


图1 研究区药材地土壤采样点位图

Fig. 1 Soil sampling sites for medicinal plant fields in study area

然粒级结构, 过 10 目尼龙筛, 通过四分法留取 300 g 样品待测。

1.3 样品检测及数据分析

土壤样品检测分析工作由安徽省地质实验研究所(国土资源部合肥矿产资源监督检测中心)承担, 检测方法与质量符合相关规范^[10-11]要求。其中, pH 测定采用离子选择性电极法; 磷(P)、钾(K)、钙(CaO)、镁(MgO)、锰(Mn)、硫(S)、铜(Cu)、锌(Zn)元素全量通过 X 射线荧光光谱法测定; 钼(Mo)元素全量采用电感耦合等离子体质谱法测定; 硼(B)元素全量通过交流电弧-原子发射光谱法检测; 硒(Se)元素全量采用氢化物发生-原子荧光光谱法测定。土壤有机质(SOM)和氮(N)元素全量分别采用重铬酸钾容量法和凯氏蒸馏-容量法测定。碱解氮(AN)与有效磷(AP)使用碳酸氢钠浸提-分光光度法测定, 速效钾(AK)通过乙酸铵浸提-电感耦合等离子体发射光谱法测定。研究区土壤元素背景值基于同期获取的 6 373 件表层土壤样品数据, 采用迭代剔除异常值的拉依达准则进行计算。

数据统计分析运用 SPSS 20 和 Office 365 完成, 图件使用 ArcGIS 10.8 和 R 语言等绘制。

1.4 土壤养分评价方法

1.4.1 MDS 构建 基于主成分分析法对初始全量数据集(TDS)进行指标筛选。首先, 提取特征值 ≥ 1 的主成分, 并依据因子载荷阈值(>0.5)将各指标归类至不同主成分组。其次, 针对同一指标在多个主成分中载荷值达到阈值, 通过相关性分析, 将其归入组内指标相关性较差的群组^[5]。最后, 引入 Norm 值对比组内指标对综合信息的解释程度^[12], 筛选组内 Norm 值达最高值 90% 以上的指标为 MDS 预选指标。对于组内存在显著相关性($r \geq 0.5$)的指标群, 仅保留 Norm 值最高者纳入最终 MDS; 反之则全部纳入最终 MDS。

Norm 值计算方法为:

$$\text{Norm}_{ij} = \sqrt{\sum_{i=1}^j (a_{ij}^2 b_j)} \quad (1)$$

式中: a_{ij} 表示第 i 个指标在第 j 个主成分上的载荷值; b_j 表示第 j 个主成分对应的特征值; Norm_{ij} 表示第 i 个指标对提取的前 j 个主成分的综合贡献度。

1.4.2 土壤养分质量指数计算 依据各指标对土壤质量的正负影响, 选择隶属函数模型^[7], 土壤 pH 通常采用峰值型隶属函数, 土壤氮、磷、钾等有益元素及 SOM 采用戒上型隶属函数^[10]。

峰值型隶属度函数:

$$f(x) = \begin{cases} 0.1, & x \leq L, \quad x \geq U \\ 0.9 \times \frac{x-L}{O_1-L} + 0.1, & L < x < O_1 \\ 1.0, & O_1 \leq x \leq O_2 \\ 1.0 - 0.9 \times \frac{x-O_2}{U-O_2}, & O_2 < x < U \end{cases} \quad (2)$$

戒上型隶属度函数:

$$f(x) = \begin{cases} 0.1, & x \leq L \\ 0.9 \times \frac{x-L}{U-L} + 0.1, & L < x < U \\ 1.0, & x \geq U \end{cases} \quad (3)$$

式中: x 表示指标实测值; L 和 U 分别表示隶属度函数的下限值和上限值; O_1 、 O_2 为评价指标的最优值, 依据有关药材栽培适宜 pH 标准^[13-14], 确定为 6.5 和 7.5; $f(x)$ 表示土壤单指标养分隶属度。

为减少极端值对土壤质量指数计算结果的影响并提高评价结果的稳健性, 采用四分位距法^[15]确定 L 和 U 。对于识别出的异常值(即实测值 x 位于 $[L, U]$ 区间之外的数据点), 其隶属度根据公式(2)和(3)直接取值为 0.1 或 1。

$$L = Q_1 - 1.5 \times \text{IQR} \quad (4)$$

$$U = Q_3 + 1.5 \times \text{IQR} \quad (5)$$

式中: Q_1 为第一四分位数; Q_3 为第三四分位数; IQR 为四分位距($\text{IQR} = Q_3 - Q_1$)。

采用土壤质量指数(SQI)对养分综合水平进行评价, 数值越大表示土壤养分水平越高。计算公式:

$$\text{SQI} = \sum_{i=1}^n C_i \cdot f(x) \quad (6)$$

式中: C_i 为第 i 项土壤指标的权重, 通过主成分分析法得到各指标的公因子方差和 Norm 值确定; n 为各数据集中的参评指标数量。

2 结果与分析

2.1 不同药材地土壤养分含量统计

由表 1 可知, 不同药材种植地土壤各养分含量存在显著差异。4 种药材地土壤均呈碱性, 丹皮地和白芷地 pH 显著高于菊花地, 白芍地处于中间水平。白芷地 SOM 含量最高, 显著高于其他 3 种地。土壤 N 含量表现为白芍地显著高于丹皮地和菊花地。AN、AP 含量以白芷地最高, 而 AK 含量表现为白芍地 > 菊花地 > 丹皮地 > 白芷地。Mn 含量以白芷地和白芍地较高, 显著高于丹皮地。土壤 Cu、Zn 含量均呈现白芷地与白芍地显著高于丹皮地。土壤 CaO 含量表现

为菊花地显著低于其他 3 种地。土壤 P、MgO、B、Mo、S、Se 等含量在各药材地间无显著差异。与研究区背景值相比，4 类药材地普遍存在 N、SOM、Se 贫乏，而 AP、MgO、S 富集。此外，白芍地 AK 轻度不足，丹皮地 AK、Mn、Cu、Zn 贫乏，菊花地 CaO、Cu、Zn 相对较低，白芷地 AK 明显贫乏。

表 1 不同药材地土壤性质
Table 1 Soil properties of different medicinal plant fields

指标	白芍地	丹皮地	菊花地	白芷地	研究区背景值
pH	8.38±0.13ab	8.45±0.13a	8.36±0.11b	8.45±0.11a	8.34
N(g/kg)	1.006±0.178a	0.891±0.19b	0.923±0.213b	1.112±0.176ab	1.124
P(g/kg)	1.232±0.288a	1.144±0.322a	1.269±0.318a	1.168±0.291a	1.087
K(g/kg)	22.0±1.7a	21.0±1.6b	21.2±2ab	22.1±2.1a	21.4
SOM(g/kg)	15.1±3.1b	13.6±3.4b	14.3±2.6b	16.8±2.7a	17.7
AN(mg/kg)	113.9±85.9bc	136.6±87.8b	75.1±15.4c	199.1±104.2a	—
AP(mg/kg)	28.8±23.8bc	38.4±28b	20.9±10.6c	60.7±30.5a	15.15
AK(mg/kg)	225±125a	143±143b	274±142a	133±184b	250
CaO(g/kg)	63.7±13.0a	64.0±7.2a	56.4±10.0b	61.9±17.4ab	57.5
MgO(g/kg)	25.3±2.3a	24.1±1.9a	24.3±2.2a	25.2±2.6a	23.9
B(mg/kg)	56.3±11.0a	55.8±13.0a	52.1±4.8a	51.5±8.3a	52.7
Mn(mg/kg)	785.4±108.3ab	697.7±114.9c	732.5±131.7bc	801.8±121.1a	768.8
Mo(mg/kg)	0.66±0.11a	0.63±0.1a	0.65±0.11a	0.67±0.17a	0.62
S(mg/kg)	221±36a	211±27a	221±20a	225±28a	210
Cu(mg/kg)	30.7±4.7ab	27±3.7c	28.6±4.9bc	32.4±4.3a	30.7
Zn(mg/kg)	86.8±10.5a	78.5±10.8b	80.3±10.9b	87.2±14a	82.9
Se(mg/kg)	0.217±0.032a	0.214±0.038a	0.209±0.023a	0.223±0.034a	0.231

注：表中同行不同小写字母表示不同药材地间差异显著($P<0.05$)；“—”表示无相关值。

2.2 基于主成分分析的最小数据集构建

如表 2 所示，对于白芍地，对 17 个土壤指标进行主成分分析，提取特征值 ≥ 1 的主成分 5 个，其累积方差贡献率为 86.13%。按 1.4.1 方法将所有指标分为 5 组。第 1 组指标中，K 的 Norm 值为 2.412，高于其他指标，按照最高 Norm 值 90% 以上的阈值标准，筛选出 K、MgO、Mn、Zn 进入预选指标。相关性分析(图 2)发现，K 与组内其余指标均显著相关，因此仅保留 Norm 值最大的 K 进入最终 MDS。第 2 组指标中，AN 的 Norm 值最高，AK 的 Norm 值达到阈值标准进入预选指标，由于 AN 和 AK 之间相关系数为 -0.66 ，基于 Norm 值最大的原则，选择 AN 进入最终 MDS。第 3 组指标中，选择达到阈值标准的 N 和 SOM 进入预选指标，由于二者相关系数为 0.96 ，SOM 因 Norm 值较大而进入最终 MDS。第 4 组指标中，pH、AP 达到阈值标准进入预选指标，由于两指标间无显著相关性，均可进入最终 MDS。第 5 组指标中，B 的 Norm 值未达到 Se 的 90%，仅 Se 进入最终 MDS。最终，白芍地土壤养分质量评价 MDS 指标包含 K、AN、

SOM、pH、AP、B、Se。

同理，对于丹皮地、菊花地和白芷地，通过主成分分析提取特征值 ≥ 1 的主成分，其累积方差贡献率分别为 89.13%、85.47% 和 90.77%(表 2)。根据指标分组、Norm 值(表 2)及相关性分析(图 2)，最终确定丹皮地土壤养分质量评价 MDS 指标包含 Zn、AK、pH、S、Se、B；菊花地包含 K、AN、AP、P、Se；白芷地包含 K、AK、SOM、B、P。

2.3 土壤养分质量评价

基于不同药材地主成分分析结果，TDS 中各指标权重通过计算单一指标公因子方差与全部指标公因子方差总和的比值确定^[5]；而 MDS 中各指标权重则通过计算 MDS 中各指标的 Norm 值与 Norm 值总和的比值获得^[9]。TDS 和 MDS 中土壤各养分指标权重结果见表 3。

根据指标权重值和隶属度，计算各样点的 TDS-SQI 和 MDS-SQI(图 3)，其中白芍地二者范围分别为 $0.331\sim 0.731$ 和 $0.266\sim 0.813$ ，平均值分别为 0.542 和 0.503 ；丹皮地二者范围分别为 $0.154\sim 0.661$ 和 $0.118\sim 0.664$ ，平均值分别为 0.477 和 0.483 ；菊花地二者范

表 2 白芍、丹皮、菊花和白芷地土壤指标主成分因子载荷矩阵及 Norm 值
Table 2 Principal component factor loading matrix and Norm values of soil indexes in fields of *Paeonia lactiflora*, *Paeonia suffruticosa*, *Chrysanthemum morifolium* and *Angelica dahurica*

指标	白芍地							丹皮地					
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	Norm	分组	PC1	PC2	PC3	PC4	Norm	分组
pH	-0.073	0.672	0.163	-0.531	0.205	1.450	4	-0.596	0.387	-0.526	0.249	2.030	3
N	0.353	-0.567	0.671	0.113	-0.107	1.696	3	0.864	-0.069	0.227	0.345	2.489	1
P	0.072	-0.117	-0.435	0.621	0.450	1.215	4	-0.314	-0.044	0.772	-0.358	1.591	3
K	0.972	0.024	-0.036	-0.119	-0.064	2.412	1	0.955	0.080	-0.142	-0.053	2.701	1
SOM	0.372	-0.559	0.660	0.199	-0.167	1.723	3	0.800	-0.036	0.343	0.356	2.353	1
AN	0.234	0.728	0.441	0.284	-0.201	1.633	2	0.114	0.935	0.167	0.135	1.770	2
AP	0.147	0.669	0.357	0.551	0.068	1.557	4	-0.088	0.932	0.184	0.188	1.764	2
AK	0.221	-0.788	-0.350	-0.145	0.096	1.612	2	0.431	-0.816	0.279	-0.082	1.978	2
CaO	0.753	0.324	-0.338	-0.225	0.170	2.049	1	0.454	0.370	-0.635	-0.345	1.820	3
MgO	0.900	0.136	-0.275	-0.054	-0.079	2.282	1	0.872	0.137	-0.204	-0.327	2.513	1
B	-0.245	-0.409	0.463	-0.402	0.494	1.407	5	0.429	-0.554	-0.194	0.509	1.704	4
Mn	0.945	-0.145	-0.010	-0.062	-0.099	2.355	1	0.935	-0.121	-0.177	-0.044	2.654	1
Mo	0.757	0.289	-0.057	-0.281	0.131	1.987	1	0.772	0.203	-0.471	-0.016	2.333	1
S	0.303	-0.141	-0.227	0.660	0.304	1.293	4	0.469	0.319	0.686	-0.314	1.859	3
Cu	0.831	-0.088	0.098	0.103	-0.174	2.079	1	0.937	0.140	-0.022	-0.115	2.650	1
Zn	0.960	-0.141	-0.062	-0.085	0.035	2.393	1	0.981	-0.010	-0.014	-0.106	2.762	1
Se	0.404	0.128	0.579	-0.026	0.590	1.493	5	0.514	0.372	0.510	0.342	1.841	3
特征值	6.116	3.159	2.356	1.890	1.121			7.905	3.352	2.668	1.227		
累积贡献率(%)	35.98	54.56	68.42	79.54	86.13			46.50	66.22	81.91	89.13		

指标	白芷地							菊花地					
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	Norm	分组	PC1	PC2	PC3	PC4	Norm	分组
pH	-0.505	0.072	0.514	0.570	0.204	1.758	4	-0.175	0.867	-0.063	-0.061	1.535	2
N	0.514	0.018	-0.627	0.409	0.371	1.832	3	0.872	-0.323	0.106	0.100	2.703	1
P	0.390	0.425	-0.432	0.032	-0.630	1.612	5	-0.198	0.641	0.637	0.119	1.458	3
K	0.963	0.111	0.171	0.020	-0.019	2.717	1	0.972	0.081	-0.078	-0.125	2.955	1
SOM	0.458	0.122	-0.714	0.141	0.433	1.764	3	0.828	-0.416	0.097	0.154	2.611	1
AN	-0.286	0.877	0.003	0.034	-0.129	1.688	2	0.628	-0.539	0.445	0.197	2.183	2
AP	-0.480	0.793	0.140	0.120	0.119	1.918	2	0.533	0.646	0.248	-0.092	1.966	2
AK	0.668	-0.534	-0.324	0.105	-0.195	2.150	2	0.805	0.112	0.292	-0.129	2.478	1
CaO	0.771	-0.192	0.488	-0.185	0.058	2.319	1	0.691	0.232	-0.009	-0.393	2.169	1
MgO	0.867	0.087	0.392	-0.107	0.161	2.515	1	0.931	0.079	-0.228	-0.051	2.840	1
B	0.418	-0.570	0.023	0.569	-0.330	1.684	4	-0.106	0.349	-0.681	0.498	1.187	3
Mn	0.896	0.110	0.276	0.042	0.170	2.560	1	0.929	-0.025	-0.293	-0.102	2.843	1
Mo	0.857	0.006	0.369	-0.074	-0.114	2.470	1	0.722	0.498	-0.021	-0.104	2.343	1
S	0.658	0.245	-0.421	-0.461	0.015	2.061	1	0.786	-0.024	0.198	0.307	2.417	1
Cu	0.782	0.414	0.106	0.133	0.176	2.318	1	0.940	-0.017	-0.179	-0.069	2.861	1
Zn	0.964	0.134	0.081	0.021	0.046	2.714	1	0.954	0.037	-0.255	-0.007	2.911	1
Se	0.507	0.557	0.049	0.355	-0.325	1.785	2	0.512	0.384	0.120	0.628	1.805	4
特征值	7.856	2.839	2.310	1.274	1.153			9.199	2.746	1.534	1.051		
累积贡献率(%)	46.21	62.91	76.50	83.99	90.77			54.11	70.26	79.29	85.47		

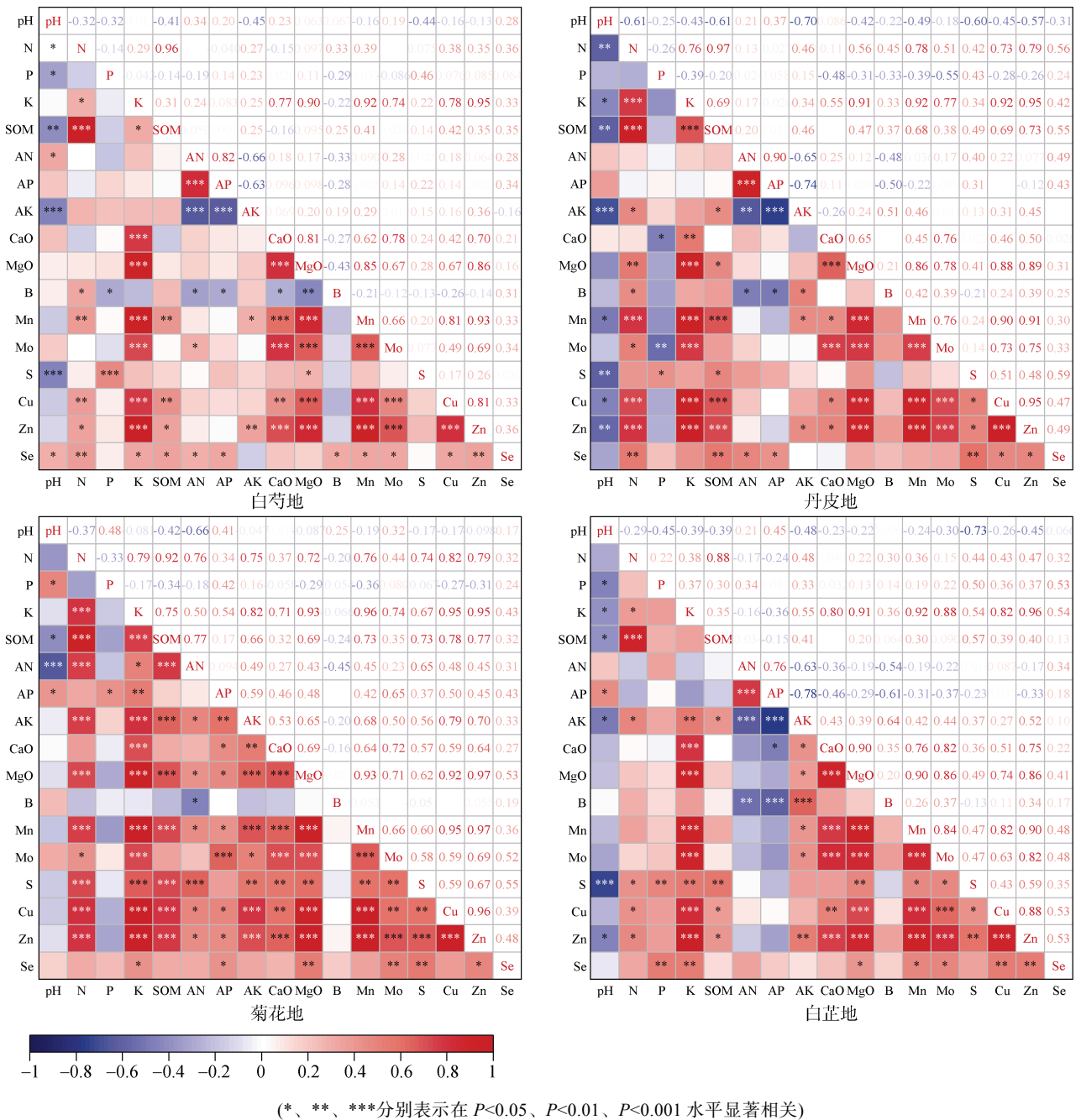


图 2 不同药材地养分指标皮尔逊相关性热图
Fig. 2 Pearson correlation heat maps of nutrient indexes in different medicinal plant fields

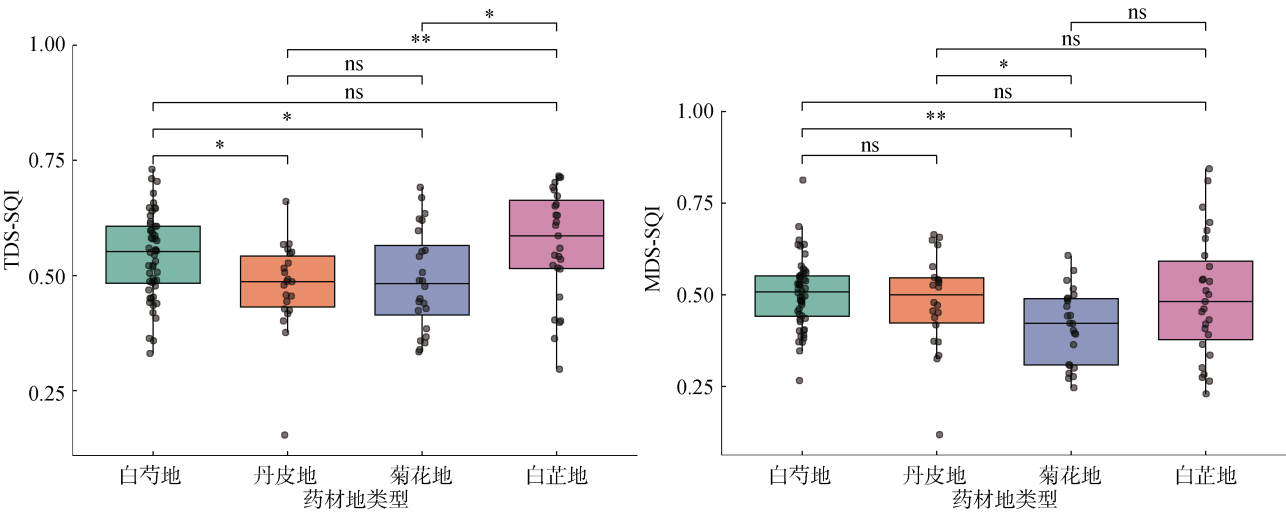
围分别为 0.334~0.692 和 0.246~0.607，平均值分别为 0.490 和 0.414；白芷地二者范围分别为 0.296~0.716 和 0.229~0.844，平均值分别为 0.567 和 0.494。4 种药材地 MDS-SQI 平均值表现为：白芍地>白芷地>丹皮地>菊花地。

使用 Ward 法和平方 Euclidean 距离法对 MDS-SQI 结果进行聚类分析，确定最大聚类数为 4。将土壤养分质量等级划分为 4 级，由 I 级至 IV 级表示土

壤养分质量逐渐下降，其对应的 MDS-SQI 指数范围分别为 >0.593 、 $(0.508\sim0.593)$ 、 $(0.355\sim0.508)$ 和 ≤ 0.355 。方差分析表明，各等级间的差异显著($P<0.01$)，等级划分有效。图 4 显示，研究区基于 MDS 的白芍地与丹皮地土壤养分质量以 II 级和 III 级为主，白芍地占比分别为 37% 和 46%，丹皮地占比分别为 32% 和 36%；菊花地土壤养分质量以 III 级为主，占比达 54%；白芷地土壤养分质量各等级分布较为均衡。

表 3 TDS 和 MDS 中土壤各养分指标权重
Table 3 Weights of soil nutrient indicators in TDS and MDS

指标	白芍地		丹皮地		菊花地		白芷地	
	TDS 权重	MDS 权重	TDS 权重	MDS 权重	TDS 权重	MDS 权重	TDS 权重	MDS 权重
pH	0.055	0.124	0.056	0.167	0.054		0.058	
N	0.063		0.061		0.061		0.062	
P	0.054		0.054		0.06	0.141	0.059	0.162
K	0.066	0.207	0.062		0.067	0.285	0.063	0.274
SOM	0.065	0.148	0.058		0.061		0.061	0.178
AN	0.062	0.140	0.062		0.063	0.211	0.056	
AP	0.062	0.133	0.062		0.053	0.190	0.059	
AK	0.056		0.062	0.162	0.052		0.057	0.217
CaO	0.059		0.057		0.047		0.059	
MgO	0.062		0.061		0.064		0.062	
B	0.058	0.121	0.052	0.140	0.058		0.06	0.170
Mn	0.063		0.061		0.066		0.06	
Mo	0.052		0.057		0.054		0.058	
S	0.047		0.059	0.153	0.052		0.057	
Cu	0.051		0.06		0.063		0.055	
Zn	0.065		0.064	0.227	0.067		0.062	
Se	0.059	0.128	0.051	0.151	0.056	0.174	0.052	



(ns 表示差异不显著, *、**分别表示差异在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 水平显著)

图 3 基于 TDS 和 MDS 的不同药材地 SQI

Fig. 3 SQIs of different medicinal plant fields based on TDS and MDS

2.4 基于 MDS 土壤养分质量评价可靠性验证

2.4.1 MDS 指标体系评价的合理性验证 对比分析 TDS-SQI 和 MDS-SQI, 其结果见图 5。不同药材地的 TDS-SQI 与 MDS-SQI 均呈显著正相关, 白芍地、丹皮地、菊花地、白芷地的 R^2 分别为 0.686、0.708、

0.821、0.735, 表明本次构建的不同药材地的 MDS 能够较好地代表 TDS 进行土壤养分质量评价。

2.4.2 隶属函数限值设定对 SQI 稳健性的影响 为评估隶属度函数 U 和 L 设定方法对评价结果的影响, 进行了敏感性分析(表 4)。对比使用原始极值法(最大

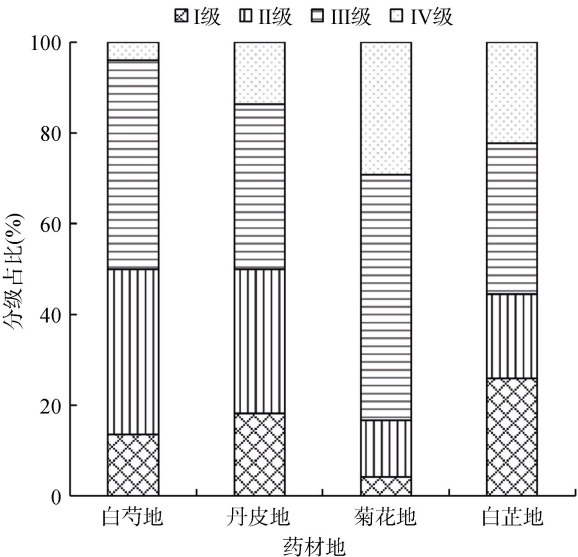


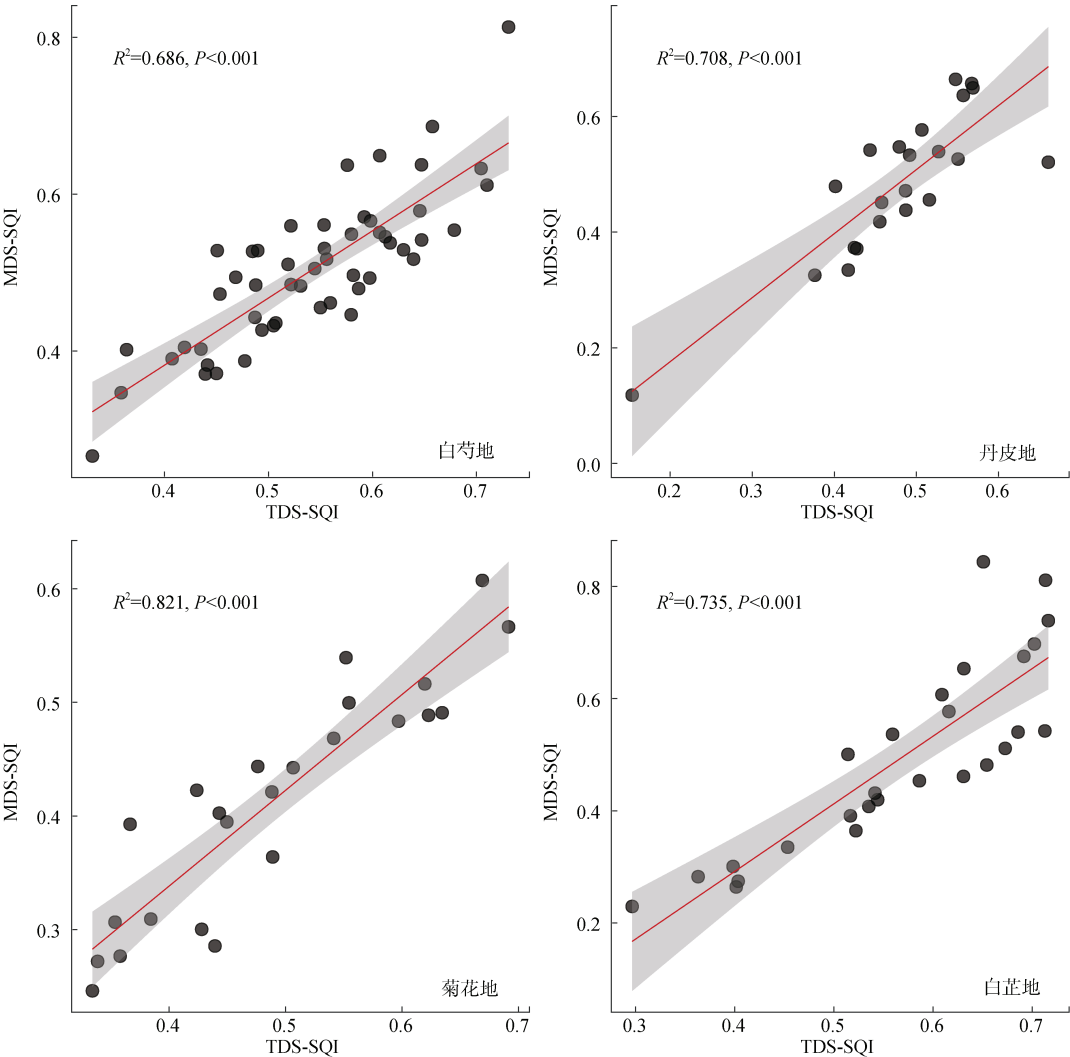
图 4 基于 MDS 的不同药材地 SQI 分级图
Fig. 4 SQI grading map of different medicinal plant fields based on MDS

值与最小值)、分位数法(95% 与 5% 分位数)、标准差法(平均值 $\pm$ 3 倍标准差)等限值定义方案,发现不同方法下计算的 R^2 略有波动,但均维持在较高水平,且各药材地 R^2 的相对排序基本一致,表明 MDS-SQI 用于评价道地药材产地土壤养分质量的方法具有较好的稳健性。在样本量有限的情况下,四分位距法因其不依赖正态分布假设的强鲁棒性更能减少异常值干扰,更能真实地反映土壤养分质量^[16]。

3 讨论

3.1 不同药材地土壤养分特征差异

pH 通过影响植物对营养元素的吸收和矿质元素的溶解,直接影响药材的生长和品质形成^[17]。本研究中,4 类道地药材地土壤 pH 均为碱性,这主要受黄泛冲积物碱性本底的影响^[18]。与魏俊岭^[19] 2012 年



(图中灰色阴影部分表示线性回归模型的 95% 置信区间)

图 5 基于 TDS 与 MDS 的土壤养分质量指数的相关性
Fig. 5 Correlations between TDS and MDS in soil nutrient quality indices

表 4 不同限值设定下 MDS-SQI 与 TDS-SQI 的相关性对比
Table 4 Comparisons of correlations between MDS-SQI and TDS-SQI under different threshold settings

药材地	R ² 值			
	原始极值法	四分位距法	分位数法	标准差法
白芍地	0.716	0.686	0.714	0.705
丹皮地	0.722	0.708	0.663	0.719
菊花地	0.859	0.821	0.786	0.848
白芷地	0.756	0.735	0.742	0.742

注：四分位距法为本次研究采用的方法。

对亳州药材地土壤 pH 的调查结果相比，本次结果略高，但与王玲玲^[1]对道地药材产区土壤 pH 的研究结果一致，表明近年来研究区土壤 pH 呈一定的升高趋势，这可能与近年来灌溉调整可能导致的地下水位抬升，进而引起的盐分经毛细蒸发表聚有关^[20]。

研究区 4 种道地药材地其他土壤养分指标存在显著差异，表明不同药材对土壤养分存在选择性吸收。这种差异会导致土壤养分的偏耗，进而影响药材产量和品质。周光姣等^[21]研究发现，土壤中的 Fe、Mn、Zn、K、Ca、Mg 等指标与药材中所含的无机指标呈一定的相关性，且对其所含的其他化学成分也有影响。张英英等^[22]研究表明，白芍根中芍药苷含量与 N、Ca、Cu 含量呈极显著正相关($P<0.01$)。本研究中，白芍地较高的土壤养分和微量元素含量可能为其有效成分积累提供了有利条件。蔡兴怀和沈章军^[23]研究指出，Ca、SOM、Fe 和 AP 对丹皮有效成分具

有显著影响。本次研究发现，谯城区丹皮地的 CaO 和 AP 含量高于铜陵市凤丹主产区土壤，但 SOM 含量较低，因此建议研究区丹皮种植过程中增施有机肥。而菊花地的 AN、P 含量显著低于王一帆等^[24]的研究结果，且 SOM 水平更低，这可能是由于王一帆等^[24]的研究样点多分布于涡河以北，而本次样点均分布于涡河以南，二者采样点位置的差异导致。本研究白芷地较高的 SOM 和 AP 含量，与翟娟园等^[25]的研究结果相呼应，其研究表明土壤 SOM 和 AP 含量分别与川白芷根粗及产量呈显著正相关，因此，本研究中白芷地的土壤养分可能利于白芷生长。然而，AK 的不足则表明亳白芷的特异性吸收，需针对性地补充施肥。

3.2 不同药材地土壤养分质量评价 MDS 指标构成

本研究构建了针对不同药材地土壤养分质量评价的 MDS 体系，其指标构成存在显著差异。根据国内相关研究(表 5)，SOM、AP、pH 被选入 MDS 的频率较高，部分微量指标在不同药材中也有出现。本研究中，白芍地和白芷地均选入 SOM，白芍地和菊花地均选入 AP，白芍地和丹皮地均选入 pH，这与前人的研究结果一致。此外，K 入选白芍地、菊花地、白芷地的 MDS，且在各药材地第一主成分上载荷大于 0.95，B 入选白芍地、丹皮地、白芷地的 MDS，S、Zn 则入选丹皮地 MDS。这些结果表明，K 和部分微量元素地球化学特征对药材地具有特殊影响^[26]，可能是影响药材品质和产量的关键因子。

表 5 国内关于研究区药材地土壤养分质量评价的 MDS 指标构成及 SQI 计算结果
Table 5 Compositions of MDS indicators and SQI calculation results for soil nutrient quality evaluations in medicinal plant research areas in China

研究对象	MDS 指标构成	SQI 计算结果
四川省川泽泻种植区 ^[5]	pH、全氮、有效磷、全铁、全锰、全锌、	范围为 0.26~0.82，均值为 0.49
四川眉山、彭州、什邡、邛崃川芎种植区 ^[8]	硝态氮、有效磷、有效镁、有效铁、有效镉、全铁	彭州最高，为 0.53；眉山最低，为 0.34
湖北省蕲春县蕲艾主要产区 ^[9]	pH、速效钾、有效铁、有效锌、有效锰、有效铜、有效镁	范围为 0.298~0.784，均值为 0.565
安徽省亳州市菊花种植区 ^[24]	有机质、电导率、速效氮、有效磷、有效钙、有效硫、有效铁、有效铜	范围为 0.212~0.678，均值为 0.458
川产道地药材羌活栽培区 ^[27]	土壤容重、抗剪强度、有机质、饱和导水率、黏粒、pH、速效氮、砂粒	范围为 0.213~0.412，均值为 0.333
陕西省商洛市山阳、洛南两县和商州区药源基地 ^[28]	蔗糖酶、有机质、全氮、有效磷、速效钾、过氧化氢酶、阳离子交换量、锌、铜、锰、黏粒、钙离子	范围为 0.30~0.67
山东威海、吉林辉南、陕西汉中 和四川古蔺西洋参基地 ^[29]	有机质、碱解氮、全磷、全镁和全锰	山东(0.796)>吉林(0.566)>四川(0.478)>陕西(0.226)
东北地区朝鲜淫羊藿土壤 ^[30]	有机质、有效锰、有效磷、有效铜、可溶性盐	范围为 0.146~0.560，均值为 0.280
湖北麻城菊花种植区 ^[31]	有机质、全磷、有效磷、有效镁、有效铁	范围为 0.353~0.833，均值 0.604

3.3 不同药材地土壤养分质量状况

研究区4种药材地的SQI均值除白芍地略高于0.5外,其他均低于0.5。尽管不同研究的SQI计算在指标选择、评分方法和权重分配上存在差异,但SQI整体中等偏低的现象与众多基于MDS评价药材地土壤质量的研究结论相似(表5),表明药材生长对土壤养分的消耗引起了土壤综合质量的下降。基于聚类分析的SQI等级划分,进一步揭示了不同药材地土壤养分质量分异特征,这种分异与不同药材的生物学特性及养分需求规律密切相关,也是道地药材连作障碍的典型特征与重要成因^[32]。因此,建议根据土壤养分质量分级情况,实施差异化管理,通过合理轮作和精准施肥以维持土壤生产的可持续性。

3.4 未来研究展望

因研究目的多样性、指标选择的区域化差异及数据可获得性限制,不同条件下构建的MDS评价模型在指标构成与权重分配上呈现显著异质性。本次研究基于土地质量地球化学调查评价工作^[10],更为关注土壤养分全量差异,并通过四分位距法和隶属度函数降低异常值敏感性,验证了其在有限样本下的可靠性。未来应进一步扩大样本量并引入土壤物理及微生物指标^[33],同时结合药材品质和产量优化指标权重,构建更为科学有效的评价体系。此外,还须监测不同生长周期土壤养分的变化,通过综合分析为土壤养分的管理和道地药材品质提升提供科学依据。

4 结论

1) 亳州市谯城区白芍、丹皮、菊花和白芷4类药材地土壤均呈碱性,养分含量差异显著。白芍地N、K、Cu、Zn元素全量较高,但AK轻度缺乏;丹皮地AK含量及Mn、Cu、Zn元素全量最低;菊花地Ca、Cu、Zn元素全量偏低,但AK含量较高;白芷地SOM、AN和AP含量最高,但AK严重不足。与研究区域背景值相比,4类药材地普遍存在SOM和N、Se元素不足,而AP及Mg、S元素富集。建议实施“一药一策”精准管理,并通过合理轮作,平衡土壤养分,促进道地药材产地的可持续生产。

2) 研究区不同药材地土壤养分质量评价MDS指标构成存在差异。不同药材地基于MDS的SQI与基于TDS的SQI呈显著正相关($R^2=0.663\sim0.786$),验证了MDS在简化土壤养分质量评价过程中的合理性和准确性。

3) 不同药材地MDS-SQI均值排序为白芍地(0.503)>白芷地(0.494)>丹皮地(0.483)>菊花地(0.414)。

本研究构建的不同药材地土壤养分评价MDS可有效简化评价体系,为精准监测和提升土壤养分质量提供依据。

参考文献:

- [1] 王玲玲. 土壤-毫白芍-水煎液系统典型元素赋存、迁移转化及风险评价与防控[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2024.
- [2] 徐浩, 吴之易, 王圣隆, 等. 论道地药材的成因及发展现状[J]. 中华中医药杂志, 2021, 36(4): 1793–1797.
- [3] 申俊忠, 包伟民, 陈红刚, 等. 影响陇南道地药材品质的主要因素及应对策略[J]. 甘肃中医药大学学报, 2025, 42(1): 53–58.
- [4] Yu P J, Han D L, Liu S W, et al. Soil quality assessment under different land uses in an Alpine grassland[J]. Catena, 2018, 171: 280–287.
- [5] 杨克方, 李瑞荣, 金梦真, 等. 基于最小数据集的川泽泻土壤肥力评价[J]. 河南农业科学, 2025, 54(1): 76–89.
- [6] Xing Y Y, Wang N, Niu X L, et al. Assessment of potato farmland soil nutrient based on MDS-SQI model in the Loess Plateau[J]. Sustainability, 2021, 13(7): 3957.
- [7] 王晓婷, 姚童言, 陈瑞蕊, 等. 基于最小数据集评价长期不同施肥对潮土土壤质量的影响[J]. 土壤, 2025, 57(3): 597–606.
- [8] 李瑞荣, 张亚玉, 杨克方, 等. 基于最小数据集探究土壤肥力质量对川芎品质的影响[J]. 河南农业科学, 2025, 54(2): 77–87.
- [9] 马琳, 王梓欣, 蒋靖怡, 等. 基于最小数据集的蕲春蕲艾种植区土壤肥力质量评价[J]. 中国中药杂志, 2022, 47(14): 3738–3748.
- [10] 中华人民共和国国土资源部. 土地质量地球化学评价规范: DZ/T 0295—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [11] 中华人民共和国国土资源部. 区域地球化学样品分析方法: DZ/T 0279—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [12] 郝点, 周润惠, 高闻哲, 等. “非粮化”土壤优质耕层快速重构材料的创制及其评价方法[J]. 土壤学报, 2024, 61(6): 1524–1536.
- [13] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 白芍栽培技术规程: GB/T 43185—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [14] 安徽省市场监督管理局. 地理标志产品 毫菊: DB34/T 4882—2024[S]. 2024. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [15] 杨轶航, 吕德生, 刘宁宁, 等. 基于多头LSTM模型的南疆枣树土壤墒情预测[J]. 水资源与水工程学报, 2025, 36(2): 207–217.
- [16] 车美惠. 基于GOSAT及多源辅助数据的中国CO₂浓度估算及其时空变化分析[D]. 上海: 上海师范大学, 2025.
- [17] 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.
- [18] 李朋飞, 杜国强, 刘超, 等. 安徽淮北平原农田土壤酸碱度特征及酸化趋势研究[J]. 华东地质, 2019, 40(3): 234–240.
- [19] 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.

- [20] 孙喜军, 吕爽, 高莹, 等. 西安市耕地土壤 pH 空间变异及主控因素分析[J]. 中国农学通报, 2023, 39(29): 59–67.
- [21] 周光皎, 王超群, 权春梅, 等. 亳白芍药材质量与土壤中主要无机元素相关性[J]. 中国实验方剂学杂志, 2018, 24(18): 76–80.
- [22] 张英英, 吴之涛, 杨宪忠, 等. 河西干旱区白芍养分吸收规律及其与药效成分积累的关系[J]. 西北植物学报, 2023, 43(12): 2100–2109.
- [23] 蔡兴怀, 沈章军. 铜陵市药用植物凤丹药效成分与土壤养分相关性研究[J]. 沧州师范学院学报, 2025, 41(1): 43–47.
- [24] 王一帆, 陈小琴, 李词周, 等. 亳州菊花生长与土壤肥力的关系[J]. 土壤, 2024, 56(2): 291–299.
- [25] 翟娟园, 吴卫, 廖凯, 等. 土壤环境对川白芷产量和品质的影响研究[J]. 中草药, 2010, 41(6): 984–988.
- [26] 李森, 赵平, 姜蓉, 等. 鲜切菊花品种‘Cedis’多头小菊和‘Country’多头菊养分需求特性研究[J]. 园艺学报, 2018, 45(3): 591–598.
- [27] 王红兰, 蒋舜媛, 崔俊芳, 等. 基于聚类及 PCA 分析的羌活栽培区土壤质量评价[J]. 安徽农业大学学报, 2024, 51(5): 857–864.
- [28] 刘瑞丰. 中国秦岭“五大商药”药源基地土壤质量及其评价[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [29] 钱佳奇, 孙海, 张亚玉, 等. 基于西洋参品质的土壤肥力质量评价[J]. 时珍国医国药, 2022, 33(7): 1733–1737.
- [30] 王英哲, 国坤, 孙云龙, 等. 基于最小数据集的东北地区朝鲜淫羊藿土壤肥力评价[J]. 特产研究, 2021, 43(5): 6–12, 18.
- [31] 刘引, 颜鸿远, 欧小宏, 等. 基于最小数据集的麻城菊花种植区土壤肥力质量评价[J]. 中国中药杂志, 2019, 44(24): 5382–5389.
- [32] 饶之望, 孙祎洋, 郭军玲, 等. 根及根茎类道地药材连作障碍研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2025(4): 258–272.
- [33] 张江周, 王光州, 李奕赞, 等. 农田土壤健康评价体系构建的若干思考[J]. 土壤学报, 2024, 61(4): 879–891.

(责任编辑: 于 飞)