

不同评价方法下土壤肥力的差异性——以南充市为例

蒲成伟¹, 周立¹, 张绩¹, 周上铃¹, 何发¹, 陈品文¹, 杨贵川¹, 杜晓秋¹,
廖前超^{2*}

1. 南充市农业科学院, 四川南充 637000; 2. 南充市土壤肥料站, 四川南充 637000

摘要: 为科学客观评价南充市农用地土壤养分状况及综合肥力, 本研究以 872 个土壤样品的 12 个养分指标为依据, 采用综合肥力指数法、因子分析法、熵权系数法、变异系数法对南充市农用地土壤肥力进行分析。结果表明: 南充市农用地土壤呈碱性, 有机质含量偏低, 磷、铁含量丰富, 铜、锌含量偏高, 钾、锰含量适宜, 氮、硼、钼含量偏低; 综合肥力指数法中综合肥力指数值为 0.75, 处于第 3 级, 土壤整体肥力为贫瘠, 仅有蓬安县土壤综合肥力达到第 2 级, 为 0.96; 因子分析法中第 4 级的样品占比为 42.09%, 第 3 级的样品占比为 34.52%, 第 2 级与第 5 级样品比例接近, 1~3 级的样品占总体的比例为 46.68%, 4~6 级的样品占总体的比例为 53.52%, 土壤整体肥力为略偏低; 熵权系数法中土壤综合肥力值 (IFI) 为 0.082 96, 处于第 2 级与第 3 级之间, 土壤整体肥力为中等; 变异系数法的土壤 IFI 为 34.09, 处于第 1 级与第 2 级之间, 土壤整体肥力为偏高。在 4 种评价方法中, 变异系数法的土壤肥力等级最高, 其次为熵权系数法和因子分析法, 综合肥力指数法的肥力等级最低。通过对比分析, 因子分析法的结果更加符合南充市的实际情况。南充市农田土壤综合肥力为略偏低, 提升农用地综合肥力应降低土壤碱性, 提升有机质含量应注重氮、硼、钼等肥料的补充。

关键词: 南充市; 农用地; 养分含量; 综合肥力; 评价方法

中图分类号: S158.2 **文献标志码:** A

Differences in Soil Fertility under Different Evaluation Methods - A Case Study of Nanchong, Sichuan, China

PU Chengwei¹, ZHOU Li¹, ZHANG Ji¹, ZHOU Shangling¹, HE Fa¹, CHEN Pinwen¹, YANG Guichuan¹,
DU Xiaochu¹, LIAO Qianchao^{2*}

1. Nanchong Academy of Agricultural Sciences, Nanchong, Sichuan 637000, China; 2. Nanchong Soil and Fertilizer Station, Nanchong, Sichuan 637000, China

Abstract: The soil nutrient status and comprehensive fertility of agricultural fields in Nanchong were scientifically and objectively evaluated based on 12 nutrient indicators of 872 soil samples, through comprehensive fertility index method, factor analysis method, entropy coefficient method and coefficient of variation method. The soil in Nanchong was alkaline, with low content of organic matter, rich content of phosphorus and iron, high content of copper and zinc, suitable content of potassium and manganese, low content of nitrogen, boron and molybdenum. In the comprehensive fertility index method, the comprehensive fertility index value was 0.75, which was in the third grade, and the overall soil fertility was poor. Only the comprehensive soil fertility of Peng'an County reached the second grade, which was 0.96. In the factor analysis method, the proportion of grade 4 samples was 42.09%, that of grade 3 samples was 34.52%, that of grade 2 samples was close to that of grade 5 samples, that of grade 1–3 samples accounted for 46.68%, that of grade 4–6 samples accounted for 53.52%, and the overall soil fertility was slightly low. In the entropy coefficient method, the

收稿日期 2024-08-30; **修回日期** 2024-10-03

基金项目 国家重点研发计划项目 (No. 2024YFD2300803); 国家产业技术体系四川省水果创新团队项目 (No. sccxttd-2024-04); 南充市农业科学院青年基金项目 (No. QJYB2504)。

作者简介 蒲成伟 (1992—), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 土壤与作物营养。*通信作者 (Corresponding author): 廖前超 (LIAO Qianchao), E-mail: 359531735@qq.com。

comprehensive fertility of soil was 0.082 96, which was between the second and third grade, and the overall fertility of soil was medium. The comprehensive soil fertility value of the coefficient of variation method was 34.09, which was between the first and second grade, and the overall soil fertility was high. Among the four evaluation methods, the coefficient of variation method had the highest soil fertility level, followed by entropy coefficient method and factor analysis method. The comprehensive fertility index method had the lowest fertility level. Through comparative analysis, the result of the factor analysis was more in line with the actual situation of Nanchong. The comprehensive fertility of farmland soil in Nanchong was slightly low. To improve the comprehensive fertility of agricultural land, it is necessary to reduce soil alkalinity, increase organic matter content, and pay attention to the supplementation of fertilizers such as nitrogen, boron, and molybdenum.

Keywords: Nanchong; agricultural land; nutrient content; comprehensive fertility; evaluation methods

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.02.021

土壤肥力是土壤生产力的基础，是衡量土壤能够提供给作物各种生长所需养分的能力^[1]，是土壤物理性质、化学性质、生物性质的综合体现^[2]，受到成土母质、自然条件以及后期人为因素的影响^[3-4]。客观全面地评价土壤肥力对实现土地资源可持续利用具有重要的现实意义^[5]。土壤肥力的评价大多是以土壤各类指标为依据，并通过数学模型将各类指标建立联系，从而得出结果，由于土壤系统的复杂性，评价目的和评价指标的差异性，当前对于土壤肥力评价仍未有统一的标准^[6]。目前广泛应用于土壤肥力评价的方法有聚类分析、因子分析、主成分分析和模糊综合评判等，如戴士祥等^[7]利用层次分析法评价安徽省水稻土的土壤肥力，周伟等^[8]利用内梅罗指数法评价哈尔滨城市绿地的土壤肥力，蒋焯林等^[9]使用熵权系数法评价新疆干旱区的土壤肥力等。南充市作为四川省最重要的粮食生产基地之一，其粮食耕种面积与产量均居全省首位，在四川省建设新时代“天府粮仓”战略中意义非凡。针对南充市土壤的研究主要集中在城市地表土壤碳、氮、磷分布特征^[10-11]，个别点位重金属监测^[12-13]、不同土壤利用方式对土壤性质的影响^[14]以及不同土壤类型间的养分含量差异研究^[15]等方面，并未有农用地养分状况与综合肥力评价的相关研究。鉴于此，本研究以南充市农用地土壤的12个养分指标为评价依据，分析对比综合肥力指数法、因子分析法、熵权系数法、变异系数法等方法下南充土壤综合肥力的差异性，探讨符合南充市农用地实际情况的土壤肥力评价方法和评价结果。通过不同评价方法间的对比，了解南充市农用地土壤综合肥力的真实状况，可以为南充市建设新时代更高水平的“天府粮仓”战略中，在耕地质量保护、高标准农田建设、土壤肥力改良与提

升等方面提供科学指导和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集及数据分析

1.1.1 土壤样本采集与处理 于2020年对南充市农用田地的土壤进行采样，共采集872份土壤样品，土壤采样点分布见图1。每个样品均采用多点混合采集法，采集土壤深度0~20 cm，在采样中心约3 m的半径范围内采集4~5个土壤样品，然后以四分法均匀混合形成一个1 kg的土壤样品^[16]。将采集到的土壤样品置于通风处自然阴干，剔除杂质后参照相应的国家标准^[17-20]进行理化指标分析检测。南充土壤类型主要以紫色土、水稻土为主，其次为黄壤、潮土、新积土等^[15]；土地利用方式包括旱地（果树、蔬菜、油菜-玉米/红薯/大豆或小麦-玉米/红薯/大豆等）、水旱轮作（水稻-小麦或水稻-油菜轮作）及水田（单季水稻）3类。

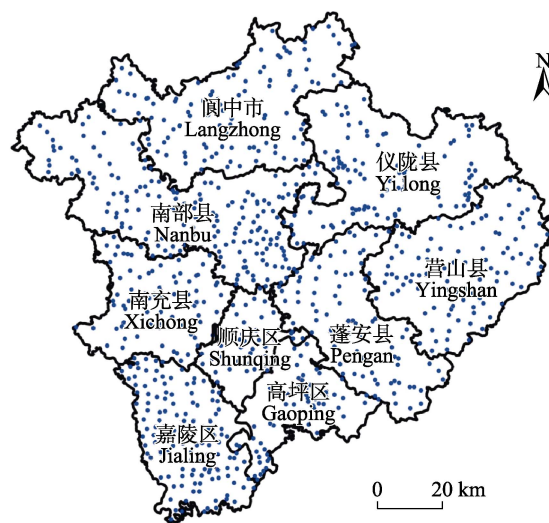


图1 土壤采样点分布

Fig. 1 Distribution map of soil sampling points

1.1.2 土壤养分分级情况 参考“全国第二次土壤普查技术规程”相关养分分级标准^[21]。酸碱度分级标准如下：强酸性（pH<4.5）、酸性（4.5≤pH<5.5）、微酸性（5.5≤pH<6.5）、中性（6.5≤pH<7.5）、碱性（7.5≤pH<8.5）、强碱性（pH≥8.5）。结合熵权系数法的计算需要，对中微量元素等级略有调整，原等级中第 3 等级取中位数重新划分为 2 个等级，如原标准中有效铜第 3 等级为 (0.2~1.0)mg/kg，现调整为 (0.2~0.6)、

(0.6~1.0)mg/kg 两个等级，其余中微量元素亦如此，后续所有等级划分及计算均采用调整后的标准，具体分级情况见表 1。土壤肥力指标分别为：有机质（SOM）、全氮（TN）、碱解氮（AN）、有效磷（AP）、速效钾（AK）、有效铜（ACu）、有效锌（AZn）、有效铁（AFe）、有效锰（AMn）、有效硼（AB）、有效钼（AMo）。养分指标第 1~6 级含义分别为丰富、高量、适宜、偏低、缺乏、极低。

表 1 土壤肥力指标分级标准
Tab. 1 Classification criterion for soil fertility indicators

等级 Grade	含量 Content										
	有机质 SOM/ (g·kg ⁻¹)	全氮 TN/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 AN (mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP (mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK (mg·kg ⁻¹)	有效铜 ACu/ (mg·kg ⁻¹)	有效锌 AZn/ (mg·kg ⁻¹)	有效铁 AFe/ (mg·kg ⁻¹)	有效锰 AMn/ (mg·kg ⁻¹)	有效硼 AB/ (mg·kg ⁻¹)	有效钼 AMo/ (mg·kg ⁻¹)
第 1 级	≥40	≥2.0	≥150	≥40	≥200	≥1.8	≥3.0	≥20	≥30	≥2.0	≥0.3
第 2 级	30~40	1.5~2.0	120~150	20~40	150~200	1.0~1.8	1.0~3.0	10~20	15~30	1.0~2.0	0.2~0.3
第 3 级	20~30	1.0~1.5	90~120	10~20	100~150	0.6~1.0	0.75~1.0	8~10	10~15	0.75~1.0	0.15~0.2
第 4 级	10~20	0.75~1.0	60~90	5~10	50~100	0.2~0.6	0.5~0.75	4.5~8	5~10	0.5~0.75	0.1~0.15
第 5 级	6~10	0.5~0.75	30~60	3~5	30~50	0.1~0.2	0.3~0.5	2~4.5	1~5	0.2~0.5	0.05~0.1
第 6 级	<6	<0.5	<30	<3	<30	<0.1	<0.3	<2	<1	<0.2	<0.05

1.2 土壤肥力评价方法

1.2.1 综合肥力指数法 参考地方标准《南方地区耕地土壤肥力诊断与评价》^[22]。评价模式分为土壤肥力单项指数 P_i （ P_i 高低直接反映该肥力指标的丰富程度，越高表明该养分越丰富，土壤肥力越高）和土壤肥力综合指数 $P_{综}$ 。土壤肥力根据综合指数的大小分为 I（ $P_{综} \geq 1.7$ ）、II（ $0.9 \leq P_{综} < 1.7$ ）、III（ $P_{综} < 0.9$ ）3 个等级。

土壤单项肥力指数计算公式：

$$P_i = C_i / S_i \tag{1}$$

式中， P_i 为土壤中某指标 i 的单项肥力指数； C_i 为土壤中某项指标 i 的实测数据； S_i 为土壤中某项指标 i 的评价标准值（评价标准值由参考的地方标准给出）。

土壤肥力综合指数计算公式：

$$P_{综} = \sqrt{\frac{\left((C_i/S_i)^2 \min + (C_i/S_i)^2 \text{ave} \right)}{2} \times \frac{N-1}{N}} \tag{2}$$

式中， $P_{综}$ 为土壤肥力综合指数； $(C_i/S_i)^2 \min$ 为土壤所有指标中单项肥力指数最小值平方，其中单项肥力指数 $P_i > 3$ 时，该项肥力指数以 $P_i = 3$ 计； $(C_i/S_i)^2 \text{ave}$ 为土壤所有肥力指数的平均值平方，

其中单项肥力指数 $P_i > 3$ 时，该项肥力指数以 $P_i = 3$ 计； N 为参与评价的土壤肥力指标个数（要求 10 项及以上，本研究为 12）。

1.2.2 因子分析法 参考杨岷园等^[23]、段必挺等^[24]的方法，并略有改动，考虑到不同指标数量级的差异，对原参考方法中直接对原始数据进行相关性分析，改为将原始数据进行标准化处理后再进行相关性分析。具体方法为：第一步，对原始数据进行标准化处理后的数据再进行相关性分析，并用 Bartlett 球度检验法验证该数据是否适用于因子分析法；第二步，用因子分析法确定南充市土壤养分指标的主成分特征值、特征向量和主成分累积贡献率；第三步，根据主成分累积贡献率选择关键主成分，计算各主成分得分，将因子得分系数矩阵与标准化数据相乘得到 F 值，再利用公式（3）求出各样点的 IFI 值；第四步，用同样的方法将求出标准样品的 IFI 值（IFI 值可反映土壤的肥力水平，得分越高表示土壤肥力水平越高）；第五步，根据标准样品的 IFI 值，对各样品的综合肥力进行划分，并评价其肥力高低。

IFI 计算公式：

$$IFI = \lambda_1 F_1 + \lambda_2 F_2 + \cdots + \lambda_m F_m \tag{3}$$

式中, IFI 代表土壤样品综合肥力; λ_m 代表第 m 个主成分的权重; F_m 代表第 m 个主成分的得分, 本研究中 m 为 4。

1.2.3 熵权系数法 参考朱春尧等^[25]的方法。设有 n 个待评价的事物, 每个事物有 m 个评价指标, 则可以建立评价模型的判断矩阵 R :

$$R = (X_{ij})_{m \times n}, i = 1, 2 \cdots m, j = 1, 2 \cdots n \quad (4)$$

由于各参评指标中有越大越优型, 也有越小越优型, 故需要对判断矩阵进行归一化处理, 得到归一化判断矩阵 B :

$$B = (B_{ij}) = \begin{cases} X_{ij} / \max X_{ij} & \text{越大越优型} \\ \min X_{ij} / X_{ij} & \text{越小越优型} \end{cases} \quad (5)$$

计算第 i 个评价指标下第 j 个待评价事物评价指标特征值比重:

$$P_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{j=1}^n b_{ij}} \quad (6)$$

计算第 i 个指标的熵值:

$$h_i = \frac{1}{mn} \sum_{j=1}^n P_{ij} \ln p_{ij} \quad (7)$$

计算第 i 个指标的权重:

$$d_i = (1 - h_i) / \sum_{i=1}^m (1 - h_i) \quad (8)$$

计算各待评价事物的综合肥力值

$$IFI_j = \sum_{i=1}^m d_i p_{ij} \quad (9)$$

1.2.4 变异系数法 由于评价指标体系中的指标量纲不同, 因此不宜直接比较其差别程度, 为了消除各项评价指标量纲不同的影响, 需要用变异系数来衡量各项指标取值的差异程度^[26], 各指标的变异系数公式:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2} \quad (10)$$

$$V_i = \frac{\sigma_i}{\bar{x}_i} \quad (11)$$

式中, σ_i 为第 i 项指标的标准差; n 为指标总数; x_i 为第 i 项指标数; $\bar{x}_i$ 为第 i 项指标的平均数; V_i 为第 i 项指标的变异系数;

各项指标的权重为:

$$W_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (12)$$

土壤综合肥力:

$$IFI = \sum_{i=1}^n x_i \times W_i \quad (13)$$

1.3 数据处理

利用 WPS Office 2024 软件按照上述公式对数据进行常规性运算与处理, 利用 SPSS 22 软件对数据进行标准化处理、相关性分析、Bartlett 球度检验与归一化处理等。

2 结果与分析

2.1 南充市农用田地土壤养分基本信息

根据土壤样品检测结果, 再结合 1.1.2 方法可以发现, 南充市农用田地呈碱性, 土壤平均 pH 为 7.61; 有机质含量为第 4 级, 整体偏低, 平均含量为 17.05 g/kg; 大量元素中全氮、碱解氮含量分别处于第 3、4 级, 整体为适宜和偏低水平, 平均分别为 1.15 g/kg、85.95 mg/kg; 有效磷含量为第 1 级, 整体为丰富水平, 平均为 57.68 mg/kg; 速效钾含量为第 2 级, 整体为适宜水平, 平均为 138.54 mg/kg; 中微量元素中, 有效铁含量为第 1 级, 整体为丰富, 平均为 43.96 mg/kg; 有效铜、有效锌含量为第 2 级, 整体为高量, 平均分别为 1.4、1.14 mg/kg; 有效锰含量为第 3 级, 整体为适宜, 平均为 12.18 mg/kg; 有效硼、有效钼含量为第 4 级, 整体为偏低, 平均分别为 0.52、0.13 mg/kg。由于南充地区成土母质多为紫红色砂岩和页岩的关系, 此类成土母质发育而成的紫色土中多含有碳酸钙、并且土层发育慢, 这也导致了土壤呈碱性、有机质含量偏低^[27-28], 同时紫色土中的磷钾含量丰富的特性和此次结果相匹配, 有效氮含量偏低的原因也与土壤的碱性程度有关^[29]。中微量元素的分布与含量主要与成土母质有关^[30], 但土壤的碱性程度过高也会影响部分元素的有效性^[31], 从而导致含量降低。同时, 南充所处的丘陵山区地形复杂多变, 也导致了元素存在离散偏差大的现象, 具体情况见表 2。

2.2 综合肥力指数评价结果

根据地方标准《南方地区耕地土壤肥力诊断与评价》, pH 的 P_i 分为以下等级, pH ≤ 5.0 或 pH ≥ 9.0 时, $P_i(C_i/S_i)=1.0$; pH 在 5.0~5.5 或 8.5~9.0 时, $P_i(C_i/S_i)=1.5$; pH 在 5.5~6.0 或 8.0~8.5 时, $P_i(C_i/S_i)=2.0$; pH 在 6.0~6.5 或 7.5~8.0 时, $P_i(C_i/S_i)=2.5$; 6.5 ≤ pH ≤ 7.5 时, $P_i(C_i/S_i)=3.0$ 。

其余各养分指标的标准值 (S_i) 分别为: 有机质 (旱地 12.5, 水田 22.5, 本研究采用平均值 17.5)、全氮 (旱地 1.0, 水田 1.2, 本研究采用平均值 1.1)、有效磷 (旱地 7.5, 水田 12.5, 本研究采用平均值 10)、速效钾 (旱地 80, 水田 100, 本研究采用平均值 90)、碱解氮 (105)、有效铜 (1.7)、有效锌 (1.8)、有效铁 (35)、有效锰 (35)、有效硼 (0.35)、有效钼 (0.15)。

表 2 南充市农用地土壤酸碱度以及养分含量分析结果
Tab. 2 Analysis of soil pH and nutrient content in agricultural fields in Nanchong

指标 Index	含量 Content											
	pH	有机质 SOM/ (g·kg ⁻¹)	全氮 TN/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 AN/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK/ (mg·kg ⁻¹)	有效铜 ACu/ (mg·kg ⁻¹)	有效锌 AZn/ (mg·kg ⁻¹)	有效铁 AFe/ (mg·kg ⁻¹)	有效锰 AMn/ (mg·kg ⁻¹)	有效硼 AB/ (mg·kg ⁻¹)	有效钼 AMo/ (mg·kg ⁻¹)
最小值	4.60	2.40	0.17	12.00	0.30	21.00	0.10	0.10	5.00	1.20	0.03	0.01
最大值	9.10	46.50	3.42	286.00	348.50	350.00	7.28	5.00	393.20	140.00	3.09	1.31
平均值	7.61	17.05	1.15	85.95	57.68	138.54	1.40	1.14	43.96	12.18	0.52	0.13
变异系数/%	11.56	46.39	41.74	46.04	174.69	49.88	75.00	75.44	127.41	97.37	98.08	46.39

利用公式 (1) 依次对各样品数据的 P_i 进行分析, 并计算出各区县中各养分指标的肥力指数平均值 (表 3)。再利用公式 (2) 计算出 $P_{\text{综}}$ 为 0.75, 为第Ⅲ级别。表明土壤肥力处于低水平、贫瘠状态, 作物也处于缺肥状态, 大部分肥力指标缺乏, 个别指标严重缺乏或不宜。仅有蓬安县的 $P_{\text{综}}$ 勉强达到第 2 等级, 为 0.96。

2.3 因子分析法评价结果

2.3.1 养分指标相关性分析 不少研究结果均证明土壤不同养分间均存在一定程度的相关性^[4,7],

对原始数据的相关性分析结果也能证明此观点。因此, 如果评价土壤综合肥力时直接采用养分指标进行, 将因为信息重叠而产生较大偏差, 进而影响评价结果的准确性^[32]。

2.3.2 土壤养分指标的因子分析 为判断土壤养分数据是否适用于因子分析法, 采用 Bartlett 球度检验法对养分指标原始数据进行检验^[32]。结果表明, KMO 值为 0.738, 大于 0.6, Bartlett 球度检验, 其显著性值小于 0, 为极显著水平, 即原始数据适用于因子分析法。

表 3 南充市农用地土壤肥力指数
Tab. 3 Fertility index of in agricultural fields in Nanchong

地区 Region	pH	P_i											$P_{\text{综}}$
		有机质 SOM	全氮 TN	碱解氮 AN	有效磷 AP	速效钾 AK	有效铜 ACu	有效锌 AZn	有效铁 AFe	有效锰 AMn	有效硼 AB	有效钼 AMo	
顺庆	2.39	0.99	1.04	0.82	6.67	1.57	0.82	0.62	1.30	0.35	1.33	0.84	0.71
高坪	2.54	1.01	1.05	0.83	8.35	1.65	0.84	0.61	1.27	0.35	1.26	0.85	0.66
嘉陵	2.40	0.99	1.04	0.81	7.04	1.59	0.78	0.61	0.95	0.30	1.40	0.81	0.81
西充	2.29	0.98	1.04	0.82	5.97	1.55	0.82	0.63	1.28	0.36	1.44	0.85	0.74
南部	2.35	0.99	1.04	0.82	6.33	1.56	0.83	0.62	1.34	0.36	1.36	0.86	0.69
阆中	2.26	0.97	1.05	0.82	5.78	1.54	0.82	0.63	1.25	0.35	1.48	0.87	0.76
仪陇	2.30	0.98	1.04	0.81	5.98	1.55	0.82	0.62	1.29	0.35	1.43	0.85	0.75
营山	2.29	0.98	1.04	0.81	5.94	1.54	0.81	0.62	1.27	0.35	1.43	0.85	0.69
蓬安	2.28	0.97	1.05	0.82	5.82	1.54	0.82	0.63	1.20	0.34	1.48	0.87	0.96
平均值	2.34	0.98	1.04	0.82	6.43	1.57	0.82	0.62	1.24	0.35	1.40	0.85	0.75

对原始数据的 12 个土壤养分指标进行因子分析, 提取出 4 个主成分 (表 4)。由表 4 可知, 4 个主成分方差贡献率分别为 32.40%、14.96%、

12.51%、8.43%, 累积贡献率达 68.26%。由表 5 可知, 第 1 主成分主要反映有机质、全氮、碱解氮、速效钾、有效铜、有效锌、有效铁、有效锰、

有效硼、有效钼的作用；第 2 主成分主要反映碱解氮、有效磷、有效铜、有效锌、有效铁、有效锰、有效钼的作用；第 3 主成分主要反映全氮、碱解氮、速效钾、有效磷、有效锰的作用；第 4 主成分主要反映 pH、有机质、全氮、碱解氮、速效钾、有效铜、有效锌、有效锰、有效硼的作用；4 个主因子经过累积，累积贡献率达到 68.26%，能够代表大多数肥力因子。因此，选择以上 4 个主因子对土壤肥力水平进行综合评价合理，与实际情况较为符合。

表 4 4 个主成分的特征值、方差贡献率及累积贡献率
Tab. 4 Eigenvalues, variance contribution rates, and cumulative contribution rates of four principal components

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累积贡献率 Accumulated contribution rate/%
F_1	3.888	32.40	32.40
F_2	1.795	14.96	47.36
F_3	1.501	12.51	59.87
F_4	1.011	8.43	68.26

表 5 方差极大正交旋转后的因子载荷矩阵
Tab. 5 Factor load matrix after maximum variance orthogonal rotation

指标 Index	F_1	F_2	F_3	F_4
pH	-0.016	-0.875	-0.082	0.148
有机质	0.901	-0.013	-0.008	0.115
全氮	0.898	-0.039	0.113	0.199
碱解氮	0.743	0.170	0.307	0.259
有效磷	-0.106	0.076	0.870	-0.180
速效钾	0.315	-0.049	0.769	0.153
有效铜	0.762	0.276	-0.039	0.192
有效锌	0.153	0.165	-0.025	0.716
有效铁	0.491	0.656	-0.315	-0.101
有效锰	0.052	0.726	0.092	0.389
有效硼	0.167	-0.209	-0.013	0.677
有效钼	0.317	0.285	-0.014	-0.092

2.3.3 构建因子得分函数模型 由养分指标的得分系数矩阵（表 6）计算 4 个主成分（ F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 ），主成分得分等于得分系数与相对应的标准化变量（ Z_{xi} ）之积，其数学模型如下：

$$F_1=0.081Z_{x1}+0.339Z_{x2}+0.314Z_{x3}+0.197Z_{x4}-0.063Z_{x5}+0.051Z_{x6}+0.228Z_{x7}-0.128Z_{x8}+0.153Z_{x9}-0.174Z_{x10}-0.063Z_{x11}+0.112Z_{x12}$$
$$F_2=-0.474Z_{x1}-0.124Z_{x2}-0.131Z_{x3}+0.012Z_{x4}+$$

$$0.070Z_{x5}-0.044Z_{x6}+0.098Z_{x7}+0.283Z_{x8}+0.283Z_{x9}+0.410Z_{x10}-0.110Z_{x11}+0.110Z_{x12}$$
$$F_3=-0.074Z_{x1}-0.061Z_{x2}+0.017Z_{x3}+0.157Z_{x4}+0.572Z_{x5}+0.476Z_{x6}-0.065Z_{x7}-0.024Z_{x8}-0.217Z_{x9}+0.073Z_{x10}-0.027Z_{x11}-0.021Z_{x12}$$
$$F_4=0.098Z_{x1}-0.113Z_{x2}-0.041Z_{x3}+0.056Z_{x4}-0.132Z_{x5}+0.054Z_{x6}-0.001Z_{x7}+0.594Z_{x8}-0.176Z_{x9}+0.355Z_{x10}+0.541Z_{x11}-0.143Z_{x12}$$

式中， Z_{x1} 、 Z_{x2} 、 Z_{x3} 、 Z_{x4} 、 Z_{x5} 、 Z_{x6} 、 Z_{x7} 、 Z_{x8} 、 Z_{x9} 、 Z_{x10} 、 Z_{x11} 、 Z_{x12} 分别代表经过标准化相关处理后的 pH、有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾、有效铜、有效锌、有效铁、有效锰、有效硼、有效钼。

表 6 主成分得分系数矩阵
Tab. 6 Principal component score coefficient matrix

指标 Index	F_1	F_2	F_3	F_4
pH	0.081	-0.474	-0.074	0.098
有机质	0.339	-0.124	-0.061	-0.113
全氮	0.314	-0.131	0.017	-0.041
碱解氮	0.197	0.012	0.157	0.056
有效磷	-0.063	0.070	0.572	-0.132
速效钾	0.051	-0.044	0.476	0.054
有效铜	0.228	0.056	-0.065	-0.001
有效锌	-0.128	0.098	-0.024	0.594
有效铁	0.153	0.283	-0.217	-0.176
有效锰	-0.174	0.410	0.073	0.355
有效硼	-0.063	-0.110	-0.027	0.541
有效钼	0.112	0.110	-0.021	-0.143

2.3.4 主成分因子得分 利用公式（3）对南充市土壤肥力的综合得分进行评价。将表 5 中的 4 个主成分的特征值进行归一化处理，得出 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 分别为 0.47、0.22、0.18、0.12。将求出的 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 分别带入公式（3）中进行计算，进而得到各样品土壤的 IFI 值。

2.3.5 土壤肥力的等级划分 根据表 2 的分级标准，将 5 个等级的数据（5 个标准样品的养分含量）作为此次土壤肥力等级划分的标准值。标准样品的数据经过标准化后，通过 2.2.3 和 2.2.4 的数学模型进行计算，最终得出标准样品的 IFI 值分别为 1.6730、0.6553、0.0531、-0.4818、-0.8150。通过对所有样品数据的综合肥力进行计算，得出各等级内的样品数量及占比分别为：第 1 级 $IFI \geq 1.6730$ ，样本数量 2，占比 0.23%；第 2 级 $0.6553 \leq IFI < 1.6730$ ，样本数量 104，占比 11.93%；第 3 级 $0.0531 \leq IFI < 0.6553$ ，样本数量 301，占比

34.52%; 第 4 级 $-0.4818 \leq \text{IFI} < 0.0531$, 样本数量 367, 占比 42.09%; 第 5 级 $-0.8150 \leq \text{IFI} < -0.4818$, 样本数量 96, 占比 11.01%; 第 6 级 $\text{IFI} < -0.8150$, 样本数量 2, 占比 0.23%。在此条件下, 第 4 级的样品数量占比最高, 其次为第 3 级的样品数量, 第 2 级与第 5 级的样品数量占比接近, 第 3 级及以上的样品数量占总体的比例为 46.68%, 第 4 级及以下的样品数量占总体的比例为 53.52%, 因此整体肥力为略偏低。

2.4 熵权系数法评价结果

2.4.1 判断矩阵的建立 在所有的土壤养分指标中, 除 pH 外, 其他指标均符合越大越优型。pH 为中性时, 符合大部分作物的生长要求, 因此将 pH 7.0 作为第 1 级标准, 其余标准依次为第 2 级 (pH 6.5 或 7.5)、第 3 级 (pH 6.0 或 8.0)、第 4 级 (pH 5.5 或 8.5)、第 5 级 (pH 5.0 或 9.0)。在此标准下, 将数据样本根据 pH 差异分为 2 部分, 其中 $\text{pH} \leq 7.0$ 的数据样品组 1, 共计 182 份; $\text{pH} > 7.0$ 的数据样品组 2, 共计 690 份。

随机选取一个样品的数据进行算法应用^[25], 该样品的基本信息为: pH 4.6、有机质含量 29.60 g/kg、全氮含量 1.78 g/kg、碱解氮含量 210.00 mg/kg、速效磷含量 44.50 mg/kg、速效钾含量 223.00 mg/kg、有效铜含量 4.50 mg/kg、有效锌含量 1.69 mg/kg、有效铁含量 185.00 mg/kg、有效锰含量 31.10 mg/kg、有效硼含量 0.80 mg/kg、有效钼含量 0.32 mg/kg。以表 2 中的等级为评价等级建立判断矩阵 R , 再根据公式 (5) 计算得到其归一化评价指标矩阵 B ^[25]。最后利用公式 (6) 计算得到评价模型的评价指标特征值比重矩阵 P ^[25]。

$$R = \begin{bmatrix} 7.0 & 6.5 & 6.0 & 5.5 & 5.0 & 4.6 \\ 40 & 30 & 20 & 10 & 6 & 29.6 \\ 2 & 1.5 & 1 & 0.75 & 0.5 & 1.78 \\ 150 & 120 & 90 & 60 & 30 & 210 \\ 40 & 20 & 10 & 5 & 3 & 44.5 \\ 200 & 150 & 100 & 50 & 30 & 223 \\ 1.8 & 1 & 0.6 & 0.2 & 0.1 & 4.5 \\ 3 & 1 & 0.75 & 0.5 & 0.3 & 1.69 \\ 20 & 10 & 8 & 4.5 & 2 & 185 \\ 30 & 15 & 10 & 5 & 1 & 31.1 \\ 2 & 1 & 0.75 & 0.5 & 0.2 & 0.8 \\ 0.3 & 0.2 & 0.15 & 0.1 & 0.05 & 0.32 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.9286 & 0.8471 & 0.7857 & 0.7143 & 0.6571 \\ 0.9456 & 0.7092 & 0.4728 & 0.2364 & 0.1418 & 0.6998 \\ 0.5882 & 0.4412 & 0.2941 & 0.2206 & 0.1471 & 0.5235 \\ 0.3000 & 0.2400 & 0.1800 & 0.1200 & 0.0600 & 0.4200 \\ 0.1143 & 0.0571 & 0.0286 & 0.0143 & 0.0086 & 0.1271 \\ 0.5714 & 0.4286 & 0.2857 & 0.1429 & 0.0857 & 0.6371 \\ 0.3377 & 0.1876 & 0.1126 & 0.0375 & 0.0188 & 0.8443 \\ 0.6000 & 0.2000 & 0.1500 & 0.1000 & 0.0600 & 0.3380 \\ 0.0509 & 0.0254 & 0.0203 & 0.0114 & 0.0051 & 0.4705 \\ 0.1245 & 0.0622 & 0.0415 & 0.0207 & 0.0041 & 0.1290 \\ 0.8584 & 0.4292 & 0.3219 & 0.2146 & 0.0858 & 0.3433 \\ 0.4110 & 0.2740 & 0.2055 & 0.1370 & 0.0685 & 0.4384 \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} 0.1694 & 0.2331 & 0.2886 & 0.3849 & 0.5103 & 0.1168 \\ 0.1602 & 0.1781 & 0.1592 & 0.1158 & 0.1013 & 0.1243 \\ 0.0997 & 0.1108 & 0.0990 & 0.1081 & 0.1051 & 0.0930 \\ 0.0508 & 0.0603 & 0.0606 & 0.0588 & 0.0429 & 0.0746 \\ 0.0194 & 0.0143 & 0.0096 & 0.0070 & 0.0061 & 0.0226 \\ 0.0968 & 0.1076 & 0.0962 & 0.0700 & 0.0612 & 0.1132 \\ 0.0572 & 0.0471 & 0.0379 & 0.0184 & 0.0134 & 0.1500 \\ 0.1017 & 0.0502 & 0.0505 & 0.0490 & 0.0429 & 0.0601 \\ 0.0086 & 0.0064 & 0.0069 & 0.0056 & 0.0036 & 0.0836 \\ 0.0211 & 0.0156 & 0.0140 & 0.0102 & 0.0030 & 0.0229 \\ 0.1454 & 0.1078 & 0.1084 & 0.1051 & 0.0613 & 0.0610 \\ 0.0696 & 0.0688 & 0.0692 & 0.0671 & 0.0489 & 0.0779 \end{bmatrix}$$

2.4.2 养分指标熵值与权重的计算 根据公式 (7) 计算出各评判指标的熵值:

$$H = [0.0306, 0.0216, 0.0199, 0.0134, 0.0079, 0.0206, 0.0178, 0.0148, 0.014, 0.0080, 0.0122, 0.0140]$$

根据公式 (8) 计算出各评判指标的权重:

$$D = [0.0821, 0.0829, 0.0830, 0.0836, 0.0840, 0.0830, 0.0832, 0.0835, 0.0835, 0.0840, 0.0837, 0.0835]$$

2.4.3 综合肥力计算 按照上述过程, 经公式 (9) 得到所有土壤样品的 IFI 值平均为 0.082 96, 其中数据样品组 1 (即 $\text{pH} \leq 7.0$) 的 IFI 值平均为 0.082 99, 数据样品组 2 (即 $\text{pH} > 7.0$) 的 IFI 值平均为 0.082 94。5 个标准样品的 IFI 值分别为 0.083 11、0.082 98、0.082 92、0.082 81、0.082 63, 以此将综合肥力划分为 6 个等级: 第 1 级 $\text{IFI} \geq 0.083 11$, 第 2 级 $0.082 98 \leq \text{IFI} < 0.083 11$, 第 3 级 $0.082 92 \leq \text{IFI} < 0.082 98$, 第 4 级 $0.082 81 \leq \text{IFI} < 0.082 92$, 第 5 级 $0.082 63 \leq \text{IFI} < 0.082 81$, 第 6 级 $\text{IFI} <$

0.08263。通过 2 组样品的 IFI 值与标准样品对比可知，南充市土壤综合肥力处于第 3 级，因此整体为适宜肥力。

2.5 变异系数法评价结果

根据表 1 和公式 (12) 计算出各养分指标的权重值分别为：pH 0.0124、有机质 0.0492、全氮 0.0442、碱解氮 0.0513、速效磷 0.1844、有效钾 0.0529、有效铜 0.0822、有效锌 0.0808、有效铁 0.1345、有效锰 0.1203、有效硼 0.1043、有效铝 0.0841。

以表 2 作为土壤肥力的标准等级，利用公式 (13) 计算出各标准等级的 IFI 值分比为 35.70、22.83、15.34、8.57、4.53，以此将综合肥力划分为 6 个等级，第 1 级 $IFI \geq 34.70$ ，第 2 级 $22.83 \leq IFI < 34.70$ ，第 3 级 $15.34 \leq IFI < 22.83$ ，第 4 级 $8.57 \leq IFI < 15.34$ ，第 5 级 $4.53 \leq IFI < 8.57$ ，第 6 级 $IFI < 4.53$ 。同时计算出所有土壤样品的 IFI 值为 34.09。可见，南充 IFI 值处于第 1~2 级之间，并接近于第 1 级，因此整体肥力为偏高。

3 讨论

本研究采用了 4 种常用评价方法对南充市农用地土壤肥力进行了评价，4 种评价方法的结果有所差异，在综合肥力指数法的评价方法中， $P_{综}=0.75$ ，在地方标准《南方地区耕地土壤肥力诊断与评价》中， $P_{综}<0.9$ 则表示土壤肥力处于低水平、贫瘠，作物处于缺肥状态，大部分肥力指标缺乏，个别指标严重缺乏^[22]，因此认定综合肥力指数法的结果为土壤肥力贫瘠；因子分析法将数据样品肥力值与标准样品肥力值进行对比，并将样本划分成不同的数据集，通过数据集占比的大小，计算出最终肥力，此次因子分析的结果中有 34.52% 的土壤样品处于第 3 级，42.09% 的土壤样品处于第 4 级，按照表 1 的肥力指标等级划分，分别为适宜和偏低，因此认定因子分析的结果为土壤肥力略偏低；熵权系数法是赋予评价指标权重值，通过加权的方法计算各土壤样品的肥力值和所有样品的平均肥力值，再与标准样品的肥力值进行对比，结果中所有土壤样品的平均肥力值为 0.082 96，经过与标准品对比，该平均肥力值处于第 3 级之间，因此认定熵权系数法的结果为肥力适宜，也可表述为中等肥力；变异系数法下，土壤肥力的平均值为 34.09，经过与标准样品的对比，该肥力处于第 2 级，因此认定变异系数

法的结果为偏高。

关于南充市土壤肥力的研究，唐晓平^[33]在 1997 年利用 Fuzzy 综合评判针法对南充地区的紫色类型土壤进行了综合肥力研究，其结果表明南充地区的紫色土肥力多以中低水平为主，该结论与本研究中因子分析法的结论较为接近；王齐齐等^[34]利用有机质、氮磷钾等大量元素作为依据，对西部地区紫色土近 30 年的土壤肥力演变进行了研究，南充市的点位中土壤肥力均表现为偏低，并且提出了限制因子为氮和有机质，这也与本结论中氮、有机质含量偏低的结果一致；此外，在南充周边地区开展的土壤肥力研究中，丁锐等^[35]采用综合肥力评价法对广元市的核桃园区进行土壤肥力分析，其结果表明广元市核桃园区土壤以紫色土和黄壤为主，土壤肥力总体偏低；王杰等^[36]利用模糊分析法对广安市柑橘园区的土壤进行肥力分析，发现该地区柑橘园的土壤肥力为中等肥力，但处于中等以及中等偏低的样本占比高达 82.57%；邓利梅等^[37]对南充周边盐亭县的撂荒土地和未撂荒土地进行对比研究，发现二者的土壤肥力均未有显著变化，且二者的肥力均在第 3~4 级之间，为偏低肥力。虽然南充的土壤类型以紫色土为主，但水稻土也占据较大比例，这一点从南充市的水稻种植面积为所有粮食作物之首也可证明^[38]。水稻土作为一种人为土，可由各类土壤发育而来，在人为长期的耕作、施肥、灌溉排水等行为下，其土壤性质也发生了变化^[39]，由于成土母质的原因，南充地区的水稻土主要由紫色土发育而来，且水稻土的肥力要高于紫色土^[25]。因此，根据前人研究进展，再结合南充市土壤酸碱性及养分基本情况，可认定因子分析的结果较为符合南充土壤肥力的实际情况，即土壤肥力偏低。

土壤肥力是土壤最基本的特征，是反映土壤能够提供给作物生长所需的各种养分的能力，一般受到养分因素、物理因素、化学因素、生物因素的影响，在本研究中采用了养分因素（有机质与各类元素）和化学因素（酸碱度）作为评价指标来反映南充市土壤的综合肥力。通过前人研究结果，结合本次土壤酸碱度检测结果和养分分析检测结果，可以认为酸碱度、有机质含量、氮含量是南充市土壤肥力的主要障碍因子，硼、铝是次要限制因子。土壤酸碱度是评价土壤健康性的重要指标^[40]，可通过影响土壤中微生物活性、养

分的有效性和转化运输^[41],进而影响作物的生长发育、抗病性及产量和质量^[42]。南充市土壤呈碱性,平均 pH 达到 7.61,其主要原因是南充地区所处四川盆地,成土母质多为紫红色砂岩和页岩,这类母质土壤多含有盐基饱和度较高的碳酸盐,从而导致本区域的土壤碱性程度较高^[28]。土壤有机质含量是衡量土壤是否肥沃的重要指标^[43],土壤中众多营养元素都来源于有机质,特别是氮素和磷素^[44],此外有机质还影响着土壤微生物含量与活性,土壤的保水保肥功效等^[45-46]。南充土壤有机质含量为 17.05 g/kg,整体偏低,其主要原因是南充地区为典型的紫色土,紫色土土层浅薄、剖面发育不明显,没有显著的腐殖质层^[27],因而有机质整体偏低。氮素是植物生长的必备要素之一,是植物体内蛋白质、核酸、磷脂和激素等含氮物质的重要组成成分,关系着植物的生物量和品质等^[47]。南充土壤碱解氮含量偏低的原因也可能是受碱性土壤的影响,碱性环境下铵态氮从离子态向分子态转化,且碱性程度越高,随之造成的矿化、硝化及反硝化作用也更为明显,NO₃淋洗和 NH₃挥发也更为严重,氮损失程度也更明显^[27, 48]。硼、钼也是作物发育的必备微量元素^[49-50],硼在植物器官发育和耐逆性方面有重要作用,钼对促进氮的代谢和促进糖类的形成和转化等方面有重要的作用。其含量主要受土壤成土母质的影响,后期的人为因素也会导致微量元素的含量发生变化^[51]。

因此,南充市土壤肥力的提升首先建议增施有机肥,研究表明增施有机肥可以有效增加土壤中有机质的含量^[52],其次有机肥中含有的腐殖酸在降低土壤 pH 方面具有良好效果^[53],最后有机肥不仅可以补充土壤所需的氮肥^[44],还可以补充多种作物所需的中微量元素^[54]。此外,有机肥在改善土壤物理性质^[55]、微生物多样性和种群结构^[56]方面有良好的效果,很多学者以将土壤的物理性质和微生物作为评价土壤肥力的重要指标^[57-59];其次多采用深翻、轮作、间作的耕作模式也有助于改善土壤肥力,蔡红光等^[60]研究表明玉米秸秆全量深翻还田能够减轻土壤肥力退化问题,赵峥等^[61]研究表明轮作可以增加水稻田的土壤肥力,许代香等^[62]研究表明禾本科与豆科间作可以提升土壤肥力。对于碱性程度较高的土壤可以适当使用石膏、硫磺等碱性土壤改良剂,相对于有机肥的改良效果,土壤改良剂的时效性更好,但长

期单独使用土壤改良剂对土壤生态系统的稳定性和安全性可能造成潜在的风险^[63],因此需要科学合理地使用土壤改良剂,也有研究表明同时将土壤改良剂与有机肥搭配使用后的效果也更佳^[64]。对于缺少的氮、硼、钼等元素除了通过有机肥补充外,还可根据实际情况以根部和叶面追肥的方式补充。

4 结论

通过综合指数法、因子分析法、熵权系数法、变异系数法 4 种方法对南充市土壤综合肥力进行评价。结果表明,4 种综合肥力评价方法的结果间存在较大差异,变异系数法的评价结果为偏高,熵权系数法的评价结果为适宜,因子分析法的评价结果略偏低,综合肥力指数法的评价结果为贫瘠。结合前人研究进展与土壤酸碱度与养分基本信息,因子分析法的评价结果与南充市土壤综合肥力较为接近。后期土壤综合肥力的提升应注重增施有机肥,注意碱性土壤的改良以及在氮、硼、钼等元素上的补充。

参考文献

- [1] 高志勤. 集约经营雷竹林土壤质量的演变: 以氮磷养分变化为例[J]. 世界竹藤通讯, 2011, 9(2): 10-12.
GAO Z Q. Changing of soil quality for extensive management in *Phyllostachy praecox* forest: taking NP nutrient as example[J]. World Bamboo and Rattan, 2011, 9(2): 10-12. (in Chinese)
- [2] 杨厚翔, 雷国平, 徐秋. 黑龙江省耕地土壤养分贫瘠化研究[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(6): 224-229, 236.
YANG H X, LEI G P, XU Q. Study of soil nutrient depletion in cultivated land of Heilongjiang province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(6): 224-229, 236. (in Chinese)
- [3] ZHANG Y, ZHANG X, SHI S, LI H, XIAO P. Determining the depth of mixing layer in which soil solute releasing from soil to surface runoff on the unsaturated loess slope under artificial rainfall condition[J]. Journal of Soils & Sediments, 2019(5): 153-165.
- [4] 程国峰, 黄达, 赵冬丽, 王立强, 程志杰. 河南省潮土区土壤肥力现状分析[J]. 中国农学通报, 2022, 38(27): 101-105.
CHENG G F, HUANG D, ZHAO D L, WANG L Q, CHENG Z J. Current situation of soil fertility in fluvo-aquic soil region of Henan province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(27): 101-105. (in Chinese)

- [5] 张宇超. 北戴河区主要道路及公园园林绿地土壤养分状况调查与评价[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2016.
ZHANG Y C. Investigation and analysis of soil nutrient in urban parks and roads green-land in Beidaihe[D]. Qinhuangdao: Hebei Normal University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [6] 朱玉杰. 抚育间伐对大兴安岭用材林土壤及生长的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
ZHU Y J. Effects of thinning on forest soil and forest growth in greater Higgan mountains[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2016. (in Chinese)
- [7] 戴士祥, 任文杰, 滕应, 陈末, 马文亭, 黄阳. 安徽省主要水稻土基本理化性质及肥力综合评价[J]. 土壤, 2018, 50(1): 66-72.
DAI S X, REN W J, TENG Y, CHEN M, MA W T, HUANG Y. Basic physico-chemical properties and fertility comprehensive evaluation of main paddy soils in Anhui province[J]. Soil, 2018, 50(1): 66-72. (in Chinese)
- [8] 周伟, 王文杰, 何兴元, 张波, 肖路, 王琼, 吕海亮, 魏晨辉. 哈尔滨城市绿地土壤肥力及其空间特征[J]. 林业科学, 2018, 54(9): 9-17.
ZHOU W, WANG W J, HE X Y, ZHANG B, XIAO L, WANG Q, LYU H L, WEI C H. Soil fertility and spatial variability of urban green hand in Harbin[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(9): 9-17. (in Chinese)
- [9] 蒋烨林, 王让会, 彭擎, 吴晓全, 刘燕, 李成. 基于熵权物元模型的土壤养分评价: 以新疆干旱区艾比湖流域人工绿洲为例[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(9): 852-859.
JIANG Y L, WANG R H, PENG Q, WU X Q, LIU Y, LI C. Soil nutrients evaluation based on entropy weight and matter element (EWME) model: a case study on artificial oasis in the ebunur lake basin, an arid zone of Xinjiang[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2017, 33(9): 852-859. (in Chinese)
- [10] 傅裕, 王建. 南充市城市绿地表层土壤有机碳、氮密度分布特征[J]. 中国土壤与肥料, 2022(7): 206-214.
FU Y, WANG J. Distribution characteristics of topsoil organic carbon and nitrogen densities in urban green space of Nanchong city[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(7): 206-214. (in Chinese)
- [11] 傅裕, 杨霞, 王建. 南充市“城-郊-乡”梯度绿地土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2020, 39(12): 4038-4047.
FU Y, YANG X, WANG J. Stoichiometric characteristics of soil CN and P of green space along an urban-suburb-rural gradient in Nanchong[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(12): 4038-4047. (in Chinese)
- [12] 刘俊鹏, 徐正刚, 梁时军, 彭修涛, 肖娟. 南充某农用地块土壤污染状况初步调查研究[J]. 绿色科技, 2022, 24(12): 134-137.
LIU J P, XU Z G, LIANG S J, PENG X T, XIAO J. Preliminary investigation on soil pollution of an agricultural plot in Nanchong[J]. Journal of Green Science and Technology, 2022, 24(12): 134-137. (in Chinese)
- [13] 李敏, 舒丽, 蔡伊莎, 刘晓红, 张自全. 南充站十年土壤重金属监测经验分享[J]. 四川环境, 2017, 36(增刊 1): 65-67.
LI M, SHU L, CAI Y S, LIU X H, ZHANG Z Q. Ten-year experience of soil heavy metal monitoring in Nanchong[J]. Sichuan Environment, 2017, 36(Suppl. 1): 65-67. (in Chinese)
- [14] 文星跃, 熊泳, 李卫朋, 吴勇, 湛柯, 沈小晓, 张渊, 林叶彬. 嘉陵江中游小流域不同土地利用对土壤理化特征的影响研究[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 284-291.
WEN X Y, XIONG Y, LI W P, WU Y, ZHAN K, SHEN X X, ZHANG Y, LIN Y B. The influence of different land-use type on soil physicochemical characteristics in the small basin of Jialing river's middle reaches[J]. Journal of China West Normal University (Natural Sciences), 2018, 39(3): 284-291. (in Chinese)
- [15] 王婉秋, 李仕培, 李辉, 胡建明, 张婕琳. 南充农耕土壤养分丰缺状况及变化情况[J]. 西南农业学报, 2015, 28(5): 2181-2186.
WANG W Q, LI S P, LI H, HU J M, ZHANG J L. Nutrient status and change situation of Nanchong cultivated soil[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2015, 28(5): 2181-2186. (in Chinese)
- [16] 中华人民共和国农业部. 农田土壤环境质量监测技术规范: NY/T 395—2012[S]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2012.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Technical specification for soil environmental quality testing of farmland: NY/T 395—2012[S]. Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2012. (in Chinese)
- [17] 辛景树, 田有国, 任意, 黄铁平, 邵华, 鲁明星, 郑磊. 土壤检测 第1部分: 土壤样品的采集、处理和贮存: NY/T 112.1—2006[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
XIN J S, TIAN Y G, REN Y, HUANG T P, SHAO H, LU M X, ZHENG L. Soil testing part 1: Collection, processing, and storage of soil samples: NY/T 112.1—2006[S]. Beijing: China Agricultural Press, 2006. (in Chinese)
- [18] 田有国, 辛景树, 任意, 龙怀玉, 朱恩, 郑磊. 土壤检测 第2部分: 土壤 pH 的测定: NY/T 112.1—2006[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006.

- TIAN Y G, XIN J S, REN Y, LONG H Y, ZHU E, ZHENG L. Soil testing part 2: determination of soil pH: NY/T 111.2—2006[S]. Beijing: China Agricultural Press, 2006. (in Chinese)
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000. (in Chinese)
- [20] 王敏, 张跃, 刘海荷, 刘密, 肖瑞芹, 刘建安, 黄跃蓉. 土壤有效态锌、锰、铁、铜含量的测定 二乙三胺五乙酸 (DTPA)浸提法: NY/T 890—2004[S]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2004.
- WANG M, ZHANG Y, LIU H H, LIU M, XIAO R Q, LIU J A, HUANG Y R. Determination of available zinc, manganese, iron, and copper content in soil by diethylenetriamine-5-acetic acid (DTPA) extraction method: NY/T 890—2004[S]. Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2004. (in Chinese)
- [21] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
- National Soil Census Office. Chinese soil survey technology[M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1992. (in Chinese)
- [22] 中华人民共和国农业部. 南方地区耕地土壤肥力诊断与评价: NYT 1749—2009[S]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2009.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Diagnosis and evaluation of soil fertility in cultivated land in southern China: NYT 1749—2009[S]. Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2009. (in Chinese)
- [23] 杨岷园, 方艺, 委亚庆, 何竟舟, 张世浩, 赵敬坤, 付登伟, 黄秀芬, 刘邦银, 李泽慧, 刁向银. 重庆稻油轮作区土壤养分状况评价[J]. 土壤, 2022, 54(5): 936-944.
- YANG J Y, FANG Y, WEI Y Q, HE J Z, ZHANG S H, ZHAO J K, FU D W, HUANG X F, LIU B Y, LI Z H, XI X Y. Evaluation of soil nutrient status in rice-oilseed rape rotation area of Chongqing[J]. Soil, 2022, 54(5): 936-944. (in Chinese)
- [24] 段必挺, 杨锡永, 李发平, 赵旭辉, 李茂林, 苏仕开, 苏德艳, 张平, 刘洪华. 基于因子分析的土壤肥力综合评价[J]. 现代农业科技, 2016(7): 228-230.
- DUAN B T, YANG X Y, LI F P, ZHAO X H, LI M L, SU S K, SU D Y, ZHANG P, LIU H H. Integrated evaluation of soil fertility based on factor analysis[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2016(7): 228-230. (in Chinese)
- [25] 朱春晓, 苏恒强. 基于熵权系数土壤肥力评价方法的研究[J]. 广东农业科学, 2013, 40(15): 200-202, 217.
- ZHU C R, SU H Q. Research of evaluation of soil fertility method based on entropy weight coefficient[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2013, 40(15): 200-202, 217. (in Chinese)
- [26] 刘小波, 涂建光, 张海峰, 李治江. 国土综合整治三维模型碎片加载优化与调度[J]. 测绘学报, 2022, 51(4): 522-533.
- LIU X B, TU J G, ZHANG H F, LI Z J. Optimization and scheduling of tile loading for three-dimensional model of land consolidation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(4): 522-533. (in Chinese)
- [27] 张启义. 成都平原土壤有机碳含量特征及影响因素研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2009.
- ZHANG Q Y. Content affecting factors of soil organic carbon in the plain of Chengdu in Sichuan province[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- [28] 储栎泉, 焦涵薇, 余靖, 张超杰, 周雪飞, 张亚雷. 四川紫色土壤中流氮流失特征及控制技术[J]. 四川环境, 2022, 39(4): 111-116.
- CHU L Q, JIAO H W, YU J, ZHANG C J, ZHOU X F, ZHANG Y L. Characteristics and control techniques of nitrogen loss in purple soil interflow in Sichuan[J]. Sichuan Environment, 2022, 39(4): 111-116. (in Chinese)
- [29] 田冬, 高明, 徐畅. 土壤水分和氮添加对 3 种质地紫色土氮矿化及土壤 pH 的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 255-261.
- TIAN D, GAO M, XU C. Effects of soil moisture and nitrogen addition on nitrogen mineralization and soil pH in purple soil of three different textures[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1): 255-261. (in Chinese)
- [30] 罗由林, 李启权, 王昌全, 张新, 张维, 贾荔, 袁大刚, 吴德勇. 四川省仁寿县土壤有机碳空间分布特征及其主控因素[J]. 中国生态农业学报, 2015(1): 34-42.
- LUO Y L, LI Q Q, WANG C Q, ZHANG X, ZHANG W, JIA L, YUAN D G, WU D Y. Spatial distribution characteristics and main controlling factors of soil organic carbon in Renshou county, Sichuan province[J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture, 2015(1): 34-42. (in Chinese)
- [31] XU Z W, ZHANG T Y, WANG S Z, WANG Z C. Soil pH and C/N ratio determines spatial variations in soil microbial communities and enzymatic activities of the agricultural ecosystems in northeast China: Jilin Province case[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 155: 103629.
- [32] 杨锡永, 段必挺, 王朝军, 杨海涛, 杨堃, 张平, 戴曙伟, 刘洪华. 施甸县烟区土壤养分综合评价[J]. 现代农业科技, 2017(19): 172-174.
- YANG X Y, DUAN B T, WANG C J, YANG H T, YANG F,

- ZHANG P, DAI S W, LIU H H. Integrated evaluation of soil nutrient in tobacco-growing area of Shidian county[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2017(19): 172-174. (in Chinese)
- [33] 唐晓平. 四川紫色土肥力的 Fuzzy 综合评判[J]. *土壤通报*, 1997(3): 12-14, 31.
- TANG X P. Fuzzy comprehensive evaluation of purple soil fertility in Sichuan province[J]. *Soil Bulletin*, 1997(3): 12-14, 31. (in Chinese)
- [34] 王齐齐, 徐虎, 马常宝, 薛彦东, 王传杰, 徐明岗, 张文菊. 西部地区紫色土近 30 年来土壤肥力与生产力演变趋势分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1492-1499.
- WANG Q Q, XU H, MA C B, XUE Y D, WANG C J, XU M G, ZHANG W J. Analysis of the evolution trends of soil fertility and productivity in purple soil in western china over the past 30 years[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2018, 24(6): 1492-1499. (in Chinese)
- [35] 丁锐, 赖霜菊, 赵柳, 杨明府, 严雄, 刘雪梅, 李波, 闵安民, 王正前. 广元核桃林地土壤肥力诊断与综合评价[J]. *四川林业科技*, 2018, 39(6): 71-75.
- DING R, LAI S J, ZHAO L, YANG M F, YAN X, LIU X M, LI B, MIN A M, WANG Z Q. Diagnosis and comprehensive evaluation of soil fertility in walnut forests in Guangyuan[J]. *Sichuan Forestry Science and Technology*, 2018, 39(6): 71-75. (in Chinese)
- [36] 王杰, 张春燕, 卢加文, 陈书, 王棋. 广安区柑橘土壤养分状况及综合肥力评价[J]. *土壤通报*, 2021, 52(6): 1360-1367.
- WANG J, ZHANG C Y, LU J W, CHEN S, WANG Q. Nutrient status and comprehensive fertility evaluation of citrus soil in Guang'an district[J]. *Soil Bulletin*, 2021, 52(6): 1360-1367. (in Chinese)
- [37] 邓利梅, 陆传豪, 刘刚才. 川中丘陵区耕地撂荒对土壤肥力的影响[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(3): 36-44.
- DENG L M, LU C H, LIU G C. The impact of abandoned farmland on soil fertility in the hilly area of central Sichuan[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2021, 43(3): 36-44. (in Chinese)
- [38] 南充市统计局. 南充市统计年鉴 2021[M]. 北京: 阳光出版社, 2021.
- Nanchong Municipal Bureau of Statistics. Nanchong statistical yearbook 2021[M]. Beijing: Sunshine Publishing House, 2021. (in Chinese)
- [39] 章明奎, 邱志腾, 毛霞丽. 长期水耕植稻对水稻土耕层质地的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(6): 249-253.
- ZHANG M K, QIU Z T, MAO X L. The effect of long-term hydroponic rice cultivation on the texture of paddy soil tillage layer[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(6): 249-253. (in Chinese)
- [40] 卢培娜, 刘景辉, 李立军, 白健慧, 赵宝平, 米俊珍, 刘敏. 有机物料对北方盐碱地土壤特性及燕麦产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(2): 73-86.
- LU P N, LIU J H, LI L J, BAI J H, ZHAO B P, MI J Z, LIU M. Effects of organic materials on soil properties and oat yields in a saline-alkaline environment in northern China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(2): 73-86. (in Chinese)
- [41] 荣勤雷. 黄泥田有机培肥效应及机理研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- RONG Q L. A study on the effect and mechanism of organic fertilization in yellow Mud fields[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014. (in Chinese)
- [42] 白萱, 焉莉, 朱健菲, 高强, 李旭, 孙萌. 近 40 年来吉林省农田耕层土壤 pH 的时空变化特征[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(6): 23-34.
- BAI X, YAN L, ZHU J F, GAO Q, LI X, SUN M. Spatial and temporal characteristics of soil pH in the cultivated layer of farmland in Jilin province in the past 40 years[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(6): 23-34. (in Chinese)
- [43] WU J S, LIN H P, MENG C F, JIANG P K, FU W J. Effects of intercropping grasses on soil organic carbon and microbial community functional diversity under Chinese hickory (*Carya cathayensis* Sarg.) stands[J]. *Soil Research*, 2014, 52(6): 575-583.
- [44] 吴海燕, 金荣德, 范作伟, 彭畅高, 洪军, 张秀芝, 李强, 朱平. 基于主成分和聚类分析的黑土肥力质量评价[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(2): 325-334.
- WU H Y, JIN R D, FAN Z W, PENG C G, HONG J, ZHANG X Z, LI Q, ZHU P. Assessment of fertility quality of black soil based on principal component and cluster analysis[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(2): 325-334. (in Chinese)
- [45] 于贝贝, 何莉莉, 杨生茂, 刘淑英. 木醋液改良盐碱土的研究进展[J]. *国土与自然资源研究*, 2024(1): 62-67.
- YU B B, HE L L, YANG S M, LIU S Y. Research progress of improving saline-alkali soil with wood vinegar[J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2024(1): 62-67. (in Chinese)
- [46] CHANG N J, ZHAI Z, LI H, WANG L G, DENG J. Impacts of nitrogen management and organic matter application on nitrous oxide emissions and soil organic carbon from spring maize fields in the North China Plain[J]. *Soil & Tillage Research*, 2020, 196: 104441.
- [47] 薛红卫, 焦雨铃, 徐通达, 丁兆军, 武国章, 高泓博, 王佳伟, 杜斐, 唐文鑫, 于子鹏, 孔祥, 培苏彤. 植物细胞与发

- 育生物学研究进展[J]. 植物生理学报, 2023, 59(12): 2145-2187.
- XUE H W, JIAO Y L, XU T D, DING Z J, WU Z G, GAO H B, WANG J W, DU F, TANG W X, YU Z P, KONG X, PEI S D. Recent advances in plant cell and developmental biology[J]. *Plant Physiology Journal*, 2023, 59(12): 2145-2187. (in Chinese)
- [48] XUE D, YU H, FANG Y, SHAN J, XI D, WANG Y, KUZUYAKOV Y, WANG Z L. ^{15}N -tracer approach to assess nitrogen cycling processes: nitrate anammox and denitrification in different pH cropland soils[J]. *Catena*, 2020, 193: 104611.
- [49] 陈歆. 浅谈土壤微量营养元素的相互作用[J]. 甘肃农业, 2007(1): 79-80.
- CHEN X. A brief discussion on the interaction of trace nutrients in soil[J]. *Gansu Agriculture*, 2007(1): 79-80. (in Chinese)
- [50] 秦晓明, 赵优优, 武松伟, 胡承孝, 孙学成. 钼提高植物抗逆性研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(6): 50-58.
- QIN X M, ZHAO Y Y, WU S W, HU C X, SUN X C. Progress on improving plant stress resistance with molybdenum[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2023, 42(6): 50-58. (in Chinese)
- [51] 宋淑钧, 崔小茹, 陈其鲜, 陈雄, 杨荣. 陇中旱区农田土壤微量元素特征及其对绿肥休耕的响应[J]. 水土保持学报, 2023, 37(6): 268-275.
- SONG S J, CUI X R, CHEN Q X, CHEN X, YANG R. Characteristics of soil trace elements in the dryland farming area of central Gansu and their responses to green manure fallow[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(6): 268-275. (in Chinese)
- [52] 邹原东, 范继红. 有机肥施用对土壤肥力影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, 29(3): 12-16.
- ZOU Y D, FAN J H. Review on effect of organic fertilizer on soil fertility[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(3): 12-16. (in Chinese)
- [53] 徐璐. 不同外源有机物对滨海盐碱地土壤地力提升的影响研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
- XU L. A study on the effect of different exogenous organic compounds on the improvement of soil fertility in coastal saline alkali land[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023. (in Chinese)
- [54] 吴霞玉, 李盼, 韦金贵, 范虹, 何蔚, 樊志龙, 胡发龙, 柴强, 殷文. 减量灌水及有机无机肥配施对西北灌区玉米光合生理、籽粒产量及品质的影响[J]. 作物学报, 2024, 50(4): 1065-1079.
- WU X Y, LI P, WEI J G, FAN H, HE W, FAN Z L, HU F L, CHAI Q, YIN W. Effect of reduced irrigation and combined application of organic and chemical fertilizers on photosynthetic physiology, grain yield and quality of maize in north-western irrigation areas[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(4): 1065-1079. (in Chinese)
- [55] 马祥, 贾志锋, 张永超, 张然. 生物有机肥对青海高寒牧区燕麦产量和土壤肥力的影响[J]. 草地学报, 2019, 27(6): 1759-1765.
- MA X, JIA Z F, ZHANG Y C, ZHANG R. Effects of bio-organic fertilizers on oat production and soil fertility in alpine region of Qinghai-Tibet plateau[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(6): 1759-1765. (in Chinese)
- [56] 郑良豹, 谢敏霞, 欧光敏, 梁宪镭, 谢秀凤, 董安强, 刘文, 周玲艳. 西番莲茎基腐病果园土壤细菌群落多样性分析[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2023, 36(4): 7-12, 58.
- ZHENG L B, XIE M X, OU G M, LIANG X Q, XIE X F, DONG A Q, LIU W, ZHOU L Y. Analysis of soil bacterial community diversity in *Passiflora* stem base rot orchard[J]. *Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering*, 2023, 36(4): 7-12, 58. (in Chinese)
- [57] 宋亮, 赵冰琴, 申远洋, 朱万庆, 杜祥运, 高儒章, 许文年. 新银合欢林土壤理化性质-微生物生物量耦合协调关系研究[J]. 土壤, 2023, 55(5): 1070-1079.
- SONG L, ZHAO B Q, SHEN Y Y, ZHU W Q, DU X Y, GAO R Z, XU W N. Evaluation of coupling coordination relationship between soil physicochemical properties and microbial biomass of *Leucaena Leucocephala* plantation[J]. *Soil*, 2023, 55(5): 1070-1079. (in Chinese)
- [58] 蔡雅琪, 包天莉, 焦晓光. 东北黑土区生物结皮对土壤微生物量的影响[J]. 中国农学通报, 2023, 39(29): 39-45.
- CAI Y Q, BAO T L, JIAO X G. Effects of biological soil crusts on soil microbial biomass in black soil region of northeast china[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(29): 39-45. (in Chinese)
- [59] 谢沐希, 张俊伶, 贾吉玉, 王光州, 秦泽峰, 高卉, 李海港. 自然和农田生态系统中土壤微生物群落组装的研究进展[J]. 土壤通报, 2023, 54(6): 1503-1512.
- XIE M X, ZHANG J L, JIA J Y, WANG G Z, QIN Z F, GAO H, LI H G. Advances in the assembly of soil microbial communities in natural and farmland ecosystems[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(6): 1503-1512. (in Chinese)
- [60] 蔡红光, 梁尧, 刘慧涛, 刘剑钊, 秦裕波, 刘方明, 袁静超, 张洪喜, 任军, 王立春. 东北地区玉米秸秆全量深翻还田耕种技术研究[J]. 玉米科学, 2019, 27(5): 123-129.
- CAI H G, LIANG Y, LIU H T, LIU J Z, QIN Y B, LIU F M, YUAN J C, ZHANG H X, REN J, WANG L C. Research on full maize straw returning with deep ploughing mode in the northeast China[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2019, 27(5): 123-129.

- 123-129. (in Chinese)
- [61] 赵峥, 朱元宏, 周德平, 褚长彬, 王庆峰, 吴淑杭. 不同轮作模式对稻田土壤肥力和微生物群落结构的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(4): 874-885.
- ZHAO Z, ZHU Y H, ZHOU D P, CHU C B, WANG Q F, WU S H. Effects of different rotation patterns on soil fertility and microbial community composition in a paddy field system[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(4): 874-885. (in Chinese)
- [62] 许代香, 杨建峰, 苏杭, 翟建荣, 綦才, 赵龙刚, 郭彦军. 间作模式下作物根际土壤代谢物对微生物群落的影响[J]. 草业学报, 2023, 32(11): 65-80.
- XU D X, YANG J F, SU H, ZHAI J R, QI C, ZHAO L G, GUO Y J. Effect of the metabolites in rhizosphere soil on microbial communities of crop intercropping system[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(11): 65-80. (in Chinese)
- [63] 索琳娜, 马杰, 刘宝存, 孙向阳, 陈广锋. 土壤调理剂应用现状及施用风险研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1141-1149.
- SUO L N, MA J, LIU B C, SUN X Y, CHEN G F. Soil conditioner application status and application of risk research[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(6): 1141-1149. (in Chinese)
- [64] 杨卫东, 吴永健, 刘春光. 盐碱土改良剂的研究和应用进展[J]. 天津科技, 2014, 41(2): 17-20.
- YANG W D, WU Y J, LIU C G. Advances in research and application of saline soil amendments[J]. Tianjin Science & Technology, 2014, 41(2): 17-20. (in Chinese)