

基于最小数据集的洞庭湖流域南部耕地土壤肥力综合评价

陈方正¹, 任 健¹, 刘思涵², 胡克林^{1*}

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193; 2. 湖南农业大学资源环境学院, 湖南 长沙 410128)

摘 要: 构建一套既能减少人力、物力和财力投入, 又能保证原有信息丢失最少的土壤肥力综合评价体系, 对于指导农业生产和土地利用规划具有重要作用。研究选取洞庭湖流域南部的四个行政市为研究区, 综合考虑表征土壤立地条件、剖面构型、土壤物理性状、土壤养分四个方面的 14 项指标, 通过主成分分析确定了最小数据集 (MDS), 对其土壤肥力指数 (SFI) 进行了综合评价, 并分析了研究区耕地土壤肥力的主要限制因子。结果表明: 1) 研究区耕地主要偏酸性, 土壤容重较紧实; 氮素养分处于较高水平, 磷素养分处于中上水平, 钾素养分处于较低水平。2) 选取的最小数据集包括成土母质、剖面土体构型、阳离子交换量、容重、有机质、有效磷和全钾等 7 项指标。全数据集与 MDS 的均值与标准差均十分接近, 其 Pearson 相关系数达到 0.788 ($P < 0.01$)。3) 土壤肥力的高值区主要位于洞庭湖南部附近集中连片的水稻种植区, 低值区主要分布于海拔相对较高的丘陵部位或靠近城市建筑区的低植被覆盖率区, 磷素与钾素为研究区内土壤肥力的主要限制因素。研究结果为洞庭湖流域南部土壤肥力综合评价和土壤培肥提供了理论指导。

关 键 词: 土壤肥力指数; 最小数据集; 主成分分析; 洞庭湖流域

中图分类号: S159.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2021)06-1348-12

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2021040901

陈方正, 任 健, 刘思涵, 胡克林. 基于最小数据集的洞庭湖流域南部耕地土壤肥力综合评价 [J]. 土壤通报, 2021, 52(6): 1348 - 1359

CHEN Fang-zheng, REN Jian, LIU Si-han, HU Ke-lin. Comprehensive Assessment of Soil Fertility of Cultivated Land in Southern Dongting Lake Basin Based on Minimum Data Set[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(6): 1348 - 1359

土壤肥力是衡量耕地能够提供作物生长所需各种养分的能力, 科学、合理地评价土地肥力将为指导农业生产、土地利用规划和测土配方施肥提供理论依据^[1]。目前国内外并没有统一的土壤肥力评价标准及方法, 土壤肥力综合指数法因其方法简单易行成为一种最常用的土壤肥力评价方法^[2, 3]。土壤肥力评价指标的选择从一开始只关注土壤养分指标^[4], 土壤理化性质^[5], 后来又逐渐引入了生物学指标^[6]。但土壤肥力是一个综合的概念, 除了受到土壤物理、化学、生物指标的影响, 立地条件 (成土母质、地貌类型)、土壤剖面性状、气候条件等也都对土壤肥力有显著影响。例如付微等^[7]采用 Delphi 模型建立了 3 个决策层: 土壤养分、土壤物理性状和立地条件, 确定了 10 个评价指标, 对松嫩平原农田土壤进行了土壤肥力评价与分析。周旭等^[8]根据环境条件、物理性状、土壤养分 3 个方面确定了 8 个评价指标,

采用层次分析法结合模糊数学理论, 对贵州省普安县耕地土壤肥力进行了评价。杨奇勇等^[9]选取了土体构型、地貌、土壤质地、电导率、阳离子交换量、有机质、全氮、速效磷、速效钾、全磷、全钾等指标, 运用改进灰色关联模型对山东禹城的土壤肥力进行了综合评价。土壤肥力综合评价方法涉及的指标众多, 因此如何选取少量的指标又能综合、全面、准确地反映整体指标的特征对土壤肥力评价至关重要。主成分分析法能将高维问题降维^[10], 并能在保证原始数据信息损失最小的情况下, 以少量的综合变量取代原有的多维变量。而且主成分分析的过程可以赋予变量权重, 这在很大程度上避免了主观随意性, 可以较好地保证评价结果的客观性。最小数据集 (Minimum Data Set, MDS) 是反映土壤肥力最少指标参数的集合, 在土壤肥力评价及监测工作中得到了广泛的应用。Larson and Pierce^[11]最早于 1991

收稿日期: 2021-04-12; 修订日期: 2021-06-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0201202) 资助

作者简介: 陈方正 (1997-), 男, 山东人, 硕士研究生, 主要从事土地信息技术的研究。E-mail: 749300321@qq.com

*通讯作者: E-mail: hukel@cau.edu.cn

年提出了最小数据集 (MDS) 概念, 后来全数据集 (TDS) 与最小数据集 (MDS) 成为了土壤质量指标的选取和土壤质量评价的常用方法^[12]。目前有学者对塔里木河上游绿洲阿拉尔垦区耕地运用主成分分析从 14 项土壤理化生指标中筛选了仅包含 4 项指标的最小数据集^[13], 结果表明, 基于 MDS 的肥力指数能够较好代表采用全部指标的肥力指数。王飞等^[6]通过比较福建省 17 对典型冷浸田与非冷浸田表层土壤的 41 项物理、化学和生物指标, 利用主成分分析方法构建了冷浸田土壤质量评价指标的 MDS, 并系统分析了冷浸田与非冷浸田之间各指标差异及其产生的原因。黄婷等^[14]通过主成分分析并结合 Norm 值的方法, 筛选了 12 项指标, 建立了陕西省长武县所处的黄土沟壑区土壤肥力质量评价的最小数据集, 对不同地形部位的土壤肥力质量进行了比较分析。刘金山等^[15]利用主成分分析确定了包括土壤有机质、碱解氮、速效磷、速效钾、有效硼、有效铝、有效锌等指标的最小数据集, 并结合相关关系法与模糊数学隶属度函数法, 对湖北省水旱轮作区耕地进行了土壤肥力质量评价。目前土壤肥力评价的研究大多只关注于定量型的土壤养分指标, 鲜有考虑对土壤肥力有显著影响的立地条件、剖面构型等指标, 这会使评价结果不够客观、全面, 且最小数据集的

确定与权重的分配过程存在主观性。本研究综合考虑耕地土壤肥力的影响因素, 选取了 14 个指标, 通过主成分分析确定最小数据集, 结合土壤肥力指数方法对湖南省洞庭湖流域农田进行土壤肥力综合评价, 旨在为土壤肥力综合评价提供一种科学合理的参考方法。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

洞庭湖位居我国五大淡水湖第二位, 南部平原区为湖南农业主产区, 以种植水稻、棉花为主, 素有“鱼米之乡”的美称, 选定研究区为洞庭湖所在的河湖冲击平原区南部, 包括岳阳、益阳、常德、长沙等四个市。研究区的行政面积为 57216 km², 其中, 耕地面积为 21093 km², 占总面积的 37%。地理坐标为 110°29'23"~114°15'30" E, 27°51'13"~30°7'35" N, 气候属于中亚热带向北亚热带过渡的湿润气候, 年均气温在 16~17℃ 之间, 年均降雨量 1398 mm。研究区海拔由中心向四周逐渐升高, 地貌由中部的冲积平原向四周过渡到低山红壤丘陵区; 土地利用方式以水田为主, 由中心向四周过渡到林地 (图 1)。土壤类型主要以水稻土为主, 其次还有潮土、红壤、黄壤、黄棕壤、紫色土 (图 1)。

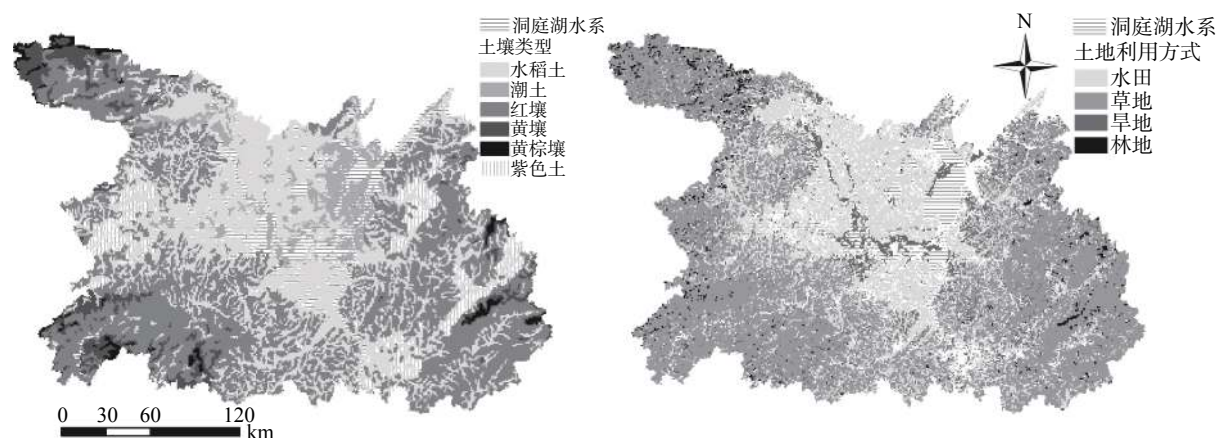


图 1 研究区土地利用方式与土壤类型图

Fig.1 Land use pattern and soil type in the southern Dongting Lake River Basin

1.2 样品的采集与测定

综合考虑研究区内耕地的成土母质、土壤类型、地形部位等基础地理空间属性, 采用分层抽样结合网格布点的方法进行样点布设, 在水田集中地区加密布点, 以满足地统计学插值和肥力评价要求。实际取样时记录每个点位经纬度和剖面性状。通过梅

花形采样法采集 0~20 cm 土样, 实际取样 3400 个点, 后续处理使用 3381 个点位 (图 2)。

土样经风干、磨碎及过筛后, 测定各土样的理化指标。土壤质地采用吸管法; 土壤容重采用环刀法; 土壤阳离子交换量 (CEC) 采用乙酸铵交换法; 土壤 pH 采用 1:2.5 土水比浸提—电位法; 有机质

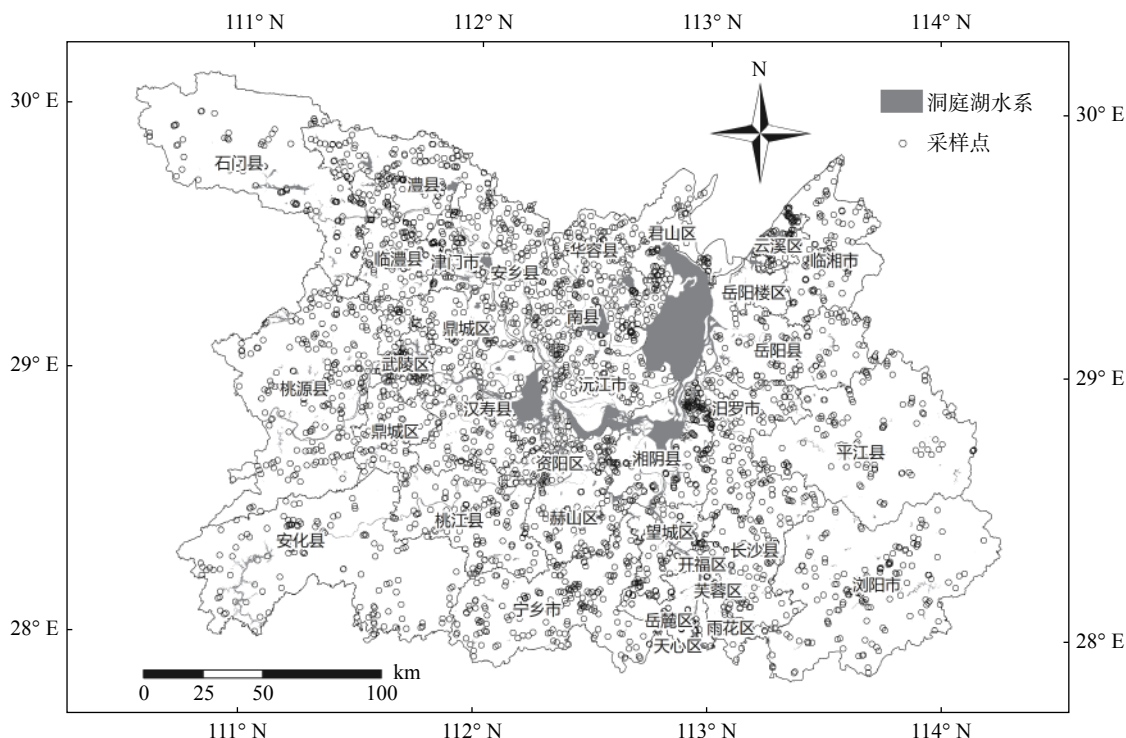


图 2 研究区采样点分布图

Fig.2 Sampling sites in the southern Dongting Lake River Basin

采用重铬酸钾容量法；碱解氮采用碱解扩散法；全氮采用凯氏定氮法；速效钾采用 NH_4OAc 浸提—火焰光度法；全钾采用 NaOH 熔融—火焰光度法；有效磷采用双酸浸提—钼锑抗比色法；全磷采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 消煮法，具体测定方法见文献^[16]。

1.3 研究方法

1.3.1 评价指标的选取与权重确定 本研究综合考虑了立地条件、剖面性状、土壤物理性状、土壤养分等对土壤肥力有显著影响的四个方面，共选取了 14 个指标，立地条件选取了成土母质、地形部位；剖面性状选取了土体构型；土壤物理性状选取了耕层质地和容重；土壤养分选取了 pH、有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾、CEC、全磷和全钾。

评价指标权重的计算方法如下：通过相关性矩阵对参评指标进行主成分分析，指标的权重为该指标公因子方差占所有参评指标公因子方差和的比值^[17]。

1.3.2 最小数据集的构建 利用主成分分析、相关性分析及 Norm 值比较，从全部土壤肥力指标数据集（Total Data Set, TDS）中筛选出最小土壤肥力指标数据集（Minimum Data Set, MDS）。具体方法如下：首先选取特征值大于 1 的主成分（PC）^[18]，计算所有指标在特征值大于 1 的主成分上的载荷，选取同一主成分下最高载荷值和最高载荷值 90% 以内的指

标进入 MDS；再对同一主成分下入选 MDS 的指标进行相关性分析，若指标高度相关（ $r > 0.5$ ），则保留 Norm 值最高的指标，若不相关，则指标均保留；若某指标同时在两个主成分上属于高载荷，则该指标应归入载荷值较低的主成分组内。其中，Norm 值表示其解释综合信息的能力^[19]，计算公式如下：

$$N_{ik} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^k u_{ik}^2 \lambda_k \right)} \quad (1)$$

式中， N_{ik} 为第 i 个评价指标在特征值大于 1 的前 k 主成分上的综合载荷， u_{ik} 为第 i 个评价指标在第 k 个主成分上的载荷， λ_k 为第 k 个主成分的特征值。

1.3.3 参评指标量化与隶属度函数的计算 数据处理与评价需要对定性型指标进行量化，故结合耕地质量等级标准^[20] 对定性型指标进行赋值，赋值范围在 0~1，赋值标准如表 1 所示。

定量型指标通过隶属度函数转换^[21]，隶属度函数包括 S 型函数与抛物线型函数^[22]，其中 S 型函数又包括升型函数与降型函数，但本研究中不涉及降型效应的土壤肥力指标。根据最小数据集与全数据集中定量型指标对土壤肥力的正、负或区间型效应确定隶属度函数类型，根据第二次土壤普查^[23] 的土壤分级标准确定各指标转折点。最终确定定量型指标

表 1 定性型指标隶属度赋值标准
Table 1 Value assignment standard for membership evaluation of qualitative indices

定性指标 Qualitative index	赋值标准 Value assignment standard					
地形部位	河流1-2级阶地、河网平原、 冲（沉）积平原	冲垄下部、低丘坡麓、 河流阶地、人工梯田	岗地、丘陵坡地、洼地、平原梯地、 丘陵低谷地、山地	岗地顶部坡面、峰林谷地、 峡谷上部		
隶属度	1	0.8	0.7	0.6		
成土母质	湖河冲积物	洪积物	坡积物	残积物		
隶属度	1	0.9	0.8	0.7		
耕层质地	轻壤、砂壤、中壤	重壤	粘土	砂土		
隶属度	1	0.85	0.7	0.6		
剖面土体构型	海绵型、上松下紧型	夹层型	紧实型	松散型	上紧下松型	薄层型
隶属度	1	0.75	0.7	0.65	0.55	0.5

的隶属度函数类型与转折点如表 2 所示。

升 S 型隶属度函数计算如下：

$$f(x)=\begin{cases}0.1 & x\leq x_1 \\ 0.9(x-x_1)/(x_2-x_1)+0.1 & x_1<x<x_2 \\ 1.0 & x\geq x_2\end{cases}\quad (2)$$

式中，转折点 x_1 、 x_2 分别为该指标在土壤分级中最低等级、最高等级对应的含量值。

抛物线型隶属度函数计算如下：

$$f(x)=\begin{cases}1.0-0.9(x-x_3)/(x_4-x_3) & x_3<x<x_4 \\ 1.0 & x_2\leq x\leq x_3 \\ 0.9(x-x_1)/(x_2-x_1)+0.1 & x_1<x<x_2 \\ 0.1 & x\leq x_1\text{或}x\geq x_4\end{cases}\quad (3)$$

式中，转折点 x_1 、 x_4 分别为该指标在土壤分级中最低等级对应的低含量值与高含量值，转折点 x_2 、 x_3 分别为该指标在土壤分级中最高等级对应的低含量值与高含量值。

表 2 定量型指标隶属度函数类型与转折点
Table 2 Membership function type and turning point of quantitative indices

转折点 Turning point	容重 BD (g cm^{-3})	pH	阳离子交换量 CEC (cmol kg^{-1})	有机质 SOM (g kg^{-1})	全氮 TN (g kg^{-1})	碱解氮 AN (mg kg^{-1})	全磷 TP (g kg^{-1})	有效磷 AP (mg kg^{-1})	全钾 TK (g kg^{-1})	速效钾 AK (mg kg^{-1})
	抛物线型函数 Parabolic function		升S型函数 S function							
x_1	1	4.5	<5	<6	<0.5	<60	<0.2	<3	<6	<30
x_2	1.1	6	>20	>40	>2	>200	>1	>40	>30	>200
x_3	1.2	7								
x_4	1.4	8.5								

1.3.4 土壤综合肥力指数的计算 土壤综合肥力指数（Soil Fertility Index, *SFI*）的计算如下：

$$SFI=\sum_{i=1}^n(q_i\times\omega_i)\quad (4)$$

式中， q_i 为第 i 项评价指标的隶属度值， ω_i 为第 i 项评价指标的权重， n 为评价指标个数。

1.3.5 数据处理 本研究利用 SPSS 16.0 软件进行数据统计分析，GS+9.0 软件进行半方差函数计算与理论模型拟合。利用 ArcGIS 10.6 软件进行空间插值和图形绘制及不同等级面积统计^[21]。

2 结果分析

2.1 土壤指标描述性统计分析

对定量型指标进行描述性统计分析，结果如表 3

所示。土壤容重的均值为 1.22 g cm^{-3} ，处于偏紧水平；土壤 pH 的均值为 6.03，整体偏酸性；CEC 均值为 $25.22\text{ cmol kg}^{-1}$ ，属于高肥力水平；土壤有机质、全氮、碱解氮和有效磷的均值分别为 31.03 g kg^{-1} 、 1.85 g kg^{-1} 、 155.2 mg kg^{-1} 和 21.65 mg kg^{-1} ，均属于较高水平；速效钾、全磷和全钾的均值分别为 105.58 mg kg^{-1} 、 0.76 g kg^{-1} 和 18.12 g kg^{-1} ，均属于中级水平。除土壤容重属于弱变异程度和有效磷属于强变异程度外，其余指标均属于中等变异程度（ $10\%\leq\text{CV}\leq100\%$ ），所有指标均不服从正态分布，对数转换后也不服从正态分布。

定量型指标的半方差函数模型及其参数结果如表 4 所示，土壤容重与有效磷的 R^2 较低，理论模型拟合效果一般，其余指标的拟合效果均比较满意。

表 3 定量型指标的统计特征值
Table 3 Statistical characteristics of quantitative indices

指标 Index	最小值 Min	最大值 Max	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 (%) CV	P (K-S test)
容重 (g cm ⁻³)	0.94	1.38	1.22	0.08	6.4	0.00
阳离子交换量 (cmol kg ⁻¹)	2.10	53.40	25.22	14.71	58.3	0.00
pH	4.10	8.50	6.03	1.01	16.7	0.00
有机质 (g kg ⁻¹)	4.70	61.00	31.03	9.64	31.1	0.01
全氮 (g kg ⁻¹)	0.29	3.88	1.85	0.58	31.2	0.00
碱解氮 (mg kg ⁻¹)	12.00	510	155.20	48.17	31.0	0.00
全磷 (g kg ⁻¹)	0.14	3.00	0.76	0.34	44.7	0.00
有效磷 (mg kg ⁻¹)	0.50	372.20	21.65	27.38	126.5	0.00
全钾 (g kg ⁻¹)	1.00	69.90	18.12	7.41	40.9	0.00
速效钾 (mg kg ⁻¹)	14.00	590.00	105.58	57.48	54.4	0.00

pH 的变程最大,说明土壤母质在研究区内的分布比较均一,容重的变程最小,说明耕作等人为活动对容重的影响比较大。除 pH 外,其余指标的块基比均小于 0.25,说明各指标均属于强空间相关性,主要受结构性因子影响;pH 的块基比略大于 0.25,属于中等程度的异质性,说明随机因素的影响有所加强。

根据前面得到的各指标的半方差函数模型进行克里格插值,得到了各指标在研究区内的空间分布图,同时对各指标分级并进行面积统计,结果如表 5 所示。研究区内耕地土壤偏微酸性、酸性和中性的面积占比分别为 32.12%、25.40% 和 22.99%,处于微碱性和碱性的耕地面积占比约 20%;研究区内土壤容重主要处于偏紧级别,面积占比 74.96%,处于适宜级别的面积占比 24.06%,其余较松级别占比小于 1%。土壤 CEC 主要处于 1 级水平,面积占比 71.51%,说明研究区土壤保肥能力强。土壤有机质、全氮和碱解氮主要处于 2 级水平,面积占比分别为 52.46%、51.93% 和 48.46%,可见研究区内碳氮养分含量较高,土壤肥力供应能力强,供肥潜力大。土壤全磷、有效磷主要处于 3 级水平,面积占比分别为 45.44% 和 54.86%,其次处于 2 级水平的耕地面

积占比也较大,说明研究区内磷素养分含量较高,磷素供应能力较充足。土壤速效钾和全钾主要处于 4 级水平,面积占比分别为 48.27% 和 52.12%,其次处于 3 级水平的耕地面积占比也较大,说明研究区内土壤钾素养分相对缺乏,是作物生长发育的主要限制因子。

2.2 土壤肥力综合评价最小数据集的构建

2.2.1 土壤肥力综合评价最小数据集的确定 对定性型指标进行赋值得到量化数据,对 14 项评价指标通过相关性矩阵先进行主成分分析。最终得到特征值大于 1 的主成分有 7 个,累积贡献率达到 72.38%。主成分载荷矩阵及 Norm 值如表 6 所示。

在 PC1 中高载荷值指标是有机质、全氮、碱解氮,代表土壤基础肥力;PC2 中高载荷值指标是地形部位、成土母质,代表立地条件;PC3 中高载荷值指标是有效磷、速效钾,代表速效养分供应能力;PC4 中高载荷值指标是容重、耕层质地,代表土壤物理性状;PC5 中高载荷值指标是全钾、全磷,代表磷钾的供应潜力;PC6 中高载荷值指标是 CEC,代表土壤的保肥能力;PC7 中高载荷值指标是剖面土体构型,代表土壤的剖面性状。每个主成分中的

表 4 半方差函数模型及参数
Table 4 The Semivariogram models and parameters

指标 Index	模型 Model	块金值 (C ₀) Nugget	基台值 (C ₀ +C) Sill	块基比 (C ₀ /C ₀ +C) Nugget/Sill	变程 (A) Range	R ²
容重 (g cm ⁻³)	指数模型	0.00068	0.00602	0.113	6000	0.108
阳离子交换量 (cmol kg ⁻¹)	指数模型	23.5	216.0	0.109	8700	0.418
pH	球状模型	0.302	1.093	0.276	84900	0.761
有机质 (g kg ⁻¹)	指数模型	11.90	93.01	0.128	22500	0.715
全氮 (g kg ⁻¹)	指数模型	0.0369	0.3338	0.111	16500	0.879
碱解氮 (mg kg ⁻¹)	指数模型	255	2310	0.110	11700	0.543
全磷 (g kg ⁻¹)	指数模型	0.0148	0.1156	0.128	12900	0.496
有效磷 (mg kg ⁻¹)	指数模型	79	712	0.111	13200	0.084
全钾 (g kg ⁻¹)	指数模型	7.30	55.88	0.131	19200	0.475
速效钾 (mg kg ⁻¹)	指数模型	381	3226	0.118	13500	0.265

表 5 定量型指标的分级面积占比
Table 5 The proportion of graded area of quantitative indices for different categories

指标 Index	分级 Category						
阳离子交换量	含量范围 (cmol kg ⁻¹)	1级 (> 20)	2级 (20 ~ 15)	3级 (15 ~ 10)	4级 (10 ~ 5)		
	面积占比 (%)	71.51	18.27	8.63	1.58		
有机质	含量范围 (g kg ⁻¹)	1级 (> 40)	2级 (40 ~ 30)	3级 (30 ~ 20)	4级 (20 ~ 10)		
	面积占比 (%)	6.45	52.46	36.55	4.54		
全氮	含量范围 (g kg ⁻¹)	1级 (> 2.00)	2级 (2.00 ~ 1.50)	3级 (1.50 ~ 1.00)	4级 (1.00 ~ 0.75)	5级 (0.75 ~ 0.50)	
	面积占比 (%)	32.95	51.93	13.96	1.14	0.02	
碱解氮	含量范围 (mg kg ⁻¹)	1级 (> 200)	2级 (200 ~ 150)	3级 (150 ~ 120)	4级 (120 ~ 90)	5级 (90 ~ 60)	6级 (< 60)
	面积占比 (%)	5.56	48.46	35.51	9.65	0.81	0.01
全磷	含量范围 (g kg ⁻¹)	1级 (> 1.0)	2级 (1.0 ~ 0.8)	3级 (0.8 ~ 0.6)	4级 (0.6 ~ 0.4)	5级 (0.4 ~ 0.2)	
	面积占比 (%)	12.43	24.36	45.44	16.93	0.84	
有效磷	含量范围 (mg kg ⁻¹)	1级 (> 40)	2级 (40 ~ 20)	3级 (20 ~ 10)	4级 (10 ~ 5)		
	面积占比 (%)	4.88	31.24	54.86	9.02		
全钾	含量范围 (g kg ⁻¹)	1级 (> 30)	2级 (30 ~ 24)	3级 (24 ~ 18)	4级 (18 ~ 12)	5级 (12 ~ 6)	6级 (< 6)
	面积占比 (%)	3.44	9.62	28.52	52.12	5.34	0.95
速效钾	含量范围 (mg kg ⁻¹)	1级 (> 200)	2级 (200 ~ 150)	3级 (150 ~ 100)	4级 (100 ~ 50)	5级 (50 ~ 30)	
	面积占比 (%)	1.35	8.87	40.89	48.27	0.62	
pH	含量范围	酸性 (4.5 ~ 5.5)	微酸性 (5.5 ~ 6.0)	中性 (6.0 ~ 7.0)	微碱 (7.0 ~ 7.5)	碱性 (7.5 ~ 8.2)	
	面积占比 (%)	25.40	32.12	20.99	7.75	13.74	
容重	含量范围 (g cm ⁻³)	适宜 (1.1 ~ 1.2)	偏紧 (1.2 ~ 1.4)	偏紧 (1.2 ~ 1.4)			
	面积占比 (%)	24.06	74.96	74.96			

高载荷指标入选 MDS。

其次，对入选 MDS 同一主成分下的指标进行相关性分析（图 3，图中相关系数均为绝对值），PC1 中有机质、全氮、碱解氮两两对比，均显著相关，故只保留 Norm 值最大的有机质指标；PC2 中地形部位与成土母质显著相关，故保留 Norm 值最大的成土母质指标；PC3 中有效磷与速效钾显著相关，故保留 Norm 值最大的有效磷指标；PC4 中容重与耕层质地显著相关，且两者 Norm 值极相近，定量型指标比定性型指标在数据分析中更为客观，故保留土壤容重；PC5 中全磷与全钾显著相关，故保留 Norm 值较大的全钾指标；PC6 中只有 CEC 指标，故保留；

表 6 主成分载荷矩阵及 Norm 值
Table 6 Principal component loading matrix and Norm values

指标 Index	主成分 Principal component							Norm 值 Norm Value
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	
有机质	0.78	0.40	-0.02	-0.12	-0.09	-0.02	0.05	1.33
全氮	0.72	0.49	-0.01	-0.12	-0.15	-0.04	0.02	1.32
碱解氮	0.64	0.38	0.04	-0.12	-0.03	0.08	-0.02	1.13
地形部位	-0.43	0.70	0.10	0.15	-0.08	0.02	-0.01	1.20
成土母质	-0.45	0.69	0.09	0.16	-0.01	-0.05	-0.02	1.21
pH	-0.30	0.56	0.06	0.36	-0.02	-0.06	-0.11	1.01
有效磷	-0.03	-0.09	0.78	-0.26	-0.03	0.12	-0.05	0.99
速效钾	-0.08	-0.04	0.75	-0.28	-0.12	-0.03	-0.12	0.98
容重	0.32	-0.22	0.19	0.66	-0.11	-0.13	-0.30	1.03
耕层质地	-0.35	0.27	-0.25	-0.64	0.14	0.04	0.00	1.04
全钾	0.21	0.05	0.00	0.10	0.75	0.22	-0.04	0.89
全磷	0.11	0.13	0.32	0.13	0.63	-0.16	0.21	0.85
阳离子交换量	0.00	0.04	-0.02	0.11	-0.05	0.91	-0.23	0.97
剖面土体构型	-0.03	-0.03	0.14	0.24	-0.18	0.24	0.88	0.99
特征值	2.32	1.98	1.42	1.31	1.08	1.02	1.00	
主成分贡献率 (%)	16.59	14.12	10.13	9.34	7.73	7.30	7.18	
累计贡献率 (%)	16.59	30.71	40.84	50.18	57.91	65.20	72.38	

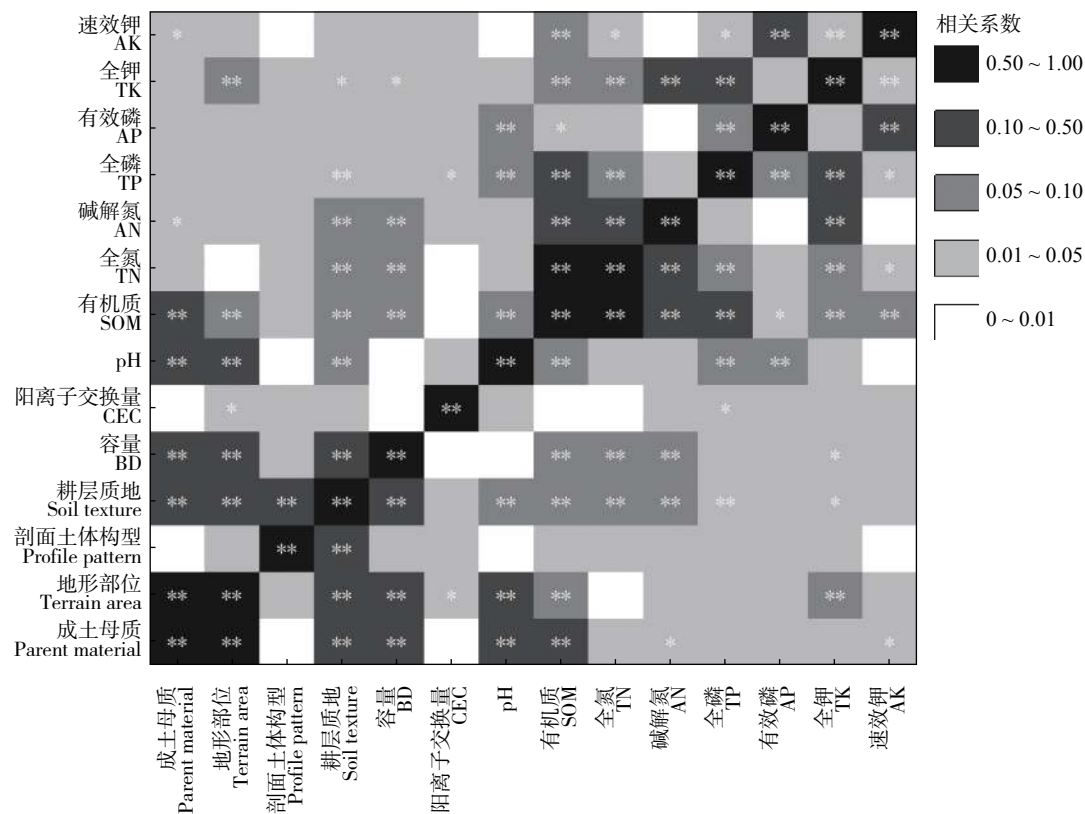


图 3 参评指标的相关系数矩阵图

Fig.3 Pearson's correlation coefficient of the indices involved in the assessment

PC7 中只有剖面土体构型指标，故保留。最终确定本研究的 MDS 有：有机质、成土母质、有效磷、容重、全钾、CEC 和剖面土体构型。

2.2.2 土壤肥力综合评价指标权重的确定

对 TDS 与 MDS 分别进行主成分分析，得到每个指标的公因子方差，该指标公因子与所有指标公因子方差和的比值即为该指标的权重。TDS 与 MDS 的指标权重值的计算过程及结果如表 7 所示。

表 7 土壤肥力综合评价指标权重值
Table 7 Weights of soil fertility assessment indices

指标 Index		全数据集 (TDS) Total data set		最小数据集 (MDS) Minimum data set	
		公因子方差 Common factor variance	权重 Weight	公因子方差 Common factor variance	权重 Weight
立地条件	成土母质	0.71	0.07	0.55	0.16
	地形部位	0.72	0.07		
剖面性状	剖面土体构型	0.95	0.09	0.30	0.09
土壤物理性状	耕层质地	0.69	0.07	0.47	0.14
	容重	0.74	0.07		
	阳离子交换量	0.91	0.09		
	pH	0.55	0.05		
土壤养分指标	有机质	0.80	0.08	0.38	0.12
	全氮	0.80	0.08		
	碱解氮	0.59	0.06		
	全磷	0.61	0.06		
	有效磷	0.70	0.07		
	全钾	0.68	0.07		
	速效钾	0.68	0.07		

2.3 土壤肥力综合评价

2.3.1 土壤肥力综合评价结果比较 采用前文转换后的隶属度值及其对应的权重值（表 7）分别按照公

式（4）计算，得出每个样品点的土壤肥力综合评价指数（SFI）。TDS 与 MDS 的 SFI 描述性统计分析结果如表 8。

表 8 基于全部和最小数据集的土壤肥力评价结果的统计特征值
Table 8 Statistical eigenvalues of soil fertility assessment results based on TDS and MDS

综合指数 Index value	最小值 Min	最大值 Max	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV	Pearson 相关系数 Pearson's correlation coefficient
SFI (TDS)	0.46	0.95	0.71	0.07	10%	0.788**
SFI (MDS)	0.37	0.97	0.69	0.09	13%	—

** $P < 0.01$, SFI, 土壤肥力综合指数; TDS, 全数据集; MDS, 最小数据集.

可以看出两者的 SFI 范围，均值和变异系数均十分相近，且两者拟合的线性回归关系为： $y = 1.030x - 0.033$ ，相关系数 r 达到 0.788（ $P < 0.01$ ），呈极显著相关，说明本研究构建的基于 MDS 的指标体系可以代替 TDS 对洞庭湖流域耕地土壤肥力进行评价。

2.3.2 土壤肥力综合评价指数空间分布特征 对基于 MDS 得到的 SFI 进行半方差函数分析，其最优理论模型为球状模型，其块金值为 0.00092，基台值为

0.00837，块基比为 0.11，属于强空间相关性，变程为 1.29 km，决定系数 R^2 为 0.528，说明拟合效果较好。进行克里格空间插值，得到了土壤肥力综合评价指数的空间分布图，为了突出研究区内耕地土壤综合肥力的区别，将 SFI 值划分为高、中、低三个区间：将前 30% 的栅格单元划分为高值区间，中间 40% 的栅格单元划分为中值区间，后 30% 的栅格单元划分为低值区间（图 4）。

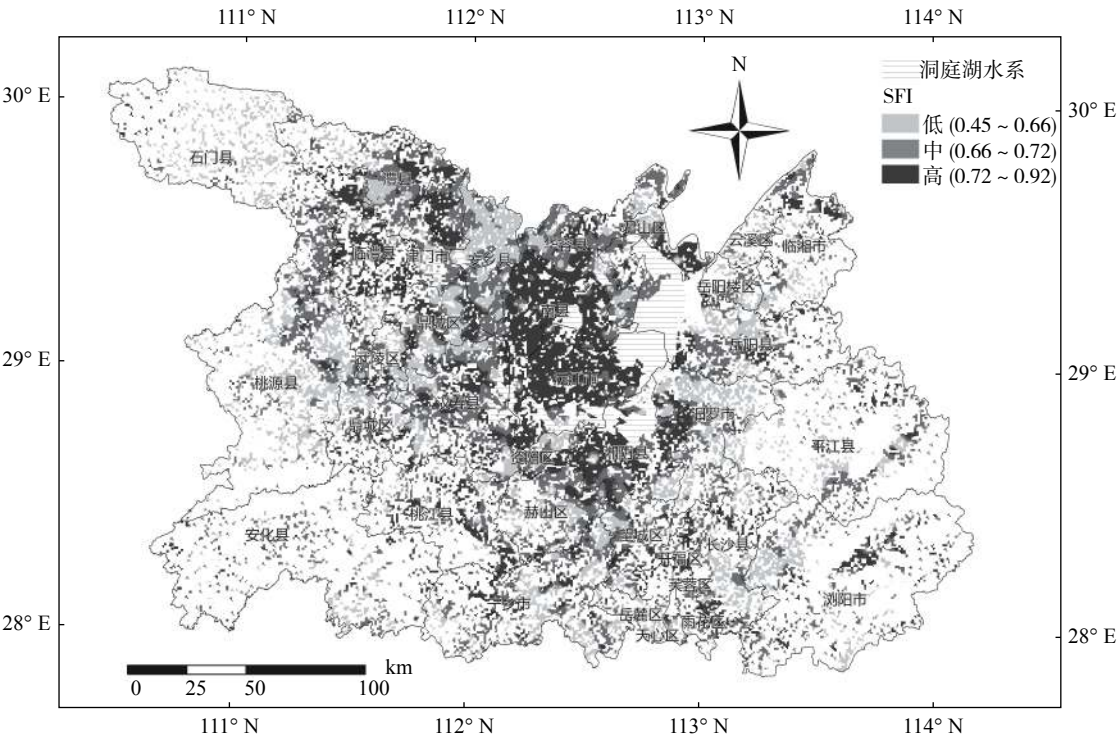


图 4 洞庭湖流域南部耕地土壤肥力综合评价指数分布图
Fig.4 Distribution map of SFI in the southern Dongting Lake Basin.

由图 4 可知，土壤肥力的高值区主要分布于洞庭湖水系附近的南县、沅江市、湘阴县、临澧县，此区域地势平坦水分充足，有集中连片的水稻种植区，此外，在山谷平原或宽谷阶地也有零星分布；

土壤肥力的低值区主要分布于常德市石门县，在桃园县西南部、平江县大部也有分布，这些区域主要位于海拔相对较高的丘陵部位或靠近城市建设规划区，该区岩石剥露面多，植被覆盖率低。

将 SFI 图与土地利用方式图和土壤类型图进行叠加,分别计算了不同土地利用方式和土壤类型下不同肥力的耕地面积占比,并做成百分比堆积图(图 5)。研究区内耕地主要以水田为主,面积占比达到 81.51%,旱地的面积占比达到 18.49%;SFI 的高值与中值区间在水田内的相对面积占比均高于旱地,所以水田的综合肥力要好于旱地。研究区耕地

的土壤类型主要以水稻土为主,面积占比达到 62.59%,红壤次之,面积占比为 23.31%,潮土、黄壤、黄棕壤、紫色土面积之和占比在 10% 左右;综合肥力最好的土壤类型为潮土,高 SFI 值耕地面积占比达到 50%;其次为水稻土和黄棕壤,高 SFI 值耕地面积占比在 33% 左右;综合肥力最差的土壤类型为紫色土,低 SFI 值耕地面积占比达到 50%。

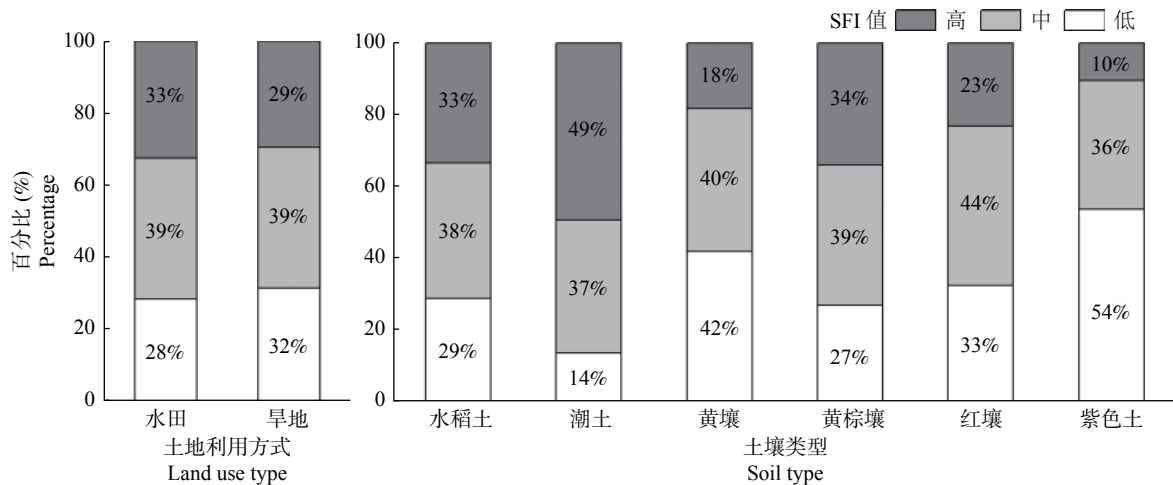


图 5 不同土地利用方式与土壤类型下不同肥力耕地的百分比堆积图

Fig.5 Percent stacked area chart of cultivated land with different fertility under different land use patterns and soil types

对 MDS 中的定量型指标与 SFI 值做百分比堆积图(图 6)。土壤容重在 SFI 值的各个区间面积相对占比相同,主要为偏紧级别,相对面积占比均为 75%。在 SFI 高值区间,CEC 主要处于 1 级水平,相对面积占比为 92%;有机质主要处于 2 级水平,相对面积占比为 62%;有效磷主要处于 3 级水平,相对面积占比为 45%;全钾主要处于 3 级水平,相对面积占比为 38%,该区间内钾素含量较低,其他养分含量较高。在 SFI 中值区间,CEC 主要处于 1 级水平,相对面积占比为 76%;有机质主要处于 2 级水平,相对面积占比为 52%;有效磷主要处于 3 级水平,相对面积占比为 57%;全钾主要处于 4 级水平,相对面积占比为 62%,该区间内钾素含量最低,磷素含量较低。在 SFI 低值区间,CEC 主要处于 1 级水平,相对面积占比为 45%;有机质主要处于 3 级水平,相对面积占比为 45%;有效磷主要处于 3 级水平,相对面积占比为 63%;全钾主要处于 4 级水平,相对面积占比为 65%,该区间内钾素含量最低,碳氮磷含量均较低。

由指标相关系数矩阵图可知(图 3),土壤有机质与全氮、碱解氮均显著相关,故有机质含量可以作为研究区内碳氮元素丰缺的指标,同理,有效磷

和全钾可以分别作为研究区内磷素和钾素养分丰缺的指标。综上,研究区内土壤 CEC 含量水平很高,土壤保肥性能强;土壤容重主要处于偏紧级别,农业耕作时需要及时翻耕,降低土壤容重;土壤碳氮养分含量丰富,但是低 SFI 值的土壤需要适当补充一些氮肥;钾素和磷素养分是研究区内农业生产的主要限制因素,需要补充磷钾肥,以钾素肥料为主,以提高研究区内的土壤肥力。

3 讨论

通常在土壤肥力评价过程中,选取的指标越多越好,但是大量指标之间的共线性会导致很多指标冗余,从而增加分析的成本、耗时费力。本研究从立地条件、剖面性状、土壤物理性状、土壤养分指标等四个方面出发,构建了包括有机质、成土母质、有效磷、容重、全钾、CEC、剖面土体构型等指标的 MDS,这与徐建明等学者给出的土壤肥力评价 MDS 指标基本一致^[24-25]。CEC 是反应土壤保肥供肥的综合指标,本研究中 CEC 对土壤肥力贡献最大(权重最高),这可能与研究区内多水田, pH 较低,土壤铝离子含量高有关^[26]。土壤有机质含量在土壤肥力评价中是不可或缺的指标^[15, 27-28],它不仅可以代表

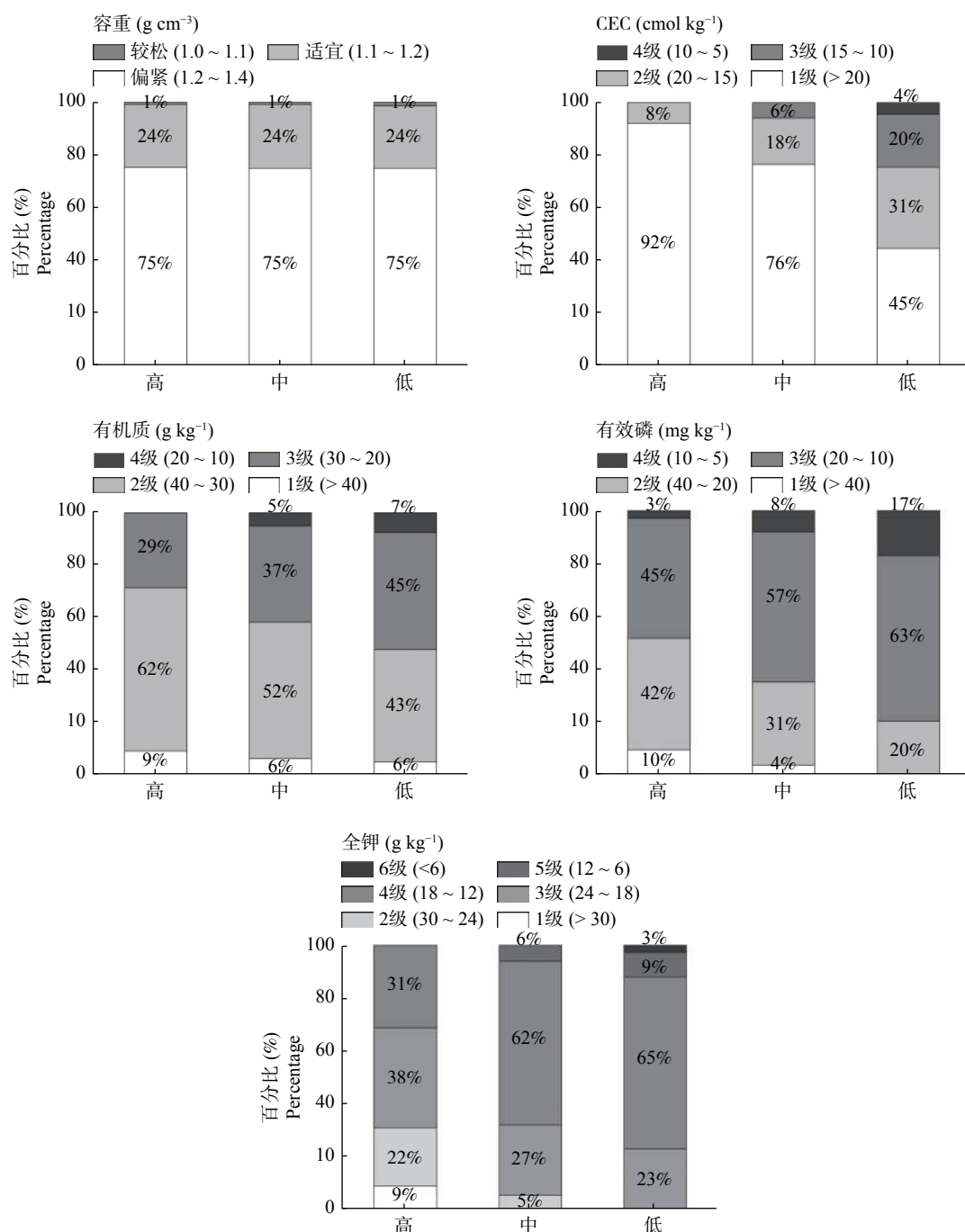


图6 定量型指标百分比堆积图

Fig.6 Percent stacked area chart of quantitative indices

土壤养分供应能力,还对土壤微生物活性有显著影响。土壤有效磷是土壤磷素供应水平高低的指标,对土壤肥力有显著的影响^[29],该指标也与速效钾含量共同反映了土壤速效养分供应能力。土壤肥力评价中,中微量元素含量与土壤生物性状指标也是重要的方面^[13]。本研究并未考虑土壤中微量元素与土壤生物性状指标对土壤肥力的贡献。同时,本文仅对研究区内土壤肥力现状进行了研究,没有研究土壤肥

力的时间变化特征,这些都有待进一步的研究。

本研究在土壤肥力综合评价中,以少数指标信息代表了全部指标信息,减少了评价过程的冗余信息。结果表明 MDS 对 TDS 的代表性很好,说明基于 MDS 的评价体系能够较全面地反映洞庭湖流域耕地土壤肥力。为了进一步探讨基于 MDS 的土壤肥力综合评价结果的可靠性,统计了不同 SFI 分值区间的水稻产量,结果如表 9 所示。发现随着 SFI 区间值

表 9 不同土壤综合肥力指数值区间水稻产量
Table 9 Rice yield in different Soil fertility index values

产量 (kg hm ⁻²) Yield	土壤综合肥力指数 soil fertility index (SFI)		
	0.46 ~ 0.66	0.66 ~ 0.72	0.72 ~ 0.92
单季稻	8055	8355	8565
双季稻	12150	12420	12675

的提高，两种种植制度的水稻产量都在上升，进一步验证了基于 MDS 的土壤肥力评价结果的可靠性。由于土壤条件、农作习惯、气候条件都会对水稻产量产生影响，土壤肥力只是其中的一个方面，如何考虑其他因素的影响，也需进一步研究。

本研究基于主成分分析法（PCA），采用最小数据集（MDS）通过计算土壤肥力指数（SFI）对洞庭湖流域南部的耕地土壤进行了评价。主成分分析作为多元统计分析方法中的一种，有优势但也存在一些不足，目前有研究者认为主成分分析为纯数理性分析，采样与化学实验造成的误差会对评价结果的灵敏度造成影响。因此，除主成分分析之外，许多研究者采用了其他方法进行土壤肥力的评价，如高宏艳等^[30]利用因子分析结合聚类分析，李丹丹等^[31]使用了层次分析法和熵权法，魏志远等^[32]采用了灰色关联度分析法，关于土壤综合肥力的评价方法，还需要进一步的研究。

4 结论

洞庭湖流域南部流域的耕地土壤偏微酸性；容重偏紧；土壤有机质、全氮、碱解氮主要处于较高水平；土壤全磷和有效磷主要处于中上水平；土壤全钾和速效钾主要处于较低水平。

本研究确定的最小数据集（成土母质、剖面土体构型、CEC、容重、有机质、有效磷、全钾等 7 项指标）与采用全数据集（14 项指标）得到的土壤综合肥力值的相关系数达到 0.788（ $P < 0.01$ ），说明 MDS 对 TDS 的代表性较好，这为其他地区土壤肥力的综合评价提供了一种简单实用的参考方法。

研究区高肥力的耕地主要分布在洞庭湖南部的平原区，以潮土和水稻土为主，该区耕地整体肥力值较高，但是钾素养分会对农业生产有一定限制作用，应适当提高钾素养分的补给。中等肥力的耕地主要分布于河网平原与低阶地，土壤类型主要以水稻土和红壤为主，磷素和钾素是该区域内农业生产的主要限制因子，应适当补充磷钾肥以提高土壤肥力。低肥力的耕地主要分布于低山丘陵岗地或阶地

的耕地，土壤类型以红壤、黄壤为主，该区域耕地靠近山区林地或城市建筑区，剖面土壤紧实，由于成土母质差加上耕作条件差，使得该区域养分较低，氮磷钾养分都需要补充，其中以磷钾为主。

参考文献：

[1] 叶回春, 张世文, 黄元仿, 等. 粗糙集理论在土壤肥力评价指标权重确定中的应用[J]. 中国农业科学, 2014, 47(4): 710 – 717.

[2] Qu M K, Li W D, Zhang C R, et al. Comparison of three methods for soil fertility quality spatial simulation with uncertainty assessment[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(6): 2182 – 2191.

[3] Bünemann E K, Bongiorno G L, Bai Z G, et al. Soil quality – A critical review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 120: 105 – 125.

[4] 崔潇潇, 高原, 吕贻忠. 北京市大兴区土壤肥力的空间变异[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 327 – 333.

[5] 马芳红, 张光辉, 耿 韧, 等. 我国水蚀区坡耕地土壤肥力现状分析[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 190 – 196.

[6] 王 飞, 李清华, 林 诚, 等. 福建冷浸田土壤质量评价因子的最小数据集[J]. 应用生态学报, 2015, 26(5): 1461 – 1468.

[7] 付 微, 李 勇, 李向越, 等. 松嫩平原黑土区农田土壤肥力评价研究[J]. 土壤与作物, 2012, 1(3): 166 – 174.

[8] 周 旭, 安裕伦, 许武成, 等. 基于GIS和改进层次分析法的耕地土壤肥力模糊评价——以贵州省普安县为例[J]. 土壤通报, 2009, 40(1): 51 – 55.

[9] 杨奇勇, 杨劲松, 姚荣江, 等. 基于GIS和改进灰色关联模型的土壤肥力评价[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 100 – 105.

[10] Kemsley E K. Discriminant analysis of high-dimensional data: A comparison of principal components analysis and partial least squares data reduction methods[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1996, 33(1): 47 – 61.

[11] Larson W E, Pierce F. Conservation and enhancement of soil quality[M]. Chiang Rai, Thailand: International Board for Soil Research and Management Inc., 1991: 175-203.

[12] Rojas J M, Prause J, Sanzano G A, et al. Soil quality indicators selection by mixed models and multivariate techniques in deforested areas for agricultural use in NW of Chaco, Argentina[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155: 250 – 262.

[13] 贡 璐, 张海峰, 吕光辉, 等. 塔里木河上游典型绿洲不同连作年限棉田土壤质量评价[J]. 生态学报, 2011, 31(14): 4136 – 4143.

[14] 黄 婷, 岳西杰, 葛玺祖, 等. 基于主成分分析的黄土沟壑区土壤肥力质量评价——以长武县耕地土壤为例[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 141 – 147.

[15] 刘金山, 胡承孝, 孙学成, 等. 基于最小数据集和模糊数学法的

- 水旱轮作区土壤肥力质量评价[J]. 土壤通报, 2012, 43(5): 1145 – 1150.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] 邓绍欢, 曾令涛, 关 强, 等. 基于最小数据集的南方地区冷浸田土壤质量评价[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1326 – 1333.
- [18] Juhos K, Czigány S, Madarász B, et al. Interpretation of soil quality indicators for land suitability assessment – A multivariate approach for central European arable soils[J]. Ecological Indicators, 2019, 99(1): 261 – 272.
- [19] 李桂林, 陈 杰, 檀满枝, 等. 基于土地利用变化建立土壤质量评价最小数据集[J]. 土壤学报, 2008, (1): 16 – 25.
- [20] 农业农村部种植业管理司. 《耕地质量等级》标准化实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.
- [21] 姜龙群, 侯贵廷, 黄 淇, 等. 基于因子分析和最小数据集的土壤养分评价——以房山平原区为例[J]. 土壤通报, 2018, 49(5): 1034 – 1040.
- [22] 孙 波, 张桃林, 赵其国. 我国东南丘陵山区土壤肥力的综合评价[J]. 土壤学报, 1995, (4): 362 – 369.
- [23] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [24] 全国农业技术推广服务中心, 农业部耕地质量监测保护中心, 华中农业大学. 长江中游区耕地质量评价[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
- [25] 徐建明, 张甘霖, 谢正苗, 等. 土壤质量指标与评价[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [26] Dai Z H, Liu Y X, Wang X J, et al. Changes in pH, CEC and exchangeable acidity of some forest soils in Southern China during the last 32–35 years[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1998, 108(3–4): 377 – 390.
- [27] 廖 程, 王德伟, 唐 亮, 等. 基于最小数据集的成都平原某区土壤养分综合评价体系的构建[J]. 地球与环境, 2021, 49(2): 189 – 197.
- [28] 娄义宝, 史东梅, 蒋光毅, 等. 基于最小数据集的紫色丘陵区坡耕地耕层土壤质量评价[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(5): 75 – 85.
- [29] 庞 凤, 李廷轩, 王永东, 等. 土壤速效氮、磷、钾含量空间变异特征及其影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 114 – 120.
- [30] 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.
- [31] 李丹丹, 周忠发, 但雨生, 等. 基于组合赋权TOPSIS模型的土壤养分空间分析及综合评价——以瓮安县为例[J]. 环境工程, 2018, 36(8): 183 – 188.
- [32] 魏志远, 孙 娟, 李松刚, 等. 海南中西部荔枝园土壤肥力的灰色关联度评价[J]. 热带作物学报, 2013, 34(10): 1883 – 1887.

Comprehensive Assessment of Soil Fertility of Cultivated Land in Southern Dongting Lake Basin Based on Minimum Data Set

CHEN Fang-zheng¹, REN Jian¹, LIU Si-han², HU Ke-lin^{1*}

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. College of Resource and Environmental Sciences, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Establishing a new method to assess soil fertility of cultivated land using less input and cost without reducing any useful information is helpful to guide agricultural production and land use planning. In this study, four administrative cities in southern Dongting Lake River Basin were selected as the study area. The 14 indices representing four main components, such as site conditions, soil profile properties, soil physical properties and soil nutrients were comprehensively considered. Soil fertility was evaluated by the integrated index based on the minimum data set (MDS) using principal component analysis, and its main limiting factors was also analyzed. The results showed that the study area was mainly slightly acidic. Soil bulk density (BD) and the nitrogen nutrient presented trends of slightly tight and at a higher level, respectively. The phosphorus nutrient ranged from the medium to high level, and the potassium nutrient was at a low level. The MDS was consist of seven indices, including soil parent material, soil profile pattern, CEC, BD, SOM, AP and TK. The mean and standard deviation of total data set (TDS) and MDS were close with a Pearson's correlation efficient of 0.788 ($P < 0.01$). The areas with high soil fertility index (SFI) were mainly located in the concentrated rice planting area near the southern Dongting Lake water system. Those with low SFI were mainly distributed in the hilly area with relatively high altitude or low vegetation coverage close to urban construction area. Phosphorus and potassium nutrients were the main limiting factors of SFI in the study area. The results provided a theoretical guidance for the comprehensive assessment and improvement of soil fertility in the southern Dongting Lake Basin.

Key words: Soil fertility index; Minimum data set; Principal component analysis; Dongting Lake River Basin

[责任编辑: 张玉玲]