

DOI: 10.11766/trxb201705080113

基于产量的稻田肥力质量评价及障碍因子区划

——以进贤县为例*

樊亚男^{1, 2} 姚利鹏^{1, 3} 瞿明凯¹ 胡文友¹ 黄标^{1†} 赵永存¹

(1 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 南京市环境保护科学研究院, 南京 210019)

摘要 土壤肥力质量评价及土壤肥力障碍因子分析, 对于区域土壤利用和改良、指导农业生产结构布局具有重要意义。以江西省进贤县为研究区, 通过水稻遥感解译测产, 结合主成分分析进行土壤质量评价; 采用综合指数法表征土壤肥力质量水平, 分析该区域低肥力质量区域主要障碍因素, 并进行障碍因子区划。结果表明, 该地区土壤肥力质量评价的最小数据集(MDS)指标包括: 有机质、阳离子交换量(CEC)、全钾(TK)、交换性钙(Ex.Ca)、容重、粉黏比; 土壤质量综合指数与水稻产量相关系数达到0.73 ($p < 0.01$), 以当地水稻平均产量 7.215 t hm^{-2} 确定土壤质量综合指数阈值为0.65。分析得出, 该地区影响土壤肥力的主要障碍包括有机质含量低和容重较大反映的低熟化度障碍、中量元素缺乏反映的酸化障碍、全钾含量低和高粉黏比反映的结构障碍等。根据障碍因素将研究区域划分为三大障碍区: 东南部丘陵区主要障碍因子为酸化和土壤结构障碍; 中西部低岗平原主要为土壤酸化障碍; 北部滨湖区主要障碍为水稻土熟化程度低。通过对不同区域施行针对性改良措施有益于提高土壤肥力。

关键词 遥感解译估产; 土壤属性; 水稻; 土壤肥力质量评价; 土壤障碍因子

中图分类号 S158.5; S159.2; S511 **文献标识码** A

20世纪70年代初, 土壤质量一词出现在土壤学文献上, 并逐步成为国际土壤学研究的热点, 土壤质量可从土壤的肥力质量、土壤环境质量及土壤健康质量三个方面进行定义^[1]。土壤质量的含义因不同的土壤利用目的, 对三个方面的侧重略有不同。土壤肥力是土壤的基本属性, 能为植物提供生长所需的基础条件, 是获得高产、优质农产品的前提保证。土壤肥力是建立可持续农业的重要物质基础^[2-3], 而由于高强度的农业利用以及不合理的管理措施, 土壤属性会产生剧烈的变化, 并且会限制土壤的生产力, 成为土壤肥力的障碍因素。对障碍

因素进行区划, 有利于区域土壤资源利用及改良。

目前, 常用的土壤质量评价方法包括多变量指标克立格法、土壤质量动力学方法、土壤质量综合评分法和土壤相对质量评价法等。综合指数法是目前在国内外应用最广泛的一种土壤质量评价方法^[4-5]。综合指数法通常有4个关键步骤: 评价最小数据集(MDS)的筛选、隶属度函数及其临界值的确定、指标权重的确定以及综合指数阈值的确定^[6-8]。在许多土壤质量评价工作中, MDS已经被广泛应用。获取MDS的方法主要为专家建议法和多元统计法, 其中, 多元统计法更能符合具体的评价工作要

* 国家科技支撑计划课题(2012BAD05B05)资助 Supported by the National Key Technology R&D Program of China (No. 2012BAD05B05)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: bhuang@issas.ac.cn

作者简介: 樊亚男(1993—), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要从事土壤质量评价及3S技术应用方面研究。E-mail: ynfan@issas.ac.cn

收稿日期: 2017-05-08; 收到修改稿日期: 2017-06-12; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-06-22

求。隶属度函数是模糊数学中的一个重要概念,用以刻画客观事物中的模糊界限,因此,可建立MDS中各指标的隶属度函数,计算其临界值来表示各肥力指标的状态值^[9-10]。已有许多相关工作对隶属度函数进行研究,但是,仅采取固定的隶属度函数模型和临界值对不同区域进行评价显然不具备科学性,也难以解决具体问题。单项肥力质量指标权重的确定是计算土壤质量综合指数的关键。以往的评价大多凭主观的经验判断或直接给予不同指标同等权重。这样的做法显然缺乏合理性。目前,常用的权重系数的确定方法除上述的经验打分法外,多元统计中的相关系数法、主因子分析法、层次分析法以及回归分析法均能较好地反映指标的权重分配^[11]。因此,如何科学选取MDS、确定其隶属度函数及其临界值、合理分配权重是土壤肥力质量评价的关键。

本研究选取鄱阳湖典型水稻种植区域进贤县作为研究区,并采用遥感解译估产数据来确定土壤质量评价的最小数据集,通过产量数据与土壤属性的主成分分析来确定具有生物学意义的指标,建立最小数据集并确定各指标权重和隶属度函数类型及其

临界值,采用综合指数法计算土壤肥力质量综合指数,并进一步分析该地区限制水稻产量、影响土壤质量的障碍因子,对该区域土壤障碍因子进行分区,并提出了合理利用的改良意见,为水稻土肥力质量评价及障碍因子的区划提供一个可借鉴的模式。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

进贤县为江西省南昌市下辖县,位于鄱阳湖南部(图1),地处亚热带季风湿润气候区,平均温度为17.5℃,全县年均日照数1 936 h,年均降水量1 587 mm。土壤类型以红壤(55.9%)和水稻土(40.3%)为主,少量草甸土(3.5%)和潮土(0.3%)。水稻土是进贤县主要的耕作土壤,以潜育型(88.0%)、潜育型(9.9%)和淹育型(2.1%)为主(图1)。进贤县面积总计1 955 km²,2005年统计数据表明,耕地面积约占35%^[12]。进贤县是全国粮食生产先进县,该地区主要农作物为水稻及油料作物,水稻一年两季,其种植面积达

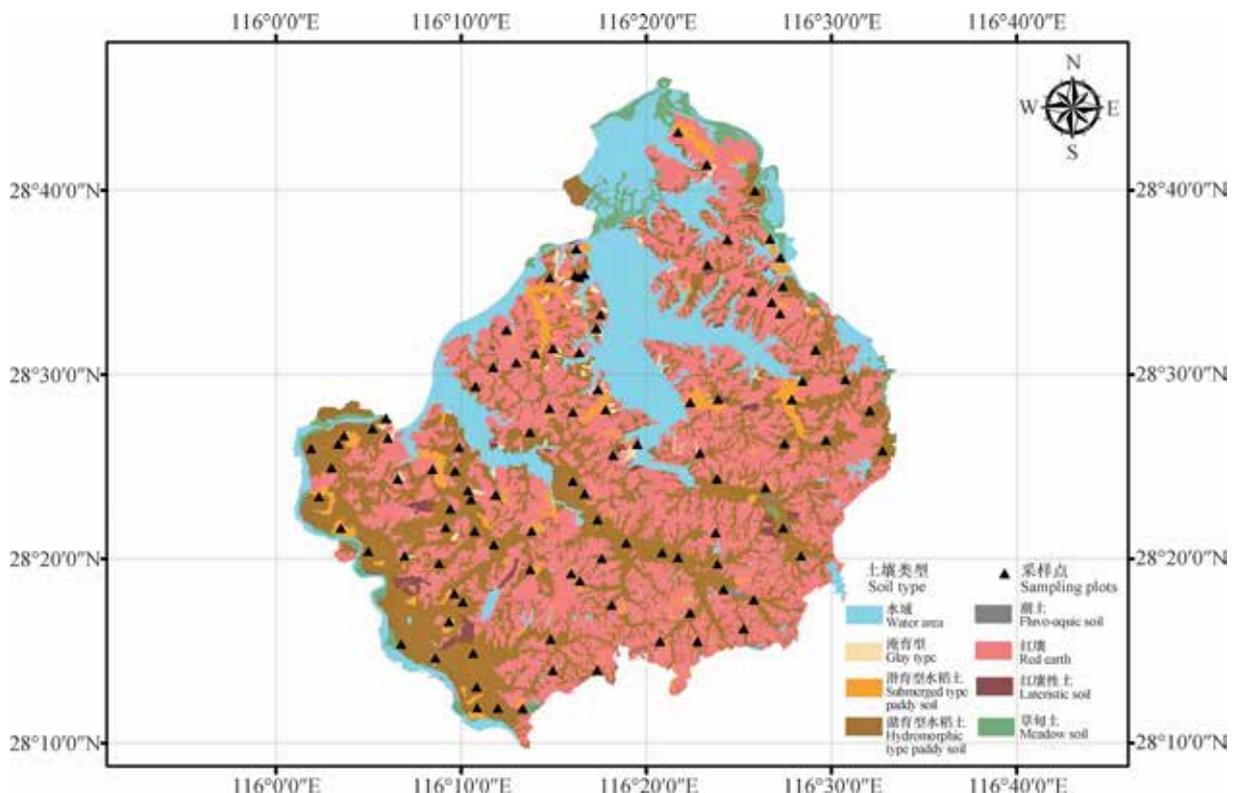


图1 野外采样点分布图

Fig. 1 Location of the sampling sites in the field

到763.0 km²，占粮食种植总面积的89%^[13]，是鄱阳湖流域具有代表性的水稻种植区域。

1.2 野外调查与样品采集

在充分考虑土壤类型、空间均匀性及粮食作物产量分布状况的基础之上进行了样点布设，共布设了103个土壤采样点，其中，潴育型水稻土70个、潜育型水稻土26个、淹育型水稻土7个。为了避免作物生长期施肥的影响以及考虑到作物产量的预测，在晚季水稻成熟期进行样品采集。2012年10月中下旬布设采集51个土壤采集点，2013年12月中下旬布设采集53个土壤采集点。

在采样点附近选取合适大小田块，在采样点10 m半径内随机五点采集表层（0~20 cm）土壤，均匀混合后四分法取1 kg左右装袋。并用相同方法采集相应位置的亚表层（20~40 cm）土壤样品。此外，采集环刀和表层原始土块样品，供土壤容重和团聚体分析用。采样时，使用GPS记录实际采样点的经纬度，并详细记载采样点的地理位置、地形、田块类型、土地利用变化状况及施肥状况等基础信息。

1.3 遥感解译估产

由于各地区种植状况、收获时间均具有很大的不确定性，而且多次采样的误差也较大，因此，本研究采用Landsat-增强型专题绘图仪（Landsat-ETM+）结合Landsat陆地成像仪（Landsat-OLI）影像数据解译研究区水稻种植面积，并提取水稻种植区域内水稻生长关键物候期的归一化植被指数（NDVI）值，建立水稻估产模型，对研究区水稻产量进行估算^[14]。在土壤样品采集的同时，采集部分易获取点位的植物样进行实际测产来验证遥感解译结果。

选择研究区晚季水稻进行实际测产。在上文中设计的土壤样点基础上，兼顾高、中、低产合理布设及空间上相对均匀的原则，第一次采样时即2012年10月中下旬晚稻收获前期，在采集土壤样品的对应田块进行野外测产样方收获。分别量取样方，采集每个样方内所有的水稻，作物采集后按样方分别装入编号的编织袋中，经晒干、脱粒、称重，通过计算每个田块的3个样方的平均单产，累加计算出每个测产田块的水稻产量，并换算单位为t hm⁻²。

1.4 测定指标与方法

为了尽可能多地了解土壤性质对水稻产量和土壤质量评价的影响，本研究参考《土壤农化分

析》^[15]及《土壤调查实验室分析方法》^[16]进行了较为全面的土壤性质测定工作。采用电位法测定pH，低温重铬酸钾氧化—滴定法测定有机质（OM），采用硒粉、硫酸铜、硫酸钾消化—蒸馏法测定土壤全氮（TN），混酸消化—钼锑抗比色法测定土壤全磷（TP），混酸消化—火焰光度法测定土壤全钾（TK），乙酸铵交换法测定阳离子交换量（CEC），乙酸铵、乙二胺四乙酸（EDTA）浸提—电感耦合全谱等离子直读光谱仪（ICP）法测定交换性钾、钠、钙、镁（Ex.K、Ex.Na、Ex.Ca、Ex.Mg），氯化钾交换中和滴定法测定交换性酸（H⁺、Al³⁺）并计算盐基饱和度（BS）。碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定有效磷（AP），乙酸铵浸提—ICP法测定土壤速效钾（AK），二乙基三胺五乙酸（DTPA）浸提—电感耦合等离子体原子发射光谱法（ICP-AES）测定土壤有效铁、锰、铜、锌（DTPA-Fe、DTPA-Mn、DTPA-Cu、DTPA-Zn），环刀法测定土壤容重（BD），吸管法测定土壤机械组成，干、湿筛法测定土壤团聚体性质，以土壤团聚体稳定率（stability）、干湿筛平均重量直径（Dry-MWD、Wet-MWD）表示。

1.5 数据处理

采用ENVI5.2进行研究区域图像的几何校正、大气校正、剪切、增强、解译分类及提取植被指数信息和建立评价模型等。采用ArcGIS9.3对基础图件进行数字化、图形的编辑、修改和显示以及图形的几何校正、空间分析等操作。采用主成分分析法对土壤属性进行分析，获取主成分，并且，通过将产量与主成分相关分析得到该研究地区限制水稻产量的主要因子，然后选取最小数据集，确定权重和隶属度函数，并进行指标归一化，得出土壤质量综合指数并对该地区土壤障碍因素进行区划。数据分析主要利用SPSS 20.0完成，此外，利用Excel 2010进行简单的数据储存和整理分析。

2 结果

2.1 水稻遥感解译产量

为了建立具有生物学意义、能代表当地实际土壤生产力的土壤质量评价方法，对该研究区域的水稻进行遥感解译和水稻估产。鉴于同类地物会受地块周边环境、地形等因素的影响，采用分区解译

的方法, 将进贤县分为北部滨湖区、中西部低岗平原区、东南部丘陵区三个区域, 采用神经网络监督分类法, 进行图像分类, 共解译晚稻种植面积 281.2 km², 与进贤县2013年统计数据的379.2 km² 相比, 准确率达到74.16%^[17]。

提取每个时相的各测产样点的植被指数信息, 与地面测产数据之间进行相关性分析, 测产数据与7、8月份的ETM+-NDVI呈现显著相关性, 相关系数分别为0.571、0.761。通过实测值与预测值的拟合方程决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE) 评价预测精度, R^2 越大、RMSE越小, 预测精度越高。从交叉验证结果来看, 各地区实测值与预测值之间 R^2 在0.70左右, 均方根误差0.421 ~ 0.954 t hm⁻²,

说明NDVI值可以较为准确地预测研究区内的水稻产量。

通过建立地面田块的测产数据与对应归一化植被指数NDVI的拟合模型, 对全县晚稻种植区域进行水稻估产。进贤县水稻年单产在2.085 ~ 11.43 t hm⁻² 之间, 全县平均晚稻亩产481 kg, 即7.215 t hm⁻²。估测结果显示, 该区域水稻产量差异大, 表现为中西部低岗平原区和军山湖南部产量较高, 丘陵地区产量稍低。

2.2 土壤属性统计特征

土壤属性测定结果及其统计特征见表1。进贤县水稻土中的全氮、全磷、全钾等养分均处于较弱的变异水平, 变异系数在15% ~ 35%, 相比之

表1 进贤县土壤属性统计特征

Table 1 Statistical characters of soil properties in Jinxian County

深度 Depth	pH	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	盐基饱和度 Base saturation (%)	阳离子交换量 CEC (cmol kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g kg ⁻¹)
0 ~ 20cm	4.80 ± 0.29	33.63 ± 6.71	38.38 ± 12.05	10.23 ± 2.12	1.96 ± 0.42
20 ~ 40cm	5.52 ± 0.54	15.49 ± 7.67	56.29 ± 18.40	8.84 ± 2.07	0.98 ± 0.40
深度 Depth	全磷 Total phosphorus (g kg ⁻¹)	全钾 Total potassium (g kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium (mg kg ⁻¹)	交换性钙 Ex.Ca ¹ (cmol kg ⁻¹)
0 ~ 20cm	0.66 ± 0.16	13.95 ± 4.74	36.77 ± 20.65	72.76 ± 41.97	3.01 ± 1.19
20 ~ 40cm	0.44 ± 0.14	14.10 ± 4.78	11.45 ± 8.36	52.08 ± 32.96	3.82 ± 1.33
深度 Depth	交换性镁 Ex.Mg (cmol kg ⁻¹)	交换性钠 Ex.Na (cmol kg ⁻¹)	有效铁 DTPA-Fe ²⁾ (mg kg ⁻¹)	有效锰 DTPA-Mn (mg kg ⁻¹)	
0 ~ 20cm	0.55 ± 0.21	0.15 ± 0.04	255.72 ± 77.03	39.76 ± 39.06	
20 ~ 40cm	0.75 ± 0.28	0.14 ± 0.04	89.08 ± 81.40	57.19 ± 45.45	
深度 Depth	有效铜 DTPA-Cu (mg kg ⁻¹)	有效锌 DTPA-Zn (mg kg ⁻¹)	容重 Bulk density (g cm ⁻³)	粉黏比 Silt/Clay	
0 ~ 20cm	3.69 ± 1.11	2.23 ± 0.98	1.08 ± 0.13	2.51 ± 0.62	
20 ~ 40cm	2.07 ± 1.35	0.83 ± 0.74	1.51 ± 0.15	2.39 ± 0.63	
深度 Depth	团聚体稳定率 Stability ³⁾	干筛平均重量直径 Dry-MWD ⁴⁾ (mm)	湿筛平均重量直径 Wet-MWD (mm)		
0 ~ 20cm	0.65 ± 0.13	7.96 ± 1.22	1.99 ± 0.92		
20 ~ 40cm	-	-	-		

注: 表中数据为均值 ± 标准差。1) Ex. Ca、Ex. Mg、Ex. Na代表交换性钙、镁、钠; 2) DTPA-Fe、DTPA-Mn、DTPA-Cu、DTPA-Zn代表有效态铁、锰、铜、锌; 3) Stability代表团聚体稳定率; 4) Dry-MWD和Wet-MWD分别代表干、湿筛平均重量直径。下同Note: Data are mean ± SD. 1) Ex. Ca, Ex. Mg and Ex. Na stands for exchangeable Ca, Mg and Na, respectively; 2) DTPA-Fe, DTPA-Mn, DTPA-Cu and DTPA-Zn stands for available Fe, Mn, Cu and Zn, respectively; 3) Stability refers to stability of aggregates; 4) Dry and Wet -MWD stands for mean weight diameter of aggregates using dry and wet sieve method, respectively. The same below

下，有效磷和速效钾的变异程度稍强，变异系数在60%~80%。通过对样点土壤基本属性分析，与第二次土壤普查时的数据相比，土壤性质发生了显著变化，研究区内水稻土酸化明显，全氮含量显著提高，速效钾含量并无明显变化，全磷含量有明显下降趋势，而土壤有效磷含量显著提高。就整体而言，全县水稻土有机质含量处于较高水平，质地偏黏，非水稳定性大团聚体含量较多。

2.3 最小数据集（MDS）指标选取

为建立具有生物学意义的土壤质量评价指标

集提供基础，本研究运用主成分分析法对研究区样点的土壤理化性质相关指标进行分析。表层土壤的主成分分析共获得6个特征值大于1的主成分，累积方差贡献率达73%（表2）；主成分1（PC1）因子载荷较高的是pH、盐基饱和度、交换性盐基离子以及有效锰，主要是度量土壤酸碱过程的因子。主成分2（PC2）土壤有机质、土壤全氮、土壤容重、阳离子交换量的因子载荷最高，因此，该主成分主要是表征土壤有机质积累过程和土壤容重的因子。主成分3（PC3）有效铁、铜、锌的因子载

表2 进贤县表层水稻土属性旋转因子荷载矩阵（0~20 cm）

Table 2 Rotated component matrix of topsoil properties of the paddy soil in Jinxian County (0~20 cm)

	旋转主成分 ¹⁾ Rotated principal component					
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
酸碱度pH	0.773 ²⁾	0.005	-0.275	-0.115	0.094	0.019
有机质Organic matter	-0.092	0.766 ²⁾	0.216	0.216	0.092	-0.178
全氮Total nitrogen	-0.185	0.912 ²⁾	-0.054	-0.024	0.182	-0.092
全磷Total phosphorus	0.138	0.088	0.328	0.084	0.816 ³⁾	0.037
全钾Total potassium	0.084	-0.068	0.500	0.041	-0.251	0.681 ²⁾
有效磷Available phosphorus	-0.155	0.148	0.291	-0.208	0.826 ³⁾	-0.121
速效钾Available potassium	0.246	0.058	0.146	0.010	0.432	0.239
盐基饱和度Base saturation	0.869 ²⁾	-0.219	0.083	0.160	-0.170	-0.128
阳离子交换量CEC	0.231	0.610 ²⁾	-0.165	-0.129	0.374	0.414
交换性钙Ex.Ca	0.895 ²⁾	0.169	-0.046	0.102	0.019	0.084
交换性镁Ex.Mg	0.770 ²⁾	0.190	0.073	-0.040	0.229	0.394
交换性钠Ex.Na	0.513	0.422	0.077	-0.149	0.206	-0.093
有效铁DTPA-Fe	-0.171	0.058	0.723 ³⁾	0.050	0.310	-0.145
有效锰DTPA-Mn	0.632 ²⁾	-0.306	0.209	0.150	-0.002	0.092
有效铜DTPA-Cu	0.133	0.124	0.778 ³⁾	-0.094	0.189	0.064
有效锌DTPA-Zn	0.011	0.018	0.853 ³⁾	0.022	0.202	0.046
容重Bulk density	-0.176	-0.763 ²⁾	-0.137	-0.250	0.129	-0.087
粉黏比Silt/Clay	-0.032	0.141	0.237	-0.364	-0.213	-0.739 ²⁾
团聚体稳定性Stability	0.014	0.084	-0.072	0.914 ³⁾	0.034	0.016
干筛平均重量直径Dry-MWD	0.017	0.008	0.257	0.551 ³⁾	-0.230	0.084
湿筛平均重量直径Wet-MWD	0.085	0.166	-0.127	0.912 ³⁾	0.049	0.124
特征值Eigenvalue	3.70	2.87	2.70	2.39	2.20	1.55
方差贡献率Variance contribution (%)	17.64	13.66	12.85	11.38	10.49	7.37
累计贡献率Total cumulative (%)	17.64	31.30	44.14	55.52	66.01	73.38

注：1) PC1~PC6代表主成分1~主成分6；2) 对应指标是指作为该主成分的代表因子进入最小数据集MDS的备选指标；3) 指对应指标在该主成分的因子荷载较高
 Note: 1) PC1~PC6 stands for principal component 1~6, respectively; 2) The indices will be used as alternative indicators in MDS; 3) The indices have high factor loading in this principal component

表3 进贤县水稻产量与各主成分的相关性 (0~20 cm)

Table 3 Correlations between rice yields and different principle components in Jinxian County (0~20 cm)

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
产量Yield	0.18*	0.23**	0.08	-0.03	0.00	0.29**

注: **表示在 $p < 0.01$ 水平上显著 (单尾检验); *表示在 $p < 0.05$ 水平上显著 (单尾检验) Note: ** means significance at $p < 0.01$ level (single-tailed test); * means significance at $p < 0.05$ level (single-tailed test)

荷最高, 可知, 该主成分代表微量元素养分的因子。主成分4 (PC4) 土壤团聚体相关指标因子载荷较高, 因此, 该主成分是度量土壤团聚体结构的因子。主成分5 (PC5) 土壤全磷、有效磷的因子载荷较高, 可以定义为度量磷素的因子。主成分6 (PC6) 土壤粉黏比因子载荷最高, 其次为全钾, 可定义为土壤质地和钾素因子。

表3为将各测产田块在综合指标因子上的得分与水稻产量进行相关分析的结果, 水稻产量与土壤质地和钾素水平 (PC6)、土壤有机质积累和土壤容重 (PC2) 相关性最高, 其次是PC1主成分。

同上, 对亚表层土壤获得5个主成分, 累积方差贡献率达到了75%。PC1为土壤的主要养分因子, PC2为衡量酸碱过程的因子, PC3为表征阳离子交换能力的因子, PC4为速效钾和土壤质地因子, PC5为全钾因子。通过亚表层土壤综合指标与水稻产量的相关性分析, 发现PC5与水稻产量在 $p < 0.01$ 水平上显著相关, PC3与水稻产量在 $p < 0.05$ 水平上显著相关, 相关系数分别为0.18和0.27。

选取与水稻产量相关的主成分上载荷较高的属性指标作为该主成分的代表因子进入最小数据集的备选指标^[18]。土壤单项指标与水稻产量相关度高的也进入最小数据集的备选指标^[19]。按照上述条件筛选后, 综合考虑主成分载荷最高、指标之间的相关性及指标测定的难易程度与准确程度等多方面因素, 最终, 表层选取进入最小数据集指标为: OM、TK、CEC、Ex.Ca、BD、Silt/Clay。

亚表层指标选取采用与表层相同方法, 最终选取指标为: TK、CEC。

最终采用的最小数据集除TK和CEC为0~40 cm外, 其余指标均为表层 (0~20 cm) 属性指标。

2.4 指标权重及隶属度函数的确定

指标权重的获取通过公因子方差来确定^[20]。为确定具有生物学意义的隶属度函数和转折点, 本研究采用土壤属性与水稻年产量之间的散点图和趋势线确定隶属度函数类型及转折点 (表4)。土壤

有机质、全钾、交换性钙与水稻产量之间为“S”型曲线关系, 土壤容重和粉黏比与产量呈抛物线关系。土壤全钾含量在12~17 g kg⁻¹时, 水稻产量呈现上升趋势, 而全钾含量高于17 g kg⁻¹时, 产量处于较高水平, 且随着土壤全钾含量的升高, 水稻并未出现明显的增产趋势, 因此, 选择12 g kg⁻¹和17 g kg⁻¹分别作为全钾含量隶属度函数的下限 (L)、上限 (U) 值^[21]。土壤有机质和阳离子交换量均为局部的S形曲线, 可选最小值和最大值分别作为其隶属度函数的临界值^[22]。对比本研究利用遥感估产数据获得隶属度函数临界值与目前常用于我国水稻土区的隶属度函数临界值, 发现两者之间存在差异^[23]。

2.5 土壤质量综合指数及阈值的确定

通过以上获取的权重数据和隶属度函数按下列公式进行土壤质量综合指数的计算:

$$SQI = \sum_{i=1}^n (W_i I_i)$$

式中, SQI为土壤质量综合指数; I_i 为第*i*个单项指标的归一化值; W_i 为第*i*个单项指标的权重值; n 为评价指标个数。SQI值越高, 说明土壤肥力质量水平越高。

图2为进贤县土壤质量综合指数与水稻产量空间分布, 对比水稻产量的空间分布, 土壤质量指数与水稻产量具有相似的空间分布特征。本文通过建立稻田土壤肥力质量综合指数与水稻产量之间的响应来确定土壤质量综合指数的阈值 (图3)。当土壤质量综合指数低于0.65时, 水稻产量在低于平均值区域上下波动; 当土壤质量综合指数高于0.65时, 水稻产量在高于平均值区域波动, 因此, 确定质量指数阈值为0.65。土壤质量综合指数与水稻产量相关系数达0.73 ($p < 0.01$)。

2.6 土壤质量障碍区识别

为了识别不同障碍区的限制性土壤因子, 需计算各土壤指标在空间上存在障碍概率的高低。从评价指标的空间分布来看, 部分指标之间具有相似

表4 基于水稻遥感估产数据获取的隶属度函数转折点

Table 4 Cutoffs values of standard core functions of soil quality indicators for rice yield estimation based on remote sensing interpretation

指标 Index	隶属度函数 Standard core function	基于估产数据的转折点 Cutoffs values based on yield estimation		常用隶属度函数转折点 Common cutoffs values	
		下限Lower limit (L)	上限Up limit (U)	下限Lower limit (L)	上限Up limit (U)
		有机质Organic matter	$f(x) = 0.9 \times \frac{x-L}{U-L} + 0.1$	25	42
全钾Total potassium	$f(x) = \begin{cases} 0.1 & x \leq L \\ 0.9 \times \frac{x-L}{U-L} + 0.1 & L < x < U \\ 1 & x \geq U \end{cases}$	12	17	15	20
阳离子交换量 CEC		9	12	5	20
交换性钙 Ex.Ca	$f(x) = \begin{cases} 0.9 \times \frac{x-L}{U-L} + 0.1 & x < U \\ 1 & x \geq U \end{cases}$	1.4	4		
容重Bulk density	$f(x) = \begin{cases} 0.9 \times \frac{x-x_{\min}}{L-x_{\min}} + 0.1 & x < L \\ 1 & L \leq x \leq U \\ 1 - 0.9 \times \frac{x-U}{x_{\max}-U} & x > U \end{cases}$	0.85	1.0	1.1	1.2
粉黏比 Silt/Clay		2.5	2.85		

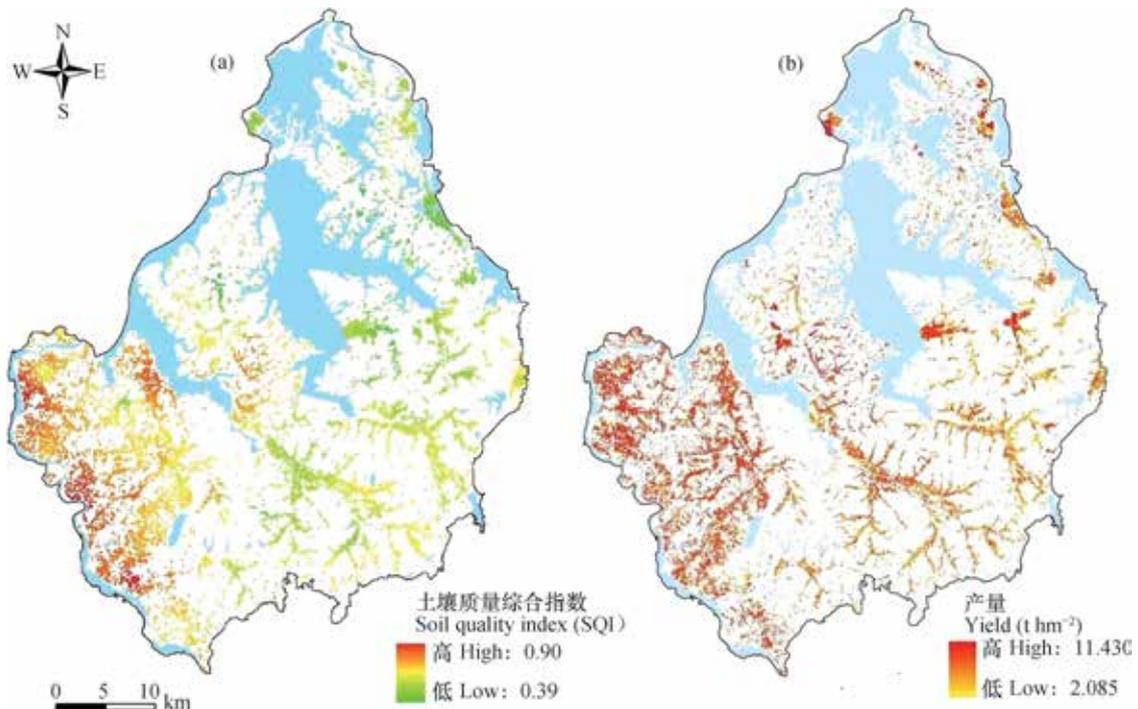


图2 土壤质量综合指数 (a) 和水稻产量 (b) 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil quality index (SQI) (a) and rice yield (b) in Jinxian County

或互补的空间分布特征。利用主成分分析可以对指标进一步降维，将6个评价指标归类为3个主要的因子：第一主成分（F1）主要表征有机质和容重，第二主成分（F2）为度量土壤质地和全钾含量状况的因子，第三主成分（F3）是表征阳离子

交换量及钙元素的因子。因子得分是观测量在每个主因子上的得分值，若是空间上一个点在某个因子上的得分大于0，说明这个点在该因子上具有正贡献值，反之，则代表该点与该因子反映的土壤特征向量方向相反^[24]。利用土壤属性空间表达的不确

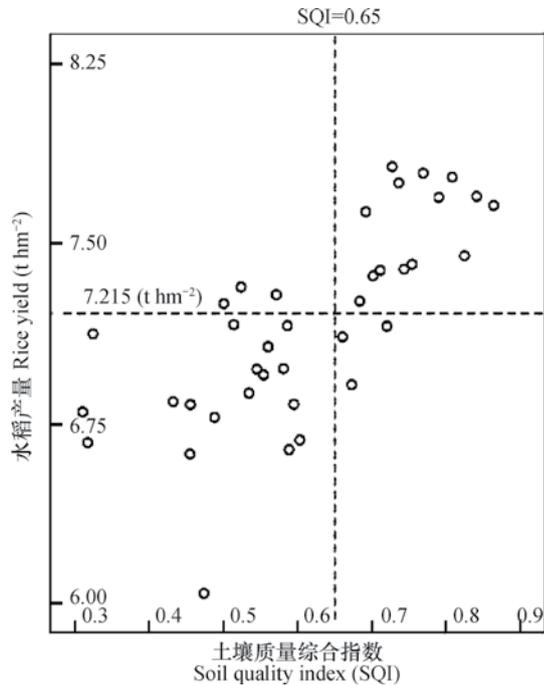


图3 进贤县水稻产量对土壤质量综合指数的响应
Fig. 3 Rice response to SQI in yield in Jianxian County

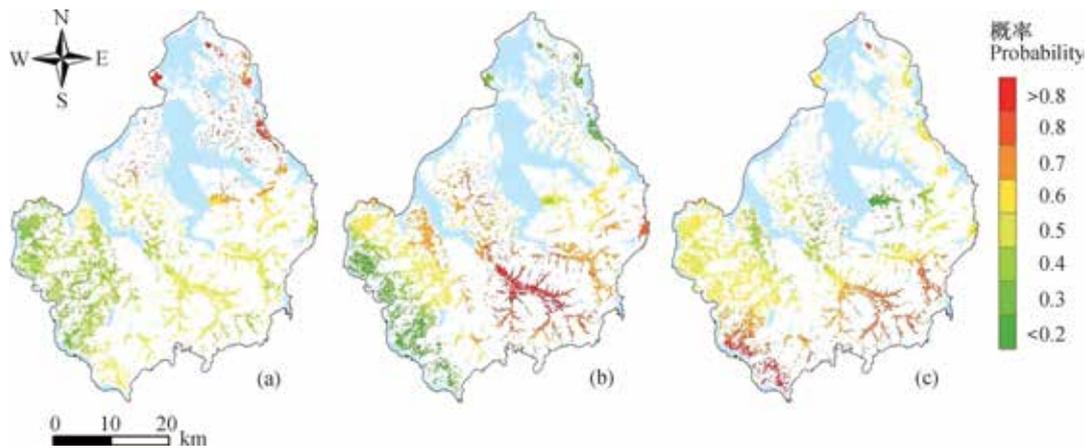


图4 不同评价指标主成分因子F1 (a)、F2 (b)和F3 (c)得分小于0的概率空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of the probabilities of principal component factor F1 (a), F2 (b) and F3 (c) being below zero in score relative to evaluation index

对于不同的作物,不同的土壤利用类型,制约生产力的肥力质量指标可能也不尽相同,采用固定统一的评价体系得到的土壤肥力质量显然不够准确,结果也往往不符合当地实际的土壤肥力状况。

本文通过主成分分析方法结合遥感解译测产结果,确定评价区域水稻土土壤质量综合指数的MDS以及权重和隶属度函数类型及临界值。在评价指标上,未选取有效磷或其他的相关磷素指标作为评价指标。近年来,由于农业生产过程中大量的肥料投

定性获取各个因子小于0的概率,即可获得空间上各个因子可能存在障碍的概率(图4)。通过统计不同乡镇各个因子得分小于0的平均概率,分析不同区域的土壤质量主要限制因子并得到障碍分区(图5)。

北部滨湖区大部分乡镇在F1上的因子得分低于0的概率明显高于其他几个主成分,表明引起该区域土壤质量指数低的因素可能是有机质含量低和容重障碍。东南部丘陵区域在F2上的因子得分低于0的概率明显高于其他几个主成分,表明该地区的障碍因素主要为钾素障碍和土壤结构性障碍。中西部低岗平原区域在F3上的因子得分低于0的概率明显较高,表明该区域障碍因素主要为土壤酸化造成的阳离子交换量低和中量元素障碍。

3 讨论

土壤是影响作物产量的关键因素之一,但是,

入,土壤的大量元素指标呈现出积累的趋势,特别对于磷肥,易被土壤固定,肥料的残效和积累利用率仍十分可观^[25-26]。但由于缺乏合理的施肥指导,农民的盲目施肥导致土壤磷素积累,使土壤的磷素指标不再成为限制农田肥力的关键指标。本文中土壤磷素指标水平及其与产量的相关性也表明,有效磷指标不再适用于该地区的土壤质量评价。可见,采取一成不变的土壤质量评价指标体系不能合理地反映土壤肥力质量水平。

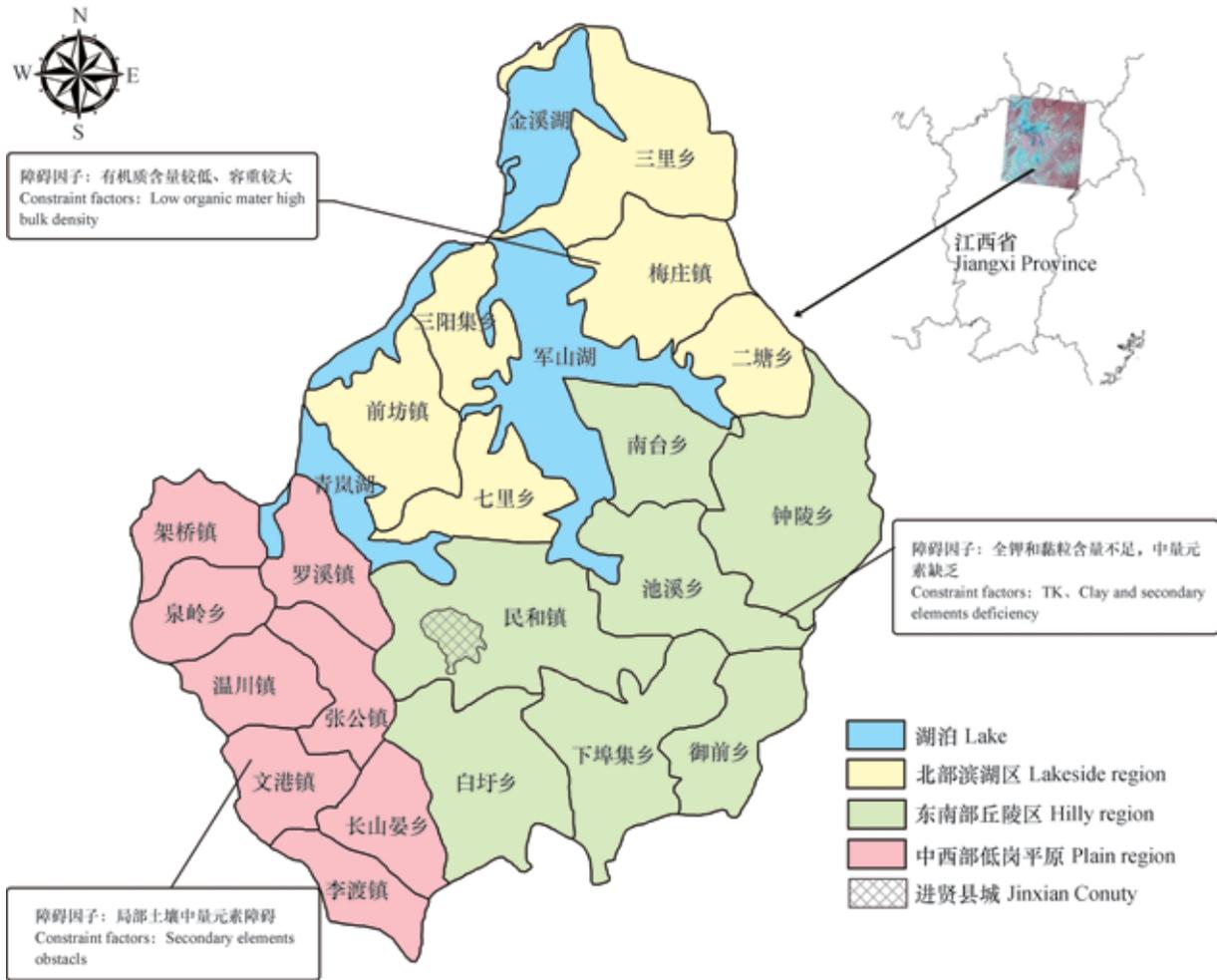


图5 进贤县土壤质量障碍分区

Fig. 5 Zoning of Jinxian County based on soil quality constraints

进行土壤质量指标归一化过程时，利用遥感估产数据获得了土壤质量指标隶属度函数的转折点，与目前常用的统一隶属度函数转折点相比，存在一定差异，但对比研究区的实际土壤性质基本状况和水稻产量状况，本文选取的隶属度函数转折点体现了当地的实际土壤生产力特征，更具有区域代表性和生物学意义。根据水稻产量与土壤质量综合指数响应关系确定SQI阈值为0.65，低于该值产量在低产区波动，高于该值产量在高产区波动。这也比较符合实际生产过程中作物产量不仅受土壤属性影响还受各种管理因素和降雨因素等影响。

以往的质量评价相关工作大多在获得质量指数后便戛然而止，虽然获得了土壤质量指数的分布状况，但研究结果基本难以应用于实际。本研究在获得了土壤质量评价综合指数的基础上对评价指标进一步降维，通过主成分分析得到因子得分情况的分

布。根据因子得分情况对研究区域的土壤障碍因素进行区划，得到较为科学的土壤肥力障碍因子区划图，对当地政府的区域土壤改良和利用决策有指导意义。

研究结果显示，进贤县水稻土主要存在的障碍因素包括有机质缺乏、土壤紧实、Ca和Mg等中量元素缺乏以及全钾和黏粒含量不足。根据进贤县土壤质量障碍分区图（图5）可知，进贤县北部滨湖低产区域主要障碍因素为有机质和容重，主要是由于土壤有机质含量较低导致的土壤物理性质较差影响土壤肥力；建议采取增加有机物料投入为主的调控策略，如推广机械深耕和秸秆还田结合的技术体系^[27-28]。西南部低产区域主要障碍因素是由于土壤酸化引起的一系列障碍因素，如阳离子流失，中量元素如钙、镁等缺乏；建议采取人为干预手段调控pH，如合理地施用生石灰和石灰石粉等改善土

壤pH状况^[29],并辅以合理的肥料施用方式,减少生理酸性肥料的施用,避免过量施肥^[30]。东南部地区低产区域则为土壤钾素障碍、黏粒含量不足以及中量元素障碍等;单一的针对性手段解决这些问题不仅需要较高的成本,且收效甚微,可采取综合性方法改善,如推广少(免)耕保护性耕作结合合理的绿肥轮作来综合改善土壤的肥力状况^[31-32],并需加强对钾肥施用技术体系的推广。

总体而言,采用结合作物产量数据进行土壤质量评价更适合区域性土壤肥力研究工作,得出的结果也更能体现地域特性,符合当地实际生产状况,为区域土壤质量评价提供了一个实用可借鉴的方法。

4 结 论

本研究选择江西进贤县稻田为研究对象,根据不同类型水稻田分布面积和特点,采集耕层和亚耕层土壤样品,测定土壤一系列理化性质指标,采用最小数据集法和土壤质量指数法,结合水稻遥感解译测产和实际测产方法,对进贤县稻田土壤质量进行了评价。选取的MDS指标包括:有机质、全钾、阳离子交换量、交换性钙、容重及粉黏比等6项指标。评价结果能够较好地揭示区域土壤肥力质量水平。在土壤肥力质量评价的基础上,进一步通过主成分分析揭示了该县主要的土壤肥力障碍因子,并在乡镇水平上对障碍区进行了区划。区划结果对政府决策和农业资源利用有指导意义。从研究结果来看,进贤县虽然平均产量较高,但仍有超过30%的水稻土存在不同程度的障碍。就全县整体而言,土壤质地和钾素水平是限制土壤肥力质量的重要因素。应当加强对土壤保护性耕作和可持续性耕作的宣传和扶持力度,合理利用与保护土壤资源。

参 考 文 献

- [1] Karlen D L, Ditzler C A, Andrews S S. Soil quality: Why and how? *Geoderma*, 2003, 114 (3/4): 145—156
- [2] 付国珍, 摆万奇. 耕地质量评价研究进展及发展趋势. *资源科学*, 2015, 37 (2): 226—236
Fu G Z, Bai W Q. Advances and prospects of evaluating cultivated land quality (In Chinese). *Resources Science*, 2015, 37 (2): 226—236
- [3] Xu X J, Lei G P, Zhang H, et al. Study on surface soil fertility quality evaluation of the Southern Songnen Plain in Heilongjiang Province. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17 (5): 268—272
- [4] Larson W E, Pierce F J. Conservation and enhancement of soil quality//Evaluation for sustainable land management in the developing world: Proceedings of the International Workshop on Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World, Chiang Rai, Thailand, 15—21 September, 1991
- [5] 刘占峰, 傅伯杰, 刘国华, 等. 土壤质量与土壤质量指标及其评价. *生态学报*, 2006, 26 (3): 901—913
Liu Z F, Fu B J, Liu G H, et al. Soil quality: Concept, indicators and its assessment (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (3): 901—913
- [6] 李静鹏, 徐明峰, 苏志尧, 等. 不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价. *生态学报*, 2014, 34 (9): 2298—2307
Li J P, Xu M F, Su Z Y, et al. Soil fertility quality assessment under different vegetation restoration patterns (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (9): 2298—2307
- [7] Oyonarte C, Aranda V, Durante P. Soil surface properties in Mediterranean mountain ecosystems: Effects of environmental factors and implications of management. *Forest Ecology and Management*, 2008, 254 (2): 156—165
- [8] 陈颖, 代斌, 高强伟, 等. 蜀南竹海毛竹林土壤化学肥力质量及其评价. *土壤*, 2015, 47 (6): 1054—1060
Chen Y, Dai B, Gao Q W, et al. Soil chemical fertility quality and its evaluation in a moso bamboo forest of Shunan Bamboo-sea, Southwest China (In Chinese). *Soils*, 2015, 47 (6): 1054—1060
- [9] 贡璐, 张雪妮, 冉启洋. 基于最小数据集的塔里木河上游绿洲土壤质量质量评价. *土壤学报*, 2015, 52 (3): 682—689
Gong L, Zhang X N, Ran Q Y. Quality assessment of oasis soil in the upper reaches of Tarimriver based on minimum data set (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (3): 682—689
- [10] 王建国, 杨林章, 单艳红. 模糊数学在土壤质量评价中的应用研究. *土壤学报*, 2001, 38 (2): 176—183
Wang J G, Yang L Z, Shan Y H. Application of fuzzy mathematics to soil quality evaluation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38 (2): 176—183
- [11] 房全孝. 土壤质量评价工具及其应用研究进展. *土壤通报*, 2013, 44 (2): 496—503
Fang Q X. Advances in agricultural soil quality assessment tolls and applications (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44 (2): 496—503

- [12] 进贤县人民政府. 进贤县土地利用总体规划 (2006—2020) .2012-7-25 [2016-6-10] . <http://ncjxx.jxggt.gov.cn/News.shtml?p5=25883762>.2012-06-28
Government of Jinxian County.Overall plan of land utilization in Jinxian County (2006—2020) (In Chinese) .2012-7-25 [2016-6-10] . <http://ncjxx.jxggt.gov.cn/News.shtml?p5=25883762>.2012-06-28
- [13] 进贤县农业区划委员会. 进贤县土壤. 江西进贤: 江西省进贤县印刷厂, 1985: 11—25
Agricultural Zoning Committee of Jinxian County. Soil of Jinxian County (In Chinese) . Jinxian, Jiangxi: Jinxian County Printers in Jiangxi Province, 1985: 11—25
- [14] 张东霞, 张继贤, 常帆, 等. 遥感技术在主要粮食作物估产中的应用. 测绘科学, 2014, 39 (11): 95—103
Zhang D X, Zhang J X, Chang F, et al. A review of application of remote sensing technology in main food crop yield estimation (In Chinese) . Science of Surveying and Mapping, 2014: 39 (11): 95—103
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 1999: 1—495
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese) . 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 1999: 1—495
- [16] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法. 北京: 科学出版社, 2012: 1—254
Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods (In Chinese) . Beijing: Science Press, 2012: 1—254
- [17] 徐磊, 林剑, 李艳华, 等. 基于BP人工神经网络的遥感影像分类. 地理空间信息, 2012, 10 (4): 83—88
Xu L, Lin J, Li Y H, et al. Classifying remote sensing image based on BP neural network technology (In Chinese) . Geospatial Information, 2012, 10 (4): 83—88
- [18] Rezaei S A, Gilkes R J, Andrews S S. A minimum data set for assessing soil quality in rangelands. Geoderma, 2006, 136 (1): 229—234
- [19] 杨丽霞, 陈少锋, 安娟娟, 等. 陕北丘陵区不同植被类型群落多样性与土壤有机质、全氮关系研究. 草地学报, 2014, 22 (2): 291—298
Yang L X, Chen S F, An J J, et al. Relationships among community diversity and soil organic matter, total nitrogen under different vegetation types in the gully region of loess region (In Chinese) . Acta Agrestia Sinica, 2014, 22 (2): 291—298
- [20] 钟赛香, 胡鹏, 薛熙明, 等. 基于合理权重赋值方法选择的多因素综合评价模型——以JCR中70种人文地理期刊为例. 地理学报, 2015, 70 (12): 2012—2031
Zhong S X, Hu P, Xue X M, et al. Multi-factor comprehensive evaluation model based on the selection of objective weight assignment method (In Chinese) . Acta Geographica Sinica, 2015, 70 (12): 2012—2031
- [21] 潘永敏, 郑俊, 沈兵, 等. 苏中地区县域农田土壤肥力综合评价——以江都市为例. 地质学刊, 2011, 35 (2): 170—176
Pan Y M, Zhen J, Shen B, et al. Integrated evaluation of soil fertility intra-county area in central Jiangsu-Taking Jiangdu City for example (In Chinese) . Journal of Geology, 2011, 35 (2): 170—176
- [22] 郑粉莉, 张峰, 王彬. 近100年植被破坏侵蚀环境下土壤质量退化过程的定量评价. 生态学报, 2010, 30 (22): 6044—6051
Zheng F L, Zhang F, Wang B. Quantifying soil quality degradation over 100 years after deforestation under erosional environments (In Chinese) . Acta Ecologica Sinica, 2010, 30 (22): 6044—6051
- [23] 曹志洪, 周健民. 中国土壤质量. 北京: 科学出版社, 2008: 504—621
Cao Z H, Zhou J M. Soil quality of China (In Chinese) . Beijing: Science Press, 2008: 504—621
- [24] 张贝尔, 黄标, 赵永存, 等. 华北平原典型区土壤肥力低下区识别及限制因子分析. 土壤学报, 2012, 49 (5): 841—849
Zhang B E, Huang B, Zhao Y C, et al. Identification of areas low in soil fertility and analysis of their limiting factors in the region typical of the North China Plain (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2012, 49 (5): 841—849
- [25] 卜容燕, 任涛, 鲁剑巍, 等. 水稻-油菜轮作条件下磷肥效应研究. 中国农业科学, 2014, 47 (6): 1227—1234
Bu R Y, Ren T, Lu J W, et al. Analysis of P fertilizer efficiency under rice-rapeseed rotation system (In Chinese) . Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47 (6): 1227—1234
- [26] 张桃林, 潘剑君, 刘绍贵, 等. 集约农业利用下红壤地区土壤肥力与环境质量变化及调控. 土壤学报, 2007, 44 (4): 584—591
Zhang T L, Pan J J, Liu S G, et al. Changes in soil fertility and environmental quality in red soil region under intensive agricultural use and their control (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2007, 44 (4): 584—591
- [27] 姜超强, 沈嘉, 王火焰, 等. 烟秆还田对水稻产量和养分吸收的影响及其替代钾肥的效果. 应用生态学报, 2016, 27 (12): 3969—3976
Jiang C Q, Shen J, Wang H Y, et al. Effect of tobacco straw incorporation on rice yield and nutrient absorption

- and its substitute for potassium fertilizer (In Chinese) . Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27 (12) : 3969—3976
- [28] 李继福, 鲁剑魏, 任涛, 等. 稻田不同供钾能力条件下秸秆还田替代钾肥效果. 中国农业科学, 2014, 47 (2) : 292—302
- Li J F, Lu J W, Ren T, et al. Effect of straw incorporation substitute for K-fertilizer under different paddy soil K supply capacities (In Chinese) . Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47 (2) : 292—302
- [29] 孙义祥, 袁媛媛, 邹刚. 不同土壤肥力水平下钙对水稻专用肥增产效应的影响. 中国农学通报, 2014, 30 (9) : 77—81
- Sun Y X, Yuan M M, Wu G. The impact of Calcium on yield increase of special fertilizer on rice under different soil fertility levels (In Chinese) . Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30 (9) : 77—81
- [30] 朱安繁, 邵华, 张龙华. 江西省耕地土壤酸化现状与改良措施. 江西农业学报, 2014, 26 (4) : 43—45, 49
- Zhu A F, Shao H, Zhang L H. Current situation and improvement measures of cultivated land soil acidification in Jiangxi Province (In Chinese) . Acta Agronomica Jiangxi, 2014, 26 (4) : 43—45, 49
- [31] 高菊生, 徐明岗, 董春华, 等. 长期稻-稻-绿肥轮作对水稻产量及土壤肥力的影响. 作物学报, 2013, 39 (2) : 343—349
- Gao J S, Xu M G, Dong C H, et al. Effects of long-term Rice-Rice-Green manure cropping rotation on rice yield and soil fertility (In Chinese) . Acta Agronomica Sinica, 2013, 39 (2) : 343—349
- [32] 黄国勤, 杨滨娟, 王淑彬, 等. 稻田实行保护性耕作对水稻产量、土壤理化及生物学性状的影响. 生态学报, 2015, 35 (4) : 1225—1234
- Huang G Q, Yang B J, Wang S B, et al. Effects of 8 years of conservational tillage on rice yield and soil physical, chemical and biological properties (In Chinese) . Acta Ecologica Sinica, 2015, 35 (4) : 1225—1234

Yield-Based Soil Fertility Quality Assessment and Constraint Factor-Based Zoning of Paddy Soil—A Case Study of Jinxian County

FAN Yanan^{1, 2} YAO Lipeng^{1, 3} QU Mingkai¹ HU Wenyong¹ HUANG Biao^{1†} ZHAO Yongcun¹

(1 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Nanjing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Nanjing 210019, China)

Abstract 【Objective】 Soil fertility quality assessment and constraint factors analysis of soil quality have vital theoretical and practical significances in regional soil improvement and utilization and guidance agricultural production. Paddy soil is an important component of the soil resources in China. Researchers have been using a set index system to evaluate soil fertility quality with results not so accurate. It is, therefore, essential to explore for a more accurate scientific method for the evaluation. 【Method】 Jinxian County of Jiangxi Province was cited as a case for the study. A total of 103 soil samples were collected from the topsoil (0 ~ 20 cm) and subsoil (20 ~ 40 cm) layers of the paddy fields in the region proportional to their respective areas and types and 51 rice sampling sites set aside as a dataset for verification of the yield prediction based on remote sensing interpretation. A fairly more comprehensive dataset of soil properties was determined in the lab. Correlation analysis and principal component analysis (PCA) of the dataset with predicted yields were performed to determine minimum data set (MDS) and weight and membership read function models of the evaluation index system. Soil fertility was characterized in level with the comprehensive index method and main constraint factors of fertility quality in areas low in soil fertility quality. 【Result】 To evaluate accuracy of remote sensing interpretation, a fitting equation was established between measured and estimated yields. In the light of the determination coefficient (R^2) and root of mean square error (RMSE) of the fitting equation,

the normalized difference vegetation index (NDVI) can reflect more accurately crop yield. According to the yield prediction based on remote sensing interpretation, yield of the rice crop in the region varied in the range from 2.085 to 11.430 t hm⁻², and averaged 7.215 t hm⁻². Through principal component analysis MDS indices, including organic matter, cation exchange capacity (CEC), total potassium (TK), exchangeable calcium (Ex. Ca), bulk density (BD) and clay/silt, were acquired. CEC and TK were common ones in both topsoil and subsoil and the others standard ones. The correlation between soil quality comprehensive index (SQI) and rice yield was analyzed and calculated to be 0.73 ($p < 0.01$) in coefficient, showing that SQI may be used to indicate fertility level of the soil accurately. Based on the average yield, 7.215 t hm⁻², of the region, threshold value of SQI for the region was determined to be 0.65. Areas with SQI value below the threshold value are subject to the risk of low yield. Further analysis of the indices via principal component analysis shows that the main constraint factors of soil fertility in the area are low organic matter content and heavy soil texture indicating low mellowness of the soil, deficiency of meso-nutrients indicating acidification, and low potassium content and high silt/clay ratio indicating poor soil physical structure. According to restraint-factor-based zoning, the county could be divided into three regions. In the hilly area, southeast of the county, soil acidification and poor soil structure are the main constraint factors; in the low mount and plain area, central and west of the county, soil acidification is; and in the lake area, north of the county, low soil mellowness is. Consequently, proper measures should be taken in correspondence to the areas facing different constraint factors so as to improve soil fertility of the paddy fields. **【Conclusion】** Yield-based soil fertility quality assessment is good for prediction of soil fertility accurately, and the models based on PCA, MDS, SQI and RS technologies can be used not only in paddy soil regions, but also in other types of region for evaluation of soil quality. Findings of the study show that over 30% of the paddy soil in the county are below the average level, but it is still not very clear what causes the low soil fertility. In order to reveal the reasons PCA will be performed to further reduce dimension of the evaluation indices, and zoning carried out on the town/township scale. Zoning on such a scale will sure be of great practical significance to the government in decision making and guiding agricultural production.

Key words Yield estimation based on remote sensing interpretation; Soil properties; Rice; Soil fertility quality evaluation; Soil constraint factors

(责任编辑：陈荣府)