

DOI: 10.11766/trxb201509070316

# 基于最小数据集的南方地区冷浸田土壤质量评价\*

邓绍欢<sup>1, 2</sup> 曾令涛<sup>1</sup> 关强<sup>1</sup> 李鹏<sup>1</sup> 刘满强<sup>1</sup> 李辉信<sup>1</sup> 焦加国<sup>1†</sup>

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

(2 江西省石城中学, 江西赣州 342700)

**摘要** 调查分析了我国南方地区7个省份冷浸田土壤理化性状和生物学性状, 筛选冷浸田土壤质量评价指标, 建立土壤质量评价最小数据集。结果表明: 冷浸田土壤有机质、全氮、C/N、有效磷与非冷浸田差异显著, 分别较非冷浸田高出26.1%、11.2%、12.3%, 低84.6%。冷浸田土壤含水量、有效铁、有效锰、有效锌、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、还原性物质总量含量分别较非冷浸田显著高出37.6%、91.5%、108.1%、17.0%、349.5%、143.1%、217.9%; 冷浸田土壤微生物生物量碳、酸性磷酸酶活性均显著低于非冷浸田, 而过氧化氢酶活性显著高于非冷浸田, 蔗糖酶活性与非冷浸田相比无显著差异。冷浸田土壤线虫数量为301.9条  $100 \text{ g干土}^{-1}$ , 显著低于非冷浸田; 采用配对样本t检验和主成分分析方法, 结果表明冷浸田土壤质量评价的最小数据集为pH、全氮、有效锰、 $\text{Fe}^{2+}$ 、C/N、线虫数量6个指标, 冷浸田土壤质量指数显著低于非冷浸田。研究结果对冷浸田土壤质量评价、土壤改良具有重要意义。

**关键词** 冷浸田; 土壤质量; 评价指标; 最小数据集; 土壤线虫

**中图分类号** S114 **文献标识码** A

冷浸田是一类强潜育性的低产水稻田, 冷浸田主要分布于我国南方丘陵地区。冷浸田具有物理性质差、有机质积累多、土壤温度低、还原性强等特点<sup>[1-2]</sup>。第二次全国土地调查显示我国当前低产田比例达到27.9%<sup>[3]</sup>, 而冷浸田占低产田比例大, 因此开展冷浸田土壤质量研究, 可为其土壤质量评价及其土壤改良提供科学依据, 对发挥其生产潜力具有现实意义。

土壤最小数据集指标的建立是土壤质量评价的基础和重要环节<sup>[4]</sup>。最小数据集建构有不同方法, 常用主成分分析、相关性分析, 也有不少学者利用Norm值提取指标<sup>[5-6]</sup>; 在土壤质量指标方面, 越来越多的生物学指标应用于土壤质量评价中, 主要为微生物指标<sup>[7]</sup>, 此外土壤蚯蚓和线虫也作为评价指标应用于土壤质量评价研究<sup>[8-9]</sup>。本文在前人对冷浸田的最小数据集研究基础上<sup>[10]</sup>,

以南方地区7省份冷浸田为研究对象, 基于土壤理化指标、生物学指标, 通过主成分分析、相关性分析筛选土壤质量评价指标, 建立低冷浸田土壤质量评价指标体系, 并通过土壤质量指数法验证最小数据集指标的有效性。研究结果可为我国南方地区的冷浸田增产提供一定的科学依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于我国冷浸田主要分布的南方丘陵地区, 具体为湖北、安徽、江西、湖南、福建、浙江、广东等7个省份。该区域地理位置大致范围为 $109^{\circ} \sim 121^{\circ}\text{E}$ ,  $24^{\circ} \sim 31^{\circ}\text{N}$ , 气候属于亚热带季风区, 降雨量丰沛, 全区年降水量1 100 ~ 2 000 mm, 无霜期220 ~ 330 d, 年均温 $15 \sim 24^{\circ}\text{C}$ , 土壤类型为

\* 国家自然科学基金项目(41301269)和公益性行业(农业)科研专项(201003059)资助 Supported by the National Natural Science Foundation (No. 41301269) and Commonweal Project of the Ministry of Agriculture of China (No. 201003059)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: jiaguojiao@njau.edu.cn

作者简介: 邓绍欢(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤生态学研究。E-mail: dengshaohuan@163.com

收稿日期: 2015-09-07; 收到修改稿日期: 2016-03-29; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-05-06

水稻土（见表1）。

## 1.2 样品采集与分析

试验于2011—2014年期间，分别采集7个省份27个县区的冷浸田的土壤样品，采集深度为0~20 cm，采用“S”形多点混合采样，采样工具为冷浸田专用取土器，每个土壤样品约1 kg，由于土壤样品水

分较多，样品装入密封的塑料盒中带回实验室。冷浸田和非冷浸田土壤样品均采集36份（表1）。采集的土壤样品，一部分保存于4℃冰箱用于土壤微生物和线虫指标的测定，另一部分自然风干、过筛，用于土壤理化指标的测定。

共测定土壤理化性状指标18项，指标测定采

表1 冷浸田土壤样品基本情况

Table 1 Information of soil samples in waterlogged paddy

省份 Province	采样地点 Sampling location	经纬度 Latitude and longitude	样品数 Sample number		采样时间 Sampling time (yyyy-mm)	年均气温 Annual temperature (℃)	年均降雨 Annual rainfall (ml)
			冷浸田 Waterlogged paddy	非冷浸田 Non- waterlogged paddy			
湖北 Hubei	黄石、黄冈、咸宁	114.64°~115.20°E, 29.94°~30.56°N	6	6	2012-04	15~19	1 350~1 600
安徽 Anhui	池州、宣城、黄山	117.60°~118.67°E, 29.79°~30.86°N	2	2	2012-04	15~17	1 300~1 550
江西 Jiangxi	吉安、宜春、景德镇、萍乡	114.35°~117.32°E, 26.85°~29.35°N	15	15	2012-11	16~20	1 350~1 950
湖南 Hunan	长沙、湘西州	109.77°~113.32°E, 27.96°~28.45°N	3	3	2012-12	15~18	1 300~1 600
福建 Fujian	三明、南平、福州、龙岩	116.69°~119.07°E, 25.12°~28.03°N	5	5	2011-11	17~21	1 400~2 000
浙江 Zhejiang	义乌、丽水	119.59°~120.04°E, 27.82°~29.12°N	2	2	2011-05	15~19	1 100~1 600
广东 Guangdong	韶关、河源	111.99°~114.50°E, 24.28°~24.66°N	3	3	2012-02	19~24	1 400~2 000

用方法如下<sup>[11]</sup>：土壤含水量（SM）采用烘干法，pH采用电位法，有机质（SOM）采用重铬酸钾容量—外加热法，碱解氮（AN）采用碱解扩散法，有效磷（AP）采用氟化铵盐酸浸提—钼锑抗比色法，速效钾（AK）采用醋酸铵浸提—火焰光度法，全氮（TN）采用半微量凯氏法，全磷（TP）采用高氯酸—硫酸酸溶—钼锑抗比色法，全钾（TK）采用氢氧化钠熔融—火焰光度法；有效铁（AF<sub>e</sub>）、锰（AM<sub>n</sub>）、锌（AZ<sub>n</sub>）、铜（AC<sub>u</sub>）采用盐酸浸提—ICP—AES法；还原性物质总量（Total reducing agents, TRA）采用高锰酸钾滴定法，Fe<sup>2+</sup>采用邻菲罗啉比色法，Mn<sup>2+</sup>采用高碘酸钾比色法。共测定计算土壤生物学指标6项<sup>[12-13]</sup>：

微生物生物量碳（MBC）、微生物生物量氮（MBN）采用氯仿熏蒸浸提法，过氧化氢酶活性（CAT）采用KMnO<sub>4</sub>滴定法测定，蔗糖酶活性（ITA）采用3,5-二硝基水杨酸显色法测定，酸性磷酸酶活性（ACP）采用磷酸苯二钠比色法测定，土壤线虫（Nematode individual, NI）分离采用蔗糖离心法。

## 1.3 最小数据集的筛选

利用配对样本t检验分析冷浸田与非冷浸田之间的差异情况，剔除不重要指标，选择冷浸田特征指标体系，得到差异指标体系。针对上一步得到的差异性指标进行主成分分析（PCA）。选择特征值大于1的主成分，选取高因子载荷指标，高因子载

荷指标即因子载荷绝对值达到该主成分中最大因子载荷的90%的指标。当一个主成分高因子载荷指标只有一个时,则该指标进入最小数据集。当一个主成分高因子载荷指标不止一个时,对其分别做相关性分析,若相关系数低( $r < 0.7$ )时,各高因子载荷指标均被选入最小数据集;若相关性高( $r > 0.7$ ),相关系数之和最大的高因子载荷指标被选入最小数据集<sup>[14-15]</sup>,考虑到本研究尺度大,选择相关系数大于0.4为高相关性。

#### 1.4 土壤质量指数的建立

由于不同指标具有不同的单位,需要对其进行标准化,将不同单位的指标转换成0~1的无量纲值。由于评价指标对作物的作用方式不同,评价指标得分函数类型参见徐建明<sup>[16]</sup>。本研究采取S型和抛物线型二类函数。各数据集指标权重值均由主成分分析获取。对全量数据集指标做主成分分析,获得各个指标的公因子方差,各指标公因子方差占公因子方差和的比例即为全量数据集指标的权重值<sup>[15, 17]</sup>。对差异性指标(重要数据集)做主成分分析,各指标公因子方差所占比例为重要数据集指标的权重值,最小数据集指标的权重值通过各指标所在主成分的贡献率所占比例获得<sup>[18]</sup>。采用加权求和模型计算评价单元的土壤质量指数(SQI),得到全体数据集的土壤质量指数(SQI-TDS)和最小数据集的土壤质量指数(SQI-MDS)。

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i \times S_i \quad (1)$$

式中, SQI为土壤质量指数(soil quality index),  $W_i$ 为第*i*项土壤指标的权重,  $S_i$ 为第*i*项土壤指标的标准得分,  $n$ 为所有参评指标/最小数据集指标。

#### 1.5 数据处理

数据统计采用Microsoft Excel 2007和SPSS18.0进行分析,应用SPSS18.0软件对数据进行配对样本t检验、主成分分析和双变量相关性分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 冷浸田土壤理化性状

与非冷浸田相比,冷浸田土壤理化性状指标电导率、速效钾、碱解氮、有效铜、全钾、全磷差异不显著,达到显著差异的指标共有12项,其中有机质( $44.04 \pm 1.52 \text{ g kg}^{-1}$ )、全氮( $2.27 \pm 0.08 \text{ g kg}^{-1}$ )和C/N( $11.34 \pm 0.26$ )均显

著高于非冷浸田( $34.93 \pm 1.12 \text{ g kg}^{-1}$ 、 $2.03 \pm 0.06 \text{ g kg}^{-1}$ 、 $10.10 \pm 0.26$ ),分别较非冷浸田高出26.1%、11.2%、12.3%,这与前人研究结果相一致<sup>[2, 19-20]</sup>。造成这种现象的原因主要是冷浸田土壤水分含量过多,加之温度低,使得土壤处于嫌气厌氧环境,微生物代谢缓慢,致使有机质分解速率下降,有机质易于积累<sup>[21]</sup>。冷浸田土壤有效磷( $5.39 \pm 0.92 \text{ g kg}^{-1}$ )显著低于非冷浸田( $34.89 \pm 10.36 \text{ g kg}^{-1}$ ),较非冷浸田低84.6%。大量研究均表明冷浸田土壤严重缺乏有效磷<sup>[2, 20]</sup>,不能满足水稻生长的正常需求。水稻土中磷的形态主要包括Ca-P、Al-P、Fe-P和O-P,冷浸田土壤磷素较低的主要原因是Ca-P、Al-P和Fe-P缺失,尤其是Fe-P,可能由于其土壤环境增大了磷随水的迁移性<sup>[18]</sup>。

冷浸田土壤水分含量达到45.13%,较非冷浸田(32.81%)高37.6%,表明冷浸田严重渍水,土壤水分含量远超出了影响水稻生长的临界值,是冷浸田低产的重要障碍因子;冷浸田土壤pH( $5.54 \pm 0.12$ )普遍略高于非冷浸田( $5.31 \pm 0.11$ );冷浸田土壤有效铁( $904.47 \pm 88.45 \text{ mg kg}^{-1}$ )、有效锰( $117.11 \pm 18.65 \text{ mg kg}^{-1}$ )、 $\text{Fe}^{2+}$ ( $956.10 \pm 231.93 \text{ mg kg}^{-1}$ )、 $\text{Mn}^{2+}$ ( $61.36 \pm 9.73 \text{ mg kg}^{-1}$ )、还原性物质总量( $2.48 \pm 0.39 \text{ cmol kg}^{-1}$ )均显著高于非冷浸田,分别高91.5%、108.1%、349.5%、143.1%、217.9%,前人研究均表明冷浸田土壤还原性物质大量积累<sup>[21]</sup>,本研究证实了冷浸田土壤还原性物质含量远高于非冷浸田,各种还原性物质含量是非冷浸田的2倍~5倍,主要是由于冷浸田长期处于渍水状态,土壤通气性差,厌氧条件下产生的还原性物质多,使得土壤处于还原状态,其氧化还原电位低<sup>[22]</sup>。

### 2.2 冷浸田土壤生物学性状

冷浸田土壤微生物生物量碳( $228.24 \pm 69.37 \text{ mg kg}^{-1}$ )显著低于非冷浸田( $406.21 \pm 44.15 \text{ mg kg}^{-1}$ ),这是由于冷浸田土壤微生物活性偏低造成的。冷浸田土壤酸性磷酸酶活性( $95.31 \pm 11.62 \text{ mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ )显著低于非冷浸田( $127.35 \pm 10.67 \text{ mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ),而蔗糖酶活性( $4.39 \pm 0.42 \text{ mg g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ )无显著差异。冷浸田土壤酸性磷酸酶活性较非冷浸田低25.2%,可能是由于冷浸田土壤磷素含量低造成的<sup>[10]</sup>;冷浸田土壤过氧化氢酶活性( $1.80 \pm 0.07 \text{ mg g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ )较非冷浸田高21.1%,有

研究表明土壤过氧化氢酶活性同土壤有机质含量和土壤全氮含量呈显著正相关<sup>[23]</sup>。冷浸田土壤线虫数量为301.9条 100 g干土<sup>-1</sup>，较非冷浸田土壤线虫数量（584.3条 100 g干土<sup>-1</sup>）低48.3%，这可能与土壤低温的环境有关<sup>[24]</sup>。

### 2.3 冷浸田土壤质量评价指标体系

冷浸田与非冷浸田存在显著差异的指标有土壤水分（SM）、pH、有机质（SOM）、全氮、C/N、有效磷（AP）、有效铁（AFe）、有效锰（AMn）、有效锌（AZn）、Fe<sup>2+</sup>、Mn<sup>2+</sup>、还原性物质总量（TRA）、微生物生物量碳（MBC）、酸性磷酸酶活性（ACP）、过氧化氢酶活性（CAT）、线虫数量（NI），共16项指标。为了减少评价指标数量，筛选土壤质量评价指标中的关键指标，针对上述16项差异性指标进行主成分分析，选择特征值大于1的组分。由表2可知，特征值大于

1的6个主成分，解释方差变异累积达到79.89%，表明可以提取主成分解释绝大多数变异。表2和表3表明，在PC1中高因子载荷有有效铁、Fe<sup>2+</sup> 2个指标，由于Fe<sup>2+</sup>因子载荷最大，且有效铁与Fe<sup>2+</sup>的相关系数大于0.4，达到极显著水平，因此PC1中Fe<sup>2+</sup>选入最小数据集；在PC2中，高因子载荷有有效锰、Mn<sup>2+</sup>和磷酸酶3个指标，有效锰与磷酸酶、Mn<sup>2+</sup>的相关系数均大于0.4，达到极显著水平，且有效锰与其他两个指标的相关系数之和最大，因此有效锰入选最小数据集；PC3中高因子载荷有有机质和全氮2个指标，它们之间的相关系数大于0.4，达到极显著水平，因此全氮选入最小数据集；PC4、PC5和PC6均只有一个高因子载荷指标，因此pH、C/N、线虫数量选入最小数据集。因此冷浸田土壤质量评价的最小数据集有pH、全氮、有效锰、Fe<sup>2+</sup>、C/N、线虫数量6个指标。

表2 显著差异性指标主成分分析结果

Table 2 Results of principal components analysis of significant soil quality indicators

指标 Indicators	主成分Principal component					
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
特征值 Eigenvalue	4.39	2.37	2.11	1.61	1.30	1.00
贡献率 Contribution rate (%)	27.42	14.82	13.20	10.08	8.13	6.24
累积贡献率 Cumulative contribution rate (%)	27.42	42.24	55.44	65.52	73.65	79.89
指标 Indicators	主成分Principal component					
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
土壤水分SM	0.185	0.256	0.725	0.164	0.203	-0.257
酸碱度pH	0.038	-0.123	0.063	-0.067	0.891	-0.144
土壤有机质SOM	0.062	-0.057	0.865	0.389	0.059	0.067
全氮TN	0.041	-0.052	0.909	-0.305	-0.014	-0.051
有效磷AP	-0.219	-0.348	-0.066	-0.720	0.200	0.272
有效铁AFe	0.871	0.145	-0.088	0.203	-0.068	0.235
亚铁离子Fe <sup>2+</sup>	0.970	0.023	0.075	0.050	0.028	0.079
还原性物质总量TRA	0.844	0.219	0.257	0.022	0.083	-0.050
有效锰AMn	0.333	0.814	0.083	0.083	-0.067	0.198
二价锰离子Mn <sup>2+</sup>	0.182	0.827	0.225	0.066	0.082	0.122
酸性磷酸酶活性ACP	-0.012	-0.741	0.076	0.113	0.186	0.220
有效锌AZn	0.517	0.197	0.096	-0.394	0.234	0.455
过氧化氢酶活性CAT	0.077	0.277	0.338	0.252	0.523	0.345
微生物生物量碳MBC	0.043	-0.607	0.191	-0.342	-0.330	0.052
碳氮比C/N	0.056	-0.037	0.098	0.860	0.133	0.196
线虫数量NI	-0.183	0.026	0.158	-0.053	0.115	-0.824

表3 高因子载荷指标相关性

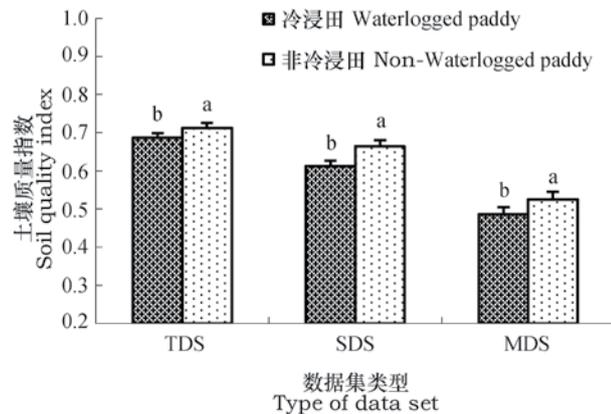
**Table 3** Correlation coefficients for highly weighted variables under principal components with multiple high factor loadings

指标 Indicators	PC1			指标 Indicators	PC2			指标 Indicators	PC3	
	AFe	Fe <sup>2+</sup>	TRA		AMn	Mn <sup>2+</sup>	ACP		SOM	TN
AFe	1			AMn	1			SOM	1	
Fe <sup>2+</sup>	0.858**	1		Mn <sup>2+</sup>	0.868**	1		TN	0.772**	1
TRA	0.672**	0.802**	1	ACP	-0.416**	-0.393*	1			

\*  $p < 0.05$  ; \*\*  $p < 0.01$

2.4 土壤质量指数

分别对全部数据集指标以及最小数据集指标做主成分分析, 获得各个指标的公因子方差, 利用指标公因子方差所占比例得到各个指标的权重值, 结果表明最小数据集指标pH、全氮、有效锰、Fe<sup>2+</sup>、C/N、线虫数量的权重值分别为0.102、0.165、0.185、0.343、0.127、0.078。参照上述指标得分函数, 将各指标标准化。经过统计得到各评价指标的权重值以及标准化的指标得分, 采取土壤质量指数函数计算各个土壤质量评价数据集的土壤质量指数, 得到全量数据集土壤质量指数、重要数据集土壤质量指数和最小数据集土壤质量指数(图1)。由图1可知, 冷浸田土壤质量指数显著低于非冷浸田, 并且冷浸田与非冷浸田土壤质量指数均表现为: 全量数据集下的土壤质量指数(0.69, 0.71) > 重要数据集下的土壤质量指数(0.61, 0.66) > 最小数据集下的土壤质量指数(0.49, 0.52), 这与Liu等<sup>[25]</sup>结果一致。



注: TDS, 全体数据集; SDS, 重要数据集; MDS, 最小数据集。下同  
Note: TDS, total data set; SDS, significant data set; MDS, minimum data set. The same below

图1 不同数据集冷浸田与非冷浸田土壤质量指数

Fig. 1 Mean values of soil quality index for waterlogged paddy and non-waterlogged paddy

得到差异性指标和最小数据集指标后, 利用最小数据集的土壤质量指数(SQI-MDS)和全体数据集的土壤质量指数(SQI-TDS)两者的回归分析对最小数据集指标进行验证(图2)。图2表明, 最小数据集得到的土壤质量指数、重要数据集得到的土壤质量指数与全量数据集得到的土壤质量指数均呈极显著正相关关系, 这说明最小数据集能够较好代替全量数据集指标, 与前人的研究结果相一致<sup>[26]</sup>。此外不少学者通过土壤生产力与最小数据集指标的相关性验证其科学性<sup>[18]</sup>。

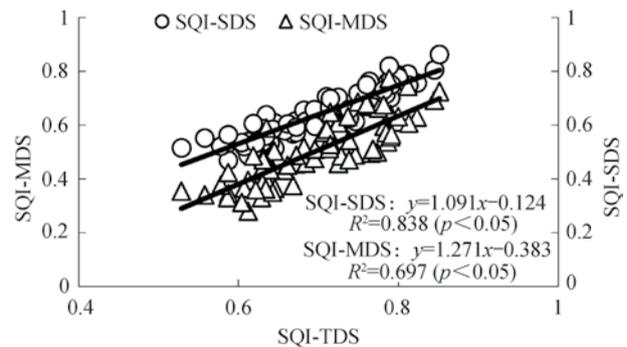


图2 最小数据集土壤质量指数、重要数据集土壤质量指数与全体数据集土壤质量指数的相关性

Fig. 2 Linear relationship of soil quality comparing MDS and SDS indicator methods with the TDS indicator method

3 结论

本研究通过对南方7省冷浸田与非冷浸田土壤性状调查, 表明冷浸田土壤还原性强于非冷浸田, 生物活性普遍低于非冷浸田。基于冷浸田与非冷浸田土壤 16 项差异显著指标的相关统计分析, 筛选出pH、全氮、有效锰、Fe<sup>2+</sup>、C/N、线虫数量6个指标为冷浸田土壤质量评价的最小数据集指标。评价结果表明, 冷浸田土壤质量低于非冷浸田。

## 参考文献

- [ 1 ] 李清华, 王飞, 何春梅, 等. 福建省冷浸田形成、障碍特性及治理利用技术研究进展. 福建农业学报, 2011, 26 ( 4 ) : 681—685  
Li Q H, Wang F, He C M, et al. Formation and difficulties and utilization of cold water paddy fields in Fujian Province ( In Chinese ). Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2011, 26 ( 4 ) : 681—685
- [ 2 ] 柴娟娟, 廖敏, 徐培智, 等. 我国主要低产水稻冷浸田养分障碍因子特征分析. 水土保持学报, 2012, 26 ( 2 ) : 284—288  
Chai J J, Liao M, Xu P Z, et al. Feature analysis on nutrient's restrictive factors of major low productive waterlogged paddy soil in China ( In Chinese ). Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26 ( 2 ) : 284—288
- [ 3 ] 张琳, 张凤荣, 姜广辉, 等. 我国中低产田改造的粮食增产潜力与粮食安全保障. 农业现代化研究, 2005, 26 ( 1 ) : 22—25  
Zhang L, Zhang F R, Jiang G H, et al. Potential improvement of medium-low yield farmland and guarantee of food safety in China ( In Chinese ). Research of Agricultural Modernization, 2005, 26 ( 1 ) : 22—25
- [ 4 ] Askari M S, Holden N M. Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management. Geoderma, 2014, 230: 131—142
- [ 5 ] 贡璐, 张雪妮, 冉启洋, 等. 基于最小数据集的塔里木河上游绿洲土壤质量评价. 土壤学报, 2015, 52 ( 3 ) : 682—689  
Gong L, Zhang X N, Ran Q Y, et al. Quality assessment of oasis soil in the upper reaches of Tarim River based on minimum data set ( In Chinese ). Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 ( 3 ) : 682—689
- [ 6 ] 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. 土壤学报, 2008, 45 ( 1 ) : 16—25  
Li G L, Chen J, Tan M Z, et al. Establishment of a minimum dataset for soil quality assessment based on land use change ( In Chinese ). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45 ( 1 ) : 16—25
- [ 7 ] 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. 生态学报, 2011, 31 ( 14 ) : 4136—4143  
Gong L, Zhang H F, Lü G H, et al. Soil quality assessment of continuous cropping cotton fields for different years in a typical oasis in the upper reaches of the Tarim River ( In Chinese ). Acta Ecologica Sinica, 2011, 31 ( 14 ) : 4136—4143
- [ 8 ] Bartz M L C, Pasini A, Brown G G. Earthworms as soil quality indicators in Brazilian no-tillage systems. Apply Soil Ecology, 2013, 69: 39—48
- [ 9 ] D'Hose T, Cougnon M, Vlieghe A D, et al. The positive relationship between soil quality and crop production: A case study on the effect of farm compost application. Apply Soil Ecology, 2014, 75: 189—198
- [ 10 ] 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. 应用生态学报, 2015, 26 ( 5 ) : 1461—1468  
Wang F, Li Q H, Lin C, et al. Establishing a minimum data set of soil quality assessment for cold-waterlogged paddy field in Fujian Province, China ( In Chinese ). Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26 ( 5 ) : 1461—1468
- [ 11 ] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 12—290  
Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry ( In Chinese ). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 12—290
- [ 12 ] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986: 206—239  
Guan S Y. Research methods of soil enzyme ( In Chinese ). Beijing: China Agriculture Press, 1986: 206—239
- [ 13 ] 毛小芳, 李辉信, 陈小云, 等. 土壤线虫三种分离方法效率比较. 生态学杂志, 2004, 23 ( 3 ) : 149—151  
Mao X F, Li H X, Chen X Y, et al. Extraction efficiency of soil nematodes by different methods ( In Chinese ). Chinese Journal of Ecology, 2004, 23 ( 3 ) : 149—151
- [ 14 ] Andrews S S, Karlen D L, Mitchell J P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2002, 90 ( 1 ) : 25—45
- [ 15 ] Li P, Zhang T L, Wang X X, et al. Development of biological soil quality indicator system for subtropical China. Soil Tillage Research, 2013, 126: 112—118
- [ 16 ] 徐建明, 张甘霖, 谢正苗, 等. 土壤质量指标与评价. 北京: 科学出版社, 2010  
Xu J M, Zhang G L, Xie Z M, et al. Indices and assessment of soil quality ( In Chinese ). Beijing: Science Press, 2010
- [ 17 ] Shukla M K, Lai R, Ebinger M. Determining soil quality indicators by factor analysis. Soil and Tillage Research, 2006, 87: 194—204
- [ 18 ] Zhang C, Xue S, Liu G B, et al. A comparison of soil qualities of different revegetation types in the Loess

- Plateau, China. *Plant and Soil*, 2011, 347 ( 1/2 ) : 163—178
- [ 19 ] 刘占军. 我国南方低产水稻土养分特征与质量评价. 北京: 中国农业大学, 2014  
Liu Z J. Nutrient characteristics and quality assessment of low-yield paddy soils in South China ( In Chinese ) . Beijing: China Agricultural University, 2014
- [ 20 ] 龚子同, 张效朴, 韦启潘. 我国潜育性水稻土的形成、特性及增产潜力. *中国农业科学*, 1990, 23 ( 1 ) : 45—53  
Gong Z T, Zhang X P, Wei Q P. The fashion of gleyic paddy soil and their potential of yield increasing ( In Chinese ) . *Scientia Agricultura Sinica*, 1990, 23 ( 1 ) : 45—53
- [ 21 ] 丁昌璞. 中国自然土壤、旱作土壤、水稻土的氧化还原状况和特点. *土壤学报*, 2008, 45 ( 1 ) : 66—75  
Ding C P. Oxidation-reduction regimes and characteristics of natural soil, upland soil and paddy soil in China ( In Chinese ) . *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 ( 1 ) : 66—75
- [ 22 ] 徐祥玉, 张志毅, 王娟, 等. 起垄和施肥对冷浸田土壤氧化还原状况的影响. *中国生态农业学报*, 2013, 21 ( 6 ) : 666—673  
Xu X Y, Zhang Z Y, Wang J, et al. Effect of ridging and fertilization on soil redox in cold waterlogged paddy fields ( In Chinese ) . *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21 ( 6 ) : 666—673
- [ 23 ] 万忠梅, 宋长春. 三江平原不同类型湿地土壤酶活性及其与营养环境的关系. *水土保持学报*, 2008, 22 ( 5 ) : 158—160  
Wan Z M, Song C C. Soil enzyme activity and its relationship with the soil nutrient environment of different types wetland in Sanjiang Plain ( In Chinese ) . *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22 ( 5 ) : 158—160
- [ 24 ] 邓绍欢, 叶成龙, 刘婷, 等. 南方地区冷浸田土壤线虫的分布特征. *土壤*, 2015, 47 ( 3 ) : 564—571  
Deng S H, Ye C L, Liu T, et al. Distribution of soil nematodes in cold waterlogged paddy soil of southern region ( In Chinese ) . *Soils*, 2015, 47 ( 3 ) : 564—571
- [ 25 ] Liu Z J, Zhou W, Shen J B, et al. Soil quality assessment of Albic soils with different productivities for eastern China. *Soil and Tillage Research*, 2014, 140: 74—81
- [ 26 ] Qi Y, Darilek J L, Huang B, et al. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, 2009, 149 ( 3 ) : 325—334

## Minimum Dataset-based Soil Quality Assessment of Waterlogged Paddy Field in South China

DENG Shaohuan<sup>1, 2</sup> ZENG Lingtao<sup>1</sup> GUAN Qiang<sup>1</sup> LI Peng<sup>1</sup> LIU Manqiang<sup>1</sup> LI Huixin<sup>1</sup> JIAO Jianguo<sup>1†</sup>  
( 1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China )  
( 2 Shicheng Middle School of Jiangxi Province, Ganzhou, Jiangxi 342700, China )

**Abstract** Investigations and analyses were done of the data of soil physical-chemical and biological properties of waterlogged paddy fields in seven provinces of South China in an attempt to screen out indices for soil quality assessment of waterlogged paddy fields and build up a minimum dataset for the assessment. Results show as follows. Waterlogged paddy fields differed sharply from non-waterlogged paddy fields and were 26.1%, 11.2% and 12.3% higher respectively in content of soil organic matter, total nitrogen and C/N, and 84.6% lower in available P. The two types of paddy fields did not varied much in content of soil total phosphorus, available nitrogen and available potassium. Besides, the former was 37.6%, 91.5%, 108.1%, 17.0%, 349.5%, 143.1% and 217.9%, respectively, higher than the latter in content of soil moisture, available iron, available manganese, available zinc, Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, total reducing substance and significantly or 43.8% and 25.2%, respectively, lower in soil microbial biomass carbon and phosphatase activity. However, the former was significantly or 21.2% higher than the latter in soil catalase activity, but did not differ much from the latter in invertase activity. Other than those, the former had a nematode population density of 301.9 ± 78.5 individuals 100g dry soil<sup>-1</sup>, which was significantly lower than that in the latter. By

means of paired sample T test and principal components analysis, it was found that the minimum data set (MDS) for soil quality assessment of waterlogged paddy fields should encompass the following six indices, that is, pH, total nitrogen, available manganese,  $\text{Fe}^{2+}$ , CN ratio and nematode population, which are significantly lower than their corresponding ones for the non-waterlogged paddy fields. All the findings in this study may be of some important significance to soil quality assessment, soil amelioration of cold waterlogged paddy fields.

**Key words** Waterlogged paddy; Soil quality; Assessment index; Minimum data set; Soil nematode

(责任编辑：檀满枝)