

稻田土壤肥力评价方法及指标研究进展

黄晶^{1,2}, 蒋先军³, 曾跃辉⁴, 陈金⁵, 柴如山⁶, 柳开楼^{1,7}, 张会民^{1,2*}

- (1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081;
2. 中国农业科学院衡阳红壤实验站/祁阳农田生态系统国家野外试验站, 湖南 祁阳 426182;
3. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 4. 湖南省土壤肥料研究所, 湖南 长沙 410125;
5. 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所/农业部长江中下游作物生理生态与耕作重点实验室/
国家红壤改良工程技术研究中心, 江西 南昌 330200; 6. 安徽农业大学资源与环境学院,
安徽 合肥 230036; 7. 江西省红壤研究所, 国家红壤改良工程技术研究中心/
农业部江西耕地保育科学观测实验站, 江西 南昌 330046)

摘要: 水稻土作为典型的水耕人为土, 其土壤肥力是水稻优质高产的重要基础, 肥力评价是稻田培肥和管理的重要内容之一。然而, 稻田肥力评价指标和方法的选择存在较大不确定性。通过分析不同土壤肥力评价方法特点, 土壤肥力指标的影响因素和变化特征, 对我国水稻土肥力评价的现状进行了总结。在选择评价方法时应最大程度地减少人为的主观性, 同时, 如何将作物产量纳入土壤肥力综合评价值值得进一步探讨。在对稻田土壤肥力进行综合评价时, 土壤容重、总孔隙度、土壤团聚体和黏粒含量可作为土壤物理肥力指标的主要因子; 土壤化学肥力指标随着施肥、耕作模式和稻作区域的差异应各有侧重; 众多的土壤生物学指标中, 微生物量碳氮、酶活性和微生物群落结构等需重点关注。下一步应制定一套针对不同稻作区典型施肥和耕作模式下比较完整和有代表性的评价指标体系, 以及客观又简单实用的评价方法, 为以水稻高产优质为目标的土壤培肥技术提供参考。

关键词: 水稻土; 土壤肥力; 评价方法; 评价指标

中图分类号: S158 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6257 (2017) 06-0001-08

土壤肥力包括土壤的生物学、物理学和化学性状, 这些性状直接或间接影响植物的养分有效性, 影响农业生产的结构、布局和效益等。用合理的方法评价土壤肥力, 有助于政府管理者或农民做出准确的决策, 以优化耕地资源, 最大限度地提高土壤生产力^[1]。

水稻是三大粮食作物之一。2013 年世界水稻播种面积约 16 472 万 hm^2 , 总产量约 74 571 万 t, 其中亚洲是世界水稻生产最集中的地区, 其播种面积、产量分别占世界总播种面积、总产量的 88.9%

和 90.5%^[2]。因此, 水稻对于全球的粮食安全起着至关重要的作用。

稻田土壤肥力是水稻生产可持续发展的基础资源, 亦是影响水稻产量的重要因素。因此, 有关稻田土壤肥力评价的研究一直是人们关注的重点。而土壤肥力的发展与演变又是一个长期复杂的过程, 因此如何选择合理的评价方法和指标对稻田土壤肥力进行科学的评价, 为稻田可持续生产和管理提供理论指导就显得尤为重要。本文阐述了国内外有关稻田土壤肥力评价方法和指标的研究进展, 以期为我国不同稻作区域选择合理的土壤肥力的评价方法和指标提供参考。

1 土壤肥力评价方法

土壤单一养分或肥力指标的变化能从一定角度反映土壤肥力的变化特征, 但往往难以全面表征土壤肥力, 国内外学者提出了多种评价方法, 已由原来的定性描述阶段发展到现在的定量评价阶段。主要有专家打分法^[3]、综合土壤质量指数^[4]、Fuzzy

收稿日期: 2017-01-25; 最后修订日期: 2017-05-22

基金项目: 国家重点研发计划“粮食丰产增效科技创新”重点专项 (2016YFD0300901); 十二五粮食丰产科技工程 (2011BAD16B15); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2011CB100501); 中国农业科学院基本科研业务费专项 (1610132016064)。

作者简介: 黄晶 (1983-), 男, 湖南汨罗人, 助理研究员, 博士, 主要从事土壤肥力演变与作物施肥研究。E-mail: huangjing@caas.cn。

通讯作者: 张会民, E-mail: zhanghuimin@caas.cn。

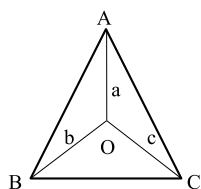
综合评判法、土壤质量动态、多变量指示克里格法^[5]等,这些方法的优点是能够为定量评价土壤肥力发挥重要作用,但由于土壤类型、肥力质量高低差异大,选取指标不同,难以选定统一方法进行土壤肥力质量评价。到目前为止,对土壤肥力的定量评价大多引用综合指数的思路,即兼顾土壤肥力的各项指标,利用数学方法,计算出土壤肥力的综合得分值^[6]。在综合评价过程中,各指标权重的确定直接影响到评价结果的准确性。依据评价思路和数学方法的不同,各评价方法呈现出较大的差异,但都存在给各指标赋权的过程。传统的评价方法所赋的权重根据来源可分为经验权重(主观权重)和统计权重(客观权重)。这样对权重的分析普遍存在对人为赋权的过度依赖和刻意回避的问题。针对这些问题,有学者提出了将“主观权重”与“客观权重”统一起来的“综合权重赋值法”^[7],但其未针对土壤肥力评价的特征;也有学者将 Delphi 法和粗糙集理论结合起来评价土壤肥力,试图解决单一考虑“主观权重”或“客观权重”的不足^[8],但也没有对综合权重做更加深入的阐述。为此,周王子等^[9]以湖北省孝昌县高岗村为例,基于综合权重法并结合地理信息系统(GIS)技术,对村域尺度上耕地综合肥力进行评价和分析,同时与传统的土壤肥力评价方法(层次分析法和内梅罗指数法)进行比较。结果表明,综合权重法与层次分析法、内梅罗指数法存在相对一致性,但它们之间也存在差异性,表现在内梅罗指数法得出的土壤肥力指数(SFI)与综合权重法相比整体偏低,且样点 SFI 频率分布与综合权重法也有较大差别;综合权重法和层次分析法的各指标权重差异明显,如综合权重法和层次分析法中速效钾权重相差近 2 倍。

无论是专家打分法、综合土壤质量指数和 Fuzzy 综合评判法等传统评价方法,还是综合权重法,都需对各评价指标进行标准化处理。土壤肥力评价指标都具有连续性和模糊性的特点,在标准化处理中不能人为划分等级界限,均借用模糊数学或多准则决策模型等现代数学方法。但有些土壤肥力指标的作用不太容易被这些数值模型证明。为探讨更好的方法,Nie 等^[10]建立了一个基于 GIS 和生态位适宜度模型(niche-fitness model)的土壤肥力综合评价方法。研究表明,土壤基本生态位适宜度(soil basic niche-fitness)值和单季水稻产量之间呈显著相关关系。土壤生态位适宜值越大,土壤肥力等级

越高,土壤对作物生长的辅助能力越好。土壤基础生态位的方法被证明是一种评价土壤肥力空间差异有效的方法。但该评价方法在最佳生态位适宜度指标的确定方法和土壤生态位适宜度综合评价模型方面还有待进一步研究。

近年来,越来越多的学者倾向于将主成分分析与聚类分析相结合作为一种新的评价方法,即主成分-聚类分析法用来评价土壤肥力。其优点是主成分函数中的特征值可以反映各土壤肥力指标对土壤肥力的影响程度。温延臣等^[11]运用主成分分析和聚类分析等数理统计方法,选取 14 种包含土壤化学肥力、物理肥力及生物肥力指标对不同施肥制度下土壤肥力水平进行综合评价。第 1 主成分中土壤全碳等特征向量系数均在 0.28~0.30 之间,其次是土壤容重、土壤总孔隙度特征向量系数为 0.25 左右。同时,也有研究表明,运用土壤肥力指数模型和基础地力指数模型来研究表征土壤综合肥力是合理的^[12]。

上述这些评价方法基本都没有直接将作物产量纳入指标进行综合评价,而在实际中,由于不合理的施肥、耕作和管理措施等,在评价时会出现土壤肥力指数较高而实际生产力较低的矛盾现象。因此,如何将作物产量纳入土壤肥力综合评价指标体系值得进一步探讨。已有研究根据测定长期施肥后不同处理土壤化学肥力指标、生物学指标和作物产量,运用三角形方法,通过计算各指标指数和可持续性指数来综合评价土壤可持续性(图 1)。图 1 中 a、b 和 c 是从点 O 出发的 3 条不同长度的线段,分别代表土壤化学肥力指数、生物肥力指数和作物指数,连接 3 条线段的另一端点组成三角形 ABC,求得 $S_{\triangle ABC}$ 即为土壤可持续性指数,用以评价土壤肥力可持续性^[13-14]。这种方法计算过程简单,不考虑各指标的权重,但在确定土壤化学肥力指标、生物肥力指标和作物指标临界值时,存在一定人为主观性。下一步将基于稻田长期肥料定位试验,在往年土壤肥力数据库的基础上,采用 Fuzzy 方法对不同施肥处理的土壤肥力质量进行评价和计算,假设以 2012 年的数据为例,构建土壤肥力质量与水稻产量及相对产量的量化关系,且进一步利用同一试验点或相近试验点近年(2015~2016 年)的数据对土壤肥力质量与水稻产量及相对产量的量化关系进行交叉验证。进而通过分析水稻产量变化规律,确定其隶属度函数拐点,计算其隶属度值和权重,从而将水稻产量及相对产量纳入土壤肥力综合评价指标体系。

图1 三角形方法评价土壤可持续性^[14]

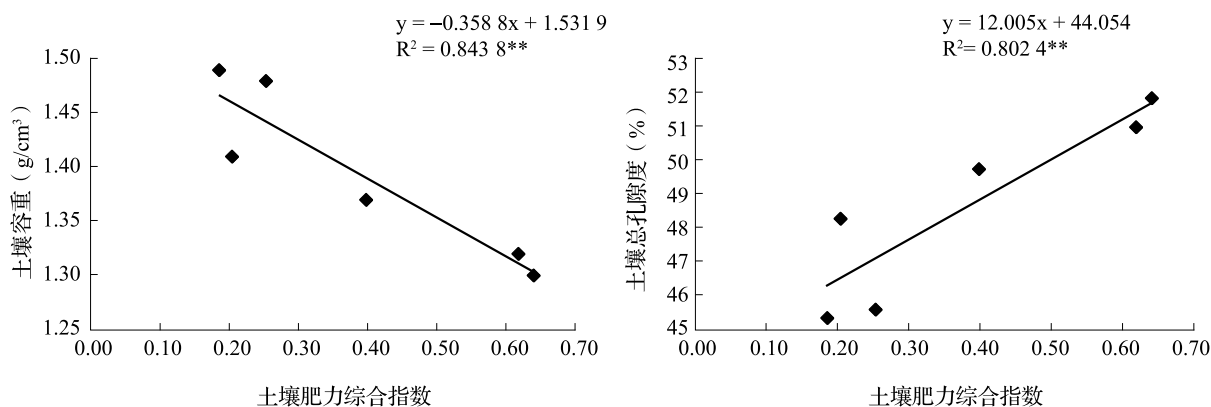
2 土壤肥力评价指标

土壤肥力是土壤物理肥力、化学肥力、生物肥力的综合体现,所以选择有代表性的土壤肥力指标是进行土壤肥力评价的关键,应尽可能地涉及所有主要的物理、化学和生物性质^[15]。土壤肥力参评指标的选取直接关系到评价结果的客观性和准确性,因此,土壤肥力指标的选定必须遵循主导性、生产性和稳定性3项原则,同时尽量选择可靠、可度量和可重复的指标^[16]。

2.1 土壤物理肥力指标

土壤物理性状决定土壤功能及耕地用途,直接或间接地影响作物生长。土壤物理退化是影响作物产量的主要因素^[17]。Mueller等^[18]研究表明,土壤质地、味道、耕层厚度、土壤紧实度、土壤湿度、温度等可视土壤结构指标能较好地土壤质量进行分等定级。Andrews等^[19]研究表明土壤容重可以用来监测土壤的紧实度,是评价土壤质量的重要物理指标。容重增加,土壤通气性、水分及养分循环和作物根系生长都会受到影响^[20]。据调查,土壤旱测容重达 1.4 g/cm^3 或水测容重 1.3 g/cm^3 以上时,稻苗发根受到明显的抑制。由此可知,土壤机械阻力的大小对根系发育影响较大。但是当土壤容重为 1.3 g/cm^3 以下时,其影响显著减小^[21]。王道中等^[22]研究表明,牛粪、猪粪、秸秆与无机肥料长期

配合施用能降低砂姜黑土土壤容重,显著提高土壤田间持水量,从而改善砂姜黑土不良的物理性状,保证作物高产稳产。范业成等^[23]通过对江西红壤性水稻土的肥力特征比较研究,证明高产水稻土的熟化程度高,其耕层土壤厚度一般达到 15 cm 。Sacco等^[24]研究表明,稻田不同水分管理对土壤孔隙产生显著影响,持续淹水条件下土壤紧实度增加,导水率降低。土壤团聚体是衡量土壤抗退化、抵御外界破坏等能力的重要指标,其大小分布和稳定性常用来描述作物和土壤管理对土壤物理性质的影响^[25]。Bandyopadhyay等^[26]研究表明,有机无机肥料配施可以降低土壤容重,增加土壤耕性,提高土壤导水率和土壤团聚体稳定性。免耕条件下直播水稻/玉米轮作且秸秆还田较常规移栽水稻/玉米轮作但秸秆带走的耕作模式,能够显著改善土壤水稳性团聚体($>0.2\text{ mm}$)、容重、贯入阻力和入渗率等物理性指标^[27]。基于模糊(Fuzzy)数学和多元数理统计分析原理,先计算各肥力指标隶属度值和权重,再根据加乘法则求出土壤肥力综合指数,通过分析土壤物理指标和土壤肥力综合指数的相关性,土壤肥力综合指数与土壤容重和总孔隙度均表现为极显著相关(图2)^[28]。土壤物理指标不仅包括土壤容重和孔隙度等土壤结构因子,土壤质地因子也是最常用和综合性的指标,但土壤质地涉及几种不同颗粒级别。通过主成分分析表明,土壤黏粒含量、土壤容重、土壤孔隙度和土壤水稳性团聚体数量包含了红壤退化中物理指标85.6%的信息^[29]。综上所述,在对稻田土壤肥力进行综合评价时,土壤容重、总孔隙度、土壤团聚体和黏粒含量可作为土壤物理肥力指标的主要因子。

图2 土壤肥力综合指数与土壤容重和总孔隙度的关系^[28]

2.2 土壤化学肥力指标

土壤化学性状直接影响土壤养分形态和浓度,对作物生长和动植物健康产生显著影响。有关土壤化学性状的指标较丰富, Schoenholtz 等^[30]认为土壤有机碳、全氮、铵态氮、硝态氮、矿化氮、矿化磷、全磷、有效磷、全钾、交换性镁、交换性钙、pH 值和土壤阳离子交换量等是评价土壤肥力的重要化学指标。土壤有机碳是表征土壤肥力质量和土壤环境质量的一个关键性参数。Wissing 等^[31]采用固态¹³C核磁共振光谱测定结果表明,长期种植水稻,土壤有机碳含量逐渐增加(从 18 mg/g 增加到 30 mg/g),而相同母质的非稻田土壤有机碳含量较低(11 mg/g)。这可能是由于稻田耕作管理使得土壤氧化还原环境不断变化,从而影响水稻土铁氧化物组成,可能增加了土壤有机碳储存潜力。41 年连续化肥和堆肥配合施用提高了水稻土总有机碳含量。相比之下,无机肥或不施肥土壤有机碳含量显著下降,导致土壤物理性状恶化,其微团聚体(0.25~0.053 mm)的土壤有机碳与土壤物理性状有很好的相关性^[32]。Liang 等^[33]研究表明长期施用有机肥可以使耕层土壤全氮增加 92.1%。廖育林等^[34]研究结果表明,氮、磷和钾化肥与稻草长期配合施用能维持和提高红壤性水稻土的生产力和土壤肥力;水稻获得了持续高产,土壤有机质、全氮、全磷、可矿化氮、有效磷和速效氮均增加;而偏施化肥处理稻田系统生产力的可持续性和土壤肥力难以维持。在各自试验设计的施肥水平下,随着施肥时间的延长,红壤性水稻土氮、磷素水平均呈现盈余,而钾素则表现为亏缺状态^[35-36]。黑土区土壤有机质和全氮是影响土壤综合肥力的关键因素^[37]。而土壤有机质和全氮存在高度相关性,所以一般在使用有机质含量指标后不再需要全氮含量。施用生物炭可提高土壤表层水势和促进水稻秸秆木质部液流的流动,提高土壤阳离子交换性能和生物学活性,显著增加缺磷土壤的水稻产量^[38]。同时,有研究表明,保护性耕作可通过提高土壤有机碳来提高作物产量^[39]。基于层次分析法和 Fuzzy 数学方法计算了长江上游典型区水耕人为土的土壤肥力综合指数,发现研究区的电导率和土壤肥力综合指数呈显著相关(图 3)^[40]。和 20 世纪 80 年代相比较,随着施肥措施的改变,长江中下游稻田土壤肥力主要贡献因子由当初的全氮、碱解氮和有机质转变为全氮、碱解氮和速效钾,主要限制因素从

有效磷和速效钾含量的缺乏转向 pH 值的逐渐降低^[41]。杨梅花等^[42]针对江西 3 个县的稻田土壤,用主成分分析法提取的最小数据集的土壤化学肥力指标为有机质、阳离子交换量和 pH 值。随着人们认知程度和分析手段的更新,具有个性的相关土壤化学指标可能会逐渐出现。例如在东南亚地区,稻田土壤植物有效硅含量是水稻可持续生产的一个关键因素^[43]。目前,在相对综合的评价指标中,水稻土土壤化学肥力评价指标随着施肥、耕作模式和稻作区域的差异而各有侧重,主要集中在土壤有机质、有效磷、速效钾、pH 值、电导率、阳离子交换量和有效硅等指标。

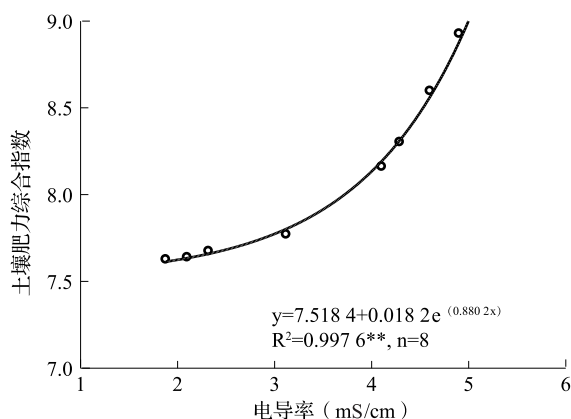


图 3 电导率和土壤肥力综合指数相关关系^[40]

2.3 土壤生物肥力指标

土壤微生物与土壤肥力有着直接的关系。Lima 等^[44]研究表明,在水稻生态系统中,土壤微生物特性对土壤质量变化的反应比土壤物理、化学属性更为灵敏。土壤微生物量碳、土壤微生物量氮、微生物熵等均被用作评价土壤肥力早期变化的有效指标。土壤生物学指标越来越多地应用于土壤肥力评价,并将成为未来土壤肥力评价的研究热点^[45]。潜在可矿化氮、微生物量碳、微生物量氮、土壤呼吸量、生物量、土壤微生物多样性、土壤酶、土壤动物等被认为是主要的土壤生物学指标^[46]。有机肥的施入,可以增加稻田土壤中可培养铁还原菌的数量和其特定的增殖活性,从而有效地限制了盐分对水稻栽培和生长的影响^[47]。Bowles 等^[48]研究表明,有机物料施用可改变微生物群落结构,碳循环酶活性随土壤有机氮的增加而增加,氮循环相关酶活性随碳的有效性增加而增加。在长期秸秆还田的施肥方式下,作物产量与土壤酶活性中的脲酶、转化酶、碱性磷酸酶活性均有极显著正相关($P <$

0.01), 水稻土养分中除有效磷外, 其它养分 (全磷、全钾、铵态氮、硝态氮和速效钾) 与作物产量均无显著相关。酶活性在一定程度上反映了土壤肥力状况, 因此在筛选土壤肥力评价指标时, 土壤酶活性应作为一个重要的关注对象^[49]。Wang 等^[50]发现氨氧化细菌中 Nitrosopira 族随着氮肥用量的增加而减少。土壤生物学指标变化还与种植制度和耕作措施等因素关系密切。彭佩钦等^[51]研究认为, 洞庭湖区不同利用方式的土壤有机碳、全氮和微生物生物量碳、氮存在显著的差异, 其中双季稻显著高于旱地和一季稻水田利用方式。Chen 等^[52]研究了长期不同施肥制度下稻田反硝化微生物的响应, 认为施肥制度显著影响了反硝化微生物群落构成和大小, 但对多样性影响较小。Choosai 等^[53]对移栽和直播两种稻作方式的研究表明, 蚯蚓的活动可以产生与周围土体不同性质的土粒, 对土壤肥力产生重要影响, 显著提高水稻的产量, 并指出蚯蚓等土壤动物是土壤肥力的一项重要生物学指标。

土壤生物学指标越来越受到人们的重视。众多的土壤生物学指标, 由于研究者对不同指标的重要性认识不同, 分析条件的限制, 侧重点不同, 选取的土壤生物肥力评价指标难以统一 (表 1), 但主要集中在微生物量碳氮、酶活性和微生物群落结构等指标。

表 1 不同研究人员对土壤生物肥力指标选取统计

土壤生物 肥力指标	研究人员					
	Bongoua – Devisme 等 ^[47]	Bowles 等 ^[48]	Wang 等 ^[50]	彭佩钦 等 ^[51]	Chen 等 ^[52]	Choosai 等 ^[53]
微生物群 落结构		*			*	
铁还原菌、 氨氧化细菌等	*		*			
微生物量碳氮				*		
酶活性	*	*				
土壤动物						*

3 存在问题 and 研究展望

目前, 大部分的土壤肥力评价主要是基于单个试验或单个试验点的研究, 今后应基于地理信息系统和地统计学等方法, 加强较大区域尺度土壤肥力精准评价方法的改进。选用评价方法时应最大程度

地减少人为的主观性, 使评价结果能客观地反映土壤肥力水平的真实差异性, 如选择主成分分析法、聚类分析法、加权综合法等一些综合评价方法。并尽可能地利用新技术和新的分析手段, 减少数据分析量对评价方法的限制, 同时如何将作物产量纳入土壤肥力综合评价体系值得进一步探讨。

我国土壤肥力指标的研究以前多集中于土壤化学肥力指标的监测和分析, 后来逐渐关注土壤生物肥力指标。有关土壤生物肥力指标, 国内应用相对广泛的主要集中在土壤微生物量碳、氮和土壤酶活性。随着分子生物学技术在国内的发展, PCR – DGGE 技术和基于 16S rRNA 基因的高通量测序技术, 较传统微生物分析技术更能真实地反映土壤中微生物群落的复杂性和多样性。因此, 基于这些分子生物学技术获取的大数据资料可以进一步丰富土壤生物肥力指标, 从而为合理评价土壤肥力提供更多参考。

水稻土是在特殊的土壤管理措施下发育形成的。“淹水条件下耕作”一直是影响水稻土肥力的最大难题, 它导致土壤大团聚体被破坏, 易溶性养分淋失^[54], 并使得水稻土的氮肥利用率不到旱地的一半。因此, 影响水稻土肥力的主要因子与其他耕作土壤 (旱地) 以及自然土壤 (森林土壤、草地等) 有所不同。同时, 以往的相关研究大多针对不同施肥措施稻田土壤肥力进行评价, 但施肥只是土壤肥力变化的影响因素之一, 因此今后应加强对现代农业耕作措施 (不同轮作模式、秸秆还田、免耕等不同耕作模式) 下稻田土壤肥力评价的研究。应制定一套针对不同稻作区典型施肥和耕作模式下比较完整并有代表性的评价指标体系, 以及客观又简单实用的评价方法, 为以水稻高产优质为目标的土壤培肥技术提供参考。

参考文献:

[1] Mokarram M, Hojati M. Using ordered weight averaging (OWA) aggregation for multi – criteria soil fertility evaluation by GIS (case study: southeast Iran) [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 132: 1 – 13.

[2] 刘清, 蔡学斌, 姜正. 我国农户粮食产后处理现状、问题及建议 [J]. 农业工程技术 (农产品加工业), 2014, (10): 18 – 21.

[3] 王京文. GIS 支持下的 大比例尺蔬菜地土壤肥力与环境质量评价研究—以慈溪市周巷镇蔬菜基地为例 [D]. 杭州: 浙江大学, 2003.

[4] Karlen D L, Hurley E, Andrews S, et al. Crop rotation effects

- on soil quality in the northern corn/soybean belt [J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98: 484–495.
- [5] Nazzareno D, Michele C. Multivariate indicator Kriging approach using a GIS to classify soil degradation for Mediterranean agricultural lands [J]. *Ecology Indic*, 2004, 4: 177–187.
- [6] 王子龙, 付强, 姜秋香. 土壤肥力综合评价研究进展 [J]. *农业系统科学与综合研究*, 2007, 23 (1): 15–18.
- [7] 陶菊春, 吴建民. 综合加权评分法的综合权重确定新探 [J]. *系统工程理论与实践*, 2001, 21 (8): 43–48.
- [8] 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.
- [9] 周王子, 董斌, 刘俊杰, 等. 基于权重分析的土壤综合肥力评价方法 [J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35 (6): 81–86.
- [10] Nie Y, Yu J, Peng Y T, et al. A comprehensive evaluation of soil fertility of cultivated land: A GIS-based soil basic niche-fitness model [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2016, 47 (5): 670–678.
- [11] 温延臣, 李燕青, 袁亮, 等. 长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31 (7): 91–99.
- [12] 李建军. 我国粮食主产区稻田土壤肥力及基础地力的时空演变特征 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2015.
- [13] Kang G S, Beri V, Sidhu B S, et al. A new index to assess soil quality and sustainability of wheat-based cropping systems [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 41: 389–398.
- [14] 孙本华, 孙瑞, 郭芸, 等. 壤土区长期施肥农田土壤的可持续性评价 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21 (6): 1403–1412.
- [15] Bhardwaj A K, Jasrotia P, Hamilton S K, et al. Ecological management of intensively cropped agro-ecosystems improves soil quality with sustained productivity [J]. *Agriculture Ecosystems Environment*, 2011, 140: 419–429.
- [16] 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.
- [17] Lima A C R, Hoogmoed W B, Pauletto E A, et al. Management systems in irrigated rice affect physical and chemical soil properties [J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 103: 92–97.
- [18] Mueller L, Shepherd G, Schindler U, et al. Evaluation of soil structure in the framework of an overall soil quality rating [J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 127: 74–84.
- [19] Andrews S S, Mithcell J P, Mancinelli R, et al. On-farm assessment of soil quality in California's central valley [J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94: 12–23.
- [20] Doran J W. Soil health and global sustainability: translating science into practice [J]. *Agriculture Ecosystems Environment*, 2002, 88: 119–127.
- [21] 吴国港, 朴莲粉, 玄成奎. 稻田少耕农艺的研究报告 [J]. *延边农学院学报*, 1984, 15 (1): 21–34.
- [22] 王道中, 花可可, 郭志彬. 长期施肥对砂姜黑土作物产量及土壤物理性质的影响 [J]. *中国农业科学*, 2015, 48 (23): 4781–4789.
- [23] 范业成, 叶厚专. 江西红壤性水稻土肥力特性及其管理 [J]. *江西农业学报*, 1998, 15 (3): 70–74.
- [24] Sacco D, Cremon C, Zavattaro L, et al. Seasonal variation of soil physical properties under different water managements in irrigated rice [J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 118: 22–31.
- [25] Saygm S D, Cornelis W M, Erpul G, et al. Comparison of different aggregate stability approaches for loamy sand soils [J]. *Applied Soil Ecology*, 2012, 54: 1–6.
- [26] Bandyopadhyay K K, Mishra A K, Ghosh P K, et al. Effect of integrated use of farmyard manure and chemical fertilizers on soil physical properties and productivity of soybean [J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 110: 115–125.
- [27] Singha V K, Yadvinder-Singh B, Dwivedi B S, et al. Soil physical properties, yield trends and economics after five years of conservation agriculture based rice-maize system in north-western India [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 133–148.
- [28] 江泽普, 黄绍民, 韦广泼, 等. 不同连作免耕稻田土壤肥力变化与综合评价 [J]. *西南农业学报*, 2007, 20 (6): 1250–1254.
- [29] 柳云龙, 胡宏韬, 陈永强. 低丘红壤肥力退化与评价指标体系研究 [J]. *水土保持通报*, 2007, 27 (5): 63–66, 70.
- [30] Schoenholtz S H, Miegroet H V, Burger J A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities [J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 138: 335–356.
- [31] Wissing L, Kolbl A, Hausler W, et al. Management-induced organic carbon accumulation in paddy soils: The role of organo-mineral associations [J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 126: 60–71.
- [32] Lee S B, Lee C H, Jung K Y, et al. Changes of soil organic carbon and its fractions in relation to soil physical properties in a long-term fertilized paddy [J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 104: 227–232.
- [33] Liang B, Zhao W, Yang X Y, et al. Fate of nitrogen-15 as influenced by soil and nutrient management history in a 19-year wheat-maize experiment [J]. *Field Crop Research*, 2013, 144: 126–134.
- [34] 廖育林, 郑圣先, 聂军, 等. 长期施用化肥和稻草对红壤水稻土肥力和生产力持续性的影响 [J]. *中国农业科学*, 2009, 42 (10): 3541–3550.
- [35] 廖育林, 郑圣先, 聂军, 等. 不同类型生态区稻-稻种植制度中钾肥效应及钾素平衡研究 [J]. *土壤通报*, 2008, 39 (3): 612–618.
- [36] 高菊生, 黄晶, 董春华, 等. 长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤有效养分影响 [J]. *土壤学报*, 2014, 51 (2): 126–136.

- [37] 康日峰, 任意, 吴会军, 等. 26年来东北黑土区土壤养分演变特征 [J]. 中国农业科学, 2016, 49 (11): 2113–2125.
- [38] Hidetoshi A, Benjamin K S, Haeefe M S, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield [J]. Field Crop Research, 2009, 111: 81–84.
- [39] Berner A, Hildermann I, Fließbach A, et al. Crop yield and soil fertility response to reduced tillage under organic management [J]. Soil and Tillage Research, 2008, 101: 89–96.
- [40] 周红艺, 何毓蓉, 张保华, 等. 长江上游典型区水耕人为土的电导率与肥力评价探讨 [J]. 西南农业学报, 2003, 16 (1): 86–89.
- [41] 李建军, 辛景树, 张会民, 等. 长江中下游粮食主产区 25 年来稻田土壤养分演变特征 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (1): 92–103.
- [42] 杨梅花, 赵小敏, 王芳东, 等. 基于主成分分析的最小数据集的肥力指数构建 [J]. 江西农业大学学报, 2016, 38 (6): 1188–1195.
- [43] Klotzbücher T, Marxen A, Vetterlein D, et al. Plant – available silicon in paddy soils as a key factor for sustainable rice production in Southeast Asia [J]. Basic and Applied Ecology, 2015, 16: 665–673.
- [44] Lima A C R, Brussaard L, Totola M R, et al. A function evaluation of three indicator sets for assessing soil quality [J]. Applied Soil Ecology, 2013, 64: 194–200.
- [45] Bastida F, Zsolnay A, Hernandez T, et al. Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective [J]. Geoderma, 2008, 147: 159–171.
- [46] Nambiar K K M, Gupta A P, Fu Q L, et al. Biophysical, chemical and socio – economic indicators for assessing agricultural sustainability in the Chinese coastal zone [J]. Agriculture Ecosystems Environment, 2001, 87: 209–214.
- [47] Bongoua – Devisme A J, Mustin C, Berthelin J. Responses of iron – reducing bacteria to salinity and organic matter amendment in paddy soils of Thailand [J]. Pedosphere, 2012, 22 (3): 375–393.
- [48] Bowles T M, Acosta – Martínez V, Calderón F, et al. Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively – managed agricultural landscape [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 68: 252–262.
- [49] 王灿, 王德建, 孙瑞娟, 等. 长期不同施肥方式下土壤酶活性与肥力因素的相关性 [J]. 生态环境, 2008, 17 (2): 688–692.
- [50] Wang Y N, Ke X B, Wu L Q, et al. Community composition of ammonia – oxidizing bacteria and archaea in rice field soil as affected by nitrogen fertilization [J]. Systematic and Applied Microbiology, 2009, 32: 27–36.
- [51] 彭佩钦, 吴金水, 黄道友, 等. 洞庭湖区不同利用方式对土壤微生物生物量碳氮磷的影响 [J]. 生态学报, 2006, 26 (7): 2262–2266.
- [52] Chen Z, Liu J B, Wu M N, et al. Differentiated response of denitrifying communities to fertilization regime in paddy soil [J]. Microbial Ecology, 2012, 63 (2): 446–459.
- [53] Choosai C, Jouquet P, Hanboonsong Y, et al. Effects of earthworms on soil properties and rice production in the rainfed paddy fields of Northeast Thailand [J]. Applied Soil Ecology, 2010, 45: 298–303.
- [54] Jiang X, Xie D. Combining ridge with no – tillage in lowland rice – based cropping system: long – term effect on soil and rice yield [J]. Pedosphere, 2009, 19: 515–522.

A review on the evaluation methods and indexes of soil fertility in paddy fields

HUANG Jing^{1,2}, JIANG Xian-jun³, ZENG Yue-hui⁴, CHEN Jin⁵, CHAI Ru-shan⁶, LIU Kai-lou^{1,7}, ZHANG Hui-min^{1,2*}
 (1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081; 2. Red Soil Experimental Station of Chinese Academy of Agricultural Sciences in Hengyang/National Observation and Research Station of Farmland Ecosystem in Qiyang, Qiyang Hunan 426182; 3. College of Resource and Environment, Southwestern University, Chongqing 400715; 4. Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha Hunan 410125; 5. Soil and Fertilizer & Resources and Environment Institute, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System for the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture/National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang Jiangxi 330200; 6. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei Anhui 230036; 7. Jiangxi Institute of Red Soil, National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement/Scientific Observational and Experimental Station of Arable Land Conservation in Jiangxi, Ministry of Agriculture, Nanchang Jiangxi 330046)

Abstract: Paddy soil as a typical stagic anthrosols, its soil fertility plays an important role on the high quality and productivity of rice. The fertility evaluation is very important to the fertility improvement and management of paddy soil. However, the selections of the assessment index and method for paddy soils still remain unclear. Thus, in this study, the characteristics of fertility evaluation methods and the effects of different factors on evaluation index were analyzed. Meanwhile, the research progress on the fertility evaluation of paddy soil across China was discussed. The evaluation method should minimize the human

subjectivity. Meanwhile, how to integrate crop yield into soil fertility comprehensive evaluation system is worthy to be further discussed. In order to comprehensively evaluate soil fertility of paddy soil, the soil bulk density, total porosity, soil aggregate and clay content could be classified as the main factors of soil physical fertility index. The evaluation indexes of chemical fertility of paddy soils were different with the various fertilization strategies, tillages, and rice planting regions. Among the most important soil biological indicators, the microbial biomass carbon and nitrogen, enzyme activity and microbial community structure were identified as the main indicators. The relatively complete, representative evaluation index system and objective, simple, practical evaluation method should be established for typical fertilization and tillage models in different rice cropping areas in next step to provide reference for soil fertilization technology that aim at high yield and good quality of rice.

Key words: paddy soil; soil fertility; evaluation method; evaluation index

《中国土壤与肥料》投稿及订阅

《中国土壤与肥料》1964年创刊,是农业部主管、中国农业科学院农业资源与农业区划研究所和中国植物营养与肥料学会主办的全国性专业科技期刊。为全国中文核心期刊、中国科技核心期刊、中国农业核心期刊、RCCSE中国核心学术期刊。被中国科学引文数据库(CSCD)核心库、中国学术期刊综合评价数据库、CBST科学技术文献速报(日)、中国学术期刊文摘、CA化学文摘(美)、CABA农业与生物科学研究中心文摘(英)等收录。以促进土肥学科的发展为宗旨,加快成果转化、推动技术进步为目标。面向科研、教学和生产实践。主要刊登土壤资源与利用、植物营养与施肥、农业水资源利用、农业微生物、分析测试、环境保护、生态农业等方面的新理论、新技术、新产品的试验研究成果与动态。辟有专家论坛、专题综述、研究报告、分析方法、研究简报等栏目。读者对象为农业科研、教学、推广、环保及肥料生产、经营部门的科技、管理人员及农民技术员。

来稿要求和注意事项:

1. 文稿请按“科技论文编写格式”撰写。要求论点明确、层次分明、数据可靠、图表清晰、文字精炼、标点准确,有关数据进行统计分析。
 2. 研究论文要有中、英文摘要和关键词。摘要中要含有论文的重要数据。
 3. 量和单位及符号采用国家法定计量单位,符合国标对科技期刊的要求,不再使用N、M、ppm、rpm、亩、目等。土壤的磷、钾养分含量需用P、K计算,肥料的磷、钾养分含量用 P_2O_5 、 K_2O 计算。
 4. 图、表要有自明性,不要求英文标注。表格采用三线表格式,图一律为黑白图,不要边框、背景和网格线。
 5. 参考文献只列出直接引用并已公开发表的文章、著作等。按正文中出现的先后排序(顺序编码制)。文献序号加方括号,在引用处以上标方式标注。中文文献不要求列英文注释。文献作者只写前3人姓名,超过3人后面加“等”,3人之内全部列出。英文文献作者姓名姓前、名后,姓第1个字母大写,名用大写字母缩写(大写字母后不加点)。
 6. 在首页脚注位置,标注基金项目、第一作者简介以及通讯作者姓名和信箱。
- 作者简介:** 姓名(出生年-),性别,民族(汉族可省略),籍贯,职称,学位,研究方向。E-mail。
7. 以word格式、A4纸型排版,通过本刊网站远程稿件处理系统在线投稿,并可查看稿件处理进程及录用情况。
 8. 文稿著作权属于作者。文责作者自负,本编辑部为保证文稿的规范和精练,可对内容进行必要的修改、删节。作者如有不同意见可在来稿中注明。
 9. 文稿请勿一稿多投。论文经初审通过后收取审稿费并送专家评审。论文一经录用,确定刊期后收取稿件处理费;刊出后付给作者稿酬,并赠送2本当期期刊。论文刊出后同时以网络方式发布。

双月刊,大16开本,双月10日出版,国内标准连续出版物号CN11-5498/S,国际标准连续出版物号ISSN1673-6257。每期15元,全年90元,邮发代号2-559,全国各地邮局均可订阅,漏订者可与本刊编辑部联系。

地址:北京市中关村南大街12号(100081)中国农业科学院农业资源与农业区划研究所《中国土壤与肥料》编辑部
电话:010-82108656 **传真:**010-82106225 **网址:**http://chinatrfl.alljournal.net.cn **E-mail:**trfl@caas.cn