植物营养与肥料学报 2013,19(1):74-81
Plant Nutrition and Fertilizer Science doi: 10.11674/zwyf.2013.0109

长期不同施肥下红壤性水稻土综合肥力评价及其效应

包耀贤[1], 黄庆海[2], 徐明岗[1*], 于寒青[1]
(1 农业部植物营养与肥料重点开放实验室,中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081;
2 江西省红壤研究所,江西进贤 331700)

摘要: 以江西进贤红壤性水稻土长期试验为基础,运用模糊数学及统计学方法进行土壤肥力综合评价及其效应研究,以期达到土壤培肥的目的。结果表明,有机质、速效氮、速效磷、速效钾、物理性粘粒、团聚度和团聚体稳定率为研究区土壤肥力评价最小数据集,由其所得评价结果具有高度代表性和科学性。NPKM 的 SFI 值最大且与其他处理均呈显著差异。NPKM、2NPK、NPK 各处理 SFI 值分别高出对照(CK) 31.3%、13.0%和 10.1%。SFI 值的时间演变为 NPKM 处理先增后降,临界年限在第 12 年,N 和 CK 处理缓降,其它处理缓增。一定范围内,二次曲线较直线更能揭示作物产量与 SFI 的关系,进一步拟合发现,SFI 和作物相对产量间符合"S"型波尔兹曼生长曲线,SFI 增至 0.60 时,相对产量增幅趋零,NPKM 处理(SFI=0.688)已属于此;模拟可知,作物产量趋稳时相应施肥年限表现为 NPKM (2a) <2NPK (8a) < NPK (9a) < NP (11a) < K、NK (13a) < P (14a)处理。综上,长期平衡施肥(NPKM、2NPK 和 NPK)明显提高土壤综合肥力,NPKM 更为显著,但其现状对作物增产已无效,应减施或不施若干年;长期偏施肥对土壤肥力贡献不力,尤其是长期单施氮反使土壤肥力下降。

关键词: 红壤性水稻土;长期施肥;综合肥力评价;相对产量
中图分类号: S158.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2013)01-0074-08

Assessment and effects of integrated soil fertility in red paddy soil under different long-term fertilization

BAO Yao-xian[1], HUANG Qing-hai[2], XU Ming-gang[1*], YU Han-qing[1]
(*1 Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;*
2 Red Soil Institute of Jiangxi Province, Jinxian, Jiangxi 331700, China)

Abstract: Based on the data of long-term fertilization experiment in red paddy soil at Jinxian county, Jiangxi province. Integrated soil fertility was evaluated and its effects were analyzed by fuzzy mathematics and statistics methods. The results showed that organic matter, available N, available P, available K, physical clay, aggregate ratio and aggregate stability were proposed a minimum data set(MDS) for soil fertility assessment and the evaluation results produced by MDS had good representativeness and scientificalness. Among all treatments, SFI for NPKM was maximum and had a significant difference with SFI for other treatments. Compared to the control, the SFI of NPKM, 2NPK and NPK treatments was about 31.3%, 13.0% and 10.1% higher respectively. As time went on, the SFI for NPKM treatment increased firstly and decreased subsequently and the critical time was 12th year after cultivated, the SFI for N and CK treatments slowly decreased and that of other treatments slowly increased over time. Within a certain range, the quadratic curve fitting could better reveal the relationship between total yield and SFI than that of the linear fitting. Further fitting found that the relationship of SFI and relative yield accorded with

收稿日期: 2012-04-11 **接受日期:** 2012-09-10
基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 课题)(2011CB100501);公益性行业(农业)科研专项(201203030)资助。
作者简介: 包耀贤(1975—),男,甘肃漳县人,博士,工程师,主要从事土壤质量特征及评价研究。E-mail:byx1822@126.com
* 通信作者 E-mail:mgxu@caas.ac.cn

"S" shape Boltzmann growth model, from this a conclusion could be drawn that when SFI increased to 0.60, the increment of relative yield was close to zero, and NPKM treatment (SFI = 0.688) had demonstrated the obvious similar effect. When relative yield closed to stable, corresponding fertilization age was the years of 2 (NPKM), 8 (2NPK), 9 (NPK), 11 (NP), 13 (K and NK) and 14 (P), respectively. In summary, long-term balanced fertilization (NPKM, 2NPK and NPK) had improved obviously integrated soil fertility, especially NPKM treatment, but its present situation had no effect on increasing crop yield and fertilizer application should be reduced or prohibited for several years. Long-term partial fertilization could slightly increase SFI, but long-term single N application made SFI decrease.

Key words: red paddy soil; long-term fertilization; integrated soil fertility assessment; relative yield

肥力评价是通过众多已知土壤外部性质对土壤内在属性进行综合量化表达[1],而如何科学评价土壤肥力成为研究热点[2-5],但至今并无统一的评价方法、指标和模型[2-6]。长期定位试验的土壤性质和作物产量因连续监测而自成体系,肥力评价结果的可靠性、延续性和检验性更为科学,也更能说明和解释科学问题。洛桑经典试验表明长期施化肥能提高有机质含量,但远小于农家肥的效果[7]。中国学者研究认为,长期施用有机肥能增加有机质和养分容量,在产量和土壤肥力的正效应方面可部分替代化肥[8],尽管如此,但仅凭有机质和养分含量的变化难以全面体现土壤综合肥力的变化。在中国的长期试验方面,于寒青等[4]仅用养分指标对长期试验红壤综合肥力进行数值化评价和检验;吴春艳等[9]用土壤容重、田间持水量和养分指标通过计算主成分得分排序评价了红壤肥力。可见,影响土壤综合肥力的颗粒组成、微团聚体、团聚体等物理性质因其相对比较稳定以及与产量间的复杂关系等原因而缺乏基础资料的累积和系统研究,即就是长期试验也如此。为此,为保证土壤综合肥力评价的全面性,本研究以江西进贤红壤性水稻土化肥长期定位试验为载体,尽可能全面地选择物理和化学的评价指标,利用敏感性分析、模糊数学和因子分析等科学评价方法,进行土壤综合肥力的评价、对各施肥处理的响应、时间演变及其对产量的趋稳效应分析,以期指导农业生产。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

红壤性水稻土长期定位试验设在江西省红壤研究所(116°20′24″ N,28°15′30″ E),为典型低丘红壤区,海拔 25 ~ 30 m;属亚热带季风气候,年均气温 17.6℃,≥10℃积温 5528℃;年降水量 1785 mm,3 ~ 6 月降水量占全年 60% 以上,年蒸发量 1800 mm,干湿季明显;无霜期 282 d,日照时数 1950 h。

供试土壤为第四纪红粘土发育的水稻土,1981 年试验开始时耕层土壤 pH 6.9,有机质 16.3 g/kg,全氮 1.49 g/kg,全磷 1.11 g/kg,全钾 9.5 g/kg,速效氮 150.4 mg/kg,速效磷 12.5 mg/kg,速效钾 97.8 mg/kg,<0.001 mm 粘粒 24.1%。

1.2　试验设计

试验设 9 个处理:CK (不施肥)、N、P、K、NP、NK、NPK、2NPK(2 倍氮磷钾)和 NPKM(氮磷钾 + 有机肥)。小区面积 46.67 m^2,3 次重复。每季施肥量:施氮肥(尿素)纯 N 90 kg/hm^2;磷肥(钙镁磷肥)P_2O_5 45 kg/hm^2;钾肥(氯化钾)K_2O 75 kg/hm^2;有机肥施 22500 kg/hm^2(早稻用紫云英,晚稻用猪粪)。1981 ~ 1986年采用一年稻-稻-油、二年稻-稻-肥(紫云英)轮茬制,1986 年后为稻-稻-冬闲制。

1.3　土样采集、测定、数据分析及计算

每年 11 月晚稻收获后,采取 0—20 cm 耕层土壤,经风干、磨细、过筛(0.25 mm 和 1 mm)后按常规法测定如下指标[10]:土壤有机质采用重铬酸钾容量法;全氮用半微量凯氏法;全磷用碱熔—钼锑抗比色法;全钾用 NaOH 熔融火焰光度法;速效氮用碱解扩散法;速效磷用 Olsen 法;速效钾用 1 mol/L NH_4OAC 浸提—火焰光度法;pH (2.5:1)采用酸度计电位法;颗粒组成采用比重计法;微团聚体采用比重计法;团聚体采用干湿机械筛分法。

使用 Excel2003、DPS7.55 和 Origin8.0 软件进行数据处理、绘图、统计和方差分析(LSD 法)。所有分析基于物理、化学和产量均齐全的年份数据(1981 ~ 1985、1987 ~ 1990 和 1998 年)。部分指标计算如下:

$$结构系数(\%) = \left(1 - \frac{<0.001\ mm\ 微团聚体}{<0.001\ mm\ 粘粒}\right) \times 100^{[11]}$$

$$团聚度(\%) = \left(1 - \frac{>0.05\ mm\ 颗粒}{>0.05\ mm\ 微团聚体}\right) \times 100^{[11]}$$

团聚体稳定率(%) $=\frac{>0.25\ \text{mm 湿筛团聚体}}{>0.25\ \text{mm 干筛团聚体}}\times 100$[10,12]；

平均重量直径(MWD) $=\sum_{1}^{n+1} D_i W_i$

式中：$D_i=\frac{(r_{i-1}+r_i)}{2}$[10,12]；$D_i$ 为各粒级（包括 < 0.25 mm)团聚体平均直径(mm)；r_i 是第 i 个筛子孔径(mm)；$r_0=r_1, r_n=r_{n+1}$；W_i 为第 i 个筛子的团聚体重量百分比。

相对产量用研究区某一施肥处理的作物总产占最高产量的百分比表示。NPKM 处理的年产量在所有处理中每年均为最高。某处理相对产量是以其所有研究年份的产量数据均值计算的。

2 结果与分析

2.1 参评指标体系的选取及最小数据集的确定

评价指标及其权重构成土壤肥力评价指标体系，而从所有参评指标中筛选出最具代表性的最小数据集是土壤肥力评价的基础[6]。为尽量保证土壤肥力评价的全面性，选取有机质、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾、pH 值、MWD、团聚体稳定率、物理性粘粒、结构系数和团聚度等 13 个参评指标。

按统计学中极差和变异系数均为“高度”或“中度”敏感作选择依据[13]，从上述 13 个指标筛选出有机质、速效氮、速效磷、速效钾、物理性粘粒、结构系数、团聚度和团聚体稳定率等 8 个指标。对 13 个初始参评指标进行因子分析并通过方差极大正交旋转，以主成分累积方差贡献率达到 85% 选取主成分，结果见表 1。7 个主成分累积贡献率接近 87%，筛选出的 10 个参评指标为有机质、速效氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾、物理性粘粒、团聚度、MWD 和团聚体稳定率。

综合敏感性分析和因子分析，最终筛选出有机质、速效氮、速效磷、速效钾、物理性粘粒、团聚度和团聚体稳定率 7 个土壤肥力参评指标作为土壤肥力综合评价的最小数据集。

表 1 因子分析方差旋转矩阵、方差贡献率及权重

Table 1 Rotated principal component matrix, contribution of variance and weight of each indicator

评价指标 Evaluation indicator	主成分 Principal component							共同度 Communality	权重 Weight
	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6	Factor 7		
有机质 Organic matter	0.888	0.055	0.179	-0.323	-0.298	-0.329	0.028	0.811	0.068
全氮 Total nitrogen	0.370	-0.353	0.014	-0.237	-0.369	-0.605	-0.089	0.843	0.071
速效氮 Available nitrogen	0.082	-0.059	-0.084	-0.957	-0.001	0.077	-0.097	0.950	0.080
全磷 Total phosphorus	0.927	0.035	-0.020	-0.021	0.113	-0.106	-0.143	0.917	0.077
速效磷 Available phosphorus	0.951	0.075	-0.077	0.032	0.012	-0.024	-0.136	0.936	0.079
全钾 Total potassium	0.134	-0.187	-0.180	0.054	-0.856	-0.112	0.162	0.877	0.074
速效钾 Available potassium	0.104	0.136	0.024	0.154	0.028	-0.913	-0.105	0.912	0.077
pH 值 pH value	0.281	-0.035	-0.416	0.111	0.683	-0.074	0.276	0.848	0.071
物理性粘粒 Physical clay	-0.242	-0.025	0.125	0.102	-0.025	0.135	0.911	0.934	0.079
结构系数 Structural coefficient	-0.080	0.047	0.127	-0.048	0.036	-0.064	-0.036	0.990	0.083
团聚度 Aggregate ratio	0.024	-0.054	0.940	0.088	0.017	-0.040	0.130	0.927	0.078
平均重量直径 MWD	0.066	0.982	-0.061	0.014	0.055	-0.010	0.006	0.976	0.082
团聚体稳定率 Aggregate stability	0.065	0.975	0.006	0.049	0.088	-0.041	-0.041	0.970	0.082
特征值 Eigenvalue	3.159	2.389	1.611	1.246	1.156	1.010	0.711		
方差贡献 of variance	2.562	2.113	1.170	1.139	1.450	1.370	1.019		
累计贡献 Cumulative(%)	24.3	42.7	55.1	64.7	73.6	81.3	86.8		

2.2　评价指标隶属度的计算

具有模糊性和连续性的隶属函数是各评价指标与作物生长效应曲线的数学关系表达式，被广泛用于各评价指标原始数据的标准化处理（消除量纲影响），即隶属度计算。本研究中根据前人研究结果[3-4,14-15]：有机质、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾呈“S”型隶属函数，在实际应用中常被简化为 f(x)：

$$f(x) = \begin{cases} 1 & x \geqslant x_2 \\ \dfrac{x}{x_2} & x < x_2 \end{cases}$$

pH 呈如下 F(x) 抛物线型隶属函数：

$$F(x) = \begin{cases} 0.9(x - x_3)/(x_4 - x_3) + 0.1 & x_3 < x \leqslant x_4 \\ 1.0 & x_2 < x \leqslant x_3 \\ 0.9(x - x_1)/(x_2 - x_1) + 0.1 & x_1 < x \leqslant x_2 \\ 0.1 & x < x_1 \, or \, x > x_4 \end{cases}$$

物理性粘粒呈 D(x) 降型分布[3]：

$$D(x) = 0.9 \times (x_{max} - x)/(x_{max} - x_{min}) + 0.1$$

MWD、团聚体稳定率、结构系数和团聚度等呈 $R(x)$ 升型分布[3]：

$$R(x) = 0.9 \times (x - x_{min})/(x_{max} - x_{min}) + 0.1$$

“S”型隶属函数的转折点（x_2）分别为 30（有机质）、2.5（全氮）、2.5（全磷）、25（全钾）、200（速效氮）、30（速效磷）和 120（速效钾）。隶属函数中，pH 值转折点分别为 4.5（x_1）、6.5（x_2）、7.5（x_3）和 8.0（x_4）。所有隶属函数中，x 为某项指标实测值，x_{min} 和 x_{max} 分别为某项指标所测最小值和最大值，据此计算出各评价指标的隶属度值。

2.3　评价指标权重的确定和土壤肥力指数（SFI）的计算

为避免主观性，本研究采用因子分析法确定指标权重，即将参评指标进行因子分析得出各评价指标的公因子方差（共同度），计算各指标公因子方差占公因子方差总和的比例即为各评价指标的权重。所有 13 项参评指标（综合指标）和 7 项最小数据集指标（简化指标）权重如表 1 和表 2。

表 2　土壤肥力评价指标权重

Table 2　Weight for indicator of soil fertility assessment

指标 Indicator	有机质 Organic matter	速效氮 Available N	速效磷 Available P	速效钾 Available K	物理性粘粒 Physical clay	团聚度 Aggregate ratio	团聚体稳定率 Aggregate stability	总和 Sum
共同度 Communality	0.850	0.970	0.887	0.984	0.990	0.989	1.000	6.670
权重 Weight	0.129	0.145	0.133	0.147	0.148	0.148	0.150	1.000

根据加乘法则，对各评价指标的权重和隶属度值采用乘法进行合成，计算综合土壤肥力指数（soil fertility index，SFI），SFI 取值为 0 ～ 1 之间，其值越高，表明土壤肥力越好。计算公式如下：

$$SFI = \sum_{i=1}^{n} W_i P_i$$

式中：W_i 和 P_i 分别为第 i 项评价指标权重和隶属度值；n—评价指标个数。

2.4　土壤肥力质量评价

为了验证土壤肥力评价最小数据集的代表性，对综合指标（13 个）所得 SFI 和最小数据集指标（7 个）所得 SFI 进行相关性模拟（图 1）发现，二者间呈极显著线性正相关，相关系数 r 高达 0.939；另外，统计显示，SFI 均值综合指标（0.581）高于简化指标（0.562），但无显著差异。可见，最小数据集指标完全能够反映综合指标所代表的信息，可用其所得 SFI 值进行有关分析，评价结果具有高度代表性。

本研究结合等距划分法及相关文献[14,16]，将土壤肥力等级（SFI 值）分为 5 级：0 ～ 0.2 为Ⅴ级（低），0.2 ～ 0.4 为Ⅳ级（较低），0.4 ～ 0.6 为Ⅲ级（中），0.6 ～ 0.8 为Ⅱ级（较高），0.8 ～ 1.0 为Ⅰ级（高）。从图 2 可看出，无论是综合还是简化指标、不同施肥还是年际间，SFI 等级绝大多数均处于中等或较高水平。统计可知，简化指标 SFI 值 70% 的属Ⅲ级（0.4 ～ 0.6），28% 的属Ⅱ级（0.6 ～ 0.8）；其 SFI 极差（0.419）和变异系数（15%）均高于综合指标所得 SFI 极差（0.334）和变异系数（12%），说明简化指标（最小数据集）相对拉开不同施肥处理或年际间土壤肥力质量的差异，具有较好的代表性。

2.5　土壤肥力质量对不同施肥处理的响应

由各处理年份 SFI 均值（图 3）可看出，NPKM、2NPK、NPK 处理分别高出 CK 处理 31.3%、13.0%、

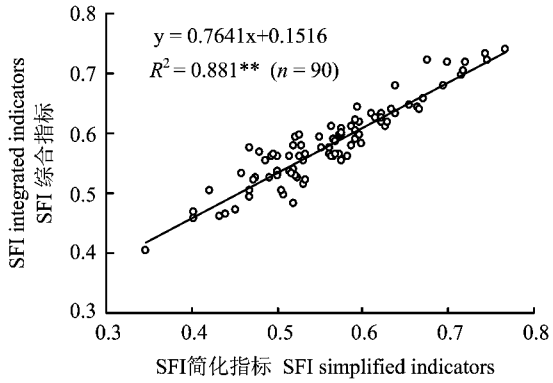

图1 综合指标与简化指标的SFI相关性

Fig. 1 Correlation between SFI based on integrated and simplified indicators

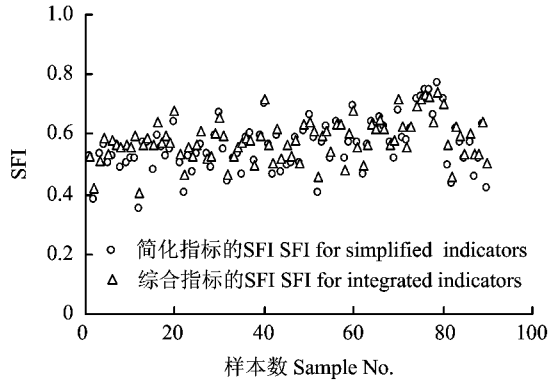

图2 试验区SFI值的频率分布

Fig. 2 Scattergram on SFI in study area

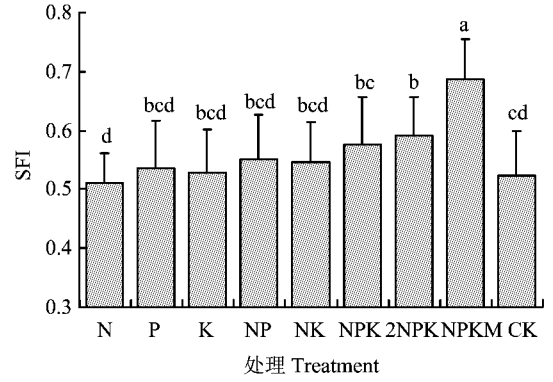

图3 SFI对不同施肥处理的响应

Fig. 3 SFI response to different fertilization

10.1%,即NPKM、2NPK和NPK等平衡施肥可提高土壤肥力质量10%以上,特别是NPKM处理提高幅度在30%以上,且其SFI值与其它处理均呈显著差异,充分表明有机无机配施是提高土壤肥力质量的重要手段。倍量平衡施肥(2NPK)的SFI值显著高于N和CK处理,而与P、K、NP、NK和NPK处理差异不显著,值得注意的是,倍量平衡施肥(2NPK)与平衡施肥(NPK)的SFI值差异不显著,说明加倍施肥并未明显提高土壤肥力质量。N处理SFI值最小,且与其它施肥处理均呈显著差异(CK处理除外),可能与长期施氮导致土壤酸化有关[17]。

2.6 土壤肥力质量的时间演化

从SFI时间演化趋势(图4)来看,N处理因酸化导致SFI逐年下降,CK处理因作物消耗加之无肥料供给导致SFI逐年下降。N、K、NP、NK、NPK和2NPK处理SFI值均随利用年限的延长呈缓慢线性增加趋势,年均增加0.006～0.012(直线拟合斜率),其中,K处理($Y_K = 0.012x + 0.450$, $R^2 = 0.673^*$)和NP处理($Y_{NP} = 0.012x + 0.473$, $R^2 = 0.611^*$)呈显著增加趋势。不同的是,NPKM的SFI值随利用年限增加呈先增后降的显著二次曲线关系(图4),在一定时段内符合实际。根据曲线拟合值可知,SFI临界年限为第12年(1992年),即NPKM处理的土壤肥力质量在开始几年提升较快,在第12年左右升至峰值后开始缓慢下降或趋于稳定。

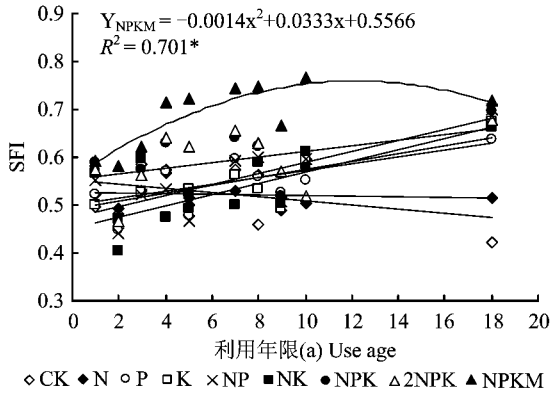

图4 长期不同施肥下SFI的变化

Fig. 4 Evolution of SFI under long-term different fertilization

2.7 土壤肥力质量对作物产量的响应

作物产量是土壤肥力质量高低的外在反映,常用二者间的相关性高低检验评价结果的科学性。数据拟合表明,作物总产量y(kg/hm²)与土壤肥力质量指数(SFI)x间的关系可描述为:

$$y = 30498x - 9280.7,\ R^2 = 0.770^{**}$$

$$y = -245052x^2 + 32750x - 96615,\ R^2 = 0.911^{**}$$

上述关系表明,在一定范围内,作物产量均随土

壤肥力质量的提高呈极显著增加，二次曲线较直线更能揭示二者关系。说明评价结果能客观反映土壤肥力实情，充分体现出由多指标综合反映的土壤肥力可用简单数量化指标（SFI）表示的科学性。

现已公认土壤养分与作物产量间呈“S”型生长效应关系[4,14-15,18]，据此和前面的分析判断，土壤肥力质量与作物产量间亦存在类似关系。为此，利用 Origin8.0 软件进一步拟合发现，不同施肥处理的 SFI（x 值）和其对应作物相对产量（y 值）间符合极显著（$r=0.960$）“S”型波尔兹曼（Boltzmann）曲线关系（图 5），即随着 SFI 的增加，相对产量开始增加较快，SFI 增加到一定程度时，相对产量增加减缓直至趋稳。结合农业生产实践和专家经验，一般地采用作物产量达到 90%～95% 所对应的土壤指标作为最优肥力标准[19]，由图 5 可看出，SFI 值达到 0.60 时，作物相对总产已达 95% 以上（模拟值 95.4%）。故可确定 SFI 的作物生长效应临界值为 0.60。其 Boltzmann 曲线模拟方程如下：

$$Y = \frac{-49.573}{1+e^{(x+0.555)/0.018}} + 99.908$$

$$F=535.5,\ P=0.0001,\ R^2=0.922^{**}$$

NPKM 处理 SFI 均值为 0.688（图 3），明显超过 Boltzmann 生长曲线 0.60 的 SFI 临界值，说明该处理的施肥量已经超过了作物对养分的需求平衡，即维持作物生长需要吸收的养分已经满足了，故持续施肥对作物增产贡献不大，而只能维持其产量。在实际生产中应减施或不施，以防浪费肥料和污染环境。

根据 SFI 临界值 0.60 和图 4 及其相关模型判定，P、K、NP、NK、NPK、2NPK 和 NPKM 等处理作物产量达到稳定时所对应的施肥年限分别约为 14 年、13 年、11 年、13 年、9 年、8 年和 2 年。

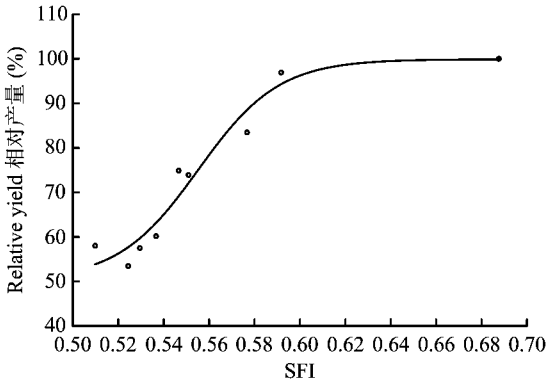

图 5　产量对 SFI 的响应

Fig. 5　Total grain yield response to SFI

3　讨论

土壤肥力是众多物理、化学和生物学指标的综合体现，但在表征土壤肥力质量时生物学指标因其种类繁多和过于敏感等特点常被忽略[20]，土壤物理性质在土壤肥力评价中也常被弱化[4,9]，由于土壤性质的多样性和土壤系统的复杂性，评价指标的选取仍无统一标准[3]。本研究利用敏感性分析和因子分析筛选所得最小数据集（7 个）SFI 值与所有评价指标（13 个）SFI 值间呈极显著正相关，SFI 与产量的验证关系也呈极显著正相关，这与相关研究类似[3-4,14]，充分揭示出最小数据集指标能够完全反映土壤肥力评价结果的科学性，加之长期试验大量数据的支持和验证，使得评价结果摒弃了以往研究中随机性和人为性较大的弊端[4,21]，也从时间上体现了土壤肥力的实质变化[15]。评价达到了用简化肥力指标（7 个）和简单数量化指标（SFI）表示复杂土壤肥力的目的，是土壤肥力评价理论的补充。

为直观衡量土壤肥力高低，界定土壤肥力等级范围很有必要。本研究根据 SFI 值将土壤肥力等级分为 5 级。于寒青等[4]、张凤荣[16]等将土壤肥力等级划为 3 级，而许明祥等[14]则划为 5 级。可见，土壤肥力评价是人们根据不同目的从不同角度进行的尝试的现实决定了土壤肥力等级范围的界定有待深入研究。

9 种施肥处理中，单施 N 处理 SFI 值最小，长期单施 N 因铵态氮的硝化和硝酸根的淋洗促使土壤酸化加重，限制了土壤微生物活性，导致养分损失和有效性降低[17]。研究表明，酸性土连施氮将加速土壤磷素耗竭，速效钾和缓效钾含量均降低[22]，故导致土壤肥力降至 CK 处理以下。

除氮处理外，相对不施肥处理，各施肥处理均能不同程度地提升土壤肥力，特别是 NPKM 处理提幅超过 30%，这是因为有机肥对土壤肥力的提升有叠加效应以及有机质的强稳定性[7-8,13]。洛桑 Hoosfield 经典试验及相关研究证实，长期施用有机肥或无机肥均在一定程度上提高土壤有机质含量，而以有机肥或有机无机肥配施有机质提幅最大[7-8,23-24]，而有机质作为土壤肥力的核心，同样体现在本研究 NPKM 处理 SFI 值最高上。偏施肥处理（P、K、NP、NK）土壤肥力提幅低于 10%，长期偏施无机肥破坏了土壤结构，改变了水、气、热环境，牵制肥料—土壤—作物营养系统的平衡。倍量平衡施肥（2NPK）较平衡施肥（NPK）仅提高 SFI 值 2.6%，但

作物总产平均前者高出后者16%，说明在土壤养分未达到平衡前，土壤综合肥力的小幅提升就能促作物较大幅增产。可见，有机无机配施是保持和提高土壤肥力的重要举措。

NPKM的SFI随时间的变化趋势呈先增后降的二次曲线模型，一定程度上说明以固定配比的NPKM处理施肥若干年后，土壤肥力不再明显增加。本研究中作物产量与SFI也有类似现象，二者呈极显著"S"型波尔兹曼生长模型关系，符合公认的"S"型生长曲线相关理论[4,15,18,21]，即养分达到一定平衡时，作物产量在SFI增加到一定程度时趋于稳定。NPKM处理SFI均值(0.688)明显超过其0.60的临界值，揭示出在实际生产中应减施或不施若干年，因洛桑Hoosfield经典试验证实了有机质供应养分的强稳定性，不施肥100年后仍高于空白的有机质含量[7]。除N和CK处理外，施肥均能不同程度地提高土壤肥力质量和作物产量，而其他施肥处理作物产量趋于稳定时的施肥年限约在2～14年，对于指导土壤肥力培育具有借鉴作用。故在通过施肥提高作物产量的时下切忌持续过量施肥导致土壤养分加速累积而造成肥料浪费，甚至导致水体富营养化而破坏生境[18]。

4 结论

1）研究区土壤肥力评价最小数据集为有机质、速效氮、速效磷、速效钾、物理性粘粒、团聚度和团聚体稳定率，其评价结果具有高度代表性。

2）研究区土壤肥力等级70%属于中等，28%属于较高；NPKM处理SFI值高出对照30%，2NPK和NPK处理高出对照10%以上，即提升土壤肥力应平衡施肥，有机无机配施效果更佳。

3）在时间演化中，NPKM处理SFI值先增后降，临界年约在第12年；N和CK处理SFI值随时间缓降，其它处理SFI值随时间缓升。

4）SFI与作物相对总产量呈极显著"S"型波尔兹曼生长曲线关系，SFI增至0.60时产量趋稳；各处理作物产量趋稳时相应施肥年限表现为NPKM (2a) <2NPK (8a) < NPK (9a) < NP (11a) < K、NK (13a) <P (14a)。

参 考 文 献：

[1] Karlen D L, Mausbach M J, Doran J W *et al*. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1997, 61(1): 4-10.

[2] 刘世梁，傅伯杰，刘国华，马克明. 我国土壤质量及其评价研究的进展[J]. 土壤通报，2006，37(1)：137-143.
Liu S L, Fu B J, Liu G H, Ma K M. Research review of quantitative evaluation of soil quality in China[J]. Chin. J. Soil Sci., 2006, 37(1): 137-143.

[3] 郑粉莉，张锋，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[J]. 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[J]. Acta Ecol. Sin., 2010, 30(22): 6044-6051.

[4] 于寒青，徐明岗，吕家珑，等. 长期施肥下红壤地区土壤熟化肥力评价[J]. 应用生态学报，2010，21(7)：1772-1778.
Yu H Q, Xu M G, Lü J L *et al*. Variations of soil fertility level in red soil region under long-term fertilization [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2010, 21(7): 1772-1778.

[5] Islam K R, Weil R R. Soil quality indicator properties in mid Atlantic soils as influenced by conservation management [J]. J. Soil Water Conserv., 2000, 55(1): 69-78.

[6] 李桂林，陈杰，檀满枝，孙志英. 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，2008，45(1)：16-25.
Li G L, Chen J, Tan M Z, Sun Z Y. Establishment a minimum dataset for soil quality assessment based on land use change [J]. Acta Pedol. Sin., 2008, 45(1): 16-25.

[7] 杨靖一. 洛桑试验站150周年—经典试验的研究进展[J]. 土壤学进展，1995，23(1)：9-13.
Yang J Y. Lausanne Experiment Station 150 anniversary—Research progress of the classic test[J]. Prog. Soil Sci. 1995, 23(1): 9-13.

[8] Bi L D, Zhang B, Liu G R *et al*. Long-term effects of organic amendments on the rice yields for double rice cropping systems in subtropical China[J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2009, (129): 534-541.

[9] 吴春艳，陈义，杨生茂，等. 长期肥料定位试验中土壤肥力的演变[J]. 浙江农业学报，2008，20(5)：353-357.
Wu C Y, Chen Y, Yang S M *et al*. Evolution of soil fertility in a long-term fertilizer experiment [J]. Acta Agric. Zhejiangensis, 2008, 20(5): 353-357.

[10] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京：中国农业出版社，1999. 31-34, 99-109, 202-205.
Bao S D. Agricultural chemistry analysis of soils (3rd Ed.) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999. 31-34, 99-109, 202-205.

[11] 中科院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海：上海科学技术出版社，1978. 34-88.
Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil physical and chemical analysis [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978. 34-88.

[12] 周虎，吕贻忠，杨志臣，李保国. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学，2007，40(9)：1973-1979.
Zhou H, Lü Y Z, Yang Z C, Li B G. Effects of conservation

tillage on soil aggregates in Huabei plain, China[J]. Sci. Agric. Sin., 2007, 40(9): 1973-1979.

[13] 许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区土壤质量评价指标研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1843-1848.
Xu M X, Liu G B, Zhao Y G. Assessment indicators of soil quality in hilly Loess Platea[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2005, 16(10): 1843-1848.

[14] 许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区侵蚀土壤质量评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(3): 285-293.
Xu M X, Liu G B, Zhao Y G. Quality assessment of erosion soil on hilly Loess Plateau[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2005, 11(3): 285-293.

[15] 王效举, 龚子同. 红壤丘陵小区域水平上不同时段土壤质量变化的评价和分析[J]. 地理科学, 1997, 17(2): 141-149.
Wang X J, Gong Z T. Evaluation and analysis of soil quality changes in different time periods at small regional level in red soil hilly regions[J]. Sci. Geogr. Sin., 1997, 17(2): 141-149.

[16] 张凤荣, 安萍莉, 王军艳, 等. 耕地分等中的土壤质量指标体系与分等方法[J]. 资源科学, 2002, 24(2): 71-75.
Zhang F R, An P L, Wang J Y *et al*. Soil quality criteria and methodologies of farmland grading[J]. Resour. Sci., 2002, 24(2): 71-75.

[17] Zhao W, Cai Z C, Xu Z H. Does ammonium-based N addition influence nitrification and acidification in humid subtropical soils of China? [J]. Plant Soil, 2007, 297: 213-221.

[18] Aulakh M S, Garg A K, Kabba B S. Phosphorus accumulation, leaching and residual effects on crop yields from long-term applications in the subtropics[J]. Soil Use Manag., 2007, 23(4): 417-427.

[19] 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.
Xu J M, Zhang G L, Xie Z M *et al*. Inidices and assessment of soil quality[M]. Beijing: Science Press, 2010.

[20] 孙波, 赵其国, 张桃林, 俞慎. 土壤质量与持续环境Ⅲ. 土壤质量评价的生物学指标[J]. 土壤, 1997, 29(5): 225-234.
Sun B, Zhao Q G, Zhang T L, Yu S. Soil quality and sustainable environment Ⅲ. Biological index of soil quality evaluation[J]. Soils, 1997, 29(5): 225-234.

[21] 沈汉, 邹国元. 菜地土壤评价中参评因素的选定与分级指标的划分[J]. 土壤通报, 2004, 35(5): 553-557.
Shen H, Zou G Y. Parameters selection for evaluation of vegetable soil quality and its gradation[J]. Chin. J. Soil Sci., 2004, 35(5): 553-557.

[22] 徐玲, 张杨珠, 曾希柏, 等. 不同施肥结构对稻田土壤肥力质量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2006, 32(4): 362-367.
Xu L, Zhang Y Z, Zeng X B *et al*. Effects of different fertilizer's application systems on soil fertility and rice yield[J]. J. Hunan Agric. Univ. (Nat. Sci.), 2006, 32(4): 362-367.

[23] 段建南, 赵丽兵, 王改兰, 等. 长期定位试验条件下土地生产力和土壤肥力的变化[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2002, 28(6): 479-482.
Duan J N, Zhao L B, Wang G L *et al*. Productivity and soil fertility under long term experiment[J]. J. Hunan Agric. Univ. (Nat. Sci.), 2002, 28(6): 479-482.

[24] Schjønning P, Christensen B T, Carstensen B. Physical and chemical properties of a sandy loam receiving animal manure, mineral fertilizer or no fertilizer for 90 years[J]. Eur. J. Soil Sci., 1994, 45(3): 257-268.