

基于红壤肥力和环境效应评价的油菜-花生适宜施肥量

孙波, 严浩, 施建平

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 基于土壤肥力的施肥决策是提高施肥经济效益和降低施肥对环境危害的基础。本文针对红壤丘陵区的油菜-花生轮作系统, 在红砂岩和红黏土红壤旱地中进行单因素的 N、P 肥料试验, 评价其产量、肥料利用率、经济效益和环境效应, 提出红壤丘陵区的施肥模型和适宜施肥量。试验表明, 红壤速效 P 含量是影响作物产量的主要因素。考虑土壤速效 P 含量参数的油菜施 N 模型为 $Y = 266.1 \times AP_class + 2.87 \times N + 393.3$, 其中 Y 为油菜的产量 (kg/hm^2); AP_class 为土壤速效 P 含量的分类变量, N 为施入的 N 肥用量 (纯 N kg/hm^2)。通过对不同施 N 量下花生产量、N 肥利用率和环境效应 (收获后土壤剖面中 NO_3^- -N 储量) 的综合评价, 红砂岩红壤旱地中花生的 N 肥适宜用量为 $103.5 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。作物对 P 肥的利用率随施 P 量的增加呈现抛物线的变化方式。土壤速效 P 含量也影响了 P 肥利用率, 速效 P 含量高的红砂岩红壤中花生对 P 肥利用率显著高于速效 P 水平低的红黏土红壤。综合评价 P 肥的产量效益、肥料利用率和经济效益, 红砂岩红壤旱地中, 油菜的适宜施 P 量为 P_2O_5 $90 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 花生的适宜施 P 量在 P_2O_5 $22.5 \sim 45 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 之间。

关键词: 红壤旱地; 油菜; 花生; 施肥; 环境效应

中图分类号: S147.2

20 世纪 90 年代以来, 建立最佳的水肥管理措施, 特别是进行区域 N 肥的施肥决策, 协调产量、经济效益和环境影响之间的平衡, 成为农业可持续发展的一个重要方面^[1]。施肥决策中的施肥模型可以分为经验模型和机理模型两类^[2]。经验模型主要可以分为测土推荐施肥模型 (平衡模型) 和肥料效应函数模型 (统计模型), 测土推荐施肥模型包括养分平衡法和地力差减法; 机理模型主要描述农田生态系统中养分循环、转化和作物生长的联合过程。欧美发达国家在 20 世纪上半叶开始利用田间试验建立肥料效应函数模型, 并用于指导农业生产^[3]; 80 年代以来发展了很多描述土壤 N 素供应和作物 N 素动态需求的机理模型^[4], 比较著名的旱作模型有 CERES-Wheat^[5] 和 DAISY^[6], 水稻模型有 DSSAT 中 CERES-Rice^[7] 和 ORYZA2000^[8], 这些模型在评价产量的同时考虑了土壤硝酸盐的污染风险。近期, 随着农业生产和区域环境管理的需求, 研究者基于过程模型和 GIS、数据库技术建立了区域决策施肥支持系统^[9], 如 SUNDIL 2.0^[10] 和 AFOPro2.1^[11]。由于机理模型需要的土壤、气候、作物参数较多, 在面向农户的应用中需要发展简单的施肥模型, 因此国外的决策施肥模型中同样应用了经验模型^[9,12]。

国内从 20 世纪 80 年代开始通过全国的化肥试验网^[13]以及大量的区域田间肥料试验, 基于单因素或

二因素的多水平田间试验, 通过产量-肥料效应的回归方程建立施肥模型, 利用边际效应曲线确定最佳的施肥量^[2,14], 但一些试验中处理数不足 (至少应该在 4 个以上), 一些经济发达区的试验中施肥水平与目前农业生产中的施肥水平相比设置过低。80 年代后期, 针对平衡模型中土壤有效养分和肥料养分利用率的变化, 重点研究了土壤有效养分供应量, 特别是土壤供 N 量^[14-15]; 进行半定量的施肥推荐, 特别是针对水稻土^[16]。由于肥料效应函数法没有考虑土壤肥力的差异, 其应用受到区域的限制, 肥料效应函数法需要和测土施肥法结合, 并配合作物营养诊断为区域和农户尺度的配方施肥推荐服务。近期研究者在施肥模型中采用土壤养分最适残留量的方法^[17], 考虑不同降水年型水分的影响^[18]建立适合不同土壤养分和水分条件的施肥模型, 同时在区域尺度上通过正交趋势分析建立大面积经济施肥模型^[19]。随着我国农业面源污染的扩展, 一些研究者在建立模型中开始考虑施肥的环境效应。陈新平等^[20]从经济和环境效益角度, 建立和比较了冬小麦-夏玉米轮作系统的 N 肥模型, 发现线性 + 平台和二次型 + 平台模型推荐的最佳施肥量有利于维持土壤无机 N 的基本平衡, 降低环境风险, 提高 N 肥利用率。侯彦林等^[21]考虑基于测土施肥模型的质量守恒定律和肥料效应函数模型的肥料报酬递减规律, 考虑

①基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2005CB121108) 和中国科学院知识创新工程项目 (KZCX2-YW-407) 资助。

作者简介: 孙波 (1968—), 男, 江苏南京人, 博士, 研究员, 主要研究土壤质量时空演变与养分循环。Email: bsun@issas.ac.cn

土壤养分平衡建立生态平衡施肥模型, 根据土壤有效养分测定值(特征参数)和地块属性建立了地块施肥模型, 实现了区域施肥模型与地块施肥模型的转换^[21]。目前, 研究者基于 GIS、土壤肥力评价和施肥模型建立村镇尺度的施肥推荐决策支持系统^[22-23]。

我国东部红壤丘陵区面积达 113 万 km², 受热带、亚热带季风的影响, 区域水热资源丰富, 农业生产和经济发展潜力很大。但红壤具有旱、黏、酸、板、瘠的特点, 红壤有机质大多在 10~15 g/kg 之间, 其肥力状况影响了施肥的效应。目前针对红壤丘陵旱地的施肥模型研究较少, 刘强等^[24]采用 N、P、K 化肥 3 因素试验, 建立了湘南红砂岩红壤玉米-大豆立体栽培模式中施肥与玉米产量和利润的模型, 但模型没有考虑土壤肥力参数以及施肥的环境效应。施建平等^[25]针对红壤丘陵区的水稻土建立了基于土壤养分等级的早稻施肥与产量概率的 Logistic 模型。本文通过田间实验, 针对红壤丘陵旱地的主要利用系统: 油菜-花生轮作系统, 选择不同肥力水平的红壤旱地, 研究施肥对产量、肥料利用率、经济效益、土壤硝酸盐累积的影响, 建立基于土壤肥力的施肥模型, 考虑产量、经济和环境效应评价区域适宜的施肥量。

1 材料与方法

1.1 田间实验

试验设置在江西省余江县中国科学院红壤生态试验站(东经 116°55'30", 北纬 28°15'20"), 位于赣东北山区向鄱阳湖平原的过渡地带, 代表中亚热带典型低山丘陵红壤分布区, 主要植被是常绿阔叶林、亚热带常绿经济林(果)、双季稻或一年三熟旱作。试验区年均温 17.6°C, ≥10°C 积温 5528°C, 年日照时数 1852h, 太阳辐射量 456 kJ/cm², 年降水量 1795 mm(集中在 4—6 月), 年蒸发量 1318 mm。试验区的缓丘海拔 35~56 m, 相对高度 5~10 m, 坡度 4°~8°。

试验选择了 6 块发育于两种母质的红壤旱地(耕作历史在 10 年以上), 其中 3 个田块(A、B、E)为发育于第四纪红砂岩的红壤, 另外 3 个田块(C、D、F)为发育于第四纪红黏土的红壤, 试验表层土壤的基本理化性质见表 1。每个田块面积为 600 m², 设置 15 个面积为 33 m²的试验小区, 并设置保护行, 小区与小区之间分割沟的宽度为 40~50 cm。

在两种母质的红壤上分别设置单因素的 N 肥试验和 P 肥试验, 每个试验各设置 5 个施肥水平(表 2 和表 3), 3 次重复, 随机区组排列。N 肥试验设置在 A、

表 1 试验土壤的养分含量

Table 1 Nutrient contents of the experimental soils

编号	母质	有机质 (g/kg)	pH (水提)	全 N (g/kg)	全 P (g/kg)	全 K (g/kg)	水解 N (mg/kg)	速效 P (mg/kg)	速效 K (mg/kg)
A	红砂岩	11.7	5.0	0.78	0.85	7.77	160	19	174
B	红砂岩	18.1	5.0	0.93	1.08	6.96	124	19	125
C	红黏土	9.0	5.0	0.54	0.60	13.94	35	6	150
D	红黏土	13.7	4.9	0.68	0.68	11.79	58	4	199
E	红砂岩	12.3	5.3	0.75	1.01	8.59	121	25	104
F	红黏土	11.1	5.5	0.65	0.52	9.24	169	7	168

表 2 油菜-花生轮作试验中的 N 肥处理

Table 2 Nitrogen fertilization treatments in the experiment on oil rape-peanut rotation

处理	油菜			花生		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
	(kg/hm ²)	(kg/hm ²)	(kg/hm ²)	(kg/hm ²)	(kg/hm ²)	(kg/hm ²)
N1	0	135	225	0	72	180
N2	90	135	225	69.0	72	180
N3	180	135	225	103.5	72	180
N4	270	135	225	138.0	72	180
N5	360	135	225	172.5	72	180

表 3 油菜-花生轮作试验中的 P 肥处理

Table 3 Phosphorus fertilization treatments in the experiment on oil rape-peanut rotation

处理	油菜			花生		
	N (kg/hm ²)	P ₂ O ₅ (kg/hm ²)	K ₂ O (kg/hm ²)	N (kg/hm ²)	P ₂ O ₅ (kg/hm ²)	K ₂ O (kg/hm ²)
P1	225	0	225	135	0	180
P2	225	45	225	135	22.5	180
P3	225	90	225	135	45.0	180
P4	225	135	225	135	67.5	180
P5	225	180	225	135	90.0	180

B、C、D 4 个田块中, P 肥试验设置在 E、F 两个田块中。试验使用的 N、P、K 化肥分别为尿素 (N 含量 46%)、钙镁磷肥 (P₂O₅ 含量 12%)、氯化钾 (K₂O 含量 60%)。油菜基肥和追肥的比例为 2:1, 油菜的基肥时间是 2003 年 12 月初, 油菜 N 肥追肥时间是 2004 年 1 月 10 号; 花生的基肥时间是 2004 年 5 月 5 号。田间实验轮作系统是油菜-花生, 轮作期为 2003 年 9 月—2004 年 9 月, 试验期间降雨量为 1099.7 mm。整个试验期间不灌溉。

1.2 土壤、植株样品分析和数据处理

分别在油菜播种前和油菜、花生收获后在每个试验小区采集表层土壤样品, 收获后采集植株样品和油菜、花生的籽粒样品; 在红黏土和红砂岩发育的 2 个田块中 (A、C) 进行了 6 个生育期的土壤剖面采样, 分析土壤 NO₃⁻-N 的变化。

植株养分全量采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消化, N 测定用 H₂O₂-H₂SO₄ 消化法, P 测定用钼锑抗比色法, K 测定用火焰光度法; 土壤样品 NO₃⁻-N 用 KCl 浸提-紫外分光光度法测定, NH₄⁺-N 用 KCl 浸提-靛酚蓝比色法测定, 全 N 用 H₂SO₄-H₂O₂ 消化-碱解蒸馏法测定, 水解 N 用扩散皿法测定, 全 P 用 H₂SO₄-H₂O₂ 消化-钼锑抗比色法, 有效 P 用 HCl-NH₄F 浸提-钼锑抗比色法测定, 全 K 用 H₂SO₄-H₂O₂ 消化-原子吸收分光光度法测定, 速效 K 用乙酸铵提取-原子吸收分光光度法测定, 土壤有机质用 H₂SO₄-K₂Cr₂O₇ 外加热法测定^[26]。

数据的相关性分析和方差分析采用 SPSS11.0 软件。

2 结果与分析

2.1 油菜的施 N 模型

对油菜产量结果的方差分析表明, 红黏土红壤中不同 N 肥处理间的差异达到极显著水平 ($p < 0.01$); 而红砂岩红壤中不同 N 肥处理间的差异不显著。在红黏土红壤中, 对油菜产量和 N 肥用量的相关分析表明, 不同类型的肥料效应函数模型中的相关系数 R² 差异不

大, 均达到显著水平 ($p < 0.05$) (表 4)。通常, 二次多项式是施肥模型中较常用的模拟方程^[1-2]。

表 4 红黏土红壤中油菜的 N 肥效应函数模型

Table 4 Nitrogen fertilizer effect model for oil rape in red soil derived from Quaternary red clay

模型	方程	R ²
线性方程	$Y = 470 + 4.40 \times N$	0.895
二次函数方程	$Y = 566 + 3.57 \times N - 0.0016 \times N^2$	0.902
平方根方程	$Y = 499 + 15.2 \times \sqrt{n} + 3.39 \times N$	0.903

对 N 肥试验中不同 N 肥处理的方差分析 (数据取 3 个重复的平均值) 表明, 红黏土和红砂岩红壤的基础地力 (不施 N 肥的油菜产量) 差异显著, 红砂岩红壤的基础地力较高, 这与其有机质和 N 素等养分含量较高有关; N 肥用量对肥料利用率的影响不显著 ($p > 0.05$), 但不同土壤的肥料利用率差异显著, 其中红砂岩红壤的油菜 N 肥利用率最低, 而红黏土红壤中低 N 处理 (90 kg/hm²) 的 N 肥利用效率最高 (表 5)。线性相关分析表明, 土壤碱解 N 含量对肥料利用效率的影响达到 5% 的显著水平, 而且碱解 N 增加到一定水平后肥料利用率下降, 但土壤碱解 N 含量对油菜产量的影响不显著。

油菜产量除了和 N 肥用量显著相关 ($p < 0.01$) 外, 对不同试验小区的油菜产量和表层土壤 (0 ~ 20 cm) 速效养分含量之间相关性的分析表明 (图 1), 油菜产量与表层土壤速效 P 含量呈极显著正相关 ($p < 0.01$)。这也说明, 缺 P 严重的红壤中土壤速效 P 含量是限制油菜产量的主要因子, 在确定适宜施 N 量时需要同时考虑红壤速效 P 含量。

上述肥料效应函数模型没有考虑到土壤养分含量。不同方法预测土壤供 N 量的相对误差在 30% 左右, 因此, 对不同肥力的土壤只能进行半定量施肥预测, 采用平均的适宜施 N 量。鲁如坤^[27]利用肥力指标法建立施肥模型, 通过对土壤肥力和 N 肥用量分级 (即

表5 油菜 N 肥试验

Table 5 Nitrogen experiment on oil rape for statistics

地块	母质	碱解 N (mg/kg)	肥料 N (kg/hm ²)	产量 (kg/hm ²)	籽实 N (mg/kg)	肥料利用率 (%)	基础地力* (kg/hm ²)
D	红黏土	58	90	1122	42.51	33.14	465
D	红黏土	58	180	1167	44.04	18.64	465
D	红黏土	58	270	1546	48.57	21.20	465
D	红黏土	58	360	2122	44.30	21.15	465
C	红黏土	35	90	929	40.39	21.86	470
C	红黏土	35	180	955	50.40	16.81	470
C	红黏土	35	270	1354	43.61	15.25	470
C	红黏土	35	360	1717	45.02	16.51	470
A	红砂岩	160	90	1515	37.59	3.76	1303
A	红砂岩	160	180	1727	41.23	4.12	1303
A	红砂岩	160	270	1788	41.92	4.19	1303
A	红砂岩	160	360	1869	41.79	4.18	1303

* N肥试验不施 N 肥情况下油菜产量。

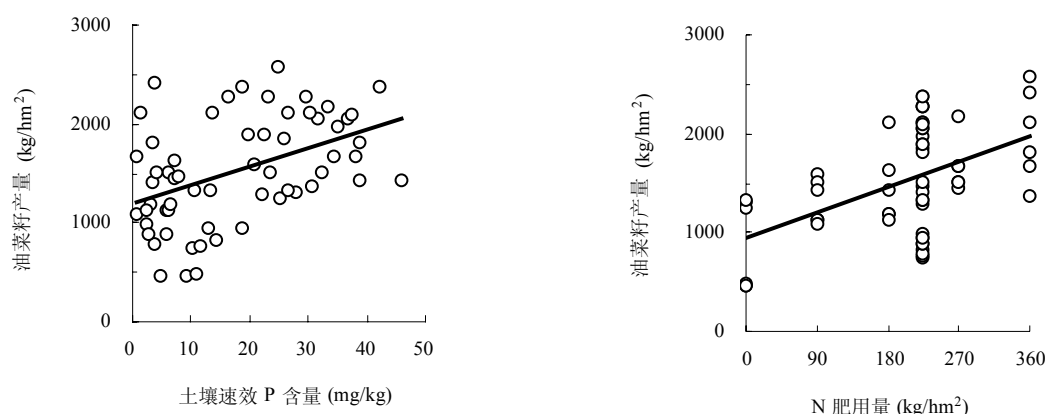


图1 油菜产量与表层土壤速效 P 含量和 N 肥用量的相关性

Fig. 1 Relationship of oil rape yield with soil available phosphorus in surface layer (0 ~ 20cm) and nitrogen application rate

高、中、低肥力，分别对应于不同 N 肥施用量范围（不需施肥、适量施肥和大量施肥），将连续的变量转化为不连续的响应变量。

一方面，土壤养分对产量的相关关系并不是一个线性的对应关系，通常表现为一定范围内的养分含量引起的产量变化不大；另一方面，在区域尺度上应用施肥模型时，对所有田块土壤养分含量的精确测定耗时、费用高，在多熟制地区不同作物季节间的分析工作无法满足下一季作物播种施肥的需要，对土壤养分的等级区分成为省时省钱的方法。为了在施肥统计模型中加入分级的土壤养分参数，我们在水稻施肥模型中引入了分类变量（categorical variable）^[25]。分类变量数值可以只是一个符号，数值之间可以不存在实

际意义的量的关系，如土壤图中土壤类型的编码；也可以不仅具有分类作用，而且存在量的关系，如速效养分水平的“高”、“中”、“低”。根据红壤区域养分的含量水平及其对作物产量的影响^[27-28]，我们将土壤速效 P 含量划分为 3 个等级并分别取值，<10 mg/kg 时取 1；20 mg/kg > 速效 P > 10 mg/kg 时取 2；速效 P > 20 mg/kg 时取 3。由此建立了油菜产量和土壤速效 P 含量以及 N 肥用量之间的相关模型：

$$Y = 266.114 \times AP_class + 2.866 \times N + 393.26 \quad (n = 60, \text{adjusted } R^2 = 0.419) \quad (1)$$

式中 Y 为油菜的产量 (kg/hm²)；AP_class 为土壤速效 P 含量的分类变量；N 为 N 肥用量 (纯 N kg/hm²)。

式中调整的判定系数 (adjusted R²) 可以消除自变

量的个数以及样本量大小对判定系数的影响。拟合模型中调整的判定系数为 0.419, 达到极显著相关水平, 说明在开垦 10 年的红壤旱地条件下, 影响油菜产量的主要因素是 N 肥的用量和表层土壤速效 P 的水平; 油菜产量随 N 肥用量、速效 P 水平的提高而增加。

对土壤剖面 NO_3^- -N 含量的分析表明^[29], 油菜季施用基肥后 30 天, 在红砂岩和红黏土发育红壤旱地剖面中, NO_3^- -N 含量在 60 ~ 80 cm 深度均出现升高趋势, 其中高 N 肥处理 (N 270 ~ 360 kg/hm^2) 较低 N 处理 (N 90 ~ 180 kg/hm^2) 的高, 在红黏土红壤中高 N 和低 N 处理的 NO_3^- -N 含量平均值分别为 30.3 和 25.7 mg/kg , 在红砂岩红壤中分别为 21.5 和 9.65 mg/kg 。红黏土红壤深层 (40 ~ 80 cm) NO_3^- -N 储量较红砂岩红壤高, 且不同施肥水平间的差异较小, 这主要是由于土壤吸附性能强、土壤空隙条件较差引起的。由于红壤中 N 素转化和迁移的复杂性, 深层土壤 NO_3^- -N 储量与施肥量之间缺乏定量的相关关系, 对 N 肥的潜在环境效应可以采用评分方法。总体上, 在利用 N 肥效应函数模型计算施 N 量后, 应考虑 N 素深层淋失的潜在环境效应, 将其用量控制在 N 180 kg/hm^2 以内。

2.2 花生的 N 肥适宜用量

考虑到花生的固 N 作用, 无法用简单的函数方程建立花生的施 N 模型, 可以通过综合评价 N 肥的产量

和环境效应, 对红壤丘陵区的旱地花生进行 N 肥推荐。通过分析 N 肥用量对花生产量、N 肥利用率以及收获后土壤剖面中 NO_3^- -N 储量的影响, 选择区域的适宜施 N 量。

在红砂岩红壤旱地中, 花生产量在 N 138 kg/hm^2 的施 N 水平下最高, 而红黏土红壤中 N 172.5 kg/hm^2 的施 N 水平下花生产量最高, 但不同 N 肥处理花生的产量之间差异不显著, 没有达到 10% 的显著水平。试验区红壤旱地的地下水位在 1 ~ 1.5 m 左右, 需要考虑施肥后土壤残留的 NO_3^- -N 淋失对水环境的潜在风险。试验表明, 花生收获后土壤剖面 (0 ~ 80 cm) NO_3^- -N 储量随施 N 水平的增加而增加 (图 2), 说明高 N 用量下土壤残留 NO_3^- -N 淋失对水环境的风险增加。但两种红壤旱地中花生对 N 肥的表观利用率不同。在红砂岩红壤中, N 69 kg/hm^2 处理的 N 肥利用率最低 (3%), N 肥用量增加, 利用率保持在 6% ~ 7% 之间, 说明随着施肥量的进一步提高, 土壤剖面中储存的 NO_3^- -N 会增加, 对环境的潜在风险加大。而红黏土红壤旱地中, N 69 kg/hm^2 处理的 N 肥利用率最高 (24%), N 肥用量增加后, 利用率下降到 4%, 然后随用量增加而增加 (图 3)。红黏土红壤表层水解 N 含量 (48 mg/kg) 低于红砂岩红壤 (160 mg/kg), 说明低 N 含量的土壤中花生对 N 肥的表观利用率较高。

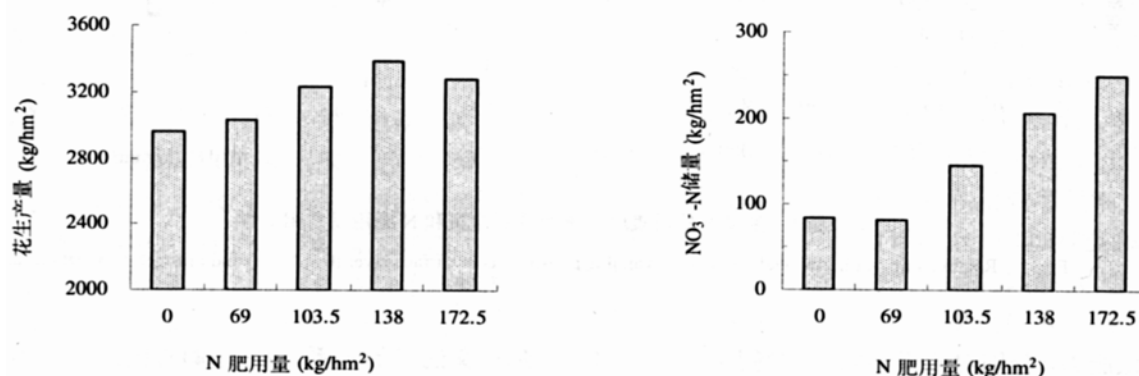


图 2 不同施 N 量下红砂岩红壤中花生产量和剖面 NO_3^- -N 储量

Fig. 2 Peanut yield and NO_3^- -N storage in 0 ~ 80 cm soil profile under different nitrogen application rates in red soil derived from red sandy stone

以红砂岩红壤为例, 可以建立综合因子评价法, 评价施 N 量对花生产量、经济效益、N 肥利用率和土壤剖面 NO_3^- -N 储量的综合影响, 选择合适的 N 肥用量。首先对各个因子进行标准化, 方法如下:

$$SCORE = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (2)$$

$$SCORE = \frac{X_{max} - X_i}{X_{max} - X_{min}} \quad (3)$$

式中 X_{max} 和 X_{min} 分别代表施肥对产量、肥料利用率、土壤剖面 NO_3^- -N 储量等产生影响的最大值和最小值, 公式 (2) 评价施肥的正效应, 公式 (3) 评价施肥的负效应。因此, 对产量和肥料利用率的效应评价选用公式 (2), 而对环境效应 (0 ~ 80 cm 土体中 NO_3^- -N 储量) 的评价选用公式 (3)。在评价了施肥在 3 个方面的效应后, 利用专家评分法确定 3 个指标在施肥综合效应评价中的权重 (表 6), 最后通过 3 个因子评分之

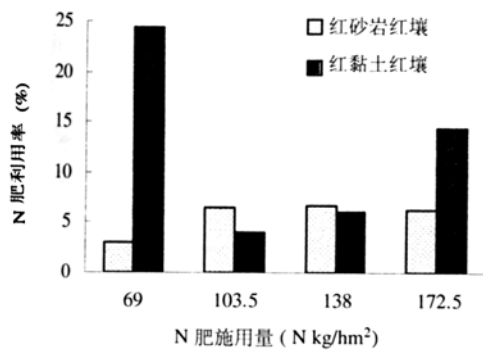


图3 两种母质发育的红壤中 N 肥利用率

Fig. 3 Nitrogen recovery efficiency of peanut in two red soils derived from different parent materials

和的大小确定适宜施 N 量。从评分结果看, 103.5 kg/hm² 的 N 肥用量是红砂岩红壤旱地中花生的适宜用量 (表 6)。

2.3 油菜的 P 肥适宜用量

红壤对 P 肥的固定能力强, 作物对 P 素的当季利用率通常在 10% ~ 25% 之间^[30]。P 肥试验结果表明, 油菜的产量变化呈现一个抛物线的形式 (图 4)。方差分析表明, 红砂岩红壤中, P₂O₅ 90 kg/hm² 的施 P 水平下油菜产量显著 ($p < 0.05$) 较 P₂O₅ 180 kg/hm² 的处理高, 而红黏土红壤中高施 P 水平 (P₂O₅ 90 ~ 180 kg

/hm²) 的油菜产量显著低于低施 P 水平 (P₂O₅ 45 kg/hm²) 的处理。

红砂岩母质红壤中油菜的 P 肥利用率在 90 kg/hm² 施 P 水平下最高, 随着施 P 量的进一步增加, 其利用率下降 (图 5)。对表层土壤的速效养分、有机质、P 肥用量和油菜产量的相关分析发现, 在 N 肥和 K 肥用量相同的情况下, 影响油菜产量的主要因素是土壤表层的速效 P 含量, 而 P 肥用量的影响不大 (图 6)。

虽然红壤固 P 能力很强, 但施入的 P 在连续种植 6 季作物后, 其累积利用率可以达到 68%^[30]。因此确定红壤中合理的施 P 量需要考虑红壤中固定 P 的释放在过程。章明清等^[31]在确定花生-甘薯轮作中 P 肥的施肥模型时, 也考虑了花生季施用的 P 肥对甘薯的后效作用。

如果从经济效益的角度评价适宜施 P 量, 需要综合考虑油菜-花生轮作期中施用的 P 肥总量产生的经济效益。方程分析表明, 整个轮作期中不同施 P 水平下油菜的经济效益达到极显著 ($p < 0.001$) 的差异。红砂岩红壤中 (图 7), 总施 P 量与油菜经济效益之间的相关方程为:

表 6 红砂岩红壤旱地花生系统中不同施 N 量的综合评分

Table 6 Comprehensive evaluation of the effect of N application rate on peanut in red soil derived from red sandstone

评价项目	影响的最大值 Xmax	影响的最小值 Xmin	权重	N 肥处理 (kg/hm ²)			
				69.0	103.5	138.0	172.5
肥料利用率	2%	10%	0.3	0.134	0.571	0.596	0.541
NO ₃ ⁻ -N 储量	250	83	0.4	1.000	0.630	0.265	0.000
油菜产量	3500	2500	0.3	0.530	0.732	0.884	0.783
总得分				0.599	0.643	0.550	0.397

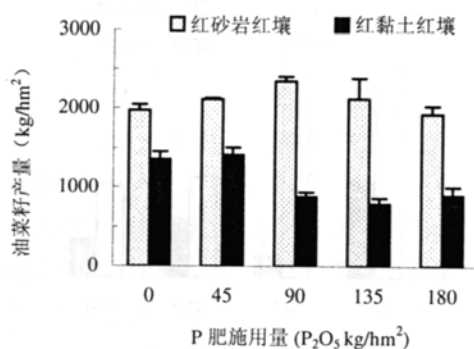


图4 红砂岩和红黏土两种红壤中不同 P 肥用量下的油菜产量

Fig. 4 Oil rape yield under different phosphorus application rate in red soil derived from red sandstone and Quaternary red clay

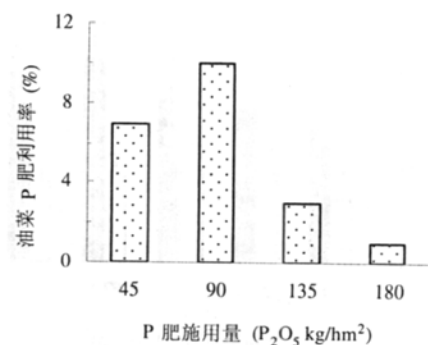


图5 红砂岩红壤中不同施 P 水平下油菜的 P 肥利用率

Fig. 5 Phosphorus recovery efficiency of oil rape under different phosphorus application rate in red soil derived from red sandstone

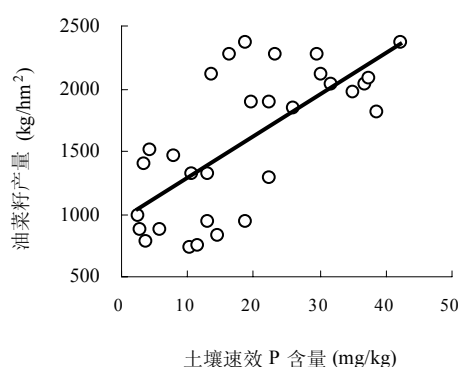


图 6 红黏土红壤中油菜产量和土壤表层速效 P 含量的关系

Fig. 6 Relationship between oil rape seed yield and available phosphorus in surface red soil derived from Quaternary red clay

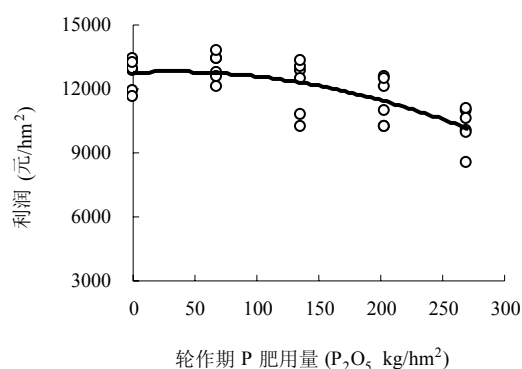


图 7 红砂岩红壤中油菜-花生轮作周期 P 肥用量与作物的经济效益

Fig. 7 Relationship between economic profit and phosphorus application rate in the oil rape-peanut rotation in red soil derived from red sandstone

$$P = -0.0463X^2 + 2.8253X + 12763 \quad (n = 30, R^2 = 0.5504) \quad (4)$$

式中 P 为整个轮作期利润 (元/hm²); X 为轮作期施用 P 肥的总量 (P₂O₅ kg/hm²)。因此, 红壤旱地条件下整个轮作周期 P 肥总量控制在 100 kg/hm² 以内可以获得较好的经济效益。综合 P 肥的产量效益和肥料利用率, 针对红砂岩红壤旱地的油菜-花生轮作系统, 其合理的 P 肥用量为 P₂O₅ 90 kg/hm²。

2.4 花生的 P 肥适宜用量

施 P 肥对花生产量的影响总体上呈先上升后下降的趋势。红砂岩红壤中, 花生产量在 P₂O₅ 45 kg/hm² 的施 P 水平下最高, 而红黏土红壤中较高的施 P 水平 (P₂O₅ 67.5 kg/hm²) 的油菜产量最高 (图 8)。开垦 10 年的红壤旱地中, 花生对 P 肥的利用率不高, 大都低于 10% (图 9)。高 P 施肥水平下 (P₂O₅ > 45 kg/hm²),

P 肥利用率较低。两种红壤中 P 肥利用率有显著差异 ($p < 0.01$), 红黏土红壤中花生对 P 肥利用率在 5% 以下, 明显地低于红砂岩红壤。对比两种土壤的养分含量表明, 有机质, 速效 N、K 差别不大, 而红砂岩红壤的全 P 和速效 P 含量明显高于红黏土红壤, 说明红壤 P 素含量的高低影响了花生对 P 肥的利用率。其他研究也表明, 土壤有效养分含量与养分利用率呈显著负相关, 与土壤养分供应量呈对数曲线关系, 而与肥料当季利用率呈负相关^[32]。

红壤全 P 含量大多 < 0.07 g/kg, 速效 P 大多 < 5 mg/kg^[28]。由于红壤的固 P 作用, 红壤旱地经过多年的耕作施肥, 土壤速效 P 含量增加。研究表明, 20 世纪 80 年代以来农民意识到红壤旱地缺 P 严重, 同时市场上常用的 P 肥 (钙镁磷肥) 价格不高, 因此旱地 P 肥用量明显增加, 近 14 年来余江县土壤表层速效 P 的

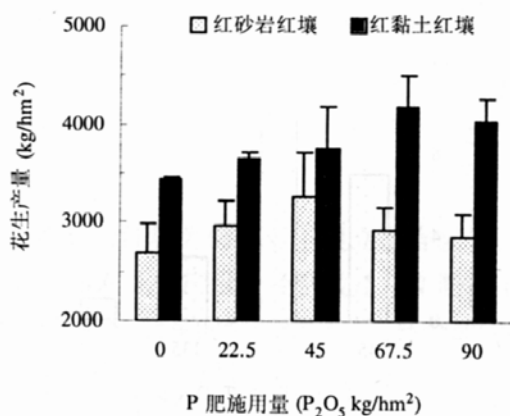


图 8 不同施 P 水平下花生产量

Fig. 8 Peanut yield under different phosphorus application rates

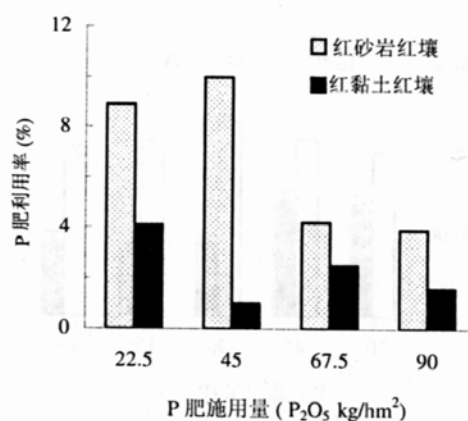


图 9 不同施 P 水平下花生对 P 肥的利用率

Fig. 9 Phosphorus fertilizer use efficiency of peanut under different phosphorus application rates

平均含量由 8 mg/kg 升至 18 mg/kg^[33]。但南方红壤丘陵区旱地红壤的有效 P 水平较低 (3 ~ 15 mg/kg), 目前施用 P 肥还不会造成对水体环境的威胁^[30]。

在花生种植季, 施 P 肥导致花生收获后表层土壤速效 P 含量增加。在红砂岩红壤中, 高施 P 水平下 (P_2O_5 67.5 和 90 kg/hm²) 土壤速效 P 含量增加了 3 ~ 5 mg/kg; 但在红黏土红壤中速效 P 含量基本不变, 说明在当季施用 P 肥对于提高红壤表层速效 P 含量的作用很小, 特别是对于严重缺 P 的红黏土红壤。但长期肥料试验表明^[33], 长期连续施用 P 肥可以增加红黏土红壤旱地的有效 P 水平, 施 P 肥 13 年后表层土壤有效 P 含量由试验前的 3.7 mg/kg 增加到 25.7 ~ 30.5 mg/kg。综合考虑产量和肥料利用率, 红壤旱地花生适宜的施 P 量在 P_2O_5 22.5 ~ 45 kg/hm² 之间。

3 结论

本文利用 N 肥和 P 肥的单因素多水平田间试验, 针对中亚热带丘陵区两种主要类型红壤: 红黏土母质和红砂岩母质发育的红壤, 从土壤基础肥力的差异、施肥的产量、经济和环境效益综合评价花生-油菜轮作系统的适宜施肥量。

N 肥试验表明, 红壤速效 P 含量影响了施 N 对油菜的增产作用, 考虑土壤速效 P 含量参数的油菜施 N 模型为 $Y = 266.1 \times AP_class + 2.87 \times N + 393.3$, 其中 Y 为油菜的产量 (kg/hm²); AP_class 为土壤速效 P 含量的分类变量 (当速效 P < 10 mg/kg 时取 1; 20 mg/kg > 速效 P > 10 mg/kg 时取 2; 速效 P > 20 mg/kg 时取 3), N 为施入的 N 肥用量 (纯 N kg/hm²)。考虑 N 素淋失的效应, 油菜季红壤旱地中 N 肥用量不宜超过 180 kg/hm²。通过综合评分法, 对不同施 N 量下花生产量、N 肥利用率和环境效应 (收获后土壤剖面中 NO_3^- -N 储量) 的评价表明, 红砂岩红壤旱地中花生的 N 肥适宜用量为 103.5 kg/hm²。

P 肥试验表明, 在 N 肥和 K 肥用量相同的情况下, 土壤表层速效 P 含量是影响油菜产量的主要因素, 而 P 肥用量的作用不大。油菜和花生对 P 肥的利用率随施 P 量的增加呈抛物线的变化方式。土壤速效 P 含量也影响了 P 肥利用率, 速效 P 含量高的红砂岩红壤中花生对 P 肥利用率显著 ($p < 0.05$) 高于速效 P 水平低的红黏土红壤。综合 P 肥的产量效益和肥料利用率, 针对红砂岩红壤旱地的油菜-花生轮作系统, 油菜的适宜施 P 量为 P_2O_5 90 kg/hm², 花生的适宜施 P 量在 P_2O_5 22.5 ~ 45 kg/hm² 之间。

参考文献:

- [1] 侯彦林, 陈守伦. 施肥模型研究综述. 土壤通报, 2004, 35 (4): 493-501
- [2] 王兴仁, 陈新平, 张福锁, 毛达如. 施肥模型在我国推荐施肥中的应用. 植物营养与肥料学报, 1998, 4 (1): 67-74
- [3] Baum EL, Heady EO, Blackmore J. Methodological Procedures in the Economic analysis of fertilizer use data. Ames, USA: The Iowa State College Press, 1956
- [4] de Willigen P. Nitrogen turnover in the soil-crop system; comparison of fourteen simulation models. Fertilizer Research, 1991, 27: 141-149
- [5] Ritchie JT, Otter S. Description and performance of CERES-Wheat: A user-oriented wheat yield model. USDA-ARS ARS-38, 1985: 159-175
- [6] Svendsen H, Hansen S, Jensen HE. Simulation of crop production, water and nitrogen balances in two German agroecosystems using the DAISY model. Ecological Modelling, 1995, 81 (1-3): 197-212
- [7] Jones JW, Hoogenboom G, Porter CH, Boote KJ, Batchelor WD, Hunt LA, Wilkens PW, Singh U, Gijsman AJ, Ritchie JT. The DSSAT cropping system model European Journal of Agronomy, 2003, 18: 235-265
- [8] Bouman BAM, Kropff MJ, Tuong TP, Wopereis MCS, Ten Berg HFM, van Laar HH. Oryza 2000: Modeling Lowland Rice. IRRI, 2001: 1-235
- [9] Falloon PD, Smith JU, Smith P. A review of decision support systems for fertiliser application and manure management. Acta Agronomica Hungarica, 1999, 47 (2): 227-236
- [10] Smith JU, Dailey AG, Glendinning MJ, Bradbury NJ, Addiscott TM, Smith P, Taylor P. Constructing a nitrogen fertilizer recommendation system around the dynamic nitrogen turnover model, SUNDIAL // Proceedings of First European Conference for Information Technology in Agriculture (EFITA) 1997: 413-416
- [11] De S, Bezuglov A. Data model for a decision support in comprehensive nutrient management in the United States. Environmental Modelling and Software, 2005, 20 (7): 852-867
- [12] David C, Jeuffroy MH, Recous S, Dorsainvil F. Adaptation and assessment of the AZODYN model for managing the nitrogen fertilization of organic winter wheat. European Journal of Agronomy, 2004, 21 (2): 249-266
- [13] 林葆, 林继雄, 李家康. 长期施肥的作物产量和土壤肥力变化. 北京: 中国农业科技出版社, 1996: 1-179
- [14] 金耀青. 配方施肥的方法及其功能—对我国配方施肥工作的评述. 土壤通报, 1989, 20 (1): 46-49
- [15] 陆允甫, 吕晓男. 中国测土施肥工作的进展和展望. 土壤学

- 报, 1995, 32 (3): 241-250
- [16] 朱兆良. 关于稻田土壤供氮量的预测和平均适宜施氮量的应用. 土壤, 1988, 20 (2): 57-61
- [17] 刘兆荣, 柳宗润. 人参“去向回收”施肥模型的应用. 土壤通报, 1993, 24 (6): 267-269
- [18] 任广鑫, 杨改河, 张正茂, 聂俊峰. 渭北旱塬地膜小麦施肥模型研究. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2002, 30 (3): 38-46
- [19] 申建波, 李仁岗. 利用正交趋势分析进行大面积经济施肥建模. 植物营养与肥料学报, 1999, 5 (3): 258-262
- [20] 陈新平, 周金池, 王兴仁, 张福锁, 宝德俊, 贾晓红. 小麦-玉米轮作制中氮肥效应模型的选择—经济和环境效益分析. 土壤学报, 2000, 37 (3): 346-354
- [21] 侯彦林, 闫晓燕, 任军, 王新民. 区域生态平衡施肥模型建立方法和应用. 土壤通报, 2003, 34(1): 33-35
- [22] 吕新, 魏亦农, 李少昆. 基于 GIS 的土壤肥力信息管理及棉花施肥推荐支持决策系统研究. 中国农业科学, 2002, 35(7): 883-887
- [23] Zhou LQ, Shi Z, Wang RC, Bailey J. A GIS-based database management application package for fertilizer recommendations in paddy fields. *Pedosphere*, 2004, 14 (3): 347-353
- [24] 刘强, 岳振华, 蒋健容, 荣湘民, 金龙新, 张富强. 红壤立体栽培模式中玉米氮、磷、钾配方施肥数学模型的研究. 土壤与环境, 1997, 6 (3): 151-156
- [25] 施建平, 鲁如坤, 时正元, 孙波. Logistic 回归模型在红壤地区早稻推荐施肥中的应用. 土壤学报, 2002, 39 (6): 853-862
- [26] 中国科学院南京土壤研究所编. 土壤理化分析. 上海: 上海科技出版社, 1978: 1-283
- [27] 鲁如坤. 土壤-植物营养学原理和施肥. 北京: 化学工业出版社, 1998: 360-366
- [28] 孙波, 张桃林, 赵其国. 我国东南丘陵区红壤养分贫瘠化的综合评价. 土壤, 1995, 27 (3): 119-128
- [29] 严浩, 孙波, 施建平, 宗良纲. 红壤旱地氮素的剖面迁移与影响因子. 农业环境科学学报, 2005, 24 (6): 38-543
- [30] 鲁如坤, 时正元. 退化红壤肥力障碍特征及重建措施. III. 典型地区红壤磷素积累及其环境意义. 土壤, 2001, 33 (5): 227-231
- [31] 章明清, 林琼, 杨杰, 彭嘉桂, 颜明娟, 李娟. 花生—甘薯轮作制中磷钾肥施肥模型研究. 土壤通报, 2004, 35 (6): 758-761
- [32] 张宽, 赵景云, 王秀芳. 黑土供磷能力与磷肥经济合理用量问题的初步研究. 土壤通报, 1984, 15 (3): 120-123
- [33] 孙波, 吴蔚东, 张桃林, 赵其国. 红壤肥力退化的时空演变// 赵其国, 张桃林, 鲁如坤, 黄鸿祥著. 我国东部红壤区土壤退化的时空变化、机理及调控对策. 北京: 科学出版社, 2002: 41-57

Suitable Fertilization Rate in Peanut-Oil Rape Rotation Based on Red Soil Fertility and Environment Impact Evaluation

SUN Bo, YAN Hao, SHI Jian-ping

(*Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

Abstract: Fertilization decision based on soil fertility is the basis for higher economic benefit and less harm to environment. A field fertilization experiment including single N and P treatments was carried out on oil rape-peanut rotation in two red soils derived from red sand stone and Quaternary red clay, respectively. Then the effects of fertilization on crop yield, fertilizer recovery efficiency, economic benefit and environmental impact were evaluated and suitable N and P application rates were recommended for the crop rotation system. Results showed that soil available P is the controlling factor for crop yield. Taking into account of soil available P content, the model for N fertilization on oil rape is $Y = 266.1 \times AP_class + 2.87 \times N + 393.3$, where Y stands for yield of oil rape (kg/m^2), AP_class for the categorical variable of soil available P content and N for N application rate (N , kg/hm^2). Based on evaluation of effects of N fertilization rate on peanut yield, N recovery efficiency and environmental impact (storage of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ in 0 ~ 80 cm depth of soil profile after the crop harvested), the suitable N application rate was defined to be $103.5 \text{ kg}/\text{hm}^2$ for peanut in red soil derived from red sandstone. The phosphorus use efficiency of the crops changed in a pattern of parabola when P fertilization rate increased. The phosphorus use efficiency of peanut was also affected by the soil available P content, which was higher in the red soil derived from red sandstone than that in the red soil from red clay. Comprehensive evaluation of yield and economic benefit showed that the suitable P fertilization rate is P_2O_5 $90 \text{ kg}/\text{hm}^2$ for oil rape and P_2O_5 $22.5 \sim 45 \text{ kg}/\text{hm}^2$ for peanut in the red soil derived from red sand stone.

Key words: Upland red soil, Oil rape, Peanut, Fertilization, Environment impact