

基于线性规划模型的红壤旱地种养结合优化模式的研究^①

屠人凤^{1,2}, 樊剑波¹, 何园球^{1,3*}

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 国家红壤改良工程技术研究中心, 南昌 330200)

摘要: 根据种植业和养殖业协调发展的原则, 以江西省余江县洪湖乡典型农户为研究对象, 对旱作花生、生猪养殖、养殖粪污处理三个子系统进行种养结合型的优化设计, 得出最优经济效益下的优化方案。优化后, 该农户年纯收入增加 7 118.7 元, 同时系统内解决 50% 的养殖粪污, 具有较高的经济效益及良好的生态、社会效益, 对该地区的生态农业发展及农业生态系统结构的调整具有一定的指导意义。

关键词: 种养结合; 线性规划; 红壤; 旱地; 优化模式

中图分类号: S181; F062.2

红壤是我国南方主要的土地资源, 面积 203 万 km², 占全国土地面积的 21%^[1]。作为典型的红壤区, 江西省气候温暖、雨量充沛、生物物质循环活跃、土壤和生物类型多样, 具有巨大的生物产量潜力^[2]。江西省现有旱地面积 35.5 hm², 占全省耕地面积的 16.85%。1999—2009 年, 江西省农业产业结构总体不断优化(图 1), 其中种植业占农业总产值比重不断下降, 到 2009 年, 下降至 44%, 而牧业比重 10 年间增长 4%。

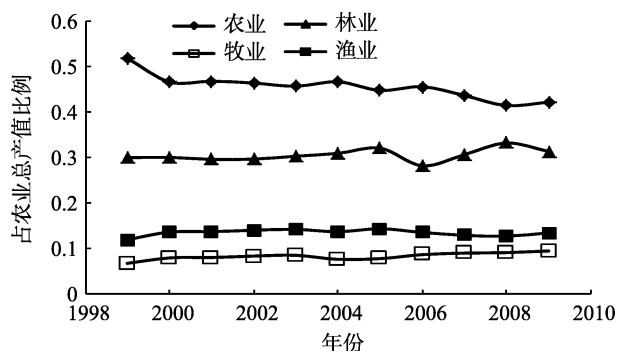


图 1 江西省农业产值结构变化图^[3-8]

Fig. 1 Structural changes of output value of agriculture in Jiangxi province

对江西省 1999—2009 年农业总产值及农(种植业)、林、牧、渔业产值做逐步回归分析(表 1), 结果显示, 10 年间对农业总产值的单位贡献率为: 牧业>种植业>林业>渔业, 牧业每增加 1 个单位, 农业总产值增加 2.68 个单位; 种植业每增加 1 个单位, 农业生产总值增加 1.00 个单位; 林业每增加 1 个单位,

农业生产总值增加 0.82 个单位; 渔业每增加 1 个单位, 农业生产总值增加 0.67 个单位。

在牧业快速发展的同时, 不可避免的出现大量的养殖废弃物, 这不仅造成了资源的大量浪费, 而且作为牧业中比重最高的生猪养殖业产生的大量养殖粪污对当地人居环境构成了危害。

近年来, 对丘岗红壤的利用模式正由单一的沟谷型农业转向为立体开发模式, 粗放耕作转为用地、养地相结合, 各种农业生产模式应运而生。如农林复合型模式、农牧复合型模式, 典型的如“顶林、腰果、谷农、塘鱼”的丘陵红壤区立体开发模式^[9]。从目前应用来看, 取得了一定的实际效果^[10]。但关于如何分配种养结合系统内部资源、统筹安排养殖规模、协调种植模式未见报导。由此遗留了土壤养分下降^[11]、资源浪费^[12]、水土流失等问题未得到良好的解决^[13-15]。

如何协调牧业的快速发展与环境的友好化, 实现农业系统的“低消耗、低排放、高利用”已成为目前社会关注的焦点之一^[16]。本研究着眼于生猪养殖粪污的能源化及肥料化, 选择线性规划模型做为研究载体, 探讨了红壤地区旱地种植业与养殖业系统间的资源配比问题, 以期得出在试验区范围内最优的养殖业规模及养殖粪污在种植业中的合理配置。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于江西省余江县洪湖乡鲁王村, 年降雨

①基金项目: 公益性行业(农业)科研专项项目(201203050-3)、国家科技支撑计划项目 (2009BADC6B04), (2012BAD05B04)资助。

* 通讯作者(yqhe@issas.ac.cn)

作者简介: 屠人凤(1983—), 男, 安徽霍邱人, 博士研究生, 主要从事土壤学、生态学研究。E-mail: turenfeng@gmail.com

表 1 1999—2009 年江西省农业产值逐步回归分析
Table 1 Stepwise regression analysis of output of agriculture in Jiangxi Province

变量	参数估计	标准差	Type II 平方和	F 值	Pr>F(P 值)
种植业	0.977 10	0.065 36	1.096×10^{12}	223.48	<0.000 1
牧业	2.675 81	0.278 24	4.535×10^{11}	92.49	<0.000 1
林业	0.815 79	0.106 12	2.898×10^{11}	59.10	0.000 1
渔业	0.670 13	0.290 24	2.619×10^{10}	5.33	0.054 3

注：数据来源于《江西省统计年鉴》(1999—2010)^[3-8]。

量 1 785 mm, 年均气温 17.8℃, 大于 10℃ 积温 5 528℃, 无霜期 262 天; 土壤为红色砂岩发育的红壤, 地形为岗地, 主要旱作作物为花生。当地平均每户 4 人, 劳动力 2 人; 户均旱地 3 亩(1 亩 = 667m²), 水田 4 亩, 林地 1 亩, 为柑橘园或者薪炭林。

1.2 研究方法

在该研究区域内某一以生猪养殖为目的的养猪场建立一口 8 m³ 的水压式沼气池, 收集全年进出料量及产气量数据, 同时对 3 个不同发育阶段的猪栏进行实时数据收集, 统计养殖环节、沼气环节所用人工、生产资料投入量。

旱地花生种植模块设置常规化肥处理(CK)、猪粪配施还田处理(包含 4 个处理)、沼气发酵残余物追施处理(包含 5 个处理)。各处理的施肥种类及 667 m² 的施肥量具体为: 常规化肥处理(CK): 尿素 17.5 kg、钙镁磷肥 30 kg、氯化钾 20 kg; 猪粪配施: 配施 I 猪粪 150 kg、尿素 15.90 kg、钙镁磷肥 22.80 kg、钾肥 19.30 kg, 配施 II 猪粪 300 kg、尿素 13.50 kg、钙镁磷肥 15.7 kg、钾肥 18.50 kg, 配施 III 猪粪 450 kg、尿素 11.50 kg、钙镁磷肥 8.50 kg、钾肥 17.74 kg, 配施 IV 猪粪 600 kg、尿素 9.47 kg、钙镁磷肥 1.37 kg、钾肥 16.99 kg; 沼肥处理: 尿素、钙镁磷肥、钾肥为 CK 处理的一半, 在此基础上添加沼气发酵残余物, 沼肥 I 添加沼气发酵残余物 1 120 L, 沼肥 II 添加沼气发酵残余物 2 240 L, 沼肥 III 添加沼气发酵残余物 3 560 L, 沼肥 IV 添加沼气发酵残余物 4 480 L, 沼肥 V 添加沼气发酵残余物 5 600 L。

对照处理(CK)、猪粪配施处理肥料均为一次基肥施入, 在保证全氮含量一致的基础上用化肥补足其他养分。沼肥处理中化肥做基肥施用, 沼肥做两次追肥 1:1 施用, 追肥时期为初花期、花针期, 均匀浇施花生垄间。所用肥料品种性质: 尿素 N 含量 467 g/kg; 钙镁磷肥: P₂O₅ 含量 120 g/kg; 氯化钾: K₂O 含量 600 g/kg; 猪粪: 含水量 75%, 干基 N、P、K 含量分别为 25、10、10 g/kg; 沼肥: 全 N 1.46 g/L, 全 P 0.4 g/L, 全 K 0.9 g/L。

应试花生品种为赣花 1 号。花生种植规格为: 行距 45 cm, 穴距 20 cm, 每穴两粒播种。小区设置 5 m × 6 m, 小区间做埂隔开, 田埂宽 0.4 m, 试验区外设保护行, 宽度 >1 m。

2 结果与分析

2010 年 4 月至 2011 年 4 月, 全年观测所设定的系统内部种植亚系统、养殖亚系统及沼气亚系统各项经济、物质投入产出数据, 结果如下:

2.1 种植亚系统

2010 年花生小区试验结果显示(图 1), 猪粪配施对红壤旱地花生有一定的增产作用。通过二次函数拟合得出, 花生产量与猪粪配施浓度的关系为: $Y = -1154.3X^2 + 639.76X + 202.24$, $R^2 = 0.870 9$, 由此可以认为, 在猪粪配施 27.8% 时, 花生产量达到最高, 为 290.9 kg/667 m², 相对常规化肥施用处理(CK), 增产 27.32 kg/667 m²。在常规化肥施用量一半的基础上, 追施一定量的沼肥对花生也有增产作用, 通过二次函数拟合得出, 花生产量与沼肥追施量的关系为: $Y = -27.916X^2 + 102.79X + 172.59$, $R^2 = 0.693 2$, 由此可以推断出, 在沼肥追施 1.84 m³/667 m² 时, 花生产量最高, 达 267.21 kg/667 m², 增产 3.64 kg/667 m²。

计算两种最优有机肥投入与常规化肥投入的投入产出, 见表 2, 其中投入部分包括了化肥、有机肥、运输、人工、种子、农药投入。结果表明两种有机肥施用均能降低化肥投入成本, 而由于有机肥的施用, 相应的提高了运输、人工等成本。从花生产出结果来看, 两者均有提高产出的能力, 综合比较表明, 猪粪配施比沼肥追施更具经济性。

2.2 养殖亚系统

2010 年对余江县鲁王村某一养猪场 3 个猪栏进行全年数据监测, 监测结果如下: 平均每头生猪实际出栏时间为 6.5 ~ 7 个月(出栏重约 100 kg); 排粪量平均 2.5 kg/(天·头), 年排粪量约为 800 kg/头。由此估算该养猪场每年产粪量约 160 t, 折价 1 800 元(按照当地价格计算, 未计算运输费用), 即每头生猪养殖过程中,

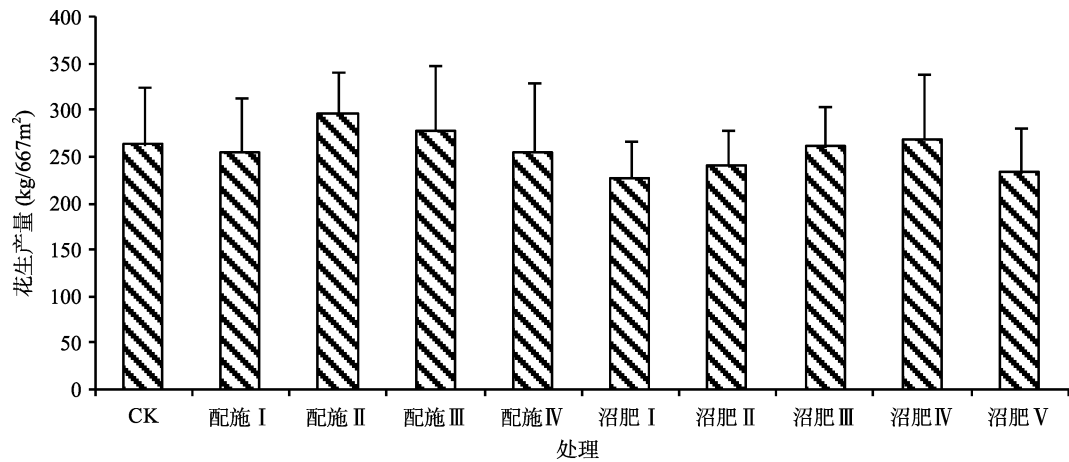


图 2 不同肥料处理下旱地花生生产量
Fig. 2 Yields of peanut under different fertilizer treatments

表 2 经济效益统计表
Table 2 Statistical table of economic benefit

与 CK 比较	化肥投入 (元/667 m ²)	有机肥投入 (元/667 m ²)	运输 (元/667 m ²)	人工支出 (个/667 m ²)	种子、农药 (元/667 m ²)	花生产出 (元/667 m ²)	利润 (元/667 m ²)
猪粪配施	-33.30	4	10	2	0	136.6	35.9
沼肥追施	-57.43	0	30	3	0	18.2	-134.37

注：表中价格均按照 2010 年当地水平设置，其中尿素 1.90 元/kg；钙镁磷肥 0.71 元/kg；钾肥 3.00 元/kg；人工 60 元/个；花生 5.00 元/kg。

产生粪污经济效益约 9 元；每头猪的养殖投入约为：玉米 250 kg，花费 520 元；豆粕 65 kg，花费 208 元；预混饲料 10 kg，花费 75 元；防疫药品和保健花费约 35 元；水电费支出 30 元；人工费花费 37 元；仔猪成本 370 元。一头猪的生产成本约为 1 275 元。按照每头猪出栏重量 100 kg，每公斤 14.4 元计算，收入为 1 440 元。因此，每头生猪纯利润约 174 元。

2.3 沼气亚系统

2010 年 4 月建成 8 m³ 水压密封式沼气发酵池一口，建设成本约 4 500 元，年维护费用为 300 元，估计 3.5 年收回成本(按照沼气产生效益估算)。至 2011 年 4 月，在保证发酵浓度 10% 的条件下，能够保证一个四口之家的全年日常能源供应。全年累计猪粪投入量 6 000 kg，估算约 8 头肥育猪年产粪量；累计出料 6.5 t，发酵残余物 N、P、K 浓度分别为 1.46、0.4、0.9 g/L；年度累计产气 720 m³，按照 2010 年鹰潭市液化气报价(90 元/14.5 kg)折算，经济效益为 1 890 元。

2.4 模型构建及优化

2.4.1 线性规划模型的引入 线性规划数学模型是数学规划与运筹学的一个分支，是运筹学中最常用的一种方法。它在市场运作、生产经营等管理领域得到了广泛应用，所处理的问题是在经济活动中以最佳的方式分配有限的资源，以便充分地发挥资源的效能

最终获取最佳经济效益^[17-19]。
针对本研究的种养模式，建立线性规划模型目标函数：

$$Y = \sum_{i=1}^k p \left(b_i x_i - \sum_{j=1}^m g_{ij} u_j \right) + \sum_{l=1}^s a_l f_l + \sum_{j=1}^m q_j u_j + dc \quad (1)$$

式(1)由 4 部分组成(等式右边加号相连的 4 个部分)，第一部分表示饲料作物或农作物在满足生猪养殖之后的剩余价值，第二部分表示非饲料作物及其他农作物的价值，第三部分表示生猪养殖产出的价值，第四部分表示养殖废弃物处理工程带来的价值。

2.4.2 模型的构建 设定该农户采取以下方式进行农业生产活动，生猪养殖饲料全部购入，农作物为单一的花生种植，其中包括两种不同的施肥措施，即猪粪配施(相对常规化肥施用增收 35.9 元/667 m²)、沼气发酵残余物追肥(相对常规化肥施用减收 134.37 元/667m²)，养殖模块为生猪养殖(每头猪纯利润 174 元)，沼气发酵每年节支(1 890 元/8m³)。与未实行该种养模式的农户比较，其年经济收入增值为：

$$\text{Max } Y = 35.9X_1 - 134.37X_2 + 174X_3 + 1\,890X_4 \quad (2)$$
式中，Y 为总产值，X₁ 为猪粪配施面积(667 m²)；X₂ 沼肥施用面积(667 m²)；X₃ 为沼气发酵规模(8 m³/口)；X₄ 为养殖规模(头)。约束方程：0 ≤ X₁ + X₂ ≤ 3 表示种植面积约束，实施两种有机施用方式的旱地不大

于 $3\ 667\ \text{m}^2$ 。 $8 \leq 8X_4 \leq 12$ 表示沼气规模约束, 沼气池规模介于 $8\ \text{m}^3$ 与 $12\ \text{m}^3$ 之间, 在保证一个四口之家的全年日常用气的基础上, 并不需要额外增加储气装置。 $8X_4 \leq X_3 \leq 24$ 表示生猪养殖规模约束, 最小值保证沼气池良性运行用猪粪, 最大养殖规模保证种植业劳动强度。 $363.5X_1 + 6\ 000X_4 \leq 800X_3$ 表示猪粪用量约束, 猪粪量应保证旱地花生猪粪配施及沼气池正常运转。

2.4.3 模型的优化求解 运用 Excel 2007 规划求解包对以上线性规划方程优化求解, 结果如表 3。

表 3 线性规划优化结果
Table 3 Optimized results of linear-programming

Max Y (元)	X_1 (667m^2)	X_2 (667m^2)	X_3 ($8\text{m}^3/\text{口}$)	X_4 (头)
7 118.7	3.0	0.0	1.5	24.0

优化结果表明达到最优经济产出的系统配置为: 一个四口之家, 年养殖生猪 24 头, 配置 $12\ \text{m}^3$ 沼气池一口, 产气保证全年燃料供应, 所产生的猪粪除保证沼气池正常产气外, 部分作为旱地花生有机配施所需, 系统内消纳约 50% 的养殖粪污。在旱地花生施肥处理上, $2\ 001\ \text{m}^2$ 可全部采取猪粪配施处理。相对于当地普通农户, 采取以上措施的农户全年经济效益增收 7 118.7 元, 其中, 生猪养殖效益为 4 176 元, 沼气池效益为 2 835 元, 花生猪粪配施效益为 107.7 元。

沼肥配施措施未被引入最优处理, 其主要原因在于沼肥配施相对于猪粪配施所耗费人工及运费较高, 且对旱地花生增产效果有限。

3 结论

(1) 研究区旱地花生种植应采取猪粪配施的肥料施用措施, 猪粪配施比例以 28%(以 N 计)为最优。

(2) 研究区应建立与生猪养殖业相匹配的沼气发酵规模, 以解决普通农户的能源使用问题。

(3) 基于沼气工程的优化结果可使农业生态系统趋于协调, 单位农户年纯效益增幅达到 7 118.7 元, 与此同时, 种养系统内部消纳了 50% 的养殖粪污。

参考文献:

- [1] 赵其国. 红壤物质循环及其调控[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 7
- [2] 何园球, 王明珠. 红壤低丘岗地区种养复合农业生态系统研究[J]. 生态农业研究, 1999, 7(3): 55-58
- [3] 江西省统计局. 江西统计年鉴 2000[G]. 北京: 中国统计出版社, 2001
- [4] 江西省统计局. 江西统计年鉴 2002[G]. 北京: 中国统计出版社, 2003
- [5] 江西省统计局. 江西统计年鉴 2004[G]. 北京: 中国统计出版社, 2005
- [6] 江西省统计局. 江西统计年鉴 2006[G]. 北京: 中国统计出版社, 2007
- [7] 江西省统计局. 江西统计年鉴 2008[G]. 北京: 中国统计出版社, 2009
- [8] 江西省统计局. 江西统计年鉴 2010[G]. 北京: 中国统计出版社, 2011
- [9] 赵其国, 何园球, 张桃林. 红壤低丘岗地的优化农业生态模式[A] // 王明珠. 红壤生态系统研究(第二集) [C]. 南昌: 江西科学技术出版社, 1993: 88-91
- [10] 王明珠. 江西低丘红壤开发模式的优化和应用[A] // 杨艳生, 侯向阳. 中国红黄壤地区农业综合发展与对策[C]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995: 312-319
- [11] 李忠佩. 红壤区耕地有机物质利用现状与开发策略[J]. 土壤与环境, 1999, 8(2): 148-152
- [12] 肖东生. 规模化养猪场污水处理和利用的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2002
- [13] 丁军, 王兆骞, 陈欣, 张如良. 南方红壤丘陵区人工林地水文效应研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(1): 141-144
- [14] 杨一松, 王兆骞, 陈欣, 张如良. 南方红壤坡地不同利用模式的水土保持及生态效益研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 84-87
- [15] 程先富, 陈梦春, 郝利霞, 史学正. 红壤丘陵区农田土壤酸化的时空变化研究[J]. 中国生态农业学报, 2008(6): 1 348-1 351
- [16] 贾凤伶, 刘应宗. 我国区域农业循环经济模式创新及对策研究[J]. 科学管理研究, 2009, 27(1): 108-116
- [17] 杨志坚. 种养结合型农业生产结构调整的实证分析[J]. 贵州农业科学, 2008, 36(1): 147-148
- [18] 杨修, 李文华. 农业生态系统种养结合优化结构模式的研究[J]. 自然资源学报 1998, 13(4): 344-351
- [19] 安劲萍. 线性规划在经济分析中的应用[J]. 中央财经大学学报, 2005(1): 44-47

Study on Optimization Model of Farming and Animal Husbandry in Upland of Red Soil Region Based on Linear-programming

TU Ren-feng^{1,2}, FAN Jian-bo¹, HE Yuan-qiu^{1,3*}

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3 *National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang 330200, China*)

Abstract: According to the principle of harmonious development of planting and animal husbandry, a typical farmer of Honghu Village Yujiang City in Jiangxi Province was taken as the research object; an optimization model consisting of upland-subsystem, pig-feeding-subsystem and manure-treatment-subsystem was suggested. In the light of the optimization model, the pure input of the farmer increased by ¥7 118.7 than that of conventional one and 50% of pig manure was fixed in the system. Higher economic benefits, eco-benefits and social benefits could be received under this optimization model and at the same time it can provide significant benefits for adjusting the structure of agriculture system in the investigated area.

Key words: Farming and animal husbandry, Linear-programming, Red soil, Upland, Optimization model