红壤旱地多熟种植系统的综合效益评价

黄国勤, 刘秀英, 刘隆旺, 叶方, 张明林, 苏艳红

(江西农业大学生态科学研究中心, 南昌 330045)

摘要: 采用加权灰色关联聚类分析的方法, 按生态效益、经济效益和社会效益的各项指标, 对 1984 ~ 2004 年在江西农业大学农学试验站红壤旱地上进行的多元多熟种植系统定位对比试验中筛选出的 23 种多熟种植系统的综合效益进行了定量分析和聚类评价。结果表明: “白菜/马铃薯/玉米-芝麻” 关联度值最大, 灰色聚类为优; 生态、经济、社会效益最高, 明显优于其他种植系统, 适合于大面积推广, 是红壤旱地增产、增收、增效和维持农业可持续发展的优化模式; “油菜 || 紫云英/玉米/玉米 || 绿豆” 次之, 适合在劳动力相对充足的城郊红壤旱作区推广, 以上两种种植模式对今后红壤旱作区种植业结构布局的调整和种植模式的优化具有积极意义。

关键词: 红壤旱地; 多熟种植; 灰色关联; 聚类分析; 综合评价

文章编号: 1000-0933(2006)08-2532-08 **中图分类号:** S181 **文献标识码:** A

Evaluation on comprehensive benefits of multiple cropping systems on upland red soil

HUANG Guo-Qin, LIU Xiu-Ying, LIU Long-Wang, YE Fang, ZHANG Ming-Ling, SHU Yan-Hong (Research Center on Ecological Science, Jiangxi Agricultural University Nanchang 330045, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2532 ~ 2539.

Abstract: The development of multi-component and multiple cropping systems is reviewed, and their comprehensive benefits are critically evaluated. The theories underpinning use of multiple cropping systems have matured, and the approach is widely accepted and practiced because of its potential role in sustainable agriculture. However, research evaluating its comprehensive benefits and optimization of system models are still at an early stage. It is difficult to evaluate the comprehensive benefits because of the complexity and diversity of the ecosystem. Therefore an evaluation indicator system for multi-component and multiple cropping systems was set up according to the principles and methods of ecology and system engineering, and grey relation clustering analysis used to evaluate the comprehensive benefits of multi-component and multiple cropping systems. Finally screening allowed identification of the optimized model, based on orientating experiences with upland red soil at Jiangxi Agricultural University from 1984 to 2004. The results showed that the grey relation degree of “cabbage/potato/maize-sesame” was highest among 23 multi-component and multiple cropping systems, and corresponded to the optimized system. It provides optimal social, economic and ecological benefits, based upon improved yields and farmers' income while achieving sustainable development of agricultural production. Therefore its use in future could be beneficially extended on upland red soil over a large scale. The grey relation degree of “canola || chinese milk vetch/maize/maize || mung bean” was next best, and is suitable for more extensive use on upland red soil at the outskirts of the city. These two planting patterns should be actively pursued in the adjustment of planting structure and optimization of planting patterns on upland red soil in the future.

Key words: upland red soil; multiple cropping systems; grey relation analysis; clustering analysis; comprehensive evaluation

基金项目: 国家教育部科学技术研究重点资助项目(03067)

收稿日期: 2005-09-11; **修订日期:** 2006-07-28

作者简介: 黄国勤(1962 ~), 男, 江西余江人, 博士, 教授, 主要从事耕作制度、农业生态、农业可持续发展的研究与教学. E-mail: hgqjxauhqq@sina.com.cn

Foundation item: The project was supported by Scientific and Technological Key Item of the Ministry of Education of China(No.03067)

Received date: 2005-09-11; **Accepted date:** 2006-07-28

Biography: HUANG Guo-Qin, Ph. D., Professor, mainly engaged in tillage system, agricultural ecology, agricultural sustainable development. E-mail: hgqjxauhqq@sina.com.cn

红壤旱地是我国南方重要的农业土壤资源。深度开发和合理利用红壤旱地资源,不仅在我国南方农业可持续发展中占有重要战略地位,而且一直是我国南方农业大发展的重要方向和研究重点^[1-3]。长期以来,由于存在酸、瘦、粘、板、旱、蚀等多种生产限制因子,加上耕作粗放和不合理的开发利用,致使红壤旱地至今农田生产力低、经济效益差,与南方快速发展的经济形势极不相称。或者说,红壤旱地较低的生产力和较差的经济效益,在一定程度上已难以适应南方经济快速发展的需要,对促进当前的粮食增产、农民增收,以及全面建设小康社会和构建社会主义和谐社会等极为不利。

然而,由于南方红壤旱地地处热带、亚热带湿润气候区,光、温、水资源充足,自然条件十分优越,适宜于种植多种农作物、发展多熟种植模式和建立高效优化的多熟种植系统。建立高效、优化的多熟种植系统和模式,不仅能提高作物光能利用率和水分利用率,减缓干旱程度,而且可以提高养分再循环率,使 N、P、K 的配比更为合理,因此,是合理开发利用红壤旱地、提升红壤旱地生态经济和社会效益的重要措施之一^[4-6]。作者从 1984 年开始,在江西农业大学农学试验站进行“红壤旱地多熟种植系统生态、经济和社会效益研究”的长期定位试验,至今已进行了 20a(田间定位试验仍在继续),已连续筛选出一些较优化的多熟种植模式,急需科学全面地进行综合评价和分类,以便生产上大面积推广应用。迄今,前人已对不同种植系统的效益采用多种方法进行综合评价^[7-22],但缺少定位性年际间系统、纵向定量研究。本文基于灰色系统理论中的关联度概念^[23],采用加权灰色关联聚类分析法,拟对红壤旱地 20a 定位对比试验中 23 种多熟种植系统的生态、经济、社会效益进行定量分析,并给予分类和综合评价,旨在科学探索和精确筛选适宜红壤旱地种植和优化种植模式,以便为实际生产提供参考依据,从而为红壤旱作区农业的全面、协调和可持续发展做出积极贡献。

1 试验地概况和资料来源

试验地点设在江西农业大学农学试验站(28°46'04.476"N, 115°50'02.040"E)内,1984~2004 年间,年平均气温为 17.6℃,日平均气温 ≥ 10 ℃ 的活动积温达 5600℃,持续 255d。年平均日照总辐射量为 $114.39 \times 4.186J/cm^2$,年平均日照时数为 1820.4h,无霜期 272d,年平均降水量达 1624.4 mm。四季温差大,光照充足,雨量丰沛,适于作物多熟生长期需要,并有较大的温光生产潜力。土壤为第四纪红粘土发育的红壤,地形为岗地,无灌溉条件。本文资料来源于 1984~2004 年在江西农业大学农学试验站进行的“红壤旱地多熟种植系统生态、经济和社会效益研究”长期定位试验选择研究的农田种植模式及所测定的试验数据^{①-④}。

2 评价对象与指标体系

采用 1984~2004 年在江西农业大学红壤旱地上不同类型的 23 种多元多熟种植系统为样品,分别为*:
 (1) 大豆-玉米;(2) 混播绿肥-甘薯;(3) 花生-绿豆;(4) 蚕豆-棉花;(5) 早玉米 || 绿豆;(6) 紫云英-玉米-芝麻;
 (7) 紫云英-玉米/玉米 || 绿豆;(8) 蚕豆-玉米/甘薯;(9) 油菜/大豆 || 玉米-芝麻;(10) 黑麦草 × 紫云英/大豆-玉米;
 (11) 油菜 || 紫云英/玉米/玉米 || 绿豆;(12) 紫云英 × 油菜-玉米-玉米;(13) 紫云英/大豆 || 玉米/玉米;(14) 蚕豆/玉米/甘薯;
 (15) 油菜-绿豆 || 甘薯;(16) 早玉米 || 花生;(17) 混播绿肥-玉米-大豆;(18) 黑麦草/大豆-晚玉米;
 (19) 玉米 || 大豆;(20) 油菜-大豆 || 玉米-芝麻;(21) 大麦-花生-荞麦;(22) 白菜/马铃薯/玉米-芝麻;(23) 蚕豆-西瓜-玉米。然后,据有关文献^[24,25],定量分析红壤旱地多元多熟种植系统曾先后采用多个评价因子,除去定性因子和明显相关因子后,选 20 个评价因子构成评价指标体系(见表 1)。按其物理意义,这 20 个评价因子又可归为生态效益($I_1 \sim I_3$)、经济效益($I_4 \sim I_7$)和社会效益($I_{18} \sim I_{20}$)3 大公共因子。评价指标体系确定后,搜集 4 个典型试验年份(1984、1998、2001、2003)各年中多元多熟种植系统中的 20 个指标原始数据,共 2300 个数据,分别逐个列入表 2。

* 符号说明:“-”作物接茬;“|| (或“+”)作物间作;“/”作物套作;“×”作物混作

① 黄国勤. 红壤旱地二熟制与三熟制生产力及其机理研究. 硕士论文. 1984

② 叶方. 红壤旱地以玉米为主体耕作制度的可持续发展研究及评价. 硕士论文. 1998

③ 张明林. 红壤旱地间作生态系统功能及调控研究. 硕士论文. 2001

④ 苏艳红. 红壤旱地多熟种植系统的生态学功能及调控措施研究. 硕士论文. 2004

表 1 多元多熟种植系统综合效益评价指标体系

Table 1 The indicators of comprehensive benefits evaluation for multicomponent-multiple cropping systems

第一级指标 The first-class indicator	第二级指标 The second-class indicator	第三级指标 The third -class indicator	
生态效益 Ecological benefits	产出能 Output energy(GJ/hm ²) (I ₁)		
	投入能 Input energy(GJ/hm ²) (I ₂)		
	能量产投比 Energy output/Energy input (I ₃)		
	光能利用率 Solar energy utilizing rate(%)(I ₄)		
	养分投入 Nutrient input	N(kg/hm ²) (I ₅) P ₂ O ₅ (kg/hm ²) (I ₆) K ₂ O(kg/hm ²) (I ₇)	
	养分输出 Nutrient output	N(kg/hm ²) (I ₈) P ₂ O ₅ (kg/hm ²) (I ₉) K ₂ O(kg/hm ²) (I ₁₀)	
	养分输入/输出 Nutrient input/Nutrient output	N (I ₁₁) P ₂ O ₅ (I ₁₂) K ₂ O (I ₁₃)	
	经济效益 Economic benefits	总产值 Gross value(yuan/hm ²) (I ₁₄) 总成本 Gross cost(yuan/hm ²) (I ₁₅) 纯收入 Net income(yuan/hm ²) (I ₁₆) 成本盈利率 Cost payoff rate (%) (I ₁₇)	
	社会效益 Social benefits	投工数 Labor input number(d) (I ₁₈)	
		劳力日产值 Gross value/labor input(Yuan/d) (I ₁₉) 科技进步率 Technological progress rate(%)(I ₂₀)	

表 2 23 种多熟种植系统评价指标原始数据及参比种植系统的指标数列 *

Table 2 Original data of assessment indicators for 23 multiple cropping systems and an indicator series of reference cropping system

种植系统 Croppingsystems	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	I ₆	I ₇	I ₈	I ₉	I ₁₀
X ₀	236.34	9.38	3.39	1.45	196.90	93.00	103.20	384.90	268.50	312.00
X ₁	19.86	40.17	0.49	0.66	245.20	217.95	103.20	91.80	34.50	22.95
X ₂	19.32	44.60	0.43	0.91	215.20	164.25	229.50	19.35	6.45	32.25
X ₃	15.03	38.10	0.39	0.74	245.20	213.45	103.20	60.00	22.50	15.00
X ₄	32.99	48.08	0.69	0.98	334.90	294.45	112.35	112.35	42.15	28.05
X ₅	26.67	45.08	0.59	0.96	286.45	177.75	163.20	102.75	38.55	25.65
X ₆	34.62	43.87	0.79	0.99	245.20	247.95	255.00	104.85	35.40	50.55
X ₇	230.57	84.97	2.71	1.43	284.40	138.00	254.50	242.30	86.50	178.80
X ₈	236.34	69.67	3.39	1.39	300.40	174.50	300.00	265.80	123.20	246.80
X ₉	154.13	81.38	1.89	0.90	298.20	212.20	298.30	234.20	168.30	263.00
X ₁₀	123.41	130.38	0.95	1.05	310.40	218.30	318.91	221.30	143.20	256.20
X ₁₁	117.39	71.34	1.65	0.75	265.80	187.00	275.00	185.60	89.40	188.00
X ₁₂	125.67	87.65	1.43	0.81	196.90	176.40	245.00	145.30	98.40	190.30
X ₁₃	21.57	53.52	0.40	0.53	259.00	187.00	278.50	189.80	99.80	194.50
X ₁₄	21.11	51.76	0.41	0.46	248.40	189.00	289.00	190.30	100.10	214.30
X ₁₅	20.33	51.30	0.40	0.51	268.00	200.00	256.70	178.40	132.40	210.20
X ₁₆	41.12	103.75	0.40	0.87	276.00	168.00	247.60	212.90	89.40	162.80
X ₁₇	39.59	102.38	0.39	0.83	396.80	168.00	288.80	268.70	120.10	174.70
X ₁₈	36.81	97.82	0.38	0.77	388.70	240.00	330.00	300.40	117.20	166.40
X ₁₉	36.34	97.26	0.37	0.77	483.00	160.00	275.00	384.90	109.70	153.20
X ₂₀	14.57	11.92	1.22	1.34	444.00	126.00	384.00	346.50	268.50	312.00
X ₂₁	10.33	9.38	1.10	0.86	363.00	93.00	295.50	279.00	180.00	264.00
X ₂₂	27.19	24.11	1.13	1.45	424.50	120.00	360.50	324.50	254.50	294.00
X ₂₃	16.57	14.99	1.11	1.37	372.00	103.50	319.50	309.00	225.00	276.00

续表 2

种植系统 Farming systems	I ₁₁	I ₁₂	I ₁₃	I ₁₄	I ₁₅	I ₁₆	I ₁₇	I ₁₈	I ₁₉	I ₂₀
X ₀	1.13	0.46	1.12	74947.20	1535.05	48202.20	247.50	164.00	164.50	98.99
X ₁	2.67	6.32	4.50	3323.70	1655.50	1668.20	100.77	280.00	55.60	20.60
X ₂	11.12	25.47	7.12	3694.80	1535.05	2159.75	140.70	265.00	69.50	23.20
X ₃	4.09	9.49	6.88	3526.50	1668.10	1858.40	111.41	260.50	62.10	24.40
X ₄	2.98	6.99	4.01	5351.55	1951.30	3400.25	174.26	259.00	58.00	30.40
X ₅	2.79	4.61	6.36	3077.40	1672.90	1404.50	83.96	283.50	41.20	26.20
X ₆	2.34	7.00	5.04	5661.60	1804.75	3856.85	213.71	242.50	65.40	31.20
X ₇	1.17	1.60	1.42	16544.37	6246.00	10298.37	164.88	225.00	73.53	64.20
X ₈	1.13	1.42	1.22	18558.51	6347.90	12210.61	192.36	270.00	68.74	93.20
X ₉	1.27	1.26	1.13	16485.15	5296.00	11189.15	211.28	180.00	91.58	74.30
X ₁₀	1.40	1.52	1.24	11683.70	4998.00	6685.70	133.77	180.00	64.91	45.60
X ₁₁	1.43	2.09	1.46	17135.80	5055.00	12080.80	238.99	164.00	103.85	85.60
X ₁₂	1.36	1.79	1.29	14789.40	4864.40	9925.00	204.03	195.00	75.84	63.40
X ₁₃	1.36	1.87	1.43	8536.80	2475.80	6061.00	244.81	320.00	81.30	44.30
X ₁₄	1.31	1.89	1.35	8888.70	2591.60	6297.10	242.98	312.00	79.00	44.60
X ₁₅	1.50	1.51	1.22	8528.60	2454.30	6074.30	247.50	318.00	81.20	44.50
X ₁₆	1.30	1.88	1.52	17689.50	5946.50	11743.00	197.48	187.50	62.60	97.55
X ₁₇	1.48	1.40	1.65	13973.60	6046.70	7926.90	131.09	180.00	44.00	63.05
X ₁₈	1.29	2.05	1.98	13458.40	5855.70	7602.70	129.83	165.00	46.10	56.86
X ₁₉	1.25	1.46	1.80	16465.20	7133.60	9331.60	130.81	217.50	42.90	30.30
X ₂₀	1.28	0.47	1.23	15240.30	11289.00	3951.30	35.00	243.50	164.50	84.30
X ₂₁	1.30	0.52	1.12	17625.20	9424.50	8200.70	87.01	265.00	128.20	84.60
X ₂₂	1.31	0.47	1.23	74947.20	26745.00	48202.20	180.23	268.00	130.00	98.99
X ₂₃	1.20	0.46	1.16	25612.90	12486.00	13126.90	105.13	254.00	99.50	94.34

* 表中多熟种植系统 X₀ 为参比种植系统 Reference cropping system is represented as X₀

3 运行计算与结果分析

3.1 加权灰色关联度的计算

首先根据本地的生产实际和“两高一优”目标,确定各指标最优化值,构成参比数列 $X_0(k)$, 表示为 $\{X_0(1)\}, \{X_0(2)\}, \dots, \{X_0(n)\} (k = 1, 2, \dots, n)$ 。试验各处理各单项指标所构成的数列, 构成比较数列 $X_i(k)$ (i 为各处理的种类), 表示为 $\{X_i(1), X_i(2) \dots X_i(n)\} (k = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m)$ 。然后将数据进行同一化处理^[26], 经同一化处理后所有值均居于 0~1。其中对于指标值越大越好的正指标, 采用下式处理:

$$X'_i(k) = \frac{x_i(k) - \min(x_i(k), Lx_{23}(k))}{\max(x_i(k), Lx_{23}(k)) - \min(x_i(k), Lx_{23}(k))};$$

对于指标值越小越好的逆指标, 采用下式处理:

$$X'_i(k) = \frac{\max(x_i(k), Lx_{23}(k)) - x_i(k)}{\max(x_i(k), Lx_{23}(k)) - \min(x_i(k), Lx_{23}(k))} \quad (1)$$

其次参比数列 $\{X_0(p)\}$ 与比较数列为 $\{X_i(p)\}$ 的关联系数 $L_i(p)$ 可由下式计算。

$$L_i(p) = \frac{\Delta_{\min} + \rho\Delta_{\max}}{\Delta_i(p) + \rho\Delta_{\max}} \quad (2)$$

式中, $\Delta_i(p)$ 表示 p 时刻两比较序列的绝对差, 即 $\Delta_i(p) = |x_0(p) - x_i(p)| (1 \leq i \leq m)$; $\Delta_{\max}$ 和 $\Delta_{\min}$, 分别表示所有比较序列各个时刻绝对差中的最大值与最小值。 ρ 称为分辨系数, 其意义是削弱最大绝对差数值太大引起的失真, 提高关联系数之间的差异显著性, $\rho \in (0, 1)$, 一般情况下常取 0.5。关联系数的范围为 $0 < L \leq 1$ 。

再求加权关联度。各地对种植模式的评判对各指标的重要性要求是不相同的, 给予各指标的关联系数不同的权重 (W_k), 对各种种植模式的评价将更为合理。因此计算公式为:

$$r_i = \sum_{k=1}^n w_k L_i(k) \quad (3)$$

本研究各种效益的权重分别为:经济效益 0.5,生态效益 0.3,社会效益 0.2,其中能量效益 0.15,肥料效益 0.15。再将 m 个比较序列对同一比较序列的关联度按大小顺序排列起来,便组成关联序,它直接反映各个比较序列对于参比序列的“优劣”关系。

根据上述步骤,计算不同种植系统综合效益的关联度如表 3。

表 3 23 种多熟种植系统综合效益的灰色关联度及排序

Table 3 Grey relation degrees of comprehensive benefits of 23 multiple cropping systems and their taxis

种植系统 Cropping systems	生态效益($I_1 \sim I_{13}$) Ecological benefits		经济效益($I_{14} \sim I_{17}$) Economic benefits	社会效益($I_{18} \sim I_{20}$) Social benefits	综合加权效益 Total weight benefits	排序 Taxis
	能量效益 Energy benefits	肥料效益 Fertilizer benefits				
X_1	0.5198	0.3681	0.5198	0.3656	0.4748	22
X_2	0.5427	0.3927	0.5427	0.3901	0.4752	21
X_3	0.5246	0.3698	0.5246	0.3891	0.4755	20
X_4	0.5609	0.4131	0.5609	0.3937	0.5010	18
X_5	0.5124	0.4047	0.5124	0.3594	0.4692	23
X_6	0.6062	0.4131	0.6062	0.4161	0.5255	14
X_7	0.5133	0.7929	0.5133	0.4983	0.5772	6
X_8	0.5413	0.8482	0.5413	0.5623	0.6140	3
X_9	0.5710	0.5267	0.5710	0.6338	0.5952	4
X_{10}	0.4975	0.6085	0.4975	0.5452	0.5490	11
X_{11}	0.6210	0.4677	0.6210	0.7498	0.6275	2
X_{12}	0.5635	0.4903	0.5635	0.5500	0.5698	7
X_{13}	0.6535	0.3673	0.6535	0.3921	0.5586	9
X_{14}	0.6481	0.3621	0.6481	0.3943	0.5572	10
X_{15}	0.6601	0.3641	0.6601	0.3933	0.5634	8
X_{16}	0.5493	0.4635	0.5493	0.7033	0.5831	5
X_{17}	0.4880	0.4559	0.4880	0.5633	0.5206	16
X_{18}	0.4884	0.4410	0.4884	0.6039	0.5228	15
X_{19}	0.4814	0.4399	0.4814	0.4310	0.4935	19
X_{20}	0.4047	0.4759	0.4047	0.7409	0.5421	12
X_{21}	0.4419	0.3798	0.4419	0.5989	0.5116	17
X_{22}	0.7364	0.5284	0.7364	0.6899	0.7022	1
X_{23}	0.4460	0.4854	0.4460	0.6150	0.5352	13

从表 3 中可看出:关联度值大于 0.6 的种植系统综合效益大小顺序为 X_{22} (“白菜/马铃薯/玉米-芝麻”) > X_{11} (“油菜 || 紫云英/玉米/玉米 || 绿豆”) > X_8 (“蚕豆-玉米/甘薯”)。同时,关联度值大于 0.5 小于 0.6 的种植系统综合效益大小顺序为 X_9 (“油菜/大豆 || 玉米-芝麻”) > X_{16} (“蚕豆/玉米/甘薯”) > X_7 (“紫云英-玉米/玉米 || 绿豆”) > X_{12} (“紫云英 × 油菜-玉米-玉米”) > X_{15} (“油菜-绿豆 || 甘薯”) > X_{13} (“紫云英/大豆 || 玉米/玉米”) > X_{14} (“蚕豆/玉米/甘薯”) > X_{10} (“黑麦草 × 紫云英/大豆-玉米”) > X_{20} (“油菜-大豆 || 玉米-芝麻”) > X_{23} (“蚕豆-西瓜-玉米”) > X_6 (“紫云英-玉米-芝麻”) > X_{18} (“黑麦草/大豆-晚玉米”) > X_{17} (“混播绿肥-玉米-大豆”) > X_{21} (“大麦-花生-荞麦”) > X_4 (“蚕豆-棉花”)。其他种植系统关联度值均小于 0.5。

3.2 聚类分析

根据全体 r_i 可构成加权关联度集 R , 根据 R 集, 定义各元素间关联度差异矩阵 E , 其中矩阵中每一元素

$$d_{ij} = |r_i - r_j| \quad (4)$$

由 E 矩阵求差异距离矩阵 D , 其中矩阵 D 是一主对角线为零的对称矩阵。再由差异距离矩阵 D 求得相似关系 R_g , 其中矩阵中元素

$$g_{ij} = 1 - \frac{d_{ij}}{\max(D)} \quad (5)$$

式中 $\max(D)$ 表示取矩阵 D 中的最大值元素。

根据上述步骤,计算不同种植系统各种效益的相似关系矩阵 R_g ,共有 23×23 个元素(略)。首先设不同的种植系统为 X_i 。从 R_g 矩阵中,首先以关联度值最大的种植系统 X_{22} 所对应的第 22 行及第 22 列的数据中寻找最大数(本矩阵中为 0.8195),这最大数对应的种植系统 X_{19} 综合效益评价指数排列第二,然后再依次第二种植系统所对应数据中寻找最大值(0.9939),则对应的就是综合质量排行第三的种植系统 X_8 ,依此类推,直到 X_6 。

任取实数 $\lambda \in [0,1]$,根据每类适宜的样本数量将其进行分类。取 $\lambda = 0.93$,则这 23 个不同的种植系统可分为 5 种类型:

优 X_{22} ;

良 X_{11}, X_8, X_9 ;

中 $X_{16}, X_7, X_{12}, X_{15}, X_{13}, X_{14}, X_{10}, X_{20}, X_{23}, X_6, X_{18}, X_{17}, X_{21}, X_4$;

劣 X_{19}, X_3 ;

差 X_2, X_1, X_5 。

聚类结果和表 2 相结合时可发现,在三熟种植系统中, X_{22} ,即“白菜/马铃薯/玉米-芝麻”种植模式被评为最优种植系统, X_{11}, X_8, X_9 种植模式属于良性种植系统, X_{16}, X_7, X_{12} 等均属于中等种植系统。而二熟种植系统中, X_{19}, X_3 等综合效益均表现为低差。以上聚类结果可较客观地反映多元多熟不同种植系统的优劣,并可发现三熟种植系统综合效益明显地优于二熟种植系统,这与实验结果相吻合^[20]。

4 多熟种植系统的综合评价

多熟种植系统综合效益主要取决于生态、经济、社会效益三者的统一。在 23 种多熟种植系统中,首先可以看出, X_{22} ,即“白菜/马铃薯/玉米-芝麻”,由于茬口衔接及群体空间分布较合理,光能利用率高,生产系统稳定,作物产值高,直接经济效益显著;粮、经、菜四季合理搭配,多种多样农产品满足人们不同的需要,社会效益显著;另一方面由于无机肥料投入量相对较小,有机肥料利用率高,提高养分再循环率,使 N、P、K 的配比更为合理,具有良好的生态效益和可持续发展能力,故被评为最优种植系统,适应在红壤旱作区大面积推广。

其次,在多熟种植系统中, X_{11} (“油菜 || 紫云英/玉米/玉米 || 绿豆”), X_8 (“蚕豆-玉米/甘薯”)和 X_9 (“油菜/大豆 || 玉米-芝麻”)的生态效益与经济效益均较高,但由于人工投入大,社会效益不明显,因此,综合效益被评为“良”,适合于劳动力相对充足的城郊红壤旱作区推广应用。

从以上被评为“优”和“良”的 4 种植系统中可以看出, X_{22} (白菜/马铃薯/玉米-芝麻)和 X_{11} (油菜 || 紫云英/玉米/玉米 || 绿豆)两种植植模式,具有“新”的特点,即该两种植植模式均为新型的多熟种植方式,其生态效益、经济效益和社会效益均优于现行的传统种植模式,对今后红壤旱作区种植业结构布局的调整和种植方式的优化具有积极意义。

第三, $X_{16}, X_7, X_{12}, X_{15}$ 等多熟种植系统绝大部分属于三熟种植系统,它们的生态、经济、社会效益比较均衡,且都处于中等或中等以上水平,故综合效益“中”。

最后,目前在红壤旱作区种植占主体的 $X_{19}, X_3, X_2, X_1, X_5$ 均属于二熟种植系统,由于作物茬口衔接不够合理,土地利用率高,复种指数低,光能利用率明显不及三熟种植系统,且没有考虑到用养结合,土壤退化严重,生态效益和社会效益较差,因此,综合效益分别评为“劣”和“差”,一般来说,不适合在红壤旱地上大面积种植和推广。

5 结论

从以上 23 种红壤旱地多熟种植方式定位对比实验结果,可看出如下趋势:旱地从二熟种植模式逐步发展到三熟种植模式,提高了光能利用率和土地复种指数,从而达到增产、增收、增效的目的;增粮型种植模式以“蚕豆-春玉米”为主体的三熟制冬季和秋季引入蔬菜和芝麻等小宗经济作物,是稳定提高作物产量和增加经

经济效益的新型种植方式。总而言之,本试验红壤旱地种植系统经历了 20 世纪 80 年代的低水平粮经两熟制,90 年代以春玉米为主体的粮经三熟制,到 21 世纪初的粮经饲菜 4 元结构的多熟种植结构。同时,根据 20 项指标,对 23 类不同种植系统进行灰色关联分析,并按照最优模式关联度值,进行相似聚类分析。结果表明,“白菜/马铃薯/玉米-芝麻”关联度值最大,生态、经济、社会综合效益最高,是红壤旱地增产、增收、增效的最优模式。“油菜 || 紫云英/玉米/玉米 || 绿豆”次之,适合于劳动力相对充足的城郊红壤旱作区,对今后红壤旱作区种植业结构布局和种植方式的优化具有积极意义。

References:

- [1] Xie Z M, Lu J, Yu J Y, *et al.* Degradation process of red soil and its niche. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(6): 669 ~ 672.
- [2] Zhao Q G. *The Red Soil Material Cycling and its Regulation*. Beijing: Science Press, 2002. 41 ~ 165.
- [3] Huang G Q. The way and directions of adjustment of agriculture structure in the South of China. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2002, 18(4): 127 ~ 129.
- [4] He Y Q, Wu D F, Li C L, *et al.* Nutrient and water cycling in red soils with different planting system and their management. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(9): 1547 ~ 1551.
- [5] Zhao Q G. Mechanism, Temporal-spatial changes and controlling countermeasures of soil degradation in hilly red soil region of southeastern China. Beijing: Science Press, 2002. 378 ~ 465.
- [6] Huang G Q. Views on agricultural ecology and its developing trend. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2002, 24(5): 656 ~ 660.
- [7] Zhang H Q, Li J Y, Niu D. Study on spatial optimization allocation of land use in the typical red soil hilly region in south China. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(5): 668 ~ 676.
- [8] Song S B, Cai H J. Comprehensive quantitative assessment models for ecological environment in arid area. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2509 ~ 2515.
- [9] Wu L F, OUYAN Z, Tang D Y. The quantitative assessment of ago-ecosystem health on a regional dimension. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2740 ~ 2748.
- [10] Xu M J, Ge X D, Zhang Y Q, *et al.* An index system for the sustainability assessment of cultivated lands and a case study of Wujiang city. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(3): 275 ~ 284.
- [11] Wu G, Wei J, Zhang P, *et al.* Benefit assessment of agroforestry ecosystems in the Three Gorges Reservoir Area. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(2): 232 ~ 239.
- [12] Wu J C, Wang Q J, Kou C L, *et al.* Evaluation of Comprehensive Benefit on Cropping Patterns in Kaifeng Sandy Experimental Region. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(1): 3 ~ 8.
- [13] Zhou B Z, Yang H, Zhou S L, *et al.* The Eco-environmental Efficiencies and Its Control in Agricultural Development in Hilly Region of Red Soil. *Areal Research and Development*, 2002, 12(4): 14 ~ 19.
- [14] Liu Z C, Zhong S F. AHP and Fuzzy comprehensive evaluation of farming systems. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 1990, 12(1): 65 ~ 72.
- [15] Liu H Z, Zhao Q J, Zheng J C, *et al.* Evaluations on multicomponent-multiple cropping patterns and their comprehensive benefits of along Changjiang River Economic Zone in Jiangsu. *Rural Eco-Environment*, 1996, 12(4): 19 ~ 23.
- [16] Xu Z B, Li Y L, Ma Z Q, *et al.* Applying grey-relation analysis to study on grain-vegetable construction of space-growing model. *Journal of Biomathematics*, 1995, 12(4): 224 ~ 228.
- [17] Wang L C, Jia Z K, Jiang J, *et al.* Study on the multiple cropping patterns with high efficiency in the irrigated farmland in semi-arid areas of south Ningxia. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2000, 9(4): 58 ~ 62.
- [18] Huang X X, Sheng M X. Multifactorial evaluation of economic and ecologic effect of cropping system with application of relational grade analysis. *Journal of Jiangsu Agricultural College*, 1993, 14(2): 31 ~ 36.
- [19] Ye F, Huang G Q. Comprehensive appraisal of effects of several maize-based cropping systems on upland red soil. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2000, 12(3): 1 ~ 6.
- [20] Muza, L. Selecting green-manure legumes for relay and intercropping systems with maize on sandy soils in Zimbabwe. In *Cover Crops in West Africa: Contributing to Sustainable Agriculture*, 1996. 1 ~ 3.
- [21] Jat R L, Gaur B L, Suresh Kumar, Kulhari R K. Effects of weed management, fertilizers and Rhizobium inoculation on growth, yield attributes of maize (*Zeamays*) and soybean (*Glycine max*) under maize + soybean intercropping systems. *Indian Journal of Agronomy*, 1998, 43(1): 23 ~ 26.
- [22] Gollar R G, Patil V C. Studies on maize based cropping systems under simultaneous and staggered planting of intercrops. *Karnataka Journal of Agricultural*

Sciences, 1997, 10(3): 648 ~ 652.

- [23] Deng J L. Primary Methods of Grey Systems. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1987. 35 ~ 47.
- [24] Wu D F, He Y Q. Comprehensive evaluation of the eco-agriculture in Yujiang county, Jiangxi Province. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(5): 819 ~ 822.
- [25] Huang G Q, Zhang X G, Ke J G. The establishment and application of a comprehensive evaluation criteria set for cropping systems. In: CAS ecological experiment station. *Research on Ecological system of Red soil(III)*. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 1995. 65 ~ 78.
- [26] Liu Y W, Gong Y Z. Applying grey relation clustering analysis into quality evaluation. *Shangdong Communication Techonology*, 1999, (4): 71 ~ 74.

参考文献:

- [1] 谢正苗, 吕军, 俞劲炎, 等. 红壤退化过程与生态位的研究. *应用生态学报*, 1998, 9(6): 669 ~ 672.
- [2] 赵其国. 红壤物质循环及其调控. 北京: 科学出版社, 2002. 41 ~ 165.
- [3] 黄国勤. 中国南方农业结构调整的方向和途径. *中国农学通报*, 2002, 18(4): 127 ~ 129.
- [4] 何园球, 吴大付, 李成亮, 等. 红壤旱地不同种植方式物质循环与调控. *应用生态学报*, 2004, 15(9): 1547 ~ 1551.
- [5] 赵其国. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控. 北京: 科学出版社, 2002. 378 ~ 465.
- [6] 黄国勤. 论农业生态学及其发展趋势. *江西农业大学学报*, 2002, 24(5): 656 ~ 660.
- [7] 张红旗, 李家水, 牛栋. 典型红壤丘陵区土地利用空间优化配置. *地理学报*, 2003, 58(5): 668 ~ 676.
- [8] 宋松柏, 蔡焕杰. 旱区生态环境质量的综合定量评价模型. *生态学报*, 2004, 24(11): 2509 ~ 2515.
- [9] 武兰芳, 欧阳竹, 唐登银. 区域农业生态系统健康定量评价. *生态学报*, 2004, 24(12): 2740 ~ 2748.
- [10] 徐梦洁, 葛向东, 张永勤, 等. 耕地可持续利用评价指标体系及评价. *土壤学报*, 2001, 38(3): 275 ~ 284.
- [11] 吴钢, 魏晶, 张萍, 等. 三峡库区农林复合生态系统的效益评价. *生态学报*, 2002, 22(2): 232 ~ 239.
- [12] 武继承, 王秋杰, 寇长林, 等. 开封沙地试验区不同作物种植方式的综合效益分析. *生态学杂志*, 1999, 18(1): 3 ~ 8.
- [13] 周炳中, 杨浩, 周生路, 等. 红壤丘陵区农业开发中的生态环境效应及其调控. *地域研究与开发*, 2002, 12(4): 14 ~ 19.
- [14] 刘灶长, 钟树福. 耕作制度的层次分析和模糊综合评价. *江西农业大学学报*, 1990, 12(1): 65 ~ 72.
- [15] 刘华周, 赵强基, 郑建初, 等. 江苏沿江经济区多元多熟种植方式及其效益评价. *农村生态环境*, 1996, 12(4): 19 ~ 23.
- [16] 许志斌, 李彦禄, 马自清, 等. 应用灰色关联分析研究粮菜立体种植模式结构. *生物数学学报*, 1995, 12(4): 224 ~ 228.
- [17] 王龙昌, 贾志宽, 蒋骏, 等. 宁南半干旱区灌溉农田高效多熟种植模式研究. *西北农业学报*, 2000, 9(4): 58 ~ 62.
- [18] 黄细喜, 沈明星. 应用灰色关联分析综合评估种植制度经济和生态效益. *江苏农学院学报*, 1993, 14(2): 31 ~ 36.
- [19] 叶方, 黄国勤. 红壤旱地几种耕作制度效益的综合评价. *江西农业学报*, 2000, 12(3): 1 ~ 6.
- [23] 邓聚龙. 灰色系统基本方法. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987. 35 ~ 47.
- [24] 吴大付, 何园球. 江西省余江县生态农业综合评价. *土壤学报*, 2004, 41(5): 819 ~ 822.
- [25] 黄国勤, 章熙谷, 柯建国. 耕作制度综合评价指标体系的建立及其应用. 见: 中国科学院红壤生态实验站. *红壤生态系统研究(第三集)*. 北京: 中国农业科技出版社, 1995. 65 ~ 78.
- [26] 刘耀文, 龚应珍. 一种加权灰色关联聚类分析方法在质量评价中的应用. *山东交通科技*, 1999, (4): 71 ~ 74.