

稻田轮作系统的生态学分析^{*}

黄国勤¹ 熊云明¹ 钱海燕¹ 王淑彬¹ 刘隆旺¹ 赵其国²

(1 江西农业大学生态科学研究中心,南昌 330045)

(2 中国科学院南京土壤研究所,南京 210008)

摘 要 针对目前稻田单一化的连作耕作制度对农田环境造成的不利因素,根据 5 a 田间定位试验,从土壤理化性状、作物产量变化、病虫害发生发展规律、能流及养分平衡状况等角度对稻田连作耕作制度和轮作系统进行生态学分析。结果表明,与连作耕作制度相比较,在试验设计范围内,稻田轮作系统明显改善土壤的理化性状,使得土壤随着耕种年限增加,容重下降,而孔隙度增加,固相比率下降,气相比率上升,气液比值增大,土壤通透性大大增强,有效阻止土壤次生潜育化和土壤酸化,提高土壤 pH 值;改变了植株病原菌寄生,增强了植株的抵抗能力,对作物病、虫、草害产生了一定的抑制作用。同时,稻田轮作系统的总初级生产力、光能利用率、辅助能利用率分别比连作系统高 17.47%、9.87% 和 5.0%。N、P、K 的养分利用率也同样明显高于连作系统。提出了合理轮作的优化模式和复种模式。

关键词 稻田轮作;理化性状;作物生产力;能量转化;物质循环

中图分类号 S154.4

文献标识码 A

轮作是一种在同一田地上有顺序地轮换种植不同作物或轮换采用不同复种方式的种植方式,是农田用地和养地相结合,提高作物产量和改善农田生态环境的一项行之有效的农业技术措施^[1]。稻田轮作系统生态效应明显,具有改善土壤理化性状,调节土壤肥力,提高系统生产力,减轻农作物的病虫害,降低农田环境污染等优点^[2~8],因而合理轮作是提高作物产量的一项重要农业技术措施^[9]。

能量转化与物质循环是生态系统的基本功能之一,是农田生态系统的最主要的研究内容之一^[9~11]。武继承等通过对开封市几种农业种植方式的氮磷钾投入产出状况和价值转换效益等方面的分析,论述了其物流、能流和价值流的数量特征^[12]。秦丽杰通过对珲春市农田生态系统 N、P、K 物质循环的状况进行分析,指出了农田生产中的限制因素及解决的对策^[13]。刘鸿翔等采用模拟养分循环开展长期定位试验的方法,模拟几种农业制度的养分循环,探索不同经营制度对生产力发展、养分循环率以及对土壤环境的影响^[14]。冷志杰等建立了人口、玉米连作与奶牛养殖相结合的农牧生态系统物流模型^[15]。李忠佩等研究了不同施肥制度下红壤稻田

的养分循环与平衡规律^[16],朱清海研究了稻田养殖泥鳅时的物流、能流特征等^[17],为发展新型农业提供了科学依据。

纵观前人研究,发现大部分研究仅局限于某一、或某几部分,对整个过程缺乏完整系统的研究。种植黑麦草发展稻草轮作虽在一些地区进行了研究和生产,但绝大部分研究都是局部的,不能全面反映其效果。本文根据 5 a 田间定位试验,对稻田轮作系统进行生态学分析,并筛选出能持续发展的稻田轮作系统和顺应当今农业结构调整要求的种植模式,从而为农业发展提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 1998 年冬至 2003 年秋在江西农业大学实验站水稻田进行,试验前各小区均为肥(紫云英、黑麦草)一稻一稻种植方式,土壤肥力均匀一致。试验设 4 个处理,重复 4 次,随机区组排列,小区面积为 33.35 m²。试验设计见表 1。

* 国家重大科技专项“粮食丰产科技工程”子课题(编号:2004BA520A14—C14)研究内容

作者简介:黄国勤(1962~),男,教授,博士生导师,研究方向为耕作制度、农业生态及农业可持续发展

收稿日期:2005-01-06;收到修改稿日期:2005-09-09

表 1 稻田轮作田间试验设计¹⁾

Table 1 Design of the experiment on crop rotation systems in paddy field

处理 Treatment	代号 code	第一年度 1998 年冬 至 1999 年秋 The first year From the winter of 1998 to the autumn of 1999	第二年度 1999 年冬 至 2000 年秋 The second year From the winter of 1999 to the autumn of 2000	第三年度 2000 年冬 至 2001 年秋 The third year From the winter of 2000 to the autumn of 2001	第四年度 2001 年冬 至 2002 年秋 The fourth year From the winter of 2001 to the autumn of 2002	第五年度 2002 年冬 至 2003 年秋 The fifth year From the winter of 2002 to the autumn of 2003
		连作	A	紫云英 —早稻 —晚稻	紫云英 —早稻 —晚稻	紫云英 —早稻 —晚稻
轮作 1	B	紫云英 —早稻 —玉米	紫云英 —早玉米 —晚稻	紫云英 —早玉米 —玉米	紫云英 —早稻 —晚玉米 晚大豆	紫云英 —玉米 大豆 —晚稻
轮作 2	C	紫云英 —玉米 —晚稻	紫云英 —早玉米 —玉米	紫云英 —早稻 —玉米	紫云英 —玉米 大豆 —晚稻	黑麦草 —中稻
轮作 3	D	紫云英 —玉米 —玉米	紫云英 —早稻 —玉米	紫云英 —玉米 —晚稻	紫云英 —玉米 大 豆 —玉米 大豆	黑麦草 —早稻 —晚稻

1) “—”表示接茬 “—”means continuous cropping, “ ”表示间作 “ ”means intercropping
Chinese milk vetch; Early rice; Middle season rice; Late rice; Early corn; Corn; Ryegrass; Soybean; Late soybean

供试材料及品种:1998 年冬至 1999 年秋:冬季绿肥为紫云英,早稻为浙 965,早玉米为湘玉 7 号,晚稻为汕优 10 号;1999 年冬至 2000 年秋:冬季绿肥为紫云英,早稻为金优 402,早玉米为农大 108,晚稻为金优桂 99,晚玉米为掖单 13;2000 年冬至 2001 年秋分别为:冬季绿肥为紫云英,早稻为金优 974,早、晚玉米为掖单 13,晚稻为金优桂 99;2001 年冬至 2002 年秋:黑麦草为赣选一号,冬季紫云英为余江大叶籽,早稻为金优 974,早玉米为掖单 13,大豆为南昌本地种,中稻为两优培九,晚稻为金优 253;2002 年冬至 2003 年秋供试材料及品种分别为:冬季黑麦草为赣选一号,冬季紫云英为余江大叶籽,早稻为中优 66,早玉米为掖单 13,早大豆为南昌本地种,中稻为两优培九,晚稻为中优 207。

水稻、玉米、大豆采用计算机模拟优化施肥方案^[18]。早稻 666.7 m² 施纯 N 9 kg,中稻 666.7 m² 施纯 N 15 kg,晚稻 666.7 m² 施纯 N 12 kg;玉米 666.7 m² 施纯 N 15 kg。水稻施肥比例 N P₂O₅ K₂O = 1 0.8 1,玉米施肥比例 N P₂O₅ K₂O = 1 0.6 0.8。在施用肥料过程中,磷肥均作基肥(紫云英除外),666.7 m² 施钙镁磷肥 25 kg;钾肥的施用是水稻 666.7 m² 施氯化钾 15 kg,按分蘖肥 孕穗肥 抽穗肥 = 2 1 1,玉米 666.7 m² 施氯化钾 20 kg,按苗肥 穗肥 = 2 1;氮肥施用,水稻采用基肥 分蘖肥 孕穗肥 抽穗肥 = 2 1 1 1,玉米按基肥 苗肥 穗肥 = 2 3 5。大豆 666.7 m² 施钾肥 10 kg,按基肥 花肥 = 1 1,钙镁磷肥 25 kg,尿素 10 kg,按基肥 花肥 = 2 3。黑麦

草施肥标准参照李正明等人的研究^[19],磷肥和钾肥均为底肥,其中 666.7 m² 施钙镁磷肥 50 kg,氯化钾 15 kg;氮肥均采用苗肥 分蘖肥 刈期肥 = 1 5 4 (2 处理的最后一次刈割除外,1 个单位表示 3 kg)施用。紫云英不施肥。其他栽培管理同一般大田。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 土壤理化性状的测定 样品分析采用常规土壤分析方法^[20]。

1.2.2 作物草害调查 作物在大田生长期对田间杂草每隔 15 d 调查一次,主要针对杂草的种群变化、覆盖度等进行调查分析,采用乘积优势度法^[21]。

1.2.3 作物病害调查 于作物成熟期对作物主要病害的发病率及病情指数进行调查分析^[22]。

1.2.4 作物虫害调查 于水稻成熟前调查稻纵卷叶螟、二化螟的危害情况;于玉米和大豆成熟前调查其害虫和天敌的种类、数量^[23]。

1.2.5 作物考种与测产 (1) 水稻,于水稻成熟期,在各小区随机选取有代表性的水稻植株 5 丛,作为考种材料,并于成熟期采用五点取样法取 100 蔸水稻,脱粒晒干去秕后称重,作为实测产量;(2) 玉米,于玉米成熟期,在各小区选取有代表性的玉米棒 5 个,作为考种材料,并采集 25 个玉米棒脱粒晒干后称重,作为实测产量;(3) 大豆,于大豆成熟期,在各小区选取有代表性的大豆 5 株,作为考种材料,并采集 5 株大豆,除去豆荚晒干后称重,作为实测产量;(4) 黑麦草,分别在刈割期,采用五点法,每点测 1 m²,测其鲜重;(5) 紫云英,在成熟期,采用五点法,

每点测 1 m²,测其鲜重。

1.2.6 各处理的物质、劳力等投入 记载不同处理的种子、农药、化肥、劳力数量及资金投入等^[24],用 yuan hm⁻²表示。

1.2.7 能量数学模型的建立和能量合理投入范围的确定 合理的辅助能投入能使农田生态系统捕获更多的太阳能,提高光合效率和光合作用量,进而促进系统生产力水平的提高。国内外许多研究表明^[25],农田生态系统投入与产出之间的关系呈 S 型:即在达到一定投入水平之前,系统边际生产力与投入呈正相关,而超过这一投入水平之后,便开始下降。由于几乎农田生态系统的各种投入都可以采用能量的形式加以表示,因此可以得出结论,系统的能量投入与产出也同样呈 S 型关系^[24]。这种 S 型关系符合生态学有限空间种群增长的 Logistic 方程,其数学模型如下:

$$Y = K_m / (1 + e^{C-rX})$$

Y 为农田生态系统的能量产出,单位 J hm⁻²;X 为农田生态系统的能量投入,单位 J hm⁻²;r 为估算系数,表示能量产出的变化率;K_m 为在能量投入的各生产要素均为合理的条件下农田生态系统能够达到的潜在最大能量产出,单位 J hm⁻²;C 为估算系数。

根据能量投入和产出的实验分析和统计数据,即可拟合能量投入产出的 Logistic 曲线,求得给定农田生态系统的潜在最大能量产出 K_m 及方程的估算系数 r 和 C,根据此拟合方程便可计算出任一能量投入水平下系统的理论能量产出。

叶旭君等认为^[9],当能量投入弹性 EEI 在 0~1 范围内的能量投入水平是农田生态系统合理的投入范围。即当能量投入弹性 EEI=1 时,边际能量生产力 MEP 等于平均能量生产力 AEP,通过求解即得能量合理投入范围的下限;当能量投入弹性 EEI=0 时,边际能量生产力 MEP=0(取近似值 0.005),求得能量合理投入范围的上限。MEP、AEP 和 EEI 的表达式如下:

$$MEP = K_m \cdot r \cdot e^{C-rX} / (1 + e^{C-rX})^2;$$

$$AEP = (y - y^0) / x; EEI = MEP / AEP$$

其中, y⁰ 指在没有任何辅助能量投入的情况下系统的能量产出,单位为 J hm⁻²。在各处理能量数学模型的基础上,根据各指数的数学表达式,分别求出边际能量生产力,平均能量生产力,能量投入弹性。令 EEI=1,即 MEP=AEP 时求出下限;EEI=0,即 MEP=0 时,求出上限,从而建立能量数学模型和确定能量合理投入范围。

1.3 数据处理

采用 DPS 统计分析软件,用 Duncan 新复极差法进行多重比较。对于表格的同一列来说,字母相同表示处理间无显著差异,字母不同表示有显著性差异(p=0.05)。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性状

2.1.1 物理性状 从表 2 看出:(1)土壤容重:从 1999 年至 2003 年,各处理土壤容重总的呈下降趋势,但轮作较连作下降幅度大。其中处理 A 下降了 2.95%,B 下降了 5.83%,C 下降了 5.79%,D 为 4.88%。(2)土壤总孔隙度:从 1999 年至 2003 年,各系统土壤总孔隙度均呈上升趋势,其中 A 为 3.86%,B 为 4.79%,C 为 5.12%,D 为 4.86%。(3)土壤毛管孔隙度:从 1999 年至 2003 年,各处理土壤毛管孔隙度均略有上升,其中 A 为 1.39%,B 为 0.92%,C 为 0.46%,D 为 1.17%。(4)土壤非毛管孔隙度:从 1999 年至 2003 年,各处理土壤非毛管孔隙度,均呈上升趋势,到 2003 年底,A 为 1999 年的 1.87 倍,B 为 2.04 倍,C 为 3.20 倍,D 为 2.84 倍。

2.1.2 化学性状 从表 3 看出:(1)土壤有机质:从 1999 年到 2003 年,各处理土壤有机质均呈上升趋势。较之 1999 年,2003 年 A 土壤增加了 10.7%,B 增加了 17.61%,C 增加了 31%,D 增加了 8.36%。其排列顺序依次为 C>B>A>D。(2)土壤有效氮、磷、钾:从 1999 年到 2003 年,土壤有效氮、磷、钾含量,不论哪种种植方式,总体上均有随土壤耕种年限增加而增加的趋势,但各处理增幅有差异。较之 1999 年,有效氮 2003 年 A 增加了 8.67%,B 增加了 12.37%,C 增加了 18.16%,D 增加了 13.03%;有效磷 2003 年 A 增加了 43.08%,B 增加了 50.07%,C 增加了 62.38%,D 增加了 48.56%;有效钾 2003 年 A 增加了 20.1%,B 增加了 38.6%,C 增加 80.3%,D 增加了 22.23%。由此可知,B、C、D 要高于连作 A,其排列顺序依次为 C>B>D>A。(3)土壤 pH 值:从 1999 年至 2003 年,各处理土壤 pH 值均有上升趋势。连作在冬季种植越冬肥料作物,使得土壤有一个短暂的回旱过程,从而在一定程度上得以增强土壤的通透性,减少土壤次生潜育化和酸化。轮作通过在稻田种植旱地作物,则明显地有了一个较长而彻底的回旱过程,使得土壤通透性大大增强,有效阻止土壤次生潜育化和土壤酸化,提高土壤 pH 值。

表 2 不同处理土壤物理性状的变化

Table 2 Variation of soil physical properties under different treatments

处理代号 Treatment code	取土时间 YYYY-MM	容重 Soil density(g cm^{-3})	总孔隙度 Total porosity(%)	毛管孔隙度 Capillary porosity(%)	非毛管孔隙度 Noncapillary porosity(%)	三相比 Three-phase ratio	气/液比值 Gas/liquid ratio
A	1999-04	1.22b	52.52c	50.94a	1.58e	1 1.07 0.03	0.031d
	2003-10	1.17e	54.60ab	51.65a	2.95c	1 1.14 0.06	0.057c
B	1999-04	1.20d	53.36bc	51.33a	2.02d	1 1.10 0.04	0.039d
	2003-10	1.13g	55.92a	51.80a	4.12a	1 1.17 0.09	0.079a
C	1999-04	1.21c	53.27bc	52.14a	1.13f	1 1.12 0.02	0.021e
	2003-09	1.14f	56.00a	52.38a	3.62b	1 1.19 0.08	0.069b
D	1999-04	1.23a	52.41c	51.35a	1.06f	1 1.08 0.02	0.021e
	2003-10	1.17e	54.96ab	51.95a	3.01c	1 1.15 0.07	0.057c

表 3 不同处理土壤化学性状的变化

Table 3 Variation of soil chemical properties under different treatments

处理代号 Treatment code	取样时间 Sampling time (YYYY-MM)	有机质 (g kg^{-1}) Organic matter	有效氮 (mg kg^{-1}) Available nitrogen	有效磷 (mg kg^{-1}) Available phosphorus	有效钾 (mg kg^{-1}) Available potassium	pH
A	1999-10	2.99e	64.69e	14.46f	29.62g	5.02d
	2003-10	3.31c	70.3d	20.69e	35.6f	5.32bc
B	1999-10	3.01e	70.39d	22.79d	48.69e	5.32bc
	2003-10	3.54a	79.10b	34.20a	67.50a	5.51a
C	1999-10	2.90f	69.92d	20.20e	36.10f	5.40b
	2003-09	3.46b	82.62a	32.80b	65.10b	5.59a
D	1999-10	3.11d	73.93c	20.08e	50.97d	5.24c
	2003-10	3.37c	83.56a	29.81c	62.30c	5.33bc

2.2 作物产量变化

2.2.1 水稻产量及其构成因素 由表 4 可知, 2003 年轮作早稻与连作早稻相比, 其有效穗、每穗粒数及结实率等各项指标均优于连作, 最终导致其产量要比连作高 569.6 kg hm^{-2} , 增幅为 9.15%; 轮

作晚稻与连作晚稻相比, 处理 B 和 D 分别比 A 高 7.15% 和 4.77%, 平均高 5.96 kg hm^{-2} 。C 与 A 全年比较, 中稻比连作两季稻少收稻谷 $3580.3 \text{ kg hm}^{-2}$, 减幅为 27.6%, D 与 A 全年比较, D 比 A 多收稻谷 901.5 kg hm^{-2} , 增幅为 6.84%。

表 4 不同处理对水稻产量及其构成因素的影响 (2003 年)

Table 4 Yields and yield components of rice under different treatments (2003)

项目 Item	处理代号 Treatment code	有效穗/丛 Effective panicles per cluster	每穗颖花数 Spikelets per panicle	每穗粒数 Grains per panicle	结实率 full-grain rate (%)	千粒重 1000-grains weight (g)	理论产量 Theoretical yield (kg hm^{-2})	实测产量 Practical yield (kg hm^{-2})
早稻 Early rice	A	8.1f	118.3f	95.1f	80.3d	24.9b	6.843f	6.226f
	D	8.3e	119.6e	99.4e	82.8c	25.3b	7.425d	6.795e
晚稻 Late rice	A	9.1d	131.6d	110.4d	83.6bc	24.8b	7.301e	6.959d
	B	9.5b	134.0c	113.3b	84.3b	25.2b	7.956b	7.456b
	D	9.3c	135.4b	112.1c	82.7c	25.0b	7.659c	7.290c
中稻 Middle season rice	C	10.3a	201.8a	173.5a	86.2a	26.2a	10.178a	9.604a

2.2.2 不同处理作物产量比较 表 5 结果为各处理不同作物的产量情况,为便于比较,将各处理作物的经济产量根据价格比调整为晚稻产量。折算后的产量以处理 D 最高,为 13 686 kg hm⁻²,比 A 高 6.7%,C 由于种植一季稻,因而产量最低,折算后比

连作处理低 25.1%。然而冬季作物产量以 C 最高,其他依次为 D 和 B,分别比 A 高出 385%、226%和 3.0%,其中 C 比 D 高出 36.1%。因此,将紫云英调整为黑麦草后,不但使粮食作物或经济作物获得了较好的产量,而且其饲料作物较对照有大幅度上升。

表 5 不同处理各作物产量(2003 年)

Table 5 Yields of crops under different treatments(2003)

处理代号 Treatment code	紫云英 Chinese milk vetch(kg hm ⁻²)	黑麦草 Ryegrass (kg hm ⁻²)	早稻 Early rice (kg hm ⁻²)	中稻 Middle season rice (kg hm ⁻²)	晚稻 Late rice (kg hm ⁻²)	早玉米 Early corn (kg hm ⁻²)	早大豆 Early soybean (kg hm ⁻²)	折产 ¹⁾ Converted yield (kg hm ⁻²)
A	26 903		6 225		6 958			12 817b
B	27 695				7 456	4 218	885	12 557c
C		119 400		9 604				9 604d
D		87 750	6 795		7 290			13 686a

1) 根据价格比折成晚稻产量(不包括冬季作物紫云英和黑麦草),各作物均按早稻 1.6 元 kg⁻¹,中晚稻 1.7 元 kg⁻¹;玉米 1.3 元 kg⁻¹;大豆 3.6 元 kg⁻¹计算 The yields of the crops (excluding milk vetch, and ryegrass) are converted into yield of late rice on the basis of the market prices when the paper was published. The price of early rice 1.6 yuan kg⁻¹; of middle season rice 1.7 yuan kg⁻¹; of late rice 1.7 yuan kg⁻¹; of corn 1.3 yuan kg⁻¹; and of soybean 3.6 yuan kg⁻¹

2.3 农田病虫害的发生、发展规律

2.3.1 作物病害 从表 6 可知,各个处理中,早稻纹枯病处理 A 发病率比 D 高 22.5%,病情指数比 D 高 0.6;晚稻纹枯病 B 最低,为 65.7%,其次为 D,

为 72.9%,最高为 A,达 80.3%。而一季稻发病率相对较轻,仅 34.6%。因此,长期轮作及适当变换作物种类(如改紫云英为黑麦草)均可以减少作物病害。

表 6 不同处理受病害的影响(2003 年)

Table 6 Crop diseases under different treatments(2003)

处理代号 Treatment code	早稻纹枯病		早玉米纹枯病		早大豆花叶病		中稻纹枯病		晚稻纹枯病	
	发病率 (%)	病情指 数	发病率 (%)	病情 指数	发病率 (%)	病情 指数	发病率 (%)	病情 指数	发病率 (%)	病情 指数
A	46.9	1.4							80.3	3.3
B			44	1.3	23.8	0.4			65.7	1.8
C							34.6	0.7		
D	38.3	0.8							72.9	2.2

Corticium sasakii; Rhizoctonia solani Kühn; Mosaic virus; Disease incidence; Index of disease

2.3.2 作物虫害 从表 7 可知,早稻稻纵卷叶螟处理 A 比 D 高 14 苞/百丛;晚稻稻纵卷叶螟处理 A 和 D 分别为 91 苞/百丛和 90 苞/百丛,无差异,B 则只有 50 苞/百丛,比 A 和 D 少 41 苞/百丛和 40 苞/百丛。中稻稻纵卷叶螟相对较少,为 58 苞/百丛。由此可见,越冬黑麦草可以抑制下茬作物的害虫发病数;年内换茬可减少作物虫害。

2.3.3 作物草害 从表 8 可知,处理 C 和 D,因冬季种植的黑麦草生长势强,对杂草有一定的抑制作用,所以在处理 A 和 B 中以优势种出现的看麦娘和雀舌草在 C 和 D 均以亚优势种出现,而有些在 A

和 B 中以亚优势种的杂草如小飞蓬等,在 C 和 D 中基本上没有出现。

B 由于实行年内旱改水,使杂草由旱地杂草为主转为以水田杂草为主,且杂草种类大大减少,无优势种杂草出现。A 和 D 均以水田杂草为主,杂草种类、优势种杂草及亚优势种杂草均有所增加。而 C 由于种植黑麦草时间较长,到种植后作水稻即水改旱时,一些旱地杂草遇水则不能生长,而一些水田杂草,因生长势较弱,与生长势强大的一季稻相争,只有较少能发展为优势种,且杂草种类也不多。

表 7 不同处理作物害虫及天敌的分析 (2003 年)

Table 7 Varieties and populations of pests and natural enemies under different treatments (2003)

项目 Items	处理代号 Treatment code			
	A	B	C	D
早稻纵卷叶螟 (虫苞数/百丛) <i>Cnaphalocrocis medinalis</i> (inset / hundred patch of early rice)	101			87
早玉米害虫 种类 Kind(种)		7		
Insect of early corn 数量 Quantity(个)		17		
早玉米天敌 种类 Kind(种)		8		
Natural enemy of early corn 数量 Quantity(个)		112		
早大豆害虫 种类 Kind(种)		5		
Insect of early soybean 数量 Quantity(个)		19		
早大豆天敌 种类 Kind(种)		7		
Natural enemy of early soybean 数量 Quantity(个)		43		
中稻纵卷叶螟 (虫苞数/百丛) <i>Cnaphalocrocis medinalis</i> (inset / hundred patch of early rice)			58	
晚稻纵卷叶螟 (虫苞数/百丛) <i>Cnaphalocrocis medinalis</i> (inset / hundred patch of early rice)	91	50		90

表 8 不同处理杂草优势种的年内消长动态 (2003 年)

Table 8 Annual dynamics of dominant weeds under different treatments (2003)

处理代号 Treatment code	调查日期 Date of investigation		
	3月26日 March 26	6月16日 June 16	9月10日 September 10
	A	看麦娘 ⁽¹⁾ 、雀舌草 ⁽²⁾ 、牛筋草 ^{(3)*} 、 双穗雀稗 ^{(4)*} 、小飞蓬 ^{(5)*}	鸭舌草 ⁽⁶⁾ 、碎米莎草 ^{(7)*} 、薹 ^{(8)*} 、 丁香蓼 ^{(9)*}
B	看麦娘 ⁽¹⁾ 、雀舌草 ⁽²⁾ 、牛筋草 ^{(3)*} 、 双穗雀稗 ^{(4)*} 、小飞蓬 ^{(5)*}	双穗雀稗 ⁽⁴⁾ 、碎米莎草 ⁽⁷⁾ 、丁香蓼 ⁽⁹⁾ 、 鳢肠 ^{(10)*} 、薹 ^{(8)*} 、碎米芥 ^{(11)*}	节节菜 ^{(12)*} 、鸭舌草 ⁽⁶⁾ 、丁香蓼 ^{(9)*}
C	看麦娘 ⁽¹⁾ 、雀舌草 ⁽²⁾ 、牛筋草 ^{(3)*} 、 双穗雀稗 ^{(4)*}	鸭舌草 ⁽⁶⁾ 、碎米莎草 ^{(7)*} 、薹 ^{(8)*}	节节菜 ⁽¹²⁾ 、鸭舌草 ⁽⁶⁾ 、矮慈菇 ^{(13)*} 、 碎米莎草 ^{(7)*}
D	看麦娘 ⁽¹⁾ 、雀舌草 ⁽²⁾ 、牛筋草 ^{(3)*} 、 双穗雀稗 ^{(4)*}	鸭舌草 ⁽⁶⁾ 、碎米莎草 ^{(7)*} 、薹 ^{(8)*} 、 丁香蓼 ^{(9)*}	节节菜 ⁽¹²⁾ 、鸭舌草 ⁽⁶⁾ 、浮萍 ^{(14)*} 、碎米 莎草 ^{(7)*} 、矮慈菇 ⁽¹³⁾ 、丁香蓼 ^{(9)*} 、薹 ^{(8)*}

注:表中杂草右上方标有“*”号为杂草亚优势种 Note: “*” means this weed is a sub-dominant weed

(1) *Alopecurus aequalis* Sobol; (2) *Stellaria alsine*; (3) *Malachium aquaticum*; (4) *Paspalum dilatatum*; (5) *Conyza Canadensis*; (6) *Monchoria vaginalis*; (7) *Cyperus rotundus*; (8) *Marsilea quadrifolia*; (9) *Ludwigia epilobloides*; (10) *Eclipta prostrata*; (11) *Cardamine hirsutea*; (12) *Rotala indica*; (13) *Sagittaria psygmaea*; (14) *Lemna minor*

从表 9 可知,处理 C 杂草种类和覆盖度,在各个时段都相对较低。处理 B 在玉米田间杂草生长高峰期时,其覆盖度比种植水稻要高得多,杂草种类更为丰富,种群结构更为复杂,草害更为严重,但后作改种水稻后,田间杂草种类和覆盖度均有较大程度的降低。处理 A 和 D 由于年内连作,使得晚稻田间

杂草覆盖度比处理 B 和 D 均高。

2.4 能流分析

2.4.1 能量构成及能流特征 从表 10 中可知,稻田轮作系统总初级生产力平均为 $575.51 \times 10^9 \text{ J hm}^{-2}$,比连作系统高 $85.61 \times 10^9 \text{ J hm}^{-2}$,达 17.47%。其中处理 D 表现最高,比 A 高出 20.41%,其他依次

为处理 C 19.79% , B 12.22% 。轮作系统能量总投入平均为 $148.94 \times 10^9 \text{ J hm}^{-2}$,比连作系统高 $16.17 \times 10^9 \text{ J hm}^{-2}$,达 12.18% 。其中,处理 D 最高,

比 A 高 14.81% ,其他依次为处理 C 13.63% , B 8.1% 。轮作系统的光能利用率比连作系统平均高出 9.87% ,辅助能效率约比连作系统平均高 5.0% 。

表 9 不同处理杂草种类和覆盖度的变化(2003 年)

Table 9 Variety and coverage of weeds under different treatments(2003)

处理代号 Treatment code	3月26日 March 26		6月16日 June 16		9月10日 September 10	
	种类	覆盖度	种类	覆盖度	种类	覆盖度
	Category	Ratio of overcasting (%)	Category	Ratio of overcasting (%)	Category	Ratio of overcasting (%)
A	7	42	11	31	11	42
B	8	51	18	63	9	18
C	6	25	7	14	8	26
D	6	23	10	28	12	37

表 10 稻田轮作系统初级生产者能量输入输出参数值($10^9 \times \text{J hm}^{-2}$)

Table 10 Parameters of energy output and input in primary production of the crop rotation systems

项目 Items	A(ck)	B	C	D	
总初级生产力 Gross production	水稻 Rice	435.43	215.03	210.28	197.19
	玉米 Maize		269.54	240.66	275.42
	大豆 Soybean		9.76	6.04	10.68
	黑麦草 Ryegrass			83.58	61.43
	紫云英 Chinese milk vetch	53.88	54.78	45.78	44.61
	杂草 Weed	0.60	0.57	0.54	0.57
	总计 Total	489.90	549.76	586.88	589.89
辅助能 Supplementary energy	化石能 Chemicals	80.25	90.7	97.23	97.75
	劳力能 Labors	37.96	42.37	41.31	45.56
	其他 Miscellany	14.55	10.45	12.33	10.12
总计 Total	132.77	143.52	150.87	152.43	
初级生产力的生态效率	光能利用率 Utilization of light (%)	1.1053	1.1180	1.2594	1.2659
Ecological efficiencies of rice field	辅助能量产投比 O/I ratio of supplementary energy	3.69	3.83	3.89	3.87

注:以上数据为 5 a 平均值;折能标准见参考文献[24];全年辐射能平均为 $4.462 \times 10^{13} \text{ J hm}^{-2}$;人工辅助能的总投入包括农机具、化肥、劳力、畜力、种子等 Note: The above-mentioned data are mean values of five years; the standard for energy conversion was cited from the reference^[24]; The annual mean energy radiation is $4.462 \times 10^{13} \text{ J hm}^{-2}$; the input of artificial auxiliary energy includes agricultural implements, chemical fertilizer, labour, animal power, seeds, etc.

2.4.2 能量数学模型的建立和能量合理投入范围的确定 为分析和比较不同处理生态系统能量产投关系和能量生产潜力的差异,本文通过分析 1998 年~2003 年江西农业大学农学实验站农田生态系统的能量输入和输出的动态变化趋势,并计算获得了各个生态系统的平均能量投入和产出,将计算获得的能量投入和产出数据输入目前普遍采用的 DPS 统计软件,在非线性方程回归程序界面下建立能量投入产出 Logistic 方程,运行回归程序,求得处理 A

的 K_m 及 r 和 C 分别为 $526.13 \times 10^9 \text{ J hm}^{-2}$ 、0.022 8 和 0.419 9,处理 B 的 K_m 及 r 和 C 分别为 $583.92 \times 10^9 \text{ J hm}^{-2}$ 、0.023 9 和 0.655 4,处理 C 的 K_m 及 r 和 C 分别为 $628.87 \times 10^9 \text{ J hm}^{-2}$ 、0.024 3 和 1.032 1,处理 D 的 K_m 及 r 和 C 分别为 $631.26 \times 10^9 \text{ J hm}^{-2}$ 、0.004 1 和 1.008 9,把经拟合获得的 K_m 及估算系数 r 和 C 代入能量投入产出模型,建立该系统的 Logistic 能量模型。然后求得边际能量生产力、平均能量生产力和能量投入弹性,并确定该系统的能量投入合

理范围(见表 11)。

由表 11 可知,稻田生态系统各处理,即轮作系统和连作系统的能量投入均在合理范围之内,目前

各系统的能量产出仍稍低于理论上最高能量的产出。因此各系统仍可以通过适当增加辅助能投入进一步提高能量产出,以期获得更大的经济效益。

表 11 稻田轮作系统能量数学模型和能量合理投入范围

Table 11 Energy input-output model and rational range of energy input in crop rotation systems

处理代号 Treatment code	能量投入产出模拟模型 Energy Input-Output Model	相关系数 Correlation coefficient	能量合理投入范围 ($\times 10^9 \text{ J hm}^{-2}$) Rational range of energy input
A	$Y = 526.13 / (1 + e^{0.4199 - 0.0228X})$	0.9196 **	27.59 ~ 359.71
B	$Y = 583.92 / (1 + e^{0.6554 - 0.0239X})$	0.8827 *	40.99 ~ 359.28
C	$Y = 628.87 / (1 + e^{1.0321 - 0.0245X})$	0.8552 *	63.17 ~ 372.70
D	$Y = 631.26 / (1 + e^{1.0089 - 0.0041X})$	0.8664 *	62.29 ~ 374.62

2.5 养分平衡状况分析

如表 12 所示,N、 P_2O_5 、 K_2O 的产投比均为轮作系统大于连作系统。

N 的投入,处理 D 最高 506.6 kg hm^{-2} ,A 最低 419.7 kg hm^{-2} ,各系统依次为 $D > C > B > A$; P_2O_5 的投

入各系统均相同,为 152.1 kg hm^{-2} ; K_2O 的投入 A 最低,为 420.7 kg hm^{-2} ,其他处理均为 465.7 kg hm^{-2} 。N、 P_2O_5 、 K_2O 产投比均小于 1,说明农田土壤中 N 素、P 素、K 素均为盈余状态,呈正平衡状态。这有利于实现土壤养分的良性循环和农田的持续稳定发展。

表 12 不同处理养分的输入与输出分析 *

Table 12 Input and output of nitrogen, phosphorus and potassium under different treatments

处理代号 Treatment code	投入 (kg hm^{-2}) Input			产出 (kg hm^{-2}) Output			产投比 Ratio between input and output		
	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
A	419.7	152.1	420.7	240.3	102.7	132.4	0.57	0.68	0.31
B	465.3	152.1	465.7	320.6	136.8	192.3	0.69	0.89	0.41
C	498.8	152.1	465.7	387.5	124.6	168.7	0.78	0.82	0.38
D	506.6	152.1	465.7	350.2	130.4	158.9	0.69	0.86	0.36

注:以上数据为五年平均值;系统养分产出包括作物籽实和秸秆的含量;养分折算标准参考《农业生态学》^[24] Note: The above-mentioned data are mean values of five years; output of nutrients from the systems includes nutrients removed with the crops; the standard for energy conversion was cited from the reference "Agricultural Ecology"^[24]

3 结论

通过 5 a 定位试验,运用生态学原理对稻田轮作系统进行了较系统的研究和分析,并筛选出适应南方稻区发展的合理高效的种植模式。稻田轮作系统的优化模式为“紫云英-早玉米-晚稻 紫云英-早玉米-晚玉米 紫云英-早稻-晚玉米 紫云英-早玉米 早大豆-晚稻 黑麦草-中稻”。复种方式的优化模式为“黑麦草-中稻”。

由于时间的限制,本研究不够全面,在有些方面未能做到更进一步的研究,如作物的生理生化指标的定量分析、黑麦草的根系效应与土壤中微生物群落变化的关系、不同耕作制度与土壤中微生物群落

变化的关系以及稻草轮作的长期效应、农田小气候,等等,都有待进一步的研究和探讨。

参考文献

- [1] 沈学年,刘巽浩.多熟种植.北京:中国农业出版社,1983. 2~3. Shen X N, Liu X H. Multi-harvesting Planting (In Chinese). Beijing: Agricultural Press of China, 1983. 2~3
- [2] 黄冲平,丁鼎良.水旱轮作对作物产量和土壤理化性状的影响.浙江农业学报,1995,7(6):448~450. Huang C P, Ding D L. The effects of paddy upland Rotation on crop yield and soil physical and chemical characteristic (In Chinese). Acta Agriculture Zhejiangensis, 1995, 7(6):448~450
- [3] 王人民,丁元树.稻田年内水旱轮作对土壤肥力的影响.中国水稻科学,1998,12(2):85~91. Wang R M, Ding Y S. Effect of the paddy-upland yearly rotation on the soil fertility (In Chinese). Chinese J. Rice Sci., 1998, 12(2):85~91

- [4] 杨东方, 李学恒. 水旱轮作条件下土壤有机无机复合状况的研究. 土壤学报, 1998, 26(1) :1~8. Yang D F, Li X H. Study of soil organic and inorganic in the paddy-upland rotation in paddy (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1998, 26(1) :1~8
- [5] Prasad R, Gangaiah B. Effect of crop residue management in rice-wheat cropping system on growth and yield of crops and on soil fertility. Experimental Agriculture, 1999, 34(4) :427~435
- [6] Phillips I R. Phosphorus availability and sorption under alternating waterlogged and drying conditions. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1999, 29(19/20) :3 045~3 059
- [7] Phillips I R. Nitrogen availability and sorption under alternation waterlogged and drying conditions. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1999, 30(1/2) :1~20
- [8] Nguyen my hoa, Upendra Singh. Potassium supplying capacity of some lowland rice soils in the Mekong Delta. Better Crops International, 1998, 12(1) :11~15
- [9] 叶旭君, 王兆骞. 浙江省德清县农田生态系统能量投入的优化. 生态学报, 2001, 21(12) :2081~2088. Ye X J, Wang Z Q. Optimize on input of energy of farm ecosystem in Deqing county of Zhejiang Province (In Chinese). Ecological Journal, 2001, 21(12) :2 081~2 088
- [10] Panesar B S, Fluck R C. Energy productivity of a production system: Analysis and measurement. Agric. Sys., 1993, 43(4) :415~437
- [11] Ma Z Y, Edwards-jones G. Optimizing the external energy input into farmland ecosystems: A case study from Ningxia, China. Agric. Sys., 1997, 53(3) :269~283
- [12] 武继承, 王秋杰. 开封市区主要种植方式的物流、能流与价值流数量特征. 河南农业科学, 1997, 28(3) :287~293. Wu Z J, Wang Q J. Quantity character of material flow and energy flow and value flow on main cultivating modes in Kaifeng (In Chinese). Henan Agricultural Science, 1997, 28(3) :287~293
- [13] 秦丽杰. 珲春市农田生态系统的物质循环分析. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 1996, 12(4) :107~109. Qin L J. Analysis of material circulation on farmland ecosystem in Chunhui City (In Chinese). The Transaction of Natural Science of Harbin Teaching University, 1996, 12(4) :107~109
- [14] 刘鸿翔. 松嫩平原黑土区不同养分循环结构农业经营制度比较研究. 应用生态学报, 1994, 5(2) :148~151. Liu H X. The compare study of agricultural managing system with different nutrient circulation structure in the black soil district of Songnen Plain (In Chinese). Applied Journal of Ecology, 1994, 5(2) :148~151
- [15] 冷志杰, 赵浩. 一个农牧结合生态系统物流模型的建立及持续性分析. 东北农业大学学报, 1997, 28(3) :287~293. Leng Z J, Zhao H. The design and durative analysis of the material flow of a agriculture-pasturage ecosystem (In Chinese). Journal of the Dongbei Agricultural University, 1997, 28(3) :287~293
- [16] 李忠佩, 唐永良. 不同施肥制度下红壤稻田的养分循环与平衡规律. 中国农业科学, 1998, 31(1) :46~54. Li Z P, Tang YL. The rule of nutrient circulation and balance in the soil of different fertilization system (In Chinese). China Agriculture Science, 1998, 31(1) :46~54
- [17] 朱清海. 稻-泥鳅田生态系统能流、物流和效益分析. 中国稻米, 1997, 1 :26~28. Zhu Q H. Analysis of the energy flow, matter flow and efficiency of paddy-loach field ecosystem (In Chinese). China Rice, 1997, 1 :26~28
- [18] 罗敏. 水稻氮、磷、钾化肥最佳用量初探. 耕作与栽培, 1999(2) :44~45. Luo M. Pilot study of optimized dosage of N, P, K on paddy (In Chinese). Cultivation and Planting, 1999(2) :44~45
- [19] 李正明, 舒惠玲, 王文. 赣选一号黑麦草鲜草总产量高产栽培技术研究, 江西畜牧兽医杂志, 1996, 12(增刊) :25~30. Li Z M, Shu H L, et al. Study on high yield planting technology of GX-1 ryegrass fresh weight (In Chinese). Pasturage and Veterinary Journal of Jiangxi. 1996, 12(Suppl.) :25~30
- [20] 中国科学院南京土壤研究所编. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1981. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. ed. The Physical and Chemical Analysis of Soil (In Chinese). Shanghai: Press of Shanghai Science and Technology, 1981
- [21] 王永山, 王凤良. 苏北沿海棉田杂草群落发生分布消长及防除策略. 杂草科学, 1998(3) :8~10. Wang Y S, Wang F L. The situation of weed community in cotton field and the strategy of prevention and elimination (In Chinese). Weed Science, 1998(3) :8~10
- [22] 《浙江农业科学》编辑部编. 农作物田间试验记载项目及标准. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1982. 25~40. Zhejiang Agriculture Science Editorial Board. ed. Newsroom of Zhejiang Agriculture Science. Item and Standards about the Farm Crop in the Field Experiments (In Chinese). Hangzhou: Press of Zhejiang Science and Technology, 1982. 25~40
- [23] 南京农业大学农学院, 扬州大学农学院主编. 农业植物病理学. 南京: 江苏科学技术出版社, 1996. 245~250. Agricultural Academy of Nanjing Agricultural University and Yangzhou University. eds. Agriculture Plant Pathology (In Chinese). Nanjing: Press of Jiangsu Science and Technology, 1996. 245~250
- [24] 骆世明, 陈聿华, 严斧编. 农业生态学. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1987. 327~342. Luo S M, Chen Y H, Yan H. eds. Agriculture Ecology (In Chinese). Changsha: Press of Hunan Science and Technology, 1987. 327~342
- [25] 叶旭君, 李全胜. 农田生态系统能量投入产出模型及其应用研究. 生物数学学报, 2002(1) :104~109. Ye X J, Li Q S. A study on the energy input-output model of farmland ecosystems and its preliminary application (In Chinese). Journal of Biomathematics, 2002(1) :104~109

ECOLOGICAL ANALYSIS OF CROP ROTATION SYSTEMS IN PADDY FIELD

Huang Guoqin¹ Xiong Yunming¹ Qian Haiyan¹ Wang Shubin¹ Liu Longwang¹ Zhao Qiguo²

(1 *Research Center on Ecological Science, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China*)

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

Abstract Aimed at the unfavorable impact of mono-cropping cultivation on farmland environment ,in paddy field , a five-year field experiment was carried out. Ecological analysis in the experiment was conducted to compare crop rotation with mono-cropping cultivation in soil physical and chemical properties , yield , incidence of crop diseases and pests , energy flow and nutrient balance. The results show that the former significantly improved soil physical and chemical properties and yield by 384.8 % , 226.2 % and 3.0 % , respectively. Moreover , crop rotation not only altered the environment for pathogen bacteria , but also built up plant resistance to diseases and pest , and suppressed crop diseases , insects , and weeds , etc. and increased the overall initiative productivity , light energy use rate and auxiliary energy use rate by 17.47 % , 9.87 % and 5.0 % , respectively , N , P and K use rate as well. Therefore , reasonable optimized multi-crop rotation systems are presented in the paper.

Key words Paddy-field rotate ; Soil physical and chemical properties ; Crop productivity ; Energy transformation ; Material circle