

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

(江西农业大学生态科学研究中心, 南昌 330045; 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, 通过 5a 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。轮作系统不但提高了作物产量, 而且总初级生产力、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

文章编号: 1000-0933(2006)04-1159-06 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Ecological analysis on crop rotation systems of paddy field

HUANG Guo-Qin¹, XIONG Yun-Ming¹, QIAN Hai-Yan¹, WANG Shu-Bin¹, LIU Long-Wang¹, ZHAO Qi-Guo² (1.

Research Center on Ecological Science, Jiangxi Agricultural University; 2. Institute of Soil Science, Academia, Sinica, Nanjing 210008, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1159 ~ 1164.

Abstract: At present, environment of cultivated land has been influenced unfavorably by single continuous cropping in paddy field. In the field experiment of five years in this paper, ecological analysis based on paddy-field rotate system and continuous cropping was studied in the view of soil physical and chemical characteristics, crop output variety, occurring and developing rule of plant diseases and insect pests of farmland, power-flow and state of equilibrium nutrient. The results show that, compare with single continuous cropping, firstly, paddy-field rotate system has improved soil physical and chemical characteristics apparently. Secondly, yield of the rotate system was increased. Moreover, the overall initiative productivity, light energy using rate and assistant energy using rate was increased by 17.47%, 9.87%, 5.0% respectively. Nutrient using rate of N, P, K was also improved in the rotate system. Thereby, optimizing pattern and complex cultivating pattern have been suggested about rational crop rotation.

Key words: paddy-field rotate; soil physical and chemical characteristics; crop productivity; energy translation; material circle

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^[3-8]。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]。例如, 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

基金项目: 国家重大科技专项资助项目(2004BA520A14—C14)

收稿日期: 2005-01-14; 修订日期: 2005-09-04

作者简介: 黄国勤(1962—), 男, 教授, 主要从事耕作制度、农业生态及农业可持续发展研究资源

Foundation item: The project was supported by National Important Technology of Plentiful Obstetrics in Food (No. 2004BA520A14-C14)

Received date: 2005-01-14; Accepted date: 2005-09-04

Biography: HUANG Guo-Qing, Ph. D., Professor, mainly engaged in farming systems, agriculture ecosystems and agricultures. E-mail: hgqjxuhgq@sina.com.cn

进行分析,指出了农田生产中的限制因素及解决的对策^[13]。本文通过 5a 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)-稻-稻种植方式。试验设 4 个处理,重复 4 次,随机区组排列,小区面积为 33.35m²。试验设计见表 1。

表 1 稻田轮作田间试验设计

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

处理 Treatments	代号 Code	第 1 年度	第 2 年度	第 3 年度	第 4 年度	第 5 年度
		1998 年冬至 1999 年秋 The first year from the winter of 1998 to the autumn of 1999	1999 年冬至 2000 年秋 The second year from the winter of 1999 to the autumn of 2000	2000 年冬至 2001 年秋 The third year from the winter of 2000 to the autumn of 2001	2001 年冬至 2002 年秋 The fourth year from the winter of 2001 to the autumn of 2002	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①-早稻②-晚稻④	紫云英①-早稻②-晚稻④	紫云英①-早稻②-晚稻④	紫云英①-早稻②-晚稻④	紫云英①-早稻②-晚稻④
轮作 1	B	紫云英①-早稻②-玉米⑥	紫云英①-早玉米⑤-晚稻④	紫云英①-早玉米⑤-玉米⑥	紫云英①-早稻②-晚玉米 晚大豆⑨	紫云英① - 玉米⑥ 大豆⑧ - 晚稻④
轮作 2	C	紫云英①-玉米⑥-晚稻④	紫云英①-早玉米⑤-玉米⑥	紫云英①-早稻②-玉米⑥	紫云英①-玉米⑥ 大豆⑧-晚稻④	黑麦草⑦ - 中稻③
轮作 3	D	紫云英①-玉米⑥-玉米⑥	紫云英①-早稻②-玉米⑥	紫云英①-玉米⑥-晚稻④	紫云英①-玉米⑥ 大豆⑧-玉米⑥ 大豆⑧	黑麦草⑦ - 早稻② - 晚稻④

“-”表示接茬 Means continuous cropping; “||”表示间作 Means intercropping; ①紫云英 (Chinese milk vetch); ②早稻 (first cropping rice); ③中稻 (mono-cropping rice); ④晚稻 (second cropping rice); ⑤早玉米 (first cropping corn); ⑥玉米 (corn); ⑦黑麦草 (ryegrass); ⑧大豆 (soybean); ⑨晚大豆 (second cropping soybean)

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^[14]。

1.2.2 能量数学模型的建立和能量合理投入范围的确定 农田生态系统的能量投入与产出呈 S 型,这种 S 型关系符合生态学有限空间种群增长的 Logistic 方程^[15],其数学模型如下:

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

Y 为农田生态系统的能量产出 (J·hm⁻²); X 为农田生态系统的能量投入 (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 (J·hm⁻²); C 为估算系数。

叶旭君等认为^[19],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:

$$MEP = K_m \cdot r \cdot e^{-Cx} / (1 + e^{-Cx})^2; AEP = (y - y^0) / x; EEI = MEP / AEP$$

式中, y⁰ 指在没有任何辅助能量投入的情况下系统的能量产出 (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,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 4.1%,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 3.96%,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 年秋,A 为 1999 年的 1.87 倍,B 为 2.04 倍,C 为 3.20 倍,D 为 2.84 倍。

表 2 不同处理土壤物理性状的变化

Table 2 Variations in soil physical characteristics under different treatments

处理代号 Treatment code	取土时间 Sampling time	容重(g/cm ³) Bulk gravity	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

2.1.2 土壤化学性状 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 N、P、K,从 1999 年到 2003 年,土壤有效 N、P、K 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 N 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 P 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 K 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 3 不同处理土壤化学性状的变化

Table 3 Variations in soil chemical characteristics under different treatments

处理 Treatments	取土时间 Sampling time	有机质(g·kg ⁻¹) Organic matter	有效 N(mg·kg ⁻¹) Available nitrogen	有效 P(mg·kg ⁻¹) Available phosphorus	有效 K(mg·kg ⁻¹) Available potassium	pH 值 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	34.2a	67.5a	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 作物的产量变化

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 $569.6\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,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%。C 与 A 全年比较,中稻比连作两季稻少收稻谷 $3580.3\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,减幅为 27.6%,D 与 A 全年比较,D 比 A 多收稻谷 $901.5\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,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 Yield and yield components of rice under different treatments(2003)

项目 Items	处理代号 Treatment codes	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 Reapened grain rate(%)	千粒重 1000-grains weight(g)	理论产量 Theoretical yield ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	实测产量 Practical yield ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
早稻 First cropping rice	A	8.1f	118.3f	95.1f	80.3d	24.9b	6843.1f	6225.6f
	D	8.3e	119.6e	99.4e	82.8c	25.3b	7424.6d	6795.2e
晚稻 Second cropping rice	A	9.1d	131.6d	110.4d	83.6bc	24.8b	7301.4e	6958.5d
	B	9.5b	134.0c	113.3b	84.3b	25.2b	7956.5b	7456.1b
	D	9.3c	135.4b	112.1c	82.7c	25b	7658.8c	7290.4c
中稻 Mono cropping rice	C	10.3a	201.8a	173.5a	86.2a	26.2a	10178.4a	9603.8a

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 $13685.9\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,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,不但提高了粮食作物或经济作物的产量,而且提高了饲料作物的产量。

表 5 不同处理各作物产量(2003 年)

Table 5 The yield of crops under different treatments(2003)

处理代号 Treatment code	紫云英 Chinese milk vetch	黑麦草 Ryegrass ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	早稻 First cropping rice ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	中稻 Mono cropping rice ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	晚稻 Second cropping rice ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	早玉米 First cropping corn ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	早大豆 First cropping soybean ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	折产* Converted yield ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
A	26902.6		6225.3		6958.2			12817.3b
B	27695.1				7456.1	4218.2	885.3	12556.5c
C		119400		9603.8				9603.8d
D		87750.3	6795.2		7290.4			13685.9a

* 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),各作物均按发稿日市场最新报价:早稻为 $1.6\text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$,中晚稻均为 $1.7\text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$;玉米为 $1.3\text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$;大豆为 $3.6\text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$ Prices of every kind of agricultural product in the market respectively as follows: early rice $1.6\text{yuan}/\text{kg}$; middle season rice $1.7\text{yuan}/\text{kg}$; late rice $1.7\text{yuan}/\text{kg}$; corn $1.3\text{yuan}/\text{kg}$; soybean $3.6\text{yuan}/\text{kg}$

2.3 能流分析

2.3.1 能量构成及能流特征 从表 6 中可知,稻田轮作系统总初级生产力平均为 $575.51 \times 10^9\text{J}\cdot\text{hm}^{-2}$,比连作系统高 $85.61 \times 10^9\text{J}\cdot\text{hm}^{-2}$,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 $148.94 \times 10^9\text{J}\cdot\text{hm}^{-2}$,比连作系统高 $16.17 \times 10^9\text{J}\cdot\text{hm}^{-2}$,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%。

2.3.2 能量数学模型的建立和能量合理投入范围的确定 通过分析 1998~2003 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,建立该系统的 Logistic 能量模型,并确定该系统的能量投入合理范围。

由表 7 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 6 稻田轮作系统初级生产者能量输入输出参数值($10^9 \times \text{J} \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 6 The energy parameters of output and input from primary producer in crop rotation ecosystems

项目 Items	A(ck1)	B	C	D
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
总初级生产力 Gross production				
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
化石能 Chemicals	80.25	90.7	97.23	97.75
辅助能 Supplementary energy				
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 Ecological efficiencies of rice field				
光能利用率 Utilization of light(%)	1.1053	1.1180	1.2594	1.2659
辅助能量产投比 Ration of output and input energy	3.69	3.83	3.89	3.87

* 以上数据为 5a 平均值;折能标准参考文献^[63];全年辐射能平均为 $4.462 \times 10^{13} \text{J}/\text{hm}^2$;人工辅助能的总投入包括农机具、化肥、劳力、畜力、种子等 Above-mentioned dates are average value of five years; standard was seen in consult documents^[52]; Average energy of all-year radiation is $4.462 \times 10^{13} \text{J}/\text{hm}^2$; input of artificial auxiliaries include agricultural implements, chemical fertilizer, labour, animal power, seed. etc.

表 7 稻田轮作系统能量数学模型和能量合理投入范围

Table 7 Energy input-output model and rational range of energy input in crop rotation systems

处理代号 Treatments codes	能量投入产出模拟模型 Energy input-output model	相关系数 Relative coefficient	能量合理投入范围($\times 10^9 \text{J} \cdot \text{hm}^{-2}$) 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	$Y = 628.87 / (1 + e^{1.0321 - 0.0243X})$	0.8552*	63.17 ~ 372.70
D	$Y = 631.26 / (1 + e^{1.0089 - 0.0041X})$	0.8664*	62.29 ~ 374.62

2.4 养分平衡状况分析

如表 8 所示, N、 P_2O_5 、 K_2O 的产投比均为轮作系统大于连作系统。

表 8 不同处理养分的输入与输出分析*

Table 8 Analyses on input and output of nitrogen, phosphorus and potassium under different treatments

处理 Treatments	投入($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Input			产出($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 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

* 以上数据为 5a 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》^[52] Above-mentioned datas are average value of five years; output of systemic nutrient include crop content; standard was seen in consult documents

N 的投入,处理 D 最高 $506.6 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, A 最低 $419.7 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,各系统依次为 $D > C > B > A$; P_2O_5 的投入各系统均相同,为 $152.1 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; K_2O 的投入 A 最低,为 $420.7 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其他处理均为 $465.7 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。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。

3 结论

通过 5a 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。本文认为,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”。该模式中包含了粮食作物、

经济作物及饲料作物,涵盖了水旱轮作、稻草轮作及间作套种等多种方式,能改善由于连作带来的农业生态环境问题。复种方式的优化模式为“黑麦草-中稻”。黑麦草的根系极大地丰富了土壤有机质,而且通过其根系的生长,可以加大土壤的孔隙,降低土壤的容重,改善土壤的团粒结构,并使后季作物产量得以明显提高。通过种植黑麦草发展养殖业,不仅可以使农民增收,提高农民务农的积极性,更有利于农业结构的调整,有利于农业的可持续发展。一季中稻不仅避免了双季稻连作的不利影响,而且其生育期所处的光温条件也明显优于双季稻,从而使其产量和品质都得到明显提高。另外,一季中稻没有了双季稻的“双抢”农忙时节,可以适度缓解农村劳动力的紧张问题。“黑麦草-中稻”的种植模式还考虑了粮食的安全,因此在我国南方双季稻区适当发展“黑麦草-中稻”模式有着良好的前景。

由于时间的限制,本研究还不够全面,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。

References:

- [1] Shen X N, Liu X H. Multi-harvesting Planting. Beijing: Agricultural Press of China, 1983. 2~3.
- [2] Huang C P, Ding D L. The effects of paddy upland rotation on crop yield and soil physical and chemical characteristic. *Acta Agriculture Zhejiangensis*, 1995, 7(6): 448~450.
- [3] Wang R M, Ding Y S. Effect of the paddy-upland yearly rotation on the soil fertility. *Chinese J. Rice Sci*, 1998, 12(2): 85~91.
- [4] 1998, 26(1): 1~8. Yang D F, Li X H. Study of soil organic and inorganic in the paddy-upland rotation in paddy. *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): 3045~3059.
- [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] Ye X J, Wang Z Q. Optimize on input of energy of farm ecosystem in Deqing county of Zhejiang Province. *Ecological journal*, 2001, 21(12): 2081~2088.
- [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] Wu Z J, Wang Q J. Quantity character of material flow and energy flow and value flow on main cultivating modes in Kaifeng. *Hernan Agricultural Science*, 1997, 28(3): 287~293.
- [13] Qin L J. Analysis of material circulation on farmland ecosystem in Chunhui city. *The Transaction of Natural Science of Haerbin Teaching University*, 1996, 12(4): 107~109.
- [14] Nanjing Institute of Soil Science. *The physical and chemical analysis of soil*. Shanghai: Press of Shanghai Science and Technology, 1981.
- [15] Luo S M, Chen Y H, Yan H. *Agriculture ecology*. Changsha: Press of Hu'nan Science and Technology, 1987. 327~342.

参考文献:

- [1] 沈学年, 刘翼浩. 多熟种植. 北京: 中国农业出版社, 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.
- [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.
- [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.
- [9] 叶旭君, 王兆寿. 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.
- [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.
- [13] 秦丽杰. 琚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.
- [14] 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.
- [15] 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.