

太湖地区两种稻麦轮作制中 营养元素的循环*

I. 稻麦作物内养分的移出与残留

秦祖平** 徐 琪 熊 毅

(中国科学院南京土壤研究所)

摘 要

本研究在基于乌栅土、黄泥土和靖血白土的三组稻田生态系统设置稻麦两熟和稻稻麦三熟两种熟耕作制度、三种施肥处理(当地肥处理、无肥处理和有机肥处理)的田间试验,以试验小区为稻田生态系统的基本研究单位。在试验的第二轮作周期(1982年10月至1983年10月)内,试验结果表明,收获物对八种主要营养元素移出总量的高低顺序为

$Si > N > K > P > Ca > S, Mg > Mn$

硅的移出总量为230—650公斤硅/公顷,锰的移出量为1.5—9.5公斤锰/公顷;养分在田间的残留量占作物总吸收量的百分率(残留率)的大小顺序却为

$Si, Mn, Ca > Mg, S > K, N, P$

三组元素的平均残留率分别为35%, 25%和10%。施肥处理间作物的生物产量存在着差异。后季稻的谷物产量按高低顺序依次为有机肥处理,当地肥处理和无肥处理;其他各季作物则为当地肥,有机肥和无肥处理。一定时期内移出系统的收获物生物量占作物总生物产量的百分数(生物物质开放度)为70—90%,大部分初级生产物被移出系统。对营养元素在稻麦作物的籽粒、秸秆、残茬及根系等四部分的含量作主组元分析后,八营养元素依相互间的相关系数可分为四组:钾;氮和磷;硫和镁;钙、锰和硅。这与按残留率大小对元素所作的分组十分相似。因子分析表明,营养元素随收获物的携出量不仅直接受收获物生物量及其含量的影响,还与稻田土壤的淹水条件有关。

研究物质循环和能量流动对改善生态系统结构,促进生态系统功能的发挥有着十分重要的作用。营养元素循环的研究受到了极为广泛的注意,并取得了大量有价值的成果(Clark & Rosswall, 1981; Frissel, 1978; Svensson & Söderland, 1976; Wetselaar, *et al.*, 1981)。我国有关农田生态系统中营养元素循环的研究也有一定的进展。黄振雄等(1981)和武冠云(1982)曾分别概略地报道过南方和北方农田生态系统中氮、磷、钾等养分的平衡状况。在太湖地区,赵强基等(1982)曾对生物生产过程中养分的转移作过报道,刘元昌和徐琪(1984)曾研究过常规稻田生态系统中氮、磷、钾等养分的循环状况。不过,迄今为止,国内外对集约农田生态系统中多种营养元素的循环作较为详细研究的报道尚不多见。本文将在田间试验条件下研究稻麦两熟和稻稻麦三熟两种轮作制中当地肥,无肥和纯有机肥处理下氮、磷、钾、钙、镁、硫、锰、硅等八种营养元素随稻麦收获物的移出以及随根茬在田间的

* 本文为秦祖平同志硕士研究生期间的工作。承蒙本所刘元昌、钱钦文、胡纪常等同志和常熟市辛庄乡农科站、无锡县东亭乡东亭村及武进县农科所大力协助,谨致谢忱。

** 现在武汉大学环境科学系。

本文于1988年4月26日收到。

残留,并注意不同营养元素的差异。对于稻田生态系统而言,这无疑是研究整个系统中营养元素循环的重要基础。本文以田间试验的小区为稻田生态系统的基本研究模型:当地肥处理小区为两种熟制现代的常规模型;纯有机肥处理小区为我国传统有机农业的模型;无肥小区则为掠夺式耗竭型农田生态系统——一种极端系统的模型。

一、材料与方法

1. 试验设计

太湖流域土壤肥沃,耕作方式及栽培手段先进,是我国农业生产发达的地区之一。本研究在该流域选取了三个试验点。常熟点位于常熟市辛庄乡农科站,地处太湖东北面的低洼圩区,土壤为乌栅土(囊水型水稻土)。无锡点在无锡县东亭乡东亭村,其土壤为黄泥土(爽水型水稻土),田间有地下暗管排水系统,位于太湖北面的平原地带。武进点则位于太湖西北面的平原地区,设在武进县运村镇附近该县农科所,土壤为鳊血白土(滞水型水稻土)。三试验点土壤的基本理化性状如表1。

表1 供试土壤的基本性状*

Table 1 Basic properties of the three soils

土 壤	pH (H ₂ O)	容 重 (克/厘米 ³)	孔隙度 %	粘粒% (<0.001)	N	O ₂ M ₁	P	K	Ca	Mg	Mn	Si
占烘干土%												
乌 栅 土	7.62	1.05	60.8	17.0	0.196	3.32	0.100	1.94	0.79	0.62	0.046	34.4
黄 泥 土	5.88	1.16	57.0	21.7	0.129	2.18	0.076	1.62	0.57	0.33	0.034	36.4
鳊血白土	6.00	1.12	57.5	22.7	0.149	2.91	0.094	1.67	0.44	0.34	0.036	36.3

* 仅包括耕层土壤

田间试验为双因素三水平试验:两种轮作制度——稻麦两熟和稻稻麦三熟制,三种施肥处理——当地肥,无肥和有机肥。当地肥处理中施用试验点所处地区氮、磷用量相近的尿素,猪粪和过磷酸钙。有机肥处理中仅施用与当地肥处理用氮量相近的猪粪,当然随猪粪而施入土壤的还有磷、钾、硫、钙等其他营养元素。无肥处理中不施用任何形式的肥料。每个试验处理均重复三次(即三个区组),区组内小区随机排列。两种熟制的试验区由田埂分开。为提高试验点对所处地区的代表性,未统一各试验点的供试作物品种,小区面积亦因试验田块的限制也略有不同(表2)。

表2 小区面积与供试作物品种

Table 2 Plot area and crop varieties

试验点	小区面积 (m ²)	小麦	单季稻	元麦	前季稻	后季稻
常 熟	33.3	早红小麦	32-78	村农2号	原丰早	东亭3号
无 锡	70.0	扬麦4号	东亭3号	114	原丰早	东亭3号
武 进	66.7	扬麦4号	7710	114	丰早-30	复红6号

2. 作物收获与样品分析

作物的栽培、管理及收获均采用常规方法。小区的谷物产量(风干重)为实测值,秸秆总量则根据考种获得的谷草比换算而得。残茬生物量于收获后在各试验小区内取一平方米样方作测量进而换算即得之。作物根系量,取小区内土壤样块(33×33×30厘米),置于箩筐

中,浸泡、水洗、剔净、烘干称重再行换算而得。收获物中秸秆量为秸秆总量与残茬量之差。收获物生物量为谷物(籽粒)量与秸秆量之和。每处理的生物量均为三次重复之均值。化学分析样分别按谷物、秸秆(全部)、残茬和根系采集。为减少分析工作量,每处理随机取出一个样品供分析。作物某部分的养分为该部分的干生物量与养分含量之积。假定风干作物体的含水量均为14%。

作物样品中全硫含量用浓硝酸——高氯酸消化,钼盐比浊法(刘崇群,1983)测定。全氮采用浓硫酸——重铬酸钾法;磷、钾、钙、镁、锰等元素之全量,在样品经三酸消化后,用等离子体(DCP)发射光谱法测定,硅用重量法测定(中国科学院南京土壤研究所,1978)。主组元分析和因子分析参考有关文献(刘多森、曾志远,1986;方开泰、张尧庭,1982)进行。谷物产量和养分残留率的多重比较(新复极差法)按有关统计文献(南京农学院,1979)进行。

二、结 果

作物收获后,体内养分一部分随收获物移出农田生态系统,另一部分随残茬和根系残留于土壤中。收获物生物量影响系统中作物体内养分的携出量和携出率。

1. 作物的生物产量

常熟、无锡、武进三个试验点田间试验的谷物产量见表3。无锡点,小麦后期发生部分倒伏,小区产量以未倒伏部分为准。常熟点,元麦播种稍迟,对其发育有一定的影响(这种情形在三熟制中并不鲜见)。对作物在各试验处理中的谷物产量作多重比较,结果表明,两种熟制下谷物产量的变异为当地肥处理和有机肥处理高于无肥处理,前两处理的产量较为接近。只是后季稻的谷物产量存在着有机肥处理高于当地肥处理的趋势。这可能是后季稻的生长期与夏季高温期重叠较长,有机肥的养分释放量和释放速度较快,较好地满足后季稻生长需要的缘故。

表 3 不同处理的谷物产量*

Table 3 Grain yield in different treatments

试验点	处 理	小 麦	单 季 稻	元 麦	前 季 稻	后 季 稻
常 熟	当地肥	3792 a ⁺	6534 a	1063 a	4373 a	4300 b
	无 肥	2028 c	5173 b	735 b	2148 c	3476 c
	有机肥	2402 b	6097 a	950 a	3629 b	4748 a
无 锡	当地肥	5332	5323 a	3257 a	5129 a	4570 a
	无 肥	4740	3870 b	2330 b	3775 b	3433 b
	有机肥	3915	4993 a	2372 b	4847 a	4832 a
武 进	当地肥	4351 a	6143 a	3827 a	5276 a	5028 a
	无 肥	2579 c	4083 b	1887 c	3111 c	3968 c
	有机肥	2743 b	5810 a	2249 b	4849 b	5409 b

* 三次重复的平均值,单位为公斤/公顷。

+ 同一试验点谷物产量后字母相同的,处理间无差异(SSR法,5%显著水准)。

不同处理中各季作物的总生物量和收获物生物量与谷物产量的变化趋势基本一致。三熟制作物的总生物量和收获物生物量一般高于两熟制的对应处理。武进点,三熟制中当地肥、无肥、有机肥三处理的总生物量依次为30052公斤/公顷,20258公斤/公顷,26567公斤/公顷;而两熟制中对应处理的总生物量却分别为24126公斤/公顷,15886公斤/公顷,19834公

斤/公顷。三熟制中三处理的收获物生物量依上述顺序为26156 公斤/公顷,16597 公斤/公顷,22841公斤/公顷;两熟制中对应三处理的收获物生物量为19910公斤/公顷,12315公斤/公顷,16055公斤/公顷。

本文以一定时期内作物收获物的生物量占收获时作物总生物量的百分率表示系统的生物物质开放度(简称开放度),它表征稻田生态系统中某种情形下作物初级生产的生物物质被移出系统的完全程度。表4为三种试验处理下单季稻与双季稻,两熟制与三熟制等系统的开放度值。这些系统的开放度均较高,其值在70%至90%范围内。这样,大部分生物物质已被移至系统之外。

表4 几种稻田生态系统的生物物质开放度

Table 4 Degree of openness of biological matter in some field ecosystems

试验点	系 统	当地肥	无肥 开放度, %	有机肥
常 熟	单季稻	83.5	80.0	83.8
	双季稻	77.3	73.0	75.7
无 锡	单季稻	83.0	82.4	82.9
	双季稻	87.6	89.1	88.9
武 进	两熟制	82.5	77.6	80.9
	三熟制	87.0	81.9	86.0

2. 养分的移出与残留

收获物的养分携出量为谷物和秸秆养分量之和。养分残留量为残茬与根系的养分量之和。某元素的残留率为该元素的残留量占作物内该元素总量的百分比,它指示某元素在一定耕作栽培条件下的残留程度。

在所研究的轮作周期内,作物收获物对养分的携出量因元素而异。硅、氮、钾等元素的

表5 收获物对养分的携出量

Table 5 Nutrient removal by crop harvest

试验点	熟 制	处 理	N	P	K	Ca	Mg	S	Mn	Si
			携出量 (kg/ha)							
常 熟	两熟制	当地肥	198.7	32.9	177.1	31.3	22.2	25.6	4.13	401.8
		无 肥	97.5	23.4	92.8	18.3	13.7	13.8	1.85	281.9
		有机肥	136.3	32.5	164.3	24.7	20.0	19.0	2.89	384.6
	三熟制	当地肥	207.5	29.1	99.4	33.9	22.6	20.7	3.25	316.0
		无 肥	108.3	20.7	70.0	17.1	12.9	11.5	1.53	234.0
		有机肥	163.1	31.6	111.3	22.6	18.2	16.9	1.85	315.9
无 锡	两熟制	当地肥	254.9	41.6	139.5	25.9	21.9	24.3	5.06	372.4
		无 肥	165.1	35.6	107.0	18.4	14.7	17.8	3.47	327.4
		有机肥	163.2	33.0	126.4	20.3	14.9	19.5	3.51	348.0
	三熟制	当地肥	260.2	47.8	125.2	42.3	30.9	29.6	9.17	398.7
		无 肥	168.0	36.5	121.4	26.1	17.7	18.1	4.27	346.7
		有机肥	231.8	41.1	156.6	32.6	23.0	25.4	7.34	483.5
武 进	两熟制	当地肥	183.0	48.6	149.6	27.9	27.1	22.6	3.11	428.5
		无 肥	98.2	28.2	84.9	13.3	13.7	10.1	1.80	270.4
		有机肥	128.0	33.5	110.7	27.1	17.5	13.4	2.30	344.3
	三熟制	当地肥	286.4	55.3	180.2	45.7	32.6	34.9	7.15	579.3
		无 肥	145.1	34.3	117.4	25.1	17.9	17.3	3.09	410.8
		有机肥	207.8	48.3	206.2	30.2	25.3	26.5	4.96	647.4

携出量较高,磷、钙、镁、硫居中,锰最低。表5为八种营养元素在本研究周期内的携出量。同一熟制中不同施肥处理单季作物收获物携出量的变化趋势与前述谷物产量基本一致:当地肥处理中养分的携出量略高于或者接近于有机肥处理,两者一般都高于无肥处理。同一试验处理中,三熟制的养分携出量一般高于两熟制。本研究周期内,营养元素携出量的大致范围为:硅,230—650公斤/公顷;氮,95—285公斤/公顷;钾,70—200公斤/公顷;磷,20—55公斤/公顷;钙,15—40公斤/公顷;硫,10—35公斤/公顷;镁,10—30公斤/公顷;锰,1.5—9.5公斤/公顷。

收获物不同部分对营养元素携出的贡献因元素而异。氮和磷两元素主要随谷物移出系统;钾、钙、硅主要随秸秆移出;硫和镁的携出量在谷物和秸秆中相近;锰却因作物而异——在水稻收获物中主要随秸秆移出,在麦作中秸秆和谷物对锰的移出量相近。因此,实行秸秆还田对于保持土壤养分库的钾、钙、硅容量的贡献要大于其他元素。此外,长期按现行方式收获水稻,尤其是双季稻,有可能加速土壤锰素的消耗。

前述开放度(表4)表明,几种系统中残留生物量仅占总生物量的10—30%。而作物中养分残留率为10—35%。可见,养分的残留总趋势与生物物质残留基本一致。但不同营养元素的残留率间存在着一定的差异。锰、钙、硅的平均残留率较高,约25%;镁和硫居中,约25%;氮、磷、钾较低,约10%。表6为三试验点八种营养元素残留率的几项数字特征,这里将整个田间试验的各季作物的总和作为样本进行统计。本研究轮作周期内,各营养元素的总线留量范围如下:硅为90—390公斤/公顷,氮为10—35公斤/公顷,钾为3—35公斤/公顷,钙为5—25公斤/公顷,镁为2—15公斤/公顷,硫为2.5—9.0公斤/公顷,磷为1.0—8.0公斤/公顷,锰为0.5—2.5公斤/公顷。

表6 八种营养元素的平均残留率

Table 6 Mean remaining rate of eight nutrients

	N	P	K	Ca	Mg	S	Mn	Si
	残留率,%							
平均值	12.3	10.9	14.7	34.8	25.8	23.2	34.0	39.2
标准差	5.1	5.3	10.1	14.9	13.4	9.6	18.5	18.2
差异*	D	D	D	AB	C	C	B	A

* SSR法比较, 1%显著水准, 样本数为42

3. 营养元素的相关分析

对作物样品中八种营养元素的含量进行相关分析。先把水稻和麦作分为两组样本, 分别求其相关阵, 结果两个相关阵十分相似。进而将两组样本合为一组, 求得代表稻麦两种禾谷类作物的养分含量相关阵(表7), 其中大多数相关阵元素均已超过极显著水准。由于从相关阵判断两营养元素间的相关关系不够直观, 故构造了因子载荷向量图, 图1基于前二主组元(累积方差贡献率为67.2%)。在图上相互靠近的元素正相关程度较好; 相距较远的元素正相关程度较差。根据图1, 可将八种营养元素划为四组: 钾; 氮和磷; 硫和镁; 钙、锰和硅。此划分与养分在不同部位的含量密切相关。钾在秸秆中含量极高; 氮和磷在谷物中含量较高; 镁和硫在作物各部位的含量比较接近; 锰、钙、硅在谷物中含量较低, 但在其他各部位均较高。营养元素在各部位的含量与它的携出量、残留率关系极为密切。收获物中含量较高

表7 作物养分含量的相关阵*

Table 7 Correlation matrix of nutrient contents in four parts of crops

	N	P	K	Ca	Mg	S	Mn	Si
N	1	0.8447	-0.3459	-0.3336	-0.0195	-0.0423	-0.2544	-0.4491
P		1	-0.4414	-0.3640	-0.0721	-0.1556	-0.2633	-0.4451
K			1	0.1859	0.0132	0.1190	0.3414	0.0952
Ca				1	0.7689	0.5391	0.5230	0.7227
Mg					1	0.4216	0.3735	0.7058
S						1	0.2882	0.3476
Mn							1	0.4429
Si								1

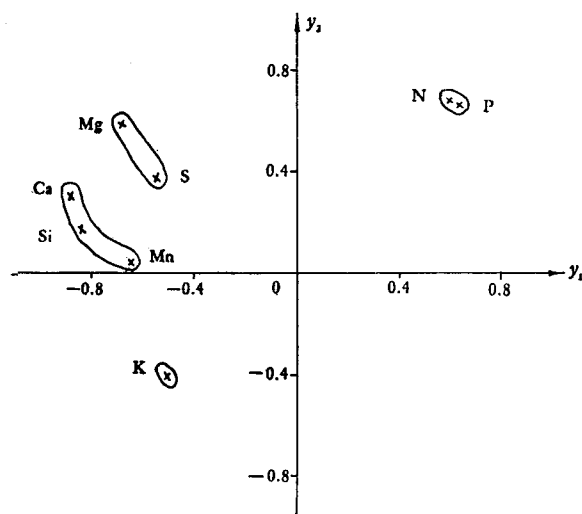
* $n = 192$, $r_{0.05} = 0.113$, $r_{0.01} = 0.148$ 

图1 八种营养元素的因子载荷图
Fig.1 Plot of eight nutrients loading on two factors

表8 元素携出量的因子载荷阵

Table 8 Factor matrix of nutrient removal data

元素	因子1	因子2
	载荷量	
N	0.8548	-0.3710
P	0.8672	-0.1099
K	0.8075	-0.2302
Ca	0.8750	0.0862
Mg	0.9526	0.1242
S	0.8297	-0.4693
Mn	0.6576	0.6642
Si	0.8238	0.4337
特征值	5.6074	1.0752

的元素，其残留率较低，如氮、磷、钾即是。残留物中含量较高的元素，其残留率则较高，如钙、锰和硅。

对收获物中携出的营养元素量作因子分析，结果如表8。这两个载荷向量分别对应于方差贡献率为70%和13%的两个主组元。第一公共因子对于每个营养元素的携出量都具有极显著的正向促进作用，因为八种营养元素的携出量均与之呈极显著的正相关，由此可推知，该因子应是收获物的生物量。收获物生物量的影响举足轻重，贡献率已达70%。相对其他因素而言，影响养分携出量的第二公共因子不应忽视。鉴于硫、氮、钾的携出量与之呈显著负相关，锰和硅的携出量与之呈显著正相关，可以推断这个影响远小于收获物生物量的公共因子该是稻田生态系统中土壤的水分状况，或者说土壤的淹水条件。长期完全淹水一方面促进锰和硅元素在土体内的活化，另一方面提高土壤的还原强度和淋溶速率。前者有利于作物对锰和硅的吸收，后者导致硫、氮、钾移出作物根际，与根系吸收相竞争，从而降低作物体内的含量。这说明养分携出量不仅受收获物的影响，还受环境条件制约。

三、讨 论

收获物携出养分是影响农田生态系统土壤养分库容量的一个重要因素。影响养分携出量的直接因素是收获物生物量及构成和养分在收获物中的含量。土壤条件对养分携出量有着重要的间接影响,它既影响收获物生物量,也影响其养分含量。表1指出土壤条件对生物量的影响。下面的两组数据可以反映土壤条件对养分含量的影响:无锡点单季稻中籽粒含氮量在当地肥、无肥、有机肥三处理中依次为:1.52%, 1.24%, 1.38%;对于秸秆相应数据为0.763%, 0.515%, 0.696%。营养元素在成熟作物体内的含量分布对其自身的携出量也有较深刻的影响,氮、磷、钾的残留率远低于硅和钙。

稻田生态系统的开放度与作物养分的残留率除了反映生物物质的移出状况及养分的残留程度以外,在一定程度上也反映着系统的管理状况。事实上,开放度与残留率在很大程度上取决于人类的收获方式。如果减少收获物生物量,则会导致开放度降低,残留率上升。本文的高开放度和低残留率反映太湖地区稻田生态系统有强烈消耗土壤养分库容的趋势。这里有必要再次重申大力实行秸秆还田。

当然,仅考虑收获物对养分的携出,不能很好地反映系统中营养元素的输出状况。渗漏和排水对钙、镁二元素的输出远远大于作物收获物,它们对钙、镁的年输出量分别为360—700公斤/公顷和90—200公斤/公顷,相当于作物收获物移出量的数倍至数十倍。

参 考 文 献

- 中国科学院南京土壤研究所 1978 土壤理化分析。上海科学技术出版社。
- 刘元昌、徐 琪 1984 江苏省太湖地区养分平衡状况初探。生态学报, (3): 12—16。
- 刘多森、曾志远 1986 土壤和环境研究中的数学方法与建模。农业出版社。(排印中)
- 刘崇群, 1983 植物硫的测定。中国土壤学会农业化学专业委员会(编), 土壤农业化学常规分析方法。科学出版社。283—284页。
- 张尧庭、方开泰 1983 多元统计分析引论。科学出版社。302—339页。
- 武冠云 1982 海陵县农田土壤养分平衡问题的探讨 土壤, 14(2): 52—55。
- 南京农学院(主编) 1979 田间试验和统计方法。农业出版社。85—121页。
- 赵强基、袁从祯、褚金元、刘乃忠 1982 江苏太湖地区几种作物和种植制度的农田生态功能。江苏农业科学, (2): 1—6。
- 黄振雄、梁考衍、王洪耀 1981 广东中山县耕地的养分平衡及存在的问题。土壤通报, (3): 24—26。
- Clark, F.E. & Rosswall, T. (eds.) 1981, Terrestrial Nitrogen Cycles, Processes, ecosystem strategies and management impacts, *Ecol. Bull.* (Stockholm) 33.
- Frissel, M.J. (ed.) 1978, Cycling of mineral nutrients in agricultural ecosystems, Elsevier Sci. Pub. Co., Amsterdam.
- Svensson, B. H. & Söderland, R. (eds.) 1976, Nitrogen, phosphorus and sulphur-global cycles, *SCOPE Report 7, Ecol. Bull.* (Stockholm) 22.
- Wetselaar, R., J.R. Simpson, & T. Rosswall (eds.) 1981, Nitrogen cycling in South-East Asian wet monsoonal ecosystems, Australian Academy of Science, Canberra.

NUTRIENT CYCLING IN WHEAT-RICE AND BARLEY-RICE-RICE ROTATION SYSTEMS OF THE TAI LAKE REGION

I. REMOVING AND REMAINING OF NUTRIENTS IN THE CEREAL GRASSES

Qin Zuping Xu Qi Y. Hseung

(Nanjing Institute of Soil Science, Academia Sinica)

Field experiments were made on the three fertilizer treatments, such as native fertilizer, no fertilizer and pig manure, in the rotation systems of wheat-rice and barley-rice-rice in three different soils-wushan, Huanni (yellow loam) and Shanxuebeitu (white soil with Fe-humus coatings). Plots of the field experiments were taken as models of paddy field ecosystems. The total amount of nutrients removed by crop harvest in most systems during the rotation from Oct. 1982 to Oct. 1983 were in the sequence of

$Si > N > K > P > Ca > S, Mg > Mn$

and the most was 230—650 kgSi/ha, the least, 1.5—9.5kg Mn/ha; the remaining rates of the remaining amount of nutrients over the total amount of nutrients uptaken by crops could be recognized in three groups with the order of

$Si, Mn, Ca > Mg, S > K, N, P$

the remaining rates of each group were about 35 percent, 25 percent, and 10 percent, respectively. The treatments of fertilizer applications had some evident effects on the biological yield of crops. Of most crops, grain yield was high in native fertilizer treatment, middle in pig manure treatment and low in no fertilizer treatment, but the grain yield of late rice decreased as treatments went along pig manure, native fertilizer and no fertilizer. Percentage of biomass removed over the total biomass of the systems was 70—90 percent, which indicated that most of the primary product of the systems had been taken out. Principal component analysis of nutrient content in different parts of cereal grass crops showed that the eight nutrients could be divided into four groups: K; N; and P; S and Mg; Ca, Mn and Si. Factor analysis indicated that nutrient removal by crop harvest was significantly related to water submergence of soil as well as the nutrient content and biomass of crop harvest. Removal of crop harvest could only partly reflect the output of nutrients in agro-ecosystems.