

# 江苏省南部农田生态系统中 营养元素循环的研究

田中明

(日本北海道大学农学部)

长谷川满良

(日本钾肥研究会)

徐 琪 刘元昌

(中国科学院南京土壤研究所)

中国由于人口众多,农业集约程度较高,数千年来,一直依靠精耕细作,发展了多种耕作—轮作制度,充分利用有限的土地资源,以增加粮食的单产。在农业生产中,有机肥一直起着重要的作用,但从80年代开始,由于城乡工业的发展,农业劳动力逐步向工业转移,化肥用量不断增加,在这种情况下,轮作系统也发生了很大的变化。

在江苏,养猪是农业生态系统中一个重要的环节。农民利用粮食及加工的副产品饲养生猪,猪粪作为有机肥归还土壤。同时,猪肉也是该区人民食物结构的重要部分。养猪也是该区农民收入的重要来源。同时,还饲养鸡、鸭、鹅等家禽。

农业生态系统包括土地、水、人口与动物等,通过各组分形成物质流。在传统的农业生态系统中,饲料来自于系统内部,植物营养元素通过“土壤—植物—动物”进行再循环,这也是物质流的主要组成部分。而在现代农业生态系统中,大量施用化肥,而收获的粮食主要作为商品粮出售,物质流是开放的。中国的农业生态系统结构更加复杂。人民生活主要依靠系统内生产的粮食、动物性产品、蔬菜等。饲料也主要来自于系统内,人畜粪尿归还土壤。还利用各种废弃物、绿肥、河泥及水生植物加工而成草塘泥,在厌气的条件下分解数月,然后施于土壤(Yuan, 1984)。故物质流是很复杂的。

作者于1982和1983年调查了江苏三个较典型的乡,即六合县八一乡、江宁县铜井乡、吴县东山乡。该次调查的主要内容已经发表(Tanaka and Hasegawa, 1982)。这里仅将调查中获得的部分数据绘制出系统内各元素的循环图。由于数据不尽完整,有些是从参考书或教科书中摘录的,况且这些数据亦因时因地而有很大的变化,故本文所讨论的只是一个粗略的估算。

## 一、农田生态系统特点

### (一)概况

1. 调查面积:调查区域的土地总面积分别为41、60、76平方公里(表1)。三个乡耕地面积占总面积百分数分别为49%、42%和30%。铜井乡的水域面积只占总面积的5%,而山东乡占14%,这两个乡的非耕地面积均超过总耕地面积的50%。八一乡耕地主要为水稻土,而铜井乡水稻土占耕地的94%,东山乡为48%,其余为果园。

八一乡位于冲积平原上,大部分土地为水稻土,并有大量的水面饲养鸭、鹅及养鱼,荒地较少。铜井乡有许多丘陵坡地,部分为旱地,水面则很少。东山乡位于太湖边的丘陵坡地上,拥有大面积的水面,50%以上的土地为果园。

2. 人口:八一乡每公顷耕地拥有14人,农业人口占75%;铜井乡每公顷耕地拥有10人,非农业人口占35%;东山乡每公顷耕地拥有27人。

3. 耕作制度:八一乡主要耕作制度为两熟制(表2),棉花占有一定的比重,有少量的大豆与玉米,冬季作物主要为油菜、大麦及绿肥,耕作制度较复杂。如果把先种绿肥、尔后又用于育秧的土地计算在内,则该区的复种指数约为2。该区产量较高,例如两熟制的年总产量为12.5吨/公顷。

铜井乡两熟制占70%,其中单季稻一油菜占18%;三熟制少于5%;有少量的棉花一小麦轮作,复种指数略大于2。产量略低于八一乡。早作物主要为山芋,大豆或花生。

东山乡所有水稻田均为两熟制,果园中64%为桔子,其他为杏子、枇杷、银杏等。

4. 畜牧业:八一乡畜牧业发达,既饲养生猪,也养大量的鸡、鸭、鹅(表3),池塘养鱼。生猪圈存数为17.5头/公顷。铜井乡类似于八一乡,只是数量少。东山乡则比上述

表3 家畜、家禽及鱼饲养量

乡	八一	铜井	东山
猪	35,000	34,000	18,000
羊	~	500	2,500
鸡	1,200,000	240,000	40,000
鸭	800,000	10,000	
鹅	500,000	50,000	0
兔	0	12,000	0
耕牛	?**	1,700	?
鱼(公顷)*	?**	267	250***
单位耕地面积(头/公顷) 生猪数	17.5	10.6	10.0

\* 鱼塘面积; \*\*无数据; \*\*\* 每公顷鱼塘产760公斤鱼计。

表1 调查区域的面积和人口

乡	八一	铜井	东山	
总面积 (公顷)	4100	7600	6000	
水面 (公顷)	大	400	867	
耕地面积 (公顷)	2000	3198	1801	
水田 (公顷)	2000	3000	867	
旱田 (公顷)	0	198	~	
果园 (公顷)	0	0	934	
其他 (公顷)	小	3804	3332	
总人口	28000	32000	49000	
其中	农业人口	6000	9000	?
	非农业人口	2000	5000	6000
单位面积人口(人/公顷)	14.0	10.0	27.2	

\* 城镇户口

表2 各季作物的面积及产量\*

乡	八一	铜井	东山
水稻	1330[7.7]	2932[6.4]	867[6.8]
玉米	30[6.0]	~	~
棉花	470[1.4]	80[1.4?]	~
大豆或花生	70[1.7]	198[1.7?]	867[3.8]
小麦或元麦	1200[4.8]	2346[3.9]	~
油菜	130[1.5]	533[1.5?]	~
山芋	~	198[20?]	~
绿肥	200[30]	~	精600[20.8]
水果	~	~	其他334[?]
复种指数	1.6	1.9	2.0

\* 括号外数字为面积(公顷/年); 括号内数字为产量(吨/公顷)。

两个乡更差些,但利用山坡养了很多羊。江苏过去耕耙的畜力主要靠水牛,但近年来已被手扶拖拉机代替。

## (二)农田生态系统中物质的输入与输出

1. 输入:八一和铜井乡都使用了大量的碳铵和过磷酸钙(表4),东山乡主要使用尿素、近来还使用少量复合肥料。八一乡还大量使用城市的人类尿,虽然该乡离城不是很远,但运费较贵。

八一乡还从系统外购进一定量的元麦作为饲料,以提供更多的畜产品。东山乡因果园所占比例大,需要购进大量的粮食作为口粮及饲料。

八一乡农民的燃料主要是作物秸秆，而铜井乡主要是灌木、杂草等，东山乡除依靠全部秸秆外，还要以部分杂草、灌木等为燃料(表5)，以弥补其不足。

2. 输出：八一乡输出的主要是动物性产品，还有少量棉花(表6)。但粮食基本自给。输出部分小麦，购进部分元麦作为饲料。表明该系统是开放的，在满足人民生活需要的前提下，能向市场提供足够的动物性产品。

铜井乡输出主要是粮食，以及少量油菜

表5 农民燃料用量估计(吨/年)

乡	八一	铜井	东山
煤 (%)	0	10	10
作物秸秆(%)	100	50	
树等(%)	0	40	90
所需植物性燃料	11356	11680	15695
植物秸秆	11356	6489	8504**
树等	0	5191	7191
作物秸秆作为燃料的百分数	42	16	70

\* 扣除10%煤后的每天每人所需燃料。

\*\* 作物秸秆的有效率为70%计。

表7 粮食、生猪的人均年消耗量

乡	八一	铜井	东山
水稻(吨)	0.37	0.43	0.12**
谷物(吨)*	0.47	0.52	0.33***
猪(头)	0.79	0.88	0.37

\* 包括水稻、小麦、元麦、玉米、山芋、以及饲料用元麦；\*\* 系统内生产的水稻；\*\*\* 包括部分购进的水稻

籽和畜产品，养鱼是该乡主要的副业收入。东山乡物质输出主要是桔子。

3. 粮食消耗：表7列出了三个乡粮食、生猪的人均年消耗量。城市的人均粮食年消耗量以南京为例为168公斤/年，猪肉消耗量为24—36公斤/年；重体力劳动者人均消耗粮食为240公斤/年。因此城市平均消耗大约是250公斤水稻和0.4头猪/人·年。从表列数字可以看出，八一和铜井乡粮食消耗超过平均消耗量，而东山乡粮食消耗低于平均值。

4. 有机肥利用情况：三个乡有机肥使用情况见表8。由表可见，三个乡都使用了大量的

表4 物质输入量(吨/年)

乡	八一	铜井	东山
碳铵(N17%)	1700	3000	~
尿素(N43%)	250	700	650
硫酸(N21%)	50	800	~
过磷酸钙(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 17%)	600	1200	300
氯化钾(K <sub>2</sub> O50%)	10	2	20
混合肥料(15-15-15)	0	0	120
油饼	352	400	~
城市人粪尿	37276	~	~
饲料元麦	650	~	7000*
糠麸	~	75	~
燃料(树,灌木,杂草)**	0	5191	7191

\* 包括口粮；\*\* 以77为基础

表6 物质的输出(吨/年)

乡	八一	铜井	东山
水稻	~	5,000	~
小麦、大麦	3,600	6,250	~
油菜	50	375	~
棉花	675	30	~
水果	~	~	12,500
猪(头/年)	13,000	6,000	~
鸡(头/年)	24,000	~	~
鸭(头/年)	400,000	20,000	~
鹅(头/年)	250,000	~	~
蛋	40	50	~
鱼	200	75	~

表8 有机肥施用量(吨/年)

乡	八一	铜井	东山
猪粪	~	59,985	62,583
草塘泥	299,855	97,950	62,583
人畜尿	47,916	87,975	~
厩肥	35,250	~	~
绿肥	5,311	少许	~
制作草塘泥的河泥*	119,942	39,180	25,033
单位面积的总施用 用量(吨/公顷)	194	77	85**

\* 草塘泥中40%为河泥；\*\* 包括果园用肥。

草塘泥。每公顷所用的有机肥总量三个乡分别为200吨/公顷·年（八一乡）和80吨/公顷·年（铜井、东山乡）。

## 二、农田生态系统中养分的循环

表9列出了每年单位面积上投入的养分量，由表可见，由有机肥提供的氮约占总氮量的49—72%，磷占68—87%，钾更高，约占95—100%。

表9 生态系统中物质的平衡

乡	八一	铜井	东山
N、P、K总施用量 (公斤/公顷·年)			
N	773	607	502
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	414	202	217
K <sub>2</sub> O	741	303	446
有机肥提供的N、P、K			
N	72	49	60
P	87	68	78
K	99	100	95
作物吸收的N、P、K (公斤/公顷·年)			
N	269	221	183
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	124	111	92
K <sub>2</sub> O	266	248	190
N、P、K的表观吸收系数			
N	35	36	36
P	30	55	42
K	36	82	44

\* 包括果园； \*\* 此项由化肥总用量除以耕地面积而来。

由于缺少土壤自然供肥的数据，故无法计算所施肥料的吸收率。以作物吸收的量除以总施肥量得到作物对肥料的表观吸收率。三个乡氮的表观吸收率均较低，约为35%。因为氮肥主要是易于挥发损失的碳铵。

虽然磷主要是由有机肥提供的，但表观吸收率仍很高，约30—55%。钾的表观吸收率三个乡差异很大，铜井乡达82%，因为该区钾肥施用量较少，而八一乡钾的表观吸收率只有36%，因为该区钾肥用量大于前者。

关于有机肥提供的氮、磷、钾是以表8中的资料作为计算基础，并参考其他有关材料。必须指出的是，这些数据的意义是有限

的，因为各种有机肥的成分是不固定的，且含量变动很大，有些只是统计数字。

有机肥的输入主要包括以下几个方面：

(1) 人畜粪尿；(2) 城市废弃物；(3) 杂草及水生植物；(4) 河泥(塘泥)。由于后两部分没有准确的资料，故主要是计算前两部分。即计算所消耗粮食中元素的含量，作物秸秆，从周围山坡荒地收集的杂草，灌木中元素的含量(假定氮在燃烧中已损失)，城市废弃物，输出的动物性产品中元素的含量。表10列出了有机肥的输入和输出情况。表中计算的结果(B)与实际的施用量(A)之间差异很大，主要是因为某些输入项目没有计算在内。

八一乡A/B为3.26—4.61，这里假定草塘泥鲜重的40%是河泥，则河泥用量约为 $120 \times 10^3$ 吨/年。如果把A、B之间的差异归于河泥的话，则河泥中氮含量必须是0.63%，

表10 有机肥中各元素的平衡(吨)

乡	八一	铜井	东山
施用有机肥中元素的量(A)			
N	1117	946	438
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	723	439	250
K <sub>2</sub> O	1473	963	626
部分原料中元素的量(B)*			
N	343	420	270
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	157	218	206
K <sub>2</sub> O	456	610	325
A/B			
N	3.26	225	162
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4.61	201	121
K <sub>2</sub> O	3.23	158	193

\* (粮食+70%秸秆植物性燃料饲料+人畜粪尿)中元素的总产量-(动、植物产品+燃料中氮的损失)的总量，水生植物杂草、鱼、河泥中元素的量没有计算在内

$P_2O_5$ 为.45%、 $K_2O$ 为0.84%。当然也有可能低于这个数字，因为还有部分是杂草，水生植物所提供的。尽管如此，河泥仍然提供了大量的营养元素。

农田生态系统内N、P、K三要素的平衡状况列于表11。三个乡的氮均表现出大量的盈余，但真实的平衡也许比表中所列的数字要小些。因为仍有几个过程没有计算在内，它们包括灌溉水所带入的氮素、生物固定的氮素，以及因挥发，径流和反硝化而损失的氮素。

三个乡磷素表现出略有盈余，但土壤中的有效磷的含量很少，因为草塘泥中主要是河泥，其有效磷含量较低。

钾有少量盈余。由化肥输入的钾量几乎可以忽略不计，钾的输出也较少。东山乡草木灰所输入的钾占有很大的比重，因为该区农户多用灌木、树枝与杂草作为燃料。

表11 农业生态系统中元素的平衡

乡	八一	铜井	东山
输入(A)*			
N	623	1023	432
$P_2O_5$	165	192	118
$K_2O$	104	58	125
输出(B)**			
N	266	266	106
$P_2O_5$	106	104	8
$K_2O$	31	43	31
平衡(A - B)			
N	357	757	326
$P_2O_5$	59	88	110
$K_2O$	73	15	94

\* 化肥 + 口粮、饲料 + 外部输入的植物性物质

\*\* 谷物、动物性产品 + 燃料中的氮

### 三、讨 论

在江苏，以水稻为主的农业耕作制度是相当复杂的。这一地区以单季稻—小麦为主要轮作制，间有单季稻—油菜，棉花—小麦以及前季稻—后季稻—元麦等耕作制度。并充分利用该系统的产出物(如谷粒、秸秆)及系统中的水面，饲养猪、鸡、鸭、鹅与池塘养鱼。

这一系统的输入主要是氮、磷肥及部分饲料粮。其输出主要是粮食及动物性产品。肥料的施用量较高，但作物对氮的吸收率很低。

该系统还使用了大量的有机肥，特别是草塘泥及堆肥等，其含有营养元素的总量大大地超过了通过植物及人畜粪尿所归还的量。

在我国植稻区，有大量的水面，农民通常利用河泥制作草塘泥肥。施用草塘泥对于充分利用营养物质无疑是很有益的，但是每个农民每年要挖20吨河泥用以制作草塘泥，每年要搬运50吨(八一乡)。根据以往的资料(Yuan, 1984)，积制和施用草塘泥的人工约为180个/公顷。如果没有必要的机器而要完成这一任务，无疑是相当繁重的。

各种耕作系统中氮素有大量盈余，磷、钾少量盈余，要维持这一状况，需要投入大量的人工。近年来，农民大量施用化学氮肥和磷肥，从而增加了农业生态系统中的产出量，但是这些化肥的利用率(特别是氮肥)不高。

据调查，三个乡主要以饲养业为主，铜井乡还侧重于粮食生产，而东山乡则着重于经营果园生产。根据八一和铜井两个乡的有关数据，绘制了以水稻为主的耕作系统中养分循环图。这两个乡以水稻为主，复种面积为5900公顷，耕地面积为2600公顷，人口为3万，每年每公顷土地所施用的化学氮肥(N)为270公斤，化学磷肥( $P_2O_5$ )为60公斤，并施用122吨有机肥。生产11.1吨的粮食(单季稻—小麦轮作系统)，可养活12个人，13头猪，280只鸡及260只鸭或鹅。除这一耕作系统外，其他耕作系统可提供2.7吨粮食/公顷，3.7头猪，134只鸡、鸭和鹅，

以及部分棉花。还利用农副业的废弃物，农作物秸秆，人畜粪尿及河泥制作了相当数量的草塘泥。

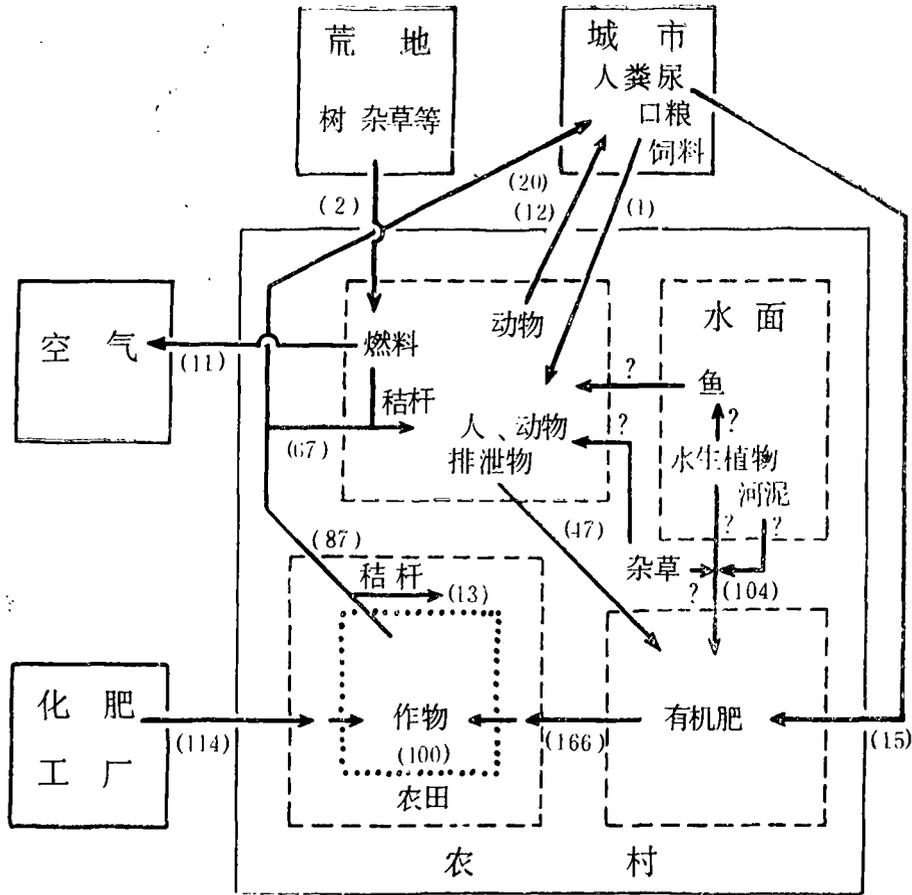


图1 农业生态系统中氮的循环【江苏】

(括号内的数字为相对百分数，以作物的年吸收240公斤N/公顷为100)

图1、图2和图3是氮、磷、钾三要素在农业生态系统中的循环图。图中数字是相对数字，即把作物一年内所吸收量作为100计(作物一年中吸收240公斤N/公顷、116公斤 $P_2O_5$ /公顷和225公斤 $K_2O$ /公顷)。

图1是氮素循环图。输入的氮肥为114，有机肥为166。肥料氮的回收率为36%，其他则通过各种途径损失或被土壤吸附固定。植物所吸收的氮(以100计)的13%又以植物秸秆的形式归还土壤，20%的粮食产品以商品出售，67%为农民生活所消耗。输入部分还包括少量的饲料及燃料，杂草及水生植物所带进的氮素。而输出的大部分是动物性产品(13%)，以及作为燃料而损失的。有机肥输入为166，其中人畜粪尿为47%，城市垃圾所带进的为15%，河泥、杂草及水生植物带进的氮素为104。整个系统的氮素平衡盈余为89。但这一盈余量并没有包括氮素因反硝化和氨挥发等引起的损失。

图2是磷的循环图。从图中可以看出，磷仅有少量盈余，化肥提供的磷为52，而有机肥提供的磷为193。通过“土壤—植物—人、家畜—有机肥”这一系统引起的磷素再循环的作用远比氮素要大得多。

钾的盈余是很少的(图3)。钾通过人和家畜再循环的量(73)比氮和磷(55)都大。而草木

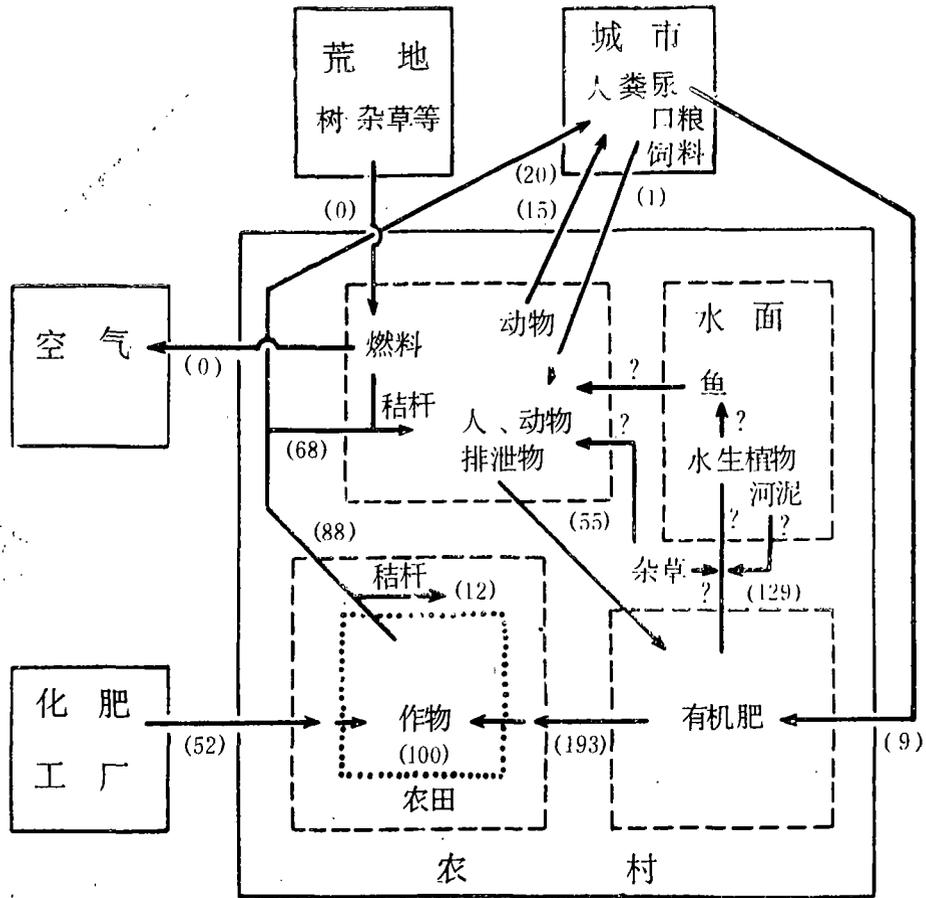


图2 农业生态系统中磷的循环【江苏】

(括号中数字为相对百分数，以作物年吸收116公斤 $P_2O_5$ /公顷为100)

灰对钾素在农业生态系统中的再循环起了相当大的作用。

应该指出的是，上述平衡中并没有包括灌溉水所带入的营养物质，也不包括各种损失的量，如果将这两部分计算在内的话，则氮、磷仅有少量盈余，而钾的盈余较大。

Wiens等对江苏苏州地区农业耕作制度进行调查后发现，这一地区氮素供应是过量的，而磷、钾较缺乏，并明确地指出，三熟制造成了严重养分供应失调的问题。

通过以上分析，在研究农业生态系统中营养物质的循环时，必须对下列几点进行研究；(1)塘泥的资源，水生植物中营养元素的含量。这些养分其中部分是由生态系统内部其他分室而来，而部分是外系统输入，有些是来自于河流，小溪的上游。因此本系统的生产力可能部分得益于上游大量的水土流失；(2)从周围荒地，边角地所输入的营养物质是因环境条件而变化的。随着荒地的减少，农民将逐步用煤、石油取代杂草、秸秆、杂树等而成为燃料的主要来源。

总之，在农业生态系统内是通过施用大量的有机肥，花费大量的劳动力，使植物营养元素在系统内进行有效地再循环，以维持土地生产力。当然，在施用有机肥的同时，要使作物进一步增产，施用一定量的化学氮、磷肥也是必不可少的。但就目前来说，化学氮肥的利用率是很低的，而要依靠传统的施用有机肥的方法，把农副业结合起来，又会出现劳动力紧张的

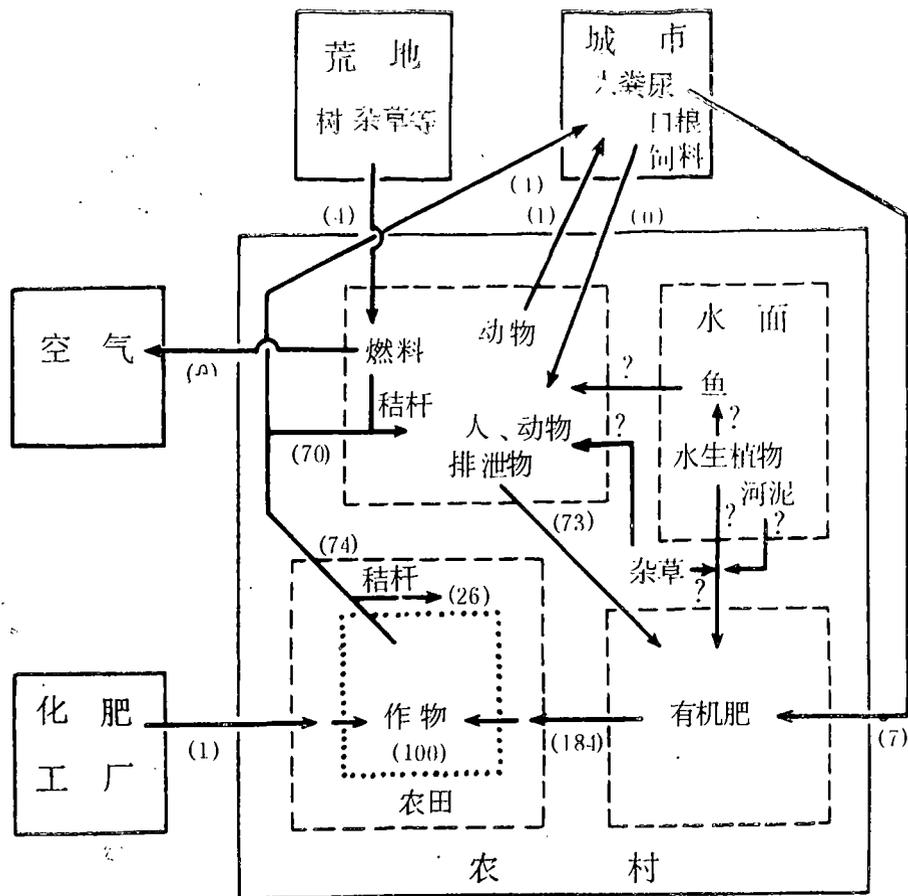


图3 农业生态系统中钾的循环【江苏】

(括号中的数字为相对百分数；以作物年吸收225公斤 $K_2O$ /公顷为100)

局面。鉴于此，必须进一步研究提高施肥效益的方法和提高劳动效率的途径。

由于工业的发展，未来农业将面临劳动力不足的问题，这将给在农业生态系统内继续维持农副结合的现状并继续靠施有机肥来维持营养元素在系统内有效地再循环带来较大的困难。即使这样，我们仍可通过合理施用化肥来维持现在的农业产量或略有增加。但是又将面临着如何处置农业生态系统中的废弃物和人畜粪便的问题，如果弃而不用，任其浪费，则会造成大量的营养元素的损失；如果对河泥和水生植物不加以利用，则未来的河流将可能变为垃圾场，而传统农业在这些方面起了很大的作用。看来，在未寻找到更新、更好地利用途径之前，传统方法似乎还不能丢弃。

#### 参 考 文 献

- [1] Guo Yixian, The rice-based cropping system and its development in China. Report of a Workshop on Cropping Systems Research in Asia. IRRI. p. 331-344, 1982.
- [2] Tanaka, A. and Hasegawa, M., Cultivation and fertilization of rice in China. Kali Kenkyu No. 31. p. 36-61, 1982, (in Japanese).
- [3] Wiens, Thomas B. (1984): Microeconomic study of organic fertilizer use in intensive farming in Jiangsu Province, China. Organic Matter and Rice. IRRI. p. 535-556., 1984.
- [4] Yuan Congyi The utilization of animal and human wastes in rice production in China. Organic Matter and Rice. IRRI. p. 178-192., 1984.