

红壤农业生态系统养分循环、 平衡和调控研究

何园球 黄小庆

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘 要 本文运用 5 年的定位资料,较系统的论述了红壤农业生态系统养分循环和平衡规律,讨论并举例说明了如何评价养分平衡的问题,同时,提出了调控养分循环和平衡的一些具体措施。

关键词 红壤农业生态系统,养分循环与平衡,调控途径

中图分类号 S181

农业生态系统中的养分循环受人类活动的深刻影响,在相当长的一段时间内,农业生产的巨大进步主要靠不断增加能源和投入来达到。化学肥料的大量投入,在促进农业迅速发展的同时,也引起了一系列环境、资源和产投比降低问题,并造成 N、P 盈余而 K 亏损。这说明,农业的发展不能只依靠化肥和能源的投入,还必须研究养分的循环和平衡^[1]。因为只有通过循环,才能使有限的养分得到最大限度的利用;只有了解养分的平衡状况才能对土壤养分水平的发展趋向进行预测,并采取合理调控措施^[2]。以便降低投资,保持肥力,改善环境,增加产出。这些方面的研究进展对农业持续发展将有重要意义。

1 养分循环特征

1.1 养分循环的基本途径

农业生态系统养分循环包括养分收入、支出、再循环和系统内部流动 4 个基本环节(图 1)。

(1) 养分收入包括通过降雨(主要是 N、K、Na、Ca)、施肥(主要是化肥 N、P、K)、种子和生物固 N(在林地和旱地,主要是豆科绿肥和灌木等,在水田主要是自生固 N)等途径进入系统的养分。

(2) 养分支出在旱地以地表径流和 N 的挥发损失为主;林地以枝、叶燃烧和木材调出损失为主;水田以商品粮调出为主;养殖以猪鱼产品的调出为主。

(3) 养分再循环是衡量系统稳定水平的重要指标之一。种植业中返回的有机肥形态以林果枝叶和农作秸秆返回为主。

(4) 系统内部养分流动是指农业生态系统中各亚系统间和亚系统内部养分的流动。

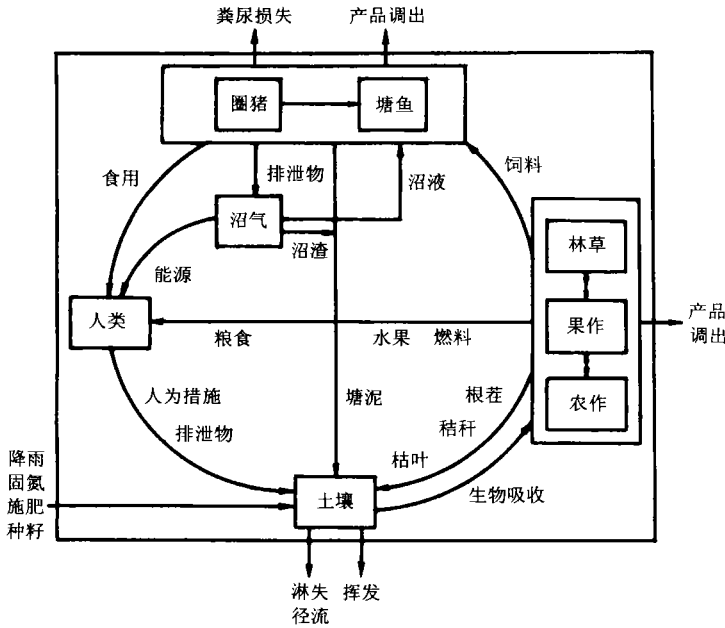


图1 农业生态系统的养分循环

Fig.1 The cycling of nutrients in the agroecosystem

例如，薪炭林和森林凋落的枝、叶作为燃料，农作物秸秆返还农田，同时，农田种植绿肥，这样，可减少农田化肥和有机肥用量而施入林草中，即为林草亚系统和农田亚系统间的养分流动；猪粪、尿入沼、沼液养鱼、猪粪、沼渣种牧草，牧草养猪和鱼，这既是种植和养殖亚系统间，也是养殖亚系统内部的养分流动。

1.2 养分循环的主要参数

1.2.1 收入方面 有机肥，包括猪粪、沼渣等有机肥和凋落叶、作物秸秆和绿肥等有机物(表 1^[3,4]和表 2)，应按平均值计算；降水、透过降水、灌溉水，动态观测的平均值如表 3；生物固 N，把豆科作物含 N 量中的 2 / 3 作为共生固 N 量；种子，一般南方作物的播种量为：水稻 180kg / ha，小麦 187kg / ha，花生 187kg / ha，玉米 45kg / ha，油菜 1.1kg / ha。按表 1 可计算其养分含量。

1.2.2 支出方面 养分吸收：农业生态模式中主要林木和作物的养分含量如表 1；养分流失：主要包括地表径流和深层渗漏两种形式(表 4)；N 素挥发：试验表明，在水田，碳铵的 N 素损失为 49—66%，以 55% 计算，尿素为 29—40%，以 35% 计算，旱地平均损失 32.7%^[5]。各种粪肥存贮过程中 N 素损失为 12.3%—50.9%，平均损失按 30% 计^[1]。

综上所述，农业生态系统养分循环特点可归纳为：养分损失季节不均，受降雨和温度影响大；养分损失大，70% 的 N 挥发和损失，90% 的 P 被土壤固定，70% 的 K 因径流和渗漏损失；养分的利用率低，主要是布局不合理，施肥不当和养分再循环率低所造成的；人为干预大，但不完全合理；土壤养分含量低(自然土壤严重退化，人为土壤结构变劣)，投资效果差。

表1 红壤区主要林作养分含量(g/kg)

Table 1 The nutrient contents of main forest trees and crops in red soil region (g/kg)

品种 Variety	器官 Organ	N	P	K
水稻	种子	12.6	3.2	2.8
	稻草	5.5	1.2	18.8
小麦	种子	17.0	3.4	5.1
	麦草	4.0	1.5	12.2
大麦	种子	15.7	2.8	7.9
	麦草	3.6	0.4	14.2
玉米	籽	19.8	4.1	4.7
	秸	13.3	1.5	33.3
早稻	籽	17.4	2.7	2.8
	杆	11.8	0.7	22.3
荞麦	籽	20.2	3.1	5.6
	杆	10.2	1.0	38.0
花生	种子	51.0	5.2	6.8
	藤	7.4	1.1	5.6
油菜	种子	4.4	8.3	6.2
	秸杆	9.0	2.2	14.6
紫云英	地上部(鲜重)	4.0	0.4	2.5
针叶树	凋叶	6.6	0.8	3.6
	枝杆	2.6	0.5	1.3
阔叶树	凋叶	20.8	1.1	2.3
	枝杆	4.0	0.4	1.3
地被物		20.8	1.1	2.3
柑桔	果实	26.8	1.7	13.6
奈李	果实	21.7	2.9	9.4

表2 猪粪、沼肥养分含量(g/kg)

Table 2 The nutrient contents of pig dung and marsh-gas residues (g/kg)

项目 Item	有机质 Organic mater	全N Total N	全P Total P	全K Total K	C/N	
猪粪 (粪尿比) 1:5.7	大猪(60-90kg)	614.4	19.5	36.0	5.9	18.3
	小猪(20-35kg)	663.5	25.7	21.6	9.1	15.0
	平均	639.0	22.6	28.8	7.5	16.0
沼渣液 (渣液比) 1:30	沼液	37.4	1.6	1.0	0.8	13.9
	沼渣	548.9	11.4	4.2	9.9	26.0
	平均	53.9	2.1	1.1	1.1	11.8

表3 降水、透过水、灌溉水的养分浓度

Table 3 The nutrient contents of precipitation, leakage and irrigation water

类型 Item	浓度(mg/L) Contents(mg/L)			养分量(kg/hm ² ·a) Nutrient(kg/hm ² ·a)		
	N	P	K	N	P	K
降雨	0.190	0.050	0.500	3.410	0.900	9.000
林冠透过水	0.950	0.100	1.250	17.100	1.800	22.500
灌溉水	1.540	0.002	0.003	20.790	0.030	0.040
水库水	0.540	0.003	—	7.290	0.040	—

表4 红壤地表径流、渗漏水养分浓度(mg/kg)

Table 4 The nutrient contents of surface runoff and seepage water in red soil (mg/kg)

项目 Item	地表径流 Surface runoff			深层渗漏 Seepage water		
	N	P	K	N	P	K
	针叶林	2.51	0.031	6.41	2.77	0.055
阔叶林	2.50	0.023	6.41	2.74	0.046	6.40
混交林	2.51	0.038	6.40	2.79	0.043	6.44
自然荒地	2.00	0.017	6.46	2.03	0.051	6.42
1 ¹⁾	8.18	0.057	21.82	1.11	0.012	13.22
2	5.58	0.042	7.94	1.39	0.011	13.44
3	9.55	0.072	17.66	1.09	0.012	6.40
4	7.41	0.050	13.21	1.47	0.013	17.81
5	11.73	0.057	23.32	3.37	0.013	38.68

1) 1. 柑桔 + (花生 -- 绿肥 -- 花生); 2. 奈李 + (花生 -- 绿肥 -- 花生); 3. 自然恢复; 4. 花生 -- 绿肥 -- 花生 -- 绿肥; 5. 玉米 -- 荞麦 -- 大麦 -- 玉米

2 养分平衡特征

2.1 养分平衡特征

根据以上各养分循环的途径和参数, 计算了农业生态系统及各亚系统的养分平衡(表

表5 农业生态系统养分平衡(kg/hm²)

Table 5 The nutrient balance in the agroecosystem (kg/ha)

项目 Item	收入 Income			开支 Output			平衡(%) ¹⁾ Balance			收入/ 开支 Income/Output			养分循环速率 ²⁾ Cycling rate		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
	优化模式														
阔叶林	177	12	205	141	8.3	130	25.5	44.8	58.2	1.26	1.45	1.58	318	21.3	235
混交林	155	13	139	128	8.1	84	21.1	55.6	65.5	1.21	1.56	1.66	28.3	20.7	233
3	11	1.8	31	36.5	4.2	75	-70.0	-57.1	-59.2	0.30	0.43	0.41	46.5	6.0	106
2	724	294	469	688	96	435	5.2	206	7.8	1.05	3.06	1.08	1412	390	904
5	373	81	403	349	47	300	69	723	34.3	1.07	1.72	1.34	722	128	703
稻-稻-肥	646	167	476	528	79.6	359	22.3	110	32.6	1.22	2.10	1.33	1174	246.6	835
稻稻油(麦)	680	197	511	643	96	491	5.8	105	4.0	1.06	2.05	1.04	1323	293	1002
传统模式															
针叶林	96	9.2	94	99.8	6.8	97.8	-3.0	35.3	-3.9	0.97	1.35	0.96	195.8	16.0	191.8
3	11	1.8	30.6	35.7	4.2	75	-69.7	-57.1	-59.2	0.30	0.43	0.41	46.5	6.0	105.6
1	728	294	468	688	92	450	5.8	220	4.1	1.06	3.20	1.04	1416	386	981.5
4	382	82	408	363	48	335	52	70	21.8	1.05	1.70	1.22	745	129.6	743
稻-稻-闲	539	121	207	463	63.5	329	16.4	91.0	-37.1	1.16	1.91	0.63	1002	184.5	536

1) (收入-支出)/支出×100%; 2) 养分收入+养分支出

5)。其特点如下:

2.1.1 年养分循环速率(养分收入 + 养分支出) 代表一个地区耕作制度、施肥水平及其他影响养分收支的因素。就优化模式而言,总体养分循环速率较快。以农田>果作>林草亚系统;就不同种植方式而言,以果树最快;养分元素组成中的养分循环速率以 N 最大, N、P、K 的平均比值约为 5:1:3。传统模式养分循环速率较低。不同种植方式以农田最快, N、P、K 的平均比值为 6:2:4。

2.1.2 养分平衡特征 优化模式 N、P、K 均盈余,说明此种模式及其种植方式均有利于养分积累,使土壤 N、P、K 水平提高;对不同亚系统的盈余量以果作亚系统>农田亚系统>林草亚系统;不同种植方式的盈余量以果树最多,旱地最少;不同元素以 P 盈余最多。传统模式 P 盈余, K 亏损, N 保持平衡,上部荒坡 N、P、K 出现负值。

2.1.3 施入的养分和消耗的养分比值 优化模式中 P 比值较大,说明模式施肥水平较高,除了作物消耗以外,土壤中还有一定的积累,同时 P 能够长期供作物吸收利用。传统模式则积累较少。

2.2 养分再循环特征

养分再循环通常用有机肥形态返回的养分量占养分总消耗量的百分数表示,各种种植模式养分再循环的结果列于表 6。结果表明:(1)在农业生态模式中,优化模式有机肥施入量较高,传统模式则较低;就不同亚系统而言,都以农田亚系统较高;就 N、P、K 的配比而言,P 和 K 的比例较大。(2)充分挖掘有机肥源,包括秸秆、厩肥和人粪尿等,研究表明:在比较合理施肥的农户中,秸秆利用率也只有 45% 左右,厩肥的利用率只有 60% 左右,而人粪尿基本未得到合理利用。(3)在磷肥方面,P 的平衡都有巨大的盈余,这意味着 P 肥的施用制度大有改进的必要,作为第一步,可考虑在农田的冬作和双季稻轮作区提倡只在冬

表6 养分再循环特征(%)

Table 6 The features of nutrient recycling(%)

种 类 Type	N	P	K	NPK总量 Total
优化模式				
阔叶林	47.3	39.1	20.4	43.3
混交林	39.5	44.4	19.3	32.0
2	52.5	74.0	17.5	41.7
5	63.6	162.3	117.0	93.3
稻--稻--油	31.3	93.8	84.8	56.7
稻--稻--绿肥	31.8	46.5	108.4	61.5
传统模式				
针叶林	24.5	23.5	3.7	14.5
1	18.6	34.8	11.8	17.3
4	28.4	99.0	31.5	34.3
花生--绿肥	17.2	24.0	45.2	25.5
稻--稻--闲	13.1	22.5	36.5	22.8
余江县种植方式	30.0	62.0	47.0	38.0
农户种植方式	39.0	47.0	37.0	39.0

作和早稻上施P,因为尽管这样,P的平衡仍有大量盈余^[6]。在林草亚系统中,应提倡栽苗时多施P肥,以供其长期使用;在果树栽培中,除了基肥外,还要大量补充P,因为果实需要大量的P。

2.3 养分平衡评价

2.3.1 评价原则 前面已经讨论了农业生态系统的养分平衡,那么养分平衡对不同养分应该保持在一个什么盈亏水平上才是合理的?这个水平在不同土壤上是否存在差异?一般认为人们施肥必须考虑两方面因素:一是为了补充土壤养分之不足,维持产量的持续增长;二是尽量减少肥料浪费,并不污染环境,这是施肥的基本原则。

2.3.2 评价方法^[7] (1) 土壤养分贡献率,简称S(Soil Nutrient Contribution Index),它的定义是:

$$S = 1 / D \times 100\% \quad (1)$$

式中D为养分平均相对增长率,用相对产量表示。例如:某地N肥平衡,如增长率为30%,即与不施N肥之比为1.3, $S = 1 / 1.3 \times 100\% = 77\%$,说明肥料养分应达到作物养分取走量的23%(100% - 77%)才能满足作物需要。(2) 养分允许平衡亏损率(B%)

$$B\% = [(1 - S) / E - 1] \times 100\% \quad (2)$$

式中E为某养分肥料利用率。养分允许平衡盈亏率是指在当地条件下养分平衡虽有亏缺或盈余既不影响作物产量,也不造成养分浪费。例如某地N肥平均增长率为30%,N肥利用率为30%,则 $B\% = [(1 - 1 / 1.3) / 0.3 - 1] \times 100\% = -23\%$ 。说明在N素有23%赤字情况下仍不影响作物产量。

上述模型为我们判断某地区养分盈亏是否合理提供了一个基本标准和方法。

2.3.3 系统养分平衡评价 根据上述原则和方法以及实验结果,计算了农业生态系统及各亚系统N、P、K元素的允许平衡盈亏率(表7),并与实测的养分平衡状况进行了比较。结果说明:农业生态系统及各亚系统N、P、K元素平衡均高出允许盈余值。但这并不等于养分投入量一定要控制在允许平衡盈亏率以内,因为,一个地区的养分平衡盈亏率主要决定于当地土壤的肥力状况。养分平衡有赤字,最终必然导致土壤养分的净损耗,相

表7 农业生态系统养分允许平衡盈亏率¹⁾

Table 7 The surplus and deficit rates of nutrient balance in the agroecosystem

项 目	相对产量	允许盈亏率(%)						平衡(%)		
		Relative yield			Permissible surplus and deficit rate			Balance		
		N	P	K	N	P	K	N	P	K
优	2	1.44	1.39	1.60	-12.7	87.1	-25.0	5.2	206.0	7.8
化	5	1.41	1.24	1.35	-16.9	29.0	-48.0	6.9	72.3	34.3
	稻--稻--油	1.41	1.12	1.14	-16.9	-28.6	-75.4	5.8	105.0	4.0
	稻--稻--绿肥	1.32	1.14	1.17	-30.7	-18.1	-70.9	22.3	110.0	32.6
传	1	1.42	1.44	1.67	-15.5	104.0	-19.8	5.8	220.0	4.1
统	4	1.45	1.60	1.49	-11.3	150.0	-34.1	25.2	70.0	100.0
	稻--稻--闲	1.46	1.09	1.18	-10.0	-45.0	-69.5	16.4	91.0	-3.7

1) N肥利用率以35%计,P肥利用率以15%计,K肥利用率以50%计

反,养分平衡有盈余,必然增加土壤肥力。但是在施肥(某种元素)不增产的情况下,一定要通过施肥来达到土壤养分平衡是不可取的,可允许有净的平衡赤字。相反,只要某一养分有增产作用,尽管允许有平衡赤字仍应使该养分的平衡达到 100%。除非经费不足或肥料缺乏时,才保持养分在允许平衡盈亏率的水平上。

在上述论述基础上,对传统模式养分状况可初步得出下列结论:(1)养分循环速率较高,出现盈余较多,(2)养分再循环比重较低,(3)N、P、K 配比不合理,P 投入较多,(4)各亚系统间养分平衡差异较大。此外,还存在养分周年使用不均等问题。

3 养分循环和平衡的调控

3.1 建立优化农业生态模式

实行顶林、腰果、谷农、塘渔(畜禽),立体农业复合模式和农林混作、农(果)肥间套作以及不同作物间套作等地块复合农业模式,使高矮、生育期、营养需求不同的植物形成适生互补的共生群落。周年均匀利用土地资源:使养分循环趋于合理,保持水土,增加肥力^[8]。

3.2 种养亚系统的结构调控

如果把猪作为食物链顶端的话,粪尿制沼、养鱼,塘泥还田种草,使种养有机结合起来。表 8 说明 1000 头牲猪粪尿可供应 5 公顷林草、3 公顷果作、2 公顷农田、3 公顷牧草和 3 公顷水面的肥料需求;牧草可满足 1000 头猪配合饲料和 3 公顷水面鱼的饲料需求;塘泥又可满足 13 公顷林果作的底肥需求,此外,猪尿可作为追肥使用。这种种养结合的模式可使总体

表8 猪粪尿的分配(存栏1000头)

Table 8 The distribution of pig dung and urine (the amount of pigs on hand: 1000)

项目 Item	饲养亚系统 Feeding subsystem	种植亚系统 Planting subsystem				小计 Total	养殖亚系统 Raising subsystem
		顶 Top	腰 Hillside	谷 Vally	草 Grass		
粪(T/Y)	365	50	150	37.5	80	317.5	47.5
尿(T/Y)	2080	—	480	500	1000	1980	100
面积(hm ²)		5	3	2	3	13	3

经济效益增加 1—3 倍,有效地实行养分在系统内的合理调控。

3.3 平衡施肥

80 年代以来,我国农业施肥主要依靠化肥,特别是 N 肥,如在江西省的农田中有 70% 的 N 素、80% 的 P 素、60% 的 K 素依靠化肥提供;林地几乎 100% 依靠化肥,园地平均也有约 70% 的 N、P、K 由化肥提供。因此应扩大有机肥源:如增加秸秆还田,合理使用厩肥和人粪尿,充分利用草木灰。同时,参考养分允许平衡盈亏率和实验结果,提高有机肥的比重,减少化肥用量,调整 N、P、K 的比例为 5:1:3 左右,实现有机、无机肥配合和 N、P、K 合理配比的施肥制度。同时,应顾及各亚系统肥力需求,协调施肥,维持整个系统的持续发展。

3.4 水肥调控

水、肥是限制红壤资源潜力发挥的最主要的两大因子。利用红壤必须培肥红壤,基本措施是:一方面增肥改土,主要是有机肥,以肥增水;另一方面灌溉保墒,以水调肥,包括中耕、

覆盖、合理安排茬口,改制等措施。迅速恢复和提高耕作层的有机质水平。

4 结 论

1. 红壤农业生态系统养分循环特点是:季节养分损失不均,损失大,利用率低,人为干预大,导致土壤养分含量低,投资效果差;养分流失(径流、渗漏)和 N 素挥发是养分损失的主要途径,土壤固定是影响 P 素效益发挥的主要因子,合理作物布局,加强养分再循环和系统内部流动是减少养分流失和提高养分利用率的有效措施。

2. 红壤农业生态系统养分平衡特点是:养分循环速率较快,出现盈余较多;养分再循环速率较低,N、P、K 配比不合理;各亚系统间养分投入不平衡。因此,要增加农田有机肥的投入,充分挖掘有机肥源,减少化肥投入,改革 P 肥施用制度。

3. 保持养分平衡必须遵循补充养分不足和不污染环境的基本原则,以土壤养分贡献率 S 和养分允许平衡亏损率 $B\%$ 为评价依据,同时考虑在施肥不增产的情况下可允许有净的平衡赤字。相反,只要某一养分有增产作用,尽管允许有平衡赤字,也可允许养分平衡达到 100% 这样的实际情况。

4. 调控红壤农业生态系统养分循环和平衡的途径主要是建立优化农业生态模式,实行种养结合,进行平衡施肥并实施水肥调控。

参 考 文 献

1. 鲁如坤. 持久农业与红壤的开发利用. 见:红壤生态系统研究第二集,南昌:江西科学技术出版社,1994. 8—15
2. 张坤民,朱 达,张世秋. 可持续发展在中国. 见:可持续发展研究论文集,北京:中国环境科学出版社,1996. 35—40
3. Diest, A. V. Agricultural sustainability and soil nutrient cycling with emphasis on tropical soils. *Trams. 15th Intern. Cong. Soil Sci.* 1994. 5a:58—61
4. 鲁如坤,史陶均. 农业化学手册. 北京:农业出版社,1982. 34—72
5. 鲁如坤. 江西省农田养分循环和平衡. 见:红壤生态系统研究第一集. 北京:科学出版社,1993. 27—32
6. 鲁如坤,张中一,时正元. 红壤农田生态系统低投入研究. 见:红壤生态系统研究第三集. 北京:中国农业科学技术出版社,1995. 189—192
7. 鲁如坤,刘鸿翔,闻大中,钦绳武. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究. *土壤通报*,1996. 27(5): 197—199
8. 何园球. 红壤低丘岗地区复合农业生态模式及其调控. *兰州:资源环境网络研究动态*,1993. 1—7

NUTRIENT CYCLING, BALANCE AND REGULATION IN RED SOIL AGROECOSYSTEM

He Yuan-qiu and Huang Xiao-qing

(*Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing 210008*)

Summary

According to the studies on dynamics of nutrients in the agroecosystem of red soil for 5 years, the laws of nutrient cycling and balance in red soil agroecosystem are discussed, the evaluation of nutrient balance is illustrated with examples, and some measures for regulating nutrient cycling and balance are put forward.

Key words Red soil agroecosystem, Nutrient cycling and balance, Regulation