

农业生态系统养分循环再利用作物产量增益的地理分异^{*}

沈善敏 殷秀岩 宇万太 张璐 陈欣

(中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110015)

刘鸿翔 王德禄 (中国科学院黑龙江农业现代化研究所, 哈尔滨 150040)

王凯荣 周卫军 谢小立 (中国科学院长沙农业现代化研究所, 长沙 410125)

【摘要】 通过4个地点中长期田间试验联网比较获得以下结果, 农业生态系统养分循环再利用的作物产量增益受气候的热量因素、化肥施用和养分循环再利用持续时间的长短等因素影响。在不施化肥情况下, 保持0.8循环率养分循环再利用的平均粮食增产率自北向南分别是: 温带黑龙江海伦 $253\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (10年平均)、暖温带辽宁沈阳 $1122\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (6年) 和喀左 $1332\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (8年)、亚热带湖南桃源 $2884\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (7年); 在施用NP化肥基础上保持养分循环再利用则分别为海陵 225、沈阳 694、喀左 786、桃源 $1321\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。循环回田的农家肥养分对作物增产有着明显的残效叠加作用, 在施用NPK化肥基础上保持养分循环再利用的作物增产率在试验期间的前3年平均为5%, 后3年平均可上升至14%。

关键词 农业生态系统 养分循环再利用 产量增益地理分异

Geographic differentiation of yield increase efficiency caused by recycled nutrients in agro ecosystems. Shen Shanmin, Yin Xiuyan, Yu Wantai, Zhang Lu and Chen Xin (*Institute of Applied Ecology, Academia Sinica, Shenyang 110015*); Liu Hongxiang and Wang Delu (*Heilongjiang Institute of Agricultural Modernization, Academia Sinica, Haerbin 150040*); Wang Kairong, Zhou Weijun and Xie Xiaoli (*Changsha Institute of Agricultural Modernization, Academia Sinica, Changsha 410125*). - *Chin. J. Appl. Ecol.*, 1998, 9(4): 379~ 385.

The results of field experiments at four stations in different parts of China indicate that the crop yield increment caused by recycled nutrients within an agricultural ecosystem was significantly influenced by the thermal condition of climate, the application of fertilizers and the duration of the experiments lasted. In the case of no fertilizer, the average crop yield increment caused by recycled nutrients with a 0.8 recycling rate ranged from $253\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (average of ten years) at Hailun station (in temperate zone) to $1122\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (six years) at Shenyang station and $1332\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (eight years) at Kezuo Xiahetao station (in warmer-temperate zone), and to $2884\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (seven years) at Taoyuan station (in subtropical zone), while on the base of applying N and P fertilizers, the corresponding increments at the four stations were 225, 694, 786 and $1321\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ respectively. There was a marked accumulative residual effect of recycled nutrients in farmyard manure on crop yields, based on N, P and K fertilizers, the average increase rate of crop yields caused by recycled manure was about 5% in the first three years, but raised up to about 14% in the last three years within the experimental period.

Key words Agro ecosystem, Use of recycled nutrients, Geographic differentiation of yield increase efficiency.

^{*} 中国科学院“八五”重大、“九五”重点资助项目。

1998-04-03 收稿, 1998-04-18 接受。

1 引 言

保持农业系统内部养分的循环再利用是我国农业施肥的传统,这一传统施肥的作物增产作用是否因外界的热量或水分条件而异?则是迄今尚未充分研究然而不论在理论或实践上均具有重要意义的问题之一.以往的试验研究中,不乏以各种农家肥为供试对象研究其作物增产作用,可惜供试农家肥的用量并非以系统内部养分的可循环量为依据,因此试验结果便不足以说明系统内部养分循环再利用的作物增产效果,亦难以进行跨区域的增产效益比较.

1990 年,根据中国科学院的一项生态学研究计划,一批统一设计的中长期田间试验在我国东部农区自北向南的 5 个试验站上进行,旨在研究、评估自本世纪 50 年代以来我国农业中施肥进步和保持农业系统中养分循环再利用这一施肥传统的作物产量增益,并比较这一效益在不同区域之间的不同表现.最初几年的试验结果表明,保持相同循环率(0.8 循环率)养分循环再利用的作物产量增益,自北向南有着明显增长的规律^[5].

十分惋惜的是,之后上述 5 组试验中的两组因故终止或改变试验设计,仅留存黑龙江海伦、辽宁沈阳、湖南桃源等 3 组试

验延续至今,加上 1987 年开始的一组在辽西喀左下河套工作站进行且设计相似的试验,共有 4 组试验组成了跨区域的试验联网,其中海伦、桃源、喀左 3 组试验的部分结果已先后发表^[1, 2, 8]. 本文便是以上述 4 组试验截止 1996 年的试验结果,讨论系统中养分循环再利用作物产量增益的区域分异现象.有关农业中施肥进步对作物产量影响的区域分异现象则另文讨论.

2 试验地自然条件与方法

2.1 试验地自然条件

4 组试验地点的气候条件及试验开始时的土壤肥力状况如表 1 所示.

海伦、沈阳、桃源 3 站在气候的热量上分属温带、暖温带和中亚热带,在气候的湿度上则均属湿润区,因此 3 站的气候条件构成了湿度大抵相似惟在热量上形成了一明显北低南高的梯度.沈阳和辽西的喀左县在热量上同属暖温带,但气候湿度不同,形成了热量相似而在湿度上东湿西旱的梯度.可见,借助这一试验联网既可比较南北之间不同热量的影响,也可比较东西之间不同湿度的影响.

上述 4 站试验地土壤的性质迥异,但符合我国土壤基本性质的地理分异规律,大抵是土壤酸碱度自北向南下降和自东向西上升;土壤有机质、全氮、速效钾含量北高南低,速效钾又以西部的褐土高于东部的潮棕壤;桃源站供试土壤为水稻土,故有机质及全氮含量可较旱作土壤略高.4

表 1 试验地点的土壤及气候条件
Table 1 Soil and climate condition of four experimental sites

试验站 Experi- mental station	气候 Climate				土壤肥力 Soil fertility					
	年均温	≥10℃ 积温	年降水	干燥度	土壤	pH	有机质	全 N	有效 P	速效 K
	Ann. av. t. (℃)	≥10℃ Accumu. t. (℃)	Ann. precipit. (mm)	Dryness index	Soil type		O. M. (g•kg ⁻¹)	T total N (g•kg ⁻¹)	A vai P (mg•kg ⁻¹)	Avai. K (mg•kg ⁻¹)
海伦 Hailun	1.5	2400	570	0.7~ 0.8	黑土 Phaeozem	6.2	54.0	3.0	25.8	191*
沈阳 Shenyang	7.9	3500	700	0.8~ 0.9	潮棕壤 Meadow- brow n soil	6.7	22.1	0.80	10.6	88
下河套 Xiahetao	8.3	3500	500	1.2	碳酸盐褐土 Cinnamon soil	8.2	13.1	0.89	23.0	150
桃源 Taoyuan	16.5	5200	1150	0.75	红壤性水稻土 Paddy soil	5.7	23.2	1.39	14.7	68

* 交换 K Exchangeable K.

站供试土壤的有效磷含量均较高, 分属“不缺磷”和“丰磷”范围, 这是因为这些试验地过去均曾持续施用过磷肥的缘故, 鉴于此, 各站试验的最初几年未能显示磷肥的增产效果, 之后随着不施肥对照区土壤的供磷力下降, 磷肥的增产效果方始明显。

2.2 试验设计

2.2.1 田间试验 养分循环再利用田间模拟试验初始于 1983 年^[4,6], 略取得经验后, 设计更为复杂的试验便先后在黑龙江海伦和辽西喀左实施, 1990 年组织跨区域联网试验时便确定下列 8 个处理为每组试验的基本处理: I. 对照 (CK) 不施肥; II. 循环猪圈肥, 不施化肥, 每年 80% 收获产品经喂饲堆腐后以猪圈肥形式返回本处理; III. 化肥 N; IV. 化肥 N+ 循环猪圈肥, N 肥用量同 III, 循环操作同 II; V. 化肥 NP; VI. 化肥 NP+ 循环猪圈肥, NP 用量同 V, 循环操作同 II; VII. 化肥 NPK; VIII. 化肥 NPK+ 循环猪圈肥, NPK 用量同 VII, 循环操作同 II。

上述 8 个处理包含了我国农业中施肥进步的几种基本类型, 同时, 以不施肥对照和 3 个化肥处理为基础形成了 4 对“无循环”和“加循环”处理对比。辽西试验的循环处理以 60% 收获产品直接堆腐回田而未经喂饲过程, 根据以往喂饲试验可以推知, 堆肥中养分与 80% 收获产品经由喂饲堆腐后猪圈肥中养分大致相当^[9]。

各地试验的化肥用量不同, 氮肥年施用量分别约为海伦 100、沈阳 150、喀左 150、桃源 260 kg·hm⁻², 大豆不施氮肥; 磷肥 (P) 年施用量北方一季作地区 16~18 kg·hm⁻², 桃源 39 kg·hm⁻²; 钾肥 (K) 年施用量北方一季作地区 30~60 kg·hm⁻², 桃源 137 kg·hm⁻²。

供试作物各地试验亦不同, 除桃源试验各处理重复小区每年固定采用稻-稻-紫云英轮作外, 其余 3 组试验采用旱作轮作, 每处理的 3 个重复小区分别为一种作物并逐年依次轮作, 海伦为小麦-大豆-玉米, 沈阳为玉米-玉米-大豆, 喀左为玉米连作和玉米-玉米-大豆轮作^[8]。

2.2.2 喂饲、堆腐试验 海伦、沈阳试验中的养分循环再利用均采用每年循环处理小区收获籽实的 80% 和相似比例的秸秆分别喂猪垫圈并掺土堆腐制成猪圈肥于下一年度返回原处理。桃源试验以

一定比例 (1990~1995 年 80%, 1996 年改为 50%) 收获稻谷喂猪制成猪圈肥, 稻草及紫云英则直接翻压回田。喀左试验的循环处理是以 60% 收获产品直接掺土堆腐于下一年度返回原处理, 已如前述。喂饲-堆腐试验中的投料量、投料中养分量以及制成猪圈肥后其中所含养分量均精确计量和分析测定, 由此可计算投料中养分经由喂饲-堆腐后的回收率, 其中的一部分结果已先后发表^[2,9]。

3 结果与讨论

3.1 作物产量稳定性

各站试验的平均作物产量以及可标示作物产量年际波动的变异系数 (C.V.) 列于表 2。

关于施肥进步导致的作物产量增长及其地理分异现象将另文讨论。这里着重指出: 在本试验的几乎所有情况下, 保持养分循环再利用可明显减小作物产量的年际波动, 亦即具有较高的产量稳定性。比较 4 个地点 15 对“加循环”和“无循环”的产量变异系数, 其中 13 对保持养分循环再利用处理的产量变异系数显著小于对应的“无循环”处理, 只有两对的产量变异系数相似。

在本试验中, 作物年际间产量的变异系数也存在着随化肥的全面施用而下降的趋势, 例如 NPK 处理的作物产量变异系数普遍低于 NP 处理, 而后者又低于 N 肥处理。可见, 全面地供给作物所需养分有助于提高作物对不同气候年景的适应性, 从而提高作物产量的稳定性。每年以施用有机肥的方式保持系统中养分循环再利用可显著提高作物产量的年际稳定性, 其原因看来主要也是由于持续施用有机肥有利于改善土壤对作物养分供给的持续性和全面性的缘故。

3.2 养分循环再利用的作物增产率及地理分异

将表 2 每一对“加循环”和“无循环”

表 2 不同施肥处理作物平均产量 (kg·hm⁻²) 及年际变异系数
Table 2 Average crop yields and variation coefficient (C. V.) of plots with different fertilization treatments

试验站 Ex per im ent al station	产量统计 Statistics of crop yields	施肥处理 Fertilization treatments							
		I CK	II 循环 Recycled manure	III N	IV N+ 循环 N+ Recycled manure	V NP	VI NP+ 循环 NP+ Recycled manure	VII NPK	VIII NPK+ 循环 NPK+ Recycled manure
海伦	Ay	2781	3034	3444	3741	3745	3970	—	—
Hailun	S*	396	455	331	266	299	279	—	—
(1987~ 1996)	C. V.	0. 14	0. 15	0. 10	0. 07	0. 08	0. 07	—	—
沈阳	Ay	3534	4656	4213	5123	4826	5520	5388	5725
Shenyang	S*	1227	1131	1665	1297	1139	1054	1063	961
(1991~ 1996)	C. V.	0. 35	0. 24	0. 40	0. 25	0. 24	0. 19	0. 20	0. 17
下河套	Ay	4505	5837	6466	7451	7094	7880	6938	7577
Xiahetao	S*	1909	2515	1914	1700	1842	1846	1784	1763
(1989~ 1996)	C. V.	0. 42	0. 43	0. 30	0. 23	0. 26	0. 23	0. 26	0. 23
桃源	Ay	5274	8158	6516	9026	7714	9035	8536	9359
Taoyuan	S*	844	679	1716	1141	1326	1225	1322	1144
(1990~ 1996)	C. V.	0. 16	0. 08	0. 26	0. 13	0. 17	0. 14	0. 15	0. 12

* 标准差 Standard deviation. Ay: 平均产量 Average yield(kg·hm⁻²).

表 3 不同化肥基础养分循环再利用的作物净增产量和增产率
Table 3 Net increment of crop yields and the yield increase rate of recycled nutrients based on different fertilizer treatments

试验站 Ex per im ent al station	作物增产 Increase of crop yields	化肥处理 Fertilizer treatment				
		CK (II- I)	N (IV- III)	NP (VI- V)	NPK (VIII- VII)	平均 Average
海伦 Hailun	净增产 Net increment(kg·hm ⁻²)	253	297	225	—	258
(1987~ 1996)	增产率 Increase rate(%)	9. 1	8. 6	6. 0	—	7. 9
沈阳 Shenyang	净增产 Net increment(kg·hm ⁻²)	1122	910	694	337	766
(1991~ 1996)	增产率 Increase rate(%)	31. 7	21. 6	14. 4	6. 3	18. 5
下河套 Xiahetao	净增产 Net increment(kg·hm ⁻²)	1332	985	786	639	936
(1989~ 1996)	增产率 Increase rate(%)	29. 6	15. 2	11. 1	9. 2	16. 3
桃源 Taoyuan	净增产 Net increment(kg·hm ⁻²)	2884	2510	1321	823	1885
(1990~ 1996)	增产率 Increase rate(%)	54. 7	38. 5	17. 1	9. 6	30. 0

处理的作物产量减差、计算可获得养分循环再利用的作物净增产量和增产率(表3)。

由表3可见,在不施化肥或施用不同化肥基础上保持系统中养分循环再利用均可获得不同程度的作物增产,惟其增产效果以不施化肥处理(CK)最为显著,施用化肥则可降低养分循环再利用的增产效果。这一现象符合“报酬递减”规律,即已充分供给作物化肥养分时,增加来自系统内部的循环再利用养分必定只能获得较低的增产报酬。同理,如适当减少化肥用量便可提高养分循环再利用的作物产量增益。

表3的结果还揭示了另一个非常有意义的现象:自北向南随气候热量增长,海伦、沈阳、桃源3组试验保持相似循环率养

分循环再利用的作物净增产量和相对增产率不论在何种化肥基础上均呈现有规律增长的势头。海伦站地处黑龙江省北部,气候冷凉,保持0.8循环率养分循环再利用,10年试验平均仅获得225~297kg·hm⁻²净增产量或6.0~9.1%的增产率,沈阳站位处暖温带北界,热量较海伦丰沛,6年试验平均分别可获得337~1122kg·hm⁻²净增产量和6.3~31.7%增产率;桃源站位于高温多雨的中亚热带,保持相似循环率的养分循环再利用,7年试验平均可获得高达823~2884kg·hm⁻²的净增产量和9.6~54.7%的增产率;显示了农业生态系统养分循环再利用的作物产量增益受热量因素控制的地理分异现象。在本项研究中,气候湿度差异在沈阳站与喀左下河套站的试验

结果之间并未显示出任何有规律的影响,事实上两站的试验结果几乎是相似的,推测是由于下河套站试验虽在气候上处于半湿润易旱区,但每年的作物生长期通常均灌溉补水,从而消除了两地水分供给条件的差异之故.自 1997 年起下河套站试验停止作物生长期灌溉,相信以后的试验结果可与沈阳站试验结果相比较以观察气候湿度的影响.

农业系统养分循环再利用的作物产量增益随气候热量增长而提高,显然与热量所驱动的系统内部养分循环通量在不同气候区之间存在巨大差异有关^[7],例如桃源试验的作物年产量可比海伦试验的作物年产量高出 1 倍或 1 倍以上,同为 0.8 循环率,前者随收获产品进入喂饲-堆腐循环的养分量大抵也可较后者高出 1 倍或 1 倍以上.正是由于农业系统内部可循环再利用的养分资源量自北向南随气候热量的提高而增长,因此,保持相同循环率养分循环再利用的作物产量增益随之增长便在情理之中.除这一根本原因外,以下因素可能也是造成此种地理分异现象所不可忽略的原因:其一是循环回田有机农肥中养分(尤其是 N)的分解释放速率可随气候热量增长而提高,亦即加速了有机肥养分的有效化;其二是施用有机农肥引起的土壤微生物体(Soil microbial biomass)消长^[3]和土壤微生物体的周转速率可因气候热量的增长而加速.Joergensen 等^[10]报导,在实验室培养条件下,温度为 25℃时土壤中微生物体的循环周转速率可比 15℃时快 1 倍以上,35℃时更快.土壤中微生物体每一次生死周转必伴随微生物体分解过程中的养分释放^[7],从而使作物有机会获得更多的养分供给.

由此可以认为,较大的养分循环通量、循环回田有机肥中养分较快的矿化释放以

及土壤微生物体养分较快的分解周转等,可能是引起养分循环再利用作物产量增益随气候热量增长而提高的种种原因.

3.3 养分循环再利用作物产量增益的叠加效应

将各试验循环处理历年作物增产率采用 3 年滑动平均的方法消除年际间波动,便可观察保持系统中养分循环再利用作物增产率的发展趋势,图 1 及图 2 分别展示了在不施化肥和每年施用 NPK 化肥基础上保持养分循环再利用作物增产率随时间的发展变化.

由图 1、2 可见,不论是在不施用任何化肥或在施用 NPK 化肥基础上,随农业中养分循环再利用持续年限的延长,循环回田猪圈肥的作物增产率均有着明显的增长趋势.其中的原因可能有二:其一是不施肥对照区土壤的养分供给力随试验年限延长而不断下降,致使循环回田猪圈肥的作

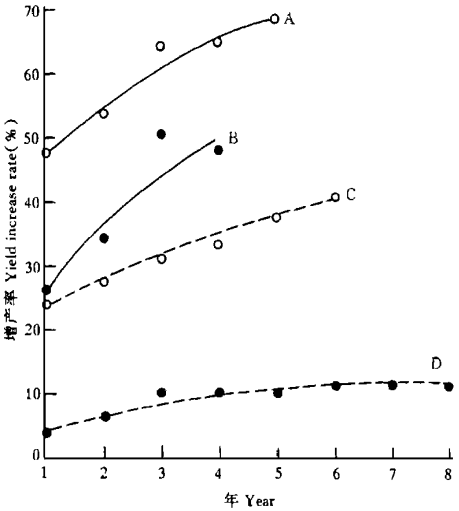


图 1 不施肥区养分循环再利用作物增产率发展趋势 (3 年滑动平均)

Fig. 1 Developing trend of yield increase rate by recycled nutrients from the plots with no fertilizer (average rate of every three sliding years). A. 桃源 Taoyuan, B. 沈阳 Shenyang, C. 喀左下河套 Xierhetuo, D. 海伦 Hailun. 下同 The same below.

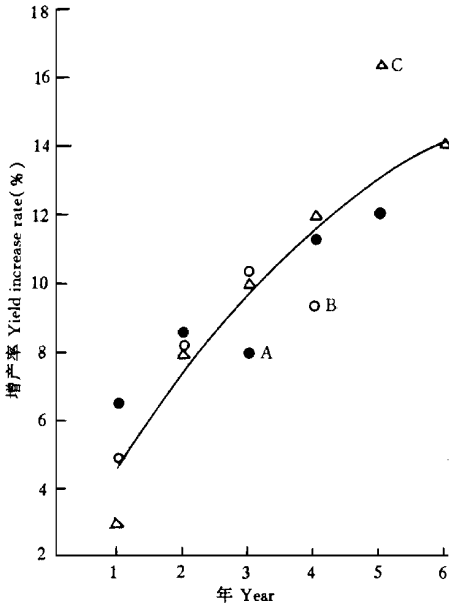


图2 施 NPK 化肥区养分循环再利用作物增产率发展趋势(3 年滑动平均)
Fig. 2 Developing trend of yield increase rate by recycled nutrients from the plots with NPK fertilizer (average rate of every three sliding years).

物增产率相对提高; 其二是循环回田猪圈肥的残效可随猪圈肥施用次数的增多而累加起来以及可能伴随发生的养分循环通量的扩大, 从而使当季猪圈肥的表观增产率有所提高. 对于图 1, 第一点原因可能是主要的; 对于图 2, 由于作参比的是 NPK 化肥区, 可以设想在每年施用 NPK 化肥情况下土壤的养分供给力并不下降, 于是, 上述作物增产率随试验年限延长而不断增长的势头可认为主要来自循环回田猪圈肥的残效叠加效应和养分循环通量的改变.

此外, 在不施化肥情况下(图 1), 上述作物增产率随试验年限延长而增长的趋势在不同区域之间也有着明显的差异, 设想主要是由于不施肥对照区土壤养分供给力下降的速率各地不同所致. 黑土养分贮量高, 养分的分解释放速率低, 不施肥对照区养分供给力的下降速率便较缓慢; 红壤性水稻土地处亚热带, 其情形恰好相反, 不施肥对照区养分供给力的下降速度相对较

快, 于是便出现图 1 中的差别. 当以 NPK 化肥区为参照时, 参照区的养分供给力不因试验延长而下降, 循环回田猪圈肥作物增产率随试验延长而增长的过程在 3 个实验地点便显得十分相似(图 2).

4 结 语

面对未来地球不可再生资源逐渐枯竭和人类生存环境不断恶化的挑战, 保持农业中养分循环再利用无疑是抑制此种恶果发展的重要措施之一. 然则保持我国农业系统内部养分的循环再利用究竟能获得多大的作物增产效益? 本项研究虽已历时多年, 可据以揭示一些现象并作出解释, 但显然尚不能作出定量评估. 主要认识如下: 1) 农业系统中养分循环再利用的作物产量增益可随气候热量增长而提高, 表明这一生态过程所产生的效应有着明显的地理分异规律. 据此可以认为, 虽然保持农业中养分循环再利用这一我国施肥传统对于改善任何地区农业中的养分供给和提高作物产量都是有意义的, 但对于热量充沛的我国南方热带、亚热带地区恐尤为重要. 2) 养分循环再利用的作物产量增益可伴随化肥施用而下降, 也必然受土壤原有的养分供给力所影响; 土壤养分供给力愈强, 养分循环再利用的增产效果必定愈低; 反之则高. 因此, 本项研究所获得的试验结果仅表示现实气候状态和供试土壤肥力水平的特定条件下保持养分循环再利用可获得的作物产量增益, 既不宜推而广之, 更不可一概而论. 3) 鉴于农业系统养分循环再利用的作物增产效果具有累积作用并且受土壤-气候环境所影响, 因此, 欲评估全国范围保持农业系统养分循环再利用对于发展我国粮食生产的贡献, 恐惟有组织包括更多试验地点的跨区域中长期田间试验网络, 按试验所获得的各项参数建模, 方有可能作出全国性

的评估.

参考文献

1 王凯荣、周卫军、谢小立. 1996. 红壤稻区农业施肥制度定位研究报告 (1990~ 1994). 农业现代化研究, (4): 12~ 14.

2 刘鸿翔、王德禄、张素君等. 1994. 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, 5(2): 148~ 151.

3 宇万太、沈善敏. 1993. 不同施肥制度下土壤微生物 C、N 量的季节变化. 张宪武主编. 土壤微生物研究. 沈阳: 沈阳出版社, 413~ 418.

4 沈善敏、殷秀岩、张璐. 1992. 农业系统中磷肥残效及磷循环研究 I. 作物吸磷量、磷肥残效及土壤有效磷变化. 应用生态学报, 3(2): 138~ 143.

5 沈善敏. 1996. 我国主要类型生态系统结构功能与提高生产力途径研究——KJ85 06 项目 1991~ 1995 研究进展. 应用生态学报, 7(3): 332~ 336.

6 沈善敏、廉鸿志、张璐等. 1998. 磷肥残效及农业系统养分循环再利用中长期试验. 植物营养与肥料学报, 4(4): (待刊).

7 沈善敏(主编). 1998. 中国土壤肥力. 北京: 中国农业出版社.

8 张璐、廉鸿志、宇万太等. 1998. 农业生态系统养分循环再利用的作物产量增益. 应用生态学报, 9(1): 37~ 40.

9 殷秀岩、张璐、宇万太等. 1992. 农业系统中磷肥残效及磷循环研究 III. 投料中磷和氮在饲养-堆腐循环中的循环率及有机肥料中养分的利用率. 应用生态学报, 3(3): 236~ 239.

10 Joergensen, R. G., Brookes, P. C. and Jenkinson, D. S. 1990. Survival of the soil microbial biomass at elevated temperatures. *Soil Biol. Biochem.*, 22(8): 1129~ 1136.