

不同施肥制度对作物产量及土壤磷素肥力的影响^{*}

宇万太 姜子绍 马 强 周 桦

(中国科学院沈阳应用生态研究所 沈阳 110016)

摘 要 在潮棕壤上连续进行 18 年的定位试验,研究了不同施肥制度对作物产量和土壤磷素肥力的影响。结果表明:与对照处理相比,施用磷肥有明显的增产和稳产作用。不施磷肥处理,土壤磷素收支赤字,土壤全磷和速效磷含量均明显下降,且土壤磷收支的盈亏值与土壤速效磷的增减量呈显著直线相关;施磷肥处理,土壤磷素收支盈余,18 年间耕层土壤全磷含量均明显提高,提高幅度为 $0.02\sim 0.04\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤速效磷含量亦明显增加,特别是在试验的后几年,土壤速效磷含量似有加速上升的趋势。施氮肥对玉米有明显增产作用,施磷钾肥对玉米增产作用不明显;大豆则相反,施氮肥增产作用不明显,施磷钾肥有显著增产作用。

关键词 施肥制度 作物产量 磷素 土壤肥力

中图分类号: S158 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2009)05-0885-05

Effect of different fertilization systems on soil phosphorus fertility and crop yield

YU Wan-Tai, JIANG Zi-Shao, MA Qiang, ZHOU Hua

(Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract The effect of different fertilization systems on crop yield and soil phosphorous fertility was investigated in an 18-year field experiment in aquic-brown soils. The results indicate that crop yield significantly increases while the yield fluctuation decreased in treatments with phosphorous fertilizer compared to the control. In treatments without phosphorous fertilizer, there is a deficit in P budget and total and available P content decreases significantly. A strong linear correlation exists between P budget and available P fluctuation in treatments without phosphorous. In treatments with phosphorous, total P content increases significantly (from 0.02 to $0.04\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), while available P content also increases significantly (especially in the latter stages of the trial). N fertilizer application significantly increases maize grain yield, while P and K fertilizers have insignificant effect on maize yield increase. Conversely, while mean soybean yield is unaffected by N fertilizer application, P and K fertilizers affect mean soybean yield significantly.

Key words Fertilization system, Crop yield, Phosphorous, Soil fertility

(Received Feb. 17, 2009; accepted April 17, 2009)

磷是植物生长发育的必需营养元素之一,土壤磷素含量变化、平衡、形态转化及其有效性等一直备受国内外学者所关注^[1-3]。长期施用磷肥,能显著提高土壤全磷及有效磷含量,且磷肥的残效期较长,大剂量施 1 次磷肥,其后效至少可持续十年以上^[4]。一些农业发达国家,由于长期施用磷肥,耕层土壤中的磷约 1/2 是施用磷肥而积累起来的。

我国农业中普遍施用磷肥的历史还较短,大多数土壤尚未建立起宏大的土壤有效磷库,但我国磷肥施用量却保持着较快增长速度,平均年增长速率

可达 6.8%^[5]。研究表明,在磷素肥力相对较高的土壤上作物对施用磷肥的反应高于低肥力土壤,肥料投入的盈余对提高土壤肥力,增加土地生产力至关重要^[6]。由于磷肥利用率较低,因此在生产实践中磷素投入都大大高于作物需要,特别是有机肥大多基于氮肥推荐,磷素盈余更加可观^[7]。但高剂量施肥不仅进一步降低了肥料利用率,而且能引起环境污染。有关农业生产中持续大量使用化肥对生态环境的影响,正受到人们越来越多的关注^[8]。

施肥对土壤磷素养分的影响,因不同土壤、气

^{*} 中国科学院知识创新项目(KZCX2-YW-407、KZCX2-YW-405),国家科技支撑计划项目(2006BAD05B05、2008BADA7B08)资助。

宇万太(1964-),男,研究员,主要从事农业生态系统物质循环研究。E-mail: wtyu@iae.ac.cn

收稿日期: 2009-02-17 接受日期: 2009-04-17

候、种植制度条件而异,因此,前人对长期施用无机肥料对土壤质量和生产能力研究仍有不同的看法^[9-11],只有通过长期定位观测,才能了解土壤性质的动态变化及本质^[12-14]。本文利用长期定位试验,研究了平衡施肥及非均衡施肥对土壤磷素肥力的影响,旨在为培育和提高土壤质量、保障土壤资源的持续利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地区概况

试验在中国科学院沈阳生态试验站进行。该站位于沈阳市以南 35 km 处,为下辽河平原,年均气温 7~8℃, 10℃ 活动积温 3 300~3 400℃, 太阳总辐射量 5 409.9~5 599.8 kJ·cm⁻², 年降雨量 700 mm, 干燥度 0.9, 无霜期 147~164 d。

1.2 田间试验

供试土壤为潮棕壤,1990 年试验开始时土壤 pH 为 6.7, 有机质含量 22.1 g·kg⁻¹, 全氮 1.18 g·kg⁻¹, 全磷 0.43 g·kg⁻¹, 速效磷 10.6 mg·kg⁻¹。试验设 8 个处理:不施肥(CK);单施氮肥(N),玉米氮肥年施用量为 150 kg(N)·hm⁻²,1990~2002 年大豆不施氮肥,2003 年后大豆年施用氮肥 25 kg(N)·hm⁻²;氮磷肥配施(NP),氮肥用法及用量同单施氮肥处理,1990~1996 年磷肥用量为 17.9 kg(P)·hm⁻²,1997 年后调整为 25 kg(P)·hm⁻²;氮磷钾配施(NPK),NP 用法及用量同氮磷肥配施处理,年钾肥用量 60 kg(K)·hm⁻²;单施磷肥(P);单施钾肥(K);氮钾肥配施(NK);磷钾肥配施(PK);后 4 个处理氮、磷、钾肥用法及用量同上。氮肥为尿素,磷肥为重过磷酸钙,钾肥为硫酸钾。试验重复 3 次,轮作方式为大豆-玉米-玉米,小区面积为 162 m²。

1.3 样品采集与分析

每年作物收获季节在长期定位试验地采集 0~20 cm 土层土样,每年 8 个处理,3 次重复,24 个土壤样品,18 年共计 432 个土壤样品。土壤样品过 2 mm 筛后风干贮存于干燥处,待测定。

1.4 测定方法

土壤全碳、全氮用元素分析仪测定,土壤全磷用碳酸钠熔融-钼锑抗比色法测定,土壤全钾用氢氧化钠碱融-火焰光度计法测定,土壤速效磷用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定,植物全磷用硫酸联合消解-钼锑抗比色法测定。

1.5 数据分析

数据采用 Excel 2000 和 SPSS 11.0 软件分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理土壤磷素收支状况

表 1 列出 1990~2007 年间不同施肥处理 18 年的磷素收支状况。由于磷在农业系统中不易流失,本试验仅就磷素的施肥输入和作物收获移出两项进行比较。作物收获时作物体内养分随收获物一起被移出农田,视为作物收获土壤养分移出量。对于磷而言,作物收获的磷量等同于土壤中磷的移出量。由表 1 可以看出,玉米磷移出量明显高于大豆,这主要是玉米产量较高的缘故。

在本试验中,不施肥处理 18 年累计移出磷量为 197.1 kg·hm⁻²;单施氮肥和钾肥处理,18 年累计磷素赤字分别为 233.3 kg·hm⁻² 和 218.2 kg·hm⁻²,赤字量均高于对照处理;氮钾配施,土壤磷素赤字最为严重,赤字量达 291.1 kg·hm⁻²。施肥(不含磷肥)提高了作物产量,也一定程度上提高了作物体内的磷素含量,因而可显著提高农田土壤磷的移出量^[15,16]。施用磷肥处理,土壤磷素均有不同程度的盈余,各处理顺序为 P>PK>NP>NPK,说明每年施入一定量的化肥磷亦可保证土壤磷素平衡。

2.2 不同施肥处理土壤全磷含量的变化

表 2 表明,对照处理连续 18 年不施肥,耕层(0~20 cm)土壤全磷含量显著下降,与试验起始时相比,2007 年耕层土壤全磷含量下降 0.06 g·kg⁻¹,相当于耕层土壤全磷贮量减少 144 kg·hm⁻²。由上文土壤磷素收支平衡看出,对照处理磷素赤字 197.1 kg·hm⁻²,说明作物吸收的土壤磷主要来自耕层,包括作物残茬、落叶以及耕层土壤中磷的风化释放,而耕层以下的土壤对于作物磷的供给贡献较小。施氮肥和钾肥处理,耕层土壤全磷含量与试验起始值相比亦有显著下降,且降低幅度高于对照处理,但未达显著水平。NK 处理,土壤全磷含量仅下降 0.02 g·kg⁻¹,降幅显著低于上述 3 个处理。得出这一结果的原因尚不明确,有待于进一步研究。

施磷肥处理,18 年间耕层土壤全磷浓度均有明显提高,提高幅度为 0.02~0.04 g·kg⁻¹。考虑到不施肥处理土壤全磷在 18 年间下降 0.06 g·kg⁻¹,则施磷处理区耕层土壤全磷来自磷肥的积累浓度实际为 0.08~0.10 g·kg⁻¹。由此可以看出,磷肥的施用对土壤耕层全磷的积累和增长有明显作用。

2.3 不同施肥处理土壤速效磷含量的变化

由表 3 可知,不施磷肥处理(CK、N、K 处理),在作物强烈吸收利用下耕层土壤的速效磷含量在试验前期几乎呈直线下降,至 2005 年,土壤速效磷含量分别降至 2.76 mg·kg⁻¹、2.86 mg·kg⁻¹ 和 2.81

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 降幅分别为 64.71%、67.01%和 74.75%。此后, CK 处理土壤速效磷含量似乎达到新的平衡点, 不再继续下降, 而施氮肥和钾肥处理进一步加剧了土壤速效磷含量的下降, 但并未达到显著水平。NK 处理耕层土壤速效磷含量仅在试验起始阶段迅速下降, 其后, 下降速率逐渐变缓, 2007 年稳定在 $6.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与本底值相比仅下降 38.19%, 土壤速效磷含量的降低幅度显著低于其他未施磷肥处理。这也与土壤全磷含量的变化趋势相一致, 即土壤全磷含量与土壤速效磷含量有极好的相关性。

持续施用含磷肥料, 土壤磷收支处于盈余状态, 耕层土壤速效磷含量缓慢而持续增加, 在试验的后

几年, 土壤速效磷含量似乎有加速上升的趋势。由表 1 可知, 施磷处理农田土壤每年收支的磷大体上略有盈余, 但土壤速效磷含量却能持续增加, 说明在土壤磷的固定与平衡系统中, 土壤释放出速效磷的速度超过了该土壤对施入肥料磷固定的速度, 该部分的磷在土壤速效磷库中得以保存, 且随施肥年限的增加, 累计的磷不断增加, 土壤速效磷库亦随之逐渐扩大, 表现为土壤速效磷含量不断上升。

2.4 磷收支与土壤速效磷含量的关系

图 1 表明: 农田磷收支赤字可导致土壤速效磷库容量缩减, 表现为土壤速效磷测定值下降及土壤供磷力减弱; 农田磷收支盈余则可扩大土壤速效磷

表 1 1990~2007 年不同施肥处理土壤磷素收支

Tab. 1 Input and output of soil P under different fertilizer treatments from 1990 to 2007

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

处理 Treatment	大豆磷移出量 P output by soybean	玉米磷移出量 P output by maize	支出 Output	收入 Input	收支 Budget
CK	140.4	225.4	197.1	0	-197.1
N	139.3	280.3	233.3	0	-233.3
NP	193.0	360.7	304.8	400.3	95.5
NPK	238.4	402.2	347.6	400.3	52.7
P	199.6	304.1	269.2	400.3	131.1
K	184.3	235.2	218.2	0	-218.2
NK	211.1	331.1	291.1	0	-291.1
PK	265.9	320.8	302.5	400.3	97.8

表 2 不同施肥处理土壤全磷含量变化状况

Tab. 2 Changes of total P content in soil under different fertilizer treatments

项目 Item	CK	N	NP	NPK	P	K	NK	PK
1990 年含量 Content in 1990 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.42	0.43	0.42	0.42	0.40	0.44	0.43	0.44
2007 年含量 Content in 2007 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.36	0.36	0.46	0.44	0.44	0.37	0.41	0.48
变化量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	-0.06	-0.07	0.04	0.02	0.04	-0.07	-0.02	0.04
Variable quantity ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	-144	-169	83	57	93	-162	-47	87

表 3 1990~2007 年不同施肥处理土壤速效磷含量状况

Tab. 3 Content of available P in soil under different fertilizer treatments from 1990 to 2007

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

年份 Year	CK	N	NP	NPK	P	K	NK	PK
本底 Original	7.82	8.67	8.69	10.44	10.87	11.13	10.08	12.20
1990	6.18	7.24	9.53	11.33	12.20	9.88	9.13	13.53
1991	5.33	6.28	11.59	10.49	11.67	8.77	9.71	13.64
1992	5.92	5.87	11.33	12.22	12.37	7.03	8.00	13.74
1993	4.93	4.97	11.74	12.44	13.00	7.13	7.93	14.02
1994	4.59	4.48	10.51	11.94	11.17	5.09	8.01	11.38
1995	4.60	4.78	10.38	11.61	11.37	6.81	8.31	13.72
1996	4.30	3.56	10.31	12.07	11.46	7.52	8.41	13.19
1997	4.16	3.67	10.58	11.38	10.71	5.94	6.98	17.52
1998	4.33	3.33	10.47	12.28	11.13	5.29	6.97	12.64
1999	4.28	3.27	11.03	13.67	13.09	5.03	7.24	13.71
2000	3.97	3.60	11.93	12.51	13.64	4.74	5.22	15.81
2001	4.14	3.53	10.17	12.01	11.40	4.70	5.14	15.50
2002	3.70	3.62	10.42	10.16	13.16	4.26	6.17	16.43
2003	3.71	3.38	10.96	11.42	13.63	4.22	6.84	14.01
2004	3.53	3.19	12.91	10.29	14.03	3.57	6.04	14.19
2005	2.76	2.86	13.34	14.93	15.21	2.81	4.02	15.91
2006	2.80	2.44	14.98	18.07	15.51	2.31	6.32	23.44
2007	2.90	2.47	14.70	16.36	15.90	2.29	6.23	18.28
修正均数 Estimated marginal mean	5.01B	4.91B	12.37b	12.78ab	12.88ab	5.11B	5.69A	13.83a

不同大写字母表示未施磷肥处理之间的差异, 不同小写字母表示施磷肥处理之间的差异($P < 0.05$)。Different capital letters mean significant difference among the treatments without P fertilizer at 0.05 level. Different small letters mean significant difference among the treatments with P fertilizer at 0.05 level.

库, 表现为土壤速效磷测定值上升及土壤供磷力的增强, 且两者之间的相关性很大程度上是等比例的, 相关系数高达 0.892 4。由此不难看出, 每提高 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的速效磷所需土壤磷收支盈余额约为 $25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 同样, 每降低 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的速效磷意味着土壤磷收支约赤字 $25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。但当土壤速效磷下降到一定水平时, 土壤磷收支的亏缺与土壤速效磷下降幅度将不存在这种等比例关系, 即使土壤磷收支有很大亏缺, 土壤速效磷仍可维持在较低水平不再下降。因此, 磷素收支盈亏与土壤速效磷消长关系仅适用于土壤速效磷超过某一水平的有限范围。

2.5 不同施肥处理的作物产量

长期连续施肥可改善土壤结构, 改良土壤基本理化性质, 使土壤有机质、全氮、全磷、速效氮、速效磷等养分含量均有一定的增加, 从而提高土壤肥力和生产力, 进而影响到作物产量。

由表 4 可知, 施肥对玉米和大豆均有显著增产作用。对照处理大豆产量最低, 仅为 $1486 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 单施氮肥、磷肥、钾肥处理大豆产量略有增加, 但三者的增加均未达到显著水平。NK、PK、NPK 处理大豆产量较对照处理有显著增加 ($P < 0.05$), 其中 PK 处理增幅最大, 达 58.15%, NK 和 NPK 处理增幅分别为 40.71% 和 47.70%, 但这三者之间的产量并无明显差异。NP 处理与对照相比, 产量虽有一定增加,

但未达显著水平。

玉米产量与大豆产量表现不尽相同, 对照处理的玉米产量仍最低, 年均 $4124 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 单施磷肥、钾肥或磷钾配施均不能显著提高玉米产量, 但施氮肥, 无论单施还是配施, 均能显著提高玉米产量。说明本试验条件下, 氮肥在提高玉米产量方面起着重要作用, 氮肥对产量的贡献也最大^[17], 其效果优于磷肥和钾肥。氮磷钾配合施用玉米产量最高, 略高于氮钾和氮磷配施, 远高于磷钾配施。

本试验中, 作物年际间产量的变异系数也存在随化肥的全面施用而下降的趋势, 表明全面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, 从而提高产量的稳定性。比较玉米和大豆两种作物, 除对照处理外, 其他不施氮肥处理中, 大豆产量的变异系数均小于玉米产量的变异系数, 在施氮处理中则相反, 说明氮肥不仅能提高玉米产量, 且有极好的稳产效果。

3 结论与讨论

土壤速效磷含量的变化与土壤类型、试验地速效磷本底值等因素有关。许多研究表明: 不施磷肥, 土壤速效磷含量迅速降低^[18,19], 且随着土壤速效磷初始值的增加, 其下降速度愈快^[20]。本试验结果表明, 不施磷肥处理, 土壤全磷和速效磷含量均有明显降低, 这与大多数学者的观点一致^[21-23]。但也有不同的看法, Rehm 等^[24]的试验结果表明, 5 年不施磷肥, 土壤速效磷未见下降, 其可能原因一是土壤中作物残体和有机磷的矿化分解可以减缓土壤速效磷的下降, 二是土壤自身无机磷的解吸附以及来自耕层以下土壤磷的补充。施用磷肥处理, 若施入量大于输出量, 磷收支有盈余, 并在土壤中积累, 其中单施磷肥处理盈余量最大, 其他依次为 PK 处理、NP 处理、NPK 处理。说明当土壤缺乏氮、钾中的一种营养元素时, 作物对磷的吸收量 NP 处理 > PK 处理。由此可以看出, 本试验条件下土壤氮的缺乏大于钾。施磷肥各处理土壤全磷和速效磷含量均有明显增加, 这也与前人的观点相符^[18]。说明持续施用

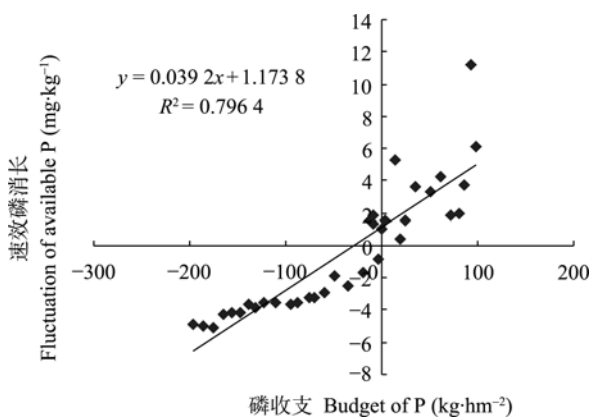


图 1 磷素收支盈亏与土壤速效磷消长的关系

Fig. 1 Relationship between P budget and fluctuation of available P in soil

表 4 1990~2007 年不同施肥处理作物籽实的平均产量

Tab. 4 Average yields of soybean and maize in different fertilizer treatments from 1990 to 2007

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

处理 Treatment	大豆籽实 Soybean seed	变异系数 C. V. (%)	玉米籽实 Maize grain	变异系数 C. V. (%)	大豆秸秆 Soybean stalk	玉米秸秆 Maize stalk
CK	1486±711c	47.85	4124±1582c	38.36	1372d	4545d
N	1503±644c	42.86	5935±1830b	30.84	1437d	5023bcd
NP	1795±564bc	31.41	6696±1482ab	22.13	1961bc	5770cd
NPK	2195±561ab	25.54	7476±1621a	21.69	2205ab	6189a
P	1793±587bc	32.74	4444±1631c	36.71	1869bc	4813cd
K	1895±624bc	32.92	4182±1714c	41.00	1692cd	4712cd
NK	2091±645ab	30.87	6423±1822ab	28.36	1881bc	5457abc
PK	2350±518a	22.04	4564±1723c	37.75	2372a	5221bcd

同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different letters in one column mean significant difference at 0.05 level.

磷肥同样可起到扩大土壤磷库, 提高土壤供磷能力的作用, 且土壤磷收支盈余额越大, 该作用越明显。

若以土壤速效磷的测定值作为土壤速效磷库的度量, 则不难发现, 本试验中农田土壤磷收支的盈亏值与土壤速效磷的增减量呈直线相关。鲁如坤等^[21]在水稻土上进行了3年肥料试验, 结果表明, 土壤磷收支的盈亏值与土壤速效磷的消长在很大幅度内是等比例的。当然, 并非所有试验结果都能获得如此理想的结果。周修冲等^[25]在水稻土上进行了5年肥料试验, 结果表明, 虽然土壤磷收支的盈亏值与土壤速效磷的消长密切相关, 但这种关系却非是等比例的。这可能与土壤磷的存在形态、土壤速效磷库缓冲力大小以及作物吸磷强度等不同有关。此外, 磷收支盈亏与土壤速效磷消长的关系也受含磷肥料施用历史的长短以及土壤肥料系统是否已趋于稳定平衡等因素影响。沈善敏等^[4]的研究结果表明, 短期试验有较高比例的残留肥料磷进入速效磷库, 而长期试验这一比例则会有所降低。

施肥能显著增加作物产量, 但不同肥料对作物增产效果却不尽相同。玉米施氮肥有显著增产作用, 大豆施氮肥却未表现出增产, 可能原因一是氮肥施用时间较晚(2003年), 且施用量较少; 二是大豆本身具有固氮作用; 三是长期不施磷钾肥, 土壤磷和钾耗竭严重, 磷和钾成为大豆生长发育的限制因子。大豆产量以PK处理为最高, 玉米则不同, PK肥配施并未显著增加玉米产量, 这与多数研究者的观点相反^[26,27]。造成此种差异的主要原因是本试验玉米产量较高, 因而移出的氮量亦较多, 氮成为玉米生长发育的主要限制因子; 而施磷钾肥增加玉米产量的试验大多是在氮素供应充足条件下进行的。因此, 要提高作物产量, 必须确保均衡施肥, 否则, 不仅不能提高作物产量, 还可能导致肥料的浪费, 污染环境。

参考文献

- [1] Zhang Z. M., Simard R. R., Lafond J., *et al.* Changes in phosphorus fractions of a Humic Gleysol as influenced by cropping systems and nutrient sources[J]. *Canad. J. Soil Sci.*, 2001, 81(2): 175–183
- [2] 贺铁, 李世俊, Bowman C. 土壤有机磷分组法的探讨[J]. *土壤学报*, 1987, 24(2): 152–159
- [3] 蒋柏藩, 顾益初. 石灰性土壤无机磷分组体系的研究[J]. *中国农业科学*, 1989, 22(3): 58–66
- [4] 沈善敏, 殷秀岩, 张璐. 农业系统中磷肥残效及磷循环研究. 作物吸磷量、磷肥残效及土壤有效磷变化[J]. *应用生态学报*, 1992, 3(2): 138–143
- [5] 鲁如坤. 我国的磷矿资源和磷肥生产消费. II. 磷肥消费和需求[J]. *土壤*, 2004, 36(20): 113–116
- [6] Johnston A. E. *Soil and Plant Phosphate*[M]. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2000
- [7] 杨学云, 孙本华, 古巧珍, 等. 长期施肥磷素盈亏及其对土壤磷素状况的影响[J]. *西北农业学报*, 2007, 16(5): 118–123
- [8] 蔡大同, 林长丰. 不同生态条件下播期和氮肥对优质小麦产量和品质性状的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 1994, 1: 74–83
- [9] Yadav R. L., Yadav D. S., Singh R. M., *et al.* Long term effects of inorganic fertilizer inputs on crop productivity in a rice-wheat cropping system[J]. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 1998, 51: 193–200
- [10] Doran J. W., Sarrantonio M., Liebig M. A. Soil health and sustainability[J]. *Adv. Agron.*, 1996, 56: 1–54
- [11] Aref S., Wander M. M. Long-term trends of corn yield and soil organic matter in different crop sequences and soil fertility treatments on the morrow plots[J]. *Adv. Agron.*, 1998, 62: 153–161
- [12] Grant R. F. Dynamics of energy, water, carbon and nitrogen in agricultural ecosystems: Simulation and experimental validation[J]. *Ecol. Mod.*, 1995, 81: 169–181
- [13] Suzuki M., Kamekawa K., Sekiya S., *et al.* Effect of continuous application of organic or inorganic fertilizer for sixty years on soil fertility and rice yield in paddy field[A] //Transactions 14th International Congress of Soil Science. Kyoto, Japan. August 1990 Chugoku Natl. Agr. Exp. Sta. Fukuyama, Japan. Volume IV, 1990: 14–19
- [14] 赵其国. 21世纪土壤科学展望[J]. *地球科学进展*, 2001, 16(5): 704–709
- [15] 王德禄, 刘鸿翔, 王守宇, 等. 黑土长期施肥及养分循环再利用的作物产量及土壤肥力质量变化. II. 养分在作物体内分配[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(6): 845–848
- [16] 张璐, 殷秀岩, 廉鸿志, 等. 农业系统中磷肥残效及磷循环研究. II. 磷及其他养分在作物体内分配[J]. *应用生态学报*, 1992, 3(3): 231–235
- [17] 宇万太, 赵鑫, 张璐, 等. 长期施肥对作物产量的贡献[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(12): 2040–2044
- [18] 周宝库, 张喜林, 李世龙, 等. 长期施肥对黑土磷素积累及有效性影响的研究[J]. *黑龙江农业科学*, 2004(4): 5–8
- [19] 赵秉强, 张夫道. 我国的长期肥料定位试验研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(增刊): 3–8
- [20] 沈善敏. *中国土壤肥力*[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998
- [21] 鲁如坤, 史陶钧. 土壤磷素在利用过程中的消耗与累积[J]. *土壤通报*, 1980(5): 6–8
- [22] 黄绍敏, 宝德俊. 长期施肥对潮土土壤磷素利用与积累的影响[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(1): 102–108
- [23] Webb J. R., Mallarino A. P., Blackmer A. M. Effects of residual and annually applied phosphorus on soil test values and yields of corn and soybean[J]. *J. Prod. Agric.*, 1992, 5: 148–152
- [24] Rehm G. W., Sorensen R. C., Wiese R. A. Soil test values for phosphorus, potassium and zinc as affected by rate applied to corn[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1984, 48: 814–818
- [25] 周修冲, 谭允阳, 陈天生. 连续施用高量化肥对稻谷产量及土壤养分影响的研究[J]. *土壤*, 1988, 20(1): 10–13
- [26] 刘恩科, 赵秉强, 胡昌浩, 等. 长期施氮、磷、钾化肥对玉米产量及土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(5): 789–794
- [27] 彭畅, 高洪军, 牛红红, 等. 长期施肥和气候因素对东北黑土区玉米产量的影响[J]. *玉米科学*, 2008, 16(4): 179–183