

基于长期定位试验的变性土养分持续供给能力和作物响应研究*

詹其厚 陈杰

(土壤与农业可持续发展国家重点试验室(中国科学院南京土壤研究所),南京 210008)

摘要 8 年定位施肥试验结果表明,不施 N 肥,淮北变性土 N 素自然供给能力,第 1 年降为原来的 64%,第 2 年则降为 22%,此后,在 20%左右振荡;不施 P 肥,土壤 P 素自然供给能力第 1 年后为 95%,8 年后逐渐下降为 45%左右;不施 K 肥,土壤 K 素自然供给能力,第 1 年后为 90%,8 年后逐渐下降为 60%~70%;而且,土壤 P、K 素自然供给能力对小麦、玉米有所差异。作物产量响应特点是,CK、N、NP、NK 和 PK 处理区小麦、玉米产量分别为 NPK 全营养区的 26.9%、54.3%、85.2%、53.2%、31.8%和 21.4%、68.9%、73.5%、81.6%、28.0%。作物养分浓度响应特点是,施 N 或 P 肥提高了籽粒和秸秆的 N 或 P 养分浓度,施 K 肥对籽粒 K 浓度影响较小,但显著提高了秸秆 K 浓度。与试验前相比,8 年后,土壤全氮含量,不施 N 处理区降低 5%~10%,施 N 处理区增加 12%~16.5%;土壤全磷含量,不施 P 处理区降低 20%左右,施 P 处理区略有不同程度提高;土壤有效磷含量,不施 P 处理区降低 75%~85%,施 P 处理提高 56.9%~119.3%;土壤全钾含量变化不大;土壤速效钾含量,不施 K 肥处理区降低 35%,NPK 处理区降低 5.9%,NK 和 PK 处理区增加 10%左右;土壤有机质含量,CK 和 PK 处理区降低 10%,其他处理基本持平。小麦和玉米对 N、P、K 肥的表观利用率分别为 59.8%、47.3%、50.2%和 51.1%、33.2%、49.5%。通过模拟,土壤有效磷消长与 P 素平衡盈亏的模型为 $y(\text{土壤有效磷消长}) = 0.1138x(\text{P 素平衡的盈亏}) - 0.4061 (n=6, r=0.9594)$,土壤速效钾消长与 K 素盈亏的模型为 $y(\text{土壤速效钾消长}) = 0.1075x(\text{K 素平衡的盈亏}) - 8.7871 (n=6, r=0.9021)$ 。

关键词 变性土;养分自然供给能力;作物响应;长期定位试验

中图分类号 S153.6 **文献标识码** A

淮北平原是我国变性土最集中分布区域,由于该类土壤是在特定的成土条件和地球化学环境下形成而具有独特的形态学、矿物学和物理化学特性,也决定了其特有的肥力特征。变性土作为一种暗色粘质耕作土壤,其农业生产性能不良,属于低产土壤类型^[1,2]。随着 20 世纪 80 年代农业综合治理和土壤改良工作的开展,该区农田基本条件得到了较大改善,土壤改良的试验研究和示范推广工作也取得了较大进展。大量化学肥料的使用,在提高作物产量的同时也使土壤肥力状况发生了较大变化^[3],土壤主要养分由过去的“缺 N、少 P、富 K”而逐步变化为“N 稳中有升、P 明显提高、K 缓慢下降”。由于在实际农业生产过程中,土壤养分、肥料等资源的利用方面仍存在许多不合理现象,如偏施氮、磷肥,而钾肥使用不足,有机肥使用减少等,造成了养分资源的浪费、肥料利用率和增产效益下降,以及影响产品品质

和环境质量等不良后果。为此,我们在长期定位施肥试验的基础上,对淮北变性土的土壤养分持续供给能力和作物响应特点进行了初步研究,希望能对该区农业的持续发展、改进土壤—作物系统内养分的调控、养分循环向有利的方向发展、减少不合理施肥造成的养分浪费、提高产品品质和环境质量等方面提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区自然条件与土壤性质

试验在中国科学院怀远农业生态实验站试验基地进行。该站属暖温带半湿润季风气候,年均温 15.4℃,无霜期 218 d。年均降水量 900 mm,年均蒸发量 1 616 mm。试验地 0~25 cm 土层土壤的化学性质为:有机质 14.0 g kg⁻¹、全氮(N) 0.91 g kg⁻¹、

* 中国科学院农业办公室项目(KN10503)、中国科学院知识创新项目(KZCX3-SW-427)资助

作者简介:詹其厚(1969~),男,助理研究员,主要从事土壤资源与质量等方面的研究工作。E-mail: qhzhhan@issas.ac.cn

收稿日期:2004-10-26;收到修改稿日期:2005-02-03

全磷(P) 0.42 g kg^{-1} 、全钾(K) 14.2 g kg^{-1} 、碱解氮(N) 82.0 mg kg^{-1} 、有效磷(P) 10.8 mg kg^{-1} 、速效钾(K) 113.3 mg kg^{-1} , pH 6.78。

1.2 试验设计

试验设无肥区(CK)、N、NP、NK、PK、NPK(N、P、K分别代表氮、磷、钾肥)6个处理,用量分别为N 225 kg hm^{-2} 、P 32.75 kg hm^{-2} 、K 75 kg hm^{-2} 。在用量分配上,P、K肥作基肥一次施入,小麦用N 80%作基肥、20%作追肥,玉米用N 50%作基肥、50%作追肥。N、P、K肥品种分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾。田间试验采用随机区组排列,重复4次,小区面积 $5.5 \text{ m} \times 6.0 \text{ m}$ 。试验时间从1992年10月至2000年10月,共计8年。试验作物为小麦、玉米轮作,一年两熟。

1.3 样品采集

在每季作物收获时分别采集植株和籽粒样(4重复混合样)烘干、磨碎,进行N、P、K养分分析,收获后立即采集各处理0~25 cm耕层土壤(4重复混合样),风干、磨碎后进行有关养分分析。

1.4 样品分析方法

有机质用硫酸-重铬酸钾湿烧法;土壤全氮用凯氏法,全磷用碱熔-钼锑抗比色法,全钾用NaOH熔融-火焰光度法,碱解氮用扩散法,有效磷用 $0.5 \text{ mol L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 浸提-钼锑抗比色法,速效钾用 $1 \text{ mol L}^{-1} \text{ NH}_4\text{OAc}$ 浸提-火焰光度法,pH采用电位法;植物样品用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消化,凯氏法测氮,钼黄比色法测磷,火焰光度法测钾^[4]。

2 结果与讨论

2.1 长期定位施肥条件下的作物响应

2.1.1 作物产量响应 由于长期定位试验是在固定地点连续不断地对土壤进行不同施肥设计的处理,通过种植作物对养分的吸收,各处理的土壤养分会出现不同的变化,作物会对之做出不同的响应。本次长期定位试验的小麦、玉米产量见表1。可以看出,8年平均,产量由高到低的顺序,小麦为 $\text{NPK} > \text{NP} > \text{N} > \text{NK} > \text{PK} > \text{CK}$,玉米为 $\text{NPK} > \text{NK} > \text{NP} > \text{N}$

表1 定位施肥试验各处理作物籽粒的平均产量

Table 1 Mean yields of the crops in different treatments in the long-term fertilizer experiment (kg hm^{-2})

处理 Treatments	第1年 The 1st year		第2年 The 2nd year		第3年 The 3rd year		第4年 The 4th year		第5年 The 5th year	
	小麦 Wheat	玉米 Maize	小麦 Wheat	玉米 Maize	小麦 Wheat	玉米 Maize	小麦 Wheat	玉米 Maize	小麦 Wheat	玉米 Maize
CK	4 977	3 954	766	1 103	629	407	1 468	1 480	1 910	2 624
N	5 364	9 344	3 548	7 774	2 719	6 962	3 172	4 050	3 912	6 099
NP	5 705	9 764	4 103	7 589	4 151	7 827	6 060	3 725	6 076	5 810
NK	5 664	10 934	3 478	8 365	2 856	8 475	2 958	4 376	3 750	7 349
PK	5 315	5 676	1 202	1 738	1 054	1 559	1 757	1 621	2 214	2 875
NPK	5 825	11 355	4 490	8 895	4 795	9 056	6 951	4 697	7 443	9 197
处理 Treatments	第6年 The 6th year		第7年 The 7th year		第8年 The 8th year		平均 Mean			
	小麦 Wheat	玉米 Maize	小麦 Wheat	玉米 Maize	小麦 Wheat	玉米 Maize	小麦 Wheat	玉米 Maize		
CK	774	1 746	833	1 270	1 006	1 175	1 547	1 720		
N	2 537	4 319	1 667	2 892	2 049	2 862	3 121	5 538		
NP	3 913	5 436	4 490	3 617	4 693	3 462	4 899	5 904		
NK	2 373	5 342	1 424	4 151	1 979	3 452	3 060	6 555		
PK	944	1 876	966	1 393	1 167	1 288	1 827	2 253		
NPK	5 006	7 805	5 570	7 544	5 939	5 735	5 752	8 036		

>PK>CK,小麦和玉米在对P、K的响应上有差异,这与在潮土上长期定位试验的结果有所不同^[5]。具体来看,两作物在不同施肥处理下的产量响应具有如下特点:(1)无肥区(CK)的小麦、玉米产量(8年平均,下同)分别为全肥区(NPK区,下同)的26.9%和21.4%,两种作物产量降低幅度基本相同。这表明:在淮北变性土区不施肥料是无法获得高产的。(2)单N肥区的小麦、玉米产量分别为全肥区的54.3%和68.9%。这表明:在淮北变性土区,长期只施单一N肥,小麦和玉米也均无法获得高产。(3)NP处理区(不施K肥)的小麦、玉米产量分别为全肥区的85.2%和73.5%,玉米的产量降幅比小麦明显。这表明:在淮北变性土区玉米对K的反应比小麦敏感。(4)NK处理区(不施P肥)的小麦、玉米产量分别为全肥区的53.2%和81.6%。小麦产量降幅近一半,远大于玉米。这说明:在淮北变性土区,小麦对P的反应比玉米敏感。(5)PK处理区(不施N肥)的小麦、玉米产量分别为全肥区的31.8%和28.0%,两种作物产量降低幅度基本一致,降幅在70%左右,比NK和NP区降幅明显,与CK处理区产量接近。这说明:N肥是淮北变性土区限制作

物产量的首要因子。另外,由于受严重涝渍,第4年玉米全肥区的产量低于上季小麦产量。而在有些年份,无肥和非全肥区,玉米产量也出现低于小麦产量的现象,这主要可能是由于养分供应不平衡对玉米的影响大于小麦的缘故。

2.1.2 作物养分浓度响应 把多年分析测定的作物籽粒和秸秆养分浓度的平均值列于表2。可以看出,不同施肥处理,作物籽粒和秸秆养分浓度的响应具有以下一些特点:凡施N处理,无论是小麦,还是玉米,它们的籽粒和秸秆N养分浓度均明显高于不施N处理;凡施P处理,两作物籽粒和秸秆P养分浓度皆高于不施P处理;而施K肥对作物籽粒K养分浓度影响较小,但秸秆K养分浓度明显高于不施K处理,这符合一般规律。

两种作物间比较可以发现,小麦籽粒的N、P养分浓度皆高于玉米,N养分浓度高出近1倍,P养分浓度高出25%左右,表明小麦籽粒的蛋白营养价值远高于玉米;而与之相反的是,玉米秸秆中N、P养分浓度明显高于小麦,N养分浓度高出25%左右,P养分浓度高出45%左右。这表明:作为饲料而言,玉米秸秆比小麦更富营养。

表2 各处理的作物籽粒和秸秆养分浓度

Table 2 Nutrient concentrations in seed and straw of the crops in different treatments (g kg^{-1})

处理 Treatments	小麦籽粒 Wheat grain			小麦秸秆 Wheat straw			玉米籽粒 Maize grain			玉米秸秆 Maize straw		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
CK	19.09	3.68	3.66	4.04	0.64	7.63	11.35	2.68	3.19	7.03	0.66	7.24
N	26.89	2.67	3.54	5.95	0.52	8.29	13.10	2.32	3.04	8.44	0.69	7.35
NP	24.52	3.98	3.92	7.12	0.64	7.10	13.50	3.08	3.16	8.87	0.97	6.43
NK	28.27	2.73	3.73	5.45	0.44	9.61	12.62	2.21	3.27	7.93	0.72	10.96
PK	22.68	4.31	4.48	4.17	0.73	10.47	10.49	2.89	3.91	5.35	1.68	10.62
NPK	23.57	3.60	3.70	6.28	0.66	10.04	12.71	2.87	3.35	7.84	0.97	9.65

2.2 长期定位施肥条件下土壤养分自然供给能力的变化

土壤养分自然供给能力是指土壤在其他养分充分供应时,不施某一养分,土壤供给的养分能够使作物产量达到全肥时产量的百分比^[6~10],其公式可表达为:

$$\text{土壤养分自然供给能力} = \frac{\text{缺某元素时的作物产量}}{\text{全肥时的作物产量}} \times 100$$

因此,通过这一概念,就能把土壤养分水平与作物产量(籽粒)之间建立起联系。根据8年的定位试验产量结果(表1),通过计算,绘制出淮北变性土N、P、K主要养分的自然供给能力的变化,见图1。

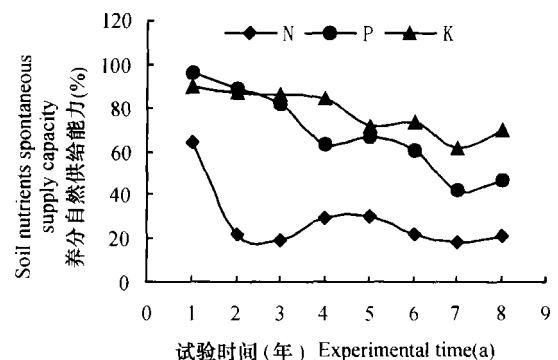


图1 淮北变性土N、P、K养分自然供给能力变化
Fig. 1 Dynamic changes in N, P and K nutrients spontaneous supply capacity in Vertisol

从图 1 可以看出:(1)淮北变性土 N 素养分潜在肥力很低。不施 N 肥,土壤 N 素养分自然供给能力,第 1 年就下降为 64%,第 2 年为 22%,此后,N 素自然供给能力基本上在 20%上下振荡;(2)不施 P 肥,土壤 P 素自然供给能力,第 1 年降为 95%左右,第 3 年则降至 80%左右,之后,继续不施 P 肥,则明显下降。8 年后,下降到 45%左右;(3)不施 K 肥,土壤 K 素自然供给能力,第 1 年下降到 90%,第 3 年下降到 85%左右。之后,继续不施 K 肥,土壤 K 素自然供给能力缓慢下降,8 年后降至 60%~70%。这与黑土定位 11 年后 N、P、K 养分自然供给能力分别降到 50%~60%、80%~90%和 90%^[11]有很大不同。上面分析表明,淮北变性土养分自然供给能力,N 素远远小于 P、K 素,这也是在该区 N 素是影响作物产量首要因子的原因之一。

由于不同作物对 N、P、K 养分需求的差异和土壤养分有效性的季节性差异,土壤养分自然供给能

力对不同作物是有所变化的。把小麦、玉米两作物的土壤 N、P、K 养分自然供给能力的变化绘于图 2。可以看出,土壤 N 素自然供给能力对小麦、玉米两种作物基本一样,连续 8 年不施 N 肥后,土壤 N 素自然供给能力均降到 20%左右;土壤 P 素自然供给能力在小麦、玉米上的表现则有所不同。对小麦来说,第 1 季不施 P 肥,土壤 P 素自然供给能力为 97.2%,到第 2 年则降到 77.4%,下降十分明显。经过 8 年不施 P 肥后,下降到 30%左右。而对玉米来说,4 年不施 P 肥,其自然供给能力仍在 90%以上,到第 5 年则明显下降,8 年后,降到 60%左右;土壤 K 素自然供给能力在小麦、玉米上的表现也有所不同,对小麦来说,连续 8 年不施 K 肥,其自然供给能力下降到 80%左右。而对玉米来说,则下降到 60%左右,在玉米上的降幅明显大于小麦。因此,这种土壤 P、K 养分自然供给能力因作物不同而表现出的差异,为针对作物拟订不同的施肥方案提供了依据。

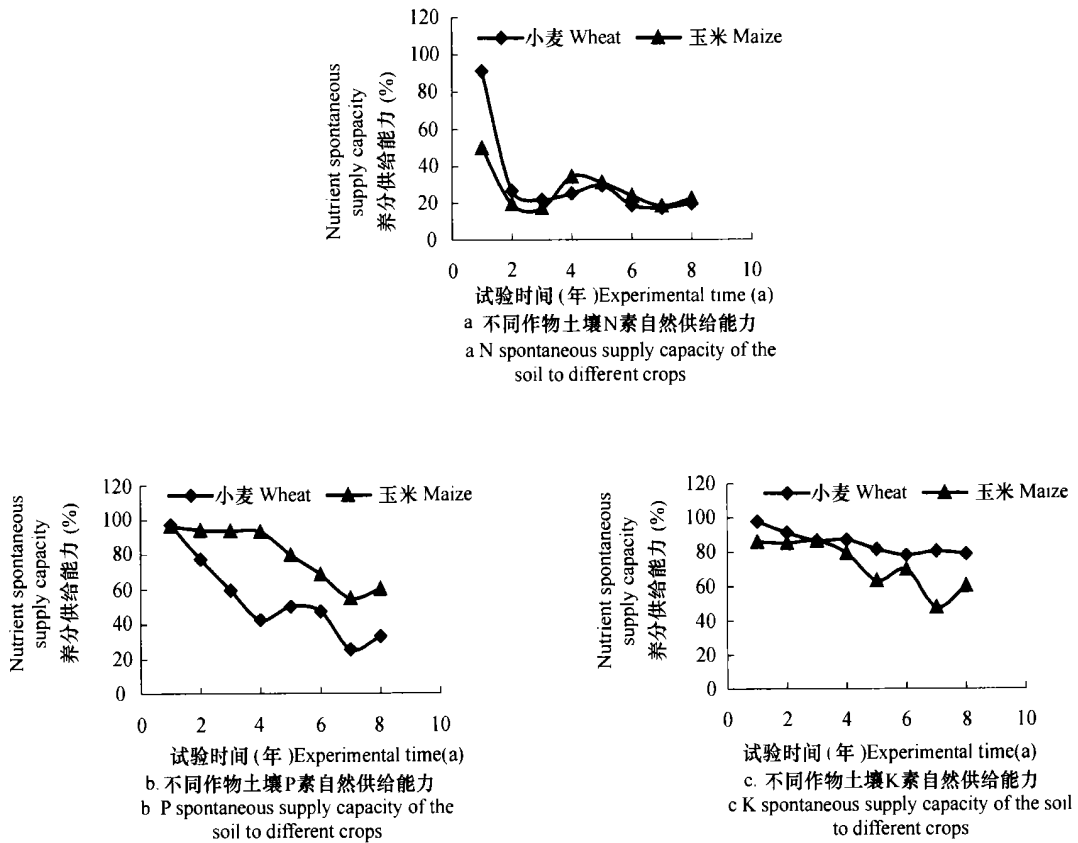


图 2 不同作物的土壤养分供给能力变化

Fig. 2 Dynamic changes in soil nutrient spontaneous supply capacity with different crops

2.3 农田养分平衡分析

农田养分输入包括施肥、种子、降水和灌溉等输入的养分。农田养分支出包括作物吸收的养分和挥发、淋失的养分。养分平衡的盈亏等于支出项与输入项之差。已有的研究结果表明^[6~10],在北方旱地 P、K 淋失量可忽略不计, N 素损失在 40% 左右, 本文 N、P 和 K 养分的损失即依此计算。

由于作物根茬仍留在土壤中, 它吸收的养分既可作为输出项, 又可作为输入项, 两者相互抵消, 未计入养分平衡当中, 因此, 作物吸收带走的养分仅指地上部分。现把每年的养分输入列于表 3, 可以看出, 通过种子和水分输入的养分占总养分输入量, N 为 4%, P 为 1.5%, K 为 4% 左右。把 8 年累计养分收支状况列于表 4。

表 3 每年养分输入量

Table 3 Annual inputs of N, P and K nutrients (kg hm^{-2})

项目 Item	种子 Seed	降水 ¹⁾ Rain water	灌溉水 ²⁾ Irrigation water	肥料 Fertilizer						总量 Total					
				CK	N	NP	NK	PK	NPK	CK	N	NP	NK	PK	NPK
N	5.00	7.50	6.00	0	450	450	450	0	450	18.50	468.5	468.5	468.5	18.5	468.5
P	0.90	0.10	0.05	0	0	65.5	0	65.5	65.5	1.05	1.05	66.55	1.05	66.55	66.55
K	1.05	3.25	1.60	0	0	0	150	150	150	5.90	5.90	5.90	155.9	155.9	155.9

1) 降雨量按年均 900 mm 计 Annual mean rainfall were 900 mm; 2) 灌水量按年均 2250 $\text{m}^3 \text{hm}^{-2}$ 计 Annual mean irrigation were 2250 $\text{m}^3 \text{hm}^{-2}$

表 4 各处理 8 年养分收支状况

Table 4 Budgets of nutrients in different treatments

处理 Treatments	输入量 Input (kg hm^{-2})			输出量 Output (kg hm^{-2})			盈亏 Profit and loss (kg hm^{-2})			平衡 Balance (%)		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
CK	148	8	47	577	104	338	- 429	- 96	- 291	- 75	- 92	- 86
N	3 748	8	47	3 207	213	783	+ 541	- 205	- 736	+ 17	- 96	- 94
NP	3 748	532	47	3 771	374	935	- 23	+ 158	- 888	- 0.6	+ 42	- 95
NK	3 748	8	1 247	3 351	231	1 115	+ 397	- 223	+ 132	+ 12	- 97	+ 12
PK	148	532	1 247	716	164	570	- 568	+ 368	+ 677	- 79	+ 224	+ 117
NPK	3 748	532	1 247	4 152	443	1 534	- 404	+ 89	- 187	- 10	+ 20	- 12

根据表 4 养分收支数据, 可以分析 N、P、K 素在不同施肥处理区平衡状况。(1) N 素: 在不施 N 肥的 CK 和 PK 处理区亏损 75% 以上, 在 N 和 NK 处理区盈余 10% 左右, 在 NP 处理区基本平衡, 在 NPK 处理区亏损 10%; (2) P 素: 在不施 P 肥的 CK、N 和 NK 处理区亏损 92%~97%, 在施 P 肥的 NP、NPK 和 PK 处理区分别盈余 42%、20% 和 224%; (3) K 素: 在不施 K 肥的 CK、N 和 NP 处理区亏损 86%~95%, 在施 K 肥的 NK 和 PK 处理区分别盈余 12% 和 117%, 而在施 K 肥的 NPK 处理区则亏损 12%。可见, 全肥区 NPK 处理, 在试验设计用量下, 只有 P 素有盈余, 而 N 和 K 素则处于亏损状态。

2.4 N、P、K 肥累计表观利用率

N、P 和 K 肥的表观利用率仍采用计算肥料当季表观利用率的“差减法”。由于在长期定位试验

中, 缺某一肥料处理的产量因养分供应不平衡, 在前几年中作物产量会明显下降, 然后处于一种低水平的平衡状态。因此, 将给累计利用率带来一些误差, 但据现有的国内外资料, 目前计算长期定位试验中肥料累计表观利用率仍采用此方法^[12]。据此计算出的 N、P、K 肥累计表观利用率列于表 5、表 6 和表 7。

可以看出, 8 年累计, 小麦、玉米对 N 肥的表观利用率分别达到 59.8% 和 51.1%, 这比在该类土壤上当季试验得到的小麦、玉米平均 N 利用率的 44% 要高一些^[12], 与潮土的定位试验结果相近^[13]; 小麦、玉米对 P 肥的表观利用率分别为 47.3% 和 33.2%, 这与已有的结果相近^[12, 13]; 小麦、玉米对 K 肥的表观利用率分别为 50.2% 和 49.5%, 两种作物基本一致。

表 5 8 年累计 N 肥表观利用率

Table 5 Apparent recovery rate of N fertilizer during the 8-year experiment

作物 Crops	8 年累计施入 N 肥量(kg hm ⁻²)		8 年累计作物地上部分带走 N 量(kg hm ⁻²)		N 肥的表观利用率(%) Apparent efficiency of N fertilizer application
	Cumulative N application by fertilizers		Cumulative N removal by crop subaerial parts		
	NPK	PK	NPK	PK	
小麦 Wheat	1 800	0	1 497	421	59.8
玉米 Maize	1 800	0	1 216	296	51.1

表 6 8 年累计 P 肥表观利用率

Table 6 Apparent recovery rate of P fertilizer during the 8-year experiment

作物 Crops	8 年累计施入 P 肥量(kg hm ⁻²)		8 年累计作物地上部分带走 P 量(kg hm ⁻²)		P 肥的表观利用率(%) Apparent efficiency of P fertilizer application
	Cumulative P application by fertilizers		Cumulative P removal by crop subaerial parts		
	NPK	NK	NPK	NK	
小麦 Wheat	262	0	209	85	47.3
玉米 Maize	262	0	234	147	33.2

表 7 8 年累计 K 肥表观利用率

Table 7 Apparent recovery rate of K fertilizer during the 8-year experiment

作物 Crops	8 年累计施入 K 肥量(kg hm ⁻²)		8 年累计作物地上部分带走 K 量(kg hm ⁻²)		K 肥的表观利用率(%) Apparent efficiency of K fertilizer application
	Cumulative K application by fertilizers		Cumulative K removal by crop subaerial parts		
	NPK	NP	NPK	NP	
小麦 Wheat	600	0	828	527	50.2
玉米 Maize	600	0	706	409	49.5

2.5 定位施肥 8 年后土壤养分含量的变化

2.5.1 土壤 N 素养分含量的变化 (1) 碱解氮含量:不施 N 肥的 CK 和 PK 处理区比试验前分别降低 10.2 mg kg⁻¹ 和 5.7 mg kg⁻¹, 降幅分别为 12.4% 和 7.0%。施 N 处理区均有不同程度增加, 增幅在 6%~15% 之间; (2) 全氮含量:不施 N 肥的 CK 和 PK 处理区比试验前分别降低 0.05 g kg⁻¹ 和 0.09 g kg⁻¹, 降幅分别为 5.5% 和 9.9%。施 N 处理区比试验前增加 0.11~0.15 g kg⁻¹, 增幅在 12%~16.5% 之间(表 8)。

2.5.2 土壤 P 素养分含量的变化 (1) 全磷含量:不施 P 肥处理区比试验前降低 0.1 g kg⁻¹ 左右, 降幅达 20% 以上。而施 P 肥处理区比试验前增加 0.018~0.079 g kg⁻¹, NPK 处理区增幅较小, 为 4.3%, 另 2 个处理增幅在 15% 以上; (2) 有效磷含量:不施 P 肥处理区比试验前降低 75%~85%, 而施 P 肥处理区比试验前增加 56.9%~119.3%。增幅由高到低的顺序为 PK>NP>NPK(表 8)。各处理土壤有效磷含量的变化幅度明显大于全磷含量的变化幅度。

2.5.3 土壤 K 素养分含量的变化 (1) 全钾含量:不施 K 肥处理区比试验前降低 0.5~0.8 g kg⁻¹, 降幅为 3.5%~5.6%。NPK 处理比试验前降低 0.1 g kg⁻¹, NK 处理与试验前持平, PK 处理比试验前增加 0.1 g kg⁻¹。可见, 经过 8 年定位施肥后, 各处理区土壤全 K 含量与试验前无十分明显的变化; (2) 速效钾含量:不施 K 肥处理区比试验前降低 40 mg kg⁻¹ 左右, 降幅在 35% 左右。NPK 处理比试验前降低 6.7 mg kg⁻¹。只有 NK 和 PK 处理比试验前增加 10 mg kg⁻¹ 左右(表 8)。

2.5.4 土壤有机质含量的变化 CK 和 PK 处理区的土壤有机质含量比试验前降低 1.2~1.6 g kg⁻¹, 降幅在 10% 左右。其他处理区增减幅度不大, 总体上基本持平(表 8)。

2.5.5 土壤 pH 的变化 CK 和 PK 处理土壤 pH 值比试验前分别增加 0.5 和 1.1 个单位, 其他处理比试验前降低 0.65~1.1 个单位(表 8), 可见, 长期施用氮肥后土壤有变酸趋势。

2.6 农田养分平衡与养分水平的消长规律

农田养分平衡的盈亏决定了土壤养分的消

长^[6-10],对各处理的 P、K 养分的盈亏与其土壤有效磷、速效钾含量之间的关系进行数学模拟,可以发现它们之间有很好的线形关系(图 3,图 4)。P 素的模型为: $y = 0.1138x - 0.4061$ ($r = 0.9594, n = 6$), 式

中 y 为土壤有效磷消长 ($P, \text{mg kg}^{-1}$), x 为土壤磷素盈亏 ($P, \text{mg kg}^{-1}$); K 素的模型为: $y = 0.1075x - 8.7871$ ($r = 0.9021, n = 6$), 式中 y 为土壤速效钾消长 ($K, \text{mg kg}^{-1}$), x 为土壤钾素盈亏 ($K, \text{mg kg}^{-1}$)。

表 8 定位试验 8 年后土壤养分变化情况

Table 8 Changes in soil nutrient status after the 8-year *irrsitu* experiment

处理 Treatments	碱解氮 Alkali-hydrolyze N ($\text{N}, \text{mg kg}^{-1}$)			全氮 Total N ($\text{N}, \text{g kg}^{-1}$)			全磷 Total P ($\text{P}, \text{g kg}^{-1}$)			有效磷 Available P ($\text{P}, \text{mg kg}^{-1}$)		
	试验前	试验后	变化	试验前	试验后	变化	试验前	试验后	变化	试验前	试验后	变化
	Before test	After test	Changes	Before test	After test	Changes	Before test	After test	Changes	Before test	After test	Changes
CK	82.0	71.8	- 10.2	0.91	0.86	- 0.05	0.419	0.323	- 0.096	10.9	1.8	- 9.1
N	82.0	88.4	+ 6.4	0.91	1.02	+ 0.11	0.419	0.310	- 0.109	10.9	2.7	- 8.2
NP	82.0	87.0	+ 5.0	0.91	1.03	+ 0.12	0.419	0.485	+ 0.066	10.9	19.6	+ 8.7
NK	82.0	88.1	+ 6.1	0.91	1.05	+ 0.14	0.419	0.328	- 0.091	10.9	1.7	- 9.2
NPK	82.0	94.2	+ 12.2	0.91	1.06	+ 0.15	0.419	0.437	+ 0.018	10.9	17.1	+ 6.2
PK	82.0	76.3	- 5.7	0.91	0.82	- 0.09	0.419	0.498	+ 0.079	10.9	23.9	+ 13.0

处理 Treatments	全钾 Total K (g kg^{-1})			速效钾 Available K (mg kg^{-1})			有机质 O.M. (g kg^{-1})			pH		
	试验前	试验后	变化	试验前	试验后	变化	试验前	试验后	变化	试验前	试验后	变化
	Before test	After test	Changes	Before test	After test	Changes	Before test	After test	Changes	Before test	After test	Changes
CK	14.2	13.4	- 0.8	113.3	76.4	- 36.9	14.0	12.8	- 1.2	6.78	7.38	+ 0.50
N	14.2	13.6	- 0.6	113.3	71.0	- 42.3	14.0	13.8	- 0.2	6.78	5.68	- 1.10
NP	14.2	13.7	- 0.5	113.3	73.5	- 39.8	14.0	13.9	- 0.1	6.78	6.13	- 0.65
NK	14.2	14.2	0	113.3	122.5	+ 9.2	14.0	13.4	- 0.6	6.78	5.93	- 0.86
NPK	14.2	14.1	- 0.1	113.3	106.6	- 6.7	14.0	14.3	+ 0.3	6.78	5.92	- 0.86
PK	14.2	14.3	+ 0.1	113.3	125.6	+ 12.3	14.0	12.4	- 1.6	6.78	7.87	+ 1.09

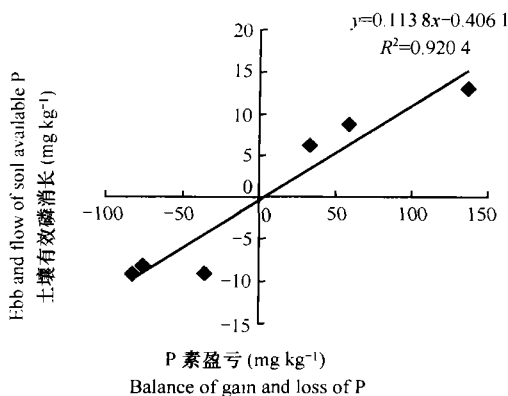


图 3 磷素盈亏与土壤有效磷消长关系的数学模型

Fig. 3 Correlation between ebb and flow of soil available P and balance of gain and loss of P

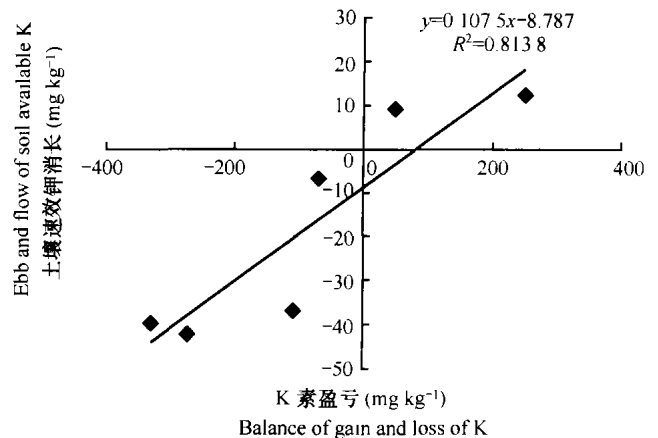


图 4 钾素盈亏与土壤速效钾消长关系的数学模型

Fig. 4 Correlation between ebb and flow of soil available K and balance of gain and loss of K

3 结 论

经过 8 年定位施肥,CK、N、NP、NK、PK 处理区的小麦产量分别为 NPK 处理区的 26.9%、54.3%、85.2%、53.2%、31.8%,玉米产量分别为 NPK 处理区的 21.4%、68.9%、73.5%、81.6%、28.0%。施 N 或 P 肥提高了作物籽粒和秸秆的 N 或 P 养分浓度,施 K 肥对作物籽粒 K 浓度影响较小,但显著提高了秸秆 K 浓度。

不施 N 肥,土壤 N 素自然供给能力第 1 年降为原来的 64%,第 2 年则降为 22%,此后,在 20%左右振荡;不施 P 肥,土壤 P 素自然供给能力第 1 年后为 95%,8 年后逐渐降为 45%左右;不施 K 肥,土壤 K 素自然供给能力,第 1 年后为 90%,8 年后逐渐下降到 60%~70%。土壤 P、K 自然供给能力在小麦、玉米上有所不同。

定位施肥 8 年后,N 素在 CK 和 PK 处理中亏损 75%以上,在 N 和 NK 处理中盈余 10%左右,在 NP 处理中基本平衡,在 NPK 处理中亏损 10%;P 素在 CK、N 和 NK 处理中亏损 92%~97%,在 NP 处理中盈余 42%,在 NPK 处理中盈余 20%,而在 PK 处理中盈余高达 224%;K 素在不施 K 肥处理亏损 86%~95%,在 NK 处理中盈余 12%,在 PK 处理中盈余 117%,在 NPK 处理中亏损 12%。土壤有效磷、速效钾的消长与磷、钾的盈亏呈线性关系,利用这个关系可以预测砂姜黑土有效磷、速效钾的发展趋向。

与试验前相比,8 年后,土壤全氮含量,不施 N 肥处理区降低 5%~10%,施 N 处理区增加 12%~16.5%;土壤全磷含量,不施 P 处理区降低 20%左右,施 P 处理区则有不同程度增加;土壤有效磷含量,不施 P 处理区降低 75%~85%,施 P 处理区提高 56.9%~119.3%;土壤全钾含量变化不大;土壤速效钾含量,不施 K 肥处理区降低 35%左右,NPK 处理区降低 6.7 mg kg^{-1} ,NK 和 PK 处理区增加 10 mg kg^{-1} 左右;CK 和 PK 处理区土壤有机质含量降低 10%左右,其他处理基本持平。

8 年累计,小麦、玉米对 N、P、K 肥的表观利用率分别为 59.8%和 51.1%、47.3%和 33.2%、50.2%和 49.5%。

参 考 文 献

- [1] 张民,龚子同. 中国变性土的分布、特性和分类. 土壤学报, 1992, 29(1): 1~17. Zhang M, Gong Z T. Distribution, characteristics and taxonomic classification of Vertisols in China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1992, 29(1): 1~17
- [2] Liu L W. Formation and evolution of Vertisols of Huaibei Plain. Pedosphere, 1991, 1(1): 3~15
- [3] 詹其厚,袁朝良,张效朴. 有机物料对砂姜黑土的改良效应及其机制. 土壤学报, 2003, 40(3): 420~425. Zhan Q H, Yuan C L, Zhang X P. Ameliorative effect and mechanism of organic matters on Vertisol (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(3): 420~425
- [4] 刘光崧主编. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996. Liu G S, eds. Soil Physical and Chemical Analysis & Description of Soil Profiles (In Chinese). Beijing: Standards Press of China, 1996
- [5] Zhang S X, Li X Y, Li X P, et al. Crop yield, N uptake and nitrates in a fluvo-aquic soil profile in a long-term fertilizer experiment. Pedosphere, 2004, 14(1): 131~136
- [6] 鲁如坤,刘鸿翔,闻大中,等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究. 农田养分支出参数. 土壤通报, 1996, 27(4): 145~150, 154. Lu R K, Liu H X, Wen D Z, et al. Nutrient cycle and balance of agroecosystem in the typical regions of China. Nutrients output of farmland (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 1996, 27(4): 145~150, 154
- [7] 鲁如坤,刘鸿翔,闻大中,等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究. 农田养分收入参数. 土壤通报, 1996, 27(4): 151~154. Lu R K, Liu H X, Wen D Z, et al. Nutrient cycle and balance of agroecosystem in the typical regions of China. Nutrients income of farmland (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 1996, 27(4): 151~154
- [8] 鲁如坤,刘鸿翔,闻大中,等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究. 全国和典型地区养分循环和平衡现状. 土壤通报, 1996, 27(5): 193~196. Lu R K, Liu H X, Wen D Z, et al. Nutrient cycle and balance of agroecosystem in the typical regions of China. Status of nutrient cycle and balance in the typical regions of China (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 1996, 27(5): 193~196
- [9] 鲁如坤,刘鸿翔,闻大中,等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究. 农田养分平衡的评价方法和原则. 土壤通报, 1996, 27(5): 197~199. Lu R K, Liu H X, Wen D Z, et al. Nutrient cycle and balance of agroecosystem in the typical regions of China. Methods and principle for evaluating nutrients balance (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 1996, 27(5): 197~199
- [10] 鲁如坤,刘鸿翔,闻大中,等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究. 农田养分平衡和土壤有效磷、钾消长规律. 土壤通报, 1996, 27(6): 241~242. Lu R K, Liu H X, Wen D Z, et al. Nutrient cycle and balance of agroecosystem in the typical regions of China. Correlation between nutrients balance and ebb and flow of soil available P and K (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 1996, 27(6): 241~242
- [11] 王建国,刘鸿翔,王守宇,等. 黑土农田养分平衡与养分消长规律. 土壤学报, 2003, 40(2): 246~251. Wang J G, Liu H Y, Wang S Y, et al. Law of nutrient equilibrium, gain and loss in black

- soil farmland (In Chinese). *Acta Pedologic Sinica*, 2003, 40 (2) : 246 ~ 251
- [12] 钦绳武,顾益初,朱兆良. 潮土肥力演变与施肥作用的长期定位试验初报. *土壤学报*, 1998, 35(3) :367 ~ 375. Qin S W, Gu Y C, Zhu ZL. A preliminary report on long-term stationary experiment on fertility evolution of fluvo-aquic soil and the effect of fertilization (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(3) :367 ~ 375
- [13] 张效朴,詹其厚,尹楚良. 淮北砂姜黑土高产施肥体系研究. 见:阎晓明,张效朴,马新明,等编著. 砂姜黑土地区农业持续发展研究. 北京:中国农业科技出版社, 2000. 247 ~ 260. Zhang X P, Zhan Q H, Yin CL. Study on highly yield applying fertilizer system in shaijiang black soil in Huaibei area (In Chinese). In: Yan X M, Zhang X P, Ma X M, *et al.* eds. Study on Agriculture Continue Developing in the Area of Shaijiang Black Meadow Soil. Beijing: Agricultural Technological Press of China, 2000. 247 ~ 260

CONTINUAL NUTRIENT SUPPLYING CAPACITY AND CROP RESPONSES BASED ON LONG TERM FERTILIZER EXPERIMENT IN VERTISOL

Zhan Qihou Chen Jie

(State Key Lab of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract An 8-year *in-situ* experiment was carried out to study spontaneous nutrient supply capacity and crop responses in vertisol, Huaibei. The data obtained indicated that, in the absence of N fertilizer, N supply capacity of vertisol declined to 64 % of the original in the first investigated year, and sharply down to 22 % in the second year, and then fluctuated around 20 % in the years that followed. And, without P fertilizer application, P supply capacity of the soil decreased gradually throughout the 8 years of the experiment, from 95 % in the first year to 45 % in the last year, and so was soil. K supply capacity, but from 90 % in the first year down to 60 % ~ 70 % in the 8th year of the experiment withholding K containing fertilizers. And, P and K supplying performances of vertisol, however, differed significantly from crop to crop, wheat and maize. The 8-year mean yields of wheat and maize in Treatments CK, N, NP, NK and PK were 26.9 %, 54.3 %, 85.2 %, 53.2 %, 31.8 % and 21.4 %, 68.9 %, 73.5 %, 81.6 %, 28.0 % of that in Treatment NPK, respectively, suggesting strong responses of the crops to fertilization models. Detailed analysis showed that, element concentrations of N and P in the seeds and straws of the crops significantly increased in the treatments with N and P fertilizer application. K concentration in the crop's seeds, however, showed no obvious change while increased evidently in the straws in the treatments with K fertilization. After 8 years of experiment, the total N content of the tested vertisol decreased by 5 % ~ 10 % in the treatments without N fertilization, by contraries increased by 12 % ~ 16.5 % in the treatments with N fertilization. And, the total P content of the soil decreased by 20 % in the treatments without P fertilization, and only slightly increased in the treatments with P fertilization available. The available P content of the soil, however, varied very strongly during the experiment period, depending on P fertilization status. As for the total K content of the soil, there was no obvious variation between treatments with or without K fertilization. The content of available K in the soil decreased by 35 % in the treatments without K fertilizer, decreased by 5.9 % in Treatment NPK, and increased 10 % in Treatments NK and PK. The content of soil organic matter decreased by 10 % in Treatments CK and PK, and remained stable in the other treatments after the 8-year experiment. The cumulative apparent recovery rates of N, P, K fertilizers on the crops of wheat and maize were 59.8 %, 47.3 %, 50.2 % and 51.1 %, 33.2 %, 49.5 % respectively during the experiment period. The equations correlation coefficients between gain and loss of soil available phosphorus and between gain and loss of soil available potassium were y (ebb and flow of soil available P) = 0.113 8 x (balance of gain and loss of P) - 0.406 1 ($n = 6$, $r = 0.959 4$) and y (ebb and flow of soil available K) = 0.107 5 x (balance of gain and loss of K) - 8.787 1 ($n = 6$, $r = 0.902 1$) respectively.

Key words Vertisol; Nutrient supply capacity; Crop response; Long-term fertilization experiment