

长期施肥对作物产量及褐潮土有机质变化的影响研究

宋永林, 唐华俊, 李小平

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 通过北京昌平“国家褐潮土土壤肥力和肥料效益监测基地”的长期定位试验(1991–2004年), 研究了褐潮土条件下长期施肥对土壤有机质状况的影响, 与对照不施肥或单施氮肥比较, 氮磷长期配合施用极显著增加冬小麦和夏玉米的生物产量和籽粒产量, 冬小麦增产4倍以上, 夏玉米增产1倍以上; 单施氮肥、或磷钾配合、或氮钾配合增产效果均不明显; 氮磷长期配合施用各处理比较, 冬小麦和夏玉米产量均表现 NPK + 有机肥或秸秆 > NPK > NP。氮磷钾配合施用有机肥耕层土壤有机质含量明显高于单施化肥; 与对照不施肥比较, NPK+ 秸秆以及 NPK+ 有机肥土壤有机质含量分别增加 7.90% 和 14.56%, 氮磷钾配合和氮磷配合分别比对照增加 6.51% 和 5.89%, 而单施氮肥仅增加 2.56%。可见 NPK 平衡施用及其配施有机肥对增加作物产量和土壤有机质含量具有重要作用。

关键词: 褐潮土; 长期施肥; 作物产量; 土壤有机质

中图分类号: S147.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2007)增刊-0001-04

The Effects of Long-term Fertilization on Crop Yield and Aquic cinnamon Soil Organic Matter

SONG Yong-lin, TANG Hua-jun, LI Xiao-ping

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on national supervision base for aquic cinnamon soil fertility and fertilizer benefits in Changping, Beijing(1991–2004), the effect of long-term fertilization on crop yield and Soil organic matter. were investigated. The main results obtained are as follows: Compared with the check(CK, no fertilizer application) and single nitrogen fertilizer (N only), combined application of N and P(NP) significantly increased both biomass and grain yield of winter wheat by 400% and summer corn by 100%; Compared with NP, treatment, N only, combined application of P and K(PK), and combined application of N and K(NK), increased crop yield not significantly. The yield increment for winter wheat and summer corn follows the following order: NPK+ pig manure(NPKM) or NPK + straw > NPK > NP. The content of soil organic matter(OM) of NPKM treatment was higher than that of single chemical fertilizer treatment significantly. In comparison with CK, soil OM with treatments of NPK+ Straw, NPKM, NPK, NP and N only increased by 7.90%, 14.56%, 6.51%, 5.89% and 2.56%, respectively. Therefore, balanced application of N, P and K, and combined application of NPK with Crop yield and organic materials play a very important role in improving soil OM status.

Key words: Aquic cinnamon soil; Long-term fertilizer experiment; Crop yield; Soil organic matter

我国的长期肥料定位试验是在不同土壤、不同种植制度下连年种植固定作物并施用定量肥料, 对作物生长发育状况和土壤各种理化性状及土壤肥力演变等进行研究的长期定位试验研究, 其研究成果将对提高我国耕地的综合生产能力、提高粮食产量、保护环境均具有极大的理论指导意义^[1-5]。本研究

是针对褐潮土条件下长期定位施肥对作物产量和土壤肥力影响的研究报道较少的情况, 利用“国家土壤肥力与肥料效益长期监测基地网”中北京褐潮土监测基地 14 年的部分试验结果, 来对褐潮土上长期施肥对农作物产量及土壤有机质的影响进行初步研究。

1 材料和方法

1.1 试验基地概况

1.1.1 基本情况 国家褐潮土肥力监测基地位于北京昌平区境内京昌公路西侧, 海拔 20 m 左右, 年平均温度 11℃ 左右, 一月份最低平均温度为 -5.4℃, 极端最低温度为 -27.4℃, 7 月份最高平均为 26℃, $\geq 0^\circ\text{C}$ 的积温 > 4500℃, 年降雨量在 600 mm 左右, 冬春干旱, 夏季多雨主要集中在 6~8 月份, 约占全年降雨量的 65% 左右, 无霜期 180 d 左右。

本试验是在该监测基地的长期定位试验区内进

行, 小区面积为 200 m², 小区之间用 80 cm 深的水泥板隔开, 互不渗漏, 且能独立排灌。于 1988-1990 年进行了 3 年 6 茬的冬小麦-夏玉米匀地播种。经测定, 匀地试验后各小区地力已较均匀, 具备了长期定位试验的土壤条件。

1.1.2 土壤条件 褐潮土属潮土类, 土壤物理性状: 容重 1.58 g/cm³。总孔隙量为 40.37%, 毛管孔隙量 38.29%, 非毛管孔隙 2.08%。田间持水量 24.75%。

土壤化学性状: 匀地后 0~20 cm 和 20~40 cm 土层主要养分含量见表 1。

表 1 供试土壤主要化学性状

Tab. 1 Chemical properties of the experimental soils

土层/cm Soil horizon	有机质 /(g/kg) Organic matter	全氮/(g/kg) Total N	全磷/(g/kg) Total P	全钾/(g/kg) Total K	速效氮 /(mg/kg) Available nitrogen	速效磷 /(mg/kg) Available phosphorus	速效钾 /(mg/kg) Available potassium	pH
0~20	12.3	0.80	1.52	17.5	36.07	11.16	78.61	8.82
20~40	12.2	0.78	1.58	17.9	47.60	8.68	77.54	

表 2 各试验处理施肥量

Tab. 2 Applied fertilizers amounts in different treatments of long-term fertilization experiment

处理 Treatment	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	有机肥 Organic fertilizer	玉米秸秆 Corn straw
CK					
N	150				
NP	150	75			
NK	150		37.5		
PK		75	37.5		
NPK	150	75	37.5		
NPK+M	150	75	37.5	22500	
NPK+玉米秸秆	150	75	37.5		3000

1.2 试验设计

褐潮土肥力与肥料效益监测试验共设 13 个处理, 本文涉及 8 个处理: (1) CK, (2) N, (3) NP, (4) NK, (5) PK, (6) NPK, (7) NPK+M, (8) NPK+ 秸秆, 各处理施肥量见表 2。

所施肥料品种为: 氮肥为尿素; 磷肥为过磷酸钙; 钾肥为氯化钾; 所施有机肥是由畜禽粪便等为主要原料沤制的厩肥; 供试作物实行冬小麦-夏玉米连作, 化肥在每茬作物播种前一次性撒施并耕翻入土, 有机肥和秸秆在冬小麦播种前施用。

1.3 分析测定项目及方法

基础土样及每年试验采集的各处理土壤样品所进行的土壤有机质的测定, 按常规分析方法进行分析测定, 即油浴加热-K₂Cr₂O₇容量法测定。

作物产量的测定: 冬小麦、夏玉米成熟后, 各试验处理小区收实产单收单打测定籽粒和秸秆干重, 计算作物生物产量和籽粒产量, 并进行统计分析和差异显著性测定

2 结果与分析

2.1 长期定位施肥对作物产量的影响

2.1.1 长期定位施肥对冬小麦产量的影响 表 3 结果显示, 不同施肥处理对冬小麦籽粒产量的影响大体可分为两组, 第 1 组产量由高到低依次为 NPK+M, NPK, NPK+ 玉米秸秆, NP 共 4 个处理; 第 2 组产量由高到低依次为: NK, PK, N, CK 共 4 个处理, 两组中组内产量间无显著差异。组间差异达到了极显著水平, 说明在各施肥处理中, 凡是含氮磷配合的施肥处理都具有显著地提高冬小麦生物产量的作用, 且增产幅度随施肥量的增加而增大。

由表中结果看出, 不同施肥处理对冬小麦生物产量的影响结果与籽粒产量的影响趋势完全相同, 仍以含氮磷配合的施肥处理增产效果较明显, 并随着施肥量的增加, 增幅也在增长。这反映了北京褐潮土氮、磷养分最为缺乏, 因此, 在施肥上首先应抓住氮、磷配合才能高产。不同施肥处理对冬小麦产量变化趋势具有一定影响, 图 1, 2 反映了不同施肥

处理 14 年来的产量变化趋势,可以看出不同施肥对冬小麦产量的影响也自然地分成了 2 组,第 1 组为: NP,NPK,NPK+ M,NPK+ 秸秆共 4 个处理;第 2 组: CK,N,NK,PK 共 4 个处理。从第 1 组的产量变化趋势来看,无论是籽粒产量还是生物产量,都具有 2~3 次高峰期,说明在较低的土壤肥力水平下,连续 3 年施肥具有迅速地提高冬小麦产量的作用;总体上第 1 组各处理连续施肥的增产效果是十分肯定的。值得注意的是,在第 1 组中的 NP 处理,从图中的多年产量变化趋势来看,在第 1 组中该处理产量是最低的,且年际间变幅较大,说明随着施肥年限的增长,长期单纯施用 N,P 配合的肥料对作物增产作用将受到限制,钾元素将成为作物增产的限制因素,只

有长期施用含 N,P,K 3 种营养元素的肥料,使得作物能吸收到含 NPK 等完全营养才能实现持续增产。在第 2 组的各施肥处理中,PK 处理效果好于其他处理,增产幅度也最大,但结合表 3 和表 4 结果总体来看,第 2 组各施肥处理无论是冬小麦生物产量还是籽粒产量,14 年连续施肥,产量变化曲线比较平缓,PK,NK 和单一施氮处理的产量虽总体上略高于 CK 处理,但因年际间差异和增产幅度小等原因,所以增产效果并不显著,从变化曲线来看,NK 和单一施氮处理,在最初可能有些增产效果,但长期施用,与不施肥比较,产量性状是无差别的,且 NK,单一施氮肥和不施肥冬小麦产量是逐年降低的。

表 3 1991-2004 年长期定位施肥冬小麦产量

Tab. 3 The Winter-wheat yield in long-term fertilization experiment from 1991to 2004

处理 Treatment	籽粒产量/(kg/hm ²) Grain yield				生物产量/(kg/hm ²) Biomass yield			
	1991-2004 平均	比 CK 增/ %	差异显著性		1991-2004 平均	比 CK 增/ %	差异显著性	
			0.05	0.01			0.05	0.01
CK	603.73		c	B	1 627.75	c	C	
N	691.38	14.52	c	B	2 124.43	30.51	c	C
NP	2 951.69	388.91	b	A	7 505.62	361.10	b	B
NK	873.41	44.67	c	B	2 450.42	50.54	c	C
PK	1 143.89	89.47	c	B	3 031.91	86.26	c	C
NPK	3 559.39	489.56	ab	A	9 025.14	454.46	ab	AB
NPK+ M	4 013.17	564.73	a	A	10 270.17	530.94	a	A
NPK+ 秸秆	3 485.67	477.35	ab	A	8 851.55	443.79	ab	AB
LSD _{0.05} = 803.762 8		LSD _{0.01} = 1 075.395 6		LSD _{0.05} = 1 565.654 3		LSD _{0.01} = 2 094.769 6		

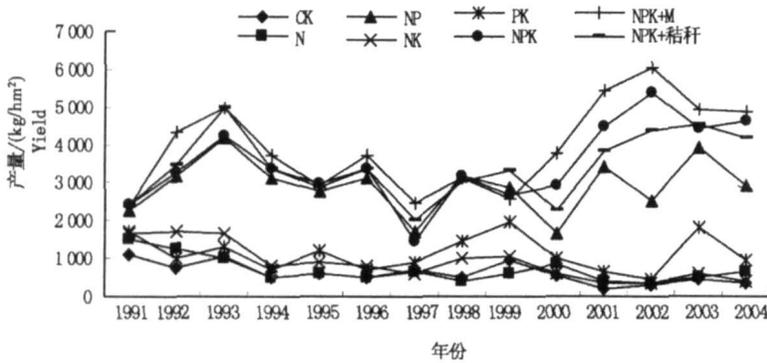


图 1 长期施肥冬小麦籽粒产量

Fig. 1 The economic yield of winter wheat in long-term fertilization

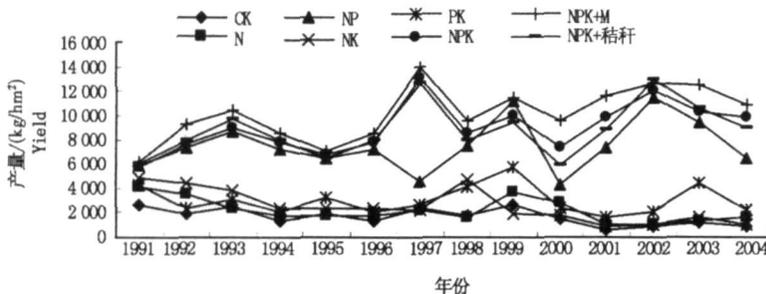


图 2 长期施肥冬小麦生物产量

Fig. 2 The biological yield of winter in long-term fertilization

2.1.2 长期定位施肥对夏玉米产量的影响 表4结果显示, 不同施肥处理对夏玉米籽粒产量的影响大体可分为两组, 第1组是含氮磷配合的施肥处理, 产量由高到低的顺序为 NPK+M>NPK+ 秸秆>NPK>NP。第2组是不含氮磷配合的各处理。第2组各产量由高到低依次为: NK>N>PK>CK。第1组中各施

肥处理与不施肥对照相比, 差异均达到极显著水平, 且除NP处理外, 第1组各处理与第2组差异达到了极显著水平。说明在各施肥处理中, 凡是含氮磷配合的施肥处理都具有显著地提高夏玉米籽粒产量的作用, 且增产幅度随施肥量和营养元素种类增加而增大。两组中组内生物产量间无显著差异。

表4 1991-2004年长期定位施肥夏玉米产量

Tab. 4 The summer corn yield in long-term fertilization experiment from 1991 to 2004

处理 Treatment	籽粒产量/(kg/hm ²) Grain yield				生物产量/(kg/hm ²) Biomass yield			
	1991-2004 平均	比CK增/%	差异显著性		1991-2004 平均	比CK增/%	差异显著性	
			0.05	0.01			0.05	0.01
CK	1 744.9		b	B	4 970.1		b	B
N	2 127.2	21.91	b	B	5 523.5	11.14	b	B
NP	3 703.6	112.25	ab	AB	8 560.7	72.24	ab	AB
NK	2 294.6	31.50	b	B	6 369.1	28.15	b	B
PK	2 483.3	42.31	b	B	6 318.6	27.13	b	B
NPK	4 333.6	148.35	a	A	9 784.5	96.87	a	A
NPK+M	4 926.3	182.32	a	A	10 796.8	117.23	a	A
NPK+ 秸秆	4 372.4	150.57	a	A	10 368.5	108.62	a	A
LSD _{0.05} = 1 311.528 5		LSD _{0.01} = 1 754.761 6		LSD _{0.05} = 2 661.264 7		LSD _{0.01} = 3 410.643 1		

由表4看出, 不同施肥处理对夏玉米生物产量影响结果与籽粒产量的影响趋势完全相同, 也可分为两组, 仍以含氮磷配合的NP处理增产效果较明显, 第1组中各施肥处理与不施肥对照相比, 差异也均达到极显著水平。各组组内差异不显著。无论是生物产量还是籽粒产量, 因年际间差异较大, 所以籽

粒产量只有增产幅度在1倍以上, 生物产量也只有在70%以上的增产幅度时, 增产差异才显著, 这反映了北京褐潮土条件下施肥与气候条件对夏玉米产量都有影响。单以施肥角度看, 首先应抓住氮、磷配合才能高产。

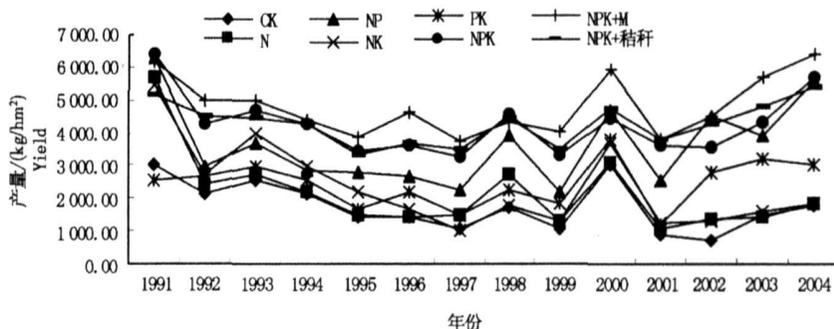


图3 长期施肥夏玉米籽粒产量

Fig. 3 The economic yield of summer corn in long-term fertilization experiment

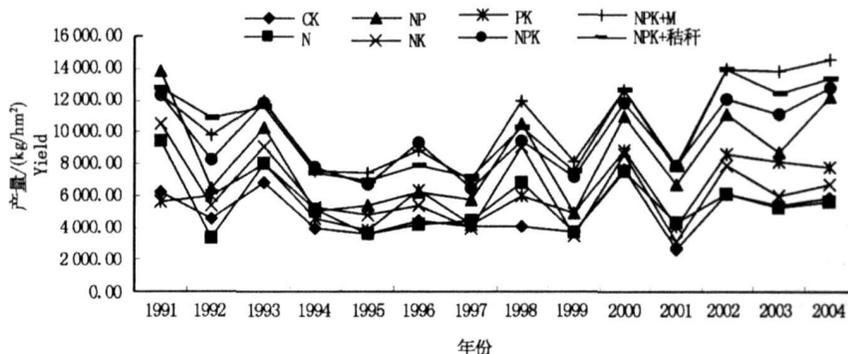


图4 长期施肥夏玉米生物产量

Fig. 4 The economic yield of winter wheat in long-term fertilization experiment

图 3, 4 反映了不同施肥处理 14 年来的产量变化趋势, 图中可以看出不同施肥对夏玉米产量的影响也自然分成两组: 第 1 组: NP, NPK, NPK+ M, NPK+ 秸秆共 4 个处理; 第 2 组: CK, N, NK, PK 共 4 个处理。从第 1 组的产量变化趋势来看, 产量曲线都是波浪式的, 第 1 次高峰是在 1991 年, 说明在较低的土壤肥力水平下, 无论是籽粒产量还是生物产量, 施肥具有迅速提高夏玉米产量的作用, 但从年际间产量变化幅度来看, NP 处理变化幅度大, 而含 NPK 配合的各处理随着施肥量的增加和完全营养元素肥料的施用, 年际间变化幅度减小, 由此可以说明, 常年施用含氮磷配合的肥料具有连年持续稳定增加夏玉米产量的作用。NP 处理尽管具有显著提高夏玉米产量的作用, 但要长期施用, 因长期缺乏其他营养元素对作物生长的供给, 所以在稳产方面的作用相对较弱。

从图中还可看出, NPK 配施有机肥(有机物料)的 2 个处理, 在 1991 年的增产幅度不如 NP 和 NPK 处理, 而在 14 年的产量曲线中却是持续稳定提高的, NPK 配施有机肥(有机物料)除年际间变化幅度较小的特点外, 在总体产量和持续增产方面都具有极佳表现, 由此说明有机肥在前期有一个分解释放过程, 但长期施用具有持续稳定的增产作用, 从第 2 组各施肥处理来看, 在夏玉米籽粒产量和生物产量

方面年际间变化均较大, 与第 1 组产量变化趋势相近, 并且每年的产量均低于第 1 组。单一施氮处理年际间变化也较大, 且总体产量与不施肥处理的效果相当。NK, PK 两处理变化曲线较平缓, 总体上一一直高于 CK 处理。从变化曲线来看, 单一施用氮肥, 在最初可能有些增产效果, 但长期施用, 与不施肥比较, 产量性状无差别。

2.2 长期定位施肥对土壤有机质含量的影响

2.2.1 长期定位施肥对耕层土壤(0~ 20 cm)有机质含量的影响 从表 5 可以看出, 不同配合的肥料施入土壤对耕层土壤的有机质含量具有显著不同的影响, 施肥与不施肥相比对土壤有机质含量都具有一定的提高作用, 并随着肥料的平衡施入有机质的提高幅度也在增大, 各处理有机质含量由高到低顺序为: NPK+ M > NPK+ 玉米秸秆 > NP > NPK > PK > NK > N > CK, 从表 5 中可明显看出, NPK+ M、NPK+ 玉米秸秆 2 个处理表现最为突出, 从多年的变化看都明显高于其他各处理, 表中显示分别比对照增加 13.72%, 14.56% 和 7.90%, 说明氮磷钾化肥配施有机物料具有显著提高耕层土壤有机质含量的作用, 在单一施用化肥的几个处理中, NPK 和 NP 两处理好于其他各处理, NP 处理因其年际间变幅较大, 所以其效果比 NPK 处理要差, 但在两两配合的几个处理中效果仍是最好的。

表 5 长期定位施肥土壤有机质含量变化(0~ 20 cm)

Tab. 5 The change of Organic matter content in 0- 20 cm soil layer of long-term fertilization experiment g/kg

处理 Treatment	基础样	1991- 1992	1993- 1994	1995- 1996	1997- 1998	1999- 2000	2001- 2002	2003	1991- 2003 平均	比 CK 净增/ %
CK	12.23	12.55	12.15	14.43	14.43	16.25	14.09	13.99	13.99	
N	12.23	13.20	13.55	14.63	14.13	16.29	14.16	14.45	14.34	2.56
NP	12.23	13.05	13.24	14.76	14.96	17.91	14.78	15.57	14.90	6.51
NK	11.92	12.55	12.87	14.04	14.40	17.07	14.28	15.25	14.35	5.15
PK	11.92	12.95	13.05	14.54	14.21	17.28	13.66	15.08	14.40	5.47
NPK	11.92	13.10	12.96	14.71	14.90	16.98	13.91	14.64	14.46	5.89
NPK+ M	11.92	13.20	13.80	15.29	15.04	17.98	16.57	17.79	15.67	14.56
NPK+ 秸秆	12.81	13.35	13.75	15.76	16.26	17.84	15.48	17.83	15.75	7.90

表 6 长期定位施肥土壤有机质含量变化(20~ 40 cm)

Tab. 6 The change of Organic matter content in 20- 40 cm soil layer of long-term fertilization experiment g/kg

处理 Treatment	基础样	1994- 1995	1996- 1997	1998- 1999	2000- 2001	2002- 2003	多年平均	比 CK 净增/ %
CK	12.20	11.49	11.16	11.82	10.29	11.31	11.21	
N	12.20	11.91	11.82	11.87	11.34	10.61	11.51	2.64
NP	12.20	11.20	10.85	12.91	10.42	10.21	11.12	- 0.86
NK	12.30	11.89	11.71	12.03	10.56	11.61	11.56	2.26
PK	12.30	11.59	11.74	13.57	11.27	12.09	12.05	6.64
NPK	12.30	10.28	11.35	13.50	10.96	11.64	11.55	2.15
NPK+ M	12.30	10.72	11.77	13.38	11.87	11.37	11.82	4.58
NPK+ 秸秆	12.20	11.56	12.02	12.65	11.28	11.84	11.87	5.82

2.2.2 长期定位施肥对犁底层(20–40 cm)土壤有机质含量的影响 表6列出了不同施肥处理对土壤犁底层有机质的影响情况,结果显示,长期定位施肥对土壤犁底层有机质含量有一定影响,但影响程度远不如耕层土壤大,从表中结果看,各施肥处理提高土壤有机质的效果不明显;但仍以氮磷钾配施有机物料效果最好,NP处理不具有对犁底层土壤有机质含量的提高作用。

3 讨论与结论

3.1 长期定位施肥对作物产量的影响

我国土壤肥力监测基地产量变化可分为3种类型^[2]: ①产量变化不显著。如重庆紫色土监测基地2001年与1991年比,NPK、NPKM处理产量变化不显著; ②产量先上升后下降。如陕西黄土基地1991–1998年产量略有上升,1999年产量开始下降;水稻土基地从1992年起产量开始下降, ③产量呈上升趋势。如吉林公主岭黑土,湖南祁阳红壤,河南郑州潮土,新疆乌鲁木齐灰漠土等基地,均表现为NPKM处理优于NPK处理,本研究褐潮土长期施肥下的产量变化属第3种类型,主要结论有:

长期施用含氮磷配合的肥料具有极显著的增加冬小麦和夏玉米的生物产量和籽粒产量的作用,冬小麦增产幅度在4倍以上,夏玉米增产幅度在1倍以上,并随着肥料的平衡施入,增产幅度也加大。

在没有氮、磷配合的情况下,或缺磷或缺氮,增产效果均不明显,但单缺磷或单缺氮作物产量均比不施肥处理略高。

在土壤肥力较低情况下,单一施用氮肥不具有提高作物生物产量和籽粒产量的作用,在产量性状上与不施肥相比无差异;此结果与黄绍敏^[7]等研究得出的“长期施用氮肥对粮食作物增产作用较小”的结论相似。

从产量变化曲线来看,单一施氮和单一施氮、磷配合的肥料年际间变化幅度均较大,而氮磷钾化肥的平衡施用及氮磷钾化肥配施有机物料除增产效果明显高于单一施用各处理外,年际间变化幅度也较小,表明在施肥上除了选择含氮、磷配合的处理增产效果较明显外,若长期施用,还应增加钾肥和有机物料的配施,这样增产效果会更加稳定和明显,此结论与孙宏德等^[8]等在黑土上的研究结论相似。

3.2 长期定位施肥对土壤有机质含量的影响

林葆等^[6]在其他土类上进行的肥料长期定位试验得出,经10年的时间,无肥区的土壤有机质是下

降的,单施氮区的土壤有机质除旱作两熟区外,也是下降的;氮磷、氮磷钾化肥配合则大多是增加的。施用有机肥或有机肥化肥配合,土壤有机质增加比较明显。有机质含量低的土壤增加幅度较大。本研究在北京褐潮土的研究结果与林葆等的结论相似:

不同配合的肥料施入土壤对耕层土壤的有机质含量具有显著不同的影响,与不施肥相比施肥对土壤有机质含量都具有一定的提高作用,并随着肥料的平衡施入有机质的提高幅度也在增大。

氮磷钾化肥配施有机肥或秸秆,其有机质含量分别比不施肥处理提高14.56%和7.9%,高于单一施用氮磷钾化肥的5.89%,说明在褐潮土上氮磷钾化肥配施有机肥或秸秆具有显著提高土壤有机质含量的作用,效果优于单一施用氮磷钾化肥。

在单施化肥的几个处理中,NPK和NP两处理好于其他各处理,NP处理因其年际间变幅较大,所以其效果比NPK处理要差,但在两两配合的几个处理中效果仍是最好的。

不同配合的肥料长期施入土壤对土壤有机质的提高作用主要是在耕层土壤中得以体现,长期施肥虽对耕层以下的土壤有机质含量有一些影响,但作用不明显,此结论在我国的长期定位肥料试验中尚未见相关报道。

参考文献:

- [1] 沈善敏. 长期土壤肥力试验的科学价值[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(1): 1–9.
- [2] 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.
- [3] 14th International Congress Of Soil Science. Transactions[C]. Kyoto, Japan, 1990. Vol. VI.
- [4] Suzuki M, Kamekawa K. Effect of continuous application of Organic and Inorganic Fertilizer for sixty years on soil Fertility and rice yield in paddy Field[C] // Translation of 14th Inter Soil Sci, 1990: 14–19.
- [5] Diest A V. Agricultural sustainability and soil nutrient cycling with emphasis on tropical soils[C] // Translation 15th Intern Cong Soil Sci, Mexico, 4 Vol. 5a, 1994: 48–61.
- [6] 林葆, 李继雄, 李家康, 等. 长期施肥的作物产量和土壤肥力变化[J]. 植物营养与肥料学报, 1994(1): 6–18.
- [7] 黄绍敏. 长期施肥对潮土作物产量及肥料对产量贡献的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(增刊): 141–145.
- [8] 孙宏德. 有机无机肥料对黑土肥力和作物产量影响的监测研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(增刊): 110–116.