

长期施肥条件下菜田—蔬菜生态系统变化的研究

() 土壤有机质的变化

葛晓光 张恩平 张 昕 王晓雪 高 慧

(沈阳农业大学园艺学院, 沈阳 110161)

摘 要: 经过 14.5 年的蔬菜长期定位施肥试验, 土壤有机质含量与品质均发生明显的变化, 从有机质积累与品质改善的角度, 通过重施有机肥达到高度培肥的程度, 需要 10~15 年; 有机肥无机氮肥配施的土壤有机质含量高于有机肥单施, 而长期单施无机氮肥的土壤有机质含量反而降低。对照区有机质含量大致平衡在 19.0 g kg^{-1} 上下。有机质的积累速度“露地”快于“设施”, 而对照的有机质下降速度则露地慢于设施, 有机质年矿化率在 7.0%~11.1% 的范围, 露地平均为 8.67%, 设施平均为 9.54%。配施磷、钾肥可以在一定程度上增加土壤有机质含量, 但必须是以连年施用有机肥为基础。随着有机肥特别是有机无机氮肥配施的年限延长, 土壤易氧化有机质的含量逐渐增加, K_{os} (有机质的氧化稳定系数) 下降; 提高了土壤松结态腐殖质含量, 提高胡敏酸的比例; 提高胡敏酸的 E_4/E_6 值, 降低土壤胡敏酸的分子量及芳构化程度; 从而促进土壤腐殖化进程, 改善有机质的品质。

关键词: 蔬菜; 定位施肥; 菜田土壤; 培肥; 有机质

中图分类号: S 63; S 606; S 181 文献标识码: A 文章编号: 0513-353X (2004) 01-0034-05

Studies on Changes of Field - Vegetable Ecosystem under Long-term Fixed Fertilizer Experiment

() Changes of Soil Organic Matter

Ge Xiaoguang, Zhang Enping, Zhang Xin, Wang Xiaoxue, and Gao Hui

(College of Horticulture, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

Abstract: After 14 and half years long-term fixed fertilization trial with vegetables, the amount and quality of soil organic matter changed evidently. Soil fertility was highly improved by 10 - 15 years' use of organic manure in the view of organic matter accumulation and quality improvement. The soil organic matter in the combination of organic manure and inorganic nitrogen was higher than that in organic manure only, while in the trial with only inorganic nitrogen the organic matter decreased. The organic matter content in the control plot fluctuated around 19.0 g kg^{-1} . The accumulation rate of organic matter in open area was quicker than that in protected field, but for the CK was not the case. The yearly mineralization rate of organic matter was between 7.0% - 11.1%. The average mineralization rate for open area was 8.67%, while for protected condition was 9.54%. Phosphorous and potassium could increase organic matter content to some extent, but it must be based on application of organic manure. With the extension of fertilization with organic, especially with the combination with organic and inorganic fertilizer, the soil readily oxidizable organic matter increased, while K_{os} decreased; The soil active humus content, humus acid and E_4/E_6 value were increased, while molecular weight and aromaticity of humus acid were decreased, thus progress to humus formation and quality of organic matter were enhanced.

Key words: Vegetable; Long-term fixed fertilization; Vegetable-soil; Soil fertility improvement; Soil organic matter

收稿日期: 2003 - 08 - 14; 修回日期: 2004 - 01 - 02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (39970515)

蔬菜生态系统中，菜田生态系统是核心，菜田土壤是基础，菜田土壤的变化直接关系整个系统的生产力水平；菜田—蔬菜生态系统和其它农田生态系统一样，都是补给性生态系统，系统的生物量和流通量在很大程度上取决于来自系统以外的物质输入量。所以，施肥是影响土壤肥力的主要因子^[1]。“一亩园十亩田”，充分说明蔬菜栽培对土壤肥力要求很高。如何通过合理施肥来培肥菜田土壤，防止土壤向恶化方向发展，是本长期定位施肥试验研究的主要目的，即在模拟的不同施肥制度下，探索与总结其长期而缓慢的变化规律，为制定合理的菜田施肥制度，强化土壤的培肥管理以及保持其可持续发展提供可靠的理论依据与实践指导。目前在国内外仍未见或少见蔬菜长期施肥的研究，但其它作物的长期施肥试验以及类似研究可以作为本项研究的参考^[2,3]。2000 年发表的论文^[4]只是局限在露地偏施氮肥条件下的一般变化规律，从本文开始分内容介绍从露地到设施栽培的全部变化及其比较明显的规律。

1 材料与方法

1.1 试验时期与试验材料

到 2002 年底，该项试验已经经历了 14.5 年，前 8.5 年（1988 年秋茬～1996 年秋茬）为露地栽培试验，后 6 年（1997～2002 年）为设施栽培试验。露地试验采用 8 种蔬菜（从 1988 年秋季开始一年两茬的栽培顺序为：大白菜、菜豆、萝卜、洋葱、黄瓜、马铃薯、叶用芥菜、甜椒）轮作；设施栽培为一年一茬长季节栽培，前 2 年为茄子，后 4 年为番茄。

1.2 试验设计与测定方法

本研究的前 8.5 年露地试验为模拟偏施氮肥的 2 因素（有机肥与无机氮肥）3 水平试验设计。有机肥因素的水平为：0 量、中量、高量处理（纯马粪施用量分别为 0、37.5、75 t·hm⁻²·a⁻¹）；无机氮肥因素的水平为：低量、中量、高量（尿素施用量分别为 300、600、900 kg·hm⁻²·a⁻¹，经过 5 茬试验后又相应地将施用量降低为 0、300、600 kg·hm⁻²·a⁻¹，9 个处理，小区面积 16 m²，3 次重复，随机排列。1997 年进入设施栽培试验后保留了露地试验的高量有机肥（代号 A，以下均简称为有机肥）的 3 个无机氮肥处理以及不施有机肥（代号 B）的 3 个无机氮肥处理，共计 6 个处理，即 AN₀（有机肥零无机氮）、AN₁（有机肥中量无机氮）、AN₂（有机肥 2 倍量无机氮）、BN₀（无肥对照）、BN₁（中量无机氮）、BN₂（2 倍量无机氮）。马粪、尿素的施用量按露地的施肥标准折算为小区施用量，这是设施施肥定位试验的第一部分（继续露地偏施氮肥的试验）。试验的第二部分（氮、磷、钾配施试验）是从露地高量有机肥与零量有机肥的中量无机氮肥处理取土配施氮（尿素）、磷（过磷酸钙）、钾（硫酸钾）肥，形成 14 个处理，即 AP、AK、ANP、ANK、APK、ANPK、BP、BK、BNP、BNK、BPK、BNPK，加上与试验第一部分共用的 AN₁、BN₁ 两个处理（AN₁、BN₁ 既作为第一试验部分的一个氮素水平，又作为第二试验部分的配施氮素处理）。第二部分试验只

表 1 设施蔬菜长期定位试验施肥处理
Table 1 Fertilizer treatments of long-term fertilization trial
in vegetable protected field

处理代号 Treatment	马粪 Manure (kg plot ⁻¹)	尿素 Urea (g plot ⁻¹)	过磷酸钙 Calcium super phosphate (g plot ⁻¹)	硫酸钾 Potassium sulphate (g plot ⁻¹)
AN ₀	11.25	0	0	0
AN ₁	11.25	97.8	0	0
AN ₂	11.25	195.6	0	0
AP	11.25	0	720	0
ANP	11.25	97.8	720	0
AK	11.25	0	0	53.79
ANK	11.25	97.8	0	53.79
APK	11.25	0	720	53.79
ANPK	11.25	97.8	720	53.79
BN ₀ (对照 Control)	0	0	0	0
BN ₁	0	97.8	0	0
BN ₂	0	195.6	0	0
BP	0	0	720	0
BNP	0	97.8	720	0
BK	0	0	0	53.79
BNK	0	97.8	0	53.79
BPK	0	0	720	53.79
BNPK	0	97.8	720	53.79

有一种施肥量, 未施肥水平。具体肥料施用量见表 1。共 18 个处理, 3 次重复, 54 个小区 (小区面积 1.5 m^2) 组成的设施栽培定位施肥微组试验设在长年覆盖的塑料薄膜大棚内。每个小区建成 0.8 m 深的无底水泥池。有机肥与磷、钾肥于定植前一次施入, 尿素在生长季节内分两次追肥。供试土壤的有机质含量本底 (1988 年试验前) 为 $24.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

在蔬菜采收结束和清理田园后, 用 5 点采样法采取 20 cm 表土层的混合土样, 于室内风干后分别过 1.0 mm 和 0.25 mm 筛, 备用。测试方法: 有机质含量采用油浴— K_2CrO_4 容量法; 易氧化有机质采用表可能法^[5]; 腐殖质分组采用科诺诺娃修改法^[6]; 活性腐殖质采用 KMnO_4 氧化法^[7]。

2 结果与分析

2.1 土壤有机质量与稳定性的变化

2.1.1 偏施氮肥条件下有机质含量的变化 在露地 8.5 年试验后, 有机肥与高量无机氮肥配施处理 (AN_2) 的土壤有机质含量已经从 $24.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (本底值) 上升到 $33.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 增长了 39.09% , 平均年增长 4.60% ; 不施有机肥而单施 2 倍量尿素的小区 (BN_2) 有机质含量下降到 $22.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 下降 9.46% , 平均年下降 1.11% ; 而空白试验区 (BN_0 无肥对照) 下降到 $21.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 降低 11.52% , 平均年下降 1.36% , 但不施氮素化肥而仅施有机肥小区 (AN_0) 有机质含量上升到 $30.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 增长了 25.10% , 平均年增长 2.95% 。在此基础上, 又经过 6 年的设施栽培 (表 2), 施有机肥和 2 倍量无机氮 (AN_2) 处理从 $33.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 上升到 $41.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 增长 22.48% , 平均年增长 3.46% ; 仅施 2 倍量无机氮 (BN_2) 小区有机质含量由 $22.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降到 $20.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 下降 7.20% , 年下降 1.20% ; 对照区变化不大, 由 $21.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低到 $19.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 降低 10.70% , 平均年降低 1.78% ; 而处理 AN_0 有机质含量则由 $30.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 上升到 $31.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 增长了 2.63% , 年平均增长 0.44% 。

2.1.2 氮、磷、钾肥配施条件下土壤有机质含量的变化 在施用有机肥基础上配施 N、P、K 肥处理, 与只施有机肥 (AN_0) 比较, 经过设施栽培 6 年, 土壤有机质含量提高 $21.8\% \sim 33.0\%$, 其中尤以 AN_1 、

AP、AK 以及 APK 的处理含量较高; 而不施有机肥的各处理, 与 0 对照比较, 几乎没有太明显的变化。

配施 P、K 肥后, 施有机肥处理中以 AP 处理增长最大, 而以 ANPK 处理增长率最低, 这可能与 N、P、K 配施后增加了植株对 N、P、K 的吸收, 从而加速了有机质的分解有关。不施有机肥处理中以 BP 处理增长率较高, BNP 增长率最低, 这与有机肥处理有着相似的变化规律 (表 3)。

2.1.3 土壤有机质氧化稳定性的变化 施用有机肥或有机肥与无机氮肥处理的易氧化有机质含量明显高于单施无机氮肥的处理, 有机质的氧化稳定系数 (Kos) 也随之下降; 与本底值比较, 1996 年 10

表 2 偏施氮肥下的土壤 2002 年有机质含量

Table 2 The content of organic matter (O. M) in 2002

处理 Treatment	有机质含量 Content of O. M ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
AN_0	31.2 b A
AN_1	40.4 a A
AN_2	41.4 b A
BN_0 (对照 Control)	19.2 d C
BN_1	20.4 c B
BN_2	20.6 c B

注: 各处理的平均值作 Duncan's 多重检验, 字母不同者差异显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$)。

Note: Mean difference of treatment identified by Duncan's multiple range test. Means followed by different letters differ significantly at $P < 0.05$ or $P < 0.01$.

表 3 配施 NPK 的土壤 2002 年有机质含量

Table 3 The content of soil organic matter (O. M) in 2002

处理 Treatment	有机质含量 Content of O. M ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
AN_1	40.4 ab ABC
AP	41.5 a A
AK	41.1 ab A
APK	40.9 ab AB
ANP	38.8 cd C
ANK	39.6 bc BC
ANPK	38.0 d D
BN_1	20.4 e D
BP	20.1 ef D
BK	19.5 ef D
BPK	18.8 f D
BNP	20.0 ef D
BNK	19.0 ef D
BNKP	18.6 f D

注: 同表 1。Note: the same with table 1.

月测得的有机肥处理（平均）易氧化有机质含量提高了 37 %，而单施无机氮肥的处理（平均）则降低了 30 %（表 4）。

表 4 不同施肥对土壤有机质稳定性的影响

Table 4 Effect of fertilizers on stability of soil organic matter (O. M)

处理 Treatment	易氧化有机质 Liabile oxidizing organic matter (g kg ⁻¹)				有机质的氧化稳定系数 Kos			
	1990 - 10	1992 - 07	1994 - 10	1996 - 10	1990 - 10	1992 - 07	1994 - 10	1996 - 10
AN ₂	14.12	17.48	17.68	18.79	1.137	1.221	0.644	0.958
AN ₁	13.91	19.72	18.90	19.17	1.042	0.963	0.456	0.910
AN ₀	14.36	17.75	15.99	19.66	1.117	1.019	0.729	0.811
BN ₂	10.21	10.13	8.97	10.09	1.390	1.606	1.382	1.593
BN ₁	9.81	10.05	8.46	10.07	1.681	1.679	1.271	1.509
BN ₀ (对照 Control)	9.46	12.09	9.40	9.23	1.600	0.937	1.297	1.600

2.2 土壤腐殖质的数量及其组成的变化

2.2.1 土壤腐殖质数量的变化 从表 5 可以明显看出，施用有机肥，特别是有机肥与无机氮肥配施的处理能显著地提高土壤腐殖质含量，而单施无机氮肥处理，不仅降低了土壤有机质含量（表 1），与试验前（本底值 14.97）比较，在试验过程中，腐殖质量始终没有增加。

2.2.2 活性腐殖质含量及其活化度的变化 能被 KMnO₄ 氧化的腐殖质为活性腐殖质，其占腐殖质重量的百分数称为腐殖质活化度。在 8.5 年露地试验过程中，AN₂、AN₀ 等施用有机肥的处理，活性腐殖质随年份延长而逐渐增加，到 1996 年，分别比试验前（本底值）提高了 52.72 %、41.83 %；而 BN₂ 与对照则随年限延长而逐渐降低，到 1996 年，分别比本底值降低了 5.16 %、9.89 %。同时，施用有机肥处理的腐殖质活化度提高了 10.0 % ~ 12.3 %，而单独施用高量无机氮肥处理，始终在试验前本底值（46.64 %）的水平上下波动，无明显变化（表 5）。

表 5 土壤松结态腐殖质及活性腐殖质含量的变化

Table 5 changes of humus and active humus in extra-humus

处理 Treatment	松结态腐殖质 Humus (g kg ⁻¹)				活性腐殖质 Active humus (%)			
	1990	1992	1994	1996	1990	1992	1994	1996
AN ₂	19.08	20.49	20.81	20.45	52.36	52.07	52.57	52.62
AN ₀	17.52	18.75	19.60	18.74	51.53	51.31	51.48	52.83
BN ₂	15.09	14.55	14.62	14.27	46.72	46.52	47.12	46.37

2.2.3 土壤松结态腐殖质 PQ 值的变化 腐殖质 PQ 值是指松结态腐殖质中胡敏酸所占的比例。与活性腐殖质的变化规律完全一样，比如，AN₂ 处理从 1988 年的 29.97（本底值）增长到 1996 年的 41.40，而 BN₂ 处理几乎与对照一样，则从 29.97 降低到 1996 年的 27.67。

2.3 胡敏酸的化学性质的变化

以 AN₂ 与 BN₂ 比较，前者不仅使菜田土壤腐殖质组成发生变化，即胡敏酸含量的增加，而且胡敏酸的光密度降低（图 1），E₄/E₆（胡敏酸碱溶液在 465 nm 和 665 nm 的光密度比值）比值有所增高（5.257 > 4.549），说明胡敏酸分子中芳香环的缩合度、芳构化度和分子量产生了变化，即施用有机肥处理的胡敏酸的光密度降低及 E₄/E₆ 的升高真正说明土壤胡敏酸分子量变小，芳构化程度降低，活性提高。

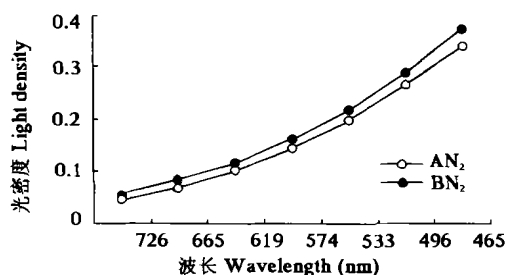


图 1 定位施肥对土壤胡敏酸光学性质的影响

Fig. 1 Effects of fertilizers on optical chemical quality of soil humus acid

3 讨论

菜田土壤的有机碳库的形成与其矿化分解是个极其缓慢的过程, 在本试验的中等肥力土壤 (土壤有机质含量 $24.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 上, 要想达到高度培肥 (土壤有机质含量达到 $3 \sim 4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上) 的程度, 在每年重施有机肥 ($75 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 纯马粪或相当于该用量的有机质含量) 的条件下, 需要经过 10 ~ 15 年的时间。应该指出, 有机肥无机氮肥配施可比有机肥单施提高土壤有机质含量, 而在露地条件下, 单施无机氮肥不但不能增加有机质含量, 反而有所降低, 这与沈善敏提出的在大田作物上的试验结果^[2]不一致, 可能是大田作物 (根荏大) 与蔬菜 (根系弱) 有差别。从空白试验的对照来看, 经过露地 8.5 年, 土壤有机质从 $24.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降到 $21.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 再经过设施 6 年栽培, 土壤有机质质量始终徘徊在 1.90 % 上下, 可以把它大致认定为是在该类土壤上栽培蔬菜 (番茄) 的土壤有机质平衡状态。

如果比较试验的“全程”, 则可发现, 在同样施用有机肥条件下, 露地比设施的有机质积累速度快, 前者比后者平均年增长量加大 1.14 % (AN_2) ~ 2.51 % (AN_0); 而对照 (空白试验) 则是露地比设施下降稍缓, 后者比前者年平均降低速度增大 0.09 % (BN_2) ~ 0.42 % (对照)。可见, 由于设施特定环境的影响, 在同等施肥条件下, 设施的培肥速度要慢于露地。土壤有机质数量的表观消长变化还与有机质矿化率有关, 根据空白试验计算 (氮通量法), 在本试验下 14.5 年的有机质年矿化率在 7.0 % ~ 11.1 % 的范围, 露地平均为 8.67 %, 设施平均为 9.54 %。这一方面说明设施内有机质质量增长速度低于露地的原因之一, 另外也可看出在肥力较高的菜田土壤上, 有机质矿化率明显高于一般土壤^[8]。在偏施氮肥基础上, 配施磷、钾肥可以在一定程度上增加土壤有机质含量, 但必须是以连年施用有机肥为前提, 否则没有明显效果。

土壤肥力的基础是土壤有机质, 而有机质对培肥的作用表现于“量”与“质”两个方面。随着有机肥特别是有机无机肥配施的施用年限延长, 土壤易氧化有机质的含量逐渐增加, K_0s 有所下降, 有机质的品质不断改善。土壤有机质氧化稳定系数高低关系有机质的矿化、养分的释放以及土壤肥力, 最终影响作物产量, 可以作为有机质质量衡量的一项重要指标^[9]。在本试验条件下, 易氧化有机质量与蔬菜产量的相关系数达到极显著水准 $r = 0.763^{**}$ ($n = 10$)。长期施用有机肥或有机无机肥配施培肥土壤的基本特点不仅是土壤有机质量的不断提高, 同时提高了土壤松结态腐殖质含量, 提高胡敏酸的比例 (PQ 值增大), 促进土壤腐殖化进程; 提高胡敏酸的 E_4/E_6 值, 降低土壤胡敏酸的分子量及芳构化程度, 改善有机质的品质, 不仅可以保持土壤始终存在一定数量的活性有机质, 改善土壤的养分供应, 协调土壤肥力的各个因子, 同时也能作为作物生长发育提供良好的土壤环境。可见, 有机栽培的真正而全面的效果, 并不在于有机肥施用的当年或近期, 而是连年施入有机肥饲养微生物, 加上整套的精耕细作制度逐步提高土壤肥力与改善土壤环境, 使菜田土壤达到温、润、肥、厚的程度, 这就是我国菜农在菜田土壤培肥方面的基本经验^[10], 在我国蔬菜生产进入产业化阶段并向现代化发展的过程中, 切切不可丢掉我国传统农业中有机农业的精华, 不应将施用有机肥当作一般的施肥方法或技术, 而是土壤培肥这项基础性工作的可靠、持续发展的有效途径, 应将其与现代科学与技术结合起来, 创造出具有我国特色的现代化蔬菜产业。

参考文献:

- 1 葛晓光. 蔬菜生态学. 北京: 中国农业出版社, 1996. 199 ~ 203
- 2 沈善敏. 国外的长期肥料试验. 土壤通报, 1984, (2): 85 ~ 91
- 3 梁成华. 蔬菜保护地土壤肥力特征及其调控研究: [博士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 1996. 11 ~ 18
- 4 葛晓光, 王晓雪, 张 昕, 等. 长期偏施氮肥对露地土壤—蔬菜生态系统变化的影响. 园艺学报, 2000, 27 (4): 263 ~ 268
- 5 袁可能. 土壤有机质复合体的研究. 土壤学报, 1963, 3: 286 ~ 292
- 6 南京农学院主编. 土壤农化分析. 北京: 农业出版社, 1982. 33 ~ 40
- 7 穆 林. 不同施肥与栽培条件对产量及土壤有机质演变的影响: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 1996. 45 页
- 8 金耀青, 张中原. 配方施肥方法及其应用. 沈阳: 辽宁科技出版社, 1993. 100
- 9 张继宏, 谭世文, 刘晓砚, 等. 不同肥力土壤有机质氧化稳定性和有机磷组分的研究. 土壤通报, 1988, (2): 60 ~ 62
- 10 葛晓光. 菜田土壤与施肥. 北京: 中国农业出版社, 2002. 25