

长期施肥条件下菜田—蔬菜生态系统变化的研究

(II) 土壤理化性质的变化

葛晓光 张恩平 高 慧 张 昕 王晓雪

(沈阳农业大学园艺学院, 沈阳 110161)

摘 要: 随着土壤有机质含量的提高, 大约占土壤全氮含量 95% 的可矿化氮量也随之增加, 土壤供氮能力增强; 而单施氮素化肥以及在此基础上配施磷钾肥的处理, 土壤中氮库难以扩大, 碱解氮的含量急剧下降。在设施内长期施肥后土壤全磷富集, 钾素不足。长期偏施过量无机氮肥加速了土壤的酸化及交换性盐基数量的下降及其比例的失调, 设施栽培长期施用有机肥以及氮磷钾配施可阻止其进程。土壤物理性退变是从量变到质变的长期过程, 对土壤的破坏性很大。

关键词: 蔬菜; 定位施肥; 设施栽培; 土壤; 理化性质

中图分类号: S 63; S 606; S 181 **文献标识码:** A **文章编号:** 0513-353X (2004) 02-0178-05

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

(II) Changes of Physical and Chemical Nature of Vegetable Soil

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

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

Abstract: With the increase of soil organic matter, the mineralizable nitrogen, which is about 95 percent of soil total nitrogen, was also increased, thus soil can provide more nitrogen. In the treatments with application of nitrogen alone or combination with phosphorous and potassium, it was difficult for the N sink to be enlarged, so the available nitrogen was decreased quickly. Long-term fertilization trial in protected field showed that the soil was rich in total phosphorus and lack of potassium. Excessive and long-term application of inorganic nitrogen alone accelerated the progress of soil acidization, decreased the exchangeable bases and their proportion was in disorder. Such problems can be prevented by application of organic matter, protected cultivation and combination with phosphorus and potassium. Soil physical degradation was a long-term progress from quantity change to quality change and it was destructive to soil productivity.

Key words: Long-term fixed fertilization; Protected vegetable cultivation; Soil mineral nutrients; Soil acidization; Soil exchangeable base

长期施肥试验和一般的肥料试验不同, 不仅要求获得肥料效果的信息, 更重要的是要求掌握不同施肥条件下土壤理化性质的变化及其所产生的影响。本文是将 14.5 年的试验结果中有关土壤的养分、pH 值、盐基饱和度、容重以及孔隙度等理化性质的变化进行总结。国内有关菜田土壤理化性质的调查报告较多^[1,2], 但未见长期施肥试验的报道。

1 材料与方法

试验作物同前文^[3]。试验前 (1988 年) 土壤的有机质含量 $24.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮含量 $1.164 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷含量 $1.374 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $86.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 $70.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 56.14

收稿日期: 2003-08-14; 修回日期: 2003-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (39970515)

$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 交换性盐基总量 $14.56 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, 交换性钙含量 $11.43 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, 交换性镁含量 $2.59 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 值 6.75。

试验过程及处理同前文^[3]。

每年茬后用土钻按 5 点取样法取 0~20 cm 耕层土样, 于室内风干后过 1 mm 筛备用。有机质用重铬酸钾容量法; 土壤全 N 采用催化剂消煮法; 土壤碱解氮采用碱解扩散法; 土壤全磷采用 $\text{HClO}_4 - \text{H}_2\text{SO}_4$ 消煮—钼锑抗比色法; 土壤有效磷采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaHCO}_3$ 浸提—钼锑抗比色法; 土壤速效钾采用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_4\text{OAc}$ 浸提—火焰光度法; 土壤交换性 Ca、Mg 采用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_4\text{OAc}$ 交换土壤—原子吸收分光光度计法; 土壤交换性 K、Na 采用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_4\text{OAc}$ 交换土壤—火焰光度计法, 土壤交换性盐基总量为交换性 Ca、Mg、K、Na 之和; 土壤 pH 采用 pH 计法; 土壤容重与孔隙度采用环刀法。

2 结果与分析

2.1 土壤矿质养分的变化

土壤矿质养分的变化主要受土壤有机质与矿质肥料施用两个方面的影响。

2.1.1 土壤有机质对矿质养分变化的影响 根据试验资料计算, 土壤有机质含量无论与土壤全量、速效养分含量和易氧化有机质量以及土壤有机质的吸肥保肥能力均有极其密切的关系, 它们之间的相关关系均达到极显著水平 (表 1)。露地前 5 年试验的土壤矿质营养量的变化已经发表^[4], 以下主要介绍后 9.5 年, 特别是后 6 年设施栽培条件下矿质营养的变化。

2.1.2 土壤氮素的变化 经过 6 年的设施栽培

(1997~2002 年, 以下同), 土壤全氮的增长率为: 有机肥偏施氮肥各处理为 35.59%~63.33%, 单施氮素化肥的各处理为 1.77%~29.01%; 配施磷、钾的各处理全氮含量均有不用程度的增长, 有机肥配施各处理增长 53.81%~67.62%, 单施无机氮肥配施的增长 9.76%~23.23%; 而碱解氮的变化情况则与全氮不同, 有机肥偏施氮肥各处理的增长率为 2.07%~8.47%, 单施无机化肥的各处理却降低了 26.62%~32.48%; 配施磷、钾的各处理碱解氮的变化规律也基本相同, 有机肥配施的各处理增长率为 4.27%~15.66%, 而单施无机氮肥配施的各处理则下降 24.46%~34.98%。

从土壤可矿化氮的变化来看, 有机肥高氮处理 (AN_2) 比有机肥不施氮处理 (AN_0) 增长 38.53%, 而单施无机氮肥处理 (BN_2) 与对照相比, 降低了 27.23%。与相应的有机肥处理比较, AN_2 比 BN_2 提高了 202.17%, AN_0 比 BN_0 提高了 74.66%。

2.1.3 土壤磷素的变化 经过 6 年的设施栽培, 土壤全磷的增长率为: 有机肥偏施氮肥各处理为 68.38%~85.89%, 单施无机氮肥的各处理为 45.98%~56.20%; 配施磷钾肥的各处理全磷含量也都有较大幅度的增长, 尤以配施磷肥的处理更为显著, 有机肥配施磷钾肥的增长率为 75.47%~182.4%, 单施无机氮肥配施处理的增长率为 49.41%~151.2%。从有效磷的增长情况来看, 有机肥偏施氮肥各处理增长率为 53.37%~123.04%, 单施无机肥各处理为 4.88%~28.29%; 有机肥配施磷钾肥的各处理增长幅度为 60.45%~202.50%, 无机氮肥配施的为 -13.57%~144.08%, 其中配施磷肥的各处理, 增长率都处于高位。

2.1.4 土壤钾素的变化 经过 6 年的设施栽培, 土壤速效钾增长率为: 有机肥偏施氮肥处理为 9.93%~14.41%, 单施无机氮肥各处理为 -25.46%~-41.18%; 配施磷钾肥的各处理中, 有机肥

表 1 土壤有机质与土壤肥力的相关

Table 1 The correlation between soil organic matter (O. M.) and soil fertility (n=10)

指标 Index	有机质含量 Content of O. M.	易氧化有机质量 Liabile oxidizing organic matter
全氮含量 Total N	0.946**	0.942**
碱解氮含量 Alkaline hydrolysis N	0.889**	0.847**
可矿化氮量 Mineralized N	0.844**	0.865**
全磷含量 Total P	0.814**	0.864**
有效磷含量 Available P	0.969**	0.961**
缓效钾含量 Slowly available K	0.916**	0.962**
速效钾含量 Available K	0.965**	0.982**
土壤阳离子代换量 CEC	0.865**	0.858**

配施的增长 6.64% ~ 32.26%，无机氮肥配施的均为负增长（-1.88% ~ -41.14%）。至 2002 年，偏施氮肥处理的土壤的速效钾含量发生了很大的变化。有机肥的 3 个偏施氮肥处理极显著地高于无机肥的 3 个处理。而 AN_1 、 AN_2 处理极显著地高于 AN_0 处理， AN_1 又显著地高于 AN_2 处理，无机肥的 3 个处理之间均没有达到显著性差异。配施磷、钾肥后，至 2002 年，土壤的速效钾含量也发生了很大的变化。有机肥处理中，APK 极显著地高于 ANP、ANK，而 ANP 又显著地高于 ANK。无机肥处理中，BNK、BPK 极显著地高于 BNP，而 BNK 与 BPK 之间差异没有达到显著性水准。无机氮肥配施的各处理为负增长，其中未配施钾素处理降低更为显著。

2.2 土壤 pH 值的变化

从图 1 (A) 看出，各个处理的 pH 值随年份变化总体上都略有波动。不同年份间的 pH 值， AN_2 总是处于最低水平， AN_0 处于最高水平，而 ANPK 的 pH 值波动较大，即在有机肥条件下随施氮量的增加 pH 值逐渐下降，但施用有机肥可以减弱无机氮肥对土壤的酸化作用。6 年平均 pH 值大小为： $AN_0 > ANPK > AN_1 > AN_2$ 。从图 1 (B) 可见， BN_2 只有在 1998 年时高于 BN_0 ，其它年份均处于最低水平，表明不施有机肥条件下随施氮量的增加土壤 pH 值呈下降趋势，而 BN_0 、 BN_1 之间差异不明显，BNPK 处理要稍高于 BN_2 处理。6 年平均 pH 值大小为： $BN_0 > BN_1 > BNPK > BN_2$ 。进一步比较有机肥处理与无机肥处理间的差异表明：各年平均值均大于无机氮肥处理，其中 1997 年有机肥与无机氮肥处理之间平均差值为 0.7 个单位。

2.3 土壤交换性盐基数量的变化

2.3.1 土壤交换性盐基总量的变化 在设施栽培连续有机肥无机氮肥配施条件下，平均交换性盐基总量为 $AN_1 > AN_0 = ANPK > AN_2$ ；连续施用无机氮肥情况下，交换性盐基总量平均值为 $BN_1 > BN_0 = BNPK > BN_2$ 。进一步比较有机肥处理与无机肥处理间的差异表明：除 1998 年外，有机肥处理的各个年份平均值均大于无机氮肥处理的各个年份平均值，至 2001 年其差值为 $4.356 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.3.2 土壤交换性钙、镁的变化 从表 2 看出，交换性 Ca 的含量随不同施氮量而变化，每年均是 BN_2 含量最少，最小的 2001 年仅为 $7.15 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，比同年份的 AN_1 降低 $10.73 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。2001 年分别以 AN_1 、 BN_1 处理最高，而 ANPK 的含量比 BNPK 的含量高，一方面说明施有机肥可以增加土壤 Ca 的含量，另外，也可证明，适当施用无机 N 肥可以提高土壤交换性 Ca 含量，而过量施用 N 肥可使土壤交换性 Ca 含量降低。交换性 Mg 含量的变化是随施 N 量的增加而逐年下降，施用有机肥的处理要高于未施有机肥的处理，ANPK 处理交换性 Mg 含量介于 AN_0 与 AN_1 之间，BNPK 也有类似的变化趋势。至 2001 年， AN_1 比 BN_2 交换性 Mg 含量增高了 $2.48 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

从交换性 Ca、交换性 Mg 占盐基总量的百分率来看：交换性 Ca 含量占交换性盐基总量的百分率变动在 58.59% ~ 71.45% 范围内。有机肥条件下，随施 N 量的增加而略有增加，过量施用 N 肥反而下降， AN_0 、 AN_1 、 AN_2 三个处理平均值为 62.33%、65.29%、64.27%，即 $AN_1 > AN_2 > AN_0$ ，而 ANPK 处于三者之间。无机肥条件下的变化与有机肥的变化规律相似，即 $BN_1 > BN_2 > BN_0$ ，而 BNPK $> BN_2$ 。交换性 Mg 含量占交换性盐基总量的百分率变动在 25.54% ~ 36.04% 范围内。有机肥条件下，随施 N 量的增加而下降， AN_0 、 AN_1 、 AN_2 三个处理平均值分别为 32.23%、29.87%、31.12%，即 $AN_0 > AN_2 > AN_1$ 。无机肥条件下表现为 $BN_2 > BN_0 > BN_1$ 。

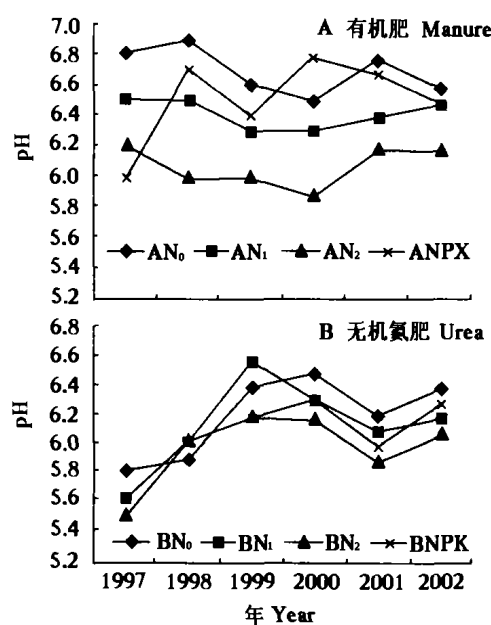


图 1 长期施肥对土壤 pH 值的影响

Fig. 1 Effect of fertilization on soil pH

表 2 不同施氮水平土壤交换性钙、镁的含量

Table 2 Effects of fertilization on exch. Ca and exch. Mg in soil

处理 Treatment	1997				1999				2001			
	Ca ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Ca^{2+} 占盐 基总量% % of base	Mg ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Mg^{2+} 占盐 基总量% % of base	Ca ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Ca^{2+} 占盐 基总量% % of base	Mg ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Mg^{2+} 占盐 基总量% % of base	Ca ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Ca^{2+} 占盐 基总量% % of base	Mg ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Mg^{2+} 占盐 基总量% % of base
AN_0	12.00	62.81	5.96	31.20	11.64	65.56	5.45	30.70	11.51	62.37	5.82	31.54
AN_1	13.04	66.88	5.59	28.67	10.90	63.91	5.17	30.32	17.88	70.49	6.41	25.27
AN_2	10.70	64.08	5.12	30.66	13.59	69.11	5.27	26.80	13.18	67.43	5.17	26.45
ANPK	11.53	64.08	5.15	28.62	13.34	65.54	6.11	30.02	10.25	59.09	5.79	33.38
BN_0	12.03	67.99	5.04	28.49	11.42	64.32	5.48	30.87	10.14	62.84	4.97	30.80
BN_1	12.34	69.08	4.92	27.54	10.07	65.97	4.32	28.30	13.44	68.17	4.92	24.95
BN_2	8.34	63.69	4.19	32.00	7.81	60.39	4.23	32.65	7.15	58.59	3.93	32.20
BNPK	11.00	67.25	4.70	28.74	9.56	65.75	4.53	31.16	9.71	63.73	4.31	28.29

2.4 土壤物理性的变化

经过长期的定位施肥处理, 到 2002 年, 土壤容重及孔隙度发生比较明显的变化。

从图 2 可以看出, 经过了多年的连续施肥, 施有机肥处理的土壤容重在 $1.115 \sim 1.290 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 范围内, 不施有机肥的处理均高于施有机肥的处理 ($1.288 \sim 1.429 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), BN_1 处理达到了最高值, 表明长期施无机肥加速了土壤的板结。而在无机肥处理中 BNPK 的容重较低, 表明在同等条件下施用无机肥时, NPK 配合施用对改善土体环境有一定的作用。

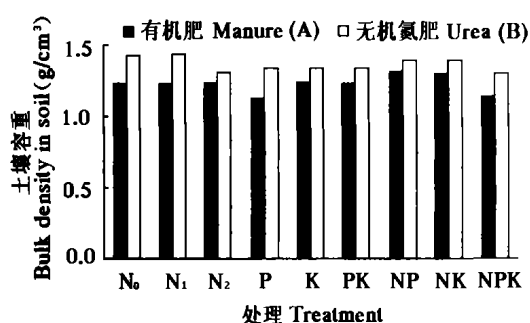


图 2 长期施肥对土壤容重的影响

Fig. 2 Effect of long-term fertilizers on bulk density in soil

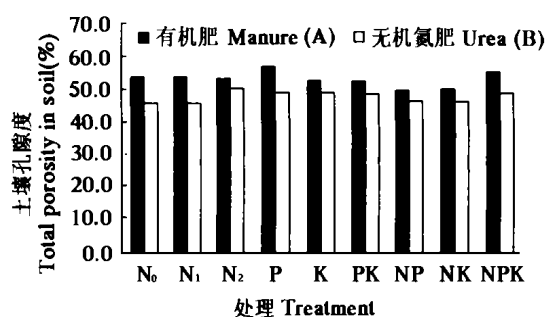


图 3 长期施肥对土壤总孔隙度的影响

Fig. 3 Effect of long-term fertilizers on total porosity in soil

从图 3 看出, 有机肥处理的土壤孔隙度均大于无机肥的相对应处理, 且均在 50% ~ 56% 的范围内; 无机肥处理仅有 BN_2 、BNPK 两个处理的土壤孔隙度较大, 分别为 51.14%、51.41%, 其余的处理则较之更低, 这进一步说明长期施用有机肥对土壤物理性的改善作用是很大的。

3 讨论与结论

土壤有机库的大小直接影响土壤的养分供给能力与供给量。在土壤有机质量基本稳定的条件下, 可以通过有机质含量大致计算出土壤的养分含量。试验中利用前 5 年 (10 茬) 的 100 对数据 (3 次重复平均) 进行回归分析得出以下数学模型: $Y = (-22.7021 + 2.1504X)/X$, Y 为土壤全氮含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), X 为土壤有机质含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), $r=0.7028^{**}$; $Y = (-34.5873 + 2.606X)/X$, Y 为土壤全磷含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), X 为土壤有机质含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), $r=0.8779^{**}$; 土壤有机质含量高低也决定土壤可矿化氮量的大小, 相关方程为: $Y (\text{可矿化氮量}) = 299.9 + 150.6X (\text{有机质含量})$, $r=0.844^{**}$ ($n=9$); 土壤可矿化氮量与土壤全氮及碱解氮的相关方程为: $Y (\text{可矿化氮量}) =$

$-225.29 + 291.89X$ (土壤全氮量), $r = 0.9534^{**}$ ($n = 9$); Y (可矿化氮量) $= -154.9 + 4.17X$ (碱解氮量), $r = 0.9281^{**}$ ($n = 9$)。可见, 随着土壤有机质含量的提高, 大约占土壤全氮含量 95% 的可矿化氮量也随之增加, 说明土壤供氮能力的增强; 与之相反, 单施氮素化肥以及在此基础上配施磷钾肥的处理, 由于有机质量偏低, 土壤供氮能力大大下降。试验资料指出, 长期单独施用氮素化肥的土壤中 N 库难以扩大, 碱解氮的含量急剧下降, 说明无机氮肥的施用可提供氮素供给蔬菜的需要, 但对提高土壤的供氮作用很小。在本试验中, 随着年份的增加, 各个处理的土壤全磷含量均表现出增加的趋势。长期偏施 N 肥条件下, 有机肥处理随施 N 量的增加而有所下降, 增加量最少的 AN_0 处理 6 年内还增加了 68.38%; 而无机肥处理随施 N 量的增加而表现为逐渐增加, BN_2 6 年内增加了 56.20%。这充分说明在设施内长期施肥后土壤全磷明显富集, 从而造成土壤养分的极度不平衡。配施 P、K 肥后, AP 处理土壤全 P 的增长率达到了 182.44%。如果从当年的养分平衡来看, 除了施磷的各处理外, 其余均表现亏缺; 这说明磷素在菜田中的富集是一个过程, 并非施入一次磷肥就能保证多年的作物吸收, 而当富集达到一定量时, 即使不连续供给磷肥, 也不会明显影响作物的产量。偏施 N 肥的有机肥处理, 土壤的速效 K 有一定的增长, 而单施无机氮肥的各处理则全面降低, 最大降低程度可达 40% 以上。配施 P、K 肥后, 除了配施钾肥处理有明显的增长外, 其它的有机肥处理均增加量不大, 而单施无机氮肥的各处理, 配施后钾素仍然全面降低, 即使配施钾素的处理, 也有比较明显的下降。说明在设施蔬菜栽培条件下, 钾素不足是其突出的特点。在栽培条件下, 钾素的不足或过量往往不像氮素那样敏感而产生毒害, 因此钾素的危害就容易被掩盖。在钾素作用的发挥上, 必须注意钾肥的施用量与氮钾的比例两个方面。依据本研究定位试验及盆栽试验资料, 从吸收量来看, N:K 以 1:1.12 ~ 1.33 为宜; 从施肥角度来看, 以 1:1.45 为宜。

长期偏施过量无机 N 肥加速了土壤的酸化, 交换性盐基总量降低, 但与栽培环境有密切关系, 设施栽培下得到一定程度的缓解进一步证明淋溶是露地栽培中促使土壤酸化的主要原因之一^[6]。另外, 到 2002 年, ANPK、BNPK 两个处理的 pH 值与 AN_0 、 BN_0 相接近, 说明不论是否施用有机肥, 氮磷钾配施对防止土壤酸化都具有一定的作用。可以认为, 施用有机肥, 设施栽培以及氮、磷、钾配施可以减弱土壤的酸化进程。E. W. Russell (1973) 认为, 北温带肥沃农田的土壤交换性盐基最佳组成是 Ca^{2+} 80%, Mg^{2+} 15%, 而设施栽培下的 5 年中 (1997 ~ 2001 年), 各处理 Ca^{2+} /盐基总量为 58.59% (BN_2) ~ 71.45% (BNPK), Mg^{2+} 的比例为 25.54% (BNPK) ~ 36.04% (AN_2), 而 1992 年 (露地栽培试验第 4 年), 各处理交换性 Ca^{2+} /盐基总量为 72.36% ~ 80.74%, 交换性 Mg^{2+} 比例为 14.90% ~ 23.26%, 如果说露地试验期间, 土壤盐基组成还基本上保持最佳比例, 随着栽培时间的延长, 特别是转入设施栽培后, 比例逐渐失调, 这说明经过多年的偏施 N 肥以后, 土壤的供钙能力下降, 造成了土壤结构的破坏。

经过 14.5 年的施肥定位试验, 有机肥处理的容重明显小于无机肥的各个处理, 二者相差 $0.135 g \cdot cm^{-3}$; 而土壤孔隙度的变化与之相反, 二者相差 3.73%, 其中 BN_1 处理的土壤容重已经达到了 $1.429 g \cdot cm^{-3}$ 。多年施肥对土壤物理性变化的影响表明, 土壤肥力发生了质的改变, 土壤板结, 通气性差, 蔬菜生育与产量以及产品品质均受到严重的影响, 从生态系统的稳定性来看, 土壤劣变是经过一个较长的由量变到质变的过程, 一旦土体结构遭到破坏, 恢复过程也必然很长。

参考文献:

- 1 王雪冲. 菜田土壤肥力特征的变化及其栽培措施. 土壤通报, 1985, 16 (6): 180 ~ 183
- 2 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
- 3 葛晓光, 张思平, 张 昕, 等. 长期施肥条件下菜田-蔬菜生态系统变化的研究 (I). 园艺学报, 2004, 31 (1): 34 ~ 38
- 4 葛晓光, 王晓雪, 付亚文, 等. 长期定位施用氮肥对菜田土壤肥力变化的影响. 中国蔬菜, 1997, 5: 1 ~ 6
- 5 张恩平. 番茄钾营养的作用及其机理的研究: [博士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2003. 68 ~ 77
- 6 嶋田永生. 野菜の栄養生理と土壤. 東京: 农山渔村文化协会, 1976. 23 ~ 35