DOI:10.15886/j.cnki.rdswxb.2014.04.006

文章编号: 1674 - 7054(2014)04 - 0339 - 09

2种施肥模式对次生盐渍化温室土壤及蔬菜养分含量的影响

郇恒福[1,2],周健民[2],段增强[2],王火焰[2],高艳芳[2]

(1. 中国热带农业科学院 热带作物品种资源研究所/农业部华南作物基因资源与种质创制重点实验室 & 农业部木薯种质资源保护与利用重点实验室,海南 儋州 571737; 2. 中国科学院 南京土壤研究所/土壤与农业可持续发展国家重点实验室,江苏 南京 210008)

摘 要: 通过大田试验,研究了2种施肥模式对次生盐渍化温室土壤、蔬菜养分的影响。结果表明,测土施肥(STFP)能平衡土壤养分,而传统施肥(TFP)土壤中已严重累积的硫和磷的含量继续增加,养分不平衡的状况更趋严重。TFP芹菜的地上部含氮量明显高于其他处理,而各处理蔬菜地下部的含氮量无显著差异($P > 0.05$);各处理的不结球白菜的含磷量差异显著($P < 0.05$),TFP的最高,STFP的最低,而芹菜的无显著差异;STFP蔬菜的地下部含钾量均显著高于对照($P < 0.05$),而3处理间蔬菜的地上部含钾量差异不显著($P > 0.05$);3处理均未影响蔬菜钙镁的含量,也未影响2种蔬菜地上部硫的含量,而STFP不结球白的地下部含硫量明显高于其他处理;STFP的蔬菜产量高于其他处理,其他处理间无显著差异($P > 0.05$)。结果说明,TFP的钾含量相对偏低,其他大中量元素含量均能满足蔬菜生长的需要,并且磷、硫含量过高;而STFP能根据温室土壤养分与平衡状况,通过降低磷、硫的施用,增加钾的施用来不断调整施肥组成,能有效遏制温室土壤次生盐渍化的发生与发展,改善温室土壤的蔬菜生长环境并能提高蔬菜产量,是一种优良的调控与持续利用次生盐渍化温室土壤的措施。

关键词: 次生盐渍化; 温室土壤; 测土施肥; 传统施肥; 蔬菜产量; 养分含量

中图分类号: 文献标志码: A

根据第2次全国农业普查主要数据公报[1]显示,2006年末,全国温室面积8.1万 hm^2,大棚面积46.5万 hm^2,中小棚面积达23.1万 hm^2。近年来,设施栽培业在我国得到了迅速发展,但设施栽培业的发展也产生了以土壤次生盐渍化为主要特征的连作障碍,严重制约了设施栽培产业的健康与持续发展。肥料养分离子残留过多是土壤次生盐渍化产生的直接原因,有研究表明,次生盐渍化温室土壤中绝大多数的盐分离子都是养分离子,并且各养分离子在次生盐渍化形成与发展中的贡献是不同的[2]。目前,国内外关于温室土壤次生盐渍化,特别是土壤养分变化与盐渍化之间关系进行了很多研究。除了进行次生盐渍化的产生与发生、发展规律的研究外,还提出了一些温室土壤次生盐渍化的防治措施。对于次生盐渍化的治理,主要采用夏季揭棚[3-4]、工程洗盐[5-6]、有机物覆盖[7-8]、种植填闲作物[9]等措施,虽然很多研究[2,10-12]均提出测土施肥是防治温室土壤盐渍化的措施之一,但针对不同施肥模式对次生盐渍化温室土壤养分与作物养分含量变化影响及其机理的研究还鲜有报道。笔者通过研究2种施肥模式对次生盐渍化温室土壤肥力以及作物养分含量变化的影响,旨在寻找治理温室土壤次生盐渍化的有效途径。

1 材料与方法

1.1 试验地概况 试验地点位于江苏省宜兴市丁山镇农业科技观光园(31°14′N,119°53′E),年降水量

收稿日期: 2014 - 10 - 22
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(30230250);中国科学院知识创新工程项目(KZCX3 - SW - 439);现代农业人才支撑计划项目;中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(1630032014029)
作者简介: 郇恒福(1976 -),男,博士,主要从事土壤化学方面的研究. E-mail: hengfu. huan@163. com
通信作者: 周健民(1956 -),男,研究员,博士生导师,主要从事土壤化学方面的研究. E-mail: jmzhou@issas. ac. acn;
段增强,男,研究员,博士生导师,主要从事土壤化学与环境科学方面的研究. E-mail: zqduan@issas. ac. acn

约为 1 177 mm，年平均温度 15.7 ℃，土壤为粘质砂壤土，俗称湖白土[13]，地下水深度 60～80 cm。供试的大棚的种植年限为 5 年，土壤的电导率为 0.51 mS·cm^{-1}，已经发生过次生盐渍化。

1.2 试验材料 不结球白菜矮脚黄(*Brassica campestris* L. *ssp. chinensis* Makino.)、芹菜(*Apium graveolens* L.)种植与处理情况见表 1。

表 1 试验处理与蔬菜种植情况

Tab. 1 Experiment treatment and the vegetables planted

处理 Treatment	施肥模式 Fertilization pattern	种植的蔬菜 Vegetables planted
1	传统施肥 Traditional fertilization pattern(TFP)	不结球白菜矮脚黄 *Brassica campestris* L. *ssp. chinensis* Makino
	传统施肥 Traditional fertilization pattern(TFP)	芹菜 *Apium graveolens* L.
2	对照 CK	不结球白菜矮脚黄 *Brassica campestris* L. *ssp. chinensis* Makino
	对照 CK	芹菜 *Apium graveolens* L.
3	测土施肥 Soil test based fertilization pattern (STFP)	不结球白菜矮脚黄 *Brassica campestris* L. *ssp. chinensis* Makino
	测土施肥 Soil test based fertilization pattern (STFP)	芹菜 *Apium graveolens* L.

1.3 试验处理 试验在 3 个已发生次生盐渍化的大棚内(36 m×6 m 的标准钢架棚，南北走向)进行。各大棚每个处理又种植不结球白菜矮脚黄和芹菜，于 2007 年 10 月定植，采用随机区组设计，每个大棚为 1 个试验区组，设 6 个试验小区，详见表 1。小区大小为 10 m×2 m，小区之间用聚氯乙烯(PVC)板隔离，大棚四周用聚乙烯薄膜隔离，防止养分和盐分离子在小区间的相互流动，PVC 板和薄膜埋深 50 cm，露出地面 15 cm。试验设 3 个处理，分别为测土施肥处理(STFP)、传统施肥处理(TFP)和对照(CK)。

3 个处理均施用 4.50 t·hm^{-2}有机肥($N+P_2O_5+K_2O \geq 5\%$)。然后，在 TFP 中，根据当地使用肥料的情况，施用 1.16 t·hm^{-2}的硫酸钾复合肥(含 $N:P_2O_5:K_2O=15\%:15\%:15\%$，总养分含量≥45%)、1.16 t·hm^{-2}的钙镁磷肥(含磷量≥12%)和 0.23 t·hm^{-2}的尿素；在 STFP 中，根据章永松等[14]的研究结果，为了使土壤有效氮的含量达到 300 mg·kg^{-1}、速效钾的含量达 240 mg·kg^{-1}，分别施用 16.67 kg·hm^{-2}尿素和 193.33 kg·hm^{-2}硝酸钾(为防止陪伴离子硫酸根离子的带入，未施用硫酸钾复合肥)来补足土壤有效钾的含量，肥料的 60% 作为基肥，其余的 40% 作为追肥施用。由于土壤有效磷的含量已经超过推荐施肥量(90 mg·kg^{-1})，所以不再施用磷肥。CK 中未再施用肥料。

1.4 试验方法 分别于 2008 年 2 月和 3 月收获不结球白菜矮脚黄和芹菜后进行取样。根据土壤分层和地下水情况取 0～20 和 20～30 cm^2 个土层的样品，每个样品用 10 个土样来制作混和样。取样后，每个土样都封存在塑料袋中，混匀后取一部分鲜土样留作分析硝态氮用，剩余的土样风干后根据分析项目的要求过不同孔径的尼龙筛，用于分析土壤有效养分等理化性质。

1.5 测定方法 土壤有效氮(硝态氮)用 2 mol·L^{-1} KCl 浸提[15]，采用流动分析仪测定浸提液中的硝态氮含量[16]。由于旱地土壤中绝大多数的有效氮是硝态氮[17-18]，所以将土壤硝态氮的含量作为土壤有效氮的含量；有效磷用 0.5 mol·L^{-1} $NaHCO_3$(pH8.5)浸提，浸提液中的磷用钼锑抗比色法测定[16]；土壤速效钾用 1 mol·L^{-1} NH_4OAC (pH7)浸提，用火焰光度计测定浸提液中的钾；土壤交换性钙、镁用 1 mol·L^{-1} NH_4OAC(pH7)淋洗土样，用 ICP-AES 测定淋洗液中钙、镁的含量，测得的值经过换算即为土壤交换性钙、镁的含量[16]；土壤有效硫用 $Ca(H_2PO_4)_2$-HOAC 浸提，用比浊法测定浸提液中硫的含量[16,19]；土壤电导率采用电导率测定仪测定[16]。

1.6 数据处理 用 MS-Excel 进行数据的计算和处理，用 SAS 8.2 统计软件中的方差分析程序对处理后的数据进行统计分析。

2　结果与分析

2.1　2 种施肥模式对土壤养分状况的影响

2.1.1　**对大量元素的影响**　氮肥是设施栽培产业中用量最大的肥料之一,施用超量氮肥造成了氮在温室土壤中残留量的大幅上升,是温室土壤养分含量不断增加的最主要因素。从图 1 可知,TFP 的含量最高,STFP 的含量最低。与 CK 相比,STFP 的土壤含氮量略有下降,但差异不显著($P>0.05$);STFP 的土壤有效氮含量比 TFP 的约低 81%($P<0.05$),说明 STFP 能比 TFP 明显减少氮素在土壤的残留;TFP 土壤含氮量增加了约 52%($P<0.05$),说明 STFP 会增加氮素在土壤中的残留。对于 20 ~ 30 cm 土层,CK 的最低,TFP 的最高,STFP 的居中,但三者间差异不显著($P>0.05$),说明 3 种施肥模式还没有对深层土壤中的含氮量产生影响,它们对土壤有效氮含量的影响主要还是在表层土壤。

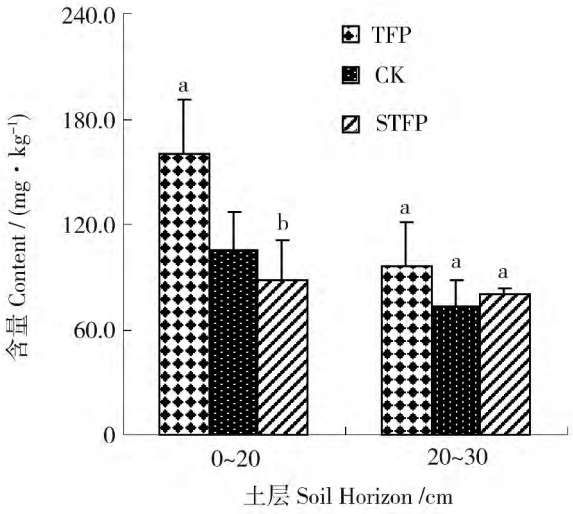

图 1　2 种施肥模式对温室土壤有效氮含量的影响
图中同一土层处理间标注不同字母表示处理间存在显著差异(显著水平 $\alpha=0.05$),相同字母表示处理间无显著差异,下同

Fig. 1　Effects of two fertilization patterns on the soil available nitrogen content in the greenhouse
The treatments in the same soil horizon with different letters mean they are significantly different at a significance level of $\alpha=0.05$; those with the same letters mean they are not significantly different, similarly hereinafter

作为肥料三要素之一,磷肥也是设施栽培产业中施用量比较大的肥料,很多研究表明,温室土壤中的有效磷含量大幅上升[2,6,20]。从图 2 可知,对于 0 ~ 20 cm 土层,TFP 的土壤有效磷含量最高,CK 的最低。STFP 的土壤有效磷含量与 CK 之间的差异不显著($P>0.05$);TFP 的土壤有效磷含量约高出 CK 32%($P<0.05$),也高出 STFP 约 30%,差异显著($P<0.05$),说明 TFP 能大幅增加磷在土壤中的残留,而 STFP 不会增加磷在土壤中的残留,同时也说明,与 TFP 相比,STFP 能有效降低磷在土壤中的残留。对于 20 ~ 30 cm 土层,仍是 CK 的最低,TFP 的最高,STFP 的居中,但三者之间差异不显著($P>0.05$),这说明,各处理主要是影响表层土壤中的磷含量,而对深层土壤中的磷含量的影响很小,同时也说明,磷在温室土壤中的移动性很差,残留的磷绝大多数聚集在 0 ~ 20 cm 土层,很难向深层土壤中迁移。

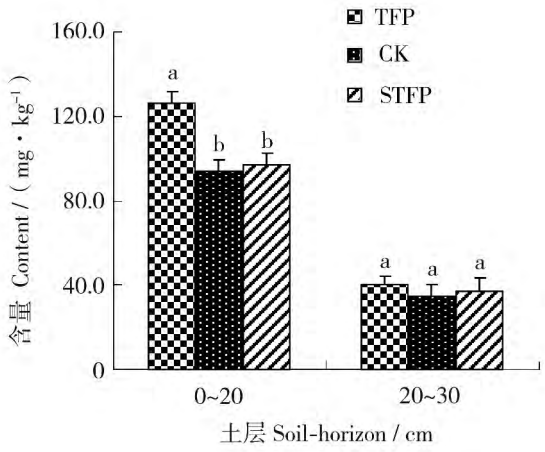

图 2　2 种施肥模式对温室土壤有效磷含量的影响

Fig. 2　Effects of two fertilization patterns on the soil available phosphorus content in the greenhouse

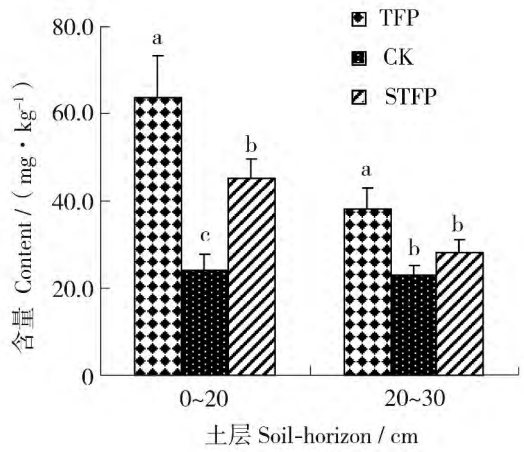

图 3　2 种施肥模式对温室土壤有效钾含量的影响

Fig. 3　Effect of two fertilization patterns on the soil available potassium content in the greenhouse

钾肥也是设施栽培产业中大量使用的肥料，也导致了温室土壤有效钾的含量有所上升。从图 3 可知，对于 0 ~ 20 cm 土层，3 个处理的土壤有效钾的含量不同，TFP 的土壤有效钾的含量最高，高出 CK 约 1.66 倍（$P < 0.05$）；STFP 的土壤有效钾含量高出 CK 约 88%（$P < 0.05$）；TFP 的土壤有效钾含量高出 STFP 约 42%（$P < 0.05$）。对于 20 ~ 30 cm 土层，TFP 的土壤有效钾含量最高，CK 最低，TFP 高出 CK 约 66%（$P < 0.05$）；STFP 的有效钾含量也高于 CK，但差异不显著（$P > 0.05$）；TFP 的含量高出 STFP 约 36%（$P < 0.05$）。实验结果说明，2 种施肥模式钾的施用均过量。

2.1.2 对中量元素的影响 设施栽培业中很少直接施用中量元素肥料，然而，中量元素会伴随着其他肥料的施用带入土壤中，比如钙镁磷肥的施用会增加投入中钙镁的含量，硫酸钾复合肥的施用会带入硫酸根离子，导致土壤中硫含量的增加[2]。从图 4 可知，对于 0 ~ 20 cm 土层，虽然 TFP 的土壤有效钙含量略高于其他 2 个处理，但是 3 种模式处理下的土壤有效钙含量之间没有显著差异（$P > 0.05$）。对于 20 ~ 30 cm 土层，TFP 的土壤有效钙含量最高，CK 的含量最低，TFP 的约高出 CK 40%（$P < 0.05$）；STFP 的略高于 CK，但差异不显著（$P > 0.05$）；TFP 的略高于 STFP，差异不显著（$P > 0.05$）。这说明，虽然 TFP 中施用磷肥的时候带入一定量的钙，但是，由于土壤钙含量的基础值比较高，短期残留在土壤中的钙还不能明显改变土壤中钙的含量，随时间的推移以及施肥次数和施肥量的增加，土壤中残留的钙必然会越来越多，最终必然会使土壤钙含量显著上升。

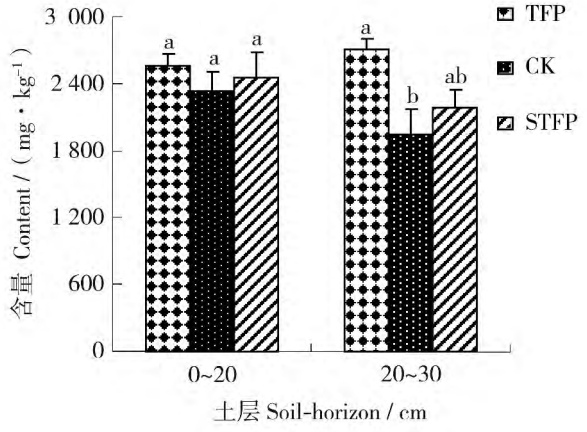

图 4 2 种施肥模式对温室土壤有效钙含量的影响

Fig. 4 Effect of two fertilization patterns on the soil available calcium content in the greenhouse

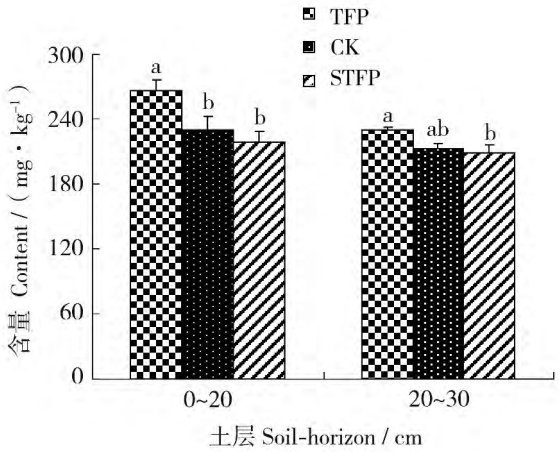

图 5 2 种施肥模式对温室土壤有效镁含量的影响

Fig. 5 Effect of two fertilization patterns on the soil available magnesium content in the greenhouse

从图 5 可知，对于 0 ~ 20 cm 土层，STFP 的土壤有效镁含量最低，TFP 的含量最高，STFP 的含量比 TFP 的约低 22%（$P < 0.05$）；STFP 的略低于 CK，但差异不显著（$P > 0.05$）；CK 的低于 TFP 约 16%（$P < 0.05$）。这说明，虽然镁和钙一样，均是在施用磷肥时带入土壤中的，但是由于土壤中镁含量的基础值比较低，因此，短期内残留在土壤中的镁也会导致土壤镁含量的显著上升。

从图 6 可知，对于 0 ~ 20 cm 土层，TFP 的土壤有效硫含量比 CK 约高 53%（$P < 0.05$）；STFP 的土壤有效硫含量比 TFP 的约低 58%（$P < 0.05$）；CK 的土壤有效硫含量略高于 STFP，但差异不显著（$P > 0.05$）。对于 20 ~ 30 cm 土层，各处理之间没显著差异（$P > 0.05$），说明由于硫酸钾复合肥的施用造成 TFP 的表层（0 ~ 20 cm）土壤有效硫含量大幅增加，这也是很多硫酸钾复合肥施用地区的温室土壤中盐分含量不断增加产生次生盐渍化的原因之一。

2.2 2 种施肥模式对土壤电导率的影响 土壤电导率是衡量土壤含盐量最常用的指标，从图 7 可知，对于 0 ~ 20 cm 土层，STFP 的土壤电导率最低，CK 的稍高，但二者之间差异不显著（$P > 0.05$）；TFP 的最高，比 CK 约高 33%（$P < 0.05$），比 STFP 约高 36%（$P < 0.05$）；对于 20 ~ 30cm 土层，依然是 TFP 的电导率最高，比 CK 约高 20%（$P < 0.05$），比 STFP 约高 26%（$P < 0.05$），STFP 的最低，但与 CK 之间差异不显著（$P > 0.05$）。实验结果说明，STFP 虽然使用了一定量的化肥，但其土壤次生盐渍化并没有加重，而是由下降的

趋势,而传统施肥却使得土壤含盐量大幅增加。

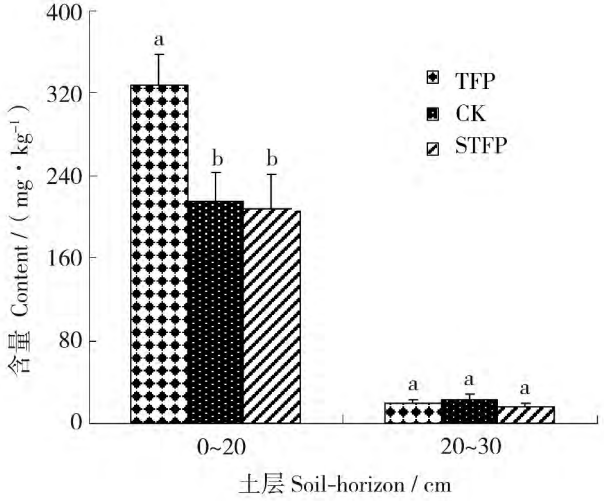

图 6　2 种施肥模式对温室土壤有效硫含量的影响

Fig. 6　Effect of two fertilization patterns on the soil available sulfur content in the greenhouse

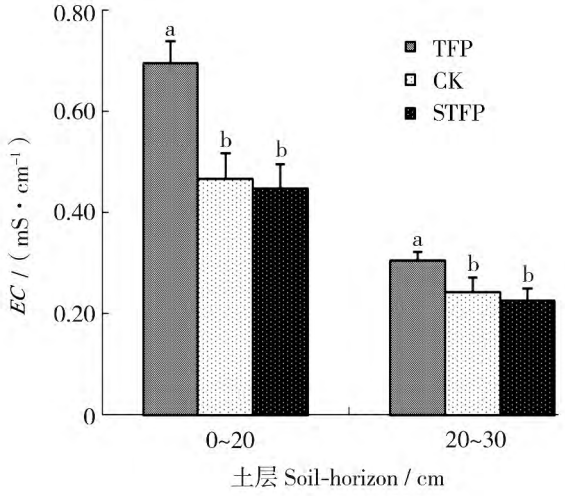

图 7　2 种施肥模式对温室土壤电导率的影响

Fig. 7　Effect of two fertilization patterns on the soil *EC* in the greenhouse

2.3　2 种施肥模式对各蔬菜养分含量的影响

2.3.1　**对大量营养元素含量的影响**　氮和磷是作物从土壤中吸收最多的元素之一,土壤中氮含量的多少可能会影响植物体内氮的含量。结果表明(表 2),各处理条件下生长的不结球白菜矮脚黄体内的含氮量存在一定的差异,但差异不显著($P>0.05$)。这说明,虽然 2 种模式的肥料施用量不同,土壤中有效氮的含量也不尽相同,但这并没有明显改变不结球白菜矮脚黄体内氮的含量,这也说明,土壤中氮含量已能够保证不结球白菜矮脚黄的生长需要,不需继续施用氮肥。对芹菜而言,地下部的含氮量没有显著差异,而地上部差异显著($P<0.05$),TFP 的芹菜地上部氮含量最高,显著高于其他 2 个处理($P<0.05$),比 CK 及 STFP 分别高出 24%,25%,说明 TFP 能明显提高芹菜体内氮的含量,然而,TFP 的芹菜产量并未提高,相反,却比 STFP 的低(图 7),这说明 TFP 的土壤含氮量过高,使芹菜体吸收了过多的氮,而其他 2 个处理的含量之间没有显著差异($P>0.05$),说明 STFP 没有明显影响芹菜体内的含氮量。实验结果表明,不同作物体内的含氮量对土壤含氮水平以及施肥水平的反应存在一定差异。

磷也是作物吸收较多的营养元素之一,不同处理的作物体内含磷量的反应也有所不同(表 2),不结球白菜体内含磷量的反应明显,无论地上部还是地下部,都是 TFP 的最高,STFP 的最低,TFP 的地下部与地上部分别比 STFP 的高出($P<0.05$)约 73% 和 65%,同时 TFP 的不结球白菜体内磷的含量还比 CK 高出($P<0.05$)约 46% 和 33%。说明与 CK 及测土 STFP 相比,TFP 均可有效提高不结球白菜体内磷的含量。然而,不结球白菜体内磷含量的的提高,并没有使产量增加(图 7),相反,TFP 的产量却显著低于 STFP,这说明 STFP 的土壤含磷量过高,使作物吸收了过多的磷,这很有可能影响了其它营养元素的吸收,导致作物体内养分含量比例失调,产量降低。而 STFP 的不结球白菜体内地上部与地下部磷的含量比 CK 分别低($P<0.05$)约 30% 和 16%,说明与 CK 相比,STFP 能有效降低不结球白菜体内磷的含量,这与 TFP 的效果相反。对芹菜而言,各处理芹菜的地上部与地下部的磷含量之间均无显著差异($P>0.05$),说明芹菜体内的含磷量对于各处理的反应不明显,这也进一步说明土壤中磷的含量已能够满足作物生长的需要,不需要进一步施用磷肥。上述结果表明,不同作物对于土壤磷的含量水平以及施磷水平的反应不一,但均说明土壤中磷的含量已能满足作物生长的需要,不需要进一步施用磷。此外,试验结果还表明,各处理芹菜的地上部与地下部的含磷量均高于不结球白菜。

钾也是作物吸收较多的一种营养元素,从表 2 可知,2 种作物的地上及地下部中钾的含量均是 STFP 的含量最高,不结球白菜与芹菜的地下部含钾量分别比 CK 约高出 38% 和 125%,说明与 CK 相比,STFP 可显著提高 2 种作物地下部的含钾量($P<0.05$),而 TFP 虽然其地下部含量也比 CK 高,但其含量低于

STFP，说明 TFP 的钾含量不足，需进一步施用钾; STFP 芹菜的地上部含钾量显著($P<0.05$) 高于 CK，说明 STFP 能有效提高其地上部钾的含量，也说明次生盐渍化土壤中需要进一步施用钾。而 TFP 的钾含量低于 STFP，与 CK 没有显著差异($P>0.05$) ，说明 TFP 施用钾的效果不明显，可能需要进一步增施钾，以获得较高的作物产量。对于不结球白菜的地上部，依然是 STFP 的含量最高，CK 的最低，但三者之间差异不显著($P>0.05$) ，说明三者对于不结球白菜地上部含钾量的影响效果不明显，此外，表 2 的结果还表明，芹菜各部位钾的含量均高于不结球白菜的相应部位。

作为中量元素之一，植物对钙的吸收量比较大，在各元素中仅次于氮(表 2) 。分析结果表明，各处理的植物全钙含量之间并没有显著差异($P>0.05$) ，说明各处理中无论施用还是不施用钙均不会影响植物体内钙的含量，这进一步说明，土壤中钙的含量已经很高，不需要继续施用钙。

镁是与钙一起随着磷施于土壤中，并造成土壤中镁含量的显著增加(图 5) ，然而，这并没造成植株中镁含量的显著差异(表 2) ，这也说明土壤中镁的含量也已经很高，不需要继续施用镁。

作为硫酸钾复合肥中钾的陪伴离子，硫酸根离子被大量带入土壤中造成了 TFP 中土壤有效硫含量的大幅上升，然而，土壤中有效硫含量的提高并没有使得植物吸收更多的硫，相反，与不施用硫的 STFP 相比较，施用硫的 TFP 的不结球白菜的地下部硫的含量下降了 88%($P<0.05$) ，此外，不结球白菜的地上部硫的含量也有下降的趋势(表 2) ，然而，TFP 土壤中硫的含量却显著高于 STFP(图 6) ，并且其产量也低于 STFP(图 8) ，这说明，温室土壤中含量已经够高，不需要施用硫，TFP 体内硫的含量之所以较低，是由于其他因素影响作物对硫的吸收。而对于芹菜，各处理植株体内的硫含量均没有明显变化。上述结果说明，土壤中硫的含量已能满足作物生长的需要，不需要继续施硫，否则，将造成过多的硫酸根离子带入土壤中，引起土壤有效硫含量的大幅上升，造成土壤盐分含量的显著上升，产生盐害，影响了作物对养分的吸收。此外，表 2 的结果还表明，芹菜各部位硫的含量均高于不结球白菜。

表 2 不同施肥模式处理对蔬菜营养元素含量的影响

Tab. 2 Effect of the different fertilization patterns on the vegetable nutrient content %

元素 Nutrient	处理 Treatment	不结球白菜 *Brassica campestris* L. *ssp. chinensis* Makino				芹菜 *Apium graveolens* L.			
		地下部 Underground part	SD	地上部 Aboveground part	SD	地下部 Underground part	SD	地上部 Aboveground part	SD
氮 Nitrogen	TFP	3.60a	0.18	4.23a	0.10	3.47a	0.21	6.56a	0.91
	CK	3.49a	0.39	4.11a	0.82	3.53a	0.25	5.28b	0.15
	STFP	3.41a	0.01	4.32a	0.38	3.87a	0.13	5.24b	0.38
磷 Phosphorus	TFP	0.38a	0.01	0.48a	0.10	0.62a	0.05	0.81a	0.09
	CK	0.26b	0.02	0.36b	0.04	0.56a	0.11	0.77a	0.05
	STFP	0.23c	0.01	0.28c	0.03	0.55a	0.10	0.77a	0.04
钾 Potassium	TFP	0.46ab	0.22	1.28a	0.43	1.76ab	0.53	2.74a	0.60
	CK	0.37b	0.01	1.02a	0.25	0.97 b	0.19	1.83b	0.11
	STFP	0.51a	0.05	1.31a	0.19	2.18a	0.57	3.06a	0.04
钙 Calcium	TFP	0.65a	0.09	1.32a	0.17	1.15a	0.24	1.40a	0.21
	CK	0.54a	0.07	1.28a	0.19	1.06a	0.51	1.47a	0.12
	STFP	0.66a	0.13	1.34a	0.23	1.06a	0.40	1.66a	0.13
镁 Magnesium	TFP	0.19a	0.05	0.25a	0.03	0.28a	0.03	0.24a	0.07
	CK	0.21a	0.03	0.24a	0.03	0.22a	0.04	0.17a	0.06
	STFP	0.20a	0.02	0.25a	0.02	0.24a	0.05	0.22a	0.02
硫 Sulfur	TFP	0.24 b	0.11	0.38a	0.02	0.61a	0.13	0.70a	0.05
	CK	0.25ab	0.06	0.42a	0.15	0.63a	0.10	0.70a	0.08
	STFP	0.43a	0.07	0.45a	0.04	0.62a	0.02	0.66a	0.08

2.4　2 种施肥模式对作物产量的影响　作物产量是衡量土壤肥力高低的重要指标。从图 8 可知,无论是芹菜还是不结球白菜,STFP 的产量最高,其芹菜产量分别高出($P<0.05$) TFP、CK 17%、18%;CK 与 TFP 的产量之间没有显著差异($P>0.05$)。对于不结球白菜而言,也是 STFP 的产量最高,并且 STFP 的芹菜产量分别高出 TFP 30%,CK 19%($P<0.05$),而其他处理间差异不显著($P>0.05$)。这说明 STFP 能显著提高作物产量,而 TFP 虽然是用大量的肥料,但不能有效提高蔬菜的产量。

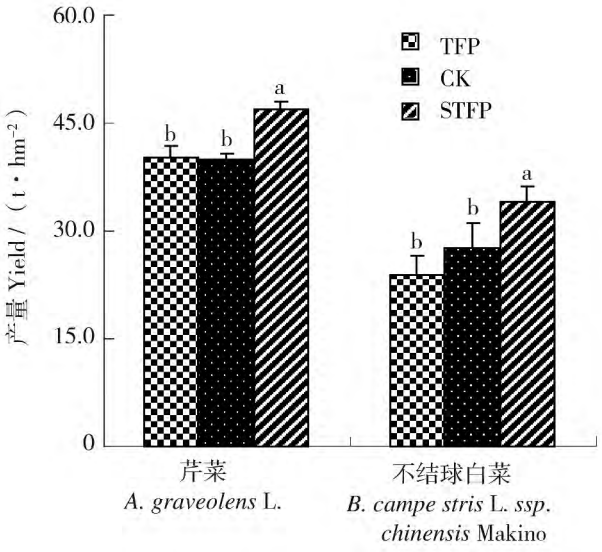

图 8　2 种施肥模式对温室蔬菜产量的影响及其分析结果

Fig. 8　Effect of two fertilization patterns on the greenhouse vegetable yield

3　讨　论

次生盐渍化是设施农业可持续发展的最主要障碍因子之一,其产生的最直接原因是由于设施农业生产中肥料的过量施用,造成大量的养分离子残留在温室土壤中,引起土壤中养分离子的大幅增加,并随种植年限的增加而增加[20-24]。此外,由于肥料施用的盲目性造成温室土壤中残留的养分比例失调,大量元素普遍过量,而微量元素含量相对偏低,在大量元素中,又以氮、磷的残留最普遍与严重,而钾含量相对不足,从而造成土壤养分比例的失调,这在一定程度上影响了作物对养分的吸收,使温室土壤中的养分离子残留问题进一步加重。由于养分离子的大量残留,引起土壤水溶性盐分含量的大幅增加以及养分含量比例失调,使得作物的生长环境较差,产量不断下降,这又在一定程度上进一步增加了养分离子的残留。目前,温室次生盐渍化土壤的治理方法主要有灌水洗盐和工程洗盐[25-27]、客土改良[28]、夏季揭棚[29]、种植填闲蔬菜[30]、施用有机物[31-32]等土壤改良剂等,这些措施都对温室土壤的次生盐渍化有良好的改良效果,但均存在一些问题,如工程改良与客土改良成本过高、治标不治本等,此外,洗盐、夏季揭棚等治理措施只是针对土壤的改良,并没有着眼于周围环境生态的的可持续性,大量养分离子排放到周围环境,使土壤中的磷富集会相对加重,土壤中的磷由农学意义方向向环境意义方向转变,使周围环境特别是水体污染的风险激增[33]。本研究对温室土壤次生盐渍化的治理着眼于肥料养分的合理使用以及土壤中养分的科学调控与管理,不仅可有效遏制乃至降低温室土壤中盐分离子的积累、增加作物的产量,也可有效避免因养分离子的流失对周围环境的污染,是一种环境友好型的治理措施。本研究结果表明,STFP 模式仅提高了温室土壤有效钾的含量,而土壤有效磷、氮以及土壤有效钙、镁和硫的含量没有显著增加,有效缓解了土壤中钾相对缺乏和磷、硫严重富集的状况,使 STFP 中的土壤养分状况向着良性方向发展,有效改善了土壤的养分状况,并显著提高了作物的产量;而 TFP 模式在提高了土壤有效钾含量的同时,也显著地提高了土壤有效磷和硫的含量,使得富集严重的土壤磷和硫素状况更加严重,不能有效改善土壤养分的状况,也没有提高作物产量。不同作物体内各营养元素的含量对各施肥模式处理的反应不一,TFP 芹菜的地上部含氮量以及不结球白菜的含磷量均明显高于 STFP 的,然而其产量却显著低于 STFP 的,这说明温室土壤中的氮、磷等元素已经过量,使得蔬菜体内吸收了过多的磷等元素,并很有可能影响了其他元素的吸收,限制了作物产量的提高。而 STFP 的 2 种作物的含钾量均明显高于 CK,而其产量也较高,说明次生盐渍化温室土壤中的含钾量相对偏低,需要进一步增施钾肥。此外,有研究表明[34],增施钾肥可有效增加作物对盐胁迫的抵抗力,因此,次生盐渍化温室土壤中增施钾肥即可弥补土壤中含钾量相对偏低的问题,又可增强作物的抗盐胁迫的能力。TFP 的芹菜的体内各营养元素的含量以及产量均高于不结球白菜的,这也表明芹菜对于温室土壤次生盐渍化胁迫的耐受力比不结球白菜的更强,可在一定程度上更有效地降低肥料养分离子在土壤中的残留,有利于温室土壤次生盐渍化的治理与修复。

结果表明,STFP 能够平衡土壤养分状况,提高蔬菜产量,有效抑制土壤次生盐渍化的发生与发展,可以在设施农业中长期施用,是一种优良的调控与持续利用次生盐渍化温室土壤的施肥模式,而 TFP 不能

平衡土壤养分,并使土壤次生盐渍化问题不断加重,限制了作物产量的提高,不适合在设施农业中长期使用。

参考文献:

[1] 国务院第二次全国农业普查领导小组办公室,中华人民共和国国家统计局. 第 2 次全国农业普查主要数据公报(第 2 号) [C/OL]. [1998 - 02 - 22]. http://www.stats.gov.cn/tjgb/nypcgb/index.htm

[2] HUAN H F, ZHOU J M, DUAN Z Q. et al. Contributions of greenhouse soil nutrients accumulation to the formation of the secondary salinization: A case study of Yixing City, China [J]. Agrochimica, 2007,(4/5): 207 - 221.

[3] 李廷轩,张锡洲,王昌全,等. 保护地土壤次生盐渍化的研究进展 [J]. 西南农业学报,2001,14(增刊):103 - 107.

[4] 李明霞. 保护地土壤营养障碍与治理途径 [J]. 蔬菜,1999(10):4 - 5.

[5] 童有为,陈淡飞. 温室土壤次生盐渍化的形成和治理途径研究 [J]. 园艺学报,1991,18(2):159 - 162.

[6] 张振华,姜泠若,胡永红,等. 设施栽培大棚土壤养分、盐分调查分析及其调控技术 [J]. 江苏农业科学,2003(1):73 - 75.

[7] 张春兰,张耀东,朱建春. 施用稻草防治保护地土壤盐渍化的作用 [J]. 土壤,1994,26(3):146 - 148.

[8] 郇恒福,周健民,段增强,等. 施用菜籽饼肥对次生盐渍化温室土壤有效养分、盐分及盐分组成的影响 [J]. 土壤,2008,40(4):586 - 590.

[9] 李元,高丽红,吴艳飞,等. 夏季填闲作物对日光温室土壤环境的影响 [J]. 沈阳农业大学学报,2006,37(3):531 - 534.

[10] 蔡志远. 保护地土壤次生盐渍化的形成与防治 [J]. 天津农林科技,2005(2):24 - 26.

[11] 项玉英,杨祥田,张光华. 设施栽培土壤次生盐渍化的调查及防治对策 [J]. 浙江农业科学,2005(1):17 - 19.

[12] 刘景占. 李忠贤. 高桂生,等. 保护地土壤次生盐渍化防治 [J]. 北方园艺,1997(6):76.

[13] 张雪林. 太湖白土的属性与形成 [J]. 浙江师范大学学报(自然科学版),1993,16(2):85 - 88.

[14] 章永松,倪吾钟,林咸永,等. 杭州市郊菜园土壤的有效养分状况与施肥对策 [C]//谢建昌,陈际型. 中国科学院南京土壤研究所、国际钾肥研究所(瑞士)第 8 次钾素讨论会论文集——菜园土壤肥力与蔬菜合理施肥. 南京:河海大学出版社,1997.

[15] BREMNER J M. Total nitrogen, inorganic forms of nitrogen, organic forms of nitrogen, nitrogen availability indexes [C]// Agronomy ed. C. A. Black et al. Methods of Soil Analysis. Part 2. Madison: American Society of Agronomy, Inc., 1965.

[16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.

[17] WIENHOLD B L, TROOIEN T P, RIECHMAN G A. Yield and nitrogen use efficiency of irrigated corn in the northern Great Plains [J]. Agronomy Journal, 1995,87: 842 - 846.

[18] FAGERIA N K, BALIGAR V C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants [J]. Advances in Agronomy, 2005, 88: 97 - 185.

[19] KILMER V J, NEARPASS D C. The determination of available sulfur in soils [J]. Soil Science Society of America Proceeding, 1960(5): 337 - 340

[20] CHEN Q, ZHANG X S, ZHANG H Y, et. al. Evaluation of current fertilizing practices and soil fertilizer in vegetable production in the Beijing region [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2004, 69: 51 - 58.

[21] ZHU J H, LI X L, CHRISTIE P, et al.. Environmental implications of low nitrogen use efficiency in excessively fertilized hot pepper (*Capsicum frutescens* L.) cropping systems [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2005, 111: 70 - 80.

[22] JU X T, KOU C L, ZHANG F S, et. al. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain [J]. Environmental Pollution, 2006, 143: 117 - 125.

[23] JU X T, KOU C L, CHRISTIE P, et al. Changes in the soil environment from excessive application of fertilizers and manures to two contrasting intensive cropping systems on the North China Plain [J]. Environmental Pollution, 2007, 145: 497 - 506.

[24] SHI W M, YAO J, YAN F. Vegetable cultivation under greenhouse conditions leads to rapid accumulation of nutrients, acidification and salinity of soils and groundwater contamination in South-Eastern China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2009, 83: 73 - 84.

[25] 童有为,陈淡飞. 温室土壤次生盐渍化的形成和治理途径研究 [J]. 园艺学报,1991,18(2):159 - 162.

[26] 张振华,姜泠若,胡永红,等. 设施栽培大棚土壤养分、盐分调查分析及其调控技术 [J]. 江苏农业科学,2003(1):73 - 75.

[27] 沈根祥,杨建军,黄沈发,等. 塑料大棚盐渍化土壤灌水洗盐对水环境污染负荷的研究 [J]. 农业工程学报,2005,21(1):124 - 128.

[28] 胡萍,严秀琴,虞冠军,等. 设施土壤次生盐渍化客土修复技术初探 [J]. 上海交通大学学报(农业科学版),2005,(1):46 - 51.

[29] 刘晓军,周建斌,陈竹君,等. 夏季休闲期不同年限日光温室土壤硝态氮淋溶状况 [J]. 农业工程学报,2010,36(S1):272 - 278.

[30] 陆扣萍,闵炬,施卫明,等. 填闲作物甜玉米对太湖地区设施菜地土壤硝态氮残留及淋失的影响 [J]. 土壤学报,2013,50(2):331 - 339.

[1] 郇恒福,周健民,段增强,等. 施用菜籽饼肥对次生盐渍化温室土壤有效养分、盐分及盐分组成的影响[J]. 土壤,2008,40(4):586 – 590.
[2] 代立兰,张怀山,夏曾润,等. 有机废弃物菌糠和醋糟对次生盐渍化土壤修复效果研究[J]. 干旱地区农业研究,2014,32(1):218 – 222,251.
[3] 杨建军,沈根祥,姚政,等. 灌水洗盐对设施农业中土壤养分的影响[J]. 上海农业学报,2004,20(2):63 – 66.
[4] BERINGER H. Nutritional and environmental effects on yield formation[C] // The International Potash Institute. Physiological Aspects of Crop Productivity (The Proceedings of the 15th Colloquium of The International Potash Institute). Bern 'Der Bund' AG,1980: 155 – 173.

Effects of Two Fertilization Patterns on the Soil Secondary Salinization and Vegetable Nutrient Content in the Greenhouse

HUAN Hengfu[1,2], ZHOU Jianmin[2], DUAN Zengqiang[2], WANG Huoyan[2], GAO Yanfang[2]
(1. Tropical Crops Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences /Key Laboratory of Crop Gene Resources and Germplasm Enhancement in Southern China, Ministry of Agriculture, P. R. China & Key Laboratory of Conservation and Utilization of Cassava Genetic Resources, Ministry of Agriculture, Danzhou 571737, China; 2. Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences/State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Nanjing 210008, China)

Abstract: Recently, soil secondary salinization has seriously restricted the development of the greenhouse agricultural industry, and most of the salt ions in the greenhouse soil were nutrient ions. Rational fertilization and the scientific control of the nutrients should be done to reduce the greenhouse soil secondary salinization. Two fertilization patterns, traditional fertilization and soil test based fertilization, were used in the green house to apply fertilizer to the vegetables, Brassica (*Brassica campestris* L. *ssp. chinensis* Makino) and celery (*Apium graveolens* L.), and the nutrient content of soil and vegetables in the greenhouse were determined. The result showed that soil test based fertilization pattern (STFP) could balance the soil nutrients, while the traditional fertilization pattern (TFP) increased continuously the soil content of the phosphorous and sulfur which had been accumulated, worsening the imbalance of soil nutrients. The TFP celery had significantly higher nitrogen content in the aboveground part than the other treatments, while the nitrogen content of the under-ground part of the vegetables was not significantly different ($P < 0.05$) among the treatments; phosphorous content was significantly different in Brassica among the treatments, the highest in the TFP treatment and the lowest in the STFP, while it was not significantly different in celery among the treatments; the STFP treated vegetables had higher potassium content in the underground part than the control, while the potassium content was not significantly different in the vegetables above the ground among the treatments; all the three treatments did not affect the Ca and Mg content of the vegetables as well as the sulfur content of the vegetables above the ground, while the STFP treatment gave a higher sulfur content of Brassica under the ground than the other treatments; the vegetables yielded higher in the STFP treatment than in the other treatments, and there was no significant difference between other treatments ($P > 0.05$). The TFP treatment was comparatively low in potassium content, and the other macro and secondary macro elements could meet the need of the vegetables growth, but the phosphorus and sulfur content was too high; the STFP improve the growing environment of vegetables by decreasing the application rate of the phosphorus and sulfur fertilizer and increasing the application rate of potassium fertilizer based on the soil nutrient conditions in the greenhouse, and the STFP can also effectively constrains the occurrence and development of the soil secondary salinization in the greenhouse and increase the yield of the vegetables. The STFP is a good measure to improve and control the greenhouse soil secondary salinization.

Key words: secondary salinization; greenhouse soil, soil test based fertilization pattern; traditional fertilization pattern; vegetable yield; nutrient content