



种植年限对设施菜地土壤理化特性及供肥能力影响研究

陈亮亮¹, 张鸿龄^{1*}, 孙玲玲¹, 段运思¹, 张金鑫¹, 刘鑫仪¹, 陈奕阳¹, 马国峰²

(1. 沈阳大学区域污染环境生态修复教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110044;

2. 沈阳大学科技创新研究院, 辽宁 沈阳 110044)

摘要: 中长期设施菜地因高频连续种植造成连作障碍, 土壤存在供肥能力下降、养分失衡、土壤酸化和盐渍累积问题。为阐明设施菜地土壤理化特性和供肥能力随种植年限的变化规律, 以沈阳典型设施菜地为研究对象, 采集种植年限分别为 1 ~ 5、6 ~ 10、11 ~ 15、16 ~ 20 和 21 ~ 25 年的表层 (0 ~ 20 cm) 和亚表层 (20 ~ 40 cm) 土壤, 分析土壤理化特性和土壤肥力随种植年限的变化规律及关键影响因子。结果表明: 随种植年限增加, 土壤 pH 先降低后增加, 显著低于露地大田对照土壤; 而土壤电导率呈相反趋势。表层土壤有机碳、全氮和碱解氮含量在 6 ~ 10 年增至最大, 较露地大田分别显著增加 41.9%、160.9% 和 747.6% ($P < 0.05$); 在 21 ~ 25 年时, 土壤有机碳、全氮和碱解氮含量降至最低; 土壤速效钾含量随种植年限增加呈下降趋势, 而全磷和有效磷含量随种植年限增加先增加后降低, 亚表层土壤供肥能力变化规律与表层土壤基本一致。综上所述, 在设施菜地种植过程中, 随种植年限变化适时调整施肥措施, 种植 10 年以上的设施菜地应减施磷肥、补施氮肥和钾肥, 并逐步增施有机肥。

关键词: 设施菜地; 种植年限; 土壤供肥能力; 土壤理化特性

设施菜地是指利用人工技术手段和辅助措施, 通过改变设施菜地内环境条件, 实现部分或完全摆脱农业生产对自然环境的高度依赖, 达到高效和高质量生产目的的农业生产类型^[1]。设施种植因其经济效益好、集约化程度高等特点, 成为我国蔬菜生产的重要组成部分。土壤供肥能力在一定程度上决定了设施生产产品的数量和品质, 土壤养分含量下降和失衡是导致土壤供肥能力下降的重要原因^[2], 而土壤理化性状变化反映设施菜地作物种植类型的适宜程度, 直接影响土壤养分的有效性和供给状态^[3]。

近年来, 我国设施农业规模发展迅速, 设施菜地种植面积占世界设施农业面积的 64.8%^[4], 设施蔬菜产量高达 2.52 亿 t, 极大满足了人们对蔬菜多样化和高品质的需求^[5]。然而, 持续多年的设

施种植会对土壤环境因子和土壤肥力状况产生较大影响。由于设施种植具有高温、高湿和高蒸发量的环境条件, 以及复种指数高、持续施肥且施肥量大的耕作状态, 随着种植年限增加, 往往因土壤理化性质恶化、养分失衡、微生物群落结构失衡和植物化感自毒作用产生的自毒物质在土壤中积累造成不同程度的土壤连作障碍, 引起土壤性质和供肥能力变化^[6-7]。

土壤是设施栽培的基础, 为设施作物生长提供必要的养分和环境条件, 而土壤供肥能力变化和连作障碍发生需要多年连续种植才能发生^[6]。已有研究表明, 随种植年限增长, 土壤中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 比例增加, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 比例降低, 导致土壤酸化、盐渍累积和肥力下降^[8]。Zhou 等^[9]研究发现, 设施菜地短期种植, 土壤有机碳、全氮和全磷含量显著增加, 长期种植后, 由于种内竞争加剧和连作障碍, 造成土壤酶活性、土壤氮磷钾养分含量和有效性降低, 土壤质量下降。这些结果表明长期连续高频种植而未定期保持土壤肥力会导致土壤质量和供肥能力下降。据报道沧州市肃宁县因长期高频连续种植, 以及频繁的土壤扰动, 随种植年限增加, 土壤 pH 降低 0.21, 全盐含量增加 11.2%, 设施土壤出现轻度酸化和次

收稿日期: 2024-06-22; 录用日期: 2024-10-09

基金项目: 沈阳市社会治理科技专项 (23-407-3-11); 沈阳市中青年科技创新人才项目 (RC210321); 辽宁省自然科学基金项目 (2024-MS-210)。

作者简介: 陈亮亮 (1998-), 硕士研究生, 研究方向为土壤团聚体稳定性和有机碳固存能力。E-mail: 507974035@qq.com。

通讯作者: 张鸿龄, E-mail: zhl19792002@163.com。



生盐渍化等土壤退化问题^[10]。此外,咸阳市泾阳县设施菜地土壤养分变化研究发现,随种植年限增加,研究区一半以上的设施菜地出现次生盐渍化现象,土壤出现碳素含量下降,磷和钾元素过度累积趋势^[11]。谢青琰等^[12]和卢鑫等^[13]研究发现,土壤粒径细化程度随种植年限增加逐渐增大,表明种植年限是影响土壤机械组成的一个重要因素。

沈阳市是中国六大设施菜地之一东北产区主要种植区,种植历史悠久。自2002年以来,已有22年的种植历史,设施菜地种植面积占辽宁省设施农业总面积的20%^[14-15]。目前,有关设施菜地土壤重金属及有机污染的研究多有报道,而关于沈阳地区设施菜地土壤环境因子和土壤供肥能力随种植年限的动态变化研究鲜有报道。因此本研究以沈阳典型设施菜地为研究对象,从种植年限角度探讨设施菜地土壤碳、氮、磷和其他养分元素与土壤理化特性的变化特征及规律,有助于揭示特定区域环境下,土壤理化特性和供肥能力在时间尺度上的变化规律,明确土壤肥力的动态变化,为设施菜地可持续发展提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

新民市位于沈阳市的西北部地区(41° 42'—42° 17' N、122° 27'—123° 20' E),是辽宁省设施菜地主要聚集区。该区域地处辽河平原,土壤肥沃,属温带半湿润大陆性季风气候,年均温8.2℃,日照时数2753.2 h,平均无霜期160 d,冬季寒冷干旱,夏季湿热,气候多变,全年降水量600 mm左右,年平均相对湿度62%。土壤类型单一,主要是草甸棕壤。该地区设施菜地长期种植黄瓜、角瓜和豆角。肥料施用种类繁多,且施用方式灵活,有机肥以鸡粪和羊粪或者混合施用为主,化肥以氮、磷和钾为主要输入元素,二者常常配合施用。设施菜地种植前,均先进行翻耕处理,按照市场需求及季节变化进行轮作。

1.2 样品采集与测定

为避免因耕作方式、施肥种类、施肥措施、种植作物等因素造成土壤差异,本研究在前期调研的基础上,在同一区域选取施肥类型、复种指数和蔬菜种植类型及种植历史基本一致的设施菜地,根据种

植年限,选取连续种植1~5、6~10、11~15、16~20和21~25年的大棚,另选取露地大田作为对照(CK),每种棚龄的蔬菜大棚根据其种植模式、施肥方式和种植蔬菜种类分别选取3~6个,采集表层(0~20 cm)和亚表层(20~40 cm)土壤样品。采用梅花采样法,从5个不同的位置收集土壤样本,并将其混合在一起。样品采集后剔除大的石砾和植物残体后装入聚丙烯材质盒内,带回实验室,放在牛皮纸上自然风干后,采用4分法分别过0.85和0.15 mm筛,装入自封袋后备用。

土壤基本理化性质测定:土壤机械组成采用激光衍射法测定(MS2000);土壤含水率(SW)采用烘干法进行测定;土壤容重(BD)采用环刀法进行测定;pH(水土比2.5:1)采用pH计进行测定;电导率(EC,水土比5:1)采用电导率仪测定;土壤阳离子交换量(CEC)采用快速Ba²⁺交换,氢氧化钠滴定法进行测定。

土壤肥力指标测定:有机碳含量采用重铬酸钾外源加热法进行测定;全氮和碱解氮含量采用凯氏定氮法进行测定;全磷含量采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定;有效磷含量采用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法进行测定^[16];速效钾含量采用醋酸铵浸提-火焰光度计法进行测定。

1.3 统计分析

采用Excel 2019对样点数据进行预处理;使用SPSS 18.0对土壤养分含量进行单因素方差分析和最小显著性差异法检验,检验差异显著性($P<0.05$),Pearson相关分析,根据分析结果,使用Origin 2021对SPSS分析结果数据进行绘图。通过Canoco 5.0绘制冗余分析(RDA)分析图。

2 结果与分析

2.1 不同种植年限土壤基本理化特性

随种植年限增加,设施菜地表层(0~20 cm)土壤pH先降低后增加(表1),各种植年限pH与露地大田相比明显降低。土壤EC和BD的变化与pH相反,呈先增加后降低趋势,各种植年限土壤BD显著高于露地大田($P<0.05$)。SW和CEC整体上随种植年限增加而增加,各种植年限土壤SW显著低于露地大田,而土壤CEC变化不显著。亚表层设施菜地土壤(20~40 cm)pH随种植年限呈先降低后增加趋势(表1),且各种植年限pH均高于表



层土壤；土壤 EC 和 SW 整体上随种植年限增加而增加，与表层土壤相比 EC 降低，土壤 SW 与露地大田相比显著降低 ($P<0.05$)，BD 随着种植年限无显著变化。

设施菜地种植后，粉粒含量显著低于露地大田（表 2）。表层土壤种植年限为 21 ~ 25 年时，

土壤粉粒和黏粒含量显著高于其他种植年限土壤 ($P<0.05$)。各种种植年限表层和亚表层土壤颗粒组成变化基本一致，砂粒含量随种植年限增加先增加后降低，粉粒和黏粒含量整体上随种植年限增加而下降，表层土壤砂粒含量一般高于亚表层土壤砂粒含量。

表 1 不同种植年限设施菜地土壤理化特性

土层深度 (cm)	种植年限 (年)	pH	电导率 ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	含水率 (%)	容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	阳离子交换量 ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)
0 ~ 20	CK	6.94 ± 0.07a	125.57 ± 72.20b	29.14 ± 7.21a	1.76 ± 0.37c	18.33 ± 10.08a
	1 ~ 5	6.19 ± 0.56b	664.25 ± 325.62ab	8.60 ± 1.53b	2.44 ± 0.10b	18.94 ± 4.58a
	6 ~ 10	6.14 ± 0.13b	843.00 ± 428.87a	11.17 ± 3.53b	2.46 ± 0.14a	13.34 ± 3.24a
	11 ~ 15	6.23 ± 0.06b	247.25 ± 11.67b	10.52 ± 2.35b	2.45 ± 0.06b	33.66 ± 33.49a
	16 ~ 20	6.63 ± 0.05b	428.93 ± 335.98ab	13.40 ± 0.03b	2.35 ± 0.11b	23.09 ± 26.90a
	21 ~ 25	6.84 ± 0.16a	273.27 ± 186.44b	13.04 ± 2.95b	2.34 ± 0.11b	40.36 ± 41.19a
20 ~ 40	CK	7.23 ± 0.04a	67.23 ± 29.71a	20.60 ± 3.66a	2.30 ± 0.06a	70.09 ± 82.61a
	1 ~ 5	6.70 ± 0.17b	93.70 ± 1.98a	11.15 ± 2.82b	2.48 ± 0.22a	16.55 ± 1.57a
	6 ~ 10	6.41 ± 0.28b	143.53 ± 65.53a	14.51 ± 0.79b	2.47 ± 0.12a	9.18 ± 7.87a
	11 ~ 15	6.77 ± 0.51ab	96.05 ± 65.41a	13.47 ± 0.11b	2.45 ± 0.32a	29.65 ± 33.69a
	16 ~ 20	6.78 ± 0.23ab	115.75 ± 37.19a	11.99 ± 5.15b	2.43 ± 0.02a	23.42 ± 83.23a
	21 ~ 25	6.61 ± 0.05b	134.35 ± 91.74a	14.77 ± 2.31b	2.36 ± 0.21a	20.29 ± 34.15a

注：同一土层同列不同小写字母表示不同种植年限设施菜地间差异达显著水平 ($P<0.05$)，下同。

表 2 不同种植年限设施菜地土壤机械组成 (%)

种植年限 (年)	0 ~ 20 cm			20 ~ 40 cm		
	黏粒	粉粒	砂粒	黏粒	粉粒	砂粒
CK	2.52 ± 0.16a	45.02 ± 2.33a	52.45 ± 2.49c	2.57 ± 0.50a	45.54 ± 7.52a	51.89 ± 8.02b
1 ~ 5	1.80 ± 0.24b	31.80 ± 1.48c	66.40 ± 1.73a	1.73 ± 0.18ab	31.80 ± 2.51b	66.48 ± 2.69a
6 ~ 10	1.33 ± 0.21b	25.35 ± 3.10c	73.31 ± 3.31a	1.28 ± 0.58b	25.44 ± 8.19b	73.29 ± 8.77a
11 ~ 15	1.53 ± 0.11b	27.88 ± 1.15c	70.63 ± 1.26a	1.84 ± 0.23ab	33.10 ± 2.63b	65.06 ± 2.93a
16 ~ 20	1.37 ± 0.03b	26.42 ± 1.47c	72.21 ± 0.65a	1.78 ± 0.05b	32.56 ± 1.56b	65.63 ± 1.61a
21 ~ 25	1.97 ± 0.37a	34.15 ± 3.00b	62.88 ± 3.34b	2.05 ± 0.45a	33.01 ± 4.38b	61.94 ± 5.38ab

2.2 不同种植年限土壤肥力

2.2.1 土壤有机碳

随着种植年限增加，土壤有机碳含量先增加后降低（图 1）。表层土壤有机碳含量在 6 ~ 10 年增至最高 ($19.38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)，较露地大田土壤有机碳含量显著增加 41.9% ($P<0.05$)，在 21 ~ 25 年降至最低 ($12.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)，较露地大田土壤有机碳含量降低 9.6%。亚表层土壤有机碳含量在 11 ~ 15 年增至最高 ($15.78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)，显著高于露地大田 ($P<0.05$)，与表层土壤相比有机碳含量降低。

2.2.2 土壤全氮和碱解氮

随种植年限增加，土壤全氮和碱解氮含量先增加后降低，表层土壤全氮含量均高于亚表层土壤（图 2）。种植年限在 6 ~ 10 年时，表层和亚表层土壤全氮含量增至最大，分别为 2.56 和 $1.64 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，相较于露地大田土壤显著增长 1.60 和 1.02 倍 ($P<0.05$)；在 21 ~ 25 年时，表层土壤全氮降至最低 ($1.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)，较露地大田土壤全氮降低 1.34%。表层和亚表层土壤碱解氮含量在 6 ~ 10 年时增至最大 (0.47 和 $0.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)，较露地大田土壤显著增加 7.47 和 5.99 倍 ($P<0.05$)。

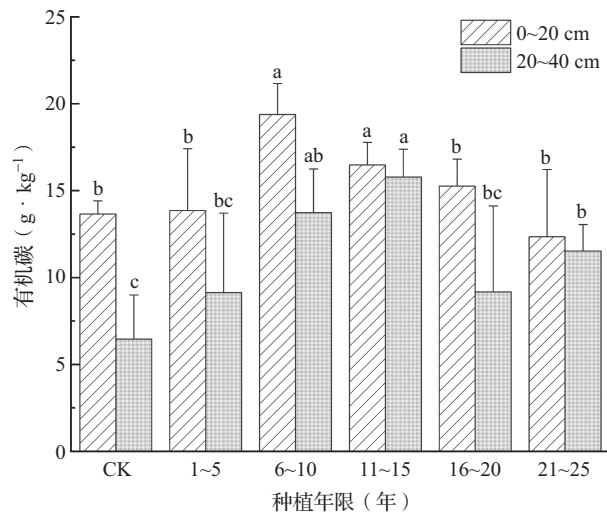


图1 不同种植年限土壤有机碳含量

注：同一土层柱上不同小写字母表示不同种植年限设施菜地间差异达显著水位 ($P<0.05$)。下同。

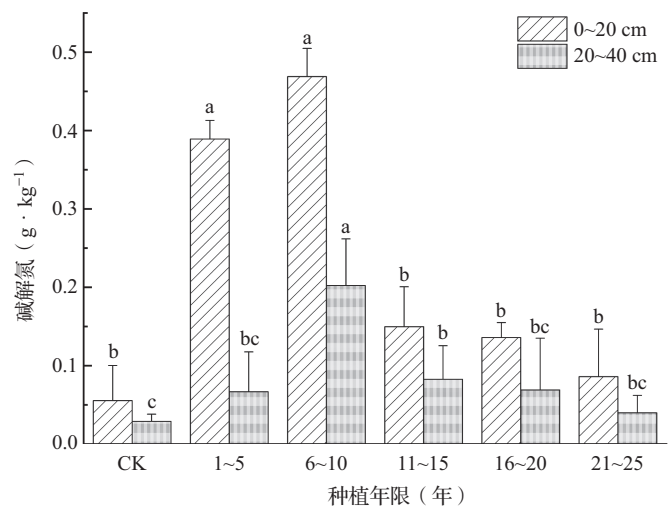
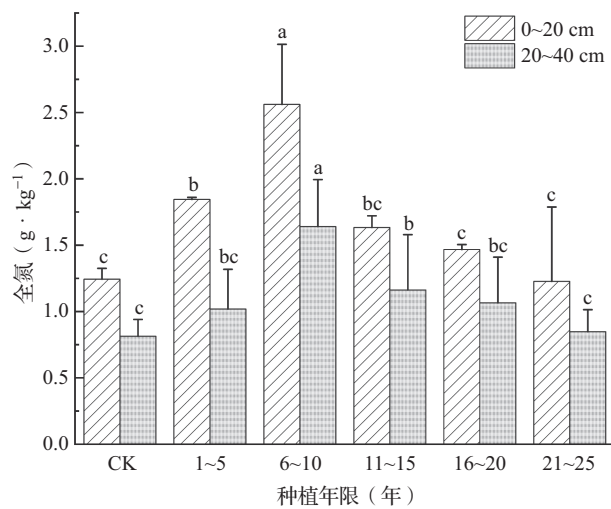


图2 不同种植年限土壤全氮和碱解氮含量

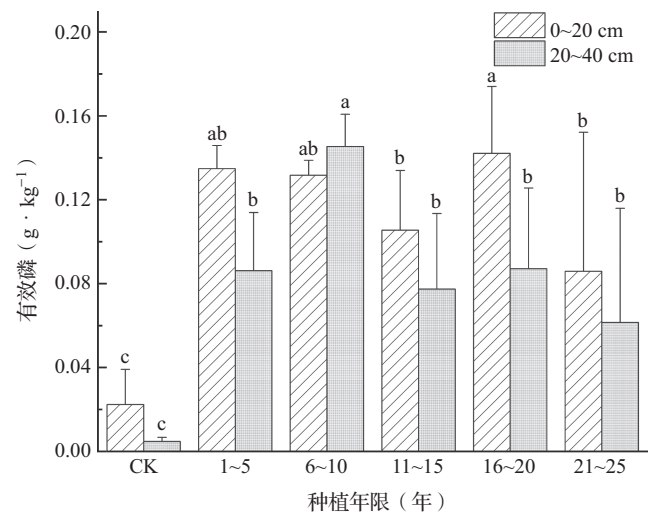
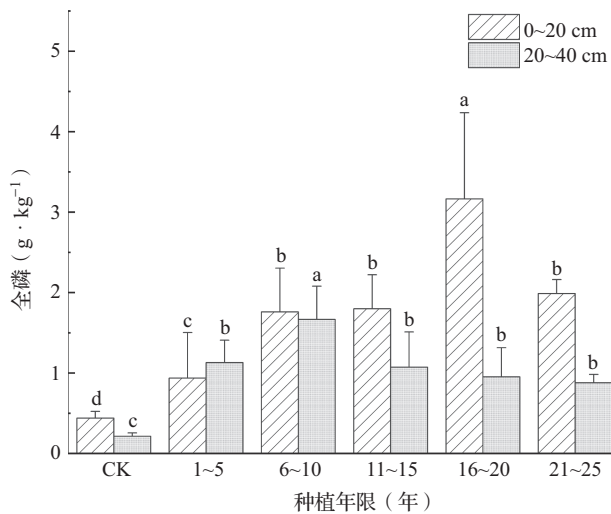


图3 不同种植年限土壤全磷和有效磷含量



16 ~ 20 和 21 ~ 25 年变化不显著。

2.2.4 土壤速效钾

土壤速效钾整体随种植年限增加而下降(图4)。种植年限在1~5年时,表层土壤速效钾含量高于露地大田土壤,此后设施菜地速效钾含量整体上随种植年限增加呈降低趋势。种植年限在16~20年时,表层土壤速效钾含量相较于露地大田显著降低43.5%,相较于1~5年土壤速效钾含量显著降低58.9% ($P<0.05$)。种植年限在21~25年时,亚表层土壤速效钾降至最低($0.08\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),较露地大田土壤速效钾含量降低46.1%,亚表层土壤速效钾含量随种植年限呈下降趋势,但变化不显著。

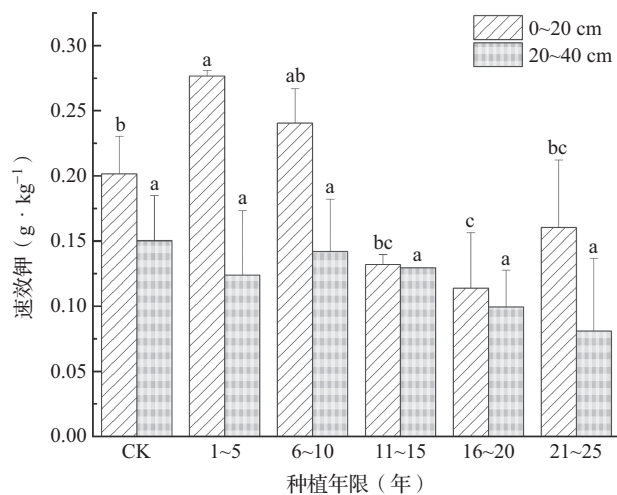


图4 不同种植年限土壤速效钾含量

2.3 不同种植年限土壤碳、氮、磷生态化学计量比

表层土壤碳氮比(C/N)整体随种植年限增加而增加(表3),变动范围为7.52~11.61。土壤碳磷比(C/P)随种植年限的增加而降低,变动范围为4.47~31.66,与露地大田相比,各种植年限土壤C/P下降38.4%~85.9%。土壤氮磷比(N/P)

随种植年限增加而降低,变动范围为0.50~2.88,与露地大田相比,各种植年限土壤N/P下降16.7%~82.6%。

亚表层土壤C/N整体随种植年限的增加而增加,变动范围为7.72~14.79,与露地大田相比,各种植年限土壤C/N增加9.1%~91.6%。土壤C/P整体随种植年限增加而降低,变动范围为7.82~30.64,与露地大田相比,各种植年限土壤C/P降低48.6%~74.5%。土壤N/P整体随种植年限增加而降低,变动范围为0.90~3.90,与露地大田相比,各种植年限土壤N/P降低71.5%~76.9%。

2.4 土壤环境因子与土壤肥力相关性分析

通过不同种植年限设施菜地土壤环境因子和土壤肥力的相关性分析可知(图5),种植年限与土壤砂粒含量、全磷和有效磷呈显著正相关($P<0.05$),与SW、速效钾和C/P呈显著负相关($P<0.01$),与土壤黏粒和粉粒含量、速效钾呈极显著负相关($P<0.01$),与C/N呈极显著正相关($P<0.01$)。有机碳与有效磷呈显著正相关($P<0.05$),与全氮和全磷呈极显著正相关($P<0.01$),与N/P呈显著负相关($P<0.05$)。全氮与速效钾呈显著正相关($P<0.05$),与碱解氮、全磷和有效磷呈极显著正相关($P<0.01$)。碱解氮与全磷、有效磷和速效钾呈显著正相关($P<0.05$)。全磷与有效磷呈极显著正相关($P<0.001$),与C/P和N/P呈极显著负相关($P<0.001$)。有效磷与C/P和N/P呈极显著负相关($P<0.001$)。RDA分析表明(图6),RDA1和RDA2解释率分别为82.27%和12.01%,RDA1和RDA2的累计解释度达到94.3%,排序结果可靠。粉粒、砂粒和pH对肥力组成变异的解释度分别为65.2%、9.2%和7.9% ($P<0.05$),是影响肥力的主要环境因子。根据图中夹角大小显

表3 不同种植年限土壤碳、氮、磷生态化学计量比

种植年限 (年)	0 ~ 20 cm			20 ~ 40 cm		
	C/N	C/P	N/P	C/N	C/P	N/P
CK	11.00 ± 0.81a	31.66 ± 4.20a	2.88 ± 0.31a	7.72 ± 2.08b	30.64 ± 11.69a	3.90 ± 0.69a
1 ~ 5	7.52 ± 1.56b	19.49 ± 1.21b	2.40 ± 1.11a	8.68 ± 1.81b	7.82 ± 1.87c	0.90 ± 0.04b
6 ~ 10	7.78 ± 1.58b	11.81 ± 3.41c	1.49 ± 0.16b	8.42 ± 1.26b	8.48 ± 2.16c	1.00 ± 0.14b
11 ~ 15	10.14 ± 1.39ab	9.34 ± 1.25cd	0.94 ± 0.21cd	14.79 ± 4.26a	15.75 ± 3.87b	1.08 ± 0.08b
16 ~ 20	10.51 ± 6.34ab	4.47 ± 1.68d	0.50 ± 0.14d	8.35 ± 1.06b	9.31 ± 1.51bc	1.11 ± 0.05b
21 ~ 25	11.61 ± 4.67a	6.15 ± 1.26d	0.63 ± 0.27cd	13.75 ± 2.14a	13.27 ± 2.74bc	0.97 ± 0.02b

注: C/N、C/P、N/P 分别为碳氮比、碳磷比、氮磷比。

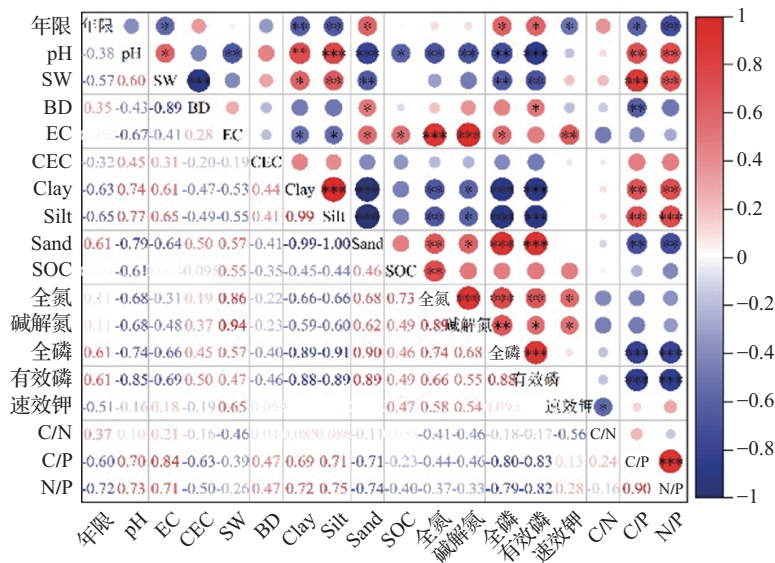


图5 土壤环境因子和土壤肥力的相关性热图

注: EC、CEC、SW、BD、Clay、Silt、Sand、SOC 分别为电导率、阳离子交换量、含水率、容重、黏粒、粉粒、砂粒、有机碳,下同。*、**、*** 分别表示 0.05、0.01、0.001 水平显著相关。

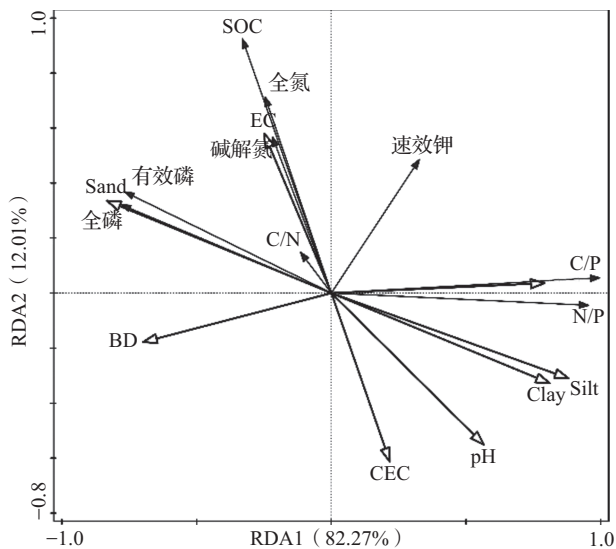


图6 土壤环境因子与土壤肥力的冗余分析 (RDA)

示,土壤粉粒含量和 pH 与 C/P、N/P 和速效钾呈显著正相关 ($P<0.05$),与有机碳、全氮、碱解氮、全磷、有效磷和 C/N 呈显著负相关 ($P<0.05$),而砂粒与其相反,与 C/P、N/P 和速效钾呈显著负相关 ($P<0.05$),与有机碳、全氮、碱解氮、全磷、有效磷和 C/N 呈显著正相关 ($P<0.05$)。其中土壤粉粒含量对土壤肥力的解释度最高。MonteCarlo 检验结果表明不同土壤环境因子对土壤肥力的重要性具有一定差异 (表 4),粉粒、砂粒、pH、黏粒、SW、BD、EC 和 CEC 的重要性依次降低,解释量分别

是 65.2%、9.2%、7.9%、5.4%、5.0%、4.0%、1.9% 和 0.2%。

表 4 土壤环境因子对土壤肥力的重要性排序

环境因子	因子解释量 (%)	F	P 值
粉粒	65.2	18.8	0.004
砂粒	9.2	3.3	0.032
pH	7.9	3.6	0.032
黏粒	5.4	4.5	0.010
含水率	5.0	2.8	0.062
容重	4.0	6.2	0.020
电导率	1.9	5.5	0.018
阳离子交换量	0.2	0.4	0.738

3 讨论

3.1 土壤理化特性随种植年限的变化

土壤理化性状是评价土壤生态环境友好的重要指标。本研究发现,随种植年限增加,土壤 pH 先降低后上升,且各种植年限设施菜地土壤 pH 均低于露地大田土壤,说明设施菜地因过量施用氮肥,土壤出现酸累积现象。王学霞等^[17]对北京大兴区设施菜地调查表明,随种植年限增加,设施菜地土壤 pH 明显降低,这与本研究结果相一致。这可能因为化肥增施,氮肥的硝化作用产生大量 H^+ ,有效降低土壤中金属离子的活性,引起土壤 pH 降



低^[18-19]。设施菜地土壤 pH 在 6 ~ 10 年后呈上升趋势,这与有机肥在肥料中施用比例有关。Cai 等^[20]研究表明,有机肥分解产生的腐殖质和碱性阳离子能与土壤中的羟基铝和铁水氧化物发生配位体交换和脱羧反应,消耗土壤中的 H^+ ,使设施菜地土壤 pH 缓慢升高。

土壤 EC 是土壤可水解盐含量的良好指标^[21]。设施菜地表层土壤 EC 随种植年限先增加后降低,这与曾希柏等^[22]的研究结果相一致。表层土壤 EC 在 6 ~ 10 年之前呈上升趋势,这可能因为高复种指数以及过量施用化肥使硝酸盐和亚硝酸盐在土壤表层富集^[23]。种植年限在 6 ~ 10 年后,表层土壤盐度降低,这可能因为化肥施用量减少,以及有机肥配施,亚硝酸氧化菌活性降低,抑制硝酸盐和亚硝酸盐产生^[24]。亚表层土壤 EC 逐年增加,且露地大田土壤 EC 低于设施菜地土壤,说明设施菜地土壤盐分在逐年累积,并随水向下运移^[25]。

土壤机械组成是土壤的基本物理属性,可作为土壤肥力的诊断指标^[12]。随种植年限增加,土壤粒径结构发生变化,土壤砂粒含量先增加后降低,粉粒和黏粒含量整体随种植年限增加而降低,使土壤排水性和通气性下降,土壤水分易过饱和,土壤氮磷养分挥发和流失风险增大,进而降低土壤碳、氮、磷养分有效性,不利于土壤保水保肥能力提高^[26]。这是因为长期设施菜地种植中频繁的机械扰动、外源有机物的输入和作物根系及根系周围微生物与土壤的相互作用改变了土壤物理属性和机械组成^[23]。露地大田土壤地表裸露,地表细颗粒被吹蚀,导致设施菜地种植后砂粒含量显著高于露地大田^[27]。随种植年限增加,由于水的淋洗作用,土壤中粉粒组分通过土壤裂隙随水下移^[28],造成表层土壤中粉粒的相对含量低于亚表层,砂粒含量高于亚表层土壤。

3.2 土壤肥力随种植年限的变化

设施菜地土壤有机碳高于露地大田土壤,且随种植年限增长呈先升高后降低的趋势,这与孔晨晨等^[29]对设施西瓜和李昕竹等^[30]对连作棉田的研究结果相一致。说明过量施肥在短期内能提高设施菜地有机碳储量,但在中长期过度施用化肥和保持高复种指数的种植模式会引起土壤结构破坏和土壤团聚体稳定性降低,土壤碳固存能力下降。此外,研究发现高温高湿的半封闭环境会引起土壤微生物对土壤不同组分有机碳的分解^[31-32],增加土壤团

聚体周转速率,引起土壤团聚体对有机碳的保护作用降低,有机碳矿化速率提高^[33],土壤中的有机碳含量降低。

氮是蔬菜需求量最大的矿质营养元素,也是制约蔬菜产量的重要因子。研究区土壤全氮和碱解氮随种植年限先升高后降低,这与前人研究结果相一致^[34-36]。耕作过程中长期过量施用氮肥能引起土壤氮元素积累,并沿土壤剖面发生渗漏。种植年限在 6 ~ 10 年之后土壤全氮和碱解氮呈下降趋势,这可能因为设施菜地土壤过度生产^[37],以及种植过程中粗暴翻整土地引起^[38]。此外,伴随种植年限增长,持续的作物障碍和致病菌增加^[8]导致设施菜地土壤微生物丰度和多样性显著降低,抑制了微生物对土壤矿物质氮的持续降解^[39],土壤中碱解氮含量降低。

磷是作物生长发育过程中不可缺少的营养物质,土壤中磷缺失会制约作物根系生长,磷过量累积则会导致作物代谢紊乱^[40]。设施菜地表层土壤全磷随种植年限显著增加,这与 Liu 等^[41]研究结果相一致,这与长期高温、高湿和高肥料施入的耕作环境和耕作制度相关^[42]。研究表明土壤中磷的利用率较低,磷元素被快速固定,导致磷素在土壤中累积^[43-44]。当磷素在土壤中积累过大时,土壤吸附点位处于饱和状态,导致土壤固磷能力减弱^[45-46],造成种植年限在 21 ~ 25 年时土壤全磷含量下降。磷在土壤中扩散速度慢和土壤对磷吸附固定能力强,这导致表层土壤全磷和有效磷含量整体上显著高于亚表层 ($P < 0.05$)。在种植年限为 1 ~ 5 和 6 ~ 10 年时,土壤中有效磷含量先显著增加后趋于稳定,这可能因为长期连作增加了土壤磷的迁移和淋失风险,降低土壤全磷向有效磷转化的能力。

土壤速效钾整体随种植年限增加而降低,这可能因为种植过程中过量施肥,但轻施钾肥有关。研究表明肥料增施,增加了土壤中植物和微生物可直接运用的养分,土壤过氧化氢酶活性降低,抑制了土壤的酶促反应,降低了土壤速效钾的累积^[47-48]。

不同种植年限设施菜地土壤物理属性、盐渍化和酸碱度以及养分含量的异质性较大,土壤肥力受土壤理化性状不同程度的影响。土壤中的细质组分(黏粒和粉粒)可通过与土壤养分结合或通过形成微团聚体和微孔保持土壤肥力^[49],RDA 分析结果也证实了这一结论,土壤供肥能力受土壤粉粒和

砂粒及 pH 的影响。然而,在设施种植初期粉粒和黏粒含量降低,土壤养分含量上升,这与谢青琰等^[12]研究结果相矛盾,这可能因为在砂粒含量较高的细质土壤中养分固持作用增强,矿化作用被延缓^[50]。此外,土壤质地通过影响土壤水分对有机质矿化有明显的间接控制作用。相关性分析表明,土壤粉粒和黏粒含量与 SW 呈显著正相关,SW 通过影响微生物生理过程间接影响土壤养分矿化,并通过调节底物和氧扩散、酶活性和渗透胁迫间接影响土壤供肥能力^[51]。除此之外,土壤 pH 可通过影响作物根系生长发育间接影响土壤养分的积累,刘红宜等^[52]研究表明有机碳的含量受土壤酸碱度的影响,且与 pH 呈显著负相关,这与本研究结果相一致。

3.3 土壤碳、氮、磷生态化学计量比随种植年限的变化

土壤碳、氮、磷化学计量比是土壤元素循环特征和耦合关系的重要体现。作为反映有机碳分解速率的指标,土壤 C/N 随种植年限增加呈上升趋势,说明有机碳矿化作用明显,土壤碳和氮的输入和输出处于不平衡状态^[26]。土壤 C/N 下降受种植年限和氮含量影响,一方面,土壤粉粒含量随土壤扰动增加而降低,造成土壤保肥能力减弱^[53];另一方面,土壤酸化导致部分有机态氮溶蚀,进而减少土壤氮积累^[20]。随种植年限增长,土壤 C/P 和 N/P 呈下降趋势。相关性分析表明土壤 C/P 和 N/P 受土壤全磷影响,这是因为土壤全磷增加幅度大于全氮和有机碳,使土壤 C/P 和 N/P 下降。各种种植年限土壤 N/P 均小于 10,表明土壤主要受氮元素限制。C/P 是反映磷元素有效性的指标,成土母质供磷变动较小,而磷有效性的提高最可能是因为磷肥施用。

4 结论

随设施菜地种植年限延长,耕层土壤理化特性发生明显改变。与露地大田相比,设施菜地土壤 pH 显著降低,土壤 EC 和粉粒含量明显增加,土壤出现酸化和盐渍累积的状态。

设施菜地短期种植可促进有机碳、全氮、碱解氮和速效钾养分的累积,但在种植年限为 6 ~ 10 年后,除磷以外的土壤养分含量均出现下降,因此中长期设施菜地种植过程中应注意氮和钾养分补充。随种植年限增加,设施菜地磷含量持续增长,生态化学计量比表现为土壤 C/N 上升,土壤 C/P 和

N/P 下降。

综上,针对中长期设施菜地土壤供肥能力下降、养分失衡的问题,应采取降低磷肥施用量,补施氮肥,增施有机肥,以降低土壤酸化和土壤结构变差风险,阻控设施菜地土壤供肥能力进一步下降和失衡。

参考文献:

- [1] 蒋卫杰,邓杰,余宏军. 设施园艺发展概况、存在问题与产业发展建议[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3515-3523.
- [2] 黄泽在,曲志强,李守明. 以肥调水提高旱地农业生产水平[J]. 中国土壤与肥料, 1983(6): 3-5.
- [3] Li Q J, Andom O, Li Y L, et al. Responses of grape yield and quality, soil physicochemical and microbial properties to different planting years[J]. European Journal of Soil Biology, 2024, 120: 103587.
- [4] 杨舒. 科技赋能“菜篮子”,设施农业大有可为[N]. 光明日报, 2022-05-26(8).
- [5] 闫鹏,张靖,沈健林,等. 有机无机肥配施对设施菜地 N₂O 排放和 NH₃ 挥发的影响[J]. 农业现代化研究, 2023, 44(4): 701-711.
- [6] 许仙菊,姜晓蕊,陈丹艳,等. 甘薯连作障碍发生的土壤养分因素探讨[J]. 中国土壤与肥料, 2024(4): 102-107.
- [7] 张英英,魏玉杰,吴之涛,等. 不同种植年限对特殊药材土壤化学性质和微生物多样性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(1): 150-159.
- [8] Li L Z, Zhao C S, Chen Q F, et al. Study on microbial community structure and soil nitrogen accumulation in greenhouse vegetable fields with different planting years[J]. Agronomy, 2022, 12(8): 1911.
- [9] Zhou Z X, Tian F, Zhao X, et al. Short-term but not long-term perennial mugwort crop increases soil organic carbon in Northern China Plain[J]. Environmental Science, 2022, 13: 975169.
- [10] 赵阳阳,刘银双,宋瑶,等. 设施番茄种植年限对土壤理化性质及微生物群落的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(12): 6982-6991.
- [11] 杨园媛,贾圣青,贺晓燕,等. 日光温室土壤养分变化及次生盐渍化程度与种植年限的关系[J]. 中国土壤与肥料, 2020(6): 83-88.
- [12] 谢青琰,张梦瑶,高永恒. 青藏高原不同年限日光温室中高寒草甸土壤机械组成、养分与微生物活性变化[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(4): 603-608.
- [13] 卢鑫,周向睿,杜明新,等. 不同年龄紫穗槐对沙化土壤的改良效应[J]. 草业科学, 2013, 30(7): 994-1001.
- [14] 丁亚会,张云鹤,孙宁,等. 我国设施农业发展的国际经验与启示[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(16): 1-8.
- [15] 彭澎,梁龙,李海龙,等. 我国设施农业现状、问题与发展建议[J]. 北方园艺, 2019(5): 161-168.



- [16] 方玉凤, 刘文环, 崔琳, 等. 弱酸性森林土壤有效磷的测定方法比较 [J]. 东北林业大学学报, 2018, 46 (12): 75-86.
- [17] 王学霞, 张磊, 张卫东, 等. 种植年限对京郊设施菜地温室气体排放的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2021, 40 (7): 1601-1610.
- [18] Han J P, Shi J C, Zeng L Z, et al. Effects of nitrogen fertilization on the acidity and salinity of greenhouse soils [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22 (4): 2976-2986.
- [19] 李嘉欣, 李智, 郭明月, 等. 不同种植年限设施蔬菜土壤的理化性质及对供磷能力的影响 [J]. 江苏农业科学, 2024, 52 (1): 210-218.
- [20] Cai Z, Wang B, Xu M, et al. Nitrification and acidification from urea application in red soil (Ferralic Cambisol) after different long-term fertilization treatments [J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, 14 (9): 1526-1536.
- [21] Bouaroudj S, Menad A, Bounamous A, et al. Assessment of water quality at the largest dam in Algeria (Beni Haroun Dam) and effects of irrigation on soil characteristics of agricultural lands [J]. Chemosphere, 2019, 219: 76-88.
- [22] 曾希柏, 白玲玉, 苏世鸣, 等. 山东寿光不同种植年限设施土壤的酸化与盐渍化 [J]. 生态学报, 2010, 30 (7): 1853-1859.
- [23] Ye C, Zheng G, Tao Y, et al. Effect of soil texture on soil nutrient status and rice nutrient absorption in paddy soils [J]. Agronomy, 2024, 14 (6): 1339-1339.
- [24] Liang F, Wen Y, Dong X, et al. Response of activity and community composition of nitrite-oxidizing bacteria to partial substitution of chemical fertilizer by organic fertilizer [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28 (23): 29332-29343.
- [25] 高新昊, 张英鹏, 刘兆辉, 等. 种植年限对寿光设施大棚土壤生态环境的影响 [J]. 生态学报, 2015, 35 (5): 1452-1459.
- [26] 黑杰, 金强, 杨文文, 等. 福州市不同种植年限茉莉花园土壤碳、氮、磷及生态化学计量比特征 [J]. 水土保持学报, 2022, 36 (1): 288-296.
- [27] 付东升, 任晓萌, 王燕玲, 等. 农牧交错带不同利用方式土壤粒径分布特征——以呼和浩特市武川县为例 [J]. 干旱区研究, 2022, 39 (4): 1322-1332.
- [28] 陈进豪, 范弢, 户红. 滇东海峰岩溶盆地石漠化坡地土壤机械组成和有机碳的变化特征 [J]. 水土保持通报, 2020, 49 (5): 33-39.
- [29] 孔晨晨, 张世文, 王维瑞, 等. 不同连作年限设施农用地土壤有机碳与细菌群落功能特征 [J]. 农业机械学报, 2024, 55 (2): 326-337.
- [30] 李昕竹, 贡璐, 唐军虎, 等. 塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳组分特征及其与理化因子的相关性 [J]. 环境科学, 2022, 43 (10): 4639-4647.
- [31] 李嘉伟, 韩秀丽, 王梦迪, 等. 种植年限对设施葡萄园养分投入与土壤理化性质的影响 [J]. 北方园艺, 2023 (22): 76-84.
- [32] 王茹, 张永清, 宗宁, 等. 长期增温对西藏高寒草甸土壤团聚体周转和稳定性影响 [J]. 土壤通报, 2023, 54 (3): 596-605.
- [33] Jie Z, Dan W, Baoku Z, et al. Responses of soil aggregation and aggregate-associated carbon and nitrogen in black soil to different long-term fertilization regimes [J]. Soil & Tillage Research, 2021, 213: 105157.
- [34] 祝海燕, 李婷婷. 设施果菜类蔬菜耕层土壤养分积累与棚龄的相关性 [J]. 中国瓜菜, 2019, 32 (5): 45-49.
- [35] 刘平, 李丽君, 霍晓兰, 等. 日光温室长期施肥条件下耕层土壤计量化学变化特征 [J]. 灌溉排水学报, 2024, 43 (2): 61-66.
- [36] 张敬智, 王青川, 边明文, 等. 不同种植年限对设施蔬菜土壤养分演变规律及其变异特征的影响 [J]. 农业工程技术, 2022, 42 (1): 77-82.
- [37] 朱玲, 普布次仁. 日喀则市不同种植年限蔬菜大棚土壤 pH 值及养分变化特征分析 [J]. 乡村科技, 2022, 13 (1): 69-71.
- [38] 徐文斌, 罗锋, 黄智刚, 等. 不同种植年限沙田柚果园土壤养分及重金属含量特征研究 [J]. 现代园艺, 2023, 46 (23): 22-31.
- [39] 邓博, 郭澎, 卫磊嘉, 等. 外源添加物对不同土地利用方式下土壤肥力的影响 [J]. 中国农学通报, 2024, 40 (8): 91-100.
- [40] Mai W, Xue X, Feng G, et al. Can optimization of phosphorus input lead to high productivity and high phosphorus use efficiency of cotton through maximization of root/mycorrhizal efficiency in phosphorus acquisition? [J]. Field Crops Research, 2018, 216: 100-108.
- [41] Liu G M, Huang B, Hu W Y, et al. Long-term vegetable production significantly reduces the selenium adsorption in two typical plastic shed soils [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022, 331: 107-910.
- [42] Bian T, Zheng S W, Li X, et al. The variation of soil phosphorus fractions and microbial community composition under consecutive cucumber cropping in a greenhouse [J]. Horticulturae, 2022, 8 (4): 320.
- [43] Yan C Z, Ruo N L, Li Y W, et al. Threshold of soil olsen-P in greenhouses for tomatoes and cucumbers [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2010, 41 (20): 2383-2402.
- [44] 方兵, 陈林, 王阳, 等. 设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素 [J]. 环境科学, 2023, 44 (1): 452-462.
- [45] 白秀玲, 马建华, 孙艳丽, 等. 开封城市土壤磷素组成特征及流失风险 [J]. 环境科学, 2018, 39 (2): 909-915.
- [46] 郭玉冰, 刘建玲, 郭巨秋, 等. 长期施用磷肥和有机肥对菜地土壤磷素有效性的影响 [J]. 河北农业大学学报, 2020, 43 (4): 76-82.

[47] 秦秦, 宋科, 孙丽娟, 等. 生物有机肥与化肥减量配施对稻田土壤酶活性和土壤肥力的影响 [J]. 上海农业学报, 2022, 38 (1): 21-26.

[48] 朱寒阳, 傅海平, 张国林, 等. 不同施肥措施对茶园土壤酶活性及土壤肥力的影响 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46 (23): 371-374.

[49] Krull E S, Baldock J A, Skjemstad J O. Importance of mechanisms and processes of the stabilisation of soil organic matter for modelling carbon turnover [J]. Functional plant biology: FPB, 2003, 30 (2): 207-222.

[50] Li H C, François A, Wang X L, et al. Field-scale assessment of direct and indirect effects of soil texture on organic matter mineralization during a dry summer [J]. Science of the Total Environment, 2023, 899: 165749-165749.

[51] Moyano E F, Manzoni S, Chenu C. Responses of soil heterotrophic respiration to moisture availability: an exploration of processes and models [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 59: 72-85.

[52] 刘红宜, 陈冲, 卢瑛, 等. 珠江三角洲平原农田土壤有机碳组分及剖面分布特征 [J]. 土壤通报, 2017, 48 (2): 399-405.

[53] 候宁, 黑杰, 金强, 等. 福州滨海地区菜地和果园土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征 [J]. 环境科学, 2023, 44 (2): 954-964.

Study on the effect of planting years on the physicochemical characteristics and fertilizer supply capacity of soil in facility vegetable plots

CHEN Liang-liang¹, ZHANG Hong-ling^{1*}, SUN Ling-ling¹, DUAN Yun-si¹, ZHANG Jin-xin¹, LIU Xin-yi¹, CHEN Yi-yang¹, MA Guo-feng² (1. Key Laboratory of Eco-restoration of Regional Contaminated Environment, Ministry of Education, Shenyang University, Shenyang Liaoning 110044; 2. Institute of Technical Innovation, Shenyang University, Shenyang Liaoning 110044)

Abstract: Continuous cropping obstacles are caused by high-frequency continuous planting in medium and long-term protected vegetable fields, and the soil has problems such as decreased fertilizer supply capacity, nutrient imbalance, soil acidification and salt accumulation. In order to elucidate the changing law of soil physicochemical properties and fertilizer supply capacity of facility vegetable land with the planting years, typical facility vegetable land in Shenyang was taken as the research object, soil samples of the surface layer (0-20 cm) and sub-surface layer (20-40 cm) soil of the planting years 1-5, 6-10, 11-15, 16-20 and 21-25 years were collected, the changing law of soil physicochemical properties and nutrient content with the planting years and the key influencing factors were analyzed. The results showed that as the planting years increased, the soil pH first decreased and then increased, which was significantly lower than the open field control soil; the soil electrical conductivity showed the opposite trend. The contents of surface soil organic carbon, total nitrogen and alkaline hydrolyzable nitrogen increased to the maximum between 6-10 years, significantly increasing by 41.9%, 160.9% and 747.6%, respectively, compared with the open field ($P<0.05$). When the planting years were 21-25 years, the contents of organic carbon, total nitrogen and alkaline hydrolyzable nitrogen dropped to the lowest. The soil available potassium content showed a downward trend with the increase of planting years, while the total phosphorus and available phosphorus contents first increased then decreased with the increase of planting years. The changing patterns of fertilizer supply capacity of subsurface soils were basically the same as the surface soil. In summary, it was suggested that during the cultivation process of facility vegetable field, the fertilization measures should be adjusted in a timely manner with the change of cultivation period, and the facility vegetable field with cultivation period of more than 10 years, phosphorus fertilizer should be reduced, nitrogen fertilizer and potassium fertilizer should be supplemented, and organic fertilizers should be gradually increased.

Key words: facility vegetable plots; planting years; soil fertility; soil physicochemical properties