

张大庚,栗杰,董越,等.设施菜田土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J].江苏农业科学,2023,51(4):232-238.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.04.034

设施菜田土壤碳氮磷生态化学计量学特征

张大庚,栗杰,董越,肖柄政,黄怡婷,杨思雨

(沈阳农业大学土地与环境学院,辽宁沈阳 100866)

摘要:为探明在设施栽培条件下菜田土壤碳氮磷的生态化学计量学特征及其影响的主导因子,在调查辽宁省设施菜田栽培现状的基础上,以辽宁省东部、中部和西部共 12 个设施蔬菜产区 165 个蔬菜大棚表层土壤为研究对象,测定分析了土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量及生态化学计量学比。结果表明,辽宁省设施土壤 SOC、TN、TP 含量平均值分别达到 (26.56 ± 7.97) 、 (2.67 ± 0.79) 、 (3.32 ± 0.69) g/kg,养分含量均处于相对丰富水平。辽宁省设施菜田土壤 C/N、C/P、N/P 频率分布相对集中,平均值分别为 9.92 ± 0.85 、 8.74 ± 4.21 、 0.90 ± 0.51 ,均低于我国农田土壤的平均水平。随着种植年限的增加,设施菜田土壤 C/N 变化幅度较小,N/P 和 C/P 则略有降低。设施栽培条件下,菜田土壤 C、N、P 生态化学计量比频率分布较集中,存在一定的耦合关系,土壤 C、N、P 生态化学计量学特征受土壤有机碳的矿化和磷素积累的影响相对较大。

关键词:设施菜田土壤;碳;氮;磷;生态化学计量学

中图分类号:S158.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)04-0232-07

生态化学计量学是研究生物系统的能量和碳(C)、氮(N)、磷(P)等元素平衡及其耦合关系的科学^[1]。C、N、P 作为土壤的基本化学组成元素,其计量比直接影响了土壤中 C、N、P 循环对全球生态系统化学变化的响应^[2]。不同类型土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)及全磷(TP)的生态化学计量特征存在一定的差异,重庆市紫色土土壤 C:N:P 约为 17:2:1^[3],吉林地区黑土土壤 C:N:P 约为 36:3.6:1^[4],中国 2 384 个 0~25 cm 土壤剖面 C:N:P 均值为 60:5:1^[5]。近年来,有关林地、湿地、草地、耕地等土壤碳氮磷生态计量学的研究不断增加,从新的视角探讨了土壤养分循环、土壤微生物、有机质矿化等相关方面的内容^[6-9]。但涉及养分高投入设施菜田土壤 C、N、P 生态计量比的研究相对较少。与自然生态系统不同,设施栽培过程中盲目和过量施肥现象普遍,再加上相对封闭的特殊环境,导致设施栽培土壤出现次生盐渍化、土壤板结、养分失调、微生物区系失调等诸多退化问题^[10],使其具有特殊的生物化学过程,设施菜田土壤的 C、N、P 化学计量特征呈现一定的多变性和复

杂性。因此,有必要充分了解设施菜田土壤 C、N 和 P 生态化学计量特征及其与不同因子之间的相互作用,对阐明设施菜田系统养分循环机制和预测土壤质量演变趋势具有重要的意义。

设施蔬菜是辽宁省农业支柱产业之一,全省蔬菜生产设施面积超过 26.67 万 hm^2 ,种植番茄、茄子、黄瓜、辣椒为主^[11],产量和产值均占全国的 15% 以上。因此,本试验以辽宁省设施菜田土壤为研究对象,选取种植面积相对较大的大连市瓦房店市、鞍山市海城市 and 台安县、朝阳市北票市、凌源市和喀喇沁左翼蒙古族自治县、葫芦岛市南票区和绥中县、锦州市凌海市、铁岭市铁岭县、沈阳市辽中区和新民市等 12 个设施蔬菜种植区,采集 165 个塑料大棚 0~20 cm 表层土壤。在室内分析土壤有机碳含量、全氮含量、全磷含量和土壤其他理化性质的基础上,阐明辽宁省不同地区设施蔬菜土壤的 C、N、P 化学计量特征,揭示影响设施菜田土壤 C、N、P 生态化学计量比的主体因素,以为设施菜田土壤养分的均衡增效、平衡施肥提供基础数据和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区为辽宁省主要设施蔬菜产区,共采集 12 个地区 165 个塑料大棚,包括辽宁省东部地区大连

收稿日期:2022-05-10

基金项目:国家重点研发计划(编号:2016YFD0201004)。

作者简介:张大庚(1975—),女,辽宁凌海人,博士,副教授,主要从事土壤肥力和农业环境与生态方面的研究。E-mail:zhangdageng@syau.edu.cn。

市 14 个和鞍山市 41 个、西部地区朝阳市 17 个、葫芦岛市 14 个和锦州市 28 个以及中部地区铁岭市 20 个和沈阳市 31 个。2018 年 10 月调查了各产区设施蔬菜种植年限、施肥方式、肥料类型、施肥数量、作物种类等基本信息。调查区设施蔬菜的栽培年限为 2~38 年,其中海城和凌海两地设施蔬菜栽培历史较长,建棚时间最长均超过了 30 年。不同建造年限的设施大棚现均为钢骨架结构,一些建造较早的大棚基本都进行了改建。施肥类型主要是有机肥和化肥,包括少量生物肥料。设施蔬菜种植施入的化肥以氮磷钾复合肥为主,随水施入,施入量为 $750 \sim 1\,050 \text{ kg/hm}^2$,有些农户会配施一定量的磷酸二铵。有机肥在种植作物前作为底肥施入,施入量为 $300 \sim 375 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,有机肥包括牛粪、羊粪、猪粪等不同种类。大多数大棚采用滴灌的方式,并覆有地膜,2015 年后新建的大棚一般有自动放风设备。种植的蔬菜以番茄、黄瓜、茄子、辣椒为主。

1.2 土壤样品的采集

在每个设施蔬菜产区选择建设规模相近,种植蔬菜种类具有代表性的大棚采集土样。为减少采用误差,在每个设施蔬菜棚内采用“S”形随机五点采样法,在 2 棵作物之间采集 5 个表层土壤(0~20 cm),混合均匀后取约 1 kg 装入自封袋中,共 165 个土样。采集的土样经风干后,剔除石块、植物根茎等杂物,过 20 目筛备用。

1.3 测定项目与方法

土壤有机碳(SOC)含量测定采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 - \text{H}_2\text{SO}_4$ 消煮法;全氮(TN)含量测定采用硫酸消煮凯氏定氮法;全磷(TP)含量测定采用硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法;全钾(TK)含量的测定采用 NaOH 熔融-火焰光度计法;碱解氮(AN)含量测定采用碱解扩散法;有效磷(AP)含量测定采用 Olson 法;速效钾(AK)含量测定采用醋酸铵浸提-火焰

光度法;酸碱度(pH 值)测定采用电位法(水土比 2.5:1);土壤电导率(EC)测定采用电导率仪法。

1.4 数据处理

采用 SPSS 软件进行数据统计和比较分析,用单因方差分析(one-way ANOVA)进行差异显著性分析。土壤碳、氮、磷等因子与全量养分的 C/N、C/P、N/P 数据作图采用 Excel 和 Origin 进行。

2 结果与分析

2.1 设施菜田土壤有机碳、全氮和全磷含量

由图 1 可知,受各地区初始土壤类型、施肥量、施肥方式及作物类型差异的影响,辽宁省各地区设施菜田土壤 SOC、TN 和 TP 含量分布均存在一定的差异,变异系数均较大。除了朝阳地区 TP 的变异系数为 9.71%,其他地区各指标均高于 20%,最高达 50.91%。土壤平均 SOC 含量最高的是大连瓦房店地区,为 $(35.22 \pm 11.26) \text{ g/kg}$ (图 1-a)。但差异较大的是朝阳和鞍山地区,变异系数均高于 40%,其中朝阳地区变异系数达到了 47.93%,SOC 含量极差达到了 54.03 g/kg 。变异系数最小的是锦州地区,也达到了 27.69%。土壤 TN 与 SOC 的分布规律相似,大连瓦房店地区 TN 含量最高,平均值为 $(3.61 \pm 1.05) \text{ g/kg}$ (图 1-b)。朝阳和鞍山两地变异系数较大,分别为 46.26% 和 45.33%。沈阳地区的 TN 含量平均值最低,仅为 $(1.52 \pm 0.57) \text{ g/kg}$ 。设施菜田土壤 TP 含量的分布与 SOC 含量和 TN 含量有一定的差异(图 1-c)。其中,鞍山地区土壤 TP 含量相对较高,平均值为 $(4.90 \pm 0.79) \text{ g/kg}$,中位值在各地区也是最高的,变异系数达 33.80%。土壤 TP 含量最特别的是朝阳地区,TP 含量的变异系数仅为 9.71%,极差仅为 0.63 g/kg ,平均值最低,仅为 $(1.83 \pm 0.18) \text{ g/kg}$ 。

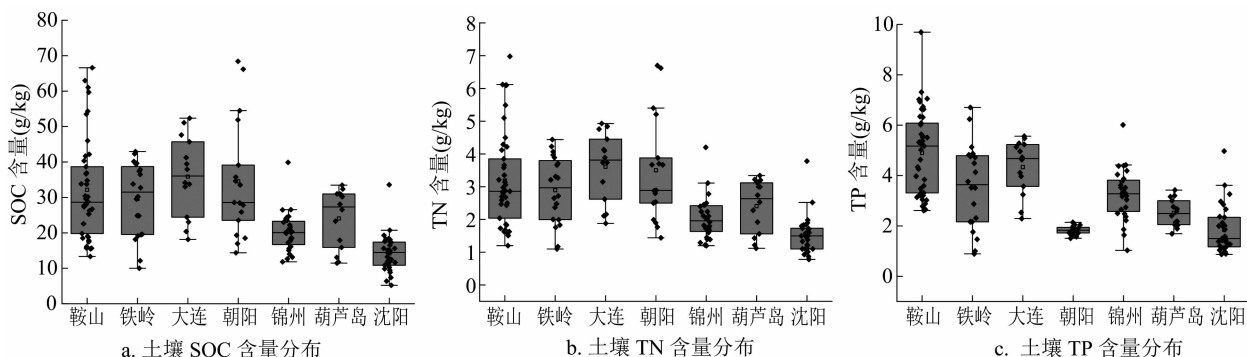


图1 各地区设施蔬菜土壤 SOC、TN、TP 含量分布

从辽宁省整体来看,设施菜田土壤 SOC 含量的变化幅度较大,为 5.21 ~ 68.40 g/kg。从正态分布图(图 2-a)来看属于偏态分布,其中偏度为 1.056,分布在右侧的数据相对较多(表 1)。峰度值为 0.922,相对较小,数据分布较平缓,SOC 主要分布在 10 ~ 35 g/kg 范围内。土壤 TN 含量的分布与 SOC

相似,也属于偏态分布,偏度和峰度值均大于 0(表 2),主要集中在 1 ~ 4 g/kg 范围内(图 2-b)。与土壤 SOC 含量和 TN 含量相比,TP 含量分布的偏度和峰值最小,均大于 0,但小于 1,在 0.5 ~ 7.5 g/kg 范围内接近于正态分布(图 2-c)。

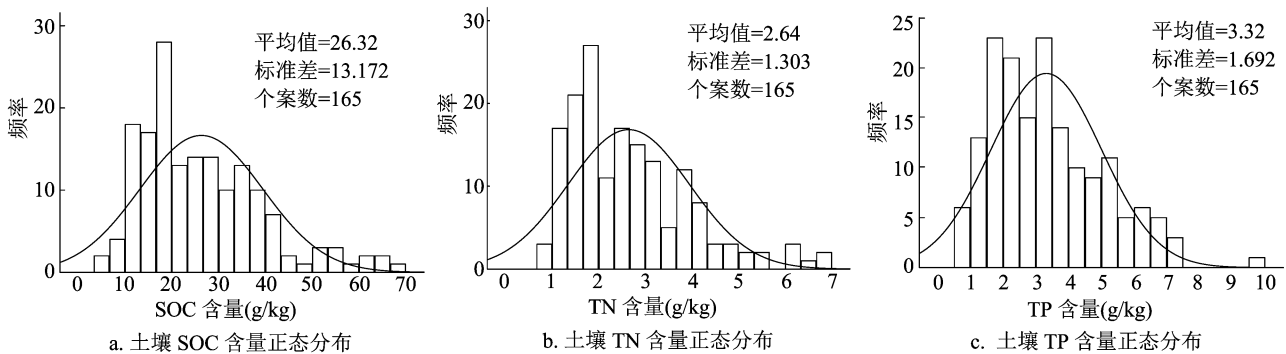


图2 辽宁省设施菜田土壤 SOC、TN、TP 含量正态分布

表 1 设施菜田土壤 SOC 含量、TN 含量、TP 含量及 C、N、P 比值的变异系数

采样点	变异系数(%)					
	SOC 含量	TN 含量	TP 含量	C/N	C/P	N/P
鞍山	44.25	45.33	33.80	4.95	28.60	29.58
铁岭	35.01	35.60	47.34	7.46	21.46	20.93
大连	31.39	29.22	24.92	6.36	42.98	43.01
朝阳	47.93	46.26	9.71	3.53	47.13	45.60
锦州	27.69	31.60	30.81	9.11	27.86	29.90
葫芦岛	34.47	33.59	21.53	4.33	40.53	39.53
沈阳	37.58	37.16	50.91	13.49	22.97	23.14

表 2 设施菜田土壤 C、N、P 及其比值正态分布统计特征

变量	SOC 含量	TN 含量	TP 含量	C/N	C/P	N/P
偏度	1.056	1.094	0.782	-1.288	2.057	2.896
峰度	0.922	0.989	0.788	4.736	5.015	10.915
变异系数(%)	50.04	49.24	50.90	8.57	48.17	56.67

2.2 辽宁省各地区设施蔬菜土壤 C、N、P 的比值

从总体来看,辽宁省设施菜田土壤的 C/N、C/P 和 N/P 平均值分别为 9.92 ± 0.85 、 8.74 ± 4.21 和 0.90 ± 0.51 。由图 3 可知,辽宁省各地区设施菜田土壤 C/N 分布存在一定的差异,但差异相对较小,大部分分布在 10.00 左右。其中朝阳地区 C/N 差异最小,变异系数仅为 3.53%,差值为 1.1。沈阳地区变异系数为 13.49%,差值最大,为 4.72。其他地区的 C/N 的变异系数则均低于 10.00%。从各地区平均值来看,葫芦岛地区最高,平均值为 10.46 ± 0.43 ,沈阳地区最低,平均值为 9.30 ± 1.26 。

与 C/N 相比,设施菜田土壤 C/P 和 N/P 变化范围较大,各地区的变异系数均在 20.00% 以上,最高接近 50.00%。其中朝阳地区 C/P 和 N/P 相对较高,平均为 18.89 ± 4.90 和 1.92 ± 0.87 ,变异系数分别是 45.60% 和 47.13%,变化幅度较大。变异系数最小的是铁岭地区,C/P 为 21.46%,N/P 为 20.93%。但 C/P 和 N/P 平均值最小的是鞍山地区,分别为 6.56 ± 1.20 和 0.65 ± 0.12 。

从正态分布图来看,C/N、C/P 和 N/P 这 3 个参数分布相对集中(图 4)。由表 2 可知,C/N 分布的偏度值为负值,分布偏左,但偏移程度相对较小,峰

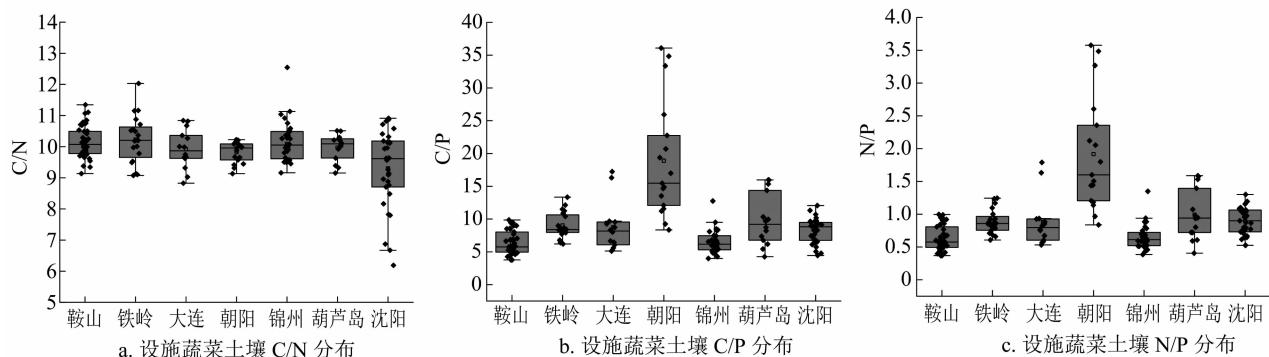


图3 辽宁省各地区设施蔬菜土壤 C/N、C/P 和 N/P 分布

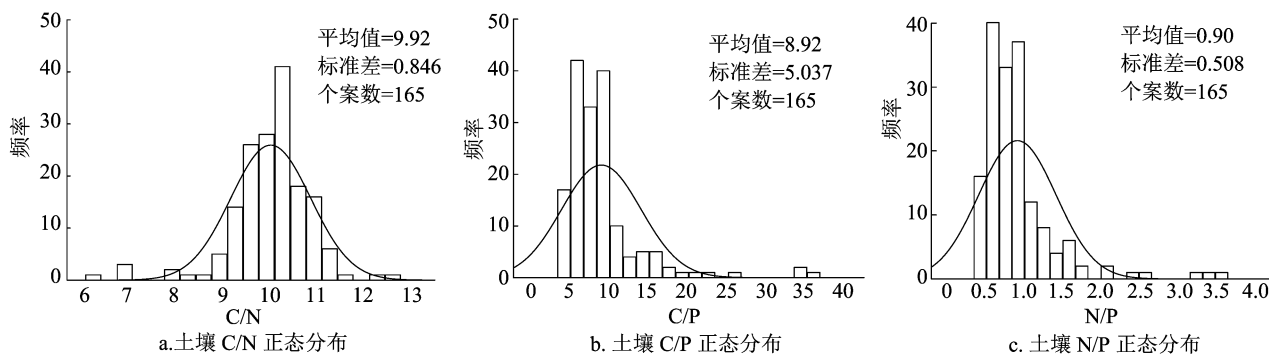


图4 辽宁省设施蔬菜土壤 C/N、C/P 和 N/P 正态分布

度值为 4.736, 分布相对较陡峭, 主要集中在 9.0 ~ 10.0 之间。C/P 和 N/P 分布的偏度值则均大于 2, 因此均属于偏度分布, 且偏右。峰度值均相对较高, 分布陡峭, 特别是 N/P 的峰度值达到了 10.915, 分布主要集中在 0.48 ~ 1.10 之间。

2.3 设施菜田土壤生态化学计量比随种植年限的变化

为减少土壤类型对生态化学计量比的影响, 以铁岭市铁岭县不同种植年限设施菜田土壤为研究对象 (该地原始土壤类型为发育于黄土性母质的棕壤, 性质差异相对较小), 进一步分析了土壤 C、N、P 计量比随种植年限的变化。所选择的大棚种植蔬菜种类以黄瓜和番茄为主, 施肥以猪粪和氮磷钾复合肥为主, 种植年限为 2 ~ 28 年。从图 5 可以看出, C/N 随种植年限的增加, 在设施栽培 2 ~ 20 年之间呈波动变化, 无明显变化趋势, 在栽培第 28 年达到了最高值 12.03。N/P 随种植年限增加呈逐渐降低的趋势, 种植 2 年 N/P 最高, 为 1.17, 在种植 28 年时, 则降为 0.65。C/P 随种植年限的增加略有降低, 但波动较大, 趋势不明显。

2.4 土壤碳、氮、磷比值与理化性质的关系

相关分析结果 (表 3) 表明, 设施菜田土壤 C/N

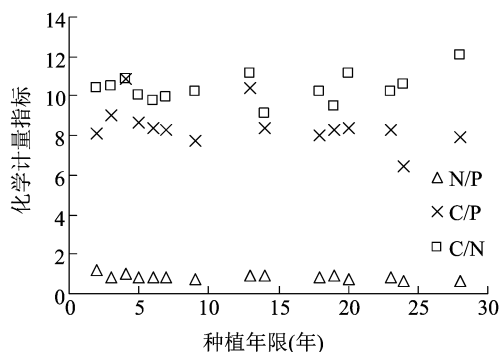


图5 不同种植年限设施菜田土壤化学计量学指标

受土壤理化性质的影响较小, 仅与 SOC 含量呈极显著正相关关系, 与有效磷 (AP) 含量和 TP 含量呈显著正相关关系, 与其他指标之间的相关性均未达到显著水平。C/P 则与土壤 pH 值、碱解氮 (AN) 含量、SOC 含量及 TN 含量之间均呈极显著正相关关系, 与 TP 含量和 AP 含量则极显著负相关。N/P 与土壤 pH 值、AN 含量、速效钾 (AK)、SOC 含量及 TN 含量呈极显著正相关关系, 与 TP 含量呈极显著负相关关系。土壤电导率对 C、N、P 比值的影响较小, 与各比值之间的相关性均未达到显著水平。因此, 从相关系数分析, 设施菜田土壤中的有机碳含量和土壤全磷含量对 C、N、P 比值的影响较大。

表 3 设施菜田土壤 C、N 和 P 比值与理化性质的相关性

影响因子	相关系数		
	C/N	C/P	N/P
pH 值	-0.098	0.305 **	0.323 **
AN 含量	0.079	0.220 **	0.204 **
AP 含量	0.194 *	-0.840 **	-0.116
AK 含量	0.013	0.209 *	0.204 **
EC	-0.006	0.050	0.051
SOC 含量	0.205 **	0.439 **	0.399 **
TN 含量	0.079	0.440 **	0.417 **
TP 含量	0.187 *	-0.385 **	-0.416 **
TK 含量	-0.011	0.197 *	0.201 *

注：“*”表示相关性显著($P<0.05$)，“**”表示相关性极显著($P<0.01$)。

3 讨论与结论

3.1 设施菜田土壤 SOC 含量、TN 含量和 TP 含量特征

土壤有机碳、全氮和全磷的含量是表征土壤肥力水平的重要元素,是研究土壤生产力元素平衡和生物系统能量平衡过程的重要因素^[12-13]。本研究发现,在辽宁省不同地区的设施菜田土壤以及同一地区不同采样点土壤的 SOC、TN 和 TP 含量均有较大的差异。在 7 个采样地区 SOC 含量的变异系数在 27.69%~47.96% 之间,TN 在 29.22%~46.26% 之间,TP 在 9.71%~50.91% 之间。除了朝阳地区 TP 含量的变异系数低于 15%,其他地区均高于 20%。按照第 2 次土壤普查土壤养分分级标准,辽宁省设施菜田土壤中的 165 个采样点 SOC 含量的平均值为 26.56 g/kg,70% 以上的采样点土壤有机质处于相对较丰富水平以上;TN 含量的平均值为 2.67 mg/kg,83% 左右土壤 TN 含量达到了较丰

富的水平以上;TP 含量的平均值为 3.32 mg/kg,96% 的设施土壤全磷含量处于丰富水平,剩余 4% 为较丰富水平。辽宁省设施菜田土壤有机质、全氮和全磷的含量均较丰富,其中磷素在土壤中的累积量相对较高。因此,随着种植年限的增加,设施土壤出现了养分富集的状况,这与许多有关设施菜田土壤养分的研究结果^[14-16]一致。

由于在设施栽培特殊的环境条件下,蔬菜复种率较高,有机肥和化肥施用量高且频繁,这正是土壤有机碳和氮磷的重要输入途径,从而增加了土壤中 C、N、P 的含量。据统计,我国典型设施栽培生产基地,每年 N、P 养分的平均投入量为 4 088、3 656 kg/hm²,且施肥比例(1:0.9)与作物需求比例(1:0.3)严重失衡,造成 N、P 的养分利用率非常低,仅为 24% 和 8%^[17-18]。设施蔬菜种植中常施入大量有机肥作为底肥,约 18 000 kg/hm²^[19],由于大棚室内温度较高,加速了土壤中有机肥分解速率,同时由于蔬菜对水分需求较多,土壤湿度大,一定程度上会影响土壤中微生物活性,进而影响有机碳的矿化速率。大量化肥和有机肥的施入加速了土壤中 C、N、P 的积累,各地区不同施肥量、施肥种类及不同蔬菜品种等均可引起设施菜田土壤 SOC、TN 和 TP 含量的差异。

基于 165 个点设施蔬菜土壤 SOC 含量、TN 含量和 TP 含量回归拟合分析(图 6)表明,SOC 含量、TN 含量和 TP 含量之间的拟合程度均较高,相关性均达极显著水平。其中,SOC 含量和 TN 含量的拟合程度最高, r 值达到了 0.989 8,而 SOC 含量和 TP 含量、TN 含量和 TP 含量之间的拟合程度相对较低, r 值分别为 0.600 9 和 0.592 3。说明设施菜田土壤 C、N、P 间存在一定的耦合关系。

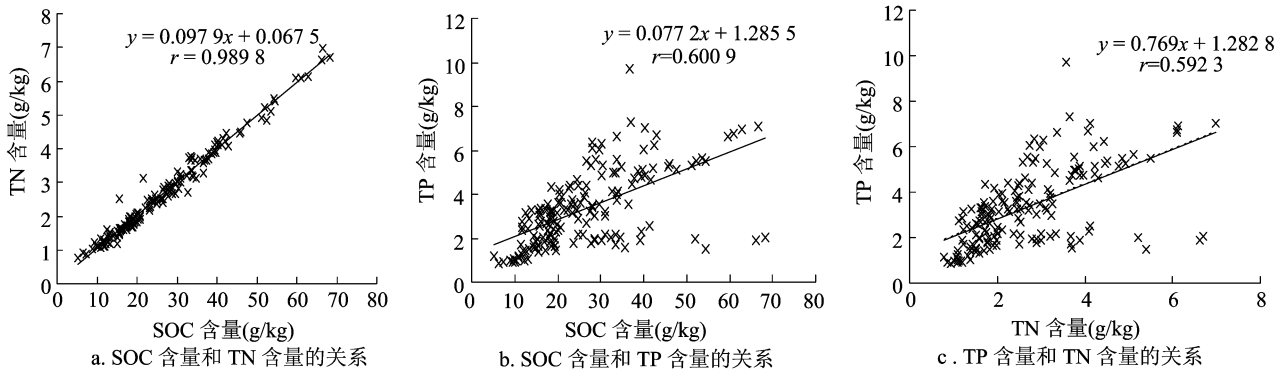


图 6 辽宁省设施菜田土壤 SOC 含量、TN 含量和 TP 含量之间的关系

3.2 设施菜田土壤 C、N、P 生态化学计量比特征

已有研究表明,土壤 C、N、P 生态化学计量比是反映土壤养分平衡的重要指标^[20-21],能够进一步揭示土壤中养分的转化和循环过程,分析土壤养分之间的耦合关系。土壤 C、N、P 生态化学计量比的大小不仅受到水热条件、土壤类型和地形地貌等自然因素的影响,同时也受到施肥、耕作方式等人类活动的显著影响^[22]。设施菜田土壤在人为活动的强烈影响下,C、N、P 计量比必然发生一定的变化。从正态分布图可知,辽宁省设施菜田土壤 C/N、C/P 和 N/P 的分布相对集中,C/N 主要集中在 9.00 ~ 11.00 之间,共 143 个采样点,占总采样点的 86.7%;C/P 主要集中在 4.75 ~ 10.00 之间,共 122 个采样点,占总采样点的 73.9%;N/P 则主要集中在 0.48 ~ 1.10 之间,共 127 个采样点,占总采样点的 77.0%。其中,设施菜田土壤 C/N 的变异系数最小,仅为 4.7%。因此,虽然受典型设施环境和施肥的影响,不同年限设施菜田土壤全量 C、N、P 有一定的波动,但 C、N、P 比值保持相对稳定的状态。

C/N 在一定程度上可以反映出土壤中有有机物质的分解和矿化程度以及有机物质对土壤肥力的潜在贡献。当 C/N 大于 25 时,土壤有机碳含量相对较高,有机质处于积累的过程;当 C/N 在 12 ~ 16 之间时,则表示部分有机碳被土壤微生物分解,已发生矿化过程^[23]。辽宁省设施菜田土壤 C/N 均值为 9.92 ± 0.85 ,万欣等研究发现,山东省设施土壤 C/N 平均值仅为 $8.4^{[24]}$ 。2 个地区的设施菜田土壤的 C/N 均低于我国农田土壤 (11.3)、湿地土壤 (18.2)、稻田土壤 (14.2)^[3,25]。本研究设施菜田土壤 C/N 与土壤有机碳含量呈极显著正相关,与全氮含量无显著相关性,由此认为土壤中有机碳含量限制 C/N 的大小。从另一角度也说明了不同类型土壤中有机碳含量的稳定性,湿地和稻田土壤处于还原状态,因此土壤有机碳含量相对稳定,C/N 相对较高。而在设施栽培条件下,虽然施入高量的有机肥,但高温高湿的环境条件促进了有机碳的矿化,降低了土壤的 C/N。经统计,辽宁省设施蔬菜 SOC 与 TN 含量呈极显著正相关关系 ($r = 0.989\ 8$,图 6),不同地区不同土壤类型的设施土壤的 C/N 较接近(图 3)。而且随着种植年限的增加,设施蔬菜土壤的 C/N 也未发生较大的变化,因此在调查的区域范围内设施蔬菜土壤存在较稳定的 C、N 耦合关系。在设施栽培条件下,土壤生物与典型的设施环境之

间的相互作用较为剧烈,在多年的种植过程中,虽然人为干扰较强烈,但经过多年的种植土壤生物与环境的协同进化可能已达到一种相对的准平衡状态。土壤 C/N 与 SOC 含量呈极显著正相关关系,因此 SOC 含量一定程度上限制了土壤 C/N 的大小。

林丽等研究认为,土壤 C/P 是土壤 P 素矿化能力的标志,并且在一定程度上对植物生长发育产生重要影响^[26]。当 C/P 较低时,有利于微生物进一步分解有机质释放养分,促进土壤 P 素的有效化;当 C/P 较高时,土壤 P 素相对较少,不同程度限制微生物对土壤有机物质的分解。辽宁省设施菜田土壤 C/P 平均值达到 8.74 ± 4.21 ,高于云南省设施土壤 C/P (5.33)^[27],但明显低于我国平均水平 (136) 和全球平均水平 (186)^[28],土壤 SOC 含量与 TP 含量呈极显著正相关关系。在本研究范围内,C/P 与土壤 SOC 含量呈极显著正相关关系,与 TP 含量和 AP 含量均呈极显著负相关关系。在设施蔬菜栽培条件下,P 素的施入量高而利用率相对较低,造成了土壤中 P 素的积累。在设施蔬菜栽培条件下,C/P 值过低一方面是因为设施土壤 P 素过量积累,另一方面在设施条件下土壤有机质分解速度较快,一定程度上也可导致土壤 C/P 值较低。

土壤 N/P 是表示土壤有机质的一个有效指标,并且可以判断土壤养分限制情况。辽宁省设施土壤 N/P 平均值达到 0.90 ± 0.51 ,明显低于全国平均水平 9.3 和全球平均水平 $13.1^{[28]}$,与山东温室土壤 N/P (0.88)^[29]接近。在设施栽培过程中,长期施用 N、P 肥料已证明显著增加了土壤 TN 和 TP 含量^[30-31]。分析可知,设施土壤 N/P 与 N 和 P 均存在显著相关性。由于设施菜田土壤 N/P 含量相对较低,也进一步说明了设施土壤中 P 素的大量累积对 N/P 的影响相对较大。在当前设施蔬菜栽培 N、P 肥的高投入背景下,设施蔬菜土壤较低的 C/P、N/P 也表明设施蔬菜土壤生态系统存在着 P 素的过量累积与总体失衡^[32]。长期 P 肥投入一定程度上会引起土壤和微生物的 C、N 限制,设施蔬菜土壤因 P 素盈余,导致 P 素利用率低,土壤有效 P 含量甚至超出环境临界点,产生环境污染。

综上所述,本研究可得出如下结论:(1) 辽宁省设施菜田土壤有机碳、全氮和全磷含量平均值分别达到 (26.56 ± 7.97) 、 (2.67 ± 0.79) 、 (3.32 ± 0.69) g/kg,按照第二次土壤普查土壤养分分级标准,养分含量均处于丰富水平,土壤全量 C、N、P 之间的相关性均呈

极显著正相关。(2) 辽宁省设施菜田土壤 C/N、C/P、N/P 平均值分别为 9.92 ± 0.85 、 8.74 ± 4.21 、 0.90 ± 0.51 , 均低于我国农田土壤的平均水平。随着种植年限的增加, 设施菜田土壤中 C/N 保持相对稳定, C/P 和 N/P 则呈略有降低趋势。在设施条件下, 有机碳矿化和磷素的累积是影响菜田土壤生态化学计量比的重要因素。

参考文献:

- [1] Sardans J, Janssens I A, Ciais P, et al. Recent advances and future research in ecological stoichiometry [J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2021, 50: 125611.
- [2] 张继辉, 蔡道雄, 卢立华, 等. 不同林龄柚木人工林土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5718–5728.
- [3] 杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 等. 长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤 C、N、P 和 K 化学计量特征[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 394–402.
- [4] 焦晓光, 陈 渊, 张兴义, 等. 黑龙江典型县域农田黑土全量养分性状分析[J]. 中国农学通报, 2011, 27(15): 132–136.
- [5] 宋佳龄, 盛 浩, 周 萍, 等. 亚热带稻田土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 403–411.
- [6] 叶 迎, 赵考诚, 马 军, 等. 农田生态化学计量研究进展[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(7): 5–9, 23.
- [7] 张亚琴, 郭其强, 罗丝琼, 等. 马尾松林下 4 种灌木植物叶片与土壤生态化学计量特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(1): 129–137.
- [8] 赵海燕, 张 剑, 刘 冬, 等. 不同沼泽湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 618–626.
- [9] 李 明, 秦 洁, 红 雨, 等. 氮素添加对贝加尔针茅草原土壤团聚体碳、氮和磷生态化学计量学特征的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(12): 29–40.
- [10] 于 泓, 卢维宏, 张乃明. 我国设施栽培土壤退化特征及修复技术研究进展[J]. 蔬菜, 2021(11): 35–42.
- [11] 张 丹. 辽宁设施蔬菜农药使用风险监测及治理对策[J]. 中国植保导刊, 2021, 41(11): 101–103.
- [12] 杨 荣, 塞 那, 苏 亮, 等. 内蒙古包头黄河湿地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2020, 40(7): 2205–2214.
- [13] Shen F F, Wu J P, Fan H B, et al. Soil N/P and C/P ratio regulate the responses of soil microbial community composition and enzyme activities in a long-term nitrogen loaded Chinese fir forest [J]. Plant and Soil, 2019, 436(1/2): 91–107.
- [14] 张艳霞, 陈智坤, 胡文友, 等. 陕西省设施农业土壤退化现状分析[J]. 土壤, 2020, 52(3): 640–644.
- [15] 卢维宏, 张乃明, 包 立, 等. 我国设施栽培连作障碍特征与成因及防治措施的研究进展[J]. 土壤, 2020, 52(4): 651–658.
- [16] 余海英, 李廷轩, 张锡洲. 温室栽培系统的养分平衡及土壤养分变化特征[J]. 中国农业科学, 2010, 43(3): 514–522.
- [17] Shang Q Y, Ling N, Feng X M, et al. Soil fertility and its significance to crop productivity and sustainability in typical agroecosystem: a summary of long-term fertilizer experiments in China [J]. Plant and Soil, 2014, 381(1/2): 13–23.
- [18] 王 柳, 张福漫, 高丽红. 京郊日光温室土壤养分特征的研究[J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(1): 62–66.
- [19] 段海芹, 秦 秦, 吕卫光, 等. 有机肥长期施用对设施土壤全铜和有效态铜含量的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1486–1495.
- [20] 宁志英, 李玉霖, 杨红玲, 等. 沙化草地土壤碳氮磷化学计量特征及其对植被生产力和多样性的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(10): 3537–3546.
- [21] 全文选, 潘延楠, 李朝婵, 等. 野生杜鹃林土壤微生物生物量碳氮磷化学计量特征[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(13): 198–202.
- [22] Jiang Y F, Guo X. Stoichiometric patterns of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in farmland of the Poyang Lake region in Southern China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(10): 3476–3488.
- [23] 王晓光, 乌云娜, 宋彦涛, 等. 土壤与植物生态化学计量学研究进展[J]. 大连民族大学学报, 2016, 18(5): 437–442, 449.
- [24] 万 欣, 董元华, 王 辉, 等. 番茄温室土壤碳氮磷的生态化学计量学特征及其与土壤酶活性的关系[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(10): 281–285.
- [25] 王 斌, 黄盛怡, 闵庆文, 等. 高复种指数区成都市郫都区农田土壤养分特征及其空间变异研究[J]. 生态科学, 2020, 39(3): 151–159.
- [26] 林 丽, 张法伟, 李以康, 等. 高寒矮蒿草草甸退化过程土壤碳氮储量及 C/N 化学计量学特征[J]. 中国草地学报, 2012, 34(3): 42–47.
- [27] 钱荣青, 沐 婵, 吕艳玲, 等. 设施葡萄种植不同层次土壤养分含量调查分析[J]. 农业科技通讯, 2019(10): 141–144.
- [28] Zhao F Z, Sun J, Ren C J, et al. Land use change influences soil C, N and P stoichiometry under ‘Grain-to-Green Program’ in China [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 10195.
- [29] Ai Z M, Xue S, Wang G L, et al. Responses of non-structural carbohydrates and C : N : P stoichiometry of *Bothriochloa ischaemum* to nitrogen addition on the loess plateau, China [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2017, 36(3): 714–722.
- [30] Griffiths B S, Spillies A, Bonkowski M. C : N : P stoichiometry and nutrient limitation of the soil microbial biomass in a grazed grassland site under experimental P limitation or excess [J]. Ecological Processes, 2012(1): 66–76.
- [31] Qin H L, Quan Z, Liu X L, et al. Phosphorus status and risk of phosphate leaching loss from vegetable soils of different planting years in suburbs of Changsha, China [J]. Agricultural Sciences in China, 2010, 9(11): 1641–1649.
- [32] 张大庚, 栗 杰, 董 越. 不同种植年限设施菜田土壤无机磷组分的累积和释放特征[J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 93–99.