

日光温室长期施肥条件下耕层土壤计量化学变化特征

刘平^{1,2}, 李丽君^{1,2}, 霍晓兰^{1,2*}, 马琳杰^{1,3}, 惠薇^{1,3}, 马琦琦^{1,3}

(1.山西农业大学 资源环境学院, 太原 030031; 2.山西省土壤环境与养分资源重点实验室, 太原 030031; 3.山西大学 生物工程学院, 太原 030006)

摘要:【目的】施肥是保持设施蔬菜地土地生产力的重要措施,但长期高量水肥条件下土壤中碳、氮和磷的化学计量特征并不清楚。【方法】本试验采用室外调查采样结合化验分析的方法,研究褐土区蔬菜保护地不同年限(5、15、20、30 a)和大田土壤主要养分碳、氮和磷的化学计量特征。【结果】①不同种植年限随着年限增加土壤表层有机质量先增加后降低并趋于稳定,15 a时有机质量达到最大值,比大田增加99.4%;土壤全氮量和全磷量随年限增加整体变化趋势类似有机质量,各年限土壤全氮量和全磷量分别是大田的1.4~2.6倍和1.7~4.5倍,全氮量15 a达最高,而20 a种植年限的全磷量最高。②与大田相比,不同种植年限土壤C:N、N:P和C:P化学计量比均随年限增加而递减并趋于稳定,变化分别在8.7~10.3、1.2~1.6和7.7~15.6范围内。土壤表层C、N、P量的增加速度排序为P>N>C,表现为化学计量比C:P变异最大,N:P次之,C:N变异较小。【结论】尽管大棚内肥料投入较高,但目前该褐土区域土壤C:N、C:P和N:P化学计量比在一定范围内维持相对稳定。从长远来看,针对本研究设施蔬菜地磷的持续快速积累而碳相对不足的问题,应采取降低磷肥施用量、控制氮肥、增施有机肥尤其是C:N比高的有机肥等措施,以阻控C:P进一步下降,维持C:N和N:P的平衡。

关键词: 日光温室; 长期施肥; 化学计量比; 不同种植年限; 山西褐土区

中图分类号: S151.9; S158.2

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023075

OSID:



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.

LIU Ping, LI Lijun, HUO Xiaolan, et al. Effect of long-term fertilization on chemical stoichiometry of topsoil in solar greenhouse[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(2): 61-66.

0 引言

【研究意义】为满足人们不断提高的生活水平,我国蔬菜生产发展迅速,蔬菜生产面积平均以每年11万hm²的速度增长,其种植面积在中国除谷物外已排第二^[1-2]。设施栽培是蔬菜生产的重要方式,既提高了土地利用率,又能增加农民的收入,在我国北方地区发展迅速^[3]。蔬菜具有生长期短、养分需求量大、产量高的特点。在施肥方面,普遍存在着养分投入过量、投入比例失衡等现象^[4-5],从而使保护地土壤的养分状况明显有别于大田土壤。以前研究者发现在人为精耕细作管理调控措施下,保护地养分丰富,均高于相应的农田^[6]。因此,人们的关注多在过量施肥带来的环境问题。高新昊等^[6]报道寿光设施菜地出现土壤含碳、氮量的增加和C/N比下降,而且菜

田土壤明显的酸化和盐渍化。多年高投入和高产出条件下,这些累积土壤养分对土壤生态平衡的潜在影响,现有资料并不十分清楚。

【研究进展】生态化学计量学是一种揭示生态过程中元素协同变化及其影响因素的综合方法^[7]。国内外学者对不同生态系统如海洋、森林、湿地及微生物等的生态化学计量特征进行了大量探讨^[8]。土壤生态化学计量比不仅是反映土壤内部C、N、P相对量的主要指标,而且是土壤内部碳氮磷养分循环与限制作用研究的重要工具^[9]。有关土壤生态化学计量学研究主要集中在植被恢复年限^[10]、植被类型^[11]和土地利用方式^[8,12]等对土壤生态化学计量特征的影响方面。土地利用变化对土壤C、N、P或生态化学计量学特征的研究主要侧重不同典型区域^[13-15]。【切入点】土壤的C:N:P容易受人类活动(施肥)和气候的影响^[16-17],但设施蔬菜地长期施肥条件下土壤中碳、氮和磷化学计量比特征方面的报道较少,仅有的文献研究年限也较短。

【拟解决的关键问题】本课题组通过在褐土区温室大棚5a定点试验,了解到设施保护地长期施肥带来的问题较多。但基于农民长期大量施肥以后,该褐土区域设施蔬菜土壤中碳、氮和磷及其化学计量比特征变化规律和影响机制报道较少。本研究采集当地不同

收稿日期: 2023-03-02 修回日期: 2023-10-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0800105-5); 科技部科技基础资源调查专项子课题(2021FY100501); 山西省重点研发计划项目子课题(202102140601010-3); 山西农业大学横向科技项目(2023HX07); 山西农业大学“科技创新提升工程”(CXGC2023029)

作者简介: 刘平, 主要研究方向为农田环境和耕地质量。

E-mail: lp709@163.com

通信作者: 霍晓兰, 主要研究方向为农业面源污染。

E-mail: xiaolan125@sina.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

棚龄(5、15、20、30 a)的蔬菜保护地和种植玉米与露地蔬菜轮作栽培的大田表层土样,探讨其土壤主要养分碳、氮和磷量变化及其生态化学计量学特征,旨在为该区域设施蔬菜保护地可持续生产中合理施用氮、磷肥,提高其利用率,优化生态环境等提供重要的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

20个大棚和4个大田土样均取自山西省晋中市太谷县范村镇象谷村,位于东经112°29'—112°30',北纬37°45'—37°46';海拔在783.3 m左右,年均降水量约415 mm,主要集中于7—9月份,年均气温在12℃。该村现有耕地153 hm²,设施蔬菜大棚约67 hm²,主要是以日光温室为主,单棚年均收入5万元左右,是全省有名的设施蔬菜专业村。该区域按照地理发生分类划分属褐土。

1.2 主要管理措施

所选日光温室均是一直种植蔬菜,单个温室面积为450~780 m²,种植蔬菜类型主要有番茄、黄瓜和西葫芦等,栽培模式为一年一茬,每年11月左右定植,翌年6月左右拉秧。番茄、西葫芦和黄瓜平均产量分别为:147、136 t/hm²和163 t/hm²。一般基肥为鸡粪、羊和牛粪等混合农家肥80~120 t/hm²(以鲜质量计),另外加施300~525 kg/hm²复合肥(N:P₂O₅:K₂O=18:18:18),在翻耕时由机械翻入土中20 cm处。此外随灌水追施复合肥(N:P₂O₅:K₂O一般是19:19:19)256~410 kg/hm²(冬季每10~20 d一次,夏季每7~10 d一次,种植6~7个月),盛果期使用复合肥中含K量为40%~43%。多采用沟灌方式,每次灌溉量约为162 m³/hm²。

1.3 土壤采集和分析方法

根据当地大棚蔬菜栽培历史,随机选5、15、20、30 a 4个种植年限蔬菜大棚各5个进行调查。土壤采集

方法为:每个大棚分3个区,每个区5点取样法采集0~20 cm土样,并以混合样代表该大棚表层土壤。同时采集邻近的玉米和蔬菜轮作栽培的4个地块作对照(文中均称作大田),取样时间为2020年7月26日至8月15日。土样采集后在室内风干,剔除里面的石块和植物残体后磨碎,过筛备用。

土壤样品中各项目采用常规分析方法;使用重铬酸钾容量法测定有机质、凯氏定氮法测定全氮、钼锑抗比色法测定全磷。

1.4 数据处理与分析:

变异系数CV(%)=标准差/均值

运用Excel 2007对数据进行整理和绘图,采用Spss20.0统计分析软件进行统计分析(Pearson相关性分析和单因素方差分析)。

2 结果与分析

2.1 不同年限土壤表层有机质量、全氮量和全磷量及其化学计量比

图1为土壤各年限有机质量为15.47~30.91 g/kg,以大田为参照,随着种植年限增加土壤表层有机质量显著累积,整体趋势呈先增加后降低并趋于稳定,增幅在12.4%~99.4%,种植年限为15 a时有机质量达到最大值,较大田增加99.4%(注:图1中不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平显著。)。图1中不同年限土壤全氮量和全磷量分别为0.76~1.94 g/kg和0.40~1.78 g/kg,且分别是大田的1.4~2.6倍和1.7~4.5倍。土壤全氮量和全磷量随年限增加变化趋势类似有机质量,只是种植年限在15 a之前(包括15 a),各年限土壤全氮量均高于全磷量,且5 a和15 a的全氮量和全磷量均值分别是大田的2.0、2.9倍,全氮量15 a达最高;而种植年限20 a时二者的量接近,20 a及30 a的全氮量和全磷量均值分别是大田的2.3、4.2倍,20 a年限的全磷量最高。可知,土壤表层有机质量、全氮量和全磷量增加的相对速度为 $P>N>C$ 。

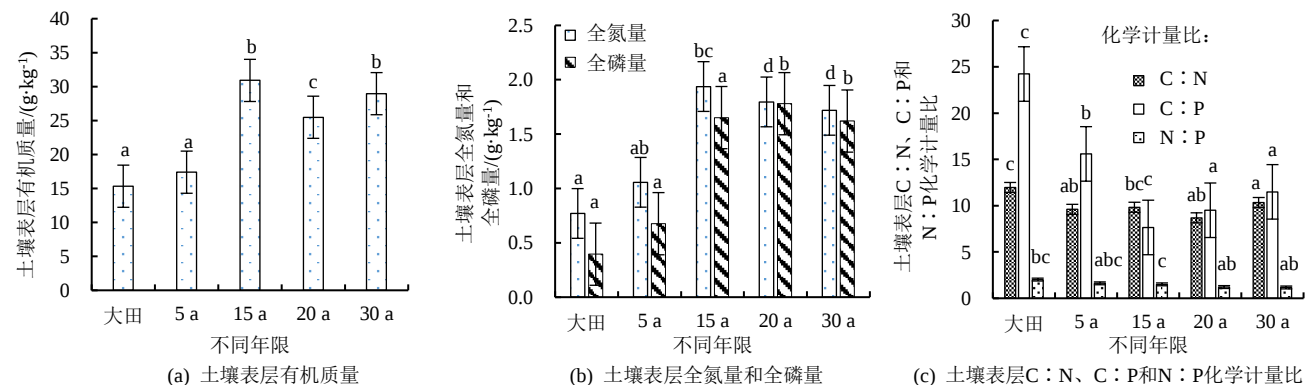


图1 不同棚龄土壤有机质量、全氮量和全磷量及C:N、C:P和N:P化学计量比
Fig.1 The contents of organic matter, total nitrogen, total phosphorus and the stoichiometry of

C:N, C:P and N:P in soils under different planting age

图1显示，与大田相比，C：N在8.7~10.3范围内随年限增加呈递减趋势，以大田的最高，30 a下降最少为13.6%，20 a下降最多为27.4%；15 a的C：P下降最多为68.4%，其余各年限在7.7~15.6范围内随年限增加变化规律类似C：N，降幅较大在35.6%~68.4%；N：P在1.2~1.6范围内随年限增加逐渐减少并趋于稳定，30 a下降最多为42.1%，其余各年限降幅在20.1%~42.1%。

2.2 不同年限土壤表层有机碳量(TC)、全氮量(TN)、全磷量(TP)及其化学计量比的变异程度和相互关系

CV(%)变异系数是表征某一系统稳定性的指标，CV(%)越大表示该系统稳定性越差。从表1来看，长期施肥下不同年限及大田土壤表层主要养分变异系数有较大差异，以全磷量的变异系数最大为51.42%，有机碳量和全氮量比其分别降低42.9%和30.9%；化学计量比以C：N较稳定为11.80%，C：P和N：P的变异系数分别是其3.9、1.8倍。虽然有机碳量相对稳定，但全磷量存在较大变异，导致C：P变异系数最大。按其变异系数的变异程度划分，有机碳量、全氮量和N：P属于中等变异，全磷量和C：P属于高度变异。

表1 不同棚龄土壤TC、TN、TP及其化学计量比的变异系数

Tab.1 The CV of TC, TN, TP, C：N, C：P and N：P in soils under different planting age

年限	TC	TN	TP	C：N	C：P	N：P
大田	8.89	0.76	0.43	11.97	24.22	2.02
5 a	10.09	1.06	0.68	9.61	15.59	1.61
15 a	17.93	1.94	1.65	9.83	7.65	1.51
20 a	14.78	1.80	1.78	8.69	9.51	1.21
30 a	16.80	1.72	1.68	10.34	11.49	1.17
均值	13.70	1.44	1.24	10.08	13.37	1.48
标准差	4.02	0.52	0.64	1.19	6.11	0.32
变异系数/%	29.37	35.54	51.42	11.80	45.67	21.49

尽管不同种植年限土壤中全氮量、全磷量和有机碳量均存在不同程度的变异。但从基本原理可知这三者之间关系较为密切，在本调查区也得以较好体现。土壤耕层全氮量、全磷量和有机碳量均呈极显著的正相关关系($P<0.01$ ，表2)，相关系数分别达0.846和0.621，可知本区域全氮量和有机碳量较有机碳量和全磷量的相关程度更高。表2显示土壤全氮量和全磷量、C：N及C：P的相关程度均达到极显著水平，相关系数分别达0.499、-0.657和-0.447。随着土壤全氮量增加全磷量随之显著增加，而C：N和C：P显著下降。此外，随着土壤全磷量增加C：P和N：P极显著降低，土壤全磷量和二者的相关程度接近，相关系数分别为-0.706和-0.637。另外，C：N和C：P以及C：P和N：P均呈极显著的正相关，只是C：P和N：P的相关系数更大为0.653。

表2 不同棚龄土壤TC，TN，TP及其化学计量比的相关关系

Tab.2 The correlation coefficient among soil nutrient contents and their stoichiometric ratios under different planting age

	TC	TN	TP	C：N	C：P	N：P
TC	1	0.846**	0.621**	-0.228	-0.381**	-0.043
TN		1	0.499**	-0.657**	-0.447**	0.126
TP			1	-0.138	-0.706**	-0.637**
C：N				1	0.403**	-0.198
C：P					1	0.653**
N：P						1

注 ** $P<0.01$ 。

3 讨论

3.1 不同种植年限下土壤表层有机质量、全氮量和全磷量

由于蔬菜较高的经济效益，设施蔬菜地每年投入大量有机肥，而大田很少施用有机肥，因此随着种植年限增加设施蔬菜地土壤表层有机质显著累积。从总趋势来看，本研究区土壤表层有机质量、全氮量和全磷量随年限增加先增加后降低，且土壤有机质量和全氮量的相关性较好，均在15 a达到最高值，而全磷量在20 a达最高。以大田做参照，年限为5 a和15 a大棚土壤全氮量和全磷量均值分别是大田的2.0、2.9倍，而20 a和30 a土壤全氮量和全磷量均值分别是大田的2.3、4.2倍，说明土壤全磷量积累的相对速度高于全氮量，尤其是近10 a的累积速度加快。该地区日光温室集约化生产中氮磷肥用量较高，蔬菜大部分生育期所施用复合肥N：P：K为19：19：19，而蔬菜对磷需求大多低于氮^[5]，长期采用此种配比的施肥模式，加之土体中氮有气体和淋溶等多种损失途径，磷却不参与大气循环且利用率低，多种因素导致设施蔬菜地土壤表层积累较多磷，且不同年限间土壤全磷存在较大变异系数。刘旭阳等^[18]也认为肥料是菜地土壤磷一个较大的输入源。甚至有资料显示山东设施蔬菜土壤磷素养分投入量约为作物带走量的14倍^[19]。

关于设施蔬菜地研究结果多数显示土壤全磷量有随种植年限增加而积累的趋势^[20-21]。张菊等^[22]研究认为全磷量先是随种植年限增加而增加，到一定年限(≥9 a)后又显著降低。山东寿光、海阳地区大棚的研究也发现^[23-24]，大棚土壤养分量随种植年限增加呈抛物线性分布，其达到最高含量时的年限多分布在8~11 a。最近的研究结果是种植年限9 a以上的耕层土壤全磷量达高水平且仍呈上涨趋势^[25]。究其原因，大棚土壤中含氮、磷量随种植年限的增加先升高后降低，与土壤微生物作用和土壤酶活性有关^[26]。而本研究中的全氮量和全磷量分别在15 a和20 a达最高，之后又下降。可能不同区域气候、肥料用量及配比的差异致使土壤生物肥力不同，最终土壤磷素累积达到最

大值的年限不同。

同李春越等^[27]种植小麦34 a的黑垆土、王传杰等^[28]种植玉米26 a的黑土相比,本研究区土壤有机碳量较低,全氮量居于中等水平,全磷量却是最高。可知,不同气候区施肥年限相近但土壤类型、施肥量和作物种类都不同的条件下,农田与日光温室蔬菜地土壤养分量有较大差异。可能蔬菜作物复种指数高需肥量大,而有机肥投入相对不足,棚内高湿高温加速原有土壤有机质的分解消耗,导致其土壤有机碳量低于其他农田,其他研究也有较为一致的解释^[6]。另外,日光温室蔬菜地输入较多氮磷化肥,输出的却是氮多磷少,导致全磷盈余较多。早期资料已显示山西设施大棚内随种植年限增加土壤有机质量降低,土壤全氮量和全磷量盈余^[29],提出设施栽培生产中应增加有机肥用量。有研究发现全国主要菜区土壤有机质量普遍不高,仅10.0%的菜田达到肥沃菜田土壤有机质量40~50 g/kg的标准,这与前面多次提到的设施菜地生产特点密切相关^[30]。由此可见,长期施肥下设施蔬菜地普遍存在土壤碳少磷过剩的问题。

3.2 不同种植年限下土壤表层C:N、C:P和N:P化学计量比

国外研究表明土地利用方式、气候区以及两者的交互作用都会显著影响土壤碳、氮和磷量及它们的比值^[31]。本研究区只是种植年限不同,主要通过肥料用量和气候影响元素生物化学循环。随年限增加土壤表层有机质量、全氮量和全磷量增加的相对速度为 $P>N>C$,使不同棚龄土壤C:N、C:P和N:P化学计量比随年限增加在一定范围内呈递减趋势。此外,土壤碳和氮变异系数较小,且二者相关性极高,维持了土壤C:N的稳定;而土壤磷具有较大变异,且与C:P和N:P均存在较高相关性,导致C:P和N:P变异较大,特别是C:P的变化范围较宽在7.7~15.6。可能的原因是,由于作物和微生物对碳、氮和磷的同化吸收利用,同时在农田中通过氨挥发、淋洗等形式造成氮肥大量损失且利用率较低^[32],盈余的磷被土壤吸附固定而累积,导致土壤C:P和N:P变异程度大。相似的研究结果认为土壤碳氮变化一致,C:N比较稳定,而C:P和N:P变化较大^[33];还有研究得出土壤有机碳和全氮变异性较大,全磷变异性较小,且封育初期有机碳量和全氮量先降后升,至封育20、30 a,保持相对平稳^[34]。可知,在不同生态系统中土壤有机碳量、全氮量、全磷量及其化学计量比的变化规律差异很大。

较低的土壤C:P比有利于微生物分解有机质,从而释放养分,较低的C:P比也是土壤含磷量高的表征^[35]。本研究情形与之相似,20 a和30 a种植年限的土壤有相对较高的C、N和P量。但是随着经济快速

发展,集约化蔬菜生产模式导致土壤含氮和磷量增加均比碳快,且含磷量增加比氮更快,表现为土壤表层有机碳量、全氮量和全磷量增加的相对速度为 $P>N>C$,导致其化学计量比均呈下降趋势。费超等^[25]研究也认为在集约化设施蔬菜体系中,随着种植年限增加,各种因素导致土壤磷素大量累积,设施土壤成为“碳限制性”种植体系。研究者利用土壤管理措施来调节土壤微生物(特别是土壤解磷菌等)种类及土壤磷酸酶活性,最终影响土壤有机磷周转过程^[36];调节土壤微生物生物量C:P,可以增加微生物生物量磷的周转量,提高土壤的供磷能力^[37]。因此,未来解决农田累积态磷素再循环利用的根本途径是通过调节作物-土壤-微生物相互作用来实现磷素^[26]的高效利用。

总之,一定的气候和水热条件下,特定土壤类型中微生物会维持相对稳定状态,故而能使土壤这个巨大缓冲体系中与微生物和酶活性相关的土壤养分主要指标如有机质、全氮和全磷保持相对稳定,进而使土壤C:N、C:P和N:P化学计量比维持在一定范围波动,本研究30 a长期施肥下土壤碳、氮和磷及其化学计量比特征正好说明这一现象。

4 结 论

1) 与大田相比,不同种植年限大棚随年限增加表现出表层土壤有机质、全氮和全磷不同程度的累积现象,有机质量和全氮量变化的转折点出现在种植年限15 a左右的大棚中,而全磷量出现在20 a。土壤耕层有机质量、全氮量和全磷量增加的相对速度为 $P>N>C$ 。

2) 土壤耕层有机碳量和全氮量相对稳定,但全磷量存在较大变异,导致C:P变异系数最大。各种种植年限土壤C:N、N:P和C:P化学计量比分别在8.7~10.3、1.2~1.6和7.7~15.6范围内随年限增加呈缓慢下降趋势。

3) 长期施肥条件下,该褐土区域日光温室土壤C:N、C:P和N:P化学计量比在一定范围内维持相对稳定。但是,针对设施蔬菜地磷的持续快速累积而碳相对不足的问题,应采取降低磷肥施用量、控制氮肥,增施有机肥、尤其是C:N比高的有机肥等措施,以阻控C:P进一步下降,维持C:N和N:P的平衡,进而维持土壤生态系统的平衡和可持续发展。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] LI J G, WAN X, LIU X X, et al. Changes in soil physical and chemical characteristics in intensively cultivated greenhouse vegetable fields in North China[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 195: 104-116.
- [2] 张真和, 马兆红. 我国设施蔬菜产业概况与“十三五”发展重点: 中国蔬菜协会副会长张真和访谈录[J]. 中国蔬菜, 2017(5): 1-5.
- [3] 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): 1 853-1 859.
- ZENG Xibai, BAI Lingyu, SU Shiming, et al. Acidification and salinization in greenhouse soil of different cultivating years from Shouguang City, Shandong[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(7): 1 853-1 859.
- [4] 白新禄, 高佳佳, 陈竹君, 等. 新建日光温室土壤养分平衡与累积特性[J]. 中国土壤与肥料, 2014(2): 1-5.
- BAI Xinlu, GAO Jiajia, CHEN Zhujun, et al. Nutrient accumulation and balances in soils of the new-established greenhouses[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2014(2): 1-5.
- [5] 曹齐卫, 张卫华, 陈伟, 等. 济南地区日光温室养分投入特征和利用状况的分析[J]. 西南农业学报, 2011, 24(5): 1 818-1 827.
- CAO Qiwei, ZHANG Weihua, CHEN Wei, et al. Analysis of characteristics of fertilizer input and absorption in Jinan greenhouse[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2011, 24(5): 1 818-1 827.
- [6] 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): 1 452-1 459.
- GAO Xinhao, ZHANG Yingpeng, LIU Zhaozhui, et al. Effects of cultivating years on soil ecological environment in greenhouse of Shouguang City, Shandong Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 1 452-1 459.
- [7] 冯德枫, 包维楷. 土壤碳氮磷化学计量比时空格局及影响因素研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(2): 400-408.
- FENG Defeng, BAO Weikai. Review of the temporal and spatial patterns of soil C: N: P stoichiometry and its driving factors[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2017, 23(2): 400-408.
- [8] 张晗, 欧阳真程, 赵小敏. 不同利用方式对江西省农田土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(3): 939-951.
- ZHANG Han, OUYANG Zhencheng, ZHAO Xiaomin. Effects of different land use types on ecological stoichiometry characteristics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in farmland soils in Jiangxi Province, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(3): 939-951.
- [9] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4 674-4 682.
- ZHU Qiulian, XING Xiaoyi, ZHANG Hong, et al. Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hillygully region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(15): 4 674-4 682.
- [10] 杨菁, 谢应忠, 吴旭东, 等. 不同种植年限人工苜蓿草地植物和土壤化学计量特征[J]. 草业学报, 2014, 23(2): 340-345.
- YANG Jing, XIE Yingzhong, WU Xudong, et al. Stoichiometry characteristics of plant and soil in alfalfa grassland with different growing years[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(2): 340-345.
- [11] 丁小慧, 罗淑政, 刘金巍, 等. 呼伦贝尔草地植物群落与土壤化学计量学特征沿经度梯度变化[J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3 467-3 476.
- DING Xiaohui, LUO Shuzheng, LIU Jinwei, et al. Longitude gradient changes on plant community and soil stoichiometry characteristics of grassland in Hulunbeir[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(11): 3 467-3 476.
- [12] 袁大刚, 张甘霖. 不同利用方式下南京城市土壤碳、氮、磷的化学计量学特征[J]. 中国土壤与肥料, 2013(3): 19-25.
- YUAN Dagang, ZHANG Ganlin. Stoichiometry of C: N: P in urban soil of Nanjing under different land use[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2013(3): 19-25.
- [13] 高君亮, 罗凤敏, 高永, 等. 农牧交错带不同土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5 594-5 602.
- GAO Junliang, LUO Fengmin, GAO Yong, et al. Ecological soil C, N, and P stoichiometry of different land use patterns in the agriculture-pasture ecotone of Northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5 594-5 602.
- [14] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 近30年川中丘陵区不同土地利用方式土壤碳氮磷生态化学计量特征变化[J]. 土壤, 2016, 48(4): 726-733.
- LUO Youlin, LI Qiquan, WANG Changquan, et al. Last 30 a changes of C, N and P ecological stoichiometry of different land use types in hilly area of mid-sichuan basin, Southwest China[J]. Soils, 2016, 48(4): 726-733.
- [15] JIANG Yefeng, GUO Xi. 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): 3 476-3 488.
- [16] BUI Elisabeth N, HENDERSON Brent L. C: N: P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors[J]. Plant and Soil, 2013, 373(1/2): 553-568.
- [17] YU Zaipeng, WANG Minghuang, HUANG Zhiqun, et al. Temporal changes in soil C-N-P stoichiometry over the past 60 years across subtropical China[J]. Global Change Biology, 2018, 24(3): 1 308-1 320.
- [18] 刘旭阳, 陈晓旋, 陈优阳, 等. 福州不同农田土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 348-355.
- LIU Xuyang, CHEN Xiaoxuan, CHEN Youyang, et al. Ecological stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus under different agricultural land-use types in Fuzhou[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(6): 348-355.
- [19] YAN Zhengjuan, LIU Pengpeng, LI Yuhong, et al. Phosphorus in China's intensive vegetable production systems: Overfertilization, soil enrichment, and environmental implications[J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42(4): 982-989.
- [20] 刘兆辉, 江丽华, 张文君, 等. 山东省设施蔬菜施肥量演变及土壤养分变化规律[J]. 土壤学报, 2008, 45(2): 296-303.
- LIU Zhaozhui, JIANG Lihua, ZHANG Wenjun, et al. Evolution of fertilization rate and variation of soil nutrient contents in greenhouse vegetable cultivation in Shandong[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(2): 296-303.
- [21] 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.
- ZHU Haiyan, LI Tingting. Correlation study on topsoil nutrient accumulation of greenhouse fruit vegetable in different ages of greenhouses[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2019, 32(5): 45-49.
- [22] 张菊, 董杰, 邓焕广, 等. 山东聊城不同种植年限蔬菜大棚土壤理化性质的演变[J]. 土壤通报, 2016, 47(5): 1 119-1 125.
- ZHANG Ju, DONG Jie, DENG Huanguang, et al. Temporal changes of soil physiochemical properties in vegetable greenhouses in Liaocheng, Shandong Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(5): 1 119-1 125.
- [23] 曾路生, 高岩, 李俊良, 等. 寿光大棚菜地酸化与土壤养分变化关系研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 157-161.
- ZENG Lusheng, GAO Yan, LI Junliang, et al. Changes of acidification and nutrient accumulation in greenhouse vegetable soils in Shouguang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(4): 157-161.
- [24] 唐海滨, 廖超英, 孙长忠. 山东寿光蔬菜大棚土壤养分的时空变化特征[J]. 西北农业学报, 2011, 20(4): 134-137.
- TANG Haibin, LIAO Chaoying, SUN Changzhong. Spatio-temporal characteristics of soil nutrients in the vegetable greenhouse in Shouguang of Shandong Province[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2011, 20(4): 134-137.
- [25] 费超, 张士荣, 梁斌, 等. 不同种植年限设施菜地土壤微生物量磷变化特征及相关性分析[J]. 华北农学报, 2018, 33(1): 195-202.
- FEI Chao, ZHANG Shirong, LIANG Bin, et al. Characteristics and correlation analysis of soil microbial biomass phosphorus in greenhouse vegetable soil with different planting years[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2018, 33(1): 195-202.
- [26] 张福锁, 申建波, 冯固, 等. 根际生态学: 过程与调控[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009.
- Zhang Fusuo, Shen Jianbo, Feng Gu, et al. Rhizosphere ecology: Processes & management[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2009.
- [27] 李春越, 苗雨, 薛英龙, 等. 长期施肥黄土旱塬农田土壤-微生物-植物系统碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 370-378.
- LI Chunyue, MIAO Yu, XUE Yinglong, et al. Ecological stoichiometric

- characteristics of soil-microorganism-plant system in the Loess upland under long-term fertilization[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(1): 370-378.
- [28] 王传杰, 王齐齐, 徐虎, 等. 长期施肥下农田土壤-有机质-微生物的碳氮磷化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2018, 38(11): 3 848-3 858.
- WANG Chuanjie, WANG Qiqi, XU Hu, et al. Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry characteristics of bulk soil, organic matter, and soil microbial biomass under long-term fertilization in cropland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(11): 3 848-3 858.
- [29] 吴忠红, 周建斌. 山西设施栽培条件下土壤理化性质的变化规律[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(5): 136-140.
- WU Zhonghong, ZHOU Jianbin. Changes of soil physical and chemical characters under greenhouses cultivation in Shanxi Province[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2007, 35(5): 136-140.
- [30] 黄绍文, 王玉军, 金继运, 等. 我国主要菜区土壤盐分、酸碱性 and 肥力状况[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4): 906-918.
- HUANG Shaowen, WANG Yujun, JIN Jiyun, et al. Status of salinity, pH and nutrients in soils in main vegetable production regions in China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4): 906-918.
- [31] ZHENG Shengmeng, XIA Yinhang, HU Yajun, et al. Stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in soil: Effects of agricultural land use and climate at a continental scale[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 209: 104 903.
- [32] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 778-783.
- ZHU Zhaoliang. Research on soil nitrogen in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 778-783.
- [33] 张雅蓉, 李渝, 刘彦伶, 等. 长期施肥对西南黄壤碳氮磷生态化学计量学特征的影响[J]. *土壤通报*, 2016, 47(3): 673-680.
- ZHANG Yarong, LI Yu, LIU Yanling, et al. Effect of long-term fertilization on ecological stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in southwest yellow soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(3): 673-680.
- [34] 赵晓单, 曾全超, 安韶山, 等. 黄土高原不同封育年限草地土壤与植物根系的生态化学计量特征[J]. *土壤学报*, 2016, 53(6): 1 541-1 551.
- ZHAO Xiaodan, ZENG Quanchao, AN Shaoshan, et al. Ecological stoichiometric characteristics of grassland soils and plant roots relative to enclosure history on the Loess Plateau[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(6): 1 541-1 551.
- [35] 王建林, 钟志明, 王忠红, 等. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳磷比的分布特征[J]. *草业学报*, 2014, 23(2): 9-19.
- WANG Jianlin, ZHONG Zhiming, WANG Zhonghong, et al. Soil C/P distribution characteristics of alpine steppe ecosystems in the Qinhai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(2): 9-19.
- [36] REISCHKE S, ROUSK J, BÄÄTH E. The effects of glucose loading rates on bacterial and fungal growth in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 70: 88-95.
- [37] RICHARDSON A E, LYNCH J P, RYAN P R, et al. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture[J]. *Plant and Soil*, 2011, 349(1): 121-156.

Effect of long-term fertilization on chemical stoichiometry of topsoil in solar greenhouse

LIU Ping^{1,2}, LI Lijun^{1,2}, HUO Xiaolan^{1,2*}, MA Linjie^{1,3}, HUI Wei^{1,3}, MA Qiqi^{1,3}

(1. College of Resource and Environment, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China;

2. Laboratory of Soil Environment and Nutrient Resources of Shanxi Province, Taiyuan 030031, China;

3. School of Biological Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract:【Objective】Soil chemical stoichiometry is an important trait affecting microbial activity and the associated carbon and nitrogen cycling. It is dynamic and modulating by both abiotic and biotic factors. In this paper, we study the effect of long-term fertilization on chemical stoichiometry of the topsoil in solar greenhouses. 【Method】Soil samples were taken from solar greenhouses that have been in operation from 5 to 30 years. The control was soil samples taken from an adjacent field. The chemical properties of each soil sample were analyzed in laboratory. 【Result】Soil organic matter increased in the first 15 years after the establishment of the greenhouse and then decreased asymptotically to a content as the greenhouses continued operation in the subsequent years. The variations in total soil nitrogen and total soil phosphorus were similar to that in soil organic matter. Depending on the operating duration of the greenhouses, the total soil nitrogen and total soil phosphorus were 1.4-2.6 times and 1.7-4.5 times that in the adjacent field, respectively. The total soil nitrogen and total soil phosphorus peaked 15 years and 20 years after the greenhouses were established, respectively. The C : N and N : P decreased with the increase in longevity of the greenhouses, with their values varying in the ranges of 8.7 to 10.3 and 1.2 to 1.6, respectively. In contrast, the C : P ratio increased significantly at first and then decreased slowly in the range of 7.7 to 15.6, with the increase in longevity of the greenhouses. The increasing rates of C, N and P with operating duration of the greenhouse were ranked in the order of P>N>C, resulting in C : P>N : P>C : N. 【Conclusion】Continued high fertilizer input in greenhouse production resulted in an accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus, but the C : N, C : P and N : P ratios remained relatively stable. Increased phosphorus and decreased organic carbon is a problem in greenhouse production, and measures such as reducing phosphorus application, adjusting nitrogen fertilization and increasing organic fertilization can be used to mitigate this problem and improve soil health.

Key words: greenhouse; long-term fertilization; stoichiometric; different planting years; cinnamon soil area in Shanxi Province

责任编辑: 赵宇龙