



沈乾春,王艳,王欣然,等.温室农业生态系统土壤有机碳与重金属关系研究进展[J].黑龙江农业科学,2023(6):101-107.

温室农业生态系统土壤有机碳与 重金属关系研究进展

沈乾春¹,王艳¹,王欣然¹,张军莹¹,王彤^{1,2}

(1. 中原工学院 能源与环境学院,河南 郑州 450007; 2. 中原环保股份有限公司,河南 郑州 450000)

摘要:温室农业生态系统作为农田生态系统的一部分,因种植的高肥需求以及连作的特点导致其与农田生态系统不同,在已有的研究中,温室农业生态系统中的土壤有机碳和重金属的含量要高于农田生态系统。土壤有机碳作为土壤肥力的基础,同时还影响着温室气体的排放,在生态系统碳循环中占据着重要地位。土壤重金属作为土壤重要的污染物之一,它在土壤中的富集、迁移、淋溶影响着农作物和环境的质量,还会对人体健康造成威胁。因此本文综述了土壤有机碳和土壤重金属的研究进展,以及二者在农田生态系统中的关系,为后续研究二者在温室农业生态系统中的关系做铺垫。研究表明,影响农田土壤有机碳和重金属的因素主要有大气沉降、灌溉、肥料的施用,而温室土壤的影响因素主要为有机肥的不合理施用和种植年限,虽然过量施用有机肥和增加种植年限能够有效增加土壤有机碳,但是这也造成土壤重金属在土壤中富集。土壤有机碳会络合吸附土壤中的重金属离子,并且还会引起土壤酸化,进而提高重金属的有效性和迁移性,二者之间呈现正相关性,所以合理控制土壤有机碳输入会在一定程度上减少温室农业生态系统土壤重金属的污染。

关键词:土壤有机碳;土壤重金属;有机肥;种植年限;温室农业生态系统

随着科技的高速发展,我国的农业得到了非常快速的发展,温室农业生态系统得益于其高投入、高产出、高效益的集约化、规模化生产得到大面积推广^[1],据行业统计,我国各类设施农业面积达333.33万hm²,大棚、日光温室、连栋温室等使用年限10年以上的设施农业总面积达到186.67万hm²,居世界第一。2020年颁发的《农业农村部关于加快推进设施种植机械化发展的意见》表明,到2025年我国以塑料大棚、日光温室和连栋温室为主的种植设施总面积稳定在200万hm²以上^[2],所以温室农业生态系统为我国农作物的种植及其出口做出了极大贡献。鉴于此,温室农业生态系统的土壤理化性质也备受关注。

随着我国力争在2030年实现“碳达峰”,2060年实现“碳中和”目标的明确提出,2020年中央经济工作会议作出重要部署,将“开展大规模国土绿化

行动,提升生态系统碳汇能力”列为“碳达峰、碳中和”的重点任务之一,陆地生态系统对实现“双碳”目标的作用和意义被提升到新高度。农田土壤有机碳作为陆地土壤有机碳库的重要组成部分,极大地影响着整个生态系统的碳循环,与普通农业生态系统土壤状况不同的是,温室农业生态系统具有人为扰动大、复种指数高、对作物产量需求高等特点^[3],因此就需要土壤质量以及土壤肥力达到所需标准,土壤有机碳作为土壤肥力的重要指标,影响着农业生产、养分有效性、土壤稳定性^[4],所以温室农业生态系统中的有机碳也是生态系统碳循环中不可忽视的一部分,并对我国双碳计划目标的实现具有极大的贡献。

随着2016年《土壤污染防治行动计划》实施^[5],标志着我国土壤污染问题已经非常严峻,环保部公布的数据显示,在2006年,我国受污染的耕地已经占耕地的8.3%,中国已经成为全球土壤污染最严重的国家之一。土壤重金属作为重要的土壤无机污染物之一,它可以通过淋溶进入到地下土壤中并通过迁移污染周围水环境,还可以通过根系迁移进入到植物体中,再通过食物链进入动物和人体中,进而影响到食品安全及人类和动物健康。与普通农田生态系统不同的是,温室农业生态系统复种指数高,会致使温室土壤养分供应不足,为了保证农作物的产量品质,会在生产

收稿日期:2022-12-23

基金项目:国家自然科学基金(31500394);河南省重点研发与推广专项(科技攻关)(192102310040);2021年河南省高等教育教学改革研究与实践项目(学位与研究生教育)(教研[2021]480号2021SJGLX146Y)。

第一作者:沈乾春(1997-),女,硕士研究生,从事温室农业生态系统土壤有机碳和土壤重金属研究。E-mail:shenqianch2021@163.com。

通信作者:王艳(1979-),女,博士,副教授,从事生态系统元素循环及环境污染生态治理等方面研究。E-mail:wyztti@163.com。

过程中施用含有重金属的化肥和有机肥,因此导致重金属含量积累甚至超标^[6-7]。所以温室农业生态系统土壤重金属污染会比普通农田生态系统更为严重。然而作为土壤性质的两个重要指标,土壤有机碳对重金属具有一定的络合作用,会使重金属随着有机碳的含量而变化,两者之前存在着重要的关联性。目前已有的研究表明土壤有机碳和重金属之间的关联性研究主要集中于露天土地以及重金属污染地区的土地,关于温室农业生态系统中两者之间关系的研究还较少,所以本文将着重研究温室农业生态系统土壤有机碳和土壤重金属的关系,为后续以土壤重金属为依托探究温室农业生态系统碳循环做铺垫,并为修复温室农业生态系统土壤重金属污染提供理论依据。

1 农业生态系统土壤有机碳国内外研究进展

1.1 农田土壤有机碳研究现状

碳是一种非常重要的生命物质,是地球一切生物体中最基本的成分。全球中的碳贮存在大气、海洋、陆地生物圈和岩石圈这四个巨大的碳库之中,它们以各种形式在碳库内部和碳库之间循环,用来维持地球生命的营养和能量需求^[8]。农田生态系统作为陆地生态系统的组成部分,全球农田耕地面积约为 13.7 亿 hm^2 ,其有机碳贮量约为 1 700 亿 t,超过全球陆地有机碳贮量的 10%^[9]。土壤有机碳是土壤肥力形成的基础,在全球气候变化中占据重要的地位,其含量的高低以及质量情况直接影响土壤有效持水量、保肥能力、养分利用效率、土壤微生物数量和活性,进而会影响作物产量。同时土壤有机碳可以通过土壤微生物在土壤酶的作用下分解释放 CO_2 ,大气中的 CO_2 可以通过光合作用被固定到植物中,植物的根系和凋落物以及人为作用可以使植物中的部分碳归还到土壤中,所以土壤有机碳会在一定程度上调节大气 CO_2 的排放^[10],进而影响区域及全球环境。据统计,自工业化以来, CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的含量已分别增加 48%、160%和 23%,这是造成全球气候变暖的主要原因^[11-12],然而农田生态系统作为重要的温室气体排放源,其温室气体排放量约占全球温室气体排放总量的 14%^[12-13],因此减缓土壤有机碳分解提高土壤固碳能力,可以在一定程度上减缓温室气体的排放,也可以为我国早日实现碳中和做出贡献。土壤固碳是指通过采取相应管理措施提高土壤中有机碳

和无机碳含量,将大气中的 CO_2 固持在土壤碳库中,而目前农田土壤固碳的研究主要集中在土壤有机碳^[14-15]。Wang 等^[16]研究表明全球农田表层 30 cm 土壤的平均有机碳密度为 43~60 $\text{Mg C}\cdot\text{hm}^{-2}$,欧洲地区为 53 $\text{Mg C}\cdot\text{hm}^{-2}$,美国为 33~87 $\text{Mg C}\cdot\text{hm}^{-2}$,中国属于低碳密度国家,与欧美国家相比农田土壤有机碳储量偏低。但是在半个世纪以来,我国农田土壤碳含量整体上呈增加的趋势,Sun 等^[17]在研究中国农业固碳时,得出 20 世纪 80 年代至 21 世纪初,中国农田土壤有机碳储量的总增量估计为 311.3~401.4 Tg C,在东部地区植物碳和土壤碳相对减少,在西部地区都呈增加趋势。Tao 等^[18]研究指出,在中国农田实施免耕、秸秆还田、施用有机肥等管理措施,可使中国农田的有机碳存量每年增加 ≥ 25.0 Tg C,补偿了 CO_2 排放 $\geq 1.0\%$ 。但是也有研究发现,土壤的固碳能力并不是无限度增加的,而是存在一个阈值,在气候、母质、耕作方式一定的条件下,生态系统碳储量趋于饱和^[19-20]。原始有机碳含量越低,积累速率越快,距离饱和水平就越近,那么土壤对有机碳的固持速率就开始下降^[20],并且如果通过施用粪肥等有机肥来增加土壤有机碳,可能会提高土壤呼吸速率和通过地表径流流失氮素,从而会导致更多的碳排放到大气中和氮的流失^[18],所以合理增强土壤有机碳输入能够有效地增加农田生态系统固碳潜力以及减少温室气体的排放。

1.2 温室土壤有机碳研究现状

1.2.1 温室种植和土壤有机碳状况分析 温室农业生态系统属于农田生态系统,在陆地生态系统中扮演重要的角色,它是一种通过农业集约化为不断增长的人口提供食物的成熟系统,在世界范围内,温室种植的总面积在过去 20 年中增加了 5 倍多^[21-22]。中国温室大棚生产面积从 1990 年的 60 万 hm^2 快速增长至 2020 年的 187 万 hm^2 ,使中国成为主要的世界蔬菜生产商。我国的温室可以分为日光温室和塑料覆盖的温室,在温暖地区的北部和南部分布较多,温室栽培可以防止水土流失和风化,为农民提供反季节蔬菜和更高的收入,因此温室大棚在中国快速扩张。此外,Wang 等^[23]研究表明,如果将蔬菜的总种植面积的 50% 转变成温室大棚种植,中国蔬菜种植的固碳量将比当前的多 3 Tg C,如果实现 100% 转化,固碳增量将为 7 Tg C。Wu 等^[24]研究中国五大

气候区碳通量变化时指出,采用温室管理系统可以有效减少净碳排放,可见温室种植不仅能够增加经济效益还能够减缓气候变化。由于温室种植目前在我国有如此庞大的规模,为了维持农业生产力的需求,温室种植所需的有机碳要比普通大田种植的高。樊德祥等^[25]研究温室土壤有机碳时,发现各区温室土壤总有机碳数量的平均值是温室外露地土壤的 1.76 倍~3.06 倍,但是由于温室农业生态系统高强度的种植,为了满足土壤对有机碳的需求,不适当的施肥方式,比如过量氮肥的施用,会导致土壤结构恶化、酸化和盐碱化,以及土壤矿化,这会致使有机碳的水平降低,进而导致土壤质量退化和土壤污染等问题^[26-27]。

1.2.2 温室土壤有机碳影响因素 目前温室农业生态系统面临着对土壤有机碳的高需求,所以提高温室土壤固碳防止土壤有机碳的流失变得尤为重要,与农田生态系统相比不同的是温室农业生态系统由于受人为因素的剧烈影响,长期处于“高温、高湿、连作、连续施肥、无淋洗”等环境中,所以温室土壤受各个方面的扰动更加强烈。温度的升高会加速土壤有机碳的矿化,土壤有机碳矿化的作用过程是土壤中的有机碳在微生物的影响下分解成 CO₂,这会致使土壤由碳汇不断转变为碳源,造成土壤有机碳的流失^[28-29]。陶宝先等^[30]在研究设施耕作对土壤有机碳矿化的影响时,表明设施菜地长期处在高温之中,土壤中的微生物对于升温条件具有适应性,所以升温对于设施土壤的碳排放较农田有所下降,但是在种植过程中施用的有机肥含有较多的易分解有机碳组成,这会提升土壤有机碳累积矿化量。虽然施用有机肥会在一定程度上导致土壤有机碳矿化,但是它会提高土壤有机碳的含量和活性,改善土壤结构。仝利红等^[31]研究有机种植对土壤有机碳库的影响时,发现施用有机肥可以使土壤有机碳含量显著提高 105.53%,同时还提高了土壤的碳储量,所以合理施肥在温室种植中是个不可忽视的问题。随着种植年限的增长,土壤的有机碳含量也随之发生着一定的变化,王彤^[32]在研究温室土壤有机碳淋溶时,发现温室大棚有机碳浓度随着大棚种植年限的延长而显著增加。张宇浩等^[33]研究栽培年限对日光节能温室土壤有机碳及组分变化的影响,结果表明随着栽培年限的延长,日光温室土壤总有机碳、高活性有机碳、中活性有机碳、活性

有机碳均极显著增加。由此可以发现,温室大棚土壤有机碳的含量随种植年限的增加呈正相关关系。

2 农业生态系统土壤重金属的国内外研究进展

2.1 农田土壤重金属研究现状

重金属是土壤中最主要的无机污染物,由于其不可见性、持久性和不可逆性以及高毒性,易于积累并转化为毒性更大的甲基化合物^[34]。在农田中,土壤重金属不仅包括生物毒性显著的 Hg、Cd、Pb、As、Cr 等元素,而且也包含生物毒性不太显著的 Zn、Cu、Ni 等元素^[35]。重金属在土壤中具有易富集性和迁移性,会影响农作物的发育生长,并且还会通过食物链进入动物体内,最后进入人体,在人体内积累会对人类的健康构成威胁,导致心血管和其他系统疾病,最终可能致癌^[36]。重金属在土壤中积累到一定程度会改变土壤的理化性质,造成土壤退化,并且还会通过淋溶污染地下水对周围环境造成影响。根据我国颁布的《全国土壤污染状况调查公报》,全国土壤污染总的超标率为 16.1%,其中重金属等无机污染物占全部超标点位的 82.8%^[37],所以我国土壤重金属污染状况不太乐观。根据土壤重金属目前污染现状,国内外很多研究者对农田土壤重金属不同方面进行了大量的研究,美国、澳大利亚最先使用单因子指数法进行土壤重金属污染评价,它主要能够呈现重金属在一定的背景值下的污染程度^[38]。成晓梦等^[39]在研究浙江矿区农田重金属含量时,使用单因子指数法得出表层土壤中 Cd、Cu、Pb、Zn 均超过浙江和全国土壤背景值,相比于农用地污染风险筛选值,土壤样品中 Cd、Cu、Pb、Zn 分别超标 82%、49%、42%和 31%,这说明该地区土壤中 Cd、Cu、Pb、Zn 污染情况较为严重。后续随着数学技术的不断发展,内梅罗综合污染指数、地质累积指数也开始应用于土壤质量评价的研究中^[38]。重金属形态的差异会产生不同的环境效应影响重金属的毒性、迁移和自然界的循环^[40], Tessier 等^[41]将土壤重金属元素分为可交换态、碳酸盐结合态、铁-锰氧化物结合态、有机物结合态和残渣态 5 种形态。其中,可交换态和碳酸盐结合态重金属比较活泼,农作物会更容易吸收,铁-锰氧化物结合态重金属在还原的条件下会释放为可溶性重金属,有机结合态和残渣态重金属比较稳定属

于难迁移态^[42]。随着重金属形态的不同,重金属进入农田土壤后会发​​生不同程度的纵向和横向迁移,会致使土壤的污染面扩大,当重金属的含量增加到一定程度,重金属会随着淋溶和农业活动向更深层次迁移,污染到深层土壤^[43-44]。唐世琪等^[45]在研究耕地土壤剖面重金属形态迁移转化时,得出重金属 Cd 各个形态都有一定的分布,由剖面深度加深,Cd 水溶态、离子交换态比例下降,重金属 As、Zn、Cr 在各个深度段残渣态占比较高,随着深度增加,水溶态和离子交换态比例基本不变,可见重金属迁移到不同土层并且以不同形态呈现。

2.2 温室土壤重金属的研究现状

2.2.1 温室土壤重金属污染分析 鉴于温室种植在中国如此广泛,那么关于温室土壤重金属的污染也是目前人们不可忽视的问题。温室种植有一个显著的特点是其封闭性,阻断了大气、交通、工业等重金属的来源途径,系统内重金属来源较为单一^[46],因此导致农田土壤和温室土壤中的重金属有了较大的差异。陈永等^[47]研究重金属积累特征时,发现相比于露天蔬菜地,设施蔬菜地土壤重金属 Cu、Hg、Pb、Zn 均产生明显的累积,且土壤中 Cu、Hg、Pb 平均含量超过温室蔬菜产地环境质量评价标准。造成这种现象的主要原因为,我国的温室生产的单位管理措施改变了土壤的理化性质,导致土壤 pH 降低和盐分增加^[48],pH 的变化,改变了土壤表面的电荷数量和性质,进而影响了土壤对重金属的吸附量^[49],随着 pH 降低,重金属离子在土壤溶液中更多地以可溶态的形式出现,有效性也随之升高,从而引起重金属含量的变化^[50]。土壤中有机质的含量在一定程度上受植物残留物的影响,但是由于我国对温室作物的需求过大,以及为了避免植物疾病的传播,温室作物的残留物没有被循环利用到土壤中^[51-52],所以就导致土壤表层有机质的含量过低,降低了土壤养分的保留能力,提高了养分的浸出风险。为了补偿养分的损失,农户们通常会过量使用化肥、农药和有机肥来补充作物对微量元素和养分的需求量,但是这样做会导致土壤环境进一步恶化,并且会增加土壤重金属的污染风险^[53]。

2.2.2 温室土壤重金属影响因素 影响农田与温室土壤重金属的因素不完全相同,农田土壤重金属累积主要受大气沉降、污水灌溉、肥料的施用

和固体废弃物堆放等因素的影响,然而温室种植有屋顶的保护,目前温室土壤重金属的来源分析主要集中在肥料的过量施用和连作。施用过量的肥料虽然能够提高有机碳和弥补土壤损失的养分,但是也为温室土壤带来了大量的重金属。贾丽等^[54]在研究设施菜地土壤重金属影响因素时表明,菜地所投入的有机肥及化肥受重金属污染严重,有机肥受 Cd、Cu、Zn 元素污染,磷肥中 Cd 含量较高,所以过量的施肥会导致土壤中重金属含量过高。随着温室大棚种植年限的增加,土壤会普遍出现酸化板结、次生盐渍化、养分失调、重金属累积等障碍问题^[55],致使土壤环境和质量持续下降,增加了土壤养分元素及重金属对种植作物的污染风险^[56]。薛延丰等^[57]在研究不同种植年限设施地重金属含量时,发现随着种植年限的增加 Pb、Cr、Cd、As 含量逐渐增加。井永苹等^[56]在研究不同种植年限设施菜地重金属含量变化时,发现随种植年限延长重金属 Cd、Cu、Zn 元素含量显著升高,其中 Cd 超标现象严重,Cu、Zn 含量均超土壤背景值。结合已有研究结果发现,温室大棚的种植年限对重金属含量的累积有一定的影响。

3 土壤有机碳和土壤重金属关系研究进展

据报道,重金属的有效性和稳定性取决于有机物质的应用和土壤的理化性质,有机物增加了表面电荷和面积以及交换位点的数量,所以可以通过表面吸附和稳定的络合作用来降低重金属的迁移性^[58]。在农业生产中经常施用的有机肥中含有大量的有机物,但是大量研究表明施用有机肥反而增加土壤重金属的含量,这是由于有机肥来源不明,粪肥中本身就含有大量的重金属,所以过量施用会导致土壤重金属含量的提高。并且也有研究发现,土壤溶液中溶解有机物结合态重金属含量高于游离态重金属,所以当此有机物部分发生变化时,也会引起其络合的重金属发生变化^[50]。有机碳作为土壤有机质的主要物质,它对重金属具有一定的络合作用,有机碳含有的大量的官能团会吸附土壤中的重金属离子,会使重金属随着有机碳的含量而变化^[59-60],并且土壤有机碳可以分解形成腐殖酸,会使土壤酸化,土壤 pH 降低,能提高土壤重金属的迁移性和有效性,进而提高土壤重金属的含量。有很多研究者对不同农田土壤方面两者之间的相关性进行了研究,谢娜等^[61]在研究不同土地利用方式土壤有机碳与重金属的

相关性分析时,定量的证明典型土壤重金属 Hg、Cd、Cr、As、Pb 与有机碳储量之间存在显著相关性,其中园地和建设用地相关性最高,然后是林地和耕地。在贵阳污灌区,刘文政等^[62]研究菜地土壤团聚体中有机碳和重金属的含量,发现土壤有机碳含量随团聚体粒径的增大表现为先增大后减小,不同粒径团聚体中重金属 Cu、Cd、Pb、As 含量与有机碳的含量呈现显著正相关,并且这几种重金属在 5~8 mm 粒径团聚体中的贡献最大。王润珑等^[63]在研究天津污灌区土壤中有机碳和重金属含量时,发现不同粒径团聚体中 Cu、Cd、Pb 和 As 含量与有机碳含量呈显著正相关。由此可见二者研究结论基本相同,说明了污灌区的重金属和有机碳的含量呈正相关。与上文得出添加有机肥会影响土壤有机碳和重金属含量的结论相同,王怡雯等^[64]在研究有机肥的施用对土壤有机碳的影响及其与重金属的关系时,得出在连续 4 年施用不同的有机肥后,土壤中重金属 Cu、Zn、Cd 分布与易氧化有机碳分布呈极显著正相关,同时也提高了土壤的易氧化有机碳和重金属含量。通过很多研究者的论证,与上文的分析一致,在农田生态系统中土壤有机碳与重金属呈正相关关系。

4 展望

有机碳作为土壤重要的理化性质,是土壤的肥力基础,影响着全球的碳循环,提高土壤有机碳能够在一定程度上减少温室气体的排放,可观的是目前我国的土壤有机碳含量呈现总体上升趋势。温室农业生态系统作为供应我国农作物生产的重要系统,由于人们对温室作物需求过高,以及连作等原因造成土壤养分流失严重,农户们会使用大量的有机肥、化肥和农药来补充损失的养分,这就造成温室农业生态系统与普通农田中的有机碳含量具有一定的差异。随着国家对土壤污染的重视,重金属作为土壤重要的污染物也备受关注,农业生态系统土壤含有的主要重金属包括 Cr、Ni、Cu、As、Cd、Zn、Hg、Pb,它影响着作物的生长以及土壤的质量状况,并且它还可以通过迁移进入农作物中,对食品健康安全造成威胁。已有的研究表明,我国土壤的重金属污染状况已经很严重。温室农业生态系统由于其封闭性的特点,致使土壤重金属的来源与农田有很大的不同,其来源主要包括为了补充土壤养分而大量施用的有机肥、化肥和农药,所以这就导致温室土壤重金属的

污染程度要比普通农田高,解决温室土壤重金属污染问题已经成为当务之急。在农田中土壤有机碳和重金属的关系目前已有许多的专家学者进行了论证,可以初步得出二者之间呈现明显的正相关关系。温室农业生态系统虽然作为农田生态系统的一部分,但是农田土壤和温室土壤存在较大的差异性,后续应进一步研究探明它们之间有机碳和重金属含量的关系。

参考文献:

- [1] 曾希柏,白玲玉,李莲芳,等. 山东寿光不同利用方式下农田土壤有机质和氮磷钾状况及其变化[J]. 生态学报,2009,29(7):3737-3746.
- [2] 农业农村部. 农业农村部关于加快推进设施种植机械化发展的意见[J]. 中华人民共和国农业农村部公报,2020(7):13-15.
- [3] 张凯. 温室农业土壤特性的调查与评价[D]. 洛阳:河南科技大学,2015.
- [4] 王艳. 中国温室农业生态系统碳平衡研究[D]. 杭州:浙江大学,2010.
- [5] 国务院. 国务院关于印发土壤污染防治行动计划的通知[J]. 中华人民共和国国务院公报,2016(17):9-18.
- [6] 胡文友,黄标,马宏卫,等. 南方典型设施蔬菜生产系统镉和汞累积的健康风险[J]. 土壤学报,2014,51(5):1045-1055.
- [7] 孙艳征,曹文会. 不同种植年限温室土壤铅的空间分布特征[J]. 安徽农业科学,2015,43(19):62-65.
- [8] 魏婷婷. 郑州东区生态系统碳循环研究[D]. 郑州:河南农业大学,2008.
- [9] 郑聚锋,陈硕桐. 土壤有机质与土壤固碳[J]. 科学,2021,73(6):13-17.
- [10] 赵永存,徐胜祥,王美艳,等. 中国农田土壤固碳潜力与速率:认识、挑战与研究建议[J]. 中国科学院院刊,2018,33(2):191-197.
- [11] 万小楠,赵珂悦,吴雄伟,等. 秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响[J]. 环境科学,2022,43(1):569-576.
- [12] BOUCHER O, RANDALL D, ARTAXO P, et al. Contribution of working group 1 to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change: clouds and aerosols [M]//STOCKER T, QIN D H, PLATTNER G K, et al. Climate Change 2013. New York: Cambridge University Press, 2013:571-658.
- [13] 王树会,陶雯,梁硕,等. 长期施用有机肥情景下华北平原旱地土壤固碳及 N₂O 排放的空间格局[J]. 中国农业科学,2022,55(6):1159-1171.
- [14] 徐均华,黄国强,菅攀峰,等. 土壤有机碳研究进展及在农业生产中的应用[J]. 耕作与栽培,2018(2):64-68,23.
- [15] DIXON R K. Mitigation and adaptation strategies for global change[J]. Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change, 2002,7(2):321-322.
- [16] WANG Y, TAO F, CHEN Y, et al. Interactive impacts of climate change and agricultural management on soil organic

- carbon sequestration potential of cropland in China over the coming decades[J]. *Science of The Total Environment*, 2022,817:153018.
- [17] SUN W, YAO H, ZHANG W, et al. Carbon sequestration and its potential in agricultural soils of China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010,24(3):GB3001.
- [18] TAO F, PALOSUO T, VALKAMA E, et al. Cropland soils in China have a large potential for carbon sequestration based on literature survey[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 186:70-78.
- [19] SIX J, CONANT R T, PAUL E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter; implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002,241(2):155-176.
- [20] 陈富荣, 梁红霞, 邢润华, 等. 安徽省土壤固碳潜力及有机碳汇(源)研究[J]. *土壤通报*, 2017,48(4):843-851.
- [21] FOLEY J A. Global consequences of land use; connecting issues, connecting scales[C]//ASA-CSSA-SSSA, Chicago: 2006.
- [22] CHANG J, WU X, WANG Y, et al. Does growing vegetables in plastic greenhouses enhance regional ecosystem services beyond the food supply? [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2013,11(1):43-49.
- [23] WANG Y, XU H, WU X, et al. Quantification of net carbon flux from plastic greenhouse vegetable cultivation: a full carbon cycle analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(5):1427-1434.
- [24] WU X, GE Y, WANG Y, et al. Agricultural carbon flux changes driven by intensive plastic greenhouse cultivation in five climatic regions of China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015,95:265-272.
- [25] 樊德祥, 依艳丽, 贺忠科, 等. 沈阳市郊日光温室土壤有机碳组成特征研究[J]. *土壤通报*, 2008(4):748-751.
- [26] LUAN H, SHUO Y, WEI G A O, et al. Changes in organic C stability within soil aggregates under different fertilization patterns in a greenhouse vegetable field[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021,20(10):2758-2771.
- [27] LUAN H, GAO W, HUANG S, et al. Partial substitution of chemical fertilizer with organic amendments affects soil organic carbon composition and stability in a greenhouse vegetable production system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019,191:185-196.
- [28] 于中阳, 李月梅. 设施农业土壤有机碳影响因素的研究[J]. *青海农林科技*, 2021(1):48-52.
- [29] 郭殿坤, 尤孟阳, 何朋, 等. 不同生态系统土壤有机碳矿化的温度敏感性[J]. *土壤与作物*, 2022,11(3):261-272.
- [30] 陶宝先, 张保华, 董杰, 等. 设施耕作促进农田土壤有机碳矿化[J]. *农业环境科学学报*, 2017,36(12):2486-2492.
- [31] 全利红, 蒋珊, 祝凌, 等. 有机种植对温室土壤有机碳库和酶活性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(6):75-82.
- [32] 王彤. 温室大棚土壤有机碳淋溶迁移研究[D]. 郑州: 中原工学院, 2021.
- [33] 张宇浩, 方莉, 程芳琴. 日光节能温室土壤有机碳及组分变化对栽培年限的响应[J]. *山西农业科学*, 2013,41(11):1202-1204.
- [34] LI S, WANG M, ZHAO Z, et al. Adsorption and desorption of Cd by soil amendment: mechanisms and environmental implications in field-soil remediation [J]. *Sustainability*, 2018,10(7):2337.
- [35] 王苗苗, 孙红文, 耿以工, 等. 农田土壤重金属污染及修复技术研究进展[J]. *天津农林科技*, 2018(4):38-41,43.
- [36] 张贵友, 王素萍, 杜雷, 等. 武汉市江夏区农田土壤重金属含量及其生态风险评价[J]. *湖北农业科学*, 2020,59(17):54-57,136.
- [37] 全国土壤污染状况调查公报[J]. *中国环保产业*, 2014(5):10-11.
- [38] 王辉, 焦振恒, 吴昊, 等. 铅锌矿周边土壤重金属污染评价方法概述[J]. *沈阳大学学报(自然科学版)*, 2021,33(4):300-306.
- [39] 成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 等. 浙中典型硫铁矿农区农田土壤重金属含量特征及健康风险[J]. *环境科学*, 2022,43(1):442-453.
- [40] 周言凤, 苏庆平. 土壤重金属形态分析研究综述[J]. *广东化工*, 2018,45(22):84-85.
- [41] TESSIER A, CAMPBELL G C, BISSON M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Analytical Chemistry*, 1979,51(7):844-851.
- [42] 孙秀敏, 陈琼, 张键, 等. 广东某区农田土壤重金属污染现状及潜在生态风险分析[J]. *当代化工*, 2021,50(2):293-297.
- [43] 张炜华. 厦门市农田土壤重金属纵向迁移、污染源及健康风险[D]. 泉州: 华侨大学, 2020.
- [44] STERCKEMAN T, DOUAY F, PROIX N, et al. Vertical distribution of Cd, Pb and Zn in soils near smelters in the north of France[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 107(3):377-389.
- [45] 唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 等. 典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021,42(8):3913-3923.
- [46] 毛明翠, 黄标, 李元, 等. 我国北方典型日光温室蔬菜生产系统土壤重金属积累趋势[J]. *土壤学报*, 2013,50(4):835-841.
- [47] 陈永, 黄标, 胡文友, 等. 设施蔬菜生产系统重金属积累特征及生态效应[J]. *土壤学报*, 2013,50(4):693-702.
- [48] KALKHAJEH Y K, HUANG B, HUW, et al. Environmental soil quality and vegetable safety under current greenhouse vegetable production management in China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2021,307:107230.
- [49] GOLUI D, DATTA S P, DWIVEDIB S, et al. Prediction of free metal ion activity in contaminated soils using WHAM VII, baker soil test and solubility model[J]. *Chemosphere*, 2020,243:125408.
- [50] 徐岩, 李静, 方文. 有机肥连续施用对菜田重金属行为的影响——基于地球化学模型研究[J]. *生态学报*, 2022,42(4):1512-1526.
- [51] TAO R, JINGGUO W, QING C, et al. The effects of manure and nitrogen fertilizer applications on soil organic carbon

- and nitrogen in a high-input cropping system[J]. PLoS ONE, 2014, 9(5): e97732.
- [52] ZHAO Y, LIN S, LIU Y, et al. Application of mixed straw and biochar meets plant demand of carbon dioxide and increases soil carbon storage in sunken solar greenhouse vegetable production[J]. Soil Use and Management, 2020, 36(3): 439-448.
- [53] WAN L, LYU H, QASIM W, et al. Heavy metal and nutrient concentrations in top-and sub-soils of greenhouses and arable fields in East China-effects of cultivation years, management, and shelter[J]. Environmental Pollution, 2022: 119494.
- [54] 贾丽, 乔玉辉, 陈清, 等. 我国设施菜田土壤重金属含量特征与影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(2): 263-274.
- [55] 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): 1119-1125.
- [56] 井永苹, 李彦, 薄录吉, 等. 不同种植年限设施菜地土壤养分、重金属含量变化及主导污染因子解析[J]. 山东农业科学, 2016, 48(4): 66-71.
- [57] 薛延丰, 石志琦. 不同种植年限设施地土壤养分和重金属含量的变化特征[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 125-130.
- [58] SHAKOOR M B, NIAZI N K, BIBI I, et al. Unraveling health risk and speciation of arsenic from groundwater in rural areas of Punjab, Pakistan[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12(10): 12371-12390.
- [59] 王文栋, 任振武, 张红英, 等. 新疆天山中部森林土壤重金属含量及其与土壤理化性质的相关性[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 47-56, 66.
- [60] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖, 等. 南京城市土壤重金属含量及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2004, 15(1): 123-126.
- [61] 谢娜, 冯备战, 李春亮. 不同土地利用方式土壤有机碳变化特征及与重金属的相关性分析[J]. 中国农学通报, 2019, 35(26): 115-120.
- [62] 刘文政, 贾亚琪, 殷忠. 贵阳污灌区菜地土壤团聚体中有机碳和重金属的含量特征及相关性分析[J]. 中国无机分析化学, 2021, 11(5): 36-43.
- [63] 王润珑, 徐应明, 王农, 等. 天津污灌区菜地土壤团聚体中有机碳和重金属含量特征[J]. 环境科学学报, 2018, 38(11): 4490-4496.
- [64] 王怡雯, 许浩, 茹淑华, 等. 有机肥连续施用对土壤剖面有机碳分布的影响及其与重金属的关系[J]. 生态学杂志, 2019, 38(5): 1500-1507.

Research Progress on the Relationship Between Soil Organic Carbon and Heavy Metals in Greenhouse Agroecosystems

SHEN Qianchun¹, WANG Yan¹, WANG Xinran¹, ZHANG Junying¹, WANG Tong^{1,2}

(1. School of Energy and Environment Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China; 2. Zhongyuan Environmental Protection Company Limited, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: As a part of farmland ecosystem, greenhouse agricultural ecosystem is widely planted in China. Different from farmland planting, due to the high fertilizer demand of greenhouse planting and the characteristics of continuous cropping, the content of soil organic carbon and heavy metals in greenhouse agricultural ecosystem is higher than that in farmland ecosystem in previous studies. Soil organic carbon, as the basis of soil fertility, also affects greenhouse gas emissions, and plays an important role in ecosystem carbon cycle. As one of the most important pollutants in soil, the concentration, migration and leaching of heavy metals in soil affect the quality of crops and the environment, and also pose a threat to human health. Therefore, the paper reports the research progress of soil organic carbon and soil heavy metals, as well as the specific relationship between them in the farmland ecosystem, which paves the way for the follow-up research on the relationship between them in the greenhouse agricultural ecosystem. Studies have shown that the factors affecting the organic carbon and heavy metals in farmland soil mainly include atmospheric sedimentation, irrigation and fertilizer application. The factors affecting greenhouse planting are mainly the unreasonable application of organic fertilizer and the planting years. Although excessive application of organic fertilizer and increasing the planting years can effectively increase the organic carbon in soil, it also causes the enrichment of heavy metals in soil. Soil organic carbon will complexly adsorb heavy metal ions in soil and cause soil acidification, which will improve the availability and migration of heavy metals. There is a positive correlation between the two. Therefore, reasonable control of soil organic carbon input will reduce soil heavy metal pollution to a certain extent.

Keywords: soil organic carbon; heavy metals in soil; organic fertilizer; planting years; greenhouse agroecosystems