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

张大庚，栗 杰，董 越

（沈阳农业大学 土地与环境学院，辽宁 沈阳 100866）

摘 要：[目的] 探明设施栽培条件下土壤磷素随种植年限的变化规律，揭示温室土壤无机磷积累和淋溶损失的主体成分，为设施农业合理施用磷肥和可持续发展提供依据。[方法] 采集了辽宁省铁岭县(2～28 a)和海城市(2～33 a)不同种植年限的设施土壤，以土壤全磷、有效磷、无机磷组分含量的变化及磷素释放曲线为切入点，分析了设施栽培条件下土壤磷素随种植年限的变化规律。[结果] ①铁岭和海城设施菜田耕层土壤全磷、无机磷和有效磷含量随种植年限的增加均呈先增加后降低的趋势，在种植 20 a 左右达到峰值。全磷含量为主，最高分别达到了 5.76±0.61 g/kg 和 7.08±0.72 g/kg。②两地设施菜田土壤无机磷以 Ca_8-P 含量高，分别是无机磷总量的 34.2%和 59.9%，其次为 Fe-P 和 Al-P。Ca_8-P 含量随种植年限的增加而增加，而 Fe-P 含量则随种植年限的增加而降低。③设施菜田种植 2～15 a 左右磷素的释放率与 15 a 后对比相对较高，释放量与 Ca_2-P，Fe-P 之间的相关性达到显著水平。[结论] 研究区域范围设施菜田土壤磷素积累以 Ca_8-P 形态为主，Ca_2-P 和 Fe-P 是磷素淋失的主要形态。

关键词：种植年限；设施菜田；土壤磷素；累积；释放

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2021)04-0093-07 **中图分类号**：S158.2

文献参数：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. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2021.04.013；Zhang Dageng，Li Jie，Dong Yue. Accumulation and release characteristics of soil inorganic phosphorus components in greenhouse vegetable fields with different planting years [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2021，41(4)：93-99.

Accumulation and Release Characteristics of Soil Inorganic Phosphorus Components in Greenhouse Vegetable Fields with Different Planting Years

Zhang Dageng，Li Jie，Dong Yue

(*College of Land and Environment*，*Shenyang Agricultural University*，*Shenyang*，*Liaoning* 100866，*China*)

Abstract：[Objective] The accumulation and release of inorganic phosphorus in vegetable field soil under the condition of greenhouse cultivation was explored，in order to provide basis for the rational application of phosphorus fertilizer and the sustainable development of protected agriculture. [Methods] The greenhouse soil in Tieling County (2—28 years) and Haicheng City (2—33 years) of Liaoning Province with different planting years was collected. The change of total phosphorus，available phosphorus and inorganic phosphorus in soil and the curve of phosphorus release were taken as the breakthrough point，to analyze the variation of soil phosphorus with different planting years. [Results] ① The total phosphorus，inorganic phosphorus and available phosphorus in topsoil in both of Tieling County and Haicheng City protected vegetation fileds increased first and then decreased with the increase of planting years，and reached the peak at about 20 years after planting，with the highest contents of total phosphorus content reached 5.76±0.61 g/kg and 7.08±0.72 g/kg，respectively. ② Ca_8-P was the main content of inorganic phosphorus in surface greenhouse soil，and

收稿日期：2021-04-18 **修回日期**：2021-04-29

资助项目：国家重点研发计划项目“东北寒区设施蔬菜化肥农药减施技术模式建立与示范”(2016YFD0201004)

第一作者：张大庚(1975—)，女(汉族)，辽宁省凌海市人，博士，副教授，硕士生导师，主要从事土壤肥力、农业环境与生态方面研究。Email：zhangdageng@syau.edu.cn。

the highest content was 34.2% and 59.9% of the total inorganic phosphorus, followed by Fe-P and Al-P. Ca_8-P increased with the increase of planting years, while Fe-P decreased with the increase of planting years. ③ The release rate of phosphorus was relatively high in the early planting period (about 2—15 years), and the correlation between the release amount and Ca_2-P and Fe-P reached a significant level. [Conclusion] The main form of phosphorus accumulation in surface greenhouse soil was Ca_8-P, and Ca_2-P and Fe-P, were the main forms of phosphorus leaching.

Keywords: planting years; greenhouse soil; phosphorus; accumulation; release

我国自 20 世纪 70 年代中期开始发展设施栽培，近年来设施农业在中国得到了快速发展，已成为世界设施农业生产大国，面积和产量均居世界第一[1]，其中蔬菜生产所占的比重最大[2]。设施蔬菜种植具有受季节影响小、复种指数高等优点，不仅提高了土壤利用率和生产效率，也大幅度提高了农民的收入[3]。但由于长期处于“高温、高湿、高度连作、无降水淋洗、持续高量施肥”等条件下，设施土壤往往出现养分富集、酸化和盐渍化等土壤退化问题[4]，其中磷素过量累积已成为设施土壤养分不平衡的显著特征[5]。磷是作物的“粮食”，是支撑作物生产、保障粮食安全的基本物质基础[6]，作为作物生长发育所必需的营养元素，参与光合作用、碳水化合物的代谢与运输、能量的转移与储存等过程[7]。但磷肥施入后易被土壤吸持，导致当季利用率相对较低，仅为 10%～25%[8]。蔬菜对氮磷钾的需求量一般高于小麦、水稻等大田作物，因此为追求高效生产，农民常常会过量投入磷肥，造成生产投入—支出的不平衡，加剧了磷在菜田土壤中的累积[9]。特别是在设施栽培高复种指数、高产出的生产模式下，磷肥施用量达蔬菜吸收量的 6～23 倍[10]，磷肥的利用率更低，仅为 8.7%左右[11]。很多研究表明设施土壤磷素含量已远高于露地[12-13]。对山东泰安种植 2～7 a 的设施土壤研究发现，土壤全磷含量由 1.2 g/kg 增加到 2.5 g/kg，是相邻露地土壤的 1.5～3.1 倍[14]。对山西省山阴县种植 2～6 a 的设施土壤研究发现，土壤有效磷含量由 32.9 mg/kg 增长到 175.5 mg/kg，增长了 433.4%，是相邻露地土壤的 1.2～6.5 倍[15]。大量磷素滞留在土壤中，不仅造成磷素资源的浪费，也加大了淋洗损失带来的污染风险[16]。因此，如何合理施用磷肥，提高磷肥利用率一直是研究的热点。与农田土壤施肥以化肥为主不同，中国设施菜田平均每季磷素投入总量中有机肥投入的磷量占了 54.3% [17]。但在蔬菜生产中，农民往往忽略了有机肥对土壤磷素供应和转化方面的作用。有研究发现，施入有机肥不仅能够提高土壤中磷素含量，并可促进磷素的循环[18]，导致 Olsen-P 的含量显著增加 [19]，连续施用有机肥料可能会导致土壤中磷的淋失[20]。但有关针对设施环境条件，特别是种植超过 20 a 土壤磷素的释放特性的研究还相对较少。因此，本文以辽宁省铁岭县(2～28 a)和海城市(2～33 a)两个地区不同种植年限设施土壤全磷、有效磷、无机磷组分含量的变化及磷素释放曲线为切入点，研究设施栽培条件下土壤磷素随种植年限的变化规律，揭示温室土壤无机磷积累和淋溶损失的主体成分，以期为设施农业合理施用磷肥和可持续发展提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域与样品采集

于 2018 年 10 月，分别在铁岭县新台子镇和海城市东四镇选取当地常规管理条件下的设施菜田大棚作为采样点。为保证采样点的代表性，对当地设施蔬菜设施种植年限、施肥方式、施肥量、作物类型等基本信息进行调查。在本次调查范围内，铁岭和海城采样点的原始土壤类型分别为棕壤和草甸土。施肥包括有机肥和化肥，有机肥一般在种植前作为底肥施入，施入量 300～375 m^3/hm^2 左右，其中海城地区以牛粪、猪粪为主，铁岭地区以猪粪为主。化肥一般以氮磷钾复合肥为主，随水施入，施入量在 750～1 050 kg/hm^2 左右，有些农户会配施一定量的磷酸二铵。海城地区以种植黄瓜、菜豆为主，铁岭地区以黄瓜、番茄为主。

按照种植年限采集了铁岭县新台子镇种植 2，6，14，18，23，28 a 和在海城市东四镇种植 2，12，18，22，27，33 a 的温室土壤为研究对象。根据每个大棚的具体种植面积，按 S 形随机五点取样法采集 0—20 cm 土层土壤，土样置室内风干后，剔除石块、植物根茎等杂物，过 0.85 mm 孔径筛备用。

1.2 土壤磷素释放动力学试验设计

土壤磷素释放动力学试验采用恒温平衡法，温度控制为 25 ℃。称取两个地区不同种植年限设施菜田土样，每个土样均各取 11 份，每份 1.00 g，三次重复。土样分别放入 33 个 100 ml 离心管中，加入 50 ml 0.02 mol/L 的 KCl 溶液，震荡(150 r/min)，充分混合后开始计时，在分别震荡 1，2，3，4，5，7，10，20，30，40 和 50 h 时，依次取出离心管离心 15 min(3 000 r)，上清液 0.45 μm 微孔滤膜，测定滤液中磷的释放量，

磷的测定采用钼锑抗比色法。

1.3　测定项目

土壤全磷采用高氯酸—硫酸消煮,钼锑抗比色法测定;有效磷(Olsen-P)采用 0.5 mol/L $NaHCO_3$ 浸提—钼锑抗比色法测定。

无机磷组分采用分级浸提法测定,采用 Ca_2-P 0.25 mol/L $NaHCO_3$ 浸提,Ca_8-P 采用 0.5 mol/L NH_4OAc 浸提,Al-P 采用 0.5 mol/L NH_4F 浸提,Fe-P 采用 0.1 mol/L NaOH-0.1 mol/L Na_2CO_3 浸提,O-P 采用 0.3 mol/L 柠檬酸钠－0.5 mol/L 氢氧化钠溶液浸提,Ca_{10}-P 采用 0.5 mol/L H_2SO_4 浸提,浸提液消煮后均用钼锑抗比色法测定[28]。

1.4　数据处理

试验数据采用 Excel 2013 进行数据统计,SPSS 22.0 进行数据分析,差异显著性以及相关性分析分别采用单因素方差分析(One-way ANVOA)和 Pearson 相关分析,并采用 Duncan 法进行多重比较,以 T 检验,判断测定指标差异是否显著。

2　结果与分析

2.1　不同种植年限设施菜田土壤全磷、无机磷总量和有效磷含量的变化

由图 1 可知,海城市东四镇不同种植年限设施菜田耕层(0—20 cm)土壤全磷、无机磷总量和有效磷含量均高于铁岭县新台子镇,但变化的趋势相似,均为先增加后降低(图 1),分别在种植的第 23 年(铁岭县)和 22 a(海城市)达到峰值。且与种植前 15 a 左右相比,在达到峰值前后的种植时间范围内,3 种磷素含量的变化幅度相对较大。以铁岭地区为例,在种植的 2～14 a 三者增加幅度较慢,其中土壤全磷平均每年增加的幅度约为 0.23 g/kg、无机磷总量为 0.093 g/kg、有效磷为 7.65 mg/kg。在 14～23 a 每年增幅相对较快,其中全磷约为 0.47 g/kg,无机磷总量为 0.17 g/kg,有效磷为 9.11 mg/kg。在达到峰值后,降低的幅度也较快,全磷的年均降幅为 0.39 g/kg,无机磷总量为 0.10 g/kg,有效磷为 14.75 mg/kg。

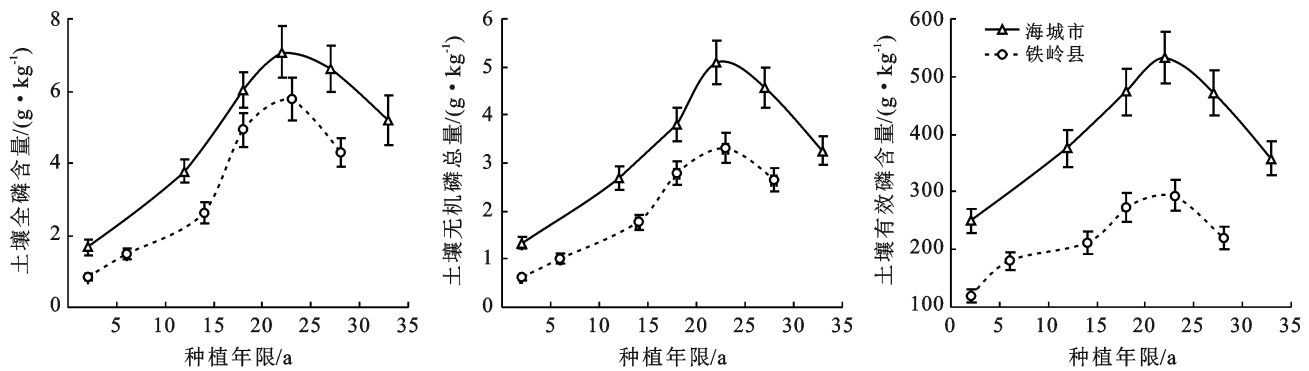


图 1　不同种植年限设施菜田耕层土壤(0－20 cm)全磷、无机磷、有效磷含量

2.2　不同种植年限设施菜田土壤无机磷组分特征

有机磷和无机磷是土壤中磷素的两种存在形态,有机磷矿化为无机磷后才能被植物吸收利用,因此无机磷的存在形态和比例决定了土壤磷素的供应能力[21]。由图 2 可知,随种植年限的增加,海城和铁岭地区的设施菜田土壤不同形态无机磷的变化趋势不完全一致。在铁岭地区 Ca_2-P,Ca_8-P,Fe-P 和 Ca_{10}-P 含量呈先增加后降低的趋势,在第 23 a 达到了峰值,而 Al-P 和 O-P 则随种植年限一直呈增加的趋势。土壤各形态磷随种植年限变化的速率也不同。在种植 2～14 a 间土壤 Ca_8-P 和 Fe-P 含量增加速率较快,平均每年增幅约为 24.47 和 24.83 mg/kg;在 14～23 a 间 Ca_8-P 增幅较大为 76.35 mg/kg,Fe-P 仅为 27.60 mg/kg;在达到峰值后大幅降低,在 23～28 a 间,降幅分别为 40.73 和 69.79 mg/kg,Fe-P 的降幅更大。而 Ca_2-P 和 Ca_{10}-P 的含量较低,随种植年限的变化幅度也相对较小。

在海城地区各形态无机磷则随种植年限的增加呈先增加后降低的趋势,但达到峰值的年限和变化的趋势不同。其中 Ca_2-P,Ca_8-P 在种植第 27 a,达到峰值,而 Fe-P,Al-P,O-P 和 Ca_{10}-P 则在种植的第 23 a 就达到了峰值。

从变化趋势来看,Ca_8-P 和 Fe-P 含量较高,变化趋势较明显。其中 Ca_8-P 的变化趋势最显著,2～12 a 间年均增幅约为 76.76 mg/kg,18～22 a 间达到 187.27 mg/kg,22～27 a 间增幅最低为 51.21 mg/kg。达到峰值后出现降低趋势,27～33 a 间下降幅度约为 143.07 mg/kg。

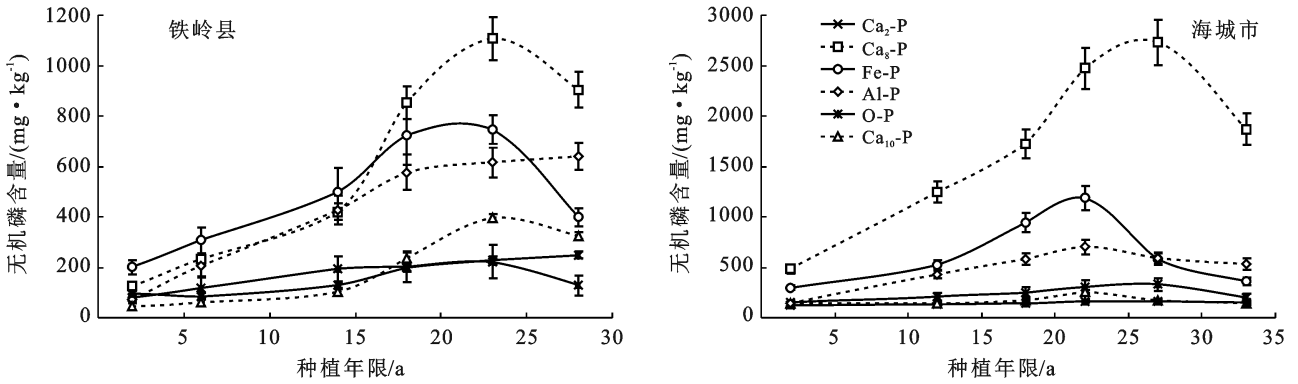


图 2 不同种植年限设施菜田土壤各形态无机磷含量

不同形态无机磷含量占无机磷总量的比例也不同(图 3)。由图 3 可知,海城市和铁岭县设施菜田土壤无机磷中均以 Ca_8-P,Fe-P 与 Al-P 含量相对较高,约占无机磷总量的 70%～80%左右。但铁岭县和海城市所占的比例不同。

铁岭县以 Ca_8-P 和 Fe-P 为主,占了 50%左右。且二者之间互有消长,其中 Ca_8-P 随种植年限的增加呈增加的趋势,由 Fe-P 则随种植年限的增加呈降低的趋势。而海城市则以 Ca_8-P 为主,且随种植年限的增加呈增加的趋势,最高占近 60%。海城市和铁岭县不同种植年限设施菜田土壤中 Ca_2-P,O-P 和 Ca_{10}-P 的含量均相对较小,其中 Ca_2-P 所占比值随种植年限增加呈逐渐降低趋势。O-P 和 Ca_{10}-P 则呈先降低后增加的趋势。

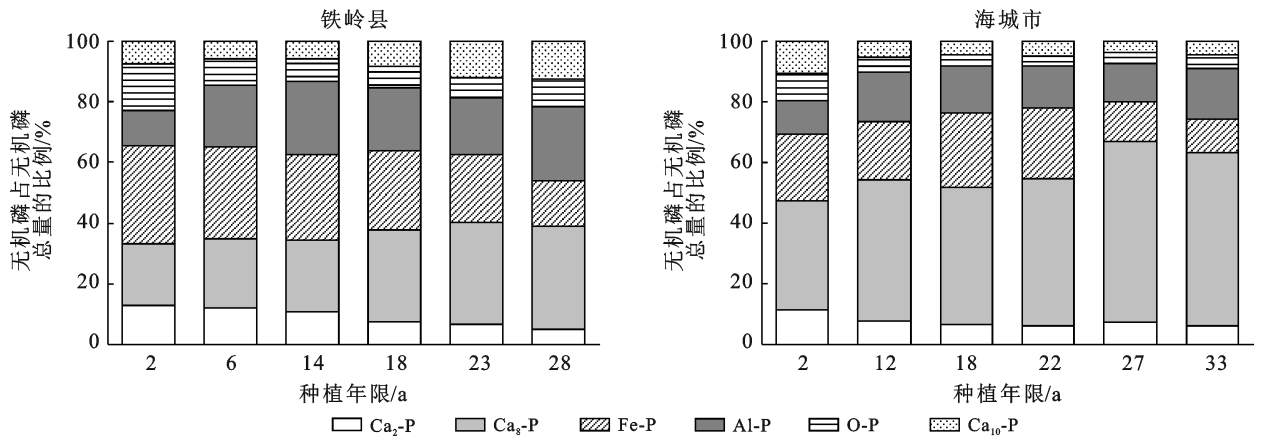


图 3 设施菜田土壤不同形态磷占无机磷总量的比例

2.3 土壤无机磷组分与有效磷的关系

由表 1 可知,土壤速效磷与 Ca_2-P,Ca_8-P 和 Fe-P 之间呈极显著的正相关,与 Al-P 呈显著的正相关,与 O-P 和 Ca_{10}-P 之间的相关性不显著。说明在设施栽培的条件下,Ca_2-P,Ca_8-P 和 Fe-P 这 3 种磷的有效性相对较高。Ca_2-P 是无机磷组成中有效性最高的形态,Ca_2-P 与 Ca_8-P 、Fe-P 和 Al-P 的相关性达到了极显著的正相关,与 O-P 和 Ca_{10}-P 之间的相关性不显著。

表 1 土壤无机磷组分与有效磷含量的相关性

项 目	Ca_2-P	Ca_8-P	Fe-P	Al-P	O-P	Ca_{10}-P	Olsen-P
Ca_2-P	1	0.898**	0.771**	0.720**	0.259	0.349	0.942**
Ca_8-P		1	0.631*	0.721**	0.295	0.326	0.876**
Fe-P			1	0.736**	0.357	0.522	0.811**
Al-P				1	0.765**	0.746**	0.672*
O-P					1	0.936**	0.170
Ca_{10}-P						1	0.288
Olsen-P							1

2.4　不同种植年限设施菜田土壤磷素释放特征

2.4.1　*土壤磷素累积释放量*　由于长期过量施肥,设施土壤对磷素吸附量达到饱和,因此研究设施菜田土壤磷的释放过程具有更重要意义。图 4 为铁岭和海城两个地区不同种植年限设施菜田土壤磷素累积释放量随时间的变化曲线。由图 4 可知,随振荡时间的增加,各年限土壤磷素累积释放量也逐渐增加,且土壤磷素的释放过程,开始是快速反应,随后是一个缓慢反应。在本试验的条件下,约在前 10 h 完成快速释放过程,其中海城地区设施土壤前 10 h 内磷素释放量占整个释放过程的 65%左右(59.91%～71.35%),铁岭地区约为 75%左右(66.28%～82.04%)。在 10 h 以后随着释放时间的增加,虽然释放速率相对较低,但在释放 50 h 后并未达到最大释放量。以振荡 50 h 不同种植年限土壤磷素释放量进行比较可知,对于铁岭和海城地区,均是磷素累积量最高的土壤磷的释放量最高,分别是种植 23 a 和种植 22 a。两地种植 2 a 的土壤磷素含量最低,释放量也最低。

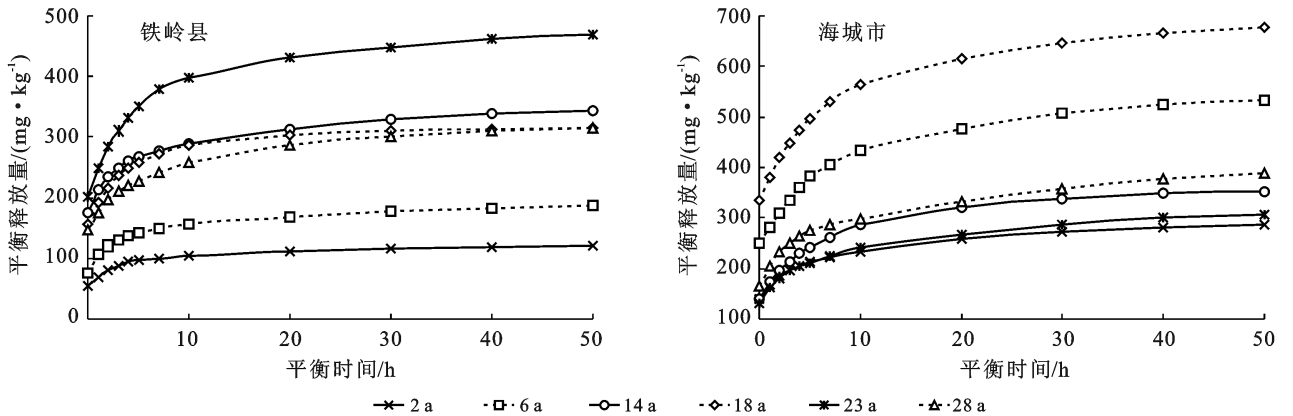


图 4　不同种植年限设施菜田土壤磷释放量与释放时间曲线

将不同年限设施菜田土壤的最大释放量(t=50 h)与不同形态磷素进行相关分析可知,最大释放量与 Ca_2-P,Fe-P 和有效磷之间呈极显著的相关性(相关系数分别是 0.820**,0.944** 和 0.783**),与 Al-P 和全磷呈显著的相关性(相关系数为 0.676*)。其中 Ca_8-P 虽然与有效磷有较高的相关性,但与最大释放量之间的相关性并不显著。

2.4.2　*设施菜田土壤磷素释放率*　由于不同种植年限土壤的全磷含量不同,磷素初始释放量(t=0.25 h)和最大释放量(t=50 h)占全磷的百分比也存在着一定的差异。由图 5 可知,温室土壤的初始释放率和最大释放量随种植年限的变化趋势基本一致,在温室种植 2～15 a 左右磷素的释放率相对较大,从种植约 15 a后磷的释放率则显著降低。虽然在种植的 22,23 a磷素的累积释放量较高,但释放率并不高。在海城地区在种植 2～14 a,土壤磷素的初始和最大释放率均较高,分别高于 5%和 13%。随年限增加则明显降低,分别在 3%和 10%以下。铁岭地区在种植的 2～12 a初始和最大释放率相对较高,分别高于 4%和 14%。种植年限 18～33 a 则均在 4%和 10%以下。

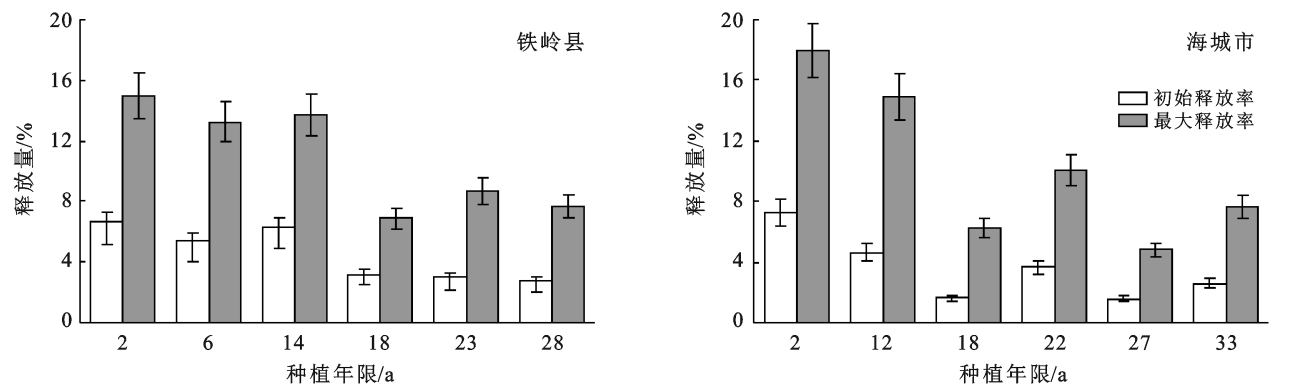


图 5　不同种植年限设施菜田土壤磷素释放率

3 讨 论

3.1 设施蔬菜栽培的年限不同显著影响了土壤中磷素的累积状况

海城和铁岭两个地区土壤磷素的累积量随种植年限的变化趋势相似，分别在2～22 a，2～23 a土壤全磷、无机磷总量和有效磷素显著增加，但达到峰值后均呈降低的趋势。这与徐晓峰等[22]研究认为随种植年限增加，设施土壤磷素含量呈增加的趋势的结论并不一致。分析其原因可能是研究对象的种植时间范围不同，徐晓峰等研究对象设施栽培5～17 a，在研究的时间范围内，土壤中磷素的累积可能还未达到峰值。但本研究结果与高妍等[23]的研究结果趋势相似，即随种植年限的增加，设施土壤磷素含量存在峰值。表明长期的设施栽培过程会造成土壤中磷素的大量积累，但并未保持峰值状态，而是呈显著降低的趋势。说明达到土壤的磷饱和后土壤中磷的淋失量增加[24]。分析认为与设施栽培的施肥特点有关，在设施栽培条件下，大量有机肥施入促进了土壤中磷素的淋失。Pizzeghello等[25]的研究证实，与矿物肥料相比，农家肥的施用增加了P-$CaCl_2$和热水可提取性P（HWP），从而促进了土壤中P的淋溶。

有研究[24]表明施用家禽粪便等有机肥可使固液磷酸分配系数降低，从而降低土壤对磷的吸附强度。这就意味着更少的磷被土壤保留，更多的磷被溶解，其结果是潜在的更高的磷淋失。这些研究中还推测有机肥分解产生的有机酸降低了磷在土壤矿物颗粒表面的吸附，主要是因为有机酸和磷酸盐竞争在氧化铝或氧化铁表面的吸附点位，另外有机酸对氧化铝或氧化铁的螯合和溶解作用减少了吸附点位[26]。这些因素均可引起土壤中磷素的淋失，但在典型设施环境条件下，以哪种影响因素为主还需进一步的分析和研究。

3.2 设施菜田土壤不同无机磷组分的有效性和累积特性不同

无机磷是土壤中磷素的主要形态，海城和铁岭两个地区设施菜田土壤各形态无机磷大部分随种植年限也呈先增加后降低的趋势，但达到峰值的年限不同，说明不同无机磷的有效性和累积特性不同。有关蔬菜保护地无机磷积累的研究报道较多，但受原始土壤类型、种植蔬菜品种、肥料种类和施肥方式等的影响，结果存在较大的差异。余群英等认为无机磷组分以Ca-P为主，其次为O-P，Fe-P和Al-P含量较少[27]。而本研究的结果中无机磷以Ca_8-P为主，其次为Fe-P和Al-P。3种形态无机磷含量较高，且随种植年限的变化幅度也较大。随种植年限的增加，Ca_8-P占无机磷总量的百分比呈逐渐增加的趋势，铁岭地区从21%增加到34%，海城地区从36%增加到57%。从而说明Ca_8-P是土壤无机磷主要的累积形态。Fe-P的含量也较高，但其占无机磷总量的百分比则随种植年限的增加呈降低的趋势，铁岭地区由32%降低到15%，海城地区由22%降低到11%，说明其活性相对较高，在设施栽培的条件下易向其他形态转化。Ca_2-P是土壤中活性最大的磷，但随种植年限的增加，呈逐渐降低的趋势，其中铁岭地区由13%降低到5%，海城地区由11%降低到6%，说明在设施条件下易造成活性磷素的淋失。由此可见，在设施栽培条件下，种植年限不仅影响了土壤各形态无机磷的含量，也影响了其在无机磷总量中所占的百分比。这一方面与设施栽培时间长短不同、施入的磷肥不同和有机质转化释放的磷素不同有关，也与设施条件下，长期施肥影响了土壤的理化性质，进而影响了土壤中不同形态磷素的转化有关。

3.3 土壤中磷素的释放特性，在一定程度上也反应了磷素的活性

从释放曲线可知，土壤中磷素累积量高，则磷素的释放量也相对较高，但释放率并不高，从另一个角度说明了土壤中不同形态磷素活性的差异。从相关分析可知，磷的释放量与有效磷、Ca_2-P和Fe-P的相关性达到了极显著的相关性，这与不同形态无机磷与有效磷的相关性相似，从而进一步说明了土壤中Ca_2-P和Fe-P的活性较高，是土壤中磷素淋失的主要因子。Al-P与磷的释放量和有效磷均达到了显著性相关，说明Al-P也具有一定的活性。O-P和Ca_{10}-P则与二者之间均无相关性，且随种植年限无显著的变化规律，两种磷素的有效性最低，占全磷含量也相对较低，两个地区基本都低于15%。但不同的是无机磷中的Ca_8-P与有效磷的活性也达到了极显著相关，但与磷的最大释放量之间的相关性却不显著，且随种植年限的增加呈逐渐增加的趋势，最高分别达到无机磷总量的57.32%和34.2%，因此Ca_8-P相对更易于积累，提高这部分磷源的生物有效性，是温室土壤磷素养分管理的关键。

4 结 论

（1）铁岭县和海城市两个地区设施菜田耕层土壤全磷、无机磷和有效磷含量随种植年限的增加，呈先增加后降低的趋势，在种植20 a左右达到磷素积累的峰值，全磷含量最高分别达到了5.76±0.61 g/kg和7.08±0.72 g/kg。

(2) 两地设施菜田土壤无机磷以 Ca_8-P 含量为主,最高分别是无机磷总量的 34.2%和 59.9%,其次为 Fe-P 和 Al-P,Ca_8-P 随种植年限的增加而增加,而 Fe-P 则随种植年限的增加而降低。速效磷与 Ca_2-P,Ca_8-P 和 Fe-P 之间呈极显著的正相关,与 Al-P 呈显著的正相关。

(3) 设施菜田种植 2～15 a 左右与 15 a 后对比磷素的释放率相对较高,释放量与 Ca_2-P,Fe-P 之间的相关性达到显著水平。

综合分析设施菜田土壤磷素积累以 Ca_8-P 形态为主,Ca_2-P 和 Fe-P 是磷素淋失的主要形态。

[参 考 文 献]

[1] 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.

[2] 余海英,李廷轩,张树金,等.温室栽培条件下土壤无机磷组分的累积、迁移特征[J].中国农业科学,2011,44(5):956-962.

[3] 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.

[4] 黄敏,梁荣祥,尹维文,等.典型设施环境条件对土壤活性磷变化的影响[J].中国环境科学,2018,38(5):1818-1825.

[5] 郑杰,高佳佳,周建斌,等.不同栽培年限日光温室土壤磷素累积特性研究[J].土壤通报,2012,43(1):171-175.

[6] 刘盛林,丁效东,郑东峰,等.黄河三角洲盐渍化荒地种植植物对土壤改良、磷形态转化及有效性的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):278-284,293.

[7] 贾志航,吕明露,张鑫,等.不同种植年限苹果园土壤磷状况和无机磷组分特征[J].水土保持学报,2020,34(5):308-312,320.

[8] 付蓉,袁久东,胥婷婷,等.不同施磷量对春油菜产量和土壤磷素平衡的影响[J].应用生态学报,2021,32(3):906-912.

[9] 马杰,马玉玲,钱晓燕,等.水铁矿对磷的吸附及胶体态磷迁移能力预测[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(1):85-93.

[10] 张经纬,曹文超,严正娟,等.种植年限对设施菜田土壤剖面磷素累积特征的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(5):977-983.

[11] 郭金花.典型设施蔬菜生产系统水肥、农药投入及环境影响的生命周期评价研究[D].北京:中国农业大学,2016.

[12] 赵满兴,刘慧,白二磊,等.延安不同种植年限日光温室土壤肥力评价[J].农学学报,2019,9(4):54-58.

[13] 郑杰,高佳佳,周建斌,等.不同栽培年限日光温室土壤磷素累积特性研究[J].土壤通报,2012,43(1):171-175.

[14] 马艳春,姚玉新,杜远鹏,等.葡萄设施栽培不同种植年限土壤理化性质的变化[J].果树学报,2015,32(2):225-231.

[15] 王金云,程宪国,郭继斌,等.设施桃园土壤养分变化规律及评价[J].作物杂志,2017(3):96-103.

[16] Yu Haiying, Li Tingxuan, Zhang Xizhou. Nutrient budget and soil nutrient status in greenhouse system [J].中国农业科学(英文版),2010,9(6):871-879.

[17] Yan Zhengjuan, Liu Pengpeng, Li Yuhong, et al. Phosphorus in China's intensive vegetable production systems: Over fertilization, soil enrichment, and environmental implications [J]. Journal of Environmental Quality, 2013,42(4):982-989.

[18] 李婠婠,滕艳敏,李季.不同温室蔬菜种植模式下土壤磷素形态分布与转化[J].土壤,2020,52(2):271-278.

[19] 牛君仿,冯俊霞,张喜英.不同磷源对设施菜田土壤速效磷及其淋溶阈值的影响[J].中国生态农业学报,2019,27(5):686-693.

[20] Dalton B A, Ivo Ribeiroda S, Leonardus V, et al. Long-term manure application effects on phosphorus speciation, kinetics and distribution in highly weathered agricultural soils [J]. Chemosphere, 2015,119(11):504-514.

[21] Bai Junhong, Ye Xiaofei, Jia Jia, et al. Phosphorus sorption desorption and effects of temperature, pH and salinity on phosphorus sorption in marsh soils from coastal wetlands with different flooding conditions [J]. Chemosphere, 2017,188(8):677-688.

[22] 徐晓锋,苗艳芳,郭大勇,等.蔬菜保护地土壤磷积累与转化研究[J].干旱地区农业研究,2008,26(1):25-28,36.

[23] 高妍,姜佰文,刘大森,等.不同种植年限黑土型蔬菜保护地磷素状况的研究[J].核农学报,2011,25(1):121-126.

[24] Vanden N T, Ruysschaert G, Vandecasteele B, et al. The long term use of farmyard manure and compost: Effects on P availability, orthophosphate sorption strength and P leaching [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2016,216(9):23-33.

[25] Diego P, Antonio B, Serenella N, et al. Phosphorus-related properties in the profiles of three Italian soils after long-term mineral and manure applications [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2014,189(3):216-228.

[26] Sabry S, Christos T. Phosphorus sorption and availability to canola grown in an alfisol amended with various soil amendments [J]. Comunication in Soil Science and Plant Analysis, 2013,44(1/4):89-103.

[27] 于群英,李孝良,李粉茹,等.安徽省土壤无机磷组分状况及施肥对土壤磷素的影响[J].水土保持学报,2006,20(4):57-61,66.

[28] 鲍士旦.土壤农化分析[D].北京:中国农业出版社,2011.