



温室滴灌条件下施用鸡粪和磷肥对土壤磷素的影响

刘志平^{1,2}, 武雪萍¹, 李若楠³, 郑凤君¹, 张孟妮¹, 李生平¹, 宋霄君¹

(¹中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; ²山西省农业科学院农业资源环境研究所, 太原 030031;

³河北省农林科学院农业资源环境研究所, 石家庄 050051)

摘要:【目的】针对温室土壤磷素积累的问题, 定位研究滴灌条件下施用鸡粪和磷肥对土壤磷素积累的影响。【方法】以中国华北平原日光温室为研究对象, 采用滴灌方式灌溉, 设置不施肥(CK)、单施磷肥(P₁)、单施鸡粪(OM)、鸡粪和减量磷肥配合施用(OM+P₁)、鸡粪和习惯量磷肥配合施用(OM+P₂)共5个处理, 研究不同施肥方式对黄瓜土壤无机磷各形态的转化积累、不同生育时期在土壤垂直剖面的运移分布及其有效性的影响。【结果】鸡粪和磷肥配施显著增加了土壤中的全磷、有效磷(01sen-P)及无机磷的积累和残留。在0—20 cm土层中, 全磷含量随着黄瓜生育时期的推进呈下降趋势, 苗期最高, 产瓜末期最低。不同施肥处理下, 土壤全磷含量明显不同, 各生育时期顺序均为OM+P₂处理>OM+P₁处理>P₁处理>OM处理>CK处理; 土壤剖面各层次有效磷含量差异很大, 苗期0—20 cm土层有效磷含量范围为44.43—86.08 mg·kg⁻¹, 20—40 cm土层含量范围为6.51—10.05 mg·kg⁻¹, 40 cm以下土层黄瓜各个生育时期有效磷含量差异很小。在温室滴灌条件下水分对磷的运移影响较小, 土壤有效磷主要集中在0—20 cm土层, 各生育时期0—20 cm土层有效磷占土壤剖面0—100 cm土层有效磷的68.76%—87.78%。与CK相比, 其他施肥处理均提高了有效磷占全磷的比重, 提高范围为1.23%—2.47%。0—20 cm土层中不同形态无机磷的含量为Ca₁₀-P>Ca₈-P>O-P>Ca₂-P>Al-P>Fe-P, 其中, Ca-P所占比例最大, 为79.55%—83.35%。随着磷肥用量增加, 磷的积累量也增加, Ca₈-P、Ca₂-P、Al-P、Fe-P和Ca₁₀-P含量均比不施磷的处理显著提高, 以Ca₈-P增加最多, 其次是Ca₂-P、Al-P和Fe-P; 磷肥施入土壤后很快会经由Ca₂-P转化为Ca₈-P, 而以缓效态累积在土壤中, 各形态无机磷中以Ca₈-P积累最多, Al-P和Fe-P也有一定的积累。【结论】传统过量施肥造成磷素以Ca₈-P、Al-P和Fe-P等形态残留于土壤中, 造成了土壤磷素的积累和磷肥的浪费。在30 000 kg·hm⁻²鸡粪的基础上增施磷肥并无显著增产效应, 却显著增加了土壤磷素的残留积累量。如果只施鸡粪, 用量不宜超过30 000 kg·hm⁻²; 如果配施无机磷肥, 则鸡粪减量, 且无机磷肥在300 kg·hm⁻²的基础上减量, 具体施肥量及配施比例有待进一步研究探讨。

关键词: 黄瓜; 日光温室; 鸡粪; 磷肥; 无机磷分级; 磷的富集和转化; 有效磷

Effect of Applying Chicken Manure and Phosphate Fertilizer on Soil Phosphorus Under Drip Irrigation in Greenhouse

LIU ZhiPing^{1,2}, WU XuePing¹, LI RuoNan³, ZHENG FengJun¹, ZHANG MengNi¹,
LI ShengPing¹, SONG XiaoJun¹

(¹Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; ²Institute of Agricultural Resource Environment, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031; ³Institute of Agricultural Resource Environment, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051)

收稿日期: 2019-05-30; 接受日期: 2019-08-21

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFE0112300、2018YFD0200408)、国家863课题(2013AA102901)、国家科技支撑计划课题(2015BAD22B03)、中国农业科学院基本科研业务费专项(1610132018024)

联系方式: 刘志平, E-mail: lzp.19881006@163.com. 通信作者武雪萍, E-mail: wuxueping@caas.cn

Abstract: 【Objective】 Aiming at the problem of phosphorous accumulation in greenhouse soil, the effects of applying chicken manure and phosphorus fertilizer on phosphorus accumulation in soil under drip irrigation were studied. 【Method】 The solar greenhouse in North China Plain using drip irrigation was taken as research object. Five treatments were designed, including no fertilizer (CK), single phosphate (P_1), single chicken manure (OM), chicken manure and reduced phosphate fertilization (OM+ P_1), chicken manure and habitual phosphate fertilization (OM+ P_2), to reveal the enrichment and transformation, migration and distribution in vertical section of soil at different growth stages and availability of inorganic phosphate form in soil. 【Result】 The results showed that the combination of chicken manure and phosphate fertilizer significantly increased the accumulation and residue of total phosphorus, available phosphorus (Olsen-P) and inorganic phosphorus in soil. In the soil layer of 0-20 cm, total phosphorus content decreased with the development of cucumber growth period, highest in seeding stage and lowest in late fruiting stage period. Under different fertilization treatments, total phosphorus contents were significantly different, and the sequence of each growth period was OM+ P_2 treatment>OM+ P_1 treatment> P_1 treatment>OM treatment>CK treatment. The Olsen-P contents at different levels in the soil profile varied greatly. In seedling stage, the range was 44.43-86.08 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ at soil of 0-20 cm, 6.51-10.05 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ at soil of 20-40 cm, and there was very little variability in soil layer lower than 40 cm. The effect of water on the movement of phosphorus was slight under the condition of drip irrigation in greenhouse. So Olsen-P mainly concentrated in the soil layer of 0-20 cm, which accounted for 68.76-87.78% of the available phosphorus in soil profile of 0-100 cm in each growth period. Compared with CK, the other treatments increased the proportion of Olsen-P in total phosphorus by 1.23%-2.47%. The sequence of inorganic phosphorus content of different forms in soil layer of 0-20 cm was $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ > $\text{Ca}_8\text{-P}$ > O-P > $\text{Ca}_2\text{-P}$ > Al-P > Fe-P , among which, the proportion of Ca-P was the highest (79.55%-83.35%). As the amount of phosphorus fertilizer increased, so did the accumulation of phosphorus. The contents of $\text{Ca}_8\text{-P}$, $\text{Ca}_2\text{-P}$, Al-P , Fe-P and $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ under fertilization treatments were all significantly higher than that under CK, with $\text{Ca}_8\text{-P}$ increased the most, followed sequentially by $\text{Ca}_2\text{-P}$, Al-P and Fe-P . Phosphate fertilizer would be converted into $\text{Ca}_8\text{-P}$ through $\text{Ca}_2\text{-P}$ soon after it was applied into the soil, which accumulated in the soil in a slow manner. Among all forms of inorganic phosphorus, $\text{Ca}_8\text{-P}$ accumulated the most, Al-P and Fe-P also accumulated to a certain extent. 【Conclusion】 Traditional excessive fertilization caused phosphorus remaining in the soil in the forms of $\text{Ca}_8\text{-P}$, Al-P and Fe-P , resulting in the accumulation of soil phosphorus and waste of phosphorus fertilizer. On the basis of 30,000 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ chicken manure, adding phosphate fertilizer had no significant effect on increasing yield but obviously increased the residual accumulation of phosphorus. If only chicken manure was applied, the dosage should not exceed 30 000 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. If inorganic phosphate fertilizer was combined, the amount of chicken manure should be reduced, while the inorganic phosphate fertilizer rate should be less than 300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. The specific amount and proportion of fertilizer application need further study and discussion.

Key words: cucumber; greenhouse; chicken manure; phosphate fertilizer; inorganic phosphate fraction; phosphate accumulation and transformation; available phosphorus

0 引言

【研究意义】磷素是作物生长不可或缺的营养元素之一,磷肥施入土壤后,很快转化为各种形态的磷酸盐,大多以难溶形态固定于土壤中,因此,磷的当季利用率仅有 10%—25%^[1-2]。随着现代种植技术的成熟,我国蔬菜大棚迅速发展,有效地解决了北方冬季蔬菜的供应问题,成为一些地区的主要产业之一。但是,农民由于受经验施肥观念及短期经济利益的驱使,盲目过量施肥现象普遍存在,实际施肥量远远超过了蔬菜对养分的需求量,施用氮磷钾的比例与蔬菜需求比例有很大差距,造成肥料浪费及环境超重负荷,使得土壤出现了不同程度的盐害和酸化问题^[3-4]。研究表明,山东济南日光温室 P_2O_5 的年均投入量为 1 965 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[5]。山东寿光等地日光温室 P_2O_5 的年均投入

量为 3 656 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,而土壤养分利用率仅为 8%^[6]。据张彦才等对河北省 8 县大棚施肥状况调查表明,在大棚蔬菜施肥中,有机肥的施入量占施肥总量的 60.77%—87.62%^[7];杨凌、安塞和靖边年平均有机肥投入量(烘干基)分别为 54.0、44.7 和 21.0 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[8]。而且农民习惯大量施用的新鲜鸡粪磷素含量较高,过多的磷蓄积在土壤中后,增加了磷素的损失,造成了水体富营养化^[9]。针对这一问题,研究温室土壤磷的积累、转化及不同形态磷的有效性对合理指导施肥意义重大,特别是随着滴灌技术的日益推广,温室菜地如何合理施用磷肥以提高磷肥的利用率,是一项亟待解决的问题。

【前人研究进展】近年来国内外学者对土壤无机磷形态、分布与有效性的关系做了许多补充和完善。对菜地磷肥转化的研究中发现,低磷、中磷、高磷土壤中无机磷含量最多的形态分别为: $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$,

3 种土壤磷肥的累积利用率分别为 41.3%、19.4%和 21.2%^[10]。哈尔滨地区黑土上的研究表明蔬菜保护地土壤的无机磷组分以 Ca-P 的含量最高,其次为 Al-P、Fe-P、O-P^[11]。土壤磷的形态和不同分级磷的含量与土壤的性质、环境条件及管理因素都有关^[12-15]。满足我国蔬菜作物生长的土壤 Olsen-P 阈值为 58.0 mg·kg⁻¹^[16],《中国主要作物施肥指南》中给出适宜黄瓜生长的耕层土壤 Olsen-P 含量为 60—100 mg·kg⁻¹^[17]。合理施肥,既可以保障农作物对磷素的需求,又可以避免磷素超过农学阈值,造成残留和浪费^[18-19]。【本研究切入点】有关磷的分级及其有效性的研究报道多是大田条件下,而针对温室菜地不同磷形态的转化、积累及其有效性尚缺乏系统的研究。【拟解决的关键问题】本研究以华北平原日光温室菜地为研究对象,采用蒋柏藩和顾益初对石灰性土壤无机磷的分级方法,对温室滴灌条件下菜地土壤无机磷形态的积累、转化及其有效性进行了探讨,具体包括(1)温室滴灌条件下不

同施肥方式(不施肥、单施鸡粪、单施磷肥、鸡粪与习惯量磷肥配合施用、鸡粪与减量磷肥配合施用)对土壤全磷及有效磷含量的影响;(2)黄瓜整个生育期不同施肥方式下各形态无机磷在土壤垂直剖面的分布、转化及其有效性;(3)不同处理对黄瓜产量的影响。通过以上研究,为温室菜地磷肥的合理施用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试温室位于河北省辛集市马庄试验站,该地区属于暖温带半湿润大陆季风气候,供试土壤为壤质石灰性潮土。长期定位试验始于 2008 年 2 月,春茬种植黄瓜。种植前对温室土壤 0—20 cm 土层的基础养分及 0—20、20—40、40—60、60—80、80—100 cm 土层基础土壤容重和田间持水量进行检测,结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 温室 0—20 cm 土层基础养分含量

Table 1 Content of basic nutrient in 0-20 cm layer of soil in greenhouse

pH	有机质 SOM (g·kg ⁻¹)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N (mg·kg ⁻¹)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N (mg·kg ⁻¹)	速效钾 NH ₄ OAc-K (mg·kg ⁻¹)	全磷 TP (g·kg ⁻¹)	有效磷 Olsen-P (mg·kg ⁻¹)
8.1	15.0	5.5	19.4	60.0	1.0	40.2

表 2 基础土壤各层次土壤容重和田间持水量

Table 2 Bulk densities and field capacity of the original soil

土壤深度 Soil depth (cm)	土壤容重 Soil bulk density (g·cm ⁻³)	田间持水量 Field capacity (%)
0-20	1.35	19.11
20-40	1.52	16.87
40-60	1.48	22.04
60-80	1.36	23.02
80-100	1.42	20.18

1.2 试验设计与田间管理

试验小区面积为 1.8 m×6.0 m=10.8 m²,各小区周围用 3 mm 厚的 PVC 板隔开,埋深 100 cm,衔接处用万能胶封好,其上缘高出土面 5 cm。周围用相应层次的土回填镇压,然后用泥土填紧微区内边缘。供试作物为黄瓜,品种为博美 11 号,于 2018 年 1 月 12 日播种育苗,2 月 16 日定植,拉秧时间为 7 月 5 日。每个小区种植黄瓜 3 行,行距 0.60 m,株距 0.30 m,每个小区 60 株。供试大棚为 10 年棚龄。

试验共设 5 个处理,每个处理设 3 次重复,养分

含量如表 3 所示。磷肥为过磷酸钙(16% P₂O₅),氮肥为尿素(46% N),钾肥为硫酸钾(60% K₂O)。有机肥为发酵鸡粪,其养分含量为有机质 249.81 g·kg⁻¹,全氮 13.49 g·kg⁻¹,全磷(P₂O₅) 30.2 g·kg⁻¹,全钾(K₂O) 20.7 g·kg⁻¹;用量根据当地农民的习惯,设置为 30 000 kg·hm⁻²。鸡粪随播前翻地撒施,化肥中将 20%氮肥、100%磷肥、40%钾肥作为基肥,剩余肥料根据黄瓜生育期需肥规律分 10 次随水追施,滴灌施肥一体化进行。

灌水采用膜下滴灌方式,每次灌溉水量参考文献中对黄瓜不同生育时期适宜土壤田间持水量和黄瓜根系生长分布范围而设计^[20-21],在黄瓜的苗期、产瓜初期、产瓜盛期、产瓜末期分别保持土壤田间持水量的 75%—90%、80%—95%、80%—95%、75%—90%,如表 4 所示。根据 TDR 实测含水量计算每次的灌水量,用水表定量灌溉,总灌溉量为 4 170 m³·hm⁻²,定苗期和缓苗期水量的单次水量为 240—360 m³·hm⁻²,之后从第一次菜瓜开始,每 5—7 d 灌溉一次,单次水量为 120—180 m³·hm⁻²,全生育期灌溉 19—23 次。

表 3 试验处理及施肥方案

Table 3 Experimental treatments and fertilization schedule

处理 Treatment	无机肥 Inorganic fertilizer (kg·hm ⁻²)			鸡粪 Chicken manure (kg·hm ⁻²)			总养分 Total nutrient (kg·hm ⁻²)		
	P ₂ O ₅	N	K ₂ O	P ₂ O ₅	N	K ₂ O	P ₂ O ₅	N	K ₂ O
CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P ₁	300	600	525	0	0	0	300	600	525
OM	0	600	525	906	405	621	906	1005	1146
OM+P ₁	300	600	525	906	405	621	1206	1005	1146
OM+P ₂	675	600	525	906	405	621	1581	1005	1146

P₂ 为当地农民大棚黄瓜习惯施磷量, P₁ 为减量磷肥
P₂ was phosphorus fertilizer quantity that local farmers used to apply to cucumber in greenhouses, and P₁ was reduced phosphorus fertilizer quantity

表 4 黄瓜不同生育时期土壤水分控制状况

Table 4 Moisture control at different growth stages of cucumber

生育时期 Growth period	土壤深度 Soil depth (cm)	田间持水量的百分数 Percentage of field capacity (%)
苗期 Seedling stage	0-20	75-90
产瓜初期 Early fruiting stage	0-40	80-95
产瓜盛期 Vigorous fruiting stage	0-60	80-95
产瓜末期 Late fruiting stage	0-60	75-90

1.3 样品采集与测试分析

分别于黄瓜苗期(3月14日)、产瓜初期(4月14日)、产瓜盛期(5月24日)和产瓜末期(7月5日)采集土样,按照0—20、20—40、40—60、60—80、80—100 cm 分层采集,土样风干后分别测定土壤全磷、有效磷和无机磷组分含量。测定方法均采用鲁如坤编著的《土壤农业化学分析方法》^[22]进行。其中,pH 采用酸度计检测;土壤容重采用环刀法;田间持水量采用压力板法;全磷采用酸溶-钼锑抗比色法;有效磷为碳酸钠法;土壤无机磷的分级测定采用蒋柏藩和顾益初关于中性、石灰性土壤无机磷形态的分级测定方法进行^[23]。

1.4 数据处理与统计方法

采用 Microsoft Excel 和 Sigmaplot 进行数据、图表整理,利用 SPSS16.0 软件进行方差分析(ANOVA),用最小差数法(LSD)进行差异显著性检验。

2 结果

2.1 不同施肥处理对土壤 pH 的影响

土壤 pH 通常会影响土壤的物理化学及微生物的性质,图 1 显示,随着黄瓜生育时期的推进,土壤 pH 呈现下降趋势,有机无机配施的处理较其他 3 个处理下降

明显,其中 OM+P₂ 处理的土壤 pH 下降最为显著。

2.2 不同施肥处理对土壤全磷含量的影响

土壤全磷是土壤中各种形态磷素的总和,能反映土壤磷库大小和潜在的供磷能力。图 2 表明,在 0—20 cm 土层中,全磷含量随着黄瓜生育时期的推进呈下降趋势,以苗期土壤全磷含量最高,产瓜末期最低。不同施肥处理下,土壤全磷含量明显不同,其顺序为 OM+P₂ 处理>OM+P₁ 处理>P₁ 处理>OM 处理>CK 处理,且不同生育时期均呈现此规律,苗期各施肥处理土壤全磷含量分别比 CK 增加了 269.2、205.0、102.5 和 85.8 mg·kg⁻¹;直到产瓜末期各施肥处理土壤仍然有较高的磷素残留,OM+P₂、OM+P₁、P₁、OM 4 个处理与 CK 相比,土壤全磷含量增加了 232.9、158.7、142.5 和 87.9 mg·kg⁻¹。经方差分析,5 个处理间差异均达到显著水平,以鸡粪和无机磷肥配施的处理全磷含量较高。

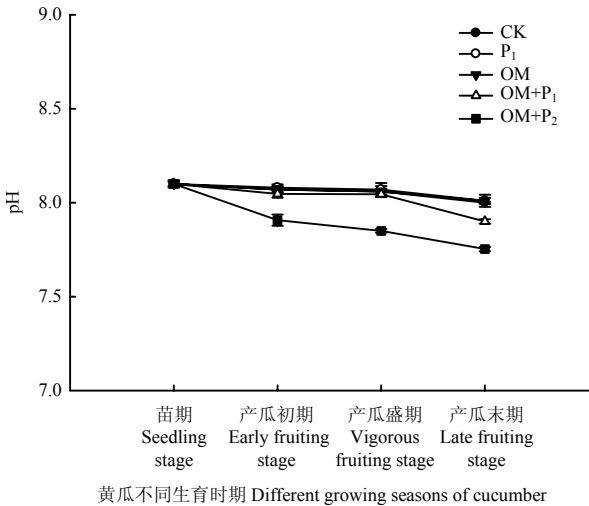


图 1 不同施肥处理对土壤 pH 的影响

Fig. 1 Effects of various fertilization treatments on soil pH

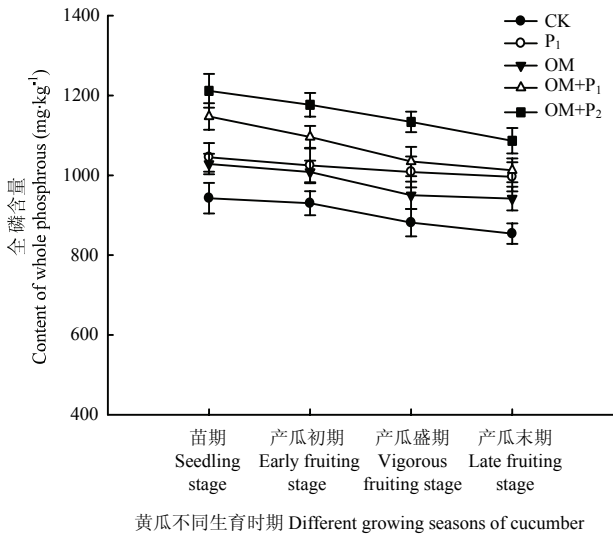


图 2 不同施肥处理对 0—20 cm 土层全磷含量的影响

Fig. 2 Effect of various fertilization treatments on the total amount of P in 0-20 cm layer of soil

2.3 不同施肥处理对黄瓜各个生育时期土壤有效磷含量的影响

图 3 结果表明，不同施肥处理对土壤有效磷含量有明显的影 响，0—20 cm 土层各处理间差异最大，其含量范围为 44.43—86.08 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ （苗期）；其次是 20—40 cm，其含量范围为 6.51—10.05 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ （苗期）；40 cm 以下土层各个生育时期有效磷含量差异很小，在 1.02—3.55 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内细微变化。由此可见，土壤剖面各层次有效磷含量差异很大，其中各生育时期 0—20 cm 土层有效磷含量最高，占土壤剖面 0—100 cm 土层有效磷的 68.76%—87.78%。

不同施肥处理下，有效磷的含量在苗期和产瓜初期的顺序为 $\text{OM}+\text{P}_2$ 处理 $>$ $\text{OM}+\text{P}_1$ 处理 $>$ P_1 处理 $>$ OM 处理 $>$ CK 处理；在产瓜盛期和产瓜末期，施鸡粪的处理中土壤有效磷含量也都保持较高水平，而单施化肥的处理，土壤有效磷含量明显下降，在产瓜盛期单

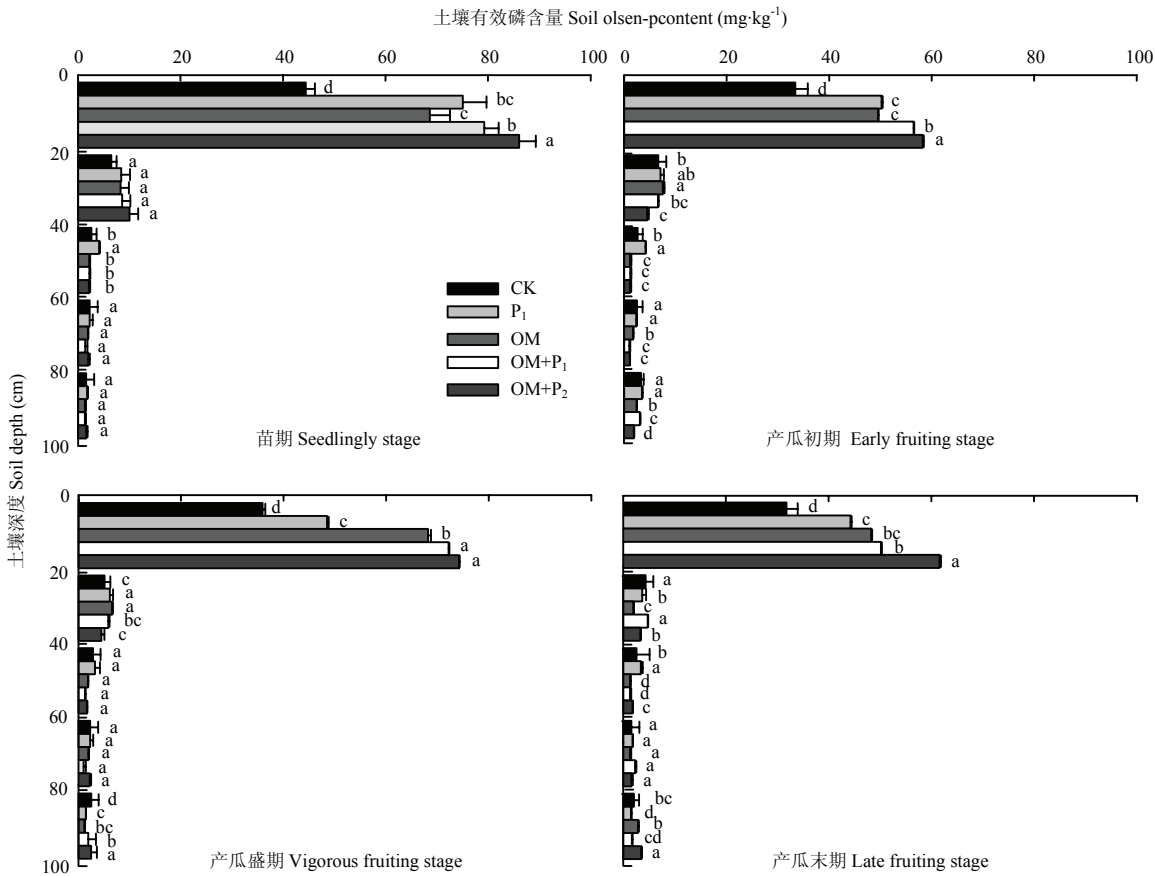


图 3 不同施肥处理对土壤有效磷含量的影响

Fig. 3 Effect of various fertilization treatments on the amount of Olsen-P in soil

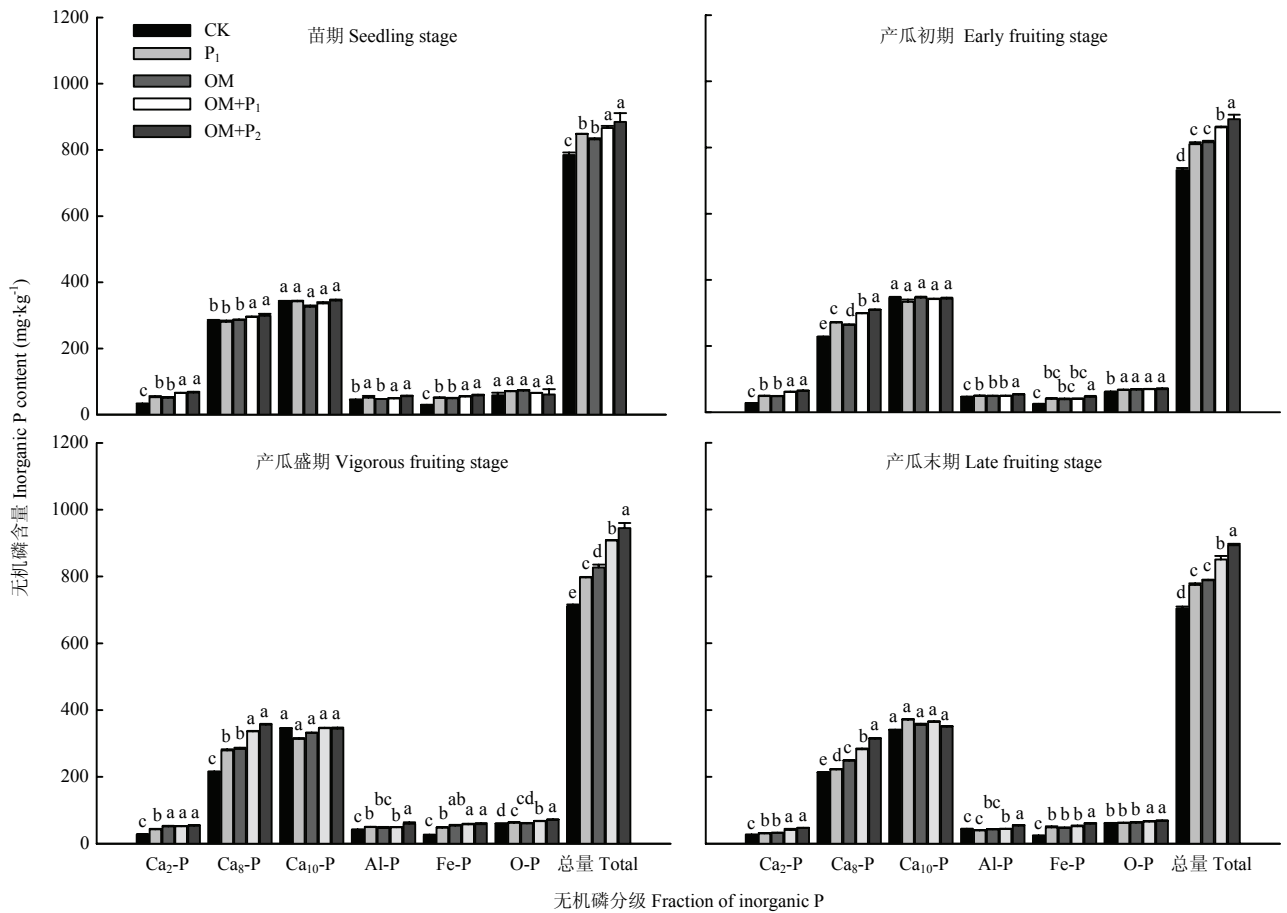
施鸡粪的处理比 CK 中有效磷的含量提高了 32.27 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，比单施磷肥的处理提高了 19.72 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。鸡粪和磷肥配施的 OM+P₂ 和 OM+P₁ 处理与单施鸡粪相比，有效磷含量分别提高了 6.04 和 2.05 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；与单施化肥的处理相比，有效磷含量分别提高了 25.76 和 23.71 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，各处理有效磷含量的顺序为 OM+P₂ 处理>OM+P₁ 处理>OM 处理>P₁ 处理>CK 处理。与 CK 相比，各施肥处理均提高了有效磷占全磷的比重，提高范围为 1.23%—2.47%。

2.4 不同施肥处理对土壤无机磷组分的影响

图 4 结果表明，石灰性壤质潮土不同形态无机磷的含量为 Ca₁₀-P>Ca₈-P>O-P>Ca₂-P>Al-P>Fe-P，其中，Ca-P 所占比例最大，为 79.55%—83.35%。在 Ca-P 组分中，Ca₁₀-P 含量最多，占 Ca-P 总量的

45.62—59.48%；其次，Ca₈-P 含量占 Ca-P 总量的 35.58—45.82%；含量最少的 Ca₂-P 所占 Ca-P 总量的 4.44—9.38%。Ca₁₀-P、Ca₈-P、O-P、Ca₂-P、Al-P、Fe-P 分别占无机磷总量的 36.44—48.59%，28.67%—37.75%，7.33%—8.73%，3.65%—7.54%，5.15%—6.33%，3.24%—6.67%。

与 CK 相比，有机无机配施普遍提高了不同组分无机磷的含量及总量，以 Ca₈-P 增加最多，其次是 Ca₂-P、Al-P、Fe-P，处理间差异达到显著水平；OM+P₂ 处理土壤无机磷的总量最高，变化趋势为 OM+P₂ 处理>OM+P₁ 处理>OM 处理>P₁ 处理>CK 处理，与土壤有效磷含量变化趋势一致。O-P 在产瓜盛期和产瓜末期有所增加，而 Ca₁₀-P 含量在各个处理间变化甚微，保持在 340.0—349.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。



不同字母表示同一生育时期不同处理之间在 0.05 水平差异显著。下同
Different letters above the bars indicate a significant difference ($P<0.05$) among treatments at the same growth stage. The same symbols were used in the following figures

图 4 不同施肥处理对 0—20 cm 土层不同形态无机磷含量的影响

Fig. 4 Effects of various fertilization treatments on different forms of inorganic P content of the 0-20 cm layer of soil

不同生育时期土壤无机磷组分的变化趋势表现为： $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的含量随着生育时期的推进逐渐下降， $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 Al-P 则在产瓜盛期之前呈现增加趋势，之后则又下降， Fe-P 略有下降趋势， O-P 含量和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 变化不明显。说明当季作物主要吸收利用的磷素形态为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 Fe-P ，而 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 很少被作物吸收利用。

2.5 不同施肥处理对黄瓜产量的影响

图 5 结果表明，不同施肥处理下，黄瓜总产量为 $\text{OM}+\text{P}_2$ 处理 $> \text{OM}+\text{P}_1$ 处理 $> \text{OM}$ 处理 $> \text{P}_1$ 处理 $> \text{CK}$ 处理，LSD 多重比较结果表明，4 个施肥处理与对照（CK）间差异达显著水平， P_1 处理与 $\text{OM}+\text{P}_2$ 、 $\text{OM}+\text{P}_1$ 、 OM 3 个处理间也达到显著水平，而 $\text{OM}+\text{P}_2$ 、 $\text{OM}+\text{P}_1$ 、 OM 3 个处理间差异不显著，由此可见，在施用 $30\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 鸡粪的基础上增施磷肥，虽然显著增加了土壤磷素的积累量，但是并无显著增产效应。

2.6 土壤无机磷与有效磷的相关性

有效磷是土壤磷库中对作物最有效的部分，这部分磷能够被植物吸收利用。一般来说，土壤有效磷是指用特定的方法检测到的土壤磷素，与无机磷的不同

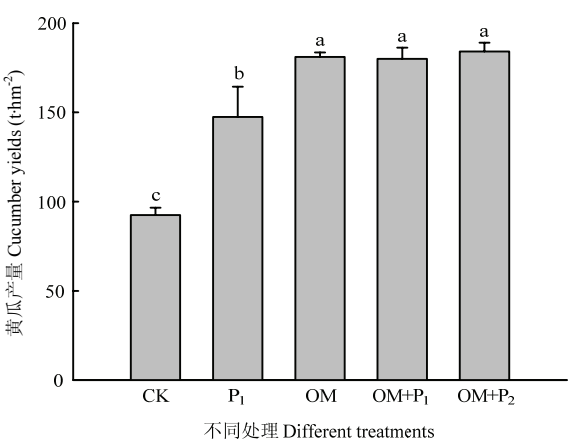


图 5 不同处理下黄瓜产量 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)

Fig. 5 Cucumber yields under the various treatments ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)

组分在含量上存在一定的交叉^[24]，本研究对有效磷和无机磷组分进行了相关性分析，结果表明（表 5）， $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量与土壤有效磷含量相关性最高，各生育时期相关系数均达到极显著水平，其次是 Al-P 各生育时期相关系数达到显著或极显著水平，再次是 $\text{Ca}_8\text{-P}$ ，除苗期外各生育期相关系数均达到显著水平。

表 5 土壤不同形态无机磷含量与有效磷的相关系数 (r)

Table 5 Correlation coefficients (r) between the content of inorganic P in different forms and Olsen-P

生育时期 Growth period	$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	Al-P	Fe-P	O-P
苗期 Seedling stage	0.974**	0.699	0.835	0.991**	0.859	0.319
产瓜初期 Early fruiting stage	0.992**	0.974**	0.691	0.973**	0.862	0.964*
产瓜盛期 Vigorous fruiting stage	0.962**	0.911*	0.695	0.929*	0.696	0.696
产瓜末期 Late fruiting stage	0.929**	0.919*	0.672	0.945*	0.781	0.845

2.7 有效磷及各形态无机磷对黄瓜产量的影响

土壤有效磷及某些形态的无机磷均会影响农作物产量。本研究中，土壤 Olsen-P 和无机磷组分与黄瓜产量的相关性分析结果表明（表 6），黄瓜各生育时期 0—20 cm 土层中 Olsen-P 含量与黄瓜产量显著相

关，其中产瓜盛期达到了极显著水平（ $r=0.963^{**}$ ），苗期、产瓜初期和产瓜末期达到了显著水平（ r 分别为 0.887^* 、 0.933^* 、 0.897^* ）；无机磷组分中， $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 Al-P 的含量与黄瓜产量之间的差异达到了显著或极显著水平，相关性最好。

表 6 不同生育时期土壤有效磷及无机磷与黄瓜产量的相关系数 (r)

Table 6 Correlation coefficients (r) between Olsen-P and inorganic P in soil and cucumber yield at different growth stages

生育时期 Growth period	Olsen-P	$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	Al-P	Fe-P	O-P
苗期 Seedling stage	0.887*	0.906*	0.691	-0.313	0.934*	0.595	0.482
产瓜初 Early fruiting stage	0.933*	0.912*	0.86	0.007	0.918*	0.759	0.989**
产瓜盛期 Vigorous fruiting stage	0.963**	0.999**	0.886*	-0.03	0.985**	0.695	0.607
产瓜末期 Late fruiting stage	0.897*	0.973*	0.774	0.472	0.931*	0.475	0.738

3 讨论

3.1 在滴灌条件下施用鸡粪对土壤磷素残留和积累的影响

大量研究表明,有机无机配施可以显著提高 Olsen-P 占全磷的比例^[25],本研究结果也显示,鸡粪和无机磷肥配施显著提高了 Olsen-P 占全磷的比例,与 CK 相比提高了 1.23%—2.47%。但是,大量施用鸡粪和磷肥会引起土壤磷素的积累,本试验结果表明,施肥显著增加温室菜地 0—20 cm 土层全磷和无机磷的残留和积累,尤以鸡粪和磷肥配施处理下,在整个生育期磷素积累均最多,特别是进入产瓜盛期(5 月份)以后,温室气温已达 30℃ 以上,同时灌水量也在增加,这时温度和湿度促进了鸡粪的矿化分解,造成磷素累积。

鸡粪能够通过自身作用改善土壤磷素营养,降低土壤对磷素的吸附作用,增加磷素的解吸,从而使土壤中的 Olsen-P 含量增加。大量研究表明,施用有机物料有利于土壤难溶态磷转化为可溶态磷的过程是通过矿化、络合溶解、酸溶、还原等作用实现的。有机酸根离子可以与磷酸根离子竞争土壤吸附位点。有机肥能明显增加土壤中有机酸根的含量,有机物腐解产生的草酸、乙酸等对钙磷有一定的效果。多数有机酸对土壤中的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 都有活化作用。除了施用有机物料和调节土壤 pH,使用菌根及早田改水田等措施,也可以在有限的磷肥投入后,提高 Olsen-P 的含量^[26-27]。

尽管磷素的化学性质使其在土壤中不易移动,但在施用量过大的情况下,不仅 0—40 cm 土层各形态磷素有大量积累,40—100 cm 土层中也有一定程度的积累^[28-29]。施用畜禽粪便后,土壤剖面中有效磷的含量增加,并促进了磷的迁移^[30-31]。可能是因为长期施肥导致表层土壤对磷的吸收达到饱和状态,水溶性磷通过土壤孔隙向下转移;也可能是因为粪肥矿化产生的有机酸对土壤本身的磷有活化作用,降低了土壤对磷的吸附能力^[32]。研究表明,相对于化肥而言,在等量磷素投入下,有机肥对土壤磷素的积累,尤其是活性态磷的积累贡献更大^[33]。

YAN 等研究指出,在中国基于瓜果菜产量的土壤 Olsen-P 阈值为 $58.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[16],《中国主要作物施肥指南》中给出适宜黄瓜生长的耕层土壤 Olsen-P 含量为 $60\text{—}100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[17],本研究 P_1 、OM、 $\text{OM}+\text{P}_1$ 及 $\text{OM}+\text{P}_2$ 4 个施肥处理中,耕层土壤 Olsen-P 含量在此范围内。可见,鸡粪与磷肥的施入虽然显著增加了全

磷含量,但并未使有效态磷超出农学阈值范围,而是以缓效态或无效态残留于土壤中,造成磷素的累积与一定程度上的浪费。

3.2 不同形态土壤无机磷的转化和积累

本研究中石灰性壤质潮土无机磷的含量为 $\text{Ca}_{10}\text{-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{O-P} > \text{Ca}_2\text{-P} > \text{Al-P} > \text{Fe-P}$,不同施肥处理均比 CK 提高了 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的含量,以 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 增加最多,其次是 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P ,处理间差异达到显著水平,而 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量处理间变化甚微。据宋付朋^[34]对长期施磷石灰性土壤无机磷形态的研究结果为耕层土壤 $\text{Ca}_{10}\text{-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Al-P} > \text{Fe-P} > \text{O-P} > \text{Ca}_2\text{-P}$;据郭智芬等^[35]对石灰性旱地土壤不同形态无机磷研究结果为 $\text{Ca}_{10}\text{-P} > \text{O-P} > \text{Fe-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_2\text{-P}$,以上结果与本试验地土壤不同形态磷含量顺序略有不同。姚炳贵等^[36]研究指出,津郊潮土磷素磷的组成以磷酸钙最多,其次是闭蓄态磷酸盐,而磷酸铝盐与所占比例很少,其研究结果与本研究结论一致。

不同生育时期土壤无机磷组分的变化趋势表现为:土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量随着生育时期的推进逐渐下降, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 Al-P 则在产瓜盛期之前呈现增加趋势,之后则又下降。 Fe-P 略有下降趋势, O-P 含量和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 变化不明显。可见,磷肥加入土壤后很快会由 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 转化为 $\text{Ca}_8\text{-P}$,而以缓效态累积在土壤中,各形态无机磷中以 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 积累最多,缓效态 Al-P 和 Fe-P 也有一定的积累。前人研究发现,对石灰性土壤投入磷素时,小麦根际土壤中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 的含量会在短时间内迅速增加,而 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 的含量几乎没有变化^[37];盐土施用有机肥后,土壤中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的含量会快速增加,其他形态变化不大;土壤施用无机磷肥时,磷素会首先向 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 转化,之后向 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 O-P 转化^[38]。大量研究表明,土壤 pH 会影响营养元素的有效性。磷在 pH 6.5 以下时,随着 pH 的降低,其有效性降低;在 pH 7.5 以上时,随着 pH 的升高,其有效性也会降低^[25]。本研究的试验偏碱性,随着生育时期的推进,pH 逐渐趋向于中性,可能会导致 Al-P 、 Fe-P 等形态含量增加。

从各形态土壤无机磷对黄瓜产量的影响及与有效磷的相关性可以看出,不同形态无机磷对黄瓜的有效性顺序是 $\text{Ca}_2\text{-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Fe-P}$,即二钙磷和铝磷是黄瓜的有效磷源。研究表明,二钙磷是作物的有效磷源,铝磷、八钙磷、铁磷是缓效磷,十钙磷是潜在磷源^[39-40],这与本研究结论一致。

3.3 不同处理对黄瓜产量的影响

本试验中 OM、OM+P₁ 和 OM+P₂ 3 个处理对黄瓜产量的影响并不显著, 在施用 30 000 kg·hm⁻² 鸡粪的基础上, 增施磷肥并无显著的增产效应, 却显著增加了土壤磷素的积累量。由此可见, 鸡粪和无机磷肥配施虽然能保证黄瓜前期有效磷的供给, 有利于产瓜盛期充足的养分保障, 但是同时会带来产瓜末期土壤磷的残留积累, 尤其是 OM+P₂ 处理, 0—20 cm 土层磷积累量显著增加, 在产瓜末期 Olsen-P 含量仍然高达 61.61 mg·kg⁻¹, 单施磷肥和单施鸡粪的处理分别为 44.28 mg·kg⁻¹、48.31 mg·kg⁻¹。据张彦才等^[7]对河北省 8 县市的大棚番茄、黄瓜、甜椒施肥状况调查表明, 温室大棚氮、磷肥平均用量都远远超出了推荐施肥量, 平均施磷量是推荐施肥量的 10.7 倍, 最高达 37 倍。菜农多施用复合肥和有机肥, 其中磷酸二铵和三元复合肥在土表面撒施也占有较大比例, 从而造成磷钾资源浪费。对河北省 95 个大棚黄瓜调查的结果表明, 有机肥施入量占施肥总量的 60.77%—87.62%, 施用有机肥多为新鲜或经简单处理的鸡粪, 其中所含的 P₂O₅ 平均量为 2 493.0 kg·hm⁻², 最高达 5 157.0 kg·hm⁻²。因此, 鸡粪和磷肥用量偏高是造成土壤磷素积累及养分不平衡的主要原因。

4 结论

在温室滴灌条件下, 土壤磷主要集中在 0—20 cm 土层。鸡粪和磷肥配施会显著提高磷的有效性, 随着磷肥用量的增加, 磷的积累量也增加。磷肥施入土壤后经由 Ca₂-P 转化为 Ca₈-P, 而以缓效态累积在土壤中, 各形态无机磷中以 Ca₈-P 积累最多, 缓效态 Al-P 和 Fe-P 也有一定的积累。在施用 30 000 kg·hm⁻² 鸡粪基础上增施磷肥并无显著的增产效应, 却显著增加了土壤磷素的残留积累量, 造成肥料浪费。因此, 如果只施鸡粪, 用量不宜超过 30 000 kg·hm⁻²; 如果配施无机磷肥, 则鸡粪减量, 且无机磷肥在 300 kg·hm⁻² 的基础上减量。

References

- [1] 薛利红, 杨林章, 施卫明, 王慎强. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——源头减量技术. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 881-888.
- XUE L H, YANG L Z, SHI W M, WANG S Q. Reduce-Retain-Reuse-Restore Technology for controlling the agricultural non-point pollution in countryside in China: Source Reduction

- Technology. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 881-888. (in Chinese)
- [2] 曾招兵, 曾思坚, 汤建东, 刘一锋, 张满红. 广东省耕地土壤有效磷时空变化特征及影响因素分析. 生态环境学报, 2014, 23(3): 444-451.
- ZENG Z B, ZENG S J, TANG J D, LIU Y F, ZHANG M H. Space-temporal variation of farmland soil AP in Guangdong province and their causing factors. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(3): 444-451. (in Chinese)
- [3] 曾艳, 李征, 张静涵, 安树青, 冷欣, 李宁. 不同施肥类型下设施农业土壤质量的累积特征. 江苏农业科学, 2016, 44(6): 465-469.
- ZENG Y, LI Z, ZHANG J H, AN S Q, LENG X, LI N. Cumulative characteristics of soil quality in facility agriculture under different fertilization types. *Journal of Jiangsu Agricultural Science*, 2016, 44(6): 465-469. (in Chinese)
- [4] 刘磊. 蔬菜温室大棚土壤盐渍化成因分析. 山东农业科学, 2012, 44(7): 69-72.
- LIU L. Causes analysis of soil salinization in vegetable greenhouse. *Shandong Agricultural Sciences*, 2012, 44(7): 69-72. (in Chinese)
- [5] 曹齐卫, 张卫华, 陈伟, 孔素萍, 孙小镭. 济南地区日光温室养分投入特征和利用状况的分析. 西南农业学报, 2011, 24(5): 1818-1827.
- CAO Q W, ZHANG W H, CHEN W, KONG S P, SUN X L. Analysis of characteristics of fertilizer input and absorption in Jinan greenhouse. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 24(5): 1818-1827. (in Chinese)
- [6] 余海英, 李廷轩, 张树金, 张锡洲. 温室栽培条件下土壤无机磷组分的累积、迁移特征. 中国农业科学, 2011, 44(5): 956-962.
- YU H Y, LI Y X, ZHANG S J, ZHANG X Z. The accumulation and migration of inorganic phosphorus fractions in soils under greenhouse cultivation. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(5): 956-962. (in Chinese)
- [7] 张彦才, 李若楠, 王丽英, 刘猛朝, 武雪萍, 吴会军, 李银坤. 磷肥对日光温室番茄磷营养和产量及土壤酶活性的影响. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(6): 1193-1199.
- ZHANG Y C, LI R N, WANG L Y, LIU M C, WU X P, WU H J, LI Y K. Effect of phosphorus fertilization on tomato phosphorus nutrition, yield and soil enzyme activities. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(6): 1193-1199. (in Chinese)
- [8] 蔡红明. 陕西日光温室系统养分平衡与土壤养分累积状况研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- CAI H M. Nutrient balance and accumulation in soils of solar greenhouse in Shanxi[D]. Yanglin: Northwest A&F University, 2015.

- (in Chinese)
- [9] 孙丽. 巢湖流域减量施肥对番茄产量、品质及后季水稻产量影响研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2012.
- SUN L. Study on effect of reducing fertilizer application on tomato production, quality and the yield of next rice season in Chao Lake Basin[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [10] 田秋英. 菜地磷肥转化、影响因素及生物有效性研究[D]. 石家庄: 河北农业大学, 2002.
- TIAN Q Y. The studies on transformation, influence factors and availability of phosphorus fertilizer in vegetable soil [D]. Shijiazhuang: Hebei Agricultural University, 2002. (in Chinese)
- [11] 高妍, 姜佰文, 刘大森, 王春宏, 张迪, 刘学生. 不同种植年限黑土型蔬菜保护地磷素状况的研究. 核农学报, 2011, 25(1): 121-126.
- GAO Y, JIANG B W, LIU D S, WANG C H, ZHANG D, LIU X S. Phosphorus status of black soil in vegetable soil after different planting duration. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2011, 25(1): 121-126. (in Chinese)
- [12] JALALI M, JALALI M. Relation between various soil phosphorus extraction methods and sorption parameters in calcareous soils with different texture. *Science of the Total Environment*, 2016, (566/567): 1080-1093.
- [13] LUO L, MA Y B, SANDERS R L, XU C, LI J M, MYNENI S C B. Phosphorus speciation and transformation in long-term fertilized soil: evidence from chemical fractionation and P K-edge XANES spectroscopy. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2017, 107(2): 215-226.
- [14] ACHAT D, NOËMIE P, NICOLAS M, FÉLIX B, AUGUSTO L. Soil properties controlling inorganic phosphorus availability: general results from a national forest network and a global compilation of the literature. *Biogeochemistry*, 2016, 127(2/3): 255-272.
- [15] SÁNCHEZ-ALCALÁ I, DEL CAMPILLO M C, BARRÓN V, TORRENT J. The Olsen P/solution P relationship as affected by soil properties. *Soil Use & Management*, 2015, 30(4): 454-462.
- [16] YAN Z, LIU P, LI Y, MA L, ALVA A, DOU Z, CHEN Q, ZHANG F. Phosphorus in China's intensive vegetable production systems: over fertilization, soil enrichment, and environmental implications. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(4): 982-989.
- [17] 张福锁, 陈新平, 陈清. 中国主要作物施肥指南. 北京: 中国农业大学出版社, 2009: 122-129.
- ZHANG F S, CHEN X P, CHEN Q. *The Fertilization Guide for Main Crop in China*. Beijing: China Agricultural University Press, 2009: 122-129. (in Chinese)
- [18] 索炎炎, 张翔, 司贤宗, 毛家伟, 李亮, 余琼, 王亚宁, 余晖. 磷肥与有机肥配施对土壤-花生系统磷素及花生产量的影响. 中国油料作物学报, 2018, 40(1): 119-126.
- SUO Y Y, ZHANG X, SI X Z, MAO J W, LI L, YU Q, WANG Y N, YU H. Effect of combined application of phosphorus and organic fertilizer on phosphorus contents in peanut-soil system and pod yield of peanut. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2018, 40(1): 119-126. (in Chinese)
- [19] 杜艳玲, 周怀平, 杨振兴, 程曼, 解文艳, 郭晋, 王志伟. 长期施肥下褐土中不同磷组分对磷素盈余的响应. 华北农学报, 2018, 33(3): 224-231.
- DU Y L, ZHOU H P, YANG Z X, CHENG M, XIE W Y, GUO J, WANG Z W. Response of different P component to P balance in cinnamon soil under long-term fertilization. *Acta Agriculturae Boreali-sinica*, 2018, 33(3): 224-231. (in Chinese)
- [20] 黄绍文, 唐继伟, 张怀志, 袁硕, 王玉军. 基于发育阶段的设施黄瓜水肥一体化技术. 中国果菜, 2017, 37(5): 82-84.
- HUANG S W, TANG J W, ZHANG H Z, YUAN S, WANG Y J. Integrated technology of water and fertilizer for facility cucumber based on development stage. *China Fruit and Vegetables*, 2017, 37(5): 82-84. (in Chinese)
- [21] REINDERS F B, NIEKERK A S V. Technology smart approach to keep drip irrigation systems functional. *Irrigation & Drainage*, 2018, 67(1): 82-88.
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 308-311.
- LU R K. *Methods in Agricultural Soil Chemical Analysis*. Beijing: China Agricultural Technique Press, 1999: 308-311. (in Chinese)
- [23] 蒋柏藩, 顾益初. 石灰性土壤无机磷分机磷分级测定方法. 土壤, 1990, 22(2): 101-102.
- JIANG B F, GU Y C. Measurement methods for the grading inorganic phosphorus in calcareous soils. *Soils*, 1990, 22(2): 101-102. (in Chinese)
- [24] 王海龙, 张民, 刘之广, 于小晶, 赵洪猛, 陈海宁. 多年定位试验条件下不同施磷水平对土壤无机磷分级的影响. 水土保持学报, 2018, 32(5): 321-327.
- WANG H L, ZHANG M, LIU Z G, YU X J, ZHAO H M, CHEN H N. Effects of different phosphorus application levels on the inorganic phosphorus fraction under multi-year location experiment. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5): 321-327. (in Chinese)
- [25] HALAJNIA A, HAGHNIA G H, FOTOVAT A, KHORASANI R. Phosphorus fractions in calcareous soils amended with P fertilizer and cattle manure. *Geoderma*, 2009, 150(1/2): 209-213.

- [26] 吴曦. 植物高效利用土壤磷素的机理研究. 产业与科技论坛, 2017, 16(9): 47-48.
- WU X. Study on the mechanism of plant efficient utilization of soil phosphorus. *Industrial & Science Tribune*, 2017, 16(9): 47-48. (in Chinese)
- [27] 唐晓鹿, 范少辉. 土壤磷有效性研究进展. 第九届中国林业青年学术年会论文摘要集, 2010.
- TANG X L, FAN S H. Advances in phosphorus availability of soil. Abstract collection of 9th China forestry youth academic annual conference, 2010. (in Chinese)
- [28] 叶会财, 李大明, 黄庆海, 柳开楼, 余喜初, 徐小林, 周利军, 胡惠文, 王赛莲. 长期不同施肥模式红壤性水稻土磷素变化. 植物营养与肥料学报, 2009, 21(6): 1521-1528.
- YE H C, LI D M, HUANG Q H, LIU K L, YU X C, XU X L, ZHOU L J, HU H W, WANG S L. Variation of soil phosphorus under long-term fertilization in red paddy soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2009, 21(6): 1521-1528. (in Chinese)
- [29] 张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯. 不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异. 环境科学, 2017, 38(12): 5247-5255.
- ZHANG T, XU H, RU S H, SU D C. Distribution of phosphorus in soil profiles after continuous application of different fertilizers. *Environmental Science*, 2017, 38(12): 5247-5255. (in Chinese)
- [30] LOURENZI C R, CERETTA C A, CERINI J B, FERREIRA P A A, LORENSINI F, GIROTTI E, TIECHER T L, SCHAPANSKI D E, BRUNETTO G. Available content, surface runoff and leaching of phosphorus forms in a typic hapludalf treated with organic and mineral nutrient sources. *Revista Brasileira de Ciênciado Solo*, 2014, 38(2): 544-556.
- [31] SHARPLEY A N, MCDOWELL R W, KLEINMAN P J A. Amounts, forms, and solubility of phosphorus in soils receiving manure. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68 (6): 2048-2057.
- [32] 赵晓齐, 鲁如坤. 有机肥对土壤磷素吸附的影响. 土壤学报, 1991, 28(1): 7-13.
- ZHAO X Q, LU R K. Effect of organic fertilizer on phosphorus adsorption in soil. *Acta Pedologica Sinica*, 1991, 28(1): 7-13. (in Chinese)
- [33] REDDY D D, RAO A S, RUPA T R. Effects of continuous use of cattle manure and fertilizer phosphorus on crop yields and soil organic phosphorus in a vertisol. *Bioresource Technology*, 2000, 75(2): 113-118.
- [34] 宋付朋. 长期施磷石灰性土壤无机磷形态特征及其有效性研究[D]. 安: 山东农业大学, 2006.
- SONG F P. Characteristics and availability of inorganic phosphate fractions in calcareous soils under long-term fertilization[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [35] 郭智芬, 涂书新, 李晓华, 潘勇, 张宜春. 石灰性土壤不同形态无机磷对作物磷营养的贡献. 中国农业科学, 1997, 30(1): 26-32.
- GUO Z F, TU S X, LI X H, PAN Y, ZHANG Y C. Contribution of different forms of inorganic phosphates in calcareous soils to phosphorus nutrition of crops. *Scientia Agricultura Sinica*, 1997, 30(1): 26-32. (in Chinese)
- [36] 姚炳贵, 姚丽竹, 王苹, 张玺, 王德芳. 津郊潮土磷素组成及其演变规律的定位研究. 土壤学报, 1997, 34 (3): 286-294.
- YAO B G, YAO L Z, WANG P, ZHANG X, WANG D F. Long-term experimental study on components and changes of phosphorus in fluvo-aquic soil of Tianjin suburbs. *Acta Pedologica Sinica*, 1997, 34(3): 286-294. (in Chinese)
- [37] 介晓磊, 杨先明, 黄绍敏, 刘芳, 刘世亮, 宝德俊, 化党领, 李有田. 石灰性潮土长期定位施肥对小麦根际无机磷组分及其有效性的影响. 中国土壤与肥料, 2007(2): 53-58.
- JIE X L, YANG X M, HUANG S M, LIU F, LIU S L, BAO D J, HUA D L, LI Y T. Effects of long-term localized fertilization of calcareous tidal soil on the composition and availability of organic phosphorus in rhizosphere of wheat. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2007 (2): 53-58. (in Chinese)
- [38] 汤炎, 赵海涛, 封克, 汪晓丽, 盛海君. 施磷对滨海盐土无机磷组分的动态影响. 土壤通报, 2007, 38(1): 77-80.
- TANG Y, ZHAO H T, FENG K, WANG X L, SHENG H J. Dynamic effects of phosphorus application on inorganic phosphorus components in coastal saline soil in China. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(1): 77-80. (in Chinese)
- [39] 李新平, 张亚林, 魏玉奎, 魏迎春. 杨凌地区大棚土壤无机磷形态及有效性研究. 水土保持学报, 2009, 23(4): 195-199.
- LI X P, ZHANG Y L, WEI Y K, WEI Y C. Study on forms of inorganic phosphates and its validity in Yangling area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(4): 195-199. (in Chinese)
- [40] 陈永亮. 不同氮源对黑松幼苗根-土界面无机磷形态转化及有效性的影响. 林业科学, 2012, 48(3): 51-57.
- CHEN Y L. Effects of different nitrogen sources on transformation and availability of inorganic phosphorus in the root-soil interface of *Pinus thunbergii* seedlings. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(3): 51-57. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)