

# 潮褐土上蔬菜产量和土壤各形态磷变化 对长期过量施磷的响应

廖文华, 刘建玲\*, 黄欣欣, 高志岭, 杨 羚

(河北农业大学资源与环境科学学院, 河北保定 071000)

**摘要:**【目的】研究长期连续过量施用磷肥下蔬菜的产量响应、磷肥去向及土壤各形态磷库的动态变化。

【方法】在太行山山前平原典型潮褐土上, 连续进行 11 年 21 草露地蔬菜的长期定位肥料试验,  $P_2O_5$  年施用量设 0 (P0)、360 (P1)、720 (P2)、1080 (P3)、1440 (P4)  $kg/hm^2$  共 5 个处理, 分别测定每茬蔬菜产量及各年土壤不同形态磷素含量。【结果】与不施磷肥处理比较, 单季  $P_2O_5$  用量 180、360、540、720  $kg/hm^2$  均显著增加大白菜、菜豆产量, 不同磷肥用量间蔬菜产量均无显著差异。 $P_2O_5$  年用量为 360、720、1080、1440  $kg/hm^2$ , 土壤年盈余磷为 41.2~478.7  $kg/hm^2$ , 积累率为 26.2%~76.1%。与基础土比较, 随着磷肥用量的增加, 土壤有效磷、全磷、无机磷总量及无机磷中的  $Ca_2-P$ 、 $Ca_8-P$ 、 $Al-P$ 、 $Fe-P$  含量均呈显著增加趋势, 无机磷中的  $O-P$ 、 $Ca_{10}-P$  含量无显著变化。 $P_2O_5$  年用量为 720、1080、1440  $kg/hm^2$  处理土壤的有效磷年均增加量为 2.3、4.2、5.0  $mg/kg$ ; 土壤有效磷增加量与磷盈余量呈显著直线正相关关系, 土壤磷素每盈余 100  $kg/hm^2$ , 有效磷、 $Ca_2-P$ 、 $Ca_8-P$ 、 $Al-P$ 、 $Fe-P$  含量分别增加 1.13、2.41、15.27、4.14、1.37  $mg/kg$ 。随着土壤磷盈余量和施肥年限的增加, 有效磷占全磷比重、 $Ca_2-P$ 、 $Ca_8-P$ 、 $Al-P$  占无机磷比重逐渐增加。【结论】施用磷肥显著增加大白菜和菜豆产量, 过量施用磷肥蔬菜产量无显著变化; 土壤磷素处于盈余状态下, 随着磷肥用量的增加或种植年限的增加, 土壤积累磷的有效性随之增加。基于蔬菜对磷肥产量响应和土壤磷素收支表观平衡状况, 露地大白菜  $P_2O_5$  推荐用量 180  $kg/hm^2$ , 菜豆 270  $kg/hm^2$ 。

**关键词:**长期定位施肥; 潮褐土; 磷肥; 蔬菜; 产量; 磷形态

## Responses of vegetable yield and changes of phosphorus fractions in cinnamon soil to long-term excess phosphorus application

LIAO Wen-hua, LIU Jian-ling\*, HUANG Xin-xin, GAO Zhi-ling, YANG Ling

(College of Resources and Environmental Science, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China)

**Abstract:**【Objectives】This study explored the vegetable yield responses to long term excess phosphorus (P) applications, fates and changes of P fractions in cinnamon soil. 【Methods】A phosphorous fertilization field experiment was consecutively conducted for 11 years, 21 vegetable seasons in total in the Piedmont Plain of Taihang Mountain. The five application rates were  $P_2O_5$  0, 360, 720, 1080 and 1440  $kg/hm^2$ , named as CK, P1, P2, P3 and P4. The vegetable yields were investigated, and the contents of different fractions of soil inorganic P were measured. 【Results】Comparing with CK, the treatments of  $P_2O_5$  180, 360, 540 and 720  $kg/hm^2$  for annual all had significantly higher vegetable yields. However, no significant differences were observed in vegetable yields among P2, P3 and P4 application rates. With the single vegetable season application rates of  $P_2O_5$  360, 720, 1080 and 1440  $kg/hm^2$ , the measured surplus P in soil were as 41.2~478.7  $kg/hm^2$ , equivalent to 26.2%~76.1% of their application rates. With the increase of P input rates, the soil Olsen-P, total P, inorganic P fractions including  $Ca_2-P$ ,  $Ca_8-P$ ,  $Al-P$  and  $Fe-P$  showed trends of increasing, less change in  $O-P$  and  $Ca_{10}-P$  contents were observed.

收稿日期: 2016-08-29 接受日期: 2016-12-16

基金项目: 河北农业大学中青年骨干教师境外研修项目; 河北省科技支撑项目 (15226421, 12220204D) 资助。

作者简介: 廖文华 (1974—), 女, 河北衡水人, 博士, 副教授, 长期从事土壤肥力方面的研究。E-mail: liaowenhua@hebau.edu.cn

\* 通信作者 E-mail: jliu@hebau.edu.cn

The annual  $P_2O_5$  input of 720, 1080 and 1440 kg/hm<sup>2</sup> had led to annual increase of 2.3, 4.2 and 5.0 mg/kg available P contents, respectively. Linear correlation was found between soil P surplus and soil available P content. After calculation, every increase of 100 kg/hm<sup>2</sup> of total soil P surplus will lead to annual increasing in contents of soil Olsen-P, Ca<sub>2</sub>-P, Ca<sub>8</sub>-P, Al-P and Fe-P of 1.13, 2.41, 15.27, 4.14 and 1.37 mg/kg, respectively, indicating an accumulation order of Ca<sub>8</sub>-P > Al-P > Ca<sub>2</sub>-P > Fe-P > Olsen-P. Meanwhile, the proportions of Olsen-P in total P and the proportions of Ca<sub>2</sub>-P, Ca<sub>8</sub>-P and Al-P in the total inorganic P increased with the elongation of cultivation years. **[Conclusions]** When growing cabbage and kidney bean on cinnamon soil, P fertilization rate at 180 kg/hm<sup>2</sup> can significantly increase yields but the increase will not be more productive when the P input excess the rate. With the increases of P fertilization rates and cultivation years, the contents of Olsen-P, Ca<sub>2</sub>-P, Ca<sub>8</sub>-P, Al-P and Fe-P and their proportions in the total inorganic P all showed increasing trends except for O-P and Ca<sub>10</sub>-P. Based on the yield response and soil P balance, P fertilization rates of  $P_2O_5$  180 kg/hm<sup>2</sup> for cabbage and 270 kg/hm<sup>2</sup> for kidney bean are recommended.

**Key words:** long-term fertilizer experiment; cinnamon soil; phosphorus fertilizer; vegetable; yield; phosphorus fraction

从1980年到2009年,我国蔬菜种植面积和产量分别增加了5.8倍和9.2倍<sup>[1]</sup>。调查表明蔬菜生产中普遍存在磷肥过量、土壤磷素积累现象<sup>[2-4]</sup>。设施蔬菜  $P_2O_5$  平均用量 767.9 kg/hm<sup>2</sup>, 是需要量的3.9~7.9倍,且日光温室>大棚>露地<sup>[5-8]</sup>。磷素的盈余导致土壤有效磷大幅度增加<sup>[9-10]</sup>,其中露地菜田土壤 Olsen-P 高达 100 mg/kg, 超过粮田的5倍<sup>[11]</sup>。

围绕菜地土壤磷素的安全管理和环境风险进行了大量研究<sup>[12-14]</sup>。土壤磷素安全管理主要基于维持土壤磷的供应水平(主要以 Olsen-P 为指标)<sup>[12]</sup>。土壤有效磷变化可在一定程度上反映土壤磷素的收支平衡状况<sup>[15]</sup>。随着土壤磷素的积累,土壤全磷、有效磷及各形态无机磷随之增加<sup>[16-18]</sup>。80年代末,蒋柏藩和顾益初提出石灰性土壤无机磷分级方法,对评价石灰性土壤积累磷的有效性提供依据<sup>[19-20]</sup>。已有研究表明,在种植大田作物的石灰性土壤上,长期过量施用磷肥土壤各形态无机磷均有不同程度的积累,主要是Ca-P积累<sup>[21-23]</sup>。在菜地土壤,长期施用磷肥导致土壤中无机磷积累,且有效性较高的Ca-P、Al-P积累量高于有效性较低的O-P、Fe-P<sup>[16, 24-26]</sup>。

本文通过蔬菜上施用不同水平磷肥长期定位试验研究了不同施磷水平下磷肥的产量效应、磷素去向及其动态转化,旨在为土壤磷素积累背景下磷素科学管理提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点基本情况

试验地位于河北省保定市河北农业大学标本园内,东经 115°26'42", 北纬 38°49'24", 属暖温带半

湿润大陆性季风气候,年均温度 12℃,无霜期 200 d 左右,年均降雨量 575.4 mm。

土壤类型为潮褐土,质地为中壤,土壤基本理化性状: pH 7.5、有机质 10.40 g/kg、全氮 1.00 g/kg,全磷 600.08 mg/kg、有效磷 20.12 mg/kg、速效钾 170.81 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验始于 2003 年,采用露地蔬菜栽培方式,一年种植春秋两茬蔬菜,单茬蔬菜磷肥( $P_2O_5$ )用量分别为: 0 (P0)、180 (P1)、360 (P2)、540 (P3)、720 (P4) kg/hm<sup>2</sup>(即年用量为 0、360、720、1080、1440 kg/hm<sup>2</sup>),共 5 个处理,3 次重复,各处理随机排列。小区面积为 6.3 m<sup>2</sup>(1.8 m × 3.5 m),2012 年春对试验小区进行了平移,将 0~20 cm 土层全部平移到新的标本园,新小区面积为 4 m<sup>2</sup>(2.0 m × 2.0 m)。

2003~2015 年每年 4~7 月种植情况: 2004 年种植青椒(中椒 7 号)、2005 年伏白菜(夏阳)、2006 年为青椒(牛角椒一号),2007~2015 年均为菜豆(2007 年为陆峰地豆王,2008~2012 年为地豆王二号,2013~2015 年为美国冠军地豆)。8~11 月中旬种植大白菜(2003~2012 年为秋绿 75, 2013~2015 年为神农绿帮菜)。

大白菜和伏白菜氮(N)、钾(K<sub>2</sub>O)用量分别为 450、300 kg/hm<sup>2</sup>,青椒为 450、450 kg/hm<sup>2</sup>,菜豆分别为 75、450 kg/hm<sup>2</sup>。

### 1.3 田间管理

春茬蔬菜:采用垄作方式,每小区起垄 3 个。青椒移栽后定苗 24 株/区,伏白菜直播后定苗 30

株/区，菜豆直播后定苗 72 株/区。其中辣椒种植中全部磷、钾肥和 2/3 氮肥做底肥，1/3 氮肥在“四母斗期”作追肥施入；伏白菜种植中全部磷、钾肥和 2/3 氮肥做底肥，1/3 氮肥在“团棵期”作追肥施入；菜豆种植中全部肥料做底肥。

秋茬蔬菜：采用垄作方式，每小区起垄 3 个，大白菜在每年立秋 3 天前后直播，定苗 24 株/区。全部磷、钾肥和 2/3 氮肥做底肥，1/3 氮肥在“团棵期”作追肥施入。

#### 1.4 样品采集与分析

青椒和菜豆果实分次收获，每次收获时除称量各小区果实重量外，采集代表性植株（青椒 3 株、菜豆 6 株）和果实（500 g 左右），称量其鲜重，烘干后测定其水分、全氮磷钾养分含量；大白菜（和伏白菜）全区收获并采集代表性植株，称量其鲜重，烘干后测定其水分、全氮磷钾养分含量。植物的含水量和全氮、磷、钾含量采用常规分析方法。

青椒和菜豆的产量为分次采收的果实重量之和；大白菜和伏白菜全区收获后称重计算产量。

蔬菜收获后，分别在垄沟、垄背各 3 点取土混合后成为一份样品，每小区采集 2 份样品。土壤有效磷（Olsen-P）、全磷采用常规分析方法；无机磷分级采用蒋柏藩和顾益初的分级方法<sup>[19]</sup>。

数据分析采用 SAS 7.0 统计软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 长期不同磷肥用量对蔬菜产量影响及土壤磷素收支表观平衡

基于磷肥在 4 种蔬菜上的产量效应趋于相同，以种植时间最长的大白菜和菜豆为例分析对磷肥的产量响应（图 1）。结果表明，在连续种植的 11 年间，

相同处理的大白菜和菜豆产量年际间变异较大，其中，大白菜产量的年际变异系数为 19.9%~26.0%，菜豆产量的年际变异系数高达 73.9%~84.8%，后者如此高的年际变异系数主要由不同年份温度、病虫害发病强度等因素所致。为了系统比较不同处理在连续种植 11 年的产量差异，本研究对同年各处理的数据进行统计分析，结果与各处理产量多年平均值的统计结果相同，因此本研究计算试验期间每个小区的产量平均值，在此基础上分析各处理之间的差异。

11 年间各处理蔬菜的平均产量结果表明，P1~P4 处理（180~720 kg/hm<sup>2</sup>）的大白菜和菜豆的平均产量比不施肥处理分别增加了 24.0%~31.6% 和 27.7%~35.4%，分别平均增加 27.2% 和 29.6%，差异均达到显著水平。各施肥处理间（P1、P2、P3 和 P4）大白菜和菜豆的平均产量均无显著性差异。这表明基于试验中大白菜和菜豆产量需求，P1 磷肥用量（180 kg/hm<sup>2</sup>）能满足大白菜和菜豆生长对磷素需求。

从不同处理土壤磷素收支表观平衡状况（表 1）可以看出，不施磷肥处理土壤磷素年均亏缺 71.3 kg/hm<sup>2</sup>。磷肥年输入量 P 157.2~628.8 kg/hm<sup>2</sup>（P1~P4 处理），年积累量为 P 41.2~478.7 kg/hm<sup>2</sup>，分别占施磷量的 26.2%、57.0%、70.1% 和 76.1%。可见，连续每年施用 P 157.2 kg/hm<sup>2</sup>（P1）以上的磷肥即可导致土壤磷素的大量累积。

### 2.2 长期不同磷肥用量土壤全磷、有效磷的变化

图 2 表明，连续 11 年不施磷肥土壤年均亏缺 P 71.3 kg/hm<sup>2</sup>，土壤全磷、有效磷含量均逐渐降低。与基础土比较，种植 2、5、8、11 年后土壤全磷含量下降了 63.9、113.2、96.6、102.4 mg/kg，降低幅度依次为 10.6%、18.9%、16.1%、17.1%，年均降幅依次为 31.9、22.6、12.1 和 9.3 mg/kg。有效磷含量也

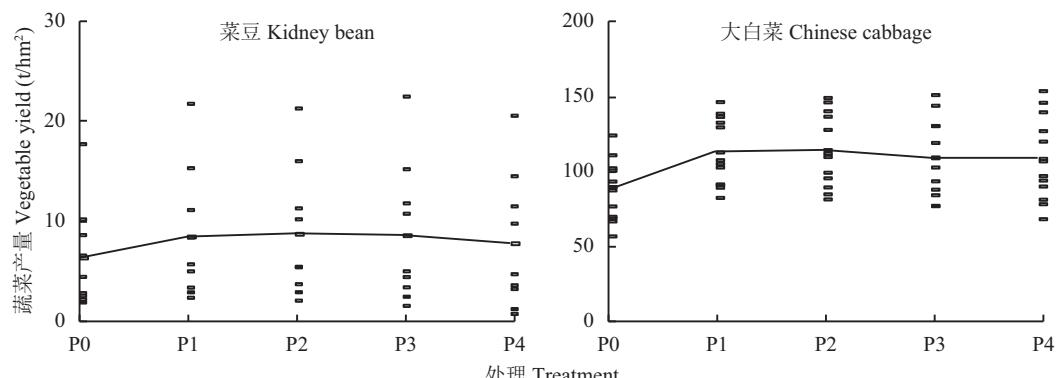


图 1 磷肥在大白菜、菜豆上的产量效应

Fig. 1 Yield response of Chinese cabbage and kidney bean to the application rates of phosphorus fertilizer

表 1 2003~2015 年土壤磷素年平均收支平衡 (P, kg/hm<sup>2</sup>)  
Table 1 The average balance of soil P input and output from 2003 to 2015

处理 Treatment	输入 Input	输出 Output	表观平衡 Apparent balance	表观平衡率 (%) Apparent balance	盈余 Surplus
P0	0	71.3 ± 19.2	-71.3		0
P1	157.2	116.0 ± 28.6	41.2	26.2	112.5
P2	314.4	135.3 ± 34.6	179.1	57.0	250.4
P3	471.6	141.1 ± 39.0	330.5	70.1	401.8
P4	628.8	150.1 ± 46.7	478.7	76.1	550.0

注 ( Note ) : 输入为肥料投入磷, 输出为蔬菜带走的磷 Input and output indicate the applied fertilizer P and removal P by vegetables; 表观平衡 = 输入 - 输出 Apparent balance = input - output; 表观平衡率 = (输入 - 输出)/输出 Apparent balance = (input - output)/output; 盈余磷 = 输入 + 土壤自然供给供应磷 - 输出, 土壤自然供给磷为处理 P0 的输出磷 Surplus = input + soil P supply - output, and soil P supply indicates the P output in treatment of P0.

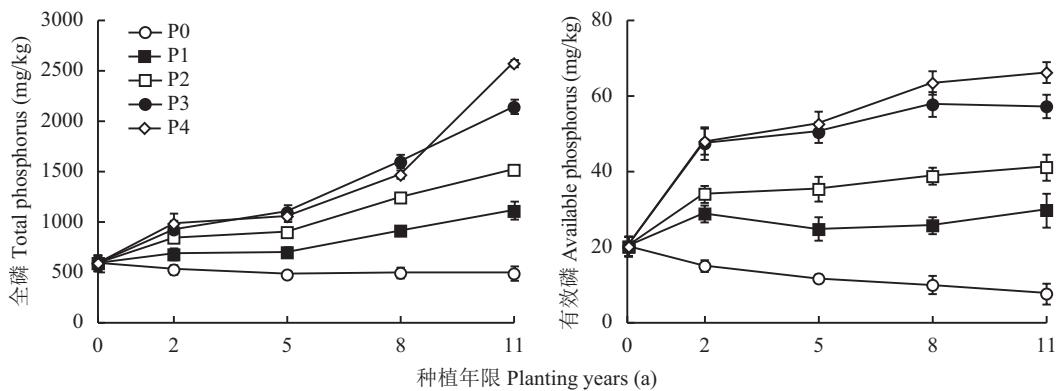


图 2 不同磷肥用量下土壤全磷、有效磷含量的年际变化

Fig. 2 Annual variation of soil total phosphorus and available phosphorus contents in different treatments

分别降低了 5.1、8.4、10.1、12.4 mg/kg, 相应的降幅为 25.3%、41.9%、50.4%、61.8%, 年均降幅依次为 2.5、1.1、0.8 和 0.6 mg/kg。随着种植年限的增加, 全磷、有效磷含量降低速率呈逐渐变缓趋势。

$P_2O_5$  年施用量为 360 kg/hm<sup>2</sup> 时, 土壤磷素年均盈余 40.1 kg/hm<sup>2</sup>。与基础土比较, 种植 2、5、8、11 年后, 土壤全磷含量分别增加了 87.0、106.9、321.6、516.9 mg/kg, 增幅依次为 14.5%、17.8%、53.6%、86.2%, 在第 8 年和第 11 年差异均达到显著水平; 土壤有效磷含量也分别增加了 8.8、4.6、5.6 和 9.7 mg/kg, 增幅分别达 43.6%、23.1%、27.9% 和 48.3%, 在第 5 年和第 11 年的差异均达到显著水平。 $P_2O_5$  年投入量达到 720、1080、1440 kg/hm<sup>2</sup> 时, 土壤磷素年均盈余分别为 179.1、330.5、478.7 kg/hm<sup>2</sup>, 与基础土比较, 11 年后土壤全磷、有效磷含量分别增加了 154.0%、257.9%、329.9% 和 104.7%、184.8%、229.5%, 全磷年均增加 84.0、140.7、179.9 mg/kg, 有效磷年均增加 1.9、3.4、4.2 mg/kg。可见, 随着磷

肥用量以及施肥年限的增加, 土壤中积累磷量逐渐增大, 土壤全磷和有效磷含量也随之显著提高。且随着施肥时间延长, 土壤全磷、有效磷的年增加速率呈逐渐变缓趋势。例如, 与基础土相比, P2 处理施肥 2、8 和 11 年后, 全磷、有效磷年均增加 126.1、114.4、91.3 和 4.7、4.7、3.4 mg/kg。

### 2.3 长期不同磷肥用量土壤各形态无机磷含量的变化

从图 3 可以看出, 与基础土相比, 连续 11 年不施用磷肥处理, 土壤无机磷总量逐渐降低, 种植 3、6、11 年后分别降低了 33.5、83.9、115.6 mg/kg (降幅为 5.3%、13.3%、18.3%), 其中 6 年和 11 年差异均达到显著水平。当  $P_2O_5$  年投入量达到 360 kg/hm<sup>2</sup>, 与基础土比较, 种植 3、6、11 年后土壤无机磷总量分别增加了 96.5、133.2、229.7 mg/kg (降幅为 15.3%、21.1%、36.4%), 6 年和 11 年的差异均达到显著水平。可见, 长期施用磷肥显著提高土壤无机磷总量, 而且随种植时间

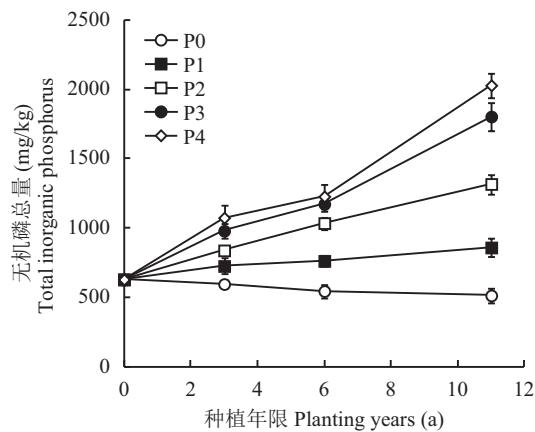


图3 不同磷肥用量下土壤无机磷总量的年际变化  
Fig. 3 Annual variation of soil total inorganic phosphorus in different treatments

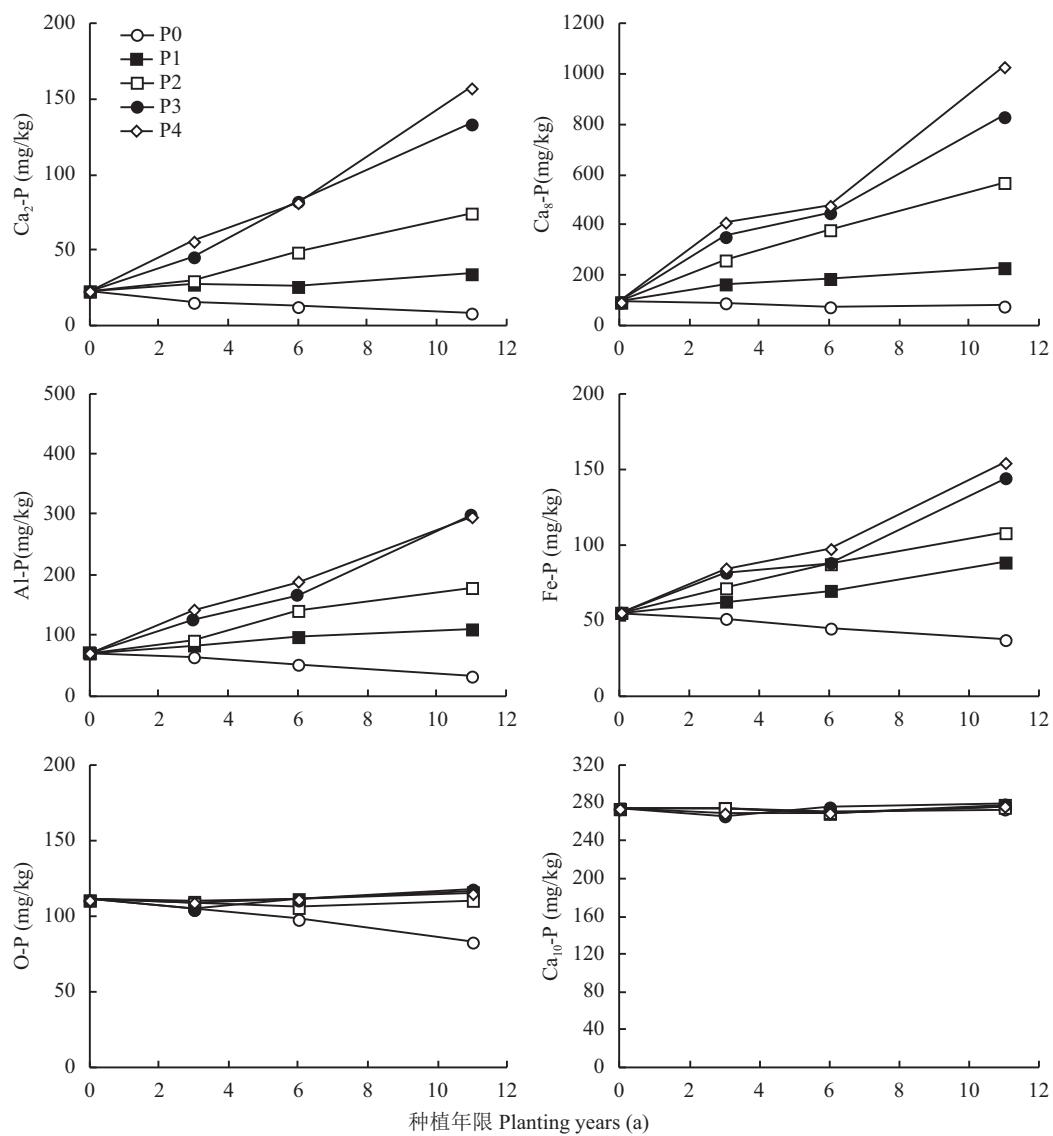


图4 不同处理土壤各形态无机磷的年际变化  
Fig. 4 Annual variation of various fraction of inorganic phosphorus in different treatments

延长增加量呈逐渐增大的趋势。如与基础土相比，种植3、6、11年后P3处理无机磷总量分别增加了350.0、543.2、1172.6mg/kg，增幅分别为55.4%、86.0%和185.7%。

从土壤各形态无机磷的变化(图4)可以看出，与基础土相比，种植11年后不施磷肥处理土壤Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P、Al-P、Fe-P和O-P含量分别降低了14.6、16.3、38.5、18.0和27.8mg/kg(62.4%、16.8%、54.4%、32.7%和25.0%)，差异均达到显著水平。但在此期间，各形态磷素含量随时间的变化特点不尽相同，如种植蔬菜3、6、11年Ca<sub>2</sub>-P分别年均降低2.5、1.7、1.3mg/kg。而Ca<sub>8</sub>-P、Al-P、Fe-P、O-P年降幅有逐渐增大趋势，其中3、6、11年Ca<sub>8</sub>-P年均降幅分别为0.21、1.46、1.85mg/kg。此外Ca<sub>10</sub>-P含

量在种植过程中无显著变化, 含量稳定在 273.3 mg/kg 左右。整体来看, 不同形态无机磷的年均降幅表现为 Al-P > O-P > Fe-P、Ca<sub>8</sub>-P > Ca<sub>2</sub>-P。

连续 11 年施用磷肥, 土壤 Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P、Al-P、Fe-P 含量均显著增加, 但 O-P 和 Ca<sub>10</sub>-P 无显著变化。与基础土相比, 连续 11 年施用 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 360、720、1080、1440 kg/hm<sup>2</sup>, 土壤 Ca<sub>2</sub>-P 含量增加了 11.4、51.5、110.4、134.2 mg/kg (48.7%、220.1%、471.8% 和 573.5%), Ca<sub>8</sub>-P 含量分别增加了 136.0、473.9、734.6 和 933.0 mg/kg (139.9%、487.5%、755.8% 和 959.9%); Al-P、Fe-P 含量分别增加了 39.3 和 33.2、107.7 和 52.6、226.7 和 88.9、224.6 和 98.9 mg/kg (55.5% 和 60.4%、152.1% 和 95.6%、320.2% 和 161.6%、317.2% 和 179.8%)。相同磷肥 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 用量不同形态无机磷的年均增幅表现为 Ca<sub>8</sub>-P > Al-P > Fe-P > Ca<sub>2</sub>-P。随着种植时间的延长, 土壤 Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P、Al-P、Fe-P 积累速率不断增加。如与基础土比较, 年施用 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 360 kg/hm<sup>2</sup> 时, 施肥 3、6、11 年后土壤 Ca<sub>2</sub>-P 含量年均增加 1.0、1.5、2.3 mg/kg, 同样土壤 Ca<sub>8</sub>-P、Al-P 和 Fe-P 分别年均增加 2.3、8.6、10.3 mg/kg, 7.5、19.8、22.1 mg/kg 和 11.0、19.5、26.8 mg/kg。

基于表 1 中的年均磷素盈余量与图 2、图 4 中土壤有效磷、各形态无机磷的年际变化量, 计算土壤有效磷、Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P、Al-P、Fe-P 增加量与土壤磷素盈余的相关关系, 发现其呈显著正相关关系(表 2)。即土壤磷素每盈余 100 kg/hm<sup>2</sup>, 有效磷、Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P、Al-P、Fe-P 含量分别增加 1.13、2.41、15.27、4.14、1.37 mg/kg, 不同形态磷素的积累率表现为 Ca<sub>8</sub>-P > Al-P > Ca<sub>2</sub>-P > Fe-P > 有效磷。

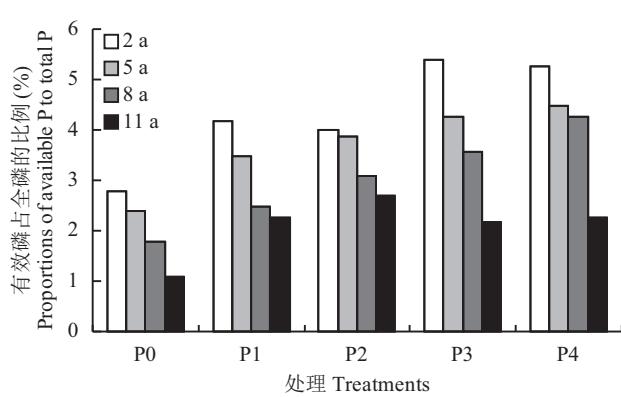


图 5 取样年各处理土壤有效磷、不同形态磷在土壤全磷中的占比

Fig. 5 The proportion of different forms of inorganic phosphorus in total soil P at the sampling year

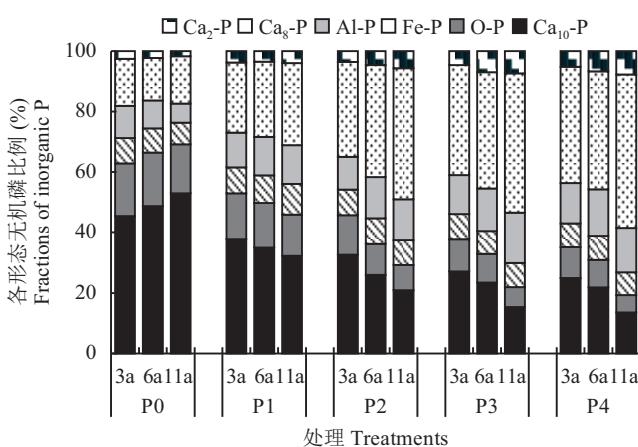
## 2.4 长期不同磷肥用量下土壤各形态磷库组成比例的变化

从不同磷肥用量下土壤有效磷占全磷比例以及 Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P、Al-P 占无机磷总量比例的变化(图 5)可以看出, 连续 11 年不施磷肥处理, 随着土壤磷素逐年亏缺, 有效磷含量逐年降低, 有效磷占全磷的比例呈逐渐降低趋势, 从最初的 2.8% 降到了 1.1%。相同施肥年限下, 随着磷肥用量的增加, 土壤有效磷占全磷的比例逐渐增加。例如连续 8 年施用 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 360、720、1080、1440 kg/hm<sup>2</sup> (P1、P2、P3、P4), 有效磷占全磷比例分别为 2.5%、3.1%、3.6%、4.3%。但是连续 11 年有效磷占全磷比例为 2.3%、2.7%、2.2%、2.3%, 比 2 年时的 4.2%、4.0%、5.4%、5.3% 有所降低。由此可见, 随着种植年限的增加, 施肥与不施肥处理的土壤有效磷占全磷比例均呈逐渐降低趋势, 但两者的原因并不相同, 前者主要是由于全磷的增加幅度大于有效磷的增幅, 而后者则

表 2 土壤磷积累 (x) 与各形态磷变化量 (y) 的相关关系<sup>\*</sup>  
Table 2 Correlation between various P content (y) and the phosphorus surplus in soil (x)

磷形态 Phosphorus fraction	a	b	r
有效磷 Avail. P	0.0113	0.3676	0.9234**
Ca <sub>2</sub> -P	0.0241	0.0127	0.9639**
Ca <sub>8</sub> -P	0.1527	16.0490	0.9211**
Al-P	0.0414	2.6390	0.9638**
Fe-P	0.0137	2.4307	0.9273**

注 (Note): \*y = ax + b, 其中 x 为磷素盈余量 (kg/hm<sup>2</sup>), y 为各形态磷增量 (mg/kg) x indicates the P surplus (kg/hm<sup>2</sup>) and y indicates the various P forms increase (mg/kg); n = 11, \*\*—P < 0.01.



是由于有效磷的降低幅度高于全磷的降幅所致。

随着磷肥用量的增加和种植时间的延长，土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 占无机磷的比例逐渐增加， $\text{Fe-P}$ 的比例无变化，基本保持在8.4%左右， $\text{O-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的比例随着无机磷总量的增加呈逐渐降低趋势。与基础土相比，连续11年施用 $\text{P}_2\text{O}_5$ 360、720、1080、1440 kg/hm<sup>2</sup>， $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 占无机磷比例分别从试验开始前的3.7%、15.4%、11.2%分别增加到4.0%、5.7%、7.4%、7.8%，27.1%、43.3%、46.1%、50.8%，12.8%、13.5%、16.5%、14.6%，平均增加了2.5、26.4和3.1个百分点，增幅表现为 $\text{Ca}_8\text{-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_2\text{-P}$ 。结合图4，相同磷肥用量下不同形态无机磷的年均增幅为 $\text{Ca}_8\text{-P} > \text{Al-P} > \text{Fe-P} > \text{Ca}_2\text{-P}$ ，得出不同形态磷素的积累率表现为 $\text{Ca}_8\text{-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_2\text{-P} > \text{Fe-P} >$ 有效磷。可见，随着磷肥用量的增加和种植时间的延长，盈余磷素主要以 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 和 $\text{Ca}_2\text{-P}$ ( $\text{Fe-P}$ )形式在土壤中积累，积累磷的有效性逐渐增加。

### 3 讨论

#### 3.1 基于植物对磷肥产量响应计算推荐施磷量的局限性

施用磷肥是蔬菜增产的重要手段，本研究表明，与长期不施磷肥处理比较，每茬蔬菜 $\text{P}_2\text{O}_5$ 用量180~720 kg/hm<sup>2</sup>时，蔬菜产量显著增加，但当施磷量超过180 kg/hm<sup>2</sup>时，随磷肥用量增加大白菜和菜豆的产量增加幅度逐渐下降。同样，张淑霞等<sup>[27]</sup>研究结果也表明，磷肥用量为0、90、180、270 kg/hm<sup>2</sup>时，大白菜产量随施磷量增加呈先增加再下降的趋势，二者关系符合 $y = 155622.33 + 225.9x - 1.06x^2$ ，相关系数为0.9679。但也有研究表明，在施磷量为0、125、250、375 kg/hm<sup>2</sup>，白菜产量随磷肥施用量增加而增加，在磷肥施用量最大时产量达到最大值<sup>[28]</sup>，这可能与不同地区试验位点土壤肥力差异等因素相关。

大量研究表明，蔬菜生产中过量施用磷肥和菜地土壤磷素大量积累、土壤有效磷含量高已成事实，菜地科学施用磷肥已成为大家关注和研究的对象，而科学推荐施肥量的计算方法成为问题的关键。近年来，基于土壤磷素的恒量监控逐渐成为推荐大田作物磷肥用量的主要方法，旨在通过对磷肥施用量的调控，将土壤耕层有效磷水平逐渐调整至相对合理的范围<sup>[29~30]</sup>。曹宁<sup>[31]</sup>以土壤有效磷40 mg/kg为目标对未来30年大田磷肥用量进行了预测；Tang等<sup>[32]</sup>也通过研究提出，为了获得高产，磷肥管理时需要将

磷肥用量、长期磷素投入产出平衡和作物目标产量结合起来，这对于节约磷肥资源具有重要作用。但不同土壤类型、质地、降水、作物和产量水平、土壤有机质含量下需维持的有效磷含量水平等尚需进行进一步深入研究。

本研究发现，当施磷量超过180 kg/hm<sup>2</sup>时，随磷肥用量增加大白菜和菜豆上的产量响应“迟钝”甚至有下降的趋势。因此文中用“一元二次”肥料效应函数拟合时，超过180 kg/hm<sup>2</sup>后肥料效应曲线“平缓”类似于“平台”。本项目组证实在过量施用磷肥时，大白菜、油菜、辣椒等作物产量响应迟钝<sup>[33~35]</sup>，由此用“一元二次”肥料效应函数计算出大白菜最高产量偏高( $\text{P}_2\text{O}_5$ 用量为357~596 kg/hm<sup>2</sup>)。许多研究也发现，在同一试验条件下，不同肥料效应函数所获得的磷肥推荐量存在很大的差异，例如Carrijo发现在低磷量(Mehlich-1 P 9 mg/kg)条件下，用线性平台模型估算的土豆最高产量施磷量为61 kg/hm<sup>2</sup>，而二次平台模型的最高施磷量为37 kg/hm<sup>2</sup>，在磷素水平较高(Mehlich-1 P 48 mg/kg)条件下，线性平台模型估算的施磷量为25 kg/hm<sup>2</sup>，而在高磷量(Mehlich-1 P 85 mg/kg)条件下施肥对产量没有影响<sup>[36]</sup>。

本研究基于土壤养分平衡法计算给出的推荐磷肥用量更符合实际。磷肥年用量360 kg/hm<sup>2</sup>时土壤磷素表观盈余41.2 kg/hm<sup>2</sup>，土壤有效磷、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 、 $\text{Fe-P}$ 有所增加。可见，基于本试验中山前平原地貌、洪冲积母质、土壤全磷约600 mg/kg，春季种植菜豆类蔬菜，秋季种植大白菜方式下，土壤有效磷25 mg/kg左右，大白菜磷肥 $\text{P}_2\text{O}_5$ 推荐用量为180 kg/hm<sup>2</sup>(产量约75 t/hm<sup>2</sup>)，菜豆类为270 kg/hm<sup>2</sup>(产量约22.5 t/hm<sup>2</sup>)。施肥量应根据产量变化、土壤肥力进行调整，蔬菜产量提高或有机质降低、春茬种植甜椒等茄果类蔬菜时建议适量增加磷肥用量。

#### 3.2 长期过量施磷下土壤积累磷的转化特点及其有效性

已有资料表明，石灰性土壤中， $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 和 $\text{Fe-P}$ 是作物的有效磷源<sup>[37]</sup>，其有效性 $\text{Ca}_2\text{-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Al-P} > \text{Fe-P}$ ， $\text{Ca-P}$ 占无机磷的80%左右，其中 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 占 $\text{Ca-P}$ 的70%以上， $\text{Ca}_8\text{-P}$ 占10%左右， $\text{Ca}_2\text{-P}$ 仅占1%左右<sup>[23]</sup>。田间定位试验结果表明，长期大量施用磷肥和秸秆还田主要增加土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量，增幅为64.5%~435.8%和42.0%~129.3%<sup>[38]</sup>。在潮土、潮褐土、褐土区菜地耕层土壤中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 、 $\text{Fe-P}$ 含量分别为相邻粮田的4.9、2.5、1.6、1.0倍，而且有效磷源 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 占无

机磷比重显著高于相邻粮田<sup>[39]</sup>。不同土壤类型、种植方式下长期施用磷肥土壤各形态无机磷累积量各有不同,棕壤上玉米-玉米-大豆轮作系统中连续15年施用磷肥,土壤中Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P、Al-P、Fe-P含量分别增加了4.2、1.3、3.6和0.3倍,主要以Ca<sub>2</sub>-P、Al-P形态积累<sup>[40]</sup>;黑土上大豆-玉米轮作中连续13年施用磷肥,主要以Al-P和Fe-P形态积累<sup>[41]</sup>;黄绵土上,与露地菜地相比,设施蔬菜土壤无机磷含量增加149.58 mg/kg,以Ca<sub>8</sub>-P增幅最大,其次为Ca<sub>2</sub>-P;各形态无机磷随种植年限增加均有增加趋势,Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P增加量较大,Al-P增加量较小,而Fe-P在前6年表现增加趋势8~13年略有下降<sup>[42~43]</sup>。土壤各形态无机磷变化也受土壤类型、有机质含量等因素的影响。第四纪黄土母质发育的红壤上的菜园土中无机磷占全磷的79.8%,O-P和Fe-P占无机磷的57.7%;由河流沉积物母质发育的红壤上的菜园土中无机磷占全磷的89.0%,Fe-P占无机磷36.6%;由湖积物发育的潮土上的菜园土中无机磷占全磷为85.0%,Ca-P占无机磷88.1%<sup>[44]</sup>。石灰性菜园土中土壤Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P、Al-P、Fe-P含量与土壤有机质之间存在极显著正相关关系<sup>[26]</sup>;水稻土上对Al-P影响最大的是有机质,对O-P影响最大的是pH,而对Ca<sub>2</sub>-P影响最大的粘粒含量<sup>[45]</sup>。

本研究表明,在潮褐土(洪冲积母质)上,11年连续过量施用磷肥土壤各形态无机磷的积累量表现为Ca<sub>8</sub>-P>Al-P、Ca<sub>2</sub>-P>Fe-P。随种植时间和磷肥用量增加,Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P、Al-P、Fe-P含量及其占无机磷比例逐渐升高,这说明施入磷肥主要以有效态积累在土壤中。土壤磷素化学组成影响各形态磷的积累量,但随着土壤磷积累量的增加或土壤磷水平的增加,有效态磷积累比例在逐渐增加,也就是说随着土壤磷水平的增加,单位积累磷量的有效性呈增加趋势。

分析土壤磷大量积累或土壤全磷水平较高条件下有效磷比例增加原因是土壤磷素大量积累导致土壤磷的吸附饱和度(DPS)增加,土壤磷最大缓冲容量(MBC)降低,土壤对磷的固定能力降低,土壤有效磷比例逐渐增加<sup>[46]</sup>。南京市25~30年集约化菜地表层DPS约为30%<sup>[47]</sup>,福州市郊12~30年菜地DPS平均为23.1%<sup>[48]</sup>,接近或超过土壤环境敏感指标临界值(25%)。可见,随着土壤磷逐渐积累,磷在土壤中运移性增加<sup>[49~51]</sup>,土壤积累磷环境风险逐渐增大。基于上述已有研究结果,关于土壤磷形态特征、积累规律和影响因素,各影响因素对土壤磷积累量影响

程度,及积累磷对磷肥推荐用量的影响等尚需进一步深入研究。

## 4 结论

1) 施用磷肥显著增加大白菜、菜豆的产量,单季P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>用量180 kg/hm<sup>2</sup>,大白菜、菜豆产量分别增加24.0%、27.7%,在此基础上增施2~4倍磷肥,大白菜、菜豆产量无显著变化。

2) 长期不施磷肥,土壤磷素亏缺(年均P亏缺71.3 kg/hm<sup>2</sup>)。随着种植时间的延长,土壤有效磷、Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P、Al-P、Fe-P、O-P含量逐渐降低,年均降低1.3~3.5 mg/kg, Ca<sub>10</sub>-P无显著变化。

3) 随着磷肥用量增加,土壤磷积累量逐渐增加,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>年用量360~1440 kg/hm<sup>2</sup>,土壤年均积累磷41.2~478.7 kg/hm<sup>2</sup>,理论上土壤年均每积累100 kg/hm<sup>2</sup>磷素,土壤有效磷、Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P、Al-P、Fe-P分别提高1.13、2.41、15.27、4.14、1.37 mg/kg。随着土壤磷积累年限和磷肥用量的增加,无机磷中的有效磷源Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P、Al-P占无机磷比例均逐渐增加。过量施用磷肥11年,土壤O-P、Ca<sub>10</sub>-P含量无显著变化。

## 参 考 文 献:

- [1] FAO. 2012. Production: Crops[EB/OL]. <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>, 2012-07-29.
- [2] 刘建玲, 张福锁, 杨奋翮. 北方耕地和蔬菜保护地土壤磷素状况研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(2): 179~186.
- [3] Liu J L, Zhang F S, Yang F H. Fractions of phosphorus in cultivated and vegetable soils in northern China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(2): 179~186.
- [4] 郝小雨. 设施菜田养分循环特征与优化调控研究[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2012.
- [5] Hao X Y. Study on nutrient balance and optimized management in soil-greenhouse vegetable system [D]. Beijing: PhD Dissertation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.
- [6] Zhang Y C, Li R N, Wang L Y, et al. Threshold of soil olsen-P in greenhouses for tomatoes and cucumbers[J]. Communication in Soil Science and Plant Analysis, 2010, 41: 2383~2402.
- [7] 马茂桐, 陈际型, 谢建昌, 等. 我国菜园土壤的养分状况与施肥[A]. 谢建昌, 陈际型, 等. 菜园土壤肥力与蔬菜合理施肥论文集[C]. 江苏南京: 河海大学出版社, 1997: 25~31.
- [8] Ma M T, Chen J X, Xie J C, et al. Status of nutrients and fertilization of vegetable lands in China [A]. Xie J C, Chen J X, et al. Proceedings of the vegetable soil fertility and reasonable fertilization [C]. Nanjing, Jiangsu: Hohai University Press, 1997: 25~31.
- [9] 陈清, 张福锁. 蔬菜养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2007: 80~85.
- [10] Chen Q, Zhang F S. Theories and practices of integrative management for vegetable production [M]. Beijing: China Agriculture University Press, 2007: 80~85.

- [7] 贾文竹, 马利民, 卢树昌, 等. 河北省菜地、果园土壤养分状况与调控技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 60–62.
- Jia W Z, Ma L M, Lu S C, et al. Status of soil nutrients and control technology of vegetable and orchard lands in Hebei Province [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007: 60–62.
- [8] 廖文华. 河北省农田土壤磷素转化、平衡与产量效应[D]. 河北保定: 河北农业大学博士学位论文, 2012.
- Liao W H. Transformation, balance and yield response of soil phosphorus in the arable lands in Hebei Province [D]. Baoding, Hebei: PhD Dissertation, Agricultural University of Hebei, 2012.
- [9] Wang Y L, Zhang H L, Tang J W, et al. Accelerated phosphorus accumulation and acidification of soils under plastic greenhouse condition in four representative organic vegetable cultivation sites[J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 195: 67–73.
- [10] 王思林, 梁成华, 杜立宇. 不同年限日光温室菜田土壤磷素状况研究[J]. 北方园艺, 2009, (9): 1–3.
- Wang S L, Liang C H, Du L Y. Study on the status of phosphorus of vegetable soil under solar greenhouse for different planting years in suburb of Shenyang City[J]. Northern Horticulture, 2009(9): 1–3.
- [11] Hua K K, Zhang W J, Guo Z B, et al. Evaluating crop response and environmental impact of the accumulation of phosphorus due to long-term manuring of vertisol soil in northern China[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2016, 219: 101–110.
- [12] Yan Z J, Liu P P, Li Y H, et al. Phosphorus in China's intensive vegetable production systems: over fertilization, soil enrichment, and environmental implications[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42: 982–989.
- [13] Bao L, Zhang N M, Liu L L, et al. Research on the evolution and accumulation characteristics of surface soil phosphorus in Tien Lake[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2015, 16(4): 840–844.
- [14] 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 Science in China*, 2010, 9(11): 1641–1649.
- [15] 展晓莹, 任意, 张淑香, 等. 中国主要土壤有效磷演变及其与磷平衡的响应关系[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4728–4737.
- Zhan X Y, Ren Y, Zhang S X, et al. Changes in Olsen phosphorus concentration and its response to phosphorus balance in the main types of soil in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4728–4737.
- [16] 杨毅, 赵文婷. 不同施肥制度对北方石灰性土壤无机磷形态影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(7): 28–33.
- Yang Y, Zhang W T. Influence of inorganic phosphorus form on calcareous soil under different fertilization systems in Northern China[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(7): 28–33.
- [17] 王永壮, 陈欣, 史奕. 农田土壤磷素有效性及影响因素[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 260–268.
- Wang Y Z, Chen X, Shi Y. Phosphorus availability in cropland soils of China and related affecting factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1): 260–268.
- [18] Motavalli P P, Miles R J. Soil phosphorus fractions after 111 years of animal manure and fertilizer application[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002(36): 35–42.
- [19] 蒋柏藩, 顾益初. 石灰性土壤无机磷分级体系的研究[J]. 中国农业科学, 1989, 22(3): 58–66.
- Jiang B F, Gu Y C. Fractionation of inorganic phosphorus in calcareous soils[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1989, 22(3): 58–66.
- [20] 蒋柏藩, 沈仁芳. 土壤无机磷分级的研究[J]. 土壤学进展, 1990, 18(1): 1–8.
- Jiang B F, Shen R F. Fractions of soil inorganic P[J]. *Advances in Soil Science*, 1990, 18(1): 1–8.
- [21] 张漱茗, 于淑芳, 刘毅志. 施肥对石灰性土壤磷素形态的影响[J]. 土壤, 1992, 24(2): 68–70.
- Zhang S M, Yu S F, Liu Y Z. Impact of fertilization on the P fractions of calcareous soil[J]. *Soils*, 1992, 24(2): 68–70.
- [22] 王道中, 郭熙盛, 刘枫, 何传龙. 长期施肥对砂姜黑土无机磷形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(3): 601–606.
- Wang D Z, Guo X S, Liu F, He C L. Effects of long-term fertilization on inorganic phosphorus fractions in lime concretion black soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(3): 601–606.
- [23] 刘建玲, 张福锁. 小麦-玉米轮作长期肥料定位试验中土壤磷库的变化II. 土壤Olsen-P及各形态无机磷的动态变化[J]. 应用生态学报, 2000, 11(3): 365–368.
- Liu J L, Zhang F S. Dynamics of soil P pool in a long-term fertilizing experiment of wheat-maize rotation II. Crop yield effect of fertilizer P and dynamics of soil total P and inorganic P[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(3): 365–368.
- [24] 杨丽娟, 李天来, 周崇峻. 塑料大棚内长期施肥对菜田土壤磷素组成及其含量影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 205–209.
- Yang L J, Li T L, Zhou C J. Long-term fertilization effect on fraction and content of phosphorus in vegetable soil in plastic film house[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2009, 23(5): 205–209.
- [25] Dalton B A, Ivo R 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: 504–514.
- [26] 宋付朋, 张民, 于林. 石灰性菜园土壤中各形态磷素的富集与变异特征[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 65–69.
- Song F P, Zhang M, Yu L. Enrichment and variation of various forms of phosphorus in calcareous vegetable cultivated soils[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2005, 19(6): 65–69.
- [27] 张淑霞, 杨晓云, 司朝光, 等. 秋白菜‘87-114’“3414”施肥试验[J]. 中国农学通报, 2012, 28(19): 245–248.
- Zhang S X, Yang X Y, Si C G, et al. Research on fertilizer of autumn Chinese cabbage‘87-114’ based on the“3414” field experiments[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(19): 245–248.
- [28] 兰翔, 王婷, 杨春玲, 等. 不同施磷量对蔬菜地土壤硝态氮淋失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 958–964.
- Lang X, Wang T, Yang C L, et al. Effects of different phosphorus application rates on soil nitrate leaching in vegetable fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(4): 958–964.
- [29] 张福锁, 陈新平, 马文奇. 现代农业时代谈化肥[J]. 磷肥与复肥, 2003, 18(1): 1–3.
- Zhang F S, Chen X P, Ma W Q. On chemical fertilizer in modern agriculture era[J]. *Phosphate and Compound Fertilizer*, 2003, 18(1): 1–3.
- [30] 王兴仁, 曹一平, 张福锁, 等. 磷肥衡量监控施肥法在农业中的探索[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(3–4): 59–64.
- Wang X R, Cao Y P, Zhang F S, et al. Feasibility of a fertilization method keeping constant application rate for phosphorus by monitoring available phosphorus in the soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1995, 1(3–4): 59–64.

- [31] 曹宁. 基于农田土壤磷肥力预测的我国磷养分资源管理研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学博士学位论文, 2007.
- Cao N. Phosphorus management in Chinese agroecosystem based on forecasting the change of soil phosphorus fertility[D]. Yangling, Shaanxi: PhD Dissertation, Northwest A&F University, 2007.
- [32] Tang X, Li J M, Ma Y B, et al. Phosphorus efficiency in long-term (15 years) wheat-maize cropping systems with various soil and climate conditions[J]. Field Crops Research, 2008, 108(3): 231–237.
- [33] 贾可, 刘建玲, 廖文华, 等. 磷肥在油菜和大白菜上的产量效应及土壤磷素的化学行为研究[J]. 河北农业大学学报, 2005, 28(4): 11–16.
- Jia K, Liu J L, Liao W H, et al. The yield response of rape and cabbage to phosphorus fertilizer and transformation of phosphorus in soils[J]. Journal of Agricultural University of HeBei, 2005, 28(4): 11–16.
- [34] 刘建玲, 李仁岗, 廖文华, 等. 白菜-辣椒轮作中磷肥的产量效应及土壤磷积累研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(8): 1616–1620.
- Liu J L, Li R G, Liao W H, et al. The yield response of vegetable to phosphate fertilizer and soil phosphorus accumulation in a Chinese cabbage-capsicum rotation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(8): 1616–1620.
- [35] Chen Q, Zhang X S, Zhang H Y, et al. Evaluation of current fertilizer and soil fertility in vegetable production in the Beijing region[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2004, 69: 51–58.
- [36] Osmar A C, George H. Tomato responses to preplant incorporated or fertigated phosphorus on soils varying in Mehlich-1 extractable phosphorus[J]. Horticulture Science, 2000, 35(1): 67–72.
- [37] 沈仁芳, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷的形态分布及其有效性[J]. 土壤学报, 1992, 29(1): 80–85.
- Shen R F, Jiang B F. Distribution and availability of various forms of inorganic-P in calcareous soils[J]. Acta Pedologica sinica, 1992, 29(1): 80–85.
- [38] 黄欣欣, 廖文华, 刘建玲, 等. 长期秸秆还田对潮土土壤各形态磷的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 779–789.
- Huang X X, Liao W H, Liu J L, et al. Effects of long-term straw return on various fractions of phosphorus in Fluvo-aquic soil[J]. Acta Pedologica sinica, 2016, 53(3): 779–789.
- [39] 刘建玲, 廖文华, 张凤华, 等. 菜园土各形态磷库的变化及空间分布[J]. 河北农业大学学报, 2004, 27(6): 6–11.
- Liu J L, Liao W H, Zhang F H, et al. Variation and distribution of individual phosphorus pool in the soil profile of vegetable fields[J]. Journal of Agricultural University of HeBei, 2004, 27(6): 6–11.
- [40] 程艳丽, 程希雷, 邹德乙. 棕壤长期定位施肥15年后磷素形态及有效性[J]. 土壤通报, 2009, 40(6): 1362–1366.
- Cheng Y L, Cheng X L, Zou D Y. Long-term located fertilizer experiments after 15-years in brown soil forms and availability of phosphate nutrient[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(6): 1362–1366.
- [41] 陆欣春, 邹文秀, 韩晓增, 等. 长期施肥对黑土磷和锌形态转化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1536–1542.
- Lu X C, Zou W X, Han X Z, et al. Effect of long-term fertilization on phosphorus and zinc fractions in a Mollisol[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(6): 1536–1542.
- [42] 魏玉奎, 李新平, 刘瑞丰, 等. 设施农业土壤磷素富集的动态变化[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(1): 126–132.
- Wei Y K, Li X P, Liu R F, et al. Study on dynamics variation of phosphorus enrichment in greenhouse agricultural soil[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2011, 29(1): 126–132.
- [43] 李新平, 张亚林, 魏玉奎, 等. 杨凌地区大棚土壤无机磷形态及有效性研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 195–199.
- Li X P, Zhang Y L, Wei Y K, et al. Study on forms of inorganic phosphorus and its validity in Yangling area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(4): 195–199.
- [44] 黄运湘, 王翠红, 张杨珠. 湖南省几种主要母质类型菜园土壤的磷素状况[J]. 农业现代化研究, 2009, 30(4): 505–508.
- Huang Y X, Wang C H, Zhang Y Z. Phosphorus status in vegetable soils derived from 3 types of parent material in Hunan province[J]. Research of Agricultural Modernization, 2009, 30(4): 505–508.
- [45] 陈明明. 四川主要农耕土壤不同形态磷含量及其影响因素研究[D]. 四川雅安: 四川农业大学硕士学位论文, 2009.
- Chen M M. Study on different forms of phosphorus and influencing factors of main cultivated soils in Sichuan [D]. Ya'an, Sichuan: MS Thesis of Sichuan Agricultural University, 2009.
- [46] 张海涛, 刘建玲, 廖文华. 磷肥和有机肥对不同磷水平土壤磷吸附-解吸的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 7(2): 284–290.
- Zhang H T, Liu J L, Liao W H. Effect of phosphate fertilizer and manure on properties of phosphorus sorption and desorption in soils with different phosphorus levels[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 7(2): 284–290.
- [47] 黄东风, 邱孝煊, 李卫华, 等. 福州市郊菜地土壤磷素特征及流失潜能分析[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 83–87, 163.
- Huang D F, Qiu X X, Li W H, et al. Analysis on characteristics and lost potential of soil phosphorus in vegetable field located at suburb of Fuzhou city[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(1): 83–87, 163.
- [48] 高秀美, 汪吉东, 刘兆普, 等. 集约化蔬菜地土壤磷素积累特征及流失风险[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(1): 82–86.
- Gao X M, Wang J D, Liu Z P, et al. Accumulation and leaching risk of phosphorus in vegetable soils under intensive cultivation[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26(1): 82–86.
- [49] 廖文华, 王新军, 刘建玲. 磷肥和有机肥施用对白菜产量及磷素径流流失潜能的影响[J]. 河北农业大学学报, 2008, 31(3): 11–16.
- Liao W H, Wang X J, Liu J L. Effects of phosphate fertilizer and manure application on the yield of Chinese cabbage and the runoff loss of phosphorus[J]. Journal of Agricultural University of HeBei, 2008, 31(3): 11–16.
- [50] 张凤华, 刘建玲, 廖文华. 农田磷的环境风险及评价研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 797–805.
- Zhang F H, Liu J L, Liao W H. Environmental risk and assessment of agricultural phosphorus: A review[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(4): 797–805.
- [51] 张作新, 刘建玲, 廖文华, 等. 磷肥和有机肥对不同磷水平土壤磷渗漏影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4): 729–735.
- Zhang Z X, Liu J L, Liao W H, et al. The effect of phosphorus fertilizer and manure on phosphorus leaching in different phosphorus levels soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(4): 729–735.