植物营养与肥料学报 2011,17(1):231-239
Plant Nutrition and Fertilizer Science

基于几种土壤测试方法的华南菜田磷素丰缺指标研究

张永起[1,2,3],李淑仪[1*],廖新荣[1],蓝佩玲[1],王荣萍[1],邵 鹏[1]
(1 广东省生态环境与土壤研究所,广东广州 510650;2 中国科学院广州地球化学研究所,广东广州 510640;
3 中国科学院研究生院,北京 100049)

摘要:依托2002—2009年开展的蔬菜田间试验结果,土样分别用Olsen法、Mehlich 1法、Mehlich 3法和ASI法测定其有效磷含量,建立上述测试方法的菜田土壤磷素丰缺指标,并进行不同测试方法的相关研究。以蔬菜产量<75%、75%~90%、90%~95%和>95%为标准,将菜田土壤有效磷分为"低"、"中"、"高"和"极高"4个肥力等级;对应的土壤有效磷丰缺指标Olsen-P为<23、23~59、59~81和>81 mg/kg;M1-P为<19、19~102、102~179和>179 mg/kg;M3-P为<19、19~96、96~165和>165 mg/kg;ASI-P为<22、22~68、68~98和>98 mg/kg。Olsen法、M3法、M1法和ASI法4种方法,两两的相关性均达到极显著水平。

关键词:蔬菜;相对产量;有效磷;丰缺指标
中图分类号:S158　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2011)01-0231-09

Abundance and deficiency indices of phosphorus in South China vegetable field based on different soil testing methods

ZHANG Yong-qi[1,2,3], LI Shu-yi[1*], LIAO Xin-rong[1], LAN Pei-ling[1], WANG Rong-ping[1], SHAO Peng[1]
(*1 Guangdong Institute of Eco-environment and Soil Sciences, Guangzhou 510650, China; 2 Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 5106402 China; 3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Based on the results of field experiments on vegetable conducted during the year 2002-2009, the abundance and deficiency indices of soil available phosphorus was investigated. The different soakage methods of soil available phosphorus were also discussed. Soil available phosphorus were classified into four classes (low, medium, high, and extremely high) corresponding to the percentage of maximum vegetable yield (<75%, 75%-90%, 90%-95% and >90% relative yield). The abundance and deficiency indices were simulated by the logarithm models. The results indicates that available phosphorus indices for different soakage methods are Olsen-P <23, 23-59, 59-81 and >81 mg/kg; Mehlich1-P <19, 19-102, 102-179 and >179 mg/kg; Mehlich3-P <19, 19-96, 96-165 and >165 mg/kg; ASI-P <22, 22-68, 68-98 and >98 mg/L, corresponding to different class of soil available phosphorus. There were significant correlation between the results obtained from Olsen, Mehlich 3, Mechlich 1 and ASI methods.

Key words: vegetable; relative yield; available phosphorus; abundance and deficiency index

土壤养分的测试是测土配方施肥的基础。只有快速、准确地测定出土壤养分的含量,才能进行正确的施肥建议。我国目前使用的土壤养分测定方法为全国第二次土壤普查时规定的方法[1],该方法化学

收稿日期:2010-01-15　　**接受日期**:2010-06-01
基金项目:广东省级农用地测土配方施肥补贴项目(粤财农[2008]293);广东省重大科技专项(2008A080800028,2009A080303008);农业公益性行业科研专项(nykyzx07-007-6);广东省特色蔬菜产业体系创新团队项目(粤农[2009]380号)资助。
作者简介:张永起(1982—),男,陕西米脂人,硕士研究生,主要从事环境科学研究。E-mail:zhyq0223@163.com
* 通讯作者 Tel:020-87024752, E-mail:lishuyi@soil.gd.cn

浸提剂提取的元素单一、分析过程烦琐、不能实现系列化操作，而分析速度慢，分析结果难于及时应用[2-3]；而且该方法的指标体系都是在20世纪80年代的产量基础上确定的，评价指标已不适合现阶段农业发展的要求。因此，在现代测土配方施肥中，采用一种快速准确而且与作物反应相关性良好的化学提取方法是必须解决的关键问题。土壤有效磷主要是指土壤中具有易溶性和吸附性的正磷酸盐，能为当季作物吸收的磷。测定有效磷可使我们了解当前土壤可供磷的能力，对合理施肥，改良土壤，提高产量有重要的参考价值。经过20世纪80、90年代国内众多学者的共同努力，土壤速效氮磷钾的常规测定方法已经得到解决[4-6]，虽然提出了大田土壤速效氮磷钾丰缺指标[4,5]，但随着时间的变化，作物产量和土壤基础肥力都有了变化。不同农业生产区域由于土壤肥力水平、生产施肥方式、水文和气候等条件的差异，即使同一种作物在相同测定方法下，不同区域所得的丰缺指标也存在一定的差异[4-5]。随着蔬菜种植面积的增加，菜农对磷肥的施用量在增加，然而，磷肥的当季利用率很低，增产效益却越来越小。大田作物一般不超过20%[7-9]，约占施磷总量75%～95%的磷在土壤中积累[10]。积累在土壤中的磷，由于其溶解性差，无法满足一般作物的生长需要，成为提高农业生产力的主要限制因子之一；而且通过农田排水、地表径流等方式进入水体，危害环境[11]，造成土壤质量的退化和磷素资源的浪费。Sharpley等[12]指出，按土壤测试磷与作物产量响应程度的关系，可将土壤含磷量划分为低、中、高以及很高等若干等级，而存在潜在的环境问题的土壤主要是在土壤测试磷超过高磷等级以上的水平。因此，广东省土壤肥料总站组织有关单位开展了蔬菜测土施肥技术指标体系建设工作。本研究以小白菜、菜心、高脚菜心、生菜、苦瓜、豆角、花椰菜、西兰花等作为对象，选取适合华南土壤有效磷测定的方法，初步建立了华南菜田土壤磷素丰缺指标和施肥技术指标，为指导华南菜田磷肥的施用和环境评价提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验方法

试验是依托2002～2009年广东蔬菜测土配方施肥项目，在广东省的增城、南海、高要、徐闻、惠阳、澄海等县的多个镇进行的小白菜、菜心、高脚菜心、生菜、苦瓜、豆角、花椰菜、西兰花等蔬菜的田间试验，在施足氮、钾肥条件下不施磷(P_0)和施磷(P_1)处理的所得方蔬菜产量数据。

田间试验为随机区组排列，3次重复，小区面积为20 m^2。不施磷(P_0)处理的N、P_2O_5、K_2O用量分别为84.54～152.4、0、59.25～103.8 kg/hm^2；施磷(P_1)处理的N、P_2O_5、K_2O用量分别为84.54～152.4、25.35～35.55、59.25～103.8 kg/hm^2。所用肥料氮肥为尿素(N 46%)、过磷酸钙(P_2O_5 12%)和硫酸钾(K_2O% 52%)。全部磷肥、40%氮肥和40%钾肥作基肥，其余分3次分别在移植后3～4 d、约10 d和约17 d各追15%、20%、25%。基肥沟施，追肥随水追施。试验点土壤基本理化性状见表1。

1.2 样本采集与分析方法

每个菜田在田间试验前多点采集耕层(0—20 cm)土壤样品作为基础土样，风干过1mm筛，分别用Olsen法[13]、Mehlich 1(简称M1)法[14]、Mehlich 3(简称M3)[15]和ASI法[16-17]测定土壤有效磷含量。

1.3 数据统计方法

蔬菜相对产量(RY)为不施磷肥区(P_0)蔬菜产量占施磷肥区(P_1)蔬菜产量的百分数，即：

$$RY\% = P_0/P_1 \times 100$$

以对数方程获得相对产量与土壤有效磷测定值之间的数学关系式，以相对产量为50%、75%、90%、95%计算土壤有效磷含量，根据计算值划分土壤磷丰缺指标。本研究定缺磷区相对产量为50%的磷测定值为极低，介于50%至75%范围内的为低，介于75%至90%范围内的为中，介于90%至95%范围内为高，>95%的为极高。

2 结果与讨论

2.1 建立不同浸提法测定的有效磷丰缺指标

利用室内分析测定试验地土样的Olsen-P、M1-P、M3-P和ASI-P的含量，根据蔬菜田间试验中的施足氮钾条件下缺磷处理和施磷处理的蔬菜产量，计算出缺磷处理小区的相对产量。由于部分产量数据的缺失，本试验只选取了43个样点的产量数据作为研究对象(表2)。利用这些数据，分别对土壤有效磷结果与田间试验蔬菜相对产量配置对数方程[18-19](图1)。Olsen-P和相对产量的相关性最高($r = 0.7740^{**}$)，M1-P和相对产量的相关系数最低也达到了极显著水平($r = 0.5084^{**}$)。

表 1　试验点土壤基本理化性状

Table 1　Chemical properties of tested soil

地点 Site	品种 Variety	质地 Texture	pH (H_2O)	全氮 Total N (g/kg)	有机质 OM (g/kg)	碱解氮 Alk. -hyd. N (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)
增城汉华	白菜 Cabbage	FS	6.25		17.09	60.60	87.70
Zengcheng Hanhua		SLS	6.40		21.57	93.90	151.70
		LCS	5.06		34.63	249.70	135.60
	苦瓜 Balsam pear	SLS	6.13		20.33	135.62	225.00
		SLS	6.13		20.33	135.62	225.00
	豆角 Legume	SLS	5.55		30.36	208.11	315.00
		SLS	5.55		30.36	208.11	315.00
佛山高明 Foshan Gaoming	小白菜 *Brassica sinensis* L.	CL	6.92		11.80	60.68	119.17
惠州惠阳 Huizhou Huiyang	小白菜 *Brassica sinensis* L.	CL	7.68		12.10	55.50	104.03
	马铃薯 Potato	CL	6.74		16.80	89.54	180.72
南海里水 Nanhai Lishui	小白菜 *Brassica sinensis* L.	SSC	7.02	2.03	33.40	188.73	280.00
	菜心 Flowering Chinese cabbage	SSC	7.02	2.03	33.40	188.73	280.00
南海和顺 Nanhai Heshun	小白菜 *Brassica sinensis* L.	LC	4.29	1.44	26.00	205.61	125.00
	苦瓜 Balsam pear	LC	4.29	1.44	26.00	205.61	125.00
南海狮山 Nanhai Shishan	苦瓜 Balsam pear	CL	6.37	0.90	14.40	90.70	31.00
高要蚬岗 Gaoyao Xiangang	苦瓜 Balsam pear	SL	6.00	2.36	42.50	187.90	182.00
增城朱村 Zengcheng Zhucun	小白菜 *Brassica sinensis* L.	SCL	6.64	1.21	19.10	134.10	65.00
		SCL	6.56	1.24	16.50	91.68	68.00
		SCL	7.15	0.82	11.80	81.32	90.00
高要蚬岗 Gaoyao Xiangang	豆角 Legume	SCL	5.50	1.33	25.40	162.20	75.00
高要金渡 Gaoyao Jindu	青梗菜 Chinese white cabbage	SCL	5.93	1.58	23.80	159.60	88.00
增城朱村 Zengcheng Zhucun	高脚菜心	SCL	5.97	0.40	7.00	49.61	68.00
	G. flowering Chinese cabbage	SCL	5.97	0.40	7.00	49.61	68.00
		SCL	5.97	0.40	7.00	49.61	68.00
		SCL	5.97	0.40	7.00	49.61	68.00
	菜心 Flowering Chinese cabbage	LC	7.80	0.72	11.90	73.78	80.00
饶平黄冈 Raoping Huanggang	小白菜 *Brassica sinensis* L.	SaL	6.17	0.74	10.50	91.04	65.00
饶平钱东 Raoping Qiandong		SCL	8.19	0.73	12.70	85.11	40.00
饶平浮山 Raoping Fushan	豆角 Legume	LC	5.12	1.76	32.70	239.70	78.00
新会大泽 Xinhui Daze	小白菜 *Brassica sinensis* L.	CL	5.08	1.45	25.98	133.90	58.36
南海大沥 Nanhai Dali	花椰菜 Cauliflower	LC	6.98	1.72	25.86	196.00	195.00
	西兰花 Broccoli	LC	5.63	2.30	19.77	174.80	105.20
徐闻城北 Xuwen Chengbei	小白菜 *Brassica sinensis* L.	CS	5.23	1.44	27.12	178.60	683.00
澄海上华 Chenghai Shanghua	包心白菜 Cabbage	SL	5.44	0.94	11.48	179.20	97.40
澄海莲上 Chenghai Lianshang	上海青白 Shanghaiqing cabbage	LS	6.70	0.73	9.13	96.82	58.36
南海狮山 Nanhai Shishan	生菜 Lettuce	SL	5.90	0.79	10.18	105.90	170.60
增城朱村 Zengcheng Zhucun	豆角 Legume	SCL	6.83	0.37	5.58	51.53	131.60
揭东锡场 Jiedong Xichang	苦瓜 Balsam pear	SSCL	5.95	0.40	30.90	363.40	497.60
惠阳平潭 Huiyang Pingtan	苦瓜 Balsam pear	SaL	5.98	0.46	6.16	32.67	53.48
南海狮山 Nanhai Shishan	苦瓜 Balsam pear	SCL	5.40	0.89	10.71	77.86	151.10
佛山高明 Foshan Gaoming	茄子 Aubergine						
南海西樵 Nanhai Xiqiao	小白菜 *Brassica sinensis* L.	LC	4.79	0.75	19.60	147.30	350.00
	菜心 Flowering Chinese cabbage	LC	4.79	0.75	19.60	147.30	350.00

注(Note): FS—细砂土 Fine sand; SL—粉壤土 Silt loam soil; LCS—壤粘土 Loam clay soil; SSC—粉砂质粘土 Silt sandy clay; LC—壤质粘土 Loamy clay; CL—粘壤土 Clay loam; SL—粉质壤土 Silty loam; SCL—砂质粘壤土 Sandy clay loam; SaL—砂质壤土 Sandy loam; CS—粘土 Clay soil; LS—壤质砂土 Loamy sand; SSCL—粉砂质粘壤土 Silt sandy clay loam; LS—壤土 Loam soil.

表2 不同试验点土壤有效磷含量及相对产量

Table 2 Concentration of available P and relative yield in different trial site

地点 Site	品种 Variety	Olsen-P	Mehich 1-P	Mehich 3-P	ASI-P	RY
		(mg/kg)			(mg/L)	(%)
增城汉华	白菜 Cabbage	62.41	220.53	302.65	99.55	93.26
Zengcheng Hanhua		87.32	430.35	437.97	197.54	98.53
		14.03	33.00	41.62	37.14	60.38
	苦瓜 Balsam pear	59.94	112.30	77.50	117.58	95.45
		98.01	122.73	107.97	186.38	92.60
	豆角 Legume	93.41	140.11	104.29	150.87	104.10
		138.17	175.41	140.12	147.28	90.65
佛山高明 Foshan Gaoming	小白菜 *Brassica sinensis* L.	59.67	134.27	98.65	72.98	90.68
惠州惠阳 Huizhou Huiyang	小白菜 *Brassica sinensis* L.	149.83	436.89	368.81	170.48	108.96
	马铃薯 Potato	99.68	244.93	109.31	145.46	97.32
南海里水 Nanhai Lishui	小白菜 *Brassica sinensis* L.	35.61	96.89	102.78	52.43	76.72
	菜心 Flowering Chinese cabbage	35.61	96.89	102.78	52.43	90.37
南海和顺 Nanhai Heshun	小白菜 *Brassica sinensis* L.	23.97	71.13	49.17	37.89	76.77
	苦瓜 Balsam pear	23.97	71.13	49.17	37.89	81.65
南海狮山 Nanhai Shishan	苦瓜 Balsam pear	122.69	101.88	127.73	158.80	108.96
高要蚬岗 Gaoyao Xiangang	苦瓜 Balsam pear	54.92	43.05	73.48	110.65	78.98
增城朱村 Zengcheng Zhucun	小白菜 *Brassica sinensis* L.	122.57	394.23	365.79	86.77	104.69
		108.15	387.21	445.39	198.77	84.48
		107.36	379.32	417.07	94.79	82.17
高要蚬岗 Gaoyao Xiangang	豆角 Legume	44.47	42.25	65.11	101.00	84.00
高要金渡 Gaoyao Jindu	青梗菜 Chinese white cabbage	47.87	185.51	201.94	51.45	79.07
增城朱村 Zengcheng Zhucun	高脚菜心	66.57	131.09	164.23	55.44	84.67
	G. flowering Chinese cabbage	37.81	241.87	221.85	52.18	84.67
		73.26	193.67	146.45	69.72	85.78
		88.64	175.59	128.77	64.96	105.80
	菜心 Flowering Chinese cabbage	81.55	177.47	160.18	40.90	91.85
饶平黄冈 Raoping Huanggang	小白菜 *Brassica sinensis* L.	90.35	185.51	172.09	57.44	95.62
饶平钱东 Raoping Qiandong	小白菜 *Brassica sinensis* L.	80.02	233.70	93.58	122.70	87.46
饶平浮山 Raoping Fushan	豆角 Legume	31.08	25.40	54.40	80.85	81.31
新会大泽 Xinhui Daze	小白菜 *Brassica sinensis* L.	237.20	339.96	304.52	115.09	116.67
南海大沥 Nanhai Dali	花椰菜 Cauliflower	208.80	298.42	148.35	69.22	103.95
	西兰花 Broccoli	216.40	476.58	351.53	137.89	109.70
徐闻城北 Xuwen Chengbei	小白菜 *Brassica sinensis* L.	51.60	105.86	40.87	40.90	89.69
澄海上华 Chenghai Shanghua	包心白菜 Cabbage	166.17	140.65	242.59	125.57	131.26
澄海莲上 Chenghai Lianshang	上海青白 Shanghai qing cabbage	116.42	167.65	122.71	174.32	101.29
南海狮山 Nanhai Shishan	生菜 Lettuce	95.48	161.61	135.93	74.99	98.50
增城朱村 Zengcheng Zhucun	豆角 Legume	61.95	159.24	258.89	100.30	97.51
揭东锡场 Jiedong Xichang	苦瓜 Balsam pear	57.28	61.90	45.21	35.39	80.52
惠阳平潭 Huiyang Pingtan	苦瓜 Balsam pear	68.46	218.49	171.57	119.85	85.94
南海狮山 Nanhai Shishan	苦瓜 Balsam pear	34.85	48.13	57.41	94.78	100.47
佛山高明 Foshan Gaoming	茄子 Aubergine	108.05	293.85	352.65	133.13	105.34
南海西樵 Nanhai Xiqiao	小白菜 *Brassica sinensis* L.	108.05	293.85	352.65	133.13	107.93
	菜心 Flowering Chinese cabbage	4.79	0.75	19.60	147.30	350.00

注(Note)：RY—相对产量 Relative yield.

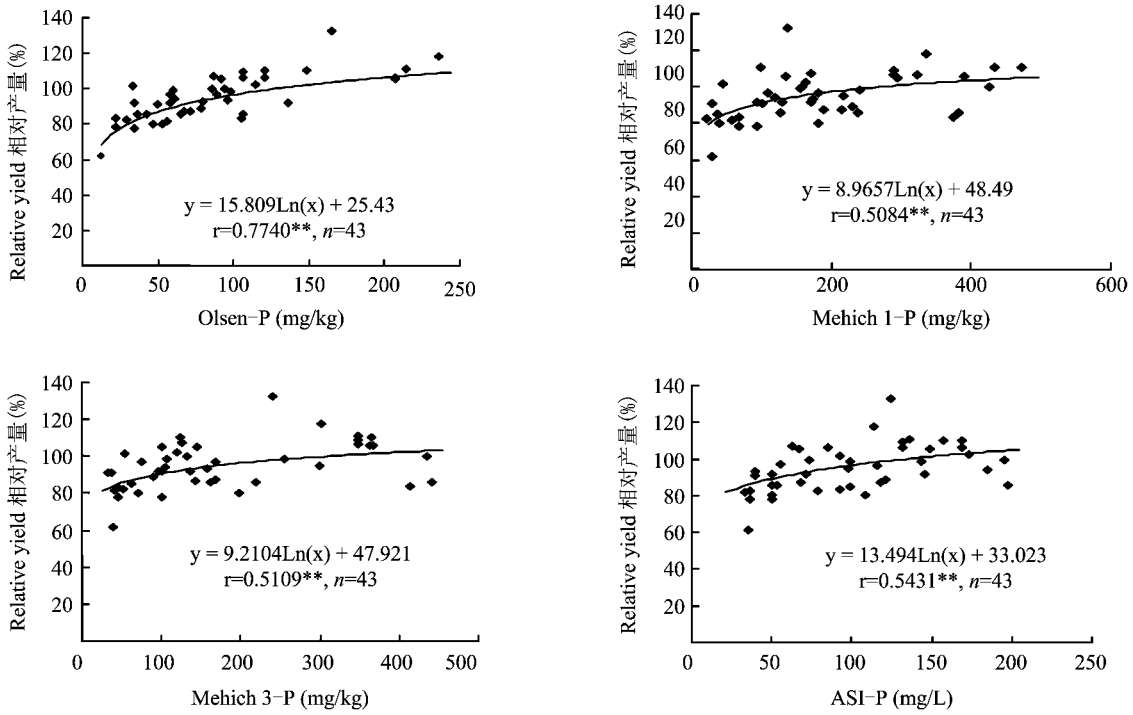

图 1　不同方法浸提有效磷与蔬菜相对产量的数学模型

Fig1.　Math models of different extraction available phosphorus to vegetable relative yields

[注：$f=41$，$P_{0.05}=0.304$，$P_{0.01}=0.393$]

关于土壤肥力等级划分，周鸣铮[4]和陆允甫[5]建议将其划分为 5 级，即“极低”、“低”、“中”、“高”和“极高”；但金耀青等[20]认为，由于作物生长受众多因素的影响从而产生的年度间产量变化幅度，足以掩盖被划分得过细的肥力级差，肥力指标划分为 3 级或 4 级就已足够。本研究所有试验点的蔬菜平均相对产量为 93%，最大值为 131%，最小值为 60%。也就是说在本研究条件下，缺磷处理的蔬菜相对产量没有低于 50% 的，而当蔬菜相对产量为 50% 时的外推值为 4 mg/kg，不具实际意义。鉴于此，当蔬菜的相对产量为 <75%、75%～90%、90%～95% 和 >95% 时所对应的土壤有效磷丰缺等级划分为“低”、“中”、“高”和“极高”4 个等级。通过图 1 建立的对数方程，求取当蔬菜相对产量为 <75%、75%～90%、90%～95% 和 >95% 时，土壤 Olsen-P、M1-P、M3-P 和 ASI-P 的丰缺指标值。因为只是一个范围，为了方便实际操作，所以将土壤有效磷“低”、“中”、“高”和“极高”各级的 Olsen-P、M1-P、M3-P 和 ASI-P 指标值取整数。分级结果见表 3。

表 3　不同浸提法浸提的有效磷丰缺指标

Table 3　Abundance and deficiency indices of available phosphorus of different extraction methods

分级 Classification	相对产量（%） Relative yield	Olsen-P (mg/kg)	Mehlich 1-P (mg/kg)	Mehlich 3-P (mg/kg)	ASI-P (mg/L)
低 Low	<75	<23	<19	<19	<22
中 Medium	75～90	23～59	19～102	19～96	22～68
高 High	90～95	59～81	102～179	96～165	68～98
极高 Very high	>95	>81	>179	>165	>98

2.2　有效磷丰缺指标的比较

本试验看出，有效磷丰缺指标均高于全国第二次土壤普查的结果，原因是近年来农民对磷肥的施用量有所增加，特别是蔬菜地磷肥增加更多；而磷肥的利用率较低，致使土壤中磷的含量有所增加。英国洛桑试验站的长期定位试验结果显示，当土壤 Olsen-P 含量低于 60 mg/kg 时，从 60cm 土层排出水的总磷含量低于 0.15 mg/L；但 Olsen-P 含量超过

约60 mg/kg时,排出水的总磷含量直线增加,并将土壤Olsen-P的含量为60mg/kg视为磷素渗漏流失的转折点[21]。Sims等[22]将土壤M3-P的含量为150 mg/kg视为磷素非点源污染的临界点。本试验点土壤Olsen-P含量为0.509～326.6 mg/kg,67.4%的土样大于临界值(60 mg/kg);Mehlich3-P的含量为10.32～572.4 mg/kg,55.8%的土样大于临界值(150 mg/kg)。由此可见,用Olsen-P与Mehlich3-P的含量作为评价指标,在当前的施磷水平下,土壤磷素的流失有较大的风险。

对比孙义祥[23]对山东小麦Olsen-P指标的研究和章明清[24]对福建马铃薯Olsen-P指标的研究(表4),本试验蔬菜地的Olsen-P指标高于二者,其原因是华南蔬菜地的播种频次要明显高于小麦田和水稻田,导致过量的磷肥转化为无机态磷以后,其当季作物的有效性显著降低,大部分积累在土壤中。而与陈琼贤[25]对华南菜心Olsen-P指标的研究比较发现,二者较为相近,同样代表了华南蔬菜地土壤的有效磷丰缺指标。

表4 与其他作物的Olsen-P指标相比较

Table 4 Compared Olsen-P indices with other crops

分级 Classification	相对产量 Relative yield (%)	小麦[23] Wheat (mg/kg)	马铃薯[24] Potato (mg/kg)	水稻[26] Rice (mg/kg)	菜心[25] Flowering Chinese cabbage (mg/kg)	蔬菜* Vegetable (mg/kg)
低 Low	<75	<10	<20	<5	<30	<23
中 Medium	75～90	10～30	20～35	5～12	30～50	23～59
高 High	90～95	30～50	35～50	12～15	50～120	59～81
极高 Very high	>95	>50	>50	>15	>120	>81

注(Note):*为本试验结果 The result were from this experiment.

中国农业科学院国家测土施肥中心实验室、加拿大钾磷研究所中国项目部通过在全国31个省(市、自治区)进行大量深入系统研究建立起来的水稻土壤有效氮、磷、钾丰缺指标体系[16]中,ASI-P指标有效磷的“极低”为<7.0 mg/L、“低”为7.0～12.0mg/L、“中”为12.0～24.0 mg/L、“较高”为24.0～40.0 mg/L、“高”为40.0～60.0 mg/L、“极高”为>60.0 mg/L。而本试验对华南菜田ASI-P指标的研究结果高于该值,同时也高于邹娟[27]对中国油菜产区长江流域的ASI-P指标的研究结果,说明华南菜田土壤的有效磷指标应该同其他地区的有效磷指标区分对待。魏义长[28]对江苏省黄海之滨的滩涂地水稻土ASI-P指标的研究结果,与本试验的蔬菜地ASI-P指标很接近,这可能是滨海滩涂土壤母质造成的(表5)。

表5 与其他作物的ASI-P指标相比较

Table 5 Compared ASI-P indices with other crops

分级 Classification	相对产量 Relative yield (%)	冬油菜[27] Winter rapeseed (mg/L)	水稻[28] Rice (mg/L)	蔬菜* Vegetable (mg/L)
低 Low	<75	<12	<13	<22
中 Medium	75～90	12～29	13～28.5(95%)	22～68
高 High	90～95	29～38	28.5(95%)～60(减产 Decrease)	68～98
极高 Very high	>95	>38	>60(减产 Decrease)	>98

注(Note):*为本试验结果 The result were from this experiment.

2.3 不同有效磷浸提方法之间的相关性

对2009～2010年度的57个土样分别用Olsen法、M1法、M3法和ASI法测定其有效磷含量,测定值整体趋势表现为M1-P > M3-P > Olsen-P > ASI-P。

其中,Olsen-P 的范围是 0.509 ～ 326.6 mg/kg,平均为 99.1 mg/kg,M3-P 的范围是 10.324 ～ 572.381 mg/kg,平均为 214.44 mg/kg,M1 的范围是 8.597 ～ 576.117 mg/kg,平均为 232.38 mg/kg,ASI-P 的范围是 2.06 ～ 285.76 mg/kg,平均为 97.58 mg/kg。

用不同浸提液浸提相同土样中的有效磷,关键是提取率的差别,分别对 4 种提取方法所得的结果两两配置线性方程(图 2)。结果看出,任意两者之间的相关性均达到极显著水平,这与众多研究结果相近[29-35]。其中 M1-P 和 M3-P 的相关性最好,$r = 0.8901^{**}$,因为 M3 方法是 M1 方法改进后的方法。M3-P 和 ASI-P 的相关系数最低,$r = 0.6632^{**}$。

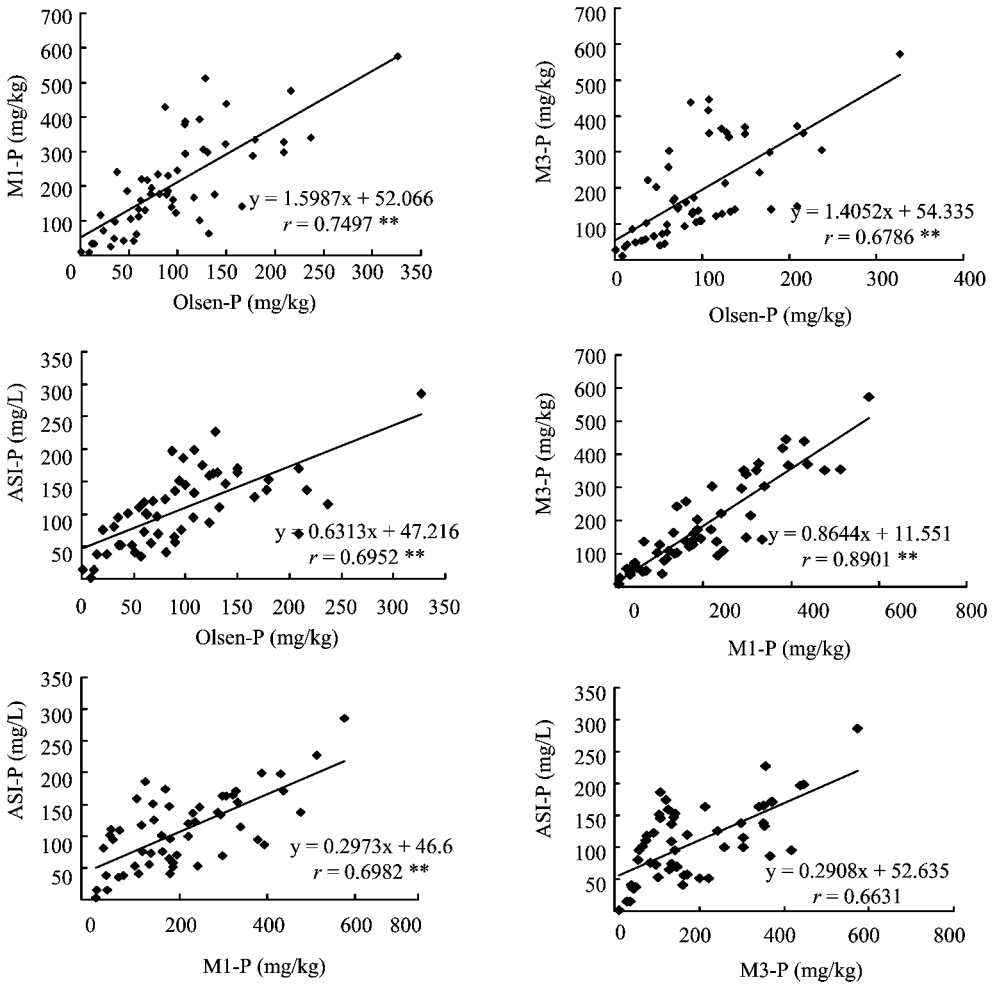

图 2　不同方法浸提所得的有效磷的相关方程

Fig. 2　Correlation of available phosphorus concentrations in different extraction methods

[注: $n = 57$, $P_{0.05} = 0.273$, $P_{0.01} = 0.354$]

通过计算得到 4 种方法测定的有效磷含量之间的换算系数,其相关系数均达到极显著水平(表 6)。利用这些方程换算,可将不同方法测定的有效磷相互转换,将为建立华南菜田统一的土壤有效磷分级标准提供很大的方便。

运用 Olsen 法、M1 法、M3 法和 ASI 法等 4 种方法对华南菜田土壤有效磷进行了测定研究,通过有效磷含量和相对产量的关系建立了土壤 Olsen-P、M1-P、M3-P 和 ASI-P 的丰缺指标。

3　结论

1) 按照蔬菜产量 < 75%、75% ～ 90%、90% ～ 95% 和 > 95% 划分的土壤肥力等级,对应的土壤有效磷丰缺指标分别为: Olsen-P < 23、23 ～ 59、59 ～ 81 和 > 81 mg/kg; M1-P < 19、19 ～ 102、102 ～ 179 和 > 179 mg/kg; M3-P < 19、19 ～ 96、96 ～ 165 和 > 165 mg/kg; ASI-P < 22、22 ～ 68、68 ～ 98 和 > 98 mg/L。

表6 不同浸提方法之间的转换方程

Table 6 Conversion equations of different extraction methods

转换方程 Conversion equation	r
$Y_{M1\text{-}P} = 1.98X_{Olsen\text{-}P}$	0.7187**
$Y_{M3\text{-}P} = 1.80X_{Olsen\text{-}P}$	0.6387**
$Y_{ASI\text{-}P} = 0.97X_{Olsen\text{-}P}$	0.5265**
$Y_{M3\text{-}P} = 0.90X_{M1\text{-}P}$	0.8888**
$Y_{ASI\text{-}P} = 0.46X_{M1\text{-}P}$	0.5370**
$Y_{ASI\text{-}P} = 0.48X_{M3\text{-}P}$	0.4083**

注(Note)：$n=57$，$P_{0.05}=0.273$，$P_{0.01}=0.354$

2）用Olsen-P与Mehlich3-P的含量作为非点源污染的评价指标，在当前的施磷水平下，土壤磷素的流失有较大的风险。蔬菜地的有效磷丰缺指标明显高于水稻和小麦作物。

3）4种方法相互间的相关性均达到极显著，其转换系数分别为：$Y_{M1\text{-}P}=1.98X_{Olsen\text{-}P}$，$Y_{M3\text{-}P}=1.80X_{Olsen\text{-}P}$，$Y_{ASI\text{-}P}=0.97X_{Olsen\text{-}P}$，$Y_{M3\text{-}P}=0.90X_{M1\text{-}P}$，$Y_{ASI\text{-}P}=0.46X_{M1\text{-}P}$，$Y_{ASI\text{-}P}=0.48X_{M3\text{-}P}$。将不同方法测定的有效磷相互转换，可建立统一的土壤有效磷分级标准。ASI法和Mehlich3法由于具有多种元素同时分析的优点，具有广阔的应用前景。

参考文献：

[1] 中国标准出版社第一编辑室. 中国农业标准汇编(土壤肥料卷)(第一版)[M]. 北京：中国标准出版社，1998. 16-20.
First Edit Room of China Criterion Press. Collection of Chinese agricultural stundards (soil fertilizer volume)[M]. Beijing: China standards Press, 1998. 16-20.

[2] 邱慧珍. “春小麦-DRIS营养诊断”双向监测施肥技术的研究[A]. 全国农业技术推广服务中心. 国际平衡施肥研讨会论文集[C]. 北京：中国农业出版社，1999.
Qiu H Z. Study on ‘Spring wheat-DRIS nutrition determine’ bidirectional test fertilization technique[A]. National Agricultural Technology Extension Service. Corpus of international balance fertilization proseminar[C]. Beijing: China Agricultural Press, 1999.

[3] 刘德忠，李婷. 关于测土配方施肥限制因素的探讨[J]. 土壤肥料，2006，(3)：60-61.
Liu D Z, Li T. Discuss of limiting factor on soil-detective and fertilization[J]. Soil Fert., 2006, (3): 60-61.

[4] 周鸣铮. 中国的测土施肥[J]. 土壤通报，1987，18(1)：7-13.
Zhou M Z. Soil-detective and fertilization of China[J]. Chin. J. Soil Sci., 1987, 18(1): 7-13.

[5] 陆允甫，吕晓男. 中国测土施肥工作的进展和展望[J]. 土壤学报，1995，32(3)：241-251.
Lu Y F, Lü X N. Progress and prospect in fertilizer recommendation based on soil resting in China[J]. Acta Pedol. Sin., 1995, 32(3): 241-251.

[6] 黄德明. 十年来我国测土施肥的进展[J]. 植物营养与肥料学报，2003，9(4)：495-499.
Huang D M. Soil testing and fertilizer recommendations in China during the past decade[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2003, 9(4): 495-499.

[7] 李庆逵，朱兆良，于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南昌：江西科学技术出版社，1998. 112-119.
Li Q K, Zhu Z L, Yu T R. Fertilizer problem of agricultural continue development in China[M]. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 1998. 112-119.

[8] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京：中国农业出版社，1998. 465-474.
Shen S M. China soil fertility[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1998. 465-474.

[9] 马茂桐，陈际型，谢建昌. 我国菜园土壤的养分状况与施肥[A]. 谢建昌，陈际型. 菜园土壤肥力与蔬菜合理施肥(第8次国际钾素讨论会文集)[C]. 南京：河海大学出版社，1997. 25-33.
Ma M T, Chen J X, Xie J C. Soil nutrition status and fertilization of China vegetable field[A]. Xie J C, Chen J X *et al*. Soil fertility and appropriate fertilization of vegetable field[C]. Nanjing: Hehai University Press, 1997. 25-33.

[10] 化全县，周健民，王火焰，等. 水溶性有机高分子对红壤磷吸附特征的影响[J]. 水土保持学报，2005，19(3)：5-8.
Hua Q X, Zhou J M, Wang H Y. Effects of water-dissolved organic polymeric compounds application on P adsorption in red soils[J]. J. Soil Water Conserv., 2005, 19(3): 5-8.

[11] 章明奎，方利平. 砂质农业土壤养分积累和迁移特点的研究[J]. 水土保持学报，2006，20(2)：46-49.
Zhang M K, Fang L P. Accumulation and transport of nutrients in agricultural sandy soils[J]. J. Soil Water Conserv., 2006, 20(2): 46-49.

[12] Sharpley A N, Daniel J C, Smis J T *et al*. Determining environmentally sound soil phosphorus levels[J]. J. Soil Water Conserv., 1996, 51(2): 160-166.

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京：中国农业出版社，2000. 30-32.
Bao S D. Analytical method of soil agrochemistry (3rd Ed.)[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000. 30-32.

[14] Pote D H, Daniel T C, Sharpley A N *et al*. Relating extractable soil phosphorus to phosphorus losses in runoff[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1996, 60: 855-859.

[15] Mehlich A. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant[J]. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 1984, (15): 1409-1416.

[16] 金继运，白由路，杨俐苹. 高效土壤养分测试技术与设备[M]. 北京：中国农业出版社，2006. 74-78，187.
Jin J Y, Bai Y L, Yang L P. High effect technique and equipment of soil nutrition testing[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2006. 74-78, 187.

[17] 杨俐苹，金继运，梁鸣早，等. ASI法测定土壤有效P、K、Zn、Cu、Mn与我国常规化学方法的相关性研究[J]. 土壤通报，

2000,31(6): 277-279.
Yang L P, Jin J Y, Liang M Z *et al*. Comparison ASI method with conventional method by determine soil available P, K, Zn, Cu, Mn[J]. Chin. J. Soil Sci., 2000, 31(6): 277-279.

[18] 陈新平,张福锁. 通过"3414"试验建立测土配方施肥技术指标体系[J]. 中国农技术推广,2006,22(2): 36-39.
Chen X P, Zhang F S. Establish fertilizer formula on soil-detective idex system via '3414' experimentation[J]. China Agric. Tech. Exten, 2006, 22(4): 36-39.

[19] 谢利昌,胡肖珍,阮华达,等. 菜心吸收氮磷钾规律及其效应研究[A]. 范怀忠, 江佳培. 广州蔬菜病虫害综使合防治[M]. 广州: 广东科学出版社,1987. 516-538.
Xie L C, Hu X Z, Ruan H D *et al*. Study on absorption pattern and effect of N, P and K fertilizers of flowering Chinese cabbage [A]. Fan H Z, Jiang J P. Prevention and cure plant diseases and insect pests synthesis of Guangzhou [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1987. 516-538.

[20] 金耀青,张中原. 配方施肥方法及其应用[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社,1993. 35-60.
Jin Y Q, Zhang Z Y. Soil-detective fertilization method and application [M]. Shengyang: Liaoning Science and Technology Press, 1993. 35-60.

[21] Heckrath G, Brookes P C. Poulton P R *et al*. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment[J]. Environ. Qual., 1995, 24(5): 904-910.

[22] Sims J T, Maguire R O, Leytem A B *et al*. Evaluation of Mehlich3 as an agri-environmental soil phosphorus test for the Mid-Atlantic United States of America[J]. Soil Sci. Soc. Am., 2002, 66: 2016-2032.

[23] 孙义祥,郭跃升,于舜章,等. 应用"3414"试验建立冬小麦测土配方施肥指标体系[J]. 物营养与肥料学报,2009,15(1): 197-203.
Sun Y X, Guo Y S, Yu S Z *et al*. Establishing phosphorus and potassium fertilization recommendation index based on the '3414' field experiments[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(1): 197-203.

[24] 章明清,徐志平,姚宝全,等. 福建主要粮油作物测土配方施肥指标体系研究Ⅱ. 土壤碱解氮、Olsen-P 和速效钾丰缺指标[J]. 福建农业学报,2009,24(1): 68-74.
Zhang M Q, Xu Z P, Yao B Q *et al*. Soil conditions and formulated fertilization for major crops in Fujian. Ⅱ. Sufficiency indices of alkali-hydrolysable N, Olsen-P and available K in soil[J]. Fujian J. Agric. Sci., 2009, 24(1): 68-74.

[25] 陈琼贤,李淑仪. 华南菜心施肥指南[A]. 张福锁,陈新平,陈清,等. 中国主要作物施肥指南[M]. 北京: 中国农业大学出版社,2009. 149-152.
Chen Q X, Li S Y. Fertilization guide of Flowering Chinese cabbage in South China[A]. Zhang F S, Chen X P, Chen Q *et al*. Fertilization guide of Chinese main crop[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2009. 149-152.

[26] 刘顺国,邢岩,韩晓日,等. 辽宁省水稻土壤养分丰缺指标建立初探[J]. 土壤通报,2008,39(4): 871-873.
Liu S G, Xing Y, Han X R *et al*. Discussion on the establishment of nutrient Plentiful-Lack index on paddy soil in Liaoning Province[J]. Chin. J. Soil Sci., 2008, 39(4): 871-873.

[27] 邹娟,鲁剑巍,陈防,等. 基于 ASI 法的长江流域冬油菜区土壤有效磷、钾、硼丰缺指标研究[J]. 中国农业科学,2009,42(6): 2028-2033.
Zou J, Lu J W, Chen F *et al*. Study on abundance and deficiency indices of soil available P, K and B for winter rapeseed in Yangtze River Valley based on ASI method[J]. Sci. Agric. Sin., 2009, 42(6): 2028-2033.

[28] 魏义长,白由路,杨俐苹,等. 基于 ASI 法的滨海滩涂地水稻土壤有效氮、磷、钾丰缺指标[J]. 中国农业科学,2008,41(1): 138-143.
Wei Y C, Bai Y L, Yang L P *et al*. Abundance and deficiency indices of soil available N, P and K for rice in marine foreland based on ASI[J]. Sci. Agric. Sin., 2008, 41(1): 138-143.

[29] 成瑞喜,刘景福,朱端卫,等. 用 ASI 法测定中、酸性土壤有效磷结果比较[J]. 华中农业大学学报,12(4): 343-346.
Cheng R X, Liu J F, Zhu D W *et al*. Study on ASI method of determination of available soil phosphorus in neutral and acidic soils [J]. J. Huazhong Agric. Univ., 12(4): 343-346.

[30] 张国辉,谢佳贵,王立春,等. 依据土壤有效磷测定值推荐玉米磷肥最佳用量[J]. 吉林农业科学,2008,33(2): 25-28.
Zhang G H, Xie J G, Wang L C *et al*. Recommend optimal phosphorus application on maize based on the determination of soil soluble phosphorus[J]. J. Jilin Agric. Sci., 2008, 33(2): 25-28.

[31] 张杨,朱奎峰,赵雪,等. 测土配方施肥中 ASI 法与常规法测定结果的相关性研究—以测定土壤有效 P、K 为例[J]. 安徽农学通报,2008,14(15): 85-86.
Zhang Y, Zhu K F, Zhao X *et al*. Study on relationship between ASI and conventional method by determining soil available phosphorus and potassium[J]. Anhui Agric. Sci. Bull., 2008, 14(15): 85-86.

[32] 于群英,段立珍. 用 Mehlich3 通用浸提剂法测定土壤有效磷和有效钾[J]. 安徽农业科学,2002,30(6): 861-862,864.
Yu Q Y, Duan L Z. Determine available phosphorus and potassium by Mehlich3 method[J]. J. Anhui Agric. Sci., 2002, 30(6): 861-862, 864.

[33] 马骏,郭丽娜,刘秀珍. 山西石灰性土壤速效磷、钾测定方法的比较[J]. 土壤通报,2006,37(3): 620-621.
Ma J, Guo L N, Liu X Z. Cooperation of the measurement methods of available phosphorus and potassium in calcareous soil of Shanxi[J]. Chin. J. Soil Sci., 2006, 37(3): 620-621.

[34] 庞洁,韦真,沈方科. Mehlich3 法与常规分析方法在测定土壤有效 P、K 的比较研究[J]. 广西农业生物科学,2008,27(增刊): 69-71.
Pang J, Wei Z, Shen F K. Comparison of Mehlich3 and conventional method in determination of soil available P and K[J]. J. Guangxi Agric. Biol. Sci., 2008, 27(Sup.): 69-71.

[35] 卜玉山,Magdoff F R. 十种土壤有效磷测定方法的比较[J]. 土壤学报,2003,40(1): 140-146.
Bu Y S, Magdoff F R. A comparison of ten methods for determination of available phosphorus in soil[J]. Acta Pedol. Sin., 2003, 40(1): 140-146.