

农田土壤有效磷的时空变异及其影响因素分析*

——以江苏省如皋市为例

廖菁菁¹ 黄标^{2†} 孙维侠² 邹忠³ 苏建平³ 丁峰³ 黄耀¹

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

(2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(3 江苏省如皋市农技推广中心, 江苏如皋 226500)

摘要 研究农田土壤有效磷的时空变异特征可为作物合理施肥和识别农业面源磷污染重点控制区提供科学依据。以长三角地区的江苏省如皋市为例, 对不同时期农田土壤有效磷的时空变异特征进行了研究。结果表明: 自 1982 年至 2002 年的 20 年间, 有效磷在空间分布上有一定的变化, 随时间整体呈持续增长的趋势, 三个年代各土系有效磷平均值分别为 3.51 mg kg^{-1} 、 6.73 mg kg^{-1} 、 12.43 mg kg^{-1} , 但不同类型的变异特征有所差别。南部的壤质云母混合型热性石灰淡色潮湿雏形土(营防系) 1982 年至 1997 年出现下降但近年来有一定回升, 其余土系在各个时段内呈现不同程度地上升。其中, 由江淮冲积物发育而成的、分布于中西部的、质地较粗的砂质云母混合型热性石灰淡色潮湿雏形土(磨头系和桃园系) 近年来与其他土系比较增长趋缓, 由江淮冲积物发育而来的分布于东北部的东陈系和由浅湖相冲积物发育而成的分布于西北部的搬经系近年来增长较快。造成这些时空变异的主要因素有施肥管理、土地利用方式的改变和土壤性质等。从全市 20a 来有效磷演化趋势拟合的方程经过计算表明, 按目前的生长趋势, 大约经过 24 a, 土壤中有效磷含量有可能达到对水体产生危害性的临界值。

关键词 江苏省如皋市; 有效磷; 时空变异; 影响因素

中图分类号 S159 **文献标识码** A

有效磷作为土壤有效磷贮库中对作物最为有效的部分, 能直接供作物吸收利用, 因而是评价土壤供磷能力的重要指标^[1]。由于自然和人为因素的影响, 农田土壤有效磷含量常具有时空变化特点, 若缺乏对其背景值及时空变异情况的了解, 不能根据其变化确定施肥量和施肥方式, 有可能导致农田磷素亏缺或盈余。土壤磷素亏缺影响作物生长, 而农田土壤磷素长期处于盈余状态, 则会加大土壤磷素向水体流失的风险并产生潜在的生态环境问题。因此推行合理施肥和有效控制农业面源磷污染已成为人们越来越关心的问题^[2]。对农田土壤有效磷的时空变异特点及其影响因素的研究可以为这一问题的解决提供重要的科学依据。

近年来, 随着地理信息系统的广泛应用和土壤科学的发展, 利用地统计学, 并结合 GIS 技术来研究

土壤性质的时空变异成为土壤学研究的热点, 也取得了很好的成果^[3~5]。但在目前的研究中, 区域尺度上的研究大多以近年来的结果与第二次全国土壤普查时的结果相比较, 时段较少, 且样点数目也不多^[6]。而在田间尺度上, 尽管有多时段的资料^[7], 但在讨论某个区域土壤有效磷时空演变时, 其代表性有限。本研究应用 GIS 与地统计学相结合的方法, 以江苏省如皋市为例, 对比 1982 年、1997 年和 2002 年三个不同时期全区农田土壤有效磷含量, 分析其 20 a 来时空变异特征及影响因素, 其成果可为合理施肥、识别农业面源磷污染重点控制区和环境磷污染的风险评价提供科学依据。同时, 如皋市地处经济发达的长江三角洲地区, 其自然条件、土地利用和种植制度等在这一带具有一定代表性, 通过当地农田土壤有效磷的时空变异的研究, 对长江三角洲其

* 中国地质调查局地质调查实施项目(200320130004)、江苏省自然科学基金项目(BK2002151)和江苏省国土生态地球化学调查项目(NO. 20031230008)资助

† 通讯作者, E-mail: bhuang@mail.issas.ac.cn

作者简介: 廖菁菁(1982~), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤地球化学、环境地球化学研究

收稿日期: 2006-04-04; 收到修改稿日期: 2006-08-23

他地区土壤的可持续利用也起到一定指导作用。

1 材料与方法

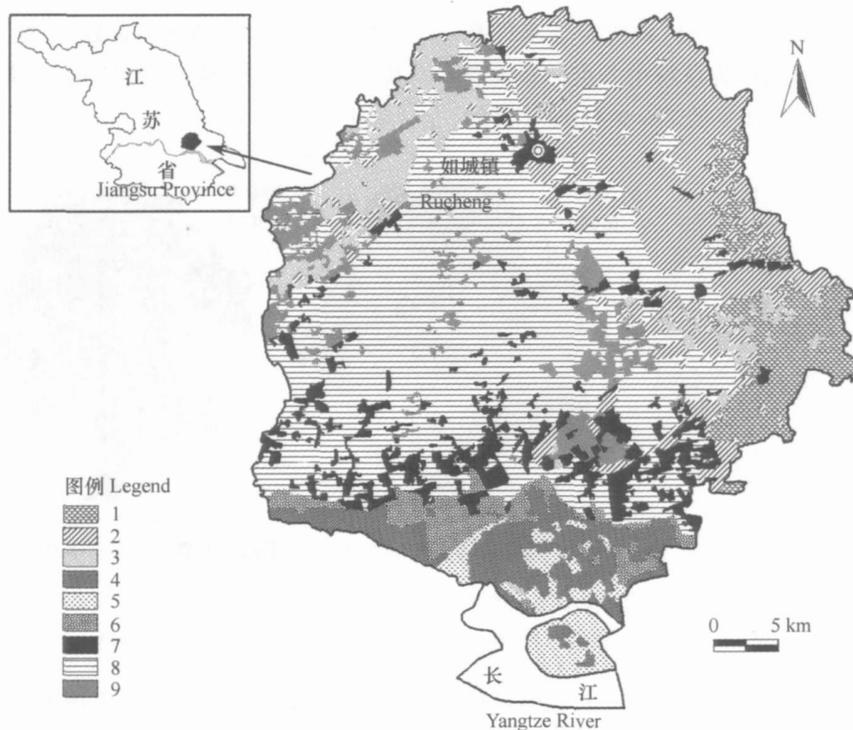
1.1 研究区概况

如皋市地处长江三角洲平原北部,位于北纬 $32^{\circ}00' \sim 32^{\circ}30'$,东经 $120^{\circ}20' \sim 120^{\circ}50'$ 之间,属北亚热带湿润季风气候区,年均温 14.6°C ,年均降雨量 1060 mm ,蒸发量 1403 mm 。全市地形基本平坦,中部略高,南部略低,内部微有起伏。土壤成土母质主要由江淮冲积物、浅湖相沉积物和长江新冲积物组成,富含石灰⁽¹⁾。全市总面积 1593 km^2 ,有耕地面积 8.25 万 hm^2 ,人口约 145 万 ,人均耕地仅 0.06 hm^2 ,是全国人口密度最大、人均耕地面积最少的县级市之一,土地资源非常紧张,土地利用异常强烈。

境内土壤类型较为复杂,受成土母质影响明显。根据新的中国土壤系统分类检索方法^[8],如皋市土壤类型大致分为雏形土和人为土两个土纲,包括九

个土系^[9],土壤的空间分布格局见图 1。东北部和中西部为江淮冲积物发育而来的壤质混合型热性水耕暗色潮湿雏形土(东陈系)、砂质云母混合型热性普通筒育干润雏形土(郭园系)、砂质云母混合型热性石灰淡色潮湿雏形土(磨头系、桃园系),质地相对较粗。东部和西北部为浅湖相冲积物发育而成的壤质云母型热性普通筒育水耕人为土(白蒲系)、壤质混合型热性水耕暗色潮湿雏形土(搬经系),质地相对较细。南部为长江近代冲积物发育而来的壤质云母混合型热性石灰淡色潮湿雏形土(营防系、张黄港系)和粘质云母型热性石灰淡色潮湿雏形土(长青沙系),质地相对偏粘(图 1)。

全市种植结构 20 世纪 80 年代早期以“二旱一水、二年五熟、粮棉轮作”为主。20 世纪 90 年代中期以后棉花种植面积逐年减少,“二旱一水”的种植制度逐渐萎缩,代之以“麦(油)-稻”轮作为主的种植模式。同时蔬菜、水果、花木等经济作物种植面积比重上升。



1. 白蒲系, 2. 东陈系, 3. 搬经系, 4. 营防系, 5. 长青沙系, 6. 张黄港系, 7. 郭园系, 8. 磨头系, 9. 桃园系

1. Baipu soil, 2. Dongchen soil, 3. Banjing soil, 4. Yingfang soil, 5. Changqingsha soil, 6. Zhanghuanggang soil, 7. Guoyuan soil, 8. Motou soil, 9. Taoyuan soil

图 1 如皋市土壤图

Fig. 1 Soil map of Rugao County, Jiangsu Province

(1) 如皋县土壤普查办公室, 江苏省土壤普查办公室. 江苏省如皋县土壤志. 1987

1.2 土壤样品的采集和分析

本研究的土壤样品来自三个时期的耕作层,第一期为1982年全国第二次土壤普查所采集的土壤样品,共1514个。第二期在1997年,采样点位分布基本上与第二次全国土壤普查时一致,有适当增加,共1651个。2002年在突出重点的基础上,综合考虑各种主要土壤类型和不同土地利用方式,共采集了342个土壤样品,并采用GPS定位记录采样点的经纬度坐标。土壤样点均是在秋季作物收获后,冬季作物播种前的10月份采集,以避免当季施肥对土壤有效磷产生的影响,每个样点由约300m²耕地内的6~8处土壤混合而成。土壤有效磷的测定用0.5 mol L⁻¹碳酸氢钠浸提,钼锑抗比色法测定^[10]。

1.3 数据处理及空间分析方法

由于前两期样点没有经纬度坐标资料,所以参照孙维侠^[11]的研究将如皋市村级行政区划图(1998年前共有897个行政村,平均每村面积约1.7 km²)数字化,利用Arcinfo软件提取每个村的中心点坐标作为该村的采样点位置,用每个村内所有土壤样品有效磷含量的算术平均值作为该村中心点的有效磷含量,在此基础上得到1982年的776个和1997年的

809个样点进行空间数据处理和分析。本文采用地统计学软件GS+5.3进行半方差函数的计算和理论模型的拟合,再应用Arcview3.2中的Ordinary-kriging模块进行空间插值计算,绘制出各个年代土壤有效磷的空间分布图。将不同时期的空间分布图进行空间叠置分析,得到1982年到1997年和1997年到2002年土壤有效磷含量的差值空间分布图。利用SAS8.0软件进行方差分析比较不同土壤类型间和不同年代间土壤有效磷含量的统计性差异。

2 结果与讨论

2.1 农田土壤有效磷的空间变异特征

1982年全市土壤有效磷含量普遍较低,绝大部分处在缺磷^[5]的水平(<5 mg kg⁻¹),有效磷的高值区(>8 mg kg⁻¹)呈零星点状分布(图2)。南部的长青沙系含量最高(4.43 mg kg⁻¹),而含量最低的是位于中西部的磨头系、郭园系和桃园系,其含量分别较同期的平均水平(3.51 mg kg⁻¹)低了十分之一左右,其他土系有效磷含量接近或略高于平均水平(表1)。

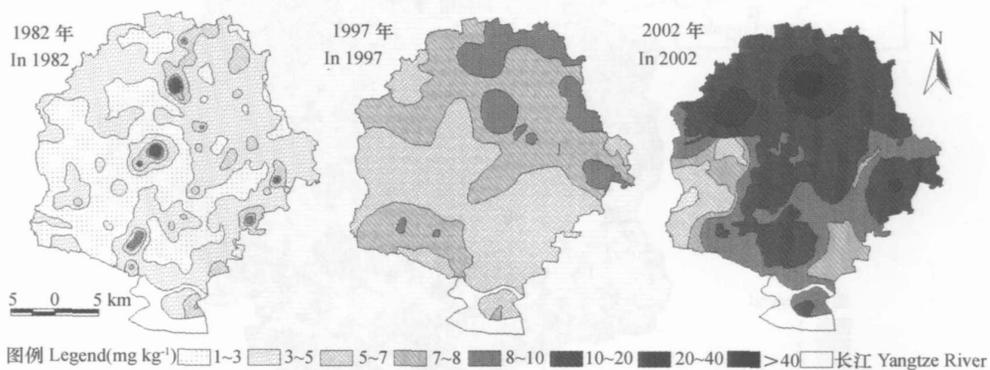


图2 如皋市三个不同年代有效磷含量分布图

Fig. 2 Spatial distribution of soil available P in Rugao County in three historical stages

1997年全市土壤有效磷含量总体上有明显的增加,但还是处在中下水平(5~10 mg kg⁻¹)。从空间分布来看(图2),西北部的搬经系、东北部的东陈系和东部的白蒲系含量相对较高。其中东陈系平均含量最高(表1),达到7.64 mg kg⁻¹,而南部的营防系土壤有效磷含量最低,较同期平均水平(6.73 mg kg⁻¹)低了60%,其余土系均接近平均水平。

2002年土壤有效磷含量的增长更为明显,北

部、中部和东部大片地区土壤有效磷水平达到中上水平(10~20 mg kg⁻¹),部分地区甚至达到好(20~40 mg kg⁻¹)或极好(>40 mg kg⁻¹)的水平(图2)。其中,东陈系和搬经系土壤的有效磷含量最高,分别为19.5 mg kg⁻¹和18.43 mg kg⁻¹,白蒲系和郭园系较同期平均水平(12.43 mg kg⁻¹)略高,而其余土系则较平均水平低了8%~28%(表1)。

总体来说,尽管三个时期土壤有效磷有各自变

化的特点,但在空间分布格局上大体相似。主要表现为北部的东陈系和搬经系还有东部的白蒲系土壤

有效磷一直相对较高,而分布于中西部的磨头系、郭园系等相对较低。

表 1 不同时期如皋市农田土壤有效磷含量

Table 1 Influence of soil series and years on soil available P in Rugao County

土系名称 Soil series	1982 年 In 1982	1997 年 In 1997	2002 年 In 2002	1997 年较 1982 年增量 Difference between 1997 and 1982	2002 年较 1997 年增量 Difference between 2002 and 1997
	(mg kg ⁻¹)				
白蒲系 Baipu soil	4.02 abC	6.95abB	13.50 abcA	2.93	6.55
东陈系 Dongchen soil	4.13 abC	7.64 aB	19.50 aA	3.51	11.86
搬经系 Banjing soil	3.86 abC	6.99 abB	18.43 abA	3.13	11.44
营防系 Yingfang soil	3.41 abB	2.63 cC	9.20 bcA	- 0.78	6.57
长青沙系 Changqingsha soil	4.43 aB	7.19 abA	10.23 abcA	2.76	3.04
张黄港系 Zhanghuanggang soil	3.77 abC	6.77 abB	10.10 abcA	3.00	3.33
郭园系 Guoyuan soil	3.21 bC	6.55 bB	14.64 abcA	3.34	8.09
磨头系 Motou soil	3.13 bC	6.75 abB	8.84 cA	3.62	2.09
桃园系 Taoyuan soil	3.12 bC	6.94 abB	11.43 abcA	3.82	4.49
总平均 Average	3.51	6.73	12.43	3.22	5.70

注:同一列内平均之后的小写字母相同表示未达到 $p=0.05$ 水平上的显著性差异;同一行内平均值后的大写字母相同表示未达到 $p=0.05$ 水平上的显著性差异 Note: Means followed by the same letter in each column (lower case) or each row (in capital) are not significantly different at $p=0.05$ by Duncan's multiple range test

2.2 农田土壤有效磷的时间变异特征

从插值图(图 2)中所获得的不同范围土壤有效磷分布面积比例可看出,从 1982 年到 2002 年的这 20 a 间,如皋市土壤有效磷高含量的面积比例一直呈增加趋势。1982 年,全市约有 90% 面积的土壤有效磷含量小于 5 mg kg^{-1} (图 3)。从 1982 年到 1997 年间近 98% 的土壤有效磷含量明显增加,平均总增长量达 3.22 mg kg^{-1} (表 1),达到显著性差异($p < 0.001$),每年增长约 0.2 mg kg^{-1} 。有效磷含量低于 5 mg kg^{-1} 的土壤面积几乎没有了, $5 \sim 10 \text{ mg kg}^{-1}$ 的土壤从 1982 年的占全市总面积的 9.7% 上升到 99% 左右(图 3)。从 1997 年到 2002 年间,约 94.3% 的土壤有效磷增加了,平均总增长量更明显,达 5.70 mg kg^{-1} (表 1),每年增长约 1.1 mg kg^{-1} 。含量在 $10 \sim 20 \text{ mg kg}^{-1}$ 的土壤从 0.8% 上升到 53.2%,还有近 10% 的土壤含量大于 20 mg kg^{-1} (图 3)。

从三期样品的描述性统计结果及含量变化范围(图 3)看到,1982 年和 1997 年土壤有效磷的变异系数(分别为 79.8% 和 43.7%)较 2002 年(106.7%)明显要低。土壤有效磷含量的变化范围前者也较后者小得多(图 3)。

经过方差分析发现除了不同时代和土壤类型间有效磷含量有显著性差异($p < 0.05$)外,两者还存在明显的交互作用($p < 0.05$),表明土壤有效磷随时间的变异在不同的土壤类型上是不同的。1982 年到 1997 年间,除了营防系土壤有效磷含量减少了 0.78 mg kg^{-1} 外,其余土系均有不同程度的增加。其中,原本含量较低的桃园系、磨头系和郭园系增长最快,含量均增长了 1 倍以上,增幅在 $3.3 \sim 3.8 \text{ mg kg}^{-1}$ 之间,其余土系的增长也达到了显著性差异($p < 0.05$)。自 1997 年到 2002 年,各个土系有效磷含量均有提高。其中,东陈系、搬经系增幅最大,平均增长量均达到 10 mg kg^{-1} 以上,而磨头系、张黄港系和长青沙系增长幅度较小,但也达到显著性差异($p < 0.05$),其余土系则介于两者之间。

另外,不同年代土壤有效磷差值分布图上也体现了不同土壤类型有效磷含量随时间的演变(图 4)。在 1997 年与 1982 年的差值图上,东北部-中西部-西北部的东陈系、磨头系、桃园系、郭园系和搬经系分布区土壤有效磷大多增加 $3 \sim 5 \text{ mg kg}^{-1}$,一些地区能达到 $5 \sim 8 \text{ mg kg}^{-1}$,但也有局部地区含量减少。南部的营防系、长青沙系和东部的白蒲系分布

区有效磷大多增加 $0 \sim 3 \text{ mg kg}^{-1}$, 也有小部分地区含量出现下降。在 2002 年与 1997 年的差值分布图上则出现了另一种分布状况, 东部 - 东北部 - 西北部的白蒲系、东陈系和搬经系分布区有效磷含量明显增加, 增加区域呈以某一高值区为中心的一系列

同心圆状分布, 增加范围以 $5 \sim 30 \text{ mg kg}^{-1}$ 为主, 局部甚至超过 30 mg kg^{-1} 。而位于广大中西部的磨头系分布区土壤有效磷含量的增加缓慢, 西部一些地区仅增加 $0 \sim 3 \text{ mg kg}^{-1}$, 还有占总面积 6% 的土壤有效磷出现降低。

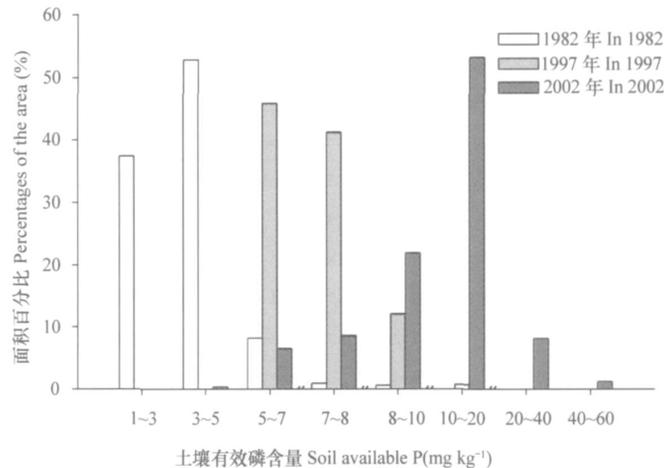


图 3 如皋市农田土壤有效磷不同级别含量面积百分比统计

Fig. 3 Statistics in percentage of areas of soils of different grades in soil available P in Rugao County

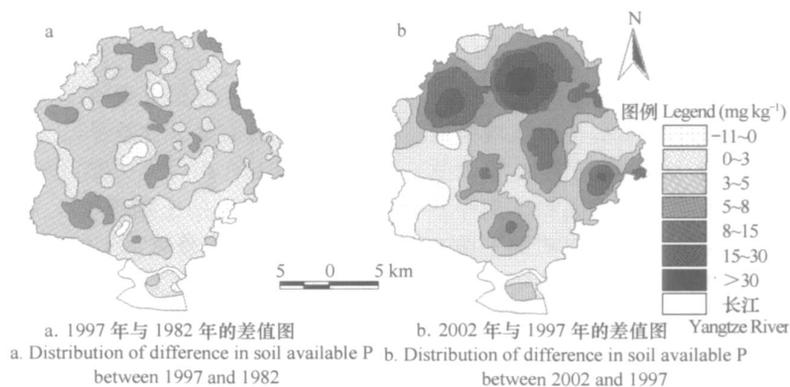


图 4 不同年代间土壤有效磷差值空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of differences in soil available P between different time periods

2.3 土壤有效磷演变的影响因素分析

2.3.1 施肥管理的影响 从总的变化趋势来看, 施肥管理是 20 a 来如皋市土壤有效磷演变的主要原因。由于如皋市主要为石灰性土壤, 作物对磷肥的当季利用率低, 施用的磷肥大部分积累于土壤中。从不同时期全市化学磷肥的平均施用量来看, 1982 年如皋市磷肥平均使用量^[11]为 60 kg hm^{-2} , 到了 1997 年升至 179 kg hm^{-2} , 有了大幅度的提高, 2002 年为 159 kg hm^{-2} , 有些许降低, 但依然在较高的水

平上。导致这段时期以来, 土壤有效磷一直呈增长的趋势。

国内外许多研究表明, 施用有机肥料可以提高土壤有效磷^[12,13], 一方面是有有机肥本身含有大量的有效磷, 另一方面是有机物质矿化分解释放有效磷, 同时在有机质腐解过程中所产生的有机酸类物质可以溶解土壤中难溶性磷。在东部的白蒲系分布区, 据统计^[11]1990 年至 1998 年间, 当地生猪存栏量由 7 万头左右增加至 10 万头左右, 其后又不断地增

加,这无疑增加了土壤有机肥的来源,可能是白蒲系在近年来土壤有效磷增加较明显的原因(图4)。

除了有机肥的影响外,秸秆还田也对提高土壤中的有效磷含量有一定贡献。但是,因秸秆中含磷量相对较少,故秸秆还田配合施以磷肥,能显著提高土壤有效磷水平与作物对磷的吸收^[14]。据统计,自20世纪80年代初开始到20世纪90年代中期,玉米秸秆还田在如皋的中西部地区生产中得到大面积实施,还田面积逐年增加,最高时还田面积占该地区耕地面积的60%(2.6万 hm^2)^[15]。如磨头系和郭园系分布区,当时夏季旱作(主要为玉米)秸秆大部分都回田,同时配合磷肥的施用,所以这一时期中西部的大片土壤有效磷含量增加较快,而1997年后该地区秸秆还田面积迅速减少,其有效磷含量增长趋缓(表1、图4)。

2.3.2 土壤利用方式的影响 除了施肥的影响外,土地利用方式的变化也是不可忽视的。20世纪80年代初期,中西部地区的土地利用主要为旱作,但其后随着农田水利建设投入的加强、市场经济的发展和农村劳动力的大量转移,棉花和玉米种植面积逐年减少,水田面积逐渐增加,20世纪90年代后期至21世纪初,无论中西部地区还是东部地区,“麦(油)-稻”轮作均已成为主要种植模式。据统计全市在20世纪80年代初,水稻种植面积约2.3万 hm^2 左右,至1990年迅速增加至3.3万 hm^2 ,1998年面积增加至4万 hm^2 以上,之后则相对平稳,保持在3.3~4万 hm^2 之间,而增加的面积绝大多数是在中西部地区⁽¹⁾。根据研究,在大量粗有机物如作物残茬、秸秆存在下,旱地变为水田,以磷酸钙盐形态为主的土壤淹水后,磷的有效性也有所提高^[16]。这可能是该市20世纪80年代至90年代中西部地区土壤有效磷增加较快的另一个原因。而东部地区土地利用方式变化不大,施肥情况大体相似,这一阶段土壤有效磷变化相对较小(图4)。

从不同年代有效磷含量的空间分布图上,也可以看出土地利用方式的影响。1982年,如皋市土壤有效磷含量总体较低,高值区主要出现在一些大的城镇周围,这主要是因为当时城镇周围的农业生产以种植蔬菜为主,长期的蔬菜种植和大量施用人粪尿,导致土壤有效磷含量增加较快^[17],明显高于其他土壤(图2)。而在1997年的空间分布图上,许多城镇周边的高值区消失了(图2),这是由于随着经济的发展、城市的扩张,城镇周围的蔬菜地转化为建

筑用地。

此外,1997年以后,由于经济的发展,种植结构发生了较大的变化,一些经济作物如花木、蔬菜、瓜果等的种植面积逐年上升,这些经济作物中,花木和蔬菜主要分布在该市至南通的204国道沿线地区,而瓜果主要分布在南部地区,如长青沙西瓜种植基地。这些作物管理精细,有机肥和化肥的投入也较大,导致土壤有效磷明显增加。

2.3.3 土壤性质的影响 土壤性质对土壤有效磷的影响主要表现为土壤质地的影响。在三期样品中,由浅湖相冲积物发育而来的质地相对较细的白蒲系和搬经系在同期样品中有效磷含量均相对较高,而由江淮冲积物发育而来的质地较粗的磨头系和桃园系土壤有效磷含量一直处于中下水平。

同时,位于南部的由长江近代冲积物发育而来的长青沙系和营防系,养分含量高,但由于土壤结构粘重,虽然保水保肥性强,但磷素释放较慢。并且它们的成土母质受长江冲积物影响,钙离子含量丰富,在碱性环境下有很强的固磷作用,降低了磷的有效性。这较好地解释了20a来长青沙系和张黄港系土壤有效磷增长幅度一直较小,营防系土壤甚至在早期出现了下降的现象(表1)。

2.3.4 土壤有效磷的演变趋势及环境风险评价

自20世纪80年代初以来,如皋市农田土壤耕层有效磷水平有了较大提高,尤其是种植经济作物的土壤提高幅度更大。土壤有效磷水平的提高增加了土壤磷向水体流失的风险,农田土壤可能成为水体中磷的重要来源。农田土壤中磷进入地表和地下水体的途径主要有3种,即地表径流、侵蚀和淋溶(渗漏或亚表层径流)^[18-20],其中地表径流和土壤侵蚀被广泛认为是主要途径,然而自20世纪90年代以来,关于磷素经淋溶进入地下或地表水体的报道逐渐增多。Hesketh等^[18]提出了发生土壤磷素淋溶的“突变点”(Change Point),认为当土壤Olsen-P含量小于“突变点”值时,发生土壤磷素的淋溶不明显;反之,当土壤Olsen-P含量大于“突变点”值时,就会发生明显的磷素淋溶。张甘霖等^[21]研究了南京城市土壤磷素淋溶的“突变点”,得出该类土壤Olsen-P的“突变点”值为 25 mg kg^{-1} 。采用全市三个时期有效磷的平均值做趋势回归分析得到拟合的方程(图5),参考上述突变点的临界值,经过计算表明,大约经过24a,土壤中有效磷含量将达到这一突变

点,有可能会对当地水体产生危害。实际上如皋市农田土壤地下水位不足 1m 的占耕地面积的 1/2 左

右,土壤质地较南京城市土壤更砂,达到对水体产生危害性的临界值的时间可能会更短。

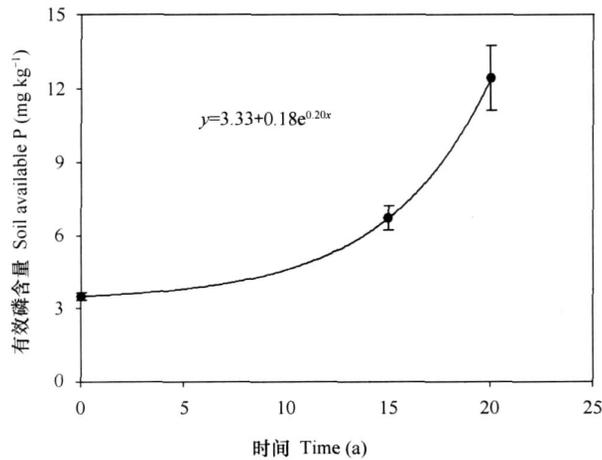


图 5 有效磷的演变趋势及拟合方程

Fig. 5 Trend of evolution of soil available P and on the spot fitted equation

3 结 论

对江苏省如皋市农田土壤有效磷时空变异特征的研究表明,尽管各时期空间分布上有一定变化,但总体上保持不断上升的趋势。虽然不同土壤类型上有效磷的时间变异特征不同,但除了南部的营防系早期出现下降但近年来有一定回升外,其余土系均遵循不断上升的总体规律。这种时空变异特征的出现与施肥管理、土地利用方式的变化和土壤质地等因素有关。从分析结果看,磷肥的施用是引起土壤有效磷升高的主要原因。鉴于土壤类型的不同,施肥产生的效果有所差异,应根据土壤有效磷的水平指导施肥。同时值得注意的是,由于有效磷含量的提高,磷素通过淋溶途径进入水体的风险大大增加。

尽管通过本研究对如皋市农田土壤有效磷的时空变异特征及其影响因素有了一定了解,但为了更好地进行土壤中磷素养分有效管理,有必要深入了解该市不同类型土壤 20 a 来磷素的累积和形态转化状况,这对指导当地磷肥的施用、生态环境的保护均有重要意义,也是今后在该地区开展磷素动力学研究的重要方向。

参 考 文 献

[1] 胡霭堂. 植物营养学. 北京:北京农业大学出版社,1995. 48 ~

53. Hu A T. Plant Nutrition Science (In Chinese). Beijing: Beijing Agriculture University Press, 1995. 48 ~ 53

- [2] 刘付程,史学正,潘贤章,等. 太湖流域典型地区土壤磷素含量的空间变异特征. 地理科学,2003,23(1):77~81. Liu F C, Shi X Z, Pan X Z, *et al.* Characteristic of spatial variability of total phosphorus in soil of the typical area of Taihu Lake watershed (In Chinese). *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(1): 77 ~ 81
- [3] 张庆利,史学正,潘贤章,等. 江苏省金坛市土壤肥力的时空变化特征. 土壤学报,2004,41(2):315~319. Zhang Q L, Shi X Z, Pan X Z, *et al.* Characteristics of spatio-temporal changes of soil fertility in Jintan County Jiangsu Province (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 315 ~ 319
- [4] 郭旭东,傅伯杰,陈利顶,等. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征—变异函数与 Kriging 插值分析. 地理学报,2000,55(5):555~566. Guo X D, Fu B J, Chen L D, *et al.* The spatio-temporal variability of soil nutrients in Zunhua Plain of Hebei Province: Semivariogram and kriging analysis (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 555 ~ 566
- [5] 张世熔,黄元仿,李保国,等. 黄淮海冲积平原区土壤有效磷、钾的时空变异特征. 植物营养与肥料学报,2003,9(1):3~8. Zhang S R, Huang Y F, Li B G, *et al.* Temporal-spatial variability of soil available phosphorus and potassium in the alluvial region of the Huang-Huai-Hai Plain (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(1): 3 ~ 8
- [6] 吕旭忠,李保国,胡克林,等. 鄂尔多斯不同地形下土壤养分的空间变异. 土壤与环境,2002,11(1):32~37. Lu Y Z, Li B G, Hu KL, *et al.* Spatial variability of soil nutrients with different landforms on Erds Plateau (In Chinese). *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(1): 32 ~ 37
- [7] 黄绍文,金继运,左余宝,等. 陵县试区土壤有效磷、钾养分的演变浅析. 土壤肥料,2004,(4):7~9. Huang S W, Jin J Y, Zuo Y

- B, *et al.* Temporal variability of soil phosphorus and potassium nutrients in Lingxian experimental region (In Chinese). *Soil Fertilizer*, 2004, (4): 7~9
- [8] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类检索. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001. Cooperative Research Group on Chinese Soil Taxonomy. Key to Chinese Soil Taxonomy (In Chinese). Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001
- [9] 邹忠, 杨荣清, 丁峰, 等. 江苏省如皋市长寿现象与土壤环境关系研究初探. *土壤*, 2005, 37(2): 89~94. Zou Z, Yang R Q, Ding F, *et al.* Relationship between longevity and environment in Rugao County of Jiangsu Province (In Chinese). *Soils*, 2005, 37(2): 89~94
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. Analytical Methods of Soil and Agronomic Chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [11] 孙维侠, 黄标, 杨荣清, 等. 长江三角洲典型地区农田土壤速效钾时空演变特征及其驱动力. *南京大学学报*, 2005, 41(6): 648~657. Sun W X, Huang B, Yang R Q, *et al.* Spatio-temporal variability of exchangeable potassium in agricultural soils and its driving factors in a typical area of Yangtze River Delta region (In Chinese). *Journal of Nanjing University*, 2005, 41(6): 648~657
- [12] 倪吾钟, 孙羲, 杨肖娥, 等. 有机无机配施对土壤中磷的有效性和水稻生长及产量的影响. *土壤通报*, 1990, 21(4): 167~169. Ni W Z, Sun X, Yang X E, *et al.* Effect of organic-inorganic fertilization on phosphorus availability in soil and growth and yield of rice (In Chinese). *Journal of Soil Science*, 1990, 21(4): 167~169
- [13] Sharply A N, Smith S J. Mineralization and leaching of phosphorus from soil incubated with surface-applied and incorporated crop residue. *J. Environ. Qual.*, 1989, 8(1): 101~106
- [14] 徐凤花, 刘永春, 王伟东. 秸秆还田的增磷作用及对植株全磷含量干物质积累的影响. *黑龙江八一农垦大学学报*, 1997, 9(3): 1~5. Xu F H, Liu Y C, Wang W D. The function of improving phosphate level and the effect of increasing phosphate level or adding dry materials of plant by returning straw to soil directly (In Chinese). *J. Heilongjiang August First Land Reclamation University*, 1997, 9(3): 1~5
- [15] 朱静, 黄标, 孙维侠, 等. 长江三角洲典型地区农田土壤有机质的时空变异特征及其影响因素. *土壤*, 2006, 38(2): 158~165. Zhu J, Huang B, Sun W X, *et al.* Temporal variation and influence factors of soil organic matter of the farmland in a typical area of the Yangtze River Delta region (In Chinese). *Soils*, 2006, 38(2): 158~165
- [16] 熊毅, 李庆逵. 中国土壤. 北京: 科学出版社, 1987. Xiong Y, Li Q K. *China Soils* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1987
- [17] 张国印, 王丽英, 孙世友, 等. 土地利用方式对土壤质量性状的影响. *河北农业科学*, 2004, 8(1): 1~5. Zhang G Y, Wang L Y, Sun S Y, *et al.* Effect of different land use on soil quality factors (In Chinese). *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2004, 8(1): 1~5
- [18] Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching. *J. Environ. Qual.*, 2000, 29: 105~110
- [19] Tunney H, Carton O T, Brookes P C, *et al.* Phosphorus loss from soil to water. UK: CAB International, 1997. 253~271
- [20] Heckrath G, Brookes P C, Bultun P R, *et al.* Phosphorus leaching from containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment. *J. Environ. Qual.*, 1995, 24: 904~910
- [21] Zhang GL, Burghardt W, Yang J L. Chemical criteria to assess risk of phosphorus leaching from urban soils. *Pedosphere*, 2005, 15(1): 72~77

SPATIO-TEMPORAL VARIATION OF SOIL AVAILABLE PHOSPHORUS AND ITS INFLUENCING FACTORS

—A CASE STUDY OF RUGAO COUNTY, JIANGSU PROVINCE

Liao Jingjing¹ Huang Biao^{2†} Sun Weixia² Zou Zhong³ Su Jianping³ Ding Feng³ Huang Yao¹

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

(2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(3 Center of Agricultural Technique Service and Extension, Rugao, Jiangsu 226500, China)

Abstract To study spatio-temporal variation of soil available phosphorus in farmland soils may provide some scientific basis for rationalizing fertilization and identifying key regions for control of agricultural non-point phosphorus pollution. Rugao County, Jiangsu Province was chosen as an object for a case study to analyze spatio-temporal variation of soil available P at three time periods. Results show that spatial distribution of soil available P varied remarkably in the 20 years' period from 1982 to 1997 and to 2002, on the whole showing a continuous rising trend, which, however, differed from soil series to soil series. In the Loam Aquatic cambosols (Yinfang) in the southern part of the area, soil available P increased in recent years after experiencing a decrease in the middle of the 1990s, and in the other soils it showed a rising trend, different in extent within each time period. In the sandy Aquatic Cambosols (Motou and Taoyuan) derived from river alluvium in the mid-western part of the area it increased more

slowly than in the other soils in recent years ,meanwhile in the loam Aquatic Cambosols (Dongchen) ,also developed from river alluvium ,in the northeastern part and the loam Aquatic Cambosols (Banjing) derived from lacustrine sediment in the northwestern part of the area it increased very fast . Fertilization ,land utilization and soil properties were found to be the main factors affecting spatio-temporal variation of soil available P. Based on the data of soil available P figured out with a certain fitting equation , it is anticipated that soil available P in the area may reach the critical value undermining the water bodies in the region in another 24 years.

Key words Soil available P ;Spatio-temporal variation ;Influencing factors ;Rugao County of Jiangsu Province