

天津市土壤磷素状况的研究*

刘先觉 张鹤航

(天津农学院)

天津市位于华北平原的东北部，总面积为11660平方公里。有棕壤、褐土、潮土、湿土、盐土和水稻土等六个土类。潮土约占总面积的75%；分步在山地丘陵和洪积平原上的褐土约占7%，这两类土壤是我市承担种植业的主要土地资源。据第二次土壤普查资料，有机质含量在1%以上的土壤占84.5%；全氮在0.075%以上的占51.4%；速效钾比较丰富。速效磷普遍缺乏，按全国分级标准进行统计，速效P<5 ppm占53.2%，5—10ppm占27.2%，>10ppm占19.6%，显然，多数土壤速效磷已低于需磷的临界标准。本项研究的目的是探讨天津地区主要土类磷素的储量、化学形态及其与有效性的关系，为提高土壤供磷水平以及合理施用磷肥提供科学依据。

一、材料与方法

供试土壤有潮土中的普通潮土、盐化潮土、湿润土和盐化湿润土四个亚类，褐土则侧重于蓟县耕地面积较大的潮褐土。样本一般是近期未施或少施矿质磷肥的地块。为摸索磷肥在土壤中的转化趋势，还采集了近几年施磷肥较多的农田土样进行对比分析，同时作了田间试验以观察土壤中磷的动态。采样深度一般为0—20厘米。进行了下列项目的测定：土壤全磷、速效磷、有机磷、分级磷以及pH、 CaCO_3 含量**；土壤有效磷库($0.5M\text{NaHCO}_3$ 连续浸提)和有机质(磷酸浴加热— $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 容量法)。

二、结果与分析

(一) 土壤全磷

天津市主要土壤类型的全磷含量比较丰富(表1)。褐土全磷量为0.05—0.16%，其中以潮褐土含量最高，平均为0.14%；淋溶褐土因土壤母质种类繁多，全磷量差异较大。潮土全磷量大致在0.10—0.25%之间，各亚类的平均值为0.13—0.18%，是全磷量较高的土类。总的看来，大体上是从山麓平原到冲积平原有逐步增加的趋势。这与土壤的风化程度、磷素的自然淋溶、沉积和重新分布有关。

人类的生产活动会引起土壤全磷量的局部变异。例如西郊区小南河的土壤，凡近村的熟化度高的土壤全磷量为0.261%，而远离村庄的肥力较低的地块只有0.153%。从0—50厘米土层内全磷的垂直分布看，0—20厘米土层内最高，20厘米土层以下逐渐降低，但变化幅

*本工作得到天津市土壤普查办及蓟县农林局的大力支持，特此致谢。

**全磷、速效磷、有机磷、分级磷以及pH、 CaCO_3 含量的测定均根据中国土壤学会农化专业委员会编《土壤农业化学常规分析方法》。

表1

天津市主要土类全磷和速效磷含量*

| 土壤类型 | 全 磷 (P_2O_5 , %) | | | 速 效 磷 (P, ppm) | | |
|---------|---------------------|-------------|-------|----------------|----------|------|
| | 样品数 | 含量范围 | 平均值 | 样品数 | 含量范围 | 平均值 |
| 淋溶褐土 | 8 | 0.05~0.154 | 0.133 | 8 | 0.9~6.5 | 3.1 |
| 石灰性褐土 | 3 | 0.08~0.153 | 0.128 | 3 | 1.4~10.1 | 5.6 |
| 褐土性土 | 4 | 0.130~0.147 | 0.139 | 4 | 1.0~8.0 | 4.7 |
| 潮 褐 土 | 11 | 0.126~0.164 | 0.140 | 11 | 3.6~15.7 | 7.4 |
| 普通潮土 | 42 | 0.083~0.231 | 0.146 | 46 | 0.2~49.6 | 8.6 |
| 湿 潮 土 | 10 | 0.108~0.144 | 0.133 | 14 | 1.0~10.8 | 4.3 |
| 盐 化 潮 土 | 12 | 0.122~0.221 | 0.158 | 12 | 0.3~20.7 | 7.0 |
| 盐化湿润土 | 15 | 0.104~0.247 | 0.178 | 5 | 0.1~10.0 | 4.1 |
| 滨海盐土 | 10 | 0.052~0.200 | 0.106 | — | — | — |
| 水 稻 土 | 5 | 0.127~0.173 | 0.157 | 5 | 3.7~28.2 | 12.9 |

* 表内部分数据来源于天津市土壤普查资料

度不大，平均值为 $0.135 \pm 0.011\%$ ；同时，不同肥力土壤的中下层，其全磷含量相差无几。所有这些都说明耕作和施肥对耕层的影响最大。

土壤全磷标志着土壤磷素的总储量，全磷高并不一定意味着土壤供磷水平高^[1,2]。但从我市的土壤情况来看，土壤全磷与速效磷之间有一定的正相关（潮土， $r = 0.842^{**}$ ， $n = 18$ ；褐土， $r = 0.694^*$ ， $n = 8$ ），因而可把全磷作为衡量土壤磷素营养水平高低的参考指标。

（二）土壤无机磷的形态

根据张守敬的分级体系，土壤无机磷可分为水溶性磷(H_2O-P)、磷酸铝盐(A1-P)、磷酸铁盐(Fe-P)、磷酸钙盐(Ca-P)和闭蓄态磷酸盐(O-P)。由表2可知，我市土壤中磷素的组成以无机磷为主，在褐土中占全磷的72.7—83.8%，在潮土中占74.2—86.4%，在水稻土中占73.4—81.9%。Ca-P在各类土壤中所占比重最高，例如在潮土中占全磷的39.2—66.3%，在褐土中占33.4—51.1%。A1-P的含量较少，在潮土中占全磷1—12%。在褐土中占2—8%，它与水溶性磷含量的趋势基本一致。Fe-P的含量也较少，但以褐土稍高，约占全磷的10—15%；潮土变异性较大，低者不足全磷的0.1%，高者可达5—6%。从总的的趋势来分析，Ca-P和Fe-P的分布规律大致相反，即从山麓平原的褐土到冲积平原的潮土，Ca-P递增，Fe-P递减；滨海平原成陆时间较短，母质风化程度低，Ca-P更显增高，Fe-P含量甚微。O-P的含量在无机磷中居第二位，约占全磷量的15—25%，蓟县城关公乐亭一带的典型水稻土剖面，O-P含量最高，占全磷30%以上。

关于磷肥施入土壤后各级磷的转化情况，曾在西郊区潮土上进行了试验。小麦播后一个月取土样分析（表3），初步表明随着施肥量的增加， H_2O-P 、A1-P和Fe-P的含量均有提高，且与速效磷有一定的相关性；Ca-P中除磷酸一钙和二钙有显著差异外，其他形态的磷酸钙盐变化不明显。说明磷肥进入土壤后，可溶性磷有向钙磷转化的趋势，但水溶性磷和铝磷含量仍较高，二者之和超过速效磷。这种趋势与表2中部分样点由于近几年施入磷肥较多而使A1-P保持较高水平是一致的。

关于无机磷中各种形态磷酸盐的有效性问题，一般认为闭蓄态磷几乎为无效态磷，而非闭蓄态磷的活性则视各地土壤性状的不同而异。为此根据23个标本的数据，用多元回归分析分别对潮土和褐土进行统计，得出速效磷(y)对A1-P(x_1)、Fe-P(x_2)和Ca-P(x_3)的组合

土 壤 磷 素 分 级

(单位: P, ppm)

| 采样地点 | 土壤类型 | 有机质(%) | CaCO ₃ (%) | pH | 全磷 | | | H ₂ O-P | | | Al-P | | | Fe-P | | | Ca-P | | | O-P | | | 无机磷 | | | 有机磷 | | |
|------|--------|----------|-----------------------|------|------|------|------|--------------------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|-----|------|-------|-----|------|-------|
| | | | | | 含量 | 占全P% | 速效磷 | 含量 | 占全P% | 占无机P% | 含量 | 占全P% | 占无机P% | 含量 | 占全P% | 占无机P% | 含量 | 占全P% | 占无机P% | 含量 | 占全P% | 占无机P% | 含量 | 占全P% | 占无机P% | 含量 | 占全P% | 占无机P% |
| 鹤县 | 潮褐土 | 1.38 微 | 7.83 | 7.17 | 15.7 | 7.3 | 1.02 | 1.22 | 63.3 | 8.8 | 10.5 | 12.1 | 16.9 | 20.2 | 239 | 33.4 | 39.8 | 170 | 23.7 | 28.3 | 601 | 88.8 | 130 | 18.1 | | | | |
| 鹤县 | 潮褐土 | 1.28 微 | 7.73 | 5.77 | 7.6 | 0.5 | 0.09 | 0.12 | 20.4 | 3.5 | 4.9 | 52.5 | 9.1 | 12.5 | 220 | 38.2 | 52.5 | 126 | 21.9 | 30.0 | 419 | 72.7 | 175 | 30.4 | | | | |
| 鹤县 | 潮褐土 | 1.08 微 | 7.90 | 5.50 | 4.8 | 0.5 | 0.09 | 0.11 | 15.2 | 2.8 | 3.4 | 51.2 | 9.3 | 11.4 | 281 | 51.1 | 62.5 | 102 | 18.5 | 22.7 | 450 | 81.8 | 114 | 20.7 | | | | |
| 宝坻 | 潮土 | 1.361.10 | 8.20 | 6.50 | 10.4 | 1.9 | 0.29 | 0.40 | 31.8 | 4.9 | 6.6 | 41.8 | 6.4 | 8.7 | 255 | 39.2 | 52.9 | 152 | 23.4 | 31.5 | 483 | 74.2 | 166 | 25.6 | | | | |
| 武清 | 潮土 | 1.122.48 | 8.24 | 6.11 | 7.5 | 1.0 | 0.16 | 0.19 | 20.1 | 3.3 | 3.8 | 32.6 | 5.3 | 6.2 | 328 | 53.6 | 62.1 | 147 | 24.0 | 27.8 | 529 | 86.5 | 93 | 15.2 | | | | |
| 静海 | 盐化潮土 | 1.254.35 | 8.35 | 5.75 | 5.0 | 1.9 | 0.33 | 0.40 | 12.0 | 2.1 | 2.5 | 0.5 | 0.1 | 0.1 | 373 | 64.9 | 78.8 | 86 | 15.0 | 18.2 | 473 | 82.3 | 111 | 19.3 | | | | |
| 宁河 | 盐化潮土 | 0.892.90 | 8.50 | 5.33 | 1.4 | 0 | 0 | 0 | 5.0 | 0.9 | 1.2 | 15.2 | 2.9 | 3.6 | 317 | 59.4 | 76.0 | 80 | 15.0 | 19.2 | 417 | 78.2 | 114 | 21.3 | | | | |
| 南郊 | 盐化湿潮土 | 1.744.50 | 8.42 | 7.12 | 12.1 | 2.5 | 0.34 | 0.44 | 18.6 | 2.5 | 3.3 | 3.0 | 0.4 | 0.5 | 418 | 56.3 | 73.2 | 129 | 17.4 | 22.6 | 571 | 76.9 | 182 | 24.5 | | | | |
| 宝坻 | 湿潮土 | 1.49 0.9 | 8.18 | 5.76 | 2.5 | 0.5 | 0.09 | 0.11 | 9.7 | 1.7 | 2.2 | 39.4 | 6.9 | 8.9 | 381 | 66.3 | 86.4 | 134 | 23.3 | 30.4 | 441 | 76.6 | 127 | 22.0 | | | | |
| 武清 | 潮土* | 1.67 — | 8.18 | 8.90 | 28.2 | 23.5 | 2.6 | 3.1 | 109 | 12.2 | 14.5 | 47.2 | 5.3 | 6.3 | 357 | 40.1 | 47.6 | 214 | 24.1 | 28.5 | 750 | 84.3 | 133 | 14.9 | | | | |
| 东郊 | 盐化湿潮土* | 1.59 — | 8.62 | 7.00 | 18.2 | 14.5 | 2.1 | 2.5 | 50 | 7.2 | 8.7 | 2.6 | 0.4 | 0.5 | 352 | 50.3 | 61.2 | 156 | 22.3 | 27.1 | 575 | 82.2 | 125 | 17.9 | | | | |
| 西郊 | 盐化潮土** | 2.156.80 | 8.11 | 9.19 | 38.8 | 20.6 | 2.2 | 2.8 | 33.8 | 3.7 | 4.6 | 13.4 | 1.5 | 1.8 | 410 | 44.6 | 55.9 | 256 | 27.9 | 35.4 | 734 | 79.9 | 250 | 27.2 | | | | |
| 西郊 | 盐化潮土** | 1.926.30 | 8.21 | 8.49 | 23.0 | 9.4 | 1.1 | 1.5 | 24.8 | 2.9 | 3.9 | 5.7 | 0.7 | 0.9 | 421 | 49.6 | 65.7 | 180 | 21.2 | 28.1 | 641 | 75.5 | 200 | 23.6 | | | | |
| 鹤县 | 水稻土 | 2.18 — | 7.96 | 7.37 | 28.2 | 15.0 | 2.1 | 2.5 | 77.5 | 10.5 | 12.9 | 72.6 | 9.9 | 12.1 | 206 | 28.0 | 34.2 | 232 | 31.5 | 38.5 | 603 | 81.9 | 195 | 26.5 | | | | |
| 宁河 | 水稻土 | 2.41 — | 8.30 | 5.53 | 3.7 | 8.0 | 0.15 | 0.2 | 16.1 | 2.9 | 4.0 | 18.1 | 3.3 | 4.5 | 281 | 50.8 | 69.2 | 90 | 16.3 | 22.2 | 406 | 73.4 | 141 | 25.5 | | | | |

* 近期施用矿质磷肥较多

** 多年施用有机肥料

表3

矿质磷肥在土壤中的转化*

单位: P, ppm

| 处 理 | H ₂ O-P | Al-P | Fe-P | O-P | Ca _{1, 2} -P | Ca ₃ -P | 磷灰石 | 有机磷 | 全磷 | 速效磷 |
|---------------------------------------|--------------------|------|------|-----|-----------------------|--------------------|-----|------|-----|------|
| 对 照 | 1.8 | 16.3 | 4.7 | 100 | 100 | 47.5 | 330 | 96 | 560 | 7.5 |
| 4斤/亩(p ₂ O ₅) | 2.5 | 17.3 | 5.3 | 98 | 110 | 48.3 | 330 | 100 | 575 | 10.3 |
| 8斤/亩(p ₂ O ₅) | 4.2 | 19.4 | 6.7 | 102 | 151 | 47.5 | 332 | 93.8 | 580 | 13.7 |
| 12斤/亩(p ₂ O ₅) | 6.0 | 21.3 | 7.8 | 100 | 179 | 47.5 | 336 | 96.3 | 583 | 15.8 |

* Ca-P分级方法: 浙江农业大学土壤教研组编, 土壤中无机磷分组的系统测定(内部资料), 1975。

效应, 求出了三元回归方程:

潮土 $\hat{y} = -6.36 + 0.498x_1 - 0.0585x_2 + 0.0187x_3$, 方差分析结果, F值为 4.78*, 经F检验速效磷与 Al-P、Fe-P、Ca-P 总的相关显著。通过偏回归平方和显著性检验, $F_1 = 17.2^{**}$, $F_2 = 0.58$, $F_3 = 0.72$ 。显而易见, 在 Al-P、Fe-P 和 Ca-P 对速效磷的影响中, 以磷酸铝盐的作用最大, 达到极显著水平, 磷酸铁盐和磷酸钙盐的贡献都不显著。

褐土 $\hat{y} = 9.57 + 0.385x_1 - 0.118x_2 - 0.0138x_3$, 方差分析结果, F值为 67.1**, 说明速效磷与 Al-P、Fe-P 和 Ca-P 总的相关非常显著。通过偏回归平方和显著性检验, $F_1 = 63.7^{**}$, $F_2 = 14.3^*$, $F_3 = 0.886$ 。结果表明, 褐土中磷酸铝盐与速效磷的关系最密切, 其次是磷酸铁盐, 而磷酸钙盐不显著。

(三) 土壤有机磷

由表 2 得知, 绝大多数土壤有机磷含量在 100ppm 以上。其中褐土为 133 ± 25.7 ppm。潮土为 133 ± 31.6 ppm。西郊区小南河乡多年施用有机肥熟化度高的农田, 有机磷可达 200—250ppm, 主要土类的有机磷含量约占全磷的 15—25%。影响有机磷含量的主要因素是有机质。根据两类土壤的统计分析看, 土壤有机质与有机磷含量在潮土上达到极显著水平 ($r = 0.772^{**}$, $n = 15$), 但褐土不显著 ($r = 0.560$, $n = 8$)。土壤中有机 C 与有机 P(C/P) 之比偏低, 大致为 50~100: 1, 这表示土壤中不大可能产生磷的生物固定^[3]。

关于有机磷对速效磷的贡献问题, 经统计发现褐土不显著 ($r = 0.200$, $n = 8$), 潮土极显著 ($r = 0.751^{**}$, $n = 15$), 它表明在潮土区有机磷可能是速效磷的给源之一。

(四) 土壤速效磷

我市绝大多数土壤为石灰性土壤, 实践证明应用 Olsen 方法测定速效磷比较合适。例如对西郊潮土区 17 个点土壤速效磷与小麦产量的相关分析, 其显著性很好, 直线回归方程为 $\hat{y} = 257.1 + 5.891x$ ($r = 0.754^{**}$, $n = 17$)。从土壤类型看, 水稻土的速效磷含量最高, 平均为 12.9ppm; 潮土为 4.1—8.6ppm; 褐土为 3.1—7.4ppm(表 1)。从地理位置看, 近郊区普遍高于各县, 如东郊区菜园性潮土最高可达 106ppm, 有些县的速效磷含量甚微。根据天津市 12 个郊区、县的 209 个乡镇土壤普查资料统计, 各区县速效磷的平均值(加权法)悬殊很大, 其中以静海县最低(2.9ppm), 汉沽区最高(19.8ppm), 全市耕地土壤速效磷的加权平均值为 6.4ppm, 可见我市农田土壤基本上属于缺磷土壤。

速效磷在土体中的垂直分布与有机质的变化趋势基本一致, 0—10 厘米最高, 20 厘米以下急剧减少。但不同肥力水平的土壤仍有明显差异, 肥沃地通体比一般地高 3.5—7 倍, 且除表层土壤累积外, 也有少量的活性磷向下层淋溶, 这说明耕作施肥对速效磷的影响极大。

为了进一步了解土壤速效磷总储量, 对不同磷素水平的 14 个土样进行了 10 次连续浸提测定, 并把 10 次连续浸提测定值的总和定为“土壤有效磷库”。从表 4 的结果看, 有效磷最低的

库容只有2.9ppm，高者可达116ppm。经统计速效磷含量与有效磷库的相关性十分显著， $r = 0.975^{**}$ (n=14)，相关方程为：

$$\hat{y} \text{ 有效磷库} = -1.474 + 4.388x \text{ 一次浸提磷}$$

表4

土壤有效磷库

单位：P, ppm

| 土样号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 总和 | 有效磷释放强度* (%) |
|-----|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|--------------|
| 11 | 15.7 | 15.0 | 9.5 | 9.5 | 8.0 | 5.7 | 7.1 | 3.4 | 3.4 | 3.0 | 80.2 | 19.4 |
| 12 | 3.6 | 2.6 | 1.9 | 2.5 | 0.6 | 0.8 | 0.5 | — | — | — | 12.5 | 28.8 |
| 13 | 10.4 | 7.4 | 5.6 | 4.6 | 3.9 | 3.4 | 4.0 | 1.4 | 2.1 | 1.6 | 44.7 | 23.3 |
| 14 | 28.2 | 24.0 | 15.0 | 11.6 | 8.0 | 6.3 | 8.2 | 4.6 | 4.9 | 4.8 | 116 | 24.4 |
| 15 | 3.7 | 2.0 | 1.4 | 1.5 | 0.8 | 0.5 | 0.5 | — | — | — | 10.4 | 35.6 |
| 16 | 1.4 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | — | — | — | — | — | — | 2.9 | 48.3 |
| 17 | 3.0 | 1.9 | 0.8 | 0.5 | 0.6 | 0.5 | — | — | — | — | 7.3 | 41.1 |
| 18 | 5.0 | 3.4 | 1.9 | 1.7 | 1.0 | 0.8 | 0.5 | — | — | — | 14.3 | 35.0 |
| 19 | 18.2 | 17.3 | 11.5 | 12.5 | 9.2 | 6.4 | 4.6 | 3.3 | 2.5 | 1.9 | 87.4 | 20.8 |
| 20 | 7.6 | 7.0 | 3.9 | 3.3 | 2.2 | 2.2 | 2.6 | 3.0 | 1.4 | 1.4 | 34.6 | 22.0 |
| 21 | 28.2 | 21.6 | 14.2 | 10.2 | 7.9 | 6.0 | 7.7 | 3.6 | 4.0 | 3.4 | 107 | 26.4 |
| 22 | 11.7 | 11.0 | 6.8 | 5.6 | 3.0 | 2.2 | 4.0 | 1.9 | 1.6 | 1.6 | 49.4 | 23.7 |
| 23 | 6.3 | 4.0 | 2.9 | 3.0 | 0.8 | 1.9 | 1.9 | 0.8 | 0.5 | — | 22.1 | 28.5 |
| 24 | 16.6 | 13.6 | 11.3 | 10.9 | 7.6 | 7.0 | 7.7 | 4.9 | 6.3 | 5.0 | 90.9 | 18.3 |

* 有效磷释放强度(%) = 速效磷(一次浸提值)/有效磷库(速效磷总和) × 100

土壤有效磷库容的大小能很好地反映土壤的供磷能力。从速效磷和有效磷库来比较，低磷土壤的库容小，一次浸提释放出的磷就达总量1/3~1/2，而高磷土壤则相反，有效磷库容大，一次浸提量不足总量的1/4~1/3，个别土样只有1/5。这说明低磷土壤活性磷的释放强度高，但供磷能力很低；高磷土壤的释放强度低，但持续时间长，表现出供磷能力强。

据前人研究，影响土壤速效磷的重要因子是土壤酸度和土壤有机质^[3]。我市多数土壤偏碱性，变化幅度不大，故可变因子主要是土壤有机质。根据表2中的资料分析，土壤速效磷与有机质有一定的正相关。经相关性检验，潮土为极显著($\hat{y} = 10.53x - 6.949$, $r = 0.783^{**}$, $n = 15$)，褐土达显著水平($\hat{y} = 15.05x - 10.32$, $r = 0.680^*$, $n = 8$)。从全市85个土壤剖面耕层样品的分析数据统计，土壤速效磷与有机质的相关性也十分显著($r = 0.410^{**}$)。这可能是因为有机质所含的有机磷可随矿化作用而转变成速效磷，同时有机质在分解过程中还可能产生有机络合物和有机酸，增强了石灰性土壤中固定态磷的活性。由此可见，施用有机肥对迅速提高我市土壤磷的有效性，确保农田磷素平衡是一项极其有效的措施。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院南京土壤研究所主编：中国土壤，378页，科学出版社，1979。
- [2] 蒋柏藩：土壤磷素状况和磷肥的转化及施用。土壤养分、植物营养与合理施肥，31—44页，农业出版社，1983。
- [3] 朱祖祥主编：土壤学（上册），211页，207页，农业出版社，1983。