

北京平谷区土壤有效磷的空间变异特征 及其环境风险评价

王淑英¹, 胡克林², 路 苹¹, 于同泉¹

(¹北京农学院农业应用新技术北京市重点实验室, 北京 102206; ²中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 【目的】探明土壤有效磷的空间分布, 为合理科学配方施肥和识别农业面源磷污染重点控制区提供依据。【方法】在北京郊区平谷区布设 1 058 个采样点, 测定其耕层 (0~20 cm) 与亚耕层 (20~40 cm) 土壤有效磷含量。应用地统计学方法对数据进行分析。【结果】平谷区耕层和亚耕层土壤有效磷的变异系数分别为 1.15 和 1.29, 均属强变异程度, 其平均含量分别为 32.80 和 9.74 mg·kg⁻¹, 耕层含量高于亚耕层, 表现出一定的表聚性。耕层和亚耕层有效磷的空间相关距离分别为 14.6 和 15.8 km。平谷区耕层土壤有效磷含量空间分布表现为: 低山区 > 平原区 > 山区, 主要与高程、土地利用方式及施肥量有关。亚耕层有效磷空间分布格局与耕层相似, 但其含量远小于耕层。耕层土壤有效磷含量超过临界值 (60 mg·kg⁻¹) 的概率为 70%~90% 的区域占研究区总面积的 1.9%, 主要分布在西北部的半山区。概率 < 20% 的区域占研究区总面积的 70.1%, 分散分布于东北部山区、东部半山区及中部、西南部平原区。【结论】平谷区果园、菜地和大田土壤磷素均有不同程度的盈余, 有机肥和化肥的大量投入是平谷区土壤有效磷含量高的主要原因。大华山镇中部及刘家店乡东南部部分区域作为农业面源磷污染的重点控制区, 应引起足够重视。

关键词: 土壤有效磷; 空间变异; 环境风险分析

Spatial Variability of Soil Available Phosphorus and Environmental Risk Analysis of Soil Phosphorus in Pinggu County of Beijing

WANG Shu-ying¹, HU Ke-lin², LU Ping¹, YU Tong-quan¹

(¹New Technological Laboratory in Agriculture Application in Beijing, Beijing Agricultural College, Beijing 102206;

²College of Resource and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193)

Abstract: 【Objective】 The objective of this study was to explore the spatial distribution of soil available phosphorus, and to provide a firm foundation for scientific formulated fertilizer and identify key regions for controlling agricultural non-point phosphorus pollution. 【Method】 One thousand and fifty eight soil samples were collected from Pinggu County of Beijing and analyzed for contents of available phosphorus in topsoil (0-20 cm) and subsoil (20-40 cm), respectively. The general statistics and geostatistics methods were used to analyze the data. 【Result】 The coefficients of variation of topsoil and subsoil were 1.15 and 1.29, respectively, which belonged to the strong degree of variability. The mean values of available phosphorus in topsoil and subsoil were 32.80 mg·kg⁻¹ and 9.74 mg·kg⁻¹, respectively, and the topsoil content was great than that of subsoil. The ranges of topsoil and subsoil available phosphorus were 14.6 km and 15.8 km, respectively. The spatial distribution of available phosphorus contents was in the order of low mountainous areas > plain areas > mountainous area, which was mainly affected by the elevation, land use types, and fertilizers application amount. The spatial distribution of subsoil phosphorus was similar with the topsoil, but its content was far lower than that in surface soil. The areas with 70%-90% probability which topsoil available phosphorus content exceeded the critical value (60 mg·kg⁻¹) was 1.9% of the whole areas, where mainly distributed in the north-western low mountainous areas of Pinggu County. The areas with < 20% probability of topsoil available phosphorus exceeding 60 mg·kg⁻¹ was 70.1% of the whole areas,

收稿日期: 2008-06-25; 接受日期: 2008-11-11

基金项目: 北京市教育委员会科技发展计划资助项目 (KM-200510020006)、北京市属市管高校人才强教计划资助项目

作者简介: 王淑英 (1972-), 女, 内蒙古赤峰人, 助理研究员, 硕士, 研究方向为土壤质量和植物营养。Tel: 010-80799077; E-mail: shuyingw@tom.com。通信作者胡克林 (1971-), 男, 湖北钟祥人, 教授, 博士, 研究方向为土壤空间变异和溶质运移。Tel: 010-62732412; E-mail: hukel@cau.edu.cn

where widely lied in north-eastern mountainous areas, eastern low mountainous areas and middle, south-western plain areas.

【Conclusion】 Soil phosphorus in the orchard, vegetable and field land has different degrees of accumulations. Organic manure and fertilizer application are main reasons resulting in higher soil available phosphorus contents in Pinggu County. The middle area of Dahuashan and the south-eastern area of Liujiadian town are the key regions for controlling agricultural non-point phosphorus pollution source.

Key words: soil available phosphorus; spatial variability; environmental risk analysis

0 引言

【研究意义】土壤有效磷是表征土壤供磷能力、确定磷肥用量和农业磷环境风险评价的重要指标^[1-2]。据 1980 年第二次全国土壤普查数据, 全国耕地中缺磷面积(有效磷含量 $<10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)约占 78%, 土壤普遍缺磷^[3]。近些年来, 随着对农业投入的不断加大, 施肥量增加, 土壤磷含量发生了明显变化。与 1980 年相比, 2000 年全国耕地有效磷含量增加了 6~8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 年均增加 11%, 缺磷面积降到 50%, 并相继在一些地区出现了磷素盈余的报道^[2,4-5]。土壤磷素的不断积累, 对生态环境构成了极大威胁。目前, 农业面源磷污染已经成为水体富营养化的主要来源^[6-9]。因此, 充分了解土壤有效磷的分布状况对合理管理土壤磷素及农业面源污染重点控制区的识别和治理具有重要意义。【前人研究进展】地统计学已经被证明是分析土壤性质空间分布特征及其变异规律最有效的方法之一。土壤有效磷含量空间变异性的研究越来越受到国内外学者关注^[10-15]。大多数研究表明, 土壤有效磷含量的变异系数比其它土壤养分大, 属中等或强变异程度, 具有较强的空间变异性, 反映了人为耕作管理措施的差异是其空间变异的主要因素。姜勇等^[12]和高义民等^[13]的研究结果表明, 农田尺度下土壤有效磷的空间变异性主要受施肥量的影响。赵彦锋等^[14]对城乡交错区的研究结果表明, 土壤有效磷含量空间变异性与土地利用方式关系密切。【本研究切入点】这些研究主要集中在平原区, 而对山地和平原交错区土壤有效磷的空间变异特征及农业磷环境风险评价的研究还不多见。大城市郊区具有服务城市及绿色生态屏障的重要功能, 近年来随着城市化进程的加快, 农业集约化程度和土地利用强度不断提高, 对土壤有效磷含量及其污染风险产生了重要影响^[16]。位于北京市东北部的平谷区, 地处燕山南麓与华北平原北端的相交地带, 由山地和平原两大地貌单元组成, 是北京市果品生产的重要基地, 由于山区果树管理中肥料投入量较大, 存在着可能由于土壤侵蚀所造成的磷素污染风险。【拟解决的

关键问题】本文采用地统计学方法, 研究了北京市平谷区耕层和亚耕层土壤有效磷的空间分布特征及其环境风险评价, 确定了农业面源磷污染的重点控制区, 旨在为城郊土壤养分科学管理及生态环境保护提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

平谷区位于北京市东北部, 地处燕山南麓与华北平原北端的相交地带, 东经 $116^{\circ}55' \sim 117^{\circ}24'$, 北纬 $40^{\circ}02' \sim 40^{\circ}22'$, 土地总面积 $1\,075 \text{ km}^2$, 地貌由北部、东部、南部山地和中部、西南部平原两大地貌单元组成, 地势由东北向西南倾斜, 中间平缓, 呈倾斜簸箕状(图 1)。海拔高度 $13 \sim 1\,230 \text{ m}$ 。植被覆盖率 51%。中山位于东北部四座楼一带, 植被以油松、侧柏、山杨等为主, 中低山、丘陵、岗台地围绕平谷镇的西北、北、东、东南呈半环带状分布, 是以桃园为主的果树分布带, 平原区分布于中部和西南部, 为主要粮、菜区。气候属暖温带大陆性季风气候区, 年均气

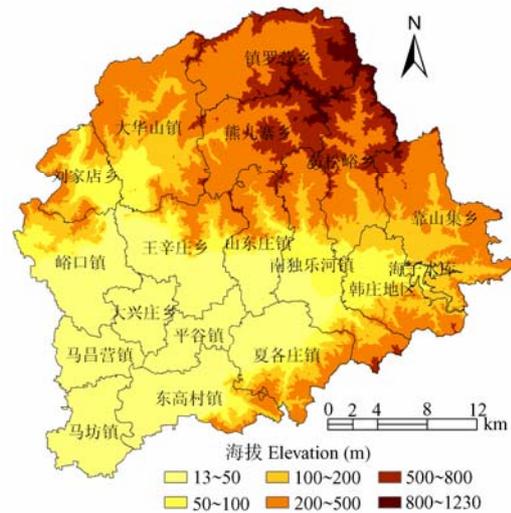


图 1 平谷区行政区及高程图

Fig. 1 Elevation and towns of Pinggu County, Beijing

温 11.5℃, 年无霜期 191 d, 年均降水量 639.5 mm, 其中约 75%集中在夏季。土壤类型为棕壤、褐土和潮土。农用地总面积 71 293 hm², 是北京郊区重要果品生产基地。

1.2 样品采集与分析

样点设计主要参照 1980 年全国土壤普查平谷区土壤的样点分布图和剖面位置记载表, 采用 400 m×400 m 网格与土地利用现状图 (只选择农用地, 包括耕地与园地) 叠加, 确定交叉样点, 再根据土壤类型和控制面积等分层抽样, 共确定了 1 058 个取样点 (图 2)。2005 年 9 月, 采用 GPS 定位, 在距每一样点 10 m 的范围内分别采集耕层 (0~20 cm) 和亚耕层 (20~40 cm) 两个土层各 5 份土样, 各层土样单独混匀后用四分法取 0.5 kg 土样带回实验室, 风干磨细后, 用 0.5 mol·L⁻¹ 碳酸氢钠浸提, 钼锑抗比色法测定土壤有效磷含量^[17]。

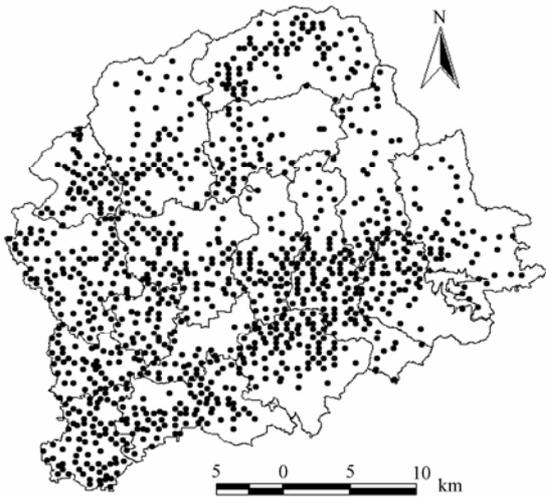


图 2 平谷区取样点分布图

Fig. 2 Sampling sites in Pinggu County

同时还对样点所在地块的土地利用方式、种植制度、作物品种、施肥状况等方面进行了实地调查。

1.3 概率克立格方法^[18]

设在区域 D 上取样并测定了某观测项目, 若区域 D 上的阈值或边界值为 Z , 则在 D 上的每个样品点 $x \in D$ 上定义一个 Z 的如下阶梯函数:

$$i(x; Z) = \begin{cases} 1 & \text{当 } x \text{ 点上的观测值 } Z(x) \leq Z \\ 0 & \text{当 } x \text{ 点上的观测值 } Z(x) > Z \end{cases} \quad (1)$$

则在区域 D 上的任一区域 $A \in D$ 内, 低于阈值 Z 的观测值 $Z(x)$ 所占区域 A 的比例可表示为:

$$\phi(A; Z) = \frac{1}{A} \int_A i(x; Z) dx \in [0, 1] \quad (2)$$

$\phi(A; Z)$ 是关于 $Z(x)$ 和 Z 的二元函数, 即小于阈值 Z 的全部 $i(x; Z)$ ($x \in A$) 的平均值。

某未知点 x_0 的估计值 $i^*(x_0; Z)$ 可表示为:

$$i^*(x_0; Z) = \text{Prob}\{Z(x) \leq Z \mid \text{周围数据}\} \quad (3)$$

而某待估域 A 的 $\phi(A; Z)$ 的估值 $\phi^*(A; Z)$ 可表示如下:

$$\phi^*(A; Z) = \frac{1}{A} \int_A \text{Prob}\{Z(x) \leq Z \mid \text{周围数据}\} dx \quad (4)$$

1.4 数据处理及分析

采用 SPSS (10.0) 进行常规统计分析; 半方差函数模型计算采用了地统计学软件 GS⁺ (7.0), 图形绘制及面积统计均采用 ArcGIS (8.3) 软件。

2 结果与分析

2.1 平谷区土壤有效磷的统计特征值

从表 1 中峰度和偏度系数可看出, 平谷区耕层土壤有效磷含量的分布较复杂, 既不服从正态分布, 也不服从对数正态分布, 表明耕层土壤受到外界的影响因素比较多。亚耕层有效磷服从对数正态分布。从变异系数来看, 耕层与亚耕层有效磷变异系数均较高, 分别为 1.15 和 1.29, 均属强变异程度, 这与已有的一些研究结果相同^[11,15]。有效磷变异系数高的原因可能有两方面, 一是与磷在土壤中的化学行为及施磷状况有关。因施入土壤中的磷移动性小, 当季利用率低, 使土壤中磷残留较多, 导致土壤中磷的分布不均; 二是与整个区域不同地区的地形、土壤类型、质地等土壤特性有关。

表 1 中耕层与亚耕层有效磷平均含量分别为 32.80 和 9.74 mg·kg⁻¹, 两个土层有效磷含量存在一定差异, 耕层有效磷含量高于亚耕层, 表现出一定的表聚性, 这与磷肥主要表施及磷素在土壤中易被固定有关。

2.2 平谷区土壤有效磷含量的空间结构分析

本研究分别选用了离差平方和最小即拟合度最好的指数模型和球状模型来描述耕层和亚耕层有效磷的空间结构, 结果见表 2。C₀ 为块金值, 表示由随机部分引起的空间异质性, Sill 为基台值, 表示系统内总的变异。C₀/Sill 表示由随机性因素所引起的异质性占总的空间异质性的程度。本研究区域内, 耕层有效磷

表 1 平谷区土壤有效磷含量的描述性统计

Table 1 The descriptive statistics of soil available phosphorus contents in Pinggu County ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

| 层次 Layers | 样点数 Sample points | 分布类型 Type of distribution | 偏度 ¹⁾ Skewness | 峰度 ¹⁾ Kurtosis | 均值±标准差 Mean±SD | 最小值 Min. | 最大值 Max. | 变异系数 CV |
|--------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------|-------------|-------------|------------|
| 0~20 cm | 1058 | 偏态 None | -0.68 | 1.80 | 32.80±37.77 | 0.02 | 328.59 | 1.15 |
| 20~40 cm | 1058 | lgN | 0.09 | 1.36 | 9.74±12.58 | 0.23 | 107.76 | 1.29 |

lgN 为对数正态分布。¹⁾ 偏度和峰度系数为对数转换后的值 lgN is lognormal distribution. ¹⁾ Skewness and Kurtosis are all Log values

表 2 平谷区土壤有效磷的半方差函数模型

Table 2 The semivariogram models of soil available phosphorus contents in Pinggu County

| 层次 Layers | 模型类型 Model | C_0 | Sill | C_0/Sill | 变程 Range (km) | R^2 |
|-----------|----------------|-------|-------|-------------------|---------------|-------|
| 0~20 cm | 指数 Exponential | 0.82 | 1.64 | 0.50 | 14.6 | 0.96 |
| 20~40 cm | 球状 Spherical | 70.9 | 181.9 | 0.39 | 15.8 | 0.95 |

的 C_0/Sill 比值为 50%，反映了平谷区耕层土壤有效磷的空间异质性是由成土母质、地形、土壤类型等区域因素和施肥、土地利用方式等随机性因素共同作用的结果，属中等程度的空间相关性。亚耕层有效磷的 C_0/Sill 比值较小，为 39%，反映了其空间异质性主要由区域因素引起的空间异质性程度大，而随机性因素对亚耕层土壤有效磷含量的影响相对较小。

变程也称之空间最大相关距离，从表 2 可以看出，耕层和亚耕层土壤有效磷含量的变程均较大，分别为 14.6 和 15.8 km。这与该研究区土壤有效磷含量主要受到成土母质、地形、土壤类型等区域因素的影响比较大有关，亚耕层土壤有效磷的空间相关范围略大于耕层，也说明了亚耕层受到随机性因素的影响相对较小。

2.3 平谷区土壤有效磷含量的空间分布特征

根据所得到的半方差函数模型，利用 Kriging 最优内插法，绘制了平谷区土壤有效磷含量的空间分布图。由图 3-a 与图 1 对比可知，耕层土壤有效磷含量具有明显的空间分布格局，总体表现为低山区 > 平原区 > 山区。有效磷含量最高 ($>80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的区域主要分布于西北部的低山区，包括大华山镇的中部、刘家店乡的东南部及峪口镇的西北部的一小部分区域，

该区域面积为 39.99 km^2 ，占研究区总面积的 4.21% (表 3)，该区域是平谷区重要的桃树种植区。有效磷含量最低 ($<10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的区域主要集中在分布在研究区东北部和东南部的山区，包括镇罗营乡的东部、熊儿寨乡的东部、黄松峪乡的北部及南独乐河镇的南部，该级别面积为 34.45 km^2 ，占研究区总面积的 3.63%。有效磷含量在 $40\sim60$ 和 $60\sim80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区域所占面积分别为 141.26 和 64.62 km^2 ，分别占研究区总面积的 14.87% 和 6.80%，该区域一部分出现在研究区西北部、西部、中部、东南部的低山、丘陵及山前岗台、阶地的果树分布密集区，包括大华山镇和刘家店乡的大部分区域、峪口镇东北部、王辛庄乡西北部、山东庄镇中部、黄松峪乡南部；另一部分出现在南部平原主要蔬菜种植区，包括平谷镇、东高村镇及大兴庄乡的部分区域。平谷区耕层土壤有效磷含量在 $10\sim40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区域所占面积最大，为 669.79 km^2 ，占全区总面积的 70.50%，分散分布在研究区的北部、东部的低山区及中部、东南部的平原区。

耕层有效磷含量 (y) 与亚耕层土壤有效磷含量 (x) 呈显著正相关 ($y=1.705x+12.578$, $r=0.604^{**}$)，亚耕层有效磷空间分布格局与耕层相似 (图 3-b)，其中

表 3 平谷区耕层与亚耕层土壤有效磷含量分级面积统计

Table 3 The areas and the percentage of topsoil and subsoil available phosphorus of different grades in Pinggu County

| 层次 Layers | | 分级标准 ¹⁾ Classification standards ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | | | | | |
|--------------|---------------------------|--|------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------|
| | | VI级 ≤ 10 | V级 $10\sim20$ | IV级 $20\sim40$ | III级 $40\sim60$ | II级 $60\sim80$ | I级 >80 |
| 0~20 cm | 面积 Area (km^2) | 34.45 | 327.29 | 342.50 | 141.26 | 64.62 | 39.99 |
| | 比例 Percentage(%) | 3.63 | 34.45 | 36.05 | 14.87 | 6.80 | 4.21 |
| 20~40 cm | 面积 Area (km^2) | 576.42 | 312.34 | 61.35 | 0 | 0 | 0 |
| | 比例 Percentage(%) | 60.7 | 32.9 | 6.5 | 0 | 0 | 0 |

¹⁾ 参照全国第二次土壤普查中平谷土壤有效磷含量的分级标准

¹⁾ There were based on the classification standards of soil available phosphorus contents of Pinggu County in the second soil survey of China

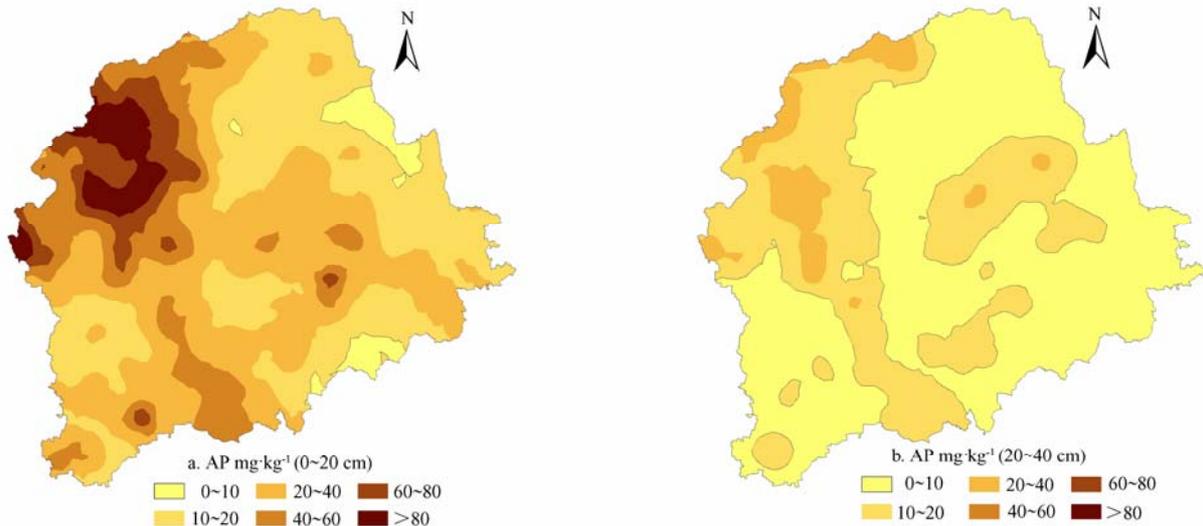


图3 平谷区耕层和亚耕层土壤有效磷含量的空间分布图

Fig. 3 Contour maps of soil available phosphorus contents in topsoil (0-20 cm) and subsoil (20-40 cm) in Pinggu County

有效磷含量 $< 10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区域所占面积最大, 为 576.42 km^2 , 占研究区总面积的 60.70%, 其它各级有效磷含量所占的比例均远低于耕层, 亚耕层有效磷含量低于耕层, 这与前面的分析结果一致。

2.4 平谷区土壤有效磷含量空间分布的影响因素

前面分析可知, 平谷区耕层土壤有效磷的空间异质性是由区域因素和随机性因素共同引起的。下面以耕层土壤有效磷为例来分析其影响因素。

首先, 高程影响土壤有效磷含量的空间分布。平谷区具有典型的半山区半平原的地形特征, 高程差别很大(图1)。高程为 $500\sim 1\,230 \text{ m}$ 的山区, 位于研究区的东北部, 该区域植被十分丰富, 但人口密度小, 土地利用强度小, 所以土壤有效磷含量较低。高程为 $50\sim 500 \text{ m}$ 的低山、丘陵及山前岗台、阶地, 分布于研究区西北部、西部、中部、东南部, 该区域的气候条件和土壤条件非常适合桃树的生长, 是平谷区以大桃为主的果树分布密集区, 农民生产态度积极, 对土壤投入较多, 有效磷含量普遍较高。平谷区中部及西南部为洪积冲积平原, 平谷镇是该区的中心, 人口密度较大, 平均 $1\,700 \text{ 人}/\text{km}^2$, 受人类活动的影响, 有效磷含量也较高。

其次, 土地利用方式和施肥量影响了平谷区土壤有效磷含量的空间分布。该区主要土地利用方式为果园、菜地和大田, 2005年3种土地利用方式面积分别为 $22\,487$ 、 $1\,558$ 和 $10\,670 \text{ hm}^2$, 分别占总农用地的 64.8% 、 4.5% 和 30.7% , 其中以大桃为主的果品生

产是该区的支柱产业和农民收入主要来源, 其种植面积和产量均居全国之首, 是中国桃的重要主产区^[19]。3种土地利用方式下的耕层土壤有机磷含量存在一定差异, 如表4所示, 其中果园和菜地有效磷含量显著高于大田, 这与施肥状况有密切关系。国内外一些研究结果表明, 施用有机肥能显著提高土壤有效磷含量, 且土壤有效磷的增加量高于化肥磷肥^[1,20]。其原因是: 一方面有机肥本身含有大量的有效磷, 另一方面有机物质矿化分解释放有效磷, 同时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。根据对该区施肥状况的调查统计结果中发现(表4), 3种土地利用方式中果园有机肥投入量最高, 平均为 $20.11 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其中 23% 果园投入 $24.04 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上, 59% 果园投入 $9.62\sim 24.04 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 还有 18% 的地块有机肥投入较少甚至不施有机肥。有机肥投入较高的区域主要分布大华山镇、峪口镇西部、山东庄镇中部以及南独乐镇中部, 此区域是桃树分布最密集的区域。有机肥投入较少的果园是北部山区和中部山前地带的部分区域。中西部和东部山区由于地形较复杂, 有机肥运输困难, 施用量最少。菜地主要分布在南部平原地区, 种植面积较小, 有机肥的投入量比果园稍低, 但总体水平也较高, 平均为 $16.91 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其中 73% 的菜地投入有机肥 $10.18 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。大田分布在中部平原地区, 90% 的地块不施用或很少施用有机肥, 有机肥平均施入量仅为 $2.00 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。果园化肥的投入量在3种利用方式中也是最高的, 平均 $1\,852.44 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 56% 的果园化

肥投入量在 $1\ 566.63\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上, 菜地化肥投入也较多, 平均 $1\ 572.51\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其中 70% 的地段化肥投入量在 $1\ 044.57\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上。相对而言, 大田化肥施用量较高, 平均 $1\ 030.09\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其中 75% 地块化肥投入量在 $515.61\sim 1\ 546.84\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 果园、菜地和大田

3 种土地利用方式来自有机肥和化肥的磷素 (P_2O_5) 平均用量分别为 194.27 、 163.50 、 $26.83\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其中果园和菜地的施磷量较高, 分别是大田施磷量的 7 和 6 倍, 由此可见, 有机肥和化肥的大量施用是平谷区果园和菜地耕层土壤有效磷含量高的主要原因。

表 4 平谷区不同土地利用方式下的施肥量及耕层土壤有效磷含量¹⁾

Table 4 Statistical results of topsoil available phosphorus contents and fertilizer application amount under different land-use types in Pinggu County

| 土地利用方式 Land-use types | 样点数 Sample points | 有效磷含量平均值 Mean value of available phosphorus ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 有机肥 Organic manure ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$) | 化肥 Fertilizer ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) | 来自有机肥和化肥的磷素(P_2O_5) P ₂ O ₅ come from organic manure and fertilizer ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) |
|--------------------------|----------------------|--|--|--|--|
| 果园 Orchard | 569 | 40.34 a | 20.11 | 1852.44 | 194.27 |
| 菜地 Vegetable land | 121 | 43.71 a | 16.91 | 1572.51 | 163.50 |
| 大田 Field | 360 | 17.72 b | 2.00 | 1030.09 | 26.83 |

¹⁾ 数据是在 2005 年 9 月对平谷区取样点所在地块的土地利用方式、种植制度、施肥量等进行的实地调查统计得来的

¹⁾The data was obtained from investigations and statistics of the land use, farming practices and fertilization in the Pinggu soil sampling areas in September, 2005

2.5 平谷区土壤有效磷含量的环境风险评价

果园、菜地和大田的所需的施磷量 (P_2O_5) 一般分别在 100 、 140 和 $10\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 左右即可满足高产的需要^[3,19]。平谷区 3 种土地利用方式的土壤施磷量均高, 均有不同程度的磷素盈余, 其中果园的磷素盈余量最高, 是所需施磷量的 2 倍左右。磷素在土壤中易被固定, 且移动性较小, 盈余的磷素主要积累在耕层土壤中。随着磷素的不断积累, 由于地表径流或土壤侵蚀等的作用, 其对水体环境污染的风险逐渐增大。因此, 一些学者提出将土壤有效磷含量 $60\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 作为农田磷对水体环境威胁的临界指标^[2,21-22]。虽然平谷区耕层土壤有效磷的平均含量为 $32.8\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 1), 低于上述的临界值, 但从前面的分析可知, 土壤有效磷含量分布很不均匀, 仍有 $104.61\ \text{km}^2$ 的耕层土壤有效磷含量在临界值之上 (表 3), 该区域占全区总面积的 11.01%, 主要集中分布在平谷区西北部的大华山镇的大部分地区、刘家店乡的东南部及峪口镇的西北部 (图 3-a), 其中大华山镇是平谷大桃的发源地, 种植面积和产量均高居全区第一位, 据对该镇的调查统计, 该镇土壤施肥量最高, 有机肥为 $30.18\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 化肥为

$2\ 383.48\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 来自有机肥和化肥的磷素为 $288\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 是桃树所需施磷量的 3 倍左右, 土壤磷素的过量施入, 导致土壤磷素大量累积, 其耕层土壤有效磷含量平均含量高达 $143.02\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是临界值 2 倍多, 对水体环境风险构成极大的威胁。

基于以上分析, 利用概率克里格方法, 以 $60\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为临界值, 进一步对平谷区耕层土壤有效磷含量的环境风险性进行评价, 结果如图 4 和表 5 所示。从图 4 可知, 有效磷含量超过临界值的概率空间分布总的趋势为: 低山区 > 平原区 > 山区, 与前面有效磷含量的空间分布趋势一致。结合图 3-a 发现, 有效磷含量高的区域其超过临界值的概率也高, 而有效磷含量低的区域其超过临界值的概率也低。概率区间为 70%~90% 的区域位于平谷区西北部低山区, 包括大华山镇中部及刘家店乡东南部一小部分区域, 面积为 $17.96\ \text{km}^2$, 占研究区总面积的 1.9%, 该区域应作为农业面源磷污染的重点控制区。概率为 60%~70% 的区域分布于东北部重点控制区的外围及峪口镇西北部, 面积为 $87.88\ \text{km}^2$, 占总面积的 9.25%。概率为 40%~60% 和 20%~40% 的区域位于东北部部分区域及平原

表 5 平谷区耕层土壤有效磷含量超过临界值 ($60\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的概率统计

Table 5 Probability of topsoil available P exceeding $60\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in Pinggu County

| | 概率 Probability | | | | | |
|---------------------------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | <20% | 20%~40% | 40%~60% | 60%~70% | 70%~80% | 80%~90% |
| 面积 Area (km^2) | 665.99 | 178.29 | 63.34 | 87.88 | 13.18 | 4.78 |
| 比例 Percentage(%) | 70.10 | 18.77 | 6.67 | 9.25 | 1.39 | 0.50 |

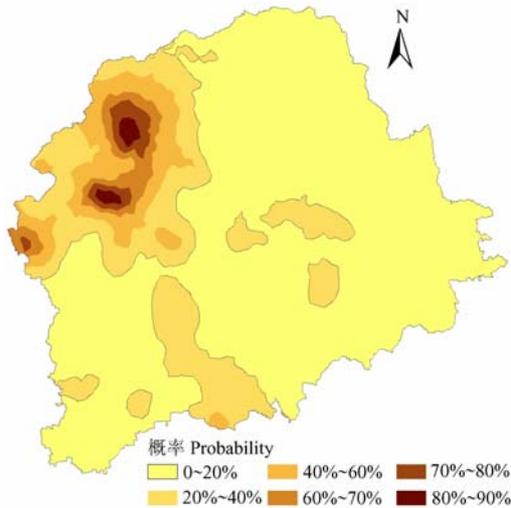


图 4 平谷区耕层土壤有效磷含量超过临界值 ($60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的概率图

Fig. 4 Probability map of topsoil available P exceeding $60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in Pinggu County

区的中部、南部、西南部,面积分别为 63.34 和 178.29 km^2 ,分别占总面积的 6.67% 和 18.77% 。概率 $<20\%$ 的区域所占面积最大,为 665.99 km^2 ,占总面积的 70.10% ,分散分布在东北部山区、东部半山区及中部、西南部平原区,这部分区域可作为平谷区有效磷含量对环境威胁的低风险区。

3 讨论

研究发现平谷区土壤有效磷含量主要受高程、土地利用方式、施肥量等因素影响,其中果园和菜地的施磷量多,其有效磷含量明显高于大田,这与以往的一些研究结果一致^[5,12-15]。两个土层中,耕层土壤有效磷含量高于亚耕层,两层有效磷含量存在极显著的正相关,表明土壤磷素已发生明显的淋溶。这与以往国内多数研究者的普遍认识不一致^[8-9]。由于磷肥主要施在耕层,磷素在土壤易被固定,因此多数人认为土壤磷沿剖面垂直向下淋溶的可能性很小,地表径流和土壤侵蚀被认为是土壤磷素进入地表和地下水的主要途径。然而,近些年来,国外的研究者在较黏重土壤和施用无机磷肥土壤中磷素淋溶至土体下部或淋溶进入地下或地表水体的报道逐年增多,得出农田土壤中磷素以淋溶形式损失的量与以地表径流和土壤侵蚀形式损失的量相当或淋溶量更大^[23-24]。国内学者刘建玲等^[1]在菜地过量施用磷肥和有机肥的研究中也发现,土壤

磷素明显发生淋溶。本研究也证实了这点,因此,建议在评价农田磷流失风险时,应考虑土壤磷素淋溶的影响。

1980 年全国第二次土壤普查平谷区耕层土壤有效磷平均含量为 $10.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,缺磷面积达到 781.15 km^2 ,占全区总面积的 82.20% ,土壤普遍缺磷。25 年后平谷区土壤有效磷含量发生了巨大的变化,耕层有效磷平均含量增加了 $22.76 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,缺磷面积下降到 34.45 km^2 ,仅占全区总面积的 3.63% ,土壤磷素普遍盈余。平谷区耕层土壤有效磷含量年均增长 91.04% ,远远高于全国耕地有效磷含量的增长速度^[3],这一点应引起高度重视。针对我国城市郊区目前农田土壤磷素累积量逐渐增加,尤其是保护地(果园、菜地)土壤磷素大量累积的现状,如何科学地评价农田面源磷污染对生态环境的影响、安全合理的施用磷肥并科学管理土壤磷养分尚需进一步探讨。

4 结论

平谷区耕层与亚耕层土壤有效磷变异系数分别为 1.15 和 1.29 ,均属强变异程度,平均含量分别为 32.80 和 $9.74 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,耕层含量远高于亚耕层,表现出一定的表聚性。结构分析表明,平谷区耕层和亚耕层土壤有效磷的空间相关距离分别为 14.6 和 15.8 km , $C_0/Sill$ 比值分别为 50% 和 39% ,反映了平谷区耕层土壤有效磷的空间异质性是由成土母质、地形、土壤类型等区域因素和施肥、土地利用方式等随机性因素共同作用的结果,而亚耕层有效磷空间异质性主要由区域因素引起的。

平谷区土壤有效磷的空间分布总体表现为低山区 $>$ 平原区 $>$ 山区。其中西北部大华山镇、刘家店乡北部及峪口镇部分地区含量最高,镇罗营乡东部、熊儿寨乡东部、黄松峪乡北部及南独乐河镇南部有效磷含量最低,其它地区含量普遍在 $10\sim 40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。耕层土壤有效磷含量的空间分布主要与高程、土地利用方式及施肥量有关。有机肥和化肥的大量投入是果园和菜地耕层土壤有效磷含量高的主要原因。3 种土地利用方式下的土壤磷素均有不同程度的盈余,耕层土壤有效磷含量超过环境风险临界值 ($60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的概率为 $70\%\sim 90\%$ 的区域占研究区总面积的 1.9% ,主要分布在西北部的半山区。概率 $<20\%$ 的区域占研究区总面积的 70% 左右,分散分布于东北部山区、东部半山区及中部、西南部平原区。大华山镇中部及刘家店乡东南部部分区域,作为农业面源磷污染重点控制区,

应引起足够的重视。

References

- [1] 刘建玲, 廖文华, 张作新, 张海涛, 王新军, 孟娜. 磷肥和有机肥的产量效应与土壤积累磷的环境风险评价. 中国农业科学, 2007, 40(5): 959-965.
- Liu J L, Liao W H, Zhang Z X, Zhang H T, Wang X J, Meng N. The response of vegetable yield to phosphate fertilizer and organic manure and environmental risk assessment of phosphorus accumulated in soil. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(5): 959-965. (in Chinese)
- [2] 鲁如坤, 时正元, 施建平. 我国南方 6 省农田养分平衡状况评价和动态变化研究. 中国农业科学, 2000, 33(2): 63-67.
- Lu R K, Shi Z Y, Shi J P. Nutrient balance of agroecosystem in six provinces in southern China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(2): 63-67. (in Chinese)
- [3] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护. 磷肥与复肥, 2003, 18(1): 4-8.
- Lu R K. The phosphorus level of soil and environmental protection of water body. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2003, 18(1): 4-8. (in Chinese)
- [4] 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. 应用生态学报, 2000, 11(3): 365-368.
- Lu J L, Zhang F S. Dynamics of soil P pool in a long-term fertilizing experiment of wheat-maize rotation II. Dynamics of soil Olsen-P and inorganic P. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(3): 365-368. (in Chinese)
- [5] 廖菁菁, 黄标, 孙维侠, 邹忠, 苏建平, 丁峰, 黄耀. 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. 土壤学报, 2007, 44(4): 620-628.
- Liao J J, Huang B, Sun W X, Zou Z, Su J P, Ding F, Huang Y. Spatio-temporal variation of soil available phosphorus and its influencing factors — A case study of Rugao County, Jiangsu Province. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(4): 620-628. (in Chinese)
- [6] Gburek W J, Sharpley A N, Heathwaite L, Folmar G J. Phosphorus management at the watershed scale: A modification of the phosphorus index. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29: 130-144.
- [7] McDowell R W, Sharpley A N. Approximating phosphorus release from soils to surface runoff and subsurface drainage. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30: 508-520.
- [8] 高超, 张桃林, 吴蔚东. 农田土壤中的磷向水体释放的风险评价. 环境科学学报, 2001, 21(3): 343-348.
- Gao C, Zhang T L, Wu W D. Risk evaluation of agricultural soil phosphorus release to the water bodies. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(3): 343-348. (in Chinese)
- [9] 全为民, 严力蛟. 农田面源污染对水体富营养化的影响及其防治措施. 生态学报, 2002, 22(3): 291-299.
- Quan W M, Yan L J. Effects of agricultural non-point source pollution on eutrophication of water body and its control measure. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(3): 291-299. (in Chinese)
- [10] Cahoon L B, Ensign S H. Spatial and temporal variability in excessive soil phosphorus levels in eastern North Carolina. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 69: 111-125.
- [11] 朱益玲, 刘洪斌, 江希流. 江津市紫色土中 N、P 养分元素区域空间变异性研究. 环境科学, 2004, 25(1): 138-143.
- Zhu Y L, Liu H B, Jiang X L. Investigation of the spatial variability of nitrogen and phosphorus in purple soils in Jiangjing City, Sichuan, China. *Environmental Science*, 2004, 25(1): 138-143. (in Chinese)
- [12] 姜勇, 梁文举, 张玉革. 田块尺度下土壤磷素的空间变异性. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2086-2091.
- Jiang Y, Liang W J, Zhang Y G. Spatial variability of soil phosphorus in field scale. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(11): 2086-2091. (in Chinese)
- [13] 高义民, 同延安, 胡正义, 王彩绒, 张树兰, 赵护兵. 黄土区村级农田土壤养分空间变异特征研究. 土壤通报, 2006, 37(1): 1-6.
- Gao Y M, Tong Y A, Hu Z Y, Wang C R, Zhang S L, Zhao H B. Spatial variability of soil nutrients in farmland of Loess Plateau. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(1): 1-6. (in Chinese)
- [14] 赵彦锋, 史学正, 于东升, 黄标, 王洪杰, 赵永存, Ingrid Oborn, Karin Blomback. 小尺度土壤养分的空间变异及其影响因素探讨—以江苏省无锡市典型城乡交错区为例. 土壤通报, 2006, 37(2): 214-219.
- Zhao Y F, Shi X Z, Yu D S, Huang B, Wang H J, Zhao Y C, Oborn I, Blomback K. Spatial variation of soil nutrients and its affecting factors at small scale—A case study of peri-urban areas in Wuxi Jiangsu Province. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(2): 214-219. (in Chinese)
- [15] 甘海华, 彭凌云. 江门市新会区耕地土壤养分空间变异特征. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1437-1442.
- Gan H H, Peng L Y. Spatial variability of nutrients in cultivated soils of Xinhui District, Jiangmen City. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(8): 1437-1442. (in Chinese)
- [16] Fu B J, Ma K M, Zhou H F, Chen L D. The effect of land use structure on the distribution of soil nutrients in the hilly area of the Loess Plateau, China. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(8): 732-736.
- [17] 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*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [18] Journel A G. Nonparametric estimation of spatial distribution. *Mathematical Geology*, 1983, 15(3): 445-468.
- [19] 孟月华, 李付国, 贾小红, 何跃东, 郝红梅, 张志刚, 陈清. 平谷桃园养分管理现状及其问题分析. *中国土壤与肥料*, 2006, (6): 54-56, 61.
- Meng Y H, Li F G, Jia X H, He Y D, Hao H M, Zhang Z G, Chen Q. Current situation and problem of conventional nutrient management in peach orchards of Pinggu. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2006, 6: 54-56, 61. (in Chinese)
- [20] Sharpley A N, McDowell R W, Kleinman P J A. Amount, forms and solubility of phosphorus in soils receiving manure. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68: 2048-2057.
- [21] Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29: 105-110.
- [22] 刘建玲, 李仁岗, 廖文华, 贾可, 孟娜, 崔哲. 白菜-辣椒轮作中磷肥的产量效应及土壤磷积累研究. *中国农业科学*, 2005, 38(8):1616-1620.
- Liu J L, Li R G, Liao W H, Jia K, Meng N, Cui Z. The yield response of vegetable to phosphate fertilizer and soil phosphorus accumulation in a Chinese cabbage-capsicum rotation. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(8): 1616-1620. (in Chinese)
- [23] McDowell R, Sharpley A, Brookes P, Poulton P. Relationship between soil test phosphorus and phosphorus release to solution. *Soil Science*, 2001, 166(2): 137-149.
- [24] McDowell R, Sinaj S, Sharpley A, Frossard E. The use of isotopic exchange kinetics to assess phosphorus availability in overland flow and subsurface drainage waters. *Soil Science*, 2001, 166(6): 365-373.

(责任编辑 李云霞)