

中国土壤有效磷的时空变化 (1990—2012)

马进川¹ 何萍^{1, 2, 3*}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 国际植物营养研究所北京办事处, 北京 100081; 3. 中国农业科学院与国际植物营养研究所植物营养创新研究联合实验室, 北京 100081)

摘要: 磷肥对作物产量的提高有着举足轻重的作用。本文利用 59,956 个土壤测试数据和 4,837 个田间试验数据对我国土壤有效磷的时空变化进行研究。结果表明, 从 1990 到 2012 年我国土壤有效磷含量呈上升趋势, 经济作物生产中磷肥的大量投入是导致土壤有效磷含量增加的主要因素。我国不同地区土壤有效磷含量差异显著, 迫切需要针对不同区域不同作物开展精准养分管理。

关键词: 土壤有效磷; 产量反应; 磷素养分管理

前言

磷 (P) 是作物生长所必需的矿质元素, 是集约化农业生产中获得高产不可或缺的元素。在低磷土壤中, 施用磷肥是保持土壤磷素养分供应的一种有效途径^[1]。磷是不可再生资源, 大量磷肥的施用导致全球磷矿储量的急剧减少。因此, 通过合理施肥, 提高磷素养分利用效率对合理利用磷矿资源至关重要。

土壤有效磷含量分析可以为磷肥的施用提供参考。在我国, 许多地区仍存在过量施肥问题并且已经引起了严重的环境问题^[2]。在农业生态系统中, 土壤磷素含量与土壤生产力紧密相关, 是衡量土壤肥力和品质的重要指标。磷肥施用直接影响土壤有效磷含量。为了保证土壤有效磷含量, 即使在不发达的国家也普遍施用磷肥^[3]。为保证粮食安全, 从上个世纪六十年代我国开始大量施用化学肥料, 包括磷肥^[4]。化肥的施用促进我国粮食产量的显著提高^[5], 然而磷肥的过量施用也导致了严重的环境问题, 如水体污染。研究表明在 2004 年我国平均磷素输入量为 1.26 公斤/亩、输出量为 0.95 公斤/亩, 导致了 0.31 公斤/亩的盈余^[2]。“三湖”水域研究表明, 滇池、太湖和巢湖磷素总负荷量的 30—60%、38—90% 和 40—52% 均来自农业^[6]。因此, 了解土壤磷素状况对合理的磷素养分管理、提高磷肥利用效率和减少非点源污染至关重要。已有研究主要在流域、省和农田水平对磷素状况进行研究^[7-11], 全国层面上关于土壤有效磷时空变化的研究尚少。因此, 本研究对土壤有效磷含量在时间和空间尺度的变化及磷肥产量效应进行研究。

1 材料与方法

1.1 数据来源

土壤有效磷和作物产量数据来源于 1990—2012 年国际植物营养研究所中国项目数据库。在本研究中, 我们从数据库中得到 59,956 个土壤有效磷含量数据和 4,837 个田间试验数据 (图 1)。所有土壤有效磷含量数据均来源于田间试验, 播种前采集 0—20 厘米的土层, 用 ASI 法对土壤有效磷含量进行测定^[12]。作物产量数据包括施用氮磷钾肥所得产量数据 (NPK, 氮磷钾施肥量根据土壤测试推荐) 和仅施用氮钾肥产量数据 (NK, 在 NPK 处理的基础上不施用磷肥)。

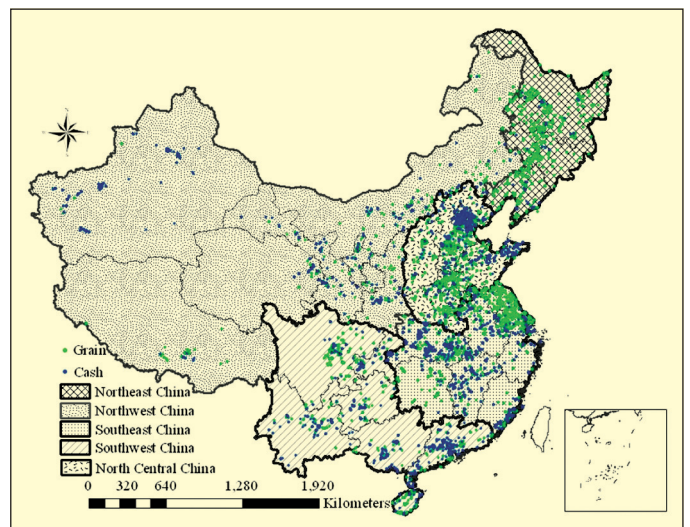


图 1 1990—2012 年试验点在五个区的分别 (其中 NE、NC、NW、SE 和 SW 分别代表东北、华北、西北、东南和西南)

为分析我国土壤有效磷含量的空间变化, 基于地理位置和行政区划将全国划分为五个区, 分别为: 东北、华北、西北、东南和西南。另外, 基于土地利用方式, 将每个区进一步划分为两个类型, 即粮食作物和经济作物类型区。粮食作物类型区指种植小麦、玉米、水稻, 经济作物类型区指种植马铃薯、大豆、蔬菜、水果、油菜籽、向日葵、棉花、糖类等经济作物。不同区域的土壤采样数量见表 1, 五个区的试验点信息参见前期研究^[13]。

1.2 数据处理

用 SPASS 13.0 对数据进行方差分析, 并由 Sigmpplot 12.0 作出相应的箱型图。用最小显著差数法 (LSD) 计算 0.05 水平下不同时期的平均值差。

2 结果分析

2.1 1990—2012 年农田土壤有效磷变化

研究表明, 从 1990 年到 2012 年土壤有效磷含量总体呈上升趋势, 线性回归分析表明, 其增长率为 1.51。为进一步分析影响土壤有效磷含量增长的主要因素, 我们根据土地利用类型进行研究。结果表明, 1990—2012 年粮食作物和经济作物土壤有效磷含量均呈增加趋势。基于线性回归分析, 粮食作物土壤有效磷含量增长率仅为 0.76, 与之相比经济作物同期大幅增加, 其增长率为 2.75(图 2)。施肥方面, 粮食作物平均施磷量为 5.47 公斤/亩 (P_2O_5) (0.67—24.00 公斤/亩 (P_2O_5)), 经济作物平均施磷量为 9.40 公斤/亩 (P_2O_5) (0.67—105.33 公斤/亩 (P_2O_5))。

表 1 我国不同地区和不同时期的试验观测数 (个)

项目	地区	全部作物		粮食作物		经济作物	
		1990s	2000s	1990s	2000s	1990s	2000s
土壤测试	东北	434	6986	403	5983	31	1003
	华北	2532	18063	2188	13009	344	5054
	西北	342	6964	105	2843	237	4121
	东南	546	17189	370	11887	176	5302
	西南	677	6223	584	3644	93	2579
相对产量	东北	62	847	44	771	18	76
	华北	80	1370	42	1261	38	109
	西北	96	577	24	174	72	403
	东南	193	840	119	637	74	203
	西南	84	688	39	421	45	267

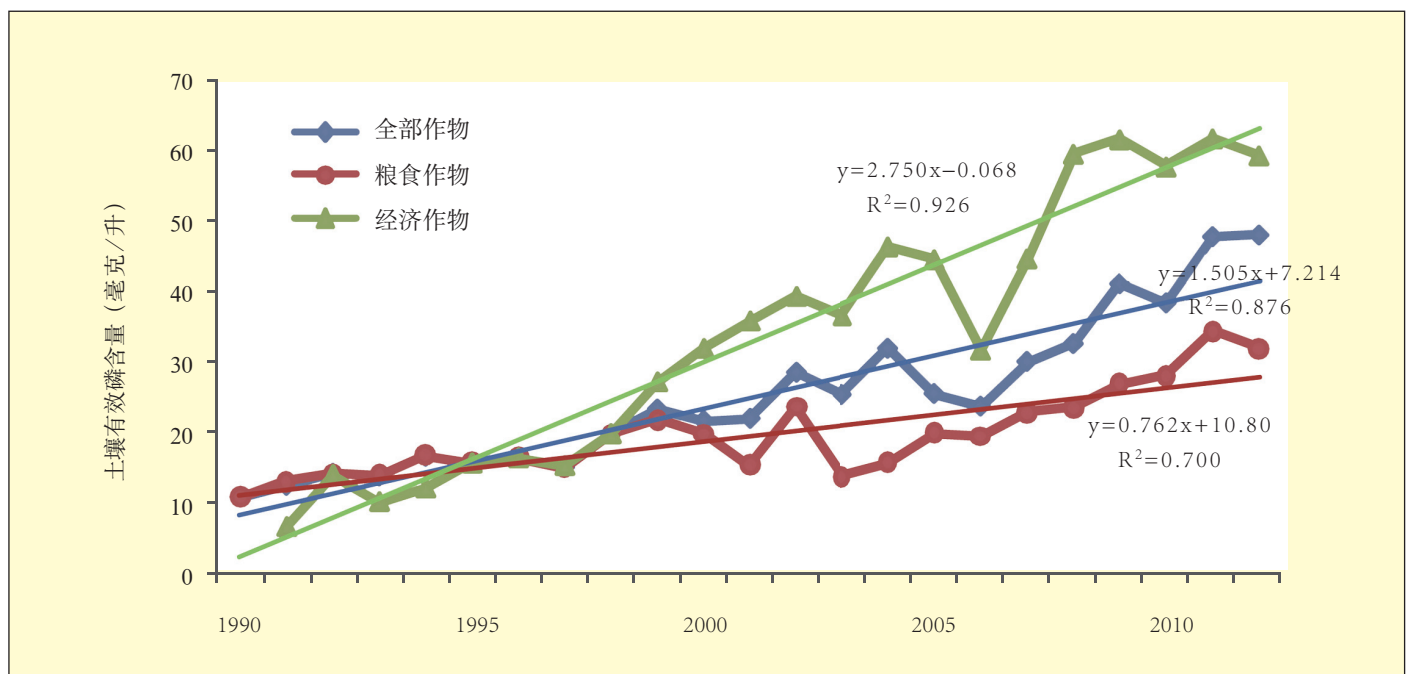


图 2 土壤有效磷含量随时间变化趋势

以上结果表明，磷肥的大量投入是经济作物土壤有效磷积累的主要原因，同时也是导致整体土壤有效磷含量增加的主要因素。

2.2 土壤有效磷的时空变化

自上个世纪 80 年代，中国开始倡导平衡施肥；然而，在很多地区过量施肥仍是一个普遍现象，不仅导致了土壤的退化也引起作物产量的下降。在我国，不同地区土壤平均有效磷含量差异显著，如东北、华北、西北、东南和西南土壤平均有效磷含量分别为 17.53、47.78、25.10、29.35、18.70 毫克/升。为了更好地评估土壤有效磷含量的时间变异，本文比较了 1990 年代（1990–1999）和

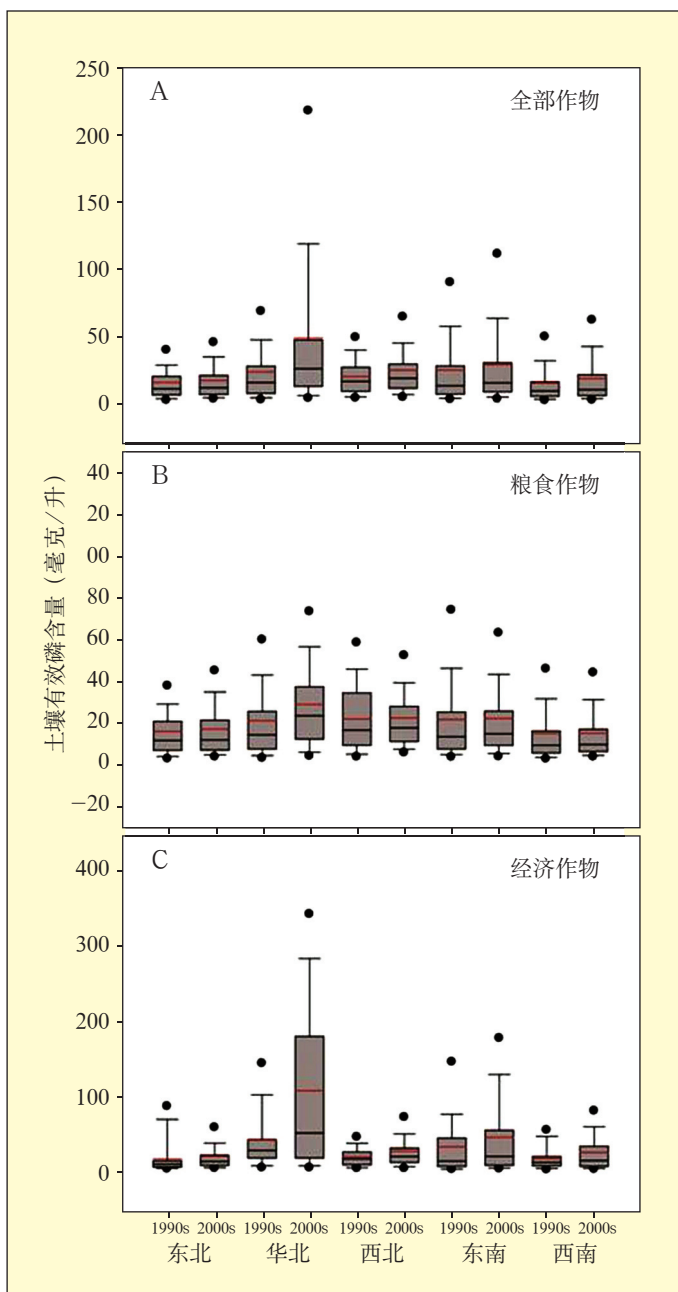


图 3 土壤有效磷含量的时空变化

2000 年代（2000–2012）两个时期土壤有效磷含量。结果表明，土壤平均有效磷含量从 1990s 的 17.09 毫克/升增加到 2000s 的 33.28 毫克/升。从 1990s 到 2000s，五个地区土壤平均有效磷含量分别增加了 10.1%、113.1%、23.1%、16.1% 和 21.4%（图 3）。

从 1990 年代到 2000 年代，五个地区粮食作物土壤平均有效磷含量分别增加了 7.4%（17.08–18.90 毫克/升）、37.1%（21.09–28.91 毫克/升）、2.2%（21.91–22.39 毫克/升）、2.1%（21.68–22.13 毫克/升）和 1.3%（14.97–15.16 毫克/升）；经济作物土壤有效磷含量分别增加 19.7%（17.45–20.8 毫克/升）、155.4%（42.40–108.27 毫克/升）、36.8%（19.98–27.34 毫克/升）、38.4%（33.21–45.96 毫克/升）和 46.8%（17.66–25.91 毫克/升）。

2.3 不同地区作物的施磷效应

相对产量，用来评估作物的施磷效应，由氮钾处理小区所得产量除以氮磷钾处理小区所得产量计算得到。相对产量越大表明土壤基础磷素供应量越大。研究结果表明，东北、华北、西北和东南地区作物相对产量相差不大，分别为 87.8%、87.8%、84.4%、88.1% 和 86.0%；相对而言，东南地区土壤基础磷素供应能力最高（图 4）。时间变异分析结果表明，相对产量从 1990 年代的 84.8% 增加到 2000 年代的 87.4%，但区域之间存在一定差异。如华北地区相对产量增加了 9.2%，但其它地区之间没有显著差异。

对粮食作物而言，五个地区相对产量范围为 85.8%–89.0%，与总的作物相对产量 84.4–88.1% 相比差异不显著。粮食作物相对产量在东北、华北、东南、西南地区分别增长 2.6%、7.6%、6.9% 和 8.6%，表明土壤基础磷素供应能力在 22 年有所提升。西北地区粮食作物相对产量从 1990 年代到 2000 年代下降了 4.9%，这可能与当地的环境条件，作物类型和土壤理化性质有关。曹宁等^[14]研究表明，不同的环境条件，作物系统，和土壤理化性质对土壤有效磷的含量具有显著的影响，也直接影响相对产量。

在这五个地区，经济作物相对产量没有显著差异。然而从 1990 年代到 2000 年代时间尺度上差异显著。五个地区中东北、东南和西南地区经济作物相对产量分别下降了 6.7%、6.0% 和 1.6%，而华北和西北地区，相对产量分别增加了 8.3% 和保持基本不变。经济作物相对产量数据结果表明，东北、东南和西南地区土壤基础磷素供应能力下降，而华北地区呈上升态势，而西北地区基本保持不变。

3 讨论

农业管理实践如轮作、施肥和耕作等影响土壤有效磷含量^[15-17]。研究发现从1990到2012年土壤有效磷含量随磷肥施用量的增加而提高,通过提高施肥量可以提高农田生产力,该结果与Hart^[18]研究结果一致。李海港等^[19]研究表明全国土壤平均有效磷含量从1980的7.4毫克/公斤增加2007年的24.7毫克/公斤;本研究与前人研究结果一致,土壤有效磷从1990年代的17.09毫克/升增加到2012年的33.28毫克/升。土壤平均有效磷含量的增加主要由经济作物生产中大量施肥引起,如在蔬菜生产中磷肥的过量施用是普遍现象^[20]。

相对产量是一个评价土壤肥力直接有效的指标,也可用来评价土壤养分供应能力^[13, 21]。在本研究中,虽然粮食作物土壤有效磷含量低于经济作物,但除西南地区外其它地区粮食作物的相对产量均高于经济作物。该结果也说明除西南地区外,其它地区土壤磷素供应量更接近粮食作物生长的需求;而对于经济作物的生产,应该推荐施用更多的磷肥以满足高产的需求。该结果与经济作物(0.852)氮钾处理产量与氮磷钾处理产量之间的斜率低于粮食作物(0.911)相吻合(图5)。本文结论与土壤速效钾时空变异研究结果一致,在不施用磷肥的情况下经济作物减产比粮食作物更严重^[13]。

不同作物和土壤类型(包括土壤结构、pH等因素)对土壤临界值有明显影响^[22-23]。对大部分作物来说土壤有效磷浓度在5.3-18.3毫克/升即能满足作物生产需求,当土壤有效磷浓度高于41.2毫克/升时土壤磷素具有淋溶风险;然而65.6毫克/升的土壤有效磷被认为是

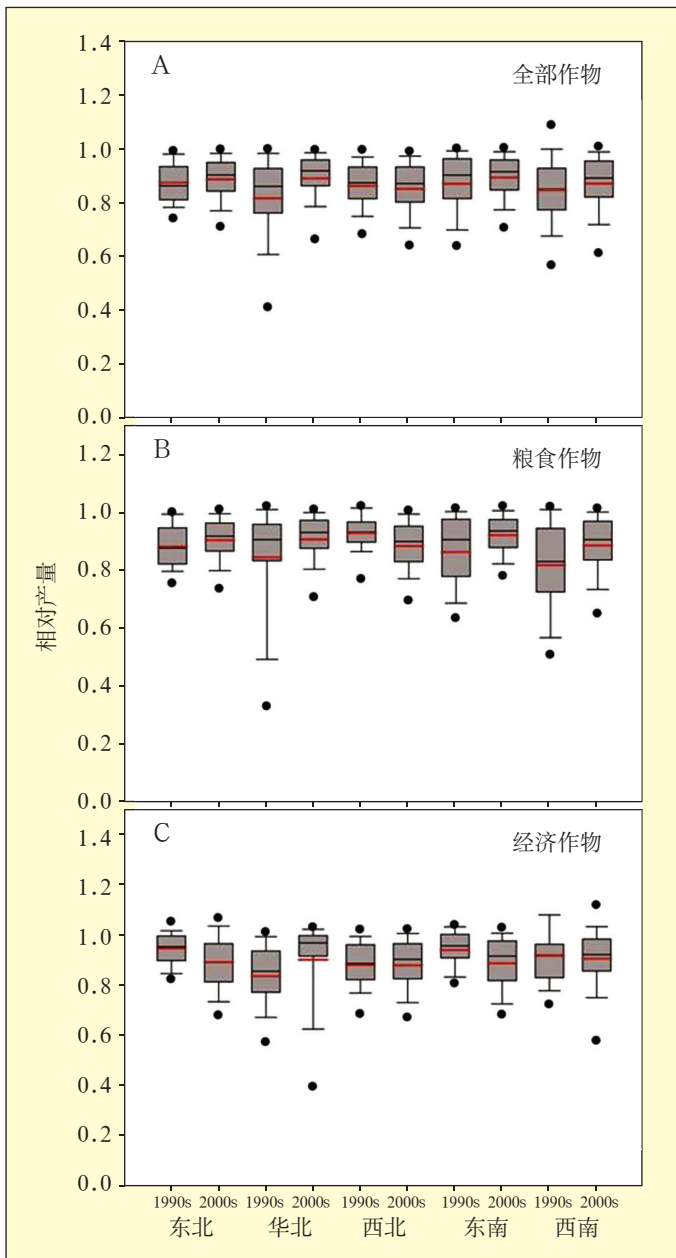


图4 相对产量的时空变化

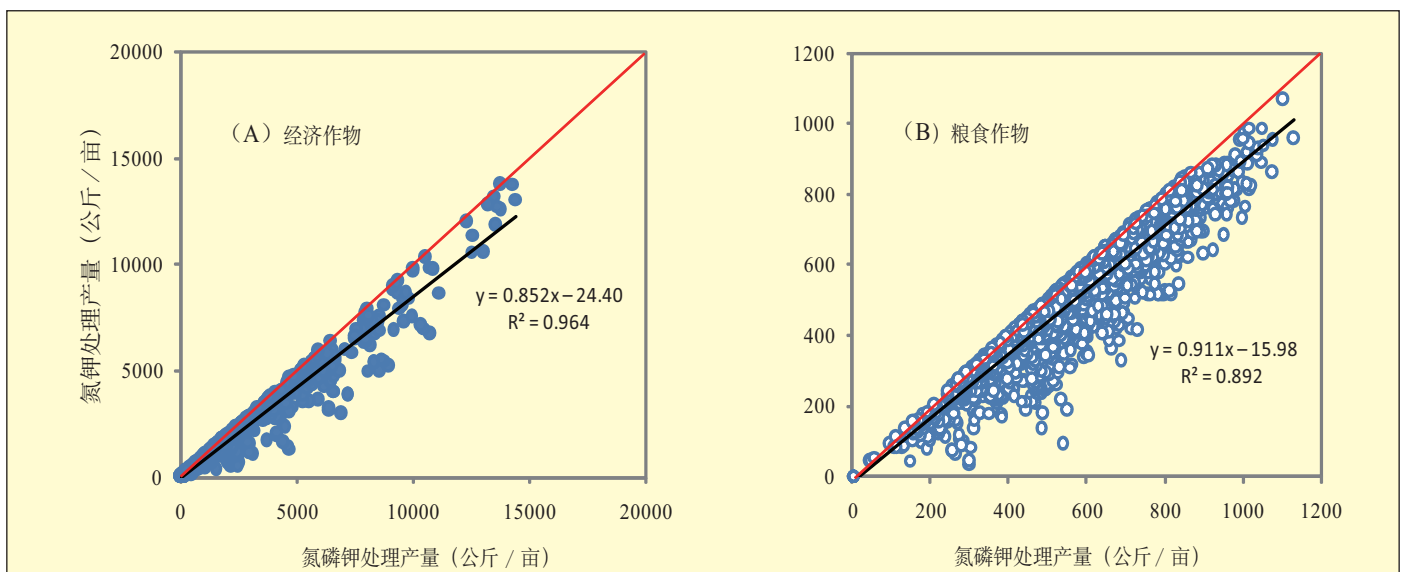


图5 粮食作物与经济作物氮钾处理产量与氮磷钾处理产量相关性比较。(A) 粮食作物; (B) 经济作物。虚线为1:1界限

蔬菜生产所需磷素临界值，其明显高于土壤淋溶风险临界值^[24-27]。因此，对于蔬菜生产需要一套不同与其它作

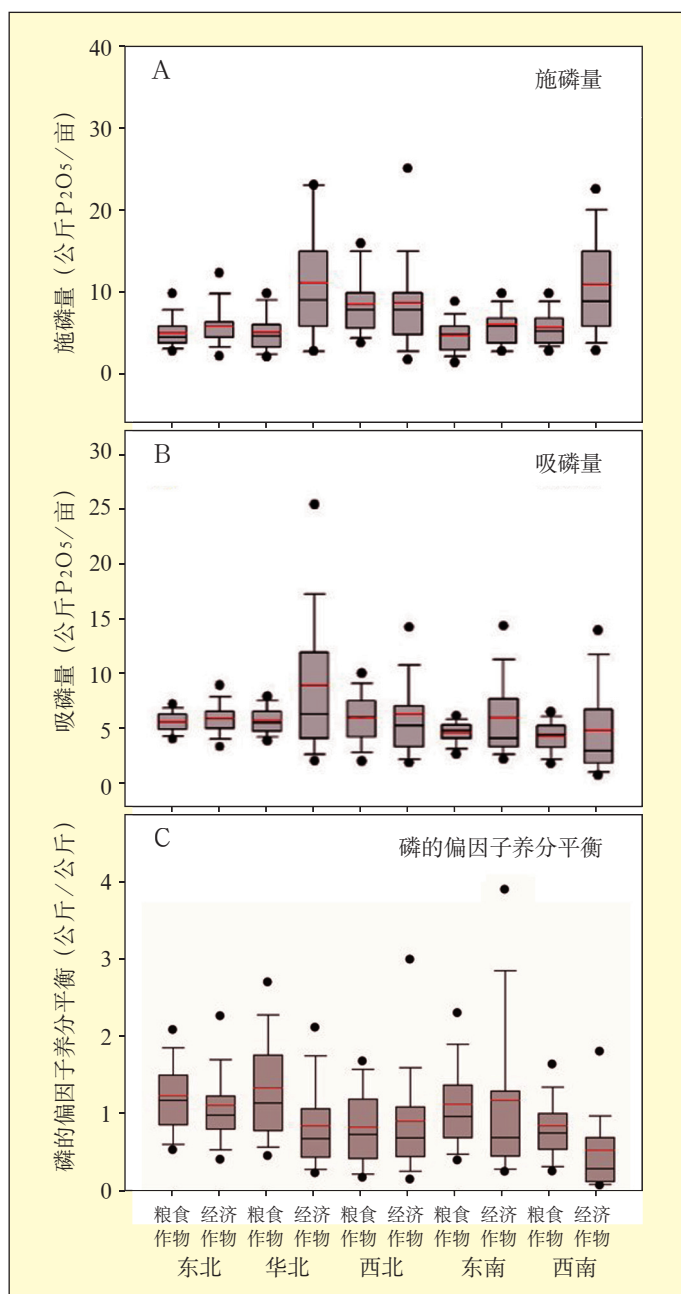


图 6 不同地区粮食作物和经济作物的施磷量 (A)、吸磷量 (B) 和磷的偏因子养分平衡 (C)

物的养分管理体系。本文研究结果表明，在 1990 年代，除了华北和东南种植经济作物地区外，其它地区土壤有效磷含量均处于作物生产临界值范围内。在 2000 年代，东北和西南地区粮食作物土壤有效磷含量处于作物生产临界值范围附近，其它地区粮食作物土壤有效磷含量均高于作物最佳产量临界范围但低于土壤淋溶风险值。对经济作物而言，在华北和东南地区土壤磷素具有淋溶风险。其它地区经济作物土壤有效磷含量高于最佳产量临界值范围低于淋溶风险值。磷肥的大量施用，不仅导致了农田磷素的非点源污染，也引起了水体的富营养化。这个现象不仅是一个区域性问题的同时也是全球面临的挑战^[28]。由长期过量施肥导致的磷素盈余是磷素扩散性损失的主要原因^[29]。控制额外磷素的输入是控制水体富营养化最有效的方法^[30]。

在农业生态系统中，理想的磷素循环是输入等于输出，同时也最大化磷素的利用效率。本文引入磷的偏因子养分平衡 (PPB) (磷素总的输出量 / 磷素总的输入) 去评估磷素平衡状况。研究发现，经济作物地上部分磷素吸收量均高于粮食作物地上部分磷素吸收量，这也说明经济作物磷素养分移走量大于粮食作物。五个地区粮食作物和经济作物偏因子磷素平衡均有显著差异，与已有研究结果一致^[31-32] (图 6)。鉴于不同地区土壤有效磷和偏因素磷平衡的显著差异，急迫切需要针对不同区域的农田磷素养分管理。

4 结论

磷是农业生产必需的大量元素，我国平均土壤有效磷含量呈上升趋势。经济作物生产中磷肥的大量施用是导致我国土壤有效磷含量增加的主要原因。磷肥推荐，对于粮食作物，我们要保持土壤有效磷高于产量最低临界值同时低于淋溶风险值；对于经济作物，针对具有较高施磷产量反应的地区也要适当加大推荐施肥量。本文将为以后关于磷素养分循环和基于非点源污染下的养分管理提供参考。

参考文献

- [1] Ibrikci, H., Ryan, J., Ulger, A.C., et al. Maintenance of phosphorus fertilizer and residual phosphorus effect on corn production [J]. *Nutr. Cycl Agroecosyst.*, 2005, 72(3):279–286.
- [2] Chen, M., Chen, J., Sun, F. Agricultural phosphorus flow and its environmental impacts in China [J]. *Sci. Total Envir.*, 2008, 405(1–3):140–152.
- [3] Ryan, J., Masri, S., Pala, M. Residual and current effects of phosphorus in rotational trials [J]. *Soil Fertility Workshop, Aleppo (Syria)*, 19–23 Nov 1995, ICARDA., 1997.
- [4] 鲁如坤. 中国农业中的磷. 中国磷肥应用研究现状与展望学术讨论会 [C], 中国农业出版社, 中国南宁, 2001.
- [5] Sheldrick, W.F., Syers, J.K., Lingard, J. Soil nutrient audits for China to estimate nutrient balances and output/input relationships [J]. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2003, 94(3):341–354.
- [6] Chen, M., Chen, J., Du, P. An inventory analysis of rural pollution loads in China [J]. *Water Sci. Technol.*, 2006, 54(11–12):65–74.
- [7] Chen, F.S., Zeng, D.H., He, X.Y. Small-scale spatial variability of soil nutrients and vegetation properties in semi-arid northern China [J]. *Pedosphere*, 2006, 16(6):778–787.
- [8] Huang, S.W., Jin, J.Y., Yang, L.P., et al. Spatial variability of soil nutrients and influencing factors in a vegetable production area of Hebei Province in China [J]. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 2006, 75(1–3):201–212.
- [9] Zhang, X.Y., Sui, Y.Y., Zhang, X.D., et al. Spatial variability of nutrient properties in black soil of northeast China [J]. *Pedosphere*, 2007, 17(1):19–29.
- [10] Wang, Y.Q., Zhang, X.C., Huang, C.Q. Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China [J]. *Geoderma*, 2009, 150(1):141–149.
- [11] Gao, R.T., Liu, S.Q., Zhang, Y.G., et al. Temporal-spatial variability and fractal characteristics of soil nitrogen and phosphorus in Xinji District, Hebei Province, China [J]. *Environ. Monit. Assess.*, 2011, 174(1–4):229–240.
- [12] Hunter, A.H. Laboratory and greenhouse techniques for nutrient survey to determine the soil amendments required for optimum plant growth. Mimeograph [J]. *Agro Service International (ASI)*, Florida, USA., 1980.
- [13] He, P., Yang, L.P., Xu, X.P., Zhao, et al. Temporal and spatial variation of soil available potassium in China (1990–2012) [J]. *Field Crops Res.*, 2015, 173:49–56.
- [14] Cao, N., Chen, X.P., Cui, Z.L., et al. Change in soil available phosphorus in relation to the phosphorus budget in China [J]. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 2015, 94(2–3):161–170.
- [15] Karasawa, T., Takebe, M. Temporal or spatial arrangements of cover crops to promote arbuscular mycorrhizal colonization and P uptake of upland crops grown after nonmycorrhizal crops [J]. *Plant Soil*, 2012, 353(1–2):355–366.
- [16] Cade-Menun, B.J., Carter, M.R., James, D.C., et al. Phosphorus forms and chemistry in the soil profile under long-term conservation tillage: A phosphorus-31 nuclear magnetic resonance study [J]. *J. Environ. Qual.*, 2010, 39(5):1647–1656.
- [17] Messiga, A.J., Ziadi, N., Bélanger G., et al. Process-based mass-balance modeling of soil phosphorus availability in a grassland fertilized with N and P [J]. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 2012, 92(3):273–287.
- [18] Hart, M.R., Cornish, P.S. Available soil phosphorus, phosphorus buffering and soil cover determine most variation in phosphorus concentration in runoff from pastoral sites [J]. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 2012, 93(2):227–244.
- [19] Li, H., Huang, G., Meng, Q., et al. Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China [J]. A review. *Plant Soil*, 2011, 349(1–2):157–167.
- [20] Yan, Z.J., Liu, P.P., Li, Y.H., et al. Phosphorus in China's intensive vegetable production systems: Overfertilization, soil enrichment, and environmental implications [J]. *J. Environ. Qual.*, 2009, 42(4):982–989.
- [21] Xu, X.P., He, P., Pampolino, M.F., et al. Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency [J]. *Field Crops Res.*, 2014, 157:27–34.
- [22] Poulton, P.R., Johnston, A.E., White, R.P. Plant-available soil phosphorus. Part I: the response of winter wheat and spring barley to Olsen P on a silty clay loam [J]. *Soil Use Manage.*, 2013, 29(1):4–11.
- [23] Johnston, A.E., Poulton, P.R., White, R.P. Plant available soil phosphorus. Part II: the response of arable crops to Olsen P on a sandy clay loam and a silty clay loam [J].

- Soil Use Manage., 2013, 29(1):12–21.
- [24] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护 [J]. 磷肥与复肥, 2003, 18(1):4–8.
- [25] 钟晓英, 赵小蓉, 鲍华军, 等. 我国 23 个土壤磷素淋失风险评估 I. 淋失临界值 [J]. 生态学报, 2004, 24(10):2275–2280.
- [26] Bai, Z.H., Li, H.G., Yang, X.Y., et al. The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types [J]. Plant Soil, 2013, 372(1–2):27–37.
- [27] 熊桂云, 刘东碧, 陈防, 等. ASI 法测定土壤有效磷、有效钾和铵态氮与我国常规分析方法的相关性 [J]. 中国土壤与肥料, 2007, 3:73–76.
- [28] Ryan, J., Ibrikci, H., Delgado, A., et al. Significance of phosphorus for agriculture and the environment in the west Asia and north Africa region [J]. Advan. Agron., 2012, 114:91–153.
- [29] Kleinman, P.J., Sharpley, A.N., McDowell, R.W., et al. Managing agricultural phosphorus for water quality protection: principles for progress [J]. Plant Soil, 2011, 349 (1–2):169–182.
- [30] Schelske, C.L. Eutrophication: focus on phosphorus [J]. Science, 2009, 324:722–722.
- [31] 刘钦普. 中国化肥投入区域差异及环境风险分析 [J]. 中国农业科学, 2014, 47(18):3596–3605.
- [32] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡 [J]. 中国农业科学, 2011, 44(20):4207–4229.