

中国土壤速效钾的时空变化 (1990–2012)

何萍^{1,2,3,*} 杨俐苹^{2,*} 徐新朋² 赵士诚² 陈防⁴ 李书田^{1,2,3} 涂仕华⁵ 金继运²

Adrian M. Johnston^{3,6}

(1. 国际植物营养研究所北京办事处, 北京 100081; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 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; 4. 国际植物营养研究所武汉代表处, 武汉 430074; 5. 国际植物营养研究所成都代表处, 成都 610066; 6. International Plant Nutrition Institute (IPNI), 102–411 Downey Road, Saskatoon, SK, S7N 4L8, Canada)

摘要: 钾肥是不可再生资源, 并且不能通过其他化学物质合成。因此, 了解中国土壤钾素的时空变化状态, 对于土壤钾素资源的有效利用、粮食安全和资源的可持续性至关重要。我们分析了全国 58,559 个土壤样本中速效钾的时空变化, 并用国际植物营养研究所 (IPNI) 中国项目数据库 (1990–2012 年) 中的 2,055 个田间试验进行验证。结果表明, 土壤速效钾含量由 1990s 的 79.8 毫克/升增加到 2000s 的 93.4 毫克/升, 经济作物土壤增速高于粮食作物土壤。土壤速效钾的增加主要是由于经济作物的施钾量较高 (粮食作物的 1.4–2.6 倍), 在土壤中形成一定的盈余。另外, 我国土壤速效钾含量具有较大的时空变异性。东北、华北、西北、东南和西南地区土壤速效钾平均含量分别为 76.8、99.8、118.0、83.9、81.3 毫克/升。过去 20 年东北地区的土壤速效钾含量未出现显著变化, 但华北、东南和西南地区分别增加了 34.8%、17.9% 和 30.2%, 而西北地区则下降了 75.9%。相对产量也存在着很大的时空变化, 并与土壤速效钾变化规律一致。由于粮食作物土壤速效钾含量一般低于土壤临界值, 而经济作物施钾增产效应高于粮食作物, 因此不管是粮食作物还是经济作物均需推荐合理施用钾肥。然而, 由于我国土壤速效钾含量空间变异较大, 所以迫切需要根据不同土壤和试验地点的具体情况有针对性地施用钾肥。

关键词: 土壤速效钾; 产量反应; 钾素管理

1 前言

钾 (K) 是高等植物必需的三大营养元素之一, 参与植物许多重要的生理过程, 有改善农作物品质和提高抗逆性等功能^[1-3]。而且对于钾素贫瘠的土壤来说, 施钾肥是为其提供钾素最有效的方法。但钾是不可再生资源, 并且不能通过其他化学物质合成。所以合理的钾素养分管理对于有效利用钾素资源尤为重要。

了解土壤钾素状态对于合理实施养分管理措施很重要。据报道, 钾素亏缺是一个世界性问题^[4], 目前全球耕地土壤钾素含量不断降低^[5-8]。上世纪 70 年代中国南部首次报道土壤缺钾问题^[9-10]。80 年代我国农业部、加拿大磷钾肥研究所 (PPIC) 和国际钾肥研究所 (IPI) 等开始在我国开展施钾效应的田间试验研究。结果显示, 我国南方地区和北方的部分地区表现土壤缺钾。随后国内学者也陆续开展了作物施钾效应的田间试验^[11]。2005 年, 我国农业部启动了测土配方施肥计划, 推动了作物合理施肥。最近研究表明我国农业生产中氮肥和磷肥普遍施用过量^[12-14], 而钾肥施用不足, 缺钾现象有进一步加剧的

趋势^[15-16]。随着农业机械化的发展和我国作物秸秆还田及施用有机肥政策的实施, 更多的作物残茬将被归还到土壤中, 从而减缓了土壤缺钾的速率^[17]。然而, 关于土壤速效钾含量变化有些相悖的一些报道已经引起了科学家和化肥行业的关注。有研究指出, 1980–2000 年华东地区^[18]和 1980–1999 年华北地区^[19]的土壤钾含量显著降低。而其他的报告表明, 除了我国西北 1986–2006 年土壤速效钾含量出现了下降趋势, 其他地区均显示稳定或增加趋势^[20-21]。这些相互矛盾的结果可能是由于土壤采样点、样品数量、取样时间和分析方法等不同而引起的。到目前为止, 钾肥还没受到像氮肥和磷肥那样的关注^[22-26], 而且我国上世纪 80 年代初进行的全国土壤普查结果已不能真实地反映目前的土壤钾素状态。由于土壤钾素平衡不仅受到氮肥和磷肥过量施用的影响, 同时也受作物新品种和高产基因型的影响, 所以迫切需要关注我国土壤钾素状况和土壤钾素平衡, 该研究可为农业可持续发展中钾素合理养分管理提供科学指导。

自 1990 年国际植物营养研究所 (IPNI) 中国项目部

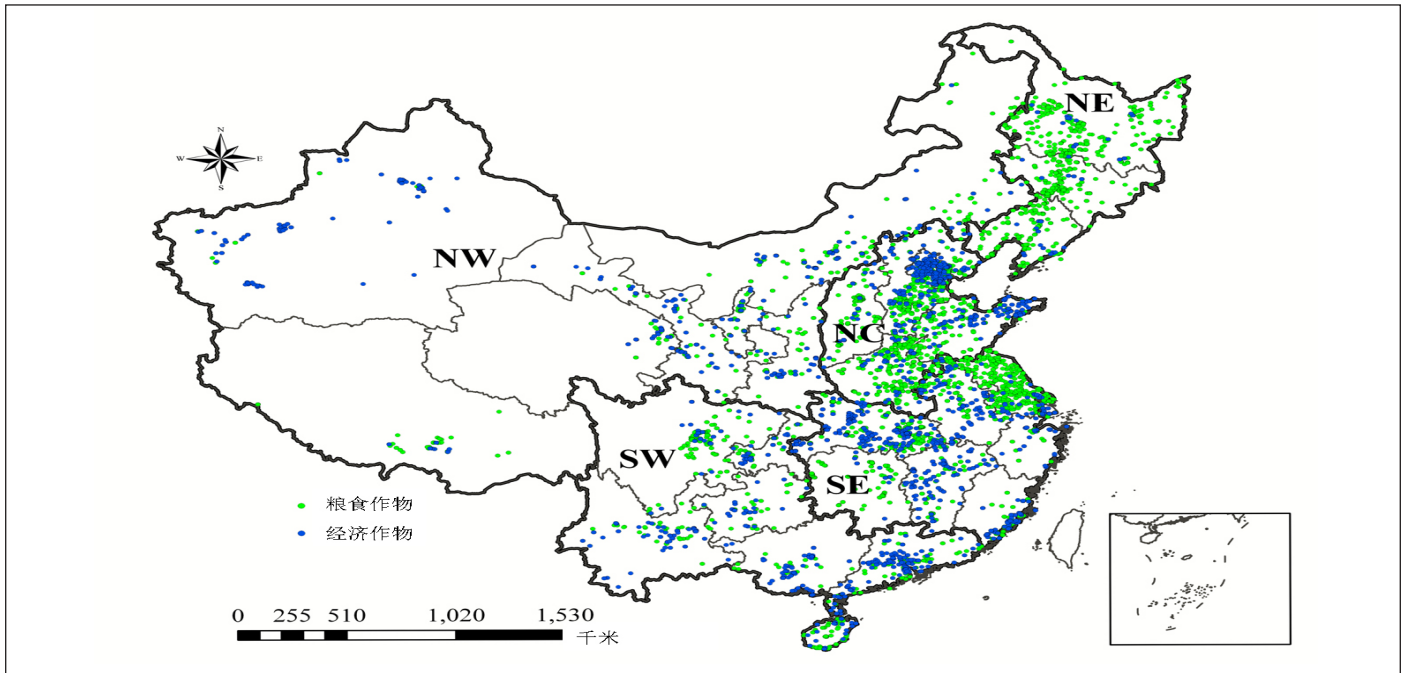


图1 1990–2012年试验点在五个区的分布 (NE、NC、NW、SE和SW分别代表东北、华北、西北、东南和西南)

就已在全国范围内展开钾肥管理研究，并且积累了大量的土壤测试数据（图1）和相关的作物产量数据。本研究的目的是评价1990–2012年中国土壤速效钾的时空变化和作物的施钾效应。

2 材料和方法

2.1 数据来源

土壤速效钾和作物产量数据来自1990–2012年国际植物营养研究所中国项目数据库，共计58,559个土壤速效钾测试数据（图1）和2,055个田间试验产量记录。所有土壤速效钾的数据都来源于田间试验，播前采集0–20厘米的土层，用Portch和Hunter^[27]推荐的Superfloc 127溶液提取土壤样品后，采用火焰光度计测定土壤速效

钾含量。试验均在田间进行，作物产量效应数据由第一季作物收获后通过测定氮磷钾肥小区（NPK，氮磷钾施肥量根据土壤测试推荐）和只施氮磷肥小区获得（NP，在NPK处理基础上不施钾）。

为分析我国土壤速效钾的空间变化，基于地理位置和行政区划将全国分为五个区：包括东北（NE）、华北（NC）、西北（NW）、东南（SE）和西南（SW）（表1）。

另外，基于土地利用方式，对每个区进一步划分为两个类型区，分别为粮食作物和经济作物类型区。依据中国农业年鉴，粮食作物类型区主要包含小麦、玉米、水稻、马铃薯和大豆，经济作物主要包含蔬菜、果树、油菜籽、向日葵、棉花和糖类作物，其具有较高的施肥量和经济附加值。

表1 我国不同地区和不同时期的试验观测数

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	435	6887	417	6,887	18
土壤测试	华北	2,446	17,896	2,233	17,896	213	4,394
	西北	295	6,752	74	6,752	221	2,136
	东南	549	16,099	373	16,099	176	4,992
	西南	701	6,499	616	6,499	85	2,378
	相对产量	86	427	63	399	23	28
相对产量	华北	90	754	56	700	34	54
	西北	51	263	31	136	20	127
	东南	42	152	13	77	29	75
	西南	59	131	19	67	40	64

表 2 中国五个区试验点情况总结

地区	省份	主栽作物	主要土壤类型	降水量	纬度	经度	样本数	pH	有机质
				(毫米)	(北纬:度)	(东经:度)			(%)
东北 地区	吉林、辽宁、 黑龙江	玉米、水稻、黄豆、 番茄、白菜、黄瓜、 胡麻	黑土、褐土、 草甸土	400-1,000	37.74-53.53	118.86-135.07	7,322	3.66-9.54	0.10-9.97
华北 地区	北京、天津、 河北、河南、 山东、山西	小麦、玉米、棉花、 白菜、黄瓜、花生、 南瓜、茄子、番茄、 花椰菜	褐土、潮土、 棕土、盐碱土	350-900	31.41-42.67	111.25-122.63	20,342	3.44-9.98	0.05-6.12
西北 地区	陕西、宁夏、 甘肃、新疆、 内蒙古、青海、 西藏	玉米、小麦、马铃薯、 棉花、白菜、菠菜、 洋葱、胡萝卜、黄瓜、 辣椒、番茄、油菜籽	黄土、灌淤土、 栗钙土、灰钙 土、潮土、荒 漠土	100-600	27.23-53.35	73.45-126.04	7,047	5.01-9.91	0.01-6.80
东南 地区	湖北、湖南、 江苏、安徽、 上海、江西、 浙江、福建	小麦、玉米、水稻、 棉花、白菜、大豆、 甘蔗、柑橘、香蕉、 油菜籽、芝麻	黄棕壤、潮土、 红壤、水稻土	700-1,600	23.58-28.28	108.38-122.20	16,648	3.55-8.82	0.05-6.80
西南 地区	重庆、贵州、 云南、四川、 广西、广东、 海南	玉米、小麦、水稻、 油菜、番茄、甘蔗、 油菜籽、香蕉、木薯、 辣椒、菠萝、茶	黄棕壤、红壤、 紫土、水稻土	600-2,000	18.17-34.30	97.39-117.06	7,200	3.39-8.53	0.10-7.96

试验点地理分布数据如图 1 所示，不同区域的土壤采样数列于表 1，五个区的试验点信息列于表 2。

2.2 数据处理

$$\text{相对产量} = \left(\frac{\text{氮磷处理产量}}{\text{氮磷钾处理产量}} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{钾的偏因子养分平衡 (PKB)} = \frac{\text{作物地上部钾移走量}}{\text{施钾量}} \quad (2)$$

用 SPSS 13.0 对数据进行方差分析，并由 SigmaPlot 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。

3 结果

3.1 1990-2012 年农田速效钾变化情况

数据显示，1990-2012 年土壤速效钾含量均呈增长趋势，而且根据线性模型得，其增长率为 1.307 (图 2)。

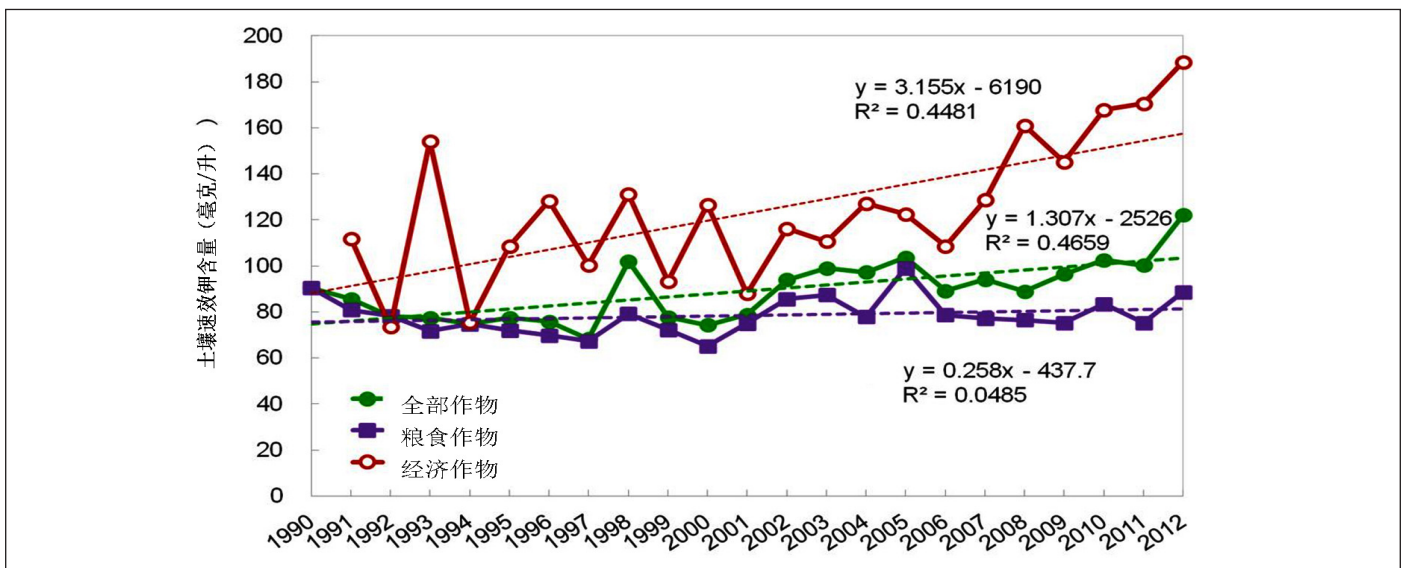


图 2 土壤速效钾含量随时间变化趋势

为了进一步分析影响速效钾增长趋势的主要因素，我们根据种植作物将土样分为两种：粮食作物和经济作物。结果显示，1990–2012年粮食作物和经济作物的土壤速效钾含量随时间均呈增加趋势。基于线性模型，粮食作物土壤速效钾含量增长率仅为0.258（图2），然而，经济作物同期大幅增加，其增长率为3.155（图2）。粮食作物的 K_2O 施用量平均为7.3公斤/亩（变化范围为1.0–124.5公斤/亩），而经济作物的 K_2O 施用量平均为17.0公斤/亩（变化范围为1.0–124.5公斤/亩）（图6）。进一步分析发现，经济作物较高的钾含量是由于大量的钾肥投入引起的，这也直接导致了1990–2012年土壤速效钾含量出现增加趋势。

3.2 土壤速效钾的时空变化

上世纪80年代开始中国引进了平衡施肥（Balance fertilization）概念，90年代钾肥合理施用受到广泛关

注。然而，不同地区土壤钾含量存在很大差异，东北、华北、西北、东南和西南地区的测试平均值为76.8、99.8、118.0、83.9、81.3毫克/升。为了评价1990–2012年中国不同地区土壤速效钾的变化，我们比较了1990年代（1990–1999年）和2000年代（2000–2012年）两个时期的土壤速效钾含量。数据显示土壤速效钾均值从1990年代的79.8毫克/升增加到2000s的93.4毫克/升，东北地区两个时期的土壤速效钾含量没有变化，华北、东南、西南地区的土壤速效钾分别增加了34.8%（76.4–103.0毫克/升）、17.9%（71.5–84.3毫克/升）和30.2%（68.8–82.7毫克/升）。而西北地区的土壤钾含量却下降了75.9%（153.5–116.5毫克/升）（图3A）。

进一步分析表明，粮食作物土壤速效钾的变化趋势同全部作物土壤速效钾变化趋势相似，但不同区间存在很大差异（图3B）。1990年代土壤速效钾在华北、东南和西南地区分别为72.2、65.1和66.4毫克/升，2000s分别

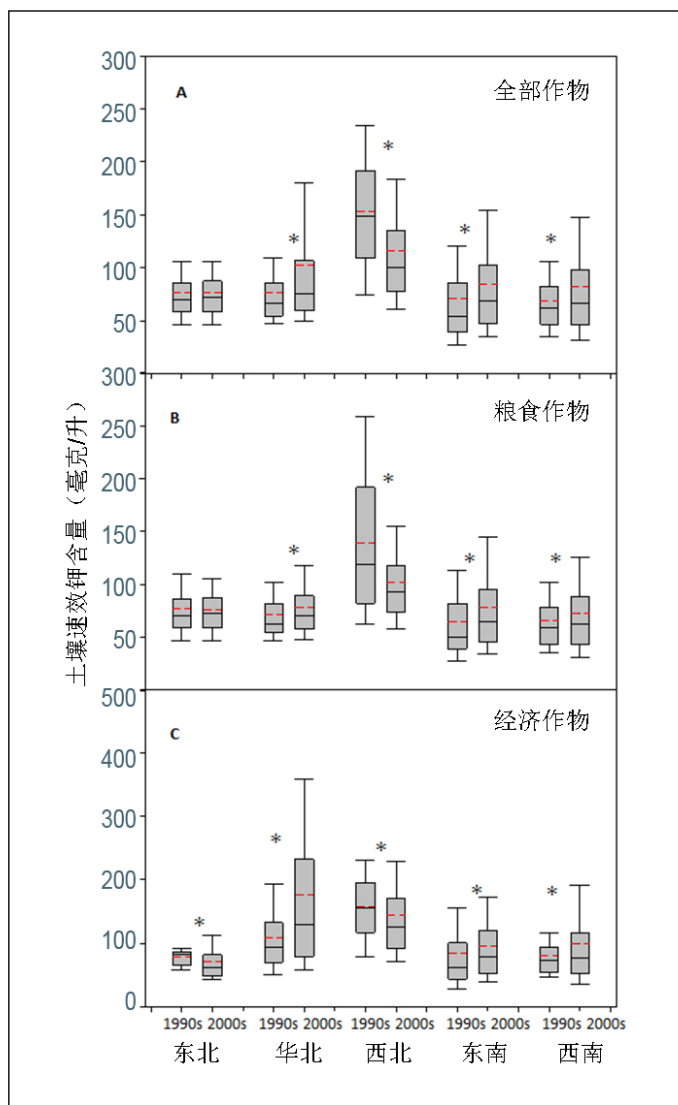


图3 土壤速效钾含量的时空变化

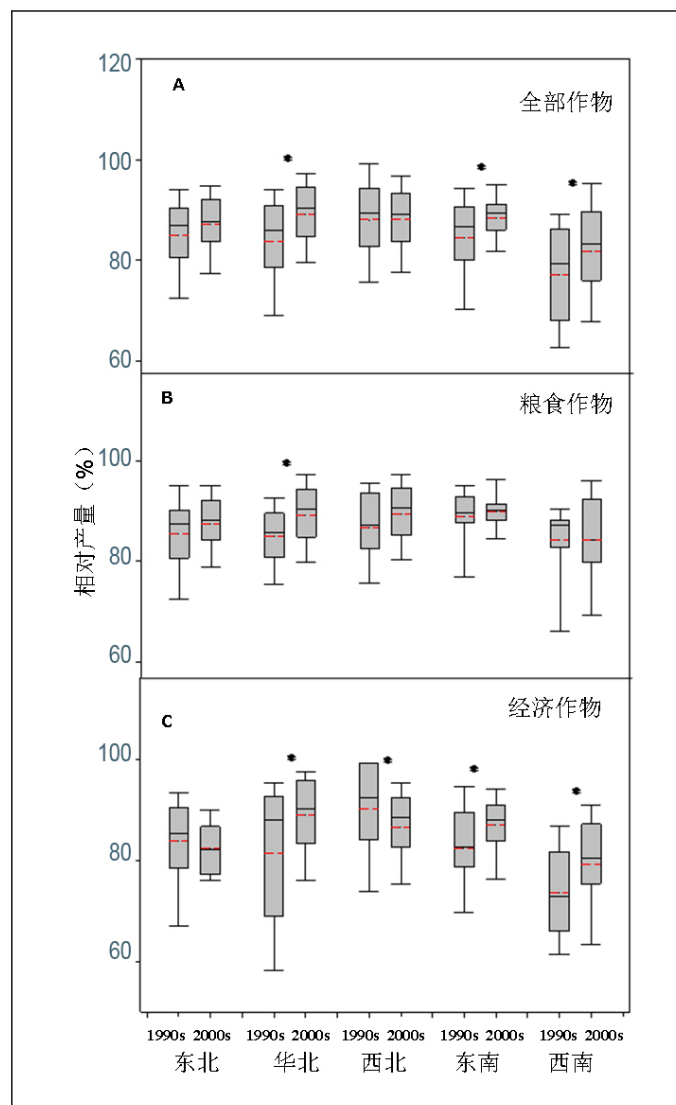


图4 相对产量的时空变化

增加了 8.7%、21.0% 和 8.7%。相反，西北地区土壤速效钾含量下降了 73.5% (图 3 B)。

2000 年代华北、东南和西南地区经济作物的土壤速效钾含量与 1990 年代相比，分别增加了 59.7%、12.4% 和 22.2%，但东北和西北地区却下降了 92.5% 和 91.7%。结果显示，华北、西南地区土壤速效钾含量增加主要归因于经济作物钾肥的大量投入，而东南地区则主要是因为粮食作物土壤速效钾含量升高。西北地区土壤速效钾降低主要是由于粮食作物土壤速效钾含量大幅降低 (图 3 C)。

3.3 不同地区作物的施钾效应

相对产量，由氮磷处理小区产量除以氮磷钾处理小区产量计算得到，用来评价作物的施钾效应。相对产量越大，土壤基础钾养分供应量越高。东北、华北、西北和东南地区作物的相对产量相差不大，分别为 86.8%、88.6%、88.1% 和 87.6%，西南地区相对产量为 80.4%，

相比其他地区较低，说明西南地区的土壤基础钾养分供应量较低。从时间上进一步分析，相对产量由 1990 年代的 83.7% (77.2–88.1%) 增加到 2000 年代的 87.9% (81.9–89.2%)，然而地区之间存在一定差异：东北、西北地区的相对产量在两个时期无显著差异，但华北、东南和西南地区的相对产量从 1990s 到 2000s 分别增加了 6.6%、4.9% 和 6.1% (图 4A)，表明这三个地区的土壤基础钾养分供应量有所增加。

不同地区粮食作物的相对产量 (东北、华北、西北、东南和西南地区分别为 87.1%、88.9%、89.0%、89.7% 和 84.3%) 与全部作物无显著差异。除华北地区外 (图 4B)，各地区两个时期的相对产量无显著差异，表明这些地区的土壤基础钾养分供应量在 22 年中并没有增加或只是略有增加。1990 年代到 2000 年代华北地区粮食作物的相对产量增加了 4.9%，可能与该地区秸秆还田量增加有关。

经济作物的相对产量存在很大差异，东北、华北、东

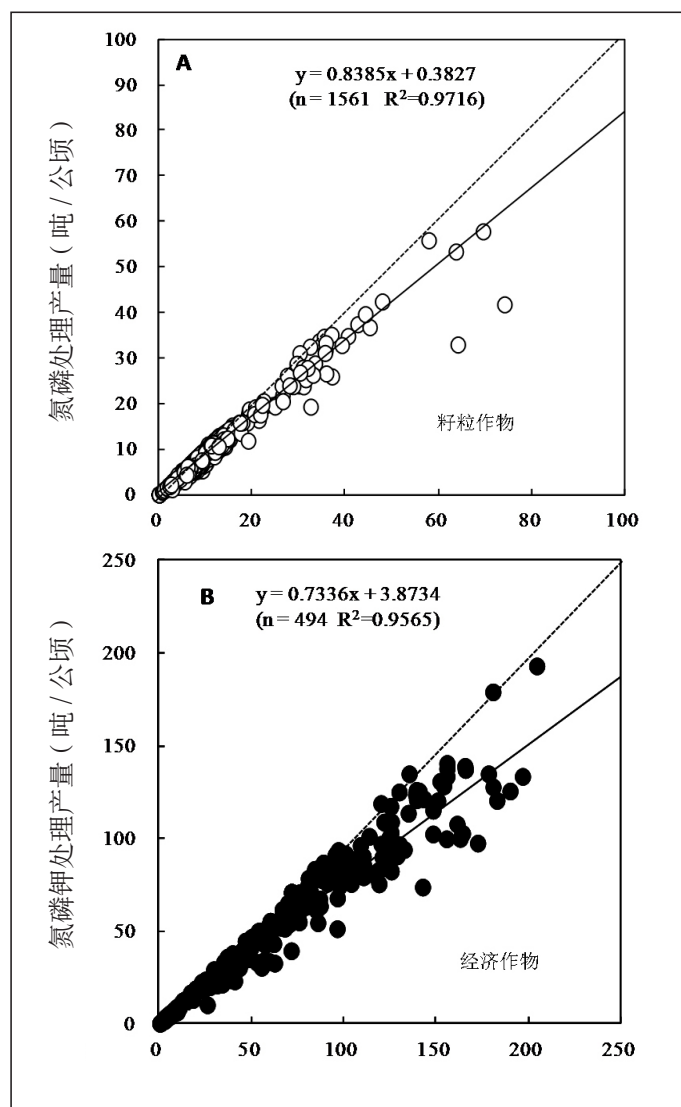


图 5 粮食作物与经济作物氮磷处理产量与氮磷钾处理产量相关性比较。(A) 粮食作物；(B) 经济作物。虚线为 1:1 界限

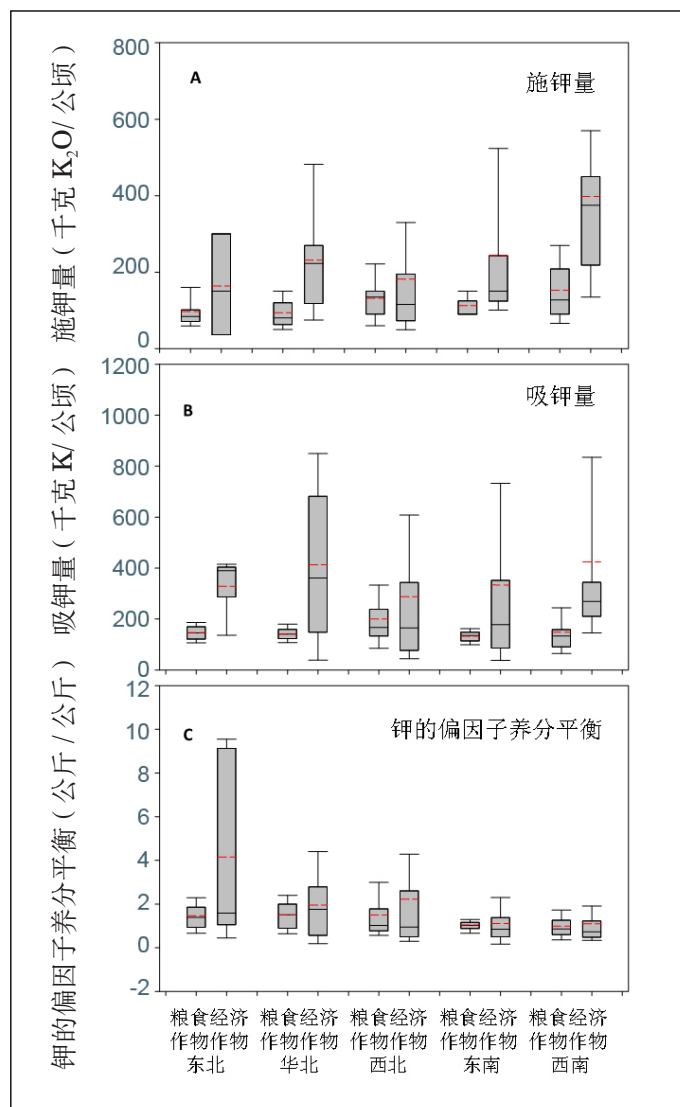


图 6 不同地区粮食作物和经济作物的施钾量 (A)、吸钾量 (B) 和钾的偏因子养分平衡 (C)

南和西南地区的相对产量分别为 83.1%、86.1%、87.1%、85.8% 和 77.2%。经过多年,东北、西北地区的相对产量分别增加了 1.8% 和 4.0%,但是华北、东南和西南地区却分别增加了 9.1%、5.6% 和 7.6% (图 4C)。相对产量的变化与土壤测试结果相吻合(图 3)。

4 讨论

数据显示,1990—2012 年粮食作物土壤速效钾含量略微增加,但是经济作物土壤速效钾含量却显著增加。这与经济作物施钾量较高有关。东北、华北、西北、东南和西南地区经济作物的 K_2O 施用量平均为 10.9、15.4、13.7、16.0 和 26.1 公斤/亩,这分别是粮食作物 K_2O 施用量的 1.7、2.1、1.7、2.1 和 2.8 倍(图 6)。施钾量越高,经济作物的土壤速效钾含量越高。这些数据显示,全国土壤钾平均含量有所增加主要是由于经济作物土壤钾含量的增加。然而,分析 2000 年代粮食作物的土壤钾含量,东北、华北、西北、东南和西南地区分别为 76.5、78.5、102.1、78.8 和 72.2 毫克/升,除西北地区外都低于 80 毫克/升(缺钾临界值)^[28]。在华北、东南和西南地区,尽管 2000 年代的粮食作物土壤速效钾含量与 1990 年代相比有所增加,但两个时期的相对产量却无差异。进一步分析,虽然我国实行农业机械化以来,大量作物还田到土壤,但随着产量不断提高,大量钾素被作物移走,土壤速效钾含量仍呈持续降低趋势。而且粮食作物的土壤钾含量低于临界最低值,土壤基础钾养分供应量也并无增加,因此,种植粮食作物的土壤仍要增加施钾量。我们可以通过相对产量和大量的田间定位试验数据来支持这些结果^[29-33]。尽管农业机械化有所发展、秸秆还田量增加,但是数据显示,仅靠秸秆还田不能保持土壤钾平衡^[30,34],施钾肥对于保持高产和土壤钾平衡都是必不可少的^[35-36]。

尽管经济作物的土壤钾含量高于粮食作物,但其相对产量(东北、华北、西北、东南和西南分别为 83.1%、86.1%、87.1%、85.8% 和 77.2%)在一定程度上却低于粮食作物(东北、华北、西北、东南和西南分别为 87.1%、88.9%、89.0%、89.7% 和 84.3%)。这与经济作物(0.7336)氮磷处理产量与氮磷钾处理产量之间的斜率低于粮食作物(0.8335)相吻合(图 5)。进一步分析,粮食作物土壤基础钾养分供应量对产量的贡献高于经济作物,即经济作物对钾肥有较大的增产效应,所以经济作物要获得最佳产量,就需要适量增施钾肥。钾的偏因子养分平衡系数(PKB)(由作物地上部钾移走量除以施钾量计算得),经济作物和

粮食作物钾均超过了 1.0(图 6),表明作物吸收的钾多于通过化肥施入的钾,这已被很多研究证实^[17,33,37-38]。经济作物钾的偏因子养分平衡为 2.1(变化范围为 1.1—4.2),高于粮食作物的 1.3(变化范围为 1.0—1.5)(图 6),表明经济作物带走的养分高于粮食作物。此外,南方地区土壤含钾量低可能是与钾素淋洗、风化还有降雨量大有关^[32]。有限的报道显示,虽然蔬菜地土壤钾素含量为 100—142 毫克/升,也仅达中等水平^[39-40]。而 2000 年代东北、东南和西南地区经济作物的土壤测试钾含量分别为 72.3、95.8 和 98.9 毫克/升,低于经济作物的土壤钾素临界值。

本研究中不同地区的土壤速效钾含量有很大的空间变化,这就强调施肥量及管理措施都要因地制宜。西北地区的土壤速效钾含量在五个区中最高,其次是华北、东南、西南和东北。西北地区的土壤钾含量之所以高,是因为其土壤母质中含有钾矿石,例如云母和长石,所以土壤钾养分供应能力也高^[17,41-42]。然而,经过 22 年的种植历史,西北地区土壤钾含量却有所降低。西北地区全部作物、粮食作物、经济作物中土壤钾含量在 1990 年代分别为 153.5、139.0 和 158.3 毫克/升,在 2000 年代则分别为 116.5、102.1 和 145.5 毫克/升。西北地区经济作物的相对产量呈下降趋势,这也说明土壤钾养分供应能力降低(图 3C)。因此及时有效地施钾对于西北地区长期保持土壤钾素平衡非常必要。此外,我国北方也要重视钾肥施用,尤其是东北和西北地区,因为这些地区作物带走的养分过大,而且还田率较低^[43]。尽管我国南部农业机械化有所发展,秸秆还田量增加,但是由于降雨造成了钾淋洗和风化,这也影响了土壤钾素平衡。因此,钾肥管理需要考虑土壤钾素平衡,以增加土壤钾库积累量,从而保证高产和钾肥的高效利用。

5. 结论

总体而言,1990—2012 年中国的耕地土壤速效钾含量呈增加趋势,这主要是因为经济作物施钾量较大造成。相对产量结果对土壤测试数据变化给予了支持,经济作物施钾效应大于粮食作物。因此,不仅粮食作物在较低土壤钾水平下需要施钾,而且经济作物由于施钾增产效应显著,也需要合理施钾。需要针对特定区域和特定地块的施肥策略才能应对这一挑战。本文的结论有利于对未来的研究方向提供指导,如在农业机械化条件下对经济作物土壤钾临界值、钾养分循环和 4R 养分管理策略等的研究。

参考文献

- [1] Marschner, H. Mineral Plant Nutrition of Higher Plants [M], second ed. Academic Press, 1995, London.
- [2] Liu, J.P., Zhu, J.K. An Arabidopsis mutant that requires increased calcium for potassium nutrition and salt tolerance [J]. Proc. Natl. Acad. Sci., 1997, U.S. A. 94:14960–14964.
- [3] Pettigrew, W.T. Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton. Physiol. Plant, 2008, 133:670–681.
- [4] Dobermann, A., Cassman, K.G., Mamaril, C.P., et al. Management of phosphorus, potassium, and sulfur in intensive, irrigated lowland rice [J]. Field Crop Res., 1998, 56:113–138.
- [5] Fagerberg, B., Salomon, E., Jösso, S. Comparisons between conventional and ecological farming systems at Öebyn [J]. Swed. J. Agric. Res., 1996, 26:169–180.
- [6] Wortmann, C.S., Kaizzi, C.K. Nutrient balances and expected effects of alternative practices in farming systems of Uganda [J]. Agric. Ecosyst. Environ., 1998, 71:115–129.
- [7] Wijnhoud, J.D., Konboon, Y., Lefroy, R.D.B. Nutrient budgets: sustainability assessment of rainfed lowland rice-based systems in northeast Thailand [J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2003, 100:119–127.
- [8] Malo, D.D., Schumacher, T.E., Doolittle, J.J. Long-term cultivation impacts on selected soil properties in the northern Great Plains [J]. Soil Till. Res., 2005, 81:277–291.
- [9] Liang, D.Y., Xu, M.D., Wang, X.Q. Potassium role in yield increase in China [J]. In: Proceeding of International Symposium on Balanced Fertilization. Chinese Agriculture Press, 1989, Beijing.
- [10] Lin, B., 1989. Application of chemical fertilizers in China [M]. Beijing Science and Technology Press, Beijing.
- [11] Xie, J.C., Zhou, J.M. Advance in soil K research and K fertilizer application in China [M]. Soils, 1999, 31:244–254.
- [12] Xu, X., He, P., Qiu, S., et al. Estimating a new approach of fertilizer recommendation across small-holder farms in China [J]. Field Crops Res., 2014a, 163:10–17.
- [13] 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., 2014b, 157:27–34.
- [14] Zhao, S.C., He Ping, Qiu, S.J., et al. Responses of soil properties, microbial community and crop yields to various rates of nitrogen fertilization in a wheat–maize cropping system in north-central China [J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2014, 169:116–122.
- [15] He, P., Li, S.T., Jin, J.Y., et al. Performance of an optimized nutrient management system for double-cropped wheat–maize rotations in north-central China [J]. Agron. J., 2009, 101:1489–1496.
- [16] Wang, H.J., Huang, B., Shi, X.Z., et al. Major nutrient balances in small-scale vegetable farming systems in peri-urban areas in China [J]. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 2008, 81:203–218.
- [17] Tan, D.S., Jin, J.Y., Jiang, L.H., et al. Potassium assessment of grain producing soils in north China [J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2012, 148:65–71.
- [18] Yu, H., Huang, J.K., Rozelle, S., et al. Soil fertility changes of cultivated land in Eastern China [J]. Geogr. Res., 2003, 22:380–389 (Chinese with English abstract).
- [19] Kong, X.B., Zhang, F.R., Wei, Q., et al. Influence of land use change on soil nutrients in an intensive agricultural region of North China [J]. Soil Till. Res., 2006, 88:85–94.
- [20] Ren, Y., Zhang, S.X., Mu, L., et al. Change and difference of soil nutrients for various regions in China [J]. China Soils Fertil., 2009, 6:13–18 (Chinese with English abstract).
- [21] Zhang, J.T., Lu, C.A., Wang, J.Z., et al. The change of farmland soil fertility in fluvo aquic soil district of China [J]. China Soils Fertil., 2010, 5:6–11 (Chinese with English abstract).
- [22] Guttierrez, R.A. Systems biology for enhanced plant nitrogen nutrition [J]. Science, 2012, 336:1673–1675.
- [23] MacDonald, G.K., Bennett, E.M., Potter, P.A., et al. Agronomic phosphorus imbalance across the world's cropland [J]. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 2011, 108:3086–3091.
- [24] Pinder, R.W., Davidson, E.A., Goodale, C.L., et al. Climate change impacts of US reactive nitrogen [J]. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 2012, 109:7671–7675.
- [25] Liu, J.G., You, L.Z., Amini, M., et al. A high-resolution assessment on global nitrogen flows in cropland [J]. Proc. Natl. Acad. U.S.A., 2010, 107:8035–8040.
- [26] Zhang, W.F., Dou, Z.X., He, P., et al. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous

- fertilizer in China [J]. PNAS, 2013, 110:8375–8380.
- [27] Portch, S., Hunter, A. A systematic approach to soil fertility evaluation and improvement [M]. In: Special Publ. No. 5. PPIC China Program, 2002, Hong Kong.
- [28] Jin, J.Y., Bai, Y.L., Yang, L.P. High efficient Soil Testing Techniques and Instrument [M]. China Agricultural Press, 2006, Beijing, 152.
- [29] Yu, W.T., Jiang, Z.S., Zhou, H., et al. Effect of nutrient cycling on grain yield and potassium balance [J]. Nutr. Cycl. Agro-ecosyst., 2009, 84:203–213.
- [30] Tan, D.S., Jin, J.Y., Huang, S.W., et al. Effect of long-term application of K fertilizer and wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting systems [J]. Sci. Agric. Sin., 2007, 6:200–207.
- [31] Tan, D.S., Jin, J.Y., Huang, S.W., et al. Effect of long-term application K fertilizer and wheat straw to soil on potassium fixation capacity of selected soils from Northern China [J]. Sci. Agric. Sin., 2010, 43:2072–2079.
- [32] Xie, J.C., Zhou, J.M. History and prospects of potash application in China [M]. In: IPI 60 Anniversary Issue. E-ific., 2012, 32:19–27.
- [33] Niu, J.F., Zhang, W.F., Chen, X.P., et al. Potassium fertilization on maize under different production practices in the North China Plain [J]. Agron. J., 2011, 103:822–829.
- [34] Wang, H.T., Jin, J.Y., Wang, B., et al. Effect of long-term potassium application and wheat straw return to cinnamon soil on wheat yields and soil potassium balance in Shanxi [J]. Plant Nutr. Fertil. Sci., 2010, 16:801–808 (Chinese with English abstract).
- [35] Xing, S.L., Liu, M.C., Han, B.W. Effect of 12-year continuous application of straw and K fertilizer on soil potassium concentration and distribution in Fluvo-aquic soil [J]. Chin. J. Soil Sci., 2007, 38:486–490 (Chinese with English abstract).
- [36] Xing, S.L., Liu, M.C., He, P. Evaluating stability of durative yield increasing effect of potassium fertilization and straw recycling on crop yield by yield increase stability coefficient [J]. Agric. Res. Arid Areas, 2010, 28:47–51 (Chinese with English abstract).
- [37] Liao, Y.L., Zheng, S.X., Huang, J.Y., et al. Effect of K application on potassium efficiency and soil K status in K deficient paddy soil [J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2008, 24:255–260, Chinese with English abstract.
- [38] Zhang, H.M., Yang, X.Y., He, X.H., et al. Effect of long-term potassium fertilization on crop yield and potassium efficiency and balance under wheat–maize rotation in China [J]. Pedosphere, 2011, 21:154–163.
- [39] Huang, S.W., Jin, J.Y., Wang, Z.L., et al. Native potassium forms and plant availability in selected soils from northern China [J]. Plant Nutr. Fertil. Sci., 1998, 4:156–164, Chinese with English abstract.
- [40] Yang, L.P., Jin, J.Y., Liang, M.Z., et al. Correlation study between ASI based soil testing of available P, K, Zn Cu and Mn and those with standard method in China [J]. Chin. J. Soil Sci., 2000, 31:277–279 (Chinese with English abstract).
- [41] Huang, S.W., Jin, J.Y., Cheng, M.F., et al. The supplying capability of potassium during the period of crops growing on main soils of northern China [J]. China Soils Fertil., 1999, 3:3–7 (Chinese with English abstract).
- [42] Huang, S.W., Jin, J.Y., Wang, Z.L., et al. Native potassium forms and plant availability in selected soils from northern China [J]. Plant Nutr. Fertil. Sci., 1998, 4:156–164, Chinese with English abstract.
- [43] Li, S.T., Jin, J.Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China [J]. Sci. Agric. Sin., 2011, 44:4207–4229 (Chinese with English abstract).