

从土壤肥力变化预测中国未来磷肥需求*

曹 宁^{1,2} 陈新平^{1†} 张福锁^{1†} 曲 东²

(1 中国农业大学资源与环境学院,北京 100094)

(2 西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌 712100)

摘 要 近年来,我国磷肥用量持续增长,土壤有效磷含量也增加很快,这些变化对磷肥生产和施用将产生什么影响?这是一个关乎我国粮食安全和环境安全的重要问题,值得进行深入地探讨。本研究通过对我国 8 种典型农业土壤上磷收支平衡和有效磷消长关系的分析,获得预测我国主要农田土壤中有效磷变化模型的参数,即每 100 kg hm⁻²磷盈余平均可使我国土壤有效磷水平提高约 3.1 mg kg⁻¹。结果表明,从 1980 年到 2003 年我国除经济作物外的主要农田土壤上累积磷盈余约为 392 kg hm⁻²,由此推出目前我国农田土壤有效磷水平约为 19 mg kg⁻¹左右。从农业需求和环境保护角度确定的土壤有效磷最适范围应在 30~50 mg kg⁻¹之间。而要在未来的 30 a 内使我国土壤有效磷水平提高并维持在 40 mg kg⁻¹左右,磷肥的消费将在 30 a 间经历一个先升后降的过程,磷肥需求将在 2020 年左右达到最高峰 1 250 万 t,到 2035 年降至 1 050 万 t,此后应一直维持这一水平。

关键词 磷平衡;肥力变化;磷肥需求

中图分类号 A 143 **文献标识码** A

我国自 20 世纪 80 年代初开始大幅度增加磷肥的施用以来,磷肥(P₂O₅,下同)的产量及消费量分别从 1980 年的 237 万 t 和 300 万 t 猛增到 2002 年的 791 万 t 和 992 万 t^[1]。在 20 a 间,我国磷肥生产和消费量已经跃居世界首位,目前仍然呈迅猛上升趋势。我国加入 WTO 后,国内许多大型磷肥企业面对国际竞争竞相扩大生产能力,据磷肥工业协会估计,2010 年我国将形成 4~5 家磷复肥实物产能达到 200 万 t 的大型企业和 5~10 家年产 100 万 t 的中型企业,2030 年的磷肥生产能力将达到 1 550 万 t⁽¹⁾。由于磷肥工业的生产前景最终会受到消费需求的制约,因此有必要对未来磷肥的需求进行合理地预测,以便指导磷肥生产和施用,引导磷肥工业健康发展。

目前对磷肥需求的预测方法主要有:1) 根据以前的磷肥消费趋势进行模拟推测未来的磷肥需求^[2]。这种方法由于可能受到社会、经济等不确定因素的影响,使得从以前的发展趋势所推测出的结果会与实际情况有较大出入。2) 借鉴国外的氮磷钾

肥消费比例来预测我国的磷肥需求^[3]。由于受西方先有磷钾肥工业,后有氮肥工业的现实问题以及土壤肥力状况和种植结构等差别的影响,国外合理的氮磷钾消费比例不一定适合我国国情;3) 根据磷肥的增产效率来预测保证粮食安全的磷肥需求量^[4]。该方法单纯从作物的增产需求来预测,没有考虑到环境等其他方面的因素。由于以上方法均存在一定的局限性,有必要探讨一种新的方法来综合粮食安全和环境友好两方面因素对我国磷肥的生产与施用进行预测与评价。

土壤磷肥力较低时,增加磷肥投入来提高土壤有效磷水平对作物增产是必需的;但土壤达到富磷水平后,有效磷的进一步增加只会加重农田土壤磷素向水体流失的威胁。实现粮食安全和环境友好双赢的磷肥合理消费必定是以土壤磷肥力的合理化为前提的。本研究通过对长期定位试验结果的总结比较,建立土壤有效磷预测的经验模型,并结合土壤有效磷的变化情况,对我国未来的磷肥需求进行预测。

* 农业部“引进国际先进农业科学技术”项目(编号:2003-Z53)资助

† 通讯作者,E-mail: chenxp@cau.edu.cn; zhangfs@cau.edu.cn

作者简介:曹宁(1977~),女,内蒙古集宁人,博士研究生,研究方向为养分资源综合管理。E-mail: caoningn@163.com

(1) 磷肥与硫酸年会资料. 第十四届磷肥与硫酸行业年会. 北京. 2004

收稿日期:2006-01-06;收到修改稿日期:2006-05-20

$$n = P_a / P_{bal} \quad (3)$$

1 材料与方法

1.1 土壤有效磷预测模型的建立方法

由于磷肥施入土壤后基本没有挥发损失,淋失也相对较少,所以土壤磷素的长期盈余或缺必然决定土壤磷素的消长趋向^[5]。英国洛桑试验站的三组长期试验发现农田土壤磷平衡(肥料投入磷量减去作物带出磷量)的盈亏值几乎与土壤有效磷测定值或其增减量呈直线相关^[6];鲁如坤等^[7]在浙江、江西红壤性水稻土、华北潮土上也得到类似的结果。因此可以通过农田土壤磷盈余累积量,来推断目前国家尺度上农田土壤有效磷的平均水平。

土壤有效磷预测模型方程为:

$$P_{ai} = P_{a0} + n \cdot P_{bali} \quad (1)$$

$$P_{bali} = P_{fi} + P_{mi} - P_{hi} \quad (2)$$

式中, P_{ai} 表示第*i*年土壤有效磷; P_{a0} 表示土壤有效磷的初始值; P_{bali} 表示土壤磷素年盈余量; P_{fi} 表示化肥磷年投入量; P_{mi} 表示有机肥磷年投入量; P_{hi} 表示作物收获年移出磷量; n 表示土壤磷盈余每增减一个单位($P \text{ kg hm}^{-2}$)相应的土壤有效磷消长量($P \text{ mg kg}^{-1}$)。

由于本文的资料来源中有效磷均采用 Olsen 方法,且我国主要的土壤类型绝大部分均适合采用 Olsen 方法,因此本文中所提到的有效磷均指 Olsen 方法的测定结果。

计算方法及数据来源:式(1)、式(2)和式(3)中 P_{a0} 采用第二次土壤普查时全国土壤有效磷的平均值 8 mg kg^{-1} ,即不同类型土壤有效磷测定值及该类型土壤所占面积^[8]的加权平均, P_f 采用 FAO 数据^[11], P_m 参考沈善敏^[9]及 Shen 等^[10]的估算数据, P_h 为作物产量^[11]乘以农产品中的磷养分含量^[12,13]。

表 1 长期定位试验点的土壤类型、起止时间、理化性状及资料来源

Table 1 Basic information about the long-term experiments

试验点 Site	土壤发生分类名称 Soil texture	土壤系统分类名称 FAO ¹⁾	起止时间 Studied periods (yyyy-yyyy)	pH	有机质 OM (g kg^{-1})	全磷 TP (g kg^{-1})	有效磷 Olsen-P (mg kg^{-1})	资料来源 Data source
吉林 Jilin	黑土 Black soil	湿润均腐土 Luvic Phaeozems	1990 ~ 1999	7.6	23.3	1.39	27	[14]
四川 Sichuan	紫色土 Purplish soil	紫色湿润雏形土 Eutric Cambisol	1992 ~ 1996	7.7	12.2	0.43	15	[15]
湖南 Hunan	红壤 Red soil	铝质湿润雏形土 Eutric Cambisol	1991 ~ 2000	5.7	11.5	0.32	13.9	[16],[17]
陕西 Shaanxi	黄土 Loess soil	正常新成土 Calcaric Regosol	1991 ~ 1998	8.6	10.92	0.61	9.6	[18],[19]
新疆 Xinjiang	灰漠土 Grey desert soil	钙积干旱土 Calcaric Cambisol	1990 ~ 1997	8.0	17.1	0.81	22	[20],[21]
河南 Henan	潮土 Fluvo aquic soil	潮湿雏形土 Calcaric Cambisol	1991 ~ 2000	8.1	10.6	0.65	21.1	[22]
浙江 Zhejiang	水稻土 Paddy soil	水耕人为土 Hydrgic Anthrosols	1991 ~ 2000	6.6	28.7	1.11	22.33	[23]
北京 Beijing	褐潮土 Fluvo aquic soil	淋溶土 Haplic Luvisol	1985 ~ 1997	7.5	13.1	0.59	6.1	(2)

1) FAO: Food and Agriculture Organization

选取 8 个长期定位试验点的数据来计算模型中的 n 值, P_a 、 P_f 、 P_h 均由表 1 所列文献资料中获得, P_a

为试验初始年份土壤有效磷与终止年份有效磷的差值; P_{bal} 为试验初始年份土壤磷平衡与终止年份磷

(2) 郭李萍. 北京潮土小麦-玉米轮作条件下肥料效应的定位研究. 中国农业大学博士学位论文, 1998

平衡的差值。长期定位试验点的重要信息及资料来源如表 1 所示。

1.2 未来磷肥需求的预测方法

对未来磷肥需求的预测分为培肥地力和维持肥力两个阶段。

在土壤培肥阶段,磷肥的需求量的计算如式(4)所示:

$$P_i = A_i (P_a - P_{a2004}) / yn + P_{hi} \quad (4)$$

式中, P_i 表示第 i 年磷肥需求量; A_i 表示第 i 年耕地面积, P_a 表示合理的土壤有效磷范围; P_{a2004} 表示目前的土壤有效磷水平; y 表示将 P_{a2004} 提高到 P_a 预定的时间; n , P_{hi} 含义同式(1)。

在维持土壤肥力阶段,磷肥的需求量的计算如式(5)所示:

$$P_i = P_{hi} \quad (5)$$

式中, P_i 表示第 i 年磷肥需求量; P_{hi} 含义同式(1),根据未来粮食需求量和农产品中的磷养分含量^[12,13]估算。

2 结果与分析

2.1 我国农田土壤有效磷预测模型中不同土壤有效磷随磷平衡增减的变化量

对我国 8 个长期定位试验中的磷平衡变化与土壤有效磷消长进行相关分析,结果表明(表 2),在吉林黑土、新疆灰漠土、陕西黄土、北京褐潮土、河南潮土、湖南旱地红壤及四川紫色土上不同处理磷平衡盈亏和有效磷消长都呈极显著性相关关系;浙江水稻土虽然没有达到 5%的显著相关,但是相差很小(5%显著性的 $r = 0.754$)。

表 2 不同地区磷平衡和有效磷消长的关系

Table 2 Relationship between P balances and the changes in soil Olsen-P

试验点 Site	吉林 Jilin	四川 Sichuan	湖南 Hunan	陕西 Shaanxi	新疆 Xinjiang	河南 Henan	浙江 Zhejiang	北京 Beijing
相关系数 Correlation coefficient r	0.91 **	0.98 **	0.96 **	0.99 **	0.88 **	0.96 **	0.72	0.86 **
方程斜率 Constant b	0.057 4	0.044 4	0.027 5	0.035 3	0.014 4	0.026 0	0.032 8	0.016 0

所选 8 个长期定位试验基本涵盖了我国主要土壤类型和农作制度,表明在全国范围内用土壤磷平衡状况来判断有效磷发展趋向比较可靠。土壤磷平衡增减和有效磷变化的直线回归方程中的斜率“ b ”值,即代表土壤磷平衡每增减一个单位($P \text{ kg hm}^{-2}$)相应的土壤有效磷消长量($P \text{ mg kg}^{-1}$)^[24]。如表 2 所示,8 种农田土壤上每累积 1 kg hm^{-2} 磷素,有效磷的增加量分别为:吉林黑土, $0.057 4 \text{ mg kg}^{-1}$;四川紫色土, $0.044 4 \text{ mg kg}^{-1}$;湖南旱地红壤, $0.027 5 \text{ mg kg}^{-1}$;陕西黄土, $0.035 3 \text{ mg kg}^{-1}$;新疆灰漠土, $0.014 4 \text{ mg kg}^{-1}$;河南潮土, $0.026 0 \text{ mg kg}^{-1}$;浙江水稻土, $0.032 8 \text{ mg kg}^{-1}$;北京褐潮土, $0.016 0 \text{ mg kg}^{-1}$ 。根据我国不同土壤所占面积比例加权平均得出:农田土壤每累积 1 kg hm^{-2} 磷素,我国土壤有效磷平均提高约 0.031 mg kg^{-1} ,即土壤有效磷变化预测模型中的 n 值为 0.031。

2.2 我国农田土壤磷平衡及有效磷现状

我国农田生态系统中磷素(以 P 计,下同)的输入、输出及磷表现平衡的历史演变^[11]如表 3 所示。

20 世纪 50 年代以前,我国农田土壤中磷素输入小于输出,磷平衡表现为亏缺状态,1952 年我国农田生态系统中磷素的年亏缺量为 39.9 万 t。20 世纪 70 年代以后,磷平衡由亏缺转为盈余并一直保持稳定盈余状态,到 2003 年农田土壤磷素年盈余量达到 331.1 万 t。20 世纪 80 年代以来,磷平衡盈余量增长很快,单位面积的磷盈余量由 1980 年的 6.1 kg 增加到 2003 年的 26.1 kg 。按照粮食作物和经济作物上的施肥量^[25],不同作物的产量^[11]及磷含量估算^[12,13],可推算出 1996 年经济作物对全国土壤总磷盈余的贡献为 40%。考虑到经济作物的面积在不断扩大,且磷肥在经济作物上的投入比例也在逐年增加,可以粗略估计 20 世纪 80 年代以来经济作物对全国土壤磷盈余量的贡献约为 30%。从 1980 年到 2003 年我国农田土壤累积磷盈余量为 560 kg hm^{-2} ,则除经济作物外的主要农田土壤上累积磷盈余约为 392 kg hm^{-2} 。代入式(1)可推算出目前全国主要农田土壤有效磷(P_{a2004})加权平均约为 19 mg kg^{-1} 左右。

表 3 我国农田生态系统中磷的输入、输出及平衡的历史演变

Table 3 Phosphorus input, output and balance in the agroecosystem of China from 1952 to 2003

年份 Year	输入 Input		输出 Output	表观平衡 Balance	耕地面积 Arable area ($\times 10^3 \text{ hm}^{-2}$)	磷盈余 Balance (P kg hm^{-2})
	化肥 Fertilizer	有机肥 Manure	收获作物带出 Harvest			
	(P 10^4 t)					
1952	0.6	46.9	87.4	- 39.9	103.4	- 3.9
1979	89.5	109.8	173.1	26.3	79.2	3.3
1980	119.8	107.4	168.3	58.9	96.9	6.1
1985	131.2	119.0	204.9	45.3	120.8	3.7
1990	255.6	137.9	251.1	142.4	123.7	11.5
1995	389.2	167.6	273.8	283.0	124.1	22.8
2000	376.0	174.8	287.9	262.9	137.1	19.2
2003	433.4	174.8	277.1	331.1	127.0	26.1

2.3 对我国未来磷肥需求的预测

获得稳定的高产需要较高的土壤肥力。土壤磷肥力低时,虽然足量的磷肥投入也可能在当年获得高产,但产量易受到年际间经济、气候等因素的影响,从而变幅太大,不能稳定维持在较高水平。在土壤中建立一个具有相对较大容量的有效磷库,对保证粮食安全更为有利。对粮食作物生产而言,土壤有效磷存在一个增产临界值,高于该临界值时,施磷肥不再增产,只起到维持土壤肥力的作用。美国依阿华州农田土壤有效磷达到 $\text{P } 16 \sim 20 \text{ mg kg}^{-1}$ 时施磷肥没有增产效果^[26];英国的施肥推荐建议农田和草地土壤有效磷达到 $\text{P } 16 \sim 25 \text{ mg kg}^{-1}$,菜地土壤有效磷达到 $\text{P } 26 \sim 45 \text{ mg kg}^{-1}$ 时不施磷肥^[27];我国平原粮区旱地土壤目前的增产临界值为土壤有效磷高于 $\text{P } 30 \text{ mg kg}^{-1}$ ^[28]。因此,我国未来应将农田土壤有效磷水平普遍提高到 $\text{P } 30 \text{ mg kg}^{-1}$ 以上。但土壤有效磷水平并不是越高越好,英国洛桑试验站的结果表明土壤中有有效磷含量超过 $\text{P } 60 \text{ mg kg}^{-1}$ 时,地下水中 P 浓度会急剧增加,对水体富营养化的威胁增大^[29];章明奎等研究表明,我国水稻土壤磷环境风险值在 $\text{P } 35 \sim 45 \text{ mg kg}^{-1}$ Olsen-P^[30]。从环境角度考虑,农田有效磷水平不应超过磷流失的临界值。综合两方面因素来看,应将土壤有效磷水平保持在作物高产需要的临界值水平与对环境产生威胁的阈值之间。水稻土的增产临界值通常高于旱地土壤^[31],而磷素淋失临界值低于旱地土壤^[30,32~34],按照协调水稻土壤环境和高产要求来制定土壤有效磷目标值,基本可以符合旱地土壤要求,因此按照统一标准认为将土壤有效磷库保持在 $\text{P } 30 \sim 50 \text{ mg kg}^{-1}$ Olsen-P 比较适宜。目

前我国的农田土壤仍处在需要进一步培肥的阶段。

根据表 3 数据和式(1)~式(3)计算出我国自 1980 年以来磷肥消费与土壤有效磷变化情况,并根据式(4)、式(5)计算出基于土壤磷肥力变化的未来磷肥需求预测结果(图 1)。如图 1 所示,假定从 2004~2015 年将土壤肥力普遍提高到 $\text{P } 40 \text{ mg kg}^{-1}$,在前 16 a 要使土壤有效磷从 $\text{P } 19 \text{ mg kg}^{-1}$ 升高到 $\text{P } 30 \text{ mg kg}^{-1}$,则农田土壤总体磷素年盈余量(P)需从 331.1 万 t 增加到 442.4 万 t,如果粮食作物产量在 2004 年的基础上以年均 6.1% 的速度增加(即 2030 年达到 6.5 亿 t 以满足人口需求^[35]),而经济作物产量不变,则总磷(P)投入需从 436.7 万 t 增加到 545.9 万 t,由于有机肥的投入量在未来 30 a 内不会有太大变化^[35],因此磷肥(P_2O_5)需求量将从 2005 年的 1 000 万 t 增加到 2020 年的 1 250 万 t;2020 年以后应使土壤累积盈余量逐年降低,但此时土壤中仍存在磷素盈余,土壤有效磷水平将继续增加。若 2020 年到 2035 年将土壤有效磷从 $\text{P } 30 \text{ mg kg}^{-1}$ 增加到 $\text{P } 40 \text{ mg kg}^{-1}$,则土壤磷盈余量应以年均 1.45% 的速度递减,磷肥(P_2O_5)需求从 1 250 万 t 逐步降至 1 050 万 t。2035 年后应将土壤肥力维持在 $\text{P } 40 \text{ mg kg}^{-1}$ 左右,此时土壤中不再允许有大量的磷素盈余。届时,粮食作物收获带走的磷(P)量为 250 万 t,约需磷肥(P_2O_5)570 万 t;其他作物虽然面积可能继续扩大,但目前的用肥量已经很高,有可能会下调,因此可以假设其他作物磷肥(P_2O_5)用量将维持目前状况,即果树蔬菜等经济作物需 270 万 t;林业 130 万 t;草业 20 万 t;渔业 36 万 t^[36]。则 2035 年以后预计磷肥(P_2O_5)年需求量总体仍需 1 050 万 t 左右。

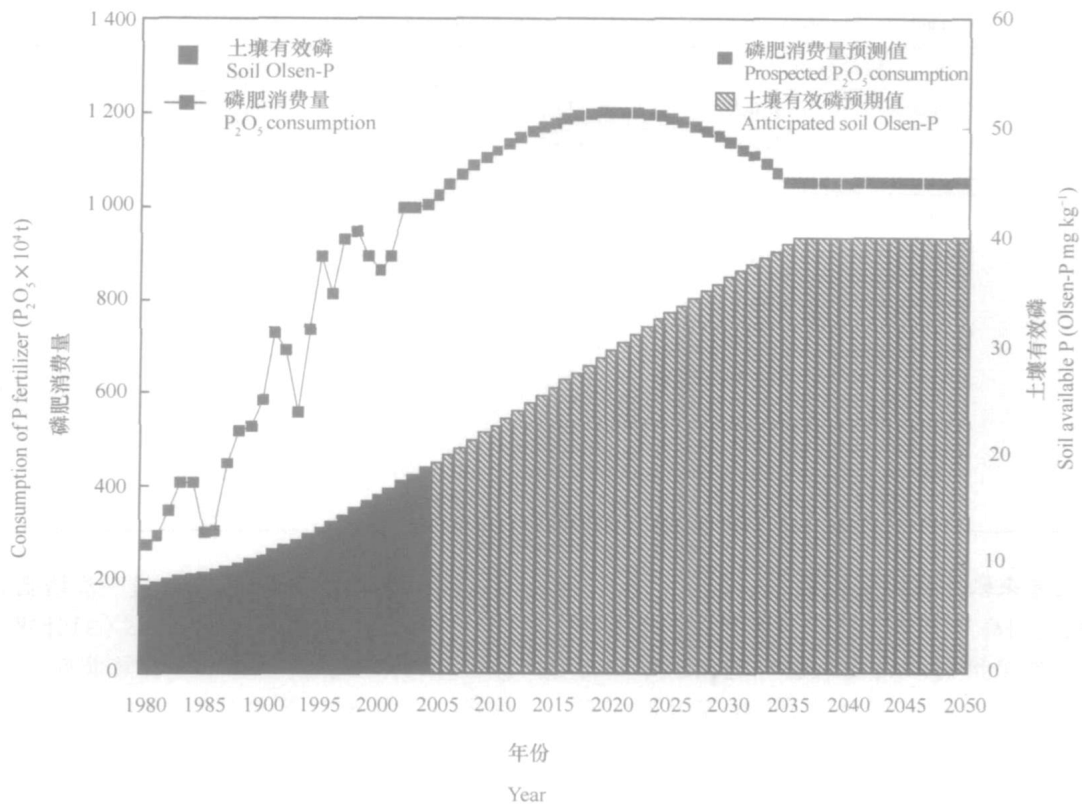


图1 我国磷肥消费对土壤有效磷的影响及基于土壤磷肥力变化的磷肥需求预测

Fig. 1 Effect of phosphorus fertilizer consumption on soil available P from 1980 to 2004 and prediction of phosphorus fertilizer demand in China based on change in soil phosphate fertility

3 讨论

发达国家施用化肥历史较长,对养分的综合管理研究也较多,养分投入已基本走向合理化和科学化。在经历了20世纪80年代的施肥高峰后,欧美各国磷肥(P_2O_5)投入量普遍降低(表3)^[11];2000年以后,美国、欧盟、德国、英国等地磷肥单位面积投入量与历史最高投入量相比,分别下降了11%、77%、69%和36%。这是由于20世纪80年代末期,由农业面源污染引起的水体富营养化引起了欧美等国的广泛关注^[37]。1992年6月,欧盟通过了以农业-环境一揽子计划为主导思想的新的共同农业政策来缓解农业对环境的压力,因此,20世纪90年代以后,欧盟磷肥的平均用量开始下降,目前仅为 P_2O_5 39 kg hm^{-2} ^[11]。20世纪70年代初到90年代末,英国单位面积耕地的平均磷肥用量一直在 P_2O_5 60 kg hm^{-2} 以上。同时,有效磷含量在 $P_{16} \sim 45 \text{ mg kg}^{-1}$ 之间的土壤面积占农田总面积的百分比由20世纪70年代初的53.5%

升高到90年代的64%左右,有效磷低于 $P_{15} \text{ mg kg}^{-1}$ 的土壤面积相应有所下降^[38]。2000年以后,英国磷肥用量降到 P_2O_5 49 kg hm^{-2} 左右^[11],如果按蔬菜及粮食产量乘以磷养分含量来粗略估算作物收获带走磷量,发现英国目前的磷肥用量基本等于作物收获带走的磷量。也就是说,英国在将土壤磷肥力普遍提高之后,已经进入维持土壤肥力阶段,从而磷肥用量大幅度降低。借鉴发达国家的经验,我国农业中磷肥的宏观调控也应以实现土壤有效磷水平的合理化为目标。

20世纪60年代初,我国农田单位面积磷肥(P_2O_5)用量只有 2 kg hm^{-2} ,2000年以后已经增加到 P_2O_5 71 kg hm^{-2} ,在国际上处于高水平,平均磷肥用量几乎是欧美发达国家的2~3倍^[11]。但由于我国基础肥力较低,且农田复种指数高,目前平均 P_2O_5 71 kg hm^{-2} 的磷肥用量尚属合理范围。在土壤培肥阶段,这一用量可能还需略有提高。

本文将我国土壤有效磷的目标值暂定为 $P_{40} \text{ mg kg}^{-1}$,主要是考虑到我国农田土壤有效磷水

平普遍偏低,土壤中尚未建立起一个容量相对较大的有效磷库。但 $P_{40} \text{ mg kg}^{-1}$ 的有效磷水平是基于国家尺度设定的平均值,各地区应具体情况具体考虑,尽快缩小区域间的施肥差异,避免造成经济发达地区出现环境问题,而经济欠发达地区尚需培肥地力的局面。因此,我国磷肥消费应在总量控制的基础上,特别加强区域间的宏观调控;同时通过提高养分资源的综合管理能力,使肥料用量趋于合理而又不影响作物产量的增加,以免重蹈发达国家“发展-污染-发现-治理”的覆辙。

根据本研究的预测结果,我国未来磷肥用量的上限应为 P_2O_5 1 250 万 t,最终稳定在 P_2O_5 1 050 万 t 左右。该用量范围是保证粮食稳定高产,同时又不对环境造成威胁的合理用量。这一预测结果将会对引导磷肥工业合理发展,以及指导磷肥的合理施用起到积极作用。

参 考 文 献

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. http://www.fao.org/Statistical_Databases//FAO_STAT_Agriculture, 1960, 1980, 2000
- [2] 林仁惠. 我国 2000 年化肥产需形势和化肥市场预测. 农业信息探索, 2000, 3: 23~24. Lin R H. Forecasting fertilizer production and demand of China in 2000 (In Chinese). *Agricultural Information Search*, 2000, 3: 23~24
- [3] 林葆, 李家康. 中国磷肥施用量与氮磷比例问题. 农资科技, 2002, 3: 13~16. Lin B, Li J K. Phosphate fertilizer application rate and the ratio of nitrogen and phosphate in China (In Chinese). *Agrochemical Science & Technology*, 2002, 3: 13~16
- [4] 许秀成. 应谨慎预测未来化肥需求量. 磷肥与复肥, 2004, 19(2): 7~10. Xu X C. Forecasting prudently fertilizer demand for the future (In Chinese). *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2004, 19(2): 7~10
- [5] 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 waterbody (In Chinese). *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2003, 18(1): 4~8
- [6] Johnston A E, Poulton P R. The role of phosphorus in crop production and soil fertility: 150 years field experiments at Rothamsted. In: Schultz J J. ed. *Phosphate Fertilizers and the Environment*. UK: IFDC. Muscle Shoals. AL. 1992. 45~64
- [7] 鲁如坤, 史陶钧. 土壤磷素在利用消耗和累积. 土壤通报, 1980, (5): 6~8. Lu R K, Shi T J. Consumption and accumulation of soil phosphorus in utilizing (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 1980, (5): 6~8
- [8] 中国科学院地理科学与资源研究所. <http://www.natural-resources.csb.cn/ny/cdroom/land/landtxz.html>
- [9] 沈善敏主编. 中国土壤肥力. 北京: 中国农业出版社, 1998. Shen S M. ed. *Soil Fertility of China* (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1998
- [10] Shen R P, Sun B, Zhao Q G. Spatial and temporal variability of N, P and K balances for agroecosystems in China. *Pedosphere*, 2005, 15(3): 347~355
- [11] 中华人民共和国国家统计局. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj>. National Bureau of Statistics of China: <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj>
- [12] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究. 农田养分支出参数. 土壤通报, 1996, 27(4): 145~151. Lu R K, Liu H X, Wen D Z, et al. Nutrient cycle and budget in agroecosystem in China. The parameters on nutrient output in arable area (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 1996, 27(4): 145~151
- [13] 李俊良, 张瑞清, 赵荣芳, 等. 华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系的农田养分平衡模式. 中国农业科技导报, 2003, 5(增刊): 40~44. Li J L, Zhang R Q, Zhao R F, et al. A typical nutrients budget model for winter-wheat/summer maize rotation system in North China Plain (In Chinese). *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2003, 5(Suppl.): 40~44
- [14] 孙宏德, 朱平, 刘淑环, 等. 有机无机肥料对黑土肥力和作物产量影响的检测研究. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(增刊): 110~116. Sun H D, Zhu P, Liu S H, et al. The monitoring research of influence on fertility of black soil and crop yield by using organic and inorganic fertilizers (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(Suppl.): 110~116
- [15] 石孝均, 刘洪滨, 黄英, 等. 紫色土肥力及肥料效益定位试验研究. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(增刊): 53~61. Shi X J, Liu H B, Huang Y, et al. Long-term located study on soil fertility and fertilizer efficiencies in purple soil (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(Suppl.): 53~61
- [16] 王伯仁, 徐明岗, 黄佳良, 等. 红壤旱地长期施肥下土壤肥力及肥料效益变化研究. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(增刊): 21~28. Wang B R, Xu M G, Huang J L, et al. Study on change of soil fertility and fertilizer efficiency under long-term fertilization in upland of red soil (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(Suppl.): 21~28
- [17] 王伯仁, 徐明岗, 文石林, 等. 长期施肥对红壤旱地磷组分及磷有效性的影响. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(增刊): 47~52. Wang B R, Xu M G, Wen S L, et al. Effects of long-term fertilization on composition and availability of phosphorus in upland of red soil (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(Suppl.): 47~52
- [18] 杨学云, 孙本华, 马路军, 等. 黄土施肥效应与肥料演变的长期定位检测研究. 长期施肥的产量效应. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(增刊): 66~70. Yang X Y, Sun B H, Ma L J, et al. A study on the effect of fertilization and fertility evolution of loess soil in long-term stationary experiment. Effects of long-term fertilization on crop yield (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(Suppl.): 66~70
- [19] 孙本华, 杨学云, 古巧珍, 等. 黄土施肥效应与肥料演变的长期定位检测研究. 长期施肥对土壤理化性质的影响. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(增刊): 71~74. Sun B H, Yang X

- Y, Gu Q Z, *et al.* A study on the effect of fertilization and fertility evolution of loess soil in long-term stationary experiment . Effects of long-term fertilization on soil properties (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(Suppl.): 71 ~ 74
- [20] 王讲利, 凌慧娟, 孙建光, 等. 灰漠土长期定位施肥试验研究 . 试肥对作物产量、肥料效益及水效益的影响. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(增刊): 82 ~ 86. Wang J L, Ling H J, Sun J G, *et al.* Research of the long-term fertilization experiment on the grey desert soil in Xinjiang . Effect of long-term fertilization on crop yield, fertilizer and water use efficiency (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(Suppl.): 82 ~ 86
- [21] 王讲利, 刘骅, 桂贞, 等. 灰漠土长期定位施肥试验研究 . 长期定位施肥对土壤肥力的影响. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(增刊): 87 ~ 91. Wang J L, Liu H, Gui Z, *et al.* Research of the long-term fertilization experiment on the grey desert soil in Xinjiang . Effect of long-term fertilization on soil fertility (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(Suppl.): 87 ~ 91
- [22] 黄绍敏, 宝德俊, 皇甫湘荣, 等. 长期施肥对潮土作物产量及肥料对产量贡献的影响. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(增刊): 141 ~ 145. Huang S M, Bao D J, Huangfu X R, *et al.* Effect of long-term fertilizer application and contribution to crop yield in fluvo-aquic soil (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(Suppl.): 141 ~ 145
- [23] 王胜佳, 陈义, 王家玉. 施肥组合对水稻产量与土壤肥力的长期影响研究. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(增刊): 121 ~ 126. Wang S J, Chen Y, Wang J Y. Study on long-term effect of different fertilizer combinations on crop yield and soil fertility in rice field (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(Suppl.): 121 ~ 126
- [24] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究 . 农田养分平衡和土壤有效磷、钾消长规律. *土壤通报*, 1996, 27(6): 241 ~ 242. Lu R K, Liu H X, Wen D Z, *et al.* Nutrient cycle and budget in agroecosystem in China. . Law of nutrient equilibrium and the gain and loss of available P and K in arable area (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 1996, 27(6): 241 ~ 242
- [25] 中国植物营养与肥料学会, 加拿大磷钾研究所. 肥料与农业发展. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. Chinese Society of Plant Nutrition and Fertilizer Science, PPIC. Fertilizer and Agricultural Development (In Chinese). Beijing: China Agriculture Sci-Tech Press, 1999
- [26] Webb J R. Effects of residual and annually applied phosphorus on soil test values and yields of corn and soybean. *Journal of Production Agriculture*, 5(1): 148 ~ 152
- [27] Ministry of Agriculture, Fisheries and Food on Behalf of the Controller of Her Majesty's Stationery Office. Fertilizer Recommendations for Agricultural and Horticultural Crops (RB209). London: The Publications Centre, 2000
- [28] 刘保存, 孙德明, 吴静. 北京郊区粮田土壤养分与施肥. *北京农业科学*, 1999, 17(6): 30 ~ 34. Liu B C, Sun D M, W J. Soil nutrient and fertilization in suburb fields of Beijing (In Chinese). *Beijing Agricultural Sciences*, 1999, 17(6): 30 ~ 34
- [29] Higgs B, Johnston A E, Salter J L, *et al.* Some aspects of achieving sustainable phosphorus use in agriculture. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1): 80 ~ 87
- [30] 章明奎, 周翠, 方利平. 水稻土磷环境敏感临界值的研究. *农业环境科学学报*, 2006, 25(1): 170 ~ 174. Zhang M K, Zhou C, Fang L P. Environmentally sensitive thresholds of phosphorus of paddy soils (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(1): 170 ~ 174
- [31] 周鸣铮. 中国的测土施肥. *土壤通报*, 1987, 18(1): 7 ~ 13. Zhou M Z. Nutrient recommendations in China (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 1987, 18(1): 7 ~ 13
- [32] 钟晓英, 赵小蓉, 鲍华军, 等. 我国 23 个土壤磷素淋失风险评估 . 淋失临界值. *生态学报*, 2004, 24(10): 2 275 ~ 2 280. Zhong X Y, Zhao X R, Bao H J, *et al.* The evaluation of phosphorus leaching risk of 23 Chinese soils I. Leaching criterion (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2 275 ~ 2 280
- [33] Zhang GL, Burghardt W, Yang J L. Chemical criteria to assess risk of phosphorus leaching from urban soils. *Pedosphere*, 2005, 15(1): 72 ~ 77
- [34] 曹志洪, 林先贵, 杨林章, 等. 论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能 . 稻田土壤磷素径流迁移流失的特征. *土壤学报*, 2005, 42(5): 799 ~ 804. Cao Z H, Lin X G, Yang L Z, *et al.* Ecological function of “Paddy Field Ring” to urban and rural environment . Characteristics of soil P losses from paddy fields to waterbodies with runoff (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(5): 799 ~ 804
- [35] 许秀成. 应谨慎预测未来化肥需求量. 磷肥与复肥, 2004, 19(2): 7 ~ 10. Xu X C. Forecasting prudently fertilizer demand for the future (In Chinese). *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2004, 19(2): 7 ~ 10
- [36] 李家康, 林葆, 梁国庆, 等. 对我国化肥使用前景的剖析. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(1): 1 ~ 10. Li J K, Lin B, Liang G Q, *et al.* Prospect of consumption of fertilizer in China (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(1): 1 ~ 10
- [37] 卓慰白, 胡云才, Urs Schmidhalter. 欧盟农业和环境政策对化肥消费和生产的影响. 磷肥与复肥, 2004, 19(2): 11 ~ 14. Zhuo M B, Hu Y C, Urs Schmidhalter. Impact of agricultural and environmental policy on fertilizer consumption and production in the European Union (In Chinese). *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2004, 19(2): 11 ~ 14
- [38] Goulding K. P and K in the Crop, the Soil and the Environment. Beijing: China Agricultural University Press, 2004

PREDICTION OF PHOSPHATE FERTILIZER DEMAND IN CHINA BASED ON CHANGE IN SOIL PHOSPHATE FERTILITY

Cao Ning^{1,2} Chen Xinping^{1†} Zhang Fusuo^{1†} Qu Dong²

(1 College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

(2 College of Resources and Environment, North West Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract The consumption of P fertilizer has been increasing dramatically in China and so has the content of available P in the soil since the 1980 's. However, how the change will affect production and application of P fertilizer in China remains to be unclear and a concern related to food safety and environment safety. Relationship between P balance and change in soil Olsen-P in eight different types of arable soils were evaluated. Results show that on average, about 3.1 % of the annual P surplus in the arable land in China was considered as Olsen-P. In the period from 1980 to 2003, the cumulative P surplus reached about 392 kg hm⁻², from which it can be inferred that currently the content of Olsen-P in the arable land of China is about 19 mg kg⁻¹. If soil available phosphorus is to be increased to and maintained around 40 mg kg⁻¹ in the future thirty years, the demand for phosphorus fertilizer will rise to 12.5 million tons in 2020 and then drop to 10.5 million tons in 2035.

Key words Change in available phosphorus; P balance; Demand for phosphorus fertilizer