

1980—2008年中国磷资源代谢的分析研究

马敦超, 胡山鹰, 陈定江, 李有润

(清华大学化学工程系生态工业研究中心, 北京 100084)

摘要:运用物质流分析方法构建数学模型以描述 1980—2008 年我国磷资源代谢的动态变化情况, 并通过比较 1980 年和 2008 年各个磷代谢环节的变化, 分析我国磷资源代谢存在的缺陷。结果发现, 我国磷资源代谢的动态变化特征可概括为: 强开采、高消费、高排放和低循环; 规模养殖和城市生活的废物处理不当以及小型磷矿的开采是导致我国磷资源不可持续使用的三大原因。最后提出若干对策, 以期实现磷资源的科学管理。

关键词:物质流分析; 磷资源代谢; 磷资源不可持续使用

中图分类号: TQ126.3; X24

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2011)09-0010-04

Study on phosphorous metabolism in China from 1980 to 2008

MA Dun-chao, HU Shan-ying, CHEN Ding-jiang, LI You-run

(Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Material flow analysis is used in this paper to construct a mathematical model for the description of the dynamic change of phosphorous metabolism in China from 1980 to 2008. Then phosphorous metabolism in 1980 and 2008 are compared from the perspective of the whole life cycle to analyze the existing metabolic defects. The dynamic change traits of China's phosphorous metabolism can be described as crazy exploitation, excessive consumption, high emission and little recycling. Unscientific waste disposal of scale breeding and city life, plus inefficient activities of small mines, should be mainly blamed for the unsustainability of phosphorous in China. Finally, several suggestions are proposed for the scientific management of China's phosphorous resource.

Key words: material flow analysis; phosphorous metabolism; phosphorous unsustainability

作为一种不可再生的矿产资源, 磷元素在人类生活和生产中发挥着不可替代的作用。作为动植物的必需元素, 磷广泛存在于细胞、蛋白质、骨骼和牙齿中, 发挥重要的生理机能; 同时作为重要的化工原料, 磷可以用来制造磷肥、烟火、杀虫剂和合成洗涤剂等产品。改革开放以来, 随着我国经济的高速发展, 不合理开采磷矿石和滥用磷产品等人类活动大大干扰了磷的自然循环, 致使磷养分大量流失, 并引发了一系列的环境问题^[1-2]。我国目前正处于经济转型期, 提高资源产出率和全面管理自然资源是保持经济快速发展的同时必须关注的问题。因此研究自改革开放以来我国磷资源的代谢模式, 寻找其存在的问题并提出相应的对策以实现我国磷资源的科学管理, 具有很重要的现实意义。

物质流分析方法(Material Flow Analysis-MFA)是运用系统思想对经济系统使用的物质输入量和输出量进行评估和优化管理的一种分析方法。它描述了人类从自然界获取能源与资源, 继而进行生产和消费活动, 并产生出各种形式的废弃物, 以及废弃物的再使用和再循环利用过程中的实物流量和流

向^[3]。已有国内学者利用物质流分析方法对我国磷资源代谢进行研究, 并提出一些有利于实现我国磷资源可持续使用的结论^[4-7], 但是至今仍没有从动态的角度研究自改革开放以来我国磷资源代谢的变化特征的相关报道。

本文中首先建立磷资源代谢的物质流分析研究框架与模型, 并选择若干代表性指标以考察 1980—2008 年我国磷资源代谢的动态变化特征; 接着以 1980 年和 2008 年为例, 从全生命周期的角度出发, 探究我国磷资源代谢各个环节的具体变化, 以分析我国磷代谢存在的问题; 最后提出政策建议, 为实现我国磷资源的可持续利用提供科学决策依据。

1 研究方法

1.1 物质流分析研究框架

物质流分析研究框架如图 1 所示。在开采阶段, 磷矿分为大中矿和小矿 2 种, 前者采矿效率高达 81.9%, 后者采富弃贫, 效率仅为 30.0%^[2]; 生产制造阶段把磷矿石加工为 3 类含磷产品: 磷肥, 黄磷产品以及饲料, 黄磷产品是以黄磷为原料生产的各种

收稿日期: 2011-06-28; 修回日期: 2011-07-30

作者简介: 马敦超(1985-), 男, 博士生, 从事生态工业与循环经济相关研究, mdchao1985@gmail.com; 胡山鹰(1965-), 男, 博士, 教授, 通讯联系人, hxr-dce@tsinghua.edu.cn。

下游产品,包括热法磷酸、三聚磷酸钠、三氯化磷和合成洗涤剂等;使用阶段主要包括5个消费节点:城市生活、农村生活、规模养殖、家庭养殖以及种植业,另外少

数的黄磷产品会进入工业应用,最后以固体废物的形式排放到环境之中;前3个生命阶段排放的含磷废物汇集在废物管理阶段的自然水体和自然土壤中。

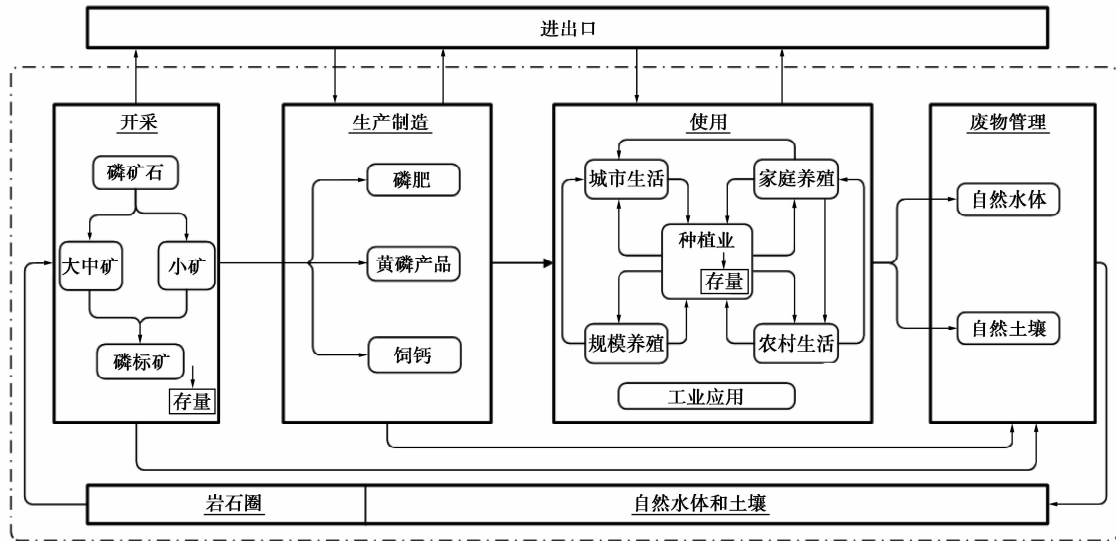


图1 我国磷资源代谢的物质流分析研究框架

1.2 研究模型与数据来源

总体来说,磷资源代谢模型可以分为计算磷流的公式和计算磷存量的公式2种。由于篇幅的限制,这里只选择关键部分加以介绍。

开采阶段和使用阶段各有一个磷存量,它们分别表示某年磷矿石存量和当季施用的磷养分在农业土壤中的存量。公式(1)中 F_{ore} 代表进入或离开开采阶段的磷流, $Stock_{ore}$ 代表磷矿石存量,它等于某年大中矿产量(P_{bm})、小矿产量(P_{sm})与磷矿石的净进口量(P_{ni})之和,减去某年磷矿石消费量(P_{cons})和采矿阶段排放的含磷废物的数量(P_{dw})。公式(2)中 F_{ar} 代表进入或离开种植业节点的磷流, $Stock_{ar}$ 代表磷养分存量,它等于某年施入农业土壤的各种磷养分(P_{in})之和减去某年被各种农作物带走的磷养分(P_{out})之和。

$$dF_{ore}/dt = Stock_{ore} = P_{bm} + P_{sm} + P_{ni} - P_{cons} - P_{dw} \quad (1)$$

$$dF_{ar}/dt = Stock_{ar} = \sum P_{in} - \sum P_{out} \quad (2)$$

与畜禽粪便、作物秸秆、畜产品、以及进出口农产品相关的磷流通量可用公式(3)计算。磷流通量(TAP)等于该磷流内部各个体含磷量(CEC)的总和(比如为计算畜禽粪便相关的磷流通量,牛粪就是其内部个体之一), CEC 等于个体数量(VEC)与其含磷比例(CON)的乘积。与人类排放废物相关的磷流通量(PL)可用公式(4)计算, POP 表示城市或农村人口总数, HFU 代表城市或农村每人年均粪便排磷量, LIB 代表城市或农村每人年均生活垃圾排磷量。

$$TAP = \sum CEC = \sum (VEC \times CON) \quad (3)$$

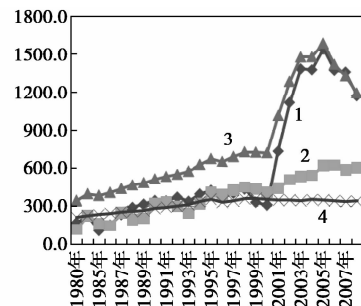
$$PL = \sum [POP \times (HFU + LIB)] \quad (4)$$

本文中数据来源主要包括各类统计年鉴^[8-9]和学术文章^[10-12]等。另外受限于数据可得性,本文中不考虑我国1981—1983年的磷资源代谢。

2 研究结果与讨论

2.1 改革开放以来我国磷资源代谢的动态变化特征

选取研究框架中若干重要磷流作为代表性指标,包括磷矿石开采、含磷产品使用、含磷废物产生和含磷废物循环,以体现1980—2008年我国磷资源代谢的动态变化特征。如图2所示,磷矿石开采、含磷产品使用和含磷废物产生快速增长。虽然小矿的开采活动以及随后政府实施的限制性开采政策使得



1—磷矿石开采;2—含磷产品使用;
3—含磷废物产生;4—含磷废物循环

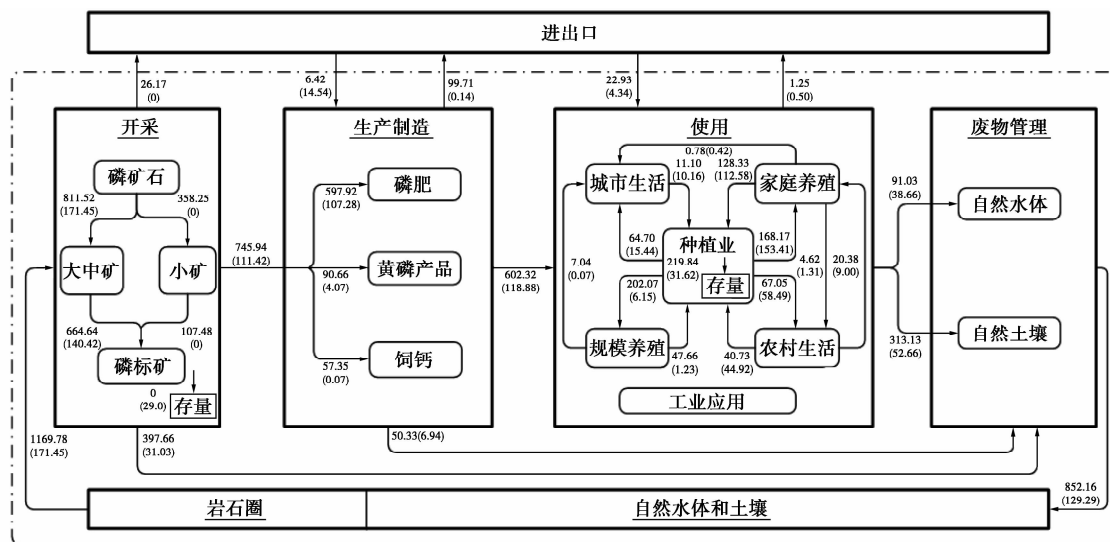
图2 1980—2008年我国磷资源代谢的若干重要磷流(万t磷)

磷矿石开采和含磷废物产生呈现巨大波动,但是两者还是从 171.45 万 t 磷和 343.73 万 t 磷增加到 1 169.78 万 t 磷和 1 191.59 万 t 磷,年均增速 7.1% 和 4.5%。含磷产品使用也涨至 602.32 万 t 磷,年均增速高达 6.0%。而含磷废物循环从 214.45 万 t 磷缓慢增长到 339.43 万 t 磷,年均增速仅为 1.7%,使得含磷废物总体循环比例从 62.4% 直降到 28.5%。这意味着越来越多的磷养分被排放到自然

水体和自然土壤中,浪费资源的同时也污染了环境。因此,改革开放以来我国磷资源代谢的动态变化特征可概括为:强开采,高消费,高排放,低循环。

2.2 1980 年和 2008 年我国磷资源代谢的比较

在以上对动态变化特征讨论的基础上,选取 1980 年和 2008 年 2 个时间点进行我国磷资源代谢的全生命周期对比分析,进一步探究各代谢环节的变化,如图 3 所示。



注:括号内为 1980 年数据,括号外为 2008 年数据,单位为万 t 磷/a。

图 3 1980 年和 2008 年我国磷资源代谢的比较

2.2.1 研究框架输入端和输出端的对比

从输入端来看,1980 年大中矿产量不仅能满足国内需求,还剩下 29.0 万 t 磷进入矿石存量;2008 年大中矿产量虽然翻了两番多,但仍需小矿提供 107.48 万 t 磷才能平衡国内需求。这种输入结构的明显变化带来的直接恶果就是 2008 年我国光磷矿开采一项就向环境中排放多达 397.66 万 t 的含磷废物,其中不乏低品味的原生磷矿石,资源浪费非常严重。

在输出端方面,1980 年和 2008 年我国输出到自然水体、自然土壤和农业土壤的磷流量如图 4

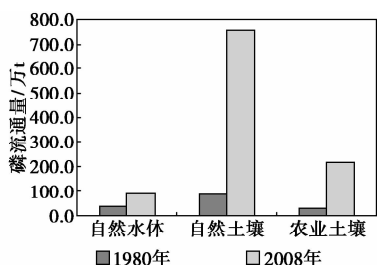


图 4 1980 年和 2008 年进入自然水体、自然土壤和农业土壤中的磷流量(万 t 磷)

所示。

2008 年进入自然水体的磷流量达到 91.93 万 t,是 1980 年的 2.4 倍,主要的贡献来自种植业和规模养殖,分别占 36.0% 和 21.4%;进入自然土壤的磷流量增长特别快,2008 年高达 760.23 万 t,主要的贡献来自磷化工业(特别是小矿)和规模养殖,分别占 58.8% 和 22.3%;进入农业土壤的比例稳定在 20.0% 左右,但磷在土壤中的纵向迁移速率很低,绝大部分长期贮存在表层土壤,很容易随农田排水和暴雨径流进入自然水体,加重水体富营养化。

2.2.2 消费部门磷代谢特征的对比

使用阶段是研究框架中最复杂的部分,磷元素以不同形式在 5 个消费节点之间快速转化和转移。离开消费节点的磷流有 4 个去向:作为产品输出、作为养分循环回收、作为含磷废物进入自然水体和自然土壤。

种植业是磷消费和循环体系的核心环节。矿物磷通过农业土壤转化为植物磷从而提供社会基本养分需求,大部分含磷有机废物主要通过农业土壤重返磷消费体系。1980 年种植业的磷流输入通量为

308.27万t磷(含农药和杀虫剂),其中化学磷肥和有机磷肥输入通量分别为115.27万t和191.60万t,有机肥施用比例高达62.4%;2008年磷流输入通量增加至814.06万t,但有机肥施用比例下降至35.9%,说明更多的含磷有机废物没有得到循环利用,磷消费体系的养分循环链进一步断裂。由表1可知,种植业的产品输出比例由74.5%下降到59.0%,这是肥料磷过度输入的体现,必然会导致磷养分在农业土壤中的大量累积以及加大磷养分向自然水体中流失的危险。

表1 1980年和2008年我国磷消费部门代谢特征的对比

消费部门	代谢特征的对比								%
	产品输出		循环回收		自然水体		自然土壤		
	1980年	2008年	1980年	2008年	1980年	2008年	1980年	2008年	
种植业	74.5	59.0	17.1	33.7	5.1	4.4	3.3	2.9	
规模养殖	1.1	2.9	19.8	19.4	8.9	8.7	70.4	69.0	
家庭养殖	1.1	2.9	69.3	68.1	9.9	9.7	19.7	19.4	
城市生活	0.0	0.0	62.6	15.6	11.8	10.6	25.6	73.8	
农村生活	0.0	0.0	90.4	86.1	7.5	10.0	2.1	3.9	

畜禽养殖业是植物磷养分的重要消费者,也是动物磷养分的生产者。规模养殖高强度地消耗植物磷养分和排出代谢磷废物,附近农田很难完全消纳有机粪肥,极易造成周围水体和土壤磷负荷过高。如表1所示,虽然规模养殖的产品输出比例由1.1%上升至2.9%,但仅有不到20.0%被循环回收。相比之下,2008年家庭养殖代谢废物返回农田的比例为68.1%,说明家庭养殖与农田耕地之间仍维系着传统的养分代谢关系。

城乡居民是磷资源代谢系统中最高级的营养消费者。城乡之间良好的养分循环关系在1980年仍有体现,当年城市生活输出的磷养分的62.6%被及时还田,但2008年循环回收比例仅为15.6%。由于速效化肥大规模应用、水冲厕所急剧增加以及运输费用提高等因素,我国城市粪便的农业利用在20世纪80年代中后期开始迅速衰退。2008年经过城市卫生系统无害化处理之后返还农田的生活粪便仅占粪便总量的31.0%,同年城市生活垃圾堆肥比例也仅为1.7%,只有0.55万t磷返回农田。同年农

村生活磷养分输出的86.1%通过有机粪肥和畜禽饲料等形式得到循环利用,大大降低了其输出到自然生态系统的磷流量。

3 政策建议

首先,严格禁止小矿的开采活动,坚决制止采富弃贫,鼓励推行全层开采,加快发展安全高效的磷矿开采与综合利用技术研究,不断提高磷矿开采的总体技术水平;其次,大力提倡和支持畜禽粪便的各种资源化处理措施,如实施种养区域一体化、使用畜禽粪便制造新型饲料或生产沼气且废渣还田等;最后,实施技术、经济与行政等手段紧密结合的举措,促进城市生活粪便的农业利用和生活垃圾的堆肥还田。

参考文献

- [1] 刘毅. 中国磷代谢与水体富营养化控制政策研究[D]. 北京:清华大学,2004.
- [2] Zhang W F, Ma W Q, Ji Y X, et al. Efficiency, economics and environmental implications of phosphorous resource use and the fertilizer industry in China[J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2008, 80: 131-144.
- [3] Brunner P H, Rechberger H. *Practical Handbook of Material Flow Analysis*[M]. New York: CRC Press, 2003.
- [4] 樊银鹏, 胡山鹰, 陈定江, 等. 不同历史时期中国磷元素代谢网络的构建[J]. *现代化工*, 2007, S2: 10-16.
- [5] 刘征, 胡山鹰, 陈定江, 等. 我国磷资源产业物质流分析[J]. *现代化工*, 2005, 25(6): 1-6.
- [6] 刘毅, 陈吉宁. 中国磷循环系统的物质流分析[J]. *中国环境科学*, 2006, 26(2): 238-242.
- [7] Liu Y, Mol A P J, Chen J N. Material flow and ecological restructuring in China, the case of phosphorous[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2004, 8(3): 103-120.
- [8] 国家统计局. *中国统计年鉴*[M]. 北京: 中国统计出版社, 1985—2009.
- [9] 国家农业部. *中国农业统计年鉴*[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009.
- [10] 陈朱蕾, 唐赢中, 等. 中国城市粪便的可持续利用研究[J]. *城市环境与城市生态*, 1999, 12(2): 42-45.
- [11] 高利伟, 马林, 张卫峰, 等. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 173-179.
- [12] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J]. *中国环境科学*, 2006, 26(5): 614-617. ■