

DOI:10.5846/stxb201404210793

## 磷元素物质流分析的研究进展和展望

陈敏鹏<sup>1,2,\*</sup>, 郭宝玲<sup>1,2,3</sup>, 刘 昱<sup>3</sup>, 夏 旭<sup>1,2</sup>, 陈吉宁<sup>3</sup>

1 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081

2 农业部农业环境重点实验室, 北京 100081

3 清华大学 环境学院, 北京 100084

**摘要:** 磷是重要的营养元素, 也是不可再生的重要非金属矿物资源。为了分析人类活动对磷流动的扰动, 国内外开展了大量磷元素的物质流分析和模拟。本文综述了磷元素物质流分析的最新研究进展, 分析了国内外磷元素物质流研究的特点和不足, 并展望了未来相关研究的研究热点和发展方向。从研究尺度看, 现有磷元素的物质流研究以全球尺度和国家尺度的研究为主, 区域和城市尺度以及企业和产品尺度的研究较少。从研究问题看, 现阶段研究主要关注农业或者食品生产和消费对磷流动的影响, 对林业、钢铁和能源部门略有涉及。从模型特征看, 现有研究以分析流量变化的静态模型为主, 考虑存量变化的动态模拟较少。从研究的发展看, 磷物质流的相关分析未来将关注五大问题: (1) 考虑不同驱动力和存量变化的动态模拟; (2) 不同层次和尺度的磷足迹研究; (3) 磷与其他元素相比对社会经济的重要性; (4) 全球变化背景下不同部门磷依赖的脆弱性; (5) 磷和其他元素的耦合研究。为了适应未来的研究需求, 磷的物质流模拟重点在于开发动态模型, 并将物质流分析与多种手段结合, 以预测全球变化、社会经济发展、技术变化以及其他重要变化对磷流动的扰动及其相应的环境影响。

**关键词:** 物质流分析; 元素流分析; 磷流动; 磷足迹

## Research on Substance Flow Analysis of Phosphorus: Progress and Perspectives

CHEN Minpeng<sup>1,2,\*</sup>, GUO Baoling<sup>1,2,3</sup>, XIA Xu<sup>1,2</sup>, CHEN Jining<sup>3</sup>

1 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Beijing 100081, China

2 Key Laboratory of Agricultural Environment, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China

3 School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract:** Phosphorus (P) is one of the three essential nutrients (together with nitrogen, phosphorus and potassium) for plant growth on earth. It is also an important non-renewable non-metal mineral resource. With the economic development and population increase, phosphorus scarcity has become one of important global challenges to the sustainability of agriculture, economy and environment. To analyze the disturbances of human activities to phosphorus flows, extensive researches have been carried out to simulate the anthropogenic-centered phosphorus flows within socioeconomic systems and sub-systems. This paper reviewed the recent progresses of phosphorus flow analysis, identified the characteristics of and insufficiency of scopes for existing studies, and projected future hotspots and developments for phosphorus flow analysis. According to the scales of defined socioeconomic systems (or sub-systems) for phosphorus flow analysis, existing studies could be categorized into four groups: global level, national (or multi-national) level, regional or city level, as well as enterprise or product level. Presently, mostly studies were performed at the global level or national (multi-national) level, while few were performed at regional/ city level, or enterprise/ product level. So far,

基金项目: 国家自然科学基金(71103186); 国家科技支撑计划资助项目(2013BAD11B03); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资助项目(BSRF201311)

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenmp@ami.ac.cn

more than 15 countries (including multi-national regions) have carried out phosphorus flow analysis, most of which focused on the disturbances of agriculture or food production and consumption for phosphorus flows. Besides, a few studies examined the disturbances of forestry, iron and steel production and energy sector for phosphorus flows and the potential for increasing the phosphorus use efficiencies in these sectors. Since current studies mostly developed static models to analyze the changes of phosphorus flows, few models were dynamic with a consideration of the long-term changes of phosphorus stocks. Less study considered the combination of classic methods or tools in ecological industry, such as life-cycle analysis, input-output analysis, and etc., with material flow analysis or substance flow analysis (MFA or SFA). In future, there are five aspects or topics which would be the hotspots for further researches: (1) the dynamic simulation of phosphorus flow with consideration of the long-term changes of important driving forces (such as population, diet change, bioenergy development, and etc.) and phosphorus stocks; (2) phosphorus footprint analysis of economic development at various sectors or scales; (3) the criticality of phosphorus for social and economic development, compared with other important elements (such as metals or rare earth elements); (4) the vulnerabilities of phosphorus of different sectors to global changes (particularly climate change); and (5) the coupled flow analysis between phosphorus and other important elements (such as carbon, nitrogen, or metal elements) for social and economic development. To meet the research demands in future, it is necessary to develop a dynamic phosphorus flow model and to combine the traditional material flow analysis with other evolving tools and models in industrial ecology as well as in other disciplines, including economic model, input-output analysis, life-cycle analysis, network analysis, computable general equilibrium model, agent-based model, and etc. to project the impacts of global changes, socio-economic development, technology innovation on phosphorus flows and resulting environmental impacts.

**Key Words:** material flow analysis; substance flow analysis; phosphorus flow; phosphorus footprint

磷 (Phosphorus, P) 是维持生物体基本机能不可或缺的重要营养元素, 其在自然界中主要的存在形式——磷矿石则是重要的、难以再生的非金属矿物资源。人们通过磷矿开采、磷化工生产、农业种植和动物养殖等过程, 将矿物磷转化为植物磷和动物磷, 以满足人类生存和社会运转的磷需求。除了制造磷肥, 磷矿石还可以用来制造黄磷、磷酸、有机磷及磷酸盐等各种产品, 广泛地用于医药、食品、火柴、染料、制糖、陶瓷、国防等工业部门。随着人口增长、饮食结构的变化以及经济的高速发展, 磷资源的需求量不断增加, 磷矿的开采和消费量逐年增长, 磷短缺也与气候变化、水短缺、氮管理一起并列成为 21 世纪重要的全球问题<sup>[1]</sup>。根据美国地质勘探局 (United States Geological Survey, USGS) 的最新数据显示, 全球 2013 年的磷矿石储量约为 670 亿 t<sup>[2]</sup>, 折合 80—90 亿 t 磷, 乐观估计可以支持全球 200—300 年的需求, 但是如果考虑开采成本, 经济储量则仅能够支持全球约 50—100 年的需求<sup>[3-6]</sup>。中国查明的磷矿资源储量约 186.3 亿 t (折标矿), 居世界第二位, 但是中国的磷矿资源平均品位低 (仅为 17%, 世界平均为 30%), 80% 以上为中低品位磷矿, 经济储量仅能维持国内 50—70 年的消费需求, 形势十分严峻<sup>[7-8]</sup>。另一方面, 磷矿开采、磷化工、以及各种含磷产品消费过程产生的含磷废水和废物的排放也带来了一系列的环境问题, 包括地表水的富营养化和含磷固体废弃物的核辐射污染问题, 磷资源的可持续利用及其环境影响已成为国内外学者广泛关注的重要科学问题。

物质流分析 (Material Flow Analysis, MFA) 通过定量分析特定时间和空间范围内物质 (或元素) 的迁

移转化路径, 识别其循环流动特征和回收利用的路径, 定量分析人类社会经济系统与自然环境之间的物质交换, 测度物质使用的环境影响, 揭示不同时间和空间尺度内资源的流动特征和转换效率, 可以为资源的高效利用和管理提供定量的决策信息, 是经济、产业和资源管理等部门可持续发展评估相关研究中的重要分析工具之一<sup>[9-11]</sup>。为了应对磷短缺、促进磷资源的可持续利用和管理, 国内外广泛开展了针对磷元素的物质流分析, 以分析不同尺度磷元素从开采、生产、加工、消费到最终处置、排放环节的环境影响和资源利用效率, 促进农业和环境的可持续发展。本研究综述了磷元素物质流分析的最新研究进展, 分析了现有磷元素物质流研究的特点和不足, 以展望未来磷元素物质流分析及其相关研究的发展趋势, 为国内可持续的磷资源管理提供方法学和信息基础。

## 1 物质流分析概述

物质流分析 (Material Flow Analysis, MFA) 指按照质量守恒定律, 以实物的物理质量为单位, 在一定的范围和时间边界内, 对预先定义的社会经济系统进行的从物质采掘、生产、转换、消费、循环使用直至最终处置过程中流量和存量的系统性定量评估, 它从早期的社会代谢、工业代谢的相关研究发展而来, 已成为包括过程控制、资源管理、废物处理、环境管理、产品设计及生命周期评价等各个领域最常用的决策支持工具之一<sup>[9-11]</sup>。当物质流分析的对象为特定元素 (例如氮、磷、硫、铝等等) 或者单一物质时, 也称为元素流分析 (Substance Flow Analysis, SFA), 目前元素周期表中已经有约 95 种元素在不同尺度上进行了元素流分析, 其中进行物质流分析的大多数元素为金属元素<sup>[12-13]</sup>。

物质流分析模型主要包括只考虑流量变化的静态模型和考虑存量变化的动态模型两大类, 其中前者主要用于判别自然环境退化和污染物的来源、预测不同社会经济因素导致的环境影响, 后者主要用于分析支撑社会经济发展的资源总需求、发展模式和长期变化趋势<sup>[11,13]</sup>。随着相关研究的不断深入, 除了传统的包括总物质需求和输出 (Total Material Requirement and Output, TMRO) 和元素流分析 (Substance Flow Analysis, SFA) 分析方法, 物质流分析现在已经衍生出或者与多种研究手段和工具结合, 包括实物投入产出表 (Physical Input-Output Tables, PIOT)、生态足迹分析 (Ecological Footprint Analysis, EFA)、网络分析 (network analysis)、和生命周期分析 (Life-Cycle Analysis, LCA)、局部均衡模型 (partial equilibrium model) 等等, 其分析问题的深度广度和对决策政策的支持功能也因此逐渐强化<sup>[14]</sup>。

## 2 磷的物质流分析

由于其对人类社会的重要支持作用以及利用过程中的重要环境影响, 磷元素一直物质流分析相关研究关注的热点元素之一<sup>[12]</sup>。目前世界各国在不同尺度、针对不同问题开展了大量磷元素的物质流分析<sup>[15]</sup>, 根据研究尺度的不同, 现有磷元素的物质流分析可以划分全球尺度、国家尺度、区域与城市尺度、企业及产品尺度四个层次, 其中国家尺度的研究是目前磷物质流分析研究的主流。

### 2.1 全球尺度

从全球尺度看, 现有研究主要集中于核算人为活动导致的磷流动, 以及这些人为活动导致的磷流动对

磷资源的耗竭速度和环境影响的加速和扰动效应(表 1)。Smil<sup>[16]</sup>最早分析了全球磷的自然及人为循环,认为化肥的施用、生活和工业废水的排放、持续的土壤腐蚀与流失以及作物秸秆和粪便的排放和利用加速了全球人为磷代谢(P metabolism)强度,并估算到 2000 年全球人为活动导致的磷代谢强度将是其自然循环过程的三倍。Villalba et al<sup>[17]</sup>和 Liu et al<sup>[18]</sup>分别从生产和消费的角度量化了全球磷代谢过程,提出全球开采 80%的磷资源用于生产磷酸和生产磷肥,但是全球耕地总体仍然面临着磷亏损问题。Cornell et al<sup>[4, 19-20]</sup>分析了全球食品生产和消费体系的磷流动,比较了不同饮食偏好(diet preference)的磷需求,断言全球的磷峰值(P peak)将于 2030 年左右达到,现有磷资源仅能满足全球 50—100 年的需求,世界各国将普遍面临着“磷短缺(P scarcity)”问题。van Vuuren 等其它学者<sup>[21-23]</sup>却认为现有磷资源至少可满足 21 世纪的全球磷需求,全球磷生产的峰值可能出现在 21 世纪末期,到 24 世纪缓慢下降 60%。Scholz<sup>[24]</sup>认为现有评估都基于静态指标,如静态使用寿命(Static Lifetime)、哈伯特曲线(Hubbert Curve)及赫芬达尔-赫希曼指数(Herfindahl-Hirschman Index)等等,而这些静态指标实际上无法预测磷资源的物理性稀缺,因此必须构建考虑技术变革、生产链潜力、资源耗散特征、存量变化、效率提升和循环利用的磷流动的动态模型来分析长期磷稀缺问题。Koppelaar 和 Weikard<sup>[25]</sup>利用 2009 年的全球磷流动模型和局部均衡模型模拟分析了不同磷循环的技术和措施对全球磷资源耗竭速度的影响,结果表明现有的磷矿资源可以维持至少到 22 世纪磷资源的高消费使用,循环利用和减少磷资源使用的技术措施将大幅提高磷资源储量的寿命,并将磷资源(包括潜在的磷资源储量)耗竭时间延长至 23 世纪以后。

表 1 全球尺度磷元素的物质流分析及比较

Table 1 A review of global phosphorus (P) flow analysis

关注问题	主要自然过程	主要人为过程/行业	模型特征	时间	文献来源
Research problem	Major natural processes	Major human processes/sector	Model features	Time	Sources
人为活动对磷元素自然循环的扰动 (Human disturbances on natural cycles of P)	大气沉降、侵蚀、径流、植物吸收、海洋沉积、地质提升以及磷在土壤和水体中的迁移转化	化肥的生产和消费、作物吸收、动物养殖、人类废物排放以及人类活动对自然活动的扰动和加速	静态	1990s	[16]
从生产角度分析磷元素流动 (P flow analysis from production perspective)	无	磷矿开采和加工、磷酸生产和消费、磷肥及其他磷产品的生产和消费	静态,但描述了存量变化	2004	[17]
从消费角度分析磷元素流动 (P flow analysis from consumption perspective)	大气沉降、侵蚀、径流、植物吸收、海洋沉积、土壤中磷的转换和损失以及磷排放的环境影响	种植业、养殖业、食品消费、其它磷产品(主要是洗涤剂)的消费、人类废物排泄和循环、	静态	2000s	[18]
分析了食品系统的磷流动以及磷资源的耗竭(磷峰值) (P flow analysis for food system and P peak)	无	磷矿开采、磷肥生产、种植业(及废物排放)、养殖业(及废物排放)、食品消费、人类废物排泄	静态	2005	[4, 20]
不同措施对全球磷流动的影响 (Impacts of different measures on global P flow)	侵蚀、径流损失	磷矿开采、磷肥生产、其他磷产品的生产和消费(洗涤剂等)、工业废物排放、种植业(及废物排放)、养殖业(及废物排放)、食品消费、人类废物排泄	静态	2009	[25]

## 2.2 国家尺度

从国家尺度看, 目前已经有十余个国家(包括跨国区域)开展了磷流动研究, 包括欧盟<sup>[26]</sup>、美国<sup>[27-28]</sup>、澳大利亚<sup>[29]</sup>、英国<sup>[30]</sup>、法国<sup>[31-32]</sup>、芬兰<sup>[33-35]</sup>、瑞典<sup>[36-37]</sup>、荷兰<sup>[38]</sup>、奥地利<sup>[12,39]</sup>、土耳其<sup>[12]</sup>、日本<sup>[40-41]</sup>、韩国<sup>[42]</sup>、马来西亚<sup>[43]</sup>和中国<sup>[44-56]</sup>(表 2)。从研究问题看, 国家尺度的研究更多关注农业行业或者食品生产和消费活动对磷流动的扰动及其造成的环境影响, 例如 Suh 和 Yee<sup>[27]</sup>、Cordell et al<sup>[29]</sup>、Senthilkumar et al<sup>[31-32]</sup>、Chen et al<sup>[45]</sup>等。其他的热点问题还包括社会经济系统的内涵(embodied P demand)、虚拟磷需求(virtual P requirement)和磷足迹(P footprint)<sup>[28,37,41]</sup>; 以及其他部门, 例如林业部门<sup>[33]</sup>、能源部门<sup>[35]</sup>和钢铁行业<sup>[40,42]</sup>的磷流动特征以及不同社会经济驱动力(经济发展、人口增长、饮食偏好的变化等等)对磷代谢的影响<sup>[44]</sup>。从模型的特征看, 国家尺度的磷流动模型以静态模型为主, 但是也有一些模型开始考虑磷的相关存量变化和动态特征<sup>[12,39,55]</sup>。

表 2 国家和区域尺度磷元素的物质流分析及比较

Table 2 A review of phosphorus (P) flow analysis at regional or national level

国家 Country	关注问题 Research problem	主要自然过程 Major natural processes	主要人为过程/行业 Major human processes/sector	模型特征 Model features	时间 Time	文献来源 Sources
欧盟15国 (EU-15)	磷流动的环境影响	侵蚀、淋失等过程	工业、消费、废水和废物处理及排放、农业、相关产品的进出口	静态	2008	[26]
美国 (USA)	食品生产和消费过程中的磷利用效率	无	磷矿开采、肥料生产、作物种植、食品加工、畜禽产品加工、居民生活、磷产品的进口	静态, 与生命周期分析和投入产出分析结合	2007	[27]
美国 (USA)	美国农业的内涵磷需求(embodied phosphorus demand)	无	种植业、养殖业、磷肥和肥料贸易、食品的进出口、食品加工、生物能源	静态	2007	[28]
澳大利亚 (Australia)	食品生产和消费体系的磷流动	土壤累积、向地表水体的径流流失	磷矿开采、化肥、种植、畜牧业、渔业、食品加工、食品消费、废水和废物处理、磷肥等产品的进出口	静态	2007	[29]
英国 (UK)	食品生产和消费过程中磷流动的闭环管理(closed-loop management)	自然本底值、土壤累积、向地表水体的径流流失	养殖(包括集中养殖和畜牧)、种植、食品和饲料生产和消费、肥料生产和消费、废物废水管理、处置和排放、相关产品的进口	静态	2009	[30]
法国 (France)	食品生产系统的磷流动	大气沉降、径流、侵蚀、淋失	种植业、养殖业、废物处理和排放、废水处理和排放	静态	2002—2006	[31-32]
芬兰 (Finland)	林业部门的磷流动	向水体(地表水和海水)的流失、森林的生长	林业、造纸、林产品的进出口、其他的工业部门、能源生产、废物和废水处理和排放	静态	1995—1999	[33]
芬兰 (Finland)	食品生产和消费体系的磷流动	大气沉降、向水体的迁移、土壤累积	种植业、养殖业、食品和饲料加工业、林业产品生产、废水和废物处理、处置和排放、相关产品的进出口	静态	1995—1999	[34]
芬兰 (Finland)	能源部门的磷流动	无	木材生产、化石燃料、废物能源、废物管理	ImPACT模型动态描述	1900—2003	[35]
瑞典 (Swede)	农业和食品生产对磷流动的扰动	无	化肥消费、种植业、养殖业、渔业、生物燃料、废水和废物处理和排放、及相关产品的进出口	静态	2008—2010	[20, 36]

国家 Country	关注问题 Research problem	主要自然过程 Major natural processes	主要人为过程/行业 Major human processes/sector	模型特征 Model features	时间 Time	文献来源 Sources
瑞典 (Swede)	动物养殖体系的磷足迹 (phosphorus footprint)	无	饲料生产、畜禽养殖、食品加工、食品消费、废水处理和排放	静态	2012	[37]
荷兰 (the Netherlands)	农业的磷流动及其环境影响	无	食品工业、饲料工业、养殖业、种植业、居民生活、废水废物处理和排放	静态	2005	[20, 38]
奥地利 (Austria)	磷资源的可持续管理	无	农业、工业贸易、旅游、居民生活、废物管理、废水管理、废水废物排放	考虑了存量变化	2001	[12]
奥地利 (Austria)	磷废物管理及其环境影响	向水体的径流流失	种植业、养殖业、林业、化工、工业 (食品、饲料和肥料)、废物管理、废水管理、消费、进出口	9个过程, 64种流量, 考虑存量变化	2004—2008	[39]
土耳其 (Turkey)	磷资源的可持续管理	无	农业、工业贸易、旅游、废物管理、废水管理和排放、居民生活	考虑了存量变化	2001	[12]
日本 (Japan)	钢铁行业废物的磷回用潜力	土壤累积, 向水体的迁移	化工、钢铁、化肥工业和消费、废物处理、排放和回用共15个部门	静态, 与投入产出分析结合	2003	[40]
日本 (Japan)	经济系统的虚拟磷需求 (Virtual phosphorus requirement)	土壤累积, 向水体的迁移	食品和饲料生产、化工、工业 (钢铁)、化肥生产和利用、磷产品的进出口、废水废物的排放	静态	2005	[41]
韩国 (South Korea)	钢铁行业的磷流动及废物的磷回用潜力	土壤累积, 向水体的迁移	磷矿开采、种植、养殖、居民生活、食品和饲料生产、化工、钢铁、化肥生产和利用、废水和废物处理和排放、磷产品的进出口	静态	2005	[42]
马来西亚 (Malaysia)	社会经济系统的磷流动	无	农业、工业、居民、废水和废物管理	静态	2007	[43]
中国 (China)	磷循环系统的结构特征与物质利用率特征	径流、侵蚀等向水体的迁移过程	磷矿开采、磷肥生产、种植业、养殖业、居民生活、进出口	静态	2000	[44]
中国 (China)	农业生产体系的磷流动及其环境影响	土壤磷含量的变化、向水体的淋失、流失、大气沉降	种植业、养殖业、相关废水和废物处理、废水废物的直接排放、	静态	2006	[45]
中国 (China)	化肥工业的磷效率	无	磷矿开采、磷肥生产及过程中涉及的废物处理和排放	静态	2003	[46]
中国 (China)	磷的循环利用及效率的变化	野生动物、野生植物, 磷在大气、海洋和淡水中的迁移转化	磷矿开采、磷肥生产、种植业、养殖业、居民生活、废物和废水处理、进出口	静态模型, 动态参数	2002	[47]
中国 (China)	城市食品消费体系的磷代谢	无	食品消费的废物、废水管理	静态模型	1985—2006	[48]
中国 (China)	食品产业链的磷流动和磷足迹 (phosphorus footprint)	向土壤和水体的迁移	种植业、养殖、食品加工、食品消费以及相关过程的废物和废水处理 and 排放	静态	1980, 2005	[49-51]
中国 (China)	社会经济驱动力对磷代谢的影响	向土壤和水体的排放	磷矿开采、磷肥生产、进出口、废物管理和循环	考虑存量变化	1980—2008	[52-55]
中国 (China)	奶牛产业的磷效率	无	奶牛的养殖、放牧、废物管理	静态	2010	[56]

### 2.3 区域和城市尺度

区域和城市尺度的研究包括在流域、城市和小区域（不跨国，例如省、县、区等等）水平进行的磷元素物质流动研究。与全球和国家层次的研究相比，该层次的研究比较少见。目前开展了磷流动研究的流域包括中国的滇池流域<sup>[57-58]</sup>，巢湖流域<sup>[59-63]</sup>和北京密云水库<sup>[64]</sup>；城市包括美国凤凰城<sup>[65]</sup>，澳大利亚悉尼市<sup>[66]</sup>、瑞典 Linköping 市<sup>[67-68]</sup>，瑞典的 Gothenburg 市<sup>[69]</sup>，越南的 Haiphong 市<sup>[70]</sup>，中国的北京<sup>[71]</sup>、天津<sup>[71]</sup>和合肥市<sup>[72]</sup>。另外 Wu et al<sup>[73]</sup>还针对安徽省开展了省水平磷利用效率的研究。从模型特征来看，现有区域和城市尺度的磷流动研究相对简单，以静态模型为主，主要关注农业和食品消费对水体的影响，尤其是对水体富营养化的影响。

### 2.4 企业和产品尺度

企业和产品尺度即针对具体企业、产品或者技术系统的磷物质流研究，目前相关研究很少，但是这类能够传递的信息也最为具体，比较成熟的研究多与生命周期分析结合。例如，Bai et al<sup>[74]</sup>研究了 2010 年典型城市排水系统不同技术选择对磷流动的影响，Asmala 和 Saikku 研究了<sup>[75]</sup>虹鳟鱼生产和消费体系的磷流动，分析水产养殖业对水体富营养化的贡献。Ridoutt et al<sup>[76]</sup>评估了具有磷高效利用特征的水稻系统的环境影响，表明该水稻可以减少 68% 的磷肥投入并大大减少磷肥向水体的流失。

## 3 现有磷物质流分析研究的评述和展望

一般而言，现有研究将磷元素的流动途径区分为自然流动（natural flows）和人为流动（anthropogenic P flows），其中自然流动主要考虑大气沉降、侵蚀、径流和淋失等过程，人为流动则按照研究尺度、研究问题、研究目的的不同区别为不同的子系统之间的投入和支出。然而，尽管研究尺度、问题和目的有所不同，现有磷的物质流动模型的结构有着很大的相似性，其人为流动模块包括的子系统不外乎磷矿开采、磷肥生产、农业生产（作物种植、畜禽养殖、渔业、林业等）、其他工业生产（例如洗涤剂、食品添加剂、饲料、饲料添加剂）、居民消费（包括食品和其他相关磷产品）以及废水废物处理处置和排放。由于更多关注人为活动对磷元素流动的扰动及其相应带来的环境影响，现有研究对自然活动的磷流动过程（例如风蚀、水蚀、大气沉降、地表挥发、底泥释放等）的关注和描述较少，更无法考虑其他元素流动对磷元素流动的影响。因此，自然活动和人为活动的耦合研究，尤其是磷元素与其他重要元素的耦合研究和比较将成为今后研究的重点。

从研究方法来看，现有的模型多数都是静态或者比较静态模型，同时考虑流量和存量变化的动态研究非常少，与产业生态学中的其他方法，例如投入产出、生命周期分析和生态足迹等，结合也较少，但是模型的动态化和与其他方法结合的相关研究正在增加。例如 Suh 和 Yee<sup>[27]</sup>，Matsubae-Yokoyama et al<sup>[40]</sup> 分别将物质流分析与生命周期分析、投入产出结合，分析了美国和日本食品生产和消费过程的磷利用效率和回收潜力。Metson et al<sup>[77]</sup>和 Straat<sup>[78]</sup>分别针对全球和瑞典养殖业构建了磷足迹模型。因此，今后磷的物质流分析必须更多与产业经济学及其他领域的各种模型和方法结合。例如经济模型、生命周期分析、投入产出

分析、生态足迹分析、网络分析、可计算的一般均衡模型、个体行为模型 (agent-based model) 等等结合, 发展考虑存量变化的动态模型工具, 以预测全球变化、社会经济发展、技术变革、政策发展等长期变化对磷流动的扰动及其相应的环境影响。

从研究问题看, 现有研究主要关注磷资源管理的六大问题: (1) 磷资源需求峰值、耗竭时间 (depletion time) 和对社会经济发展的关键作用; (2) 农业、食品生产和消费对磷元素循环的扰动及其环境影响; (3) 社会经济系统的磷资源利用效率和总需求; (4) 含磷废物废水的排放及其环境影响, 尤其是对地表水体富营养化的影响; (5) 含磷废物废水的处理处置和回收潜力; 以及 (6) 不同的管理和技术选择对磷资源可持续利用及其向环境排放的影响。其中研究最多的是第二类 and 第三类问题, 研究最多的经济部门为农业部门。然而, 由于不同国家和地区具有不同的磷资源禀赋, 其关注的部门和磷管理问题也有很大差异。例如日本和韩国作为磷资源的进口国, 格外关注从不同途径回收和利用各种磷资源, 并开展了钢铁炉渣磷回收的潜力研究, 结果表明钢铁炉渣中的磷存量可以达到两个国家磷消费量的 10% 以上, 是两国最具回收潜力的磷资源<sup>[40,42]</sup>。随着生物燃料的发展加速, 美国<sup>[28]</sup>和瑞典<sup>[36]</sup> 在磷流动模型中区分生物燃料部门, 以特别考虑生物燃料发展对磷流动的影响。但是在全球“磷短缺”和环境剧烈变化的背景下, 如何分析磷物质流动的长期变化、不同社会驱动力对磷需求的影响以及全球变化对磷流量和存量的影响变得尤为重要。

综上所述, 磷物质流分析及其相关研究未来关注的主要问题包括五大方面: (1) 考虑社会驱动力 (人口增长、经济发展、技术变革和消费偏好) 和存量变化的磷物质流动的长期动态模拟, 以分析人类社会磷素需求的峰值和拐点及其相应的环境影响。(2) 不同层次的磷足迹研究, 包括社会经济发展的磷足迹以及不同产品的磷足迹<sup>[78]</sup>, 以分析不同社会经济发展模式和不同产品对磷素总需求的影响, 从而能够从磷素管理的角度分析不同经济发展模式或者不同产品的优先性。(3) 磷元素与其他元素和物质相比 (包括氮、碳、金属、水等), 对于人类社会经济发展的重要性 (criticality)<sup>[79-80]</sup>, 即分析在现有的需求和资源储量格局下, 哪一种元素的供给必须优先保障, 一般而言元素的不可替代的作用越强, 其供给越应该得到优先保障。(4) 全球变化 (例如气候变化) 背景下, 食品体系磷依赖的脆弱性<sup>[1]</sup>, 即分析全球变化是否会影响食品体系磷需求及其环境影响, 例如温度升高是否会降低磷肥的肥效从而导致磷肥的用量增加? 降雨空间格局和时间格局 (极端降雨的增加) 的变化是否会增加磷的流失? (5) 磷和其他元素的耦合流动研究, 包括其他的重要营养元素 (氮、碳、钾、硫) 和金属元素 (铁、铀<sup>[81]</sup>、稀土金属等), 以分析不同政策和战略对多种污染物或者多种资源管理的共生效益 (co-benefit) 或者权衡 (trade-off)。

#### 参考文献:

- [1] Cordell D, Neset T S S. Phosphorus vulnerability: A qualitative framework for assessing the vulnerability of national and regional food systems to the multidimensional stressors of phosphorus scarcity. *Global Environmental Change*, 2014, 24(1): 108-122.
- [2] United States Geological Survey (USGS). Mineral Commodity Summaries: Phosphoric Rock. USGS, 2014.
- [3] Prud'homme M. World phosphate rock flows, losses, uses. In: International Fertilizer Industry Association (IFA), Phosphates 2010 International Conference. Brussels, Belgium, 2010.



- [4] Cordell D, Drangert J, White S. The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 2009, 19(2): 292-305.
- [5] Van Kauwenbergh S V. World Phosphorus Rock Reserves and Resources. International Fertilizer Development Center (IFDC), 2010.
- [6] 常苏娟, 朱杰勇, 刘益, 杨永超, 白光顺. 世界磷矿资源形势分析. *化工矿物与加工*, 2010, 39(9): 1-5.
- [7] 国土资源部. 中国矿产资源报告 2013. 北京: 地质出版社, . 2013. ([http://www.mlr.gov.cn/zwgk/qwsj/201311/t20131129\\_1294361.htm](http://www.mlr.gov.cn/zwgk/qwsj/201311/t20131129_1294361.htm))
- [8] 王邵东, 张红映. 中国磷矿资源和磷肥生产与消费. *化工矿物与加工*, 2007, 36(9): 30-32.
- [9] Brunner P H, Rechberger H. *Practical Handbook of Material Flow Analysis*. Boca Raton London New York Washington, D C: Lewis Publishers, 2004: 1-318.
- [10] Huang C L, Vause J, Ma H W, Yu C P. Using material/substance flow analysis to support sustainable development assessment: A literature review and outlook. *Resources, Conservation and Recycling*, 2012, 68: 104-116.
- [11] 彭建, 王仰麟, 吴健生. 区域可持续发展生态评估的物质流分析研究进展与展望. *资源科学*, 2006, 28(6): 189-195.
- [12] Seyhan D. Country-scale phosphorus balancing as a base for resources conservation. *Resources Conservation and Recycling*, 2009, 53(12): 698-709.
- [13] Chen W Q, Graedel T E. Anthropogenic cycles of the elements: A critical review. *Environmental Science and Technology*, 2012, 46(16): 8574-8586.
- [14] 徐鹤, 李君, 王絮絮. 国外物质流分析研究进展. *再生资源与循环经济*, 2010, 3(2): 29-34.
- [15] Chowdhury R B, Moore G A, Weatherley A J, Arora M. A review of recent substance flow analyses of phosphorus to identify priority management areas at different geographical scales. *Resources Conservation and Recycling*, 2014, 83: 213-228.
- [16] Smil V. Phosphorus in the environment: natural flows and human interferences. *Annual Review of Energy and the Environment*, 2000, 25(1): 53-88.
- [17] Villalba G, Liu Y, Schroder H, Ayres R U. Global phosphorus flows in the industrial economy from a production perspective. *Journal of Industrial Ecology*, 2008, 12(4): 557-569.
- [18] Liu Y, Villalba G, Ayres R U, Schroder H. Global phosphorus flows and environmental impacts from a consumption perspective. *Journal of Industrial Ecology*, 2008, 12(2): 229-247.
- [19] Cornell D, White S. Peak Phosphorus: Clarifying the key issues of a vigorous debate about long-term phosphorus security. *Sustainability*, 2011, 3(10): 2027-2049.
- [20] Schröder J J, Cordell D, Smit A L, Rosemarin A. *Sustainable Use of Phosphorus*. Wageningen: Plant Research International, 2009.
- [21] van Vuuren D P, Bouwman A F, Beusen A H W. Phosphorus demand for the 1970-2100 period: a scenario analysis of resource depletion. *Global Environmental Change*, 2010, 20(3): 428-439.
- [22] Cooper J, Lombardi R, Boardman D, Carliell-Marquett C. The future distribution and production of global phosphate rock reserves. *Resources Conservation and Recycling*, 2011, 57: 78-86.
- [23] Rawashdeh R, Maxwell P. The evolution and prospects of the phosphate industry. *Mineral Economics*, 2011, 24(1): 15-27.
- [24] Scholz R W, Wellmer F W. Approaching a dynamic view on the availability of mineral resources: What we may learn from the case of phosphorus? *Global Environmental Change*, 2013, 23(1): 11-27.
- [25] Koppelaar, R H E M, Weikard H P. Assessing phosphate rock depletion and phosphorus recycling options. *Global Environmental Change*, 2013, 23(6): 1454-1466.
- [26] Ott C, Rechberger H. The European phosphorus balance. *Resource Conservation and Recycling*, 2012, 60: 159-172.
- [27] Suh S, Yee S. Phosphorus use-efficiency of agriculture and food system in the US. *Chemosphere*, 2011, 84(6): 806-813.
- [28] MacDonald G K, Bennett E M, Carpenter S R. Embodied phosphorus and the global connections of United States agriculture. *Environmental Research Letter*, 2012, 7, doi: 10.1088/1748-9326/7/4/044024.
- [29] Cordell D, Jackson M, White S. Phosphorus flows through the Australian food system: Identifying intervention points as a roadmap to phosphorus security. *Environmental Science and Policy*, 2013, 29(9): 87-102.

- [30] Cooper J, Carliell-Marquet C. A substance flow analysis of phosphorus in the UK food production and consumption system. *Resources Conservation and Recycling*, 2013, 74: 82-100.
- [31] Senthilkumar K, Nesme T, Mollier A, Pellerin S. Regional-scale phosphorus flows and budgets within France: the importance of agricultural production systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 92(2): 145-59.
- [32] Senthilkumar K, Nesme T, Mollier A, Pellerin S. Conceptual design and quantification of phosphorus flows and balances at the country scale: the case of France. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26(2): 12-25.
- [33] Antikainen R, Haapanen R, Rekolainen S. Flows of nitrogen and phosphorus in Finland-the forest industry and use of wood fuels. *Journal of Cleaner Production*, 2004, 12(8): 919-934.
- [34] Antikainen R, Lemola R, Nousiainen J I, Sokka L, Esala M, Huhtanen P, Rekolainen S. Stocks and flows of nitrogen and phosphorus in the Finnish food production and consumption system. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 107(2-3): 287-305.
- [35] Saikku L, Antikainen R, Kauppi P E. Nitrogen and phosphorus in the Finnish energy system, 1900-2003. *Journal of Industrial Ecology*, 2007, 11(1): 103-119.
- [36] Linderholm K, Mattsson J E, Tillman A M. Phosphorus flows to and from Swedish agriculture and food chain. *AMBIO*, 2012, 41(8): 883-893.
- [37] Strååt K D. Phosphorus Footprint Model: A Model Development and Application to the Swedish Bovine and Poultry Industries. *Industrial Ecology*, Royal Institute of Technology, 2013.
- [38] Smit A L, Van Middelkoop J C, Van Dijk W, Van Reuler H, De Buck A J, Van De Sanden P A C M. A Quantification of Phosphorus Flows in the Netherlands Through Agricultural Production, Industrial Processing and Households. The Netherlands: Plant Research International, Part of Wageningen UR Business Unit Agrosystems; 2010: 56-56.
- [39] Egle L, Zoboli O, Thaler S, Rechberger H, Zessner M. The Austrian P budget as a basis for resource optimization. *Resources Conservation and Recycling*, 2014, 83: 152-162.
- [40] Matsubae-Yokoyama K, Kubota H, Nakajima K, Nagasaka T. A material flow analysis of phosphorus in Japan: The iron and steel industry as a major phosphorus source. *Journal of Industrial Ecology*, 2009, 13(5): 687-705.
- [41] Matsubae K, Kajiyama J, Hiraki T, Nagasaka T. Virtual phosphorus ore requirement of Japanese economy. *Chemosphere*, 2011, 84(6): 767-772.
- [42] Jeong Y S, Matsubae-Yokoyama K, Kubo H, Par J J, Nagasaka T. Substance flow analysis of phosphorus and manganese correlated with South Korean steel industry. *Resource Conservation and Recycling*, 2009, 53(9): 479-489.
- [43] Ghani L A, Mahmood N Z. Balance sheet for phosphorus in Malaysia by SFA. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2011, 5(12): 3069-3079.
- [44] 刘毅, 陈吉宁. 中国磷循环系统的物质流分析. *中国环境科学*, 2006, 26(2): 238-242.
- [45] Chen M, Chen J, Sun F. Agricultural phosphorus flow and its environmental impacts in China. *Science of the Total Environment*, 2008, 405(1-3): 140-52.
- [46] Zhang W F, Ma W Q, Ji Y X, Fan M S, Oenema O, Zhang F S. Efficiency, economics, and environmental implications of phosphorus resource use and the fertilizer industry in China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, 80(2): 131-144.
- [47] Fan Y P, Hu S Y, Chen D J, Li Y R, Shen J Z. The evolution of phosphorus metabolism model in China. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(9): 811-820.
- [48] Li G L, Bai X M, Yu S, Zhang H, Zhu Y G. Urban Phosphorus Metabolism through Food Consumption. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, 16(4): 588-599.
- [49] Ma L, Ma W Q, Velthof G L, Wang F H, Qin W, Zhang F S. Modeling nutrient flows in the food chain of China. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1279-1289.
- [50] Ma L, Velthof G L, Wang F H, Qin W, Zhang W F, Liu Z, Zhang Y, Wei J, Lesschen J P, Ma W Q, Oenema O, Zhang F S. Nitrogen and phosphorus use efficiency and losses in the food chain in China at regional scales in 1980 and 2005. *Science of the Total Environment*, 2012, 434: 51-61.

- [51] Wang F, Sims J T, Ma L, Ma W, Dou Z, Zhang F. The phosphorus footprint of China's food chain: Implications for food security, natural resource management, and environmental quality. *Journal of Environmental Quality*, 2011, 40(4): 1081-1089.
- [52] 刘征, 胡山鹰, 陈定江, 沈静珠, 李有润. 我国磷资源产业物质流分析. *现代化工*, 2005, 25(6): 01-06.
- [53] 马敦超, 胡山鹰, 陈定江, 李有润. 1980-2008 年中国磷资源代谢的分析研究. *现代化工*, 2011, 31(9): 10-13.
- [54] 马敦超, 胡山鹰, 陈定江, 李有润. 中国磷消费结构的变化特征及其对环境磷负荷的影响. *环境科学*, 2012, 33(4): 1376-1382.
- [55] Ma D C, Hu S Y, Chen D J, Li Y R. Substance flow analysis as a tool for the elucidation of anthropogenic phosphorus metabolism in China. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 29-30: 188-198.
- [56] Bai Z H, Ma L, Oenema O, Chen Q, Zhang F S. Nitrogen and phosphorus use efficiencies in dairy production in China. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(4): 990-1001.
- [57] 刘毅, 陈吉宁. 滇池流域磷循环系统的物质流分析. *环境科学*, 2006, 27(8): 1549-1553.
- [58] Liu Y, Chen J N, Mol A P J, Ayres R U. Comparative analysis of phosphorus use within national and local economies in China. *Resources Conservation and Recycling*, 2007, 51(2): 454-474.
- [59] 武慧君, 袁增伟, 毕军. 巢湖流域农田生态系统磷代谢分析. *中国环境科学*, 2010, 30(12): 1658-1663.
- [60] Yuan Z W, Liu X, Wu H J, Zhang L, Bi J. Anthropogenic phosphorus flow analysis of Lujiang county, Anhui province, Central China. *Ecological Modelling*, 2011, 222(8): 1534-1543.
- [61] Yuan Z W, Li S, Bi J, Wu H J, Zhang L. Phosphorus flow analysis of the socioeconomic ecosystem of Shucheng County, China. *Ecological Applications*, 2011, 21(7): 2822-2832.
- [62] Wu H J, Yuan Z W, Zhang L, Bi J. Eutrophication mitigation strategies: perspectives from the quantification of phosphorus flows in socioeconomic system of Feixi, Central China. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 23(1): 122-137.
- [63] Bi J, Chen Q Q, Zhang L, Yuan Z W. Quantifying phosphorus flow pathways through socioeconomic systems at the county level in China. *Journal of Industrial Ecology*, 2013, 17(3): 452-460.
- [64] 王晓燕, 阎恩松, 欧洋. 基于物质流分析的密云水库上游流域磷循环特征. *环境科学学报*, 2009, 29(7): 1549-1560.
- [65] Metson G S, Hale R L, Iwaniec D M, Cook E M, Corman J R, Galletti C S, Childers D L. Phosphorus in Phoenix: a budget and spatial representation of phosphorus in an urban ecosystem. *Ecological Applications*, 2012, 22(2): 705-721.
- [66] Tangsubkul N, Moore S, Waite T D. Incorporating phosphorus management considerations into wastewater management practice. *Environmental Science and Policy*, 2005, 8(1): 1-15.
- [67] Neset T S S, Bader H P, Scheidegger R, Lohm U. The flow of phosphorus in food production and consumption-Linköping, Sweden, 1870-2000. *Science of the Total Environment*, 2008, 396(2): 111-120.
- [68] Neset T S S, Drangert J O, Bader H P, Scheidegger R. Recycling of phosphorus in urban Sweden: a historic overview to guide a strategy for the future. *Water Policy*, 2010, 12(4): 611-624.
- [69] Kalmykova Y, Harder R, Borgstedt H, Svanang I. Pathways and management of phosphorus in urban areas. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, 16(6): 928-939.
- [70] Aramaki T, Thuy N T T. Material flow analysis of nitrogen and phosphorus for regional nutrient management: case study in Haiphong, Vietnam // Fukushi K, Hassan K M, Honda R, Sumi A. *Sustainability in Food and Water*. Netherlands: Springer, 2010: 391-399.
- [71] Qiao M, Zheng Y M, Zhu Y G. Material flow analysis of phosphorus through food consumption in two megacities in northern China. *Chemosphere*, 2011, 84(6): 773-778.
- [72] Li S S, Yuan Z W, Bi J, Wu H J. Anthropogenic phosphorus flow analysis of Hefei city, China. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(23): 5715-5722.
- [73] Wu H J, Yuan Z W, Zhang Y L, Gao L M, Liu S M. Life-cycle phosphorus use efficiency of the farming system in Anhui province, Central China. *Resource Conservation and Recycling*, 2014, 83: 1-14.

- [74] Bai H, Zeng S Y, Dong X, Chen J N. Substance flow analysis for an urban drainage system of a representative hypothetical city in China. *Frontier in Environmental Science and Engineering*, 2013, 7(5): 746-755.
- [75] Asmala E, Saikku L. Closing a loop: substance flow analysis of nitrogen and phosphorus in the rainbow trout production and domestic consumption system in Finland. *AMBIO*, 2010, 39(2): 126-135.
- [76] Ridoutt B G, Wang E L, Sanguansri P, Luo Z K. Life cycle assessment of phosphorus use efficient wheat grown in Australia. *Agricultural Systems*, 2013, 120: 2-9.
- [77] Metson G S, Bennett E M, Elser J J. The role of diet in phosphorus demand. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(4): 44043-44053.
- [78] Shaw A, Barnard J. What is your phosphorus footprint? *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2011, (12): 4422-4429.
- [79] Erdmann L, Graedel T E. Criticality of non-fuel minerals: A review of major approaches and analysis. *Environmental Science and Technology*, 2011, 45(18): 7620-7630.
- [80] Graedel T E, Barr R, Chandler C, Chase T, Choi J, Christoffersen L, Friedlander E, Henly C, Jun C, Nassar N T, Schechner D, Warren S, Yang M Y, Zhu C. Methodology of metal criticality determination. *Environmental Science and Technology*, 2012, 46(2): 1063-1070.
- [81] Ulrich A E, Schnug E, Prasser H M, Frossard E. Uranium endowments in phosphate rock. *Science of the Total Environment*, 2014, 478: 226-234.