DOI: 10.5846/stxb201601010001
许肃,黄云凤,高兵,黄葳,崔胜辉.城市食物磷足迹研究——以龙岩市为例.生态学报,2016,36(22): - .
Xu S, Huang Y F,Gao B, Huang W,Cui S H.Study on phosphorus footprint of urban food: A case study in Longyan City.Acta Ecologica Sinica,2016,36(22): - .

城市食物磷足迹研究
——以龙岩市为例

许　肃[1,2,3],黄云凤[4],高　兵[1,2,3],黄　葳[1,2,3],崔胜辉[1,2,3,*]
1 中国科学院城市环境与健康重点实验室,中国科学院城市环境研究所,厦门　361021
2 中国科学院大学,北京　100049
3 厦门市城市代谢重点实验室,厦门　361021
4 集美大学食品与生物工程学院,厦门　361021

摘要:运用物质流分析法,以龙岩市为例,分析了 1985—2010 年城市食物磷代谢的变化,估算了食物磷足迹。研究表明,龙岩市总磷输入和总磷输出都有明显的增长(总磷输入从 4110 t P 增加到 12102 t P,总磷输出从 3855 t P 增加到 11315 t P);总磷足迹从 6482 t P 增加到 20473 t P,直接磷足迹的比例从 53%下降到 42%;而间接磷足迹的增速明显高于直接磷足迹;龙岩市在城市尺度上是重要的磷汇,在流域尺度上则是重要的磷源。磷足迹的研究有助于全面理解和评估城市磷代谢的特征;将磷足迹与磷流动分析结合,对我国磷资源和区域磷素管理调控具有指导意义。

关键词:食物;磷足迹;城市代谢;物质流分析;龙岩市

Study on phosphorus footprint of urban food: A case study in Longyan City

XU Su[1,2,3], HUANG Yunfeng[4],GAO Bing[1,2,3], HUANG Wei[1,2,3],CUI Shenghui[1,2,3,*]
1 *Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen* 361021, *China*
2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*
3 *Xiamen Key Lab of Urban Metabolism, Xiamen* 361021, *China*
4 *School of Food and Biotechnology Engineering, Jimei University, Xiamen* 361021, *China*

Abstract: Phosphorus (P) is an irreplaceable and essential nutrient for all living beings and a critical element for food production. However P is not only an essential and irreplaceable non-renewable resource, but also a potential water pollutant can cause eutrophication.. Phosphorus used in fertilizer for food, accounts for approximately 90% of the total phosphorus consumption. China's rapid urbanization calls for a better and comprehensive understanding of P management in urban food systems. In this paper, we firstly present a concept model to map the P metabolism of food production and consumption system. And then we analyzed the change of urban food P metabolism and estimated food P footprint from the year 1985 to 2010 based on the method of substance flow analysis and our definition of P footprint, taking Longyan as an example. The result demonstrated that both input P and output P increased significantly (the input P increased from 4110 t P to 12102 t P, the output P from 3855 t P to 11315 t P); the total P footprint grew up from 6482 t P to 20473 t P and the proportion of the direct P footprint decreased from 53% to 42%; the growth of the indirect P footprint was faster than that of the direct P footprint. The P metabolism analysis reflected that Longyan was an important P sink at the city scale and main P source at

基金项目:国家科技支撑计划项目(2013BAJ04B01);中国科学院城市环境研究所青年人才领域前沿项目(IUEMS201402);国家自然科学基金项目(31500391)
收稿日期:2016-01-01;　　**修订日期**:2016-04-18
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: shcui@ iue.ac.cn

the watershed scale. Our results of P footprint analysis indicated that the indirect P footprint constituted an important proportion of the total P footprint and should not be neglected. The analysis of P footprint helped to comprehensively understand and evaluate characters of urban P metabolism. Combining the analysis of P footprint and substance flow had guiding significance for national and regional P management and regulation.

Key Words: food; phosphorus footprint; urban metabolism; substance flow analysis; Longyan City

磷是所有生命必需的营养元素,同时也是农业生产中的关键要素。在现代农业中,人类通过开采磷矿石,生产出无机磷肥,并施用到农田土壤中,从而获得农作物的高产[1-2],以满足自身对食物的需求。但是,随着无机磷肥投入的不断增加,有限的磷资源正逐渐被消耗殆尽[3];而磷肥的大量施用,也带来了水体富营养化等环境问题[4]。中国拥有世界第二大的磷矿石资源,同时也是最大的磷肥生产者和消费者[6]。在我国经济不断增长和城市化进程的背景下,一方面城市生态系统已经成为了主要的磷代谢区域,另一方面城市也面临着食物安全和水体环境日益恶化的双重挑战[7],而是否能够合理利用磷资源,是解决以上两大问题的关键。因此,分析研究磷在我国城市食物生产和消费等过程中的流动,对于磷资源的保护、粮食安全问题和水体环境治理都具有重要意义。

以往的研究表明,磷矿石被开采出来后,经过筛选、加工等过程后,大约有 90%的磷被用于农业生产(化肥、农药等),只有 10%被用于工业制造(制药、纺织等)[9],又由于各种工业活动较为复杂,难以准确计算工业品的磷含量,因此食物磷的研究一直被作为磷物质流研究的主要方面。例如,Cordell 等通过估算,认为全球每年有 1.75×10^7 吨磷矿石被开采,而其中 57%的磷在农业生产和食物供应过程中流失[8];Cordell 等还研究了澳大利亚的食物系统,发现畜禽养殖业占到了当地 60%的磷需求[9];在城市尺度上,Metson 等运用空间分析的方法定量地确定了美国凤凰城地区的磷流和磷汇,发现在城市内部,磷流由食物和饲料以及人畜粪尿的转移来决定[10]。在我国磷代谢研究方面,Liu 等构建了中国磷循环分析框架与核算模型,重建了中国 1600—2012 年的磷循环格局演变过程,并在此基础上绘制 2012 年中国人类活动磷排放的富营养化潜势图谱[10]。刘毅运用物质流分析和产业理论,建立了静态物质流分析模型,分别从国家和区域两个层次识别了我国磷代谢的主要特征及其发展趋势,深入地分析了我国水体富营养化的控制策略[11]。除了国家尺度,一些典型的农业型城镇的磷代谢,如龙岩[12]、肥西[13]等,也受到学者的关注。另外,由于我国湖泊富营养化较为严重,因此流域层次的磷代谢也逐步受到重视,如学者研究发现巢湖流域农业输入磷在 35 年间增长了 5 倍[14]。

然而,大多数磷素的研究只是关注生产食物或者产品本身需要投入多少磷,却忽略了除了直接投入磷素以外,其它“看不见”的磷素投入。本文通过研究食物生产和消费等过程的磷流动,运用磷足迹的概念,以福建省龙岩市为例,全面地分析食物生产和消费等过程中的磷素利用情况,从而回答以下 3 个科学问题,期望能够对我国磷资源的利用和管理起到指导作用:(1)如何定义磷足迹,并进行估算?(2)城市化进程中龙岩市食物磷足迹是如何变化的?(3)龙岩食物磷足迹的结果对我国城市磷调控和管理有何启发?

1 材料与方法

1.1 磷物质流分析模型和计算过程

为了考察龙岩市食物磷的源、汇和过程,在综合考虑龙岩市的实际情况,数据的可获得和理论假设下,参考已有的城市磷代谢研究模型[12,15],首先建立龙岩市食物磷物质流模型(图 1),将龙岩市社会经济系统中涉及食物生产和消费的部分划分为作物种植子系统、畜禽养殖子系统和人类消费子系统,然后采用物质流分析法(Substance flow analysis),以统计年鉴和相关文献作为基础,计算各子系统之间的磷流和存量。其中,作物种植系统包括作物和农田土壤;畜禽养殖系统包括牲畜和家禽;人类消费系统包括研究区内的城市人口和农村人口。模型的理论假设为:(1)本地生产的食物首先满足本地居民对食物的需求,多余的部分才通过贸易

供给其它城市;(2)由于龙岩是一个内陆邻海城市,因此居民消费的水产品大部分是海产品,假定海产品全部通过贸易进口;(3)因为在社会经济系统中,磷代谢主要是由人为磷流作为主导,所以一些流量小的自然过程磷流就不予以考虑(例如大气磷沉降);(4)人类消费系统的磷输入和输出基本达到平衡,人体内的磷累积不予以考虑。

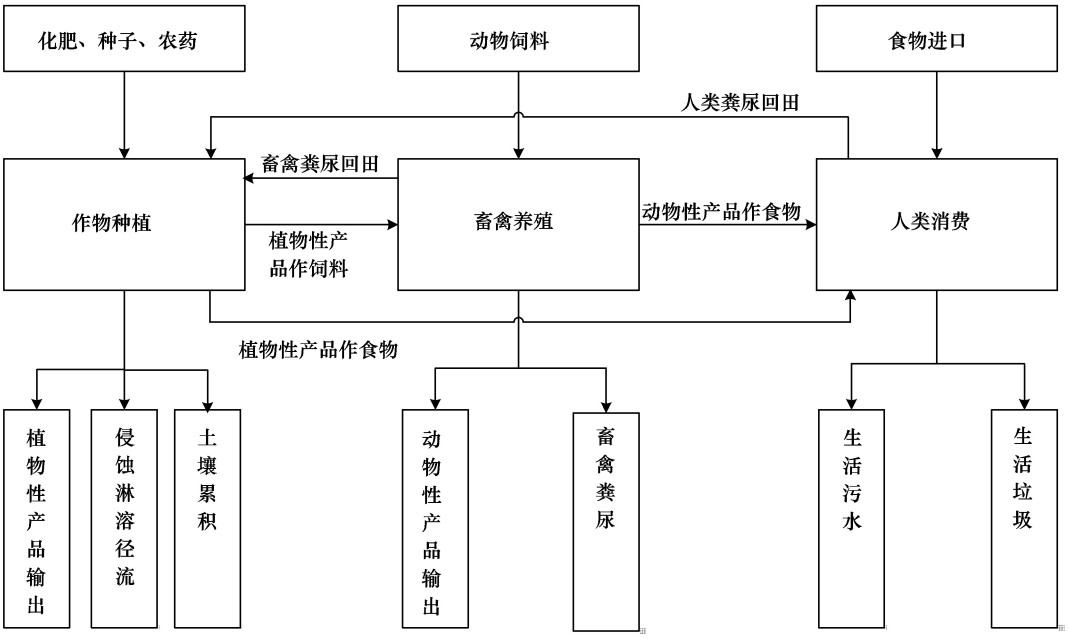

图 1　龙岩市食物磷代谢概念模型

Fig.1　Concept model of Food phosphorus metabolism in Longyan City

本研究的数据主要来自官方的统计年鉴,公开发表的文献和实地调查。官方统计年鉴包括龙岩统计年鉴 1986—2011 年和福建统计年鉴 1986—2011 年。我们还采访了约 30 名农民从事家禽养殖,获得当地畜禽的繁殖周期等参数,另外还咨询了 5 家当地污水处理厂的工作人员,获得污水排放相关磷数据。

根据质量守恒定律。本文用下面的输入和输出公式来计算了龙岩社会经济系统食物磷流动:

$$\text{P flow} = \text{mass of material} \times \text{P concentration of material}$$

并用以下公式来计算系统中的磷素累积:

$$\text{P accumulation} = \sum \text{P inputs} - \sum \text{P outputs}$$

式中,*P* flow 为磷流量;mass of material 为磷流对应的物品质量;*P* concentration of material 为物品中的磷含量;*P* accumulation 为系统中的累积磷量;∑ *P* inputs 为系统磷的总输入量;∑ *P* outputs 为系统磷的总输出量。

对于龙岩磷代谢模型,在作物种植子系统中,计算了 7 种类型的产品(大米、小麦、豆类、块茎、油料作物、蔬菜和水果);在畜禽养殖子系统中,分别考虑了四类常见的牲畜和家禽(猪、牛、羊和禽类)。在人类消费子系统中,计算时考虑了 14 种常用的消费食物(谷物、蔬菜、油料、猪肉、牛肉、家禽肉、蛋类、水产品、奶类、糖类、酒类、瓜果类、薯类和豆类),并分别从城市和农村两方面来计算。计算公式为:

$$q_p = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i q_i$$

式中,q_p为年人均磷消费量;γ_i为 i 种食物的磷含量;q_i表示食物 i 的消费量;n 表示食物的种类数。

本研究的不确定性主要来自于两个方面,一方面是参数的不确定性,由于本文所采用的参数有些来自其它的城市和国家,因此造成了一些不确定性。例如,计算龙岩人均食物磷消费时,本文用的是中国人均的数据;另一方面是数据来源的不确定性,如在实地调研中,由于时间和人手的有限,抽样的数据也有很高的不确定性。本文中,对于食物磷流的计算只考虑的主要的过程,忽略了一些比较难以计算的过程,比如植物性食物

在食物加工中的磷流失。虽然有以上不确定性的存在,但是本文尽量采用的是权威的统计数据和专业文献,大部分的数据都具有高的可信度,在整个系统中,不确定的磷流只占很小的一部分。

1.2 磷足迹定义

1992 年,William Rees 首次提出了“生态足迹”的概念,以评估人类对自然资本的需求和人类地球系统的可持续性[15]。随后“足迹”被广泛用于表征人类对自然资源的占用,或者用来衡量某种产品或服务在自然资源维度上的可持续性,比如已经被广泛接受的水足迹、碳足迹和氮足迹等[16-18]。磷作为一种不可再生的自然资源,用足迹的概念能够更好地衡量人类对它的利用强度,从而为整个磷管理提供科学的度量指标。当前,已经有不少学者提出了磷足迹的概念和计算方法。比如,Meston 等人定义人均磷足迹为满足每人食物消费所需开采的矿石磷的量[19],并计算了 1961 到 2007 年世界的人均磷足迹;Shaw 等定义区域磷足迹为某区域净输入或者净输出的磷量[20],认为经过磷循环沉积到海底的那部分磷就是人类对磷资源的占用。

要全面了解磷足迹,必须对磷的整个循环过程和人类对磷实际消耗有全面的分析。借鉴水足迹的相关内涵,产品的磷足迹定义为:在整个供应链上,生产该产品所需投入的所有磷素之和。和产品水足迹[21]的定义相似,而与碳足迹[22]、氮足迹[23]从排放的视角定义不同,该定义主要是从资源性的角度来明确磷足迹,用于理解消费者和生产者与磷资源之间的关系。总磷足迹可以分为两部分:直接磷足迹和间接磷足迹。直接磷足迹指生产某产品所投入的来源于矿石的磷量,间接磷足迹指除了矿石磷以外,生产某产品所投入的其它磷量。以食物供应链(作物生产→畜禽养殖→食物加工→人类消费)为例,直接磷足迹等于在整个供应链中,所投入的无机磷肥的量;间接磷足迹就是除了无机磷肥,所投入的其它磷的量,包括来自土壤再利用磷,以产品形式投入的磷,通过贸易输入的磷以及循环利用磷(畜禽粪尿还田、秸秆还田和人类粪尿还田等)。上述磷足迹可以用公式表示为:

$$PF = PF_{\text{direct}} + PF_{\text{indirect}}$$

$$PF_{\text{direct}} = P_{\text{mineral fertilizer}}$$

$$PF_{\text{indirect}} = P_{\text{residue in soil}} + P_{\text{recycling}} + P_{\text{other inputs}}$$

式中,PF 为总磷足迹;PF_{direct}为直接磷足迹;PF_{indirect}为间接磷足迹;$P_{\text{mineral fertilizer}}$为供应链中投入无机磷肥的量;$P_{\text{residue in soil}}$为土壤累积磷量;$P_{\text{recycling}}$为循环磷量;$P_{\text{other inputs}}$为供应链中其它磷投入量,包括通过贸易输入的食物磷和饲料磷等。

1.3 研究区域和研究边界

本文研究范围为龙岩市行政区(24°23′N —26°02′N,115°51′ E— 117°45′E)。龙岩市位于福建省西部,面积 1.9×10^4平方公里,其中建成区面积 45 平方公里,常住人口 259 万人(2014 年)。从 1985 到 2010 年间,龙岩的 GDP 有显著的增长,从约 10 亿元增加到 990 亿元,城镇化率从 27%提高到 45%。在龙岩市,有 50%以上的人口仍在从事农业活动,农业产值仅占龙岩市 GDP 的 12%。当地的畜牧业贡献了 40%的本地农业总产值,并生产了全省 26%的生猪。由于龙岩是福建省三大江闽江、九龙和汀江的发源地,而当地畜禽养殖业的发展产生了大量的牲畜排泄物,这些排泄物不合理的排放严重影响到了下游水环境。因此以龙岩市为例研究磷代谢,不仅有助于改善本区域的磷管理,也对福建省流域环境的治理有积极的意义。

本文食物磷代谢和磷足迹的研究边界是龙岩食物生产和消费系统,以化肥→作物生产→畜禽养殖→人类消费→环境(作物生产和畜禽养殖也有磷素输出到环境)这条食物链作为研究主线,不涉及相关的工业系统(如磷矿石加工和生产,以及化肥的生产制造等),关注人为食物生产消费活动对磷资源的利用。贸易输入和输出的边界为龙岩行政区边界;输出到环境的边界也是限定在龙岩境内。

2 结果与分析

2.1 龙岩市磷流动和磷代谢结构

如图 2 所示,1985 年,龙岩市食物系统总磷输入为 4110 t P,其中作物种植子系统占 88%,畜禽养殖子系

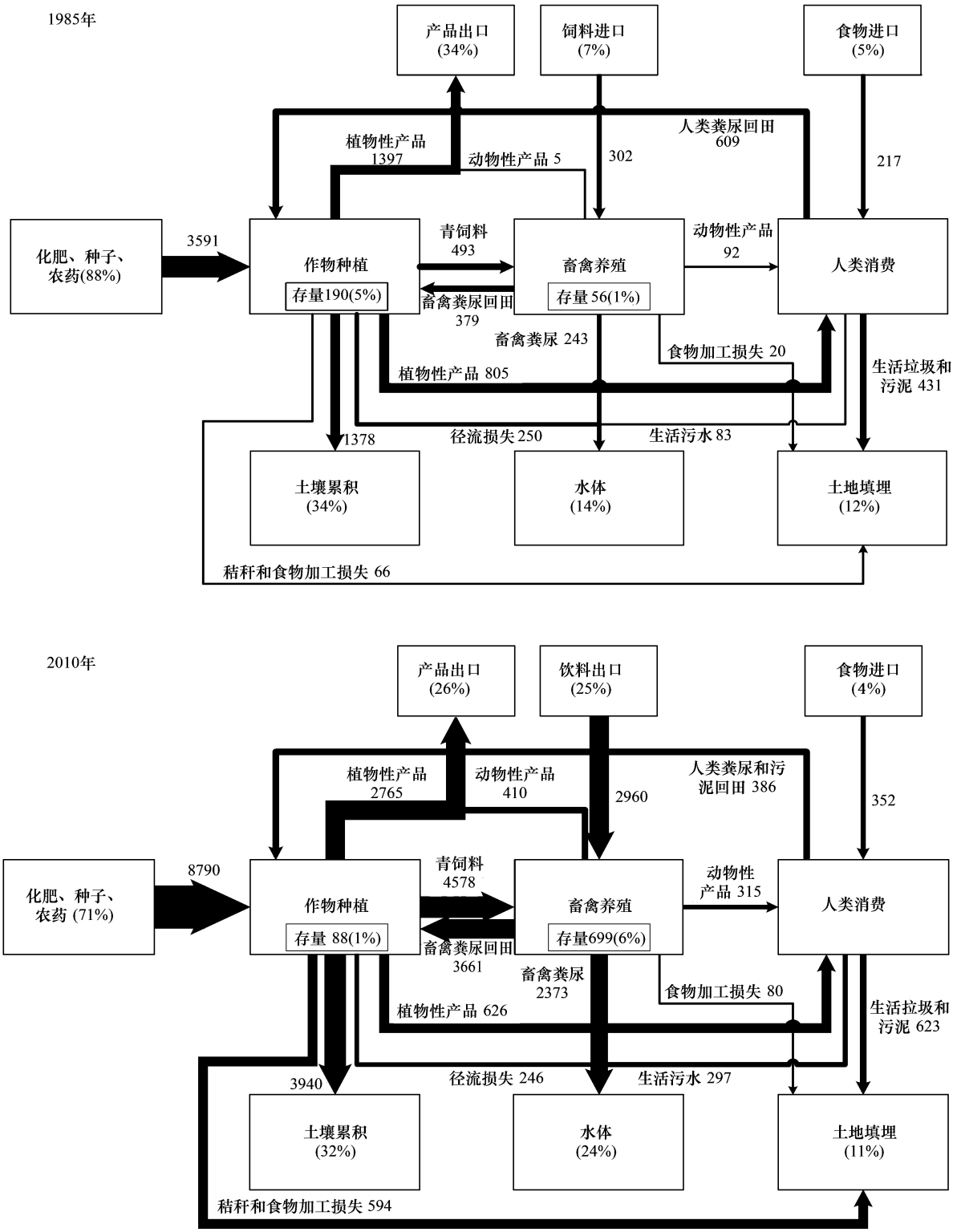

图 2　1985 年(a)和 2010 年(b)龙岩市食物磷代谢物质流(t P)

Fig.2　Food phosphorus flow of Longyan in 1985 (a) and 2010 (b)

统占 7%,剩下 5%为进口食品磷。在输出端,总磷输出为 3855 t P,以贸易形式出口的磷占到了总输出磷的 34%;土地填埋占 12%;系统存留磷占 6%(5%+1%);剩余 48%的磷进入到环境中,其中土壤累积占 34%,水体占 14%。到了 2010 年,龙岩市食物系统总磷输入猛增至 12102 t P。作物种植子系统所占磷的比例显著下

降到了 71%;畜禽养殖输入磷提高到了 25%;食物进口磷所占比重基本保持不变。在输出端,总磷输出也随之提高到 11315 t P,其中以贸易形式出口的磷占到了总输出磷的比重降低到了 26%;土地填埋和土壤累积的比例基本保持不变,但是水体磷负荷有明显的增加,从原先的 14%增加到了 24%。

因此,同 1985 年相比,2010 年龙岩市食物磷代谢特征有明显的变化。一方面是食物供给结构和贸易输出结构的变化。磷素输入食物生产系统(作物种植和畜禽养殖子系统),生产出植物性产品和动物性产品满足本地居民和贸易供给的需求。从 1985 年和 2010 年的磷流对比可以明显看出,本地居民食物消费只增加了 5%,其中植物性产品消费下降了 22%,动物性产品消费增加了 242%;同期贸易供给增加了 126%,其中植物性产品输出增加了 98%,动物性产品输出增加了 80 倍。另一方面是环境磷素负荷的显著增加。研究期内土壤累积磷上升了 186%,水体磷负荷增加了 3 倍。其中土壤累积磷增加是由于施肥所致,而水体磷负荷猛增的原因主要是由于畜禽粪尿排放的增加(从 243 t P 升至 2373 t P,上升了约 8 倍)。

2.2 龙岩磷输入输出的时间变化

从图 3 可以看出,在研究期内,龙岩磷代谢随着时间的变化在总输入量和总输出量上都呈现稳步的增长。其中在输入端,化肥磷和饲料磷分别增加了 1.5 倍和 8.8 倍,而农药种子和食物进口输入在时间上没有明显的变化。在输出方面,土壤累积、土地填埋、水体负荷和动物性产品输出都呈现出逐步递增的趋势,分别从 1378、830、955 和 5 t P 增加到 3940、3434、2960 和 410 t P。只有植物性产品输出表现出先增加后减少的时间变化,从 1985 年到 1999 年,植物性产品输出首先从 1397 t P 增加到 3790 t P,到 2010 年为止又下降到 2765 t P。

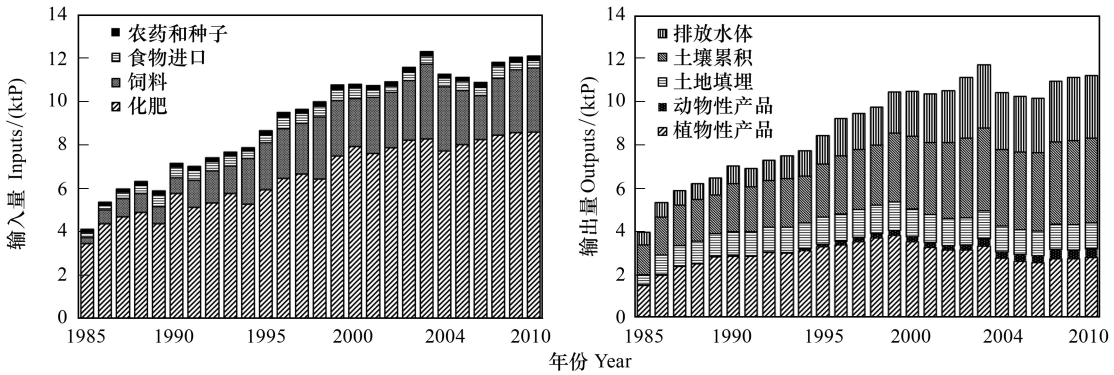

图 3 龙岩 1985—2010 年磷代谢输入(a)和输出(b)项目和变化趋势

Fig.3 Categories and trends of phosphorus inputs (a) and outputs (b) of Longyan from 1985 to 2010

2.3 龙岩磷足迹

根据前文 2.1 所述的定义,结合龙岩市磷代谢物质流分析,可以计算出龙岩市磷足迹,如图 4 所示,这里其它磷主要包括饲料进口磷和食物进口磷。1985 年,龙岩市直接磷足迹占到总磷足迹的 53%(3436 t P),间接磷足迹占到 47%(3046 t P),直接磷足迹的量略超过间接磷足迹。而到了 2010 年,直接磷足迹的比例降到了 42%(8599 t P),间接磷足迹比例提高很大,达到了 58%(11874 t P)。造成这种原因主要是由于在间接磷足迹中,循环磷和其它磷足迹的比例有明显的提高。其中循环磷的提高主要是由于畜禽粪尿回田比例的大幅提升,从 6%提高到 18%;从磷流图可以看出,其它磷足迹的提高主要是由于饲料进口磷的显著提高。

3 讨论

从 1985 年到 2010 年,随着龙岩市社会经济的发展和城市化的推进,整个龙岩市磷代谢的通量大大增加,磷流结构发生了明显的变化,主要集中在:(1)涉及到畜禽养殖业的磷流所占比例均有明显增加,如饲料进口磷、畜禽粪尿排放磷和畜禽粪尿回田磷;(2)水环境的负荷压力增大;(3)本地居民对动物性产品的消费需求增加,饮食结构发生变化;(4)对外食物贸易对植物性和动物性产品需求均有显著增长,特别是动物性产品。

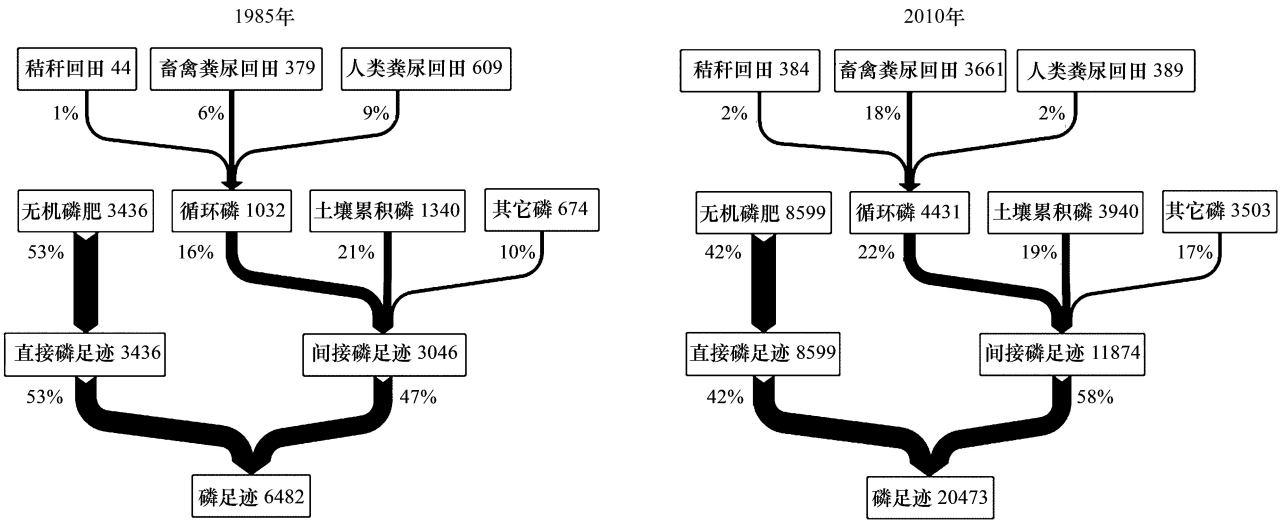

图 4　1985(a)和 2010(b)年龙岩磷足迹(kt P)

Fig.4　Phosphorus footprint of Longyan in 1985 (a) and 2010 (b)

在研究期内,龙岩市人口从 230 万人增加到 290 万人[25],更多的人口意味着需要生产更多的食物,这无疑是驱动龙岩市磷流量增加的因素之一。然而,驱动龙岩市磷流和结构改变的更重要的原因是居民饮食结构的改变和周边城市对龙岩食物进口需求的增加。研究表明,本地植物性产品消费对动物性产品消费的比例从 1985 年的 8.8 : 1 降到为 2010 年的 2 : 1(图 2),从以植物性食物为主的饮食结构向以动物性食物为主的饮食结构转变。另一方面,植物性产品出口的比例也从 279.4 :1 下降到 6.7 : 1(图 2),意味着龙岩市周边城市居民饮食结构也有类似的调整,从而导致贸易方面,龙岩动物性产品出口量大增。以上这些驱动因子表明,要实现龙岩市可持续的磷资源管理,不但要考虑对龙岩市本地居民消费的引导,而且要在更大的区域尺度上进行调控,才能有效地降低龙岩磷的增长。

将龙岩与其它城市化水平接近或较高的市县进行比较,如合肥、巢湖和庐江(其中合肥城市化水平比龙岩高,接近 60%,而巢湖和庐江城市化水平接近龙岩),磷代谢特点有所不同。例如,在输入端,合肥等三个市县磷输入的主要是以磷矿石的形式,而不是磷肥的形式(合肥。巢湖和庐江的矿石磷输入分别为 3700 t P、4748 t P 和 5699 t P)[26-28]。主要原因在于:不同于龙岩磷以农业为主的代谢模式,合肥等三个市县有较多的磷矿加工工厂,而且当地也不是主要的畜禽养殖业基地。但是,将龙岩与其它城市化水平较低的市县进行比较,如肥西县和无为县,却呈现出较为相似的特征。在肥西和无为,农业生产同样占到了较大的比例,在输入端和龙岩类似,也是以化肥和畜禽饲料为主[13,29]。这些表明,城市磷代谢和当地的产业结构也有密切的关系。

虽然从物质流的角度,龙岩市磷流的结构并不合理,呈现出不可持续的特征,但是从磷足迹的角度来看,龙岩磷代谢结构有明显的调整。这种调整主要表现在直接磷足迹,也就是矿石磷比例的降低;循环磷比例的增加,其中以畜禽粪尿回田贡献最大。如图 5 所示,直接磷足迹和间接磷足迹分别表现出波段式上升和下降的趋势,畜禽粪尿回田比例在研究期内持续升高。造成这种现象的原因一方面可能是磷矿石逐渐变得稀缺,价格持续走高,从而有机肥

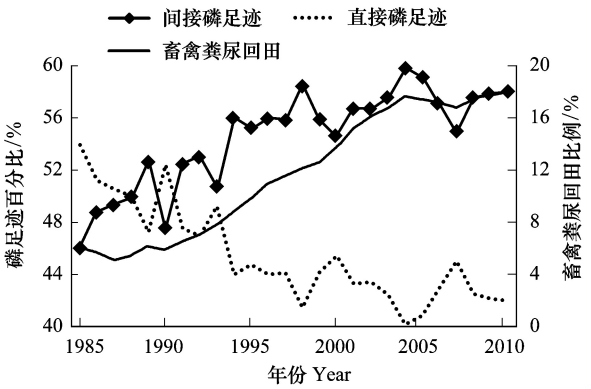

图 5　磷足迹和畜禽粪尿回田比例

Fig.5　The proportion of P footprint and livestock manure recycling

的利用开始收到重视;另一方面得益于龙岩市政府近年来大力开展龙津河流域综合整治工作,全面推行“猪—沼—草(竹、国、林)”等生态养殖模式,有效地将猪粪尿进行回收,作为有机化肥[30]。

龙岩人均总磷足迹从 1985 年的 2.72 kg P/a 增加到 2010 年的 6.92 kg P/a,相应的,人均直接磷足迹从 1.44 kg P/a 增加到 2.92 kg P/a;人均间接磷足迹从 1.28 kg P/a 增加到 4.00 kg P/a。其中龙岩人均直接磷足迹和中国人均直接磷足迹的数据比较接近(从 1985 年的 1.38 kg P/a 增加到 2007 年的 3.00 kg P/a)[19],反映出我国居民食物磷的消费情况。然而值得注意的是,龙岩人均直接磷足迹的增长速度要低于中国人均直接磷足迹的增长速度,因此,在小尺度上更能体现出磷调控的效果。另一方面,在研究期内,龙岩人均间接磷足迹增加了 2 倍,而直接磷足迹只增加了约 1 倍,龙岩人均间接磷足迹的增长速度远快于直接磷足迹。所以说,在分析人类对磷资源占用时,不应忽略间接磷足迹的作用,可以预见,随着磷资源的逐渐稀缺,人类的间接磷足迹将成为影响磷资源可持续的关键。

综合来考察龙岩市磷代谢和磷足迹,可以发现龙岩市在城市尺度上是磷汇。而在区域或是流域尺度上则是磷源。龙岩市从外部区域输入化肥和饲料等大量含磷生产资料,经过内部社会经济子系统进行生产和加工,最后形成产品,同时有大量磷滞留在当地的环境中,环境磷负荷持续增加,本身起到一个磷汇的作用;而龙岩又将大量的含磷食物产品输出到周边城市,并排放含磷的污水进入水体。虽然在 2000 以后产品的输出磷量有所减少,但是在区域和流域尺度上而言也是一个重要的磷源(图 6)。究其原因,龙岩磷代谢的管理目标已经不仅是满足本地居民的消费需求,而更多的是满足产品输出的需求。对于我国磷资源和区域磷管理而言,应该首先对类似龙岩这种高投入、高排放、以出口需求为导向的城市进行研究和调控,才能够更有针对、更有效的达到磷可持续的目标。

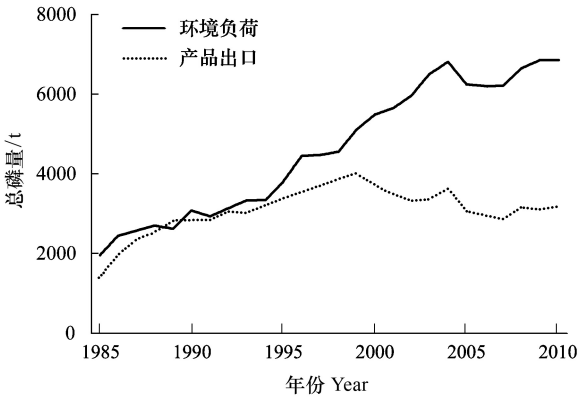

图 6 龙岩磷环境负荷和产品输出

Fig. 6 The P environemnt load and the P products output of Longyan

4 结论

从 1985 年到 2010 年,随着城市化进程的推进,本文研究表明,龙岩市已经转变为一个以磷出口为导向的城市,伴随着大量的磷输入和磷产品输出,以及高的环境磷负荷。从磷足迹的角度来看,龙岩市逐步开始减少对于矿石磷的依赖,转而更多的利用循环磷和其它进口磷。而龙岩市的人均间接磷足迹的增速明显快于直接磷足迹,反映了本身发展过程中对磷足迹结构的调整,未来人类的间接磷足迹将对磷资源的可持续有重要影响。在城市尺度上,龙岩是重要的磷汇;对区域或流域尺度上,龙岩又是重要的磷源。本研究认为,城市磷调控和磷的可持续利用不仅要关注城市磷代谢本身,更要全面的去考察磷足迹,从多角度、多系统和跨区域进行研究和分析。

参考文献(References):

[1] Tilman D, Fargione J, Wolff B, D'Antonio C, Dobson A, Howarth R, Schindler D, Schlesinger W H, Simberloff D, Swackhamer D. Forecasting agriculturally driven global environmental change. Science, 2001, 292(5515): 281-284.

[2] Tilman D, Cassman K G, Matson P A, Naylor R, Polasky S. Agricultural sustainability and intensive production practices. Nature, 2002, 418(6898): 671-677.

[3] Gilbert N. Environment: the disappearing nutrient. Nature, 2009, 461(7265): 716-718.

[4] Carpenter S R. Phosphorus control is critical to mitigating eutrophication. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(32): 11039-11040.

[5] Online International Fertilizer Industry Association data: Electronic database. [2013-02-01]. http://www.fertilizer.org/ifa/ifadata/search. (未找到本条文献信息,请核对)

[6] Metson G S, Iwaniec D M, Baker L A, Bennett E M, Childers D L, Cordell D, Grimm N B, Grove J M, Nidzgorsk D A, White S. Urban phosphorus sustainability: Systemically incorporating social, ecological, and technological factors into phosphorus flow analysis. Environmental Science & Policy, 2015, 47: 1-11.

[7] Cordell D, Drangert J O, White S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. Global Environmental Change, 2009, 19(2): 292-305.

[8] Cordell D, Jackson M, White S. Phosphorus flows through the Australian food system: Identifying intervention points as a roadmap to phosphorus security. Environmental Science & Policy, 2013, 29: 87-102.

[9] 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.

[10] Xin L, Hu S, Jiang S Y, Yuan Z W, Zhang C S, and Elser J J. Intensification of phosphorus cycling in China since the 1600s. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 13(10): 2609-2614.

[11] 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.

[12] Cui S G, Xu S, Huang W, Bai X M, Huang Y F, Li G L. Changing urban phosphorus metabolism: Evidence from Longyan City, China. Science of the Total Environment, 2015, 536: 924-932.

[13] 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.

[14] Jiang S Y, Yuan Z W. Phosphorus flow patterns in the Chaohu watershed from 1978 to 2012. Environmental Science & Technology, 2015, 49(24): 13973-13982.

[15] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. Environment and Urbanization, 1992, 4(2): 121-130.

[16] Galli A, Wiedmann T, Ercin E, Knoblauch D, Ewing B, Giljum S. Integrating ecological, carbon and water footprint into a "footprint family" of indicators: definition and role in tracking human pressure on the planet. Ecological Indicators, 2012, 16: 100-112.

[17] Cranston G R, Hammond G P. Carbon footprints in a bipolar, climate-constrained world. Ecological Indicators, 2012, 16: 91-99.

[18] Leach A M, Galloway J N, Bleeker A, Erisman J W, Kohn R, Kitzes J. A nitrogen footprint model to help consumers understand their role in nitrogen losses to the environment. Environmental Development, 2012, 1(1): 40-66.

[19] Metson G S, Bennett E M, Elser J J. The role of diet in phosphorus demand. Environmental Research Letters, 2012, 7(4): 044043.

[20] Shaw A, Barnard J. What is your phosphorus footprint? //Proceedings of the Water Environment Federation, WEFTEC 2011: Session 61 through Session 70. Water Environment Federation, 2011: 4422-4429. (请核对出版地)

[21] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, Mekonnen M M. 水足迹评价手册. 刘俊国, 曾昭, 赵乾斌, 马坤, 译. 北京: 科学出版社, 2012.

[22] Wiedmann T, Minx J. A definition of ´carbon footprint´ // Pertsova C C, ed. Ecological Economic Research Trends. Hauppauge, NY: Nova Science, 2008: 1-11

[23] Gu B J, Leach A M, Ma L, Galloway J N, Chang S X, Ge Y, Chang J. Nitrogen footprint in China: food, energy, and nonfood goods. Environmental Science & Technology, 2013, 47(16): 9217-9224.

[24] 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.(本条文献与第 9 条重复,请核对)

[25] 龙岩统计局, 中华人民共和国国家统计局. 龙岩统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 1985-2011.

[26] 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.

[27] Yuan Z W, Shi J K, Wu H J, Zhang L, Bi J. Understanding the anthropogenic phosphorus pathway with substance flow analysis at the city level. Journal of Environmental Management, 2011, 92(8): 2021-2028.

[28] 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.

[29] 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.

[30] 龙岩市人民政府. 龙岩市龙津河综合整治工作方案. (2006-04-28) [2014-08-01]. http://www.longyan.gov.cn/zwpd/zfwj/szfbwj/200604/t20060428_12441.htm.