

城市食物生产与消费系统磷代谢研究

黎斯思, 袁增伟*, 毕军, 武慧君, 刘恒

(南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210093)

摘要:研究运用物质流分析方法, 构建基于物质代谢过程的城市食物生产与消费系统磷代谢分析框架, 即追踪以“食物生产”、“食物加工”、“居民消费”、“废物处置”为主要过程的磷代谢路径, 解析磷代谢主要过程机制并提出相应的核算方法; 在此基础上, 以合肥市食物生产与消费系统为例进行了案例研究. 结果表明, 2008 年合肥市食物生产消费系统磷的总需求量为 5 475.86 t, 其中出口到系统外含磷总量为 242.57 t, 进入地表水体的磷负荷为 1 710.84 t, 其余磷以存量形式留存于系统中. 农田化肥流失与生活废污排放是导致水体磷负荷过大的主要原因. 据此, 针对磷代谢系统的总体结构特征, 从农业种植、城乡消费、环境基础设施建设和畜禽养殖等方面提出若干优化磷代谢过程和减少磷排放的对策建议.

关键词:磷; 物质流分析; 合肥; 食物生产; 食物消费; 富营养化

中图分类号:X21 **文献标识码:**A **文章编号:**0250-3301(2011)02-0603-06

Phosphorus Flow Analysis of Civil Food Production and Consumption System

LI Si-si, YUAN Zeng-wei, BI Jun, WU Hui-jun, LIU Heng

(State Key Laboratory of Pollution Control & Resource Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: With the method of substance flow analysis(SFA), the study provided an analytical framework for phosphorus cycle on civil food production and consumption system that was demonstrated by four life stages—food production, food processing, consumption and waste handling. Furthermore, a case study was carried out in Hefei City, for the year 2008. The SFA results show that the total demand of phosphorus reaches 5 475.86 t in the food production and consumption of Hefei City in 2008; approximately 242.57 t P leaves the system, and around 1 710.84 t P is emitted via waste discharge to the surface water, the rest is transformed as the stocks in the system. The effluent of excessive fertilizer in agriculture plays an important role for the huge phosphorus load, as well as the civil sewage. In the end, the study provided some suggestions on improving the use efficiency of phosphorus and reducing phosphorus discharge into surface water.

Key words: phosphorus; substance flow analysis(SFA); Hefei; food production; food consumption; eutrophication

我国自 20 世纪 70 年代开始发展以大量化肥使用为特征的现代农业以来, 农业产量显著提高, 然而, 现代农业也极度加快了人类生产和消费系统中的氮、磷代谢过程, 造成大量的氮、磷排放, 进而导致了严重的生态后果——水体富营养化现象日益严重. 相关研究表明, 氮、磷是导致水体富营养化的关键因子^[1,2]. 然而, 我国现有的水体富营养化控制措施多是针对废水减排和处理的, 缺乏针对氮磷营养物质的系统调控技术, 这主要是因为缺乏对这些营养元素在流域生态系统中代谢过程的整体把握^[2]. 因此, 解析流域磷代谢过程机制并量化表征其代谢路径是进行有效氮磷减排和控制的关键. 物质流分析是系统识别社会经济系统与环境系统之间物质循环规律以求减少环境负荷的一种有效方法, 能帮助政策制定者了解不同社会经济活动之间以及这些活动与环境之间的相互关系, 从而将资源使用、有害物质的排放与其潜在根源联系起来. 目前已有研究将物质流分析方法引入氮磷代谢分析, 但都是从含磷产品生产或消费的局部过程角度探讨其代谢机

制^[3-10], 如农田系统磷代谢机制等^[11-13], 运用物质流分析方法进行城市氮磷代谢分析的系统研究较少^[14-17]. 本研究将物质流分析方法引入城市食物生产与消费系统的磷代谢分析中, 并以合肥为例进行了案例探讨, 通过量化城市食物生产与消费系统对流域水体的磷贡献度, 以期对流域湖泊富营养化控制提供决策依据.

1 磷代谢分析框架

在对城市食物生产与消费系统实地调查的基础上, 参考相关研究成果^[17,18], 确定城市食物生产与消费系统磷代谢的 4 个主要过程, 即“食物生产”、“食物加工”、“居民消费”、“废物处置”, 进而确定如图 1 所示的城市食物生产与消费系统磷代谢分析

收稿日期: 2010-02-09; 修订日期: 2010-06-11

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07103-007); 国家自然科学基金项目(40971302)

作者简介: 黎斯思(1984~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为产业生态学, E-mail: lisa_env@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: yuanzw@nju.edu.cn

框架.

本研究中不考虑自然条件下的磷流失,如土壤侵蚀等过程造成的磷损失;同时,由于大气中磷含量

相对较少,并且磷经由大气圈与土壤、水体的循环通量几乎可以忽略不计^[2],因此本模型也不考虑大气沉降对耕地土壤的影响.

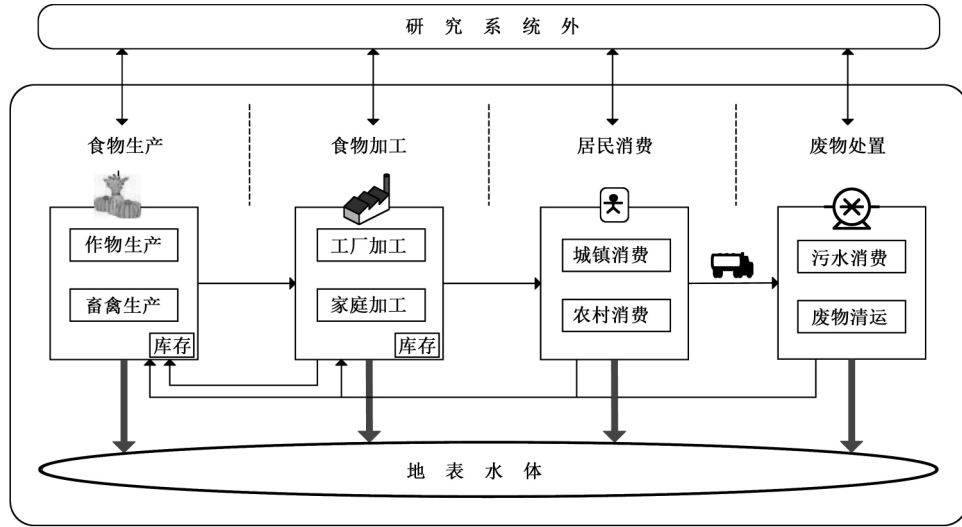


图1 城市食物生产与消费系统磷代谢分析框架

Fig.1 An analytical framework for phosphorus flow of civil food production and consumption system

2 磷代谢过程核算方法

城市食物生产与消费系统磷代谢过程分析的核心在于定量分析主要代谢过程的输入、输出和库存量,其核算的基本原理是各个过程的物质输入输出平衡.本研究依据系统磷素流动年际特点,将各个代谢过程的核算方法分为三类^[2]:①定值方程用于描述独立的且有固定值的物质流过程;②从属方程用于计算依赖于其他物质流过程的物质流;③对于实际发生但无法准确定量的物质流过程,通过各环节输入输出平衡方程计算得到各物质流累计值.

2.1 作物生产

作物生产是食物生产消费系统中磷素流动的起始过程,其输入形式是肥料(含磷化肥和各种农家肥料的施用)、含磷农药和种子等,其净输入总量可表达为:

$$P_{agr}^{input} = \sum_{i=1}^M Agr_i^{p-input} \quad (1)$$

式中, P_{agr}^{input} 为作物生产过程的磷输入总量, M 为作物生产投入中含磷物质的种类数, $Agr_i^{p-input}$ 作物生产中投入的第 i 类物质的含磷总量,可以用第 i 类物质的总量及其含磷率的乘积表示,即:

$$Agr_i^{p-input} = \sum_{j=1}^N Q_{i,j}^{agr-input} \cdot \gamma_{i,j}^{p-agr} \quad (2)$$

式中, N 为作物生产投入中第 i 类含磷物质包含的物质类别数, $Q_{i,j}^{agr-input}$ 为作物生产投入的第 i 类含磷物质中第 j 种物质的投入总量, $\gamma_{i,j}^{p-agr}$ 为作物生产投入的第 i 类含磷物质中第 j 种物质的含磷率.将式(2)代入式(1)得:

$$P_{agr}^{input} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N Q_{i,j}^{agr-input} \cdot \gamma_{i,j}^{p-agr} \quad (3)$$

实际计算过程中,含磷化肥主要包括复合肥和磷肥;含磷农药主要包括杀虫剂和除草剂两大类;而农家肥则包括秸秆还田、畜禽粪便和人体粪便三类,还田秸秆量一般用秸秆产生量与秸秆还田率的乘积表示,畜禽粪便又可细分为规模养殖和家庭养殖两类,而人体粪便则可细分为农村和城镇.之所以这样划分,主要是考虑到其含磷率不同.

作物生产过程的净积累磷主要是由土壤中可溶性磷转化为不可溶性磷造成的,可以用作物生产过程土壤中的磷沉积率来表示,一般约为磷投入总量的 30% ~ 45%^[19,20].

作物生产过程的净输出磷主要分为三类,即作物输出磷、作物秸秆输出磷和农田排水输出磷,前2种的核算方法与公式(2)类似,即用输出总量与其含磷率的乘积表示;农田排水输出磷可以根据作物生产过程磷输入输出平衡来计算.

2.2 畜禽生产

在畜禽生产过程中,考虑到家庭养殖和规模养殖在养殖数量、种类、饲料结构、粪污处理等方面的差异,需对其单独核算.一般而言,畜禽生产过程的总磷输入可以用畜禽饲养数量、每头饲料用量和饲料含磷率的乘积来表示,即:

$$P_{\text{livestock}}^{\text{input}} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N Q_{i,j}^{\text{livestock}} \cdot \phi_{i,j}^{\text{ls-input}} \cdot \gamma_{i,j}^{\text{p-input}} \quad (4)$$

式中, $P_{\text{livestock}}^{\text{input}}$ 为畜禽生产过程磷输入总量, M 为畜禽养殖方式种类, N 为每种养殖方式中各种畜禽的种类数, $Q_{i,j}^{\text{livestock}}$ 为第 i 种养殖方式中养殖的第 j 种畜禽的数量, $\phi_{i,j}^{\text{ls-input}}$ 为第 i 种养殖方式中养殖的第 j 种畜禽每头饲料消耗量, $\gamma_{i,j}^{\text{p-input}}$ 为第 i 种养殖方式中养殖的第 j 种畜禽饲料的含磷率. 在实际核算中,考虑到饲料并非完全被利用,如饲养过程损失以及畜禽病死情况,因此,可以在实际调查的基础上在式(4)中增加食料有效利用率项.

畜禽生产过程磷输出主要表现为畜禽产品(如畜禽活体、蛋、奶)和畜禽粪便两大类,一般而言,畜禽产品中的磷输出用各类畜禽产品产出总量及其含磷率的乘积相加得出,考虑到同一种产品中由于饲养方式的差异而可能造成其含磷量的不同,在具体计算过程中一般将每种产品产量均按养殖方式的不同进行分开. 即:

$$P_{\text{livestock}}^{\text{prod-out}} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N Q_{i,j}^{\text{ls-prod}} \cdot \gamma_{i,j}^{\text{p-prod}} \quad (5)$$

式中, $P_{\text{livestock}}^{\text{prod-out}}$ 为畜禽生产过程产品输出磷总量, M 为畜禽养殖方式种类, N 为每种养殖方式中畜禽产品的类别数, $Q_{i,j}^{\text{ls-prod}}$ 为第 i 种养殖方式下第 j 种产品的产量, $\gamma_{i,j}^{\text{p-prod}}$ 为第 i 种养殖方式下第 j 种产品的含磷率.

畜禽养殖过程中畜禽粪便中的磷输出可表示为:

$$P_{\text{livestock}}^{\text{residue-out}} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N Q_{i,j}^{\text{livestock}} \cdot \phi_{i,j}^{\text{residue-out}} \cdot \gamma_{i,j}^{\text{p-residue}} \quad (6)$$

式中, $P_{\text{livestock}}^{\text{residue-out}}$ 为畜禽生产过程粪便输出磷总量, $Q_{i,j}^{\text{livestock}}$ 与式(4)相同, $\phi_{i,j}^{\text{residue-out}}$ 为第 i 种养殖方式中养殖的第 j 种畜禽每头粪便产生量, $\gamma_{i,j}^{\text{p-residue}}$ 为第 i 种养殖方式中养殖的第 j 种畜禽产生粪便的含磷率. 考虑到粪便去向有 3 种,即还田、存量和排入河道,因此,在实际核算过程中根据实际情况可以对粪便输出总量进行细分.

畜禽养殖过程中磷存量一般表现为存栏畜禽和粪便堆存,分别用各类畜禽产量减去其屠宰量后乘

上其含磷率和各类粪便存量与其含磷率的乘积表示.

2.3 工厂加工

农畜产品在工厂加工部门经进一步加工、清洗、包装进入消费者家庭,其净输入总量可表达为:

$$P_{\text{manu}}^{\text{input}} = \sum_{i=1}^M Q_i^{\text{manu-input}} \cdot \gamma_i^{\text{p-manu}} \quad (7)$$

式中, $P_{\text{manu}}^{\text{input}}$ 为工厂加工过程磷输入总量, M 为农畜产品加工过程输入的各种含磷物质种类数, $Q_i^{\text{manu-input}}$ 为第 i 种农畜产品(如畜禽活体、蛋、奶、蔬菜)的加工量, $\gamma_i^{\text{p-manu}}$ 为第 i 种农畜产品的含磷率.

农畜产品加工过程的输出包括农畜产品和加工废物两大类,考虑到现实中多用产出率指标表征行业生产水平,因此,该过程的农畜产品磷输出用农畜输入总量与其产品产出率的乘积表示,而废物中磷含量则通过该过程的输入输出平衡来核算.

2.4 家庭加工

家庭厨房对农畜产品进行清洗、加工、烹饪进入居民消费过程. 一般而言,用人口数、各类农畜产品的人均消费量、各类农畜产品含磷率三者乘积相加来计算磷输入总量,即:

$$P_{\text{family}}^{\text{input}} = \sum_{i=1}^M Q^{\text{family}} \cdot \vartheta_i^{\text{input}} \cdot \gamma_i^{\text{p-family}} \quad (8)$$

式中, $P_{\text{family}}^{\text{input}}$ 为家庭加工过程磷输入总量, M 为家庭加工输入含磷农畜产品种类数, Q^{family} 为核算区域人口总数, $\vartheta_i^{\text{input}}$ 为第 i 种农畜产品的人均消费量, $\gamma_i^{\text{p-family}}$ 为第 i 种农畜产品的含磷率. 家庭厨房加工过程磷输出主要包括食物、生活垃圾和生活废水 3 部分,食物磷输出用农畜输入总量与其加工产出率的乘积表示,生活垃圾中磷输出用人口数、人均生活垃圾产生量、生活垃圾含磷率的乘积来计算,而生活废水中的磷输出则用人口数、人均生活废水产生量、生活废水中磷浓度三者乘积表示. 在实际核算过程中,考虑到农村和城镇在饮食结构、消费水平、废物处置方式不同,农村家庭和城镇家庭消费应分别核算.

2.5 居民消费

居民消费过程是人类对家庭过程的输出消耗的过程,因此该过程的总磷输入等于家庭加工过程的总磷输出;该过程磷输出主要体现为人体粪便,其核算方法与家庭加工过程磷输出核算相同;居民消费过程的磷存量主要是人体吸收,可通过该过程的输入输出磷平衡来核算.

2.6 废物处置

废物处置过程的磷输入主要是垃圾和废水,一

一般而言,垃圾经过填埋或焚烧后其中的磷均成为存量,而废水经过处理后一部分磷随处理后的出水排入环境,另外一部分磷进入污泥,成为存量,据此,垃圾中的磷输入输出均可以通过垃圾总量与其含磷率的乘积表示,废水中的磷输入输出则用废水总量与其磷浓度的乘积表示,而污泥中磷量可通过废水处理过程的磷输入输出平衡来计算。

3 合肥市食物生产与消费系统磷代谢分析

3.1 研究背景

巢湖以其自身丰富的资源以及巨大的生态功能对周边地区社会经济的发展起到巨大支撑作用。然而,随着社会经济的快速发展以及城市化水平的不断提高,巢湖水体富营养化现象日益严重,相关报告已指出,氮磷超标是导致巢湖水质富营养化暴发的根源之一^[19]。合肥是巢湖主要上游来水区域,流经市内的入湖河流包括南淝河、派河和十五里河,长期以来,这些河道在农业灌溉、畜禽养殖、人居生活等方面发挥了巨大作用。20 世纪末,合肥市各入湖河流水质逐渐下降,对巢湖水质产生潜在威胁;同时,合肥作为巢湖流域重要的农副产品生产和加工基地,磷元素在食物生产消费系统中活动强度较高,其磷代谢系统的结构特征和物质利用效率对水体污染负荷产生直接影响。本研究运用城市食物生产与消费系统磷代谢模型,定量分析 2008 年合肥市食物生产与消费系统中磷元素流动过程,为调整和优化磷代谢结构与效率提供支撑。

3.2 数据来源与参数确定

原始数据主要来源于《合肥统计年鉴(2009)》、《安徽农村经济统计年鉴(2009)》、相关文献中已有的研究成果,以及南京大学环境学院于 2010 年完成的《巢湖流域经济社会系统磷代谢分析报告》^[20~28]。考虑到数据缺失,特别是研究系统内外的产品进出流数据无法获取,本研究假设主要生产过程的磷产品输出以满足系统内磷产品消费为主,即磷产品本地消费量大于本地生产量,则消费不足部分需从系统外输入;若磷产品本地消费量小于本地生产量,则生产多余部分输出到系统外;对未考虑在本研究系统内的生产过程,本研究假设其产品进出流(如化肥、农药、饲料、种子)全部来源于外区域系统。磷代谢过程物质流向次序及物质流强度分配满足:①农产品输出优先满足家庭加工部门,再供给畜禽生产过程,不再进入工厂加工部门;②由畜禽生产过程直接输送到家庭加工的畜禽产品按照农村家庭

养殖消费量计算,其余进入工厂加工部门转化。实际磷产品市场流通可能与此物质流向次序和分配不同,但上述假设对于识别系统整体与各环节代谢特征不产生影响^[2]。

3.3 结果与讨论

明确磷代谢过程磷流关系,即可绘制磷代谢分析图。如图 2 所示,用箭头表示系统内外磷的输入输出,用箭头粗细表示磷流大小,其中,系统物质输入输出流用 $E_i (i = 1, \dots, 5)$ 表示,主要包括肥料、饲料和农畜产品贸易;过程间物质交换流用 $P_j (j = 1, \dots, 6)$ 表示,主要指农畜产品;废物循环利用流用 $R_k (k = 1, 2, 3)$ 表示,主要包括人畜粪便还田和生活废物回用; $H_l (l = 1, 2, 3)$ 分别表示家庭加工、工厂加工、居民消费过程废物处置流;环境流用 $W_m (m = 1, \dots, 6)$ 表示,主要指磷经由各过程进入地表水体和非耕地土壤磷量, $S_n (n = 1, \dots, 5)$ 分别表示作物生产、畜禽生产、家庭加工、工厂加工、居民消费过程磷存量。

从食物生产与消费系统(以下简称“系统”)磷代谢过程含磷物质输入看,化肥、饲料和农畜产品输入构成的物质投入量表征了系统的磷消耗强度。2008 年,系统投入磷 5 475.86 t,其中化肥、饲料输入分别占总投入的 57.1% 和 23.6%,因此作物生产和畜禽生产是影响物质投入的决定性因素;农作物和畜禽产品磷输入量,即其对外依存度分别达到 47.5% 和 35.9%,从一定程度上降低了本地作物生产和畜禽生产强度,因而减轻了区域生态特别是地表水体环境压力。从系统磷代谢过程含磷物质输出看,以磷产品形式输出含磷总量 1 342.69 t,其中 18.1% 的含磷物质通过畜禽生产过程输出至系统外。可见,系统含磷物质输入量中绝大部分留存于系统中,并极大影响了系统内部磷代谢循环过程。从系统内部各过程间物质交换看,城乡居民消费是系统磷代谢物质循环流动的驱动力,城乡居民消费结构决定了本地作物生产和畜禽生产发展的规模与方向。

系统代谢“废物”发生强度体现了系统磷代谢效率水平。2008 年,系统未利用磷代谢“废物”(包括作物秸秆残余和人畜粪便)含磷总量达到 4 539.38 t,按照系统生产性输出计算,每单位物质投入量则产生约 3 倍的代谢“废物”积存或排放。其中,生活废弃物以及污泥通过填埋、堆放、焚烧等处置方式进入非耕地土壤的磷通量为 629.24 t,约占代谢“废物”产生量的 1/7,通常这部分磷难以得到

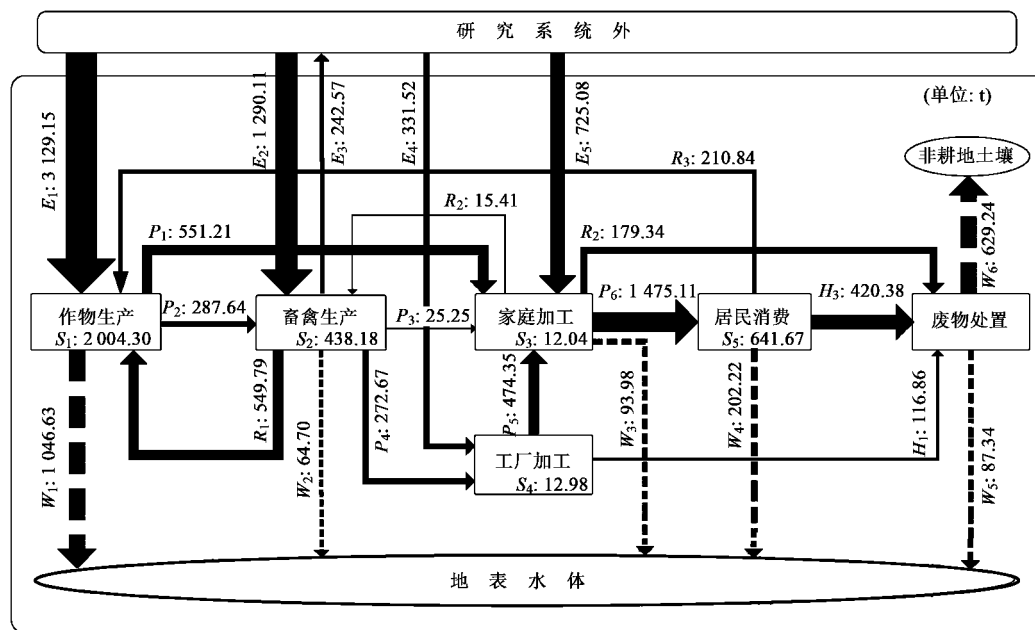


图2 2008年合肥市食物生产与消费系统磷代谢图

Fig. 2 Phosphorus flows of food production and consumption system of Hefei City in 2008

回收和利用,从而造成严重的资源浪费.另外,大量的磷“废物”进入系统库存,库存中约有47.5%的磷全部被耕地土壤所积存,显著加大了磷养分进一步流失的风险,也进一步增加了化肥施用量.由于农村与城镇废物处理方式的不同,农村人畜粪便的循环利用(综合还田率高达93%),有效加强了农村与农田之间的磷养分循环而减少了农村污染物质地表水体流失.相对于农村代谢“废物”的高效利用,城乡之间缺失的传统营养链,很大程度上抵消了系统磷代谢“废物”循环利用产生的正效应.

磷代谢“废物”流失入水体直接影响区域地表水质,如图3所示的系统磷代谢水体负荷来源构成.2008年,系统磷代谢水体负荷约为1495 t,表明当年食物生产消费系统对水体富营养化的直接贡献度.系统进入地表水体的磷总量主要来自作物生产过程的养分流失,数据显示,仅当年流失量达1046.64 t,占系统水体负荷的70%,究其根本原因:长期依赖化肥耕种、高强度的化肥施用水平破坏了土壤养分平衡,加剧了土壤养分流失,农田化肥的大量流失反映了我国化学集约型农业的普遍特点.此外,生活消费产生的水体磷负荷占水体总负荷的1/5,居民生活废物排放成为地表水体富营养化的直接威胁.从现状来看,农村生活废物无序排放是造成农村生活污染难以控制的症结所在;与农村污水排放现状相比,城镇污水处理设备日益完善,城镇消费磷排放导致

的富营养化现象有所减弱,但城乡之间传统养分链断裂,大量含磷“废物”不再得到循环利用而是直接进行废物集中处理,“废物”只是从水体中转移进入污泥从而最终进入非耕地土壤,这部分“磷资源”浪费严重.相比之下,畜禽生产过程粪便的高效率利用、家庭加工过程废污的集中填埋处置和废物处置过程废物除磷技术的日益提高,有效降低了这些过程的水体磷负荷危害强度.

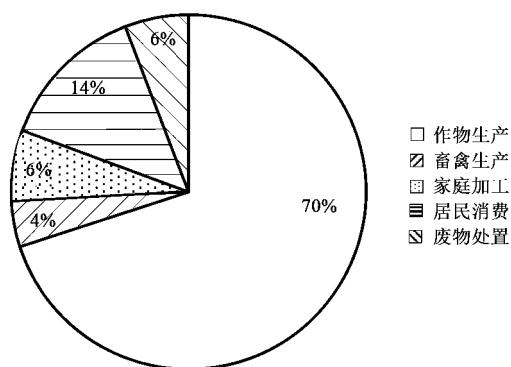


图3 合肥市食物生产消费系统磷代谢水体负荷图

Fig. 3 Phosphorus load into water bodies of food production and consumption system in Hefei City

通过识别磷代谢过程主要问题,本研究从优化磷代谢过程和减少磷排放的角度提出以下对策建议:①针对盲目施肥和过量施肥现象造成的农业面源污染,应改变传统的化学农业生产方式,提高农民

科学施肥的环保意识,同时应大力发展有机农业和生态农业,降低工业化肥施用水平;②推进生态护河,建设入湖河流湿地保护工程,减少养分和土壤流失;③倡导城乡居民绿色消费,树立节约消费意识和环保意识;④加快城乡环境基础设施建设,进一步扩大城乡污水集中处理处置范围;⑤加大污泥资源循环利用技术研究力度,提高磷资源循环利用水平;⑥继续加强规模化畜禽养殖业环境管理,实施生态养殖,建设鱼禽复合养殖工程,实现畜禽粪便综合利用,有效保护生态环境。

4 结论

本研究运用物质流分析方法构建城市食物生产与消费系统磷代谢模型。在此基础上定量分析合肥市食物生产与消费系统磷代谢过程,结果表明,2008年合肥市食物生产消费系统磷需求量为5 475.86 t,进入地表水体的磷负荷为1 710.84 t,农业种植生产引起的化肥流失是造成水体富营养化控制目标难以实现的主要原因;同时,城乡消费生活排污是导致地表水体富营养化的重要原因。最后针对磷代谢系统的总体结构特征,从农业种植、城乡消费、环境基础设施建设和畜禽养殖等方面提出若干优化磷代谢过程和减少磷排放的对策建议。

参考文献:

- [1] Carpenter S R, Caraco N F, Correll D L, *et al.* Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen [J]. *Ecological Applications*, 1998, **8**(3):559-568.
- [2] 刘毅,陈吉宁. 滇池流域磷循环系统的物质流分析[J]. *环境科学*, 2006, **27**(8):1549-1553.
- [3] 刘征. 我国磷资源产业系统代谢分析与循环经济发展研究[D]. 北京:清华大学, 2005.
- [4] Villalba G, Liu Y, Schroder H, *et al.* Global phosphorus flows in the industrial economy from a production perspective [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2008, **12**(4): 557-569.
- [5] Jeong Y S, Matsubae-Yokoyama K, Kubo H, *et al.* Substance flow analysis of phosphorus and manganese correlated with South Korean steel industry [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2009, **53**(9):479-489.
- [6] Liu Y, Villalba G, Ayres R U, *et al.* Global phosphorus flows and environmental impacts from a consumption perspective [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2008, **12**(2): 229-247.
- [7] Antikainen R, Lemola R, Nousiainen, J I, *et al.* Stocks and flows of nitrogen and phosphorus in the Finnish food production and consumption system [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, **107**(2-3): 287-305.
- [8] Saikku L, Antikainen R, Kauppi P E. Nitrogen and phosphorus in the Finnish energy system, 1900-2003 [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2007, **11**(1): 103-119.
- [9] Reed-Andersen T, Carpenter S R, Lathrop R C. Phosphorus flow in a watershed-lake ecosystem [J]. *Ecosystems*, 2000, **3**(6): 561-573.
- [10] Laura S, Antikainen R, Kauppi P. Flows of nitrogen and phosphorus in municipal waste: a substance flow analysis in Finland [J]. *Progress in Industrial Ecology*, 2004, **1**(1-3): 165-186.
- [11] Chen M, Chen J, Sun F. Agricultural phosphorus flow and its environmental impacts in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **405**(1-3): 140-152.
- [12] Iital A, Loigu E, Vagstad N. Nutrient losses and N & P balances in small agricultural watersheds in Estonia [J]. *Nordic Hydrology*, 2003, **34**(5): 531-542.
- [13] Isermann K. Share of agriculture in nitrogen and phosphorus emissions into the surface waters of Western-Europe against the background of their eutrophication [J]. *Fertilizer Research*, 1990, **26**(1-3): 253-269.
- [14] Matsubae-Yokoyama K, Kubo H, Nakajima K, *et al.* A material flow analysis of phosphorus in Japan [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2009, **13**(5): 687-705.
- [15] Nilsson J. A phosphorus budget for a Swedish municipality [J]. *Journal of Environmental Management*, 1995, **45**(3): 243-253.
- [16] Hansen E, Lassen C. Experience with the use of substance flow analysis in Denmark [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2003, **6**(3-4): 201-219.
- [17] Neset T S S, Bader H P, Scheidegger R, *et al.* The flow of phosphorous in food production and consumption-Linköping, Sweden, 1870-2000 [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **396**(2-3): 111-120.
- [18] 张玲,袁增伟,毕军. 物质流分析方法及其研究进展[J]. *生态学报*, 2009, **29**(11):6189-6198.
- [19] 安徽省环境保护局. 巢湖流域水污染防治“十一五”规划[R]. 2006.
- [20] Smil V. Phosphorus in the environment-natural flows and human interferences [J]. *Annual Review of Energy and the Environment*, 2000, **25**: 53-88.
- [21] 安徽省统计局. 安徽农村经济统计年鉴[R]. 2009.
- [22] 合肥市统计局. 合肥统计年鉴[R]. 2009.
- [23] 袁增伟. 巢湖流域经济社会系统磷代谢分析报告[R]. 2010.
- [24] 王静,郭熙盛,王允青. 秸秆覆盖与平衡施肥对巢湖流域农田磷素流失的影响研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2009, (5):53-56.
- [25] 阎恩松. 基于物质流分析的密云水库上游流域磷循环研究[D]. 北京:首都师范大学, 2008.
- [26] 武淑霞. 我国农村畜禽养殖业氮磷排放变化特征及其对农业面源污染的影响[D]. 北京:中国农业科学院, 2005.
- [27] 霍启光. 动物磷营养与磷源[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2002.
- [28] 王凯军. 畜禽养殖污染防治技术与政策[M]. 北京:化学工业出版社, 2004.