

DOI: 10.5846/stxb201302060250

王进, 吝涛. 食物源 CNP 的城市代谢特征——以厦门市为例. 生态学报, 2014, 34(21): 6366-6378.

Wang J, Lin T. Characterizing the urban metabolism of food-sourced carbon, nitrogen, and phosphorous: a case study of Xiamen. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21): 6366-6378.

食物源 CNP 的城市代谢特征 ——以厦门市为例

王 进^{1,2}, 吝 涛^{1,2,*}

(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. 厦门市城市代谢重点实验室, 厦门 361021)

摘要: 基于元素流分析原理, 将食物源碳氮磷 3 种元素在城市系统中的代谢特征进行耦合分析, 追踪以“食物消费”、“废物处置”、“人体代谢”为主要环节的食物碳氮磷代谢过程, 发掘其中共同的代谢环节, 明晰 3 种元素代谢路径、代谢通量及其影响因素的差异, 并对厦门市 1991—2010 年食物源碳氮磷城市代谢进行案例分析。结果表明, 食物源碳氮磷城市代谢中通量最大的代谢路径是“食物—食物摄入—人体粪尿—未还田粪尿—污水处理—污泥—污泥填埋—土壤”; 食物源碳氮磷城市代谢主要引起土壤和水体的环境负荷加重; 厨余垃圾中碳氮磷占食物源的比例分别为 13.7%、32.2%、70.3%, 在整个代谢过程中具有最大的减量管理潜力。提出优化代谢过程、减少碳氮磷环境负荷的若干对策建议, 包括增大食物的有效食用比例、资源化利用污泥和厨余垃圾等。

关键词: 食物; 碳氮磷; 城市代谢; 厦门

Characterizing the urban metabolism of food-sourced carbon, nitrogen, and phosphorous: a case study of Xiamen

WANG Jin^{1,2}, LIN Tao^{1,2,*}

1 Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2 Xiamen Key Laboratory of Urban Metabolism, Xiamen 361021, China

Abstract: Under the background of rapid urbanization process, cities need more and more substance and energy to maintain. The direction of material flow changes along with the urban development. Urban metabolism studies the material and energy flows arising from urban socioeconomic activities as well as regional and global biogeochemical processes. Food consumption takes an assignable part of substantial input and continues to grow with rapid urbanization process. The unutilized part of CNP (Carbon, Nitrogen and Phosphorous) in food may cause environment problems. The imbalance of urban metabolism is the root of environment problems. It is urgent to investigate the process of food-sourced CNP and to find out the ways to reduce environmental load.

Substance flow analysis (SFA) method focuses on the flow of a certain chemical element and considers all related transformation and transition of this element. Based on SFA method, food-sourced CNP metabolism processes in urban system were characterized systematically in this paper. We focused on three main metabolic processes (food consumption, waste disposal and human metabolism) to analyze the similarity and difference among the urban metabolism of food-sourced CNP substance. We found that CNP share many links in metabolic path but have its unique characteristic independently.

基金项目: 厦门市科技计划项目 (3502Z20130037); 中国科学院重点部署项目 (KZZD-EW-16); 国家自然科学基金项目 (41371540, 41201598)

收稿日期: 2013-02-06; **网络出版日期:** 2014-03-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tlin@iue.ac.cn

After considering about these, we built up the framework of food-sourced CNP metabolism process and make it possible to study these three elements simultaneously and systematically.

We took Xiamen as a case city to trace the urban metabolism of food-sourced CNP from 1991 to 2010. We calculated the flux of food-sourced CNP metabolism in Xiamen, which starts from food consumption and ends in human body or emission to the environment.

The results showed that: 1) The most increasing environmental load of food-sourced CNP are carbon in air (from 74859 t/a to 149763 t/a), nitrogen in soil (from 3897 t/a to 9323 t/a) and phosphorous in soil (from 406 t/a to 1049 t/a); 2) The path with maximum flux is “food—food eating—human fecaluria—wastewater treatment—sludge—sludge landfill—soil”; 3) The urban metabolism of food-sourced CNP mainly resulted in the increasing of loading in soil and water body; 4) The part of food-sourced CNP that stored in human body is extremely low with the proportions of 0.3%, 0.5% and 1.6% in 2010; 5) The proportions of CNP in kitchen waste to that in food source were 13.7%, 32.2% and 70.3% respectively, which had great potential of reduction management.

Some advices to reduce CNP environment loading and optimize the metabolism process systematically were provided. The advices are: 1) increasing the edible rate of food and encouraging consume food in economy way; 2) utilizing sludge from wastewater treatment to produce bricks; 3) producing fertilizer with urban kitchen waste for rural use.

Key Words: food; CNP; urban metabolism; Xiamen City

随着人类社会经济的发展,以城市人口增加、城区建设扩张为代表的城市化进程正在世界范围内不断加速^[1]。中国在城市化过程中,城市空间范围不断扩张,人口、GDP、城市化率不断提高,物质和能量的消耗量也随之升高^[2-3]。城市生态系统不仅涉及自然系统,也涉及人工系统,城市经济系统和自然环境通过物质与能量流动相互联系^[4]。人类社会需要从自然环境中获取所需资源,同时尽可能增大其代谢效率^[3]。城市环境问题的本质就是城市系统中代谢途径或代谢效率出现问题^[5]。城市地区的发展方向、发展结构和发展速度,应该根据当地社会经济自然复合生态系统的实际运作机制,作系统性分析与管理。城市代谢这一概念首先由 Wolman 于 1965 年提出^[6],其后由其他科学家发展完善^[7-8],其研究重点放在城市的输入和输出上,将系统视为黑箱,并没有对物质能量在城市内的代谢过程进行系统研究。本文认为今后城市代谢研究应该进入系统内部,明晰代谢过程中的关键环节、代谢路径、代谢通量,以挖掘影响代谢过程的重要影响因素,为将来管理调控作科学支撑。

食物作为城市内物质能量的主要来源之一,对其相关物质能量代谢过程研究是城市代谢研究的重要组成。居民食物消费量伴随城市发展和人口增长成倍增加^[9]。人们的食物消费量在不断增长的同

时,食物消费模式和营养状况也随之发生改变。中国城市化进程导致生活方式和饮食偏好改变,主要表现在由粮食消费转向动物性食物消费^[10],且城乡差异显著^[11-12]。伴随食物消费结构改变,营养元素流动也在城市中发生改变。家庭作为基本的社会单元,其物质能量输入受食物消费改变的影响巨大,是城市系统研究中最适尺度^[13]。有学者计算美国明尼阿波利斯市、中国香港的食物消费情况,发现食物消费是碳氮磷元素进入城市系统的主要环节^[14-16]。

食物经过利用后,需要通过居民生活垃圾处理和污水处理或直接排放的途径输出食物碳氮磷输出城市系统。有学者计算多伦多、曼谷、中国合肥食物源元素流动情况,发现仅有少量能够留在城市系统,大量食物碳氮磷元素输出环境并造成环境负荷,如表 1 所示。从城市代谢角度分析,食物源污水是城市系统营养元素的流失。从城市系统流失到土壤、水体等环境系统的营养元素可能造成严重的环境负荷。

碳、氮、磷 3 种元素是食物代谢研究中的关键组成,谷类粮食和禽畜肉中碳氮磷总含量分别为 34.8% 和 28.2%。与氢氧元素相比,碳氮磷元素比例在各类食物和人体中的比例相对稳定。碳氮磷代谢过程的研究有利于把握城市物质转移与转化的特点和规律,对解决一些重要的环境问题具有重要意义。

碳代谢是应对全球气候变化的基础,氮和磷是城市水体污染主要限制因子。以往研究主要以碳氮磷元素中的一种作为研究对象,忽视了3种元素之间的系统联系,对于同时涉及多种元素的环境问题解释欠佳,例如碳氮磷比例影响植物尤其是藻类的生长过程,当环境介质中碳氮磷元素接近某一比例时,特定植物进入其最适生长阶段大量繁殖并引发赤潮等系列环境问题^[21]。本文基于对厦门市1991—2010

年食物源碳氮磷代谢过程的物质流分析,发掘其中共同的代谢环节,对城市食物碳氮磷代谢的物质流体系结构进行深层分析,追踪以“食物消费”、“废物处置”、“人体代谢”为主要过程的食物碳氮磷代谢途径,提炼食物代谢的主要环节以及影响因素,最后提出若干优化代谢过程和减少碳氮磷环境负荷的对策建议。

表1 相关研究结果比较

Table 1 Comparison among related research

区域 Study area	年份 Year	元素 Element	进食/% Eatable part	留在人体/% Human body	留在城市/% Inside cities	排出城市/% Outside cities	气体/% Air	污水/% Water	土壤/% Soil	来源 Source
多伦多 Toronto	1990—2004	氮 N		6.90—6.93			44.5—51.2	12.2—23.9	7.63—14.0	[17]
中国城市	1986—2006	磷 P			20	80				[18]
中国厦门	1988—2008	氮 N		22.5—32.1			2.44—40.0	18.4—37.4	6.42—45.3	[19]
中国厦门	1991—2010	磷 P				59.7—85.1				[20]
中国厦门	1991—2010	碳 C	83.0—91.3	0.300—1.00			81.5—88.9	1.36—2.37	9.43—16.2	本研究 This Research
		氮 N	67.1—68.7	0.48—1.75			5.96—7.14	18.6—26.0	65.1—74.0	
		磷 P	25.7—34.2	1.63—6.85			0	8.40—10.1	83.1—89.5	

1 研究区概况

厦门市位于福建省东南部,是我国东南沿海重要的中心城市、港口及风景旅游城市。市域行政面积为1565 km²。1981年厦门的建成区面积仅为12 km²,2010年已扩张至230 km²;户籍人口从1991年的114万激增至180万。

在经济快速增长的同时,厦门市居民食物消费量伴随人口增长和人均GDP增加而增加,如图1所示,从1988年34.2万t迅速增长至2003年的51.0万t,其后呈现波动上升趋势。图2显示厦门市食物消费碳氮磷总量历史概况,碳氮磷各自的消费量与消费食物总量的变化趋势基本一致,食物碳消费量在2003年后出现下降,可能与膳食结构中粮食比重下降有关。

2010年厦门市空气质量总体优良,优良率为42.7%,优良率为97.5%。首要污染物为可吸入颗粒物,其次是二氧化氮,酸雨污染严重。2010年厦门市饮用水源地水质达标率为98.4%,饮用水源地水质仍存在氮、磷的超标现象;厦门海域水质呈现富营养

化,主要超标污染物依然是无机氮与活性磷酸盐。2010年厦门市生活垃圾产生量为94.45万t,生活垃圾无害化处理率96.93%。生活污水排放量1.99亿t,占全市废水排放总量的81.71%。

2 研究方法

2.1 元素流分析原理

元素流分析(Substance Flow Analysis, SFA)是物质流分析(Material Flow Analysis, MFA)中的一种^[22]。物质流分析依据质量守恒定律,定量分析系统的物质输入与输出及其背后的隐流问题,主要涉及物质流动的源、路径及汇,是研究系统代谢过程对自然生态环境造成的直接和间接影响的有力工具^[23]。由于城市尺度研究中存在城市系统的物质数据缺乏且难以统计的特点,有关学者引入面向元素的物质流分析。元素流分析研究在具体经济系统的特定化学元素或化合物流量的方法^[24]。元素流的突出优点是解决具体的环境问题,其开始于具体的环境污染问题,通过分析元素在系统中的流动过程,探寻主要污染来源和关键元素流动环节。

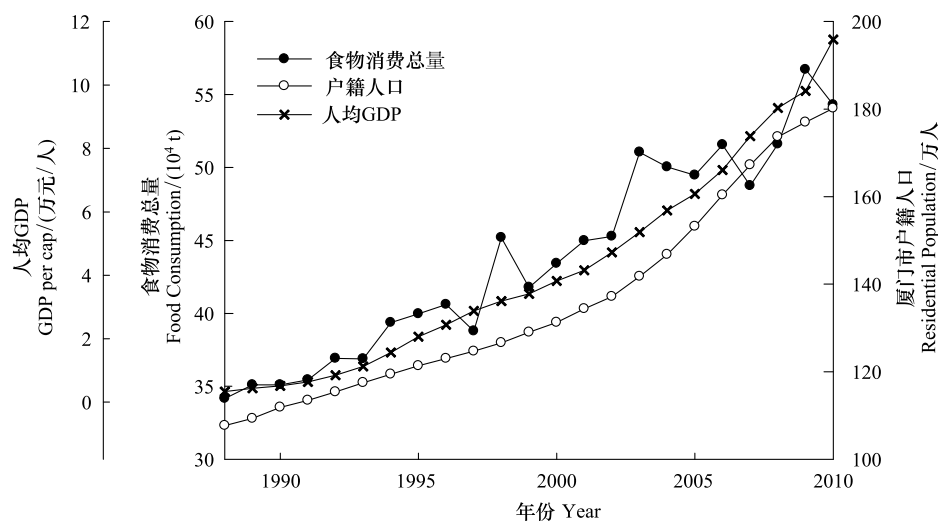


图1 厦门市人口与食物消费历史概况

Fig.1 Dynamics of food consumption and population in Xiamen from 1988 to 2010

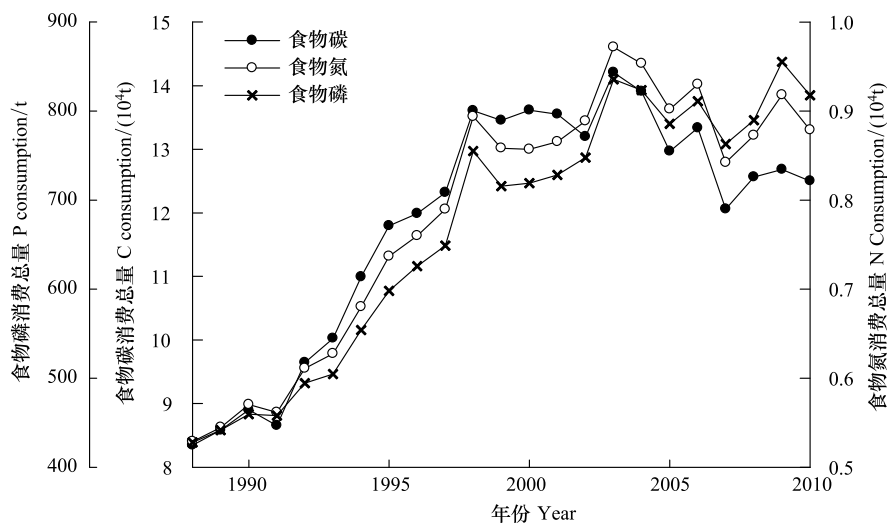


图2 厦门市食物消费碳氮磷总量历史概况

Fig.2 Dynamics of CNP consumption in food in Xiamen from 1988 to 2010

2.2 城市居民食物源碳氮磷代谢路径分析

完整的食物源碳氮磷元素代谢包括了城市社会生态系统内的代谢(食物消费、人体代谢、废弃物处理)和生物地球化学循环两部分。本研究主要以食物消费、人体消化吸收和废弃物处理及再利用等城市社会经济活动为系统边界,忽略自然生态系统中复杂的理化作用。元素流从食物消费开始,经过城市居民的新陈代谢和城市污水和固废处理系统,最后排放到环境介质。系统的输入端,是指城市居民食物消费。系统的输出端,包括留在城市系统内部并参与构成人体的营养物质和排放进入大气、水和土壤等环境介质的物质。构成人体营养物质的主要

来源是食物,若人体是食物代谢的唯一元素汇,人体碳氮磷比例应与食物一致,然而实际两者差异巨大。其主要原因包括两点:1)部分食物未被居民进食,成为厨余垃圾;2)人体摄食食物经选择性吸收后形成粪尿等排泄物排出体外。因此,明晰人体新陈代谢及城市污水和废弃物处理过程中的元素流动特点,是本研究的重点。

(1) 食物消费环节

食物根据其是否能被人类食用,可分为可食部分和不可食部分。可食部分通过进食行为进入人体代谢环节,不可食部分食物(包括食物的不可食用部分和被丢弃的可食部分)成为城市厨余垃圾进入废

废弃物处理环节。人体摄取的食物进入人体代谢环节,经过人体消化系统消化吸收,合成人体生长发育所需的营养物质,代谢产物通过排泄物排出体外,进入废弃物处理环节。

(2) 人体代谢环节

人体代谢环节可细分为人体元素构成、呼吸代谢和粪尿代谢 3 个子环节。氧、碳、氢、氮、磷、硫这 6 种元素是构成人体生命基础的主要成分,其主要获取途径为食物。人体产生的二氧化碳是人体生理代谢的结果。人在生命活动过程中,需要不断地消耗能量,机体所需要的能量主要来源于食物,营养物质氧化后所产生的二氧化碳通过呼吸作用排出体外。食物中的营养物质进入消化道后被选择性的消化、吸收,不能消化、吸收的物质变成粪尿排出体外。

(3) 废弃物处理环节

由食物源产生的废弃物主要分为厨余垃圾和居民粪尿两部分,而两者的处理方式又因城市化水平的不同而有所差异。一般而言,垃圾处理方式可分为分类回收、填埋、堆肥和焚烧 4 种。食物源所产生垃圾为厨余垃圾,含大量水分和有机物,分类回收和焚烧处理的难度巨大,因此其主要处理方式为填埋和堆肥,在城镇地区以填埋为主,在农村地区以堆肥为主。对于粪尿处理,城镇地区粪尿经过管道收集成为粪尿污水进入污水处理系统。污水处理系统的尾水排出到自然水体,而处理过程产生的副产物污泥又通过填埋和焚烧进行再处理。农村地区粪尿主要经过堆肥腐熟成为农家肥料,直接施用于农田。在填埋和堆肥、粪尿污水处理、粪尿堆肥的过程中,有机物质在厌氧环境下发酵,产生甲烷、一氧化氮等气体直接进入空气中。由于气态化合物磷化氢在潮湿空气中不稳定,因而空气中磷可以忽略不计。

2.3 食物源碳氮磷代谢通量分析

本研究在分析食物源碳氮磷元素代谢路径基础上,逐一量化各个环节元素流,即碳氮磷元素在各路径中的通量。在元素流计算过程中,分为食物消费、人体代谢和废弃物处理 3 个环节进行计算,根据元素守恒定律,整个碳氮磷元素代谢通量可用以下公式表示:

$$\text{CNP}_{\text{食物}} = \text{CNP}_{\text{人体}} + \text{CNP}_{\text{大气}} + \text{CNP}_{\text{水体}} + \text{CNP}_{\text{土壤}} \quad (1)$$

式中, $\text{CNP}_{\text{食物}}$ 是指城市居民食物消费碳氮磷, $\text{CNP}_{\text{人体}}$ 是指食物经居民消化吸收后储存在体内的部分,

$\text{CNP}_{\text{大气}}$ 、 $\text{CNP}_{\text{水体}}$ 、 $\text{CNP}_{\text{土壤}}$ 指未被居民摄取和经人体代谢后产生的碳氮磷途经或未经废弃物处理系统后直接或间接排入环境介质的部分,包括大气、水体、土壤 3 种介质。

食物消费环节

(1) 食物消费环节中的元素守恒公式为:

$$\text{CNP}_{\text{食物}} = \text{CNP}_{\text{食用部分}} + \text{CNP}_{\text{未食用部分}} \quad (2)$$

其中, $\text{CNP}_{\text{食物}}$ 是指城市居民食物消费碳氮磷, $\text{CNP}_{\text{食用部分}}$ 是指居民消费食物中经过居民摄食行为进入居民体内的部分, $\text{CNP}_{\text{未食用部分}}$ 是指居民消费食物中未被居民摄食的部分,包括食物的不可食用部分和被丢弃的可食部分。

食物源碳氮磷总量计算公式为:

$$W_{\text{C,N,P}} = \sum_{i=1}^n w_{i\text{C,N,P}} \quad (3)$$

$$w_{i\text{C,N,P}} = w_i \times \alpha_{\text{C,N,P}} \quad (4)$$

式中, $W_{\text{C,N,P}}$ 为消费食物的总碳氮磷量, $w_{i\text{C,N,P}}$ 为食物类型 i 的碳氮磷消费总量; w_i 为食物类型的消费量, $\alpha_{\text{C,N,P}}$ 为食物类型 i 的碳氮磷含量。本研究将日常食物分为九类,包括粮食、植物油、蛋制品、水产品、蔬菜、酒及饮料、瓜果、奶制品、禽畜肉。根据《中国食物成分表》计算各类食物中的碳氮磷元素含量及元素比值,结果如表 2 所示。

(2) 人体代谢环节

人体代谢环节中的元素守恒公式为:

$$\text{CNP}_{\text{食用部分}} = \text{C}_{\text{呼吸}} + \text{CNP}_{\text{人体}} + \text{CNP}_{\text{粪尿}} \quad (5)$$

式中, $\text{CNP}_{\text{食用部分}}$ 是指居民消费食物中经过居民摄食行为进入居民体内的部分, $\text{C}_{\text{呼吸}}$ 是指人体通过呼吸作用排放的碳元素, $\text{CNP}_{\text{人体}}$ 是指食物经居民消化吸收后储存在体内的碳氮磷元素, $\text{CNP}_{\text{粪尿}}$ 是指食物经居民消化吸收后经粪尿排出体外的碳氮磷元素。

本研究假设研究区人群是由完全相同的“标准人”形成的集合。“标准人”具有固定的体重、元素组成、新陈代谢效率,人口的增加或减少视作“标准人”数量增加或减少的过程。碳氮磷的累积随“标准人”的增加而增加。人体元素构成因性别、年龄等因素有所差异。有研究通过化学检验的方法计算出 70 kg 成人体内各种含量(表 2)。由于人群中老人小孩的存在,需根据研究区 2010 年人口普查数据计算人均体重。

表 2 九类食物与人体中碳氮磷含量比较

Table 2 The comparison of CNP content among nine categories of food and human body

项目 Items	粮食 Grains	植物油 Plant oil	蛋制品 Egg	水产品 Aquatic product	蔬菜 Vegetable	酒饮料 Drinks	瓜果 Fruit	奶制品 Milk	禽畜肉 Meats	人体 Human body
C 含量/% Carbon content	32.7	76.7	15.1	14.3	2.7	4.1	5.0	6.3	25.5	23.0
N 含量/% Nitrogen content	2.0	0.0	2.1	2.2	0.3	0.0	0.2	2.2	2.5	2.6
P 含量/% Phosphorous content	0.1	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.4	0.2	0.8
C:P CP Ratio	228.1	8779.2	84.2	56.1	64.5	470.7	237.1	17.5	154.3	27.7
N:P NP Ratio	13.7	0.0	11.5	8.5	7.1	3.4	9.0	6.0	14.8	3.1
P:P PP Ratio	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

在城市生态学研究一般以人口数乘以人均净呼出碳量计算城市居民二氧化碳产生量,计算公式为^[25]:

$$\text{人体呼吸的碳释放量 (t/a)} = \text{人口总数 (人)} \times 0.079 \text{ (t/a)}$$

人粪和人尿在性质和成分上有很大的区别。在计算时应分别计算人粪与人尿中碳氮磷元素含量。有关研究通过化学检验的方法对人粪和人尿中的碳氮磷含量进行了研究,本研究以文献中的数据作为计算依据^[26-27]。

(3) 废弃物处理环节

废弃物处理环节中的元素守恒公式为:

$$\text{CNP}_{\text{处理前}} = \text{CNP}_{\text{产物}} + \text{CNP}_{\text{副产物}} \quad (6)$$

该公式概括表示污水处理、垃圾填埋、粪尿还田、污泥填埋、污泥焚烧等废弃物处理过程中的元素转移过程。式中,CNP_{处理前}是指处理前废弃物所含碳氮磷元素,CNP_{产物}是指处理后主要产物所含碳氮磷元素,CNP_{副产物}是指处理后气体副产物所含碳氮磷元素。

由于废弃物处理环节中涉及变量和公式数量较多,本文以附表形式表示(表3)。厦门对厨余垃圾处理方式主要为卫生填埋。根据《2006 年 IPCC 国家气体清单指南》,对垃圾填埋产生的气体需要计算 CH₄和 CO₂的排放量,其他气体含量极少,可忽略不计。污水处理的元素去除率是指厦门市污水处理系统排入厦门海域的污染物元素含量与进入污水处理系统前污水中的污染物元素含量的比值,碳氮磷去除率分别以进水与出水中的 COD、氨氮、总磷含量计

算。假设污水处理厂当年实行的排放标准全部达标排放以表示出水污染状况。整个污水处理厂的运行过程中,考虑污水处理厂气体的直接排放部分,采用联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)的质量平衡方法计算碳氮元素从污泥到 CH₄、N₂O 气体的转换率。考虑到 IPCC 仅提供牛、猪、家禽等牲畜的粪便排放特征,本研究选取食性与人最相似的单胃杂食性动物猪的粪便表示人的粪便特征。

2.4 数据来源

本研究居民食物消费环节的主要数据来自于《厦门经济特区年鉴》、《中国食物成分表》;人口数据来自于《厦门经济特区年鉴》;人体代谢环节数据来自于人体生理相关文献^[26-27];废弃物处理环节数据来自于《厦门市环境统计及城考资料汇编》、《厦门市水污染物排放标准》、《2006 年 IPCC 国家气体清单指南》^[28]。

3 结果与讨论

3.1 食物源碳氮磷城市代谢路径的耦合特征

对城市居民食物源碳氮磷元素流分析表明,食物是食物源碳氮磷元素城市代谢的源,系统中的碳氮磷元素通过居民食物消费行为进入系统,然后逐级分配到下一级的路径,直至进入本研究系统的汇——人体、大气、水体和土壤,储存在城市生态系统或移出城市生态系统的食物以外的物质形式。图3显示食物源碳氮磷城市代谢的系统路径。本研究不考虑城市范围内自然生态系统的生物地球化学循环过程。

表 3 废弃物处理环节数据来源及计算公式

Table 3 The data source and formula of waste disposal

计算项目 Items	计算公式 Formulas	数据来源 Data source
污水处理过程中 CH ₄ 产生量 CH ₄ production in wastewater treatment	$\text{CH}_4 \text{ Emissions} = \sum_i (\text{TOW}_i \times \text{EF}_i) - R \quad \text{EF} = B_0 \times \text{MCF}$	IPCC 报告表 6.3
污水处理过程中 N ₂ O 产生量 N ₂ O production in wastewater treatment	$\text{N}_2\text{O Emissions} = N_{\text{Waste}} \times \text{EF}_{\text{Waste}} \times 44/28$	
污泥填埋过程中 CH ₄ 产生量 CH ₄ production in sludge landfill	$\text{CH}_4 \text{ Emissions} = W \times \text{DOC} \times \text{DOC}_f \times \text{MCF} \times F \times 16/12$	
污泥填埋过程中 CO ₂ 产生量 CO ₂ production in sludge landfill	$\text{CO}_2 \text{ Emissions} = W \times \text{DOC} \times \text{DOC}_f \times \text{MCF} \times (1 - F) \times 44/12$	
污泥填埋过程中 N ₂ O 产生量 N ₂ O production in sludge landfill	$R_N = R_{\text{NinN}_2\text{O}} / R_{\text{NinSludge}} \times 100\%$	IPCC 报告表 4.1
垃圾填埋过程中 CH ₄ 产生量 CH ₄ production in waste landfill	$E_{\text{CH}_4} = \left[\text{MSW} \times \eta \times \sum_j (\text{DOC}_j \times W_j) \times \text{DOC}_f \times 16/12 \times 50\% - R \right] \times (1 - \text{OX})$	IPCC 报告表 2.4
垃圾填埋过程中 CO ₂ 产生量 CO ₂ production in waste landfill	$E_{\text{CO}_2} = \text{MSW} \times \eta \times \sum_j (\text{DOC}_j \times W_j) \times r \times 44/12 \times 50\%$	IPCC 报告表 2.4
垃圾填埋过程中 N ₂ O 产生量 N ₂ O production in waste landfill	$\text{CH}_{4\text{Manure}} = \sum_{(T)} \frac{\text{EF}_{(T)} \times N_{(T)}}{10^6}$	《北京市生活垃圾现状与垃圾堆肥应用潜力研究》
粪尿还田过程中 CH ₄ 产生量 CH ₄ production in composting	$\text{EF}_{(T)} = (\text{VS}_{(T)} \times 365) \times \left[B_{0(T)} \times 0.67 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \sum_{S,k} \frac{\text{MCF}_{(S,k)}}{100} \times \text{MS}_{(T,S,k)} \right]$	IPCC 报告表 10.17
粪尿还田过程中 N ₂ O 产生量 N ₂ O production in composting	$\text{N}_2\text{O}_{\text{D(mm)}} = \left[\sum_S \left[\sum_T (N_{(T)} \times \text{Nex}_{(T)} \times \text{MS}_{(T,S)}) \right] \times \text{EF}_{3(S)} \right] \times 44/28$	IPCC 报告表 10.21

污水处理: $\text{CH}_4\text{Emissions}$ 为计算年份污水 CH_4 排放总量; TOW 为计算年份污水中有机物含量; EF 为排放因子; i 为污水来源; R 为计算年份回收的 CH_4 量; B_0 为最大 CH_4 产生能力, 缺省值可取 $0.6 \text{ kg CH}_4/\text{kg BOD}$ 或 $0.25 \text{ kg CH}_4/\text{kg COD}$; MCF 为 CH_4 修正因子; $\text{N}_2\text{O Emissions}$ 为计算年份污水 N_2O 排放总量 ($\text{kg N}_2\text{O}/\text{a}$); N_{Waste} 为排放到水生环境的污水中的氮含量 ($\text{kg N}/\text{a}$); EF_{Waste} 为排放因子 ($\text{kg N}_2\text{O}-\text{N}/\text{kg N}$); $44/28$ 为单位从 $\text{kg N}_2\text{O}-\text{N}$ 到 kg N 的转化系数。

污泥填埋: W 为污泥质量; DOC 为可降解有机碳, 取决于产生该污泥的废水来源、处理工艺, IPCC 推荐值为干污泥的 40%—50%, 按污泥含水率 80% 计算, 则湿污泥 DOC 含量为 8%—10%, 按 10% 计算; DOC_f 为实际分解的可降解有机碳比例, IPCC 推荐取 50%; MCF 为甲烷修正因子, 对于厌氧填埋场, 可以选择为 100%; F 为填埋气体中的 CH_4 体积比例, 按 50% 计算; $16/12$ 为 CH_4/C 分子量比率;

垃圾填埋: E_{CH_4} 为填埋产生的 CH_4 量; E_{CO_2} 为填埋产生的 CO_2 量; MSW 为城市生活垃圾总量; η 为垃圾填埋率 (本研究取 100%); DOC_j 为可降解组分 j 中可降解有机碳的百分比; W_j 为可降解组分 j 的百分比; $16/12$ 为从 CH_4 到 C 的转化系数; $44/12$ 为从 CO_2 到 C 的转化系数; 50% 为填埋气中 CH_4 和 CO_2 各自所占的比例; R 为 CH_4 的回收率, 厦门市运行中的垃圾填埋场均未回收 CH_4 , 故取 0 值; OX 为 CH_4 的氧化比例, 除了覆盖有氧化材料的填埋场, 其他管理或未管理的填埋场的 OX 缺省值为 0。

粪尿还田: $\text{EF}_{(T)}$ 为牲畜类别 T 的年 CH_4 排放因子; $\text{VS}_{(T)}$ 为牲畜类别 T 的日挥发固体排泄物; 365 为计算年 VS 产量的基数; $B_{0(T)}$ 为牲畜类别 T 所产粪便的最大甲烷生产能力; 0.67 为 $\text{m}^3 \text{CH}_4$ 换算为 kg CH_4 的换算系数; $\text{MCF}_{(S,k)}$ 为气候区 k 每种粪便管理系统 S 的甲烷转化因子; $\text{MS}_{(T,S,k)}$ 为使用气候区 S 粪便管理系统 T 管理牲畜类别 T 粪便的比例; $\text{N}_2\text{O}_{\text{D(mm)}}$ 为源自国内粪便管理的 N_2O 直接排放; $N_{(T)}$ 为国内牲畜品种/类别 T 的头数; $\text{Nex}_{(T)}$ 为国内种类/类别 T 每头家畜的年均氮排泄量; $\text{MS}_{(T,S)}$ 为源自国内粪便管理系统 S 所管理的每一牲畜种类/类别 T 总氮排泄的比例; $\text{EF}_{3(S)}$ 为源自国内家畜粪便管理系统 S 中的 N_2O 直接排放的排放因子; S 为粪便管理系统; T 为牲畜的品种/类别; $44/28$ 为 ($\text{N}_2\text{O}-\text{N}$) (mm) 排放转化为 N_2O (mm) 排放

居民消费食物首先分为可食部分和不可食部分。可食部分通过进食行为进入人体, 不可食部分食物 (包括食物的不可食用部分和被丢弃的可食部分) 成为城市厨余垃圾进入垃圾处理系统。人体摄取的食物经过人体消化系统消化吸收, 合成人体生长发育所需的营养物质, 代谢产物通过排泄物排出

体外, 进入污水处理系统。城镇和农村在厨余垃圾和生活污水的处理方式上差异较大。城镇厨余垃圾进入垃圾处理系统, 处理方式主要分为填埋、焚烧、再利用 3 种; 农村厨余垃圾以堆肥还田为主。城镇粪尿进入污水处理系统; 农村粪尿以堆肥还田为主。在垃圾填埋、污水处理、污泥填埋、污泥焚烧、粪尿还

田等过程中,碳氮磷元素主要进入水体和土壤,但由于处理过程中在厌氧条件下发生了复杂的化学反

应,部分元素形成气体排出处理体系进入大气介质。

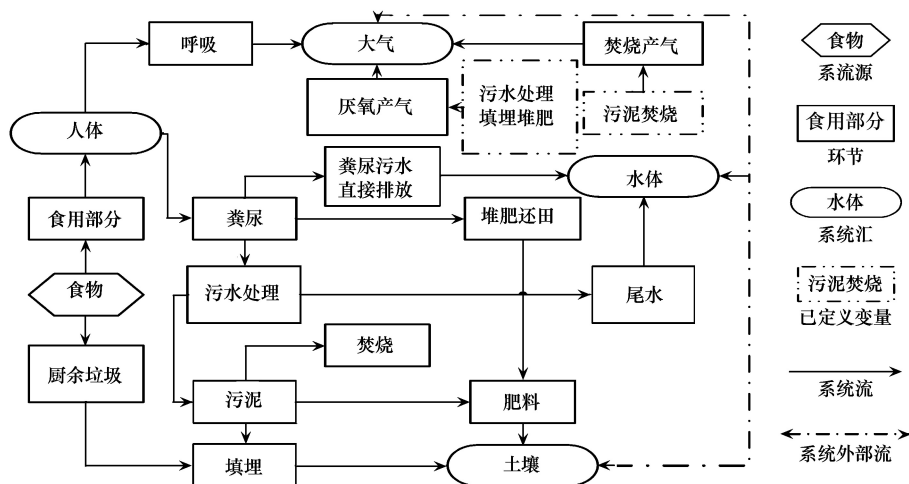


图3 食物源碳氮磷元素流框架

Fig.3 The metabolic flow of food-sourced CNP

碳氮磷元素在城市代谢过程中所经历路径不尽相同:碳元素在人体代谢过程中以气体产物二氧化碳形式排出体外,直接进入大气介质,而氮磷元素均以固体产物为主,以粪尿形式排出体外。磷元素由于其气体化合物化学性质不稳定,在系统中可忽略不计,因此涉及气体排放的各个环节中均不考虑磷

元素,而碳氮元素在微生物厌氧发酵的过程中会以甲烷、二氧化氮等气体化合物的形式进入大气介质。

3.2 厦门市食物源碳氮磷城市代谢通量的动态特征

大气、土壤和水体3种环境介质中碳氮磷环境负荷量如图4所示。

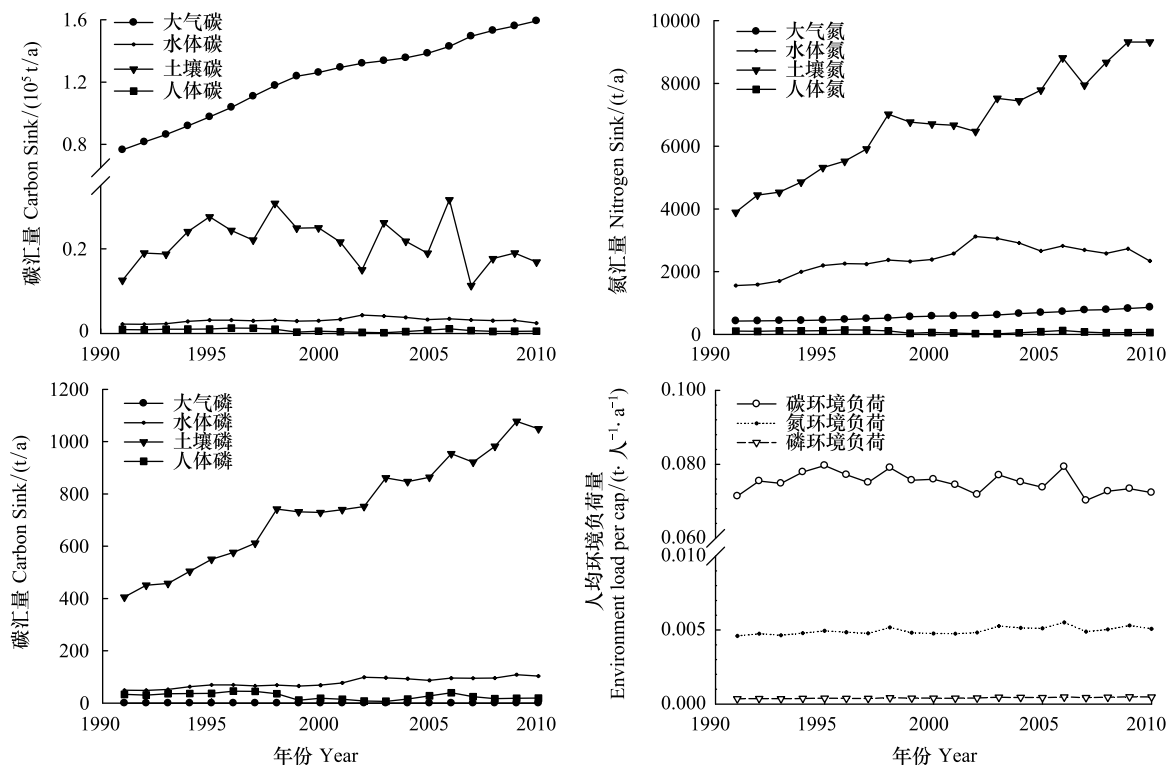


图4 厦门市食物源碳氮磷城市代谢通量动态特征

Fig.4 Dynamic of metabolic flux of food-sourced in Xiamen

碳在大气与土壤的负荷呈现相同的变化趋势:分别从 1991 年的 74859 t/a 和 14305 t/a 波动上升至 2010 年的 149763 t/a 和 26404 t/a,年均增幅分别为 3.53% 和 3.11%。而水体碳负荷表现出稳定和缓慢上升的趋势,从 1991 年的 2187 t/a 以 0.55% 的速度增长到 2010 年的 2440 t/a。

氮在 3 种环境介质中的负荷呈现不同的变化趋势。大气氮负荷增长缓慢,从 1991 年的 427 t/a 以 3.59% 的速度增长到 2010 年的 865 t/a。水体氮负荷 2010 年前增长速度较快,从 1991 年的 1556 t/a 以 2.07% 的速度增长到 2010 年的 2345 t/a。土壤氮负荷增长迅速,从 1991 年的 3897 t/a 以 4.46% 的速度快速增长到 2010 年的 9323 t/a。

磷在 3 种环境介质中的负荷也呈现出不同的变化趋势。因磷元素并无气体存在形式,不产生大气磷负荷。水体磷负荷增长缓慢,从 1991 年的 49 t/a 以 3.83% 的年均增长速度快速增长到 2010 年的 104 t/a。土壤磷负荷呈现直线稳定上升趋势,从 1991 年的 406 t/a 以 4.86% 的年均增长速度快速增长到 2010 年的 1049 t/a。

人均环境负荷量反映人均食物消费输出到大气、水体、土壤 3 种环境介质的碳氮磷总量。碳氮磷 3 种元素均呈现波动上升趋势,其中人均食物碳输出到环境介质的总量最大,从 1991 年 $0.071 \text{ t 人}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 波动上升至 2010 年的 $0.072 \text{ t 人}^{-1} \text{ a}^{-1}$,年均增幅为 0.07%。人均食物氮输出缓慢上升的趋势,从 1991 年的 $0.0045 \text{ t 人}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 上升至 2010 年的 $0.0051 \text{ t 人}^{-1} \text{ a}^{-1}$,年均增幅为 0.63%。人均食物磷输出缓慢上升的趋势,从 1991 年的 $0.00036 \text{ t 人}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 上升至 2010 年的 $0.00047 \text{ t 人}^{-1} \text{ a}^{-1}$,年均增幅为 1.34%。

3.3 厦门市食物源碳氮磷城市代谢通量的比例特征

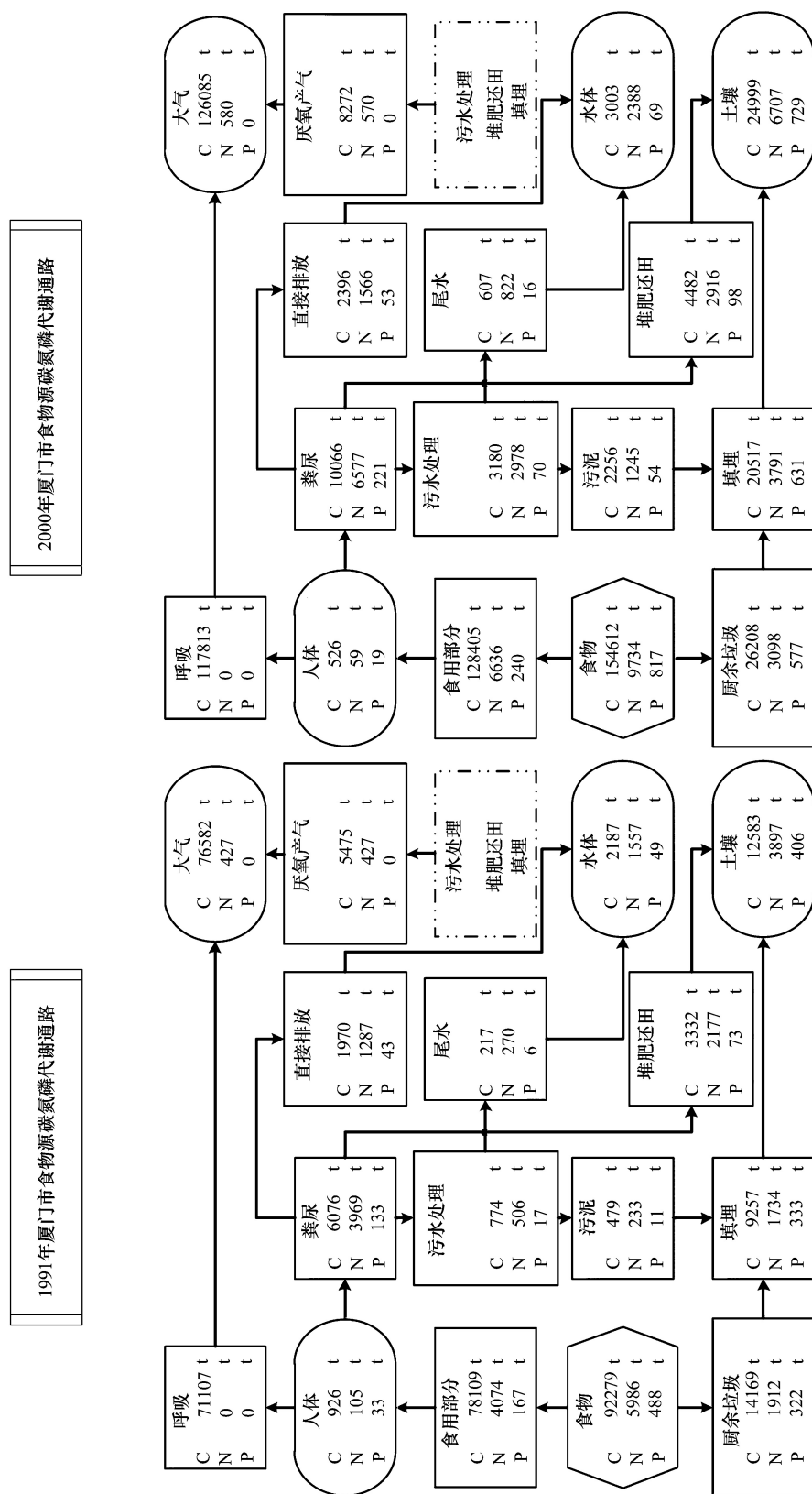
图 5 表示 1991、2000 和 2010 年食物源碳氮磷代谢过程中主要环节的碳氮磷元素通量。对各年份代谢通量分析发现,通量最大的代谢路径为“食物—食物摄入—人体粪尿—未还田粪尿—污水处理—污泥—污泥填埋—土壤”。随着时间推移,城市化率增大,人口增多,这一通路呈现增大趋势。以 1991、2000 和 2010 年 3a 平均值计算,食物源碳氮磷元素最终流向土壤的比例分别为 13.1%、69.3%、87.3%。由于碳元素主要通过人体代谢以二氧化碳形式排入大气,大气碳占食物源碳的比例为 84.5%。

人口增加、食物结构改变和奢侈型消费综合作用造成的食物源总量增加,食物源碳氮磷消费量分别从 1991 年的 92279、5986、488 t 上升至 2010 年的 179140、12593、1173 t。随着时间推移,流向水体介质的氮磷元素比例逐年降低,食物源氮磷流向水体的比例分别从 1991 年的 26.0%、10.1% 下降至 2010 年的 18.6%、8.8%,而食物源氮磷流向土壤的比例分别从 1991 年的 65.1%、83.1% 上升至 74.0%、89.5%,出现向土壤介质转移的趋势。综合上文氮磷元素在水体和土壤介质的环境负荷量分析发现,尽管污水进入城镇污水处理系统的比例增加,元素去除率随技术革新和排放标准提高而提高,水体环境负荷在总量上并未减少,反而呈现逐年上升趋势;元素流动路径发生了变化,原本流向水体的元素因为处理技术改革转移到土壤。

食物消费的最终目的是摄取食物中的营养,从结果看出,食物源碳氮磷元素流向新增人口体内的比例下降,食物源碳氮磷转移到人体以外的汇。新增人口体内碳氮磷占食物源的比例极低,2010 年分别为 0.3%、0.5%、1.6%。食物有效利用率低与人体是一个开放系统有关,人体必须时刻不停地从外部环境获取能量以维持自身体温和其它正常生理活动,这部分物质和能源的消耗不可避免。由于食物的不可完全利用特点和居民过度消费食物的现象,使得原本可利用的部分食物成为厨余垃圾,2010 年厨余垃圾中碳氮磷占食物源比例分别为 13.7%、32.2%、70.3%,这部分物质和能源的消耗可以通过节约消费减少。

4 结论

本研究运用元素流分析法,对厦门市 1991—2010 年居民食物源碳氮磷元素物质流特征及其环境负荷进行了综合分析。从环境负荷总量上看,大气、水体、土壤三种介质的环境负荷总量均随城市化率和人口增长同步增加,增幅最为明显的是:大气碳从 1991 年的 74859 t/a 增长至 2010 年的 149763 t/a;土壤氮从 1991 年的 3897 t/a 增长至 2010 年的 9323 t/a,土壤磷从 1991 年的 406 t/a 增长至 2010 年的 1049 t/a。表 1 将本研究结果与相关研究进行比较,由于研究区域和部分环节计算方法的不同,计算结果有所不同,但本研究建立了食物源碳氮磷城市代



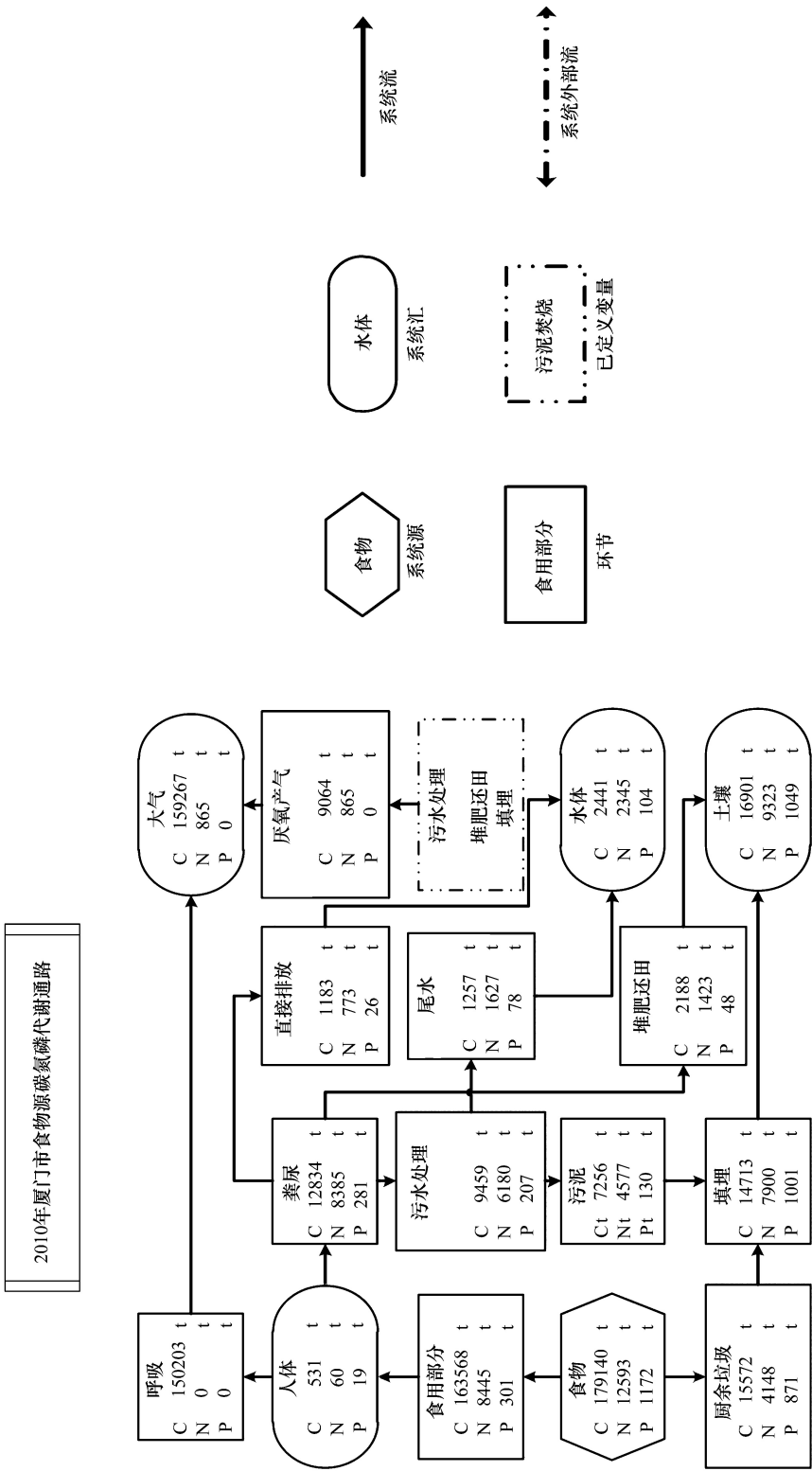


图 5 厦门市食物源碳氮磷城市代谢通量耦合特征
Fig. 5 The metabolic flux of food-sourced in Xiamen

谢统一研究框架,使得不同区域、不同元素之间可作横向比较。

食物源代谢过程中通量最大的代谢路径为“食物—食物摄入—人体粪尿—未还田粪尿—污水处理—污泥—污泥填埋—土壤”。研究区的食物源碳氮磷主要引起土壤和水体的环境负荷,随着城镇化水平的提高,人口和食物消费量的增加,使得进入环境的碳氮磷元素总量随之增加,尽管过去十多年里,研究区污水处理厂规模增大、污水排放标准提高,但仍无法逆转土壤和水中碳氮磷增加的趋势。从比例上看,进入水体的碳氮磷元素占环境总负荷量的比例逐年显著递减,而进入土壤介质的显著增加。食物源碳氮磷流向人体的比例极低,2010 年比例分别为 0.3%、0.5%、1.6%;同时由于食物的不可完全利用特点和居民过度消费食物的现象,食物源流向厨余垃圾的比例过高,2010 年比例分别为 13.7%、32.2%、70.3%,这使得食物源碳氮磷元素利用率更低。在制定政策减小研究区食物源碳氮磷的环境负荷时,可以从以下几个方面考虑:(1)增大食物的有效食用比例,提倡节约型消费,使原本进入厨余垃圾途径的食物碳氮磷流向人体;(2)资源化利用污泥。随着污水处理率的提高,污泥的产量也越来越大,目前采取的处置方式是污泥堆肥。这种填埋方式的问题是污泥中的富营养物在无防渗情况下进入土壤介质。从经济的发展、资源的开发利用、城市生态环境的保护等方面来看,污泥处置的较理想出路是污泥制砖;(3)资源化利用厨余垃圾。城镇厨余垃圾可通过堆肥、发酵等方法资源利用,生产肥料和饲料并输入农村进行二次利用。

References:

- [1] Turner W R, Nakamura T, Dinetti M. Global urbanization and the separation of humans from nature. *Bioscience*, 2004, 54(6): 585-590.
- [2] Liu Y. Exploring the relationship between urbanization and energy consumption in China using ARDL (autoregressive distributed lag) and FDM (factor decomposition model). *Energy*, 2009, 34(11): 1846-1854.
- [3] Huang S L, Chen C W. Urbanization and socioeconomic metabolism in Taipei. *Journal of Industrial Ecology*, 2009, 13(1): 75-93.
- [4] Pickett S T A, Cadenasso M L, Grove J M, Nilon C H, Pouyat R V, Zipperer W C, Costanza R. Urban ecological systems: linking terrestrial ecological, physical, and socioeconomic components of metropolitan areas// Marzluff J M, ed. *Urban Ecology: An International Perspective on the Interaction Between Humans and Nature*. New York: Springer, 2008: 99-122.
- [5] Wu Y Q, Yan M C, Xu L F. Review on the research of energy-based urban metabolism. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(3): 1139-1145.
- [6] Decker E H, Elliott S, Smith F A, Blake D R, Rowland F S. Energy and material flow through the urban ecosystem. *Annual Review of Energy and the Environment*, 2000, 25(1): 685-740.
- [7] Sahely H R, Dudding S, Kennedy C A. Estimating the urban metabolism of Canadian cities: Greater Toronto Area case study. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2003, 30(2): 468-483.
- [8] Kennedy C, Cuddihy J, Engel Yan J. The changing metabolism of cities. *Journal of Industrial Ecology*, 2007, 11(2): 43-59.
- [9] Barles S. Feeding the city: Food consumption and flow of nitrogen, Paris, 1801—1914. *Science of the Total Environment*, 2007, 375(1/3): 48-58.
- [10] Feng Z M, Shi D F. Chinese food consumption and nourishment in the latest 20 years. *Resources Science*, 2006, 28(1): 2-8.
- [11] Luo T W, Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H, Zheng H. Dynamics of urban food-carbon consumption in Beijing households. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3252-3258.
- [12] Wang W X, Wu K Y, Liu X W. Differences and trends of food-carbon consumption between urban and rural households: a case study of Anhui province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(10): 1177-1184.
- [13] Chakravarty S, Chikkatur A, De Coninck H, Pacala S, Socolow R, Tavoni M. Sharing global CO₂ emission reductions among one billion high emitters. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(29): 11884-11888.
- [14] Fissore C, Baker L A, Hobbie S E, King J Y, Mcfadden J P, Nelson K C, Jakobsdottir I. Carbon, nitrogen, and phosphorus fluxes in household ecosystems in the Minneapolis-Saint Paul, Minnesota, urban region. *Ecological Applications*, 2011, 21(3): 619-639.
- [15] Baker L A, Hartzheim P M, Hobbie S E, King J Y, Nelson K C. Effect of consumption choices on fluxes of carbon, nitrogen and phosphorus through households. *Urban Ecosystems*, 2007, 10(2): 97-117.
- [16] Warren-Rhodes K, Koenig A. Escalating trends in the urban metabolism of Hong Kong: 1971—1997. *Ambio*, 2001, 30(7): 429-438.
- [17] Forkes J. Nitrogen balance for the urban food metabolism of Toronto, Canada. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, 52(1): 74-94.
- [18] Li G L, Bai X, Yu S, Zhang H, Zhu Y G. Urban phosphorus metabolism through food consumption. *Journal of Industrial*

- Ecology, 2012, 16(4): 588-599.
- [19] Yu Y, Cui S H, Zhao S N, Meng F X, Li F. Changes of residents nitrogen consumption and its environmental loading from food in Xiamen. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(19): 5953-5961.
- [20] Wang H N, Zhao X F, Tang L N, Cui S H, Li G L. Changes in phosphorus consumption and its environmental loads from food by residents in Xiamen City(Accepted). *Acta Ecologica Sinica*, doi: 10.5846/stxb201204180553.
- [21] Nie Z Y, Liang X Q, Xing B, Ye Y S, Qian Y C, Yu Y W, Bian J Y, Gu J T, Liu J, Chen Y X. The current water trophic status in Tiaoxi River of Taihu Lake watershed and corresponding coping strategy based on N/P ratio analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(1): 48-55.
- [22] Huang H P, Bi J, Zhang B, Li X M, Yang J, Shi L. A critical review of material flow analysis (MFA). *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 368-379.
- [23] Chen B, Yang J X, Shi Y, Ouyang Z Y. Framework and indicator system of urban material flow analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(22): 6289-6296.
- [24] Shi L, Lou Y. Methodology and procedure for urban-wide material flows analysis. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(4): 196-200.
- [25] Song Y C, You W H, Wang X R. *Urban Ecology*. Shanghai: East China Normal University, 2000.
- [26] Yadav K D, Tare V, Ahammed M M. Vermicomposting of source-separated human faeces for nutrient recycling. *Waste Management*, 2010, 30(1): 50-56.
- [27] Karak T, Bhattacharyya P. Human urine as a source of alternative natural fertilizer in agriculture: A flight of fancy or an achievable reality. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011, 55(4): 400-408.
- [28] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. 2006. Hayama, Japan: IGES. 2006.

参考文献:

- [5] 吴玉琴, 严茂超, 许力峰. 城市生态系统代谢的能值研究进展. *生态环境学报*, 2009, 18(3): 1139-1145.
- [10] 封志明, 史登峰. 近 20 年来中国食物消费变化与膳食营养状况评价. *资源科学*, 2006, 28(1): 2-8.
- [11] 罗婷文, 欧阳志云, 王效科, 苗鸿, 郑华. 北京城市化进程中家庭食物碳消费动态. *生态学报*, 2005, 25(12): 3252-3258.
- [12] 王文秀, 吴开亚, 刘晓薇. 城乡居民食物碳消费变化与差异分析——以安徽省为例. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(10): 1177-1184.
- [19] 于洋, 崔胜辉, 赵胜男, 孟凡鑫, 李飞. 城市居民食物氮消费变化及其环境负荷——以厦门市为例. *生态学报*, 2012, 32(19): 5953-5961.
- [20] 王慧娜, 赵小锋, 唐立娜, 崔胜辉, 李桂林. 城市居民食物磷素消费变化及其环境负荷——以厦门为例. *生态学报*, 2013, 33(14): 4495-4504.
- [21] 聂泽宇, 梁新强, 邢波, 叶玉适, 钱铁超, 余昱葳, 边金云, 顾佳涛, 刘瑾, 陈英旭. 基于氮磷比解析太湖苕溪水体营养现状及应对策略. *生态学报*, 2012, 32(1): 48-55.
- [22] 黄和平, 毕军, 张炳, 李祥妹, 杨洁, 石磊. 物质流分析研究述评. *生态学报*, 2007, 27(1): 368-379.
- [23] 陈波, 杨建新, 石磊, 欧阳志云. 城市物质流分析框架及其指标体系构建. *生态学报*, 2010, 30(22): 6289-6296.
- [24] 石磊, 楼俞. 城市物质流分析框架及测算方法. *环境科学研究*, 2008, 21(4): 196-200.
- [25] 宋永昌, 由文辉, 王祥荣. *城市生态学*. 上海: 华东师范大学出版社, 2000.