

物质流分析方法

物质流分析（Material Flow Analysis，简称为 MFA）是指在一定时刻范围内关于特定系统的物质流动和存储的系统性分析或评价。它所分析的物质包括对形式单一且均匀的化学物质（Substance）和由化学物质构成的具有市场经济价值的物质（Goods）。其中对前者的分析常常被称为元素流分析（Substance Flow Analysis，简称为 SFA）。SFA 由于其研究对象简单、单一而被广泛应用。在进行物质流分析时，首先需要做的工作是系统分析。系统分析过程中一个很重要的步骤就是系统边界的界定。系统边界（System Boundary）是区分系统内部和系统外部的分界线，它既包括时间边界、空间边界和虚拟边界（或者称为“逻辑边界”或者“过程边界”）。在确定了系统边界之后，我们就需要对系统细化成一个个过程（Process），这些过程可以是自然过程，也可以是人为过程。从一个过程到另一个过程之间的物质交换就是物质流（Flow），穿过系统边界流入系统的物质流称为进口（Imports），穿过系统边界流出系统的物质流称为出口（Exports），进入一个过程的流称为输入流（Inputs），离开一个过程的流称为输出流（Outputs）。当一个过程中的部分物质没有流入到其他过程或者流出到系统边界，那么这些物质就形成了库存（Stocks）。库存是过程的一个部分，用于存储过程中的物质。在稳态条件下（输入=输出），物质在库存中的停留时间可以通过库存量除以输入流（或者输出流）来计算。库存可以增加也可以减少，同时也可以保持不变。根据物质守恒，对于一个系统满足：输入流=输出流+库存的变化（ $Inputs=Outputs+\Delta Stocks$ ）。通过以上概念，我们对物质流分析能够建立一种基本的认识，但如何实现物质流分析的这个过程也是我们十分关心的问题。为了说明这一问题，这里引入了一个关于磷流分析（SFA）的假例。我们知道，人类所利用的磷起初来源于自然界里的磷矿石，最终通过人类消费后以废水或者废物的形式排放到自然环境中。如何分析人类对磷资源开发利用的相关活动所引起的磷流是我们现在所关注的问题。很明显，这一研究的系统边界就是所有的涉磷人类活动，这里我们将其划分为 6 个过程：磷矿采选（Rocks）、磷化工生产（Chemicals）、作物生产（Crops）、动物生产（Animals）、人类消费（Humans）和废物处置（Wastes）。这 6 个过程之间的磷流联系如图 1 所示。图 1 中过程之间的连线就是磷流，其中箭头所指的方

向就是流向，箭头上面的变量标识就是流量。为了方便说明，用 $F(P_1, P_2)$ 来表示一条磷流，其中 F 表示流量， P_1 和 P_2 表示过程， $F(P_1, P_2)$ 就表示从 P_1 过程到 P_2 过程的磷流量。我们进行物质流分析的一个重要步骤，就是定量刻画我们研究系统中所有的物质流。所以，我们需要提供一套计算 $F(P_i, P_j)$ (i 和 j 为系统过程的标识) 的算法。这里，通常的计算方法是：物质流=活动水平×物质系数 ($F(P_i, P_j)=A_k \times C_k$ ， A_k 为活动水平， C_k 为物质系数， k 为活动类型)。采用这种计算方式进行物质流计算的方法称为独立型核算。另外，通过已经计算出来的物质流的某种转换关系(如对这个物质流按照某种比例进行分配而得到的其他物质流)进行物质流计算的方法称为依附型核算。在依附型核算中，有一类是按照一个过程输入输出物质守恒原理来对未知物质流进行计算的方法称为平衡型核算。

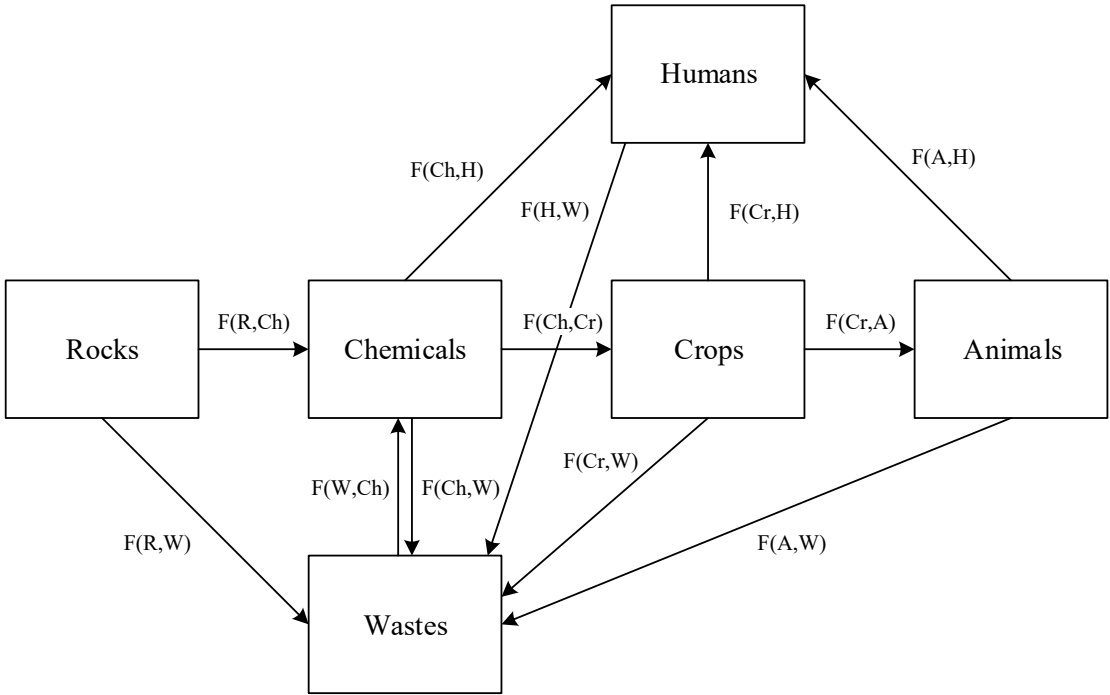


图 1 磷流分析概念框架图

根据以上提出的 3 类核算方法，我们可以构建如下的物质流核算模型：

1. $F(R,Ch)=\text{原矿产量}\times\text{原矿元素含量}\times\text{矿石产率}$
2. $F(R,W)=\text{原矿产量}\times\text{原矿元素含量}-F(R,Ch)$
3. $F(Ch,Cr)=\text{化肥产量}\times\text{化肥元素含量}$
4. $F(Ch,H)=\text{日化产量}\times\text{日化元素含量}$
5. $F(Ch,W)=(F(R,Ch)-F(Ch,Cr)-F(Ch,H))/(1-\text{化工废物回用率})$
6. $F(W,Ch)=F(Ch,W)\times\text{化工废物回用率}$
7. $F(Cr,A)=\text{作物产量}\times\text{作物元素含量}\times\text{饲料占比}$
8. $F(Cr,H)=\text{作物产量}\times\text{作物元素含量}\times\text{食品占比}$
9. $F(Cr,W)=F(Ch,Cr)-F(Cr,A)-F(Cr,H)$
10. $F(A,H)=\text{动物产量}\times\text{动物元素含量}\times\text{肉产率}$
11. $F(A,W)=F(Cr,A)-F(A,H)$
12. $F(H,W)=F(Ch,H)+F(Cr,H)+F(A,H)$

从以上模型可以看出，表达式 1、3、4、7、8、10 为独立性核算，其余为依附型核算，其中表达式 2、9、11 为平衡型计算。在构建了核算模型后，我们需要采集相应的数据对其进行计算。这里我们需要整理的数据包括节点数据与模型数据两个部分。节点数据主要是对物质流分析中各个过程的说明。我们定义的过程往往名称都比较长，但是为了简化我们对其进行重新编码（见表 1 中的 NAME 那一列），并且为了说明编码的含义我们对其进行说明（见表 1 中的 NOTE 那一列）。节点数据表无论是对我们进行表达式的书写还是进行编程计算都很有帮助，因为真实的分析可能涉及到几十个甚至几百个节点，如果不加以整理很容易就因此而发生混乱。因此这个不直接参与计算的数据表格也很重要，不能省略。

表 1 节点数据

NAME	NOTE
R	Rocks
Ch	Chemicals
Cr	Crops
A	Animals
H	Humans
W	Wastes

模型数据是参与核算的数据，因此十分重要。关于模型数据，我们首先要对

模型中的变量进行重新编码（见表 2 中的 NAME 那一列）。同时还需要有一些辅助的说明，包括编码所对应的含义（见表 2 中的 NOTE 那一列）、编码所对应的单位（见表 2 中的 UNIT 那一列，其目的就是为了保持单位的统一，对于不统一的单位要转化成统一的单位）。另外，还有一些重要的标识，如时间标识（见表 2 中的 TIME 那一列）。最后也就是我们最关心的数据（见表 2 中的 DATA 那一列）。表 2 是长表格的形式，而有时候我们会遇到宽表格的形式，如不同年份的数据分别写成一列。这时候就需要按照前面介绍的方法对这些表格进行转化。当然，如果是在 MS Excel 中计算，可能宽表格会更适合，因为可以通过拖动来实现数据的批量计算。

表 2 模型数据

NAME	NOTE	UNIT	TIME	DATA
DRP	原矿产量	kt	Y2000	20
PRP	原矿元素含量	1	Y2000	0.5
PRR	矿石产率	1	Y2000	0.8
DFP	化肥产量	kt	Y2000	15
PFP	化肥元素含量	1	Y2000	0.4
DCP	日化产量	kt	Y2000	5
PCP	日化元素含量	1	Y2000	0.3
PCR	化工废物回用率	1	Y2000	0.5
DMP	作物产量	kt	Y2000	1000
PMP	作物元素含量	1	Y2000	0.005
PHR	饲料占比	1	Y2000	0.4
PNR	食品占比	1	Y2000	0.45
DAP	动物产量	kt	Y2000	800
PAP	动物元素含量	1	Y2000	0.002
PAR	肉产率	1	Y2000	0.75
DRP	原矿产量	kt	Y2005	40
PRP	原矿元素含量	1	Y2005	0.5

PRR	矿石产率	1	Y2005	0.85
DFP	化肥产量	kt	Y2005	30
PFP	化肥元素含量	1	Y2005	0.4
DCP	日化产量	kt	Y2005	10
PCP	日化元素含量	1	Y2005	0.3
PCR	化工废物回用率	1	Y2005	0.6
DMP	作物产量	kt	Y2005	2000
PMP	作物元素含量	1	Y2005	0.005
PHR	饲料占比	1	Y2005	0.35
PNR	食品占比	1	Y2005	0.5
DAP	动物产量	kt	Y2005	1600
PAP	动物元素含量	1	Y2005	0.002
PAR	肉产率	1	Y2005	0.8

将表 2 中的数据带入到模型中就可以得到如表 3 所示的计算结果。从表 3 可以看出， $F(P_i, P_j)$ 的计算结果是按照 P_i 、 P_j 、 F 的顺序给出的，为了将不同年份的数据进行区分，我们在前面有一个时间的标识（见表 3 中的 TIME 那一列）。在表 3 的基础上，我们能够很容易地对其进行进一步计算。如我们要计算整个过程中产生的废物量，可以挑选出表 3 中 TO 那一列中所有的 W，对其进行加和即可（当然，事先需要筛选固定的年份，或者按照年份来进行操作）。这一过程可以通过 MS Excel 中的数据透视表功能来实现。

表 3 计算结果

TIME	FROM	TO	FLOW
Y2000	R	Ch	8
Y2000	W	Ch	0.5
Y2000	Ch	Cr	6
Y2000	Cr	A	2
Y2000	Ch	H	1.5

Y2000	Cr	H	2.25
Y2000	A	H	1.2
Y2000	R	W	2
Y2000	Ch	W	1
Y2000	Cr	W	1.75
Y2000	A	W	0.8
Y2000	H	W	4.95
Y2005	R	Ch	17
Y2005	W	Ch	3
Y2005	Ch	Cr	12
Y2005	Cr	A	3.5
Y2005	Ch	H	3
Y2005	Cr	H	5
Y2005	A	H	2.56
Y2005	R	W	3
Y2005	Ch	W	5
Y2005	Cr	W	3.5
Y2005	A	W	0.94
Y2005	H	W	10.56
