

工业园区磷代谢分析 ——以江苏宜兴经济开发区为例

武娟妮, 石磊*

(清华大学 环境科学与工程系 国家环境保护生态工业重点实验室, 北京 100084)

摘要:工业园区是工业活动的重要载体,也是水污染控制与治理的焦点对象。运用物质代谢分析方法解析水中主要污染主导元素在工业园区的代谢途径、结构与动力机制,有助于寻求提高水资源利用效率和减缓水环境污染压力的举措。以江苏宜兴经济开发区为案例,基于物质流分析方法构建了工业园区的磷代谢网络,详细解析了工业系统和污水处理模块的磷代谢途径和通量。研究表明,印染、食品加工和机械(磷化)行业是宜兴经济开发区的主要磷排放源;企业自备处理设施除磷效果不佳,磷去除率大约为 60%,集中污水处理厂可以有效除磷,去除率约 75%;生活污水磷去除率低;不经处理直接排入水体的降水给水体造成了较大的负荷,为 34%。由此,建议企业完善简单的处理设施,污水处理厂提高企业纳管率,同时园区加强对生活污水、生活垃圾和企业固体排放物的管理。

关键词:磷;工业园区;代谢分析;物质流分析;江苏宜兴经济开发区

Phosphorus metabolism in industrial parks: a case study of Yixing economic development zone

WU Juanni, SHI Lei*

MEP Key Laboratory of Eco-industry, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: Being hives of intensive industrial activities, industrial parks become the focus of water pollution control. However, water management at industrial levels is a challenging job because of the diversification of industrial types, complexity of wastewater treatment network, and interactive metabolism of various elements. Industrial metabolism, especially for phosphorus and nitrogen, can present insights for improving water use efficiency and reducing water pollution. By applying substance flow analysis methods, this paper established a hierarchical phosphorus metabolism framework for industrial parks. Firstly, a metabolic network was established at the level of the entire park, comprising the resource system, environmental system, and the park's internal and external socio-economic systems. The park's internal socio-economic systems comprise phosphate conversion modules and treatment modules. Phosphorus conversion modules contain industrial systems, domestic sources and non-point source. Phosphorus treatment modules contain pre-processing facilities of enterprises and wastewater plants. Then, more detailed metabolic networks were delineated for industrial systems and wastewater treatment systems according to the reality of the Yixing economic development zone. Industrial systems further divide into seven industrial types: phosphoric acid production, phosphorus flame retardant manufacturing, detergent production, printing and dyeing, food processing, machinery (phosphating), and other industries. Wastewater treatment systems further divided into three types: physical treatment, physico-chemical treatment, and biochemical treatment. Based on the network topology, the metabolic structure and dynamic mechanism were analyzed to seek measures for improving water use efficiency and reducing water pollution. The case study on the Yixing Economic Development Zone showed the following: (a) printing and dyeing, food processing and machinery (phosphating) were major water phosphorus-emission

基金项目:国家水体污染控制与治理重大专项资助项目(2008ZX07313-005);国家重点实验室专项基金资助项目(08Y05ESPCT)

收稿日期:2009-12-08; **修订日期:**2010-01-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: slone@tsinghua.edu.cn

industries, accounting for 86.8% of total industrial water phosphorus-emission of the entire park, though however, waste water of these industries goes through efficient treatment process; (b) pre-processing facilities of enterprises had a low (about 60%) phosphorus removal ratio, while waste water plants could remove phosphorus more effectively (about 75%); (c) most enterprises of the park have only simple wastewater pre-processing facilities (physico-chemical treatment and biochemical treatment), which can only remove 5%—11% of the phosphorus, and about 5% of total water phosphorus-emission of the park goes directly into water body just after simple pre-processing; (d) untreated precipitation into water body cause much pollution load in water body (around 34%), because of the low management ratio of domestic waste and solid waste of enterprises; and (e) domestic sewage has low phosphorus removal ratio (62.1%), due to the simple pre-processing facilities of most enterprises. Following these results and further discussion, some suggestions were put forth: (a) the waste water pre-processing facilities of enterprises should be improved for higher phosphorus removal ratio; (b) the treated water from enterprises should be piped into the centralized wastewater treatment plant for further treatment; (c) the wastewater pipeline system of the park should be improved to let more enterprises' wastewater, especially more domestic sewage be treated by the centralized wastewater treatment plant; and (d) domestic waste and industrial solid waste of enterprises should be well managed and treated to avoid phosphorus going directly into water body through precipitation.

Key Words: phosphorus; industrial park; material metabolism; substance flow analysis (SFA); Yixing economic development zone

绝大多数环境问题都与元素、物质或产品在社会经济系统中的流动规模、途径和归宿有关。研究表明,我国 59 种元素的代谢过程主要受控于人工因素而非自然因素^[1]。工业园区作为生产活动的载体,高密度的产业活动和复杂多样的物质代谢导致了高强度的环境压力。以水为例,工业园区给排水的通量巨大,产业类型多样化导致了废污水成分的复杂化,同时,污水治理有 3 种途径:(1)企业预处理后接入污水处理厂;(2)企业自行处理;(3)直接排入污水处理厂^[2],使得企业内部处理环节与集中污水处理厂处理环节耦合形成了一个庞杂的废污水处理体系。

生态工业园区建设的一个重要方面就是建立生态基础设施,增加废物处理与循环再生环节并促进基础设施共享,优化工业代谢途径及资源利用效率,促进园区向生态化的方向演进^[3-4]。工业园区作为一个典型的社会经济系统,可以应用工业生态学领域发展起来的物质流分析方法^[5],系统识别并定量解析园区层面上物质代谢所产生的资源环境影响及其规律。本文综合运用了针对特定区域系统的物质流分析(MFA)^[6]和针对特定物质的物质流分析(SFA)^[7],以江苏宜兴经济开发区为案例,开展了工业园区上磷代谢的途径、结构与动力机制研究。

1 工业园区磷代谢系统界定

无论是针对特定区域系统的物质流分析(MFA)还是针对特定物质的物质流分析(SFA),一般都遵循明确研究目的和定义系统边界、确定代谢拓扑结构、量化代谢规模和强度、结果解释并寻求政策含义四个基本步骤。

工业园区尺度上的磷代谢分析,其研究对象是待考察的工业园区社会经济系统。事实上,工业园区是一个典型的人工复合生态系统,除了产业、生活等社会经济系统外,还包括自然生态系统。本研究的主要目的是考察磷在工业园区产业系统中的来源、代谢途径和归宿,以此来确定产业活动对于水生态环境的压力及其作用机制。因此,本研究的系统边界在空间上设定为工业园区的地理区域边界,在时间上设定为一年,在对象系统上设定为产业系统以及与产业系统紧密相关的生活系统。

2 工业园区磷代谢网络结构

磷元素的代谢分析无论是全球尺度^[8-9]、国家尺度^[10-13]、流域/地区尺度^[14-15]还是部门/行业尺度^[16-21],在拓扑结构的确定上,都借鉴 SFA 的分析框架,即分解为 4 个子系统:资源子系统、环境子系统、社会经济子

系统以及与之进行物质交换的区外社会经济系统。本文中工业园区系统也采取这 4 个子系统,其中,社会经济子系统包括 4 个结构模块:原材料采掘与准备、产品生产与加工制造、产品消费、废物处理处置与再生利用。由于本文只考虑工业园区社会经济系统的物质代谢,因此环境子系统就可以大大简化,其相应的自然流动如风蚀、水蚀、大气沉降、地表挥发、底泥释放等也不纳入本文的研究范畴。

图 1 示出了工业园区磷代谢的一般拓扑结构,其中包含 5 类节点和 4 类流。节点方面,磷矿是最根本输入源,以 R 表示;与工业园区有物质供应链关系的节点以 C 表示;在园区中主要对磷进行加工、消费和再分配的节点以 P 表示;对含磷废水进行处理的企业污水处理设施和污水处理厂以 T 表示;磷最终归属部门以 S 表示。流方面,通过产品或原料形式由外部进入园区的流以 i 表示;由园区企业通过产品或原料方式销售到外部的流以 e 表示;以污水和回用水形式进行的磷流以 w 表示;以固废形式流动到土壤或园区面源的磷流以 x 表示。

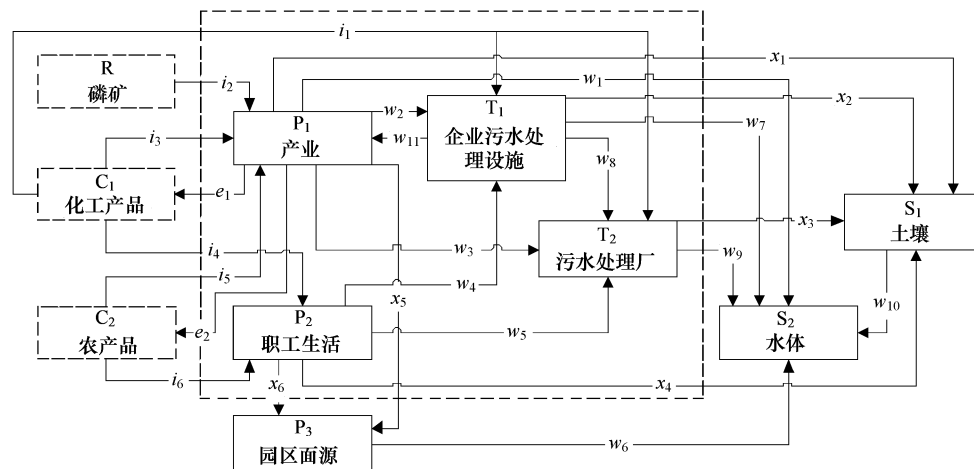


图 1 工业园区社会经济系统磷代谢拓扑结构

Fig. 1 Topology structure of phosphorus metabolism of socio-economic system in industrial park

基于磷代谢的特殊性和工业园区的区域特性,区外社会经济子系统划分出化工产品和农产品两个模块;环境子系统则只考虑了水体和土壤两个模块,并没有考虑大气模块;社会经济子系统考虑了磷加工转换和处理处置两大模块,其中磷加工转换模块划分为产业、生活和园区面源 3 个子模块,而处理处置模块可划分为预处理和集中处理两个子模块。由于产业模块和预处理模块的多样性和复杂性,可以对其进行进一步的细化,如产业模块可以划分不同的行业,而预处理模块可以根据处理方式划分为“物理处理”、“物化处理”和“生物处理”^[22]等,这将在案例研究中具体展示。

3 量化方法及数据来源

物质代谢分析实质上是一组物质平衡方程的设定与求解,以此确定出代谢网络中每一个节点的存量与每一个流股的流量。在代谢网络拓扑结构确定后,首先需要为每一个节点建立物质平衡方程,本文所建立的方程是磷元素平衡方程;接着,需要确定方程组哪些变量是决策变量,哪些是需要求解的因变量。

一般而言,因变量的确定是相对容易的,也就是那些我们关注的但又无法直接获得的变量。然而,决策变量的选取是困难的。决策变量的数目严格对应于方程的数目,因此只要确定了代谢分析的拓扑结构,也就确定了决策变量的个数。选择哪些自变量作为决策变量,不仅取决于内在的逻辑关系,也取决于数据获得的难易程度。一般而言,可以将那些数据易得且可靠的自变量直接确定出其数值,并作为常量进入方程组,不再作为决策变量。在代谢分析过程中,也可以选择不同的决策变量组合,并从中择优确定。

本文只开展工业园区的稳态磷代谢研究,即每一个节点都不存在系统累积,总输入严格等于总输出^[23]。借鉴文献^[14,24],列出了如下平衡方程:

以原料或产品形式的磷输入(或输出量)

$$i_i(\text{或 } e_i) = \text{物质贸易量} \times \text{物质平均磷含量} \quad (1)$$

产业废水磷排放量

$$w_i(i=1-3, 7-9) = \text{废水排放量} \times \text{废水磷含量} \times \text{排放到该物质流接收节点的废水的比例} \quad (2)$$

职工生活废水磷排放量

$$w_i(i=4-5) = (\text{人均排磷量} + \text{人均消耗洗衣粉量} \times \text{洗衣粉平均含磷量}) \times \text{企业职工数} \times \text{排放到该物质流接收节点的人数比例} \quad (3)$$

园区面源磷排放量

$$w_6 = x_5 + x_6 \quad (4)$$

土壤通过地表径流排入水体磷量 $w_{10} = (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) \times \text{土壤含磷排入水体的比例}$

$$(5)$$

产业通过回用水的回磷量 $w_{11} = w_2 \times \text{回用水占废水排放量的比例}$

$$(6)$$

产业固体废弃物磷排放量 $x_1 = \text{企业固废排放量} \times \text{固废磷含量}$

$$(7)$$

企业污水处理设施污泥含磷量 $x_2 = (w_2 + w_4) \times \text{污水处理设施的磷去除率}$

$$(8)$$

污水处理厂污泥磷含量 $x_3 = (w_3 + w_5 + w_8) \times \text{污水处理设施的磷去除率}$

$$(9)$$

职工清运生活垃圾磷含量 $x_4 = \text{人均生活垃圾磷产生量} \times \text{企业职工数} \times \text{垃圾清运率}$

$$(10)$$

产业无组织排放磷量 $x_5 = i_2 + i_3 + i_5 - e_1 - e_2 - x_1 - w_1 - w_2 - w_3 + w_{11}$

$$(11)$$

职工生活垃圾无组织排放磷量 $x_6 = i_4 + i_6 - w_4 - w_5 - x_4$

$$(12)$$

计算所需具体参数参见文献^[24-27]。

本文以 2008 年为基准年,计算数据主要来源于宜兴经济开发区污染源普查、经济普查、开发区或企业提供的清洁生产报告、现场调研资料、访谈资料以及网络资料。

4 宜兴经济开发区案例

4.1 宜兴经济开发区概况

宜兴经济开发区位于江苏省宜兴市,地处太湖流域上游,规划面积为 56.70 km²。开发区有企业 400 余家,先期发展集聚了一批化工、纺织印染、机械加工和热电企业,成为开发区主要产业类型,近期吸引了光伏、光电和新能源等高新技术产业入驻,2008 年工业增加值为 38.2 亿元。

2007 年,宜兴市经济开发区工业用水总量为 3.64 亿 t,其中取新鲜水 2516 万 t,其中河水 1963 万 t,占 78.03%,自来水 538 万 t,占 21.40%,地下水 11 万 t,占 0.57%,废水排放 1187 万 t。经济开发区以万人港为分界线,以南地区采用雨污分流制,以北地区采用雨污合流制。万人港以南污水管网系统很不完善,大部分企业污水只通过简单处理后排入河道。园区有两座污水处理厂,分别为宜兴市清源污水处理厂和欧亚华都污水处理厂,其中,宜兴市清源污水处理厂现在处理规模为 5 万 t/d,处理工艺采用 A2/O,主要接纳工业区南部的生活和工业废水,欧亚华都污水处理厂现处理规模为 5 万 t/d,采用 A/O 工艺,主要处理北部园区的污水。

4.2 园区层面的磷代谢分析

宜兴经济开发区园区层面的磷代谢结构如图 2 所示。工业园区主要以物质贸易的形式进行磷流通,2008 年,直接投入园区的磷为 1.21 万 t,其中通过化工产品输入 0.90 万 t,占 74.4%,通过农产品输入 0.31 万 t,占 25.6%。从系统的物质输出看,2008 年以产品形式输出园区的磷为 1.19 万 t,占总输入的 98.3%,其中化工产品和农产品分别占 74.0% 和 26.0%;以废弃物的形式最后输入到生态环境中的磷通量为 0.02 万 t,占总输入的 1.7%,其中进入土壤和水体的磷通量分别占 54.2% 和 45.8%。

工业园区主要通过废水形式排放磷,而排入水体的磷会对水体造成富营养化的压力,所以这里只考虑水体负荷,如表 1 所示。产业对水体造成的负荷最大,但 3 部分磷排放源对水体造成的负荷相差并不大,主要原因在于虽然园区产业通过废水排放了大量的磷,但企业自备污水处理设施和园区污水处理厂的组合处理模式削减了产业水体负荷的 88.4%,相比较而言,园区生活废水的磷处理率较低,仅为 62.1%。另外,不经处理直接排入水体的园区降水给水体造成了较大负荷,占园区水体总负荷的 32.8%,这一部分磷主要来自于降水对

园区地面的冲刷,其中包含企业无组织排放的磷和职工未经清运的生活垃圾所含的磷。

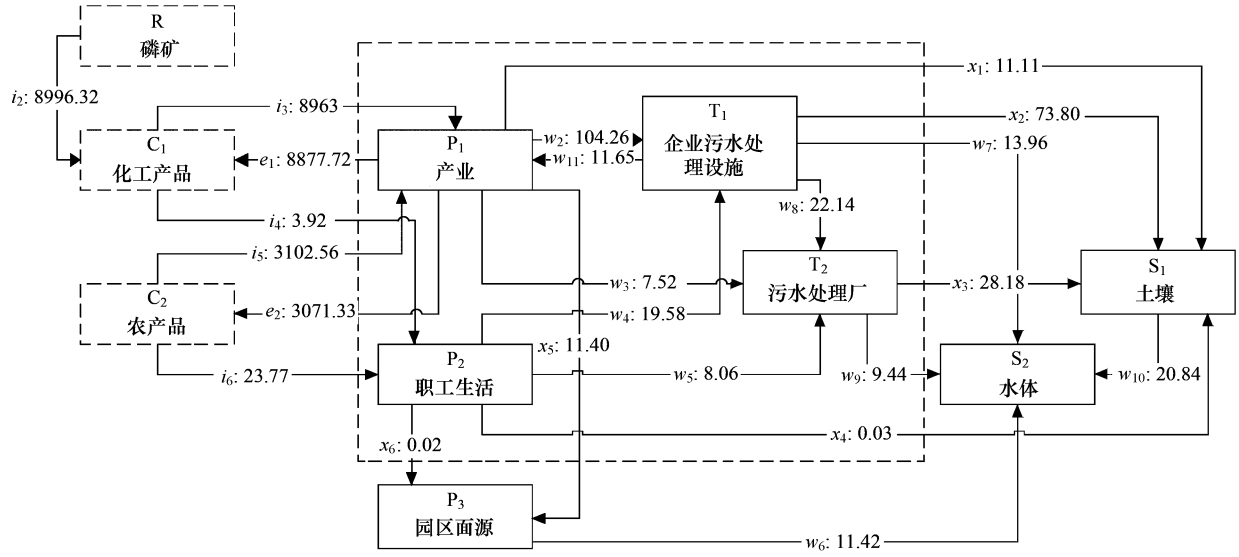


图 2 2008 年宜兴经济开发区磷物质流网络/t

Fig. 2 Phosphorus flow network of Yixing Economic Development Zone in 2008 /t

表 1 2008 年宜兴经济开发区磷物质水体负荷

Table 1 Water phosphorus pollution loads of Yixing Economic Development Zone in 2008

项目 Item	废水磷排放量 Wastewater phosphorus emissions/t	水体负荷量 Water loads/t	磷去除率 Phosphorus removal ratio/%	水体负荷比例 Water loads ratio/%
产业 Industry	111.78	12.93	88.4	37.1
职工生活 Domestic sources	27.64	10.47	62.1	30.1
园区面源 Non-point source	11.42	11.42	0	32.8
合计 Total	150.84	34.82	76.9	100

4.3 产业系统的磷代谢分析

本节进一步分析排磷产业中的关键行业,根据宜兴经济开发区包含的主要行业类型,本文将生产过程中涉及磷的“产业”细分为 7 类行业:磷酸行业、磷系阻燃剂行业、洗涤剂行业、印染行业、食品加工行业、机械行业(磷化环节)和其他行业,其中“其他”主要考虑大量使用含磷软水剂或洗涤剂的热电行业,如图 3 所示。

在宜兴经济开发区,印染、食品加工和机械(磷化)是主要的废水磷排放行业,合计占产业磷排放总量的 86.8%,3 个行业对水体造成的负荷占园区产业对水体造成的总负荷的 77.2%。同时,这 3 个行业废水的磷去除率也较高,印染废水磷去除率为 90.4%,食品加工废水磷去除率为 91.8%,机械(磷化)废水磷去除率为 81.5%,工业废水总体磷去除率为 88.4%,说明园区主要排磷企业具有较完善的污水处理环节,除磷效果较好。下面将对宜兴经济开发区整体的污水处理组合模式进行分析。

4.4 污水处理系统的磷代谢分析

园区有污水处理厂,同时企业有自备污水处理设施,不同的污水处理模式的组合形成了复杂的污水处理网络。为了考察宜兴经济开发区污水处理组合模式,本文将“企业污水处理设施”进一步细分为“物理处理”、“物化处理”和“生物处理”,并根据当地的实际情况,将“污水处理厂”节点划分为“清源污水处理厂”和“欧亚华都污水处理厂”,如图 4 所示。

从磷通量的角度考虑,直接由园区点源(产业和职工生活)以废水形式产生的磷通量为 139.42t,其中 26.0% 经企业自行处理后排放,41.2% 经企业预处理后回用,21.7% 经企业预处理后接入污水处理厂,11.2% 直接排入污水处理厂。而在企业处理环节,14.3% 为物理处理,4.5% 为物化处理,81.3% 为生物处理,所以有

约 5% 的磷只经过简单的物理和物化处理直接排入水体。

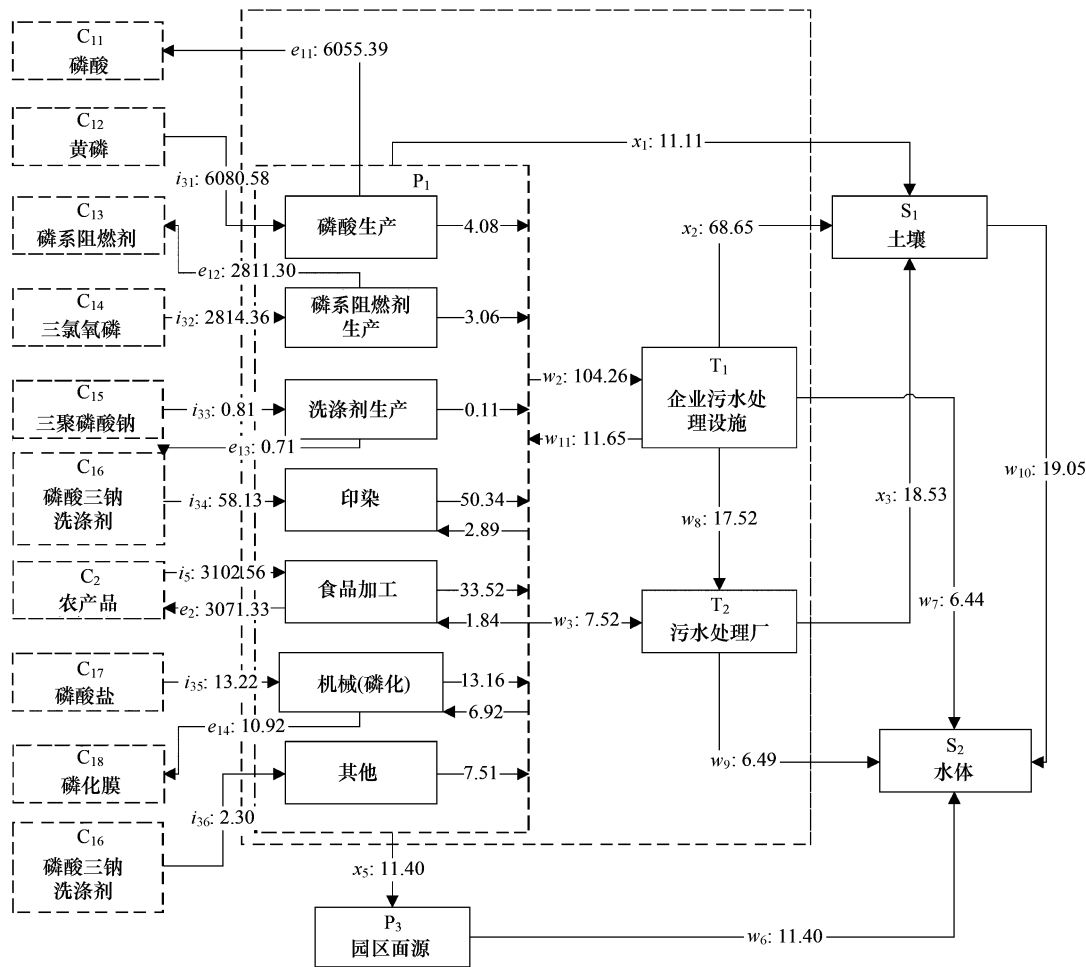


图 3 2008 年宜兴经济开发区工业系统磷物质流网络/t

Fig. 3 Phosphorus flow network of industrial system of Yixing Economic Development Zone in 2008 /t

表 2 2008 年宜兴经济开发区工业磷物质水体负荷

Table 2 Water phosphorus pollution loads of industrial system of Yixing Economic Development Zone in 2008

行业 Industry	废水磷排放量 Wastewater phosphorus emissions/t	水体负荷量 Water loads/t	磷去除率 Phosphorus removal ratio/%	水体负荷比例 Water loads ratio/%
磷酸生产 Phosphoric acid production	4.08	1.11	72.8	8.6
磷系阻燃剂生产 Phosphorus flame retardant manufacturing	3.06	0.25	91.8	2.0
洗涤剂生产 Detergent production	0.11	0.02	81.8	0.2
印染 Printing and dyeing	50.34	4.81	90.4	37.2
食品加工 Food processing	33.52	2.74	91.8	21.2
机械(磷化) Machinery (Phosphating)	13.16	2.43	81.5	18.8
其他 Others	7.51	1.56	79.2	12.1
合计 Total	111.78	12.93	88.4	100

从磷去除率的角度考虑,企业处理环节去除了废水总磷(139.42t)的 52.9%,园区污水处理厂又去除了废水总磷(139.42t)的 20.2%,磷总体去除率为 73.1%。考察各处理环节的磷去除效率,企业自备污水处理设施磷去除率仅约60%,其中物理处理环节的平均磷去除率约5%,物化处理环节的平均磷去除率约11%,

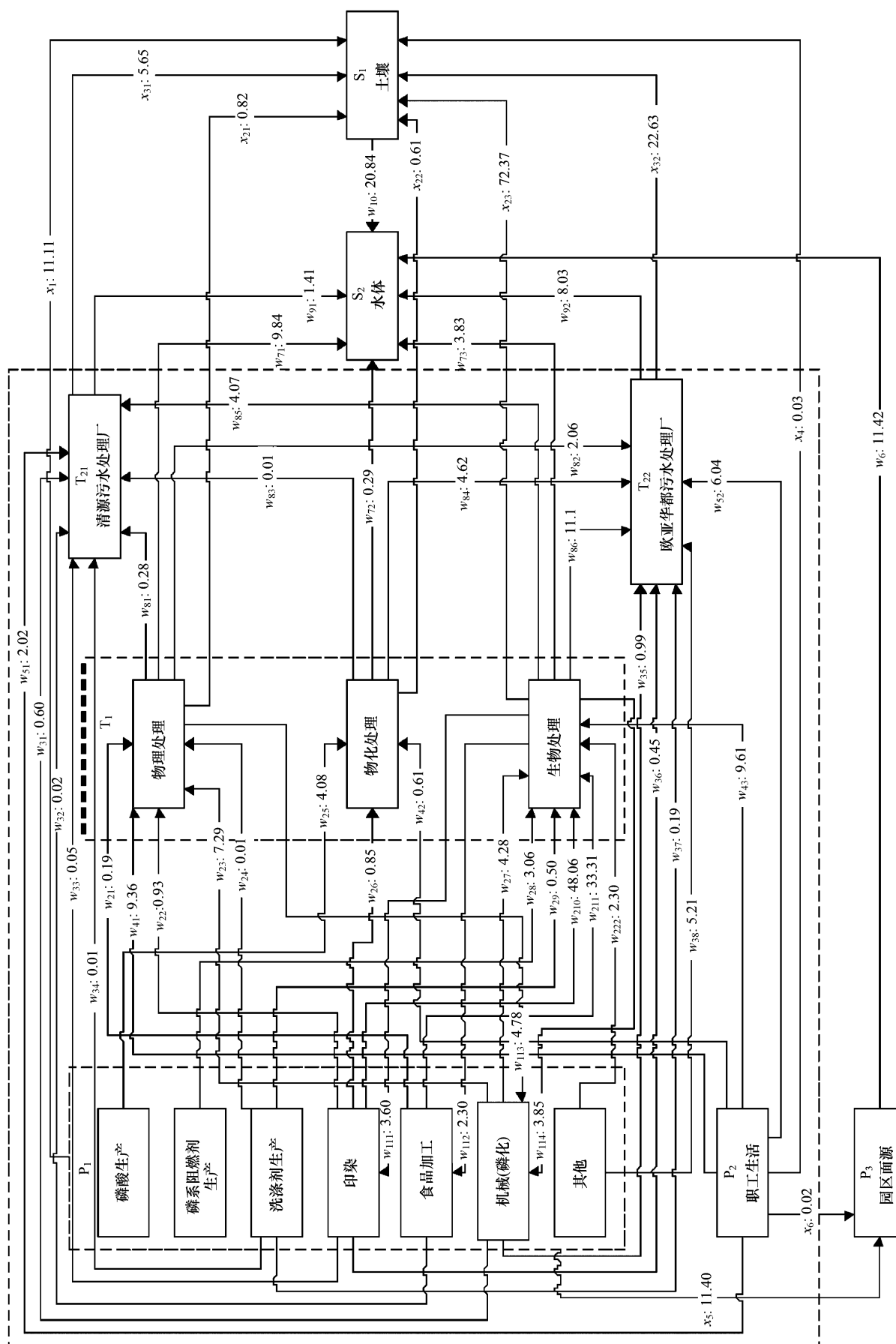


图4 2008年宜兴经济开发区污水处理设施磷物质流网络/t

Fig.4 Phosphorus flow network of wastewater treatment system of Yixing Economic Development Zone in 2008/t

生物处理环节的平均磷去除率约 75% ;污水处理厂磷去除率约 75% ,其中清源污水处理厂的磷去除率约 80% ,欧亚华都污水处理厂的磷去除率约 74% ,企业内部污水处理环节的磷去除率较低。

从企业主要污水处理组合模式和企业数量考虑,如表 3 所示。这里的“其他”为园区中以上 6 类行业以外的所有企业。可见宜兴经济开发区大部分企业所采取的主要污水处理组合模式为简单的物理处理。这些企业大都是生产废水较少的企业,但是企业的废水包括生产废水和生活废水,即使其生产废水量较少或含磷量较低,而简单的物理处理也不能有效的处理其生活污水中的磷,这也是园区生活污水磷去除率低的主要原因。

表 3 宜兴经济开发区的综合污水处理组合模式

Table 3 Wastewater treatment combined mode of Yixing Economic Development Zone

行业 Industry	企业总数 Number of enterprises	主要污水处理组合模式 Main wastewater treatment combined mode	次要污水处理组合模式 Secondary wastewater treatment combined mode
磷酸生产 Phosphoric acid production	1	物化处理 + 污水处理厂	
磷系阻燃剂生产 Phosphorus flame retardant manufacturing	1	生物处理 + 污水处理厂	
洗涤剂生产 Detergent production	20	污水处理厂	物理处理 + 污水处理厂
印染 Printing and dyeing	25	生物处理 + 污水处理厂	物理处理
食品加工 Food processing	9	物理处理	生物处理 + 污水处理厂
机械(磷化) Machinery (Phosphating)	74	物理处理	污水处理厂
其他 Others	348	物理处理	污水处理厂

5 结论和建议

通过宜兴经济开发区磷代谢分析,本文得出如下结论和建议:(1) 污水处理设施和污水处理厂有效削减了产业的水体负荷,而不经处理直接排入水体的园区降水给水体造成了较大负荷,所以工业园区需加强对园区生活垃圾和企业无组织排放的管理。同时宜兴经济开发区生活污水的磷去除率较低,需加强对生活污水的管理;(2) 在宜兴经济开发区,印染、食品加工和机械(磷化)是主要的废水磷排放行业;(3) 企业自备污水处理设施磷去除率仅约 60% ,污水处理厂磷去除率约 75% ,企业内部污水处理环节的磷去除率较低。另外,大部分企业只有简单的处理设施,使得园区点源通过废水排放的磷中约 5% 只通过简单的处理后直排入水体,建议完善企业的简单处理设施,同时园区污水处理厂提高企业纳管率,以提高污水的磷去除率。

References:

- [1] Wei Y, Shi L. Elemental flows analysis in China: human or natural dominance. *Resources Science*, 2009, 31(8): 1286-1294.
- [2] Xu Z X, Qu J N, Fu W, Li H Z. Control route and policy approach of waste water in industrial area. *Environmental Protection*, 2005, (1): 30-32.
- [3] Ernest A L. Creating by-product resource exchanges: strategies for eco-industrial parks. *Journal of Cleaner Production*, 1997, 5(1/2): 57-65.
- [4] Chertow M R. Uncovering industrial symbiosis. *Journal of Industrial Ecology*, 2007, 11(1): 11-30.
- [5] Yuichi M. Systematic description of material flows among anthrosphere and ecosphere. *Environmental Science*, 2005, 18(4), 411-418 (in Japanese)
- [6] Ayres R U, Ayres L W. Material flow analysis // Ayres R U, Ayres L W eds. *Industrial Ecology: Towards Closing the Materials Cycle*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing Limited, 2002: 79-90.
- [7] Ayres R U, Ayres L W. Substance flow analysis methodology // Ayres R U, Ayres L W eds. *Industrial Ecology: Towards Closing the Materials Cycle*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing Limited, 2002: 91-101.
- [8] Shinichiro F, Yuzuru M. Development of estimating method of global carbon, nitrogen, and phosphorus flows caused by human activity. *Ecological Economics*, 2009, 62(3/4): 399-418.
- [9] Vaclav S. Phosphorus in the environment: natural flows and human interferences. *Annual Review of Energy and Environment*, 2000, 25(1): 53-88.

- [10] 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(12): 811-820.
- [11] Liu Y, Chen J N, Molb A P J, Ayres R U. Comparative analysis of phosphorus use within national and local economies in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, 51(10): 454-474.
- [12] Liu Z, Hu S Y, Chen D J, Shen J Z, Li Y R. Material flow analysis on China's phosphor resources. *Modern Chemical Industry*, 2005, 25(6): 1-7.
- [13] Liu Y, Chen J N. Substance flow analysis of phosphorus cycle system in China. *China Environmental Science*, 2006, 26(2): 238-242.
- [14] Liu Y, Chen J N. Substance flow analysis on phosphorus cycle in Dianchi basin, China. *Environmental Science*, 2006, 27(8): 1549-1553.
- [15] Liu C, Wang Q, Mizuochi M, Wang K, Lin Y M. Human behavioral impact on nitrogen flow — a case study of the rural areas of the middle and lower reaches of Changjiang River, China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2008, 125(12): 84-92.
- [16] 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(8/10): 919-934.
- [17] Jeong Y, Kazuyo M, Kubo H, Pak J, Nagasaka T. Substance flow analysis of phosphorus and manganese correlated with South Korean steel industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 2009, 53(4): 479-489.
- [18] Schmid N T, Bader H, 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.
- [19] Antikainen R, Lemola R, Nousiainen J, 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(10): 287-305.
- [20] Chen M, Chen J N, Sun F. Agricultural phosphorus flow and its environmental impacts in China. *Science of the Total Environment*, 2008, 405(1): 140-152.
- [21] Sabine B. Feeding the city: food consumption and flow of nitrogen, Paris, 1801 — 1914. *Science of the Total Environment*, 2007, 375(1): 48-58.
- [22] Zheng X C, Li Y X. *Waste Water Phosphorus and Nitrogen Removal Technology*. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998: 1-5.
- [23] Kleijn R. In = out: the trivial central paradigm of MFA?. *Journal of Industrial Ecology*, 2000, 3(2/3): 8-10.
- [24] Fan Y P, Hu S Y, Chen D J, Li Y R, Shen J Z. Building of phosphorus metabolism network in different historic periods in China, *Modern Chemical Industry*, 2007, 27(2): 10-14.
- [25] Mao Y H, Yang Z J. *Industrial Pollution Accounting*. Beijing: China Environmental Science Press, 2007: 255 — 460.
- [26] Beijing Agricultural University. *Fertilizer Handbook*. Beijing: Agricultural Press, 1979: 5-15.
- [27] Tang S Y, Dai Y Z, Liu Z Y, Zhou Z M. *Food Industrial Waste Water Treatment*. Beijing: Chemical Industry Press, 2001.

参考文献:

- [1] 韦艳, 石磊. 中国国家尺度元素流的主导因素分析. *资源科学*, 2009, 31(8): 1286-1294.
- [2] 徐祖信, 屈计宁, 傅威, 李怀正. 工业区污水治理路线和政策探讨. *环境保护*, 2005, (1): 30-32.
- [12] 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): 1-7.
- [13] 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.
- [14] 刘毅, 陈吉宁. 滇池流域循环系统的物质流分析. *环境科学*, 2006, 27(8): 1549-1553.
- [22] 郑兴灿, 李亚新. *污水除磷脱氮技术*. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 1-5.
- [24] 樊银鹏, 胡山鹰, 陈定江, 李有润, 沈静珠. 不同历史时期中国磷元素代谢网络的构建. *现代化工*, 2007, 27(2): 10-14.
- [25] 毛应淮, 杨子江. *工业污染核算*. 北京: 中国环境科学出版社, 2007: 255-460.
- [26] 北京农业大学. *肥料手册*. 北京: 农业出版社, 1979: 5-15.
- [27] 唐受印, 戴友芝, 刘忠义, 周作明. *食品工业废水处理*. 北京: 化学工业出版社, 2001.