

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第 30 卷 第 22 期
Vol.30 No.22
2010



中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 30 卷 第 22 期 2010 年 11 月 (半月刊)

目次

高温对水稻叶片蛋白质表达的影响·····	曹云英,段 骅,王志琴,等 (6009)
茶园间作柑桔杨梅或吊瓜对叶蝉及蜘蛛类群数量和空间格局的影响·····	叶火香,崔 林,何迅民,等 (6019)
鼠尾藻生长与生殖的权衡·····	张树宝,唐永政,王志芳,等 (6027)
不同氮素水平下超高产夏玉米冠层的高光谱特征·····	陈国庆,齐文增,李 振,等 (6035)
近 100 年植被破坏侵蚀环境下土壤质量退化过程的定量评价 ·····	郑粉莉,张 锋,王 彬 (6044)
毛乌素沙地南缘沙漠化临界区域土壤养分的空间异质性·····	邱开阳,谢应忠,许冬梅,等 (6052)
CO ₂ 浓度倍增对干旱胁迫下黄瓜幼苗膜脂过氧化及抗氧化系统的影响 ·····	李清明,刘彬彬,艾希珍 (6063)
小兴安岭阔叶红松林粗木质残体空间分布的点格局分析·····	刘妍妍,金光泽 (6072)
光照对鄂东南 2 种落叶阔叶树种幼苗生长、光合特性和生物量分配的影响 ·····	杨 莹,王传华,刘艳红 (6082)
不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响·····	林超文,罗春燕,庞良玉,等 (6091)
黄土残塬沟壑区流域次生植被物种分布的地形响应·····	王盛萍,张志强,张建军,等 (6102)
农村土地经营权流转对区域景观的影响——以北京市昌平区为例·····	刘 同,李 红,孙丹峰,等 (6113)
基于农户响应的北方农牧交错带生态改善策略·····	徐建英,柳文华,常 静,等 (6126)
滨岸不同植物配置模式的根系空间分布特征·····	仲启铖,杜 钦,张 超,等 (6135)
三江平原小叶章湿地剖面土壤微生物活性特征·····	杨桂生,宋长春,宋艳宇,等 (6146)
不同水分处理对湿地松幼苗生长与根部次生代谢物含量的影响·····	李昌晓,魏 虹,吕 茜,等 (6154)
生活污水慢渗生态处理对土壤及杨树生长的影响·····	白保勋,杨海青,樊 巍,等 (6163)
玉米连作及其施肥对土壤微生物群落功能多样性的影响·····	时 鹏,高 强,王淑平,等 (6173)
茶园 4 种半翅目主要害虫与其捕食性天敌的关系·····	周夏芝,毕守东,柯胜兵,等 (6183)
采煤塌陷地不同施肥处理对土壤微生物群落结构的影响·····	李金岚,洪坚平,谢英荷,等 (6193)
典型区域果园表层土壤 5 种重金属累积特征·····	杨世琦,刘国强,张爱平,等 (6201)
工业园区氮代谢——以江苏宜兴经济开发区为例·····	武娟妮,石 磊 (6208)
公路绿化带对路旁土壤重金属污染格局的影响及防护效应——以山西省主要公路为例·····	王 慧,郭晋平,张芸香,等 (6218)
奥运期间北京 PM _{2.5} 、NO _x 、CO 的动态特征及影响因素 ·····	曾 静,廖晓兰,任玉芬,等 (6227)
新疆绿洲农田土壤-棉花系统 9 种矿质元素生物循环特征 ·····	韩春丽,刘 娟,张旺锋,等 (6234)
甘肃省黄土高原旱作玉米水分适宜性评估·····	姚小英,蒲金涌,姚茹莘,等 (6242)
基于粪便 DNA 的马鹿种群数量和性比 ·····	田新民,张明海 (6249)
专论与综述	
水生态功能分区研究中的基本问题·····	唐 涛,蔡庆华 (6255)
土壤水分遥感监测研究进展·····	杨 涛,官辉力,李小娟,等 (6264)
中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施·····	邓振镛,王 强,张 强,等 (6278)
问题讨论	
城市物质流分析框架及其指标体系构建·····	陈 波,杨建新,石 焱,等 (6289)
研究简报	
湖南会同不同退耕还林模式初期碳密度、碳贮量及其空间分布特征 ·····	田大伦,尹刚强,方 晰,等 (6297)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 300 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 32 * 2010-11

工业园区氮代谢 ——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:以江苏宜兴经济开发区为例, 基于物质流分析构建了工业园区的氮代谢网络和分析方法, 解析了工业园区中产业系统和污水处理系统的氮代谢途径和通量。研究表明, 氮物质流系统的源和汇比磷物质流系统多, 流量大且较为集中; 氮肥生产、纺织印染和食品加工行业是宜兴经济开发区的主要氮排放源; 企业自备处理设施除氮效果较好, 去除率约 79%, 而污水处理厂由于设计和运行等原因氮去除率较低, 约 57%; 生活污水氮去除率低; 直接排入水体的降水造成的水体负荷约 28%。由此, 建议企业继续完善企业内处理设施, 对集中污水处理厂进行脱氮除磷提标改造, 同时加强对园区内生活污水、生活垃圾和企业固体排放物的管理。

关键词:氮代谢; 工业园区; 物质流分析; 江苏宜兴经济开发区

Nitrogen metabolism in industrial parks: a case 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. Based on previous research of phosphorus metabolism, this paper established a hierarchical nitrogen metabolism framework for industrial parks, by applying substance flow analysis methods. Firstly, a metabolic network was established at the level of the entire park, comprising the resource systems, environmental systems, and the park's internal and external socio-economic systems. The park's internal socio-economic systems comprise nitrogen conversion modules and treatment modules. Nitrogen conversion modules contain transportation, industrial systems, domestic sources and ecological process. Nitrogen treatment modules contain water treatment which include pre-processing facilities of enterprises and wastewater plants, and solid waste treatment which include incineration, landfill and hazardous waste treatment. Then, more detailed metabolic networks were delineated for industrial systems and wastewater treatment systems. Industrial systems further divide into six industrial types: heating and power plant, nitrogen fertilizer production, chemical industry, printing and dyeing, food processing, and other industries. Wastewater treatment systems further divided into physical 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) compared to phosphorus flow systems, nitrogen flow systems contain more modules, and also the flow is much greater and centralized; b) nitrogen fertilizer production, printing and dyeing and food

基金项目:国家水体污染控制与治理重大专项; 工业园区清洁生产和污染源控制技术与工程示范(2008ZX07313-005); 国家重点实验室专项基金课题(10Y03ESPCT)

收稿日期:2010-05-03; **修订日期:**2010-08-25

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

processing, were major water nitrogen-emission industries, accounting for 96.5% of total industrial water nitrogen-generation of the entire park, though however, wastewater of these industries goes through efficient treatment processes; c) opposed to phosphorus treatment, wastewater plants had a lower (about 57%) nitrogen removal ratio than pre-processing facilities of enterprises (about 79%), because of design and operation problems; d) most enterprises of the park have only simple wastewater pre-processing facilities (physical treatment), which can only remove 6% of the nitrogen, and about 56t water nitrogen-generation of the park goes directly into the water bodies just after simple pre-processing; e) untreated precipitation into water bodies causes a high pollution load in water bodies (around 28%), because of the low management ratio of domestic waste and solid waste of enterprises; and f) domestic sewage has low nitrogen removal ratio (about 54%), due to the simple pre-processing of enterprises. Following these results and further discussion, some suggestions were put forth: a) simple wastewater pre-processing and wastewater plant should be improved for higher nitrogen removal ratio; b) 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 c) domestic waste and industrial solid waste of enterprises should be well managed and treated to avoid nitrogen going directly into water body through precipitation.

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

环境与发展冲突的根源在于人类活动对物质自然循环的强烈干扰。氮和磷是受到人类社会经济活动强烈影响的典型元素。与自然循环过程相比,氮和磷在社会经济系统中的代谢通量显著增大,代谢途径趋于复杂化,大量排入生态环境后导致了水体富营养化等环境问题^[1-3]。当前,我国 31 个主要淡水湖泊均存在严重的富营养化问题^[4]。运用物质代谢分析方法解析氮、磷等元素在社会经济系统中的代谢途径、结构与通量,有助于寻求减缓水体富营养化的举措^[5-7]。

工业园区是典型的社会经济系统,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,是水污染控制与治理的焦点对象。本研究的目标为江苏宜兴经济开发区,该开发区正处于快速发展阶段,前期聚集的主要行业有纺织印染、机械加工和包括大型氮肥厂在内的化工行业,同时又位于富营养化严重的太湖地区,所以以宜兴经济开发区为案例开展氮、磷代谢分析对工业园区清洁生产和水污染控制具有重要意义。

本研究前期开展了工业园区尺度的磷代谢分析^[8],本文在此基础上,综合运用了针对特定区域系统的物质流分析(MFA)^[9]和针对特定物质的物质流分析(SFA)^[10],以江苏宜兴经济开发区为例开展了工业园区尺度的氮代谢分析。

1 氮代谢分析方法

1.1 系统边界

物质流分析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 4 个基本步骤。

本文的研究对象是工业园区这一典型的社会经济系统,研究目的是考察氮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 2008 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。

1.2 代谢结构

氮代谢系统包含 4 个子系统:资源系统、环境系统、社会经济系统以及与之进行物质交换的区外社会经济系统。每个子系统可以进行细分,形成 5 级结构(图 1)。与磷不同的是,氮代谢途径更加复杂,代谢节点更多,其中大气和能源是氮代谢过程的重要节点,所以相对于磷代谢系统,氮代谢系统在区外社会经济子系统增加了能源模块,在环境子系统增加了大气模块,图中以虚线框表示。此外,本文只考虑工业园区社会经济系统

的物质代谢,相应的自然流动如大气沉降、地表挥发、底泥释放、生物固氮等不纳入本文的研究范畴。

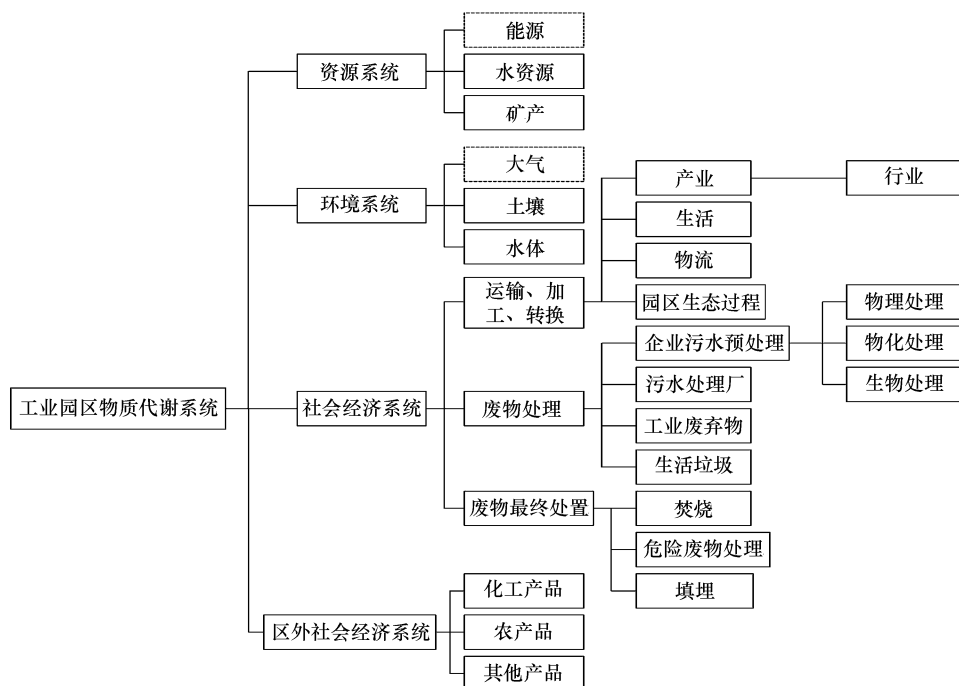


图1 工业园区物质代谢系统结构图

Fig.1 Structure for substance metabolism of industrial park

在上述结构基础上,参考城市和流域等其它尺度研究的氮代谢结构^[5-7,11-16],构建工业园区氮代谢的一般拓扑结构(图2)。其中包含5类节点和5类流。节点方面,区外社会经济系统中与园区有物质供应关系的节点以C表示;在园区中主要对氮进行加工、消费和再分配的节点以P表示;对园区含氮废弃物进行处理的环节以T表示;对园区固废进行最终处置的环节以D表示;氮最终归属部门以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氮流以*w*表示;以固废形式流动到土壤或园区面源的氮流以*x*表示;以氮氧化物或氮气的方式与大气进行交换的流以*n*表示。

1.3 量化方法

SFA所遵循的基本原理是热力学第一定律,总系统、子系统以及节点都严格遵循物质守恒定律^[17]。在建立节点的平衡方程后,通过优先计算容易获取数据的变量,逐渐降低方程维数,依次获得所有节点的存量及其相关流量。本研究中,以园区生态过程(P4)、污水处理厂(T2)、生活垃圾(T4)和废物处理处置(D1、D2、D3)节点为源头的元素流在园区层面计算,除此之外的其他流股均采用自下而上(Bottom-up)的方法,以企业为基本单位进行量化,首先刻画企业层面的代谢过程,之后将相同类型的流股进行加和。本文只开展工业园区层面上的稳态氮代谢研究,即社会经济系统的节点都不存在系统累积,总输入严格等于总输出^[18]。借鉴文献^[11,19],表1列出了计算公式。

原则上,公式中所有的参数均需采用研究对象的特有参数,然而往往由于数值难以全部获得,所以在不影响主要研究目的的前提下可以对部分参数采用平均值。本文主要解析工业园区工业废水中的氮代谢情况,所以涉及面源流、固废流和废气流的部分参数采用了文献中的平均值或典型值(表2)。

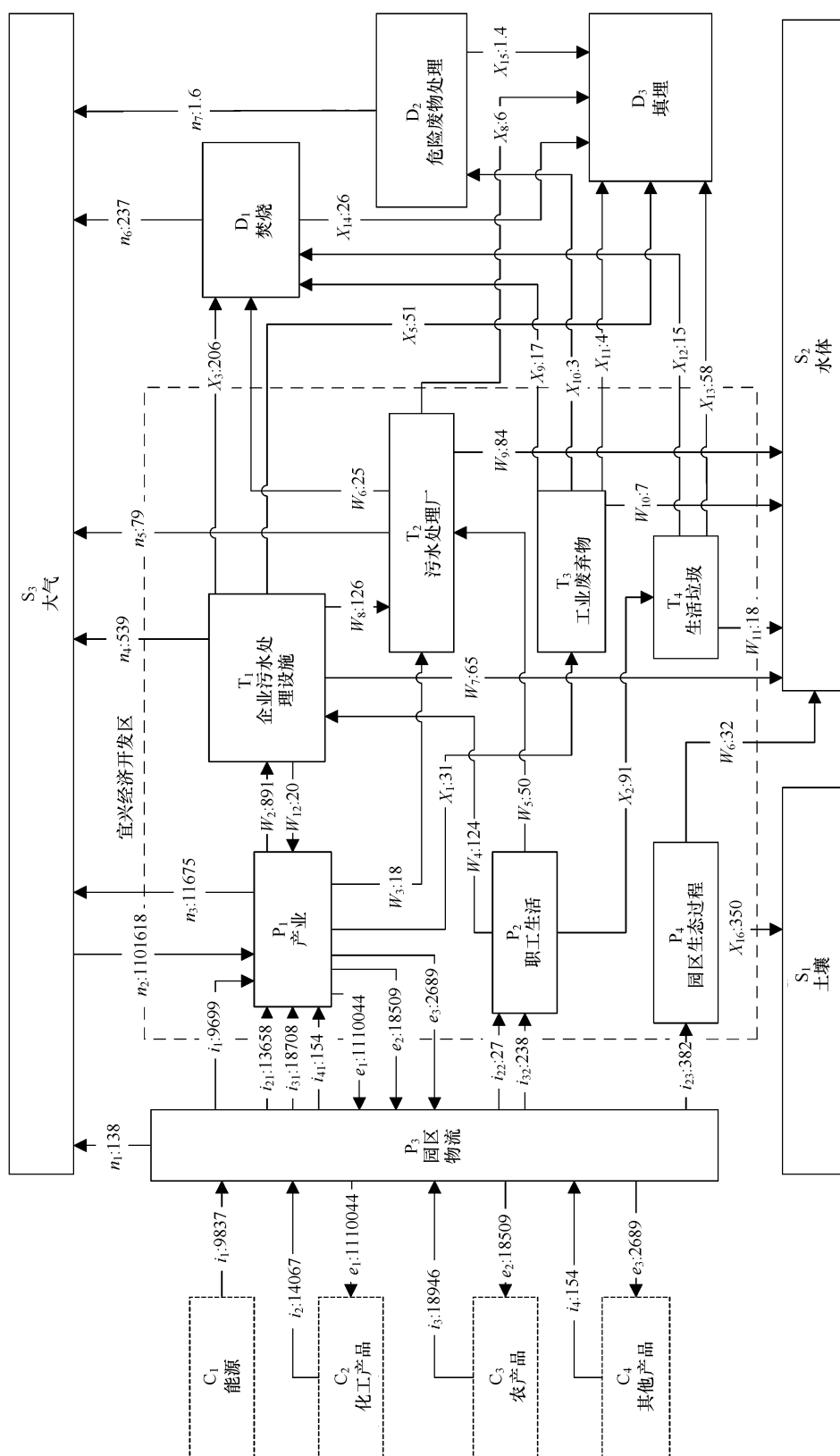


图2 2008年宜兴经济开发区氮物质流网络(单位: t)
Fig. 2 Nitrogen flow network of Yixing Economic Development Zone in 2008 (unit: t)

表 1 工业园区氮物质代谢计算公式

Table 1 Formula for nitrogen metabolism of industrial park

原料/产品 Material/product	计算公式 Formula
原料/产品 Material/product	以原料或产品形式的氮输入(或输出量): i_1 (或 e_1) = Σ (物质贸易量 $\times$ 物质平均氮含量)
废水 Wastewater	工业生产以及污水处理设施氮排放量: w_i ($i=1-3, 7-9$) = Σ (废水氮含量 $\times$ 排放到该物质流接收节点的废水量) 职工生活废水氮排放量: w_i ($i=4-5$) = Σ (人均排氮量 $\times$ 排放到该物质流接收节点的人数) 园区生态过程废水氮排放量: $w_6 = (i_{23} + w_{14} + w_{15}) \times$ 绿化面源排放氮进入水体的比例 工业固废(或生活垃圾)排入水体氮量: w_{10} (或 w_{11}) = x_1 (或 x_2) $\times$ (1-垃圾清运率) 产业回用水的回氮量: w_{12} (或 w_{13}) = $\Sigma[(w_2 + w_4)(或w_3 + w_5) \times (1 - \text{污水氮去除率}) \times \text{回用水占废水排放量的比例} \times \text{回用到产业环节的比例}]$ 园区生态过程回用水的回氮量: w_{14} (或 w_{15}) = $\Sigma[(w_2 + w_4)(或w_3 + w_5) \times (1 - \text{污水氮去除率}) \times \text{回用水占废水排放量的比例} \times \text{回用到园区生态过程的比例}]$
固废 Solid waste	产业固体废弃物氮排放量: $x_1 = \Sigma$ (企业固废排放量 $\times$ 固废氮含量) 职工生活垃圾氮排放量: $x_2 = \Sigma$ (人均生活垃圾排氮量 $\times$ 企业职工数) 污泥中氮焚烧处理量: x_3 (或 x_6) = $(w_2 + w_4)(或w_3 + w_5) \times$ 污水氮去除率 $\times$ 氮进入污泥的比例 $\times$ 进行焚烧处理的比例 污泥中氮危险废物处理量: x_4 (或 x_7) = $(w_2 + w_4)(或w_3 + w_5) \times$ 污水氮去除率 $\times$ 氮进入污泥的比例 $\times$ 危险废物处理比例 污泥中氮填埋处理量: x_5 (或 x_8) = $(w_2 + w_4)(或w_3 + w_5) \times$ 污水氮去除率 $\times$ 氮进入污泥的比例 $\times$ 进行填埋处理的比例 固废中氮焚烧处理量: x_9 (或 x_{12}) = x_1 (或 x_2) $\times$ 垃圾清运率 $\times$ 进行焚烧处理的比例 固废中氮危险废物处理量: $x_{10} = x_1 \times$ 垃圾清运率 $\times$ 危险废物处理的比例 固废中氮填埋处理量: x_{11} (或 x_{13}) = x_1 (或 x_2) $\times$ 垃圾清运率 $\times$ 填埋处理的比例 固废处理氮填埋量: x_{14} (或 x_{15}) = 焚烧量 $\times$ 焚烧后氮排入灰渣的比例 园区生态过程土壤氮排放量: $x_{16} = (i_{23} + w_{14} + w_{15}) \times$ 绿化面源排放氮进入土壤的比例
废气 Air emission	园区物流大气氮排放量: $n_1 =$ 交通工具燃料耗用量 $\times$ 单位燃料大气氮排放量 大气氮输入量: $n_2 = \Sigma$ (产业燃料耗用量 $\times$ 单位燃料燃烧大气氮输入量) + 氮肥生产大气氮输入量 产业大气氮排放量: $n_3 = \Sigma$ (燃料耗用量 $\times$ 燃料氮含量 $\times$ 燃料含氮排放比例) 污水处理大气氮排放量: n_4 (或 n_5) = $(w_2 + w_4)(或w_3 + w_5) \times$ 污水氮去除率 $\times$ 氮进入大气的比例 固废焚烧大气氮排放量: n_6 (或 n_7) = 处理量 $\times$ 氮排入大气的比例

表 2 公式中的参数

Table 2 Parameters in the formula

参数 Parameters	单位 Unit	数值 Value	来源 Source
物质平均氮含量 Average nitrogen content of material	%	根据物质分子式确定	分子式
生活废水人均排氮量 Per capita emission of nitrogen in sewage	kg/d	0.012	[11, 20]
绿化面源排放氮进入水体的比例 Proportion of fertilizer nitrogen into the water body	%	0.1	[21]
人均生活垃圾排氮量 Per capita emission of nitrogen in domestic waste	kg/d	0.012	[13]
废水去除氮进入污泥的比例 Proportion of removed nitrogen into the sludge	%	物化/活性污泥 100	AO/SBR 25—30 [20]
生活垃圾焚烧处理的比例 Proportion of domestic waste incineration	%	0.2	[22]
生活垃圾填埋处理的比例 Proportion of domestic waste landfill	%	0.8	[22]
焚烧后氮排入灰渣比例 Proportion of nitrogen into ash from incineration	%	0.1	[11]
绿化面源排放氮进入土壤的比例 Proportion of fertilizer nitrogen into soil	%	0.9	[21]
交通工具单位燃料氮排放量 Nitrogen emission in transportation	g/kg	重型柴油车(NOx) 38.41	[23]
燃料燃烧过程大气氮输入量 Nitrogen input in the burning of fuel	g/kg	公式	[24]
燃料氮含量 Average nitrogen content of fuel	%	烟煤 1.55 无烟煤 0.15 重油 0.14	[24]
燃料含氮排放比例 Proportion of nitrogen emission from the fuel	%	15—40	[24]
废水去除氮进入大气的比例 Proportion of removed nitrogen into air	%	物化/活性污泥 0	AO/SBR 70—75 [20]
焚烧氮排入大气比例 Proportion of nitrogen into air from incineration	%	0.9	[11]

2 宜兴经济开发区氮代谢分析

2.1 数据来源

根据流通股量化方式不同,数据的获取方式分为企业、污水处理厂和园区 3 个层面。企业层面的数据通过统计资料和调查问卷获得;污水处理厂层面的数据通过统计资料和访谈获得;园区层面的数据通过统计资料和文献^[25-28]获得。其中统计资料包括污染源普查、经济普查、清洁生产报告等。

2.2 园区层面的氮代谢分析

宜兴经济开发区园区层面的氮代谢结构如图 2 所示。

2008 年园区的氮输入量为 114.46 万 t,由于园区内有较大的氮肥企业,所以以大气形式输入氮 110.16 万 t,占了投入园区总氮的 96.2%,其余的氮以贸易形式输入,其中能源占 22.9%,化工产品占 32.7%,农产品占 44.1%,其他产品占 0.4%。从系统的物质输出看,以产品形式输出园区的氮为 113.12 万 t,占总输入的 98.8%,其中化工产品 98.1%,农产品 1.6%,其他产品 0.3%;以废弃物的形式输出到生态环境中的氮通量为 1.34 万 t,占总输入的 1.2%,其中进入大气、土壤(包括填埋)和水体的氮通量分别占 94.8%、3.7%和 1.5%,如图 3 所示。

相对磷物质流系统,氮物质流系统的源和汇较多,流量较大,物质投入、产品输出和环境输出三者的流量均约为磷流通量的 50—100 倍。在物质投入方面,氮和磷的区外经济系统输入相差不大,氮流量大的主要原因在于人工固氮;在物质输出方面,两者都主要以化工产品输出,同时氮以产品输出的比例更高,说明园区中氮元素的大量流通较为集中,便于管理和处理,而磷元素相对分散,是管理的主要对象。

表 3 2008 年宜兴经济开发区氮物质水体负荷
Table 3 Water nitrogen pollution loads of Yixing Economic Development Zone in 2008

	废水氮产生量 Wastewater nitrogen generation/t	氮去除率 Nitrogen removal ratio/%	水体负荷 Water loads	
			负荷量/t	比例 Ratio/%
热电行业 Heating and power plant	1.1	64.8	0.4	0.2
氮肥生产 Nitrogen fertilizer production	385.0	93.4	25.4	12.4
化工产业 Chemical industry	27.5	71.8	3.8	1.8
纺织印染 Printing and dyeing	286.3	85.5	39.0	19.0
食品加工 Food processing	206.3	94.1	5.2	2.5
其他 Others	3.0	46.0	1.6	0.8
产业合计 Industry	909.3	90.2	75.4	36.7
职工生活 Domestic sources	174.0	54.3	73.0	35.5
园区生态过程 Ecological process	32.0	0	32.0	15.6
其他 Others	25.0	0	25.0	12.2
合计 Total	1140.3	80.2	205.4	100

考虑通过废水排放的氮,如表 3 所示。产业对水体造成的负荷最大,但与职工生活造成的水体负荷差距不大,园区面源的水体负荷相对较小。主要原因在于虽然园区产业通过废水排放了大量的氮,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 90.2%,相比较而言,园区生活废水的氮处理率较低,仅为 54.3%。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 27.8%,这一部分氮主要来自于降水对园区地面的冲刷,包含两个部分:园区生态过程和未经清运的工业废物和生活垃圾所含的氮。对比磷元素的园区层面代谢,两者工业、生活和雨水造成的水体负荷比例相似,但磷去除率较小。

2.3 产业系统的氮代谢分析

本文主要考察工业园区氮排放对水体造成的影响,所以本节将生产废水中涉及氮的“产业”细分为 6 类行业:热电行业、氮肥生产行业、化工产业、纺织印染行业、食品加工行业和其他行业,同时将涉及的氮流进行

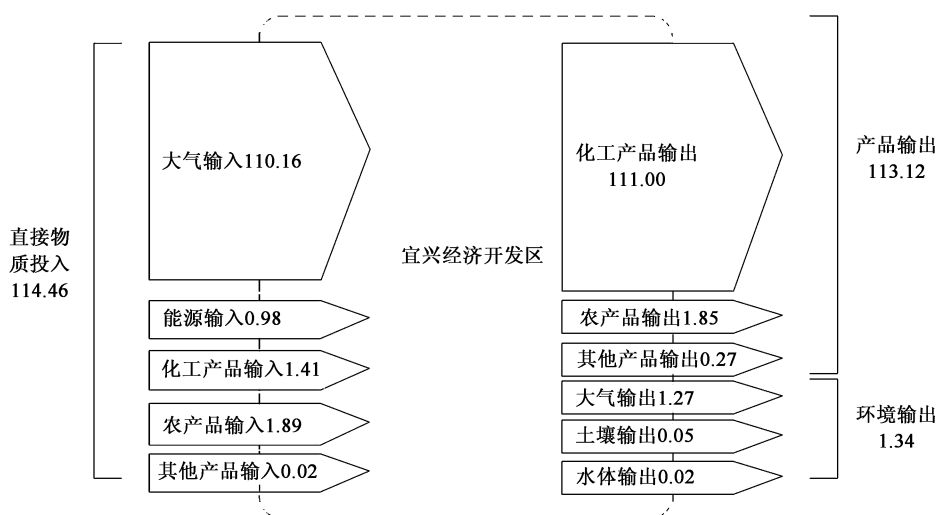


图3 2008年宜兴经济开发区氮物质流系统结构(单位:万 t)

Fig.3 Nitrogen flow system of Yixing Economic Development Zone in 2008(Unit: 万 t)

二级细分,如 i_1 细分为 i_{1n} ($n=1\sim6$) 等(图4)。图中略去了大气及固废处理相关的节点和流。

在宜兴经济开发区,氮肥生产、纺织印染和食品加工是主要的废水氮排放行业,合计占产业废水氮排放总量的96.5%,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92.3%。同时,这3个行业废水的氮去除率也较高,氮肥废水氮去除率为93.4%,印染废水氮去除率为85.5%,食品加工废水氮去除率为94.1%,工业废水总体氮去除率为90.2%,说明园区主要排氮企业具有较完善的污水处理环节,除氮效果较好(表3)。

对比磷元素的产业系统代谢,纺织印染、食品加工和机械(磷化)是宜兴经济开发区主要的废水磷排放行业,合计占产业磷排放总量的86.8%,比例低于主要氮排放行业,说明园区氮元素的排放更具有集中度,这也是其处理率高于磷的主要原因。

2.4 污水处理系统的氮代谢分析

针对污水中氮的处理方式,“企业污水处理设施”可以进一步细分为“物理处理”和“生物处理”^[20],根据当地的实际情况,“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”,两者都是“生物处理”,同时将涉及的氮流进行二级细分,如 w_2 细分为 w_{2n} 等(图4)。

从氮通量的角度考虑,直接由园区点源(产业和职工生活)以废水形式产生的氮通量为1083.3t,其中28.9%经企业自行处理后排放,8.9%经企业预处理后回用,55.9%经企业预处理后接入污水处理厂,6.3%直接排入污水处理厂。而在企业处理环节,9.0%经过物理处理,91.0%经过生物处理,总计约56t氮只经过简单的物理处理后直接排入水体。

从氮去除率的角度考虑,企业处理环节去除了废水总氮的73.5%,园区污水处理厂又去除了废水总氮的11.0%,氮总体去除率为84.5%。考察各处理环节的氮去除效率,企业自备污水处理设施氮去除率约79%,其中物理处理环节的平均氮去除率约6%,生物处理环节的平均氮去除率约87%;污水处理厂氮去除率约57%,其中清源污水处理厂的氮去除率约88%,欧亚华都污水处理厂的氮去除率约46%,欧亚华都污水处理厂由于设计和运行等原因氮去除率较低。

宜兴经济开发区大部分企业所采取的污水处理组合模式为简单的物理处理后排入水体。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氮量较低,而简单的物理处理也不能有效的处理其生活污水中的氮,在56t只经过物理处理后排入水体的氮中有52t是生活污水。

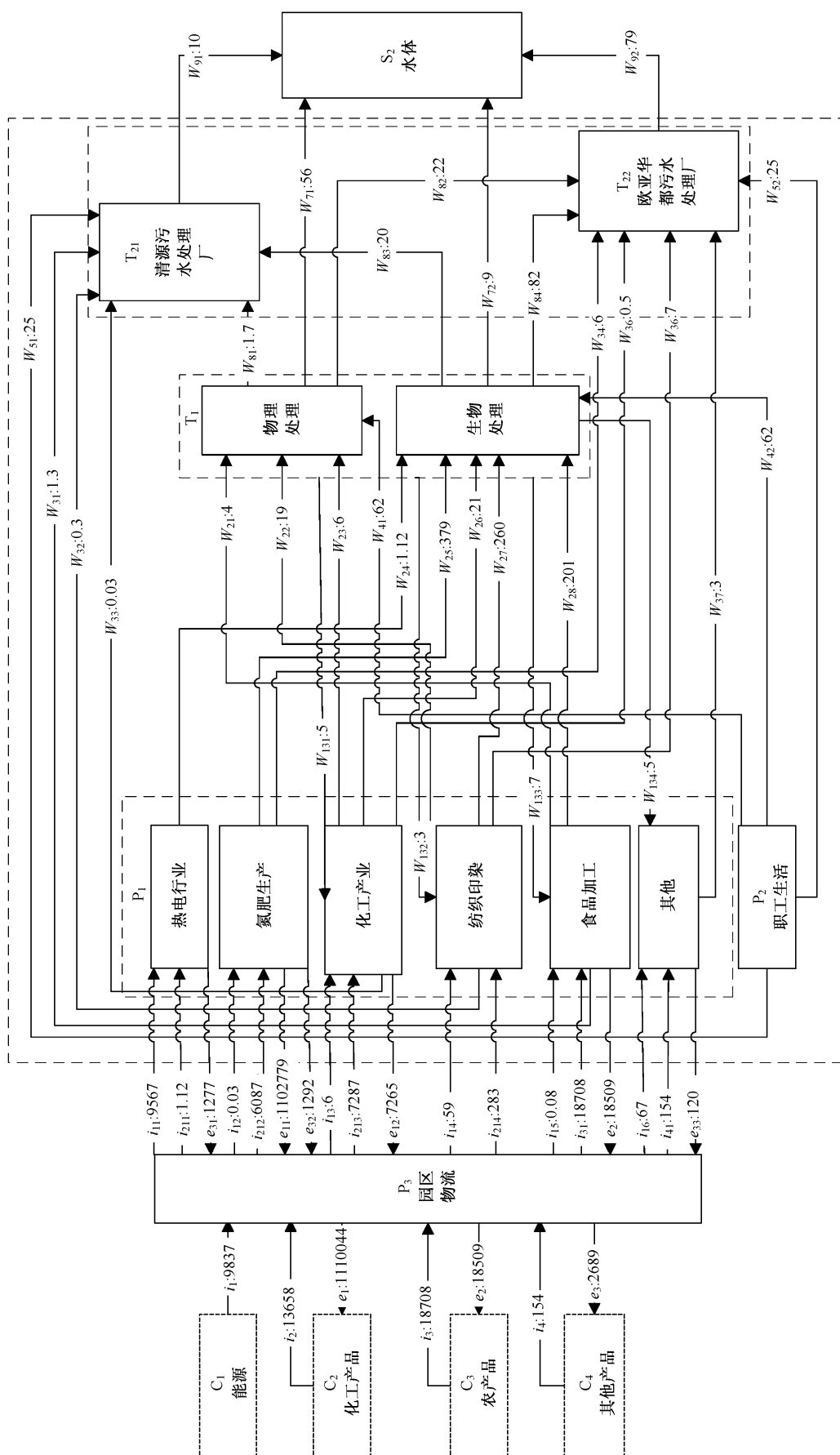


图 4 2008年宜兴经济开发区工业系统及污水处理氮物流网络(单位: t)

Fig. 4 Nitrogen flow network of industrial system and wastewater treatment system of Yixing Economic Development Zone in 2008 (unit: t)

对比开发区的磷通量,经过企业预处理后回用的比例较高,相应经企业预处理后接污水处理厂的比例下降,其余途径的比例相差不大。在去除率方面,磷的总体去除率小于氮,同时企业自行处理的磷去除率小于污水处理厂,而氮去除率反而高于污水处理厂。

3 结论和建议

(1)相比磷物质流系统,氮物质流系统的源和汇较多,流通量较大且较为集中,便于管理和处理,而磷元素相对分散;(2)企业污水处理设施和污水集中处理厂有效削减了产业系统的氮负荷。然而,生活污水的处理方式较为简单,56t 只经过物理处理后排入水体的氮有 52t 来自于生活污水,建议加强对生活污水的管理。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,磷代谢分析也表明了类似的问题;(3)在宜兴经济开发区,氮肥生产、纺织印染和食品加工是主要的废水氮排放行业,但这 3 个行业具有较完善的污水处理环节,除氮效果较好;(4)园区废水氮的主要处理方式是经企业预处理后接入污水集中处理厂,其次是经企业自行处理后排放,大部分氮都经过生物处理;(5)企业自备污水处理设施氮去除率约 79%,污水处理厂由于设计和运行等的原因氮去除率较低,约 57%,而污水处理厂的磷去除率高于企业预处理,建议改进污水集中处理厂的脱氮工艺,以提高污水的氮去除率。另外大部分企业只有简单的处理设施,约 56t 氮只经过简单的物理处理后直接排入水体,磷元素也具有同样的问题,所以建议完善企业的简单处理设施。

References:

- [1] Fred T M, Leah M V, Abraham L. Century-scale nitrogen and phosphorus controls of the carbon cycle. *Chemical Geology*, 2002, 190: 13-32.
- [2] Zhu Z L, Xing G L. *Nitrogen Cycle-a Natural Process to Sustain Life on Earth*. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [3] Hu SY. *Circular economy of phosphorus resource industry*. Beijing: Xinhua Press, 2006.
- [4] Dokulil M, Chen W, Cai Q. Anthropogenic impacts to large lakes in China: the Tai Hu example. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 2000, 3: 81-94.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Wu J N, Shi L. Phosphorus metabolism in industrial parks-a case study of Yixing Economic Development Zone. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(9): 2397-2405.
- [9] Ayres R U, Ayres L W. *Material flow analysis*// Ayres R U, Ayres L W. *Industrial Ecology: Towards Closing the Materials Cycle*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing Limited, 2002: 79-90.
- [10] Ayres R U, Ayres L W. *Substance flow analysis methodology*// Ayres R U, Ayres L W. *Industrial Ecology: Towards Closing the Materials Cycle*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing Limited, 2002: 91-101.
- [11] Liu Y, Chen J N. Substance flow analysis of phosphorus cycle system in China. *China Environmental Science*, 2006, 26(2): 238-242.
- [12] 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 the Changjiang River, China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2008, 125(12): 84-92.
- [13] Sabine B. Feeding the city: food consumption and flow of nitrogen, Paris, 1801 — 1914. *Science of the Total Environment*, 2007, 375(1): 48-58.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Chen M P, Chen J N. Nitrogen flow in farming-feeding system and its environmental impact in China. *Environmental Science*, 2007, 28(10): 2342-2349.
- [17] Van der Voet E. *SFA methodology*// Ayres R U, Ayres L W. *Industrial Ecology: Towards Closing the Materials Cycle*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing Limited, 2002: 91-101.

- [18] Kleijn R. In = out: the trivial central paradigm of MFA?. *Journal of Industrial Ecology*, 2000, 3(2/3): 8-10.
- [19] 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.
- [20] Zheng X C, Li Y X. *Waste Water Phosphorus and Nitrogen Removal Technology*. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998.
- [21] Huang Y F, Zhang L P, Hong H S, Chen Q W. Characteristics and influencing factors of nitrogen loss of sub watershed. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(7): 801-806.
- [22] Wei J, Ma L, Ma W Q, Li J H, Zhao L. The influence of urbanization on nitrogen flow and recycling utilization in food consumption system of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1016-1025.
- [23] Tian H Z, Hao J M, Lu Y Q, Zhu T L. Inventories and distribution characteristics of NO_x emissions in China. *China Environmental Science*, 2001, 21(6): 493-497.
- [24] Mao Y H, Yang Z J. *Industrial Pollution Accounting*. Beijing: China Environmental Science Press, 2007.
- [25] Wang J N, Yan W J, Jia X D. Modeling the export of point sources of nutrients from the Yangtze River basin and discussing countermeasures. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(4): 658-666.
- [26] Beijing Agricultural University. *Fertilizer Handbook*. Beijing: Agricultural Press, 1979.
- [27] Tang S Y, Dai Y Z, Liu Z Y, Zhou Z M. *Food Industrial Waste Water Treatment*. Beijing: Chemical Industry Press, 2001.
- [28] Zhang Z Z. *Wastewater Treatment of Small Nitrogen Fertilizer Plant*. Beijing: Chemical Industry Press, 1984.

参考文献:

- [2] 朱兆良, 邢光熹. 氮循环——维系地球生命生生不息的一个自然过程. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [3] 胡山鹰. 磷资源产业循环经济. 北京: 新华出版社, 2006.
- [8] 武娟妮, 石磊. 工业园区磷代谢分析——以江苏宜兴经济开发区为例. *生态学报*, 2010, 30(9): 2397-2405.
- [11] 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.
- [16] 陈敏鹏, 陈吉宁. 中国种养系统的氮流动及其环境影响. *环境科学*, 2007, 28(10): 2342-2349.
- [19] 樊银鹏, 胡山鹰, 陈定江等. 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.
- [20] 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.
- [21] 黄云凤, 张珞平, 洪华生, 陈求稳. 小流域氮流失特征及其影响因素. *水利学报*, 2006, 37(7): 801-806.
- [22] 魏静, 马林, 路光, 马文奇, 李建辉, 赵路. 城镇化对我国食物消费系统氮素流动及循环利用的影响. *生态学报*, 2008, 28(3): 1016-1025.
- [23] 田贺忠, 郝吉明, 陆永琪, 朱天乐. 中国氮氧化物排放清单及分布特征. *中国环境科学*, 2001, 21(6): 493-497.
- [24] 毛应淮, 杨子江. *工业污染核算*. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [25] 王佳宁, 晏维金, 贾晓栋. 长江流域点源氮磷营养盐的排放、模型及预测. *环境科学学报*, 2006, 26(4): 658-666.
- [26] 北京农业大学. *肥料手册*. 北京: 农业出版社, 1979.
- [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.
- [28] 张震智. *小型氮肥厂水处理*. 北京: 化学工业出版社, 1984.

2008 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2009 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	8956	1	生态学报	1.669
2	应用生态学报	7979	2	植物生态学报	1.656
3	植物生态学报	3742	3	应用生态学报	1.632
4	西北植物学报	3584	4	生物多样性	1.474
5	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3460	5	生态学杂志	1.276
6	植物生理学通讯	3187	6	植物学通报	1.058
7	生态学杂志	3148	7	西北植物学报	1.046
8	遗传学报	2142	8	植物生理与分子生物学 学报	1.034
9	植物生理与分子生物学学报	1855	9	遗传学报	0.887
10	昆虫学报	1580	10	遗传	0.835

★《生态学报》2008 年在核心版的 1868 种科技期刊排序中总被引频次 8956 次,全国排名第 2;影响因子 1.669,全国排名第 14;第 1~8 届连续 8 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 30 卷 第 22 期 (2010 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 30 No. 22 2010

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元