

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 20 期 Vol.32 No.20 **2012**

中国生态学会
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 32 卷 第 20 期

2012 年 10 月 (半月刊)

目 次

太湖流域源头溪流氧化亚氮(N_2O)释放特征.....	袁淑方, 王为东 (6279)
闽江河口湿地植物枯落物立枯和倒伏分解主要元素动态.....	曾从盛, 张林海, 王天鹅, 等 (6289)
宁夏荒漠草原小叶锦鸡儿可培养内生细菌多样性及其分布特征.....	代金霞, 王玉炯 (6300)
陕西省栎黄枯叶蛾蛹的空间分布.....	章一巧, 宗世祥, 刘永华, 等 (6308)
模拟喀斯特生境条件下干旱胁迫对青冈栎苗木的影响.....	张中峰, 尤业明, 黄玉清, 等 (6318)
中国井冈山生态系统多样性.....	陈宝明, 林真光, 李 贞, 等 (6326)
鄂西南木林子常绿落叶阔叶混交林恢复过程中优势树种生态位动态.....	汤景明, 艾训儒, 易咏梅, 等 (6334)
不同增温处理对夏蜡梅光合特性和叶绿素荧光参数的影响	徐兴利, 金则新, 何维明, 等 (6343)
模拟长期大风对木本猪毛菜表观特征的影响	南 江, 赵晓英, 余保峰 (6354)
雷竹林土壤和叶片 N、P 化学计量特征对林地覆盖的响应	郭子武, 陈双林, 杨清平, 等 (6361)
利用树木年轮重建赣南地区 1890 年以来 2—3 月份温度的变化	曹受金, 曹福祥, 项文化 (6369)
川西亚高山草甸土壤呼吸的昼夜变化及其季节动态.....	胡宗达, 刘世荣, 史作民, 等 (6376)
火干扰对小兴安岭白桦沼泽和落叶松-苔草沼泽凋落物和土壤碳储量的影响	周文昌, 牟长城, 刘 夏, 等 (6387)
黄土丘陵区三种典型退耕还林地土壤固碳效应差异.....	佟小刚, 韩新辉, 吴发启, 等 (6396)
岩质公路边坡生态恢复土壤特性与植物多样性	潘树林, 辜 彬, 李家祥 (6404)
坡位对东灵山辽东栎林土壤微生物量的影响.....	张 地, 张育新, 曲来叶, 等 (6412)
太湖流域典型入湖港口景观格局对河流水质的影响.....	王 瑛, 张建锋, 陈光才, 等 (6422)
基于多角度基尼系数的江西省资源环境公平性研究	黄和平 (6431)
中国土地利用空间格局动态变化模拟——以规划情景为例	孙晓芳, 岳天祥, 范泽孟 (6440)
世界主要国家耕地动态变化及其影响因素	赵文武 (6452)
不同氮源下好氧反硝化菌 <i>Deffluibacter lusatiensis</i> str. DN7 的脱氮特性	肖继波, 江惠霞, 褚淑祯 (6463)
基于生态足迹方法的南京可持续发展研究.....	周 静, 管卫华 (6471)
基于投入产出方法的甘肃省水足迹及虚拟水贸易研究.....	蔡振华, 沈来新, 刘俊国, 等 (6481)
浦江县土壤碱解氮的空间变异与农户 N 投入的关联分析	方 斌, 吴金凤, 倪绍祥 (6489)
长江河口潮间带盐沼植被分布区及邻近光滩鱼类组成特征	童春富 (6501)
深圳湾不同生境湿地大型底栖动物次级生产力的比较研究.....	周福芳, 史秀华, 邱国玉, 等 (6511)
灰斑古毒蛾口腔反吐物诱导沙冬青细胞 Ca^{2+} 内流及 H_2O_2 积累	高海波, 张淑静, 沈应柏 (6520)
濒危物种金斑喙凤蝶的行为特征及其对生境的适应性.....	曾菊平, 周善义, 丁 健, 等 (6527)
细叶榕榕小蜂群落结构及动态变化.....	吴文珊, 张彦杰, 李凤玉, 等 (6535)
专论与综述	
流域生态系统补偿机制研究进展	张志强, 程 莉, 尚海洋, 等 (6543)
可持续消费的内涵及研究进展——产业生态学视角	刘晶茹, 刘瑞权, 姚 亮 (6553)
工业水足迹评价与应用.....	贾 佳, 严 岩, 王辰星, 等 (6558)
矿区生态风险评价研究述评.....	潘雅婧, 王仰麟, 彭 建, 等 (6566)
研究简报	
围封条件下荒漠草原 4 种典型植物群落枯落物枯落量及其蓄积动态.....	李学斌, 陈 林, 张硕新, 等 (6575)
密度和种植方式对夏玉米酶活性和产量的影响.....	李洪岐, 蔺海明, 梁书荣, 等 (6584)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 312 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2012-10	

封面图说: 草丛中的朱鹮——朱鹮有着鸟中“东方宝石”之称。洁白的羽毛, 艳红的头冠和黑色的长嘴, 加上细长的双脚, 朱鹮历来被日本皇室视为圣鸟。20 世纪前朱鹮在中国东部、日本、俄罗斯、朝鲜等地曾有较广泛地分布, 由于环境恶化等因素导致种群数量急剧下降, 至 20 世纪 70 年代野外已认为无踪影。1981 年 5 月, 中国鸟类学家经多年考察, 在陕西省洋县重新发现朱鹮种群, 一共只有 7 只, 也是世界上仅存的种群。此后对朱鹮的保护和科学研究做了大量工作, 并于 1989 年在世界首次人工孵化成功。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201201060030

贾佳, 严岩, 王辰星, 梁玉静, 张亚君, 吴钢, 刘馨磊, 王丽华, 杜冲. 工业水足迹评价与应用. 生态学报, 2012, 32(20): 6558-6565.

Jia J, Yan Y, Wang C X, Liang Y J, Zhang Y J, Wu G, Liu X L, Wang L H, Du C. The estimation and application of the water footprint in industrial processes. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(20): 6558-6565.

工业水足迹评价与应用

贾 佳^{1,2}, 严 岩^{1,*}, 王辰星^{1,2}, 梁玉静^{3,1}, 张亚君^{1,2},
吴 钢¹, 刘馨磊⁴, 王丽华⁴, 杜 冲⁴

(1. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 武汉理工大学, 武汉 430070; 4. 中国检验认证集团测试技术有限公司, 北京 100028)

摘要:大规模的工业生产不但消耗了大量的水资源,同时产生了大量的工业废水,这是造成和加剧全球或区域水资源危机和水环境问题最重要的原因之一。对工业生产过程的水资源综合影响进行科学有效评估是目前资源环境管理领域研究的重要问题之一,是采取有效措施、提升工业生产的水资源利用效率和管理水平的重要前提和基础。以发展和完善工业生产过程的水资源综合影响的评价系统和方法体系为目标,基于水足迹理论,提出了工业水足迹的概念,即用以测量由某一产品、工业企业、行业或区域的工业生产过程引发的水资源利用增量的一个多维指标。以此概念为理论基础,进而首先分析了工业水足迹的内涵,包括直接工业水足迹与间接工业水足迹两部分。另外,区别于全生命周期的水足迹,工业水足迹评价是针对工业生产过程中由于工业原料、辅料、能源和水的输入,以及废水、废物与产品的输出产生的水足迹,其系统边界不包括分销零售、消费使用与废物处理等环节。其次,在确定的系统边界内构建了工业水足迹的核算框架和基础方法体系,即从生产、公共及运输 3 个方面收集数据、处理并核算。最后,从产品、企业、行业和区域 4 个层面对工业水足迹的应用及其意义进行了展望。

关键词:工业水足迹;水足迹;水资源;水环境;可持续利用

The estimation and application of the water footprint in industrial processes

JIA Jia^{1,2}, YAN Yan^{1,*}, WANG Chenxing^{1,2}, LIANG Yujing^{3,1}, ZHANG Yajun^{1,2}, WU Gang¹, LIU Xinlei⁴,
WANG Lihua⁴, DU Chong⁴

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

4 China Certification & Inspection Group, Beijing 100028, China

Abstract: Large-scale industrial production consumes considerable amounts of water and discharges a large quantity of industrial sewage, and both of these are primary causes of the global water crisis and problems relating to the water environment. Scientifically and effectively evaluating the impact of industrial production on water resources is the premise and foundation of improving the efficiency of water resources utilization and management in industrial production, which is very important in relieving the stress on water resources and the water environment, especially in China. In order to develop a system and methods for evaluating the impact of industrial production on water resources based on the concept and theory of water footprint, the concept of Industrial Water Footprint (IWF) was proposed and its system boundary and evaluation

基金项目:国家质量监督检验检疫总局质检公益性行业科研专项项目(200910082);国家水体污染控制与治理科技重大专项课题(2009ZX07318-006);城市与区域生态国家重点实验室资助项目(SKLURE 2010-1-6)

收稿日期:2012-01-06; 修订日期:2012-07-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yyan@rcees.ac.cn

content analysed. IWF is a multi-dimensional index for the increment of water resources usage caused by the industrial production process. As a part of water footprint sustainability evaluation, IWF focuses on the industrial production process. The function of IWF is to evaluate the synthetic impacts of an industrial production process or an individual product, an industrial enterprise, an industry or even a region on water resources and the water environment. Based on the concept of IWF, this paper also analysed its connotation and categories, and determined the system boundary. Compared with the traditional footprint evaluation of entire Life Cycle Assessment (LCA), IWF has its own system boundary and range of issues to be evaluated, in which items such as water usage and pollutant discharge of natural and agricultural process, plant growth, livestock feeds, agricultural irrigation and daily life of human beings are not taken into account. IWF can be divided into two parts: direct and indirect. As the name implies, the direct IWF comprises the water resources consumed and the pollution of the water environment directly caused by the industrial production process. On the other hand, the indirect IWF comprises the potential water resources consumption and pollution of the water environment caused by raw materials, auxiliary materials and secondary energy resources. Moreover, the framework and basic methods of evaluation in IWF are also constructed. The evaluation framework of IWF is composed of three parts: production water footprint, public water footprint and transport water footprint. 'Production water footprint' refers to the sum of processed water footprints of all industrial production processes. 'Public water footprint' refers to the sum of water footprints of the assistant production management system, including detection, maintenance and wastewater treatment. 'Transport water footprint' refers to the water footprint caused by transportation, which includes transportation production and public transportation in industrial production processes. 'Transportation production' particularly refers to freight transportation of all processes, including the semi-finished product and raw material transportation in the industrial production processes, as well as transporting the semi-finished product and final product in and out of store. 'Public transportation' particularly refers to the transportation of the staff of the assistant production management sector. Furthermore, the prospect of application and significance of evaluation of IWF in terms of product, enterprise and region were forecasted and discussed.

Key Words: industrial water footprint (IWF); water footprint; water resources; water environment; sustainable utilization

随着全球经济和世界人口持续增长,资源短缺、环境污染及生态破坏等问题已严重威胁到人类健康和社会可持续发展。我国水资源总量虽然相对丰富,但人口众多,人均水资源占有量仅为世界人均占有量的 1/4,是全世界 13 个水资源最贫乏的国家之一。随着我国社会经济的快速发展,水资源危机越发突显出来,已成为制约我国社会经济可持续发展的重要因素。加强水资源保护与管理、提升水资源利用效率,对于我国解决水资源瓶颈、实现可持续发展具有重要的作用和意义。为提升我国工业生产过程的用水效率和管理水平提供新的科学参考和技术方法,本文运用和发展水足迹的理论与方法,提出了工业水足迹评价的概念,探讨了其内涵和核算的系统边界、框架和方法,并从产品、企业、行业、和区域四个层次探讨工业水足迹的应用与意义,以发展和丰富水资源利用的评估方法与管理技术。

1 工业水足迹评价的内涵与意义

1.1 水足迹理论概述

“足迹”这一概念最初起源于 20 世纪末加拿大生态学家 William Rees 和他的学生 Wackernagel 共同提出的“生态足迹”的概念,即依据人类对土地的依赖性将人类活动对生态系统的影响归结为对土地面积的占用^[1]。水足迹的概念是 2002 年由荷兰学者 Hoekstra 首先提出的,是借由生态足迹的思想,通过虚拟水概念的介入来描述人类活动对淡水资源需求^[2],是继生态足迹、碳足迹研究之后,以水资源为研究对象,而提出的一套测量方法与指标体系。

水足迹将水资源的消费形式及其影响联系起来,是作为测量某一已知人口(个人、地区、国家或世界)在一定时间内消耗的所有产品和服务所需要的淡水资源量的多维指标^[3-4]。根据不同的水资源类型,水足迹可

分为蓝水足迹、绿水足迹与灰水足迹。蓝水即地表水和地下水,蓝水足迹指为个人或社会提供商品和服务的生产过程中需要的淡水资源量,其中不包括使用后以直接或泄露的方式返回其来源的那部分蓝水。绿水足迹指绿水资源(储存在土壤中的雨水)的消耗。灰水足迹指为个人或社会提供商品和服务的生产过程所引起水资源污染量^[5]。

水足迹评价是以生命周期理论为基础,采用清单分析的方法,完整、系统地评价某一时空范围内水资源消费的构成。水足迹评价有助于修正人们对水资源消费认识的片面性,提升水资源保护与管理的科学性和系统性。经济发展和人口增加造成的全球性水资源危机持续加剧,客观上也推动了水足迹研究的迅速发展。2009年,Hoekstra等依据不同的评估目标将水足迹评估划分为:消费者或社区水足迹评估、划定地理区域内的水足迹评估、产品水足迹评估、国家水足迹评估、商业水足迹评估5种类型,并分析了以上各类评估的研究框架和计算方法^[5]。至此,水足迹的研究已经发展成为一套系统、规范的理论体系。

1.2 工业水足迹评估的提出与内涵分析

近年来,国内外学者关于水足迹评价理论及其应用研究日益增多。根据“水足迹网络”公布的27种农、畜产品虚拟水含量的研究结果表明,谷物类中稻米的虚拟水含量最高;等质量水果中生长在亚热带的椰子虚拟水含量最高;等体积饮料中茶的虚拟水含量最低,咖啡的虚拟水含量最大;等质量肉类中牛肉的虚拟水含量最大,是其它各种肉类的3至4倍。另外,在国家尺度上,学者们已计算出了全球54个国家的水足迹,其中美国的年消费水足迹最大,达到 $2482.7 \text{ m}^3/\text{a}$,是已知世界各国年水足迹消费量之首;而我国最低,且消费量不足美国的1/3。最近,美国苹果公司还新推出了一款名为virtual water的应用程序,可随时查询人们日常生活中通过摄入食物产生的水足迹。

工业是国民经济和社会物质生产的支柱产业,工业发展对促进国家或地区经济增长具有重要的战略意义。但大规模的工业生产过程不仅需要消耗大量的水资源,还排放大量的生产废水,造成严重的水环境污染,进而加剧国家或地区的水资源短缺。我国工业经济发展迅速,以制造业为主的工业生产规模不断扩大,给我国的水资源和水环境带来了越来越大的压力。进入21世纪以来,我国农业用水量在缓慢减少,工业用水量却在持续增加,工业用水所占比重已经从2001年的20.5%增加到2010年的24.0%左右,提高了近26.8%,且工业废水排放量也相应地不断增加^[6]。

目前对于水足迹理论的研究,国外学者主要着重于完善现有的模型与评价方法,将已有的研究成果应用于分析特定区域、国家的水资源消费,还有学者将产品贸易与区域水资源安全相结合,提出适宜研究区域可持续发展的消费模式^[7-12]。其中,Gerbens-Leenes等提出商业水足迹计算方法,能够用于确定商业用水活动的社会与自然环境影响、增加公众与政府的透明度、在水单元中择优选择、识别和支持发展政策,以减少对淡水资源的风险等^[7];Van Oel等利用现有的农、畜产品虚拟水数据,计算荷兰水足迹得出,荷兰是外部水足迹比重最大的国家,且在分析外部的来源及比重中发现中国、印度、西班牙、土耳其、巴基斯坦、苏丹、南非和墨西哥等8个贫水国也在其中,应给予足够的重视^[8];Aldaya等利用现有的农作物水足迹数据,从消费的角度分析意大利人通过食用比萨和意大利面间接产生的水资源消耗及各组成部分的比重,进而为控制与调节水资源消耗提供数据参考^[9]。由于我国的研究起步较晚,当前的研究多是借助国外已有的研究成果,分析一定时空范围内的水资源消费^[13-16]。但是,与农业和畜牧业相比,国内外有关工业生产过程或产品水足迹的研究较少。原因主要在于,对比农业和畜牧业产品,工业产品中的虚拟水贸易相对较少,约占全球产品总贸易量的10%^[3],因此未得到广泛重视;另外,根据水足迹的量化原则,产品水足迹的量化是沿着产品的生产链和供应链,自上而下地计算整个生产过程中的水资源消耗,并且能够反映产品种类、工艺及生产条件等特征,然而由于工业产品的种类繁多且生产工艺过程复杂多样,导致工业产品水足迹的核算框架很难构建,并且很大程度上缺乏相关的数据支持,因此也增加了计算的难度。然而,与农、畜产品的生产过程相比,工业生产过程由于规模大、水环境影响大,其在水量、水质方面的水资源综合影响更加显著。另外,工业生产过程与农业、畜牧业相比,其生产工艺、技术、管理等受人为控制程度更强,水资源节约和污染削减的潜力巨大,对于有针对性地调控和优化

水资源利用、缓解水资源矛盾具有巨大潜力和重要意义。

为了系统评价工业过程的水资源综合影响,本文将水足迹理论和方法运用于产品的工业生产,提出了工业水足迹概念,是用以测量由某一产品、企业、行业或区域的工业生产过程引发的水资源利用增量的一个多维指标。具体对于某一工业产品、企业、行业或区域而言,其工业水足迹包括工业生产过程中直接消耗的水资源及造成的水环境污染(直接工业水足迹)和使用的各种工业原料、辅料以及二次能源中隐含的水资源消耗和水环境污染(间接工业水足迹)两部分。鉴于 Hoekstra 提出的水足迹构成,根据不同的水资源影响类型,工业水足迹可分为蓝水足迹和灰水足迹^[5]。另外,从工业活动类型的角度划分,工业水足迹还包括生产水足迹、公共水足迹与运输水足迹 3 种类型(图 1)。工业水足迹的研究旨在反映工业生产过程的用水需求及其对水环境的影响,以有效地管理工业用水,为实现水资源保护提供数据参考。

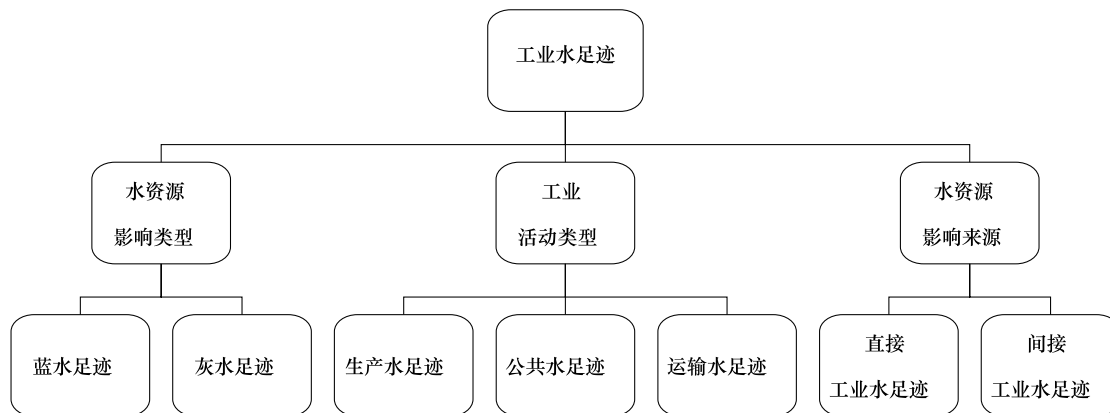


图 1 工业水足迹的分类与组成

Fig. 1 Categories of Industrial Water Footprint

1.3 工业水足迹和水足迹的联系与区别

工业水足迹是水足迹的重要组成部分,是专门用于分析工业生产过程中水资源消耗和影响的物理指标。与水足迹的方法类似,工业水足迹的研究是以生命周期理论为基础,沿着产品的生产链与供应链分析生产过程中直接和间接的水资源消费与水环境污染。因此,工业水足迹和水足迹中都包括直接水足迹与间接水足迹两部分。

然而,工业水足迹的研究目标是分析工业生产及其相关活动中的水资源消耗,因此它们之间也存在着明显的差异:首先,与 Hoekstra 提出的水足迹不同,工业水足迹中不考虑农产品和畜牧产品原料或辅料,只分析各种工业原料、辅料与二次能源中隐含的水资源消耗和水环境污染。其次,在以产品为研究对象进行评估时,产品工业水足迹与产品水足迹不同,产品工业水足迹中除包括产品生产过程中消耗的工序水足迹与原材料水足迹外,还包括由工业产品生产所引起的运输和辅助生产部门消耗的水足迹^[5]。第三,水足迹的评价对象除产品外,还可为国家、区域、商业、消费者等,其中商业水足迹指为了支持商业活动运营所直接与间接消耗的水资源^[5]。目前由于企业及行业间的供应链相互交织、错综复杂,导致商业水足迹评估难于实践。工业水足迹能够在商业水足迹中筛选出与工业生产相关的直接与间接的用水指标,并清楚地划定了它的研究范畴,在以企业和行业为研究对象时更易于实践。

2 工业水足迹的核算方法

2.1 系统边界

本文将工业水足迹的研究边界划分为从原材料入厂到产品出厂的整个工业生产过程(图 2),重点分析新鲜水、能源及物料(工业原料与辅料)等的输入与废水、废物的输出过程中的水资源消费情况。但文中工业水足迹的研究不包括以下内容:

(1)工作人员的生活用水与排水。考虑到工作人员的生活用水与排水主要是人类的生理需求引起的,工

业生产不能作为这部水资源消费的根本原因。因此,生产与管理人员的生活用水与排水应忽略不计^[2]。但由于工业人员的职业原因,可能造成生活耗水量增加,该部分额外消耗的水资源须计入工业水足迹中。

(2)工业生产所消耗的农业、林业、畜牧业、渔业和自然生态系统提供的产品在生产过程中的水资源消耗。工业水足迹评价的目标是分析和调控工业生产过程中的水资源消耗,农业、林业与畜牧业等动植物资源在其生长、生产过程中消耗的水资源不纳入评价。

(3)工业水足迹的评价对象是某一特定的工业生产系统或工业产品的某一特定生产阶段,评价系统边界以外的各种原料和能源向评价对象的工业生产系统的运输过程产生的水足迹,以及作为评价对象的工业产成品进入下一生产或消费环节的运输过程产生水足迹均不纳入评估。因为工业水足迹评价的目标在于揭示评价对象内部的工业生产过程中的水资源消耗,进而改善水资源效率。如纳入工业生产系统外部的运输环节,将由于原料和能源来源地不同、运输距离远近等因素对评价结果产生显著影响和干扰。

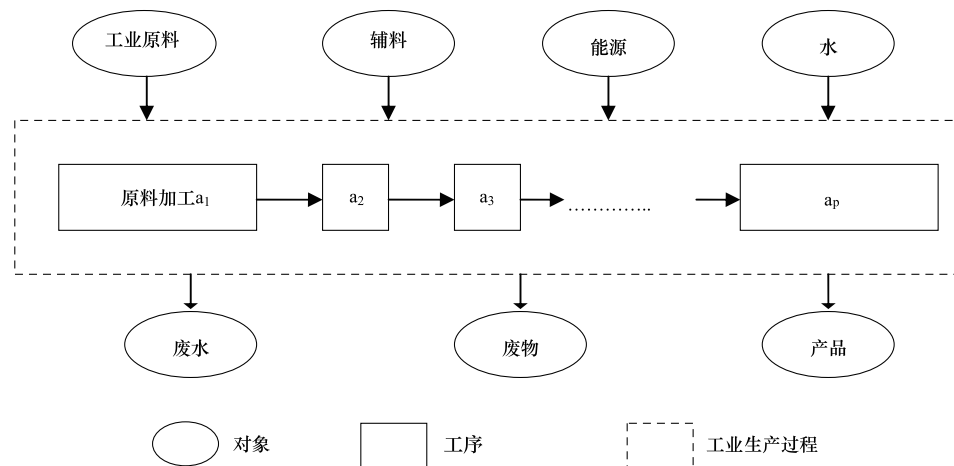


图2 工业水足迹评价系统边界

Fig. 2 System Boundary of Industrial Water Footprint

2.2 核算框架

工业水足迹的核算首先是通过收集系统边界范围内所有新鲜水和材料(能源、物料及添加剂等)的消耗量以及工业废水排放情况,进而分别计算出生产、公共以及系统内部运输环节中消耗的水足迹,核算框架如图3所示。生产水足迹指产品生产过程中各工序水足迹之和。公共水足迹指与工业生产过程相关的管理、检测、维修、锅炉、污水处理等辅助生产部门消耗的水足迹。系统内部运输水足迹指由于工业产品生产所引起的,工业生产系统内部运输过程中产生的水足迹,包括生产运输与公共运输在内的所有运输过程的水足迹。生产运输指工业生产过程中的货物运输,包括不同工序之间半成品的运输以及原材料、半成品与成品的入仓与出仓的运输。公共运输指辅助生产部门人员的交通运输。

2.3 核算方法

根据工业水足迹的核算框架,工业水足迹由生产水足迹、公共水足迹与运输水足迹3部分组成:

$$WF_{\text{industry}} = WF_{\text{production}} + WF_{\text{public}} + WF_{\text{transport}} = \frac{\sum (V_{\text{fresh}} + WF_{\text{grey}} + WF_{\text{matter}})}{Y}$$

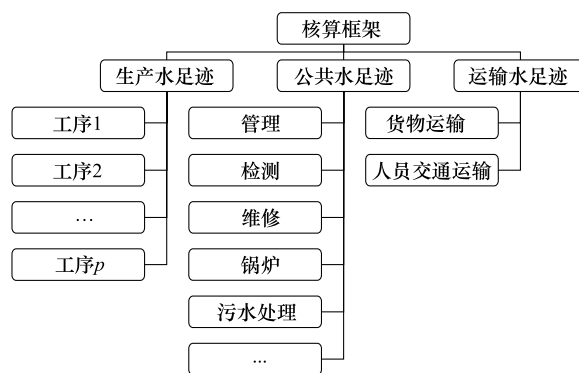


图3 工业水足迹核算框架

Fig. 3 Accounting Framework of Industrial Water Footprint

式中, WF_{industry} 代表工业水足迹, $WF_{\text{production}}$ 代表生产水足迹, WF_{public} 代表公共水足迹, $WF_{\text{transport}}$ 代表运输水足迹。实际的核算是通过将生产、公共和运输环节消耗的所有新鲜水量 (V_{fresh} , 体积/时间)、材料水足迹 (WF_{mater} , 体积/时间) 以及灰水足迹 (WF_{grey} , 体积/时间) 相加后除以产品产量 (Y , 质量/时间) 得到的。

水足迹作为一项评价人类活动对水资源消费的指标, 研究对象可选择人类活动的发生区域、人类活动所产生的产品或结果, 因此评价过程中一般以单位时间的水资源或单位产品的质量、体积、面积、长度的水资源等作为水足迹评价单位。而工业水足迹作为水足迹评价的一部分, 因此工业水足迹评价单位与水足迹的评价单位一致。本文是以单位质量产品水资源表示工业水足迹, 另外根据时间或产品性质的不同, 工业水足迹还可采用体积/时间、体积/体积、体积/面积、体积/长度等计量单位。

2.3.1 新鲜水

新鲜水量是用生产、公共及运输各环节中的取水量 (V_{draft} , 体积/时间) 减去废水排放量 (V_{effl} , 体积/时间) 计算得到的。

$$V_{\text{fresh}} = \sum (V_{\text{draft}} - V_{\text{effl}})$$

2.3.2 灰水足迹

与农业需水不同, 分析工业生产对水环境的影响对系统评价和管理工业水资源消耗尤为重要。本文采用 Hoekstra 提出的灰水足迹的计算方法, 测量工业废水排放引起的水环境污染, 能够更加准确的反映工业生产对水资源的消耗。

$$WF_{\text{grey}} = \frac{L}{C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}} = \frac{V_{\text{effl}} \times (C_{\text{effl}} - C_{\text{nat}})}{C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}}$$

灰水足迹通过用污染物负荷 (L , 质量/时间) 除以接受水体的环境水质标准浓度 (最大可接受浓度 (C_{max} , 质量/体积) 和接受水体本身的自然浓度 (C_{nat} , 质量/体积) 之差得出。 C_{effl} 代表污水中污染物的浓度 (质量/体积)。

当 $C_{\text{effl}} < C_{\text{max}}$ 时, 说明计算出的灰水足迹小于现有河流或地下水的流量, 因此仍然有充足的水资源可将污染物的浓度稀释至标准以下。当 $C_{\text{effl}} = C_{\text{max}}$ 时, 表示计算的灰水足迹刚好等于环境水流量。 $WF_{\text{grey}} > 0$, 表示接受水体的一部分稀释能力被消耗。当 $C_{\text{effl}} < C_{\text{nat}}$ 时, 计算出的 $WF_{\text{grey}} < 0$, 表示该污水的排放是对自然水体的净化, 因此这时的灰水足迹将不必计算。当污水中的污染物浓度较高时, 可能出现 $C_{\text{effl}} > C_{\text{max}}$ 的情况, 即计算出的灰水足迹超过现有河流或地下水的流量, 这时计算出的 WF_{grey} 表示用以吸收所有污染负荷的淡水资源。

实际运用中, 一方面, 可以采用计算每月或每年平均灰水足迹的方法, 统计产品生产或消费造成水资源污染的程度。另一方面, 工业废水中一般包括如汞、镉、6 价铬、铅、挥发酚、氰化物、化学需氧量、石油类以及氨氮等多种污染物, 计算时可以选择工业废水中含有的最典型的污染物或与当地水质差异最显著的污染物指标为代表, 计算同化工业废水中的污染物所间接占用的水资源量, 以反映水环境污染程度^[5,17]。

2.3.3 材料水足迹

$$WF_{\text{matter}} = \sum_{i=1}^n M_i l_i$$

材料水足迹指系统边界范围内的整个生产过程中消耗 i 种材料中隐含的工业水足迹之和。材料包括能源 (一级能源、二级能源)、工业原料、辅料、添加剂、机械设备及办公耗材等, 消耗量 (M) 的计量单位需根据具体的能源类型确定。 i 表示整个产品生产过程中消耗的材料种类, 取值为 1 到 n 的自然数 (n 代表消耗材料的种类总数)。 M_i 代表第 i 种材料的消耗量, l_i 代表第 i 种材料工业水足迹转换系数, 指生产单位第 i 种材料所消耗的工业水足迹。

3 工业水足迹的应用与展望

3.1 应用

本文提出的工业水足迹评价方法可针对产品、企业、行业和区域等不同层次的评价对象进行, 其评价结果

具有不同的揭示意义。

3.1.1 产品工业水足迹

产品工业水足迹是以某一产品(商品或服务)为评价目标对象的工业水足迹,用以衡量产品的水环境影响并分析和揭示在其工业生产过程中各环节的水足迹贡献。开展产品工业水足迹的评价,首先,能够更加科学、准确地计算出产品工业水足迹,进而丰富水足迹数据库。其次,有助于识别产品生命周期的各阶段中提高水资源利用率的机会。第三,结合开展如水标签策略,发表环境声明或发布环保产品声明等销售策略,以增加消费者对不同产品水足迹的认知度,进而提高消费者的环保意识,引导绿色消费。

3.1.2 企业工业水足迹

企业工业水足迹指以一定区域内的某一企业为评价对象的工业水足迹,用以反映区域内某一企业的水环境影响和效率的整体水平及企业之间的差异。企业工业水足迹可视为企业生产所有工业产品水足迹的累加。通过分析企业内部不同环节的水足迹贡献,可为企业改善工艺技术和流程,提高水资源效率提供科学依据。此外,对不同企业生产的同种产品的工业水足迹进行评估和对比,可为刺激和激励企业努力减小单位产品生产的水资源消耗与影响提供一种新的技术工具。

3.1.3 行业工业水足迹

行业工业水足迹指以一定区域内的某一行业为评价对象的工业水足迹,用以反映区域内某一行业的水资源与水环境影响,以及用水效益的整体水平和企业之间的差异。开展行业工业水足迹评价,一方面可以反映区域内某一行业的水资源消耗与工业废水排放的整体水平和企业之间的差异;另一方面,能够警示管理部门或决策者,以限制和规范高耗水与高污染物排放行业的发展,进而降低国家或区域经济发展过程中环境成本。

3.1.4 区域工业水足迹

区域工业水足迹指一定区域内所有企业或生产活动造成的工业水足迹,用于分析和评价区域水资源禀赋与部门用水之间的关系。开展区域工业水足迹评价,可为产业、政府或非政府组织中的决策者提供更加全面、准确的参考信息,用以制定区域水资源战略规划及调整工业产业结构,从而降低经济发展过程中产生的水资源压力。

3.2 研究展望

自19世纪工业革命爆发以来,工业化成为了世界各国经济发展的目标。伴随工业化进程的加快,能源短缺、环境污染和生态破坏等环境问题日益严重,危及到人类生存和健康。基于水足迹理论体系,研究和完善工业水足迹核算的相关理论与方法,开发工业水足迹评价的基础数据库与应用工具,对于提高水资源利用效率和管理水平、缓解水资源危机和水环境压力具有重要作用 and 意义。

水足迹评价体系可为我国实现和保障国家水资源安全、应对水资源危机、实现可持续发展提供重要技术方法和科学参考,但目前工业水足迹研究仅仅处于起步阶段,可借鉴的研究成果很少,计算模型还有待进一步完善。另外,由于工业水足迹的量化需要依据工业产品生产的供应链顺次进行,而当前可利用的基础数据不足,严重阻碍工业水足迹评价的实践应用与推广。今后的研究重点应从两方面进行:一方面,充分利用农畜产品虚拟水或水足迹的相关研究成果,在此基础上,对纺织、造纸及食品加工等高耗水产品的工业水足迹评价进行方法研究和应用推广,加强这些重点产品的水足迹评价与管理;另一方面,从基础工业部门着手,开展初级能源产品的工业水足迹研究,以丰富现有的基础数据库。

References:

- [1] Liu B Q, Feng Z M, Yao Z J. Theory, method and progress on virtual water research. *Resources Science*, 2006, 28(1): 120-127.
- [2] Hoekstra A Y. Human appropriation of natural capital: a comparison of ecological footprint and water footprint analysis. *Ecological Economics*, 2009, 68(7): 1963-1974.
- [3] Hoekstra A Y. Virtual water trade: proceedings of the international expert meeting on virtual water trade // Value of Water Research Report Series No. 12. Delft. The Netherlands: UNESCO-IHE, 2003. [2012-4-6]. <http://www.waterfootprint.org/Reports/Report12.pdf>.

- [4] Hoekstra A Y, Hung Q P. Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade // Value of Water Research Report Series No. 11. Delft. The Netherlands: UNESCO-IHE, 2002. [2012-4-6]. <http://www.waterfootprint.org/Reports/Report11.pdf>.
- [5] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, Mekonnen M M. Water Footprint Manual: State of the Art 2009. Enschede, the Netherlands: Water Footprint Network, 2009.
- [6] National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook-2011. Beijing: China Statistics Press, 2011.
- [7] Gerbens-Leenes P, Hoekstra A Y. Business water footprint accounting: a tool to assess how production of goods and services impacts on freshwater resources worldwide // Value of Water Research Report Series No. 27. Delft. The Netherlands: UNESCO-IHE, 2008. [2012-4-6]. [http://www.waterfootprint.org/Reports/Report 27-BusinessWaterFootprint.pdf](http://www.waterfootprint.org/Reports/Report%2027-BusinessWaterFootprint.pdf).
- [8] Van Oel P R, Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The external water footprint of the Netherlands: Geographically-explicit quantification and impact assessment. *Ecological Economics*, 2009, 69(1): 82-92.
- [9] Aldaya M M, Hoekstra A Y. The water needed for Italians to eat pasta and pizza. *Agricultural Systems*, 2010, 103(6): 351-360.
- [10] Chapagain A K, Hoekstra A Y. The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands. *Ecological Economics*, 2007, 64(1): 109-118.
- [11] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(5): 1577-1600.
- [12] Chapagain A K, Hoekstra A Y. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. *Ecological Economics*, 2011, 70(4): 749-758.
- [13] Mo M H, Wang X L, Ren X Y, Wang H L, Zhou H Y. Dynamic analysis on ecological footprint and water footprint of Honghu city, Hubei Province, China. *China Population Resources and Environment*, 2009, 19(6): 70-74.
- [14] Huang J, Song Z W, Chen F. Characteristics of water footprint and agricultural water structure in Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(23): 6546-6554.
- [15] Chen J X, Zhang S F, Hua D, Long A H, Chen B. A study on water resources guarantee in Beijing city based on water footprint evaluation. *Resources Science*, 2010, 32(3): 528-534.
- [16] Li Z H, Dong S C. Impacts of agricultural development in the Wuwei oasis on water resources in the Minqin oasis in the lower reaches: Based on water footprint. *Resources Science*, 2011, 33(1): 86-91.
- [17] Cui W J, Zhou F X, Xu C P. Method study of ecological footprint calculating of heavy and chemical industry in China. *China Population Resources and Environment*, 2010, 20(8): 137-141.

参考文献:

- [1] 刘宝勤, 封志明, 姚治君. 虚拟水研究的理论、方法及其主要进展. *资源科学*, 2006, 28(1): 120-127.
- [6] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴-2011. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [13] 莫明浩, 王学雷, 任宪友, 王慧亮, 周海燕. 湖北省洪湖市生态足迹与水足迹动态分析. *中国人口·资源与环境*, 2009, 19(6): 70-74.
- [14] 黄晶, 宋振伟, 陈阜. 北京市水足迹及农业用水结构变化特征. *生态学报*, 2010, 30(23): 6546-6554.
- [15] 陈俊旭, 张士锋, 华东, 龙爱华, 陈博. 基于水足迹核算的北京市水资源保障研究. *资源科学*, 2010, 32(3): 528-534.
- [16] 李泽红, 董锁成. 武威绿洲农业开发对民勤绿洲来水量的影响——基于水足迹的视角. *资源科学*, 2011, 33(1): 86-91.
- [17] 崔维军, 周飞雪, 徐常萍. 中国重化工业生态足迹估算方法研究. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(8): 137-141.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 20 October, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Characteristics of nitrous oxide (N ₂ O) emission from a headstream in the upper Taihu Lake Basin	YUAN Shufang, WANG Weidong (6279)
Nutrient dynamics of the litters during standing and sediment surface decay in the Min River estuarine marsh	ZENG Congsheng, ZHANG Linhai, WANG Tian'e, et al (6289)
Diversity and distribution of endophytic bacteria isolated from <i>Caragana microphylla</i> grown in desert grassland in Ningxia	DAI Jinxia, WANG Yujiong (6300)
Spatial distribution of <i>Trabala vishnou gigantina</i> Yang pupae in Shaanxi Province, China	ZHANG Yiqiao, ZONG Shixiang, LIU Yonghua, et al (6308)
Effects of drought stress on <i>Cyclobalanopsis glauca</i> seedlings under simulating karst environment condition	ZHANG Zhongfeng, YOU Yeming, HUANG Yuqing, et al (6318)
Ecosystem diversity in Jinggangshan area, China	CHEN Baoming, LIN Zhengguang, LI Zhen, et al (6326)
Niche dynamics during restoration process for the dominant tree species in montane mixed evergreen and deciduous broadleaved forests at Mulinzi of southwest Hubei	TANG Jingming, AI Xuenru, YI Yongmei, et al (6334)
Effects of different day/night warming on the photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of <i>Sinocalycanthus chinensis</i> seedlings	XU Xingli, JIN Zexin, HE Weiming, et al (6343)
The effect of simulated chronic high wind on the phenotype of <i>Salsola arbuscula</i>	NAN Jiang, ZHAO Xiaoying, YU Baofeng (6354)
Responses of N and P stoichiometry on mulching management in the stand of <i>Phyllostachys praecox</i>	GUO Ziwu, CHEN Shuanglin, YANG Qingping, et al (6361)
Tree-ring-based reconstruction of the temperature variations in February and March since 1890 AD in southern Jiangxi Province, China	CAO Shoujin, CAO Fuxiang, XIANG Wenhua (6369)
Diel variations and seasonal dynamics of soil respirations in subalpine meadow in western Sichuan Province, China	HU Zongda, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (6376)
Effects of fire disturbance on litter mass and soil carbon storage of <i>Betula platyphylla</i> and <i>Larix gmelinii</i> - <i>Carex schmidtii</i> swamps in the Xiaoxing'an Mountains of Northeast China	ZHOU Wenchang, MU Changcheng, LIU Xia, et al (6387)
Variance analysis of soil carbon sequestration under three typical forest lands converted from farmland in a Loess Hilly Area	TONG Xiaogang, HAN Xinhui, WU Faqi, et al (6396)
Soil-property and plant diversity of highway rocky slopes	PAN Shulin, GU Bin, LI Jiaxiang (6404)
Effects of slope position on soil microbial biomass of <i>Quercus liaotungensis</i> forest in Dongling Mountain	ZHANG Di, ZHANG Yuxin, QU Laiye, et al (6412)
Responses of water quality to landscape pattern in Taihu watershed: case study of 3 typical streams in Yixing	WANG Ying, ZHANG Jianfeng, CHEN Guangcai, et al (6422)
Study on the fairness of resource-environment system of Jiangxi Province based on different methods of Gini coefficient	HUANG Heping (6431)
Simulation of the spatial pattern of land use change in China: the case of planned development scenario	SUN Xiaofang, YUE Tianxiang, FAN Zemeng (6440)
Arable land change dynamics and their driving forces for the major countries of the world	ZHAO Wenwu (6452)
Denitrification characteristics of an aerobic denitrifying bacterium <i>Deffluibacter lusatiensis</i> str. DN7 using different sources of nitrogen	XIAO Jibo, JIANG Huixia, CHU Shuyi (6463)
Study on sustainable development in nanjing based on ecological footprint model	ZHOU Jing, GUAN Weihua (6471)
Applying input-output analysis method for calculation of water footprint and virtual water trade in Gansu Province	CAI Zhenhua, SHEN Laixin, LIU Junguo, et al (6481)
Correlation analysis of spatial variability of Soil available nitrogen and household nitrogen inputs at Pujiang County	FANG Bin, WU Jinfeng, NI Shaoxiang (6489)
Characteristics of the fish assemblages in the intertidal salt marsh zone and adjacent mudflat in the Yangtze Estuary	TONG Chunfu (6501)
A comparison study on the secondary production of macrobenthos in different wetland habitats in Shenzhen Bay	ZHOU Fufang, SHI Xiuhua, QIU Guoyu, et al (6511)
Regurgitant from <i>Orgyia ericae</i> Germar induces calcium influx and accumulation of hydrogen peroxide in <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> (Maxim. ex Kom.) Cheng f. cells	GAO Haibo, ZHANG Shujing, SHEN Yingbai (6520)
Behavior characteristics and habitat adaptabilities of the endangered butterfly <i>Teinopalpus aureus</i> in Mount Dayao	ZENG Juping, ZHOU Shanyi, DING Jian, et al (6527)
Community structure and dynamics of fig wasps in syconia of <i>Ficus microcarpa</i> Linn. f. in Fuzhou	WU Wenshan, ZHANG Yanjie, LI Fengyu, et al (6535)
Review and Monograph	
Review and trend of eco-compensation mechanism on river basin	ZHANG Zhiqiang, CHENG Li, SHANG Haiyang, et al (6543)
Definition and research progress of sustainable consumption: from industrial ecology view	LIU Jingru, LIU Ruiquan, YAO Liang (6553)
The estimation and application of the water footprint in industrial processes	JIA Jia, YAN Yan, WANG Chenxing, et al (6558)
Research progress in ecological risk assessment of mining area	PAN Yajing, WANG Yanglin, PENG Jian, et al (6566)
Scientific Note	
Litter amount and its dynamic change of four typical plant community under the fenced condition in desert steppe	LI Xuebin, CHEN Lin, ZHANG Shuoxin, et al (6575)
Effects of planting densities and modes on activities of some enzymes and yield in summer maize	LI Hongqi, LIN Haiming, LIANG Shurong, et al (6584)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

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 32 卷 第 20 期 (2012 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 20 (October, 2012)

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:1000717	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