

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

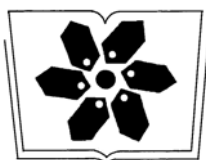
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第11期 Vol.33 No.11 **2013**

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 33 卷 第 11 期 2013 年 6 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 新一代 Landsat 系列卫星: Landsat 8 遥感影像新增特征及其生态环境意义 徐涵秋, 唐 菲 (3249)
- 两种自然保护区设计方法——数学建模和计算机模拟 王宜成 (3258)
- 家域研究进展 张晋东, Vanessa HULL, 欧阳志云 (3269)
- 浅水湖泊生态系统稳态转换的阈值判定方法 李玉照, 刘 永, 赵 磊, 等 (3280)
- 辐射传输模型多尺度反演植被理化参数研究进展 肖艳芳, 周德民, 赵文吉 (3291)
- 微囊藻毒素对陆生植物的污染途径及累积研究进展 靳红梅, 常志州 (3298)

个体与基础生态

- 年龄、性别及季节因素对千岛湖岛屿社鼠最大活动距离的影响 叶 彬, 沈良良, 鲍毅新, 等 (3311)
- 寄主大小及寄生顺序对蝇蛹佣小蜂寄生策略的影响 詹月平, 周 敏, 贺 张, 等 (3318)
- 两种苹果砧木根系水力结构及其 PV 曲线水分参数对干旱胁迫的响应
..... 张林森, 张海亭, 胡景江, 等 (3324)
- 三种根系分泌脂肪酸对花生生长和土壤酶活性的影响 刘 苹, 赵海军, 仲子文, 等 (3332)

种群、群落和生态系统

- 象山港春季网采浮游植物的分布特征及其影响因素 江志兵, 朱旭宇, 高 瑜, 等 (3340)
- 洞头海域网采浮游植物的月际变化 朱旭宇, 黄 伟, 曾江宁, 等 (3351)
- 狗牙根与牛鞭草在三峡库区消落带水淹结束后的抗氧化酶活力 李兆佳, 熊高明, 邓龙强, 等 (3362)
- 三亚岩相潮间带底栖海藻群落结构及其季节变化 陈自强, 寿 鹿, 廖一波, 等 (3370)
- 长期围封对不同放牧强度下草地植物和 AM 真菌群落恢复的影响 周文萍, 向 丹, 胡亚军, 等 (3383)
- 北京松山自然保护区森林群落物种多样性及其神经网络预测 苏日古嘎, 张金屯, 王永霞 (3394)
- 藏北高寒草地生态补偿机制与方案 刘兴元, 龙瑞军 (3404)
- 辽东山区次生林生态系统不同林型树干茎流的理化性质 徐天乐, 朱教君, 于立忠, 等 (3415)
- 施氮对亚热带樟树林土壤呼吸的影响 郑 威, 闫文德, 王光军, 等 (3425)
- 人工高效经营雷竹林 CO₂ 通量估算及季节变化特征 陈云飞, 江 洪, 周国模, 等 (3434)
- 新疆典型荒漠区单食性天花吉丁虫磷元素含量对环境的响应 王 晶, 吕昭智, 宋 菁 (3445)
- 双斑长跗萤叶甲越冬卵在玉米田的空间分布型 张 聪, 葛 星, 赵 磊, 等 (3452)
- 舟山群岛四个养殖獐种群遗传多样性和遗传结构 林杰君, 鲍毅新, 刘 军, 等 (3460)

景观、区域和全球生态

- 乡镇尺度金塔绿洲时空格局变化 巩 杰, 谢余初, 孙 朋, 等 (3470)
- 合并与不合并: 两个相似性聚类分析方法比较 刘新涛, 刘晓光, 申 琪, 等 (3480)

资源与产业生态

基于投入产出表的中国水足迹走势分析 王艳阳,王会肖,张 昕 (3488)

基于 MRICES 模型的气候融资模拟分析 朱潜挺,吴 静,王 铮 (3499)

黄东海陆架区沉积物中磷的形态分布及生物可利用性..... 张小勇,杨 茜,孙 耀,等 (3509)

鄱阳湖采砂南移扩大影响范围——多源遥感的证据 崔丽娟,翟彦放,邬国锋 (3520)

温度、盐度及其互作效应对吉富罗非鱼血清 IGF-I 与生长的影响 强 俊,杨 弘,王 辉,等 (3526)

城乡与社会生态

福建省城镇-交通系统的景观分隔效应 张天海,罗 涛,邱全毅,等 (3536)

研究简报

青藏高原高寒草原区工程迹地面积对其恢复植物群落特征的影响 毛 亮,周 杰,郭正刚 (3547)

黄土山地苹果树树体不同方位液流速率分析..... 孟秦倩,王 健,张青峰,等 (3555)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 314 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 33 * 2013-06



封面图说: 清晨的天山马鹿群——家域是动物行为学和保护生物学的重要概念之一,它在动物对资源环境的适应与选择,种群密度及社会关系等生态学过程研究中有着重要的作用。马鹿属于北方森林草原型动物,在选择生境的各种要素中,隐蔽条件、水源和食物的丰富度是最重要的指标。野生天山马鹿是中国的特产亚种,主要分布在北天山深山海拔1500—3800m 地带的森林草原中,在高山至谷地之间不同高度的坡面上,马鹿按季节、昼夜变化的不同进行采食。

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

DOI: 10.5846/stxb201203310452

王艳阳, 王会肖, 张昕. 基于投入产出表的中国水足迹走势分析. 生态学报, 2013, 33(11): 3488-3498.

Wang Y Y, Wang H X, Zhang X. China water footprint trend analysis based on input-output tables. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(11): 3488-3498.

基于投入产出表的中国水足迹走势分析

王艳阳¹, 王会肖^{1,*}, 张 昕²

(1. 北京师范大学水科学研究院 水沙科学教育部重点实验室 北京 100875;

2. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 水足迹是近年来国内外研究水资源压力的常用方法。基于投入产出表的水足迹分析方法, 分析了我国 1997—2007 年的水足迹状况, 改进了耗水系数的计算方法, 研究了基于稀释理论的灰水足迹计算方法, 计算了外部水足迹及额外水足迹负重以及相应系数, 分析了我国水足迹消费的商品(服务)结构。结果表明, 1997—2007 年我国年均水足迹总量为 2.83 万亿 m³, 总体呈现下降趋势, 其中蓝水足迹为 2183 亿 m³, 灰水足迹为 2.62 万亿 m³ (以Ⅲ类水标准核算)。在水足迹总量中, 间接水足迹占据比例达到 90%, 可见水资源压力的产生主要基于商品或服务的消费。我国水足迹基本上依靠自给, 同时我国承担其他国家的水资源压力的比例很大, 但是整体上呈现下降趋势。从水足迹消费商品(服务)结构上看, 与饮食相关的商品或服务占较大比例。

关键词: 水足迹; 投入产出法; 虚拟水; 水资源

China water footprint trend analysis based on input-output tables

WANG Yanyang¹, WANG Huixiao^{1,*}, ZHANG Xin²

1 College of Water Sciences, Beijing Normal University; Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, Beijing 100875, China

2 College of Water Recourses and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

Abstract: Water footprint (WF) method is a common way to study the water resources pressure in recent years. The total water footprint of China from 1997 to 2002 were calculated by using water footprint method based on the input-output tables in this paper, the method for calculating the water consumption coefficients was improved, and the method for calculating the gray water footprint based on dilution theory was studied in the paper. The external water footprints, the extra water footprints and the corresponding coefficients were also calculated, and the goods (services) structures of the water footprint consumption were analyzed in this study. The results showed that the annual WF of China had a downward trend from 1997 to 2007, with an average annual of 2.83 trillion cubic meters, in which the blue WF was 218.3 billion cubic meters and the gray WF was 2.62 trillion cubic meters (accounting to the third level surface water quality standards). The indirect water footprint accounted for 90% of the total WF, which meant the pressure of water resources mainly comes from the consumption of goods or services. The WF of China depends on self-sufficiency largely, and at the same time China bears a large proportion of the water pressure of other countries, but which has a it shows a downward trend on the whole. In the sight of the structure of goods or services, the diet-related goods or services occupied a higher proportion of WF.

Key Words: water footprints; input-output table methods; virtual water; water resources

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2009SD-10)

收稿日期: 2012-03-31; 修订日期: 2012-11-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huixiaowang@bnu.edu.cn

水足迹指在一定的物质生活标准下,生产一定人群(个体、城市或国家)消费的产品和服务所需要的水资源数量^[1]。这部分水资源数量既包括日常生活实体用水、工农业商品(服务)中的虚拟水和市政用水,同时也包括处理人类生活生产活动排放的污水废水所需要的水资源量。水足迹的概念实际上将实体水消费与虚拟水消费结合起来,将对“蓝水”(地表水及地下水)和“绿水”^[2](降水中未形成地表水、地下水蕴藏在土壤等的水分)的消耗结合起来,将水量和水质的变化结合起来,从更加广阔的角度展现了人们消费对水资源造成的影响。

水足迹是 2002 年由 A. Y. Hoekstra 提出的。Hoekstra 和 Hung^[3]于 2002 年初步估算了国家层面的水足迹, Hoekstra 和 Chapagain^[4]于 2007—2008 年更加系统地估算了国家层面的水足迹。A. Y. Hoekstra 等集中多年研究成果,编写了《水足迹分析手册》^[5],成为全面总结水足迹分析的著作,为水足迹的研究提供了样本。我国的水足迹研究起步相对较早,龙爱华等^[6]于 2003 年对我国西北 4 省区的 2000 年进行了水足迹的研究,王爱华等^[7]于 2005 年对我国的水足迹进行了初步的研究。中国投入产出学会课题组^[8]以 2002 年投入产出表为基础进行了国民经济各生产部门水资源消耗的投入产出分析,研究了我国各生产部门实际水资源的消耗量,成为我国水资源投入产出分析研究中最具权威性的成果。此后,国内学者开始在水足迹和虚拟水的研究中广泛采用投入产出法,赵旭等^[9]采用投入产出法分析了我国的虚拟水贸易情况,王艳阳等^[10]分析了北京市的水足迹状况,廖明珠^[11]等针对投入产出表在资源环境的应用,提出了经济、资源、环境投入产出模型,推进了投入产出模型在水资源领域的应用。许健等^[11]研究了直接消耗系数、间接消耗系数和完全消耗系数的理论和应用方法,解决了投入产出法在虚拟水计算的应用中最为关键的问题。另外,有学者开始在其他问题的研究中采用水足迹方法,例如戚瑞等^[13]提出了若干水足迹评价指标,并将水足迹方法应用于水资源评价,孙克^[14]等在环境影响评价中采用了水足迹指标。

当前水足迹的研究重点依然是方法体系的问题。在一些研究中没有区分用水量与耗水量,如周娇等^[15]在虚拟水的计算中直接采用新鲜水用量而非消耗量。其次,对基于投入产出表的灰水足迹计算还没有系统的研究。另外,水足迹宏观分析指标有待于完善。目前的宏观分析中,常采用水足迹自给率,主要针对存在外部水足迹的地区使用,而无法反映水足迹流出量大地区的状况。

本文采用基于投入产出表的水足迹计算方法,估算了 1997—2007 年中国水足迹状况;对原有蓝水足迹计算方法进行了改进;提出了基于投入产出表的灰水足迹计算方法;对水足迹宏观评价指标进行了发展。

1 数据与方法

1.1 用水量、耗水量与排水量

用水量指用水户对新鲜水的取用量。耗水量指在生产生活过程中通过蒸腾、指在输水、用水过程中,通过蒸腾蒸发、土壤吸收、产品带走、居民和牲畜饮用等各种形式消耗掉而不能回归到地表水体或地下含水层的水量^[16]。在水足迹的概念中,强调采用的水量数据应该除去在用水过程中回到地表水源或地下水源的部分^[5],因此,应采用耗水量数据,而非用水量数据。用水量、耗水量与排水量的关系为^[17]:

$$V_{f,j} = V_{co,j} + V_{d,j} \quad (1)$$

式中, $V_{f,j}$ 为 j 行业用水量; $V_{co,j}$ 为 j 行业耗水量, $V_{d,j}$ 为 j 行业排水量。

农业耗水量,由中国水资源公报提供的农业用水量和农业耗水率确定;第二产业耗水量由中国环境年鉴提供的行业用水量和排水量确定;生活耗水量及第三产业耗水量由中国水资源公报提供的生活用水量、公共用水量、家庭人均用水量和相应耗水率确定。在总水量的平衡方面,依据中国水资源公报提供的数据对各行业耗水量进行适当调整。

1.2 用水投入产出表

依据中国统计年鉴公布的 1997 年、2000 年、2002 年、2005 年、2007 年 5 张 17 部门经济投入产出表,并考虑环境年鉴行业用水排水数据的情况,编制 16 部门中国用水投入产出表。投入产出表结构如图 1。

在用水投入产出表中,应用投入产出表的行模型^[18],即 $\sum_{j=1}^n x_{ij} + Y_i = X_i$, 式中 i 表示横行中的某一部门; j

表示纵列的某一部门; x_{ij} 表示 i 部门产品提供给 j 部门作为生产消耗的数量; Y_i 表示 i 部门的最终使用数量; X_i 表示 i 部门的总产出数量。

定义 $a_{ij} = \frac{x_{ij}}{X_i}$ 为直接消耗系数^[18], 定义 $A = \{a_{ij}\}_{n \times n}$

为直接消耗系数矩阵^[18], 则行模型表达式为 $AX + Y = X$, 式中 X 为总产出列向量, Y 为最终使用列向量。用水投入产出表的完全需求矩阵定义^[18] 为 $B = (E - A)^{-1}$ 。

1.3 耗水系数与排水系数

许健等^[11] 提出了直接用水系数、完全用水系数的概念, 本研究参照直接用水系数、完全用水系数的概念, 提出行业直接耗水系数、完全耗水系数、直接排水系数和完全排水系数。

行业直接耗水系数指生产一单位产品的过程中所消耗掉自然形态的水资源量^[11], 计算公式为:

$$f_{co,j} = V_{co,j} / X_j \quad (2)$$

式中, $f_{co,j}$ 为 j 行业直接耗水系数 ($\text{m}^3/\text{万元}$); $V_{co,j}$ 为 j 行业耗水量 (m^3); X_j 为 j 行业总产出 (万元)。

直接排水系数指生产一单位产品过程中直接排出的污水水量, 计算公式为:

$$f_{d,j} = V_{d,j} / X_j \quad (3)$$

式中, $f_{d,j}$ 为 j 行业直接耗水系数 ($\text{m}^3/\text{万元}$); $V_{d,j}$ 为 j 行业排水量 (m^3); X_j 为 j 行业总产出 (万元)。

一个行业的完全用水系数指该行业增产一单位产品所需整个经济体系总耗水量的增加量^[11], 计算公式为:

$$r_{co} = f_{co} \times B \quad (4)$$

式中, r_{co} 为全行业完全耗水系数行向量; f_{co} 为全行业直接耗水系数行向量; B 为完全需求矩阵。

一个行业完全排水系数指该行业增产一单位产品所需整个经济体系总排水量的增加量, 计算公式为:

$$r_d = f_d \times B \quad (5)$$

式中, r_d 为全行业完全排水系数行向量; f_d 为全行业直接排水系数行向量; B 为完全需求矩阵。

1.4 蓝水足迹与灰水足迹

水足迹包括绿水足迹、蓝水足迹和灰水足迹 3 部分, 绿水足迹、蓝水足迹分别指在水资源利用中由于对绿水和蓝水的消耗产生的水足迹, 灰水足迹指由于污水排放产生的水足迹。绿水足迹、蓝水足迹与水资源量的变化相关, 灰水足迹同水资源质的变化相关。

本研究基于各行业的取水和排水数据, 重点研究蓝水足迹和灰水足迹, 绿水足迹不在本研究的范围内。

蓝水足迹包括实体水消费和虚拟水消费两部分, 实体水消费指居民家庭耗水量, 虚拟水消费指居民消费和政府消费间接造成的耗水量。

居民家庭耗水量通过家庭居民用水量和生活用水耗水系数确定, 依据《中国水资源公报》提供的相应年份数据计算得到。

虚拟水消费额计算公式^[19] 为:

$$VWC_j = r_{co,j} \times P_j \quad (6)$$

式中, VWC_j 为 j 产品消费的虚拟水量 (m^3); $r_{co,j}$ 为 j 产品完全耗水系数 ($\text{m}^3/\text{万元}$); P_j 为 j 产品的消费额 (万元)。

灰水足迹的计算, 一方面要考虑污水排放量及污染物浓度, 另一方面要考虑水质标准以及背景污染物含量。本研究中, 取 COD 作为特征污染物, 分析灰水足迹状况。灰水足迹计算公式^[5] 为:

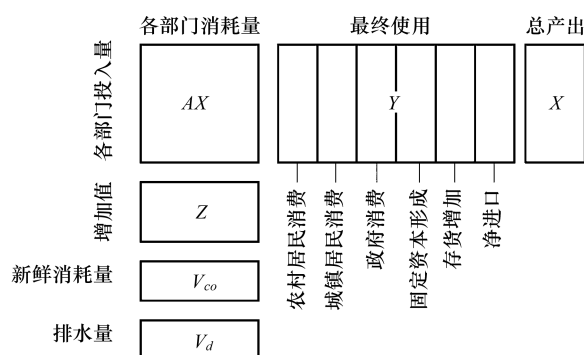


图1 用水投入产出表结构图

Fig. 1 Structure of water input-output table

$$WF_{grey} = \frac{L}{1000(c_{max} - c_{nat})} \quad (7)$$

式中, WF_{grey} 为灰水足迹(m^3); L 为污染负荷(mg); c_{max} 为最大允许污染物浓度(mg/L); c_{nat} 为自然条件下水体背景污染物浓度(mg/L)。

污染负荷的计算,分为两种情况,一是居民生活直接排放污废水造成的污染负荷,计算公式如下:

$$L_d = 1000WW_d \times c_{w,d} \quad (8)$$

式中, L_d 为居民生活直接排放污废水造成的污染负荷; WW_d 为生活污水排放量(m^3); $c_{w,d}$ 为居民生活直接排放污废水的特征污染物浓度(mg/L),由环境年鉴提供的统计值确定。

另外一种情况是有商品(服务)消费造成的污染负荷,按照虚拟排水量进行计算,公式如下:

$$L_j = 1000VWW_j \times c_{w,j} \quad (9)$$

式中, VWW_j 为 j 行业虚拟排水量(m^3); $c_{w,j}$ 为 j 行业特征污染物排放浓度(mg/L),本研究为 COD,工业产品由中国环境年鉴提供的统计值确定,农业产品和第三产业以生活特征污染物排放浓度为参照确定。

定义 k_j 为灰水足迹折算系数, $k_j = \frac{c_{w,j}}{c_{max} - c_{nat}}$, 则灰水足迹计算公式如下:

$$WF_{grey,j} = k_j \times VWW_j \quad (10)$$

虚拟排水量计算同虚拟水计算方法类似,计算公式如下:

$$VWW_j = r_{d,j} \times P_j \quad (11)$$

式中, $r_{d,j}$ 为 j 行业完全排水系数($m^3/万元$)。

c_{max} 的取值依据《中国地表水环境质量标准》(GB3838—2002)确定,本研究分别按照Ⅲ类、Ⅳ类、Ⅴ类水标准确定 c_{max} 的取值,对于 COD 分别为 20mg/L, 30mg/L, 40mg/L。在自然状况下,污染物含量很低,因此 $c_{nat} = 0$ 。

1.5 外部水足迹与额外水足迹负重

伴随区域间的商品(服务)贸易,会产生虚拟水和虚拟排水量在区域间的流动,对于区域,虚拟水的净流入计算公式^[19]为:

$$VWI_j = r_{co,j} \times P_{j,net,imp} \quad (12)$$

式中, VWI_j 为 j 行业虚拟水净流入量; $P_{j,net,imp}$ 为 j 行业商品(服务)净进口量(万元)。

同理,虚拟排水量的净流入计算公式为:

$$VWWI_j = r_{d,j} \times P_{j,net,imp} \quad (13)$$

式中, $VWWI_j$ 为 j 行业虚拟排水量净流入量; $P_{j,net,imp}$ 为 j 行业商品(服务)净进口量(万元)。

虚拟水净流入量与虚拟排水量净流入值反映水资源压力的转移状况,如果虚拟水(虚拟排水量)净流入量为正值,说明本地区通过贸易方式,将水资源压力转移到其他地区;虚拟水(虚拟排水量)净流入量为负值,说明本地区通过贸易方式,承载了其他地区的水资源压力。

如果虚拟水(虚拟排水量)净流入量为正,则定义该值为本地区的外部水足迹^[20]。外部水足迹由外部蓝水足迹和外部灰水足迹构成,其中,外部蓝水足迹计算公式如下:

$$WF_{ex,blue} = \begin{cases} \sum VWI_j & \text{假如 } \sum VWI_j > 0 \\ 0 & \text{假如 } \sum VWI_j \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

外部灰水足迹计算公式如下:

$$WF_{ex,gre} = \begin{cases} \sum k_j \times VWWI_j & \text{假如 } \sum k_j \times VWWI_j > 0 \\ 0 & \text{假如 } \sum k_j \times VWWI_j \leq 0 \end{cases} \quad (15)$$

如果虚拟水(虚拟排水量)净流入量为负,则定义该值的相反数为本地区的外部水足迹负重。额外水足迹负

重由额外蓝水足迹负重和额外灰水足迹构成,其中,额外蓝水足迹负重计算公式如下:

$$WF_{ep,blue} \begin{cases} - \sum VWI_j & \text{假如 } \sum VWI_j < 0 \\ 0 & \text{假如 } \sum VWI_j \geq 0 \end{cases} \quad (16)$$

额外灰水足迹负重计算公式如下:

$$WF_{ep,greys} \begin{cases} - \sum k_j \times VWI_j \\ 0 \end{cases} \quad (17)$$

在外部水足迹和额外水足迹负重概念的基础上,定义区域水足迹的两个指标,即水资源自给率和额外水足迹负重系数。水资源自给率^[21](WSS)反映区域的水资源自给情况,如果等于1,说明实现完全自给,值越小说明越依赖外部水资源,计算公式^[21]如下:

$$WSS = (1 - \frac{WF_{ex}}{WF}) \times 100\% \quad (18)$$

式中,WF为区域总水足迹,由蓝水足迹和灰水足迹构成。

额外水足迹负重系数(WEE)反映区域承载其他地区水资源压力的程度,如果等于零,说明没有承载其他地区水资源压力,数值越大说明承载其他地区水资源压力的程度越大,计算公式如下:

$$WEE = \frac{WF_{ep}}{WF} \times 100\% \quad (19)$$

2 中国水足迹状况

2.1 中国水足迹构成

1997年至2007年,中国年均总水足迹为2.83万亿 m^3 ,其中蓝水足迹为2183亿 m^3 ,灰水足迹为2.62万亿 m^3 (以三类水标准核算)。在总水足迹中,灰水足迹占据主导地位,灰水足迹所占比例达到了90%以上,1997—2007年,灰水足迹所占比例最大时达到了94%,最小年份也有89%。总水足迹呈现下降趋势,年均下降率大约为17%;蓝水足迹变化不明显,而灰水足迹下降较多,年均下降率达到18%。年总水足迹及其构成的变化如图2。

1997—2007年,全国人均水足迹年均值为2220 m^3 ,其中人均蓝水足迹年均值为170 m^3 ,灰水足迹人均值为2050 m^3 。农村居民人均水足迹为1730 m^3 ,城镇居民人均水足迹为2730 m^3 。城镇居民人均水足迹值达到了农村居民人均水足迹的1.5倍。

2.2 蓝水足迹消费结构

1997年至2007年,由居民直接消耗实体水而产生的蓝水足迹年均值为280亿 m^3 ,由虚拟水产生的蓝水足迹年均值为1904亿 m^3 ,显然,虚拟水量在蓝水足迹中占据很大比例,而实体水消耗占据的比例几乎可以忽略。由此可见,居民对商品和服务的消费是蓝水足迹消费的最主要方式。图3表示1997年至2007年蓝水足迹年际变化情况,可以看出,虚拟水消费总体上呈现下降趋势,但是下降程度并不明显。实体水消费量比较稳定。

表1为1997年至2007年各行业虚拟水消费状况。农业行业产品的虚拟水消费量很大,均值达到1060亿 m^3 ,占总虚拟水消费总量的56%;其次是食品、饮料制造及烟草制品业,达到了287.61亿 m^3 ,占虚拟水消费总量的15%。而采矿业和建筑业的虚拟水消费量很小,分别仅有0.70亿 m^3 和1.44亿 m^3 ,所占比例均不足0.1%。各行业的虚拟水消费量既有增长的行业,也有下降的行业,其中年增长最快的行业是运输仓储邮

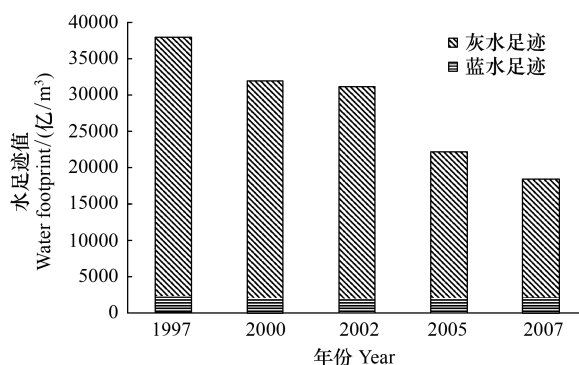


图2 中国年水足迹变化

Fig. 2 Water footprint of China

政、信息传输、计算机服务和软件业其增长率为 53%；其次是其他服务业，其增长率为 36%。而年下降最快的行业是非金属矿物制品业，其下降率为 36%；其次是农业，其下降率为 17%。变化不大的行业是房地产业、租赁和商务服务业，金属产品制造业，采矿业。

在农村居民消费中，农业的虚拟水消费较大，达到 574.77 亿 m^3 ，占 73%；其次是食品、饮料制造及烟草制品业，达到了 106.44 亿 m^3 ，占 14%。建筑业、采矿业的虚拟水消费较小，所占比例不足 0.1% 在 16 个行业中，其他服务业 (16) 年均增长率最大，达到了 38%；其次是运输仓储邮政、信息传输、计算机服务和软件业，达到了 22%。非金属矿物制品业年均下降率最大，达到了 43%，其次是金属产品制造业、农业，达到了 25%。机设备制造业、金融业等行业变化不大。

在城镇居民消费中，农业虚拟水消费最大，达到了 474.43 亿 m^3 ，占 50%；其次是食品、饮料制造及烟草制品业，达到了 181.17 亿 m^3 ，占 19%。采矿业的虚拟水消费最小，仅为 0.41 亿 m^3 ，占 0.1%；其次为建筑业，仅为 1.44 亿 m^3 ，占 0.2%。在 16 个行业中，12 个行业处于增长态势，其他服务业年均增长率最大，达到了 63%；其次是运输仓储邮政、信息传输、计算机服务和软件业，达到了 54%。非金属矿物制品业年均下降率最大，达到了 34%，其次是农业，达到了 9%。采矿业等行业变化不大。

在政府消费中，虚拟水消费集中在其他服务业，年均达到了 153 亿 m^3 ，占 90%。其他行业所占比例很小，甚至为零。

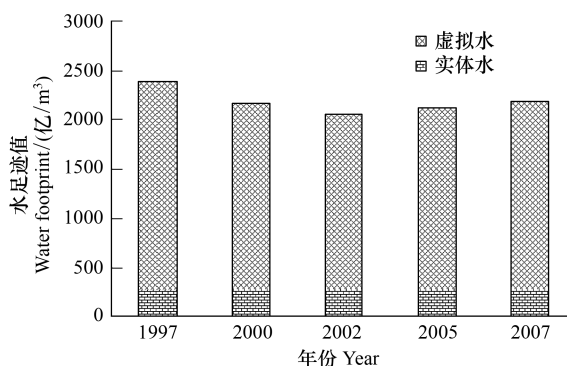


图3 蓝水足迹年际变化

Fig.3 Blue water footprint of China

表1 各行业虚拟水消费状况

Table 1 Virtual water consumption of different sectors of China

行业部门 Sectors	虚拟水总消费量 Virtual water consumption/(亿 m^3)				
	1997 年	2000 年	2002 年	2005 年	2007 年
农、林、牧、渔业(01)	1442.20	1267.73	1124.64	792.70	677.08
采矿业(02)	0.61	0.37	0.90	1.16	0.49
食品、饮料制造及烟草制品业(03)	322.31	277.82	166.11	243.62	428.22
纺织、服装及皮革产品制造业(04)	66.17	56.15	42.25	70.42	86.34
其他制造业(05)	14.64	9.97	10.21	18.49	18.83
炼焦、燃气、使用加工业及电力、热力及水的生产和供应业(06)	21.93	22.63	31.03	50.32	72.57
化学工业(07)	23.62	29.48	17.42	33.19	30.36
非金属矿物制品业(08)	5.30	2.63	1.37	3.55	0.89
金属产品制造业(09)	5.17	3.69	3.43	5.49	4.51
机械设备制造业(10)	50.26	62.84	39.08	102.47	107.97
建筑业(11)	0.00	0.00	0.00	0.00	7.18
运输仓储邮政、信息传输、计算机服务和软件业(12)	6.52	7.28	12.21	42.59	35.65
批发零售贸易、住宿和餐饮业(13)	44.14	47.28	85.13	90.41	112.02
房地产业、租赁和商务服务业(14)	16.64	18.20	6.92	18.12	17.60
金融业(15)	1.56	1.48	4.84	4.36	4.50
其他服务业(16)	87.96	81.15	231.03	362.11	303.72

(01): Agriculture; (02): Mining; (03): Manufacture of foods and tobacco; (04): Manufacture of textile, footwear, caps, leather, fur, feather (down) and its products; (05): Manufacture of other products; (06): Processing of petroleum, coking, processing of nuclear fuel & Production and supply of electric power and heat power; (07): Chemical industry; (08): Manufacture of nonmetallic mineral products; (09): Manufacture of metal products; (10): Manufacture of machinery and equipment; (11): Construction; (12): Traffic, transport and storage, post, information transmission, computer services and software; (13): Wholesale, retail trades, hotels and catering services; (14): Real estate & leasing and business services; (15): Financial intermediation; (16): other services

虚拟水的消费量受两个因素影响,即完全耗水系数和消费总额。消费总额反映商品(服务)消费结构;而完全耗水系数与行业直接耗水及产业链相关,反映技术水平与产业结构对水足迹的影响。从1997年至2007年各行业完全耗水系数分析,农业完全耗水系数最大,其次是食品、饮料制造及烟草制品业。1997—2007年各行业的完全耗水系数呈现下降趋势,其中年均下降率最大的行业是非金属矿物制品业,房地产业、租赁和商务服务业,达到了20%。而机械设备制造业,运输仓储邮政、信息传输、计算机服务和软件业完全耗水系数变化很小。

各行业直接耗水系数占完全耗水系数的比例并不相同,图4表示了2005年各行耗水系数状况。从图中可以看出,农业的直接耗水系数所占比例最大,达到了77%,其次是炼焦、燃气、使用加工业及电力、热力及水的生产和供应业,达到了65%。而机械设备制造业的间接耗水系数所占比例最大,达到了99%,其次是建筑业,达到了97%。从计算结果可以看出,间接耗水系数占完全耗水系数的比例超过50%的行业数达到了14个,占总行业数目的87.5%;间接耗水系数占完全耗水系数的比例超过90%的行业数达到了9个,占总行业数目的64%。可见,多数商品(服务)中蕴含的虚拟水主要来自生产过程中的虚拟水投入,即原材料中蕴含的虚拟水,而非新鲜水投入。表明,产业链的累积效应对蓝水足迹的影响很大。

2.3 灰水足迹消费结构

1997年至2007年,由居民直接排放污水而产生的灰水足迹年均值为0.32万亿 m^3 (按照Ⅲ类水标准核算),由虚拟排水产生的灰水足迹年均值为2.3万亿

m^3 。显然,虚拟排水量在灰水足迹中占据很大比例,而实体直接排放污水占据的比例几乎可以忽略。由此可见,居民对商品和服务的消费是灰水足迹消费的最主要方式。灰水足迹总体上呈现下降趋势,年下降率为25%。间接灰水足迹总体上呈现下降趋势,年均下降率为30%,直接灰水足迹量总体上比较稳定。

从各行业虚拟排水量状况分析,农业的年均虚拟排水量很大,达到650亿 m^3 ,占总虚拟水排水量的46%;其次是其他服务业,达到了205亿 m^3 ,占15%;食品、饮料制造及烟草制品业达到了199亿 m^3 ,占14%。建筑业、采矿业的虚拟排水量很小,所占比例不足0.1%。各行业的虚拟排水量总体上呈现下降趋势,非金属矿物制品业下降最快,年均下降率达到了57%;其次是采矿业,年均下降率达到了39%。年均增长最快的行业是运输仓储邮政、信息传输、计算机服务和软件业,其增长率为10%;其次是批发零售贸易、住宿和餐饮业,增长率为8%。变化不大的行业是食品、饮料制造及烟草制品业。

在农村居民消费中,农业的虚拟排水量最大,年均值达到351.80亿 m^3 ,占总量的65%;其次是食品、饮料制造及烟草制品业,达到了75亿 m^3 ,占14%。建筑业、采矿业的虚拟排水量较小,所占比例不足0.1%。在城镇居民消费中,农业的虚拟排水量最大,达到290亿 m^3 ,占42%;其次是食品、饮料制造及烟草制品业,达到了124亿 m^3 ,占18%。建筑业、采矿业的虚拟排水量较小,所占比例不足0.1%。在政府消费中,虚拟排水量集中在其他服务业,年均达到了149.14亿 m^3 ,占93%。其他行业所占比例很小,甚至为零。

虚拟排水量受3个因素影响,即灰水足迹折算系数、完全排水系数和消费总额。消费总额反映商品(服务)消费结构;而完全排水系数与行业直接排水及产业链相关,反映技术水平与产业结构对灰水足迹的影响;灰水足迹折算系数与污染物的浓度、水质标准及污染物背景浓度相关,反映商品(服务)生产工艺、环境品质

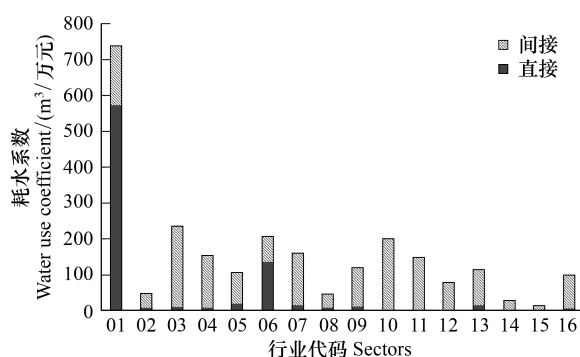


图4 2005年耗水系数情况

Fig. 4 Water use coefficients of different sectors of China in 2005

01 农、林、牧、渔业;02 采矿业;03 食品、饮料制造及烟草制品业;04 纺织、服装及皮革产品制造业;05 其他制造业;06 炼焦、燃气、使用加工业及电力、热力及水的生产和供应业;07 化学工业;08 非金属矿物制品业;09 金属产品制造业;10 机械设备制造业;11 建筑业;12 运输仓储邮政、信息传输、计算机服务和软件业;13 批发零售贸易、住宿和餐饮业;14 房地产业、租赁和商务服务业;15 金融业;16 其他服务业

要求及现状对灰水足迹的影响。图 6 表示了 2005 年排水系数情况。各行业直接排水系数占完全排水系数的比例并不相同,农业的直接排水系数所占比例最大,达到了 76%;其次是炼焦、燃气、使用加工业及电力、热力及水的生产和供应业,达到了 67%。而机械设备制造业的间接排水系数所占比例最大,达到了 99%;其次是建筑业,达到了 97%。从计算结果可以看出,间接排水系数占完全排水系数的比例超过 50% 的行业数达到了 14 个,占总行业数目的 87.5%;间接排水系数占完全排水系数的比例超过 90% 的行业数达到了 7 个,占总行业数目的 44%。可见,多数商品(服务)中蕴含的虚拟排水量主要来自生产过程中的虚拟排水量累积,即原材料中蕴含的虚拟排水量,而非直接污废水排放量。表明,产业链的累积效应对灰水足迹的影响很大。

表 2 给出不同年份在不同水质标准要求下的灰水足迹折算系数,显然水质标准越低折算系数越小。水质标准越低意味着单位水体允许容纳的污染物质越大,因此对于同样的污染负荷所需要的稀释水量越小,即灰水足迹越小。表 3 给出了不同年份在不同水质标准下的灰水足迹以作对比,但是本文在对水足迹进行分析时,采用按照Ⅲ类水标准核算的结果。

表 2 不同年份不同水质标准下灰水足迹折算系数

Table 2 Conversion coefficient of gray water footprint under different water quality standards in 1997 to 2007

水质标准 Water quality standards	1997 年		2000 年		2002 年		2005 年		2007 年	
	生活	工业	生活	工业	生活	工业	生活	工业	生活	工业
Ⅲ类 Standard Ⅲ	23.7	18.1	18.1	16.8	14.1	16.9	11.4	15.3	10.4	14.0
Ⅳ类 Standard Ⅳ	15.8	12.1	12.1	11.2	9.4	11.2	7.6	10.2	6.9	9.4
Ⅴ类 Standard Ⅴ	11.8	9.0	9.1	8.4	7.0	8.4	5.7	7.6	5.2	7.0

表 3 不同年份不同水质标准下灰水足迹(亿 m³)

Table 3 Gray water footprint under different water quality standards in 1997 to 2007

水质标准	1997 年	2000 年	2002 年	2005 年	2007 年
Ⅲ类	32521	26592	25783	16924	13239
Ⅳ类	21681	17728	17188	11283	8826
Ⅴ类	16261	13296	12891	8462	6619

3.4 外部水足迹与额外水足迹负重状况

1997 年至 2007 年,年均虚拟水净流出量为 360 亿 m³,年均虚拟排水量流出量为 460 亿 m³。图 6,7 表示了年外部水足迹(额外水足迹负重)。总体来讲,虚拟水和虚拟排水量的净流出量呈现下降的趋势。1997—2007 年,中国同其他区域的水足迹交换表现为额外水足迹负重。

依据外部水足迹与额外水足迹负重状况,计算水足迹评价指标。1997 年、2000 年、2002 年、2005 年及 2007 年水资源自给率均为 100%,而额外水足迹负重系数分别为 62%、67%、0.4%、3.4%、7.7%。结果表明,我国水资源实现自给,没有将水资源压力转移到其他地区,相反,我国承载了其他地区的水资源压力。总体来讲,我国水资源压力主要来自本区域内水足迹消费,额外水足迹负重对水资源压力也有一定的影响,特别是 2000 年之前,额外水足迹负重超过 50%,而 2000 年之后发生了很大的变化,额外水足迹负重系数明显降低。结果还同时表明,灰水足迹在额外水足迹负重中占据较大比例,超过了 70%,个别年份超过了 90%,额外

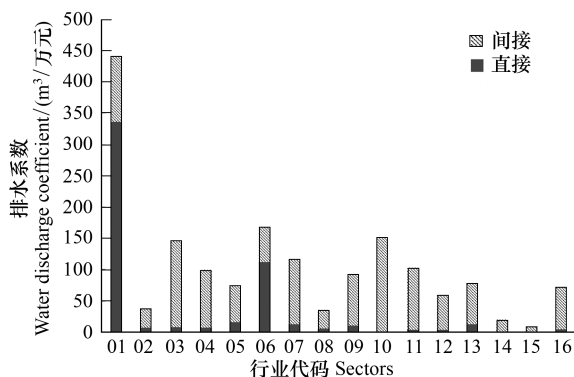


图 5 2005 年各行业排水系数

Fig. 5 Water discharge coefficients of different sectors of China in 2005

水足迹负重对中国水资源压力的影响主要体现在灰水足迹方面。

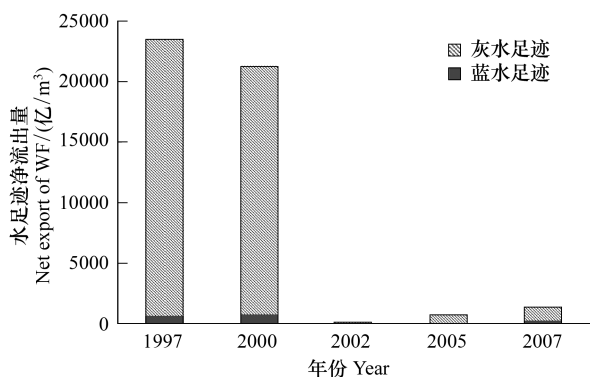


图6 虚拟水净流出(流入)状况

Fig. 6 Net export (import) of virtual water of different sectors of China in 1997 to 2007

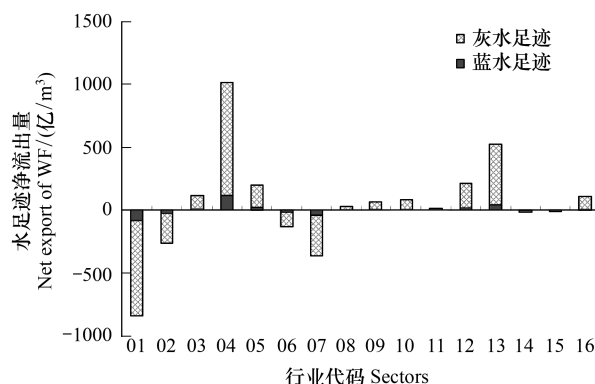


图7 2005年水足迹净流出(流入)状况

Fig. 7 Net export (import) of virtual water of different sectors of China in 2005

3 讨论

本研究得出中国年均总水足迹为2.83 万亿 m^3 , 其中蓝水足迹为2183 亿 m^3 , 灰水足迹为2.62 万亿 m^3 。A. Y. Hoekstra 等^[22]的研究表明, 中国年均水足迹为8833.9 亿 m^3 , 显然本研究的结果偏大。一方面, 本研究计算了灰水足迹, 而后者的研究中没有计算该部分, 因此本研究的水足迹总量高于后者; 另一方面, A. Y. Hoekstra 等^[22]的研究中, 用于本国农业产品耗水量为7711 亿 m^3 , 除去农业用水耗水量2374 亿 m^3 ^[16], 绿水足迹约为5337 亿 m^3 。本研究没有考虑农业生产的绿水消耗, 而且区分了用水与耗水量的差别, 因此蓝水足迹结果比后者的水足迹小。

蓝水足迹和灰水足迹是本文研究的重点。蓝水足迹计算的关键点之一是要搞清楚水的真实消耗量。本文考虑了用水与耗水的关系, 避免将排出生产系统的水计入产品水的消耗中, 较真实的计算了蓝水足迹。但是, 本文对不同行业部门蓝水消耗都认为是完全相同的“蓝水”, 没有考虑不同行业或不同地区用水质量的不同。这方面主要是由于分质供水目前还没有完全实现, 也没有相关的数据, 从这一点上看, 蓝水足迹的结果没有完全反映实际的状况。但是不同行业或不同地区用水质量的差别主要反映供水条件的状况, 不能反映国民经济结构、生产水平、消费规模等的差别, 因此认为各部门各地区是相同的“蓝水”是合理的。

灰水足迹与蓝水足迹、绿水足迹不同, 其关注的重点是水质的变化。由于影响水质变化的物质很多, 有不同的指标衡量, 同时对于不同的行业, 排水中物质种类和浓度也并不相同。本文采用 COD 作为评估的指标, 主要考虑到 COD 一直是我国水环境研究关注的重点, 具有代表性。另外, 不同地区的水污染物背景值也是不同的, 本文忽略该因素的影响, 设定背景为无污染状况。同时对于水质容许的污染物值也颇具有人为因素, 本文采用水环境质量标准中规定的不同类别水质的标准值进行灰水足迹的估算。从以上因素分析, 灰水足迹应该比实际情况偏小。

4 结论

(1) 1997 年至 2007 年, 中国年均总水足迹为2.83 万亿 m^3 , 其中蓝水足迹为2183 亿 m^3 , 灰水足迹为2.62 万亿 m^3 (以Ⅲ类水标准核算)。在总水足迹中, 灰水足迹占据主导地位, 灰水足迹所占比例达到了90% 以上。全国人均水足迹年均值为2220 m^3 , 其中人均蓝水足迹年均值为170 m^3 , 灰水足迹人均值为2050 m^3 。农村居民人均水足迹为1730 m^3 , 城镇居民人均水足迹为2730 m^3 。城镇居民人均水足迹值达到了农村居民人均水足迹的1.5 倍。中国水足迹总量、蓝水足迹、灰水足迹以及各行业的水足迹消费量均呈现下降的趋势。

(2) 1997 年至 2007 年, 由居民直接消耗实体水而产生的蓝水足迹年均值为280 亿 m^3 , 由虚拟水产生的蓝水足迹年均值为1904 亿 m^3 , 显然, 虚拟水量在蓝水足迹中占据很大比例, 而实体水消耗占据的比例几乎可以

忽略。农业行业产品的虚拟水消费量很大达到 1060 亿 m^3 , 占总虚拟水消费总量的 56%; 其次是食品、饮料制造及烟草制品业), 达到了 287.61 亿 m^3 , 占虚拟水消费总量的 15%。采矿业和建筑业的虚拟水消费量很小。

(3) 1997 年至 2007 年, 由居民直接排放污废水而产生的灰水足迹年均值为 0.32 万亿 m^3 (按照Ⅲ类水标准核算), 由虚拟排水产生的灰水足迹年均值为 2.3 万亿 m^3 。显然, 虚拟排水量在灰水足迹中占据很大比例, 而实体直接排放污废水占据的比例几乎可以忽略。农业的年均虚拟排水量很大, 达到 650 亿 m^3 , 占总虚拟水排水量的 46%; 其次是其他服务业, 达到了 205 亿 m^3 , 占 15%; 食品、饮料制造及烟草制品业达到了 199 亿 m^3 , 占 14%。建筑业、采矿业的虚拟排水量很小。

(4) 1997 年/2000 年、2002 年、2005 年、2007 年水资源自给率均为 100%, 而额外水足迹负重系数分别为 62%、67%、0.4%、3.4%、7.7%。结果表明, 我国水资源实现自给, 没有将水资源压力转移到其他地区, 相反, 我国承载了其他地区的水资源压力。

References:

- [1] Hoekstra A Y. Human appropriation of natural capital: a comparison of ecological footprint and water footprint analysis. *Ecological Economics*, 2009, 68(7): 1963-1974.
- [2] Liu C M, Li Y C. "Green water" and water conservation: discussions on the connotation of China's water resource. *Impact of Science on Society*, 2006, (1): 16-20.
- [3] Hoekstra A Y, Hung P Q. Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade. *Global Environmental Change*, 2005, 15(1): 45-56.
- [4] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management*, 2007, 21(1): 35-48.
- [5] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, Mekonnen M M. *The Water Footprint Assessment Manual*. London: Earthscan Press, 2011.
- [6] Long A H, Xu Z M, Zhang Z Q. Estimate and analysis of water footprint in northwest China, 2000. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(6): 692-700.
- [7] Wang X H, Xu Z M, Long A H. Estimation of water footprint of China in 2000. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(5): 774-780.
- [8] Researching Group of Chinese Input-Output Association. input-output analysis of water resources consumption and water input coefficient in national economic sectors: the fifth of researching report series on input-output tables of 2002. *Statistical Research*, 2007, 24(3): 20-25.
- [9] Zhao X, Yang Z F, Chen B. Study on Chinese virtual water trade and consumption in an input-output framework. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(2): 286-294.
- [10] Wang Y Y, Wang H X, Cai Y. Calculation and analysis of water footprint in Beijing City. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4): 954-960.
- [11] Xu J, Chen, X K, Yang C H, Calculation method of direct water use coefficient and cumulate water use coefficient. *Water resources planning and design*, 2002, (4): 28-30, 36-36.
- [12] Liao M Q, *Economy, resources and environment input-output model research*. Beijing: Capital University of Economics & Business Press, 2005.
- [13] Qi R, Geng Y, Zhu Q F. Evaluation of regional water resources utilization based on water footprint method. *Journal of Natural Resources*, 2009, 29(3): 1563-1570.
- [14] Sun K, Xu Z M. A spatial econometric analysis of the impacts of human factors on environment in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1563-1570.
- [15] Zhou J, Shi A N. Method for calculating virtual water trade and demonstration. *China Population Resources and Environment*, 2008, 18(4): 184-188.
- [16] The Ministry of Water Resources of The People's Republic of China, *Water resources bulletin (1997)*. Beijing: China Water Power Press, 1998.
- [17] Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12452—2008, *The General Principles of Water Balance Test in Enterprises*. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [18] Liao M Q, *Input-output table and the extended table analysis*. Beijing: Capital University of Economics & Business Press, 2009.
- [19] Zhao X, Chen B, Yang Z F. National water footprint in an input-output framework—a case study of China 2002. *Ecological Modelling*, 2009, 220(2): 245-253.
- [20] 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.

- [21] Ma J, Wang D X, Lai M L, Wang Y. Water footprint — an application in water resources research. *Resources Science*, 2005, 27(5): 96-100.
- [22] Hoekstra A Y, Chapagain A K. *Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources*. Oxford: Wiley-Blackwell Publishing Ltd, 2008.

参考文献:

- [6] 龙爱华, 徐中民, 张志强. 西北四省(区) 2000 年的水资源足迹. *冰川冻土*, 2003, 25(6): 692-700.
- [7] 王新华, 徐中民, 龙爱华. 中国 2000 年水足迹的初步计算分析. *冰川冻土*, 2005, 27(5): 774-780.
- [8] 中国投入产出学会课题组. 国民经济各部门水资源消耗及用水系数的投入产出分析——2002 年投入产出表系列分析报告之五. *统计研究*, 2007, 24(3): 20-25.
- [10] 王艳阳, 王会肖, 蔡燕. 北京市水足迹计算与分析. *中国生态农业学报*, 2011, 19(4): 954-960.
- [11] 许健, 陈锡康, 杨翠红. 直接用水系数和完全用水系数的计算方法. *水利规划与设计*, 2002, (4): 28-30, 36-36.
- [12] 廖明球. *经济、资源、环境投入产出模型研究*. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2005.
- [13] 戚瑞, 耿涌, 朱庆华. 基于水足迹理论的区域水资源利用评价. *自然资源学报*, 2011, 26(3): 476-495.
- [14] 徐中民. 环境影响评价中人文因素作用的空间计量. *生态学报*, 2009, 29(3): 1563-1570.
- [15] 周娇, 史安娜. 区域虚拟水贸易计算方法及实证. *中国人口·资源与环境*, 2008, 18(4): 184-188.
- [16] 中华人民共和国水利部. 1997 年水资源公报. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [17] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12452—2008, 企业水平衡测试通则. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [18] 廖明球. *投入产出及其扩展分析*. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2009.
- [21] 马静, 汪党献, 来海亮, 王茵. 中国区域水足迹的估算. *资源科学*, 2005, 27(5): 96-100.

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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

本期责任副主编 朱永官

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 33 卷 第 11 期 (2013 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 11 (June, 2013)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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: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 90.00 元