

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

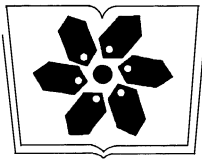
Acta Ecologica Sinica



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, 褚淑祎 (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/stxb201203160355

蔡振华, 沈来新, 刘俊国, 赵旭. 基于投入产出方法的甘肃省水足迹及虚拟水贸易研究. 生态学报, 2012, 32(20): 6481-6488.

Cai Z H, Shen L X, Liu J G, Zhao X. Applying input-output analysis method for calculation of water footprint and virtual water trade in Gansu Province. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(20): 6481-6488.

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¹, 沈来新², 刘俊国^{1,*}, 赵旭³

(1. 北京林业大学自然保护区学院, 北京 100083; 2. 北京市水利规划设计研究院, 北京 100048;

3. 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

摘要: 随着社会化进程的加快, 地处西北内陆的甘肃省正面临日益严峻的水资源短缺危机, 社会经济发展受到一定程度的制约, 水生态环境也呈现出恶化的趋势。水足迹是近年来提出的衡量人类活动对于水生态系统影响的指标, 能够帮助决策者制定水资源管理及保护的政策, 从而实现地区水资源的可持续利用。运用单区域投入产出方法计算并分析了甘肃省 1997、2002 和 2007 年第一产业、第二产业和第三产业部门的虚拟水强度、水足迹以及虚拟水贸易情况。结果显示: (1) 甘肃省第一产业的虚拟水强度最高, 但呈现出逐年下降的趋势, 水足迹也因此有所下降; (2) 虚拟水贸易方面, 甘肃省以虚拟水净出口为主, 尤其是第一产业, 每年虚拟水净出口量约全省总水资源量的 10%。建议甘肃省继续巩固已有的节水成果, 调整产业结构, 大力发展节水型产业和高新技术产业。同时建议适当调整贸易格局, 合理控制虚拟水出口, 以缓解当地水资源短缺危机, 保障地区水安全与生态安全。

关键词: 水足迹; 虚拟水贸易; 投入产出分析; 甘肃省

Applying input-output analysis method for calculation of water footprint and virtual water trade in Gansu Province

CAI Zhenhua¹, SHEN Laixin², LIU Junguo^{1,*}, ZHAO Xu³

1 School of Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Beijing Institute of Water, Beijing 100048, China

3 School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: In recent decades, China's fast economic and social development has put a heavy burden on its water demand. Located in the northwest of China, Gansu Province is facing more and more serious water crisis. Water footprint is an indicator that is used to measure the water use derived from the consumed products. The water footprint concept will help the policymakers to make more rational policies for water resources management. Another relevant concept is the virtual water, which measures the embodied water in the traded products. For water scarce regions, the virtual water import of water intensive products will relieve the local pressure for water supply. Four methods can be used for the water footprint calculation, in which an input-output model provides a reliable and constantly updated framework for the disaggregated sectors. The quantification results are ready for the local government to carry out a better water resource management practice. This paper presents a framework of calculating and evaluating the water footprint and the virtual water trade of three sectors in Gansu Province with a single regional input-output model.

The results showed that the virtual water intensity (water use per final demand, m³/Yuan) for the primary sector is the

基金项目: 国家自然科学基金项目(91025009, 41161140353); 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-09-0222); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(HJ2010-1); 科技部国际合作项目(2012DFA91530)

收稿日期: 2012-03-16; **修订日期:** 2012-07-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: water21water@yahoo.com

highest among the three sectors. However, the primary sector contributes most to the decrease of the total virtual water intensity in 2007. The primary sector also has the highest direct water use rate (80%), which is calculated as the proportion of direct virtual water intensity to the total virtual water intensity. While the direct water use rate of the second and third sectors is under 20%. The above mentioned results indicate that reducing the agricultural water use is one of the key measures to the water foot print reduction. Compared to the water footprint in 1997, the water footprint of the three sectors all increased in 2002 (from 11.9 billion m^3 to 14.5 billion m^3). However, the water footprint has seen a sharp decrease in 2007. It can be concluded that the main reason of the water footprint decrease is the successful water saving practice in agriculture.

As for a region suffering from water scarcity, externalizing the water footprint is one of the methods to alleviate the region's pressure for water supply. The proportion of the external water footprint to the total water footprint has been increasing for the three years considered in Gansu Province. However, the external water footprint of the primary sector only accounts for 10% of the water footprint of the primary sector, which means that the food demand in Gansu Province largely depends on its own production. In addition, Gansu Province continuously exported its agricultural virtual water to other regions for the three years considered. In 2007, the virtual water export of the primary sector amounts to 10% of the total water resource and 25% of the total water use in the Province. The paper finally suggests that the policymakers in Gansu Province should keep reinforcing the water saving achievement, adjusting the industrial structure and trade patterns, as well as seeking for the possibility of the virtual water strategy for the province.

Key Words: water footprint; virtual water trade; input-output analysis; Gansu Province

水足迹是由荷兰屯特大学 Hoekstra 教授于 2002 年针对水资源综合管理提出的一个新概念,指一个国家、一个地区或一个人在一定时期内消费的所有产品和服务所需要的水资源总量^[1]。水足迹通过识别人类消费和生产活动对水资源的消耗和污染,来衡量人类对地区水资源和水环境所造成的影响。水足迹将消费方式与其对淡水生态系统的影响紧密联系起来,为重新审视水资源可持续利用提供了崭新的视角。

目前关于水足迹的研究主要集中在水足迹的量化和驱动因素分析上。其中很多研究以国家或省市作为研究区。例如:Hoekstra 计算了 1997—2001 年间每个国家的水足迹。美国的人均水足迹最多,为 $2480\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,同期的中国只有 $700\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,全球平均的水足迹是 $1240\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[2]。Liu 计算了 1961—2003 年间中国基于食物消费的水足迹,研究结果表明,随着社会经济发展而不断增长的肉类产品的消耗是导致水足迹增长的重要因素^[3]。Liu 采用低、中、高现代化程度构建了三种社会经济发展情景,研究结果表明在任何一种情景下,中国未来水足迹均呈现上升趋势^[3]。龙爱华、徐中民等研究了人口、富裕及技术对中国水足迹的影响。结果表明:人口数量是当前我国水足迹的一个主要驱动因子,富裕程度的提高会增加人类对水资源的消耗量,气候因素和区位条件对水足迹具有显著影响,而提高土地生产能力对减少水足迹具有重要作用^[4]。黄晶等计算评价了 1990—2005 年北京市水足迹及水资源利用的可持续性,并在此基础上进一步分析了北京市农业用水结构的变化特征^[5]。孙才志等探索分析了中国近 11 年水足迹强度发展的空间格局变化规律^[6]。

与水足迹密切相关的概念是虚拟水。虚拟水最早由 Allan 教授于 1993 年提出并定义为在产品生产过程中消耗的水资源量^[7]。由于生产农产品等高耗水产品需要消耗大量的水资源,因此对这些产品的贸易意味着看不见的水的交易,即虚拟水贸易。对于缺水国家或地区而言,虚拟水进口克服了实体水调配路途遥远、价格昂贵、对水生态环境影响大等缺点。虚拟水贸易对于缓解缺水地区水资源短缺和粮食安全起到了重要作用。例如,中东地区每年靠粮食补贴进口的虚拟水数量相当于尼罗河每年流入埃及的水量^[8]。

水足迹和虚拟水概念的提出拓宽了水资源研究的范畴,为水资源综合管理开辟了新的思路^[9]。尽管水足迹和虚拟水研究在全球范围内受到广泛的关注,但是以往研究主要侧重于大尺度(如全球、国家)农产品水

足迹的量化^[10],而在地区尺度上(如省份)评价各产业部门水足迹并以此分析水资源在部门间合理利用的研究较为少见。另一方面,已有研究对特定年份或者多年平均的水足迹研究较多,而对于水足迹随时间变化研究较少^[11]。而近年来中国经济发展迅速,经济结构调整较大,研究单一年份的水足迹不能反映经济变化以及水资源管理措施对于水足迹的影响。本研究旨在通过评价甘肃省不同产业部门水足迹与虚拟水贸易的历史变化,探讨水资源合理利用取得的成绩和存在的问题,为干旱半干旱地区制定水资源可持续利用政策提供理论依据。

甘肃省位于我国西北内陆干旱半干旱地区,降雨量稀少,气候干燥,潜在蒸发量高,水资源相对贫乏。人均每年水资源量 1170 m³,仅为全国人均水资源占有量的 1/2,世界人均水资源占有量的 1/8;甘肃省耕地亩均水资源 395 m³,不及全国平均水平的 1/4^[12]。加上近几十年来经济快速发展和人口增加,造成水的供需关系非常紧张。长期大量超采地下水和挤占生态用水,造成河流来水量逐年减少、水质恶化、土地沙漠化持续扩展,对社会经济的发展造成了严重的影响^[13]。

1 研究方法与数据

1.1 研究方法

目前,水足迹的计算主要有 4 种方法:第一种方法是自下而上求和法,即由该地区居民所消费的产品、服务数量与单位产品和服务的虚拟水含量相乘求和得到^[10];第二种方法是自上而下法,即用本地用水总量加上虚拟水进口量,再减去虚拟水出口量^[14]。前者需要详细的居民消费的产品和服务数量,计算结果能体现居民消费结构对水足迹的影响;后者需要详细的贸易数据,计算结果能体现研究区域对外部水资源的依赖程度。由于中国各地区缺少针对不同产品的长时间序列的居民消费和贸易数据,前两种方法在应用上受到了一定程度的制约。后来发展的基于生命周期评价的第三种水足迹评价方法,可以评价一个产品整个生命周期阶段所需要的全部水资源量。但此种方法计算复杂,并且难以获取所需的充足的数据,目前主要应用于产品或产品工艺的水足迹评价中,在区域水足迹和虚拟水贸易评价中鲜有应用^[15]。第四种方法为投入产出分析法(Input-output analysis,以下简称 IOA)^[16]。该方法在权威统计部门编制的投入产出表的基础上,加入了水资源消耗量,以此计算所有生产和消费部门的水足迹和虚拟水贸易。由于各国家和地区都有相对完善的不同时间序列的投入产出表,因此该方法在水足迹和虚拟水贸易的计算和评价中得到越来越广泛的应用^[17-18]。

水足迹和虚拟水贸易投入产出分析表的基本结构如表 1 所示。表中符号 i 代表行, j 代表列; x_{ij} 为第 j 部门所需要的第 i 部门的投入; f_i 为第 i 部门产出在所属研究区内的最终需求; e_i 为第 i 部门的出口值; m_i 为第 i 部门的进口值; x_i 为第 i 部门的总产出, x_j 为第 j 部门的总投入, $x_i = x_j$; c_j 为第 j 部门的增加值总和; m_{ij} 为研究区内第 j 部门从研究区外第 i 部门的进口值; m_i^f 是为满足研究区内最终需求而从研究区外第 i 部门进口的量; m_i^e 是从研究区外第 i 部门进口进而又被出口出去的量。该表在原投入产出分析表的基础上,增加了一行用水量数据 w_j , 表示第 j 部门的用水量。

表 1 水足迹和虚拟水贸易计算所需投入产出表的基本结构^[16]

Table 1 The structure of IOA table					
投入 Input		产出 Output			
		中间使用 Intermediate input	最终需求 Final demand		
			国内消费 Domestic consumption	出口 Export	
中间投入 Intermediate input	国内投入 Domestic input	x_{ij}	f_i	e_i	x_i
	进口 Import	m_{ij}	m_i^f	m_i^e	m_i
增加值 Value added		c_j			
总投入 Total input		x_j			
用水量 Freshwater		w_j			

1.2 计算步骤

单区域投入产出方法计算水足迹及虚拟水贸易的步骤如下(式中用到的 x , w , m , 和 f 与表 1 中符

号一致)。

1) 计算技术系数矩阵和里昂惕夫逆矩阵

技术系数 a_{ij} 表示部门 j 为增加单位产出所需要的部门 i 的投入,其计算公式如下:

$$a_{ij} = x_{ij}/x_j \quad A = [a_{ij}] \quad (1)$$

里昂惕夫逆矩阵^[16]采用下面公式计算:

$$(I - A)^{-1} = [\alpha_{ij}] \quad (2)$$

2) 计算虚拟水强度矩阵

虚拟水强度在本文中表示部门单位最终需求所需要的用水量,单位是 $\text{m}^3/\text{万元}$ 。虚拟水强度包含两个部分:直接虚拟水强度和间接虚拟水强度。

直接虚拟水强度 ω_j 表示部门 j 增加单位产出需要部门 j 所直接投入的水量,其矩阵形式如下:

$$\omega_j = w_j/x_j \quad W = [\omega_j] \quad (3)$$

已知直接虚拟水强度和列昂惕夫逆矩阵则可以求出总的虚拟水强度。部门 j 的虚拟水强度 δ_j 可表示为:

$$\delta_j = \sum_i \omega_i \times \alpha_{ij} \quad D = [\delta_j] \quad (4)$$

式中, δ_j 表示为满足部门 j 单位最终需求所需要投入的所有直接和间接水量之和。

间接虚拟水强度 p_j 表示为满足单位最终需求除部门 j 的直接用水之外所引起的其它部门用水。可以通过虚拟水强度与直接虚拟水强度之差得到:

$$p_j = \delta_j - \omega_j \quad P = [p_j] \quad (5)$$

直接虚拟水强度占虚拟水强度的比率称为直接用水率,用以下公式计算:

$$z_j = \omega_j/\delta_j \quad Z = [z_j] \quad (6)$$

3) 计算内部水足迹 t_j ,是指国内生产的用于部门 j 最终需求的产品所需要的水资源量。

$$t_j = \delta_j \times f_j \quad T = [t_j] \quad (7)$$

4) 计算虚拟水进口(或外部水足迹),即用于部门 j 最终需求的进口产品所需要的水资源量外部水足迹包含两部分:进口产品直接用于最终需求所需要的水资源量 S^f ,和进口产品用于中间需求再转化为最终消费的 S^{in} 。计算公式如下:

$$S = S^f + S^{in} \quad (8)$$

式中, S^f 的计算公式为:

$$s_j^f = \delta_j \times m_j^f \quad S^f = [s_j^f] \quad (9)$$

式中, s_j^f 进口产品直接用于部门 j 最终消费所需要的水资源量。

S^{in} 的计算公式为:

$$s_j^{in} = \left(\sum_i \delta_i \times m_{ij} \right) \times v_{ij} \quad v_{ij} = \frac{f_i - e_i}{f_i} \quad S^{in} = [s_j^{in}] \quad (10)$$

式中, s_j^{in} 表示进口产品用于中间需求再转化为部门 j 的最终消费所需要的水资源量;由于进口产品用于中间需求会转化为最终需求和出口,所以应用 v_{ij} 作为调整系数。

5) 计算总水足迹

$$WF = T + S = T + S^f + S^{in} \quad (11)$$

6) 求虚拟水出口 u_j

$$u_j = \delta_j \times e_j \quad U = [u_j] \quad (12)$$

式中, u_j 表示部门 j 出口产品所需要的水资源量。

7) 虚拟水净进口量

虚拟水净进口量 NVWI (Net Virtual Water Input) 为虚拟水进口与虚拟水出口的差值:

$$NVWI = S - U \quad (13)$$

1.3 数据来源与处理

投入产出表选取自国家统计局出版的 1997、2002、2007 年份的《甘肃省投入产出表》^[19]。其中 1997 年甘肃省投入产出表包含 40 个部门,2002 年和 2007 年包含 42 个部门,将所有部门按照国家统计局的《三次产业划分规定》^[20]合并为第一产业、第二产业和第三产业,其中第一产业包括农林牧渔业,第二产业包括所有工业和建筑业,其余行业是第三产业。

第一产业和第二产业的用水量数据 w_j ,来自于 1998、2003、2008《甘肃省统计年鉴》^[21]中的第一、第二产业用水量。第三产业用水数据由城镇总用水量减去相应年份城市居民生活用水量^[21-22]得到。

2 甘肃省水足迹计算结果及分析

2.1 虚拟水强度

从图 1 可以看到,在三个产业部门中,第一产业的虚拟水强度远高于第二、第三产业。第一产业,尤其是农业生产,为高耗水产业,因此单位总产出消耗的水量远高于其他产业。三个部门虚拟水强度随时间变化趋势基本一致,2002 年与 1997 比较虚拟水强度变化不明显,但到 2007 年虚拟水强度下降了一半还多。例如,1997 年甘肃省第一产业虚拟水强度为 $3745\text{m}^3/\text{万元}$,2002 年这一数值虽然降低到 $3382\text{m}^3/\text{万元}$,但还是比 2002 年全国 $1654\text{m}^3/\text{万元}$ 的平均水平多了 1 倍^[23]。甘肃省位于干旱半干旱地区,蒸发量较大,作物水分利用效率比较低,这是导致其第一产业虚拟水强度远高于全国平均水平的一个主要原因。2007 年第一产业的虚拟水强度骤降到 $1734\text{m}^3/\text{万元}$,约为 2002 年的一半。

持续下降的虚拟水强度主要与两个因素有关。第一,节水农业的推广。甘肃省坚持把发展节水农业作为缓解地区水资源短缺的重要手段,按照“灌区常规节水化、井灌输水管道化、经济作物微灌化”的基本思路,坚持因地制宜发展节水模式,并取得了很大的成绩。农业灌溉定额由 2000 年的 $10200\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 下降到 2007 年的 $7950\text{ m}^3/\text{hm}^2$ ^[24]。甘肃省的粮食生产却从 2002 年的 782.7 万吨增加到 2007 年的 824 万吨^[21]。节水农业的推广直接引起第一产业虚拟水强度的下降。第二,节水型社会的建设。张掖市是我国第一个节水型社会建设试点,之后又有敦煌市、武威市、庆阳市列为全国节水型社会建设试点,全省先后两批确定了 43 个省级试点,开展节水型社会建设。2004 年由省政府批转发布了《甘肃省行业用水定额》,对不同行业的用水进行了严格的规定。节水型社会的建设有利的保证了甘肃省第二、第三产业虚拟水强度的持续下降。

第一产业直接用水率一直维持在 77%—88% 之间(图 2)。由此可见,第一产业主要提供农产品,对水资源不仅需求量大,而且水消耗主要发生在第一产业本身(直接用水)。第一产业部门生产过程所需要的第二、第三产业提供的原材料的用水量(间接用水)相对较小,导致第一产业很高的直接用水率,直接消费水资源是间接消费水资源量的 3—6 倍。第二产业和第一产业完全相反,其消耗的水资源以间接为主,间接用水的比例在 77%—86% 之间,约为直接水资源消费量的 3—6 倍。第三产业直接用水率都在 10% 以下,间接用水的比例很大,达到 90%—93%,其间接消耗的水资源量是直接消耗水资源量的 10—13 倍。第二和第三产业本身耗水较小,但却依赖于第一产业提供大量水密集型原

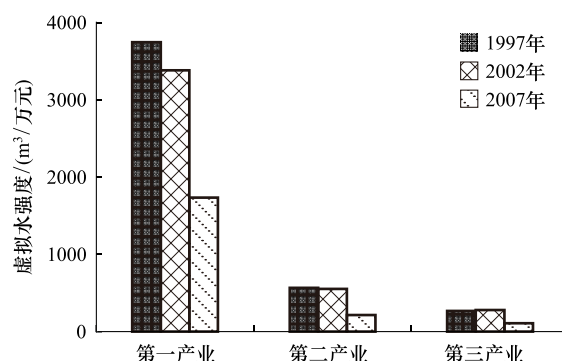


图1 1997、2002、2007年甘肃省不同产业部门虚拟水强度

Fig.1 Virtual water intensity of three sectors in Gansu Province in 1997, 2002 and 2007

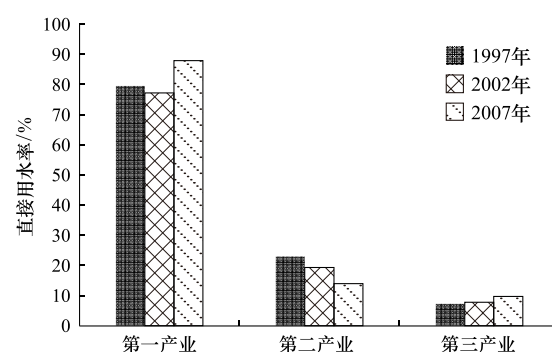


图2 甘肃省不同产业部门直接用水率

Fig.2 The direct water use rate for 3 sectors in Gansu Province

材料。因此,第二、第三产业直接消耗的水资源比较少,其虚拟水强度以间接用水为主。例如,轻工业以及餐饮业等的特点是以第一产业的产品为原材料,这样大量的虚拟水以中间投入的方式转移到第二、三产业的产品中去。所以,提高第一产业的用水效率能有效地降低第二、三产业的虚拟水强度。同时,这些产业部门也可通过减少使用耗水量大的第一产业的产品,间接降低其虚拟水强度。

从 1997 年到 2007 年,第一产业的直接用水率略有上升,而第二产业直接用水率持续下降。这与工业部门不断提高用水效率和重复利用率可能有很大关系。第三产业直接用水率持续上升,可能是与其对第一产业依赖性减弱有关。

2.2 水足迹

从 1997 年到 2002 年,甘肃省每个产业的水足迹均有不同程度的上升(图 3),总的水足迹从 119.0 亿 m^3 上升到 145.1 亿 m^3 ,增加了 26.1 亿 m^3 。到 2007 年,第三产业水足迹略有增加;第二产业水足迹出现小幅回落;而第一产业的水足迹减少则十分明显,减小约一半,由 2002 年的 77.5 亿 m^3 减少到 39.0 亿 m^3 。2002 年以后,甘肃省总水足迹呈现明显下降趋势。2007 年水足迹相比 2002 年减少 52.4 亿 m^3 ,减少了约 36%。

虚拟水强度的减少(图 1)是导致这一变化的直接原因。尤其是第一产业虚拟水强度的减少,不仅直接减少了第一产业本身的水足迹,还通过影响第二、三产业的原材料水分消耗进而影响这两个产业的水足迹。因此,要想减少水足迹,一条有效的方法即减小第一产业的虚拟水强度,提高农业部门水资源的利用效率。实践表明,通过在生产中降低虚拟水强度和调整产业结构来降低水足迹更具可行性。第一产业以直接用水为主,用水效率较低,通过加强农业节水,提高农业水分利用效率,则可降低第一产业虚拟水强度;通过调整产业结构,将有限的水资源应用于高附加值的第二、三产业的发展,减少第一产业在 GDP 中的比例,也能在一定程度上减少水足迹,缓解水资源压力。可以看到,从 1997 到 2007,甘肃省农业 GDP 占整体经济的比例持续下降;从 1997 年的 24.3% 下降到 2002 年的 18.4%,到 2007 年这一比例仅为 14.3%。这对于甘肃省减少水足迹具有一定的贡献。

通过横向比较可以看到,甘肃省 2002 年人均水足迹为 569 m^3 ,相比于 Zhao 等计算的 2002 年全国人均水足迹多出约 1.5 倍,而第一产业人均水足迹为 304 m^3 ,约为全国的 2 倍,其它两个产业与全国基本持平。可见与全国相比甘肃省在农业节水方面仍然有很大的空间。甘肃省第一产业外部水足迹仅占第一产业水足迹的不到 10%(图 4),说明甘肃省主要依靠本地农业满足自身粮食消费和农业发展。而第二、第三产业对外部水足迹的依赖性较强,尤其是第二产业,外部水足迹比例维持在 40% 左右。由此可见,甘肃省的第二、第三产业对省外进口的依赖性较强。从总的水足迹来看,1997—2007 年外部水足迹比例呈现增长的趋势,说明作为一个缺水的省份,虚拟水战略已经逐渐成为甘肃省缓解水资源短缺的一条途径。

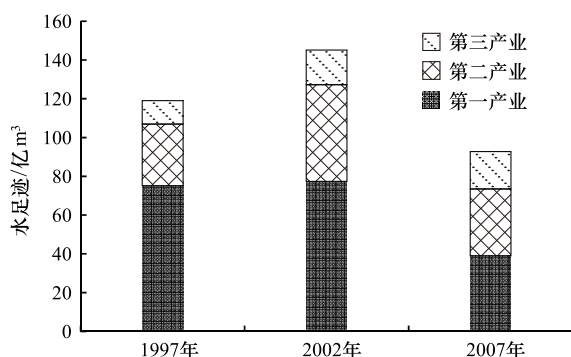


图 3 甘肃省水足迹

Fig. 3 The water footprint of Gansu Province

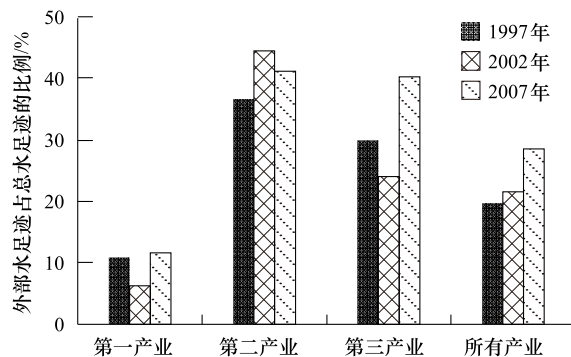


图 4 甘肃省外部水足迹占总水足迹的比例

Fig. 4 The percentage of the external water footprint to the total water footprint in Gansu Province

2.3 虚拟水贸易

从总的虚拟水贸易看,1997 年和 2007 年是净出口,而 2002 年为净进口。1997 年,主要受第一产业净虚

拟水出口的影响,尽管第二、第三产业为净进口,但数量不大,甘肃省净出口了 5.7 亿 m^3 的虚拟水。2002 年,第一产业的虚拟水净出口减小至 2.1 亿 m^3 ,而第二产业净进口猛增至 16.1 亿 m^3 。受此影响,甘肃省净进口了 13.3 亿 m^3 的虚拟水。2007 年,第一产业的虚拟水净出口剧增至 28.8 亿 m^3 。主要受第一产业影响,甘肃省的虚拟水净出口量高达 24.5 亿 m^3 。

由以上分析可知,甘肃省第一产业以虚拟水出口为主;第二产业以虚拟水进口为主,但 2007 年其进口微乎其微;第三产业虚拟水进出口接近平衡。作为一个缺水的地区,甘肃省 2007 年属于虚拟水净出口地区。尤其是 2007 年甘肃省的农业虚拟水出口达到 28.8 亿 m^3 ,相当于全省总水资源量的 10%,全省总用水量的 1/4。因此,用水结构及生产方式的调整,以及贸易格局的改变,对于甘肃省水资源保护与合理利用具有极其重要的战略。作为干旱半干旱地区,甘肃省应当尽快压缩农业虚拟水出口量,以缓解水资源短缺的危机。

3 结论及建议

通过以上研究可以发现,第一产业水足迹远高于其它两个产业。降低水足迹的关键在于第一产业。从产业结构调整和社会经济发展的角度考虑,也应减少第一产业的水足迹,将有限的水资源更多地用于第二、三产业发展及生态环境建设中。同时我们也应看到,甘肃省在第一产业节水方面取得了很大进展。第一产业水足迹所占的比重在逐步下降,其所占总水足迹的比重由 1997 年的 63%,2002 年的 53%,下降到 2007 年的 42%,平均每 5 年下降了约十个百分点,对总水足迹的下降做出了很大的贡献。为此甘肃省应继续加强农业节水力度,对灌溉区节水设备进行升级和改造,适当引入农业节水的激励机制。

近年来,以进口高耗水的农产品为特点的虚拟水战略已经受到很多国家和地区的重视,将其视为缓解水资源危机的一种有效手段。但可以看到甘肃省仍然以虚拟水净出口为主,这从某种程度上加剧了其水资源的短缺。因此甘肃省应积极探索相应的虚拟水贸易政策措施,减少农作物以及高耗水行业的出口,将更多的可用水资源用于其它产业部门以及用于生态环境的改善。

总之,降低水足迹以及进行虚拟水贸易是水资源缺乏地区缓解其水资源危机的两种重要手段。降低水足迹主要通过部门节水措施的采用,产业结构的调整(高耗水行业向低耗水行业的转变),以及消费结构的调整(从消费高耗水产品到消费低耗水产品)。而虚拟水贸易则通过调整高耗水产品生产和进口的比例得以实现。可以看出,甘肃省的节水措施以及产业结构调整对减少水足迹起到了正面的影响,应继续巩固加强。而适当调整产业结构,合理控制虚拟水出口,则是甘肃省以及中国其他缺水省份缓解水资源短缺的有效途径。

通过本研究可以看出,单区域投入产出方法能够在统一的框架下评价区域内各部门的水足迹以及虚拟水贸易随时间的变化,有效的评估其当地因生产和消费所产生水资源利用和虚拟水贸易情况,为水资源管理部门制定合理的区域水资源综合管理政策提供科学依据。但投入产出方法也有一定的局限,例如中国及各省市的投入产出表以 5a 为周期发布,目前可获得最新数据的年份为 2007 年。而近年来中国各省经济发展迅速,产业结构调整明显,采用每隔五年发布一次且相对较为滞后的数据对于全面反映研究区水足迹的变化具有一定的限制。

References:

- [1] Hoekstra A Y. Virtual water trade proceedings of the international expert meeting on virtual water trade. Value of Water Research Report Series No. 12. Netherlands, Delft: UNESCO-IHE Institute for Water Education, 2003: 1-100.
- [2] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Water footprint of nations-Water use by people as a function of their consumption pattern. Water Resource

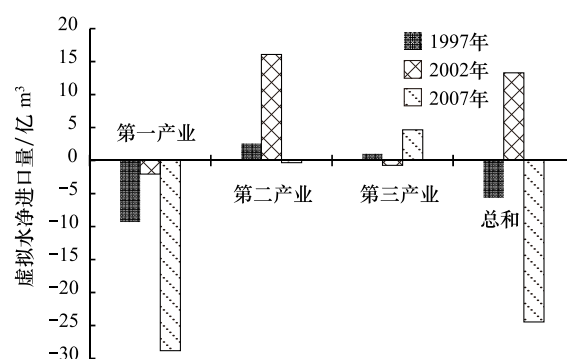


图5 甘肃省各产业部门虚拟水净进口量

Fig.5 Net virtual water import in different sectors in Gansu Province

- Management, 2007, 21:35-48.
- [3] Liu J G, Williams J R, Zehnder A J B, Yang H. GEPIC-modelling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale. *Agric. Syst.*, 2007, 94: 478-493.
- [4] Long A H, Xu Z M, Wang X H, Shang H Y. Impacts of population, affluence and technology on waterfoot print in China. *ActaEcologicaSinica*, 2006, 26(10): 3358-3365.
- [5] Huang J, Song Z W, Chen F. Characteristics of water footprint and agricultural water structure in Beijing. *ActaEcologicaSinica*, 2010, 30(23): 6546-6554.
- [6] Sun C Z, Liu Y Y, Chen L X, Zhang L. The spatial-temporal disparities of water footprint intensity based on Gini coefficient and Theil index in China. *ActaEcologicaSinica*, 2010, 30(5): 1312-1321.
- [7] Allan J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible. *Prioritized for Water Resources Allocation and Management*. London, 1993:13-26.
- [8] Chapagain A K, Hoekstra A Y. Virtual water trade: aquan tification of virtual water flows between nations in relation to international trade of livestock products, IHE Delft, 2003:49-76.
- [9] Cheng G D. Virtual water-A strategic instrument to achieve water security. *Journal of Chinese Academy of Sciences*, 2003(4):260-265.
- [10] Chapagain A K, Hoekstra A Y. Water Footprint of Nations. Value of water Research Report Series (NO. 16). IHE Delft, 2004:1-80.
- [11] Zhang Z Y, Yang H, Shi M J. Analyses of water footprint of Beijing in an interregional input-output framework. *Ecological Economics*, 2011 (70): 2494-2502.
- [12] Ma D G. Present situation of water source in Gansu provide and sustainable use. *Scientific Research & Management*, 2003, 12(3): 94-98.
- [13] Wang G X, Cheng G D. The utilization of water resource and its influence on eco-environment in the northwest arid area of China. *Journal of nature resources*, 1999, 14(2): 109-116.
- [14] Wang X H, Xu Z M, Li Y H. A rough estimate of water footprint of Gansu Province in 2003. *Journal of nature resources*, 2005, 20(6):909-915.
- [15] Pfister S, Koehler A, Hellweg S. Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA. *Environ. Sci. Technol.* 2009, 43: 4098-4104.
- [16] Leontief W. Environmental repercussions and the economic structure: An input-output approach. *The Review of Economics and Statistics*, 1970, 52 (3): 262-271.
- [17] Guan D B, Hubacek K. Assessment of regional trade and virtual water flows in China. *Ecological Economics*, 2007, 61: 159-170.
- [18] Zhao X, Chen B, Yang Z F. National water footprint in an input-output framework-A case study of China 2002. *Ecological Modelling* 220 (2009): 245-253.
- [19] National Economical Account Department, National Bureau of Statistics of China. *China Input-output analysis in 1997*. Beijing: China Statistic Publish, 1999.
- [20] National Bureau of Statistics of China. Triple divisions of industry regulations. *The state council bulletin*, 2003, 27: 41-44.
- [21] National Bureau of Statistics of China. *China Statistical Yearbook*, 1998, 2003, 2008. Beijing: China Statistic Publish, 1999, 2004, 2009.
- [22] Statistics Bureau of Gansu Province. *The statistical yearbook of Gansu Province*, 1998, 2003, 2008. Beijing: China Statistic Publish, 1999, 2004, 2009.
- [23] Zhao X, Yang Z F, Chen B. Study on Chinese virtual water trade and consumption in an input-output framework. *Journal of nature resources*, 2009, 24(2): 286-293.
- [24] Zheng W Y. Agricultural water-saving in Gansu province current situation and development proposal. *Water saving irrigation*, 2011, 09: 9-13.

参考文献:

- [4] 龙爱华,徐中民,王新华,尚海洋. 人口、富裕及技术对 2000 年中国水足迹的影响. *生态学报*, 2006, 26(10): 3358-3365.
- [5] 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.
- [6] 孙才志,刘玉玉,陈丽新,张蕾. 基于基尼系数和锡尔指数的中国水足迹强度时空差异变化格局. *生态学报*, 2010, 30(5): 1312-1321.
- [9] 程国栋. 虚拟水——中国水资源安全战略的新思路. *中国科学院院刊*, 2003, 4:260-265.
- [12] 马东刚. 甘肃水资源现状与可持续利用. *甘肃林业职业技术学院院报*, 2003, 12(3): 94-98.
- [13] 王根绪,程国栋. 中国西北干旱区水资源利用及其生态环境问题. *自然资源学报*, 1999, 14(2): 109-116.
- [14] 王新华,徐中民,李应海. 甘肃省 2003 年的水足迹评价. *自然资源学报*, 2005, 20 (6):909-915.
- [19] 国家统计局国民经济核算司. 甘肃省投入产出表 1997, 2002, 2007. 北京:中国统计出版社, 1998, 2003, 2008.
- [20] 国家统计局. 三次产业划分规定. 国务院公报, 2003, 27:41-44.
- [21] 国家统计局. *中国统计年鉴* 1998, 2003, 2008. 北京:中国统计出版社, 1999, 2004, 2009.
- [22] 甘肃省统计局. *甘肃省统计年鉴* 1998, 2003, 2008. 北京:中国统计出版社, 1999, 2004, 2009.
- [23] 赵旭,杨志峰,陈彬. 基于投入产出分析技术的中国虚拟水贸易及消费研究. *自然资源学报*, 2009, 24(2): 286-293.
- [24] 郑文燕. 甘肃省农业节水现状与发展建议. *节水灌溉*, 2011, 09: 9-13.

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