

水资源生态足迹计算方法

黄林楠¹, 张伟新², 姜翠玲³, 范晓秋⁴

(1. 河海大学学生工作处, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省委研究室, 江苏南京 210098;
3. 河海大学水资源环境学院, 江苏南京 210098; 4. 河海大学土木工程学院, 江苏南京 210098)

摘要: Wackernagel 创立的生态足迹模型是一种较好的评价可持续发展与利用的方法, 但是在该模型中, 仅评价了的地表水域的渔业功能, 忽略了地下水和地表水作为水资源的其他功能。分析生态足迹模型及水资源的特点后, 在其理论框架下设立水资源帐户, 并阐述了该帐户的内涵, 建立了水资源生态足迹以及水资源生态承载力的计算模型, 确定了计算水资源帐户生态足迹所需的 3 个关键参数即全球平均水资源产量、全球均衡因子和地区产量因子, 按水资源利用的一般分类对水资源帐户进行了细分。通过利用该模型对江苏省 1998 ~ 2003 年水资源生态足迹的计算, 结果表明, 计算结果可以客观的评价江苏省水资源可持续发展与利用的情况, 证明了模型的正确性和科学性, 从而弥补了生态足迹模型的不足。

关键词: 生态足迹; 水资源评价; 可持续发展

文章编号: 1000-0933(2008)03-1279-08 中图分类号: X826 文献标识码: A

Ecological footprint method in water resources assessment

HUANG Lin-Nan¹, ZHANG Wei-Xin², JIANG Cui-Ling³, FAN Xiao-Qiu⁴

1 The Student Work Department, Hohai University, Nanjing 210098, China

2 Jiangsu Provincial Party Committee Research Branch Nanjing 210098, China

3 The College of Water Resources and Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China

4 The College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 1279 ~ 1286.

Abstract: Ecological footprint model created by Wackernagel is a good method for evaluating the sustainable development and application of water resource, but the method only evaluated the surface water area's production for harvesting fish and other sea food, and neglected other important production function for water resources including surface water and ground water resources. On the basis of the theoretical framework of ecological footprint model, the computational model was built for managing ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources. The three crucial parameters including mean global yield, global equivalent factor, and local yield factor for freshwater resources were determined for evaluating the ecological footprint of water resources. The model was applied to computing the ecological footprint of water resources in Jiangsu Province, China from 1998 to 2003. The results that were in agreement with the real situation sustainable utilization of water resources in Jiangsu Province demonstrated the correctness and scientific of the model. The model compensated the inadequacy of Wackernagel's model.

Key Words: ecological footprint; water resources assessment; sustainable development

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50579018)

收稿日期: 2007-03-02; 修订日期: 2008-01-20

作者简介: 黄林楠(1970 ~)女, 江苏南京人, 博士生, 主要从事生态环境保护研究. E-mail: hln70@163.com

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50579018)

Received date: 2007-03-02; **Accepted date:** 2008-01-20

Biography: HUANG Lin-Nan, Ph. D. candidate, mainly engaged in ecological and environmental protection. E-mail: hln70@163.com

生态足迹最早是由加拿大生态经济学 Willam Rees 等在 1992 年提出并在 1996 年由其博士生 Wackernagel 完善的一种衡量人类对自然资源利用程度以及自然界为人类提供的生命支持服务功能的方法^[1~3]。该方法通过估算维持人类的自然资源消费量和同化人类产生的废弃物所需要的生态生产性空间面积大小,并与给定人口区域的生态承载力进行比较,来衡量区域的可持续发展状况。

综观以往生态足迹研究的理论和实践,就生态足迹模型本身而言仍然存在一些不足^[4~7]。正如 Wackernagel 所言,生态足迹分析没有把自然系统提供资源、消纳废弃物的功能描述完全,忽视了地下资源和水资源的估算;另外,现有的生态足迹分析中有关污染的生态影响这一点墨迹寥寥。事实上,由于酸雨、工业废水等导致的资源条件的恶化,世界上的生态生产性土地及水域面积是不断缩减的,换一个角度来说,我们现在实际所占有的生态足迹要比计算结果更大;生态足迹评价的某些方面还需进一步的改进,考虑到淡水是一种举足轻重的生态资源,所以,在分析中需要将水资源纳入了生态足迹的计算当中^[8],国内已有一些专家学者开始城市水生态足迹进行研究^[9~12],吴志峰、刘宝勤、马静等均对水足迹进行了一定的研究,将虚拟水的概念引入水足迹中,以水资源按消耗的主体、方式对水足迹帐户进行了细分,提出了核算的方法,但各种计算方法所得到的结论,均也无法与 Wackernagel 的生态足迹模型结合起来评价一个地区的可持续发展状况;另外还有一些研究考虑了污染(酸雨、工业废水等)这一生态因素对生态足迹的影响,如“加拿大生态研究小组”目前正在研究如何将环境污染的生态影响纳入生态足迹的计算表格中^[13]。

水域作为生态足迹模型的六大类生产型土地之一,其定义是有生产能力的水面。但是,生物生产仅仅是水域的一个功能,水资源在维持生态环境和进行社会生产的过程中是起着不可取代的功能和作用,而且模型中的水域并不包括地下水,然而,现实中地下水在生态环境保护和社会经济发展中起着重要作用。所以,生态足迹模型中现有的水域所描述的水资源功能并不能完全体现水资源真实的用途,因此必须对生态足迹模型中的生物生产性土地类型进行扩充,补充生态足迹理论水资源帐户的不足,进一步完善生态足迹理论,借此可以更科学地评价社会经济环境的可持续发展。

1 水资源帐户创建

1.1 定义

Wackernagel 的生态足迹模型中所描述的六类帐户均基于“生物生产”这一概念而定义。将水域的生物生产功能仅仅以渔业生产来概括,是极其狭隘的。在社会经济发展和生态环境保护的任一环节,水资源均不可缺少,水资源的这一功能虽然不能以“生物生产”来界定,但可以认为这是水资源的生产功能。

为弥补 Wackernagel 建立的生态足迹模型中对于水域功能描述的局限,在生态足迹模型中建立水资源帐户。用于描述水资源的生态环境和社会经济功能,以弥补水域对水资源功能描述的不足。同时,为把水资源帐户统一到生态足迹模型中去,在六类土地以外建立第七类土地类型——水资源用地,该类型可以表述为具有生产功能的水资源用地,其含义类似于建筑用地,在社会经济发展过程中,将不断被消耗和补充。在计算过程中,将消费的水资源量按一定规则折算成相应的土地面积,以该面积作为水资源帐户与其他各类帐户度量相统一的基础。

事实上水是公认的资源,因此在生态足迹模型中建立的水资源帐户与生态足迹的内涵具有一致性。对于水资源帐户的用地类型,称之为水资源用地。由于水随时间和空间分布的差异性和不一致性,因此水资源用地不能如同耕地、林地一样定义,作者认为,水资源在一定的区域内(流域、省或市)是均匀分布的,即在该区域内水均匀分布于该区域内,单位面积上的水量是相同的。

显而易见,Willam Rees 的生态足迹模型包括的水域(sea space-for harvesting fish and other sea food),仅仅描述必须依靠水这一物质这才得以维持并生长的生物所占用的空间,事实上,水作为一种资源,其功能远非如此。水资源面积内概括了其他各类型土地(地下水资源面积),这是由水资源分布的独特性以及水作为资源本身的特点所决定的。为了在生态足迹模型中全面描述水域生态足迹,而又必须满足生态足迹模型所要求的各类土地的互异性,必须将水域这一概念抽象化,即区域内水资源用地可概化为独立于其他各帐户以外的虚

拟用地,其目的仅仅是基于生态足迹模型框架内描述水域的生态足迹,它和其他各帐户是没有影响,从而保证了模型中各类土地的互异性。所以,水资源转换成土地面积后仅是一个抽象数值,丧失了描述水资源量的能力。

通过对上述水资源生态足迹进行均衡,可以将水资源帐户纳入生态足迹总的构成,以计算总的生态足迹,评价地区的可持续发展状况。

1.2 核算对象

生态足迹理论主要是用于某一区域的可持续发展评估,因此水资源帐户核算也是界定于某一区域内。

目前,关于水资源生态足迹的计算方法,以及相应水资源帐户分类的报道甚少,徐中民等在计算张掖地区生态足迹中将水资源分为地下水资源和地表水资源^[14];李金石等在进行澳门生态足迹分析时独立计算了淡水资源^[15]。

水资源生态足迹的意义可以表述为两个方面,一是人类在生活生产中消耗水资源的过程,二是自然环境维持自身不断进化对水的需求过程。根据用水特性,用水可以分为生活用水、生产用水和生态环境用水三大类。

生活用水包括城镇居民生活用水和农村居民生活用水。

生产用水包括第一产业用水(含农业、林业、畜牧业用水、鱼塘补水和农村牲畜用水),第二产业用水(含工业用水和建筑业用水)、第三产业用水(含商饮业用水和服务业用水)。

生态环境用水按杨志峰等可分为河道内、外用水,河道外用水包括城市环境用水、湿地补水等;河道内用水指为改善江河湖泊水环境进行的调配水量等^[16]。但是根据研究结果,一个国家和地区的水资源承载力中必须至少扣除 60% 用于维持生态环境^[17],因此生态环境用水足迹只需计算城市绿地用水以及区域内水体纳污能力之外的稀释污染物用水,而其他用水均在 60% 的预留水量中。

根据上述对用水的分类,将水资源帐户分为生活用水足迹、生产用水足迹和生态需水足迹三个二级帐户。

2 水资源生态足迹模型构建

2.1 计算方法

根据水资源生态足迹的描述,生态足迹将如同其他各个帐户,将消耗的水资源量转化为相应帐户的生产面积——水资源用地面积,然后对其进行均衡化,最终得到可用于全球范围内不同地区可以相互比较的均衡值。水资源帐户的计算模型可以用下式表示:

$$EC_w = N \times ec_w = N \times \gamma_w \times [W/p_w] \quad (1)$$

式中, EC_w 为水资源总生态足迹(hm^2); N 为人口数; ec_w 为人均水资源生态足迹($\text{hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$); γ_w 为水资源的全球均衡因子; W 为消耗的水资源量(m^3); p_w 为水资源全球平均生产能力($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)。

2.2 平均生产能力

在水文学中,平均产水模数的概念为计算时段内为地表水资源量与地下水资源量中扣除重复计算量除以计算区域的面积,公式如下:

$$p = V/S \quad (2)$$

式中, V 为计算时段内区域的水资源总量(m^3); S 为计算区域的面积(hm^2); p 为计算时段内的平均产水模数($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)。

本文将以多年平均产水模数来刻画区域内水资源的生产能力,水资源全球平均生产能力即为全球多年平均产水模数。

据世界资源研究资料,世界每年再生性水资源总量约 42×10^4 亿 m^3 ,但专家们认为其中稳定径流量只有 14×10^4 亿 m^3 ,而 5×10^4 亿 m^3 流经沙漠无法利用,因此实际可以利用的河川径流量为 9×10^4 亿 m^3 ,其中还必须要 有充足的水量留在江河湖泊中保持健康的生态系统,因此每年实际可供开发利用的水资源量仅仅只有 3.24×10^4 亿 m^3 ^[17]。表 1 为世界几个水资源比较丰富的国家的单位面积产水量统计,可以看出不同国家差异

较大^[18]。

表 1 世界几个国家的单位面积产水量统计

Table 1 Water resources yield per sq. km. in several countries

国家 Country	单位面积产水量 Water quantity($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	国家或地区 Country and area	单位面积产水量 Water quantity($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)
巴西 Brazil	60.9	中国 China	29.46
前苏联 USSR	21.1	印度 Hindustan	51.4
加拿大 Canada	31.3	日本 Japan	147.0
美国 USA	31.7	世界 World	31.4

2.3 均衡因子

在生态足迹模型中,由于各类生物生产性土地单位面积生产力差异较大,为了使计算结果转化为一个可以比较的标准,给各类生物生产面积乘以一个等价因子,以转化为可以相互比较的生物生产性面积。

某种生物生产面积的均衡因子(Equivalence Factor)等于全球该类生物生产面积的平均生态生产力除以全球所有各类生物生产面积的平均生态生产力。均衡处理以后的各类生态系统的面积即为具有全球平均生态生产力的、可以相加的世界平均生物生产面积,公式如下:

$$p/1 = p_i/\gamma_i \quad (3)$$

式中, p 为全球所有各类生物生产面积的平均生态生产力, p_i 为某一类生物生产面积的平均生态生产力, γ_i 为对应于 p_i 的均衡因子。

土地面积等量化处理的目的在于方便国际比较,因为很难准确计算全球各类生物性产量的总平均值,同时产量每年变化,因此,均衡因子的标准难以统一,如表 2 是目前 4 种不同的均衡因子估计值。

表 2 各类土地均衡因子的值

Table 2 Equivalence Factor for six types of ecologically productive area

土地类型 Land-use type	Chambers ^①	WWF2000 ^②	WWF2002 ^③	EU ^④
化石能源用地 Fossil energy land	1.17	1.78	1.35	1.66
耕地 Arable land	2.83	3.16	2.11	3.33
林地 Forest land	1.17	1.78	1.35	1.66
草地 Pasture land	0.44	0.39	0.47	0.37
建筑用地 Construction land	2.83	3.16	2.11	3.33
水域-渔业 Sea space-for harvesting fish and other sea food	0.06	0.06	0.35	0.06

注: ① Chambers N, 分享大自然的馈赠. : 伦敦 Earthscan 出版社, 2000 Chambers N. Sharing nature's interest Earthscan London. 2000; ② 世界自然基金会(WWF), 2000 地球生命力报告 World Wide Fund for Nature Living Planet Report 2000; ③ 世界自然基金会(WWF), 2002 地球生命力报告 World Wide Fund for Nature Living Planet Report 2002; ④ 2002 年欧盟生态足迹报告, STOA 项目 EU Ecological Footprint, STOA 2002

由于 Wackernagel 所提供的水域均衡因子仅仅描述了水域对水产品的提供能力,然而在社会和自然的整个生产过程中均需要一定的水资源,因此,仅仅用水资源的水产品生产能力去均衡其他各类帐户,将极大地降低了水资源的生产能力对社会和自然的贡献。

本文以 WWF2000 核算的均衡因子为基础,计算水资源的均衡因子,具体计算流程如图 1。全球耕地产出主要以谷物为主,还包括豆科作物和根茎作物。2000 年谷物产量为 206 352 万 t,平均产出量为 $3\ 070 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 豆科作物产量为 16 123 万 t,平均产出量 $2\ 176 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 根茎作物产量为 69 817 万 t,平均产出量为 $13\ 247 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,通过核算,2000 年世界耕地的平均产出量为 $3\ 654 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。粮食的全球平均价格(1995 ~ 2001 的平均价)为 $1\ 825 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$,因此耕地的全球平均产量可折算为 $0.67 \text{ 万元 GDP} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

2000 年中国万元 GDP 用水量为 610 m^3 ,是世界平均水平的 4 倍,可以计算全球万元 GDP 用水量为 152.5 m^3 ; 全球水资源平均产量为 $31.4 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$,目前全球开采利用的水资源量仅仅占可开采量(约 32400 亿

m^3) 的 8% 左右^[17], 因此全球水资源的平均开采量仅仅为 $2.512 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$ 。根据图 1 所示流程, 可以计算出全球水资源均衡因子, 结果见表 3。

3 水资源承载力模型构建

基于生态足迹模型的水资源承载力兼具自然属性、社会属性以及空间属性, 可将其定义为: 某一区域在某一具体历史发展阶段, 水资源最大供给量可供支持该区域资源、环境和社会(生态、生产和生活)可持续发展的能力。具体可表述为: 某一区域在具体的发展阶段, 考虑当前科技、文化、体制的影响, 在当前的管理技术条件下, 水资源对生态系统和经济系统良性发展的支撑能力。

3.1 计算方法

一个地区的地下水资源和地表水资源扣除重复计算量后即为该地区的水资源总量。但是根据专家研究的结果, 一个国家或地区的水资源开发利用率若超过 30% ~ 40%, 则可能引起生态环境的恶化, 因此, 一个国家和地区的水资源承载力中必须至少扣除 60% 用于维持生态环境, 因此在水资源承载力的计算中必须按上述原则扣除维持生态环境的水资源量^[17]。

因此水资源承载力公式可表示为:

$$EC_w = N \cdot ec_w = 0.4 \cdot \psi \cdot \gamma \cdot Q/p \quad (4)$$

式中, EC_w 为水资源承载力 (hm^2); N 为人口数; ec_w 为人均水资源承载力 ($\text{hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$); γ 为水资源均衡因子; ψ 为水资源产量因子; Q 为水资源总量 (m^3); p 为世界水资源平均生产能力 ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)。

3.2 水资源产量因子

由于同类生物生产性土地的生产力在不同地区之间存在差异, 因而各地区同类生物生产性土地的实际面积不能直接对比。在 Wackernagel 的生态足迹模型中, 产量因子的计算方法就是一个将各地区同类生物生产性土地转换成可比面积的参数。确定水资源帐户的产量因子, 可以将水资源帐户纳入 Wackernagel 的生态足迹模型, 进行区域可持续发展的生态足迹评价。

为确定不同区域的水资源产量因子, 假定世界水资源产量因子为 1, 区域水资源产量因子为该区域水资源量平均生产能力与世界水资源生产能力的比值。通过建立上述规则, 确定不同国家、地区水资源产量因子, 可以对比不同国家、地区的水资源供给能力。

水资源产量因子根据水资源平均生产能力确定的公式如下:

$$\psi = \nu/\nu_g \quad (5)$$

式中, ψ 为水资源产量因子, ν 为区域单位面积产水量; ν_g 为全球的单位面积产水量。

径流深指计算时段内的径流总量平铺在整个流域面积上所得到的水层深度, 径流深的大小取决于降水量和径流系数, 是能够直接反映各地区水量的丰沛程度的一个水文参数。因此当 ν 为区域多年平均年径流深、 ν_g 为全球多年平均年径流深, 按 5 式也可计算水资源产量因子。表 4 为按水资源平均生产能力确定的水资源

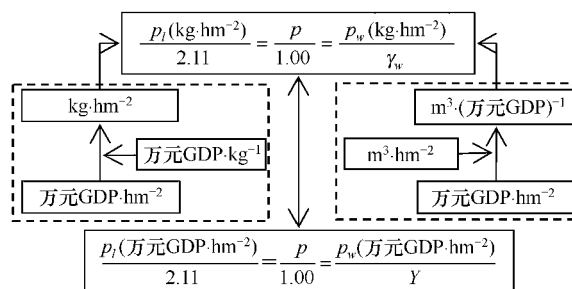


图1 水资源均衡因子计算流程

Fig. 1 Flow chart for computation of equivalence factor

图1中 p_l 表示耕地平均生态生产力; p 为全球所有各类生物生产面积的平均生态生产力; p_w 表示水资源的平均生态生产力; γ_w 为对应于 p_w 的均衡因子。鉴于不同国家、地区统计指标的差异, p_l 存在 p_{l1} (单位: $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 以及 p_{l2} (单位: $\text{万元 GDP} \cdot \text{kg}^{-1}$) 两种统计量; p_w 存在 p_{w1} (单位: $\text{m}^3 \cdot \text{万元 GDP}^{-1}$) 以及 p_{w2} ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$) 两种统计量。为使 p_l 与 p_w 具有相同的量纲, 可通过虚线框所示公式将二者换算成统一以 $\text{万元 GDP} \cdot \text{hm}^{-2}$ 为单位的统计指标

表3 水资源的均衡因子

Table 3 Equivalence factor for water resources

土地类型 Land-use type	Chambers	WWF2000	WWF2002	EU
水域1 Water space 1	0.06	0.06	0.35	0.06
水域2 Water space 2	6.97	7.78	5.19	8.20

* 水域1 为渔业的均衡因子, 水域2 为水资源的均衡因子

产量因。全球及一些国家的水资源平均生产能力 ν_g 见表 1, 国内各地区的水资源平均生产能力 ν 见文献^[19]。

表 4 水资源产量因子

Table 4 Yield Factor for water resources

国家和地区 Country and area	产量因子 Yield factor	国家和地区 Country and area	产量因子 Yield factor	国家和地区 Country and area	产量因子 Yield factor	国家和地区 Country and area	产量因子 Yield factor
全球 World	1.00	北京 Peking	0.77	江苏 Jiangsu	1.02	广东 Guangdong	3.21
巴西 Brazil	1.94	天津 Tianjin	0.41	浙江 Zhejiang	2.81	广西 Guangxi	2.52
前苏联 USSR	0.67	河北 Hebei	0.40	安徽 Anhui	1.54	海南 Hainan	3.73
加拿大 Canada	1.00	山西 Shanxi	0.29	福建 Fujian	3.07	重庆 Chongqing	2.04
美国 USA	1.01	内蒙 Neimen	0.14	江西 Jiangxi	2.71	四川 Sichuan	1.76
印尼 Indonesia	4.70	辽宁 Liaolin	0.79	山东 Shandong	0.70	贵州 Guizhou	1.87
中国 China	0.94	吉林 Jilin	0.66	河南 Henan	0.78	云南 Yunnan	1.84
印度 Hindustan	1.64	黑龙江 Heilongjiang	0.53	湖北 Hubei	1.68	西藏 Sitsang	1.19
日本 Japan	4.68	上海 Shanghai	1.39	湖南 Hunan	2.45	陕西 Shanxi	0.68
甘肃 Gansu	0.22	青海 Qinhai	0.28	宁夏 Ninxia	0.06	新疆 Xinjiang	0.17

4 模型检验

利用本文推导的水资源生态足迹(式 1)以及水资源生态承载力(式 4), 以及江苏省水资源产量因子($\psi = 1.02$)和均衡因子($\gamma = 5.19$)的取值, 对江苏省水资源生态足迹进行计算, 以检验水资源生态足迹计算方法的科学性和准确性, 在此基础上, 对江苏省生水资源生态足迹进行分析和探讨。其中江苏省各年份水资源供给明细以及用水明细摘自江苏省水资源公报(1998~2003 年)。

计算过程中将水资源帐户细分为生活用水帐户、生产用水帐户和生态用水帐户 3 个二类帐户, 生活用水细分为农村生活用水和城镇生活用水两个三类帐户, 生产用水细分为农业、工业和林牧渔 3 个三类帐户。其中生态用水帐户除 2003 年有统计数据外其他各年均以 2003 年生态用水量取值, 事实上这样将高估了 1998 年到 2002 年的生态用水足迹, 实际上由于生态用水足迹比生活用水足迹和生产用水足迹小的多, 因此可以判断上述生态用水足迹的取值对水资源生态足迹将不会有影响。计算明细表见表 5。

表 5 江苏省水资源生态足迹计算结果 ($\text{hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$)Table 5 Calculations of ecological footprint of water resources in Jiangsu Province ($\text{hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$)

项目 Item	年份 Year					
	1998	1999	2000	2001	2002	2003
生态足迹 Ecological footprint	0.9725	1.0080	1.0111	1.0539	1.0779	0.9407
生活用水 Household water use	0.0990	0.0950	0.0942	0.0954	0.0986	0.0656
城镇 Town	0.0498	0.0497	0.0507	0.0552	0.0583	0.0379
农村 Rural area	0.0492	0.0454	0.0435	0.0402	0.0402	0.0277
生产用水 Industrial and agricultural water	0.8673	0.9070	0.9110	0.9527	0.9735	0.8693
农业 Agriculture	0.4792	0.5140	0.5376	0.5766	0.5900	0.4441
工业 Industry	0.3342	0.3383	0.3212	0.3217	0.3259	0.3477
林牧渔 Forest, pasture and harvesting fish	0.0540	0.0546	0.0521	0.0544	0.0576	0.0774
生态用水 Ecological water use	0.0062	0.0060	0.0059	0.0058	0.0058	0.0058
生态承载力 Ecological capacity	0.4729	0.3871	0.4058	0.2522	0.2449	0.5637
生态赤字 Ecological deficit	0.4997	0.6209	0.6053	0.8018	0.8330	0.3770

社会生产的任何阶段几乎都需要水, 因此社会发展对水的需求是导致水资源生态足迹持续走高的主要原因, 同时由于水资源利用率不高导致生产用水增长也是水资源生态足迹较大的一个原因。从 1998 年到 2002 年, 水资源生态足迹持续上升, 各年增长分别为 0.0355 、 0.0030 、 $0.0428 \text{ hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$ 和 $0.0240 \text{ hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$, 而到

2003 年,水资源生态足迹降至 $0.9707 \text{ hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$, 下降了 $0.1372 \text{ hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$, 超过前 4a 的增长量 $0.1054 \text{ hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$ 。可以推测,近几年来水资源生态足迹的小幅度上升是社会经济发展的需要,但是对水资源的利用效率有了显著的提高,这与江苏省的发展规律基本是一致的。可见,本文推导确定的水资源生态足迹计算方法是较为科学合理的。

5 结果与讨论

根据本文确定的水资源生态足迹计算所需的 3 个基本参数:全球水资源平均产量、水资源帐户的产量因子和水资源帐户的均衡因子,可以计算水资源帐户的生态足迹和生态承载力,籍此衡量区域的水资源可持续发展状况。如果水资源生态足迹大于水资源承载力,那么水资源帐户出现生态赤字,该区域将面临水资源短缺的危机;如果水资源生态足迹小于水资源承载力,那么水资源帐户生态盈余,该区域有足够的水资源余量供社会经济发展的需要。

在 Wackernagel 等的生态足迹中纳入第七帐户,将更全面的评价一个区域的可持续发展状况。由于在确定水资源帐户的均衡因子时利用了万元 GDP 耗水量这一动态指标,因此使得该因子与生态足迹模型中定义的其他各类帐户的均衡因子存在一定的差距,因此对于水资源帐户的均衡因子,需进行深入的研究。

References:

- [1] William E R. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out? *Environ Urban*, 1992, 4:121—130.
- [2] Wackernagel M, William E R. Our ecological footprint: reducing human impact on the earth. Gabriola Island, B. C. : New Society Publishers, 1996. 2—17.
- [3] Wackernagel M. An evaluation of the ecological footprint. *Ecol Econom*, 1999, 31:315—320.
- [4] Wang S H, Mao H Y, Wang Z J. Progress in research of ecological footprint all over the world. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(6):775—782.
- [5] Wu L J, Yang L, Su X. Advance s in ecological footprint. *Journal of China Agricultural University*, 2006, 11(3):1—8.
- [6] Liu M, Hu Y M, Li Y H, *et al.* Ecological footprint model and its research advances. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(3):334—339.
- [7] Zhang J H, Zhang J. Research Progress and Model Modification of Ecological Footprint. *Resources Science*, 2006, 28(6):196—203.
- [8] Xu Z M, Zhang Z Q. The calculation & analysis of ecological footprints of Gansu Province in 1998. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(9):1484—1493.
- [9] Zhou W H, Zhang K F, Wang R S. Urban water ecological footprint analysis-a case study in Beijing, China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(9):1524—1531.
- [10] Wu Z F, Hu Y H, Li D Q, *et al.* Analyzing and Modeling Temporal Variation of Water Ecological Footprint in Guangzhou City of China. *Resources Science*, 2006, 28(5):152—156.
- [11] Ma J, Wang D X, Lai H L, *et al.* Water footprint 2An application in water resources research. *Resources Sciences*, 2005, 27(5):96—100.
- [12] Liu B Q, Feng Z M, Yao Z J. Theory method and progress on virtual water research. *Resources Science*, 2006, 28(1):120—126.
- [13] Li R B, Jiang J S. The Analytic Model of Ecological Footprint and Its Current Research Situation. *Journal of South China University of Tropical Agriculture*, 2004, 10(2):12—14.
- [14] Xu Z M, Cheng G D, Zhang Z Q. Measuring sustainable development with the ecological footprint method-take Zhangye prefecture as an example. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(9):1484—1493.
- [15] Lei K P, Wang Z S. The analysis of ecological footprints of Macao in 2001. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2):197—203.
- [16] Yang Z F, Cui B S. Eco-environmental water requirement conception and characteristic. In: Yao P L, Liu L C eds. *Eco-environmental water demand theory, methodology and practice*. Beijing: Science Press, 2003. 36—37.
- [17] Zhang Y. China's water resources and sustainable development. Nanning: Guangxi Science and Technology Publishing House, 2000. 2—3, 120—125.
- [18] Zhang Y. Water for the 21st Century and water crisis. *Hydropower Scientific Progress*, 1997, 2: 2—9.
- [19] Hydrological Bureau of Hydropower Ministry. China's water resources evaluation. Beijing: Hydropower Press, 1987. 140—144.

参考文献:

- [4] 王书华,毛汉英,王忠静.生态足迹研究的国内外近期进展.自然资源学报,2002,17(6):775~782.
- [5] 吴隆杰,杨林,苏昕.近年来生态足迹研究进展.中国农业大学学报,2006,11(3):1~8.
- [6] 刘森,胡远满,李月辉,等.生态足迹方法及研究进展.生态学杂志,2006,25(3):334~339.
- [7] 章锦河,张捷.国外生态足迹模型修正与前沿研究进展.资源科学,2006,28(6):196~203.
- [9] 周文华,张克锋,王如松.城市水生态足迹研究——以北京市为例.环境科学学报,2006,26(9):1524~1531.
- [10] 吴志峰,胡永红,李定强,等.城市水生态足迹变化分析与模拟.资源科学,2006,28(5):152~156.
- [11] 马静,汪党献,来海亮,等.中国区域水足迹的估算.资源科学,2005,27(5):96~100.
- [12] 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):120~126.
- [13] 黎瑞波,蒋菊生.生态足迹分析模型及其研究现状.华南热带农业大学学报,2004,10(2):12~14.
- [14] 徐中民,程国栋,张志强.生态足迹方法:可持续性定量研究的新方法——以张掖地区1995年的生态足迹计算为例.生态学报,2001,21(9):1484~1493.
- [15] 李金平,王志石.澳门2001年生态足迹分析.自然资源学报,2003,18(2):197~203.
- [16] 杨志峰,崔保山.生态环境需水量概念界定及特征.见:姚平录刘卓澄主编.生态环境需水量理论、方法与实践.北京:科学出版社,2003. 36~37.
- [17] 张岳.中国水资源与可持续发展.南宁:广西科学技术出版社,2000.2~3,120~125.
- [18] 张岳.21世纪水危机与节水.水利水电科学进展,1997(2):2~9.
- [19] 水利电力部水文局.中国水资源评价.北京:水利水电出版社,1987.140~144.