

黑龙江省水资源生态承载力计算

邱 微, 樊庆铎, 赵庆良, 袁一星

(哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090, qiuwei@hit.edu.cn)

摘 要: 以生态足迹理论为基础, 构建水资源生态承载力模型, 收集、整理和分析黑龙江省 2003—2008 年水资源指标数据. 计算结果表明: 黑龙江省水资源生态承载力逐年减少, 水资源生态足迹需求逐年增加. 2008 年水资源生态足迹需求达到最大, 为 $0.311\ 7\ \text{hm}^2/\text{人}$. 分析黑龙江省水资源呈现不可持续发展的原因, 并提出黑龙江省水资源科学管理和有效利用的建议. 计算结果验证水资源生态足迹和生态承载力模型的科学合理性, 为科学利用有限的水资源提供决策依据.

关键词: 水资源; 生态足迹; 生态承载力; 模型

中图分类号: X37 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2010)06-1000-04

Calculation on ecological carrying capacity of water resources in Heilongjiang province

QIU Wei, FAN Qing-xin, ZHAO Qing-liang, YUAN Yi-xing

(State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, qiuwei@hit.edu.cn)

Abstract: Based on the ecological footprint, a water resources capacity model was built up. The water resources indicator data of Heilongjiang province from 2003 to 2008 were collected and analyzed. The results indicated that the water resources capacity decreased, and the demand for ecological footprint of water resources increased year by year, and it reached the maximum of $0.311\ 7\ \text{hm}^2/\text{cap}$ in 2008. The reasons for the unsustainable development of water resources in Heilongjiang province were analyzed, and recommendations on scientific management and effective utilization of water resources were put forward. Calculation result verifies that the ecological footprint of water resources and the capacity calculation model are scientific and reasonable. The study provides a basis for scientific decision making of water resources utilization.

Key words: water resource; ecological footprint; ecological capacity; model

水资源短缺已经成为制约许多国家和地区社会经济可持续发展的瓶颈问题. 研究水资源承载力是确定流域或区域社会发展的基础和前提, 是解决度量水资源可持续利用等诸多水问题的根本. 保证水环境能够支撑生态系统的良性循环, 控制水资源的开发利用不超过其承载能力, 促进社

收稿日期: 2010-03-01.

基金项目: 黑龙江省青年科学基金资助项目(QC2009C113); 城市水资源与水环境国家重点实验室开放基金资助项目(08UWHC09).

作者简介: 邱 微(1980—), 女, 博士;
赵庆良(1963—), 男, 教授, 博士生导师;
袁一星(1957—), 男, 教授, 博士生导师.

会经济持续发展, 是学术界和管理者亟待解决的问题.

水资源生态承载力在国际上研究成果相对较少, 主要针对特定区域围绕虚拟水^[1-3]、生态足迹方法^[4-7]、投入-产出模型与生态足迹模型结合^[8]展开研究. 此外, 还有研究人员从生物能源利用的角度^[9], 考虑人类对水资源的直接消费和间接消费^[10], 从供水的角度对水资源生态承载力进行相关研究^[11-13]. 我国新疆水资源软科学课题组在 1985 年首次对新疆的水资源承载能力和开发战略对策进行了研究^[14]. 徐中民等^[15]采用情景基础的多目标分析框架, 探索性地计算了水资

源的生态足迹. 许新宜等^[16]将水资源纳入了宏观经济系统集成研究. 吴志峰等^[17]汇总淡水生态足迹与水产品生态足迹作为一个区域总的水生态足迹. 杜发兴等^[18]在传统多目标分析决策技术的基础上,建立了基于熵权的属性识别水资源承载力评价模型. 韩俊丽等^[19]运用系统动力学模型对包头市水资源承载力进行了模拟和预测. 崔振才等^[20]将水资源承载力计算概化为模糊线性规划问题.

现有方法还存在一定局限性,如多目标模型由于求解技术上的困难及对资料的要求使其应用受到影响;基于虚拟水发展起来的计算方法,由于选择指标的局限性,影响计算结果的准确性;系统动力学法由于涉及的变量比较多,容易导致不合理的结论. 本文基于生态足迹理论,构建水资源生态足迹和生态承载力模型,计算黑龙江省水资源生态需求和供给能力. 研究结果对于促进黑龙江省水资源的科学管理和有效利用具有指导意义.

1 水资源生态足迹和生态承载力计算模型

水资源生态足迹模型主要用来计算在一定的人口和经济规模条件下维持水资源消费和消纳水污染所必需的生物生产性面积. 把生态足迹中的水域扩大为水资源用地,将消耗的水资源转化为相应账户的水域面积,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相互比较的均衡值. 本研究中,水资源生态足迹包括生活用水生态足迹、生产用水生态足迹、农业用水生态足迹、生态用水生态足迹和水产品消耗生态足迹.

(1) 生活用水生态足迹(WF_d),指城市生活用水和农村生活用水及家畜用水在研究时间段的需求

$$WF_d = N \cdot wf_d = N \cdot a_w \cdot aa_j = a_w \cdot (A_{dw}/P_w).$$

(1)

式中: wf_d 为人均生活用水生态足迹($\text{hm}^2/\text{人}$); N 为人口数; aa_j 为人均水域面积($\text{hm}^2/\text{人}$); A_{dw} 为生活用水消耗量(m^3); P_w 为全球水资源平均生产能力(m^3/hm^2).

(2) 生产用水生态足迹(WF_i),企业在生产过程中用于制造、加工、冷却、洗涤和其他生产过程中对水资源的需求过程

$$WF_i = N \cdot wf_i = N \cdot a_w \cdot aa_j = a_w \cdot (A_{iw}/P_w).$$

式中: wf_i 为人均生产用水生态足迹($\text{hm}^2/\text{人}$); A_{iw} 为生产用水消耗量(m^3); N 、 aa_j 、 P_w 同式(1).

(3) 农业用水生态足迹(WF_{ag}),指用于农业生产过程中对水资源的需求过程

$$WF_{ag} = N \cdot wf_{ag} = N \cdot a_w \cdot aa_j = a_w \cdot (A_{agw}/P_w).$$

式中: wf_{ag} 为人均农业用水生态足迹($\text{hm}^2/\text{人}$); A_{agw} 为农业用水消耗量(m^3).

(4) 生态用水生态足迹(WF_e),包括城市环境用水和部分河湖、湿地的人工补水对水资源的需求

$$WF_e = N \cdot wf_e = N \cdot a_w \cdot aa_j = a_w \cdot (A_{ew}/P_w).$$

式中: wf_e 为人均生态用水生态足迹($\text{hm}^2/\text{人}$); A_{ew} 为生态用水消耗量(m^3).

(5) 水产品用水生态足迹(WF_{aq}),指人工养殖的水产品和天然生长的水产品对水资源的需求

$$WF_{aq} = N \cdot wf_{aq} = N \cdot a_w \cdot aa_j = a_w \cdot (A_{aqw}/P_w).$$

式中: wf_{aq} 为人均水产品用水生态足迹($\text{hm}^2/\text{人}$); A_{aqw} 为水产品用水消耗量(m^3).

(6) 水资源生态足迹以水资源生产性土地的面积来表达,水资源生态足迹计算公式为

$$WF = WF_d + WF_i + WF_{ag} + WF_e + WF_{aq}.$$

(7) 水资源承载力的计算必须综合考虑生态环境以及社会生产,由于同类生物生产性的土地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的土地的实际面积不能直接对比. 产量因子就是一个将同类生物生产性的土地转换成可比面积的参数. 同时,根据世界环境与发展委员会的建议,生态承载力应扣除 12% 的面积用于生物多样性保护的生态补偿. 同理,在计算水资源生态足迹时也应扣除 12% 的面积用于生物多样性保护的生态补偿. 在生态足迹理论框架内,水资源承载力(WC)为

$$WC = N \cdot wc = (1 - 12\%) \cdot a_w \cdot r_w \cdot Q_w/P_w.$$

式中: wc 为人均水资源承载力($\text{hm}^2/\text{人}$); a_w 为水资源的全球均衡因子; γ_w 区域水资源产量因子; Q_w 水资源总量(m^3); P_w 水资源全球平均生产力(m^3/hm^2).

(8) 水资源生态赤字和水资源生态盈余
将一个地区或国家的水资源消耗产生的生态足迹和生态承载力相比较,就会产生水资源生态赤字和水资源生态盈余

$$\text{水资源生态盈余(或赤字)} = WC - WF.$$

当 $WC > WF$ 时,为水资源生态盈余;当 $WC = WF$ 时,为水资源生态平衡;当 $WC < WF$ 时,为水资源生态赤字.

(9) 模型中参数的确定

a. 全球水资源平均生产力为

$$P_w = Q_w / A.$$
式中: P_w 为水资源全球平均生产力(m^3/hm^2); Q_w 为水资源总量(m^3); A 为计算区域的面积(hm^2).

b. 中国水资源产量因子为

$$\gamma = \frac{P_i}{P_c}.$$

式中: γ 为水资源产量因子(无量纲值); P_i 为区域单位面积产水量(m^3/hm^2); P_c 为全国单位面积产水量(m^3/hm^2),假设中国的水资源产量因子为 1.

c. 全球范围内水资源产量因子为

$$\gamma_w = \gamma_{wC} \cdot \gamma_{wa}.$$

式中: γ_w 为全球范围内的水资源产量因子; γ_{wC} 为中国在全球范围内的水资源产量因子; γ_{wa} 为某区域在国家范围内的水资源产量因子.

d. 均衡因子为

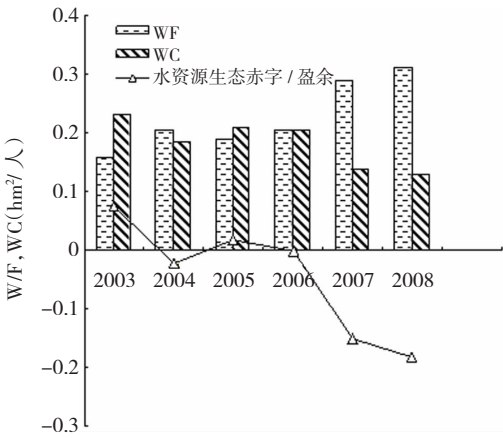
$$a_w = P_w / P.$$

式中: a_w 为水资源均衡因子; P_w 为全球所有各类生物生产面积的平均生态生产力; P 为某一类生物生产面积的平均生态生产力.

2 结果与分析

收集、整理和分析黑龙江省 2003 - 2008 年水资源指标数据,按照上述计算模型,计算黑龙江省水资源生态足迹和生态承载力. 2003 年黑龙江省人均水资源生态足迹需求计算结果见表 1. 同理,计算出 2004 - 2008 年黑龙江省水资源生态足迹,2003 - 2008 年黑龙江省水资源的生态足迹和生态承载力变化趋势见图 1. 可以看出,黑龙江省水资源生态足迹需求逐年增加,水资源生态承载力逐渐减少. 2008 年水资源生态足迹需求达到最大,为 $0.3117 \text{ hm}^2/\text{人}$;2003 年水资源生态足迹需求达到最小,为 $0.1582 \text{ hm}^2/\text{人}$;水资源生态承载力逐渐减少,2008 年水资源生态赤字为 $0.1823 \text{ hm}^2/\text{人}$. 2004、2006、2007、2008 年黑龙江省水资源利用均为不可持续状态.

表 1 2003 年黑龙江省人均水资源生态足迹需求计算结果			
类型	人均需求面积/($\text{hm}^2/\text{人}$)	均衡因子	生态足迹/($\text{hm}^2/\text{人}$)
生活	0.010 4	1	0.010 4
工业	0.028 8	1	0.028 9
农业	0.094 1	1	0.094 1
生态	0.001 6	1	0.001 6
水产品	0.023 3	1	0.023 3
总计			0.158 2



注:计算数据来源于国家统计局数据库、黑龙江统计年鉴
图 1 2003 - 2008 年黑龙江省水资源生态足迹与生态承载力变化趋势

黑龙江省水资源时空分布不均,降水主要集中在夏季,造成全省或局部地区常常出现供水不足和农业旱涝交替变化. 近些年来,黑龙江省气候变化较大,有些年份降水偏少,导致降水量减小、蒸发量增加,气候明显变得干旱,流域水资源总量明显低于多年平均值. 此外,水资源供需矛盾突出,水资源利用效率较低,水土流失较严重,都是导致水资源生态承载力下降的原因,因此黑龙江省水资源呈现生态赤字状态.

黑龙江省地下水开采规模有限,总开采量远小于可开采量,今后要考虑合理利用地表水,科学开发地下水,充分利用降水与过境水资源,通过调蓄洪水解决水资源季节、空间分配不均的矛盾;倡导发展耗水少、节水型工业,对已有的耗水型企业进行技术改造;推广农业节水技术与农业结构调整等措施,实现水资源的优化管理和科学利用,维系水资源消耗量和水资源供给量的动态平衡.

3 结 论

- 1) 基于生态足迹理论,构建水资源生态足迹与生态承载力计算模型,收集、整理和分析黑龙江省 2003 - 2008 年水资源指标数据,定量地计算和分析黑龙江省水资源生态足迹和生态承载力.
- 2) 黑龙江省水资源生态足迹需求逐年增加,水资源生态承载力逐渐减少,2004、2006、2007、2008 年黑龙江省水资源利用均为不可持续状态,计算结果验证了水资源生态足迹和生态承载力模型的科学合理性.
- 3) 黑龙江省水资源时空分布不均,近年来流域水资源总量明显低于多年平均值,水资源供需矛盾突出,水资源利用效率较低,水土流失较严重,都是导致水资源生态承载力下降的原因.

4) 通过合理利用地表水,科学开发地下水,充分利用降水与过境水资源,调蓄洪水、推广农业节水等措施,科学管理和有效利用黑龙江省有限的水资源,人为调节维系或恢复流域的健康水环境,控制水资源的开发利用不超过其承载能力和环境容量,促进水资源的健康循环。

参考文献:

[1] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K. The water footprints of Morocco and the Netherlands: Global water use as a result of domestic consumption of agricultural commodities[J]. *Ecological Economics*, 2007, 64(1):143 – 151.

[2] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y, SAVENIJE H H G, *et al.* The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries[J]. *Ecological Economics*, 2006, 60(1):186 – 203.

[3] ELENA G C, ESTHER V. From water to energy: The virtual water content and water footprint of biofuel consumption in Spain[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(3): 1345 – 1352.

[4] GERBENS – LEENES P W, HOEKSTRA A Y, Van Der MEER T. The water footprint of energy from biomass: A quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio – energy in energy supply[J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(4):1052 – 1060.

[5] VENETOULIS J. Accessing ecological impact of a university the ecological footprint for the university of Red lands [J]. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 2001, 2(2):180 – 196.

[6] JENERETTE G D, MARUSSICH W A, NEWELL J P. Linking ecological footprints with ecosystem valuation in the provisioning of urban freshwater[J]. *Ecological Economics*, 2006, 59(1):38 – 47.

[7] JENERETTE G D, WU Wanli, GOLDSMITH S, *et al.* Contrasting water footprints of cities in China and the United States[J]. *Ecological Economics*, 2006, 57(3): 346 – 358.

[8] HUBACEK K, GUAN Dabo, BARRETT J, *et al.* Environmental implications of urbanization and lifestyle

change in China: Ecological and water footprints [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17: 1241 – 1248.

[9] TAN R R, FOOD C Y, AVISO K B, *et al.* The use of graphical pinch analysis for visualizing water footprint constraints in biofuel production [J]. *Applied Energy*, 2009, 86: 605 – 609.

[10] YU Yang, HUBACEK K, FENG Kuishuang, *et al.* Assessing regional and global water footprints for the UK [J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(5):1140 – 1147.

[11] FENG Lihua, ZHANG Xingcai, LUO Gaoyuan. Application of system dynamics in analyzing the carrying capacity of water resources in Yiwu City, China [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2008, 79(3):269 – 278.

[12] XIA Y Q, SHAO M A. Soil water carrying capacity for vegetation: A hydrologic and biogeochemical process model solution[J]. *Ecological Modelling*, 2008, 214(2 – 4):112 – 124.

[13] HOEKSTRA A Y. Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis [J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(7):1963 – 1974.

[14] 新疆水资源软科学课题组. 新疆水资源及其承载力的开发战略对策[J]. *水利水电技术*, 1989(6):29.

[15] 徐中民. 情景基础的水资源承载力多目标分析理论与应用[J]. *冰川冻土*, 1999, 21(2):99 – 106.

[16] 许新宜,王浩,甘泓,等. 华北地区宏观经济水资源规划理论与方法 [M]. 郑州:黄河水利出版社, 1997: 24 – 38.

[17] 吴志峰,胡永红,李定强,等. 城市水生态足迹变化分析与模拟[J]. *资源科学*, 2006, 28(5): 152 – 156.

[18] 杜发兴,曹广品,梁川,等. 水资源承载力综合评价的熵权属性识别模型 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2009, 41(11):243 – 246.

[19] 韩俊丽,段文阁,李百岁. 基于 SD 模型的干旱区城市水资源承载力模拟与预——以包头市为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2005, 19(4):188 – 191.

[20] 崔振才,白玉慧,刘庆凤,等. 基于模糊规划的水资源承载力评价模型及应用 [J]. *武汉大学学报*, 2009, 42(6):738 – 781.

(编辑 赵丽莹)