

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2019. 05. 007

基于水足迹理论的中国水资源压力评价

刘 静^{1,2}, 余钟波^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为实现水资源可持续利用,在明晰中国蓝水足迹和灰水足迹空间分布规律的基础上,提出了涵盖水量和水质的水资源压力指数计算方法,并对中国各省级行政区水资源压力状况进行了评价。结果表明:各省级行政区蓝水足迹差异显著,大部分省级行政区农业部门蓝水足迹大于其他部门;灰水足迹排名前3的是河南、江苏和山东;宁夏、河北、山东和天津的水资源压力指数显著大于其他省级行政区,水资源压力指数分布与等级分布存在一定差异。节水技术应用、作物布局优化以及节水意识提高均有助于减小蓝水足迹;控制氮肥施用量,提高氮肥利用率有助于减小灰水足迹;实体及虚拟水资源进口有助于缓解区域水资源压力。

关键词:水资源压力;水足迹;蓝水;灰水;中国

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2019)05 - 0035 - 05

Water resources pressure assessment in China based on water footprint theory // LIU Jing^{1,2}, YU Zhongbo^{1,2}
(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to realize the sustainable utilization of water resources, a calculation method of water resources pressure index covering water quantity and water quality was put forward based on the clear spatial distribution law of China's blue water footprint and grey water footprint, and the water resources pressure situation of provincial administrative regions in China was evaluated. The results show that there are significant differences in blue water footprint among provincial administrative regions. The blue water footprint of agricultural departments in most provincial administrative regions is larger than that of other departments. Henan, Jiangsu and Shandong rank the top three in the grey water footprint. The pressure index of water resources in Ningxia, Hebei, Shandong and Tianjin is significantly higher than that in other provincial administrative regions. There are some differences between water resources pressure index distribution and grade distribution. The application of water-saving technology, the optimization of crop layout and the improvement of water-saving consciousness all contribute to the reduction of blue water footprint. Controlling the application rate of nitrogen fertilizer and increasing the utilization rate of nitrogen fertilizer are helpful to reduce the grey water footprint. Entity and fictitious water resources import helps to alleviate regional water resources pressure.

Key words: water resources pressure; water footprint; blue water; grey water; China

受气候变化、人口增长、消费结构改变等多因素影响,很多地区的水资源压力日趋严重,如何合理评价区域水资源压力水平,成为改善水资源利用现状、实现水资源可持续利用的重要前提^[1-2]。很多学者针对区域水资源压力开展了大量研究,目前的水资源压力研究主要集中在水量分析方面^[3-8],也有一些学者针对水质对区域水资源压力的影响开展了相关研究^[9-12],但同时将水量和水质纳入分析的研究相对较少。

2002 年荷兰学者 Hoekstra 等^[13]首次提出水足迹概念,丰富了传统水资源评价体系,为水资源科学管理提供了重要理论依据。水足迹概念涵盖了蓝水

基金项目:国家自然科学基金(51609063);中央高校基本科研业务费专项(2018B10614);国家重点研发计划(2018YFF0215702);水文水资源与水利工程科学国家重点实验室专项(20145027312)

作者简介:刘静(1986—),女,副教授,博士,主要从事水资源规划与管理研究。E-mail:liujing0027@hhu.edu.cn

通信作者:余钟波,教授。E-mail:zyu@hhu.edu.cn

(地表水和地下水)、绿水(有效降水)和灰水(以自然本底浓度和现有的环境水质标准为基准,稀释污染物所消耗的水资源)3种不同类型的水资源,同时包含了水量和水质两个方面^[14]。一些学者^[7,15]尝试将水足迹理论纳入区域水资源压力分析体系,但主要集中于蓝水足迹,很少将蓝水足迹和灰水足迹同时纳入分析。

本文基于水足迹理论,提出了同时涵盖水量和水质的区域水资源压力指数计算方法,并对中国各区域水资源压力状况进行了分析,以期水资源管理提供理论参考。

1 研究方法

1.1 蓝水足迹计算

农业部门蓝水足迹为不同种类农产品蓝水虚拟水含量与对应产量的乘积,本文农产品包括作物与动物产品两类。作物蓝水虚拟水含量可根据下式计算^[14]:

$$V_b = \frac{W_b}{Y} = \frac{10\max(ET_c - P_e, 0)}{Y} \quad (1)$$

式中: V_b 为作物蓝水虚拟水含量, m^3/kg ; W_b 为生育期蓝水资源利用量, m^3/hm^2 ; Y 为单位面积产量, kg/hm^2 ; ET_c 为生育期蒸发蒸腾量,mm,根据彭曼公式计算; P_e 为生育期利用的有效降水量,mm,以旬为计算步长,采用美国农业部土壤保持局推荐方法:

$$P_{et} = \begin{cases} P_i(4.17 - 0.02P_i)/4.17 & P_i \leq 83 \text{ mm} \\ 41.7 + 0.1P_i & P_i > 83 \text{ mm} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{et} 为旬有效降水量,mm; P_i 为旬降水量,mm。

动物产品蓝水虚拟水含量包含动物产品饲料、饮水及服务相关的蓝水虚拟水含量3部分,采用Mekonnen等^[16]的计算结果。其中动物产品饲料相关的蓝水消耗包含饲料原料对应的蓝水消耗及混合这些饲料原料所使用的蓝水资源;饲料原料对应的蓝水资源消耗采用作物蓝水足迹计算方法得到;服务相关的蓝水足迹指的是进行动物屋舍清洁、动物自身清洁以及其他保持环境清洁所必需的服务所对应的蓝水资源消耗^[17-18]。

工业、生活及生态部门蓝水足迹为蓝水用量与对应耗水系数的乘积。区域蓝水足迹为各部门蓝水足迹之和。

1.2 灰水足迹计算

灰水足迹可根据下式计算^[14]:

$$G = \frac{\alpha N}{C_m - C_n} \quad (3)$$

式中: G 为灰水足迹, m^3 ; N 为氮肥施用量,kg; α 为氮肥淋溶率; C_m 、 C_n 分别为氮元素的最大环境允许

质量浓度和自然本底质量浓度, mg/L 。根据相关研究^[19-20],本文假定 $C_m = 10 \text{ mg/L}$, $C_n = 0 \text{ mg/L}$ 。

1.3 区域水资源压力指数与等级计算

区域水资源消耗应同时涵盖生产用水^[5]与稀释污染物用水^[21],本文假定当地可用水资源可全部用于污染物稀释。区域水资源压力指数 W_s 可根据下式计算:

$$W_s = \frac{B + \max(G - R, 0)}{R} \quad (4)$$

式中: B 为蓝水足迹, m^3 ; R 为可用水资源量, m^3 。

结合以往研究^[5],规定 $W_s < 0.1\beta$ (β 为区域综合耗水系数)为低水资源压力, $0.1\beta \leq W_s < 0.2\beta$ 为低-中水资源压力, $0.2\beta \leq W_s < 0.4\beta$ 为中-高水资源压力, $W_s \geq 0.4\beta$ 为高水资源压力。 β 可根据下式计算:

$$\beta = \frac{B_a + B_i + B_d + B_e}{W_a + W_i + W_d + W_e} = \frac{B_a + W_i\beta_i + W_d\beta_d + W_e\beta_e}{W_a + W_i + W_d + W_e} \quad (5)$$

式中: B_a 、 B_i 、 B_d 、 B_e 分别为农业、工业、生活及生态部门蓝水足迹, m^3 ; W_a 、 W_i 、 W_d 、 W_e 分别为农业、工业、生活及生态部门蓝水用量, m^3 ; β_i 、 β_d 、 β_e 分别为工业、生活及生态部门耗水系数。

1.4 研究区域与数据来源

本文研究区域为中国的31个省级行政区,因数据原因,未涉及港澳台地区。气象数据来自中国气象科学数据共享服务网,农产品产量、消费、氮肥施用量及人口数据来自《中国统计年鉴:2015》和《中国农业统计资料:2015》,水资源用量、可用量及耗水系数来自《2015年中国水资源公报》,作物系数主要参考《中国主要作物需水量与灌溉》^[22]和《北方地区主要农作物灌溉用水定额》^[23]确定,部分由水利部灌溉试验总站提供。

2 结果与讨论

2.1 蓝水足迹

由图1可看出,各省级行政区蓝水足迹差异显著,其中新疆(355.47亿 m^3)、山东(246.37亿 m^3)、河南(213.85亿 m^3)、河北(203.22亿 m^3)和江苏(190.87亿 m^3)蓝水足迹排名前5,这些省级行政区社会生产活动相对密集,蓝水资源量大;西藏经济水平相对落后,社会生产活动相对较少,蓝水足迹最小,不足新疆的2%。对比各部门蓝水足迹发现,除广东、浙江、福建、北京和上海外,其他省级行政区的农业蓝水足迹均大于工业、生活及生态蓝水足迹,这与农业生产活动需要消耗大量的水资源,以及农业

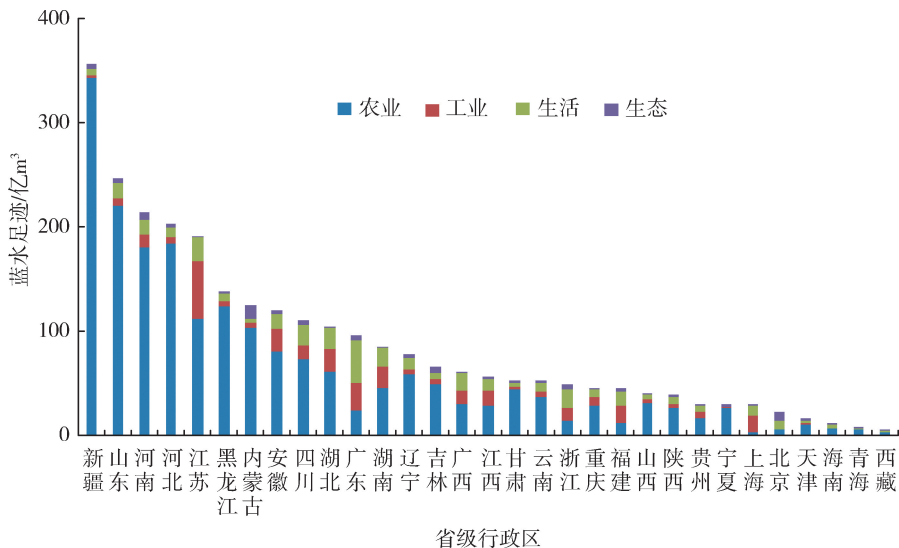


图1 蓝水足迹空间分布及部门差异

是中国最大的水资源消耗部门(农业蓝水足迹占全国蓝水足迹的 72.70%)的情况一致。对于部分沿海(广东、浙江和福建)和经济高度发达的省级行政区(北京和上海),消费的农产品主要来自其他省级行政区调入,因而工业及生态部门成为重要的蓝水资源消耗部门。对于蓝水足迹较大的省级行政区,尤其是农业蓝水足迹大于 100 亿 m^3 的新疆、山东、河南、河北、黑龙江和内蒙古,节水技术的应用、作物布局优化(高耗水作物向水资源丰富省级行政区转移)以及节水意识的提高均有助于减小区域蓝水足迹,进而缓解区域水资源压力。

2.2 灰水足迹

图2给出了灰水足迹空间分布。由图2可看出,河南、江苏和山东是灰水足迹排名前3的省级行政区,其灰水足迹分别为 238.70 亿 m^3 、162.10 亿 m^3 和 151.00 亿 m^3 ,这与河南等地是重要的农业生产地

区,氮肥施用相对较多,稀释其所产生的污染物所需的水资源相对较多的情况一致。北京、青海和西藏灰水足迹较小,分别为 4.90 亿 m^3 、4.10 亿 m^3 和 2.00 亿 m^3 ,这与其农业生产活动较少,氮肥施用量相对较少密不可分。现有灰水足迹计算主要考虑氮肥对区域水资源的影响,因此,合理控制氮肥施用量,提高氮肥利用率均有助于减小灰水足迹。未来,其他污染物也需纳入区域灰水足迹量化分析,以实现更精准的水资源管理。

2.3 区域水资源压力

表1给出了基于蓝水足迹和灰水足迹的区域水资源压力指数及等级。由表1可看出,宁夏(4.070)、河北(1.599)、山东(1.463)和天津(1.282)的水资源压力指数均显著大于其他省级行政区。宁夏和河北的高水资源压力主要是由于其可用水资源量不足以稀释氮肥施用所产生的污染物,

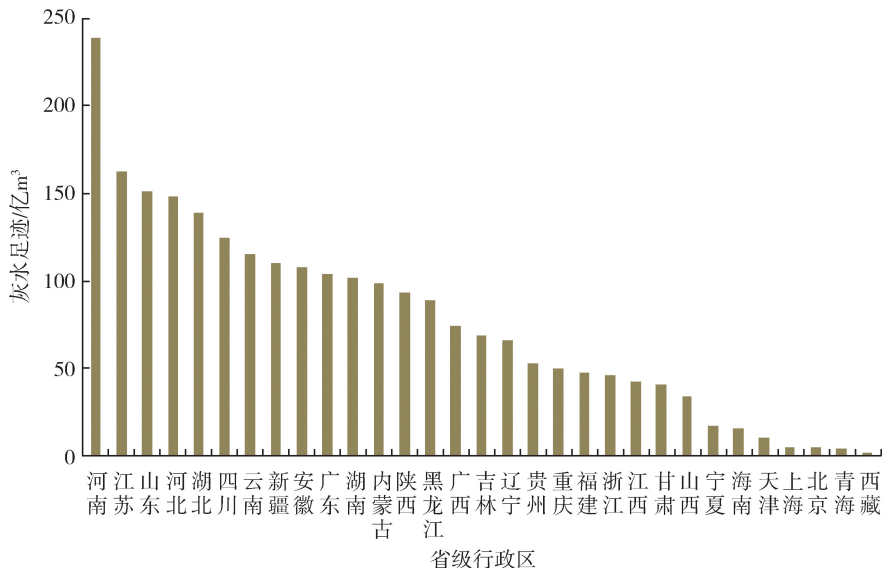


图2 灰水足迹空间分布

表 1 各省级行政区水资源压力指数与等级		
省级行政区	水资源压力指数	水资源压力等级
宁 夏	4.070	高
河 北	1.599	高
山 东	1.463	高
天 津	1.282	高
北 京	0.809	高
河 南	0.745	高
上 海	0.452	高
辽 宁	0.436	高
山 西	0.434	高
新 疆	0.382	高
江 苏	0.328	高
甘 肃	0.315	高
内蒙古	0.233	中-高
吉 林	0.196	高
黑龙江	0.168	高
安 徽	0.131	中-高
陕 西	0.116	中-高
湖 北	0.102	中-高
重 庆	0.099	低-中
海 南	0.053	中-高
四 川	0.049	低-中
广 东	0.049	中-高
湖 南	0.045	低-中
浙 江	0.034	低-中
福 建	0.034	低-中
江 西	0.028	低-中
云 南	0.028	低
贵 州	0.025	低
广 西	0.025	低-中
青 海	0.013	低
西 藏	0.001	低

因此需要额外的水资源消耗。山东和天津的高水资源压力主要是由蓝水资源消耗引起的(山东的蓝水足迹在全国排名第 2, 而其可用水资源在全国排名第 24; 天津的蓝水足迹和可用水资源量均较小, 分别占全国总量的 0. 60% 和 0. 05%)。西藏的水资源压力最小, 这与其可用水资源量全国排名第 1, 但同时经济相对落后, 社会经济活动相对较少, 水资源消耗较少密不可分。不同区域水资源消耗特点不同, 区域水资源压力指数分布与水资源压力等级分布存在一定差异。以内蒙古和黑龙江为例, 其水资源压力指数分别为 0. 233 和 0. 168, 而其压力等级分别为中-高水资源压力和高水资源压力。受农业灌溉水平等因素影响, 内蒙古的综合耗水系数(0. 673) 显著大于黑龙江(0. 386), 因此同样的水资源压力水平, 内蒙古对应的水资源压力指数阈值明显高于黑龙江(以高水资源压力指数阈值为例, 内蒙古和黑龙江分别为 0. 269 和 0. 154)。减小区域尤其是高水资源压力地区水资源压力, 是目前亟需解决的问题之一。除上文提及的减少区域蓝水足迹及灰水足迹的措施外, 实体及虚拟形式的水资源进口均有助于增加区域可用水

资源量, 以缓解区域水资源压力^[5, 19, 24]。

3 结 论

- a. 各省级行政区蓝水足迹差异显著, 除广东、浙江、福建、北京和上海外, 其他省级行政区的农业蓝水足迹均大于工业、生活及生态蓝水足迹, 节水技术的应用、作物布局优化(高耗水作物向水资源丰富省级行政区转移) 以及节水意识的提高均有助于减小区域蓝水足迹, 进而缓解区域水资源压力。
- b. 灰水足迹排名前 3 的是河南、江苏和山东, 北京、青海和西藏灰水足迹较小。合理控制氮肥施用量, 提高氮肥利用率均有助于减小灰水足迹, 未来其他污染物也需纳入区域灰水足迹量化分析。
- c. 宁夏、河北、山东和天津的水资源压力指数均显著大于其他省级行政区。水资源压力指数分布与考虑区域水资源消耗特点的水资源压力等级分布存在一定差异。除蓝水足迹及灰水足迹减小措施外, 实体及虚拟形式的水资源进口均有助于增加区域可用水资源量, 以缓解区域水资源压力。

参考文献:

[1] 张乐勤, 方宇媛. 基于空间自相关分析的安徽省水资源生态压力空间格局探析[J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 24-29. (ZHANG Leqin, FANG Yuyuan. Study of spatial pattern of water resources ecological pressure in Anhui Province based on spatial autocorrelation analysis[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 24-29. (in Chinese))

[2] 黄晶, 王学春, 陈阜. 水足迹研究进展及其对农业水资源利用的启示[J]. 水资源保护, 2016, 32(1): 135-141. (HUANG Jing, WANG Xuechun, CHEN Fu. Research progress of water footprint and its implication for utilization of agricultural water[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(1): 135-141. (in Chinese))

[3] GOSLING S N, ARNELL N W. A global assessment of the impact of climate change on water scarcity[J]. Climatic Change, 2016, 134(3): 371-385.

[4] KUMMU M, GUILAUME J H A, DE MOEL H, et al. The world's road to water scarcity: shortage and stress in the 20th century and pathways towards sustainability[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 38495.

[5] LIU Jing, WANG Yubao, YU Zhongbo, et al. A comprehensive analysis of blue water scarcity from the production, consumption, and water transfer perspectives[J]. Ecological Indicators, 2017, 72: 870-880.

[6] PORKKA M, GERTEN D, SCHAPHOFF S, et al. Causes and trends of water scarcity in food production[J]. Environmental Research Letters, 2016, 11(1): 015001.

[7] ZHAO Xu, LIU Junguo, LIU Qingying, et al. Physical and virtual water transfers for regional water stress alleviation

in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2015,112 (4): 1031-1035.

[8] 操信春,邵光成,王小军,等. 中国农业广义水资源利用系数及时空格局分析[J]. 水科学进展,2017,28(1): 14-21. (CAO Xinchun, SHAO Guangcheng, WANG Xiaojun, et al. Generalized water efficiency and strategic implications for food security and water management: a case study of grain production in China[J]. Advances in Water Science,2017,28(1):14-21. (in Chinese))

[9] LI Bing, YANG Guishan, WAN Rongrong, et al. Dynamic water quality evaluation based on fuzzy matter-element model and functional data analysis;a case study in Poyang Lake[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017,24(23):19138-19148.

[10] MLADENOVIC-RANISAVLJEVIC I I, ŽERAJIC S A. Comparison of different models of water quality index in the assessment of surface water quality [J]. International Journal of Environmental Science and Technology,2018, 15(3):665-674.

[11] SCHOUMANS O F, CHARDON W J, BECHMANN M E, et al. Mitigation options to reduce phosphorus losses from the agricultural sector and improve surface water quality;a review[J]. Science of the Total Environment,2014,468: 1255-1266.

[12] SENER S, SENER E, DAVRAZ A. Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey) [J]. Science of the Total Environment,2017,584:131-144.

[13] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. 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[R]. Delft:UNESCO-IHE,2002.

[14] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard[M]. London:Earthscan,2011.

[15] HOEKSTRA A Y, MEKONNEN M M, CHAPAGAIN A K, et al. Global monthly water scarcity:blue water footprints versus blue water availability[J]. PLoS One,2012,7(2): e32688.

[16] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. The green, blue and grey water footprint of farm animals and animal products: value of water research report series No. 48 [R]. Delft: UNESCO-IHE,2010.

[17] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y. Virtual water flows between nations in relation to trade in livestock and livestock products; value of water research report series No. 13 [R]. Delft: UNESCO-IHE,2003.

[18] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y. Water footprints of nations; value of water research report series No. 16 [R]. Delft: UNESCO-IHE,2004.

[19] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y, SAVENIJE H H G. Water saving through international trade of agricultural products[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2006, 10(3):455-468.

[20] ABABAEI B, ETEDALI H R. Water footprint assessment of main cereals in Iran [J]. Agricultural Water Management,2017,179:401-411.

[21] ZENG Z, LIU J G, SAVENIJE H H. A simple approach to assess water scarcity integrating water quantity and quality [J]. Ecological indicators,2013,34:441-449.

[22] 陈玉民,郭国双,王广兴,等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京:水利电力出版社,1995.

[23] 段爱旺,孙景生,刘钰,等. 北方地区主要农作物灌溉用水定额[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2004.

[24] BULSINK F, HOEKSTRA A Y, BOOIJ M J. The water footprint of Indonesian provinces related to the consumption of crop products [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2010,14:119-128.

(收稿日期:2018-09-12 编辑:熊水斌)

+++++

(上接第 18 页)

[24] 郭雨华,赵廷宁,孙保平,等. 草地坡面水动力学特性及其阻延地表径流机制研究[J]. 水土保持研究,2006 (4): 264-267. (GUO Yuhua, ZHAO Tingning, SUN Baoping, et al. Study on the dynamic characteristics of overland flow and resistance to overland flow of grass slope [J]. Research of Soil and Water Conservation 2006, 13 (4):264-267. (in Chinese))

[25] 戴晶晶,刘增贤,陆沈钧. 基于数值模拟的城市内涝风险评估研究:以苏州市城市中心区为例[J]. 中国水利, 2015 (13): 20-23. (DAI Jingjing, LIU Zenxian, LU Shenjun. Risk-assessment of city waterlogging based on numerical simulation;case study on urban center of Suzhou [J]. China Water Resources, 2015 (13): 20-23. (in Chinese))

[26] 侯精明,郭凯华,王志力,等. 设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟[J]. 水科学进 展,2017,28(6):820-828. (HOU Jingming, GUO Kaihua, WANG Zhili, et al. Numerical simulation of design storm pattern effects on urban flood inundation[J]. Advances in Water Science, 2017,28(6):820-828. (in Chinese))

[27] 卢超. 基于综合风险指数的城市内涝风险评价[C]// 中国水利学会. 科技创新与水利改革:中国水利学会 2014 学术年会论文集(上册). 北京:中国水利学会, 2014:128-133.

(收稿日期:2018-12-02 编辑:熊水斌)