

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.05.017

黑龙江省水足迹时空分布规律及空间均衡分析

姜秋香, 吴云星, 王子龙, 欧阳兴涛, 李鑫莹, 何晓龙

(东北农业大学水利与土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要:利用水足迹理论, 量化2000—2018年黑龙江省13个地级市的不同类型水足迹, 分析其时空演变规律, 并结合空间均衡分析研究了各地区水足迹的差异性。结果表明:2000—2018年黑龙江省总水足迹呈波动上升趋势, 但灰水足迹一直下降, 2018年人均灰水足迹为 300.7 m^3 ;水足迹空间分布不均匀, 水足迹富足和水足迹匮乏同时存在, 整体上呈现出北低南高、东低西高的趋势;研究时段内, 黑龙江省人均灰水足迹和人均水足迹的空间分布较为均匀, 其总体空间均衡度超过0.6;水足迹强度、工业蓝水足迹和生态环境蓝水足迹的空间分布存在较大差异;水足迹的总体空间均衡度在逐渐上升, 但最大值不超过0.6, 区域分布仍有较大差异。

关键词:水足迹; 水足迹强度; 时空分布规律; 空间均衡度; 黑龙江省

中图分类号:TV213.9

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2022)05-0122-10

Spatio-temporal distribution and spatial equilibrium analysis of water footprint in Heilongjiang Province // JIANG Qiuxiang, WU Yunxing, WANG Zilong, OUYANG Xingtao, LI Xinying, HE Xiaolong (School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Using the water footprint theory, the different types of water footprints of 13 cities in Heilongjiang Province from 2000 to 2018 were quantified, and their spatio-temporal distribution was analyzed. The differences of water footprints in various regions were studied by combining the spatial balance analysis. The results showed that the total water footprint of Heilongjiang Province showed a rising trend from 2000 to 2018, of which the grey water footprint had been decreasing. In 2018, the per capita grey water footprint was 300.7 m^3 . The spatial distribution of water footprint is uneven, and the abundant water footprint and the lack of water footprint coexist. On the whole, it shows a trend of low in the north, high in the south, low in the east and high in the west. During the study period, the spatial distribution of the per capita grey water footprint and the per capita water footprint in Heilongjiang Province is relatively uniform, and the overall spatial equilibrium degree is higher than 0.6. The spatial distribution of water footprint intensity, industrial blue water footprint and ecological blue water footprint are quite different. The overall spatial equilibrium degree of water footprint is gradually rising, but the maximum value is not more than 0.6, and there are still large differences in regional distribution.

Key words: water footprint; water footprint intensity; spatio-temporal distribution; spatial equilibrium degree; Heilongjiang Province

水资源是基础性的自然资源, 是人类生存发展的物质基础, 是实现可持续发展的必要条件^[1]。为了更准确地衡量一个地区对水资源的消耗, Hoekstra教授在“虚拟水”的基础上提出了水足迹的概念^[2], 即任何已知人口(一个国家、区域或个人)在一定时间内消耗或生产的产品和服务所需要的水资源总量。水足迹从水源角度区分了生产活动所消耗水资

源的类型, 更加清晰地刻画了水资源的取用与消耗^[3-4]。根据水足迹理论, 可以更精确地衡量水资源的消耗和污染量, 有效改善水资源管理分配方式, 最大程度满足不同部门的水资源需求。自水足迹概念提出以来, 其理论蓬勃发展、不断完善, 成为量化水资源消耗的一个重要手段。水足迹的研究经历了从全球和国家尺度^[5-7]到区域和流域尺度^[8-10]的转

基金项目: 国家自然科学基金(42071243); 黑龙江省科学基金(YQ2020E001); 东北农业大学“学术骨干”项目(18XG17)

作者简介: 姜秋香(1982—), 女, 教授, 博士, 主要从事水土资源高效利用和管理研究。E-mail: jiangqiuxiang914@163.com

通信作者: 王子龙(1982—), 男, 教授, 博士, 主要从事寒区水土资源高效利用研究。E-mail: wangzilong2017@126.com

变。Hoekstra 等^[6]计算了 1997—2001 全球各国家的水足迹,得出全球平均水足迹为 $1\,240\text{ m}^3/\text{a}$,而中国为 $700\text{ m}^3/\text{a}$,远低于全球平均水平;郭相等^[11]对中国 31 个省份作物水足迹进行了研究,并利用途径分析识别了人均纯收入、人口密度、化肥施用量和降水量是影响水足迹时空分布的主要驱动因素;侯林秀等^[12]对内蒙古地区 1998—2018 年的水足迹进行研究,得出了研究区水资源压力较高但尚未出现水质性缺水的结论。目前研究主要集中在区域水足迹上,包括工业水足迹^[13]、农业水足迹^[14]和生活水足迹^[15]等的核算和影响因素分析,得出不同部门对水足迹的需求,从而制定减少水足迹的合理策略,使水资源得到可持续利用。水足迹空间均衡指水足迹的空间分布与社会经济的布局和生态环境的功能之间呈现的一种平衡状态^[16]。在区域发展水平、自然条件和人口数量等因素作用下,不同地区对水足迹的需求有较大差异。利用空间均衡理论定量分析水足迹区域间的差异,能够制定更符合区域自身条件的水资源分配方案。目前研究仅针对灰水足迹进行空间均衡分析,蓝水和绿水足迹空间均衡特征分析的缺失,易造成后续政策制定的不完善和应用性差等问题。

本文利用水足迹理论,对 2000—2018 年黑龙江省 13 个地级市水足迹进行量化,并分析其时空分布规律。在选取水足迹特征指标的基础上,利用空间均衡理论进行水足迹的空间均衡分析,利用熵权法计算各指标权重,最终得出水足迹的空间均衡情况,以期对黑龙江省高效利用、合理分配水资源提供可行建议。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黑龙江省位于中国东北部,面积为 45.25 万 km^2 ,约占全国面积的 4.7% ,位居全国第六。多年平均降水量为 536 mm ,折合水量为 $2\,420\text{ 亿 m}^3$,境内拥有黑龙江、乌苏里江、松花江、绥芬河四大水系,是我国重要的粮食生产基地^[17]。黑龙江省多年平均水资源总量为 775 亿 m^3 ,人均水资源量为 $2\,067\text{ m}^3$,对地表水的利用率较低,多依赖于地下水资源,导致地表水的开发程度不高。黑龙江省水资源时空差异较大,年内年际分布不均,大体上呈现夏秋多、春冬少、边缘多、腹地少等特点。黑龙江省作为农业大省,是中国粮食安全的压舱石,保障农业用水至关重要。在中国“振兴东北老工业基地”战略指导下,发展工业,提高工业水平,满足黑龙江省工业部门水资源需求是重中之重。研究黑龙江省各部门水足迹,

确定各部门对水资源的实际需求,可为制定区域水资源分配方案提供依据。

1.2 数据来源

本文采用的社会经济数据、氮肥施用量、畜禽存栏出栏量、养殖业产品产量和污染物排放量来源于《黑龙江统计年鉴》。水资源相关数据来源于《中国水资源公报》。农业气象数据来自中国气象数据网 (<http://data.cma.gov.cn/>)。

2 研究方法

2.1 水足迹计算

2.1.1 蓝水足迹

蓝水足迹是人类消耗的径流,即由人类利用而不再回到原流域的径流^[18]。总蓝水足迹包括区域内工业、农业、生活和生态部门的蓝水足迹。其中,工业部门蓝水足迹由于工业部门产品种类繁多、生产流程复杂,计算较为困难,采用工业用水量来代替^[19];生活与生态部门主要消耗蓝水,其蓝水足迹可以用用水数据来代替^[20]。农业部门蓝水足迹由作物和养殖业蓝水足迹组成,作物蓝水足迹根据作物生长期间的蒸散发量计算^[21],计算公式为

$$W_{bl} = AC_{bl} = \beta A \sum_d ET_{bl} \quad (1)$$

其中 $ET_{bl} = \max(0, ET_c - P_{eff})$

$$ET_c = K_c ET_0$$

式中: W_{bl} 为作物蓝水足迹, m^3 ; C_{bl} 为作物生长期内消耗的蓝水量, m^3/hm^2 ; d 为作物生长期的时长, d ; ET_{bl} 为生长期内蓝水蒸散发量, mm ; A 为作物的种植面积, hm^2 ; ET_c 为作物蒸散发总量, mm ; P_{eff} 为作物生育期内的有效降水量, mm ; K_c 为作物系数; ET_0 为参照作物蒸散量, mm ; β 为转换系数,本文中取 $\beta = 10$ 。

养殖业蓝水足迹 W_{l2} 的计算公式为

$$W_{l2} = \sum_{i=1}^n V_i P_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: V_i 为第 i 种畜产品虚拟水含量, m^3/kg , 取值参考文献[6]; P_i 为第 i 种畜产品产量, kg 。

2.1.2 绿水足迹

绿水足迹表示生产过程中消耗的降水量^[18]。利用作物生长时期的蒸散发量计算区域绿水足迹^[22],计算公式为

$$W_g = AC_g = \beta A \sum_d ET_g \quad (3)$$

其中 $ET_g = \min(ET_c, P_{eff})$

式中: W_g 为绿水足迹, m^3 ; C_g 为作物生长期内消耗的绿水量, m^3/hm^2 ; ET_g 为生长期内绿水蒸散发量, mm 。

2.1.3 灰水足迹

灰水足迹是将污染的水资源稀释到一定标准所需要的水的体积^[18]。结合研究区域具体情况将灰水足迹分为农业、工业和生活灰水足迹。

a. 农业灰水足迹。农业生产过程中化肥与农药的大量使用、畜牧业中畜禽粪便的排放以及其他农业过程排放的污染,都会导致不同程度的水资源污染。结合文献[23],本文主要计算种植业灰水足迹和畜牧业灰水足迹。农作物生产过程中所使用的化肥与农药除被植物吸收外,还会随着径流、入渗等方式进入水体,从而造成水污染。根据作物生长过程中施用肥料的不同含量,选取氮肥作为代表污染物对灰水足迹进行计算^[24],计算公式为

$$W_{g1} = \frac{\alpha U}{\rho_{\max} - \rho_{\text{nat}}} \quad (4)$$

式中: W_{g1} 为种植业灰水足迹, m^3 ; α 为化肥淋失率,取为10%^[25]; U 为化肥的使用量, kg ; $\rho_{\max}$ 为污染物在水体中最大可容许质量浓度, kg/m^3 ,硝酸盐是农业过程中氮肥流失和水污染的主要原因,根据GB 3838—2022《地表水环境质量标准》^[26]中Ⅲ类水质标准,将 $\rho_{\max}$ 设定为 $0.01 \text{ kg}/\text{m}^3$; ρ_{nat} 为受纳水体中污染物的自然本底质量浓度, kg/m^3 ,由于真正的环境情况较为复杂, ρ_{nat} 的获取难度偏大且估值较低,因此令 ρ_{nat} 为0^[18]。选取有代表性的畜禽(猪、牛、羊、家禽)作为污染来源,主要通过每年畜禽排放污染物进入水体的含量来计算养殖业灰水足迹。畜禽排放污染物中含量较高的是总氮(TN)和化学需氧量(COD)^[26],因此选择TN和COD作为计算的指标。由于受纳水体可以同时氮和COD进行稀释,因此选取氮灰水足迹和COD灰水足迹中较大值为养殖业灰水足迹。具体公式为

$$W_{g2} = \frac{L}{\rho_{\max} - \rho_{\text{nat}}} \quad (5)$$

式中: W_{g2} 为养殖业灰水足迹, m^3 ; L 为进入到受纳水体的污染物含量, kg 。受纳水体中COD的最大容许质量浓度为 $0.02 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。水体可以同时多种污染物进行稀释,如果直接将种植业与养殖业的灰水足迹相加,会导致重复计算。因此需要将相同的污染物含量累加,选出较大的为代表污染物,稀释代表污染物所消耗的水资源即为农业灰水足迹。计算公式为

$$W_{\text{ga}} = \max[(W_{g1\text{TN}} + W_{g2\text{TN}}), W_{g2\text{COD}}] \quad (6)$$

式中 W_{ga} 为农业灰水足迹, m^3 。

b. 工业与生活灰水足迹。工业部门灰水足迹可以通过工业废水中各种污染物的含量直接求出。结合研究区具体情况,选择COD和氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)

为代表污染物。工业灰水足迹计算公式为

$$W_{\text{gi}} = \max(W_{\text{giNH}_4^+ - \text{N}}, W_{\text{giCOD}}) \quad (7)$$

式中 $W_{\text{gr}, \text{in}}$ 为工业灰水足迹, m^3 。

根据研究区污染物具体排放情况,生活用水选择COD与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为代表污染物。生活灰水足迹(W_{gd})计算方法与工业灰水足迹相同。

c. 区域灰水足迹。由工业与生活灰水足迹计算结果可知,工业与生活灰水足迹的污染物中COD含量最大。由种植业和养殖业灰水足迹计算结果可知,农业部门灰水足迹的污染物中氮元素含量最大,将相同类型污染物消耗的水足迹进行累积,水足迹消耗最大者即为区域灰水足迹。

2.2 空间均衡分析

2.2.1 空间均衡系数

水足迹空间均衡系数可以表示为水足迹在任意空间点或空间单元分布的均衡程度,取值范围为 $[0, 1]$ 。越接近1表示空间分布越均衡,越接近0表示空间分布越不均衡^[27-29]。计算公式为

$$A_{ij} = \begin{cases} 0 & x_{ij} < \bar{x}_j - \Delta x_{ij1} \\ \frac{x_{ij} - \bar{x}_j + \Delta x_{ij1}}{\Delta x_{ij1}} & \bar{x}_j - \Delta x_{ij1} \leq x_{ij} \leq \bar{x}_j \\ \frac{\bar{x}_j + \Delta x_{ij2} - x_{ij}}{\Delta x_{ij2}} & \bar{x}_j < x_{ij} \leq \bar{x}_j + \Delta x_{ij2} \\ 0 & x_{ij} > \bar{x}_j + \Delta x_{ij2} \end{cases} \quad (8)$$

式中: A_{ij} 为水足迹空间均衡系数; x_{ij} 为区域*i*指标*j*的初始数据; $\bar{x}_j$ 为各地区内指标*j*的平均值; Δx_{ij1} 为各指标平均值向负方向减少量; Δx_{ij2} 为各指标平均值向正方向增加量,由于各指标的最大值和最小值差距较大,因此假定 $\Delta x_{ij1} = \Delta x_{ij2} = \bar{x}_j$ ^[27]。

2.2.2 总体空间均衡度

水足迹总体空间均衡度可以表示为水足迹在整个区域分布的均衡程度,取值范围为 $[0, 1]$ 。越接近1表示水足迹在整个空间上分布越均衡,越接近0表示水足迹在整个空间上分布越不均衡^[27]。由于各空间点分布不均匀,故将指标*j*的空间均衡系数按区域*i*的面积比加权,计算指标*j*的总体空间均衡度 B_j :

$$B_j = \sum_{i=1}^N \frac{S_i}{S} A_{ij} \quad (9)$$

式中: S_i 为区域*i*的面积, m^2 ; N 为区域数; S 为研究区总面积, m^2 。

采用熵权法^[30]计算各指标权重,即各指标对水足迹总体空间均衡度的贡献率,从而得出水足迹的

总体空间均衡度 B :

$$B = \sum_{j=1}^J w_j B_j \quad (10)$$

式中: J 为指标的个数; w_j 为指标 j 的权重。

3 结果与分析

3.1 黑龙江省水足迹时空演变规律

3.1.1 时间演变规律

通过对 2000—2018 年黑龙江省蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹的计算,确定水足迹的组成及变化趋势(图 1、图 2)。研究时段内黑龙江省总水足迹平均值为 837 亿 m^3 ,其中蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹分别占总量的 41.13%、33.02% 和 25.85%,蓝水足迹的主导地位显著。

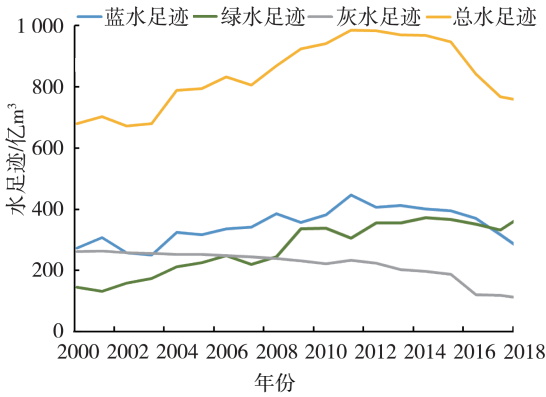


图 1 黑龙江省水足迹随时间变化

Fig. 1 Changes of water footprint with time in Heilongjiang Province

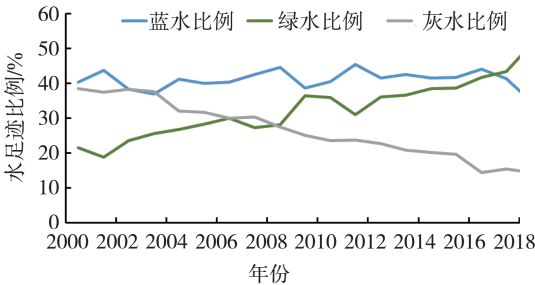


图 2 黑龙江省水足迹比例随时间变化

Fig. 2 Changes of ratio of water footprint with time in Heilongjiang Province

由图 1 可知,2000—2018 年黑龙江省总水足迹呈现波动上升的趋势。总水足迹变化可以分为 2 个阶段,第一阶段 2000—2011 年,从 2000 年逐渐增加,至 2011 年达到峰值 986 亿 m^3 ,第二阶段 2012—2018 年,从 2012 年又逐渐回落至 2018 年的 752 亿 m^3 。研究时段内黑龙江省积极响应“推动全社会节水,全面提高水资源利用效率”的国家政策,实施农业节水增效、工业和生活节水减排等措施。因此,黑龙江省总水足迹呈现逐渐下降趋势。

由图 2 可知,黑龙江省蓝水足迹占总水足迹的比例在波动下降,从 2000 年的 40.20% 降到 2018 年的 34.49%,说明黑龙江省采取水资源总量强度双控和科技创新引领等节水措施取得较好成效。研究时段内灰水足迹的比例下降幅度较大(年均下降 1.85%),黑龙江省控制污染物排放总量和实施减排重点工程等污水减排措施效果明显。而绿水足迹的比例则在快速上升,在 2018 年达到 51.22%,同时从 2017 年开始绿水足迹的比例首次超过蓝水足迹。黑龙江省作为粮食主产区,种植面积在逐渐增加,且蓝水和灰水足迹在下降,因此绿水足迹的比例不断增加并成为主导。黑龙江省蓝水足迹变化与总水足迹相近,均表现出两阶段变化的趋势。在第一阶段中 2003 年的蓝水足迹最低,2003 年作物种植面积下降,导致农业蓝水足迹大幅下降。本文蓝水足迹构成中,养殖业蓝水为总蓝水的 66.72%,占据蓝水足迹的主要部分。第一阶段黑龙江省主要畜产品产量逐渐增加,由于黑龙江省部分地区施行禁牧政策,导致第二阶段畜产品产量逐渐降低,由此使蓝水足迹呈现出先增加后减少的变化趋势。绿水足迹总体呈现增加的趋势,黑龙江省作为“中华大粮仓”,粮食种植面积逐渐增加,对绿水的需求也在逐渐增加。受到枯水年、自然灾害和农业供给侧改革导致作物种植面积减少等因素的影响,2007、2011、2016 和 2017 年黑龙江省绿水足迹略微下降。研究时段内黑龙江省灰水足迹逐年下降,其下降趋势较为明显,从 261 亿 m^3 降到 108 亿 m^3 ,年均减少 3.27%。该时段黑龙江省污水治理效果明显,污染物排放量逐渐减少,因此灰水足迹也呈下降趋势。本文灰水足迹主要由吸纳工业和生活部门排放的 COD 所产生。在灰水足迹构成中,生活灰水足迹比例较大,占总灰水足迹的 70% 以上,最大为 94.26%。因此下一步要做好生活污水减排工作。

3.1.2 空间演变规律

根据水足迹计算方法,核算 2000—2018 年黑龙江省 13 个地级市的不同水足迹。根据各水足迹在研究时段内的变化特征,选取 2000 年、2003 年、2007 年、2011 年、2016 年和 2018 年作为代表年,利用 ArcGIS 绘制其蓝水、绿水和灰水足迹空间分布。图 3 为各代表年黑龙江省蓝水足迹空间分布。可见,黑龙江省北部和东部蓝水足迹较低,包括大兴安岭、鹤岗、伊春和七台河,该区域蓝水足迹之和仅占黑龙江省总蓝水足迹的 6.14%。其中大兴安岭地区的蓝水足迹最低,为 0.802 亿 $\sim$ 1.68 亿 m^3 。大兴安岭地区为黑龙江省最北部,人口数量最少,工业不

发达,作物产量和畜牧业产量也较低,因此对蓝水足迹的需求较低。位于黑龙江省西部和南部的齐齐哈尔、大庆、绥化和哈尔滨蓝水足迹较高,其中哈尔滨最大,为52.2亿~109.0亿m³。哈尔滨的养殖业蓝水足迹占总蓝水足迹的69.85%,作为黑龙江省省会,其养殖业的产值和产量均最大,因此消耗较多蓝水足迹。大庆的蓝水足迹也较大,在其蓝水构成中

工业和养殖业蓝水足迹占大庆蓝水足迹的92.23%。大庆作为典型的工业城市,工业较为发达,养殖业产值在全省为中等水平,故蓝水足迹较大。

图4为各代表年黑龙江省绿水足迹空间分布。可见,绿水足迹的低值地区主要在黑龙江省的北部和中部,包括大兴安岭、伊春和七台河,影响绿水足

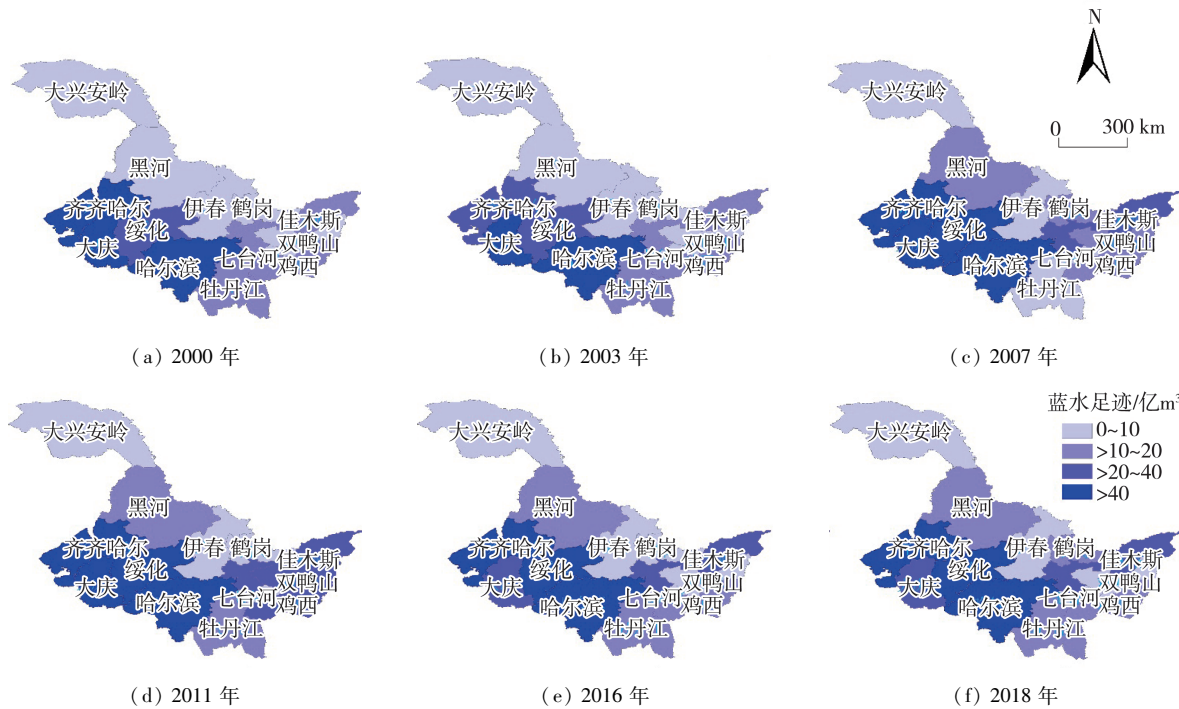


图3 各代表年黑龙江省蓝水足迹空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of blue water footprint in Heilongjiang Province in each representative year

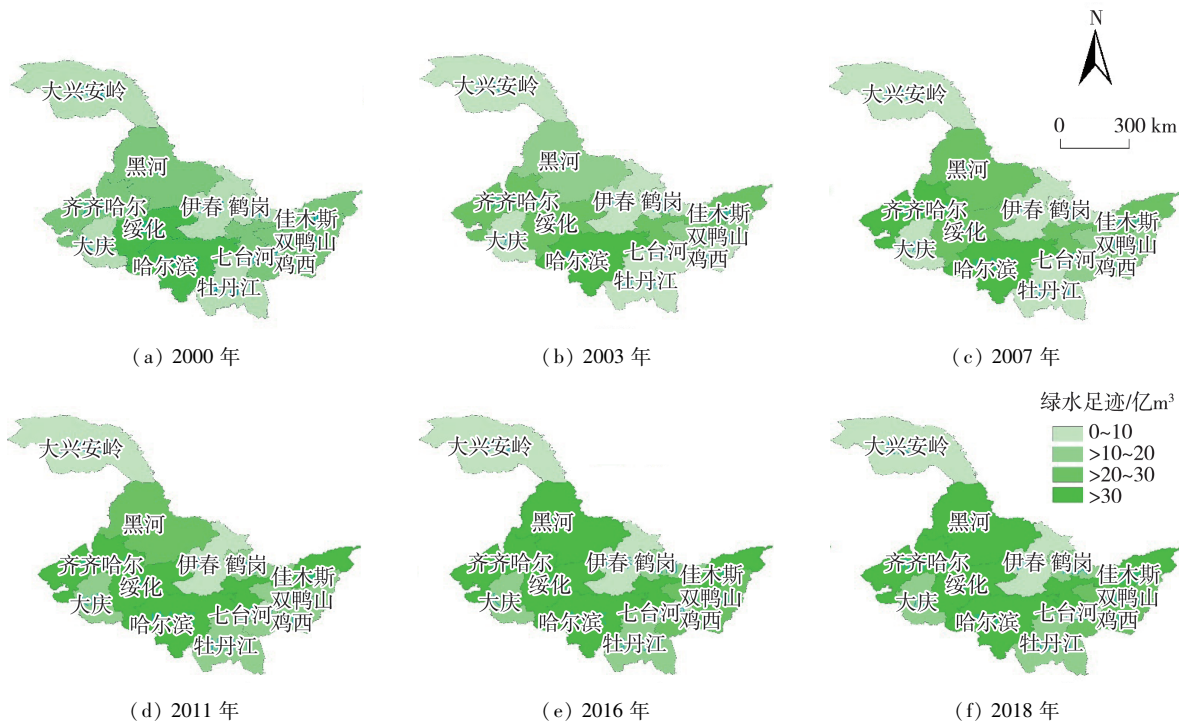


图4 各代表年黑龙江省绿水足迹空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of green water footprint in Heilongjiang Province in each representative year

迹的因素有作物蒸发条件、降雨条件和作物种植面积,这3个地区的降水量较为丰富,占全省的24.43%,但种植面积较低,仅占全省的4.85%,因此这些区域的绿水足迹较低。绿水足迹的高值地区主要分布在黑龙江省的西部和东部,包括黑河、绥化、哈尔滨、齐齐哈尔和佳木斯,这些区域降水量占全省的37.10%,种植面积则占全省的69.02%,在降水和种植面积的综合作用下,这5个地区的绿水足迹较高。

图5为各代表年黑龙江省灰水足迹空间分布。可见,位于黑龙江省北部和东部地区的大兴安岭、伊春、鹤岗、双鸭山和七台河是灰水足迹低值区,该区域中生活灰水足迹占平均灰水足迹的85.14%,生活污水排放是决定灰水足迹空间特征的主要因素。然而该区域总人口数量仅为全省的13.9%,人口数量少,排放的生活污水较少,因此灰水足迹也较低。灰水足迹高值地区主要集中在齐齐哈尔、绥化、哈尔滨和大庆,哈尔滨灰水足迹占全省比例最大(22.98%~26.54%)。在哈尔滨灰水足迹构成中,生活灰水足迹占比为73.02%以上。哈尔滨人口最多,污水排放量较大,故灰水足迹较高。大庆由于工业水平发达,工业污水排放较多,导致灰水足迹较高,其工业灰水足迹占该区域总灰水足迹的56.03%。

3.2 黑龙江省水足迹空间均衡分析

3.2.1 水足迹特征指标总体空间均衡度分析

根据黑龙江省人口规模、产业结构和经济发展

特点等,选取水足迹强度、农业水足迹强度、生态环境蓝水足迹、工业蓝水足迹、人均水足迹和人均灰水足迹等作为水足迹特征指标。水足迹强度为总水足迹与地区生产总值的比值,反映不同经济发展水平下所消耗的水资源量,水足迹强度越大,单位经济产值消耗的水资源量也越多,对水资源的利用效率就越低。农业水足迹强度为农业水足迹与农业增加值的比值,反映农业用水水平,该值越大,农业用水水平越低。本文采用左其亭等^[31]提出的空间均衡量化方法计算水足迹特征指标的空间均衡系数和总体空间均衡度(表1),进而分析黑龙江省13个地级市水足迹的空间均衡特征。

由表1可知,研究时段内水足迹强度、农业水足迹强度和人均水足迹的总体空间均衡度逐渐减少,空间差异在逐渐变大。其中人均水足迹的总体空间均衡度从2002年开始一直下降。随着经济的发展,发达地区对人口的吸引力越来越大,加剧了各地区的人口差异,并且我国又实施了最严格的水资源管理制度,而不同的地区对政策的响应也不同。因此导致了黑龙江省人均水足迹空间分布越来越不均衡。

研究时段内黑龙江省生态环境蓝水足迹的总体空间均衡度低于0.5,由于各地区对生态用水的重视程度不同,导致生态环境蓝水足迹的分布有较大差异。工业蓝水足迹和人均灰水足迹的总体空间均衡度波动上升,但工业蓝水足迹的总体空间均衡度最大值仅为0.357,其空间分布仍存在较大差异。人

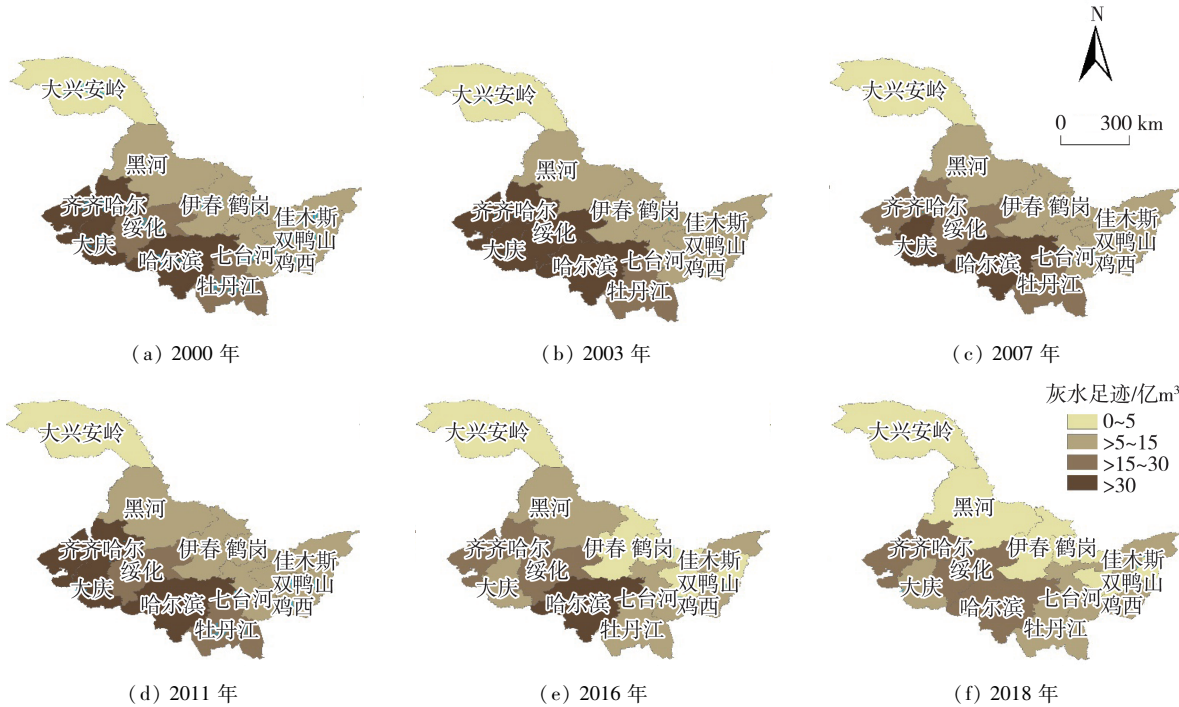


图5 各代表年黑龙江省灰水足迹空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of grey water footprint in Heilongjiang Province in each representative year

表 1 黑龙江省水足迹特征指标的总体空间均衡度

Table 1 Overall spatial equilibrium degree of water footprint characteristic indexes in Heilongjiang Province

年份	水足迹强度	农业水足迹强度	生态环境蓝水足迹	工业蓝水足迹	人均水足迹	人均灰水足迹
2000	0.677	0.728	0.000	0.251	0.779	0.772
2001	0.655	0.715	0.000	0.254	0.786	0.801
2002	0.631	0.668	0.000	0.271	0.813	0.815
2003	0.596	0.622	0.424	0.264	0.790	0.817
2004	0.574	0.707	0.421	0.266	0.775	0.825
2005	0.588	0.743	0.417	0.221	0.757	0.795
2006	0.581	0.732	0.413	0.224	0.743	0.790
2007	0.556	0.739	0.411	0.241	0.718	0.792
2008	0.546	0.729	0.411	0.245	0.722	0.796
2009	0.525	0.716	0.410	0.287	0.719	0.823
2010	0.515	0.679	0.408	0.287	0.710	0.812
2011	0.518	0.691	0.408	0.286	0.704	0.833
2012	0.522	0.699	0.410	0.298	0.702	0.833
2013	0.519	0.710	0.418	0.311	0.700	0.833
2014	0.548	0.684	0.413	0.284	0.690	0.829
2015	0.558	0.649	0.412	0.329	0.699	0.840
2016	0.547	0.612	0.409	0.325	0.692	0.949
2017	0.523	0.660	0.411	0.342	0.665	0.960
2018	0.537	0.667	0.410	0.357	0.640	0.952

均灰水足迹的总体空间均衡度最高,研究时段内平均值为 0.835,黑龙江省污染治理效果明显,对污水排放控制力度逐渐加强,人均灰水足迹的分布更为均衡。

3.2.2 代表年水足迹特征指标空间均衡分析

为进一步分析水足迹特征指标在不同地区的空间均衡差异度,有针对性地制定区域水资源利用政策,以现状 2018 年为代表年,分析各地区水足迹特征指标的空间均衡系数(表 2)。

黑龙江省水足迹强度、农业水足迹强度和人均水足迹的总体空间均衡度较为接近,数值均大于 0.5。由于各地区的水资源禀赋、经济水平、种植结构、水资源的利用率和人口数量等因素差异较大,因此水足迹强度、农业水足迹强度和人均水足迹的空间分布仍不均衡。其中伊春和黑河的水足迹强度空

间均衡系数相差 4.08 倍,黑河水足迹强度远超全省平均值,水资源利用效率低下;伊春水足迹强度接近全省平均值,其积极响应国家节水政策,减少水足迹,水资源利用效率较高。齐齐哈尔、鸡西、大庆和伊春的农业水足迹强度空间均衡系数较低,导致该指标总体空间均衡度较低,齐齐哈尔的空间均衡系数最低(0.451)。齐齐哈尔属于干旱半干旱地区,农业产值位于全省前列,但农业用水较为粗放,对水资源的利用率低。人均水足迹空间均衡系数较低的区域有佳木斯、黑河和大兴安岭,这些区域的水足迹在全省处于中等水平,人口数量较少,因此人均水足迹偏离全省平均值较多。各地区应出台相应的节水政策,提升水资源利用效率,并大力发展节水型农业,降低水足迹,使水足迹强度、农业水足迹强度和人均水足迹的分布更均衡。工业蓝水足迹和生态环

表 2 2018 年各地区水足迹特征指标的空间均衡系数

Table 2 Spatial equilibrium coefficient of water footprint characteristic indexes in each city in 2018

行政区	水足迹强度	农业水足迹强度	生态环境蓝水足迹	工业蓝水足迹	人均水足迹	人均灰水足迹
哈尔滨	0.342	0.816	0.000	0.000	0.660	0.999
齐齐哈尔	0.510	0.451	0.073	0.960	0.899	0.964
鸡西	0.537	0.559	0.628	0.350	0.677	0.969
鹤岗	0.564	0.847	0.362	0.260	0.780	0.983
双鸭山	0.838	0.808	0.512	0.260	0.779	0.965
大庆	0.321	0.568	0.998	0.000	0.953	0.698
伊春	0.885	0.581	0.415	0.130	0.621	0.950
佳木斯	0.755	0.739	0.849	0.510	0.423	0.972
七台河	0.643	0.814	0.283	0.290	0.605	0.992
牡丹江	0.410	0.672	0.918	0.790	0.617	0.968
黑河	0.217	0.702	0.579	0.200	0.350	0.952
绥化	0.818	0.656	0.092	0.990	0.894	0.966
大兴安岭	0.639	0.630	0.156	0.030	0.559	0.938

境蓝水足迹的总体空间均衡度均低于 0.5,说明黑龙江省工业和生态用水空间差异性较为显著。哈尔滨工业水平发达,生态保护投入较大,因此其生态和工业蓝水足迹远高于全省平均值,导致其空间均衡系数都为 0.000。大庆降水少,生态条件较差,但能保障生态供水,生态环境蓝水足迹处于全省平均水平,因此其空间均衡系数接近 1。大庆作为工业主导型城市,工业水平远超全省大部分地区,故其工业蓝水足迹的空间均衡系数为 0.000。黑龙江省各地区工业水平相差较大,应积极响应国家振兴东北老工业基地的政策,大力发展工业,减少工业耗水,缩小地区工业蓝水足迹差异。黑龙江省对生态用水投入不足,应充分考虑生态用水需求,维护生态用水健康,使生态环境蓝水足迹分布更均衡。除大庆外黑龙江省其他区域的人均灰水足迹空间均衡系数均超过 0.9,说明人均灰水足迹的分布较为均衡,各地区对水污染的治理力度较大,污水治理效果明显。而大庆的人均灰水足迹为全省平均的 1.3 倍,说明大庆污水排放量较大,治理力度不够,应提高环保意识,响应国家“绿水青山就是金山银山”的政策。

3.2.3 水足迹总体空间均衡度分析

本文根据熵权法计算 2000—2018 年各水足迹特征指标的权重,其中水足迹强度、农业水足迹强度、生态环境蓝水足迹、工业蓝水足迹、人均水足迹和人均灰水足迹的权重分别为 0.087、0.098、0.193、0.268、0.087、0.268,进而得出黑龙江省水足迹的总体空间均衡度随时间变化趋势(图 6)。由图 6 可见,水足迹的总体空间均衡度在逐渐升高,说明黑龙江省水足迹空间分布的不平衡性在逐渐降低。水足迹总体空间均衡度在 2002—2003 年有明显的上升,2000—2002 年,黑龙江省对生态供水不足,导致各地区的水足迹分布差异较大,从 2003 年开始加大对生态环境蓝水足迹的投入,使得水足迹的空间分布更为均匀。虽然水足迹的总体空间均衡度逐渐升高,但最大值仍未超过 0.6,各地区水足迹仍有差

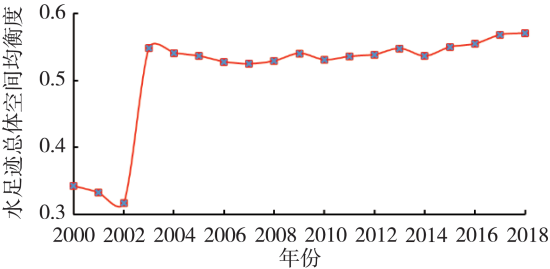


图 6 黑龙江省水足迹总体空间均衡度随时间变化
Fig.6 Changes of the overall spatial equilibrium degree of water footprint with time in Heilongjiang Province

异,还有较大的提升空间。黑龙江省应采用更为合理的水资源分配方式,减小水资源利用的区域差异,使区域发展更为均衡。

3.3 讨论

a. 黑龙江省蓝水和灰水足迹在逐渐减少,表明中国实施最严格水资源管理制度在黑龙江省得到较好的响应,但是和全国平均水平仍有较大差距,应提升工业技术,采取科学的养殖、种植技术,加强污水处理,减少蓝水、灰水足迹。蓝水足迹中养殖业蓝水足迹的占比最高,黑龙江省应坚持实施禁牧政策,引导、改善养殖方式,并推动养殖业转型升级。黑龙江省生态环境蓝水足迹只占总蓝水足迹的 0.76%,生态用水投入不足,应坚持“以水定绿,以水定产”的政策,加强生态环境保护。黑龙江省生活灰水足迹占总灰水足迹的 82.75%,应控制生活污水点源污染,加强对生活用水的控制,鼓励污水处理回用。

b. 黑龙江省作为农业大省,在作物种植面积逐年增加、对绿水的需求也在逐渐增加的前提下,绿水足迹的比例越来越大,从 2000 年 21.43% 增加到 2018 年的 51.22%。因此,黑龙江省应持续推进农业供给侧改革,优化种植结构,提升灌溉水利用系数,减少水资源的消耗。

c. 蓝水、绿水和灰水足迹高值区主要集中在黑龙江省的西部和南部,由于人口数量、作物种植面积和畜牧业产量等都较高,导致蓝水、绿水和灰水足迹高于其他区域;位于黑龙江省北部和东部的大兴安岭、伊春、七台河、鹤岗和黑河等区域是蓝水、绿水和灰水足迹低值区,该区域降水、人口数量和种植面积等较低,因此水足迹较少。黑龙江省应推动节水政策,加强污染控制,减少哈尔滨、大庆等高值地区的水足迹;发展水足迹低值区如伊春、鹤岗等地区的经济,提升其工业、农业水平,合理利用水资源。

d. 水足迹的总体空间均衡度在逐渐上升,表明水足迹在黑龙江省的分布越来越均衡,但其中生态环境蓝水足迹、工业蓝水足迹的总体空间均衡度较低。黑龙江省应明确生态水权,合理分配生态用水量,提升生态环境蓝水足迹,改进工业节水技术,确定节水目标,减少工业蓝水,合理分配水资源,使水足迹分布更均衡,实现水资源的可持续利用。

4 结论

a. 在研究时段内,黑龙江省种植面积在逐渐增加,因此绿水足迹总体呈现出增加的趋势,从 2000 年的 146 亿 m^3 增加到 2018 年的 385 亿 m^3 。灰水足迹一直在减少,人均灰水足迹从 2000 年的 706.1 m^3 降到 2018 年 300.7 m^3 ,表明黑龙江省污水治理效果

明显,人均灰水足迹显著减少。

b. 由于各地区的降水情况、种植面积和工业水平等条件的不同,导致黑龙江省 13 个地级市的水足迹空间分布不均匀,水足迹盈余与匮乏同时存在。大兴安岭、伊春、七台河和鹤岗水足迹较低,哈尔滨、绥化、大庆、齐齐哈尔和佳木斯的水足迹较高。

c. 水足迹强度、生态环境蓝水足迹和工业蓝水足迹总体空间均衡度较低,社会经济发展不平衡、工业水平差异较大和生态意识不同是导致差异较大的主要原因。人均灰水足迹的总体空间均衡度超过 0.7,2016 年以后超过 0.9,表明各地区对污水治理的力度在不断加强,因此人均灰水足迹的分布趋于均衡。

d. 随着黑龙江省各地区逐渐加大生态环境供水和坚持实施节水政策,导致水足迹的总体空间均衡度由 0.317 增加至 0.570,水足迹的空间分布向更均衡方向发展,但区域差异仍较为明显。黑龙江省应调整部门用水,加大对生态用水的投入,提升水资源利用效率。

参考文献:

[1] HE Yanhu, WANG Yilin, CHEN Xiaohong. Spatial patterns and regional differences of inequality in water resources exploitation in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 227: 835-848.

[2] ALLAN J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible [C] // Priorities for Water Resources Allocation and Management. London: ODA, 1993.

[3] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade [J]. Global Environmental Change: Part A, 2005, 15(1): 45-56.

[4] HOEKSTRA A Y. The water footprint of modern consumer society [M]. London: Routledge, 2013.

[5] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y. The global component of freshwater demand and supply: an assessment of virtual water flows between nations as a result of trade in agricultural and industrial products [J]. Water International, 2008, 33(1): 19-32.

[6] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern [J]. Water Resources Management, 2007, 21(1): 35-48.

[7] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. Global anthropogenic phosphorus loads to freshwater and associated grey water footprints and water pollution levels: a high-resolution global study [J]. Water Resources

Research, 2018, 54(1): 345-358.

[8] ZENG Zhiyuan, LIU Junguo, KOENEMAN P H, et al. Assessing water footprint at river basin level: a case study for the Heihe River Basin in northwest China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(8): 2771-2781.

[9] ZHUO L, MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. Sensitivity and uncertainty in crop water footprint accounting: a case study for the Yellow River Basin [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(6): 2219-2234.

[10] CHU Yingmin, SHEN Yanjun, YUAN Zaijian. Water footprint of crop production for different crop structures in the Hebei southern plain, North China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(6): 3061-3069.

[11] 郭相平, 高爽, 吴梦洋, 等. 中国农作物水足迹时空分布与影响因素分析 [J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 295-302. (GUO Xiangping, GAO Shuang, WU Mengyang, et al. Analysis of temporal-spatial distribution and influencing factors of water footprint in crop production system of China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 295-302. (in Chinese))

[12] 侯林秀, 温璐, 张雪峰, 等. 内蒙古地区水足迹量化及水资源评价分析 [J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(8): 182-195. (HOU Linxiu, WEN Lu, ZHANG Xuefeng, et al. Quantification of water footprint and analysis of water resources evaluation in Inner Mongolia [J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(8): 182-195. (in Chinese))

[13] MA Xiaotian, YE Liping, QI Congcong, et al. Life cycle assessment and water footprint evaluation of crude steel production: a case study in China [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 224: 10-18.

[14] 陈岩, 童国平, 王蕾. 淮河流域农业灰水足迹效率的时空分布与驱动模式 [J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 60-66. (CHEN Yan, TONG Guoping, WANG Lei. Spatial-temporal distribution and driving models of agricultural grey water footprint efficiency in the Huai River Basin [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 60-66. (in Chinese))

[15] SOBHANI S R, REZAZADEH A, OMIDVAR N, et al. Healthy diet: a step toward a sustainable diet by reducing water footprint [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(8): 3769-3775.

[16] 李倩文, 左其亭, 李东林, 等. 新疆水资源开发利用的空间均衡分析 [J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 28-33. (LI Qianwen, ZUO Qiting, LI Donglin, et al. Spatial equilibrium analysis of water resources development and utilization in Xinjiang [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 28-33. (in Chinese))

[17] 刘巍, 李雨晴, 付强, 等. 黑龙江省粮食水足迹时空分布

- 规律与影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 214-222. (LIU Wei, LI Yuqing, FU Qiang, et al. Spatial and temporal distributions of crop water footprint and its influence factors analysis in Heilongjiang Province [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 214-222. (in Chinese))
- [18] 刘静, 余钟波. 江苏省农产品水足迹与虚拟水流动及其环境影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(4): 320-326. (LIU Jing, YU Zhongbo. Water footprints and virtual water flows of agricultural products in Jiangsu and their environmental impacts [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(4): 320-326. (in Chinese))
- [19] 周玲玲, 王琳, 余静, 等. 基于水足迹理论的即墨市水资源可持续利用对策研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2014, 44(11): 95-100. (ZHOU Lingling, WANG Lin, YU Jing, et al. Study on water resource sustainable utilization strategy in Jimo based on water footprint theory [J]. Periodical of Ocean University of China, 2014, 44(11): 95-100. (in Chinese))
- [20] NOVOA V, AHUMADA-RUDOLPH R, ROJAS O, et al. Understanding agricultural water footprint variability to improve water management in Chile [J]. Science of the Total Environment, 2019, 670: 188-199.
- [21] ZENG Z, LIU J G, SAVENIJE H H G. A simple approach to assess water scarcity integrating water quantity and quality[J]. Ecological Indicators, 2013, 34: 441-449.
- [22] LI Hongying, QIN Lijie, HE Hongshi. Characteristics of the water footprint of rice production under different rainfall years in Jilin Province, China[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(8): 3001-3013.
- [23] 张鑫, 李磊, 甄志磊, 等. 时空与效率视角下汾河流域农业灰水足迹分析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(4): 1502-1510. (ZHANG Xin, LI Lei, ZHEN Zhilei, et al. Analysis of agricultural grey water footprint in Fenhe River basin based on the perspective of space-time and efficiency [J]. China Environmental Science, 2019, 39(4): 1502-1510. (in Chinese))
- [24] 王勤勤, 刘俊国, 赵丹丹. 京津冀地区主要农作物生产水足迹研究[J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 22-27. (WANG Qinqin, LIU Junguo, ZHAO Dandan. Study on water footprint of main crop production in Jing-Jin-Ji Region [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 22-27. (in Chinese))
- [25] ZHU Zhaoliang. Research on soil nitrogen in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 5: 778-783.
- [26] 国家环境保护总局自然生态保护司. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [27] 左其亭, 纪瓊芯, 韩春辉, 等. 基于 GIS 分析的水资源分布空间均衡计算方法及应用[J]. 水电能源科学, 2018, 36(6): 33-36. (ZUO Qiting, JI Yingxin, HAN Chunhui, et al. Spatial equilibrium calculation method and application in regional water resources distribution based on GIS analysis [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(6): 33-36. (in Chinese))
- [28] 郭旭宁, 郇建强, 李云玲, 等. 京津冀地区水资源空间均衡评价及调控措施[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 62-66. (GUO Xuning, LI Jianqiang, LI Yunling, et al. Water resources spatial equilibrium evaluation and regulation measures in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 62-66. (in Chinese))
- [29] 金菊良, 徐新光, 周戎星, 等. 基于联系数和耦合协调度的水资源空间均衡评价方法[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 1-6. (JIN Juliang, XU Xinguang, ZHOU Rongxing, et al. Water resources spatial balance evaluation method based on connection number and coupling coordination degree [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 1-6. (in Chinese))
- [30] 陈红光, 李晓宁, 李晨洋. 基于变异系数熵权法的水资源系统恢复力评价: 以黑龙江省 2007—2016 年水资源情况为例[J]. 生态经济, 2021, 37(1): 179-184. (CHEN Hongguang, LI Xiaoning, LI Chenyang. Resilience evaluation of water resource system based on coefficient of variation-entropy weight method; a case study of water resources in Heilongjiang province from 2007 to 2016 [J]. Ecological Economy, 2021, 37(1): 179-184. (in Chinese))
- [31] 左其亭, 韩春辉, 马军霞. 水资源空间均衡理论应用规则 and 量化方法[J]. 水利水运工程学报, 2019(6): 50-58. (ZUO Qiting, HAN Chunhui, MA Junxia. Application rules and quantification methods of water resources spatial equilibrium theory [J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(6): 50-58. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-07-08 编辑: 王芳)

