

基于能值理论的水资源生态足迹变化特征 ——以北京市为例

刘珂伶, 杨柳

(中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘 要:水资源生态足迹是水资源可持续开发利用的研究热点之一,目前研究集中于区域尺度的水资源生态足迹研究。优化水资源生态足迹模型、探究尺度关联问题对区域水资源可持续发展规划十分必要。基于统计数据和格网数据,在传统水资源生态足迹基础上,结合生态学科的能值理论,分别在城市和格网两个尺度探求北京市 2005—2018 年水资源开发利用变化规律。结果表明:(1) 2005—2018 年,北京市生态赤字明显。水资源能值生态足迹(WEEF)年均值为 $0.35 \text{ hm}^2/\text{人}$,水资源能值生态承载力(WEEC)年均值为 $0.05 \text{ hm}^2/\text{人}$;(2) 北京市多年处于水资源生态不安全状态,水资源生态压力(WEFI)年均值为 7.37,水资源生态经济协调性(WEECI)年均值仅为 1.13,水资源生态系统与经济协调性较差;(3) 水资源开发利用空间分布不均匀,中心城区水资源生态赤字严重,水资源生态压力(WEFI)达到 30 以上。周边城区生态压力减缓,平谷区是北京唯一生态安全区。北京市水资源生态安全形势较为严峻,限制人口、调整产业结构、加强节约用水宣传力度、提高节水效率是必要举措。

关键词:水资源生态足迹;能值分析;北京市;格网尺度

中图分类号:X826

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)03-0406-09

Characteristics of Water Resources Ecological Footprint Based on Emergy Theory —Taking Beijing as an Example

LIU Keling, YANG Liu

(College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Water resources ecological footprint is one of the research hotspots in the sustainable development and utilization of water resources. The current research focuses on the study of the ecological footprint of water resources at the regional scale. Optimizing the ecological footprint model of water resources and exploring the problem of scale correlation are necessary for the sustainable development of regional water resources. Based on statistical data and grid data, the changes in the development and utilization of water resources in Beijing from 2005 to 2018 were explored at the city and grid scales by combining with the emergy theory of ecological disciplines on the basis of the traditional water resources ecological footprint. The results show that: (1) from 2005 to 2018, the annual average value of Beijing's water resources emergy ecological footprint was 0.35 hm^2 per capita, and the annual average value of water resources emergy ecological carrying capacity was 0.05 hm^2 per capita; the ecological deficit was obvious; (2) Beijing has been in a state of ecological insecurity of water resources for many years; the average annual value of water ecological footprint intensity is 7.37, and the annual average value of water resources ecological and economic coordination index is only 1.13; the coordination between water resources ecosystem and economic development is poor; (3) the spatial distribution of water resources development and utilization is uneven, the ecological deficit of water resources in the central urban area is serious, and the ecological pressure of water resources is above 30; the ecological pressure on the surrounding urban areas has eased, and Pinggu District is the only ecological safety region in

收稿日期:2020-07-08

修回日期:2020-08-15

资助项目:中央高校基本业务费专项资金项目(2009QD04)

第一作者:刘珂伶(1996—),女,辽宁抚顺人,在读硕士研究生,主要从事生态足迹及生态承载力研究。E-mail:liu_kling@163.com

通信作者:杨柳(1978—),女,辽宁铁岭人,博士,教授,主要从事 3S 技术应用、水资源管理等研究。E-mail:yang_l@126.com

Beijing. The situation of water resources ecological security in Beijing is relatively severe. It is necessary to restrict population, adjust industrial structure, strengthen publicity on water conservation, and improve water conservation efficiency.

Keywords: water resources ecological footprint; emergy analysis; Beijing; grid scale

水资源的可持续开发利用是资源环境研究的重要内容。水足迹和水资源生态足迹是水资源可持续利用研究中应用最广泛的两种方法。Hoekstra 以虚拟水理论为基础提出水足迹方法,是一种测量淡水利用与消耗的计算方法^[1]。水资源生态足迹则在传统生态足迹的基础上,增加了对水资源自然资源供应能力的考虑^[2]。国内学者亦对水资源生态足迹开展诸多探讨,如黄林楠等建立水资源生态足迹和水资源生态承载力模型,并对江苏省 1998—2003 年水资源生态足迹进行测算^[3]。谭秀娟等利用该理论分析了我国 1949—2007 年的水资源可持续利用状况,进一步证明该模型的科学性^[4]。此后,不同学者对中国、辽宁省、中原城市群、湖州市等不同区域尺度的地区进行水资源生态足迹的计算,并提出针对性建议^[5-8]。

然而,水资源生态足迹模型仍存在一定缺陷。在水资源生态足迹模型中,均衡因子和产量因子是两个重要参数,它们将不同区域不同类型的土地面积转化为可比较的度量相同的土地面积。现有研究中,均衡因子和产量因子的选取,大多为全球性的数据且时间久远。这种处理虽便于不同地区间水资源生态足迹的横向比较,但忽略了时间和区域的差异性,会产生计算结果于实际情况的误差。有学者利用遥感产品 NPP 计算研究区域的均衡因子,以求更准确反映区域水资源开发利用现状^[9]。但是 NPP 产品的空间分辨率往往很粗糙,对于景观异质性强的地区,NPP 产品会出现无效值,从而导致计算结果无意义^[10]。

能值生态足迹模型为探求自然资源供需关系提供了新思路。Zhao 等人首次将能值理论引入生态足迹方法,通过与传统生态足迹模型的对比,证明能值生态足迹模型的可行性^[11]。此后,不同学者利用能值生态足迹模型对中亚地区、我国江苏省、上海市、青岛市等不同尺度进行研究,并在研究中不断改进,形成较为健全的能值生态足迹模型^[12-15]。区域能值密度和太阳能值转换率是能值生态足迹模型中的重要参数。区域能值密度是将太阳能值折算成土地面积的参数,太阳能值转换率可将不同类型的能量转化成度量统一的太阳能值。由于自然生态系统的自组织程度已达到较高水平,故太阳能值转换率和区域能值密度更为稳定,其随时间波动程度很小^[16]。引入能值理论,从能值流动角度计算区域水资源生态足迹,

采用更为稳定的太阳能值转换率和区域能值密度等参数,能够更为准确地动态模拟区域水资源开发利用现状。

北京市作为全国政治、文化等中心,人口日益增加,水资源匮乏,人均占有量仅为我国人均占有量的 1/8,是世界人均占有量的 1/30,缺水程度十分严重^[17]。准确辨识北京市水资源开发利用现状是提出科学决策的重要基础。北京市人口密度大导致景观异质性很高,若使用遥感产品计算均衡因子和产量因子意义不大。因此,本文以北京市为例,采用基于能值理论的水资源生态足迹模型对北京市 2005—2018 年水资源生态足迹和水资源生态承载力的变化趋势进行测算和分析,利用水资源生态足迹评价指标对北京市水资源现状进行评价,并将研究尺度缩小至格网,对格网尺度的水资源生态足迹及与区域尺度之间的关联问题进行研究。研究结果可为北京市水资源开发利用和科学管理及区域可持续发展评估与规划提供参考,进一步丰富水资源开发利用研究理论体系。

1 数据来源和方法

1.1 数据来源

水资源能值生态足迹计算中涉及的北京市水资源总量、用水量数据均来自北京市水务局《北京市水资源公报》,北京市分区及分产业用水量来自《节水基础数据统计汇编》。地区生产总值(GDP)、年末常住人口数等统计数据来自北京市统计局官网上的《北京市统计年鉴》和《北京区域统计年鉴》。地图数据为北京市 1:100 万分区划矢量图。北京市人口、降水量、GDP 1 km 格网空间分布数据均来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。

1.2 研究方法

1.2.1 基于能值理论的水资源生态足迹模型

(1) 水资源能值生态足迹(WEEF)。生态足迹代表了人类负荷强度,反映了区域生态和经济特征。根据传统水资源生态足迹和能值生态足迹模型,建立 WEEF 模型。利用太阳能值转换率,根据不同种类用水量得到水资源人均太阳能值,再通过区域水资源能值密度得到消耗水资源的生物生产性土地面积,即为 WEEF。此外,水资源作为一种供给人类发展需求的资源,还承担着消纳人类产生废弃物的作用。因此 WEEF 由

用水足迹和污染足迹组成,其中用水足迹包括农业用水、工业用水、生活用水、生态用水等用水足迹,污染足迹为消纳污染的足迹。其计算方法为^[18]:

$$WEEF=\sum_{i=1}^n\frac{C_i}{P}+WEEF_p\tag{1}$$

$$C_i=\frac{E_{wi}\cdot T_{wi}}{N}\tag{2}$$

$$P=\frac{U}{S}\tag{3}$$

$$WEEF_p=\frac{\text{MAX}(E_{\text{COD}}\cdot E_{\text{NH}_3\text{-N}})}{N\cdot P}\tag{4}$$

$$E_{\text{COD/NH}_3\text{-N}}=\frac{M_{\text{COD/NH}_3\text{-N}}\cdot\rho}{\text{CON}_{\text{COD/NH}_3\text{-N}}}\cdot H_w\cdot U_w\tag{5}$$

式中:WEEF 为 人 均 水 资 源 能 值 生 态 足 迹 (hm²/人);C_i 为 第 i 种 用 水 的 人 均 太 阳 能 值 (sej/人);E_{wi} 为 第 i 种 用 水 量 (m³);T_{wi} 为 第 i 种 用 水 的 太 阳 能 值 转 换 率 (sej/m³);N 为 人 口 总 数 ;P 为 区 域 能 值 密 度 (sej/hm²);U 为 区 域 能 值 总 量 (sej);S 为 研 究 区 域 面 积 (hm²);WEEF_p 为 人 均 水 资 源 污 染 足 迹 (hm²/人);E_{COD} 和 E_{NH₃-N} 分 别 为 化 学 需 氧 量 (COD) 和 氨 氮 的 能 值 (sej);M_{COD/NH₃-N} 为 COD 或 氨 氮 的 废 水 排 放 量 (t);ρ 为 水 的 密 度 (1 000 kg/m³);CON_{COD/NH₃-N} 为 COD 或 氨 氮 的 允 许 排 放 浓 度 ,可 在 《北 京 市 水 污 染 物 排 放 标 准 》(DB11/307-2005) 中 获 得 ;COD 为 30 mg/L,氨 氮 为 1.5 mg/L;H_w 为 热 值 系 数 (2.56E+04 J/kg);U_w 为 水 的 单 位 能 值 ,由 集 水 区 年 降 水 总 能 值 与 年 集 水 化 学 相 除 的 多 年 平 均 值 得 到 ,取 值 为 3.02 E+04 sej/J。具 体 计 算 方 法 为^[19]:

$$U_w=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n\frac{\text{集水区年降水总太阳能值(sej)}}{\text{年集水化学能(J)}}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n\frac{\text{雨水化学能}\times\text{太阳能值转换率}}{\text{地表水化学能}+\text{地下水化学能}}\tag{6}$$

$$\text{雨水化学能}=\text{区域面积}\times\text{年降水量}\times\text{蒸散系数}(60\%)\times\text{水密度}\times\text{雨水吉布斯自由能}\tag{7}$$

$$\text{地表水(地下水)化学能}=\text{水量}\times\text{地表水(地下水)吉布斯自由能}\times\text{水密度}\tag{8}$$

其中,雨水的太能能值转换率参考《能值评估手册》,取值为 1.54E+04 sej/J^[13]。吉布斯自由能是指各类水体相对于海水的吉布斯自由能,计算公式为:

$$\text{吉布斯自由能}=\frac{(8.33\text{J/mol})(300^{\circ}\text{C})}{(18\text{g/mol})}\ln\frac{(1\times10^6-s)\text{mg/kg}}{965000\text{mg/kg}}\tag{9}$$

式中:s 为水体的固体物质溶解量(mg/kg)。雨水、地表水、地下水的固体物质溶解量分别为 10 mg/kg, 56.9 mg/kg,300 mg/kg。

(2) 水资源能值生态承载力(WEEC)。水资源生态承载力是区域水资源丰富程度的度量。北京市水资源主要来源于地表水、地下水和雨水。能值理论中雨水能值分为雨水化学能和雨水势能,雨水化学能降落到地表后,随地表径流会转化为地表水化学能,随土壤渗透至地下水后会转化为地下水化学能,因此北京市水资源能值组成为地表水化学能、地下水化学能和雨水势能(图 1)。此外有研究表明^[20],区域对水资源开发利用率若超过 40%将会引起该区域生态环境恶化,因此在计算水资源生态承载力时要乘以 0.4 作为开发水资源的利用率。其计算模型为:

$$WEEC=0.4\times\frac{E_G+E_U+E_R}{P_w\cdot N}\tag{10}$$

式中:WEEC 为 人 均 水 资 源 能 值 生 态 承 载 力 (hm²/人);E_G 为 地 表 水 化 学 能 (sej);E_U 为 地 下 水 化 学 能 (sej);E_R 为 雨 水 势 能 (sej);P_w 为 区 域 水 资 源 平 均 能 值 密 度 (sej/hm²)。

(3) 相关参数的确定。区域能值密度 P 和区域水资源能值密度 P_w是根据北京市区域能值和水资源能值除以北京市面积的多年平均值得出,区域能值密度为 1.35E+15 sej/hm²,区域水资源能值密度为 5.85E+14 sej/hm²。各种用水或水资源的能值通过将用水量乘以相应能值转化系数来计算。表 1 是本文用到的能值转化系数及其来源,其中雨水势能计算方法为^[16]:

$$E_R=S\times\text{Rain}\times\text{Runoff}\times\rho\times\text{elevation}\times g\tag{11}$$

式中:S 为 区 域 面 积 (m²);Rain 为 平 均 降 水 量 (m);Runoff 为 径 流 系 数 (0.4);elevation 为 平 均 高 程 (m);g 为 重 力 加 速 度 (9.8 m/s²)。

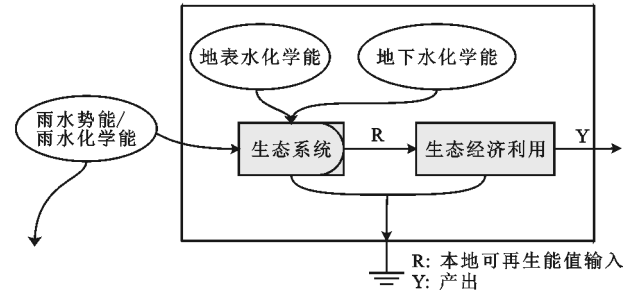


图 1 水资源生态系统能量流动图

表 1 各类用水或水资源的能值转换率

sej/m ³					
农业用水 ^[21]	工业用水 ^[21]	生活用水 ^[21]	生态用水 ^[22]	地表水 ^[23]	地下水 ^[24]
8.80E+11	1.60E+12	2.32E+12	1.26E+12	5.56E+11	2.10E+11

1.2.2 水资源生态足迹评价指标

(1) 水资源生态赤字/生态盈余(WED/WES)。

WED/WES 能直接反映区域对水资源的利用强度。当 WEEC>WEEF 时为生态盈余(WES),区域水资

源供给满足人类需求;反之,区域水资源供给则不能满足人类需求,区域社会经济发展对当地水资源生态安全构成威胁; $WEEC=WEEF$ 时水资源生态平衡。其计算公式如下^[2]:

$$WED(WES)=WEEC-WEEF \tag{12}$$

(2) 水资源生态压力指数(WEFI)。WEFI 利用水资源生态系统单位生态容量承受的压力来评价水资源生态安全。根据 Yang 等^[16]对区域生态安全等级划分的研究结果,当 $WEFI<1$ 时,人类消耗小于生态承载,表明水资源处于生态安全状态; $WEFI>1$ 时,生态系统承受压力大于实际生态承载力,说明水资源生态不安全; $WEFI=1$ 时则表明区域水资源供需处于平衡状态(表 2)。与 WED/WES 相比,WEFI 为无量纲,可用于不同区域间水资源利用情况的比较。其计算公式为:

$$WEFI=WEEF/WEEC \tag{13}$$

表 2 基于生态压力的区域生态安全等级分类

生态安全等级	生态安全状态	生态压力范围
1	安全	0~1
2	亚安全	1~10
3	轻度不安全	10~18
4	中度不安全	18~24
5	高度不安全	24~30
6	极度不安全	≥30

(3) 水资源生态经济协调指数(WEECI)。WEECI 可反映生态环境与社会经济之间的生态协调性,区域社会经济发展是否在生态环境承载范围内以及能值生态足迹与区域资源禀赋之间的关系。本文引进该指数来评价水资源生态系统与社会经济之间的协调性以及区域社会经济发展与水资源禀赋之间的关系。其计算方法为^[15]:

$$WEECI=\frac{(WEEF+WEEC)}{\sqrt{WEEF^2+WEEC^2}}=(WEFI+1)/\sqrt{WEFI^2+1} \tag{14}$$

其中,WEECI 取值区间为(1,1.414)。WEECI 越接近 1,则生态协调性越差;WEECI 越接近 1.414,则说明生态协调性越好;当 $WEECI=1.414$ 时,处于最佳生态协调状态。

1.2.3 格网水资源生态足迹 水资源生态足迹计算受限于统计数据的缺失。统计数据多数以行政区域(市、区等)为统计单元,更小单元的统计数据基本缺失或难于获得。鉴于 GIS 数据可提供不同格网单元的人口、降水量等空间分布数据,因此本文利用 ArcGIS 软件的数学分析方法,将北京市 WEEF, WEEC, WED, WEFI, WEECI 进行 1 km 尺度格网化,并与北京市区划矢量数据叠加,获得格网和区域尺度相关数据^[25]。

$$WEEF_{ij}=\frac{WEEF_i}{p_i}\times p_j+Pl \tag{15}$$

式中: $WEEF_{ij}$ 为第 i 个行政区第 j 个格网的水资源能值生态足迹; $WEEF_i$ 为第 i 个行政区的用水能值生态足迹; p_i 为第 i 个行政区的人口数量; p_j 为第 j 个格网内的人口数量。

在水资源生态承载力的计算中,由于北京城市化现象十分明显,自来水供水情况已非常普遍,因此本文假设同一行政区内,人均水资源供给水平一致,结合 1 km 格网降水量空间分布数据,可计算各格网内的雨水势能,三者相加得到格网水资源能值生态承载力,具体计算公式为:

$$WEEC_{ij}=(WEEC_{Gi}+WEEC_{Ui})\times p_j+WEEC_{Rj} \tag{16}$$

式中: $WEEC_{ij}$ 为第 i 个行政区第 j 个格网的水资源生态承载力; $WEEC_{Gi}$ 和 $WEEC_{Ui}$ 分别为为第 i 个行政区的人均地表水生态承载力和人均地下水生态承载力; $WEEC_{Rj}$ 为第 j 个格网的雨水势能包含的水资源生态承载力。

在水资源生态足迹评价指标的计算中,WED, WEFI, WEECI 均可由格网水资源生态足迹与格网水资源生态承载力按照 1.2.2 节中式(12—14)进行计算。

1.2.4 传统水资源生态足迹 为分析水资源能值生态足迹与传统水资源生态足迹的差异及其产生原因,本文根据文献[3]提出的传统水资源生态足迹方法^[3],文献[26]提出的水污染足迹计算模型^[26],计算北京市 2005—2018 年的水资源生态足迹。其中,均衡因子取世界自然基金会在 2002 年的测算结果 5.19,产量因子根据北京市多年产水模数与世界平均产水模数的比值计算得出为 0.54,世界水资源平均生产能力为 3 140 m³/hm²,水消纳 COD 全球平均生产能力为 0.094 2 t/hm²,水消纳氨氮全球平均生产能力为 0.004 71 t/hm²。

2 结果与分析

2.1 WEEF 变化特征

北京市 WEEF 从 2005 年 0.41 hm²/人下降至 2018 年 0.29 hm²/人,降幅为 29.27%。变化趋势呈现周期波动,2005—2010 年逐年下降,至 0.32 hm²/人,2011 年增长显著,环比增长 29.03%而后逐年下降至 0.29 hm²/人(表 3)。2005—2018 年,北京市农业用水、工业用水、生活用水、生态用水、污染账户等足迹分别占总能值生态足迹的 4.32%~12.94%, 5.39%~12.10%, 30.69%~49.95%, 1.55%~19.80%, 19.74%~49.52%。生活用水对总能值生态足迹的贡献最大,其次是污染账户、农业用水、工业用水,最小

的是生态用水。

各类用水账户的变化规律表明,污染账户的变化可能是导致总能值生态足迹周期性变化的原因。用

水账户总体呈现小幅下降趋势,其中生活用水足迹基本没有变化,农业用水和工业用水足迹逐年降低,而生态用水足迹正逐年上升(图 2)。

表 3 北京市水资源能值生态足迹

年份	农业用水 能值/sej	工业用水 能值/sej	生活用水 能值/sej	生态用水 能值/sej	污染用水 能值/sej	总能值/ sej	总能值生态 足迹/hm ²	人均能值生态足迹/ (hm ² ·cap ⁻¹)
2005	1.16E+21	1.09E+21	3.10E+21	1.39E+20	2.99E+21	8.48E+21	6.28E+06	0.41
2006	1.12E+21	9.92E+20	3.18E+21	2.05E+20	2.83E+21	8.33E+21	6.16E+06	0.38
2007	1.09E+21	9.20E+20	3.22E+21	3.44E+20	2.74E+21	8.32E+21	6.16E+06	0.37
2008	1.06E+21	8.32E+20	3.41E+21	4.04E+20	2.61E+21	8.31E+21	6.15E+06	0.35
2009	1.06E+21	8.32E+20	3.41E+21	4.55E+20	2.55E+21	8.30E+21	6.14E+06	0.33
2010	1.00E+21	8.16E+20	3.41E+21	5.05E+20	2.37E+21	8.10E+21	6.00E+06	0.31
2011	9.60E+20	8.02E+20	3.61E+21	5.66E+20	4.98E+21	1.09E+22	8.08E+06	0.40
2012	8.19E+20	7.82E+20	3.71E+21	7.18E+20	4.80E+21	1.08E+22	8.02E+06	0.39
2013	8.00E+20	8.20E+20	3.78E+21	7.41E+20	4.60E+21	1.07E+22	7.95E+06	0.38
2014	7.19E+20	8.15E+20	3.94E+21	9.12E+20	4.35E+21	1.07E+22	7.95E+06	0.37
2015	5.68E+20	6.16E+20	4.06E+21	1.31E+21	4.16E+21	1.07E+22	7.93E+06	0.37
2016	5.33E+20	6.04E+20	4.14E+21	1.41E+21	2.24E+21	8.93E+21	6.60E+06	0.30
2017	4.46E+20	5.65E+20	4.25E+21	1.59E+21	2.11E+21	8.96E+21	6.63E+06	0.31
2018	3.70E+20	5.28E+20	4.27E+21	1.69E+21	1.44E+21	8.30E+21	6.14E+06	0.29

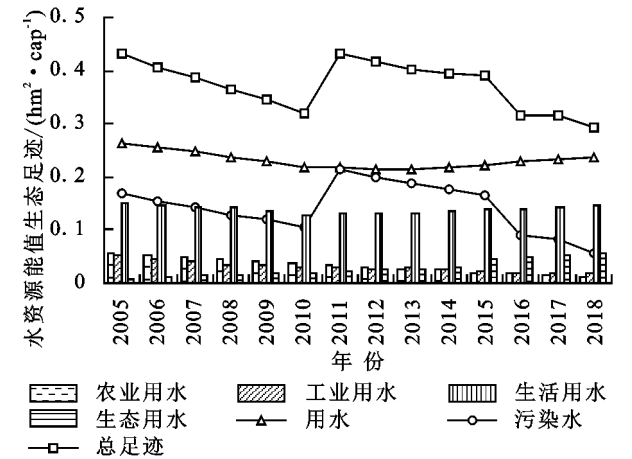


图 2 北京市水资源能值生态足迹结构

2.2 WEEC 变化特征

2005—2018 年,北京市 WEEC 为 0.02~0.05 hm²/人。其中地表水是水资源能值生态承载力的主要贡献者,其次是地下水,雨水势能的生态承载力最小(表 4)。WEEC 呈现周期性上下波动,主要受地表水的影响,若某年份地表水能值大,则该年的生态承载力也高。2012 年北京市水资源生态承载力最高,为 0.05 hm²/人,2014 年最低,为 0.02 hm²/人(图 3)。

2.3 WED 与 WEFI 变化特征

2005—2018 年,北京市 WED 总体呈逐年下降趋势,从 2005 年的 -0.35 hm²/人下降至 2018 年的 -0.22 hm²/人,降幅为 37.14%。WEFI 呈现上下波动的形势,2014 年最高,为 11.55,2018 年最低,为 4.72。该值受 WEEC 变化的影响较大,WEEC 在

2014 年最小导致该年的生态压力激增。研究结果表明,北京市常年处于水资源生态赤字状态,南水北调等外调水的输入以及北京市发布的节水减排等一系列举措稍减轻了赤字程度,但由于起始生态赤字程度高,现阶段也仍处于较大的赤字状态。水资源生态压力多年平均值为 7.37,常年处于亚安全状态(图 4)。

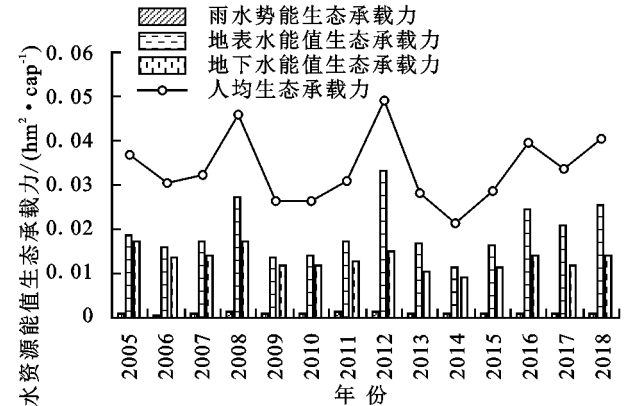


图 3 北京市水资源能值生态承载力趋势变化

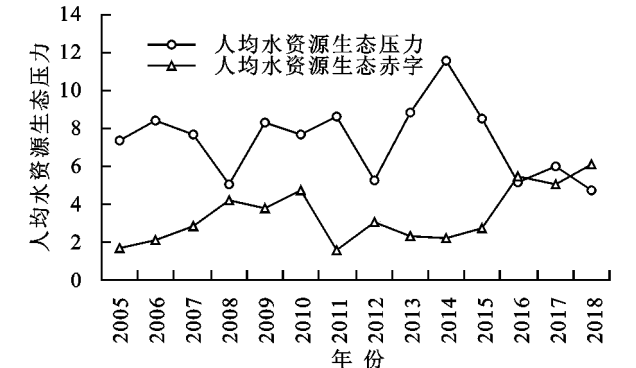


图 4 北京市水资源生态压力与生态赤字

2.4 WEECI 变化特征

2005—2018 年,北京市水资源生态系统与其社会经济系统之间的协调性较差,WEECI 为 1.08~1.19,均接近于 1(图 5)。2014—2018 年 WEECI 有上升趋势,2018 年最高,为 1.19,表明水资源生态与社会经济的关系正不断改善。很可能是由于北京市积极调整产业结构,扩张水资源利用效率高的第三产业,同时注重节水科技的提升,减少在运输和利用时的水资源消耗,使水资源利用效率不断提高。

2.5 北京市水资源能值生态足迹空间特征

北京每 1 km² WEEF 最大值为 13 447 hm²,最小值为 17.706 hm²。总体上呈由中心向四周逐渐变小的形势,其中海淀区东部地区 WEEF 最高,延庆区、平谷区等周边城区 WEEF 较小。各行政区内 WEEF 亦呈中心高四周低的形势,区内均存在 WEEF 较高的小型聚集区(图 6)。

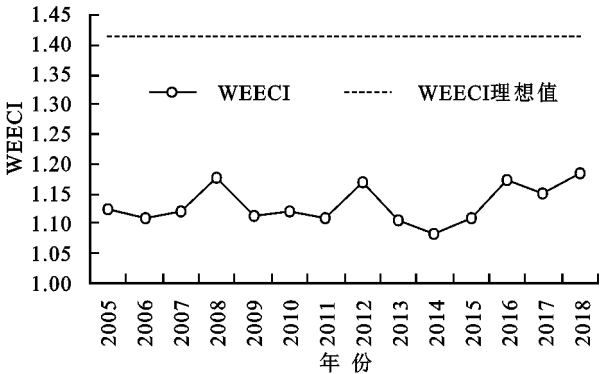


图 5 北京市水资源生态经济协调指数

每 1 km² WEEC 最大值为 2 708 hm²,最小值为 2 hm²。平谷区、大兴区拥有较高的 WEEC,中心城区 WEEC 相对较低。WEEC 在行政区内分布变化较大的是大兴区和平谷区,其中大兴区从北到南 WEC 逐渐增大,平谷区从北到南 WEC 逐渐减小。

表 4 北京市水资源能值生态承载力

年份	雨水势能/ sej	地表水 能值/sej	地下水 能值/sej	总能值/ sej	总能值生态 承载力/hm ²	人均能值生态承载力/ (hm ² ·cap ⁻¹)
2005	2.02E+19	4.21E+20	3.88E+20	8.29E+20	1.42E+06	0.04
2006	1.57E+19	3.71E+20	3.23E+20	7.10E+20	1.21E+06	0.03
2007	2.38E+19	4.23E+20	3.40E+20	7.87E+20	1.34E+06	0.03
2008	3.08E+19	7.11E+20	4.50E+20	1.19E+21	2.04E+06	0.05
2009	2.37E+19	3.76E+20	3.17E+20	7.16E+20	1.22E+06	0.03
2010	2.57E+19	4.01E+20	3.33E+20	7.60E+20	1.30E+06	0.03
2011	3.55E+19	5.10E+20	3.70E+20	9.16E+20	1.57E+06	0.03
2012	3.61E+19	9.98E+20	4.53E+20	1.49E+21	2.54E+06	0.05
2013	2.85E+19	5.24E+20	3.23E+20	8.76E+20	1.50E+06	0.03
2014	2.27E+19	3.59E+20	2.90E+20	6.71E+20	1.15E+06	0.02
2015	2.26E+19	5.18E+20	3.66E+20	9.07E+20	1.55E+06	0.03
2016	3.30E+19	7.79E+20	4.42E+20	1.25E+21	2.14E+06	0.04
2017	2.84E+19	6.69E+20	3.73E+20	1.07E+21	1.83E+06	0.03
2018	2.91E+19	7.96E+20	4.44E+20	1.27E+21	2.17E+06	0.04

WED 和 WEFI 总体上也呈现中心高四周低的形势,其中仅平谷区的 WED 大于 0,呈现水资源生态盈余,水资源供需状况协调。其他行政区 WED 均小于 0,中心城区城六区生态赤字最大,说明其水资源供需严重不平衡。各区内的 WEFI 变化不明显,只有平谷区 WEFI 小于 1 呈安全状态,西城区、东城区、朝阳区和海淀区 WEFI 均超过 30,为极度不安全状态,通州区为轻度不安全状态,其余行政区均为亚安全状态。

WEECI 总体上在中心城区城六区和通州区的值较小,均靠近 1,水资源生态经济协调性最低,而平谷区水资源生态与经济发展的协调性最高。

3 讨论

3.1 水资源能值生态足迹与传统水资源生态足迹对比

水资源能值生态足迹与传统水资源生态足迹的变

化趋势大体相似,但前者数值略低于后者。主要原因有二(图 7)。其一,传统计算方法中缺少对各类用水足迹贡献差异的考虑,认为各种类型用水消耗的单位淡水资源所占用的生物生产性土地面积是相同的。事实上,各类用水中水资源的最终流向有差异就会导致占用能力不同,例如农业用水的最终去向是农作物和土壤,土壤中水分会通过渗透作用汇入地下水,农作物中的水分也会被人类所用,因此农业用水的占用能力应相对较低。其二,能值水污染足迹计算结果总体上大于传统水污染足迹计算结果。这可能由于传统水污染足迹选取参数为全球性的,即消纳 COD/氨氮全球平均生产能力,该参数忽略了地区差异,而能值水污染足迹在计算水的单位能值时考虑到北京市实际降水情况及水资源储量,计算得到的能值污染足迹更大。水资源能值生态足迹对各类用水实际占用能力的差异以及地区差异

均有衡量,因此更能真实反映区域水资源利用状况。

水资源生态承载力计算结果的比较,表明传统水生态足迹中水资源生态承载力大于能值方法的结果,这与能值生态足迹的相关研究结果相反(图 8)。对于整个生态系统而言,能值生态承载力的计算以能量流为基础进行转换,能考虑到被传统生态承载力忽视的其他类型土地所提供的承载力,例如湿地等,所以其值比传统生态承载力高^[22-24]。而在水资源生态系统中,只有雨水和地表地下水资源提供生态承载力,因此导致计算结果比传统方法低的原因可能在于传统方法中均衡因子的选取是世界性的,忽略了地区之间的差异,而能值方法中选取区域能值密度,能真实反映区域实际承载能力。

将能值理论与水资源生态足迹模型结合,既能考虑到污染账户,也能避免均衡因子和产量因子计算时的不稳定性,对于景观异质性高的地区,可利用该方法能够更为真实的计算区域水资源生态足迹与生态承载力。

3.2 北京市水资源开发利用状况

WEEF 呈现周期性变化,主要受污染足迹变化的影响,其中 2011 年和 2016 年是两个重要的转折点。2011 年污染足迹迅速增大,是由于 COD 排放量的迅速增大。2016 年污染足迹迅速减少,这可能与北京市在 2015 年底发布的《北京市水污染防治工作方案》有关,该方案的颁布加强了水污染的管控力度,严格限制了不达标污水的排放。从用水账户来看,农业用水和工业用水的生态足迹一直降低,这与农业灌溉技术提高和工厂等工业设施转移关系密切。先进的农业灌溉设施提高了用水效率,节省了农业用水。生态用水足迹不断增加,说明北京市对生态环境保护的重视程度日益增大。生活中水资源消耗对水资源利用影响较大,限制人口、加强节约用水宣传力度、建立节约用水奖励制度、发展科技提高节水效率是必要举措。WEEC 常年保持较低水平且呈现波动变化形势,其变化主要受降水影响,2008 年、2012 年是降水丰年,地区的水资源储量增加,WEEC 上升;2014 年曾因厄尔尼诺现象导致全国大部分地区降水量锐减,水资源储量显著降低,WEEC 随之下降。南水北调的外来水也能增加 WEEC,本文中将其均归纳到地表水。但是南水北调外来水水量都比较固定,且由于地理环境的原因,水质与本地水可能会有不同,相互之间不相容导致水质变差甚至不可用^[27],因此适量增加南水北调外来水量,并提高水质改良技术,使其与本地水质相容,以人工方式增加区域水资源生态承载力。

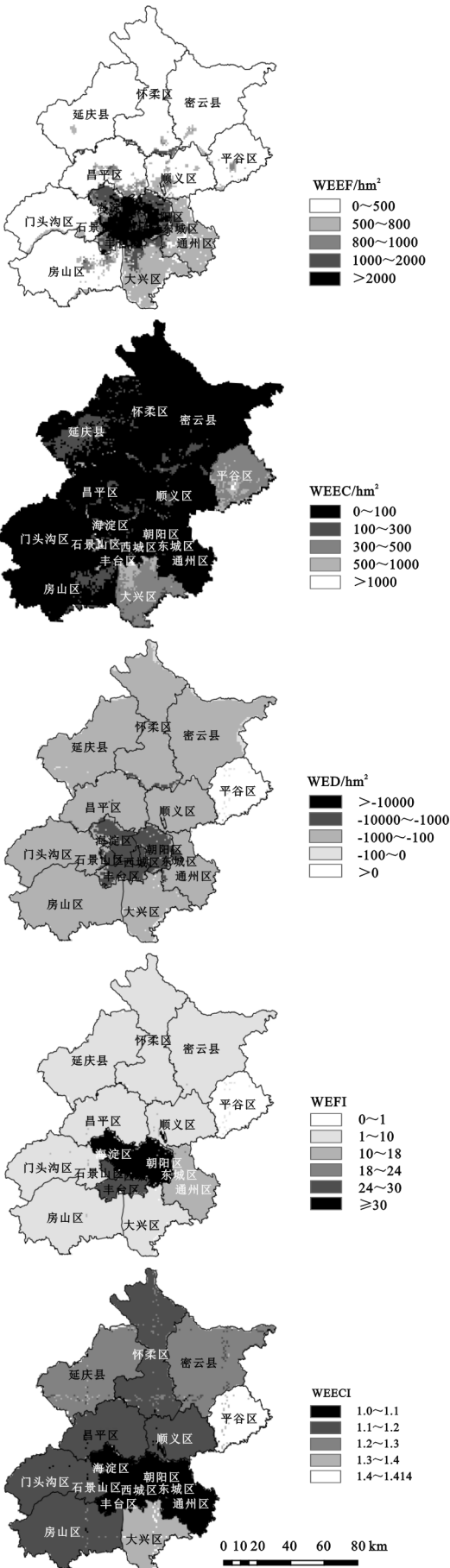


图 6 2015 年北京市水资源生态足迹空间特征

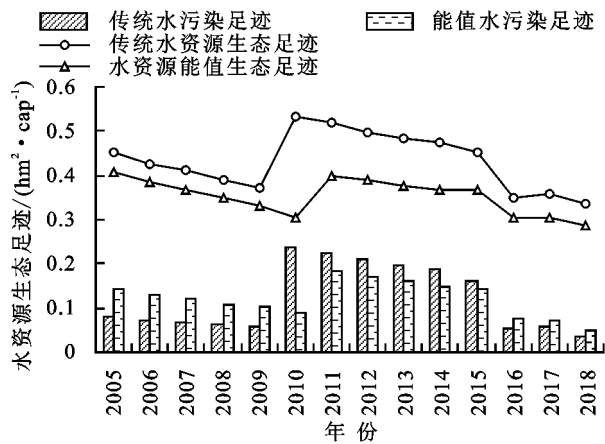


图7 水资源能值生态足迹与传统水资源生态足迹

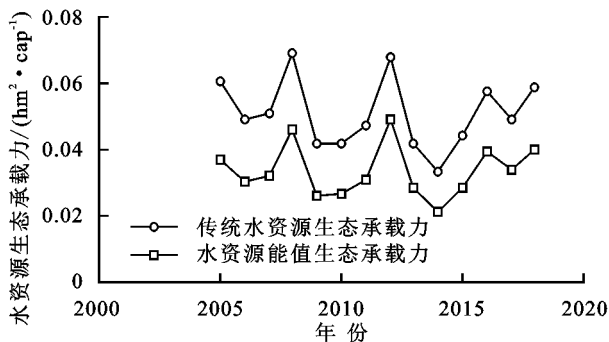


图8 水资源能值生态承载力与传统水资源生态承载力

从空间特征上看, WEEF, WED, WEFI 均呈现四周低、中心高的形势, WEECI 呈现四周高、中心低的形势, WEEC 无固定规律。限制人口是北京市整体控制水资源生态压力的有效举措, 明确城市发展方向, 调整产业结构, 将第二产业适当向周边城市转移, 继续发展第三产业并将其适当转移至周边行政区, 产业疏解带动人口疏解^[28], 从而将中心城区人口转移至周边行政区, 平衡全市水资源生态压力。此外, 与以往研究中行政区域尺度相比, 将研究尺度降低到 1 km 格网尺度, 可清楚了解行政区内部的水资源利用空间分布特征以及尺度之间的关联特征, 可为行政区域间和区域内的水资源配置提供参考。

4 结论与建议

(1) 北京市 WEEF 在 0.29~0.41 $\text{hm}^2/\text{人}$, 其中生活用水对 WEEF 的贡献最大, 其次是污染账户、农业用水、工业用水, 最小的是生态用水。WEEC 在 0.02~0.05 $\text{hm}^2/\text{人}$, 地表水比重最大, 其次是地下水, 雨水势能比重最小。

(2) WED 与 WEI 的年均值分别为 -0.30 $\text{hm}^2/\text{人}$ 和 7.37, 北京市常年处于生态赤字和水资源生态亚安全状态。WEECI 年均值为 1.13, 生态经济协调性较差。水资源生态足迹空间特征分布不均, 中心城区

的水资源生态足迹、生态赤字和生态压力最高, 生态经济协调性最差。

(3) 北京市水资源生态安全仍处于较为严峻的形势。为降低水资源生态足迹和生态压力, 限制人口、拆迁转移人口、调整产业结构、转移产业区位、加强节约用水宣传力度、建立节约用水奖励制度、发展科技提高节水效率是必要举措。

参考文献:

- [1] Hoekstra A. Virtual water trade: Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade [R]. The Delft: Value of Water Research Report, 2003.
- [2] 李丹. 基于水生态足迹的水资源可持续利用评价[D]. 兰州: 西北师范大学, 2014.
- [3] 黄林楠, 张伟新, 姜翠玲, 等. 水资源生态足迹计算方法[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1279-1286.
- [4] 谭秀娟, 郑钦玉. 我国水资源生态足迹分析与预测[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3559-3568.
- [5] Hubacek K, Guan D, Barrett J, et al. Environmental implications of urbanization and lifestyle change in China: Ecological and water footprints[J]. Journal of Cleaner Production, 2009, 17(14): 1241-1248.
- [6] 周悦, 谢屹. 基于生态足迹模型的辽宁省水资源可持续利用分析[J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 3157-3163.
- [7] 王刚毅, 刘杰. 基于改进水生态足迹的水资源环境与经济发展协调性评价: 以中原城市群为例[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(1): 80-90.
- [8] 刘子刚, 郑瑜. 基于生态足迹法的区域水生态承载力研究: 以浙江省湖州市为例[J]. 资源科学, 2011, 33(6): 1083-1088.
- [9] Wang H, Huang J, Zhou H, et al. Analysis of sustainable utilization of water resources based on the improved water resources ecological footprint model: A case study of Hubei Province, China [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 262: 110331.
- [10] Zhang J, Pan X L, Gao Z P, et al. Landscape heterogeneity and net primary productivity (NPP) of mountain-oasis-desert ecosystems in western China[J]. Proc Spie, 2003, 5153: 302-312.
- [11] Zhao S, Li Z, Li W. A modified method of ecological footprint calculation and its application [J]. Ecological Modelling, 2005, 185(1): 65-75.
- [12] Li J X, Chen Y N, Xu C C, et al. Evaluation and analysis of ecological security in arid areas of Central Asia based on the emergy ecological footprint (EEF) model [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 235: 664-677.
- [13] He J, Wan Y, Feng L, et al. An integrated data envelopment analysis and emergy-based ecological footprint

- methodology in evaluating sustainable development, a case study of Jiangsu Province, China [J]. *Ecological Indicators*, 2016,70:23-34.
- [14] Pan H, Zhuang M, Geng Y, et al. Emergy-based ecological footprint analysis for a mega-city: The dynamic changes of Shanghai [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,210:552-562.
- [15] Peng W, Wang X, Li X, et al. Sustainability evaluation based on the emergy ecological footprint method: A case study of Qingdao, China, from 2004 to 2014 [J]. *Ecological Indicators*, 2018,85:1249-1261.
- [16] Yang Q, Liu G, Hao Y, et al. Quantitative analysis of the dynamic changes of ecological security in the provinces of China through emergy-ecological footprint hybrid indicators [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,184:678-695.
- [17] 康可.北京市水资源供需预测[D].北京:北京交通大学,2018.
- [18] 曾晓霞.基于能值生态足迹优化模型的湘江城市群生态安全研究[D].长沙:湖南大学,2015.
- [19] 吕翠美.区域水资源生态经济价值的能值研究[D].郑州:郑州大学,2009.
- [20] 范晓秋.水资源生态足迹研究与应用[D].南京:河海大学,2005.
- [21] 连颖.闽江流域改进能值生态足迹及其社会经济影响因素研究[D].福州:福建农林大学,2014.
- [22] 黄显峰,周祎,阎玮,等.基于能值分析的生态供水效益量化方法[J].*水利水电科技进步*,2019,39(2):12-15,36.
- [23] Chen D, Chen J, Luo Z, et al. Emergy evaluation of the natural value of water resources in Chinese rivers [J]. *Environmental Management*, 2009,44(2):288-297.
- [24] Buenfil A A. Emergy evaluation of water: Department of environmental engineering sciences[D]. University of Florida, Gainesville, USA,2001.
- [25] 林聪,李小磊,杨楠,等.遥感产品支持的城市群生态足迹空间格局研究:以长江三角洲核心区城市群为例[J].*地理与地理信息科学*,2018,34(3):20-25,130.
- [26] 张义,张合平.基于生态系统服务的广西水生态足迹分析[J].*生态学报*,2013,33(13):4111-4124.
- [27] 徐华山,赵磊,孙昊苏,等.南水北调中线北京段水质状况分析[J].*环境科学*,2017,38(4):1357-1365.
- [28] 赵成伟.区域协同发展视角下首都人口疏解作用路径及效果研究[D].北京:北京邮电大学,2019.

~~~~~

(上接第405页)

- [28] 张鹏.基于最大熵增原理的科尔沁沙地蒸散发估算及区域水量平衡计算[D].内蒙古农业大学(呼和浩特市),2019.
- [29] Du C, Ren H, Qin Q, et al. A practical split-window algorithm for estimating land surface temperature from Landsat 8 data[J]. *Remote Sensing*, 2015,7(1):647-665.
- [30] Ren H, Du C, Qin Q, et al. Atmospheric water vapor retrieval from Landsat 8 and its validation[C]//2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Ieee, 2014.
- [31] Peng G, Li J, Chen Y, et al. High-resolution surface relative humidity computation using MODIS image in Peninsular Malaysia[J]. *Chinese Geographical Science*, 2006,16(3):260-264.
- [32] Guo Y, Cheng J. Feasibility of estimating cloudy-sky surface longwave net radiation using satellite-derived surface shortwave net radiation [J]. *Remote Sens.*, 2018,10(4):596, DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10040596>.
- [33] Jian S, Zhao C, Fang S, et al. Effects of different vegetation restoration on soil water storage and water balance in the Chinese Loess Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015,206:85-96.
- [34] Schreiner-McGraw A P, Vivoni E, Mascaro G, et al. Closing the water balance with cosmic-ray soil moisture measurements and assessing their relation to evapotranspiration in two semiarid watersheds[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016,20(1):329-345.