北京市 2010—2019 年水资源生态足迹和生态承载力

岳 晨[1,2], 刘 峰[1,2,3], 杨 柳[1,2], 高 昀[1,2], 郭斯嘉[1,2]

〔1.中国地质科学院 水文地质环境地质研究所,河北 石家庄 050061; 2.自然资源部
地热与干热岩勘查开发技术创新中心,河北 石家庄 050061; 3.中国地质大学(北京),北京 100083〕

摘 要:[目的] 定量评价北京市水资源生态承载状态,为地区可持续发展提供科学依据。[方法] 以水资源生态足迹作为理论基础,叠加生态承载力模型,以北京市 2010—2019 年数据为主,分析了北京市水资源生态足迹、生态承载力和水资源负载指数的动态变化。[结果] 北京市 2010—2019 年水资源生态足迹总趋势非常平稳,其值范围为 0.28～0.32 hm^2/人。北京市人均水资源生态承载力在 0.04～0.12 hm^2/人之间,受降水影响较大。但随着南水北调外来水的输入,该项指标受降水影响的程度有所降低。万元 GDP 水资源生态足迹呈现上下波动的趋势,整体变幅与北京市年均降水量变化趋势一致。北京市历年来水资源呈现明显赤字,负载指数也远高于 10,水资源生态压力大。[结论] 北京市近几年积极采取措施缓解水资源状况取得了一定成效,但目前北京市水资源形势依然比较严峻。南水北调外调水虽然从很大程度上缓解了北京市严重缺水的局面,但由于北京市水资源存量资本消耗严重,外来水对北京市水资源生态承载力的改善有限。提高水资源利用率,合理调整产业结构,依然是北京可持续发展的主要措施。

关键词:水资源生态足迹; 水资源生态承载力; 水资源负载指数; 北京市

文献标识码:A **文章编号**:1000-288X(2021)03-0291-05 **中图分类号**:TV211.1

文献参数:岳晨, 刘峰, 杨柳, 等.北京市 2010—2019 年水资源生态足迹和生态承载力[J].水土保持通报, 2021,41(3):291-295.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.038; Yue Chen, Liu Feng, Yang Liu, et al. Ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources in Beijing City during 2010—2019 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(3):291-295.

Ecological Footprint and Ecological Carrying Capacity of Water Resources in Beijing City During 2010—2019

Yue Chen[1,2], Liu Feng[1,2,3], Yang Liu[1,2], Gao Yun[1,2], Guo Sijia[1,2]

〔1.*Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei* 050061, *China*; 2.*Technology Innovation Center of Geothermal & Hot Dry Rock Exploration and Development, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang, Hebei* 050061, *China*; 3.*China University of Geosciences (Beijing), Beijing* 100083, *China*〕

Abstract: [Objective] The ecological carrying capacity of water resources in Beijing City was evaluated in order to provide a scientific basis for sustainable development of the region. [Methods] Based on the theory of ecological footprint, the model of ecological carrying capacity of water resources and data from 2010 to 2019 in Beijing City, ecological footprint, ecological carrying capacity, and load index of water resources were analyzed. [Results] From 2010 to 2019, the general trend of the ecological footprint for water resources in Beijing City was very stable, and values ranged from 0.28 hm^2/person to 0.32 hm^2/person. The per capita ecological carrying capacity of water resources ranged from 0.04 hm^2/person to 0.12 hm^2/person and was greatly affected by precipitation. The influence of precipitation on ecological carrying capacity of water resources decreased with the input of external water from the south to north water transfer project. The tendency of the ecological footprint of ten thousand-yuan GDP fluctuated up and down, and was consistent with precipitation. Water resources showed a significant deficit, and the load index of water was much higher

收稿日期:2020-12-30 **修回日期**:2021-03-14

资助项目:国家重点研发项目子课题"深部碳酸盐岩热储层天然构造及人工干预下综合评价技术"(2019YFB150410302); 中国地质调查项目"雄安新区资源环境承载能力综合监测和透明雄安数字平台建设(中国地质科学院水文地质环境地质研究所)"(DD20189144, DD20190128)

第一作者:岳晨(1988—),女(汉族),河北省武安市人,硕士,助理研究员,主要从事水资源承载力评价研究。Email:yuechen24@163.com。

通讯作者:刘峰(1988—),男(汉族),山东省新泰市人,硕士,助理研究员,主要从事水文地质研究。Email: xtliufeng@foxmail.com。

than 10, with the ecological pressure of water resources being great. [Conclusion] The government of Beijing City has taken active measures to increase the efficient use of water resources in recent years, and some positive results have been achieved. However, the situation regarding water resources in Beijing City is still grim. Although water transfer from south to north has alleviated the serious water shortage in Beijing City to a large extent, the results for ecological carrying capacity have been limited due to the serious consumption of water resources stock capital. Reasonable adjustments to the industrial structure, and further improved use of water resources may become important measures to promote sustainable development in Beijing City.

Keywords: ecological footprint of water resources; ecological carrying capacity of water resources; load index of water resource; Beijing City

水资源作为可再生性资源,在社会生产及生态环境等方面具有不可替代的重要作用。水资源的可持续开发也关系到城市的可持续发展。Willam Rees 等在 1992 年最早提出生态足迹法,其博士 Wackernagel 于 1996 年将其完善,使其成为衡量资源可持续利用的综合核算的工具[1-4]。生态足迹法通过估算维持人类生活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[5]。经过多年的发展,各国科研人员也在对水资源生态足迹法进行不断改进和探索。Haberl 等[6]通过长时间段生态足迹计算方法,分析了奥地利 1926—1955 年的生态足迹。Wackernagel 等[7]分析菲律宾、韩国、奥地利 1961—1999 年的生态足迹和实际土地需求。孟丽红等[8]通过分析了江西省 2007—2011 年水资源生态足迹模型,为江西省水资源可持续利用提供技术支持。陈正雷等[9]通过 LMDI 构建的水资源生态足迹模型分析了山东省 2007—2016 年水资源生态足迹和水资源承载力。目前,国内外对水资源生态足迹的基本理论、计算方法不断探讨以及实证分析研究[10-14]。本文主要以水资源生态足迹模型为理论框架,以北京市 2010—2019 年数据为基础,通过分析南水北调前后 5 a 水资源生态足迹,生态承载力,以及水资源生态赤字和负载指数,系统分析南水北调为北京市可持续发展的影响,为北京市可持续发展提供科学依据。

1 研究区概况

北京市位于华北平原的西北边缘,是中国的首都,也是全国的政治中心,文化中心,经济中心;该地区的水资源可持续研究具有重要的科研价值与现实意义。北京市东、西、北三面环山,东南部为平原。平原区地势西北高东南低。总的地貌平坦广阔,由洪、冲积扇及冲、洪积平原联合而成。北京市具有明显的温带季风气候特征,属于华北平原降水量较多的地区,年平均降水量约 630 mm。降水集中在 7—8 月,多暴雨。北京市地表水多年平均径流量为 1.77×10^9 m^3,地下水多年平均补给量为 3.67×10^9 m^3[15],人均水资源量为 114 m^3/人(2019 年),属严重缺水地区。北京市主要河流有五条,但水量较少,多年供水以地下水为主。自南水北调中线工程于 2014 年底 12 月正式通水后,北京市城市供水结构发生重大变化,南水北调水成为供水结构的主要部分。

2 数据来源与研究方法

2.1 水资源生态足迹模型

水资源生态足迹,就是将消耗的水资源量转化为相应账户的生产面积——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[16]。公式如下:

$$EF_w = N \times ef_w = N \times \gamma_w \times (W/p_w) \quad (1)$$[17]

式中:EF_w 为水资源生态足迹(hm^2);N 为人口数;ef_w 为人均水资源生态足迹(hm^2/人);γ_w 为全球水资源均衡因子,取 5.19[18];W 为水资源消耗量(m^3);p_w 为全球水资源平均生产能力(m^3/hm^2),取 3 140 m^3/hm^2[19]。

2.2 水资源生态承载力模型

水资源生态承载力,主要表示水资源对生态系统和经济系统良性发展的支撑能力,需要综合考虑生态环境以及社会生产所需要的水资源[19]。

$$EC_w = N \times ec_w = 0.4 \times \psi \times \gamma_w \times Q/p_w \quad (2)$$

式中:EC_w 为水资源生态承载力(hm^2);N 为人口数;ec_w 为人均水资源生态承载力(hm^2/人);γ_w 为水资源均衡因子;ψ 为水资源产量因子,取0.77[18];Q 为水资源总量(m^3);p_w 为世界水资源平均生产能力(m^3/hm^2)。通常,一个国家和地区的水资源承载力中60%用于维持生态环境,因此,计算中乘以系数 0.4[18]。

2.3 水资源生态盈余及水资源生态赤字

将区域内水资源生态足迹和生态承载力相比较,其差值即为水资源生态盈余或赤字[20]。

$$水资源生态赤字(盈余) = EC_w - EF_w \quad (3)$$

当数值为正时,则为生态盈余,表明北京市水资源尚有潜力;当数值为 0 时,则表明北京市水资源生态平衡。当数值为负时,则为生态赤字,表明水资源过量开发。

2.4　万元 GDP 水资源生态足迹

万元 GDP 水资源生态足迹是通过水资源生态足迹与万元 GDP 的比值来表示的。其值越小表示水资源利用效率越高,反之越低[21],公式如下:

$$\text{万元 GDP 水资源生态足迹}=EF_w/GDP \tag{4}$$

2.5　水资源负载指数

水资源负载指数能够反映水资源的时空分布、利用程度及水资源开发的难易程度。其分级指标见表 1[22],公式为:

$$c=k\sqrt{pG}/W \tag{5}$$

式中:c 为水资源负载指数;p 为人口(10^4 人);G 为国内生产总值(10^8 元);W 为水资源总量(10^8 m^3);k 为与降水有关的系数。

k 值计算公式[23]如下:

$$k=\begin{cases}1.0 & (R\leqslant 200)\\ 1.0-0.1(R-200)/200 & (200<R\leqslant 400)\\ 0.9-0.2(R-200)/400 & (400<R\leqslant 800)\\ 0.7-0.2(R-200)/800 & (800<R\leqslant 1\,600)\\ 0.5 & (R>1\,600)\end{cases} \tag{6}$$

表 1　水资源负载指数分级指标[22,24]

水资源负载指数	级别	水资源利用程度	水资源开发条件
>10	Ⅰ	很高,潜力不大	需要外来水
5～10	Ⅱ	高	困 难
2～5	Ⅲ	中等,潜力较大	中 等
1～2	Ⅳ	较低,潜力大	较容易
<1	Ⅴ	低,潜力很大	容 易

2.6　数据来源

本文的研究数据主要来自北京统计年鉴(2011—2020 年),北京市水资源公报(2010—2019 年),具体数值见表 2。

表 2　2010—2019 年北京市社会经济及用水量分析

年份	人口/10^4 人	GDP/10^8 元	年降水量/mm	水资源总量/10^8 m^3(自产水)	水资源总量/10^8 m^3(加入南水北调来水)	农业用水/10^8 m^3	工业用水/10^8 m^3	生活用水/10^8 m^3	生态用水/10^8 m^3
2010	1 961.9	14 113.6	524.0	23.1	23.1	11.4	5.1	14.7	4.0
2011	2 018.6	16 251.9	552.0	26.8	26.8	10.9	5.0	15.6	4.5
2012	2 069.3	17 879.4	708.0	39.5	39.5	9.3	4.9	16.0	5.7
2013	2 114.8	19 800.8	501.0	24.8	24.8	9.1	5.1	16.3	5.9
2014	2 151.6	21 330.8	439.0	20.3	20.3	8.2	5.1	17.0	7.2
2015	2 170.5	23 014.6	583.0	26.8	35.6	6.5	3.8	17.5	10.4
2016	2 172.9	25 669.1	660.0	35.1	45.7	6.1	3.8	17.8	11.1
2017	2 170.7	28 014.9	592.0	29.8	40.5	5.1	3.5	18.3	12.6
2018	2 154.2	30 320.0	590.0	35.5	47.4	4.2	3.3	18.4	13.4
2019	2 153.6	35 371.3	506.0	24.6	34.5	3.7	3.3	18.7	16.0

3　结果与分析

3.1　北京市水资源生态足迹、生态承载力及生态赤字(盈余)计算

本文以北京市 2010—2019 年的各行业用水量为基础,以前文所述的水资源生态足迹模型及水资源生态承载力模型为依据,计算北京市 2010—2019 年水资源生态足迹和生态承载力,计算结果见表 3。

由图 1 可知,北京市 2010—2019 年水资源生态足迹 4 个账户中,生活用水生态足迹所占水资源生态足迹比例最高,约为 45%,呈现缓慢波动上升的趋势。生态环境用水生态足迹变化最大,这几年呈现逐步升高的趋势,且所占比重逐年加大。由趋势线可以看出 2014 年北京市生态环境用水生态足迹明显上升,可能是由于使用京密引水渠调水,增加了运输途中的输水损失造成的。农业用水生态足迹和工业用水生态足迹自 2010 年以来逐年下降,尤其是农业用水生态足迹,下降趋势明显,说明这几年北京市农业节水措施效果显著,农业水资源利用率显著提高。由示意图可以看出近几年北京市对工业节水相对重视,效果也比较显著。由此可知,北京市水资源生态与社会经济的关系正不断改善。推测是北京市政府通过积极调整产业结构,注重节水科技的发展,不断提高水资源利用率呈现的成果。

表 3 北京市 2010—2019 年人均水资源生态足迹与人均生态承载力分析 hm^2/人

年份	生态足迹					人均水资源生态承载力	人均生态赤字	GDP 生态足迹
	人均农业用水	人均工业用水	人均生活用水	人均生态环境用水	人均水资源生态足迹			
2010	0.096	0.043	0.124	0.034	0.297	0.060	0.237	0.027
2011	0.089	0.041	0.128	0.037	0.295	0.068	0.227	0.027
2012	0.074	0.039	0.128	0.046	0.287	0.097	0.190	0.037
2013	0.071	0.040	0.127	0.046	0.284	0.060	0.225	0.021
2014	0.063	0.039	0.131	0.055	0.288	0.048	0.240	0.016
2015	0.049	0.029	0.133	0.079	0.291	0.083	0.207	0.026
2016	0.046	0.029	0.135	0.084	0.295	0.107	0.188	0.029
2017	0.039	0.027	0.139	0.096	0.301	0.095	0.206	0.024
2018	0.032	0.025	0.141	0.103	0.302	0.112	0.190	0.026
2019	0.028	0.025	0.144	0.123	0.320	0.081	0.239	0.016

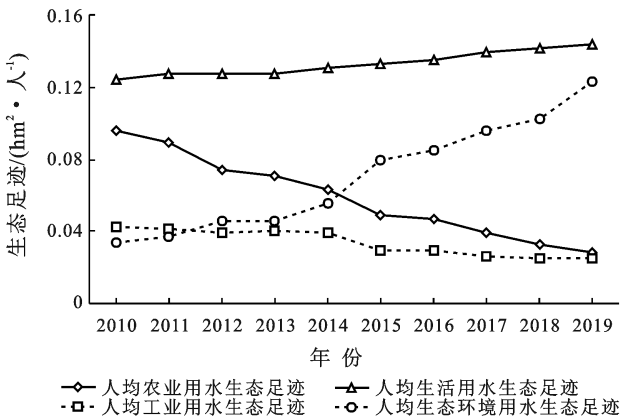


图 1 北京市 2010—2019 年水资源人均农业、工业、生活、生态环境生态足迹

由图 2 可知，北京市水资源生态足迹总趋势非常平稳，表明随着经济与人口的增长，人均水资源利用率也随之上升，保持较低的人均水资源生态足迹是实现可持续发展的有效途径。而反观水资源生态承载力，可以看出上下波动频率较大，较高年份为 2016 年和 2018 年，分别达到 0.107 hm^2/人和 0.112 hm^2/人。究其影响因素，不仅限于人口、水文、植被、地质条件等情况，也与当年的气候条件，尤其是降水密切相关。根据图 3 可以看出，2010—2014 年水资源生态承载力的变化与降水的年度变化规律基本一致，说明水资源生态承载对于气候变化非常敏感。2015 年以后水资源生态承载力的变化规律与降水变化整体趋势一致，但曲线更加平滑，推测可能是南水北调来水起到了一定的调蓄作用，对北京市水资源生态承载力起到一定影响作用。北京市水资源生态赤字在 2016 年达到最低值 0.188 hm^2/人，也是水资源生态承载力最高，推测主要原因是因为 2016 年为丰水年，且 2016 年南水北调供水已正常为北京市供水。由此可见，南水北调外调水的输入对于北京市水资源生态赤字程度有一定缓解作用，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。

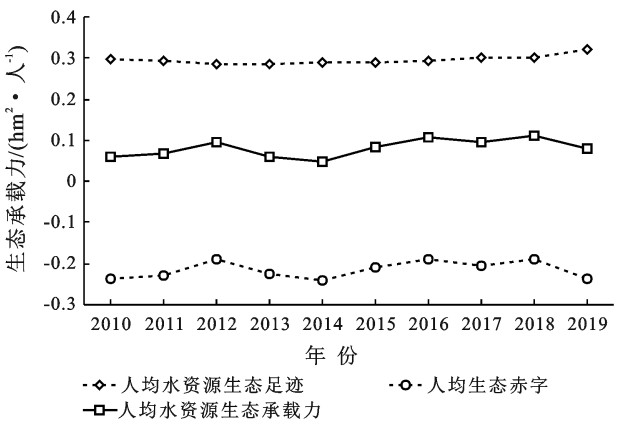


图 2 北京市 2010—2019 年人均水资源生态足迹、人均水资源生态承载力和人均水资源生态赤字特征

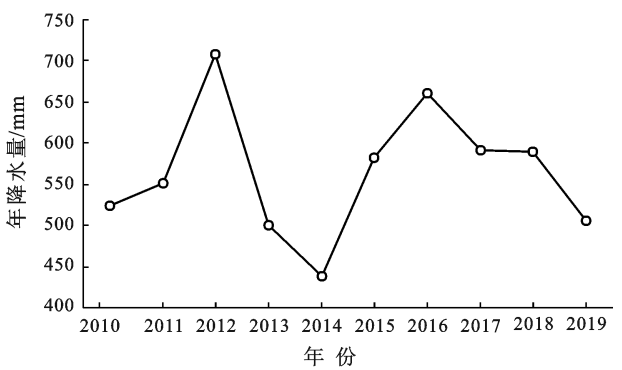


图 3 北京市 2010—2019 年年均降水量变化

从图 4 可知，2010—2019 年北京市万元 GDP 水资源生态足迹呈现上下波动的形势，整体变幅与北京市年均降水量变化趋势一致。除 2012 年最高外，整体仍然有向下的趋势，说明北京市水资源利用效率在稳步提高，这也与北京市近些年来不断调整产业结构，优化产业发展息息相关。

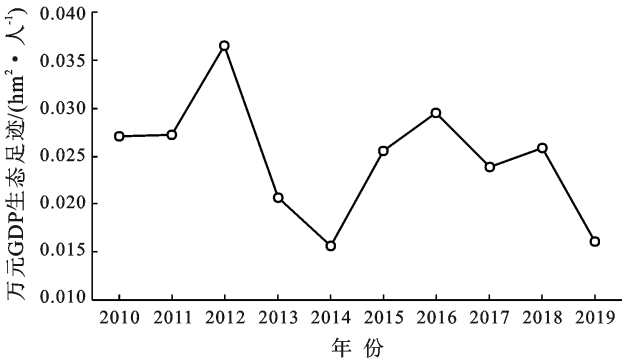


图 4　北京市 2010－2019 年万元 GDP 生态足迹变化特征

3.2　北京市水资源负载指数

通过计算北京市水资源负载指数表(表 4),可以看出北京市水资源负载指数很高。水资源负载指数与水资源时空分布、利用程度息息相关。北京市人口密度大,水资源储量少且时空分布极不均匀,经济增长迅速,用水量逐年增长造成水资源开发利用率高,因此,北京市水资源负载指数比较高。南水北调外调水进京后,北京市水资源负载指数有下降趋势,但负载程度依然较高。说明南水北调外调水虽然很大程度上缓解了北京市供水紧张的形势,但由于北京市水资源多年处于超采情况,即使有南水北调外调水输入,仍需要一定时间才能进一步改善北京市水资源生态承载状况。

表 4　北京市历年来水资源负载指数等级分布

年份	水资源负载指数	级别	水资源利用程度	水资源开发条件
2010	151.223	Ⅰ	很高,潜力不大	需要外来水
2011	141.001	Ⅰ	很高,潜力不大	需要外来水
2012	92.892	Ⅰ	很高,潜力不大	需要外来水
2013	171.320	Ⅰ	很高,潜力不大	需要外来水
2014	251.192	Ⅰ	很高,潜力不大	需要外来水
2015	145.736	Ⅰ	很高,潜力不大	需要外来水
2016	115.136	Ⅰ	很高,潜力不大	需要外来水
2017	142.337	Ⅰ	很高,潜力不大	需要外来水
2018	127.294	Ⅰ	很高,潜力不大	需要外来水
2019	199.380	Ⅰ	很高,潜力不大	需要外来水

4　结 论

(1) 通过计算北京市 2010—2019 年水资源生态足迹,水资源生态承载力,水资源生态赤字,万元 GDP 生态足迹等诸多指标,计算结果显示北京市人均水资源生态足迹在 0.28～0.32 hm^2/人,其中,生活用水对水资源生态足迹贡献最大,生态环境生态足迹变化最大,成为影响北京市水资源生态足迹的第二项指标,其次是农业用水,最小的是工业用水。北京市人均水资源生态承载力在 0.04～0.12 hm^2/人之间,水资源生态承载力受降水影响较大。但随着南水北调外来水的输入,该项指标受降水影响的程度有所降低。

(2) 2010—2019 年北京市水资源负载指数远大于 10,赤字程度较高,水资源生态压力大。随着南水北调外调水进京,备用水源地取水量和当地供水量减少,会有效的缓解本地水资源的压力,有利于水源地的涵养。但由于北京市水资源存量资本消耗严重,外调水对北京市水资源生态承载力的改善有限。

(3) 北京市水资源生态安全仍然处于比较严峻的形势。虽然北京市政府已经做了很多工作,并取得了显著成效。但由于北京特殊的政治背景,人口基数庞大,新增流动人口多,经济增长迅速,均成为北京市水资源可持续发展的主要限制因素。为了降低水资源生态足迹和缓解水资源现有状况,限制人口,调整产业结构,加强节水工业、农业的生产,提高水资源效率仍是必要举措。

[参 考 文 献]

[1] William E R. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves outs [J]. Environment & Urbanization, 1992,4(2):121-130.

[2] Wackenagel M, William E R. Our ecological footprint: reducing human impact on the earth [M]. Cabriola Isoland, B.C.: New Society Publishers, 1996:2-17.

[3] Wackenagel M. An evaluation of the ecological footprint [J]. Ecological Economics, 1999,31(3): 315-320.

[4] 李培月,钱会,吴健华,等.银川市 2008 年水资源生态足迹研究与分析[J].南水北调与水利科技,2010,8(1): 69-71.

[5] 门宝辉,蒋美彤.基于生态足迹法的水资源承载力研究:以北京市为例[J].南水北调与水利科技,2019,17(5): 29-36.

[6] Haberl H, Erb K H, Krausmann F. How to calculate and interpret ecological footprints for long periods of time: the case of Austria 1926—1995 [J]. Ecological Economics, 2001,38(1):25-45.

[7] Wackernagel M, Chad M, Erb K H. Ecological footprint time series of Austria, the Philippines, and South Korea for 1961—1969 [J]. Land Use Policy, 2004,21(3):261-269.

[8] 孟丽红,叶志平,袁素芬,等.江西省 2007—2011 年水资源生态足迹和生态承载力动态特征[J].水土保持通报,2015,35(1): 256-261.

[9] 陈正雷,陈星.山东省水生态足迹时空分布与驱动效应研究[J].人民黄河,2020,42(4): 76-80.

(下转第 304 页)

格局定量分析[J].国土资源遥感,2009,22(2):76-81.
[22] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J].自然资源学报,2008,23(5):911-919.
[23] 欧阳志云,王效科,苗鸿,等.中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J].生态学报,1999,19(5):607-613.
[24] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2):189-196.
[25] 谢高地,张彩霞,张昌顺,等.中国生态系统服务的价值[J].资源科学,2015,37(9):1740-1746.
[26] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
[27] 赵小汎.土地利用生态服务价值指标体系评估结果比较研究[J].长江流域资源与环境,2016,25(1):98-105.
[28] 李文楷,李天宏,钱征寒.深圳市土地利用变化对生态服务功能的影响[J].自然资源学报,2008,23(3):440-446.
[29] 陈浮,葛小平,陈刚,等.城市边缘区景观变化与人为影响的空间分异研究[J].地理科学,2001,21(3):210-216.
[30] 李杨帆,朱晓东,孙翔,等.快速城市化对区域生态环境影响的时空过程及评价[J].环境科学学报,2007,27(12):2060-2066.
[31] 陈志强,陈健飞.闽台土地利用/覆被人为影响指数的地统计分析[J].热带地理,2008,28(6):518-522.
[32] 赵志刚,余德,韩成云,等.鄱阳湖生态经济区生态系统服务价值预测与驱动力[J].生态学报,2017,37(24):8411-8421.
[33] 曾杰,李江风,姚小薇.武汉城市圈生态系统服务价值时空变化特征[J].应用生态学报,2014,25(3):883-891.
[34] 徐媛银,郭泺,薛达元,等.赣南地区土地利用格局及生态系统服务价值的时空演变[J].生态学报,2019,39(6):1969-1978.
[35] 茆长宝,陈勇.土地利用及其生态服务价值演变的驱动力与预测研究:以江苏省为例[J].水土保持研究,2010,17(4):270-275.
[36] 马晓勇,党晋华,李晓婷,等.太原市近 15 年城市景观格局时空变化及其驱动力[J].水土保持通报,2018,38(4):308-317.
[37] 汪权方,杨宇琪,陈龙跃.近 30 年南京市水域消长及其原因分析[J].中国农业信息,2019,31(2):110-119.
[38] 张骞,高明,杨乐,等.1988—2013 年重庆市主城九区生态用地空间结构及其生态系统服务价值变化[J].生态学报,2017,37(2):566-575.
[39] 赵可,张雄,张炳信.城市化与城市建设用地关系实证:基于中国大陆地区 1982—2011 年时序数据[J].华中农业大学学报(社会科学版),2014,33(2):107-113.
[40] Yang Zhaoping, Gao Jixi, Zhou Caiping, et al. Spatio-temporal changes of NDVI and its relation with climatic variables in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers [J]. Journal of Geographical Sciences, 2011,21(6):979-993.
[41] 孙洪波,杨桂山,万容容,等.昆山生态系统服务价值变化及其驱动力差异性分析[J].长江流域资源与环境,2009,18(4):760-762.
[42] O'Neill R V, Hunsaker C T, Timmins S P, et al. Scale problems in reporting landscape pattern at the regional scale [J]. Landscape Ecology, 1996,11(3):169-180.

(上接第 295 页)

[10] 周子琴,苏维词,郑群威.2007—2016 年贵州省水资源生态足迹的演化特征[J].水土保持通报,2019,39(2):227-233.
[11] 宋亚洲,韩宝平,朱国平,等.基于生态足迹的江苏省渔业资源可持续利用评价[J].水生态学杂志,2010,31(2):17-22.
[12] 张天海,刘刚,唐立娜,等.基于时间序列计算的厦门市生态足迹动态研究[J].安全与环境学报,2018,18(2):800-806.
[13] 焦士兴.河南省水生态足迹测度及其驱动效应分析[J].水文,2020,40(1):91-96.
[14] 朱晛亭,宁立波,孙丽苹,等.安阳市地热开发区浅层地下水资源生态足迹研究[J].湖南师范大学学报(自然科学版),2018,41(3):9-15.
[15] 吕金波.以水为魂的首都城市:北京[J].化石,2020(1):46-50.
[16] 王洪波.基于改进型生态足迹模型的北京市生态足迹分析与评价[D].北京:首都经济贸易大学,2013.
[17] 焦士兴,陈林芳,王安周,等.中原城市群水资源生态足迹变化及驱动研究[J].人民黄河,2020,11:124-128.
[18] 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.
[19] 雷亚君,张永福,张敏惠,等.新疆水资源生态足迹核算与预测[J].干旱地区农业研究,2017,35(5):142-150.
[20] 李玉平,王晓妍,朱琛,等.邢台市水资源生态足迹核算与预测研究[J].水土保持研究,2014,21(3):227-230.
[21] 王先庆,李博,李进,等.基于生态足迹模型的水资源可持续利用分析[J].人民长江,2019,50(5):107-112.
[22] 张军,张仁陟,周冬梅.基于生态足迹法的疏勒河流域水资源承载力评价[J].草业学报,2012,21(4):267-274.
[23] 庄庆威,吴世新,罗格平,等.新疆绿洲变化与资源配置协调性分析[J].干旱区地理,2020,43(5):1298-1306.
[24] 张军,周冬梅,张仁陟.黑河流域 2004—2010 年水足迹和水资源承载力动态特征分析[J].中国沙漠,2012,32(6):1779-1785.