

华北平原水资源生态足迹与生态承载力评估

秦欢欢^{1,2}

1. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 南昌 330013

2. 东华理工大学水资源与环境工程学院, 南昌 330013

摘要 根据水资源生态足迹模型和系统动力学方法,通过构建华北平原水资源利用SD模型,设计4种不同情景,对2000—2018年和2019—2050年华北平原水资源生态足迹和生态承载力进行评价与预测。结果表明:(1)对于现状年份,人均水资源生态足迹、生态承载力和生态盈亏均值分别为0.427、0.126和-0.302 hm²/人,水资源生态压力指数和生态经济协调指数均值分别为3.522和1.242;华北平原水资源压力过大,处于不安全利用状态,南水北调工程对华北平原水资源生态亏损有一定的缓解作用。(2)对于未来年份,4种情景下人均水资源生态足迹均值分别为0.392、0.430、0.329和0.359 hm²/人,人均水资源生态承载力均值分别为0.121、0.121、0.121和0.120 hm²/人,人均水资源生态亏损分别为0.271、0.309、0.208和0.239 hm²/人;水资源生态压力指数分别为3.240、3.571、2.734和3.011,生态经济协调指数均值分别为1.251、1.235、1.283和1.266,华北平原未来水资源利用压力较大,处于不安全状态。(3)2019—2050年水资源压力和不安全利用状态将持续,情景NS4既能保证经济发展,也能降低水资源不安全利用程度,是华北平原未来应采用的情景,但需加大各种节水措施和技术的应用,提高各部门的用水效率,多管齐下,才能保证水资源的可持续利用。

关键词 水资源生态足迹;水资源生态承载力;可持续水资源利用;系统动力学;华北平原

水资源生态足迹是指可以满足区域人口对水资源需求并具备生物生产力的水域面积^[1-4],是一种非货币的度量方法^[5-7]。水资源生态承载力是指在满足区域水资源生态足迹的前提下,水资源为该

区域的社会经济与资源环境发展提供支持的能力^[8],是各用水部门承载能力之和^[9]。水资源生态足迹与生态承载力之间的平衡关系表征了区域水资源的盈亏状况,前者大于后者表示水资源亏损,

收稿日期:2022-10-21;修回日期:2023-02-13

基金项目:东华理工大学博士科研启动基金项目(DHBK2016104)

作者简介:秦欢欢,副教授,研究方向为水文学与水资源,电子信箱:qhhasn@126.com

引用格式:秦欢欢. 华北平原水资源生态足迹与生态承载力评估[J]. 科技导报, 2023, 41(11): 41-51; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.

而后者大于前者则表示水资源盈余。通过水资源生态足迹与生态承载力对比可为区域水资源管理制定有针对性的政策。

水资源生态足迹与生态承载力已成为水科学研究中主要方法之一^[10-14],在全国^[11]以及长江流域^[14]、鄱阳湖流域^[12]、淮河流域^[10]、西南地区^[1]、甘肃省^[2]、广东省^[15]、福建省^[16]、辽宁省^[17]、江西省^[18]、陕西省^[19]、上海市^[3]和北京市^[20]等不同区域范围得到了广泛应用。这些应用大多是针对现状下水资源生态足迹和生态承载力进行计算和评价,对未来不同水资源利用情景下的预测和评估较少,仅有少数研究采用系统动力学法、BP神经网络法进行未来情景下水资源生态足迹和生态承载力的预测^[7,10]。随着中国经济的高速发展,区域水资源供需失衡不断加剧,水环境污染问题也日益突出^[21],生态文明建设已成为区域社会经济与资源环境可持续发展的重要组成部分,水资源生态足迹与生态承载力越来越受到社会各界人士的重视,在水资源可持续利用与管理中得到了长足的发展。

华北平原人口稠密、经济发达,是中国水资源压力最大的地区之一,属于“资源型”缺水地区。一方面,华北平原人均水资源量不到全国平均值的1/4^[22-23];另一方面,华北平原降水量具有时空分布不均的特点,极易出现洪涝或旱灾^[24],而旱灾使得水资源供需矛盾更突出,需要大量开采地下水以满足工农业生产和居民生活的需要。缺水问题在华北平原产生了深远的影响,产生了地下水超采、地面沉降等诸多生态环境问题^[25]。目前暂未检索到华北平原水资源生态足迹和生态承载力的研究,但有一些针对华北平原各省市的研究^[16, 26-27]。余慧^[26]计算了2013—2016年京津冀的水资源生态足迹和生态承载力,结果表明三地均处于生态赤字状态。卢艳等^[27]计算了2007年河南省水资源生态足迹和生态承载力,结果表明河南省多数城市水资源呈生态赤字,水资源生态足迹和生态承载力存在空间分布的差异。因此,为了解华北平原水资源利用及盈亏现状,科学预测华北平原未来不同情景下可持续水资源利用状况,有必要对华北平原水资源生态足迹和生态承载力进行评价与预测。

科学预测区域水资源生态足迹和生态承载力,可以为区域可持续水资源利用提供前瞻性建议与意见^[10]。目前,研究者采用灰色预测模型^[28]、ARIMA模型^[29]、GRNN模型^[30]、BP神经网络模型^[10]、系统动力学SD模型^[7]等进行水资源生态足迹和生态承载力的预测。与其他方法相比,需水量计算中涉及的社会、经济、工程及技术等因素均可在SD模型中得到量化的分析,能够较准确地进行需水量预测^[31],而需水量预测是水资源生态足迹和生态承载力预测的基础,因此,本研究选择SD法进行水资源生态足迹和生态承载力的预测。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

华北平原(36°~41°N、114°30'~118°30'E)是指黄河以北、燕山以南和太行山以东的冲积平原区,总面积140000 km²,包括京、津、冀、豫和鲁等地的21座城市,是中国人口密集、经济发达且水资源压力最大的区域之一。研究区多年平均降水量和蒸散发量分别为554和1550 mm/a^[32],其中超3/4的降水发生在6—9月的汛期。研究区内有潮白河、永定河、滦河、蓟运河等近60条河流,大部分常年干涸或仅在汛期短时过流,或成为城镇的排污河。南水北调工程是中国解决北方缺水问题的重大战略性工程,分东、中、西三线。已于2014年底正式通水的中线工程从丹江口水库调水至华北平原,年调水量82.2亿m³。

1.2 水资源生态足迹与生态承载力

水资源生态足迹由式(1)计算^[33]:

$$E_F = \sum_{i=1}^4 E_{Fi} = \sum_{i=1}^4 \frac{\delta_w \times W_i}{P_w} \quad (1)$$

式中, E_F 表示水资源生态足迹(hm²); E_{Fi} 表示第*i*个部门的水资源生态足迹(hm²),本文将研究区划分为农业、工业、生活和生态4个部门; δ_w 表示全球水资源均衡因子,取值5.19^[3,7]; W_i 表示水资源消耗量(m³); P_w 表示全球水资源平均生产能力(m³/hm²),一般取值3140 m³/hm²^[7,12]。

水资源生态承载力由式(2)计算^[34-35]:

$$E_C = 0.4 \times \delta_w \times \varphi \times \frac{W_C}{P_w} \tag{2}$$

$$= 0.4 \times \delta_w \times \varphi \times \frac{W_S + W_G + W_R + W_N}{P_w}$$

式中, E_C 表示水资源生态承载力(hm^2); φ 是水资源产量因子,是区域水资源平均生产能力与全球水资源平均生产能力的比值^[5],经计算,研究区水资源产量因子为0.773; W_C 、 W_S 、 W_G 、 W_R 和 W_N 分别表示水资源总量及地表水、地下水、灌溉回归水和南水北调引水量(m^3); 0.4为在水资源生态承载力计算中需扣除用于生态和生物多样性补偿面积后的可用水资源比例^[7]。

1.3 可持续水资源利用评价指标

水资源利用系统中供需不匹配是导致缺水和水资源不可持续利用的根源^[6],而水资源生态足迹和生态承载力是可持续水资源利用模型中最关键、最重要的参数。因此,本研究选取水资源生态盈亏、水资源生态压力指数和水资源生态经济协调指数等作为评价可持续水资源利用的指标:

$$PL_{EW} = E_C - E_F \tag{3}$$

$$P_{EW} = \frac{E_F}{E_C} \tag{4}$$

$$EC_{EW} = \frac{E_F + E_C}{\sqrt{E_F^2 + E_C^2}} \tag{5}$$

式中, PL_{EW} 表示水资源生态盈亏(hm^2),正值表示盈余,水资源可继续利用;负值表示赤字,水资源存在过度利用。 P_{EW} 表示水资源生态压力指数, $P_{EW} > 1$ 说明水资源需大于供,水资源处于不安全利用状态,程度与 P_{EW} 值成正比关系; $0 < P_{EW} < 1$ 说明水资源供大于需,水资源处于安全利用状态。 EC_{EW} 表示水资源生态经济协调指数($0 \leq EC_{EW} \leq \sqrt{2} \approx 1.414$),衡量生态环境与社会经济之间协调程度^[7],数值越大说明水资源生态协调性越好。

1.4 水资源利用SD模型

本研究在文献[23]构建、校准的研究区水资源利用SD模型基础上,进行水资源生态足迹和生态承载力的预测。图1是研究区水资源利用SD模型流程图,展示了变量之间的因果与定量关系。模拟周期为2000—2050年,时间步长为1年,其中2000—2018年为现状年份,2019—2050年为预测年份。

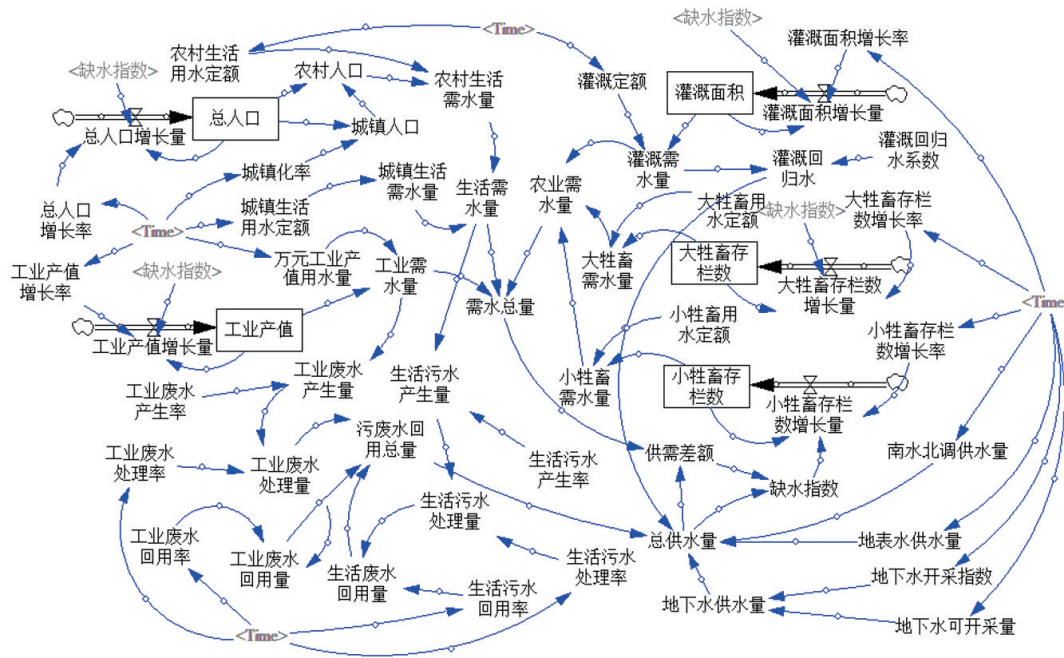


图1 研究区水资源利用SD模型流程图

利用2000—2018年的历史数据对模型进行了校准,生活、工业、农业和总需水量的相对误差(式(6)为其计算公式)。

$$R = \frac{W_{测} - W_{模}}{W_{模}} \times 100\%$$

式中 R 、 $W_{测}$ 和 $W_{模}$ 分别表示相对误差、实测值和模拟值)均在 $\pm 5\%$ 以内(图2),说明模型校准是成功的,可用于研究区水资源生态足迹和生态承载力的计算。

研究区水资源利用SD模型中的数据包括社会经济数据(来源于各省市2001—2019年统计年鉴)、水资源数据(来源于各省市和海河流域2000—2018年水资源公报)和污水回用数据(来源于各省市2001—2019年统计年鉴)。

在模型校准基础上,根据研究区水资源利用和经济发展的现状,综合考虑未来不同情况下研究区

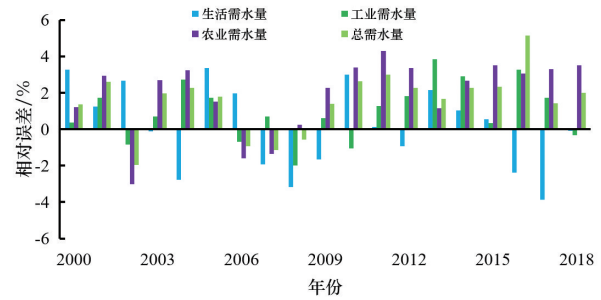


图2 研究区水资源利用SD模型校准结果

水资源利用的侧重点,设计了4种情景:趋势保持型NS1、经济发展型NS2、节约用水型NS3和可持续发展型NS4,表1列出了这些情景的具体内容。参照河北、北京、天津等省市社会经济发展趋势和水资源利用现状的基础上设定了4种情景下华北平原的各项经济发展和水资源利用参数,这样的情景设计是符合实际和科学的。

表1 研究区水资源利用SD模型情景设计

情景名称	情景描述	主要参数		
		2030年	2040年	2050年
趋势保持(NS1)	保持现状的发展趋势和系统结构	总人口增速6.8‰,工业总产值增速2%,城镇化率70%	总人口增速6.8‰,工业总产值增速2%,城镇化率75%	总人口增速6.8‰,工业总产值增速2%,城镇化率80%
经济发展(NS2)	发展经济仍是华北平原的重中之重	总人口增速8‰,工业总产值增速5%	总人口增速9‰,工业总产值增速7%	总人口增速9‰,工业总产值增速8%
节约用水(NS3)	将水资源保护列为重点,采用多种节水措施	城镇生活和农村生活用水定额分别降低10%,万元工业产值用水定额、灌溉定额、大牲畜和小牲畜用水定额分别降低20%,其他参数取值和情景NS1相同		
可持续发展(NS4)	既强调经济发展,也注重水资源保护	NS4=NS2+NS3	NS4=NS2+NS3	NS4=NS2+NS3

2 结果与分析

2.1 水资源生态足迹现状分析

从图3和图4可以看出,研究区人均农业用水生态足迹占水资源生态足迹比重(58.4%~72.4%)最高,呈明显波动下降趋势,拟合曲线为 $y=-0.0083x+0.3715$ ($R^2=0.9602$),年下降量为 $0.0083 \text{ hm}^2/\text{人}$;人均工业用水生态足迹占水资源生态足迹比重为12.0%~15.8%,呈缓慢波动下降趋势,拟合曲线为 $y=-0.0017x+0.0757$ ($R^2=0.906$),年下降量为 $0.0017 \text{ hm}^2/\text{人}$;人均生活用水生态足迹占水资源生态足迹比重为12.8%~19.2%,呈缓慢波动

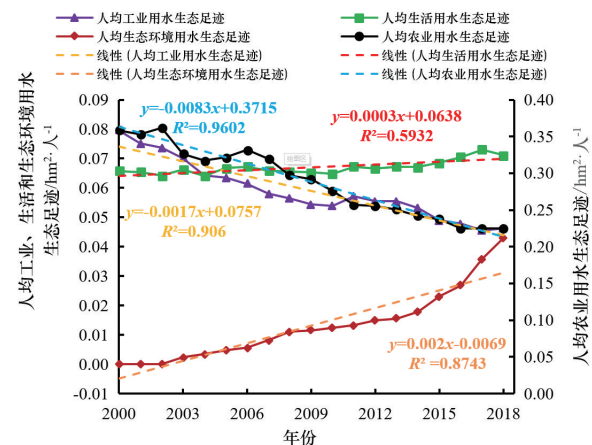


图3 2000—2018年研究区人均农业、工业、生活和生态环境用水生态足迹曲线

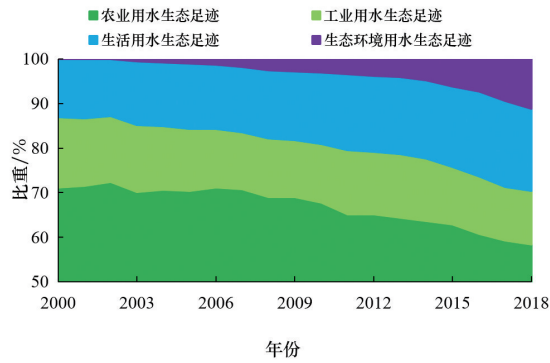


图4 2000—2018年研究区水资源生态足迹组成

上升趋势,拟合曲线为 $y=0.0003x+0.0638$ ($R^2=0.5932$),年上升量为 $0.0003 \text{ hm}^2/\text{人}$;人均生态环境用水生态足迹占水资源生态足迹比重为 $0\sim 11.1\%$,呈快速上升且占比逐年上升趋势,拟合曲线为 $y=0.002x-0.0069$ ($R^2=0.8743$),年上升量为 $0.002 \text{ hm}^2/\text{人}$,特别是2014年后,人均生态环境用水生态足迹明显上升,可能与南水北调工程投入使用后输水损失增大有关。研究区人均农业和工业用水生态足迹显著下降说明2个部门采取的节水措施取得了显著效果,农业和工业用水效率显著提高。由此可知,现状年份下研究区水资源生态与社会经济的关系处于不断改善状态,可能与研究区在产业结构调整、节水技术与措施的推进及水资源利用效率提升等方面的努力息息相关。

由图5可见,现状年份研究区人均水资源生态足迹呈缓慢下降趋势,由2000年的 $0.504 \text{ hm}^2/\text{人}$ 降为2018年的 $0.385 \text{ hm}^2/\text{人}$,下降 23.61% ,均值为

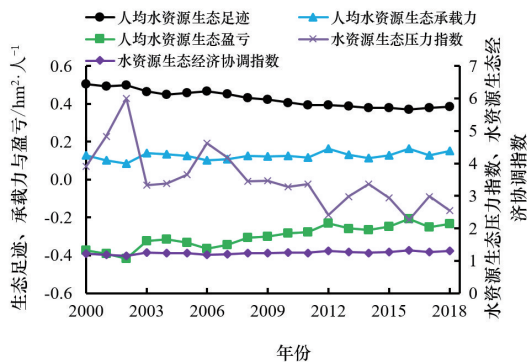


图5 2000—2018年研究区人均水资源生态足迹、生态承载力与生态盈亏以及水资源生态压力指数和水资源生态经济协调指数曲线

$0.427 \text{ hm}^2/\text{人}$,说明人均水资源生态足迹不断下降,这是实现可持续水资源利用的有效途径之一。研究区人均水资源承载力呈较大波动变化趋势,始终小于人均水资源生态足迹,均值为 $0.126 \text{ hm}^2/\text{人}$,最大/小值分别为 $0.164 \text{ hm}^2/\text{人}$ (2016年)和 $0.083 \text{ hm}^2/\text{人}$ (2002年),相差 97.59% ,这与人口、经济、生态、水文、气候条件等因素有关。相比而言,2016年是丰水年而2002年是枯水年,水资源生态承载力因此而波动。根据以上分析可知,现状年份研究区人均水资源生态盈亏一直是亏损状态,均值为 $-0.302 \text{ hm}^2/\text{人}$,最大/小人均水资源生态亏损分别为 $0.417 \text{ hm}^2/\text{人}$ (2002年)和 $0.207 \text{ hm}^2/\text{人}$ (2016年),可能的原因是2002年是枯水年而2016年是丰水年且南水北调工程已开始为研究区供水。由此可见,南水北调工程对研究区水资源生态亏损具有一定的缓解作用,但由于水资源生态亏损程度较高,南水北调工程起的作用有限。

现状年份研究区水资源生态压力指数呈波动缓慢下降趋势且大于1(图5),从2000年的3.909降至2018年的2.547,均值为3.522,最大/小值分别为6.008和2.262,说明水资源生态足迹大于生态承载力,水资源压力过大,处于不安全利用状态。研究区水资源生态经济协调指数处于平稳状态,均值为1.242,最大/小值分别为1.319和1.151。总体来看,现状年份研究区水资源生态经济协调性较好,但离最佳值1.414还有一定距离,需加以重视,提高研究区水资源生态经济协调性。

与其他地区相比(表2),研究区人均水资源生态足迹和生态承载力处于偏下水平,人均水资源生态盈亏处于较高亏损状态。研究区人均水资源生态足迹均值($0.427 \text{ hm}^2/\text{人}$)低于全国($0.720 \text{ hm}^2/\text{人}$)、长江流域($0.721 \text{ hm}^2/\text{人}$)、淮河流域($0.604 \text{ hm}^2/\text{人}$)、广东省($0.613 \text{ hm}^2/\text{人}$)、福建省($0.848 \text{ hm}^2/\text{人}$)、辽宁省($0.509 \text{ hm}^2/\text{人}$)、江西省($0.916 \text{ hm}^2/\text{人}$)、上海市($0.537 \text{ hm}^2/\text{人}$)和珠三角九市($0.546 \text{ hm}^2/\text{人}$),而高于陕西省($0.372 \text{ hm}^2/\text{人}$)和北京市($0.296 \text{ hm}^2/\text{人}$)。研究区人均水资源生态承载力仅高于北京市($0.081 \text{ hm}^2/\text{人}$)而远低于其它地区,水资源生态盈亏($-0.301 \text{ hm}^2/\text{人}$)则远高于其它地区。

表2 不同研究区域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盈亏的比较($\text{hm}^2/\text{人}$)

研究区域	计算周期	人均水资源生态足迹均值	人均水资源生态承载力均值	人均水资源生态盈亏量均值
广东省 ^[15]	2011—2020年	0.613	3.602	2.989
珠三角九市 ^[15]	2011—2020年	0.546	1.995	1.449
长江流域 ^[14]	2003—2019年	0.721	1.109	0.388
北京市 ^[16]	2010—2019年	0.296	0.081	-0.215
淮河流域 ^[10]	2001—2016年	0.604	0.519	-0.085
福建省 ^[17]	2010—2019年	0.848	7.235	6.388
辽宁省 ^[18]	2010—2019年	0.509	0.431	-0.078
江西省 ^[19]	2007—2011年	0.916	5.716	4.800
上海市 ^[3]	2013—2019年	0.537	0.290	-0.247
陕西省 ^[20]	2000—2017年	0.372	0.457	0.085
全国 ^[11]	2000—2020年	0.720	1.280	0.560
华北平原(本研究)	2000—2018年	0.427	0.126	-0.301

由此说明研究区水资源利用压力很大,水资源生态亏损较严重,需采取更有利措施才能缓解和消除这种现象。

2.2 水资源生态足迹预测

运行SD模型对研究区2019—2050年水资源利用进行模拟,进而对未来年份水资源生态足迹和生态承载力进行预测。从图6和图7可以看出,

2019—2050年4种情景下研究区人均农业、生活和生态环境用水生态足迹呈平稳状态,人均工业用水生态足迹呈快速增长趋势。人均农业用水生态足迹呈平稳下降趋势,其占水资源生态足迹比重最大且逐年下降,年下降量分别为0.001、0.0013、0.0008和0.001 $\text{hm}^2/\text{人}$;人均工业用水生态足迹呈上升趋势且情景NS2和NS4增速较快,其占水资源生态足

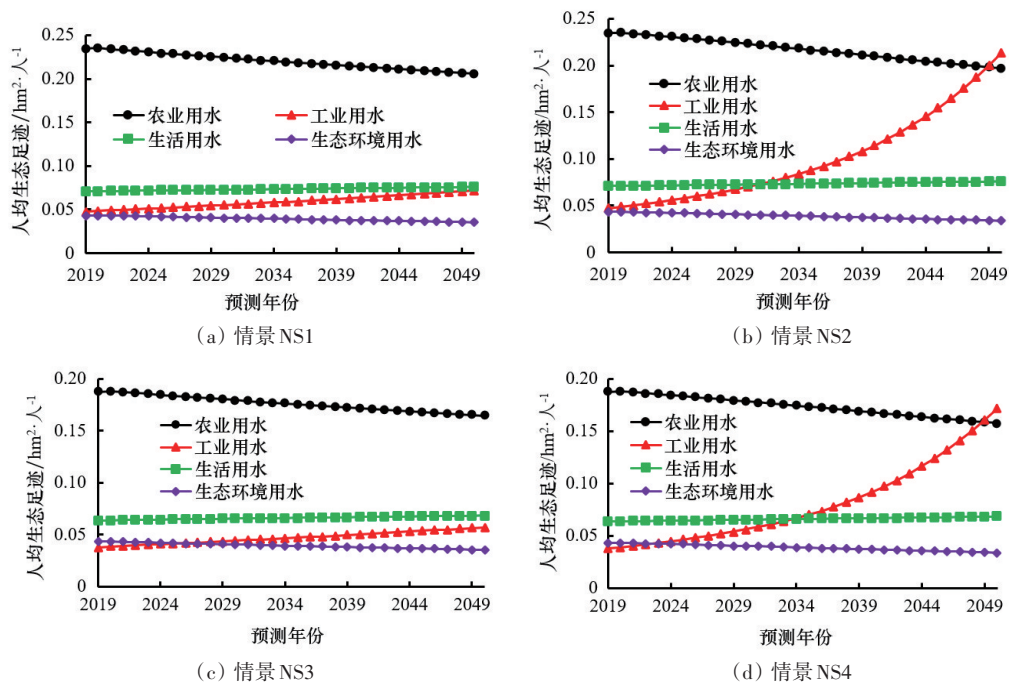


图6 2019—2050年不同情景下研究区人均农业、工业、生活和生态环境用水生态足迹曲线

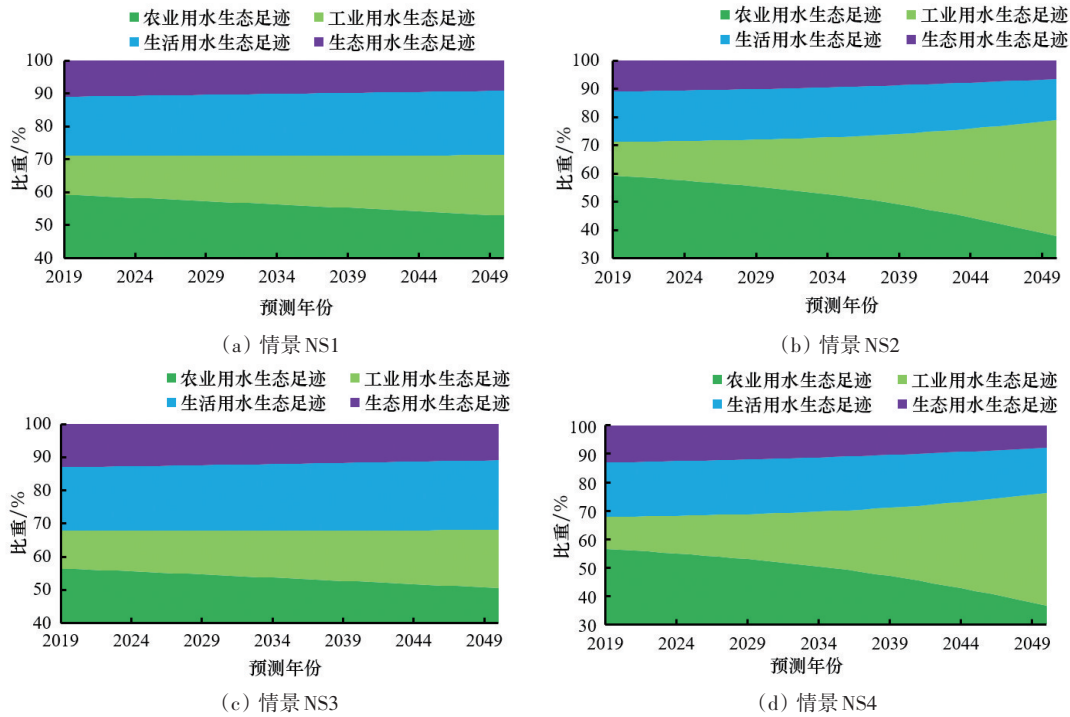


图7 2019—2050年不同情景下研究区水资源生态足迹组成

迹比重逐年增加,年上升量分别为0.0008、0.0049、0.0006和0.0039 $\text{hm}^2/\text{人}$;人均生活用水生态足迹及其占比呈缓慢上升趋势,年上升量分别为0.0002、0.0002、0.0001和0.0001 $\text{hm}^2/\text{人}$;人均生态环境用水生态足迹及其占比呈缓慢下降趋势,年下降量分别为0.0003、0.0003、0.0003和0.0003 $\text{hm}^2/\text{人}$ 。2019—2050年平均来看(表3),4种情景下人均水资源生态足迹分别为0.392、0.430、0.329和0.359 $\text{hm}^2/\text{人}$,

情景 NS2 最大,情景 NS1 和 NS4 次之,情景 NS3 最小,这与4种情景的侧重点不同有关。以上分析说明,在未来不同的水资源利用与经济发展情景下,农业用水效率提升和节水技术更新使农业用水生态足迹占比逐年下降,经济发展和人口增长使工业和生活用水生态足迹占比缓慢提高,而生态环境用水生态足迹在不同情景下变化缓慢。

表3 2019—2050年不同情景下研究区不同用水部门人均水资源生态足迹均值(单位: $\text{hm}^2/\text{人}$)

情景	农业用水	工业用水	生活用水	生态用水	总用水
NS1	0.220	0.059	0.073	0.039	0.392
NS2	0.217	0.101	0.073	0.039	0.430
NS3	0.176	0.047	0.066	0.039	0.329
NS4	0.174	0.081	0.066	0.039	0.359

不同情景有不同的发展侧重点,对水资源生态足迹和生态承载力有不同预测结果(图8)。从图8(a)可以看出,2019—2050年情景 NS2 和 NS4 的人均水资源生态足迹呈快速增长趋势,其中情景 NS2 的均值为 0.430 $\text{hm}^2/\text{人}$,由 2019 年的 0.396 $\text{hm}^2/\text{人}$

增至 2050 年的 0.521 $\text{hm}^2/\text{人}$,增长 31.51%;情景 NS4 的均值为 0.359 $\text{hm}^2/\text{人}$,由 2019 年的 0.332 $\text{hm}^2/\text{人}$ 增至 2050 年的 0.432 $\text{hm}^2/\text{人}$,增长 29.79%。情景 NS1 和 NS3 的人均水资源生态足迹呈平稳波动趋势,其中情景 NS1 的均值为 0.392 $\text{hm}^2/\text{人}$,由 2019

年的 $0.396 \text{ hm}^2/\text{人}$ 变为 2050 年的 $0.389 \text{ hm}^2/\text{人}$, 下降 1.85%; 情景 NS3 的均值为 $0.329 \text{ hm}^2/\text{人}$, 由 2019 年的 $0.332 \text{ hm}^2/\text{人}$ 变为 2050 年的 $0.326 \text{ hm}^2/\text{人}$, 下降 2.05%。4 种情景下人均水资源承载力呈平稳趋势(图 8(b)), 均值分别为 0.121 、 0.121 、 0.121 和 $0.120 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。2019—2050 年 4 种情景下研究区人均水资源生态盈亏均为亏损且呈下降趋势(图 8(c)), 均值分别为 -0.271 、 -0.309 、 -0.208 和 $-0.239 \text{ hm}^2/\text{人}$, 其中情景 NS2 和 NS4 下降速率最大, 分别从 2019 年的 -0.264 和 $-0.201 \text{ hm}^2/\text{人}$ 降为 2050 年的 -0.409 和 $-0.322 \text{ hm}^2/\text{人}$, 分别下降 55.13% 和 60.28%。由此可见, 由于水资源生态足迹大于生态承载力, 4 种情景下研究区都会承受较大的水资源生态亏损压力, 特别是强调经济情景, 其水资源生态亏损程度更严重, 需采取更严格措施进一步压减水资源生态足迹, 扭转水资源生态亏损的

局面。

2019—2050 年 4 种情景下研究区水资源生态压力指数均大于 1 且呈上升趋势, 水资源生态经济协调指数均呈下降趋势(图 8(d) 和 (e))。2019—2050 年 4 种情景下研究区平均水资源生态压力指数分别为 3.240、3.571、2.734 和 3.011, 情景 NS2 增长最快(从 2.995 增至 4.668), 情景 NS4(从 2.527 增至 3.939)和情景 NS1(从 2.995 增至 3.530)次之, 情景 NS3 最小(从 2.527 增至 2.981)。4 种情景下研究区在 2019—2050 年均会承受较大水资源生态压力, 水资源处于不安全利用状态, 排序为 $\text{NS2} > \text{NS4} > \text{NS1} > \text{NS3}$ 。2019—2050 年 4 种情景下研究区平均水资源生态经济协调指数分别为 1.251、1.235、1.283 和 1.266, 相差不大, 协调性较好, 但离最佳值 1.414 还有不少距离, 需进一步加强研究区水资源生态经济协调性。

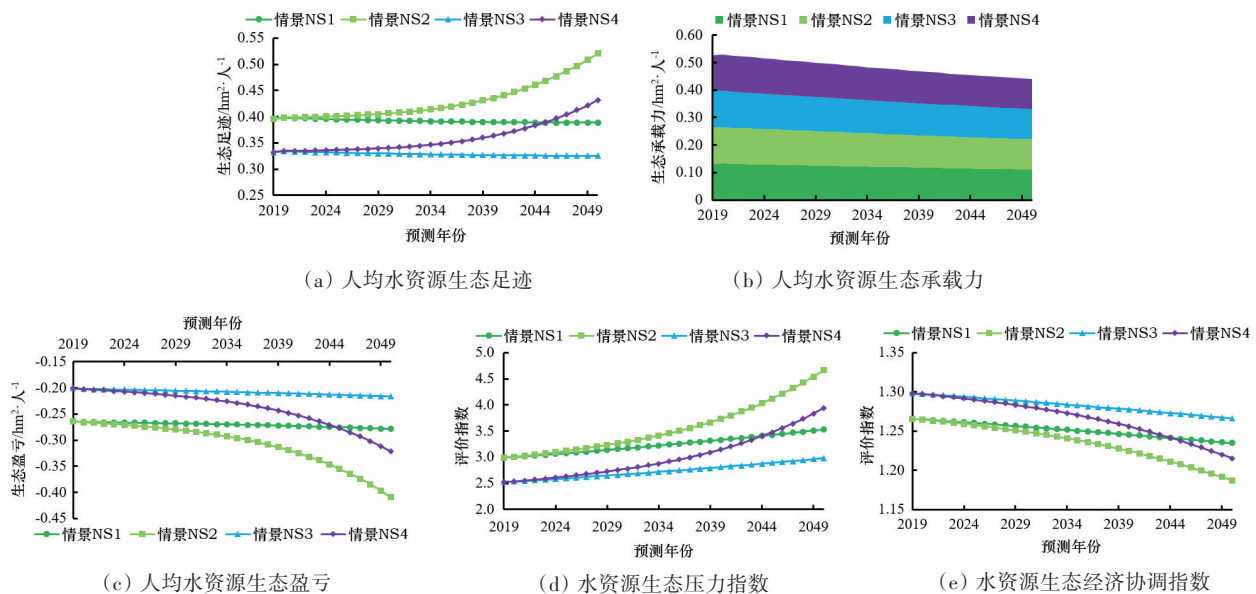


图 8 2019—2050 年不同情景下研究区人均水资源生态足迹、人均水资源生态承载力、人均水资源生态盈亏、水资源生态压力指数及水资源生态经济协调指数

2.3 情景比较与分析

表 4 是 4 种情景下研究区水资源可持续利用指标的对比。2019—2050 年平均来看, 如果研究区选择优先发展经济(情景 NS2), 那么人均水资源生态足迹 ($0.430 \text{ hm}^2/\text{人}$) 和水资源生态压力指数 (3.571) 是最大的, 而人均水资源生态盈亏 ($-0.309 \text{ hm}^2/\text{人}$) 和水资源生态经济协调指数 (1.235) 是最小

的。如果研究区将节水当作重点(情景 NS3), 那么人均水资源生态足迹 ($0.329 \text{ hm}^2/\text{人}$) 和水资源生态压力指数 (2.734) 最小而人均水资源生态盈亏 ($-0.208 \text{ hm}^2/\text{人}$) 最大。无论优先发展经济而不顾水资源保护, 还是着重保护水资源而牺牲经济发展, 对于水资源压力大且经济发达的研究区来说都是不可接受的。与其他情景相比, 情景 NS4 具有适

中的可持续水资源利用评价指标,人均水资源生态足迹(0.359 hm²/人)和水资源生态压力指数(3.011)仅比情景 NS3 高,人均水资源生态盈亏(-0.239 hm²/人)仅比情景 NS3 低。从表 4 及前面分析可看出,无论采用哪种情景,2019—2050 年研究区都会出现水资源生态亏损,水资源生态压力指

数均大于 1,即水资源压力和不安全利用状态将持续。与现状相比,情景 NS4 既能保证经济发展,也能降低水资源不安全利用程度,是研究区未来应采用的情景。研究区在未来水资源利用过程中,需加大节水措施和技术的应用,提高各部门的用水效率,多管齐下,才能保证水资源的可持续利用。

表 4 2019—2050 年 4 种情景下研究区可持续水资源利用情况对比

项目	情景			
	趋势保持情景 NS1	经济发展情景 NS2	经济发展情景 NS3	经济发展情景 NS4
人均水资源生态足迹均值(hm ² /人)	0.392	0.430	0.329	0.359
人均水资源生态盈亏均值(hm ² /人)	-0.271	-0.309	-0.208	-0.239
平均水资源生态压力指数	3.240	3.571	2.734	3.011
平均水资源生态经济协调指数	1.251	1.235	1.283	1.266
水资源生态亏损年数	32	32	32	32
水资源生态压力指数>1 年数	32	32	32	32

3 结论

1) 2000—2018 年,华北平原人均水资源生态足迹呈缓慢下降趋势,人均水资源生态承载力呈波动变化趋势,存在 0.302 hm²/人的水资源生态亏损,南水北调工程对于华北平原水资源生态亏损具有一定程度的缓解作用。同时,华北平原水资源压力过大,处于不安全利用状态,而水资源生态经济协调性离最佳值尚有距离,需加以重视,提高水资源生态经济协调性。

2) 2019—2050 年,4 种情景下华北平原人均农业、生活和生态环境用水生态足迹均呈现较平稳的状态而人均工业用水生态足迹则呈现较快速的增长趋势;4 种情景下人均水资源生态亏损分别为 0.271、0.309、0.208 和 0.239 hm²/人;华北平原未来情景下水资源利用压力较大,处于不安全状态。

3) 2019—2050 年水资源压力和不安全利用状态将持续,情景 NS4 既可以保证经济发展,也能够降低水资源不安全利用程度,是华北平原未来应考虑的情景。在未来水资源利用过程中,需加大各种节水措施和技术的应用,提高各部门用水效率,多管齐下,才能最终保证可持续水资源利用的实现。

参考文献(References)

- [1] 杨晓霖,潘玉君,李晓莉.西南地区水资源生态足迹及承载力动态特征与预测分析[J].西南师范大学学报(自然科学版),2022,47(6):58-67.
- [2] 李菲,张小平.甘肃省水资源生态足迹和生态承载力时空特征[J].干旱区地理,2020,43(6):1486-1495.
- [3] 周飞,邱卫国.2013—2019 年上海市水资源可持续利用程度评价[J].人民黄河,2022,44(增刊 1):51-53.
- [4] 张羽,左其亭,曹宏斌,等.沁河流域水资源生态足迹时空变化特征及均衡性分析[J].水资源与水工程学报,2022,33(3):50-57.
- [5] 徐智超,温璐,张雪峰,等.基于生态足迹的阿拉善地区生态安全评价[J].生态科学,2022,41(5):90-97.
- [6] Ester V. Books: Our ecological footprint: Reducing human impact on the earth[J]. Journal of Industrial Ecology, 1999, 3(2/3): 185-187.
- [7] 欧阳兴涛,廖浩宇,姜秋香,等.基于改进水资源生态足迹模型的中国水资源可持续利用仿真及调控[J].环境科学,2023,44(3):1368-1377.
- [8] 刘文铮.区域水资源生态承载力耦合模型研究[J].海河水利,2022(3):98-101.
- [9] 方国华,罗乾,黄显峰,等.基于生态足迹模型的区域水资源生态承载力研究[J].水电能源科学,2011,29(10):12-14.
- [10] 安慧,范历娟,吴海林,等.基于 BP 神经网络的淮河流

- 域水生态足迹分析与预测[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(5): 1076-1087.
- [11] 马晓蕾, 郭婷文. 中国水生态足迹与承载能力时空演化研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(6): 81-87.
- [12] 夏军, 刁艺璇, 余敦先, 等. 鄱阳湖流域水资源生态安全状况及承载力分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 1-8, 24.
- [13] 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.
- [14] 邵骏, 卢满生, 杜涛, 等. 长江流域水资源生态足迹及其驱动因素[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(12): 19-24, 32.
- [15] 张义敏, 张晓琳, 陈畅. 基于水资源生态足迹模型的广东省及珠三角九市水资源可持续利用研究[J]. 人民珠江, 2022, 43(4): 31-40.
- [16] 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.
- [17] 岳晨, 钱永, 崔向向, 等. 福建省2010—2019年水资源生态足迹与生态承载力[J]. 水土保持通报, 2022, 41(6): 282-287.
- [18] 朱正如, 湛雅琪, 曹永强, 等. 辽宁省水资源生态足迹时空特征及其影响因素分析[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(11): 29-34.
- [19] 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.
- [20] 张淑兰, 张海军, 张盩傲, 等. 陕西省水资源生态足迹及其可持续利用分析[J]. 人民长江, 2021, 52(4): 130-136.
- [21] 张凯, 吴风平, 成长春. 三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析[J]. 环境科学, 2021, 42(12): 5757-5767.
- [22] Qin H H, Sun A, Liu J, et al. System dynamics analysis of water supply and demand in the North China Plain[J]. Water Policy, 2012, 14(2): 214-231.
- [23] 秦欢欢, 黄碧贤, 吴昊, 等. 基于SD模型和情景分析法的华北平原需水量预测[J]. 节水灌溉, 2022(2): 59-65.
- [24] 秦欢欢, 孙占学, 高柏, 等. 气候变化影响下华北平原地下水可持续利用研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(1): 106-114.
- [25] 石建省, 李国敏, 梁杏, 等. 华北平原地下水演变机制与调控[J]. 地球学报, 2014, 35(5): 527-534.
- [26] 余慧. 京津冀水资源生态足迹与生态承载力研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2019(26): 57.
- [27] 卢艳, 于鲁冀, 王燕鹏, 等. 河南省水资源生态足迹和生态承载力分析[J]. 中国农学通报, 2011, 27(1): 182-186.
- [28] 郭荣中, 申海建, 杨敏华. 基于灰色模型的长沙市生态足迹与生态承载力预测分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(4): 195-200.
- [29] 张振龙, 孙慧, 苏洋. 新疆干旱区水资源生态足迹与承载力的动态特征与预测[J]. 环境科学研究, 2017, 30(12): 1880-1888.
- [30] 郭晓娜, 苏维词, 杨振华, 等. 城乡统筹背景下重庆市水生态足迹分析及预测[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(2): 69-75.
- [31] 李晶晶, 李俊, 黄晓荣, 等. 系统动力学模型在青白江区需水预测中的应用[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(4): 200-205.
- [32] Cao G L, Zheng C M, Scanlon B R, et al. Use of flow modeling to assess sustainability of groundwater resources in the North China Plain[J]. Water Resources Research, 2013, 49(1): 159-175.
- [33] 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(3): 398-405.
- [34] 孙才志, 张智雄. 中国水生态足迹广度、深度评价及空间格局[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7048-7060.
- [35] Niccolucci V, Galli A, Reed A, et al. Towards a 3D national ecological footprint geography[J]. Ecological Modelling, 2011, 222(16): 2939-2944.
- [36] 高洁, 吴普特, 谢朋轩, 等. 灌区蓝绿水资源与作物生产水足迹多时空分布量化分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 105-112.
- [37] Yang Y, Cai Z X. Ecological security assessment of the Guanzhong Plain urban agglomeration based on an adapted ecological footprint model[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 260: 120973.

Evaluation and prediction of water resources ecological footprint and ecological carrying capacity in North China Plain

QIN Huanhuan^{1,2}

1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

2. School of Water Resources and Environmental Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

Abstract According to the water resources ecological footprint model and system dynamics method, four different scenarios are designed to evaluate and predict the water resources ecological footprint and ecological carrying capacity of the North China Plain (NCP) in the current years (2000—2018) and future years (2019—2050) based on the construction of water resources utilization SD (system dynamics) model of the NCP. The results show the followings: 1) for the current years, the average values of per capita water resources ecological footprint, ecological carrying capacity and ecological profit and loss are 0.427, 0.126 and -0.302 hm²/capita, respectively, and the average values of water resources ecological pressure index and ecological economic coordination index are 3.522 and 1.242, respectively. The water resources in the NCP are under excessive pressure and in an unsafe utilization state. The South-to-North Water Transfer Project can alleviate water resources ecological loss in the NCP to a certain extent. 2) in the future, the average values of per capita water resources ecological footprint under the four scenarios will be 0.392, 0.430, 0.329 and 0.359 hm²/capita, respectively, and the average values of per capita water resources ecological carrying capacity will be 0.121, 0.121, 0.121 and 0.120 hm²/capita, respectively, resulting in per capita water resources ecological losses of 0.271, 0.309, 0.208 and 0.239 hm²/capita. The average values of water resources ecological pressure indexes and ecological economic coordination indexes under the four scenarios will be 3.240, 3.571, 2.734 and 3.011, and 1.251, 1.235, 1.283 and 1.266, respectively. The water resources utilization pressure in the NCP in the future will be large and in an unsafe state. 3) from 2019 to 2050, the pressure and the state of unsafe utilization of water resources will continue in the NCP. Scenario NS4 can not only ensure economic development but also reduce the degree of water resources unsafe utilization, which is a development scenario that should be considered in the NCP in the future. However, it is necessary to promote applications of various water saving measures and technologies and improve water efficiency of various departments. Only in this way can the sustainable utilization of water resources be realized.

Keywords water resources ecological footprint; water resources ecological carrying capacity; sustainable water resources utilization; system dynamics; North China Plain ●



(责任编辑 祝叶华)