

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221019

# 南水北调东线一期工程沿线代表城市水生态足迹研究

杨荣雪<sup>1</sup>, 曾 萌<sup>1</sup>, 王红瑞<sup>1</sup>, 郝鹏鑫<sup>1</sup>, 高媛媛<sup>2</sup>, 刘英学<sup>3</sup>

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 水利部南水北调规划设计管理局, 北京 100038;  
3. 河北省邢台水文勘测局, 河北 邢台 054000)

**摘要:** 基于水生态足迹和承载力模型, 分析了南水北调东线一期工程沿线代表城市 2010~2020 年间水生态足迹和承载力的动态变化趋势, 并采用 SVR 模型预测了代表城市 2021~2025 年的水生态状况。结果表明, 山东段的人均水生态足迹总体呈上升趋势, 骆马湖以南段和胶东半岛段的人均水生态足迹处于较高水平; 骆马湖以北段和胶东半岛段人均水生态承载力总体呈上升趋势, 骆马湖以南和穿黄段则呈下降趋势, 其中骆马湖以南段处于较高水平; 沿线代表城市的水生态赤字或盈余状况皆于 2013 年开始好转, 说明工程的实施对生态环境改善具有正向作用; 在 2021~2025 年, 江苏段总体呈水生态足迹上升、水生态承载力下降的趋势, 随各行业用水量不断增加, 该区域可持续发展将面临极大的威胁; 山东段虽然水生态状况向好发展, 但仍将持续一段时间的水生态赤字状态, 水生态压力形势严峻。

**关键词:** 南水北调东线; 水生态足迹; 水生态承载力; 赤字/盈余; SVR

**中图分类号:** TV213.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)07-0040-05

## 1 概况

南水北调工程的实施, 在保障工程沿线城市生态安全中起到了至关重要的作用, 同时也推进了社会主义生态文明建设。自 2013、2014 年南水北调东、中线一期工程相继竣工以来, 沿线供、受水区地下水位得到提升, 有效缓解了地下水长期以来透支压力, 恢复了生态功能, 修复了环境地质问题。随着周边地区经济产业的迅猛发展, 水生态、水环境问题日趋严峻, 严重制约地区生态安全、制约地区发展<sup>[1-2]</sup>。目前, 随着南水北调东线工程的实施, 沿线城市生态环境问题逐渐得到了解决, 水质状况也得到了改善。为促进南水北调东线水资源开发利用与经济社会可持续发展相协调, 需对沿线水生态现状进行评价, 了解水生态现状的时空变化趋势<sup>[3]</sup>。生态足迹方法是了解一个地区生态环境改善状况领域应用较为广泛的方法。现有研究已围绕水生态足迹做了大量探索, 如范月华等<sup>[4]</sup>构建了基于市公顷的水生态足迹模型进行水生态足迹评价, 得到深圳市水资源均衡

因子逐步增加; 路瑞等<sup>[5]</sup>建立了区域水生态足迹模型并分析了黄河流域水资源生态足迹与经济发展协调性的时空特征; 谭秀娟等<sup>[6]</sup>运用 ARIMA(2, 1, 3) 模型预测了我国水资源生态足迹变动趋势; 安慧等<sup>[7]</sup>采用具有自学习能力的 BP 神经网络预测出淮河流域 2017~2025 年的水生态足迹和承载力。然而时间序列方法需对数据的平稳性进行检验, 神经网络模型一般不适用于小样本数据。支持向量回归机(SVR)则是一种适用于小样本数据集的方法, 且其泛化能力较好。为此, 本文基于水生态足迹模型, 分析了南水北调东线一期工程沿线代表城市 2010~2020 年间水生态足迹和承载力的动态变化趋势, 并采用 SVR 模型对代表城市 2021~2025 年的水生态状况进行预测, 以为政府部门制定水资源调度相关决策提供依据。

## 2 研究方法

### 2.1 水生态足迹模型

水生态足迹反映了水产品消费、淡水资源供

**收稿日期:** 2022-05-15, **修回日期:** 2022-09-05

**基金项目:** 济南财政水务专项(JNSWKJ202001); 国家自然科学基金项目(52279005)

**作者简介:** 杨荣雪(1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水资源系统分析, E-mail: yongxue@mail.bnu.edu.cn

**通讯作者:** 王红瑞(1963-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为水资源系统分析和环境规划与评价, E-mail: henrywang@bnu.edu.cn

给、污水稀释和净化等服务功能对水资源的占用和消耗<sup>[8]</sup>。由于水既可养殖水产品,又具有污染稀释的作用,为避免二者重复计算,选取最大值进行核算。其计算公式为:

$$E_{F_w} = Ne_{f_w} = E_{F_{f_w}} + \max(E_{F_{wp}}, E_{F_{ww}}) \quad (1)$$

$$\text{其中 } E_{F_{f_w}} = Ne_{f_{f_w}} = \phi'_w(T_{C_{f_w}}/A_{P_w}) \quad (2)$$

$$E_{F_{wp}} = Ne_{f_{wp}} = \phi_w(T_{C_{wp}}/A_{P_w}) \quad (3)$$

$$E_{F_{ww}} = Ne_{f_{ww}} = \phi'_w(T_{C_{ww}}/A_{P_w}) \quad (4)$$

$$T_{C_{ww}} = 8\ 600W/(31.536KC_S) \quad (5)$$

式中,  $E_{F_w}$  为水生态足迹;  $N$  为区域总人口;  $e_{f_w}$  为人均水生态足迹;  $E_{F_{f_w}}$  为淡水资源生态足迹;  $E_{F_{wp}}$  为水产品生态足迹;  $E_{F_{ww}}$  为水污染生态足迹;  $e_{f_{f_w}}$  为淡水资源人均生态足迹;  $\phi'_w$  为全球水资源均衡因子;  $T_{C_{f_w}}$  为水资源消耗量;  $A_{P_w}$  为全球水资源平均生产能力;  $e_{f_{wp}}$  为水产品消费人均生态足迹;  $\phi_w$  为全球水域均衡因子;  $T_{C_{wp}}$  为水产品消费总量;  $A_{P_{wp}}$  为全球水产品平均生产能力;  $e_{f_{ww}}$  为水污染人均生态足迹;  $T_{C_{ww}}$  为污染稀释净化需水量;  $W$  为污染物排放量;  $K$  为污染物综合降解系数;  $C_S$  为水质目标浓度。

南水北调东线水质目标须达到Ⅲ类水的标准,故 COD 和氨氮浓度标准分别取 20、1 mg/L, 污染物降解系数  $K$  取 0.25。

## 2.2 水生态承载力模型

水生态承载力的计算公式为:

$$E_{C_w} = Ne_{c_w} = \pi\phi'_w\gamma_w Q_w/A_{P_w} \quad (6)$$

式中,  $E_{C_w}$  为水生态承载力;  $e_{c_w}$  为人均水生态承载力;  $\pi$  为水资源合理开发利用率,一般取 0.4<sup>[9]</sup>;  $\gamma_w$  为水资源产量因子;  $Q_w$  为水资源总量。

## 2.3 水生态赤字/盈余

水生态赤字或盈余计算公式为:

$$E_{rd} = E_{F_w} - E_{C_w} \quad (7)$$

当  $E_{rd} < 0$  时,表明该地区的水生态承载力可支撑水生态负荷,水生态足迹为盈余状态;当  $E_{rd} > 0$  时,表明该地区的水生态负荷超出了水生态承载力,水生态足迹为赤字状态,区域可持续发展可能受到阻碍。

## 2.4 水生态足迹和水生态承载力预测模型——SVR 模型

考虑到所获取的数据时间序列较短,采用支持向量回归机(SVR)来使预测模型在较少的数据量下取得较好的性能。 $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$  决定了超平面的方向,训练样本为  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。只要确定  $\omega$  和  $b$ ,即可唯一地确定一个划分超平面。SVM 用于回归时需引入损失函数,定义

常量  $\epsilon > 0$ ,SVR 的损失函数度量则为:

$$e(x_i, y_i) = \begin{cases} 0 & |y_i - \omega\phi(x_i) - b| \leq \epsilon \\ |y_i - \omega\phi(x_i) + b| - \epsilon & |y_i - \omega\phi(x_i) - b| > \epsilon \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\omega$  为超平面方向,可理解为  $x_i$  对应的权重;  $b$  为超平面与原点间距离,为位移项。

SVR 目标函数的原始形式为:

$$\min_{\omega, b, \xi_i, \xi_i^*} \left[ \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^n e(x_i, y_i) \right] \quad (9)$$

式中,  $1/\|\omega\|$  为划分超平面与边际超平面上任意一点的距离;  $C$  为惩罚因子。

引入松弛变量  $\xi_i, \xi_i^*$ ,式(8)、(9)可转化为:

$$\min_{\omega, b, \xi_i, \xi_i^*} \left[ \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) \right] \quad (10)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} f(x_i) - y_i \leq \epsilon + \xi_i \\ y_i - f(x_i) \leq \epsilon + \xi_i^* \\ \xi_i \geq 0, \xi_i^* \geq 0, i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $f(x_i)$  为真实值  $y_i$  对应的预测值。

通过 Lagrange 乘子  $\alpha_i, \alpha_i^*$  的引入,可得到最值问题的对偶问题,即:

$$\max_{\alpha_i, \alpha_i^*} \left\{ \sum_{i=1}^m [y_i(\alpha_i - \alpha_i^*) - \epsilon(\alpha_i + \alpha_i^*)] - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [(\alpha_i - \alpha_i^*)(\alpha_j - \alpha_j^*)K(x_i, x_j)] \right\} \quad (12)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{i=1}^m (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \\ 0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq C \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $K(x_i, x_j)$  为核函数。

## 2.5 基础数据与部分变量说明

为测度南水北调东线一期工程水生态足迹和水生态承载力的动态变化趋势,本文选择的样本期为 2010~2020 年。年底人口数、水产品消费量、COD 排放量、氨氮排放量数据来源于历年《中国统计年鉴》;水资源消耗量数据来源于历年《水资源公报》。参考谭秀娟等<sup>[6,10]</sup>的计算结果,全球水产品平均生产能力  $A_{P_{wp}}$  取 0.18 t/hm<sup>2</sup>,全球水资源平均生产能力  $A_{P_w}$  取 3.14 × 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>;水资源产量因子  $\gamma_w$  可通过计算  $\phi_w, \phi'_w$  的比值获得,根据世界自然基金会(WWF)2000 年地球生命力报告核算的均衡因子,全球水域均衡因子  $\phi_w$  取 0.35,参考黄林楠等<sup>[8]</sup>的计算结果,全球水资源均衡因子  $\phi'_w$  取 5.19。

模型流程图见图 1。

## 3 结果与分析

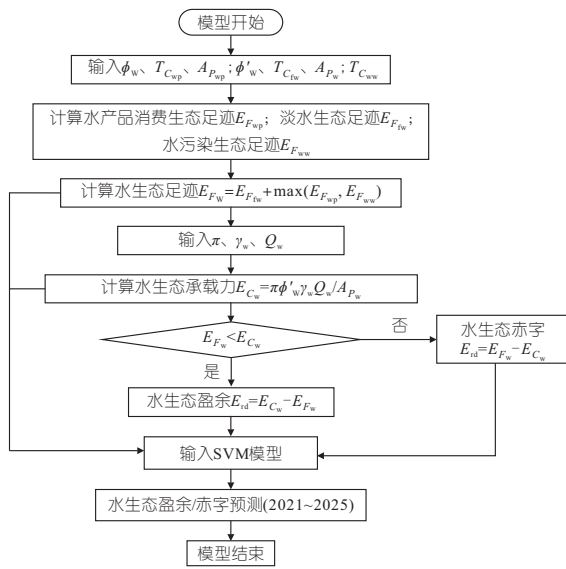


图 1 模型流程图

Fig. 1 Flow chart of the model

### 3.1 水生态足迹和水生态承载力分析

南水北调东线工程自南向北依次跨长江流域、淮河流域、黄河流域,最终进入海河流域。南水北调一期工程是在原江水电北调的基础上改扩建而成,将南水北调东线一期工程分段计算,江苏省骆马湖为界分为两段;山东省以输水路线为界分为两段。考虑到选取生态安全评估控制单元的代表性及数据获取的完整性,取 11 个地级市为研究区,即江苏段取骆马湖以南的淮安、扬州和骆马湖以北的徐州;山东段取穿黄干线的济宁、聊城、德州和胶东支线的济南、烟台、潍坊、青岛、威海。其水生态足迹和水生态承载力计算结果见图 2。

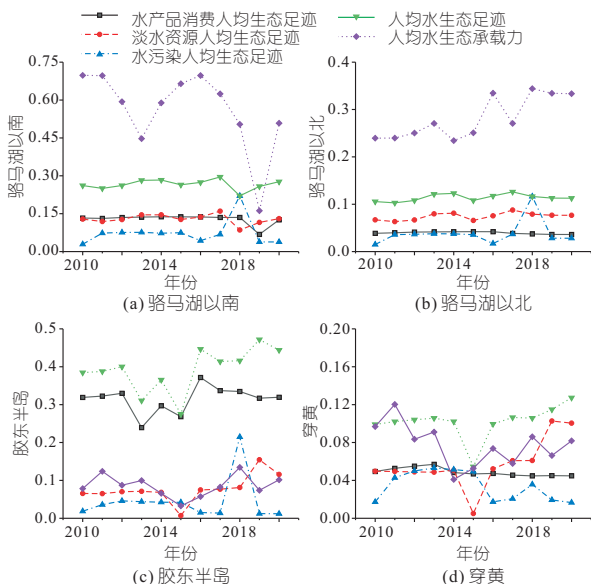


图 2 2010~2020 年区域水生态足迹和水生态承载力变化趋势(单位:  $10^4 \text{ hm}^2$ )

Fig. 2 Change trend of regional water ecological footprint and water ecological carrying capacity from 2010 to 2020

由图 2 可看出:①对于水产品消费人均生态足迹而言,四个地区历年来的变化总体上呈平稳态势,其中,胶东半岛段处于较高水平,最高达  $0.37 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。②对于淡水资源人均生态足迹而言,骆马湖以南和骆马湖以北段历年来变化趋于平稳,而胶东半岛和穿黄段的淡水资源人均生态足迹均在 2015 年大幅下降,在 2019 年大幅增长,其中骆马湖以南段的淡水资源人均生态足迹处于较高水平,其多年平均水平高达  $0.13 \text{ hm}^2/\text{人}$ ,表明该地区水资源消耗量较高。四个地区的水污染人均生态足迹在 2010~2020 年间变幅不大,值得注意的是,2018 年四个地区的水污染人均生态足迹均呈现出不同幅度的增长,这与该年东线干线的 COD 和氨氮排放量较多有很大关系,东线输水干线有大量的货船从长江通航至山东济宁市,产生大量含油废水和船员生活垃圾、污水,可见水质污染是影响东线水生态安全的一大隐患。③对于人均水生态足迹而言,山东段的波动较大,总体呈上升趋势,表明近年来山东段的水资源开发利用程度增大,江苏段的人均水生态足迹则趋于平稳,其中,骆马湖以南段和胶东半岛段的人均水生态足迹处于较高水平,胶东半岛段最高达  $0.47 \text{ hm}^2/\text{人}$ ,这与胶东半岛段的水产品消费量较高有很大关系,尤其是威海和青岛的水产品消费量占胶东支线 5 个代表城市的 82%;而骆马湖以北段和穿黄段的多年平均人均水生态足迹仅为  $0.1 \text{ hm}^2/\text{人}$ ,其主要原因是这些地区的水产品消费人均生态足迹和淡水资源人均生态足迹多年来一直处于较低水平。④对于人均水生态承载力而言,时空变化规律各有差异,骆马湖以北段和胶东半岛段人均水生态承载力总体呈逐年上升趋势,骆马湖以南和穿黄段总体上呈下降趋势,其中山东段多年平均人均水生态承载力为  $0.08 \text{ hm}^2/\text{人}$ ,江苏段尤其是骆马湖以南则处于较高水平,最高达  $0.70 \text{ hm}^2/\text{人}$ ,其主要原因是骆马湖以南段的水资源总量充沛,提高了水资源产量因子较高,反之山东段的水资源产量因子相对较低,多年平均水资源量更是低于江苏段,导致山东段水生态承载力多年来处于较低水平。

### 3.2 水生态赤字/盈余计算

水生态赤字或盈余计算结果见图 3。由图 3 可看出,在 2010~2020 年间,江苏段基本处于水生态盈余状态,其中骆马湖以南段年平均人均水生态盈余为  $0.30 \text{ hm}^2$ ,表明该区域水生态承载力足以支撑水生态负荷;而山东段则基本处于赤字状态,说明该区域水资源不能满足当地生产和生

骆马湖以南	-410	-420	-307	-153	-285	-374	-397	-310	-268	-322	-289
骆马湖以北	-115	-117	-122	-128	-96	-124	-189	-127	-201	-162	-176
穿黄	4	-36	40	29	122	4	52	98	40	27	15
胶东半岛	1053	913	1089	738	1054	857	1389	1190	1018	1463	1231
年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020

图 3 水生态赤字/盈余结果(单位:10<sup>4</sup>hm<sup>2</sup>)

Fig. 3 Water ecological deficit/surplus results

活的需要,其中,胶东半岛段水生态赤字状况最为严重,年平均人均水生态赤字为 0.31 hm<sup>2</sup>,且近年来居高不下,2019 年水生态赤字达到了最高水平 1 463×10<sup>4</sup>hm<sup>2</sup>,水资源长期被过度利用,导致区域发展多年来处于不可持续状态。综合南水北调东线四段水生态足迹盈余或赤字状态变化趋势来看,水生态赤字或盈余状况皆于 2013 年开始好转,说明自 2013 年南水北调东线一期工程通水以来,工程的实施对于生态环境改善起到了正向作用,尤其以苏北地区和东线穿黄地区表现较为明显。

### 3.3 水生态赤字/盈余趋势预测

基于 SVR 模型预测 2021~2025 年的水生态足迹和水生态承载力,采用三折交叉验证的方法对样本集进行训练和验证,核函数取 RBF(径向基)函数  $K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2)$ ,其中 RBF 函数的参数  $\gamma$  和 SVM 模型的惩罚参数  $c$  取值范围分别为  $c \in [2^0, 2^{16}]$ ,  $\gamma \in [2^{-16}, 2^0]$ ,得到的预测结果见表 1。由表 1 可看出,在 2021~

表 1 各地区水生态赤字/盈余趋势预测表

Tab. 1 Forecast of water ecological deficit/surplus trend

年份	骆马湖以南			骆马湖以北			穿黄			胶东半岛		
	$E_{F_w}$	$E_{C_w}$	$E_{rd}$	$E_{F_w}$	$E_{C_w}$	$E_{rd}$	$E_{F_w}$	$E_{C_w}$	$E_{rd}$	$E_{F_w}$	$E_{C_w}$	$E_{rd}$
2021	233	567	-334	101	266	-165	186	155	31	1 671	321	1 350
2022	250	540	-290	102	258	-157	192	150	42	1 629	313	1 316
2023	241	541	-299	100	251	-150	192	160	32	1 577	325	1 252
2024	250	554	-304	100	245	-145	192	152	40	1 530	317	1 213
2025	250	547	-298	99	241	-142	192	155	37	1 495	319	1 176

2025 年,江苏段水生态承载力呈现下降趋势,表明随区域经济的快速发展,东线工程江苏段需承担消纳的废物和供水任务越来越重,其中骆马湖以南段的水生态足迹呈逐年上升的趋势,若按目前的经济社会发展趋势,各行业用水量持续增加,该区域的可持续发展将面临极大的威胁;总体上看江苏段的水生态未来仍处于盈余状态,表明水资源开发利用总体处于可持续状态,水生态与经济发展协调性较好。山东段的水生态长期处于赤字状态,且未来仍将处于赤字状态,穿黄段的水生态足迹和水生态承载力趋于稳定,胶东半岛段水

生态足迹呈下降趋势,水生态赤字状况也将逐年向好发展,但其水生态仍将在一段时间内处于严重的赤字状态,因此山东段应严格控制水资源取用水量,避免水资源被过度开发,导致水生态环境恶化。 $R^2$  为本文引用的优化算法 SRS 中的决定系数,也称拟合优度,见表 2。由表 2 可看出,各地区  $R^2$  大部分达到 0.4 以上,说明拟合效果较理想。

表 2 决定系数  $R^2$

Tab. 2 Coefficient of determination  $R^2$

项目	扬州	淮安	徐州	济宁	聊城	德州	威海	青岛	潍坊	烟台	济南
$E_{F_w}$	0.296	0.446	0.542	0.376	0.413	0.425	0.533	0.217	0.461	0.516	0.472
$E_{C_w}$	0.529	0.432	0.498	0.341	0.519	0.437	0.574	0.425	0.389	0.397	0.414

## 4 结论

a. 山东段的人均水生态足迹波动较大,总体呈上升趋势,江苏段的人均水生态足迹趋于平稳,其中,骆马湖以南段和胶东半岛段的人均水生态足迹处于较高水平;骆马湖以北段和胶东半岛段人均水生态承载力总体呈逐年上升趋势,骆马湖以南和穿黄段总体呈下降趋势,其中江苏段尤其是苏南段处于较高水平。

b. 沿线代表城市的水生态赤字或盈余状况皆于 2013 年开始好转,说明自 2013 年南水北调东线一期工程通水以来,工程的实施对生态环境改善具有正向作用,尤其以苏北地区和穿黄地区表现较为明显。

c. 在 2021~2025 年,江苏段总体呈现水生态足迹上升、水生态承载力下降态势,表明东线工程江苏段需承担消纳的废物和供水任务越来越重,应加强水生态安全风险防范,改善水资源的可持续利用状况;山东段水生态状况向好发展,但仍将持续一段时间的水生态赤字状态,水资源、水环境将面临严峻形势。

### 参考文献:

- [1] 郭鹏, 吴培任, 任静, 等. 南水北调东线主要污染物入河量历年变化分析[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(6):62-66.
- [2] 郭鹏, 任静. 基于 TMDL 模式的南水北调东线一期工程治污成效分析[J]. 水资源保护, 2014, 30(1): 1-7.
- [3] 王红瑞, 李一阳, 杨亚锋, 等. 水资源集约安全利用评估模型构建及应用[J]. 水资源保护, 2022, 38(1):18-25.
- [4] 范月华, 陈涟, 唐文雯, 等. 基于改进水生态足迹模型的深圳市水资源可持续利用分析[J]. 水电能源科学, 2021, 39(4):36-39.
- [5] 路瑞, 赵琛鑫. 基于水资源生态足迹的黄河流域水资源利用评价[J]. 人民黄河, 2020, 42(11):48-52.

