

基于水资源空间均衡的“四水四定”调控模型构建

魏豪杉^{1,2}, 王红瑞¹, 郝鹏鑫¹, 周利超³, 李永坤⁴, 刘昌明^{1,2}

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 3. 临沂市自然资源和规划局, 山东 临沂 276001; 4. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048)

摘要:为实现未来不同时间尺度下的水资源空间均衡与动态调控, 创建了一套完整严谨、可动态调控的“四水四定”模型体系。通过模糊信息粒化窗口的支持向量机模型预测区域未来总用水量, 利用基于时间序列相似性分析的自回归-支持向量机模型预测区域未来分用水量, 并对两类数据进行不确定性分析; 构建了复杂回归函数对各类用水指标进行情景预测, 经统计检验后将其作为当前用水模式下未来用水指标; 构建了“四水四定”水资源承载力模型和水资源空间均衡模型, 基于未来总用水量、未来各分用水量、未来用水指标, 选用水资源负载系数、用水效益和水土资源匹配系数3个指标, 结合基尼系数量化水资源空间均衡度, 分析当前用水模式下未来水资源均衡度; 构建了最优化模型, 以最小化基尼系数为目标函数调整未来用水模式, 实现水资源动态调控。所创建的模型体系可以实现未来不同时间尺度下的水资源空间均衡与动态调控。

关键词:“四水四定”; 水资源空间均衡; 水资源动态调控; 时间序列相似性; 支持向量机模型; 模糊信息粒化窗口

中图分类号: F205; TU981

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2024)03-0071-07

Construction of “defining city, land, population, and industry based on water” regulation and control model based on spatial equilibrium of water resources//WEI Haoshan^{1,2}, WANG Hongrui¹, JIA Pengxin¹, ZHOU Lichao³, LI Yongkun⁴, LIU Changming^{1,2}(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Linyi Natural Resources and Planning Bureau, Linyi 276001, China; 4. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China)

Abstract: In order to realize the spatial equilibrium and dynamic regulation of water resources at different time scales in the future, a complete and rigorous model system for “defining city, land, population, and industry based on water”, suitable for balance measurement and dynamic control of water resources in different provinces and cities, was created. The total regional water consumption was predicted by the support vector machine (SVM) model based on fuzzy information granulation window, the regional sub-water consumption was predicted by the autoregressive-SVM model based on time series similarity analysis, and uncertainty of the two types of data was analyzed. Complex regression functions were constructed to predict various water use indicators in different scenarios, which were used as future water use indicators under current water use pattern after statistical test. Then, a water resources carrying capacity model of “defining city, land, population, and industry based on water” and a water resources spatial equilibrium model were constructed, and three indicators including the water resources loading coefficient, water consumption efficiency, and matching factor of water and soil resources were selected based on the future total water consumption, future sub-water consumption, and future water use indicators, to quantify the spatial equilibrium degree of water resources in combination with the Gini coefficient and analyze the future equilibrium degree of water resources under current water use pattern. Finally, an optimization model was constructed, with minimization of the Gini coefficient as the objective function, to adjust the future water use pattern and realize dynamic regulation of water resources. The model system can realize the spatial equilibrium and dynamic regulation of water resources at different time scales in the future.

Key words: “defining city, land, population, and industry based on water”; spatial equilibrium of water resources; dynamic regulation and control of water resources; time series similarity; support vector machine model; fuzzy information granulation window

基金项目: 国家自然科学基金项目(52279005); 国家发展和改革委员会“四水四定”政策研究项目(23-10-13)

作者简介: 魏豪杉(1997—), 男, 博士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: weih1997@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 王红瑞(1963—), 男, 教授, 博士, 主要从事水资源系统分析和环境规划与评价研究。E-mail: henrywang@bnu.edu.cn

“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产” (“四水四定”)是多年来水资源承载力研究成果的集中体现与结晶,是贯彻习近平总书记“十六字”治水思路的具体举措。水是“四水四定”的主体,如何定量化开展地区“四水四定”研究,根据地区可开发水资源总量合理规划人口数量和城市发展规模等^[1],尽可能规避水资源短缺带来的风险^[2],提高水资源利用效率^[3,4],精准落实水资源刚性制约制度,是当前地区高质量发展的迫切需求^[5]。

目前“四水四定”研究还处于初步探索阶段,认知、原则和理论分析居多^[6]。例如:王浩等^[7]探讨了“四水四定”的基本认知和关键技术体系;杨舒媛等^[8]以水资源承载力为底线,分析北京市“四水四定”的思路和指标,提出了人口、用地、产业的发展目标和布局;谷树忠^[9]归纳了“四水四定”的主要进展和症结问题,提出了强化落实、协同推进“四水四定”策略;宋志等^[10]提出了全国31个省(自治区、直辖市)水资源承载力评价的主控指标计算规则,建立了水资源承载力评价体系。已有研究基本在区域尺度上对概念做解释和延伸,结论则随着区域的不同发生变化,缺乏实用性和普适性。目前研究中,大多只针对“四水四定”中的“以水定城”^[11-12]、“以水定地”^[13-14]、“以水定人”^[15]、“以水定产”^[16-17]分别相对割裂地开展研究,忽略了“四水四定”概念的整体性和综合性,也割裂了其与水资源空间均衡的紧密关系。同样在“四水四定”的空间均衡调控中,由于缺乏有效的未来用水量预测,导致“四水四定”的空间均衡调控可信度不高,成效也不显著,大部分预测方法只能基于模型的基础数据进行自身验证,缺乏基于预测数据进行合理性或一致性验证,随着时间变量增加,预测结果有效性和可信性会降低。

针对以上问题,本文提出了基于水资源空间均衡的“四水四定”调控模型的构建方法,旨在以当前研究区的用水模式为基准,预测未来一定时段内的用水量和各类用水指标,以探究该时段内水资源利用的发展模式与空间均衡性。通过对水资源量的宏观调控,构建最优化模型,探究如何以最小代价在一定时期内提高水资源空间均衡度以及动态调控下短期均衡性与长期均衡性的差异性和一致性,基于水资源空间均衡量化水资源利用效率与城市发展下的水资源分配情况,通过区域用水动态调控,提升水资源利用效率。

1 “四水四定”调控模型构建思路

“四水四定”调控模型由三部分组成,如图1所示。第一部分通过统计模型对当前用水模式下的未

来用水量 and 用水指标进行预测,提出了一种考虑地区总用水量时间序列过程和长时序分行业用水量空间变化情景的预测模型,能够有效解决数据量较少、使用效果不佳的问题,得到未来用水量预测的不确定区间,并利用复杂函数的趋势回归模型预测未来用水指标值。第二部分基于获得的计算结果以及人口规模、GDP 规模、工业规模、人均建设用地规模和农田耕地灌溉规模等,构建水资源承载力模型,选用水资源负载系数、用水效益和水土资源匹配系数3个指标,评估水资源空间均衡度。第三部分通过对不同行业、不同区域水资源动态调控,实现未来不同时间尺度下的水资源空间均衡。

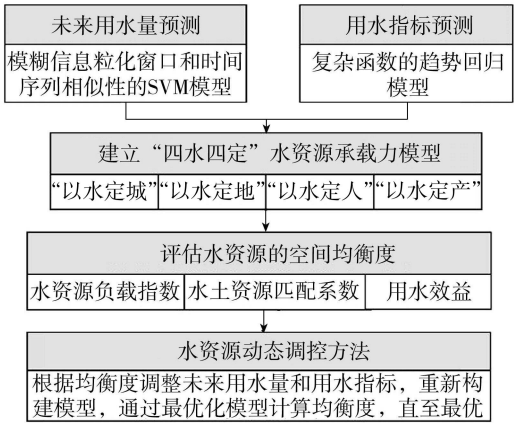


图1 “四水四定”调控模型构建思路流程

Fig.1 Schematic diagram for construction of “defining city, land, population and industry based on water” regulation and control model

2 未来用水量与用水指标预测模型

2.1 未来用水量预测方法与不确定性分析

通过地区历年《水资源公报》收集到总用水量和各行业的历史分用水量,如居民生活用水、城镇公共用水、农田灌溉用水、工业用水、生态用水、林牧渔畜用水等,实现当前用水模式下对未来用水量的预测。具体过程为:①采用模糊信息粒化方法处理总用水量,给出总用水量的模糊信息粒化窗口,采用支持向量机(support vector machine, SVM)模型预测未来若干年的总用水量区间;②利用基于时间序列的自回归-支持向量机(autoregressive-support vector machine, AR-SVM)模型对未来分用水量进行预测,采用时间序列扩充方法,对于该地区不同子区域的某一分用水量,通过基于密度的聚类算法(density-based spatial clustering of application with noise, DBSCAN),对数据进行相似性划分,扩充为连续性序列;③采用 AR-SVM 模型对扩充的分用水量进行预测;④对预测结果进行不确定性度量。

2.1.1 模糊信息粒化方法

模糊信息粒化方法基于信息粒概念,属于信息处理的一个新分支,该方法将信息数据模糊化后,通过隶属函数给出最佳上、下界^[18]。本文选用三角模糊粒化的隶属函数进行信息粒化处理^[19-20],隶属函数为

$$B(x; a, m, b) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a} & a < x \leq m \\ \frac{b-x}{b-m} & m < x < b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为模糊集均值; a 、 b 分别为模糊集的上、下界,用于描述隶属于 $B(x; a, m, b)$ 的非0元素的范围。简单来说,将三角隶属函数 $B(x; a, m, b)$ 作为约束, x 落在 m 附近准确度高,落 a 、 b 端点附近准确度逐渐降低。

将模糊信息粒化方法中的连续时间序列窗口选取改进为滑动时间序列窗口选取,每3个连续时间段作为一个窗口,以确保SVM模型更好的预测效果。若原时序长度为 N ,则窗口总数为 $N-2$ 。将时序依次连续划分为训练集和预测集(设置的预测集和实际数据有2a重叠,可以用于数据验证),设训练集和预测集时序长度分别为 N_1 和 N_2 ,训练集窗口数为 N_1-2 。

训练集窗口与预测集窗口集合(包括2个训练集窗口和所有预测数据构成的窗口)分别为

$$W_{u\Gamma} = \{v_{u\Gamma, (N_0+1)}, v_{u\Gamma, (N_0+2)}, \dots, v_{u\Gamma, (N_0+N_1-2)}\} \quad (2)$$

$$W_{k\Gamma} = \{v_{k\Gamma, (N_0+N_1-1)}, v_{k\Gamma, (N_0+N_1)}, \dots, v_{k\Gamma, (N_0+N_1+N_2+1)}\} \quad (3)$$

式中: Γ 为指标集,分别取 u 、 r 、 l 时,对应的 $W_{u\Gamma}$ 、 $W_{r\Gamma}$ 、 $W_{l\Gamma}$ 分别为训练集窗口的上界、均值和下界的集合,对应的 W_{ku} 、 W_{kr} 、 W_{kl} 分别为预测集窗口的上界、均值和下界的集合; $v_{u\Gamma, i}$ 为训练集第 i 个窗口的取值, $i=N_0+1, N_0+2, \dots, N_0+N_1-2$; $v_{k\Gamma, j}$ 为预测集第 j 个窗口的取值, $j=N_0+N_1-1, N_0+N_1, \dots, N_0+N_1+N_2+1$; N_0 为起始年份。

以2008—2020年的历史数据与2021—2030年的预测数据为例,图2给出了模糊信息粒化窗口示意图(训练集窗口为11个,预测集窗口为9个)。

2.1.2 时间序列相似性度量

DBSCAN是基于密度的聚类算法,根据样本分布的紧密程度,用邻域 ε 内设置的包含最小核心点数圆的半径划分聚类类型^[21]。本文采用退化的DBSCAN对不同子区域的分用水量进行一维时间序列相似性度量。将数据从大到小排列,基于欧氏距

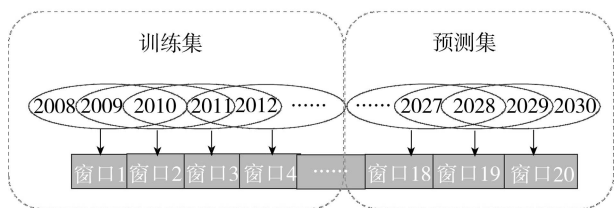


图2 模糊信息粒化窗口示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fuzzy information granulation window

离,给定邻域半径 δ_ε ,将邻域内相互包含核心点的数据集分为一类,在一定范围内类别越少,每一类的数据量越大,带入AR-SVM模型中训练的结果越好。时间序列相似性度量的基本思路为:对于各子区域的数据样本集,给定一个 δ_ε ,即可确定样本集的分类 C_{δ_ε} ,若邻域半径 $\delta_{\varepsilon_1} < \delta_{\varepsilon_2}$, $C_{\delta_{\varepsilon_1}}$ 则为 $C_{\delta_{\varepsilon_2}}$ 的细分,因此可通过调节 δ_ε 确定样本集的分类细化程度。 δ_ε 越大,数据类别越少,则每一类数据量越大; δ_ε 越小,数据类别越多,则每一类数据量越小。

通过时间序列相似性度量能够挑选出每个分用水量的相似区域,将相似区域的数据进行“S”形排列(先读取同一时间的所有相似时间序列,如依次读入 A_1 、 A_2 、 A_3 序列在2008年的数据,再反向读入下一年的相似数据,即 A_3 、 A_2 、 A_1 序列在2009年的数据,直到所有年份都读取完毕),输入AR-SVM模型中,可以较好地满足AR-SVM对于输入数据量的要求。根据模型精度的要求,适当调节 δ_ε 的大小, δ_ε 越大,模型训练数据精度越高。值得注意的是,数据类别太少,预测结果会趋同化;反之数据类别太多,预测结果准确性会受到影响。

2.1.3 未来用水量预测模型

AR-SVM模型是基于自回归(autoregressive model, AR)的SVM模型,AR模型是常用于时间序列分析的自回归移动平均模型(autoregressive integrated moving average model, ARIMA)^[22]的一种,本文采用一阶差分对时间序列进行处理^[23-24],表达式^[25-26]为

$$y_t = \varphi_0 + \varphi_1 y_{t-1} + \dots + \varphi_p y_{t-p} + \varepsilon_t \quad (4)$$

式中: y_t 为第 t 年平稳时间序列; p 为AR模型的阶数,本文采用贝叶斯信息准则确定^[24]; φ_j ($j=0, 1, 2, \dots, p$)为回归系数, $\varphi_j \neq 0$; ε_t 为白噪声误差项。

SVM^[27]是随着人工智能发展和广泛应用而流行起来的一种机器学习模型,是机器学习中一种基于最优边界的分类技术,主要用于分类和回归分析,具有样本数量少、非线性、高维度等特点^[28-29]。本文选取径向基函数作为SVM核函数进行计算。设 $M(\cdot)$ 为SVM模型映射,对于阶数为 p 的AR模

型,采用式(5)对数据进行预测:

$$\tilde{y}_t = M(y_{t-1}, y_{t-2}, \dots, y_{t-p}) \quad (5)$$

式中 $\tilde{y}_t$ 为时间序列的预测值。

2.1.4 预测结果的一致性分析与校正

由于预测结果的准确度会随着时间下降,为检验预测结果的合理性,本文引入随机波动范围对预测结果的不确定性进行度量,随着时间增加,预测结果的波动范围为

$$\begin{pmatrix} \tilde{L} \\ \tilde{U} \end{pmatrix} = \begin{cases} L - \sigma(1 + \gamma_s)^{i-i_0} \\ U - \sigma(1 + \gamma_s)^{i-i_0} \end{cases} \quad (6)$$

式中: L 、 U 分别为模型预测值波动范围的下、上界; $\tilde{L}$ 、 $\tilde{U}$ 分别为模型预测值波动范围下、上界的最小和最大范围; σ 为训练集标准差; γ_s 为波动系数,其范围为 1% ~ 10%,根据实际情况确定; i 为年份; i_0 为训练集最后一年,即预测年份的前一年。

AR-SVM 模型预测结果的波动形式通常与实际相符,但在绝对数值上会有偏差,特别是分用水量,因此,本文对分用水量的预测结果进行一次数据校正,以达到最优的预测结果。设计方法为:①计算预测年前 5 a 总分用水量上界 $q_{\max}$ 和下界 $q_{\min}$,设置 $(1+5\gamma_s)^5 - 1 \approx 5\gamma_s$ 的波动系数变化范围;②用预测值的均值 $\bar{q}$ 表示预测值的整体水平, $(1+5\gamma_s)q_{\max}$ 表示 $q_{\max}$ 可接受变动范围的上界, $(1-5\gamma_s)q_{\min}$ 表示 $q_{\min}$ 可接受变动范围的下界,认为落在波动范围内的预测值可以接受;③当 $\bar{q} > (1+5\gamma_s)q_{\max}$ 或 $\bar{q} < (1-5\gamma_s)q_{\min}$ 时,对预测分用水量值 q_{use} 进行校正,即:

$$q_{\text{adj}} = \begin{cases} q_{\text{use}}\delta_{\min} & \bar{q} < (1 - 5\gamma_s)q_{\min} \\ q_{\text{use}} & (1 - 5\gamma_s)q_{\min} \leq \bar{q} \leq (1 + 5\gamma_s)q_{\max} \\ q_{\text{use}}\delta_{\max} & \bar{q} > (1 + 5\gamma_s)q_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

其中 $\delta_{\min} = (1 - 5\gamma_s)q_{\min}/\bar{q}$
 $\delta_{\max} = (1 + 5\gamma_s)q_{\max}/\bar{q}$

式中 q_{adj} 为校正后的分用水量。

2.2 用水指标预测

在“四水四定”调控模型建立过程中,用水指标是除用水量之外的另一重要决定性因素。水资源是区域的刚需,用水指标的实际变化趋势相对平缓,其数据的拟合趋势大多为指数函数或幂函数形式,但此类函数随着时间序列增长,变化率增大,将不符合实际情况下用水指标的变化趋势。为了尽可能贴近实际情况,需进行指标模拟。本文选用对数函数作为基础函数描述用水指标相对平缓的趋势,用正弦函数描述波动变化情况,将对数函数和正弦函数结合,提出复杂函数回归趋势法,在一定程度上修正了回归趋势法的计算误差。

用水指标可以表达为

$$q_{\text{true},t} = f_{\text{trend},t} + f_{\text{flu},t} + \varepsilon_t \quad (8)$$

式中: $q_{\text{true},t}$ 为第 t 年的用水指标实际值; $f_{\text{trend},t}$ 为用水指标随时间变化的趋势项; $f_{\text{flu},t}$ 为用水指标的波动项。

主要的拟合步骤如下:

步骤 1 选用对数函数拟合趋势项:

$$q_{\text{true},t} - f_{\text{flu},t} = c \ln |t + d| + e_1 + \varepsilon_t \quad (9)$$

式中 c 、 e_1 、 d 为对数函数的拟合参数。由于 $f_{\text{flu},t}$ 未知,先通过对用水指标真值的拟合确定对数函数的拟合参数。

步骤 2 选用正弦函数拟合波动项:

$$f_{\text{flu},t} = q_{\text{true},t} - (c \ln |t + d| + e_1) = h \sin(jt) + e_2 + \varepsilon_t \quad (10)$$

式中 h 、 j 、 e_2 为正弦函数的拟合参数。

步骤 3 由用水指标的非负性,得到修正的拟合表达式:

$$q_{\text{fit},t} = |c \ln |t + d| + h \sin(jt) + e| \quad (11)$$

其中

$$e = e_1 + e_2$$

式中 $q_{\text{fit},t}$ 为第 t 年用水指标的修正值。

综上,得到更具一般意义的表达式:

$$f(t; c, d, h, j) = |c \ln |t + d| + h \sin(jt) + e| + \varepsilon_t \quad (12)$$

3 模型构建方法

3.1 “四水四定”水资源承载力模型构建

“四水四定”是用可供水量约束人口规模、城市用地以及产业发展的基本方案,以水资源作为最大的刚性约束,有助于水资源的可持续性高效利用。可供水量是城市或乡村可获取的水量上限,然而,由于政府对各行业用水的调控和区域调水对水资源匮乏地区的补充,可用水量并不能完全反映出城市或乡村的用水模式。因此,本文通过对区域各行业用水量的综合建模反映水资源的“有效”承载力,基于 2.1 节中未来用水量预测方法,对工业用水总量、居民生活用水量(城镇和农村居民生活用水量)、农田灌溉用水量、总用水量(所有分用水量的之和)进行预测;基于 2.2 节中用水指标预测方法,对城乡综合生活用水指标、城镇居民生活用水指标、农村居民生活用水指标以及城镇建设用地规模、人均建设用地规模、城镇化率、农田耕地灌溉规模等指标进行预测,进一步构建水资源空间均衡的“四水四定”调控模型。

a. “以水定产”反映了产业用水资源和产业规模的关系,是经济可持续发展的关键。本文将工业增加值和 GDP 作为产业规模的评价要素,将水资源

承载的产业增加值规模分为工业增加值规模和 GDP 规模,工业用水量、总用水量作为约束产业发展的红线,万元工业用水量、万元 GDP 用水量作为重要变量引入。当前用水模式下水资源可承载的产业增加值规模为

$$S_1 = q_1/q_{IW} \tag{13}$$

$$S_{GDP} = q/q_{GW} \tag{14}$$

式中: S_1 、 S_{GDP} 分别为工业增加值规模和 GDP 规模; q_1 、 q 分别为工业用水总量和总用水量; q_{IW} 、 q_{GW} 分别为万元工业用水量和万元 GDP 用水量。

b. “以水定人”指以生活供水约束居民人口数量。分别用城镇居民生活用水量及其用水指标、农村居民生活用水量及其用水指标,结合中心城区以及其他城区的城镇化率,计算水资源量可承载的人口规模:

$$P = q_L/Q \tag{15}$$

其中 $Q = d_y[rQ_c + (1 - r)Q_r]$ $r = P_c/P$

式中: P 为人口规模; P_c 为城镇人口; q_L 为居民生活用水量; Q 为城乡综合生活用水指标; r 为城镇化率; Q_c 为城区综合生活用水指标; Q_r 为农村综合生活用水指标; d_y 为总天数,一般取 365 d。

c. “以水定城”反映合理规划城市建设的发展。采用当前用水模式下水资源承载的人口规模以及人均城镇用地标准计算当前用水模式下可承载的城镇建设用地,可表示为

$$R = PR_p \tag{16}$$

式中: R 为城镇建设用地规模; R_p 为人均建设用地规模。

d. “以水定地”将用水作为耕地灌溉规模的约束条件,主要反映水资源可以承载的农业生产耕地灌溉规模。用农田灌溉用水量和灌溉用水指标计算:

$$D_q = q_F/Q_a \tag{17}$$

式中: D_q 为农田耕地灌溉面积; q_F 为农田灌溉用水量; Q_a 为农田耕地灌溉单位面积用水量。

3.2 水资源空间均衡模型构建

水资源空间均衡是当前用水模式下水资源承载力内涵的延伸,反映了水资源供需平衡、水资源刚性约束与韧性调控以及水资源与社会发展的匹配状况。本文选取水资源负载指数、水土资源匹配系数、用水效益三大指标,评估水资源均衡度^[30]:

$$C = K\sqrt{PS_{GDP}/q} \tag{18}$$

$$\delta = (q/D_q) \times 10^4 \tag{19}$$

$$E_q = Z_q = S_{GDP}/q \tag{20}$$

式中: C 为水资源负载系数; K 为降水系数,取值范围如表 1 所示; δ 为水土资源匹配系数; E_q 为用水效益; Z_q 为单方水 GDP 值。

表 1 各降水地带类型 K 取值范围

Table 1 K value ranges for different precipitation zone types

降水地带类型	K	区域全年降水量 p_r/mm
严重干旱带	1.0	≤ 200
干旱带	$1.0 - 0.1(P_r - 200)/200$	$> 200 \sim 400$
过渡带	$0.9 - 0.2(P_r - 400)/400$	$> 400 \sim 800$
湿润带	$0.7 - 0.2(P_r - 800)/800$	$> 800 \sim 1\,600$
十分湿润带	0.5	$> 1\,600$

采用改进的基尼系数公式^[31]计算各指标的基尼系数:

$$G = 1 - \frac{1}{n} \left(2 \sum_{i=1}^{n-1} z_i + 1 \right) \tag{21}$$

式中: G 为基尼系数,取值范围为 $0 \sim 1$,基尼系数处于 $0 \sim 0.2$ 、 $> 0.2 \sim 0.3$ 、 $> 0.3 \sim 0.4$ 、 $> 0.4 \sim 0.5$ 、 $> 0.5 \sim 1.0$ 分别对应水资源分配状况绝对均衡、一般均衡、比较均衡、一般失衡、严重失衡; z_i 为将各计算指标(水资源负载指数、水土资源匹配系数、用水效益)从小到大排序后累积到第 i 组的和占总量的百分比; n 为组数。

3.3 水资源动态调控方法

通过基尼系数可得到水资源负载系数、用水效益、水土资源匹配系数 3 个指标的均衡度,分别记为 G_C 、 G_{E_q} 、 G_δ ,将研究区的平均基尼系数看作用水量的函数,建立目标函数:

$$G_f(q, q_s) = \frac{1}{3k} \sum_k (G_{C,k} + G_{E_q,k} + G_{\delta,k}) \tag{22}$$

式中: q_s 为各行业分用水量; k 为分区序号。

为以最优的调控手段实现水资源动态调控,使目标函数达到全局最小,构建最优化模型,即:

$$\begin{cases} \min G_f(q, q_s) = G_f(q_{sp}, d_s) \approx G_f(d_s) \\ \text{s. t.} \quad d_s \in [B_{sl}, B_{su}] \\ \sum (q_{sp} - d_s) \in [L, U] \end{cases} \tag{23}$$

式中: q_{sp} 为当前用水模式下的各行业预测未来用水量; d_s 为对 q_{sp} 的调控值; $[B_{sl}, B_{su}]$ 为各行业设定的调控范围。

式(23)是在未来合理用水量情景下,未来各行业用水量预设调控范围下的最优值,以较小代价实现水资源的动态调控,进而实现水资源空间均衡的“四水四定”。可分别计算动态调控下未来长期(如未来 10 年)、短期(如未来 2 年)的均衡性,以做更进一步的分析。

4 结 语

本文在“四水四定”相关概念与前人研究基础

上探究并构建了基于水资源空间均衡的“四水四定”调控模型。调控模型构建由三部分组成:①基于用水模型下的未来用水变化情景预测,给出全新的未来用水量预测方法和不确定性分析模型与校正方法;②基于改进基尼系数构建了“四水四定”水资源承载力模型和水资源空间均衡模型,通过水资源负载指数、水土资源匹配系数、用水效益等对水资源均衡度进行度量;③通过水资源动态调控方法,利用最优化模型调整研究区各分区、各行业未来用水量,使综合基尼系数达到全局最优或局部最优。在不同时间尺度下重复该过程,即可得到未来不同时期区域用水动态调控方式。水资源系统是一个高度复杂的非线性系统,本文通过建立多种数学模型开展建模分析,构建出一套完整的水资源空间均衡度评估和水资源动态调控模型,以期为区域水资源空间均衡、国土空间规划中的“四水四定”等提供数据模型支持。

参考文献:

[1] DENG Caiyun, WANG Hongrui, GONG Shuxin, et al. Effects of urbanization on food-energy-water systems in mega-urban regions;a case study of the Bohai MUR, China [J]. Environmental Research Letters, 2020, 15 (4) : 044014.

[2] 钱龙霞,王红瑞,党素珍,等. 一种水资源短缺风险评价耦合模型及其应用[J]. 系统工程理论与实践,2021,41 (5) :1319-1327. (QIAN Longxia, WANG Hongrui, DANG Suzhen, et al. A coupled model for evaluating water shortage risk and its application [J]. Systems Engineering:Theory & Practice,2021,41(5):1319-1327. (in Chinese))

[3] WANG Hongrui, LIU Hongli, WANG Cheng, et al. A study of industrial relative water use efficiency of Beijing: an application of data envelopment analysis [J]. Water Policy, 2019, 21 (2) :326-343.

[4] HONG Siyang, YANG Hong, WANG Hongrui, et al. Water and energy circulation characteristics and their impacts on water stress at the provincial level in China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2021, 35 (1) :147-164.

[5] 洪思扬,王红瑞,梁俊芬,等. 京津冀地区水-能源利用效率与资源压力核算[J]. 水资源保护,2021,37(5): 102-111. (HONG Siyang, WANG Hongrui, LIANG Junfen, et al. Calculation of energy-water utilization efficiency and resource pressure in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (5) :102-111. (in Chinese))

[6] 王若禹,赵志轩,黄昌硕,等. “四水四定”水资源管控理论研究进展[J]. 水资源保护, 2023, 39 (4) :111-117. (WANG Ruoyu, ZHAO Zhixuan, HUANG Changshuo, et

al. Research progress on water resources management theory of “basing four aspects on water resources” [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (4) :111-117. (in Chinese))

[7] 王浩,许新发,成静清,等. 水资源保护利用“四水四定”:基本认知与关键技术体系[J]. 水资源保护, 2023, 39 (1) :1-7. (WANG Hao, XU Xinfu, CHENG Jingqing, et al. “Basing four aspects on water resources” in water resources protection and utilization: basic cognition and key technology system [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (1) :1-7. (in Chinese))

[8] 杨舒媛,魏保义,王军,等. “以水四定”方法初探及在北京的应用[J]. 北京规划建设, 2016 (3) :100-103. (YANG Shuyuan, WEI Baoyi, WANG Jun, et al. A preliminary study of the “basing four aspects on water resources” method and its application in Beijing [J]. Beijing Planning and Construction, 2016 (3) :100-103. (in Chinese))

[9] 谷树忠. 落实“以水四定”的症结识别与政策工具[J]. 中国水利, 2021 (6) :52-54. (GU Shuzhong. Identification of sticking points and policy tools for implementing during defining scopes of city, land, population and production with water [J]. China Water Resources, 2021 (6) :52-54. (in Chinese))

[10] 宋志,乐琪浪,陈绪钰,等. 水资源承载力评价方法初探以及在“以水四定”中的运用[J]. 沉积与特提斯地质, 2021, 41 (1) :106-111. (SONG Zhi, LE Qilang, CHEN Xuyu, et al. A preliminary study on evaluating method of water resources’ carrying capacities of China and its application [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2021, 41 (1) :106-111. (in Chinese))

[11] 刘笑月. 以水定城引导新型城镇化建设[J]. 水利科技与经济, 2014, 20 (10) :67-68. (LIU Xiaoyue. Guiding new urbanization with water [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2014, 20 (10) :67-68. (in Chinese))

[12] 冯奎,李庆. 以水定城的系统视角与实施路径[J]. 河北水利, 2019 (7) :26-28. (FENG Kui, LI Qing. The system perspective and implementation path of water-based urbanization [J]. Hebei Water Resources, 2019 (7) :26-28. (in Chinese))

[13] 李发鹏,穆文彬,肖恒. 北方干旱半干旱地区以水定地问题探析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42 (2) :104-108. (LI Fapeng, MU Wenbin, XIAO Heng. Analysis on the problem of optimal allocation of water and land resources in arid and semi-arid areas of North China [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42 (2) :104-108. (in Chinese))

[14] 苗晓颖,胡继连,王秀鹃. 中国蔬菜生产“以水定地”优化布局研究[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43 (7) :

- 205-215. (MIAO Xiaoying, HU Jilian, WANG Xiujuan. Study on the optimized layout with “water-based planting” of vegetable production in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 43 (7):205-215. (in Chinese))
- [15] 魏奋子,李含琳. 民勤县生态环境状况及水资源评价:对甘肃省民勤县以水定人的调查和分析[J]. 人口与经济,2006(6):53-58. (WEI Fenzi,LI Hanlin. Evaluation of ecological environment and water resource in the Minqin county: empirical studies on basing population development on water resource [J]. Population & Economics,2006(6):53-58. (in Chinese))
- [16] 李虹瑾. 新疆哈密工业园区规划水资源论证“以水定产”研究[J]. 水利水电快报,2021,42(8):16-20. (LI Hongjin. Study on proofing agricultural output based on water quantity for water resources plan in Hami Industry Zone, Xinjiang [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2021, 42 (8): 16-20. (in Chinese))
- [17] 张瑞美,王亚杰,杨钢. 西北地区落实“以水定产”的问题与对策[J]. 水利发展研究,2021,21(5):33-37. (ZHANG Ruimei,WANG Yajie,YANG Gang. Problems and countermeasures of implementing “water-based production” in Northwest China [J]. Water Resources Development Research, 2021, 21 (5): 33-37. (in Chinese))
- [18] ZADEH L A. Fuzzy sets and information granularity [M]//GUPTAM M,RAGADE R,YAGER R R. Advances in Fuzzy Set Theory and Applications. Amsterdam:North-Holland,1979,3-18.
- [19] GUPTA S,HUSSAIN R R. Use of triangular membership function for prediction of compressive strength of concrete containing nanosilica [J]. Cogent Engineering, 2015, 2 (1):1025578.
- [20] PEDRYCZ W. An introduction to computing with fuzzy sets: analysis, design, and applications [M]. Cham: Springer,2021.
- [21] 翟玉健,余承智,高星. 一种基于 DBSCAN 聚类的雷达点迹处理方法[J]. 舰船电子对抗,2021,44(5):58-61. (ZHAI Yujian, YU Chengzhi, GAO Xing. A radar plot processing method based on DBSCAN clustering [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2021, 44 (5): 58-61. (in Chinese))
- [22] WANG H R,WANG C,LIN X,et al. An improved ARIMA model for precipitation simulations [J]. Nonlinear Processes in Geophysics,2014,21(6):1159-1168.
- [23] 唐奇,王红瑞,许新宜,等. 基于混合核函数 SVM 水文时序模型及其应用[J]. 系统工程理论与实践,2014,34(2):521-529. (TANG Qi,WANG Hongrui,XU Xinyi,et al. Hydrological time series model based on SVM with mixed kernel function and its application [J]. Systems Engineering:Theory & Practice,2014,34(2):521-529. (in Chinese))
- [24] 王红瑞,魏豪杉,胡立堂,等. 基于遗传算法的 SVM-AR 改进模型与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):488-497. (WANG Hongrui,WEI Haoshan,HU Litang,et al. Improved model and application of SVM-AR based on genetic algorithm [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48 (6): 488-497. (in Chinese))
- [25] 王红瑞,高雄,常晋源,等. 基于条件异方差分析的水文时序模型及其应用[J]. 系统工程理论与实践,2009,29(11):19-30. (WANG Hongrui,GAO Xiong,CHANG Jinyuan,et al. Hydrological time series model based on conditional heteroskedasticity analysis and its application [J]. Systems Engineering:Theory & Practice,2009,29(11):19-30. (in Chinese))
- [26] 王红瑞,康健,林欣,等. 水文序列 ARIMA 模型应用中存在的问题与改进方式[J]. 系统工程理论与实践,2008,28(10):166-176. (WANG Hongrui,KANG Jian,LIN Xin,et al. Problems existing in ARIMA model of hydrologic series and some improvement suggestions[J]. Systems Engineering:Theory & Practice,2008,28(10):166-176. (in Chinese))
- [27] BOSER B E,GUYON I M,VAPNIK V N. A training algorithm for optimal margin classifiers[C]//Proceedings of the 5th Annual Workshop on Computational Learning Theory. Pittsburgh:ACM Press,1992:144-152.
- [28] YIN Shen,JIANG Yuchen,TIAN Yang,et al. A data-driven fuzzy information granulation approach for freight volume forecasting [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2017,64(2):1447-1456.
- [29] HUANG Yu,ZHAO Lu. Review on landslide susceptibility mapping using support vector machines [J]. CATENA, 2018,165:520-529.
- [30] 李思燕,罗清海,高瑞霞,等. 基于灰色模型的衡阳市总家庭用水量预测分析[J]. 建筑热能通风空调,2021,40(10):35-38. (LI Siyan,LUO Qinghai,GAO Ruixia,et al. Prediction and analysis of total household water consumption in Hengyang City based on gray model[J]. Building Energy & Environment, 2021, 40 (10): 35-38. (in Chinese))
- [31] 杨亚锋,巩书鑫,王红瑞,等. 水资源空间均衡评估模型构建及应用[J]. 水科学进展,2021,32(1):33-44. (YANG Yafeng,GONG Shuxin,WANG Hongrui,et al. New model for water resources spatial equilibrium evaluation and its application [J]. Advances in Water Science,2021,32(1):33-44. (in Chinese))

(收稿日期:2023-10-09 编辑:施业)