水利水运工程学报
HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

变化环境下考虑物理机制的SD需水预测研究

陈颖杰，金保明，金君良，王国庆，曹民雄

System dynamics model-based water demand prediction under changing environment with consideration of physical mechanism

CHEN Yingjie, JIN Baoming, JIN Junliang, WANG Guoqing, CAO Minxiong

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12170/20200416001

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

气候变化下黄河流域未来水资源趋势分析
The future water resources regime of the Yellow River basin in the context of climate change
水利水运工程学报. 2020(2): 1 https://doi.org/10.12170/20200216001

黄河流域典型流域水文气象变化与径流过程模拟
Typical hydro-meteorological changes and runoff process simulation in Yellow River basin
水利水运工程学报. 2019(5): 36 https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.005

黄河流域砒砂岩区地貌-植被-侵蚀耦合研究进展
Research progress of spatial distribution about geomorphology-vegetation-water erosion in Pisha stone area of Yellow River
水利水运工程学报. 2020(4): 64 https://doi.org/10.12170/20191229002

膨胀复合浆液的物理力学性能试验研究
Experimental study on physical and mechanical properties of expanded composite slurry
水利水运工程学报. 2020(3): 92 https://doi.org/10.12170/20190227002

长江口水源地取水口盐度对径潮动力的响应
Response of salinity at water source intakes to runoff and tidal dynamics of Yangtze River estuary
水利水运工程学报. 2018(5): 14 https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.003

黄河上游梯级水库联合调水调沙及合理库容研究
Analysis of joint regulation of water and sediment and reasonable storage of cascade reservoirs of upper Yellow River
水利水运工程学报. 2018(6): 19 https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.06.003

扫码进入官网，阅读更多精彩文章

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20200416001
陈颖杰, 金保明, 金君良, 等. 变化环境下考虑物理机制的 SD 需水预测研究 [J]. 水利水运工程学报, 2021(3): 84-95. (CHEN Yingjie, JIN Baoming, JIN Junliang, et al. System dynamics model-based water demand prediction under changing environment with consideration of physical mechanism[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(3): 84-95. (in Chinese))

变化环境下考虑物理机制的 SD 需水预测研究

陈颖杰[1,2], 金保明[1], 金君良[2,3,4], 王国庆[2,3,4], 曹民雄[2,3,4]

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 3. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 4. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029)

摘要: 随着气候变化与人类活动作用的加剧, 流域水资源受变化环境的影响愈加显著。研究变化环境下的流域水资源系统变化特征及需水预测对支撑流域水资源管理与合理配置具有重要的指导意义。基于系统动力学原理, 耦合了考虑物理机制的需水预测方法, 建立水资源系统模型, 以黄河流域为例, 分析了多因子驱动及多要素胁迫作用下黄河流域水资源系统变化特征, 采用 MPI 气候模式预估的未来气温、降水结果及未来流域 5 种不同的经济社会发展情形, 预测了黄河流域 2017—2030 年的水资源供需演变趋势。结果表明: ①黄河流域的生活需水量随着流域人口及人均用水需求的增加不断增长。随着产业结构调整, 工业需水量呈现缓慢减少态势, 生态及三产需水量逐年增加, 农业灌溉需水量呈下降趋势; ②在加强流域水资源管理力度、增加节水技术投资的前提下, 保障流域经济、社会协调发展, 注重发展经济的同时兼顾流域生态环境保护, 满足黄河流域下一阶段的经济社会可持续发展的要求; ③为保障黄河流域水资源可持续发展, 实现黄河流域生态保护和高质量发展, 需要调整流域水资源管理策略, 提高节水程度, 促进流域产业结构优化。

关 键 词: 系统动力学; 物理机制; 需水预测; 黄河流域

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2021)03-0084-12

水是最基本的自然资源和战略性的经济资源, 是人类生存和社会发展不可缺少的物质基础[1-3]。近几十年来, 包括人口增长、粮食和能源需求增加、城市化和工业发展在内的一系列人类活动加剧了对稀缺淡水资源的压力, 同时生态环境恶化和气候变化使得水资源问题日益突出[4-8]。在气候变化和人工干预双重影响的背景下, 对水资源系统来说, 预测未来的需水情势是十分必要的。系统动力学作为一种主要的需水预测方法, 通过定性和定量相结合的途径来描述复杂系统中的动态结构和反馈回路, 擅长处理非线性动态过程模拟问题[9-10]。现阶段 SD 被应用于水资源承载力[11-12]、气候变化对区域需水量的影响[13]、水资源供需平衡分析[14] 等方面的研究, 并逐渐得到了广泛认可。由于在需水过程中涉及的气象要素较多, 在以往将系统动力学应用于需水预测的研究中, 模型对变化环境下需水过程的反映相对粗糙, 很少考虑物理机制对需水过程的影响, 且大多主要反映气象因子对灌溉需水的影响, 没有考虑工业和生活需水物理机制在 SD 模型中的应用。

物理机制是始终伴随在需水过程中的重要机制, 在预测过程中考虑物理机制可以更好地反映变化环境对需水的影响程度。物理机制被广泛应用于农业灌溉需水的研究中, 主要反映了气象因子对农作物需水的影响[15]。其中气温的增加会直接影响作物的蒸散发过程, 延长作物的物候期, 进而导致灌溉需水量的增加;

收稿日期: 2020-04-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404401); 国家自然科学基金资助项目(51779144, 51679144, 51879164); 中央公益性科研院所基本业务费联合资助项目(Y520025, Y220011, Y519010)

作者简介: 陈颖杰(1996—), 男, 福建南平人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 2441125649@qq.com
通信作者: 金君良(E-mail: jljin@nhri.cn)

而有效降雨量主要用于供给作物生育期的需水, 进而减少作物的灌溉需水量。此外, 生活及工业的需水过程也与物理要素息息相关。居民生活饮用水随着气温的增加而增多; 居民家庭生活需水中占 50% 的洗衣及洗澡需水皆与气温要素相关, 在高温天气的影响下, 洗澡洗衣的频率会增加, 从而导致生活用水需求的增加[16]。工业生产过程中, 冷却用水量最大, 约占整个工业用水的 60%。工业冷却水的效率随着气温增加而降低, 从而导致工业需水量增加[17]。将物理机制引入需水过程的研究, 将其与社会、经济发展等人类活动影响相结合, 有助于把握气候变化及人类活动影响下流域需水的变化脉络。

本文以黄河流域为研究区域, 充分考虑流域生活、农业及工业需水过程中的物理机制, 并在此基础上建立了流域水资源系统动力学模型, 分析了经济、社会、生态环境、气候等各子系统要素的相互胁迫及驱动作用, 进而提出了 5 种情景, 对未来黄河流域的水资源供需情况进行分析预测, 总结黄河流域水资源供需的演变规律, 为变化环境下流域水资源管理提供科学依据。

1　资料及方法

1.1　研究区域概况与数据来源

黄河作为我国的第二大河, 流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东等九省(区), 流域面积达 79.5 万 km^2。黄河流域人口众多, 至 2017 年黄河流域覆盖省份人口达 12330 万人, 城镇化率达 52%。黄河流域是我国重要的农业生产及矿产能源基地, 是我国重要的经济发展区域, 2017 年黄河流域省内生产总值达 38850 亿元。现阶段黄河流域的经济社会发展主要表现为高速度向高质量转变的发展态势, 流域经济仍然以中高速发展为主。流域产业结构在经济新常态的带动下逐步发生转变, 第一、第二产业仍占较大比重。此外, 黄河流域的水污染和大气污染也较为严重, 生态环境用水存在被占用现象, 流域的能源利用效率较低, 需水压力突出, 水资源保障形势严峻。随着黄河流域生态保护和高质量发展上升为国家重大战略, 水资源将作为最大的刚性约束影响流域的经济社会发展。

本研究用到黄河流域各省的社会经济、生态环境及水资源数据, 来源于黄河水资源公报、中国统计年鉴及黄河流域各省的经济统计年鉴; 气象数据采用黄河流域范围内的 95 个主要气象站(图 1)的日均数据, 源自中国气象数据共享服务网。

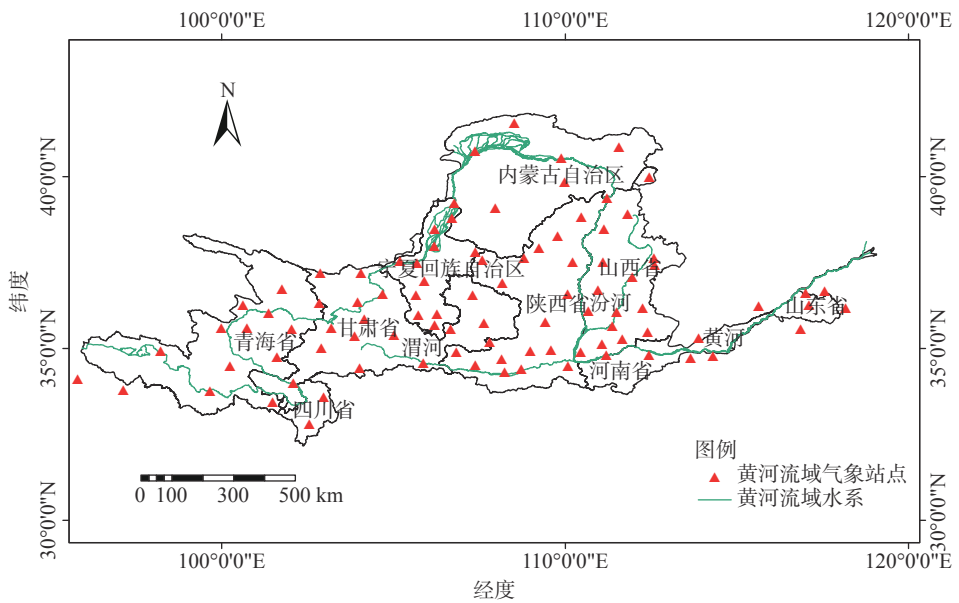

图 1　黄河流域气象站点分布

Fig. 1　Meteorological stations for the Yellow River basin

1.2 需水预测方法

国内外常见的需水预测方法有:(1)基于回归分析的需水预测方法[18],该方法通过用水量与其影响因素之间的相关关系,建立回归模型进行预测,适用于长期预测,但在短期预测的应用中存在波动性大、影响因素复杂多变的问题;(2)基于灰色预测模型的需水预测方法[19-20],通过对原始数据的累加生成寻找系统的整体规律,构建指数增长模型进行预测,适用于数据较为缺乏的情况,但是该方法对历史需水数据依赖性较强,对其他要素的影响反映不足;(3)基于 BP 神经网络的需水预测方法[21],能预测非线性数据,自学习和自适应能力强,能够自动提取数据和输出数据,但该方法的长期预测精度不足,容易陷入局部收敛。

相对于上述常见的需水预测方法,本文采用考虑物理机制的系统动力学需水预测方法,可以分析经济社会等多方面因素对区域需水量的影响,考虑不同类型需水的影响机理,在农业、工业和生活需水预测中引入具有一定物理意义的预测方法,可以更加精细化和客观地表现各需水环节受变化环境的影响程度,可认为更加适应变化环境下的流域需水预测。

系统动力学自 1956 年由美国 Forrester 教授提出和创立以来,最早用于解决工业问题,而后发展到经济社会领域,目前被广泛用于解决生态、环境领域中高阶次、非线性、多重反馈、复杂时变的系统性问题。系统性问题的定性建模有助于描述问题,发现问题可能的根源因素,从而找到解决问题的方法。系统动力学可以将多个结构不同的子系统清晰展现出来,并基于主导性过程反映整个系统的反馈回路。系统动力学的反馈回路一般由状态变量、速率变量与辅助变量 3 种基本变量组成,并分别通过状态方程、速率方程与辅助方程进行描述,从而构建 SD 模型。根据 SD 模型变量与方程的特点,其数学表达式为:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{R} \\ \boldsymbol{A} \end{bmatrix} = \boldsymbol{W} \begin{bmatrix} \boldsymbol{L} \\ \boldsymbol{A} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{L}$为状态向量;$\boldsymbol{R}$ 为速率向量;$\boldsymbol{A}$ 为辅助变量向量;$\boldsymbol{W}$ 为关系矩阵。

1.3 需水物理机制计算方法

1.3.1 农业需水物理机制 气象因子对灌溉需水的影响相当显著,且灌溉需水占据了农业需水的近 85%,故而农业需水的物理机制以研究灌溉需水为主。本文利用研究区域内 95 个气象站的平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度、风速、日照时数等气象数据,采用气候模式(MPI)预估未来气温、相对湿度、风速等结果,根据 Penman-Monteith 公式[22] 计算作物的灌溉需水量。

参考作物需水量(ET_0)的计算:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \dfrac{900}{T+273}\gamma U_2(e_s - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \tag{2}$$

式中:R_n为冠层表面净辐射;G为土壤热通量;T 为平均温度;e_s为饱和水汽压;e_d为实际水汽压;Δ为饱和水汽压与温度曲线斜率;γ为湿度计常数;U_2为 2 m 高处风速。

有效降水量(P_e)的计算:

$$P_e = \min(\alpha P, K_c ET_0) \tag{3}$$

式中:α为有效降水系数;P 为降水量;K_c为作物系数(采用 FAO 中的相关作物系数推荐值,并根据研究区域的气象资料进行修正)。

考虑非充分灌溉的情况,作物的灌溉需水定额可以通过下式计算:

$$I_{irr} = \frac{K_c ET_0 - P_e}{\eta} \tag{4}$$

式中:I_{irr}为灌溉需水定额;η为灌溉水利用系数。在研究中,未来气温和降水的变化主要影响了ET_0和P_e,忽略气候变化对灌溉水利用系数和作物种植结构的影响。

1.3.2 工业需水物理机制 工业需水量的变化受许多因素影响,概括起来主要有 3 个方面:一是人为因素,主要是用水管理水平,节水情况及节水技术的发展;二是产业结构的变化,取决于新建、扩建、改建工业的

类型和规模, 工业的发展速度; 三是气候因素, 可以概述为气温要素对工业用水过程的影响作用。

本文在邹庆荣等[23] 的工业需水预测模型的基础上加以改进, 综合考虑上述因素的影响, 采用多元线性回归法, 分析工业需水同影响因素之间的关系, 建立数学模型, 模拟的回归决定系数达 0.999 7, 故而模型拟合优度高, 具有合理性, 相关公式如下:

$$\ln W_{\mathrm{iwg}} = b_0 + b_1 \ln x_1 + b_2 \ln x_2 + b_3 \ln x_3 \tag{5}$$

式中: W_{iwg}为万元工业增加值需水量; b_0、b_1、b_2、b_3 为回归系数; x_1为工业水重复利用率; x_2为工业水价; x_3为气温变化量。

1.3.3 *生活需水物理机制*　不同的气候要素对生活用水的影响程度不同, 其中降雨和气温对居民家庭生活用水影响最大。本文在刘家宏等[16] 的生活用水预测模型的基础上增加了对居民水价的考虑, 根据气象因子、经济发展水平及流域节水机制对生活需水的影响建立流域生活需水模型, 主要包括冲厕需水W_{T}、洗澡需水W_{B}、洗衣需水W_{La}和烹饪需水W_{K}等 4 个部分。生活需水定额W_{L}计算如下:

$$W_{\mathrm{L}} = W_{\mathrm{B}} + W_{\mathrm{La}} + C \tag{6}$$

式中: $C = W_{\mathrm{T}} + W_{\mathrm{K}}$, 为冲厕和烹饪需水之和, 是一个常数。

洗衣W_{La}及洗澡W_{B}需水皆与气温要素相关, 计算如下:

$$W_{\mathrm{B}} + W_{\mathrm{La}} = \left[\frac{T_{\mathrm{h}}}{365} + \frac{1}{n}\left(1 - \frac{T_{\mathrm{h}}}{365}\right)\right] \times \left[BL_0 + \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi}\tan^{-1}\left(\frac{x-3}{\alpha}\right)\right)\Delta BL + \Delta BL_1 y\right] \tag{7}$$

式中: T_{h}为当地一年中气温超过 25 ℃ 的天数; n 为气温低于 25 ℃ 时, 每 n 天洗澡和洗衣一次; BL_0为一次洗澡和洗衣的用水量; x 为人均 GDP; α为伸缩系数, 为常量, 表示人均生活用水随人均 GDP 的变化缓慢; ΔBL为随经济发展水平波动的洗衣和洗澡用水需求; ΔBL_1为随居民水价波动的洗衣和洗澡用水需求; y 为居民水价。

2　水资源系统模型构建

2.1　水资源系统结构及其驱动和胁迫要素

2.1.1 *子系统结构*　水资源系统是社会-经济-自然可持续发展的信息反馈系统之一, 具有相对的独立性。系统内部影响因素的相互作用构成子系统, 各子系统之间存在相互影响、相互限制的关系, 通过子系统与影响因素之间线性与非线性的关系共同构成系统要素的反馈关系。

根据水资源系统研究要求, 结合模型建立的基本原则, 在充分考虑气候变化、经济增长速度及缺水程度等影响因素的前提下, 本文将水资源系统划分为供需、经济、人口、生态环境、气候五大子系统, 以黄河流域为模拟的空间边界, 取 2006—2030 年为模拟时间边界, 其中 2006—2017 年为模型历史验证年份, 2006 年为基准年, 2017 年为现状年, 时间步长为 1 年。

2.1.2 *水资源系统多因子驱动及多要素胁迫分析*　水资源系统是多因子驱动和多要素胁迫共同作用下的复杂供需系统。在各水资源子系统中, 存在许多对用水需求起到不同影响效应的要素, 明确这些要素对需水变化的作用程度是准确预测需水量的关键所在。对需水变化起到推动作用的要素视作水资源系统中的驱动因子, 而限制需水量增加的要素则是胁迫要素。

驱动和胁迫作用详图见图 2, 图中红色变量为胁迫要素, 绿色变量为驱动要素。现阶段的流域供需矛盾主要反映为流域内生活水平提高、经济进一步发展和生态环境保护带来的用水需求和流域供水不足之间的矛盾。由供需矛盾中可以看出, 在流域水资源系统中, 多要素在驱动流域需水的增加。近年来流域人口依然保持增长趋势, 城镇化水平在稳步提升, 流域经济持续发展, 产业结构调整, 都驱动着流域需水结构的变化和相关用水需求的增加。此外, 从气候变化的角度出发, 近 30 年来, 黄河流域的气温上升。气温上升将

会导致生活饮用、沐浴、洗涤用水、工业冷却用水的需求上升;同时作物的灌溉需水量与流域的气温变化紧密关联,故而气温的上升势必带来作物需水压力的增加。

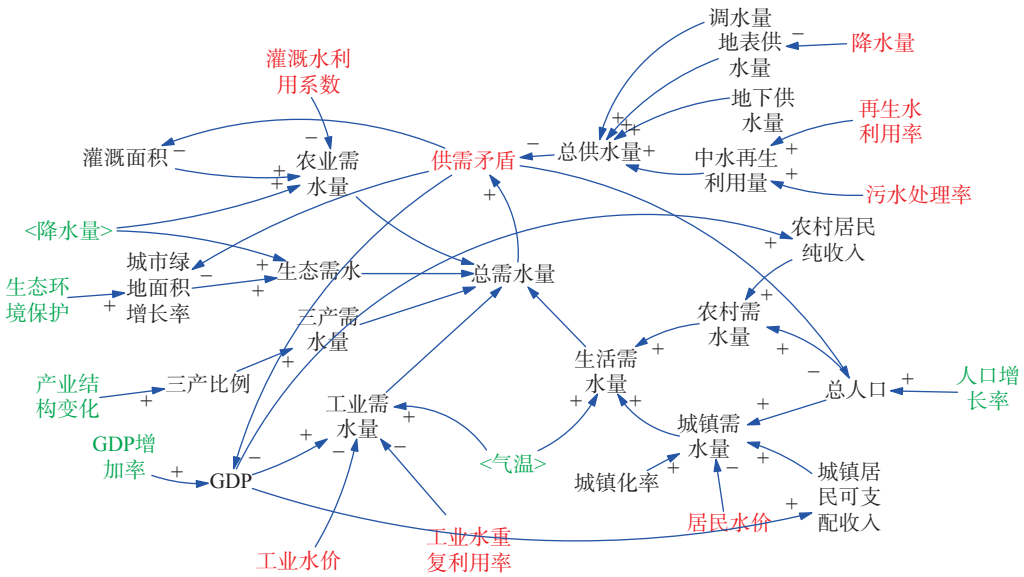

图 2 多因子驱动和多要素胁迫图

Fig. 2 Multi-factor driving and multi-element stress diagram

在各气候因素和经济社会因子的驱动作用下,水资源系统面临需水压力的同时应考虑到需水的相应胁迫机制。供需层面的反馈机制主要体现为缺水程度对流域发展的胁迫影响,进而约束流域的需水量。从气候角度来看,流域的降水量呈下降趋势,年径流量在长时间序列上反映为减少趋势,导致流域内地表供水量的下降,进而胁迫流域的用水需求。从水资源管理层面出发,不同的管理策略将导致不同流域需水量。提高节水技术投入,增加工业用水重复利用率,有助于减少工业用水的需求量;同样提高灌溉供水的节灌效率和水利用效率,可以胁迫农业需水的增长。此外,增加污水处理和再生水技术的投资可以提高整个流域的水利用效率,进而相应地减少部分用水需求。工业及居民用水价格可以保障节水政策在生活和工业方面的实施,对生活和工业需水起到较大的胁迫作用。

子系统结构分析可以定性研究水资源系统内部要素间的胁迫及驱动关系,但要明确系统内部不同变量对水资源系统的影响程度,就需要进行定量分析。故而本文基于系统动力原理,以 Vensim-Dss 为平台建立水资源系统动力学模型。

2.2 模型验证及主要参数

根据前文所述构建模型,并结合需水物理机制,具体模型流图见图 3,模型的主要方程见表 1。水资源系统动力学模型建立后,为确保其仿真结果和实际系统相符,模型应用前需要对模型有效性进行检验。SD 模型的检验方法一般分为 4 种:直观检验、运行检验、历史检验和灵敏度分析。其中直观检验和运行检验已在建模过程中实现,这里主要采用历史检验和灵敏度分析对模型进行有效性验证。

2.2.1 *历史检验* 检验的时间段为 2006—2017 年,计算模型模拟值与历史实际值之间的相对误差,误差小于 20% 认为模型是有效的,可以用于预测 2017—2030 年的流域需水量。本文选取模型中具有代表性的 5 个指标用于历史检验:GDP、总人口、城市绿地面积、农田灌溉需水量及生活需水量,主要检验结果见表 2。其中 GDP、总人口和城市绿地面积 3 个指标的历史检验误差均小于 5%,模型模拟效果较好,农田灌溉需水量及生活需水量模拟值与历史实际值的误差都在允许范围内,故黄河流域系统动力学模型可以用于需水预测,其结果具有准确性。

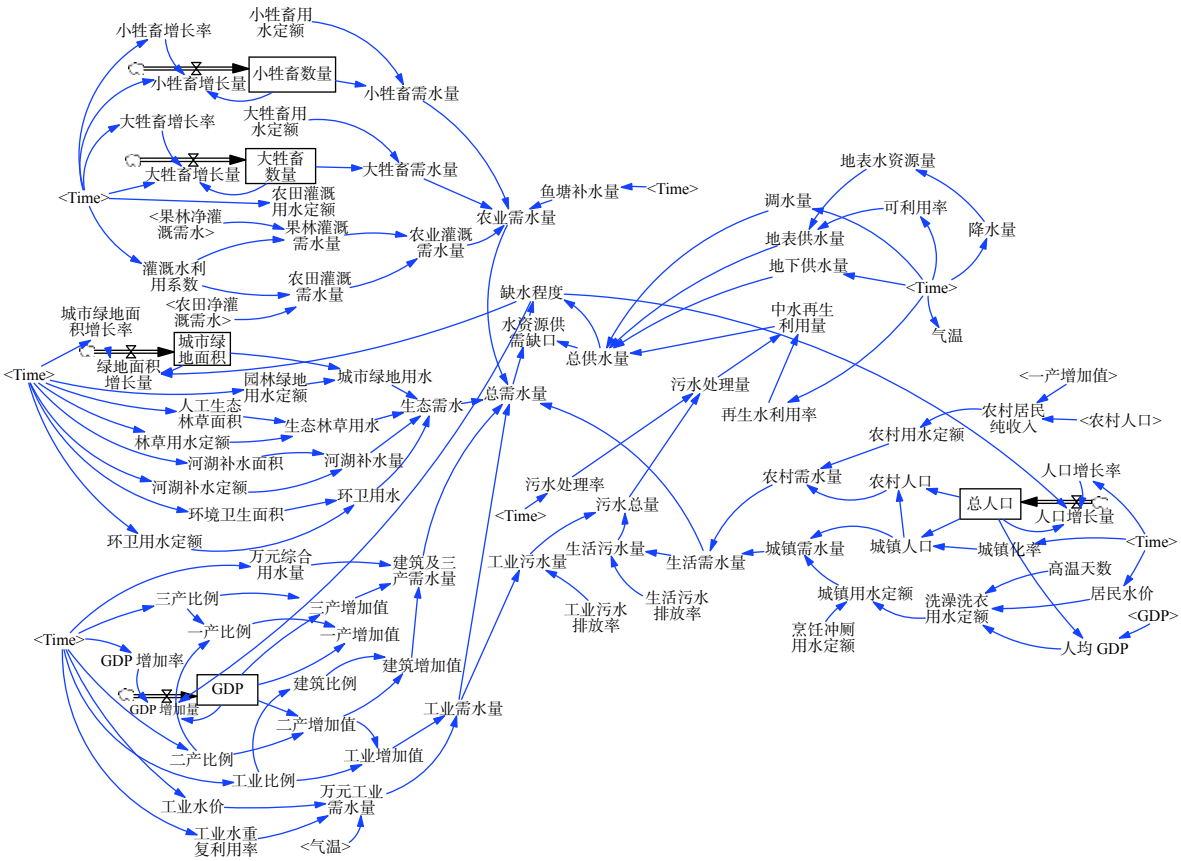

图 3　黄河水资源系统流图

Fig. 3　System dynamics model flow chart of water resources in the Yellow River

表 1　SD 模型主要参数方程

Tab. 1　Main parametric equations of SD model

子系统	参　数	方　程
人口	城镇居民生活用水定额/(L/(d×人))	(高温天数/365+1/2×(1−高温天数/365))×(57+(0.5+1/3.141 6×ARCTAN((人均GDP−3) /5))×76−2×居民水价)+烹饪冲厕用水定额
	人口变化量/(万人/a)	总人口数量×人口变化率/1 000
	城镇人口数量/万人	总人口数量×城镇化率
	生活用水量/亿m^3	农村居民生活用水量+城镇居民生活用水量
经济	GDP总量/亿元	INTEG(GDP增加量, 13 588.5)
	GDP增长率/%	(2006,0.125), (2012,0.084), (2015,0.065)
	万元工业增加值用水量/ m^3	EXP(18.054 6−3.318 9×LN(工业水重复利用率)−0.162 31×LN(工业水价)+0.145 1×LN(气温))
	农业灌溉需水量/亿m^3	(果林净灌溉需水量+农田净灌溉需水量)/灌溉水利用系数
生态	生态需水量/亿m^3	城市绿地用水+河湖补水量+环卫用水+生态林草用水
供需	供水量/亿m^3	调水量+中水再生利用量+地下水供水量+地表水供水量
	总需水量/亿m^3	生活需水量+生态需水量+工业需水量+三产需水量+农业需水量
	供需缺口/亿m^3	IF THEN ELSE(总需水量−总供水量>=0, 总需水量−总供水量, 0)

表 2 2006—2017 年模型仿真结果误差统计

Tab. 2 Error statistics of model simulation results from 2006 to 2017

指标	数据性质	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
农田灌溉需水量	历史值/亿m^3	346.2	324.9	317.8	323.0	327.0	330.4	321.5	336.4	330.8	328.5	321.4	317.7
	仿真值/亿m^3	324.5	293.4	310.6	316.2	287.3	321.8	277.3	305.0	287.6	330.5	303.4	315.8
	误差/%	−6.26	−9.69	−2.27	−2.11	−12.13	−2.60	−13.74	−9.33	−13.07	0.62	−5.60	−0.61
生活需水量	历史值/亿m^3	31.1	29.7	32.2	34.7	36.2	38.9	38.4	37.7	38.6	39.4	40.3	41.8
	仿真值/亿m^3	29.0	29.8	30.3	31.9	32.7	33.4	34.3	36.6	36.4	37.6	38.5	38.9
	误差/%	−6.71	0.13	−6.11	−8.12	−9.77	−14.12	−10.62	−2.71	−5.71	−4.69	−4.38	−6.98

2.2.2 *参数的灵敏度分析* 灵敏度分析是进行模型参数不确定性分析的重要方法，用于分析参数变化对模型变量输出结果产生的影响。一个稳定性好且有效的模型应具有较低的灵敏度。常用的分析方式为单因子法，即每次变化 1 个参数。本研究采用灵敏度模型对系统灵敏度进行分析。

因水资源系统中涉及较多参数和变量，本研究只选取系统内较为关键的 5 个参数和 6 个变量，根据 2006—2017 年数据进行分析。每次变化其中 1 个参数(增加 10%)，分析其对 6 个变量的影响。对于黄河流域水资源模型来说，生活、工业、三产、农业、生态需水量和总供水量是反映整个水资源系统受各因素影响的主要变量，此外选择的 GDP 增长率、人口增长率、城市绿地面积增长率、再生水利用率和灌溉面积变化率则是系统中较为重要的 5 个影响因子，与主要的状态变量息息相关。灵敏度分析结果见表 3。

表 3 模型灵敏度分析结果

Tab. 3 Sensitivity analysis results of model

指标	GDP增长率	人口增长率	再生水利用率	城市绿地面积增长率	灌溉面积变化率
三产需水量	0.5764	0	0.0011	0.0004	0.0007
农业需水量	0.0003	0	0	0	0.0268
工业需水量	0.5764	0.0001	0.0011	0.0004	0.0007
总供水量	0.0090	0.0001	0.0183	0	0
生态环境需水	0.0028	0	0.0007	0.3629	0.0004
生活需水量	0.0168	0.0257	0.0001	0	0.0001
平均灵敏度	0.1970	0.0043	0.0035	0.0606	0.0048

由表 3 可见，GDP 增长率对系统的灵敏度超过 10%，其余参数对系统灵敏度均低于 7%，表明系统对参数的灵敏度较低，稳定性较强。综合检验结果，该模型可用于黄河流域实际系统模拟。

3 结果与分析

3.1 水资源系统演变情景分析

在上述系统结构分析的基础上，依据水资源系统动力学模型，根据胁迫要素和驱动因子的分析结果，选择相关决策参数：GDP 增长率、三产比例、人口增长率、城镇化率等驱动因子作为用水需求变化的驱动力参数；城市绿地面积增长率、生态林草用水定额则作为生态环境政策调整参数；再生水利用率、农田灌溉定额、灌溉水利用系数、居民和工业用水水价和工业水重复利用率等胁迫要素作为水资源管理政策及节水技术反映参数。依照未来不同情景的具体意义，设定参数，预测 5 种情景下黄河流域的供需情况，主要情景参数见表 4。

本文根据流域范围的 95 个气象站的气象数据进行加权平均(泰森多边形)得到流域不同区域的气象数据，选择全球气候模式(CMIP5)中的 MPI 气候模式，通过降尺度处理，预估 RCP4.5 情景下黄河流域 2017—2030 年的降水和气温数据。其中气温的 MK 趋势检验结果为 1.75，小于 1.96(0.05 显著水平)，为不

明显增温趋势; 降水量检验值为−2.19, 其绝对值大于 1.96(0.05 显著水平), 表明降水量表现为显著的下降趋势, 故而模式预测结果与相关降水量研究结果相符, 较为合理。此外, 未来的流域供水量综合考虑了降水量对供水量的影响及流域综合规划的相关预测结果。

表 4　不同情景下黄河流域水资源系统的主要参数

Tab. 4　Main parameters of water resources system in the Yellow River basin under different scenarios

情景	年份	GDP增长率	工业水重复利用率/%	人口增长率	城镇化率	城市绿地面积增长率	灌溉水利用系数
现状延续情景	2020	0.058 0	72.50	0.003 5	0.540	0.060	0.525 0
	2025	0.049 0	77.25	0.003 5	0.585	0.060	0.560 0
	2030	0.049 0	82.00	0.003 5	0.630	0.060	0.580 0
情景二	2020	0.055 1	75.76	0.003 3	0.540	0.069	0.536 0
	2025	0.046 6	80.73	0.003 3	0.585	0.069	0.580 5
	2030	0.046 6	85.12	0.003 3	0.630	0.069	0.610 0
情景三	2020	0.052 2	79.02	0.003 0	0.540	0.063	0.567 4
	2025	0.044 1	84.20	0.003 0	0.585	0.063	0.616 8
	2030	0.044 1	88.40	0.003 0	0.630	0.063	0.650 0
情景四	2020	0.055 1	76.49	0.003 2	0.550	0.066	0.550 0
	2025	0.046 6	81.50	0.003 2	0.600	0.066	0.600 0
	2030	0.046 6	86.10	0.003 2	0.650	0.066	0.630 0
情景五	2020	0.063 8	74.68	0.003 7	0.550	0.063	0.530 0
	2025	0.053 9	79.57	0.003 7	0.600	0.063	0.575 0
	2030	0.053 9	85.12	0.003 7	0.650	0.063	0.600 0

3.2　需水结果分析

以下根据不同需水情景预测结果进行分析, 研究相关需水预测结果见表 5。

表 5　2030 年黄河流域需水情景比较

Tab. 5　Comparison of water demand in the Yellow River basin in 2030

	需水类型	现状延续情形	情景二	情景三	情景四	情景五	黄河综合规划
生活	生活需水量/亿m^3	48.06	48.45	48.26	50.00	50.98	48.89
农业	农田灌溉需水量/亿m^3	305.40	290.40	272.60	281.20	295.30	312.50
	果林需水量/亿m^3	21.27	20.22	18.98	19.58	20.56	16.80
	牲畜需水量/亿m^3	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	11.25
	鱼塘补水量/亿m^3	6.45	6.45	6.45	6.45	6.45	6.45
	汇总/亿m^3	340.40	324.40	305.20	314.50	329.50	347.10
生产	工业需水量/亿m^3	115.10	98.80	84.00	94.50	106.30	110.40
	建筑业及第三产业需水量/亿m^3	13.71	13.96	13.66	14.52	16.17	16.30
生态	生态需水量/亿m^3	37.93	41.08	39.12	40.08	38.97	24.65
	总需水/亿m^3	555.20	526.60	490.30	513.60	541.90	547.30

(1)现状延续情景: 模型在产业结构及人口增长保持现状的水平下运行, 各决策变量指标值维持现有发展趋势不变。至 2030 年, 黄河流域 GDP(不变价下同)达 77 940 亿元, 产业结构优化不足, 三产比例为 0.39, 工业增加值达 33 390 亿元。水资源管理程度较低, 工业水重复利用率为 82%, 农业灌溉水利用系数为 0.58, 工农业需水量占较大比重, 农业灌溉需水量达 327.00 亿 m^3, 生态需水量为 37.93 亿 m^3, 流域总需水量为 555.20 亿 m^3, 流域供需矛盾紧迫, 流域缺水量达 48.46 亿 m^3。

(2)情景二: 考虑到黄河流域生态用水常年被占用的状况, 该情景下注重考虑流域生态环境的用水需求。通过增加城市绿地面积, 提高城市环境绿化水平, 提高人工生态林地的用水量, 回补被占用的生态用水。至 2030 年, 生态林地用水定额为 276 m^3/亩, 城市绿地面积增长率达 0.069, 生态需水量逐年增加, 达 41.08 亿 m^3。该情景下为一般节水水平, 工业水重复利用率为 85%, 农业灌溉水利用系数为 0.61, 农业灌溉需水量达 310.70 亿 m^3, 工业需水量为 98.80 亿 m^3, 流域总需水量为 526.60 亿 m^3, 2030 年流域缺水量达 21.05 亿 m^3。

(3)情景三: 此情景下为强化水资源管理力度, 大力促进节水技术发展, 达到超常的节水水平。由于农业需水量占流域总需水量的 65%, 故而节水政策主要作用于农业节水。通过推进农业节水技术投资, 不断优化农业节灌水平, 提高流域内农灌水利用效率, 增加流域节灌面积, 该情景至 2030 年灌溉水利用系数达 0.65, 农田灌溉需水量为 273.00 亿 m^3。结合工业生活水价和水重复利用机制来推进生活和工业的节水管理, 工业水重复利用率为 88%, 工业需水量达 84.00 亿 m^3, 生活需水量为 48.30 亿 m^3。但是该情景下为了达到超常的节水水平, 管理决策上倾向节水, 一定程度上限制了经济社会的发展水平, 该情境下 2030 年黄河流域的 GDP 为 74 700 亿元, 流域总需水量为 490.30 亿 m^3, 实现流域供需平衡。

(4)情景四: 该情景加强水资源管理力度, 以尽可能满足社会经济发展、生态环境保护需求, 符合可持续发展的基本思想。此情景下充分考虑到将来时段内的经济社会发展趋势放缓, 生态需水增加的情形, 通过适当调控工业及生活用水价格, 促进经济发展带动节水技术的进步, 进而提高工业水及农业水的利用效率, 推动流域再生水利用的程度, 达到强化节水的水资源管理水平。该情境至 2030 年, 黄河流域 GDP 达 76 440 亿元, 三产比例达 0.429, 灌溉水利用系数达 0.63, 灌溉需水量为 281 亿 m^3, 工业水重复利用率为 86.1%, 工业需水量为 94.50 亿 m^3, 城市绿地面积增长率达 0.066, 生态需水量保持增长, 达 40 亿 m^3。故而该情景下的管理决策有助于缓解流域的供需矛盾, 保持流域经济社会良性发展。该情景至 2030 年, 流域总需水量为 513.06 亿 m^3, 缺水量为 7.60 亿 m^3。

(5)情景五: 此情景首要突出经济发展的地位, 必然伴随对生态的忽视, 模型中表现为经济社会需水的上涨, 节水管理在节水投资带动下为一般水平。在现状趋势发展的基础上提高各产业的增长率, 2030 年黄河流域的 GDP 增长率为 0.539, GDP 达 82 120 亿元; 产业规模扩大驱动生产用水量增加, 工业需水量达 106.30 亿 m^3, 灌溉需水量为 295.30 亿 m^3; 伴随经济发展, 生活水平与生活质量提高, 生活用水将较现状发展有所增长, 生活需水量为 51.00 亿 m^3。流域总需水量为 541.90 亿 m^3, 水资源短缺的问题将日益严重, 缺水量为 35.08 亿 m^3。

(6)黄河综合规划的结果源自《黄河流域水资源综合规划》对流域 2030 年的需水预测。

对比分析各情景和黄河综合规划的需水结果, 可以看出, 黄河综合规划对未来水资源管理水平和节水机制的约束作用预估较低, 故而工业、农业需水量较大, 总需水量超过了经济高速发展的情景五。而本研究的各情景分不同程度考虑水资源系统要素的驱动及胁迫作用, 在部分情景中加强了工农业生产需水的约束, 并根据流域发展需要, 适当增加了生态环境用水需求, 具有一定的合理性。

4 结 语

本文将基于物理机制的需水预测方法耦合至 SD 系统动力学模型中, 将经济、社会、气候、生态环境与流域水资源共同构成水资源巨系统, 以黄河流域为例, 探究了物理机制在农业、工业及生活需水过程中的应用, 分析了水资源各子系统中多要素胁迫及多因子驱动的关系, 以明确不同要素对流域需水的影响作用, 在此基础上, 结合系统动力学模型进行了流域需水预测。主要结论如下:

(1)随着黄河流域经济社会的进入新的发展阶段, 流域经济和人口依然保持相对增长趋势, 城镇化进程不断推进, 黄河流域对水资源的需求将不断增加, 水资源供需矛盾紧张。主要表现为: 黄河流域的生活需水

量随着流域人口及人均用水需求的增加不断增长, 随着产业结构调整, 工业需水量呈现缓慢减少态势, 生态及三产需水量逐年增加, 农业灌溉需水量呈下降趋势。

(2)对比 5 种情景下的黄河流域需水预测成果可知, 在加强流域水资源管理力度, 增加节水技术投资的前提下, 保障流域经济、社会协调发展, 注重发展经济的同时兼顾流域生态环境保护, 满足黄河流域下一阶段的经济社会可持续发展的要求, 可作为流域需水预测的最优化方案。

(3)为保障黄河流域水资源可持续发展, 实现黄河流域生态保护和高质量发展, 满足流域居民日益增长的用水需求, 需要把握流域经济社会发展的脉络, 调整流域水资源管理策略。通过现状延续情景和注重节水情景的比较可知, 提高节水意识, 增加流域节水技术投入, 进行流域水价调控, 发展节水农业, 可以有效地减少流域的需水量; 流域经济产业结构的调整, 大力发展第三产业, 促进产业结构优化, 有助于减少高耗水行业在流域需水中的占比, 从而优化流域的需水结构; 生态环境是流域经济社会可持续发展的保障, 从流域需水角度出发, 流域生态需水量将逐步增加, 以保证流域生态安全。

(4)本文考虑到流域不同作物分布区域气象数据不同的问题, 根据不同作物采用不同种植区域的气象数据进行作物灌溉需水量的计算, 但是研究区面积较广, 自然气候、水资源利用及社会经济等在空间尺度上相差较大, 按流域尺度设置的情景, 仍然会导致一定的需水预测误差, 因此在进一步研究中可以分省区进行预测。

参　考　文　献:

[1] 夏军, 翟金良, 占车生. 我国水资源研究与发展的若干思考[J]. 地球科学进展, 2011, 26(9): 905-915. (XIA Jun, ZHAI Jinliang, ZHAN Chesheng. Some reflections on the research and of development water resources in China[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(9): 905-915. (in Chinese))

[2] 张建云, 刘九夫, 金君良. 关于智慧水利的认识与思考[J]. 水利水运工程学报, 2019(6): 1-7. (ZHANG Jianyun, LIU Jiufu, JIN Junliang. Understanding and thinking of smart water conservancy[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(6): 1-7. (in Chinese))

[3] 刘晶, 刘翠善, 李潇, 等. 中国水-能源-粮食关联系统协同安全评价[J]. 水利水运工程学报, 2020(4): 24-32. (LIU Jing, LIU Cuishan, LI Xiao, et al. Security evaluation of water-energy-food nexus system in China[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(4): 24-32. (in Chinese))

[4] SHARAWAT I, DAHIYA R, DAHIYA R P, et al. Policy options for managing the water resources in rapidly expanding cities: a system dynamics approach[J]. Sustainable Water Resources Management, 2019, 5(3): 1201-1215.

[5] BEKCHANOV M, SOOD A, PINTO A, et al. Systematic review of water-economy modeling applications[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2017, 143(8): 04017037.

[6] 王喜峰, 周祖昊, 贾仰文, 等. 水资源演变研究现状及进展[J]. 水电能源科学, 2010, 28(8): 20-23. (WANG Xifeng, ZHOU Zuhao, JIA Yangwen, et al. Advances in water resources evolution research and future prospects[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(8): 20-23. (in Chinese))

[7] 刘晶, 鲍振鑫, 刘翠善, 等. 近20年中国水资源及用水量变化规律与成因分析[J]. 水利水运工程学报, 2019(4): 31-41. (LIU Jing, BAO Zhenxin, LIU Cuishan, et al. Change law and cause analysis of water resources and water consumption in China in past 20 years[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(4): 31-41. (in Chinese))

[8] 管晓祥, 金君良, 黄爱明, 等. 黄河流域典型流域水文气象变化与径流过程模拟[J]. 水利水运工程学报, 2019(5): 36-43. (GUAN Xiaoxiang, JIN Junliang, HUANG Aiming, et al. Typical hydro-meteorological changes and runoff process simulation in Yellow River basin[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(5): 36-43. (in Chinese))

[9] 朱洁, 王烜, 李春晖, 等. 系统动力学方法在水资源系统中的研究进展述评[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(2): 32-39. (ZHU Jie, WANG Xuan, LI Chunhui, et al. Review on method of system dynamics applied in water resources system[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015, 26(2): 32-39. (in Chinese))

[10] 李韧, 聂春霞. 基于系统动力学的乌鲁木齐市水资源配置方案优选[J]. 中国农村水利水电, 2019(10): 99-104. (LI Ren,

NIE Chunxia. Optimization of water resources allocation scheme based on system dynamics in Urumqi[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(10): 99-104. (in Chinese))

[11] 金菊良, 陈梦璐, 郦建强, 等. 水资源承载力预警研究进展[J]. 水科学进展, 2018, 29(4): 583-596. (JIN Juliang, CHEN Menglu, LI Jianqiang, et al. Advance in early warning of water resources carrying capacity[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(4): 583-596. (in Chinese))

[12] 李福臻, 曹升乐, 刘阳, 等. 区域水资源预警方法研究及其应用——以济南市为例[J]. 中国农村水利水电, 2020(4): 65-70. (LI Fuzhen, CAO Shengle, LIU Yang, et al. The study and application of regional water resources early warning method——take Jinan city as an example[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(4): 65-70. (in Chinese))

[13] HOEKEMA D J, SRIDHAR V. A system dynamics model for conjunctive management of water resources in the Snake River Basin[J]. American Water Resources Association, 2013, 49(6): 1327-1350.

[14] 张腾, 张震, 徐艳. 基于SD模型的海淀区水资源供需平衡模拟与仿真研究[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(2): 29-36. (ZHANG Teng, ZHANG Zhen, XU Yan. Simulation and emulation on the equilibrium of supply and demand of water resources in Haidian district based on the SD model[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016, 37(2): 29-36. (in Chinese))

[15] 粟晓玲, 谢娟, 周正弘. 基于SD变化环境下农业水资源供需平衡模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(3): 285-291. (SU Xiaoling, XIE Juan, ZHOU Zhenghong. System dynamics model-based simulation of agricultural water resources supply and demand balance in changing environments[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(3): 285-291. (in Chinese))

[16] 刘家宏, 王建华, 李海红, 等. 城市生活用水指标计算模型[J]. 水利学报, 2013, 44(10): 1158-1164. (LIU Jiahong, WANG Jianhua, LI Haihong, et al. A mathematic model for rational domestic water demand considering climate and economic development factors[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(10): 1158-1164. (in Chinese))

[17] 何霄嘉. 黄河水资源适应气候变化的策略研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(8): 44-48. (HE Xiaojia. Study on strategies of Yellow River water resources adapting to climate change[J]. Yellow River, 2017, 39(8): 44-48. (in Chinese))

[18] 郭磊, 黄本胜, 邱静, 等. 基于趋势及回归分析的珠三角城市群需水预测[J]. 水利水电技术, 2017, 48(1): 23-28. (GUO Lei, HUANG Bensheng, QIU Jing, et al. Trend and regression analysis-based water demand prediction of Pearl River Delta urban agglomeration[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(1): 23-28. (in Chinese))

[19] 贺丽媛, 夏军, 张利平. 水资源需求预测的研究现状及发展趋势[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(1): 61-64. (HE Liyuan, XIA Jun, ZHANG Liping. Present research and development trend on water resources demand forecast[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2007, 24(1): 61-64. (in Chinese))

[20] 赵阳, 孙杰肖, 韩会玲. 灰色预测GM(1, 1)模型在张家口市需水量预测中的应用[J]. 水电能源科学, 2014, 32(7): 40-43. (ZHAO Yang, SUN Jiexiao, HAN Huiling. Application of grey prediction GM(1, 1) model in Zhangjiakou water demand forecasting[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(7): 40-43. (in Chinese))

[21] 郭强, 李文竹, 刘心. 基于贝叶斯BP神经网络的区间需水预测方法[J]. 人民黄河, 2018, 40(12): 76-80. (GUO Qiang, LI Wenzhu, LIU Xin. Interval water demand prediction method based on Bayesian BP network[J]. Yellow River, 2018, 40(12): 76-80. (in Chinese))

[22] 唐雅君, 魏晓妹. 变化环境下宝鸡峡灌区农业需水量的合理确定[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(3): 254-260. (TANG Yajun, WEI Xiaomei. Reasonable determination of agricultural water demand in Baojixia irrigation district under changing environment[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2018, 29(3): 254-260. (in Chinese))

[23] 邹庆荣, 刘秀丽. 我国工业需水量预测模型研究及应用[J]. 数学的实践与认识, 2015, 45(13): 96-103. (ZOU Qingrong, LIU Xiuli. Research on the industrial water demand forecasting models and its application in China[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2015, 45(13): 96-103. (in Chinese))

System dynamics model-based water demand prediction under changing environment with consideration of physical mechanism

CHEN Yingjie[1, 2], JIN Baoming[1], JIN Junliang[2, 3, 4], WANG Guoqing[2, 3, 4], CAO Minxiong[2, 3, 4]

(1. *College of Civil Engineering*, *Fuzhou University*, *Fuzhou* 350108, *China*; 2. *Yangtze Institute for Conservation and Development*, *Nanjing* 210098, *China*; 3. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering*, *Nanjing Hydraulic Research Institute*, *Nanjing* 210029, *China*; 4. *Research Center for Climate Change*, *Ministry of Water Resources*, *Nanjing* 210029, *China*)

Abstract: With the intensification of climate change and human activities, water resources in the basin are more and more affected by the changing environment. It is of great significance to study the change characteristics of watershed water resources system and water demand prediction in the changing environment to support the management and rational allocation of watershed water resources. Based on the principle of system dynamics, coupled with the water demand prediction method considering physical mechanism, this article establishes the model of water resources system. Taking the Yellow River basin as an example, this paper analyzes the change characteristics of water resources system in the Yellow River basin under the action of multi-factor driving and multi-element stress, and predicts the evolution trend of water resources supply and demand in the Yellow River basin from 2017 to 2030 according to five different economic and social development situations in the future basin and the predicted future temperature and precipitation results using MPI climate model. The results show that: (1) The domestic water demand of the Yellow River basin increases continuously with the increase of the population and the per capita water demand of the basin. With the adjustment of industrial structure, the water demand for industry shows a trend of slow decrease, while the water demand for ecology and production increases year by year. (2) On the premise of strengthening the river basin water resources management and increasing the investment in water-saving technology, we should ensure the coordinated development of the basin economy and society, pay attention to the development of the economy while giving consideration to ecological environment protection in the basin, and meet the requirements of sustainable economic and social development in the next stage of the Yellow River basin. (3) In order to ensure the sustainable development of water resources in the Yellow River basin, and realize the ecological protection and high-quality development of the Yellow River basin, it is necessary to adjust the strategies of water resources management in the basin, improve the degree of water-saving, and promote the optimization of the industrial structure of the basin.

Key words: system dynamics; physical mechanism; water demand forecast; Yellow River basin