

基于水资源空间均衡的“四水四定”调控模型的应用

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: 将前期研究构建的基于水资源空间均衡的“四水四定”调控模型应用于山东省临沂市水资源空间均衡动态调控, 在预测各区(县)用水量和用水指标的基础上, 探究了各区(县)未来水资源空间均衡度, 在不同时间尺度上对未来用水量进行了动态调控。结果表明: 调控模型可靠性高且具备普适性; 当前用水模式下临沂市未来水资源在空间上处于绝对均衡状态, 仅水土匹配系数处于一般均衡状态; 对各区(县)不同类型未来用水量进行动态调控, 可在不同时间尺度上使临沂市水资源空间均衡的各项指标达到绝对均衡状态; 在“四水四定”与水资源空间均衡的约束下, 通过对未来长短期用水量的动态调控, 临沂市预期用水量能够实现动态均衡。

关键词: “四水四定”; 水资源空间均衡; 未来用水量; 动态调控; 临沂市

中图分类号: F205; TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2024)05-0078-08

Application of water resources spatial equilibrium-based “defining city, land, population, and industry based on water” regulation and control model//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: The “defining city, land, population, and industry based on water” (DCLPIW) regulation and control model based on water resources spatial equilibrium constructed in previous research was used to carry out applied research of water resources spatial equilibrium dynamic regulation of Linyi City, Shandong Province. The spatial equilibrium of water resources in different districts (counties) in the future was explored based on the forecast results of water consumption and water use indicators, and dynamic regulation of future water consumption was conducted on different time scales. The results show that the regulation and control model is highly reliable and universally applicable, and future water resources in Linyi City are in an absolute spatial equilibrium state under the current water use pattern, only the water and soil matching coefficient is in a general equilibrium state. The dynamic regulation of future water consumption of different types in various districts (counties) can make the spatial equilibrium indicators of water resources in Linyi City reach the absolute equilibrium state on different time scales. Under the constraints of DCLPIW and spatial equilibrium of water resources, Linyi City is expected to realize dynamic equilibrium of water consumption based on the long- and short-term dynamic regulation of water consumption in the future.

Key words: “defining city, land, population, and industry based on water”; spatial equilibrium of water resources; future water consumption; dynamic regulation; Linyi City

水资源作为保障高质量发展的重要因素^[1], 需要在空间上合理布局与均衡发展^[2], 开展水资源空间均衡研究, 是实现国土空间规划“四水四定”^[3-5]的重要基础^[6-7]。区域水资源承载力评估^[8-9]、水资源优化配置^[10-13]、水资源优化调度^[14-16]是提高水资

源利用效率、保证民生的重要手段, 为此, 笔者在前期研究中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^[17]。该方法由3部分组成: 第一部分通过统计模型对当前用水模式下的未来用水量和用水指标进行预测; 第二部分基于第一

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: weihs1997@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

部分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“四水四定”水资源承载力模型、水资源空间均衡模型,评估水资源空间均衡度;第三部分利用构建的模型对不同行业、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。本文以山东省临沂市为例,采用基于水资源空间均衡的“四水四定”调控模型验证临沂市各区(县)未来用水量和用水指标预测结果的可靠性与合理性,分析当前用水模式下各区(县)未来用水量和用水指标的变化趋势,研究各区(县)未来水资源空间均衡度,在不同时间尺度上对未来用水量进行动态调控。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

临沂市(34° 22' N ~ 36° 13' N、117° 24' E ~ 119° 11' E)位于鲁东南,总面积 17 186 km²,包括 3 区、9 县,共 119 个镇、9 个乡、3 个开发区(图 1)。临沂市水资源丰富且南多北少、东多西少,时间变化

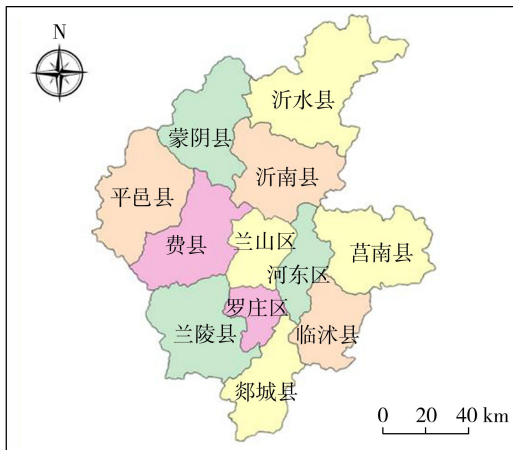


图 1 临沂市行政区划

Fig. 1 Zoning map of Linyi City

上与降水趋势一致,平均年降水量为 815.8 mm,雨量集中。全市人口总计 1 101.84 万人,地区生产总值 4 650.56 亿元,人均生产总值达 38 655 元。临沂市总用水量中,居民生活用水量、公共用水量、农业用水量、工业用水量、生态用水量占比分别为 16.7%、3.9%、61.8%、11.8%、5.8%。目前临沂市存在水资源供需矛盾较为突出、水源工程与区域用水分布不均衡、水资源配置能力不足、现状水源工程丰枯调节能力较低、开发能力不足、大量雨洪资源无法利用等问题。

1.2 数据来源

本文采用的用水量数据包括城镇居民生活用水量、农村居民生活用水量、城镇公共用水量、农田灌溉用水量、工业用水量、生态与环境补水量、林牧渔畜用水量,共 7 类,来源于《临沂市水资源公报》。用水指标数据中,万元 GDP 用水量、万元工业增加值用水量、城镇和农村居民生活用水指标、农田耕地灌溉用水指标数据来源于《临沂市水资源公报》,城镇化率和人均建设用地数据来源于《临沂市统计年鉴》。选取 2008—2020 年的年际数据作为模型构建的基础,对未来 2 年(短期)和未来 10 年(长期)的水资源空间均衡度进行评估,并对未来用水量进行调控。

2 用水量与用水指标预测分析

2.1 用水量预测过程与结果

2.1.1 相似性划分

由于可获取的用水量数据年份有限,通过时间序列相似性度量挑选出各类型用水量的相似区域,以满足输入数据量的要求。因用水量种类较多,本文以城镇居民生活用水量为例,预测和分析未来用水量。2008—2020 年城镇居民生活用水量时间序列相似性计算结果如表 1 所示,相似年份数越大,表

表 1 城镇居民生活用水量时间序列相似性计算结果

Table 1 Calculation results of time series similarity of urban resident water consumption

区(县)	相似年份数											
	兰山区	罗庄区	河东区	沂南县	郯城县	沂水县	兰陵县	费县	平邑县	莒南县	蒙阴县	临沭县
兰山区	13											
罗庄区	0	13										
河东区	0	6	13									
沂南县	0	11	4	13								
郯城县	0	6	2	8	13							
沂水县	0	7	4	9	11	13						
兰陵县	0	2	2	4	9	7	13					
费县	0	6	3	8	5	6	9	13				
平邑县	0	2	2	2	7	5	11	7	13			
莒南县	0	3	2	5	6	7	10	10	13	13		
蒙阴县	0	1	1	3	8	6	12	8	12	11	13	
临沭县	0	5	2	7	4	3	8	10	8	9	9	13

示两个区域的时间序列相似性越高,对角线上的数字 13 表示时间序列总数。由表 1 可知,罗庄区和沂南县、沂南县和郯城县、沂水县与费县相似年份数均不低于 8,将它们划分为一类;与其他区(县)的相似年份数都低于 8 的区(县)自成一类。

2.1.2 未来各类用水量预测分析

根据笔者前期研究^[17],利用自回归-支持向量机 (autoregressive-support vector machine, AR-SVM) 模型预测 2021—2030 年各区(县)未来各类用水量,结果如图 2 所示。总体来看,在当前用水模式

下,未来城镇居民生活用水量、城镇公共用水量呈现上升趋势,未来农村居民生活用水量呈现下降趋势,未来农田灌溉用水量、工业用水量和生态与环境补水量在不同区(县)呈现不同趋势,未来林牧渔畜用水量呈现一定的上升趋势。

2.1.3 未来总用水量预测与不确定性分析

以 2008—2018 年为模型训练集,2019—2020 年为模型测试集,2021—2030 年为模型预测集,图 3 为各区(县)未来总用水量预测结果。各区(县)未来总用水量为各类用水量预测结果之和,

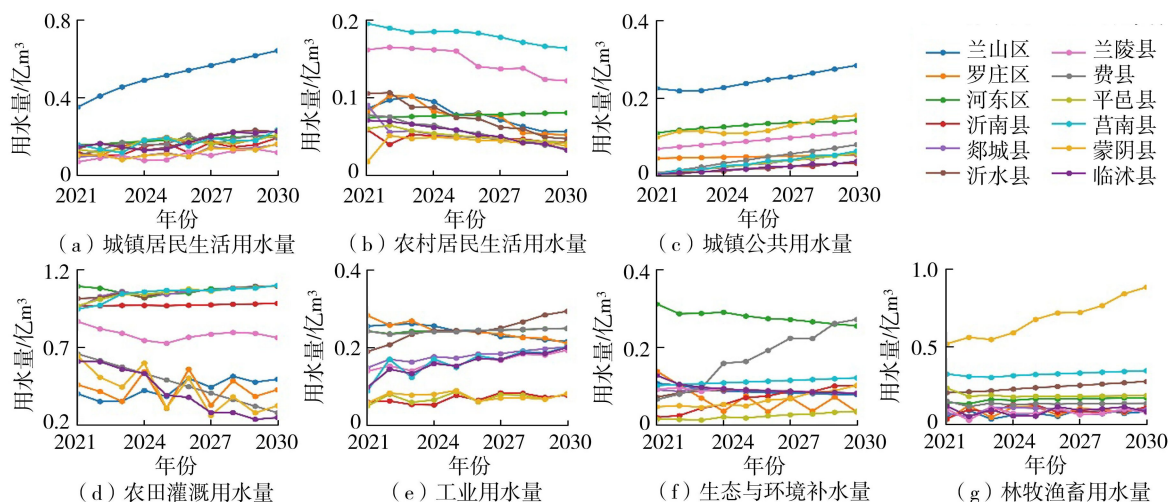


图 2 各类用水量预测结果

Fig. 2 Forecast results of various types of water consumption

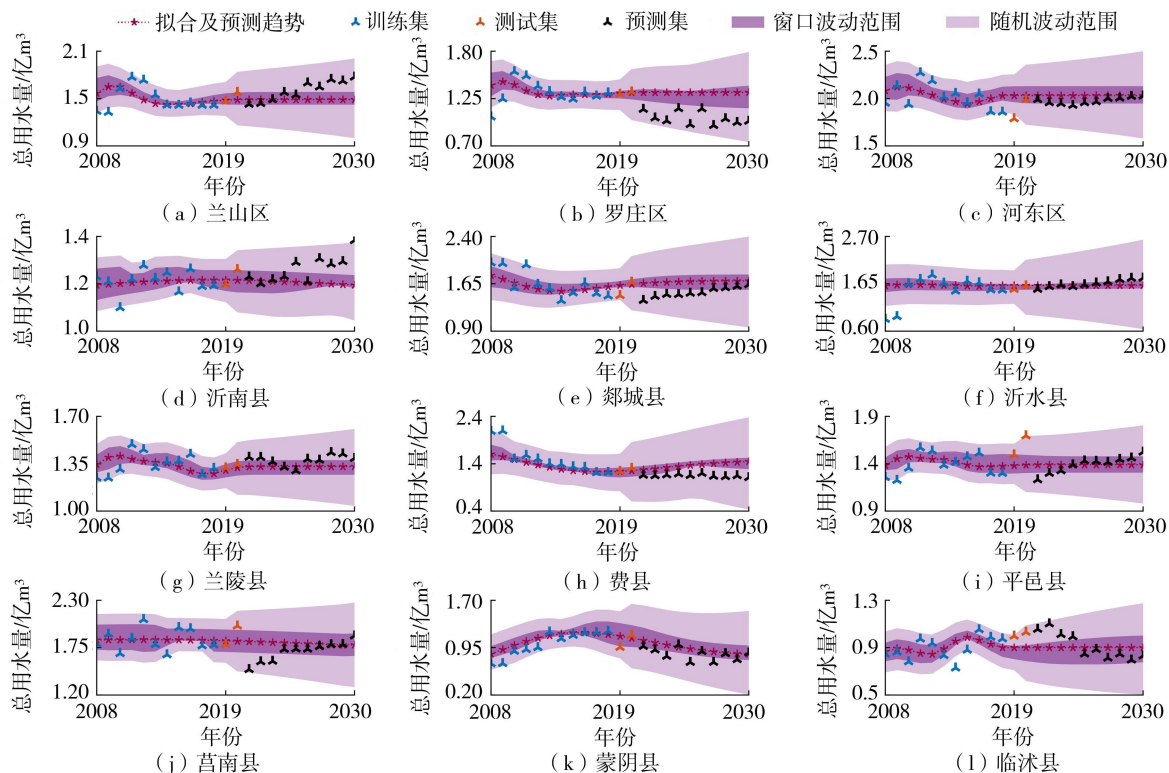


图 3 各区(县)总用水量预测结果与不确定性分析

Fig. 3 Forecast results and uncertainty analysis of total water consumption in different districts (counties)

图3中未来总用水量窗口波动范围由基于模糊信息粒化和时间序列相似性度量的AR-SVM模型^[17]预测得到。由于不确定性因素干扰,预测结果的准确度随时间下降,即随机波动范围随着时间增大。以城镇居民生活用水量为例,当某区(县)2021—2030年的预测值均值超出理想波动区间时,则对该区(县)的预测值进行校正,结果如图4所示。从图4中可以看出,波动系数为5%时,校正后的城镇居民生活用水量预测结果几乎都在随机波动范围内。

2.1.4 预测方法对比

选取水文学中常用的两种未来用水量预测法,年增长率法^[18]和灰色神经网络预测模型^[19-20],将其预测结果与本文基于模糊信息粒化和时间序列相似

性度量的AR-SVM模型预测结果对比,取临沂市12个区(县)2019年和2020年的数据,计算3个模型预测结果的决定系数 R^2 ,验证模型的相对精确度。

不同模型预测精度对比见图5。AR-SVM模型预测结果的 R^2 最高,说明该模型预测精度较高。灰色神经网络预测模型预测结果的 $R^2=0.11$,精度明显低于AR-SVM模型,且对应点大多在1:1线的左侧,说明此模型预测结果偏小。年增长率法预测结果 $R^2=0.08$,精度较低,该方法基于历史数据的变化趋势预测规划水平年的数值,具有较大的不确定性,预测结果偏离程度较大,且有较多的异常偏大点。结果表明,本文采用的AR-SVM模型预测结果精度最佳,预测结果合理且可靠。

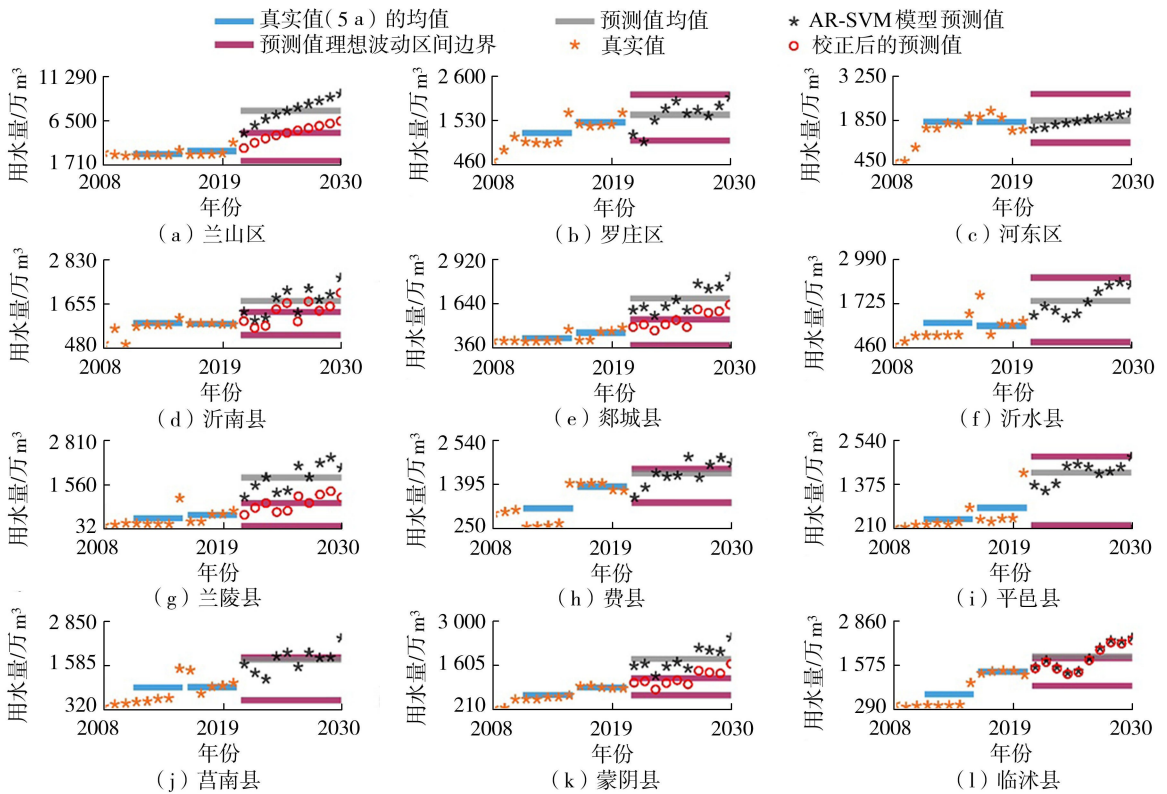


图4 城镇居民生活用水量预测与校正结果

Fig. 4 Forecast and corrected results of urban resident water consumption

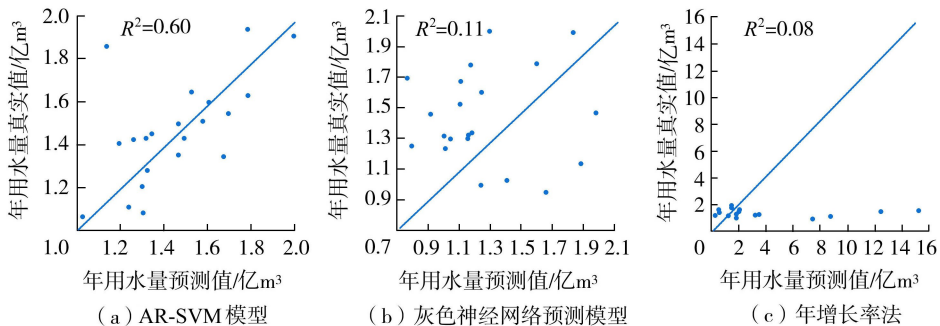


图5 不同模型预测精度对比

Fig. 5 Comparison of forecast accuracy of different models

2.2 用水指标预测结果

用水指标是构建“四水四定”调控模型的基础,包括万元用水指标(万元GDP用水量和万元工业增加值用水量)、城镇化率、居民用水指标(城镇和农村居民用水指标)、人均建设用地、农田耕地灌溉用水指标。

以万元GDP用水量为例,通过复杂函数回归趋势法拟合得到预测结果(图6)。一般来说, R^2 与数据量有关,数据量越大,波动值对 R^2 的影响越小。从图6可以看出,各(区)县万元GDP用水量都有较

好的拟合效果(R^2 大于0.5)。各区(县)所有用水指标预测结果 R^2 的均值为0.64,蒙阴县各用水指标预测结果 R^2 的均值最低,为0.56,也具有较高的精度。

根据国家发展改革委等部门联合印发的《“十四五”节水型社会建设规划》,为了实现水资源节约集约利用,2025年需实现万元GDP用水量和万元工业增加值用水量下降。从图7可知,临沂市万元GDP用水量和万元工业增加值用水量在2021—2030年出现波动,其中,万元GDP用水量在各区

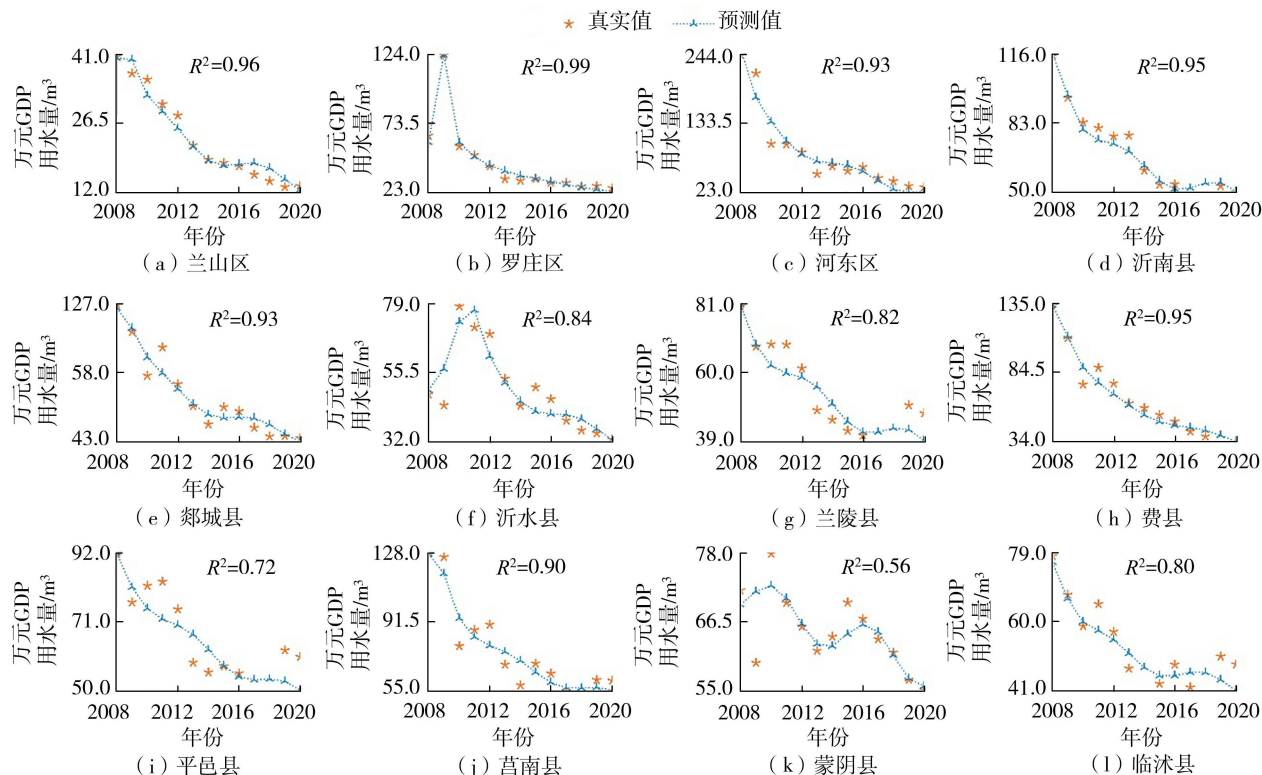


图6 万元GDP用水量预测结果

Fig. 6 Forecast results of water consumption per ten thousand yuan of GDP

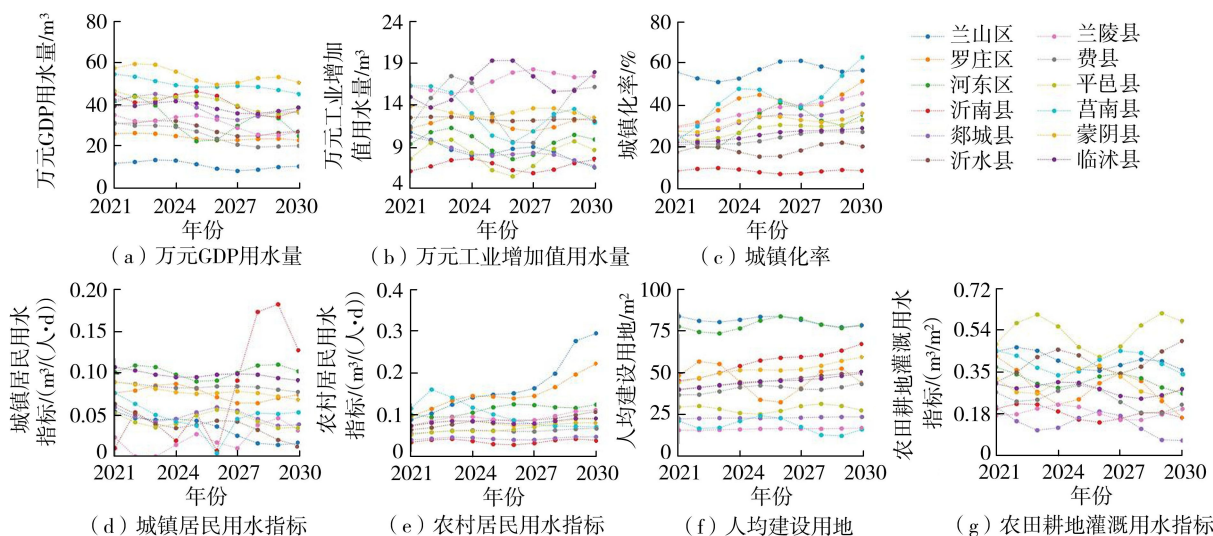


图7 未来用水指标预测结果

Fig. 7 Forecast results of future water use indicators

(县)均呈减小趋势,但万元工业增加值用水量在部分区(县)呈增加趋势。随着城市化进程加快,临沂市城镇化率逐年缓慢上升。城镇居民用水指标与农村居民用水指标呈现相反的变化趋势,城镇居民用水指标呈现下降趋势,而农村居民用水指标呈现上升趋势,这与城镇化发展过程密切相关。人均建设用地是建设用地与人口数量之比,是“以水定城”最重要的参数之一,在2021—2030年呈现波动变化趋势。农田耕地灌溉用水指标为单位面积灌溉用水量,是“以水定地”的主要参数,该指标受未来用水量和农田灌溉面积的影响。从农田耕地灌溉用水指标的常规变化趋势来看,该指标应逐年下降,但2008—2020年的历史数据具有一定的波动性,因此,从预测趋势来看,虽然大部分区(县)呈现下降趋势,但仍有部分区(县)有一定的上升,这可能是由实际用水记录波动较大所致。

3 基于“四水四定”调控模型的水资源空间均衡计算

临沂市水资源空间均衡度计算考虑两个时段,分别是2021—2022年短期情况和2021—2030年长期情况,两个时段的计算基于未来用水量和用水指标在该时段的均值。依据基于“四水四定”调控模型的水资源空间均衡计算方法^[17],水资源负载系数、水土匹配系数和用水效益的基尼系数均值 G 为

$$G = (G_C + G_\delta + G_{E_q})/3 = G(q, q_L, q_F) \quad (1)$$

式中: G_C 、 G_δ 、 G_{E_q} 分别为水资源负载系数 C 、水土匹配系数 δ 和用水效益 E_q 的基尼系数; q 为调控前的总用水量; q_L 为居民生活用水量(城镇与农村居民用水量之和); q_F 为农田灌溉用水量。

最优化方程为

$$\min G = G(a_{q_L}, a_{q_F}) \quad (2)$$

表3 各区(县)未来用水量动态调控结果

Table 3 Results of dynamic regulation of future water consumption for different districts

时段	区(县)	居民生活用水量/(万 m ³ /a)	农田灌溉用水量/(万 m ³ /a)	总用水量/(万 m ³ /a)	时段	区(县)	居民生活用水量/(万 m ³ /a)	农田灌溉用水量/(万 m ³ /a)	总用水量/(万 m ³ /a)
2021—2022年	兰山区	-237	123	-114	2021—2030年	兰山区	-299	126	-173
	罗庄区	-187	420	232		罗庄区	215	106	321
	河东区	3	-98	-95		河东区	121	-113	8
	沂南县	218	-317	-99		沂南县	212	-233	-21
	郯城县	118	-96	22		郯城县	131	-110	21
	沂水县	542	-493	49		沂水县	-271	302	31
	兰陵县	81	-171	-90		兰陵县	97	-177	-80
	费县	482	-478	4		费县	485	-523	-38
	平邑县	-87	71	-16		平邑县	-87	81	-6
	莒南县	-494	287	-207		莒南县	-524	212	-312
	临沭县	130	-114	16		临沭县	129	-116	13
	蒙阴县	507	-303	204		蒙阴县	523	-38	485
	临沂市	1076	-1171	-95		临沂市	732	-485	247

式中 a_{q_L} 、 a_{q_F} 分别为 q_L 和 q_F 的波动系数,范围设置为 $[0.95, 1.05]$ 。

未来用水量调控后的临沂市总用水量 q' 为

$$q' = q - q_L + a_{q_L}q_L - q_F + a_{q_F}q_F \quad (3)$$

本文通过策略化随机搜索算法^[21]计算调整后的总用水量。表2给出了用水量调控前后的基尼系数。可以看到,用水量调控前临沂市的整体水资源空间均衡度较好,长短期的平均基尼系数、水资源负载系数的基尼系数和用水效益的基尼系数均不超过0.2,处在绝对均衡状态,只有水土匹配系数的基尼系数稍差,处于一般均衡状态。对未来用水量动态调控后,3个系数的基尼系数均不超过0.2,达到了绝对均衡状态。

表2 用水量调控前后的基尼系数

Table 2 Gini coefficients before and after adjustment of water consumption

调控状态	时段	G_C	G_δ	G_{E_q}	G
调控前	2021—2022年	0.14*	0.30**	0.15*	0.20*
	2021—2030年	0.12*	0.25**	0.16*	0.18*
调控后	2021—2022年	0.13*	0.20*	0.15*	0.16*
	2021—2030年	0.11*	0.20*	0.16*	0.16*

注: *、**分别表示绝对均衡状态和一般均衡状态。

表3为各区(县)未来用水量动态调控结果,根据式(1),只需要对居民生活用水量和农田灌溉用水量两个关键类型用水量进行调节。从短期来看,为达到水资源空间均衡,12个区(县)的居民生活用水量和农田灌溉用水量的动态调整有差异。其中,沂南县、蒙阴县、沂水县、费县、临沭县居民生活用水量需求增加,相对应的农田灌溉用水量相应减少才能更好地实现水资源的空间均衡,意味着这5县农村或城镇人口增长的同时,应提升农田灌溉用水效率,替换节水作物或减少灌溉农田面积;兰山区、罗庄区和莒南县居民用水量需求减少,农田灌溉未来

用水量需求增加,意味着这3区(县)居民的耗水量较大,需要减少居民用水量以达到水资源空间均衡,可通过提高生活用水效率方式减少居民用水量,农田灌溉未来用水量需求增加可通过适当增加农田规模实现;其他区(县)需调整的规模较小。总体来说,为达到水资源空间均衡,必须提升水资源利用效率。

从长期来看,临沂市在当前用水模式和城乡建设的发展模式下,需要增加总水量(247万 m^3/a)才能使未来各项指标在空间上达到绝对均衡,这一点与短期状况相比有差别。与短期调控的较大差异体现在罗庄县居民生活用水量和农田灌溉用水量增加,表明从长期趋势看,罗庄县人口数量增长,农田规模扩大。而沂水县则应减少人口数量,增加农田规模;临沭县需增加人口规模,农田规模则保持当前水平。需要说明的是,对未来用水量动态调控基于对未来各行业用水量的预测,而不是基于当前某一年的用水量,未来用水量变化建立在历史数据上,也就是说在当前城镇发展和用水模式下,宏观调控未来用水量变化,以达到全市用水量动态均衡。

总体来看,长短期水资源动态调控有一定的一致性,但在部分区(县)呈现出一定差异,对于长短期动态调控不一致的区(县)需要更加关注。具体来说,这是未来各类用水量长时间序列预测结果(图2)和未来用水指标预测结果(图7)在不同时间尺度下预测差异导致的,如罗庄区未来2年居民平均生活用水量和农田灌溉用水量分别为1018万 m^3/a 和4365万 m^3/a ,未来10年居民平均生活用水量和农田灌溉用水量分别为1219万 m^3/a 和4250万 m^3/a ,这和表3中罗庄区未来10年居民生活用水量需求增加,农田灌溉用水量有所减少相一致,也解释了罗庄区长短期居民生活用水量和农田灌溉用水量出现差异的原因。

值得注意的是,未来水资源动态调控应该建立在城乡发展的基础上,人口规模、农田种植规模等调控除了考虑水资源因素外,还需要考虑其他因素,水资源空间均衡是城市发展的重要因素之一,需要政府综合考虑调控过程。

4 结 语

本文以山东临沂市为例,开展了基于水资源空间均衡的“四水四定”调控模型应用研究,重点验证了分区用水量和用水指标预测方法的合理性,展示了水资源动态调控方法的实现过程。

临沂市在当前用水结构模式下,未来水资源空间均衡性表现较好,长短期水资源负载系数和用水

效益的基尼系数均不超过0.2,仅有水土匹配系数的基尼系数稍差,大于0.2,没有达到绝对均衡。通过未来用水量动态调控,可使水土匹配系数的基尼系数不超过0.2,达到绝对均衡。长短期水资源动态调控呈现出一定的一致性。为达到水资源空间长期均衡,未来总用水量需求增加,与当前用水模式下总用水量相比,预测未来长期总用水量增加量为247万 m^3/a ,因此,临沂市需将提升水资源利用效率摆在首要位置。从短期看,当前用水模式和城市发展情况下未来用水量足以实现水资源空间均衡,仅需适当调整各区(县)未来用水量和用水方式。

需要说明的是,本文水资源动态调控基于水资源空间均衡,水资源空间均衡是流域区域发展的重要因素之一,但不是决定性因素,水资源分配需要根据实际情况进行调整,如在一些城市某些区域,农田规模、工业耗水等可调控范围有限,需要基于水资源空间均衡的“四水四定”调控模型增加一定的约束因子,如调整工业用水或农田用水上下限,以实现水资源动态调控。

参考文献:

- [1] 刘昌明,刘璇,杨亚锋,等.水文地理研究发展若干问题商榷[J].地理学报,2022,77(1):3-15.(LIU Changming,LIU Xuan,YANG Yafeng,et al. A discussion on some issues of hydro-geographical research[J]. Acta Geographica Sinica,2022,77(1):3-15.(in Chinese))
- [2] 杨荣雪,王丰,王红瑞,等.国土空间规划体系下的城市水资源空间均衡评价模型及应用[J].水资源保护,2023,39(6):130-136.(YANG Rongxue,WANG Feng,WANG Hongrui,et al. Spatial equilibrium evaluation model of urban water resources and its application under territorial spatial planning system[J]. Water Resources Protection,2023,39(6):130-136.(in Chinese))
- [3] 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))
- [4] 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))
- [5] 褚俊英,李孟泽,周祖昊,等.水资源保护利用“四水四

- 定”的创新管理模式[J]. 水资源保护, 2024, 40(2): 23-27. (CHU Junying, LI Mengze, ZHOU Zuhao, et al. Innovative management pattern of “four water-based principles” in water resources protection and utilization [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 23-27. (in Chinese))
- [6] 赵自阳,王红瑞,张力,等. 长江经济带水资源-水环境-社会经济复杂系统韧性调控模型及应用[J]. 水科学进展, 2022, 33(5): 705-717. (ZHAO Ziyang, WANG Hongrui, ZHANG Li, et al. Construction and application of resilience evaluation model of water resources-water environment-social economy complex system in the Yangtze River Economic Belt [J]. Advances in Water Science, 2022, 33(5): 705-717. (in Chinese))
- [7] 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))
- [8] 崔毅,唐慧彦,金菊良,等. 基于动态差异度系数的区域水资源承载力评价与诊断[J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 152-160. (CUI Yi, TANG Huiyan, JIN Juliang, et al. Evaluation and diagnosis of regional water resources carrying capacity based on dynamic difference degree coefficient [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 152-160. (in Chinese))
- [9] 安莉娜,范国福,吴迪,等. 基于水资源承载力与城市经济社会发展水平耦合协调度模型的遵义市发展评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 35-41. (AN Lina, FAN Guofu, WU Di, et al. Development evaluation of Zunyi City based on coupling coordination degree model of water resources carrying capacity and urban economic and social development level [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 35-41. (in Chinese))
- [10] 陈军飞,张学友,李远航,等. 考虑利他偏好的南水北调水资源供应链生态补偿契约决策[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 18-28. (CHEN Junfei, ZHANG Xueyou, LI Yuanhang, et al. Ecological compensation contract decision of water resources supply chain in South-to-North Water Diversion Project considering altruistic preference [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(6): 18-28. (in Chinese))
- [11] 李轶,万芬芬,张文龙. 长三角地区工业园区水资源高效利用的发展趋势与策略[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 1-9. (LI Yi, WAN Fenfen, ZHANG Wenlong. Development trend and strategy of efficient utilization of water resources for industrial parks in Yangtze River Delta Region [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3): 1-9. (in Chinese))
- [12] 沈际杰,柏欣莉,衣鹏. 节水建设城市用水时空差异模型研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 38-43. (SHEN Jijie, BAI Xinli, YI Peng. Research on temporal and spatial difference model of urban water use for water-saving construction [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(1): 38-43. (in Chinese))
- [13] 陶洁,王沛霖,王辉,等. 基于 A-NSGA-III 的引江济淮工程河南段水资源优化配置研究[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 111-119. (TAO Jie, WANG Peilin, WANG Hui, et al. Research on water resources optimal allocation in Henan Section of Yangtze River to Huaihe River Water Diversion Project based on A-NSGA-III algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 111-119. (in Chinese))
- [14] 方国华,李智超,钟华昱,等. 考虑供水均衡性的南水北调东线工程江苏段优化调度[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 10-18. (FANG Guohua, LI Zhichao, ZHONG Huayu, et al. Optimal operation of Jiangsu section of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project considering the water supply balance [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3): 10-18. (in Chinese))
- [15] 陈晓楠,靳燕国,许新勇,等. 南水北调中线干线智慧输水调度的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(5): 46-55. (CHEN Xiaonan, JIN Yanguo, XU Xinyong, et al. Thinking on smart water dispatching in the South-to-North Water Diversion Middle Route Project [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(5): 46-55. (in Chinese))
- [16] 王文君,方国华,李媛,等. 基于改进多目标粒子群算法的平原坡水区水资源优化调度[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 91-96. (WANG Wenjun, FANG Guohua, LI Yuan, et al. Optimal operation of water resources in plain slope water area based on improved multi-objective particle swarm optimization algorithm [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 91-96. (in Chinese))
- [17] 魏豪杉,王红瑞,郑鹏鑫,等. 基于水资源空间均衡的“四水四定”调控模型构建[J]. 水资源保护, 2024, 40(3): 71-77. (WEI Haoshan, WANG Hongrui, JIA Pengxin, et al. Construction of “defining city, land, population, and industry based on water” regulation and control model based on spatial equilibrium of water resources [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 71-77. (in Chinese))

- [26] HAIR J F, RISHER J J, SARSTEDT M, et al. When to use and how to report the results of PLS-SEM[J]. *European Business Review*, 2019, 31(1): 2-24.
- [27] WETZELS M, ODEKERKEN-SCHRÖDER G, VAN OPPEN C. Using PLS path modeling for assessing hierarchical construct models: guidelines and empirical illustration[J]. *MIS Quarterly*, 2009, 33(1): 177-195.
- [28] LIU Shuai, HU Baolan, HE Zhanfei, et al. Ammonia-oxidizing archaea have better adaptability in oxygenated/hypoxic alternant conditions compared to ammonia-oxidizing bacteria [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, 99(20): 8587-8596.
- [29] 李小平, 方涛, 敖鸿毅, 等. 东湖沉积物中 dNaR 活性和硝酸盐还原菌的垂向分布[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(2): 228-232. (LI Xiaoping, FANG Tao, AO Hongyi, et al. Vertical variation of dissimilatory nitrate reductase activity and nitrate reducer in the sediments of Lake Donghu[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(2): 228-232. (in Chinese))
- [30] 文高辉, 王子诚, 何庆, 等. 洞庭湖平原化肥面源污染生态环境风险及脱钩效应[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(4): 301-308. (WEN Gaohui, WANG Zicheng, HE Qing, et al. Eco-environmental risks and decoupling effects of fertilizer non-point source pollution in Dongting Lake Plain [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(4): 301-308. (in Chinese))
- [31] SINGH B K, BARDGETT R D, SMITH P, et al. Microorganisms and climate change: terrestrial feedbacks and mitigation options[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2010, 8(11): 779-790.
- [32] ZHAO Shan, ZHANG Baoju, ZHOU Nianqing. Effects of redox potential on the environmental behavior of nitrogen in riparian zones of west Dongting Lake Wetlands, China [J]. *Wetlands*, 2020, 40(5): 1307-1316.
- [33] 耿玉栋, 张千千, 孙继朝, 等. 不同土地利用方式和地下水埋深对水中硝态氮浓度分布的影响[J]. *环境污染与防治*, 2016, 38(6): 63-68. (GENG Yudong, ZHANG
- Qianqian, SUN Jichao, et al. Impact of land use types and groundwater depth on the distribution of nitrate nitrogen in groundwater [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2016, 38(6): 63-68. (in Chinese))
- [34] 崔荣阳, 雷宝坤, 张丹, 等. 浅层地下水升降对菜地土壤剖面硝化/反硝化微生物丰度的影响[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(9): 3099-3106. (CUI Rongyang, LEI Baokun, ZHANG Dan, et al. Effects of shallow groundwater fluctuations on the abundances of nitrification and denitrification microbes in the soil profile of vegetable field [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(9): 3099-3106. (in Chinese))
- [35] 李勇, 单雅洁, 李娜, 等. 太湖潜流带有机质含量对硝酸盐还原途径的影响[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(1): 44-51. (LI Yong, SHAN Yajie, LI Na, et al. Effects of organic matter content on nitrate reduction pathway in the hyporheic zone of Lake Taihu [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(1): 44-51. (in Chinese))
- [36] THAYALAKUMARAN T, BRISTOW K L, CHARLESWORTH P B, et al. Geochemical conditions in groundwater systems: implications for the attenuation of agricultural nitrate [J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(2): 103-115.
- [37] 沈帅, 马腾, 杜尧, 等. 江汉平原东部浅层地下水氮的空间分布特征[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(2): 47-56. (SHEN Shuai, MA Teng, DU Yao, et al. The spatial distribution characteristic and genesis of nitrogen of shallow groundwater in the east of Jiangnan Plain [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(2): 47-56. (in Chinese))
- [38] XIA Qiwen, HE Jiangtao, HE Baonan, et al. Effect and genesis of soil nitrogen loading and hydrogeological conditions on the distribution of shallow groundwater nitrogen pollution in the North China Plain [J]. *Water Research*, 2023, 243: 120346. (收稿日期: 2024-01-26 编辑: 王芳)

(上接第 85 页)

- [18] 白鹏, 龙秋波. 3 种用水量预测方法在京津冀地区的适用性比较[J]. *水资源保护*, 2021, 37(2): 102-107. (BAI Peng, LONG Qiubo. Applicability comparison of three water consumption prediction methods in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(2): 102-107. (in Chinese))
- [19] 杜迎欣, 曹小兵, 李琛, 等. 基于遗传算法的城市用水量灰色预测模型研究: 以秦皇岛市引青济秦工程为例 [J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(3): 129-132. (DU Yingxin, CAO Xiaobing, LI Chen, et al. Research on model of gray prediction of urban water demand based on genetic algorithm: taking project of water diversion from Qinglong River to Qinhuangdao for example [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2014, 25(3): 129-132. (in Chinese))
- [20] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016: 93-93.
- [21] WEI Haoshan, ZHANG Yongqiang, LIU Changming, et al. The strategic random search (SRS): a new global optimizer for calibrating hydrological models [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2024, 172: 105914. (收稿日期: 2023-10-09 编辑: 施业)