

左朝晖,李绍康,杨津津,等.基于GA-BP神经网络的页岩气开发区域水资源承载力研究[J].环境工程技术学报,2021,11(1):194-201.
ZUO C H,LI S K,YANG J J,et al. Research on water resources carrying capacity of shale gas development area based on GA-BP neural network[J].
Journal of Environmental Engineering Technology,2021,11(1):194-201.

基于GA-BP神经网络的页岩气开发 区域水资源承载力研究

左朝晖^{1,2},李绍康¹,杨津津¹,袁颖^{2*},李翔^{1*}

1. 中国环境科学研究院

2. 河北地质大学城市地质与工程学院

摘要 以西南地区威远县为例,从社会、经济、生态、水资源和页岩气开发5个方面构建水资源承载力评价指标体系及分级标准,采用遗传算法(genetic algorithm, GA)优化BP(back propagation)神经网络,形成GA-BP神经网络组合模型,对研究区2014—2019年的水资源承载力状态进行评价。结果表明:使用GA-BP神经网络计算得到验证数据的最大相对误差为6.5%,期望输出与结果的相关系数为0.995 98。随着页岩气井群规模的增大,研究区水资源承载力指数总体上逐年降低,其中2014—2017年水资源承载力为可承载状态,2018—2019年为弱承载状态;水资源承载力指数主要影响指标为人均水资源量、页岩气的井群规模和万元工业增加值用水量等。

关键词 页岩气;水资源承载力;遗传算法(GA);BP神经网络

中图分类号:X741 **文章编号**:1674-991X(2021)01-0194-08 **doi**:10.12153/j.issn.1674-991X.20200081

Research on water resources carrying capacity of shale gas development area based on GA-BP neural network

ZUO Zhaohui^{1,2}, LI Shaokang¹, YANG Jinjin¹, YUAN Ying^{2*}, LI Xiang^{1*}

1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2. School of Prospecting Technology & Engineering, Hebei GEO University

Abstract Taking Weiyuan County in Southwest China as an example, the evaluation system and grading standard of water resources carrying capacity were constructed from five aspects, i. e. society, economy, ecology, water resources and shale gas development, and the genetic algorithm (GA) was used to optimize back propagation (BP) neural network. GA-BP neural network combined model was thus formed to evaluate the water resources carrying capacity status of the study area from 2014 to 2019. The results showed that the maximum relative error of the verification data calculated by GA-BP neural network was 6.5%, and the correlation coefficient between the expected output and the result was 0.995 98. With the increase in the scale of shale gas well groups, the water resources carrying capacity index of the study area had been decreased year by year. The water resources carrying capacity from 2014 to 2017 was in a bearable state, and from 2018 to 2019, it was in a weakly carrying state. The main impact indicators of the index were per capita water resources, shale gas well group scale and water consumption of 10 000 yuan of industrial added value.

Key words shale gas; water resources carrying capacity; genetic algorithm; BP neural network

页岩气是蕴藏于页岩层可供开采的天然气资源,相比于常规天然气,页岩气具有开采寿命长和生产周期长的优点^[1]。中国的页岩气资源可采量约

为 $115 \times 10^{11} \sim 361 \times 10^{11} \text{ m}^3$,近几年页岩气年产量达到 $44.6 \times 10^8 \text{ m}^3$,页岩气的大规模开发有助于优化我国能源消费结构^[2],同时促进页岩气开发区域经

收稿日期:2020-09-22

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05040-001)

作者简介:左朝晖(1995—),男,硕士研究生,研究方向为环境与灾害地质,798460483@qq.com

* 责任作者:1. 袁颖(1976—),男,教授,博士,主要从事环境与灾害地质、工程地质的教学和科研工作,yuanyingson@163.com

2. 李翔(1970—),女,研究员,博士,主要从事规划环境影响评价、地下水污染控制与修复技术研究,lixiang@craes.org.cn

济发展。然而,页岩气开采过程中需要消耗大量淡水资源^[3],钻井和压裂过程所需水量通常达到 10 000~24 000 m³,其中有 30%~70% 耗水被重复利用,其开采耗水十分严重^[4-5],若不协调页岩气开发与水资源之间的关系,可能导致区域水资源匮乏^[6]。因此,有必要开展页岩气水资源承载力评价研究,为页岩气开发区域水资源可持续利用政策的制定提供借鉴。

目前,国外对水资源承载力的研究很少,多数研究将水资源承载力纳入可持续发展研究范畴^[7-9]。国内对区域水资源承载力的研究主要是选取社会、水资源、经济、生态 4 个方面的指标建立水资源承载力评价体系,运用模糊综合评价法、系统动力学法、神经网络法、生态足迹法等进行评价^[10-11]。在评价指标体系方面,针对页岩气的耗水特点的区域水资源承载力研究较少,基于社会、水资源、经济、生态方面指标的区域水资源承载力评价体系缺少客观性与全面性,如何通过科学的模型分析区域页岩气开发过程中水资源承载力成为重要的研究课题。在评价方法方面,BP (back propagation)神经网络模型具有广泛的适应能力、学习能力和映射能力等特点,非线性数据处理能力十分强大,且不需要人工确定指标权重,在多变量非线性系统的建模与预测方面可取得满意的结果^[12]。许莉等^[13]提出了基于 BP 神经网络的水资源承载力综合评价方法,并描述了方法的应用过程;郭晓英等^[14]将指标作为 BP 神经网络的输出,对厦门市的水资源承载力进行了动态分析;冯湘华等^[15]使用模糊综合评判模型、TOPSIS 模型、径向基神经网络模型完成了对淳化县的水资源承载力综合评价,得到神经网络与其他方法评价结果基本一致的结论;张彦等^[16]在保定市水环境承载研究中将遗传算法(genetic algorithm, GA)结合 BP 神经网络模型形成 GA-BP 神经网络评价模型,并对比了 BP 神经网络模型和 GA-BP 神经网络模型的可信度,指出 GA-BP 神经网络模型的精度更高且具有很强的泛化能力。

笔者以威远县为研究对象,在区域水资源承载力评价中社会、水资源、经济、生态指标基础上增加页岩气开采特征指标,建立页岩气开采区域水资源承载力评价指标体系。使用 GA 优化 BP 神经网络评价模型,将 GA-BP 神经网络组合模型应用于页岩气开发区域的水资源承载力评价,以期页岩气开发区域的水资源承载力评价提供思路,同时为促进威远县的社会经济活动与水资源协调发展提供

参考。

1 研究方法

1.1 BP 神经网络基本原理

BP 神经网络是按照误差逆向传播算法训练的多层前馈神经网络,是目前应用最广泛的神经网络^[17]。BP 神经网络模型一般由输入层、隐含层和输出层组成。在运算时将归一化后的指标数据作为输入层,将指标期望结果作为输出层,输入层数据正向传播至隐含层,通过传递函数处理后传播至输出层,当测试输出与期望结果之间存在误差时,将误差沿原传播过程反向传播并逐一调整各层连接权值(w^1 、 w^2)。经过不断迭代计算,当误差降至设定范围时,得到最终的神经网络模型。BP 神经网络结构如图 1 所示。

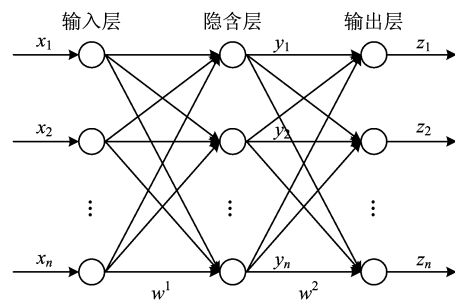


图 1 BP 神经网络结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of BP neural network structure

1.2 GA 基本原理

GA 是一种基于自然选择和遗传理论的随机优化算法,其通过选择、交叉和变异等操作对所有个体进行筛选,根据适应度保留优秀个体,淘汰适应度差的个体,循环迭代至搜寻到最优解^[18]。由于其高效率的算法以及强大的全局寻优能力,被广泛应用在组合优化方面^[19]。

1.3 GA-BP 神经网络模型

虽然 BP 神经网络具有自学习和非线性映射的能力,但其算法收敛速度慢,对初始权值和阈值非常敏感,容易陷入局部最优或出现过拟合现象。遗传算法从群体出发,同时将多个个体一起比较,从而提高运算效率,同时具有全局搜索能力而不易陷入局部最优。将 GA 与 BP 神经网络结合,使用 GA 全局寻优的能力来优化 BP 神经网络模型的初始权值和阈值,可以提高 BP 神经网络的收敛速度,从而使优化后的网络可更好地进行预测。具体流程见图 2。

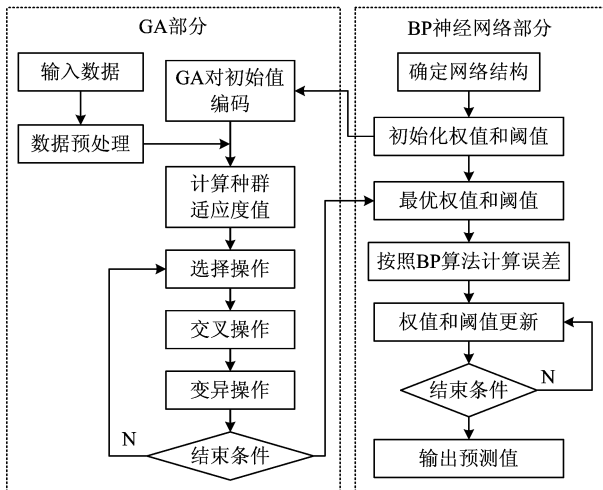


图 2 GA-BP 神经网络流程

Fig. 2 GA-BP neural network flowchart

2 水资源承载力评价与分析

2.1 研究区概况

威远县位于我国西南地区,地处四川盆地中南部,行政面积 1 289 km²。属亚热带暖湿季风气候,冬春干旱而夏秋多雨。地势西北高,东南低,主要为

低山和丘陵地貌。由于气候与地形地貌影响,威远县降水时空分布不均,水资源开发利用率高 51%,年平均水资源总量为 4.7 亿 m³,但人均水资源占有量仅为 600 m³左右,是四川省人均水资源占有量的 1/4,属于水资源贫乏地区。

我国已经探明的页岩气大部分分布于西南地区,目前已有 9 个页岩气重点建产区,威远县大部分区域处于长宁—威远国家级页岩气示范区内。长宁—威远示范区页岩气单井压裂用水量在 20 000 m³以上,其中仅有 20% 左右的压裂用水得以循环使用,导致大部分水资源被注入地下。这使得威远县水资源情况更加复杂,进一步加剧社会、经济发展和水资源之间的矛盾。

2.2 评价指标体系及其分级标准

受经济、社会和生态的影响与制约,水资源承载力评价是一个复杂的系统,如何确定评价体系中的指标是承载力研究的基础^[20]。因此,基于研究区页岩气开发与生活、生产用水的矛盾,在区域水资源承载力研究^[14,21]中结合页岩气井开发规模和用水特点,确定了由 5 个方面共 16 个指标构成的区域水资源承载力指标体系,详见表 1。

表 1 研究区水资源承载力评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of water resources carrying capacity in the study area

目标层	准则层	指标层	指标计算	指标特性
水资源承载力	社会指标分级	人口密度/(人/km ²)	区域总人口/区域土地面积	-
		人均生活用水量/(m ³ /人)	生活用水量/区域总人口	-
		年污水处理率/%	污水达标排放量/总排放量	+
	水资源指标分级	水资源利用率/%	供水总量/水资源量	+
		人均水资源量/(m ³ /人)	水资源总量/常住人口数	+
		万元工业增加值用水量/(m ³ /万元)	工业用水量/工业增加值	-
		工业用水重复率/%	重复利用水量/工业用水量	+
	经济指标分级	第一产业占比/%		-
		第三产业占比/%		-
		灌溉水有效利用系数		+
	生态指标分级	水质达标率/%	达标水量/总水量	+
		植被覆盖率/%	区域内植被覆盖面积/区域总面积	+
	页岩气指标分级	单井需水量/m ³	页岩气开发过程中平均每口井需要的水量	-
		井群规模/口	区域钻井的数量	-
		压裂返排液回用率/%	压裂返排液回用量/压裂返排液量	+
		压裂液返排率/%	压裂返排液量/压裂液量	+

注: + 为正影响指标,即数值越大,水资源承载力越强;- 为负影响指标,数值越大,水资源承载力越弱。

国内外对于水资源承载力的评价鲜见统一标准,本研究在确定分级标准时依据以下原则:1) 优

先采用已有国家标准或国际标准;2)尽量参照近似行业的设定标准;3)对于没有参照标准的指标,寻求专家经验或者采用等间距法、总分频率法等进行划分。依据上述原则以及 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》、GB/T 50331—2002《城市居民生活用水量标准》和《页岩气发展规划(2016—2020年)》等国家标准或规划文本,将各指标对水资源承载力的影响分为 5 个等级,为了方便区分研究区水资源承载力状态,分别以“理想状态”“可承载”“弱承载”“弱不可承载”和“不可承载”表示,各指标对应的分级标准见表 2。其中水资源承载力指数为 [0.8,1.0],表明水资源承载力处于适宜人类活动

的理想状态,经济社会发展不会受到水资源阻碍,可以适当加大发展力度;[0.6,0.8),表明区域水资源承载力处在可以承载人类活动的状态,经济社会发展与水资源的关系较为协调;[0.4,0.6),表明水资源承载力处在较弱的状态,社会经济发展受到水资源掣肘,需要保护水资源并进行资源分配结构优化;[0.2,0.4),表明水资源承载力处于很弱的状态,区域水资源问题较为突出,经济社会发展受到水资源阻碍,需要大力保护水资源并提高水资源供给;[0,0.2),表明水资源承载力处于差的状态,区域内社会经济发展与水资源之间极不协调。

表 2 研究区水资源承载力指标分级标准

Table 2 Classification standards of water resources carrying capacity in the study area

评价指标	理想状态 [0.8,1.0]	可承载 [0.6,0.8)	弱承载 [0.4,0.6)	弱不可承载 [0.2,0.4)	不可承载 [0,0.2)
人口密度/(人/km ²)	0~100	100~300	300~500	500~700	700~900
人均生活用水量/(m ³ /人)	0~120	120~175	175~240	240~300	300~350
水资源利用率/%	0~10	10~20	20~40	40~60	60~70
人均水资源量/(m ³ /人)	3 000~4 000	2 000~3 000	1 000~2 000	500~1 000	0~500
万元工业增加值用水量/(m ³ /万元)	0~35	35~45	45~60	60~70	70~90
水质达标率/%	90~100	75~90	60~75	50~60	40~50
植被覆盖率/%	40~50	36~40	34~36	32~34	25~32
年污水处理率/%	90~100	80~90	70~80	60~70	50~60
单井需水量/m ³	10 000~17 200	17 200~22 000	22 000~25 000	25 000~28 000	28 000~30 000
井群规模/口	0~50	50~100	100~200	200~300	300~400
压裂返排液回用率/%	90~100	85~90	75~85	60~75	50~60
压裂液返排率/%	30~35	25~30	20~25	15~20	10~15
第一产业占比/%	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30
第三产业占比/%	30~35	25~30	20~25	15~20	10~15
工业用水重复率/%	90~100	80~90	65~80	50~65	45~50
灌溉水有效利用系数	0.55~0.60	0.50~0.55	0.45~0.50	0.40~0.45	0.35~0.40

2.3 GA-BP 神经网络模型构建

基于表 2 的分级标准,采用随机技术公式^[22] [式(1)]在每一等级中生成 100 组数据,其中随机选出 90 组作为训练样本数据,剩余 10 组作为测试样本数据。由此,在 5 个等级区间中共计生成 500 组样本,其中训练样本 450 组,测试样本 50 组。

$$x_{ij}^k = \text{rand}(n_k)(a_j^k - b_j^k) + b_j^k \quad (1)$$

式中: x_{ij}^k 为第 k 个评价等级生成的样本数据, $k=1, 2, \dots, 5$; n_k 为第 k 个评价等级生成的样本数量; a_j^k 和 b_j^k 分别为第 k 个评价等级的上下限。

为避免指标体系中各指标量纲不统一带来的影响,采用最大最小方法在形成模型前对数据进行归一化处理。公式如下:

$$X_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

式中: X_{\max} 和 X_{\min} 为数据中最大值和最小值; X_{ij} 为数据的实际值。

选取 3 层神经网络模型,经过反复训练设置隐含层神经元数为 6 个,训练函数选用 trainlm 函数,模型精度设置为 0.001。采用 GA 对所建立的网络

结构进行优化,经过反复调试后确定 GA 参数,其中迭代次数为 10,种群规模为 10,交叉概率为 0.3,变异概率为 0.1,得到最佳适应度曲线如图 3 所示,最佳适应度为 1.431 9。将测试样本数据代入训练好的模型,得到测试样本的拟合值和原始值的线性回归曲线(图 4),相关系数为 0.995 98,测试样本最大相对误差为 6.50%,表明模型拟合具有良好的效果。

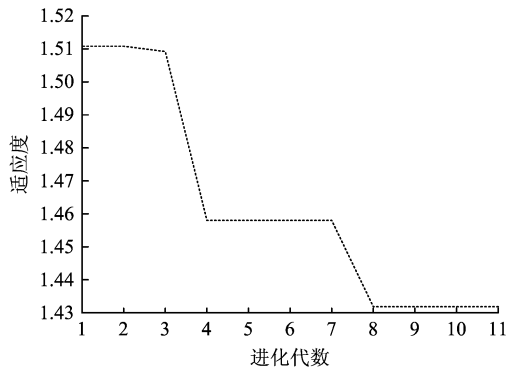


图 3 适应度曲线
Fig.3 Fitness curve

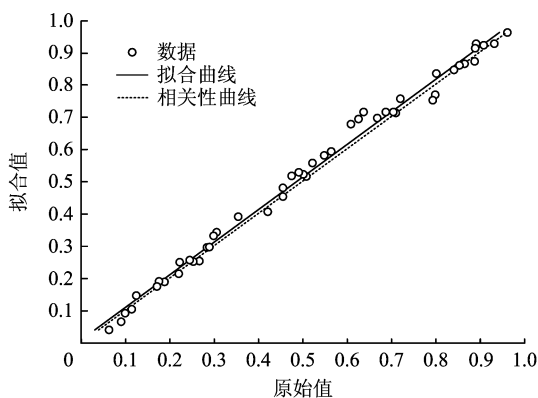


图 4 测试样本回归曲线
Fig.4 Test sample regression curve

将相同网络结构的 BP 神经网络模型和 GA-BP 神经网络模型的测试样本数据误差进行对比,结果见图 5。由图 5 可知,单一 BP 神经网络模型的评价结果波动明显,在第 40~50 个样本处理过程中出现较大误差;GA-BP 神经网络模型的评价结果未出现剧烈的波动,相比单一 BP 神经网络模型误差更小,表明该模型在页岩气开发区域的水资源承载力评价中具有一定的适用性。

2.4 评价结果与分析

评价指标数据来源于历年《内江市水资源公

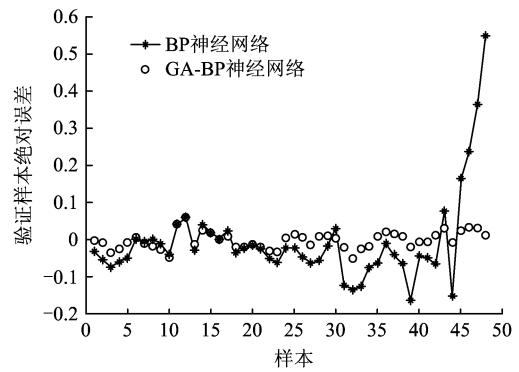


图 5 模型验证误差比较

Fig.5 Comparison of validation errors between two models

报》《内江市统计年鉴》和《威远县国民经济和社会发展统计公报》等,部分缺少数据采用插值法补充,具体数据见表 3。选用训练好的 BP 神经网络结构,将研究区 2014—2019 年的评价指标数据作为输入层,将西南地区页岩气开发状态下水资源承载力作为输出层,对研究区 2014—2019 年水资源承载力进行评价,得到威远县页岩气开发区域的水资源承载力指数及承载力状态,结果见表 4。由表 4 可以看出,2014—2017 年水资源承载力均处于可承载状态,说明在现有页岩气开发状态下,水资源相对充足,页岩气开发处于比较适合的状态;2018 年和 2019 年水资源承载力处于弱承载状态,说明社会经济活动和水资源处于非协调状态。从趋势上来看,2014—2019 年的水资源承载力虽然没有达到不可承载的水平,但水资源承载力指数除 2016 年稍有回升外,均处于逐年下降趋势。

进一步分析发现,2015 年人均生活用水量、万元工业增加值用水量、页岩气井群规模等均较 2014 年有所增加,而人均水资源量达到近几年的最低水平,其他指标变化不大,因此可以推断水资源供给不足、生活用水剧烈增加和工业用水(包括页岩气开采用水)量增加 3 个方面的原因导致水资源承载力剧烈波动;2016 年人均水资源量达到近几年最高水平,水资源供给充足,井群规模仅增加 23 口,人均生活用水量相比 2015 年减少 45 m³,万元工业增加值用水量减少,且水质达标率、植被覆盖率、年污水处理率等指标均有所增长,在这些因素的共同影响下,水资源承载力指数较 2015 年有所增长。由 2014—2016 年水资源承载力变化可以看出,其主要受到人均水资源量、人均生活用水量、万元工业增加值用水

表 3 2014—2019 年评价指标数据

Table 3 Evaluation index data from 2014 to 2019

评价指标	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
人口密度/(人/km ²)	475.60	462.54	462.65	462.01	455.30	455.03
人均生活用水量/(m ³ /人)	282.00	330.00	285.00	313.00	213.00	238.10
水资源利用率/%	51.00	51.00	51.00	50.00	51.00	51.00
人均水资源量/(m ³ /人)	552.00	379.00	602.00	484.00	635.00	548.70
万元工业增加值用水量/(m ³ /万元)	39.00	42.20	40.20	24.00	18.20	14.70
水质达标率/%	85.00	88.00	91.00	92.30	92.90	93.60
植被覆盖率/%	47.44	48.90	50.23	51.65	53.04	54.44
年污水处理率/%	79.16	79.73	79.42	81.05	81.51	95.53
单井需水量/m ³	24 500	23 369	22 900	21 989	21 189	20 389
井群规模/口	20	66	89	132	299	374
压裂返排液回用率/%	80.00	80.00	85.00	90.00	90.00	90.00
压裂液返排率/%	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
第一产业占比/%	13.20	12.80	13.30	13.40	14.30	14.50
第三产业占比/%	15.70	16.20	18.40	19.30	24.60	25.10
工业用水重复率/%	74.00	75.30	77.60	79.20	81.00	82.30
灌溉水有效利用系数	0.46	0.46	0.48	0.48	0.49	0.49

表 4 水资源承载力评价结果

Table 4 Evaluation results of water resources carrying capacity

年份	水资源承载力指数	承载状态
2014	0.769	可承载
2015	0.630	可承载
2016	0.644	可承载
2017	0.618	可承载
2018	0.566	弱承载
2019	0.517	弱承载

表 5 页岩气开发所需水量数据

Table 5 Water volume data required for shale gas development

年份	总需水量	回用水量	新鲜水使用量
2014	490 000	78 400	411 600
2015	1 542 354	246 777	1 295 577
2016	2 038 100	346 477	1 691 623
2017	2 902 548	522 459	2 380 089
2018	6 335 511	1 140 392	5 195 119
2019	7 625 486	1 372 587	6 252 899

量和井群规模等指标的影响。根据页岩气井群规模、单井需水量、压裂返排液回用率和压裂液返排率 4 项指标数据推算研究区页岩气总需水量、回用水量和新鲜水使用量(表 5),发现 2017 年之后虽然人均水资源量、人均生活用水量、万元工业增加值用水量等主要指标并未恶化,但页岩气井群规模急剧扩大,导致开发总需水量急剧增长,研究区水资源承载力指数下降明显,这表明页岩气系统方面的耗水压力变大是水资源承载力逐年下降的主要原因。

综上所述,研究区水资源承载力受到社会、水资源、生态等多方面的影响,其中主要影响因素为人均水资源量、万元工业增加值用水量和井群规模。由于页岩气开发活动不断增强,水资源承载力总体处

于下降趋势,尤其在 2017—2019 年开发规模快速扩大时,水资源承载力明显下降,但由于社会、水资源和生态三方面的指标均比较稳定,万元工业增加值用水量、年污水处理率、单井需水量、压裂返排液回用率等工业指标负荷逐渐降低,区域水资源承载力并未出现不可承载的情况。因此,研究区在页岩气开发时要充分考虑页岩气耗水的影响,在井群规模维持现状或继续扩大的情况下,应进一步加强水资源的节约和保护,同时调整产业结构、建设节水型社会,通过节水、回用和暂时调整经济发展重心等手段不断提高经济社会发展过程中的用水效率,保障经济社会的可持续发展。

3 结论

(1)在常规区域水资源承载力影响因素中充分考虑页岩气开发对区域水资源承载力的影响,增添页岩气开采耗水指标,建立适合页岩气开发区域的水资源承载力评价体系。采用遗传算法优化 BP 神经网络组合模型中的权值和阈值进行评价,与单一的 BP 神经网络模型相比,组合模型收敛速度更快,误差较小,评价结果更为稳定。

(2)研究区水资源承载力总体处于波动下降状态,主要受到人均水资源量、页岩气的井群规模和万元工业增加值用水量等指标影响。2014—2017 年水资源承载力处于可承载水平,水资源与经济、社会、页岩气发展处于相对平衡状态,区域水资源供给仍处于较协调的状态;2018 年和 2019 年研究区水资源承载力处于弱承载水平,页岩气开采规模急剧扩大改变了研究区的水资源承载力结构,加剧了社会经济发展与水资源之间的不平衡。

(3)研究区万元工业增加值用水量、年污水处理率、单井需水量、压裂返排液回用率等指标的持续好转可以缓解页岩气大规模开发带来的水资源压力,因此,威远县可以在节约和保护水资源的基础上,进一步降低页岩气井单井用水量,提高区域内经济社会发展过程中的用水效率,通过重新优化水资源分配结构,推动经济社会发展与水资源承载能力相适应。

参考文献

- [1] 程涌,陈国栋,尹琼,等. 中国页岩气勘探开发现状及北美页岩气的启示[J]. 昆明冶金高等专科学校学报,2017,33(1):16-24.
CHENG Y, CHEN G D, YIN Q, et al. Exploration and development status of shale gas in China and enlightenment from North American prosperous shale gas [J]. Journal of Kunming Metallurgy College, 2017, 33(1):16-24.
- [2] 李建飞. 煤层气和页岩气开发对水资源影响的对比分析[J]. 煤炭经济研究,2019,39(12):71-75.
LI J F. Comparative analysis of the impact of coalbed methane and shale gas development on water resources [J]. Coal Economic Research, 2019, 39(12):71-75.
- [3] 岳婷,胡社荣,彭纪超,等. 页岩气勘探开发过程中的若干环境和生态问题[J]. 中国矿业,2013,22(3):12-15.
YUE T, HU S R, PENG J C, et al. Environmental and ecological problems in the process of shale gas' exploration and development [J]. China Mining Magazine, 2013, 22(3):12-15.
- [4] 马静,李晓妹,姜琳. 国外页岩气资源的开发和政策分析[J]. 现代矿业,2012,27(8):144-147.
MA J, LI X M, JIANG L. Development and policy analysis of foreign shale gas resources [J]. Modern Mining, 2012, 27(8):144-147.
- [5] 徐国盛,徐志星,段亮,等. 页岩气研究现状及发展趋势[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2011,38(6):603-610.
XU G S, XU Z X, DUAN L, et al. Research status and development trends of shale gas [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2011, 38(6):603-610.
- [6] XIE X M, ZHANG T T, WANG M, et al. Impact of shale gas development on regional water resources in China from water footprint assessment view [J]. Science of the Total Environment, 2019, 679:317-327.
- [7] FANG H Y, GAN S W, XUE C Y. Evaluation of regional water resources carrying capacity based on binary index method and reduction index method [J]. Water Science and Engineering, 2019, 12(4):263-273.
- [8] LU Y L, HUANG Y Q, ZENG S Y, et al. Scenario based assessment and multi-objective optimization of urban development plan with carrying capacity of water system [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2019, 14(23):12.
- [9] MUNTHER J H. Water issue in hashemite Jordan [J]. Arab Study Quarterly, 2000, 22(5):54-67.
- [10] 朱光磊,赵春子,朱卫红,等. 基于生态足迹模型的吉林省水资源可持续利用评价[J]. 中国农业大学学报,2020,25(9):131-143.
ZHU G L, ZHAO C Z, ZHU W H, et al. Evaluation of sustainable water resources utilization in Jilin Province based on the ecological footprint model [J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(9):131-143.
- [11] 段春青,刘昌明,陈晓楠,等. 区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J]. 地理学报,2010,65(1):82-90.
DUAN C Q, LIU C M, CHEN X N, et al. Discussion on the concept and research method of regional water resources carrying capacity [J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(1):82-90.
- [12] 余金龙,尹亮,鲍广强,等. 基于 BP 神经网络的腾格里湖水环境承载力研究[J]. 中国农村水利水电,2017(11):83-86.
YU J L, YIN L, BAO G Q, et al. Research on water environmental carrying capacity of Tenggeli Lake based on BP neural networks [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(11):83-86.
- [13] 许莉,赵嵩正,杨海光. 水资源承载力的 BP 神经网络评价模型研究[J]. 计算机工程与应用,2008(8):217-219.
XU L, ZHAO S Z, YANG H G. Research on BP neural network model of performance appraisal for water resources carrying capacity [J]. Computer Engineering and Applications, 2008(8):217-219.
- [14] 郭晓英,陈兴伟,陈莹,等. 基于粗糙集和 BP 神经网络组合法的水资源承载力动态变化分析[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(2):236-240.
GUO X Y, CHEN X W, CHEN Y, et al. Dynamic variation analysis of water resources carrying capacity in Xiamen City based on rough set theory and BP neural network [J]. South-to-

- North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13 (2): 236-240.
- [15] 冯湘华, 宋孝玉, 晁智龙. 淳化县水资源承载力预测评价[J]. 西安理工大学学报, 2018, 34(4): 447-453.
FENG X H, SONG X Y, CHAO Z L. Evaluation of Chunhua County's water resources carrying capacity prediction[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2018, 34(4): 447-453.
- [16] 张彦, 李明然, 李新德. GA-NN 模型在保定市水环境承载力评价中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(5): 131-138.
ZHANG Y, LI M R, LI X D. Application of GA-NN model for evaluation of water environment carrying capacity in Baoding City [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5): 131-138.
- [17] 谢劭峰, 赵云, 李国弘, 等. GA-BP 神经网络的 GPS 可降水量预测[J]. 测绘科学, 2020, 45(3): 33-38.
XIE S F, ZHAO Y, LI G H, et al. Prediction of GPS perceptible water vapor based on GA-BP neural network [J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(3): 33-38.
- [18] 周星勇, 杨容浩, 王志胜, 等. 一种改进遗传神经网络的建筑基坑沉降预测模型[J]. 测绘工程, 2018, 27(3): 53-57.
ZHOU X Y, YANG R H, WANG Z S, et al. An improved GA-BP network settlement prediction model of building foundation pit [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2018, 27(3): 53-57.
- [19] 张超群, 郑建国, 钱洁. 遗传算法编码方案比较[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(3): 819-822.
ZHANG C Q, ZHENG J G, QIAN J. Comparison of coding schemes for genetic algorithms [J]. Application Research of Computers, 2011, 28(3): 819-822.
- [20] 王友贞, 施国庆, 王德胜. 区域水资源承载力评价指标体系的研究[J]. 自然资源学报, 2005(4): 597-604.
WANG Y Z, SHI G Q, WANG D S. Research on evaluation index system of regional water resources carrying capacity [J]. Journal of Natural Resources, 2005(4): 597-604.
- [21] 刘佳骏, 董锁成, 李泽红. 中国水资源承载力综合评价研究 [J]. 自然资源学报, 2011, 26(2): 258-269.
LIU J J, DONG S C, LI Z H. Comprehensive evaluation of China's water resources carrying capacity [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(2): 258-269.
- [22] 金菊良, 丁晶, 魏一鸣, 等. 区域水资源可持续利用系统评价的插值模型[J]. 自然资源学报, 2002(5): 610-615.
JIN J L, DING J, WEI Y M, et al. Interpolation model for regional water resources sustainable utilization system evaluation [J]. Journal of Natural Resources, 2002(5): 610-615. ⊗

声 明

本刊已被美国《乌利希期刊指南(网络版)》(Ulrichsweb)、英国《农业与生物科学研究中心文摘》(CAB Abstracts)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、日本科学技术振兴机构数据库(JST)收录,被《中国核心期刊数据库》《万方数据-数字化期刊群》《中国学术期刊网络出版总库》及 CNKI 系列数据库、《中文科技期刊数据库》(维普)、《超星期刊域出版平台》全文收录,作者的网络及电子版著作权使用费已与本刊稿酬一次性给付,特此声明。如作者不同意将文稿编入以上数据库,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理,否则视作同意。

《环境工程技术学报》编辑部