

白龙江引调水工程受水区需水预测研究

王军德^{1,2}, 张波森^{2*}, 刘德地^{1,2*}, 程玉菲^{1,2}, 包志为¹

¹甘肃省水利科学研究院, 甘肃 兰州

²武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年4月1日; 录用日期: 2025年6月4日; 发布日期: 2025年8月26日

摘要

白龙江引调水工程是为解决甘肃省天水、平凉、庆阳地区水资源短缺危机而规划建设的大型水利工程, 对提高区域水安全保障水平具有重要作用。对受水区进行合理准确的需水预测, 能有效提高引调水工程水资源配置效率。本文进行了调水工程受水区的需水预测研究, 利用LSTM模型建立了从全球WFaS用水数据到统计调查历史用水数据之间的映射关系, 从而将未来受水区上的WFaS用水预测数据转化为受水区的需水数据, 并与定额法预测的需水数据进行对比。该方法有效克服了统计调查历史用水数据样本不足以及WFaS数据在区域范围内精度不高的问题, 为引调水工程受水区的需水预测提供了一种新思路。

关键词

需水预测, 定额法, LSTM模型, 白龙江引调水工程

Water Demand Prediction Research in the Water Receiving Area of the Bailongjiang Water Diversion Project

Junde Wang^{1,2}, Bosen Zhang^{2*}, Dedi Liu^{1,2*}, Yufei Cheng^{1,2}, Zhiwei Bao¹

¹Gansu Research Institute for Water Conservancy, Lanzhou Gansu

²State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan Hubei

Received: Apr. 1st, 2025; accepted: Jun. 4th, 2025; published: Aug. 26th, 2025

Abstract

The Bailongjiang Water Diversion Project is a large-scale water conservancy project planned and con-

作者简介: 王军德(1981年3月-), 男, 甘肃凉州人, 硕士研究生, 正高级工程师, 主要从事干旱区水文水资源方面的工作, Email: jundwang@163.com

*通讯作者 Email: 2024282060124@whu.edu.cn, dediliu@whu.edu.cn

文章引用: 王军德, 张波森, 刘德地, 程玉菲, 包志为. 白龙江引调水工程受水区需水预测研究[J]. 水资源研究, 2025, 14(4): 350-362. DOI: 10.12677/jwrr.2025.144038

structured to address the water resources shortage crisis in Tianshui, Pingliang, and Qingyang areas of Gansu Province, playing a crucial role in enhancing regional water security. Accurate and appropriate water demand forecasting for the water-receiving areas can effectively improve the efficiency of water resources allocation for the diversion project. This paper conducts a study on water demand forecasting for the water-receiving areas of the diversion project. It establishes a mapping relationship between global WFaS water use data and historical water use data from statistical surveys using an LSTM model. This allows for the conversion of future WFaS water use forecast data in the water-receiving areas into water demand data for those areas, which is then compared with water demand data predicted by the quota method. This approach effectively overcomes the issues of insufficient samples in historical water use data from statistical surveys and the low accuracy of WFaS data at the regional level, offering a new perspective for water demand forecasting in the water-receiving areas of water diversion projects.

Keywords

Water Demand Forecasting, Quota Method, LSTM Model, Bailongjiang Water Diversion Project

Copyright © 2025 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

引调水工程旨在解决水资源时空分布不均问题。大量实践证明,通过合理规划和科学管理,引调水工程的实施为实现可持续发展和生态文明建设提供了坚实支撑,同时也为解决全球水资源问题提供了宝贵经验。为确保引调水工程能够适应未来的水资源变化,需要对受水区在未来一段时间内需水量进行科学预测[1];而且精确地评估受水区的用水需求也是水资源优化管理的核心环节。

目前已经有大量的关于需水预测的方法研究[2],其中被广泛应用有两种:第一种是时间序列分析方法,其核心思想是基于历史的用水量数据,捕捉其中的规律和趋势,从而建立预测模型;第二种是相关分析方法,它通过将用水量与经济增长、人口数量等相关因素结合起来,利用历史数据中的关联性来进行预测[3]。在时间序列方法中,比较典型的形式包括趋势外推法和随机模型法,这些方法主要适用于单一周期内的用水需求预测;而相关分析方法则由多种技术构成,例如灰色预测法、用水定额法以及人工神经网络法,这些方法通常被用于多个周期的用水需求预测[4]。但这两种方法在使用时都有其局限性:在根据历史用水数据分析其变化趋势且预测未来需水量时,虽然使用到的历史数据本身相对精确可靠,但是往往会因为历史统计用水数据量少而阻碍预测;在运用传统的定额法进行需水预测时,虽然方法简单,但是缺乏灵活性。

为提高预测精度,需水预测的研究逐渐向精细化方向发展,许多学者相继提出了创新性方法。例如, Ma 等人基于卷积神经网络(CNN)构建了一种需水预测模型,通过对逐日的作物气象数据进行深度特征提取,成功预测了小麦和玉米的需水量[5]; Wu 等人则提出了一种结合 Transformer 和神经网络的模型,将其应用于智能水管理系统中,从而实现了更高效的需水预测[6]; Liu 等人开发了一种融合时空特征的短期城市需水预测模型,有效应对了复杂的非线性动态特征[7];在生活用水预测方面, Chen 等人利用社会水文学方法提出了系统动力学模型,通过建立微分方程和差分方程对生活需水量进行预测,研究结果表明该模型在生活用水需求预测中具有良好的实用性[8]; Wang 等人则基于简单回归方法,提出了一种生活用水需求模型,可快速评估环境变化对用水需求的潜在影响[9];针对工业需水量预测, Liu 等人结合多元回归分析、时间序列分析以及专家经验等方法,对 2021 年中国工业需水量进行了精准预测[10],同时在农业领域,将需水预测指标与人工神经网络相结合,构建了径向基函数神经网络模型,用于农业灌溉需水量的预测,也取得了良好的

效果[11]。

综上所述，已有大量基于机器学习的需水预测研究，但他们都热衷于讨论选取合适的需(用)水量影响因子，从而确定模型关键的输入特征来进行需水预测。本文则是试图通过机器学习确定数据与数据之间的映射关系，实现预测未来任意时期的需水量。因此，本文主要内容是在基于传统的定额法计算白龙江引调水工程受水区的需水预测，讨论了利用 LSTM 模型寻求从全球 WFaS 数据(水预报数据)到历史用水统计数据的映射关系，从而实现将未来区域上的 WFaS 数据转化为需水数据。该方法在一定程度上克服了历史统计数据量小和 WFaS 数据在区域范围内精度不高的问题，为需水预测提供一种新思路。

2. 研究区域及数据

2.1. 研究区域

白龙江引调水工程是《甘肃省“十二五”发展规划》中列入的重点水利工程之一。该工程从甘肃省嘉陵江支流白龙江上游引水，向甘肃省陇东南天水、平凉、庆阳 3 市供水，输水线路总长 575.18 km，工程任务是以城乡生活供水为主，结合工业供水，兼顾高效农业灌溉，工程受益总人口约 955 万人。白龙江引调水工程将为解决天水、平凉、庆阳地区水资源短缺危机，提高区域水安全保障水平，优化水资源配置格局起到重要作用。本文研究区域即为调水工程受水区的天水、平凉、庆阳 3 市，位于甘肃省的东部，共计 20 个区县，总面积为 4.61 万 km²。研究区见图 1 所示。

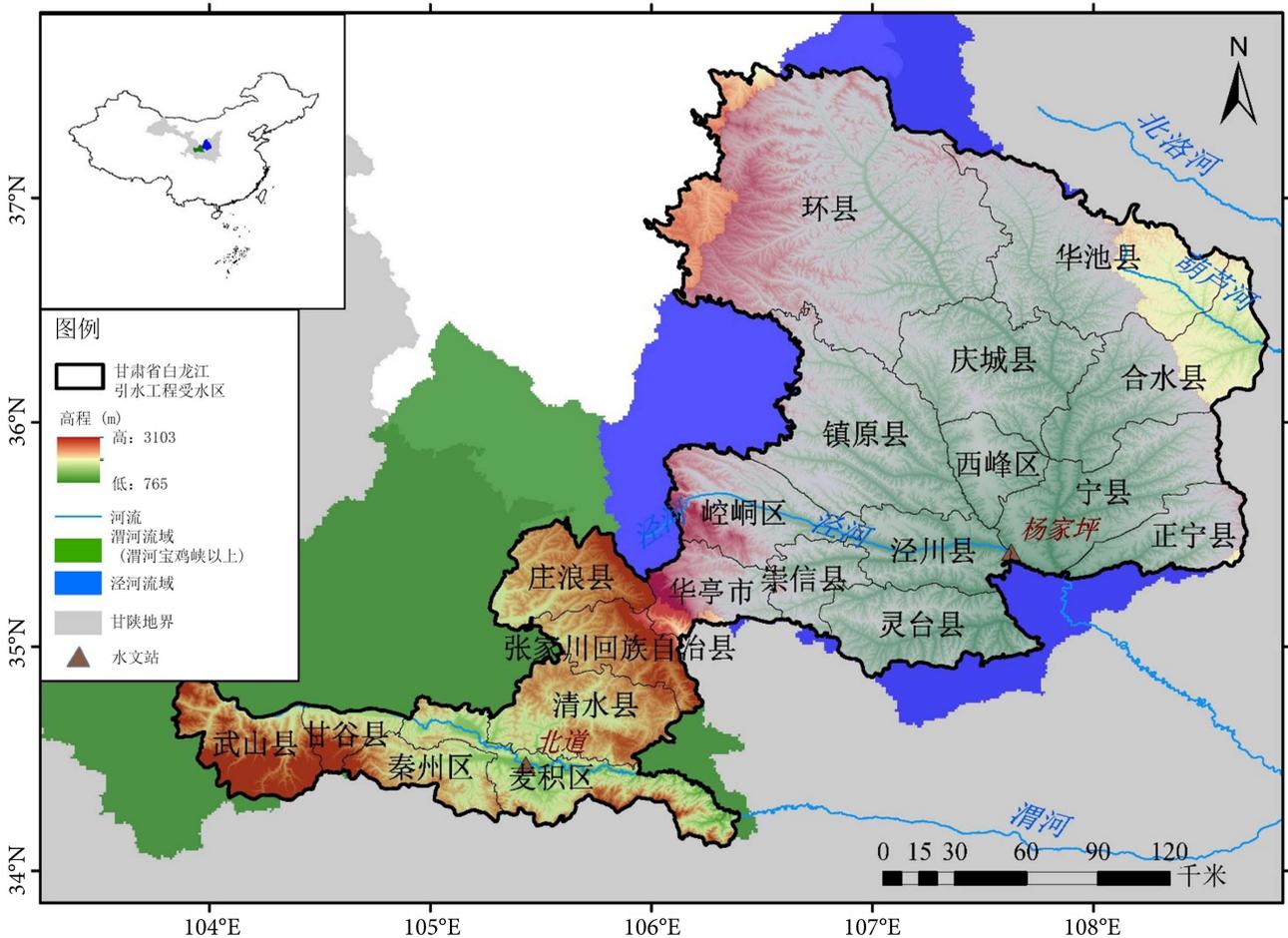


图 1. 白龙江引水工程受水区示意图

2.2. 研究数据

2.2.1. 受水区用水定额标准数据

定额法是基于历史用水数据和用水标准, 确定单位时间内每个用水类别(如工业、农业、生活用水等)的用水定额, 从而预测未来的用水需求。现状年各地区人口总数、人口自然增长率数据来自 2020 年《甘肃省发展年鉴》; 有效灌溉面积数据来自 2020 年《甘肃省水利统计年鉴》; 其余相关数据均来自《甘肃省水资源公报》。

2.2.2. WFaS 数据

WFaS 可提供历史与未来不同情境下的全球生活、工业、畜牧需(用)水栅格数据[12] [13]: 具体包括模拟的历史时期 1961~2010 的用水数据和“共享社会经济路径”(Shared Socioeconomic Pathways, SSPs)中不同情景下 2005~2060 年用水数据。WFaS 需(用)水数据的特点是提供了全球用水数据的空间分布信息, 并且数据量足够丰富, 但是在区域上的数据分辨率不高。

2.2.3. 历史统计用水数据

Zhou 等[14]提供了基于调查的重建历史用水数据集, 该数据集是 1965 年至 2013 年全国 341 个市级行政单位上的部门用水量, 并对各个城市进行了编号, 其中 C36、C37、C38 分别代表平凉、庆阳、天水。历史统计用水数据往往比较可靠, 但是数据样本小。

3. 研究方法

3.1. 基于定额法的需水预测

定额法需水预测是一种基于用水定额的需求预测方法, 广泛应用于水资源管理和规划领域。其核心思想是通过设定特定的用水定额, 即单位对象或活动所需的标准用水量, 结合预测对象的规模或数量, 计算出未来的需水量。本文以 2020 年为现状水平年, 2025 年为近期规划水平年, 2030 年为远期规划水平年, 根据预测对象的不同, 对工程受水区 20 个县区, 生活、工业、农业、畜牧业这 4 个部门的需水量进行预测。

3.1.1. 生活需水

生活需水是指能够满足人们日常生活所需要的水量。调水工程受水区在不同水平年的生活需水量包含居民生活需水与城镇公共需水两部分, 城镇公共需水使用城镇公共人均日需水量进行计算, 居民生活需水使用居民生活用水定额标准计算。

人口预测使用自然增长法, 则总人口数:

$$N = P(1+R)^n \quad (1)$$

式中, N 为水平年预测人口总数; R 为人口自然增长率; P 为现状水平年各地区人口总数; n 为预测年限。

城镇居民与农村居民需水使用人均用水量指标进行预测, 计算公式如下:

$$W_{dom,城镇} = N \cdot p_{城镇} \cdot Q_{dom,城镇} \quad (2)$$

$$W_{dom,农村} = N \cdot (1 - p_{城镇}) \cdot Q_{dom,农村} \quad (3)$$

式中, $W_{dom,城镇}$ 为城镇居民生活需水量(万 m^3); N 为水平年预测人口总数; $p_{城镇}$ 为城镇化率; $Q_{dom,城镇}$ 为城镇居民生活用水定额标准; $W_{dom,农村}$ 为农村居民生活需水量(万 m^3); $Q_{dom,农村}$ 为农村居民生活用水定额标准。

3.1.2. 工业需水

工业需水是指工业生产过程中所需要的水资源。工业需水使用当地万元增加值需水定额进行计算, 计算公式如下:

$$W_{ind} = X \cdot (1 - R)^n \cdot Q_{ind} \quad (4)$$

式中, W_{ind} 为工业需水量(万 m^3); X 为现状年工业增加值(万元); R 为工业增加值增长率; Q_{ind} 为当前水平年万元工业增加值需水定额(m^3 /万元); n 为预测年限。

3.1.3. 灌溉需水

灌溉需水是指用于农业生产中灌溉作为所需的水量。灌溉需水使用亩均定额法进行农田灌溉需水预测, 计算公式如下:

$$W_{irr} = \frac{150000SQ_{irr}}{\lambda} \quad (5)$$

式中, W_{irr} 为灌溉需水量(万 m^3); S 为有效灌溉面积(千公顷); Q_{irr} 为农田灌溉定额(m^3 /亩); λ 为灌溉水有效利用系数。

3.1.4. 畜牧需水

畜牧需水使用单位牲畜定额用水量进行畜牧需水预测, 计算公式如下:

$$W_{iv} = N \cdot Q_{iv} \quad (6)$$

式中, W_{iv} 为畜牧需水量(万 m^3); N 为不同种类的牲畜总数(万头); Q_{iv} 为对应的单位牲畜定额用水量(m^3 /(头·年))。

3.2. 基于 LSTM 的需水预测 s

在需水预测中, 使用定额法对生活、工业、灌溉、畜牧需水进行了预测, 但定额法需水预测中定额不确定性大, 对未来信息利用较少。本文利用 WFaS 数据, 利用 LSTM 模型捕捉已有的历史用水统计数据 and WFaS 全球尺度需水数据之间的联系, 根据 WFaS 数据中未来时期的驱动数据, 就可以得出未来需水量。

3.2.1. LSTM 简介

近年来, 长短时网络记忆模型(LSTM)在各个领域得到广泛应用, 同时 LSTM 与其他学科的交叉研究及应用更是当下的焦点[15]。LSTM 作为机器学习的一种, 主要以数据为驱动, 通过捕捉变量间的映射关系从而实现目标因子的预测[15]。LSTM 相较于其他机器学习的优点在于 LSTM 能够学习数据中的长期依赖关系。总体而言, 目前 LSTM 在水文领域已具备较为丰富的研究成果, 其在预测方面的准确性也得到了广泛的认可。

3.2.2. 数据准备

WFaS 是全球用水栅格数据, 分别包含了生活用水、工业用水、畜牧业用水。从中提取了平凉、庆阳、天水区域等受水区的年用水数据后, 结合全国统计调查的 1965~2013 年历史用水统计数据中的 341 个城市的部门用水量, 将两组数据处理为满足模型输入要求的三维格式。

3.2.3. 模型设计

模型以 WFaS 数据作为输入, 历史用水统计数据作为输出, 选取两组数据的交集年份为 1963~2010 年。将数据按 80%用于训练, 20%用于验证, 确保模型在训练时能够评估其泛化能力。输入特征为 WFaS 数据中的生活、工业、畜牧业用水, 输出特征为历史统计数据的生活、工业、畜牧业用水, 流程见图 2 所示。

模型性能评价指标选用均方根误差(root mean square error, RMSE), 用于衡量模型预测值与实际值之间的差异, 计算式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^m (y_i - x_i)^2}{m}} \quad (7)$$

式中, y_i 表示第 i 个实际观测值, x_i 表示第 i 个模型预测值, m 表示数据点的总数, $RMSE$ 值越小, 表明结果越精确。

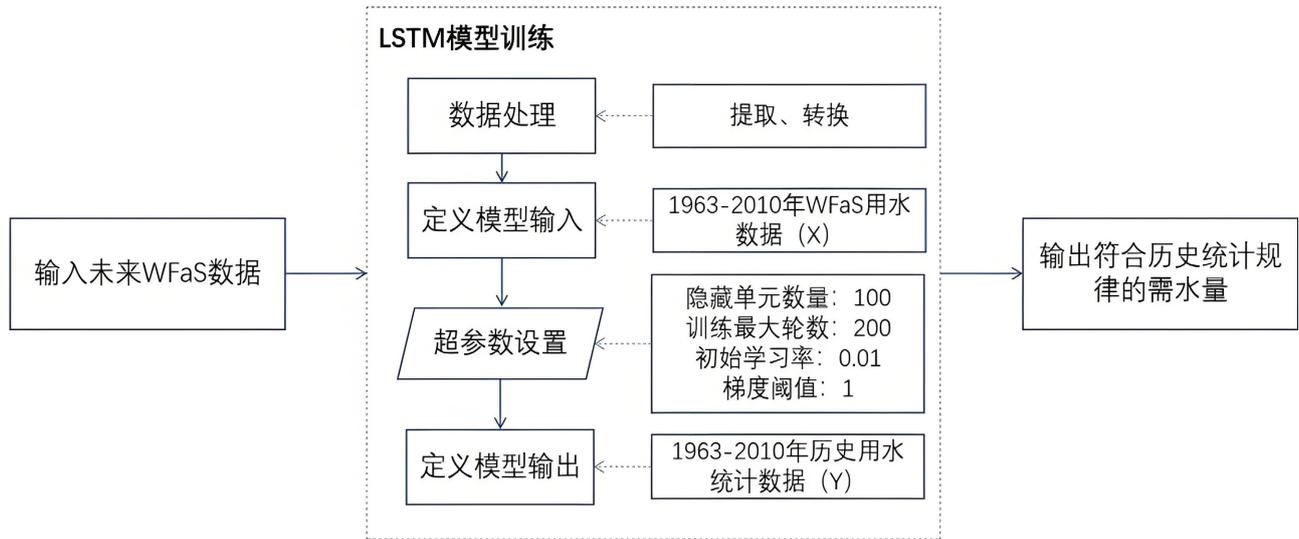


图 2. LSTM 模型流程图

4. 结果分析

4.1. 定额法预测结果

依据对平凉、庆阳、天水市生活、工业、农业和畜牧业的预测方法分析, 定额法在 2025 年和 2030 年的需水预测结果如表 2、表 3、表 5 和表 6 所示。

4.1.1. 生活需水

城镇公共人均日用水量(L/人·d)数据来自 2020 年《甘肃省水资源公报》中, 流域与行政分区用水指标统计表中的各项数据; 城镇人口(万人)来自人口预测公式计算得到的数据。根据 2020 年的用水指标, 结合平凉、庆阳、天水的需求定额, 并考虑具体实际情况, 计算出 2025 和 2030 年生活需水量, 其中城镇公共需水量计算结果见表 1。

表 1. 受水区各区县城镇公共需水量计算结果(万 m³)

行政区	2025 城镇人口	城镇公共人均日需水量	2025 年城镇公共需水量	2030 城镇人口	2030 年城镇公共需水量
麦积区	24	22	195	27	215
秦州区	36	22	287	38	309
甘谷县	15	22	124	18	142
武山县	15	22	117	17	138
清水县	12	22	98	15	120
张家川县	13	22	102	15	121
天水市	115	22	925	130	1045
泾川县	12	35	159	15	196

续表

崆峒区	37	35	473	41	522
华亭县	13	35	160	14	177
崇信县	5	35	59	5	65
灵台县	7	35	91	9	120
庄浪县	14	35	175	17	222
平凉市	87	35	1116	102	1303
环县	13	42	196	16	245
华池县	5	42	84	6	92
合水县	6	42	99	8	116
庆城县	12	42	181	13	203
宁县	15	42	230	18	270
正宁县	8	42	127	10	152
西峰区	36	42	548	38	586
镇原县	16	42	238	21	318
庆阳市	111	42	1703	129	1982

居民生活需水计算中, 根据《2023年甘肃省行业用水定额》, 选择城镇居民用水定额标准为 105 L/(人·d), 农村居民用水定额标准为 80 L/(人·d)。2025 年城镇化率来自各县区十四五规划, 2030 年城镇化率保持 2025 年态势增长计算得出。居民生活需水计算结果如表 2 所示:

表 2. 2025 和 2030 年生活用水预测结果(万 m³)

区县	2025 城镇化率	2025 居民生活需水量	2025 生活需水量	2030 城镇化率	2030 居民生活需水量	2030 生活需水量
麦积区	0.6	1399	1594	0.65	1445	1660
秦州区	0.7	1813	2101	0.74	1869	2178
甘谷县	0.52	1006	1130	0.585	1045	1188
武山县	0.51	965	1083	0.59	1009	1147
清水县	0.5	821	919	0.6	864	984
张家川县	0.51	839	941	0.59	883	1004
天水市		6844	7769		7116	8161
泾川县	0.55	770	929	0.665	812	1008
崆峒区	0.725	1825	2298	0.791	1882	2404
华亭县	0.675	653	813	0.735	675	852
崇信县	0.55	285	344	0.6	296	362
灵台县	0.45	525	616	0.585	557	677
庄浪县	0.4	1113	1288	0.5	1175	1398
平凉市		5170	6287		5398	6700
环县	0.41	1016	1212	0.5	1079	1324

续表

华池县	0.45	402	487	0.48	419	511
合水县	0.47	459	558	0.54	477	593
庆城县	0.493	801	981	0.544	830	1032
宁县	0.44	1126	1356	0.51	1171	1442
正宁县	0.47	587	714	0.552	616	768
西峰区	0.68	1852	2399	0.711	1918	2504
镇原县	0.42	1207	1445	0.55	1291	1609
庆阳市		7450	9153		7801	9783

本文生活需水量包含居民生活需水与城镇公共需水两部分，故居民生活需水与城镇公共需水两者之和即为总的生活需水量。

4.1.2. 工业需水

现状年工业增加值来自 2021 年《甘肃发展年鉴》的工业增加值(万元)统计部分；工业增加值增长率来自于各县区的十四五规划中的工业增加值增长率，其中，天水市为 0.07，平凉市为 0.08，庆阳市为 0.04；2025~2030 年工业增加值增长率取 2020~2025 数据且进行适当降低，其中，天水市取 0.03，平凉市取 0.03，庆阳市取 0.02；2025 年万元增加值需水定额(m³/万元)来自各县区十四五水利规划(庆阳地区的西峰区、镇原县、宁县和正宁县根据现状年工业用水量做适当调整)，2030 年数据来自“三条红线”中用水效率控制目标的万元工业增加值用水量控制值。计算结果如表 3，从工业需水量来看，庆阳市的需求最大，天水市的缺水量最小。

表 3. 2025 和 2030 年工业需水预测结果(万 m³)

区县	2025 工业增加值	2025 万元增加值 需水定额	2025 工业需水量	2030 工业增加值	2030 万元增加值 需水定额	2030 工业需水量
麦积区	892,455	18	1606	1,034,599	11.95	1236
秦州区	579,129	18	1042	671,369	11.95	802
甘谷县	47,994	18	86	55,638	11.95	66
武山县	20,802	18	37	24,115	11.95	29
清水县	12,108	18	22	14,037	11.95	17
张家川县	9688	18	17	11,231	11.95	13
天水市	1,562,175		2812	1,810,989		2164
泾川县	25,284	35	88	29,312	30	88
崆峒区	324,797	35	1137	376,529	30	1130
华亭县	541,225	35	1894	627,428	30	1882
崇信县	248,077	35	868	287,589	30	863
灵台县	34,175	35	120	39,618	30	119
庄浪县	29,941	35	105	34,710	30	104
平凉市	1,203,499		4212	1,395,185		4186
环县	673,584	29	1953	743,691	29	2157

续表

华池县	886,502	27	2394	978,770	27	2643
合水县	410,594	29	1191	453,328	29	1315
庆城县	516,399	28	1446	570,146	28	1596
宁县	84,003	14.4	121	92,746	14.4	134
正宁县	11,872	7.2	9	13,108	7.2	9
西峰区	1,202,624	18	2165	1,327,794	18	2390
镇原县	220,539	18	397	243,493	18	438
庆阳市	4,006,116		9675	4,423,075		10,682

4.1.3. 灌溉需水

有效灌溉面积数据来自 2020 年《甘肃省水利统计年鉴》；农田灌溉定额数据来自《2023 年甘肃省行业用水定额》，具体不同地区农田灌溉定额数据见表 4；灌溉水有效利用系数来自“三条红线”中用水效率控制目标的农田灌溉水有效利用系数控制值。

表 4. 农田灌溉定额统计表

来水频率(来水年种类)	农田灌溉定额(m ³ /亩)		
	50% (平水年)	75% (枯水年)	90% (特枯年)
天定片(天水)	145	150	155
平庆片(平凉、庆阳)	135	165	195

农田灌溉定额数据来自《2023 年甘肃省行业用水定额》；灌溉水有效利用系数来自“三条红线”中用水效率控制目标的农田灌溉水有效利用系数控制值。农业需水预测结果如表 5。

表 5. 2025 年农业需水预测结果(万 m³)

区县	2025 年			2030 年				
	灌溉水有效利用系数	50%需水量	75%需水量	90%需水量	灌溉水有效利用系数	50%需水量	75%需水量	90%需水量
麦积区	0.565	2876	2975	3074	0.58	2801	2898	2994
秦州区	0.565	1775	1836	1897	0.58	1729	1788	1848
甘谷县	0.563	645	667	690	0.58	626	648	669
武山县	0.563	1650	1706	1763	0.59	1574	1628	1683
清水县	0.567	1373	1421	1468	0.58	1343	1389	1435
张家川县	0.567	1132	1171	1210	0.58	1106	1144	1183
天水市		9450	9776	10,102		9179	9496	9812
泾川县	0.555	2550	3117	3684	0.58	2440	2712	3525
崆峒区	0.555	2711	3313	3916	0.58	2594	2882	3747
华亭县	0.555	1127	1378	1629	0.58	1079	1199	1558
崇信县	0.555	763	932	1101	0.58	730	811	1054

续表

灵台县	0.555	1481	1811	2140	0.58	1418	1575	2048
庄浪县	0.555	1065	1302	1539	0.58	1019	1133	1473
平凉市		9698	11,853	14,008		9280	10,311	13,405
环县	0.564	1924	2352	2780	0.57	1904	2327	2751
华池县	0.564	1476	1804	2132	0.57	1460	1785	2109
合水县	0.565	1337	1634	1931	0.57	1325	1620	1914
庆城县	0.565	1029	1257	1486	0.58	1002	1225	1447
宁县	0.566	1406	1719	2031	0.58	1372	1677	1982
正宁县	0.565	867	1060	1253	0.58	845	1033	1220
西峰区	0.566	3188	3896	4605	0.58	3111	3802	4493
镇原县	0.565	1193	1459	1724	0.58	1163	1421	1679
庆阳市		12,420	15,180	17,940		12,182	14,889	17,596

4.1.4. 畜牧业需水

2025年牲畜数量信息来自各县区十四五规划,对于无相关描述,则选取2021年《甘肃省农村年鉴》中的相关数据。由于缺少2030年的牲畜信息,默认2030年畜牧需水与2025年一致。单位牲畜定额用水量数据来自《2023年甘肃省行业用水定额》文件,其中,猪取 $12.775\text{ m}^3/(\text{头}\cdot\text{年})$,牛取 $21.9\text{ m}^3/(\text{头}\cdot\text{年})$,羊取 $3.285\text{ m}^3/(\text{头}\cdot\text{年})$ 。具体的预测结果如下表6所示:

表 6. 2025 年畜牧业需水预测结果(万 m^3)

区县	2025 年				2030 年			
	猪存栏	牛存栏	羊存栏	需水量	猪存栏	牛存栏	羊存栏	需水量
麦积区	13	1	2	190	13	1	2	190
秦州区	10	1	3	173	10	1	3	173
甘谷县	27	2	3	395	27	2	3	395
武山县	12	3	7	245	12	3	7	245
清水县	30	10	14	648	30	10	14	648
张家川县	7	22	20	637	7	22	20	637
天水市	100	39	49	2288	100	39	49	2288
泾川县	7	7	3	247	7	7	3	247
崆峒区	5	31	5	763	5	31	5	763
华亭县	2	10	2	256	2	10	2	256
崇信县	40	10	3	740	40	10	3	740
灵台县	50	10	3	872	50	10	3	872
庄浪县	11	8	1	328	11	8	1	328
平凉市	115	77	17	3206	115	77	17	3206
环县	5	5	150	653	5	5	150	653

续表

华池县	3	10	100	586	3	10	100	586
合水县	4	10	19	327	4	10	19	327
庆城县	5	3	21	203	5	3	21	203
宁县	36	14	60	964	36	14	60	964
正宁县	30	20	1	826	30	20	1	826
西峰区	50	1	10	694	50	1	10	694
镇原县	30	31	100	1391	30	31	100	1391
庆阳市	162	94	462	5643	162	94	462	5643

4.2. LSTM 结果

由于农业的定额需水计算中按照 50%，70%，90% 进行概率预测，因此在进行 LSTM 需水预测时，只考虑了对生活、工业、畜牧业三个部门进行计算。采用 1963~2001 年的相关数据进行训练，经过多次调试，最终确定参数如下：输入层节点为 3；隐藏层为 2 层；隐藏单元数为 50；学习率 0.01；最大训练轮数为 200；输出层节点为 3。

模型训练进度如图 3 所示，均方根误差与损失值在训练的过程中不断减小并趋于稳定。模型在验证集上的预测误差 RMSE 为 0.030914，说明模型满足预测要求。

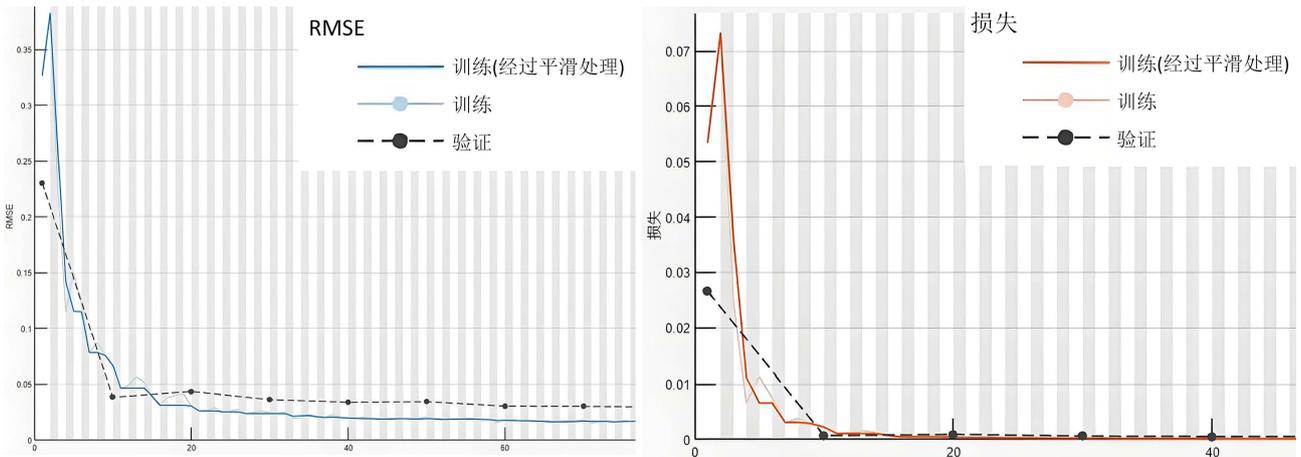


图 3. 模型训练进度

从图 3 中可以看出，模型能够满足预测要求。利用训练好的 LSTM 模型，输入 SSP2 情景下 2025 和 2030 的 WFaS 用水数据，得到对应时期对应关系的历史统计数据，如表 7、表 8 所示：

表 7. 基于 LSTM 得到的 2025 年需水预测结果(万 m³)

地级市	生活	工业	畜牧业
平凉	6590	7168	2155
庆阳	8361	7359	3984
天水	5749	3145	2427

表 8. 基于 LSTM 得到的 2030 年需水预测结果(万 m³)

地级市	生活	工业	畜牧业
平凉	8228	7409	3423
庆阳	9069	11323	6445
天水	5398	2920	2285

可以看出畜牧业并没有如定额法一样,在 2025 和 2030 年需水量保持不变。结合 2024 年甘肃省水资源公报来看,预测结果也完全符合实际情况。

4.3. 预测结果比较

定额法需水预测和基于 LSTM 机器学习的需水预测结果分别如表 9 所示。

表 9. 不同方法需水量预测结果比较(万 m³)

年份	定额法			LSTM 法		
	生活需水量	工业需水量	畜牧业需水量	生活需水量	工业需水量	畜牧业需水量
2025	23,209	16,699	11,137	20,700	17,672	8566
2030	24,644	17,032	11,137	22,695	21,652	12,153

本文在定额法需水预测上采用固定增长率的水指标进行预测,但是这在很大程度上是基于统计数据和经验进行估算的,所以并没有考虑研究区域在预测期的具体情况。根据实际情况来看,近年来甘肃省人口增长并不满足固定增长率,甚至出现人口负增长情况,按照固定的增长率得出来的生活需水量的结果显然是不合理的。同时在全球经济萧条的大背景下,企业发展也具有不确定性。此外,对于畜牧业需水的估计,默认 2030 年畜牧需水与 2025 年一致,也具有不足之处。

通过 LSTM 模型确定历史统计用水数据与 WFaS 数据的映射关系,实现预测未来任意时期的需水量时,所需的数据量更小,计算过程也更加简易,大大提高了计算效率,为需水预测提供一种新思路。对比两者的计算结果来看,有差异但是却不大。

5. 结论

本文探讨了受水区的需(用)水预测,为后续的优化配置提供了坚实的数据基础。在需水预测中,使用定额法对生活、工业、灌溉、畜牧需水进行了系统预测。同时利用 LSTM 模型建立从全球 WFaS 数据到历史用水统计数据映射关系,为需水预测提供一种新思路。主要结论如下:

1) 本文在定额法需水预测上采用了固定增长率的水指标进行预测,但是根据近几年研究区域实际情况来看,按照固定增长率的用水指标具有不合理性。但是作为当下应用广泛的预测方法,也能满足预测要求。

2) 利用机器学习寻求 WFaS 和历史统计用水数据间的映射关系,结合了两类数据的优点,在一定程度上克服了历史统计数据量小和 WFaS 数据在区域范围内精度不高的问题。通过输入未来任何时期的 WFaS 数据,从而得到符合映射关系的历史用水数据。该方法可以利用更少的数据、更简单的机器学习模型来计算未来的区域需水量。对比定额法的计算结果来看,两种方法有差异但是却不大。

基金项目

甘肃省重点人才项目(2025RCXM0050),甘肃省重点研发项目(23YFFA0017, 23YFFA0018),省水利科技推广计划项目(23GSLK011),国家自然科学基金项目(52379022)。

参考文献

- [1] 黄军, 胡卫权, 陈媛媛, 等. 水资源论证区域评估关键技术研究与应用实践[J/OL]. 水利发展研究, 2024: 1-8. <https://link.cnki.net/urlid/11.4655.TV.20241022.1101.008>, 2025-08-05.
- [2] 孙芳欣, 杜崇, 刘岩. 多种数学模型下的绥滨县需水预测研究[J]. 黑龙江水利科技, 2024, 52(11): 25-29.
- [3] 蔡素芳, 梅亚东. 需水预测研究综述[C]//中国水利学会水资源专业委员会, 中国水利水电科学研究院, 大连理工大学. 变化环境下的水资源响应与可持续利用——中国水利学会水资源专业委员会 2009 学术年会论文集. 2009: 227-232.
- [4] 邓奎, 李龙国. 灰色回归模型在农业用水量预测中的应用[J]. 杨凌职业技术学院学报, 2011, 10(1): 48-50.
- [5] MA, J., CHEN, Y., HAO, X., et al. Study on real-time water demand prediction of winter wheat—Summer corn based on convolutional neural network—Informer combined modeling. Sustainability, 2024, 16(9): 3699. <https://doi.org/10.3390/su16093699>
- [6] WU, W., KANG, Y. Ensemble empirical mode decomposition granger causality test dynamic graph attention transformer network: Integrating transformer and graph neural network models for multi-sensor cross-temporal granularity water demand forecasting. Applied Sciences-Basel, 2024, 14(8): 3428. <https://doi.org/10.3390/app14083428>
- [7] LIU, C., LIU, Z., YUAN, J., et al. Urban water demand prediction based on attention mechanism graph convolutional network-long short-term memory. Water, 2024, 16(6): 831. <https://doi.org/10.3390/w16060831>
- [8] CHEN, L., GAN, X., YI, B., et al. Domestic water demand prediction based on system dynamics combined with social-hydrology methods. Hydrology Research, 2022, 53(8): 1107-1128. <https://doi.org/10.2166/nh.2022.051>
- [9] WANG, X., ZHANG, J., SHAHID, S., et al. Domestic water demand forecasting in the Yellow River basin under changing environment. International Journal of Climate Change Strategies and Management, 2018, 10(3): 379-388. <https://doi.org/10.1108/ijccsm-03-2017-0067>
- [10] LIU, X., QIN, M. and XIANG, X. Forecasting on China's water demand by industry in 2021. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 772(1): 012097. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/772/1/012097>
- [11] 潘梦娜. 改进 BP 神经网络模型在锦州地区农业灌溉用水预测中应用[J]. 水与水技术, 2025: 124-128.
- [12] WADA, Y., FLOERKE, M., HANASAKI, N., et al. Modeling global water use for the 21st century: The water futures and solutions (WFaS) initiative and its approaches. Geoscientific Model Development, 2016, 9(1): 175-222. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-175-2016>
- [13] WADA, Y., WISSER, D. and BIERKENS, M. F. P. Global modeling of withdrawal, allocation and consumptive use of surface water and groundwater resources. Earth System Dynamics, 2014, 5(1): 15-40. <https://doi.org/10.5194/esd-5-15-2014>
- [14] ZHOU, F., BO, Y., CIAIS, P., et al. Deceleration of China's human water use and its key drivers. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(14): 7702-7711. <https://doi.org/10.1073/pnas.1909902117>
- [15] 郑铁刚, 吴茂喜, 张迪, 等. 基于改进长短期记忆网络模型的水库库区水温模拟[J]. 农业工程学报, 2025, 41(3): 144-153.