DOI 10.15302/J-SSCAE-2022.05.010

基于水资源约束的我国城市发展策略研究

吴志强[1]，刘晓畅[1]，刘琦[2]，乔壬路[1]，刘治宇[2]，杨婷[1]，严娟[1]，姬凌云[1]

（1. 同济大学建筑与城市规划学院，上海 200092；2. 上海同济城市规划设计研究院有限公司，上海 200082）

摘要：水资源是城市发展的基础性自然资源和战略性经济资源，是城市生态环境的控制性要素，是城市空间的基本底色。我国水资源分布不平衡、区域结构性缺水、水污染等问题严峻，制约了城市的发展，亟需以城市为独立研究单元进行全域诊断与推演，对全国的城市水环境和用水特征进行分析并制定策略。本文通过对我国八大综合经济区的369个城市的水情总体特征以及关键要素时空分布格局进行分析，揭示了我国800 mm等雨量线、降水总量与水资源总量关系的演进规律；从未来推演视角，预测了我国369个城市2035年水平衡发展情势；在此基础上，聚焦城市用水需求与水资源供给之间的矛盾，将我国的城市划分为“城渴型”“产旱型”“房淹型”3类，分别阐述3类城市的水环境特征和空间分布。最后，本文提出了适应水条件的我国城市发展政策建议，包括“以水定城”的新型城镇化对策、“以水定产”的城市产业发展对策和“以水定人”的城市人口发展对策，以期对我国今后城市发展布局提供参考。

关键词：水资源；城渴型；产旱型；房淹型；以水定城；水情推演

中图分类号：TU98　　**文献标识码：**A

Urban Development Strategies in China Based on Water Resource Constraints

Wu Zhiqiang[1], Liu Xiaochang[1], Liu Qi[2], Qiao Renlu[1], Liu Zhiyu[2], Yang Ting[1], Yan Juan[1], Ji Lingyun[1]

(1. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Shanghai Tongji Urban Planning and Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200082, China)

Abstract: Water resources are the fundamental natural resources and strategic economic resources demanded by urban development, and are crucial for urban ecological environment. However, the unbalanced distribution of water resources, regional structural shortage of water, and water pollution have been hindering China's urban development. Therefore, city-scale full-coverage water resource diagnosis and deduction are urgently required to reveal the status of water environment and water use characteristics of different cities in China for more rational and specific strategy-making. The study analyzes the overall characteristics of water environment and the spatial distribution of key urban elements in 369 cities within eight comprehensive economic regions, reveals the dynamic interactive relationship among the 800 mm isopluvial, total precipitation, and total water resources in China, and predicts the water balance trends of the 369 cities by 2035. On this basis, according to the types of water demand and supply contradictions, the study categorizes Chinese cities into domestic water deficient cities, water – industry mismatching cities, and flood-prone cities. The study further reveals the spatial layout and water environment characteristics of

收稿日期：2022-07-20；**修回日期：**2022-09-02

通讯作者：吴志强，同济大学建筑与城市规划学院教授，中国工程院院士，研究方向为城乡可持续发展与智能城市规划；
E-mail: wus@tongji.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“水平衡与国土空间协调发展战略研究（一期）”(2020-ZD-20)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

these cities and proposes urban development strategies for Chinese cities to grow in accordance with their specific water resource conditions, including water resource-based urbanization, water resource-based industrial development, and water resource-based population development.

Keywords: water resource; domestic water deficient cities; water–industry mismatching cities; flood-prone cities; water resource-based urbanization; water condition deduction

一、前言

水资源是人类的基本生存资源，也是城市发展的重要支撑。随着我国城市工业的快速发展和城镇人口数量的大幅增加，经济社会用水规模长期居于高位，生态环境与经济社会的用水矛盾日渐凸显，造成了我国水资源不平衡、区域结构性缺水、水环境污染和水生态退化等一系列严峻的水环境问题，严重制约了我国的经济发展和生态建设。

我国的水资源战略布局从无到有，经历了不断深化认知的调整过程。20世纪80年代之前，水资源保护隐含于传统的流域管理中，以水土保持和水资源综合开发为重点，此后逐渐转向以水资源保护为管理核心的全面建设节水防污型社会时期 [1]。1988年，《中华人民共和国水法》的发布，标志着我国水资源管理进入有法可依和取水许可管理阶段，水利工作由工程水利转变为资源水利；2002年，对其进行修订，确立了水资源论证制度，明确在进行国民经济和社会发展规划以及城市总体规划的编制、重大建设项目的布局时，应当开展科学论证，并与当地水资源条件和防洪需求相适应 [2]。2011年，国务院发布《关于实行最严格水资源管理制度的意见》，提出“三条红线”，对用水效率、水资源开发利用、环境容量3项内容进行控制 [3]。

在城市节水领域，近年来我国深入推进国家节水型城市建设，截至2021年年底，全国已建成130个国家节水型城市。2015年以来，从国家层面确定了50个城市开展海绵城市建设试点示范工作 [4]，在缓解城市内涝的同时，开展雨水收集利用，绿地及滨水空间得到扩展，人居环境得到相应改善。但总体来看，作为水资源利用和治理的重要主体，面向城市领域的水资源战略研究尚缺乏：① 以城市作为独立研究单元，针对全国各城市水环境和用水特征进行具体策略制定；② 引入未来发展视角，针对自然环境和城市产业、人口等要素，在时间向量上的变化进行规律学习和发展推演；③ 以城市安全为底线，通过安全底线倒推，确定水灾害防治、水资源利用、水环境治理及水生态保护标准，并纳入城市安全战略总方针。

为从根本上实现我国城市人口经济发展与水资源承载力相适应，提高城市发展质量和资源利用效率，本文依托中国工程院咨询项目“水平衡与国土空间协调发展战略研究（一期）”，立足于基本国情和水情，落实我国东北综合经济区、北部沿海综合经济区、东部沿海综合经济区、南部沿海综合经济区、黄河中游综合经济区、长江中游综合经济区、大西南综合经济区、大西北综合经济区八大综合经济区的369个城市（包含直辖市、地级市、地区、自治州、盟与省直管县级行政区等）的水资源刚性约束，通过城市水资源的现状诊断与未来推演，提出“以水定城、以水定人、以水定产”三大战略及具体策略，建构节水型生产生活方式，为建设资源节约、环境友好、永续发展的城市提供有效路径。

二、数据来源与分析方法

本文基于2021年我国31个省级行政区的水资源公报数据（未包含香港特别行政区、澳门特别行政区、台湾省）、科学数据银行（Science Data Bank）的2000—2020年我国月降水量栅格数据、2011—2021年我国城市统计年鉴中的城市人口数据及城市工业生产总值数据，对我国城市的“基本水情”与“用水挑战”进行分析与诊断。

本文采用基于粒子群优化的神经网络模型（PSO_BP）对时序数据进行未来推演预测。BP神经网络算法采用梯度下降算法，具有强大的非线性拟合能力，可以高精度地逼近符合数据内在机理的函数。PSO通过群体智能进行全局寻优，从而有效提升BP网络的收敛速度与拟合精度。具体来看，本研究通过等距时间窗，重构时序数据结构，采用PSO_BP构建数据的时序联系与迭代运算，进行我国城市水情未来演进的时序推演。

三、我国城市水情分析与推演

（一）我国城市水情基本情况

我国的基本水情是水资源分布不均、人多水少、用水量大、用水效率低，这也决定了我国水资源问题的复杂性。截至2021年，我国水资源总量为2.96×10^{12} m³ [5]，约占世界水资源总量的7% [6]。但我国2021年人均水资源量为2095 m³ [7]，仅为世界平均水平的1/4 [8]。

1. 水资源总量分布不平衡

2020年我国水资源总量的地区分布总体呈现“南方多、北方少”的特点，水资源总量最丰沛的城市多位于我国大西南综合经济区、长江中游综合经济区、南部沿海综合经济区，其中水资源总量最多的城市为四川省甘孜藏族自治州，为7.876×10^{10} m³（见图1）。水资源最匮乏的城市多位于我国大西北综合经济区、黄河中游综合经济区、北部沿海综合经济区，其中水资源总量最少的城市为甘肃省嘉峪关市，仅为0.06×10^{8} m³，人均水资源量为264.4 m³（见图2）。水资源最丰沛与最匮乏城市的水资源总量差异比值高达1.3万倍。

我国水资源的空间分布不平衡严重影响了我国经济社会的布局。长期以来，我国沿用的是增加外源供水来支撑经济社会发展的“保障思维”。未来，在控制水资源消耗总量和强度的同时要统筹优化调整经济社会系统布局，使其与水资源承载力相适应 [9]。

2. 用水总量差距悬殊

2020年，我国用水量的地区分布总体呈现“胡焕庸线以东的综合经济区、黄河中游综合经济区部分区域、大西北综合经济区部分区域”较高的特点（见图3）。

2020年用水量最大的城市多位于我国大西北综合经济区、东部沿海综合经济区、长江中游综合经济区、东北综合经济区等，其中用水量最多的是新疆维吾尔自治区的阿克苏地区，高达1.18×10^{10} m³（见图3）。用水量较小的城市多位于我国大西南综

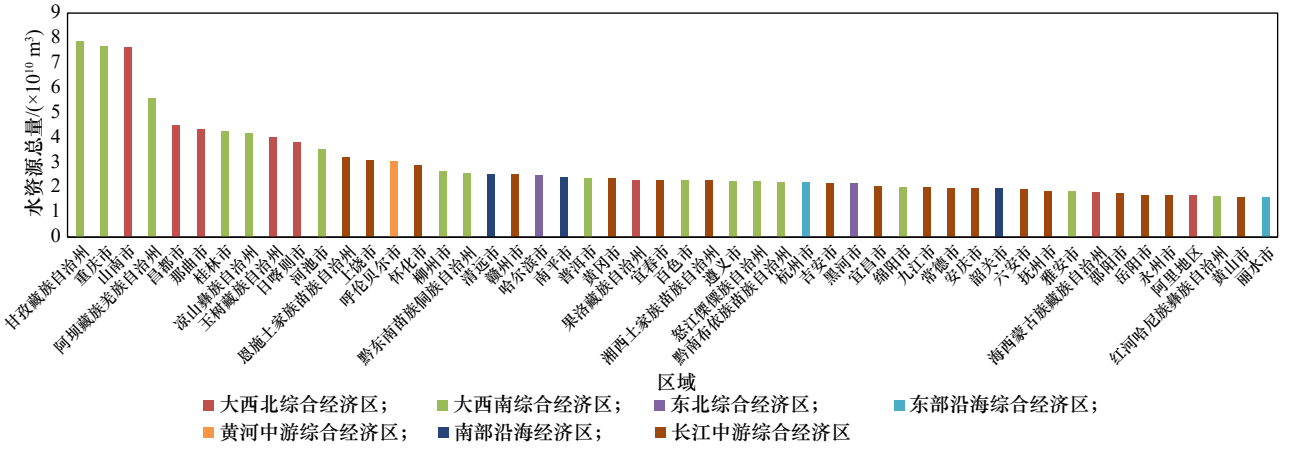

图1　2020年我国各城市水资源总量排行（正数前50名）

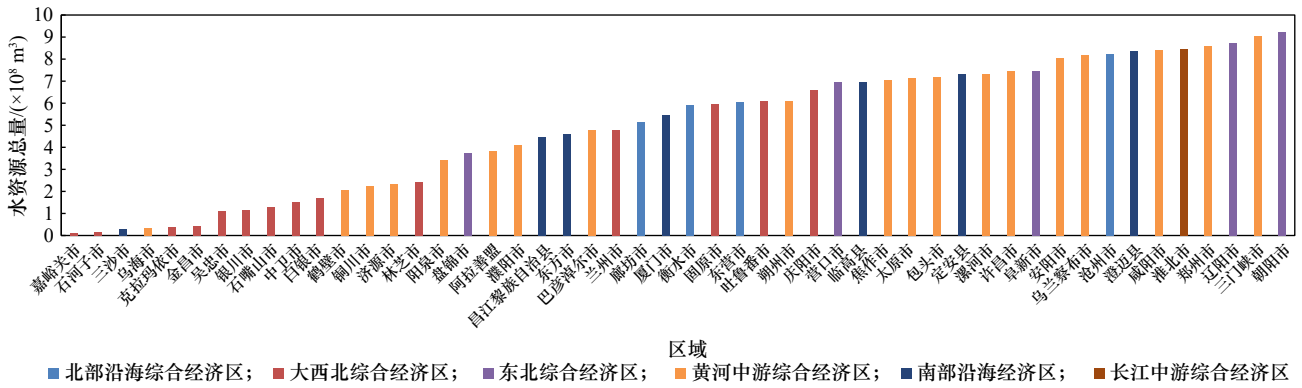

图2　2020年我国各城市水资源总量排行（倒数后50名）

合经济区、北部沿海综合经济区等，其中用水量最少的是湖北省神农架林区，仅为0.13×10^8 m³。用水量最大城市与最小城市的差异比值高达908倍（见图4）。

3. 用水效率差异明显

地区的用水效率可以通过每万元国内生产总值（GDP）的耗水量来直观反映。2020年，全国每万元GDP（当年价）的用水量为60.8 m³ [10]，由于产业结构差异大，不同地区的每万元GDP的用水量差异显著（见图5）。

2020年，我国用水效率较高的区域主要集中于水资源紧缺及经济较为发达的北部沿海综合经济区、东部沿海综合经济区、南部沿海综合经济区、长江中游综合经济区等，其中用水效率最高的城市是深圳市，每万元GDP用水量为7.69 m³（见图5）。用水效率较低的区域主要集中于农业用水比重较高的大西北综合经济区、大西南综合经济区、东北综合经济区，其中用水效率最低的地区是新疆维吾尔自治区的和田地区，每万元GDP用水量为1036.18 m³（见图6）。新疆和田地区的每万元GDP用水量为深圳市的134倍。

（二）面向2035年的我国城市降水量推演

我国幅员辽阔，国土纵横广大，各地区距海距

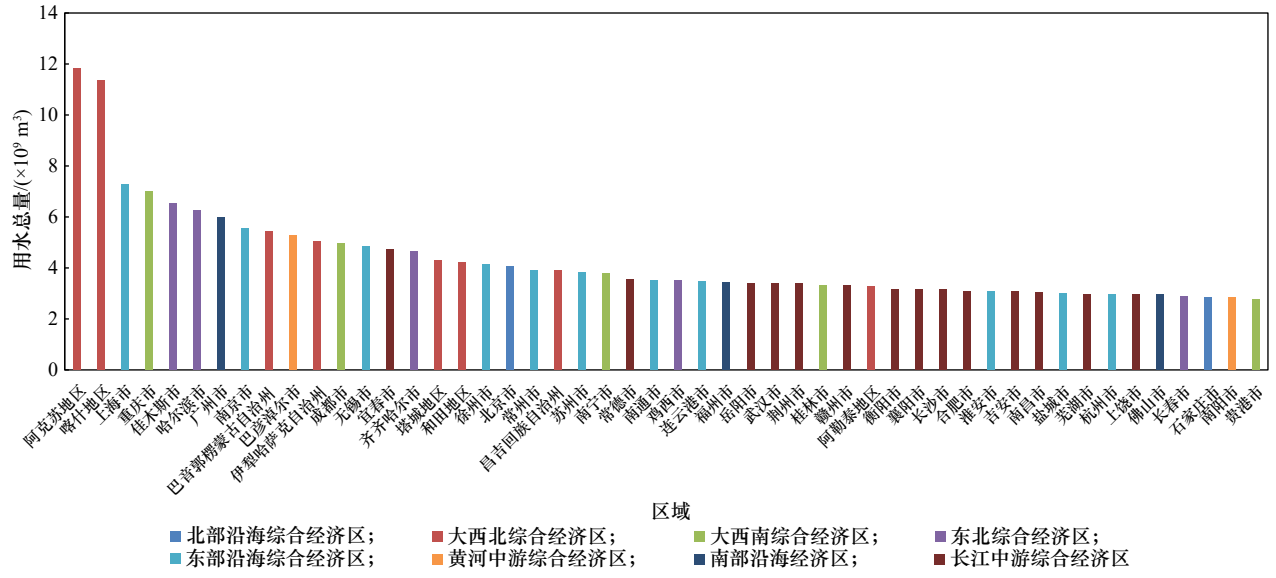

图3　2020年中国各城市用水总量排行（正数前50名）

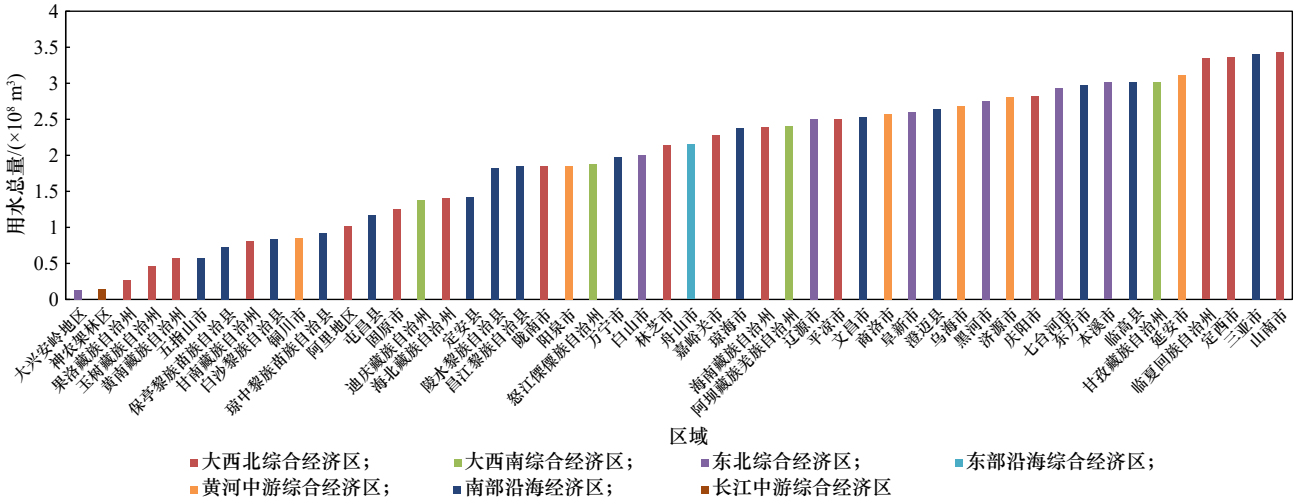

图4　2020年我国各城市用水总量排行（倒数前50名）

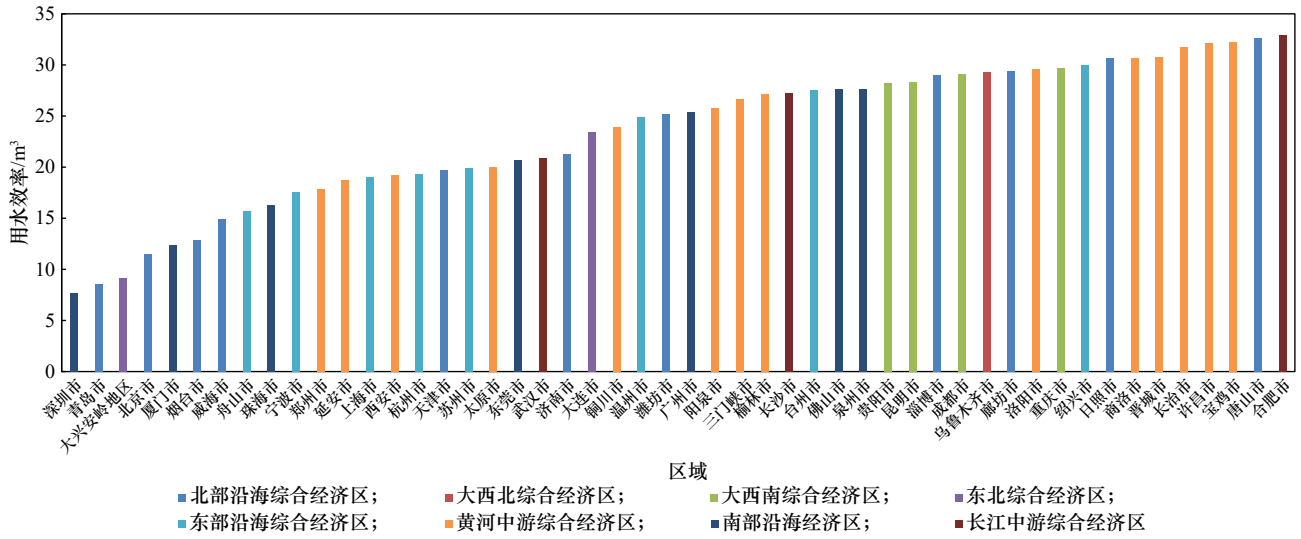

图5　2020年中国各城市用水效率排行（正数前50名）

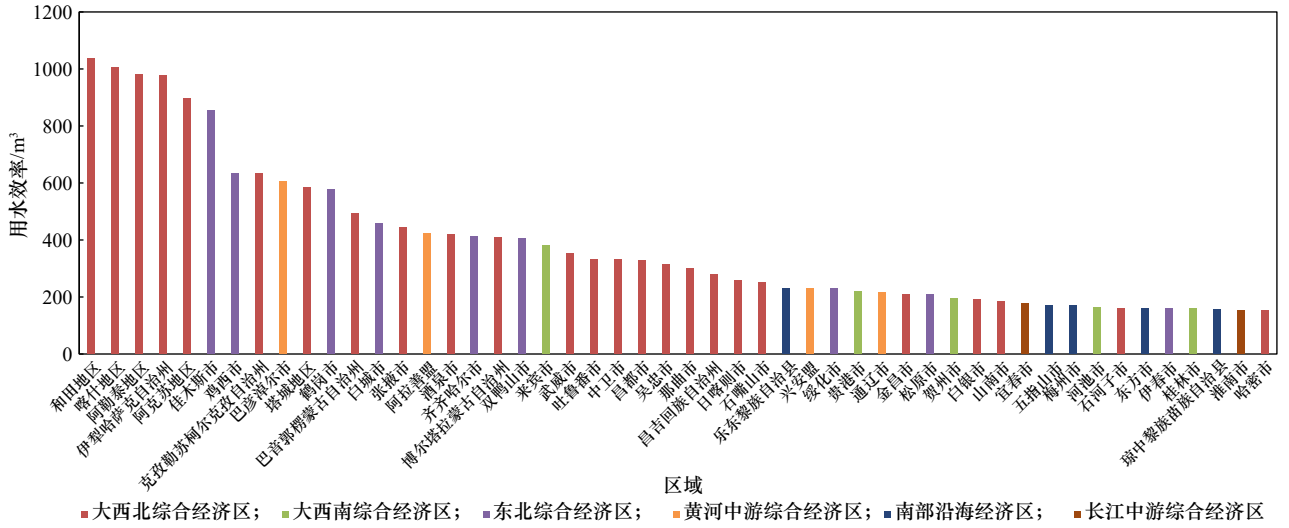

图6　2020年中国各城市用水效率排行（倒数前50名）

离差异显著，河流湖泊分布不均，地势高低多变，地形类型及山脉走向多样性显著，因此形成了丰富的气候环境，各地降水趋势复杂多样。

1. 城市降水总量与水资源总量呈线性相关

从各城市降水总量来看，2020年我国的降水分布呈现西南及东北两端高，中部匮乏的趋势。主要高值区位于“西南–华南”连绵区，以及“华北北部–东北”连绵区（见图7），主要低值区位于“环渤海–华北下部–西北”连绵区（见图8）。其中那曲市是我国2020年年降水总量最多的城市，高达2.823×10^{11} m³，甘孜藏族自治州与重庆市紧随其后，分别为1.771×10^{11} m³、9.747×10^{10} m³（见图7）；嘉峪关市是我国年降水总量最少的城市，仅为0.99×10^{8} m³，石河子市以及乌海市略高于嘉峪关市，分别为1.01×10^{8} m³、5.01×10^{8} m³（见图8）。全国雨水分配极度不均，具有千余倍的差距。

我国城市降水总量与水资源总量在全局上呈现高度的线性相关性（见图9），两者之间的相关系数为0.86。降水总量与水资源总量存在正相关关系，即降水总量多的城市，其水资源总量同样丰富，二者之间的线性权重为0.57，即城市降水总量每提升1×10^{10} m³，城市水资源总量提升5.7×10^{9} m³。

因此，本研究以2035年城市的降水量预测，推演2035年我国各城市的水资源总量。

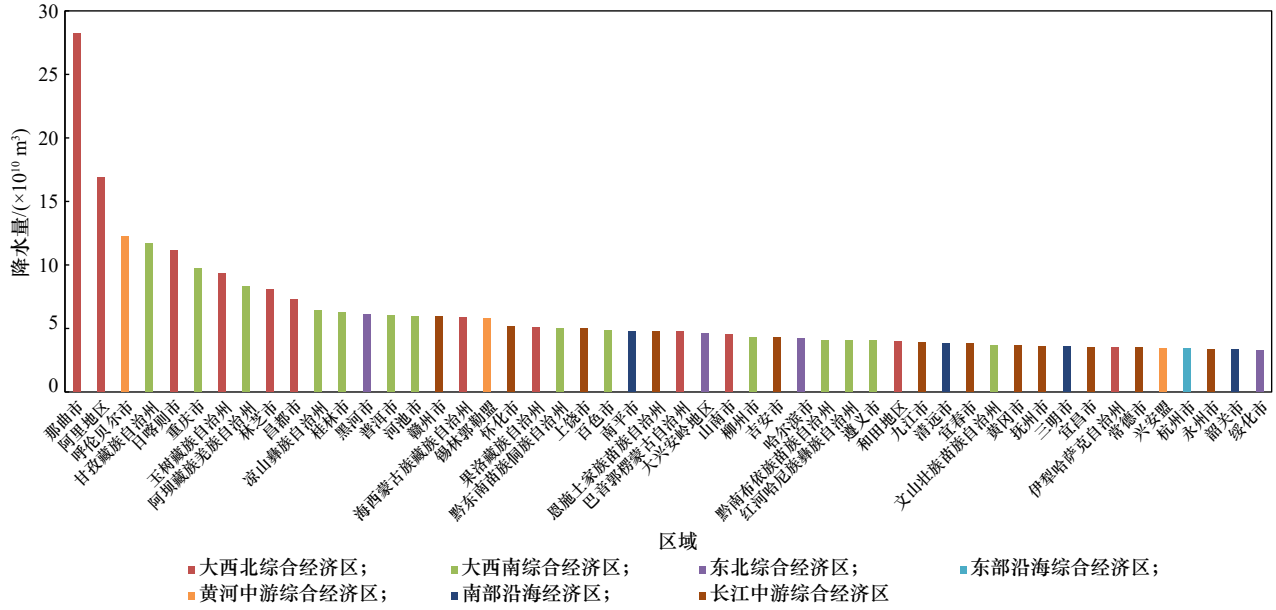

图7　2020年我国各城市降水量总排行（正数前50名）

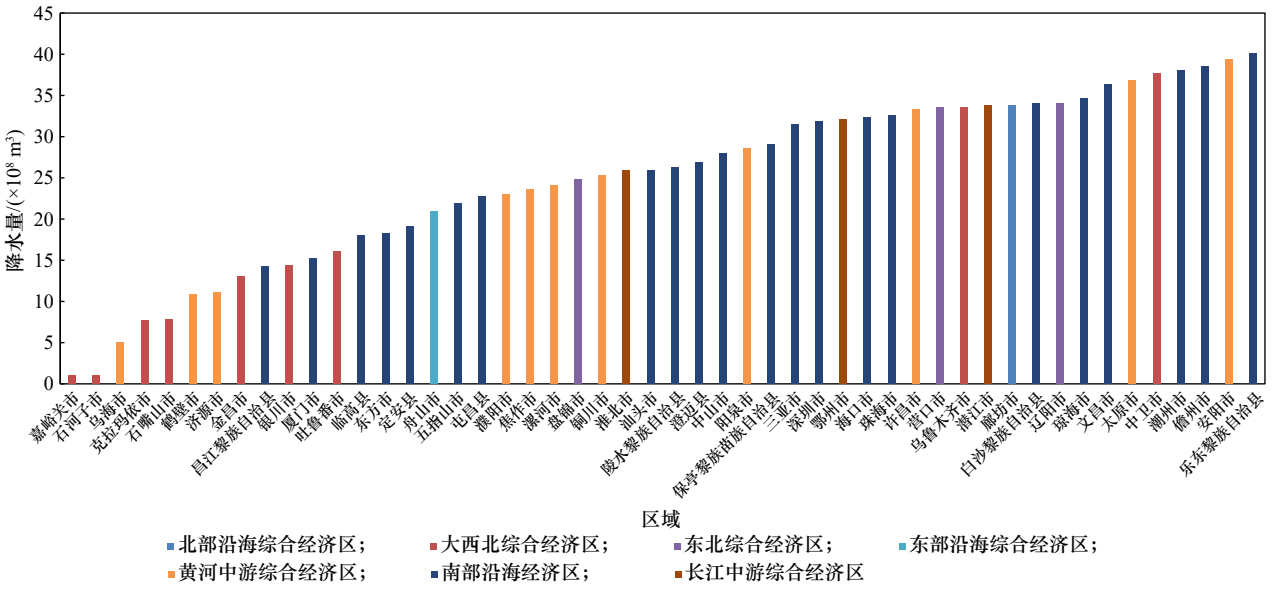

图8　2020年我国各城市降水量总排行（倒数前50名）

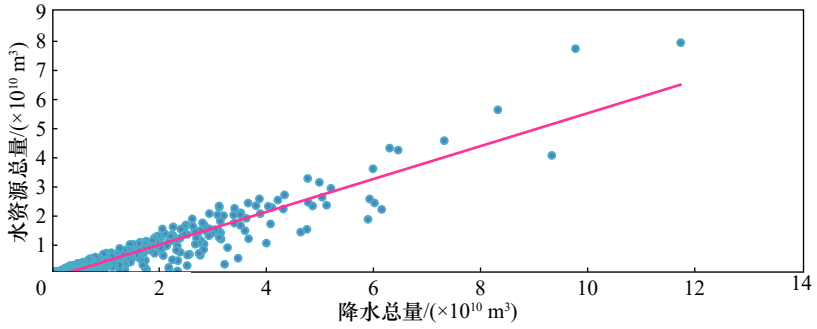

图9　我国城市降水总量与水资源总量相关性

2. 近20年我国城市降水量呈波动升高

2000—2020年，我国城市年降水量波动明显，在整体上形成了山谷状的变化趋势（见图10） [11]。2000—2004年，我国大部分城市的年降水量曲线迅速下坠，城均年降水量从高值1003 mm降低到20年中的最低值864.3 mm。2005—2020年，我国城市的年降水量缓慢提升，并且在2016年城均年降水量达到了新高1046.1 mm，并且在随后的4年中保持在1040 mm左右震荡。

3. 2035年我国城市800 mm等雨量线将显著北移

800 mm等雨量线是我国重要的空间划分界限，等雨量线的移动与生态环境和农耕效益息息相关。影响城市降水量的因素众多，由于受大气环境这一混沌系统制约，较难构建一个精准的物理模型解析推演城市降水量的变化趋势 [12~14]。针对于此，为解决降水量非线性推演问题，本文采用PSO_BP模型，基于我国2000—2020年的城市降水量数据，对2020—2035年的城市降水量进行推演。

研究结果显示，2020—2035年，我国800 mm等雨量线逐渐从秦岭–淮河一线显著北移。2020年，我国有222个城市的年降水量高于800 mm，到2035年将有273个城市年降水量高于800 mm。这种变换将对我国的生态格局、产业格局、社会格局产生深远的影响。

就城市年降水量情况来看，2020年，我国城市平均年降水量为1042.6 mm；到2035年，我国城均年降水量将为1244.6 mm，我国年降水量将显著增加。未来，各城市年降水量的提升情况仍会存在一定差异。2035年，广州、深圳的年降水量均将突破2000 mm，较2020年分别增加了352.8 mm、334.1 mm。到2035年，新疆维吾尔自治区的降水量仍较低，如阿拉尔市的年降水量将为199.6 mm，仅比2020年增加了56.7 mm；铁门关市的年降水量将为194.0 mm，较2020年增加了58.6 mm。虽然新疆维吾尔自治区各城市的年降水量提升有限，但提升比例为29.8%，远超全国平均值17.8%。

（三）2035年我国城市供水缺口预测

我国是联合国列出的13个贫水国家之一，但水资源总量却位居世界前列。这一问题产生的主要原因是水资源供给与用水需求不匹配之间的矛盾，因此，加强用水需求预测成为水平衡调控的重要路径之一。按照推导逻辑来看，用水预测主要有两类方法，一类是根据历史用水记录进行预测，另一类是根据经验推导，如构建影响用水的各因素与总用水量的影响模型 [15]。按照使用的计算方法来划分，主要有数学模型、人工智能模型等，其中人工神经网络常用于用水预测，可有效解决常规数学方法难以克服的样本少、具有不确定性、波动性等问题。

本文基于各城市历史用水总量数据进行用水总量推演，其模型的拟合优度（R^2）达到0.92。结合预测的水资源总量和用水量计算得到2035年我国各城市的供水缺口。

到2035年，我国共有140个城市存在供水缺口，以上海到克拉玛依为界，呈现显著的东北、西南分异，东北片区大部分城市供水情况呈现供小于求，西南片区大部分城市则是供大于求。在东北片区，黑龙江、吉林和辽宁的边境城市水资源较为丰富，用水供需压力偏小；在西南片区，福建、广东、广西部分城市有较大的用水缺口（见图11）。另外，新疆阿克苏地区的用水缺口高达9.518×10^8 m³，

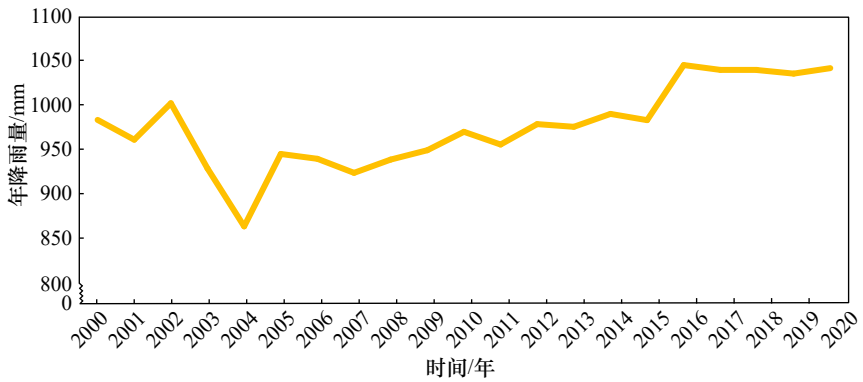

图10 2000—2020年我国城市平均降水量

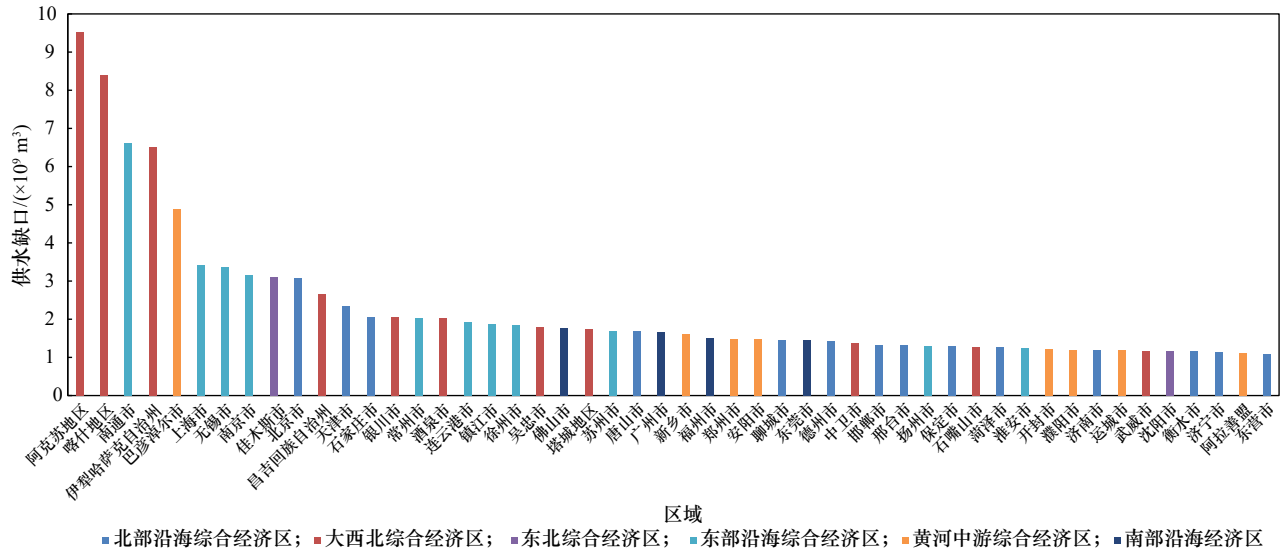

图11　2035年我国各城市供水缺口排行（正数前50名）

位居全国第一。到2035年，长江三角洲、珠江三角洲和京津冀三大城市群的主要城市皆位列全国前50名缺水城市名单中，面临严峻的用水考验（见图11）。

四、我国城市用水面临的挑战

我国用水结构按照用水部门进行分类，包括农业用水、工业用水、生活用水和生态用水4个部分 [16]。其中，生态用水多年平均不超2% [17]；而农业用水受生产工具、相关设备技术影响较大，短期内用水需求变化较小且呈持续下降趋势；工业用水和生活用水自改革开放以来其年均增长率分别为3.47%和3.03% [18]，增速较高，且可通过结构性调控得以改变，逐渐成为研究的主要热点。同时，城市洪涝灾害逐渐常态化，促使城市人民生命财产安全面临严峻挑战。针对于此，本文将工业用水、生活用水、洪涝灾害作为亟需解决的主要矛盾，分析我国城市用水面临的挑战。

（一）“城渴型”城市水环境特征和空间分布

近30年我国人口总量持续增长，人口总量从1949年的5.4亿人发展到14.1亿人（2021年），年均增长率约为1.4%。随着城镇化进程的加快，人口高度集聚于城市区域，用水需求的大幅提高导致城市区域水资源供应不足的问题日益严峻，城市出现程度不一的“渴水”现象，故将此类缺水城市定义为“城渴型”城市，并重点结合水资源与人口规模矛盾最突出的“高度城渴型”城市，剖析城市人口集聚过程中的水平衡问题。

1. 我国2035年的各城市人口预测

随着我国经济社会发展，出现了人口不断向城市集聚的“城市化”现象，人口集聚对城市承载力带来了显著的压力。预测结果显示，我国城市人口总量总体呈平稳波动且持平趋势，百万人口城市占比为84%，千万人口城市占比为4%。常住人口排名前列的城市为重庆市、上海市、北京市、成都市、天津市、广州市、深圳市、保定市、武汉市等。

2.“城渴型”城市的水环境特征

在城市发展过程中，高强度人类活动对水循环过程造成了全方位影响，以特大、超大城市和城市群为主要增长极的快速发展导致我国人口高度聚集和经济迅猛增长，且对局部环境和水循环过程产生了剧烈扰动，强化了有限水资源承载能力和不断上涨的生活用水需求之间的不匹配性，形成水资源匮乏、城市人口规模较大的“城渴型”城市。

3. 2035年“城渴型”城市空间分布推演

根据2035年我国各城市常住人口预测数量，按照2020年我国各城市人均生活用水量，推演2035年我国369个城市人口生活用水总需求量。通过生活用水需求与水资源供给的关系，定义“城渴型”城市的生活用水的稀缺程度，如公式（1）所示。

$$K_i = S_i / W_i \quad (1)$$

式（1）中，K_i表示i城市2035年的生活用水压力，S_i表示i城市2035年的生活用水量，W_i表示i城市2035年的水资源总量。

借鉴已有研究的水资源稀缺程度、水资源压力指标[19]以及相关国际组织如世界粮农组织、联合国教科文组织、联合国可持续发展委员会等的实际应用情况[20]，将K_i设定为10%、20%、40%，划为4个区间，对城市的生活用水压力进行分类，如公式（2）所示。将“高压力型”城市称为“高度城渴型”城市，将“中高压力型”城市称为“中度城渴型”城市，将“中低压力型”城市称为“中度城润型”城市，将“低压力型”城市称为“高度城润型”城市。

$$\text{城市生活用水压力分类}\begin{cases}\text{低压力型: } K_i \leqslant 10\% \\ \text{中低压力型: } 10\% < K_i \leqslant 20\% \\ \text{中高压力型: } 20\% < K_i \leqslant 40\% \\ \text{高压力型: } 40\% < K_i\end{cases} \tag{2}$$

研究表明，到2035年，我国共有129个“高度城渴型”城市，53个“中度城渴型”城市（见表1）。我国内蒙古城市群及京津冀城市群形成了一条巨型高度城渴区风险带，并向东北延伸与沈阳–大连城市群相连，构成渤海湾环状城镇缺水地带。

（二）“产旱型”城市水环境特征和空间分布

工业生产过程中的不断增加用水及废水处理问

表1 2035年我国的“高度城渴型”城市与“中度城渴型”城市

地区	“高度城渴型”城市（129个）	“中度城渴型”城市（53个）
东北综合经济区	佳木斯市、齐齐哈尔市、鸡西市、长春市、沈阳市、绥化市、白城市、大庆市、鹤岗市、双鸭山市、大连市、松原市、盘锦市、鞍山市、辽阳市、铁岭市、锦州市、四平市、营口市、葫芦岛市、朝阳市、阜新市	哈尔滨市、丹东市、抚顺市
北部沿海综合经济区	北京市、石家庄市、天津市、菏泽市、保定市、唐山市、济宁市、济南市、德州市、邯郸市、邢台市、聊城市、滨州市、东营市、潍坊市、沧州市、衡水市、泰安市、淄博市、青岛市、烟台市、廊坊市、张家口市、承德市、秦皇岛市、枣庄市、威海市	日照市
东部沿海综合经济区	上海市、南京市、无锡市、徐州市、常州市、苏州市、南通市、连云港市、淮安市、盐城市、扬州市、镇江市、泰州市、宿迁市、嘉兴市	宁波市、绍兴市、温州市、台州市、舟山市
南部沿海综合经济区	广州市、福州市、佛山市、泉州市、茂名市、湛江市、漳州市、深圳市、东莞市、中山市、揭阳市、莆田市、汕头市、潮州市、厦门市、海口市、儋州市、临高县、东方市、澄迈县、昌江黎族自治县	江门市、梅州市、云浮市、汕尾市、珠海市、乐东黎族自治县、文昌市、定安县
黄河中游综合经济区	巴彦淖尔市、南阳市、通辽市、赤峰市、郑州市、新乡市、周口市、西安市、鄂尔多斯市、运城市、开封市、安阳市、洛阳市、商丘市、濮阳市、阿拉善盟、兴安盟、渭南市、焦作市、榆林市、平顶山市、包头市、呼和浩特市、许昌市、咸阳市、太原市、临汾市、晋中市、忻州市、大同市、漯河市、长治市、朔州市、乌兰察布市、鹤壁市、晋城市、三门峡市、延安市、济源市、乌海市、阳泉市、铜川市	驻马店市
长江中游综合经济区	武汉市、衡阳市、襄阳市、合肥市、南昌市、芜湖市、马鞍山市、孝感市、滁州市、淮南市、湘潭市、阜阳市、蚌埠市、鄂州市、铜陵市、亳州市、仙桃市、宿州市、天门市、淮北市	宜春市、常德市、岳阳市、荆州市、长沙市、安庆市、株洲市、黄石市、新余市
大西南综合经济区	成都市、贵港市、玉林市、昆明市、德阳市、南充市、楚雄彝族自治州、北海市、玉溪市、遂宁市、内江市、自贡市	南宁市、来宾市、钦州市、眉山市、广安市
大西北综合经济区	阿克苏地区、喀什地区、巴音郭楞蒙古自治州、伊犁哈萨克自治州、塔城地区、和田地区、昌吉回族自治州、阿勒泰地区、酒泉市、银川市、张掖市、吴忠市、武威市、博尔塔拉蒙古自治州、中卫市、石嘴山市、吐鲁番市、乌鲁木齐市、兰州市、哈密市、白银市、金昌市、西宁市、克拉玛依市、庆阳市、嘉峪关市、林芝市	海东市、临夏回族自治州、平凉市、固原市

题加剧了地区的水资源压力[21]和供需不平衡，而用水需求的扩展并没有对等的多源水资源供给，致使水资源的自我循环无法满足工业化的需求。针对于此，水资源量较少且工业占比较高的“产旱”现象成为城市缺水的核心问题。为衡量城市“产旱”现象的挑战，需要综合各城市历史工业用水数据来进行未来工业用水的预测，精准把握存在的和潜在的挑战。

对2035年的城市工业用水趋势进行预测推演，结果显示，到2035年，工业用水需求将以济南、成都为界，大体上呈现北低南高的趋势，包括长江三角洲东北部连绵区，湖南、湖北，福州、泉州及其周边连绵区，重庆市及其周边，东莞市及其周边，南宁及其东部城市在内的6个强工业用水需求区。

“产旱型”城市指工业生产需求与水资源供给不平衡的城市，根据2035年的城市工业生产需求与水资源供给不平衡程度，将城市根据工业用水压力划分为4类，具体见公式（3）与（4）。

$$H_i = C_i / W_i \tag{3}$$

$$\text{城市工业用水压力分类}\begin{cases}\text{低压力型: } H_i \leqslant 10\% \\ \text{中低压力型: } 10\% < H_i \leqslant 20\% \\ \text{中高压力型: } 20\% < H_i \leqslant 40\% \\ \text{高压力型: } 40\% < H_i\end{cases} \tag{4}$$

式（3）、（4）中，H_i表示城市i的2035年的工业用水压力，C_i表示i城市2035年的工业用水量，W_i表示i城市2035年的水资源总量。同“城渴型”城市分类依据，如公式（4）所示，将H_i按照10%、20%、40%划为4个区间，划分出4类工业用水压力城市。将“高压力型”城市称为“高度产旱型”城市，将“中高压力型”城市称为“中度产旱型”城市。

研究表明，到2035年，“产旱型”城市主要集中在东北综合经济区、北部沿海综合经济区、东部沿海综合经济区、南部沿海综合经济区、黄河中游综合经济区（见表2），工业用水效率总体上处于全国较

表2　2035年我国的“高度产旱型”城市与“中度产旱型”城市

地区	“高度产旱型”城市（104个）	“中度产旱型”城市（62个）
东北综合经济区	成都市、佳木斯市、抚顺市、鸡西市、长春市、沈阳市、绥化市、大连市、盘锦市、辽阳市、锦州市	丹东市、白城市、鹤岗市、双鸭山市、营口市、朝阳市、阜新市
北部沿海综合经济区	北京市、天津市、唐山市、济宁市、济南市、邯郸市、聊城市、东营市、潍坊市、沧州市、衡水市、泰安市、淄博市、青岛市、烟台市、秦皇岛市	邢台市、枣庄市
东部沿海综合经济区	上海市、南京市、无锡市、徐州市、常州市、南通市、连云港市、淮安市、扬州市、镇江市、泰州市	温州市、苏州市、舟山市、宿迁市、嘉兴市、湖州市
南部沿海综合经济区	广州市、福州市、佛山市、泉州市、漳州市、深圳市、东莞市、中山市、莆田市、汕头市、厦门市	肇庆市、宁德市、云浮市、珠海市、乐东黎族自治县、临高县
黄河中游综合经济区	巴彦淖尔市、南阳市、赤峰市、郑州市、新乡市、周口市、西安市、鄂尔多斯市、运城市、开封市、安阳市、洛阳市、商丘市、濮阳市、阿拉善盟、焦作市、平顶山市、包头市、呼和浩特市、咸阳市、太原市、临汾市、晋中市、大同市、朔州市、乌兰察布市、鹤壁市、三门峡市、济源市、乌海市	驻马店市、兴安盟、榆林市、忻州市、长治市、阳泉市
长江中游综合经济区	滁州市、湘潭市、阜阳市、蚌埠市、铜陵市、亳州市、宿州市、淮北市	吉安市、邵阳市、益阳市、宜春市、衡阳市、常德市、襄阳市、合肥市、芜湖市、马鞍山市、岳阳市、孝感市、淮南市、鄂州市、长沙市、株洲市
大西南综合经济区	—	来宾市、贵港市、德阳市、南充市、楚雄彝族自治州、玉溪市、遂宁市、崇左市、资阳市
大西北综合经济区	阿克苏地区、喀什地区、伊犁哈萨克自治州、塔城地区、昌吉回族自治州、酒泉市、银川市、吴忠市、武威市、博尔塔拉蒙古自治州、中卫市、石嘴山市、吐鲁番市、乌鲁木齐市、兰州市、哈密市、白银市、金昌市、克拉玛依市、嘉峪关市、林芝市、石河子市	海东市、临夏回族自治州、平凉市、固原市、巴音郭楞蒙古自治州、和田地区、阿勒泰地区、庆阳市

高的水平，工业单位GDP水耗仅为15.73 m^3/万元，低于全国平均值33.05 m^3/万元。

在“产旱型”城市中，北京、天津、陕西的工业用水效率位列全国前三位，京津冀地区整体表现为高效率。“产旱型”城市中用水效率较高的有轻工业、设备制造业、木材加工业、纺织业、烟草业等制造业部门。同时，“产旱型”城市集聚了大规模的高耗水行业，主要包括采矿、化学制造、造纸、金属冶炼等重工业行业。

（三）“房淹型”城市水环境特征和空间分布

随着全球气候变化，极端降雨事件频发，洪涝灾害成为我国发生频率高、影响范围广、损失最为严重的自然灾害之一。根据《2020中国水旱灾害防御公报》统计数据[22]，2020年，我国出现了1998年以来的最大汛情，全国主要河流共发生21次“编号级别”的洪水灾害，其中四川、安徽、湖北、江西4省的洪涝灾害最为严重，直接经济损失占全国的61%；全国共发生40起人员死亡的山洪事件，带来了巨大的人员伤亡和经济损失[23]。因此，做好城市防淹规划预警，面临着更加严峻的考验与挑战。

根据2035年我国各城市年降水量推演结果，本文采用城市年降水量提升量超过250 mm或提升比例超过25%这两个指标对“房淹型”城市进行划定，将具有洪涝灾害风险的城市定义为“房淹型”城市。

研究表明，我国共有174个“房淹型”城市(见表3)，其中基于降水量提升比例划定的“房淹型”城市集中在新疆维吾尔自治区、西藏自治区、宁夏回族自治区、甘肃省、内蒙古自治区。基于降水量提升比例划定的“房淹型”城市主要集中在海南省、广东省、广西壮族自治区、福建省、浙江省等沿海地区。

五、适应水条件的我国城市发展政策建议

（一）以水定城：适应水条件的新型城镇化对策

1. 实现区域城镇化进程与水资源协调

“以水定城”的“定”是建构新型“水–城”

表3 2035年我国的“房淹型”城市

地区	“房淹型”城市（174个）
东北综合经济区	鞍山市、大连市、朝阳市、绥化市
北部沿海综合经济区	威海市、滨州市、烟台市、邯郸市、保定市、唐山市、张家口市
东部沿海综合经济区	衢州市、杭州市、绍兴市、温州市、台州市、丽水市、湖州市、常州市
南部沿海综合经济区	韶关市、潮州市、三明市、漳州市、福州市、宁德市、南平市、龙岩市、泉州市、莆田市、琼中黎族苗族自治县、白沙黎族自治县、定安县、五指山市、屯昌县、陵水黎族自治县、万宁市、临高县、昌江黎族自治县、琼海市、保亭黎族苗族自治县、儋州市、三亚市、乐东黎族自治县、海口市、文昌市、澄迈县、广州市、汕尾市、湛江市、深圳市、佛山市、茂名市、惠州市、河源市、中山市、清远市、东莞市、阳江市、肇庆市、珠海市、揭阳市、汕头市、云浮市、梅州市、江门市
黄河中游综合经济区	宝鸡市、渭南市、铜川市、咸阳市、晋城市、临汾市、运城市、阳泉市、长治市、鄂尔多斯市、阿拉善盟、兴安盟、通辽市、乌兰察布市、呼和浩特市、呼伦贝尔市、巴彦淖尔市、包头市、乌海市、洛阳市、濮阳市、新乡市
长江中游综合经济区	抚州市、景德镇市、吉安市、南昌市、新余市、鹰潭市、九江市、赣州市、宜春市、上饶市、萍乡市、岳阳市、永州市、湘潭市、株洲市、衡阳市、益阳市、怀化市、仙桃市、鄂州市、黄石市、咸宁市、襄阳市、黄山市、池州市、铜陵市、六安市、淮南市、芜湖市、宿州市
大西南综合经济区	红河哈尼族彝族自治州、资阳市、凉山彝族自治州、贵阳市、防城港市、钦州市、桂林市、玉林市、梧州市、柳州市、贵港市、来宾市、崇左市
大西北综合经济区	可克达拉市、哈密市、乌鲁木齐市、伊犁哈萨克自治州、塔城地区、吐鲁番市、和田地区、五家渠市、阿勒泰地区、克拉玛依市、克孜勒苏柯尔克孜自治州、昌吉回族自治州、石河子市、胡杨河市、图木舒克市、巴音郭楞蒙古自治州、北屯市、双河市、博尔塔拉蒙古自治州、阿克苏地区、昆玉市、喀什地区、铁门关市、阿拉尔市、拉萨市、那曲市、日喀则市、阿里地区、黄南藏族自治州、玉树藏族自治州、海东市、西宁市、吴忠市、石嘴山市、银川市、平凉市、定西市、武威市、张掖市、酒泉市、嘉峪关市

关系的核心。“定”不仅限于“城”的个体，需要综合考虑“域”的系统。一方面，对于“水–城”矛盾尖锐的区域或流域，应进行城镇化进程速度与规模的调控，通过规划引导城镇化进程由“城渴型”区域向“城润型”区域进行转移；另一方面，借助区域已有的信息共享机制、标准衔接机制、协调联动机制，推进区域水资源的共建共享，完善区域水资源与区域城镇化的协同配置。

2. 将水资源刚性约束纳入国土空间规划

充分考虑全球气候变化趋势、水利工程调控能力、河湖生态保障目标、外调水和非常规水资源利用等因素的影响，合理确定城市地表水资源可利用量、城市地下水可开采量和城市水环境容量等城市水循环系统承载能力的指标阈值，并将其纳入国土空间规划的基本指标体系。以此为基本约束，完善资源环境承载力和国土空间开发适宜性评价，优化城市国土空间发展战略和目标，确定城市国土空间使用规模与布局，严格进行“以水定城”的管控与传导，使水资源真正成为国土空间“一张图”的底色。

3. 推进城市水安全治理能力现代化建设

建设城乡“空天地一体化”高速动态暴雨洪水智能监测预警系统，提升洪水预报的精度，并运用人工智能、大数据、云计算、物联网等新技术，提高城市建成区、城市水库、城市河道、城市蓄滞洪区的洪水模拟推演的智能化水平。动态编制 / 修订城市洪涝灾害防御预案，推行基于多情景、海量方案的预案编制方法，形成超标洪涝预案实时修正与动态调整体系。同时，建立“快速反应、协同应对”的洪涝灾害应急体系，将气象、水务等部门的“预、防、报”与应急管理等部门的“抗、救、援”有机衔接。

（二）以水定产：适应水条件的产业发展对策

1. 促进城市产业结构与水资源相匹配

促进城市产业结构与水资源匹配的重要途径是选择与城市水资源条件相匹配的产业结构，宜粮则粮、宜农则农、宜工则工、宜商则商，构建与城市水资源承载能力相适应的现代产业体系。“产旱型”城市原则上不引入“高耗能、高污染和消耗资源性”的“两高一资”产业，需要制定一票否决的产业清单。同时，要推行“以水定产、量水而行”的发展战略，推动建立超用水量的产业退减机制，倒逼地方经济转型升级。此外，应引导“产旱区”的高耗水产业向水资源相对充足地区转移。

2. 研创节水与减排的置顶与管理技术

产业节水可分为技术性、管理性节水。在技术性层面，鼓励科技创新研发，提高产业用水效益、减少产业用水损失、可替代常规水资源等的城市节水置顶技术。在管理性层面，优化企业用水网络，提升企业用水管理水平，通过“分质供水、一水多用、梯级用水、循环用水”，大力推广企业水网络的高速动态监测与优化技术，提升企业用水质效。此外，持续完善工业节水标准体系，研究“量水而行、节水为重”的发展模式，进一步引导“产旱型”城市的产业转型。

（三）以水定人：适应水条件的人口发展对策

1. 科学明确水资源人口承载规模阈值

基于未来气候情景的模拟推演，耦合城市水资源可利用量、城市地下水可开采量、城市水环境容量和城市洪涝调控能力等控制指标，提高水资源承载力评估的科学性和可操作性，明确国土空间适度承载的人口规模。针对人水矛盾尖锐的“城渴型”城市，在考虑跨流域调水等外部因素基础上，应充分考虑水资源承载力的阈值条件并作为城市人口增长的限制“短板”，切实贯彻“以水定人”的基本原则。

2. 严格控制“城渴型”城市人口规模增长

遵循“城渴型”城市的人口规模“天花板”，制定相应政策，严格控制“城渴型”城市的人口规模增长，放开、放宽“城润型”城市的落户限制，主动适应和引导“城渴型”城市到“城润型”城市的人口有序流动疏解，提高城市人口与城市水资源分布的匹配性。同时，对极偏远的“城渴型”地区实施生态移民，因地制宜提高人口聚集度，提高水资源供给保障以改善生活水平。

致谢

感谢姚雪艳、温晓诣、李俊、王紫琪、周士奇、何珍、唐晓薇等人对本文所做的贡献，特此致谢。

参考文献

[1] 贾绍凤, 张杰. 变革中的中国水资源管理 [J]. 中国人口・资源与环境, 2011, 21(10): 102–106.

Jia S F, Zhang J. Institutional reform of water resources management in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(10): 102–106.

[2] 李加林, 田鹏, 史小丽, 等. 水资源管理研究进展 [J]. 浙江大学学报(理学版), 2019, 46(2): 248–260.
Li J L, Tian P, Shi X L, et al. Research progress on water resource management [J]. Journal of Zhejiang University(Science Edition), 2019, 46(2): 248–260.

[3] 李维明, 何凡. 中国最严格水资源管理制度实施进展、问题与建议 [J]. 中国经济报告, 2019 (3): 96–100.
Li W M, He F. Progress, problems and suggestions on the implementation of the strictest water resources management system in China [J]. China Policy Review, 2019 (3): 96–100.

[4] 新华社. 2021年全国城市再生水利用量同比增近20% [EB/OL]. (2022-05-19)[2022-07-30]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-05/19/content_5691317.htm.
Xinhua News Agency. In 2021, urban renewable water consumption in China increased by nearly 20% year-on-year [EB/OL]. (2022-05-19)[2022-07-30]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-05/19/content_5691317.htm.

[5] 中华人民共和国水利部. 中国水资源统计公报 2021 [R]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2022.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China water resources bulletin 2021 [R]. Beijing: Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2022.

[6] 侯春梅, 张志强, 迟秀丽.《联合国世界水资源开发报告》呼吁加强水资源综合管理 [J]. 地球科学进展, 2006 (11): 1211–1214.
Hou C M, Zhang Z Q, Chi X L. *The United Nations world water development report* calls for strengthening integrated water resources management [J]. Advances in Earth Science, 2006 (11): 1211–1214.

[7] 贺伟程. 世界水资源 [C]// 中国大百科全书总委员会《水利》委员会. 中国大百科全书・水利. 北京: 中国大百科全书出版社, 1992.
He W C. Water resources of the world [C]. Water Conservancy Committee of the General Committee of Encyclopedia of China. Encyclopedia of China water conservancy. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 1992.

[8] World Water Assessment Programme. Water—A shared responsibility: The United Nations world water development report 2 [EB / OL]. (2006-04-28)[2022-07-30]. https: //unesdoc.unesco.org/ark: /48223/pf0000144409.

[9] 王浩, 刘家宏. 国家水资源与经济社会系统协同配置探讨 [J]. 中国水利, 2016 (17): 7–9.
Wang H, Liu J H. Collaboration of national water resources with eco-social system in China [J]. China Water Resources, 2016 (17): 7–9

[10] 中华人民共和国水利部. 中国水资源统计公报 2020 [R]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2021.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China water resources bulletin [R]. Beijing: Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2021.

[11] 瞿莉莎, 朱求安, 朱超凡, 等. 1960—2020年中国1公里分辨率月降水数据集 [J/OL]. 中国科学数据. (2022-07-05)[2022-07-30]. https://doi.org/10.11922/sciencedb.01607.
Qu L S, Zhu Q A, Zhu C F, et al. Monthly precipitation data set with 1 km resolution in China from 1960 to 2020 [J/OL]. China Scientific Data. (2022-07-05)[2022-07-30]. https://doi.org/10.11922/sciencedb.01607.

[12] 周明圆, 刘君龙, 许继军, 等. 近48年长江源区降水时空变化特征 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(2): 474–480.
Zhou M Y, Liu J L, Xu J J, et al. Spatial and temporal characteristics of precipitation in the Source Area of the Yangtze River in recent 48 years [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(2): 474–480.

[13] 张先起, 胡登奎, 刘斐. 基于CEEMD-Elman耦合模型的年降水量预测 [J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 32–39.
Zhang X Q, Hu D K, Liu F. Prediction of annual precipitation based on CEEMD-Elman coupling model [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2019, 40(4): 32–39.

[14] 黄鹤, 张维江, 李娟, 等. 蒙特卡洛与马尔可夫方法在降水预测中的应用 [J]. 人民黄河, 2020, 42(5): 19–23.
Huang H, Zhang W J, Li J, et al. Application of Monte Carlo and Markov methods for precipitation prediction [J]. Yellow River, 2020, 42(5): 19–23.

[15] 郭晓茜, 闫强, 王高尚. 水资源需求预测研究方法概述 [J]. 中国矿业, 2019, 28(9): 160–165.
Guo X Q, Yan Q, Wang G S. Review of prediction methods on water resources demand [J]. China Mining Magazine, 2019, 28(9): 160–165.

[16] 魏榕, 王素芬, 訾信. 区域用水结构演变研究进展 [J]. 中国农村水利水电, 2019 (10) : 81–83.
Wei R, Wang S F, Zi X. Research progress in regional water structure evolution [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019 (10) : 81–83.

[17] 阚得源, 孔珂, 徐晶. 中国近期用水量变化特征及趋势 [J]. 济南大学学报(自然科学版), 2022, 36(5): 1–8.
Kan D Y, Kong K, Xu J. Characteristics and trend of recent water consumption changes in China [J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2022, 36(5): 1–8.

[18] 吴芳, 张新锋, 崔雪锋. 中国水资源利用特征及未来趋势分析 [J]. 长江科学院院报, 2017, 34(1): 30–39.
Wu F, Zhang X F, Cui X F. Characteristics and future trends of water resources utilization in China [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(1): 30–39..

[19] Malin F, Carl W. Population and water resources: A delicate balance [J]. Population Bulletin, 1992, 47(3): 1–36

[20] 贾绍凤, 张军岩, 张士锋. 区域水资源压力指数与水资源安全评价指标体系 [J]. 地理科学进展, 2002 (6): 538–545.
Jia S F, Zhang J Y, Zhang S F. Regional water resources stress and water resources security appraisement indicators [J]. Progress in Geography, 2002 (6): 538–545.

[21] 阿丽亚・阿不都克里木. 中国水资源开发利用现状及改善措施 [J]. 能源与节能, 2022 (3): 174–176.
Aliya A. Present situation and improvement measures of water resources development and utilization in China [J]. Energy and Energy Conservation, 2022 (3): 174–176.

[22] 中华人民共和国水利部. 2020中国水旱灾害防御公报 [EB/OL]. (2021-12-08)[2022-07-31]. http: //www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgshzhgb/202112/t20211208_1554245.html.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China flood and drought disaster prevention bulletin 2020 [EB/OL]. (2021-12-08)[2022-07-31]. http: //www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgshzhgb/202112/t20211208_1554245.html.

[23] 中华人民共和国应急管理部. 应急管理部发布2020年全国自然灾害基本情况 [R]. 北京: 中华人民共和国应急管理部, 2021.
Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China. The Ministry of Emergency Management released the basic information on natural disasters nationwide in 2020 [R]. Beijing: Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China, 2021.