

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.08.005

基于聚类分析的城市再生水供需平衡区域性差异研究

李佳霓, 王红武, 吴贤培, 夏四清

(同济大学环境科学与工程学院 水利部长三角城镇供水节水及水环境治理重点
实验室, 上海 200092)

摘要: 再生水的开发利用是解决城市水资源供需矛盾,实现节水的重要途径。对我国港澳台以外的31个省级行政区的城市再生水供需平衡关系进行计算,并通过聚类分析方法探究差异性分布规律,探讨城市再生水的最大供给潜力与再生水需求量之间的关系,进而为各类地区节水发展方向提供建议。不同地区按照城市再生水供需平衡关系分为4类:第1类地区大部分与我国典型的资源型缺水地区相吻合,再生水供需水平均较低;西藏自治区由于水资源禀赋优异和用水需求小的突出特征被单独分为第2类;第3类地区为沿海经济发达地区,再生水需求与供给潜力均为最高水平;第4类地区人均生活用水量相对较大,但缺少水资源总量优势,再生水需求和供给潜力均较可观。

关键词: 聚类分析; 城市再生水; 供需平衡; 节水; 雨水利用; 污水回用

中图分类号: TU99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)08-0032-09

Research on Regional Differences in Supply-Demand Balance of Urban Reclaimed Water Based on Cluster Analysis

LI Jiani, WANG Hongwu, WU Xianpei, XIA Siqing

(Key Laboratory of Urban Water Supply, Water Saving and Water Environment Governance in the Yangtze River Delta of Ministry of Water Resources, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The development and utilization of reclaimed water represent a crucial approach to resolving the supply-demand imbalance in urban water resources and achieving water conservation. This study calculates the supply-demand balance of urban reclaimed water across 31 provincial-level administrative regions in China excluding Hong Kong, Macao and Taiwan. Cluster analysis was then employed to investigate their differential distribution patterns. The relationship between the maximum potential supply of reclaimed water and its demand was examined to provide tailored recommendations for water conservation strategies in different types of regions. Based on the urban reclaimed water supply-demand balance, the regions were classified into four categories: Category 1 regions largely correspond to China's typical resource-based water-scarce areas, characterized by a low capacity for domestic water supply. Category 2 uniquely comprises the Xizang Autonomous Region, which is distinguished by its abundant water resource endowment and low water demand. As economically developed coastal areas, category 3 regions are defined by a water use structure featuring a particularly high total demand for

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3201300)

通信作者: 王红武 E-mail: wanghongwu@tongji.edu.cn

reclaimed water and supply potential. Category 4 regions exhibit relatively high per capita domestic water consumption despite limited total water resources, and demonstrate substantial demand and supply potential for reclaimed water.

Keywords: cluster analysis; urban reclaimed water; supply-demand balance; water conservation; rainwater utilization; wastewater reuse

新时代城镇节水强调在保障用水舒适度的前提下,通过循环用水和高效用水解决水资源供需矛盾^[1]。雨水和污水回用作为传统水源的有效补充,能缓解水资源供给侧压力。《国务院办公厅关于推进海绵城市建设的指导意见》(国办发〔2015〕75号)要求将70%的降雨就地消纳利用,根据我国城市建成区面积推算,2017年我国城市总降水量约为1.41万亿 m^3 ^[2],除自然蒸发和渗透外,城市雨水收集利用潜力巨大。随着排水和污水处理设施的逐渐完善,城市污水回用潜力可观,有望弥补城市缺水量的50%^[3]。我国已发布《水回用导则 再生水分级》(GB/T 41018—2021)等以城镇污水为水源的再生水系列标准,各地也完善了相关规范^[4-5],但污水回用规模化发展不足,集中式系统实践主要见于北京、辽宁、天津等北方缺水地区^[6]。

聚类分析常用于城市用水和节水水平的区域性差异分析。大量研究是基于地区水资源禀赋或者用水现状的区位差异分析^[7],其中经济发展水平和水资源分布影响显著。Fan等^[8]利用聚类分析研究了我国不同省份用水强度(WUI)的特征,发现WUI与各省份的经济发展状况成正比,北京、上海、重庆等经济发达地区的WUI值较低。Du等^[9]针对更大范围的263个节水型社会建设试点城市的节水成效分析指出,水资源总量和经济发展水平导致节水效果呈现区域差异。在城市再生水供需平衡研究方面,再生水利用率是主要考察指标。例如,李昂臻等^[10]对我国东北、华北、西北、西南、华中和东南沿海六大区域的节水发展进行比较,指出华北地区的城市再生水利用率和利用量均较高,而节水成效突出的东南沿海地区再生水利用水平则较低。张秀智^[11]以京津冀、长三角、珠三角、成渝等城市群为研究尺度,发现京津冀和长三角城市群的再生水利用率最高。

由于已有研究缺少对区域非常规水源最大供水潜力的估计,以及将其与需求侧非常规水源再生

水量的比较,本文对我国除港澳台外的31个省级行政区的城市再生水供需平衡关系进行计算,通过聚类分析方法探究差异性分布规律,结合不同地区的水资源禀赋、缺水特征等条件分析供需平衡的区域性差异,从而为各类地区节水方向发展提供建议,为优化城市水资源配置、提高用水效率提供参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 指标选取及计算

① 城市再生水需求侧主要包括城市工业用水中的循环冷却水、城市生活用水中的厕所冲洗水和市政杂用水以及部分城市环境用水,因此计算各省级行政区的可替代水量作为指标。可替代水被定义为城市工业用水、居民生活用水及生态用水中可以用再生水替代的部分。可替代水量衡量了对再生水可回用量的最大需求,计算公式如下:

$$Q_t = Q_{gy}m + Q_{sh}n + Q_{st} \quad (1)$$

式中: Q_t 为城市可替代水量,亿 m^3/a ; Q_{gy} 为城市工业用水量,亿 m^3/a ; Q_{sh} 为城市生活用水量,亿 m^3/a ; Q_{st} 为生态用水量,包括部分河湖、湿地人工补水和城市环境用水,亿 m^3/a ; m 为城市工业用水中冷却水用量占比,取0.7; n 为城市生活用水中冲洗厕所用水和市政杂用水所占比例,取0.42。

需要说明的是,本研究采用统一的替代比例系数进行估算是基于现有公开数据可得性的简化处理,这可能导致部分工业结构特殊地区的再生水需求估算存在一定偏差,是未来研究可进一步深化的方向。理想情况下,该系数应根据各省市具体的工业结构与用水定额进行差异化校正。

② 城市再生水供给侧包括雨水收集利用和污水处理回用,因此将各省级行政区的可回用雨水量和可回用污水量作为指标。其中可回用雨水量根据当地的降雨量进行估算^[12],计算公式如下:

$$Q_y = \Psi\alpha Ah \times 10^{-5} \quad (2)$$

式中: Q_y 为可回用雨水量,亿 m^3/a ; Ψ 为地表径流系数; α 为折减系数,综合考虑降雨量季节折减系

数和初期雨水的弃流系数,取0.9;A为集雨面积(以城区面积计), km^2 ;h为年平均降雨量,mm。

不同区域的雨水径流系数不同,统一按照设计规范要求,屋面、路面、硬质铺装雨水综合雨量径流系数取0.90,绿地雨水综合雨量径流系数取0.15^[13]。综合径流系数 Ψ 根据各地建成区绿化覆盖率(R)加权计算,计算公式如下:

$$\Psi = 0.15R + 0.9(1 - R) \quad (3)$$

城市可回用污水量根据城市污水处理量进行计算,理想状态下,假设全部污水均可作为再生水回用,计算公式如下:

$$Q_w = 365 \times k \times Q_r \times 10^{-8} \quad (4)$$

式中: Q_w 为可回用污水量,亿 m^3/a ;k为污水处理厂的负荷率,取83%(我国污水处理厂平均运行负荷率)^[14]; Q_r 为污水处理厂处理能力, m^3/d 。

③ 城市再生水供需平衡还受到地区水资源禀赋、生活用水及节水水平等因素的影响^[15],因此本研究考虑了人均水资源量、人均生活用水量、人均节约用水量和节水器具使用率等指标数据。在所有数据中,节水器具使用率来自节水器具问卷调查结果,其余数据均来自国家统计局分省年度数据以及住房和城乡建设部公布的《中国城市建设统计年鉴》。由于缺少我国港澳台地区的相关统计数据,因此未将其纳入计算结果及后续分析。本研究选用2020年数据进行横断面分析,旨在揭示特定年份下我国城市再生水供需平衡的区域性格局。虽然单一年份数据无法完全代表长期趋势,但可以为理解当前的区域差异提供一个清晰的基准。关于供需关系的时间演变分析则将是未来研究的重要方向。

1.2 研究方法

① 主成分分析法。作为综合指标的主成分分析法,其评价结果的客观性较好,且主成分相互独立,可避免信息的冗余性。

② K-means聚类法。该法基本思路是将样本划分到K个类别中,使得类别之间的差异最大,而同一类别中的个体差异最小。本研究中各地区用所选指标构成的向量表示,任意两地区之间的差异即可通过欧氏距离公式进行计算。样本X在K维变量中的向量表示为:

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_K)^T \quad (5)$$

A、B两地的欧氏距离计算如下:

$$D_{AB} = \sum_{i=1}^K (X_{Ai} - X_{Bi})^2 \quad (6)$$

分组的组别数目即K的取值采用手肘法确定。

③ 层次聚类法。该法基本思路是先将每个个体作为一个单独的类,然后不断将相似度最高的两个类合并成一个新的类,最终构建出一个树状的聚类层次结构。层次聚类同样可以采用欧氏距离衡量样本的相似程度,其迭代步骤如下:将每个地区作为一个类别,将欧氏距离最近的两个地区合并为一个类别,计算新产生的类别和其他类别之间的欧氏距离;本研究采用Ward法计算类别间的距离;重复以上两个步骤,直到所有地区合并为一个类别;上述步骤通过Rstudio中的hclust功能实现并生成直观的树状图。

2 结果与讨论

2.1 城市再生水供需平衡计算结果及分析

各省级行政区平衡计算结果及供需平衡关系见表1。其中,当地可回用雨水量与可回用污水量之和小于可替代水量,即可以供给的再生水量小于再生水需求量(可供不足)的省级行政区包括:河北省、内蒙古自治区、江苏省、福建省、江西省、河南省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区。可以看出,与再生水需求量相比,可供量不足的省级行政区主要分布在我国西北和华北地区。城市再生水供给不足原因分析如下:

① 根据计算结果,福建省和江西省虽然属于再生水供给量不足的情况,但其再生水供给量与需求量之间差距较小,基本达到供需平衡。

② 江苏省用水的突出特征是工业用水量巨大,2020年江苏省工业用水量为236.9亿 m^3 ,远超其他省级行政区,同时在省内各类用水中占比较大,同年其万元工业增加值用水量为35.6 m^3 ,虽较全国平均水平有优势,但巨大的工业体量使其总用水需求居高不下,因此其再生水需求量主要源于工业用水。

③ 内蒙古自治区、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区和新疆维吾尔自治区的共同特征为可回用雨水量和可回用污水量均较小。根据再生水量计算过程可知,这些地区降水量普遍较低,其中新疆维吾尔自治区、内蒙古自治区、青海省等地区虽然土地面积大,但其城区面积较小且绿化覆盖率低,

因此可回用雨水量较低。此外,区域人口总量及密度较小,城市生活污水处理量较小,因此可回用污水量较低。自 21 世纪以来,新疆维吾尔自治区的生态用水总量增长迅猛,生态用水在可替代水中占比较大(60% 以上),其总量甚至超过生活及工业用水量之和。值得注意的是,在纳入计算的省级行政区中,具有上述相同特征的西藏自治区总人口最少(2020 年末常住人口仅 366 万人),且工业不发达,因

此其可替代水量极小,呈现出再生水供给量大于需求量的情况。

④ 河南省、河北省与新疆维吾尔自治区类似,可替代水量的主要组成部分也是生态用水,其生态用水总量分别位于全国第二和第三。对黄河流域地区的各类型用水生态位的研究^[16]表明,河南省的生态用水生态位增长趋势显著,远大于黄河流域其他省级行政区水平。

表 1 各省级行政区城市再生水供需情况

Tab.1 Urban reclaimed water supply-demand in each provincial-level administrative region 亿 m³/a

省级行政区	行政区域名	可替代水量	可回用雨水量	可回用污水量	供需平衡关系
北京市	BJ	26.22	44.04	21.53	可供大于需
天津市	TJ	11.87	7.85	10.36	可供大于需
河北省	HE	52.16	17.95	20.60	可供不足
山西省	SX	18.37	9.12	10.39	可供大于需
内蒙古自治区	NM	42.31	8.49	7.17	可供不足
辽宁省	LN	28.21	50.98	30.93	可供大于需
吉林省	JL	22.99	26.79	13.48	可供大于需
黑龙江省	HL	19.66	10.25	14.00	可供大于需
上海市	SH	45.45	55.03	25.46	可供大于需
江苏省	JS	173.69	99.16	56.19	可供不足
浙江省	ZJ	48.33	110.96	35.97	可供大于需
安徽省	AH	71.28	55.73	23.61	可供大于需
福建省	FJ	47.82	30.31	14.39	可供不足
江西省	JX	45.54	27.08	11.09	可供不足
山东省	SD	53.99	102.92	41.70	可供大于需
河南省	HA	74.46	24.72	27.17	可供不足
湖北省	HB	79.49	71.61	28.12	可供大于需
湖南省	HN	60.35	46.69	23.22	可供大于需
广东省	GD	99.56	130.69	83.27	可供大于需
广西壮族自治区	GX	39.79	51.56	24.80	可供大于需
海南省	HI	5.36	13.01	3.62	可供大于需
重庆市	CQ	21.37	57.08	12.57	可供大于需
四川省	SC	42.51	47.52	25.13	可供大于需
贵州省	GZ	20.48	27.63	10.47	可供大于需
云南省	YN	24.84	19.90	9.66	可供大于需
西藏自治区	XZ	2.41	2.10	0.87	可供大于需
陕西省	SN	19.68	8.97	12.58	可供大于需
甘肃省	GS	18.33	3.74	5.12	可供不足
青海省	QH	3.80	1.45	1.87	可供不足
宁夏回族自治区	NX	7.77	1.55	3.59	可供不足
新疆维吾尔自治区	XJ	59.89	1.73	9.26	可供不足

2.2 主成分分析

原始变量解释的总方差计算结果见表 2。为保证主成分解释的总体方差足够大,即包含原始数据足够多的信息,选取 Dim1、Dim2 和 Dim3 作为主成

分,累计方差达 75.9%。

原始变量在主成分上的载荷计算结果如表 3 所示。

变量在主成分坐标上的分布情况如图 1 所示。

表2 原始变量解释的总方差

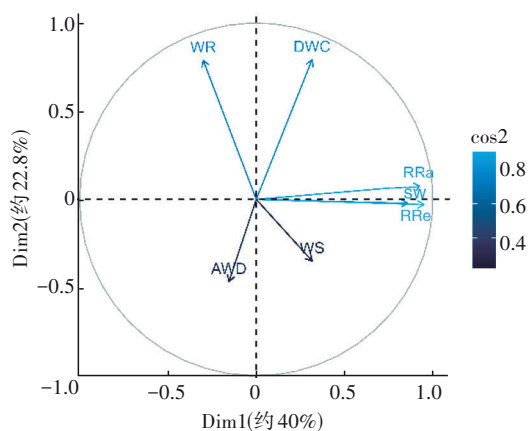
Tab.2 Total variance explained by original variables

成分	特征值合计	方差/%	累计方差/%
Dim1	2.798 45	39.977 84	39.977 84
Dim2	1.598 87	22.841 00	62.818 83
Dim3	0.918 92	13.127 43	75.946 26
Dim4	0.847 03	12.100 43	88.046 69
Dim5	0.420 34	6.004 88	94.051 56
Dim6	0.340 48	4.863 96	98.915 52
Dim7	0.075 91	1.084 48	100

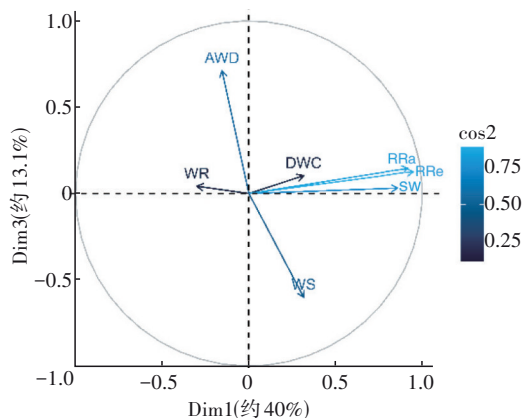
表3 原始变量在主成分上的载荷

Tab.3 Loadings of original variables on principal components

载荷贡献	Dim1	Dim2	Dim3
节水器具使用率	0.86	13.63	55.15
人均水资源量	3.23	38.98	0.19
人均生活用水量	3.57	39.29	1.16
可替代水量	26.35	0.03	0.11
可回用雨水量	30.18	0.39	2.31
可回用污水量	32.24	0.05	1.73
实际人均节水量	3.58	7.63	39.34



a. 变量在主成分 Dim1 和 Dim2 坐标上的分布



b. 变量在主成分 Dim1 和 Dim3 坐标上的分布

图1 变量在主成分坐标上的分布

Fig.1 Distribution of variables on principal component coordinates

图1中AWD为节水器具使用率,WR为人均水资源量,DWC为人均生活用水量,SW为可替代水量,RRa为可回用雨水量,RRe为可回用污水量,WS为实际人均节水量。

根据表3和图1可知:

① 主成分Dim1与可替代水量、可回用雨水量、可回用污水量密切相关,主要表征的是城市再生水的供需平衡关系。个体在Dim1坐标轴上对应的值越大,说明该地区对非常规水源基于节水目的的需求量和供给潜力越大。

② 主成分Dim2与人均生活用水量、人均水资源量密切相关,主要表征的是城市生活用水的供需平衡关系。个体在Dim2坐标轴上对应的值越大,说明该地区对生活用水的需求量和水资源可供量越大。

③ 主成分Dim3与节水器具使用率、实际人均节水量密切相关。个体在Dim3坐标轴上对应的值越大,说明该地区节水器具的使用率和人均节水量越高。

2.3 聚类分析

2.3.1 K-means 聚类

组内方差(L_w)随K值变化的曲线如图2所示。可以看出,曲线拐点出现在K=4时,可以观察到K从1增加到4的过程中组内方差的下降幅度较大,继续增大K值对减小组内方差的影响较小,因此确定类别为4类。

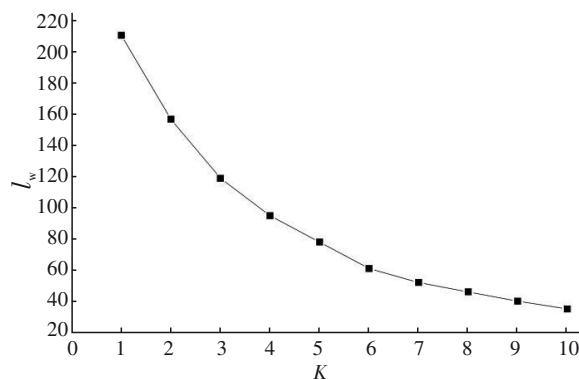


图2 组内差异与K取值的关系

Fig.2 Relationship between within-group variation and K value

K-means 聚类的分组结果如图3所示。可以看出,不同类别省级行政区在主成分坐标上得到了明显区分。

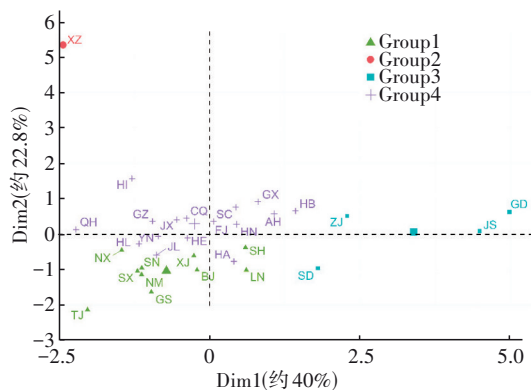


图3 通过 K-means 聚类的省级行政区在主成分坐标上的分布

Fig.3 Distribution of provincial-level administrative regions clustered by K-means on principal component coordinates

2.3.2 层次聚类

图4的树状图是对层次聚类过程的直观描述,图中竖线为分支,节点为子聚类,分支之间的水平距离是子聚类相似性的度量。树状图不同高度对应的分支数意味着组别数目,将所有个体分为4类时,对应图4中不同颜色所示的4个分支。

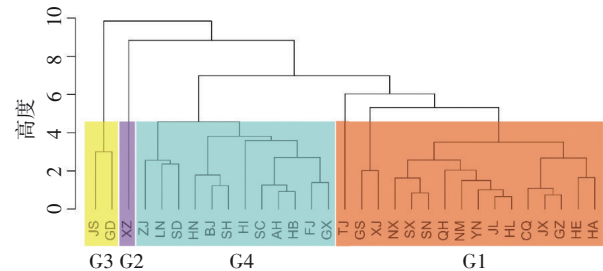


图4 层次聚类法树状图分组
Fig.4 Hierarchical clustering method for tree diagram grouping

层次聚类分组结果如图5所示。

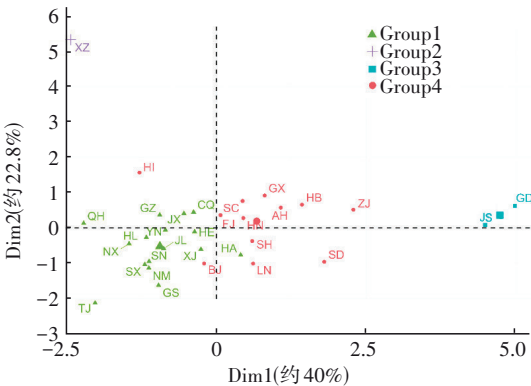


图5 通过层次聚类的省级行政区在主成分坐标上的分布
Fig.5 Distribution of provincial-level administrative regions clustered by hierarchical clustering on principal component coordinates

由图5可知,不同类别省级行政区在主成分坐标上得到了明显区分。

2.3.3 城市再生水供需平衡差异性分析

对比两种聚类结果,从算法原理上看,层次聚类方法的组内方差为98.2,K-means聚类方法的组内方差为95.3。相较而言,K-means聚类方法的组内方差更小,即组内个体差异更小。从地理属性上看,K-means聚类中同类地区的地理属性和经济状况相对更接近,如云南、贵州和重庆毗邻四川,西南省份的社会经济发展程度、水资源禀赋、人文特点等相对类似;江西地处我国东南偏中部长江中下游,邻省包括福建、安徽、湖北、湖南等。综上,K-means聚类结果更合理,其分组结果见表4。

表4 K-means聚类分组结果

Tab.4 K-means clustering results

组别	省级行政区
Group1	天津市,山西省,陕西省,宁夏回族自治区,内蒙古自治区,甘肃省,新疆维吾尔自治区,北京市,辽宁省,上海市
Group2	西藏自治区
Group3	山东省,浙江省,江苏省,广东省
Group4	安徽省,福建省,湖北省,湖南省,广西壮族自治区,重庆市,海南省,江西省,四川省,贵州省,河北省,吉林省,黑龙江省,河南省,青海省,云南省

同一类别中各地具有同质性,结合主成分分析结果对各类地区的特征描述如下:

① 第1类(Group1):该类别地区生活及工业用水量处于国内较低水平,因此对城市再生水的需求量较小。人均水资源占有量总体不高,降水量普遍较低,大部分地区属于典型的资源型缺水地区,饮用水水源和非常规水源的供给能力均低于其他地区。生活节水器具普及情况较好,使用率较高。

② 第2类(Group2):西藏自治区被单独分为一类,其突出特征是人均水资源占有量远高于其他地区,地广人稀,城市化和工业化水平相对较低,因此其城市再生水的供给和需求量都非常小。

③ 第3类(Group3):该类别地区的城市生活用水和工业用水总量较大,再生水需求量缺口突出。山东、浙江、江苏、广东4省均属于沿海地区,地势平坦,降水充足,具备雨水收集利用的地理和经济条件;同时污水处理能力在全国处于领先地位,尤其是广东省优势明显,因此该4省城市再生水的

可供能力相对较高。

④ 第4类(Group4):该类别地区人均生活用水量相对较大,但水资源占有量不高,对城市再生水具有一定的供给潜力和较大需求。

2.4 基于城市再生水供需平衡关系的节水前瞻

① 第1类地区

第1类地区除存在水质型缺水特征的上海市外,其他均为北方地区,其中天津市、山西省、内蒙古自治区、陕西省、甘肃省、宁夏回族自治区和新疆维吾尔自治区的水资源绝对量不足,是以水资源空间分布为标准的典型缺水地区^[17-18]。我国水资源空间分布总体呈现南多、北少,山区多、平原少的地域特点,这与聚类分组结果呈现出较好的相关性。根据问卷结果可知,第1类地区节水器具普及水平较高,同时已有研究印证了北方城市节水器具使用率普遍高于南方^[7],但这些地区节水总量并不理想,结合省级行政区在主成分坐标上的分布可以看出,人均节水量普遍较低。推测原因是产业结构限制,降水不足,以及城市生活用水量本身偏低,因此城市再生水的供给能力较低。如天津市、山西省等地虽然水资源利用率已经较高^[18],但由于多水源供需总量的限制,对非常规水源的利用仍难以填补二次平衡中的用水供需缺口。

根据城市再生水供需平衡计算结果,第1类地区中的西北、华北等大部分地区雨水和污水回用量难以满足可替代水量需求。因此,对于第1类地区的节水型社会建设除了供给侧的多水源开发外,更应强调控制总量需求,优化资源配置,如在产业发展类型上,通过产业结构提高工业节水效率,可以减少或停止向钢铁、建材、化工等高耗水行业拓展,逐步发展低耗水的高新技术产业和现代服务业;在水资源总体配置上,一方面可以依靠区域间大规模调水工程缓解用水压力,另一方面需提高引水、蓄水等工程调节能力,完善水源工程配套,避免用水管理粗放。

② 第2类地区

西藏自治区由于水资源优势明显且用水总量需求小,不属于缺水地区,但在水资源管理配置上存在如下问题:a. 区域内城镇化水平和集约化用水水平均较低,减弱了对水资源的统筹调配能力;b. 自然生态系统极其脆弱,在水资源开发利用过程中需要预防对生态水环境的破坏;c. 需要平衡经济快

速发展同节水降耗之间的关系;d. 目前西藏农林牧渔业的水消耗占比较高,消耗量较大,是推动区域用水量增长的主导因素^[19],农业用水效率有待提高。

③ 第3类地区

第3类地区虽然本地降水充沛,且有丰富的过境水量,但人均水资源占有量并不高,同时存在时空分布不均以及水污染严重造成的水质型缺水问题。此外,第3类地区的用水效率较低,如通过万元GDP用水量等指标衡量可以发现其用水效率较先进省份有一定差距^[20-21]。

由于城市再生水供给能力远高于其他地区,因此开发非常规水源是第3类地区缩小二次平衡中用水供需差距的重要途径。由城市再生水供需平衡计算结果可知,该类地区工业用水量占比非常高,目前在工业节水方面主要通过高耗水行业节水技术改造提高工业用水效率、减少用水量。在城市生活节水方面主要聚焦于居民生活节水宣传和城市供水管网改造,还需要进一步推进雨水收集利用和污水再生利用。

④ 第4类地区

与第1类地区广泛呈现缺水特征不同,第4类大部分地区水资源相对丰富,丁竹英等^[17]根据水资源短缺程度将我国各省级行政区划分为严重缺水、缺水、脆弱区和相对丰富区,其中脆弱区和相对丰富区基本由第4类地区组成。如广西壮族自治区、海南省、江西省、湖南省、云南省、贵州省等地,人口密度适中且降水丰沛,人均水资源储量较大,总量也可满足工农业发展需求。因此,第4类地区中的节水压力主要也来源于水质型缺水,比较典型的是重庆以及长三角等地,由于人口密集且经济发达,生活及工业用水量较大,水污染严重^[22]。聚类分析结果和已有统计研究表明,第4类地区节水器具使用率普遍较低,再生水利用情况总体相对较差。其中,云南省、贵州省、四川省等西南地区再生水利用量和利用率在我国六大区域中排名落后^[10]。以云贵高原为中心的云南、贵州、广西西南部地区受喀斯特地貌影响,其水资源利用率较低^[23],如2017年云南省文山市水资源开发利用率仅为6.42%。长三角地区工业再生水回用率较高,但各省市工业用水效率存在较大差异^[22]。华中地区和东南沿海地区,近年来再生水利用情况有所改善,相应地区加强了对污水再生利用设施的建设与

改造。

第4类地区虽然在水资源条件和节水现状方面存在一定的组内异质性,但是城市再生水供需关系总体较均衡。对于第4类地区,一方面,用水强度下降和产业结构优化有助于抑制用水总量的继续上升;另一方面,长三角、成渝等地区人口快速增长,城市化和工业化对水资源的需求量较大,单纯减少水资源总量消耗存在困难^[9],因此提高该类地区城市再生水供给能力具有重要意义。

3 结论

① 城市再生水供需平衡关系呈现显著的区域性差异。第1类主要为北方资源型缺水地区,供需水平最低,生活及工业用水需求有限,但水资源禀赋不足;第2类仅为西藏自治区,因水资源丰富且需求极小,供需矛盾不突出;第3类主要为沿海经济发达地区,供需水平最高,工业用水需求较大且非常规水源开发潜力较高;第4类主要为中西部及部分南方地区,供需水平较高,再生水需求和供给潜力较可观,但面临水质型缺水与节水技术普及不足的双重挑战。

② 不同地区城市再生水供需失衡的核心原因存在差异。第1类地区主要受限于降水稀少、污水回用规模小及生态用水需求占比高;第2类地区西藏自治区则因城镇化水平低与生态脆弱性限制了水资源集约利用;第3类地区工业用水强度大导致再生水需求缺口显著;第4类地区虽水资源总量较优,但节水器具普及率低与再生水利用设施不足制约了供需平衡。

③ 采取差异化节水策略缓解不同地区城市再生水供需失衡。建议第1类地区通过产业结构优化与跨区域调水工程缓解总量约束;第2类地区西藏自治区需平衡生态保护与农业用水效率提升;第3类地区需重点提升工业再生水回用率与雨水资源化利用效率;第4类地区应加强节水技术推广与污水再生设施建设。

参考文献:

- [1] 刘勇,石敏俊,沈大军,等. 水资源利用与区域协调发展[J]. 区域经济评论,2021(5):20-31.
LIU Y, SHI M J, SHEN D J, et al. Water resources utilization and regional coordinated development [J]. Regional Economic Review,2021(5):20-31(in Chinese).

- [2] 王雪莉,陈永,王国田,等. 公共建筑用水现状分析与节水策略研究[J]. 给水排水,2021,47(12):118-123.
WANG X L, CHEN Y, WANG G T, et al. Preliminary analysis on water utilization of public buildings and water-saving strategies [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(12):118-123(in Chinese).
- [3] 武浩浩,肖志毅. 中水回用技术的发展和应[J]. 绿色科技,2023,25(2):202-208.
WU H H, XIAO Z Y. Development and application of reclaimed water reuse technology [J]. Journal of Green Science and Technology,2023,25(2):202-208(in Chinese).
- [4] 郭星星,罗欢,李宁. 再生水回用现状及展望[J]. 人民珠江,2023,44(5):45-52.
GUO X X, LUO H, LI N. Status and prospect of reclaimed water reuse in China [J]. Pearl River, 2023, 44(5):45-52(in Chinese).
- [5] 梁耀匀,黄潇. 中国市政再生水深度处理技术研究进展[J]. 人民珠江,2024,45(2):29-37.
LIANG Y Y, HUANG X. Research progress in advanced treatment technology of municipal reclaimed water in China [J]. Pearl River,2024,45(2):29-37(in Chinese).
- [6] 朱娜,荆勇,苗永刚,等. 沈阳市中水回用现状分析及展望[J]. 环境保护与循环经济,2021,41(1):20-23,41.
ZHU N, JING Y, MIAO Y G, et al. Current status analysis and future prospects of reclaimed water reuse in Shenyang City [J]. Environmental Protection and Circular Economy,2021,41(1):20-23,41(in Chinese).
- [7] LU S B, GAO X R, LI W, et al. A study on the spatial and temporal variability of the urban residential water consumption and its influencing factors in the major cities of China [J]. Habitat International,2018,78:29-40.
- [8] FAN X H, XU H H, NING C, et al. Regional variability in water use intensity in China by clustering analysis [J]. Water Science & Technology: Water Supply, 2016, 16(4):1102-1109.
- [9] DU M Z, LIAO L P, WANG B, et al. Evaluating the effectiveness of the water-saving society construction in China: a quasi-natural experiment [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 277:111394.
- [10] 李昂臻,刘兆瀛,吴鹏,等. 我国六大区域的城市节水发展比较研究[J]. 中国给水排水,2021,37(10):49-55,60.
LI A Z, LIU Z Y, WU K, et al. Comparative study of the development of urban water saving in the six regions of China [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37

- (10):49-55,60(in Chinese).
- [11] 张秀智. 京津冀等七大城市群节约用水和再生水利用状况比较分析[J]. 给水排水, 2017, 43(7):39-48.
ZHANG X Z. Comparative analysis of water conservation and reclaimed water utilization in seven major urban agglomerations including Jing-Jin-Ji [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(7):39-48(in Chinese).
- [12] 严伟, 樊金红, 王红武. 典型缺水城市多水源水质评价和水量平衡分析[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5):46-51.
YAN W, FAN J H, WANG H W. Water quality evaluation and water balance analysis of typical water-deficient cities with multi-sources [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(5):46-51 (in Chinese).
- [13] 周紫蕊. 感潮地区城市洪涝风险分析与调控研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2023.
ZHOU Z R. Analysis and Regulation of Urban Flooding Risk in Tide-sensitive Areas [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2023(in Chinese).
- [14] ZHANG J B, SHAO Y T, WANG H C, et al. Current operation state of wastewater treatment plants in urban China[J]. Environmental Research, 2021, 195:110843.
- [15] 王红武, 张健, 陈洪斌, 等. 城镇生活用水新型节水“5R”技术体系[J]. 中国给水排水, 2019, 35(2):11-17.
WANG H W, ZHANG J, CHEN H B, et al. A novel “5R” technology system for urban domestic water saving [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(2):11-17 (in Chinese).
- [16] 陈颖杰, 金保明, 金君良, 等. 基于生态位理论的黄河流域用水结构分析[J]. 水利水电技术, 2020, 51(12):36-46.
CHEN Y J, JIN B M, JIN J L, et al. Ecological niche theory-based analysis on water consumption structure in Yellow River basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(12):36-46(in Chinese).
- [17] 丁竹英, 陈瀛洲, 胡陈静. 中国水资源短缺程度及缺水类型研究[J]. 特区经济, 2018(9):47-50.
DING Z Y, CHEN Y Z, HU C J. Water shortage and water shortage types in China [J]. Special Zone Economy, 2018(9):47-50(in Chinese).
- [18] 刘建峰, 何兰超, 许继军. 节约用水工作视角下的“严重缺水地区”识别分析[J]. 水资源开发与管理, 2020(2):3-8, 13.
LIU J F, HE L C, XU J J. Identification and analysis of “severe water shortage areas” from the perspective of water saving work [J]. Water Resources Development and Management, 2020(2):3-8, 13(in Chinese).
- [19] 刘慧, 孙思奥, 方创琳, 等. 1990—2020年新疆用水量时空演化格局及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2024, 47(9):1451-1461.
LIU H, SUN S A, FANG C L, et al. Spatiotemporal evolutionary patterns and influencing factors of water use in Xinjiang from 1990 to 2020 [J]. Arid Land Geography, 2024, 47(9):1451-1461(in Chinese).
- [20] 陈诗凌, 刘达, 洪昌红. 浅议广东省节水产业发展[J]. 广东水利水电, 2024(3):1-5.
CHEN S L, LIU D, HONG C H. An overview of the development of water-saving industry in Guangdong Province [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2024(3):1-5(in Chinese).
- [21] 孙晓文, 陈松峰, 何菡丹. 江苏省“十四五”节约用水潜力探究[J]. 水资源开发与管理, 2022, 8(1):3-7.
SUN X W, CHEN S F, HE H D. Probe into the water saving potential of Jiangsu during the 14th Five-year Plan [J]. Water Resources Development and Management, 2022, 8(1):3-7(in Chinese).
- [22] 李骥飞. 长三角地区水资源承载力及协调发展研究[D]. 上海:上海师范大学, 2020.
LI J F. Research on Water Resources Carrying Capacity and Coordination in the Yangtze River Delta Region [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2020 (in Chinese).
- [23] 肖葵淞, 兰安军, 范泽孟, 等. 西南喀斯特地区水资源利用效率与经济发展水平协调度的时空差异解析[J]. 中国农村水利水电, 2024(12):19-26.
XIAO K S, LAN A J, FAN Z M, et al. Spatial and temporal difference analysis of coordination degree between water resources use efficiency and economic development level in southwest karst region [J]. China Rural Water and Hydropower, 2024 (12):19-26 (in Chinese).

作者简介: 李佳霓(2000—), 女, 重庆人, 硕士研究生, 主要研究方向为城镇供水与水资源高效利用。

E-mail: 1287208077@qq.com

收稿日期: 2025-09-12

修回日期: 2025-11-17

(编辑: 丁彩娟)