

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0070

侯金甫,方红远,李艳明,等.苏州市再生水利用影响因素识别及潜力评估[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(4):682-690. HOU J F, FANG H Y, LI Y M, et al. Identification of influencing factors and potential assessment of the reclaimed water utilization in Suzhou City[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(4): 682-690. (in Chinese)

苏州市再生水利用影响因素识别及潜力评估

侯金甫,方红远,李艳明,程倩倩

(扬州大学水利科学与工程学院,江苏 扬州 225009)

摘要:以苏州市为研究区,对其污水处理以及再生水利用能力现状进行了分析。选取 25 项影响苏州市再生水利用量的指标因素,并根据 2008—2020 年相关统计资料,运用 BP-DEMATEL(backpropagation decision-making trial and evaluation laboratory)模型识别出影响再生水利用的关键驱动因素以及关键特征因素,在此基础上构建差分 GM(1, N)预测模型,评估苏州市再生水利用潜力。结果显示:污水处理投资、排水设施投资、居民家庭用水量、全年水资源总量、万元 GDP 用水量等 5 项因素为关键驱动因素,污水排放量、污水处理量、污水处理能力、城市用水人口 4 项因素为关键特征因素,均与苏州市再生水利用发展密切相关。GM(1, N)预测模型拟合结果精度较高,平均相对误差为 0.22%,预期至 2025 年苏州市再生水利用潜力可达到 59 630.52 万 m³。

关键词:再生水;利用现状;BP-DEMATEL 模型;GM(1, N)模型;潜力评估

中图分类号:TV214 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



再生水被誉为城市的“第二水源”,其应用可在很大程度上缓解自然水资源不足及水质污染问题。我国对于再生水资源的利用仍处于不断发展的阶段,根据统计数据^[1],2020 年度作为其他水源供水量主要来源的再生水年利用量达到 108.9 亿 m³,占总供水量的 1.89%,全国再生水生产能力达到 6 095.2 万 m³/d。为做好城市再生水利用规划,促进城市再生水事业的进一步发展,分析影响城市再生水利用的驱动因素并对再生水的利用潜力进行评估具有极大的必要性。

国内外学者对再生水利用影响因素分析及潜力评估的方法做了大量研究。MESA-PEREZ 等^[2]采用聚类分析方法评估了欧洲再生水回用于农业的机会以及阻碍因素;LIAO 等^[3]基于亚洲 48 个国家和地区的数据研究发现经济发展水平是影响污水处理和再生水利用的主要因素;CHANG 等^[4]对比分析了北京市淡水和再生水的消耗情况,考虑了水价、再

生水水质和政策等因素对再生水利用的影响;LI 等^[5]模拟西北内陆地区再生水利用现状,建立了预测城市再生水潜力的系统动力学模型;ZHENG 等^[6]构建了具有随机效应的潜力预测模型,对全国再生水利用潜力进行了分析预测;余鹏明等^[7]运用 Spearman 秩相关分析了影响再生水利用量的敏感指标,为再生水可利用量预测提供了可靠的参考依据;汪妮等^[8]考虑到用水对象对再生水用水量的影响,对回用于工业的再生水和市政杂用的再生水分别采用了改进的灰色模型和定额法进行需水量预测;唐莲等^[9]分别计算了银川市再生水供水能力以及利用能力,通过供需平衡分析确定了其再生水利用潜力。

针对水资源相对丰富的南方城市再生水利用潜力的研究尚不多见。苏州市作为苏南典型的经济发达城市,水资源的消耗量十分巨大,且随之产生的大量工业、生活污水的排放导致了较为严重的

收稿日期:2022-03-18 修回日期:2022-06-06 网络出版时间:2022-6-11

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220610.1600.002.html

基金项目:苏州市水利水务科技项目(2021010)

作者简介:侯金甫(1997—),男,河南泌阳人,主要从事水资源规划与管理研究。E-mail:1352046846@qq.com

通信作者:方红远(1963—),男,江苏溧水人,教授,博士,主要从事水资源规划与管理研究。E-mail:hyfang@yzu.edu.cn

水质型缺水问题。以城市污水为水源的再生水利用可以很大程度上减少淡水资源的浪费以及改善污水排放问题,有利于实现水资源的可持续利用^[10]。本文基于 BP-DEMATEL(backpropagation decision-making trial and evaluation laboratory)模型对影响苏州市再生水利用的主要因素进行识别。对比层次分析法等方法,DEMATEL 法不要求因素之间相互独立,可以分析出各因素对于目标因素的重要性并识别出各因素之间的影响关系以及关联性。目前,DEMATEL 模型在地区用水量预测^[11]、水资源承载力评价^[12]等方面均有较为良好的应用成果。BP-DEMATEL 模型则通过构建 BP 神经网络模型代替问卷调查或专家打分来获取直接关联矩阵,在一定程度上克服了传统 DEMATEL 方法应用难度大以及带有主观性等不足,扩展了模型的应用范围。随后根据 BP-DEMATEL 模型的分析结果,利用差分 GM(1, N)灰色预测模型评估了苏州市未来一段时期的再生水利用潜力,以期为进一步提升苏州市再生水利用率、形成先进适用的再生水利用模式、促进苏州再生水事业的发展提供依据,并为其他地区提高再生水利用水平提供经验参考。

1 研究区概况

苏州市位于东经 $119^{\circ}55' \sim 121^{\circ}20'$,北纬 $30^{\circ}47' \sim 32^{\circ}02'$,地处江苏省东南部,是长三角地区重要的中心城市之一,东、南分别与上海市、浙江省接壤,西北则是太湖、长江等重要湖泊水系,区域总面积 $8\,657.32\text{ km}^2$,下辖 6 个区、4 个县级市。2020 年苏州全市总人口 744.33 万人,全市国内生产总值 20 170.45 亿元,其中工业年增加值为 8 514.39 亿元^[13]。市域内地势低平,境内河网密布,湖泊众多,拥有各级河道 2 万多条、大小湖泊 300 多个,包括太湖、阳澄湖、长江、京杭运河等,太湖水面绝大部分在苏州境内,河流、湖泊、滩涂面积占全市土地面积的 36.6%。

2 研究区污水处理及再生水利用现状

2018 年以来,苏州市全力推进 89 座城镇污水处理厂尾水提标改造。目前,全市城镇污水处理厂出水水质全面提标,达到苏州准 IV 类标准。据统计,2020 年(现状年),全市污水处理系统累计处理污水 11.5 亿 m^3 ,较 2017 年增长 15%。截至 2020 年底,完成提标改造的 89 座城镇污水处理厂出水水质均已达到《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业

主要水污染物排放限值》(DB 32/1072—2018)和“苏州特别排放限值”标准要求。全市污水治理取得的良好工作基础,势必促进本地区再生水资源开发利用的发展,同时通过合理配置方案的实施,预期可全面提高非常规水源利用率。各区市(县)污水处理厂分布以及污水处理情况见图 1。

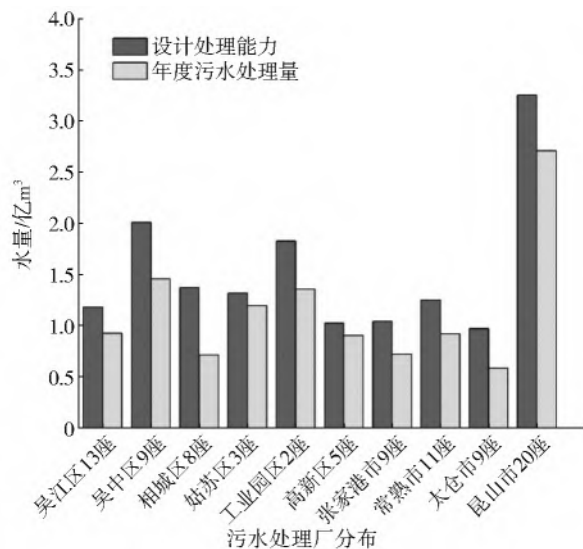


图1 2020年苏州市污水处理厂分布及污水处理情况

Fig. 1 Distribution and treatment of sewage treatment plants in Suzhou in 2020

市区范围内(包括吴江区、吴中区、相城区、姑苏区、工业园区以及高新区)共有 40 座污水处理厂。其中:仅有工业园区的两座污水处理厂规模在 $20\text{ 万 m}^3/\text{d}$ 以上;而规模在 $10\text{ 万} \sim 20\text{ 万 m}^3/\text{d}$ 的污水处理厂共 4 座;规模在 $5\text{ 万} \sim 10\text{ 万 m}^3/\text{d}$ 的污水处理厂共 8 座;其余污水处理厂规模均在 $5\text{ 万 m}^3/\text{d}$ 以下。各县(市)中,仅昆山市有 2 座规模在 $10\text{ 万} \sim 20\text{ 万 m}^3/\text{d}$ 的污水处理厂,其他污水处理厂规模较小。

苏州市各区市(县)2020 年度再生水利用详细情况(表 1)如下:吴江区 2020 年度再生水利用量为 $4\,648.95\text{ 万 m}^3$,其中 98%均用于环境用水;吴中区再生水利用量为 $4\,923.35\text{ 万 m}^3$,其中 91%被各厂区留作自用,其余 9%用于工业用水以及环境用水;相城区再生水利用量相对较少,为 $1\,907.48\text{ 万 m}^3$,且除少部分留作厂区自用外,其余均用于环境用水;姑苏区再生水利用量达到了 $10\,520.07\text{ 万 m}^3$,利用率为 88.3%,高于苏州其他区市(县);工业园区再生水利用总量为 $6\,429.37\text{ 万 m}^3$,除 13.37 万 m^3 留作厂区自用外,其余均用于环境用水;高新区再生水利用总量为 270.59 万 m^3 ,再生水利用率仅为 3.01%,远低于苏州其他区市(县)再生水利用水平。可以看出,吴江区及姑苏区再生水利用率均达到了

50%以上,但两区回用于环境的再生水量均达到了 97%以上,而其他如工业用水和城市杂用水等途径

的再生水利用量几近于无,其再生水配置方案有待进一步优化,利用潜力仍有提升空间。

表 1 苏州市再生水利用现状
Tab. 1 Utilization status of reclaimed water in Suzhou

区、市(县)	再生水年利用量/万 m ³	再生水利用途径/万 m ³					再生水利用率/%
		厂区自用	工业用水	城市杂用	环境用水	其他	
吴江区	4 648.95	103.63	8.21	2.14	4 534.37	0.2	50.43
吴中区	4 923.35	4 472.73	256.76	—	193.86	—	33.80
相城区	1 907.48	75.57	—	—	1 831.90	—	26.76
姑苏区	10 520.07	220.89	—	—	10 299.18	—	88.30
工业园区	6 429.37	13.37	—	—	6 416.00	—	47.00
高新区	270.59	270.27	—	0.32	—	—	3.00
张家港市	1 423.31	2.33	370.43	2.64	551.26	496.65	19.81
常熟市	2 395.97	7.20	35.96	1.14	2 155.14	52.86	26.14
太仓市	1 847.21	460.39	—	—	1 386.82	—	31.70
昆山市	10 122.61	337.71	363.46	2.85	7 521.68	1 896.92	37.38
总计	44 488.91	5 964.10	1 034.82	9.09	34 890.21	2 446.63	38.69

张家港市再生水利用总量为 1 423.31 万 m³,其中:26%用于工业用水;39%用于环境用水;余下 35%用于城市杂用水、厂区自用以及其他用途。常熟市再生水利用总量为 2 395.97 万 m³,其中 96%用于环境用水。太仓市再生水利用总量为 1 847.21 万 m³,其中,75%用于环境用水,25%被各厂区留作自用。昆山市再生水利用总量为 10 122.61 万 m³,其中:74%用于环境用水;3.4%留作厂区自用;3.6%用于工业用水;其余 19%用于城市杂用水及其他用途。

综合以上分析,2020 年苏州市再生水 78.68%用于环境用水,13.45%被各再生水厂留做自用,工业用水及城市杂用水仅占 2.33%和 0.02%,见图 2。目前苏州市现状再生水利用还存在着管网覆盖率底、配置方案不合理等问题,但随着再生水可利用量的逐步提升,配套设施水平的不断完善,苏州市再生水开发利用水平的增长潜力非常可观。

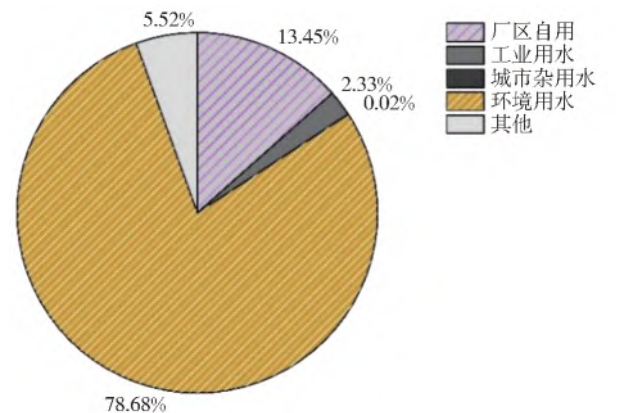


图 2 苏州市 2020 年再生水利用比例
Fig. 2 Proportion of reclaimed water utilization in Suzhou in 2020

3 再生水利用影响因素识别

3.1 指标选取与数据来源

综合考虑经济、社会等多种影响再生水利用量的因素以及相关文献^[14-18]研究成果,结合研究区实际情况,确定对城市再生水利用量存在影响的 25 个指标因素,见表 2。各指标因素数据来源于中华人民共和国住房和城乡建设部的《城乡建设统计年鉴》以及苏州市水务局的《苏州市水资源公报》,且所有指标均包含 2008—2020 年的完整数据序列。

表 2 苏州市再生水利用影响因素指标
Tab. 2 Influencing factors of reclaimed water use in Suzhou

指标因素	编号	指标因素	编号
常住人口/万人	X ₁	居民家庭用水量/万m ³	X ₁₄
人均 GDP/万元	X ₂	城市用水人口/万人	X ₁₅
污水处理量/万m ³	X ₃	城市人口密度/(人·km ⁻²)	X ₁₆
污水排放量/万m ³	X ₄	排水设施投资/万元	X ₁₇
全年水资源总量/亿m ³	X ₅	污水处理投资/万元	X ₁₈
供水总量/万m ³	X ₆	排水管道长度/km	X ₁₉
万元 GDP 用水量/m ³	X ₇	排水管道密度/(km·km ⁻²)	X ₂₀
建成区面积/km ²	X ₈	再生水生产能力/(万m ³ ·d ⁻¹)	X ₂₁
再生水管道长度/km	X ₉	污水处理能力/(万m ³ ·d ⁻¹)	X ₂₂
工业用水重复利用率/%	X ₁₀	二、三级污水处理量/万m ³	X ₂₃
人均用水量/(L·d ⁻¹)	X ₁₁	污水集中处理率/%	X ₂₄
生产运营用水量/万m ³	X ₁₂	污水处理率/%	X ₂₅
公共服务用水量/万m ³	X ₁₃		

3.2 研究方法

DEMATEL(decision-making trial and evaluation laboratory,决策实验室分析法)是一种被广泛应用于影响因素识别的方法,通过计算各因素的中心度和原因度构建模型,识别出关键因素及因素间的因果关系^[19]。

BP-DEMATEL 模型^[20]是在传统 DEMATEL 模型的基础上构建 BP 神经网络模型,经过不断修正满足模型误差要求,从而得到输入值与输出值之间的权值矩阵,并以此替代问卷调查或专家打分来计算获取直接关联矩阵,在一定程度上克服了传统 DEMATEL 方法应用难度大以及带有主观性的不足,扩展了模型的应用范围^[21]。建立 BP-DEMATEL 模型对影响苏州市再生水利用的因素进行识别,确定关键影响因素,具体步骤如下。

构建影响因素矩阵 $X=(x_{ij})_{m \times n}$ 以及目标指标矩阵 $Y=(y_{ik})_{m \times k}$,并对矩阵进行归一化处理,归一化后的影响因素矩阵和目标指标矩阵分别作为 BP 神经网络模型的输入和输出向量。其中: m 、 n 分别为样本、影响因素个数; $k=1$ 为目标因素个数。

神经网络模型训练完成后得到输入层与隐含层之间的权值矩阵 $(W)_{n \times i}$ 和隐含层与输出层之间的权值矩阵 $(W)_{i \times k}$ 。

计算整体权值矩阵 $\omega = \text{mean}(|W| \times |w|)$,其中: $\omega=(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$; $|W|$ 、 $|w|$ 指对矩阵中每个元素取绝对值。

计算影响因素指标之间的直接关联矩阵

$$A=(a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: A 为直接关联矩阵; $a_{ij}=0$, $a_{ii}=\frac{\omega_i}{\omega_j}$ (表示因子 i 对因子 j 的影响程度),若 $\omega_j=0$,则 $a_{ij}=0$ 。

归一化直接关联矩阵

$$B=(b_{ij})_{n \times n} = \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n a_{ij}} \times A \quad (2)$$

计算综合影响矩阵

$$T=(t_{ij})_{n \times n} = B(I-B)^{-1} \quad (3)$$

式中: T 为综合影响矩阵; t_{ij} 为因素 i 对 j 的综合影响程度; B 为归一化后的直接关联矩阵; $(I-B)^{-1}$ 为 $(I-B)$ 的逆矩阵; I 为单位矩阵。

建立因果关系图,定义影响度 D 为 T 各行之和,被影响度 R 为 T 各列之和。

$$D_i = \sum_{j=1}^n t_{ij}, (i=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

$$R_i = \sum_{j=1}^n t_{ji}, (i=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中: D_i 为因素 i 的影响度; R_i 为因素 i 的被影响度。

中心度 $D+R$ 值表示因素对系统的影响程度,该值越大代表因素越重要;原因度 $D-R$ 值为某因素对其他因素的影响程度。分别以 $D+R$ 和 $D-R$ 为横、纵坐标,将各因素点在图中绘制出来。

3.3 计算结果与分析

本次研究共有 13 组数据,分别为 2008—2020 年苏州市再生水利用量及其主要影响因素。以 25 个影响再生水利用量的因素为输入值,年再生水利用量为模型的输出值,在 MATLAB 软件中构建含有一个隐含层的 3 层 BP 神经网络。经过多次模型运行试验,并对比分析结果之后,确定网络参数设置^[22]如下:训练次数为 50 000、学习速率和期望误差分别为 0.05、0.000 01,此时模型运算结果最佳。导出输入层至隐含层、隐含层至输出层之间的权值矩阵,根据公式(1)~(5)计算直接关联矩阵和综合影响矩阵,并计算影响度 D 、被影响度 R 、中心度 $D+R$ 和原因度 $D-R$ 的值,见表 3。并依据计算结果绘制各因素的因果关系,见图 3。

表 3 再生水利用影响因素的中心度和原因度

Tab. 3 Centrality and cause degree of influencing factors of the utilization of reclaimed water

指标因素	D	R	$D+R$	$D-R$	指标因素	D	R	$D+R$	$D-R$
X_1	0.822	0.828	1.65	-0.005	X_{14}	1.523	0.443	1.967	1.080
X_2	0.547	1.241	1.788	-0.694	X_{15}	0.491	1.379	1.870	-0.888
X_3	0.359	1.869	2.228	-1.510	X_{16}	0.804	0.847	1.651	-0.044
X_4	0.408	1.650	2.059	-1.242	X_{17}	1.654	0.407	2.061	1.247
X_5	1.451	0.466	1.917	0.985	X_{18}	1.723	0.391	2.113	1.332
X_6	1.138	0.597	1.735	0.541	X_{19}	0.518	1.308	1.826	-0.790
X_7	1.437	0.471	1.908	0.967	X_{20}	1.231	0.551	1.782	0.680
X_8	1.266	0.536	1.802	0.731	X_{21}	0.558	1.217	1.774	-0.659
X_9	0.832	0.818	1.650	0.014	X_{22}	0.370	1.816	2.185	-1.446
X_{10}	0.676	1.007	1.683	-0.331	X_{23}	0.540	1.256	1.796	-0.716
X_{11}	1.067	0.637	1.704	0.430	X_{24}	1.016	0.670	1.685	0.346
X_{12}	1.102	0.617	1.719	0.486	X_{25}	0.904	0.753	1.657	0.152
X_{13}	0.556	1.221	1.777	-0.665					

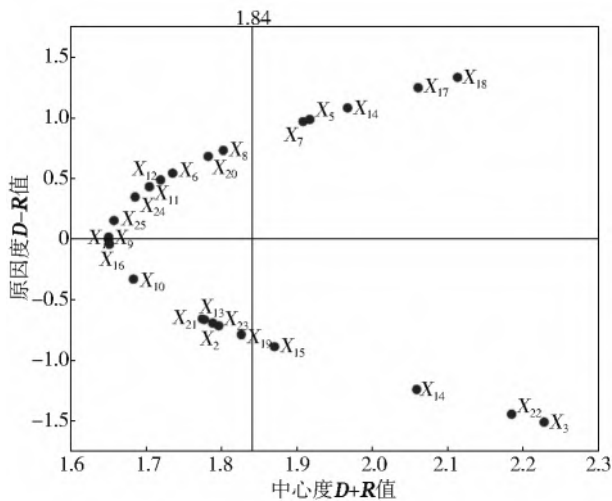


图 3 影响因素因果关系

Fig. 3 Causal diagram of influencing factors

根据 DEMATEL 模型分类要求,可按照原因度 $D-R$ 值的正负将全部影响因素分为原因因素和结果因素两类; $D-R > 0$ 意味着其为原因型因素,对其他因素影响较大,其自身则较为稳定,又称驱动因素; $D-R < 0$ 意味着其为结果型因素,容易受到驱动因素的影响,又称特征因素。同时可将所有因素中心度均值和标准差之和作为界限值,大于该值的因素为关键驱动因素及关键特征因素^[23],界限值经计算为 1.84。

3.3.1 驱动因素分析

根据模型计算结果,污水处理投资(X_{18})、排水设施投资(X_{17})、居民家庭用水量(X_{14})、全年水资源总量(X_5)、万元 GDP 用水量(X_7)5 项因素为关键驱动因素。建成区面积(X_8)、排水管道密度(X_{20})、供水总量(X_6)3 项因素的中心度高于其余 16 个因素的平均值,说明其对再生水利用量也有较大的影响。

分析可知,增加污水处理投资可提升污水处理厂的污水处理能力以及出水水质,从而提升再生水生产量,加速城市再生水利用发展。据统计:至 2020 年底苏州市污水处理投资总额已达 26.75 亿元;加大城市排水管网设施投资有利于提升城市各行业及生活污水的收集效率和能力,通过增加污水处理厂的进水来源间接影响再生水利用水平,根据历史数据分析苏州市对于排水设施的投资整体呈上升趋势,城市排水设施正在逐步完善;居民家庭用水产生的污水是再生水的重要水源之一,故而用水量的多少也影响着再生水利用发展,与再生水利用量呈正相关;水资源总量匮乏与否是驱动城市发展再生水代替常规水资源的重要因素,结合研究区情况分析,随着经济快速发展,苏州市面临着水质型缺水

的现状,2020 年苏州市地表水国考断面水质为Ⅲ类及以下的达到 81.25%,太湖及阳澄湖总体水质仍处于Ⅳ类,发展再生水事业对于改善水环境状况十分关键;万元 GDP 用水量代表了城市水资源利用水平,其值越低说明利用效率越高,苏州市万元 GDP 用水量从 2008 年的 113 m^3 下降至 2020 年的 25.57 m^3 ,与再生水利用量呈负相关。

建成区面积可反映城市污水再生回用相关配套设施的完善程度,与再生水利用量呈正相关。排水管网密度增加可提升污水收集率,避免部分污水直接进入水资源系统。供水总量一定程度上决定了污水排放量等关键因素,与再生水利用量呈正相关。其余 X_9 、 X_{11} 、 X_{12} 、 X_{24} 等驱动因素对再生水利用量影响程度较低,结合苏州市实际情况分析,这些因素历年来的变化趋势较为缓慢,没有对再生水利用量提升起到明显的推动作用。例如,再生水管道长度自 2009 年至 2020 年仅增加了 20 km,而再生水利用水平较高的北京市再生水管道长度达到了 1719 km ^[24],这在一定程度上也反映了苏州市再生水输配基础设施需要进一步完善,以有效促进再生水资源得到充分利用。

3.3.2 特征因素分析

污水处理量(X_3)、污水处理能力(X_{22})、污水排放量(X_4)、城市用水人口(X_{15})4 项因素为关键特征因素。排水管道长度(X_{19})、二、三级污水处理量(X_{23})、人均 GDP(X_2)、公共服务用水量(X_{13})、再生水生产能力(X_{21})等因素中心度高于其余 16 项因素,也会对再生水利用量产生直接影响。根据分析得出,污水处理量及处理能力对再生水利用直接影响最大,并且容易受到污水处理投资、排水设施投资、用水量等因素的影响。由于再生水厂的进水来源为经城市污水处理厂处理后的出水,故污水处理量和处理能力的提升可直接增加再生水厂的进水量,优化进水水质,从而使城市再生水利用量稳定增长并得到合理配置,推动再生水利用事业的发展。城市用水人口及污水排放量的增加也可直接影响再生水水源,分析历史数据可知,苏州市污水排放及处理量历年来不断提升,且增长趋势十分一致,均与城市再生水利用量呈正相关。

排水管道长度,二、三级污水处理量,公共服务用水量等因素与污水排放处理量有着密切的联系,同样会对再生水利用量产生重要影响。人均 GDP 则反映了城市经济发展水平,苏州市人均 GDP 水平保持持续增长趋势,与再生水利用量呈正相关;再生水生产能力反映了再生水厂的生产水平和处理能力,

根据历史数据分析,苏州市 2011 年至 2018 年再生水生产能力并没有明显提升,不过近两年随着各污水处理厂及再生水厂逐步完成提标改造,其再生水生产水平也开始进步,这必然会促进再生水利用量的增加。

因此,若要进一步提升苏州市再生水利用水平,需要做到:加大污水处理投资,对污水处理厂进行提标改造,提升其处理规模;加大排水设施投资,完善城市污水收集管网,提升污水收集率;同时注重科技水平发展,提升对水资源的利用效率。

4 再生水利用潜力评估

根据上述对苏州市再生水利用影响因素的分析识别,将筛选出的 9 项关键驱动因素和关键特征因素的数据作为相关因素序列数据,构建 GM(1, N) 灰色预测模型,对苏州市再生水的利用潜力进行评估。

4.1 研究方法

GM(1, N) 模型是灰色系统理论中常用的模型之一^[25],该模型的原理是利用离散的数据序列作为输入变量建立微分方程以及预测模型,反映其对目标变量的影响^[26]。建模过程如下:

设系统有特征数据序列

$$X_1^{(0)} = (X_1^{(0)}(1), X_1^{(0)}(2), \dots, X_1^{(0)}(n))$$

则相关因素序列为

$$X_2^{(0)} = (X_2^{(0)}(1), X_2^{(0)}(2), \dots, X_2^{(0)}(n))$$

$$X_3^{(0)} = (X_3^{(0)}(1), X_3^{(0)}(2), \dots, X_3^{(0)}(n))$$

⋮

$$X_N^{(0)} = (X_N^{(0)}(1), X_N^{(0)}(2), \dots, X_N^{(0)}(n))$$

令 $X_i^{(0)}$ 的 1-AGO 序列为 $X_i^{(1)}$, $i=1, 2, \dots, N$,

$$X_i^{(1)}(k) = \sum_{k=1}^n x_i^{(0)}(k), (i=1, 2, \dots, n)$$

生成 $X_1^{(1)}$ 的紧邻值序列 $Z_1^{(1)}$, $Z_1^{(1)}(k) = \frac{1}{2}[X_1^{(1)}(k) + X_1^{(1)}(k-1)]$, $k=2, 3, \dots, n$ 。则称式(6)为 GM(1, N) 模型。

$$X_1^{(0)}(k) + aZ_1^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^N b_i x_i^{(1)}(k) \quad (6)$$

式中: a 为发展系数; b_i 为驱动系数; $b_i x_i^{(1)}(k)$ 为驱动项。

建立 $X_1^{(1)}$ 的白化形式微分方程

$$\frac{dX_1^{(1)}}{dt} + aX_1^{(1)} = b_2 X_2^{(1)} + b_3 X_3^{(1)} + \dots + b_N X_N^{(1)} \quad (7)$$

按最小二乘法求解参数列 $\beta = (B^T B)^{-1} B^T Y$

$$B = \begin{bmatrix} -Z_1^{(1)}(2) & X_2^{(1)}(2) & \dots & X_N^{(1)}(2) \\ -Z_1^{(1)}(3) & X_2^{(1)}(3) & \dots & X_N^{(1)}(3) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -Z_1^{(1)}(n) & X_2^{(1)}(n) & \dots & X_N^{(1)}(n) \end{bmatrix}, Y_n = \begin{bmatrix} X_1^{(0)}(2) \\ X_1^{(0)}(3) \\ \vdots \\ X_1^{(0)}(n) \end{bmatrix}$$

GM(1, N) 近似时间相应式为

$$\hat{X}_1^{(1)}(k+1) =$$

$$[X_1^{(0)}(1) - \frac{1}{a} \sum_{i=2}^n b_i X_i^{(1)}(k+1)] e^{-ak} + \frac{1}{a} \sum_{i=2}^n b_i X_i^{(1)}(k+1) \quad (8)$$

通过差分模拟形式 $\hat{X}_1^{(0)}(k) = -aZ_1^{(1)}(k) +$

$\sum_{i=2}^N b_i X_i^{(1)}(k)$ 将其结果进行还原得到预测值。

4.2 关键影响因素数据序列延展

基于灰色预测 GM(1, N) 模型对苏州市未来再生水利用潜力进行预测,需要各影响因素的未来值,由于其数据难以获得,因此,这里采用延展各影响因素数据序列的方法^[27],以时间为自变量对各因素变化进行拟合,关键影响因素 2021—2025 年的预测值见表 4。

表 4 2021—2025 年关键影响因素延展数据

Tab. 4 Extension data of key influencing factors from 2021 to 2025

年份	X_3 /万 m^3	X_4 /万 m^3	X_5 /亿 m^3	X_7 /m ³	X_{14} /万 m^3	X_{15} /万人	X_{17} /万元	X_{18} /万元	X_{22} /(万 $m^3 \cdot d^{-1}$)
2021	68 519.36	70 663.64	50.97	24.021	24 877.62	420.63	131 547.1	17 500.84	229.011 4
2022	70 471.98	72 438.55	52.45	21.338	25 114.84	438.28	140 483.1	17 062.88	238.354 8
2023	72 424.60	74 213.46	53.93	18.96	25 352.06	455.93	149 419.1	16 624.92	247.698 2
2024	74 377.22	75 988.37	55.41	16.84	25 589.28	473.58	158 355.1	16 186.96	257.041 6
2025	76 329.84	77 763.28	56.89	14.96	25 826.50	491.23	167 291.1	15 749.00	266.385 0

4.3 再生水利用潜力评估

使用 MATLAB 软件建立差分模拟形式的 GM(1, N) 预测模型,将预测关键影响因素数据序列作为输入变量,预测苏州市 2021—2025 年再生水利用潜力,并绘制模型拟合结果及预测图,见图 4。根据计算,2025 年苏州市再生水利用潜力预计可达到 59 630.52 万 m^3 ,利用率可达到 51.85%。

4.4 模型精度检验及合理性分析

模型精度各检验指标见表 5,根据模型评价标准: $-a=0.026 1 < 0.3$,表明模型适合中长期预测;方差比 $C=0.037 8 < 0.35$,且小误差概率 $P=1$,模型预测等级为好;关联度 $R=0.680 9$,在 0.6~0.7,合格。模型基本满足各种检验,可用于再生水利用量的中长期预测。

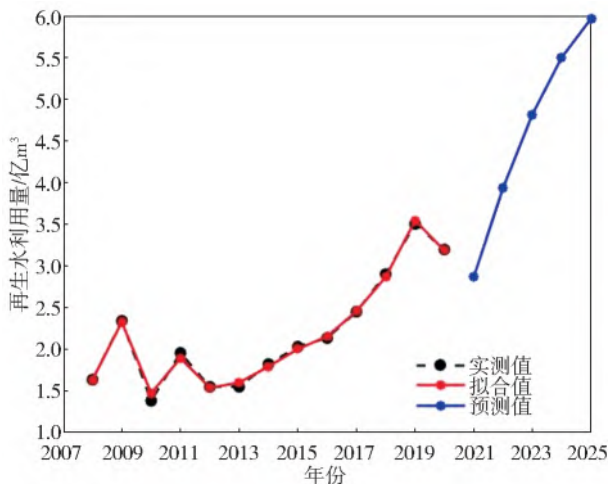


图 4 GM(1, N)模型拟合结果及预测

Fig. 4 Fitting results and prediction diagram of GM(1, N) model

表 5 模型精度检验结果

Tab. 5 Results of model accuracy test

检验标准	模型指标
$-a$	0.026 1
方差比 C	0.037 8
小误差概率 P	1.0
关联度 R	0.680 9
相对误差均值	0.016 2

对比 2008—2020 年苏州市再生水实际利用量与 GM(1, N)模型输出的预测值可知,模型的拟合精度较高,见表 6,平均误差仅为 0.22%,其中最大拟合误差为 6.55%。模型拟合结果说明通过 BP-DEMATEL 模型识别出的 9 个关键影响因素可以表明苏州市再生水利用量的原始信息。根据预测结果,苏州市 2021—2025 年再生水利用量将保持稳定增长趋势,这符合“十四五”规划中优化再生水利用规划布局、扩大再生水利用领域和规模的总体要求,预测结果具有一定的合理性与可参考性。

表 6 2008—2020 年模型拟合结果及误差

Tab. 6 Fitting results and errors of the model from 2008 to 2020

年份	实际值/万 m ³	预测值/万 m ³	误差/%
2008	16 405.00	16 405.00	0
2009	23 445.00	23 308.48	-0.58
2010	13 875.00	14 784.21	6.55
2011	19 613.00	18 978.56	-3.23
2012	15 546.00	15 429.94	-0.75
2013	15 557.00	16 052.75	3.19
2014	18 272.00	17 981.07	-1.59
2015	20 352.00	20 059.46	-1.44
2016	21 386.00	21 586.07	0.94
2017	24 550.00	24 586.39	0.15
2018	29 035.00	28 707.41	-1.13
2019	35 054.00	35 452.41	1.14
2020	31 985.00	31 883.98	-0.32

5 结论

本文运用 BP-DEMATEL 模型对影响苏州市再生水利用水平的因素进行了识别分析,并以识别出的关键因素指标为基础,构建了 GM(1, N)灰色预测模型,对苏州市未来一段时期内再生水利用潜力进行预测评估,结果如下。

通过引入 BP 神经网络对传统 DEMATEL 模型进行改进,有效识别出了污水处理投资、排水设施投资、居民家庭用水量、全年水资源总量、万元 GDP 用水量 5 项关键驱动因素以及直接影响再生水利用量的污水处理量、污水处理能力、污水排放量、城市用水人口 4 项关键特征因素。

构建了基于差分模拟形式的 GM(1, N)模型,根据计算可知,模型预测结果与实际再生水利用量拟合度较高,模型精度较好。预测结果表明,苏州市“十四五”时期将保持再生水利用量稳定增长的趋势,预期至 2025 年,再生水利用量、利用率分别可达到 59 630.52 万 m³、51.85%,与现状利用水平相比提升潜力巨大。

综合考虑影响因素和潜力评估结果,结合苏州市再生水利用现状分析,目前苏州市再生水利用潜力较大但利用形式单一,若要促进苏州市再生水回用事业的发展,需要加大污水处理投资,对污水处理厂进行提标改造,提升其处理规模以及处理技术水平,加大排水设施投资,完善城市污水收集管网,提升污水收集率,进一步完善配套设施、提升再生水管网覆盖率,使再生水资源得到更为合理的配置。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报[EB/OL]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/202107/t20210709_1528208.html, 2021-7-9/2022-1-25. (Ministry of Water Resources of People's Republic of China. China water resources bulletin[EB/OL]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/202107/t20210709_1528208.html, 2021-7-9/2022-1-25. (in Chinese))
- [2] MESA-PEREZ E, BETHEL J. Analysis of barriers and opportunities for reclaimed wastewater use for agriculture in Europe[J]. *Water*, 2020, 12(8). DOI: 10.3390/w12082308.
- [3] LIAO Z T, CHEN Z, XU A, et al. Wastewater treatment and reuse situations and influential factors in major Asian countries[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 282. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.111976.

- [4] CHANG D H, MA Z. Wastewater reclamation and reuse in Beijing: Influence factors and policy implications [J]. *Desalination*, 2012, 297: 72-78. DOI: 10. 1016/j. desal. 2012. 04. 019.
- [5] LI Q, WANG W J, JIANG X H, et al. Analysis of the potential of reclaimed water utilization in typical inland cities in northwest China via system dynamics [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 270. DOI: 10. 1016/j. jenvman. 2020. 110878.
- [6] ZHENG J, LIU J, MA T, et al. An SEM-REM-based study on the driving and restraining mechanisms and potential of reclaimed water utilization in China [J]. *Water*, 2021, 14(1). DOI: 10. 3390/w14010052.
- [7] 余鹏明, 管孝艳, 陈俊英, 等. 基于 Spearman 秩相关的再生水利用量影响因素研究[J]. *节水灌溉*, 2019(10): 78-82. (YU P M, GUAN X Y, CHEN J Y, et al. Study on factors affecting reclaimed water utilization based on spearman rank correlation[J]. *Water Saving Irrigation*, 2019(10): 78-82. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-4929. 2019. 10. 017.
- [8] 汪妮, 秦涛, 张刚. 城市再生水需水量预测的研究与应用[J]. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(5): 61-64. (WANG N, QIN T, ZHANG G. Research and application of water demand prediction of reclaimed water in city[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, 23(5): 61-64. (in Chinese)) DOI: 10. 13448/j. cnki. jal re. 2009. 05. 024.
- [9] 唐莲, 刘超. 基于供需平衡的城市污水再生利用潜力预测[J]. *节水灌溉*, 2014(11): 56-59. (TANG L, LIU C. Sewage regeneration and reuse potential estimation based on supply and demand balance[J]. *Water Saving Irrigation*, 2014(11): 56-59. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-4929. 2014. 11. 016.
- [10] 张云, 崔树彬, 胡惠方, 等. 南方地区再生水利用可行性及关键问题探讨[J]. *南水北调与水利科技*, 2011, 9(1): 122-125. (ZHANG Y, CUI S B, HU H F, et al. Discussion on the feasibility and key problems of recycled water utilization in southern China[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2011, 9(1): 122-125. (in Chinese)) DOI: 10. 3724/SP. J. 1201. 2011. 01122.
- [11] 崔惠敏, 薛惠锋, 王磊, 等. 基于 PCCs-DEMATEL 指标筛选的 BP 神经网络用水量预测[J]. *节水灌溉*, 2019(5): 87-91, 98. (CUI H M, XUE H F, WANG L, et al. BP neural network water consumption prediction based on PCCs-DEMATEL index screening[J]. *Water Saving Irrigation* 2019(5): 87-91, 98. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-4929. 2019. 05. 018.
- [12] 侍孝瑞, 王远坤, 卞锦宇, 等. 水资源承载力关键驱动因素识别研究[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2018, 54(3): 628-636. (SHI X R, WANG Y K, BIAN J Y, et al. Study on identification of key driving factors of water resources carrying capacity[J]. *Journal of Nanjing University(Natural Science)*, 2018, 54(3): 628-636. (in Chinese)) DOI: 10. 13232/j. cnki. njnu. 2018. 03. 019.
- [13] 苏州市统计局. 苏州统计年鉴[EB/OL]. <http://tjj.suzhou.gov.cn/sztjj/tjnj/2021/zk/indexce.htm>, 2020-12-30/2022-1-25. (Suzhou Statistics Bureau. *Suzhou statistical yearbook* [EB/OL]. <http://tjj.suzhou.gov.cn/sztjj/tjnj/2021/zk/indexce.htm>, 2021-12-30/2022-1-25. (in Chinese))
- [14] 汪晶, 韦诚, 王菊, 等. 江苏城市再生水利用潜力及影响因素分析[J]. *中国水利*, 2014(11): 43-46. (WANG J, WEI C, WANG J, et al. Potentiality and influential factor analysis of recycled wa-ter utilization in cites of Jiangsu[J]. *China Water Resources*, 2014(11): 43-46. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; ZGSL. 0. 2014-11-017.
- [15] MASSOUD M A, KAZARIAN A, ALAMEDDINE I, et al. Factors influencing the reuse of re-claimed water as a management option to augment water supplies [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(9). DOI: 10. 1007/s10661-018-6905-y.
- [16] 郑锦涛, 刘九夫, 刘湘伟, 等. 再生水开发利用影响因素及作用机制研究: 基于胡焕庸线的空间定量分析[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(6): 1125-1135. (ZHENG J T, LIU J F, LIU X W, et al. Influencing factors and mechanism of exploitation and utilization of reclaimed water: Spatial quantitative analysis based on Hu Line[J]. *South to North Water Transfev and Water Science & Technology*, 2021, 19(6): 1125-1135. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2021. 0115.
- [17] 陈梓豪, 许萍. 制约我国城市再生水推广利用的关键因素[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(11): 76-80. (CHEN Z H, XU P. The key factors restricting promotion and utilization of urban reclaimed water in China[J]. *Hydropower and Energy Science*, 2021, 39(11): 76-80. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; SDNY; 2021-11-018.
- [18] 黄欢欢. 基于多目标的城市再生水利用决策方法研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2019. (HUANG H H. Research on decision-making method of urban reclaimed water utilization based on multiobjective[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019. (in Chinese))
- [19] 孙永河, 韩玮, 段万春. 复杂系统 DEMATEL 算法研究进展评述[J]. *控制与决策*, 2017, 32(3): 385-392. (SUN Y H, HAN W, DUAN W C. Review on research progress of DEMATEL algorithm for complex systems[J]. *Control and Decision Making*, 2017, 32(3): 385-392. (in Chinese)) DOI: 10. 13195/j. zjyjc. 2016. 0823.
- [20] 崔强, 武春友, 匡海波. BP-DEMATEL 在空港竞争力影响因素识别中的应用[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(6): 1471-1478. (CUI Q, WU C Y, KUANG H B. Influencing factors research of airports competitiveness based BP-DEMATEL model[J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2013, 33(6): 1471-1478. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-6788. 2013. 06. 013.
- [21] 常骑, 李宏伟, 张斌, 等. 沿黄主要城市空气质量时空

- 特征及社会经济影响因素研究[J]. 生态经济, 2021, 367(7): 183-189. (CHANG Q, LI H W, ZHANG B, et al. Spatial-temporal characteristics and socio-economic influencing factors of air quality in major cities along the Yellow River [J]. Ecological Economy, 2021, 367(7): 183-189. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; STJJ. 0. 2021-07-183.
- [22] 樊振宇. BP 神经网络模型与学习算法[J]. 软件导刊, 2011, 10(7): 66-68. (FAN Z Y. BP neural network model and learning algorithm [J]. Software Guide, 2011, 10(7): 66-68. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; RJDK. 0. 2011-07-025.
- [23] 张秋, 朱翠华. 基于 BP-DEMATEL 模型的我国直辖市创业环境影响因素研究[J]. 工业技术经济, 2018, 300(10): 67-74. (ZHANG Q, ZHU C H. Research of influence factors for China's municipalities entrepreneurial environment based on BP-DEMATEL model [J]. Industrial Technology and Economy, 2018, 300(10): 67-74. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-910X. 2018. 10. 009.
- [24] 徐傲, 巫寅虎, 陈卓, 等. 北京市城镇污水再生利用现状与潜力分析[J]. 环境工程, 2021, 39(9): 1-6, 47. (XU A, WU Y H, CHEN Z, et al. Municipal wastewater reclamation in Beijing [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(9): 1-6, 47. (in Chinese)) DOI: 10. 13205/j. hjgc. 202109001.
- [25] 章恒全, 何薇. 基于主成分回归与灰色神经网络模型的水资源承载力需水量预测[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(1): 103-108. (ZHANG H Q, HE W. Forecast of water requirement of water resources carrying capacity based on regression of principal components and grey neural network model [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(1): 103-108. (in Chinese)) DOI: 10. 11705 /j. issn. 1672-643X. 2014. 01. 22.
- [26] 曾亮. 改进的灰色多变量 GM(1, N) 模型及其应用[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 297(9): 68-76. (ZENG L. Improved grey multivariable GM(1, N) model and its application [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2019, 297(9): 68-76. (in Chinese)) DOI: 10. 13718/j. cnki. xdzk. 2019. 09. 009.
- [27] 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 等. 基于 RDA-REM 模型的我国再生水开发利用潜力[J]. 环境科学, 2021, 42(6): 2758-2768. (ZHENG J T, MA T, LIU J F, et al. China's reuse water development and utilization potential based on the RDA-REM model [J]. Environmental Science, 2021, 42(6): 2758-2768. (in Chinese)) DOI: 10. 13227/j. hjkx. 202009068.

Identification of influencing factors and potential assessment of the reclaimed water utilization in Suzhou City

HOU Jinfu, FANG Hongyuan, LI Yanming, CHENG Qianqian

(College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Suzhou is a typical economically developed city in southern Jiangsu. With the rapid economic development, the consumption of water resources is also very large, and the resulting discharge of a large number of industrial and domestic sewage leads to a serious water shortage. Strengthening the utilization of reclaimed water plays a very important role in alleviating the contradiction between supply and demand of urban water resources and improving water pollution, which is conducive to realizing the sustainable utilization of water resources.

In order to further improve the utilization rate of reclaimed water in Suzhou, form an advanced and suitable model of reclaimed water utilization and promote the development of reclaimed water enterprise, the present situation of sewage treatment is analyzed and water utilization capacity is reclaimed in Suzhou. Selected 25 factors affecting the amount of reclaimed water resources, and based on the relevant statistical data from 2008 to 2020, a BP neural network model was constructed to obtain the weight matrix between input value and output value. It replaced the direct correlation matrix obtained by questionnaire survey or expert scoring in the traditional DEMATEL model. The key driving factors and characteristic factors which affect the development of reclaimed water utilization in Suzhou were identified. On this basis, the GM (1, N) grey prediction model is established, and the historical data of identified key factors and their extended data were taken as the data of relevant factors to predict the potential of reclaimed water utilization in Suzhou.

The results show that: investment in sewage treatment and drainage facilities, water consumption of households, total annual water resources and water consumption of 10 thousand RMB GDP were the key driving factors, which were the main factors affecting the development of reclaimed water utilization in Suzhou; sewage discharge, the amount and capacity of sewage treatment, and urban water consumption population were the key characteristic factors, which had a direct impact on the development of reclaimed water utilization in Suzhou. Therefore, in order to promote the development of Suzhou city reclaimed water utilization, it is needed to increase investment for sewage treatment, promote the treatment scale and technology level, on the other hand to increase drainage facilities investment, improve the urban sewage collection pipe network, increase the rate of sewerage, perfect supporting facilities, improve reclaimed water pipe network coverage. To make renewable water resources have more reasonable allocation, GM (1, N) prediction model basically met all kinds of tests and could be used for medium and long term prediction of reclaimed water consumption. The average relative error was 0.22%, and the maximum error was 6.55%. By 2025, the utilization potential of reclaimed water in Suzhou can reach 596.305 2 million m³, which had a huge space for improvement compared with the current utilization level.

Key words: reclaimed water; utilization status; BP-DEMATEL model; GM (1, N) model; potential assessment