

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0115

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 Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(6): 1125-1135. (in Chinese)

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

郑锦涛^{1,2}, 刘九夫^{1,3}, 刘湘伟⁴, 马涛^{1,3}, 邓晰元^{1,3}, 彭安帮^{1,3}, 李薛刚¹

(1. 南京水利科学研究院, 南京 210029; 2. 河海大学水文水资源学院, 南京 210029;

3. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029; 4. 西藏自治区水文水资源勘测局, 拉萨 850000)

摘要:针对我国再生水开发利用现状,开展驱动-约束影响因素分析,解析影响因素间的关联关系与层次结构,在此基础上,考虑影响因素的空间异质性,以胡焕庸线为分界线,对东西两侧地区分别建立再生水开发利用驱动-约束非递归结构作用机制框架,采用结构方程模型(structural equation modeling, SEM)刻画影响因素间的传导路径,量化影响因素贡献率。结果表明:胡焕庸线东侧地区再生水开发利用驱动推进作用大于约束限制作用,具备高水平开发潜质;西侧地区约束限制作用大于驱动推进作用,再生水开发利用推动能力不足。再生水配套管网等工程条件不完善为东侧地区主导制约因子,影响程度贡献率为11.8%,地区经济条件与污水处理技术水平为次要制约因子;区域水资源环境胁迫、再生水工程建设不完善、地区经济发展水平偏低为西侧地区主导制约因子,贡献率为15.9%~18.1%,污水处理技术水平为次要制约因子。

关键词:再生水;胡焕庸线;非递归结构;SEM;水资源管理

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



我国水资源总量丰富,但由于人口基数大,人均水资源占有量仅为世界平均水平的1/4,属于水资源极度匮乏的国家之一。随着我国工业化和城市化进程加快,水环境污染日趋严重,进一步加剧了我国水资源短缺压力。在水资源供需矛盾日益严峻的形势下,如何更好地应对水资源短缺压力成为现阶段我国亟待解决的问题。再生水开发利用可置换常规水资源,降低对新鲜水的消耗,提高水资源循环效率,对于缓解水资源供需矛盾具有积极作用,“将再生水纳入水资源统一配置体系”已成为新时期水利部推进全国节约用水工作、贯彻落实“节水优先”方针的一项重要举措^[1]。不过

由于我国再生水开发利用工作尚处于发展阶段^[2],开发利用过程中驱动-约束机制不清依然是制约我国再生水高效利用与战略布局的关键。研究再生水开发利用驱动-约束影响因素,掌握开发利用规模与驱动、约束的关系和响应机制,对于全面提升我国再生水利用效率、破解制约再生水开发利用瓶颈十分必要。

目前,针对再生水开发利用驱动-约束作用机制的研究较少,并且多集中于行业/主体间相互影响的宏观定性分析^[3-5]。王丰等^[6]基于环境经济学原理,定性分析了再生水利用主体间的相关关系,初步构建了再生水利用激励机制框架。董战峰等^[7]认为科

收稿日期:2021-03-30 修回日期:2021-06-07 网络出版时间:2021-06-22

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210621.1820.004.html

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0403501);水利部水资源节约项目(126302001000200010)

作者简介:郑锦涛(1993—),男,河南安阳人,博士研究生,主要从事水文学与水资源研究。E-mail:2261669514@qq.com

通信作者:马涛(1981—),男,山东潍坊人,高级工程师,博士,主要从事水文学与水资源研究。E-mail:tma@nhri.cn

学考虑价格-市场间作用关系,创新再生水价格机制,是驱动再生水高质量发展的重要环节。何力等^[8]采用系统动力学方法模拟了定额调整、非常规水资源利用等多种调控方案下的水资源供需变化情况,定量分析了各激励机制的节水效应,但对激励机制的作用分析主观性较强。陈莹等^[9]认为科学合理的再生水定价是驱动用户接受再生水的重要因素之一,通过开展再生水利用影响因素分析及再生水定价机制分析,确定了自来水价与再生水定价的比差关系与再生水的合理定价区间。

同时,由于地理位置、水资源禀赋、经济发展水平等因素的不同,各地区再生水开发利用也应存在一定差异,然而,当前研究对我国再生水开发利用影响因素的空间异质性考量较少,不利于各地因地制宜地制定适合当地发展的再生水开发利用方案,有关再生水开发利用影响因素的空间异质性研究亟需补充。“胡焕庸线”作为我国人地关系空间差异的地理大发现^[10],承载着我国水-能源关系空间演变的重要分界作用^[11],其东西两侧的水资源分配存在着显著不均衡性,两侧地区城镇化发展与水资源综合评价的协调水平也存在着较大差异性^[12]。因此,以胡焕庸线为分界线,将我国 31 省(自治区、直辖市)划分为东西两侧,综合考虑两侧区域地理环境、经济社会、生态脆弱性等差异,针对再生水开发利用影响因素开展比对分析,研究我国再生水开发利用影响因素与开发利用的空间差异程度,旨在为再生水高效开发利用提供新视角,为协同再生水开发与利用共同发展提供量化依据。

1 研究区划分

胡焕庸线东西两侧稳定的空间格局是一系列自然因素与经济社会因素的综合体现^[13-14],因此选取胡焕庸线为分界线,将东西两侧地区分别作为再生水开发利用影响因素研究区域,比对分析两侧地区影响因素作用机制异同。胡焕庸线西侧地区包括内蒙古、宁夏、甘肃、青海、新疆、西藏等 6 省(自治区);东侧地区包括北京、天津等 25 省(自治区、直辖市)。

2 构建 SEM 模型

2.1 SEM 方法介绍

结构方程模型(structural equation modeling, SEM)是一种基于变量协方差矩阵来分析变量之间关系的统计学方法,能够对抽象的概念进行定量估计与验证^[15]。再生水开发利用集自然资源、生态环境、经济社会等因素为一体,其开发利用规模与驱动

因素、约束因素的内在关系与响应机制中存在众多不可被直接观测的潜变量,如再生水处理技术水平、地区经济发展水平等,为探明潜变量与再生水开发利用间的影响关联,选取 SEM 开展再生水开发利用驱动机制与约束机制分析。

在 SEM 分析软件中,AMOS 普及率较高,其不仅可以完成 SEM 图形模型的构建,开展验证性因素分析、路径分析等,还可以完成浏览估计模型图与进行模型图的修改、评估模型的适配与参考修正指标等工作。本文基于 AMOS 软件开展 SEM 模型分析。

2.1.1 SEM 模型

SEM 包括测量模型与结构模型两部分。测量模型由潜变量与测量变量构成,描述测量变量与潜变量之间的测量关系,将不可被直接观测的潜变量进行量化分析。测量模型一般性方程式为

$$y = \Lambda_y \eta + \epsilon \quad (1)$$

$$x = \Lambda_x \xi + \delta \quad (2)$$

式中: y 为内生测变量; η 为内生潜变量; Λ_y 为内生测变量和内生潜变量之间的关系系数; ϵ 为内生测变量解释不完全的残差; x 为外源测变量; ξ 为外源潜变量; Λ_x 为外源测变量和外源潜变量之间的关系系数; δ 为外源测变量解释不完全的残差。

结构模型可描述潜变量间因果关联,探讨变量之间潜在阶层性。结构模型一般性方程式为

$$\eta = B\eta + \Gamma\xi + \zeta \quad (3)$$

式中: B 为内生潜变量间的关系系数; Γ 为外生潜变量对内生潜变量影响的关系系数; ζ 为方程的残差项。

SEM 模型包含的完整参数及其代表意义见图 1、表 1。SEM 模型是基于变量方差与协方差矩阵来分析变量间相互关系,因此构建变量间方差(协方差)与相关系数的方程至关重要。根据 Hays^[17] 指出的 4 种与方差(协方差)计算有关的定理,协方差等于潜变量所属的 2 个测量变量的因素载荷乘积,方差等于各测量变量的因素载荷的平方与误差项的和,计算公式为

$$\begin{aligned} \text{Cov}(x_1, x_2) &= \text{Cov}(\lambda_1 \xi_1 + \delta_1, \lambda_2 \xi_2 + \delta_2) = \\ &\lambda_1 \lambda_2 \text{Cov}(\xi_1, \xi_2) + \lambda_1 \text{Cov}(\xi_1, \delta_2) + \\ &\lambda_2 \text{Cov}(\xi_2, \delta_1) + \text{Cov}(\delta_1, \delta_2) = \\ &\lambda_1 \lambda_2 \text{Cov}(\xi_1, \xi_2) = \lambda_1 \lambda_2 \Phi_{21} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}(x_1) &= \text{Cov}(\lambda_1 \xi_1 + \delta_1, \lambda_1 \xi_1 + \delta_1) = \\ &\lambda_1^2 \text{Cov}(\xi_1, \xi_1) + \lambda_1 \text{Cov}(\xi_1, \delta_1) + \\ &\lambda_1 \text{Cov}(\xi_1, \delta_1) + \text{Cov}(\delta_1, \delta_1) = \\ &\lambda_1^2 \text{Var}(\xi_1) + \text{Var}(\delta_1) = \lambda_1^2 + \theta_1 \end{aligned} \quad (5)$$

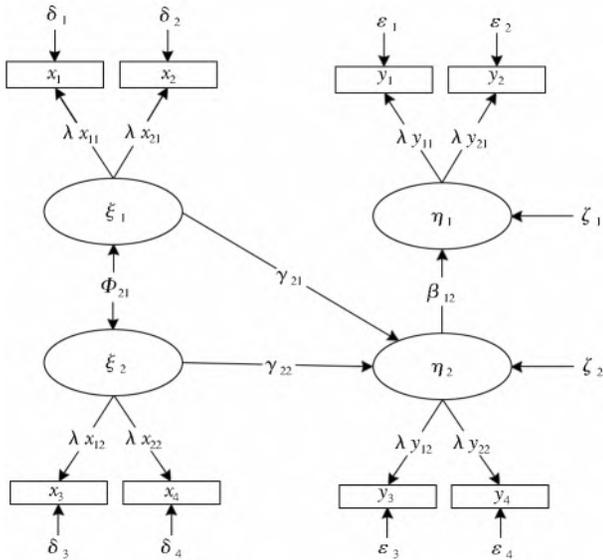


图1 SEM模型参数

Fig. 1 SEM model parameters

表1 SEM模型参数的代表意义^[16]

Tab. 1 Representative significance of the SEM model parameters^[16]

| 符号 | 代表意义 |
|--------------------|-------------------------|
| 结构模型矩阵 β | 内生潜变量被内生潜变量解释的回归矩阵 |
| γ | 内生潜变量被外源潜变量解释的回归矩阵 |
| λ_x | 外源观察变量被外源潜变量解释的回归矩阵 |
| 测量模型矩阵 λ_y | 内生观察变量被内生潜变量解释的回归矩阵 |
| ϕ | 外源潜变量协方差矩阵 |
| ζ | 内生潜变量被外源潜变量解释的误差项协方差矩阵 |
| 残差矩阵 δ | 外源观察变量被外源潜变量解释的误差项协方差矩阵 |
| ϵ | 内生潜变量解释的误差项协方差矩阵 |

通过式(4)、(5)可逐一求得各测量变量、潜变量的方差与配对协方差,进而得到包含各参数方差、协方差的导出矩阵。值得注意的是,矩阵中的每一个参数都是由SEM模型参数估计推导得出的,并非实际观测得到的数值。导出矩阵的参数估计可以采用二阶段最小方法(TSLS)、极大似然法(ML)等方法进行参数估计。SEM模型计算程序见图2。

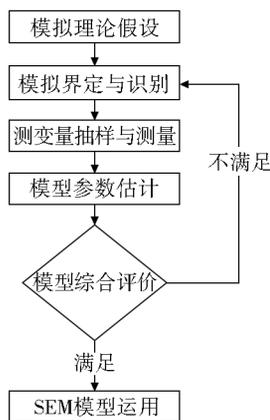


图2 SEM模型计算流程

Fig. 2 SEM model calculation flowchart

2.1.2 SEM模型影响因素贡献率的计算

假设*i*为直接影响再生水开发利用的潜变量,*j*为通过潜变量*i*间接影响再生水开发利用的潜变量,则结构方程模型中潜变量对再生水开发利用贡献的计算公式^[18]为

$$P_{ij} = \frac{|X_i Y_{ij}|}{\sum_{i=1, j=1} |X_i Y_{ij}|} \times 100\% \quad (6)$$

式中: P_{ij} 为潜变量对再生水开发利用的贡献率; X_i 为对再生水开发利用的直接影响作用系数; Y_{ij} 为通过潜变量*j*影响潜变量*i*的直接作用系数; $X_i Y_{ij}$ 为潜变量*j*通过潜变量*i*影响再生水开发利用的作用系数。

2.2 再生水开发利用影响因素作用机制

再生水开发利用水平受自身资源特性、区域缺水程度、气候变化、需水强度等驱动因素以及开发利用工程条件、经济成本、技术水平、公众接受程度等约束因素的共同影响。因此从驱动和约束2个方面对再生水开发利用潜力影响因素进行分析,综合考虑区域水资源禀赋条件、水源特性、常规水资源稀缺程度、生态环境脆弱状态、开发利用现状、经济社会条件和配套工程完备程度等要素,建立基于供需双侧协调交互的再生水开发利用非递归结构作用机制框架。

2.2.1 供给-需求作用机制

再生水开发利用受供给-需求协同匹配、共同驱动。供给侧驱动是从供给方角度考虑,包含与再生水生产、利用相关的“上游”供应,具体指再生水水源供给、生产设施供给、人力资源供给、激励政策供给等方面。需求侧驱动是从需求方角度考虑,包含所有再生水开发利用的“下游”用户,具体指再生水用于工业回用、生态环境补给、城市杂用、农业灌溉等方面。供给侧和需求侧共同构成再生水开发利用产业的完整供应链,其间也体现出供需双侧的耦合性和子系统间互反关系与反馈环路等。因此将驱动因素划分为供给因素与需求因素两部分,并通过建立供需双侧非递归结构模型,反映两系统间协调交互的动态关联关系。

2.2.2 供给-约束作用机制

再生水供给-约束侧重于反映约束因素对再生水供给造成的影响,具有单向作用,具体指约束因素中的非市场性约束对再生水供给数量、供给价格或供给主体等方面造成的约束性限额或准入性限制,使得再生水供给成本上升,导致再生水有效供给减少或无法形成新的有效供给的现象。

再生水供给-约束具体可分为直接供给-约束与间接供给-约束两类,其中:直接供给-约束包括再生

水开发利用行政管理体制不健全、激励政策滞后等行政方面的约束;间接供给-约束包括再生水配套工程建设不完善、水处理技术落后等原因造成的再生水高处理成本、高融资成本等成本方面的约束。本文为体现再生水开发利用中供给-约束作用的影响,刻画出一条再生水供给侧受约束因素影响的路径(图 3)。

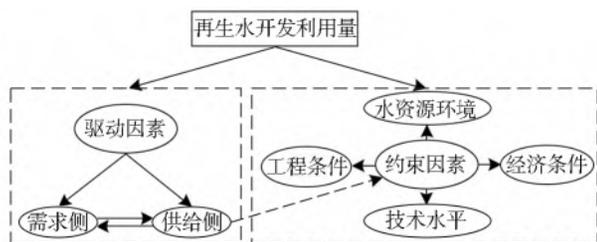


图 3 再生水开发利用影响因素非递归结构作用机制框架

Fig. 3 Framework of the mechanism of non-recursive structure influencing factors in the exploitation and utilization of reclaimed water

2.2.3 约束机制中的主要约束因素

从既有研究来看,常见能反映再生水开发利用情况的约束因素包括:

(1)工程条件约束。再生水开发利用受到水源特性与现有水利设施的影响和限制,强化再生水厂处理设施建设及配套管网建设是推动再生水开发利用的关键^[19]。

(2)经济条件约束。在国民经济层次中,再生水开发利用项目作为一种公共投资,应综合考虑当地经济发展水平、再生水处理设施与主体工程成本等方面因素^[18]。

(3)技术水平约束。再生水处理技术的发展对于再生水开发利用的普及至关重要^[20],随着再生水厂深度处理技术由 20 世纪 80 年代的简单生物曝气处理向超滤-反渗透、超磁分离和膜生物反应器等技术的发展,再生水处理效率得以极大提升。

(4)水资源环境约束。再生水开发利用对现有水资源环境将产生一定影响,具体体现在水量、水质两方面^[21-22]。水量上,再生水资源作为城市“第二水源”,原污水处理厂尾水被深度处理为“下游”用户所需水质,随着再生水利用规模的增加,自然水循环中的水量将可能减少,从而对水资源环境产生不利影响^[23];水质上,随着《城市污水再生利用景观环境用水水质》(GB/T 18921—2019)和《城市污水再生利用地下水回灌水质》(GB/T 19772—2005)等国家标准的颁布与更新,对用于补给自然环境的再生水水质提出了更为严格的要求,有利于水资源环境的改善。但目前再生水利用风险管控技术较为薄弱,不合理开发利用对水资源环境造成的风险依旧较大。

2.2.4 再生水开发利用影响因素作用机制框架

基于上述供给-需求间非递归结构作用机制以及供给-约束间作用机制分析,综合考虑再生水开发利用工程条件、经济条件、技术水平、水资源环境等约束因素,构建再生水开发利用影响因素非递归结构作用机制框架,见图 3。

2.3 测量变量的选取

2.3.1 驱动因素测量变量的选取

(1)供给侧。为研究供给侧对再生水开发利用的影响,选取水资源总量、人均水资源量、污水排放量和水处理业就业人员数等 4 项指标。其中:水资源总量与人均水资源量代表了当地水资源禀赋条件^[24],反映出当地水资源对再生水水源的潜在补给能力;由于再生水厂进水水源多为污水处理厂处理后的尾水^[25],因此污水处理厂的污水处理量对于保证再生水供水水源的稳定性也具有重要意义;水处理业就业人员数反映了再生水资源的市场化程度,可综合体现再生水开发利用政策激励程度与市场参与程度。

(2)需求侧。提高再生水资源的开发利用率作为“以水定城”要求的内在体现,意味着再生水开发利用与城市化发展密切相关,也是对未来新型城市化发展的必然要求。因此,需求侧驱动指标选取城区面积、城市人口密度指标,从城区面积、城市人口 2 个维度较为综合地反映城市化进程的发展^[26],体现城市化发展对再生水开发利用的需求。目前国内尚未统计再生水各领域利用量,研究^[27]表明:再生水在生产运营、公共服务、居民生活和生态环境等领域中将发挥愈加重要的作用,并且再生水利用量与各领域用水量之间的相关性呈逐年显著性递增趋势。因此,添加各领域用水指标作为再生水开发利用需求驱动指标。

2.3.2 约束因素测量变量的选取

(1)工程条件。综合考虑再生水水源水量及水质条件、配套管网体系完备程度等方面因素,选取城市污水日处理能力、建成区供水管道密度、建成区排水管道密度、具备二级和三级污水处理能力污水处理厂数量、污水处理率、污水处理总量以及供水综合生产能力等 7 项指标作为反映再生水开发利用工程条件约束的指标集。

(2)经济条件。选取地区生产总值、人均地区生产总值指数、工业污染治理废水投资完成情况、污水处理设施建设固定资产投资和再生水处理设施建设固定资产投资等 5 项指标作为反映再生水开发利用

经济条件约束的指标集。

(3)技术水平。考虑处理工艺技术和利用技术措施等方面的因素,选取水处理业专利授权数作为综合反映再生水开发利用技术水平约束的指标。

(4)水资源环境。选取年平均降水量、年平均蒸发量、地表水资源量、地下水资源量、劣V类河长百分比和水资源开发利用率等6项指标作为反映再生水开发利用水资源环境约束的指标集。

基于上述再生水开发利用驱动-约束影响因素分析,结合影响因素非递归结构作用机制框架,选取驱动因素、约束因素等2项不可直接被测量的变量作为结构方程模型的I级潜变量,选取供给侧、需求侧、工程条件等6项不可直接被测量的变量作为II级潜变量,针对各II级潜变量选取测量变量,构建测量模型见表2,结合非递归结构作用机制框架,最终建立完整的再生水开发利用结构方程模型,见图4。

表2 再生水开发利用测量模型

Tab.2 Measurement model for reclaimed water development

| I级潜变量 | II级潜变量 | 测量变量 | 文献 | I级潜变量 | II级潜变量 | 测量变量 | 文献 |
|----------------------------------|--------|------------------------------|------|------------|--------------------|---|------|
| 驱动因素 | 供给侧 | 水资源总量/亿 m ³ | [28] | 约束因素 | 工程条件 | 污水处理厂(二、三级处理)/座 | [29] |
| | | 人均水资源量/m ³ | [28] | | | 污水处理率/% | [29] |
| | | 污水排放量/亿 m ³ | [29] | | | 污水处理总量/万 m ³ | [29] |
| | | 水处理业就业人员数/人 | [30] | | | 供水综合生产能力/(万 m ³ ·d ⁻¹) | [30] |
| | 需求侧 | 城区面积/km ² | [29] | | | 地区生产总值/亿元 | [30] |
| | | 城市人口密度/(人·km ⁻²) | [29] | | | 人均地区生产总值指数 | [30] |
| | | 用水总量/亿 m ³ | [28] | | 经济条件 | 工业污染治理废水投资完成情况/万元 | [30] |
| | | 农业用水情况/亿 m ³ | [28] | | | 污水处理设施建设固定资产投资/万元 | [29] |
| | | 工业用水情况/亿 m ³ | [28] | | 再生水处理设施建设固定资产投资/万元 | [29] | |
| | | 生活用水情况/亿 m ³ | [28] | | 技术水平 | 水处理业专利授权数/件 | [30] |
| | | 生态用水情况/亿 m ³ | [28] | | | 年平均降水量/mm | [28] |
| | | 人均用水量/L | [28] | | 水资源环境 | 年平均蒸发量/mm | [28] |
| | | 生产用水/亿 m ³ | [28] | | | 地表水资源量/亿 m ³ | [28] |
| | | 约束因素 | 工程条件 | | | 城市污水日处理能力/万 m ³ | [29] |
| 建成区供水管道密度/(km·km ⁻²) | [29] | | | 劣V类河长百分比/% | | [28] | |
| 建成区排水管道密度/(km·km ⁻²) | [29] | | | 水资源开发利用率/% | | [29] | |
| | | | | | | | |

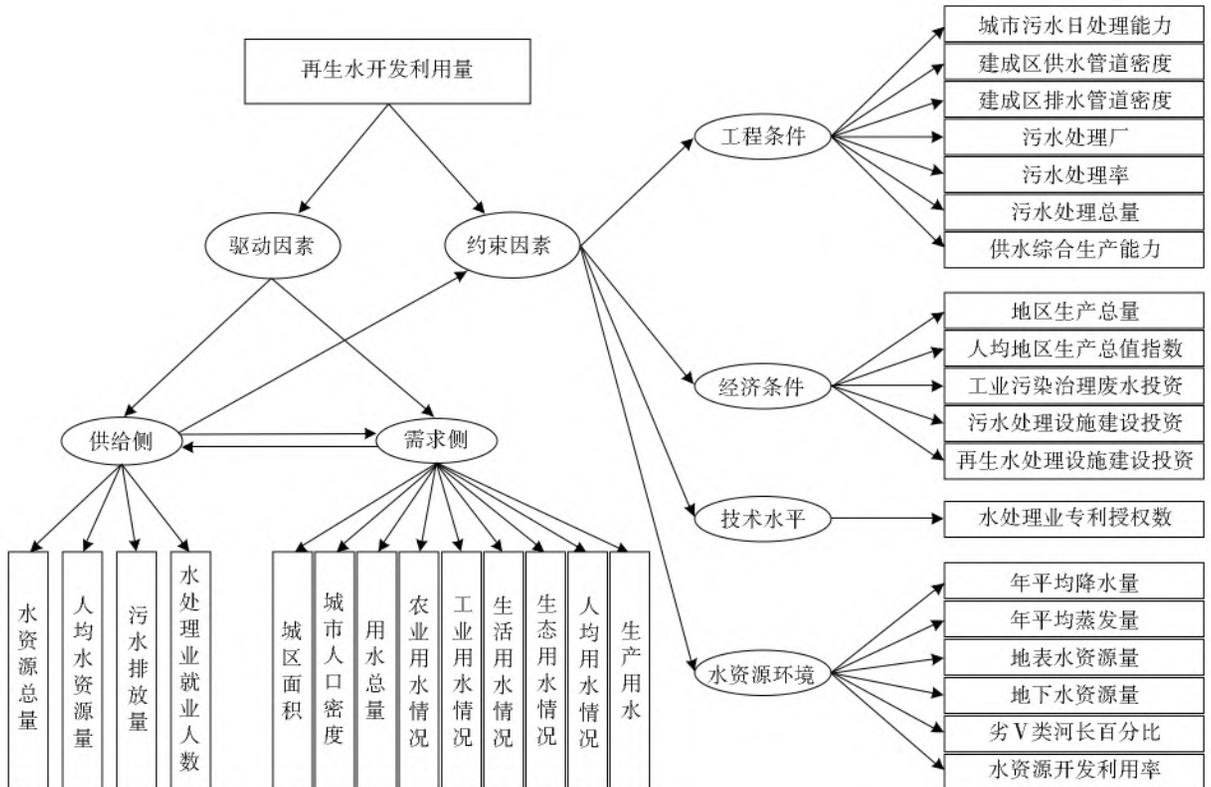


图4 再生水开发利用影响因素结构方程模型

Fig.4 Structural equation model of influencing factors for reclaimed water development

3 模型拟合结果分析

为考虑再生水开发利用影响因素的空间异质性,对胡焕庸线东西两侧地区分别构建结构方程模型,并以 2017 年全国节约用水办公室组织各省(自治区、直辖市)、各计划单列市和新疆生产建设兵团统计的 2015—2017 年再生水开发利用量数据、2011—2018 年全国非常规水资源开发利用量数据^[28]以及 2011—2018 年各省(自治区、直辖市)的 32 项测量变量数据为样本数据^[29-30],将其标准化处理后导入 AMOS 软件,采用极大似然法对东西两侧地区结构方程模型分别进行参数估计,测算模型因素载荷系数。

3.1 模型拟合效果

针对模型拟合效果,选取常见结构方程模型评鉴指数:卡方检验、适合度指数、替代性指数、残差分析对模型进行综合评价见表 3。由表 3 可知:模型卡方检验值 χ^2/df 位于合理区间,表明测量模型适配度高,解释力能强,且未存在过度适配问题^[31];拟合指数与替代指数在拟合标准范围内,表示模型可以解释测量数据方差与协方差的比例较大,拟合度高^[32];残差分析均方根指数未达到临界阈值,反映模型整体残差小^[33]。综合各项评鉴指标,结果表明构建的非递归结构方程模型符合检验标准,拟合效

果较好。

表 3 结构方程模型拟合评鉴指数计算结果

Tab. 3 Table of results of the evaluation index of structural equation model fitting

| 结果类型 | 卡方检验 | 拟合指数 | | 替代指数 | | 残差分析 |
|------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | χ^2/df | GFI | NFI | CFI | RMSEA | SRMR |
| 标准值 | 1~3 | >0.90 | >0.90 | >0.95 | <0.08 | <0.08 |
| 拟合值 | 1.236 | 0.914 | 0.902 | 0.987 | 0.063 | 0.031 |

3.2 再生水开发利用影响因素贡献程度

3.2.1 胡焕庸线东侧地区再生水开发利用影响因素贡献程度

胡焕庸线东侧地区再生水开发利用影响因素之间相互作用关系及作用强度见图 5。

由图 5 可知:胡焕庸线东侧地区再生水开发利用对驱动因素潜变量的因素载荷为 0.79,表示驱动因素潜变量对再生水开发利用的解释水平可达 62.4%;约束因素潜变量因素载荷为 0.36,代表其解释水平约为 13.0%;剩余 24.6%的再生水开发利用方差解释量为无法被完全解释的估计误差,可能与测量变量测量误差或其他潜变量相关。考虑到估计误差与驱动因素潜变量、约束因素潜变量之间的内关联误差系数($\Phi_1 = 0.48, \Phi_2 = 0.62$)较小,相关性不强,因此认为胡焕庸线东侧地区可能存在其他能够解释再生水开发利用情况的潜变量。

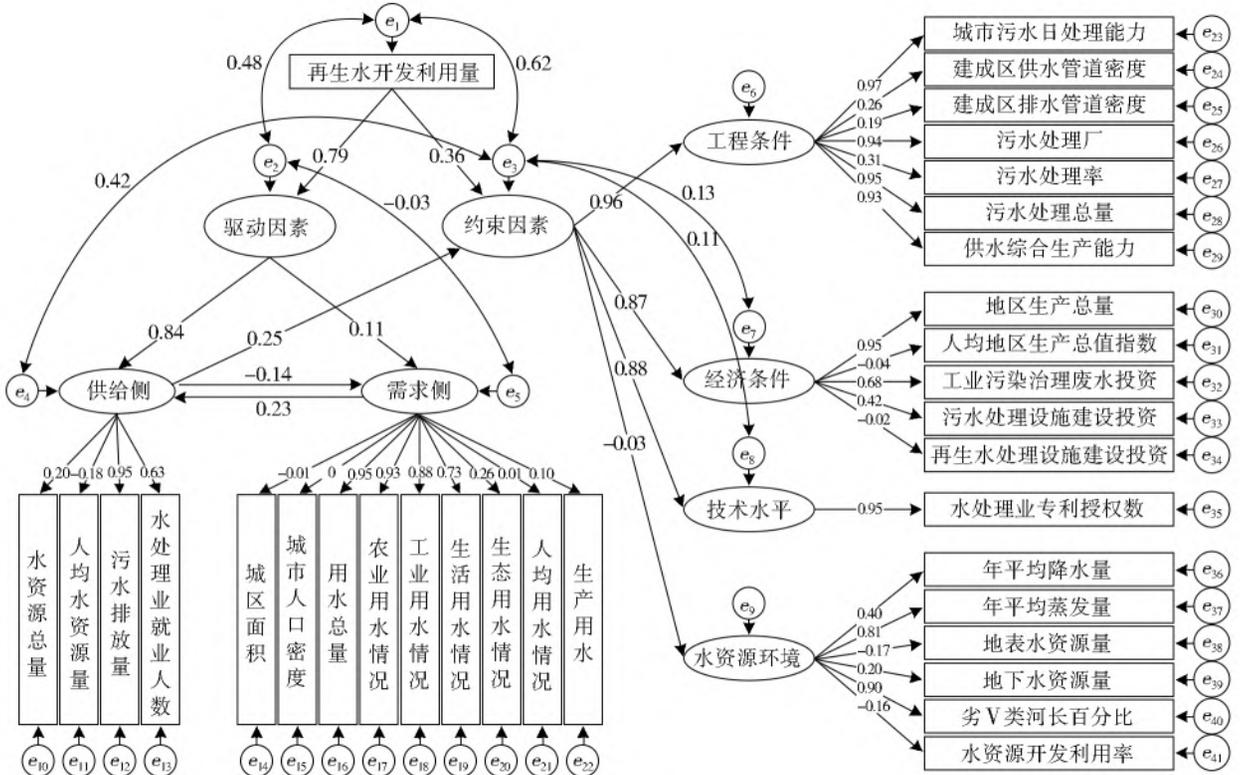


图 5 胡焕庸线东侧地区再生水开发利用影响因素结构方程模型通径图
Fig. 5 Development and utilization of regenerative water in the eastern region of Hu Line

基于约束因素潜变量对II级潜变量因素载荷系数分析,发现约束因素潜变量受工程条件、经济条件、技术水平约束影响较大,因素载荷均在 0.85 以上,与此相左,约束因素潜变量受水资源环境潜变量影响较弱($\beta = -0.03$),因此认为胡焕庸线东侧地区水资源环境对再生水开发利用约束作用较小,而再生水配套工程建设、污水处理成本等方面的约束影响则较为强烈。

通过分析驱动因素潜变量与供给侧潜变量、需求侧潜变量之间的结构模型,比较潜变量间的关联强度,发现供给侧潜变量对驱动因素潜变量影响强度较强($\beta = 0.79$),解释水平达到 70.6%。同时,通过需求侧潜变量与供给侧潜变量之间方向性关联分析,发现需求侧潜变量对供给侧潜变量因素载荷为负($\beta = -0.14$),表明需求侧潜变量对供给侧潜变量影响较少,更多地是受到供给侧潜变量影响。因此认为东侧地区再生水供给能力水平对开发利用的驱动效应更为显著,为主导因子。

为进一步辨析供给双侧潜变量以及工程条件、经济条件、技术水平、水资源环境潜变量对再生水开发利用的影响程度,结合各潜变量间的直接、间接关联强度,定量测算了各潜变量对再生水开发利用影响程度的贡献率见表 4。

由表 4 可知,胡焕庸线东侧地区再生水开发利用受驱动因素潜变量影响较大,其影响效力约为约束因素潜变量的 2 倍,表明东侧地区再生水开发利用驱动推进大于约束限制,具备高水平开发潜质。

再生水开发利用结构模型中存在供给约束,导致供给侧潜变量对于再生水开发利用兼有直接影响与间接影响,总贡献率达 63.6%。需求侧潜变量影响程度贡献率仅为 6.2%,客观反映出东侧地区再生水供给能力较强,但再生水利用需求不强的现状,与东侧地区水资源禀赋条件相对较好、再生水利用风险不明等因素相关。针对约束因素潜变量影响程度贡献率分析,发现再生水配套管网等工程条件的不完善成为主导制约因子,影响程度贡献率达到 11.8%;地区经济条件与污水处理技术水平为次要制约因子,贡献率不足 10.0%;水资源环境潜变量对再生水开发利用制约效力微弱,影响程度仅为 0.3%。

表 4 胡焕庸线东侧地区不同潜变量对再生水开发利用影响程度贡献率

| 目标层 | I级潜变量 | 贡献率 P/% | II级潜变量 | 贡献率 P/% |
|---------|-------|---------|--------|---------|
| 再生水开发利用 | 驱动因素 | 68.7 | 供给侧 | 63.6 |
| | | | 需求侧 | 5.2 |
| | 约束因素 | 31.3 | 工程条件 | 11.8 |
| | | | 经济条件 | 9.7 |
| | | | 技术水平 | 9.5 |
| | | | 水资源环境 | 0.3 |

3.2.2 胡焕庸线西侧地区再生水开发利用影响因素贡献程度

胡焕庸线西侧地区再生水开发利用影响因素之间相互作用关系及作用强度见图 6。

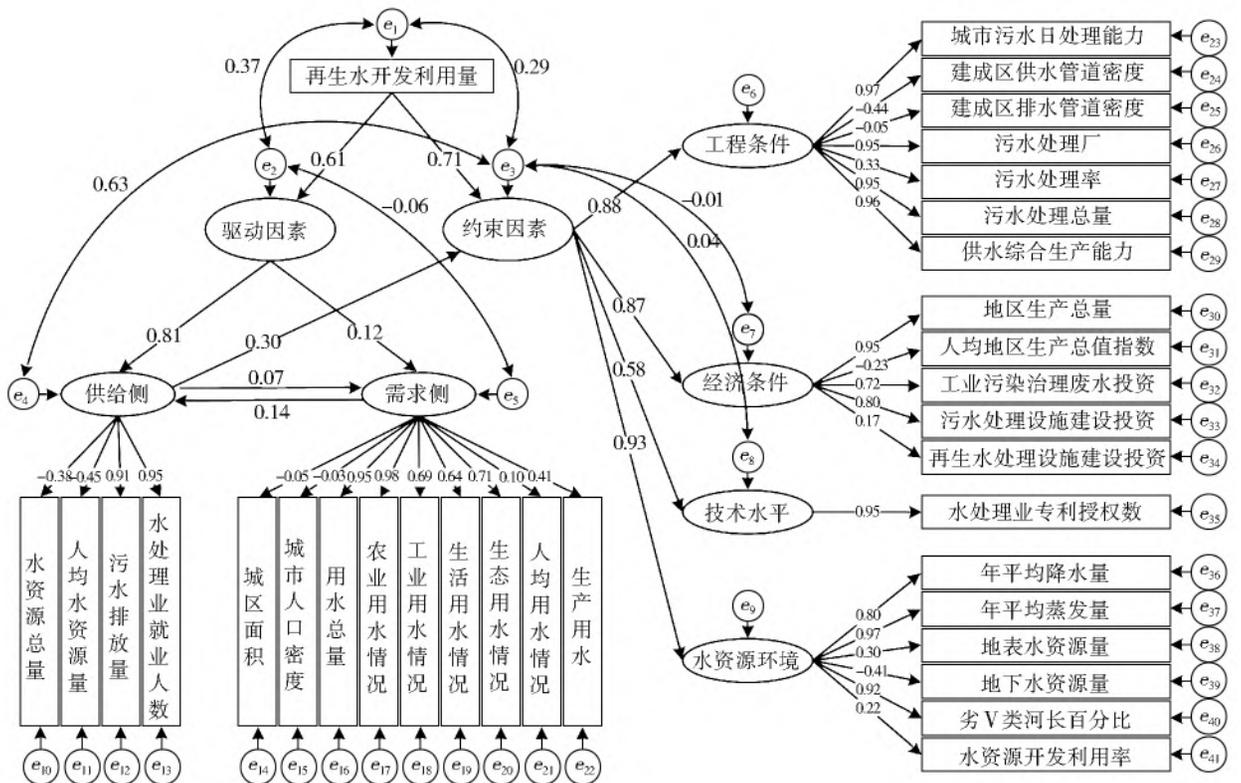


图 6 胡焕庸线西侧地区再生水开发利用影响因素结构方程模型通路图
Fig. 6 Development and utilization of reclaimed water in the west area of Hu Line

由图 6 可知:胡焕庸线西侧地区驱动因素潜变量因素载荷为 0.61,表示其对再生水开发利用的解释水平为 37.2%;约束因素潜变量因素载荷为 0.71,代表其解释水平约为 50.4%;剩余 12.4%的再生水开发利用方差解释量为无法被完全解释的估计残差。

针对约束因素潜变量对 II 级潜变量的因素载荷系数展开分析,发现约束因素潜变量受工程条件、经济条件、水资源环境约束影响较大($\beta=0.85$),技术水平潜变量对约束因素潜变量影响较弱($\beta=0.58 < 0.71$),其解释水平未达到理想质量阈值(50%)^[34],表明胡焕庸线西侧地区再生水处理配套工程建设、地方财政支持力度相较污水处理技术水平,对于再生水开发利用的制约性限制更为强烈。

通过分析驱动因素潜变量与供给侧潜变量、需求侧潜变量结构模型中的关联强度,发现西侧地区供给侧潜变量因素载荷最大($\beta=0.81$),再生水供给能力的驱动效力较需求驱动更为剧烈。胡焕庸线西侧地区各潜变量对再生水开发利用影响程度贡献率见表 5。

表 5 胡焕庸线西侧地区不同潜变量对再生水开发利用的贡献率

Tab. 5 Contribution of different latent variables to the development and utilization of reclaimed water in the west of Hu Line

| 目标层 | I 级潜变量 | 贡献率 P/% | II 级潜变量 | 贡献率 P/% |
|-----------------|--------|---------|---------|---------|
| 再生水 开发 利用 | 驱动因素 | 42.5 | 供给侧 | 36.4 |
| | | | 需求侧 | 6.1 |
| | 约束因素 | 57.5 | 工程条件 | 16.3 |
| | | | 经济条件 | 15.9 |
| | | | 技术水平 | 7.2 |
| | | | 水资源环境 | 18.1 |

由表 5 可知:西侧地区驱动因素潜变量与约束因素潜变量对再生水开发利用影响效力相近,但值得注意的是,西侧地区再生水开发利用约束限制高于驱动推进程度($\Delta P=15.0\%$),导致再生水开发利用推动能力不足;驱动因素潜变量中供给侧潜变量对于西侧地区再生水开发利用影响程度贡献率最大($P=36.4\%$),但仍远低于东侧地区的 63.6%;同时,受限于约束因素潜变量影响及供给约束结构关系的存在,需求侧潜变量影响程度仅为 6.1%,驱动效应微弱;约束因素潜变量中 4 项 2 级潜变量对再生水开发利用影响程度相对均衡,贡献率为 7.2%~18.1%,其中区域水资源环境胁迫、再生水工程建设不完善、地区经济发展水平偏低对再生水开发利用约束影响较大($P=15.9\% \sim 18.1\%$),为主导

制约因子,污水处理技术水平为次要约束,贡献率为 7.2%。

4 结 论

本文从驱动因素和约束因素 2 个方面对再生水开发利用影响因素进行了分析,同时考虑了再生水开发利用影响因素空间异质性,以胡焕庸线为分界线,对东西两侧地区分别构建了非递归结构作用机制框架,定量分析了再生水开发利用规模与驱动、约束的关系和响应机制。得出如下主要结论。

(1)胡焕庸线东侧地区再生水开发利用驱动推进大于约束限制,具备高水平开发潜质。供给侧潜变量对于再生水开发利用影响程度最大,贡献率达 63.6%,需求侧潜变量影响程度贡献率仅为 6.2%,客观反映出东侧地区虽然再生水供给能力较强,但再生水利用需求不强现状。再生水配套管网等工程条件的不完善为东侧地区主导制约因子,影响程度贡献率为 11.8%,地区经济条件与污水处理技术水平为次要制约因子,贡献率均不足 10.0%。

(2)胡焕庸线西侧地区再生水开发利用约束限制高于驱动推进程度,开发利用推动能力不足。供给侧潜变量对西侧地区再生水开发利用影响程度最大,贡献率为 36.4%,需求侧潜变量影响程度仅为 6.1%,整体驱动效力不足。区域水资源环境胁迫、再生水工程建设不完善、地区经济发展水平偏低对再生水开发利用约束影响程度较大,为主导制约因子,影响程度贡献率为 15.9%~18.1%,污水处理技术水平为次要制约因子,贡献率为 7.2%。

参考文献(References):

- [1] 马东春,唐摇影,于宗绪.北京市再生水利用发展对策研究[J].西北大学学报(自然科学版),2020(5):779-786. (MA D C, TANG Y Y, YU Z X. The countermeasures for the development of reclaimed water utilization in Beijing[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2020(5): 779-786. (in Chinese)) DOI: 10.16152/j.cnki.xdxzbzr.2020-05-011.
- [2] 刘晓君,杨兴,付汉良.再生水研究的发展态势与研究热点分析:基于 CiteSpace 的图谱量化研究[J].干旱区资源与环境,2019,33(4):68-75. (LIU X J, YANG X, FU H L. Development trend and research hotspots of reclaimed water research: Visualize quantitative research based on CiteSpace[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(4): 68-

75. (in Chinese)) DOI:10.13448/j.cnki.jalre.2019.108.
- [3] 李昂臻,龚道孝,王丽红,等. 关于我国城市节水激励政策的思考[J]. 给水排水,2021,57(1):28-32. (LI A Z, GONG D X, WANG L H, et al. Thoughts on incentive mechanism of water-saving cities in China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(1): 28-32. (in Chinese)) DOI:10.13789/j.cnki.wwel964.2021.01.006.
- [4] 胡洪营. 聚焦矛盾 精准施策 全面提升污水资源化利用水平[J]. 给水排水,2021,57(2):1-3. (HU H Y, Focusing on key issues and precise measures to comprehensively upgrade wastewater utilization [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(2): 1-3. (in Chinese)) DOI:10.13789/j.cnki.wwel964.2021.02.001.
- [5] 张蕾,付美安,张强. 北京市污水处理工作考核政策与建议[J]. 人民黄河,2020,42(S2):105-106,108. (ZHANG L, FU M A, ZHANG Q. Assessment policy and suggestions on sewage treatment work in Beijing [J]. Yellow River, 2020, 42(S2): 105-106, 108. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2020.S2.042.
- [6] 王丰,王红瑞,来文立,等. 再生水利用激励机制研究[J/OL]. 水资源保护:1-10[2021-09-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20210219.0928.002.html>. (WANG F, WANG H R, LAI W L, et al. Research on incentive mechanism of reclaimed water utilization[J/OL]. Water Resources Protection; 1-10 [2021-09-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20210219.0928.002.html>. (in Chinese))
- [7] 董战峰,龙凤,田雪,等. 水环境资源价格机制改革助推长江流域高质量发展[J]. 环境保护,2021,49(Z1):58-60. (DONG Z F, LONG F, TIAN X, et al. Reform of water environment pricing mechanism to promote the high quality development of the Yangtze River basin [J]. Environmental Protection, 2021, 49 (Z1): 58-60. (in Chinese)) DOI:10.14026/j.cnki.0253-9705.2021.z1.010.
- [8] 何力,刘丹,黄薇. 基于系统动力学的节水型城市激励机制研究[J]. 长江科学院院报,2010,27(6):10-13,22. (HE L, LIU D, HUANG W. Research on incentive mechanism of water-saving cities based on system dynamics[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(6): 10-13, 22. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1001-5485.2010.06.003.
- [9] 陈莹,赵辉,聂汉江,等. 再生水定价的形成机制分析[J]. 水利经济,2015,33(4):50-52. (CHEN Y, ZHAO H, NIE H J, et al. Price-formation mechanism of reclaimed water[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2015, 33(4): 50-52. (in Chinese)) DOI:10.3880/j.issn.1003-9511.2015.04.013.
- [10] WU J, MOHAMED R, WANG Z. Agent-based simulation of the spatial evolution of the historical population in China[J]. Journal of Historical Geography, 2011, 37(1): 12-21. DOI:10.1016/j.jhg.2010.03.006.
- [11] LIAO X W, ZHAO X, JIANG Y, et al. Water footprint of the energy sector in China's two megalopolises[J]. Ecological Modelling, 2018, 391: 9-15. DOI:10.1016/j.ecolmodel.2018.10.009.
- [12] 张梅,黄贤金,揣小伟,等. 胡焕庸线两侧城镇建设用地变化及其碳排放差异[J]. 资源科学,2019,41(7):1262-1273. (ZHANG M, HUANG X J, CHUAI X W, et al. Urban construction lands and their carbon emission differences in east and west of the Hu Huanyong Line[J]. Resources Science, 2019, 41(7): 1262-1273. (in Chinese)) DOI:10.18402/resci.2019.07.07.
- [13] 陆大道,王铮,封志明,等. 关于“胡焕庸线能否突破”的学术争鸣[J]. 地理研究,2016,35(5):805-824. (LU D D, WANG Z, FENG Z M, et al. Academic debates on Hu Huanyong population line[J]. Geographical Research, 2016, 35(5): 805-824. (in Chinese)) DOI:10.11821/dlyj201605001.
- [14] 张锦宗,梁进社,朱瑜馨,等. 土地资源和 GDP 对中国人口分布的影响机理分析[J]. 地理科学,2017,37(7):1006-1013. (ZHANG J Z, LIANG J S, ZHU Y X, et al. Land and GDP's function on population distribution in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(7): 1006-1013. (in Chinese)) DOI:CNKI: SUN:DLKX.0.2017-07-005.
- [15] PREACHAER K J, ZYPHUR M J, ZHANG Z. A general multilevel SEM framework for assessing multilevel mediation[J]. Psychological Methods, 2010, 15(3):209-233. DOI:10.1037/a0020141.
- [16] 方杰,张敏强,邱皓政. 中介效应的检验方法和效果量测量:回顾与展望[J]. 心理发展与教育,2012,28(1):105-111. (FANG J, ZHANG M Q, QIU H Z. Mediation analysis and effect size measurement: Retrospect and prospect[J]. Psychological Development and Education, 2012, 28(1): 105-111. (in Chinese)) DOI:10.16187/j.cnki.issn1001-4918.2012.01.015.
- [17] HAYS W L. Statistics[M]. 4th ed. Fort Worth, TX: Holt, Reinhart, & Winston, 1988.
- [18] 崔丹,陈岩,马冰然,等. 土地利用/景观格局对水环境质量的影响[J]. 水科学进展,2019,30(3):423-433. (CUI D, CHEN Y, MA B R, et al. Effects of land use/landscape patterns on the water quality[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(3): 423-433. (in Chinese)) DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2019.03.012.

- [19] 刘广奇,赵志伟,白桦. 基于复杂网络理论的城市供水系统规划优化[J]. 中国给水排水, 2020, 36(13): 113-118. (LIU G Q, ZHAO Z W, BAI H. Optimization of urban water system planning based on complex network theory [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(13): 113-118. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; GSPS. 0. 2020-13-022.
- [20] 高旭阔,刘奇. 再生水项目国民经济评价体系研究[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(4): 229-236. (GAO X K, LIU Q. National economic evaluation of reclaimed water project[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(4): 229-236. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; FJKS. 0. 2019-04-034.
- [21] 胡洪营,吴乾元,吴光学,等. 污水特质(水征)评价及其在污水再生处理工艺研究中的应用[J]. 环境科学研究, 2019, 32(5): 725-733. (HU H Y, WU Q Y, WU G X, et al. Evaluation of water feature and its application in the wastewater reclamation[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(5): 725-733. (in Chinese)) DOI: 10. 18402/resci. 2019. 07. 07.
- [22] 张瑞,刘操,孙德智,等. 北京地区再生水补给型河湖水质改善工程案例分析与问题诊断[J]. 环境科学研究, 2016, 29(12): 1872-1881. (ZHANG R, LIU C, SUN D Z, et al. Water quality improvement engineering for urban rivers and lakes supplied by reclaimed water in Beijing: case analysis and problem diagnosis [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(12): 1872-1881. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; HJKX. 0. 2019-05-001.
- [23] 廖安然,宋献方,张应华,等. 2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5440-5450. (LIAO A R, SONG X F, ZHANG Y H, et al. Impact of maximum precipitation in 2017 on the runoff component of reclaimed water-intaking river[J]. Environmental Science, 2018, 39(12): 5440-5450. (in Chinese)) DOI: 10. 13227/j. hjkx. 201804037.
- [24] 徐依婷,穆月英. 粮食生产水足迹动态演变及分解效应[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2020, 19(3): 70-83. (XU Y T, MU Y Y. Dynamic change and decomposition effects of water footprint in grain production[J]. Journal of South China Agricultural University (Social Science Edition), 2020, 19(3): 70-83. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; HNNA. 0. 2020-03-007.
- [25] 刘健,程丽华,王明月,等. 不同水源的再生水中溶解性有机物的特性[J]. 中国给水排水, 2019, 35(21): 92-96. (LIU J, CHENG L H, WANG M Y, et al. Characteristic of dissolved organic matter of reclaimed water from different sources [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(21): 92-96. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; GSPS. 0. 2019-21-022.
- [26] BAO C, HE D M. Scenario modeling of urbanization development and water scarcity based on system dynamics: a case study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(20): 3834-3852. DOI: 10. 3390/ijer-ph16203834.
- [27] 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: CNKI; SUN; JSJU. 0. 2019-10-017.
- [28] 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/>, 2021-04-17. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China water resources bulletin[EB/OL] <http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/>, 2021-04-17. (in Chinese))
- [29] 住房和城乡建设部. 建设和统计年鉴[EB/OL]. <http://www.mohurd.gov.cn/xytj/tjzljxsxytjgb/jstjnj/>, 2021-04-17. (Ministry of Housing and Urban Rural Development. Construction and statistics yearbook [EB/OL] <http://www.mohurd.gov.cn/xytj/tjzljxsxytjgb/jstjnj/>, 2021-04-17. (in Chinese))
- [30] 国家统计局. 中国统计年鉴[EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>, 2021-04-17. (National Bureau of Statistics. China statistical yearbook[EB/OL] <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>, 2021-04-17. (in Chinese))
- [31] BENTLER P, BONETT M, et al. Significance tests and goodness of fit in the analysis of covariance structures. [J]. Psychological Bulletin, 1980, 88(3): 588-606. DOI: 10. 1037/0033-2909. 88. 3. 588.
- [32] Browne M W, Cudeck R. Alternative Ways of Assessing Model Fit[J]. Sociological Methods & Research, 1992, 21(2): 230-258. DOI: 10. 1177/0049124192021002005.
- [33] HU L, BENTLER P M. Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives [J]. Structural Equation Modeling, 1999, 6(1): 1-55. DOI: 10. 1080/10705519909540118.
- [34] JOSEPH F H, WILLIAM C B, BARRY J B, et al. Multivariate data analysis[M]. 7th ed. N J: Prentice-Hall, 2010.

Influencing factors and mechanism of exploitation and utilization of reclaimed water:**Spatial quantitative analysis based on Hu Line**ZHENG Jintao^{1,2}, LIU Jiufu^{1,3}, LIU Xiangwei⁴, MA Tao^{1,3}, DENG Xiyuan^{1,3}, PENG Anbang^{1,3}, LI Xuegang¹(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;*2. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210029, China;*3. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China;*4. *Hydrological and Water Resources Survey Bureau of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000, China)*

Abstract: Under the increasingly severe contradiction between supply and demand of water resources, pressure of water resources shortage has become an urgent problem in China.

Hu Line was taken as the dividing line for the spatial heterogeneity of influencing factors of reclaimed water development and utilization in east and west regions. The structural equation model (SEM) was used to construct the mechanism framework of the driving-constrained non-recursive structure, to describe the conduction path of the influencing factors, and to quantify the contribution degree of the influencing factors.

The factor load of reclaimed water development and utilization on the east side of Hu Line was 0.79, which indicated that the interpretation level of the latent variable of driving factor on reclaimed water development and utilization could reach 62.4%. A load of a latent variable factor of constraint factor was 0.36, which indicated that its interpretation level was about 13.0%. The variance interpretation of the remaining 24.6% reclaimed water development was an estimation error that could not be fully explained. The latent variables of constraint factors were more affected by engineering conditions, economic conditions, and technical level. The load of factors was above 0.85, and the latent variables of constraint factors were less affected by the latent variables of the water resources environment. By analyzing the structural model between the latent variable of driving factor and the latent variable of supply-side, the demand side, and comparing the correlation intensity between latent variables, it was found that the latent variable of supply-side had a strong on the latent variable of a driving factor, and the interpretation level reached to 70.6%. At the same time, through the directional correlation analysis between the demand-side and the supply-side latent variable, it was found that the demand-side latent variable had a negative on the supply-side latent variable, which indicated that the demand-side latent variable had less influence on the supply-side latent variable. The latent variable factor load of driving factors in the west side of Hu Line was 0.61, which indicated that the interpretation level of reclaimed water development and utilization was 37.2%. ; A load of a latent variable factor of constraint factor was 0.71, which indicated that its interpretation level was about 50.4%. The remaining 12.4% of reclaimed water development uses variance interpretation as the estimated residual which could not be fully explained. The factor load coefficient of the latent variable of the constraint factor on the latent variable of class II, and found that the latent variable of the constraint factor was greatly affected by the engineering condition, the economic condition, and the water resources environment constraint, and the latent variable of the technical level had a weak influence on the latent variable of the constraint factor.

The development and utilization of reclaimed water in the east side of Hu Line was greater than the restriction and had high-level development potential. The contribution rate of supply-side latent variables to the development and utilization of reclaimed water was 63.6%, and the contribution rate of demand-side latent variables was only 6.2%, which objectively reflected that a strong supply capacity of reclaimed water in the eastern region, but the demand for reclaimed water was not strong. The imperfection of the engineering conditions such as the supporting pipe network of reclaimed water was the leading constraint factor in the eastern region, and the contribution rate of its influence degree was 11.8%. The regional economic conditions and the level of sewage treatment technology were the secondary constraints, and their contribution rate was less than 10%. The restriction of reclaimed water development and utilization in the west side of Hu Line was higher than that of driving propulsion, and the ability of development and utilization was insufficient. The supply-side latent variable had the greatest influence on the development and utilization of reclaimed water in the west area with contribution rate 36.4%. On the contrary, the influence degree of demand-side latent variable was only 6.1%. The overall driving effect was insufficient. Environmental stress of regional water resources, imperfect construction of reclaimed water engineering facilities, and low level of regional economic development had a great influence on the development and utilization of reclaimed water, which were the leading factor, and the contribution rates of the influence degree were between 15.9% and 18.1%. The technical level of sewage treatment was a secondary constraint factor, and the contribution rate was 7.2%.

Key words: reclaimed water; Hu Line; non-recursive structure; SEM; water resource management