DOI: 10.20103/j.stxb.202211213365
官冬杰,张喻翔,陈明珠,朱康文,周李磊,张艳军.水源供给服务供需流空间不匹配特征识别及优化.生态学报,2024,44(12):5070-5082.
Guan D J, Zhang Y X, Chen M Z, Zhu K W, Zhou L L, Zhang Y J.Identification and optimization of spatial mismatch characteristics of supply and demand flows for water supply services.Acta Ecologica Sinica,2024,44(12):5070-5082.

水源供给服务供需流空间不匹配特征识别及优化

官冬杰[1,*],张喻翔[2],陈明珠[1],朱康文[1],周李磊[1],张艳军[3]
1 重庆交通大学智慧城市学院,重庆　400074
2 中国地质调查局军民融合地质调查中心,成都　610036
3 重庆理工大学管理学院,重庆　400054

摘要:如何识别水源供给服务在自然-人类社会系统中的空间流动过程和匹配特征,对于区域水资源管理和可持续利用具有重要意义。以重庆市为研究区域,基于 InVEST 模型和社会经济发展视角定量评估流域尺度下的水源供给量和需水量,结合水资源安全指数和热点分析构建水源供给服务流模型,揭示水源供给服务供需空间匹配关系,依据水源供给服务流空间属性特征划分供需匹配关系的区域类型,借助地理探测器从自然、社会和生态三个角度讨论影响各区域类型水源供给服务供需匹配关系的影响因素。结果表明:(1) 2000、2010、2020 年重庆市流域水源供给量与需水量均先减少后上升,供需比平均值分别为 1.17、1.08、0.9,整体供需不匹配的问题逐渐得到缓解,但局部仍有供需不匹配现象。空间上中高度赤字区域集中在主城区内,向外辐射为轻度赤字区域,盈余区域分布在东北和东南方向。(2) 2000、2010、2020 年重庆市水源供需比冷、热点范围均在缩小,流域面积分别相对减少了 25.34%、9.2%。水源供给服务流空间上整体呈现出自东北、东南方向向西流动的路径,同时冷点区内部呈边缘向中心流动。(3) 汇流区集中在西北部,经流区位于中部,外流区集中在东南和与东北部。影响汇流区供需匹配关系的主导因素是蒸散发,解释力为 74.08%;影响经流区的主导因素是第三产业 GDP,解释力为 51.44%;外流区各影响因子的解释力均较低。不同影响因子之间蒸散发与其它因素的交互作用显著增强。研究可以为重庆市自然资源的管理与流域生态补偿机制的建立提供科学依据。

关键词:生态系统服务;水源供给;空间匹配;供需关系

Identification and optimization of spatial mismatch characteristics of supply and demand flows for water supply services

GUAN Dongjie[1,*], ZHANG Yuxiang[2], CHEN Minzhu[1], ZHU Kangwen[1], ZHOU Lilei[1], ZHANG Yanjun[3]
1 *School of Smart City, Chongqing Jiaotong University, Chongqing* 400074, *China*
2 *Civil-Military Intergration Center of China Geoloical Survey, Chengdu* 610036, *China*
3 *School of Management, Chongqing University of Technology, Chongqing* 400054, *China*

Abstract: How to identify the spatial flow processes and matching characteristics of water supply services in natural-human social systems is important for regional water resources management and sustainable utilization. Taking Chongqing as the study area, the water supply and water demand at the watershed scale in Chongqing from 2000 to 2020 were quantitatively assessed based on the InVEST model and socio-economic development perspective. Combining the water security index and hotspot analysis to build a water supply service flow model, we reveal the spatial matching relationship between supply and demand of water supply services, and classify the regional types of supply and demand matching relationship based on the spatial attribute characteristics of water supply service flow. On this basis, the factors influencing the matching relationship

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42171298);国家自然科学基金青年科学基金项目(42201333);重庆市自然科学基金创新发展联合基金(2023NSCQ-LZX0181);重庆英才计划"包干制"项目(CQYC20220302420)
收稿日期:2022-11-21;　　**网络出版日期**:2024-04-10
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: guandongjie_2000@163.com

between supply and demand of water supply services for each regional type are discussed from three perspectives: natural, social and ecological with the use of the Geodetector. The results show that (1) From 2000 to 2020, the supply and demand of water in the Chongqing watershed first decreased and then increased, and the average value of the supply-demand ratio was 1.17, 1.08, and 0.9, respectively. Overall supply-demand mismatch gradually easing, but localized mismatch still exists. The areas of medium to high spatial deficit are concentrated within the main urban area, radiating outwards into areas of mild deficit, and the surplus areas are distributed in the north-eastern and south-eastern directions. (2) From 2000 to 2020, the cold and hot spot range of water supply and demand ratios was shrunk in Chongqing, and the watershed area was relatively reduced by 25.34% and 9.2%, respectively. The water supply service flow spatially showed an overall flow path from the northeast and southeast to the west, while the cold spot area presented edge-to-center flow within the area. (3) The confluence area was concentrated in the northwest, the meridian area was located in the middle, and the outflow area was concentrated in the southeast and the northeast. The dominant factor affecting the supply-demand matching relationship in the confluence area is evapotranspiration, with an explanatory power of 74.08%; the dominant factor affecting the meridional area is the tertiary GDP, with an explanatory power of 51.44%; the explanatory power of all influencing factors in the outflow area is low. Interaction of evapotranspiration with other factors was significantly higher among different impact factors. The study can provide a scientific basis for the management of natural resources and the establishment of watershed ecological compensation mechanisms in Chongqing.

Key Words: ecosystem service flow; water supply; spatial matching; supply and demand

生态系统服务是人类从生态系统中直接或间接获得的利益[1]。在高速城镇化、工业化背景下,区域生态环境遭受不同程度的影响,导致许多地区生态系统服务供需失衡、甚至生态赤字[2]。生态系统服务的研究既要关注自然生态环境的供给,也要关注人类经济社会的需求,这两者共同形成了生态系统服务的动态过程[3]。然而由于生态系统服务的供给和需求具有强烈的空间异质性,存在供需空间不匹配的问题[4]。生态系统服务流是生态系统服务从供给区以某种形式和路径流向需求区的过程[5—6]。可见,生态系统服务流是连接供需的重要桥梁和纽带,对生态系统服务的传输路径、流动方向和转化方式具有重要的作用[7]。因此,对生态系统服务流进行定量化研究,明确生态系统服务从供给到需求的流动过程,将是解决供需空间不匹配的重要依据[4]。

自千年生态系统评估报告提出以来,生态系统服务供需关系的研究越来越受到重视[8]。相应的,量化生态系统服务供需关系的方法也逐渐多样化,主要分为以下 5 种方法:指标法、当量因子法、生态模型法、问卷法和经验统计法。(1)指标法,如 Costanza 等[1]对全球 24 项生态系统服务进行评估。现有研究选取指标多针对服务供给方,而对需求指标的研究比较缺乏与零散[9];(2)当量因子法,最早于 1997 年由 Costanza 等[1]提出。谢高地等[10]在此基础上,提出更适合中国的生态服务当量因子表及其在实际应用中的修正公式,该方法输入数据要求少,且容易获取。(3)生态模型法,基于生态过程与机理能较好揭示服务的空间特征,实现了评估动态化、精准化[11]。常见的有如 InVEST、ARIES、SolVES、SWAT、CASA 等模型[12]。目前 InVEST 模型应用较多,数据要求少且易获取,适用于各种尺度范围,但目前该模型没有开发合并需求评估模块[13];(4)问卷法,如 Ji 等[14]通过对专家评估结果集中、总结、统计和反馈研究郑州市生态系统供需状况的变化。Cao 等[15]使用生态系统服务供需矩阵量化了白洋淀盆地的生态系统服务供需程度和供需差异。问卷法常用于生态系统服务需求研究,但易受调查者影响产生描述性偏差;(5)经验统计法,是指从政府官网和统计年鉴中获取数据、计算过程相对简单易操作,适用于单项服务需求或供给的评估。如 Larondelle 等[16]在量化柏林供水、固碳服务供需时,采用地下水补给率与面积的乘积值作为水供给,人均消耗量与人口数量的乘积作为水需求。综上所述,目前还没有任何方法或模型能完全精准地评估各类服务供给与需求。评估生态系统服务供给,InVEST 模型相对而言是应用最为广泛且较成熟的模型;评估生态系统服务需求,经验统计模型相对易操作、

适用性广,对于较小研究尺度,评估较为准确。

自认识到生态系统供需不匹配后,便开展了生态系统服务流的相关研究[17]。研究内容总体侧重于生态系统服务供需、生态系统服务从供给区到需求区的空间联系等方面[6]。对于生态系统服务流的研究方法大致可分为空间分布式模型、生态系统服务量评估。(1)空间分布式模型,可模拟生态系统服务的空间流动路径与过程。Locatelli 等[18]利用专家知识以及模糊数字模拟计算了通过不同的过滤器从多样生态系统到达多元用户的多个生态系统服务流。Bark 等[19]尝试利用媒体数据进行了生态系统服务流的时间格局和动态的分析。Li 等[20]利用水文模型从格网尺度与行政区尺度对京津冀地区水源供给服务流进行研究,揭示了水源供给服务从供给区到需求区的传递路径。张欣荣等[21]基于 RUSLE、InVEST、CASA 等多种模型量化西南喀斯特区 2000—2015 年土壤保持服务、产水和固碳服务的供给量和需求量后,探讨供需空间盈余变化特征并确定了服务流传输路径和流量。赵庆建等[22]运用生态系统服务流的思想分析了森林生态系统所产生的碳流与水流供需状况。(2)生态系统服务量评估方法,根据识别与量化的生态系统服务供需值与空间分布,定量分析供需匹配状况。Serna-Chavez 等[17]从不同尺度选取授粉、地下水供给以及气候调节服务,对各类型生态系统服务供给区、服务辐射范围及需求区的空间位置进行识别,分析供给区与需求区之间的空间联系,并引入供需比指标来探索生态系统服务流。该方法虽易于度量,能揭示生态系统服务流特征,但无法揭示其传递过程机制。

水源供给服务有助于调节流域内的水量分配,对于保障可持续的水资源利用和维护流域的健康生态系统具有关键意义[23]。而水供给服务流作为生态系统服务流中重要的一环,能够连接提供各种生态系统服务的自然生态环境和需要消耗生态系统服务的人类经济社会活动[24]。由于水源供给服务流自身的复杂性,对其研究主要集中在概念框架上,近年来有部分学者对水源供给服务流进行了定量研究。如 Li 等[25]基于 DEM 和水系网络通过 D8 算法模拟了水源供给服务流的流向和流量特征。陈登帅等[26]基于 SWAT 模型和供需关系模拟了延河流域水供给服务流空间分布。张欣蓉等[21]基于 InVEST 模型和供需关系模拟了西南喀斯特区水源供给服务流。综上所述,以往研究多以分析水源供给服务的数量供需关系,有关定量识别水源供给服务流空间不匹配特征较少,并且较少关注进行调控水源供给服务的分区设计及影响因素。因此,本研究旨在解决以下科学问题:第一,如何在流域尺度下定量化识别水源供给服务供需关系演变特征?第二,如何较为准确地量化水源供给服务流?第三,如何在供需视角下进行调控水源供给服务的分区设计及影响因素的研究?

重庆市作为长江上游地区重要的生态屏障区,虽然随生态文明建设理念的推进,生态系统服务供给有所调节与增加,但人们对美好人居环境的需求与日俱增,各子流域的生态系统服务供需关系仍紧张,存在供需不匹配问题。因此,本研究将围绕生态系统服务流概念,从流域尺度分析重庆市水源供给服务供需的时空格局、动态演化规律,分区调控路径。采用 InVEST 模型评估重庆市水源服务供给量,从社会经济视角评估重庆市需水量,基于水资源安全指数计算生态系统服务供需比,分析重庆市水源供给服务供需时空格局;采用空间自相关模型,构建生态系统服务“流”量化模型,分析重庆市生态系统服务供需变化的空间格局和聚簇特征,明确重庆市水源供给服务流动态演化规律;基于上述结果,对服务空间进行分区设计,以地理探测器法分析生态系统服务供需变化的影响因素及相关性,提出生态系统服务供需不匹配调控路径,加强区域生态资产管理、实现生态环境可持续发展。

1 研究区域及数据来源

1.1 研究区概况

重庆市位于长江上游地区,28°10′N—32°13′N,105°11′E—110°11′E 之间,总面积 8.24 万 km^2,下辖 26 个区、8 个县、4 个自治县,如图 1 所示。地势以山地、丘陵为主,向东西方向的长江流域倾斜,起伏变化明显。江河纵横,雨水丰沛,多年年均降水量 1229 mm,年均气温 17℃,属于亚热带湿润性季风气候。同时属于经济较为发达的东部地区和自然资源富饶的西部地区的中间地带,流域长达 665 km,通航河流达 136 条。土壤类型主要包括紫土、黄壤、水稻土及石灰土类,主要植被类型为常绿阔叶林、暖性针叶林等类型,森林覆盖率为

54.5%。截至 2020 年底,重庆市地区生产总值 25002.79 亿元、常驻人口 3208.9 万人。频繁人类活动干扰使重庆较为脆弱的生态系统受到相当威胁,部分地区常发泥石流、滑坡、山洪等严重地质灾害,生态脆弱性程度高[27]。

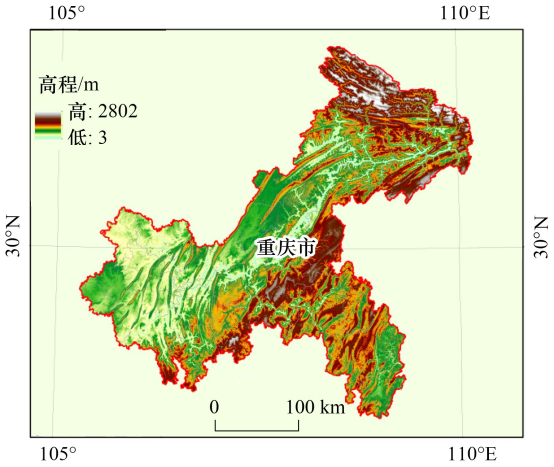

图 1　重庆市区位

Fig.1　A location map of the Chongqing

1.2　数据来源

本研究所用到的数据主要分为气象数据、土壤数据、GIS 数据和社会经济数据。(1)气象数据,从中国气象数据共享网(http://data.cma.gov.cn)获取,为提高研究区气象数据空间插值的精度,除研究区范围内的 11 个可用气象站点之外,在研究区外尽可能均匀地选取了 26 个气象站点。(2)土壤数据,来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(http://crensed.ac.cn/)的第二次全国土壤普查数据,重采样为 30 m×30 m。(3)土地利用数据,来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)的陆地卫星 TM/ETM 图像,时间分辨率为 2000、2010、2020 年,空间分辨率均为 30 m。(4)DEM 数据,从中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)经过镶嵌裁剪后获取,V3 版全球数字高程数据,空间分辨率 30 m。(5)重庆市人口和 GDP 公里网格数据由中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn)裁剪获取。(6)用水量等社会经济数据来源于《重庆市统计年鉴》和《重庆市水资源统计公报》。本研究中所有空间数据均以 CGCS2000_3_GK_CM_108E 为投影坐标系。

2　研究方法

2.1　水源供给服务供需模型

本研究选用 InVEST 模型中的产水量模块定量化评估水源供给服务量[28—29]。该模块基于水循环原理,参考降水量、植物蒸腾量、地表蒸发量等多项参数,计算各个像元的产水量,包括地表径流量、土壤所含的水分和地表滞留的水分[30—31]。本研究中需水量即人类在生活、生产等活动中对水的需求与消耗,不含由于植物吸收利用、河流截留或下渗等地表水分损失的部分,可分为 3 类,即农业需水、工业需水、居民生活需水[26, 32]。

主要公式如下:

$$Y_{ij} = \left(1 - \frac{\mathrm{AET}_{ij}}{P_i}\right) \times P_i \tag{1}$$

$$W_{Ui} = W_{\mathrm{agi}} + W_{\mathrm{ini}} + W_{\mathrm{lii}} \tag{2}$$

式中,Y_{ij}为像元 i 上土地利用类型 j 的产水量,即水源供给量;AET_{ij}为像元 i 上土地利用类型 j 的实际蒸散量;P_i为像元 i 上的年均降水量;W_{Ui}为需水量,W_{agi}、W_{ini}、W_{lii}分别为第 i 流域上的农业灌溉需水量、工业需水量、居民生活需水量。本研究基于 DEM 数据经过填洼、流向、流量、提取河网、河流链接、分水岭计算等步骤来进行子流域的划分,并对比不同阈值下子流域划分效果,得到在阈值 50000 hm^2时空间分布结果较为理想,此时子流域个数为 1438 个。使用克里金插值法得到气象数据空间分布;经过多次比对 2020 年《重庆市水资源公报》的地表水资源量和产水量模拟结果,确定 Zhang 系数为 4.7。为了实现子流域尺度上水源供给服务供给量与需求量的空间匹配,需要通过空间离散化的方法来对用水量进行处理。通过叠加土地利用数据中的耕地和每亩耕地灌溉用水量来实现农业需水的空间离散化;叠加 GDP 公里格网数据和每万元工业 GDP 用水量来实现工业需水的空间离散化;叠加人口密度数据和居民人均生活用水量来实现居民生活需水的空间离散化。

本研究基于水资源安全指数法(Freshwater Security Index, FSI)构建供需比模型,量化水源供给服务供需

比,揭示重庆市水源供给服务在空间上的供需匹配关系[33—34]。公式如下:

$$FSI_i = \lg(\frac{Supply_i}{Demand_i}) = \lg(\frac{Y_{ij}}{W_{Ui}}) \tag{3}$$

式中,$FSI_i > 0$ 时表示流域 i 的水源供给服务处于盈余状态,供给量大于需水量,正值越大,说明供给服务越为丰富,满足本流域需水量后还能有所盈余流向其他流域;$FSI_i < 0$ 时表示流域 i 的水源供给服务处于短缺状态,供给量小于需水量,负值越小,说明供给越难以满足人类需求,供给需求不匹配越严重,要依靠周围区域共同供给,强调供需不匹配关系。本研究参考张蓬涛等[35]的研究将供需情况分为 6 类:高度赤字(-1, -0.6)、中度赤字(-0.60, -0.30)、轻度赤字(-0.30,0)、轻度盈余(0, 0.30)、中度盈余(0.30, 0.60)、高度盈余(0.60, 1.00)。

2.2 水源供给服务流模型的构建

本研究引入 Getis-Ord G_i^* 指数来测度重庆市供需比局部冷热点聚簇特征,识别不同位置上的高值簇和低值簇,即获取冷点区和热点区[36—37]。公式如下:

$$G_i^*(d) = \sum_{j=1}^{n} W_{ij}(d) X_i X_j / \sum_{j=1}^{n} X_j \tag{4}$$

式中,在不存在空间自相关的零假设下,G_i^* 服从渐近正态分布,其统计量的检验可以采取标准化 Z 值,G_i^* 统计量可以用来识别高值或低值的空间关联模式。在热点分析基础上,根据水文学的河流的水文连通性,应用生态系统服务流模型。定义水源供给服务流为:径流及其作为载体携带的物质与能量从供给区经水系网络注入需求区的空间位移[26],一种具有向性的服务流。本研究参考 SPANs 模型分析服务流传输路径[38—39]。

2.2.1 服务流类型

水源供给服务流属于复合型服务流,包含原位服务流与定向服务流类型[40]。对于人类需求部分,工业生产所必需的水资源一般来自于场域地下水提取,故工业需求产生的服务流属于原位服务流。农业用水与居民生活用水来自自然径流、集中灌溉与自来水输送,故农业与居民生活需求产生的服务流属于定向服务流。

2.2.2 服务流流向

在生态系统服务流模型中,所有的水源通过降水、径流汇入、地下水流动、植物蒸散等水循环过程和人类需求联系在一起。在流域中能够满足人类需求量的部分被工业、农业及生产生活所消耗,被各类产品与生物固定。未被消耗的部分,即满足需求后大量盈余的水源供给将随地表、地下水流动到其他区域,补充满足其余地区的需求量或增加其他地区的正常盈余。地下径流由地下水补给区流向排泄区,流向不易探测辨别,本研究仅考虑地表径流。

2.3 地理探测器

本研究采用王劲峰等[41]提出的地理探测器进行水源供给服务供需关系分区影响因子分析。采用地理探测器来研究水源供给服务供需关系影响因素的核心思想为:如果某一影响因素对水源供给服务供需比的发展变化有重要影响,那么此因素和水源供给服务供需比的空间分布应该具有相似性[42]。本研究参考 Xu 等分区方案[43],以重庆市子流域为统计单位,基于冷热点分区与服务流路径,按供需匹配关系的聚集状态为全市流域分区为汇流区、经流区和外流区。基于地理探测器揭示影响各区水源供给服务供需匹配关系的驱动力因子,有针对性地探索各区水源供给服务供需不匹配现状的调控方案。运用其因子探测器与交互探测器来识别自然、社会经济及生态环境现状因子对生态系统水源服务供需关系的主要影响因子及其影响程度,并解释影响因子的交互作用。交互作用的判断条件参考相关文献[42];因子探测器计算公式如下[44]:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2} \tag{5}$$

式中,$h = 1, \cdots, L$ 为因变量供需比 Y 或自变量影响因子 X 的分层,即分类;N_h 和 N 为层 h 和特定分区范围年

内的流域数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和特定分区的 Y 值的方差。q 的值域为[0, 1],值越大代表该影响因子 X 对该分区各个流域的供需比 Y 的解释力越强,反之则越弱。极端情况下,$q=1$,表明 X 完全控制了 Y 的空间分布,$q=0$,则表明 X 与 Y 无关联。

水源供给服务供需关系受到经济、社会和自然等诸多因素的综合影响。本研究遵照指标选取的科学性、可比性、独立性、可操作性及可获取性等原则并在参考已有成果[45—46]的基础上,从自然地理、社会经济和生态环境 3 个角度选取了 13 项指标来定量分析影响重庆市水源供给服务供需关系的影响因素,如表 1 所示。地理探测器的适用条件中要求输入自变量应为类型量,如果自变量为数值量,则需要进行离散化处理[41]。因此本研究对除土地利用类型外 12 个指标以自然间断法划分为 9 类。土地利用数据作为类型量则划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 类。基于冷热点与服务流划分为汇流区、经流区、外流区,得到样本数目分别为 24228、26948、30224 个,导入地理探测器中。

表 1　地理探测器指标

Table 1　Geodetector indicators

目标层 Target layer	指标层 Index layer	编码 Code	单位 Unit	目标层 Target layer	指标层 Index layer	编码 Code	单位 Unit
自然地理	DEM	$X1$	m		第三产业 GDP	$X8$	万元
Natural geography	坡度	$X2$	-		常住人口数	$X9$	万人
	气温	$X3$	℃	生态环境	土地利用类型	$X10$	-
	降水	$X4$	mm	Ecological	水域面积	$X11$	m^2
	蒸散发	$X5$	mm	environment	森林覆盖率	$X12$	%
社会经济	第一产业 GDP	$X6$	万元		NDVI	$X13$	-
Socio-economic	第二产业 GDP	$X7$	万元				

3　结果与分析

3.1　重庆市水源供给服务供需量化评估与时空格局分析

3.1.1　水源供给服务时空分布特征分析

通过 InVEST 模型量化评估了 2000、2010、2020 年的重庆市水源供给服务,并在流域尺度下得到重庆市水源供给量分布。如图 2 所示,从时间上来看,2000、2010、2020 年水源供给总量先减小后增加,分别为 612.94 亿 m^3、508.65 亿 m^3、766.21 亿 m^3,平均水源供给量分别为 0.43 亿 m^3、0.35 亿 m^3、0.53 亿 m^3。其中重庆市各个流域中最大供给量分别达 3.82 亿 m^3、3.70 亿 m^3、5.44 亿 m^3。从空间上来看,2000 年重庆市水源供给服务分布由北沿西南-东北轴向南减弱,大致分 3 部分,高供给量主要出现在东北方向的水土保持生态功能保护区域,渝东南酉水附近存在一个高供给服务流域,且以该流域为中心向外供给量减少。2010 年,供给服务相对前一时期明显减弱,呈四周较高中间低的分布格局,尤其渝东北方向高供给量流域减至 2 个,但渝东南城镇群中高供给量流域仍有少量增加,增加至 5 个。2020 年,重庆市水源供给量相对前两时期明显地增大,其空间分布格也呈现由北沿西南-东北轴向南减弱再增加的趋势,且高供给量流域数据大幅增加,渝西平原的水源供给服务呈现普遍高值状态。整体上看,处在渝东北内的各流域供给量都较高,而处于中央位置的流域供给量都较低,整体基本都存在中央低、周围高、边缘低的分布特点,趋近于环层状分布。

3.1.2　需水量时空分布特征分析

如图 3 所示,2000、2010、2020 年重庆市需水总量先减小后增大,分别为 84.51 亿 m^3、80.6 亿 m^3、84 亿 m^3,平均需水量分别为 587.70 万 m^3、560.51 万 m^3、584.14 万 m^3。最高需水量值分别为 3.68 亿 m^3、2.83 亿 m^3、2.749 亿 m^3,其中高于 0.56 亿 m^3 的高需求区域分别为 16、13、16 个,主要分布在主城人口密集、经济发达的区域,各流域需求均远高于平均值。从空间分布来看,整体上 2000、2010、2020 年重庆市需水量的空间分布格局基本一致,呈现出中心辐射状分布特征,大致吻合重庆市功能区划分,以主城区核心为高需量中心向四周需

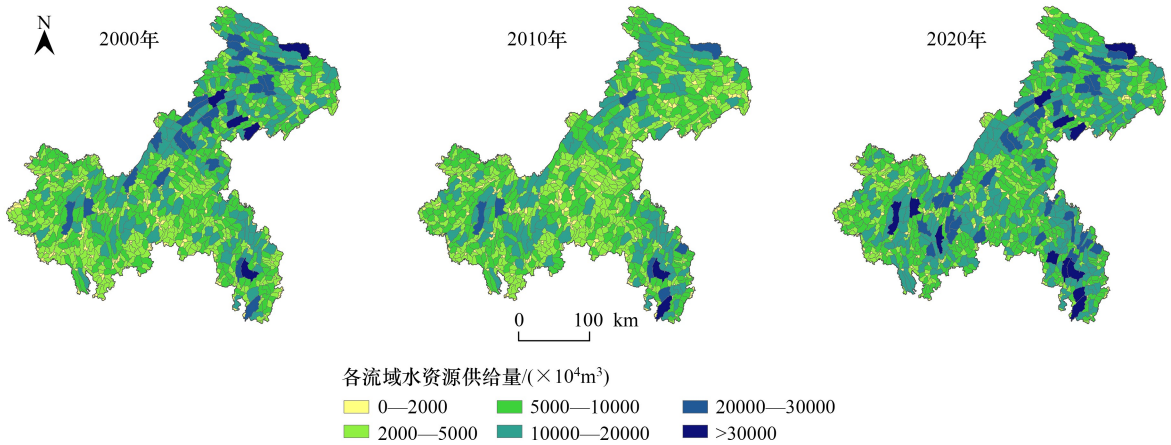

图 2 2000、2010、2020 年重庆市流域尺度水源供给量空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of watershed-scale water supply in Chongqing from 2000 to 2020

求量逐渐减少,仅局部出现微小波动。2010、2020 年渝东南秀山县地区都出现一个稍高需求的流域,流域位置与秀山县中心有所重合,社会经济相对以更快速度发展、人口不断集聚是需求量增大的可能原因;其余渝东北城镇群与渝东南城镇群的需水量普遍低于平均需求值。

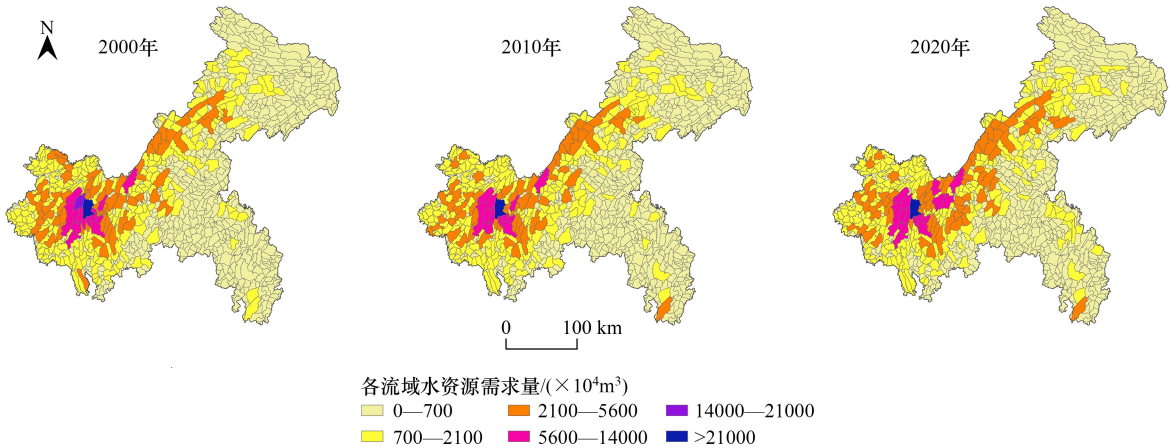

图 3 2000、2010、2020 年重庆市流域尺度需水量空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of watershed-scale water demand in Chongqing from 2000 to 2020

3.1.3 水源供给服务供需时空分布特征分析

如图 4 所示,2000、2010、2020 年重庆水源供给服务供需比平均值分别为 1.17、1.08、0.9,说明重庆市水源供给服务总体处于供大于求的状态,存在水盈余加深的趋势,并且供需匹配关系逐渐趋于缓和。从空间分布来看,2000、2010、2020 年水源供需比呈现近似圈层分布的特点,中高度赤字区域主要出现在主城区核心范围内,向外辐射为轻度赤字区域,经济发展与生态环境保护之间的矛盾较为突出,水源供给服务无法满足人类生产生活的水需求;高度盈余区域主要分布在渝东北和渝东南,此区域植被茂盛,雨量充沛,拥有较好的自然生态环境。整体上,流域供需比逐期趋向更为均匀地分布状态,空间上呈现一种近乎平行分层的分布,整体供需处于平衡状态,供需不匹配的问题逐渐得到缓解,但局部仍有供需不匹配现象,且供需差距有扩大趋势。

3.2 重庆市水源供给服务流特征

如图 5 所示,2000、2010、2020 年重庆市供需匹配关系的冷点区流域面积分别为 32753.38 km^2、37972.52 km^2、24452.68 km^2,面积占比分别为 39.75%、46.09%、29.68%。从空间分布来看,冷点主要以主城区

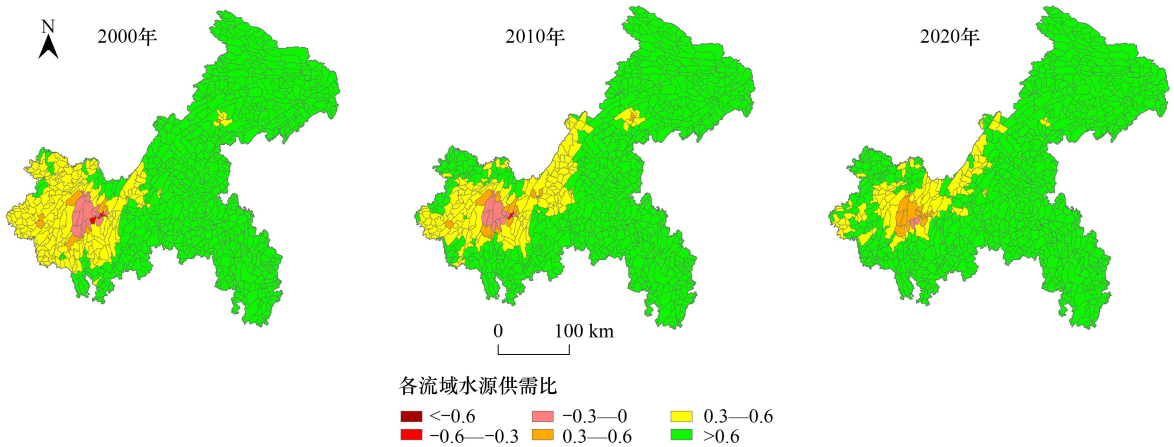

图 4　2000、2010、2020 年重庆市流域尺度供需比空间分布图

Fig.4　Spatial distribution of watershed-scale supply and demand ratio in Chongqing from 2000 to 2020

为中心,低值沿着都市区范围向外辐射扩散,并且冷点区随着时间逐渐向中心主城收拢。2000、2010、2020 年重庆市供需匹配关系的热点区流域面积分别为 33825.97 km^2、26000.74 km^2、30714.22 km^2,面积占比分别为 41.05%、31.56%、37.28%。高值区主要分布在渝东北的边缘地带与渝东南,并且随着时间分布相对更为松散。整体而言,2000、2010、2020 年冷、热点聚集的流域面积分别相对减少了 25.34%、9.2%。绝大多数大都市区的流域始终处在冷点区中心,是流域水源供给服务赤字聚集区;东部边缘的流域始终处在热点中心,是流域水源供给服务盈余聚集区。到 2020 年,全市供需不匹配关系有所缓解,但各局部流域供需不匹配仍有不同程度的严重趋势。

重庆市水源供给服务流特征如图 5 所示,基于三个时期供需不匹配冷热区分布情况,服务流主要从供给量盈余较多的热点区流域向需求值较高的冷点区流域流去,优先满足空间上距离更近的流域的需求,且随距离增加可流向高需求区流域的服务减少。2000、2010 年整体服务流向呈自东北方向与东南生态发展区向西部大都市区方向流动,冷点区局部呈四周向中心流动;2020 年,供给服务流向在前一时期基础上,新增明显服务流路径,即在渝东南地区由热点区包围的冷点区局部呈四周往中心流动,但此处作为渝东南部分流域,供给服务流主要仍体现为向大都市区流动。

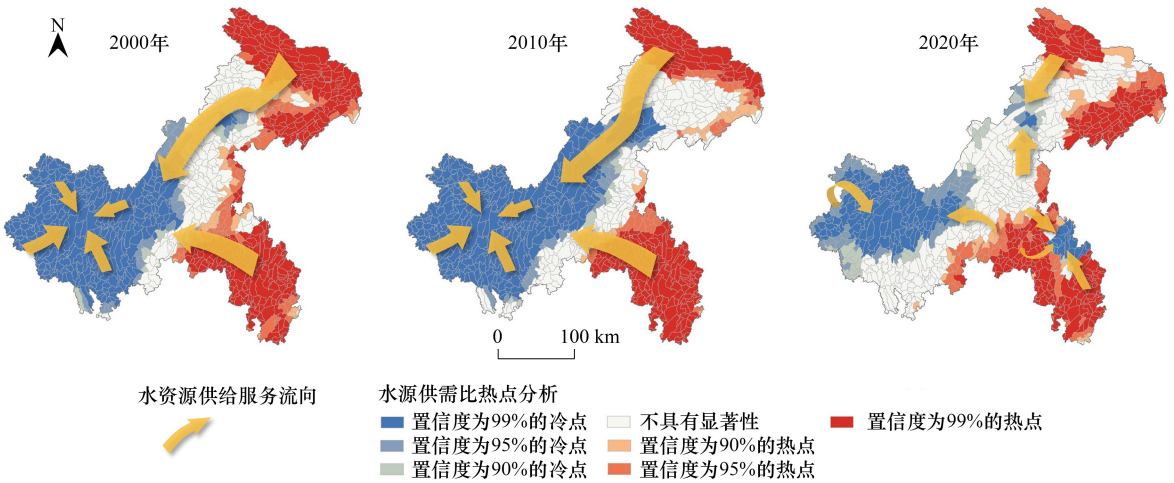

图 5　2000、2010、2020 年重庆市水源供给服务流示意图

Fig.5　Schematic diagram of water supply service flow in Chongqing from 2000 to 2020

3.3 重庆市水源供给服务供需匹配关系的分区设计及驱动因子分析

3.3.1 重庆市水源供给服务供需匹配关系的分区设计

当降水从大气中下降到地面时,它会通过不同的路径流动,形成水源供给的汇流区、经流区和外流区。汇流区聚集所需水源,经流区传输和分配水资源,外流区提供水源,这些区域相互关联,构成了水的循环和供应系统。因此,对水源供给服务供需进行合理分区设计对于保护和合理利用水资源至关重要。如图 6 所示,本研究在调控供需匹配关系的思路下,基于冷热点分区与服务流路径,按供需匹配关系的聚集状态为全市流域分区为汇流区、经流区和外流区。并针对流域的供需比变化情况,对初分区结果进行整合优化,使分区更为合理。汇流区集中在西北部,经流区位于中部,外流区集中在东南和与东北部:

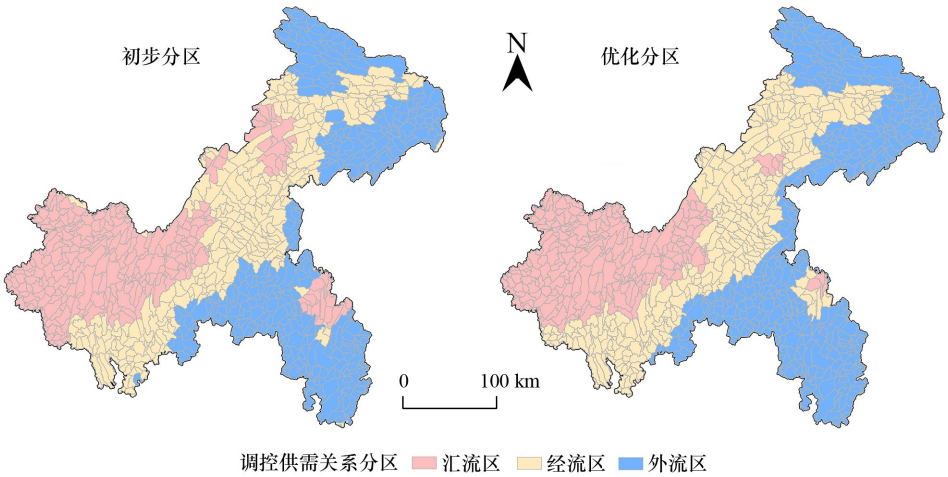

图 6 基于调控供需关系思路区域划分示意图

Fig.6 Regional division based on the idea of regulating supply and demand

3.3.2 重庆市水源供给服务供需匹配关系的驱动因子分析

本研究基于分区设计结果来对水源供给服务供需匹配关系进行驱动因子分析,针对不同类型供需关系分析其主要影响因子及因子间交互作用的影响。如图 7 所示,由因子探测器结果可知,汇流区、经流区和外流区各影响因子的 q 值范围分别为 0.0653—0.7408、0.0713—0.5144 和 0.0135—0.2958,且均显著($P<0.01$)。其中对汇流区影响最高的驱动因子是蒸散发因子,q 值为 0.7408。蒸散发越高,地表水、地下水等水源的供给量减少,从而导致汇流区供需不匹配较为严重。此外还有水域面积和第二产业 GDP 的解释力均超过了 70%。对经流区影响最高的驱动因子是第三产业 GDP,q 值为 0.5144。随着服务业的发展,人们对水资源的需求可能会增加。对外流区影响最高的驱动因子是第二产业 GDP,q 值为 0.2948。一方面,工业生产过程中需要大量的水资源,包括冷却、洗涤、生产工艺等方面的用水。因此,随着第二产业 GDP 的增加,工业用水需求也会相应增加,从而对水源供给服务供需产生影响;另一方面,工业的空间布局不合理,结构性矛盾突出。重庆市高用水行业主要集中主城区,使该地区水源供给服务供需矛盾更为突出。分维度来看,自然地理因子和社会经济因子对汇流区水源供给服务供需匹配关系的平均解释力分别为 50.26%和 40.12%,说明自然条件和社会条件共同作用对水源供给服务赤字状态的影响最高。社会经济因子对经流区和外流区水源供给服务供需匹配关系的解释力平均值最高,分别为 36.68%和 19.13%。总体来看社会经济因子的贡献率明显高于自然生态环境因子,之后可以从减少人类活动干扰的政策出发,实现水源供给服务可持续,以达到供需平衡状态。

如图 8 所示,由交互探测器结果可知,各项影响因子指标交互后对汇流区、经流区和外流区水源供给服务供需的影响关系均为双因子增强或非线性增强,说明任意两个因子的交互作用均大于单个因子的影响,不存在单个因子独自作用的情况。其中,汇流区蒸散发量与第一产业 GDP 交互作用对供需匹配的解释力最强,达到 87.19%;经流区森林覆盖率与气温的交互作用对供需匹配的解释力最强,达到 66.66%;外流区第一产业

GDP 与降水的交互作用对供需匹配的解释力最强,达到 45.46%。总体来看对水源供给服务供需匹配关系的影响,主要受自然因子和社会经济因子交互较强,生态环境因子中森林覆盖率与其他因子交互作用较强。

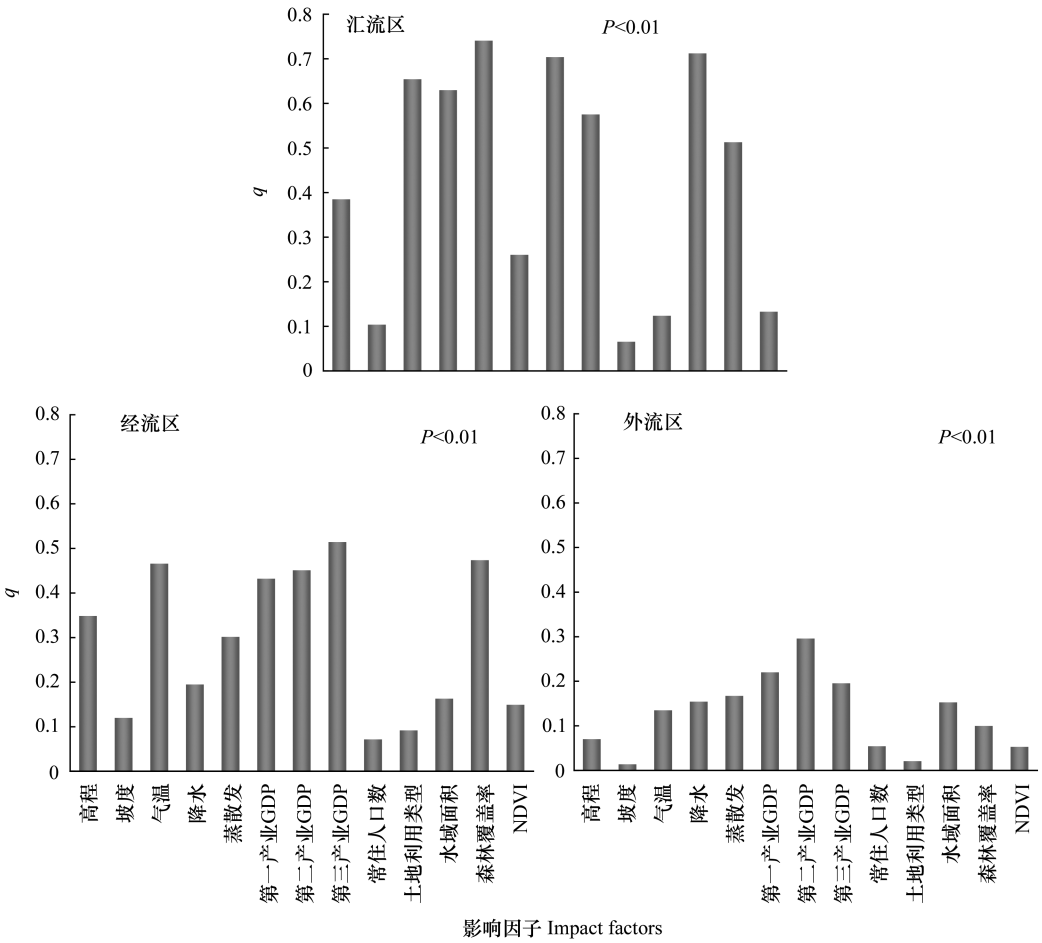

图 7　水源服务供需关系影响因素的因子探测结果

Fig.7　Results of factor detection of factors influencing supply and demand for water services

4　讨论

4.1　基于调控水源供给服务供需匹配关系思路的分区设计

2020 年水源供需匹配关系变化最为明显,热点区收缩,出现多个较小热点区,冷点区亦发生明显缩小,但冷点中心位置基本不变。供给服务流向整体从热点区流向冷点区、局部从冷点区外围流向冷点中心的路径,新增从热点区流向被其三面包围的冷点区的路径,供需不匹配差距有所增大,但供需不匹配空间格局趋于缓解。在生态文明思想的指导下,《重庆市国土空间生态保护修复规划(2021—2035 年)》中提出了“三带四屏多廊多点”生态安全总体格局,有针对性地实施生态保护和修复。本研究优化后的分区设计(图 6)与“三带四屏多廊多点”的发展格局具有良好的对应关系,有助于为重庆市生态安全格局规划提供决策依据。其中汇流区对应重庆主城区和都市区,社会经济发展程度高,对水的需求量高,供需不匹配严重,各流域供需比均较低,需要依靠外来供给服务与自身供给服务共同满足。经流区对应“三带”,即长江、嘉陵江、乌江组成的生态涵养带,同时也说明了经流区通过长江传输分配水资源的功能,该区域供需相对匹配,各流域供需比较为理想,供给服务较为充裕,极少出现供不应求的现象,盈余供给服务可能外流到其他区域,其他区域的盈余供给服务也可能流入该区。外流区对应“四屏”,即大巴山、巫山-七曜山、武陵山、大娄山组成的生态屏障,该区域

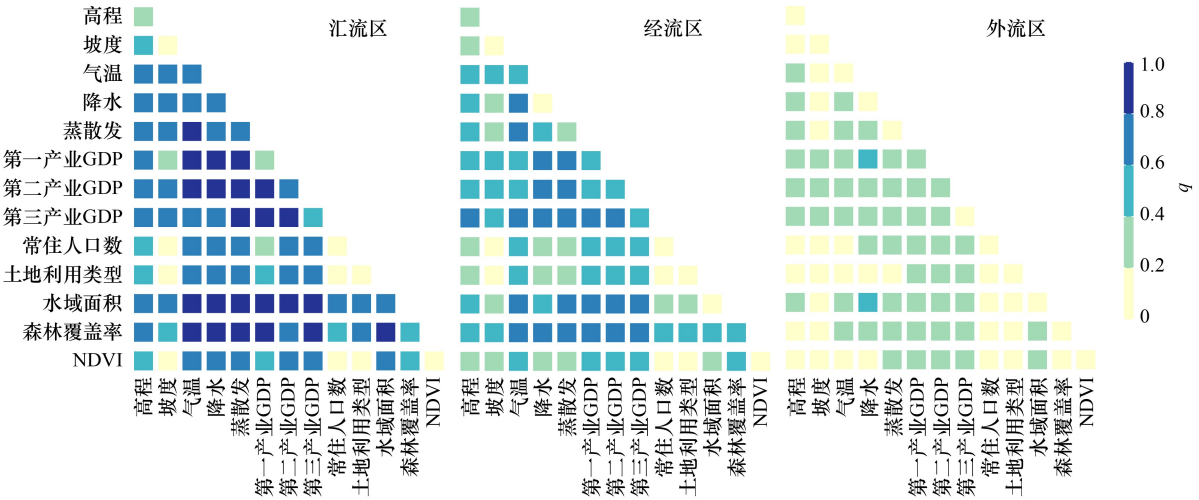

图 8 水源服务供需关系影响因素的交互探测结果

Fig.8 Interaction detection results of factors influencing supply and demand for water services

是水源涵养和生物多样性保护重点区域,水源供给服务较为充裕,供需比较高,供给服务盈余可补充其他流域。

4.2 水源供给服务供需空间不匹配相关研究对比

在水源供给服务供需研究方面,供给上,本研究基于 InVEST 模型中定量化评估重庆市子流域尺度下水源供给服务量,结果与张艳军等[47]的重庆市生态系统服务的时空格局相对一致,同时符合曹跃群等[48]的重庆市生态系统服务价值与区域经济增长的时空动态关系,一定程度上说明本研究水源供给服务量化的合理性。需求上,基于社会经济发展视角从农业需水、工业需水、居民生活需水来量化源供给服务需求量,结果具有实际性。但需求的量化尚未达成共识,今后研究可从综合模型方向建立一个具有普遍性的需求标准。供需关系上,本研究重庆市供需比空间分布结果与张欣蓉等[21]的西南喀斯特区产水供需平衡时空分布较为接近。在水源供给服务流方面,基于局部冷热点分析了服务流的类型和流向,其结果与 Wu 等[49]珠江三角洲水生态系统服务流的空间分布相符。但是本研究的水源供给服务流忽略了水资源在传输过程中的损耗量和累积量,今后可从水源供给服务的流量、流向、流速等方面出发,分析其在传递过程中对区域的影响,揭示水源供给服务在传递过程中的损耗与累积规律。

4.3 重庆市水源供给服务供需不匹配现状的调控方案

水源供给服务供需关系的分区设计和其影响因子量化对于实施可持续的调控管理方案十分重要[50]。研究结果显示在 2000 年至 2020 年期间,重庆市的水源供给服务供需比持续下滑,面对不断上升的需水量,我们应采取一定的调控方案,以增加水源供给、减少需求,以此减轻生态环境的负担。汇流区建成区所占面积大且持续增加,难以避免热岛效应,城市高温化,蒸散发量相对较高。已有研究表明合理规划城市绿地空间布局是缓解热岛效应的有效手段[51]。因此可以从保护河网水域、公园绿地,以及合理建设绿色城市入手,减少城市大量的需水量。经流区以长江为主体,可以以河流水域为支撑推进重庆市生态廊道建设,完善水源地保护,开展湿地公园保护,从而提高水源供给量[52]。外流区应该继续加强生态屏障保护,提高生态监管力度,保持三峡库区等水源涵养区的重要性,通过水源涵养来保护水源地,才能确保可持续的水源供给[53]。此外,影响汇流区供需不匹配的第二产业 GDP 解释力高达 70.38%,该区域可以发展绿色科技产业体系,加强工业集聚区中水的循环利用和污水排放标准,减少生产耗水,以此减少对水的需求[54]。汇流区所在是全市的社会经济发展中心,承担密集繁杂的人类生产生活活动,各流域人口密度较大。应提高居民生态文明素养,居民在日常生活中仍应当巩固加强家庭合理用水、循环用水等环保理念,实施节水行动,以尽可能使流域的生活需水量不至

于过快增长、缩小供需差距。

5　结论

(1)2000、2010、2020 年重庆市流域水源供给量与需水量均先减少后上升,水源供给服务供需比逐年下降,整体供需不匹配的问题逐渐得到缓解,但局部仍有供需不匹配现象。在空间分布上,水源供给量整体基本呈中央低、周围高、边缘低的分布特点,趋近于环层状分布。需水量呈现出主城区高,四周低的中心辐射状分布特征。水源供需关系呈现出中央主城区高度赤字、四周区县盈余的圈层式分布。

(2)2000、2010、2020 年重庆市水源供需比冷、热点范围均在缩小。2000 年和 2010 年重庆市水源供给服务流路径呈现出自东北、东南方向生态发展区向西部大都市区流动,同时冷点区局部呈四周向中心流动。2020 年水源供给服务主要仍体现为向大都市区流动,但渝东南局部服务流路径增加,由热点区包围的冷点区部分呈四周往中心流动的时空分布变化。

(3)针对重庆市水源服务供需匹配关系划分出汇流区、经流区、外流区。影响汇流区、经流区和外流区供需匹配关系的主导因素分别是蒸散发、第三产业 GDP 和第二产业 GDP。社会经济因子的总体影响程度明显高于自然生态环境因子。任意两个因子的交互作用均大于单个因子的影响,汇流区中蒸散发与其他因子交互产生的影响更强,经流区中第三产业 GDP 与其他因子交互产生的影响更强,外流区中第二产业 GDP 与其他因子交互产生的影响更强。

参考文献(References):

[1] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Ecological Economics, 1998, 25(1): 3-15.

[2] 赵晓冏, 苏军德, 王建, 晋王强, 陈锷, 张娟, 项明. 甘肃省生态服务供需关系及影响因子研究. 中国环境科学, 2021, 41(10): 4926-4941.

[3] Boerema A, Rebelo A J, Bodi M B, Esler K J, Meire P. Are ecosystem services adequately quantified? Journal of Applied Ecology, 2017, 54(2): 358-370.

[4] 肖玉, 谢高地, 鲁春霞, 徐洁. 基于供需关系的生态系统服务空间流动研究进展. 生态学报, 2016, 36(10): 3096-3102.

[5] 姚婧, 何兴元, 陈玮. 生态系统服务流研究方法最新进展. 应用生态学报, 2018, 29(1): 335-342.

[6] 王嘉丽, 周伟奇. 生态系统服务流研究进展. 生态学报, 2019, 39(12): 4213-4222.

[7] 刘慧敏, 范玉龙, 丁圣彦. 生态系统服务流研究进展. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2161-2171.

[8] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis. Washington, DC: Island Press, 2005.

[9] 傅伯杰, 于丹丹, 吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系. 生态学报, 2017, 37(2): 341-348.

[10] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.

[11] 郭朝琼, 徐昔保, 舒强. 生态系统服务供需评估方法研究进展. 生态学杂志, 2020, 39(6): 2086-2096.

[12] 黄从红, 杨军, 张文娟. 生态系统服务功能评估模型研究进展. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3360-3367.

[13] 唐尧, 祝炜平, 张慧, 宋瑜. InVEST 模型原理及其应用研究进展. 生态科学, 2015, 34(3): 204-208.

[14] Ji Z X, Xu Y Q, Wei H J. Identifying dynamic changes in ecosystem services supply and demand for urban sustainability: insights from a rapidly urbanizing city in central China. Sustainability, 2020, 12(8): 3428.

[15] Cao T G, Yi Y J, Liu H X, Xu Q, Yang Z F. The relationship between ecosystem service supply and demand in plain areas undergoing urbanization: a case study of China's Baiyangdian Basin. Journal of Environmental Management, 2021, 289: 112492.

[16] Larondelle N, Lauf S. Balancing demand and supply of multiple urban ecosystem services on different spatial scales. Ecosystem Services, 2016, 22: 18-31.

[17] Serna-Chavez H M, Schulp C J E, van Bodegom P M, Bouten W, Verburg P H, Davidson M D. A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services. Ecological Indicators, 2014, 39: 24-33.

[18] Locatelli B, Imbach P, Vignola R, Metzger M J, Hidalgo E J L. Ecosystem services and hydroelectricity in Central America: modelling service flows with fuzzy logic and expert knowledge. Regional Environmental Change, 2011, 11(2): 393-404.

[19] Bark R H, Robinson C J, Flessa K W. Tracking cultural ecosystem services: water chasing the Colorado River restoration pulse flow. Ecological Economics, 2016, 127: 165-172.

[20] Li D L, Wu S Y, Liu L B, Liang Z, Li S C. Evaluating regional water security through a freshwater ecosystem service flow model: a case study in Beijing-Tianjian-Hebei region, China. Ecological Indicators, 2017, 81: 159-170.

[21] 张欣蓉, 王晓峰, 程昌武, 刘世荣, 周潮伟. 基于供需关系的西南喀斯特区生态系统服务空间流动研究. 生态学报, 2021, 41(9):

3368-3380.
[22] 赵庆建, 温作民, 张敏新. 识别森林生态系统服务的供应与需求——基于生态系统服务流的视角. 林业经济, 2014, 36(10): 3-7.
[23] 王丹妮, 郭青云, 王志浩, 林慧龙. 生态系统水供给服务空间流动研究进展. 水土保持学报, 2022, 36(3): 1-8.
[24] 刘慧敏, 刘绿怡, 丁圣彦. 人类活动对生态系统服务流的影响. 生态学报, 2017, 37(10): 3232-3242.
[25] Li X, Sun W, Zhang D, Huang J L, Li D H, Ding N, Zhu J F, Xie Y J, Wang X R. Evaluating water provision service at the sub-watershed scale by combining supply, demand, and spatial flow. Ecological Indicators, 2021, 127: 107745.
[26] 陈登帅, 李晶, 张渝萌, 张城, 周自翔. 延河流域水供给服务供需平衡与服务流研究. 生态学报, 2020, 40(1): 112-122.
[27] 李艳华, 许月卿, 郭洪峰. 西部生态脆弱区典型县域农用地质量等别对比研究. 干旱区资源与环境, 2013, 27(8): 14-20.
[28] Sharp R, Chaplin-Kramer R, Wood S, Guerry A, Tallis H, Ricketts T, Nelson E, Ennaanay D, Wolny S, Olwero N, Vigerstol K, Pennington D, Mendoza G, Aukema J, Foster J, Forrest J, Cameron D R, Arkema K, Lonsdorf E, Douglass J. InVEST User's Guide. 2018.
[29] Moreira M, Fonseca C, Vergílio M, Calado H, Gil A. Spatial assessment of habitat conservation status in a Macaronesian Island based on the InVEST model: a case study of Pico Island (Azores, Portugal). Land Use Policy, 2018, 78: 637-649.
[30] 陈德权, 兰泽英, 陈晓辉, 李玮麒, 周园, 唐玲, 汪润芝. InVEST 模型在市县级水源涵养功能评价中的应用——以广东省广州市为例. 水土保持通报, 2021, 41(4): 196-206.
[31] 王耕, 韩冬雪. 基于 InVEST 模型的大凌河上游区产水功能分析. 人民黄河, 2020, 42(2): 42-47.
[32] Chen F Y, Li L, Niu J Q, Lin A W, Chen S Y, Hao L. Evaluating ecosystem services supply and demand dynamics and ecological zoning management in Wuhan, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(13): 2332.
[33] Zhang C, Li J, Zhou Z X, Sun Y J. Application of ecosystem service flows model in water security assessment: a case study in Weihe River Basin, China. Ecological Indicators, 2021, 120: 106974.
[34] 王一达, 李晶, 周自翔, 王玉丹. 基于 SWAT 模型的无定河流域水供给服务空间流动模拟. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2022, 50(4): 81-91.
[35] 张蓬涛, 刘双嘉, 周智, 刘春敬, 徐磊, 高星. 京津冀地区生态系统服务供需测度及时空演变. 生态学报, 2021, 41(9): 3354-3367.
[36] 涂小松, 龙花楼. 2000—2010 年鄱阳湖地区生态系统服务价值空间格局及其动态演化. 资源科学, 2015, 37(12): 2451-2460.
[37] Shi Y S, Shi D H, Zhou L L, Fang R B. Identification of ecosystem services supply and demand areas and simulation of ecosystem service flows in Shanghai. Ecological Indicators, 2020, 115: 106418.
[38] 董丽青. 基于 SPANs 模型碳固定服务和水产出服务供给、需求和服务流的量化评估与制图[D].太原:山西师范大学, 2018.
[39] 杨丽雯, 董丽青, 张立伟, 何秉宇, 张永清. 固碳服务供需平衡和服务流量化评估——以引黄入晋南干线为例. 资源科学, 2019, 41(3): 557-571.
[40] 刘慧敏, 刘绿怡, 任嘉衍, 卞子亓, 丁圣彦. 生态系统服务流定量化研究进展. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2723-2730.
[41] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
[42] Wang J F, Li X H, Christakos G, Liao Y L, Zhang T, Gu X, Zheng X Y. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.
[43] Xu Z H, Peng J, Dong J Q, Liu Y X, Liu Q Y, Lyu D N, Qiao R L, Zhang Z M. Spatial correlation between the changes of ecosystem service supply and demand: an ecological zoning approach. Landscape and Urban Planning, 2022, 217: 104258.
[44] Wang J F, Zhang T L, Fu B J. A measure of spatial stratified heterogeneity. Ecological Indicators, 2016, 67: 250-256.
[45] 董悦, 付梅臣, 陈乃鸽, 刘金兰. 近 30 年唐山市生态服务价值空间分异及地理探测研究. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6): 1196-1207.
[46] 李理, 赵芳, 朱连奇, 何莎莎, 叶露培. 淇河流域生态系统服务权衡及空间分异机制的地理探测. 生态学报, 2021, 41(19): 7568-7578.
[47] 张艳军, 官冬杰, 翟俊, 邓伟. 重庆市生态系统服务功能价值时空变化研究. 环境科学学报, 2017, 37(3): 1169-1177.
[48] 曹跃群, 赵世宽, 杨玉玲, 郭鹏飞. 重庆市生态系统服务价值与区域经济增长的时空动态关系研究. 长江流域资源与环境, 2020, 29(11): 2354-2365.
[49] Wu J S, Fan X N, Li K Y, Wu Y W. Assessment of ecosystem service flow and optimization of spatial pattern of supply and demand matching in Pearl River Delta, China. Ecological Indicators, 2023, 153: 110452.
[50] Mehring M, Ott E, Hummel D. Ecosystem services supply and demand assessment: why social-ecological dynamics matter. Ecosystem Services, 2018, 30: 124-125.
[51] 刘凤凤, 闫伟姣, 孔繁花, 尹海伟, 班玉龙, 徐文彬. 基于气温实地调查的城市绿地降温效应研究现状与未来展望. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1387-1396.
[52] 赵宇豪, 罗宇航, 易腾云, 王振宇, 王娜, 吴健生. 基于生态系统服务供需匹配的深圳市生态安全格局构建. 应用生态学报, 2022, 33(9): 2475-2484.
[53] 吕乐婷, 任甜甜, 孙才志, 郑德凤, 王辉. 1980—2016 年三江源国家公园水源供给及水源涵养功能时空变化研究. 生态学报, 2020, 40(3): 993-1003.
[54] 曹祺文, 鲍超, 顾朝林, 管卫华. 基于水资源约束的中国城镇化 SD 模型与模拟. 地理研究, 2019, 38(1): 167-180.