

基于生态系统服务流的东北地区水安全格局

孙才志¹, 安志英²

(1. 辽宁师范大学海洋可持续发展研究院, 辽宁 大连 116029; 2. 辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁 大连 116029)

摘要: 基于供水服务“供-流-需”(供给-流动-需求)的研究思路构建水安全框架, 采用水生态系统服务供需比测度水生态系统供需服务盈余和赤字状态, 提取水生态“源”“汇”区, 采用最小累计阻力模型识别“源-汇”廊道和脆弱节点, 进而分析东北地区水安全格局。结果表明: 2000—2020年东北地区产水量和需水量均呈增加态势, 空间上产水量大致呈东多西少分布, 需水量的空间分布与人口密度、社会经济发展程度高度一致; 整体而言, 研究期内水生态系统供需服务主要表现为盈余状态, 且盈余面积逐渐增加; 水生态“源”区主要分布在东部及中部地区的耕地和林地, 水生态“汇”区主要集中在西部地区的耕地、林地和未利用地; 东北地区的水生态“源-汇”廊道主要为松花江、绥芬河、辽河、图们江、大凌河、太子河等河流及其支流; 辽宁中部、长春、哈尔滨等地多个供水节点较为脆弱, 黑龙江中部的供水节点需要加强保护。

关键词: 水资源; 生态系统服务流; 产水量; 需水量; 东北地区

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2024)03-0011-09

Water security pattern in Northeast China based on ecosystem service flow//SUN Caizhi¹, AN Zhiying² (1. Institute of Marine Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China; 2. School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: A water security framework was constructed based on the research idea of “supply-flow-demand” of water supply service. The surplus and deficit states of water ecosystem services were measured with the supply-demand ratio of water ecosystem services, and water ecological “source” and “sink” areas were extracted. The minimum cumulative resistance model was used to identify “source-sink” corridors and vulnerable nodes, and the water security pattern of Northeast China was analyzed. The results indicate that from 2000 to 2020, the water yield and water demand in Northeast China showed increasing trends. Spatially, the water yield was generally more abundant in the east and less in the west, while the spatial distribution of water demand was highly correlated with population density and the level of social and economic development. On the whole, the main performance of water ecosystem supply and demand services was characterized by a surplus state in the research period, and the area of surplus gradually increased. Water ecological “source” areas were mainly distributed in cultivated land and forest land in the eastern and central regions, and water ecological “sink” areas were mainly concentrated in cultivated land, forest land, and unused land in the western region. The water ecological “source-sink” corridors in Northeast China were mainly in the Songhua River, Suifen River, Liao River, Tumen River, Daling River, and Taizi River, along with their tributaries. Multiple water supply nodes in central Liaoning, Changchun, and Harbin were relatively fragile, and water supply nodes in central Heilongjiang need to be highly protected.

Key words: water resources; ecosystem service flow; water yield; water demand; Northeast China

水作为生存之本、生产之要,是决定可持续发展的重要战略资源。随着我国城市化快速推进和经济高速发展,水资源需求量激增^[1],水资源短缺、水生态损害、水环境污染等水安全问题日益显现。东北地区是我国重要的工农业基地,肩负着维护国家五大安全的战略使命,但由于其水资源空间分布不均

衡,加之过度开发利用,辽河、松花江水系以及霍林河等河流多次出现断流,部分大中城市和主要产业城市水资源供需矛盾突出,社会经济发展受到严重制约。如何保护东北地区水资源,进而实现水安全和社会经济高质量发展的双重目标是亟须解决的重要科学问题。

供水服务需求量主要为人类日常生产、生活中的农业、工业和生活用水,通过人口密度与人均用水量乘积赋值于 1 km×1 km 的栅格单元中,得到供水服务需求量。

2.2 水生态系统服务供需比

本文采用水生态系统服务供需比(R)反映水资源供需之间的关系以及水生态服务可持续供应能力,计算公式为

$$R = \frac{S - D}{(S_{\max} + D_{\max})/2} \tag{1}$$

式中: S 、 D 分别为供水服务供给和需求量; $S_{\max}$ 、 $D_{\max}$ 分别为供水服务最大供给和最大需求量。 $R>0$ 、 $R<0$ 分别表示水生态系统供需服务为盈余和赤字状态; $R=0$ 表示供需平衡。

2.3 水安全格局分析

2.3.1 “源”“汇”区识别

识别供水服务的来源和去向是分析水安全格局的基础。本文将水生态“源”区定义为在满足人类对水资源需求的同时,可为缺水地区提供大量供水服务的区域^[17]。参考 Chen 等^[19] 研究筛选出 $R>0$ 的地区后,对其进行聚类分析(分为高-高、高-低、低-高和低-低集聚),提取具有高盈余供水服务的高-高集聚区作为水生态“源”区。 $R<0$ 意味着供水服务赤字,将其作为水生态“汇”区。

2.3.2 水生态综合阻力面构建

供水服务流路径受地形和传输过程中河道等多因素影响,较低的流量存在较高的阻力。已有研究表明,供水时空分布不均增加了区域水资源利用的复杂性^[22-24]。本文结合相关研究^[19,25],综合考虑区域水资源供需对水资源调配的影响^[26],选取河网、坡度、高程、产水量和需水量作为阻力因子(表 1),根据 D8 算法和流量条件指示供水服务流的方向,在高海拔地区设置高阻力,低海拔地区设置低阻力,进而构建水生态综合阻力面^[19]。

表 1 东北地区水生态阻力因子

Table 1 Water ecological resistance factors in Northeast China					
阻力值	河网	坡度/(°)	高程/m	产水量/(m ³ /hm ²)	需水量/(m ³ /hm ²)
1	一级河流	0~5	-268~200	0~500	0~300
2	三级河流	>5~10	>200~370	>500~1000	>300~500
3	四级河流	>10~15	>370~580	>1000~2000	>500~1000
4	五级河流	>15~20	>580~870	>2000~4000	>1000~1500
5		>20~21.41	>870~2589	>4000	>1500

注:河流外的阻力值为 10。

2.3.3 “源-汇”廊道构建

水安全格局综合了物理流和水生态系统服务流的特征,物理流主要指由地形因素等导致水沿河道

自上游向下游的流动过程,水生态系统服务流则是水资源由供应地向需求地的实际消耗过程。为明确空间上水资源供不应求的地区,借助生态系统的供应和需求特征确定“源”“汇”区后,水流的物理特性被用于确定“源-汇”廊道。由于 Linkage Mapper 工具仅连接生态源之间的走廊,无法可视化方向性。本文选取最小累计阻力(minimum cumulative resistance, MCR)模型确定从“源”区到“汇”区的累计阻力最小成本路径,以确保走廊从“源”到“汇”的方向,具体计算方法见文献^[19]。

2.3.4 关键廊道及脆弱节点提取

跨区域调水主要通过河道、运河等方式完成,在识别研究期内的水生态“源-汇”廊道时,将 2000—2020 年“源-汇”廊道进行叠加,基于河网结构划定东北地区“源-汇”廊道,其中每条廊道都准确代表一条特定的河流,并作为水生态系统服务流的关键廊道。河流交叉处是物质和能量流动的汇聚点,属于结构脆弱且易受攻击的节点^[19]。本文利用网络数据集工具对主要廊道交叉点进行识别时,将其认定为“源-汇”廊道的脆弱节点。水生态综合阻力面处于不断增长阶段意味着节点所受的攻击力更强,节点更脆弱,需要重点保护。本文使用 ArcGIS 中的“值提取至点”工具识别各年份累积阻力增加的所有脆弱节点,并将其作为预警节点。此外,由于东北地区地域辽阔,“源”“汇”区斑块数量庞大且小面积斑块较多,为方便直观可视化,在提取关键廊道时仅考虑了大于 500 km²的“源”“汇”区斑块。

2.4 数据来源

本文行政边界、土地利用、数字高程模型等数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心,降雨、蒸散发数据来源于国家地球系统科学数据中心,根系深度、土壤质地、有机碳含量等数据来源于《基于世界土壤数据库的中国土壤数据集》(V 1.1),需水量数据来源于水资源公报,人口密度数据来源于 WorldPop 网站。

3 结果与分析

3.1 水生态系统服务供需特征

2000—2020 年东北地区水资源供需空间分布如图 2 所示。从图 2 可以看出,研究期内产水量均值由 842.53 m³/hm²增加至 2 490.50 m³/hm²,年均增长率约 9.78%,其空间差异随时间的变化逐渐增加(图 2(a)~(e))。2000—2015 年产水量分布特征大致为东多西少,其中辽东、长白山区、小兴安岭、三江平原等地产水量较高,中部松嫩、辽河平原区产水较低。中部多个城市产水量较低主要是因为随着

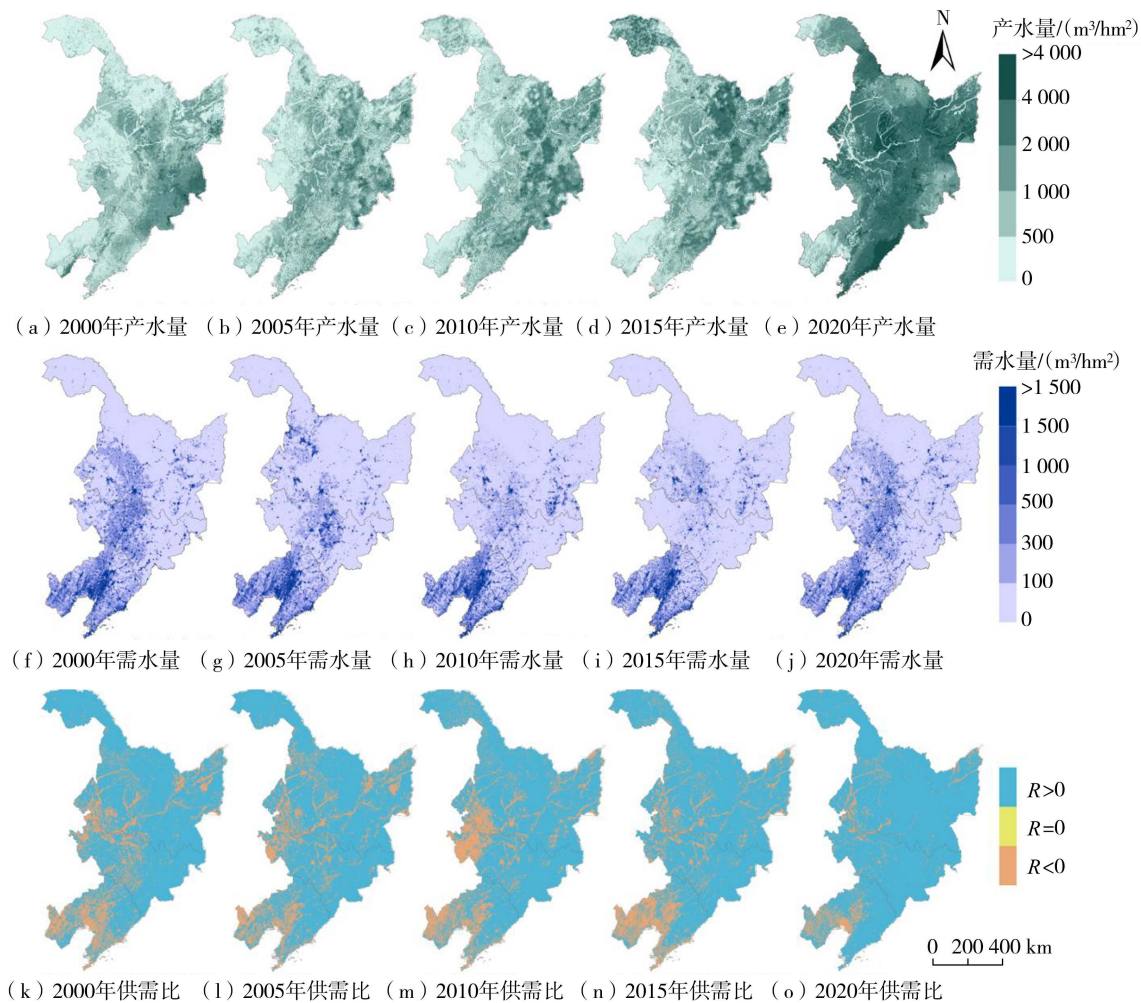


图2 2000—2020年东北地区水资源供需空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of water supply and demand in Northeast China from 2000 to 2020

城市化进程加快,不透水面面积持续增加,随之地表径流增加、地下径流减少、蒸发量增加,进而导致供水量减少。2020年为丰水年,产水量在空间上大幅增长,且空间分布较为均匀,辽西、西北部以及长白山区较低,其余地区较高。产水量时空演变主要受温度、降水等因素影响,由于地处欧亚大陆最东端且属于中高纬度地区,东北地区对全球气候变化具有较强的敏感性。从降水来看,东部临近海洋,海洋为其提供了更多水汽,而中部平原区受长白山脉阻挡,降水较少。

就需水量而言,2000年、2005年、2010年、2015年平均需水量分别为308.94、284.17、275.82、272.17 m^3/hm^2 ,年均下降幅度为2.45 m^3/hm^2 。该时段内由于水资源管理政策的落实,多数城市生产用水和人均生活用水量均不断减少。2020年需水量增加至339.33 m^3/hm^2 ,与2015年相比,年均增幅约13.43 m^3/hm^2 。说明随着社会经济快速发展,人类生活和生产活动对水资源的需求量不断上升,迫切需要相关部门加以管控。从其空间分布格局来看

(图2(f)~(j)),需水量高值区的空间分布与人口密度、社会经济发展程度高值区具有较高的一致性,在东北平原地区大致呈带状分布。其中,辽西、辽中水资源需求量较为突出,是由于辽宁主要产业为工农业,尤其辽中南是东北地区重工业的典型代表,耗水量较大,水资源供需矛盾突出。吉林和黑龙江的产水服务需求高值区主要在松嫩平原区,呈“带状一点状一带状”变化,其面积呈先减后增变化,这可能是由于该地区以长春、哈尔滨两大省会为中心,工农业及制造业发展较好,农作物灌溉、产业发展等对水的需求量较大。

从供需情况来看(图2(k)~(o)),研究期内主要表现为盈余状态,主要分布于东部、中部及北部;供需比为赤字状态的地区主要呈星点状散布于中西部和北部,其面积在2000—2010年为增加态势,之后表现为减少态势。整体而言,2020年水资源供需比赤字面积小于2000年。具体地,辽宁西、中部的的水资源供需关系较为紧张,一方面由于该地区处于干旱和半干旱地带,降水量少;另一方面由于该地区

主要为耕地,农业灌溉用水量大,且辽中南重工业基地耗水突出,进一步加重了其用水压力。松嫩平原水资源“供不应求”面积占比逐渐减少,说明在相关政策的管控下,供水服务紧张程度得到缓解。东北地区的社会经济发展中心与水资源丰沛区存在空间错位现象,迫切需要配备大型控制性蓄水中心,同时,完善水源工程建设,加快形成供水服务保障体系,也需要综合考虑调水条件,合理分配区域内水资源,逐步推进东部向西部地区的引水、调水工程建设。

3.2 水生态系统服务流格局

探究流动下的供水服务实质上是将盈余地区的水资源运送至匮乏区,基于生态系统服务流的水安全格局能够为跨流域引、调水及水资源保护提供更科学合理的决策参考,2000—2020 年东北地区水生态系统服务流空间格局见图 3。

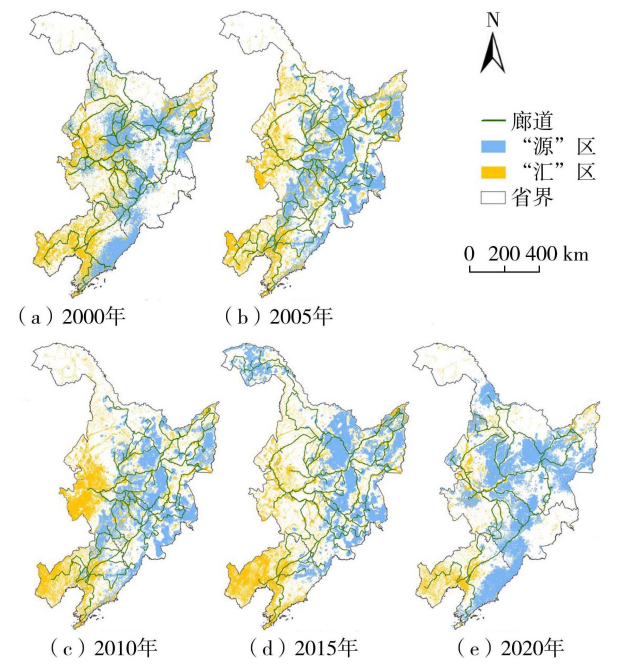


图 3 2000—2020 年东北地区水生态系统服务流空间格局
Fig.3 Spatial pattern of water ecosystem service flow in Northeast China from 2000 to 2020

水生态“源”“汇”区的位置整体上处于“聚集—分散—聚集”的动态变化中。“源”区主要分布在东、中部,面积由 16.69 万 km²增加至 23.55 万 km²,年增长率约为 2.06%,增加的地区主要分布在吉林中部和黑龙江东、北部;“汇”区面积则从 15.67 万 km²减少至 6.91 万 km²,年减少率约为 2.80%,减少的面积主要分布于东北地区西、中部,以辽中、西部减少最为显著。研究期内“源”“汇”区面积之比由 1.03 增大至 3.41,说明水资源盈余增加,“引浑济辽”“引松入长”等水资源跨区域调用较大地缓解了水资源匮乏区的用水压力。

“源-汇”廊道在数量上呈先增后减变化,且

2020 年数量明显小于 2000 年;就位置而言,由于其为连接供水服务供需的通道,其位置随“源”“汇”区空间分布改变而变化。2020 年,“源”区空间分布特征趋于集聚,且多处于地形较高的林地;“汇”区主要分布于辽中、西和三江平原等地区,廊道路径多为高海拔至低海拔,其输送阻力较小。

地理重心转移可以直观地反映出某段时间内地理要素的变化幅度及空间差异。本文借助重心转移模型探究了 2000—2020 年东北地区水生态“源”“汇”区重心转移情况(图 4)。结果表明,“源”区重心主要分布于松原和长春交界处,其地理位置变化范围为 126.95°E ~ 128.67°E、45.37°N ~ 46.24°N,研究期内呈逆时针小幅移动;“汇”区重心均在哈尔滨滨境内,在 124.13°E ~ 125.14°E、44.07°N ~ 44.64°N 范围内先向西移动,后向北、西南移动。2005 和 2010 年“汇”区重心几乎重叠,这主要与两个时期“汇”区面积和位置变化有关。

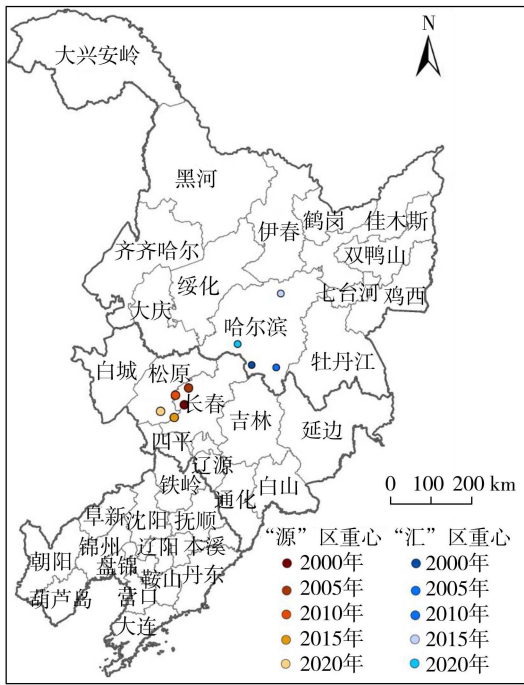


图 4 2000—2020 年东北地区水生态“源”“汇”区重心转移
Fig.4 Shifting of water ecological “source” and “sink” region gravity centers in Northeast China from 2000 to 2020

了解水生态“源”“汇”区土地利用模式可为东北地区水资源可持续管理提供理论基础。东北地区水生态“源”“汇”区各土地利用类型面积占比如表 2 所示,“源”区主要为耕地和林地,二者占比超 80%。总体而言,2000 年和 2020 年水生态“源”区各土地利用类型占比情况趋于一致。从各时期变化特征来看,“源”区耕地面积占比呈先减后增变化,2000 年、2020 年耕地占比分别为 52.44% 和

50.08%；林地面积占比则为先增后减趋势，2015 年林地占比高达 73.73%，为研究期内最高值；草地、水域、建设用地和未利用地面积占比在研究期内变化较为稳定。“源”区空间分布特征的形成主要有两方面原因：一方面是由于东北地区土地利用以耕地、林地为主；另一方面是由于东部地区降水较多且为高海拔地区，耕地主要处于三江、辽河平原等低海拔地区，东部林地地表水和地下水由上游流至下游，为耕地灌溉使用。

表 2 东北地区水生态“源”“汇”区土地利用类型面积占比
Table 2 Area proportion of different land use types in water ecological “source” and “sink” regions in Northeast China

区域类型	年份	面积占比/%					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
“源”区	2000	52.44	36.33	4.28	0.78	2.84	3.33
	2005	35.22	56.89	2.85	1.25	2.65	1.14
	2010	34.05	58.01	2.20	1.47	2.76	1.51
	2015	18.36	73.73	3.69	0.82	0.96	2.44
	2020	50.08	37.57	4.26	1.02	3.26	3.81
“汇”区	2000	47.33	18.97	5.54	9.31	6.29	12.56
	2005	46.32	18.05	6.14	9.08	6.15	14.26
	2010	44.77	17.43	6.68	7.68	7.58	15.86
	2015	45.09	18.70	5.00	8.63	8.68	13.90
	2020	37.69	14.65	7.90	14.35	8.65	16.76

从水生态“汇”区看，耕地占比最大，草地占比最小。2000—2015 年“汇”区在各土地利用类型上占比变化较小，整体占比从大到小依次为：耕地、林地、未利用地、水域、建设用地、草地，其中，耕地和林地占比超过 60%。2020 年耕地和林地占比有所减

少，草地、水域和未利用地面积明显增加。这与人类生产、生活用水情况相一致，东北地区是我国主要的农业基地，已逐步发展成商品性生产，农田灌溉用水量较大。21 世纪以来，东北地区格外重视生态环境保护，先后实施了天然保护林工程、退耕还林工程等重大生态恢复工程，植被覆盖度增加，供水能力也随之增强。2020 年耕地类型需水量有所减少，这可能与伴随着东北地区产业结构调整，农田灌溉需水量减少，生活和工业需水量增加，用水结构改变有关。

行政边界是社会经济和水资源管理最有效的边界之一。本文对市级尺度下供水服务进行分析，结果如图 5 所示。研究期内水生态“源”“汇”区在各市级行政单元所占面积的增减变化较为显著。“源”区主要分布于沿海地区的丹东、大连及中、北部的哈尔滨、绥化、伊春、黑河、牡丹江等城市，其面积和空间分布主要受气温和降水条件的强烈影响。“汇”区主要分布于朝阳、阜新、沈阳、大庆、绥化、齐齐哈尔、哈尔滨等用水量较大的城市，其用水量主要与工农业和人口需水量有关。一方面由于中西部平原区的农业灌溉和工业产品生产耗水量大，另一方面沿海地区和城市群快速城市化和人口聚集是水资源需求量增长的主要驱动力，如沈阳、哈尔滨属于特大城市，人口较多，其用水量也较其他城市多。

3.3 水安全格局

基于生态系统服务流的水安全格局可根据产水量和需水量空间分布指示水资源的供需热点和脆弱

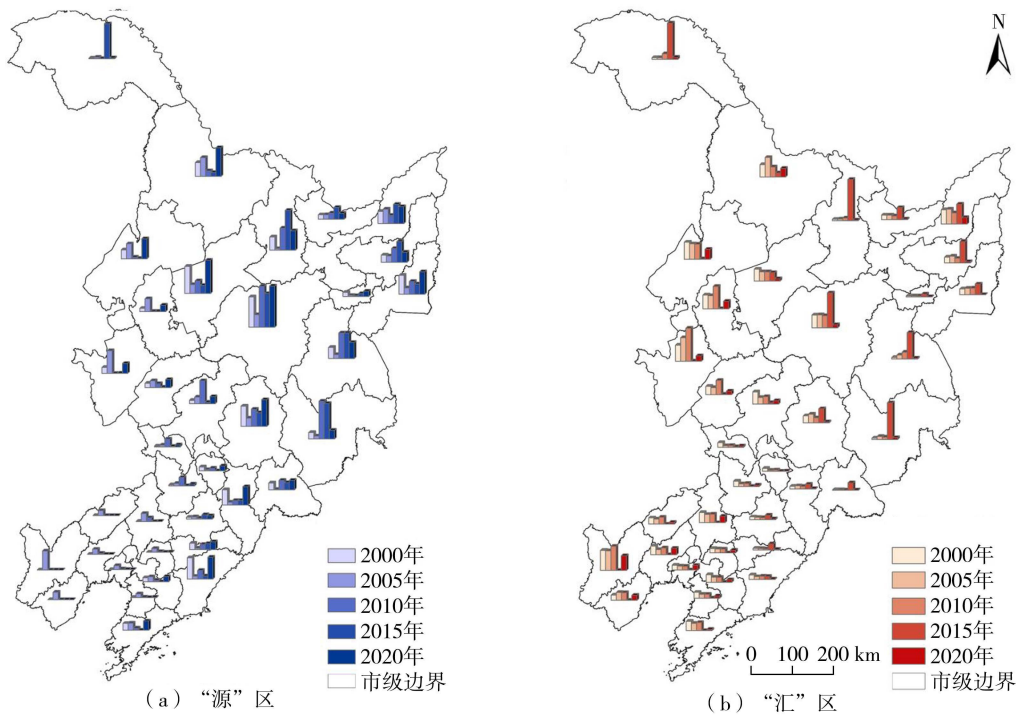


图 5 2000—2020 年东北地区水生态“源”“汇”区面积变化

Fig. 5 Area changes of water ecological “source” and “sink” areas in Northeast China from 2000 to 2020

区域,进而有针对性地加强脆弱区水资源保护,保障水资源可持续发展。本文采用自然断点法将水生态系统服务划分为高度、较高、一般、较低和低度5个安全等级(图6)。东北地区水生态系统服务大多为较低安全等级,主要分布于中部平原和三江平原等海拔较低的地区;低度安全等级主要分布于北部大兴安岭及东部本溪、通化、牡丹江、伊春等地,该地区为东北地区的高海拔地区;一般安全等级主要分布于大庆、白城、松原及黑龙江东部、辽宁中部,该地区供水服务状态良好,主要为草地;较高安全等级主要位于由三、四、五级河流构成的水生态廊道;高度安全等级地区与境内主要河流及其支流的分布在空间上重叠较高。这意味着当前供水服务廊道在大兴安岭和东北地区东部面临着较大的阻力。整体而言,东北地区需严格把控地下水资源开采,以维护地表水和地下水的平衡性,进一步保护水资源安全。

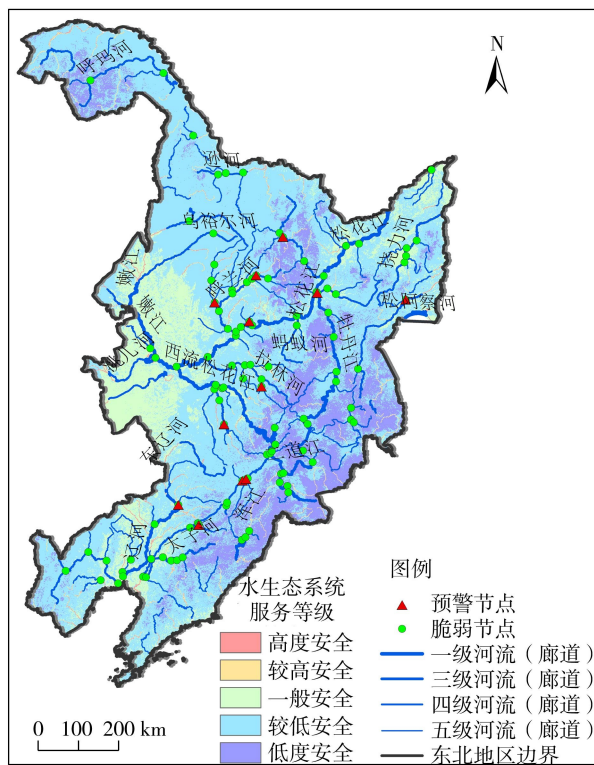


图6 东北地区水安全格局

Fig. 6 Water security pattern in Northeast China

水生态“源-汇”廊道的一级河流为松阿察河;三级河流主要为松花江、嫩江、黑龙江、牡丹江、鸭绿江;四级河流为额木尔河、呼玛河、呼兰河、绥芬河、东辽河、大辽河、图们江、辉发河、大凌河、太子河等;五级河流为卡马兰河、沾河、努敏河、欧根河等。本文提取出主要“源-汇”廊道交叉点113个,并将其作为水生态脆弱节点。其中黑龙江、吉林和辽宁的脆弱节点占比分别为48.67%、31.86%和19.47%,主要位于辽宁中部及长春、白山、哈尔滨等地,这些地

区均为流动路径节点,其供水量较大,需要将水资源输送至多个“汇”区。因此,这些节点较为脆弱、容易出现水资源量盈余不足或断流等情形。以松花江上的节点最为典型,需要严格把控水资源开发利用,严防地下水超采。在脆弱节点中,有12个预警节点,占脆弱节点的10.62%,主要分布于伊春、绥化、哈尔滨、吉林、抚顺等地。其中黑龙江的预警节点最多,占比为50%,哈尔滨、绥化各2个,伊春和鸡西各1个;吉林和辽宁的预警节点占比分别为33.34%和16.66%。这些节点处的阻力在研究期内为增加态势,在水资源输送过程中会受到更强的攻击力,需要特别保护;同时还应在合理范围内减少人类活动对沿廊道及其周围环境的扰动,控制城市扩张。此外,还应规划“源”“汇”区土地利用,保护和扩大森林和草原带,增强保水、供水能力,以实现水安全可持续发展。

4 讨论

4.1 东北地区水安全格局

当前从生态连通性角度整合景观格局和生态过程是深入了解生态安全格局的有效途径,其研究结果可促进社会系统与生态系统的协调发展^[27]。本文将这一思想应用至水安全格局中,从生态系统服务流角度出发,综合考虑了水生态系统服务流特性,所分析的水安全格局更贴近东北地区跨区域引、调水实际情形^[28],具有较强的可操作性。一方面,“源”“汇”区为反映丰水区和缺水区地理位置及其跨区域水生态系统服务流提供了参考;另一方面,廊道和节点对应于实际的河流和河段,可为河流管理和重点河流、节点的优先保护提供科学依据,有助于社会经济与水资源系统的协调发展。此外,本文的水安全格局与东北地区水资源空间分布相一致^[29],反映出以重化工业为主的辽河流域中下游地区脆弱节点密集;用水量较大的哈尔滨、长春等城市由于过量开采地下水导致水生态环境脆弱。

4.2 模拟结果科学性分析

InVEST模型操作简单,结果具有较强的空间特性,其应用已较为广泛。然而,该模型在应用中还存在一些问题,可能会导致输出结果的不确定性。如该模型涉及诸多参数,参数的准确性将在一定程度上影响结果的精准度;产水模块中未考虑地形、地表水与地下水相互作用等复杂因素对产水量模拟结果的影响^[29]。本文采用InVEST模型测算的年均产水量1 073亿m³与水资源公报的年均径流量1 053亿m³间相对误差约为1.90%。闫晓露等^[30]基于InVEST模型模拟的大连市水源涵养与水资源

总量的相对误差为 7.26%；刘美娟等^[31]利用 InVEST 模型对青海湖流域模拟的产水量与实际产水量在 1997—2009 年、2010—2020 年的相对误差分别为-4.27% 和 4.15%。对比以上研究发现，本文的产水量模拟结果与实际接近。此外，吴健等^[29,32]均基于 InVEST 模型的产水量模块对东北地区产水量进行模拟，其结果与本文基本一致，因此，本文的结果具有科学性和合理性。

5 结 论

- a. 2000—2020 年东北地区产水量明显增加，在空间上大致呈东多西少分布；需水量为增加态势，其空间分布与人口密度、社会经济发展程度具有较高的一致性；水生态系统供需服务主要表现为盈余状态，盈余区分布于东、北部，赤字区则主要集中于西、中部。
- b. 水生态“源”区主要分布在东、中部，耕地和林地占比超 80%；水生态“汇”区主要集中在西部，2000—2015 年“汇”区各土地利用类型面积占比从大到小依次为耕地、林地、未利用地、水域、建设用 地和草地，2020 年耕地和林地面积占比有所降低。
- c. 东北地区水生态“源-汇”廊道主要为松阿察河、松花江、额木尔河、绥芬河、辽河、图们江、大凌河、太子河等；辽宁中部、长春、哈尔滨等地多个供水节点较为脆弱，黑龙江中部的供水节点需要加强保护。

参考文献：

[1] 邓捷铭,贾绍凤. 区域水安全评价指标体系构建与应用 [J]. 水科学进展,2022,33(1):48-56. (DENG Jieming, JIA Shaofeng. Indicators system construction and application of regional water security [J]. Advances in Water Science,2022,33(1):48-56. (in Chinese))

[2] VEETIL A V, MISHRA A K, GREEN T R. Explaining water security indicators using hydrologic and agricultural systems models [J]. Journal of Hydrology, 2022, 607: 127463.

[3] LIANG Hanxu, ZHANG Dan, WANG Wensheng, et al. Evaluating future water security in the upper Yangtze River Basin under a changing environment[J]. Science of the Total Environment,2023,889:164101.

[4] 王欣,侯效灵,侯保灯,等. 基于 DPSIRM 模型的城市化进程与水安全耦合关系分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021,42(2): 50-57. (WANG Xin, HOU Xiaoling, HOU Baodeng, et al. Analysis of the coupling relationship between urbanization process and water security based on DPSIRM model [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42(2): 50-57.

(in Chinese))

[5] 左其亭,郝林钢,刘建华,等. “一带一路”分区水资源特征及水安全保障体系框架[J]. 水资源保护,2018,34(4):16-21. (ZUO Qiting,HAO Lin’ gang,LIU Jianhua,et al. Characteristics of water resources in “Belt and Road” district and its framework of water security system [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(4): 16-21. (in Chinese))

[6] 金菊良,汤睿,周戎星,等. 基于联系数的城市水生态文明建 设评价方法[J]. 水资源保护,2021,37(4): 1-6. (JIN Juliang, TANG Rui, ZHOU Rongxing, et al. Evaluation method for urban water eco-civilization construction based on connection number [J]. Water Resources Protection,2021,37(4):1-6. (in Chinese))

[7] LI Yongge,LIU Wei,FENG Qi,et al. The role of land use change in affecting ecosystem services and the ecological security pattern of the Hexi regions,Northwest China[J]. Science of the Total Environment,2023,855:158940.

[8] GUAN Dongjie,DENG Zhao,ZHOU Lilei,et al. How can multisenario flow paths of water supply services be simulated? a supply-flow-demand model of ecosystem services across a typical basin in China[J]. Science of the Total Environment,2023,893:164770.

[9] 郑炜. 基于改进灰靶模型的广州市水生态安全评价 [J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(6):72-77. (ZHENG Wei. Evaluation of water ecological security in Guangzhou based on improved grey target model [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018,39(6):72-77. (in Chinese))

[10] 林若兰,卓文珊,高延康,等. 基于 SWAT 模型的北江流域生态径流调节服务评估[J]. 水资源保护,2020,36(6): 131-136. (LIN Ruolan, ZHUO Wenshan, GAO Yankang, et al. Assessment of ecohydrological regulation service in the Beijiang River Basin based on SWAT model [J]. Water Resources Protection,2020,36(6): 131-136. (in Chinese))

[11] 冯涛,杨睿峰,左其亭,等. 引黄灌区水资源承载力多目标决策模型[J/OL]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2023: 1-9 [2024-05-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20230913.1701.002.html>. (FENG Tao,YANG Ruifeng,ZUO Qiting,et al. A multi-objective decision-making model for water resources carrying capacity in the Yellow River diversion irrigation area[J/OL]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2023: 1-9 [2024-05-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20230913.1701.002.html>. (in Chinese))

[12] 安莉娜,范国福,吴迪,等. 基于水资源承载力与城市经济社会发展水平耦合协调度模型的遵义市发展评价

- [J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):35-41. (AN Lina, FAN Guofu, WU Di, et al. Development evaluation of Zunyi City based on coupling coordination degree model of water resources carrying capacity and urban economic and social development level[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):35-41. (in Chinese))
- [13] QIN Keyu, LIU Jingya, YAN Liwen, et al. Integrating ecosystem services flows into water security simulations in water scarce areas:present and future[J]. Science of the Total Environment,2019,670:1037-1048.
- [14] 陈默,林育青,张建云,等. 水生态系统生产总值核算体系及应用[J]. 水资源保护,2023,39(1):234-242. (CHEN Mo, LIN Yuqing, ZHANG Jianyun, et al. Accounting system of gross water ecosystem product and its application[J]. Water Resources Protection,2023,39(1):234-242. (in Chinese))
- [15] 赵奕博,于洋,孙保平. 山西省产水服务供需时空变化[J]. 水土保持学报,2023,37(6):126-133. (ZHAO Yibo, YU Yang, SUN Baoping. Research on the spatiotemporal changes of supply and demand for water yield in Shanxi Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(6):126-133. (in Chinese))
- [16] YUAN Donghai, DU Manrui, YAN Chenling, et al. Coupling coordination degree analysis and spatiotemporal heterogeneity between water ecosystem service value and water system in Yellow River Basin cities[J]. Ecological Informatics,2024,79:102440.
- [17] 李兆碧,陶宇,欧维新,等. 基于水量与水质的太湖流域水生态服务供需关系及多情景评估[J]. 生态学报,2023,43(5):2088-2100. (LI Zhaobi, TAO Yu, OU Weixin, et al. Supply and demand relationship and multi-scenario assessment of water ecological services related water quantity and quality in Taihu Lake Basin[J]. Acta Ecologica Sinica,2023,43(5):2088-2100. (in Chinese))
- [18] 方国华,李智超,钟华昱,等. 考虑供水均衡性的南水北调东线工程江苏段优化调度[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):10-18. (FANG Guohua, LI Zhichao, ZHONG Huayu, et al. Optimal operation of Jiangsu section of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project considering the water supply balance[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(3):10-18. (in Chinese))
- [19] CHEN Zilong, LIN Jingyu, HUANG Jinliang. Linking ecosystem service flow to water-related ecological security pattern: a methodological approach applied to a coastal province of China[J]. Journal of Environmental Management,2023,345:118725.
- [20] LIN Jingyu, HUANG Jinliang, PRELL C, et al. Changes in supply and demand mediate the effects of land-use change on freshwater ecosystem services flows[J]. Science of the Total Environment,2021,763:143012.
- [21] PENG Jian, YANG Yang, LIU Yanxu, et al. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns[J]. Science of the Total Environment,2018,644:781-790.
- [22] 郭旭宁,郦建强,李云玲,等. 京津冀地区水资源空间均衡评价及调控措施[J]. 水资源保护,2022,38(1):62-66. (GUO Xuning, LI Jianqiang, LI Yunling, et al. Water resources spatial equilibrium evaluation and regulation measures in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Water Resources Protection,2022,38(1):62-66. (in Chinese))
- [23] 宾零陵,蒋睿文,曹永强,等. 京津冀水资源生态足迹动态变化与预测[J]. 水资源保护,2023,39(5):32-38. (BIN Lingling, JIANG Ruiwen, CAO Yongqiang, et al. Dynamic change and prediction of ecological footprint of water resources in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Water Resources Protection,2023,39(5):32-38. (in Chinese))
- [24] 杨荣雪,王丰,王红瑞,等. 国土空间规划体系下的城市水资源空间均衡评价模型及应用[J]. 水资源保护,2023,39(6):130-136. (YANG Rongxue, WANG Feng, WANG Hongrui, et al. Spatial equilibrium evaluation model of urban water resources and its application under territorial spatial planning system[J]. Water Resources Protection,2023,39(6):130-136. (in Chinese))
- [25] 黄梅,刘晨曦,俞晓莹,等. 城市水生态网络韧性评价与优化策略:以长沙市为例[J]. 经济地理,2022,42(10):52-60. (HUANG Mei, LIU Chenxi, YU Xiaoying, et al. Resilience evaluation and optimization of urban water ecological network: take Changsha as an example[J]. Economic Geography,2022,42(10):52-60. (in Chinese))
- [26] 方国华,赵文萃,李鑫,等. 南水北调东线工程江苏段水资源调配研究[J]. 水资源保护,2023,39(4):1-8. (FANG Guohua, ZHAO Wencui, LI Xin, et al. Study on water resources dispatching and allocation in Jiangsu section of Eastern Route Project of South-to-North Water Diversion Project[J]. Water Resources Protection,2023,39(4):1-8. (in Chinese))
- [27] LIU Xiaoyang, SU Yan, LI Zhigang, et al. Constructing ecological security patterns based on ecosystem services trade-offs and ecological sensitivity: a case study of Shenzhen metropolitan area, China[J]. Ecological Indicators,2023,154:110626.
- [28] 张城,李晶,周自翔. 基于水供给服务空间流动模型的渭河流域水资源安全格局[J]. 地理科学,2021,41(2):350-359. (ZHANG Cheng, LI Jing, ZHOU Zixiang. Water resources security pattern of the Weihe River Basin based on spatial flow model of water supply service[J]. Scientia Geographica Sinica,2021,41(2):350-359. (in Chinese))

Engineering,2023,34(3):28-36. (in Chinese))

[21] RICHTER B D,BAUMGARTNER J V,POWELL J,et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems[J]. Conservation Biology,1996,10(4):1163-1174.

[22] 武连洲,白涛,黄强. 基于 RVA 阈值区间集成的河道内生态需水计算与应用[J]. 水资源保护,2022,38(6):168-174. (WU Lianzhou, BAI Tao, HUANG Qiang. Integrated calculation of ecological water demand of rivers based on RVA threshold interval and its application[J]. Water Resources Protection,2022,38(6):168-174. (in Chinese))

[23] SHIAU J T,WU Fuchun. Feasible diversion and instream flow release using range of variability approach [J]. Journal of Water Resources Planning and Management,2004,130(5):395-404.

[24] 高英,苏华英,于洁,等. 乌江流域水光互补梯级蓄能调度图绘制[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):56-64. (GAO Ying, SU Huaying, YU Jie, et al. Drawing of Hydro-PV complementary cascade energy storage dispatching diagram in Wujiang River Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):56-64. (in Chinese))

[25] REN K, HUANG S, HUANG Q, et al. Assessing the reliability, resilience and vulnerability of water supply system under multiple uncertain sources[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 252: 119806.

[26] 闻昕,秦济森,谭乔凤,等. 基于余留期效益函数的水光互补随机优化调度方法[J]. 水资源保护,2023,39(6):23-31. (WEN Xin, QIN Jisen, TAN Qiaofeng, et al. Research on stochastic optimal operation of hydro-photovoltaic complementary based on utility function of carryover stage[J]. Water Resources Protection,2023,39(6):23-31. (in Chinese))

[27] 尹丽君,许昌,黄显峰,等. 水光互补基地水库调度图绘制及应用策略[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):65-69. (YIN Lijun, XU Chang, HUANG Xianfeng, et al. Drawing and application strategy of dispatching diagram for water-light complementary base reservoir [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):65-69. (in Chinese))

[28] 黄显峰,颜山凯,李大成,等. 对水电效益影响最小的水光互补运行方式研究[J]. 水利水电科技进展,2022,42(6):15-20. (HUANG Xianfeng, YAN Shankai, LI Dacheng, et al. Research on hydro-photovoltaic complementary rules for minimum influence on hydropower benefit[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(6):15-20. (in Chinese))

[29] DEB K, JAIN H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2014,18(4):577-601.

[30] 方国华,李智超,钟华昱,等. 考虑供水均衡性的南水北调东线工程江苏段优化调度[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):10-18. (FANG Guohua, LI Zhichao, ZHONG Huayu, et al. Optimal operation of Jiangsu section of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project considering the water supply balance [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(3):10-18. (in Chinese))

[31] 陶洁,王沛霖,王辉,等. 基于 A-NSGA-Ⅲ的引江济淮工程河南段水资源优化配置研究[J]. 水利水电科技进展,2023,43(6):111-119. (TAO Jie, WANG Peilin, WANG Hui, et al. Research on water resources optimal allocation in Henan Section of Yangtze River to Huaihe River Water Diversion Project based on A-NSGA-Ⅲ algorithm[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(6):111-119. (in Chinese))

(收稿日期:2023-09-14 编辑:施业)

+++++

(上接第 19 页)

[29] 吴健,李英花,黄利亚,等. 东北地区产水量时空分布格局及其驱动因素[J]. 生态学杂志,2017,36(11):3216-3223. (WU Jian, LI Yinghua, HUANG Liya, et al. Spatiotemporal variation of water yield and its driving factors in Northeast China [J]. Chinese Journal of Ecology,2017,36(11):3216-3223. (in Chinese))

[30] 闫晓露,李欣媛,刘澄浩,等. 生态系统服务簇空间演变轨迹及其社会-生态驱动的地理探测:以大连市为例[J]. 生态学报,2022,42(14):5734-5747. (YAN Xiaolu, LI Xinyuan, LIU Chenghao, et al. Spatial evolution trajectory of ecosystem service bundles and its social-ecological driven by geographical exploration:a case study of Dalian[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(14):5734-5747. (in Chinese))

[31] 刘美娟,仲俊涛,王蓓,等. 基于 InVEST 模型的青海湖流域产水功能时空变化及驱动因素分析[J]. 地理科学,2023,43(3):411-422. (LIU Meijuan, ZHONG Juntao, WANG Bei, et al. Spatiotemporal change and driving factor analysis of the Qinghai Lake Basin based on InVEST model[J]. Scientia Geographica Sinica,2023,43(3):411-422. (in Chinese))

[32] XIANG Hengxing, ZHANG Jian, MAO Dehua, et al. Identifying spatial similarities and mismatches between supply and demand of ecosystem services for sustainable Northeast China [J]. Ecological Indicators, 2022, 134: 108501.

(收稿日期:2024-01-28 编辑:施业)