哈尔滨市产水量时空变化及驱动力分析

祁玉馨，胡远东
（东北林业大学 园林学院，黑龙江 哈尔滨 150040）

摘　要：［目的］探讨 2000—2020 年哈尔滨市产水服务的时空变化特征，揭示哈尔滨市产水量时空分异特征的驱动机制，为该市水资源管理及可持续发展提供科学依据。［方法］选取我国典型的寒地城市哈尔滨市作为研究区，基于 InVEST 模型产水量模块对 2000，2010 和 2020 年的产水量时空变化特征进行分析，并利用参数最优地理探测器揭示了哈尔滨市产水量时空演变的驱动因素。［结果］①2000—2020 年哈尔滨市产水量呈逐年增长趋势，产水量由 2000 年的 9.68×10^{9} m^3 增长至 2020 年的 2.23×10^{10} m^3，不同年份产水量的空间分布格局基本相似，在空间上整体表现为“东高西低”的分布特征；②研究区产水量的分布存在显著的空间正相关，以“低—低聚集”和“高—高聚集”类型为主，2000—2020 年，二者面积占全市总面积的比例呈下降趋势；③各驱动因素对产水量的影响具有明显的空间异质性，实际蒸散发量和土地利用类型是经济质量发展区的主要驱动因子，而在自然主导的生态屏障区，二者的综合驱动力远不及经济质量发展区。［结论］产水量评估作为水源涵养研究的基础，与生态系统服务和生态产品价值密切相关，2000—2020 年哈尔滨市产水量时空格局变化显著，气象和土地利用因子是其主要驱动因子。

关键词：InVEST 模型；产水量；地理探测器；哈尔滨市
文献标识码：A　　**文章编号：**1000-288X(2023)06-0000-00　　**中图分类号：**X171.1

文献参数：祁玉馨，胡远东.哈尔滨市产水量时空变化及驱动力分析[J].水土保持通报，2023，43(6)：-. Qi Yuxin, Hu Yuandong. Spatial-temporal variation and driving force analysis of water yield in Harbin City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): -.

Spatial-temporal Variation and Driving Force Analysis of Water Yield in Harbin City

Qi Yuxin, Hu Yuandong
(*College of Landscape Architecture, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang* 150040, *China*)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal variation characteristics of Harbin's water yield services from 2000 to 2020 were discussed, and the driving mechanism of the spatiotemporal differentiation characteristics of Harbin City's water yield was revealed, which provided a scientific basis for the management and sustainable development of water resources in Harbin. [Methods] In this study, Harbin City, a typical cold land city, was selected as the research area, and the spatiotemporal variation characteristics of water yield in 2000, 2010 and 2020 were analyzed based on the InVEST model water yield module, and the spatial and temporal evolution of water yield services in Harbin City was revealed by using the parameter optimal geographic detector. [Results] ① The water output of Harbin City from 2000 to 2020 showed a year-by-year growth trend, and the water output increased from 9.68×10^{9} m^3 in 2000 to 2.23×10^{10} m^3 in 2020. The spatial distribution pattern of water yield in different years is basically similar, and the overall distribution characteristics of high east and low west are manifested spatially. ② There was a strong spatial positive correlation in the distribution of water yield in the study area, mainly low-low aggregation and high-high aggregation types, and the proportion of the two areas to the city's area showed a downward trend from 2000 to 2020. ③ The influence of each driving factor on water yield has obvious spatial heterogeneity, actual evapotranspiration

收稿日期：2023-02-28　　**修回日期：**2023-04-03
资助项目：黑龙江省重点研发计划指导类项目“黑龙江生态产品总值核算”(GZ20220117)
第一作者：祁玉馨(1999—)，女，山东省海阳市人，硕士研究生，研究方向为城市生态系统服务。Email：qiyuxin@nefu.edu.cn。
通信作者：胡远东(1977—)，男(土家族)，湖北省宜昌市人，博士，副教授，主要从事区域景观规划与生态修复、城市生态系统服务等方面的研究。Email：huyuandong@nefu.edu.cn。

and land use type are the main driving factors of economic quality development zone. In the nature-dominated ecological barrier area, the comprehensive driving force of the two is far less than that of the economic quality development area. [Conclusion] As the basis of water conservation research, water yield assessment is closely related to ecosystem services and ecological product value, and the temporal and spatial changes of water production in Harbin from 2000 to 2020 were significant, and meteorological and land use factors were the main driving factors.

Keywords: InVEST model; water yield; GeoDetector; Harbin City

生态系统是地球生命支持系统的基本组成单元，为人类提供丰富的生态产品，并具有净化水源、保持水土、清洁空气等服务功能[1]，是维持人类生存和社会可持续发展的基本保障。产水服务作为生态系统服务的重要组成部分，一方面可以满足人类生产生活用水的基本需求，另一方面有助于维持生物多样性、维护生态系统平衡，从而增进人类福祉[2]。同时产水服务也是影响生物量、碳循环以及泥沙输移等其他生态功能不可或缺的部分。因此，对产水服务进行定量评估，深入了解产水服务的时空分布规律及变化特征、揭示其变化的驱动因素，对于生态系统服务研究具有重要意义。

产水服务基本上等于“生态系统产水量”，两者都是通过根据水平衡原理从降水中减去实际蒸散量而获得的[4-6]。InVEST(The integrate valuation of ecosystem services and tradeoffs tool)模型由美国斯坦福大学、大自然保护协会(TNC)和世界自然基金会(WWF)联合开发，其中产水模块(water yield)是以水量平衡法原理为基础，能够在 ArcGIS 环境支持下量化研究区域内所有土地利用类型的产水服务[7]，其输出结果为产水深度，可据此计算研究区域产水总量。目前，InVEST 模型产水模块已应用在肯塔基州[8]、亚特兰大[9]、乌鲁米耶湖流域[10]，以及青藏高原[11]、横断山区等[12]地区，通过对产水量的评估与研究量化了产水服务，并结合冷热点分析[13]、相关性分析[14]、结构方程模型[15]以及情景模拟等[16]方法深入研究其空间分布规律和驱动因素，从而取得了一系列成果。产水量的空间异质性并不是某一因子单独作用而形成的，而是多因子复合驱动下的结果，因此在进行产水量驱动力分析时，地理探测器作为一种检验地理空间是否存在分异性的工具[17]，不仅可以定量探测各因子对产水量的解释度，而且可以探测各驱动因子间的交互作用[18]。本文借助 R 语言运用参数最优地理探测器进行计算，避免了人为因素对结果的影响，能够充分解释产水量空间异质性的主要驱动因子及其解释力，并结合国土空间规划对不同功能分区进行地理探测，从而深入分析不同功能分区之间空间异质性的驱动差异。

东北地区是我国主要的三大寒区之一，该区域广泛分布着季节性冻土和雪被[19]，近年来冻土退化较为严重，降低了区域水资源稳定性，干扰了生态系统进程[20-21]。哈尔滨市作为我国第一批重要工业城市，是我国东北端最典型的寒地省会城市，其气候变化较为敏感、且极端灾害天气频繁，土壤类型多样，人为干扰活动剧烈，区域内产水量具有明显的空间异质性，特别是近年来城市化的快速发展进一步加剧了产水量的空间差异。根据模型计算原理[7]，降水量越高、实际蒸散发量越低，则产水量越高，假设植被覆盖度较低的城镇生态系统蒸散发量较小、径流量较大，产水量较高；而森林生态系统通过林冠层截留降水、枯落物层吸收降水、土壤层蓄渗降水，水源涵养量较高，可能产生的蒸散发量较多，因此产水量较低；而哈尔滨湿地生态系统主要集中在松花江周围，若松花江水面蒸散发量较高，则产水能力较弱。据此，本文以哈尔滨市为研究区，基于 InVEST 模型产水模块，探讨 2000—2020 年近 20 a 来哈尔滨市产水服务的时空变化特征，并借助参数最优地理探测器，选择气候、地形地貌、土地利用类型等因子，揭示哈尔滨市产水量时空分异特征的驱动机制，以期为哈尔滨市的水资源管理及可持续发展提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

哈尔滨市(44°04′N—46°40′N，125°42′E—130°10′E)位于中国东北平原东北部地区，是中国东北的区域性中心城市、哈长城市群的核心城市之一，以及第一批国家新型城镇化综合试点城市[22]，总面积约 5.30×10^4 km^2。哈尔滨属于中温带大陆性季风气候，四季分明，总体地貌为南高北低，西高东低。松花江干流自西向东贯穿哈尔滨中部地区，成为全市灌溉量最大的河道。作为我国典型的寒地城市，哈尔滨市气候变化特征显著，水资源的分布不均衡，其中东部地区水资源较为丰富，而中、西部地区水资源严重缺乏，对当地居民生活和社会经济可持续发展产生了重要影响。

根据《哈尔滨市国土空间总体规划(2020-2035

年）》，可将哈尔滨市国土空间划分为都市经济高质量发展区、县域经济高质量发展区、小兴安岭生态屏障区和张广才岭生态屏障区，各分区具有不同的生态服务功能。

1.2　数据来源

（1）土地利用类型及面积。2000，2010 和 2020 年共 3 期土地利用数据（分辨率为 30 m×30 m）均来自 GlobeLand30（http：// www. globallandcover. com/），精度达到 83％以上，符合本研究的要求。根据研究目的和我国《土地利用现状分类（GB/T21010-2017）》，将研究区的土地利用类型划分为耕地、林地、草地、湿地、水体、建设用地和未利用地 7 大类。

（2）气象数据。本研究降水、气温和潜在蒸散发数据来自国家地球系统科学数据中心（http：// www.geodata.cn）；归一化差值积雪指数（NDSI）数据来自国家冰川冻土沙漠科学数据中心（http：// www. ncdc.ac.cn/portal/）。

（3）土壤数据。土层深度数据及土壤质地来自国家冰川冻土沙漠科学数据中心（http：// data.casnw.net/portal/）的第二次全国土壤数据库；土壤类型来源于中国科学院南京土壤研究所 1∶400 万中国土壤图（2000 年）。

（4）地形地貌数据。DEM 数字高程模型来自地理空间数据云（https：// www.gscloud.cn/），空间分辨率为 30 m，基于 DEM 数据，在 ArcGIS 中使用 Slope 工具计算研究区坡度数据。

（5）植被数据。归一化植被指数（NDVI）数据来自美国地质勘探局的 MOD13Q1 产品（https：// lpdaac.usgs.gov/products/mod13 q1 v061/），经 ArcGIS 处理后制作成研究区范围内的 NDVI 数据。

2　研究方法

2.1　InVEST 模型

2.1.1　模型原理　InVEST 模型产水（water yield）模块主要根据水量平衡原理，基于气象、土地利用类型等要素，计算每个栅格像元的径流量[7]。产水量的计算公式为：

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

式中：Y_{xj} 为栅格 x 中土地覆被类型 j 的年产水量（mm）；AET_{xj} 为栅格 x 中土地覆被类型 j 的实际蒸散量（mm）；P_x 为栅格 x 的降水量（mm）；AET_{xj}/P_x 为实际蒸散量与降水量的比值，具体计算公式为：

$$\frac{\mathrm{AET}_{xj}}{P_x}=\frac{1+w_xR_{xj}}{1+w_xR_{xj}+1R_{xj}} \tag{2}$$

$$w_x=Z\frac{\mathrm{PAWC}_x}{P_x} \tag{3}$$

$$R_{xj}=\frac{k_{ij}\times \mathrm{ET}_0}{P_x} \tag{4}$$

式中：R_{xj} 为土地覆被类型 j 上栅格单元 x 的 Budyko 干燥指数；ω_x 为植被年可利用水量与预期降水量的比值；Z 为 Zhang 系数；k_{ij} 是植物蒸散系数，即不同发育期中作物蒸散量与参考蒸散量（ET_0）的比值，参考前人的研究成果[8,23]及 InVEST 模型用户使用手册[7]，并结合研究区域实际进行赋值；PAWC_x 代表植物可利用含水量，采用周文佐等[24]提出的 AWC 模型计算，具体计算公式为：

$$\begin{aligned}\mathrm{PAWC}=&54.509-0.132\mathrm{sand}-0.003\mathrm{sand}^2-\\&0.055\mathrm{silt}-0.006\mathrm{silt}^2-0.738\mathrm{clay}+\\&0.007\mathrm{clay}^2-2.688\mathrm{OM}+0.501\mathrm{OM}^2\end{aligned} \tag{5}$$

式中：sand 为土壤砂粒含量（％）；silt 为土壤粉粒含量（％）；clay 为土壤黏粒含量（％）；OM 为土壤有机质含量（％）。

2.1.2　模型校验　Zhang 系数是反映当地降水格局和水文地质特征的气候季节因子，其值在 1～30 之间变化。产水模块 Zhang 系数通过《黑龙江水资源公报》及《黑龙江统计年鉴》数据进行设定，经过不断调试，当产水量与官方公布的产水数据差异较小时，所对应的 Zhang 系数即为本研究的参数值。基于此对 InVEST 模型的产水模块输出结果进行校验，当 Z 系数赋值为 5.0，1.8，1.1 时，输出结果与官方公布的当年水资源总量数据最为接近，相对误差控制在 10％以内，由此可见，产水量得到较好模拟。

2.2　空间自相关

空间自相关分析方法可以表示事物或现象之间在空间上的依赖关系[25]。本文利用 Geoda 软件计算全局与局部空间自相关，从而揭示哈尔滨市产水服务的空间聚集现象。计算公式为：

$$\begin{aligned}I&=\frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\\&=\frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j\neq 1}^{n}w_{ij}(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{S^2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j\neq 1}^{n}w_{ij}}\end{aligned} \tag{6}$$

$$I_i=\frac{(x_i-\bar{x})}{S^2}\sum_j w_{ij}(x_j-\bar{x}) \tag{7}$$

式中：I 为 Moran's I 全局空间自相关指数值；I_i 为局部空间自相关指数值为；n 为区域个数；x_i，x_j 分别为样本 i，j 的指数值；$\bar{x}$ 为样本指数平均值；w_{ij} 为空间关系权重矩阵。

全局空间自相关用于表示产水量在总体研究空间内是否存在相互影响以及产水量的相关程度。取值范围位于[－1,1]之间,如果 0＜I≤1,则表示研究区内产水量整体趋于空间正相关;如果－1≤I＜0,则表示产水量呈整体趋于空间负相关;当其趋于或等于 0 时,则说明研究区产水量不存在空间自相关。局部空间自相关将产水量的空间格局分为 5 类,即 H—H(高—高聚集)、H—L(高—低聚集)、L—H(低—高聚集)、L—L(低—低聚集)和 NS(不显著),其中,H—H 和 L—L 为正相关类型,H—L 和 L—H 为负相关类型。

2.3 参数最优地理探测器

2.3.1 *最优参数选择* 地理探测器是探测空间分异性以及揭示其背后驱动力的一种统计学方法[17]。其关键环节是将连续型因变量离散化处理,进而确定空间分层异质性的最佳尺度,因此,本研究利用 R 语言运用相等间隔分类(equal breaks)、自然断点分类(natural breaks)、分位数分类(quantile breaks)、几何间隔分类(geometric breaks)、标准差分类(standard deviation breaks),将分类等级数中设置为 3～10 类,从而筛选出最优参数。

2.3.2 *地理探测器原理* 在选择最优参数的基础上运用地理探测器中因子探测揭示哈尔滨市产水量空间分布异质性的驱动力。因子探测器主要计算因变量的空间异质性,评估研究区不同驱动因子对产水服务空间分异的解释能力,用 q 值表示,范围位于[0,1]之间,数值越大,解释能力越强,其计算公式为:

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2}=1-\frac{\mathrm{SSW}}{\mathrm{SST}} \tag{8}$$

$$\mathrm{SSW}=\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2,\ \mathrm{SST}=N\sigma^2 \tag{9}$$

式中:$h=1\cdots L$ 为变量 Y 或因子 X 的分层(Strata),即分类或分区;N_h,N 分别为层 h 和全区的单元数;σ_h^2,σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差。SSW,SST 分别为层内方差之和(Within sum of squares)和全区总方差(Total sum of squares)。

交互探测则主要评估两个不同驱动因子同时作用于同一空间事物时,对其空间异质性的交互解释力。

2.3.3 *驱动因子的选择* 哈尔滨市产水量空间特征的形成是自然环境和社会经济等多重因素共同作用下的结果。基于对产水量有可能产生影响的相关因素以及研究区数据的可获取性,本研究从气候、地形地貌、植物、土壤和土地利用 5 方面共选择 11 个驱动因子进行分析(表 2),同时结合研究区域作为东北端典型的寒地省会城市的特点,加入积雪指数(NDSI)这一驱动因子,深入探究寒区城市产水量空间异质性的影响因素。

3 结果与分析

3.1 产水量时空分布及动态变化特征

哈尔滨市 2000,2010 和 2020 年的产水深度、降水量、实际蒸散发量、潜在蒸散发量以及产水总量的年际变化趋势如图 1 所示。哈尔滨市年产水总量与产水深度呈现逐年上升趋势,产水深度由 2000 年的 182.50 mm 增加至 2020 年的 420.44 mm,产水总量由 9.68×10^9 m^3 上升至 2.23×10^{10} m^3,产水量显著增加;降水量波动增加,2000 年降水为 584.54 mm,2020 年则上升至 696.21 mm;潜在蒸散发量则较为平稳,一直保持在 800 mm 左右;实际蒸散发量则呈现下降趋势,由 2000 年的 402.03 mm 下降至 2020 年的 275.76 mm,很大程度上也影响了产水量的变化。

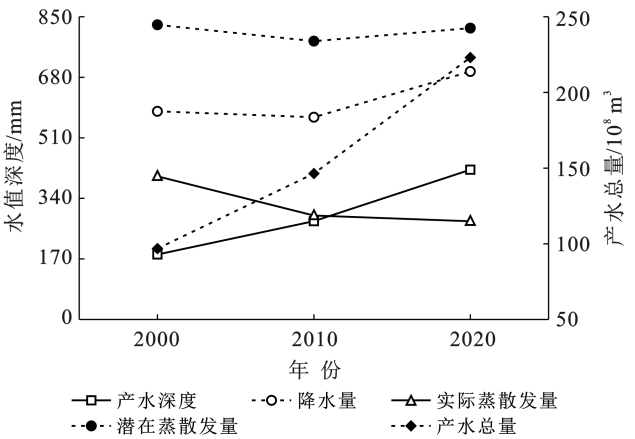

图 1 哈尔滨市不同年份产水深度、降水量、实际蒸散发量、潜在蒸散发量及产水总量

Fig.1 Variation of water yield, precipitation, actual evapotranspiration, potential evapotranspiration and total water production in different years of Harbin City

由图 2 可以看出,2000,2010 年和 2020 年哈尔滨市各区县的年产水深度总体呈现增长趋势,依兰县产水深度远高于其他区县,最大产水深度为 501.24 mm(2020 年),市区产水深度最低,为 146.56 mm(2000 年);2000—2020 年尚志市平均产水总量最高,为 2.79×10^9 m^3,其次为市区,平均产水总量为 2.59×10^9 m^3,最低值位于木兰县,为 8.66×10^8 m^3。从不同土地利用类型来看,2000,2010 和 2020 年不同土地利用类型的年产水深度总体呈现增长趋势。未利用地产水深度高于其他土地利用类型,最大值为 534.65 mm(2020 年),这可能是由于未利用地植被覆

盖率低，蒸散发能力低，蒸散发量较小，因此产水量较高，产水能力也较强；水体产水深度低于其他土地利用类型，最小值为 0(2000 年和 2010 年)，这可能与哈尔滨市气候特点有关，由于哈尔滨水体主要由松花江组成，松花江水面蒸发量较高，当大于当年降水量时，水体产水量为 0。2000—2020 年各土地利用类型平均产水深度从大到小依次为：未利用地(394.64 mm)＞建设用地(332.46 mm)＞耕地(324.42 mm)＞草地(313.69 mm)＞林地(265.69 mm)＞湿地(9.42 mm)＞水体(0.01 mm)。耕地的产水总量最高，2000—2020 年平均值为 8.58×10^9 m^3，这是因为耕地面积占比较大，其面积占全市总面积的 50%左右，且产水深度也较高，因此产水总量较多；水体产水总量最低，接近于 0。

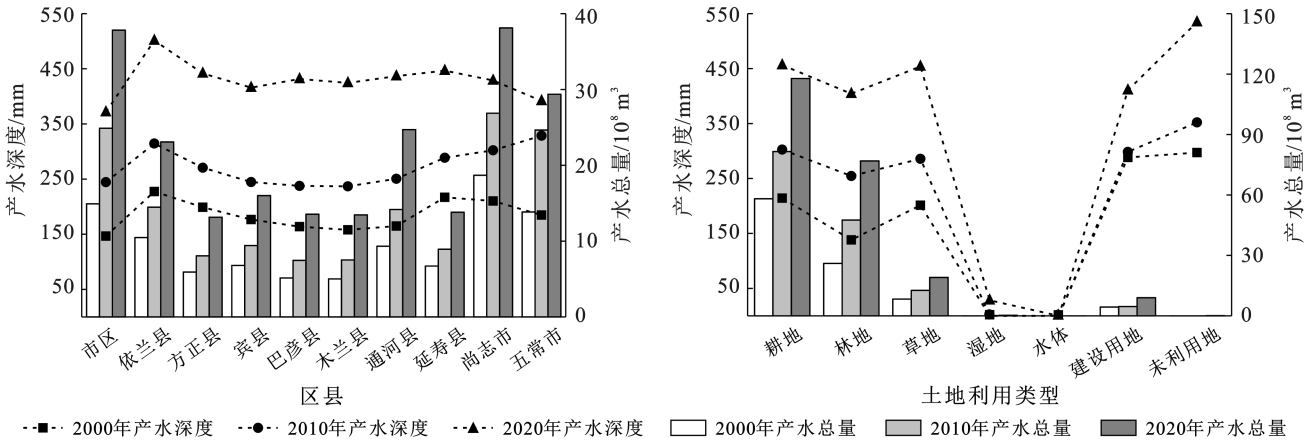

图 2　哈尔滨市不同年份各区县及各地类的产水量

Fig.2　Water yield in different districts, counties and types in different years in Harbin City

哈尔滨市 2000—2020 年产水量的空间变化如图 3 所示，总体空间分布格局变化趋势较为相似，整体呈现东高西低的空间分布特征，高值区包括依兰县、延寿县、尚志市。2000—2020 年平均产水深度位于 313.78～347.71 mm 之间，这与该区域年降水量较多、土地利用类型以耕地为主有关；市区和木兰县位于低值区，2000—2020 年平均产水深度为 254.18，273.08 mm。

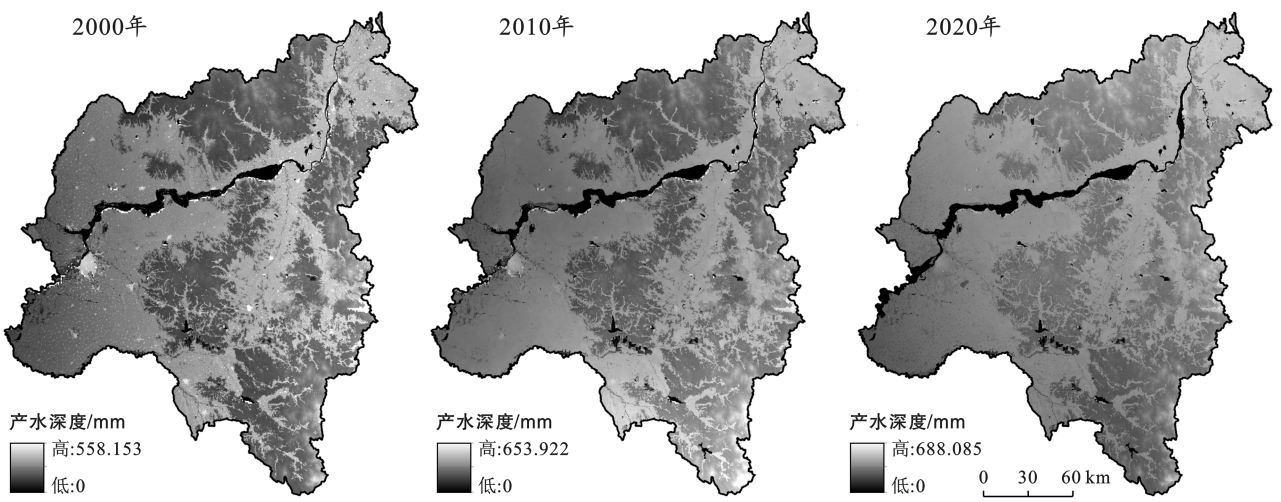

图 3　哈尔滨市不同年份产水量的空间分布格局

Fig.3　Spatial distribution of annual water yield in Harbin City for different years

3.2　空间自相关分析

2000，2010 和 2020 年全局 Moran's I 指数分别为 0.807，0.833 和 0.809，此时 $p=0.001$，通过显著性检验，说明哈尔滨市产水量空间格局的分布存在强烈的正向空间关联性，即产水量较高的区域倾向于与其他产水量较高的区域毗邻，而产水量较低的区域倾向与其他产水量较低的区域毗邻。局部空间自相关如图 4 所示，哈尔滨市产水服务以 L—L 聚集和 H—H

聚集类型为主，L—L 聚集主要集中在城市西部，松花江区域呈连续线状分布，聚集程度较为明显，2000 年占全市面积的 17.00%，2020 年则下降至 5.34%，说明哈尔滨市产水量整体低值区在减少；H—H 聚集则分布在城市东部，以东北角的依兰县最为明显，呈连片分布，由 2000 年占全市总面积的 18.70% 下降至 2020 年的 15.59%；L—H 聚集和 H—L 聚集占比较小，且无明显集中分布。

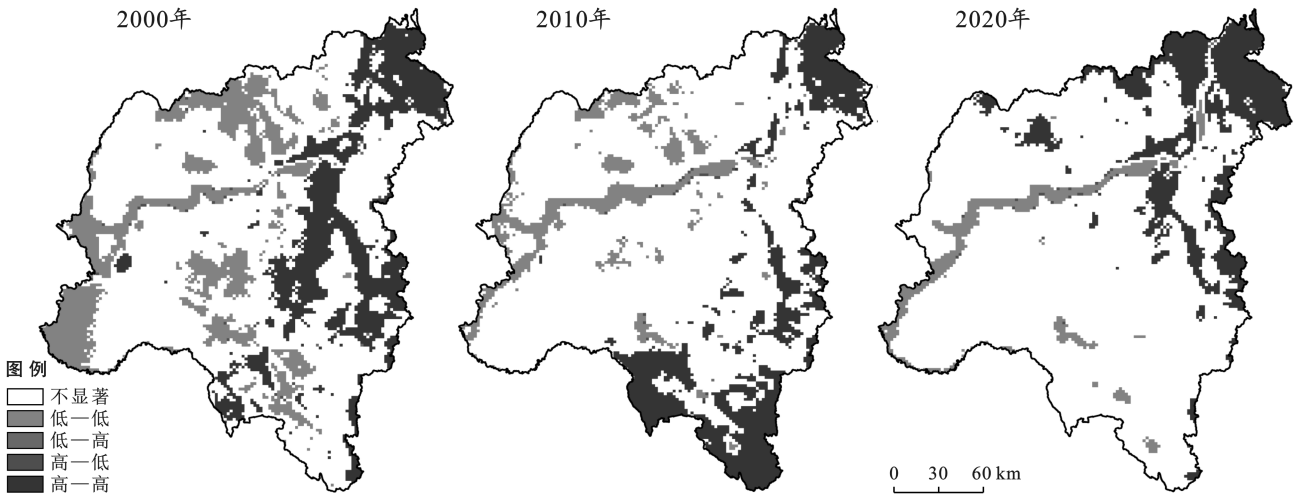

图 4 哈尔滨市产水量空间分异特征

Fig.4 Spatial differentiation of water yield in Harbin City

3.3 驱动力探测分析

3.3.1 *因子探测* 采用参数最优地理探测器的单因子探测识别单因子对哈尔滨市产水量空间异质性的解释力(表 1)。整个研究区实际蒸散发量和土地利用类型对产水量空间异质性的解释力最强，2000—2020 年平均 q 值分别为 0.651 2 和 0.580 2，明显高于其他影响因子的解释能力，即为主要驱动因子。其次为积雪指数 NDSI、降水量和植被指数 NDVI，平均 q 值为 0.218 1，0.163 8 和 0.121 8，与实际蒸散发和土地利用类型解释力存在明显差异，其他影响因子解释能力极其有限，对产水量空间异质性的影响按照由高到低依次为土壤类型(0.089 7)、坡度(0.083 0)、温度(0.079 6)、潜在蒸散发量(0.066 3)、高程(0.062 7)、PAWC(0.060 2)。

表 1 哈尔滨市 2000—2020 年单因子对产水量空间异质性解释力(q)

Tab.1 Explanatory power (q) of single factor on spatial heterogeneity of water yield in Harbin City from 2000 to 2020

影响因素	驱动因子	2000 年	2010 年	2020 年	2000—2020 年
气 候	X_1 气温	0.061 9	0.064 2	0.112 6	0.079 6
	X_2 降水量	0.104 0	0.223 7	0.163 7	0.163 8
	X_3 实际蒸散发量	0.569 3	0.621 8	0.762 7	0.651 2
	X_4 潜在蒸散发量	0.037 1	0.078 0	0.083 9	0.066 3
	X_5 NDSI	0.166 7	0.131 8	0.355 8	0.218 1
地形地貌	X_6 高程	0.041 1	0.086 3	0.060 6	0.062 7
	X_7 坡度	0.039 1	0.084 4	0.125 5	0.083 0
植 被	X_8 PAWC	0.037 6	0.062 5	0.080 6	0.060 2
	X_9 NDVI	0.081 1	0.094 3	0.189 8	0.121 8
土 壤	X_{10} 土壤类型	0.091 4	0.087 0	0.090 7	0.089 7
土地利用	X_{11} 土地利用类型	0.490 5	0.508 8	0.741 3	0.580 2

3.3.2 *交互探测* 产水量的空间格局实际是由多种驱动因子之间复杂的相互作用而共同形成的。从交互作用探测结果来看(图 5)，研究区域内驱动因子交互作用的解释力明显高于单个因子对产水服务空间分布格局异质性的解释力。作为影响产水量空间异质性的主导因素，实际蒸散发量和土地利用类型与其他因子的相互作用，仍然是研究区最重要的交互主导因素，其中哈尔滨市降水量和实际蒸散发量交互作用

解释力最强,2000,2010 和 2020 年交互作用解释力分别为 0.970 0,0.970 0 和 0.990 0,说明二者交互作用极大程度上影响了产水量的空间格局形成;降水量和土地利用类型交互作用解释力由 2000 年的 0.900 0 上升到 2020 年的 0.970 0,说明气候与土地利用作用对产水量的影响作用极大,且影响力愈加显著。

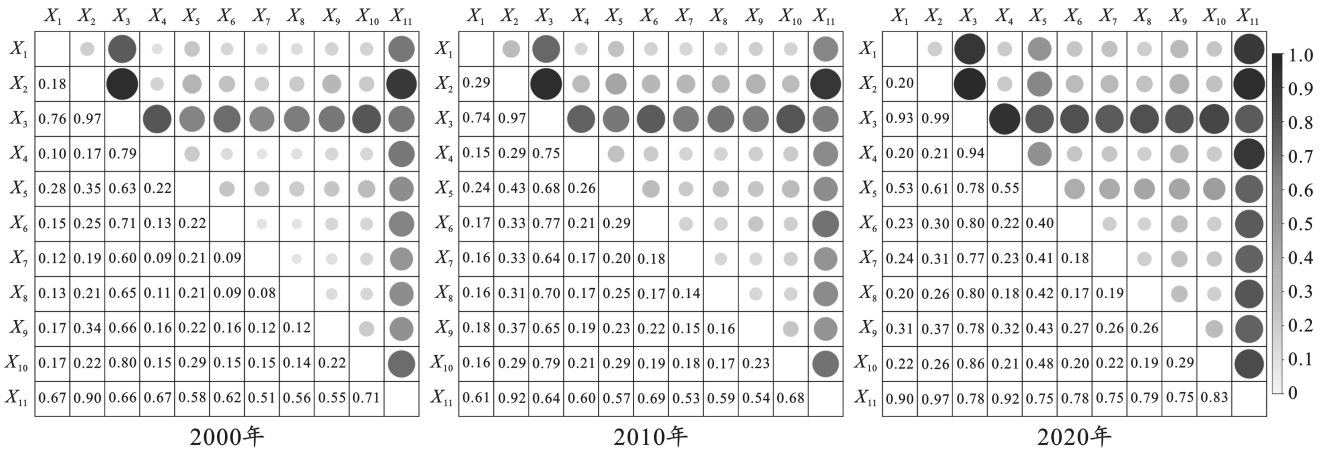

图 5　不同年份哈尔滨市交互作用探测结果

Fig.5　Results of interaction detection in Harbin City in different years

3.3.3　不同功能分区驱动因子差异分析　以 2020 年为例,对哈尔滨市不同功能分区进行产水量空间异质性驱动的单因子解释,结果详见表 2。哈尔滨市不同功能分区内产水量驱动因子解释力存在明显差异,但实际蒸散量和土地利用类型仍是主要的影响因子,都市经济高质量发展区和县域经济高质量发展区二者的解释力均达到 0.800 0 上,明显高于 2020 年哈尔滨市全区域的 0.762 7 和 0.741 3,而小兴安岭生态屏障功能分区,二者解释力仅有 0.474 7 和 0.464 3,比哈尔滨市全域的解释力要低得多;在张广才岭生态屏障功能分区二者解释力为 0.600 0 左右。虽然二者依旧为生态屏障功能分区的主要驱动因子,但是相较于经济高质量发展区,其解释程度明显下降,其他气象因子的解释力则明显上升。生态屏障功能分区的降水量驱动因子解释力为 0.309 8 和 0.299 1,但是经济高质量发展区的解释力为 0.1 左右,温度和潜在蒸散发量对生态屏障功能分区的解释力为 0.170 0,0.230 0 左右,但是经济高质量发展区则明显降低,解释力较弱。

2020 年哈尔滨市不同功能分区内驱动因子两两交互作用的解释力具有显著差异(图 6),在经济高质量发展区,实际蒸散发量和土地利用与其他因子叠加的交互作用,是其产水量空间异质性的主要驱动力,但在生态屏障功能分区内,虽然实际蒸散发量和土地利用与其他因子的叠加也呈现较强解释力,但其综合驱动力远不及经济质量发展区,其他气象因子与影响因素的相互作用也呈现出较高的解释力,这可能是因为在生态屏障子分区人为干扰较少,气象因素的影响更显著,而经济高质量发展区受人类活动干扰大、土地类型以建设用地为主,从而导致自然因素的影响程度相对减弱。

表 2　哈尔滨市 2020 年不同功能分区单因子对产水量空间异质性解释力(q)

Tab.2　Explanatory power (q) of single factor on spatial heterogeneity of water yield in different functional zones in Harbin City in 2020

编号	都市经济高质量发展区	县域经济高质量发展区	小兴安岭生态屏障	张广才岭生态屏障
X_1	0.090 0	0.035 3	0.172 9	0.168 8
X_2	0.099 3	0.109 2	0.309 8	0.299 1
X_3	0.928 1	0.899 4	0.474 7	0.635 5
X_4	0.078 6	0.061 6	0.239 0	0.224 4
X_5	0.610 5	0.378 6	0.214 7	0.273 6
X_6	0.218 0	0.069 8	0.219 7	0.119 2
X_7	0.077 0	0.128 9	0.045 8	0.080 4
X_8	0.051 0	0.106 3	0.083 4	0.092 1
X_9	0.321 4	0.152 6	0.127 0	0.176 2
X_{10}	0.197 2	0.070 8	0.037 4	0.103 8
X_{11}	0.917 1	0.845 5	0.464 3	0.568 5

4　讨论

区域产水量的空间特征是多种影响因子共同作用的结果,但就目前来说,细致划分多种因子的解释程度是一个比较困难的过程。本研究以哈尔滨市为研究区域,基于 InVEST 模型对其近 20 a 的产水服务进行评估,利用 R 语言参数最优地理探测器识别研究区产水量空间异质性的主要驱动因素,并进一步揭示了其不同功能分区之间差异的内在驱动力,有助于弥补对全市产水量整体研究分析的不足。

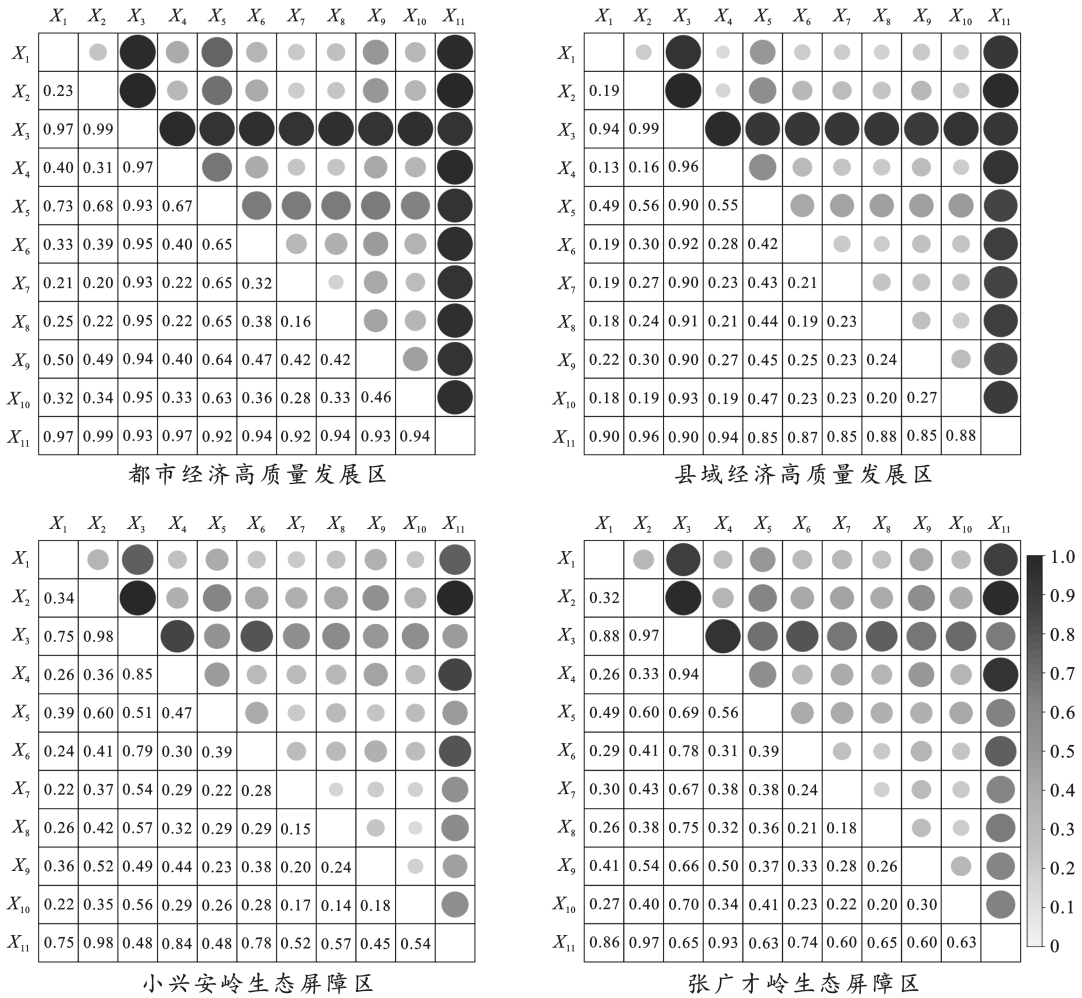

图 6 哈尔滨市 2020 年不同功能分区交互作用探测结果

Fig.6 Detection results of interaction between different functional zones in Harbin in 2020

4.1 基于 InVEST 模型的产水量时空变化分析

本研究借助 InVEST 模型对哈尔滨市产水服务进行定量评估，研究结果表明，2000—2020 年哈尔滨市产水量呈现上升趋势，产水量由 2000 年的 9.68×10^{9} m^3 增长至 2020 年的 2.23×10^{10} m^3，产水量整体呈现“东高西低”的空间分布格局，未利用地、建设用地的产水量较高，耕地产水量高于草地和林地，湿地和水体产水量最低，与前人研究结果较为一致，总体来说，坡度较大、植被覆盖度较高的区域产水量较低，而坡度较缓、人口活动较为强烈的区域产水量高。这可能是因为城镇生态系统植被覆盖度较低，降水后蒸散发量较小、水量下渗较少、地表径流较大，因此产水量较高。而林地的植被覆盖度较高，蒸散发量可能也比较大，因此产水量较低。比较特殊的是 2000—2020 年哈尔滨市水体的产水量接近于 0，根据前人研究[28]，松花江多年平均水面蒸发量为 720.2 mm，高于哈尔滨市多年平均降水量，因此哈尔滨市水体几乎没有产水，与实际情况较为符合。

研究区域整体呈现空间正相关，“L—L 聚集”类型主要沿松花江一带呈线状集中分布，“H—H 聚集”类型则主要呈连片状集中于东北部。哈尔滨市产水量的空间格局特征以及空间自相关结果可以为规划重点产水功能分区提供依据，例如依兰县产水深度远高于其他区县，张广才岭生态屏障东南部一带也是“H—H 聚集”类型的典型区域，可以作为产水服务的重点关注区域，在对城市整体规划时着重保护规划，发挥其最大生态系统服务作用。而松花江一带是“L—L 聚集”类型的典型区域，也是水体和湿地的重点分布区，常年产水量较低，周围零星存在“L—H 聚集”的空间异质性区域，应重点加强此区域的湿地保护计划，避免湿地面积缩减。

4.2 基于地理探测器的产水量影响因素研究

地理探测器是一种常用的探究空间异质性及其驱动力的统计方法学方法，其数据离散化的分类方法是运用地理探测器的重要环节，很大程度上会影响最后因子探测的结果，国内研究大多数是依据传统方

法[12,18],根据经验对连续型自变量进行离散化处理,主观影响较大,分类方法并不一定是最优参数。本研究利用 R 语言筛选出地理探测的最优参数,其结果更加科学,增强了结果可信度。同时由于哈尔滨是是我国东北端最典型的寒地省会城市,因此在进行影响因素选取时,加入归一化差值积雪指数(NDSI)作为特色驱动因子进行探测,以期探究积雪因子对产水量的解释力大小,突出寒地特点。

在不同时期或同一时期不同功能分区之间,影响产水量空间分布的主控因子是相同的,表明哈尔滨市产水量驱动因素对产水量的影响变化总体平稳。但在相同时期各类驱动因子对哈尔滨市空间异质性格局的形成具有较明显差异,实际蒸散发量和土地利用类型仍是主要驱动因子。在受人类活动干扰程度较小的生态屏障区,气候、土地利用等自然因素均在不同程度上影响着产水量的空间格局;而在受人类干扰强度较大的经济高质量发展区,实际蒸散发量和土地利用呈现极为显著的影响程度,其他自然因素影响较小。该区域同时也是城市建成区、耕地及未来重点城市规划用地区域,是未来哈尔滨市着重建设区,土地利用类型变化会更加显著,此区域的产水量将会发生更加明显的变化。未来应注重土地规划的合理性,避免严重破坏区域生态基底,造成生物多样性降低、生态系统服务价值下降的后果,尽量减少对规划用地产水服务的影响。

4.3　不足与局限性

本研究从时空异质性的角度出发,基于 InVEST 模型和参数最优地理探测器探讨了黑龙江省哈尔滨市各功能分区产水量的时空差异,厘清了气候、土地利用类型、地形地貌和植被等因素与哈尔滨市产水量的驱动关系,对制定精准科学的水资源管理政策提供科学依据。但本研究也存在不足之处,InVEST 模型具有一定的局限性,未能够将复杂的地形地貌考虑在产水模块中,且 InVEST 模型根据水平衡原理以降水量减实际蒸散量计算产水量,从而量化研究区域产水服务,但是针对于人类活动密集的区域,引调水等政策以及上游来水都会对实际水资源产生很大影响,这些因素并不在 InVEST 模型产水模块的考虑范围之内。同时,本研究以 2000,2010 和 2020 年 3 个不同时期为例,年份跨度较大,连续年份之间的细微变化并未得以分析,今后研究需要进一步细化研究时期,缩小研究年份跨度,提高研究时间精度,尽可能充分分析出连续年份的细微演变,从而得到更加精准细致的研究结果。

5　结 论

(1) 2000—2020 年,哈尔滨市产水量总体呈现增长趋势,平均产水深度在由 182.50 mm 上升至 420.44 mm,产水总量由各年份产水服务的空间分布格局较为类似,整体呈现东高西低的空间分布特征,高值区主要位于依兰县、延寿县、尚志市一带,低值区主要位于哈尔滨市区和木兰县等区域。

(2) 哈尔滨市产水量空间分布格局整体呈现强烈的空间正相关,以 L—L 聚集和 H—H 聚集类型为主,2000 年 L—L 聚集类型面积占全市面积为 17.00%,2020 年则下降至 5.34%,下降幅度较为明显;而 H—H 聚集类型面积占比则呈现略微下降趋势,由 2000 年的 18.70%下降至 2020 年的 15.59%。

(3) 不同驱动因子对哈尔滨市产水量空间异质性的解释能力存在明显差异,实际蒸散发量和土地利用类型是其主要驱动因子,其他影响因子解释力均较低。但是同一时期不同功能分区之间存在明显差异,经济高质量发展区的实际蒸散发量和土地利用类型与其他因子叠加的交互作用更为显著,而生态屏障功能分区的二者综合驱动力远不及经济高质量发展区,但其他气候因子的解释力比经济高质量发展区高。

[参 考 文 献]

[1] 赵士洞.新千年生态系统评估:背景、任务和建议[J].第四纪研究,2001,21(4):330-336.

[2] Sánchez-Canales M, Benito A L, Passuello A, et al. Sensitivity analysis of ecosystem service valuation in a Mediterranean watershed [J]. Science of the Total Environment, 2012,440:140-153.

[3] Chahine M T. The hydrological cycle and its influence on climate [J]. Nature, 1992,359(6394):373-380.

[4] Rohatyn S, Rotenberg E, Ramati E, et al. Differential impacts of land use and precipitation on "ecosystem water yield" [J]. Water Resources Research, 2018,54(8):5457-5470.

[5] Ellison D, N. Futter M, Bishop K. On the forest cover-water yield debate: from demand-to supply-side thinking [J]. Global Change Biology, 2012,18(3):806-820.

[6] Pei Hongwei, Liu Mengzhu, Shen Yanjun, et al. Quantifying impacts of climate dynamics and land-use changes on water yield service in the agro-pastoral ecotone of Northern China [J]. Science of the Total Environment, 2022,809:151153.

[7] Sharp R, Tallis H T. Ricketts T, et al. InVEST 3.2.0 User's Guide [M]. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota. The Nature Conser-

vancy, and World Wildlife Fund,2018.

[8] Bai Yang, Ochuodho T O, Yang Jian. Impact of land use and climate change on water-related ecosystem services in Kentucky, USA [J]. Ecological Indicators, 2019,102:51-64.

[9] Sun X, Crittenden J C, Li F, et al. Urban expansion simulation and the spatio-temporal changes of ecosystem services, a case study in Atlanta Metropolitan area, USA [J]. Science of the Total Environment, 2018,622/623:974-987.

[10] Ashrafi S, Kerachian R, Pourmoghim P, et al. Evaluating and improving the sustainability of ecosystem services in river basins under climate change [J]. Science of the Total Environment, 2022,806:150702.

[11] Xue Jian, Li Zongxing, Feng Qi , et al. Spatiotemporal variations of water conservation and its influencing factors in ecological barrier region, Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022,42:101164.

[12] 戴尔阜,王亚慧.横断山区产水服务空间异质性及归因分析[J].地理学报,2020,75(3):607-619.

[13] 杜佳衡,王锦.基于 InVEST 模型的大理州永平县水生态系统服务功能时空变化分析[J].西部林业科学,2021,50(6):91-102.

[14] 王亚慧,戴尔阜,马良,等.横断山区产水量时空分布格局及影响因素研究[J].自然资源学报,2020,35(2):371-386.

[15] 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.

[16] 赵亚茹,周俊菊,雷莉,等.基于 InVEST 模型的石羊河上游产水量驱动因素识别[J].生态学杂志,2019,38(12):3789-3799.

[17] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.

[18] 郑续,魏乐民,郭建军,等.基于地理探测器的干旱区内陆河流域产水量驱动力分析:以疏勒河流域为例[J].干旱区地理,2020,43(6):1477-1485.

[19] 刘水清,周祖昊,刘佳嘉,等.基于冻土水文模拟的松花江流域水资源演变规律[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(1):127-136.

[20] 王宁,臧淑英,张丽娟.近 50 年来黑龙江省冻土厚度的时空变化特征[J].地理研究,2018,37(3):622-634.

[21] 金会军,李述训,王绍令,等.气候变化对中国多年冻土和寒区环境的影响[J].地理学报,2000,55(2):161-173.

[22] 丛东来,于少鹏,陈曦,等.哈尔滨市水资源开发利用与城镇化发展的响应关系[J].水土保持通报,2020,40(1):269-275.

[23] Yang Shiliang, Bai Yang, Alatalo J M, et al. Spatio-temporal changes in water-related ecosystem services provision and trade-offs with food production [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,286:125316.

[24] Zhou Wenzuo, Liu Gaohuan, Pan Jianjun, et al. Distribution of available soil water capacity in China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2005,15(1):3-12.

[25] 朱增云,阿里木江·卡斯木.干旱区绿洲城市生态系统服务价值空间自相关格局分析与模拟[J].生态与农村环境学报,2019,35(12):1531-1540.

[26] 张耀文,张勃,姚荣鹏,等.2000—2020 年渭河流域植被覆盖度及产水量时空变化[J].中国沙漠,2022,42(2):223-233.

[27] 窦攀烽,左舒翟,任引,等.气候和土地利用/覆被变化对宁波地区生态系统产水服务的影响[J].环境科学学报,2019,39(7):2398-2409.

[28] 闫桂霞,李登华.1961—2006 年我国水面蒸发时空变化特征分析[J].水电能源科学,2015,33(10):1-5.