

2000—2019 年京津冀地区水源涵养功能 时空格局变化及其驱动因素

李鑫¹, 邹长新², 陈艳梅¹, 刘亚楠¹, 李涵聪¹

(1.河北师范大学 地理科学学院/河北省环境变化遥感识别技术创新中心/河北省环境演变与生态建设重点实验室, 河北 石家庄 050024; 2.生态环境部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042)

摘要: [目的] 研究京津冀地区水源涵养功能时空格局变化及其驱动因素, 为区域协同发展过程中的生态保护和建设工作提供科学支撑。[方法] 基于研究区基础地理数据和相关参数, 利用 InVEST 模型及水源涵养公式, 在 ArcGIS 平台上采用一元线性回归模型、变异系数和土地利用转移矩阵等空间分析法, 分析 2000—2019 年京津冀地区水源涵养功能时空格局变化特征及主要驱动因素。[结果] ①京津冀地区多年平均产水量为 $1.87 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 产水量空间格局为东高西低。②京津冀地区水源涵养量空间格局呈东北—西南燕山、太行山较高, 西北—东南坝上高原、河北平原较低。③水源涵养量年际变化较大, 多年平均水源涵养量为 $7.85 \times 10^9 \text{ m}^3$, 2002 年最低, 2012 年最高。像元尺度上, 2000—2019 年水源涵养功能增强区面积大于减弱区, 增强区占研究区 67.49%, 减弱区占研究区 32.51%。20 a 间水源涵养功能呈“中低波动为主, 少数区域波动强烈”的特征, 低波动、相对低波动区占 93.96%, 中等波动、相对高波动和高波动区占 6.04%。④京津冀地区水源涵养功能变化主要驱动因素为降水、潜在蒸散发和土地利用变化, 典型区水源涵养深度与降水量呈显著正相关, 与潜在蒸散发量呈显著负相关。在土地利用变化方面, 退耕还林还草等生态工程使林地、草地面积提高, 水源涵养能力相对增强; 而工矿等建设用地扩展侵占林草、耕地面积, 水源涵养能力相对降低。[结论] 京津冀地区水源涵养功能时空格局变化明显, 水源涵养功能主要驱动因素是气象因子与土地利用变化。

关键词: 水源涵养功能; 时空格局; 驱动因素; InVEST 模型; 京津冀地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)05-0265-10

中图分类号: X171.1

文献参数: 李鑫, 邹长新, 陈艳梅, 等. 2000—2019 年京津冀地区水源涵养功能时空格局变化及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 265-274. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20220525.004; Li Xin, Zou Changxin, Chen Yanmei, et al. Spatio-temporal pattern changes and driving factors of water conservation function in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2019 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 265-274.

Spatio-temporal Pattern Changes and Driving Factors of Water Conservation Function in Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2000 to 2019

Li Xin¹, Zou Changxin², Chen Yanmei¹, Liu Yanan¹, Li Hancong¹

(1.School of Geographical Sciences, Hebei Normal University/Hebei Technology

Innovation Center for Remote Sensing Identification of Environmental Change/Laboratory of

Environmental Evolution and Ecological Construction of Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei 050024, China;

2.Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing, Jiangsu 210042, China)

Abstract: [Objective] Temporal and spatial pattern changes and driving factors of a water conservation function in the Beijing-Tianjin-Hebei region were analyzed in order to provide scientific support for ecological protection and construction in the process of regional coordinated development. [Methods] Using the InVEST model and a water conservation formula with basic geographic data and relevant parameters for the

收稿日期: 2022-02-14

修回日期: 2022-03-26

资助项目: 国家社会科学基金项目“大尺度生态廊道空间布局优化整合新路径研究”(20BJY047)

第一作者: 李鑫(1996—), 男(汉族), 山东省淄博市人, 硕士研究生, 研究方向为区域生态系统服务评估与生态安全。Email: 740527147@qq.com。

通信作者: 陈艳梅(1970—), 女(汉族), 河北省邢台市人, 博士, 教授, 主要从事区域生态系统评估与生态安全、区域生态补偿。Email: 330896729@qq.com。

study area, the temporal and spatial pattern change characteristics and main driving factors of a water conservation function in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2019 were analyzed. Spatial analysis methods such as univariate linear regression, coefficient of variation, and land use transfer matrix on the ArcGIS platform were also used. [Results] ① The average annual water yield in the Beijing-Tianjin-Hebei area was $1.87 \times 10^{10} \text{ m}^3$. The spatial pattern of water yield was high in the east and low in the west. ② The spatial pattern of water conservation in the Beijing-Tianjin-Hebei region was higher in the Yanshan and Taihang Mountains (varying from northeast to southwest), and lower in the Bashang Plateau and the Hebei Plain (varying from northwest to southeast). ③ The amount of water conservation varied greatly from year to year, and the annual average amount of water conservation was $7.85 \times 10^9 \text{ m}^3$ (lowest in 2002 and highest in 2012). On the pixel scale, the area of the enhanced area of water conservation function was larger than that of the weakened area from 2000 to 2019. The enhanced area accounting for 67.49% of the study area. The weakened area accounted for 32.51% of the study area. In the past 20 years, the water conservation function could be characterized as being “mainly medium and low fluctuations, with strong fluctuations in a few areas”. The low fluctuation and relatively low fluctuation areas accounted for 93.96% of the total area, and the medium fluctuation, relatively high fluctuation, and high fluctuation areas accounted for 6.04% of the total area. ④ The main driving factors for the change of the water conservation function in the Beijing-Tianjin-Hebei region were precipitation, potential evapotranspiration, and land use changes. The depth of water conservation in typical areas had a significant positive correlation with precipitation, and a significant negative correlation with potential evapotranspiration. With regard to land use changes, ecological projects such as returning farmland to forest and grassland increased the area of forest land and grassland, and relatively increased water conservation capacity. Expansion of industrial and mining construction land encroached on the area of forest, grass, and cultivated land, and water conservation capacity has been relatively reduced. [Conclusion] The temporal and spatial patterns of the water conservation function have noticeable changed in the Beijing-Tianjin-Hebei region. The main driving factors of the water conservation function are meteorological factors and land use changes.

Keywords: water conservation function; spatio-temporal pattern; driving factor; InVEST model; Beijing-Tianjin-Hebei region

生态系统功能一直是近年来生态学、地理学与生态经济学等领域研究热点^[1-2],作为生态系统最基础也最重要的服务功能之一,水源涵养功能变化及其驱动机制受到广泛关注^[3-4]。水源涵养功能是一定时空范围内特有生态系统结构对降水进行截留、渗透和蓄积的能力,受多种因素的影响,具有复杂性、动态性、区域差异性和尺度变化性等特征^[5-6],深入开展区域尺度水源涵养功能时空格局研究对科学认识和有效提升区域生态系统水源涵养能力具有科学意义与实践价值。

水源涵养功能与降水量、土壤含水率、蒸散量、地表径流和土地利用类型等因素密切相关^[7-8],评估水资源涵养能力目前广泛采用的方法有水量平衡法、蓄水能力法以及综合模型法等^[9],而综合模型法如 SWAT 模型^[10]、InVEST 模型^[11]、SCS-CN 模型^[12]等,因参数选取时考虑相对全面,计算结果误差较小,应用尤为广泛。其中的 InVEST 模型具有功能强大、操作方便和应用性强等优势,能较好地反映区域

产水量以及水源涵养功能时空格局变化特征。如许丁雪等^[13]运用 InVEST 模型估算张家口—承德地区产水量和土壤保持量,并分析了不同海拔和坡度条件下 2011—2015 年产水和土壤保持功能的变化。

京津冀地区人均水资源占有量不足 300 m^3 ,远低于国际公认的极度缺水标准^[14],属“资源型”严重缺水区,水资源短缺问题严重制约生态、经济和社会的可持续发展。本研究将 InVEST 模型产水模块和水源涵养计算方法相结合,测算京津冀地区 20 a 的产水量和水源涵养量,研究其时空格局变化及主要驱动因素,进而为京津冀地区协同发展过程中的生态保护和建设提供科学支撑。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

京津冀地区位于 $36^{\circ}0' - 42^{\circ}40' \text{ N}$, $113^{\circ}27' - 119^{\circ}50' \text{ E}$,总面积 $2.16 \times 10^{50} \text{ km}^2$,地势西北高东南

低,地貌类型复杂多样,西部和北部为太行山、燕山山脉,两山交汇处是冀西北间山盆地,区域最北部是坝上高原,东南为华北平原北端。气候为典型的温带半湿润半干旱大陆性气候,降水量自东南向西北递减。区域内水系较多,主要包括海河、滦河、辽河和坝上西部内流河诸河。区域中南部地带性植被为温带落叶阔叶林,北部坝上地区为温带草原,河北平原主要是

农作物栽培区,由于人类活动频繁,该区域自然植被受到不同程度的破坏。发育的地带性土壤类型主要有栗钙土、棕壤、褐土和潮土等。

1.2 数据来源及本地化处理

研究所需数据主要有降水量、潜在蒸散发量、土地利用类型、DEM 高程、土壤、植物可利用含水量、流域边界等数据(表 1)。

表 1 数据来源及本地化处理

数据类型	来源及本地化处理
降水量	降水量数据来源于中国气象局网站的中国地面气候标准值数据集,对京津冀地区内 24 个观测站点测得的 2000—2019 年的年值降水量数据,在 ArcGIS 软件中空间插值获得逐年栅格数据,对数据定义投影和重采样处理,空间分辨率为 250 m。
潜在蒸散发量	潜在蒸散发是指水分充足条件下,水体通过土壤蒸发和植物蒸腾作用的最大蒸散发量 ^[15-16] 。基于 Hargreaves 公式计算月潜在蒸散发后,将 2000—2019 年逐月潜在蒸散发量累计相加得到研究区逐年潜在蒸散发量,在 ArcGIS 软件中空间插值获得逐年栅格数据,对数据定义投影和重采样处理,空间分辨率为 250 m。
土地利用类型	来源于中国科学院资源环境科学数据中心—资源环境数据云平台,初始空间分辨率 30 m,数据类型为 GRID 栅格格式,包括 2000、2005、2010、2015、2018 年 5 期土地利用类型矢量数据。在计算过程中,按全国土地覆被分类系统标准,将研究区内 25 个二级地类划分为林地、草地、耕地、水域、建设用地和未利用土地 6 种土地利用类型,对数据定义投影和重采样处理,将空间分辨率统一为 250 m,最后按 2000—2004、2005—2009、2010—2014、2015—2017、2018—2019 年计算周期分别采用上述 5 期数据。
DEM 高程	从中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像中心网站获得,初始空间分辨率为 90 m,数据类型为 IMG 格式,经定义投影和重采样处理,空间分辨率为 250 m。
土壤	来源于寒区旱区科学数据中心—基金委/国家地球系统科学数据平台的基于世界土壤数据库(HWSD)中的中国土壤数据集,比例尺为 1:100 万,数据类型为 GRID 栅格格式,包括所需的土壤黏粒、粉粒和砂粒含量数据和土层深度数据,将所需数据定义投影和重采样处理,空间分辨率为 250 m。
植物可利用水含量	植物可利用含水量(AWC)为田间持水量和萎蔫点之间的差值,即能为植物生长所能提供的水量,由经验公式计算所得,得到植物可利用含水量后,在 ArcGIS 软件中空间插值获得栅格数据,定义投影和重采样处理,空间分辨率为 250 m。
流域边界	基于 DEM 高程数据,利用 ArcGIS 软件平台空间分析模块中的水文分析,分别进行填洼、流向、流量、河流链接以及分水岭的处理,得到研究区的流域、子流域矢量边界数据。

潜在蒸散发量计算。基于 Hargreaves 公式计算研究区潜在蒸散发量,所需数据包括月天文辐射量和各气象观测站点的 2000—2019 年月降水量、月平均最高气温、月平均最低气温,计算公式如下:

$$ET = 0.0013 \times 0.408 \times R_a \times (T_{av} + 17) \times (T_d - 0.0123 \times P)^{0.76} \quad (1)$$

式中:ET 为月潜在蒸散发量(mm); R_a 为月天文辐射量(MJ/m²); T_{av} 为月平均最高气温和最低气温的均值(°C); T_d 为月平均最高气温与最低气温均值的差值(°C); P 为月降水量(mm)。

植物可利用水含量计算。根据 Zhou 等^[17]提出的植物可利用水含量 AWC 模型计算植物可利用水含量,所需数据包括土壤沙粒、粉粒、黏粒、有机质含量,计算公式如下:

$$AWC = 54.509 - 0.132 \times SAN - 0.003 \times (SAN)^2 - 0.055 \times SIL - 0.006 \times (SIL)^2 - 0.738 \times CLA + 0.007 \times (CLA)^2 - 2.688 \times OM + 0.501 \times (OM)^2 \quad (2)$$

式中:SAN 为土壤沙粒含量(%);SIL 为土壤粉粒含

量(%);CLA 为土壤黏粒含量(%);OM 为土壤有机质含量(%)。

1.3 研究方法

1.3.1 InVEST 模型产水量 InVEST(integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs)模型是由美国自然资本研究组开发,模型内包含多种模块,可以通过研究区具体状况设定不同情境,输入数据与对应参数,得出计算结果。

InVEST 模型产水量模块是基于 Budyko 水文公式^[18]和降水对区域水资源供给量进行的空间可视化表达,采用水量平衡原理,用各栅格降水量减去蒸散发后的水量即为产水量,计算公式如下:

$$Y_{x,j} = \left(1 - \frac{AET_{x,j}}{P_x}\right) \times P_x \quad (3)$$

式中: $Y_{x,j}$ 表示栅格单元 x 中土地覆被类型 j 类的年产水量(mm); $AET_{x,j}$ 表示栅格单元 x 中土地覆被类型 j 的年蒸散发量(mm); P_x 表示栅格单元 x 的多年平均降水量(mm)。

$AET_{x,j}/P_x$ 计算采用 Budyko 水热耦合平衡假

设公式^[19], 计算公式如下:

$$\frac{AET_{x,j}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_{x,j}}{1 + \omega_x R_{x,j} + 1/R_{x,j}} \quad (4)$$

式中: $R_{x,j}$ 表示栅格单元 x 中土地覆被类型 j 类的干燥度指数, 为潜在蒸散发量与降水量的比值; ω_x 表示为自然气候条件下表示土壤性质的一个无量纲非物理参数, 为植被年可利用水量与预期降水量的比值, 计算公式如下:

$$R_{x,j} = \frac{k \times ET_0}{P_x} \quad (5)$$

$$\omega_x = Z \times \frac{AWC_x}{P_x} + 1.25 \quad (6)$$

式中: k 为蒸散系数; ET_0 表示潜在蒸散发量(mm); AWC_x 表示栅格单元 x 的植被可利用水含量(mm); Z 表示生态水文常数, 也称作降水季节常数, 用于表征区域气候的季节性特征、降水强度以及地形特征, Donohue 等^[20]认为 Z 系数与年降水次数成正比, 年代表值内降水发生次数越多, Z 系数越大, 一般取值范围为 1~30, 本研究依据研究区历年降水次数变化, 通过多次模拟校正, 取值范围为 4.1~25.4。

1.3.2 水源涵养修正公式 通过 InVEST 模型计算出产水量, 在此基础上, 利用地形指数、流速系数和土壤饱和导水率与产水量计算获得水源涵养量^[21], 计算公式为:

$$W = \min(1, 249/V) \times \min(1, 0.9 \times TI/3) \times \min(1, K_{soil}/300) \times Y \quad (7)$$

式中: W 为水源涵养量(mm); Y 为产水量(mm); V 为流速系数, 采用模型参数表获得, 无量纲; K_{soil} 为土壤饱和导水率(mm/d), 根据土壤中黏粒、粉粒和砂粒含量, 通过 Neuro-Theta 模型计算得到; TI 为地形指数, 计算公式如下:

$$TI = \lg(D_{area}/Soil_{dep} - P_{slope}) \quad (8)$$

式中: D_{area} 为集水区栅格数量; $Soil_{dep}$ 为土层深度(mm), 从土壤数据集中获取; P_{slope} 为百分比坡度, 通过 DEM 高程数据在 ArcGIS 软件坡度分析中获得。

1.3.3 趋势分析和变异系数公式 为研究京津冀地区 2000—2019 年像元尺度水源涵养能力的时空动态趋势, 对研究区建立逐像元的水源涵养量与年份的线性回归方程进行趋势分析, 其自变量为年份, 因变量为水源涵养量^[22]。基于像元尺度水源涵养量年份的相关分析, 得到 Pearson 相关系数(R_{xy}), 通过相关系数显著性查表, 可得动态趋势的显著性, 当 R_{xy} 为正(负)值时, 表示水源涵养量变化趋势系数在所计算的时段内呈线性增加(减少)趋势, 若水源涵养量变化趋势系数通过 0.01 或 0.05 的显著性检验($p < 0.01$ 或 p

< 0.05), 则认为减少或增加趋势显著^[23]。

变异系数反映了数据的波动特征, 变异系数是标准差与平均值的比值^[24], 因此可以用来研究水源涵养功能的时空波动特征, 其计算公式为:

$$C = S/|\bar{x}| \quad (9)$$

式中: C 为变异系数; S 为标准差; $|\bar{x}|$ 为平均值。变异系数越小, 表明水源涵养量的年际变异越小, 即波动程度越小; 反之, 变异系数越大, 表明水源涵养量的年际变异越大, 即波动程度越大。

1.3.4 土地利用转移矩阵 土地利用转移矩阵是研究土地利用类型之间转移方向和数量变化的经典方法, 它可以反映区域土地利用变化的结构特征和空间格局的演化过程^[25]。该方法是在一定时间间隔下, 一个亚稳定系统从 K 时刻向 $K+1$ 时刻状态转化的过程, 从而从时空尺度上反映研究区的土地利用/覆被演化过程^[26-27]。土地利用/覆盖变化可以改变生态系统的结构和功能, 并影响到生态系统功能, 本文基于土地利用转移矩阵, 分析研究区 2000—2019 年间土地利用变化, 进而探索水源涵养功能的驱动因素。

2 结果与分析

2.1 产水量时空格局

水资源总量是地表水资源量与地下水资源量之和, 产水量是基于水量平衡原理, 降水量同蒸散发等消耗量的差值, 从总量守恒的角度来讲, 二者在本质上是采用不同方法对同一资源量的计算。因此, 利用 InVEST 模型测算出产水量后, 再依据同期水资源公报中水资源统计量, 对模拟结果进行验证(表 2), 各年产水量与水资源统计量相对误差均小于 10.60%, 产水量模拟效果相对较好。

(1) 产水量空间格局。京津冀地区多年产水量空间格局呈现东部较高、西部较低(图 1)。产水深度 > 60 mm 的高值区主要分布在燕山山区、东部沿海平原所在地; < 60 mm 的低值区主要分布在冀西北坝上高原和间山盆地、冀西太行山丘陵和河北平原地区。按行政区划分, 秦皇岛、唐山、天津等市单位面积多年平均产水量较多, 分别为 1.75×10^5 , 1.63×10^5 , 1.27×10^5 m^3/km^2 ; 保定、石家庄、张家口等市单位面积多年平均产水量较少, 分别为 6.87×10^4 , 6.71×10^4 , 3.58×10^4 m^3/km^2 。

(2) 产水量年际变化规律。京津冀地区 2000—2019 年产水量年际变化较大(表 2), 研究区 20 a 间平均产水量为 1.87×10^{10} m^3 , 最低值是 2002 年, 为 1.05×10^{10} m^3 ; 最高值是 2012 年, 为 3.41×10^{10} m^3 , 产水量年际变化整体呈现前期缓慢增加, 后期略有降低。

表2 2000—2019年京津冀地区模拟产水量验证

年份	模拟产水量/ 10 ⁸ m ³	水资源统计量/ 10 ⁸ m ³	相对 误差/%	Z 值
2000	165.99	164.36	0.99	5.5
2001	136.57	135.13	1.06	5.7
2002	105.10	105.95	0.80	4.1
2003	194.25	182.06	0.70	16.1
2004	189.36	189.9	0.29	7.5
2005	168.22	168.38	0.09	7.5
2006	139.39	139.52	0.10	5.2
2007	153.23	154.99	1.14	8.2
2008	214.74	213.48	0.59	12.6
2009	179.17	178.24	0.52	6.9
2010	170.71	170.09	0.36	9.9
2011	198.10	199.48	0.69	7.5
2012	340.57	307.95	10.59	25.4
2013	216.81	215.31	0.70	8.3
2014	138.11	137.76	0.25	5.4
2015	181.48	174.67	3.90	16.7
2016	286.70	262.29	9.30	24.5
2017	180.26	181.12	0.48	9.2
2018	215.20	217.08	0.87	9.6
2019	147.30	146.15	0.79	6.5

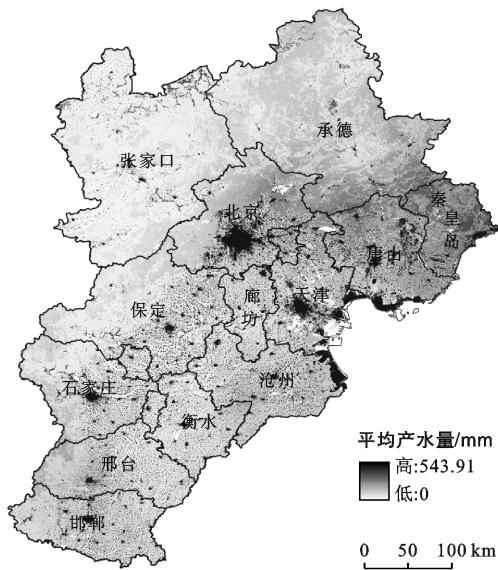


图1 2000—2019年京津冀地区平均产水量空间格局

2.2 水源涵养量空间格局

京津冀地区水源涵养量空间格局呈现东北—西南部较高、西北—东南部偏低(图2)。水源涵养深度 >60 mm的高值区分布在坝上高原东北部、燕山和太行山呈东北—西南、南北走向,其中 >120 mm的主高值区分布在燕山山区,此区域内高值区呈连片分布; $60\sim 120$ mm的次高值区分布在太行山区,呈东北—西南走向、条带状分布。 $20\sim 60$ mm的中值区主

要分布在燕山东南部、太行山北部和间山盆地边缘。 <20 mm的低值区广泛分布于坝上高原西部、间山盆地和河北平原,呈西北—东南走向。上述地貌单元中,燕山山区单位面积多年平均水源涵养量最高,为 7.81×10^4 m³/km²;太行山区单位面积多年平均水源涵养量相对较低,为 3.97×10^4 m³/km²;间山盆地、河北平原的水源涵养能力相对较弱,单位面积多年平均水源涵养量均低于 2.00×10^4 m³/km²。按行政区划分,秦皇岛市单位面积多年平均水源涵养量最高,为 1.02×10^5 m³/km²,其次为承德、北京和唐山市,分别为 6.49×10^4 , 5.98×10^4 , 4.83×10^4 m³/km²,而张家口、廊坊、沧州、衡水等市单位面积多年平均水源涵养量较低,均低于 2.00×10^4 m³/km²。

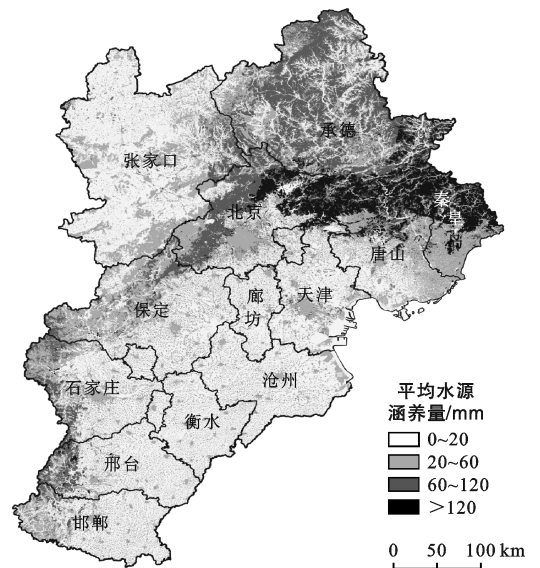


图2 2000—2019年京津冀地区平均水源涵养量空间格局

2.3 水源涵养量动态趋势和波动特征

水源涵养量年际变化规律。京津冀地区2000—2019年水源涵养量年际变化较大(图3),其多年平均水源涵养量为 7.85×10^9 m³,在2002年水源涵养量最低,为 4.75×10^9 m³;在2012年水源涵养量最高,为 1.52×10^{10} m³;2016年相对较高,为 1.31×10^{10} m³;2019年水源涵养量相对降低,为 6.19×10^9 m³。20 a间研究区平均水源涵养深度为36.85 mm,其中2000—2003年平均水源涵养深度为29.50 mm,2004—2007年略有提升,为31.40 mm,2008—2011年平均水源涵养深度稳定提升,为34.90 mm,2012—2015年平均水源涵养深度提升显著,达到45.08 mm,2016—2019年较2012—2015年略有降低,为42.06 mm。除个别年份、周期出现水源涵养量极低、极高情况外,京津冀地区水源涵养量年际变化整体呈现不显著增强趋势。

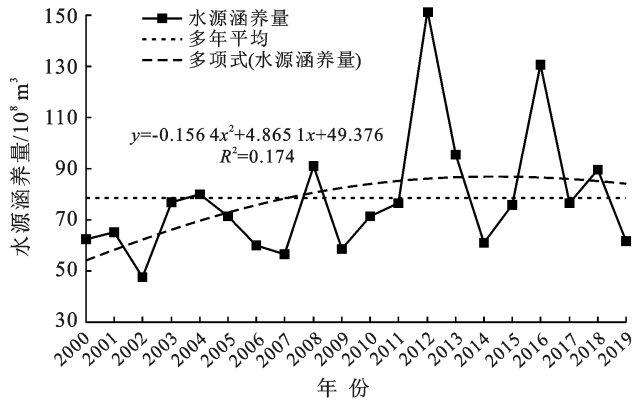


图3 2000—2019年京津冀地区年际水源涵养量统计

水源涵养动态趋势。像元尺度上,京津冀地区2000—2019年水源涵养功能增强区面积大于减弱区(图4),增强趋势区域占研究区的67.49%,其中通过显著性检验面积占研究区的9.28%,未通过显著性检验的占研究区的58.22%。减弱趋势区域占研究区的32.51%,其中通过显著性检验面积占研究区的3.72%,未通过显著性检验的占研究区的28.79%。

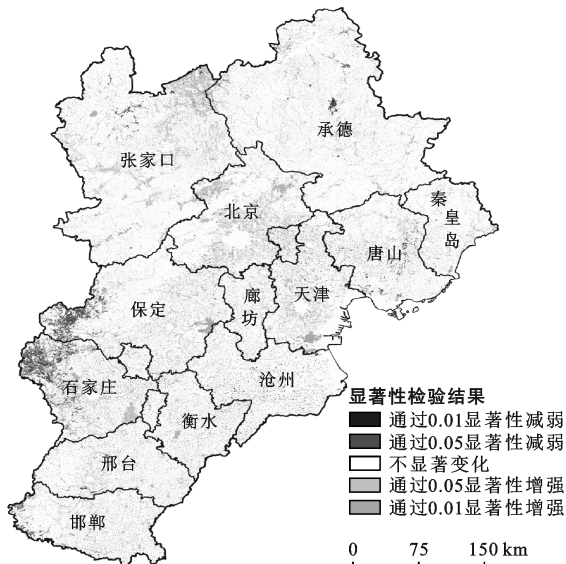


图4 2000—2019年京津冀地区水源涵养动态趋势分布格局

研究区水源涵养功能通过0.01,0.05显著性检验的增强区面积分别为11 177.61,8 832.69 km²,主要分布在坝上高原中部、太行山北段、间山盆地中部、燕山东部及河北平原的大型湖泊、湿地等地;其中,通过0.01显著性检验的增强区占辖区面积比例较大的集中在河流、湖泊、湿地分布较多的河北雄安新区、天津大港区等区县;通过0.05显著性检验的增强区占辖区面积比例较大的则集中在北京延庆区、石家庄赵县、张家口沽源县和赤城县等区县。研究区水源涵养功能通过0.01,0.05显著性水平检验的减弱区面积分

别为2 501.04,5 514.26 km²,主要分布在燕山北部、间山盆地中部和太行山中部地区;其中,通过0.01显著性水平检验的减弱区面积占辖区面积比例较大的主要分布在承德隆化县;通过0.05显著性水平检验的减弱区面积占辖区面积比例较大的集中在保定阜平县、石家庄平山县、灵寿县、井陘矿区。京津冀地区水源涵养功能增强区和减弱区具有空间集聚特征,如张家口市沽源县和石家庄市平山县,本研究将这两县作为典型区,进一步分析其变化驱动因素。

水源涵养波动特征。采用自然间断法将京津冀地区水源涵养波动状况划分为5类:低波动(0.14~0.62)、相对低波动(0.63~1.34)、中等波动(1.35~2.89)、相对高波动(2.90~5.65)、高波动(5.66~30.70)。因此像元尺度上,京津冀地区2000—2019年水源涵养功能波动性空间分异明显,表现为“中低波动为主,少数区域波动强烈”的特征(图5)。其中低波动区占全区面积的51.80%,主要分布在冀西北坝上高原、间山盆地、燕山北部和太行山北部地区,表明该地区水源涵养功能稳定,波动性弱。相对低波动区占全区面积的42.16%,主要连片分布在冀东沿海和河北平原南部,其余则呈斑块状分布在间山盆地东部、燕山北部地区,表明该地区水源涵养功能相对稳定。中等波动、相对高波动和高波动区占比较少,仅占全区面积的6.03%,主要呈点状分布在冀东沿海和河北平原的白洋淀等地区,表明该地区水源涵养功能变化强烈。

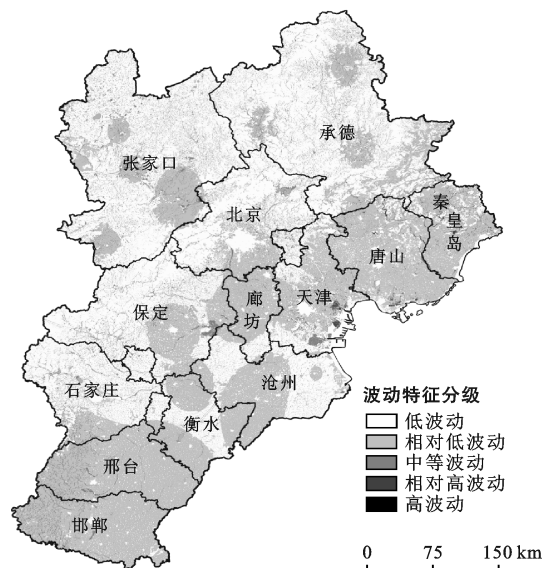


图5 2000—2019年京津冀地区水源涵养波动特征分布格局

2.4 水源涵养量时空变化驱动因素

2.4.1 气象因子是驱动水源涵养能力变化关键自然因素 以水源涵养功能典型增强区沽源县和典型退化区平山县为例,分析降水量和潜在蒸散量对区域水

源涵养功能的驱动。沽源县总面积约 3 589.26 km², 水源涵养功能增强区面积为 2 624.81 km², 其中通过显著性检验面积为 1 433.59 km², 占总面积的 39.94%。平山县总面积约为 2 643.67 km², 水源涵养功能减弱区面积为 1 949.79 km², 其中通过显著性检验面积为 1 064.26 km², 占总面积的 40.26%。

基于 2000—2019 年沽源县、平山县的年降水量、年潜在蒸散发量数据与水源涵养平均深度相关统计结果(图 6—7)可知。20 a 间沽源县、平山县降水量

分别呈现持续增强和先增强后减弱的两种趋势, 但共同表现出水源涵养深度随降水量增加而加深的特点, 表明降水量与水源涵养量呈显著正相关。20 a 间沽源县、平山县潜在蒸散发量分别呈现略有降低和略有增强的两种趋势, 其共同特点是水源涵养深度随潜在蒸散发量增加而减少, 表明潜在蒸散发量与水源涵养量呈显著负相关。可见, 气象因子中降水量和潜在蒸散发量的增减, 对区域生态系统水源涵养能力驱动较大。

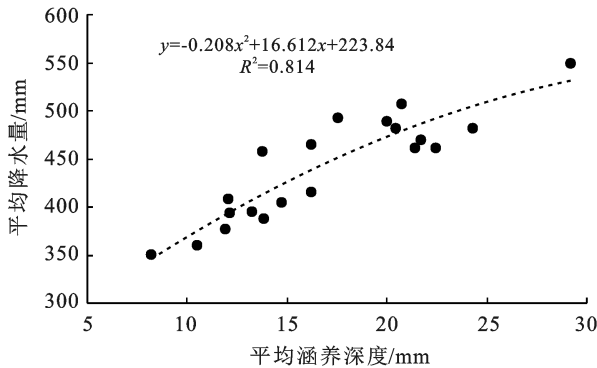


图 6 2000—2019 年沽源县降水量、潜在蒸散发量与水源涵养深度变化关系

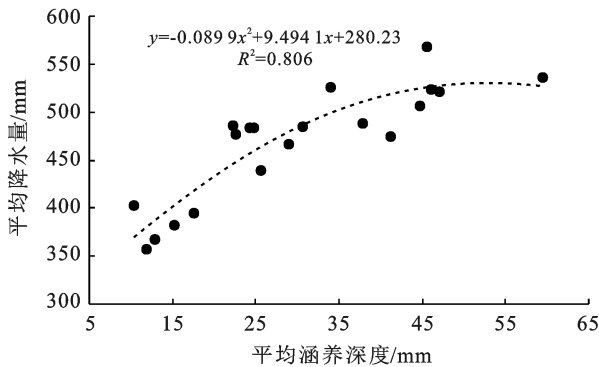
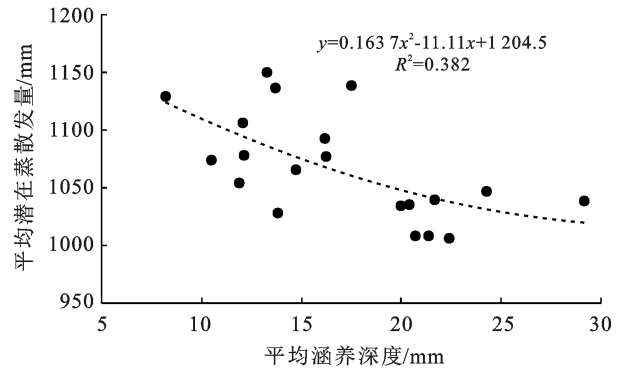
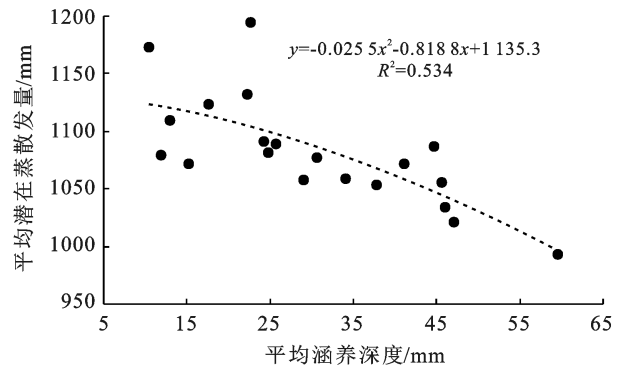


图 7 2000—2019 年平山县降水量、潜在蒸散发量与水源涵养深度变化关系



2.4.2 土地利用类型变化是驱动涵养水源能力变化重要人文因素 对沽源县 2000—2019 年土地利用类型转移矩阵进行分析(表 3), 发现沽源县耕地类型分布面积最大, 其次为草地、未利用土地和林地。在土地利用类型转移方面, 耕地和草地转化较多, 水域变化最小; 耕地主要转化为草地、未利用土地和林地, 面积分别为 96.31, 30.49, 16.61 km², 分别占沽源县土地总面积比例的 2.70%, 0.85% 和 0.46%。2000—2019 年, 草地总面积相对稳定, 转入和转出基本平衡, 耕地总面积有所减少, 减少面积为 18.92 km²; 建设用地、林地和水域有所增加, 增加面积分别为 41.9, 10.36, 1.9 km²; 林地面积增长来源主要为草地和耕地, 未利用土地、建设用地和水域中有少部分演变为林

地。该县 2000 年以来执行了一系列生态建设工程, 如退耕还林还草、风沙治理等, 使得森林、草地覆盖密度升高, 土壤下渗、持水能力增强, 水源涵养能力增强。

对平山县 2000—2019 年土地利用类型转移矩阵进行分析(表 4), 发现平山县土地类型主要为草地、林地和耕地, 其次为建设用地和水域。在土地利用类型转移方面, 耕地转出最大, 其次为草地, 未利用土地变化最小; 耕地主要转化为建设用地、草地和水域, 面积分别为 53.76, 46.38, 18.52 km², 分别占平山县土地总面积比例的 3.52%, 3.04% 和 1.21%。草地主要转化为林地、耕地和建设用地, 其中转林地面积为 70.76 km², 转耕地和建设用地面积之和为 77.68 km², 分别占平山县土地总面积的 4.64% 和 5.09%, 草地转

林地面积少于转耕地和建设用地面积之和。

2000—2019 年,平山县耕地面积减少最多,为 64.64 km²,其次草地面积减少较多,为 49.34 km²;建设用地面积增加最多,面积从 2000 年的 26.05 km² 增加至 2018 年的 115.2 km²,建设用地面积增长主要

来自草地和耕地,林地和水域中也有部分被建设用地占用。另外,该县山地矿产资源丰富,2000 年以来当地工矿业、服务业发展较快,草地、耕地减少面积主要发展演变为工矿、城市等建设用地,对草地、耕地等植被覆盖的干扰较大,水源涵养能力也相应降低。

表 3 2000—2019 年沽源县土地利用类型转移矩阵

地类统计	2000 年													
	草地		耕地		建设用地		林地		水域		未利用地		总计	
	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %
2019 年 草地	737.33	20.64	85.28	2.39	10.64	0.30	18.88	0.53	1.08	0.03	6.04	0.17	859.24	24.05
耕地	96.31	2.70	1 835.6	51.39	41.9	1.17	16.61	0.46	1.46	0.04	30.49	0.85	2 022.36	56.61
建设用地	3.03	0.08	15.92	0.45	38.41	1.08	0.08	0.002	0.11	0.003	2.19	0.06	59.74	1.67
林地	11.84	0.33	11.12	0.31	2.38	0.07	142.98	4.00	0.12	0.003	0.15	0.004	168.58	4.72
水域	0.95	0.03	0.56	0.02	0.31	0.01	0.08	0.002	40.37	1.13	5.13	0.14	47.4	1.33
未利用地	10.66	0.30	54.96	1.54	7.99	0.22	0.31	0.01	6.16	0.17	334.78	9.37	414.87	11.61
总计	860.11	24.00	2 003.44	56.08	101.64	2.85	178.94	5.01	49.3	1.38	378.77	10.60	3 572.2	1.00

表 4 2000—2019 年平山县土地利用类型转移矩阵

地类统计	2000 年													
	草地		耕地		建设用地		林地		水域		未利用地		总计	
	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %
2019 年 草地	1 106.65	72.56	44.4	2.91	33.28	2.18	70.76	4.64	16.53	1.08	2.93	0.19	1 274.55	83.56
耕地	46.38	3.04	407.5	26.72	53.76	3.52	10.1	0.66	18.52	1.21	0	0	536.26	35.16
建设用地	0.41	0.03	5.2	0.34	20.18	1.32	0.23	0.015	0.03	0.002	0	0	26.05	1.71
林地	64.42	4.22	3.46	0.23	5.32	0.35	618.85	40.57	0.32	0.021	0.39	0.026	692.77	45.42
水域	7.23	0.47	10.83	0.71	2.59	0.17	2.21	0.145	77.62	5.09	0	0	100.47	6.59
未利用地	0.14	0.01	0.23	0.02	0.07	0.00	1.38	0.09	0.72	0.05	0	0	1.81	0.12
总计	1 225.21	80.33	471.62	30.92	115.2	7.55	703.53	46.13	113.74	7.46	3.33	0.22	1 525.25	1.00

3 讨论

本研究扩展了水源涵养功能测算方法,明确了水源涵养功能变化与驱动因素间的关系。当前在水源涵养功能研究领域,不少学者以 InVEST 模型产水量作为生态系统水源涵养量^[28-29],产水量是基于水量平衡法原理,由降水量减去蒸散发量后得到的径流产出量,水源涵养量则是特有生态系统结构在多种复杂因素驱动下,对降水截留、渗透和蓄积后得到的水分贮存量^[30]。因此,本研究基于生态系统水源涵养功能形成原理,利用 InVEST 模型产水量模块和本地化处理的基础地理参数,验证计算得到的产水量,结合地形指数、土壤饱和导水率和流速系数等因子对地表径流的影响,修正水源涵养公式,测算出每栅格单元的水源涵养深度和水源涵养量,拓展了水源涵养功能测算方法,提高了研究方法的准确性。此外,本研究基于

上述模型和公式计算出京津冀地区水源涵养功能逐年数据后,对水源涵养结果进行了 20 a 的时空格局变化、像元尺度的动态趋势与波动特征分析,并对典型增强、减弱区主要驱动因素进行了探讨,明确了京津冀地区水源涵养功能变化与关键自然因素(降水、潜在蒸散发)、重要人文因素(土地利用变化)间的关系,在研究内容上比较全面,提高了研究结果的客观性。

本研究定量评估京津冀地区 20 a 的水源涵养功能,与已有研究结果有相同点,也有不同之处。①水源涵养量年际变化方面,潘梅等^[31]基于降水贮存量法估算 2000—2015 年京津冀地区平均水源涵养量为 $7.46 \times 10^9 \text{ m}^3$,且年际变化呈不显著上升趋势,与本研究平均水源涵养量和年际变化趋势近似。但潘梅等测算了多类生态系统功能,水源涵养功能只是其中之一,计算方法相对简单,未测算栅格尺度上水源涵养量的多年动态趋势,本研究则用多种空间方法分析了

水源涵养量动态趋势与波动特征,结果相对全面;②水源涵养空间格局方面,刘娅等^[32]、张宇硕等^[33]分别利用SOFM神经网络分析法、降水储存量法,对京津冀地区水源涵养空间格局进行研究,结果显示水源涵养高值区主要分布于燕山—太行山区,低值区主要位于冀中南平原区。高值区与低值区空间分布与本研究空间格局有相似之处,但刘娅等^[32]研究结果认为坝上高原、间山盆地区属于水源涵养中能力区,本研究发现坝上高原东部水源涵养功能较强,西部较差,间山盆地山地和边缘较强,盆地内部较差。张宇硕等^[33]研究发现2000年和2015年冀西南太行山区邢台—邯郸一带水源涵养功能较差,与本研究结果不同,本研究发现该区域为高值区。研究结果有差异,主要原因是测算方法和所选因子不同。刘娅等^[32]评估水源涵养功能主要考虑海拔、降水、蒸散量等因素,本研究除考虑降水、蒸散量、海拔等以外,还考虑到土地利用、土层深度、植物可利用水含量以及植物蒸散等诸多因素,在测算中模拟诸因素在生态系统内部水分复杂流转中的作用过程,结果较符合实际水分贮存状况。张宇硕等^[33]基于降水、土地利用数据,在县域尺度上对京津冀水源涵养功能空间格局进行分析,测算过程中按县域单元对各类数据进行了平均化处理,本研究在像元尺度上进行测算,研究结果与自然地貌一致性较好。

驱动生态系统水源涵养功能的自然、人文因素诸多,如植被变化、区域经济状况、国家政策等因素,本研究未进行深入探究;另外,本研究仅分析了两个典型区变化的驱动因素,未对整个研究区的变化原因进行全面分析,存在一定不足。未来应从生态系统综合角度开展研究,充分考虑多种驱动因素的综合作用,对整个研究区动态变化进一步细致分析。

4 结论

(1) 京津冀地区产水量空间格局呈现东部较高、西部较低,产水深度 >60 mm的高值区主要分布在燕山山区、东部沿海平原所在地; <60 mm的低值区主要分布在坝上高原和冀西北间山盆地、冀西太行山丘陵和河北平原地区。京津冀地区多年平均产水量为 1.87×10^{10} m³,在2002年最低,2012年最高,产水量年际变化整体表现为前期缓慢增加,后期略有降低。

(2) 京津冀地区水源涵养量空间格局呈现东北—西南部较高、西北—东南部偏低,水源涵养深度 >60 mm的高值区沿坝上高原东北部、燕山和太行山呈东北—西南、南北走向分布,20~60 mm的中值区分布在燕山东南部、太行山北部和间山盆地边缘,

<20 mm的低值区广泛分布在坝上高原西部、间山盆地和河北平原。

(3) 京津冀地区水源涵养量年际变化较大,其多年平均水源涵养量为 7.85×10^9 m³,2002年最低,2012年最高,年际变化整体呈不显著增强趋势。像元尺度上,水源涵养功能增强区面积大于减弱区,增强区占研究区67.49%,其中通过显著性检验占研究区9.28%;减弱区占研究区32.51%,其中通过显著性检验占研究区3.72%。水源涵养功能的增强区与减弱区具有明显的空间聚集特征。20 a间水源涵养功能呈“中低波动为主,少数区域波动强烈”的波动特征,其中低波动区占全区面积51.80%,相对低波动区占全区面积42.16%,中等波动、相对高波动和高波动区仅占全区面积6.03%。

(4) 气象因子是驱动水源涵养能力变化的关键自然因素,水源涵养量与降水量呈显著正相关,与潜在蒸散发量呈显著负相关。土地利用类型变化是驱动涵养水源能力变化重要人文因素,森林、草地等生态空间面积增加、生态环境质量改善,水源涵养能力增强,草地、耕地等生态空间转化为工矿、城市等建设用地,自然生态系统受到干扰或破坏,水源涵养能力降低。

[参 考 文 献]

- [1] 戴尔阜,王晓莉,朱建佳,等.生态系统服务权衡:方法、模型与研究框架[J].地理研究,2016,35(6):1005-1016.
- [2] De Groot R S, Alkemade R, Braat L, et al. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making [J]. Ecological Complexity, 2010,7(3):260-272.
- [3] 侯晓臣,孙伟,李建贵,等.森林生态系统水源涵养能力计量方法研究进展与展望[J].干旱区资源与环境,2018,32(1):121-127.
- [4] Brauman K A, Daily G C, Duarte T K, et al. The nature and value of ecosystem services: An overview highlighting hydrologic services [J]. Annual Review of Environment and Resources, 2007,32:67-98.
- [5] 潘韬,吴绍洪,戴尔阜,等.基于InVEST模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化[J].应用生态学报,2013,24(1):183-189.
- [6] 欧阳志云,王如松,赵景柱.生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J].应用生态学报,1999,10(5):635-640.
- [7] 魏晓华,李文华,周国逸,等.森林与径流关系:一致性和复杂性[J].自然资源学报,2005,20(5):761-770.
- [8] 周佳雯,高吉喜,高志球,等.森林生态系统水源涵养服务功能解析[J].生态学报,2018,38(5):1679-1686.

- [9] 张彪,李文华,谢高地,等.森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法[J].生态学杂志,2009,28(3):529-534.
- [10] 王军德,李元红,李赞堂,等.基于 SWAT 模型的祁连山区最佳水源涵养植被模式研究:以石羊河上游杂木河流域为例[J].生态学报,2010,30(21):5875-5885.
- [11] Azimi M, Barzali M, Abdolhosseini M, et al. Examining the impact of rangeland condition on water conservation by using an integrated modelling approach [J]. *Land Degradation & Development*, 2021,32(13):3711-3719.
- [12] 杜世勋,郭新亚,荣月静.基于 Budyko 假设和 SCS-CN 模型的河源区水源涵养功能研究[J].水土保持研究,2018,25(1):147-152.
- [13] 许丁雪,吴芳,何立环,等.土地利用变化对生态系统服务的影响:以张家口—承德地区为例[J].生态学报,2019,39(20):7493-7501.
- [14] 余灏哲,李丽娟,李九一.基于量—质—域—流的京津冀水资源承载力综合评价[J].资源科学,2020,42(2):358-371.
- [15] 张晓琳,熊立华,林琳,等.五种潜在蒸散发公式在汉江流域的应用[J].干旱区地理,2012,35(2):229-237.
- [16] Droogers P, Allen R. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions [J]. *Irrigation and Drainage Systems*, 2002,16:33-45.
- [17] 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.
- [18] Baker T J, Miller S N. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed [J]. *Journal of Hydrology*, 2013,486:100-111.
- [19] 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.
- [20] Donohue R J, Roderick M L, McVicar T R. Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model [J]. *Journal of Hydrology*, 2012,436/437:35-50.
- [21] 包玉斌,李婷,柳辉,等.基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J].地理研究,2016,35(4):664-676.
- [22] 吕国旭,陈艳梅,邹长新,等.京津冀植被退化的空间格局及人为驱动因素分析[J].生态与农村环境学报,2017,33(5):417-425.
- [23] 李燕丽,潘贤章,王昌昆,等.2000—2011 年广西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J].生态学报,2014,34(18):5220-5228.
- [24] 潘颖,林杰,佟光臣,等.2004—2014 年太湖流域植被覆盖时空变化特征[J].生态与农村环境学报,2018,34(1):37-45.
- [25] 刘瑞,朱道林.基于转移矩阵的土地利用变化信息挖掘方法探讨[J].资源科学,2010,32(8):1544-1550.
- [26] 张建国,李晶晶,殷宝库,等.基于转移矩阵的准格尔旗土地利用变化分析[J].水土保持通报,2018,38(1):131-134.
- [27] 王燕,高吉喜,金宇,等.基于 2005—2015 年土地利用变化和 InVEST 模型的内蒙巴林右旗农牧交错带生境质量研究[J].生态与农村环境学报,2020,36(5):654-662.
- [28] 迟妍妍,许开鹏,王晶晶,等.京津冀地区生态空间识别研究[J].生态学报,2018,38(23):8555-8563.
- [29] 王耕,韩冬雪.基于 InVEST 模型的大凌河上游汇水区水源涵养功能评估[J].水土保持通报,2018,38(3):206-211.
- [30] 左其亭,王骄阳,杨峰,等.水源涵养相关概念辨析及水源涵养能力计算方法[J].水利水电科技进展,2022,42(2):13-19.
- [31] 潘梅,陈天伟,黄麟,等.京津冀地区生态系统服务时空变化及驱动因素[J].生态学报,2020,40(15):5151-5167.
- [32] 刘娅,朱文博,韩雅,等.基于 SOFM 神经网络的京津冀地区水源涵养功能分区[J].环境科学研究,2015,28(3):369-376.
- [33] 张宇硕,吴殿廷.京津冀地区生态系统服务权衡的多尺度特征与影响因素解析[J].地域研究与开发,2019,38(3):141-147.