

辽宁省 2001—2020 年水源涵养量变化及其影响因素

吕乐婷, 李青, 杨勇

(辽宁师范大学 地理科学学院, 辽宁 大连 116029)

摘 要: [目的] 探讨辽宁省水源涵养量时空变化特征及其影响因素, 为水资源合理开发利用及水源涵养功能恢复提供可视化评估依据。[方法] 基于 InVEST 模型产水量模块, 评估辽宁省 2001—2020 年水源涵养量时空动态变化状况, 采用相关分析和地理探测器探索水源涵养的主要影响因素。[结果] 2001—2020 年辽宁省年均水源涵养量总体呈波动上升趋势, 多年平均值为 95.28 mm, 增长速率为 13.35 mm/(10 a); 水源涵养量呈由东向西递减的空间分布特征, 丹东市、抚顺市和本溪市水源涵养量较高, 盘锦市、锦州市、阜新市和葫芦岛市水源涵养量较低。[结论] 水源涵养量与降水量、地表水资源量、山区入渗量和林地比例呈显著正相关, 与蒸散量、气温、地块破碎度、建设用地比例呈显著负相关。气候因子及土地利用因子是影响辽宁省水源涵养量空间分异的主导因素, 单因子解释力 0.6 以上, 多因子交互作用强于单因子作用, 其中降水、蒸散与各因子的交互作用解释力达 0.92。

关键词: InVEST 模型; 水源涵养; 地理探测器; 辽宁省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)01-0290-07

中图分类号: X171

文献参数: 吕乐婷, 李青, 杨勇. 辽宁省 2001—2020 年水源涵养量变化及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 290-296. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.01.038; Lü Leting, Li Qing, Yang Yong. Change and influencing factors of water conservation in Liaoning Province during 2001—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 290-296.

Change and Influencing Factors of Water Conservation in Liaoning Province During 2001—2020

Lü Leting, Li Qing, Yang Yong

(School of Geography Science, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029, China)

Abstract: [Objective] The temporal and spatial variation characteristics and influencing factors of water conservation in Liaoning Province were explored in order to provide a visual evaluation basis for the rational development and utilization of water resources and the restoration of water conservation function. [Methods] The spatial and temporal dynamics of water conservation in Liaoning Province from 2001 to 2020 were evaluated based on the water production module of the InVEST model. The main influencing factors were explored by using correlation analysis and Geodetector. [Results] During 2001—2020, the average annual water conservation in Liaoning Province fluctuated and increased, with an annual average value of 95.28 mm and a growth rate of 13.35 mm/(10 yr). The spatial distribution of water conservation decreased from east to west. Water conservation in Dandong, Fushun, and Benxi City was higher, while water conservation in Panjin, Jinzhou, Fuxin, and Huludao City was lower. [Conclusion] Water conservation was positively correlated with precipitation, surface water resources, mountain infiltration, and forest proportion, and negatively correlated with evapotranspiration, temperature, fragmentation degree, and construction land proportion. Climate factors and land use factors were the dominant factors affecting the spatial differentiation of water conservation in Liaoning Province. The explanatory power of a single factor was above 0.6, and the interaction of multiple factors was stronger than that of a single factor, among which the explanatory power of the interaction

收稿日期: 2021-08-05

修回日期: 2021-09-04

资助项目: 国家自然科学基金项目“流域景观格局对非点源污染影响的定量评估: 以辽宁省汤河流域为例”(41701208)

第一作者: 吕乐婷(1984—), 女(满族), 辽宁省大连市人, 博士, 副教授, 硕导, 主要从事水资源评估与水文生态系统研究。Email: lvleting@lnnu.edu.cn。

通信作者: 李青(1994—), 女(汉族), 贵州省黔南州人, 硕士研究生, 研究方向为水资源评估与水文生态系统。Email: 1162594478@qq.com。

between precipitation, evapotranspiration, and each factor was 0.92.

Keywords: InVEST model; water conservation; Geodetector; Liaoning Province

生态系统服务是人类赖以生存和发展的基础,水源涵养作为其提供的众多服务之一,是水资源可持续利用的保障^[1]。生态环境恶化及人类不合理开发利用,导致水资源短缺,已成为世界各国共同关注的问题。水源涵养是一个不断发展的动态概念,它是指在一定时空范围和条件下,将水分保持在系统内的过程和能力,其功能表现为涵养水源、拦蓄降水、调节河川流量、影响降雨量、净化水质等^[2],其内涵随着人们对生态系统的进一步研究而逐步丰富。国内研究始于 20 世纪 80 年代,集中探讨不同森林类型涵养水源的作用^[3]。随着社会发展及研究的深入,其研究范围不断扩大,不同土地利用下的水源涵养成为研究热点^[4]。水源涵养量计算方法主要有降水储存法、综合蓄水能力法、地下径流增长法等,常用模型主要有基于水量平衡的 InVEST 模型、SWAT 模型、MIKE SHE 模型等。

InVEST(integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs)模型,是由斯坦福大学、大自然保护协会、世界自然基金会联合开发的生态系统服务功能评估模型。该模型突破了传统评估方法的局限性,可动态分析、定量评估生态系统服务功能并以地图的形式表现出来,其陆地生态系统模块包括产水量、生境质量、碳储存及生物多样性等模块^[5]。InVEST模型在国外应用相对成熟,Babbar 等^[6]利用马尔科夫链和 InVEST 模型对印度萨里卡老虎保护区固碳量进行评估,结果表明研究区 2000—2018 年由于人类过度砍伐森林导致固碳量逐年减少,经预测 2035 年实施森林管理后,碳排放量减少。Ashok 等^[7]利用 InVEST模型量化印度海得拉巴市绿地的防洪服务,结果表明城市绿地和开放空间保留了 44%~50%的降雨,降雨强度稍微增加,就会产生巨大的径流量,造成相应的经济损失。国内研究集中在 2010 年以后,研究方向主要集中于生态系统服务功能的评估。吴哲等^[8]、包玉斌等^[9]采用 InVEST 模型等方法分别对海南岛的产水量、陕北黄土高原的水源涵养进行研究模拟。结果表明土地利用类型中的林地、草地和气候因子中的降水是影响产水量、水源涵养的主要因素。此外,模型在其他地理环境差异性较大的区域均取得了较好的效果^[10-11]。

辽宁省作为东北粮食基地和老工业基地之一,生产、生活用水需求量较大,城市化及产业集聚与水污

染加重,生态系统水源涵养功能不断退化,水资源严重匮乏。近年来,辽宁省水生态系统研究取得了新进展,薛超^[12]、李红振^[13]对辽宁省水资源承载力、森林水源涵养能力进行研究。本研究基于辽宁省 2001—2020 年土地利用状况,结合气象、土壤、地形等数据,使用 InVEST 模型评估辽宁省生态系统水源涵养量时空变化特征,并探索其与气候因素、土地利用、生态、社会经济方面的相应关系,以期对辽宁省的生态环境保护、生态系统水源涵养功能恢复提供决策依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

辽宁省位于 118°53′—125°46′E,38°43′—43°26′N,地跨辽河、浑河、大凌河、太子河、绕阳河、鸭绿江六大水系,与吉林、内蒙古及河北等地区接壤。属于大陆性季风气候,四季分明,夏季炎热多雨,冬季寒冷漫长,2001—2020 年多年均温 6—11℃,平均降水量为 429.25~999.61 mm。气温由东部向西部递增;降水量由沿海向内陆递减,东部的抚顺、本溪和丹东市降水量较多,西部的朝阳、葫芦岛等市降水量较少。

1.2 数据来源

InVEST 模型的产水量模块(即水源供给模块)所需参数有年降水量、年潜在蒸散发量、土壤最大根系埋藏深度、植物可利用水量和土地利用/覆被和生物物理参数表等。

(1) 土地利用/覆被。本研究采用 2005,2010,2015,2020 年共 4 期土地利用/覆被数据,分辨率为 1 km×1 km,均来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn>),数据生产制作是以各期 Landsat TM/ETM 遥感影像为数据源,通过人机交互目视解译生成。根据研究需要将原土地利用/覆被类型数据归类并调整为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 类。辽宁省土地利用变化详情见表 1。耕地和林地为主要用地类型,占全省总面积的 83%。2005—2020 年,辽宁省各土地利用类型变化较大,其中耕地和草地面积分别减少 4 097,4 653 km²,降幅分别为 3.16%,3.22%;林地、建设用地增加,面积增长 4 214,4 129 km²,增幅分别为 2.53%,2.75%;水域和未利用地变化小,面积分别增加 1 310,358 km²,增幅分别为 0.86%,0.23%。

表 1 辽宁省土地利用类型结构

土地类型	2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
耕地	64 866	44.46	64 732	44.36	64 505	44.21	60 961	41.43
林地	56 732	38.89	56 669	38.83	56 604	38.79	60 973	41.43
草地	9 307	6.38	9 333	6.41	9 322	6.39	4 683	3.18
水域	4 638	3.17	4 626	3.17	4 619	3.17	5 906	4.01
建设用地	8 974	6.15	9 162	6.28	9 474	6.49	12 892	8.76
未利用地	1 388	1.00	1 386	0.95	1 384	0.95	1 742	1.18

(2) 气象数据。本研究所需气象数据均来源于中国气象局数据中心(<http://data.cma.cn>)。2001—2020 年平均降水量分布特征(图 1a)利用辽宁省 27 个气象站通过克里金插值法对所有站点数据进行空间插值得到;年潜在蒸散量利用气温、风速、日照时数、气压日值数据基于联合国粮农组织 FAO 修正的 Penman-Monteith 公式计算^[14],再进行空间插值(图 1b)。

降水量和潜在蒸散量的空间分布特征呈显著差异,降水主要集中于辽宁省东部的丹东、抚顺、本溪市,降水量在 726.13~999.61 mm 之间,西部的朝阳市、阜新市和锦州市是降水低值区,降水范围为 429.25~550.67 mm。西部的朝阳市、阜新市和锦州市的潜在蒸散较强,蒸散量在 977.71~1 061.91 mm 之间,东部的丹东、本溪、抚顺、鞍山市潜在蒸散较弱,蒸散范围为 773.54~887.04 mm。

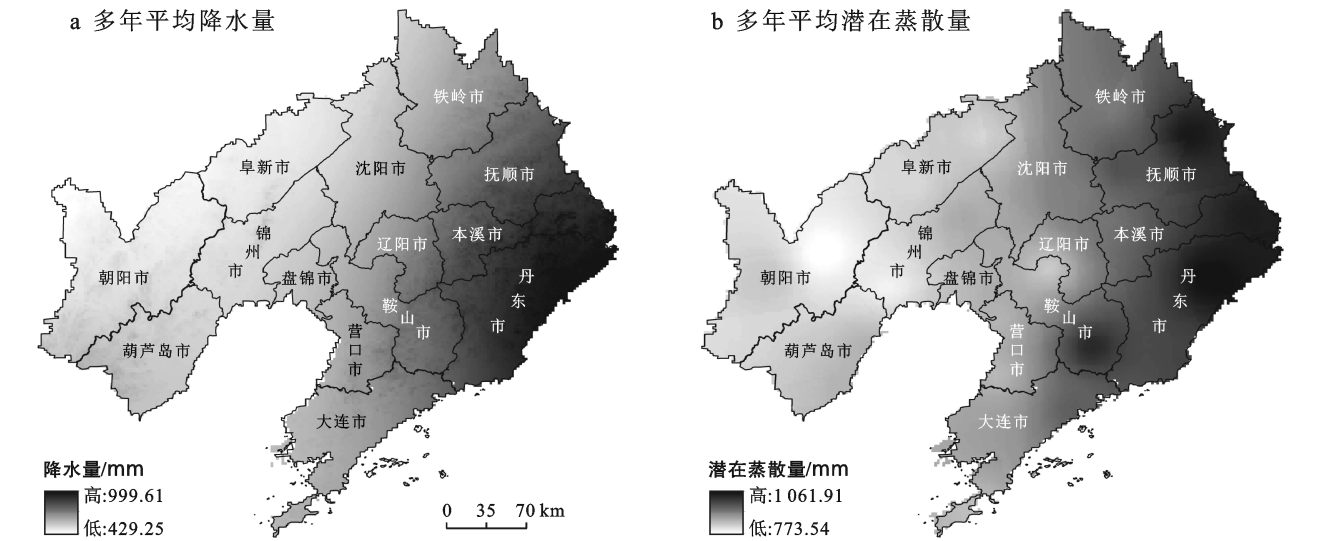


图 1 2001—2020 年平均辽宁省降水量、潜在蒸散量空间分布特征

(3) 土壤数据。本研究所需土壤数据均来源于联合国粮农组织和维也纳国际应用系统研究所构建的世界土壤数据库,中国境内数据源为第二次全国土地调查(2009 年)南京土壤所提供的 1:100 万土壤数据。土壤厚度又称根系最大埋藏深度,是指受物理或化学特性的影响而强烈阻碍根系穿透时的土层深度。土壤有效含水量计算是基于土壤属性数据,由美国华盛顿州立大学开发的土壤水特性软件中的 soil-water-characterstics(SWCT)模块计算获得。计算方法如下:根据黏土(caly)、砂(sand)、有机物(organic matter)、盐度(salinity)、砂砾(gravel)等参数计算得出的凋萎系数和田间持水量,田间持水量和凋萎系数

差值即土壤有效含水量。
(4) 生物物理参数表。包括土地利用/覆被编码、作物根系深度、蒸散系数,其中作物根系深度来自其他学者对全球范围内植被最大根深的研究获得^[15],蒸散系数是根据联合国粮农组织作物蒸散系数指南、InVEST 用户指南获得。

2 研究方法

2.1 水源涵养量的计算

InVEST 模型的产水模块,是基于水量平衡原理,对产水量进行估算,其实质为每一个栅格降水量和实际蒸散量的差值,计算方式如下:

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}\right) P_x \quad (1)$$

式中: Y_{xj} 为栅格单元 x 中土地覆被/利用类型 j 的年产水量, 主要包括地表径流量、土壤含水量、枯落物持水量、冠层截留量; P_x 为栅格单元 x 的年降水量; AET_{xj} 为栅格单元 x 中的土地覆被/利用类型 j 的实际蒸散量, 由(2) 式计算:

$$\frac{AET_{xj}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_{xj}}{1 + \omega_x R_{xj} + \frac{1}{R_{xj}}} \quad (2)$$

式中: ω_x 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, 由公式(3) 计算:

$$W_x = Z \times \frac{AWC_x}{P_x} \quad (3)$$

式中: Z 为经验常数, 也叫季节性因子, 代表区域降水分布及其他水文地质特征。根据相关研究^[16], 对于冬季降水为主的地区, Z 值接近 10, 而对于降水均匀分布的湿润地区和夏季降水为主的地区, Z 值接近 1。 AWC_x 为栅格单元 x 的土壤有效含水量, 由土层深度和理化性质决定。 R_{xj} 为 Bydyko 干燥指数, 由公式(4) 计算:

$$R_{xj} = \frac{K_{xj} \cdot ET_0}{P_x} \quad (4)$$

式中: ET_0 为栅格单元 x 中土地覆被类型 j 的植被蒸散系数; K_{xj} 为参考作物蒸散; ET_0 由公式(5) 计算: $ET_0 =$

$$\frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{\text{mean}} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (5)$$

式中: ET_0 为潜在蒸散量 (mm/d); R_n 为地表净辐射 [MJ/(m² · d)]; G 为土壤热通量 [MJ/(m² · d)]; γ 为干湿表常数 (kPa/°C); T_{mean} 为日平均温度 (°C); u_2 为 2 m 高处风速 (m/s); e_s 为饱和水气压 (kPa); e_a 为实际水气压 (kPa)。

水源涵养量的计算是 InVEST 模型在模拟出研究区年产水量的基础上考虑地形因素、地表径流(流速系数大小)、土壤性质(土壤饱和导水率)等因素对其的影响, 计算径流在栅格上停留时间得出, 具体计算如公式(6):

$$\text{retention} = \min\left(1, \frac{249}{V}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times TI}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K_{\text{sat}}}{300}\right) \times Y_{xj} \quad (6)$$

式中: retention 为单位面积水源涵养量 (mm); V 是流速系数, 采用模型参数表数据; K_{sat} 为土壤饱和导水率 (mm/h); TI 为地形指数, 由公式(7) 计算:

$$TI = \lg\left(\frac{D_{\text{area}}}{\text{Soil}_{\text{dep}}} \times P_{\text{slope}}\right) \quad (7)$$

式中: D_{area} 为集水区栅格数量; Soil_{dep} 为土层深度 (mm); P_{slope} 为坡度比。

2.2 基于地理探测器影响因素的分析

地理探测器是探测地理现象空间分异以及其背后驱动因素的一种统计学方法, 主要包括风险探测、因子探测、生态探测和交互探测 4 个模块, 其具有同时探测多个因子在不同空间单元的不同影响作用及其交互关系的优势^[17]。本文主要通过因子探测和交互探测两个模块对辽宁省水源涵养空间分异影响因素进行定量分析, “因子探测” 表明单个因子在一定程度上解释生态系统服务功能的空间分异, “交互探测” 识别不同自变量因子之间的交互作用。计算如公式(8):

$$q = 1 - \frac{1}{N \delta_1^2} \sum_{i=1}^L N_h \delta_h^2 \quad (8)$$

式中: q 表示影响因子对水源涵养的探测力值, 阈值范围为 [0, 1], 值越高说明分类因素对水源涵养的影响越大, 空间分异性越明显; $h = 1, 2, \dots, L$ 表示变量或者因子的分层, N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数, δ_h^2 和 δ^2 分别为层 h 和全区变量的方差。

3 结果与分析

3.1 模型校验

基于 InVEST 模型计算研究区产水量时, 依据辽宁省水资源公报数据对模型参数进行率定, 通过调整 Z 值 (Z 系数) 使模拟值更加接近实测值, 模拟结果如图 2。2001—2020 年, 辽宁省多年平均径流量为 $2.53 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 与辽宁省水资源公报公布的多年平均径流量 $2.61 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 较接近, 平均误差率为 3.92%, 说明模拟结果较好。

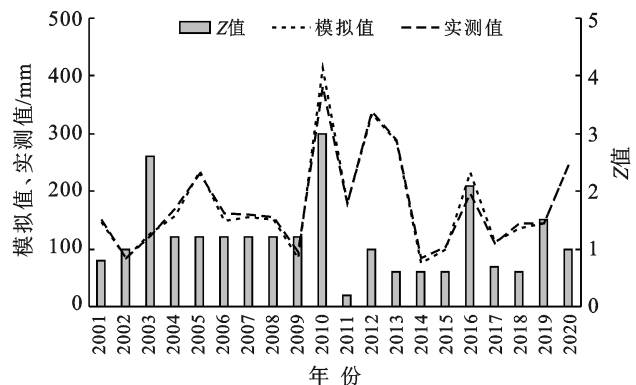


图 2 2001—2020 年辽宁省 InVEST 模型结果验证

3.2 辽宁省水源涵养量的年际变化特征

2001—2020 年辽宁省年均降水量、潜在蒸散量、

产水量、水源涵养量变化见图 3。辽宁省多年平均降水量为 644.35 mm,在研究时段内呈显著增加趋势($p < 0.05$),增长速率为 14.6 mm/(10 a);多年平均潜在蒸散量为 931.88 mm,增长速率为 49.92 mm/(10 a),未达显著性水平;多年平均产水量和水源涵养量分别为 177.22 mm 和 95.28 mm,最低值分别出现在 2014 年和 2009 年,分别为 76.47 mm 和 40.52 mm,最高值均出现在 2010 年,分别为 412.73 mm 和 186.64 mm。多年来,辽宁省产水量和水源涵养量均呈现不显著增长趋势,增长速率分别为 19.36 mm/(10 a)和 13.35 mm/(10 a)。

3.3 辽宁省水源涵养量的空间分布

辽宁省多年平均产水量及水源涵养量空间变化见图 4。水源涵养总体呈从东—西递减的空间分布特征,高值区包括抚顺市、本溪市和丹东市,水源涵养量在 180.73~245.24 mm 之间。这是由于该区域降水充沛,林地分布广,蒸散发为全省最低值,故产水量大,水源涵养能力强。中、西部的盘锦市、锦州市、阜新市、朝阳市、沈阳市和葫芦岛市是低值区,水源涵养

量在 24.25~46.23 mm 之间,该区域地形以平原、低山和丘陵为主,降水偏少,蒸散强,受地形与蒸散影响,产水量与水源涵养量均较少。处于东部向中西部过渡的大连市、营口市、铁岭市、辽阳市和鞍山市水源涵养量在 71.45~111.04 mm 之间。

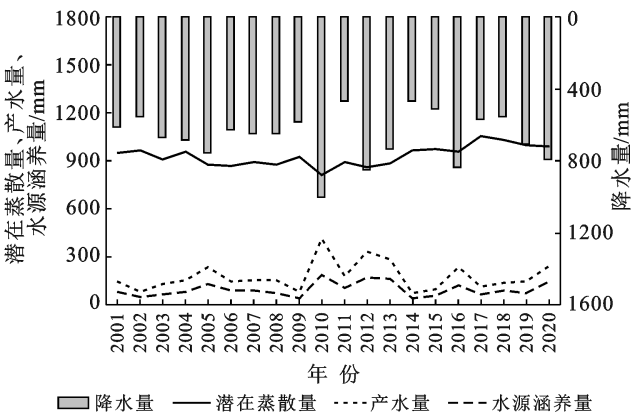


图 3 2001—2020 年辽宁省降水量、潜在蒸散量、产水量及水源涵养量的年际变化

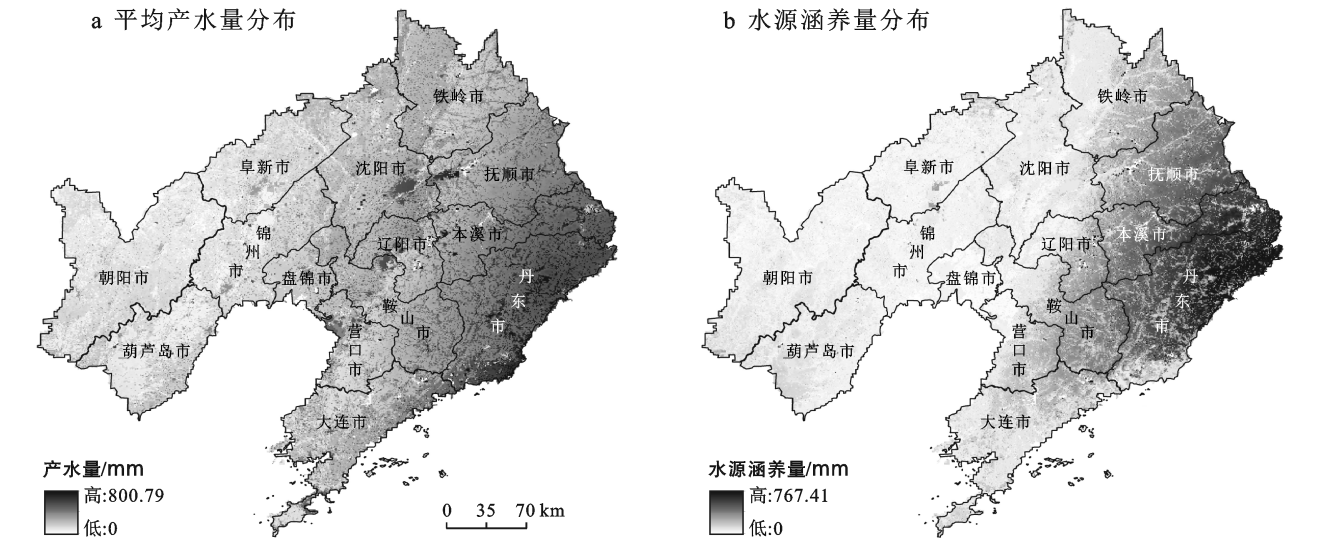


图 4 辽宁省产水量和水源涵养量空间分布特征

3.4 水源涵养与不同因子的相关分析结果

参考李怡颖等^[18],王亚慧等^[19]的研究及数据可获取性,本研究分别从气候、土地利用、生态、社会经济方面选择降水量、蒸散量、气温、地块破碎度、林地比例、地表水资源量、山区入渗量、城镇化率等参数,探索其与水源涵养量的关系。经皮尔逊相关分析可得,水源涵养量与降水量、林地比例、地表水资源量和山区入渗量呈显著正相关,与蒸散量、气温、建设用地比例、地块破碎度呈显著负相关(表 2)。

水源涵养量与降水量、地表水资源量、林地比例和山区入渗量相关性较高,相关系数分别为 0.95,

0.67,0.61,0.56。辽宁省东部山区林地面积大,人类活动强度小,地块较完整,植被覆盖度高,降水、地表水资源量丰富,水源涵养量明显高于其他地区,水源涵养能力强。蒸散量、气温、地块破碎度、建设用地比例与水源涵养量的相关系数分别为-0.93,-0.64,-0.72,-0.55,相关性较强,辽宁省中、西部地区地形以平原、低山和丘陵为主,气温高于东部山地,蒸发旺盛,建设用地扩张,地块破碎度增加,水源涵养能力弱。此外,城镇化率增长在一定程度上对水源涵养起促进作用,农作物播种面积增加,人类过度使用耕地,灌溉率高,影响土壤持水功能,导致水源涵养功能退化。

表 2 辽宁省不同影响因素与水源涵养的相关关系

影响因素		相关性	影响因素		相关性
气候	降水量	0.95**	生态	地表水资源量	0.67**
	蒸散量	−0.93**		山区入渗量	0.56*
	气温	−0.64*		生态环境用水	−0.04
土地利用	林地比例	0.61*	社会经济	城镇化率	0.24
	建设用地比例	−0.55*		农作物面积	−0.22
	地块破碎度	−0.72**		农业灌溉率	−0.45

注: * 为在 0.05 级别(双尾)相关性显著; ** 为在 0.01 级别(双尾)相关性显著。

3.5 辽宁省水源涵养的空间分异驱动力分析

辽宁省各单因子对水源涵养空间异质性的解释力见表 3。

表 3 辽宁省单因子对水源涵养空间异质性解释力(*q*)

因子	降水	蒸散	气温	林地比例	建设用地比例	地块破碎度
<i>q</i> 值	0.90	0.85	0.62	0.61	0.83	0.59

因子	地表水资源量	山区入渗量	生态环境用水	城镇化率	农作物面积	农业灌溉率
<i>q</i> 值	0.77	0.44	0.43	0.33	0.36	0.49

辽宁省多因子的交互作用对水源涵养空间异质性解释力均高于单个因子的解释力(表 4)。气候因子中的降水和蒸散与其他各因子的交互作用解释力最强,均在 0.9 以上,气温与其他因子交互作用稍弱,与农业灌溉率交互作用的解释力最低,为 0.72;土地

降水、蒸散、建设用地比例、地表水资源量、气温和林地比例是影响辽宁省水源涵养空间分异的主导因素,解释力分别为 0.9,0.85,0.83,0.77,0.62,0.61。地块破碎度、农业灌溉率、山区入渗量、生态环境用水的解释力在 0.4~0.59 之间,分别为 0.59,0.49,0.44,0.43。其他因子如农作物面积、城镇化率的解释力有限,分别为 0.36,0.33。总体上,气候因子对辽宁省水源涵养空间分异影响远大于其他因子;土地利用方面,建设用地比例解释力大于林地比例与地块破碎度;生态因子与社会经济因子总体解释力相当,但生态因子中的地表水资源量对水源涵养空间分异的影响更大,解释力更强。

利用中各因子的交互作用解释力表现为:建设用地比例>地块破碎度>林地比例;生态因子和社会经济因子交互作用解释力相当。综上可知,无论单因子作用还是多因子交互作用,气候因子都是影响辽宁省水源涵养空间分异的主导因子。

表 4 辽宁省不同因子对水源涵养空间异质性交互作用解释力(*q*)

因子	降水	蒸散	气温	林地比例	建设用地比例	地块破碎度	地表水资源量	山区入渗量	生态环境用水	城镇化率	农作物面积
蒸散	0.90										
气温	0.91	0.91									
林地比例	0.92	0.92	0.92								
建设用地比例	0.92	0.91	0.91	0.86							
地块破碎度	0.91	0.90	0.91	0.88	0.92						
地表水资源量	0.90	0.90	0.86	0.92	0.91	0.91					
山区入渗量	0.91	0.91	0.84	0.87	0.90	0.92	0.91				
生态环境用水	0.92	0.91	0.76	0.83	0.91	0.92	0.85	0.91			
城镇化率	0.92	0.91	0.89	0.84	0.87	0.92	0.91	0.71	0.83		
农作物面积	0.92	0.92	0.88	0.71	0.92	0.83	0.87	0.88	0.83	0.89	
农业灌溉率	0.91	0.90	0.72	0.83	0.91	0.64	0.90	0.83	0.72	0.72	0.79

4 讨论与结论

4.1 结论

(1) 2001—2020 年辽宁省多年平均产水量和水源涵养量分别为 177.22 mm 和 95.28 mm,增长速率分别为 19.36 mm/(10 a)和 13.35 mm/(10 a)。水源涵养量空间变化总体上从东—西递减,高值区分布于丹东市、抚顺市和本溪市,低值区位于盘锦市、锦州

市、阜新市和朝阳市。

(2) 水源涵养量与降水量、地表水资源量、林地比例和山区入渗量呈显著正相关,与蒸散量、气温、地块破碎度、建设用地比例呈显著负相关。

(3) 气候因子与土地利用因子是辽宁省水源涵养空间分异的主导因子。降水、蒸散、建设用地比例、地表水资源量、气温和林地比例的解释力 0.6 以上,地块破碎度、农业灌溉率、山区入渗量、生态环境用水

的解释力在 0.4~0.59 之间,农作物面积、城镇化率的解释力有限。多因子交互解释力均高于单个因子,其中降水、蒸散与各因子共同作用于水源涵养时部分解释力可达 0.92 以上。

4.2 讨论

本研究结果表明辽宁省 2001—2020 年水源涵养总量呈波动上升变化。2001 年水源涵养总量 $11.95 \times 10^9 \text{ m}^3$, 2020 年上升至 $21.15 \times 10^9 \text{ m}^3$, 总体上呈上升趋势。辽宁省水源涵养量多年均值自西部丘陵区向东部山区增加,造成这种分异规律的原因是东、西部地区在气候、用地类型等方面的差异。东部地区地形以山地为主,林地约占全省林地面积 50%, 森林盖度高且多为天然林,降水丰富,蒸散量低于其他地区,产水能力强,水源涵养量大。中、西部地区与内蒙古河北接壤,平原、低山和丘陵比例大,森林资源相对匮乏,植被覆盖度低,气候干燥,日照时数长,降水少且蒸散强,产水量低、水源涵养能力弱。

气候、土地利用类型与水源涵养相关性较强,是影响水源涵养变化的主要因素,其中降水与蒸散对水源涵养有直接影响。在 6 类土地利用类型中,林地具有根系深度大的特征,截留、下渗能力强,因而水源涵养量大,与水源涵养呈显著正相关性,在城市化过程中应注重林地的开发与保护。无论单因子作用还是多因子交互作用,气候因子都是辽宁省水源涵养空间分异的主要控制因素,降水量、蒸散量差异较大的地区,水源涵养量不同,表现出明显的空间差异性。此外,用地类型是水源涵养空间分异的驱动力之一,受人类活动影响较大,用地类型转变影响水源涵养功能,因此优化土地利用结构,对水源涵养功能恢复有重要作用。

水源涵养量的计算是一个复杂的综合性过程,参考可获取的水资源公报及统计年鉴的相关数据,对模型所需参数进行校验,在今后的研究中应加强野外数据监测,增加研究结果的可信度。相较于其他研究,本论文集中研究行政区尺度的水源涵养时空动态及归因分析,在不同生态系统类型,例如森林生态系统方面研究较少,还需进一步完善。此外, Z 值是表征多年平均降水特征的常数,不同地区的年际降水特征存在差异,长时间序列情况下, Z 值的确定需不断调整,耗时较长。通过 Z 值调整提高模拟精度,使模拟结果更接近实测值。

【参 考 文 献】

[1] 苏敬华.崇明岛生态系统服务功能价值评估[D].上海:东华大学,2009.

- [2] 王玉纯,赵军,付杰文,等.石羊河流域水源涵养功能定量评估及空间差异[J].生态学报,2018,38(13):4637-4648.
- [3] 于立忠,吴振锋,唐凤德.辽东山区 5 种主要林型水源涵养功能的 AHP 评定[J].辽宁林业科技,1995(5):22-26.
- [4] 王保盛,陈华香,董政,等.2030 年闽三角城市群土地利用变化对生态系统水源涵养服务的影响[J].生态学报,2020,40(2):484-498.
- [5] 唐尧,祝炜平,张慧,等. InVEST 模型原理及其应用研究进展[J].生态科学,2015,34(3):204-208.
- [6] Babbar D, Areendran G, Sahana M, et al. Assessment and prediction of carbon sequestration using Markov chain and InVEST model in Sariska Tiger Reserve, India [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,278:123333.
- [7] Kadaverugu A, Nageshwar Rao C, Viswanadh G K. Quantification of flood mitigation services by urban green spaces using InVEST model: A case study of Hyderabad city, India [J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2021,7(1):589-602.
- [8] 吴哲,陈歆,刘贝贝,等.不同土地利用/覆盖类型海南岛产水量空间分布模拟[J].水资源保护,2014,30(3):9-13.
- [9] 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.
- [10] 梁晓瑶,袁丽华,宁立新,等.基于 InVEST 模型的黑龙江省生境质量空间格局及其影响因素[J].北京师范大学学报(自然科学版),2020,56(6):864-872.
- [11] 刘有延,刘兴元,张博,等.基于 InVEST 模型的黄土高原丘陵区水源涵养功能空间特征分析[J].生态学报,2020,40(17):6161-6170.
- [12] 薛超.辽宁省水资源评价指标体系研究[J].黑龙江水利科技,2020,48(2):1-4.
- [13] 李红振.辽东地区人工林和天然林水源涵养功能[J].绿色科技,2017(15):195-196.
- [14] 童宏良.我国蒸发力计算的气候学方法[J].南京气象学院学报,1989,12(1):19-33.
- [15] 张灿强,李文华,张彪,等.基于土壤动态蓄水的森林水源涵养能力计量及其空间差异[J].自然资源学报,2012,27(4):697-704.
- [16] 张媛媛.1980—2005 年三江源区水源涵养生态系统服务功能评估分析[D].北京:首都师范大学,2012.
- [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] 李怡颖,范继辉,廖莹.基于 InVEST 模型的张家口市水源涵养功能时空差异分析[J].草业科学,2020,37(7):1313-1324.
- [19] 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.