

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.06.015

太子河流域景观格局时空演变及其对水源涵养的影响

吕乐婷, 乔皓, 郑德凤, 杨勇

(辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁 大连 116029)

摘要:基于 InVEST 模型,研究了太子河流域 2000—2020 年水源涵养时空分布特征,定量评估了研究期土地利用变化及景观格局演变,并采用皮尔逊相关分析法和地理加权回归模型研究了景观格局和水源涵养量之间的关系。结果表明:景观水平上,最大斑块指数、蔓延度指数和聚集度指数越高,则水源涵养量越高;类型水平上,耕地数量越多、斑块密度越大、景观分离度越大,林地优势度越高,建设用地景观越分裂、斑块数量越少、斑块密度越小,则水源涵养力越高;空间上,流域大部分区域景观蔓延度指数对水源涵养起正向作用,耕地斑块数量、斑块密度分别在流域中南部和西北部对水源涵养起正向作用,林地斑块面积比在全域对水源涵养起正向作用,建设用地斑块数量、斑块密度、斑块面积比对水源涵养均以负向作用为主。

关键词:景观格局;水源涵养;时空演变;InVEST 模型;太子河流域

中图分类号:P901;X171.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)06-0111-10

Spatial-temporal evolution of landscape pattern in the Taizi River Basin and its impact on water conservation//
LYU Leting, QIAO Hao, ZHENG Defeng, YANG Yong (School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: Based on the InVEST model, the spatial-temporal distribution characteristics of water conservation in the Taizi River Basin from 2000 to 2020 were explored, and the land use change and landscape pattern evolution during the study period were quantitatively evaluated. Using Pearson correlation analysis and geographical weighted regression model, the relationship between landscape pattern and water conservation was analyzed. The results show that, at the landscape level, the amount of water conservation increases with the largest patch index, contagion index, and aggregation index; at the landscape type level, the capacity of water conservation gets higher when the cultivated land has larger area, higher patch density, and higher degree of landscape fragmentation, the forest land has higher dominance degree, and the construction land has smaller number and lower density of patches, with landscape being more fragmented. Spatially, the landscape contagion index plays a positive role in water conservation in most area of the basin, the number and density of patches in cultivated land have positive effect on water conservation in the southern central part and the northwestern part of the basin, respectively. The percentage of landscape of forest land has a positive effect on water conservation in the whole region, while the number and density of patches and percentage of landscape of construction land mainly play a negative role in water conservation.

Key words: landscape pattern; water conservation; spatial-temporal evolution; InVEST model; the Taizi River Basin

水源涵养是生态系统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,是生态系统水文供给服务中极为重要的部分,在防洪抗旱、固土保水和改良生态环境等方面发挥着重要作用^[1]。水源涵养能力受气候、地形、土壤、植被等因素影响,具有空间异质性和复杂性^[2]。景观格局是不同土

地利用类型在空间上的分布与组合形式,是各种生态过程在不同尺度上作用的结果^[3]。景观格局作为人类对地表形态最为直观的表现,其分布特征与水文过程有着密切联系^[4]。土地利用变化会改变地表径流、下渗、蒸发等水文过程,影响水源涵养功能,进而影响生态系统服务功能。景观格局的演变

基金项目:辽宁经济社会发展立项课题(2022lslybkt-002);辽宁省教育厅科研项目(LJKZ0975);辽宁省社科基金重点项目(L22AJY010)

作者简介:吕乐婷(1984—),女,副教授,博士,主要从事水资源与水生态评价研究。E-mail:lvleting@lnnu.edu.cn

通信作者:郑德凤(1970—),女,教授,博士,主要从事自然地理、资源环境及地质灾害研究。E-mail: defengzheng@lnnu.edu.cn

对区域生态环境和生态过程变化有重要影响^[5]。

气候变化及人类活动引起土地覆被的变化,已经对流域水文过程产生剧烈影响^[6-7],量化景观变化与水文过程之间的关系有助于对景观组成格局和空间格局进行有效规划和管理^[8],为水文生态系统服务提升提供理论基础。目前,国内外对水源涵养研究已较为成熟,主要围绕水源涵养能力、时空变化^[9-11]、价值评估^[12-13]、不同模型之间比较^[14],对水源涵养的影响研究多从土地覆被类型和土地利用转移变化以及气候变化、人类活动等方面探究^[15-17],较缺乏水源涵养对景观格局变化的响应研究。如李冲等^[18]利用偏相关分析法研究了京津冀重要水源涵养区景观格局变化对水源涵养的影响,结果表明两者之间存在显著关系,水源涵养量与聚集度指数显著相关;Yohannes等^[19]利用偏最小二乘回归模型研究水文生态系统服务对景观结构变化的响应,发现农田和人工林景观百分比、平均斑块大小和最大斑块指数是影响贝雷萨流域水文生态系统服务退化的关键因素;杨婉清等^[20]分析北京市景观格局演变对生态系统服务的影响表明,破碎化指数、多样性指数等景观配置指数对生态系统服务影响最为显著。

前人的研究成果多在整体上分析景观指数对水文生态系统的影响,本文以太子河流域为研究对象,试图从空间上构建景观格局与水源涵养量的关系。科学认识水源涵养量的时空变化及其与景观格局的关系,对于更好地掌握太子河流域生态环境质量,优化土地利用景观结构,制定相应管理策略,建设可持续发展生态环境具有重要意义。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

太子河流域位于辽宁省东部低山丘陵与辽河冲积平原过渡区(122°26'E ~ 124°53'E、40°29'N ~ 41°39'N),西部为辽河冲积平原农业灌溉区,是辽宁省商品粮基地,东部山区自然资源丰富,是多种经济作物的集中产区^[21]。太子河流贯辽阳、本溪、鞍山境内,是大辽河非常重要的支流(图1)。太子河干流全长约464 km,流域面积约为1.38万 km²^[22]。流域属温带季风气候,雨热同季,年平均温度5 ~ 10℃,年均降水量600 ~ 900 mm,降水量由东向西递减。太子河流域上游森林茂密,植被覆盖度高,下游作物面积大,具有重要的生态防护功能,如水土保持、防风固沙、水源涵养等,此外,太子河还承担着为城市提供优质水资源,促进生态质量全面改善的双重任务。

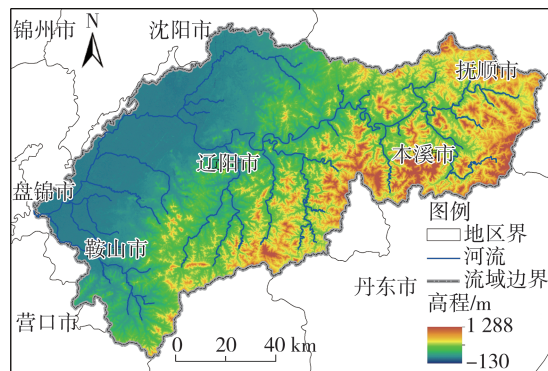


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of study area

1.2 数据来源

土地利用数据基于2000年和2018年Landsat影像(地理空间数据云 <http://www.gscloud.cn>),借助ENVI软件,采用人机交互目视解译获得,空间分辨率为30 m。结合研究区土地利用实际情况,将用地类型分为林地、耕地、建设用地、水域、草地和未利用地6种。解译结果采用随机采样法检验,对照Google Earth高清影像进行人机交互验证,Kappa系数为85%,达到了使用要求^[23]。气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn>);土壤厚度数据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南京土壤所提供的1:1 000 000土壤数据;土壤有效含水量利用土壤有效含水量经验公式^[24]在SPAW软件里完成;DEM数据下载自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率为30 m。

2 研究方法

2.1 水源涵养量计算

本文基于InVEST模型输出的逐年产水量计算水源涵养量。InVEST模型中产水量评估基于水量平衡原理^[25],将每个栅格的降水量减去蒸散量得到该栅格的产水量值,该值包括地表产流、土壤含水量、枯落物持水量以及冠层截留量^[26-27]。模型计算公式为

$$Y_{xj} = (1 - ET_{Axj}/P_x)P_x \quad (1)$$

其中

$$ET_{Axj} = P_x \frac{1 + w_x R_{xj}}{1 + w_x R_{xj} + 1/R_{xj}}$$

$$w_x = ZW_x/P_x \quad R_{xj} = k_{xj}ET_0/P_x$$

式中: Y_{xj} 为栅格单元 x 中土地覆被类型 j 的年产水量; P_x 为栅格单元 x 的多年平均降水量; ET_{Axj} 为栅格单元 x 中土地覆被类型 j 的实际蒸散量; w_x 为经验参数; Z 为经验常数,取值范围为1 ~ 10; W_x 为栅格单元 x 的土壤有效含水量; R_{xj} 为土地利用覆被类

型 j 在栅格单元 x 的Budyko干燥指数; ET_0 为潜在蒸散量; k_{vj} 为植物蒸散系数。

水源涵养量由研究区年产水量、地形指数、土壤饱和和导水率与流速系数计算得出^[11]:

$$W_R = Y_{sj} \min(1, 249/V) \min(1, 0.9I_l/3) \min(1, K_{sat}/300)$$
 (2)

其中 $I_l = \lg[n/(DS)]$
式中: W_R 为水源涵养量; V 为流速系数; I_l 为地形指数; K_{sat} 为土壤饱和和导水率; n 为流域单元集水区的栅格数量; D 为土层厚度; S 为坡度。

2.2 景观格局指数选取

景观格局指数是一种能够高度浓缩景观格局信息、表达景观组成特征和空间结构特征的简单定量指标^[28]。本文结合太子河流域独特的自然地理环境及区位条件,以Fragstats4.2软件为支撑,在参考前人研究^[29-30]的基础上,分别从景观和类型尺度选取了9个景观格局指数(表1),分析研究区景观格局变化。

2.3 地理加权回归

地理加权回归(geographical weighted regression, GWR)模型是一种不同于一般线性回归模型的空间系数变化回归分析工具,GWR模型通过将空间位置信息纳入回归方程(式(3)),基于参数估计值随地理位置变化,探讨非平稳性空间关系^[31-33]。

$$y_i = \beta_0(u_i, r_i) + \sum_{k=1}^m \beta_k(u_i, r_i) x_{ik} + \varepsilon_i$$
 (3)

式中: y_i 为位置 i 处的因变量值; x_{ik} 为位置 i 处第 k 个自变量; (u_i, r_i) 为回归分析位置 i 的坐标; ε_i 为随机误差项; β_0 为截距项; β_k 为对应第 k 个自变量回归分析系数; m 为自变量总数。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化分析

2000—2018年太子河流域土地利用类型变化如图2所示。林地和耕地是太子河流域主要的土地

利用类型,林地集中分布在流域东部,与耕地、草地交错,耕地集中分布在西部和北部,建设用地主要分布在低缓的平原地区。与2000年相比,2018年水域和建设用面积增加,其余用地类型减少。其中,建设用地面积和比例增加最多,分别增加了436.50 km²和44.33%。通过分析土地利用转移矩阵可知(表2),建设用地增加主要来源于耕地,为163.24 km²;耕地转出面积最多,为675.75 km²,其中163.24 km²转为建设用地,422.62 km²转为林地;林地有462.21 km²转为耕地,99.99 km²转为草地;草地减少比例最大,达34.82%,有53.89 km²转为林地;未利用地减少,主要向林地、耕地转化,说明荒废土地得到利用并逐渐有了植被生长;水域增加主要由一部分水田转化而来。总体来看,林地、耕地和建设用地的相互转化是太子河流域最明显的景观变化。林地和草地总量基本维持不变,在2000年和2018年分别占比55.95%、55.32%,流域植被覆盖率整体

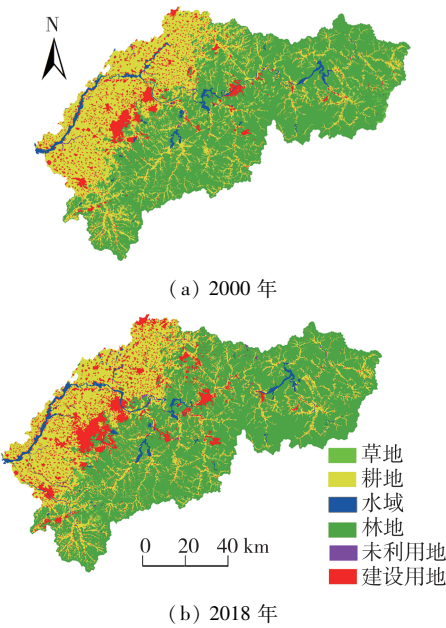


图2 土地利用类型变化

Fig.2 Variation of land use type

表1 选取的景观格局指数

Table 1 Selected landscape pattern indexes

景观格局指数	简称	含义	分析尺度
斑块数量(number of patch)	NP	斑块总数	景观、类型
斑块密度(patch density)	PD	单位面积上总斑块数	景观、类型
最大斑块指数(largest patch index)	LPI	最大斑块所占面积比例	景观、类型
景观形状指数(landscape shape index)	LSI	景观形状复杂程度	景观
斑块面积比(percentage of landscape)	PLAND	某一斑块类型面积与景观总面积比值	类型
香农多样性指数(Shannon's diversity index)	SHDI	景观斑块的不确定性	景观
蔓延度指数(contagion index)	CONTAG	景观斑块类型的延展程度	景观
分离度指数(division index)	DIVISION	不同景观斑块分布离散程度	景观、类型
聚集度指数(aggregation index)	AI	景观中同类斑块的聚集程度	景观

表 2 2000—2018 年太子河流域土地利用转移矩阵

Table 2 Land use transfer matrix in the Taizi River Basin for 2000-2018

土地利用 类型	各土地类型面积/km ²		占总面积比例/%		土地利用转移量/km ²					
	2000 年	2018 年	2000 年	2018 年	草地	建设用地	耕地	林地	水域	未利用地
草地	154.41	100.64	1.11	0.73	8.59	4.62	32.08	53.89	1.22	0.12
建设用地	984.56	1421.06	7.09	10.24	10.11	785.28	488.41	118.70	14.49	1.86
耕地	4799.90	4397.96	34.58	31.68	29.70	163.24	3718.45	422.62	51.04	9.15
林地	7613.05	7578.88	54.84	54.59	99.99	21.20	462.21	6977.01	15.96	1.84
水域	305.66	363.32	2.20	2.62	3.57	7.31	93.67	29.20	220.54	9.13
未利用地	25.10	20.84	0.18	0.15	2.06	1.24	4.32	9.04	1.19	2.96

较高。随着 socioeconomic 发展,城市化进程不断加快,城乡、工矿、居民点用地增加,耕地减少和转化则可能与退耕还林还草政策有关。

3.2 景观格局特征变化分析

3.2.1 景观水平

从景观水平来看,2000—2018 年 NP、PD、LSI、LPI 和 SHDI 均有增加,研究区景观形状趋于复杂化和破碎化,景观差别增大,多样性和丰富度提高。CONTAG、AI 和 DIVISION 减少,表明研究区各斑块类型间聚集度降低,空间分布呈现分散趋势,景观异质性增强(表 3)。

表 3 太子河流域景观水平指数变化

Table 3 Changes in landscape level indexes in the Taizi River Basin

年份	NP	PD	LSI	LPI	SHDI	DIVISION	AI	CONTAG
2000	4297	0.31	65.46	16.53	1.03	0.92	96.78	66.76
2018	7831	0.56	68.32	44.54	1.07	0.78	96.63	65.45

结合 2018 年土地利用数据,将计算的各子流域景观水平指数结果借助 GIS 平台进行可视化表达(图 3),从空间分布格局上看,流域 NP、PD、DIVISION、LSI 和 SHDI 由上游向下游递增。流域上游为东部山地丘陵区,林地所占面积大,优势度高,AI

和 CONTAG 较大,说明上游受人类活动影响较小,景观格局较完整,斑块数量少,类型较为单一,破碎化程度低。流域下游 LSI、SHDI 及 DIVISION 比较大,斑块形状不规则,趋于复杂化。下游地形平坦,用地类型以建设用地和耕地为主,受人类活动影响大,开垦、耕作、建设的加快使破碎化程度严重,空间异质性程度增强。

3.2.2 类型水平

类型水平指数结果如表 4 所示。耕地、林地、建设用地 NP、PD 有所增加,破碎度增大,景观异质性增加;草地、未利用地斑块数量有所减少,破碎度降低。与 2000 年相比,2018 年林地 LPI 增加,且 PLAND 最大,在研究区具有显著优势,而耕地优势度减少。研究区土地利用类型分散程度无明显变化,其中耕地和林地变化相对突出,耕地 DIVISION 增加,林地 DIVISION 减少,主要原因是经济发展和城镇化进程加快、退耕还林使得耕地变得更加分散,聚集度有所降低。

2018 年太子河流域类型水平指数空间分布如图 4 所示,因篇幅限制,只讨论耕地、林地和建设用地 3 种主要用地类型。从空间分布看,耕地及建设用地分布特征相似,其 LPI 及 PLAND 高值区分布在

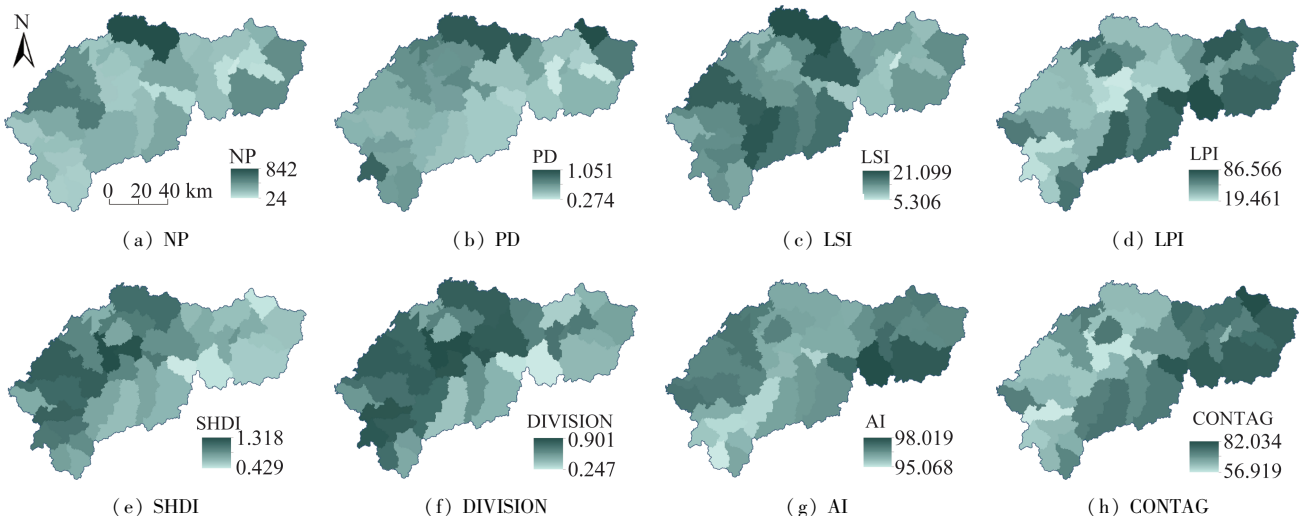


图 3 2018 年太子河流域景观水平指数空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of landscape level index in the Taizi River Basin in 2018

表 4 太子河流域类型水平指数变化

Table 4 Changes in landscape type indexes in the Taizi River Basin

年份	土地利用类型PLAND	NP	PD	LPI	DIVISION	年份	土地利用类型PLAND	NP	PD	LPI	DIVISION		
2000	耕地	34.57	871	0.06	12.23	0.97	2018	耕地	31.68	3367	0.24	9.48	0.98
	林地	54.84	544	0.04	16.53	0.94		林地	54.60	657	0.05	44.54	0.79
	草地	1.11	496	0.04	0.04	1		草地	0.73	192	0.01	0.09	1
	水域	2.20	132	0.01	1.37	0.99		水域	2.61	142	0.01	1.28	0.99
	建设用地	7.09	2190	0.16	0.78	0.99		建设用地	10.24	3432	0.25	1.78	0.99
	未利用地	0.18	64	0.00	0.05	1		未利用地	0.15	41	0.00	0.02	1

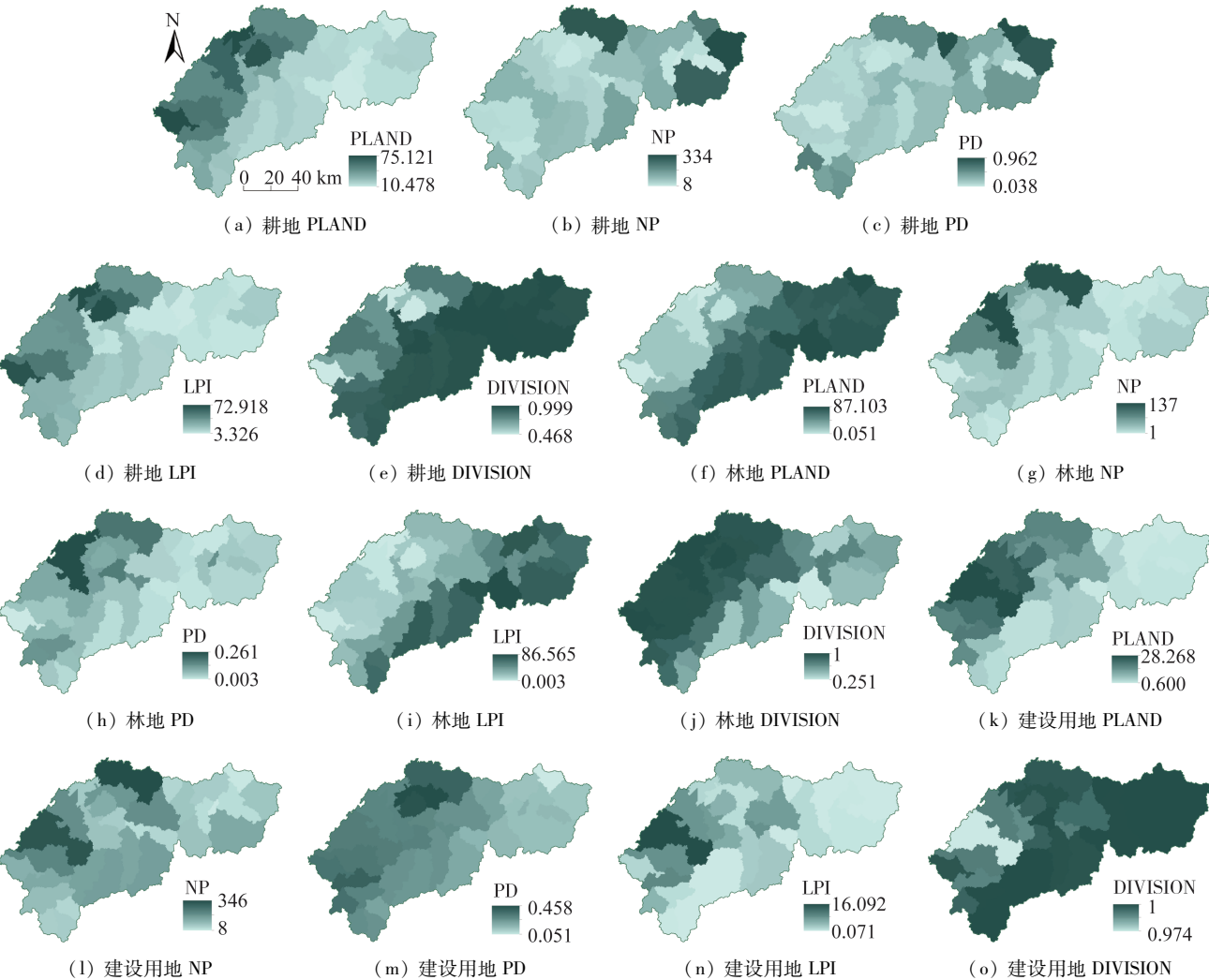


图 4 2018 年太子河流域类型水平指数空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of landscape type indexes in the Taizi River Basin in 2018

流域西北部, DIVISION 高值区则分布在东部和南部,流域西北部下游地带地形平坦,受人类开垦、耕作、建设的影响使得耕地和建设用地集中;林地 LPI 和 PLAND 高值区主要分布在流域东部和南部,而 DIVISION 高值区主要分布在流域西北部,这是因为流域东部和南部处于山地丘陵区,林地分布广,聚集度高。

3.3 太子河流域水源涵养量时空分布

3.3.1 水源涵养量年际变化

利用 2000—2020 年气象数据和两期土地利用

数据,对太子河流域产水量和水源涵养量进行计算(图 5)。结果显示,太子河流域年均降水量为 770.34 mm,年均实际蒸散量为 598.56 mm,年均产水深度为 172.47 mm,产水总量为 23.94 亿 m³,年均水源涵养深度为 89.77 mm,水源涵养量为 12.46 亿 m³。2010 年水源涵养深度最高,为 331 mm;2014 年最低,仅为 13 mm;2010 年和 2014 年水源涵养量分别为 46.03 亿 m³、1.81 亿 m³。2000—2020 年流域水源涵养深度总体呈不显著上升趋势,每 10 a 上升 8.08 mm。

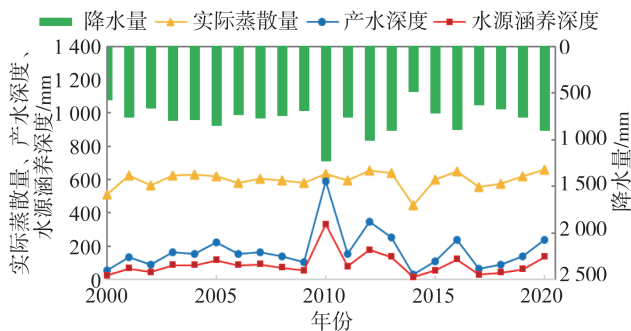


图5 2000—2020年太子河流域年降水量、实际蒸散量、产水深度与水源涵养深度

Fig.5 Annual precipitation, actual evapotranspiration, and depths of water yield and water conservation in the Taizi River Basin during 2000-2020

3.3.2 水源涵养量空间分布

利用 InVEST 模型计算得到逐年产水量,结合式(2)求得水源涵养量,根据研究需要,计算多年平均水源涵养量。太子河流域水源涵养深度空间分布如图6所示,水源涵养量高值区位于流域东部,地貌为山地丘陵,林草地交错,植被覆盖度高,来自东部海洋的水汽受山地地形抬升,降水量多,且蒸发较少,故东部区域水源涵养能力高;水源涵养量低值区位于流域西部,该区域为流域下游,地势低、地形平坦,以耕地为主,土层覆盖相对薄,不利于拦截降水,且农作物根系吸收水分能力有限,此外,西部降水较东部少,蒸散强,综合导致该区域水源涵养能力低。

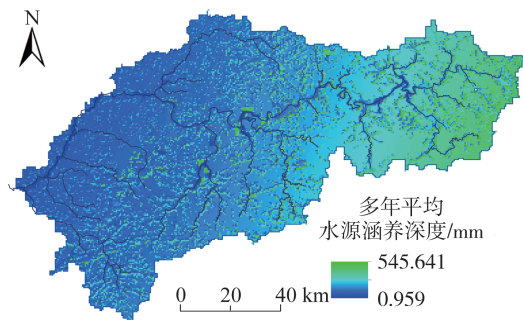


图6 太子河流域多年平均水源涵养深度空间分布

Fig.6 Spatial distribution of annual average depth of water conservation in the Taizi River Basin

3.4 景观格局对水源涵养量的影响

3.4.1 相关性分析

为进一步分析景观格局对水源涵养量的影响,结合研究区实际情况,借助 ArcGIS10.4 软件中的水文分析模块,通过填注、计算流水累积量等步骤对 DEM 数据进行处理,将研究区划分为 35 个子流域。将 35 个子流域景观格局指数及其对应的水源涵养量作为样本进行皮尔逊相关分析。结果表明,景观

水平指数 LPI、CONTAG 和 AI 与水源涵养量呈正相关关系,相关系数分别为 0.464、0.639 和 0.411; DIVISION 和 SHDI 与水源涵养量呈负相关关系,相关系数分别为 -0.483 和 -0.649。其中, AI 与水源涵养量在 0.05 级别(双尾)相关性显著,其他景观水平指数与水源涵养量在 0.01 级别(双尾)相关性显著,说明优势景观类型斑块面积增大,各类型斑块聚集化发展会促使流域水源涵养量增加;而斑块分布分散、类型不平衡、破碎化增加,会促使流域水源涵养量减少。

类型水平指数与水源涵养量的相关关系如表5所示,耕地 NP、PD 和 DIVISION 与水源涵养量呈显著正相关关系,耕地 PLAND 和 LPI 与水源涵养量呈显著负相关关系,表明耕地 NP 越多、PD 和 DIVISION 越大,水源涵养力越高;林地 LPI 与水源涵养量呈显著正相关关系,林地 PLAND、NP、PD 和 DIVISION 与水源涵养量呈显著负相关关系,说明林地优势度越高,水源涵养力越高;建设用地 DIVISION 与水源涵养量呈显著正相关关系, PLAND、NP、PD 和 LPI 与其呈显著负相关关系,表明建设用地景观越分裂、NP 越少、PLAND 和 PD 越小,水源涵养力越高;草地、水域和未利用地水源涵养量与各景观指数相关性不显著。

表5 类型水平指数与水源涵养量的相关关系

Table 5 Correlation between landscape type indexes and water conservation

类型水平指数	与水源涵养量的相关系数		
	耕地	林地	建设用地
PLAND	-0.698 **	-0.746 **	-0.699 **
NP	0.478 **	-0.376 *	-0.402 *
PD	0.431 **	-0.455 **	-0.826 **
LPI	-0.617 **	0.740 **	-0.478 **
DIVISION	0.535 **	-0.722 **	0.404 *

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

3.4.2 GWR 空间影响分布分析

为准确分析太子河流域景观格局与水源涵养量的关系,本文构建景观格局指数与水源涵养量地理加权回归模型,分别从景观水平和类型水平定量分析其空间上的异质性。

3.4.2.1 景观水平指数与水源涵养 GWR 分析

为探究水源涵养与景观水平指数的空间非平稳关系,将与水源涵养显著相关的 5 个景观水平指数作为解释变量,水源涵养量作为因变量进行普通最小二乘法共线性检验,剔除方差膨胀因子最高的两个变量(LPI 和 DIVISION),将剩余的 3 个变量(CONTAG、SHDI 和 AI)重新进行共线性检验,最终

达到回归分析基本要求。

水源涵养量及其影响因素均具有空间异质性特征,而 GWR 模型可以有效解决由空间位置引起的因变量和自变量之间局部变异问题^[34]。因此,运用 ArcGIS 软件将变量 CONTAG、SHDI 和 AI 与水源涵养量进行地理加权回归运算。

景观水平指数对水源涵养量影响的空间变化如图 7 所示。CONTAG 与水源涵养量正相关面积占比达 97.7%,自西向东正向作用逐渐增强,在本溪满族自治县、新宾满族自治县正相关最强。SHDI 与水源涵养量负相关面积占比达 85.15%,回归系数负值区主要分布在西部千山区、立山区、铁西区一带和东部本溪满族自治县、新宾满族自治县一带以及中南部辽阳县、南芬区、平山区、明山区一带。AI 与水源涵养量正相关面积占比为 33.21%,主要分布在中南部明山区、弓长岭区、海城市南部、辽阳县、南芬区一带,该区域景观斑块越聚集,水源涵养量越高;AI 与水源涵养量负相关面积占比为 66.79%,主要分布在流域东部和西北部,东部以林地分布为主,林地过于密集阻挡部分降水,且植物蒸腾作用较强,导致水源涵养量略低,而西北部多为耕地及建设用地,地表裸露缺少植被,降雨更多转化为地表径流,从而使水源涵养量减少。

3.4.2.2 类型水平指数与水源涵养 GWR 分析

根据相关性结果(表 5),在类型上对耕地、林地、建设用地进行空间相关性分析,先进行普通最小二乘法共线性检验,剔除方差膨胀因子不达标两个变量(LPI 和 DIVISION),将剩余 3 个变量(NP、PD 和 PLAND)重新进行共线性检验,达到回归分析基本要求,进一步探究各土地利用类型对水源涵养量影响的空间变异特征。

耕地类型水平指数对水源涵养影响结果的空间变化如图 8(a)~(c)所示。PD 在研究区回归系数均为正值,在空间上对水源涵养起正向作用,西北部正向作用更加明显;NP 与水源涵养量以正相关为主,面积占比为 91.19%,回归系数正值区主要分布

在中部、东部和南部除铁西区、立山区、铁东区、辽阳县西北部的地区;PLAND 在流域本溪满族自治县西部及以西地区对水源涵养主要为负向作用,占全流域面积的 79.60%,流域中下游受地形及农业活动影响,耕地面积广且集中,林地及草地覆盖度低。因此,耕地生态系统与水源涵养量相关性较低。

林地类型水平指数对水源涵养影响结果的空间变化如图 8(d)~(f)所示。PLAND 回归系数在流域内均为正值,对水源涵养起正向作用,且自西向东正向作用增强。NP 与水源涵养量以负相关为主,面积占比为 80.27%,主要分布在本溪满族自治县以西至海城市以东地区,该地区受地形及人类农业活动影响,林地覆盖程度低,致使林地生态系统与水源涵养相关性低;NP 回归系数正值区主要分布在上游东部丘陵地区,说明东部林地 NP 越多,水源涵养力越高。PD 对水源涵养以负向作用为主,面积占比为 89.27%,分布在海城市以南及千山区以东的地区。

建设用地类型水平指数对水源涵养影响结果的空间变化如图 8(g)~(i)所示。NP、PD 和 PLAND 对水源涵养负向作用明显,负相关面积分别占流域面积的 58.38%、89.84%、95.95%,建设用地分布在流域中下游,逐渐扩大并聚集分布,城市下垫面固化易形成径流,降低了地表植被水源涵养能力,因而负相关作用明显。

3.5 讨论

研究表明,景观水平指数与水源涵养量之间具有显著相关性,进一步说明了景观格局变化会对生态系统内部结构产生影响,从而改变水源涵养量。研究区景观聚集度和优势度越高,连通性越好,越利于水源涵养,而景观破碎化程度越高,水源涵养量则越低,这与李冲等^[18]的研究结果一致。研究发现,SHDI 对太子河流域水源涵养影响最大,SHDI 值越大,景观包含的不定性成分越多,水源涵养量越低,这可能与研究区特点有关。在不同用地类型对水源涵养量的贡献中,建设用地 PD 对太子河流域水源

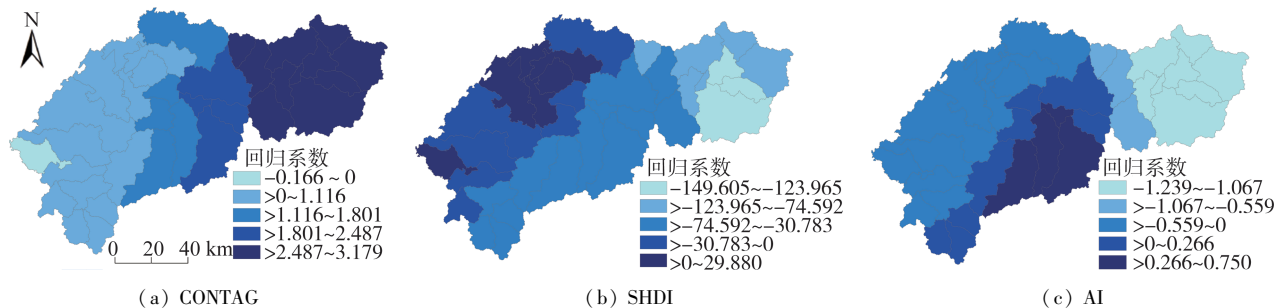


图 7 景观水平指数对水源涵养影响的空间变化

Fig. 7 Spatial variations of impact of landscape level indexes on water conservation

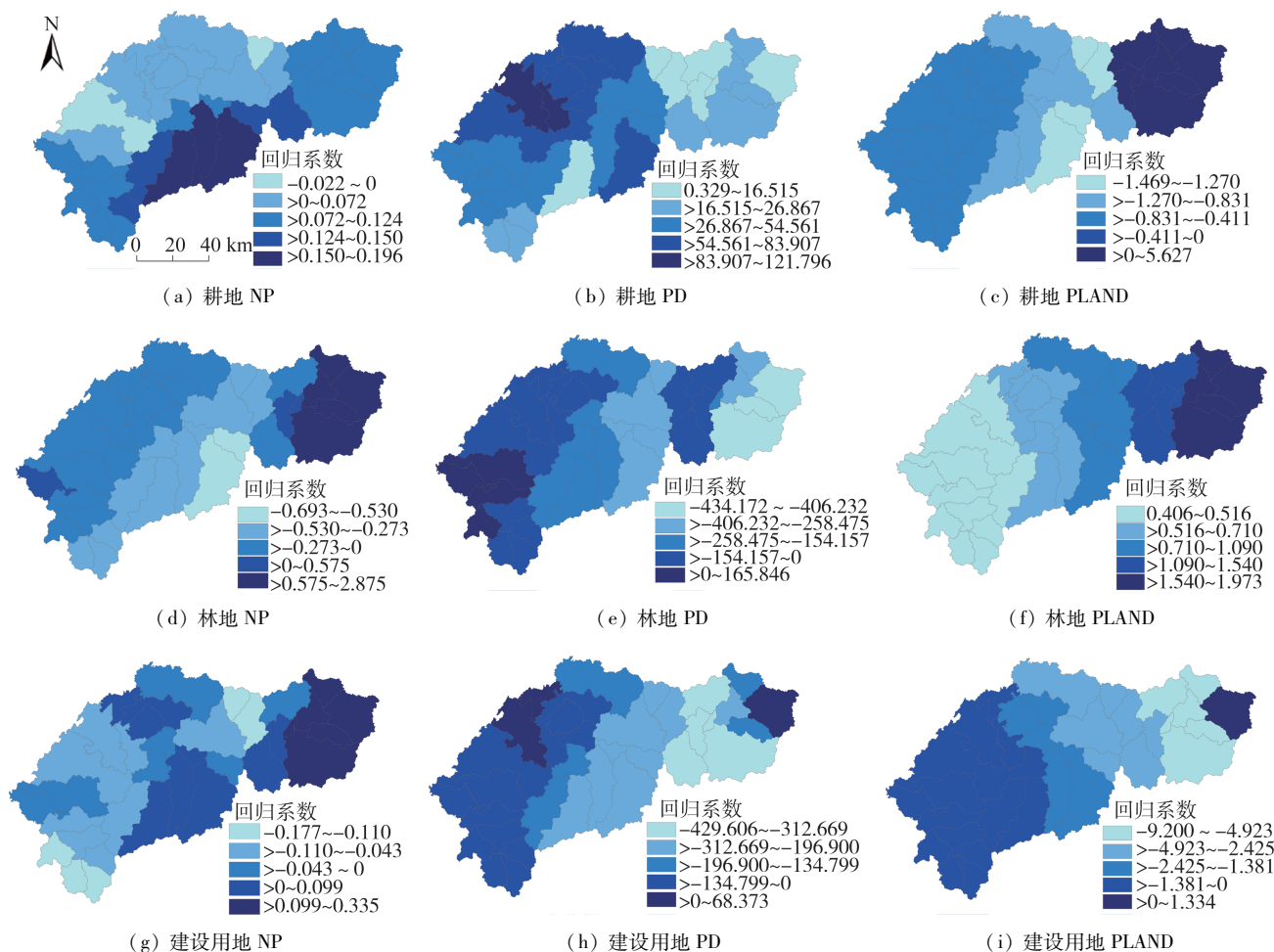


图8 类型水平指数对水源涵养影响的空间变化

Fig. 8 Spatial variations of impact of landscape type indexes on water conservation

涵养量影响最大,其 PD 越大,植被覆盖度越低,产水量随之变大,水源涵养力降低。GWR 空间分析结果与相关分析基本一致,但水源涵养量与 AI 以负相关为主,与林地 PLAND 以正相关为主,这与相关分析的结果相反,可能是由水源涵养与景观特征相关关系在空间上的差异引起的。

各类型水平指数对水源涵养的作用在空间上也是不均匀的,水源涵养量与林地、耕地和建设用地的关系更为显著,其中,耕地 NP、PD 和林地 PLAND 对该地区水源涵养起积极的作用,而耕地 PLAND 和林地 PD、NP 以及建设用地各指数对水源涵养主要起消极的作用。研究表明,林地的优势度越高,水源涵养力越高。流域林地面积占比达 50%,森林覆盖度高且多为天然林,此外,流域降水丰富,水源涵养力高,且该流域林地优势度在增大,凭借其较高的蓄水能力,减少了径流量,提高了流域水源涵养量。但受地形及人类农业活动的影响,林地 NP 和 PD 在空间上对水源涵养以负向作用为主,使林地生态系统的 NP 和 PD 与水源涵养量相关性降低。太子河流域耕地面积占比约为 1/3,是流域第二大土地利用类

型,农田通过减少水土流失和提高土壤保水能力,在空间上对水源涵养以正向作用为主。建设用地水源涵养量与 DIVISION 呈正相关关系,但随着经济社会发展,城乡、居民、工矿建设用地不断增加,集聚效应不断增强,未来发展可能不利于水源涵养量的提高。研究区水源涵养量与草地、水域相关性低,与未利用地不相关,这和覆被类型占比少、覆被特点有很大关系。由此看出水源涵养受景观格局指数的影响具有空间差异特征,不同类型水平指数对水源涵养影响程度不尽相同,通过提高景观的多样性分布格局,可以提高水源涵养能力、稳定性和生态系统服务功能,因此,在流域管理中要因地制宜,合理规划土地利用及有效管理流域资源。

4 结论

a. 太子河流域建设用地面积大幅增加,耕地面积大幅减少。景观格局呈现破碎化、复杂化,景观异质性和多样性增强。

b. 太子河流域年均产水深度为 172.47 mm,产水总量为 23.94 亿 m^3 ; 年均水源涵养深度为

89.77 mm,水源涵养量为 12.46 亿 m³。水源涵养量呈不显著增加趋势,空间上呈东多西少的格局。

c. 景观水平指数 LPI、CONTAG、AI 越大,水源涵养量越高。耕地 NP、PD、DIVISION 越大,水源涵养量越高;林地 LPI 越大,水源涵养量越高;建设用地 DIVISION 越大,水源涵养量越高。

d. 在空间上,水源涵养量与景观水平指数 CONTAG 自西向东正相关性增强,受林地分布状况的影响,在流域东部水源涵养量与 SHDI 和 AI 多呈负相关关系。水源涵养量与耕地 PD 和 NP 以正相关为主,与 PLAND 的关系受地形及农业活动影响,在流域中部和西部多呈负相关关系;水源涵养量与林地 NP 和 PD 以负相关为主,在全域与 PLAND 呈正相关关系;水源涵养量与建设用地 NP、PD 和 PLAND 以负相关为主,主要与建设用地分布特点、固化性质及其扩张聚集趋势有关。

参考文献:

[1] MELILLO J M, MCGUIRE A D, KICKLIGHTER D W, et al. Global climate change and terrestrial net primary production[J]. *Nature*, 1993, 363(6426): 234-240.

[2] 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. (ZUO Qiting, WANG Jiaoyang, YANG Feng, et al. Concept analysis of water conservation and calculation methods of water conservation capacity[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(2): 13-19. (in Chinese))

[3] 徐延达, 傅伯杰, 吕一河. 基于模型的景观格局与生态过程研究[J]. *生态学报*, 2010, 30(1): 212-220. (XU Yanda, FU Bojie, LYU Yihe. Research on landscape pattern and ecological processes based on landscape models[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(1): 212-220. (in Chinese))

[4] 巩杰, 谢余初, 赵彩霞, 等. 甘肃白龙江流域景观生态风险评价及其时空分异[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(8): 2153-2160. (GONG Jie, XIE Yuchu, ZHAO Caixia, et al. Landscape ecological risk assessment and its spatiotemporal variation of the Bailongjiang Watershed, Gansu[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(8): 2153-2160. (in Chinese))

[5] 谈娟娟, 董增川, 付晓花, 等. 流域景观生态健康演变及其驱动因子贡献分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(2): 107-113. (TAN Juanjuan, DONG Zengchuan, FU Xiaohua, et al. Analysis of watershed landscape ecological health evolution and contribution of driving factors[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2015, 43(2): 107-113. (in Chinese))

[6] 顾晋飴, 李一平, 杜薇. 基于 InVEST 模型的太湖流域水

源涵养能力评价及其变化特征分析[J]. *水资源保护*, 2018, 34(3): 62-67. (GU Jinyi, LI Yiping, DU Wei. Evaluation on water source conservation capacity and analysis of its variation characteristics of Taihu Lake Basin based on InVEST model[J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(3): 62-67. (in Chinese))

[7] 周冰玉, 李志威, 田世民, 等. 黄河源区水源涵养能力研究综述[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(4): 87-93. (ZHOU Bingyu, LI Zhiwei, TIAN Shimin, et al. A review on water conservation capacity in Yellow River source region[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(4): 87-93. (in Chinese))

[8] 郑宇, 程香菊, 王兆礼, 等. 韩江流域面源污染及与景观格局的关系[J]. *水资源保护*, 2019, 35(5): 78-85. (ZHENG Yu, CHENG Xiangju, WANG Zhaoli, et al. Non-point source pollution in Hanjiang River Basin and its relation with landscape pattern[J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(5): 78-85. (in Chinese))

[9] 刘宥延, 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. (LIU Youyan, LIU Xingyuan, ZHANG Bo, et al. Spatial features analysis of water conservation function in the hilly areas of the Loess Plateau based on InVEST model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(17): 6161-6170. (in Chinese))

[10] 吕乐婷, 任甜甜, 孙才志, 等. 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[J]. *生态学报*, 2020, 40(3): 993-1003. (LYU Leting, REN Tiantian, SUN Caizhi, et al. Spatial and temporal changes of water supply and water conservation function in Sanjiangyuan National Park from 1980 to 2016[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(3): 993-1003. (in Chinese))

[11] MARQUÈS M, BANGASH R F, KUMAR V, et al. The impact of climate change on water provision under a low flow regime: a case study of the ecosystems services in the Francoli River Basin[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 263: 224-232.

[12] 刘菊, 傅斌, 张成虎, 等. 基于 InVEST 模型的岷江上游生态系统水源涵养量与价值评估[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(3): 577-585. (LIU Ju, FU Bin, ZHANG Chenghu, et al. Assessment of ecosystem water retention and its value in the upper reaches of Minjiang River based on InVEST model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(3): 577-585. (in Chinese))

[13] 白杨, 郑华, 庄长伟, 等. 白洋淀流域生态系统服务评估及其调控[J]. *生态学报*, 2013, 33(3): 711-717. (BAI Yang, ZHENG Hua, ZHUANG Changwei, et al. Ecosystem services valuation and its regulation in Baiyangdian Basin: based on InVEST model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(3): 711-717. (in Chinese))

- [14] 刘业轩,石晓丽,史文娇. 福建省森林生态系统水源涵养服务评估:InVEST 模型与 meta 分析对比[J]. 生态学报, 2021, 41 (4): 1349-1361. (LIU Yexuan, SHI Xiaoli, SHI Wenjiao. Evaluation of water retention services of forest ecosystems in Fujian Province: comparison between results from the InVEST model and meta-analysis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4): 1349-1361. (in Chinese))
- [15] 龚诗涵,肖洋,郑华,等. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2017, 37 (7): 2455-2462. (GONG Shihan, XIAO Yang, ZHENG Hua, et al. Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(7): 2455-2462. (in Chinese))
- [16] GAO Jie, LI Feng, GAO Hui, et al. The impact of land-use change on water-related ecosystem services: a study of the Guishui River Basin, Beijing, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 163 (sup1): 148-155.
- [17] 刘娇,郎学东,苏建荣,等. 基于 InVEST 模型的金沙江流域干热河谷区水源涵养功能评估[J]. 生态学报, 2021, 41 (20): 8099-8111. (LIU Jiao, LANG Xuedong, SU Jianrong, et al. Evaluation of water conservation function in the dry-hot valley area of Jinsha River Basin based on InVEST model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41 (20): 8099-8111. (in Chinese))
- [18] 李冲,张璇,吴一帆,等. 京津冀生态屏障区景观格局变化及其对水源涵养的影响[J]. 中国环境科学, 2019, 39 (6): 2588-2595. (LI Chong, ZHANG Xuan, WU Yifan, et al. Landscape pattern change of the ecological barrier zone in Beijing-Tianjin-Hebei region and its impact on water conservation [J]. China Environmental Science, 2019, 39(6): 2588-2595. (in Chinese))
- [19] YOHANNES H, SOROMESSA T, ARGAW M, et al. Impact of landscape pattern changes on hydrological ecosystem services in the Beressa Watershed of the Blue Nile Basin in Ethiopia [J]. Science of the Total Environment, 2021, 793: 148559.
- [20] 杨婉清,杨鹏,孙晓,等. 北京市景观格局演变及其对多种生态系统服务的影响[J]. 生态学报, 2022, 42 (16): 6487-6498. (YANG Wanqing, YANG Peng, SUN Xiao, et al. Changes of landscape pattern and its impacts on multiple ecosystem services in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(16): 6487-6498. (in Chinese))
- [21] 刘鸣彦,房一禾,孙凤华,等. 气候变化和人类活动对太子河流域径流变化的贡献[J]. 干旱气象, 2021, 39 (2): 244-251. (LIU Mingyan, FANG Yihe, SUN Fenghua, et al. Contributions of climate changes and human activities to runoff change in the Taizihe Basin [J]. Journal of Arid Meteorology, 2021, 39(2): 244-251. (in Chinese))
- [22] 苑晨. 基于 SWAT 模型的太子河流域景观格局对绿水资源影响研究[D]. 大连:辽宁师范大学, 2021.
- [23] 范文义,崔林丽,史军,等. 遥感图像与矢量图形叠合显示方法[J]. 东北林业大学学报, 2001, 29 (6): 15-17. (FAN Wenyi, CUI Linli, SHI Jun, et al. Registration displaying of remote sensing image and vector graph [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2001, 29(6): 15-17. (in Chinese))
- [24] 周文佐. 基于 GIS 的我国主要土壤类型土壤有效含水量研究[D]. 南京:南京农业大学, 2004.
- [25] 吴哲,陈歆,刘贝贝,等. 不同土地利用/覆盖类型下海南岛产水量空间分布模拟[J]. 水资源保护, 2014, 30 (3): 9-13. (WU Zhe, CHEN Xin, LIU Beibei, et al. Simulation of spatial distribution of water yield of Hainan Island with different types of land use/land cover [J]. Water Resources Protection, 2014, 30 (3): 9-13. (in Chinese))
- [26] 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. (WANG Yahui, DAI Erfu, MA Liang, et al. Spatiotemporal and influencing factors analysis of water yield in the Hengduan Mountain region [J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35 (2): 371-386. (in Chinese))
- [27] 吕乐婷,任甜甜,李赛赛,等. 基于 InVEST 模型的大连市产水量时空变化分析[J]. 水土保持通报, 2019, 39 (4): 144-150. (LYU Leting, REN Tiantian, LI Saisai, et al. Analysis on spatio-temporal variation of water supply in Dalian City based on InVEST model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4): 144-150. (in Chinese))
- [28] 彭建,王仰麟,刘松,等. 海岸带土地持续利用景观生态评价[J]. 地理学报, 2003, 58 (3): 363-371. (PENG Jian, WANG Yanglin, LIU Song, et al. Landscape ecological evaluation for sustainable coastal land use[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58 (3): 363-371. (in Chinese))
- [29] 陈利顶,刘洋,吕一河,等. 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来[J]. 生态学报, 2008, 28 (11): 5521-5531. (CHEN Liding, LIU Yang, LYU Yihe, et al. Landscape pattern analysis in landscape ecology: current, challenges and future[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28 (11): 5521-5531. (in Chinese))
- [30] 于媛,李明玉,韩旭龙,等. 边境地区景观格局演变及生态系统服务价值响应:以延边朝鲜族自治州为例[J]. 水土保持研究, 2021, 28 (1): 315-322. (YU Yuan, LI Mingyu, HAN Xulong, et al. Study on the response of ecosystem service value to the evolution of landscape pattern in border areas: taking Yanbian Korean Autonomous Prefecture as an example [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(1): 315-322. (in Chinese))

(下转第 159 页)

- networks based on 3D-EEM technology and marker species technology[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48 (5): 128-133. (in Chinese))
- [20] 徐祖信,王诗婧,尹海龙,等. 基于节点水质监测的污水管网破损位置判定方法[J]. *中国环境科学*, 2016, 36 (12): 3678-3685. (XU Zuxin, WANG Shijing, YIN Hailong, et al. Locating the sewer network defect based on marker investigation at pipe manholes [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36 (12): 3678-3685. (in Chinese))
- [21] SHELTON J M, KIM L, FANG Jiasong, et al. Assessing the severity of rainfall-derived infiltration and inflow and sewer deterioration based on the flux stability of sewage markers[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45 (20): 8683-8690.
- [22] 许畅畅,温瑶,成思,等. 长江口滨岸浅层地下水化学组分时空分布特征及影响机制[J]. *水资源保护*, 2022, 38 (3): 181-188. (XU Changchang, WEN Yao, CHENG Si, et al. Spatio-temporal distribution characteristics and mechanisms of chemical composition of shallow groundwater in coastal area of Yangtze River Estuary[J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38 (3): 181-188. (in Chinese))
- [23] 徐祖信,汪玲玲,尹海龙. 基于水质特征因子和 Monte Carlo 理论的雨水管网混接诊断方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2015, 43 (11): 1715-1721. (XU Zuxin, WANG Lingling, YIN Hailong. Quantification of non-storm water flow entries into storm drains using Monte Carlo based marker species approach [J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2015, 43 (11): 1715-1721. (in Chinese))
- [24] MASSOUDIEH A, KAYHANIAN M. Bayesian chemical mass balance method for surface water contaminant source apportionment[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2013, 139 (2): 250-260.
- [25] WANI O, SCHEIDEGGER A, CARBAJAL J P, et al. Parameter estimation of hydrologic models using a likelihood function for censored and binary observations [J]. *Water Research*, 2017, 121: 290-301.
- [26] VRUGT J A. Markov chain Monte Carlo simulation using the DREAM software package: theory, concepts, and MATLAB implementation[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 75: 273-316.
- [27] CLOUTIER V, LEFEBVRE R, THERRIEN R, et al. Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 353 (3/4): 294-313.
- [28] 余倩,张宇,董昕,等. 地表水-地下水相互作用对砷在浅层地下水系统中运移的影响[J]. *地球科学*: 2023, 48 (9): 3420-3431. (YU Qian, ZHANG Yu, DONG Ting, et al. Effect of surface water-groundwater interaction on arsenic transport in shallow groundwater of Jiangnan plain [J]. *Earth Science*, 2023, 48 (9): 3420-3431. (in Chinese))
- [29] 周峰,陶良,胡元平,等. 武汉长江新城起步区地下水环境特征研究[J]. *资源环境与工程*, 2020, 34 (3): 471-476. (ZHOU Feng, TAO Liang, HU Yuanping, et al. Research on groundwater environmental characteristics in starting area of the Yangtze River New Town in Wuhan [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2020, 34 (3): 471-476. (in Chinese))
- [30] 尹海龙,徐祖信,李怀正,等. 电子企业水质特征因子与雨污混接诊断研究[J]. *中国环境科学*, 2015, 35 (9): 2713-2720. (YIN Hailong, XU Zuxin, LI Huaizheng, et al. Tracer parameters to identify and quantify electronic industrial flow entries into storm drains [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35 (9): 2713-2720. (in Chinese))

(收稿日期:2023-01-03 编辑:施业)

(上接第 120 页)

- [31] 王永明,王美霞,吴殿廷,等. 贵州省乡村贫困空间格局与形成机制分析[J]. *地理科学*, 2017, 37 (2): 217-227. (WANG Yongming, WANG Meixia, WU Dianting, et al. Spatial patterns and determinants of rural poverty: a case of Guizhou Province, China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37 (2): 217-227. (in Chinese))
- [32] ZHAO Fangqi, TANG Lina, QIU Quanyi, et al. The compactness of spatial structure in Chinese cities: measurement, clustering patterns and influencing factors [J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2020, 6 (1): 1743763.
- [33] 卢宾宾,葛咏,秦昆,等. 地理加权回归分析技术综述 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45 (9): 1356-1366. (LU Binbin, GE Yong, QIN Kun, et al. A review on geographically weighted regression [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45 (9): 1356-1366. (in Chinese))
- [34] 孙才志,马奇飞,赵良仕,等. 基于 GWR 模型的中国水资源绿色效率驱动机理[J]. *地理学报*, 2020, 75 (5): 1022-1035. (SUN Caizhi, MA Qifei, ZHAO Liangshi, et al. Analysis of driving mechanism based on a GWR model of green efficiency of water resources in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75 (5): 1022-1035. (in Chinese))

(收稿日期:2022-05-05 编辑:施业)