

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2025.06.014 CSTR:32310.14.stbcbx.2025.06.014

杨明霄, 卢远, 汤传勇, 等. 基于InVEST-PLUS模型的北部湾经济区水源涵养功能时空演变及驱动机制分析[J]. 水土保持学报, 2025, 39(6):431-443, 454.

YANG Mingxiao, LU Yuan, TANG Chuanyong, et al. Spatiotemporal evolution and driving mechanisms of water conservation function in Beibu Gulf economic zone based on InVEST-PLUS model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6):431-443, 454.

## 基于InVEST-PLUS模型的北部湾经济区水源 涵养功能时空演变及驱动机制分析

杨明霄<sup>1</sup>, 卢远<sup>1,2</sup>, 汤传勇<sup>1</sup>, 梁丽琪<sup>1</sup>

(1. 南宁师范大学地理科学与规划学院, 南宁 530001; 2. 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 南宁 530001)

**摘要:** [目的] 探究北部湾经济区水源涵养功能的时空演变规律及其驱动机制, 为陆海统筹视角下的生态安全格局优化提供科学依据。 [方法] 集成InVEST-PLUS模型, 构建“土地利用演变-水源涵养响应-驱动机制解”综合分析框架, 结合最优参数地理探测器与空间自相关分析方法, 定量评估2000—2030年水源涵养功能的时空分异特征及驱动机制。 [结果] 2000—2020年, 水源涵养量平均值下降12.4%, 空间分布呈“山地高-沿海低”的阶梯格局, 空间集聚性持续增强。自然因子( $q>0.5$ )主导分异, 交通网络扩张加剧功能破碎化。2030年情景预测表明, 生态保护情景下水源涵养总量( $1\ 570.79\times 10^7\ m^3$ )较自然发展情景提升0.8%, 但建设用地扩张的不可逆性仍制约功能恢复。 [结论] 北部湾水源涵养功能退化由自然本底约束与人类活动胁迫耦合驱动, 需通过差异化生态修复策略, 如优先保护山地林区、创新“碳汇-水源”协同交易机制实现可持续发展。研究结果为滨海经济区生态管理提供多情景模拟与空间决策支持方法。

**关键词:** InVEST-PLUS模型; 水源涵养; 地理探测器; 驱动机制; 北部湾经济区

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2025)06-0431-13

## Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanisms of Water Conservation Function in Beibu Gulf Economic Zone Based on InVEST-PLUS Model

YANG Mingxiao<sup>1</sup>, LU Yuan<sup>1,2</sup>, TANG Chuanyong<sup>1</sup>, LIANG Liqi<sup>1</sup>

(1. School of Geography Science and Planning, Nanning Normal University, Nanning 530001, China; 2. Key Laboratory of Beibu Gulf, Environmental Change and Resource Utilization of Ministry of Education, Nanning 530001, China)

**Abstract:** [Objective] This study investigates the spatiotemporal evolution of water conservation function and its driving mechanisms in the Beibu Gulf Economic Zone, providing a scientific basis for optimizing ecological security patterns from the perspective of land-sea coordination. [Methods] By integrating the InVEST-PLUS model, a comprehensive analytical framework of "land use evolution-water conservation response-driving mechanism interpretation" was established. This was combined with the optimal parameter-based geodetector and spatial autocorrelation analysis to quantitatively evaluate the spatiotemporal heterogeneity and driving mechanisms of water conservation function from 2000 to 2030. [Results] From 2000 to 2020, the average water conservation volume decreased by 12.4%, exhibiting a stepped spatial pattern of "high in mountainous areas and low in coastal areas", with progressively intensified spatial clustering. Natural factors ( $q>0.5$ ) dominated the heterogeneity, while expansion of transportation networks intensified functional fragmentation. The scenario predictions for 2030 showed that the total water conservation volume ( $1\ 570.79\times 10^7\ m^3$ ) under the ecological protection scenario would increase by 0.8% compared to the natural development scenario. However, the irreversible expansion of construction land continued to constrain functional recovery. [Conclusion] The degradation of water conservation function in the Beibu Gulf Economic

收稿日期: 2025-04-20 修回日期: 2025-06-03 录用日期: 2025-06-25 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-08-13

资助项目: 广西南方生态屏障遥感监测体系建设与应用项目(84-Y50-G29-9001-22/23); 国家自然科学基金项目(41661043)

第一作者: 杨明霄(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事环境遥感与土地可持续发展研究。E-mail: 1181516324@qq.com

通信作者: 卢远(1971—), 男, 博士, 教授, 主要从事生态水文遥感应用研究。E-mail: luyuan.gx@qq.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

Zone is jointly driven by the coupled effects of natural background constraints and human activities. Achieving sustainable development requires differentiated ecological restoration strategies, such as prioritizing the protection of mountainous forests and innovating the "carbon sink-water conservation" synergistic trading mechanism. The findings provide multi-scenario simulation and spatial decision-making support methods for ecological management in coastal economic zones.

**Keywords:** InVEST-PLUS model; water conservation; geodetector; driving mechanism; Beibu Gulf Economic Zone

**Received:** 2025-04-20

**Revised:** 2025-06-03

**Accepted:** 2025-06-25

**Online**(www.cnki.net): 2025-08-13

作为人类社会生存与发展的核心物质基础,生态系统通过资源供给、环境调节等服务功能维系着社会-生态系统的动态平衡<sup>[1]</sup>。这些功能不仅深刻映射自然资本的内在价值,更是构筑可持续发展目标的稳固基石<sup>[2]</sup>。水源涵养功能乃调控水文循环、维持区域水安全与生物多样性的核心生态系统服务。其通过截留降水、调节径流、补充地下水等过程,为人类社会提供水资源供给、洪水调控及水质净化等核心功能<sup>[3]</sup>。全球气候变化背景下,滨海经济区普遍面临水源涵养功能退化,但驱动机制存在区域分异的特征。表现在长江三角洲<sup>[4]</sup>和珠江三角洲<sup>[5]</sup>以建设用地扩张为主导压力,而美国切萨皮克湾<sup>[6]</sup>和孟加拉湾<sup>[7]</sup>更受海平面上升和盐碱化威胁。北部湾经济区作为陆海交互带,其“山地-沿海”阶梯式格局兼具东亚季风区共性,又因喀斯特地貌呈现独特性。在生态系统服务研究领域,水源涵养能力对水资源可持续调控的支撑作用备受学界关注,相关定量评价方法与驱动机制解析已成为该领域的前沿研究方向。

目前,水源涵养功能评估呈多尺度、多模型的融合发展态势。水量平衡法基于降水、蒸散发与径流差值实现大尺度静态评估;储水量估算法聚焦森林冠层截留与土壤持水微观机理;模型模拟法依托 InVEST、SWAT 等模型通过耦合水文过程与土地利用数据实现动态模拟。其中,InVEST 模型凭借参数易获取、模块化架构及多服务协同评估能力等优势,被广泛应用于省域-流域<sup>[8-9]</sup>多尺度水源涵养功能研究。近年来,众多学者<sup>[10-12]</sup>通过整合相关分析、多元统计及地理探测器等多维方法,系统揭示水源涵养功能变化的驱动机制。然而,目前对于水源涵养功能的研究多局限于单要素线性分析,对气候-地形-植被多维度耦合效应及非线性反馈机制关注不足。尽管 PLUS 模型通过斑块生成算法提升土地利用模拟的机理性<sup>[13]</sup>,但其与生态过程模型的耦合深度仍制约着“土地利用-生态响应”系统动态预测的精度。因此,集成 InVEST-PLUS 模型,构建“土地利用演变-水源涵养响应-驱动机制解析”新的分析框架,优化驱动因子筛

选策略,深入探究多维度耦合效应,弥补已有研究的不足,提升多情景模拟的决策支持能力。

中国北部湾经济区作为西部陆海新通道的核心枢纽<sup>[14]</sup>,是我国面向东盟开放合作的核心门户与区域协调发展的引擎。在快速城镇化与高强度陆海交互作用下,该区域水系统稳定性遭受多维胁迫,地表覆被格局剧变引发流域调蓄能力衰减,季节性水资源供需矛盾加剧,生态脆弱性显著提升。已有研究<sup>[15-16]</sup>表明,区域生态系统健康状况总体呈轻微恶化趋势,退化型生态空间面积占比达 23.6%。作为典型陆海交互带,其上游水源涵养区承载着维系河口湿地生态完整性、调节滨海城市群水安全的关键功能。然而,已有研究多聚焦其经济发展与空间扩展,但在生态系统服务功能,鲜有研究关注亚热带滨海区水源涵养功能的时空演变机制的定量解析,制约陆海统筹视角下的国土空间优化决策。本研究基于 InVEST-PLUS 集成框架,利用 InVEST 模型解析北部湾经济区 2000—2020 年水源涵养功能的时空分异特征;结合最优参数地理探测器定量筛选高解释力驱动因子,构建 PLUS 模型核心驱动参数集,提升土地利用模拟精度(Kappa=0.89)。在此基础上,模拟 2030 年自然发展、城镇扩张与生态保护 3 种情景下的功能演变趋势。研究成果可为《广西北部湾经济区国土规划(2014—2030 年)》<sup>[17]</sup>的生态修复项目实施奠定坚实的科学依据,同时为中国滨海经济区的可持续发展决策提供多情景模拟与空间决策辅助工具。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

北部湾经济区地处广西南部沿海(20°52'22"~23°32'59"N, 106°33'21"~110°54'17"E),主要包含南宁、崇左、玉林、防城港、钦州和北海 6 个地级市(图 1),面积达 7.34 万 km<sup>2</sup>,占广西全区的 30.9%,城镇化率 56.2%,常住人口 2 305.55 万人,占全区人口的 45.7%。作为中国唯一与东盟国家海陆相连的西部沿海经济区,其地理位置具有“承东启西、联南接北”的战略意义,是西部陆海新通道的核心枢纽和面向

东盟的国际门户。

该区域属南亚热带季风气候,夏季高温多雨,冬季温和少雨;年平均气温 21.5~22.9℃,热量资源丰富,光照充足;地势整体呈北高南低格局,兼具陆海过渡带特征;植被类型丰富多样,以亚热带常绿阔叶林为主,滨海湿地拥有独特的红树林植被;农作物种植广泛,粮食作物以水稻为主,实现一年两熟甚至三熟。甘蔗是重要的糖料作物,种植面积广,盛产香蕉、芒果、荔枝、龙眼等热带亚热带水果,水果产业在区域农业经济中占据重要份额。

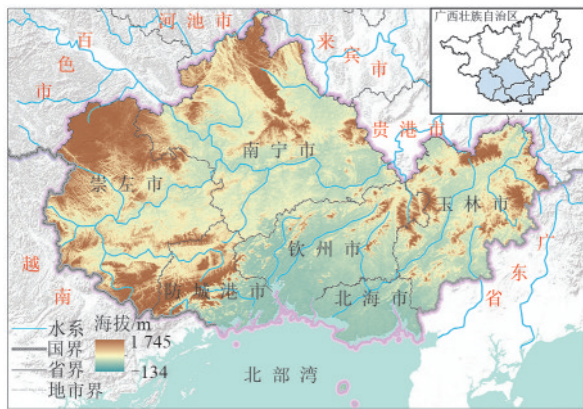


图 1 地理位置示意

Fig. 1 Schematic diagram of geographical location

1.2 数据来源

本文利用的相关数据类型、名称与来源见表 1。土地利用数据选取 2000 年、2010 年、2020 年 LULC 数据集,分辨率为 30 m,该数据集基于 Landsat 图像进行可视化解译,将土地类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地,总体精度超过 90%。在 InVEST 模型的 Water Yield 模块中关键参数包括土壤深度、植被有效利用水含量、流域等。土壤属性数据来源于世界土壤数据库(<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans>),涵盖土层厚度、砂粒、粉砂粒、黏粒和有机质含量等,旨在估算植物可利用水含量和土壤饱和导水率。参考相关地区的研究成果<sup>[18-19]</sup>、InVEST 用户指南手册<sup>[20]</sup>并结合北部湾经济区的实际情况,对作物蒸散系数、根系限制深度进行本地化校准(表 2)。1)作物蒸散系数( $K_c$ )是基于北部湾经济区 2015—2020 年的气象站点实测蒸散发数据,计算潜在蒸散发( $ET_0$ )调整  $K_c$  值。2)根系限制深度是根据北部湾土壤剖面调查数据,将林地根系深度根据默认值进行调整,以匹配当地亚热带常绿阔叶林的根系分布特征。流域界限数据源自中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn>)。所有栅格数据均重采样成空间分辨率 30 m 并转换为与土地利用数据集投影坐标系(CGCS2000)一致。

表 1 数据来源

Table 1 Data sources

数据类型	数据名称	数据来源
土地利用数据	土地利用分类	中国科学院资源环境科学数据中心 ( <a href="https://www.resdc.cn">https://www.resdc.cn</a> )
	DEM 坡度	地理空间数据云 ( <a href="http://www.gscloud.cn">http://www.gscloud.cn</a> )
自然地理因子	潜在蒸散发	中国科学院资源环境科学数据中心
	年平均气温 年降雨量	( <a href="https://www.resdc.cn">https://www.resdc.cn</a> ) (2000—2020 年)
	NDVI	国家科技资源共享服务平台 ( <a href="http://www.nesdc.org.cn">http://www.nesdc.org.cn</a> ) (2000—2020 年)
社会经济因子	土壤有机质	世界土壤数据库 HWSO
	GDP 人口密度	中国科学院资源环境科学数据中心 ( <a href="https://www.resdc.cn">https://www.resdc.cn</a> )
	夜间灯光数据	OpenStreetMap ( <a href="https://www.openstreetmap.org">https://www.openstreetmap.org</a> )
	距河流距离	ArcGIS 欧氏距离提取
	距公路距离	ArcGIS 欧氏距离提取

表 2 InVEST Water Yield 模块生物物理

Table 2 Biophysical table of InVEST Water Yield module

土地利用类型	作物蒸散系数	根系限制深度/mm
耕地	0.68	2 000
林地	0.95	4 500
草地	0.65	2 600
水域	0	1
建设用地	0.10	1
未利用地	0.50	1

注:参数经北部湾地区气象、土壤实测数据校准。

1.3 分析方法

本文通过“数据驱动-过程模拟-空间反馈”的闭环框架构成 InVEST-PLUS 模型(图 2),实现土地利用变化与水源涵养功能的动态耦合模拟。技术路线分为 3 个层次:1)数据输入层。统一多源数据的时空基准,构建土地利用转移矩阵与驱动因子集。2)模型耦合层:PLUS 模型通过斑块生成算法模拟土地利用演变,其输出结果作为 InVEST 模型的输入参数计算水源涵养量。3)反馈优化层。基于地理探测器与空间自相关分析识别驱动机制,反馈优化 PLUS 的转换规则。  
1.3.1 土地利用转移矩阵 土地利用转移矩阵具备定量揭示不同时期各地类构成及其转移变化情况,反映出人类行为引发的用地类型演变趋势。计算公式为:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： $A_{ij}$ 为第*i*类土地利用类型转变为第*j*类土地利用类型的面积；*n*为土地利用类型的总数量。

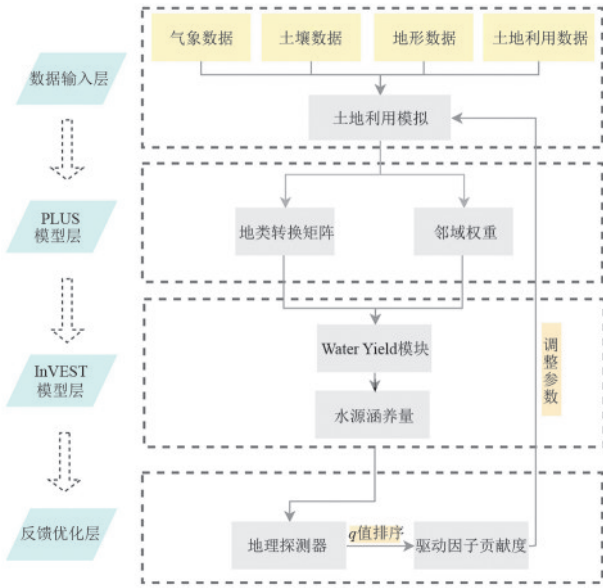


图 2 模型框架

Fig. 2 Model framework

1.3.2 产水量计算 Water Yield 模块根据水量平衡原理,将区域划分为多个栅格单元,在每个栅格中通过降水量减去实际蒸散发量来得出年产水量。考虑气象要素、土壤特征和地表覆盖等多方面因素对水量平衡的影响。模型计算时简化汇流过程,忽

$$PAWC_x = 54.509 - 0.132\varphi_{sand} - 0.003(\varphi_{sand})^2 - 0.055\varphi_{silt} - 0.006(\varphi_{silt})^2 - 0.738\varphi_{clay} + 0.007(\varphi_{clay})^2 - 2.688\sigma_{OM} + 0.501(\sigma_{OM})^2 \quad (7)$$

式中： $\varphi_{clay}$ 、 $\varphi_{sand}$ 、 $\varphi_{silt}$  和  $\sigma_{OM}$  分别为土壤砂粒、粉粒、黏粒占比和有机质质量分数，%。

1.3.3 水源涵养量计算 基于 InVEST 模型计算出

$$WR = \min\left(1, \frac{249}{V}\right) \times \min(1, 0.3 \times TI) \times \min\left(1, \frac{K_s}{300}\right) \times Y_{jx} \quad (8)$$

$$TI = \log(D/S \times P) \quad (9)$$

$$K_s = 76.36 \times 10^{(-0.7 + 0.0246\varphi_{sand} - 0.0087\varphi_{silt})} \quad (10)$$

式中：WR 为水源涵养量，mm；V 为流速系数； $Y_{jx}$  为研究区产水量，mm；TI 为地形指数；D 为研究区栅格数；S 为土层深度，mm；P 为坡度比； $K_s$  为土壤饱和导水率，mm/d。

1.3.4 空间自相关分析 空间自相关分析主要是从整体上分析空间异质性，Moran's I 指数是常用的空间自相关系数，来判断区域内属性值在空间分布的

略地表水和地下水的相互影响。计算公式为：

$$Y_{jx} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}\right) P_x \quad (2)$$

式中： $Y_{jx}$  为第*j*类土地利用栅格*x*中的年产水量，mm； $AET_{xj}$  为第*j*类土地利用栅格*x*中的年蒸散发量，mm； $P_x$  为栅格单元的年降水量，mm。蒸散发与降水量的比值源于傅抱璞等<sup>[21]</sup>、ZHANG 等<sup>[22]</sup>提出的 Budyko 水文平衡曲线理论进行区域性拓展，计算公式为：

$$\frac{AET_{xj}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_{xj}}{1 + \omega_x R_{xj} + \frac{1}{R_{xj}}} \quad (3)$$

式中： $R_{xj}$  为第*j*类土地利用栅格*x*的布德科干燥度指数； $\omega_x$  为气候-土壤非物理参数，计算公式为

$$R_{xj} = \frac{K_{cr} \times ET_{0r}}{P_x} \quad (4)$$

$$\omega_x = Z \times \left(\frac{AWC_x}{P_x}\right) \quad (5)$$

式中： $K_{cr}$  为植被蒸散系数，其数值因植被类型的差异而有所不同； $ET_0$  为潜在蒸散发量，mm；Z 为多年平均降水特征的季节常数，为[1, 30]，根据《广西水资源公报》<sup>[23]</sup>中北部湾各市的产水系数来矫正； $AWC_x$  为植被有效利用水含量，mm。计算公式为：

$$AWC_x = \text{MIN}(\text{MSD}_x, \text{RD}_x) \times \text{PAWC}_x \quad (6)$$

式中： $\text{MSD}_x$  为土壤的最大深度，mm； $\text{RD}_x$  为根系最大深度，mm； $\text{PAWC}_x$  为植物可利用水含量，依据 ZHOU 等<sup>[24]</sup>提出的基于土壤物理与化学特性估算的方法，计算公式为：

$$PAWC_x = 54.509 - 0.132\varphi_{sand} - 0.003(\varphi_{sand})^2 - 0.055\varphi_{silt} - 0.006(\varphi_{silt})^2 - 0.738\varphi_{clay} + 0.007(\varphi_{clay})^2 - 2.688\sigma_{OM} + 0.501(\sigma_{OM})^2 \quad (7)$$

产水量后，需通过降水量减去蒸散发和地表径流后，结合土壤饱和导水率、流速系数、地形指数对水源涵养量进行修正，以获得最终结果。计算公式为：

集聚程度<sup>[25]</sup>。在自相关性分析工具中，包含有全局空间自相关与局部空间自相关。计算公式为：

$$I = \frac{\sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N w_{ab} (x_a - \bar{x})(x_b - \bar{x})}{S^2 \sum_{a=1}^N (x_a - \bar{x})^2} \quad (11)$$

式中：*I* 为全局 Moran's I 指数；N 为样本区域渔网单元数量； $x_a$ 、 $x_b$  为第*a*、*b*区域的水源涵养面积， $\text{km}^2$ ； $\bar{x}$  为  $x_a$  的平均值； $w_{ab}$  为空间权重矩阵。本文综合渔网的可视化分析结果，考虑更清晰的大范围的趋势，最终选择

500 m 空间分辨率的渔网。当 Moran's  $I > 0$ , 表示要素为空间集聚分布模式, 其值越大, 空间集聚性越强; 当 Moran's  $I < 0$ , 表示要素为空间离散分布模式, 其值越小, 空间离散性越强; 当 Moran's  $I = 0$ , 要素呈空间随机分布模式。本文采用 Local Moran's  $I$  探测北部湾水源涵养功能空间局部性集聚特征。计算公式为:

$$I_a = \frac{(x_a - \bar{x})}{S^2} \sum_{j=1}^n w_{ab} (x_b - \bar{x}) \quad (12)$$

式中:  $I_a$  为第  $a$  区域的局部 Moran's  $I$  指数, 其他变量含义与全局 Moran's  $I$  指数含义相同。依据数据分析结果, 空间局部集聚特征被划分为高值(H-H)聚类 and 低值(L-L)聚类。

1.3.5 最优参数地理探测器 地理探测器是由王劲峰等<sup>[26]</sup>开发的一种工具, 旨在通过分析要素在空间上的差异性来揭示其驱动因素<sup>[27]</sup>, 而最优参数地理探测器则是对传统地理探测器的优化, 通过确定最优的参数组合, 能更精准地识别各因子对因变量的影响程度。本研究运用 R 语言实现最优参数地理探测器, 以探究北部湾经济区水源涵养功能的驱动机制。计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma^2 h}{N \sigma^2} \quad (13)$$

式中:  $h$  取值  $1 \sim L$  的影响因子  $X$  分层;  $N_h$  和  $N$  分别为第  $h$  层和全区的单元数;  $\sigma^2 h$  和  $\sigma^2$  分别为第  $h$  层和全区的  $Y$  值的方差。  $q$  值为  $[0, 1]$ , 值越大说明  $Y$  的空间分异性愈发显著; 若分层是由自变量  $X$  生成的, 则  $q$  值的递增表示自变量  $X$  对属性  $Y$  的解释力的增强, 反之则越弱。

1.3.6 PLUS 模型 由中国地质大学 HPSCIL 实验室开发的 PLUS 模型是基于栅格数据, 提出了一种斑块生成的土地利用模型。它是利用用地扩张分析策略模块(LEAS)和结合随机种子生成机制与阈值递减机制的 CA 模型(CARS)<sup>[28]</sup>, 先利用 LEAS 模块生成各地类的土地利用发展概率图集, 再通过 CARS 模块模拟研究区未来土地利用空间格局。在 PLUS 模型中 CARS 模块设置地类转换成本矩阵, 定义土地利用类型是否允许相互转变。一个地类可转变为另一种地类, 则矩阵中的值为 1, 否则为 0, 见表 3。每个地类的扩张能力需用邻域权重参数表示, 本文设置不同土地利用类型的邻域权重, 取值为  $0 \sim 1.00$ , 通过历史土地利用变化的空间自相关分析和北部湾经济区的政策导向确定, 分别为耕地 0.83、林地 0.42、草地 0.03、水域 0.56、建设用地 1.00、未利用地 0.02。

表 3 多情景土地转移矩阵

Table 3 Multi-scenario land transfer matrix

土地利用类型	自然发展情景						城镇发展情景						生态保护情景					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
林地	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0
草地	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0
水域	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0
建设用地	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1
未利用地	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

综合考虑北部湾水源涵养量时空演变规律及政策反应, 本研究选取驱动土地利用变化的因素包括自然地理因素和社会经济因素。并设置 3 种不同情景来模拟出 2030 年北部湾水源涵养功能空间格局, 即自然发展情景、城镇发展情景和生态发展情景, 基于 2015 年和 2020 年的土地利用数据, 采用 Markov 链计算未来的面积需求。情景设置为:

1) 自然发展情景下, 此情景作为多情景模拟体系的基石, 将水域地划定为研究区内的限制发展区域, 紧密遵循 2010—2020 年研究区所呈现出的土地利用变化规律, 未来土地利用变化不会考虑突发政策的影响。2) 城镇发展情景下侧重于城市发展, 在

自然发展情景基础上, 降低建设用地向其他地类转移的可能性 40%, 耕地、林地和草地转换为建设用地的概率增加 30%。3) 生态保护情景下, 是倡导人与自然和谐共生, 参照《广西北部湾经济区国土规划(2014—2030 年)》<sup>[17]</sup>《广西北部湾经济区高质量发展“十四五”规划》<sup>[29]</sup>等规划方案, 严守生态保护红线, 使耕地、林地、草地向建设用地转移概率降低 30%, 未利用地向建设用地转移概率提高 40%, 水域向建设用地转移概率降低 40%, 向耕地转移概率提高 30%, 建设用地转为草地的概率提高 20%, 综合考虑生态保护与社会经济的双重目标, 确保生态资源的可持续利用。

## 2 结果与分析

### 2.1 2000—2020 年土地利用演化特征

基于多期遥感解译数据(图 3),2000—2020 年,区域土地覆被结构发生系统性重构,建设用地扩张与耕地收缩构成主导演变模式。由转移矩阵(表 4)显示,研究期间建设用地面积总转入 1 059.1 km<sup>2</sup>,显著高于总转出面积(110.21 km<sup>2</sup>)。耕地面积总转出则达到 1 053.45 km<sup>2</sup>,高于总转入面积(368.34 km<sup>2</sup>),主要流向建设用地和林地。林地作为基底景观,转出面积略大于转入面积,面积占比始终维持在 45% 以上,但呈现“核心区退化、边缘区稳定”的空间异质性特征。

土地利用类型转移图谱(图 4)可知,“转为建设

用地”的面积占比最大,且 2010—2020 年较于前 10 a 明显增多。土地开发呈现“城市边界外推、乡村空间挤压”特征,主要分布于南宁主城区、钦州港及北海铁山港等城镇化的热点区,且以南宁为核心的中心城市群呈现“圈层式扩张”、沿海港口城市呈现“轴向填充”模式的梯度推移规律。林地变为耕地转移占比 18.2%,集中于十万大山南麓缓坡带,反映农业开垦与退耕还林政策的博弈效应。与沿海区域建设用地扩张主导的土地利用变化不同,2010—2020 年钦州市北部出现显著的生态修复导向型转换,显著高于 2000—2010 年,印证了《北部湾城市群发展规划》<sup>[30]</sup>“严格管控生态空间”政策的实施成效。此类逆向转换过程可能对区域碳汇功能提升产生积极影响。

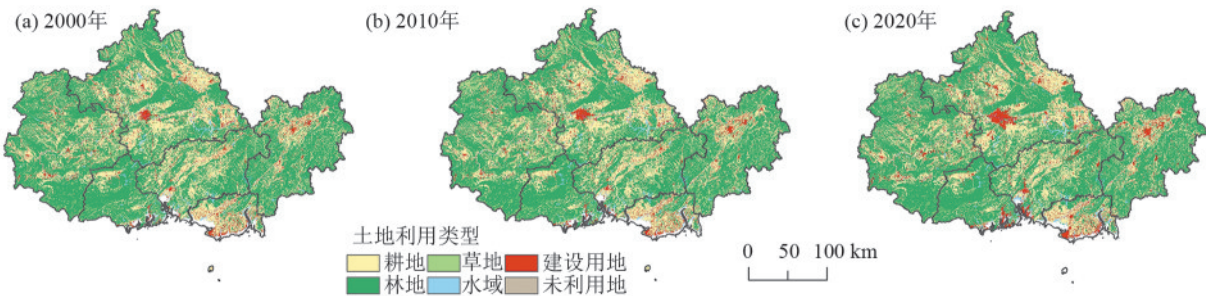


图 3 2000—2020 年北部湾经济区土地利用分布

Fig.3 Land use distribution in Beibu Gulf Economic Zone from 2000 to 2020

表 4 2000—2020 年土地利用类型转移矩阵

Table 4 Land use type transfer matrix from 2000 to 2020

土地利用类型	2020 年						总转出
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	
2000 年 耕地	20 258.27	346.49	26.37	47.51	632.79	0.30	1 053.45
林地	214.47	42 272.60	86.28	30.62	301.95	1.32	634.66
草地	24.03	131.16	3 674.25	5.32	83.78	0.08	244.37
水域	53.17	23.34	5.38	1 518.74	39.62	1.64	123.15
建设用地	76.55	13.71	6.86	13.06	2 256.22	0.03	110.21
未利用地	0.11	0.34	0.44	1.34	0.96	21.84	3.19
总转入	368.34	515.03	125.34	97.86	1 059.10	3.37	2 169.03

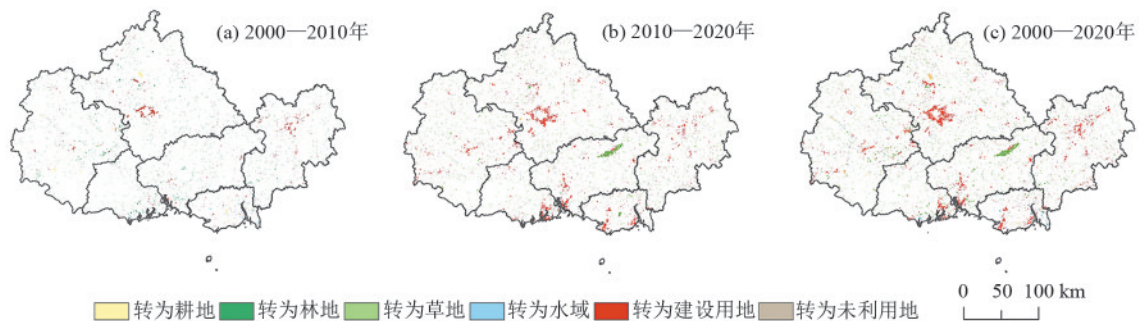


图 4 2000—2020 年北部湾经济区土地利用类型转移

Fig.4 Land use type transfer in Beibu Gulf Economic Zone from 2000 to 2020

### 2.2 2000—2020 年水源涵养功能演化特征

基于 InVEST 模型结果(图 5),北部湾经济区产水量与水源涵养功能呈现显著时空分异。时序数据

分析(图 6a)表明,2000—2020 年区域产水量呈现“先升后降”特征,由 2000 年的 345.63 mm 增至 2010 年峰值 482.27 mm 后回落至 2020 年 393.11 mm;而水源涵

养量持续衰减趋势显著,由 2000 年的 255.74 mm 降至 2020 年的 223.92 mm,年均衰减速率由 2000—2010 年 -3.1 mm/a 加速至 2010—2020 年 -8.2 mm/a,揭示生态功能退化的加速趋势。

空间格局上(图 5、图 6b),产水量高值区集中于北部湾沿海,以防城港市(峰值 511.1 mm)为核心,形成滨海高值带;喀斯特地貌主导的崇左市则长期处于低值区间(155.3~187.3 mm)。南宁主城区产水量随建设用

地扩张从 226.92 mm 降低至 208.73 mm,凸显城市化对水文过程的干扰。水源涵养功能呈现“东高西低、山地高-沿海低”阶梯分布。高值区稳定分布于防城港十万大山、玉林六万大山等生态屏障(>1 200 mm),其森林覆盖率达 75% 以上;低值区则向喀斯特地貌区和沿海经济带扩张,其中北海市因向海开发导致涵养量骤降 36.9%,钦州湾区减少 25.7%,反映人类活动对生态系统的显著胁迫。

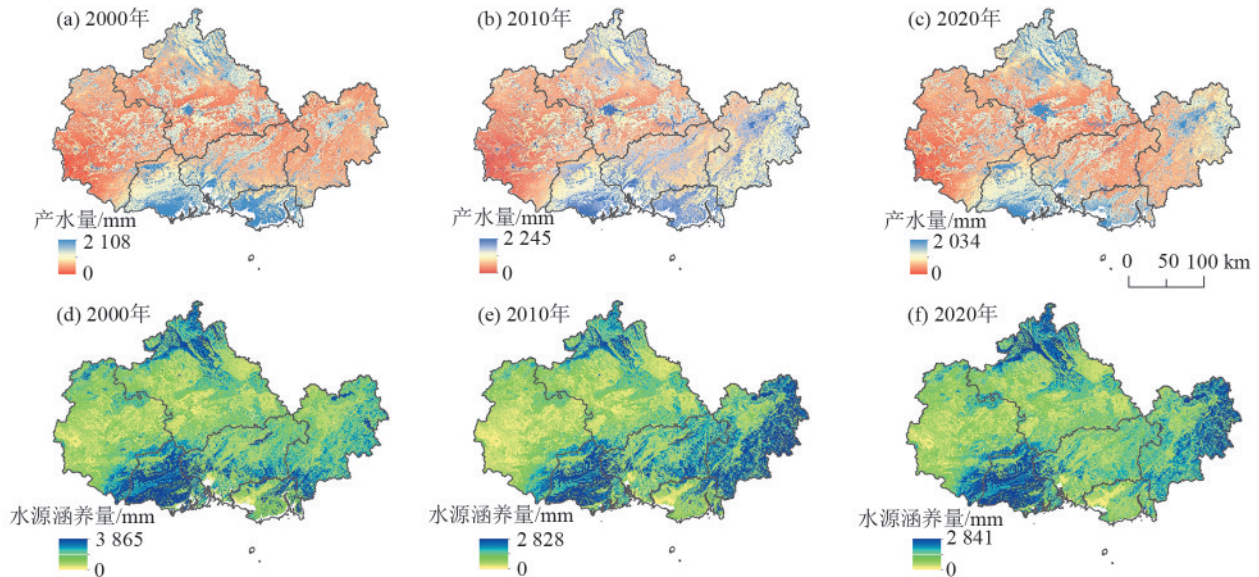


图 5 2000—2020 年北部湾经济区产水量与水源涵养量空间分布

Fig.5 Spatial distribution of water yield and water conservation volume in Beibu Gulf Economic Zone from 2000 to 2020

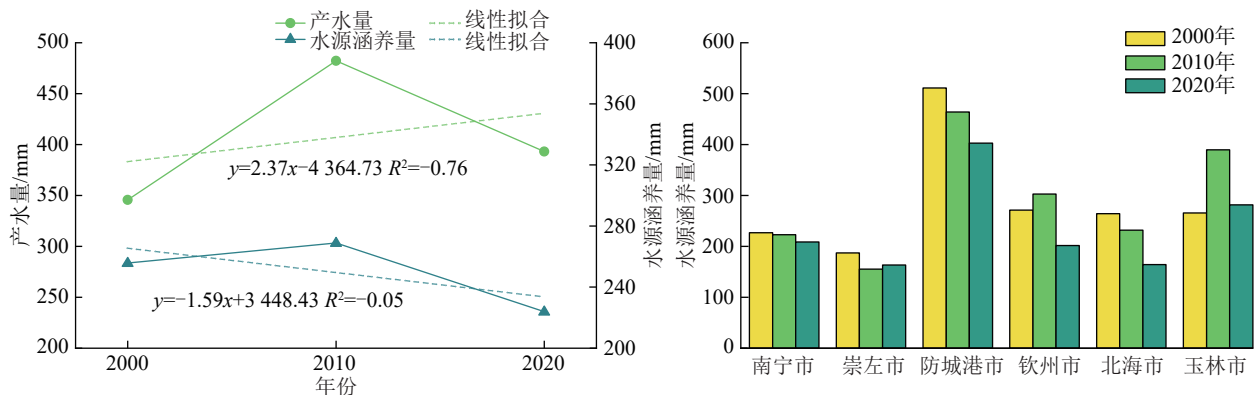


图 6 2000—2020 年北部湾经济区含水量与水源涵养量变化及各地级市水源涵养量

Fig. 6 Changes in water retention and water conservation volume in Beibu Gulf Economic Zone and water conservation volume in different prefecture-level cities from 2000 to 2020

全局空间自相关分析(表 5)显示,水源涵养量空间集聚性持续增强(Moran’s I 指数:0.67→0.71)。局部聚类(图 7)表明,高-高集聚区持续分布于北部山地林区,与生态保护区高度重叠,面积扩张显著;低-低集聚区在城镇发展轴带和沿海经济区形成连续廊道,并出现轻微减少,钦州-北海向海经济发展带新增低值斑块显著增加,印证快速城市化与海岸带开发对空间异质性的重塑。这种“核心保育-边缘退化”的极化格局,揭示自然地理约束与人类活动驱动的协

同作用机制。

表 5 2000—2020 年水源涵养量全局 Moran’ I 指数

Table 5 Global Moran’ I index of water conservation volume from 2000 to 2020

年份	Moran’ I 指数	方差	z 得分	p
2000	0.676	0.000 004	337.032	0
2010	0.734	0.000 004	366.170	0
2020	0.709	0.000 004	353.594	0

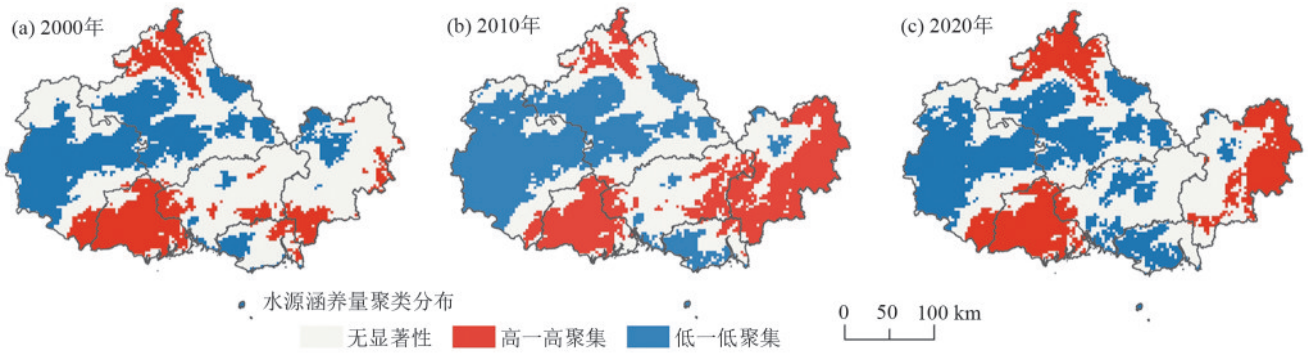


图7 2000—2020年北部湾经济区水源涵养量聚类空间分布

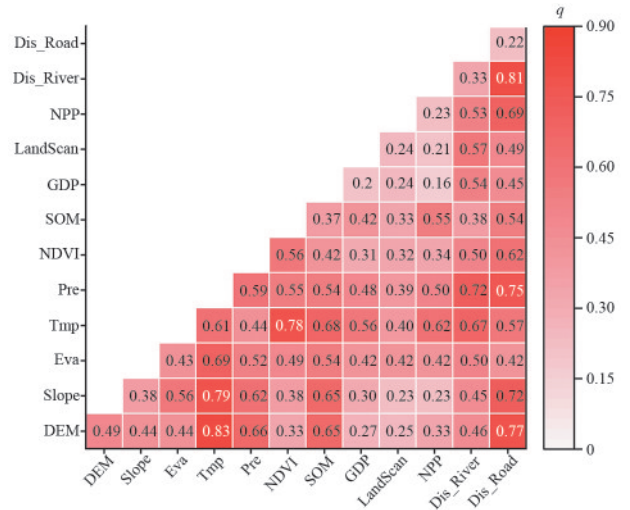
Fig. 7 Cluster spatial distribution of water conservation volume in Beibu Gulf Economic Zone from 2000 to 2020

2.3 水源涵养功能驱动分析

基于R语言实现的最优参数地理探测器的单因子探测与交互作用分析,自然本底因子对水源涵养功能分异的解释力显著高于社会经济因子。各因子对水源涵养功能的影响程度依次为年平均气温>年降水量>NDVI>海拔>蒸散发>坡度>土壤有机质>到河流距离>人口密度>夜间灯光数据>到道路距离>GDP。年平均气温、年降水量和NDVI为关键气候驱动因子,其解释力接近60%,显著高于其他因子;海拔、蒸散发对其解释力较强,解释力为40%~50%;坡度和土壤有机质含量对水源涵养功能解释力中等;而人口密度、夜间灯光数据、到道路距离和GDP的解释力最弱,解释力<25%。

多因子交互作用显著增强解释力(图8)。自然因子间以年平均气温∩高程( $q=0.83$ )和NDVI∩年降雨量( $q=0.78$ )的协同效应为主,分别表征气候-地形耦合调控与植被-降水响应机制;其中,前者的解释力较单因子(Tmp: 61%, DEM: 49%)提升36.1%。自然因子与人文因子的交互作用发现,地形与人类活动的空间耦合对水源涵养功能存在显著非线性影响。海拔与距公路距离的交互作用( $q=0.77$ )解释力较单因子分别提升57.1%和250.0%,表明交通网络在山地低海拔区域的扩张(如南宁-钦州公路沿线),通过切割林地斑块加剧了地形雨截留能力的衰减。气候因子与建设用地扩张的协同效应同样显著,年平均气温与夜间灯光数据的交互作用( $q=0.62$ )揭示城镇化热岛效应可通过提升蒸散速率,间接削弱植被水源涵养能力。距公路距离∩距河流距离( $q=0.81$ )反映交通网络沿河扩张对生态空间的叠加切割效应,解释力较单因子(Dis\_Road: 22%, Dis\_River: 33%)提升145.5%。此外,坡度∩土壤有机质( $q=0.65$ )通过增强土壤持水性与减缓径流,对喀斯特区功能恢复具有关键作

用。根据交互作用探测分析结果,研究区水源涵养功能驱动因素呈现出复杂性。在探讨单因子影响时,需同步关注因子间的交互作用。



注: DEM为海拔; Slope为坡度; Eva为蒸散发; Tmp为年平均气温; Pre为年降雨量; NDVI为植被归一化指数; SOM为土壤有机质; GDP为生产总值; LandScan为人口密度; NPP为夜间灯光数据; Dis\_River为到河流距离; Dis\_Road为到道路距离。

图8 多因子交互探测结果

Fig. 8 Results of multi-factor interaction detection

综合单因子解释力与交互增强效应,筛选出9个核心驱动因子(图9),自然本底因子即DEM、坡度、年均气温等来解释地形-气候-植被协同机制,生态过程因子即蒸散发、土壤有机质表征地表能量平衡与持水能力,区位约束因子即距水源距离、距公路距离凸显人类活动空间胁迫影响。排除GDP、人口密度等低解释力因子,因其对水源涵养空间分异的直接驱动效应未通过显著性检验( $p>0.05$ )。由PLUS模型因子贡献度评估(图9)显示,年降雨量(0.23)、NDVI(0.18)对林地演变驱动贡献最大,而距公路距离(0.26)对建设用地扩张的解释力突出,高贡献区域与建设用地“轴向填充”模式在空间分布上呈现出高度重合的现象。

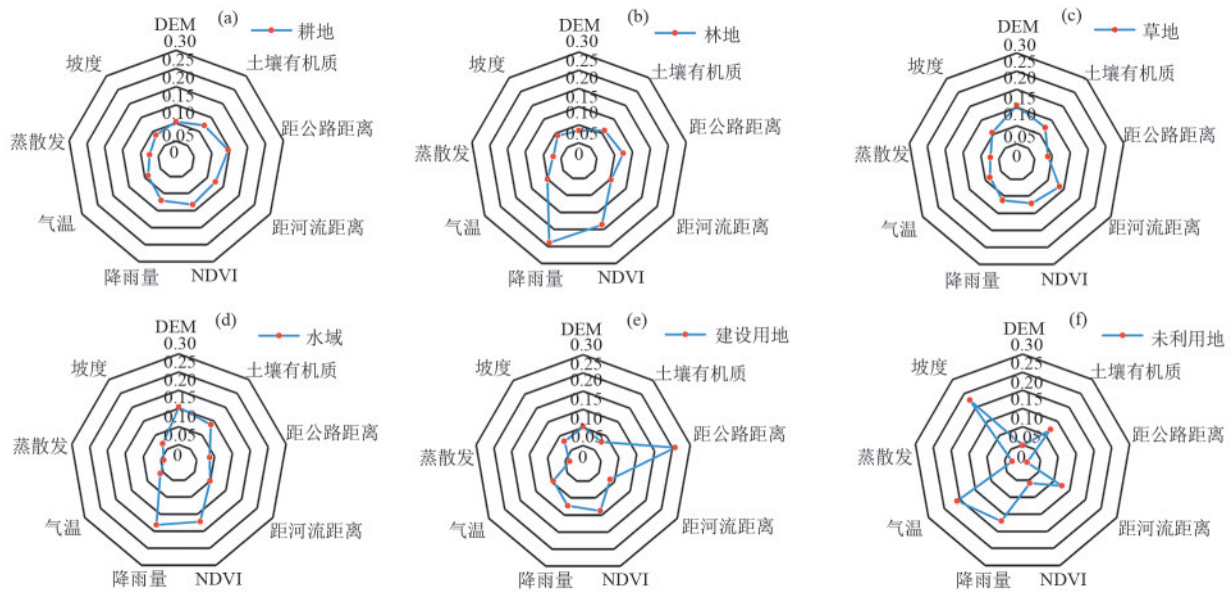


图 9 各土地利用类型的驱动因素贡献度

Fig. 9 Contributions of driving factors to different land use types

2.4 2030 年不同情景下水源涵养功能预测

通过 PLUS 模型模拟出 3 种情景下土地利用分布(图 10)及类型面积与比例(表 6)。2030 年在自然发展情景下的各土地利用类型变化延续 2010—2020 年的趋势,耕地、林地、草地面积持续减少,分别减少 538.84、168.31、16.23 km<sup>2</sup>,建设用地持续扩张 782.54 km<sup>2</sup>,土地开发强度较 2020 年提升 18.7%,表明城镇化扩张是区域土地利用转型的主要驱动力。城镇发展情景下,建设用地增至 4 425.99 km<sup>2</sup>(占比 6.13%),

耕地与林地年缩减速率分别为 1.8%、0.5%,南宁市城区及钦州湾沿海的耕地向建设用地转化率迅速提升,形成以南宁-钦州为核心的“T 型”城市蔓延带。生态保护情景下,林地和草地逆转衰退趋势,大量的耕地转化为林地与草地,林地面积较 2020 年增加 69.17 km<sup>2</sup>,草地增加至 3 814.69 km<sup>2</sup>,耕地减少 194.75 km<sup>2</sup>,建设用地年增速放缓至 1.2%,生态空间占比恢复至 66.8%,反映出生态优先政策对土地利用格局的调控作用。

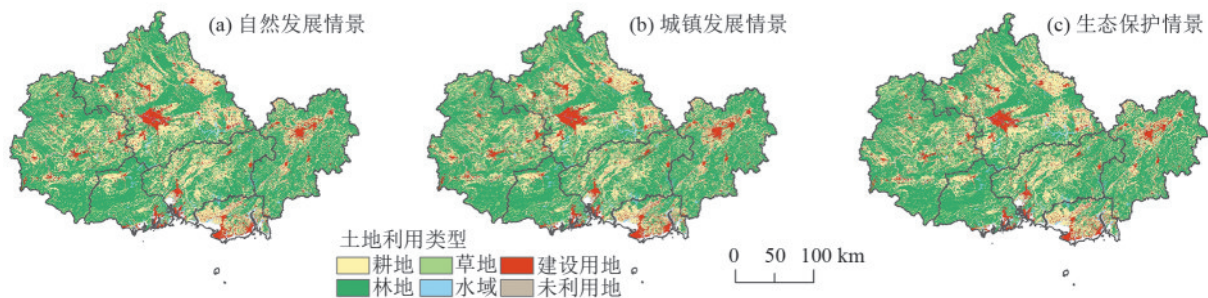


图 10 3 种情景下 2030 年北部湾经济区土地利用分布

Fig.10 Land use distribution in Beibu Gulf Economic Zone in 2030 under three scenarios

表 6 2000—2030 年北部湾经济区土地利用类型面积与比例

Table 6 Area and proportion of land use types in Beibu Gulf Economic Zone from 2000 to 2030

土地利用类型	2000 年		2010 年		2020 年		2030 年					
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	自然发展情景		城镇发展情景		生态保护情景	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
耕地	21 335.17	29.54	21 335.17	29.36	20 626.78	28.55	20 087.94	27.81	19 930.17	27.59	20 432.03	28.28
林地	42 922.99	59.43	42 922.99	59.44	42 788.29	59.23	42 619.98	58.99	42 537.78	58.88	42 857.46	59.32
草地	3 919.52	5.43	3 919.52	5.28	3 800.59	5.26	3 784.36	5.24	3 764.02	5.21	3 814.69	5.28
水域	1 648.65	2.28	1 648.65	2.37	1 641.01	2.27	1 579.56	2.19	1 557.84	2.16	1 600.80	2.22
建设用地	2 366.99	3.28	2 366.99	3.52	3 361.05	4.65	4 143.59	5.74	4 425.99	6.13	3 511.25	4.86
未利用地	25.06	0.03	25.06	0.03	26.15	0.04	28.44	0.04	28.06	0.04	28.05	0.04

土地利用变化直接影响水源涵养功能的时空演变(图 11、表 7)。2000—2030 年,水源涵养量总体仍处于较高水平,各类水源涵养功能排序分别为林地>耕地>草地>水域>建设用地>未利用地。林地作为水源涵养的核心载体,其单位面积均值在自然发展情景下从 319.10 mm/m<sup>2</sup>降至 279.89 mm/m<sup>2</sup>,水源涵养总量减少 12.9%(1 369.67×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>至 1 192.89×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>),而生态保护情景下为三者最高,达 283.89 mm/m<sup>2</sup>。耕地与草地的水源涵养量亦呈下降趋势,主要归因于面积缩减与土地利用强度加剧导致的生态功能退化。相比之下,建设用地水源涵养量在城镇发展情景下显著增加(93.07×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>),但其单位面积均值(210.29 mm/m<sup>2</sup>)仍显著低于自然覆被类型,人工地表对水文调节的贡献有限且存在明显阈值效应。

生态保护情景下区域水源涵养总量(1 570.79×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>)高于自然发展(1 558.61×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>)与城镇发展情景(1 567.35×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>),生态修复措施可部分抵消城镇化带来的负面影响,但较 2020 年仍分别下降 3.5%、2.9%、2.3%。具体而言,生态保护情景下林地与草地面积的保护性恢复使其水源涵养量分别达到 1 215.05×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>和 105.34×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>,较自然发展情景提升 1.8%和 0.5%。而城镇发展情景中建设用地扩张虽提升了局部水源涵养量(93.07×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>),但其对整体功能的边际贡献较低,且伴随耕地与水域生态功能的显著退化,耕地水源涵养量下降至 150.35×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>。2030 年生态保护情景下水源涵养功能的局部恢复,验证了“退耕还林”“湿地修复”等政策的有效性,但其效果仍受限于建设用地扩张的不可逆性。

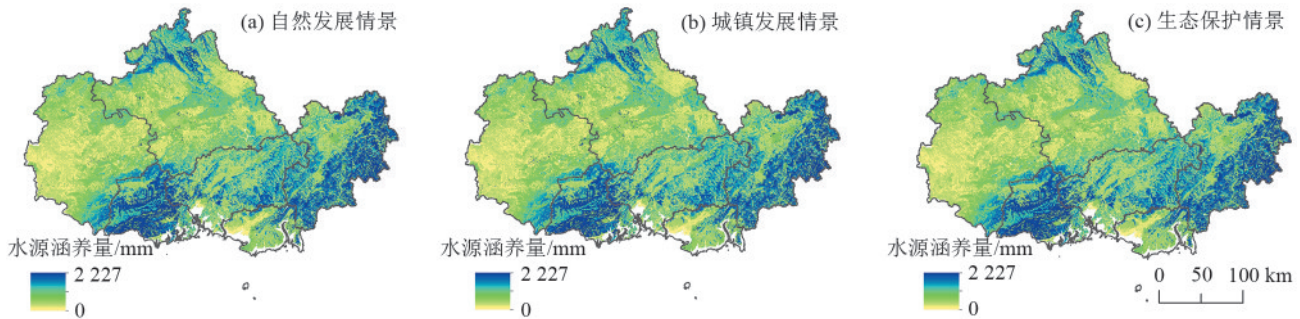


图 11 3 种情景下 2030 年北部湾经济区水源涵养量空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of water conservation volume in Beibu Gulf Economic Zone in 2030 under three scenarios

表 7 2000—2030 年不同土地利用类型水源涵养量

Table 7 Water conservation volume of different land use types from 2000 to 2030

土地利用类型	2000 年		2010 年		2020 年		2030 年					
	水源涵养量/ (10 <sup>7</sup> m <sup>3</sup> )	单位面积 平均值/ (mm·m <sup>-2</sup> )	水源涵养量/ (10 <sup>7</sup> m <sup>3</sup> )	单位面积 平均值/ (mm·m <sup>-2</sup> )	水源涵养量/ (10 <sup>7</sup> m <sup>3</sup> )	单位面积 平均值/ (mm·m <sup>-2</sup> )	自然发展情景		城镇发展情景		生态保护情景	
							水源涵养量/ (10 <sup>7</sup> m <sup>3</sup> )	单位面积 平均值/ (mm·m <sup>-2</sup> )	水源涵养量/ (10 <sup>7</sup> m <sup>3</sup> )	单位面积 平均值/ (mm·m <sup>-2</sup> )	水源涵养量/ (10 <sup>7</sup> m <sup>3</sup> )	单位面积 平均值/ (mm·m <sup>-2</sup> )
耕地	223.38	104.70	207.12	97.60	172.44	83.60	151.38	75.36	150.35	75.44	152.27	75.26
林地	1 369.67	319.10	1 523.66	354.60	1 226.31	286.60	1 192.89	279.89	1 190.85	279.95	1 215.05	283.89
草地	152.35	388.70	131.49	344.40	122.91	323.40	104.76	276.82	104.39	277.34	105.34	276.90
水域	45.37	275.20	36.79	215.00	33.02	201.20	28.14	178.17	27.88	178.95	28.46	177.76
建设用地	55.51	234.50	45.29	177.90	59.79	177.90	80.96	195.39	93.07	210.29	69.20	178.26
未利用地	0.26	104.70	0.39	167.30	0.52	197.70	0.48	167.19	0.81	187.57	0.47	167.16
总量	1 846.54	255.74	1 944.74	268.89	1 614.99	223.92	1 558.61	215.79	1 567.35	216.96	1 570.79	218.70

### 3 讨论

#### 3.1 水源涵养功能演化格局

本研究揭示了北部湾经济区 2000—2020 年水源涵养功能呈现“东高西低、山地高-沿海低”的阶梯式分布特征,且年平均均值由 255.7 mm 下降至 223.9 mm,退化速率在 2010 年后显著加剧。这一趋势与亚热带滨海区域生态系统服务功能退化的普遍规律一致,如长江三角洲及广东省等地的研究<sup>[4-5]</sup>均表明,快速城

镇化导致的林地缩减与建设用地扩张是水源涵养功能衰减的核心动因。值得注意的是,玉林市北部及钦州市退耕还林区的水源涵养量局部增加,表明生态修复工程对功能恢复具有积极作用,但整体效应仍受限于建设用地扩张的不可逆性。与长江经济带等内陆区域相比,北部湾经济区水源涵养功能的空间异质性更显著,与其陆海过渡带复杂的地形地貌(如喀斯特与滨海湿地并存)及高强度人类活动叠加

密切相关<sup>[31]</sup>。高春莲等<sup>[32]</sup>通过生态系统服务簇分析发现,北部湾山江海耦合带随地形位梯度的增加,水土保持和水质净化服务能力随之增高,进一步支持本研究的空间异质性结论。此外,水源涵养功能空间集聚性持续增强(Moran's  $I$ :0.67~0.71),形成“山地收缩-城镇扩散”的极化格局。

### 3.2 水源涵养功能驱动因素

驱动分析表明,水源涵养功能空间分异受气候-地形-植被协同作用主导,年平均气温( $q=0.61$ )与年降雨量( $q=0.59$ )的解释力最高。然而,不同于内陆流域,北部湾经济区 NDVI 与年降水量的交互作用( $q=0.78$ )凸显滨海植被对降水再分配的调控能力,红树林与常绿阔叶林通过冠层截留和根系持水显著减缓地表径流<sup>[33]</sup>。人文因子中,距公路距离对建设用地扩张的贡献度(0.26)最高,表明交通网络延伸通过切割生态廊道加剧水源涵养功能的破碎化。值得注意的是,GDP与人口密度等传统社会经济因子解释力较低( $q<0.25$ ),可能受限于数据空间粒度(30 m)对微观人类活动表征的不足。例如,高精度 POI 数据(如工业用地分布)或能更精准解析人类活动的非线性驱动效应<sup>[34]</sup>。赵忠旭等<sup>[35]</sup>对西藏地区的研究同样发现,水土保持功能的衰减与夜间灯光强度增加呈显著负相关,与本研究结果相似。此外,土壤有机质( $q=0.32$ )的驱动效应揭示土壤持水能力对水源涵养功能的基础性作用,建议未来研究结合土壤微生物活性等微观指标深化机理解析。

### 3.3 模型预测可信度论证

本研究通过集成 InVEST-PLUS 模型,实现土地利用变化与水源涵养功能的动态耦合模拟。模型验证显示,2000—2020 年土地利用模拟精度(Kappa=0.89)达到较高水平,与 SWAT-InVEST 耦合模型在泮河中上游流域的应用结果相当<sup>[36]</sup>。邢笑天等<sup>[37]</sup>利用 PLUS 模型模拟济南都市圈土地利用变化,其 Kappa 系数为 0.81,与本研究结果(0.89)共同验证了该模型在快速城镇化区域的适用性。PLUS 模型通过剔除低效驱动因子(如 GDP)并优化邻域权重参数,显著提升建设用地扩张模拟的空间精度(RMSE=0.15 km<sup>2</sup>)。然而,InVEST 模型未考虑地下水位波动对水源涵养的反馈效应,可能导致滨海区域模拟值偏低。地下水与地表水相互作用对生态系统水质、水量具有潜在影响<sup>[38]</sup>,建议未来研究耦合水文模型以修正偏差。尽管如此,多情景模拟结果与区域发展规划(如《北部湾城市群发展规划》<sup>[30]</sup>)的空间吻合性(高值区与保护区重叠度>75%),验证模型在决策支持中的实用性。

### 3.4 北部湾生态修复优化建议

由水源涵养预测结果可知,北部湾 2030 年 3 种发展情景下的水源涵养功能均比 2020 年降低,与 2000—2020 年建设用地面积大量增加,耕地、林地草地面积减少的趋势相关,其中生态保护情景下降最少。建议构建“核心保护区-城镇发展带-生态修复廊道”协同治理框架,优先强化十万大山、六万大山及铁山港红树林等核心生态源地的保护,严格限制建设用地侵占,通过退耕还林与植被恢复工程提升山地林区与滨海湿地的连通性;在南宁-钦州城镇扩展轴带推行紧凑型城市发展模式,结合蓝绿基础设施(如雨水花园、透水路面)优化水文调节功能,缓解土地开发对生态空间的切割效应;同时,建立气候适应性管理机制,依据降水-植被响应阈值动态调整树种配置,在低降雨区优先种植深根系植被以增强土壤持水能力,并通过“碳汇-水源”协同交易等市场化手段,将生态功能价值纳入区域发展规划,实现生态保护与经济发展的长效平衡。

### 3.5 不足与展望

本研究基于 30 m 分辨率土地利用数据,可能低估小尺度生态斑块(如分散林地、湿地)对水源涵养功能的贡献;此外,时间跨度较短,难以捕捉气候波动与政策响应的长期滞后效应。未来研究需加强跨国滨海区对比,整合东盟经济圈(如泰国湾、马六甲海峡)的 LULC 数据,解析陆海统筹政策的区域差异。建立与长江三角洲、珠江三角洲的标准化比较框架,重点揭示喀斯特地貌对水源涵养功能退化空间格局的调控作用。驱动因子分析侧重于宏观自然与人文要素,对土壤微生物活性、植被根系水力再分配等微观生态过程的量化不足。因此,未来研究可结合原位试验与多源数据同化技术,构建“宏观-微观”耦合驱动模型。

## 4 结论

1)北部湾经济区水源涵养功能呈显著空间异质性,2000—2020 年,水源涵养量平均值由 255.7 mm 降至 223.9 mm,退化速率在 2010 年后加速至 -8.2 mm/a。空间分布上呈“东高西低、山地高-沿海低”的阶梯格局,高值区收缩至山地林区(如十万大山),低值区向喀斯特地貌区和沿海经济带扩张。Moran's  $I$  指数(0.67~0.71)表明空间集聚效应增强,生态保护政策与城镇化压力博弈显著,形成“山地收缩-城镇扩散”的极化格局。

2)气候-地形-植被协同作用主导功能分异,年平均气温( $q=0.61$ )、年降雨量( $q=0.59$ )及 NDVI-降水交互效应( $q=0.78$ )是关键自然驱动因子;人文因子

中, 交通网络扩张(距公路距离贡献度 0.26)通过切割生态廊道加剧了水源涵养功能的破碎化, 而 GDP 与人口密度的直接驱动效应不显著, 受限于数据空间粒度对微观人类活动表征的不足。

3) 多情景模拟 2030 年显示, 生态保护情景可部分缓解功能退化, 林地水源涵养量较自然情景提升 1.8%。但建设用地扩张的不可逆性导致整体功能仍呈下降趋势, 较 2020 年减少 2.3%~3.5%。此结果验证“退耕还林还草”“湿地修复”等生态保护政策的有效性, 但也凸显建设用地扩张对生态功能恢复的制约。

#### 参考文献:

- [1] DAILY G C. Nature's Services: Societal dependence on natural ecosystems[M]. Washington DC: Island Press, 1997.
- [2] YIN C C, ZHAO W W, CHERUBINI F, et al. Integrate ecosystem services into socio-economic development to enhance achievement of sustainable development goals in the post-pandemic era[J]. *Geography and sustainability*, 2021, 2(1): 68-73.
- [3] 刘亦晟, 侯鹏, 王平, 等. 生态系统水源涵养服务功能定量评估方法研究进展[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(1): 275-288.
- LIU Y S, HOU P, WANG P, et al. Research progress on quantitative evaluation methods of water conservation service function in ecosystems [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(1): 275-288.
- [4] SONG S, XU Y P, WU Z F, et al. The relative impact of urbanization and precipitation on long-term water level variations in the Yangtze River delta [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 648: 460-471.
- [5] 吴文坤, 武欣. 广东省生态系统服务特征及生态分区优化研究[J]. *农业与技术*, 2024, 44(13): 91-97.
- WU W K, WU X. Characteristics of ecosystem services and ecological zoning optimization in Guangdong Province [J]. *Agriculture and Technology*, 2024, 44(13): 91-97.
- [6] SUDOL T A, NOE G B, REED D J. Tidal wetland resilience to increased rates of sea level rise in the Chesapeake bay: Introduction to the special feature [J]. *Wetlands*, 2020, 40(6): 1667-1671.
- [7] AKHTER S, QIAO F, WU K, et al. Seasonal and long-term sea-level variations and their forcing factors in the northern bay of Bengal: A statistical analysis of temperature, salinity, wind stress curl, and regional climate index data [J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2021, 95: e101239.
- [8] 张忠伟, 郭晋廷, 张军, 等. 基于多源数据的云南省水源涵养能力评估及影响因素研究[J]. *西北林学院学报*, 2025, 40(01): 165-177.
- ZHANG Z W, GUO J T, ZHANG J, et al. Assessment of water conservation capacity and driving factors in Yunnan Province based on multi-source data [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2025, 40(1): 165-177.
- [9] 傅春, 李帆, 刘业忠, 等. 基于 InVEST 与 CA-Markov 模型的鄱阳湖流域水源涵养模拟预测分析[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2024, 57(11): 1513-1521.
- FU C, LI F, LIU Y Z, et al. Simulation and prediction of water conservation in Poyang Lake basin based on InVEST and CA-Markov models [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2024, 57(11): 1513-1521.
- [10] 龚诗涌, 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 S Y, XIAO Y, ZHENG H, et al. Spatial characteristics and influencing factors of water conservation in China's ecosystems [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(7): 2455-2462.
- [11] 陈德权, 兰泽英, 张郁, 等. 广州市水源涵养生态系统服务功能评价与影响因素研究. *地理空间信息*, 2024, 22(2): 34-38.
- CHEN D Q, LAN Z Y, ZHANG Y, et al. Evaluation of water conservation ecosystem services and their driving factors in Guangzhou City [J]. *Geospatial Information*, 2024, 22(2): 34-38.
- [12] 尚婷婷, 张亚群, 任衍淦. 甘肃省水源涵养功能时空变化及其影响因素[J]. *水土保持通报*, 2024, 44(6): 237-247.
- SHANG T T, ZHANG Y Q, REN Y G. Spatiotemporal variation of water conservation function and its influencing factors in Gansu Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(6): 237-247.
- [13] 黄韬, 刘素红. 基于 PLUS-InVEST 模型的福建省土地利用变化与碳储量评估[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(2): 246-257.
- HUANG T, LIU S H. Assessment of land use change and carbon storage in Fujian Province based on PLUS-InVEST model [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(2): 246-257.
- [14] 国家发展改革委. 关于印发《西部陆海新通道总体规划》的通知(发改基础[2019]1333号)[EB/OL]. (2019-08-02). [https://www.mct.gov.cn/preview/whhlyqzcxw/zghl/202012/t20201226\\_920117.html](https://www.mct.gov.cn/preview/whhlyqzcxw/zghl/202012/t20201226_920117.html).
- National Development and Reform Commission. Notice on the issuance of the "Master Plan for the New Western Land-Sea Corridor" (No. 1333[2019])[EB/OL]. (2019-08-02). [https://www.mct.gov.cn/preview/whhlyqzcxw/zghl/202012/t20201226\\_920117.html](https://www.mct.gov.cn/preview/whhlyqzcxw/zghl/202012/t20201226_920117.html).
- [15] 张丽芳, 冉丹阳, 张鑫, 等. 基于 GIS 的北部湾经济区生态安全格局构建与评价[J]. *生态科学*, 2019, 38(4): 202-208.
- ZHANG L F, RAN D Y, ZHANG X, et al. Construc-

- tion and evaluation of ecological security pattern in Beibu Gulf Economic Zone based on GIS [J]. *Ecological Science*, 2019, 38(4): 202-208.
- [16] 窦世卿, 张楠, 刘丹丹, 等. 耦合VOR和InVEST模型的广西北部湾经济区生态系统健康时空变化研究[J]. *广西科学*, 2024, 31(3): 581-592.  
DOU S Q, ZHANG N, LIU D D, et al. Spatiotemporal changes of ecosystem health in Guangxi Beibu Gulf Economic Zone based on VOR and InVEST models [J]. *Guangxi Sciences*, 2024, 31(3): 581-592.
- [17] 广西壮族自治区国土资源厅. 关于发布实施《广西北部湾经济区国土规划(2014—2030年)》的通知桂国土资发[2016]24号[EB/OL]. (2016-06-08). <https://dnr.gxzf.gov.cn/zfxxgk/fdzdgnr/ghjh/ghjh/t16126491.shtml>.  
Department of Natural Resources of Guangxi Zhuang Autonomous Region. Notice on the implementation of "Guangxi Beibu Gulf Economic Zone Territorial Plan (2014—2030)" (No. 24 [2016]) [EB/OL]. (2016-06-08). <https://dnr.gxzf.gov.cn/zfxxgk/fdzdgnr/ghjh/ghjh/t16126491.shtml>.
- [18] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于InVEST模型的黄河流域产水量时空变化及其对降水和土地利用变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2731-2739.  
YANG J, XIE B P, ZHANG D G. Spatiotemporal variation of water yield in the Yellow River basin and its response to precipitation and land use change based on InVEST model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(8): 2731-2739.
- [19] 何秋琴, 王京伟, 毕旭, 等. 2005—2020年山西省水源涵养功能时空格局及其演变驱动力分析[J]. *环境科学研究*, 2024, 37(4): 862-873.  
HE Q Q, WANG J W, BI X, et al. Spatiotemporal pattern and driving forces of water conservation function in Shanxi Province from 2005 to 2020 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2024, 37(4): 862-873.
- [20] Tallis H T, Ricketts T, Nelson E, et al. InVEST 1.004 beta user's guide [M]. Stanford: The Natural Capital Project, 2010.
- [21] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算[J]. *大气科学*, 1981, 5(1): 23-31.  
FU B P. On the calculation of land surface evaporation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1981, 5(1): 23-31.
- [22] ZHANG L, HICKEL K, DAWES W R, et al. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration [J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(2): W02502.
- [23] 广西壮族自治区水利厅. 2020年广西水资源公报[EB/OL]. (2021-09-01). <http://slt.gxzf.gov.cn/zfxxgk/xxgknr/jbgb/gxszygb/t10121765.shtml>.  
Guangxi Zhuang Autonomous Region Water Resources Department. *Guangxi Water Resources Bulletin* 2020 [EB/OL]. (2021-09-01). <http://slt.gxzf.gov.cn/zfxxgk/xxgknr/jbgb/gxszygb/t10121765.shtml>.
- [24] ZHOU W Z, LIU G H, PAN J J, et al. Distribution of available soil water capacity in China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2005, 15(1): 3-12.
- [25] 周怡宁, 关颖慧, 林一诚, 等. 基于InVEST模型的小滦河流域产水及水源涵养功能时空变化[J]. *中国水土保持科学*, 2024, 22(5): 72-82.  
ZHOU Y N, GUAN Y H, LIN Y C, et al. Spatiotemporal variation of water yield and water conservation function in Xiao Luan River basin based on InVEST model [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2024, 22(5): 72-82.
- [26] 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.  
WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [27] 王懋源, 齐实, 郭衍瑞, 等. 藏东-川西生态维护水源涵养区产水量驱动机制[J]. *生态学报*, 2024, 44(21): 9520-9534.  
WANG M Y, QI S, GUO Y R, et al. Driving mechanisms of water yield in ecological conservation and water source areas of eastern Tibet-Western Sichuan [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(21): 9520-9534.
- [28] LIANG X, GUAN Q F, CLARKE K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, e85.
- [29] 广西壮族自治区人民政府. 关于印发广西北部湾经济区高质量发展“十四五”规划的通知(桂政办发[2021]143号)[EB/OL]. (2022-01-14). <http://www.gxzf.gov.cn/zcfw2024/zcbh2024/dmzchb/zzqz/t24326013.shtml>.  
People's Government of Guangxi Zhuang Autonomous Region. Notice on the issuance of the "14th Five-Year Plan for High-Quality Development of Guangxi Beibu Gulf Economic Zone" (No. 143 [2021]) [EB/OL]. (2022-01-14). <http://www.gxzf.gov.cn/zcfw2024/zcbh2024/dmzchb/zzqz/t24326013.shtml>.
- [30] 国家发展改革委住房城乡建设部. 关于印发北部湾城市群发展规划的通知(发改规划[2017]277号)[EB/OL]. 2017-02-16). [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201702/t20170216\\_962229.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201702/t20170216_962229.html).  
National Development and Reform Commission, Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Notice on the issuance of Beibu Gulf Urban Agglomeration Development Plan (Development and Reform Plan No. 277) [EB/OL]. 2017-02-16). [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201702/t20170216\\_962229.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201702/t20170216_962229.html).