

1996—2020年海南岛水源涵养量时空变化及地理探测

韩念龙^{1,2}, 刘子荣¹, 贾培宏¹, 张伟璇¹

(1.海南大学 公共管理学院, 海南 海口 570228; 2.惠州学院 地理与旅游学院, 广东 惠州 516007)

摘要: [目的] 分析影响海南岛水源涵养量时空变化的主要驱动因素, 为海南岛生态系统水源涵养功能重点区域识别及保护, 水资源管理及区域可持续发展等方面提供决策依据。[方法] 基于 InVEST 模型产水量模块, 定量分析海南岛 1996—2020 年水源涵养的时空变化, 并对海南岛的水源涵养影响因素展开地理探测分析研究。[结果] ① 1996—2020 年海南岛水源涵养总量略微上升, 多年平均水源涵养量为 41.77 mm, 水源涵养总量为 $1.42 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。空间上, 海南岛水源涵养分布呈现东高西低及北高南低的特征。各地类中, 林地的水源涵养能力较强, 且面积占比大, 对海南岛水源涵养量的贡献显著。② 水源涵养量有较强的空间正相关性, 呈现明显聚集特征, 水源涵养重点区域主要分布于海南岛东中部、东部沿海海岸带以及海口市西部的火山熔岩湿地。③ 各因子对水源涵养影响力从大到小依次为降水量、土地利用类型、实际蒸散发和高程; 因子交互作用, 尤其是降水与土地利用的交互显著增强水源涵养分布的解释。[结论] 气候作用和人类活动主导了海南岛水源涵养量空间格局。未来既要充分考虑气候变化对水源涵养的影响, 通过建立有效措施确保海南岛生态系统水源涵养功能有效适应全球变化, 又要通过土地资源的合理利用与管理, 确保土地生态安全。

关键词: 海南岛; 水源涵养; 空间自相关; 地理探测器

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)05-0193-09

中图分类号: X171

文献参数: 韩念龙, 刘子荣, 贾培宏, 等. 1996—2020 年海南岛水源涵养量时空变化及地理探测[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 193-201. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.05.025; Han Nianlong, Liu Zirong, Jia Peihong, et al. Spatio-temporal changes and geographic detection of water conservation on Hainan Island from 1996 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 193-201.

Spatio-temporal Changes and Geographic Detection of Water Conservation on Hainan Island from 1996 to 2020

Han Nianlong^{1,2}, Liu Zirong¹, Jia Peihong¹, Zhang Weixuan¹

(1. School of Public Administration, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China;

2. School of Geography and Tourism, Huizhou University, Huizhou, Guangdong 516007, China)

Abstract: [Objective] The main driving factors affecting the spatio-temporal variation of water conservation on Hainan Island were analyzed in order to provide a decision-making basis for the identification and protection of key areas of water conservation function, water resource management, and regional sustainable development of the Hainan Island ecosystem. [Methods] Based on the water yield module of the InVEST model, the spatio-temporal changes in water conservation on Hainan Island from 1996 to 2020 were quantitatively analyzed, and a geographic detection and analysis of the influencing factors of water conservation on Hainan Island was conducted. [Results] ① The total amount of water conservation in Hainan Island increased slightly from 1996 to 2020. The annual average water conservation was 41.77 mm, and the total water conservation was 1.42 billion m^3 . Water conservation on Hainan Island was high in the east and north, and low in the west and south. Among all land use types, forest had strong water conservation capacity and accounted for a large area, making a significant contribution to the water conservation of Hainan Island. ② Water conservation had a strong positive spatial correlation, showing obvious aggregation characteristics. The key areas of water

收稿日期: 2022-03-17

修回日期: 2022-04-06

资助项目: 国家社科基金西部项目“海南自贸港生态保护空间监管策略研究”(21XGL019); 海南省自然科学基金“人类活动视角下的海南岛中部山区生态系统服务功能权衡与模拟”(421RC1034)

第一作者: 韩念龙(1983—), 男(黎族), 海南省文昌县人, 博士, 高级工程师, 主要从事土地资源管理方面研究。Email: nlhan@hainanu.edu.cn.

通信作者: 贾培宏(1972—), 女(汉族), 宁夏回族自治区中卫市人, 博士, 教授, 主要从事土地资源管理研究。Email: jiaph@hainanu.edu.cn.

conservation were mainly located in the eastern and central parts of Hainan Island, the eastern coastal zone, and the volcanic lava wetlands to the west of Haikou City. ③ The influence of each factor on water conservation followed the order of precipitation > actual evapotranspiration > land use pattern > elevation. The interaction of factors, especially the interaction between precipitation and land use pattern, significantly enhanced the distribution of water conservation. [Conclusion] Climate and human activities dominated the spatial pattern of water conservation on Hainan Island. In the future, it is necessary to fully consider the impact of climate change on water conservation, establish effective measures to ensure that the water conservation function of the Hainan Island ecosystem can effectively adapt to global changes, and ensure land ecological security through rational utilization and management of land resources.

Keywords: Hainan Island; water conservation; spatial autocorrelation; geodetector

水源涵养是指生态系统通过其特有结构与水相互作用,将水分保持在生态系统的过程与功能^[1]。随着中国经济增长和城市化发展,人类活动对生态系统水源涵养功能的影响程度加深,生态系统水源涵养服务功能正处于退化之中^[2]。同时伴随水资源供需矛盾紧张及水环境的恶化^[3],使得生态系统水源涵养功能成为当前研究的热点问题之一。水源涵养的估算方法主要有水量平衡法^[4]、年径流法^[5]、降水贮存法^[6]和综合蓄水能力法等^[7]。当前,定量化、空间化的水源涵养模拟成为主流,常用的模型包括 MIKE SHE(MIKE system hydrological European)模型, SWAT(soil and water assessment tool)模型和 InVEST(integrate valuation of ecosystem services and tradeoffs tool)模型等^[8-10]。其中 InVEST 模型由于数据易获取、参数调整灵活、评价结果表达可空间化等优势被广泛应用^[10-12]。

海南岛是中国的热带海洋性气候岛屿,其生态系统具有有限性、孤立性及脆弱性等独特特点^[13],在自然或人类活动的干扰下生态系统面临易受损及难恢复等威胁,因此对岛屿生态系统研究有利于岛屿生态系统功能保持及可持续发展。海南岛自 1999 年的“生态省”定位到如今的“全国生态文明建设示范区”发展,始终体现了生态优先在海南发展中的核心地位。在已有的海南岛水源涵养研究中,主要集中于区域水源涵养计算^[14],或土地覆被类型转变对水源涵养的影响^[15-16],并未考虑气候以及其他影响因素的情况。地理探测器不仅可以探测地理空间异质性及驱动因子,还可以探测因子交互作用等影响,已应用于多个领域的研究^[17-19]。因此,基于地理探测的水源涵养研究,对热带岛屿生态系统水源涵养功能的科学问题发现以及可持续发展有重要启示作用。

因此,本研究以海南岛为研究区域,模拟海南岛水源涵养时空分布及变化特征,通过对水源涵养影响因素的地理探测,探究影响海南岛水源涵养时空变化的主要驱动因素,以期对热带海岛水源涵养重点区域

识别及规划,生态系统水源涵养功能保护及社会—生态可持续发展探索提供理论依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

海南岛位于中国最南端,位置为 $18^{\circ}10'—20^{\circ}07'N$, $108^{\circ}37'—111^{\circ}03'E$ 。陆域面积约为 $3.40 \times 10^4 \text{ km}^2$, 主要是由山地、丘陵、台地、阶地和平原等地貌类型构成的三大环带,由里向外依次分布于全岛,中间高四周低(图 1)。海南岛地处热带,属于热带季风海洋性气候。受地形影响,海南岛降雨量空间分布不均,东部降水量充沛,西部降水少。海南岛年均蒸发量较高,为 1 020 mm 左右,西部绝大部分地区蒸发量多于降水量,存在枯水期的极端干旱情况^[20]。夏季高强度集中降水,岛上截流困难,地表径流生成快,加之河流源短流促,使大部分雨量变成洪水流入海域,蓄水储水困难。同时,海南岛水资源主要依靠岛内供给,但洪涝、干旱等自然灾害的发生、水源地保护的不到位等问题存在使得海南岛水资源供需矛盾突出,成为社会经济发展中的重要制约因素^[21]。

1.2 数据来源及处理

本研究水源涵养研究所涉及的数据来源如表 1 所示,包括降雨量、潜在蒸散量、土地利用类型、土层深度、有效含水量、土壤饱和导水率、生物物理参数(蒸散系数和植物根系深度)、流速系数及高程等数据。

首先,将各栅格数据的空间投影坐标统一为 GCGS2000 高斯投影坐标系,分辨率均为 1 km;其次,根据海南岛实际情况,结合土地利用分类系统(GB/T2010-2007)《土地利用分类现状》,将土地利用类型合并为耕地、林地、园地、草地、水体、建设用地和未利用地 7 类;计算水源涵养量时,将 2000,2005,2010,2015,2020 年的 5 期土地利用数据分别用以代表 1996—2000,2001—2005,2006—2010,2011—2015,2016—2020 年这 5 个时间段的土地利用状况。

表 1 水源涵养研究数据来源及说明

数据	来源	数据说明
土地利用栅格数据	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn/)	2000,2005,2010,2015,2020 年海南岛土地利用数据(1 km 分辨率)
降水量	中国气象科学数据共享服务网 (http://cdc.cma.gov.cn)	1996—2020 年(1 km 分辨率)
潜在蒸散量	中国气象科学数据共享服务网 (http://cdc.cma.gov.cn)	通过 Penman-Monteith 公式计算及克里金插值
土层深度/植物可利用含水量/ 土壤饱和导水率	世界土壤数据库(HWSD)、第二次全国土壤调查 1:100 万土壤数据	SPAW hydrology 软件计算(1 km 分辨率)
高程	国家基础地理信息中心	30 m 分辨率

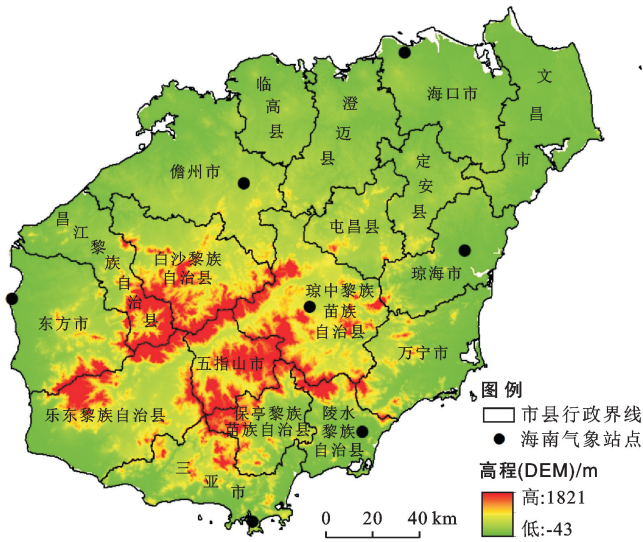


图 1 海南岛地形及气象站分布

2 研究方法

2.1 水源涵养计算

水源涵养量是根据 InVEST 产水模型计算获得产水量,再对产水量修正获得。InVEST 产水量模型是基于水量平衡原理,将每一个栅格的降水量减去蒸发量得到该栅格的产水量值。产水量的计算方法如下:

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

式中: Y_{xj} 为土地覆被类型 j 上栅格单元 x 的年平均产水量; AET_{xj} 是土地覆被类型 j 在栅格 x 上的年实际蒸散量; P_x 是栅格 x 上的年降水量、其中 $\frac{AET_{xj}}{P_x}$ (实际蒸散量与降水量比值) 是依据 Zhang 等^[22] 在 Budyko 曲线基础上发展而来,其表达式如下:

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

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

$$R_{xj} = \frac{k_{ij} \times ET_0}{p_x} \quad (4)$$

式中: R_{xj} 为土地覆被类型 j 上栅格单元 x 的 Budyko 干燥指数,定义为潜在蒸散发与降水量的比值; ω_x 为修正植被年可利用水量与预期降水量的比值; Z 为季节常数,代表区域降水分布及其他地质特征,取值范围在 1~10; k_{ij} 是植物蒸散系数,是不同发育期中作物蒸散量与参考蒸散量 (ET_0) 的比值; AWC_x 是植物可利用含水量。 ET_0 表示栅格单元 x 的潜在蒸散,由 Penman-Monteith 公式计算得出:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_x - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (5)$$

式中: R_x 表示地表净辐射; G 表示土壤热通量; γ 表示干湿表常熟; T_{mean} 表示日平均温度; u_2 表示 2 m 高处风速; e_s 表示饱和水汽压; e_a 表示实际水汽压。

基于公式(1)~(5)得出产水量、地形指数、土壤饱和导水率和流速系数对产水量进行修正获得水源涵养。具体计算方法为:

$$R = \min\left(1, \frac{249}{V}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times T}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K}{300}\right) \times Y \quad (6)$$

式中: R 为水源涵养量(mm); K 为土壤饱和导水率 (mm/d),根据世界土壤数据库(HWSD)利用 SPAW 软件计算获得; V 为流速系数(见表 2); T 为地形指数,无量纲,根据公式(7)计算; Y 为产水量,根据(1)公式计算。

$$T = \lg \frac{D_A}{S_D \times P_s} \quad (7)$$

式中: D_A 为集水区栅格数,无量纲; S_D 为土层深度 (mm); P_s 为百分比坡度。

表 2 InVEST 模型相关参数取值^[23]

土地利用	植物根系深度	蒸散系数	流速系数
耕地	700	0.65	1 500
林地	3 000	1.00	300
园地	3 000	0.7	500
草地	2 000	0.65	500
水域	1	1.00	2 012
建设用地	1	0.30	2 012
未利用地	1	0.50	300

2.2 地理探测器

地理探测器是一种探测空间分异性及定量解释其驱动因子的方法,由因子探测器、风险探测器、交互作用探测器和生态探测器 4 个探测器组成^[17]。本文主要采用因子探测和交互作用探测、风险探测展开海南岛水源涵养的影响因素地理探测研究。

因子探测可以探测因变量(Y)的空间分异性,并探测各自变量(X)对因变量空间分布的影响大小,用

q 值度量,表示为:

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

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad SST = N \sigma^2 \quad (9)$$

式中: $h=1, \dots, L$ 为变量 Y 或因子 X 的分层(Strata),即分类或分区; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差。SSW 和 SST 分别为层内方差之和与全区总方差。 q 的值为 $[0, 1]$, 值越大说明该因子作用越大。

交互作用探测用于分析不同因子之间的交互作用,即评估因子 X_1 和 X_2 共同作用时是否会增加或减弱对因变量 Y 的解释力,或这些因子对 Y 的影响是相互独立的。可以通过比较单因子的 q 值和他们交互后的 q 值来衡量对因变量的影响。交互作用判断方式见表 3。

表 3 地理探测交互作用类型

判断	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

注:有关符号含义见本文 2.2 部分。下同。

本研究以海南岛多年平均水源涵养量为因变量,选取多年平均降水量、土地利用类型、多年平均实际蒸散量和高程 4 个因子进行地理探测。根据地理探测器对输入变量的离散要求,将多年平均降水量、实际蒸散量按等间距分类法分为 6 类,将高程分为 5 类,土地利用类型按类别分类。同时,生成随机点 8 000 个,排除异常值 378 个,最终保留 7 622 个,采样间距为 1 000 m,使用 ArcGIS 栅格值提取至点功能,提取相应的水源涵养、降水、土地利用类型、实际蒸散发和高程值作为地理探测器的运行数据。

3 结果与分析

3.1 水源涵养时间变化

本文参考已有研究^[23-24],基于不同季节常数值的生产量结果与实际数值进行误差对比分析。当季节常数 \approx 值为 2.5 时,得到多年平均产水深度为 1 052.04 mm,多年平均产水量为 $3.58 \times 10^{10} \text{ m}^3$,与《海南省水资源公报》公布的 1998—2020 年多年平均

地表水资源量 $3.53 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 相比,其相对误差最小,仅为 1.40%,表明计算结果较为可靠。

1996—2020 年,海南岛多年平均水源涵养深度 41.77 mm,多年平均水源涵养量 $1.42 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。1996—2020 年,水源涵养量由 $1.40 \times 10^9 \text{ m}^3$ 降至 $1.03 \times 10^9 \text{ m}^3$,下降了 $3.70 \times 10^8 \text{ m}^3$,下降速率为 $1.00 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 。年际变化呈现先增加后减少的下降趋势,最高值 $2.01 \times 10^9 \text{ m}^3$ 出现在 2001 年,最低值 $6.76 \times 10^8 \text{ m}^3$ 出现在 2015 年,总体波动很大。1996—2020 年海南岛多年平均降水量为 1 975.53 mm,年均降水量最多在 2001 年,为 2 439.9 mm;2015 年年均降水量最小,为 1 404.22 mm,降雨量变化与水源涵养量变化一致。多年平均实际蒸散量与潜在蒸散量依次为 907.35, 1 303.85 mm,整体趋势较为平稳(图 2)。从时间变化中可以看出,海南岛水源涵养深度与降水量变化趋势具有较高一致性,可见降水量是影响海南岛水源涵养量变化的重要因素,为此对降水量展开变异性分析。

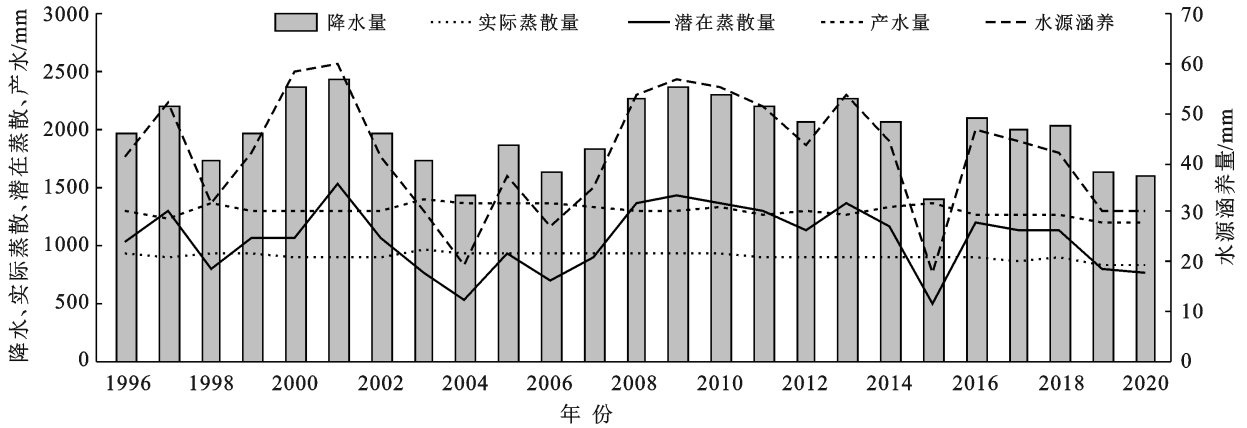


图2 1996—2020年海南省降水、实际蒸散、潜在蒸散、产水及水源涵养量年际变化

1996—2020年海南岛降水量在Mann-Kendall检验中 z 值为-0.72,绝对值小于1.96,表明近25a的降水量呈现不显著的总体下降的趋势,降水量变异系数为14.9%。通过对海南岛平均降水进行Mann-Kendall突变点检验,在0.05的置信水平下 $UF(k)$ 与 $UB(K)$ 存在7个交点,并不能直观得到降水突变的年份。因此采用累积距平的方法对海南岛1996—2020年的降水量进行突变分析^[25]。距平曲线显示海南岛降水量高于平均值的有9a,低于平均值的有9a,丰水年与枯水年频次比较接近。累积距平曲线显示,研究时段内出现两次突变,第一次突变出现在

2002年,在2002年以前降水量在波动中增加,在2002年以后降水量呈现从下降到增加的波动,在2014年增加至最大,成为第2个突变点,从2014年以后,海南岛的降水出现下降的趋势(图3)。

海南岛多年平均降雨量的全局Moran's I 值为0.997,通过了置信水平95%检验,表明其表现出较强的聚集特征,具有很强的空间正相关性,空间变异性较小。基于局部Moran's I 指数对海南多年平均降雨量进行局部空间变异性分析,可以看出其在空间上主要呈现“高一高”和“低—低”在东、西部分别聚集分布的特征(图4)。

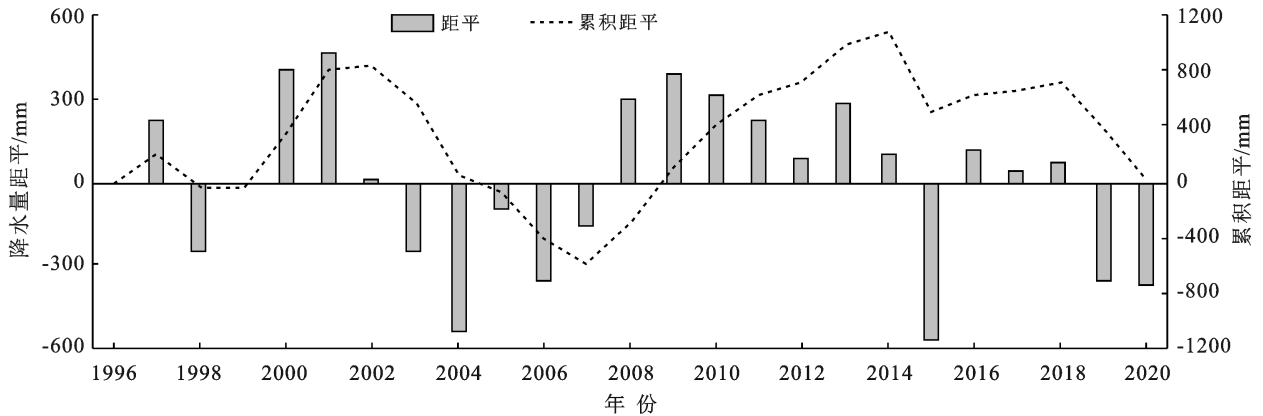


图3 1996—2020年海南岛降水量距平和累积距平特征

3.2 水源涵养空间分布特征

海南岛水源涵养量在空间格局上呈现东中部高,西部低的分布特征(图5)。水源涵养量高值区主要集中在海南岛中东部、海南岛东部沿海海岸带和海口市西部的部分地区;低值区主要集中在西部大部地区、南部、定安县北部及文昌西部地区。海南岛多年平均降水量空间分布由东到西递减;实际蒸散发受降水量及土地利用类型的综合影响,主要表现为耕地和建设用地区域的实际蒸散较低,林地受降水量影响,

西部和海口市北部的实际蒸散发较高,而东中部区域蒸散相对较低。海南岛各地类的水源涵养能力从大到小的排序依次为:未利用地(132.62 mm)、林地(57.68 mm)、园地(44.04 mm)、草地(40.67 mm)、建设用地(16.44 mm)、耕地(15.27 mm)和水域(7.56 mm)。

水源涵养高值区分布在东中部的原因在于该区域的森林覆盖面积广,尽管实际蒸散发相对较高,大部分处于932~1 143 mm之间,但该地区多年平均降水量为2 254~2 411 mm,是海南岛多年平均降水

量最丰沛的地区,植被和土壤截留的降水相对较多,导致区域水源涵养量较高。海南岛东部沿海海岸带由于种植有大量的海岸防护林,加上降水量丰沛,因此在空间上具有明显的水源涵养高值带状分布。海口市西部区域主要分布着火山熔岩湿地,已有众多研究均表明湿地具有较强的水源涵养能力^[26-27],因此该区域为水源涵养高值区。水源涵养西南部低值区是因为区域平均降水量少,尽管大部分区域分布有林地,但同时由于植被的实际蒸散发相对较高,导致被截留的降水少,使其水源涵养低。定安县北部及文昌西部地区水源涵养低值区,原因在于区域土地利用类型以耕地为主。林地的水源涵养能力较强,且其面积约占海南岛整体面积的 48%,对海南岛水源涵养总量贡献率最高达 68%。

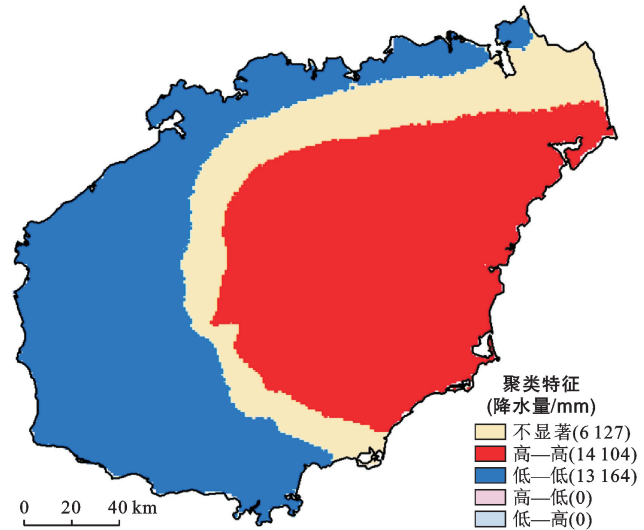


图 4 海南岛多年平均降水量 LISA 聚类分析

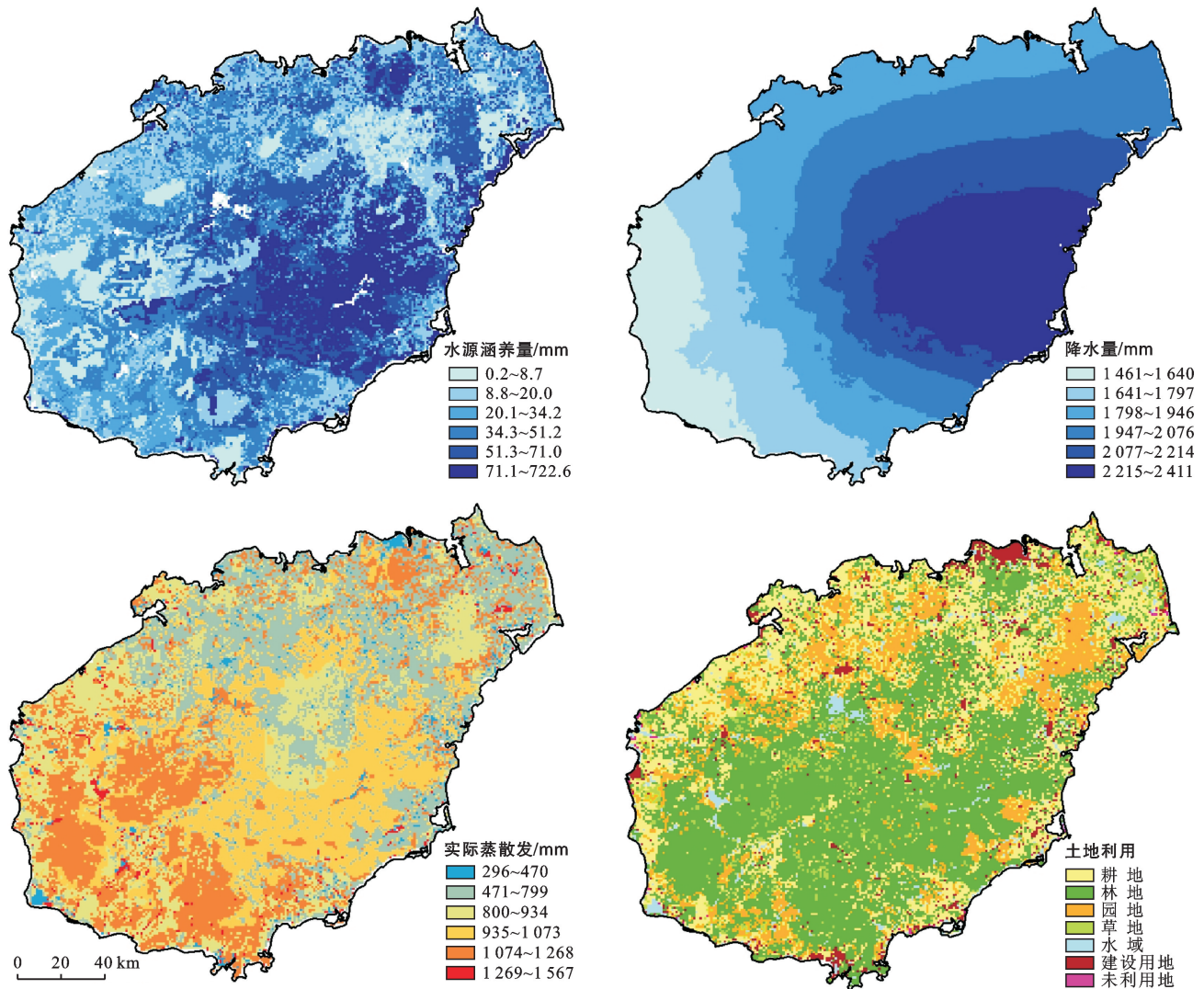


图 5 海南岛水源涵养、降水量、实际蒸散发、土地利用类型空间分布

3.3 空间自相关分析

以 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的格网为单位,对海南岛水源涵养量进行全局空间自相关分析。结果显示,全局

Moran's I 值为 0.553,且其 p 值和 Z 值均通过显著性检验,说明海南岛水源涵养量有较强的空间正相关性,空间聚集特征明显(图 6)。

局部自相关 LISA 聚类图可以看出(图 7),海南岛水源涵养显著中以大多以“高一高”型或“低—低”型的空间格局聚集,为空间正相关,空间关联聚集效果明显。“高一高”型主要分布在海南岛东中部、东部沿海海岸带以及海口市西部地区,与水源涵养高值区分布一致。“低—低”型主要聚集在海南岛内西南部、北部和东北部分地区,区域以耕地、建设用地为主,水源涵养能力弱,同时叠加降水量少及实际蒸散发高的原因,因而该区域呈“低—低”聚集分布。“高一低”型聚集即水源涵养量呈现中高周低分布,其分布较为零散,且大多数分布在“低—低”型周边,例如在中西部表现为建设用地在耕地中建立,东北部表现为园地被耕地所包围或建设用地被耕地包围;“低高”型聚集主要分布在“高高”型周边,如在海南岛南部,建设用地被园地、林地所包围,中部呈现的是林地地区出现耕地,西北部林地与耕地的过渡区域,耕地周边出现林地。此外,当相邻区域的实际蒸散发差异较大时,也是导致显著空间异质性的原因之一。

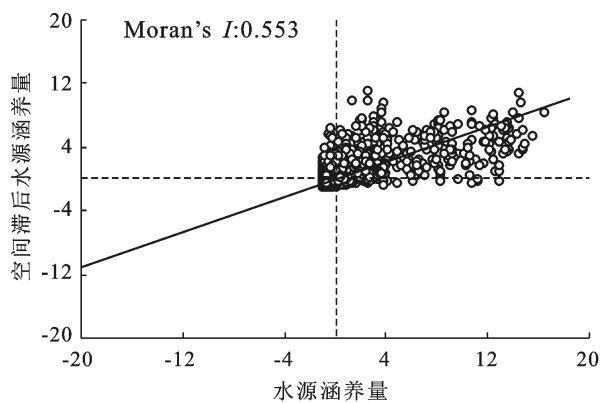


图 6 海南岛水源涵养量局部自相关分析莫兰指数

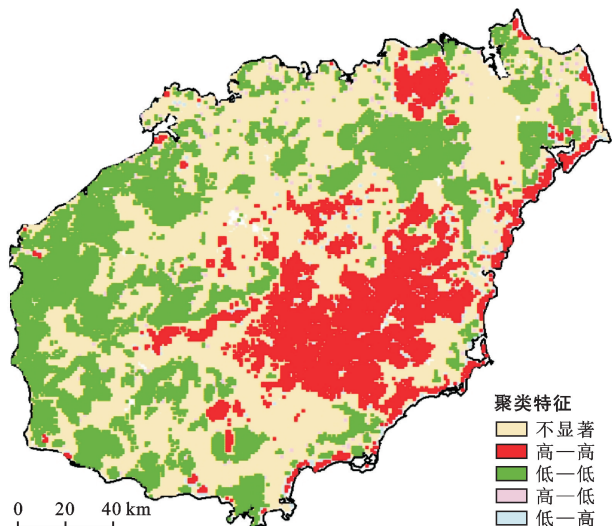


图 7 海南岛水源涵养量局部自相关 LISA 聚类结果

3.4 水源涵养影响因素的地理探测

基于上述空间自相关分析可知海南岛水源涵养量存在空间异质性。为进一步探究海南岛水源涵养空间分异的影响,利用地理探测器对其影响因素进行探测。

3.4.1 水源涵养影响因子定量分析 基于因子探测的结果显示(表 4),各因子对水源涵养量的解释力从大到小依次为降水量、实际蒸散发、土地利用类型和高程,4 个因子均通过显著性检验。降水量的 q 值最高,是影响水源涵养空间格局的主要因素。海南岛属于热带季风海洋性气候,雨量充沛,但降水量时空分布不均,受海南岛中部海拔高的地形影响,东部多雨,最大站点年均降水量约为 2 335.87 mm,西部降雨少,最大站点年均降雨量约为 1 681.29 mm,而降水对水源涵养、截留和汇流等有重要影响,因此海南岛水源涵养量总体上与降水量的空间格局一致性较高。土地利用类型对水源涵养量的影响力排第二位,由于各土地利用类型的水源涵养能力不同以及海南岛土地利用变化的空间分布,也会影响海南岛水源涵养空间分布,但影响力不及降水量。海南岛水源涵养空间分布解释力第三的因子是实际蒸散发,根据水量平衡原理,降水量相等的情况下,实际蒸散发越高,即意味着地表蒸发或植被蒸腾越多,区域水源涵养量越少。4 个因子中,高程对水源涵养的影响力最弱。

表 4 海南岛水源涵养影响因子探测及空间自相关分析结果

因子	降水量	土地利用类型	实际蒸散发	高程
q	0.157	0.085	0.084	0.014
p	0.000	0.000	0.000	0.000

3.4.2 水源涵养因子的交互作用探测研究 交互作用探测结果表明(表 5),影响因子的两两交互均增强对水源涵养的解释力。交互作用解释力最高的是降水量与土地利用类型的作用,其对水源涵养空间分布的解释力是土地利用类型单因子的 2.76 倍,说明两者的交互作用是影响水源涵养空间分布的最主要原因。交互作用解释力差异最大是降水量与高程,交互作用是高程单因子作用的 12.43 倍,说明在相同海拔下,由于降雨量的不同,导致水源涵养量出现较大差异,这也是海南中部山区东西两侧的水源涵养空间分布差异较大的主要原因。

由于降雨量对水源涵养空间分布的影响最为显著,因此降雨量与其他因子解释力均大于其他因子之间的交互作用。例如,降雨量与高程交互作用是土地利用类型与高程交互作用的 1.93 倍,即在相同海拔,降雨量对水源涵养量的影响显著大于土地利用类型。

降水量与土地利用类型的交互作用是实际蒸散发与土地利用类型的交互作用的 1.59 倍,其对水源涵养空间分布的作用力更强,即对同一土地利用类型而言,降水量对其水源涵养量的影响大于实际蒸散发。

表 5 海南岛水源涵养影响因子交互作用探测

因子	降水量	土地利用类型	实际蒸散发	高程
降水量	0.157			
土地利用类型	0.227	0.085		
实际蒸散发	0.205	0.143	0.084	
高程	0.174	0.090	0.099	0.014

4 讨论与结论

4.1 讨论

海南岛降水量、实际蒸散发和土地利用类型对水源涵养量时空变化分布具有密切关系,这几个因素的空间分布具有较高的一致性。这一点与太湖^[11]及三江源等^[28]地区的研究一致。1996—2020 年,海南岛水源涵养总量呈现 3 个波峰两个波谷,与降水量的变化特征基本一致,说明降水量对水源涵养有明显的直接影响。海南岛林地对水源涵养服务中起到了重要作用,其水源涵养能力较强,覆盖面积大,在土地利用类别中对海南岛水源涵养总量的贡献度超过 2/3。尽管水源涵养量很大程度取决于气候降雨因素,但林地可通过水分再循环及降雨再分配,在一定程度上影响局部气候^[23,29]。

海南岛的水源涵养能力空间特征及空间自相关结果可作为海南岛生态系统水源涵养重点区域的划定依据,如水源涵养值高的海南中东部、东部沿海海岸防护林带以及海口市西部区域以及自相关中“高一高”集聚区域是一致的,这些区域都可考虑作为生态系统水源涵养重点功能区加以规划保护,以维持提高生态系统水源涵养服务功能稳定性。此外,在海南岛中部山区,拥有中国分布最集中、保存最完好、连片面积最大的热带雨林,其水源涵养能力有必要深入研究。由于受人类活动影响较大,近 30 a 期间海口市西部的火山熔岩湿地,面积缩减退化严重,严重损害生态系统服务功能^[26]。因此,须重视火山熔岩湿地保护以及实施湿地恢复措施^[30]。局部自相关分析中,海南岛水源涵养呈现出“低—高”或“高一低”的空间异质性区域,应实施严格的森林保护措施,避免建设用地占用林地以及退耕还林工程等,以改变及提高区域生态系统的水源涵养功能。尤其是东部沿海的海岸防护林带,沿海防护林是抵御台风、海啸等灾难兼具美化环境功能,但目前呈现出来的“低高”分布是

由于存在养殖业占用防护林或部分建设项目导致防护林出现断带等现象的存在,从而威胁着沿海防护林的生态作用。所以,应结合不同区域的防护林相关问题,实施退耕还林或修复灾损林带,构建完善的沿海防护屏障,增强其生态系统服务功能。

地理探测器表明降水量是海南岛的水源涵养分布的主导因素,且降水量与其他因素的交互显著增强对水源涵养的影响。例如在降雨量高且海拔较高的海南岛东部地区,实施天然林保护、退耕还林等重点生态工程建设,是保持或提高海南岛水源涵养服务功能的有效手段之一。西南部地区,因处于背风坡导致降雨量低,且森林的蒸散作用较强,因此该区域森林对水源涵养功能保持作用并不如东中部显著。因此,未来对于海南岛生态系统功能的保护必须充分考虑气候变化影响,通过建立相应措施,才能确保海南岛的生态系统水源涵养有效地适应全球变化。

InVEST 模型基于水量平衡原理,简化产水量及水源涵养估算步骤,能够基本反映海南岛的水源涵养时空格局。但本研究仍存在一定的不足。例如模型中各项参数如蒸散系数、最大根系深度及流速系数均获取于已有文献经验数据,在一定程度上影响了评估结果的精度。因此,模型参数本地化是未来研究的重点。另外,海南岛水源涵养侧重于自然因素的影响研究,而对 GDP、人口或政策影响等社会经济因素未予以考虑,未来要加强这方面研究。

4.2 结论

本研究基于 InVEST 模型产水量模型以及相关系数修正模拟海南岛水源涵养量,采用地理探测器定量分析降雨量、实际蒸散发、土地利用类型和高程因子对水源涵养空间分布的影响。

(1) 1996—2020 年海南岛多年平均水源涵养总量为 $1.42 \times 10^9 \text{ m}^3$,研究期间水源涵养总量略微下降,下降速率为 0.22 mm/a 。海南岛水源涵养量总体上呈现东中部高,西南部低空间分布特征。各地类中,林地水源涵养能力强,同时其面积占比大,林地在海南岛生态系统水源涵养功能发挥重要作用。

(2) 海南岛水源涵养呈现显著的空间正相关性,空间聚集特征明显。水源涵养重点区域主要分布在海南岛东中部、东部沿海海岸带以及海口市西部的火山熔岩湿地。在水源涵养量的空间异质性明显区域,避免建设用地占用林地,同时实施退耕还林工程及严格生态保护措施,以维持区域生态系统水源涵养功能稳定。

(3) 各因子的地理探测结果表明,降水量对水源涵养空间分布解释力最强,土地利用类型和实际蒸散

发的解释力相对次之,高程最弱。因子的交互作用增强水源涵养空间分布格局的解释力。其中,降雨量与土地利用的协同作用最显著,说明气候作用和人类活动主导了海南岛水源涵养空间格局。因此,未来既要充分考虑气候变化对水源涵养的影响,通过建立有效措施确保海南岛生态系统水源涵养功能有效适应全球变化,又要通过土地资源的合理利用与管理,确保土地生态安全。

[参 考 文 献]

- [1] 王云飞,叶爱中,乔飞,等.水源涵养内涵及估算方法综述[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(6):1041-1071.
- [2] United Nations Environment Program. Millennium ecosystem assessment: ecosystems and human wellbeing [M]. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [3] 武文慧.浅析我国水资源现状[J].国土资源科技管理,2005,22(4):71-74.
- [4] 高月明,吴文俊,蒋洪强,等.基于全球陆地生态系统的水源涵养服务价值时空变化分析[J].环境科学研究,2021,34(11):2696-2705.
- [5] 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.
- [6] 司今,韩鹏,赵春龙.森林水源涵养价值核算方法评述与实例研究[J].自然资源学报,2011,26(12):2100-2109.
- [7] 唐玉芝,邵全琴.乌江上游地区森林生态系统水源涵养功能评估及其空间差异探究[J].地球信息科学学报,2016,18(7):987-999.
- [8] 刘景红,郑晓,樊俊美,等.基于 SWAT 模型的浑河中上游水源涵养服务价值评估[J].应用生态学报,2021,32(11):3905-3912.
- [9] 赵雪雁,马平易,李文青,等.黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化[J].地理学报,2021,76(11):2780-2796.
- [10] 顾铮鸣,金晓斌,沈春竹,等.近 15 a 江苏省水源涵养功能时空变化与影响因素探析[J].长江流域资源与环境,2018,27(11):2453-2462.
- [11] 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.
- [12] 陈姗姗,刘康,包玉斌,等.商洛市水源涵养服务功能空间格局与影响因素[J].地理科学,2016,36(10):1546-1554.
- [13] 黄宝荣,欧阳志云,张慧智,等.海南岛生态环境脆弱性评价[J].应用生态学报,2009,20(3):639-646.
- [14] 刘贤词,王晓辉,邢巧.海南岛中部山区生态系统水源涵养功能研究[J].节水灌溉,2010(7):65-66.
- [15] 张翠萍,姜佳,白杨.重点生态功能区建设对海南中部山区水源涵养功能的影响[J].安徽农业科学,2018,46(5):66-72.
- [16] 文志,赵赫,刘磊,等.土地利用变化对海南土壤水源涵养功能的影响[J].应用生态学报,2017,28(12):4025-4033.
- [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] 彭娜,周立志.基于地理探测器的菜子湖群湿地景观格局变化及驱动因子分析[J].水资源保护,2021,37(6):168-176.
- [19] 王欢,高江波,侯文娟.基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因[J].地理学报,2018,73(9):1674-1686.
- [20] 李伟光,易雪,蔡大鑫,等.基于 MOD16 蒸散量的海南岛干旱特征分析[J].自然灾害学报,2016,25(5):176-183.
- [21] 李光伟,李春鸾,敖杰,等.海南岛大气降水量的时空分布特征研究[J].自然灾害学报,2015,24(5):129-138.
- [22] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale [J]. Water Resources Research, 2001, 37(3):701-708.
- [23] 韩念龙,张伟璇,张亦清.基于 InVEST 模型的海南岛产水量的时空变化研究[J].海南大学学报(自然科学版),2021,39(3):280-287.
- [24] 韩念龙,张亦清,张伟璇.海南岛土地利用及产水量时空变化模拟[J].水资源保护,2022,38(2):119-127.
- [25] 刘政鸿.陕西省近 50 年来降水量时空变化特征分析[J].水土保持研究,2015,22(2):107-112.
- [26] 吴庭天,陈宗铸,雷金睿,等.琼北火山熔岩湿地生态安全格局研究[J].生态学报,2020,40(23):8816-8825.
- [27] 谢亚军,谢永宏,陈心胜,等.湿地土壤水源涵养功能研究进展[J].湿地科学,2012,10(1):109-115.
- [28] 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.
- [29] 朱西存,赵庚星.局地不同下垫面对气象要素的影响及其气候效应[J].中国生态农业学报,2009,17(4):760-764.
- [30] 张华,袁兴中,贾恩睿,等.海口羊山湿地区的多用途管理区规划[J].湿地科学,2020,18(2):166-172.