主持人：宋希强，任明迅　Open Access

海南“三江源”水源涵养量时空演变特征及驱动因素分析

何倩倩[1,2#]，任明迅[1,2*]

（1. 海南大学 生态学院/海南省环南海陆域生物多样性国际联合研究中心，海南 海口 570228 中国；2. 海南国家公园研究院/海南国家公园保护与发展重点实验室，海南 海口 570203 中国）

摘　要：海南“三江源”区域是海南 3 大河流南渡江、昌化江和万泉河的共同发源地和最重要的汇水区，位于海南热带雨林国家公园的中央地带。本研究综合考虑水文、地形地貌、植被条件及国家公园管理边界等，科学划定了海南“三江源”区域。采用 2013、2018 和 2023 年共 3 期数据，利用 InVEST 模型评估水源涵养量及其动态变化趋势，并利用最优参数地理探测器（OPGD）探究水源涵养量时空变化的主要驱动因素。结果表明：1）2013、2018 和 2023 年的海南“三江源”水源涵养量分别为 19.4×10^8、8.97×10^8、10.66×10^8 m^3，呈现先下降后小幅回升的阶段性变化特征，体现出筹建于 2019 年的海南热带雨林国家公园对海南“三江源”水源涵养量的积极作用；2）水源涵养量高值区主要集中在五指山、鹦哥岭和黎母山中高海拔山区；3）降水量是水源涵养空间分异的主导因素，q 值为 0.525 ~ 0.654。高程次之，潜在蒸散发和气温也具有较高解释力。降水量与高程交互作用的解释力最强，q 值为 0.779 ~ 0.804。本研究阐明了海南“三江源”水源涵养量的时空演变特征及其影响因素，有助于海南水资源管理和海南热带雨林国家公园水源涵养量优化提升策略的科学制定。

关键词：海南；水源涵养；时空演变；驱动因素

中图分类号：X171.4　**文献标志码：**A　**文章编号：**1674 − 7054(2026)05 − 0748 − 12

何倩倩, 任明迅. 海南“三江源”水源涵养量时空演变特征及驱动因素分析[J]. 热带生物学报 (中英文), 2026, 17(5): 748−759.　DOI: 10.15886/j.cnki.rdswxb.20250206　CSTR: 32425.14.j.cnki.rdswxb.20250206

水源涵养是生态系统在一定的时空范围和条件下，将水分保持在系统内的过程和能力，是生态系统最为重要的服务功能之一[1]。水源涵养量对区域气候、土壤、水文和植被状况产生直接影响，不仅对生态系统健康、生物多样性维持与生境质量具有举足轻重的作用，而且是人类生存与发展的重要基础条件[2]。如何科学识别水源涵养服务重要区域，量化水源涵养量及其时空演变规律和驱动因素，一直是学术界讨论与研究的热点[3−5]。

海南是中国唯一同时建设国家生态文明试验区、国家公园和中国特色自由贸易港的省份，生态保护和经济发展需要加强协调。海南中南部山区的自然植被，尤其是海南热带雨林国家公园内的原始森林是整个海南水源涵养的关键区域，直接决定着海南的水资源与水安全[6]。其中，海南最大的 3 条河流——南渡江、昌化江和万泉河，都发源于海南热带雨林国家公园的黎母山、五指山与鹦哥岭形成的三角地带，海南“三江源”是海南 3 大河流的共同发源地和最重要的汇水区，是整个海南的水源涵养核心区域，维系着海南水资源的生态平衡与安全，也是海南实现生态安全、保障生态服务功能、支撑人口与经济发展的核心区域。因此，这一区域是《海南省总体规划（2015—2030 年）》生态保护格局中生态保护和水土涵养的核心空间之一，在《全国生态功能区划》中被列入海南中部生物多样性保护与水源涵养功能区，具有极其重要的保护价值。Li 等[6] 揭示了海南热带雨林国家公园的土地利用类型变化及其对生态系统服务功能的空间自相关特点；Lei 等[7] 和 Yao 等[8] 深入研究了海南热带雨林国家公园水源涵养量等生态系统服务功能的时空变化特征。但这些研究都是从整个海南热带雨林国家公园的角度分析水源涵养

CC BY 4.0
收稿日期：2025−12−30　**修回日期：**2026−02−23

基金项目：海南省重点研发项目（ZDYF2025SHFZ037）

#**第一作者：**何倩倩（1998—），女，海南大学生态学院 2023 级硕士研究生。E-mail: 2352564184@qq.com

*__通信作者：__任明迅（1976—），男，教授，博士生导师。研究方向：生物多样性与生态文化。E-mail: renmx@hainanu.edu.cn

量,较少涉及局域水源涵养量的精细量化研究,在一定程度上限制了对海南水资源优化提升和海南热带雨林国家公园重点水源涵养区域管理的实践指导价值。

本研究综合考虑水文条件、地形地貌特征、植被条件及国家公园管理边界等[9],科学划定了海南“三江源”区域。将海南热带雨林国家公园境内的黎母山、五指山与鹦哥岭形成的三角地带中至少同时为两大河流(或两条一级支流)提供水源的山体划为海南“三江源”区域。海南“三江源”区域主要包括黎母山全境、五指山全境和鹦哥岭中东部,该范围涵盖了 3 大河流的主要补给区。目前,针对海南这种全球气候变化导致水源涵养量在旱季雨季变动明显、3 大河流的源头与汇水区集中在很小的一个区域的特殊情况,类似的研究较为欠缺。因此,本研究采用 2013、2018 和 2023 年共 3 期数据,利用 InVEST 模型,评估水源涵养量及其动态变化趋势,并利用最优参数地理探测器模型[10−11],探究水源涵养量时空变化的主要驱动因素,以及海南热带雨林国家公园建立(2019 年筹建、2021 年正式批准建设)对水源涵养能力的可能作用,以期为海南水资源管理和水源涵养量优化提升策略,并为海南热带雨林国家公园管理提供科学依据。

1　研究区概况

研究区位于南渡江、昌化江、万泉河 3 大河流的上游,地理位置(18°42′35″ ~ 19°14′16″ N, 109°12′48″ ~ 109°48′42″ E)涉及五指山、琼中、白沙、昌江等 4 个县(市),总面积 1 780 km^2,约占国家公园总面积的 41.7%。其中,包含的国家公园五指山分区和黎母山分区面积分别约为 537 和 541km^2,包含的鹦哥岭分区中东部区域面积为 701 km^2。

该区山地、丘陵地形广布,山体陡峭,地形起伏较大,海拔为 180 ~ 1 867 m,其中,五指山为海南最高峰,主峰海拔达 1 867 m。该区年均气温在 17 ~ 24 ℃,为热带海洋性季风气候,年降水量大,雨水充沛,年均降水量 1 800 mm 以上,但时空分布不均,干湿季节明显。土壤以热带红壤和砖红壤为主,局部高海拔山地分布有山地赤红壤和山地黄壤。植被类型以热带天然林为主体,是海南热带雨林国家公园天然林保存最完整、连片分布程度最高的区域之一。

本研究参照邓雅文等[9]提出的基于多特征指标和层次聚类分析的河源市自动划分方法,结合海南 3 大河流(南渡江、昌化江、万泉河)的水系特征和海南热带雨林国家公园管理边界,首次明确界定海南“三江源”区域。首先,基于高程数据,采用均值变点法确定最佳汇流累积量阈值,提取子流域单元作为河源区划分的基本单元。其次,从水文条件(汇流累积量、河网密度)、地形地貌(高程、坡度)和植被条件(植被覆盖度、土地利用类型)3 个维度构建多特征指标体系,对各子流域单元的指标均值进行极差标准化处理。然后,采用 ward 聚类分析法进行层次聚类分析,聚类数设置为 2 ~ 9,将 8 次聚类结果中被判定为河源市的频次≥50% 的子流域单元进行组合,得到初步划定的海南“三江源”区域。最后,将初步划定结果与海南热带雨林国家公园管理边界(五指山分区、黎母山分区、鹦哥岭分区)进行叠加分析和人工目视修正,确保 3 大河流源头均包含在内且保持分水岭边界的完整性。最终确定的海南“三江源”区域总面积 1 780 km^2,包含黎母山全境、五指山全境和鹦哥岭中东部(图 1)。

2　研究方法

2.1　数据来源　本研究采用 2013、2018、2023 年这 3 年的多源数据开展研究。构建 InVEST 模型所需输入数据包括年降水量、年潜在蒸散发、植物根系限制层深度、植物可利用水分含量、土地利用类型等。根据模型计算得到逐年产水量,再利用地形指数、流速系数和土壤饱和导水率数据,对逐年产水量进行修正,得到逐年水源涵养量。模型计算中用到的所有栅格数据利用 Arcgis v10.8 软件统一重采样至空间分辨率为 30 m,使用投影坐标系 Krasovsky_1940_Albers。此外,本研究使用的数据还包括归一化植被指数(NDVI)、温度、高程等,主要用于水源涵养量驱动因素分析(表 1)。

本研究所采用的土地利用数据来源于地球资源数据云平台(https://www.gis5g.com),空间分辨率为 30 m,根据 LUCC 分类体系将土地利用类型分为 6 个一级类,25 个二级类。采用二级分类体系,一级分类(6 类)基于土地利用属性划分,包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地;

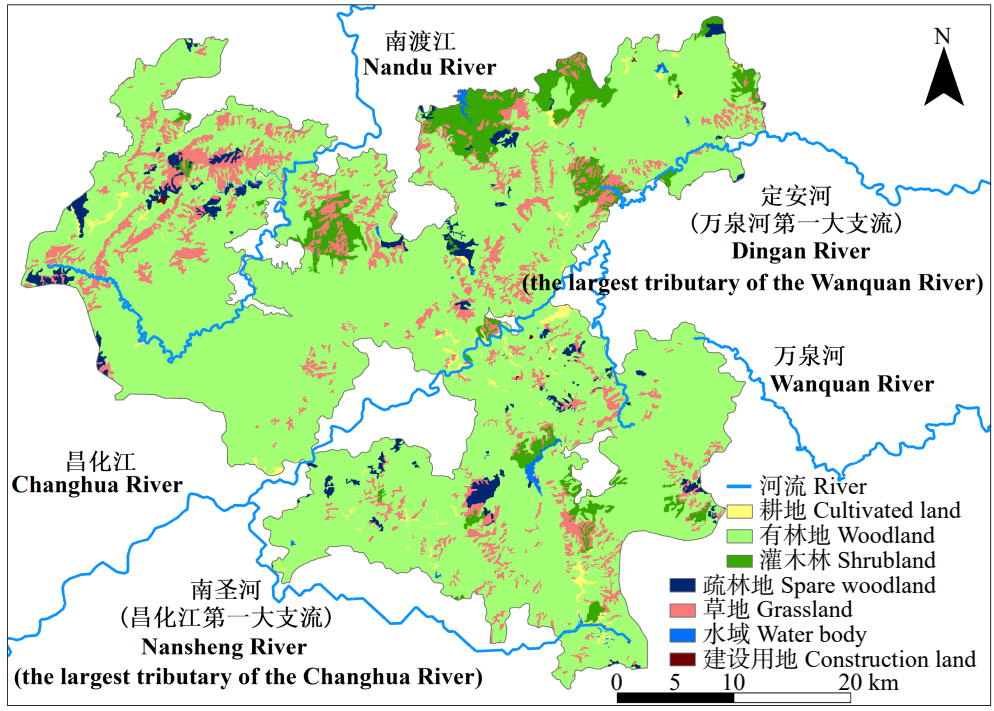

图 1 海南“三江源”区域土地利用类型分布图

Fig. 1 Land use type distribution map of the "Sanjiangyuan" area of Hainan Island

二级分类(25 类)依据土地覆被自然属性细分(耕地分为水田/旱地，林地分为有林地/灌木林等)。该体系由中国科学院地理科学与资源研究所刘纪远[12] 提出，作为中国土地变化研究的基准框架，其数据已应用于国土规划、生态评估及全球变化研究，分类精度通过人机交互验证确保可靠性，在适用性方面具有重要的现实意义。

根据海南水资源公报(https://swt.hainan.gov.cn)及相关文献研究成果[3−4,8,13]，当 Z 取值为 12 时，InVEST 模型产水模块的模拟效果好。

根据 InVEST 模型用户指南、联合国粮农组织(FAO)的《作物蒸散量作物需水量计算指南》，以及参考相关文献的研究成果[3−4,8,13]，InVEST 模型输入所需的生物物理系数见表 2。

2.2 研究方法

2.2.1 产水量评估模型 采用 InVEST 模型中的产水模块对海南“三江源”区域产水量进行评估。InVEST 模型产水模块基于水量平衡原理，认为栅格单元的降水量减去实际蒸散发后的水量即为产水量[3]。模型相关算法如下：

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

式中，Y_{xj}为 j 类土地利用类型栅格单元 x 的年产水量，单位 mm; AET_{xj}为 j 类土地利用类型栅格单元 x 的年实际蒸散量，单位 mm; P_x为栅格单元 x 的年降水量，单位 mm。

基于 Budyko 的水热耦合平衡假设[14] 计算水量平衡的蒸散部分。

$$\frac{AET_{xj}}{P_x}=\frac{1+w_xR_{xj}}{1+w_xR_{xj}+\dfrac{1}{R_{xj}}},$$

$$w_x=Z\times\frac{AWC_x}{P_x},$$

$$R_{xj}=\frac{k_{xj}ET_{0x}}{P_x},$$

$$AWC_x=\mathrm{Min}(\mathrm{Max}soilDepth,\ RootDepth)PAWC_x。$$

式中，w_x为描述自然气候与土壤性质的非物理参数; AWC_x为栅格单元 x 的植物有效利用水分含量，单位 mm; Z 为 Zhang 系数，又称季节常数，表示研究区降水特征的常数，取值范围 1 ~ 30; R_{xj}为 j 类土地利用类型栅格单元 x 的 Budyko 干燥指数，表示潜在蒸发量与降水量的比值; k_{xj}为 j 类土地利用类型栅格单元 x 的植被蒸散系数; ET_{0x}为栅格单元 x 的潜在蒸散量，单位 mm; Max$soilDepth$为最大土壤深度，单位 mm; $RootDepth$为根系深度，单位 mm; $PAWC_x$为栅格单元 x 的植物可利用水分含量，单位 mm，取值范围 0 ~ 1。

基于世界土壤数据库，根据周文佐[15] 提出的

表 1　数据来源

Tab. 1　Data source

数据名称 Data	缩写 Abbr.	数据来源 Data source	空间分辨率 Spatial resolution
降水量 Precipitation	Pre	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/home)	1 km
潜在蒸散发 Potential evapotranspiration	Pet	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/home)	1 km
温度 Temperature	Tem	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/home)	1 km
土壤数据 Soil data	SD	世界土壤数据库(https://gaez.fao.org/pages/hwsd, Harmonized World Soils Database version 2.0, HWSD v2.0)	1 km
土壤深度 Soil depth	SDD	国家地球系统科学数据中心-土壤分中心(http://soil.geodata.cn)	90 m
土地利用类型 Land use and land cover	LULC	地球资源数据云平台(https://www.gis5g.com)	30 m
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	NDVI	美国国家航空航天局地球科学数据系统(https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13A3.006)	1 km
数字高程 Digital elevation model	DEM	地理空间数据云 (https://www.gscloud.cn)	30 m

表 2　生物物理系数

Tab. 2　Biophysical coefficient

编码 Lucode	土地利用 LULC_desc	蒸散系数 Kc	植被根系深度/mm Root_depth	实际蒸发值 LULC_veg	流速系数 Vel
11	水田 Paddy	0.75	200	1	900
12	旱地 Dryland	0.50	300	1	800
21	有林地 Woodland	1.00	3 000	1	200
22	灌木林 Shrubland	1.00	2000	1	250
23	疏林地 Spare woodland	0.85	1 500	1	300
24	其他林地 Other woodland	0.85	1 000	1	400
31	高覆盖度草地 High coverage grassland	0.65	1 750	1	500
32	中覆盖度草地 Medium coverage grassland	0.50	1 300	1	550
33	低覆盖度草地 Low coverage grassland	0.30	1 000	1	600
41	河渠 River	1.00	1	0	2 012
43	水库坑塘 Reservoir and pond	1.00	1	0	2 012
52	农村居民点 Rural residential areas	0.50	1	0	2 012
53	其他建设用地 Other construction land	0.30	1	0	2 012

经验估算模型计算 $PAWC$(图 2)。

$$PAWC = 54.509 - 0.132sand - 0.003(sand)^2 - 0.055silt - 0.006(silt)^2 - 0.738clay + 0.007(clay)^2 - 2.688OM + 0.501(OM)^2。$$

式中, $sand$为土壤砂粒含量(%); $silt$为土壤粉粒含量(%); $clay$为土壤黏粒含量(%); OM为土壤有机质含量(%)。

2.2.2　水源涵养量估算　在产水量的基础上, 通过地形指数、地表流速系数、土壤饱和导水率对产水量进行修正得到水源涵养深度(water retention)[4]。相关算法如下。

$$Retention_{xj} = \min\left(1,\ \frac{249}{Vel_{xj}}\right) \times \min\left(1,\ \frac{K_{sat\,x}}{300}\right) \times \min\left(1,\ \frac{0.9TI_x}{3}\right) Y_{xj},$$

$$TI_x = lg\left(\frac{drainagearea}{soil_{depth_x} slope_x}\right),$$

式中, $Retention_{xj}$为 j 类土地利用类型栅格单元 x 的水源涵养深度, 单位 mm; Vel_{xj}为 j 类土地利用

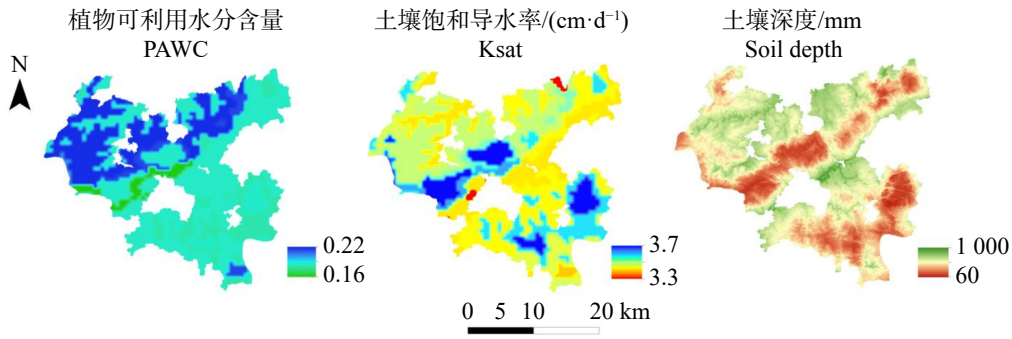

图 2 水源涵养模型参数

Fig. 2 Water conservation model parameters

类型栅格单元 x 的流速系数; $K_{sat\,x}$为栅格单元 x 的土壤饱和导水率，单位(m·d^{-1}); TI_x为栅格单元 x 的地形指数; $drainagearea$为集水区栅格数量; $soil_{depth_x}$为栅格单元 x 的土壤深度，单位 mm; $slope_x$为栅格单元 x 的百分比坡度。

土壤饱和导水率(K_{sat})采用 Cosby 土壤传递公式[16] 计算。

$$K_{sat} = 1.148 \times 10^{(-0.6+0.012\,6\times sand-0.006\,4\times clay)}。$$

在 ArcGIS 软件中，根据每个栅格的水源涵养深度(mm)，使用分区统计工具按海南“三江源”区域及其分区(五指山、黎母山、鹦哥岭)面积分别计算水源涵养量。水源涵养量(m^3)计算公式:

$$V_x = \frac{Retention_x}{1\,000} \times A。$$

式中，V_x为栅格单元 x 的水源涵养量，单位 m^3; $Retention_x$为栅格单元 x 的水源涵养深度，单位 mm; A 为单个栅格单元的面积(本研究采用空间分辨率为 30 m 的数据，栅格面积为 900 m^2)。

2.2.3 最优参数地理探测器 本研究以 InVEST 模型模拟得到的水源涵养量为因变量，采用最优参数地理探测器方法探究水源涵养量的空间分异特征及其主要驱动因素，最优参数地理探测器主要基于 R 语言软件里的 GD 包来实现。

地理探测器是探测空间分异性，以及定量揭示其背后驱动因素的一种统计学方法，包含 4 个探测器: 分异及因子探测、交互作用探测、风险区探测以及生态探测[10]。最优参数地理探测器是基于传统地理探测器改进得到的模型，它优化了空间数据离散化过程和空间分析尺度，确定了地理探测器模型的最佳参数组合，显著提升了空间分析的准确性和有效性[11]。本研究采用最优参数地理探测器计算所有连续型数据在不同分级方式下以及不同间断数下的值，使用自然断点分类、分位数分类、相等间隔法、几何间隔分类和标准差分类 5 种分类方式，选择 q 值最高的参数组合(分类方法与分类数)进行离散化，q 值最高的组合即为驱动因素的最优空间离散化，从而探测研究区水源涵养量的空间分异性和影响因子对水源涵养量变化的解释力。

在参数优化的基础上，本研究主要使用模型中的因子探测器和交互作用探测器。通过因子探测分析单一影响因素对研究区水源涵养量的解释程度，通过交互作用探测识别双因素共同作用时对研究区水源涵养量的解释程度，解释力的强弱通过比较 q 值的大小来反映。双因子交互作用的强弱及类型详见表 3。具体计算公式:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2}\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2。$$

式中，q为某影响因子对水源涵养量空间异质性的影响力，取值 [0,1]，q值越大，说明解释程度越强; $h = 1,\cdots,L$为变量 Y 或因子 X 的分层(Strata)，即分类或分区; N和N_h分别为全区和层 h 的单元数; σ_h^2和σ^2分别是层 h 和全区的 Y 值的方差。

3 结果与分析

3.1 降水量、潜在蒸散量和水源涵养量的时空变化特征 2013—2023 年，以 5 年为一个时间段，通过 InVEST 模型评估得到海南“三江源”区域的水源涵养量。综合降水量和潜在蒸散量变化来看，总体而言，海南“三江源”区域 2013、2018 和 2023 年 3 期的降水量和水源涵养量都呈现“先下降，后小幅回升”的变化特征，潜在蒸散量整体变化幅度较小，降水量和潜在蒸散量整体具有相反的空间分布特征(图 3)。降水量在 2013 年最高(1 860 mm)，

表 3　双因子交互作用类型

Tab. 3　Types of two-factor interaction

判据 Criterion	交互作用 Interaction
$q(X1\cap X2) < \mathrm{Min}\,(q(X1), q(X2))$	非线性减弱 Nonlinear weakening
$\mathrm{Min}[q(X1), q(X2)] < q(X1\cap X2) < \mathrm{Max}[q(X1), q(X2)]$	单因子非线性减弱 Univariate nonlinear weakening
$q(X1\cap X2) > \mathrm{Max}[q(X1), q(X2)]$	双因子增强 Bivariate enhancement
$q(X1\cap X2) = q(X1) + q(X2)$	独立 Independent
$q(X1\cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强 Nonlinear Enhancement

注: $\mathrm{Min}[q(X1), q(X2)]$表示在$q(X1)$、$q(X2)$取最小值; $\mathrm{Max}[q(X1), q(X2)]$表示在$q(X1)$、$q(X2)$取最大值; $q(X1) + q(X2)$表示$q(X1)$、$q(X2)$两者求和; $q(X1\cap X2)$表示两者交互。

Note: $\mathrm{Min}[q(X1), q(X2)]$ denotes the minimum of $q(X1)$ and $q(X2)$; $\mathrm{Max}[q(X1), q(X2)]$ denotes the maximum of $q(X1)$ and $q(X2)$; $q(X1) + q(X2)$ denotes the sum of $q(X1)$ and $q(X2)$; $q(X1\cap X2)$ denotes the interaction between $X1$ and $X2$.

2018 年下降(1 250 mm), 2023 年(1 366 mm)有所回升。潜在蒸散量整体变化幅度较小, 2013 年最低(1 233 mm), 2018 年略升(1 282 mm), 2023 年最高(1 304 mm)。

海南“三江源”区域 2013、2018 和 2023 年的年均水源涵养量分别为 1 005、463 和 551 mm, 水源涵养量分别为 19.4×10^8、8.97×10^8、10.66×10^8 m^3。2013—2018 年水源涵养量降幅为 53.8%, 2018—2023 年升幅为 18.8%, 但仍明显低于 2013 年水平(图 3、表 4)。五指山、鹦哥岭和黎母山各区的水源涵养量及单位面积水源涵养量变化情况亦呈现类似趋势。

空间分布上, 研究区水源涵养量和降水量高的地方都集中分布于南渡江、昌化江和万泉河等主要河流源头的中高海拔山区, 即海拔高、蒸散水平低、降水条件良好的鹦哥岭的东部、黎母山东北部及五指山。相比之下, 鹦哥岭的西北部较低(图 3)。

3.2　水源涵养量空间分异的地理探测分析

3.2.1　基于最优参数地理探测器的因子探测分析

基于最优参数地理探测器对研究区水源涵养驱动因素进行探测, 定量评估各驱动因子对研究区水源涵养量变化的解释力。选取降水量(Pre)、潜在蒸散发(Pet)、温度(Tem)、归一化植被指数

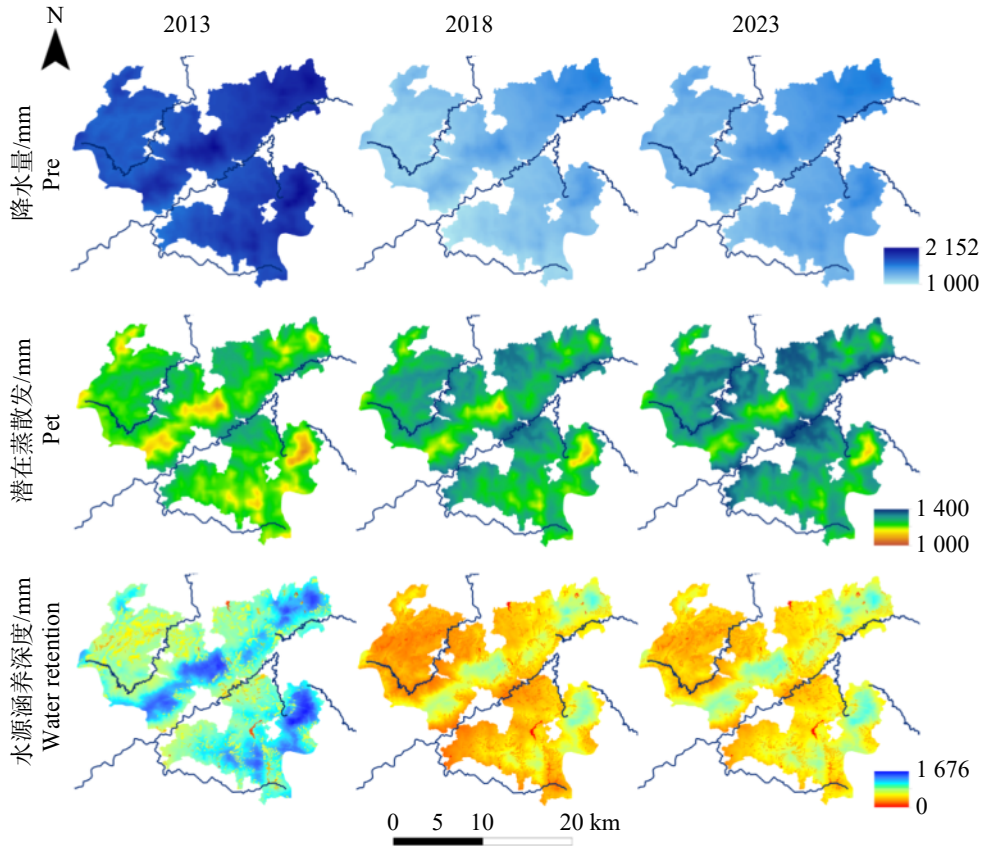

图 3　海南“三江源”降水量、潜在蒸散量和水源涵养深度时空分布特征

Fig. 3　Spatiotemporal distribution characteristics of precipitation, potential evapotranspiration and water retention of the "Sanjiangyuan" of Hainan Island

表 4 海南“三江源”水源涵养量分区统计情况

Tab. 4 Water conservation for each part of the "Sanjiangyuan" of Hainan Island

年份 Year	区域 Region	水源涵养总量/(10^8 m^3) Total water conservation	单位面积水源涵养量/(10^5 $m^3 \cdot km^{-2}$) Water conservation per unit area	水源涵养总量占比/% Proportion of total water conservation
2013	整个区域 Entire region	19.40	10.90	
	五指山 Mt. Wuzhi (WZS)	6.18	11.51	31.86
	黎母山 Mt. Limu (LMS)	5.95	11.00	30.67
	鹦哥岭 Mt. Yingge (YGL)	7.27	10.37	37.47
2018	整个区域 Entire region	8.97	5.03	
	五指山 Mt. Wuzhi (WZS)	2.73	5.08	30.43
	黎母山 Mt. Limu (LMS)	3.04	5.62	33.89
	鹦哥岭 Mt. Yingge (YGL)	3.20	4.56	35.68
2023	整个区域 Entire region	10.66	5.99	
	五指山 Mt. Wuzhi (WZS)	3.36	6.26	31.52
	黎母山 Mt. Limu (LMS)	3.40	6.28	31.89
	鹦哥岭 Mt. Yingge (YGL)	3.90	5.56	36.59

(NDVI)、高程(DEM)、坡度(Slope)、土地利用类型(LULC)这 7 个因子，分别计算 2013、2018 和 2023 年这些因子对水源涵养量空间分异的决定值 q，从而揭示不同年份各因子的影响强度差异。显著性检验结果表明，大部分驱动因子的 P 值均低于 0.05，通过显著性检验，表明所选取的驱动因子对研究区水源涵养量的空间分异具有一定的解释力。但是，在 2013 年，NDVI、坡度和土地利用类型的 P 值均大于 0.05，未通过显著性检验，说明该年份植被覆盖、地形起伏及土地利用类型对水源涵养空间分异的影响尚不显著。

各因子在不同年份对水源涵养量空间分异的解释力不同，整体来看，从大到小排序为降水量>高程>温度>潜在蒸散发>土地利用类型>NDVI>坡度(表 5、图 4)。降水量的解释力最强，对水源涵养量的空间分异起主导作用，q 值为 0.525 ~ 0.654；其次为高程，q 值为 0.498 ~ 0.621；温度和潜在蒸散发两个因子的 q 值分别为 0.440 ~ 0.593 和 0.416 ~ 0.541。土地利用类型、NDVI 和坡度的解释力较弱，q 值分别为 0.088 ~ 0.107、0.030 ~ 0.076 和 0.030 ~ 0.035(表 5)。

3.2.2 基于最优参数地理探测器的因子交互探测 交

表 5 海南“三江源”水源涵养量单因子探测结果

Tab. 5 Single factor detection of water conservation of the “Sanjiangyuan” of Hainan Island

年份 Year	降水量 Pre	潜在蒸散发 Pet	温度 Tem	归一化植被指数 NDVI	高程 DEM	坡度 Slope	土地利用 LULC
2013	0.654	0.541	0.593	0.030	0.621	0.035	0.096
2018	0.538	0.416	0.440	0.045	0.498	0.030	0.088
2023	0.525	0.526	0.538	0.076	0.558	0.033	0.107

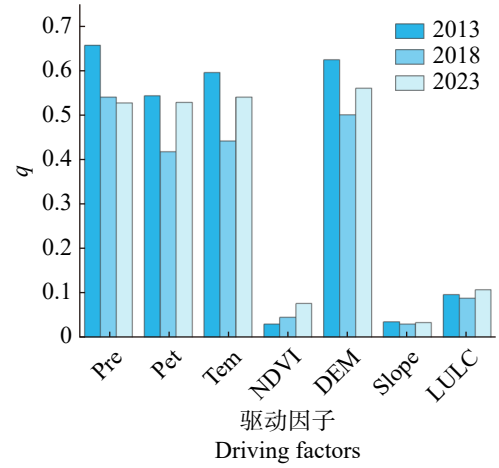

图 4 海南“三江源”水源涵养量单因子探测结果

Fig. 4 Single factor detection of water conservation of the "Sanjiangyuan" area of Hainan Island

互作用探测结果显示，所有驱动因子之间的交互作用均表现为双因子增强或非线性增强，表明因子的交互作用均可增强对水源涵养量空间分异的解释力(图 5)。降水量与高程交互作用的解释力最强($0.779<q<0.804$)，其次为降水量与温度的交互作用($0.768<q<0.770$)以及降水量与潜在蒸散发的交互作用($0.758<q<0.770$)。土地利用类型、NDVI 和坡度单因子对水源涵养量空间分异的解释力较小($0.030<q<0.107$)，但分别与降水量、潜在蒸散发、温度和高程交互时解释力显著增强($0.431<q<0.786$)，最强的是土地利用类型分别与降水量、潜在蒸散发、温度和高程的交互($0.553<q<0.786$)。

3.3　土地利用类型变化对水源涵养量的影响　通过 OPGD 模型揭示了土地利用类型(LULC)是影响水源涵养空间分异的重要交互因子。为进一步理解 LULC 的具体变化过程及其对水源涵养量的潜在影响，本节对研究期内(2013—2018 年，2018—2023 年)的土地利用类型转移特征进行分析。

整体来看，2013—2018 年土地利用各地类之间存在转换，但变化量较小，大部分面积保持不变，林地为研究区主体土地利用类型(表 6)。林地转出面积达到 1 567.68 km^2，其中除 1 552.28 km^2 保持林地外，仍有 13.18 km^2 转为草地、1.44 km^2 转为耕地，同时存在向水域与建设用地的小范围转移，分别为 0.34 和 0.44 km^2，这说明林地在维持主体地位的同时仍存在向周边地类的小幅退化趋势(表 6)。草地主要向林地转移，转移面积为 13.69 km^2，同时仅有少量转向耕地、水域和建设用地(均小于 0.2 km^2)(表 6)。耕地、水域、建设用地的转移量都较小，大部分面积保持不变(表 6)。值得注意的是，2018 年建设用地虽在区域内占比极低，但其面积在 2013—2018 年期间呈现增长趋势，由 2013 年的 0.47 km^2 增加至 2018 年的 0.95 km^2，增长幅度超过一倍(表 6)。

2018—2023 年，总体而言，土地利用类型变化以林地和草地之间的微幅转换为主，向建设用地的转移规模较小，土地利用类型变化整体趋于稳定(表 7)。

综上所述，2013—2018 年间，研究区土地利用变化主要表现为林地的少量转出和建设用地的扩张，这与同期水源涵养量的下降趋势在时间上吻合，暗示了人类活动增强可能加剧了水源涵养功能的退化；而 2018—2023 年土地利用趋于稳定，为国家公园建设后水源涵养功能的恢复提供了有利的下垫面条件。

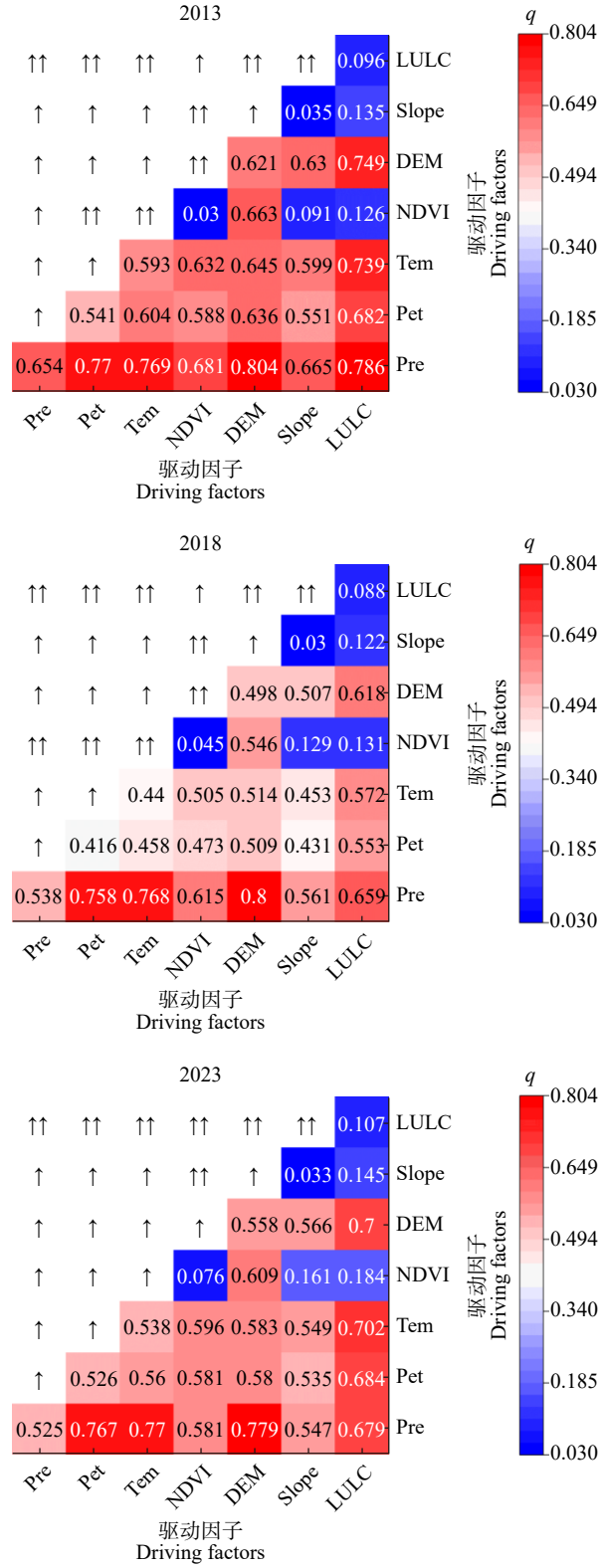

图 5　海南“三江源”水源涵养量影响因子交互作用探测结果

Fig. 5　Detection of factors influencing water conservation of the "Sanjiangyuan" area of Hainan Island

注：↑表示双因子增强；↑↑表示非线性增强。

Note: ↑ denotes Bi-variable enhance; ↑↑ denotes Nonlinear-enhance.

表 6 海南“三江源”2013—2018 年土地利用类型转移矩阵

Tab. 6 Land use type transfer matrix from 2013 to 2018 of the "Sanjiangyuan" area of Hainan Island

2013年土地利用类型 Land use type in 2013	2018年转移面积 Transferred area in 2018/km^2					
	耕地 Cropland	林地 Forestland	草地 Grassland	水域 Water land	建设用地 Construction land	转出合计 Total outflow
耕地 Cropland	18.62	1.56	0.04	0.04	0.02	20.28
林地 Forestland	1.44	1 552.28	13.18	0.34	0.44	1 567.68
草地 Grassland	0.11	13.69	168	0.02	0.02	181.84
水域 Water land	0.05	0.35	0.01	7.73	0.01	8.15
建设用地 Construction land	0	0.01	0	0	0.46	0.47
转入合计 Total inflow	20.22	1 567.89	181.23	8.13	0.95	1 778.42

表 7 海南“三江源”2018—2023 年土地利用类型转移矩阵

Tab. 7 Land use type transfer matrix from 2018 to 2023 of the "Sanjiangyuan" area of Hainan Island

2018年土地利用类型 Land use type in 2018	2023年转移面积 Transferred area in 2023/km^2					
	耕地 Cropland	林地 Forestland	草地 Grassland	水域 Water land	建设用地 Construction land	转出合计 Total outflow
耕地 Cropland	18.74	1.41	0.08	0.04	0	20.27
林地 Forestland	1.51	1 554.73	12.94	0.23	0.02	1 569.43
草地 Grassland	0.06	12.17	169.07	0.01	0	181.31
水域 Water land	0	0.14	0.01	7.99	0	8.14
建设用地 Construction land	0	0.01	0	0	0.95	0.96
转入合计 Total inflow	20.31	1 568.46	182.1	8.27	0.97	1 780.11

4 讨 论

4.1 海南“三江源”水源涵养功能时空异质性成因

海南“三江源”区域是整个海南的水源涵养核心区域，维系着整个海南水资源的生态平衡与安全，定量评估其水源涵养功能并探明水源涵养功能驱动因素，对掌握海南饮用水安全、推动全省绿色可持续发展具有关键作用。

本研究结果表明，在时间尺度上，2013—2023 年间海南“三江源”区域水源涵养量整体呈现出“先下降、后小幅回升”的阶段性变化特征，该变化特征与海南热带雨林国家公园尺度和海南主要流域尺度的相关研究结果相似[3,7−8]。主要原因是 2013 年的降水量明显高于 2018 年和 2023 年，这种降水量的时段差异是驱动研究区水源涵养量变化的主导因素。作为典型的热带季风气候区，海南降水总量大但不同时期变化不稳定，降水的变化直接影响区域水源涵养量的变化起伏。自 2019 年海南热带雨林国家公园试点建设以来，植被覆盖度与生态系统完整性逐步提升，海南“三江源”区域水源涵养量呈现小幅回升趋势，体现了国家公园建设在促进水源涵养功能恢复方面的积极效应。

在空间尺度上，水源涵养功能表现出高值集聚特征。水源涵养高值区主要集中分布于南渡江、昌化江和万泉河等主要河流源头的中高海拔山区，整体呈现出海拔较高、降水条件优越且蒸散发水平较低的典型特征。类似的空间分异规律已在海南热带雨林国家公园及其他山地河流源头区的水源涵养评估研究中得到验证[3,17]。从水文过程机理的角度分析，高海拔与复杂地形对区域内潮湿气流的抬升有积极作用，使得该地区降水量极为丰富，为水源涵养功能的形成提供了充足的水

量基础。同时,高海拔地区气温相对较低,潜在蒸散发受到明显抑制,在高植被覆盖和稳定森林结构的共同作用下,降水更易通过下渗和土壤蓄存方式被有效保留,从而增强了区域水分调蓄与水源涵养能力。相关研究表明,高海拔地区较低的潜在蒸散发和有利的植被结构是其水源涵养功能高值形成的重要水文机制[18]。

最优参数地理探测器结果在统计意义上为前述基于时空格局和水文过程的成因解释提供了定量支持。单因子探测结果表明,降水量在研究区水源涵养空间分异中具有最高的解释力,是其主要控制因子。高程次之,潜在蒸散发和温度的解释力亦保持在较高水平。同时,双因子探测结果表明,降水量与高程交互作用的解释力最强,其次为降水量与温度的交互作用及降水量与潜在蒸散发的交互作用。即在热带季风气候和复杂山地地形共同作用的背景下,研究区水源涵养空间分异总体表现为以降水条件为主导、地形因子起强化作用,同时受潜在蒸散发和温度等热量条件共同调节的控制特征。类似的水量服务驱动机制已在季风气候控制下的山地地区相关研究中得到验证[19−20]。

尽管土地利用类型、NDVI 和坡度在单因子探测中的解释力较弱,但其与降水量、潜在蒸散发、温度及高程交互后解释力显著增强。在热带季风气候控制下的山地河流源区,水源涵养首先受降水输入及能量条件约束,并在地形梯度作用下形成基本空间格局,而土地利用类型和植被状态主要通过调节蒸散过程、入渗能力和水分再分配路径,对气候—地形效应起放大或削弱作用。类似的“弱单因子—强交互”特征在相关研究中得到证实[21],强调了土地利用类型与植被因子的调节作用。

需说明的是,本研究未直接纳入人类活动强度指标。一方面,土地利用类型在一定程度上可作为人类活动的间接表征,其交互作用结果表明,土地利用方式变化可能通过影响植被结构和下垫面条件,对水源涵养功能产生间接调节作用。另一方面,研究区尺度相对较小,样本数量有限,进一步增加解释变量可能削弱地理探测器结果的稳健性与统计可靠性。因此,本研究重点关注气候、地形等自然因子及土地利用因子对水源涵养功能的影响。

4.2　水源涵养优化提升对策建议　研究发现,海南“三江源”区域水源涵养能力具有时段差异性和空间差异性,为提升海南“三江源”区域水源涵养服务,提出如下对策建议:

1)加强河流源头区生态空间的保护与优化布局,划定并严守水源涵养生态保护红线。研究发现,海南“三江源”区域水源涵养高值区主要集中分布于中高海拔山地源头区,其空间格局受降水输入与地形条件共同控制,因此,水源涵养能力提升应以源头区生态空间为优先保护对象,实施严格管控。

2)增强水源涵养功能对气候变化的适应与调节能力。研究发现,海南“三江源”区域水源涵养功能主要受降水输入及潜在蒸散发、温度等气候因子控制。在全球气候变化大背景下,气候变暖驱动水循环加速,极端降水事件增多且蒸散发显著增强,打破了降水、蒸发、径流与地下水补给之间的动态平衡,从而削弱了水源涵养功能的稳定性[22]。因此,未来对于海南“三江源”区域水源涵养功能的优化提升必须充分考虑气候变化的影响。

基于自然的解决方案(Nature-based Solutions, NbS)强调通过保护和恢复生态系统自身的调节功能,以自然过程应对气候变化和水安全等社会挑战[23]。在该理念的指导下,建议加强源头区森林生态系统的连续性与完整性,通过实施天然林保护,维持连片分布的森林覆盖和完整的林分结构,增强森林对降水的自然调蓄作用,从而提升水源涵养功能在气候变化背景下的稳定性与适应能力。此外,可结合地形条件布局小尺度、分散式的生态蓄水单元(如适当移动山间石块和倒木,增加沟谷水潭的数量及其容水量,降低流速和增加局域水量维持能力),提高径流滞留和洪峰削减能力,既留住雨季水量,也补给枯水期用水,从而提升局域水源涵养与水文系统稳定性。

3)健全水资源生态补偿机制,构建支撑水源涵养功能稳定提升的长效激励体系。海南“三江源”区域作为典型的热带山地河流源头区,承担着全岛重要的水源涵养与水安全保障功能,其水源涵养服务具有显著的空间外溢性。受生态保护红线管控和天然林保护等措施约束,源头区在土地利用、产业发展和资源开发等方面,面临着较高的机会成本。而水源涵养服务带来的供水保障、防

洪减灾和水质改善等综合收益则主要由下游城镇与社会经济系统共享。在气候变化背景下，极端降水事件增多与蒸散发增强进一步放大了源头区生态系统调蓄功能的重要性，也对持续投入生态保护提出了更高要求。因此，有必要通过制度化的水资源生态补偿机制，将水源涵养服务的受益关系转化为稳定的经济激励，以保障以源头区生态保护和天然林保护为核心的水源涵养提升措施得以长期有效实施。

5 结 论

本研究以海南“三江源”区域为研究对象，基于 2013、2018 和 2023 年 3 期数据，运用 InVEST 模型与最优参数地理探测器（OPGD），系统评估了水源涵养量的时空演变特征及其主要驱动因素。

1）2013、2018 和 2023 年，海南“三江源”区域水源涵养量由 19.4×10^8 m^3 降至 8.97×10^8 m^3，后回升至 10.66×10^8 m^3。

2）水源涵养高值区主要集中在鹦哥岭东部、黎母山及五指山降水条件优越且蒸散发水平较低的中高海拔山区。

3）降水量是水源涵养空间分异的主导因子（q 值为 0.525 ~ 0.654），其次为高程（0.498 ~ 0.621）、温度（0.440 ~ 0.593）和潜在蒸散发（0.416 ~ 0.541）。交互作用探测表明，降水量与高程交互作用的解释力最强（q 值为 0.779 ~ 0.804）。

4）水源涵养量的提升需聚焦中高海拔源头区生态保护与气候适应性管理，增强天然林保护与植被结构和沟谷水潭优化，加强对极端气候的缓冲能力；同时完善水资源生态补偿机制，为水源涵养能力持续提升提供制度保障。

参考文献：

[1] 高红凯, 刘俊国, 高光耀, 等. 水源涵养功能概念的生态和水文视角辨析[J]. 地理学报, 2023, 78(1): 139−148. https://doi.org/10.11821/dlxb202301009

[2] 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. https://doi.org/10.5846/stxb201512012406

[3] 杜乐山, 刘海鸥, 刘文慧, 等. 热带雨林区水源涵养服务时空演变及驱动因素分析: 以海南热带雨林国家公园为例[J]. 环境科学研究, 2023, 36(9): 1716−1727. https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2023.07.06

[4] 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. https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.2022.05.025

[5] 白婷婷, 徐栋, 武少腾. 生态系统服务时空交互特征及其驱动力: 以海南岛为例[J]. 中国环境科学, 2023, 43(11): 5961−5973. https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230606.003

[6] Li L M, Tang H N, Lei J R, et al. Spatial autocorrelation in land use type and ecosystem service value in Hainan Tropical Rain Forest National Park[J]. Ecological Indicators, 2022, 137: 108727. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108727

[7] Lei J R, Zhang L, Wu T T, et al. Spatial-temporal evolution and driving factors of water yield in three major drainage basins of Hainan Island based on land use change[J]. Frontiers in Forests and Global Change, 2023, 6: 1131264. https://doi.org/10.3389/FFGC.2023.1131264

[8] Yao X L, Zhou L, Wu T X, et al. Ecosystem services in National Park of Hainan Tropical Rainforest of China: spatiotemporal dynamics and conservation implications [J]. Journal for Nature Conservation, 2024, 80: 126649. https://doi.org/10.1016/j.jnc.2024.126649

[9] 邓雅文, 侯鹏, 蒋卫国, 等. 基于多特征指标和层次聚类分析的河源区范围自动划分方法研究[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(3): 469−482.

[10] 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. https://doi.org/10.11821/dlxb201701010

[11] Song Y Z, Wang J F, Ge Y, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: cases with different types of spatial data[J]. GIScience & Remote Sensing, 2020, 57(5): 593−610. https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1760434

[12] 刘纪远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996: 144−158

[13] 李昂, 叶长青, 朱丽蓉, 等. 土地利用/覆被变化对产水服务功能的影响: 以海南热带雨林国家公园为例[J]. 水利水电技术 (中英文), 2022, 53(5): 36−45. https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2022.05.004

[14] 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. https://doi.org/10.1029/2000WR900325

[15] 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, 2003.

[16] 杨振奇, 秦富仓, 李旻宇, 等. 砒砂岩区不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究[J]. 生态环境学报, 2020, 29(4): 733−739. https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2020.04.012

[17] Niu P T, Zhang E C, Feng Y, et al. Spatial-temporal pattern analysis of land use and water yield in water source region of middle route of south-to-north water transfer

project based on google earth engine[J]. Water, 2022, 14(16): 2535. https://doi.org/10.3390/w14162535

[18] Chen J H, Wang D C, Li G D, et al. Spatial and temporal heterogeneity analysis of water conservation in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on the geodetector and spatial elastic coefficient trajectory models[J]. GeoHealth, 2020, 4(8): e2020GH000248. https://doi.org/10.1029/2020GH000248

[19] Li T H, Wang X J, Jia H. Evaluate water yield and soil conservation and their environmental gradient effects in Fujian province in South China based on InVEST and geodetector models[J]. Water, 2025, 17(2): 230. https://doi.org/10.3390/w17020230

[20] Shao Q F, Han L B, Lv L F, et al. Spatiotemporal variation and factors influencing water yield services in the Hengduan mountains, China[J]. Remote Sensing, 2023, 15(16): 4087. https://doi.org/10.3390/rs15164087

[21] 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. https://doi.org/10.20103/j.stxb.202310082163

[22] 汤秋鸿, 陈德亮. 全球变化加剧水循环失衡与水资源危机[J]. 中国科学: 地球科学, 2025, 55(9): 3209−3212. https://doi.org/10.1360/SSTe-2025-0078

[23] 贾雨欣. 基于自然的解决方案的发展历程[J]. 环境保护前沿, 2022, 12(6): 1318−1324. https://doi.org/10.12677/AEP.2022.126164

Spatio-temporal dynamics and driving factors of water conservation in the “Sanjiangyuan” area of Hainan Island

He Qianqian[1,2#], Ren Mingxun[1,2*]

（1. School of Ecology, Hainan University, International Joint Center for Terrestrial Biodiversity around South China Sea of Hainan Province, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Hainan Institute of National Park/Key Laboratory for National Park Protection and Development of Hainan Province, Haikou, Hainan 570203, China）

Abstract: The “Sanjiangyuan” area (Sources of three major rivers) of Hainan Island constitutes the shared source area and primary catchment of the three major rivers, the Nandu, Changhua, and Wanquan rivers. As the central core of the National Park of Hainan Tropical Rainforest, this area plays a vital role in maintaining ecological security, sustaining ecosystem services, and supporting socio-economic development across Hainan Island. The “Sanjiangyuan” area of Hainan Island was delineated through an integrated framework that incorporates hydrological processes, topographic and geomorphological characteristics, natural environmental conditions, ecosystem service functions, and national park management boundaries. The data of three periods in 2013, 2018, and 2023 were selected for analysis of their water conservation and its temporal evolution and spatial distribution pattern conservation by using the InVEST model, and the Optimal Parameters-based Geographical Detector was used to explore the main driving factors of temporal and spatial changes of water conservation. The results showed that water conservation from 2013 to 2023 was 19.4×10^8, 8.97×10^8, $10.66\times10^8 m^3$, respectively, and exhibited a non-linear temporal trajectory, characterized by a pronounced decline followed by a modest recovery. In terms of spatial scale, high-value areas were predominantly concentrated in the middle-to high-elevation mountainous headwaters of the three major river systems, reflecting the combined effects of higher elevations, favorable precipitation regimes, and relatively low evapotranspiration demand. Precipitation emerged as the primary determinant of spatial variation in water conservation (q = 0.525−0.654), followed by elevation, while potential evapotranspiration and temperature also exerted substantial explanatory influence. Interactions among driving factors consistently enhanced their explanatory power, with the precipitation–elevation interaction exerting the strongest effect (q = 0.779−0.804). These findings clarify the spatiotemporal dynamics and driving forces of water conservation in a critical tropical headwater region and provide robust scientific evidence to improve water resource management and ecosystem-based strategies for enhancing water security on Hainan Island.

Keywords: Hainan Island; water conservation; spatial variations; driving factors

(责任编辑:钟云芳)