

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.02.017

海南岛土地利用及产水量时空变化模拟

韩念龙,张亦清,张伟璇

(海南大学公共管理学院,海南 海口 570228)

摘要:采用 InVEST 模型的产水模块研究海南岛 1995—2015 年的产水量时空变化,同时基于 FLUS 模型利用 1995 年与 2015 年两期的土地利用数据及自然、交通和社会因子,模拟 2035 年海南岛不同情景的土地利用变化及其对产水功能的影响。结果表明:1995—2015 年海南岛城镇化加剧导致建设用地增加,增加的建设用地主要来源于林地和耕地的转换;1995—2015 年海南岛产水量处于增长状态,产水深度总体呈现出东北部高、西南部低的空间分布格局;2035 年自然发展情景下海南岛仍延续快速城镇化的发展速度,建设用地将增加 36.7%,由此导致海南岛产水量较 2015 年增长 0.67%;生态空间保护情景下的产水量增长率为 -0.21%,实施生态保护措施可以很好地抑制产水量的增加,能够降低洪涝风险,保障海南岛生态系统产水功能。

关键词:土地利用;产水量;InVEST 模型;FLUS 模型;海南岛

中图分类号:TV211;P344 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)02-0119-09

Simulation of temporal and spatial changes of land use and water yield in Hainan Island // HAN Nianlong, ZHANG Yiqing, ZHANG Weixuan (School of Public Administration, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: The water production module of InVEST model was used to study the temporal and spatial changes of water yield in Hainan Island from 1995 to 2015. At the same time, the land use data in 1995 and 2015 and natural, traffic and social factors were used to simulate the land use changes under different scenarios of Hainan Island in 2035 and their impact on water production function based on the FLUS model. The results showed that the intensification of urbanization in Hainan Island from 1995 to 2015 led to the increase of construction land, which mainly came from the conversion of forest land and cultivated land. From 1995 to 2015, the water yield of Hainan Island was increasing, and the water yield depth showed a spatial distribution pattern of high in the northeast and low in the southwest. Under the natural development scenario, Hainan Island will continue the development speed of rapid urbanization in 2035, and the construction land will increase by 36.7%, resulting in an increase of water production of Hainan Island by 0.67% compared with 2015. The growth rate of water yield under ecological protection scenario is -0.21%. The implementation of ecological protection measures can inhibit the increase of water yield well, reduce the risk of flood and ensure the water production function of island ecosystem.

Key words: land use; water yield; InVEST model; FLUS model; Hainan Island

土地利用变化对生态系统功能影响具有空间差异性,以生态系统碳循环为例,土地利用在热带和中高纬度地区分别导致碳释放和碳汇两种截然不同的变化^[1]。热带地区土地利用改变导致反照率、蒸散发效率和地表粗糙率等变化的综合效应引起温度升高,从而对区域气候产生影响,进而影响生态系统功能^[2]。生态系统产水服务是生态系统重要功能之一,科学评估热带区域土地利用/覆被变化对生态系

统产水功能的影响,对热带区域的水资源利用有着重要意义^[3]。生态系统服务与权衡交易的综合评估(integrate valuation of ecosystem services and tradeoffs, InVEST)模型,其产水量模块主要基于水量平衡原理,根据土地利用、气候及土壤等要素实现对生态系统产水功能的定量、动态及可视化评估,目前已被学者应用于英国典型流域^[4]、伊朗半干旱盆地^[5]、横断山脉^[6]、太湖流域^[7]、三江源^[8]、海南

岛^[9]和大连市^[10]等国内外区域生态系统产水服务的评估研究,均取得较好的模拟效果。

土地利用的类型、格局和强度变化都会影响生态系统服务^[11],依据土地利用模拟预测可以定量评估生态系统服务的发展趋势,为未来生态系统的可持续发展提供支撑,这是当前生态与土地学科的交叉研究热点。土地利用预测模型如 CLUE-S (conversion of land use and its effects at small region extent)^[12]、LUSD (land use scenario dynamics)^[13]和 FLUS (future land use simulation)^[14]等的研究应用已比较成熟,其中 FLUS 模型基于元胞自动机及自适应惯性竞争机制,与其他模型相比模拟精度更高,广泛应用于省级生态空间规划^[15]、城市边界划定^[16]及农牧交错带土地利用优化^[17]等方面,但较少应用于热带区域土地利用变化模拟对生态系统功能的影响。

海南岛是我国典型的热带岛屿,作为一个独立地理单元,随着城镇化进程加快及旅游资源的释放,其生态系统功能受人类活动干扰发生的变化也较为明显。在此过程中发生的大规模土地利用变化显著影响了生态系统功能,而这些变化的趋势对生态系统产水功能的进一步影响仍不清楚。为探明人类活动导致的土地利用变化以及趋势对生态系统产水功能的影响,本文通过分析 1995—2015 年海南岛土地利用变化趋势,基于 InVEST 模型的产水模块和空间制图分析探讨期间海南岛的产水量变化趋势及空间格局,分析各种土地利用类型的产水能力;同时基于 FLUS 模型进行 2035 年不同政策下的土地利用变化情景模拟,评估其对岛屿产水功能的影响,为海南岛生态保护以及土地利用与水资源的保护与规划提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

海南岛位于我国南端,地处热带,位置在北纬 $18^{\circ}10' \sim 20^{\circ}10'$,东经 $108^{\circ}37' \sim 111^{\circ}3'$,陆域总面积约 3.4 万 km^2 ,整体地形为四周低中间高,地貌结构复杂(图 1)。受热带季风气候影响,海南岛降雨比较丰沛,年均降水量约 1500 mm ^[9]。由于台风频繁及降雨时空分布不均等原因,海南岛极易发生暴雨洪涝灾害,洪涝灾害风险由海南岛中部地区向四周沿海地区逐渐增大,海南岛东部及北部地势平缓,人口密集,是发生洪涝灾害的高风险区。据相关统计,1949—1979 年海南岛共出现洪涝灾害 20 次,给社会经济带来很大损失^[18-19]。2019 年海南省地区生产总值 5309 亿元,比 2018 增长 5.8%。常住人口为 944.72 万人,城镇化率为 59.23%。根据海南自

贸港建设的需求,未来常住人口仍将持续增加。2019 年 5 月《国家生态文明试验区(海南)实施方案》提出,为进一步发挥海南省的生态优势,将海南定位为国家生态文明试验区,为推进全国生态文明建设探索新经验。由此可知,研究区自贸港建设在满足经济增长需要的同时,也面临着生态文明建设的挑战。

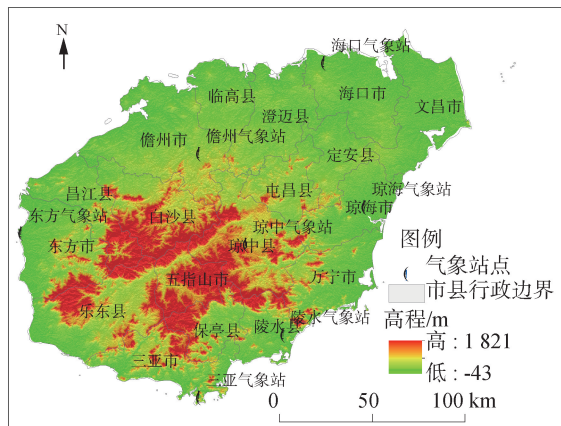


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of study area

1.2 数据来源

研究数据主要包括用于产水量和未来土地利用变化的模拟所需数据。产水量模拟需要的数据包括土地利用、气象及土壤数据等;未来土地利用变化模拟则利用自然、交通区位以及社会经济等因素的空间驱动因子数据。具体来源如表 1 所示。

1.3 数据处理

产水量运算需要的数据包括土地利用、降水量、年潜在蒸散量、土壤深度、有效含水量和生物物理参数等。土地利用栅格数据是 1995 和 2015 年两期基于 Landsat TM/ETM 遥感影像分类生成的空间分辨率为 1 km 的数据产品,根据 GB/T 2010—2007《土地利用分类现状》和海南岛实际情况将土地利用类型分为耕地、林地、草地、园地、水域、建设用地和未利用地 7 类。气象数据方面,为提升代表性,分别用 1985—1995 年和 2005—2015 年两个时段表示 1995 与 2015 两期的气象特征。其中,基于海南岛 7 个气象站点(图 1)的日均降雨观测数据,处理得到多年平均降水量,通过反距离加权插值得到 1995 和 2015 年两期分辨率为 1 km 的降水量栅格数据;潜在蒸散量是基于 7 个气象站点的气温、风速、日照时数和气压等日值数据,采用 Penman-Monteith 公式^[20]计算并插值得出分辨率为 1 km 的栅格数据。土壤深度栅格数据基于南京土壤所中国 1:100 万土壤数据库提取;有效含水量栅格数据根据土壤质地中砂粒、粉粒及黏粒的比例,采用土壤有效含水量经验公

表 1 数据来源
Table 1 Data source

数据类型	内容	时间	数据来源
土地利用栅格数据	土地利用分类现状(1 km 分辨率)	1995 年、2015 年	资源环境数据云平台(http://www.resdc.cn/)
气象栅格数据	降水、潜在蒸散量(1 km 分辨率)	1995 年、2015 年	中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn)
土壤栅格数据	土壤深度、有效含水量等(1 km 分辨率)		南京土壤所第二次全国土壤调查 1:100 万土壤数据
自然因素栅格数据	DEM(30 m 分辨率) 坡度(30 m 分辨率)		国家基础地理信息中心(http://www.ngcc.cn/ngcc)
交通区位因素栅格数据	到河流的距离	1995 年、2015 年	Open Street Map(https://download.geofabrik.de)
	到铁路的距离	2015 年	Open Street Map(https://download.geofabrik.de)
	到高速公路的距离	2015 年	Open Street Map(https://download.geofabrik.de)
	到一般公路的距离		
	到城镇中心的距离		
	到居民点的距离	1995 年、2015 年	各年土地利用数据中的水域及建设用地分类数据
社会经济因素栅格数据	各市县常住人口、地区生产总值	1995 年、2015 年	1995 年和 2015 年《海南省统计年鉴》

式计算获取,并通过重分类生成,两者分辨率均为 1 km。生物物理参数表的蒸散系数和植被根系深度分别根据联合国粮农组织作物蒸散系数指南^[21]和 Canadell 等^[22]的研究得到。

FLUS 模型除了相应的土地利用数据外,还包括自然、交通及社会经济等驱动因子数据。其中,自然因子包括高程、坡度和到河流距离,这些数据从根本上影响着土地利用方式。研究采用 SRTM 30 m 分辨率的 DEM 数据,同时基于 ArcGIS 空间分析的坡度功能生成坡度数据。交通因素对土地利用格局也有较大影响,如城镇会沿着交通道路沿线发展;交通通达性因子包括到一般公路、高速公路、城镇中心的距离,利用 ArcGIS 欧式距离计算生成。社会经济因素对土地利用格局也有着相当大的影响,本研究将海南各市县的常住人口及地区生产总值数据进行空间格网化获取社会经济因子。

2 研究方法

2.1 InVEST 模型的产水量模拟

InVEST 模型产水量模块主要基于水量平衡的假设估算方法,以某个栅格单元的降水量减去实际蒸散发量即为产水量。每个栅格单元 x 的年产水量 Y 的计算公式为

$$Y = \left(1 - \frac{ET_A}{P}\right)P \quad (1)$$

式中: ET_A 为栅格单元 x 的年实际蒸散量; P 为栅格单元 x 的年降水量。两者的比值即 Zhang 等^[23]提出的近似 Budyko 曲线,计算公式为

$$\frac{ET_A}{P} = \frac{1 + \omega R}{1 + \omega R + 1/R} \quad (2)$$

其中 $\omega = Z \frac{W_{AC}}{P}$ $R = \frac{kET_0}{P}$

式中: ω 为表征自然气候与土壤性质的非物理参数; W_{AC} 为植被可利用水含量; Z 为季节常数,代表区域降水分布及其他水文地质特征,取值范围为 1~10; R 为干旱指数,定义为参考蒸散量 ET_0 与降水量的比值; k 为栅格单元 x 中植被蒸散系数。其中, ET_0 由 Penman-Monteith 公式^[20]计算:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_x - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

式中: R_x 为地表净辐射; G 为土壤热通量; Δ 为温度-饱和水汽压关系曲线在 T 处切线斜率; γ 为干湿表常数; T_{mean} 为日平均温度; u_2 为距地面 2 m 处风速; e_s 为饱和水汽压; e_a 为实际水汽压。

2.2 基于 FLUS 模型的土地利用变化预测

FLUS 模型主要由基于神经网络适宜性概率计算及基于自适应惯性机制的元胞自动机组成。本研究采用 FLUS 模型基于 1995 年与 2015 年的两期土地利用数据进行模拟,并由模拟结果预测 2035 年不同情景下的海南岛土地利用格局变化。首先,采用随机采样策略提取 1995 年数据的 10% 作为训练样本,设置训练隐藏层数为 10,通过归一化驱动因子,利用神经网络算法计算得出 2015 年海南岛土地利用类型适宜性概率图层。同时,设定模型的邻域影响因子和转换成本,邻域影响因子用以反映不同用地类型之间以及邻域范围内不同用地单元间的相互作用,转换成本表示当前用地类型转换为需求类型的困难度。邻域影响因子的计算需要设定邻域因子参数,其范围为 0~1,数值越大表示该用地类型的扩张能力越强。参考已有研究的经验并考虑热带岛屿的土地利用特征,依次定义各用地类型的扩张能力。建设用地的扩张能力最强,设为 1;林地次之,

为0.8;耕地、园地和草地均设为0.5;水域、未利用地最弱,设为0.1。研究选用3×3的Moore邻域模型计算邻域影响因子。然后,基于马尔科夫链模拟得到2015年各类用地的预期需求,计算实际用地之间的差异得到自适应惯性系数。最后,基于轮盘选择机制确定元胞最终转换的土地利用类型,从而实现2015年的土地利用模拟。

3 结果与分析

3.1 海南岛土地利用变化

1995年海南岛土地利用/覆被结构中,最高的林地占比50.8%,其次是耕地占比26.1%,第三为园地占比14.1%,水域、草地、建设用地及未利用地占比较小,分别为3.4%、3.1%、2.0%和0.5%。由表2可见,2015年,海南岛的耕地、林地、草地及未利用地面积均有不同程度的减少,林地面积占比49.3%,耕地占比25.5%,园地占比15%,水域、草地、建设用地及未利用地占比分别为3.7%、2.9%、3.3%和0.3%。林地面积减小最多,共计493 km²,其中52.2%转变成园地,18.8%转变成建设用地,16.7%转变成耕地;其次是耕地,面积减少219 km²,其中49%转变成了建设用地,19.8%转变成园地,16.4%转变成林地。建设用地、园地与水域面积增加,建设用地增加最多,共计440 km²,增幅为63.2%,主要由耕地(46.1%)、林地(26.4%)和园地(15.5%)转化而来。其次是园地,面积增加303 km²,增幅为6.4%,主要分别由林地(74.9%)和耕地(17.9%)转化而来。水域面积增加104 km²,增幅为8.9%,主要来自耕地(37.5%)、林地(28.9%)和园地(21.7%)的转化。总体而言,1995—2015年海南岛处于快速城镇化的过程,建设用地面积的增加主要来源于林地和耕地的转化。

3.2 海南岛产水量模拟

经反复计算验证,当季节常数Z取值2.6时模拟1995和2015年的海南岛多年平均产水总量分别为321.14亿m³和375.64亿m³,1995—2015年平

均产水总量为348亿m³,与海南省水资源公报公布的1998—2015年多年平均地表径流量351亿m³较为接近,相对误差仅为0.85%,说明产水总量模拟效果较好。

1995和2015年海南岛降水量均值分别为1858.6 mm、2001.2 mm,潜在蒸散量均值分别为1065.2 mm、1037.8 mm,实际蒸散量均值分别为897.5 mm、879.8 mm,产水深度均值分别为944.08 mm、1104.3 mm,除实际蒸散外均呈上升趋势,其中产水增幅为17%。图2~5为1995、2015年海南岛土地利用、年均降水量及产水深度情况。可见,1995—2015年,产水深度高值区在海南岛的东北部和东部沿海区域集聚,产水深度高值区主要位于城市建设区、园地及耕地分布的人类活动频繁区域。产水深度低值区的范围在西南部不断集聚并扩大,最终形成以中部山脉为界的东北高值区-西南低值区的海南岛产水深度分布格局。1995—2015年,海南岛西南部产水深度逐渐减少,但该区域中的城市建设区(如三亚、乐东及东方市)产水量依然增加(图5(b))。

从空间上看,海南岛产水深度空间分布受降水量和土地利用双重影响,空间格局具有较高一致性。这种分布格局与海南岛的降水量、植被分布及城市发展的格局存在直接关系,即降水多、植被蒸散量小或城市化进程高的区域,其产水能力较强。海南岛受东南季风影响,西南部处于中部山脉的背风坡,导致该区域降水相对少,加上区域森林植被覆盖率高及蒸腾作用,导致了西南部成为全岛的产水深度低值区。

1995—2015年,海南岛不同土地利用类型平均产水深度从大到小依次是建设用地、园地、草地、耕地、林地、未利用地和水域,各土地利用类型的单位面积平均产水深度依次分别为1324.08 mm、1123.96 mm、1122.26 mm、1117.05 mm、943.06 mm、730.14 mm和524.58 mm。

产水能力总体上与植被蒸散量呈反比关系^[24]。

表2 1995—2015年土地利用/覆被转移矩阵
Table 2 Land use/cover transfer matrix from 1995 to 2015
单位: km²
unit: km²

土地利用类型	耕地	林地	园地	草地	水域	建设用地	未利用地	合计
耕地	8551	68	85	5	57	208	0	8974
林地	116	16778	337	33	44	119	3	17430
园地	37	36	4676	0	11	70	0	4830
草地	7	41	23	933	33	22	0	1059
水域	6	6	4	8	1117	23	1	1165
建设用地	7	3	1	0	0	685	0	696
未利用地	31	5	7	11	7	9	105	175
合计	8755	16937	5133	990	1269	1136	109	34329

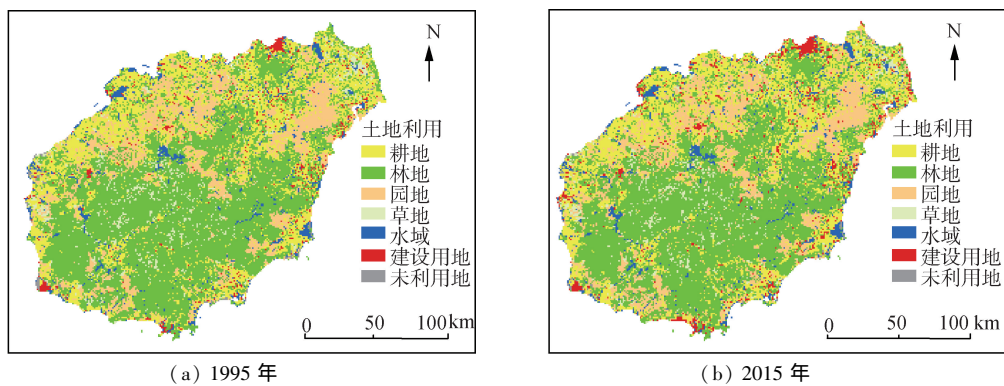


图2 1995年和2015年海南岛土地利用情况

Fig. 2 Land use situation of Hainan Island in 1995 and 2015

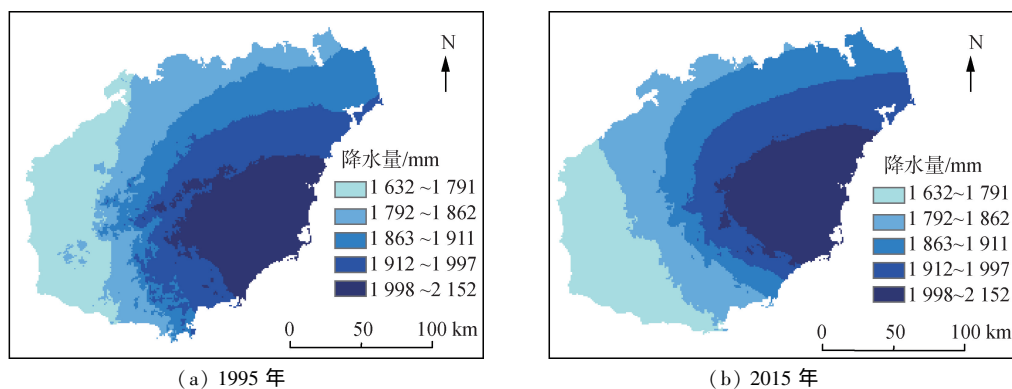


图3 1995年和2015年海南岛年均降水量情况

Fig. 3 Annual precipitation situation of Hainan Island in 1995 and 2015

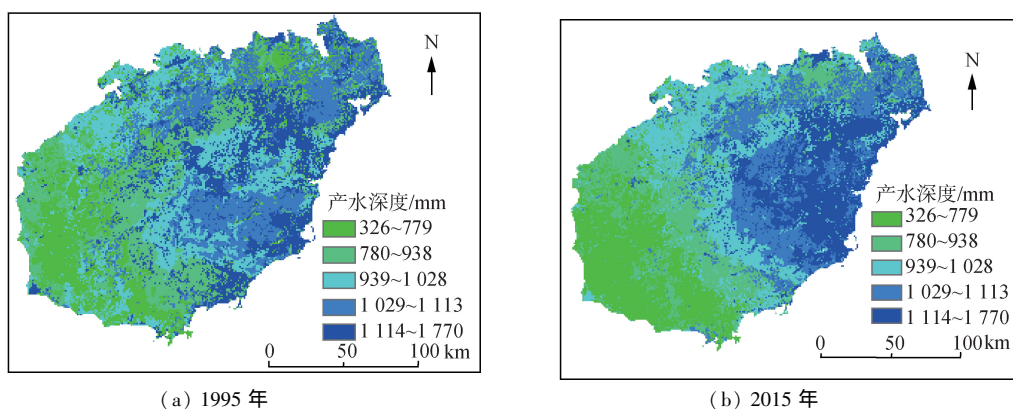


图4 1995年和2015年海南岛产水深度情况

Fig. 4 Water yield depth of Hainan Island in 1995 and 2015

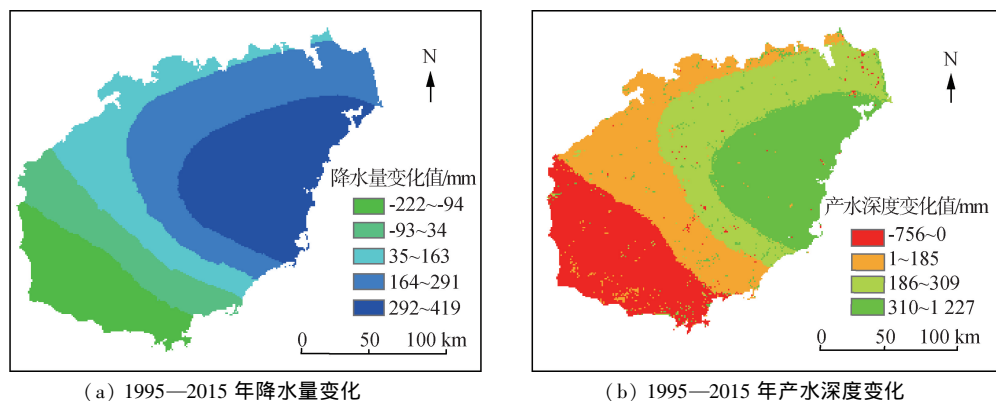


图5 1995—2015年海南岛降水量及产水深度变化

Fig. 5 Changes of precipitation and water yield of Hainan Island from 1995 to 2015

建设用地的植被最少,其蒸散量也最小,同时大量人工建筑地表增多导致不透水面积的增加,改变了水量平衡,使得降水入渗减少、洪峰流量增加,因此建设用地具有较高的产水量;林地对地表径流具有拦截作用,同时土壤入渗量增加,延迟了降水汇流时间,削减了洪峰流量,加上植被的蒸散发能力最强,因此林地的产水量相对较低^[25]。

海南岛处于城镇快速化进程中,建设用地增幅较大,另一方面,由于种植业在热带地区的天然优势,园地增幅也较为明显,建设用地和园地的平均产水深度在各土地利用类型中较高;林地占比大,减小面积多,通过表 2 得知林地主要转换成产水深度较高的园地和建设用地;水域和未利用地的占比低,产水深度也较低,变动相对较小,对产水量的影响可忽略不计。因此剔除气候因素,导致海南岛产水量变化的主要原因是建设用地和园地的增加以及林地的减少,说明人类活动对海南岛生态系统产水功能产生较大影响。

3.3 土地利用情景对产水量的影响

3.3.1 2035 年土地利用变化模拟

本研究中,FLUS 模型模拟迭代次数达到 300 次时,模型误差曲线趋于稳定。利用 2015 年实际土地利用类型对模拟结果进行精度检验,kappa 系数为 0.95,总体精度为 0.97,模拟结果的精度较高,说明 FLUS 模型在海南岛的适用性较好。在模拟完成的

基础上,分别设置自然发展和生态空间保护的未來土地利用变化情景的转换成本矩阵(表 3),进行海南岛 2035 年土地利用变化预测。自然发展情景中,对各类土地利用类型的转换均不设限制,土地利用变化将延续快速城镇化的发展态势;生态空间保护情景中,对保障生态安全的林地、草地和水体这些类型进行限制开发,在此情景下将对生态空间起重要作用的林地、水体、草地设置为不可转出区域,但相互之间可转换。转换矩阵中的 0 表示受限,1 表示不受限,进而得到两种发展情景下,2035 年土地利用类型情况如表 4 所示。

由表 4 可见,基于自然发展情景模拟 2035 年的海南岛土地利用变化仍延续快速城镇化趋势,建设用地面积比 2015 年增加 36.8%,建设用地扩张主要有以下特征:首先是海口与三亚两大城市边界的扩张,海口市主要向东西两侧以及南部区域扩张,三亚市则在原有城区以及其西边的崖州区扩张明显;其次是中西部城市如洋浦、儋州、屯昌、临高及澄迈等市城区的建设区扩大;第三是岛内园地区域的建设用地增加明显。园地比 2015 年增加 5.94%,增加的范围位于海南岛中西部地区,由原先的小碎斑状范围扩大成块状区域。扩张的建设用地大都分布在园地区域内,可见种植业对生产生活等配套设施存在一定需求,从而导致建设用地增加。耕地减少 2.38%,主要受到建设用地扩张的影响。林地、草地和水域均

表 3 不同情景转换成本矩阵

Table 3 Conversion cost matrix under different scenarios

土地利用类型	自然发展情景							生态空间保护情景						
	林地	园地	草地	耕地	未利用地	建设用地	水域	林地	园地	草地	耕地	未利用地	建设用地	水域
林地	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1
园地	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
草地	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1
耕地	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
未利用地	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
建设用地	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
水域	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1

表 4 2035 年不同情景模拟的土地利用结果

Table 4 Simulation results of land use in 2035 under different scenarios

土地利用类型	自然发展情景				生态空间保护情景			
	面积/km ²	面积增长率/%	产水深度/mm	产水深度增长率/%	面积/km ²	面积增长率/%	产水深度/mm	产水深度增长率/%
耕地	8 545	-2.4	1 222.18	-0.04	8 531	-2.54	1 210.54	-0.99
林地	16 165	-2.4	1 002.93	0.35	16 587	0.12	1 011.95	1.25
园地	5 515	5.9	1 218.84	-0.09	5 298	1.77	1 205.51	-1.18
草地	1 083	-5.9	1 219.40	0.86	1 146	-0.43	1 166.55	-3.51
水域	1 311	-2.3	537.66	-0.40	1 427	6.33	588.91	9.10
建设用地	1 635	36.8	1 493.68	0.53	1 233	3.18	1 295.62	-12.80
未利用地	75	-34.8	706.52	-5.52	107	-6.96	699.05	-6.52

出现不同程度的减少,说明该情景下城市边界的扩张挤占了部分生态空间,不利于可持续发展。

由表 4 可见,基于生态空间保护情景模拟的 2035 年海南岛的建设用地较 2015 年增幅为 3.18%,城镇化增长的迅猛势头大为减缓。保障生态空间的林地、草地和水体总面积比 2015 年增加 0.52%。其中,林地面积与 2015 年相比微增 0.12%,与 1995—2015 年大幅减少的趋势相比,已被遏制并得到改善。

3.3.2 未来土地利用变化情景对产水量的影响

假设 2035 年研究区多年平均蒸散量及多年平均降水量同 2015 年保持一致,据此进行 2035 年海南岛产水量模拟。图 6~8 为 2035 年海南岛不同情景下土地利用及产水量模拟及变化情况,自然发展情景下,2035 年海南岛平均产水深度为 1111.68 mm,比 2015 年增加 7.38 mm。从空间上看,自然发展情景下产水深度增加区域主要位于海口和三亚两大城市扩张区域及部分零碎的山地区域

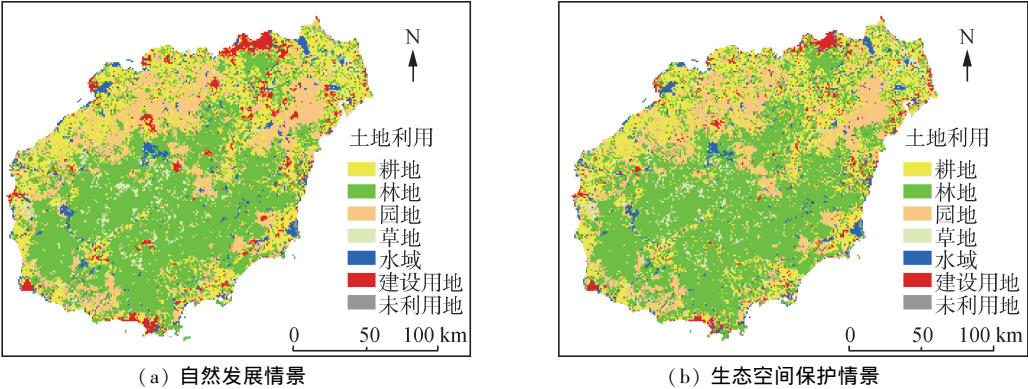


图 6 2035 年海南岛不同情景下土地利用情况

Fig. 6 Land use change in Hainan Island in 2035 under different scenarios

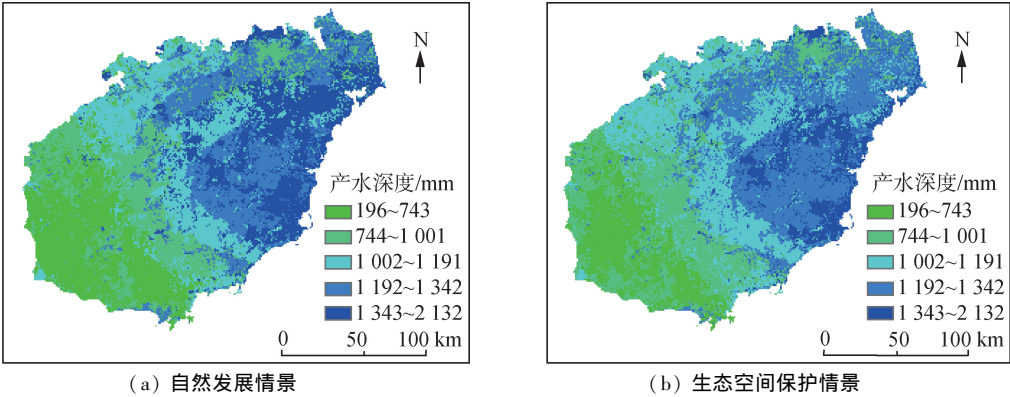


图 7 2035 年海南岛不同情景下产水深度情况

Fig. 7 Water yield depth of Hainan Island in 2035 under different scenarios

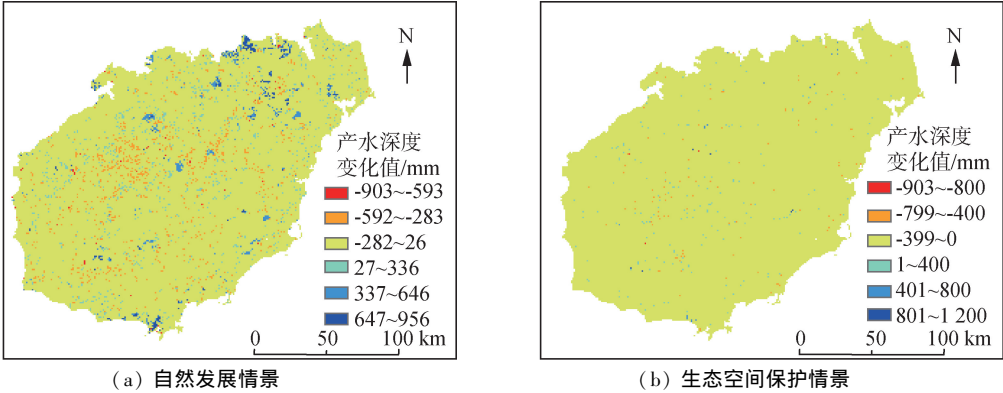


图 8 2015—2035 年海南岛不同情景下产水深度变化情况

Fig. 8 Water yield changes of Hainan Island from 2015 to 2035 under different scenarios

(图 8(a));2035 年海南岛产水量为 378.15 亿 m^3 , 较 2015 年增加 2.51 亿 m^3 , 增长 0.67%。自然发展情景下海南岛延续着城镇快速发展的趋势, 城镇建设使得不透水面增加, 从而导致地表径流的增长, 在此过程中需要防范城镇区域的洪涝灾害。生态空间保护情景下, 2035 年海南岛平均产水深度为 1102.02 mm, 较 2015 年减少 2.28 mm; 空间上, 2015—2035 年产水深度无明显增加区域(图 8(b)), 显著少于自然发展情景;2035 年海南岛产水总量为 374.86 亿 m^3 , 比 2015 年减少 0.78 亿 m^3 , 降幅为 0.21%, 比自然发展情景减少 3.29 亿 m^3 。这主要是因为生态空间保护情景中, 占海南岛比例最大的林地数量得以保留并略有增长。由于林草地对地表径流的拦截以及水域的蓄洪作用, 减少地表径流, 能够很好地抑制产水量的增加。不仅能够降低洪涝风险, 还能达到生物多样性保护、水源地保护、水土保持等目的。因此, 在坡地实施退耕还草还林、设置重点生态功能保护区等政策, 对海南岛生态系统功能保护有重要意义。

4 结 论

海南岛 1995—2015 年土地利用变化主要特征是快速的城镇化进程, 表现为城镇化对林地和耕地的占用。产水量的模拟结果表明, 1995—2015 年海南岛的产水量增加, 产水深度空间上形成了东北高—西南低的非均衡分布格局; 在各土地利用类型中, 建设用地的单位面积产水能力最高, 园地次之, 水域最低。对 2035 年土地利用变化的模拟结果显示, 在自然发展情境下, 海南岛仍延续快速的城市化趋势, 导致产水总量比 2015 年增长了 0.67%; 在生态空间保护情景下, 实施生态空间保护政策, 使林地剧减的趋势得以减缓, 有效抑制区域产水量, 这表明实施严格的生态红线保护及退耕还林还草等政策, 能够提升水源涵养、水土保持能力及碳汇等生态系统功能, 降低洪涝风险。因此, 一方面要科学管控城市的规模及其发展速度, 城市建设用地产水量较高, 降水到达城市不透水面后通过地下管网直接排掉, 难以被人类循环利用; 另一方面, 要尽量减少对林地的侵占, 增加城市绿化面积, 保障城市的生态空间, 同时发挥水库对降水的拦蓄作用, 提高水资源利用率, 这对降低暴雨洪涝风险, 提升城市抗灾能力有积极作用。

参考文献:

[1] 陈广生, 田汉勤. 土地利用/覆盖变化对陆地生态系统碳循环的影响[J]. 植物生态学报, 2007, 31(2): 189-204. (CHEN Guangsheng, TIAN Hanqin. Land use/cover

change effects on carbon cycling in terrestrial ecosystems [J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(2): 189-204. (in Chinese))

- [2] 邵璞, 曾晓东. 土地利用和土地覆盖变化对气候系统影响的研究进展[J]. 气候与环境研究, 2012(1): 105-113. (SHAO Pu, ZENG Xiaodong. Progress in the study of the effects of land use and land cover change on the climate system[J]. Climatic and Environmental Research, 2012(1): 105-113. (in Chinese))
- [3] 吕乐婷, 张杰, 江源, 等. 土地利用变化对东江流域产流过程影响的定量评估[J]. 水资源保护, 2018, 34(3): 45-51. (LYU Leting, ZHANG Jie, JIANG Yuan, et al. Quantitative assessment on influence of land use change on process of runoff production in Dongjiang River Basin [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(3): 45-51. (in Chinese))
- [4] REDHEAD J W, STRATFORD C, SHARPS K, et al. Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale[J]. Science of the Total Environment, 2016(569/570): 1418-1426.
- [5] SHIRMOHAMMADI B, MALEKIAN A, SALAJEGHEH A, et al. Impacts of future climate and land use change on water yield in a semiarid basin in Iran [J]. Land Degradation and Development, 2020, 31(10): 1252-1264.
- [6] DAI E, WANG Y. Attribution analysis for water yield service based on the geographical detector method: a case study of the Hengduan Mountain region [J]. Journal of Geographical Sciences, 2020, 30(6): 1005-1020.
- [7] 顾晋怡, 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))
- [8] 潘韬, 吴绍洪, 戴尔阜, 等. 基于 InVEST 模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化[J]. 应用生态学报, 2013(1): 183-189. (PAN Tao, WU Shaohong, DAI Erfu, et al. Spatiotemporal variation of water source supply service in Three Rivers Source Area of China based on InVEST model. [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013(1): 183-189. (in Chinese))
- [9] 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))
- [10] 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 Shaishai, 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))
- [11] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念, 方法与进展[J]. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441-446. (FU Bojie, ZHANG Liwei. Land-use change and ecosystem services: concepts, methods and progress[J]. Progress in Geography, 2014, 33 (4): 441-446. (in Chinese))
- [12] VERBURG P H, SOEPBOER W, VELDKAMP A. Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model[J]. Environmental Management, 2002, 30 (3): 391-405.
- [13] HE Chunyang, ZHANG Da, HUANG Qingxu, et al. Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD-urban and InVEST models[J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 75(1): 44-58.
- [14] LIU Xiaoping, LIANG Xun, LI Xia, et al. A future land use simulation model(FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. Landscape & Urban Planning, 2017, 168: 94-116.
- [15] 王旭, 马博文, 李丹, 等. 基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 230-242. (WANG Xu, MA Bowen, LI Dan, et al. Multi-scenario simulation and prediction of ecological space in Hubei Province based on FLUS model[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 230-242. (in Chinese))
- [16] 吴欣昕, 刘小平, 梁迅, 等. FLUS-UGB 多情景模拟的珠江三角洲城市增长边界划定[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20 (4): 532-542. (WU Xinxin, LIU Xiaoping, LIANG Xun, et al. Multi-scenarios simulation of urban growth boundaries in Pearl River Delta based on FLUS-UGB[J]. Journal of Geo-Information Science, 2018, 20 (4): 532-542. (in Chinese))
- [17] 杨露, 颜耀文, 宗乐丽, 等. 基于多目标遗传算法和 FLUS 模型的西北农牧交错带土地利用优化配置[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 568-579. (YANG Lu, XIE Yaowen, ZONG Leli, et al. Land use optimization configuration based on multi-objective genetic algorithm and FLUS model of agro-pastoral ecotone in northwest China[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22 (3): 568-579. (in Chinese))
- [18] 李海亮, 汪秀华, 戴声佩, 等. 基于环境减灾卫星 CCD 数据的海南岛洪涝灾害监测[J]. 农业工程学报, 2015, 31 (17): 191-198. (LI Hailing, WANG Xiuhua, DAI Shengpei, et al. Flood monitoring in Hainan Island based on HJ-CCD data[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31 (17): 191-198. (in Chinese))
- [19] 刘少军, 张京红, 蔡大鑫, 等. 台风过程引发洪涝灾害的风险评估: 以海南岛为例[J]. 自然灾害学报, 2010, 19 (3): 146-150. (LIU Shaojun, ZHANG Jinghong, CAI Daxin, et al. Risk assessment of flood disaster triggered by typhoon process: a case study on Hainan Island[J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19 (3): 146-150. (in Chinese))
- [20] 童宏良. 我国蒸发力计算的气候学方法[J]. 大气科学学报, 1989, 12(1): 19-33. (TONG Hongliang. A climatic calculation method for the evaporation power in China [J]. Transactions of Atmospheric Sciences 1989, 12(1): 19-33. (in Chinese))
- [21] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56[R]. Rome: FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [22] CANADELL J, JACKSON R B, EHLERINGER J B, et al. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale[J]. Oecologia, 1996, 108(4): 583-595.
- [23] 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): 89-97.
- [24] 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): 131-146. (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): 131-146. (in Chinese))
- [25] 孙小银, 郭洪伟, 廉丽姝, 等. 南四湖流域产水量空间格局与驱动因素分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(4): 669-679. (SUN Xiaoyin, GUO Hongwei, LIAN Lishu, et al. The spatial pattern of water yield and its driving factors in Nansi Lake Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(4): 669-679. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-10-28 编辑: 王芳)

(上接第 96 页)

- [17] 孔波, 付少杰, 黄强. 大型复杂跨流域调水工程电站 - 水库 - 泵站群多目标优化调度[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 67-72. (KONG Bo, FU Shaojie, HUANG Qiang. Multi-objective optimal operation of hydropower plant-reservoir-pumping station group in large complex inter-basin water transfer projects [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 67-72. (in Chinese))
- [18] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Perth: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [19] ZITZLER E, DEB K, THIELE L. Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: empirical results [J]. Evolutionary Computation, 2000, 8(2): 173-195.

(收稿日期: 2019-10-28 编辑: 俞云利)