

DOI: 10.20103/j.stxb.202304220838

常云蕾, 廖静娟, 张丽. 全球红树林时空变化及演变趋势. 生态学报, 2024, 44(9): 3830-3843.

Chang Y L, Liao J J, Zhang L. Spatio-temporal changes and trends of global mangroves. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(9): 3830-3843.

全球红树林时空变化及演变趋势

常云蕾^{1,2,3}, 廖静娟^{1,2,*}, 张 丽^{1,2}

1 中国科学院空天信息创新研究院数字地球重点实验室, 北京 100094

2 可持续发展大数据国际研究中心, 北京 100094

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 红树林是全球重要的生态系统, 了解红树林的时空变化特征及演变趋势对开展红树林的保护、恢复及可持续管理具有重要意义。基于谷歌地球工程 (Google Earth Engine, GEE) 云平台, 利用全球红树林分布数据和陆地卫星 (Landsat) 系列光学影像特征指数数据, 结合 Theil-Sen 中值趋势分析、Mann-Kendall 检验、Hurst 指数等方法, 分析了全球红树林的时空分布特征、时空演变趋势及其可持续特征。结果表明: 1990—2020 年全球红树林面积呈先下降后上升趋势, 总面积减少 52174.18 km², 年平均流失率达 1.2%, 红树林面积减少最多的地区为东南亚, 其次为澳大利亚和新西兰、南美洲和东南非洲; 红树林呈退化趋势变化的面积 (81.44%) 明显多于改善区域的面积 (17.43%), 其中澳大利亚和新西兰的退化趋势最为明显; 2015—2020 年全球红树林变化趋势有所改善, 有 73.85% 的区域在未来是可持续的, 持续改善区域面积 (38.58%) 大于持续退化区域面积 (33.06%), 且改善区域的可持续性明显高于不可持续性, 表明 2020 年之后全球红树林整体上呈改善趋势变化。全球红树林时空变化特征和演变模式, 可为生物多样性保护、沿海经济发展、生态环境的可持续改善提供重要支撑, 对评估联合国 2030 可持续发展目标实现状况具有重要影响。

关键词: 红树林; Google Earth Engine; 时空演变; 可持续特征; 全球

Spatio-temporal changes and trends of global mangroves

CHANG Yunlei^{1,2,3}, LIAO Jingjuan^{1,2,*}, ZHANG Li^{1,2}

1 Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

2 International Research Center of Big Data for Sustainable Development Goals, Beijing 100094, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Mangrove forests are intertidal herbaceous and woody wetland communities that grow on tropical and subtropical coastal mudflats and riverbanks, and are one of the most productive and biologically significant ecosystems, providing important support for the development of coastal ecology, economy and society in all aspects. However, mangrove forests are one of the most vulnerable and threatened ecosystems in the world due to their special growing locations. Aquaculture, urban development, environmental pollution, deforestation, and sea-level rise are constant threats to mangrove growth. This loss of mangrove forests greatly threatens the survival and development of human beings. In recent years, the management and conservation of mangrove forests have received worldwide attention, including methods for the scientific and effective monitoring of mangrove forests. Understanding of the spatial and temporal changes and trends of mangrove forests is very important for the conservation, restoration and sustainable management of mangrove forests. Based on the Google Earth Engine (GEE) cloud computing platform, this study used global mangrove distribution data and Landsat series optical image feature index data, combined with Theil-Sen median trend analysis, Mann-Kendall test, and Hurst index to analyze

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) (XDA19030302)

收稿日期: 2023-04-22; **网络出版日期:** 2024-02-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liaojj@aircas.ac.cn

the spatio-temporal distribution characteristics of global mangrove forests, their spatio-temporal evolution trends and their sustainability characteristics. Firstly, the global mangrove area declined and then increased from 1990 to 2020, with a net decrease of 52174.18 km² in total area, and overall disappeared at an average rate of 1.2% per year. The most serious region of mangrove loss was in Southeast Asia over the world, followed by Australia and New Zealand, South America, and East and Southern Africa. The area of mangrove forests showing changes in degradation trends (82.8%) was significantly larger than the area of improved areas (17.43%), with the most pronounced degradation trends in Australia and New Zealand. Then, the global trend of mangrove forest change in 2015—2020 improved, 73.85% of the global mangrove forests are sustainable in the future, with the area of persistently improving areas (38.58%) being larger than the area of persistently degrading areas (33.06%), and the sustainability of the improving areas being significantly higher than that of the unsustainable ones, indicating an overall improving trend change in global mangrove forests after 2020. The spatio-temporal changes and trends of global mangrove forests can provide important supports for biodiversity conservation, coastal economic development, and sustainable improvement of ecological environment, and will have a significant impact on the assessment of the realization of the United Nations 2030 Sustainable Development Goals (SDGs).

Key Words: mangrove; Google Earth Engine; spatio-temporal changes; sustainable characteristics; globe

红树林是一种生长在热带和亚热带海岸潮间带的草本植物群落,是最具生产力和生物学意义的生态系统之一^[1]。作为海岸重要生态关键区,红树林为沿海生态、经济、社会等各方面的发展提供着重要支撑^[2-6]。然而,红树林地处海陆交界的特殊地带,是全球最脆弱的生态系统之一,生存极易受到围海建陆、水产养殖、木材砍伐、人工建设、极端天气、海平面上升等自然和人类活动的影响^[7-9]。联合国粮食及农业组织的统计报告中指出,20 世纪 80 年代全球红树林损失估计为每年 0.99%,90 年代的年均损失率为 0.7%^[10]。进入 21 世纪后,红树林的保护和恢复工作逐渐得到各国政府和相关组织的重视,2000 年后的红树林砍伐趋势为每年 0.16%至 0.39%,相比于过去的几十年,红树林年损失率显著下降,但整体上红树林面积仍在不断减少^[11]。按照这种趋势发展,全球红树林仍将会逐渐消失,其提供的生态系统服务和产品也将荡然无存,严重威胁到沿海地区经济和社会的发展^[12]。因此,开展全球红树林的时空变化特征分析并探究其长时间序列的时空演变模式,对红树林的保护、恢复及可持续管理具有重要意义。

目前,得益于遥感技术的应用,红树林生态系统时空变化监测的研究已经得到广泛开展,并获得了诸多成果,但仍存在一些值得深入研究之处。首先,目前全球红树林研究多局限于对红树林的面积变化分析,缺乏像元尺度上红树林覆盖空间变化特征分析,且在时间跨度及数据时效方面需要进一步提升^[13-14];其次,在处理大尺度长时序遥感影像时需要很大的计算资源,在目前已有的大范围红树林动态监测中,较少开展长时间序列的红树林趋势变化分析。本研究首先基于已有的红树林分布数据集,开展 1990—2020 年全球红树林面积变化的时空分布特征分析;然后基于谷歌地球工程(Google Earth Engine, GEE)云计算平台^[15-16],采用 Landsat 长时序影像数据和红树林分布数据,结合 Theil-Sen 中值趋势分析和 Mann-Kendall 检验方法,基于增强植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)分析 1990—2020 年全球红树林的时空变化趋势;最后,进一步结合 Hurst 指数分析 2015—2020 年全球红树林时空变化趋势的可持续特征,为红树林的保护、恢复和利用提供科学合理的理论依据和决策支持。

1 研究区概况

红树林分布于沿海热带和亚热带海陆之间的潮间带,主要位于北纬 30°至南纬 30°之间。全球红树林种类复杂,结构多样,广泛地分布于 118 个国家和地区,由于沿海栖息地的不同,全球真红树植物约有 60 种^[17]。在过去的几十年中,随着池塘养殖、土地开垦和森林乱砍滥伐等沿海地区的过度开发,红树林遭到了严重的破坏,在全球范围内红树林面积均显著减少。近年来,随着可持续发展目标的提出,政府采取了退耕还湿、退塘

还湿等措施,加强了对红树林的保护;同时,民众的保护意识也得到了显著提高,全球红树林面积有所恢复。

本研究将 1990、2000、2010、2015、2020 年有红树林生长的所有区域及其周边 1 km 缓冲区作为红树林分布区,如图 1 所示。

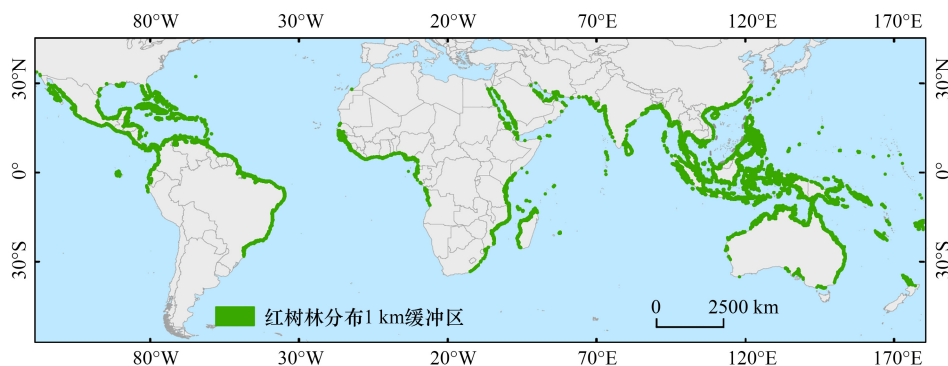


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

2 数据源

2.1 红树林分布数据

本文采用的红树林分布数据时间范围为 1990、2000、2010、2015、2020 年。该数据集是利用无云或云量少于 20% 的多时相 Landsat 影像经过大气校正、波段合成等预处理,基于 Capsules-Unet 深度学习模型^[18–19]分别提取 2000 年和 2010 年全球红树林空间分布信息,在此基础上,利用 2000 年数据、2010 年数据目视解译分别提取 1990 年、2015 年和 2020 年全球红树林分布数据,从而得到 5 期全球红树林分布数据集^[20]。该数据集利用公开的红树林数据集^[21–22]相互重叠的区域作为选取红树林样本点的参考区域,并参考相关年份的高分辨率影像随机布设验证点,共布设红树林验证点 1443 个,非红树林验证点 1046 个,得到该数据集 1990、2000、2010、2015、2020 年的总体精度分别为 87%、90%、88%、88%、91%。

2.2 EVI 分布数据

归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)和 EVI 在监测和评估植被数量和条件的时空变化方面表现出良好的动态范围和敏感性^[18]。在湿润环境下进行高密度植被监测时,NDVI 指数可能会出现过饱和的问题。而 EVI 指数能够减少大气或地表生长等因素所带来的误差。此外,与 NDVI 相比,EVI 对针叶/阔叶树冠结构更加敏感,尤其在高生物量区域,NDVI 会逐渐饱和,而 EVI 对冠层变化仍然保持敏感^[23]。红树林是常绿阔叶林的一种,也是全球生产力和碳密度最高的生态系统之一,其结构属性(冠层高度)具有高度空间异质性,因此,本文选择采用 EVI 来分析红树林生长变化趋势。

研究中使用的 EVI 分布数据为 GEE 云平台存储的 EVI 年际均值数据(<https://developers.google.com/earth-engine/datasets>)。其中,1990—2012 年由 Landsat5 TM (Collection 1 Tier 1) 生成、2013 年由 Landsat7 (Collection 1 Tier 1) 生成、2014—2020 年由 Landsat8 (Collection 1 Tier 1) 生成。为了更好地确定不同时期的研究区范围,本研究以 1990—2020 年作为研究时间范围,选取 1990、2000、2010、2015、2020 年出现过红树林的区域作为研究区范围。利用 1990、2000、2010、2015、2020 年合并后的红树林范围对 EVI 分布数据进行掩膜处理,从而获取 1990—2020 年全球红树林 EVI 逐年均值分布数据。

3 研究方法

在本研究中,首先基于 GEE 平台获取 1990—2020 年全球 EVI 年际均值数据,利用 1990、2000、2010、

2015、2020 年全球红树林数据对 EVI 分布数据做掩膜处理,生成全球红树林 EVI 逐年均值分布数据。然后,将 Theil-Sen 中值分析和 Mann-Kendall 检验方法相结合,分析 1990—2020 年红树林在时间和空间上的变化趋势,并对时空变化的原因和影响进行定性分析。最后,结合 Hurst 指数,进一步探讨 2015—2020 年全球红树林时空变化的持续性特征,预示红树林的未来变化趋势。

3.1 趋势分析

目前广泛应用的植被长时间序列分析方法是 Will 中值趋势分析和 Mann-Kendall 检验方法结合起来进行趋势分析^[24—25],其中 Theil-Sen 中值方法是一种稳健的非参数统计趋势分析方法^[26—27],其基本原理是计算 $n(n-1)/2$ 对数据组合的斜率中位数,公式如下:

$$S = \text{Median} \left(\frac{\text{Index}_j - \text{Index}_i}{j - i} \right) \quad (1)$$

式中,Median()代表取中值,Index_i 和 Index_j 为第 i 年和第 j 年的时间序列数据。 $S > 0$,表示时间序列数据呈上升趋势,否则呈下降趋势。

Mann-Kendall 检验是一种非参数统计的显著性检验方法,无需样本数据服从一定分布。其计算公式如下:

对于一组时间序列数据 {Index_i} ,定义统计量 Z :

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{s(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{s(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sgn}(\text{Index}_j - \text{Index}_i)$,

$$\text{sgn}(\text{Index}_j - \text{Index}_i) = \begin{cases} 1, & \text{Index}_j - \text{Index}_i > 0 \\ 0, & \text{Index}_j - \text{Index}_i = 0, s(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \\ -1, & \text{Index}_j - \text{Index}_i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中,Index_i 和 Index_j 分别为第 i 年和第 j 年的 Index 值; n 为时间序列数据的跨度; Z 的值域为 $(-\infty, +\infty)$ 。在给定的显著水平 α 下,当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ 时,说明该时间序列数据具有显著性变化,包括显著上升或显著下降趋势。一般来说, α 取值为 0.05。

根据 Theil-Sen 中值斜率和 Mann-Kendall 检验的结果,红树林变化趋势被划分为 5 个级别,如表 1 所示。

表 1 红树林时空变化趋势分级

Table 1 Classification of spatio-temporal trends of mangrove

S	Z	变化趋势等级 Level of change trend	S	Z	变化趋势等级 Level of change trend
≥ 0.005	≥ 1.96	显著改善	< -0.005	$-1.96 \sim -1.96$	轻微退化
≥ 0.005	$-1.96 \sim -1.96$	轻微改善	< -0.005	< -1.96	显著退化
$-0.005 \sim -0.005$	$-1.96 \sim -1.96$	稳定不变			

S : 斜率 Slope; Z : 统计量 Statistic

3.2 可持续分析

Hurst 指数是一种判断时间序列数据可持续性的方法,对于植被变化的时间序列监测比较有效^[28—29],在此用于红树林的可持续性判断。原理如下:

给定一组时间序列数据 Index_t, $t = 1, 2, \dots$, 计算其平均值:

$$\overline{\text{Index}_\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} \text{Index}_i, \tau = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

累积离差:

$$X_{(t,\tau)} = \sum_{i=1}^t (\text{Index}_i - \overline{\text{Index}_\tau}), 1 \leq t \leq \tau \quad (5)$$

极差:

$$R_{(\tau)} = \max_{1 \leq t \leq \tau} X_{(t,\tau)} - \min_{1 \leq t \leq \tau} X_{(t,\tau)}, \tau = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

标准差:

$$S_{(\tau)} = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (\text{Index}_i - \overline{\text{Index}_\tau})^2 \right]^{1/2}, \tau = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

Hurst 指数:

$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} = (c\tau)^H \quad (8)$$

式中, H 可以通过方程 $\log(R/S)_n = \alpha + H \times \log(n)$ 利用最小二乘法拟合得到的。Hurst 指数的结果分为三种: (1) 当 $0.5 < H < 1$ 时, 表明数据具有正向持续性, 即未来变化与过去变化趋势一致; (2) 当 $0 < H < 0.5$ 时, 表明数据具有反向持续性, 未来变化与过去变化趋势相反; (3) 当 $H = 0.5$, 说明数据不具备可持续性, 即未来的变化趋势是随机的, 与过去不存在时间上的关联性。

4 结果与分析

4.1 全球红树林时空变化特征分析

全球红树林总面积在 1990—2020 年的变化如图 2 所示。1990—2020 年全球红树林总面积整体呈下降趋势, 由 1990 年的 171508.80 km² 减少至 2020 年的 119334.62 km², 整体上每年以 1.2% 的平均速度消失。其中 1990—2015 年持续下降, 2015—2020 年面积有所回升, 但并没有恢复到 2010 年的水平, 2015—2020 年全球红树林增加的面积仅占 2010—2015 年减少面积的 7.8%。

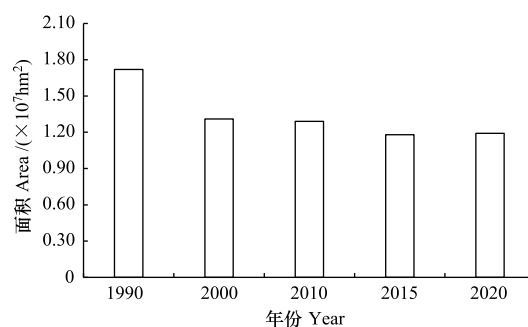


图 2 1990—2020 年全球红树林面积变化趋势

Fig. 2 Change trends of global mangrove area from 1990 to 2020

基于全球红树林分布数据, 以国家为单位分别统计 1990、2000、2010、2015、2020 年红树林面积并计算其面积变化率 (见附录)。全球红树林分布广泛, 本研究采用了全球红树林联盟在《世界红树林状况报告》^[30] 中使用的分区方法, 对全球红树林进行了分区, 分别为: 北中美洲和加勒比地区、南美洲、中西非、东南非、中东、南亚、东南亚、东亚、澳大利亚和新西兰、太平洋岛屿共十个区域。分区统计红树林面积并计算不同时段红树林面积变化率 (表 2 和图 3)。

结合表 2 和图 3, 可以看出, 东南亚是全球红树林的主要分布区域 (约占 31.85%), 其次为北中美洲和加勒比地区、南美洲、中西非, 这三个区域红树林面积相当, 且变化趋势一致, 红树林面积均在 1990—2000 年间急剧减少, 2000—2010 年面积有所回升, 但 2010 年开始面积依旧呈减少趋势变化, 直到 2015 年面积开始恢复。中东、南亚、澳大利亚和新西兰地区, 红树林面积在 1990—2020 年间持续减少。东亚地区的红树林面积虽然在 1990—2010 年间显著下降, 但是在 2010—2015 年期间, 红树林面积迅速恢复, 面积增加了 60.87 km²。从 1990—2020 年整个时段的红树林面积变化率来看, 十个区域红树林面积均呈下降趋势, 其中中东地区红树林面积下降率最大, 达到 80.93%, 其余依次为澳大利亚和新西兰 (54.09%)、太平洋岛屿 (43.02%)、东南非 (42.12%)、南美洲 (31.87%)、南亚 (29.88%)、东南亚 (28.18%)、中西非 (20.6%)、东亚 (19.73%)、北中美洲和加勒比地区 (16.77%)。

表 2 1990—2020 年红树林面积分区统计表/km²
Table 2 Statistics of regional mangrove area from 1990 to 2020

地区 Region	1990	2000	2010	2015	2020
北中美洲和加勒比 North & Central America & the Garibbean	23639.55	19185.50	20061.27	19255.20	19676.33
南美洲 South America	24796.13	17891.51	18212.86	16880.60	16892.68
中西非 West & Central Africa	23966.47	17995.22	18764.60	18697.26	19030.11
东南非 East & Southern Africa	12285.54	6870.95	7425.17	6951.22	7110.59
中东 Middle East	1005.09	309.75	231.35	205.89	191.64
南亚 South Asia	10738.37	8856.10	8385.79	7693.42	7529.58
东南亚 Southeast Asia	52058.01	45091.81	41861.83	36377.30	37388.97
东亚 East Asia	259.85	176.26	142.85	203.73	208.56
澳大利亚和新西兰 Australia & New Zealand	15006.79	9094.12	8719.49	7154.59	6888.36
太平洋岛屿 Pacific Islands	7753.00	5316.00	5476.65	5078.35	4417.79
总和 Total	171508.80	130787.21	129281.84	118497.53	119334.62

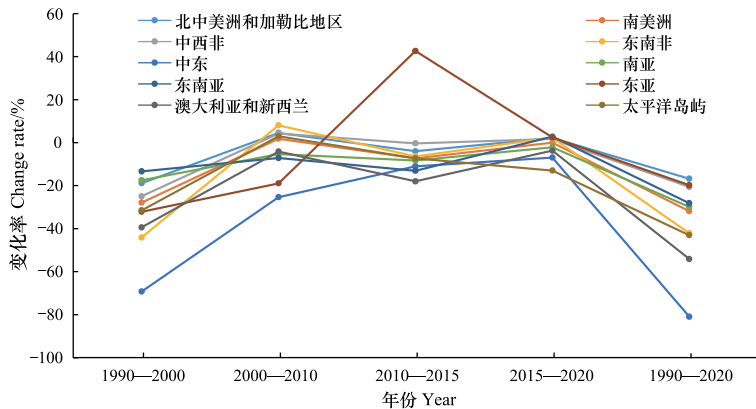


图 3 红树林分区面积变化率趋势
Fig.3 Trends of regional mangrove area change rates

本文采用正六边形(蜂窝网)来统计 1990—2020 年全球红树林面积变化率,并对其分级显示。考虑到格网形状存在边界效应,会产生一定的样本偏差,而正六边形具有很低的面积周长比,在削弱该偏差上具有优势。本研究分别统计了边长为 10 km、15 km、20 km、25 km、30 km、35 km、40 km 的蜂窝网数据,结果表明边长为 30 km 时更能体现红树林空间变化的分异特征,且成图效果更直观。因此选取边长为 30 km 的蜂窝网形式来表示 1990—2020 年全球红树林面积变化率的空间分布,并将变化率结果划分 11 个类别,结果如图 4 所示。

从图 4 可以直观地看出全球红树林 30 年的面积变化分布情况。从整体上来看,面积减少的区域占比远高于面积增加的区域,尤其在红树林分布的边缘,红树林面积严重下降,甚至大部分红树林消失,而增长的区域呈零星分布。红树林面积急剧下降的地区包括东加里曼丹和北加里曼丹、廖内和西巴布亚、孙德尔本斯、湄公河三角洲、伊洛瓦底江三角洲。红树林面积明显增加的区域主要位于墨西哥东部、巴西东南部、利比里亚和科特迪瓦的南部、坦桑尼亚东部、中国和所罗门群岛以及东南亚部分地区。

以蜂窝网为基本单位对 1990—2020 年全球红树林面积变化率分级统计,结果表明:1990—2020 年,红树林完全丧失区域高达 20.25%,变化率在-99%—-50%的区域占 25.41%,在-49%—-5%的占 31.1%,在-4%—-1%占 6.04%,面积变化增加的区域(变化率在 1%—99%)共占 11.1%,红树林新增区域即面积变化率为 100%的占 5.5%,面积不变的区域即面积变化率为 0%的区域仅占 0.6%。

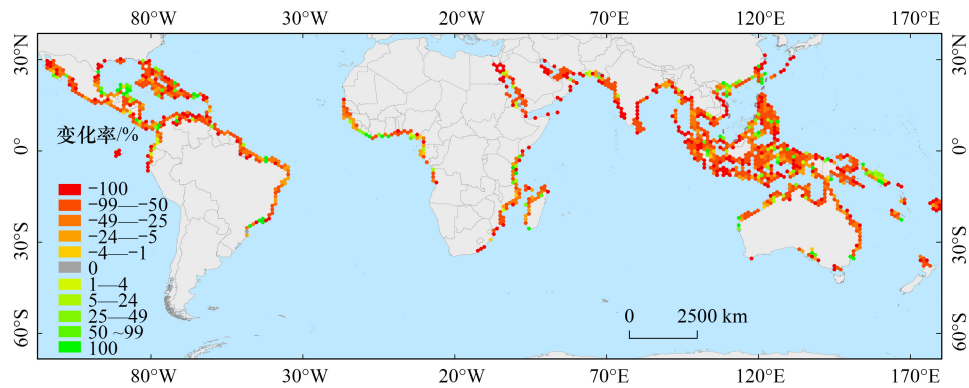


图 4 1990—2020 年全球红树林面积变化率空间分布

Fig.4 Spatial distribution of global mangrove area change rate from 1990 to 2020

4.2 全球红树林时空变化趋势分析

叠加 Theil-Sen 中值趋势分析和 Mann-Kendall 检验结果,得到像元尺度上全球红树林趋势变化数据。对全球红树林划分的十个区域内的红树林五种变化趋势等级进行了统计分析,并选取红树林广泛分布的保护区或受多种因素影响发生显著变化的部分区域作为典型研究区,分析其时空变化趋势及时空变化原因。结果如图 5 所示。

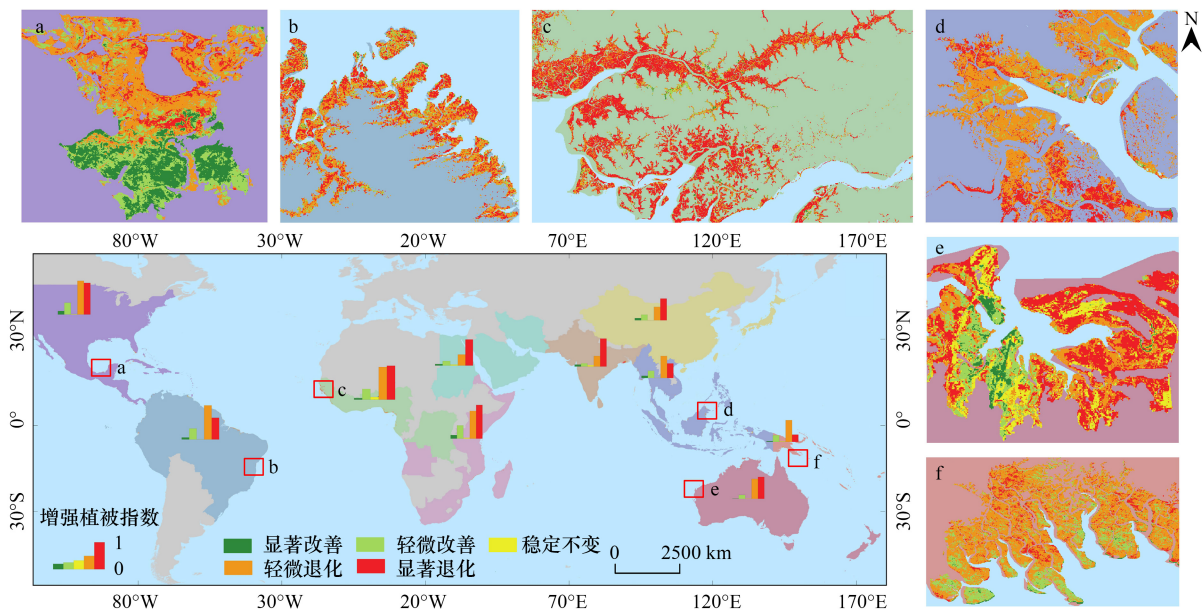


图 5 1990—2020 年全球红树林 EVI 变化趋势

Fig.5 Trends of global mangrove EVI from 1990 to 2020

a. 墨西哥特米诺斯泻湖 Teminos Lagoon of Mexico; b. 巴西塞阿拉河口 Ceará River estuary of Brazil; c. 几内亚比绍 Bijagós 群岛 Bijagós Islands of Guinea-bissau; d. 印度尼西亚加里曼丹 Tanjung Putting of Indonesia; e. 西澳大利亚州北部 Northern Western Australia; f. 巴布亚新几内亚莫尔兹比港 Port Moresby of Papua New Guinea; EVI: 增强植被指数 Enhanced vegetation index

全球红树林退化趋势明显,退化的区域明显多于改善的区域,呈退化趋势变化的区域占全球红树林分布的 81.44%,其中,轻微退化占 42.92%,显著退化占 38.52%,而改善的区域仅占总面积的 17.43%,稳定不变即没有发生显著变化的占 1.18%。分别统计全球十个区域内红树林趋势变化类别占比,并生成柱状图(图 5)。从图 5 可以看出,十个区域内红树林退化的区域均多于改善的区域,且呈退化趋势的区域占比均在 70%以上,

改善区域均占 20%左右。澳大利亚和新西兰退化趋势最为明显,退化区域面积占该区域红树林总面积的 90.02%,仅有 9.27%的区域表现为改善趋势。南美洲、东南非、东南亚、太平洋岛屿的红树林改善趋势相对于其他几个区域较好,改善区域占比达到 20%以上,虽然整体上呈现退化趋势,但是改善的区域也在不断增加。中西非地区红树林有 3.14%的区域保持不变,说明该地区部分红树林分布存在一定的稳定性,与该地区红树林大片连续分布的特点有关,红树林分布内部受各种因素影响较小,因此分布较为稳定。北中美洲和加勒比地区红树林主要表现为轻微退化和显著退化,分别占比 41.48%和 38.97%,19.02%的区域呈改善趋势变化,仅有 0.54%的区域保持不变。中东和南亚地区的红树林严重退化,显著退化的区域占比最高,轻微退化的区域次之,其中显著退化的占比均在 60%以上,轻微退化占比均在 25%左右。

(1) 特米诺斯泻湖(Teminos Lagoon)(图 5a):该区域是墨西哥的一个沿海泻湖,几乎完全被广阔的红树林包围。该红树林分布区北部受墨西哥湾的影响,红树林主要呈现为退化趋势,而南部地区受潮汐影响较小,且附近地区居民红树林保护意识不断增强,该区域红树林明显改善,尤其在居民区附近的红树林,主要表现为显著改善,轻微改善和显著改善伴随分布。

(2) 塞阿拉河河口(Ceará River estuary)(图 5b):该区域是位于巴西北部的一个红树林保护区,该保护区位于巴西人口分布最稠密的地区(人口密度 55.2 人/km²),城镇化率(76.4%)较高(数据来自百度百科),红树林在 1990—2020 年整体上呈明显的退化趋势,显著退化和轻微退化伴随分布,退化的区域远远多于改善的区域,在红树林内部有少量呈现轻微改善。

(3) Bijagós 群岛(图 5c):该区域为几内亚比绍的主要红树林分布区,该区域内红树林沿着被潮汐淹没的河道分布,对整个国家来说具有极其重要的农业价值。在 1990—2020 年间,Bijagós 群岛红树林严重退化,在红树林分布四周主要呈显著退化趋势,并由四周向中心逐渐扩展,仅有少量红树林在该群岛西部有所改善。

(4) 加里曼丹(Tanjung Puting)(图 5d):该区域是印度尼西亚五个重要生物保护圈之一,该区域内的红树林为大量野生动物提供了必不可少的生存环境。该区域北部红树林主要表现为轻微退化,南部红树林显著退化,退化区域集中分布,尤其在红树林大面积分布区退化趋势更为明显,改善的区域主要分布在南部红树林中心,多呈轻微改善。

(5) 西澳大利亚(Western Australia)(图 5e):澳大利亚红树林是全球第三大红树林分布区。位于西澳大利亚北部剑桥湾附近的红树林变化趋势具有明显的空间分布特征,从整体上来看,该区域内红树林四周显著退化和轻微退化伴随分布,显著退化主要分布于红树林边缘,退化区域不断向中心扩展,在西部有部分红树林显著改善,轻微改善分布在显著改善周围。

(6) 莫尔兹比港(Port Moresby)(图 5f):该区域位于巴布亚新几内亚南部,拥有整个国家最丰富的红树林物种。该地区红树林轻微退化和轻微改善区域分布比较广泛,且呈明显的交叉分布,其中,轻微退化多分布于南部内陆,在北部沿海红树林变化呈现为轻微改善。显著退化的区域零星分布于中部,并在北部有少量集中分布。

4.3 全球红树林变化趋势可持续特征分析

根据红树林时空变化趋势分级(表 1),并结合 Hurst 指数的可持续分析判断依据(见章节 3.2),在 GEE 上逐像元计算 2015—2020 年全球红树林 EVI 变化趋势和可持续性,得到了全球红树林 EVI 的可持续变化趋势图,并统计了 6 个持续类别的面积占比,如图 6 所示。

从图 6 可知,全球红树林在 2015—2020 年有 73.85%的区域是可持续的,26.15%不可持续。其中,持续改善占 38.58%,持续退化的占 33.06%,全球红树林的正向持续性强于反向持续性,说明在 2020 年之后红树林呈退化趋势变化的面积仍多于改善区域的面积。对全球划分的十个区域红树林可持续性变化类型统计分析,结果表明,北中美洲和加勒比地区、中东、澳大利亚和新西兰地区的红树林持续改善区域均达到 40%以上,但是持续退化的面积占比也相对较高,分别占 39.32%、50.51%、53.75%,持续退化区域的面积仍然高于持续改善的区域面积。南美洲和中西非红树林呈不可持续变化的区域分别占红树林总面积的 42.51%和 45.81,其反向

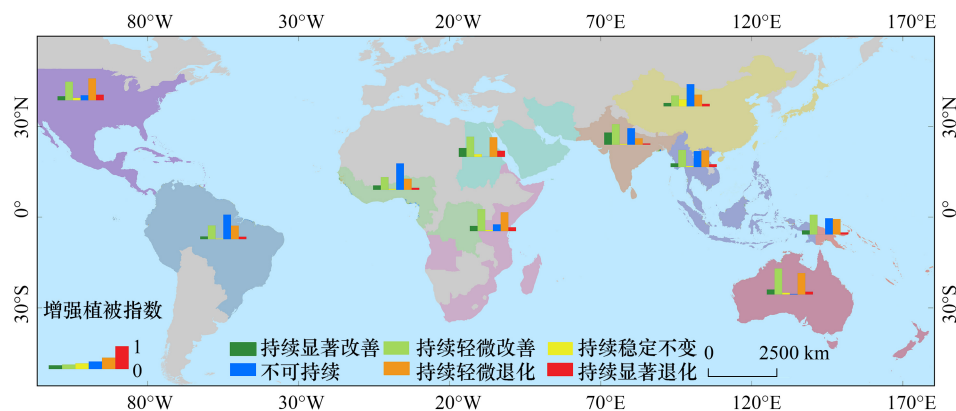


图 6 2015—2020 年全球红树林 EVI 可持续变化趋势

Fig.6 Sustainable trends of global mangrove EVI from 2015 to 2020

EVI: 增强植被指数 Enhanced Vegetation Index

持续性占比较高,在制定红树林保护及恢复策略时,应结合 2015—2020 年时间序列变化趋势结果与可持续性变化结果,考虑改善区域的反向持续变化。东亚地区红树林是稳定不变占比最高的区域,但是其持续改善区域占比仅占 24.80%,且大多呈现持续轻微改善。东南非、南亚、东南亚和太平洋岛屿地区红树林持续退化占比分别为 46.93%、56.74%、36.22%、41.43%,尤其在南亚,其红树林持续显著退化区域占比达到 21.14%,表明该地区红树林在未来仍会呈现大面积退化。从整体上来看,2015—2020 年全球红树林有改善趋势,且在未来具有一定的可持续性,但是持续退化的区域占比也相对较高,在保证红树林稳定不变的同时,应加大力度管理持续退化区域的红树林。

5 结论与讨论

依据全球红树林分布数据和 GEE 平台提供的 Landsat 系列光学影像特征指数数据,结合 Theil-Sen 中值趋势分析、Mann-Kendall 检验、Hurst 指数等方法,探讨了全球红树林的时空变化特征和时空演变模式,主要结论如下:

(1) 从时空分布特征上,1990—2020 年,全球红树林面积先下降后上升,总面积净减少 52174.18km²,整体上每年以 1.2% 的平均速度消失,十个区域中东南亚面积下降最为严重,其次为澳大利亚和新西兰、南美洲、东南非等。利用蜂窝网统计的 1990—2020 年全球红树林面积变化率的空间分布中,红树林面积减少的区域占 82.8%,面积增加的区域占 16.6%,面积不变的仅占 0.6%。

(2) 从时空演变趋势上,1990—2020 年全球红树林呈退化趋势变化的面积(81.44%)明显多于改善的区域面积(17.43%),其中澳大利亚和新西兰的退化趋势最为严重,显著退化和轻微退化的面积分别占 47.07% 和 42.95%。

(3) 从变化趋势可持续特征上,2015—2020 年,全球红树林变化趋势有所改善,持续改善区域面积(38.58%)大于持续退化区域面积(33.06%),且改善区域的可持续性明显高于不可持续性,说明 2020 年之后全球红树林整体上呈改善趋势变化。

红树林湿地生态系统可以为人类提供有价值的社会、经济和环境服务,为确保红树林生态系统价值的可持续利用,联合国可持续发展目标在 2015 年将红树林列为生态系统指标^[31—32]。可持续地管理红树林生态系统离不开有效的政策实施以及基于可持续发展概念中各种行动计划和战略的支持。然而,制定合理的红树林管理策略需要充分了解红树林的时空分布和演变特征。本研究探讨了全球红树林时空变化特征和演变模式,可为生物多样性的保护、沿海经济的发展、生态环境的可持续改善提供重要支撑。研究取得了一些具有参考

价值的成果,但研究工作中仍存在不足之处:由于红树林分布范围大,获取全球红树林实时分布范围相对困难。因此全球红树林时空分布特征研究受到已有红树林分布数据时间和覆盖范围的限制,时间间隔为五年或十年。之后的研究可以充分利用 GEE 云平台的优势,以增量更新的方式提取时间间隔更短的红树林分布数据,进而对全球红树林的长时序时空变化特征开展更稳定详细的分析。

本文的研究结果表明,红树林的损失受人为和自然环境多种因素的影响,相比于自然因素,人为因素对红树林的影响破坏力度更大、影响范围更广、持续时间更长,人口增长所导致的经济发展需求是红树林面积退化的最主要原因。从社会经济角度看,红树林可持续发展充满挑战的原因主要包括:(1)人们没有意识到红树林的损失会直接导致经济损失,也意味着红树林更为宝贵的生态系统价值和效益不会得到重视;(2)缺乏红树林生态系统的长期可持续监测方法,尚未发展针对区域的红树林生态系统可持续利用模式;(3)人口增长率和经济需求高,引发了土地利用和土地覆盖的变化。因此,如何在保证沿海社会经济稳步发展的同时,实现红树林的恢复与沿海居民生活水平提升的统筹兼顾至关重要。

为实现红树林可持续发展的目标,需要实现并长期维持在全球范围内从国家到地区的红树林监测,以获取不同时间、不同空间状态下的红树林相关数据,以达到对红树林的实时监测、实时分析、实时维护。依据本文的全球红树林长时序时空变化特征分析,时空演变趋势分析和持续特征分析结果,把“因地制宜、精准施策”作为管理目标,填补现有政策和实地实施之间的差距,对红树林管理和恢复具有建设性的意义。

参考文献(References):

- [1] 林鹏. 中国红树林研究进展. 厦门大学学报: 自然科学版, 2001, 40(2): 592-603.
- [2] Ellison A M, Farnsworth E J, Merkt R E. Origins of mangrove ecosystems and the mangrove biodiversity anomaly. *Global Ecology and Biogeography*, 1999, 8(2): 95-115.
- [3] 张乔民, 隋淑珍, 张叶春, 于红兵, 孙宗勋, 温孝胜. 红树林宜林海洋环境指标研究. *生态学报*, 2001, 21(9): 1427-1437.
- [4] 沈满洪, 毛狄. 海洋生态系统服务价值评估研究综述. *生态学报*, 2019, 39(6): 2255-2265.
- [5] 徐姗楠, 陈作志, 李适宇. 红树林水生动物栖息地功能及其渔业价值. *生态学报*, 2010, 30(1): 186-196.
- [6] Hossain M D, Nuruddin A A. Soil and mangrove: a review. *Journal of Environmental Science and Technology*, 2016, 9(2): 198-207.
- [7] Feka N Z, Ajonina G N. Drivers causing decline of mangrove in West-Central Africa: a review. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 2011, 7(3): 217-230.
- [8] 黄雪松, 陈燕丽, 莫伟华, 范航清, 刘文爱, 孙明, 谢敏, 徐圣璇. 近 60 年广西北部湾红树林生态区气候变化及其影响因素. *生态学报*, 2021, 41(12): 5026-5033.
- [9] 李莎莎, 孟宪伟, 葛振鸣, 张利权. 海平面上升影响下广西钦州湾红树林脆弱性评价. *生态学报*, 2014, 34(10): 2702-2711.
- [10] FAO U. The world's mangroves 1980—2005. FAO forestry paper, 2007, 153: 77.
- [11] Hamilton S, Casey D. Creation of a high spatio-temporal resolution global database of continuous mangrove forest cover for the 21st Century (CGMFC-21). *Global Ecology and Biogeography*, 2016, 25(6): 729-738.
- [12] 贾明明, 王宗明, 毛德华, 黄春林, 路春燕. 面向可持续发展目标的中国红树林近 50 年变化分析. *科学通报*, 2021, 66(30): 3886-3901.
- [13] Thomas N, Lucas R, Bunting P, Hardy A, Rosenqvist A, Simard M. Distribution and drivers of global mangrove forest change, 1996-2010. *PLoS One*, 2017, 12(6): e0179302.
- [14] Ruan L L, Yan M, Zhang L, Fan X S, Yang H X. Spatial-temporal NDVI pattern of global mangroves: A growing trend during 2000-2018. *Science of the Total Environment*, 2022, 844: 157075.
- [15] Patel N N, Angiuli E, Gamba P, Gaughan A, Lisini G, Stevens F R, Tatem A J, Trianni G. Multitemporal settlement and population mapping from Landsat using Google Earth Engine. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 35: 199-208.
- [16] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D, Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 18-27.
- [17] America I. International Society for Mangrove Ecosystems. Okinawa, Japan, 1993: 245-272.
- [18] Guo Y J, Liao J J, Shen G Z. A deep learning model with Capsules embedded for high-resolution image classification. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 214-223.
- [19] Guo Y J, Liao J J, Shen G Z. Mapping large-scale mangroves along the Maritime Silk Road from 1990 to 2015 using a novel deep learning model and Landsat data. *Remote Sensing*, 2021, 13(2): 245.

- [20] Liao J J. Global 30-m spatial distribution of mangroves in 2000—2020 (GMF30_2000—2020), Beijing: International Research Center of Big Data for Sustainable Development Goals (CBAS), 2022. Doi: 10.12237/casearth.62ff4caa819aec75a535cbe8.
- [21] Giri C, Ochieng E, Tieszen L L, Zhu Z, Singh A, Loveland T, Masek J, Duke N. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, 20(1): 154-159.
- [22] Bunting P, Rosenqvist A, Hilarides L, Lucas R M, Thomas N, Tadono T, Worthington T A, Spalding M, Murray N J, Rebelo L M. Global mangrove extent change 1996-2020: Global Mangrove Watch version 3.0. *Remote Sensing*, 2022, 14(15): 3657.
- [23] Liu H Q, Huete A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(2): 457-465.
- [24] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 刘颖慧, 王文杰, 陶亮亮, 郑华, 刘孝富. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化. *生态学报*, 2013, 33(24): 7798-7806.
- [25] 王巨. 基于时序 NDVI 植被变化检测与驱动因素量化方法研究——以河西地区为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [26] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [27] Theil H. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. *Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Sciences* 1950, 53, Part I: 386-392, Part II: 521-525, Part III: 1397-1412.
- [28] Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1951, 116(1): 770-799.
- [29] Andrews D F, Bickel P J, Hampel F R, Huber P J, & Tukey J W, Hoaglin D, Mosteller F, Tukey J W. *Understanding Robust and Exploratory Data Analysis*, Wiley Series in probability and mathematical statistics, New-York. 1983.
- [30] Spalding, Mark D and Leal, Maricé (editors), *The State of the World's Mangroves 2021*. Global Mangrove Alliance, 2021.
- [31] Sasmito S D, Basyuni M, Kridalaksana A, Saragi-Sasmito M F, Lovelock C E, Murdiyarso D. Challenges and opportunities for achieving Sustainable Development Goals through restoration of Indonesia's mangroves. *Nature Ecology & Evolution*, 2023, 7(1): 62-70.
- [32] Arifanti V B, Sidik F, Mulyanto B, Susilowati A, Wahyuni T, Subarno S, Yulianti Y, Yuniarti N, Aminah A, Suita E, Karlina E, Suharti S, Pratiwi P, Turjaman M, Hidayat A, Rachmat H H, Imanuddin R, Yeny I, Darwati W, Sari N, Hakim S S, Slamet W Y, Novita N. Challenges and strategies for sustainable mangrove management in Indonesia: a review. *Forests*, 2022, 13(5): 695.

附录 1 全球不同国家红树林面积及变化率
Appendix table 1 Area and change rate of mangrove in different countries

国家/地区 Country/Region	1990 /hm ²	2000 /hm ²	2010 /hm ²	2015 /hm ²	2020 /hm ²	1990—2000 /%	2000—2010 /%	2010—2015 /%	2015—2020 /%	1990—2020 /%
北美洲和加勒比地区 North & Central America & the Caribbean										
美国	302549.40	237400.44	189177.38	204041.69	172450.35	-21.53	-20.31	7.86	-15.48	-43.00
墨西哥	857309.05	699993.12	941978.70	865666.18	887948.47	-18.35	34.57	-8.10	2.57	3.57
危地马拉	43606.85	32313.25	21035.43	11792.75	11792.75	-25.90	-34.90	-43.94	0.00	-72.96
伯利兹	58057.68	44369.70	36923.11	34727.35	30189.82	-23.58	-16.78	-5.95	-13.07	-48.00
萨尔瓦多	34030.73	31766.02	36219.68	28359.75	28580.06	-6.65	14.02	-21.70	0.78	-16.02
洪都拉斯	71284.49	63979.81	54274.08	48519.02	35020.21	-10.25	-15.17	-10.60	-27.82	-50.87
巴拿马	170103.38	146746.29	146875.38	113470.53	131459.20	-13.73	0.09	-22.74	15.85	-22.72
巴哈马	115690.15	78492.10	83952.09	103342.99	108959.20	-32.15	6.96	23.10	5.43	-5.82
古巴	503307.62	392845.91	314668.16	276152.66	243083.19	-21.95	-19.90	-12.24	-11.98	-51.70
牙买加	10221.47	9052.74	9340.22	12961.63	13585.57	-11.43	3.18	38.77	4.81	32.91
海地	16350.45	11358.92	15886.84	17634.79	19203.40	-30.53	39.86	11.00	8.89	17.45
多米尼加	20668.32	19323.05	20270.75	17295.42	10085.06	-6.51	4.90	-14.68	-41.69	-51.21
哥斯达黎加	41501.12	37623.79	35032.61	46831.08	70425.19	-9.34	-6.89	33.68	50.38	69.69
圣卢西亚	189.94	181.15	210.95	156.78	155.05	-4.63	16.45	-25.68	-1.10	-18.37
格林纳达	284.97	252.09	230.79	11.90	10.50	-11.54	-8.45	-94.84	-11.78	-96.31
特立尼达和多巴哥	8626.33	8015.12	7076.03	5080.20	5080.20	-7.09	-11.72	-28.21	0.00	-41.11
尼加拉瓜	74593.51	71067.85	64360.78	56112.81	53305.76	-4.73	-9.44	-12.82	-5.00	-28.54
特克斯和凯科斯群岛	19281.18	19319.49	13110.11	14855.95	22708.42	0.20	-32.14	13.32	52.86	17.78
波多黎各	10125.02	8606.09	8918.17	63634.77	118828.92	-15.00	3.63	613.54	86.74	1073.62
美属维尔京群岛	231.43	224.58	246.99	123.84	123.84	-2.96	9.98	-49.86	0.00	-46.49
英属维尔京群岛	97.55	70.12	87.34	31.13	31.13	-28.12	24.56	-64.35	0.00	-68.08
瓜德罗普	4027.76	3866.58	4237.39	3406.90	3330.44	-4.00	9.59	-19.60	-2.24	-17.31
马提尼克	1462.95	1360.32	1809.72	1122.07	1088.64	-7.02	33.04	-38.00	-2.98	-25.59
荷属安的列斯	353.86	321.80	203.75	187.37	187.37	-9.06	-36.68	-8.04	0.00	-47.05
哥伦比亚	280200.67	207356.45	239417.86	236893.27	238255.62	-26.00	15.46	-1.05	0.58	-14.97
委内瑞拉	338880.69	274161.82	254225.88	196433.36	179886.15	-19.10	-7.27	-22.73	-8.42	-46.92
圭亚那	25586.91	21035.94	27729.11	14118.23	13818.14	-17.79	31.82	-49.09	-2.13	-46.00
法属圭亚那	87933.31	72842.49	38080.41	35778.43	40063.48	-17.16	-47.72	-6.05	11.98	-54.44
苏里南	106130.57	65583.31	68844.13	59524.82	61052.07	-38.21	4.97	-13.54	2.57	-42.47
厄瓜多尔	186648.85	135540.29	153719.10	128755.52	128402.30	-27.38	13.41	-16.24	-0.27	-31.21
秘鲁	4471.96	4161.17	4271.80	203.23	203.23	-6.95	2.66	-95.24	0.00	-95.46
南美洲 South America										

续表

国家/地区 Country/Region	1990 /hm ²	2000 /hm ²	2010 /hm ²	2015 /hm ²	2020 /hm ²	1990—2000 /%	2000—2010 /%	2010—2015 /%	2015—2020 /%	1990—2020 /%
巴西	1449760.35	1008469.70	1034997.18	1016353.55	1027586.74	-30.44	2.63	-1.80	1.11	-29.12
中西非	22231.43	20529.44	25009.44	25009.44	24513.30	-7.66	21.82	0.00	-1.98	10.26
West & Central Africa	163828.22	128671.05	155936.59	155200.78	170316.88	-21.46	21.19	-0.47	9.74	3.96
赤道几内亚	23726.58	17860.96	25053.00	24889.11	23379.59	-24.72	40.27	-0.65	-6.06	-1.46
喀麦隆	223466.46	203676.37	188026.05	185939.70	183855.78	-8.86	-7.68	-1.11	-1.12	-17.73
毛里塔尼亚	3036.14	35.92	119.31	117.37	117.37	-98.82	232.19	-1.62	0.00	-96.13
塞内加尔	290715.44	119986.50	127677.75	127321.23	126387.48	-58.73	6.41	-0.28	-0.73	-56.53
冈比亚	144045.56	67858.77	61249.70	61026.69	60641.71	-52.89	-9.74	-0.36	-0.63	-57.90
几内亚	244883.07	215408.36	206115.74	205785.82	210236.06	-12.04	-4.31	-0.16	2.16	-14.15
几内亚比绍	447833.34	266312.62	248348.81	245361.93	239492.64	-40.53	-6.75	-1.20	-2.39	-46.52
塞拉利昂	144402.20	131478.35	121678.37	121094.11	116486.09	-8.95	-7.45	-0.48	-3.81	-19.33
利比里亚	10234.98	10015.85	18289.43	28247.22	33809.20	-2.14	82.60	54.45	19.69	230.33
科特迪瓦	4287.88	3486.21	5170.54	1885.44	1758.66	-18.70	48.31	-63.54	-6.72	-58.99
加纳	31841.78	9319.60	16368.76	13815.77	14763.86	-70.73	75.64	-15.60	6.86	-53.63
贝宁	3718.65	2931.97	138.98	135.56	135.21	-21.15	-95.26	-2.46	-0.26	-96.36
尼日利亚	638395.35	601949.90	677277.16	673895.49	697117.44	-5.71	12.51	-0.50	3.45	9.20
厄立特里亚	19495.11	4423.35	6469.46	8759.78	8487.77	-77.31	46.26	35.40	-3.11	-56.46
吉布提	1002.29	550.76	494.58	307.13	307.13	-45.05	-10.20	-37.90	0.00	-69.36
索马里	5465.63	2043.65	2160.98	870.48	596.76	-62.61	5.74	-59.72	-31.45	-89.08
肯尼亚	60427.68	34090.19	44710.99	82564.06	82214.88	-43.59	31.16	84.66	-0.42	36.05
坦桑尼亚	141916.96	87681.68	97079.01	94417.49	107483.66	-38.22	10.72	-2.74	13.84	-24.26
安哥拉	46597.21	28626.85	35537.51	31221.06	30171.58	-38.57	24.14	-12.15	-3.36	-35.25
莫桑比克	535572.55	281445.48	282919.49	251570.44	255881.83	-47.45	0.52	-11.08	1.71	-52.22
南非	3921.91	1690.84	2431.27	1764.91	1231.48	-56.89	43.79	-27.41	-30.22	-68.60
马达加斯加	413473.16	245935.23	270083.26	223029.79	224160.39	-40.52	9.82	-17.42	0.51	-45.79
科摩罗	117.35	101.70	98.46	87.49	19.40	-13.33	-3.19	-11.14	-77.82	-83.46
马约特	564.55	505.58	531.67	529.18	504.44	-10.44	5.16	-0.47	-4.67	-10.65
伊朗	47289.47	11723.72	7633.57	7329.05	7328.16	-75.21	-34.89	-3.99	-0.01	-84.50
也门	3447.56	975.14	1581.96	1244.36	1244.36	-71.71	62.23	-21.34	0.00	-63.91
阿曼	459.35	192.53	84.19	109.01	107.32	-58.09	-56.27	29.48	-1.55	-76.64
沙特阿拉伯	12921.37	7655.08	6061.23	4177.66	2814.05	-40.76	-20.82	-31.08	-32.64	-78.22
卡塔尔	2816.85	368.57	431.28	304.21	289.54	-86.92	17.01	-29.46	-4.82	-89.72

续表

国家/地区 Country/Region	1990 /hm ²	2000 /hm ²	2010 /hm ²	2015 /hm ²	2020 /hm ²	1990—2000 /%	2000—2010 /%	2010—2015 /%	2015—2020 /%	1990—2020 /%
南亚										
阿联酋	31112.31	9840.97	6872.19	7357.82	7346.35	-68.37	-30.17	7.07	-0.16	-76.39
埃及	114.91	27.56	75.75	30.00	0.00	-76.02	174.90	-60.39	-100.0	-100.0
苏丹	2347.29	191.07	394.37	36.59	34.30	-91.86	106.40	-90.72	-6.28	-98.54
印度	523258.99	369505.75	344777.90	295720.73	286198.33	-29.38	-6.69	-14.23	-3.22	-45.30
巴基斯坦	54818.21	52509.41	66446.45	63300.15	62979.06	-4.21	26.54	-4.74	-0.51	14.89
孟加拉国	462340.62	444676.51	413538.80	403475.25	400214.70	-3.82	-7.00	-2.43	-0.81	-13.44
斯里兰卡	33419.22	18917.82	13816.12	6845.80	3566.34	-43.39	-26.97	-50.45	-47.90	-89.33
缅甸	622943.07	491956.23	465023.78	350279.48	353366.69	-21.03	-5.47	-24.67	0.88	-43.27
柬埔寨	50157.29	44722.32	53752.58	38105.77	37868.61	-10.84	20.19	-29.11	-0.62	-24.50
越南	229604.24	199342.78	153619.95	131989.71	70597.31	-13.18	-22.94	-14.08	-46.51	-69.25
泰国	288741.89	242649.70	222121.89	171957.36	154225.21	-15.96	-8.46	-22.58	-10.31	-46.59
马来西亚	587155.00	533745.98	486394.61	398832.24	406505.66	-9.10	-8.87	-18.00	1.92	-30.77
新加坡	669.04	556.76	506.01	76.99	22.36	-16.78	-9.12	-84.79	-70.96	-96.66
印度尼西亚	3134960.60	2745227.57	2576445.32	2323075.47	2448700.32	-12.43	-6.15	-9.83	5.41	-21.89
菲律宾	278328.85	239433.90	217189.88	215473.18	259191.58	-13.97	-9.29	-0.79	20.29	-6.88
文莱	11098.47	10597.93	10351.69	7622.72	8111.23	-4.51	-2.32	-26.36	6.41	-26.92
东帝汶	2142.75	947.63	776.89	316.61	307.79	-55.78	-18.02	-59.25	-2.79	-85.64
中国	24942.70	16591.32	13475.24	19754.95	20335.93	-33.48	-18.78	46.60	2.94	-18.47
日本	1041.91	1034.13	809.85	617.50	520.89	-0.75	-21.69	-23.75	-15.65	-50.01
澳大利亚	1473548.30	888933.43	846709.06	709648.42	681350.02	-39.67	-4.75	-16.19	-3.99	-53.76
新西兰	27130.47	20478.05	25240.33	5810.18	7486.28	-24.52	23.26	-76.98	28.85	-72.41
所罗门群岛	46759.91	46433.41	52720.91	49900.70	50042.25	-0.70	13.54	-5.35	0.28	7.02
斐济	109668.34	47458.06	36522.29	46419.67	47148.86	-56.73	-23.04	27.10	1.57	-57.01
巴布亚新几内亚	592882.42	416585.52	432835.93	387527.07	330085.25	-29.74	3.90	-10.47	-14.82	-44.33
瓦努阿图	1359.41	1180.11	1470.65	633.26	633.26	-13.19	24.62	-56.94	0.00	-53.42
新喀里多尼亚	24629.46	19942.97	24114.88	23354.05	13869.18	-19.03	20.92	-3.16	-40.61	-43.69
总计 Total	17150880.29	13078720.59	12928183.74	11849753.39	11933462.25	-23.74	-1.15	-8.34	0.71	-30.42