

DOI: 10.20103/j.stxb.202308171780

刘豪富, 李士成, 罗全欣. 基于人类足迹的长江经济带自然保护区保护成效评价. 生态学报, 2024, 44(8): 3172-3184.

Liu H F, Li S C, Luo Q X. Evaluation of effectiveness of nature reserves of the Yangtze River Economic Belt in reducing human disturbance. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(8): 3172-3184.

基于人类足迹的长江经济带自然保护区保护成效评价

刘豪富, 李士成*, 罗全欣

中国地质大学(武汉)公共管理学院, 武汉 430074

摘要:自然保护区保护成效评价是区域可持续发展评估的重要内容。长江经济带具有丰富的生物多样性, 科学评价其保护区保护成效对完善其管护措施和建设生态文明具有重要意义。基于人类足迹, 从保护区的保护级别、地理经济分区与功能分区三个方面, 分析长江经济带 2000—2018 年保护区内的人类扰动变化, 并引入倾向得分匹配法来测度保护区对人类扰动的控制程度。结果表明: ①长江经济带有 35.12% 的保护区保护成效良好, 50.30% 的保护区保护成效尚可, 仅有 14.58% 的保护区成效较差。②长江经济带及其保护区的人类足迹整体上均呈增长趋势, 但保护区内部增长幅度不足整个地区的一半, 这表明保护区虽然没有改变内部人类足迹整体增加的趋势, 但有效减缓了其增速。③保护区和功能分区的保护等级越高, 保护成效越好。④长江经济带上游与中游地区保护区的保护成效好于下游地区, 特别是“巴山-巫山-武陵山-雪峰山”和云南西部地区的保护区保护成效良好。研究结果可为长江经济带保护区管护措施的完善和生态文明建设提供参考。

关键词:自然保护区; 人类足迹; 倾向得分匹配; 保护成效评价; 长江经济带

Evaluation of effectiveness of nature reserves of the Yangtze River Economic Belt in reducing human disturbance

LIU Haofu, LI Shicheng*, LUO Quanxin

School of Public Administration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Evaluating the effectiveness of nature reserves is crucial for promoting regional sustainable development. The Yangtze River Economic Belt of China is a hub of biodiversity. So, evaluating the effectiveness of nature reserves in this region is important to enhance its management and ecological civilization. Based on global human footprint datasets, this study analyzed the changes of the human disturbance in nature reserves in the Yangtze River Economic Belt during 2000—2018 from the perspectives of management levels, geographical economic zones, and functional zones. Then the propensity score matching method was used to assess the effectiveness of nature reserves in reducing human disturbance. The major findings are as follows: ① The number of nature reserves with excellent, good, and poor protection effectiveness in the Yangtze River Economic Belt accounted for 35.12%, 50.30%, and 14.58%, respectively. ② The human footprint values of the Yangtze River Economic Belt and its nature reserves were increasing overall, but the latter increase was less than half of the former. It suggests that although establishing nature reserves in this region has not changed the trend of increasing human footprint, it has effectively slowed down its growth. ③ The higher the management level of nature reserves and their functional zones, the better protection effectiveness. ④ The effectiveness of nature reserves in the upper and middle reaches of the Yangtze River Economic Belt was better than that in the lower regions, particularly in the Ba Mountain-Wu Mountain-Wuling Mountain-Xuefeng Mountain area and the western part of Yunnan. These findings can provide a reference for

基金项目: 教育部人文社会科学研究项目(23YJA630046); 国家自然科学基金项目(42001229, 41971245)

收稿日期: 2023-08-17; 网络出版日期: 2024-01-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lisc@cug.edu.cn

enhancing the management of nature reserves in the Yangtze River Economic Belt and promoting ecological civilization construction for this region, and even in China.

Key Words: nature reserve; human footprint; propensity score matching; effectiveness evaluation; Yangtze River Economic Belt

为进一步扭转全球生物多样性丧失局面,联合国《生物多样性公约》第十五次缔约方大会提出“采取紧迫的行动,停止人为导致的受威胁物种的灭绝,实现物种特别是受威胁物种的恢复和保护”。设立自然保护区是实现生物多样性保护和可持续发展的重要生态工程之一^[1]。目前,全球已设立 20 多万个自然保护区,覆盖 15.4% 的陆地面积和 7.5% 的海洋面积^[2]。中国已设立的自然保护区超过了 1.18 万个,面积占其陆域面积的 18% 和海域面积的 4.6%,是全球规模最大的自然保护区体系之一^[3]。自然保护区的保护成效评价问题也随之而来。国家林业局于 2014 年发布了《自然保护区保护成效评估技术导则》,分别就野生植物、植被、景观和野生动物四方面对自然保护区保护成效评估工作提供了指导。随后生态环境部在 2017 年出台了《自然保护区管理评估规范》,为自然保护区管理评估提供了标准。但由于其评价指标复杂多样、专家评分法难以客观反映管理状况等问题,自然保护区保护成效评估仍是学界研究的热点和难点。

已有学者对自然保护区的保护成效开展了评价^[4-13]。然而,当前的评估多是针对保护区内主要保护对象^[14]、生态系统结构^[15]、生态系统服务^[16]等方面的保护效果。这些生态数据的获取成本高、周期长,以它们为指标难以应用于大区域内多个自然保护区长时间序列保护成效的快速评价,导致无法在宏观尺度上给决策者提供很好的支持。考虑到自然保护区主要是通过人类扰动进行管控来实现对生物多样性的保护,因此可以通过分析对比自然保护区内外人类扰动强度变化,来评价其管护效果。已有学者利用该方法开展了相关的研究。具体而言,基于综合人类扰动强度测度方法——人类足迹模型^[17-19],Jones 等^[20]分析了全球自然保护区内部人类扰动的变化,发现 1992 年以前设立的 2 万多个自然保护区,约有 55% 其内部人类扰动呈增加态势,其保护生物多样性的效用堪忧。Geldmann 等^[10]评价了全球自然保护区在减少人口密度和土地利用方面的有效性。Tapia-Armijos 等^[21]评价了南厄瓜多尔保护区建立以后其内部人类足迹的变化。Li 等^[22]在测度西藏自治区 1990—2010 年人类足迹时空变化的基础上,发现西藏自治区自然保护区的设立有效减少了其内部人类扰动的增长。上述工作为自然保护区在减少人类扰动方面的保护成效评价奠定了良好的基础,但在保护区内外人类足迹值对比的时候,忽略了保护区内外自然地理和人文社会等本底条件的异同,也就是说保护区内外人类足迹变化的差异也有可能是管护措施以外的因素带来的。鉴于此,在 Geldmann 等^[10]的基础上,张涵等^[23]采用倾向得分匹配法,充分考虑了保护区内外自然地理和人文社会条件的差异选取对比点位,对比保护区内外人类足迹值的变化,评估了中国部分自然保护区在缓解人类扰动方面的成效。

自然保护区是我国自然保护区体系的主体。长江经济带涵盖四川、湖北、上海等 11 个省(市),是重要的天然物种基因库^[24]。中国政府强调“要正确把握生态保护和经济发展的关系,推动长江经济带绿色发展”。在此背景下,针对长江经济带的自然保护区保护成效评价受到了广泛关注。但因为数据的限制,现有的研究多以长江经济带内个别省/市内的单个或部分自然保护区^[4-6,8,9,25]为研究对象,聚焦整个经济带保护区整体的评价鲜有报道。冯春婷等^[26]虽然从管理学视角评估了长江经济带自然保护区管理状况,但其采用的专家打分法存在一定的不确定性,且没有给出管理状况的空间分布情况。

因此,首先本文从自然保护区保护级别、地理经济分区和功能分区共三个角度出发,分析长江经济带自然保护区 2000—2018 年人类扰动程度的变化。其次,引入倾向得分匹配法克服自然保护区内外非管护因素对人类扰动变化差异的影响,测度自然保护区对人类扰动的控制程度,科学评价长江经济带自然保护区在减少人类扰动方面的保护成效,探求原因,以期长江经济带自然保护区管理提供科学依据,同时也为未来国家公园管护制度建立提供参考。

1 研究区简介

长江经济带总面积约为 205.23 万 km²,覆盖长江流域的 11 个省市——云南、贵州、四川、重庆、湖北、湖南、江西、安徽、浙江、江苏以及上海(图 1)。按照国家发展改革委员会推动长江经济带发展领导小组以及相关研究^[27,28]的划分,长江经济带下游地区包括上海、江苏、浙江、安徽四省市,中游地区包括江西、湖北、湖南三省,上游地区包括重庆、四川、贵州、云南四省市。

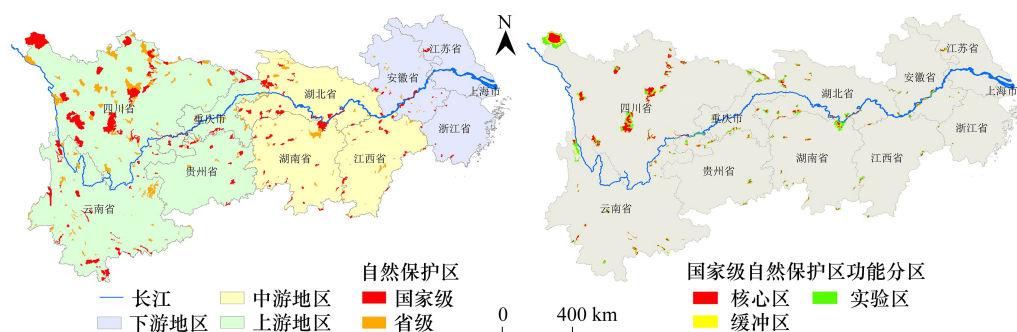


图 1 长江经济带自然保护区空间分布及国家级保护区功能分区

Fig.1 Spatial distribution of nature reserves and the functional zones of national nature reserves in the Yangtze River Economic Belt

根据全国自然保护区名录,长江经济带共有 435 个省级及国家级自然保护区。上海市多个保护区为海洋保护区或海陆过渡保护区,其人类足迹数据不可得,因此不予考虑。其次,由于本文使用的人类扰动数据集空间分辨率为 1 km,因此空间范围不能完全覆盖 1 个 1 km × 1 km 栅格的自然保护区也不予考虑。综上,本研究共涵盖了长江经济带的 336 个保护区,包含 136 个国家级,200 个省级。面积最小的保护区为江西省萍乡市莲花县高天岩省级自然保护区,为 2.73 km²。336 个保护区的面积总计为 11.32 万 km²,占长江经济带总面积的 5.52%(图 1)。此外,为进一步从功能分区(核心区、缓冲区、实验区)的角度进行保护区内部人类扰动变化分析,本研究还收集到 93 个国家级保护区的功能分区(图 1)。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文主要用到了自然保护区数据,人类扰动数据集,以及用于倾向得分匹配的自然环境因子数据集(表 1)。详细介绍如下。

第一,自然保护区相关数据。自然保护区矢量边界数据来自中国自然保护区标本资源共享平台和各省(市)政府网站公布的自然保护区功能分区图,本研究通过网站数据下载与图像矢量化方法获取。此外,本研究还获取了包含各个保护区属性的自然保护区名录数据,并将其与自然保护区矢量边界进行匹配。

第二,人类扰动数据集。Sanderson 等^[17]于 2002 年提出人类足迹模型,量化了人口密度、土地利用、通达性、电力设施四类人类扰动因子对生态环境的扰动,空间叠加后,获得全球人类足迹数据集,来刻画人类扰动的时空特征。后续该团队对其数据集不断更新,并增加了其他人类扰动因子,得到 1993—2013 年人类足迹数据集^[18,19]。采用同样的方法并收集更高精度的人类扰动因子数据,Mu 等^[29]新近研制了 2000—2018 年逐年的全球人类足迹数据集。该数据集测度人类足迹的公式如下:

$$HF(i, t) = \text{builtenv}(i, t) + \text{popd}(i, t) + \text{nightlight}(i, t) + \text{crop}(i, t) + \text{pas}(i, t) + \text{road}(i, t) + \text{rail}(i, t) + \text{navi}(i, t) \quad (1)$$

式中, $HF(i, t)$ 是 t 年网格 i 的人类足迹, $\text{builtenv}(i, t)$ 、 $\text{popd}(i, t)$ 、 $\text{nightlight}(i, t)$ 、 $\text{crop}(i, t)$ 、 $\text{pas}(i, t)$ 、 $\text{road}(i, t)$ 、 $\text{rail}(i, t)$ 、 $\text{navi}(i, t)$ 依次代表 t 年网格 i 的建设用地、人口密度、夜间灯光、农田、牧场、公路、铁路、通航水道

的人类扰动程度。考虑到数据集的精度、时效性、时间序列的可得性等,本研究采用 Mu 等^[29]研制的人类足迹数据集进行长江经济带自然保护区人类扰动程度的分析与保护成效评价。

表 1 长江经济带自然保护区保护成效评价所使用的数据集

Table 1 Datasets for the evaluation of the protection effectiveness of nature reserves in the Yangtze River Economic Belt			
数据名称 Name of data	数据类型 Data types	空间分辨率 Resolution	数据来源 Data source
自然保护区矢量边界 Boundaries of nature reserves	矢量数据	/	中国自然保护区标本资源共享平台, 长江经济带各省市级政府网站
自然保护区名录 List of nature reserves	统计数据	/	长江经济带各省市级政府网站
人类扰动数据集 Human disturbance Datasets	栅格数据	1000 m	https://doi.org/10.6084/m9.figshare.16571064
海拔高度 Elevation	栅格数据	15"(约 500 m)	数字高程模型 (DEM) 数据集, 来自海洋总深数据平台 (https://www.gebco.net/)
年均降水量 Mean annual precipitation	栅格数据	1000 m	科学数据银行 (https://www.scidb.cn/en/cstr/31253.11.sciencedb.01607)
年均地表温度 Mean annual surface temperature	栅格数据	1000 m	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/)
道路 Road	矢量数据	/	北京大学地理数据平台 (2000。 https://geodata.pku.edu.cn/) 全球道路开放获取数据集 (2005, 2010。 https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/groads-global-roads-open-access-v1/data-download) 开放街道图 (2015, 2018。 https://download.geofabrik.de/)
土地覆盖 Land cover	栅格数据	30 m	http://doi.org/10.5281/zenodo.4417809

第三,自然环境因子数据集。在对自然保护区内外人类足迹数据进行倾向得分匹配中,参考相关研究^[10,23],本文选取高程、坡度、年均降水量、年均地表温度、距道路的距离及土地覆盖类型数据作为人类扰动的影响变量。其中高程数据来源于全球数字高程模型 (DEM) 数据,坡度数据则根据 DEM 在 ArcGIS 10.6 中生成;降水数据来源于瞿莉莎等^[30]基于中国 1960—2020 年 2400 多个地面气象站数据插值获得的年均降水数据集;温度数据源于中国科学院资源环境科学与数据中心 1 km 分辨率中国地表温度数据集;道路矢量数据来源于北京大学地理数据平台 (2000 年)、美国航空航天局 (NASA) 的全球道路开放获取数据集 (2005 和 2010 年)、开放街道图 (2015 和 2018 年);土地覆盖来源于 Yang 等^[31]基于 Landsat 卫星影像研制的 1985—2019 年土地覆被产品 (表 1)。

2.2 方法

2.2.1 比较分析法

本文首先从以下三个方面来比较分析长江经济带及其自然保护区 2000—2018 年人类足迹平均值的变化趋势。三个方面包括:自然保护区的保护级别,长江经济带上、中、下游地区,以及自然保护区的功能分区,包括核心区、缓冲区、实验区。

2.2.2 倾向得分匹配法

自然保护区里面人类扰动变化的不同,可能是由自然环境的差异带来的,不完全是相关管控措施的效果,比如保护区内坡耕地的撂荒,很可能是海拔高、坡度大,难以开展机械化的背景下,农民的自发行为^[32]。因此,本文引入倾向得分匹配法,降低保护区内外采样点自然环境的差异,最大限度减少自然环境因子的差异引起的人类扰动变化,从而达到科学评价的目的。参考相关研究^[10,23,33],影响人类扰动变化的主导自然环境因子 (特征变量) 包括高程、坡度、降水、温度、距道路的距离及土地覆盖类型等。

具体做法简述如下。首先,在保护区内外随机生成采样点,将保护区内部的随机点作为实验组,保护区外部随机点作为控制组。由于人类足迹数据集空间分辨率为 1 km,因此在长江经济带内以最小间距 1 km 随机

生成采样点,并将保护区边界向内收缩 1 km,来作为保护区内部随机点生成边界。考虑到自然保护区的溢出效应^[34],所以其外围 10 km 缓冲带内不能采样。在保护区内生成其 10%面积的随机点,共 8042 个,自然保护区及其外围缓冲带以外的长江经济带内同样生成其 10%面积的随机点^[23],共 160036 个。部分随机点中存在属性缺失及异常情况,最后保留保护区内部 7986 个随机点和外部 157874 个。其次,将实验组和控制组的随机点,基于其自然环境因子值进行一对四匹配^[35]。采用卡尺内最近邻匹配的规则进行倾向得分匹配,倾向得分的样本标准差的四分之一为卡尺大小。倾向得分值越高,表明保护区内外随机点的上述自然环境因子越接近,便可以进行匹配对比。这样操作以后,便可以保证保护区内外匹配后的随机点仅“是否在保护区内”这一属性是不同的,其他自然环境特征较为接近甚至一致。

倾向得分匹配(PSM)利用降维的方法计算随机点 i 进入保护区的概率,即随机点 i 的倾向得分。其计算方法为:

$$P(X_i) = \Pr[RA_i = 1 | X_i] = E(RA | X) \quad (2)$$

式中, $P(X_i)$ 为随机点 i 的倾向得分(Pscore)概率; RA_i 表示处理变量,表示随机点 X_i 是否在自然保护区内,分别用 1 和 0 表示; X_i 表示一系列的观测变量,这些观测变量会影响随机点是否进入自然保护区内和人类足迹值。

依据倾向得分概率为实验组匹配控制组之后,自然保护区内部的额外控制效应即实验组的平均处理效应(ATT)表达式如下:

$$\begin{aligned} ATT &= E[Y_{1i} - Y_{0i} | RA_i = 1] \\ &= E\{E[Y_{1i} - Y_{0i} | RA_i = 1, P(X_i)]\} \\ &= E\{E[Y_{1i} | RA_i = 1, P(X_i)] - E[Y_{0i} | RA_i = 0, P(X_i)] | RA_i = 1\} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, Y_{0j} 和 Y_{1i} 分别表示进入自然保护区的结果变量(控制效果)以及随机点在反事实下的潜在结果,这体现了 PSM 的匹配过程也是为实验组样本寻找无限接近的控制组匹配对象的过程。

2.2.3 自然保护区对人类扰动控制的有效性评价

接下来,为评价自然保护区对人类扰动控制效果,将每个保护区内实验组与倾向得分匹配后保护区外控制组随机点的人类足迹变化的平均值赋值给对应的自然保护区,前者减去后者得到控制有效性指数(CEI),即保护区内外人类足迹增加值的差异。其公式如下:

$$CEI = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} P_j - \sum_{i=1}^{n_i} P'_j}{n_i} \quad (4)$$

式中, P_j 为区域内实验组人类足迹值; P'_j 为区域内匹配后控制组的人类足迹值; n_i 为内采样点的个数。当控制有效性指数为负值时,表示该保护区内部人类足迹增长小于同等条件下保护区外部的人类足迹增长,表明政府采取的管护措施对人类扰动的管控效果较好。简而言之,控制有效性指数的数值越低,保护区对人类足迹正向增长的抑制效果越好。

2.2.4 自然保护区保护成效分级

自然保护区主要是通过对人类扰动进行管控来实现对生物多样性的保护。因此,本文根据 2000—2018 年自然保护区内人类足迹变化及其对人类扰动控制的有效性指数 CEI 均值,将保护成效划分为三个级别(表 2):良好(人类足迹变化 ≤ 0 , CEI 均值 ≤ 0)、尚可(人类足迹变化 ≤ 0 , CEI 均值 > 0 或人类足迹变化 > 0 , CEI 均值 ≤ 0)、较差(人类足迹变化 > 0 , CEI 均值 > 0),以此更加直观地反映保护区保护成效及空间分布。

表 2 自然保护区保护成效分级

Table 2 Classification of the protection effectiveness of nature reserves

保护成效 Protection effectiveness	良好 Good	尚可 Fair	较差 Poor
分级条件 Classification conditions	人类足迹变化 ≤ 0 , CEI 均值 ≤ 0	人类足迹变化 ≤ 0 , CEI 均值 > 0 或人类足迹变化 > 0 , CEI 均值 ≤ 0	人类足迹变化 > 0 , CEI 均值 > 0

3 结果与分析

3.1 自然保护区人类扰动变化

整体来看,长江经济带和其自然保护区在 2000—2018 年人类足迹均呈增长趋势,但自然保护区内部的人类足迹值以及年均增长率均明显小于长江经济带整体的均值和增长率(图 2,表 3),特别是人类足迹的年均增长率,保护区内部不到整个经济带的一半,有约 48.51%的自然保护区内部人类足迹是下降或稳定不变(表 3)。总体而言长江经济带大多数自然保护区的设立并没有改变人类足迹增加的趋势,但在一定程度上减缓了区域内人类足迹的增加速度。

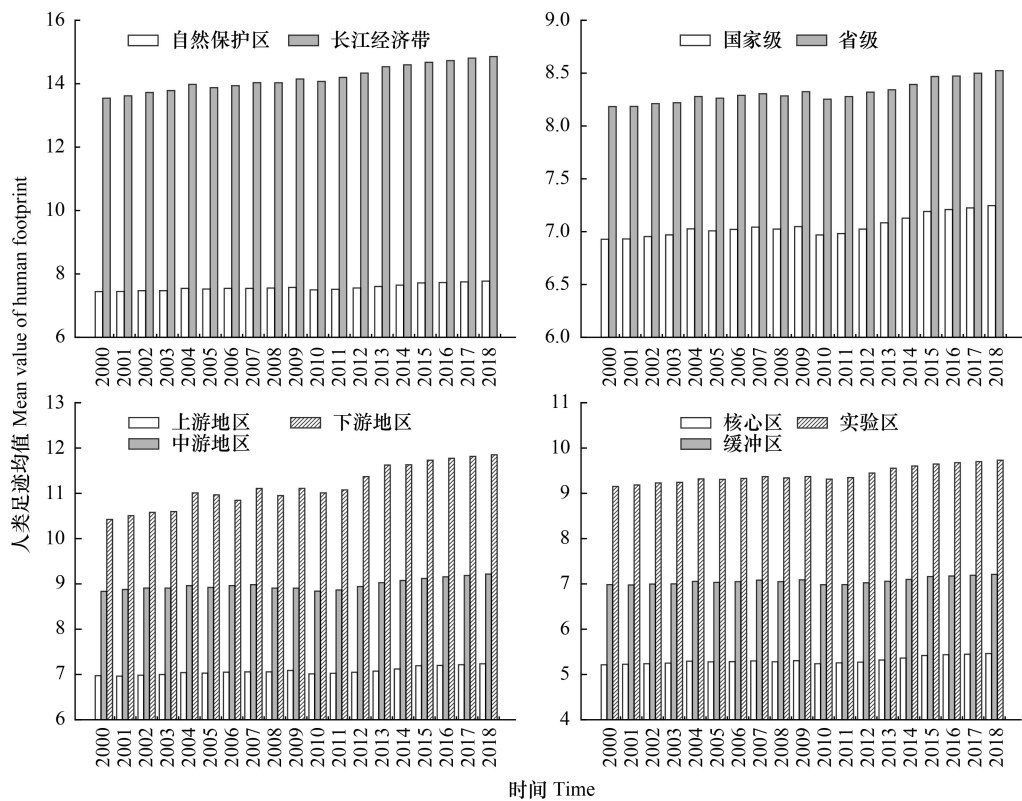


图 2 长江经济带自然保护区 2000—2018 年人类足迹变化

Fig.2 Changes in human footprint of nature reserves of the Yangtze River Economic Belt from 2000 to 2018

表 3 自然保护区 HF 变化统计

Table 3 Statistics on the changes of HF in nature reserves

	保护区内外 Inside and outside		保护级别 Management levels		地理经济区 Geographical economic zones			功能分区 Functional zones		
	外 Outside	内 Inside	国家级 National	省级 Provincial	上游 Upstream	中游 Middle	下游 Downstream	核心区 Core zone	缓冲区 Buffer zone	实验区 Experimental zone
HF 均值 Mean	14.60	7.76	7.05	8.32	7.07	8.97	11.15	5.31	7.06	9.42
HF 年均变化率 Mean annual rate of HF change/%	0.60	0.23	0.10	0.31	0.20	0.06	0.70	0.26	0.18	0.35
HF 变化值≤0 的保护区数量占比 Proportion of nature reserves with no HF increase/%	\	48.51	55.15	44.00	42.20	56.30	52.27	52.17	56.04	52.75

HF:人类足迹 Human footprint

从不同保护级别来看,国家级保护区人类足迹均值在 2000—2018 年间均小于省级保护区(图 2)。国家级保护区内人类足迹的增长趋势仅为省级保护区的三分之一,两者的增长趋势均远小于保护区外部。超过一半的国家级保护区的人类足迹呈降低趋势,有 44.00% 的省级保护区的人类足迹呈现降低(表 3)。因此,保护级别越高,保护区的人类扰动及其增加值越低。

从不同经济地理区来看,长江经济带上游地区人类足迹值最小,中游地区其次,下游地区最大(图 2)。自然保护区内人类足迹值的变化均呈上升趋势,下游地区增长率最高。从表 3 可知,中游地区的自然保护区在减小人类扰动方面优于上游与下游地区。

从不同的功能分区来看,人类足迹均值从大到小以此为:实验区>缓冲区>核心区。他们变化趋势依旧都是增长的,其中实验区增长趋势最大(表 3,图 2)。从变化趋势来看,缓冲区人类足迹值年均增长率最小,且有 56.04% 的缓冲区人类足迹是呈下降趋势,表明其限制人类扰动增加的效果最明显。

长江经济带自然保护区人类足迹变化的空间分布如图 3 所示。可以看出 19 年间分布在“巴山-巫山-武陵山-雪峰山”“龙门山-大凉山”及沿江中游地区的自然保护区的人类足迹变化为负,表明这些地区的自然保护区人类扰动在下降。但在长江下游沿江的部分自然保护区出现较为剧烈的人类扰动增长,在川西高原及云南部地区部分自然保护区外围出现了轻微的人类扰动增长。

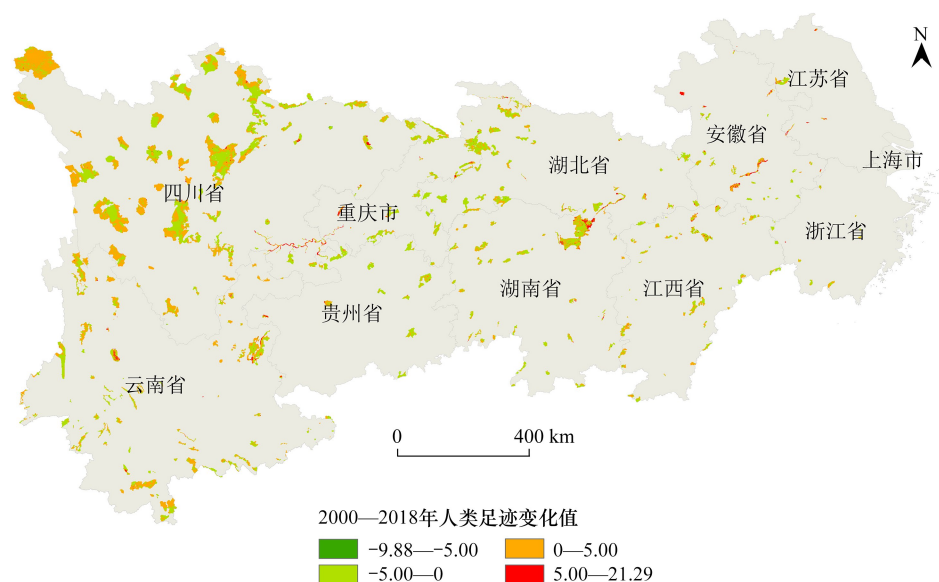


图 3 长江经济带 2000—2018 年自然保护区人类足迹空间变化

Fig.3 Spatial changes in human footprint in nature reserves of the Yangtze River Economic Belt from 2000 to 2018

3.2 自然保护区对人类扰动的控制程度

3.2.1 倾向得分匹配的平衡性检验结果

以 2018 年倾向得分匹配的平衡性检验结果为例(表 4),判断本次变量匹配后在实验组和控制组间是否均衡的,即是否符合倾向得分匹配的平衡性假设,主要关注两点:首先是匹配后各变量标准化偏差,其次是 T 统计量的显著性水平。通过表 4 可以得出,匹配后各变量标准化偏差的绝对值在 10% 以内,远小于平衡性检验规定的 20% 上限标准^[36]。并且经过 T 检验,在 0.05 的水平下,实验组与控制组的各观测变量经匹配后无显著性差异。综上,本次匹配显著降低实验组与控制组之间自然环境因子的差异,即满足倾向得分匹配的平衡性假设。

3.2.2 自然保护区内的控制有效性指标

2000—2018 年,所有保护区控制有效性指数的均值为 -1.9207,而且绝大部分的自然保护区的控制有效

性指数均为负,占总数的 77.08%(表 5)。从时间序列来看(图 4),所有年份的控制有效性指数均为负,且控制有效性指数变化趋势比较平稳。对自然保护区的控制有效性指数分布进行分析可以得到,各年份随机点的中位数与平均值均为负并且均值与中位数接近(图 4)。上述数据说明长江经济带的绝大部分自然保护区与自然保护区大部分的区域对人类扰动的控制良好。

表 4 2018 年倾向得分匹配的平衡性检验结果
Table 4 Balance test results of propensity score matching in 2018

变量 Variables	U/M	均值 Mean		标准化 偏差/% Bias	标准化偏差 降低幅度/% Reduction bias	T 检验 T-test	
		实验组 Treated	控制组 Control			T 统计值 T-statistic	T 检验相伴概率 $p> t $
坡度 Slope	U	11.468	5.9838	75.7		74.65	0.000
	M	11.455	11.555	-1.4	98.2	-0.78	0.434
高程 Elevation	U	1846.6	1079.3	58.4		53.36	0.000
	M	1844.2	1878.4	-2.6	95.5	-1.43	0.153
道路 Road	U	0.04176	0.01887	47.0		54.48	0.000
	M	0.04176	0.04200	-0.5	99	-0.27	0.784
土地覆盖 Land cover	U	2.3971	2.0958	22.6		17.55	0.000
	M	2.3951	2.4093	-1.1	95.3	-0.75	0.455
年均地表温度 Mean annual surface temperature	U	16.269	20.666	-99.7		-94.75	0.000
	M	16.283	16.252	0.7	99.3	0.38	0.706
年均降水 Mean annual precipitation	U	3.5019	3.3832	13.7		12.82	0.000
	M	3.5018	3.5031	-0.2	98.9	-0.09	0.930

U:匹配前 Unmatched M:匹配后 Matched

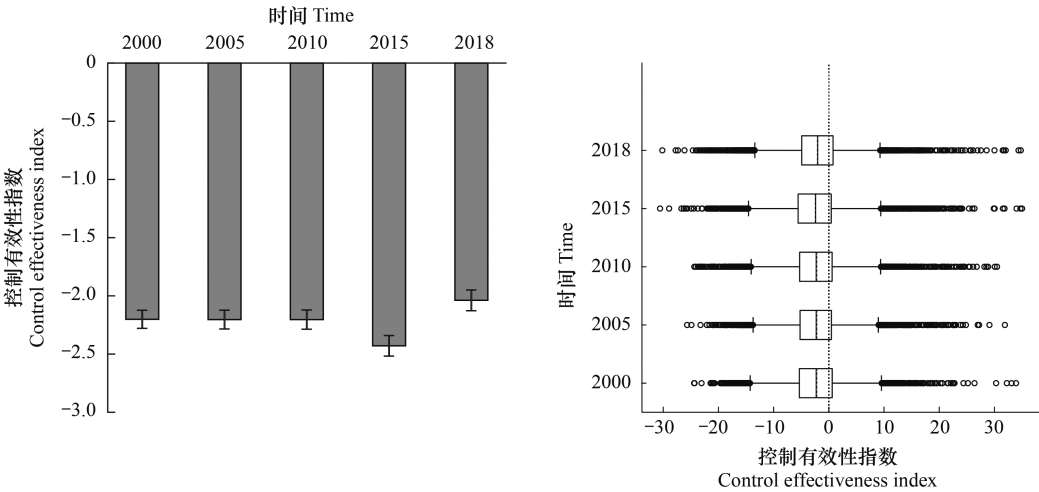


图 4 2000—2018 年保护区控制有效性指数均值及保护区内部采样点分布

Fig.4 Mean control effectiveness index of nature reserves and distribution of sampling points within nature reserves for 2000—2018

从自然保护区的不同保护级别来看,2000—2018 年国家级保护区与省级保护区每年的控制有效性指数均值均为负(表 5),国家级保护区的控制有效性指数值低于省级保护区(图 5)。并且 19 年间有 78.68%的国家级保护区的控制有效值是非正的,而省级保护区也有 76.00%(表 5)。国家级保护区控制有效性指数在 2000—2015 年呈递减趋势,但在 2015—2018 年有明显增长(图 5)。此外,省级保护区 2000—2018 年变化趋势较为平稳。因此,目前绝大部分保护区对人类扰动是有控制作用的,其中国家级保护区好于省级保护区。

表 5 2000—2018 年长江经济带自然保护区 CEI 统计结果

Table 5 Statistics on the CEI of nature reserves in the Yangtze River Economic Belt from 2000 to 2018

	所有保护区 All	保护级别 Management levels		地理经济分区 Geographical economic zones			功能区划 Functional zones		
		国家级 National	省级 Provincial	上游 Upstream	中游 Middle	下游 Downstream	核心区 Core zone	缓冲区 Buffer zone	实验区 Experimental zone
CEI 均值 CEI mean	-1.9207	-2.0403	-1.8394	-2.3675	-2.3962	0.1233	-2.7437	-2.4016	-1.1392
保护区 CEI 均值>0 的数量占比/% Proportion of nature reserves with mean CEI >0	22.92	21.32	24.00	20.23	16.81	50.00	13.83	22.58	30.11
保护区 CEI 均值≤0 的数量占比/% Proportion of nature reserves with mean CEI ≤0	77.08	78.68	76.00	79.77	83.19	50.00	86.17	77.42	69.89

CEI:控制有效性指数 Control effectiveness index

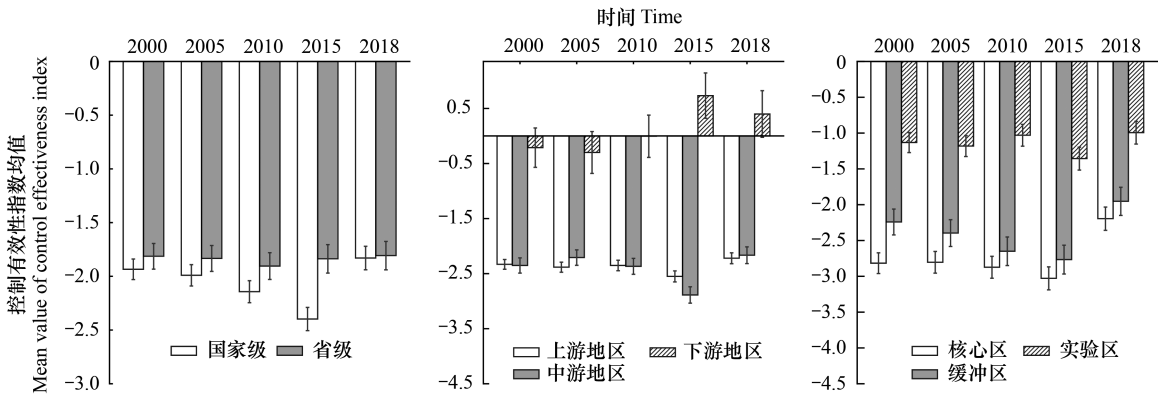


图 5 自然保护区控制有效性指数统计

Fig.5 Statistics of nature reserves control effectiveness index of nature reserves

从不同地理经济区来看,2000—2018 年长江经济带上游、中游的自然保护区控制有效性指数均值为负,而下游地区控制有效性指数均值大于前两者,且在 2015、2018 年控制有效性指数均值为正(表 5,图 5)。上游与中游地区的保护区的控制有效性指数呈现降低趋势,而下游地区变化趋势与之相反(图 5)。同时上游与中游保护区控制有效性指数非正的数量远多于下游保护区,均超过 75%,而下游保护区仅有 50.00%(表 5)。因此,上游与中游的保护区对人类扰动的控制程度好于下游保护区。

从国家级自然保护区不同的功能区来看,核心区、缓冲区、实验区的控制有效性指数均为负数,在 2000—2018 年控制有效性指数数值从小到大排序为:核心区<缓冲区<实验区(图 5),并且三者在控制有效性指数非正数目上从多到少排序为:核心区>缓冲区>实验区(表 5)。其中核心区与缓冲区变化趋势一致,均在 2000—2015 年呈递减趋势,在 2015—2018 呈现增长,而实验区则变化趋势较为稳定。整体来看,管护越严格的功能区,对人类扰动的限制作用越好。

最后,从空间分布来看,负值成片分布在“川西高原-横断山脉-云贵高原”及“巴山-巫山-武陵山-雪峰山”地区的保护区,其中位于前者的保护区有效性控制指数值最低,显示其对人类扰动的控制较好。大部分国家级自然保护区的核心区的控制有效性指数更低(图 6)。

3.3 自然保护区保护成效

根据上述自然保护区人类足迹变化与控制有效性指数,本文评价了长江经济带自然保护区的保护成效。从表 6 中可知,长江经济带内绝大部分自然保护区的保护成效以良好与尚可为主,数量占比分别为 35.12%和 50.30%,面积占比分别为 26.78%和 61.95%。面积较大的保护区保护成效以尚可为主,保护成效较差的保护

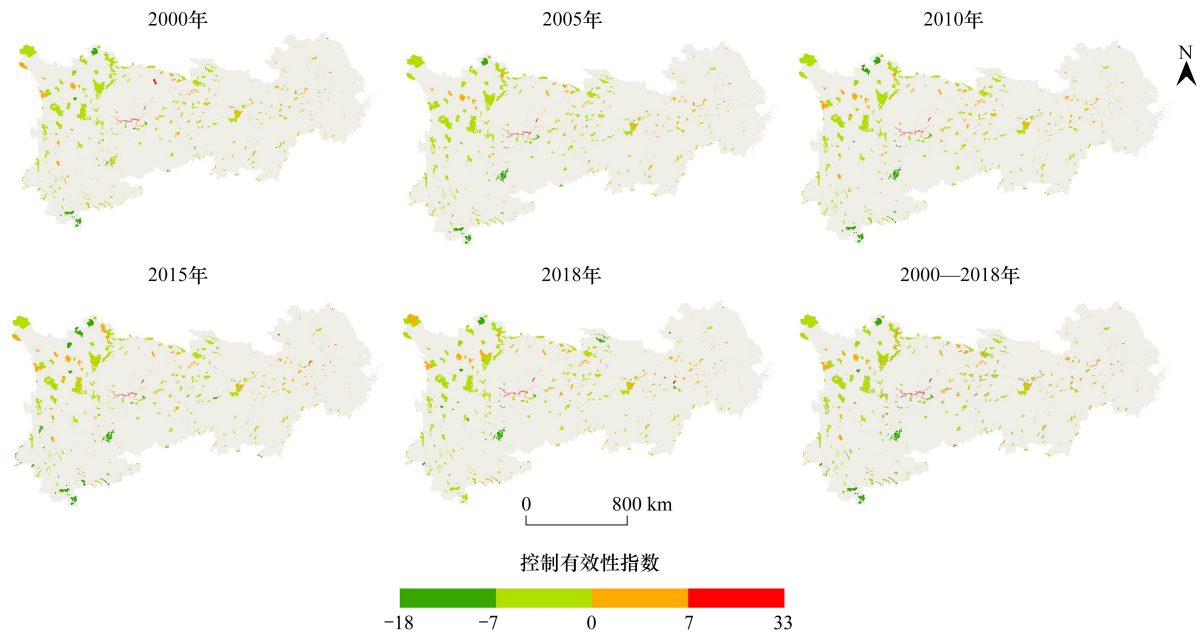


图 6 长江经济带自然保护区控制有效性指数空间分布

Fig.6 Spatial distribution of control effectiveness index in nature reserves in the Yangtze River Economic Belt

区数量和面积占比均较小。这说明长江经济带大部分自然保护区在限制人类扰动增长方面做的较好。

表 6 自然保护区保护成效数量(N)与面积(A)占比统计结果/%

Table 6 Statistics on the number (N) and area (A) proportion of nature reserves protection effectiveness												
保护成效 Protection effectiveness	所有保护区 All		保护级别 Management levels				地理经济分区 Geographical economic zones					
			国家级 National		省级 Provincial		上游 Upstream		中游 Middle		下游 Downstream	
	N	A	N	A	N	A	N	A	N	A	N	A
良好 Good	35.12	26.78	41.91	29.91	30.50	22.27	30.64	23.52	42.86	42.04	31.82	19.99
尚可 Fair	50.30	61.95	49.26	64.29	51.00	58.57	55.49	65.38	49.58	51.57	31.82	40.67
较差 Poor	14.58	11.27	8.82	5.79	18.50	19.16	13.87	11.10	7.56	6.39	36.36	39.34

N:数量 Number; A:面积 Area

从不同的保护级别来看(表 6),国家级保护区中有 41.91%的保护成效良好,面积占 29.91%;49.26%的保护成效尚可,面积占 64.29%;8.82%的保护成效较差,面积占 5.79%。分布在“川西高原-横断山脉-云贵高原”附近的国家级保护区保护成效以尚可为主,分布在“巫山-武陵山-雪峰山”地区的国家级保护区保护成效以良好为主,而分布在沿江中下游的国家级保护区则出现保护成效较差聚集的现象(图 7)。省级保护区中有 30.50%的保护成效良好,面积仅占 22.27%;51.00%的保护成效尚可,面积占 58.57%;18.50%的保护成效较差,面积占 19.16%。通过比较各类保护成效数量与面积,发现面积较大的保护区,保护成效较好。国家级保护区保护成效整体好于省级保护区,说明级别越高的自然保护区保护成效越好。

从不同地理经济地区来看(表 6),长江经济带上、中、下游地区分别有约 30.64%、42.86%、31.82%的保护区保护成效良好,面积分别占区域自然保护区总面积的 23.52%、42.04%、19.99%;约 55.49%、49.58%、31.82%的保护区成效尚可,面积分别占 65.38%、51.57%、40.67%。上游与中游地区保护区保护成效以良好与尚可为主,下游地区超过三分之一的保护区保护成效较差。随着地区经济发展,人类活动影响加剧,生态保护空间遭受挤占,从而降低保护成效。

表 7 国家级自然保护区各功能分区保护成效数量(N)与面积(A)占比统计结果/%

保护成效 Protection effectiveness	核心区 Core zone		缓冲区 Buffer zone		实验区 Experimental zone	
	N	A	N	A	N	A
良好 Good	40.43	27.95	39.79	28.35	41.94	33.13
尚可 Fair	54.25	68.64	47.31	65.05	43.01	47.41
较差 Poor	5.32	3.41	12.90	6.60	15.05	19.46

从不同的功能分区来看(表 7),核心区、缓冲区、实验区依次有约 40.43%、39.79%、41.94%的保护成效良好,面积分别占地区自然保护区总面积的 27.95%、28.35%、33.13%;约 54.25%、47.31%、43.01%的保护成效尚可,面积分别占 68.64%、65.05%、47.41%;只有约 5.32%、12.90%、15.05%的保护成效较差,面积分别占 3.41%、6.60%、19.46%。这说明核心区、缓冲区、实验区的保护成效在依次变差,管护越严格,保护成效越好。

从自然保护区保护成效的空间分布可以看出(图 7),长江经济带大部分地区的自然保护区的保护成效较好,特别是“巴山-巫山-武陵山-雪峰山”地区及云南西部保护区保护成效的级别为良好。保护成效较差的保护区主要分布在长江上游、下游流域及四川省甘孜县附近。

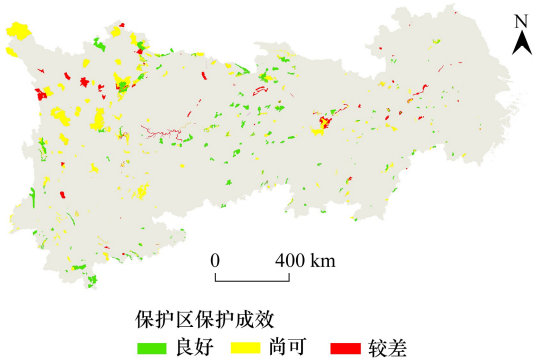


图 7 长江经济带自然保护区保护成效空间分布
Fig.7 Spatial distribution of protection effectiveness of nature reserves in the Yangtze River Economic Belt

4 结论与讨论

4.1 结论

本文以人类足迹为指标,一方面分析了自然保护区的人类扰动变化,另一方面基于倾向得分匹配的方法量化了自然保护区对人类扰动的控制程度,进而从两方面评估了长江经济带 2000—2018 年自然保护区的保护成效。得出以下结论:

(1)长江经济带有 35.12%的保护区保护成效良好,面积占地区总面积的 26.78%;50.30%的保护区保护成效尚可,面积占 61.95%;仅有 14.58%的保护区成效较差,面积占 11.27%。

(2)长江经济带及其自然保护区的人类足迹整体上均呈增长趋势,但保护区内部增长幅度不足整个地区的一半,有 48.51%的保护区人类足迹是降低的,有 77.08%的保护区控制有效性指数均值为负。这表明自然保护区虽然没有改变内部人类足迹整体增加的趋势,但有效减缓了其增速。

(3)保护区和功能分区保护等级越高,保护成效越好。超过 90%的国家级保护区保护成效较好,同时超过 80%的省级保护区保护成效较好。在国家级保护区功能分区中,超过 90%的核心区保护成效较好,超过 80%的缓冲区与实验区保护成效较好。

(4)长江经济带上游与中游地区保护成效好于下游地区。特别是“巴山-巫山-武陵山-雪峰山”地区和云南西部保护区保护成效良好。

4.2 讨论

长江经济带自然保护区对于减缓人类活动有一定效果,但没有改变其内部人类足迹整体增加的趋势。潜在的原因分析如下:首先,自然保护区存在多头管理、权限不清等原因,而导致边界混乱与重叠,这种情况集中在长江经济带上游地区及下游皖南山区^[37]。其次,长江经济带自然保护区同时存在保护空缺现象,例如:长江流域存在部分水生两栖及爬行濒危动物无保护区覆盖的情况^[38]、云南乌蒙山国家级自然保护区内箬竹

种群资源的退化。最后,自然保护区内还存在大量生产经营活动,例如西双版纳保护区内分布有农田、橡胶林和茶园^[39],湖南大义山自然保护区内违规探矿、采矿^[40]等。针对上述原因,后续,应该采取严格的管护措施势在必行,如提高保护级别或采取针对性的管护措施,依法解决土地权属问题,合理有序调整保护区范围并加强分区管理^[41, 42]等都可以在一定程度上提升生态保护成效。例如,在川西高原,由于道路会导致其周围景观明显破碎化,所以道路设施的规划与修建过程需要科学考虑生态保护问题,比如设置动物通道;在成都平原、洞庭湖平原、江汉平原与鄱阳湖平原等我国重要农业地区,在保障粮食安全的前提下,适当进行生态退耕^[33];对于保护区集中分布地区开展生态廊道建设,提高保护区的连通性也会提升自然保护区管护效果。

本文采用的人类足迹模型涉及格网化的人口密度,土地利用等数据。该模型人类扰动因子数据容易获取,可快速开展大范围的多个自然保护区保护成效评估,这是传统基于生物多样性等生态指标进行保护成效评价短时间内很难实现的。因此,本文的方法可为其他地区自然保护区保护成效评估提供参考。本文也存在一些不足,有待后续研究进一步完善。就 Mu 等^[29]研制的人类足迹数据而言,该数据集相较前人引入了通航水域人类扰动因子,对航运发达的长江经济带来说,数据的准确度尚佳,但是对某些存在通航条件水域但航运不发达的地区或存在季节性通航的地区来说,该数据集的准确度就大大降低。该人类足迹数据集的空间分辨率为 1 km,而部分保护区的核心区、缓冲区、实验区的空间范围小,不能完全覆盖 1 个 1 km×1 km 栅格,影响了本文功能分区内部人类扰动计算结果的准确性。人口密度与土地利用等人类扰动因子之间具有较高的空间相关性^[22, 43],直接进行空间累加虽然不会影响长江经济带人类足迹的时空变化趋势,但会高估现有的人类足迹的绝对值。

参考文献 (References):

- [1] 马克平. 试论生物多样性的概念. 生物多样性, 1993, 1(1): 20-22.
- [2] Maxwell S L, Cazalis V, Dudley N, Hoffmann M, Rodrigues A S L, Stolton S, Visconti P, Woodley S, Kingston N, Lewis E, Maron M, Strassburg B B N, Wenger A, Jonas H D, Venter O, Watson J E M. Area-based conservation in the twenty-first century. *Nature*, 2020, 586 (7828): 217-227.
- [3] 高吉喜, 徐梦佳, 邹长新. 中国自然保护区 70 年发展历程与成效. 中国环境管理, 2019, 11(4): 25-29.
- [4] 王翠玲, 臧振华, 邱月, 邓舒雨, 冯朝阳, 谢宗强, 徐文婷, 刘蕾, 陈全胜, 申国珍. 湖北神农架国家级自然保护区森林和川金丝猴栖息地的保护成效. 生物多样性, 2017, 25(5): 504-512.
- [5] 晏玉莹. 湖北石首麋鹿国家级自然保护区保护成效评估[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014.
- [6] 邱成, 胡金明, 杨飞龄. 基于 NDVI 的云南省自然保护区保护成效分析. 生态学报, 2020, 40(20): 7312-7322.
- [7] 赵广华, 田瑜, 唐志尧, 李俊生, 曾辉. 中国国家级陆地自然保护区分布及其与人类活动和自然环境的关系. 生物多样性, 2013, 21(6): 658-665.
- [8] Li S C, Su S, Liu Y X, Zhou X W, Luo Q X, Paudel B. Effectiveness of the Qilian Mountain nature reserve of China in reducing human impacts. *Land*, 2022, 11(7): 1071.
- [9] Wang L Z, Pan Y D, Cao Y, Li B, Wang Q X, Wang B X, Pang W T, Zhang J, Zhu Z F, Deng G P. Detecting early signs of environmental degradation in protected areas: an example of Jiuzhaigou Nature Reserve, China. *Ecological Indicators*, 2018, 91: 287-298.
- [10] Geldmann J, Manica A, Burgess N D, Coad L, Balmford A. A global-level assessment of the effectiveness of protected areas at resisting anthropogenic pressures. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(46): 23209-23215.
- [11] Xia H, Li H, Prishchepov A V. Assessing Forest conservation outcome of a nature reserve in a subtropical forest ecosystem: effectiveness, spillover effects, and insights for spatial conservation prioritization. *Biological Conservation*, 2023, 285: 110254.
- [12] Schleicher J, Peres C A, Leader-Williams N. Conservation performance of tropical protected areas: how important is management? *Conservation Letters*, 2019, 12: e12650.
- [13] Andam K S, Ferraro P J, Pfaff A, Sanchez-Azofeifa G A, Robalino J A. Measuring the effectiveness of protected area networks in reducing deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(42): 16089-16094.
- [14] 袁虹, 冯宏元, 汪有奎, 郭生祥, 李进军, 孙小霞. 祁连山自然保护区主要保护对象及类型调查分析. 中南林业科技大学学报, 2016, 36 (1): 6-11.
- [15] Stoner C, Caro T, Mduma S, Mlingwa C, Sabuni G, Borner M. Assessment of effectiveness of protection strategies in Tanzania based on a decade of survey data for large herbivores. *Conservation Biology*, 2007, 21(3): 635-646.
- [16] 刘永杰, 王世畅, 彭皓, 李镇清. 神农架自然保护区森林生态系统服务价值评估. 应用生态学报, 2014, 25(5): 1431-1438.
- [17] Sanderson E W, Jaiteh M, Levy M A, Redford K H, Wannebo A V, Woolmer G. The human footprint and the last of the wild. *BioScience*, 2002,

- 52(10): 891.
- [18] Venter O, Sanderson E W, Magrach A, Allan J R, Beher J, Jones K R, Possingham H P, Laurance W F, Wood P, Fekete B M, Levy M A, Watson J E M. Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and implications for biodiversity conservation. *Nature Communications*, 2016, 7: 12558.
- [19] Williams B A, Venter O, Allan J R, Atkinson S C, Rehbein J A, Ward M, Di Marco M, Grantham H S, Ervin J, Goetz S J, Hansen A J, Jantz P, Pillay R, Rodríguez-Buritica S, Supples C, Virnig A L S, Watson J E M. Change in terrestrial human footprint drives continued loss of intact ecosystems. *One Earth*, 2020, 3(3): 371-382.
- [20] Jones K R, Venter O, Fuller R A, Allan J R, Maxwell S L, Negret P J, Watson J E M. One-third of global protected land is under intense human pressure. *Science*, 2018, 360(6390): 788-791.
- [21] Tapia-Armijos M F, Homeier J, Draper Munt D. Spatio-temporal analysis of the human footprint in South Ecuador; influence of human pressure on ecosystems and effectiveness of protected areas. *Applied Geography*, 2017, 78: 22-32.
- [22] Li S C, Wu J S, Gong J, Li S W. Human footprint in Tibet: assessing the spatial layout and effectiveness of nature reserves. *Science of the Total Environment*, 2018, 621: 18-29.
- [23] 张涵, 黎夏, 石洪, 刘晓娟. 基于倾向得分匹配方法的中国自然保护区缓解人类活动压力评估. *地理学报*, 2021, 76(3): 680-693.
- [24] 杨桂山, 徐昔保, 李平星. 长江经济带绿色生态廊道建设研究. *地理科学进展*, 2015, 34(11): 1356-1367.
- [25] 贾艳艳, 唐晓岚, 张卓然. 长江中下游流域自然保护区空间分布及其与人类活动强度关系研究. *世界地理研究*, 2020, 29(4): 845-855.
- [26] 冯春婷, 罗建武, 刘方正, 周越, 张立博, 杜金鸿, 王伟. 长江经济带国家级自然保护区管理状况评价. *环境科学研究*, 2020, 33(3): 709-717.
- [27] 胡昕利, 易扬, 康宏樟, 王彬, 史明昌, 刘春江. 近 25 年长江中游地区土地利用时空变化格局与驱动因素. *生态学报*, 2019, 39(6): 1877-1886.
- [28] 唐宇娣, 朱道林, 程建, 宋洋, 李瑶瑶. 人地挂钩视角下人口与土地城镇化协调发展关系研究——以长江经济带上游地区为例. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(2): 287-295.
- [29] Mu H W, Li X C, Wen Y N, Huang J X, Du P J, Su W, Miao S X, Geng M Q. A global record of annual terrestrial Human Footprint dataset from 2000 to 2018. *Scientific Data*, 2022, 9: 176.
- [30] 瞿莉莎, 朱求安, 朱超凡, 张江. 1960—2020 年中国 1 公里分辨率月降水数据集. *中国科学数据*, 2023, 8(2): 286-297.
- [31] Yang J E, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [32] 雷会霞, 敬博, 朱依平. 自然保护区体系下的秦巴山脉区域乡村振兴发展战略与模式研究. *中国工程科学*, 2020, 22(1): 96-110.
- [33] Geldmann J, Barnes M, Coad L, Craigie I D, Hockings M, Burgess N D. Effectiveness of terrestrial protected areas in reducing habitat loss and population declines. *Biological Conservation*, 2013, 161: 230-238.
- [34] Bowker J N, De Vos A, Ament J M, Cumming G S. Effectiveness of Africa's tropical protected areas for maintaining forest cover. *Conservation Biology*, 2017, 31(3): 559-569.
- [35] Abadie A, Drukker D, Herr J L, Imbens G W. Implementing matching estimators for average treatment effects in stata. *The Stata Journal: Promoting Communications on Statistics and Stata*, 2004, 4(3): 290-311.
- [36] Rubin D B. Using propensity scores to help design observational studies: application to the tobacco litigation. *Health Services and Outcomes Research Methodology*, 2001, 2(3): 169-188.
- [37] 靳川平, 刘晓曼, 王雪峰, 孙阳阳, 付卓, 王超, 候静. 长江经济带自然保护区边界重叠关系及整合对策分析. *生态学报*, 2020, 40(20): 7323-7334.
- [38] 舒国成, 何忠萍, 郭鹏, 贺锦铨, 杜文字, 胡琳, 李成, 谢锋. 长江流域水生两栖爬行动物多样性与保护. *水产学报*, 2023, 47(2): 50-61.
- [39] Huang Z D, Bai Y, Alatalo J M, Yang Z Q. Mapping biodiversity conservation priorities for protected areas: a case study in Xishuangbanna Tropical Area, China. *Biological Conservation*, 2020, 249: 108741.
- [40] 《长江保护法》立法中自然保护区问题研究. 新时代环境资源法新发展——自然保护区法律问题研究: 中国法学会环境资源法学研究会 2019 年年会论文集(上). 海口, 2019: 196-201.
- [41] 黄宝荣, 张丛林, 邓冉. 我国自然保护区历史遗留问题的系统解决方案. *生物多样性*, 2020, 28(10): 1255-1265.
- [42] 唐小平, 刘增力, 马炜. 我国自然保护区整合优化规则与路径研究. *林业资源管理*, 2020(1): 1-10.
- [43] Kennedy C M, Oakleaf J R, Theobald D M, Baruch-Mordo S, Kiesecker J. Managing the middle: a shift in conservation priorities based on the global human modification gradient. *Global Change Biology*, 2019, 25(3): 811-826.