

DOI: 10.5846/stxb202201200198

张睿, 师玮一, 周靖宣, 方贺, 王宇白, 徐深, 康娟, 徐栋. 2001—2019 年中国自然保护区生态环境质量时空变化特征及其驱动力. 生态学报, 2023, 43(5): 2101-2113.

Zhang R, Shi W Y, Zhou J X, Fang H, Wang Y B, Xu S, Kang J, Xu D. Temporal and spatial variation characteristics and driving forces of eco-environmental quality in China's nature reserves from 2001 to 2019. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 2101-2113.

# 2001—2019 年中国自然保护区生态环境质量时空变化特征及其驱动力

张睿<sup>1</sup>, 师玮一<sup>2</sup>, 周靖宣<sup>3</sup>, 方贺<sup>4</sup>, 王宇白<sup>5</sup>, 徐深<sup>6</sup>, 康娟<sup>7</sup>, 徐栋<sup>8,\*</sup>

1 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 武汉 430074

2 苏州大学政治与公共管理学院, 苏州 215031

3 大连理工大学建设工程学部, 大连 116081

4 浙江省气象中心, 杭州 310017

5 南京工业大学测绘科学与技术学院, 南京 211816

6 北京大学心理与认知科学学院, 北京 100871

7 阿克苏地区气象局, 阿克苏 843099

8 北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 北京 100875

**摘要:**自然保护区对维护生物多样性, 改善生态环境质量具有重要作用。然而, 我国自然保护区生态环境质量变化及其对自然因素与人类活动的响应规律还不清晰, 理解这些规律对我国的生态文明建设以及生物多样性的保护具有重要意义。基于 2001—2019 年中国历史高分辨率生态环境质量数据 CHEQ 数据集以及自然因素, 利用 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 检验以及多元回归残差分析方法, 探究了 2001—2019 年中国自然保护区的生态环境质量时空变化特征及其对自然因素与人类活动驱动因素的响应。结果表明: ①我国自然保护区的 CHEQ 指数呈现多阶段波动变化, 总体呈小幅度下降趋势, 平均趋势率为  $-0.54 \times 10^{-3}/a$ ; 在空间上, 中国自然保护区 CHEQ 变化趋势值呈“南高北低, 东高西低”的分布格局; ②自然因素与人类活动的共同作用是我国自然保护区生态环境质量恶化的主要原因, 且恶化区域主要分布在自然保护区的实验区和缓冲区。其中自然因素对我国自然保护区生态环境质量变化的影响在  $-3 \times 10^{-3}/a$ — $0/a$  之间, 人类活动的影响在  $-1 \times 10^{-3}/a$ — $2 \times 10^{-3}/a$  之间; ③自然因素对我国自然保护区贡献率多在 75% 以上, 人类活动对我自然保护区贡献率多在 45% 以下。在所选的自然因素里, 降水因子对我国自然保护区的生态环境质量空间分布影响最大, 地表径流量因子的影响最小。研究在弥补了现有研究不足的同时, 有望未来为可持续发展中生态环境与经济社会协同发展研判提供科学的定量支撑, 并为制定相应的政策提供科学依据。  
**关键词:** 中国自然保护区; 中国高分辨率生态环境质量数据(CHEQ); 自然因素; 人类活动; 残差分析; 变化趋势

## Temporal and spatial variation characteristics and driving forces of eco-environmental quality in China's nature reserves from 2001 to 2019

ZHANG Rui<sup>1</sup>, SHI Weiyi<sup>2</sup>, ZHOU Jingxuan<sup>3</sup>, FANG He<sup>4</sup>, WANG Yubai<sup>5</sup>, XU Shen<sup>6</sup>, KANG Juan<sup>7</sup>, XU Dong<sup>8,\*</sup>

1 School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

2 School of Politics and Public Management, Soochow University, Suzhou 215031, China

**基金项目:** 浙江省自然科学基金项目(LQ21D060001); 风云卫星先行计划项目(FY-APP-2021.0105); 新疆气象局科技创新发展基金项目(MS202128); 阿克苏地区气象局科技项目(AKS202210)

**收稿日期:** 2022-01-20; **网络出版日期:** 2022-10-21

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xd@mail.bnu.edu.cn

# 本研究尚不含中国港澳台统计数据。

3 Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116081, China

4 Zhejiang Climate Center, Hangzhou 310017, China

5 School of Geomatics Science and Technology, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China

6 School of Psychology and Cognitive Science, Peking University, Beijing 100871, China

7 Aksu Regional Meteorological Bureau, Aksu 843099, China

8 State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

**Abstract:** Nature reserves play an important role in maintaining biodiversity and improving ecological environment quality. It is not clear how the ecological environment quality in nature reserves changes and its response to the natural factors and human activities. Understanding these rules is of great significance to the construction of ecological civilization and the biodiversity protection in China. Based on China's high-resolution eco-environmental quality (CHEQ) dataset and natural factors from 2001 to 2019, the changing patterns of the ecological environment quality of the nature reserves in China were investigated and the corresponding contributions of the main driving forces, natural factors and human activities to these changes were distinguished using the methods of trend analysis and multiple regression residuals analysis. The results showed as follows: ① CHEQ index of nature reserves in China indicated multi-stage fluctuation change and an overall slightly decreasing trend, with an average trend rate of  $-0.54 \times 10^{-3}/a$ . Overall pattern of CHEQ was high in the south and east region and low in the north and west region. ② The combination of natural factors and human activities was mainly distributed in the experimental zone and buffer zone of the nature reserves and was the main factor of environmental degeneration. The impacts of natural factors on CHEQ change ranged from  $-3 \times 10^{-3}/a$  to  $0/a$ , while the impacts of human activities changed from  $-1 \times 10^{-3}/a$  to  $2 \times 10^{-3}/a$ . ③ The contribution rate of natural factors to CHEQ change in China's nature reserves was more than 75%, and the contribution rate of human activities to CHEQ change was less than 45%. Among the natural factors in this study, precipitation had the greatest impact on the ecological environment quality of China's nature reserves, while surface runoff factor had the least impact. While making up for the shortcomings of the existing studies, this work is expected to provide the quantified support on the coordination between ecological conservation and economic development in the future, and provide scientific knowledge for formulating the corresponding policies.

**Key Words:** China National Nature Reserve; CHEQ; natural factors; human activities; residuals analysis; change trend

近些年,中国面临的生态环境问题日益突出<sup>[1]</sup>。其中,作为生态环境重点保护对象,以及自然资源与生物多样性的主要庇护所<sup>[2]</sup>,自然保护区对维护国家的生态系统平衡与生物多样性的稳定发挥了重要作用。而随着气候变化和人类活动的不断加剧,中国自然保护区的生态环境质量也在发生着剧烈变化。因此,揭示国家自然保护区内的生态环境质量演变特征,并分析其对自然因素与人类活动的响应,对于中国未来的生态保护以及可持续发展目标的实现具有重要的现实意义。

随着卫星技术的不断发展,日趋完善的对地观测系统极大地推动了大尺度的生态环境质量监测研究<sup>[3-6]</sup>。例如,中国环境部于2006年提出了生态环境状况指数(EI)<sup>[7]</sup>,EI指数由生物丰度、植被覆盖、水网密度、土壤退化和污染负荷5个指标构建而成,但该指数计算过程较为复杂,并且存在数据难获取的缺点<sup>[8]</sup>。徐涵秋在2013年提出完全基于遥感数据的遥感生态指数(RSEI)<sup>[9]</sup>,RSEI指数基于主成分分析方法耦合了绿度、湿度、干度、热度4个指标,避免了主观定权的缺点,该指数在生态研究方面得到众多学者的广泛应用<sup>[10-12]</sup>。2021年,Xu等<sup>[13]</sup>在RSEI的基础上引入了生境质量指标,并利用生态环境部提供的中国县域EI指数数据验证了RSEI指数以及改进后的模型在中国的适用性,结果表明RSEI指数不适合地表覆盖类型较为丰富的地区,而改进后的模型则有效地弥补这一缺陷。

另一方面,以往研究表明影响生态环境质量的动态变化主要受气候因子与人类活动的共同影响<sup>[14-15]</sup>。首先,气候和生态环境之间的影响具有相互性,气候不稳定变化导致区域生态系统紊乱<sup>[16]</sup>,相反生态系统的

变化也会给气候带来相应的反馈<sup>[17]</sup>;另外,人类活动对生态环境的影响同样具有两面性,如“退耕还林”、“三北防护林”等生态恢复工程促进了区域生态环境质量的改善,而人口的快速增长以及资源的过度消耗也同样会给生态环境带来巨大威胁<sup>[18]</sup>。

近些年,我国自然保护区的生态环境质量受到了自然因素与人类活动共同影响,而目前针对我国自然保护区生态环境质量时空变化以及驱动机制的研究较少。因此,迫切需要科学的手段来定量探究我国自然保护区生态环境质量时空变化特征及其对自然因素与人类活动的响应机制,从而为政府部门制定普适性的生态环境保护提供科学的参考,以此来缓解未来可能的自然因素以及城市化加速发展带来的潜在生态风险。

为此,本研究基于中国高分辨率生态环境质量数据集(CHEQ)<sup>[13]</sup>以及主要自然因素指标,分析了2001—2019年中国自然保护区生态环境质量的时空变化特征,并利用像元尺度的趋势分析和多元回归残差法定量探究了自然因素变化与人类活动对我国自然保护区生态环境质量变化的相对贡献度。本研究在弥补了现有研究不足的同时,有望为政府部门制定相关环境保护政策提供科学依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据源与预处理

本研究使用的数据包括中国高分辨率生态环境质量数据集(CHEQ)、气温(TEMP)<sup>[19]</sup>、降水(PRE)<sup>[20]</sup>、实际蒸散量(AET)、潜在蒸散量(PET)、缺水量(DEF)、地表径流量(RO)、干旱指数(PDSI)、大气压(VAP)、饱和水汽压差(VPD)、短波下行辐射(SRAD)、风速(VS)、土壤水分(SOIL)以及行政区划数据。数据处理过程包括数据裁剪、坐标转换,以及月度平均气温合成年数据,并将所有数据设置为相同的空间分辨率和坐标系。数据详细信息见表1。

表1 数据源详细说明

Table 1 Detailed description of data

数据名 Data name	空间分辨率 Spatial resolution	时间分辨率 Time resolution	时间范围 Time range	来源 Source
生态环境质量 CHEQ	1000m	年	2001—2019 年	国家地球系统科学数据中心
气温 Temperature	1000m	月	2001—2019 年	国家地球系统科学数据中心
降雨 Precipitation	1000m	月	2001—2019 年	国家地球系统科学数据中心
Terra Climate 数据集 Terra Climate Datasets	1000m	月	2001—2019 年	谷歌地球引擎
国家自然保护区边界 National nature reserve	/	2018 年	2018 年	资源环境科学与数据中心

### 1.2 方法

#### 1.2.1 趋势分析

Theil-Sen Median 趋势分析是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法,可以减少异常值的影响,并且计算效率高,常被用于长时间序列数据的趋势分析中<sup>[21]</sup>。本研究利用 Theil-Sen Median 趋势分析的方法计算2001—2019年CHEQ的变化趋势,计算公式如下:

$$\text{Slope} = \text{Median} \left( \frac{\text{CHEQ}_j - \text{CHEQ}_i}{j - i} \right), \quad 2001 \leq i < j \leq 2019 \quad (1)$$

式中,Slope表示CHEQ变化趋势,CHEQ<sub>j</sub>和CHEQ<sub>i</sub>分别为第j年和第i年CHEQ值。若Slope<0,则CHEQ在时间序列上呈下降趋势,表明在该时间段内生态环境质量处于降低或恶化状态;若Slope>0,则CHEQ在时间序列上呈上升趋势,表明在该时间段内生态环境质量处于改善或提高状态。

本研究中Mann-Kendall检验被用于对CHEQ趋势进行显著性判断<sup>[20]</sup>,其统计量S和Z<sub>Slope</sub>计算如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(\text{CHEQ}_j - \text{CHEQ}_i) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(X_j - X_i) \begin{cases} 1, \text{CHEQ}_j - \text{CHEQ}_i > 0 \\ 0, \text{CHEQ}_j - \text{CHEQ}_i = 0 \\ -1, \text{CHEQ}_j - \text{CHEQ}_i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

$$Z_{\text{Slope}} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\text{CHEQ}_i$  和  $\text{CHEQ}_j$  为时间序列中年份  $i$  和  $j$  所对应的 CHEQ 值,  $n$  为代表时间序列的长度为 19。检验统计量  $Z_{\text{Slope}}$  的值处于  $(-\infty, +\infty)$  内。在给定显著性水平  $\alpha$  下, 当  $|Z_{\text{Slope}}| > Z_{1-\alpha/2}$  时, 表示时间序列在  $\alpha$  水平上变化显著。在本研究中, 取  $\alpha = 0.05$ , 判断在 0.05 置信水平上即  $Z_{\text{Slope}} > 1.96$  时, 2001—2019 年中国自然保护区 CHEQ 变化趋势的显著性。

1.2.2 多元回归残差分析

传统的研究大多基于降水和气温数据模拟自然因素对生态系统的影响<sup>[22-24]</sup>, 但影响生态系统的因素多样, 例如饱和水汽压、土壤水分、实际蒸散发等自然因素同样会对生态系统造成影响。因此, 本研究基于多元回归残差的方法定量分析了自然因素与人类活动对 CHEQ 变化相对贡献度。首先选择多元线性回归模型, 以 CHEQ 为因变量, 以气温 (TEMP) 和降雨 (PRE) 实际蒸散量 (AET)、潜在蒸散量 (PET)、缺水量 (DEF)、地表径流量 (RO)、干旱指数 (PDSI)、大气压 (VAP)、饱和水汽压差 (VPD)、短波下行辐射 (SRAD)、风速 (VS) 以及土壤水分 (SOIL) 因子为自变量, 建立自然因素指标与 CHEQ 之间的回归关系; 其次, 基于回归模型的系数以及自然因素计算得到 CHEQ 预测值 ( $\text{CHEQ}_{\text{CC}}$ ), 即仅受自然因素变化影响下的 CHEQ; 接着, 利用 CHEQ 观测值和 CHEQ 预测值的差值, 即 CHEQ 残差 ( $\text{CHEQ}_{\text{HA}}$ ), 来表示仅受人类活动影响下的 CHEQ。计算公式如下:

$$\text{CHEQ}_{\text{CC}} = \sum_{i=1}^n a_i x_i + b \quad (6)$$

$$\text{CHEQ}_{\text{HA}} = \text{CHEQ}_{\text{obs}} - \text{CHEQ}_{\text{CC}} \quad (7)$$

式中:  $\text{CHEQ}_{\text{CC}}$  为基于回归模型的 CHEQ 预测值,  $x_i$  为自然因子,  $a_i, b$  为回归模型参数;  $\text{CHEQ}_{\text{HA}}$  为残差,  $\text{CHEQ}_{\text{obs}}$  为观测值。

1.2.3 CHEQ 变化驱动因素影响分析

根据公式 (1) 计算 2001—2019 年中国自然保护区  $\text{CHEQ}_{\text{CC}}$  和  $\text{CHEQ}_{\text{HA}}$  的变化趋势, 得到的结果分别代表在自然因素与人类活动影响下 CHEQ 的变化趋势。变化趋势值大于 0 时表示自然因素或人类活动可促进 CHEQ 的上升, 有利于环境的改善; 反之, 表示自然因素或人类活动对生态环境具有抑制作用。参考表 2, 采用自然断点法将  $\text{CHEQ}_{\text{obs}}$ 、 $\text{CHEQ}_{\text{CC}}$  和  $\text{CHEQ}_{\text{HA}}$  的变化趋势按照统一划分标准划分为 8 个等级。

表 2 自然因素与人类活动对 CHEQ 的影响程度分级

Table 2 Classification of impacts of natural factors and human activities on CHEQ

趋势 Slope	影响程度 Degree of influence	趋势 Slope	影响程度 Degree of influence
-0.035—-0.007	明显抑制	0—0.002	不明显促进
-0.007— -0.003	中度抑制	0.002— 0.006	轻微促进
-0.003— -0.001	轻微抑制	0.006— 0.012	中度促进
-0.001— 0	不明显抑制	0.012—0.045	明显促进

CHEQ: 中国高分辨率生态环境质量数据 China's high-resolution eco-environmental quality

1.2.4 CHEQ 变化驱动因素判定分析

为了探究影响 CHEQ 变化的主要驱动因素,本研究按照表 3 计算了自然因素和人类活动对 CHEQ 变化的相对贡献度<sup>[25]</sup>,相对贡献度计算是基于自然因素与人类活动年际变化趋势和真实 CHEQ 变化趋势比值。具体计算公式如表 3 所示。

表 3 CHEQ 变化的驱动因素判定标准及贡献率计算方法

Table 3 Determination criteria of driving factors of CHEQ change and calculation method of contribution rate

趋势(CHEQ <sub>obs</sub> ) Slope(CHEQ <sub>obs</sub> )	驱动因素 Driving factors	驱动因素的划分标准 Classification criteria of driving factors		驱动因素的贡献率/% Contribution rate of driving factors	
		趋势(CHEQ <sub>CC</sub> ) Slope(CHEQ <sub>CC</sub> )	趋势(CHEQ <sub>HA</sub> ) Slope(CHEQ <sub>HA</sub> )	自然因素 Natural factors	人类活动 Human activities
大于 0 Greater than 0	CC & HA	>0	>0	$\frac{\text{Slope}(\text{CHEQ}_{\text{CC}})}{\text{Slope}(\text{CHEQ}_{\text{obs}})}$	$\frac{\text{Slope}(\text{CHEQ}_{\text{HA}})}{\text{Slope}(\text{CHEQ}_{\text{obs}})}$
	CC	>0	<0	100	0
	HA	<0	>0	0	100
小于 0 Less than 0	CC & HA	<0	<0	$\frac{\text{Slope}(\text{CHEQ}_{\text{CC}})}{\text{Slope}(\text{CHEQ}_{\text{obs}})}$	$\frac{\text{Slope}(\text{CHEQ}_{\text{HA}})}{\text{Slope}(\text{CHEQ}_{\text{obs}})}$
	CC	<0	>0	100	0
	HA	>0	<0	0	100

CC、HA、Slope(CHEQ<sub>obs</sub>)、Slope(CHEQ<sub>CC</sub>)和 Slope(CHEQ<sub>HA</sub>)分别为自然因素、人类活动、CHEQ 观测值趋势、CHEQ 预测值趋势以及 CHEQ 残差趋势;其中,预测值的趋势和残差的趋势分别代表自然因素和人类活动影响下的 CHEQ 变化趋势

2 结果

2.1 CHEQ 时空变化特征

从图 1 可以看出,2001—2019 年中国自然保护区 CHEQ 平均值为 0.424,最高值为 2005 年的 0.433,最低值为 2016 年的 0.413。总体上,2001 年—2019 年我国自然保护区 CHEQ 平均趋势率为 $-0.54 \times 10^{-3}/a$ ( $P < 0.001$ ),这表明我国自然保护区生态环境质量呈现出显著恶化的趋势。整个时间序列可大致分为 3 个阶段:第一阶段为 U 型上升期(2001—2006 年),CHEQ 变化率为 0.13%;第二阶段为快速下降期(2007—2016 年),CHEQ 变化率为 $-3.12\%$ ;第三阶段为缓慢上升期(2017—2019 年),CHEQ 变化率为 2.16%。

图 2 为 2001—2019 年中国自然保护区 CHEQ 变化趋势的空间分布图,从图中可以看出,2001—2019 年中国自然保护区 CHEQ 变化趋势具有较强空间异质性,CHEQ 呈增长和降低的区域面积分别为  $19.14 \times 10^4 \text{ km}^2$  和  $57.33 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。其中,CHEQ 增长明显的区域面积为  $0.21 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,主要分布在可可西里自然保护区东部;CHEQ 降低明显的区域面积为  $0.45 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,主要分布在羌塘自然保护区东南部;约 74.97% 区域面积的生态环境质量呈现变差趋势,且总体趋势率多分布在 $-3 \times 10^{-3}/a$ — $0/a$  范围内。

本次研究的所有自然保护区中,共有 139 个生态环境质量呈改善趋势,生态环境质量改善最明显的自然保护区为宽阔水自然保护区,趋势值为  $5.38 \times 10^{-3}/a$ ,其次

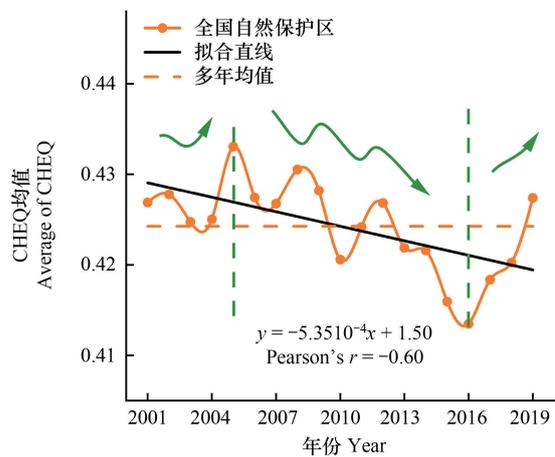


图 1 2001—2019 年中国自然保护区 CHEQ 年际变化  
Fig.1 Interannual variation of CHEQ in Nature reserves of China from 2001 to 2019

CHEQ: 中国高分辨率生态环境质量数据 China's high-resolution eco-environmental quality

为黑里河自然保护区,趋势值为  $4.69 \times 10^{-3}/a$ ;生态环境质量呈恶化趋势的有 101 个自然保护区,生态环境质量恶化最为显著的为龙溪-虹口自然保护区,趋势值为  $-8.98 \times 10^{-3}/a$ ,其次为额尔古纳自然保护区,趋势值为  $-5.22 \times 10^{-3}/a$ 。

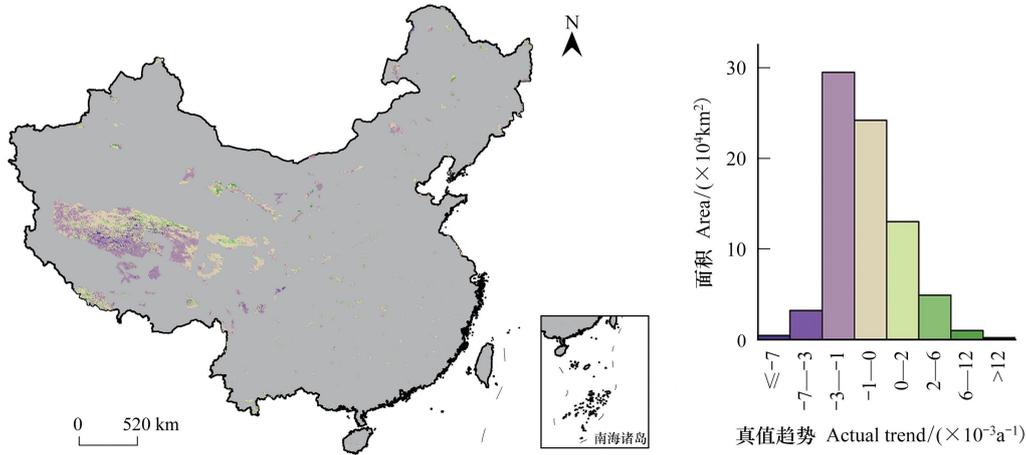


图 2 2001—2019 年中国自然保护区 CHEQ 变化趋势空间分布图

Fig.2 Spatial distribution map of CHEQ change trend in China's nature reserves from 2001 to 2019

### 2.2 CHEQ 时间变化驱动因素分析

图 3 表明,自然因素与人类活动对中国自然保护区 CHEQ 变化的影响均存在很大的空间异质性,并且两类因素对 CHEQ 变化的影响也有很大的差异。由表 4 可得,自然因素对国家自然保护区 CHEQ 变化影响不明显的区域(不明显促进和不明显抑制)面积约为  $47.24 \times 10^4 \text{ km}^2$  (60.53%);自然因素对国家自然保护区 CHEQ 变化起促进作用(不包括不明显促进)的区域面积约为  $4.83 \times 10^4 \text{ km}^2$  (6.19%);自然因素对国家自然保护区 CHEQ 变化起抑制作用(不包括不明显抑制)的区域面积约为  $25.97 \times 10^4 \text{ km}^2$  (33.28%)。

另一方面,从图 3 和表 4 可以看出人类活动对国家自然保护区 CHEQ 变化影响不明显的区域(不明显促进和不明显抑制)约为  $75.28 \times 10^4 \text{ km}^2$  (96.47%)。人类活动对国家自然保护区 CHEQ 变化起促进作用(不包括不明显促进)的区域面积约为  $0.67 \times 10^4 \text{ km}^2$  (0.87%),其中中度促进的区域面积约为  $0.02 \times 10^4 \text{ km}^2$  (0.03%)。人类活动对国家自然保护区 CHEQ 变化起抑制作用(不包括不明显抑制)的区域面积约为  $2.08 \times 10^4 \text{ km}^2$  (2.66%),其中中度抑制区域面积约为  $0.09 \times 10^4 \text{ km}^2$  (0.11%)。总体而言,相比于人类活动,自然因素对 CHEQ 变化的影响更为突出,且自然因素年际趋势的空间分布和 CHEQ 年际变化趋势的空间分布相似。

表 4 自然因素与人类活动对中国自然保护区 CHEQ 变化的影响面积以及占比

Table 4 The area and proportion of impacts of natural factors and human activities on CHEQ change in Nature reserves in China

影响因素 Influence factor	明显抑制 Obvious inhibition	中度抑制 Moderate inhibition	轻微抑制 Slight inhibition	不明显抑制 Indistinct inhibition	不明显促进 Indistinct promotion	轻微促进 Slight promotion	中度促进 Moderate promotion	明显促进 Obvious promotion
自然因素 Natural factors	0.26 km <sup>2</sup> 0.33%	2.18 km <sup>2</sup> 2.80%	23.53 km <sup>2</sup> 30.15%	31.90 km <sup>2</sup> 40.88%	15.34 km <sup>2</sup> 19.65%	4.13 km <sup>2</sup> 5.30%	0.60 km <sup>2</sup> 0.77%	0.10 km <sup>2</sup> 0.12%
人类活动 Human activities	0	0.09 km <sup>2</sup> 0.11%	1.99 km <sup>2</sup> 2.55%	52.54 km <sup>2</sup> 67.33%	22.74 km <sup>2</sup> 29.14%	0.65 km <sup>2</sup> 0.84%	0.02 km <sup>2</sup> 0.03%	0

由图 4 和表 5 可知,CHEQ 变化的驱动因素由自然因素和人类活动的共同作用的区域面积约有  $58.59 \times 10^4 \text{ km}^2$  (76.64%),其中,起抑制效果的区域面积约为  $45.63 \times 10^4 \text{ km}^2$  (59.69%)。主要分布在羌塘自然保护区缓冲区和实验区、三江源自然保护区的实验区、色林错的缓冲区和实验区以及实验区和敦煌西湖的实验区,起促进效果

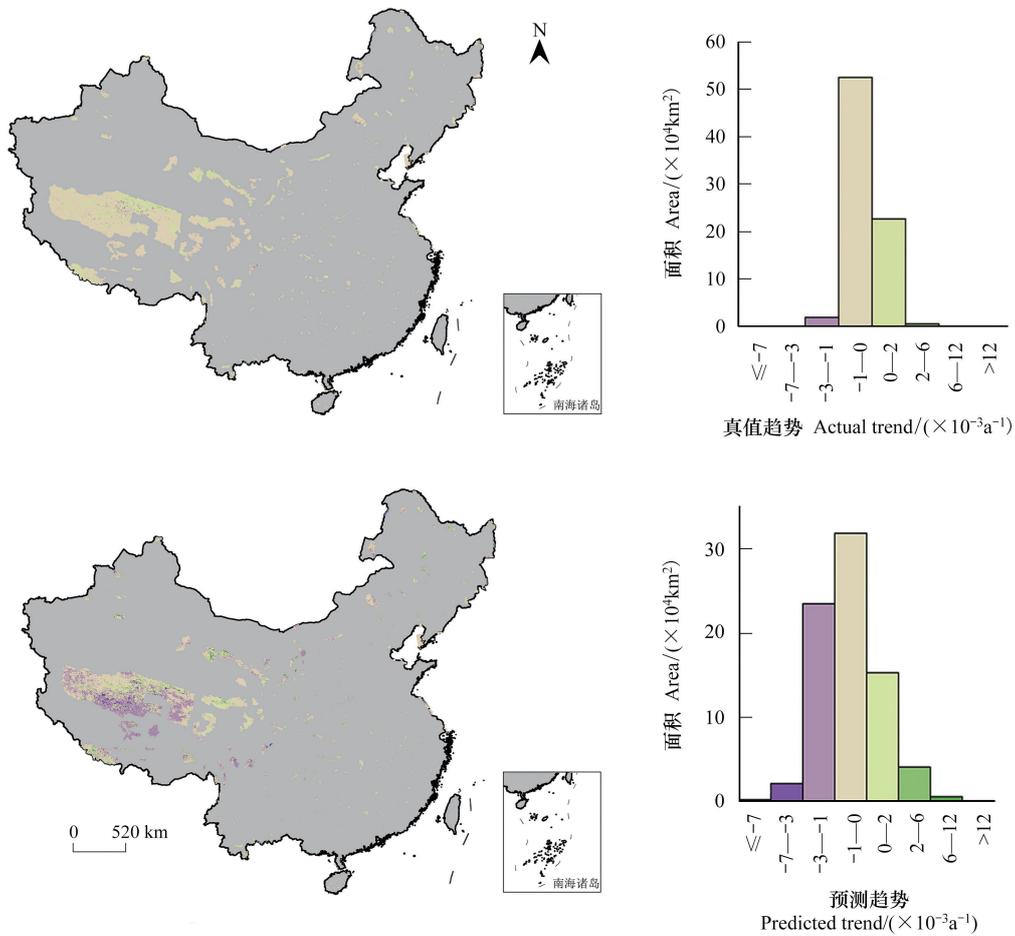


图3 2001—2019年自然因素与人类活动对中国自然保护区CHEQ变化趋势的影响空间分布

Fig.3 Spatial distribution of impacts of natural factors and human activities on CHEQ changes in Nature reserves in China from 2001 to 2019

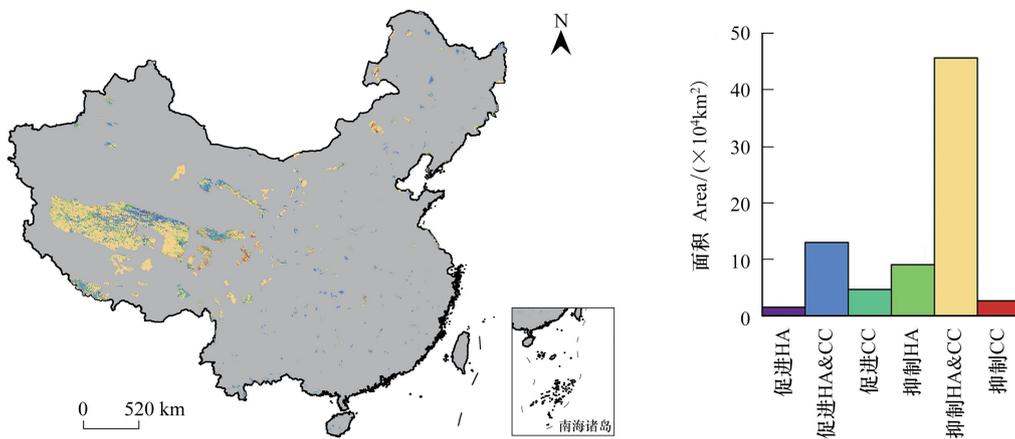


图4 2001—2019年中国自然保护区CHEQ变化的驱动因素空间分布

Fig.4 Spatial distribution of driving factors of CHEQ change in Nature reserves of China from 2001 to 2019

HA为人类活动,CC为自然因素

的区域面积约为  $12.96 \times 10^4 \text{ km}^2$  (16.95%), 主要分布在可可西里自然保护区的核心区、羌塘自然保护区的核心区以及中国东部自然保护区。CHEQ 变化由人类活动因素驱动的区域面积约  $10.56 \times 10^4 \text{ km}^2$  (13.81%), 其中, 起抑制效果的区域面积约为  $9.05 \times 10^4 \text{ km}^2$  (11.84%), 主要集中在西藏自治区、内蒙古和甘肃自然保护区的实验区和缓冲区; 起促进效果的区域面积约为  $1.51 \times 10^4 \text{ km}^2$  (1.97%), 主要分布在三江源自然保护区的核心区、可可西里自然保护区、祁连山自然保护区北侧。CHEQ 变化只由自然因素驱动的区域面积为  $7.30 \times 10^4 \text{ km}^2$  (9.55%), 由自然因素驱动的区域主要分布在生态脆弱区且人类密度低的地区, 如珠穆朗玛峰自然保护区、三江源自然保护区和可可西里自然保护区的核心区。总结来说, 自然因素和人类活动的共同作用在中国自然保护区 CHEQ 变化中起主导作用(抑制), 且主要分布在自然保护区的实验区和缓冲区。

表 5 中国自然保护区 CHEQ 变化的驱动因素面积以及占比

Table 5 The area and proportion of driving factors of CHEQ change in Nature reserves in China

影响结果 Influence result	人类活动 & 自然因素 HA&CC	人类活动 HA	自然因素 CC	影响结果 Influence result	人类活动 & 自然因素 HA&CC	人类活动 HA	自然因素 CC
促进 Promotion	12.96 km <sup>2</sup> 16.95%	1.51 km <sup>2</sup> 1.97%	4.65 km <sup>2</sup> 6.08%	抑制 Inhibition	45.63 km <sup>2</sup> 59.69%	9.05 km <sup>2</sup> 11.84%	2.65 km <sup>2</sup> 3.47%

### 2.3 不同驱动因素对 CHEQ 时间变化的相对贡献度

图 5 和表 6 表明, 自然因素对我国自然保护区 CHEQ 变化的贡献率高于 60% 的区域面积约为  $60.67 \times 10^4 \text{ km}^2$  (79.92%), 其中, 自然因素的贡献率在 90%—100% 范围内的面积为  $26.93 \times 10^4 \text{ km}^2$  (35.47%), 在 75%—90% 范围内的面积为  $21.81 \times 10^4 \text{ km}^2$  (28.73%), 可以看出自然因素对中国自然保护区 CHEQ 的变化影响较大, 这与 3.2 节中得出的结论一致。

图 5 和表 6 表明, 人类活动对我国自然保护区 CHEQ 变化的贡献率为 45% 以下的区域面积约占  $63.98 \times 10^4 \text{ km}^2$  (83.08%)。并且人类活动贡献率在 0%—15% 范围的区域面积较大, 面积占比约为  $35.68 \times 10^4 \text{ km}^2$  (46.60%), 主要分布在各个自然保护区的实验区和缓冲区。整体上看, 人类活动对我国自然保护区 CHEQ 的贡献弱于自然因素的贡献度, 这与 3.2 节得到的结论相一致。

表 6 自然因素和人类活动对中国自然保护区 CHEQ 变化的贡献率面积以及占比

Table 6 The area and proportion of contribution of natural factors and human activities to CHEQ change in Nature reserves in China

影响因素 Influence factor	贡献率 Contribution/%						
	0—15%	15%—30%	30%—45%	45%—60%	60%—75%	75%—90%	90%—100%
自然因素 Natural factors	5.18 km <sup>2</sup> 6.83%	1.65 km <sup>2</sup> 2.17%	2.84 km <sup>2</sup> 3.75%	5.57 km <sup>2</sup> 7.34%	11.93 km <sup>2</sup> 15.71%	21.81 km <sup>2</sup> 28.73%	26.93 km <sup>2</sup> 35.47%
人类活动 Human activities	35.68 km <sup>2</sup> 46.60%	18.68 km <sup>2</sup> 24.39%	9.26 km <sup>2</sup> 12.09%	4.42 km <sup>2</sup> 5.77%	2.34 km <sup>2</sup> 3.06%	1.40 km <sup>2</sup> 1.82%	4.79 km <sup>2</sup> 6.27%

### 2.4 CHEQ 空间分布驱动因素分析

为了探究我国自然保护区生态环境质量的空间分布驱动机制, 本文以 2001、2005、2010、2015、2019 年的数据为例, 基于随机森林算法分析了自然因素对生态环境质量在空间分布上的相对重要性, 评价指标包括气温、降水、实际蒸散量、潜在蒸散量、气候缺水、地表径流量、干旱指数、大气压、饱和水汽压差、短波下行辐射、风速以及土壤水分。从图 6 可以看出, 降水、实际蒸散发、大气压、太阳辐射与气温等指标对自然保护区生态环境质量的空间分布起着主导作用, 而气候缺水、潜在蒸散以及干旱指数等指标对保护区内生态环境质量的空间分布的相对重要性则较低; 其次, 从图中可以看出, 随机森林回归的拟合度  $R^2$  均大于 0.86, Pearson 相关系数均达高于 0.93, 而均方根误差均低于 0.08, 这表明基于本研究选取的 12 项自然因素指标可以很好的揭示我国保护区内生态环境质量的空间分布的驱动力。

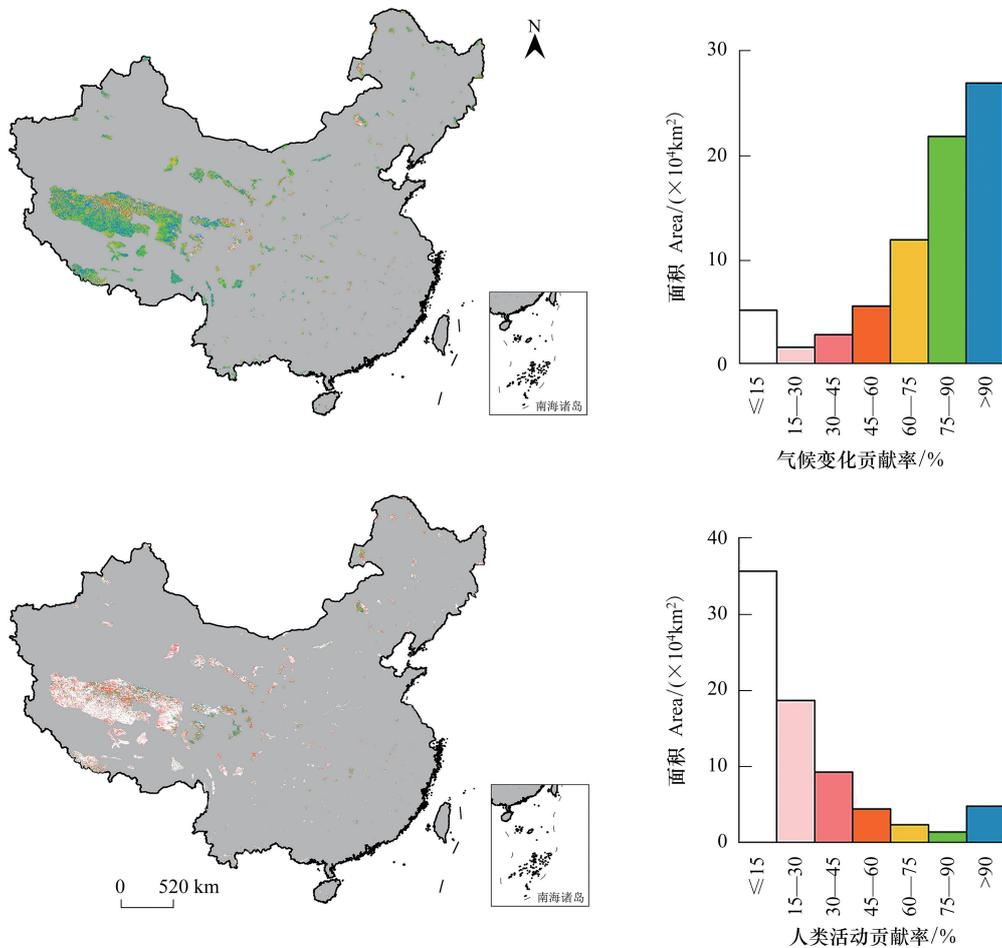


图5 2001—2019 年自然因素和人类活动对中国自然保护区 CHEQ 变化的贡献率空间分布

Fig.5 Contribution of natural factors and human activities to CHEQ change in Nature reserves of China from 2001 to 2019

### 3 讨论

#### 3.1 原因探索

自然因素和人类活动的共同作用是多数自然保护区生态恶化的原因,2004—2016 年中国自然保护区生态环境质量逐渐恶化(图 1),变化率为 $-3.11\%$ 。一方面,21 世纪最初十多年降雨量总体偏少,中国地表年平均气温显著上升<sup>[26]</sup>,这会加剧某些区域水资源短缺,植被生长受限。另一方面,以农业和旅游业为主的自然保护区频繁出现耕地和建设地扩张、过度开发等不合理的人类活动<sup>[27]</sup>。2016—2019 年中国自然保护区生态环境质量逐渐恢复(图 1),自然因素和人类活动的共同作用同样也能促进保护区内生态环境质量的改善,变化率为 $2.16\%$ 。一方面,地表温度上升有利于植被加速生长,水资源增加有利于生态系统的自我恢复<sup>[23]</sup>。另一方面,2016 年以后退耕还林还湿等生态工程可在局部地区有效增加生态恢复。

生态环境质量改善最明显的自然保护区为宽阔水保护区,CHEQ 趋势值 $5.38 \times 10^{-3}/a$ ,恶化最明显的自然保护区为龙溪-虹口自然保护区,CHEQ 趋势值为 $-8.98 \times 10^{-3}/a$ ,其次为额尔古纳自然保护区,CHEQ 趋势值为 $-5.22 \times 10^{-3}/a$ 。其中,宽阔水自然保护区属于喀斯特非地带性森林生态系统,森林覆盖率达 $80\%$ 。近十几年,宽阔水自然保护区管理局充分吸纳社区群众参与工程建设,鼓励社区规划沼气池建设和节柴改灶<sup>[28]</sup>,大大降低了对自然资源的消耗,生态环境质量逐年得到改善。而龙溪-虹口自然保护区生态环境恶化较为集中在地震多发地区,多发的自然灾害导致该地区景观破碎化严重,生物多样性维持功能减弱、植被覆盖度降低,

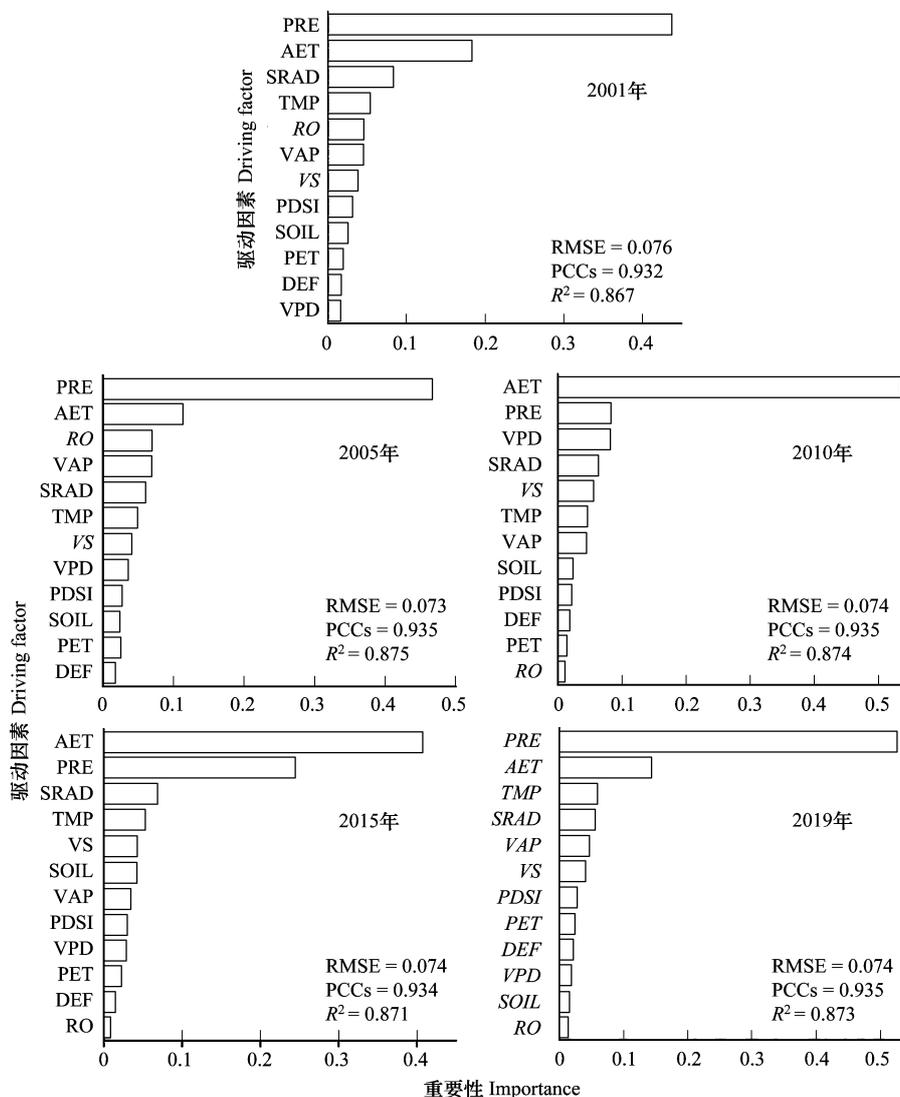


图 6 我国自然保护区生态环境质量空间分布驱动因素重要性排名

Fig.6 Importance ranking of driving factors for spatial distribution of ecological environment quality in China's nature reserves

生态屏障功能丧失<sup>[29]</sup>。额尔古纳自然保护区拥有典型的湿地景观、丰富的生物资源以及便利的交通条件,保护区内大力发展生态旅游业、农业和畜牧业,农业开垦导致保护区内天然湿地面积逐年减少,过度放牧导致植被遭到破坏<sup>[30]</sup>,严重破坏了湿地生态系统的平衡,额尔古纳政府在追求经济发展的同时应该注意生态和经济耦合协调发展。由 2001—2019 年中国自然保护区 CHEQ 变化趋势的空间分布图可知,内蒙古西部、西藏北部地势较高的自然保护区生态环境质量呈明显恶化趋势,因保护区内植被稀疏且蒸散发高、年降水量少,并伴随着矿石资源过度开采和放牧等人类活动<sup>[31]</sup>,生态系统脆弱,自我修复能力较弱。生态质量高的自然保护区大部分为林区,这些自然保护区植被覆盖度高,物种多样性丰富,生态系统自我修复能力强,有利于水土保持<sup>[32]</sup>。中东部丘陵地区的自然保护区生态环境质量呈好转趋势,该区域是退耕还林还草工程的实施区域,工程实施对自然保护区内的生态环境质量的变化有较大影响。

自然因素和人类活动共同作用对我国自然保护区 CHEQ 变化起促进效果的区域约占研究区面积 16.95%,主要位于西藏自治区、青海省和甘肃省自然保护区的核心区(图 4),由于气候变化和工程实施使得区域植被覆盖增加<sup>[33]</sup>,沙化面积呈减少趋势,地方政府近年来加大生态投入且严格管控自然保护区的核心区<sup>[27]</sup>,统筹开展山水林田湖草生态保护修复试点工作,如退耕还林还草<sup>[33]</sup>、自然保护区分布格局的扩展<sup>[34]</sup>、

防风固沙造林等生态修复项目<sup>[35]</sup>,因此这些区域自然因素和人类活动的共同作用对自然保护区生态环境质量起促进作用。起抑制效果的区域面积约占研究区面积 59.69%,主要分布在羌塘自然保护区缓冲区和实验区、三江源自然保护区的实验区、色林错的缓冲区以及实验区和敦煌西湖的实验区(图 4),原因可能是自然保护区内的缓冲区和试验区允许开展适当的科学实验、参观考察以及旅游等活动,部分不合理的人类活动扰乱了区域生态系统的稳定<sup>[36]</sup>,水热条件差以及土地扩张导致的湿地<sup>[37]</sup>、草地<sup>[38]</sup>萎缩。

### 3.2 残差模型适用性探究

为了探究本研究构建的残差模型的科学与普适性,本文验证了基于传统方式(气温、降雨)模拟的 CHEQ 值以及本研究模拟的 CHEQ 值的精度(图 7)。由图 7 可知,基于多中自然因素模拟 CHEQ 预测值的  $R^2$  和 RMSE 较基于气温和降雨模拟 CHEQ 预测值都有所提高,矫正后的 CHEQ 预测值模拟精度提高且更能表征自然因素对生态环境质量的影响,因此本研究中改进的残差模型具有较好说服力、科学性、普适性,可用于我国生态环境质量时间序列变化驱动力研究。

### 3.3 局限性

本研究从时间和空间两个维度,对我国自然保护区生态环境质量进行了时空动态分析,并探讨了自然保

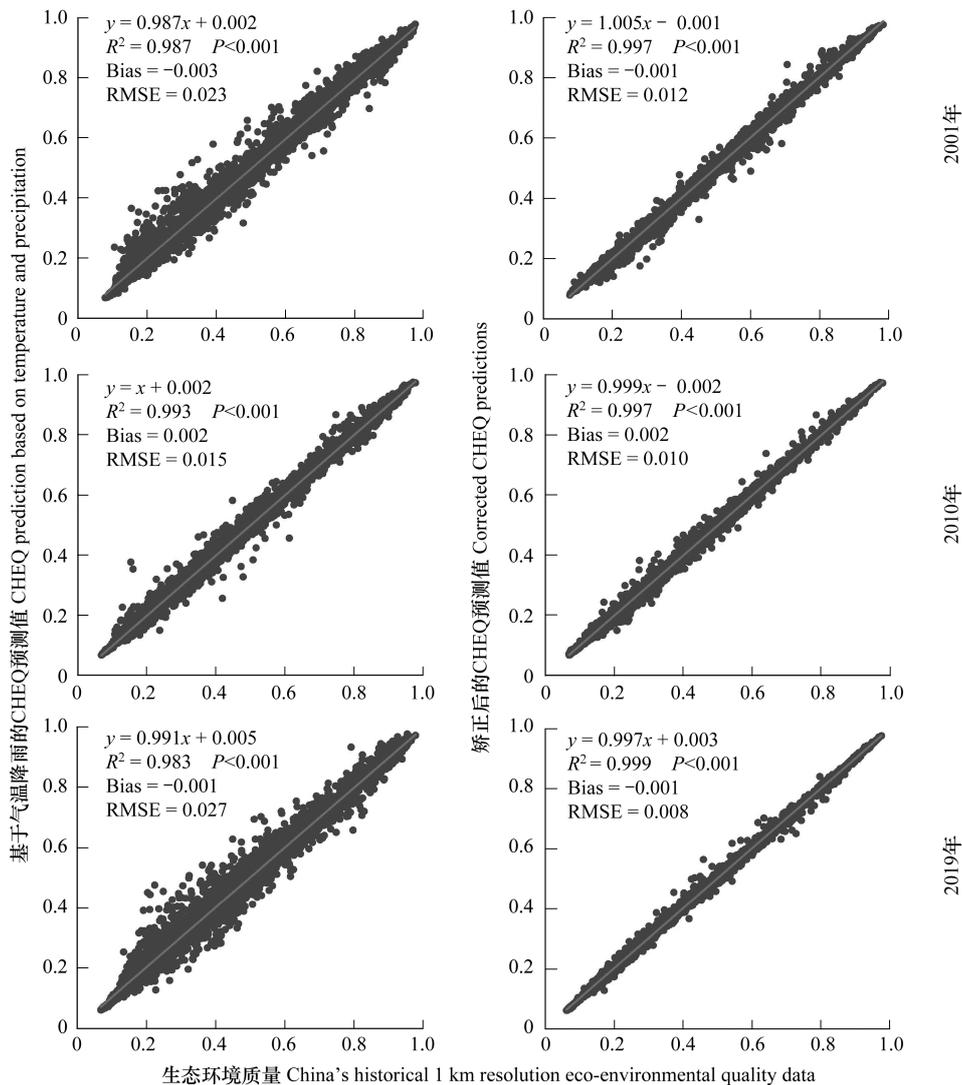


图 7 残差模型矫正前后 CHEQ 预测值精度验证

Fig.7 Accuracy verification of CHEQ predicted values before and after correction of residual model

保护区近 19 年来生态环境质量变化对自然因素与人类活动的响应。然而,基于多元回归残差分析法分离人类活动和自然因素对生态环境质量变化的影响也存在一些不足,本文残差得到的人类活动影响也只是宽泛含义,没有考虑到工程实施、城市扩张、技术改进等具体方面<sup>[39]</sup>。目前,影像时空分辨率较低、气象站数据较少等限制了空间大尺度研究<sup>[40]</sup>,因此,针对我国自然保护区自然因素和人类活动对生态环境质量变化的影响及其驱动力仍需进一步研究。

#### 4 结论

本研究基于中国高分辨率生态环境质量数据集以及气候要素数据,并利用 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 检验以及多元回归残差分析等方法,探究了 2001—2019 年我国自然保护区生态环境质量时空变化及其对自然因素和人类活动的响应规律。主要结论如下:

(1) 2001—2019 年,我国自然保护区的 CHEQ 指数呈现多阶段波动变化,第一阶段为 U 型上升期(2001—2006 年),CHEQ 变化率为 0.13%;第二阶段为快速下降期(2007—2016 年),CHEQ 变化率为 -3.12%;第三阶段为缓慢上升期(2017—2019 年),CHEQ 变化率为 2.16%。CHEQ 指数总体呈小幅度下降趋势,平均趋势率为  $-0.54 \times 10^{-3}/a$  ( $P < 0.001$ ),表明我国自然保护区生态环境质量呈现恶化趋势。

(2) 近 19 年,自然因素和人类活动的共同作用对 CHEQ 变化的影响占据主导作用,主要分布在自然保护区的实验区和缓冲区,并且对区域内生态环境质量的变化主要起抑制作用,其中自然因素对我国自然保护区生态环境质量变化的影响在  $-3 \times 10^{-3}/a$ — $0/a$  之间,主要分布在生态脆弱区且人类密度低的地区。人类活动的影响在  $-1 \times 10^{-3}/a$ — $2 \times 10^{-3}/a$  之间,对 CHEQ 变化起抑制效果的主要分布在西藏自治区、内蒙古和甘肃自然保护区的实验区和缓冲区,起促进效果的主要分布在三江源自然保护区的核心区、可可西里自然保护区、祁连山自然保护区北侧。

(3) 自然因素对我国自然保护区贡献率多在 75% 以上,人类活动对我自然保护区贡献率多在 45% 以下。本次研究的自然因素里,降水因子对我国自然保护区的生态环境质量影响最大,实际蒸散发的影响次之,对我国自然保护区生态环境质量影响最小的是地表径流量因子。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Yu Y Q, Zhi H, Wang B, Wan H, Li C, Liu H L, Li W, Zheng W P, Zhou T J. Coupled model simulations of climate changes in the 20th century and beyond. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2008, 25(4): 641-654.
- [ 2 ] 马建章, 戎可, 程鲲. 中国生物多样性就地保护的研究与实践. *生物多样性*, 2012, 20(5): 551-558.
- [ 3 ] Yue H, Liu Y, Li Y, Lu Y. Eco-environmental quality assessment in China's 35 major cities based on remote sensing ecological index. *IEEE Access*, 2019, 7: 51295-51311.
- [ 4 ] Firozjaei M K, Fathololoumi S, Weng Q H, Kiavarz M, Alavipanah S K. Remotely sensed urban surface ecological index (RSUSEI): an analytical framework for assessing the surface ecological status in urban environments. *Remote Sensing*, 2020, 12(12): 2029.
- [ 5 ] Firozjaei M K, Kiavarz M, Homae M, Arsanjani J J, Alavipanah S K. A novel method to quantify urban surface ecological poorness zone: a case study of several European cities. *Science of the Total Environment*, 2021, 757: 143755.
- [ 6 ] Li Y, Wu L Y, Han Q, Wang X, Zou T Q, Fan C. Estimation of remote sensing based ecological index along the Grand Canal based on PCA-AHP-TOPSIS methodology. *Ecological Indicators*, 2021, 122: 107214.
- [ 7 ] 国家环保总局. HJ/T 192—2006 生态环境状况评价技术规范. 北京: 中国环境出版社.
- [ 8 ] Shan W, Jin X B, Ren J, Wang Y C, Xu Z G, Fan Y T, Gu Z M, Hong C Q, Lin J H, Zhou Y K. Ecological environment quality assessment based on remote sensing data for land consolidation. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239: 118126.
- [ 9 ] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数. *中国环境科学*, 2013, 33(5): 889-897.
- [ 10 ] 杭鑫, 罗晓春, 曹云, 李亚春. 基于 RSEI 模型的生态质量评估及城镇化影响——以南京市为例. *应用生态学报*, 2020, 31(1): 219-229.
- [ 11 ] Huang H P, Chen W, Zhang Y, Qiao L, Du Y Y. Analysis of ecological quality in Lhasa metropolitan area during 1990-2017 based on remote sensing and Google Earth Engine platform. *Journal of Geographical Sciences*, 2021, 31(2): 265-280.
- [ 12 ] Gou R K, Zhao J. Eco-environmental quality monitoring in Beijing, China, using an RSEI-based approach combined with random forest

- algorithms. *IEEE Access*, 2020, 8: 196657-196666.
- [13] Xu D, Yang F, Yu L, Zhou Y Y, Li H X, Ma J J, Huang J C, Wei J, Xu Y, Zhang C, Cheng J. Quantization of the coupling mechanism between eco-environmental quality and urbanization from multisource remote sensing data. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 321: 128948.
- [14] 梁艳, 干珠扎布, 张伟娜, 高清竹, 旦久罗布, 西饶卓玛, 白马玉珍. 气候变化对中国草原生态系统影响研究综述. *中国农业科技导报*, 2014, 16(2): 1-8.
- [15] 陈舒婷, 郭兵, 杨飞, 韩保民, 范业稳, 杨潇, 何田莉, 刘悦, 杨雯娜. 2000—2015 年青藏高原植被 NPP 时空变化格局及其对气候变化的响应. *自然资源学报*, 2020, 35(10): 2511-2527.
- [16] 周伟, 刚成诚, 李建龙, 章超斌, 穆少杰, 孙政国. 1982-2010 年中国草地覆盖度的时空动态及其对气候变化的响应. *地理学报*, 2014, 69(1): 15-30.
- [17] 李晓东, 傅华, 李凤霞, 周秉荣, 杨鑫光, 王喆. 气候变化对西北地区生态环境影响的若干进展. *草业科学*, 2011, 28(2): 286-295.
- [18] 刘世梁, 朱家菡, 许经纬, 武雪, 赵爽, 侯笑云. 城市化对区域生态足迹的影响及其耦合关系. *生态学报*, 2018, 38(24): 8888-8900.
- [19] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, Li Z. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1931-1946.
- [20] Wu H, Soh L K, Samal A, Chen X H. Trend analysis of streamflow drought events in Nebraska. *Water Resources Management*, 2008, 22(2): 145-164.
- [21] 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.
- [22] 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究. *生态学报*, 2011, 31(19): 5495-5504.
- [23] 孙艳玲, 郭鹏, 延晓冬, 赵天宝. 内蒙古植被覆盖变化及其与气候、人类活动的关系. *自然资源学报*, 2010, 25(3): 407-414.
- [24] 阿多, 赵文吉, 宫兆宁, 张敏, 范云豹. 1981—2013 华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响. *生态学报*, 2017, 37(2): 576-592.
- [25] Sun W Y, Song X Y, Mu X M, Gao P, Wang F, Zhao G J. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 209-210: 87-99.
- [26] 冯刚. 《中国气候变化蓝皮书(2021)》发布. *环境*, 2021, (11): 75-77.
- [27] 鲁小波. 自然保护区生态旅游开发与管理研究——以辽宁白石砬子国家级自然保护区为例[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2008.
- [28] 杨昌乾. 宽甸水保护区实施“天保工程”的措施及其成效探讨. *绿色科技*, 2012, (6): 27-28.
- [29] 刘立冰, 熊康宁, 任晓冬. 基于遥感生态指数的龙溪——虹口国家级自然保护区生态环境状况评估. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(2): 202-210.
- [30] 焦玲. 额尔古纳湿地资源及其保护利用. *林业机械与木工设备*, 2010, 38(10): 15-17.
- [31] 刘晓曼, 付卓, 闻瑞红, 靳川平, 王雪峰, 王超, 肖如林, 侯鹏. 中国国家级自然保护区人类活动及变化特征. *地理研究*, 2020, 39(10): 2391-2402.
- [32] 邢一明. 典型温带森林自然保护区生态资产价值评估研究——以长白山自然保护区和泰山自然保护区为例[D]. 北京: 中央民族大学, 2020.
- [33] 达瓦次仁, 弓进梅, 拉巴卓嘎. 改革开放以来西藏自然保护区建设与成就. *西藏研究*, 2018, (5): 133-140.
- [34] 唐文家, 张紫萍, 张妹婷, 马艳丽, 马超, 宋国富. 青海省 12 个类型保护地现状调查与分析. *青海环境*, 2020, 30(1): 19-25.
- [35] 田庆林. 甘肃投巨资整改祁连山生态环境破坏问题. *中国工业报*, 2021-09-14(02).
- [36] 徐增让, 邹秀萍. 羌塘高原自然保护地社会生态效果评价. *生态学报*, 2020, 40(23): 8743-8752.
- [37] 朱美媛. 近 42a 西藏色林错流域湿地变化与生态脆弱性评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- [38] 王穗子, 张雅娴, 樊江文, 张海燕. 三江源自然保护区高寒草地草情诊断研究. *生态科学*, 2022, 41(1): 100-109.
- [39] 崔利芳, 王伦澈, 屈赛, 邓利欢, 王兆夺. 气温、降水量和人类活动对长江流域植被 NDVI 的影响. *地球科学*, 2020, 45(6): 1905-1917.
- [40] 张宝庆, 吴普特, 赵西宁. 近 30a 黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析. *农业工程学报*, 2011, 27(4): 287-293.