

## 内蒙古高原湖泊时空变化特征及影响因素

蒋钰迪<sup>1</sup>, 于洋<sup>1,2</sup>, 王正坤<sup>3</sup>, 刘殿君<sup>4</sup>

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083; 2.北京林业大学山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站,北京 100083; 3.北斗应用发展研究院,北京 100089; 4.内蒙古自治区水利科学研究院,呼和浩特 010020)

**摘要:** [目的] 开展内蒙古高原湖泊面积变化研究对深入理解区域水资源演变具有重要意义。[方法] 利用 Google Earth Engine(GEE)平台和 Landsat 影像资料,获取 1988—2021 年内蒙古高原逐年湖泊面积数据,采用趋势检验和层次分割等方法分析湖泊的时空变化特征及其影响因素。[结果] 1) 1988—2021 年,内蒙古的湖泊面积和数量经历先减少后恢复的变化趋势,在年际尺度,2021 年湖泊面积最大,达到 4 363.63 km<sup>2</sup>,2002 年湖泊面积最小,为 1 915.61 km<sup>2</sup>。在湖泊数量方面,>1 km<sup>2</sup> 的湖泊由 2002 年的 71 个增加到 2021 年的 458 个。2) 2012—2021 年,内蒙古高原湖泊面积逐渐恢复,主要集中于阿拉善盟、兴安盟和呼伦贝尔市。3) 内蒙古高原湖泊面积变化主要受气候和人类活动双重因素影响,其中在 1988—2012 年,人类活动是湖泊面积变化的主要驱动力,湖泊面积变化与降水呈显著正相关,与灌溉、放牧和煤炭产量呈显著负相关;在 2012 年以后,气候因素是影响湖泊面积变化的主要因素。[结论] 研究结果解析了内蒙古高原湖泊面积变化与气候及人类活动的关系,为高原湖泊的生态保护与恢复提供科学依据。

**关键词:** 内蒙古高原; 湖泊数量; 湖泊面积; 时空变化

中图分类号: P343.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0092-10

## Spatiotemporal Variation Characteristics and Influencing Factors of Lakes on the Inner Mongolia Plateau

JIANG Yudi<sup>1</sup>, YU Yang<sup>1,2</sup>, WANG Zhengkun<sup>3</sup>, LIU Dianjun<sup>4</sup>

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2.Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, National Ecosystem Research Network of China, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3.Bei Dou Institute of Application and Development, Beijing 100089, China; 4.Inner Mongolia Hydraulic Research Institute, Huhhot 010020, China)

**Abstract:** [Objective] Conducting research on lake area changes on the Inner Mongolia Plateau is of great significance for deep understanding of regional water resource changes. [Methods] The Google Earth Engine (GEE) platform and Landsat image data were used to obtain annual lake area data on the Inner Mongolia Plateau from 1988 to 2021, and methods such as trend testing and hierarchical segmentation were used to analyze the spatiotemporal change characteristics of lakes and their influencing factors. [Results] 1) From 1988 to 2021, the area and number of lakes in Inner Mongolia showed a trend of first reduction and then recovery. On an inter-annual scale, the lake area was the largest in 2021, reaching 4 363.63 km<sup>2</sup>, and the smallest in 2002, only 1 915.61 km<sup>2</sup>. In terms of the number of lakes, the number of lakes larger than 1 km<sup>2</sup> increased from 71 in 2002 to 458 in 2021. 2) Between 2012 and 2021, the area of lakes on the Inner Mongolia Plateau gradually recovered, and mainly concentrated in Alxa League, Xing'an League and Hulunbuir City. 3) The changes in lake area on the Inner Mongolia Plateau were mainly affected by climate change and human activities. From 1988 to 2012, human

收稿日期: 2024-09-18

修回日期: 2024-10-18

录用日期: 2024-10-25

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-12-02

资助项目: 国家自然科学基金项目(42377331); 内蒙古自治区水利科技项目(NSK202402); 北京林业大学大学生创新训练计划项目(X202410022061)

第一作者: 蒋钰迪(2003—),女,硕士研究生,主要从事水土保持与流域治理研究。E-mail:jiangyudi2021@163.com

通信作者: 于洋(1985—),男,教授,主要从事脆弱生态系统结构与功能研究。E-mail:yangyu@bjfu.edu.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

activities were the main driving force of lake area changes, and lake area was significantly positively correlated with precipitation. There was a significant negative correlation between lake area and irrigation, grazing and coal production. After 2012, climate factors were the main factors affecting changes in lake area. [Conclusion] The results elucidate the relationship between lake area changes, climate and human activities on the Inner Mongolia Plateau, and provide a scientific basis for ecological protection and restoration of plateau lakes.

**Keywords:** Inner Mongolia Plateau; number of lakes; lake area; spatiotemporal changes

Received: 2024-09-18

Revised: 2024-10-18

Accepted: 2024-10-25

Online(www.cnki.net): 2024-12-02

湖泊是陆地生态系统的重要组成部分,超过50%的地表淡水来自大型湖泊<sup>[1]</sup>。湖泊具有多重的生态系统服务功能,为人类提供丰富的食物、矿物质和生态景观资源<sup>[2]</sup>。在维持生物的多样性、防洪抗旱、水质净化和气候调节等方面,对人类社会和生态环境都具有重要意义<sup>[3-4]</sup>。然而,随着气候变化、工业化和城市化的全球蔓延,湖泊正面临富营养化和重金属污染等问题,其生态环境遭受严重威胁,已成为全球性的挑战<sup>[5-7]</sup>。

内蒙古自治区(以下简称“内蒙古”)是我国北方重要的生态屏障,东西地域气候差异显著<sup>[8]</sup>,生境复杂。该地区孕育了构造湖、冲积湖和风蚀湖3大类湖泊,≥1 km<sup>2</sup>的湖泊总面积为4 209.07 km<sup>2</sup><sup>[9]</sup>。由于资源禀赋的限制、人类活动的加剧及气候变化,内蒙古湖泊也出现不同程度的萎缩和干涸,高原湖泊蓄水量显著减少,导致水生态系统退化等问题,严重影响区域自然生态系统。因此,有必要研究内蒙古湖泊的长期变化特征,为湖泊生态系统保护与恢复提供科学依据。

近年来,随着多源遥感数据的出现和空间观测技术的提升,越来越多的研究使用遥感数据来提取水体,分析湖泊动态变化。例如,2014年,有研究<sup>[10]</sup>利用20世纪70年代至21世纪初的多时相陆地卫星图像,量化蒙古高原湖泊的变化和驱动因素;2016年,PEKEL等<sup>[11]</sup>使用300万张陆地资源卫星图像,以30 m的分辨率量化过去32 a全球地表水的变化;2019年,FENG等<sup>[12]</sup>使用陆地卫星数据分析1984—2015年中国水体的特点和变化;同年,ZHOU等<sup>[13]</sup>绘制1991—2017年蒙古高原上>1 km<sup>2</sup>湖泊的动态变化图,并探讨湖泊变化的自然和人为驱动因素表明,自2009年以来,降水对湖泊恢复起着越来越重要的作用,煤炭开采、灌溉和放牧等人为因素在不同阶段对湖泊产生负面影响。然而,单独关注于内蒙古湖泊长时间序列的动态研究较少,且湖泊变化原因分析仅考虑单一因子影响,未进一步采取分类分析的方法来判断人类和气候因素对湖泊面积带来的影响。

针对上述问题,本文以内蒙古高原湖泊为研究对象,利用多源遥感数据和空间观测技术,系统分析

内蒙古湖泊的长期动态变化。研究重点解析湖泊在不同时间尺度上的空间分布及变化趋势,并探究气候和人为因素对湖泊变化的影响。通过量化内蒙古湖泊的长期变化,明确其变化规律及驱动因素,为评估气候变化对湖泊生态系统影响及开展生态保护与恢复提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

内蒙古(37°24′~53°23′N,97°12′~126°04′E)位于中国大陆北部,是我国北方重要的生态屏障<sup>[14]</sup>(图1)。该地区地貌复杂、地形多样,整体上西南高、东北低,主体为蒙古高原。内蒙古跨越中温带干旱、半干旱、半湿润区和寒温带湿润区<sup>[15]</sup>,生态分区从西南向东北依次为荒漠、草原和森林<sup>[16]</sup>,包括沙漠、草原和森林生物群系,形成独特的生态气候带<sup>[17]</sup>。内蒙古地区气候典型,属干旱半干旱区,多年平均气温4.8℃,年总降水量341.5 mm,全年大风日数平均为10~40 d,其中70%集中在春季。内蒙古以工业和畜牧业为主,土地利用和景观格局差异显著<sup>[17-18]</sup>。湖泊在内蒙古的民生和工农业生产中发挥着关键作用,是该地区主要的水资源<sup>[19-20]</sup>。

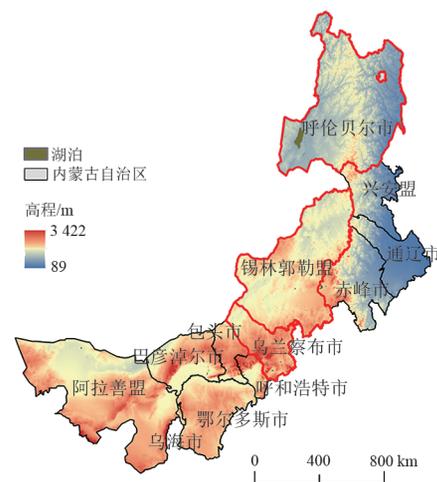


图1 内蒙古行政区及湖泊分布

Fig.1 Inner Mongolia administrative region and lake distribution

## 1.2 数据集介绍

1988—2021年,内蒙古的 Landsat 系列地表反射率数据来自美国地质调查局(USGS),用于识别开放的地表水体和湖泊。由于湖泊水体面积具有季节性,为确保结果的准确性,本研究在每年的1月1日至翌年1月1日内使用 Landsat 影像,以减少降水分布对湖泊面积的影响。图像通过谷歌地球引擎(google earth engine, GEE)进行处理。GEE是一个云计算平台,提供高性能计算能力,并整合来自美国国家航空航天局(NASA)及其他来源丰富的地理空间数据集<sup>[21]</sup>。由于遥感影像中常存在云和云阴影的影响,本文采用基于质量掩膜的去云处理技术。经过去云处理后,获取高质量的陆地卫星观测数据,用于露天地表水体的制图与分析。通过水体检测方法提取湖泊数据,结合归一化水体指数(MNDWI)与植被指数(NDVI、EVI)的计算,排除植被影响并准确识别水体和水体出现频率,频率>0.25的像元被认为是水体。最终基于GEE生成1988—2021年内蒙古湖泊数据集(包括水库等人工水体)。

在进行归因分析时,考虑气候变化和人类活动,气候因素包括年平均气温、年总降水量和风速,人类活动则选择放牧、煤炭开采和灌溉作为指标<sup>[10]</sup>。本研究的气候数据来自欧洲中期天气预报中心(ERA5),放牧(山羊、绵羊数量)、煤矿开采(煤炭年产量)和灌溉(灌溉农田面积)数据则来源于《内蒙古统计年鉴》<sup>[10]</sup>(表1)。研究采用ERA5的2 m温度、总降水量、10 m u风分量和10 m v风分量数据(<https://cds.climate.copernicus.eu>)

表 1 研究使用的数据集

Table 1 Datasets used in the study

数据集	数据来源	分辨率/m	年份
年平均气温	欧洲中期天气预报中心	500×500	1988—2021
年总降水量	欧洲中期天气预报中心	500×500	1988—2021
风速	欧洲中期天气预报中心	500×500	1988—2021
地形图	全球海洋通用水深数据	30×30	2024
山羊、绵羊数量	内蒙古统计年鉴	统计资料	1988—2021
灌溉农田面积	内蒙古统计年鉴	统计资料	1988—2021
煤炭年产量	内蒙古统计年鉴	统计资料	1988—2021

## 1.3 数据统计与分析

1.3.1 湖泊面积与分类统计方法 利用水与植被指数之间的关系可以有效检测开放地表水体,本研究采用修正归一化差异水体指数(mNDWI)、增强型植被指数(EVI)和归一化植被指数(NDVI)进行水体制图。

$$mNDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{Green} + \rho_{SWIR1}} \quad (1)$$

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} \quad (2)$$

$$EVI = 2.5 \times \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{1.0 + \rho_{NIR} + 6.0\rho_{Red} - 7.5\rho_{Blue}} \quad (3)$$

式中: $\rho_{Blue}$ 、 $\rho_{Green}$ 、 $\rho_{Red}$ 、 $\rho_{NIR}$ 和 $\rho_{SWIR1}$ 分别为蓝色波段(0.45~0.52  $\mu\text{m}$ )、绿色波段(0.52~0.60  $\mu\text{m}$ )、红色波段(0.63~0.69  $\mu\text{m}$ )和近红外(NIR)(0.77~0.90  $\mu\text{m}$ )的表面反射率值和 Landsat TM、ETM+和OLI传感器中的短波红外(SWIR1)(1.55~1.75  $\mu\text{m}$ )。

将获得的内蒙古湖泊栅格图转换为矢量格式,以便于进一步计算每个湖泊的面积。研究主要关注面积>1 km<sup>2</sup>的湖泊,并剔除<1 km<sup>2</sup>的湖泊。为更好地分析不同大小湖泊的动态变化,参考TAO等<sup>[10]</sup>的分类方法,将湖泊分为3类:小型湖泊(1~10 km<sup>2</sup>)、中型湖泊(10~50 km<sup>2</sup>)和大型湖泊(>50 km<sup>2</sup>)。

1.3.2 趋势检验 Mann-Kendall是一种非参数统计检验方法,广泛用于气候诊断与预测中,主要用于分析时间序列数据(如降雨量、气温、径流和水质)的趋势变化。本研究采用Mann-Kendall(MK)检验方法,以评估内蒙古地区近30 a来湖泊变化的趋势。

在Mann-Kendall检验中,零假设 $H_0$ 表示时间序列数据( $X_1, X_2, \dots, X_n$ )是 $n$ 个独立且随机分布的样本;备选假设 $H_1$ 表示时间序列数据存在趋势。检验的统计量 $S$ 用于度量数据序列中的趋势,定义为<sup>[22]</sup>:

$$S = \sum_{a=1}^{n-1} \sum_{b=i+1}^n \text{Sgn}(x_a - x_b) \quad (4)$$

式中: $\text{Sgn}(x_a - x_b)$ 是符号函数,其值为:

$$\text{Sgn}(x_a - x_b) = \begin{cases} 1 & (x_b - x_a > 0) \\ 0 & (x_b - x_a = 0) \\ -1 & (x_b - x_a < 0) \end{cases} \quad (5)$$

当 $S$ 呈正态分布时,其平均值为0,方差公式为:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (6)$$

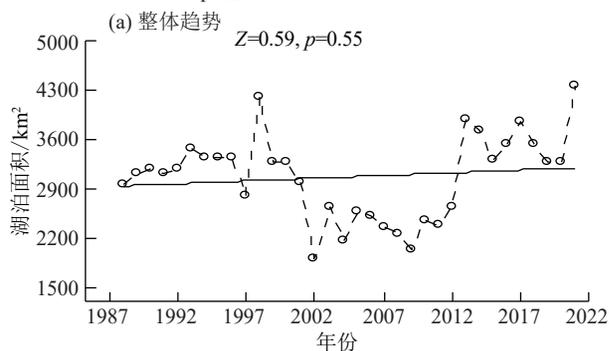
将 $S$ 标准化后,得到标准正态分布变量 $Z$ ,计算公式为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (7)$$

在双边趋势检验中,若给定 $Z$ 一个显著性水平 $\alpha$ ,则可以从标准正态分布表中查找对应的临界值 $Z_{1-\alpha/2}$ 。当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ 时,说明这个时间序列在给定的显著性水平 $\alpha$ 下,其变化趋势是显著的<sup>[23]</sup>。此次研究的 $\alpha$ 取0.05,对应的信度水平为 $\pm 1.96$ 。

1.3.3 湖泊动态变化归因分析 考虑气候变化和人为活动对湖泊年际动态的影响,其中,气候因素包括年平均气温、年总降水量和风速;人类活动则包括放牧、煤矿开采和灌溉。为确定湖泊变化可能的驱动因素,使用相关性分析。因为6个因子和湖泊面积并非都呈线性关系,且不是正态分布,所以采用广义线性模型进行多因素分析,研究不同因子对湖泊面积变化的贡献率,并采用层次分割法<sup>[24]</sup>进行冗余分析。

本文使用 ArcMap 10.8 软件和 R 进行湖泊面积的统计和分类等分析,序列变点监测使用 cpm 包,相关性分析和广义线性模型的构建使用 stats 包,冗余分析采用 rdacca.hp 包<sup>[24]</sup>。



## 2 结果与分析

### 2.1 内蒙古高原湖泊动态变化特征

对内蒙古高原湖泊的面积和数量的年际变化进行统计分析(图2)可知,1988—2021年,内蒙古高原湖泊面积整体呈增长趋势,但差异不显著,湖泊面积和数量经历先减少后恢复的变化趋势。采用序列变点监测法得出,2012年是湖泊面积变化的转折点:2012年前,湖泊面积显著减少;2012年后,湖泊面积增长不显著。2021年湖泊面积达到最大值,为4363.6 km<sup>2</sup>,而2002年则为最小值1915.6 km<sup>2</sup>。湖泊数量在2021年达到最高,为458个,而2002年为最少,只有71个。

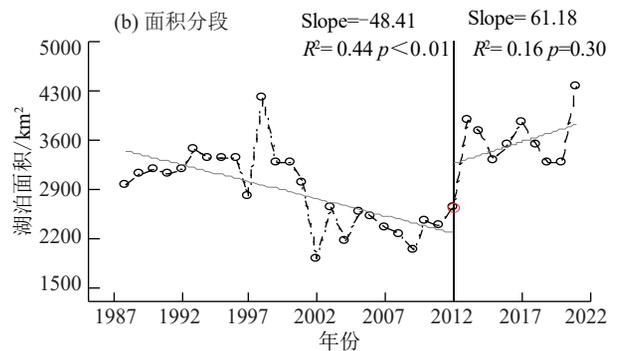


图2 内蒙古高原湖泊面积整体趋势与分段

Fig.2 Overall trend and segmented map of lake area in Inner Mongolia Plateau

从图3可以看出,在1988年、2012年和2021年3个时间节点中,小型湖泊的数量最多,大型湖泊的数量最少,但面积占比始终最高,小型湖泊的总面积超过中型湖泊。在1988—2012年,湖泊面积整体减少,其中小型湖泊(18.1 km<sup>2</sup>)、中型湖泊(143.3 km<sup>2</sup>)和大型湖泊(-479.8 km<sup>2</sup>)的变化率分别为4.1%、62.7%和-21.0%,大型湖泊对整体面积减少的贡献最大(表2)。2012—2021年,湖泊总面积从2012年的2635.77 km<sup>2</sup>增加到2021年的4363.63 km<sup>2</sup>,增幅为65.6%,小型湖泊(722.9 km<sup>2</sup>)、中型湖泊(257.6 km<sup>2</sup>)和大型湖泊(747.4 km<sup>2</sup>)的变化率分别为158.4%、69.3%和41.3%,其中小型湖泊面积变化幅度最大。综合1988—2021年的数据,湖泊数量呈增长趋势,小、中、大型湖泊的数量均有所增加。小湖泊的数量从1988年的135个增加至2021年的426个,增幅最为显著。

### 2.2 内蒙古高原湖泊空间分布

内蒙古地区湖泊分布表现出显著的空间异质特征。在面积方面,呼伦贝尔市湖泊面积最大,其次是赤峰市和锡林郭勒盟。整体面积变化见图3。西部地区湖泊面积显著增加,包括阿拉善盟、巴彦淖尔市和乌海市。阿拉善盟湖泊面积从1988年的7.3 km<sup>2</sup>增至2021年的123.4 km<sup>2</sup>;巴彦淖尔市湖泊面积从1988年的

23.6 km<sup>2</sup>增至2021年的139.7 km<sup>2</sup>;乌海市湖泊面积从无到2021年的40.8 km<sup>2</sup>。东部地区,兴安盟湖泊面积显著增长,从49.9 km<sup>2</sup>增至213.1 km<sup>2</sup>,其余地区湖泊面积普遍减少。通辽市湖泊面积显著减少,从1991年的118.8 km<sup>2</sup>降至2020年的12.7 km<sup>2</sup>。中部地区的锡林郭勒盟和乌兰察布市湖泊面积显著减少,其中锡林郭勒盟的湖泊面积动态变化,但总体趋势为减少。分阶段来看,1988—2012年,乌兰察布市、锡林郭勒盟和呼伦贝尔市湖泊面积减少最多;2012—2021年,阿拉善盟、兴安盟和呼伦贝尔市湖泊面积增加最多。

在湖泊变化方面,呼伦贝尔市、乌兰察布市和锡林郭勒盟的湖泊变化与内蒙古整体变化趋势一致。1988—2012年,全区湖泊面积减少318.4 km<sup>2</sup>,其中呼伦贝尔市减少356.5 km<sup>2</sup>,乌兰察布市减少92.5 km<sup>2</sup>,锡林郭勒盟减少66.2 km<sup>2</sup>;2012—2021年,湖泊面积增加1727.9 km<sup>2</sup>,其中呼伦贝尔市增加1288.9 km<sup>2</sup>,锡林郭勒盟增加39.0 km<sup>2</sup>,乌兰察布市增加3.6 km<sup>2</sup>。湖泊数量方面,1988—2012年,全区减少159个湖泊,其中呼伦贝尔市减少8个,锡林郭勒盟增加4个,乌兰察布市数量无变化。2012—2021年,全区增加141个湖泊,呼伦贝尔市增加202个,乌兰察布市增加9个,锡林郭勒盟增加4个。

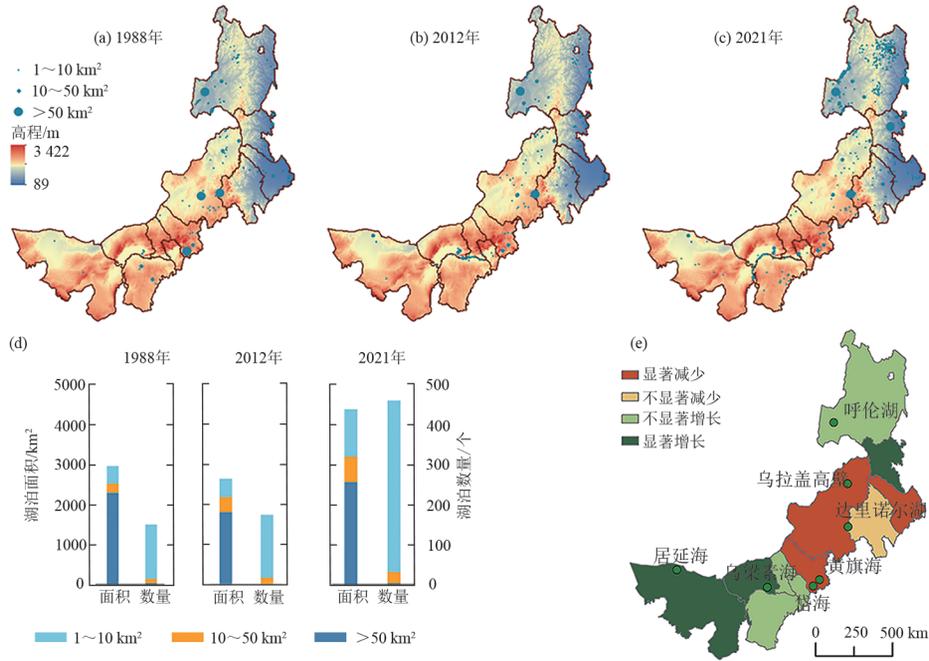


图3 内蒙古高原湖泊分布及变化趋势

Fig. 3 Distribution and trend of lakes in Inner Mongolia Plateau

表2 内蒙古高原湖泊数量及变化统计

Table 2 Statistics of the number and changes of lakes in the Inner Mongolia Plateau

湖泊面积/km <sup>2</sup>	1988年		2012年		2021年		湖泊变化(1988—2012年)				湖泊变化(2012—2021年)			
	数量/个	面积/km <sup>2</sup>	数量/个	面积/km <sup>2</sup>	数量/个	面积/km <sup>2</sup>	数量/个	数量变化率/%	面积变化/km <sup>2</sup>	面积变化率/%	数量/个	数量变化率/%	面积变化/km <sup>2</sup>	面积变化率/%
1~10	135	438.1	156	456.2	426	1 179.1	21	15.6	18.1	4.1	270	173.1	722.9	158.4
10~50	11	228.6	16	371.9	28	629.5	5	45.5	143.3	62.7	12	75.0	257.6	69.3
>50	4	2 287.5	2	1 807.7	4	2 555.1	-2	-50.0	-479.8	-21.0	2	100.0	747.4	41.3
合计	150	2 954.1	174	2 635.8	458	4 363.6	24	16.0	-318.4	-10.8	284	163.2	1 727.9	65.6

在典型湖泊方面,东部的呼伦湖和达里诺尔湖面积变化不显著,呼伦湖从1988年的2 061.6 km<sup>2</sup>增至2021年的2 296.6 km<sup>2</sup>,达里诺尔湖从1988年的88.8 km<sup>2</sup>增至2021年的192.3 km<sup>2</sup>;西部地区的居延海和乌梁素海面积显著增加,居延海湖泊面积从无增至2021年的30.8 km<sup>2</sup>,乌梁素海湖泊面积从1988年的29.0 km<sup>2</sup>增至2021年的88.0 km<sup>2</sup>。中部地区的岱海、黄旗海和乌拉盖高壁面积显著减少。岱海和黄旗海从1988年的156.9 km<sup>2</sup>减少至2021年的68.9 km<sup>2</sup>。由图4可知,乌拉盖高壁在1998年面积达到最大,为517.0 km<sup>2</sup>,但在1998—2001年面积大幅减少,到2002年降至22.7 km<sup>2</sup>,2012年后虽有短暂回升,但总体呈显著减少趋势。研究<sup>[25]</sup>表明,自2012年以来,中国重点生态修复工程是湖泊面积恢复的主要驱动力。这些关键湖泊的变化对各区域湖泊整体变化产生重要影响。

2.3 湖泊面积驱动因素

采用年总降水量、年平均气温和风速作为气候

因素,灌溉面积、放牧数量和煤炭产量作为人类活动因素来分析对湖泊面积的影响。从图5可以看出,年总降水量呈显著减少趋势,年平均气温显著增加,而风速略有上升。气候因素中,年总降水量和年平均气温的变化较为显著,可能对湖泊面积产生重要影响。在人类活动因素中,灌溉面积、煤炭产量和放牧数量均显著增长,表明农业灌溉、煤炭开采和放牧可能是导致湖泊萎缩的主要驱动因素之一。

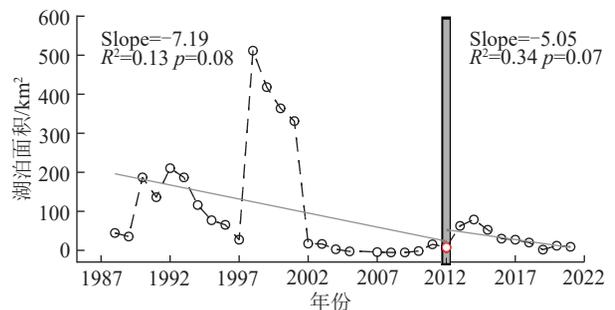


图4 乌拉盖高壁湖泊变化

Fig. 4 Changes of Ulagai high-wall lakes

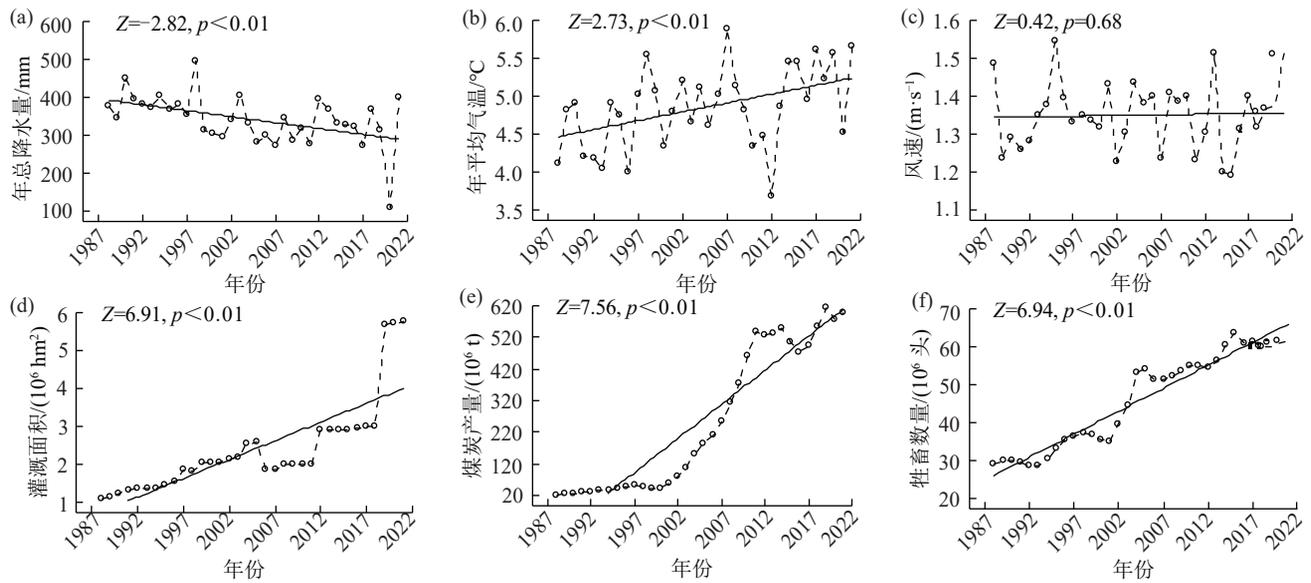


图 5 影响因素趋势

Figure 5 Trend of influencing factors

将内蒙古湖泊动态变化分为 2 个阶段(1988—2012 年湖泊萎缩阶段和 2012—2021 年湖泊恢复期),对湖泊进行分类归因分析。从表 3 和表 4 可以看出,在 1988—2012 年,牲畜数量的贡献比例最高,为 34.73%;而在 2012—2021 年,年平均气温的贡献比例最高,为 36.84%;在 1988—2021 年,气候因素中年总降水量的贡献比例最高,为 25.72%;在人类活动因素中,牲畜数量的解释率最高,为 28.20%。总体来看,人类活动的影响大于气候因素。

用层次分割的方法评估不同因素对湖泊面积的贡献率。由表 5 可知,1988—2021 年,气候因素解释 36.25% 的变化,人类活动解释 63.82% 的变化。在 1988—2012 年,气候因素贡献率为 31.22%,人类活动贡献率为 68.74%;在 2012—2021 年,人类活动贡献率降至 0.92%,气候因素的贡献率则上升至 99.04%。表明在湖泊的长期变化中,气候因素的作用逐渐增大,而人类活动的影响有所减小。然而,人类活动仍对湖泊变化产生重要影响,因此需要持续关注人类活动对湖泊生态系统的潜在影响。

进一步分析气候和人类因素的影响差异时,采

表 3 相关性分析

Table 3 Correlation analysis

影响因素	1988—2012 年		2012—2021 年		1988—2021 年	
	相关系数( <i>r</i> )	显著性( <i>p</i> )	相关系数( <i>r</i> )	显著性( <i>p</i> )	相关系数( <i>r</i> )	显著性( <i>p</i> )
年平均气温	-0.28	0.16	0.54	0.11	0.21	0.24
年总降水量	0.56	0**	0.32	0.37	0.31	0.07
风速	0.08	0.72	0.54	0.11	0.12	0.49
灌溉面积	-0.51	0.01*	0.10	0.79	0.24	0.17
牲畜数量	-0.68	0**	0.35	0.33	0.19	0.28
煤炭产量	-0.70	0**	-0.08	0.84	0.13	0.46

注:\*表示在 0.05 水平上显著相关;\*\*表示在 0.01 水平上显著相关。

表 4 多元广义线性回归模型

Table 4 Multivariate generalized linear model

影响因素	1988—2012 年		2012—2021 年		1988—2021 年	
	回归系数	贡献比例/%	回归系数	贡献比例/%	回归系数	贡献比例/%
年平均气温	54.51	1.89	189.10	36.84	302.77	9.66
年总降水量	3.18	28.55	0.35	3.09	3.07	25.72
风速	992.88	2.09	3 650.00	36.27	886.19	6.39
灌溉面积	187.84	12.81	-240.10	4.48	224.17	25.68
牲畜数量	-43.47	34.72	118.40	17.11	-49.41	17.44
煤炭产量	0.55	19.95	3.96	2.20	2.17	15.11

表 5 层次分割分析

Table 5 Hierarchical segmentation analysis table

影响因素	1988—2012年		2012—2021年		1988—2021年	
	个体贡献	贡献百分比/%	个体贡献	贡献百分比/%	个体贡献	贡献百分比/%
气候	0.07	31.22	0.59	99.04	0.13	36.25
人类活动	0.25	68.74	0.08	0.92	0.22	63.82

整体而言,气候因素对湖泊面积的影响逐渐增强。由于呼伦贝尔市、锡林郭勒盟和乌兰察布市的湖泊面积变化与整个内蒙古高原湖泊动态变化趋势相似,本

研究利用此数据进一步分析自然因素对湖泊面积变化的影响。结果(表6)表明,年总降水量在不同阶段对3个地区的湖泊面积均有显著的正向影响。

表 6 呼伦贝尔市、锡林郭勒盟、乌兰察布市湖泊面积与年总降水量相关性

Table 6 Correlation between lake area and meteorological factors in Hulunbuir, Xilin Gol and Ulanqab

研究地区	1988—2012年		2012—2021年		1988—2021年	
	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>
呼伦贝尔市	0.51	0.01*	0.28	0.43	0.28	0.11
锡林郭勒盟	0.49	0.01*	0.54	0.11	0.47	0**
乌兰察布市	0.37	0.06	0.39	0.26	0.43	0.01*

注:\*表示在0.05水平上显著相关;\*\*表示在0.01水平上显著相关。

### 3 讨论

#### 3.1 湖泊变化趋势

本研究表明,2012年是湖泊面积突变点。由图5可知,2012年之后,降水量变少,气温升高,所以该突变并不完全由降水的变化直接引起,可能是生态恢复工程的实施对局部水分循环产生重要影响。通过改善土壤水分保持能力和减少地表径流损失,部分抵消降水减少和蒸发增加的负面影响。因此,尽管总体降水量减少,湖泊面积依然呈现恢复趋势。实际的湖泊变化受到更复杂的水文过程影响,湖泊的水量变化不仅受蒸发的影响,还受到地下水补给、河流汇水及人类活动(如水资源管理和水库调度)的调节。因此,在干旱和半干旱地区,生态恢复措施可能通过改善水分循环和增强水资源管理,促进湖泊水体的恢复。

进一步研究可知,1988—2012年,内蒙古地区大型湖泊面积的减少显著影响整体湖泊面积的变化。在2012—2021年,小型湖泊的变化率最高,对整体湖泊面积的影响日益显著,值得特别关注。本研究选择7个典型湖泊进行面积动态分析表明,乌拉盖高壁、黄旗海和岱海的面积显著减少,乌拉盖高壁面积的扩张和缩小主要集中在湖泊中心区域。1988—1999年,湖泊中心水域的变化尤为剧烈,自2002年起开始萎缩,至2018年几乎完全消失。2018年以来,湖泊东北部的海域也几近干涸,广泛分布着盐化草甸和盐碱滩。乌拉盖高壁的主要水源来自内蒙古境内最大内陆河乌拉盖河,乌拉盖水库的建立显著影响乌拉盖高壁的湖泊面积。该水库于1980年建成,1998年的洪水导致水库受损,造成湖泊面积的暂时

增加。自2002年水库重建以来,水库对湖泊主要水源的截断导致湖泊面积自此开始显著缩减<sup>[26]</sup>。黄旗海和岱海是内蒙古西部的主要内陆湖泊。黄旗海主要依赖大气降水补给<sup>[27]</sup>,湖泊面积减少与气候变化密切相关。由于气候变暖,降水减少,湖泊水源不足,同时农业开垦也进一步加剧湖泊面积的缩减<sup>[28]</sup>。岱海面积的变化主要与土地利用的变化密切相关,受人类活动影响显著<sup>[29]</sup>。岱海、乌梁素海和呼伦湖被称为“一湖两海”,是内蒙古的重要湿地资源。自2016年以来,中央政府指出“一湖两海”生态环境破坏严重,亟须修复。因此,政府采取一系列生态恢复措施。本研究结果表明,乌梁素海和呼伦湖的治理效果显著,湖泊面积均有所增加。居延海也受益于有效的治理措施。居延海是古弱水黑河的尾间湖,20世纪60~90年代,由于黑河中游人口增加和经济发展,下游水量急剧减少,东、西居延海相继干涸,引发频繁的沙尘暴,使居延海成为我国沙尘暴的重要策源地之一。为应对黑河流域的生态危机,政府自1997年起实施一系列治理措施,取得良好的成效。2024年8月20日,黑河尾间东居延海实现连续20 a不干涸,水域面积稳定在30~40 km<sup>2</sup><sup>[30]</sup>。达里诺尔湖地区呈现温度上升、降水量下降、蒸发量增加的气候暖干化趋势<sup>[31]</sup>。虽然本研究结果表明,湖泊面积目前未受明显影响,但未来环境变化可能导致湖泊面积缩减,需要重点关注水源补给问题。

本研究表明,小型和大型湖泊的变化对内蒙古高原湖泊的整体动态影响尤为显著。湖泊的动态变化不仅受到气候因素的驱动,还与人类活动密切

相关,特别是中部和东部地区的湖泊变化,进一步凸显人类活动对湖泊生态系统的显著影响。针对湖泊变化的趋势和潜在影响,亟须制定有效的管理措施,特别是在小型湖泊和大型湖泊的保护和恢复方面。

### 3.2 湖泊变化驱动因素分析

本研究表明,1988—2012年,降水量对湖泊面积起到显著的正向影响。作为湖泊的主要补给水源,降水的增加直接促进湖泊面积的恢复,与之前的研究<sup>[10]</sup>结果一致。表6的分析进一步确认降水量对湖泊面积恢复的积极作用,凸显水资源管理和气候调节在湖泊生态系统中的关键作用。人类活动,特别是农业灌溉和放牧,对湖泊生态系统造成直接的负面影响。具体而言,农业用地的扩张增加对地下水和河流水资源的需求。一部分水资源通过蒸发、渗漏而损失,或在田间输水系统中被浪费,直接影响湖泊的补给水源<sup>[10,32-33]</sup>,导致湖泊水资源的减少,从而使湖泊逐渐枯竭。过度放牧导致植被覆盖减少,引发土壤侵蚀,进一步削弱湖泊的水源涵养能力<sup>[10]</sup>。例如,黄旗海、岱海等湖泊由于这些负面影响经历严重的退化,湖泊面积大幅减少,水质恶化,生态系统服务功能显著下降<sup>[34]</sup>。煤炭开采则导致地面塌陷和水均衡破坏,影响湖泊的补给水源,造成水源污染<sup>[35]</sup>。人类活动对湖泊生态系统的负面影响强调可持续发展和生态保护的重要性。因此,尽管降水量对湖泊面积恢复起到积极作用,人类活动对湖泊生态系统的负面影响却不容忽视,需强调有效的水资源管理和环境保护措施在维护湖泊生态系统健康中的重要性。

内蒙古湖泊面积变化的2个阶段的驱动机制表现出不同的驱动机制。1988—2012年,灌溉面积、牲畜数量和煤炭产量对湖泊面积有显著负向影响,而年总降水量对湖泊面积有显著正向影响。线性模型显示,气候因素中,年总降水量的贡献率最高;在人类因素中,牲畜数量的贡献率最高,煤炭产量次之。表明年总降水量减少对湖泊面积的减少起到主要作用,牲畜数量和煤炭产量的增加进一步加剧湖泊面积的减少,此阶段人类活动对湖泊的影响较大。自改革开放以来,内蒙古地区的煤炭产业发展促进当地经济,但也对生态环境产生巨大的负面影响<sup>[36]</sup>。1990年全区牲畜总头数比解放初期的1947年增长4.6倍<sup>[37]</sup>,过度放牧进一步影响湖泊面积。在此阶段,虽然采取生态环境保护措施,但效果不显著,人类影响占主导地位。而在2012—2021年,除煤炭产量外,

其他影响因素均为不显著正向影响。在此阶段,气象因素的影响超过人类活动,与2012年后的生态文明建设有关<sup>[25]</sup>。人类影响因素中,灌溉面积、牲畜数量和煤炭产量的变化与政策紧密相关,例如,在政策控制下,牲畜数量在2006年后有所减少<sup>[38]</sup>。

在早期阶段(1988—2012年),人类活动对湖泊动态变化的贡献率较高,影响显著。随着时间的推移,尤其是2012年后,气候变化的影响逐渐超越人类活动,成为湖泊面积变化的关键因素,说明在湖泊管理和保护策略中,需要更加关注自然环境变化,特别是气候变化对湖泊面积的持续影响。

### 3.3 不足与展望

尽管本研究通过GEE平台和Landsat系列数据,对内蒙古高原湖泊的时空变化特征及其影响因素进行系统分析,但受限于数据精度与分辨率限制,对于某些区域的湖泊边缘和细小湖泊的识别上,仍可能存在一定的误差。本研究数据的时间分辨率主要集中在年度尺度,缺乏更高频率(如月度或季度)的数据支持,限制对湖泊动态变化的细致刻画,特别是短期内快速变化过程的捕捉。尽管本研究选取多个气象和人为因素作为可能影响湖泊面积变化的驱动因子,但在2012—2021年,此类因子与湖泊面积变化的相关性并未表现出显著性,此现象可能与多个因素相关:首先,当前研究主要使用年度尺度的数据,难以捕捉短期气象事件(如极端降水、干旱)对湖泊面积的直接影响;其次,湖泊面积变化是一个复杂的多因素综合过程,单一因素的影响可能较弱或被滞后效应掩盖;第三,地下水位变化、河流流量及其他未纳入分析的因素可能是影响湖泊面积的关键驱动,但在本研究中未得到充分考虑。因此,今后应在数据、时间分辨率、扩展更多的气象和水文因子等方面进行深入分析,增加月度或季节性高分辨率数据的分析,探索多因素间的复杂交互效应,以便全面揭示内蒙古高原湖泊的时空变化特征及其影响因素,为湖泊保护和管理提供更加科学、准确和有效的支持。

## 4 结论

1)内蒙古高原湖泊的面积和数量在1988—2021年经历显著变化。从1988—至2012年,湖泊面积整体呈减少趋势,而在2012—2021年则出现恢复迹象,展现湖泊面积先减少后增加的变化模式。其中,大型湖泊占据内蒙古湖泊整体面积的主要部分。在湖泊数量方面,小型湖泊的数量增长尤为显著,对内蒙古高原湖泊整体动态变化产生重要影响。小型湖泊和大型湖泊

的动态变化是研究高原湖泊变化趋势的关键。

2) 湖泊变化主要受气候因素和人类活动的驱动。年总降水量对湖泊面积有显著正向影响。在 1988—2012 年, 降水量减少导致湖泊水量的下降。人类活动如放牧、采矿和灌溉对湖泊面积产生显著负向影响, 导致湖泊面积缩减。自 2012 年起, 人类活动对湖泊面积变化的影响逐渐减弱, 气候因素成为主要驱动力。

3) 鉴于气候变化和人类活动对湖泊的显著影响, 建议制定并实施综合管理措施, 包括加强水资源管理、控制人类活动对湖泊的负面影响、实施生态恢复工程等。在小型湖泊和大型湖泊的保护与恢复方面, 应注重平衡生态保护和经济发展, 确保湖泊生态系统的可持续性。

#### 参考文献:

- [1] STERNER R W, KEELER B, POLASKY S, et al. Ecosystem services of Earth's largest freshwater lakes [J]. *Ecosystem Services*, 2020, 41: e101046.
- [2] HO L, GOETHALS P. Research hotspots and current challenges of lakes and reservoirs: A bibliometric analysis [J]. *Scientometrics*, 2020, 124(1): 603-631.
- [3] 张甘霖, 谷孝鸿, 赵涛, 等. 中国湖泊生态环境变化与保护对策 [J]. *中国科学院院刊*, 2023, 38(3): 358-364.  
ZHANG G L, GU X H, ZHAO T, et al. Ecological and environmental changes and protection measures of lakes in China [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, 38(3): 358-364.
- [4] 罗建桦, 陶晔, 邢鹏, 等. 湖泊微生物宏基因组学研究进展 [J]. *湖泊科学*, 2020, 32(1): 271-280.  
LUO J H, TAO Y, XING P, et al. Mini-review: Advances of metagenomics research for lake microbiomes [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(1): 271-280.
- [5] DEARING J A, YANG X D, DONG X H, et al. Extending the timescale and range of ecosystem services through paleoenvironmental analyses, exemplified in the Lower Yangtze basin [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(18): 1111-1120.
- [6] FUJITANI M, MCFALL A, RANDLER C, et al. Participatory adaptive management leads to environmental learning outcomes extending beyond the sphere of science [J]. *Science Advances*, 2017, 3(6): e1602516.
- [7] 刘震, 赵钟楠, 张越, 等. 中国主要湖泊演变趋势及成因分析 [J]. *长江科学院院报*, 2022, 39(11): 17-20.  
LIU Z, ZHAO Z N, ZHANG Y, et al. Trend and causes of the evolution of major lakes in China [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, 39(11): 17-20.
- [8] 博文静, 沈钰仟, 王馨悦, 等. 植被覆盖度对夏季降温效应的影响: 以内蒙古为例 [J]. *生态学报*, 2022, 42(22): 9165-9174.  
BO W J, SHEN Y Q, WANG X Y, et al. The influence of vegetation coverage on cooling effect in summer: A case study of the Inner Mongolia [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(22): 9165-9174.
- [9] 贾玲, 周毓鹏. 内蒙古自治区湖泊萎缩(干涸)情况调查分析 [J]. *内蒙古水利*, 2024(2): 80-82.  
JIA L, ZHOU Y J. Investigation and analysis of lake shrinkage (drying) in Inner Mongolia Autonomous Region [J]. *Inner Mongolia Water Conservancy*, 2024(2): 80-82.
- [10] TAO S L, FANG J Y, ZHAO X, et al. Rapid loss of lakes on the Mongolian Plateau [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(7): 2281-2286.
- [11] PEKEL J F, COTTAM A, GORELICK N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes [J]. *Nature*, 2016, 540(7633): 418-422.
- [12] FENG S L, LIU S G, HUANG Z H, et al. Inland water bodies in China: Features discovered in the long-term satellite data [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(51): 25491-25496.
- [13] ZHOU Y, DONG J W, XIAO X M, et al. Continuous monitoring of lake dynamics on the Mongolian Plateau using all available Landsat imagery and Google Earth Engine [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 689: 366-380.
- [14] 孙艳玲, 郭鹏, 延晓冬, 等. 内蒙古植被覆盖变化及其与气候、人类活动的关系 [J]. *自然资源学报*, 2010, 25(3): 407-414.  
SUN Y L, GUO P, YAN X D, et al. Dynamics of vegetation cover and its relationship with climate change and human activities in Inner Mongolia [J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(3): 407-414.
- [15] 郑景云, 尹云鹤, 李炳元. 中国气候区划新方案 [J]. *地理学报*, 2010, 65(1): 3-12.  
ZHENG J Y, YIN Y H, LI B Y. A new scheme for climate regionalization in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 3-12.
- [16] JOHN R, CHEN J Q, LU N, et al. Predicting plant diversity based on remote sensing products in the semi-arid region of Inner Mongolia [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(5): 2018-2032.
- [17] JOHN R, CHEN J Q, OU-YANG Z T, et al. Vegetation response to extreme climate events on the Mongolian

- Plateau from 2000 to 2010[J]. Environmental Research Letters, 2013, 8(3): e035033.
- [18] CHEN J Q, JOHN R, ZHANG Y Q, et al. Divergences of two coupled human and natural systems on the Mongolian Plateau[J]. BioScience, 2015, 65(6): 559-570.
- [19] GAO H B, RYAN M, LIC Y, et al. Understanding the role of groundwater in a remote transboundary lake (Hulun lake, China)[J]. Water, 2017, 9(5): e363.
- [20] O'REILLY C, SHARMA S, GRAY D K, et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42: 10773-10781.
- [21] GORELICK N, HANCHER M, DIXON M, et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 202: 18-27.
- [22] MANN H B. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica, 1945, 13(3): e245.
- [23] 曹洁萍, 迟道才, 武立强, 等. Mann-Kendall 检验方法在降水趋势分析中的应用研究[J]. 农业科技与装备, 2008(5): 35-37.
- CAO J P, CHI D C, WU L Q, et al. Mann-Kendall examination and application in the analysis of precipitation trend [J]. Agricultural Science and Technology and Equipment, 2008(5): 35-37.
- [24] 刘尧, 于馨, 于洋, 等. R 程序包“rdacca.hp”在生态学数据分析中的应用: 案例与进展[J]. 植物生态学报, 2023, 47(1): 134-144.
- LIU Y, YU X, YU Y, et al. Application of “rdacca.hp” R package in ecological data analysis: Case and progress [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(1): 134-144.
- [25] GAO Z F, ZHOU Y, CUI Y P, et al. Rebound of surface and terrestrial water resources in Mongolian Plateau following sustained depletion [J]. Ecological Indicators, 2023, 156: e111193.
- [26] 邬佳宾, 马浩艳, 赵志猛, 等. 乌拉盖水库生态环境状况变化分析与评价[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2024, 55(6): 587-595.
- WU J B, MA H Y, ZHAO Z M, et al. Analysis and evaluation of ecological environment changes in Wulagai reservoir [J/OL]. Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition), 2024, 55(6): 587-595.
- [27] 皇彦. 气候变化对黄旗海湿地生态环境的影响及其对策[J]. 现代农业, 2020(1): e97.
- HUANG Y. Influence of climate change on ecological environment of Huangqihai wetland and its countermeasures [J]. Modern Agriculture, 2020(1): e97.
- [28] 李东, 胡平, 吴冰, 等. 黄旗海湿地恢复与保护措施[J]. 内蒙古林业调查设计, 2013, 36(3): 23-25.
- LI D, HU P, WU B, et al. Restoration and protection measures of Huangqihai wetlands [J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2013, 36(3): 23-25.
- [29] 庞雪敏, 刘华民, 刘旭隆, 等. 近30年岱海湖泊面积动态变化及其驱动力分析[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2021, 52(3): 311-321.
- PANG X M, LIU H M, LIU X L, et al. Analysis of lake area and water level dynamic and its driving forces of Daihai Lake in recent 30 years [J]. Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition), 2021, 52(3): 311-321.
- [30] 黑河流域管理局. 黑河尾间东居延海实现连续20年不干涸[J]. 人民黄河, 2024, 46(8): 172.
- Heihe River Basin Administration Bureau. Dongju Yanhai at the end of Heihe River has achieved 20 consecutive years of non drying up [J]. Yellow River, 2024, 46(8): 172.
- [31] 魏学. 近45 a 达里诺尔湖面积演变对气候的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(2): 110-115.
- WEI X. Response of Dali Lake area to climate factors in the past 45 years [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(2): 110-115.
- [32] BLANC E, STRZEPEK K, SCHLOSSER A, et al. Modeling U. S. water resources under climate change [J]. Earth's Future, 2014, 2(4): 197-224.
- [33] SASAKI T, OKAYASU T, JAMSRAN U, et al. Threshold changes in vegetation along a grazing gradient in Mongolian rangelands [J]. Journal of Ecology, 2008, 96(1): 145-154.
- [34] 黄群, 姜加虎. 岱海水位下降原因分析[J]. 湖泊科学, 1999, 11(4): 304-310.
- HUANG Q, JIANG J H. Analysis of water level descent in Daihai Lake [J]. Journal of Lake Science, 1999, 11(4): 304-310.
- [35] 王关区, 陈晓燕. 牧区矿产资源开发引起的生态经济问题探析[J]. 生态经济, 2013(2): 89-93.
- WANG G Q, CHEN X Y. Analysis on eco-economic problems caused by exploitation of mineral resources in pastoral areas [J]. Ecological Economy, 2013(2): 89-93.
- [36] 张国, 韩巧欠. 新时期内蒙古自治区生态文明建设研究 [C]// 第十届环境与发展论坛论文集, 北京: 中华环保联合会, 2014: 492-496.
- ZHANG G, HAN Q Q. Research about the construction of ecological civilization of Inner Mongolian Autonomous Region in the new period [C]// Proceedings of the 10th Environment and Development Forum, Beijing: China Environmental Protection Federation, 2014: 492-496.

(下转第110页)

- 193:e104609.
- [25] 林玉, 聂富育, 杨万勤, 等. 四川盆地西缘 4 种人工林土壤氮转化酶的季节动态[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(3): 634-639.
- LIN Y, NIE F Y, YANG W Q, et al. Seasonal dynamics of soil nitrogen transformation enzymes at four plantations in the western edge of Sichuan basin [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2019, 25(3): 634-639.
- [26] 胡宗达, 刘世荣, 罗明霞, 等. 川西亚高山不同演替阶段天然次生林土壤碳氮含量及酶活性特征[J]. 植物生态学报, 2020, 44(9): 973-985.
- HU Z D, LIU S R, LUO M X, et al. Characteristics of soil carbon and nitrogen contents and enzyme activities in sub-alpine secondary forests with different successional stages in Western Sichuan, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44(9): 973-985.
- [27] LIU L. Impact of plant diversity on soil nitrogen enzyme dynamics [J]. Plant and Soil, 2020, 455(1/2): 71-83.
- [28] WANG Y. Microbial functional traits and their responses to vegetation and microclimate in soil nitrogen cycling [J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: e571563.
- [29] 朱虹颖, 靳振江, 张晓文, 等. 岩溶区与非岩溶区稻田土壤磷含量与碱性磷酸酶活性比较 [J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(5): 1083-1090.
- ZHU H Y, JIN Z J, ZHANG X W, et al. Comparison of soil phosphorus content and alkaline phosphatase activity in paddy fields in karst and non-karst areas [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024, 41(5): 1083-1090.
- [30] 廖远行, 舒英格, 王昌敏, 等. 喀斯特地区不同植被类型土壤微生物量磷、碱性磷酸酶及植酸酶的变化特征 [J]. 南方农业学报, 2023, 54(6): 1762-1770.
- LIAO Y H, SHU Y G, WANG C M, et al. Change characteristics of soil microbial phosphorus, alkaline phosphatase and phytase under different vegetation types in karst area [J]. Journal of Southern Agriculture, 2023, 54(6): 1762-1770.
- [31] 尹辉, 张波, 荆瑞雪, 等. 干旱区不同地理种群骆驼刺元素组成及表面结构特征的对比研究 [J]. 生态学报, 2019, 39(18): 6745-6752.
- YIN H, ZHANG B, JING R X, et al. Elemental compositions and surface structures of *Alhagi sparsifolia* Shap. in different geographical populations in arid zone [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(18): 6745-6752.
- [32] CHEN D M, SALEEM M, CHENG J H, et al. Effects of aridity on soil microbial communities and functions across soil depths on the Mongolian Plateau [J]. Functional Ecology, 2019, 33(8): 1561-1571.
- [33] 谷晓楠, 贺红士, 陶岩, 等. 长白山土壤微生物群落结构及酶活性随海拔的分布特征与影响因子 [J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8374-8384.
- GU X N, HE H S, TAO Y, et al. Soil microbial community structure, enzyme activities, and their influencing factors along different altitudes of Changbai Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(24): 8374-8384.
- [34] LUO S. Organic carbon availability drives enzymatic processes in nitrogen cycling [J]. Science of the Total Environment, 2021, 780: e146641.
- (上接第 101 页)
- [37] 马春梅, 贾鲜艳, 杨静, 等. 内蒙古草地生态环境退化现状及成因分析 [J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2000, 21(1): 117-120.
- MA C M, JIA X Y, YANG J, et al. The current situation and cause analysis of ecological environment degeneration of Inner Mongolia grassland [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2000, 21(1): 117-120.
- [38] 孙肖钰. 近 20 年内蒙古自治区生态文明建设成效评估 [D]. 西安: 长安大学, 2021.
- SUN X Y. Effectiveness evaluation of ecological civilization construction in Inner Mongolia autonomous region in recent 20 years [D]. Xi'an: Changan University, 2021.