DOI: 10.20103/j.stxb.202402020297

丁辰,神祥金,刘奕雯,吴丽媛,张佳琦,马蓉,王延吉,张兴东,吕宪国,姜明.中国沼泽湿地植被覆盖度时空变化及其对气候变化的响应.生态学报,2025,45(6):2643-2654.

Ding C, Shen X J, Liu Y W, Wu L Y, Zhang J Q, Ma R, Wang Y J, Zhang X D, Lü X G, Jiang M.Spatial-temporal variation in fraction of vegetation cover and its response to climate change in marshes of the China. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(6):2643-2654.

中国沼泽湿地植被覆盖度时空变化及其对气候变化的 响应

丁 辰^{1,2},神祥金^{1,*},刘奕雯^{1,2},吴丽媛^{1,2},张佳琦^{1,2},马 蓉³,王延吉¹,张兴东¹, 吕宪国¹,姜 明¹ 1中国科学院东北地理与农业生态研究所,长春 130102

2 中国科学院大学,北京 100049

3 东北林业大学,哈尔滨 150040

摘要:沼泽湿地在中国分布广泛,在区域碳循环中起着关键作用。植被覆盖度是评价湿地植被生长和固碳能力的重要指标。目前,全球气候变化深刻影响着沼泽湿地植被覆盖度,进而影响区域乃至全球碳循环。在全球气候变暖背景下,明确沼泽植被覆盖度时空变化及其对气候变化的响应对于准确评估和预测沼泽湿地固碳潜力具有重要意义。基于 2001—2022 年 MODIS NDVI 数据及逐月气象数据,利用像元二分模型等方法分析了中国沼泽湿地生长季植被覆盖度时空变化特征及其对气候变化的响应。 研究结果表明:在 2001—2022 年,中国沼泽湿地生长季植被覆盖度多年均值为 58.49%,沼泽湿地生长季植被覆盖度总体呈现 显著增加趋势(0.025/10a; P<0.01),生长季植被覆盖度上升趋势较高的区域位于松嫩平原,下降趋势较高的区域位于青藏西南 部地区。全国平均的生长季沼泽植被覆盖度与生长季降水和最低温度呈显著正相关,表明生长季降水和最低温度的增加能够 显著增加中国沼泽湿地植被覆盖度。在不同地区,生长季降水的增加能够显著提高东北地区与内蒙古地区沼泽湿地植被覆盖 度;生长季白天最高温度与夜晚最低温度的升高对青藏高原地区沼泽湿地植被覆盖度的增加具有较强的促进作用,而生长季白 天最高温度的升高对内蒙古地区的沼泽植被覆盖度具有降低作用。在夜晚最低温度的影响方面,7、8 月夜晚最低温度的升高 能够显著增加青藏高原地区沼泽植被覆盖度;9 月夜晚最低温度的升高能显著增加中国沼泽湿地固碳潜力,揭示湿地植被覆盖度。明确中 国沼泽湿地生长季植被覆盖度时空变化特征及其对气候变化的响应能够为评估中国沼泽湿地固碳潜力,揭示湿地植被写气候 变化的关系机理提供科学依据。

关键词:沼泽;植被覆盖度;气候变化;响应;中国

Spatial-temporal variation in fraction of vegetation cover and its response to climate change in marshes of the China

DING Chen^{1,2}, SHEN Xiangjin^{1,*}, LIU Yiwen^{1,2}, WU Liyuan^{1,2}, ZHANG Jiaqi^{1,2}, MA Rong³, WANG Yanji¹, ZHANG Xingdong¹, LÜ Xianguo¹, JIANG Ming¹

1 Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China

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

3 Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

收稿日期:2024-02-02; 采用日期:2025-01-16

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: shenxiangjin@ iga.ac.cn

#限于数据的可获取性,本研究尚未含中国港澳台统计数据。

基金项目:国家自然科学基金项目(42422101, 42371070);国家重点研发计划项目(2023YFF0807204);中国科学院青年创新促进会优秀会员项 目(2019135)

Abstract: Marshes are widely distributed in China and play a key role in regional carbon cycling. The Fraction of vegetation cover is an important indicator for evaluating wetland vegetation growth and carbon sequestration capacity. Currently, global climate change profoundly impacts the vegetation coverage of marshes, thereby affecting regional and even global carbon cycles. In the context of global warming, understanding the spatiotemporal change in marsh vegetation coverage and its response to climate change is of great significance for accurately assessing and predicting the carbon sequestration potential of marshes. Based on MODIS NDVI data and monthly meteorological data from 2001 to 2022, this study used the dimidiate pixel model to analyze the spatiotemporal changes of vegetation coverage during the growing season of marshes in China and their responses to climate change. The multi-year average of vegetation coverage during the growing season of marshes in China was 58.49% from 2001 to 2022. The vegetation coverage during the growing season of marshes showed a significant increasing trend (0.025/10a; P < 0.01). The areas with the higher increasing trend in vegetation coverage during the growing season were mainly located in the Songnen Plain, while the areas with the higher decreasing trend were mainly found in the southwestern part of the Tibetan Plateau. The national average growing season vegetation coverage of marshes was significantly positively correlated with both growing season precipitation and minimum temperature, indicating that increases in growing season precipitation and minimum temperature could enhance marsh vegetation coverage. In different regions, the increase in growing season precipitation significantly enhanced the vegetation coverage in the marshes of the Northeast and Inner Mongolia regions; the rise in daytime maximum and nighttime minimum temperatures during the growing season had a strong positive effect on the increase in marshes vegetation coverage in the Tibetan plateau region, but the rise in daytime maximum temperature had a negative effect on the marshes vegetation coverage in the Inner Mongolia region. In terms of the influence of nighttime minimum temperature, the increase in the nighttime minimum temperature during July and August can significantly increase the vegetation coverage of marshes in the Tibetan Plateau region. The increase of September's nighttime minimum temperature can significantly increase the vegetation coverage of marshes in the most of China's marshes. Understanding the spatiotemporal variation of vegetation coverage during the growing season of marshes in China and its response to climate change can provide scientific evidence for assessing the carbon sequestration potential of Chinese marshes and reveal the mechanisms behind the relationships between wetland vegetation and climate change.

Key Words: marshes; vegetation coverage; climate change; response; China

湿地作为地球表层生态系统的重要组成部分,其碳储量约占全球陆地碳储量的 12%—24%^[1-2],对全球 碳循环过程有着重要影响^[2-3]。沼泽是湿地生态系统的重要类型之一,在全球碳循环、生物多样性保护与调 蓄水量等方面发挥着重要作用^[4-5]。植被作为沼泽生态系统碳库的主要来源,是沼泽固碳的基础。植被覆盖 度是衡量区域植被生长状况、评估区域植被固碳能力的重要指标,其对气候变化的响应非常敏感^[6-7]。气候 变化能够通过影响区域沼泽湿地植被覆盖度,进而影响区域乃至全球碳循环。在全球气候变化背景下,明确 沼泽植被覆盖度时空变化及其对气候变化的响应对于准确评估和预测沼泽湿地固碳潜力具有重要意义。

中国沼泽湿地面积约为 2173.29 万公顷,占全国湿地总面积的 40.68%^[8]。中国沼泽湿地在陆地生态系 统碳循环与调节局地气候等方面发挥着重要的作用。已有一些学者对中国部分地区沼泽湿地植被覆盖度变 化及其对气候变化的响应展开了研究,例如杨瑞瑞等^[9]通过像元二分模型估算了若尔盖草本沼泽湿地植被 覆盖度,并对其与气象因子间的响应展开研究,发现若尔盖草本沼泽植被覆盖度对气温与降水均呈现出显著 的正相关性。王伟泽等^[10]通过像元二分模型对扎龙沼泽湿地植被覆盖度进行估算,并对其与气象要素响应 方面展开分析,发现温度升高对扎龙沼泽湿地核心区植被覆盖度有促进作用,降水对扎龙沼泽湿地植被覆盖 度无明显影响。然而,以往研究多侧重于某一区域,对全国沼泽湿地植被覆盖度的时空变化及其对气象因子 的响应方面缺乏研究。已有研究表明,由于不同地区植被响应气候的机理不同,沼泽湿地植被覆盖度对气象 因子的响应在不同地区存在一定差异^[2]。为揭示生态系统植被对气候变化响应机理,有必要对比中国不同 地区内沼泽湿地植被覆盖度对气象因子响应的差异性,进一步明确中国沼泽湿地植被覆盖度的时空变化及其 对气候响应的机理。

本文基于中国沼泽湿地分布数据集、MODIS NDVI 植被数据与气象数据分析了中国及不同分布区沼泽湿 地植被覆盖度时空变化特征及其对气候变化的响应。明确中国沼泽湿地植被覆盖度时空变化特征及其对气 候变化的响应能够为评估中国沼泽湿地固碳潜力,揭示湿地植被与气候变化的关系机理提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

中国沼泽湿地主要分布在东北地区、内蒙古地区、 青藏高原地区以及长江中下游地区(图1)。东北地区 及内蒙古地区东部属于典型的温带季风气候,夏季温和 湿润,冬季寒冷干燥^[11],在该气候类型下孕育了大面积 的沼泽湿地。青藏高原地区属于高原山地气候,终年干 冷^[12],其中草本沼泽、沼泽草甸、内陆盐沼是主要的沼 泽类型。

1.2 数据及预处理

本研究所采用的气象数据是由国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/en)提供的 2001—





2022年中国逐月降水、平均温度、平均最高温度及平均最低温度数据^[13],其空间分辨率为1km。该数据集是 根据 CRU 发布的全球 0.5°气候数据集以及 WorldClim 发布的全球高分辨率数据集,通过 Delta 空间降尺度方 案在中国地区降尺度生成,该数据集已经通过严格的质量检验^[14—16]。根据已有研究,本文将中国沼泽湿地植 被生长季定义为 5—9 月^[1],将 5—9 月降水量求和同时将 5—9 月平均温度、最高温度与最低温度求平均获取 生长季降水及气温值,得到长时间序列的生长季气象数据集。本研究所采用的沼泽分布数据是由中国科学院 东北地理与农业生态研究所提供的 2015年中国沼泽分布数据,该数据集已经通过野外准确性验证^[17]。

本研究所采用的 NDVI 数据来自于美国国家航空航天局提供的 2001—2022 年 MOD13Q1 级植被指数产品(https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov)该数据集空间分辨率为 250m,时间分辨率为 16d,并已经通过质量检测^[18]。为减少大气、云、太阳高度角等不确定性因素的影响,本研究通过最大值合成法将逐旬 NDVI 数据合成为逐月数据,根据像元二分模型^[1,9],采用 5%与 95%的 NDVI 值分别作为完全裸露无植被覆盖像元值与纯植被像元值^[1,19—20],并利用合成的逐月 NDVI 数据集计算逐月沼泽湿地植被覆盖度(Fraction of Vegetation Cover, FVC),并将 5—9月 FVC 值求平均获取生长季 FVC 值,得到长时间序列的生长季沼泽湿地植被覆盖度数据集。

1.3 研究方法

1.3.1 植被覆盖度计算

本研究利用像元二分模型计算 2001—2022 年中国沼泽湿地生长季逐像元 FVC 值,计算公式如下^[21]:

式中,NDVI_i表示第*i*年生长季或生长季内逐月 NDVI 值;NDVI_{soil}表示完全裸露无植被覆盖时的 NDVI 像元值; NDVI_{veg}表示纯植被时的 NDVI 像元值。

1.3.2 趋势分析法

本研究利用趋势分析法分析 2001—2022 年中国沼泽湿地生长季 FVC 及气象因子变化趋势,并得出逐像 元 FVC 与气象因子的变化趋势值,计算公式如下^[22]:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{\left(n \sum_{i=1}^{n} iX_{i}\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} X_{i}\right)}{n \sum_{i=1}^{n} i^{2} - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^{2}}$$

式中,*n*为研究时间序列长度;*i*为年份序号;*X_i*为第*i*年的生长季 FVC 值或气象因子值; θ_{slope} 为各个像元 FVC 或气象因子变化趋势的斜率,若 θ_{slope} 为正值,则表示该像元生长季 FVC 或气象因子的变化为上升趋势,若 θ_{slope} 为负值,则表示该像元生长季 FVC 或气象因子的变化为下降趋势,若 θ_{slope} 值为0,则表示该像元生长季 FVC 或气象因子的变化为下降趋势,若 θ_{slope} 值为0,则表示该像元生长季 FVC 或气象因子无明显变化趋势。

1.3.3 相关分析

本研究通过皮尔逊相关性分析对 FVC 与气象因子之间的相关性进行计算,计算公式如下^[22]:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})}}$$

式中, *R_{xy}*为相关系数, 正代表 FVC 与气象因子之间为正相关, 反之则为负相关; *n* 为研究时间序列长度; *x_i*为研 究时间序列内某年份的 FVC 值, *x* 为研究时间序列内的 FVC 平均值; *y_i*为研究时间序列内某年份某气象因子 的平均值, *y* 为研究时间序列内的某气象因子平均值。

2 结果与分析

2.1 中国沼泽湿地生长季 FVC 时空变化特征

2001—2022年,中国沼泽湿地植被生长季平均FVC约为58.49%,总体呈现极显著上升趋势(P<0.01),上升趋势为2.5%/10a(图2)。东北地区、内蒙古地区、青藏高原地区沼泽湿地生长季FVC多年平均值从大到小排序为:东北地区(75.58%)>内蒙古地区(63.29%)>青藏高原地区(47.77%)。三个分区内沼泽湿地生长季FVC均呈现极显著上升趋势(P<0.01),其中东北地区沼泽湿地生长季FVC上升趋势最大(0.04/10a),青藏高原地区沼泽湿地生长季FVC上升趋势最大(0.04/10a),青藏高原地区沼泽湿地生长季FVC上升趋势最小(0.013/10a)。在植被覆盖度变化趋势的空间分布上,发现沼泽湿地生长季FVC增加趋势最明显地区集中在东北地区西部松嫩平原,而生长季FVC呈现下降趋势的地区集中在青藏西南部地区(图3)。

2.2 中国沼泽湿地植被生长季 FVC 与气象因子的相关性

为探究气候变化对中国沼泽湿地生长季 FVC 的影响,本研究分析了生长季降水、平均温度、最高温度、最低温度变化趋势(图4;表1),以及其与中国平均沼泽湿地生长季 FVC 的相关性(图5、图6;表2)。研究结果表明:2001—2022 年中国沼泽湿地分布区生长季降水呈现极显著增加趋势(6.93mm/10a;P<0.01),最高温度无显著变化,最低温度以 0.20℃/10a 的趋势显著上升(P<0.05)。在变化趋势的空间分布上,中国沼泽湿地生长季 FVC 增加趋势最大的区域位于东北地区西部松嫩平原(图3),下降趋势最大的区域位于青藏西南部地区。在中国不同地区,东北地区(13.77mm/10a)与内蒙古地区(10.95mm/10a)生长季降水呈现出极显著上升趋势(P<0.01),青藏高原地区生长季气象因子总体呈现出不显著的上升趋势(P>0.05)。其中东北地区 6、8、9月降水与7月最高温度和最低温度呈现出显著上升趋势;内蒙古地区8、9月降水与7、9月最低温度呈现出显著的下降趋势;青藏高原地区6月最低温度上升趋势显著(表1)。

在相关性方面,2001—2022年中国沼泽湿地生长季 FVC 与生长季降水、平均温度及最低温度总体均呈现 正相关性(图5),与生长季最高温度呈现出负相关性,其中与生长季降水及最低温度的相关性分别达到了极 显著(P<0.01)与显著水平(P<0.05)。在不同月份,6—9月降水及7、9月最低温度均与中国沼泽湿地生长季 FVC 呈现显著的正相关性(表 2)。在中国不同地区,发现东北地区、内蒙古地区和青藏高原地区沼泽湿地生 长季 FVC 与生长季降水均呈现显著正相关性(图 6),其中在内蒙古地区正相关性达到极显著水平(P<0.01); 青藏高原地区沼泽湿地生长季 FVC 与生长季最高温度和最低温度均呈现显著正相关性,其中与生长季最低 温度的相关性达到极显著水平(P<0.01)。在生长季不同月份内,东北地区7、9月最低温度与FVC间呈现出



图 2 2001—2022 年中国、东北地区、内蒙古地区及青藏高原地区沼泽湿地生长季 FVC 变化

Fig.2 Changes in marshes growing season FVC in China, Northeast region, Inner Mongolia region, and Tibetan plateau region from 2001 to 2022



图 3 2001—2022 年中国沼泽湿地生长季 FVC 多年平均空间分布及 FVC 变化趋势

Fig.3 Multi-year average spatial distribution and changing trend of FVC during the growing season of marshes in China from 2001 to 2022 FVC:植被覆盖度 Fraction of vegetation cover

2647

显著的正相关性(表 2);内蒙古地区 6—9 月降水及 9 月最低温度与对应月份 FVC 均呈显著正相关性,8 月最高温度与 8 月 FVC 间呈现出显著的负相关性;青藏高原地区 7、8 月降水、7—9 月最低温度与 9 月最高温度均与对应月份 FVC 间呈现出显著的正相关性。



图 4 中国沼泽湿地分布区生长季降水、平均温度、最高温度、最低温度变化趋势空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of trends in growing season precipitation, average temperature, maximum temperature, and minimum temperature in marshes distribution areas in China

时间 Time	气象因子 Meteorological factor	中国 China	东北地区 Northeast region	内蒙古地区 Inner Mongolia region	青藏高原地区 Tibetan plateau region
生长季	降水/(mm/10a)	6.93 **	13.77 **	10.95 **	1.22
Growing season	平均温度/(℃/10a)	0.10	0.00	0.00	0.14
	最高温度/(℃/10a)	0.00	-0.17	-0.22	0.12
	最低温度/(℃/10a)	0.20 *	0.16	0.22	0.17
5月 May	降水	1.02	3.48	-0.83	1.09
	平均温度	0.12	-0.08	0.02	0.21
	最高温度	0.12	-0.07	0.05	0.17
	最低温度	0.12	-0.09	-0.01	0.26

表 1 2001—2022 年中国及不同沼泽湿地分布区气象因子变化趋势 Table 1 Trends in meteorological factors in marshes distribution areas in China and different regions from 2001 to 2022

续表					
时间 Time	气象因子 Meteorological factor	中国 China	东北地区 Northeast region	内蒙古地区 Inner Mongolia region	青藏高原地区 Tibetan plateau region
6月 June	降水	8.42 *	20.17 *	8.37	3.12
	平均温度	-0.07	-0.55	-0.21	0.25
	最高温度	-0.19	-0.80	-0.36	0.18
	最低温度	0.06	-0.29	-0.07	0.30 *
7月 July	降水	5.83	1.16	16.47	0.99
	平均温度	0.31	0.62 **	0.34	0.03
	最高温度	0.31	0.68 *	0.27	0.04
	最低温度	0.30	0.56 *	0.41 *	0.01
8月 August	降水	10.73 *	23.42*	18.91 *	-0.75
	平均温度	-0.02	-0.16	-0.33	0.19
	最高温度	0.02	0.41	-0.83 *	0.25
	最低温度	0.16	0.09	0.16	0.13
9月 September	降水	8.64 **	20.62 **	11.86 *	1.64
	平均温度	0.16	0.16	0.19	0.04
	最高温度	-0.06	-0.22	-0.22	-0.05
	最低温度	0.38 *	0.55	0.60 *	0.13

** 在 0.01 水平上极显著,* 在 0.05 水平上显著

表 2 2001—2022 年中国及不同分区沼泽湿地生长季内逐月 FVC 与逐月气象因子的相关性

Table 2Correlation between monthly FVC during the growing season and monthly climatic factors in China and different regions from 2001to 2022

时间 Time	气象因子 Meteorological factor	中国 China	东北地区 Northeast region	内蒙古地区 Inner Mongolia region	青藏高原地区 Tibetan plateau region
5月 May	降水	0.27	0.28	0.25	0.35
	平均温度	0.08	-0.08	0.01	0.22
	最高温度	0.02	-0.15	-0.09	0.15
	最低温度	0.16	0.06	0.16	0.27
6月 June	降水	0.53 *	0.35	0.51 *	0.07
	平均温度	0.02	-0.18	-0.14	0.46 *
	最高温度	-0.21	-0.22	-0.29	0.29
	最低温度	0.39	-0.06	0.22	0.33
7月 July	降水	0.58 **	0.09	0.72 **	0.48 *
	平均温度	0.38	0.56 **	0.00	0.47 *
	最高温度	0.06	0.40	-0.32	0.17
	最低温度	0.66 **	0.57 **	0.35	0.71 **
8月 August	降水	0.56 **	0.23	0.51 *	0.64 **
	平均温度	-0.18	0.06	-0.38	0.18
	最高温度	-0.36	-0.12	-0.52 *	-0.09
	最低温度	0.15	0.27	-0.03	0.51 *
9月 September	降水	0.72 **	0.29	0.58 **	-0.11
	平均温度	0.42	0.36	0.19	0.58 **
	最高温度	0.03	-0.01	-0.25	0.56 **
	最低温度	0.67 **	0.49 *	0.58 **	0.43 *

** 在 0.01 水平上极显著,* 在 0.05 水平上显著



图 5 2001—2022 年中国及不同地区沼泽湿地生长季平均 FVC 与生长季气象因子的相关性

Fig.5 Correlation between average FVC of marshes during the growing season and meteorological factors in China and different regions from 2001 to 2022

*表示 P<0.05; **表示 P<0.01



图 6 中国沼泽湿地植被生长季 FVC 与生长季降水、平均温度、最高温度和最低温度相关系数空间分布

Fig.6 Spatial distribution of correlation coefficients between marshes vegetation growing season FVC and growing season precipitation, average temperature, maximum temperature, and minimum temperature in China

FVC:植被覆盖度 Fraction of vegetation cover

3 讨论

3.1 中国沼泽湿地生长季 FVC 的变化

2001—2022年中国沼泽湿地生长季 FVC 多年均值为 58.49%,东北地区、内蒙古地区、青藏高原地区沼泽 湿地生长季 FVC 多年均值分别为 75.58%、63.29%和 47.77%。Ma 等^[23]研究发现中国温带草甸生长季多年平 均 FVC 为 65.10%,本研究所得到的内蒙古地区沼泽湿地生长季多年平均 FVC 值略低于 Ma 等^[23]的研究结 果,分析其原因可能是由于 Ma 等的研究对象为中国温带草甸植被覆盖度,其研究范围主要为内蒙古地区的 东部^[23],与内蒙古地区西部相比该地区气候较为湿润,更能满足植被生长所必需的水热条件,植被覆盖度较 高。而本研究的研究区域包括内蒙古地区西部植被覆盖度较低的地区,这可能是导致本研究结果略低于 Ma 等研究结果的原因。在生长季 FVC 变化方面,东北地区、内蒙古地区和青藏高原地区分别以 0.04/10a、0.038/ 10a 和 0.013/10a 的趋势增加。Shen 等^[1]、王瑾等^[24]和郭建晓等^[25]发现东北地区、内蒙古地区与青藏高原地 区植被覆盖度在过去 20 年不断增加,本文通过对生长季沼泽湿地植被覆盖度的分析,进一步证实了东北地 区、内蒙古地区与青藏高原地区生长季沼泽湿地植被覆盖度明显提高。

3.2 中国沼泽湿地生长季 FVC 对气象因子的响应

本文分析了中国及其不同地区沼泽湿地生长季 FVC 对气象因子的响应,研究发现 2001—2022 年中国沼 泽湿地生长季 FVC 与生长季降水呈现显著的正相关性(图 5, P<0.01),尤其在相对干旱的东北地区西部、内 蒙古地区以及青藏地区,生长季降水与沼泽湿地生长季 FVC 呈显著的正相关性,这一结果表明,在中国半干 旱的沼泽湿地分布区,生长季降水的增加可能提高植物水分利用效率并促进植被生长^[8],进而能够增加沼泽 植被覆盖度。此外,本文发现生长季最高温度和最低温度的升高对中国及其内部分区沼泽湿地生长季 FVC 具有不对称影响,白天最高温度与夜间最低温度的升高均能促进沼泽湿地 FVC 的增加,但夜间最低温度的升 高对中国及其内部分区沼泽湿地 FVC 增加的促进作用更为显著。植物由于夜间升温会使呼吸增强并消耗大 量有机质,可能会刺激植物第二天光合作用的增强,进而促进植物生长,这一现象被称为补偿效应^[2]。已有 研究表明,水分与养分充足的区域容易发生补偿或超补偿效应(即植物通过促进光合作用补偿的有机质超过 了夜晚呼吸增强所消耗的有机质)^[2],因此,尽管夜间最低温度的升高能够增强叶片在夜间的呼吸作 用^[26-27],但由于湿地水分与养分条件充裕,可能会通过促进光合作用发生超补偿作用,促进植被的生长^[28], 这可能解释了生长季夜晚最低温度的上升促进沼泽湿地植被 FVC 增加的能力高于白天最高温度的原因。

相关性结果分析发现,生长季降水能够显著促进东北地区与内蒙古地区沼泽湿地 FVC 升高,生长季最低 温度能够显著促进青藏高原地区 FVC 升高。在东北地区,生长季降水的增加一方面可能会导致季节性沼泽 面积的增加^[1],另一方面会为沼泽植被生长提供充足水分,进而促进一定区域 FVC 的升高。在干旱半干旱的 内蒙古地区,水分是沼泽湿地植被生长的主要限制性因素^[1,28-29]。生长季降水量的升高能够提高植被的水 分利用效率^[23,28],进而促进内蒙古地区 FVC 的升高。与此同时,在内蒙古地区,生长季 FVC 与生长季最高温 度呈现出负相关性,表明生长季最高温度的增加会导致植被覆盖度降低,这可能是由于白天增温可能导致蒸 发量增加并减少土壤有效水分进而抑制植被生长^[23]。在青藏高原地区,生长季降水、平均温度与最低温度的 升高能显著增加该地区沼泽湿地植被覆盖度,其中最低温度的促进作用更为显著,这可能是由于青藏高原地 区海拔较高,夜晚最低温度的升高能有效减少霜冻及低温冻害,进而促进沼泽植被的生长^[30]。

为了进一步分析气候变化对沼泽湿地生长季 FVC 的影响,本文对中国沼泽湿地生长季内逐月植被覆盖 度与气象因子间的相关性进行分析,研究结果表明,在降水影响方面,青藏高原地区 7、8 月降水与 FVC 间的 正相关性显著,其原因可能是 7、8 月正处于青藏高原地区植被生长旺期,植被生长对水分的需求量较大^[30], 7、8 月降水的增加能够促进植被的生长,从而提高青藏高原地区植被覆盖度。

在白天最高温度影响方面, 青藏高原地区 9 月最高温度与 FVC 呈现出显著的正相关性(P<0.05), 表明 9 月最高温度的升高对青藏高原地区植被覆盖度升高具有促进作用。其原因可能是 9 月正处于青藏高原地区

45 卷

植被生长末期且气温相对较低,白天温度的上升通过提高光合作用酶的活性提高了植物的光合作用^[2,31],延缓了植被的衰老进程,进而促进了植被覆盖度的升高。与之相反,内蒙古地区9月最高温度与FVC负相关性显著(P<0.05),表明9月最高温度的升高对内蒙古地区植被生长起抑制作用。这可能是由于内蒙古地区绝大部分为干旱半干旱地区,最高温度的升高使得内蒙古地区蒸发量增加,降低植被的水分利用效率^[23,28],导致植被覆盖度降低。

在夜晚最低温度影响方面,青藏高原地区 7、8 月最低温度与 FVC 的相关性达到显著水平,可能是由于青藏高原地区 7、8 月水热充足,最低温度的升高使沼泽湿地分布区植被夜间补偿作用更为显著,进而促进植被覆盖度的增加^[1]。东北地区、内蒙古地区与青藏高原地区 9 月最低温度与 FVC 间的相关性均达到显著水平, 其原因可能是由于 9 月最低温度的升高可能通过减少霜冻及低温冻害以降低低温对植物组织器官生理机能的损害^[32],从而提高沼泽植被覆盖度。

3.3 中国沼泽湿地分布区气象因子的变化

结合生长季气象因子变化趋势及其与生长季沼泽湿地 FVC 间的相关性,本文进一步解释了中国沼泽湿地分布区生长季 FVC 的变化。2001—2022 年中国沼泽湿地分布区生长季降水呈现极显著增加趋势,且生长季降水与生长季 FVC 呈极显著正相关性,因此我们可以得出生长季降水的增加可能是中国沼泽湿地植被生长季 FVC 总体呈现增加的一个主要原因。

中国沼泽湿地生长季 FVC 增加趋势最大的区域位于东北地区西部松嫩平原(图 3)。松嫩平原生长季降水呈现出上升趋势(图 4),且松嫩平原沼泽湿地生长季 FVC 与生长季降水呈现正相关性(图 6),因此生长季 降水量的显著增加可能也是该地区沼泽湿地生长季 FVC 上升的重要因素,这与 Wang 等^[33]生长季降水量的 增加能够促进松嫩平原沼泽湿地植被生长的结论一致。中国沼泽湿地生长季 FVC 下降趋势最大的区域位于 青藏西南部地区(图 3),青藏西南部地区生长季平均温度和最高温度呈现出上升趋势(图 4),且青藏西南部 地区沼泽湿地生长季 FVC 与生长季平均温度和最高温度呈现出负相关性(图 6),因此生长季内温度尤其白 天最高温度的上升是青藏西南部地区植被覆盖度下降的主要因素。

在不同地区,东北地区、内蒙古地区与青藏高原地区沼泽湿地生长季 FVC 主要呈现出上升趋势,结合相 关结果分析(表 2)发现,生长季降水呈现出极显著上升趋势,且东北地区与内蒙古地区生长季降水与 FVC 间 的正相关性显著,因此生长季降水是东北地区与内蒙古地区植被覆盖度升高的主要因素。内蒙古地区 6—9 月降水与 FVC 呈现出显著正相关性,其中 8、9 月降水呈现出显著上升趋势(表 1),可以得出 8、9 月降水的显 著上升可能是导致沼泽湿地植被覆盖度升高的主要原因。青藏高原地区 7—9 月最低温度与 FVC 正相关性 达到显著水平,且最低温度在总体上呈现出上升趋势,因此 7—9 月最低温度的上升可能是青藏高原地区沼泽 湿地植被覆盖度的升高的主要原因。

3.4 研究不足及未来展望

本研究目前还可能存在一定的不足。首先,本研究所用的 FVC 数据是基于 NDVI 数据计算得出,NDVI 数据可能会受到云、大气及太阳高度角等因素的影响,遥感数据自身的不确定性可能会对本研究的结果产生 一定影响^[1]。其次,本文采用的沼泽湿地分布图为 2015 年的沼泽湿地分布数据集,由于缺少连续的中国沼泽 湿地分布数据,研究期间沼泽湿地的变化可能也会对研究结果产生一定影响。此外,除了温度与降水,其他气 象要素及人类活动也可能会影响沼泽湿地植被覆盖度。因此,人类活动和其他气象因子对沼泽湿地植被的影 响还需进一步探究。

4 结论

2001—2022年,中国沼泽湿地生长季 FVC 总体呈显著增加趋势(0.025/10a)。沼泽湿地植被生长季 FVC 增加趋势最显著的区域为东北地区西部松嫩平原,下降趋势最显著的区域为青藏西南部地区。降水与气温对中国沼泽湿地植被 FVC 的影响具有显著的空间异质性,白天与夜晚温度对生长季沼泽湿地 FVC 具有不对称

的影响。在东北地区与内蒙古地区,沼泽湿地生长季 FVC 主要受生长季降水的影响。生长季夜间温度的升高能够增加内蒙古地区沼泽湿地 FVC,但生长季白天温度的升高会降低内蒙古地区沼泽湿地 FVC。生长季最低温度的升高对青藏高原地区沼泽湿地生长季 FVC 具有显著的增加作用。尤其9月夜间温度的升高能显著促进中国沼泽湿地植被覆盖度的增加。在全球气候变化背景下,本研究结果有助于预测中国沼泽湿地植被覆盖度的变化,并为评估中国沼泽湿地固碳潜力提供一定科学依据。

参考文献(References):

- [1] Shen X J, Xue Z S, Jiang M, Lu X G. Spatiotemporal change of vegetation coverage and its relationship with climate change in freshwater marshes of Northeast China. Wetlands, 2019, 39(3): 429-439.
- [2] 吴丽媛,神祥金,刘奕雯,马蓉,张佳琦,丁辰,吕宪国,姜明.青藏高原草本沼泽植被净初级生产力时空变化及其对气候变化的响应. 生态学报, 2024, 44(5): 2115-2126.
- [3] 王延吉,神祥金,吕宪国. 1980—2015 年东北沼泽湿地景观格局及气候变化特征. 地球与环境, 2020, 48(3): 348-357.
- [4] 刘奕雯,张佳琦,王延吉,神祥金,吕宪国,姜明.三江平原沼泽湿地归一化植被指数分布特征及其变化分析.湿地科学,2022,20(5): 728-732.
- [5] 高璐, 商颖. 浅谈湿地在生态环境修复中的作用. 资源节约与环保, 2022(7): 28-31.
- [6] 阿卜杜热合曼・吾斯曼,玉素甫江・如素力,王雪梅,仇忠丽,买合木提江・维吉旦,陈世雪.博斯腾湖流域草地植被覆盖度时空格局 变化及影响因素.草业科学,2023,40(6):1518-1531.
- [7] 王亚琼,高曼莉,罗劲松,徐莹梅,徐伟,卢毅敏. 2001—2021 年巢湖流域植被覆盖时空变化及驱动分析.长江科学院院报,2024,41
 (6):58-68.
- [8] 姜明, 武海涛, 白军红. 湿地生态学. 北京: 高等教育出版社, 2023: 22.
- [9] 杨瑞瑞,易桂花,张廷斌,李景吉,别小娟,夏杰,申一林. 2000—2015 年若尔盖地区植被覆盖度变化及气候因子驱动分析. 草业科学, 2018, 35(12): 2822-2835.
- [10] 王伟泽, 胡鹏, 王建华, 杨泽凡, 刘欢, 杨钦. 扎龙湿地植被覆盖度及其分布结构对水文气象要素的响应. 水生态学杂志, 2020, 41(5): 89-97.
- [11] Zheng Y H, Pancost R D, Naafs B D A, Li Q Y, Liu Z, Yang H. Transition from a warm and dry to a cold and wet climate in NE China across the Holocene. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 493: 36-46.
- [12] Yang K, Wu H, Qin J, Lin C G, Tang W J, Chen Y Y. Recent climate changes over the Tibetan Plateau and their impacts on energy and water cycle: A review. Global and Planetary Change, 2014, 112: 79-91.
- [13] 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.
- [14] Peng S Z, Gang C C, Cao Y, Chen Y M. Assessment of climate change trends over the Loess Plateau in China from 1901 to 2100. International Journal of Climatology, 2018, 38(5): 2250-2264.
- [15] Ding Y X, Peng S Z. Spatiotemporal trends and attribution of drought across China from 1901 2100. Sustainability, 2020, 12(2): 477.
- [16] Peng S Z, Ding Y X, Wen Z M, Chen Y M, Cao Y, Ren J Y. Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011 - 2100. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 233: 183-194.
- [17] Shen X J, Liu B H, Jiang M, Wang Y J, Wang L, Zhang J Q, Lu X G. Spatiotemporal change of marsh vegetation and its response to climate change in China from 2000 to 2019. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2021, 126(2): e2020JG006154.
- [18] Wang Y J, Shen X J, Jiang M, Tong S Z, Lu X G. Spatiotemporal change of aboveground biomass and its response to climate change in marshes of the Tibetan Plateau. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 102: 102385.
- [19] Tong S Q, Zhang J Q, Ha S, Lai Q, Ma Q Y. Dynamics of fractional vegetation coverage and its relationship with climate and human activities in Inner Mongolia, China. Remote Sensing, 2016, 8(9): 776.
- [20] 符帆,赵德轩,张贝尔,朱竹墨,陆海岳,杨灿灿,赵明伟.我国不同气候带多年植被覆盖度时空变化特征及其地形效应.环境科学, 2024, doi:10.13227/j.hjkx.202407184.

http://www.ecologica.cn

[21]	志远, 张圣微, 王怡璇. 基于 GEE 的 1982—2021 年内蒙古地区植被覆盖度时空动态及气候响应特征. 农业工程学报, 2023,	39(15):
	-102.	

- [22] 神祥金,张佳琦,吕宪国.青藏高原沼泽湿地植被 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应. 生态学报, 2020, 40(18); 6259-6268.
- [23] Ma R, Zhang J Q, Shen X J, Liu B H, Lu X G, Jiang M. Impacts of climate change on fractional vegetation coverage of temperate grasslands in China from 1982 to 2015. Journal of Environmental Management, 2024, 350: 119694.
- [24] 王瑾. 内蒙古自治区植被覆盖度变化的驱动因素与气候因子响应[D]. 徐州:中国矿业大学, 2020.
- [25] 郭建晓, 桑会勇, 翟亮. 青藏高原植被覆盖度时空变化特征及其驱动因素. 生态学杂志, 2023, 42(11): 2665-2674.
- [26] Turnbull M H, Murthy R, Griffin K L. The relative impacts of daytime and night-time warming on photosynthetic capacity in *Populus deltoides*. Plant, Cell & Environment, 2002, 25(12): 1729-1737.
- [27] Peng S S, Piao S L, Ciais P, Myneni R B, Chen A P, Chevallier F, Dolman A J, Janssens I A, Peñuelas J, Zhang G X, Vicca S, Wan S Q, Wang S P, Zeng H. Asymmetric effects of daytime and night-time warming on Northern Hemisphere vegetation. Nature, 2013, 501(7465): 88-92.
- [28] 马蓉, 夏春林, 张佳琦, 神祥金. 中国温带草原植被 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应. 生态学杂志, 2023, 42(2): 395-405.
- [29] 李霞,李晓兵,王宏,喻锋,余弘婧,杨华. 气候变化对中国北方温带草原植被的影响. 北京师范大学学报:自然科学版,2006,42(6): 618-623.
- [30] Shen M G, Piao S L, Chen X Q, An S, Fu Y H, Wang S P, Cong N, Janssens I A. Strong impacts of daily minimum temperature on the green-up date and summer greenness of the Tibetan Plateau. Global Change Biology, 2016, 22(9): 3057-3066.
- [31] 邢红爽,乌佳美,陈健,史作民.植物光合作用限制因素与植被生产力研究进展.生态学报,2023,43(12):5186-5199.
- [32] 神祥金,姜明,吕宪国,刘兴土,刘波,张佳琦,王宪伟,佟守正,雷光春,王升忠,仝川,范航清,田昆,王晓龙,胡远满,谢永宏,马 牧源,张树文,曹春香,王志臣.中国草本沼泽植被地上生物量及其空间分布格局.中国科学:地球科学,2021,51(8):1306-1316.
- [33] Wang Y J, Shen X J, Jiang M, Lu X G. Vegetation change and its response to climate change between 2000 and 2016 in marshes of the Songnen Plain, Northeast China. Sustainability, 2020, 12(9): 3569.