

DOI: 10.5846/stxb202003140533

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.

Shen X J, Zhang J Q, Lü X G. Spatio-temporal change of marshes NDVI and its response to climate change in the Qinghai-Tibet Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6259-6268.

# 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

神祥金\*, 张佳琦, 吕宪国

中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102

**摘要:** 基于 2000—2017 年逐旬 MODIS NDVI 数据和逐月气温、降水数据, 分析了青藏高原不同类型沼泽湿地植被生长季 NDVI 时空变化特征及其对气候变化的响应。研究结果表明: 青藏高原沼泽植被生长季多年平均 NDVI 自西北向东南逐渐增加; 沼泽植被生长季平均 NDVI 在 2000—2017 年总体呈现显著上升趋势 (0.010/10a), 生长季 NDVI 呈上升趋势的面积占整个研究区面积的 78.25%。青藏高原沼泽植被生长季 NDVI 与降水量总体上呈现弱的相关性, 表明降水并不是影响该地区沼泽植被生长的主要因素。青藏高原沼泽植被生长主要受气温影响, 气温升高能明显促进沼泽植被的生长。此外, 发现白天和夜晚温度升高对青藏高原沼泽植被生长具有不对称性影响, 其中夜晚增温对沼泽植被生长的促进效果更加显著。在全球白天和夜晚不对称增温的背景下, 白天和夜晚温度对青藏高原沼泽植被的不对称影响应当引起重视, 尤其是在利用模型模拟未来气候变化对该地区沼泽植被影响时。

**关键词:** 青藏高原; 沼泽; 植被; 气候变化; 响应

## Spatio-temporal change of marshes NDVI and its response to climate change in the Qinghai-Tibet Plateau

SHEN Xiangjin\*, ZHANG Jiaqi, LÜ Xianguo

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

**Abstract:** The Qinghai-Tibet Plateau is a sensitive region to global climate change, which has a large area of marshes wetland. As a core component of marsh ecosystems, marshes vegetation plays an important role in land surface energy exchange, biogeochemical cycle and hydrological cycle in the Qinghai-Tibet Plateau. Understanding the spatio-temporal change of marshes vegetation and its response to climate change can stimulate insights on the relationship between marshes vegetation and climate change, and provide evidence to guide wetland vegetation conservation and restoration in the Qinghai-Tibet Plateau. Based on the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) data, monthly precipitation, mean temperature, maximum temperature, and minimum temperature data, this study analyzed the spatio-temporal change of marshes NDVI and its response to climate change in the Qinghai-Tibet Plateau during the growing season from 2000 to 2017. The results showed that the long-term averaged growing season NDVI of marshes increased from northwest to southeast in the Qinghai-Tibet Plateau; the mean growing season NDVI of marshes showed an overall increasing trend (0.010/10a) from 2000 to 2017. The area where the mean growing season NDVI increased accounted for 78.25% of the entire study area. There was a weak correlation between the marshes NDVI and precipitation, indicating that precipitation may not be the main factor affecting the growth of marshes vegetation in the Qinghai-Tibet Plateau. There was a significant positive correlation

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (41971065); 国家重点研发计划专项 (2019YFC0409100); 中国科学院青年创新促进会项目 (2019235)

**收稿日期:** 2020-03-14; **修订日期:** 2020-07-15

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

between the growing season NDVI and mean temperature, maximum temperature and minimum temperature, which indicated that the growth of marshes vegetation was mainly affected by temperature in the Qinghai-Tibet Plateau, and the increase of temperature could obviously promote the growth of marshes vegetation. In addition, we found for the first time that the daytime and night-time warming had an asymmetric effect on the marshes vegetation in the Qinghai-Tibet Plateau. The correlation between the growing season NDVI and the minimum temperature was higher than the correlation between the growing season NDVI and the maximum temperature, indicating that the effect of night-time warming on the growth of marshes vegetation was more obvious in the Qinghai-Tibet Plateau. Under the background of global daytime and night-time asymmetric warming, more attention should be paid to the asymmetric effects of day and night temperature on the marshes vegetation in the Qinghai-Tibet Plateau, especially when we want to use the model to simulate the impact of future climate change on the marshes vegetation in this area.

**Key Words:** Qinghai-Tibet Plateau; marsh; vegetation; climate change; response

气候变化与生态系统关系密切,生态系统对气候变化的响应一直是全球变化研究的焦点<sup>[1]</sup>。植被作为生态系统的重要组成部分,对气候变化响应非常敏感<sup>[2-3]</sup>。目前关于植被对气候变化响应的研究多侧重在森林和草地生态系统,有关湿地植被对气候变化响应的研究相对较少<sup>[4-7]</sup>。作为全球三大生态系统之一,湿地具有独特的环境条件<sup>[8]</sup>,可能导致植被对气候变化响应与其他生态系统植被相比具有明显的差异<sup>[9-12]</sup>。明确湿地生态系统植被变化对气候变化的响应,对于全面了解生态系统与气候变化的关系具有重要意义。

青藏高原是全球气候变化的敏感区<sup>[13-15]</sup>,该地区集中分布着大量沼泽湿地。作为青藏高原沼泽湿地的主要组成部分,沼泽植被在陆地表面能量交换、生物地球化学循环和水文循环等方面起着重要的作用<sup>[16]</sup>。已有许多学者对青藏高原沼泽植被对气候变化的响应进行了研究,如杨玲莉<sup>[17]</sup>研究发现黄河源区沼泽植被与降水呈显著正相关,但与气温无显著相关性;李英年等<sup>[18]</sup>研究发现青藏高原海北高寒沼泽植被在气候暖干化的影响下,物种多样性增多;严晓瑜等<sup>[19]</sup>通过分析若尔盖高原沼泽植被与气温、地温、降水等气象因子的相关性,发现气温是影响该区植被生长的最关键因素;李宁云<sup>[20]</sup>研究发现青藏高原东北部沼泽湿地植被与平均温和降水均呈现极显著的相关性,其中与降水呈显著正相关。然而,以往上述研究多集中在局地或样地尺度,缺少对整个青藏高原沼泽植被对气候变化响应的研究。已有研究表明不同地区、不同类型沼泽湿地植被对气候变化的响应可能存在明显的差异<sup>[10,12]</sup>,因此青藏高原不同类型沼泽植被对气候变化的响应规律需进一步揭示。此外,已有研究发现白天最高温和夜晚最低温变化对青藏高原植被生长具有不同的影响。Peng 等<sup>[21]</sup>发现青藏高原植被生长季 NDVI 与生长季平均最高温和最低温均呈正的相关性;Shen 等<sup>[22]</sup>研究发现青藏高原草地植被 NDVI 与夏季平均最低温呈显著正相关,而与平均最高温呈显著负相关关系。在全球白天和夜晚不对称增温的背景下<sup>[23]</sup>,亟需探究白天和夜间升温分别对青藏高原沼泽植被的影响。

本文基于 2000—2017 年 MODIS NDVI 数据和气象数据,分析了青藏高原沼泽植被生长季(5—9 月) NDVI 时空变化特征及其与气象因子(降水、平均气温、平均最高温和平均最低温)的相关性。明确青藏高原沼泽植被 NDVI 时空变化特征及其对气候变化的响应,能为揭示沼泽植被与气候变化关系机理提供科学依据,并对青藏高原沼泽植被的预测及湿地植被保护具有重要的指导意义。

## 1 数据和方法

### 1.1 研究区

青藏高原位于中国西南部,范围在 73°—105°E 和 26°—40°N 之间,包括中国青海、甘肃、西藏、新疆等 6 个省区,总面积 250 万 km<sup>2</sup>。青藏高原气候特征表现为:气温较低,昼夜温差大,年降水量偏少,降水有显著的季节性差异。青藏高原生态系统类型多样,主要有森林、草原、沼泽和荒漠生态系统<sup>[24]</sup>。青藏高原沼泽种类有草本沼泽、灌丛沼泽、内陆盐沼、季节性咸水沼泽、沼泽化草甸、森林沼泽等。草本沼泽主要由水生和沼生的

草本植物构成;内陆盐沼以盐生植被为主要植被类型;季节性咸水沼泽只在部分季节维持浸湿或潮湿状况;沼泽化草甸多分布在地势低洼、排水不畅、土壤过分潮湿、通透性不良的地区,是草甸向沼泽转化的过渡类型<sup>[25]</sup>。本文以草本沼泽、沼泽化草甸、内陆盐沼和季节性咸水沼泽四种沼泽作为研究对象,其他几种沼泽由于所占面积很小,为了避免其统计结果的不准确性,故将其排除(图1)。

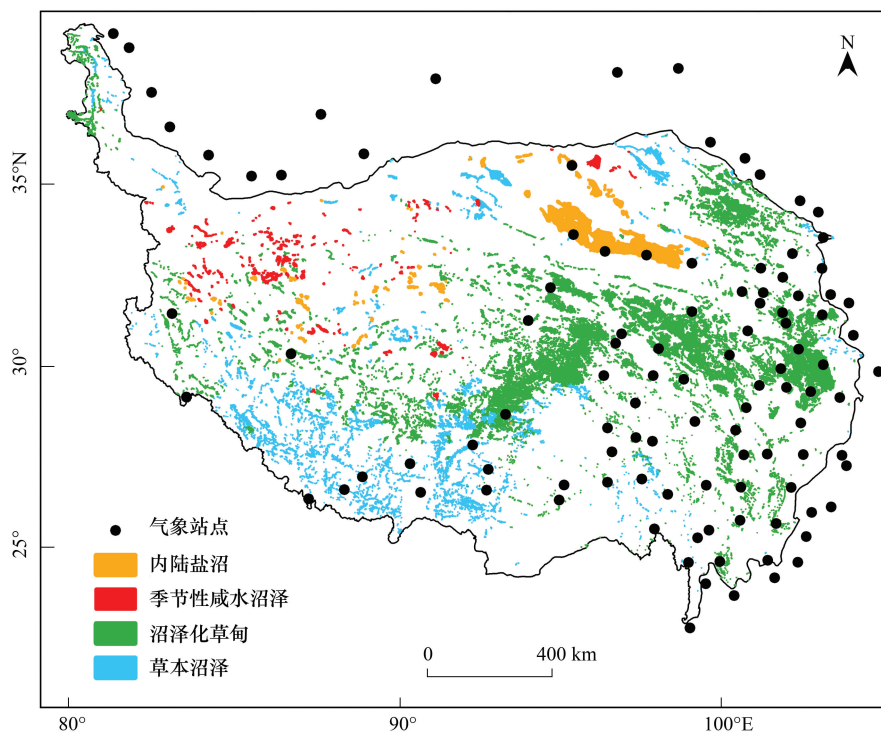


图1 青藏高原沼泽(中国湿地生态与环境数据中心提供)及气象站(国家气象科学数据中心提供)空间分布

Fig.1 Spatial distributions of marshes (provided by China wetland ecology and environment data center) and meteorological stations (provided by National Meteorological Information Center) in the Qinghai-Tibet Plateau

## 1.2 数据

本研究采用的气象数据是由国家气象中心提供的2000—2017年青藏高原地区106个站点的逐月降水、平均温、平均最高温和平均最低温数据。

本文采用的 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Normalized Difference Vegetation Index (MODIS NDVI) 数据,是由美国国家航空航天局提供的 MOD13Q1 级植被指数产品,时间范围为2000—2017年,空间分辨率为250米,时间分辨率为16天。本文利用最大值合成法<sup>[26]</sup>将逐旬NDVI数据合成为逐月数据,以减少云、大气、太阳高度角等不确定因素的影响。为了避免下垫面非植被信息对沼泽植被NDVI的干扰,参照以往青藏高原植被NDVI的阈值<sup>[27]</sup>,将NDVI值大于0的区域定为本文的研究区。本文利用各类型沼泽对应的研究区内所有像元的NDVI平均值来代表该类型沼泽植被的NDVI值<sup>[12]</sup>,并将5—9月NDVI值求平均得到生长季NDVI值。

沼泽分布数据是由中国湿地生态与环境数据中心提供的2010—2015年青藏高原沼泽矢量分布数据集,该数据集是利用美国Landsat卫星、中巴资源卫星等中高分辨率遥感影像作为主要数据源,建立的沼泽分类数据集。该数据集已采用遥感技术和地面验证相结合的方法,对数据进行人机交互判别解译,并通过了野外准确性验证<sup>[12]</sup>。

## 1.3 方法

### 1.3.1 趋势分析法

本文利用趋势分析法分析2000—2017年青藏高原沼泽植被生长季NDVI变化趋势,并基于ArcGIS软件

中的栅格计算器工具来计算逐像元植被 NDVI 的变化趋势值<sup>[28]</sup>, 计算公式如下<sup>[29]</sup>:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{\left( n \times \sum_{i=1}^n i \times \text{NDVI}_i \right) - \left( \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i \right)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left( \sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (1)$$

式中,  $n$  为研究的时间序列长度即为 18 年;  $i$  为年序号;  $\text{NDVI}_i$  为第  $i$  年的生长季 NDVI 值;  $\theta_{\text{slope}}$  为各个像元 NDVI 变化趋势的斜率, 若  $\theta_{\text{slope}}$  为正值, 则表示该像元生长季 NDVI 的变化为增加趋势, 反之则为减少趋势。

### 1.3.2 相关分析

基于 ArcGIS 的栅格计算器工具, 利用 NDVI 影像与插值得到的生长季的降水量、平均气温、平均最高温和平均最低温栅格影像, 分别计算青藏高原沼泽植被生长季 NDVI 与降水、平均气温、平均最高温和平均最低温的相关系数, 进而分析沼泽植被 NDVI 对气候变化的响应。计算公式如下<sup>[29]</sup>:

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

式中,  $R_{xy}$  为相关系数;  $n$  为研究时间段累计年数即为 18 年;  $x_i$  为某年份的某气象因子生长季的数值,  $\bar{x}$  为 18 年来某气象因子生长季的平均值;  $y_i$  为某年份的生长季 NDVI 均值;  $\bar{y}$  为 18 年来生长季 NDVI 均值。

### 1.3.3 多元线性回归分析

基于 SPSS 软件, 利用多元线性回归分析法来分析降水、平均温、平均最高温和平均最低温对沼泽植被 NDVI 的综合影响, 公式如下<sup>[30]</sup>:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 \quad (3)$$

式中,  $Y$  为沼泽植被生长季 NDVI,  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$  分别为生长季降水量、平均温、平均最高温和平均最低温,  $\beta_0$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta_4$  分别对应常数项、生长季降水量、生长季平均温、生长季平均最高温和生长季平均最低温的回归系数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 青藏高原沼泽植被生长季 NDVI 时空变化特征

青藏高原沼泽植被生长季平均 NDVI 在 2000—2017 年总体呈现显著上升趋势 (图 2), 上升趋势为 0.010/10a ( $P < 0.01$ )。草本沼泽、沼泽化草甸、内陆盐沼和季节性咸水沼泽植被生长季 NDVI 均呈显著上升趋势 ( $P < 0.05$ ), 其中内陆盐沼 NDVI 的增长趋势 (0.011/10a) 最大, 而草本沼泽 NDVI 增长趋势最小 (0.009/10a)。由图 2 可以看出, 青藏高原草本沼泽和沼泽化草甸的植被生长季 NDVI 年际间的变化波动较大, 而内陆盐沼和季节性咸水沼泽 NDVI 具有类似的年际间变化规律, 均呈现持续的上升趋势。

在空间分布上, 青藏高原沼泽植被生长季多年平均 NDVI 呈现从西北向东南逐渐升高的规律 (图 3), 四种沼泽植被生长季 NDVI 多年平均值按从大到小排序为: 沼泽化草甸 (0.44) > 草本沼泽 (0.26) > 内陆盐沼 (0.12) = 季节性咸水沼泽 (0.12)。在空间变化上, 青藏高原沼泽植被生长季 NDVI 呈增加趋势的面积 (78.25%) 明显大于呈减少趋势的面积 (21.75%), 其中青藏高原东北部的沼泽化草甸生长季 NDVI 增加最为明显, 沼泽植被 NDVI 呈减少趋势的地区分布在西藏东北部那曲县和聂荣县, 青海省西南部杂多县和曲麻莱县等地, 这些区域的沼泽类型主要为草本沼泽 (图 3)。

### 2.2 沼泽湿地植被生长季 NDVI 对气象因子的响应

青藏高原沼泽植被生长季 NDVI 与降水量总体呈现弱的正相关性 (表 1), 表明降水可能不是影响青藏高原沼泽植被生长的主要因素。生长季 NDVI 与降水呈正相关的区域占整个沼泽分布区的 54.89%, 主要集中在青藏高原西部的草本沼泽和季节性咸水沼泽分布区 (图 4), 其中季节性咸水沼泽植被生长季 NDVI 与降水

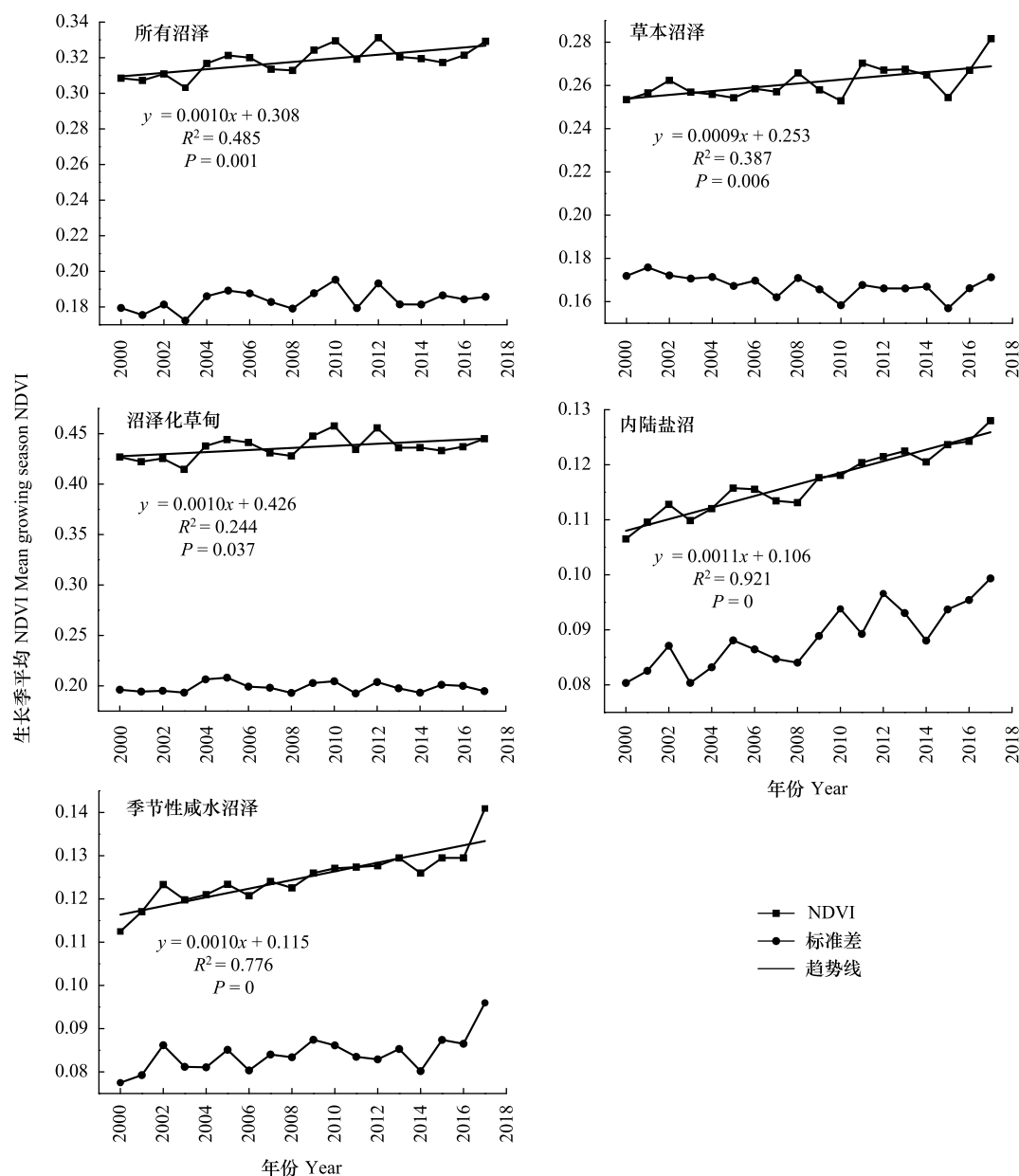


图 2 2000—2017 年青藏高原不同类型沼泽植被生长季 NDVI 变化

Fig.2 Variation of growing season NDVI for different types of marshes in the Qinghai-Tibet Plateau during 2000—2017

NDVI: 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index

的相关性通过了显著性检验 ( $P < 0.05$ ), 表明降水的增多可能会促进季节性咸水沼泽植被 NDVI 的增加。分析其原因可能是因为季节性咸水沼泽只在部分季节维持浸湿或潮湿, 由于植物在干旱季节的生长同样需要充足的水分, 因此降水的增加在一定程度上可能会促进季节性咸水沼泽植被的生长<sup>[25]</sup>。青藏高原沼泽植被生长季 NDVI 与降水呈负相关的区域占整个沼泽分布区的 45.11%, 主要分布在青藏高原中部的青海省的乌兰县、玛沁县、治多县, 沼泽植被类型主要为沼泽化草甸、内陆盐沼 (图 4)。青藏高原沼泽植被生长季 NDVI 与降水呈负相关的区域和沼泽植被 NDVI 与气温呈正相关的区域基本重合, 表明气温升高能促进这些地区沼泽植被的生长, 而降水的增多会导致植被 NDVI 的下降, 这是由于一方面降水的同时往往伴随着降温过程, 另一方面降水增多可能会引起霜冻或洪涝等灾害, 进而抑制植被生长<sup>[31]</sup>。

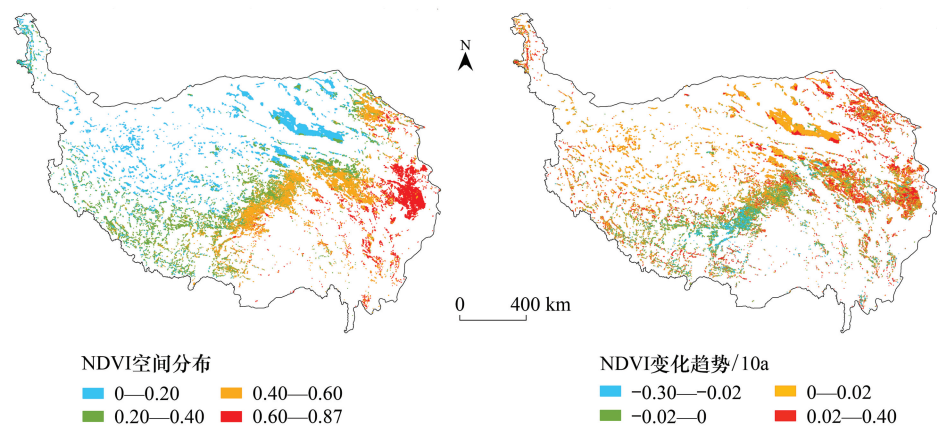


图3 2000—2017年青藏高原沼泽植被生长季NDVI空间分布及变化趋势/10a

Fig.3 Spatial distribution and trend (/10a) of growing season NDVI of marshes in the Qinghai-Tibet Plateau during 2000—2017

表1 青藏高原沼泽植被生长季平均NDVI与气象因子的相关性

Table 1 Correlation coefficients between the growing season NDVI and climate variables in marshes of the Qinghai-Tibet Plateau

| 相关系数<br>Correlation coefficients                   | 生长季降水<br>Growing season<br>precipitation | 生长季平均温<br>Growing season<br>mean temperature | 生长季平均最高温<br>Growing season<br>maximum temperature | 生长季平均最低温<br>Growing season<br>minimum temperature |
|----------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 沼泽 NDVI<br>NDVI of marshes                         | 0.02                                     | 0.70 **                                      | 0.61 **                                           | 0.81 **                                           |
| 草本沼泽 NDVI<br>NDVI of herbaceous marshes            | 0.39                                     | 0.29                                         | 0.20                                              | 0.44                                              |
| 沼泽化草甸 NDVI<br>NDVI of marsh meadow                 | -0.02                                    | 0.71 **                                      | 0.64 **                                           | 0.75 **                                           |
| 内陆盐沼 NDVI<br>NDVI of inland salt marshes           | -0.22                                    | 0.54 *                                       | 0.27                                              | 0.82 **                                           |
| 季节性咸水沼泽 NDVI<br>NDVI of seasonal saltwater marshes | 0.50 *                                   | 0.48 *                                       | 0.22                                              | 0.70 **                                           |

\*\* 在 0.01 水平上显著相关, \* 在 0.05 水平上显著相关; NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index

青藏高原沼泽植被生长季 NDVI 与生长季平均温、最高温和最低温均呈显著正相关 ( $P<0.01$ ) (表 1), 正相关区域占整个沼泽分布区的比例分别为 77.99%、70.25%、82.60% (图 4), 主要分布在除研究区南部的那曲县以外的大部分地区; 青藏高原沼泽植被生长季 NDVI 与平均温、最高温和最低温呈负相关的区域主要分布在研究区南部西藏的那曲县 (图 4)。沼泽化草甸、内陆盐沼、季节性咸水沼泽生长季 NDVI 与平均温均呈显著正相关 (表 1), 表明这三种类型沼泽植被生长季 NDVI 主要受气温影响, 生长季气温的升高可以促进沼泽植被的生长。这与神祥金等得出气温是影响高寒草甸草原植被生长季生长的主要因素, 温度的升高有利于植被生长的结论相一致<sup>[29]</sup>。但本文结果与 Shen 等<sup>[22]</sup>的研究结果有些不同, Shen 等指出青藏高原夏季植被 NDVI 与夏季平均最低温呈显著正相关, 与平均最高温呈显著负相关, 其原因可能是由于白天增温导致蒸发量增加和土壤水分有效性降低, 使植被不能获取充足的水分, 进而抑制了植被生长。与 Shen 等分析的是青藏高原所有草地生态系统植被有所不同, 本文的研究对象为沼泽植被, 与干旱的草地生态系统相比, 沼泽湿地具有相对充足的水分, 因此白天增温能提升光合作用酶的活性<sup>[32]</sup>, 进而促进光合作用<sup>[33]</sup>和沼泽植被的生长<sup>[34]</sup>。

沼泽植被生长季 NDVI 与最低温的相关性均要高于最高温, 其中沼泽化草甸、内陆盐沼、季节性咸水沼泽植被生长季 NDVI 与最低温相关性达到极显著水平 ( $P<0.01$ ), 而最高温仅与沼泽化草甸植被 NDVI 呈显著正相关 (表 1)。白天和夜晚温度变化对青藏高原沼泽植被生长具有不对称影响, 与白天增温相比, 夜晚温度升高对植被生长的促进作用更显著。本文结果与 Peng 等<sup>[21]</sup>得出的平均最低温的升高相比平均最高温更利于

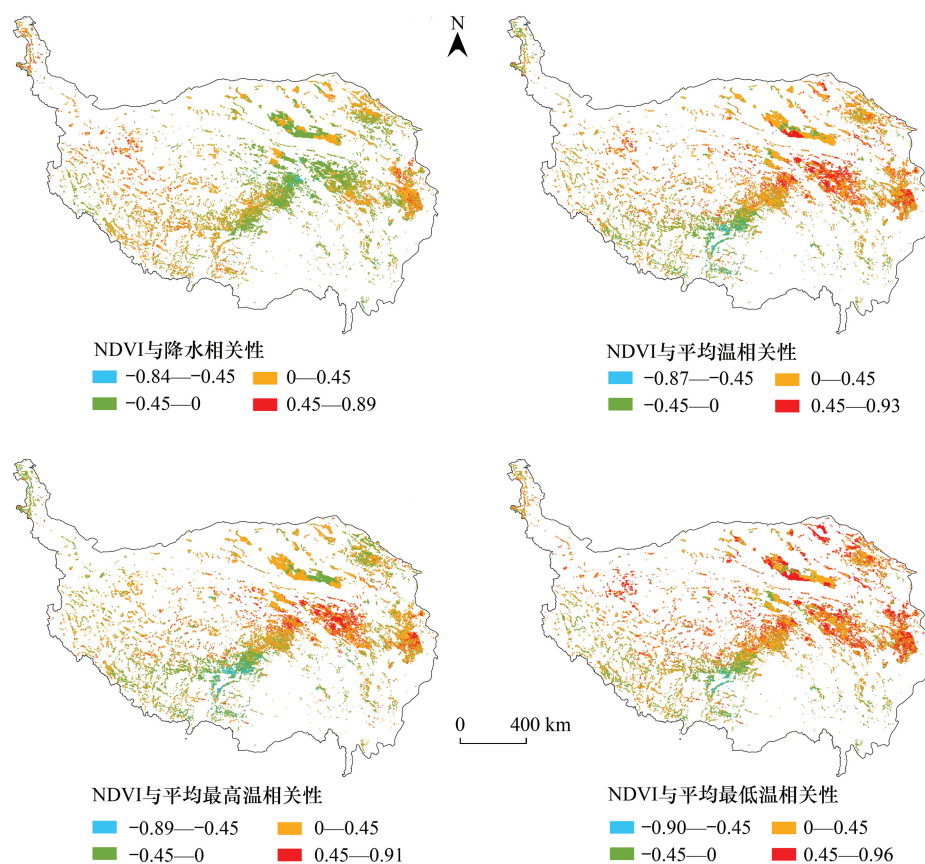


图4 青藏高原沼泽植被生长季 NDVI 与生长季降水、平均温、平均最高温和平均最低温相关系数空间分布

Fig.4 Spatial distributions of correlation coefficients between the growing season NDVI and precipitation, mean temperature, maximum temperature, and minimum temperature of marshes in the Qinghai-Tibet Plateau

青藏高原植被生长的结论基本相同。而本文的研究结果与 Shen 等关于青藏高原植被对气温响应的结果有所不同,Shen 等发现青藏高原草地植被生长季 NDVI 与白天最高温呈显著正相关,而与夜晚最低温呈显著负相关,其原因可能是由于夜间增温对促进植被呼吸作用的影响,比通过补偿效应促进植被光合作用的效果更为显著<sup>[35]</sup>。作为植被对逆境的一种适应,补偿效应是指植被在经历夜晚呼吸作用增强导致消耗较多的有机质后,可通过补偿和促进第二天的光合作用产生更多的有机质,进而使植被生长得到一定恢复的现象<sup>[36]</sup>。已有研究表明植被在比较丰富的可利用资源条件下,补偿效应能力较高<sup>[37]</sup>,有时甚至达到或超过未经胁迫下的情形,表现出明显的补偿或超补偿效应,而湿地充裕的水分正是超补偿性发生的最理想环境条件<sup>[38]</sup>。由于本文的研究对象是沼泽湿地,因此夜晚最低温度升高通过补偿效应促进沼泽植被生长的作用很可能比夜间增温导致的沼泽植被呼吸消耗作用更加显著,这可能是导致本文与 Shen 等研究结果不同的主要原因。

### 2.3 青藏高原沼泽湿地植被变化

对青藏高原沼泽植被 NDVI 与各气象因子进行多元线性回归分析(表2),结果同样表明青藏高原沼泽植被主要受气温影响( $P < 0.001$ ),生长季内气温的变化总体解释了 71.7% 的沼泽植被 NDVI 变化。与相关性分析结果相同,沼泽化草甸植被 NDVI 受生长季平均气温、最高气温和最低气温的影响,内陆盐沼植被 NDVI 主要受最高气温和最低气温的影响;而季节性咸水沼泽植被 NDVI 受生长季降水、平均气温和最低气温的共同影响(表2)。

为进一步解释青藏高原沼泽植被生长季 NDVI 的时空变化,本文计算了 2000—2017 年的青藏高原沼泽分布区气温和降水变化趋势。2000—2017 年,青藏高原草本沼泽和季节性咸水沼泽的生长季降水量总体呈

现上升趋势(表3,图5),而沼泽化草甸和内陆盐沼降水量呈现减少趋势。青藏高原沼泽区生长季平均温、最高温、最低温在2000—2017年均呈现上升趋势,且平均最低温增加幅度明显高于最高温。根据气象因子与NDVI之间的相关性结果,我们可以得出生长季内气温的升高很可能是导致青藏高原沼泽植被生长季NDVI增加的主要原因。沼泽化草甸与内陆盐沼生长季降水量的下降和平均最低温的升高,在一定程度上解释了沼泽化草甸与内陆盐沼植被生长季NDVI的增加。从空间上分析,青藏高原沼泽植被NDVI在2000—2017年显著增加,其中青藏高原东部地区NDVI增幅最大,主要沼泽类型为沼泽化草甸,青藏高原东部生长季平均最低温的升高也最为显著(图5),因此生长季内夜晚最低温的升高可能是这些地区沼泽植被NDVI增幅最大的原因。

表2 青藏高原沼泽植被生长季NDVI与气象因子多元线性回归分析结果

Table 2 The results of multiple linear regression analysis between growing season NDVI and climate variables in marshes of the Qinghai-Tibet Plateau

| 沼泽类型<br>Marsh type                 | 回归模型<br>Regression model                       | $R^2$ | $F$    | $P$    |
|------------------------------------|------------------------------------------------|-------|--------|--------|
| 沼泽 Marshes                         | $Y = 0.238 - 0.051X_2 + 0.023X_3 + 0.037X_4$   | 0.717 | 11.847 | <0.001 |
| 草本沼泽 Herbaceous marshes            | —                                              | —     | —      | —      |
| 沼泽化草甸 Marsh meadow                 | $Y = 0.184 - 0.018X_2 + 0.016X_3 + 0.023X_4$   | 0.591 | 6.746  | 0.005  |
| 内陆盐沼 Inland salt marshes           | $Y = 0.174 - 0.014X_2 + 0.018X_4$              | 0.826 | 35.695 | <0.001 |
| 季节性咸水沼泽 Seasonal saltwater marshes | $Y = 0.121 + 0.00001X_1 - 0.012X_2 + 0.019X_4$ | 0.552 | 5.757  | 0.009  |

$Y$  为 NDVI;  $X_1$  为生长季降水量;  $X_2$  为生长季平均温;  $X_3$  为生长季平均最高温;  $X_4$  为生长季平均最低温

表3 2000—2017年青藏高原沼泽生长季温度和降水量的变化趋势

Table 3 The temporal trends of growing season temperatures and precipitation of marshes in the Qinghai-Tibet Plateau during 2000—2017

| 沼泽类型<br>Marsh type                    | 生长季降水量<br>Growing season<br>precipitation/<br>(mm/10a) | 生长季平均温<br>Growing season<br>mean temperature/<br>(°C/10a) | 生长季平均最高温<br>Growing season<br>maximum temperature | 生长季平均最低温<br>Growing season<br>minimum temperature |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 沼泽 Marshes                            | 0.01                                                   | 0.03 **                                                   | 0.03 *                                            | 0.05 **                                           |
| 草本沼泽<br>Herbaceous marshes            | 0.38                                                   | 0.03 **                                                   | 0.03 *                                            | 0.04 **                                           |
| 沼泽化草甸<br>Marsh meadow                 | -0.06                                                  | 0.03 **                                                   | 0.04 *                                            | 0.05 **                                           |
| 内陆盐沼<br>Inland salt marshes           | -0.20                                                  | 0.03 *                                                    | 0.02                                              | 0.07 **                                           |
| 季节性咸水沼泽<br>Seasonal saltwater marshes | 1.37                                                   | 0.03 *                                                    | 0.02                                              | 0.05 **                                           |

\*\* 在 0.01 水平上显著相关, \* 在 0.05 水平上显著相关

## 2.4 不足与展望

本文目前的研究可能存在一定的不确定性及不足之处。首先,本研究所采用的 NDVI 数据可能会受到云、大气、太阳高度角等因素的影响,因此遥感数据本身的不确定性可能会影响到本文的研究结果。其次,由于无青藏高原早期的沼泽分布数据,本文所利用的沼泽分布数据仅为一期 2010—2015 年沼泽分布数据集,无法排除研究时段内青藏高原沼泽变化对分析结果的影响。此外,沼泽植被与气候变化之间的关系实际上非常复杂,除了气温和降水以外,许多其他气象和环境因素也可能对沼泽植被产生影响,其他气象及环境要素对沼泽植被的影响还需进一步揭示。为更准确地揭示青藏高原沼泽植被变化及其机理,未来研究需进一步借助更加精确的数据和研究方法,并加强对其他气象和环境因素以及人类活动等对青藏高原沼泽植被影响的研究。

## 3 结论

青藏高原沼泽植被生长季平均 NDVI 在 2000—2017 年总体呈现上升趋势,上升趋势为 0.010/10a。青藏

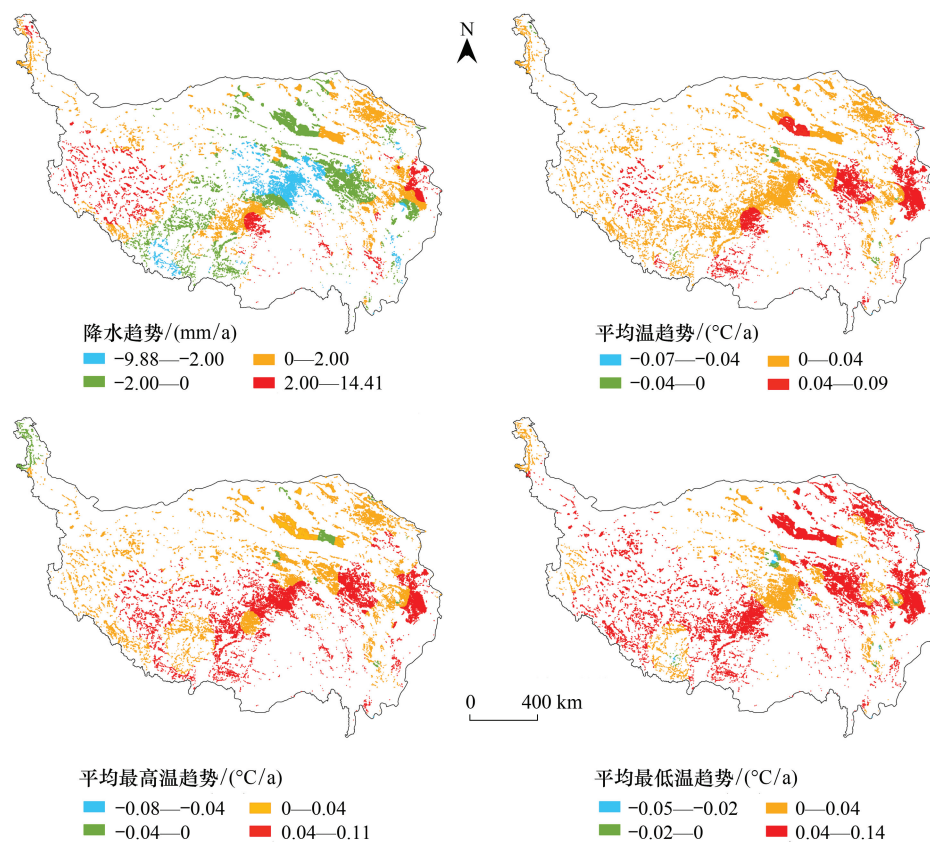


图5 2000—2017年青藏高原沼泽生长季降水 (mm/a), 平均温 (°C/a), 平均最高温 (°C/a), 平均最低温 (°C/a) 变化趋势空间分布  
 Fig.5 The spatial patterns of trends in growing season precipitation (mm/a), mean temperature (°C/a), maximum temperature (°C/a), and minimum temperature (°C/a) for marshes in the Qinghai-Tibet Plateau during 2000—2017

高原沼泽植被生长主要受气温影响,生长季内白天和夜晚增温都会对沼泽植被生长产生促进作用,夜晚增温对沼泽植被生长的促进作用更加明显。在全球白天和夜晚不对称增温的背景下,利用模型模拟未来气候变化对青藏高原沼泽植被影响时,应重视白天与夜晚温度对沼泽植被生长的不对称影响。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 吴绍洪, 尹云鹤, 赵慧霞, 李双成, 邵雪梅, 陶波. 生态系统对气候变化适应的辨识. 气候变化研究进展, 2005, 1(3): 115-118.
- [ 2 ] Gottfried M, Pauli H, Futschik A, Akhalkatsi M, Barančok P, Alonso J L B, Coldea G, Dick J, Erschbamer B, Calzado M R F, Kazakis G, Krajčiči J, Larsson P, Mallaun M, Michelsen O, Moiseev D, Moiseev P, Molau U, Merzouki A, Nagy L, Nakhutsrishvili G, Pedersen B, Pelino G, Púscas M, Rossi G, Stanisci A, Theurillat J P, Tomaselli M, Villar L, Vittoz P, Vogiatzakis I, Grabherr G. Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. *Nature Climate Change*, 2012, 2(2): 111-115.
- [ 3 ] Wu D H, Zhao X, Liang S L, Zhou T, Huang K C, Tang B J, Zhao W Q. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change. *Global Change Biology*, 2015, 21(9): 3520-3531.
- [ 4 ] Erwin K L. Wetlands and global climate change: the role of wetland restoration in a changing world. *Wetlands Ecology and Management*, 2009, 17(1): 71-84.
- [ 5 ] Neubauer S C, Franklin R B, Berrier D J. Saltwater intrusion into tidal freshwater marshes alters the biogeochemical processing of organic carbon. *Biogeosciences*, 2013, 10(12): 8171-8183.
- [ 6 ] Ross P M, Adam P. Climate change and intertidal wetlands. *Biology*, 2013, 2(1): 445-480.
- [ 7 ] Wei D, Zhang X K, Wang X D. Strengthening hydrological regulation of China's wetland greenness under a warmer climate. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122(12): 3206-3217.
- [ 8 ] Wei X D, Wang S N, Wang Y K. Spatial and temporal change of fractional vegetation cover in North-western China from 2000 to 2010. *Geological*

- Journal, 2018, 53(52): 427-434.
- [9] Shen X J, Liu B H, Jiang M, Lu X G. Marshland loss warms local land surface temperature in China. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(6): e2020GL087648.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Piao S L, Cui M D, Chen A P, Wang X H, Ciais P, Liu J, Tang Y H. Altitude and temperature dependence of change in the spring vegetation green-up date from 1982 to 2006 in the Qinghai-Xizang Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(12): 1599-1608.
- [14] Zhang L, Guo H D, Lei L P, Yan D M. Monitoring vegetation greenness variations in Qinghai-Tibet Plateau with MODIS vegetation index// *Proceedings of 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Vancouver, BC, Canada; IEEE, 2011: 760-762.
- [15] Zhang G L, Zhang Y J, Dong J W, Xiao X M. Green-up dates in the Tibetan Plateau have continuously advanced from 1982 to 2011. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(11): 4309-4314.
- [16] 白军红, 欧阳华, 徐惠风, 周才平, 高俊琴. 青藏高原湿地研究进展. *地理科学进展*, 2004, 23(4): 1-9.
- [17] 杨玲莉. 2000—2014 年黄河源区植被 NDVI 时空变化特征与气候变化响应分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- [18] 李英年, 赵新全, 赵亮, 王启基, 沈振西. 祁连山海拔高寒湿地气候变化及植被演替分析. *冰川冻土*, 2003, 25(3): 243-249.
- [19] 严晓瑜. 不同时间尺度若尔盖湿地植被变化及其与气候的关系[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2008.
- [20] 李宁云. 黄河源区沼泽湿地宏观生态变化与气候的关系研究[D]. 昆明: 云南大学, 2018.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Shen X J, Liu B H, Li G D, Wu Z F, Jin Y H, Yu P J, Zhou D W. Spatiotemporal change of diurnal temperature range and its relationship with sunshine duration and precipitation in China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(23): 13163-13179.
- [24] 刘双俞, 张丽, 王翠珍, 闫敏, 周宇, 鹿琳琳. 基于 MODIS 数据的青藏高原植被物候变化趋势研究(2000 年—2010 年). *遥感信息*, 2014, 29(6): 25-30.
- [25] 李玉凤, 刘红玉. 湿地分类和湿地景观分类研究进展. *湿地科学*, 2014, 12(1): 102-108.
- [26] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1417-1434.
- [27] 孔冬冬, 张强, 黄文琳, 顾西辉. 1982-2013 年青藏高原植被物候变化及气象因素影响. *地理学报*, 2017, 72(1): 39-52.
- [28] 刘世梁, 赵海迪, 董世魁, 苏旭坤, 刘琦, 邓丽, 张翔. 基于 SPOT NDVI 的阿尔金山自然保护区植被动态变化研究. *干旱区研究*, 2014, 31(5): 832-837.
- [29] 神祥金, 周道玮, 李飞, 张海艳. 中国草原区植被变化及其对气候变化的响应. *地理科学*, 2015, 35(5): 622-629.
- [30] Dunton K H, Hardegree B, Whitledge T E. Response of estuarine marsh vegetation to interannual variations in precipitation. *Estuaries*, 2001, 24(6): 851-861.
- [31] Poiani K A, Johnson W C. Potential effects of climate change on a semi-permanent prairie wetland. *Climatic Change*, 1993, 24(3): 213-232.
- [32] 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.
- [33] 梁春玲, 于泉洲, 刘煜杰, 张祖陆. 昼夜增温对南四湖湿地植被 NDVI 的影响差异. *热带地理*, 2015, 35(3): 422-426, 436-436.
- [34] Piao S L, Friedlingstein P, Ciais P, Viovy N, Demarty J. Growing season extension and its impact on terrestrial carbon cycle in the Northern Hemisphere over the past 2 decades. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(3): GB3018.
- [35] Shen X J, Liu B H, Li G D, Zhou D W. Impact of climate change on temperate and alpine grasslands in China during 1982-2006. *Advances in Meteorology*, 2015, 2015: 180614.
- [36] 胡田田, 康绍忠. 植物抗旱性中的补偿效应及其在农业节水中的应用. *生态学报*, 2005, 25(4): 885-891.
- [37] 赵威, 王征宏. 植物的补偿性生长. *生物学通报*, 2008, 43(3): 12-13.
- [38] Belsky A J. Does herbivory benefit plants? A review of the evidence. *The American Naturalist*, 1986, 127(6): 870-892.