

夏尔希里自然保护区生长季 NDVI 变化特征及驱动力研究

方登先^{1,2}, 王勇辉^{1,2}

(1.新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054; 2.新疆干旱区湖泊环境与资源实验室, 乌鲁木齐 830054)

摘要: 采用趋势分析、相关分析、多元线性回归等方法, 系统研究了夏尔希里自然保护区成立前(1990—2005 年)和成立后(2006—2018 年)不同植被类型归一化植被指数(NDVI)的时空变化特征及驱动 NDVI 变化的主要因素。结果表明: (1)不同海拔梯度上, 保护区成立后的 NDVI 多年平均值均高于成立前; (2)保护区成立前后 NDVI 趋势均以增加为主, 成立后 NDVI 的增加趋势为 0.05~0.10/10 a 的像元数量明显比成立前增多; (3)保护区成立前后大部分区域的 NDVI 均与气温呈现显著负相关, 与降水呈现显著正相关 ($p < 0.05$)。 (4)气温抑制低海拔(500~1 500 m)草地生长, 降水促进中海拔(1 500~2 000 m)的植被生长, 土壤有机碳、气温共同驱动高海拔(2 000~3 000 m)的植被生长。

关键词: NDVI; 变化特征; 气候影响; 驱动因素; 夏尔希里自然保护区

中图分类号: S715 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2023)02-0127-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.02.016

Study on Variation Characteristics and Driving Forces of NDVI During Growing Season in Xarxili Nature Reserve

FANG Dengxian^{1,2}, WANG Yonghui^{1,2}

(1.School of Geography Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054;

2.Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Areas of Xinjiang, Urumqi 830054)

Abstract: By using the methods of trend analysis, correlation analysis and multiple linear regression, this paper systematically studied the temporal and spatial variation characteristics and the main driving factors of normalized vegetation index (NDVI) of different vegetation types changed in the establishment of Xarxili Nature Reserve before (1990—2005) and after (2006—2018). The results showed that: (1) At different altitude gradients, the annual mean of NDVI after the establishment of the nature reserve was higher than that before. (2) The trend of NDVI before and after the establishment of the NDVI was mainly increased. After the establishment of the reserve, the increasing trend of NDVI was 0.05 to 0.10/10 years, the number of pixels was significantly increased compared with that before the establishment. (3) The NDVI in most areas showed a significant negative correlation with air temperature and a significant positive correlation with precipitation ($p < 0.05$). (4) Temperature inhibited the growth of grassland at low altitude (500~1 500 m), precipitation promoted the growth of vegetation at middle altitude (1 500~2 000 m), and soil organic carbon and air temperature jointly drove the growth of vegetation at high altitude (2 000~3 000 m).

Keywords: NDVI; change characteristics; climatic influence; driving factors; Xarxili Nature Reserve

植被作为生态系统重要的组成部分,是土壤、大气和水分的联结点^[1-2],归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)作为植被生长状况的最佳指示因子,被广泛应用在植被变化对气候因子的响应研究中。遥感技术的发展为大规模、长时间的植被变化监测提供了可能^[3],相对于地表实测研究来说,具有研究尺度大、周期长,较易获取等优点^[4-6]。

通常区域植被的短期变化主要受人为和自然因素影响,但长期变化影响因素有所不同,主要取决于温度、降水、辐射等因子^[7]。在全球气候变化背景下,植被生长受水热条件的影响日益凸显^[8],然而,由于区域生态系统差异性较大,植被对水热变化的响应也存在较大差别^[9]。目前,一些学者^[10-13]利用 GIMMS3g 数据对全球干旱区、北半球荒漠草原、中国温带草原的

收稿日期: 2022-07-25
资助项目: 中国沙漠气象科学研究基金项目“夏尔希里自然保护区森林土壤固碳潜力研究”(Sqj2021015)
第一作者: 方登先(1994—),女,在读硕士研究生,主要从事干旱区资源利用与环境演变研究。E-mail: 1336684770@qq.com
通信作者: 王勇辉(1977—),男,教授,博士,主要从事干旱区资源利用与环境演变研究。E-mail: wyhsd_3011@163.com

NDVI 动态变化和驱动力进行分析;有些学者^[14-16]利用 MODIS 数据产品研究了青藏高原、黄河流域、新疆阿勒泰地区的植被动态变化和气候之间的响应关系;还有学者^[17-19]则使用 Landsat 数据集对毛乌素沙地、岷江上游、塔里木河下游区域的 NDVI 动态变化及影响因素进行了研究。研究结果显示,由于数据集、研究区、时间周期不同,植被对水热条件的响应以及驱动机制也明显不同。因此,深入探讨气候变化背景下植被的动态变化、植被与水热条件的响应关系,以及植被的驱动机制,对提升和优化区域的生态功能和生态建设方面具有重要意义。

夏尔希里国家级自然保护区于 2005 年成立,面积约为 314 km²。该区域地处中国与哈萨克斯坦交界处且位于中方一侧,由于该区域人为干扰较小,生态系统仍处于自然原始状态,且该地区海拔差异较大,垂直带谱极其明显,也是许多珍稀濒危物种的居住地、繁殖地和避难地。因此,在该区域内开展植被动态变化及驱动力研究具有极其重要的意义。目前,对于保护区的研究主要以土壤研究为主^[20-22],而对研究区长时间的植被动态变化及其驱动力的研究鲜有报道。本文利用 Landsat 影像数据集,分析了研究区成立前(1990—2005 年)和成立后(2006—2018 年) NDVI 的时空变化及趋势特征;并研究了成立前后的生长季 NDVI 与季前气温、降水的响应关系;最后分析了保护区不同海拔下不同植被类型受主要因子的驱动程度;系统地阐明了夏尔希里自然保护区成立前后 NDVI 的特征变化,厘清了气候因素与保护区成立前后植被的相关性及差异性;以及剖析了不同海拔的 NDVI 变化的驱动机制;旨在揭示自然保护区的生态效益,也可为研究区管理部门提供基础数据,并为同类山地系统的植被恢复和重建提供目标样板。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

夏尔希里国家级自然保护区位于新疆博尔塔拉

蒙古自治州境内,地处天山支脉阿拉套山山地南坡(81°43′09″—82°33′18″E,45°07′43″—45°23′15″N),东西长 66 km,南北宽 25 km,面积 314 km²,主要由西部的夏尔希里地区、东部的江巴斯地区以及连接 2 个区域的边境廊道组成。保护区内主要以大陆性寒温带寒冷气候为主,近 30 年(1990—2018)平均气温为 0.15℃,大致以 0.3°/10 a 的速度增温;多年平均降水量为 490.66 mm,以增加趋势为主,大致以 14.9 mm/10 a 的速率增加,降水量主要集中于春、夏两季,随海拔高度上升而逐步增大。低山带为 100~250 mm,中山带为 250~450 mm,高山带可达 450~600 mm。受山地地势差影响,地形北高南低,由西北向东南倾斜,海拔 310~3 670 m。从最高处到最低处依次为高山积雪、高山草甸、山地森林、荒漠草原和荒漠化草原,构成干旱区典型而完整的自然地理垂直带谱,自然景观多样。保护区河流以保尔德河为主,江巴斯地区有少量河流分布,土壤垂直分布规律明显,自下而上,依次为棕漠土、山地棕钙土、山地黑钙土和栗钙土(阳坡),灰褐色森林土,亚高山草甸土和高山草甸土。

1.2 夏尔希里保护区植被生长季确定

植被生长季的确定是分析植被动态变化的关键一步。NDVI 距平值、降水量指标是确定植被生长季的关键因素^[23]。通过计算夏尔希里自然保护区 1990—2018 年 NDVI 多年月平均值可知,该研究区的 NDVI 均值为 0.287。从该区域 1990—2018 年 NDVI 多年月平均值的距平来看(图 1a),5—9 月的 NDVI 距平值均高于平均值,说明该时间段内植被处于生发阶段,状态好于年内平均水平,其中,7 月的距平值最大,表明该月份的植被生长较好。而 1—4,10—12 月的 NDVI 距平值均低于多年平均值,表明该时间段的植被生长状态明显低于年平均水平。结合研究区的多年气温、降水的月平均值可知(图 1b),5—9 月的月平均值均明显高于其他月份,因此,将研究区的生长季定义为每年的 5—9 月。

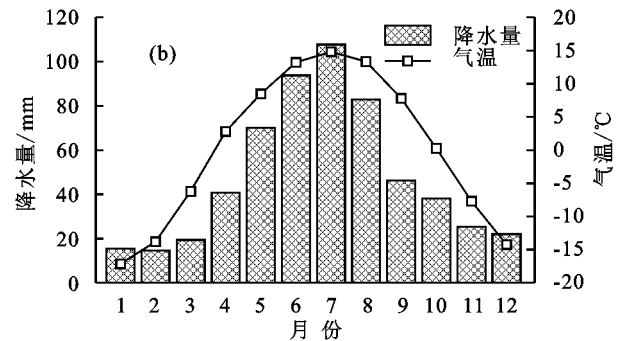
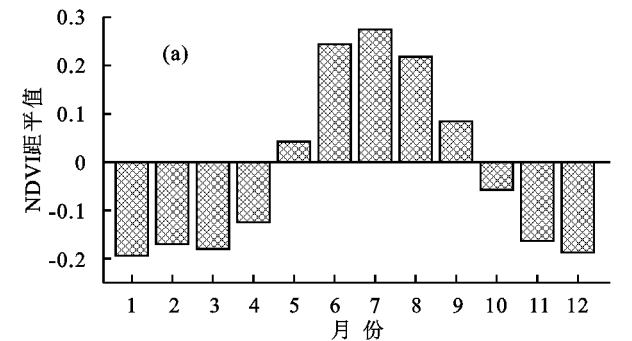


图 1 夏尔希里自然保护区 1990—2018 年 NDVI 距平值及气温和降水量

1.3 数据来源

1.3.1 NDVI 数据集

本文使用的植被指数遥感影

像数据来自地理大数据分析和可视化云平台谷歌地球引擎(GEE)(<https://earthengine.google.com>)提供

的所有 Landsat TM/ETM/OLI 遥感影像,与传统的影像处理工具相比,GEE 具有快速批量处理大量影像数据的能力。通过该平台对 Landsat5 TM、Landsat7 ETM、Landsat8 OLI 系列数据进行去云、填补等处理,并采用最大值合成法提取研究区 1990—2018 年逐月的 NDVI 数据,该数据的云量低于 10%,空间分辨率为 30 m。

1.3.2 植被覆盖类型数据 文中涉及的植被类型数据是采用 Yang 等^[24]在 Google Earth Engine(GEE)平台上基于 Landsat 衍生的中国 30 m 分辨率土地覆盖及其动态数据集(<http://doi.org/10.5281/zenodo.4417810>)。

1.3.3 气象数据 文中的气温、降水数据均来自于 CHELSA (climatologies at high resolution for the earth's land surface areas),该数据是基于全球再分析数据或全球环流模式产生 (<https://chelsa-climate.org/>),文中仅选取 1990—2018 年的逐月气温、降水数据,空间分辨率为 1 km。

1.3.4 高程数据 文中采用的高程数据是由 Hawker 等^[25]开发的 FABDEM (forest and buildings removed copernicus DEM)数据产品,该产品首次去除建筑物和森林,其分辨率为 30 m。

1.3.5 土壤数据 本文土壤理化性质数据是采用地理大数据分析和可视化云平台谷地球引擎(GEE) (<https://earthengine.google.com>) 提供的 Openlandmap 影像数据集,该数据集的空间分辨率为 250 m,时间周期为 1950—2018 年,分别选取土壤 pH、含水量(SW)、含沙量(SA)、有机碳(SO)、黏土含量(CL) 5 个指标在 0,10,30,60 cm 的平均值进行驱动力分析。

由于各遥感数据的空间分辨率有所差别,其中分辨率最高的为 30 m,分辨率最低的数据为 1 km,为了后期分析气温、降水、土壤因子和植被响应关系研究,利用 Matlab2019a 中的插值函数中的最邻近法,将气温、降水及土壤数据集的空间分辨率与 NDVI 数据相统一,均插值为 30 m。

1.4 研究方法

1.4.1 一元线性回归分析

为了解研究区域多年植被覆盖的空间变化规律,本文在 MATLAB 软件下对保护区成立前(1990—2005 年)与保护区成立后(2006—2018 年)的 NDVI 遥感数据,进行一元线性回归趋势分析,逐像元的逐年变化趋势进行计算,公式为^[26]:

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

式中: n 为研究时段年数; NDVI_i 为第 i 年植被 NDVI 均值; slope 为植被 NDVI 变化趋势斜率; slope 为正,说明对应像元 NDVI 呈增长趋势;反之表示 NDVI 呈下降趋势。采用 F 检验对变化趋势显著性水平进行判别^[27]。本文中显著性变化趋势的置信水平为 0.05。

1.4.2 相关性分析 相关系数用于分析 2 个变量之间的相关程度^[28-29],本文采用相关分析法研究保护区成立前后生长季的 NDVI 年际变化分别与气温、降水之间的单相关关系,2 个变量之间的相关系数计算公式为:

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

式中: R_{xy} 为变量 x 、 y 的相关系数; x_i 为第 i 年的生长季植被指数值; y_i 为不同时序气温、降水的值; $\bar{x}$ 为生长季植被指数的平均值; $\bar{y}$ 为气温、降水的平均值; i 为样本数。

偏相关系数是假定其中 1 个变量不变,计算另 2 个变量之间的相关系数,公式为^[30]:

$$R_{xy \cdot z} = \frac{R_{xy} - R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1 - R_{xz}^2)(1 - R_{yz}^2)}} \quad (3)$$

式中: R_{xy} 为将 z 剔除后 x 与 y 之间的偏相关系数; R_{xy} 、 R_{xz} 、 R_{yz} 为两因子间相关系数。

1.4.3 多元线性回归模型 由于 NDVI 变化受多因子的共同作用而发生改变,因此,利用多元回归模型进行研究区 NDVI 变化的驱动因素研究,将更符合实际情况,多元回归模型构建为^[31]:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 \times X_{1i} + \beta_2 \times X_{2i} + \cdots + \beta_k \times X_{ki} + \epsilon_i \quad (4)$$

式中: y_i 为 y 第 i 次的样本观测值; X_{1i} 、 X_{2i} 、 $\cdots$ 、 X_{ki} 为对应 y_i 的 k 个影响因子; β_0 、 β_1 、 $\cdots$ 、 β_k 为未知回归参数; ϵ_i 为随机误差, $\epsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$,且协方差 $\sigma_{\epsilon_i, \epsilon_i - \tau} = 0 (\tau \neq 0)$ 。

因此误差方程为:

$$v_i = \beta_0 + \beta_1 \times X_{1i} + \beta_2 \times X_{2i} + \cdots + \beta_k \times X_{ki} - y_i \quad (5)$$

化为矩阵形式为:

$$V = A\beta - Y \quad (6)$$

式中: $V = (v_1, v_2, \cdots, v_n)^T$, $\beta = (\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_n)^T$, $Y = (y_1, y_2, \cdots, y_n)^T$,

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \cdots & x_{k1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \cdots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \cdots & x_{kn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

依据 $V^T V = \min$, 得到法方程为:

$$A^T A \hat{\beta} - A^T Y = 0$$

(8)

从而得到参数的最小二乘解为:

$$\hat{\beta} = (A^T A)^{-1} A^T Y$$

(9)

最后得到多元回归模型为:

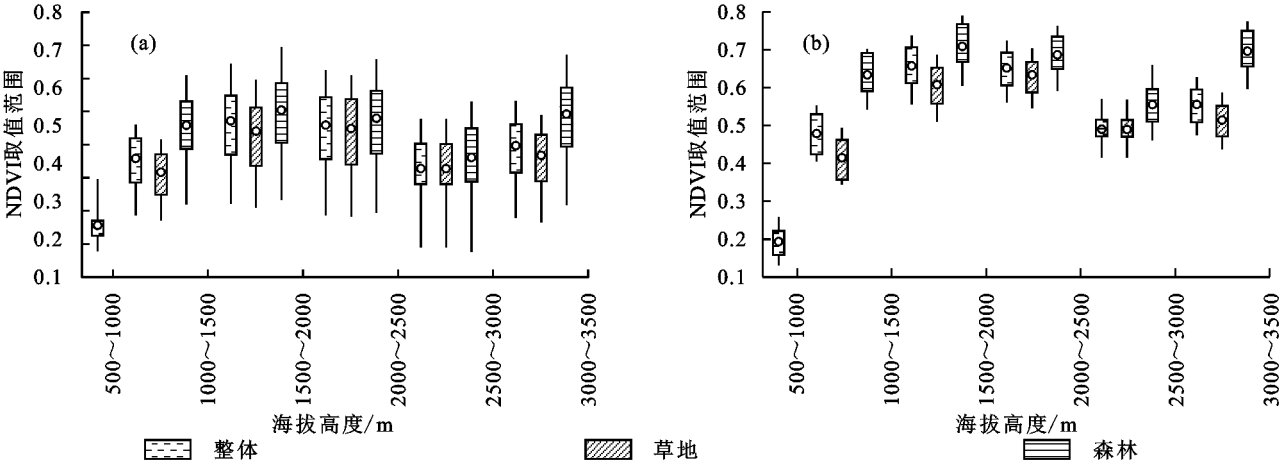
$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_{1X_{1i}} + \hat{\beta}_{2X_{2i}} + \cdots + \hat{\beta}_{kX_{ki}}$$

(10)

2 结果与分析

2.1 夏尔希里自然保护区 NDVI 年际变化特征

为了系统研究夏尔希里自然保护区内 NDVI 的年际变化特征, 根据研究区海拔特征, 现将研究区按海拔每升高 500 m 为 1 个单元, 共将研究区划分为 5 00~1 000, 1 000~1 500, 1 500~2 000, 2 000~2 500, 2 500~3 000, 3 000~3 500 m 6 个梯度, 从保护区成立前后不同梯度森林、草地的 NDVI 年际变化来看, 在不同海拔梯度上, 保护区成立前(1990—2005 年)的 NDVI 值年际变化范围均较大(图 2a),



注:(a)表示保护区成立前(1990—2005 年)的 NDVI 年际变化;(b)表示保护区成立后(2006—2018 年)的 NDVI 年际变化。

图 2 研究区成立前后的 NDVI 年际变化

2.2 保护区成立前后 NDVI 的趋势变化

通过对夏尔希里自然保护区成立前后的 NDVI 趋势变化分析(图 3)来看, NDVI 的趋势变化在空间分布上差异较为明显。从保护区成立前 NDVI 的趋势变化(图 3a)来看, NDVI 的趋势主要以增加趋势为主, 像元数量约占总数量的 87.96%, 其中, NDVI 以每年增加 0.010~0.015 的像元数量最多, 约占总数量的 33.75%, 主要多分布在保护区的中部和北部部分区域。而对于研究区中 82°10'E 以西的区域来说, 该区域的 NDVI 趋势主要以减小为主, 趋势减小的范围主要分布在 0~0.005。从研究区 NDVI 的趋势显著性来看, 中部和北部区域的趋势显著性较好, 像元数量约占以上区域的 34.98%。

从保护区成立后 NDVI 的趋势变化分析(图 3b)发现, 保护区成立后的 NDVI 增加趋势的像元数量

NDVI 主要集中分布在 0.10~0.70, 且 1 000~3 500 m 不同植被类型 NDVI 多年平均值的变化规律一致, 均表现为森林>整体>草地, 其中, NDVI 多年平均值的最大值出现在海拔 1 500~2 000 m 的森林处, 约为 0.52。而 NDVI 多年平均值的最小值则出现在海拔 5 00~1 000 m 的草地处, 约为 0.17。

通过对保护区成立后(2006—2018 年)的 NDVI 年际变化分析(图 2b)可知, 不同海拔梯度上森林、草地的 NDVI 年际变化范围不大, 均较稳定, 除 5 00~1 000 m 的草地外, 其余海拔梯度上的 NDVI 主要分布在 0.35~0.80。对比保护区成立前来看, 保护区成立后的 NDVI 多年平均值在不同海拔梯度上均高于保护区成立前, 其中, 二者在海拔 1 500~2 000 m 森林的 NDVI 多年平均值相差最大, 二者相差近 0.20。在 1 000~1 500, 3 000~3 500 m 中, 森林的 NDVI 多年平均值均明显高于草地, 分别是草地的 1.50, 1.35 倍, 而其他的海拔高度上草地、森林的 NDVI 多年平均值较接近。

明显高于保护区成立前, 趋势增加的像元数量约占总数量的 96.96%, 其中, NDVI 以每年增加 0.005~0.01 的像元数量增加最多, 约增加 12.23%。而研究区内趋势减小区域的像元数量明显减少, 其中, -0.005~0 的像元数量减少最多, 约减少 8.78%。另 82°10'E 以西的区域趋势变化最为明显, 由保护区成立前的趋势减小转为保护区成立后的趋势增加。从 NDVI 趋势显著性的变化来看, 显著性像元数量较保护区成立前明显增多, 约为成立前的 2 倍, 这说明保护区成立后植被状况明显好转, 可能是由于气温、降水等因素的综合影响所致。

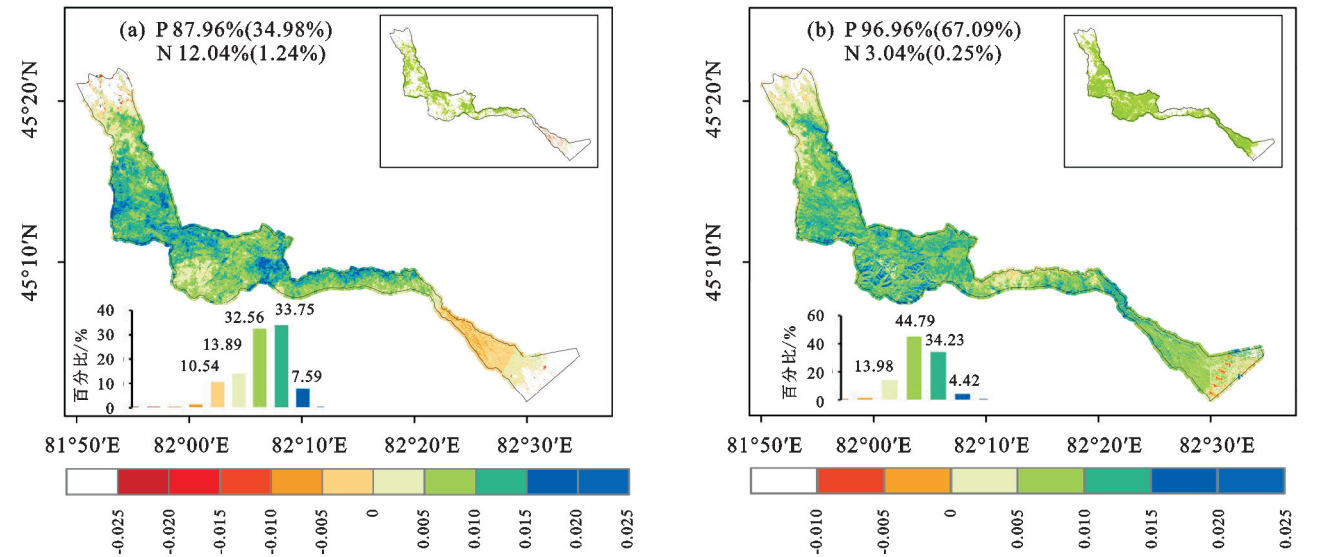
2.3 保护区成立前后 NDVI 与气温、降水相关性分析

通过分析保护区成立前后 NDVI 与气温、降水的相关性(图 4)能较好地揭示气候因素对研究区植被动态的影响。从研究区成立前气温与 NDVI 的空

间相关性(图 4a)可知,气温与 NDVI 的空间相关性主要以负相关关系为主,负相关的像元数量约占总量的 94.04%,即温度的升高导致 NDVI 值降低,其中,中部区域的负相关关系最强,二者的相关系数最高可为 0.5~0.6;从气温与 NDVI 空间显著性相关程度来看,中部和部分北部区域的显著相关性较明显($p < 0.05$);对于研究区成立前降水与 NDVI 的空间相关性(图 4b)来说,降水与 NDVI 之间的相关性主要以正相关为主,正相关的像元数量约占总量的 94.89%,即 NDVI 随着降水的增加而增大,但从二者显著性情况来看,显著正相关的像元数量较少,多集中在中

部部分区域,仅占正相关像元总量的 13.52%。

对于研究区成立后 NDVI 与气温的相关性(图 4c)来说,NDVI 与气温仍以负相关关系为主,但负相关关系的像元数量所占比例明显下降,像元数量约下降 14.65%,而正相关关系的像元数量增多区域主要集中在分布在 81°53'—81°58'E 和 45°10'—45°15'N 区域内;从二者显著相关的空间分布来看,显著正相关的像元数量占主体,约占正相关像元总量的 22.08%。通过分析研究区成立后 NDVI 与降水之间的关系发现,降水与 NDVI 的正相关像元数量增加较多,其中,二者显著性增加的像元数量明显增多,约增加 16.42%。



注:注:(a)、(b)分别表示保护区成立前和成立后的 NDVI 趋势变化情况;图中左下角柱状图表示 NDVI 值在各区间内的占比,右上角分图表示 NDVI 趋势显著性情况($p < 0.05$),图中的 P 和 N 分别表示 NDVI 的正向趋势和负向趋势的像元数量占总像元数量的比例;括号内数据表示相应趋势的显著性像元数量所占比例。

图 3 保护区成立前后 NDVI 趋势变化

2.4 NDVI 变化的因子驱动力分析

为了系统研究保护区内不同海拔内 NDVI 受主要因子的驱动程度,选取 pH、土壤含水量(SW)、土壤含沙量(SA)、土壤有机碳(SO)、黏土含量(CL)、温度(TE)、降水(PR)等因子进行分析,通过分析(图 5)发现,在不同海拔高度上,SO 均与 NDVI 呈正相关关系,其中,2 500~3 000 m 草地受其影响最大,相关系数高于 0.50(图 5h)。从 5 00~1 000 m 的草地来看,TE 和 SO 对其影响均较大,但二者与 NDVI 之间的相关关系相反,TE 主要以负相关关系为主,即随着温度的升高,NDVI 的值减小,相关系数可达 0.75。

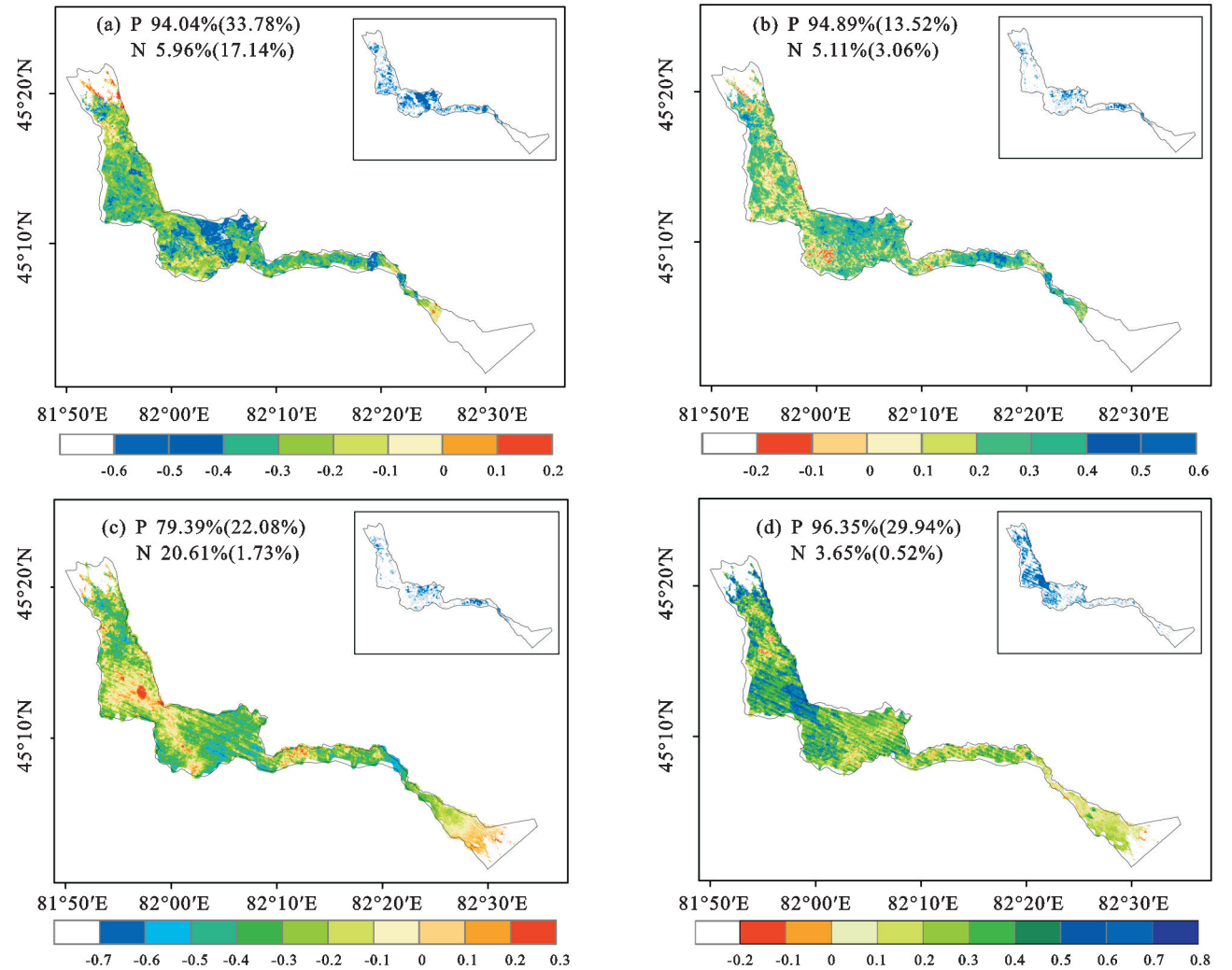
对于海拔 1 000~1 500 m 的草地和森林来说,pH、SW、TE 等因子均与 NDVI 呈负相关关系,而 SO 和 CL 因子则与 NDVI 呈正相关关系;从海拔 1 500~2 000 m 来看,TE、PR 因子对其变化的影响均较大,TE 呈现极显著的负相关关系,而 PR 则表现为极显著的正相关关系($p < 0.001$);通过海拔 2 000~

2 500 m 的草地、森林 NDVI 来看,仅 CL 在二者之间的相关关系相反,其余指标均表现出相同的规律,其中,pH 在二者中均表现为极显著的负相关,而 SO 则表现为极显著的正相关;从海拔 2 500~3 000 m 草地、森林 NDVI 来看,不同因子对二者的影响差异性较大,其中,pH、SO、TE 是影响草地 NDVI 变化的主要因素,而在森林中,TE 则是影响 NDVI 变化的主要因素;从不同海拔草地的 NDVI 分析来看,500~1 500 m 的低海拔范围内,TE 的升高是致使 NDVI 降低的主要因素,而 SO 的增加是导致 NDVI 增大的主要因子,随着海拔的升高,降水因子对 NDVI 的作用更加明显;通过不同海拔森林的 NDVI 分析可知,土壤物理指标含量相对较高的情况下,均对 NDVI 的变化有一定的促进作用,在海拔 1 000~2 000 m 的森林中,TE 与 NDVI 呈极显著负相关,而海拔 > 2 000 m 时,二者显著相关相反。在不同海拔上 PR 与森林的 NDVI 之间相关性主要以极显著正相关为主。

3 讨论

夏尔希里自然保护区是我国现存较少的、无人为干扰的、垂直带明显的境地,在气候变化状况下,深入开展该区域内 NDVI 变化及其驱动因素的研究,对同类山地系统的植被动态变化与气候因子之间的响应关系以及恢复和重建具有重要意义。通过研究保护区植被的生长季的起止时间发现,研究区的植被生长季主要集中分

布在 5—9 月,这与 Du 等^[32]、Zhao 等^[33]确定的新疆生长季为 4—10 月有一定的差异性,植被生长季的开始时间和结束时间均较新疆生长季提前近 1 个月,这主要是因为研究区的海拔梯度差异较大,东部区域多以低山平原区为主,但由于该区域土壤贫瘠,植被生长较少,研究区的中部和西部是植被的主要分布区,但以上区域海拔较高,温度较低,从而导致生长季开始时间推迟,生长季结束时间提前。



注:(a)、(b)分别表示气温、降水与保护区成立前的 NDVI 单相关性;(c)、(d)分别表示气温、降水与保护区成立后的 NDVI 单相关性,各子图中右上角代表显著性情况。

图 4 保护区成立前后 NDVI 与气温降水偏相关性

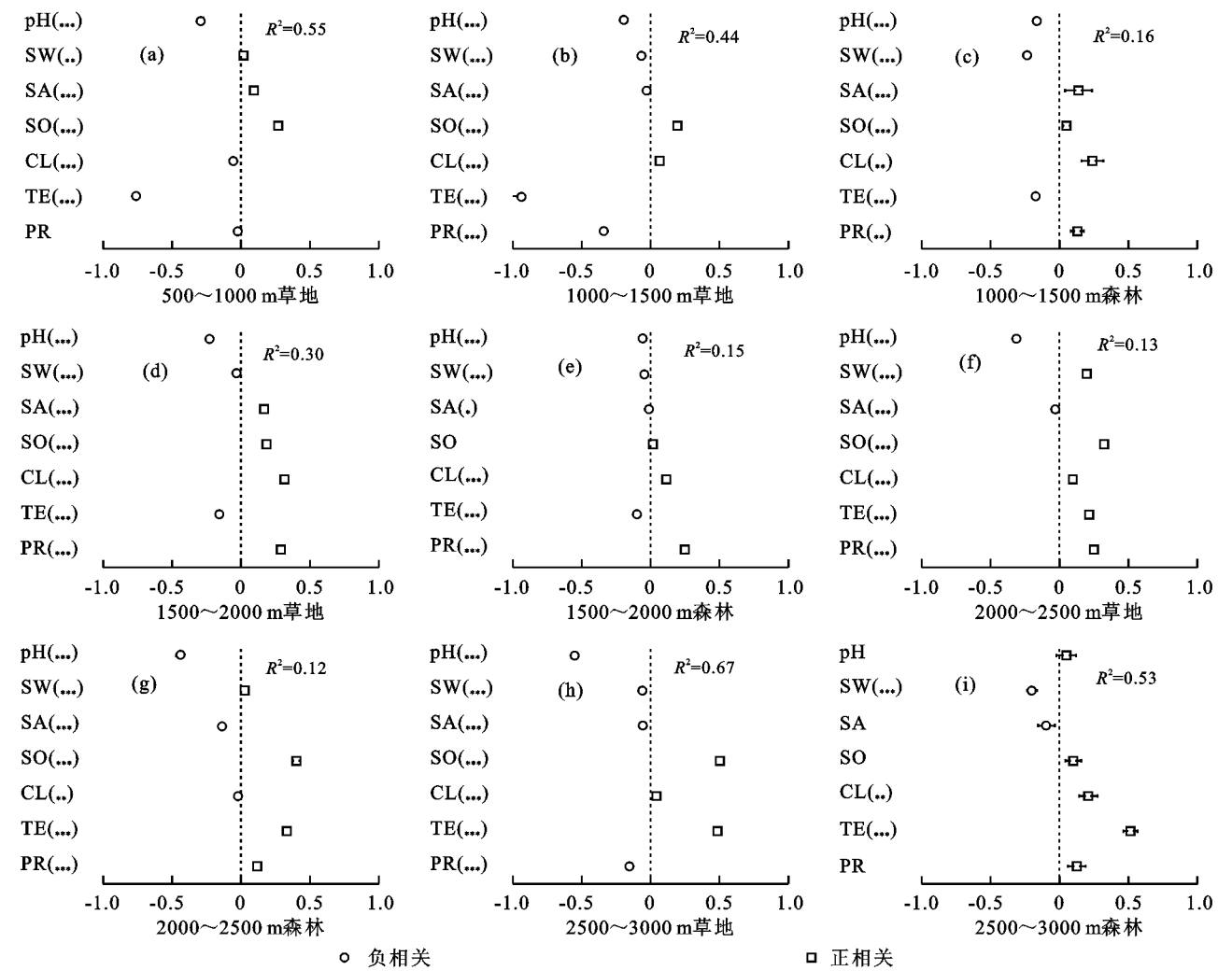
从保护区成立前后的 NDVI 年际变化来看,保护区成立前(1990—2005 年)不同海拔高度上草地、森林的变化幅度均较大,而保护区成立后的变化幅度均较稳定,且保护区成立后(2006—2018 年)的 NDVI 在不同海拔梯度上均高于保护区成立前,这可能是由于保护区成立后的温度、降水等均较成立前增高,水热条件更有利于植被的生长所致,而保护区成立后的 NDVI 高于彭凯峰等对三江源国家公园植被时空变化及其影响因子的研究^[34],这可能是因为三江源地区多位于高海拔的寒冷地区,水热条件不利于植被的生长所致。保护区成立前后

的 NDVI 趋势均呈增加趋势,主要以 0~0.05/10 a 为主,但保护区成立后的 NDVI 趋势增加的像元数量较成立前明显增多,约比成立前增加 9%,这主要与保护区成立后合理化管理密切相关。

气候因子制约物种在区域尺度上的空间分布范围,其中水热条件对其起主导作用^[35],从文中发现,研究区成立前和成立后生长季期间(5—9 月)的 NDVI 与气温之间均主要以负相关关系为主,而与降水之间则主要以正相关关系为主,这表明随着温度的升高,研究区内植被生长的抑制作用增强,而降水的增

加对植被生长的促进作用增强,这是因为温度过高,导致植被中酶的活性发生相应改变,从而抑制植物的生长^[36]。研究区成立前和成立后绝大部分的草地 NDVI 与降水呈现显著正相关,这与陈宸等^[37]对新疆荒漠草地近 20 年的动态变化研究结果一致,可能是因为水分条件是制约干旱区草地变化的决定因素。

研究区大部分森林 NDVI 与气温的相关性主要以负相关为主,与降水的相关性主要以正相关为主,这与张艳静等^[38]的研究结果一致,这是因为该区域的森林主要是雪岭云杉,随着温度的升高,植物的蒸腾作用以及土壤水分的蒸散均加快,致使植物的水分耗散和养分的流失,从而影响树木的生长^[39]。



注:(a)~(i)分别表示研究区成立后海拔在 500~3 000 m 内草地、森林的 NDVI 受主要因子的影响情况,由于研究区成立后无人为因素干扰,因此选取影响 NDVI 的主要因子 pH、SW、SA、SO、CL、TE、PR 进行分析。其中,SW 为土壤含水量,SA 为土壤含沙量,SO 为土壤有机碳,CL 为黏土含量,TE 为温度,PR 为降水,括号中的 * 表示显著性相关程度,* 表示 95% 的显著相关($p<0.05$),* * 表示 99% 的显著相关($p<0.01$),* * * 表示 99.9% 的显著相关($p<0.001$)。

图 5 保护区成立后不同海拔下 NDVI 变化的因子驱动力

土壤作为植物生长的重要基础^[40],其理化性质对植物的生长、组成、分布等产生多方面和多尺度的影响^[41],也是衡量土壤肥力的重要指标。土壤有机碳是土壤肥力的直接体现^[42],土壤含水量、土壤酸碱度是反映土壤理化性质的重要指标,直接影响植物的生长以及土壤的其他性质和肥力状况^[43]。研究区不同海拔梯度上草地、森林的 NDVI 受因子的驱动力差异较大,温度是限制较低海拔(<1 500 m)草地生长的主要因素,随着海拔的升高(1 500~2 000 m),温度对保护区草地、森林 NDVI 的作用减弱,而降水

对保护区草地、森林 NDVI 的作用则显著增强,但海拔继续升高(2 000~3 000 m),降水对保护区草地、森林的促进作用逐渐减弱,而温度、土壤有机碳对其促进作用显著增强,这是因为研究区内垂直地带性分布明显,海拔是极其重要的地形因素,它不仅对水热条件起决定性作用^[44-46],而且导致土壤理化性质发生相应变化^[47-50],进而影响研究区植被的生长。

4 结论

(1)夏尔希里自然保护区成立前后 NDVI 的年内变化差异较大,成立后(2006—2018 年)NDVI 的

年际变化波动相对成立前(1990—2005 年)较稳定,且多年平均值在不同海拔上均高于成立前。

(2)保护区成立前后的 NDVI 趋势主要以增加为主,增加趋势为 0.05~0.1/10 年,但保护区成立后增加趋势的像元数量明显多于成立前,这与气温、降水的变化密切相关。

(3)生长季内气温的增加,抑制研究区草地、森林植被的生长,而降水的增加,促进草地、森林植被的生长,其中,成立后的促进作用更加显著。

(4)生长季内的气温是抑制研究区低海拔(500~1 500 m)草地生长的主要驱动因素,生长季内的降水是促进研究区中海拔(1 500~2 000 m)植被生长的主要驱动因子,而生长季内的土壤有机碳和气温是促进研究区高海拔(2 000~3 000 m)植被生长的主要驱动因子。

在全球气候变化背景下,不同海拔梯度对研究区不同植被 NDVI 产生的差异需要引起足够重视,尤其是利用相关模型预测未来气候变化对夏尔希里自然保护区植被的影响。

参考文献:

[1] Thuiller W, Lavorel S, Araújo M B, et al. Climate change threats to plant diversity in Europe[J].*Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2005, 102 (23):8245-8250.

[2] Wang J, Meng J J, Cai Y L. Assessing vegetation dynamics impacted by climate change in the southwestern karst region of China with AVHRR NDVI and AVHRR NPP time-series[J].*Environmental Geology*, 2008, 54(6):1185-1195.

[3] 刘瑶,江辉,吴春波.鄱阳湖区植被覆盖度的遥感估算[J].*南昌工程学院学报*, 2006, 25(1):52-56.

[4] 朴世龙,方精云.最近 18 年来中国植被覆盖的动态变化[J].*第四纪研究*, 2001, 21(4):294-302.

[5] 马明国,董立新,王雪梅.过去 21 a 中国西北植被覆盖动态监测与模拟[J].*冰川冻土*, 2003, 25(2):232-236.

[6] 金凯,王飞,韩剑桥,等.1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J].*地理学报*, 2020, 75(5):961-974.

[7] 张江,袁昱舒,张婧,等.近 30 年来青藏高原高寒草地 NDVI 动态变化对自然及人为因子的响应[J].*生态学报*, 2020, 40(18):6269-6281.

[8] 陈舒婷,郭兵,杨飞,等.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[J].*自然资源学报*, 2020, 35(10):2511-2527.

[9] Wu D H, Zhao X, Liang S L, et al. Time-lag effects of

global vegetation responses to climate change[J].*Global Change Biology*, 2015, 21(9):3520-3531.

[10] 郑艺,张丽,周宇,等.1982—2012 年全球干旱区植被变化及驱动因子分析[J].*干旱区研究*, 2017, 34(1):59-66.

[11] 候静,杜灵通,刘可,等.1982—2012 年北半球荒漠草原过渡带植被物候特征及其与气候因子的关系[J].*气候变化研究进展*, 2017, 13(5):473-482.

[12] 马蓉,夏春林,张佳琦,等.中国温带草原植被 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应[J/OL].*生态学杂志*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20220617.1531.022.html>.

[13] Militino A F, Ugarte M D, Pérez-Goya U. Stochastic spatio-temporal models for analysing NDVI distribution of GIMMS NDVI3g images[J].*Remote Sensing*, 2017, 9(1):e76.

[14] 李红英,张存桂,汪生珍,等.近 40 年青藏高原植被动态变化对水热条件的响应[J].*生态学报*, 2022, 42(12):4770-4783.

[15] 解晗,同小娟,李俊,等.2000—2018 年黄河流域生长季植被指数变化及其对气候因子的响应[J].*生态学报*, 2022, 42(11):4536-4549.

[16] 黄豪奔,徐海量,林涛,等.2001—2020 年新疆阿勒泰地区归一化植被指数时空变化特征及其对气候变化的响应[J].*生态学报*, 2022, 42(7):2798-2809.

[17] 周淑琴,荆耀栋,张青峰,等.毛乌素沙地南缘植被景观格局演变与空间分布特征[J].*生态学报*, 2013, 33(12):3774-3782.

[18] 林玉英,胡喜生,邱荣祖,等.基于 Landsat 影像的 NDVI 对植被与影响因子交互耦合的响应[J].*农业机械学报*, 2018, 49(10):212-219.

[19] 高庆,艾里西尔·库尔班,肖昊.塔里木河下游区域植被时空变化[J].*自然资源学报*, 2019, 34(3):624-632.

[20] 刘西刚,王勇辉,焦黎.夏尔希里自然保护区草地表层土壤理化性质与海拔高度的关系[J].*生态与农村环境学报*, 2019, 35(6):773-780.

[21] 刘西刚,王勇辉,焦黎.夏尔希里自然保护区典型植被土壤水源涵养功能探究[J].*水土保持学报*, 2019, 33(3):121-128.

[22] 王勇辉,焦黎.中国夏尔希里土壤环境背景值特征及评价[J].*土壤通报*, 2015, 46(3):754-761.

[23] 曹永强,周姝含,杨雪婷.近 20 年辽宁省植被动态特征及其对气候变化的响应[J].*生态学报*, 2022, 42(14):5966-5979.

[24] Yang J, Huang X. 30 m annual land cover and its dynamics in China from 1990 to 2019[J].*Earth System Science Data*, 2021, 13:3907-3925.

[25] Hawker L, Bates P, Neal J, et al. Perspectives on digital elevation model (DEM) simulation for flood modeling in the absence of a high-accuracy open access global DEM[J].

- Frontiers in Earth Science, 2018, 6: e233.
- [26] 姜萍, 胡列群, 肖静, 等. 新疆植被 NDVI 时空变化及定量归因[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 212-220, 242.
- [27] 王涛, 白红英. 秦岭山地植被 NDVI 对气候变化与人类活动的响应[J]. 山地学报, 2017, 35(6): 778-789.
- [28] 程昌武. 黄河流域 1982—2015 年植被变化及其影响因素分析[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [29] 陈强, 陈云浩, 王萌杰, 等. 2001—2010 年黄河流域生态系统植被净第一性生产力变化及气候因素驱动分析[J]. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2811-2818.
- [30] 陈春波, 李刚勇, 彭建. 1981—2018 年新疆草地归一化植被指数时空特征及其对气候变化的响应[J/OL]. 生态学报, 2023, 43(4). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.202209>.
- [31] 陈建东. 多元回归模型在基坑地下水位预测中的应用[J]. 矿山测量, 2021, 49(1): 52-55, 73.
- [32] Du J Q, Shu J M, Yin J Q, et al. Analysis on spatio-temporal trends and drivers in vegetation growth during recent decades in Xinjiang, China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 38: 216-228.
- [33] Zhao X, Tan K, Zhao S, et al. Changing climate affects vegetation growth in the arid region of the north-western China[J]. Journal of Arid Environments, 2011, 75(10): 946-952.
- [34] 彭凯锋, 蒋卫国, 侯鹏, 等. 三江源国家公园植被时空变化及其影响因子[J]. 生态学杂志, 2020, 39(10): 3388-3396.
- [35] Schofield C J. Biogeography: An ecological and evolutionary approach (6th edn) by C. Barry Cox and Peter D [J]. Parasitology Today, 2000, 16(9): 406.
- [36] Ling Y, Mahfouz M M, Zhou S. Pre-mRNA alternative splicing as a modulator for heat stress response in plants[J]. Trends in Plant Science, 2021, 26(11): 1153-1170.
- [37] 陈宸, 井长青, 邢文渊, 等. 近 20 年新疆荒漠草地动态变化及其对气候变化的响应[J]. 草业学报, 2021, 30(3): 1-14.
- [38] 张艳静, 郑宏伟, 于瑞德, 等. 天山中西段不同地区雪岭云杉径向生长对气候变暖的响应差异[J]. 植物研究, 2017, 37(3): 340-350.
- [39] 李广起, 白帆, 桑卫国. 长白山红松和鱼鳞云杉在分布上限的径向生长对气候变暖的不同响应[J]. 植物生态学报, 2011, 35(5): 500-511.
- [40] 陈海存, 李晓东, 李凤霞, 等. 黄河源玛多县退化草地土壤温湿度变化特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(1): 35-40.
- [41] 杨瑞红, 王新军. 伊犁河谷山地北坡土壤特性及植被群落多样性垂直分布格局[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 32-39, 44.
- [42] 刘厚田. 湿地的定义和类型划分[J]. 生态学杂志, 1995, 14(4): 73-77.
- [43] 刘建新. 不同农田土壤酶活性与土壤养分相关关系研究[J]. 土壤通报, 2004, 35(4): 523-525.
- [44] 张慧, 邵雪海, 张永. 不同海拔高度树木径向生长对气候要素响应的研究进展[J]. 地球环境学报, 2012, 3(3): 845-854.
- [45] Peng J F, Li J B, Wang T, et al. Effect of altitude on climate-growth relationships of Chinese white pine (*Pinus armandii*) in the northern Funiu Mountain, central China[J]. Climate Change, 2019, 154(1): 273-288.
- [46] 李媛媛, 任少华, 黄宗胜, 等. 贵州喀斯特地区不同海拔常见树种枯落物分解及养分释放特征[J/OL]. 生态学报. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20220630.1409.004.html>.
- [47] 李相楹, 张维勇, 刘峰, 等. 不同海拔高度下梵净山土壤碳、氮、磷分布特征[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 19-24.
- [48] 张彦军, 郁耀闯, 牛俊杰, 等. 秦岭太白山北坡土壤有机碳储量的海拔梯度格局[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 629-639.
- [49] Gutierrez-Giron A, Diaz-Pines E, Rubio A, et al. Both altitude and vegetation affect temperature sensitivity of soil organic matter decomposition in Mediterranean high mountain soils[J]. Geoderma, 2015, 237: 1-8.
- [50] 程浩, 张厚喜, 黄智军, 等. 武夷山不同海拔高度土壤有机碳含量变化特征[J]. 森林与环境学报, 2018, 38(2): 135-141.