

网络出版时间:2019-03-07 13:33 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2019.09.007
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20190307.1332.014.html

基于 ITPCAS 驱动数据集的黄河源区植被变化及其 与气候因子相关分析

张晓龙¹,黄领梅¹,权全¹,张磊²,沈冰¹,莫淑红¹

(1 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室(西安理工大学),陕西 西安 710048;

2 黄河上游水电开发有限责任公司,青海 西宁 810000)

[摘要] 【目的】厘清近年来黄河源区植被覆盖变化及其对驱动因子的响应,为黄河源区生态环境可持续发展与科学预估气候变化对植被格局的影响提供理论依据。【方法】基于 1999—2015 年 SPOT VGT-NDVI 数据集和中国区域高时空分辨率地面气象要素(ITPCAS)驱动数据集,运用趋势分析、Mann-Kendall 非参数统计检验、R/S 分析和相关分析等方法,分析了 1999—2015 年 NDVI 和气象因子的时空变化特征,并探讨温度、降水量、地表净辐射(R_n)等气象因子以及人类活动对植被覆盖变化的影响。【结果】(1)黄河源区多年平均 NDVI 空间分布呈东南高、西北低的格局,整体上 NDVI 呈增加趋势,每 10 年增速为 1.6%,其中上升趋势的区域占研究区 78.2%;NDVI 在 2003 年附近存在突变;同时期温度和降水为振荡上升趋势,而 R_n 为振荡下降趋势,并且未来 NDVI 和各气象因子将持续这种变化趋势。(2)年平均 NDVI 与年平均温度呈显著正相关关系,与年平均降水量呈不显著正相关关系,而与年平均 R_n 呈不显著负相关关系;在偏相关分析中,NDVI 与年平均温度的相关性最好。(3)NDVI 对温度、降水量变化的响应滞后 1 个月左右,对 R_n 变化的响应滞后 2 个月左右。【结论】ITPCAS 驱动数据集在黄河源区有较好的适用性;在年尺度和月尺度上,温度都是黄河源区植被生长影响最大的气象要素;黄河源区植被覆盖的增加主要归因于温度上升以及生态保护“综合性”工程的实施。

[关键词] ITPCAS 驱动数据集;时空变化;驱动因子;黄河源区;遥感影像

[中图分类号] P467;Q948.112

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2019)09-0055-14

Relationship of vegetation cover change with climate factors in source region of the Yellow River based on ITPCAS forcing data

ZHANG Xiaolong¹,HUANG Lingmei¹,QUAN Quan¹,ZHANG Lei²,
SHEN Bing¹,MO Shuhong¹

(1 State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China (Xi'an University of Technology),
Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2 Huanghe Hydropower Development Co. Ltd, Xining, Qinghai 810000, China)

Abstract: 【Objective】The study aimed to clarify the relationship between vegetation cover and its driving factors to provide basis for the sustainable development of ecological environment and scientific estimation of climate change impacts on vegetation pattern in source areas of the Yellow River. 【Method】Based on SPOT VGT-NDVI (normalized difference vegetation index) data and the ITPCAS forcing dataset (reanalysis datasets), trend analysis, the Mann-Kendall statistical method, R/S analysis and correlation analysis were used to investigated the spatiotemporal changes of NDVI and climate factors during 1999—

[收稿日期] 2018-08-03

[基金项目] 国家重点研发计划项目(2017YFC0403600);国家自然科学基金项目(51509202,51679185)

[作者简介] 张晓龙(1988—),男,河北邯郸人,在读博士,主要从事生态水文学和干旱区水文研究。

E-mail: zhangzhangyanhe@hotmail.com

[通信作者] 黄领梅(1972—),女,四川乐至人,副教授,主要从事水文学及水资源演变研究。E-mail: 269894801@qq.com

2015. The effects of temperature, precipitation and R_n (surface net radiation) and human activities on vegetation cover change were also analyzed. 【Result】 (1) The NDVI in source region of the Yellow River was high in the southeast and low in the northwest. The NDVI has been increasing with an average rate of 1.6% per 10 years from 1999 to 2015. The area with increasing trend accounted for 78.2% of the study area. There existed abrupt point in around 2003. Temperature and precipitation were on an upward oscillation trend during the same period, while R_n was opposite. The trend of NDVI and meteorological factors would continue in future. (2) The annual NDVI had significant positive correlation with temperature, insignificant positive correlation with precipitation, and insignificant negative correlation with R_n . The correlation between NDVI and annual temperature was best in partial correlation analysis. (3) The responses of NDVI to temperature and precipitation lagged by one month, while the response to R_n lagged by two months. 【Conclusion】 The ITPCAS forcing dataset had good applicability in source region of the Yellow River. In both annual and monthly scales, temperature was the most important meteorological factor influencing vegetation growth, and the increased NDVI was mainly attributed to climate warming and the implementation of comprehensive ecological protection project.

Key words: ITPCAS forcing data; spatiotemporal change; driving factors; source region of the Yellow River; remote-sensing image

青藏高原素有“世界屋脊”、“第三极”之称,在全球气候变暖的背景下,青藏高原正在经历气候变暖过程,且比周围地区更为强烈,因此青藏高原又被称之为气候的“放大器”^[1]。黄河源区处于青藏高原腹地,海拔较高且落差大,地形、地貌复杂,气候恶劣,生态环境非常脆弱,对气候变化敏感而迅速^[2-4]。黄河源区面积占全流域面积的 16.2%,却贡献了黄河全流域 40% 以上的径流量^[5],被称为黄河流域的“水塔”,所以黄河源区对整个黄河流域的生态安全和经济发展具有重要作用^[6]。植被是重要的生态因子,它既是气候变化的承受者,又是气候变化的影响因子^[7]。归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)与植被覆盖度、叶面积指数、净初级生产力等具有很好的相关性,是监测地区或全球植被和生态环境的重要指标^[8]。植被覆盖的变化与气候变化的关系是国内外全球变化研究的重要内容之一。陆地生态系统的植被生长和空间分布与温度、降水、地表净辐射(surface net radiation, R_n)有着重要关系^[9-10]。因此,研究 21 世纪以后黄河源区植被变化及其对气候因子的响应,对于理解新世纪青藏高原生态变化与区域气候变化的联系具有重要意义。

有学者发现,黄河源区 20 世纪 90 年代以前气候表现为暖干化趋势,生态持续恶化^[11];90 年代以后,特别是进入 21 世纪后,黄河源区呈现暖湿化趋势^[12]。由于黄河源区的特殊性,近年来许多学者已对黄河源区植被变化规律及其可能的影响因素进行

了研究^[2-3,6],但因数据来源、时间跨度、研究区域侧重点和分析方法的不同而得出截然相反的两种结论^[6,13],即植被变化趋势存在“植被持续退化”^[14-15]和“植被略有增加趋势”^[3,6,16]。黄河源区处于高寒区域,自然条件恶劣,气象站点稀少且分布不均匀^[3,17]。使用气象站点进行空间插值的结果往往会产生较大误差,而再分析数据集可以较好地解决空间分布的不确定性问题。因此,本研究基于 1999—2015 年 SPOT VGT-NDVI 数据集和中国区域高时空分辨率地面气象要素(ITPCAS)驱动数据集,综合利用遥感和地理信息系统技术,分析黄河源区植被覆盖的时空变化规律及其与气象因子温度、降水和 R_n 的关系,以为黄河源区生态环境保护提供决策支持,并为科学预估气候变化背景下的植被演化分布格局提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究中黄河源区选用龙羊峡水库以上部分,地理坐标处于 32.2°~37.1°N, 95.9°~103.4°E,海拔在 2 568~6 018 m(图 1)。在行政区划上,黄河源区主要位于青海省境内,也有少部分区域位于甘肃省和四川省境内。研究区总体地势西北高、东南低,最高处位于阿尼玛卿山,最低处位于龙羊峡。研究区内分布有峡谷、高山、盆地、冰川等地貌,海拔 5 000 m 以上的山脉基本处于终年积雪状态。该区属大陆性高原气候,冷热季分明,气压低,含氧量少,

日温差较大,太阳辐射强,光热条件丰富。受季风影响,降水多集中于 6—9 月^[5],多年平均降水量 234.6~839.2 mm,空间分布差异大^[18]。黄河源区高寒植被分布较为广泛,约占源区面积的 3/4 左右,主要植被生态类型包括高寒灌丛、高寒草甸、高寒草原、沼泽及水生植被等,其中高寒草甸面积最大,高

寒草原次之。黄河源区处于季节性冻土和多年冻土的过渡区域,区域内同时存在季节冻土、连续多年冻土和片状多年冻土。多年冻土分布下界的多年平均气温为-2.5~-3.5℃,近年来由于气候变暖,黄河源区冻土发生了显著的退化^[15]。

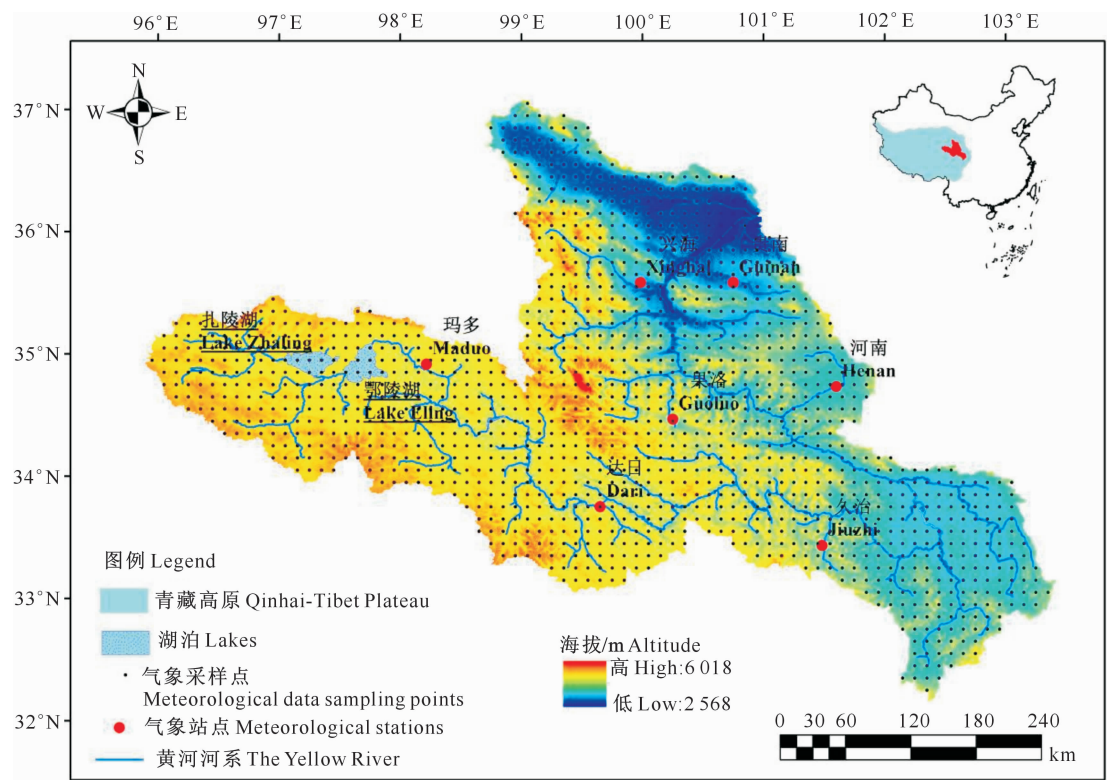


图 1 研究区概况及气象站点分布

Fig. 1 General situation of the study area and distribution of meteorological stations

1.2 数据来源及预处理

本研究使用的植被数据为 SPOT VGT-NDVI 数据集。该数据集来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>),利用最大值合成法 MVC(maximum value composites)将比利时弗莱芒技术研究所发布的 10 d 最大合成 NDVI 进一步合成中国地区 1998 年以来逐月植被指数数据集,空间分辨率为 1 km。

气象数据集使用中国区域高时空分辨率地面气象要素 (ITPCAS) 驱动数据集 (<http://westdc.westgis.ac.cn/>)。该驱动数据集是由中国科学院青藏高原研究所开发的一套再分析数据集^[19],其以 Princeton 再分析资料、GEWEX-SRB 辐射资料、GLDAS 资料以及 TRMM 降水数据为背景场,以中国气象观测数据为融合资料制作而成。该数据集为 3 h 时间分辨率和 0.1°水平空间分辨率,当前覆盖

时间段为 1979—2015 年。本研究中所涉及的参数通过以上不同时段的不同变量计算得到,其中日最大、最小温度通过每日 3 h 气温数据集取最大、最小值得到;日空气实际水汽压通过日比湿和日气压数据集计算得到。该驱动数据集在该研究区的数据采样点达到 1 421 个(图 1),能基本满足正确反映黄河源区气象要素的空间分布要求。为了分析 NDVI 与气温、降水和地表净辐射(R_n)的时空相关性,利用 ArcGIS 软件 CUBIC 重采样技术将 ITPCAS 数据集生成 1 km 空间分辨率的数据集。为了验证重采样后数据的适用性,将 1 km 气象要素数据集和研究区内 7 个典型气象站的实测温度、降水和估算的 R_n 数据进行对比。气象台站数据来源于国家气象科学数据共享服务平台 (<http://data.cma.cn/>)。气象数据采样点及气象台站点分布见图 1。

DEM 数据为地理空间数据云 (<http://www.>

gscloud.cn/)平台提供的 90 m 分辨率 SRTM 产品。土地利用数据由中国科学院地理科学与资源研究所网站(<http://www.resdc.cn/DatauseInfo.aspx?Id=1596>)获得。为了保持空间尺度的一致性,利用 ArcGIS 软件 CUBIC 重采样技术将 90 m 空间分辨率的 DEM 数据生成空间分辨率为 1 km 的数据。

1.3 研究方法

1.3.1 净辐射估算 在研究区内缺乏 R_n ($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)观测资料,所以本研究根据 1998 年联合国粮农组织(FAO)推荐的标准方法^[20],由常规气象资料分项计算的净短波辐射 R_{ns} 和净长波辐射 R_{nl} 之差得到 R_n :

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}, \quad (1)$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s, \quad (2)$$

$$R_{so} = (0.75 + 2z \times 10^{-5}) R_a, \quad (3)$$

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max,k}^4 + T_{\min,k}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a})$$

$$(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35). \quad (4)$$

式中: α 为地表反照率,本研究根据 FAO 推荐取 $0.23^{[20]}$; σ 为 Stefan-Boltzman 常数 ($4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$); $T_{\max,k}$ 和 $T_{\min,k}$ 分别为日最大、最小绝对温度(K); e_a 为空气实际水汽压(kPa); R_s 和 R_{so} 为估算的太阳辐射和净空辐射($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$); z 为海拔高度(m); R_a 为地外辐射($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)。

在进行基于中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集的 R_n 估算时, R_s 直接采用驱动数据集数据。而进行基于气象台站数据的 R_n 估算时, R_s 的计算公式为:

$$R_s = (0.25 + 0.5 \frac{n}{N}) R_a. \quad (5)$$

式中: n 为日照时数, N 为可照时数, R_a 为地外辐射($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)。

1.3.2 趋势分析 利用一元线性回归分析得到植被指数及气象要素每个栅格值在一定时间序列的变化趋势和强度^[6]。本研究通过 IDL 程序计算长时间序列的每个栅格的多年变化趋势,得到斜率 b ,即年际间的变化率,进而生成黄河源区年际变化率空间分布图。

一元线性回归计算公式为:

$$b = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times x_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n x_i}{n \times \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}. \quad (6)$$

式中: b 为斜率,即变化趋势, $b > 0$ 表示增加趋势,

$b < 0$ 表示减少趋势; i 为年序号; n 为时间长度; x_i 为第 i 年的栅格值。

1.3.3 其他分析方法 Mann-Kendall 非参数统计检验法中样本可不必遵从某一特定的分布,也不受个别异常值的干扰,能较客观地表征样本序列的整体变化趋势,被广泛应用于时间序列趋势检验和突变分析^[21]。考虑到存在多种影响植被变化的因素,本研究采用单相关分析来确定研究两个要素之间是否存在某种相关关联,采用偏相关分析来确定其中一个或多个变量固定的情况下单独一个自变量与因变量之间的偏相关系数,采用复相关分析确定因变量与多个自变量的综合影响^[22]。R/S 分析法是应用 Hurst 指数 H 来判断趋势性成分的强度,根据 H 值判断时间序列趋势的持续性或反持续性,是反映序列持续性的有效方法^[23]。

2 结果与分析

2.1 再分析数据集适用性分析

由于黄河源区处于高寒区域,自然条件恶劣,气象站点稀少,而这些气象站点分布极不均匀,地面气象观测站不能较好地反映气象要素在复杂地势下的空间分布^[24]。遥感技术的快速发展弥补了常规传统监测手段的不足,在区域信息采集和监测过程中有着无法替代的优势,为解决这些气象要素较准确的空间分布问题提供了较好的方法和工具。但是因为当前主流遥感反演产品使用地面站点信息较少,特别是在中国寒区、旱区^[19],数据精度还存在一定误差。利用地面气象站数据对遥感产品进行数据融合、再分析得到的产品不仅可以满足数据的空间分布要求,而且在精度上也有较大提高,为进一步研究提供了极大的便利。

本研究使用 ITPCAS 驱动数据集分析黄河源区气象要素的时空变化。该驱动数据集在黄河源区的数据采样点达到 1 421 个(图 1),满足了数据空间均匀分布的要求。为了验证重采样后数据的适用性,将研究区内 7 个典型实测的温度、降水和估算的 R_n 数据与气象站相距最近采样点的 ITPCAS 数据进行对比,结果见表 1。从表 1 可知,再分析数据集的温度和通过再分析数据集估算的 R_n 与气象站数据的相关系数均接近于 1,而与降水数据的相关系数也在 0.94 以上,表明该气象数据集与气象站数据的相关性和一致性较好,说明该数据集或通过该数据集估算的气象要素可以较好地反映区域变化规律,在黄河源区有较好的适用性。需要说明的是,气

象要素存在一定误差,主要原因可能是气象站点和 等差异;另外插值本身也会产生一定误差。采样点之间并不完全重合,存在着海拔、坡度、坡向

表 1 再分析数据集气象要素与气象站点数据的对比
Table 1 Comparison of weather station data and reanalysis dataset

站名 Meteorological station	温度 Temperature				
	气象站月平均值/℃ Monthly values of the weather station	再分析数据集月平均值/℃ Monthly values of the reanalysis dataset	误差 Error	标准误差 RMSE	相关系数 Correlation coefficient
兴海 Xinghai	2.03	2.86	0.83	0.96	1.00**
贵南 Guinan	2.89	2.52	−0.37	0.50	1.00**
玛多 Maduo	−2.62	−2.54	0.07	0.21	1.00**
果洛 Guoluo	0.52	−0.02	−0.54	0.66	1.00**
达日 Dari	0.06	−1.44	−1.50	1.51	1.00**
河南 Henan	0.38	−0.32	−0.70	0.74	1.00**
久治 Jiuzhi	1.64	−0.32	−1.97	1.99	1.00**

站名 Meteorological stations	降水 Precipitation				
	气象站月平均值/mm Monthly values of the weather station	再分析数据集月平均值/mm Monthly values of the reanalysis dataset	误差 Error	标准误差 RMSE	相关系数 Correlation coefficient
兴海 Xinghai	32.17	35.18	3.00	12.00	0.96**
贵南 Guinan	36.66	33.43	−3.23	13.78	0.94**
玛多 Maduo	28.78	29.23	0.45	3.74	0.99**
果洛 Guoluo	42.94	45.49	2.55	9.72	0.98**
达日 Dari	47.90	47.57	−0.33	5.61	0.99**
河南 Henan	46.86	46.80	−0.06	4.07	1.00**
久治 Jiuzhi	61.03	62.79	1.77	9.40	0.99**

站名 Meteorological stations	R_n				
	气象站月平均值/ (MJ·m ^{−2}) Monthly values of the weather station	再分析数据集月平均值/ (MJ·m ^{−2}) Monthly values of the reanalysis dataset	误差 Error	标准误差 RMSE	相关系数 Correlation coefficient
兴海 Xinghai	235.08	267.88	32.80	39.6	1.00**
贵南 Guinan	237.64	272.71	35.07	44.7	1.00**
玛多 Maduo	250.01	297.47	47.46	52.8	1.00**
果洛 Guoluo	238.65	276.47	37.82	47.1	1.00**
达日 Dari	244.16	286.82	42.66	48.6	1.00**
河南 Henan	245.57	276.50	30.93	37.8	1.00**
久治 Jiuzhi	237.44	271.75	34.31	42.3	1.00**

注: * 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$ 。下同。
Note: * mean $P<0.05$; ** mean $P<0.01$. The same below.

2.2 黄河源区植被 NDVI 的时空变化特征

2.2.1 植被 NDVI 年际变化特征 从图 2-a 可知, 21 世纪以来黄河源区植被 NDVI 处于振荡上升趋势中,NDVI 最小值(0.282)出现在 2001 年,最大值(0.332)出现在 2010 年。通过 Mann-Kendall 趋势分析计算 1999—2015 年黄河源区植被覆盖的平均变化趋势,结果表明黄河源区平均植被 NDVI 呈增加趋势,每 10 年增速为 1.6%,未通过显著性检验 ($P>0.05$)。将研究区分为 5 类不同的海拔带(< 3 000 m、≥3 000~<3 500 m、≥3 500~<4 000 m、≥4 000~<4 500 m 和 ≥4 500 m)进行统计,得到不同海拔带 NDVI 年均值的多年变化情况见图 2-b。从图 2-b 可知,海拔 ≥3 500~<4 000 m 植被

NDVI 均值最高(0.406),其次是 ≥3 000~<3 500 m (0.314),然后依次是 ≥4 000~<4 500 m (0.283),<3 000 m (0.145)和 ≥4 500 m (0.022)。各海拔带均呈上升趋势,其中 ≥3 000~<3 500 m 上升速率最大(每 10 年增速 2.1%),≥4 500 m 上升速率最小(每 10 年增速仅为 0.03%),但只有 ≥3 500~<4 000 m 和 ≥3 000~<3 500 m 海拔带上升趋势通过显著性检验 ($P<0.05$)。通过 Mann-Kendall 法分析可知,研究区多年序列 NDVI 在 2003 年附近存在突变并呈现上升趋势,通过显著水平为 0.05 的检验。经过 R/S 法分析,表明研究区植被 NDVI 的 Hurst 指数为 0.771,说明研究区植被 NDVI 未来的变化趋势将会持续上升。

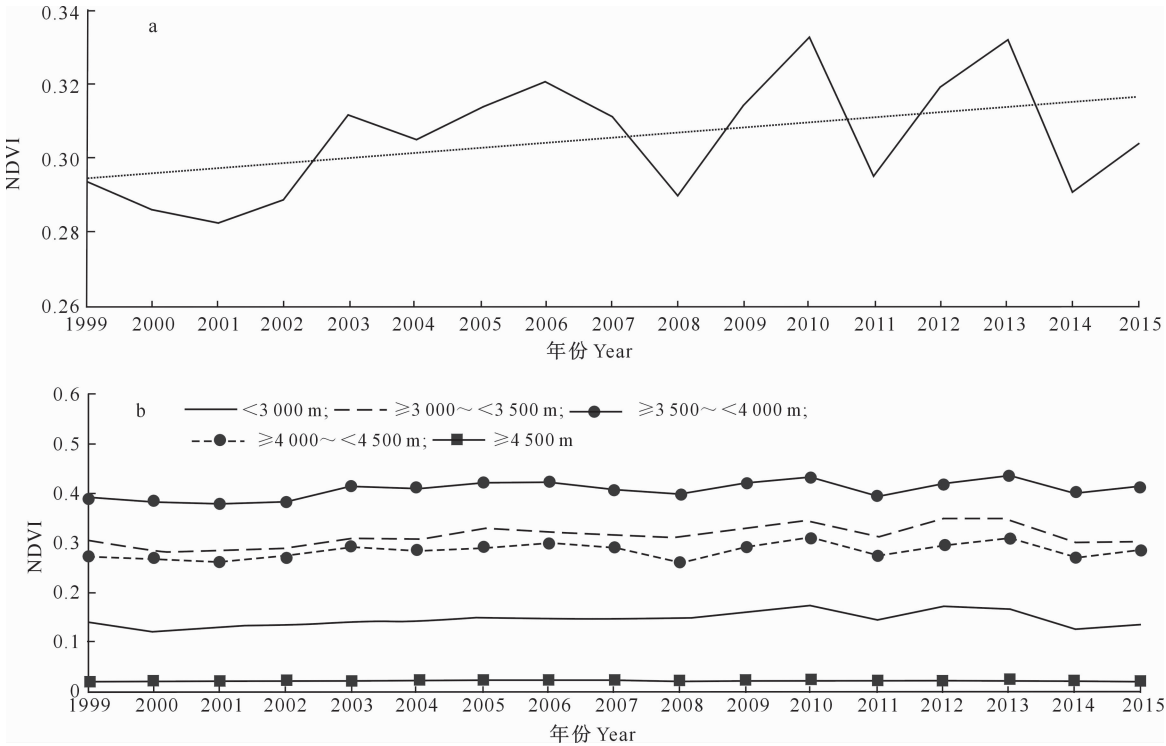


图 2 研究区(a)及不同海拔带(b)NDVI 的年均值变化

Fig. 2 Annual mean NDVI in study area (a) and at different altitudes (b)

2.2.2 植被 NDVI 空间分布和趋势特征 本研究基于 ArcGIS 软件和 IDL 编程得到年平均 NDVI 后,进一步可以得到其多年平均的空间分布及多年变化趋势特征见图 3。从图 3-a 可知,黄河源区植被 NDVI 值为 0.005~0.52,平均值为 0.304,呈东南高、西北低的空间格局,其中以 NDVI 值为 0.35~0.45 的面积最大,占 31.91%,NDVI 值为 0.25~0.35 的面积占 26.71%。NDVI 高值区主要分布在东南部玛曲、红原、诺尔盖及河南蒙古族自治县等区域,该区域水量充沛、温热条件较高,因河流游荡形成大面积湿地,所以植被较好;NDVI 低值区主要分布在曲麻莱、玛多、共和、乌兰县等地区,该区域或因处于高海拔山地,或因处于荒漠草原覆被类型区而植被 NDVI 较低。从图 3-b 可知,黄河源区植被 NDVI 整体呈上升趋势,呈上升趋势的区域占 78.2%,呈下降趋势的区域占 21.8%。其中每 10 年上升速率小于 4%的区域占 72.6%,每 10 年上升速率大于 4%的区域主要分布在龙羊峡附近的兴海、同德和贵南县;每 10 年下降速率小于 4%的区域占 19.5%,零星分布于西北高山区及北部共和盆地附近。

2.3 黄河源区气象要素的时空变化特征

2.3.1 气象要素年际变化特征 全球气候变化导

致区域气温、降水和 R_n 的时空分布发生变化,进而对植被活动造成显著影响。研究区多年平均温度、降水量和 R_n 的年际变化和年内变化过程见图 4。从图 4 可知,1999—2015 年黄河源区温度和降水处于振荡上升中,而 R_n 处于振荡下降中。年平均温度 $-1.22\text{ }^{\circ}\text{C}$,最小值($-1.953\text{ }^{\circ}\text{C}$)出现在 2000 年,最大值($-0.742\text{ }^{\circ}\text{C}$)出现在 2014 年;年平均降水量 543.1 mm ,年降水量最小值(434.3 mm)出现在 2000 年,最大值(625.0 mm)出现在 2009 年;年平均 R_n 为 $2\,474.7\text{ MJ/m}^2$,年 R_n 最小值($2\,393.9\text{ MJ/m}^2$)出现在 2009 年,最大值($2\,523.8\text{ MJ/m}^2$)出现在 2001 年。通过 Mann-Kendall 趋势分析计算 1999—2015 年黄河源区各气象要素的变化趋势,结果表明黄河源区温度和降水呈增加趋势,每 10 年温度增速为 $0.52\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($P<0.01$),降水增速为 7.604 mm ($P>0.05$), R_n 呈下降趋势,速率为 $3.501\text{ MJ/(m}^2\cdot\text{a)}$ ($P>0.05$)。研究区温度的多年序列在 2008 年附近存在突变并呈现上升趋势 ($P<0.05$);研究区温度的 Hurst 指数为 0.825 2,说明研究区温度未来的变化趋势会持续上升。研究区降水的多年序列在 2003 年附近存在突变并呈现上升趋势 ($P<0.05$);研究区降水的 Hurst 指数为 0.797 4,说明研究区降水未来的变化趋势会持续上

升。研究区 R_n 的多年序列在 2011 年附近存在突变并呈现下降趋势($P>0.05$);研究区 R_n 的 Hurst 指数为 0.698 4,说明研究区 R_n 未来的变化趋势会持续下降。

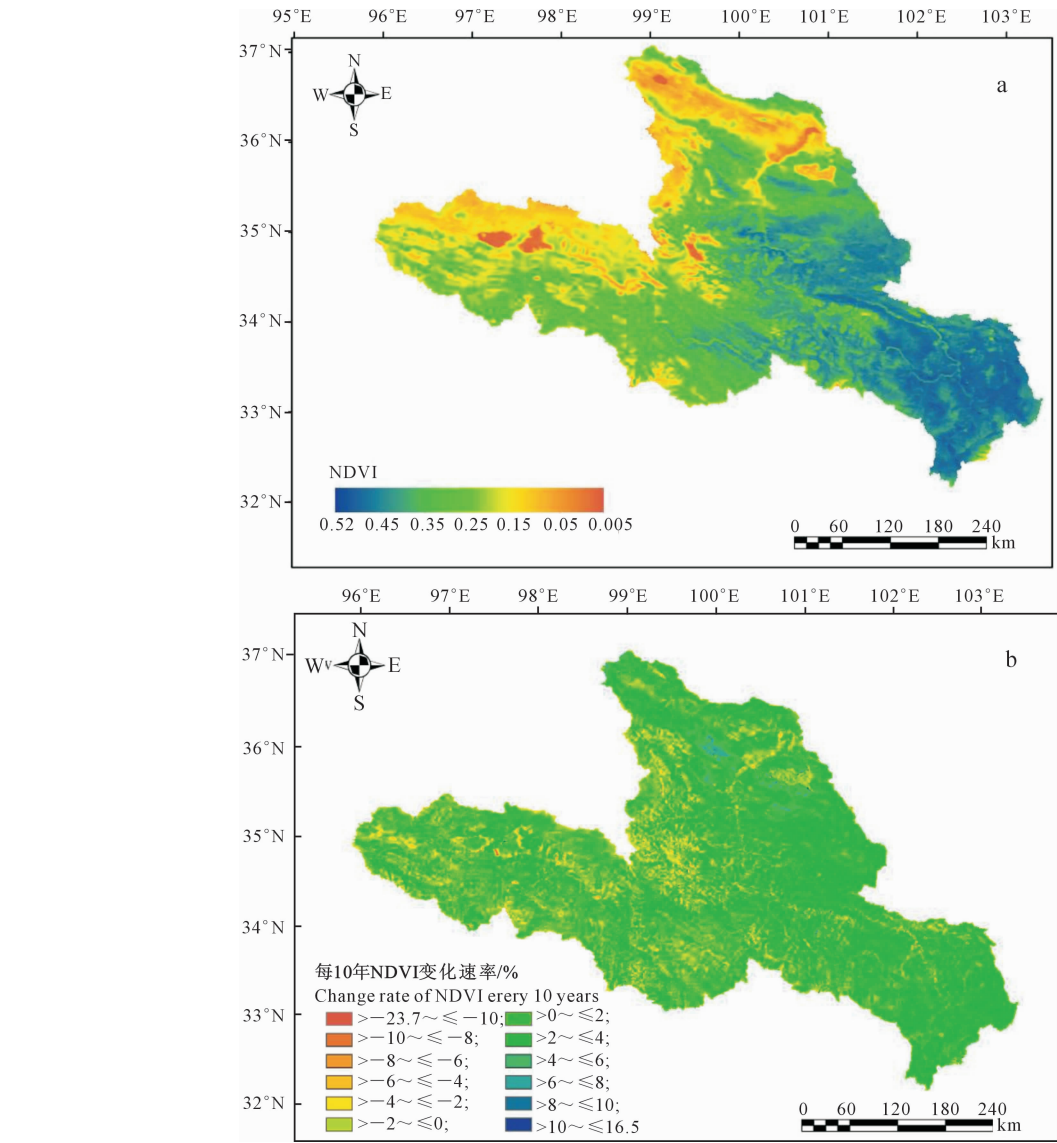


图 3 研究区植被 NDVI 多年平均空间分布(a)及变化速率(b)

2.3.2 气象要素空间分布和趋势特征 本研究基于 ArcGIS 软件和 IDL 编程得到黄河源区多年平均的温度、降水、 R_n 的空间分布及多年变化趋势特征,结果见图 5。由图 5-a1 可知,黄河源区多年平均温度为 $-8.91\sim7.22\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度的空间分布与海拔有较为紧密的联系。在低海拔地区多年平均温度大于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高温度出现在龙羊峡附近及共和盆地附近;在高海拔地区多年平均温度小于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低温度出现在中部和西部的高寒山区。从图 5-a2 可知,黄河源区年平均降水量为 $268\sim841\text{ mm}$,降水的空间分布主要受海拔和地形的影响,降水量分布呈源区东南部向西北部递减,东南部处于源区的迎风坡上,季风携带的水汽经过此处形成更多的降水。从图 5-a3 可知,黄河源区年平均 R_n 为 $2\,126\sim2\,715\text{ MJ/m}^2$, R_n 分布呈源区西南部向东北部递减,其空间分布主要受日照时数、经纬度、海拔和水汽压等的综合影响。由图 5-b1 可知,1999—2015 年黄河源区绝大部分地区(占研究区 93.65%)的温度表现为上升趋势,上升最明显的区域为扎陵、鄂陵湖以南的高寒山区及共和、乌兰县附近;仅有 6.35% 的地区温度表现为下降趋势,主要集中在阿尼玛卿山北麓和龙羊峡附近;有 73.87% 的区域温度每 10 年的上升速率在 $0\sim0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从图 5-b2 可知,1999—2015 年黄河源区降水量呈整体增加趋势,其中呈增加趋势的区

域占源区 97.7%，而呈下降趋势的区域占源区 2.3%，下降区域主要集中在阿尼玛卿山附近；有 78.64% 的区域降水量年增加速率在 4~12 mm。从图 5-b3 可知，1999—2015 年黄河源区 R_n 整体呈下降趋势，其中呈下降趋势的区域占源区 89.82%，

而呈上升趋势的区域占 10.18%，上升区域主要集中在阿尼玛卿山以北、龙羊峡以南及扎陵、鄂陵湖以北等区域；有 61.58% 的区域 R_n 年下降速率在 $-1 \sim -6 \text{ MJ/m}^2$ ，而 R_n 年下降速率超过 -6 MJ/m^2 的区域主要出现在源区东南部。

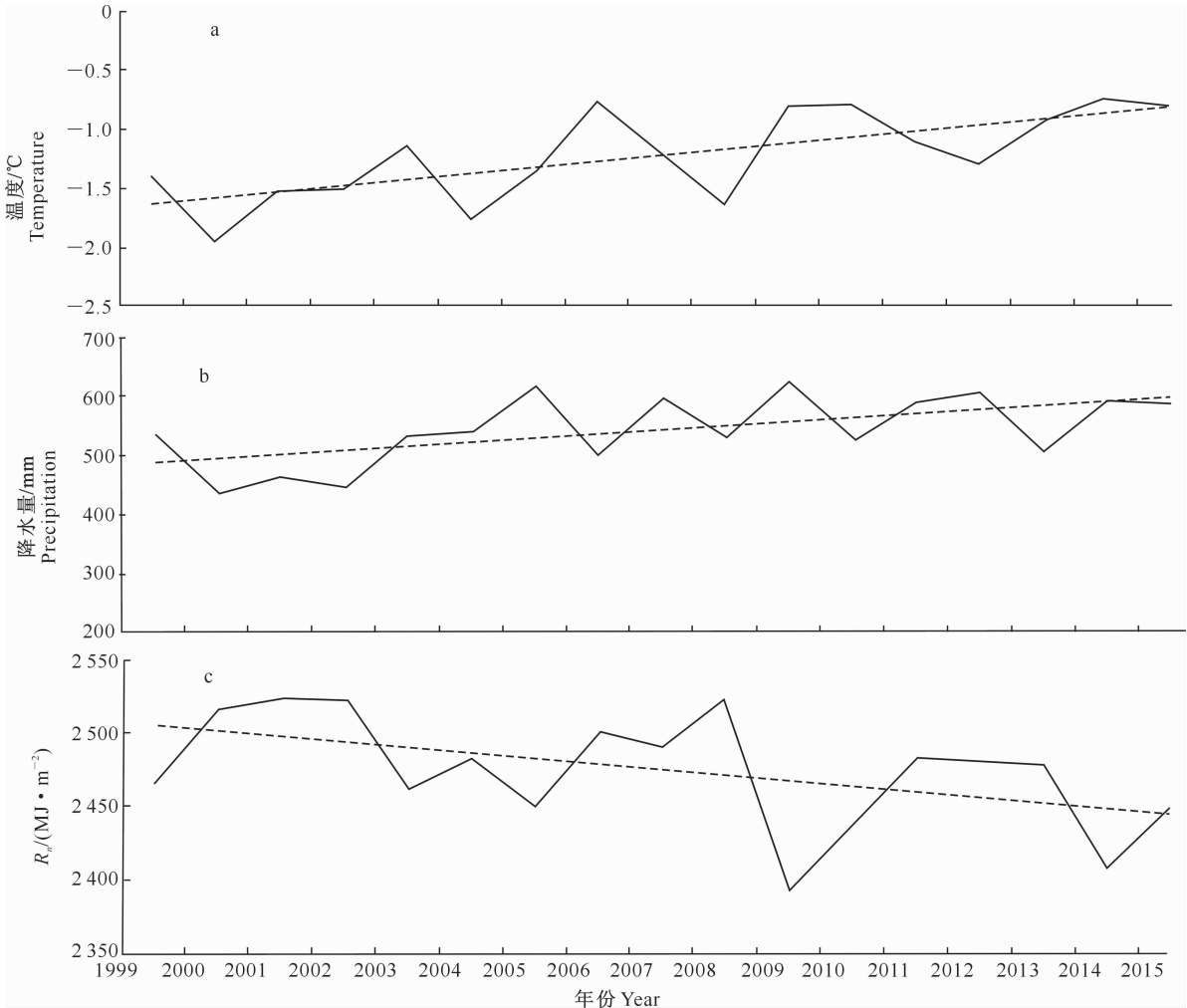


图 4 研究区温度(a)、降水量(b)和 R_n (c)的年平均变化

Fig. 4 Annual mean and monthly mean of temperature (a), precipitation (b) and R_n (c) in study area

2.4 黄河源区植被 NDVI 与气象要素的相关性

2.4.1 年尺度上植被 NDVI 与气象要素的相关性

对 1999—2015 年 NDVI 与年平均温度、降水量和 R_n 进行相关性分析，研究区整体的单相关系数分别为 0.559($P < 0.05$)、0.326 5($P > 0.05$)和 -0.389 ($P > 0.05$)，即 NDVI 与年平均温度呈显著的正相关关系，与年平均降水量呈不显著的正相关关系，与年平均 R_n 呈不显著的负相关关系。

基于 ArcGIS 软件和 IDL 编程得到年平均 NDVI 与年平均温度、年平均降水量和年平均 R_n 单相关系数的空间分布见图 6。从图 6-a 可知，年平均 NDVI 与年平均温度的相关系数为 $-0.71 \sim 0.95$ ，

根据显著性检验临界值可知，正相关区域占 87.33%，其中显著正相关区域($P < 0.05$)占 30.84%，主要分布在源区东南部和黄河干流两岸植被较好的区域；负相关区域占 12.67%，显著负相关区域($P < 0.05$)仅占 0.47%。从图 6-b 可知，年平均 NDVI 与年平均降水量的相关系数为 $-0.79 \sim 0.88$ ，根据显著性检验临界值可知，正相关区域占 77.25%，其中显著正相关区域($P < 0.05$)占 12.22%，主要分布在源区东南部和同德、贵南县区域；负相关区域占 22.75%，其中显著负相关区域($P < 0.05$)仅占 1.11%。从图 6-c 可知，年平均 NDVI 与年平均 R_n 的相关系数为 $-0.91 \sim 0.69$ ，根

据显著性检验临界值可知,负相关区域占 78.95%,其中显著负相关区域($P<0.05$)占 9.66%;正相关区域占 21.05%,主要分布在扎陵、鄂陵湖附近、贵南县东部,其中显著正相关区域($P<0.05$)占 0.68%。

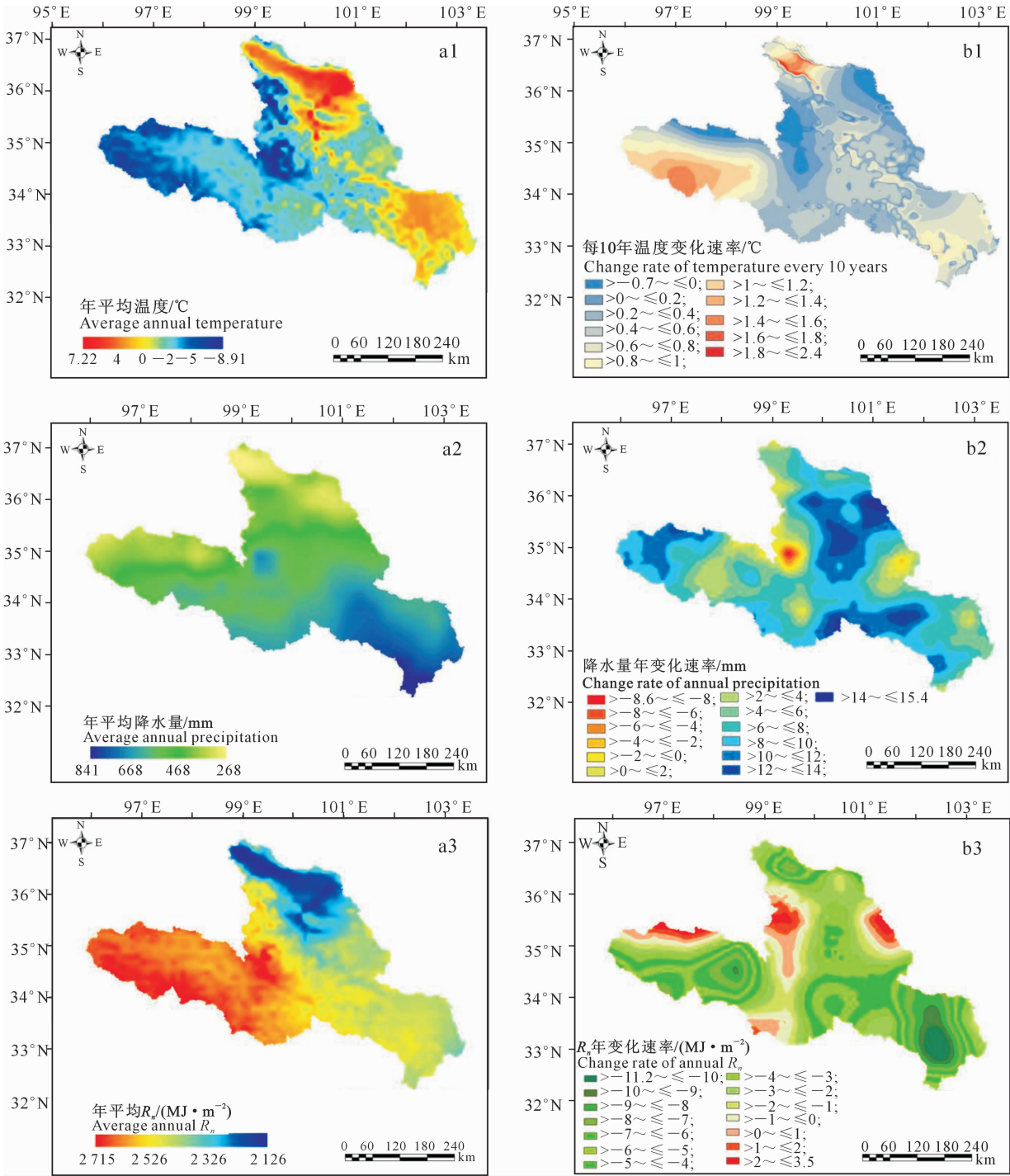


图 5 研究区温度(a)、降水量(b)和 R_n (c)的空间分布及变化速率

Fig. 5 Spatial distribution and changing rates of temperature(a), precipitation(b) and R_n (c) in study area

2.4.2 月尺度上植被 NDVI 与气象要素的相关性

基于黄河源区 1999—2015 年逐月植被 NDVI 数据,分别计算其当前月、前推 1 个月、前推 2 个月、前推 3 个月和后移 1 个月的月平均温度、降水量和 R_n 的相关系数,结果见表 2。从表 2 可以看出,逐月

NDVI 与不同时期气象要素的相关系数均通过了 0.01 水平的显著性检验。在 NDVI 与同期气象要素的相关性中,其与温度的相关性最好,其次是降水量,最后是 R_n 。进一步分析表明,NDVI 与温度的相关性中,其与前推 1 个月的月平均温度的相关性

最好(0.883);降水量的相关性中,其与前推 1 个月的平均降水量的相关性最好(0.898);与 R_n 的相关性中,其与前推 2 个月的平均 R_n 的相关性最好

(0.864),这说明 NDVI 与各气象要素存在时滞效应,即总体上该研究区 NDVI 对温度、降水量变化的滞后响应在 1 个月,对 R_n 变化的滞后响应在 2 个月。

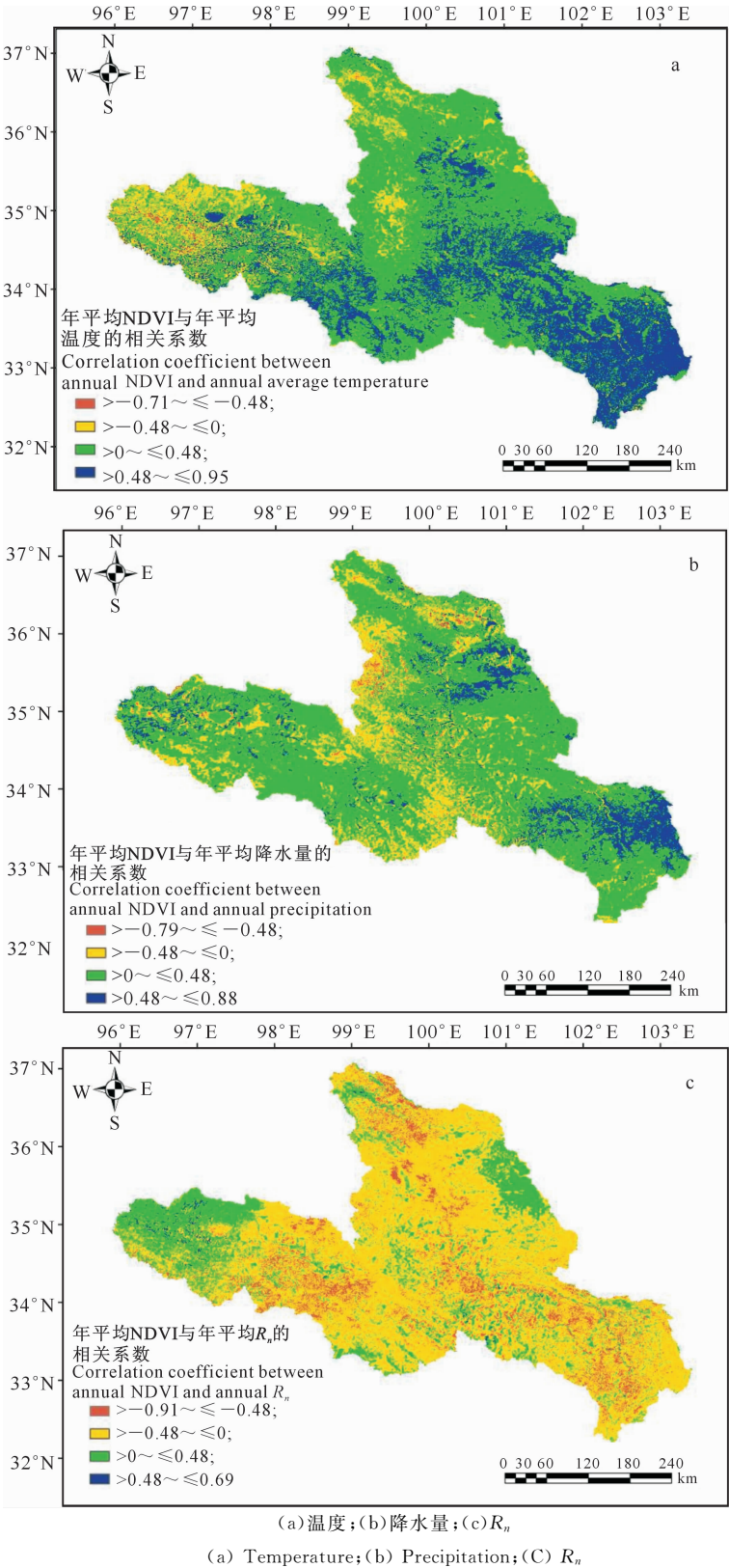


图 6 研究区植被 NDVI 与不同气象要素相关系数的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of correlation coefficients between annual NDVI and different climate factors in study area

表 2 研究区逐月植被 NDVI 与气象要素的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between monthly NDVI and different climate factors in study area

NDVI	温度 Temperature	降水量 Precipitation	R_n
当前月 Current month	0.864 **	0.861 **	0.622 **
前推 1 个月 1 month forward	0.883 **	0.898 **	0.842 **
前推 2 个月 2 month forward	0.686 **	0.639 **	0.864 **
前推 3 个月 3 month forward	0.339 **	0.219 **	0.669 **
后移 1 个月 1 month later	0.598 **	0.552 **	0.228 **

3 讨 论

3.1 NDVI 与气象因子响应的时空差异性

植被是连接土壤、大气和水分的纽带,对气候变化比较敏感,气候变化引起的植被变化已直接影响到区域陆气交换过程的物质与能量平衡^[25]。气候与植被的关系相辅相存、密不可分,主要表现在植被对大气的反馈作用和植被与大气的适应性两方面。气候类型直接决定了地球表面的植被分布规律^[26-27],同时植被对气候变化和大气环境变化十分敏感。一方面极端的气候变化可能引起一系列的生态环境破坏问题,另一方面可以通过人类对环境的反作用改善气候条件,从而使植被覆盖情况也随之改善^[28]。20 世纪 90 年代以前,黄河源区主要生态系统呈现明显退化趋势,主要原因在于区域气候暖干化以及冻土退化等^[29]。本研究结果表明,1999—2015 年黄河源区植被 NDVI 整体上呈增加趋势,每 10 年增速为 1.6%($P>0.05$);黄河源区植被的 NDVI 值为 0.005~0.518,平均值为 0.304,呈东南高、西北低的空间格局;海拔 $\geq 3\,500\sim<4\,000\text{ m}$ 植被 NDVI 均值最高;黄河源区植被 NDVI 呈上升趋势的区域占 78.2%,存在零星、斑块化退化现象,这与许多研究结果接近^[3,6,16]。值得注意的是,龙羊峡附近的兴海、同德和贵南县等地较大面积 NDVI 均值每 10 年的上升速率大于 4%。

植被覆盖变化是一个自然与人类活动交互作用的过程,植被 NDVI 虽然受温度、降水量、 R_n 的共同影响,但三者的影响程度不同。经计算,NDVI 与年平均温度、年平均降水量和年平均 R_n 的偏相关系数分别为 0.436,0.089 和 0.027,表明在只考虑单因子而固定其他因子时,研究区 NDVI 与年平均温度的相关性最好,而与年平均降水量和年平均 R_n 的相关性均较低。由此可知,温度升高是黄河源区植被 NDVI 增加的主要因素,这可能是因为黄河源区处于青藏高原腹地,光照资源和水资源十分丰富,而这 2 个因子不能成为植被生长的主要限制因子,这与本地区其他研究结果一致^[16,30]。

3.2 NDVI 对气象因子响应的时滞效应

黄河源区 NDVI 对气象因子的响应具有明显的时滞效应。本研究结果表明,黄河源区 NDVI 总体上对温度、降水量变化的响应滞后 1 个月左右。该结果与国内外一些研究结果^[31-38] 基本一致。Wang 等^[31] 发现,美国中部大平原地区当月和前 1 月的气温对 NDVI 影响显著。温刚等^[32] 研究发现,中国东部季风区 NDVI 对降水变化滞后响应 20~30 d,而同步响应温度变化。崔林丽等^[33] 发现,中国华东及其周边地区 NDVI 对气温变化滞后响应 0~1 个月,对降水变化滞后响应 1 个月左右。陈晓光等^[34] 发现,青海湖地区冬末春初温度越高,夏季植被覆盖度越大。Davenport 等^[35] 发现,在东非 NDVI 对降水滞后响应 0~2 个月;Nezlin 等^[36] 发现,威海东北部和北部 NDVI 对降水的响应滞后 0~2 个月和 3~4 个月。李霞等^[37] 发现,我国北方温带草原植被 NDVI 对前 1 月降水的时滞效应最强烈,而与当月和前 2 月降水累积量相关性最强。张景华等^[38] 发现,澜沧江流域上、中、下游植被 NDVI 对气温变化的响应滞后 0,1 和 3 个月,对降水变化的响应滞后 0,1 和 2 个月。本研究发现,黄河源区 NDVI 总体上对 R_n 变化滞后响应 2 个月左右,而国内外目前对这方面的研究较少。植被的动态变化不仅仅受到温度和降水因子的支配,还受到 R_n 的影响。太阳辐射是温度变化的主要驱动力,而 R_n 的变化较 NDVI 快速得多,同时该区域光照资源丰富,可满足植被生长的最低要求。植被 NDVI 的变化是多种因素的综合效应,所以在月尺度上,在黄河源区或类似高寒地区 NDVI 对 R_n 变化的响应滞后 2 个月是合理的。另外,不同研究区域和数据来源都可能是造成时滞效应研究结果差异的原因^[30]。另外有研究发现,NDVI 对温度的滞后效应也可能是因为当全年温度都超过了植被生长最低的需求温度时,温度对植被生长的限制作用就较小,NDVI 对温度变化的敏感度降低,滞后期就较长^[39];对于降水、 R_n 有同样的道理。不管在年尺度还是月尺度上,温度都是黄河源区植被生长影响最大的气象要素。

3.3 黄河源区人类活动对植被 NDVI 的影响

气候变化是黄河源区植被覆盖变化的重要影响因素,但是人类活动也不是可忽略的驱动因素。本研究从中国 1 : 10 万比例尺土地利用现状遥感监测数据库中提取研究区范围内每 5 年一期共 4 期的土地利用数据,统计结果见表 3。从表 3 可以看出,黄

河源区近十几年来各土地利用类型虽有浮动变化,但变化幅度不大。水域、耕地、未利用地面积略有增加,草地面积减少。另外值得注意的是,虽然城乡、工矿、居民用地相对整个源区所占比例很小,但增加了近 1.15 倍。

表 3 1996—2015 年黄河源区土地利用面积统计结果

Table 3 Land use area of 1996—2015 in study area							km ²
年代 Time	耕地 Farmland	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Water area	城乡、工矿和居民用地 Construction land	未利用地 Unused land	
1996—2000	1 495	9 253	106 647	3 201	99	23 349	
2001—2005	1 526	9 241	105 923	3 212	106	24 036	
2006—2010	1 560	9 243	105 898	3 241	117	23 985	
2011—2015	1 557	9 242	105 780	3 282	213	23 970	

黄河源区的主要产业为畜牧业,主要集中在较大的居民点附近,且呈斑块状分布。黄河源区的土地资源存在部分草场退化或荒漠化的现象,但是否由过度放牧引起仍存在争议^[24]。同时人类活动中城市、工矿、水库等建设导致城镇周围植被遭到破坏,而这些区域一般处于河流两岸较为开阔、气候较为舒适的地带,导致局部区域植被覆盖下降。而三江源自然保护区(2000 年)实施的生态保护与建设工程,以及青海省实施的人工增雨、退牧/耕还草、治理草原鼠害和黑土滩及生态移民等“综合性”工程(2004 年),都对植被恢复产生正面影响^[3],这些政策已经初见成效。

4 结 论

本研究利用 1999—2015 年 SPOT VGT-NDVI 数据和 ITPCAS 驱动数据集,综合利用遥感和地理信息系统技术,分析黄河源区植被覆盖的时空变化规律及其气象因子的响应,并初步分析了人类活动对植被覆盖的影响,得到以下结论。

(1)通过对比 ITPCAS 驱动数据集与气象站数据,结果显示数据一致性非常好,可以较好地反映区域时空变化规律,该再分析数据集在黄河源区有较好的适用性。

(2)1999—2015 年黄河源区整体上植被 NDVI 呈增加趋势,同时期温度和降水量处于振荡上升趋势,而 R_n 处于振荡下降趋势,并且未来各 NDVI 和气象因子将持续这种变化趋势。NDVI 与年平均温度呈显著正相关关系,与年平均降水量呈不显著正相关关系,而与年平均 R_n 呈不显著的负相关关系;NDVI 与年温度的偏相关性最好。NDVI 总体上对温度、降水量变化滞后响应 1 个月左右,对 R_n 变化

滞后响应 2 个月左右。在年尺度和月尺度上,温度都是黄河源区植被生长影响最大的气象要素。

(3)黄河源区植被覆盖的增加主要归因于温度上升以及生态保护“综合性”工程的实施。在此双重利好下,黄河源区的生态环境将进一步得到恢复。

[参考文献]

[1] 潘保田,李吉均. 青藏高原:全球气候变化的驱动机与放大器:Ⅲ. 青藏高原隆起对气候变化的影响 [J]. 兰州大学学报(自然科学版),1996,32(1):108-115.
Pan B T,Li J J. Qinghai-Tibetan Plateau:a driver and amplifier of the global climatic change:Ⅲ. the effects of the uplift of Qinghai-Tibetan Plateau on climatic changes [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences),1996,32(1):108-115.

[2] 陈 琼,周 强,张海峰,等. 三江源地区基于植被生长季的 NDVI 对气候因子响应的差异性研究 [J]. 生态环境学报,2010,19(6):1284-1289.
Chen Q,Zhou Q,Zhang H F,et al. Spatial disparity of NDVI response in vegetation growing season to climate change in the Three-River Headwaters Region [J]. Ecology and Environmental Sciences,2010,19(6):1284-1289.

[3] 吴喜芳,李改欣,潘雪鹏,等. 黄河源区植被覆盖度对气温和降水的响应研究 [J]. 资源科学,2015,37(3):512-521.
Wu X F,Li G X,Pan X P,et al. Response of vegetation cover to temperature and precipitation in the source region of the Yellow River [J]. Resources Science,2015,37(3):512-521.

[4] 宋 翔,颜长珍,朱艳玲,等. 黄河源区土地利用/覆被变化及其生态环境效益 [J]. 中国沙漠,2009,29(6):1049-1055.
Song X,Yan C Z,Zhu Y L,et al. Land use/cover change and associated effects on eco-environment in source region of Yellow River [J]. Journal of Desert Research,2009,29(6):1049-1055.

[5] 蓝永超,鲁承阳,喇承芳,等. 黄河源区气候向暖湿转变的观测事实及其水文响应 [J]. 冰川冻土,2013,35(4):920-928.
Lan Y C,Lu C Y,La C F,et al. The fact of climate shift to warm-humid in the source regions of the Yellow River and its

- hydrologic response [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(4): 920-928.
- [6] 徐浩杰, 杨太保, 曾彪. 黄河源区植被生长季 NDVI 时空特征及其对气候变化的响应 [J]. *生态环境学报*, 2012, 21(7): 1205-1210.
- Xu H J, Yang T B, Zeng B. Spatial-temporal variation of growing-season NDVI and its responses to climate change over the source region of the Yellow River [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(7): 1205-1210.
- [7] 孙善磊, 孙杰, 李洪利, 等. 典型干湿区植被与气候因子的相互响应关系研究 [J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(9): 4713-4716.
- Sun S L, Sun L, Li H L, et al. The relationship between vegetation and climate factors in typical arid and humid regions [J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2010, 38(9): 4713-4716.
- [8] 崔林丽, 史军, 肖风劲, 等. 中国东部 NDVI 的变化趋势及其气候因子的相关分析 [J]. *资源科学*, 2010, 32(1): 124-131.
- Cui L L, Shi J, Xiao F J, et al. NDVI changes trend and its relationship with climate factors in Eastern China [J]. *Resources Science*, 2010, 32(1): 124-131.
- [9] 郝成元, 朱宗泽, 吴绍洪. 哀牢山东、西两侧植被 NDVI 指数和植被类型与主要环境因子的相关性分析 [J]. *植物资源与环境学报*, 2009, 18(2): 68-72.
- Hao C Y, Zhu Z Z, Wu S H. Correlation and analysis of vegetation NDVI and type if vegetation with main environmental factors on eastern and western sides of Ailao Mountain [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2009, 18(2): 68-72.
- [10] 周涛, 仪垂祥, 史培军. 辐射干燥指数影响下 NDVI 与气候因子的关系 [J]. *地理学报*, 2003, 58(4): 512-518.
- Zhou T, Yi C X, Shi P J. The relationship of NDVI and climatic factors under different radiation dryness indexes [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(4): 512-518.
- [11] 张士锋, 华东, 孟秀敬, 等. 三江源气候变化及其对径流的驱动分析 [J]. *地理学报*, 2011, 66(1): 13-24.
- Zhang S F, Hua D, Meng X J, et al. Climate change and its driving effect on the runoff in the Three-River Headwaters Regions [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 13-24.
- [12] 徐维新, 古松, 苏文将, 等. 1971—2010 年三江源地区干湿状况变化的空间特征 [J]. *干旱区地理*, 2012, 35(1): 46-55.
- Xu W X, Gu S, Su W J, et al. Spatial pattern and its variations of aridity/humidity during 1971—2010 in Three-River Source Region on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Arid Land Geopraphy*, 2012, 35(1): 46-55.
- [13] 康悦, 李振朝, 田辉, 等. 黄河源区植被变化趋势及其对气候变化的响应过程研究 [J]. *气候与环境研究*, 2011, 16(4): 505-512.
- Kang Y, Li Z C, Tian H, et al. Trend of vegetation evaluation and its responses to climate change over the source region of the Yellow River [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2011, 16(4): 505-512.
- [14] 张懿锂, 刘林山, 摆万奇, 等. 黄河源地区草地退化空间特征 [J]. *地理学报*, 2006, 61(1): 3-14.
- Zhang Y L, Liu L S, Bai W Q, et al. Grassland degradation in the source region of the Yellow River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(1): 3-14.
- [15] 刘纪元, 徐新良, 邵全琴. 近 30 年来青海三江源地区草地退化的时空特征 [J]. *地理学报*, 2008, 63(4): 364-376.
- Liu J Y, Xu X L, Shao Q Q. The spatial and temporal characteristics of grassland degradation in the Three-River Headwaters Region in Qinghai Province [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(4): 364-376.
- [16] 刘宪峰, 任志远, 林志慧, 等. 2000—2011 年三江源区植被覆盖时空变化特征 [J]. *地理学报*, 2013, 68(7): 897-908.
- Liu X F, Ren Z Y, Lin Z H, et al. The spatioal-temporal changes of vegetation coverage in the Three-River Headwater Region in recent 12 year [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7): 897-908.
- [17] 史丹丹. 基于 NDVI 的黄河源区生长季植被对气候因子的响应 [D]. 昆明: 云南大学, 2016.
- Shi D D. The responses of NDVI-based vegetation during growing season to climate factors in the Yellow River Source Region [D]. Kunming: Yunnan University, 2016.
- [18] 张磊. 近 32 年黄河源区土地利用和植被指数时空动态变化及其驱动因子分析 [D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- Zhang L. Spatial and temporal dynamic changes of land use and vegetation index in the source area of the Yellow River in recent 32 years and analysis of its driving factors [J]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [19] 何杰, 阳坤. 中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集 [DS]. 兰州: 寒区旱区科学数据中心, 2011. doi: 10.3972/westdc.002.2014.db.
- He J, Yang K. China meteorological forcing dataset [DS]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Science Data Center, 2011. doi: 10.3972/westdc.002.2014.db.
- [20] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements [J]. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, 1998, 56: 100-109.
- [21] 张晓龙, 黄领梅, 沈冰. 秦岭南北典型流域径流特征及其降水变化响应 [J]. *水电能源科学*, 2015, 1(1): 11-14.
- Zhang X L, Huang L M, Shen B. Characteristics of runoff and its responses to rainfall change in typical basins of northern and southern regions of Qinling Mountain [J]. *Water Resources and Power*, 2015, 1(1): 11-14.
- [22] 徐建华. 现代地理学中的数学方法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- Xu J H. Mathematical method in modern geography [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [23] 张晓伟, 沈冰, 孟彩侠. 和田绿洲水文气象要素分形特征与 R/S 分析 [J]. *中国农业气象*, 2008, 29(1): 12-15.
- Zhang X W, Shen B, Meng C X. Fractal characteristics and R/S analysis of hydrometeor in Hotian Oasis of Xinjiang Autonomous Region [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2008, 29(1): 12-15.
- [24] 柳媛普. 黄河源区植被变化及其对气候环境影响的研究 [D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2007.

Liu Y P. The study of vegetation changes and influenced on climatic environment in the source regions of Yellow River [D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2007.

[25] 刘 可, 杜灵通, 侯 静, 等. 近 30 年中国陆地生态系统 NDVI 时空变化特征 [J]. 生态学报, 2018, 38(6): 1885-1896.

Liu K, Du L T, Hou J, et al. Spatiotemporal variations of NDVI in terrestrial ecosystems in China from 1982—2012 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 1885-1896.

[26] 王昭生, 黄 玫, 闫慧敏, 等. 1982—2006 年加纳植被覆盖时空变化及其气候影响 [J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(1): 78-85.

Wang Z S, Huang M, Yan H M, et al. Spatiotemporal variation of vegetation and climate impacts on it in Ghana from 1982 to 2006 [J]. Journal of Geo-Information Science, 2015, 17(1): 78-85.

[27] Antanba A, Tucker C J. Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981—2003 [J]. Journal of Arid Environments, 2005, 63(3): 596-614.

[28] 郑亚云. 榆林 NDVI 时空变化及驱动因子研究 [D]. 西安: 长安大学, 2015.

Zheng Y Y. The study on NDVI temporal and spatial change and driving factors in Yulin [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.

[29] 王根绪, 沈永平, 程国栋. 黄河源区生态环境变化与成因分析 [J]. 冰川冻土, 2000, 22(3): 200-205.

Wang G X, Shen Y P, Cheng G D. Eco-environmental changes and causal analysis in the source regions of the Yellow River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(3): 200-205.

[30] Fan J W, Shao Q Q, Liu J Y, et al. Assessment of effects of climate change and grazing activity on grassland yield in the Three Rivers Headwaters Region of Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 170: 571-584.

[31] Wang J, Rich P M, Proce K P. Temporal response of NDVI to precipitation and temperature in the Central Great Plains, USA [J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24: 2345-2364.

[32] 温 刚, 符淙斌. 中国东部季风区植被物候季节变化对气候响应的大尺度特征: 多年平均结果 [J]. 大气科学, 2000, 24(5): 676-682.

Wen G, Fu C B. The large features of the seasonal phenological response to the monsoon climate in East China: multi-year average results [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science, 2000, 24(5): 676-682.

[33] 崔林丽, 史 军. 中国华东及其周边地区 NDVI 对气温和降水的月际响应特征 [J]. 自然资源学报, 2011, 26(2): 2121-2130.

Cui L L, Shi J. Inter-monthly response characteristics of NDVI to the variation of temperature and precipitation in East China and its surrounding areas [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(2): 2121-2130.

[34] 陈晓光, 李剑萍, 李志军, 等. 青海湖地区植被覆盖及其与气温降水变化的关系 [J]. 中国沙漠, 2007, 27(5): 797-804.

Chen X G, Li J P, Li Z J, et al. Vegetation coverage and its relation with climate change in Qinghai Lake area [J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(5): 797-804.

[35] Davenport M, Nicholson S. On the relation between rainfall and the normalized difference vegetation index for diverse vegetation types in East Africa [J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(2): 2369-2389.

[36] Nezlin N P, Kostianoy A G, Li B L. Inter-annual variability and interaction of remote-sensed vegetation index and atmospheric precipitation in the Aral Sea region [J]. Journal of Arid Environments, 2005, 62(4): 677-700.

[37] 李 霞, 李晓兵, 陈云浩, 等. 中国北方草原植被对气象因子的时滞效应 [J]. 植物生态学报, 2007, 31(6): 1054-1062.

Li X, Li X B, Chen Y H, et al. Temporal responses of vegetation to climate variables in temperate steppe of northern China [J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(6): 1054-1062.

[38] 张景华, 封志明, 姜鲁光, 等. 澜沧江流域植被 NDVI 与气候因子的相关性分析 [J]. 自然资源学报, 2015, 30(9): 1425-1435.

Zhang J H, Feng Z M, Jiang L G, et al. Analysis of the correlation between NDVI and climate factors in the Lancang River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(9): 1425-1435.

[39] 崔林丽, 史 军. 中国华东及其周边地区 NDVI 对气温和降水的季节响应 [J]. 资源科学, 2012, 34(1): 81-90.

Cui L L, Shi J. Characteristics of seasonal response of NDVI to variations in temperature and precipitation in East China and its surrounding areas [J]. Resources Science, 2012, 34(1): 81-90.