

黄河源区植被 NDVI 演变及其与降水、气温的关系

管晓祥^{1,2}, 刘翠善^{2,3}, 鲍振鑫^{2,3}, 金君良^{2,3,4}, 王国庆^{2,3,4}

(1.河海大学 水文水资源学院, 南京 210098;

2.水利部 应对气候变化研究中心, 南京 210029; 3.南京水利科学研究院

水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029; 4.长江保护与绿色发展研究院, 南京 210098)

摘要:为分析 1982—2018 年黄河源区不同季节植被 NDVI 空间演变规律及其影响因子, 根据流域内及周边气象站点的同期降水、气温观测资料, 运用趋势检验法和相关分析等方法, 在像元尺度上揭示了 NDVI 演变趋势及其与降水气温的关系。结果表明: 黄河源区各季节气温上升趋势显著, 年平均升温率达到了 $0.54^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。流域内降水年际内略有波动, 无显著变化趋势, 冬季降水略有减少趋势。源区内超过 90% 的地区 NDVI 值全年呈增长趋势, 植被状况呈现改善态势, 而中下游地区这一趋势比上游及源头地区更为显著。NDVI 与气温呈显著的正相关关系, 气温的升高对植被生长起到显著的正面促进作用; 除冬季之外, 绝大多数地区 NDVI 与降水的相关性都不显著 ($p > 0.05$), 夏季约有 50% 的地区 NDVI 与降水量呈正相关关系, 源头玛多县地区降水的增加有助于植被生长。残差分析结果表明: 冬季人类活动对流域 NDVI 变化的影响微弱; 达日站—久治站区间和河南站—兴海站区间受人类活动影响较为显著, 2000 年以后人类活动所导致的植被退化情势减缓, 黄河源区植被情况得到一定的改善。

关键词: 黄河源区; 植被变化; NDVI; 影响因素分析

中图分类号: Q948.112

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)05-0268-10

Variation of Vegetation NDVI and Its Relationship with Climate Factors in the Yellow River Source Region

GUAN Xiaoxiang^{1,2}, LIU Cuishan^{2,3}, BAO Zhenxin^{2,3}, JIN Junliang^{2,3,4}, WANG Guoqing^{2,3,4}

(1.College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098,

China; 2.Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029,

China; 3.State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,

Nanjing 210029, China; 4.Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to analyze the spatial changing characteristics of vegetation NDVI and its influencing factors in different seasons in the Yellow River source area (YRSA) from 1982 to 2018, based on the precipitation and temperature observation data from 8 meteorological stations, trends detection approach, correlation analysis and other methods were used to reveal the changing characteristics of NDVI at the pixel scale. The results show that the air temperature rose significantly in all seasons, and the annual average warming rate reached $0.54^{\circ}\text{C}/\text{decade}$; the precipitation fluctuated slightly, the change trend was not very significant; the precipitation in winter decreased slightly; in most areas of YRSA, the NDVI value showed an increasing trend and the vegetation showed an improvement trend; The NDVI was positively correlated with temperature; the increase in air temperature had a significant positive effect on vegetation growth; except for winter, the correlation between NDVI and precipitation was not significant ($p > 0.05$); In summer, about 50% of the areas showed positive correlation between NDVI and precipitation, concentrated on the Maduo County, which contributed to vegetation growth to some extent. Residual analysis results showed that the impact of human activities in winter on the NDVI change was weak; the Dari-Jiuji region and Henan-Xinghai region were more sensitive to human activities. The vegetation degradation caused by human activities had slowed down after 2000, and the vegetation in the YRSA had been improved to a certain extent.

收稿日期: 2020-09-20

修回日期: 2020-10-20

资助项目: 国家重点研发计划 (2017YFC0404403); 国家自然科学基金项目 (51879164); 河海大学中央高校基本科学研究业务费 (B200203016)

第一作者: 管晓祥 (1995—), 男, 江苏淮安人, 硕士研究生, 从事水文水资源模拟方面的研究。E-mail: xxguan@hhu.edu.cn

通信作者: 王国庆 (1971—), 男, 山东成人, 博士, 教授级高级工程师, 从事气候变化及水文模拟研究。E-mail: gqwang@nhri.cn

Keywords: Yellow River source region; vegetation variations; NDVI; impact analysis

植被作为地表覆被系统中的主要组成部分,是陆地生态系统存在的基础条件,也是连接土壤、大气、水分和人类生产生活用地的自然纽带^[1]。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)是反映区域植被生长状态及植被覆盖程度的最佳指示因子,与植被覆盖度、净初级生产力及叶面积指数等具有良好的相关性^[2-3],因此 NDVI 被广泛用来监测区域或全球植被和生态环境变化^[4-5]。基于 NDVI 监测植被动态变化以及分析其对气候演变和人类活动的响应已经成为全球变化研究中的热点问题^[6]。

大量研究表明,植被变化主要受气候变化(如气温和降水的变化)的影响^[4,7]。国内外学者利用 NDVI 数据来监测植被覆盖变化,并在像元尺度^[8]、气象站点尺度^[9]或者流域平均尺度^[10]将 NDVI 与气象要素进行相关分析或回归分析以探寻植被覆盖与气象因子之间存在的响应关系。例如姜欣彤等^[7]基于高程分段,研究了黄河源区 NDVI 变化与水热条件空间分布格局的关系,发现源头高海拔地区以及下游流域出口地区降水量较低,降水是主要驱动因子,而在中等海拔地区降水量丰沛,植被演变主要受气温影响。除气候因素外,人类活动(如人工生态恢复工程和城市化)也会在一定程度上影响区域的植被覆盖变化^[2,11-12]。Evans 和 Geerken^[13]提出了残差分析法,即通过构建 NDVI 与影响因子的回归方程,计算方程残差,从而分离气候变化和人类活动对植被覆盖的影响,该方法简单有效,在之后的人类活动对植被覆盖变化的影响研究中广范使用。易浪等^[2]基于此方法在黄土高原区建立生长季植被 NDVI 与气温降水的回归关系,通过残差来表征人类活动在黄土高原不同地区对植被影响的正负作用,结果表明退耕还林还草工程极大地促进了该地区的植被恢复,而城市扩张、乱砍乱伐以及过度放牧则导致植被 NDVI 的降低。在三江源区,2000 年以来的三江源区生态保护及相关实践举措对植被恢复起到显著的积极作用,但生态措施的实施效果存在空间差异^[3]。刘宪峰等^[14]基于 MODIS NDVI 数据分析了 2000—2011 年黄河源区植被覆盖的时空变化特征及驱动因素,发现植被整体呈增加趋势,植被覆盖的增加主要与气候的暖湿化、三江源国家级自然保护区建立、生态保护工程的实施有关。

黄河源区地理位置处于青藏高原东北部,是黄河上游主要产流区、水源涵养区,也是黄河流域生态环

境保护重点区域。由于其独特的自然环境,生态环境脆弱,高寒植被系统的演变不仅决定着当地的生态环境和畜牧业生产,对整个黄河流域的生态安全和水资源的形成也具有重要影响。因此,研究黄河源区植被覆盖的变化及其对气候变化的响应,对于理解黄河流域和青藏高原环境生态系统的演变具有重要意义^[15-16]。目前对黄河源区多时间尺度(季节尺度) NDVI 演变进行相关关系及归因分析的研究尚有不足,量化区分气候因素与人类活动对黄河源区内植被情势变化的手段需要进一步的验证。本文利用趋势分析和相关性分析的方法在像元尺度上对黄河源区 1982—2018 年不同季节植被 NDVI 进行时空变化分析,揭示植被演变的空间连续性和异质性;并利用复直线回归分析方法和残差分析法,定量分析气候因素和人为因素对植被动态变化的影响,实现气候因素与人类活动对植被指数影响的定量区分。

1 研究流域及数据来源

黄河发源于青藏高原东北巴颜喀拉山北麓,黄河源区通常是指位于黄河干流唐乃亥断面以上的区域,集水面积约为 12.2 万 km²,占整个黄河流域面积的 15%左右。流域内分布高山、盆地、峡谷、湖泊和沼泽等地貌,地势西高东低(图 1)。研究区多年平均年降水量约为 508 mm,多年平均天然径流量为 205 亿 m³,降水产流多集中于夏秋季。具有典型内陆高原气候特征,冷热两季交替,干湿季分明,无明显的四季之分,气温东南高、西北低。

黄河源区内以及周边的 16 个气象站点的降水、气温观测资料通过国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>)下载获取,并采用基于高程修正方法结合 IDW (Inverse Distance Weighted)对气象数据进行插值处理,依据已有研究结果在利用气象站点观测数据对气温进行空间插值时,设定气温的垂直递减率为 $-0.55^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ^[7]。1982—2018 年的归一化植被指数 NDVI 数据来源于 NASA 发布的基于 NOAA 气象卫星数据全球 8 km 数据集,时间分辨率为 15 d,该数据集是目前持续时间最长的连续数据集,具有覆盖范围广、时间跨度长和较强的植被监测能力等优点^[17]。为方便在不同时间尺度研究 NDVI 演变特点,采用年最大值合成法(Maximum Value Composite, MVC)获得 NDVI 月值,此方法可以有效减少大气中来自云、气溶胶、云阴影、视角以及太阳高度角的影响,以各月份的平均值作为季度或年 NDVI 的结果。

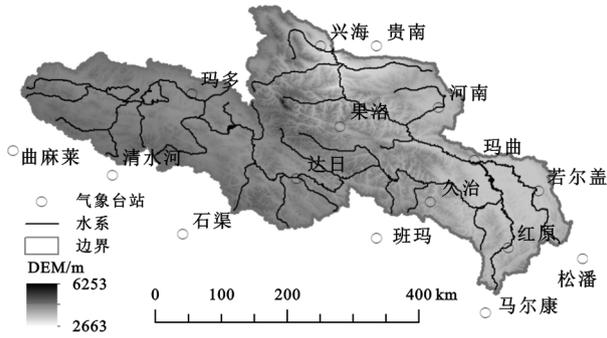


图 1 黄河源区地形、水系及气象站分布

2 研究方法

2.1 趋势检验方法

本文除采用线性回归法之外,还选择 Mann-Kendall 趋势检验法(简称 MK 法)诊断时间序列演变的趋势特征及其显著性。利用线性回归法计算要素的变化率,即气候倾向率,用来反映要素变化的方向和剧烈程度。MK 法具有检验范围宽、受人为影响较小的特点,是目前水文、气象系列趋势检验方法中应用较多且具有理论意义的一种方法。其统计量 MK 值的绝对值大于 1.96 时,即说明趋势在 0.05 置信水平上显著, MK 为正值表示增加趋势,负值表示减少趋势,具体计算公式详见参考文献[18]。

2.2 残差分析法

残差分析法通过剔除 NDVI 长时间序列变化中降水、气温因素的影响来剥离植被覆盖变化中自然因素和人为因素。利用 NDVI 和降水量、气温做多元线性回归分析,并计算出 NDVI 的预测值和真实值之间的差值,以此表征人类活动因素对植被覆盖变化的正负影响,即残差趋势法。该方法在研究中得到了广泛的应用^[2-3,19],多元线性回归方程表达式如下:

$$\text{NDVI} = a \cdot P + b \cdot T + c \quad (1)$$

式中: P 和 T 分别代表降水(mm)和气温($^{\circ}\text{C}$)。利用遥感观测的 NDVI 数据以及实测降水气温数据,计算得到 3 个回归方程参数 a , b , c 的值; NDVI 残差计算公式为:

$$\epsilon = \text{NDVI}_{\text{真实值}} - \text{NDVI}_{\text{预测值}} \quad (2)$$

式中: $\text{NDVI}_{\text{预测值}}$ 为根据多元线性回归模型预测的 NDVI 值; $\text{NDVI}_{\text{真实值}}$ 即是 NDVI 时间数据集。NDVI 残差 ϵ 为正值时,表示人类活动对流域内植被生长产生正面作用;若 $\epsilon < 0$,人类活动产生负面影响。

3 结果与分析

3.1 黄河源区降水、气温变化特征

基于 MK 趋势检验法,计算并分析了黄河源区以内 8 个代表性气象台站的降水和气温系列的变化

趋势。四季划分如下:每年 3—5 月份为春季,6—8 月份为夏季,9—11 月份为秋季,12 月至下一年 1 月、2 月份为冬季。就气温变化趋势而言,1982 年以来年均气温升高显著,所有气象站点的四季以及年气温系列 MK 趋势检验结果都表明,源区内升温现象显著,通过 0.05 水平置信度检验(MK 都大于 1.96),平均升温率达到了 $0.54^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$,该结论与张成凤等^[20]和王栋等^[21]研究结果一致,具体计算值在本文中略去。就降水系列演变结果而言(图 2),不同站点 1982—2018 年不同季节降水量的变化趋势各不相同,在春季多数站点降水呈现增加趋势,但是趋势不显著($\text{MK} < 1.96$),源头处玛多站和下游河南站、兴海站春季降水未发生显著变化;夏季降水量变化率最大,但 MK 检验结果表明趋势不显著;而所有气象站点冬季的降水都呈现减少趋势,源头玛多站和黄河源区下游地带减少趋势显著。就年降水系列而言, MK 值都在 ± 0.5 之间,黄河源区内降水量年际略有波动,但无明显趋势。

3.2 黄河源区 NDVI 变化特征

3.2.1 NDVI 时间变化特征 经计算,黄河源区流域 1982—2018 年流域面均 NDVI 值为 0.335,1982 年以来年 NDVI 变化率为 $0.016/\text{a}$, MK 值为 3.21,表明黄河源区 NDVI 值呈现显著的上升趋势,流域植被覆盖情况向良好方向发展。4 个季节流域 NDVI 值年际变化情况如图 3 所示(图中 S 表示变化斜率),结果表明各个季节 NDVI 值都呈现上升的趋势,而且趋势显著(MK 值都在 1.96 之上);其中夏季和秋季 NDVI 值增长率较大,在 $0.015/\text{a}$ 以上;春季和冬季 NDVI 增长率相近,约为 $0.013/\text{a}$ 。

3.2.2 NDVI 空间变化特征 为分析黄河源区 NDVI 演变的空间特征,计算各个像元 NDVI 变化的 MK 值,其空间分布结果如图 4 所示,相对应的 MK 值超过制频率曲线如图 5 所示。结果表明,达日站以下的下游地区 NDVI 值的增加趋势比较显著。黄河源头(鄂陵湖、扎陵湖附近及以上地区)NDVI 值的变化较不显著,源区中下游地区春、夏、秋季 NDVI 值都有显著的上升趋势,超过 95% 的像元 NDVI 呈现增长趋势($\text{MK} > 0$),其中 65% 的地区趋势显著($\text{MK} > 1.96$),冬季 NDVI 增长趋势显著的地区不超过 40%。综合而言,黄河源区多数地区 NDVI 值全年呈现增长趋势,植被状况呈现良好改善态势,而中下游地区这一趋势比源头区更为显著。

3.3 降水、气温对 NDVI 的影响

为分析气候要素对黄河源区植被状况变化的影响,选择降水和气温两个气候因子与 NDVI 做相

关性分析,计算各季节的相关系数,其空间分布如图 6 所示,统计相关系数分布情况结果如图 7 所

示,描述气候因子与 NDVI 相关关系显著性空间分布如图 8 所示。

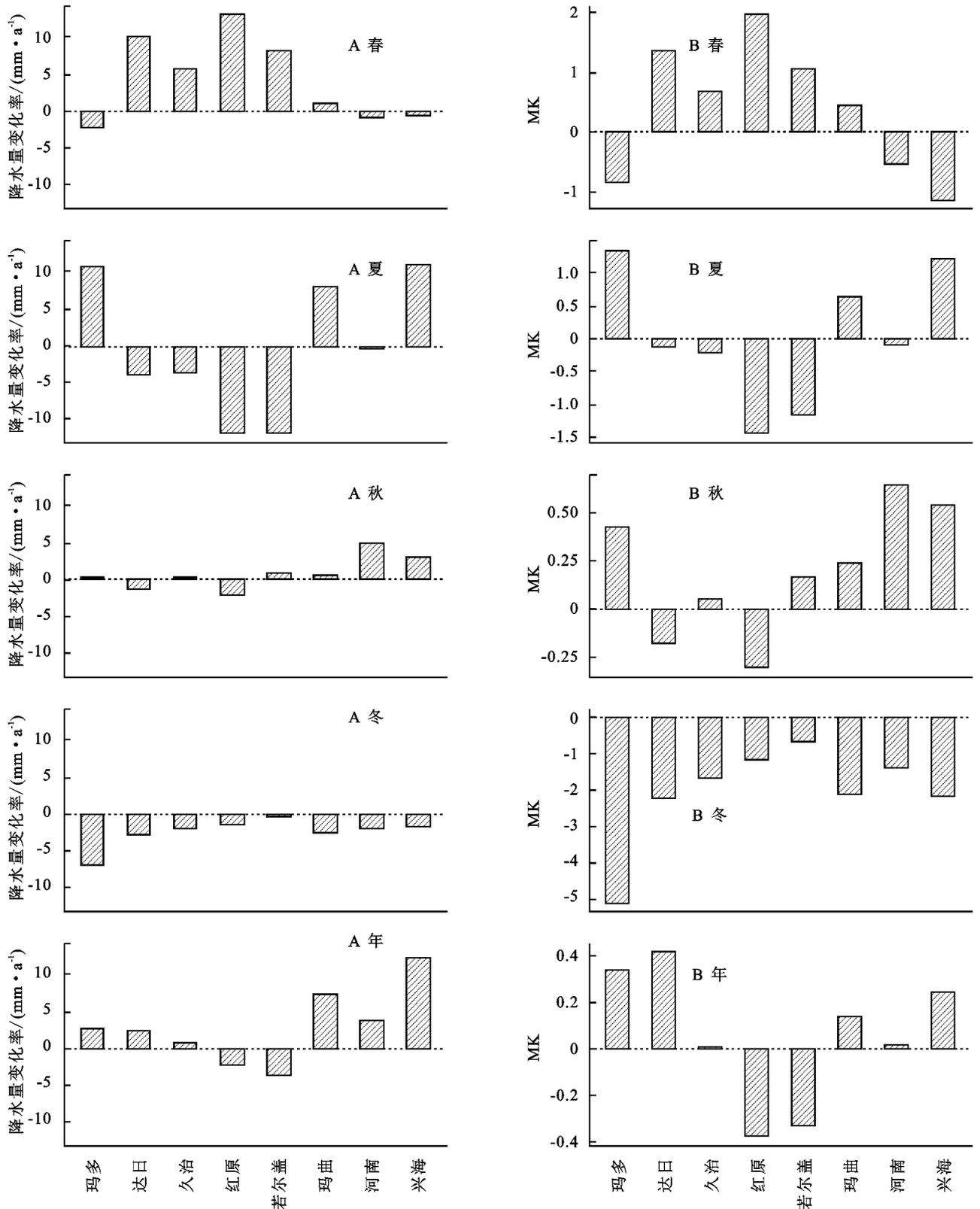


图 2 黄河源区 8 个气象站不同季节降水变化气候倾向率和趋势检验 MK 值

图 6 显示 1982—2018 年源区内 NDVI 与降水多呈负相关关系,尤其是在冬季,相关系数低于 0(见图 6 和图 7),且超过 60%的地区相关系数低于-0.4,从

图 8 可以看出绝大多数(超过 90%)地区负相关关系显著。春季约有超过 32%的地区相关系数在 0 以上,主要集中于黄河源区东南较为湿润的中游地区

(久治—玛曲一带),说明春季该地区雨量的增加(图 2)有助于植被的生长,对 NDVI 的增长起到正面作用,从图 3 也可以看出久治—玛曲一带春季 NDVI 增长格外显著, MK 值多在 4 以上。在秋季,降水和 NDVI 之间的相关系数大多数(约 85%)都在 -0.2 , 0.2 之间(见图 7),中下游地区相关系数值在 0 附近

(见图 6), p 值大于 0.05 , 以上表明秋季降水与 NDVI 变化无显著关系。在夏季,约有超过 50% 的地区相关系数在 0 以上,主要集中于流域的源头区(鄂陵湖、扎陵湖周边,玛多县一带),玛多气象站观测到的夏季降水年增长率为 10 mm/a (图 2),对植被生长具有促进作用。

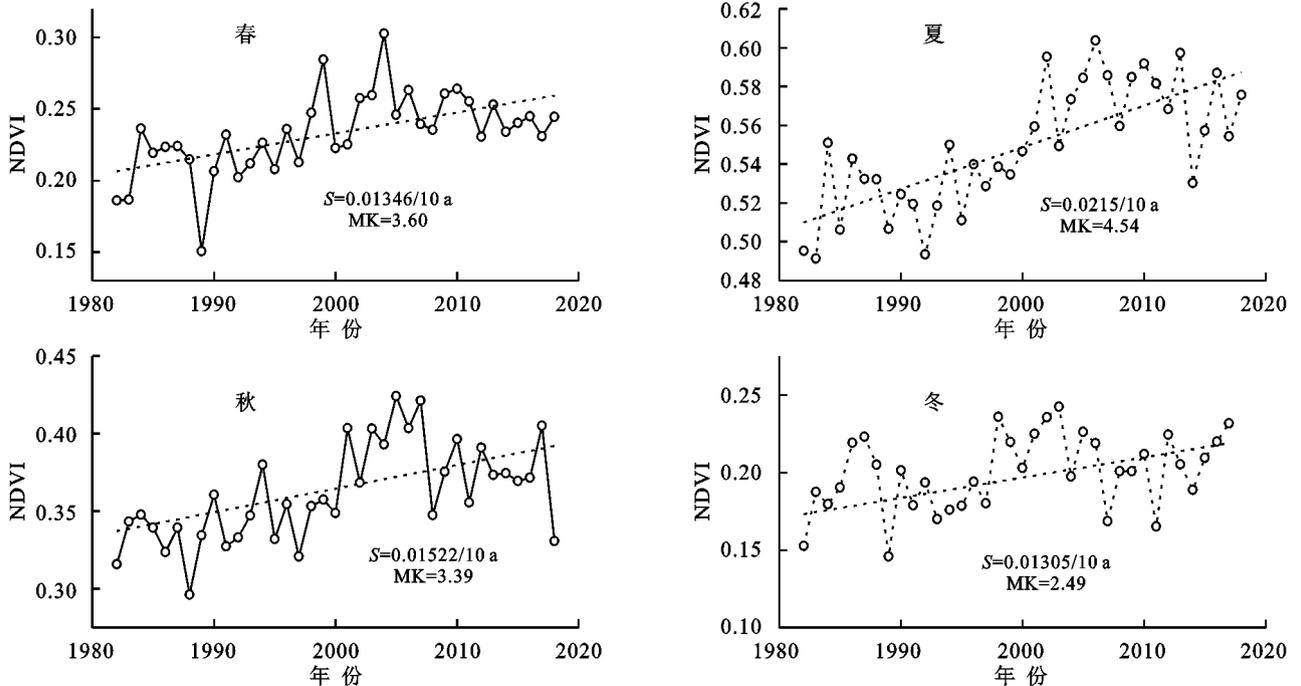


图 3 黄河源区不同季节 NDVI 变化趋势

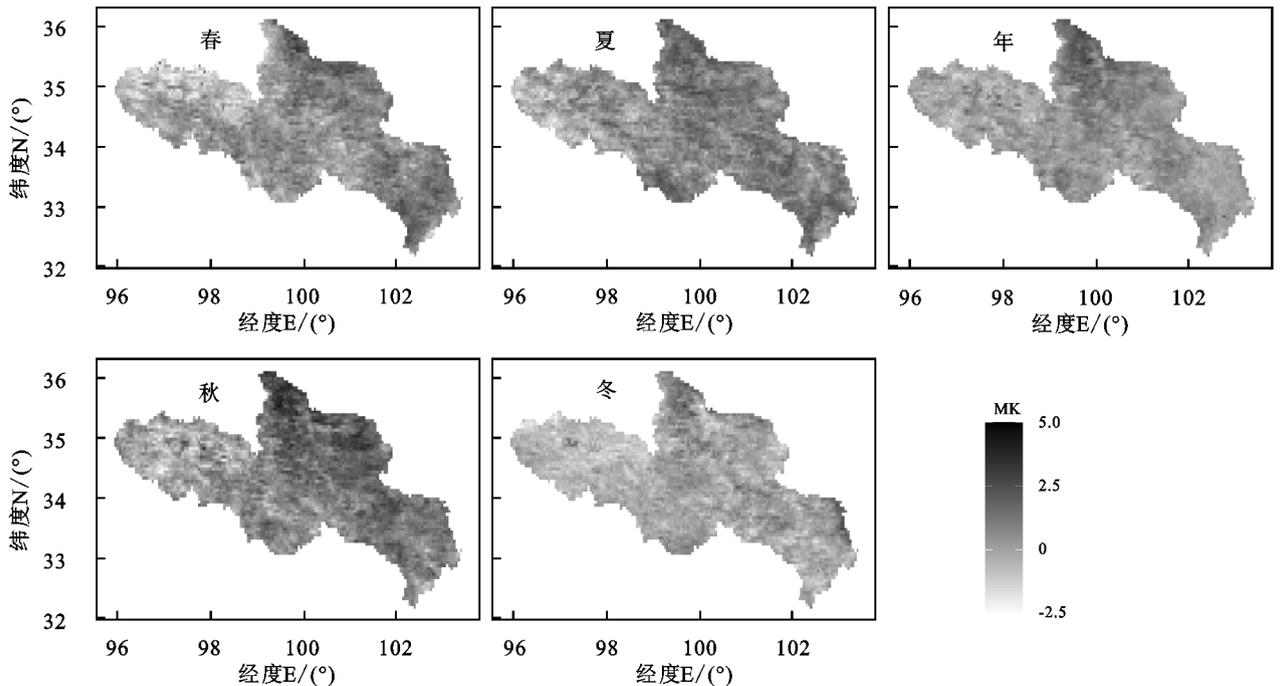


图 4 黄河源区 NDVI 变化趋势 MK 检验结果空间分布

就气温与 NDVI 相关关系分析结果而言,黄河源区 NDVI 与气温呈正相关,相关系数都大于 0。就年尺度以及春夏两季而言,气温的升高对植被生长起到显著

的正面促进作用。秋冬两季,气温与 NDVI 的相关系数对比春夏两季较小,其超过频率曲线在春夏两季的下(图 7),相关系数在 $0.2 \sim 0.6$, 相较而言显著的相关性

($p < 0.05$)多发生在黄河源区东南部的湿润地区。

3.4 人类活动对 NDVI 的影响

除了气候波动影响流域内植被生长外,人类活动对流域下垫面情势的改变也起到显著作用。残差值的正负以及变化即可反映人类活动对植被覆被变化的影响。将 1982—2018 年以 2000 年为节点划分为 2 个历史阶段,分别进行多元线性回归模型分析,计算得到 2 个时期 NDVI 残差多年平均值的结果及其空间分布如图 9 所示,其超过频率曲线见图 10。

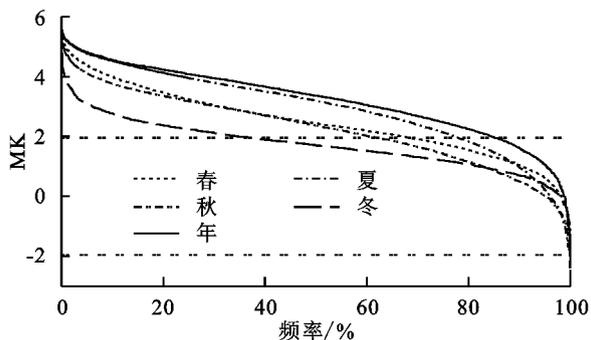


图 5 黄河源区 NDVI 趋势检验 MK 值超过频率分布曲线

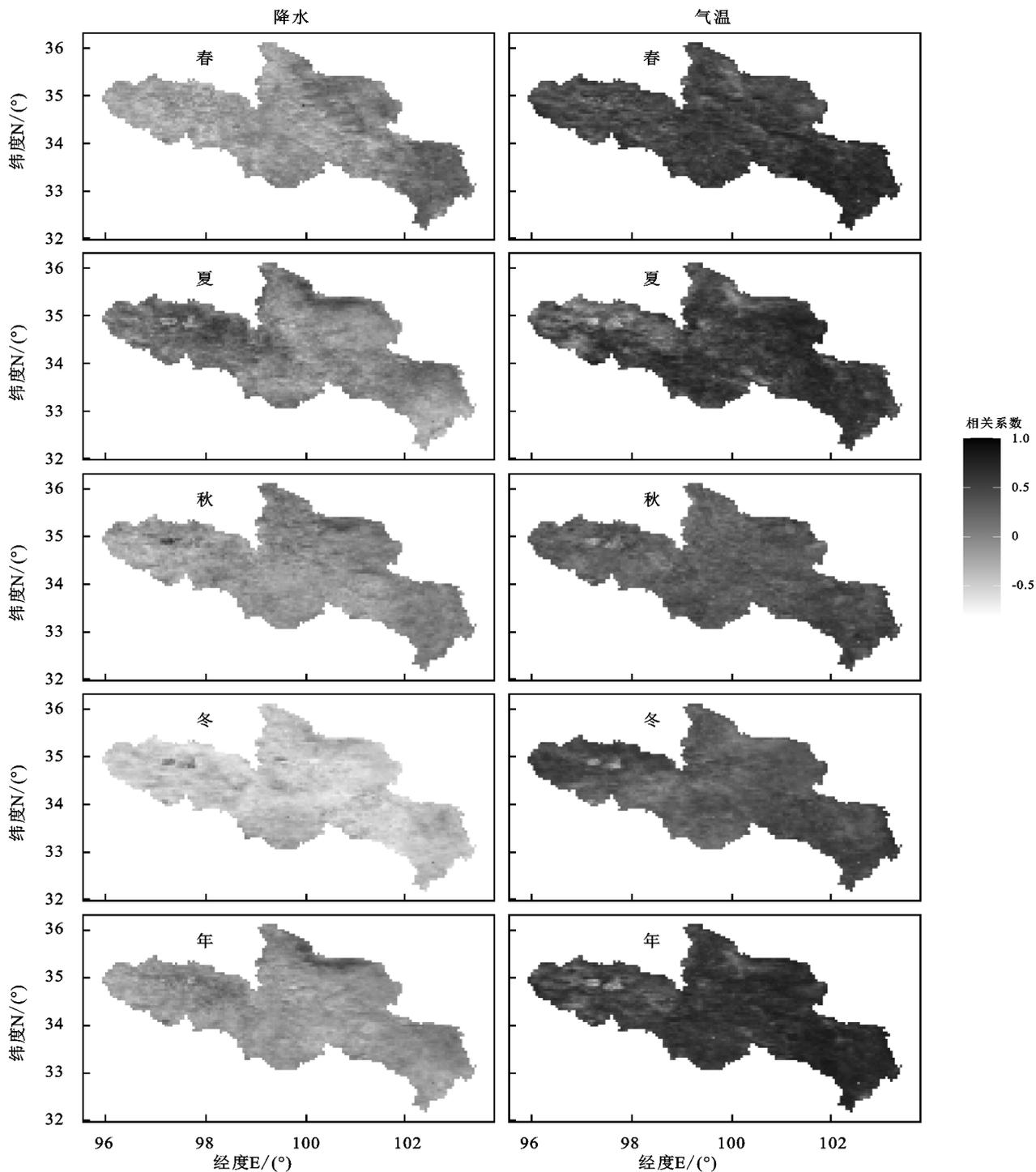


图 6 黄河源区 NDVI 与降水、气温因子的相关性

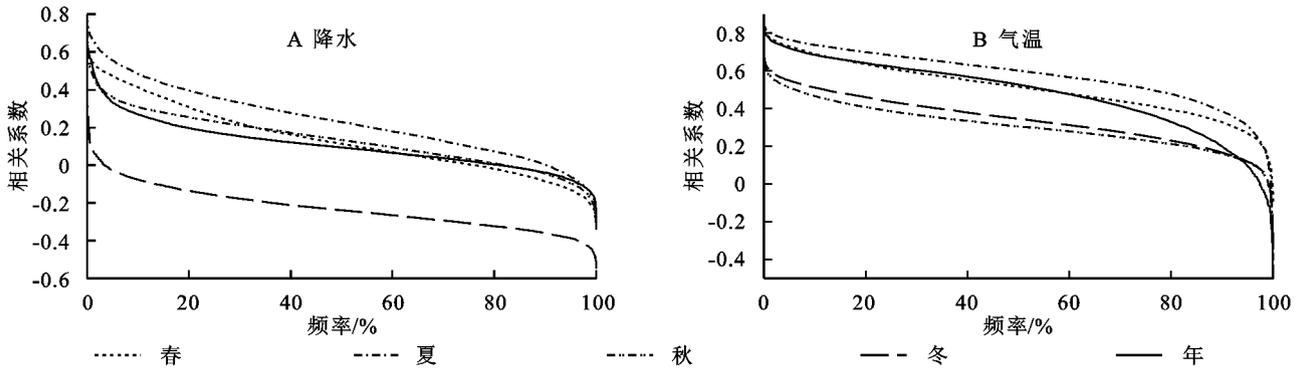


图 7 黄河源区降水和气温与 NDVI 相关系数超过频率分布曲线

残差分析结果表明,1982—2000 年阶段夏秋两季,超过 90% 的地区残差多年平均值小于 0,而 2000 年之后(2001—2018 年)超过 90% 的地区残差均值大于 0(见图 10),达日站—久治站区间和河南站—兴海站区间尤为明显(见图 9),说明人类活动对该地区植被的影响较为显著,即 2000 年之前该地区受人类活动影响、NDVI 值较预测值偏小,2000 年之后人类活动的影响对植被生长其正面作用,实测 NDVI 值大于预测值。在冬季,2 个历史时期的 NDVI 残差均值绝大多数(超过 95%,见图 10)落在 $[-0.01, 0.01]$ 区间,说明在冬季人类活动对流域植被变化(NDVI 演变情势)的影响微弱。就年系列而言,2000 年之后人类活动所导致的植被退化情势减缓,黄河源区植被情况得到一定的改善。

4 讨论

本文研究结果表明 1982—2018 年黄河源区年平均 NDVI 与气温存在显著的正相关性。一般而言,水热条件较好的情况有利于植被生长,高寒山区气温上升可延长植被生长季并增加其光合作用,从而促进植被生长^[22-23],尤其是在流域内降水相对丰富的地区^[11]。就季节而言,流域春季气温对 NDVI 的影响最大,这是因为春季多为植被生长季,植被生长的增温效应较其他季节更为明显,这一结论与 Richardson 等^[24]的研究结果较为一致。1982—2018 年黄河源区 NDVI 与降水量之间的负相关关系较弱,即降水对流域 NDVI 的影响不显著。Wang 等^[25]研究表明在气候湿润或降水较为丰富的地区,降水量波动并不是植被生长的主要限制因子。而在干旱缺水的地区,降水少,蒸发大,则植被生长对降水量极为敏感,NDVI 与降水量的相关性也更高^[26-28]。

就黄河源区而言,其年降水量从东南(800 mm 左右)到西北(300 mm 左右)递减,多年平均天然径流量为 205 亿 m^3 ,约占黄河天然总径流量(利津站)的 38%,相对黄河流域中下游其他地区来说,水资源较为丰富,而源区平均海拔在 4 km 以上,热量条件不足是限制植被生长的主要因素。此外,黄河源地方

政府自 2003 年起开展实施退牧还草和减畜工程,2015 年平均牲畜存栏量减少至 1 959.8 万头,减幅达到 8.6%^[29]。同时 2000 年国家批准成立三江源国家级自然保护区和一期工程,对黄河源区等地的生态环境产生了积极影响^[12],植被的增加趋势是以气候因素为主的气候暖湿化与保护工程叠加效应的结果。

不过在多数关于植被 NDVI 演变与气温关系的研究中,着重日均气温对植被 NDVI 的影响,而神祥金等^[30]指出植被 NDVI 对日最高气温与日最低气温变化的响应存在明显差异,夏季青藏高原植被 NDVI 与平均日最低气温呈现显著正相关关系,而与日平均最高气温呈现负相关关系^[31],而在沼泽地区平均日最低气温的升高对植被生长的促进效果比平均日最高气温更加显著^[30]。可以看出,不同地表类型(森林、草地或冻土等)下日平均、最高、最低气温对植被 NDVI 的影响并不一致,升温背景下植被 NDVI 演变是一个比较复杂的系统过程,其作用机理与影响程度还需进一步的研究与对比验证。

5 结论

(1) 黄河源区自 1982 年以来气温升高显著,平均升温率达到了 $0.54^{\circ}C/10 a$,各个季节气象站点的升温现象都通过了 0.05 水平的置信度检验。流域内降水年际内略有波动,变化趋势不显著,冬季降水略有减少趋势,春夏两季降水波动幅度较大。研究区内超过 90% 的地区 NDVI 值全年呈增长趋势,即流域内植被状况呈现改善态势,而且中下游地区这一趋势比上游源头区更为显著。

(2) 黄河源区 NDVI 与气象因子相关分析结果表明,NDVI 与气温呈现显著的正相关关系,即气温的升高对植被生长起到积极的正面促进作用。而 NDVI 与降水之间相关系数多为负数,在夏季约有 50% 的地区呈正相关关系,源头玛多县地区降水的增加有助于植被生长;除冬季之外,NDVI 与降水之间的相关性并不显著($p > 0.05$)。

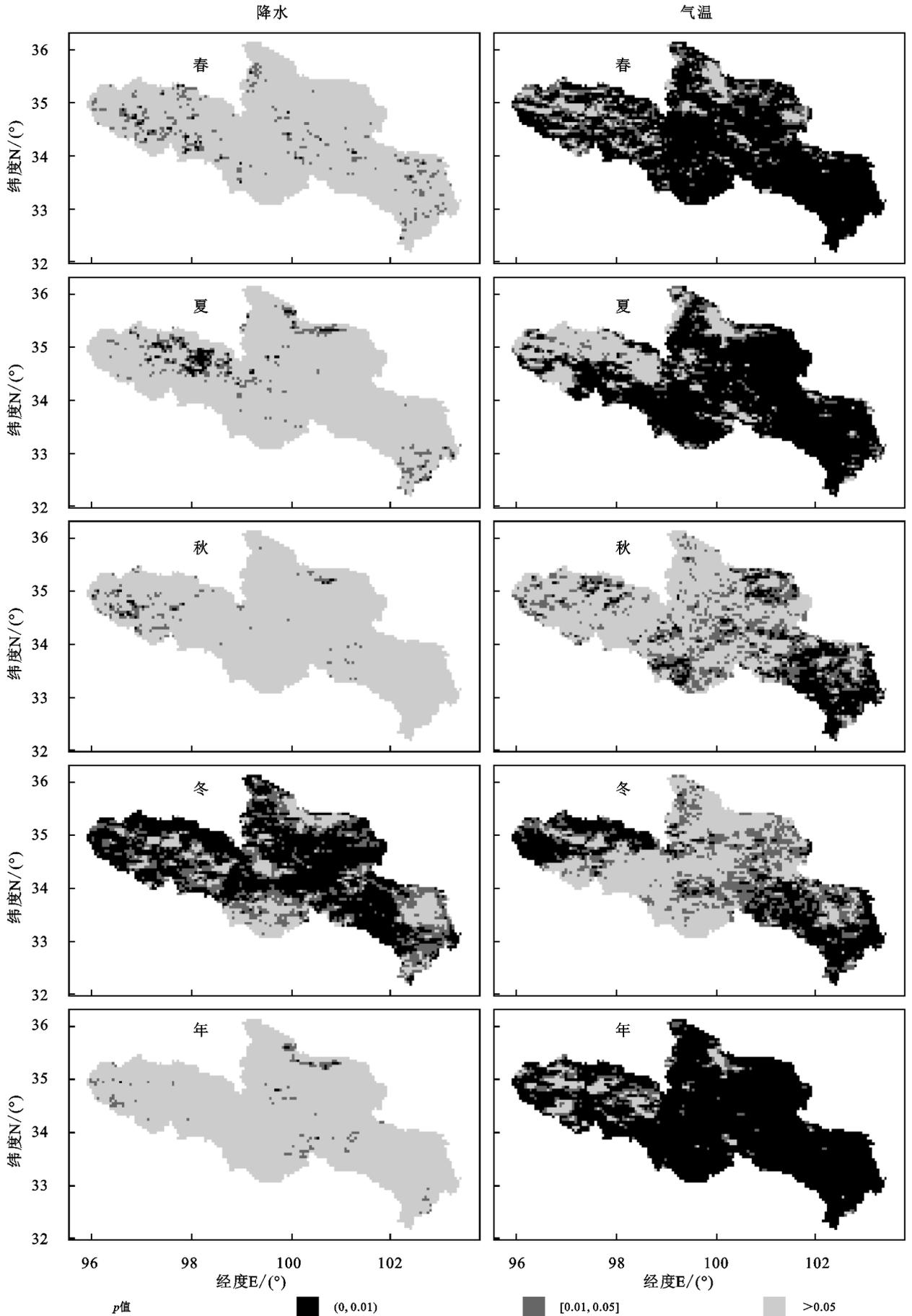


图 8 黄河源区 NDVI 与降水、气温因子相关检验 p 值空间分布

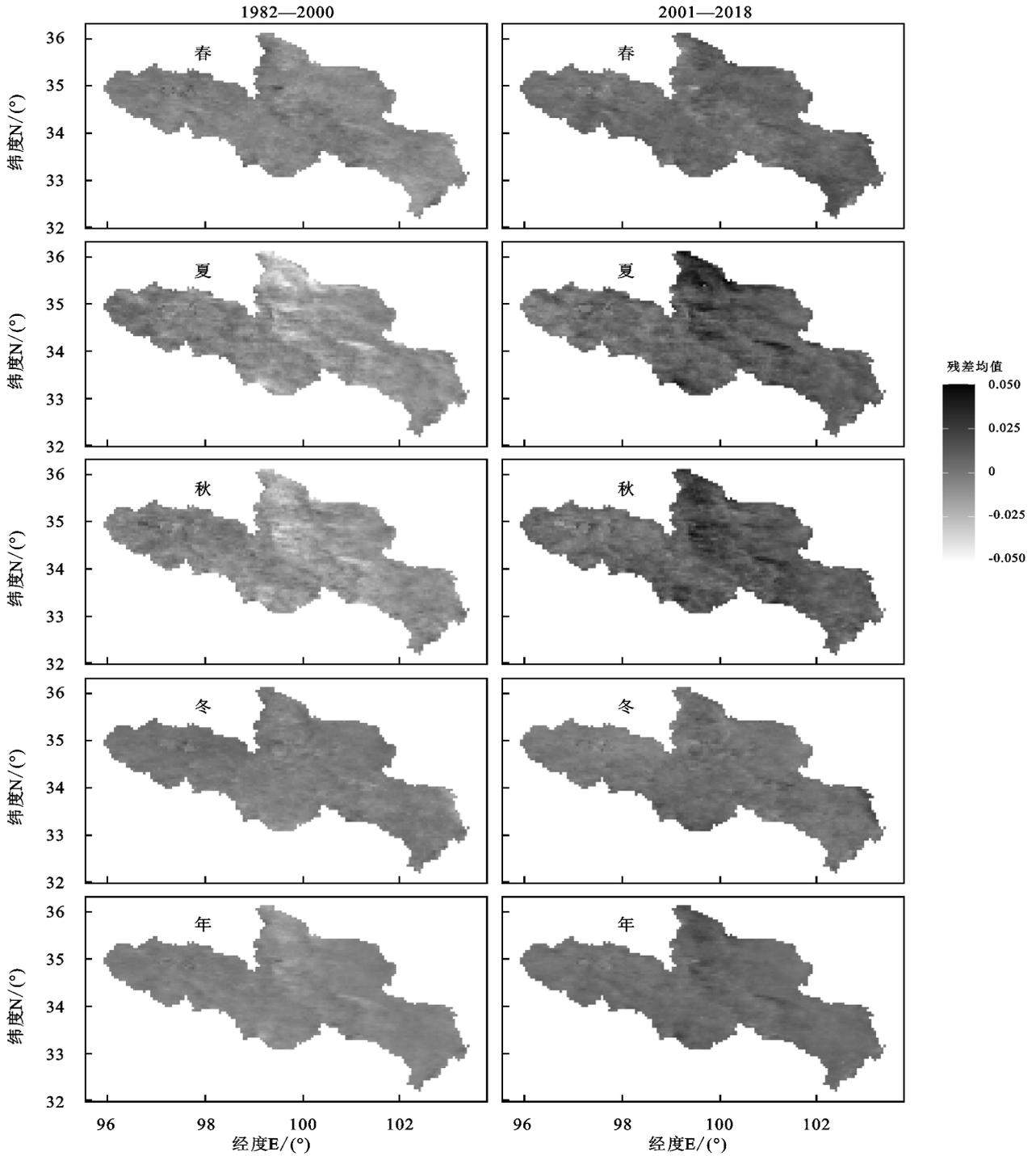


图 9 黄河源区 1982—2000 年、2001—2018 年时期 NDVI 残差多年平均值空间分布

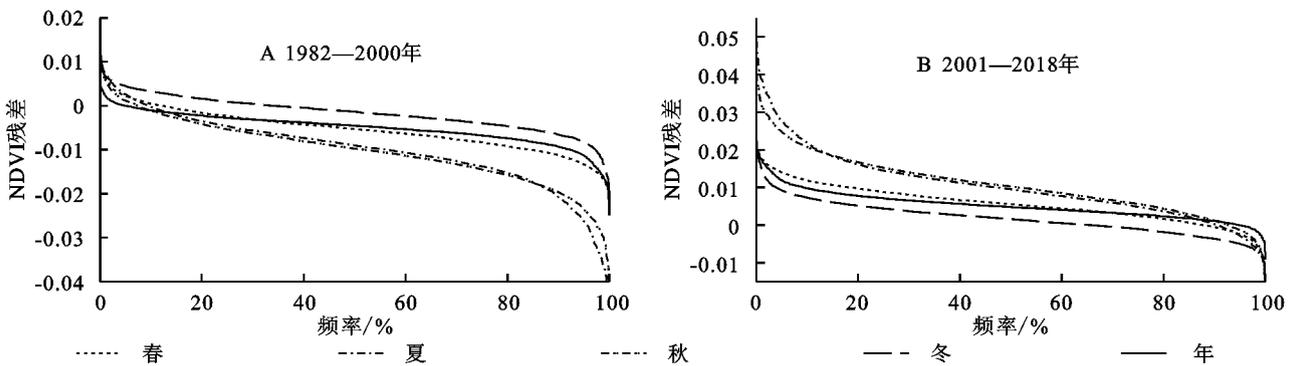


图 10 NDVI 残差均值超过频率分布曲线

(3) 就 NDVI 残差分析结果而言,冬季人类活动对流域植被变化(NDVI 演变情势)的影响微弱;达日站—久治站区间和河南站—兴海站区间受人类活动影响较为显著,2000 年之后人类活动所导致的植被退化情势减缓,黄河源区植被情况得到一定的改善。

参考文献:

- [1] 刘启兴,董国涛,景海涛,等.2000—2016 年黄河源区植被 NDVI 变化趋势及影响因素[J].水土保持研究,2019,26(3):86-92.
- [2] 易浪,任志远,张翀,等.黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系[J].资源科学,2014,36(1):166-174.
- [3] Zhang Y, Zhang C, Wang Z, et al. Vegetation dynamics and its driving forces from climate change and human activities in the Three-River Source Region, China from 1982 to 2012 [J]. Science of the Total Environment, 2016,563:210-220.
- [4] 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.
- [5] 史丹丹,杨涛,胡金明,等.基于 NDVI 的黄河源区生长季植被时空变化及其与气候因子的关系[J].山地学报,2018,36(2):184-193.
- [6] 徐冠华,葛全胜,宫鹏,等.全球变化和人类可持续发展:挑战与对策[J].科学通报,2013,58(21):2100-2106.
- [7] 姜欣彤,黎曙,周祖昊,等.基于高程分段的黄河源区 NDVI 和水热条件空间分布格局研究[J].南水北调与水利科技,2020,18(4):39-53.
- [8] 沈斌,房世波,余卫国. NDVI 与气候因子关系在不同时间尺度上的结果差异[J].遥感学报,2016,20(3):481-490.
- [9] 欧朝蓉,朱清科,孙永玉.元谋干热河谷旱季植被覆盖度的时空异质性[J].林业科学,2017,53(11):20-28.
- [10] 徐丽萍,郭鹏,刘琳,等.天山北麓土地利用与土地退化的时空特征探析[J].水土保持研究,2014,21(5):316-321.
- [11] Zhou Y, Zhang L, Fensholt R, et al. Climate contributions to vegetation variations in central Asian drylands: Pre-and post-USSR collapse [J]. Remote Sensing, 2015,7(3):2449-2470.
- [12] 邵全琴,樊江文,刘纪远,等.基于目标的三江源生态保护 and 建设一期工程生态成效评估及政策建议[J].中国科学院院刊,2017,32(1):35-44.
- [13] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation[J]. Journal of Arid Environments, 2004,57(4):535-554.
- [14] 刘宪锋,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.
- [15] 杜加强,贾尔恒·阿哈提,赵晨曦,等.三江源区近 30 年植被生长动态变化特征分析[J].草业学报,2016,25(1):1-12.
- [16] 吴喜芳,李改欣,潘学鹏,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.
- [17] 王高杰,黄进良,肖飞,等.基于关联性 & 趋势性分析的 AVHRR NDVI 及 MODIS NDVI 数据产品比较[J].长江流域资源与环境,2018,27(5):1143-1151.
- [18] 管晓祥,张建云,鞠琴,等.多种方法在水文关键要素一致性检验中的比较[J].华北水利水电大学学报:自然科学版,2018,39(2):51-56.
- [19] 崔利芳,王伦澈,屈赛,等.气温、降水量和人类活动对长江流域植被 NDVI 的影响研究[J].地球科学,2020,45(6):1905-1917.
- [20] 张成凤,鲍振鑫,杨晓甜,等.黄河源区水文气象要素演变特征及响应关系[J].华北水利水电大学学报:自然科学版,2019,40(6):15-19.
- [21] 王栋,吴栋栋,解效白,等.黄河源区水文气象要素时空变化特征分析[J].人民珠江,2020,41(3):66-72,84.
- [22] Piao S, Yin G, Tan J, et al. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years [J]. Global Change Biology, 2015,21(4):1601-1609.
- [23] Potter C, Klooster S, Genovese V. Net primary production of terrestrial ecosystems from 2000 to 2009[J]. Climatic Change, 2012,115(2):365-378.
- [24] Richardson A D, Black T A, Ciais P, et al. Influence of spring and autumn phenological transitions on forest ecosystem productivity[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2010,365(1555):3227-3246.
- [25] Wang J, Wang K, Zhang M, et al. Impacts of climate change and human activities on vegetation cover in hilly southern China[J]. Ecological Engineering, 2015,81:451-461.
- [26] Bao G, Qin Z, Bao Y, et al. NDVI-based long-term vegetation dynamics and its response to climatic change in the Mongolian Plateau[J]. Remote Sensing, 2014,6(9):8337-8358.
- [27] Li S, Yang S, Liu X, et al. NDVI-based analysis on the influence of climate change and human activities on vegetation restoration in the Shaanxi-Gansu-Ningxia Region, Central China [J]. Remote Sensing, 2015,7(9):11163-11182.
- [28] Zhao W, Hu Z, Guo Q, et al. Contributions of climatic factors to interannual variability of the vegetation index in northern china grasslands [J]. Journal of Climate, 2019,33(1):175-183.
- [29] 刘璐璐,曹巍,邵全琴.近 30 年来长江源区与黄河源区土地覆被及其变化对比分析[J].地理科学,2017,37(2):311-320.
- [30] 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[J].生态学报,2020,40(18):6259-6268.
- [31] Shen M, Piao S, Cehn X, et al. Strong impacts of daily minimum temperature on the green-up date and summer greenness of the Tibetan Plateau [J]. Global Change Biology, 2016,22(9):3057-3066.