

1982—2015 年中国北方草地 NDVI 时空动态及其对气候变化的响应

秦格霞¹, 芦倩¹, 孟治元², 李政¹, 陈泓羽¹, 孔婕¹, 吉珍霞¹, 秦安宁³

(1.甘肃农业大学 资源与环境学院, 兰州 730070; 2.西安东方宏业科技有限公司, 西安 710000; 3.苏州科技大学 机械工程学院, 江苏 苏州 215009)

摘要:了解草地覆盖动态在生态环境保护和建设上有重要意义。基于 GIMMS NDVI3g 数据、气象数据和高程数据分析了 1982—2015 年中国北方草地 NDVI 时空动态及对气候变化的响应。结果表明:(1) 1982—2015 年中国北方草地 NDVI 以增加趋势为主(占 76%),增速为 0.002/10 a。其中,坡地草地的增加速率最大(增长速率为 0.001/10 a),高山亚高山平原草原变化速率最小,其他 4 种草地类型速率为平原草地 NDVI 增长速率>高山亚高山草甸>荒漠草原>草甸;(2) NDVI 变异系数均值为 0.078,变化相对稳定($C_v < 0.15$);(3) Hurst 指数均值为 0.42,结合 NDVI 变化趋势结果发现未来草地 NDVI 变化趋势主要以下降为主($0 < H < 0.5$,占 79.8%);(4) 降水是影响北方草地生长的主要气候因子。除昆仑山脉、青海高原东坡坡底及小兴安岭等海拔较高区域外,其他地区(占 92.4%)的降水与 NDVI 呈显著相关关系。温度与草地 NDVI 主要以正相关为主(占 62.7%),呈负相关关系的区域集中在内蒙古高原、黄土高原西南部、准噶尔盆地和塔里木盆地等较为干旱地区。以上研究结果可为草地资源管理、生态环境保护、荒漠化防治提供重要参考信息。

关键词:NDVI 动态;草地;空间异质性;气候变化

中图分类号:S181

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)01-0101-08

Spatial-temporal Dynamics of Grassland NDVI and Its Response to Climate Change in Northern China from 1982 to 2015

QIN Gexia¹, LU Qian¹, MENG Zhiyuan², LI Zheng¹,
CHEN Hongyu¹, KONG Jie¹, JI Zhenxia¹, QIN Anning³

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University,
Lanzhou 730070, China; 2.Xi'an Dongfanghongye Technology Co., Ltd, Xi'an 710000, China;

3.School of Mechanical Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China)

Abstract: Understanding the spatial-temporal changes of grassland is of great significance to regional environmental protection and ecological construction. The spatial-temporal variation characteristics of grassland was analyzed based on the GIMMS NDVI 3g data, meteorological data and DEM data for northern China during the period 1982 to 2015. The results indicate that: (1) NDVI mainly showed growth trend from 1982 to 2015, with growth rates of 0.000 2/decade (76%); the growth rate of slope grassland was the (0.001/10 a), the growth rates of alpine and sub-alpine plain grassland were the smallest, and the growth rates of the NDVI of the other four grassland types decreased in the order: plain grassland>alpine subalpine meadow > desert grassland>meadow; (2) the average coefficient of variation of grassland NDVI was 0.078, with the stable state ($C_v < 0.15$); (3) the average Hurst value was 0.42; according to the coupling results of NDVI and Hurst index, it is found that the future NDVI change trend of the grassland will mainly reduce ($0 < H < 0.5$, accounting for 79.8%); (4) precipitation was the main factor for grassland growth in northwest China

收稿日期:2020-04-10

修回日期:2020-04-18

资助项目:甘肃农业大学科技创新基金“盛彤笙创新基金:SWAT 模型在祁连山小流域的径流模拟研究”(GSAU-STS-2018-35)

第一作者:秦格霞(1995—),女,甘肃宁县人,在读硕士,研究方向为生态遥感。E-mail:2603246958@qq.com

通信作者:芦倩(1986—),女,甘肃永登人,讲师,在读博士,研究方向为 GIS 应用与森林水文。E-mail:lq04500232@qq.com

except for higher latitudes; In snow-covered areas, 92.4% of the precipitation was favorable for NDVI growth except Kunlun Mountains, the bottom of the eastern slope of the Qinghai Plateau temperature and the Iljehari-Alin, precipitation in other areas and NDVI had positive correlation; the NDVI of grassland was mainly positive correlation (62.7%) with temperature, and the negative correlation areas concentrated in Inner Mongolia Plateau, the southwest of Loess Plateau, Junggar Basin and Tarim Basin. The above results are expected to provide important reference information for grassland resource management, ecological environment protection and desertification control.

Keywords: dynamics of NDVI; grassland; spatial heterogeneity; climate change

草地生态系统作为陆地生态系统中的敏感成员^[1],在发展畜牧业^[1-2]、维持生物多样性^[2]、维持生态系统平衡等^[2-3]方面发挥着重要作用,但其发育与演替受气候、人类活动等影响较为严重^[3-9]。据气象报告显示过去几十年间气候经历了明显变化^[10],这势必会对我国(尤其在干旱半干旱地区)草地生长产生显著影响^[4-9],进而影响全球的物质循环和能量流动,对生态系统的稳定性产生重要影响。归一化植被指数(NDVI)作为植物生长状况及地表覆盖变化的最佳指示因子^[8,11],已被广泛用于研究陆地生态系统植被长势^[8]、季相^[8]、物候等^[12]变化趋势中,是研究植被变化和植被—气候关系的首选指标^[4-12]。

近年来,国内外诸多学者基于 NDVI 指数研究了植被随气候波动的变化情况,取得了卓越成果^[13-21]。如:梁爽等^[21]利用 AVHRR NDVI 数据研究我国草地生长时空变化发现,在 1982—2010 年草地 NDVI 呈增加趋势,但 1999 年以后大范围出现逆转,尤以干旱、半干旱地区最为显著;而尼加提·伊米尔等^[20]基于 MODIS NDVI 数据研究发现因全球气候变暖,2000—2015 年天山山区降水量增加,导致天山北坡 NDVI 呈增加趋势;但戴声配等^[22]基于 SPOT-NDVI 对祁连山植被时空动态研究发现,自 1999 年以来,祁连山植被 NDVI 呈减少趋势的多集中在河流等较为湿润的区域;赵鸿雁等^[13]研究 2008—2016 年甘肃中东部的 NDVI 变化发现,低山丘陵区与冲积平原区生长季 NDVI 明显增加,部分中起伏山地出现减少的现象,但以 2012 年为一个突显的转折点;阿荣等^[11]研究了 2000—2015 年锡林郭勒草地生长季 NDVI 变化得出每年以 0.002 1 的速率缓慢增长,但其变化存在明显地域差异,降水是影响锡林郭勒地区 NDVI 动态变化的主要因素。正如上述综述所示,虽有很多学者对植被覆盖动态及其对气候变化的响应做了大量工作,但因研究数据、研究区、植被类型和起始年份不同而存在差异。草地植被覆盖研究作为草地生态系统动态监测的一项长期性、经常性的工作,被列为生态保护与修复工程的重要任务之一。因此,引入 NDVI 探究在生态保护

与修复工程措施下草地覆盖动态及其对气候变化的响应情况,从而掌握和评价生态保护与修复等工程所取得的效果有重大意义^[14,16,23]。

基于此,本文利用长时间序列(1982—2015 年)的 GIMMS NDVI 数据,辅以 Sen + Mann-Kendall (M-K)、变异系数 C_v 、Hurst 指数等方法对 1982—2015 年我国北方天然草地 NDVI 时空变化、变化的稳定性和未来变化趋势进行分析。并结合草地类型分类数据分析不同草地覆盖下 NDVI 变化特征,以掌握退耕还林还草等生态工程措施下草地 NDVI 的时空变化特征,以期为我国生态环境改善、畜牧业管理措施及未来生态环境建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为我国北方草地覆盖区域(32°—53°N, 77°—135°E),总面积为 $1.559 \times 10^6 \text{ km}^2$ (图 1)^[1,24]。区域所处纬度较高,草地面积较大,距海较远,西、北边沿有山脉阻隔,大部分区域属温带大陆性干旱气候,是非季风气候影响的主要地区,少部分属寒温带季风气候和高原高山气候。光热资源充足,年日照时数达 2 200 h 以上,降水量少而不匀,一般多在 400~800 mm,主要集中在 7 月、8 月,春冬季节旱情严重,夏秋多暴雨,多大风天气^[24]。因其特殊的地理位置、地形条件和干旱气候的影响,区域内生态环境极为脆弱,草地类型主要以温性草原、荒漠草原、高寒草甸、高寒草原、盐生草甸为主,温性草原面积最大,是我国天然草地的主体,是欧亚草原的重要组成部分^[24]。

1.2 数据来源与预处理

气象(气温、降水)数据由中国气象数据网站(<http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode>)提供,选用剔除有数据缺失的站点后,选取了 324 个气象站点的 1982—2015 年气温、降水的月数据(图 2)。数字高程模型(DEM)来源于地理空间数据云的 SRTM 产品数据,分辨率为 30 m。并采用基于样条函数插值理论的专业气象插值软件 ANUS-

PLINE^[25],以 DEM 数据为协变量,对气温和降水数据进行空间插值获得 8 km 的栅格数据。最后选用计算中未使用的气象站点,随机选取 417 个数据对插值结果进行精度验证,结果表明气温插值数据与实测

值的相关系数基本在 0.975 以上(占 97.5%),均方根误差(RMSE)=0.000 08。而降水与插值结果的相关系数基本在 0.918 以上,均方根误差(RMSE)=0.000 11,插值精度在整体上可以满足研究的需求。

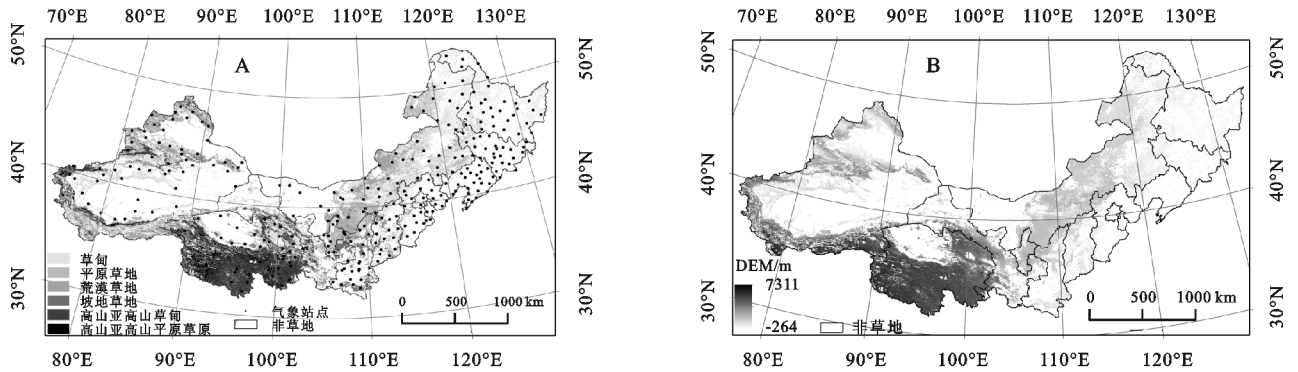


图 1 研究区草地类型、气象站点空间分布(A)及 DEM(B)

NDVI 数据来自西部环境与生态科学数据下载中心(<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/>)提供的 1982—2015 年 15 d 最大值合成的 8 km 的 GIMMS NDVI3g 数据集(版本 3)。该数据是由 NOAA 卫星搭载的 AVHRR 传感器获取,经过校正,最大程度减少火山气溶胶、太阳高度角、传感器误差和偏移影响的全球植被数据^[12,21],但仍存在假高值、低值。为减少云、大气等造成的假高值、低值影响,将多时相 NDVI 组合为时间序列,提取每个像素时序值,基于 Savitzky-Golay(S-G)滤波法拟合^[26],拟合前后数据的平均绝对误差(MAE)=0.000 5,均方根误差(RMSE)=0.001 9,相关系数在 0.90 以上的像元占总像元的 96.3%,仅在祁连山脉、甘肃陇南有较少像元相关系数在 0.70~0.80^[12],整体保真性较好。并采用国际上常用的 NDVI_(年均值)=0.05 排除非植被因素影响^[12],为了与气象数据保持一致,采用最大合成法获得月 NDVI 数据。

草地类型数据由国家自然科学基金委员会“中国西部环境与生态科学数据中心”(http://westdc.westgis.ac.cn)提供的空间分辨率为 1 km 的 GLC 2000 数据集,采用 FAO 的土地覆盖分类标准(LCCS),通过非监督分类方法制作的全球土地覆盖图^[27]。高艳妮等^[28]对我国北方地区的土地分类数据(30 m 地表覆盖数据、1:10 万中国草地资源图、中国土地利用现状遥感监测数据、中国土地覆盖数据、全球陆地覆盖数据、全球土地覆盖数据和 MODIS 土地覆盖数据)进行精度评价发现 GLC 2000 的其采样点验证精度为 83.45%,精度排在第三,与 1:10 万中国草地资源图在面积上一致性最高。在该分类系统中,草地类型包括草甸、平原草地、荒漠草原、坡地草地、高山亚高山草甸、高山亚高山平原草原(图 1)^[27]。

1.3 研究方法

(1) 空间趋势分析采用非参数趋势度 Sen^[28]分

析法分析 1982—2015 年我国北方草地 NDVI 变化趋势,并基于 Mann-Kendall(M-K)^[29]统计检验法对趋势的显著性进行检验。Sen 趋势分析法和 M-K 检验法相结合,可减少数据异常值的影响,几乎不受测量误差和离群数据的干扰^[29]。计算公式为:

$$S_{NDVI} = \text{median}\left(\frac{NDVI_j - NDVI_i}{j - i}\right)$$

式中: S_{NDVI} 为 NDVI 变化趋势; i, j ($1982 \leq i < j \leq 2015$)为 NDVI 的时间序数; $NDVI_i, NDVI_j$ 分别表示第 i, j 对应的 NDVI 值。当 $S_{NDVI} > 0$ 时,说明 NDVI 呈增长趋势; $S_{NDVI} < 0$,NDVI 呈下降趋势。

M-K 检验公式^[30]为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(NDVI_j - NDVI_i)$$

其中:

$$Z_s = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases}$$

$$\text{sign}(X_j - X_i) = \begin{cases} 1 & (X_j - X_i) > 0 \\ 0 & (X_j - X_i) = 0 \\ -1 & (X_j - X_i) < 0 \end{cases}$$

其中:

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18}$$

式中: S 为检验统计量; Z_s 为标准化后的检验统计量; n 为 NDVI 的总序列数; $\text{var}(S)$ 为方差。给定的显著性水平 α 下,当 $|Z_s| > Z_{(1-\alpha)/2}$ 时,表示变化趋势显著。结合 S_{NDVI} 值和 $|Z_s|$ 值,将草地趋势变化的显著性分为 6 个等级,即在大于等于 1.615,1.943,2.518 时,分别表示通过了

置信度 90%,95%,99% 的显著性检验(不显著增加/减少、显著增加/减少、极显著增加/减少)^[29]。

(2) 稳定性分析利用变异系数 C_v 来表示草地 NDVI 相对波动程度,数值越大表明草地受干扰强度越大,越不稳定;数值越小说明植被状态相对稳定^[28]。计算公式如下:

$$C_v = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\text{NDVI}_i - \text{NDVI}_{\text{mean}})^2 / \text{NDVI}_{\text{mean}}}$$

式中: C_v 为 NDVI 变异系数; NDVI_i 表示第 i 年对应的 NDVI 值; $\text{NDVI}_{\text{mean}}$ 为基于 1982—2015 年的 NDVI 数据获得的多年 NDVI 均值。

(3) 未来趋势分析 Hurst 指数是根据 NDVI 时间序列数据预测未来 NDVI 的变化趋势,是一种定量表述时间序列信息长期依赖性的有效方法^[31]。本文用来研究草地 NDVI 未来的趋势,其计算原理可参考相关研究^[31],Hurst 指数分为 3 种情况:若 $0 \leq \text{Hurst} < 0.5$,说明 NDVI 时序数据具有长期的相关性,将来的总体趋势和过去的趋势相反,时间序列表现出反持续性;若 $\text{Hurst} = 0.5$,表明 NDVI 时序数据互相独立且没有依赖性,现在不会影响到未来;若 $0.5 < \text{Hurst} \leq 1$,表明未来的 NDVI 时序数据总体趋势与过去的总体趋势相同,过程具有持续性,越接近 1,持续性越强^[31]。

(4) 月均 NDVI 与月均气温、降水的偏相关性分析地理系统是由多因素组成的复杂系统,采用偏相关分析法逐像元分析北方草地月均 NDVI 和月均气温、月均降水因果关系,公式如下^[28]:

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

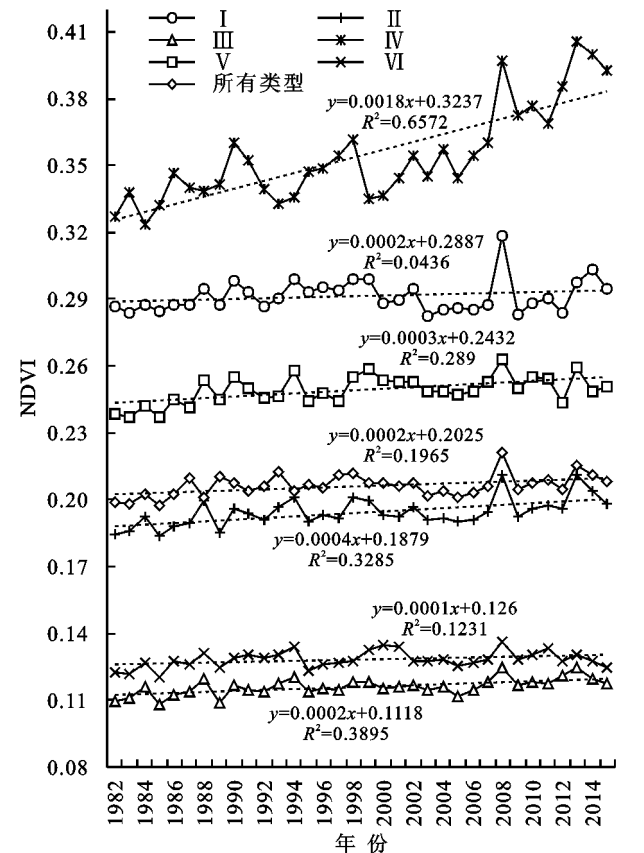
式中: x 表示 NDVI; y 代表月均降水; z 为月均气温; r_{xy} 表示月均 NDVI 与月均降水的相关系数; r_{xz} 表示月均 NDVI 与月均气温的相关系数; r_{yz} 表示月均降水与月均气温的相关系数。 $r_{xy \cdot (z)}$ 为变量降水固定后月均 NDVI 与月均气温的偏相关系数,以此类推。

2 结果与分析

2.1 植被覆盖的空间分布特征

使用均值法计算得到的 34 a 间中国北方草地 NDVI 的时间特征(图 2)发现:中国北方 NDVI 以 0.000 2/10 a 的速率增加($p < 0.05$),变化相对稳定,NDVI 值基本在 0.2 附近上下波动,2008 年 NDVI 有最大值。但不同的草地类型 NDVI 变化特征各不相同,坡地草地 NDVI > 草甸 > 高山亚高山草甸 > 平原草地 > 高山亚高山平原草原 > 荒漠草原 NDVI。其中,坡地草地的增加速率最大(增长速率 = 0.001 82/10 a,相关系数 = 0.811),变化较为明显;高山亚高山平原草

原变化速率最小,其他 4 种草地类型速率从大到小为平原草地 NDVI 增长速率 > 高山亚高山草甸 > 荒漠草原 > 草甸。总体来看,2007—2008 年,2008—2009 年的两个期间 NDVI 先剧增后剧减,为 34 a 间变化较为明显的两个阶段。



注: I 表示草甸; II 表示平原草地; III 表示荒漠草原; IV 表示坡地草地; V 表示高山亚高山草甸; VI 表示高山亚高山平原草原。下同。

图 2 1982—2015 年中国北方草地植被 NDVI 的年际变化及趋势

基于均值法计算得到 34 a 间中国北方草地 NDVI 的空间分布情况(图 3),发现 NDVI < 0.1 的地区集中在地处西北的昆仑山脉和阿尔金山脉周围,NDVI > 0.5 主要分布在祁连山脉北坡,天山山脉(主要集中在南坡)和小兴安岭地区。NDVI 值的分布整体呈现出从东南向西北逐渐降低。

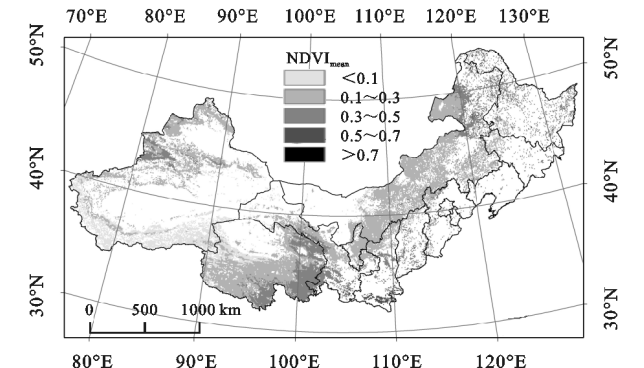
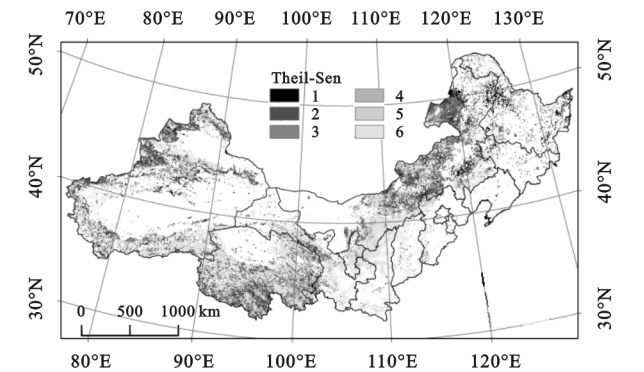


图 3 1982—2015 年中国北方草地 NDVI 空间变化

结合草地类型图(图 1A)可知:草甸、平原草地类型的 NDVI 基本在 0.3 以上,南北分布差异较小;荒漠草地的 NDVI 值基本在 0.3 以下,但存在明显区域差异,如在新疆、青海的荒漠草地比在内蒙古地区的 NDVI 低;坡地草地、高山亚高山草甸、高山亚高山平原草原的 NDVI 基本在 0.3 以上,但高山亚高山草甸的 NDVI 存在明显的南高北低的特征。

2.2 植被覆盖的空间变化趋势

基于 Sen 和 M-K 检验方法得到 34 a 间 NDVI 变化趋势的空间分、全部草地和每种草地在不同变化等级中所占面积(图 4),发现我国北方地区 NDVI 以增加趋势为主,占研究区总面积的 76%。其中,极显著增加所占



注:1 表示极显著减少;2 表示显著减少;3 表示不显著减少;4 表示不显著增加;5 表示显著增加;6 表示极显著增加。

图 4 1982—2015 年中国北方草地 NDVI 变化趋势及不同草地类型显著性统计

2.3 植被稳定性的空间格局

基于中国北方草地 34 a 间各像元的 NDVI 变异系数计算结果和实际情况,将变异划分为 8 个等级(图 5)。中国北方草地 34 a 间 NDVI 变异系数的平均值为 0.078,变化相对稳定(<0.15),但这种稳定性存在显著的空间差异。低波动($0\sim0.1$)约占 31.4%,其中,较低波动变化($0.1\sim0.15$)占 53.6%,主要分布在除祁连山脉、青海高原和大、小兴安岭区域、昆仑山脉外的其他区域。区域内较高波动变化($0.15\sim0.2$)和

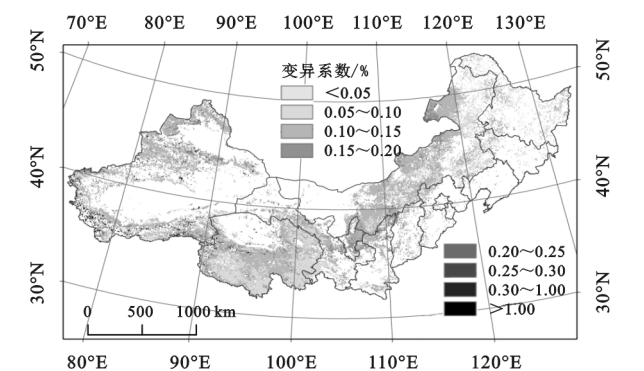


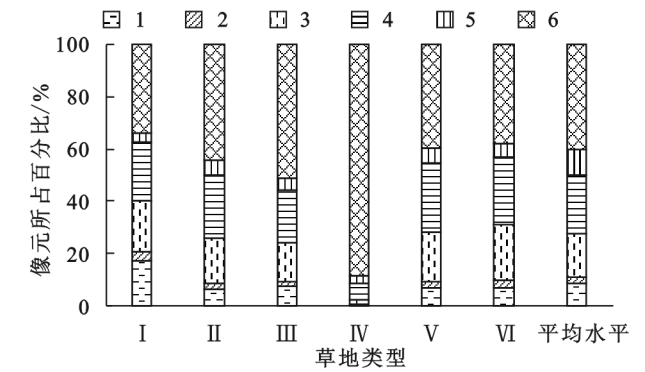
图 5 1982—2015 年中国北方草地 NDVI 变异系数及不同草地类型变异系数统计

2.4 植被覆盖变化可持续分析

基于 1982—2015 年中国北方草地 NDVI 的 Hurst 指数(H)分布图(图 6),发现中国北方草地未来变化趋

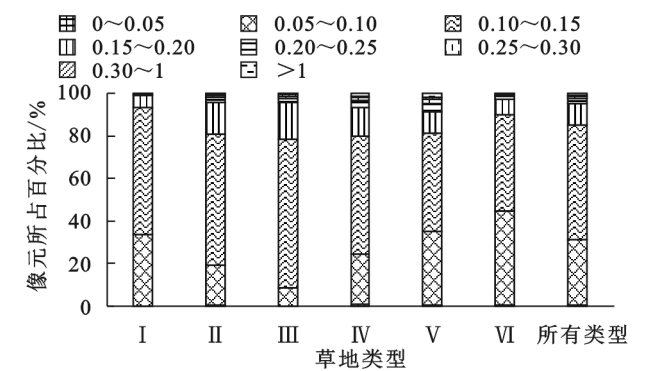
比例最大(占 43%),集中分布在黄土高原、青海高原、祁连山脉地区。NDVI 呈减少趋势集中分布在大兴安岭、小兴安岭和天山山脉地区,以不显著减少为主(占 18%)。增加趋势的面积比例远高于减少趋势,表明研究区草地覆盖状态整体上为不断改善趋势。

就每种草地类型而言,6 种草地类型的 NDVI 值呈增加趋势的面积均高于呈减少趋势面积,坡地草地类型表现为增加趋势的比例最大(占 98%),其次为荒漠草原(占 76%),再次为平原草地(占 74%),草甸呈增加趋势的比例最小(占 59%),高山亚高山草甸、高山亚高山平原草原增加趋势所占比例分别为 72%和 68%。



高波动变化(>0.2)仅占整个研究区的 15.0%,集中新疆的尔齐斯河、伊犁河、塔里木河、塔里木盆地和甘肃境内的黄河流域以及内蒙古的呼伦贝尔高原呼伦湖周围,这些区域大部分为河流和沙漠地区。

草地类型除高山亚高山草甸和荒漠草原呈高波动的面积达到 8%,其他 4 种草地类型呈高波动所占面积不足 5%。其中,稳定性最好的草地类型为草甸,其次为高山亚高山平原草原;稳定性最差的为荒漠草原,其次为高山亚高山草甸。



势具有 Hurst 现象,Hurst 指数均值为 0.42,即未来一段时期内草地 NDVI 的变化趋势与 1982—2015 年的变化趋势整体表现为相反趋势。 H 介于 $0\sim0.5$ 的面积占

79.8%。结合前面的 NDVI 变化趋势发现我国北方地区草地 NDVI 在未来一段时间内会出现大面积的减少趋势。其中,反持续性极显著减少($0 \leq H < 0.2$)占 0.6%,零星的分布在青海高原区域;反持续性显著减少($0.2 \leq H < 0.4$)占 35.1%,主要集中在内蒙古高原、青海高原、阿尔卑斯山脉和天山山脉;44.0%的区域为反持续性减少不显著($0.4 \leq H < 0.5$),零散分布在整个研究区。未来草地 NDVI 的变化趋势与 1982—2015 年的变化趋势相同的面积($0.5 < H \leq 1$)的仅占研究区总面积的

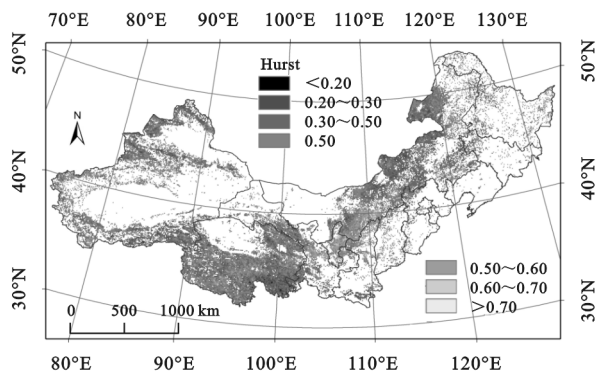


图 6 1982—2015 年中国北方 NDVI 的 Hurst 指数分布不同草地类型 Hurst 统计

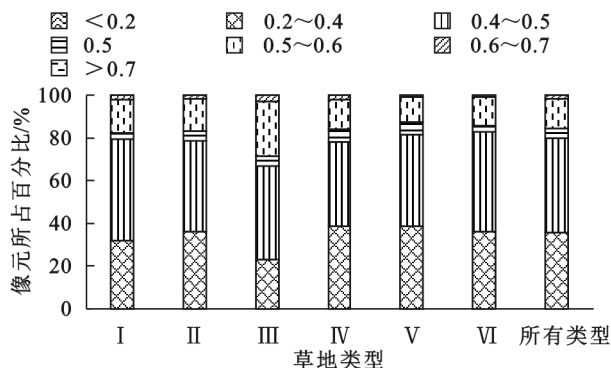
2.5 植被 NDVI 动态对气候变化的响应格局

中国北方草地 NDVI 与气温和降水的关系图(图 7A, 7B)中显示, 1985—1987 年、1989—1991 年、1993—1995 年、1997—1999 年、2001 年、2003 年、2005—2006 年、2012 年中国北方草地 NDVI 与气温的年际变化趋势上表现出一致性, 其余大部分时段与 NDVI 的变化趋势相反。草地 NDVI 与降水的年际变化趋势总体上具有同步性, 但 1982—1984 年、1989—1992 年、2003 年、2005 年表现出相反的变化趋势。

从北方草地 NDVI 与气温和降水的偏相关关系图中(图 7C, 7D), 发现在控制降水的条件下 NDVI 和气温之间的关系为正负相关并存, 但只有 0.7% 的区域达到 $p < 0.05$ 的显著性检验; 其中, 37.3% 的区域呈正相关关系(即气温升高对草地生长是有利的), 主要集中在内蒙古高原、青海高原及甘肃境内黄河流域等海拔较高、较低周围及冰雪覆盖区域。相关系数集中在 $0 \sim -0.3$ 之间所占面积最大, 大部分区域气温升高对草地的生长是有利的; NDVI 与气温之间呈负相关的区域主要分布于内蒙古高原、黄土高原西南部、准噶尔盆地和塔里木盆地等较为干旱地区, 年均气温升高对草地的生长是不利的。NDVI 与降水之间也呈现正负相关并存的特征, 但正相关(92.4%)约是呈负相关(7.6%)的 9 倍, 只有 3.5% 的区域达到 $p < 0.05$ 的显著性检验; 年降水量的增多对草地植被的生长不利的区域多集中在昆仑山脉、青海高原东坡坡底和小兴安岭零散分布。

15.7%, 远小于反持续性变化, 主要分布在黄土高原和小兴安岭区域内。未来 NDVI 变化趋势表现为随机的面积($H = 0.5$)占研究区总面积的 4.5%, 零星分布在昆仑山脉、青海高原和祁连山脉。

从草地类型的统计数据(图 6)发现: 每种草地均以反持续性变化为主, 除坡地草原外, 其他几种草地类型基本占到每种草地类型总面积的 80% 左右; 持随机变化趋势区域约占每种草地类型总面积的 2%; 与现在变化趋势一致的仅占不到 18% (除坡地草原)。



3 讨论

草地对地形地貌、气候变化和人类活动的响应过程是一个复杂的动态过程。不同地貌条件会导致热量和水分的空间差异, 进而使得不同地区、不同草地类型 NDVI 存在明显空间差异, 尤其在对气温和降水敏感的干旱、半干旱地区尤为显著^[13-22]。我国西北地区大面积处于干旱、半干旱地区, 降水量的多少直接影响草地的生长状况。本文通过研究 1982—2015 年我国草地时空特征变化及其对气候变化的响应, 发现除昆仑山脉、青海高原东坡坡底和小兴安岭等海拔较高的区域外(图 7B), NDVI 随降水量的增加而增加。而温度对海拔较高地区的草地生长是有利的, 但在较为干旱的地区(如黄土高原西南部、准噶尔盆地和塔里木盆地), 温度升高对草地的生长是不利的。这主要是因为温度过高会导致植被叶片蒸腾作用加快, 导致蒸散发增加, 使得土壤水分减少, 反过来抑制植被生长和光合作用; 而降雨量会直接影响土壤含水量, 同样会加速植物内部化学反应速度。太阳辐射较好的阳坡由于降雨量较少会容易导致更多的蒸散发, 使植被覆盖度降低, 阴坡主要由于光照和太阳辐射较差, 容易形成干冷的天气, 不利于植被生长^[32-36]。

除气候因素等自然因素外, 人类行为也是影响草地 NDVI 动态的一个重要原因。已有学者研究表明大型的生态工程会对植被等的生长产生正面的影响^[13, 16, 23, 34], 如 1999 年、2003 年开始实施的退耕还林还草、退牧还草

以及 2008 年土地整治相关措施的实施,对我过草地植被产生了较为显著的影响。如梁爽等^[21]研究发现在 1982—1999 年全国草地生长季 NDVI 的变化较为显著,但是从 1999 年之后,因实施的一些生态工程项目的原因,草地 NDVI 的变化趋势和方向与研究时段有关。修丽娜等^[16]人对 1990—2015 年黄土高原土地利用类型转移数据进行统计发现,1990—2000 年,草地大量转为耕地和人工表面(转化面积分别为 4 104.05 km², 270.87 km²),其原因主要是因为这一时期我国人口大量增加,黄土高原的开荒力度加大,很多天然草地覆盖区被人类所占用;而 2000—2015 年,草地面积约增加了 14 278.59 km²,这主要是因为退耕还林(草)生态工程的实施,坡度较大的耕地转换为草地。以上这些都为本文的研究

结果的正确性提供了支持(2007—2009 年的 NDVI 呈现出显著的相反变化趋势,其中坡地草地和草地变化最为显著)。但也有研究^[37]表明因退耕还林还草政策实施后,没有考虑到地区的气候、水文等自然因素,林地面积的大幅度增加会使土壤蒸发量加大,而造成土地的干旱程度增加,对草地生造成了影响,草地 NDVI 降低。因此,进行大规模的植树造林还草等工程可能存在风险。因此,大型生态工程实施的后期是否有片面(或负反馈作用)影响还需进一步研究。再者,在未来的生态环境保护上是否应该考虑将改变现有的土地覆盖类型转移为重点的工程,转为禁止放牧、过度开垦等以制约人类活动方面,值得研究人员和相关工作人员关注。

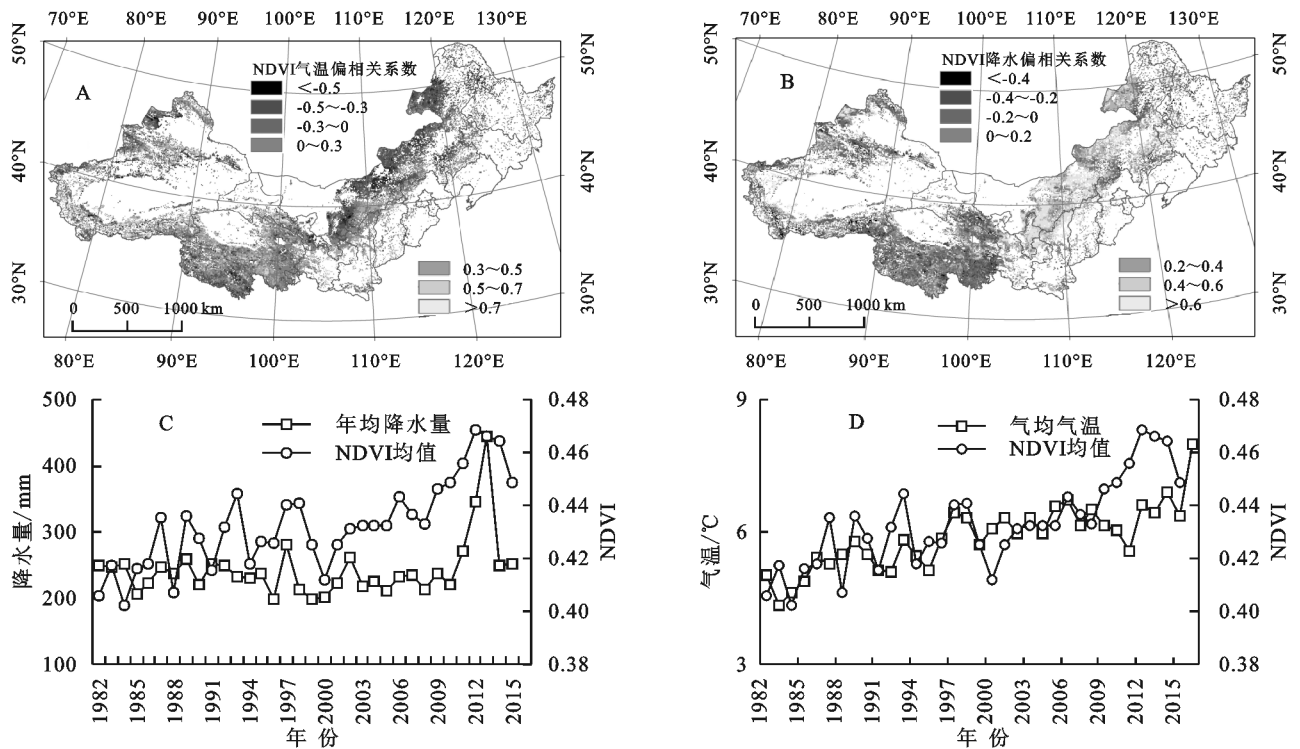


图 7 1982—2015 年中国北方 NDVI 与气温、降水的关系图和偏相关关系

虽目前对植被 NDVI 的变化趋势、影响因子的研究较多,且大多数结果都表明在近 30 a 的我国很多地区 NDVI 都表现出增加趋势^[13,15,20-21,32],本文研究结果与已有的结果空间和时间变化趋势具有一致性。但是,目前对未来植被 NDVI 的变化趋势的研究较少,且研究结果上存在差异性。如:李双双等^[33]对陕甘宁地区的植被未来趋势研究发现研究区大部分植被薄覆盖变化将持续改善;但赵安周^[34]、孙锐^[35]、刘宪锋^[36]等分别对黄土高原和秦巴山区的植被未来变化趋势研究发现,大部分区域植被未来的变化趋势与现在的变化趋势相反,可能在将来植被会呈现退化的趋势,这与本文的研究结果较为一致。但未来 NDVI 的趋势研究因为受到很多自然和认为的因素,因此,研究人员应持

续关注退化地区的植被状态。

4 结论

(1) 北方草地 NDVI 以增加趋势为主(占 76%),其增速为 0.002/10 a,但存在西北低、东南部高的分布特征,其中 1999 年和 2008 年为突变点。

(2) 山地草原类型表现为增加趋势的比例最大(98%),其次为荒漠草原(76%),再次为坡地草地(74%),草甸呈增加趋势的比例最小(59%),高山亚高山草甸、高山亚高山平原草原增加趋势所占比例分别为 72%和 68%。

(3) 34 a 间 NDVI 变异系数的平均值为 0.078,变化相对稳定(<0.15),但这种稳定性存在显著的空

间差异性。

(4) Hurst 指数均值为 0.42, 未来草地 NDVI 变化趋势与现在变化趋势呈反持续性变化的面积 ($0 < H < 0.5$) 占总面积的 79.8%; 草地 NDVI 变化趋势延续现在植被变化态势区域 ($0.5 < H \leq 1$) 占总研究区的 15.7%。变化随机的 ($H = 0.5$) 面积占 4.5%。

(5) 降水是西北草地生长的主要因素, 除纬度较高的冰雪覆盖区, 92.4% 地区的降水对 NDVI 生长是有利的; 除较干旱地区外, 气温升对 NDVI 生长呈不显著的正相关 (37.3%)。

参考文献:

- [1] 柳海鹰, 高吉喜, 成文连. 草原管理与草地畜牧业可持续发展对策[J]. 草原与草坪, 2002(4): 21-23.
- [2] 中共环境保护部党组. 构建人与自然和谐发展的现代化建设新格局—党的十八大以来生态文明建设的理论与实践[J]. 环境保护, 2016, 44(13): 11-13.
- [3] Parmesan C, Yohe G W. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems[J]. Nature, 2003, 421(6918): 37-42.
- [4] Zhao X, Tan K, Zhao S, et al. Changing climate affects vegetation growth in the arid region of the northwestern China[J]. Journal of Arid Environments, 2011, 75(10): 946-952.
- [5] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991[J]. Nature, 1997, 386(6626): 698-702.
- [6] Piao S, Nan H, Huntingford C, et al. Evidence for a weakening relationship between interannual temperature variability and northern vegetation activity[J]. Nature Communications, 2014, 5(1): 1-7.
- [7] Del Grosso S, Parton W, Stohlgren T, et al. Global potential net primary production predicted from vegetation class, precipitation, and temperature [J]. Ecology, 2008, 89(8): 2117-2126.
- [8] Gao J B, Jiao K W, Wu S H, et al. Past and future effects of climate change on spatially heterogeneous vegetation activity in China [J]. Earth's Future, 2017, 5(7): 679-692.
- [9] Jiang L, Bao A, Guo H, et al. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia[J]. Science of the Total Environment, 2017, 599: 967-980.
- [10] 第二次气候变化国家评估报告编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告[C]. 北京: 科学出版社, 2011: 1-22.
- [11] 张慧, 李平衡, 周国模, 等. 植被指数的地形效应研究进展[J]. 应用生态学报, 2018, 29(2): 669-677.
- [12] 秦格霞, 吴静, 李纯斌, 等. 中国北方草地植被物候变化及其对气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4099-4107.
- [13] 赵鸿雁, 陈英, 周翼, 等. 甘肃中东部植被生长季 NDVI 时空变化及其对气候因子的响应[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1427-1435.
- [14] 赵旺林, 罗天祥, 张林. 气候变化与放牧对西藏典型高寒荒漠草地植被指数变化的相对影响[J]. 生态学报, 2018, 39(22): 298-307.
- [15] 牟乐, 芦奕晓, 杨惠敏, 等. 1981—2015 年中国西北牧区植被覆盖的时空变化[J]. 干旱区研究, 2018, 35(3): 615-623.
- [16] 修丽娜, 颜长珍, 钱大文, 等. 生态工程背景下黄土高原植被变化时空特征及其驱动力[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4): 214-221.
- [17] 阿荣, 毕其格, 董振华. 基于 MODIS/NDVI 的锡林郭勒草原植被变化及其归因[J]. 资源科学, 2019, 41(7): 1374-1386.
- [18] Walther G R, Post E, Convey P, et al. Ecological responses to recent climate change[J]. Nature, 2002, 416(6879): 389-395.
- [19] Zoungrana B J B, Conrad C, Thiel M, et al. MODIS NDVI trends and fractional land cover change for improved assessments of vegetation degradation in Burkina Faso, West Africa[J]. Journal of Arid Environments, 2018, 153: 66-75.
- [20] 尼加提, 伊米尔, 满苏尔, 等. 天山北坡植被 NDVI 时空变化及其与气候因子的关系[J]. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1250-1260.
- [21] 梁爽, 彭书时, 林鑫, 等. 1982—2015 年全国草地生长时空变化[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2013, 49(2): 311-320.
- [22] 戴声佩, 张勃, 王海军, 等. 1999—2007 年祁连山区植被指数时空变化[J]. 干旱区研究, 2010, 27(4): 585-591.
- [23] 秦国玲. 土地整治对 NDVI 的影响研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [24] 郑度. 中国生态地理区域系统研究[D]. 北京: 商务印书馆, 2008.
- [25] 李任君, 高懋芳, 李强, 等. 基于 ANUSPLIN 的降水空间插值方法研究[J]. 中国农业信息, 2019, 31(1): 52-61.
- [26] 耿丽英, 马明国. 长时间序列 NDVI 数据重建方法比较研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(2): 362-368.
- [27] 冉有华, 李新, 卢玲. 中国地区土地覆盖综合数据集[R]. 寒区旱区科学数据中心, 2010.
- [28] 高艳妮, 郭艳芳, 王维, 等. 不同土地利用/覆盖数据在中国北方草地的精度评价[J]. 生态学杂志, 2019, 38(1): 289-299.

(4) 小波分析表明,年及春、夏、秋季 SPEI 指数周期性变化特征有一定的相似性,均明显存在着 4~18 a 的短周期和 20 a 以上的长周期,还可能存在着更大尺度的周期;冬季存在着 3~11 a 的短周期和 12~30 a 的长周期。

参考文献:

- [1] 杨涛,陆桂华,李会会,等.气候变化下水文极端事件变化预测研究进展[J].水科学进展,2011,22(2):279-286.
- [2] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis: contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [3] 刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,等.农业干旱监测研究进展与展望[J].地理学报,2015,70(11):1835-1848.
- [4] 袁星,马凤,李华,等.全球变化背景下多尺度干旱过程及预测研究进展[J].大气科学学报,2020,43(1):1-13.
- [5] 姚玉璧,张强,李耀辉,等.干旱灾害风险评估技术及其科学问题与展望[J].资源科学,2013,35(9):1884-1897.
- [6] Zhang L, Xiao J, Li J, et al. The 2010 spring drought reduced primary productivity in southwestern China[J]. Environmental Research Letters, 2012,7(4):045706.
- [7] 翁白莎,严登华.变化环境下中国干旱综合应对措施探讨[J].资源科学,2010,32(2):309-316.
- [8] 李红梅,李林,李万志.气象干旱监测指标在青海高原的适用性分析[J].干旱区研究,2018,35(1):114-121.
- [9] 茅海祥,聂云,杨群,等.1980—2018 年贵州省 PDSI 干旱指数与降水 Z 指数对比分析[J].现代农业科技,2020(7):202-204,208.
- [10] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate, 2010,23(7):1696-1718.
- [11] 冉大川,罗全华,刘斌,等.黄河中游地区淤地坝减洪减沙及减蚀作用研究[J].水利学报,2004,35(5):7-13.
- [12] 黄晓阳,金晓斌,郭贝贝,等.黄土台塬区农用地整治分区研究[J].资源科学,2014,36(3):438-445.
- [13] 王芝兰,李耀辉,王素萍,等.1901—2012 年中国西北地区东部多时间尺度干旱特征[J].中国沙漠,2015,35(6):1666-1673.
- [14] 中华人民共和国国家标准 GB/T 20481—2006.气象干旱等级[M].北京:中国标准出版社,2006.
- [15] 孙艺杰,刘宪锋,任志远,等.1960—2016 年黄土高原多尺度干旱特征及影响因素[J].地理研究,2019,38(7):1820-1832.
- [16] 张克新,董小刚,廖空太,等.1960—2017 年黄河流域极端气温的季节变化特征及其与 ENSO 的相关性分析[J].水土保持研究,2020,27(2):185-192.
- [17] 冯文文,柳凤霞,钱会,等.气候变化背景下武功地区降水特征[J].水土保持研究,2020,27(2):200-205.
- [18] 张营营,胡亚朋,张范平.黄河上游天然径流变化特性分析[J].干旱区资源与环境,2017,31(2):104-109.
- [19] 文广超,王文科,段磊,等.巴音河流域德令哈市气象站近 60 年来降水变化特征分析[J].水资源与水工程学报,2018,29(1):18-24.
- [20] 郭梦,张奇莹,钱会,等.基于 SPEI 干旱指数的陕西省干旱时空分布特征分析[J].水资源与水工程学报,2019,30(3):127-132,138.
- [21] 马柱国,符淙斌,杨庆,等.关于我国北方干旱化及其转折性变化[J].大气科学,2018,42(4):951-961.
- [22] 程国锋,窦慎,许玮.渭北旱塬区气温变化与冬小麦物候的响应[J].干旱地区农业研究,2014,32(5):112-115.
- ~~~~~
- (上接第 108 页)
- [29] Kendall M G. Rank correlation methods[J]. British Journal of Psychology, 1990,25(1):86-91.
- [30] 徐建华.计量地理学[M].北京:高等教育出版社,2014:109-200.
- [31] 刘兆羽,盛虎,董莹莹.基于加权平均值的时变 Hurst 指数估计方法研究[J].信息技术,2019,43(11):1-4,9.
- [32] 周伟,刚成诚,李建龙,等.1982—2010 年中国草地覆盖度的时空动态及其对气候变化的响应[J].地理学报,2014,69(1):15-30.
- [33] 李双双,延军平,万佳.近 10 年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征[J].地理学报,2012,67(7):960-970.
- [34] 赵安周,刘宪锋,朱秀芳,等.2000—2014 年黄土高原植被覆盖时空变化特征及其归因[J].中国环境科学,2016,36(5):290-300.
- [35] 孙锐,陈少辉,苏红波.2000—2016 年黄土高原不同土地覆盖类型植被 NDVI 时空变化[J].地理科学进展,2019,38(8):1248-1258.
- [36] 刘宪锋,潘耀忠,朱秀芳,等.2000—2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J].地理学报,2015,70(5):705-716.
- [37] Zhang J T, Ru W, Li B. Relationships between vegetation and climate on the Loess Plateau in China[J]. Folia Geobotanica, 2006,41(2):151-163.