

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.005.

付建新. 山西黄河流域不同土地利用类型 NDVI 时空变化及其对气温、降水的响应[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 364-372.

FU Jianxin. Temporal and Spatial Changes of NDVI of Different Land Covers and Their Responses to Temperature and Precipitation in the Yellow River Basin of Shanxi[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 364-372.

山西黄河流域不同土地利用类型 NDVI 时空变化及其对气温、降水的响应

付建新

(太原师范学院 城镇与区域发展研究所, 山西 晋中 030619)

摘要: [目的] 了解山西黄河流域不同土地利用类型 NDVI 时空变化及其对气温、降水的响应关系, 对该流域生态保护、修复和高质量发展具有重要的意义。 [方法] 基于 1998—2018 年 NDVI 数据, 利用 NDVI 变化趋势、变异系数、空间自相关等方法, 对山西黄河流域不同土地利用类型 NDVI 时空变化特征及其与气温、降水的关系进行分析。 [结果] 不同土地利用类型 NDVI 变化趋势均呈向好态势, 草地和林地覆盖状况优于整体水平。 NDVI 在空间上整体呈南北纵列、高低相间的分布格局, 吕梁山和太岳山—中条山高, 西部高原丘陵区 and 汾河谷地低。 NDVI 变化趋势的空间异质性显著, 植被以显著改善为主。 林地改善趋势的稳定性最好。 NDVI 表现出明显的空间集聚性特征, 其中耕地 NDVI 变化趋势集聚特征最明显。 不同土地利用类型 NDVI 对降水的敏感性强于气温。 [结论] 山西黄河流域不同土地利用类型 NDVI 时空变化差异显著, 并对气温和降水存在响应关系, 此研究将为该流域生态保护和建设提供更精准的植被恢复数据及其和气温、降水关系的基础资料。

关键词: NDVI; 土地覆被; 生态修复; 气候变化; 山西黄河流域

中图分类号: Q948.112

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0364-09

Temporal and Spatial Changes of NDVI of Different Land Covers and Their Responses to Temperature and Precipitation in the Yellow River Basin of Shanxi

FU Jianxin

(Institute of Urban and Regional Development, Taiyuan Normal University, Jinzhong, Shanxi 030619, China)

Abstract: [Objective] Understanding the temporal and spatial changes of NDVI of different land use types and their responses to temperature and precipitation is of great significance to the ecological protection, restoration and high-quality development of the Yellow River Basin in Shanxi. [Methods] Based on NDVI data from 1998 to 2018, the methods of mathematical such as NDVI change trend, coefficient of variation, and spatial autocorrelation were used to illustrate temporal and spatial variation characteristics of NDVI of different land covers in the Yellow River Basin of Shanxi and their relationship with temperature and precipitation. [Results] The NDVI change trend of the whole region and different land cover showed a positive trend, and the coverage of grassland and woodland was better than the overall level. NDVI as a whole showed a spatial distribution pattern of north-south arrays and mosaic of high and low levels, value of NDVI was high in Lüliang Mountain and Taiyue-Zhongtiao Mountain, and it was low in western plateau hills and Fenhe Valley. The spatial heterogeneity of the NDVI change trend was significant, and the vegetation was mainly improved

收稿日期: 2022-03-14

修回日期: 2022-04-09

资助项目: 山西省高等学校科技创新项目(2020L0505); 山西省社科联重点课题研究项目(SSKLZDKT2022100); 山西省高等学校人文社会科学重点研究基地项目(2022J026, 20200133)

第一作者: 付建新(1980—), 男, 山西大同人, 博士, 副教授, 主要从事土地利用与区域发展研究。E-mail: fujx@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

significantly. The improvement trend of woodland had the best stability. NDVI presented obvious spatial agglomeration characteristics, among which the change trend of cultivated land NDVI was the most obvious. The sensitivity of NDVI of different land types to precipitation was stronger than that of temperature. [Conclusion] The spatial and temporal variation of NDVI varied significantly among different land use types in the Yellow River Basin of Shanxi Province, and there was a responsive relationship to temperature and precipitation. This research can provide more accurate basic data for vegetation restoration and its relationship with temperature and precipitation for the ecological protection and construction of the Yellow River Basin in Shanxi.

Keywords: NDVI; land cover; ecological restoration; climate change; Yellow River Basin of Shanxi

2019年9月,习近平总书记提出了黄河流域生态保护与高质量发展的重大国家战略。之后相关研究不断涌现,黄河流域生态保护和高质量发展战略实施^[1-2]、内涵解析^[3]、评价指标体系构建^[4]、路径与对策提出等^[5]。国家和山西“十四五”规划纲要都将黄河流域生态环境保护、修复和治理作为“十四五”的重点工作。不同土地利用类型变化及其和气候因子关系的研究是当前流域内生态保护和修复的基础性研究工作之一。

在人类活动和气候变化的影响下,全球生态系统和土地利用类型正发生着深刻的变化。在此背景下,植被作为土地生态系统的主体^[6],其变化直接影响到自然生态系统和人文环境系统的正常运行,是全球环境变化的敏感指示器^[7]。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)是目前最为常用的表征植被状况的指标^[8],被广泛应用于植被覆盖对气候变化的响应研究中^[9-10]。从1999年开始,流域内实施退耕还林(草)生态治理工程,改善了生态环境,减缓了水土流失,加剧了土地利用变化,改变了局地小气候,同时也给气候变化对植被覆盖变化影响研究带来了许多不确定因素。气候变化对植被的影响是长时间尺度的作用过程,其中气温和降水因子对植被覆盖变化的影响尤为显著。受全球变暖和区域气温升高影响,中国北部地区植被生长季提前^[11],气温升高导致蒸发加剧,植被返青所需的土壤水分缺失,影响植物生长^[12]。降水增加有利于植被维持平稳状态,山区和干旱区的植被覆盖增加尤为明显^[13],然而降水减少,气温迅速上升,将抑制植被生长^[14]。不同地域气候差异导致植被覆盖与气候变化的关系也不尽相同,西南地区气温升高,降水下降,NDVI与气温呈正相关,而与降水呈负相关^[15];青藏高原NDVI与气温和降水均呈正相关^[16];气温对长江流域NDVI的影响强于降水^[17]。气候因素是影响黄河流域NDVI变化的主导因素^[18],气温和降水整体上对黄河流域植被生长起正向促进作用^[19]。在时间分布上,植被且与年降水量的偏相关性稍大于年均温^[20],季节气温

对植被覆盖贡献率大于降水^[21]。在空间分布上,降水对NDVI变化的贡献主要体现在黄河上游,而温度的贡献则在黄河下游表现最明显^[22]。

山西黄河流域是我国水土保持生态功能区、京津冀水源涵养地、拱卫黄河生态安全的重要屏障,又是我国重要的能源资源富集区,在流域高质量发展中占据重要地位。流域内土地利用转型、煤炭资源可持续开采、水土流失同步治理、精准脱贫后防止返贫、生态环境高质量保护与建设等关键问题同时并存,在实现经济和社会高质量、可持续发展的同时,精准、高质量保护和建设生态环境是流域内“十四五”期间重要工作之一,在此背景下,采用1980—2018年NDVI数据,采用NDVI变化趋势法、变异系数法、空间自相关法和相关分析法对山西黄河流域不同土地利用类型NDVI时空变化及其和气温、降水的关系进行探析具有重要的生态意义,为政府合理制定土地资源开发利用和生态环境保护政策提供决策支撑。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

黄河流域山西段(图1A)地处黄河流域中游地带,位于黄土高原东部地区,范围为 $110^{\circ}14'22''$ — $113^{\circ}32'44''$ E, $34^{\circ}35'40''$ — $40^{\circ}41'37''$ N,行政区包括山西省86个县(区),面积11.44万 km^2 ,分别占全省和整个黄河流域总面积的73.02%和14.40%。地形起伏大,吕梁山纵贯南北,其以西为黄土高原丘陵区,以东为断陷盆地,盆地海拔由北向南逐渐降低,依次为太原盆地、临汾盆地和运城盆地,盆地以东为太岳山和中条山,气候以温带大陆性季风气候为主,黄绵土和褐土占土壤类型总面积的64.04%,流域内分布黄河支流汾河、沁河、涑水河、三川河、昕水河,其中汾河是黄河第二大支流,总长695 km,流域面积3.95万 km^2 。根据中国土地利用/土地覆盖数据的三级分类系统,将研究区地类分为耕地(39.75%)、林地(28.59%)、草地(25.77%)、水域(0.77%)、建设用地(5.08%)和未利用土地(0.05%)共6大类(图1B)。

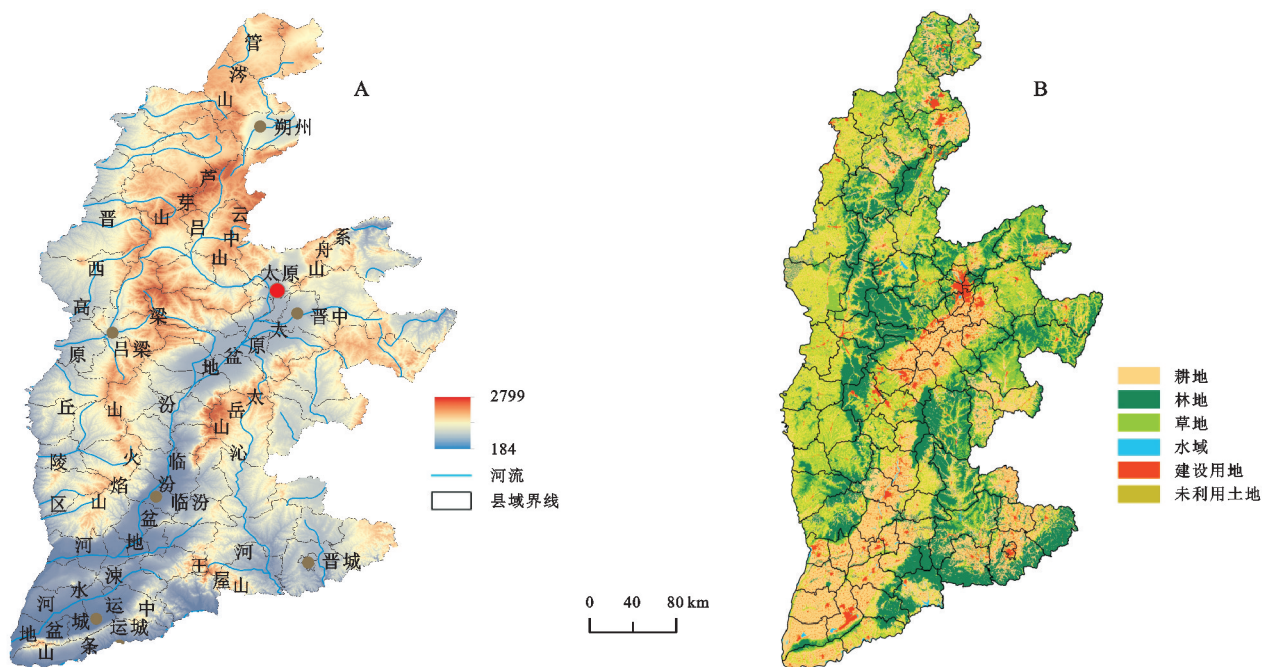


图1 山西黄河流域 DEM 及行政区划和土地利用类型

1.2 数据来源与研究方法

1.2.1 数据来源 土地利用、NDVI 数据均来源于中国科学院资源环境科学与数据中心,其中土地利用数据为 2018 年 Landsat 8 遥感影像数据,通过人工目视解译生成,空间分辨率为 30 m,对数据进行野外调查点随机抽样和核查线随机抽样核查,解译精度为 95.7%。因未利用土地所占比重极小,故在分析中未涉及未利用土地的 NDVI 分析。NDVI 数据是基于连续时间序列的 SPOT/VEGETATION NDVI 卫星遥感数据,采用最大值合成法生成,空间分辨率为 1 km,时间序列为 1998—2018 年。DEM 数据来源于地理空间数据云。

1.2.2 研究方法 本研究主要采用 NDVI 变化趋势、变异系数、空间自相关和相关分析法对山西黄河流域 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应进行分析。

(1) NDVI 变化趋势。利用 ArcGIS 10.2 栅格计算器模块对 NDVI 值和时间变量进行一元线性回归拟合,来表征植被的变化趋势^[14],其公式为:

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

式中:slope 为 NDVI 变化趋势; i 为 1 到 n 的整数; n 为研究年份(21); NDVI_i 为第 i 年 NDVI 的均值。若 $\text{slope} > 0$,NDVI 呈正向变化趋势,若 $\text{slope} < 0$,NDVI 呈负向变化趋势。对变化趋势采用 F 检验,结合检验结果和 slope 值,将 NDVI 变化趋势分为 6 个等级,即极显

著改善($\text{slope} > 0.1$)、显著改善($\text{slope} > 0.05$)、轻微改善($\text{slope} > 0$)、轻微退化($\text{slope} < 0$)、显著退化($\text{slope} < -0.05$)和极显著退化($\text{slope} < -0.1$)。

(2) 变异系数法。此方法表征植被覆盖的波动规律,反映植被变化程度的稳定性强弱^[23]。其公式为:

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

式中: C_a 为变异系数; i 为研究年份; x 为 NDVI 值; x_i 为第 i 年 NDVI; \bar{x} 为研究时段内 NDVI 均值; C_a 值愈小,表示数据分布越集中,植被波动愈小, C_a 值愈大,表示数据分布越分散,植被波动愈大。根据本文研究实际情况,参照已有研究^[24],变异系数 0~0.15 为相对稳定状态,>0.15 为不稳定状态。

(3) 空间自相关法。空间自相关法是一种探究区内观测值空间集聚性特征的方法,分析单元观测值与其相邻单元观测值是否存在相关性^[25],包括全局空间自相关和局部空间自相关。

全局空间自相关采用 Moran's I 指数,其反映的是研究时段内 NDVI 及其相邻 NDVI 相关属性相关的重要指标,公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中: I 是 Moran's I 指数; x_i 和 x_j 分别表示乡镇 i 和乡镇 j 的 NDVI 变化趋势值; \bar{x} 为均值; W_{ij} 表示乡镇 i 和乡镇 j 的空间关系。

局部空间自相关用来挖掘和识别区内 NDVI 集聚或异常的具体区域,公式为:

$$I_i = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

空间自相关显著性采用 Z 检验进行判断是否显著,公式为:

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{var}(I)}} \quad (5)$$

式中: $E(I)$ 表示期望值; $\text{var}(I)$ 表示方差,显著性水平选择为 0.05,在显著性水平下; $|Z| > 1.96$ 表示空间自相关存在显著性。综合考虑 I 和 Z ,将空间自相关分为集聚、异常和不显著 3 种情况^[26]。

(4) 相关分析法。气温和降水是影响植被变化的主要气候因子,使用相关分析法来反映 NDVI 与气温、降水之间的相关程度^[23],公式为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中:相关系数 r_{xy} 介于 $[-1, 1]$ 区间, r_{xy} 为正,表示两要素同向相关, r_{xy} 为负,表示两要素异向相关, r_{xy} 的绝对值越接近 1,表示关系越密切,越接近 0,表示关系越不密切; \bar{x}, \bar{y} 表示 x 和 y 的平均值。

2 结果与分析

2.1 山西黄河流域 NDVI 时空变化特征

2.1.1 NDVI 时间变化特征 山西黄河流域耕地、林地、草地和全域 NDVI 值分别介于 0.345~0.503, 0.478~0.651, 0.323~0.523, 0.379~0.547(图 2),多

年均值分别为 0.431, 0.572, 0.434, 0.472, 研究区内植被覆盖状况整体较好,林地覆盖状况优于耕地和草地;不同土地利用类型 NDVI 变化趋势均呈波动上升趋势,全域、耕地、林地、草地 NDVI 的上升趋势分别为 0.072/10 a, 0.065/10 a, 0.078/10 a, 0.085/10 a, 且均通过了 $p < 0.001$ 显著性检验。

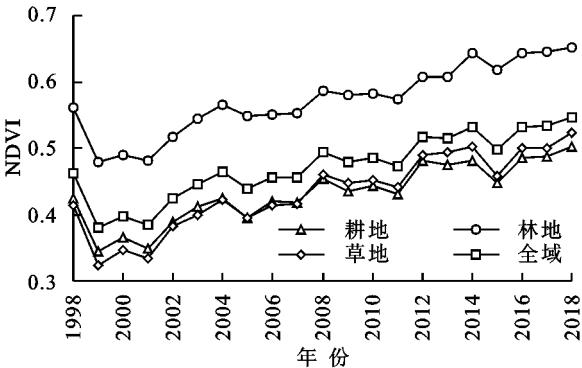


图 2 山西黄河流域 NDVI 变化趋势

2.1.2 NDVI 空间分布与变化规律

(1) NDVI 空间分布。NDVI 空间分布整体(图 3)呈南北纵列、高低相间分布格局,吕梁山、太岳山、中条山高,西部高原丘陵区 and 汾河谷地低。NDVI 最大值出现在夏县,最小值出现在运城盐湖区,太原城区、晋城城区、临汾尧都区、晋中榆次区和朔州朔城区均出现了低值区,太原城区尤为明显。不同土地利用类型 NDVI 值空间分布差异显著,临汾盆地和运城盆地耕地 NDVI 值最大,西北部高原丘陵区耕地 NDVI 值最小。吕梁山、中条山、太岳山等山区为林地 NDVI 高值区。从东部孟县、寿阳、昔阳到西南部蒲县、吉县,形成了东北—西南走向的草地 NDVI 高值区,而西部高原丘陵区 NDVI 值较小。

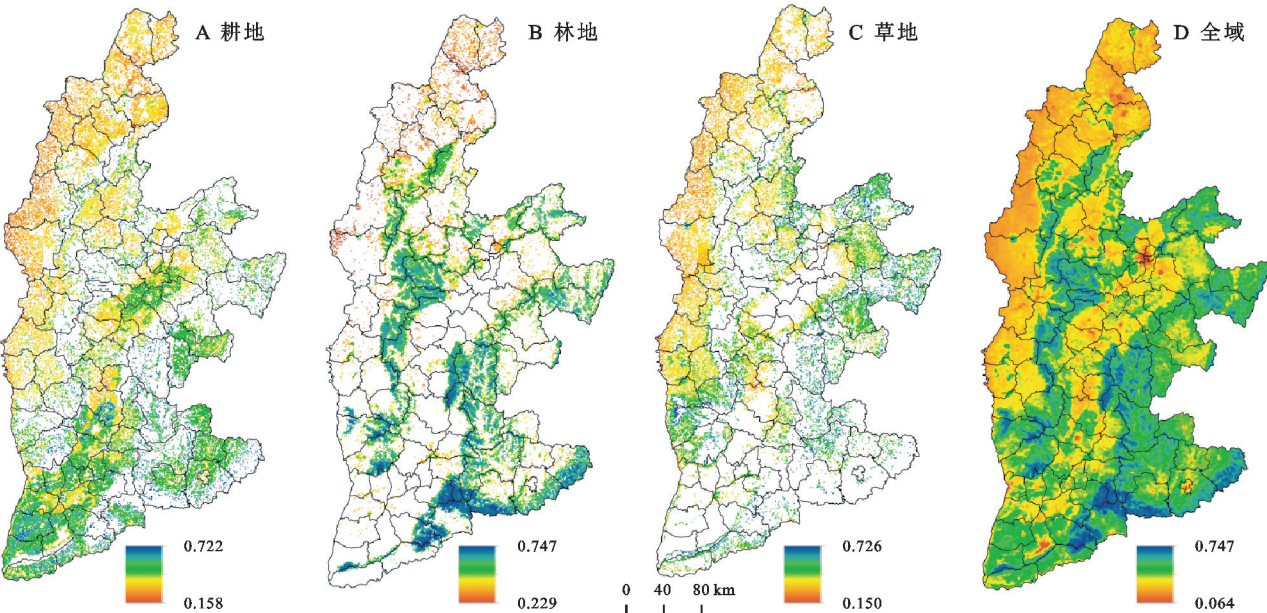


图 3 山西黄河流域不同土地利用类型 NDVI 空间分布

(2) NDVI 空间变化趋势。NDVI 变化趋势空间异质性显著(图4),范围为0.178~-0.132/a,NDVI 增加趋势面积占比高达97.07%,故植被覆盖状况整体改善良好。其中增长较快的县域分别为柳林、蒲县和石楼。小店区 NDVI 减小趋势面积比例大于增加趋势,分别为61.51%和38.49%。晋城城区植被退化现象也较为严重,其 NDVI 减小趋势面积比例为40.54%。变化趋势等级占比由大到小依次为显著改善(67.28%)、轻微

改善(23.41%)、极显著改善(6.46%)、轻微退化(2.52%)、显著退化(0.32%)和极显著退化(0.02%),植被以显著改善为主。每种地类 NDVI 改善比例(极显著改善、显著改善和轻微改善的总和)远大于退化比例(极显著退化、显著退化和轻微退化的总和)。林地、草地、耕地 NDVI 显著改善比例均最大,占比分别为80.81%、74.86%和57.56%,其中林地和草地占比超过了整体水平(67.28%)。

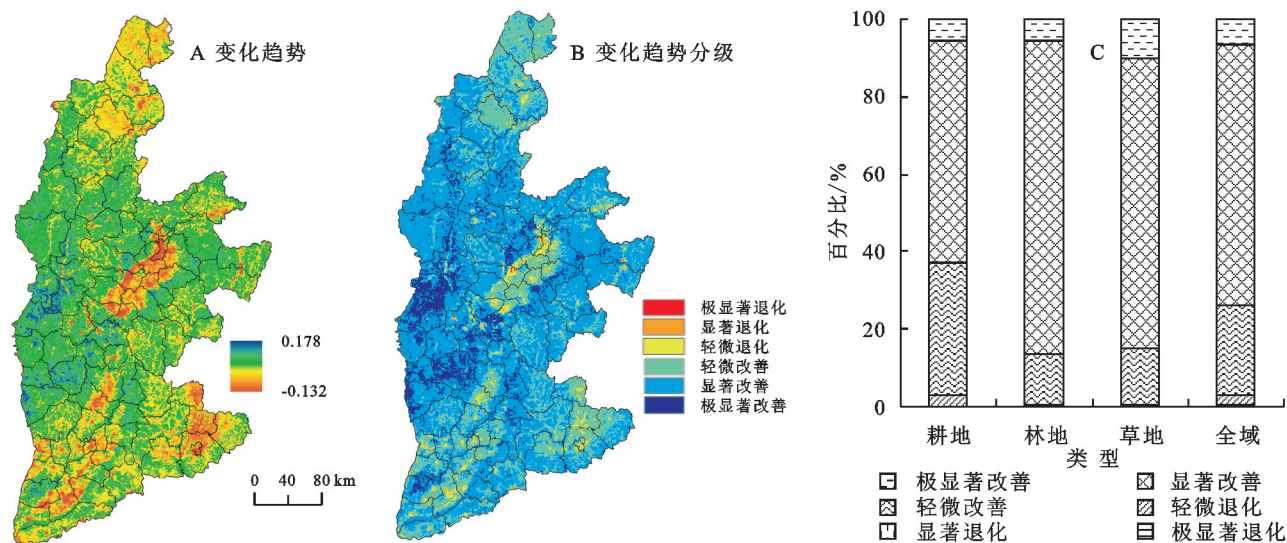


图4 山西黄河流域 NDVI 空间变化趋势

(3) NDVI 波动特征。NDVI 变异系数范围为0.03~0.56,NDVI 空间差异性显著(图5),相对稳定区(0~0.15)占全区68.89%,不稳定区占全区31.11%。不同土地利用类型 NDVI 变异系数相对稳定区占全区的比例由大到小依次为林地(87.39%)、耕地(66.62%)和草地(49.48%),林地稳定性最优。不稳定区(>0.15)

占全区比例由大到小依次为草地(50.52%)、耕地(33.38%)和林地(12.61%),草地稳定性最差。林地和耕地均以稳定改善为主,占研究区比例分别为87.14%和63.84%,其中林地稳定改善比例高于整体水平(66.59%)和其他地类,草地稳定改善和不稳定改善的占比相近。

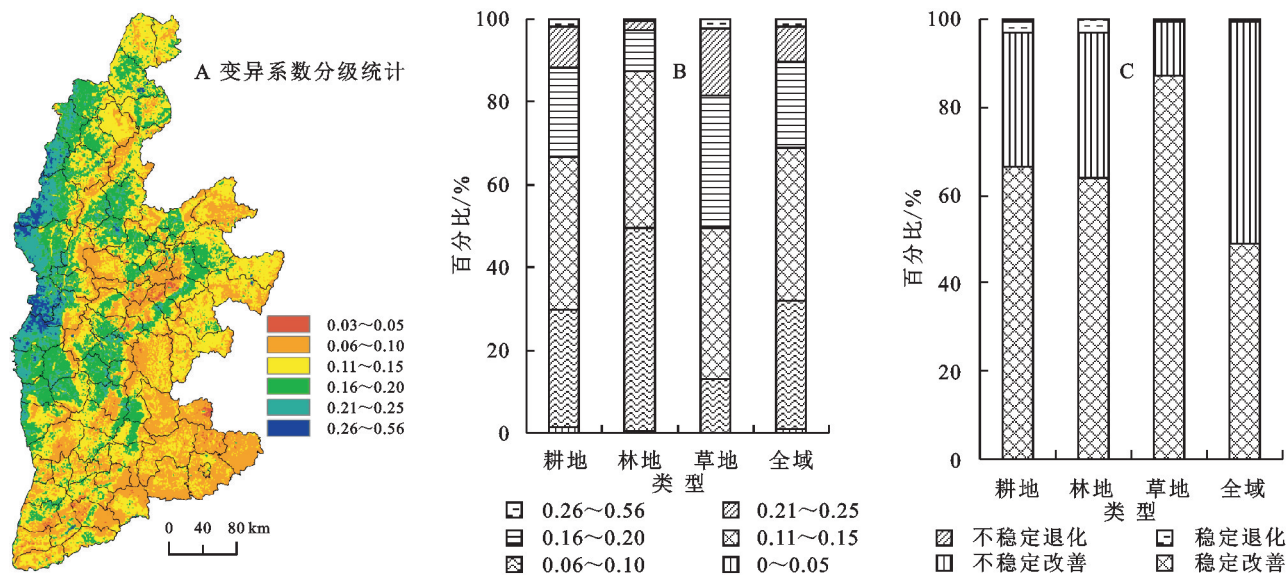


图5 山西黄河流域 NDVI 变异系数和稳定性趋势

(4) NDVI 变化趋势空间自相关分布。耕地、林地和草地 NDVI 变化趋势 Moran' s I 值(表1)均大于0,

并均通过了显著性检验,Z 统计值21.067~35.952,说明不同土地利用类型 NDVI 变化趋势空间分布并非随

机分布,呈正向空间自相关,表现出空间集聚性特征,其中耕地 NDVI 集聚特征最明显,其 Moran's *I* 值为 0.705,次之为草地,第三为林地。

表 1 山西黄河流域 NDVI 变化趋势的全局 Moran's <i>I</i> 值			
类型	Moran's <i>I</i>	Z	<i>p</i> 值
耕地	0.705	35.952	0.000 *
林地	0.413	21.067	0.000 *
草地	0.561	28.621	0.000 *

注:“*”表示通过了显著性检验。

由图 6 可知,耕地 NDVI 变化趋势的局部空间分布表现为高高“带状”和“块状”集聚、低低“块状”集聚和高低“零星”集聚状态,乡镇数量分别为 151 个、147 个和 5 个,占全部乡镇数量的 16.65%、16.21%和 0.55%,高高集聚区集中在晋西高原丘陵区、吕梁山和火焰山交界处,而低低集聚区主要分布在太原盆地、临汾盆地的尧都区、运城盆地的盐湖区和晋城盆地的晋城城区和高平市。高低集聚分散在低低集聚的周边局部地区。林地 NDVI 变化趋势的局部空间分布表现出高高“块状”集聚和低低“带状”集聚状态,乡镇数量分别为 50 个和 137 个,占全部乡镇数量的 5.51%和 15.10%,西部高原丘陵地区为高高集聚区,汾河谷地的盆地区域为低低集聚区。草地 NDVI 变化趋势表现为高高“大组团”集聚和低低“块状”集聚状态,乡镇数量分别为 87 个和 136 个,占全部乡镇数量的 9.59%和 14.99%。

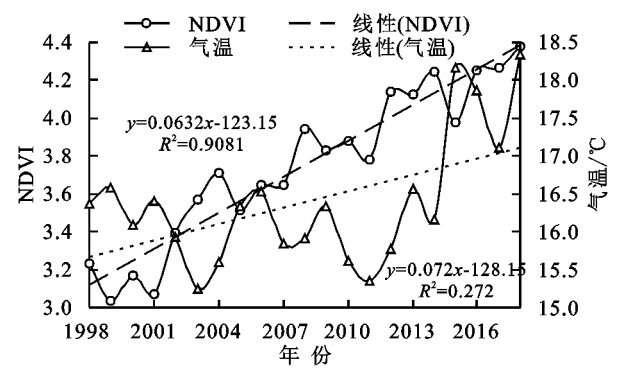


图 7 NDVI 与气温、降水的关系

全域 NDVI 和气温、降水之间相关性较为明显,相关系数分别为 0.386、0.623($p<0.01$),其中和降水的相关性尤为显著。气温和耕地 NDVI、林地 NDVI、草地 NDVI 的相关系数分别为 0.364、0.368($p<0.05$),0.444,降水和耕地 NDVI、林地 NDVI、草地 NDVI 的相关系数分别为 0.635($p<0.01$),0.603($p<0.01$),0.621($p<0.01$),整体上降水和不同土地利用类型 NDVI 相关性强于气温。

流域内气温整体上呈南高北低的趋势(图 8),汾河谷地气温明显高于两侧山地,西南部气温最高。降水整体由东南向西北降低,呈高低相间分布。

由图 9A 可知,NDVI 与气温的相关性以负向相

高高集聚集中在晋西高原丘陵区的中南部,低低集聚区集中在汾河谷地。

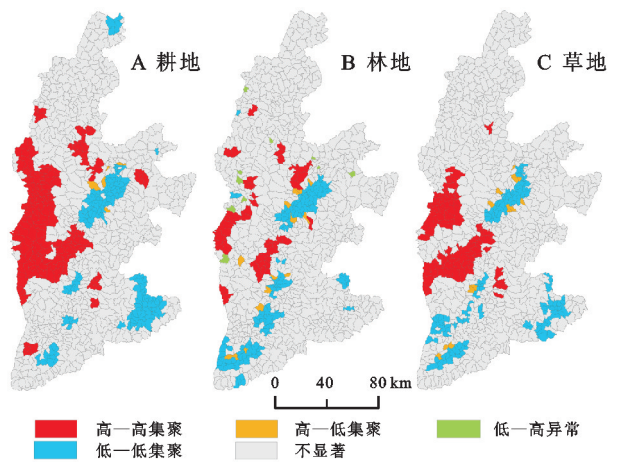
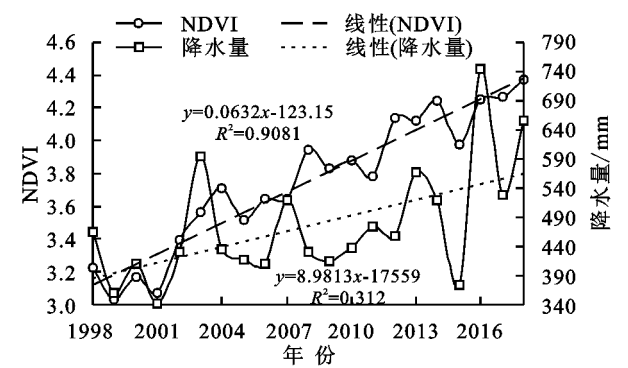


图 6 山西黄河流域 NDVI 变化趋势的局部 Moran's *I* 值空间分布

2.2 不同土地利用类型 NDVI 变化对气温、降水的响应关系

NDVI、气温和降水均呈波动上升趋势(图 7),就具体年份来看,降水和 NDVI 上升或下降趋势的一致性强于气温和 NDVI 的关系,NDVI 和降水上升或下降趋势一致的年份为 12 个,而与气温上升或下降趋势一致的年份仅为 7 个,故 NDVI 整体上受降水影响比气温大。



关性为主,共占 77.76%,其中负相关占 37.83%,主要集中在北部和中南部;显著负相关占 26.73%,中部分布较广;极其显著负相关占比为 13.20%,主要集中在太原盆地、晋西高原丘陵区的中部,以及临汾盆地的尧都区、运城盆地的盐湖区和晋城盆地的晋城城区;正相关与显著正相关主要集中在运城盆地和中条山。由图 9B 可知,NDVI 与降水的相关性以正向相关性为主,共占 95.85%,其中正相关、显著正相关和极其显著正相关分别占全区的 41.74%、26.29%和 27.82%,大致均呈东北—西南走向,三者空间上依次分布在东南部、中部和西北部,负相关占比仅为 4.15%。

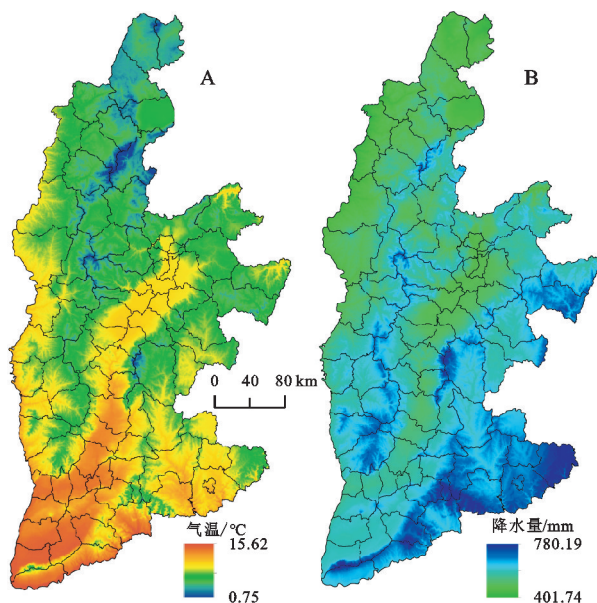


图8 山西黄河流域气温和降水空间分布

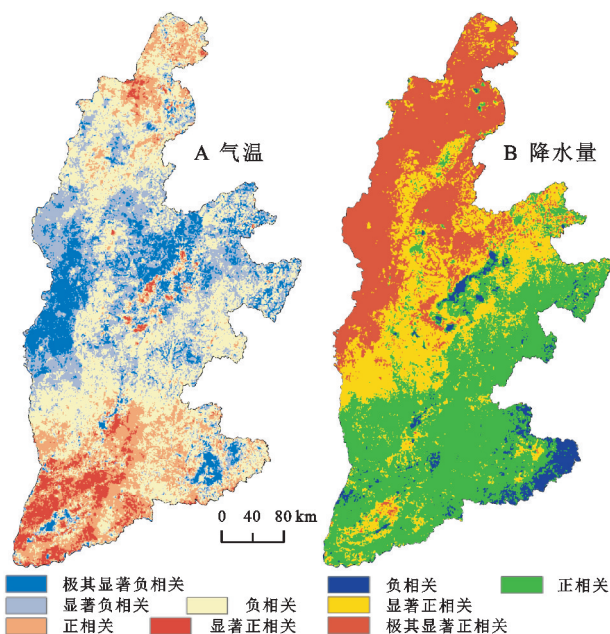


图9 山西黄河流域不同土地利用类型NDVI与气温、降水的相关性

3 讨论与结论

3.1 讨论

山西黄河流域不同土地利用类型植被覆盖状况整体改善良好,该研究结果与山西NDVI增长趋势最快的结论相似^[14]。西部高原丘陵区因降水较少,且气温较低,水热条件较差,地形起伏大,植被覆盖相对较低;汾河谷地NDVI值较低和城市建设等人类活动频繁有关。NDVI极低值区出现在太原城区和晋城城区,已有研究证明太原盆地和晋城市区植被出现严重退化^[27]的现象。耕地集中连片分布导致其NDVI变化趋势聚集特征最明显。西部高原丘陵区

区,地形起伏较大,有一定的坡度,耕地类型为旱地,马铃薯、杂粮等旱作农作物分布较集中,故耕地NDVI表现出高高集聚;而城郊地区的耕地主要发展以覆膜和温室大棚农业技术方式为主的城郊农业,呈较为明显的低低集聚特征。吕梁山通过连片新造林和未成林管护等生态综合治理工程的实施,植被覆盖实现了“量”上的提升,故林地NDVI高高“组团状”集聚特征较为显著,而汾河谷地是重要的商品农业生产基地,主要发展耕作业,林地覆被为农田防护林,为低低“带状”集聚区。草地NDVI变化趋势表现出高高“大组团”集聚,主要和天然草地保护与生态草地建设、退耕还草政策实施有关,覆盖率稳步提升。

不同研究者因研究区、研究方法、数据来源等差异,导致气温和降水对NDVI的影响也存在差异。降水对湿润地区植被的影响不明显^[28],而干旱地区^[29]和山地^[30]植被对降水的响应更为敏感。干旱抑制植被生长,导致植被生长力下降^[6]。降水对山西黄河流域NDVI的影响强于气温,尤其在西北高原丘陵区,降水少,蒸发强,降水对植被变化的影响更为明显,此结果与整个黄河流域植被覆盖影响因素的研究结论相似^[31]。普遍认为全球气候变暖有可能通过加速土壤有机质的分解环节进而促进植被净初级生产力的提高,影响植被覆盖状况^[32]。水分通过输送营养物质、维持各种生理过程等环节为植物的生长提供保障。气温通过影响植物叶片净光合速率进而影响植物的生长过程。主要因为该区属于雨热同期的季风气候区,气温适宜的情况下,降水对植被的生长具有促进作用。不同土地利用类型NDVI对气温和降水的响应也存在差异^[33]。临汾盆地和运城盆地较流域内其他区域,纬度较低,气温较高,热量充足,在降水较丰富的前提下,热量充分满足农作物的生长需求,耕地NDVI值为高值区。在退耕还林(草)、植树造林等生态治理工程政策的推动下,林地和草地改善趋势明显。林地的NDVI改善趋势稳定性最好,主要因林地地处山地地形,海拔较高,人类活动干扰少,且受地形抬升作用,降水丰富,林地NDVI空间分布形成了明显沿山脉走向的“绿色植被带”。降水对草地NDVI变化影响较大,因草地在水分需求上基本依赖于大气降水,稳定性最差。而耕地的水源来自于大气降水和人工灌溉两方面,稳定性仅次于林地。

全域NDVI和气温的相关性以负相关为主,正相关与显著正相关主要集中的区域与流域内西南部气温高有关。NDVI和降水的相关性以正相关为

主,与前人研究结论一致^[18]。耕地 NDVI 和气温负相关区域主要集中在汾河谷地,和高海拔山地相比,谷地气温较高且稳定,对耕地 NDVI 影响较小,耕地 NDVI 和降水的极其显著正相关区域主要分布在西部高原山地丘陵区,此区降水少,蒸发强,满足植物生长的水分有限。林地 NDVI 和气温的关系以负相关为主,主要和森林生长在海拔较高的山地,适合温度低的生长环境有关,而和降水以正相关为主,显著、极其显著正相关区域主要分布在吕梁山,充沛的降水对林地生长具有推动作用^[34],在山地迎风坡尤为明显。草地 NDVI 和气温以负相关为主,主要分布在西部沿黄地区,此区气温较高,植被呼吸作用强,营养物质加速消耗^[35],抑制草地生长。

不同土地利用类型对气温、降水的需求存在差异,比如落叶林、常绿林、灌木林、草地、草甸等,故更为详细分类的植被 NDVI 时空分布及其对气温、降水的响应研究今后需加强。

3.2 结论

(1) 1998—2018 年,山西黄河流域植被覆盖状况整体较好,林地覆盖状况优于耕地和草地。

(2) NDVI 空间分布整体呈南北纵列、高低相间分布格局,不同土地利用类型 NDVI 值空间分布差异显著。

(3) 流域内植被以显著改善为主,相对稳定区占比近 70%,不同土地利用类型 NDVI 表现出空间集聚性特征。

(4) 流域内 NDVI 整体受降水影响比气温大,不同土地利用类型在空间上与气温、降水的相关性存在一定差异。

参考文献:

- [1] 金凤君.黄河流域生态保护与高质量发展的协调推进策略[J].改革,2019,309(11):33-39.
- [2] 薛澜,杨越,陈玲,等.黄河流域生态保护和高质量发展战略立法的策略[J].中国人口·资源与环境,2020,30(12):1-7.
- [3] 安树伟,李瑞鹏.黄河流域高质量发展的内涵与推进方略[J].改革,2020,311(1):76-86.
- [4] 徐辉,师诺,武玲玲,等.黄河流域高质量发展水平测度及其时空演变[J].资源科学,2020,42(1):115-126.
- [5] 徐勇,王传胜.黄河流域生态保护和高质量发展:框架、路径与对策[J].中国科学院院刊,2020,35(7):875-883.
- [6] 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.
- [7] 杨达,易桂花,张廷斌,等.青藏高原植被生长季 NDVI 时空变化与影响因素[J].应用生态学报,2021,32(4):1361-1372.
- [8] 徐光来,李爱娟,徐晓华,等.中国生态功能保护区归一化植被指数动态及气候因子驱动[J].植物生态学报,2021,45(3):213-223.
- [9] 付建新,曹广超,郭文炯.1998—2017 年祁连山南坡不同海拔、坡度和坡向生长季 NDVI 变化及其与气象因子的关系[J].应用生态学报,2020,31(4):1203-1212.
- [10] 邵周玲,周文佐,李凤,等.2003—2018 年米仓山地区植被物候时空变化及对气候的响应[J].生态学报,2021,41(9):3701-3712.
- [11] 李净,刘红兵,李彩云,等.基于 GIMMS 3g NDVI 的近 30 年中国北部植被生长季始期变化研究[J].地理科学,2017,37(4):620-629.
- [12] 全莉棉,曾彪,王鑫.山西省不同生态区 NDVI 时空变化及其影响因素[J].水土保持研究,2016,23(3):71-76.
- [13] 刘洋,李诚志,刘志辉,等.1982—2013 年基于 GIMMS—NDVI 的新疆植被覆盖时空变化[J].生态学报,2016,36(19):6198-6208.
- [14] 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.
- [15] 马海云,张林林,魏学琼,等.2000—2015 年西南地区土地利用与植被覆盖的时空变化[J].应用生态学报,2020,32(2):618-628.
- [16] 韩炳宏,周秉荣,颜玉倩,等.2000—2018 年青藏高原植被覆盖变化及其与气候因素的关系分析[J].草地学报,2019,27(6):1651-1658.
- [17] 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[J].地球科学,2019,45(6):1905-1917.
- [18] 付含培,王让虎,王晓军.1999—2018 年黄河流域 NDVI 时空变化及驱动力分析[J].水土保持研究,2022,29(2):145-153,162.
- [19] 孙高鹏,刘宪锋,王小红,等.2001—2020 年黄河流域植被覆盖变化及其影响因素[J].中国沙漠,2021,41(4):205-212.
- [20] 张乐艺,李霞,冯京辉,等.2000—2018 年黄河流域 NDVI 时空变化及其对气候和人类活动的双重响应[J].水土保持通报,2021,41(5):276-286.
- [21] 李晴晴,曹艳萍,苗书玲.黄河流域植被时空变化及其对气候要素的响应研究[J].生态学报,2022,42(10):1-14.
- [22] 赵倩倩,李建华,张桂琴,等.气候变化背景下黄河流域植被变化及其成因[J].气候与环境研究,2022,27(1):157-169.
- [23] 徐建华.现代地理学中的数学方法.[M].2 版.北京:高

- 等教育出版社,2002.
- [24] 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.
- [25] 杨斯棋,邢潇月,董卫华,等.北京市甲型 H1N1 流感对气象因子的时空响应[J].地理学报,2018,73(3):460-473.
- [26] 熊俊楠,李进,程维明,等.西南地区山洪灾害时空分布特征及其影响因素[J].地理学报,2019,74(7):1374-1391.
- [27] 袁丽华,蒋卫国,申文明,等.2000—2010年黄河流域植被覆盖的时空变化[J].生态学报,2013,33(24):7798-7806.
- [28] Wang, J, Wang K L, Zhang M Y. Impacts of climate change and human activities on vegetation cover in hilly southern China[J]. Ecological Engineering the Journal of Ecotechnology, 2015,81:451-461.
- [29] Zhao W, Hu Z M, Guo Q, et al. Contributions of climatic factors to inter-annual variability of vegetation index in northern China grasslands[J]. Journal of Climate, 2019,33(1):175-183.
- [30] 汲玉河,周广胜,王树东,等.2000—2019年秦岭地区植被生态质量演变特征及驱动力分析[J].植物生态学报,2021,45(6):617-625.
- [31] 张志强,刘欢,左其亭,等.2000—2019年黄河流域植被覆盖度时空变化[J].资源科学,2021,43(4):849-858.
- [32] 张懿铨,李兰晖,丁明军,等.新世纪以来青藏高原绿度变化及动因[J].自然杂志,2017,39(3):173-178.
- [33] 贾丹阳,熊祯祯,高岩,等.近30年台特玛湖地区土地利用/土地覆被变化及其影响因素[J].干旱区地理,2021,44(4):1022-1031.
- [34] 高江波,焦珂伟,吴绍洪.1982—2013年中国植被 NDVI 空间异质性的气候影响分析[J].地理学报,2019,74(3):534-543.
- [35] 刘恒,汤弟伟,孙毅,等.武陵山区植被生长季 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应[J].水土保持研究,2021,28(5):245-253.

~~~~~  
(上接第363页)

- [23] Su F, Duan X, Chen D, et al. Evaluation of the global climate models in the CMIP5 over the Tibetan Plateau [J]. J. Clim, 2013,26:3187-3208.
- [24] Xie Y Y, Wang X J, Silander J A. Deciduous forest responses to temperature, precipitation, and drought imply complex climate change impacts[J]. Proc. Natl. Acad. Sci. Usa 2015,112:13585-13590.
- [25] 张晓克,杜心栋,鲁旭阳,等.青藏高原高寒草地物候的研究进展[J].遥感技术与应用,2019,34(2):337-344.
- [26] 李鹏,青藏高原植被枯黄期的时空变化及其对极端气候事件的响应[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [27] 黄文洁,曾桐瑶,黄晓东.青藏高原高寒草地植被物候时空变化特征[J].草业科学,2019,36(4):1032-1043.
- [28] 李兰晖,刘林山,张懿铨,等.青藏高原高寒草地物候海拔梯度变化的差异分析[J].地理研究,2017,36(1):26-36.
- [29] 边金虎,李爱农,宋孟强,等. MODIS.植被指数时间序列 Savitzky\_Golay 滤波算法重构[J].遥感学报,2010,14(4):725-741.
- [30] Dunn R J, Alexander L V, Donat M G, et al. Development of an updated global land in situ-based data set of temperature and precipitation extremes: HadEX3 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020, 125,(16):e2019 JD032263.
- [31] Jönsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data[J]. Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002,40(8):1824-1832.
- [32] 徐建华.计量地理学[M].2版.北京:高等教育出版社,2014:109-200.
- [33] Ding M, Zhang Y, Sun X, et al. Spatiotemporal variation in alpine grassland phenology in the Qinghai-Tibetan Plateau from 1999 to 2009 [J]. Chinese Science Bulletin, 2012,58(3):396-405.
- [34] 王璐,王宁练,李志杰,等.1993—2016年喀喇昆仑山中部 Shigar 流域冰川物质平衡变化空间特征研究[J].冰川冻土,2021,43(1):1-13.
- [35] Cong N, Wang T, Nan H J, et al. Changes in satellite-derived spring vegetation green-update and its linkage to climate in China from 1982 to 2010: A multimethod analysis [J]. Global Change Biology, 2013,19(3):881-891.
- [36] Sherry R A, Zhou X, Gu S, et al. Divergence of reproductive phenology under climate warming[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States, 2007,104:198-202.
- [37] Wang S P, Meng F D, Duan J C, et al. Asymmetric sensitivity of first flowering date to warming and cooling in alpine Plants[J]. Ecology, 2014,95:3387-3398.