

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.037.

杨航, 马彩虹, 滑雨琪, 等. 宁夏草地绿度时空变化图谱及驱动因素分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 228-239.

Yang Hang, Ma Caihong, Hua Yuqi, et al. Spatiotemporal Variation Atlas of Grassland Greenness in Ningxia and Its Driving Factors [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 228-239.

宁夏草地绿度时空变化图谱及驱动因素分析

杨航, 马彩虹, 滑雨琪, 李聪慧, 刘园园

(宁夏大学 地理科学与规划学院, 银川 750021)

摘要: [目的]揭示宁夏草地绿度的时空变化规律, 探明其驱动因素, 为有效管理北方农牧交错生态脆弱区草地碳库和推动宁夏草地长效生态增汇提供决策参考。[方法]基于 NDVI、气象及土地利用数据, 采用地学信息图谱、Sen+Mann-Kendall 趋势分析、变异系数、Hurst 指数、偏相关分析及残差分析等方法, 分析了宁夏草地绿度时空分布及变化特征, 探究了气候变化和人类活动对草地绿度的影响。[结果]2000—2020 年, 宁夏草地绿度以速率为 0.007/a 波动上升, 草甸草地绿度最高且增速最快为 0.011/a, 荒漠草地绿度最低且增速最慢为 0.004/a; 草地绿度月均变化呈倒“U”型, 不同类型草地绿度最大值相差较大, 最小值相近。草地绿度空间分异明显, 呈“南高北低”的格局, 3—8 月绿度提升由南向北推进, 9 月至次年 2 月渐次降低由北向南推移。97.76% 草地绿度呈增加趋势, 极其显著增加比重最大为 48.78%, 荒漠草地和典型草地绿度变化为高波动且绿化趋势不持续, 草甸草地绿度变化为中低波动且绿化趋势可持续。宁夏草地绿度与气温正负相关并存, 与降水呈正相关, 67.10% 区域以降水驱动为主; 残差分析显示人类活动对宁夏草地绿度以正效应为主, 退耕还草等生态工程促进草地绿度提升, 建设用地扩张导致草地绿度降低。[结论]2000 年以来, 宁夏草地绿度有了明显提升, 且在宁夏南部地区增加成效尤为显著。荒漠草地和典型草地绿度波动较大, 需要在后期管理中减少人类活动对其的扰动。

关键词: 地学信息图谱; 草地绿度; 时空变化; 偏相关分析; 残差分析

中图分类号: S181

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0228-12

Spatiotemporal Variation Atlas of Grassland Greenness in Ningxia and Its Driving Factors

Yang Hang, Ma Caihong, Hua Yuqi, Li Conghui, Liu Yuanyuan

(School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to reveal the spatial and temporal variations pattern of grassland greening in Ningxia and prove its driving factors, and provide decision-making reference for effectively managing the grassland carbon reservoir in the ecologically fragile areas of agriculture and animal husbandry in northern China and promoting the long-term ecological increase of grassland in Ningxia. [Methods] Based on NDVI, meteorological and land use data, geographical information map, Sen+Mann-Kendall trend analysis, coefficient of variation, Hurst index, partial correlation analysis, residual analysis methods were adopted. The spatial and temporal distribution and variation characteristics of grassland greenness in Ningxia from 2000 to 2020 were analyzed. The driving mechanism of climate change and human activities on grassland greenness was explored. [Results] The greenness of grassland in Ningxia fluctuated at the rate of 0.007/a, the greenness of meadow grassland was the highest and the fastest growth rate was 0.011/a, and the greenness of desert grassland was the lowest and the slowest growth rate was 0.004/a. The average monthly variation of grassland greenness in Ningxia showed an inverted U-shape, and the maximum greenness of different types of grassland varied greatly, and the minimum value was similar. The spatial difference of grassland

收稿日期: 2023-04-05

修回日期: 2023-04-26

资助项目: 国家自然科学基金项目(41961034, 42061037); 宁夏重点研发资助项目(2021BEG03019)

第一作者: 杨航(1998—), 女, 安徽桐城人, 在读研究生, 主要从事空间技术及分析研究。E-mail: yanghang0905@163.com

通信作者: 马彩虹(1974—), 女, 宁夏西吉人, 博士, 教授, 主要从事资源环境评价与 GIS/RS 应用研究。E-mail: mchayanni@163.com

<http://stbcj.paperonice.org>

greenness in Ningxia was obvious, showing a pattern of high level in the south and the low level in the north. The greenness increased from south to north from March to August, and gradually decreased from north to south from September to February. 97.76% of the greenness of grassland showed an increasing trend, with the largest proportion of extremely significant increase being 48.78%, the greenness of desert grassland and typical grassland changed to high fluctuation and the greening trend was not continuous, and the greenness of meadow grassland changed to medium and low fluctuation and the greening trend was sustainable. Ningxia grassland greenness and temperature were positively correlated with precipitation, and 67.10% of the area was mainly driven by precipitation. The residual analysis showed that human activities mainly had a positive effect on the greenness of grassland in Ningxia, and ecological projects such as returning farmland to grassland promoted the greenness of grassland, and the expansion of construction land led to the reduction of grassland greenness. [Conclusion] Since 2000, the grassland greening of Ningxia has improved significantly, and the increase in southern Ningxia is particularly significant. Desert grassland and typical grassland fluctuate greatly, which needs to reduce the disturbance of human activities in the later management.

Keywords: geographical information map; grass greenness; spatiotemporal changes; partial correlation analysis; residual analysis

草地作为陆地生态系统的重要成员,在生态防护等方面发挥着重要作用^[1]。草地绿度是表征草地覆盖度的重要参数,能较好反映草地覆盖度的年内和年际变化特征,归一化植被指数(NDVI)是草地绿度最佳指示因子之一^[2]。宁夏降水较少,草地覆盖度低,NDVI不会出现饱和现象,即NDVI越大,草地绿度越高。气温和降水是影响草地绿度的关键气候因子,学者们利用遥感数据在草地生长对气候变化响应方面开展了广泛研究,如趋势分析^[3]、相关分析^[4]和偏相关分析等^[5]。气温和降水对草地绿度的影响具有明显的空间分异^[6],东北地区气温为关键气候因子^[7],西北一带降水为主导因子^[8],青藏高原气温占主导地位主要分布在中部和东南部,降水占主导地位主要分布在东北部和西部^[9]。同时不同类型和地形的草地对气温和降水响应具有差异,如荒漠草地和平原草地受降水影响较大,草甸草地和坡面草地受气温影响较大^[10]。近年来,随着人类活动的加强,草地生长状况直接或间接受到人类活动的影响,部分地区影响速度和强度超过自然因素,剥离气候因素影响,定量分析人类活动对草地生长的影响迫在眉睫^[11-12]。准确及时掌握草地绿度的时空变化,探究气候变化和人类活动对其作用,不但有利于草地生态系统健康,更促进了陆地生态系统协调发展^[13]。

地学信息图谱是一种时空复合分析方法,它是由我国地理学家陈述彭院士首次提出^[14],在地理学中得到广泛应用,如山地垂直带信息图谱^[15]、土地利用变化信息图谱^[16]、自然景观要素信息图谱^[17]、地貌信息图谱等^[18]。部分学者将其引入到植被变化的研究中,如韩磊等根据植被覆盖地图谱发现延安植被以持续变化为

主^[19],郑惠茹等通过建立退耕还林前后的植被恢复演替图谱,发现研究区植被恢复遵循旱生进展演替的一般规律^[20]。草地作为一种季节性植被,是气候变化和人类活动的承担者和反馈者,在很大程度上表征区域环境状况^[21]。利用地学信息图谱探究其时空变化及性质,可将草地绿度多维时空信息以图谱单元的形式动态化和可视化,对定量开展长时间序列草地绿度变化空间格局与时序特征的集成研究具有重要意义。

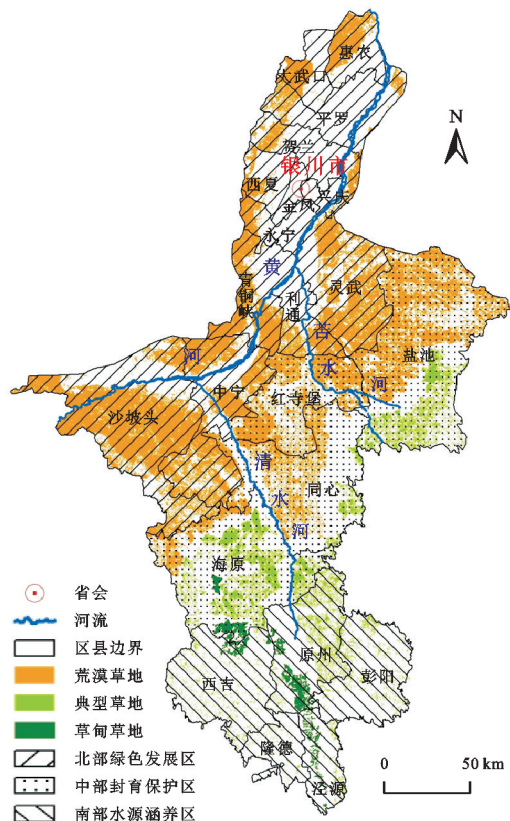
宁夏作为草地资源大省,草地面积占全省面积的43%,具有重要的经济和生态价值^[22]。学者对草地研究多集中在青藏高原、新疆、内蒙古一带,对宁夏草地绿度的研究鲜有报道。因此,本研究基于2000—2020年草地NDVI,结合气象和土地利用数据,采用地学信息图谱等方法对宁夏不同类型草地绿度时空分布及变化特征进行多时间尺度的研究,并探究草地绿度的驱动因素。旨在保护宁夏草地资源和促进生态系统的可持续发展,为宁夏实现碳达峰、碳中和目标提供一定的决策参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

宁夏回族自治区位于中国西北内陆,地处北纬 $35^{\circ}14'$ — $39^{\circ}23'$ N,东经 $104^{\circ}17'$ — $107^{\circ}29'$ E,总面积 $6.64 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。属于温带大陆性气候,干旱少雨,年均气温 $5.20 \sim 8.19^{\circ}\text{C}$,年降水量为 $183 \sim 677 \text{ mm}$ 。依据自然环境条件和生态基础,将其划分为北部绿色发展区、中部封育保护区、南部水源涵养区^[23]。宁夏地处北方温带草原地区,天然草地资源丰富。荒漠草地广泛分布在宁夏北部和中部的风沙带上,典型草地主要分布在宁夏中部和南部的黄土丘陵区,草甸草地主

要分布在宁夏南部的六盘山一带^[24](图 1)。



注:底图采用宁夏回族自治区自然资源厅标准地图制作,审图号为宁 s [2019]第 018 号,对底图边界无修改。下同。

图 1 研究区概况图

Fig. 1 Overview diagram of the study area

1.2 数据来源与预处理

草地逐年 NDVI 数据来自中国 30 m 逐年 NDVI 最大值数据集,逐月 NDVI 数据来自中国月度 1 km 植被指数(NDVI)空间分布数据集,均采用最大值合成法生成,来源于资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。气温和降水数据是分辨率为 1 km 的逐月平均数据集,来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>)。将草地 NDVI、降水和温度数据集在 ArcGIS 中进行投影、掩膜、重采样等统一成空间分辨率为 30 m、行数和列数分别为 1055,10 768,投影为 Krasovsky_1940_Albers 数据集。

1.3 研究方法

1.3.1 地学信息图谱 地学信息图谱可以同时表达地理空间结构特征及时间动态变化等,草地绿度地理信息图谱是基于遥感、地理信息系统及空间分析方法,对研究区草地图斑进行提取,并获得草地绿度变化信息。

1.3.2 变异系数 变异系数表示数据的离散程度,可用来表示草地绿度变化的波动状况。计算公式为:

$$CV = \frac{\sigma_{NDVI}}{NDVI_{avg}} \quad (1)$$

式中:CV 为草地绿度变异系数; σ_{NDVI} 为标准差; $NDVI_{avg}$

为均值。变异系数越小,草地绿度波动程度越小,草地绿度变化越稳定,反之则表明草地绿度越不稳定。

1.3.3 Hurst 指数法 Hurst(H)指数可以定量描述草地绿度时间序列的持续性或反持续性。当 $0 < H < 0.5$ 时,表示草地绿度未来变化状况与过去变化趋势相反, H 越小反持续性越强;当 $H = 0.5$ 时,草地绿度不具有持续性;当 $0.5 < H < 1$ 时,表示草地绿度未来变化状况与过去变化趋势相同, H 越大持续性越强。具体计算方法参见文献^[25]。

1.3.4 趋势分析 采用 Sen+Mann-Kendall 分析法研究宁夏草地绿度年际变化趋势^[26],公式如下:

$$Z_c = \begin{cases} S - \frac{1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ S + \frac{1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sgn}(NDVI_k - NDVI_i) \quad (3)$$

$$Q = \text{median}\left(\frac{NDVI_k - NDVI_i}{k - i}\right), \forall k > i \quad (4)$$

式中: $NDVI_k$, $NDVI_i$ 为连续的 NDVI 数据序列; n 为年份; S 为检验统计量; Z_c 为标准化检验统计量。当 $1 < i < k < n$ 时, Q 表示草地绿度变化幅度的大小, $Q < 0$ 时,表示草地绿度呈下降趋势;反之则表示上升趋势。

1.3.5 偏相关分析 偏相关分析相较于相关性分析,可以消除其他气候因子对草地绿度的影响,仅研究一个气候因子对草地绿度的作用,可识别出影响草地绿度变化的关键气候因子。公式如下:

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)}} \quad (5)$$

式中: $r_{xy,z}$ 为剥离 z 后 x 和 y 的偏相关系数; r_{xy} , r_{xz} , r_{yz} 分别为 x , y , z 两个因子之间的相关系数,本研究逐像元分析草地绿度和温度、降水的偏相关性。

1.3.6 多元回归残差分析 多元回归残差分析法由 Evans and Geerke 提出^[27],可以剥离气候因素影响,定量评估人类活动对草地绿度的影响程度。公式如下:

$$NDVI_{pre} = a \times T_{mean} + b \times P_{total} + c \quad (6)$$

$$NDVI_{res} = NDVI_{obs} - NDVI_{pre} \quad (7)$$

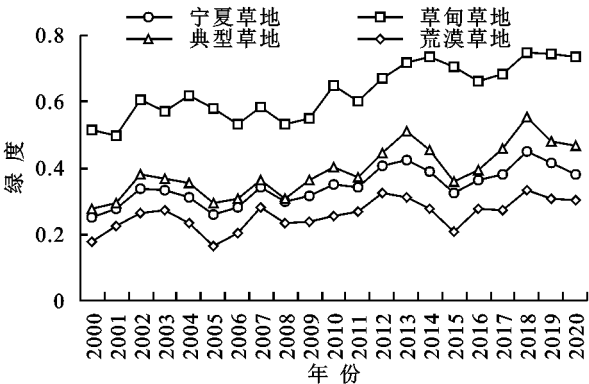
式中: $NDVI_{obs}$ 和 $NDVI_{pre}$ 分别为草地绿度的观测值和预测值; $NDVI_{res}$ 为草地绿度变化的残差; $NDVI_{pre}$ 表示气候因素对草地绿度的影响; T_{mean} 和 P_{total} 分别为年均温和年累计降水量; a , b 和 c 为参数。

2 结果与分析

2.1 草地绿度时序变化特征

2000—2020 年宁夏草地绿度呈波动上升趋势,

绿度变化与年份相关,相关系数 0.607,绿度由 0.25 上升到 0.38,增长速率为 0.007/a,宁夏草地绿度得到显著提升(图 2)。不同草地类型绿度均呈波动上升趋势,草甸草地上升速率最大为 0.011/a;典型草地次之为 0.009/a;荒漠草地上升最为缓慢,速率为 0.004/a。不同草地类型年均绿度大小为:草甸草地(0.63)>典型草地(0.39)>宁夏草地(0.34)>荒漠草地(0.26)。



在此基础上对宁夏草地月均绿度进行分析,宁夏草地、典型草地、荒漠草地 8 月绿度最大,依次为 0.32, 0.36, 0.24, 草甸草地 7 月份月绿度最大为 0.59;宁夏草地、典型草地、荒漠草地和草甸草地 2 月份绿度最低,依次为 0.11, 0.12, 0.10, 0.15。月均草地绿度整体呈倒“U”型,不同类型草地绿度最大值相差较大,最小值相近。

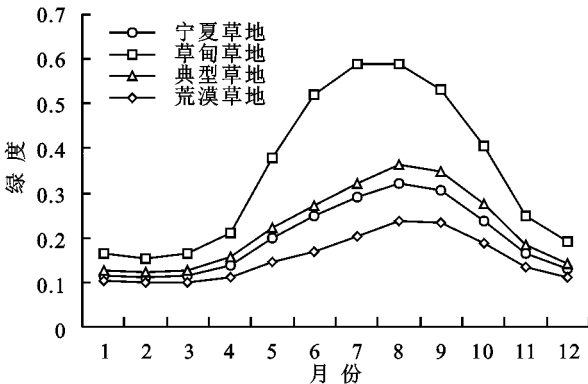


图 2 2000—2020 年宁夏草地年均(左)和月均(右)绿度变化趋势

Fig. 2 Change trend of annual (left) and average (right) green degree in Ningxia grassland from 2000 to 2020

2.2 草地绿度空间差异特征

2.2.1 草地绿度年度信息图谱特征分析 以 2000 年为基准年研究 2001—2020 年各年较基准年草地绿度增减变化(图 3)。研究时段内,多数年份草地绿度较基础年呈增加态势,2011—2020 年较 2001—2010 年相对于基准年绿度提升显著且稳定。2018 年绿度增加最显著,该年年均降水量较基准年增加了 11.65 mm,气温增加 0.39℃,表现为暖湿,有利于草地绿度提升;2005 年草地绿度较基准年降低最显著,主要在黄河和清水河沿线区域,该年降水量较 2000 年减少 8.00 mm,温度增加 0.40℃,降水较少在一定程度上导致绿度降低。境内贺兰山、罗山、六盘山呈显著增长趋势,增长趋势较其他区域显著,以“三山”为主的自然保护区通过生态修复和环境整治取得一定成效,草地绿度得到一定提升。

2.2.2 草地绿度月度信息图谱特征分析 受气候、地形等因素的影响,宁夏草地绿度总体上呈“南高北低”的空间分布格局(图 4)。南部分布有六盘山,受地形影响降水较多,草地类型主要为草甸草地和典型草地,草地绿度较高。中部为干旱带,降雨较少,且有小范围的沙漠分布,草地类型主要为典型草地,草地绿度居中。北部因贺兰山阻断暖湿气流向西发展,局部区域降水较多,黄河沿岸的银川平原降水量较少,草地类型主要为荒漠草地,同时由于经济发达、人口集聚和农畜产业等,草地覆被情况较差,研究期内草地绿度最低。年内变化表现为 3—8 月宁夏草地绿度提升且由南向北渐次推进,9 月至次年 2 月草地绿度

值降低且空间呈现为由北向南逐渐褐化。

2.3 草地绿度趋势指数时空变化图谱特征

2.3.1 草地绿度变化图谱特征 运用 Theil-Sen Median 趋势法分析 2000—2020 年宁夏草地绿度年际变化趋势的空间特征(图 5A—5B),Mann-kendall 显著性检验为草地绿度通过极显著($p<0.01$)与显著($p<0.1$)的检验(表 1)。草地绿度总体上呈增加趋势,绿化趋势由南到北递减。计算表明,97.76%的宁夏草地绿度呈增加趋势,极其显著增加趋势面积占比最大为 48.78%,主要分布在草甸草地和典型草地;宁夏草地绿度显著增加和不显著增加面积占比分别为 28.40%, 20.58%,主要分布在荒漠草地和中部的典型草地;宁夏草地绿度减少区域面积较少,占比为 2.24%,主要分布在北部荒漠草地。草甸草地和典型草地无绿度减少趋势,荒漠草地无极其显著减少趋势。

2.3.2 草地绿度稳定性图谱特征 2000—2020 年宁夏草地绿度变化较大,变异系数介于 0.03~0.61,平均值为 0.22,表明 21 年宁夏草地绿度整体处于高波动状态(图 5C)。草甸草地波动最低,典型草地次之,荒漠草地最高。宁夏草地绿度稳定性空间分异显著,北部主要为高波动,中部和南部局部区域因地形和气候等因素呈现出高低波动并存。草地绿度高波动面积占比最大为 67.60%,主要分布在典型草地和荒漠草地(表 2)。荒漠草地广布在沿黄经济带上,受人为因素如经济活动和农业生产的影响较大;典型草地主要分布在中部干旱带,受自然因素如干旱、极端天气等的影响较大。相对高波动面积占比为 22.75%,主

要分布在中部和南部的典型草地。中等波动、低波动和相对低波动面积占比较小,分别为 6.97%,0.32%,2.37%,主要分布在六盘山一带的草甸草地,自然条件较好,受人类干扰小。

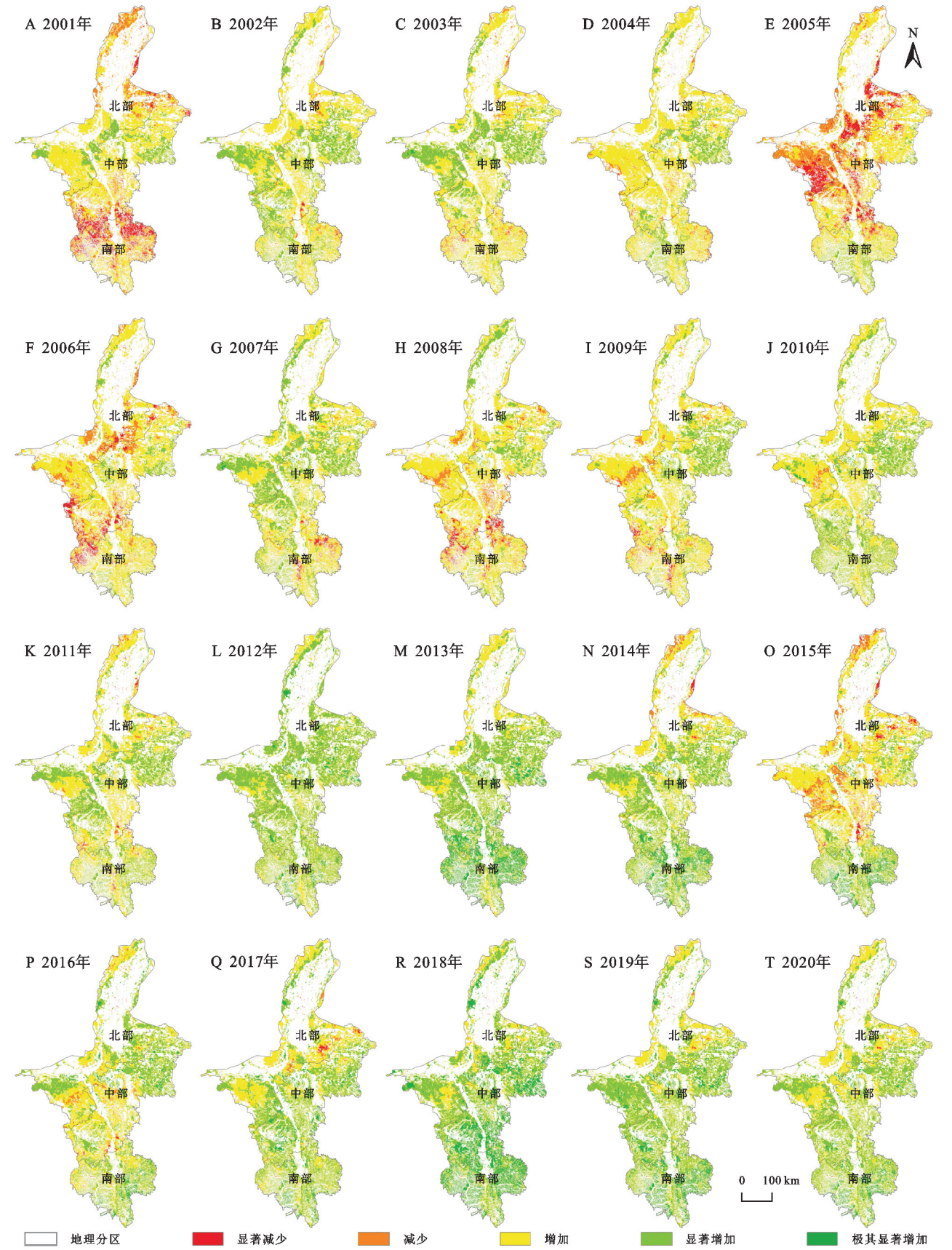


图 3 2001—2020 年草地绿度较基准年(2000)变化图谱

Fig. 3 Change map of grassland greenness from 2001 to 2020 compared with the base year (2000)

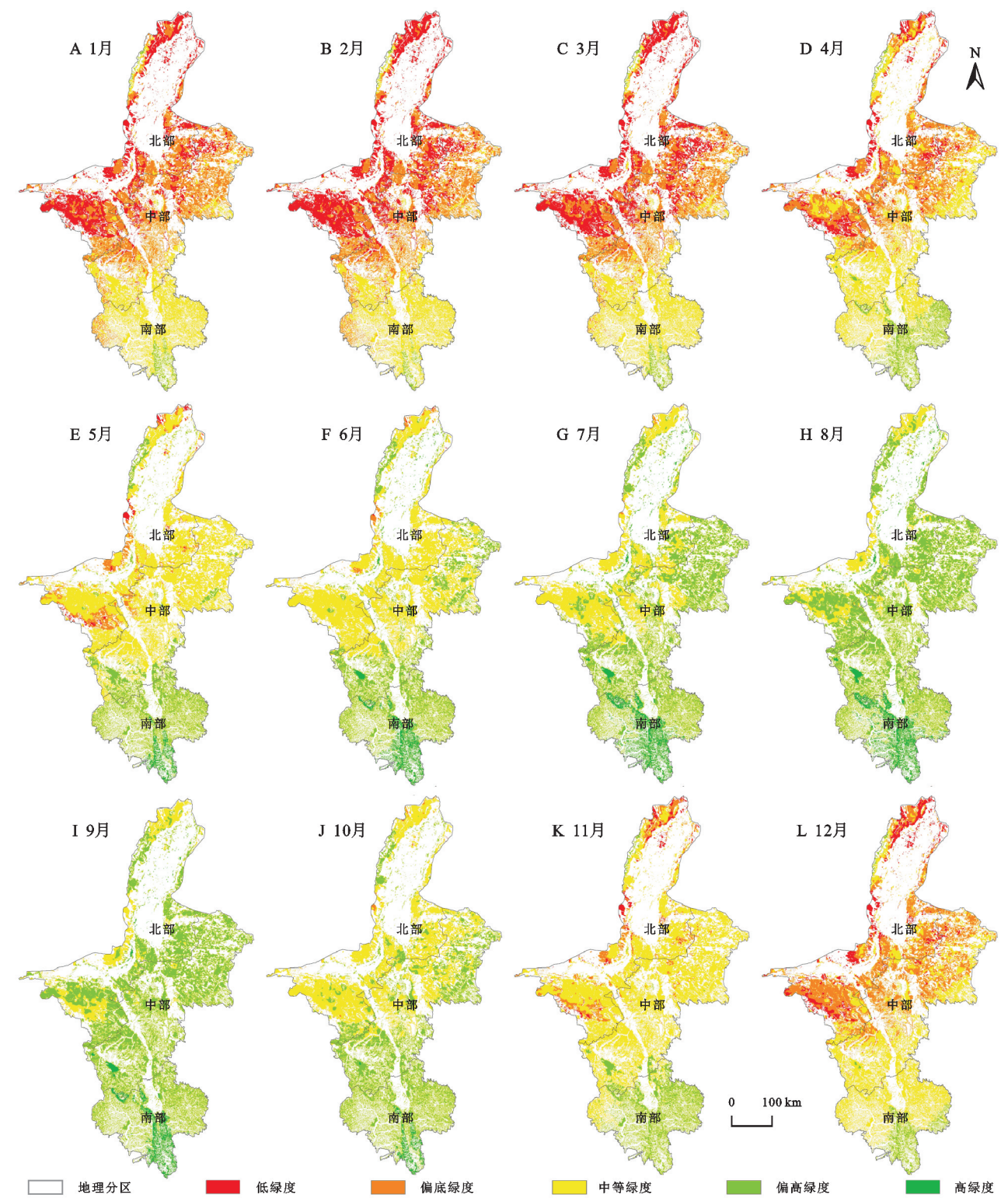


图 4 2000—2020 年宁夏月度草地绿度空间分布图谱

Fig. 4 Monthly spatial distribution map of grassland greenness in Ningxia from 2000 to 2020

2.3.3 草地绿度可持续性特征 2000—2020 年宁夏草地绿度 Hurst 指数处于 0.19~0.91 之间,均值为 0.48,呈“南高北低”的空间格局(图 5D),结合稳定性分析结果,宁夏草地绿度整体上不具有稳定可持续的绿化趋势。荒漠草地和典型草地 Hurst 指数均值分别为 0.47,0.49,不具备可持续的绿化趋势;草甸草地

Hurst 指数均值为 0.53,可持续性高于其他草地类型,具备的可持续绿化趋势。

2.4 草地绿度对气候变化和人类活动响应

2.4.1 草地绿度对气候变化的响应 草地绿度与气温表现为正负相关并存(图 6,表 3)。草地绿度与气温呈正相关的区域占 65.65%,主要分布在草甸草地、典

型草地、贺兰山和香山一带,其中具有显著($p<0.1$)和极显著($p<0.01$)负相关分别为 1.31%和 0%,零星分布在中部典型草地。草地绿度与气温呈负相关的区域面积占比为 34.35%,其中不显著负相关面积占比最大为 33.93%,主要分布在荒漠草地和典型草地北部。草地绿度和降水整体上呈正相关,正相关区域的面积占比达到 99.46%,其中 40.73%为极其显著正相关,主要分布在荒漠草地和典型草地的北部;显著正相关的面积占比为 34.80%,广泛分布在中部和南部的典型草地;不显著正相关的面积为 23.93%,主要分布贺兰山、六盘山、白芨滩和哈巴湖一带。草地绿度与降水呈负相关的区域面积占比较小为 0.53%。

气候因素影响草地绿度的面积占比为 99.04%,气温和降水共同驱动区域面积占比为 30.99%,主要分布在贺兰山、哈巴湖、罗山和六盘山等自然保护区(图 7)。受降水驱动为主的地区面积占比最大为 67.10%,成片分布在荒漠草地南部和典型草地;受气温驱动为主的地区面积占比较小为 0.95%,零星分布在北部和中部分界线周围和宁夏的最南部;0.96%的区域不受气温和降水的驱动,零星分布在白芨滩和香山一带。研究期内

温度和降水均呈上升趋势,表现为暖湿化,在一定程度上促进草地绿度提升。

表 1 宁夏草地绿度变化趋势的显著性统计

Table 1 Significance statistics of the change trend

	of grassland greening in Ningxia			%
	荒漠草地	典型草地	草甸草地	
极其显著增加	25.69	83.63	96.75	48.78
显著增加	37.22	15.92	2.98	28.40
不显著增加	33.78	0.45	0.27	20.58
不显著减少	3.19	0.00	0.00	2.10
显著减少	0.12	0.00	0.00	0.10
极其显著减少	0.00	0.00	0.00	0.04

表 2 2000—2020 年宁夏草地绿度变化稳定性

Table 2 Stability of grassland greening in

	Ningxia from 2000 to 2020			%
	荒漠草地	典型草地	草甸草地	
波动程度				
低波动	0.00	0.00	0.60	0.32
相对低波动	0.26	0.66	23.11	2.36
中等波动	3.97	4.21	29.20	6.97
相对高波动	19.57	21.69	34.25	22.75
高波动	76.20	73.44	12.84	67.60

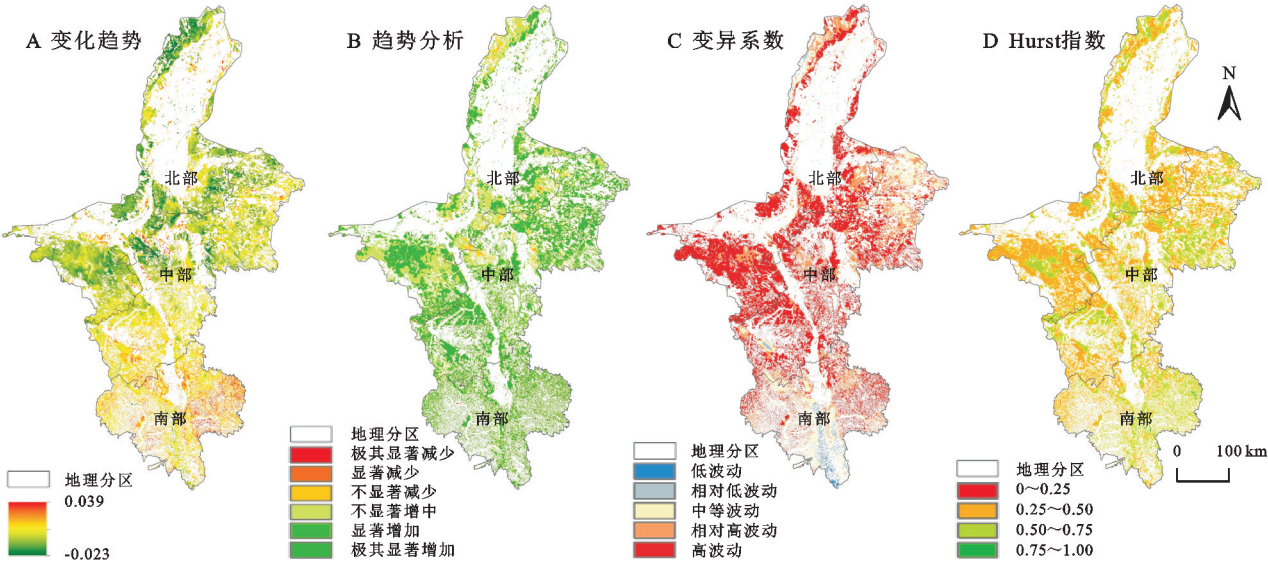


图 5 2000—2020 年宁夏草地绿度变化稳定性、可持续性和变化趋势信息图谱

Fig. 5 Information map of stability, sustainability and change trend of grassland greenness change in Ningxia from 2000 to 2020

表 3 草地绿度与气温和降水的偏相关显著性统计

Table 3 Significance statistics of partial correlation between grassland greenness and temperature and precipitation %

	不显著负相关	显著负相关	极其显著负相关	极其显著正相关	显著正相关	不显著正相关
气温	33.93	0.42	0.00	0.00	1.31	64.34
降水	0.54	0.00	0.00	40.73	34.80	23.93

2.4.2 草地绿度对人类活动的响应 残差分析法能剥离气候因素的作用,有效测算人类活动对草地绿度的影响程度,宁夏草地绿度受人类活动影响的正面效应远大于负面效应(图 8)。草地绿度多元回归残差总体呈上升趋势,2000 年以来实施的退耕还草、

封山禁牧等生态工程积极促进了宁夏草地的绿化趋势,人类活动正向效应明显,面积占比达 97.01%。残差为负的区域为人类活动对草地绿度产生破坏作用的区域,面积占比为 2.99%,主要分布在贺兰山一带,贺兰山煤矿开采区的修复工程在一定程度上改

善了生境质量,但贺兰山脆弱的生态环境也引起人类活动对草地绿度的反作用。随着城市化速率的加快,部分草地转化为建设,致使城市周边区域草地绿度降低。

土地利用对草地绿度变化具有明显的正负效应。一方面,城市化降低了草地绿度,另一方面,退耕还草和草地面积增加促进了草地绿度的提升。2000—2020 年,宁夏土地类型发生变化的面积约 251 862.62 hm²,耕地转出面积最多为 113 617.63 hm²,47.75%转移为高覆盖度草地,27.23%转移为低覆盖度草地;中覆盖度草地转入面积较多为 90 805.75 hm²,主要由耕地(58.96%)和低覆盖度草地(23.21%)转入。21 年低覆盖度草地、中覆盖度草地、高覆盖度草地面积分别增加了 16 171.28 hm²,52 159.81 hm²,23 425.39 hm²,耕地、水域、未利用土地面积减少,分别减少了 86 856.01 hm²,1 459.32 hm²,18 793.79 hm²(表 4—5)。

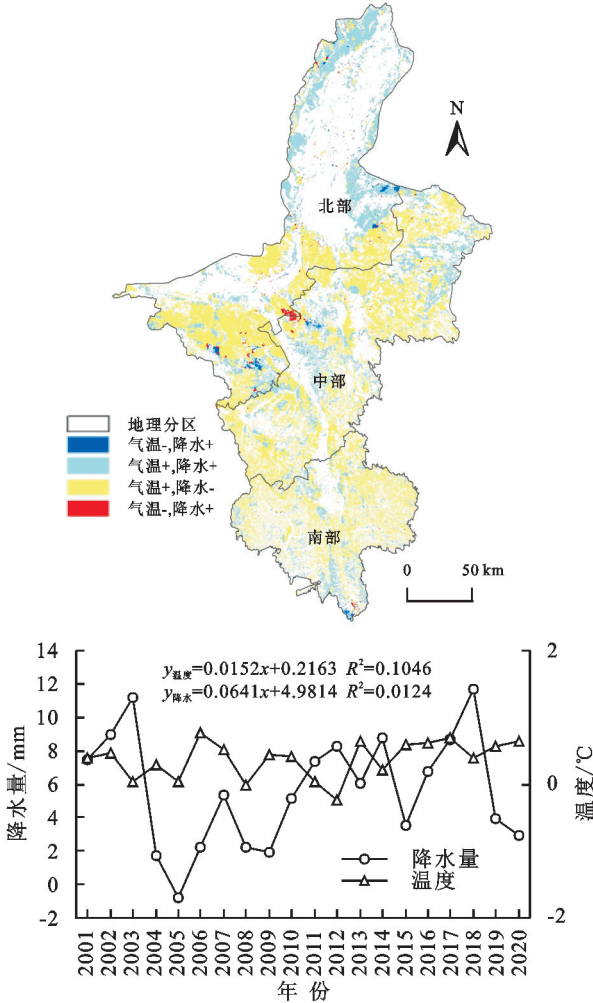


图 7 温度—降水对宁夏草地绿度驱动因素分区及较基准年变化趋势

Fig. 7 Temperature-precipitation on the driving factors of grassland greenness in Ningxia and the trend of changes compared with the base year

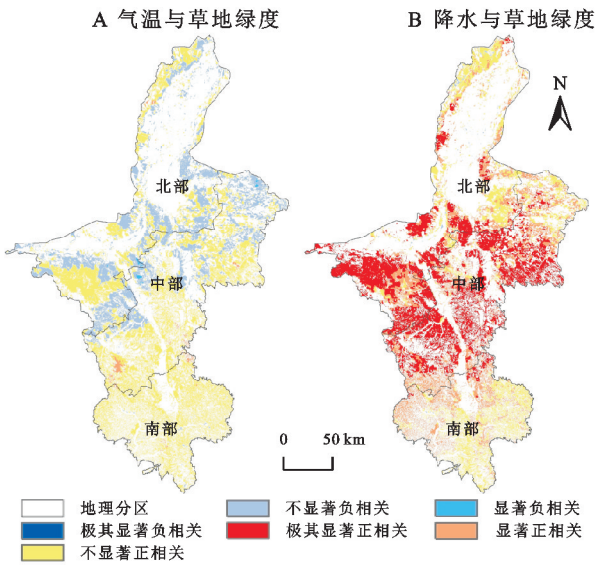


图 6 草地绿度与气温和降水的偏相关分析

Fig. 6 Partial correlation analysis between grassland greenness and air temperature and precipitation

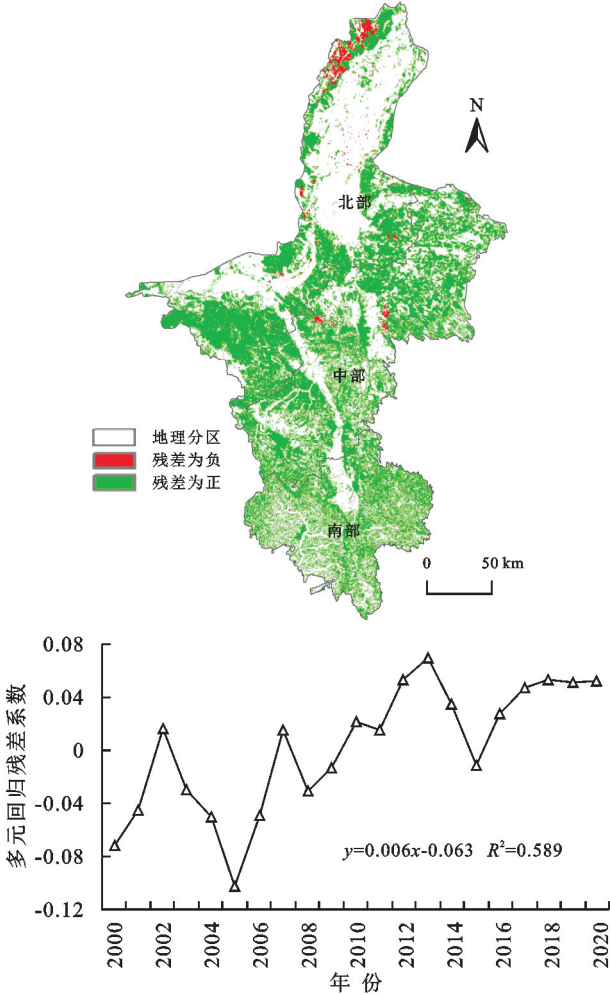


图 8 2000—2020 年宁夏草地绿度多元残差分析

Fig. 8 Analysis of multiple residues of grassland greening in Ningxia from 2000 to 2020

残差变化为正的区城土地利用转移主要表现为低覆盖度草地、中覆盖度草地和高覆盖度草地面积分别增加

16 499.63 hm², 50 873.75 hm², 22 994.77 hm², 耕地和未利用地绿度残差变化为负的区域中主要表现为低覆盖度草地面积减少 328.35 hm², 建设用地面积增加 1 661.70 hm²。

表 4 2000—2020 年宁夏草地正向效应区域土地利用变化转移矩阵

Table 4 Land use change transfer matrix in Ningxia grassland positive effect area from 2000 to 2020		hm ²							
残差为正		2020 年							
		林地	耕地	低覆盖度草地	中覆盖度草地	高覆盖度草地	水域	建设用地	未利用土地
2000 年	林地	40111.87	558.90	1057.07	1059.99	969.45	59.26	227.81	106.85
	耕地	2631.78	278082.61	30457.55	53619.21	14586.33	776.94	2134.01	7144.64
	低覆盖度草地	2397.21	14765.87	747510.19	20614.99	2645.14	1090.16	2542.39	2822.77
	中覆盖度草地	3154.64	8502.58	15122.54	713236.10	2846.68	1021.49	3467.76	4550.01
	高覆盖度草地	412.93	198.82	1970.92	1194.12	62413.26	110.53	196.99	115.60
	水域	27.31	423.16	930.94	847.60	1784.39	10482.75	171.19	222.07
	建设用地	31.61	308.31	301.19	256.84	274.10	15.51	7240.18	44.53
	未利用土地	636.86	1798.82	13537.95	11946.71	4088.58	314.15	1158.64	56382.86
	总计	49404.21	304639.07	810888.35	802775.56	89607.93	13870.79	17138.97	71389.33
	总计	49404.21	304639.07	810888.35	802775.56	89607.93	13870.79	17138.97	71389.33

表 5 2000—2020 年宁夏草地负向效应区域土地利用变化转移矩阵

Table 5 Land use change transfer matrix in Ningxia grassland negative effect area from 2000 to 2020		hm ²							
残差为正		2020 年							
		林地	耕地	低覆盖度草地	中覆盖度草地	高覆盖度草地	水域	建设用地	未利用土地
2000 年	林地	2041.61	7.41	59.63	150.10	53.81	16.77	56.26	0.58
	耕地	18.43	2170.72	476.58	629.73	468.75	114.25	300.96	258.47
	低覆盖度草地	16.64	59.10	15640.36	738.41	73.72	109.41	448.92	137.30
	中覆盖度草地	53.44	64.73	188.44	27883.80	95.80	91.73	607.06	89.12
	高覆盖度草地	19.57	0.48	214.27	165.82	8343.45	28.68	113.28	1.05
	水域	3.53	44.48	92.08	397.38	234.09	1270.07	49.64	1.71
	建设用地	3.19	3.77	11.07	17.05	11.56	2.36	237.41	0.44
	未利用土地	0.99	25.19	213.07	377.89	36.07	19.00	135.01	1079.33
	总计	2157.39	2375.88	16895.50	30360.18	9317.23	1652.27	1948.55	1567.99
	总计	2157.39	2375.88	16895.50	30360.18	9317.23	1652.27	1948.55	1567.99

3 讨论

本文对宁夏不同类型草地绿度时空分异和变化趋势进行了定量分析,不同类型草地绿度均呈上升态势,上升速率存在差异,48.78%的草地呈极其显著增加趋势,这一结果与刘洋洋等对中国草地研究中宁夏区域部分的结果一致^[28]。研究期内宁夏气候表现为暖湿化,在一定程度上促进了草地植被的生长。气温和降水的高位、低位震荡,使得草地绿度表现出年际波动^[5],采用地学信息图谱分析法对草地绿度变化进行研究,能够比较发现草地绿度变化的空间异质性特征。宁夏草地绿度、变化趋势、稳定性、可持续性均呈“南高北低”的空间格局,与秦格霞等对中国北方草地宁夏区域部分研究的空间格局相似^[29],宁夏由南到北依次处于半湿润区、半干旱区、干旱区,气温“南低北高”、降水“南多北少”,使得南部草甸草地的长势优于北部的荒漠草地。草地绿度与气温呈正相关的面积占比为 65.65%,与降水呈正相关的面积占比为 99.46%,草地绿度变化受降水驱动的面积占比为

67.10%,表明草地绿度受降水的影响更大,对降水更敏感,这与人研究结论一致,即半干旱区与干旱区降水为草地绿度变化的主导气候因子^[7]。

宁夏草地绿度变化受气候和人类活动共同作用,不同区域、不同草地类型的驱动因素和相对作用强度具有明显的空间分异^[30]。位于六盘山一带的草甸草地绿化趋势稳定可持续,草地绿度与气温和降水呈不显著正相关,六盘山作为西北生态安全屏障,坚持实施退耕还林还草,封山禁牧等生态工程,人类活动是绿度提升的主导因素。典型草地绿度与降水呈极其显著正相关,绿度年际与月度变化受气候因素影响较大,残差系数为正表征人类活动促进了绿度提升,绿度提升受气候和人类活动共同驱动,以降水驱动为主。荒漠草地绿度与降水极其显著和不显著正相关并存,与气温不显著正负相关并存,荒漠草地主要分布在黄河生态经济带上,在保护生态的前提下促进经济发展,人类活动以正向驱动为主,荒漠草地受气候和人类活动共同作用,相对作用强度主要受气候因素影响。宁夏草地绿化以气候驱动为主,局部区域表现

为气候和人类活动共同作用。多年回归残差系数呈波动上升趋势,人类活动对草地绿度正向驱动强度加大,表明如三北防护林建设、退耕还草、封山禁牧等生态工程促进了草地绿度提升。残差为负的区域主要分布在贺兰山一带,多年的煤矿开采使得该区域生境脆弱,对生态措施敏感且易产生反作用,人类活动是宁夏草地退化的主导因素。生态脆弱区的草地以自我恢复为主,人工修复为辅。

研究期内,宁夏草地面积和绿度均得到提升,部分耕地和建设用地转为草地,反映宁夏草地生态质量的提升。草地绿度和绿化趋势空间上呈“南高北低”,应进一步有针对性地促进荒漠草地和典型草地绿度提升。草地绿度变化波动较大且绿化趋势不持续,宁夏地处生态脆弱区,生态环境较为恶劣,易受干旱、大风等自然灾害影响,在推进草地资源提升时,要降低自然灾害对草地绿化和生态工程的破坏,提高草地绿度韧性。草地绿度时空变化是多种因素共同作用的结果,本文探索了研究期内逐年气温和降水对宁夏草地逐年绿度的影响,非生长季、气温降水的滞后效应和未纳入分析的其他气候因子均在一定程度上影响气温和降水对草地绿度的偏相关分析,在分析人类活动对草地绿度影响程度方面也存在一定偏差,今后将综合考虑研究的时间尺度和多种气候因素的作用。本文仅关注了气候对草地整体绿度的影响,后期研究将重视草地绿度提升对局地气候的响应。

4 结论

本研究基于 NDVI、气象、土地利用等数据,分析了 2000—2020 年宁夏不同类型草地绿度时空变化及气候因子和人类活动的驱动。主要结论如下:

(1) 宁夏草地绿度呈波动上升趋势,草甸草地绿度最高且增速最快为 0.011/a,荒漠草地绿度最低且增速最慢为 0.004/a。月均草地绿度整体呈倒“U”型,草甸草地 7 月份绿度最高为 0.59,2 月份绿度最低为 0.15,其他草地类型均 8 月份绿度最高,2 月份最低。

(2) 宁夏草地绿度空间分异显著,呈“南高北低”的格局,以贺兰山、罗山、六盘山为首的自然保护区的绿度优于其他区域。3—8 月宁夏草地绿度提升由南向北推进,9 月至次年 2 月渐次降低由北向南推移。

(3) 宁夏草地绿度呈增加趋势的面积占比为 97.76%,典型草地和草甸草地全部表现为增加趋势,96.69%的荒漠草地表现为增加趋势,宁夏草地绿度极其显著增加占比最大为 48.78%。荒漠草地和典型草地表现为不稳定不持续的绿化趋势,需要在后期管理中减少人类活动对其的扰动,草甸草地表现为稳定可持续的绿化趋势。

(4) 99.46% 和 65.65% 宁夏草地绿度分别与降水和气温呈正相关,67.10% 区域以降水驱动为主,降水为主导气候因子。宁夏草地绿化以气候驱动为主,局部区域表现为气候和人类活动共同作用,残差分析表明人类活动对草地绿度以正向驱动为主。

参考文献(References):

- [1] 李治国,王占义,屈志强,等.中国草地等级划分体系回顾与新体系构建[J].资源科学,2021,43(11):2192-2202.
Li Z G, Wang Z Y, Qu Z Q, et al. Review of grassland classification and grading and construction of a new system in China[J]. Resources Science, 2021, 43(11): 2192-2202.
- [2] 朱玉英,张华敏,丁明军,等.青藏高原植被绿度变化及其对干湿变化的响应[J].植物生态学报,2023,47(1):51-64.
Zhu Y Y, Zhang H M, Ding M J, et al. Changes of vegetation greenness and its response to drought-wet variation on the Qingzang Plateau[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(1): 51-64.
- [3] 何玉杰,孔泽,户晓,等.水热条件分别控制了中国温带草地 NDVI 的年际变化和增长趋势[J].生态学报,2022,42(2):766-777.
He Y J, Kong Z, Hu X, et al. Water and heat conditions separately controlled inter-annual variation and growth trend of NDVI in the temperate grasslands in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 766-777.
- [4] 魏晓旭,魏伟,刘春芳.近 40 年青海省草地植被时空变化及其与人类活动的关系[J].生态学杂志,2021,40(8):2541-2552.
Wei X X, WEI W, Liu C F. Spatiotemporal variation of grassland vegetation and its relationship with human activities in Qinghai Province in recent 40 years[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(8): 2541-2552.
- [5] 郑春燕,梁俊红,王建.中巴经济走廊归一化植被指数(NDVI)时空变化及影响因素分析[J].生态与农村环境学报,2022,38(9):1147-1156.
Zheng C Y, Liang J H, Wang J. The Impact of climate and land use on the spatio-temporal changes of NDVI of China-Pakistan Economic Corridor[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(9): 1147-1156.
- [6] 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].生态学报,2023,43(4):1537-1552.
Chen C B, Li G Y, Peng J. Spatial-temporal characteristics of Xinjiang grassland NDVI and its response to climate change from 1981 to 2018[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4): 1537-1552.
- [7] 任涵玉,温仲明,刘洋洋,等.我国北方草地净初级生产力时空动态特征及其与水热因子的关系[J].草地学报,2021,29(8):1779-1792.

- Ren H Y, Wen Z M, Liu Y Y, et al. Spatial-temporal dynamic of grassland net primary productivity and its relationship with hydrothermal factors in northern China [J]. *Journal of Grassland*, 2021, 29(8): 1779-1792.
- [8] 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.
- Chen C, Jing C Q, Xing W Y, et al. Desert grassland dynamics in the last 20 years and its response to climate change in Xinjiang[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(3): 1-14.
- [9] 石明明, 王喆, 周秉荣, 等. 青藏高原草地退化特征及其与气候因子的关系[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(12): 3271-3278.
- Shi M M, Wang Z, Zhou B R, et al. Characteristics of grassland degradation and its relationship with climate factors on Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(12): 3271-3278.
- [10] 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.
- Zhou W, Gang C C, Li J L, et al. Spatial-temporal dynamics of grassland coverage and its response to climate change in China during 1982-2010[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 15-30.
- [11] 同琳静, 刘洋洋, 章钊颖, 等. 定量评估气候变化与人类活动对西北地区草地变化的相对作用[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(6): 202-210.
- Tong L J, Liu Y Y, Zhang Z Y, et al. Quantitative assessment on the relative effects of climate variation and human activities on grassland dynamics in Northwest China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(6): 202-210.
- [12] 徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 等. 2000—2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征[J]. *环境科学*, 2022, 43(6): 3230-3240.
- Xu Y, Huang W T, Dou S Q, et al. Responding mechanism of vegetation cover to climate change and human activities in southwest China from 2000 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(6): 3230-3240.
- [13] 罗琦, 甄霖, 杨婉妮, 等. 生态治理工程对锡林郭勒草地生态系统文化服务感知的影响研究[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 119-129.
- Luo Q, Zhen L, Yang W N, et al. The influence of ecological restoration projects on cultural ecosystem services in the Xilin Gol Grassland[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 119-129.
- [14] 陈述彭, 岳天祥, 励惠国. 地学信息图谱研究及其应用[J]. *地理研究*, 2000, 19(4): 337-343.
- Chen X P, Yue T X, Li H G, et al. Studies on Geo-Informatic Tupu and its application[J]. *Geographical Research*, 2000, 19(4): 337-343.
- [15] Zhang B, Yao Y. Implications of mass elevation effect for the altitudinal patterns of global ecology[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(7): 871-877.
- [16] 张韵, 彭建东, 王晶晶, 等. 基于地学信息图谱的江汉平原土地利用时空变化分析[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(4): 85-92.
- Zhang Y, Peng J D, Wang J J, et al. Analysis on spatial and temporal change of land use in Jiangnan Plain based on geo-information atlas[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(4): 85-92.
- [17] 陈毓芬, 廖克. 中国自然景观综合信息图谱研究[J]. *地球信息科学*, 2003(3): 97-102.
- Chen Y F, Liao K. Research on complex informatic tupu of natural landscape in China[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2003(3): 97-102.
- [18] 熊礼阳, 汤国安, 杨昕, 等. 面向地貌学本源的数字地形分析研究进展与展望[J]. *地理学报*, 2021, 76(3): 595-611.
- Xiong L Y, Tang G A, Yang X, et al. Geomorphology-oriented digital terrain analysis: Progress and perspectives[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(3): 595-611.
- [19] 韩磊, 火红, 刘钊, 等. 基于地形梯度的黄河流域中段植被覆盖时空分异特征: 以延安市为例[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(5): 1581-1592.
- Han L, Huo H, Liu Z, et al. Spatial and temporal variations of vegetation coverage in the middle section of Yellow River Basin based on terrain gradient: Taking Yan'an City as an example[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(5): 1581-1592.
- [20] 郑惠茹, 罗红霞, 邹扬庆, 等. 基于地学信息图谱的重庆岩溶石漠化植被恢复演替研究[J]. *生态学报*, 2016, 36(19): 6295-6307.
- Zheng H R, Luo H X, Zhou Y Q, et al. Quantifying vegetation restoration in a karst rocky desertification area in Chongqing based on Geo-informatic Tupu[J]. *Acta Ecological Sinica*, 2016, 36(19): 6295-6307.
- [21] 郭婧, 张骞, 宋明华, 等. 黄河上游草地生态现状及功能提升技术[J]. *草地学报*, 2020, 28(5): 1173-1184.
- Guo J, Zhang Q, Song M H, et al. Status and function improvement technology of the grassland ecological in the upper Yellow River [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(5): 1173-1184.
- [22] 孔丽霞, 叶毅. 退耕还林还草: 宁夏中南部生态脆弱区生态减贫实践探索[J]. *贵州民族研究*, 2022, 43(3): 109-114.
- Kong L X, Ye Y. Returning farmland to forest and grassland: practice and exploration of ecological poverty reduction in ecologically fragile areas in central and southern Ningxia[J]. *Guizhou Ethnic Studies*, 2022, 43(3): 109-114.
- [23] 杨航, 侯景伟, 马彩虹, 等. 黄河上游生态脆弱区复合生

- 态系统韧性时空分异:以宁夏为例[J].干旱区研究, 2023,40(2):303-312.
- Yang H, Hou J W, Ma C H, et al. Spatio-temporal differentiation of the composite ecosystem resilience in the ecologically fragile area in the upper reaches of the Yellow River: A case study in Ningxia[J]. Arid Zone Research, 2023,40(2):303-312.
- [24] 丁金梅,王维珍,米文宝,等.宁夏草地土壤有机碳空间特征及其影响因素[J].生态学报,2023,43(5):1913-1922.
- Ding J M, Wang W Z, Mi W B, et al. Spatial characteristics and influencing factors of soil organic carbon in grassland in Ningxia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(5):1913-1922.
- [25] Wallis J R, Matalas N C. Small Sample Properties of H and K-Estimators of the Hurst Coefficient h[J]. Water Resources Research, 1970,6(6):1583-1594.
- [26] 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.
- Yi L, Ren Z Y, Zhang C, et al. Relationship between vegetation cover change and climate and human activities on the Loess Plateau [J]. Resource Science, 2014, 36 (1):166-174.
- [27] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation[J]. Journal of Arid Environments, 2004,57(4):535-554 .
- [28] 刘洋洋,任涵玉,章钊颖,等.中国草地覆盖度时空动态格局及其影响因素[J].水土保持研究,2022,29(2):221-230,242.
- Liu Y Y, Ren H Y, Zhang Z Y, et al. Temporal and spatial dynamic pattern of grassland coverage and its influencing factors in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(2):221-230,242.
- [29] 秦格霞,芦倩,孟治元,等.1982—2015 年中国北方草地 NDVI 时空动态及其对气候变化的响应[J].水土保持研究,2021,28(1):101-108,117.
- Qin G X, Lu Q, Meng Z Y, et al. Spatial-temporal dynamics of grassland NDVI and its response to climate change in northern China from 1982 to 2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(1):101-108,117..
- [30] 张江,袁旻舒,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.
- Zhang J, Yuan M S, Zhang J, et al. Responses of the NDVI of alpine grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau to climate change and human activities over the last 30 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(18):6269-6281.

(上接第 218 页)

- [26] 赵文玥,李阳兵,李媛媛,等.三峡库区腹地撂荒地动态演变及景观格局:以重庆市奉节县平安乡、竹园镇为例[J].水土保持通报,2018,38(3):256-262.
- Zhao W Y, Li Y B, Li Y Y, et al. Evolution and landscape pattern of abandoned land in center region of Three Gorges Reservoir area: A case study in Ping'an and Zhuyuan township of Fengjie County, Chongqing municipality[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(3):256-262.
- [27] 米吾作.论凉山彝族移民扶贫[J].西南民族学院学报:哲学社会科学版,2000,21(S3):13-17.
- Mi W Z. On poverty alleviation of Yi immigrants in Liangshan[J]. Journal of Southwest University for Nationalities: Philosophy and Social Sciences, 2000,21(S3):13-17.
- [28] Li S F, Li X B. Global understanding of farmland abandonment: A review and prospects[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017,27(9):1123-1150.

(上接第 227 页)

- [28] 刘逸滨,刘宝元,成城,等.退耕还林草 20 年来榆林市植被覆盖度时空变化及影响因素分析[J].水土保持学报,2022,36(2):197-208.
- Liu Y B, Liu B Y, Cheng C, et al. Spatio-temporal changes and influencing factors of vegetation coverage in Yulin City during the past 20 years since the implementation of the "Grain for Green" program[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(2):197-208.
- [29] 邵明安,贾小旭,王云强,等.黄土高原土壤干层研究进展与展望[J].地球科学进展,2016,31(1):14-22.
- Shao M A, Jia X X, Wang Y Q, et al. A review of studies on dried soil layers in the Loess Plateau[J]. Advances in Earth Science, 2016,31(1):14-22.
- [30] 易海杰,张晓萍,何亮,等.黄土高原不同地貌类型区植被恢复潜力及其土地利用变化[J].农业工程学报,2022,38(18):255-263.
- Yi H J, Zhang X P, He L, et al. Vegetation restoration potential and land use change in different geomorphological areas of the Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2022,38(18):255-263.