

中国草地覆盖度时空动态格局及其影响因素

刘洋洋¹, 任涵玉¹, 章钊颖², 张伟¹, 张志新¹,
巴桑·参木决¹, 王亦波¹, 温仲明¹

(1.西北农林科技大学 草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100; 2.南京大学 国际地球系统科学研究所, 南京 210023)

摘要:为了探究近几十年来中国草地覆盖度的动态变化,基于多源遥感数据,采用像元二分模型模拟分析了 1982—2016 年中国草地覆盖度的时空动态格局,并从植被类型、地形要素、气候区及气候变化等角度分析了其主要影响因素。结果表明:35 a 间中国草地覆盖度平均值为 36.21%,呈极显著增加趋势(0.12%/a)。高山亚高山草甸、坡面草地及湿润地区、半干旱地区草地覆盖度的增加对于中国草地恢复具有重要贡献。草地覆盖度随海拔的升高呈降低趋势,DEM<500 m 及 3 500 m<DEM 两个梯度上的草地覆盖度增长率较高。年际变化上,东南坡、西北坡和西南坡草地覆盖度增加率较高。空间上,草地覆盖度与气温呈现显著正相关的区域集中在新疆中部、西藏西部及青海省南部,而与降水呈显著正相关的区域集中在新疆中部和北部、西藏南部及内蒙古中东部地带。高山亚高山草甸、坡面草地及高山亚高山草地植被覆盖度的增加主要受气温控制,而平原草地、荒漠草地和草甸覆盖度的增加主要依赖于降水。干旱区草地覆盖度的限制因子为降水,而湿润地区草地覆盖度受气温控制。中国低海拔地区草地覆盖度对气温、降水依赖性均较强,这种依赖性随海拔升高减弱,中海拔地区草地生长主要依赖气温。

关键词:草地覆盖度;不同气候区;气候变化;海拔梯度;坡向梯度

中图分类号:Q948.112

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)02-0221-10

Temporal and Spatial Dynamic Pattern of Grassland Coverage and Its Influencing Factors in China

LIU Yangyang¹, REN Hanyu¹, ZHANG Zhaoying², ZHANG Wei¹, ZHANG Zhixin¹,
BASANG · Canmujue¹, WANG Yibo¹, WEN Zhongming¹

(1.College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100,
China; 2.Nanjing Institute of Environmental Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to explore the dynamic changes of grassland coverage in China in recent decades, based on multi-source remote sensing data, we used the pixel dichotomy model to quantitatively calculate the grassland coverage in China from 1982 to 2016, analyzed the temporal and spatial dynamic pattern of grassland coverage in China, and analyzed the influencing factors of grassland coverage from the perspectives of vegetation types, terrain elements, climate regions and climate change. The results showed that the average grassland coverage in China was 36.21% in the past 35 years, showing an extremely significant increase trend (0.12%/a). The increase of grassland coverage in alpine subalpine meadow, slope grassland, humid and semi-arid areas had an important contribution to grassland restoration in China. The increase rate of grassland coverage on DEM<500 m and 3 500 m<DEM was higher than that on southeast slope, northwest slope and southwest slope. The areas with significant positive correlation between grassland coverage and temperature concentrated in central Xinjiang, western Tibet and southern Qinghai Province, while the areas with significant positive correlation with precipitation concentrated in the central and northern Xinjiang, southern Tibet and central and eastern Inner Mongolia. The increase of vegetation coverage of alpine subalpine meadow, slope grassland and alpine subalpine grassland was mainly controlled by temperature, while that of plain

收稿日期:2021-02-03

修回日期:2021-02-23

资助项目:国家自然科学基金(42107512);西北农林科技大学博士科研启动金(2452020186);陕西省林业科学院科技创新计划专项(SXLK2020-0204);中国博士后科学基金(2020M683594)

第一作者:刘洋洋(1991—),男,河南洛阳人,副教授,主要从事草地遥感及陆地生态系统碳循环研究。E-mail:hnlylcbtks@163.com

通信作者:温仲明(1969—),男,陕西定边人,博士,研究员,主要从事草地生态学研究。E-mail:zmwen@ms.iswc.ac.cn

grassland, desert grassland and meadow mainly depended on precipitation. The limiting factor of grassland growth in arid area was precipitation, while grassland coverage in humid area was controlled by temperature. Grassland coverage in low altitude areas of China was strongly dependent on temperature and precipitation, and this dependence decreased with the increase of altitude. The growth of grassland in middle altitude areas mainly depended on temperature.

Keywords: grassland coverage; different climatic regions; climate change; altitude gradient; aspect gradient

植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover, FVC)能反映植被分布的密集度,也可以揭示植被进行光合活动的分布面积大小,此外也是表征植被生长动态及生态系统质量的主要指标之一^[1-2]。当植被覆盖度在气候变化的影响下不断降低时,将直接导致土壤暴露在空气之中,进而在极端降雨和地表径流的作用下,会加剧土壤侵蚀的发生从而引起严重的水土流失^[3]。

近年来,3S技术及遥感数据应用方法的进步为大尺度范围内的植被覆盖度监测提供广阔的发展空间,最根本的方法就是基于长时序的 MODIS-NDVI 数据结合像元二分模型来实现植被覆盖度的定量核算^[2,4]。张斯琦^[5]基于 MODIS-NDVI 数据估算 2000—2015 年柴达木盆地的植被覆盖度,揭示出柴达木盆地的植被覆盖度有明显改善的趋势,其主要影响因素为区域降水及湿度的增加;裴志方等^[6]则在该技术手段下定量评估 2000—2016 年宁夏地区植被覆盖度的时空演变格局,发现该时间段宁夏植被覆盖度大体上向良好方向发展。大区域尺度上,赵明伟等^[7]基于遥感技术动态评估中国陆地生态系统的植被覆盖度,发现 2001—2015 年中国华北平原大部分地区及黄土高原地区的植被覆盖度呈现显著增加趋势,其主要因素也归因于区域降水量的增加。

草地作为中国尤其是西北干旱地区的主要覆盖类型,其覆盖度的高低及时空动态格局对于区域生态环境质量具有重要的指示意义^[2,7]。此外,草地覆盖度对气候演变的响应敏感,通过探究其对气候变化的响应机制,也可揭示植被-气候之间的相互作用机理。本研究基于长时间序列的植被 NDVI 数据,采用像元二分模型估算 1982—2016 年中国草地生态系统的覆盖度,并分析其部分潜在的影响因素,如地形因素、温度、降水等,旨在揭示中国草地覆盖度对气候变化的响应机理,对草地退化监测及其驱动机制评估提供科学指导价值。

1 材料和方法

1.1 数据来源及预处理

1.1.1 草地覆被数据 采用 Global Land Cover 2000(GLC 2000)产品提取中国草地覆被。相对于

IGBP 等其他植被分类数据而言,GLC 2000 分类精度更高,且草地精度高达 66.95%^[8-9]。该分类法中中国草地总面积为 335 万 km²,草地种类具体包括高山亚高山草甸(93.13 万 km²)、坡面草地(20.98 万 km²)、平原草地(41.99 万 km²)、荒漠草地(55.16 万 km²)、草甸(59.16 万 km²)、高山亚高山草地(64.58 万 km²)(图 1)。

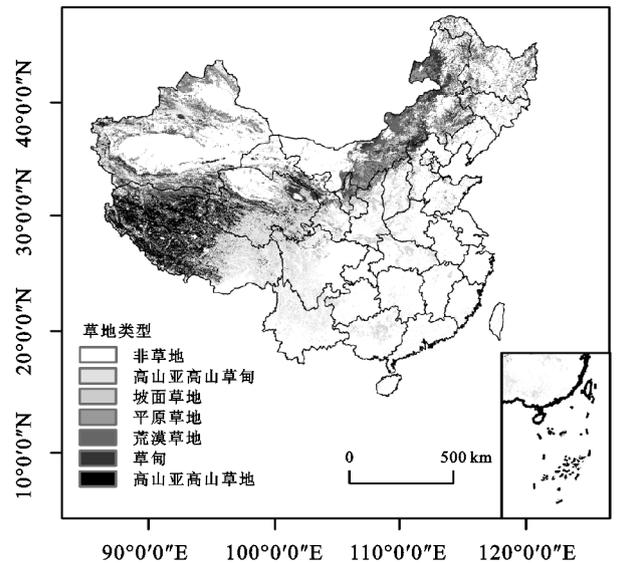


图 1 中国草地类型分布特征

1.1.2 NDVI 数据 NDVI 数据主要采用 GIMMS NDVI 数据和 MOD13A2 产品。GIMMS NDVI 数据(1982—2006 年)的时空分辨率分别为 15 d 和 8 km^[10],采用最大合成法 MVC(maximum Value Composites)消除大气、云及太阳高度角对数据的干扰,获取月 NDVI 值^[11]。MOD13A2 产品(2001—2016 年)的时空分辨率分别为 16 d 和 1 km,数据为 HDF 存储格式,采用 MRT 工具实现数据格式的转换及数据的拼接、裁剪^[12-13]。同样采用最大合成法将 16 d 的 MODIS NDVI 数据合成为月 NDVI 数据。最终,在 ArcGIS 10.3 环境下对两种 NDVI 数据进行投影的转换及数据的重采样,分辨率统一为 1 km。

1.1.3 气象数据 气象数据源于中国气象数据共享网提供的 1982—2016 年的中国 720 多个标准气象站点的月降水量和月平均气温数据^[12]。通过引入海拔及日照等协变量因子,基于 ANUSPLIN 程序实现气象数据的空间插值处理,确保栅格气象数据与 NDVI

数据的投影一致且像元大小也相同^[1]。

1.1.4 草地植被覆盖度的计算 植被覆盖度通常与 NDVI 的线性关系非常显著,因而通常根据两者之间的转换关系,基于像元二分模型计算覆盖度^[12]。具体计算方式如下:

$$NDVI = NDVI_v C_i + NDVI_s (1 - C_i) \quad (1)$$

式中:NDVI_v为植被覆盖部分像元的 NDVI 值;NDVI_s为裸地部分像元的 NDVI 值; C_i 为植被像元覆盖度^[13]。植被覆盖度 C_i 的计算方式如下^[14]:

$$C_i = \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \quad (2)$$

对于地表有纯植被覆盖的像元,植被生长季相变化、群落组成、类型及地形因素均能够导致 NDVI_v 值产生差异。而对于裸地地表的像元,通常 NDVI_s 的值在时间上较为稳定且几乎趋于 0,但实际上 NDVI_s 会在空气湿度及光照等因素的影响下发生波动变化,且波动范围大致为 -0.1~0.2。本研究以植被 NDVI 生长季内的最大及最小值来表示 NDVI_v 及 NDVI_s^[12],具体表示如下:

$$C_i = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (3)$$

式中:NDVI_{min}, NDVI_{max} 分别为植被生长季内 NDVI 的最小及最大值。

1.1.5 DEM 数据 DEM 数据源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>) 提供的 GDEM-DEM 产品,分辨率为 30 m×30 m,采用 ArcGIS 10.3 通过最邻近法将数据分辨率重采样为 1 km×1 km。

1.1.6 湿润度指数(AI) 根据联合国环境规划署(UNEP)提出的标准格式,湿润度指数被定义为年均降水量和年潜在蒸散量的比值^[15],被广泛应用于气候区和气候类型的划分^[16]。根据 UNEP 的干旱分类标准计算中国草地生态系统湿润度指数,将中国草地生态系统划分为 4 个气候区:干旱区(AI<0.20, AR)、半干旱区(0.20≤AI<0.50, SAR)、半湿润区(0.50≤AI<0.65, DSH)和湿润区(AI≥0.65, HU),见图 2。

1.2 主要分析方法

1.2.1 趋势分析 基于一元线性拟合回归分析来研究 NDVI 在像元尺度上的时空变化率^[2]:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times \text{var}_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{var}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (4)$$

式中:slope 为变量的变化率; i 为年限数;var_{*i*} 为第 i 年的变量值。基于 F 检验来确定其变化的显著性,可分为极显著减少、显著减少、未显著减少、未显著增加、显著增加、极显著增加 6 个等级。

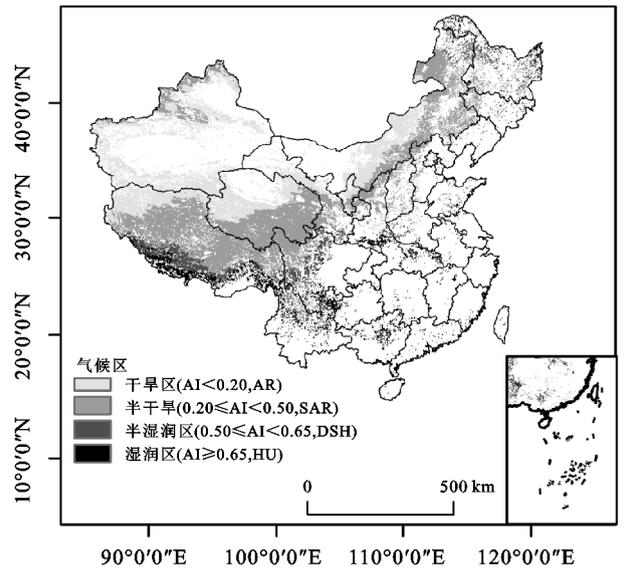


图 2 中国草地生态系统气候区划分

1.2.2 相关性分析 基于 Pearson 相关系数分析不同变量之间的空间相关性,具体如下^[7]:

$$R_{xy} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (x_i \times y_i) - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \times \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \sqrt{n \times \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}} \quad (5)$$

式中: R_{xy} 为 x 和 y 变量之间的相关系数; x_i 为第 i 年的覆盖度值; y_i 为第 i 年的气象因子变量值。

2 结果与分析

2.1 中国草地植被覆盖度的空间分布动态格局

如图 3 所示,35 a 间中国草地覆盖度多年均值为 36.21%,草地覆盖度低于 20% 的区域占 45.67%,集中在青海省西部、新疆西部和南部地带及西藏的大部分地区,另在黄土高原北部和内蒙古中部地区也有大面积分布,草地覆盖度处于 20%~40% 的区域占草地总面积的 37.38%,主要分布在内蒙古中部、新疆北部、西藏东南部及青海省南部地带。草地覆盖度较高(40%~60%)区域占 13.64%,集中在黑龙江、呼伦贝尔及四川省多数地带,而中国南部地区草地覆盖度相对较高,大部分地区草地覆盖度处于 60% 以上。

35 a 间中国草地覆盖度总体上表现出波动增长趋势,且达到显著水平($R^2 = 0.76$; $p < 0.001$),平均年增长率为 0.12%(图 4)。草地覆盖度的较大值主要发生在 2014 年,覆盖度高达 39.72%,而草地覆盖度的最小值则为 1985 年的 34.86%。本研究重点分析 1999 年前后中国草地覆盖度的动态演变特征,表明 1982—1999 年草地覆盖度呈现极显著增加趋势($R^2 = 0.41$; $p = 0.004$),平均变化率为 0.1%,而 1999 年后草地覆盖度增加趋势较 1999 年之前更明显,平均增长率为 0.21%,表现为极显著增加趋势($R^2 = 0.79$; $p < 0.001$)。

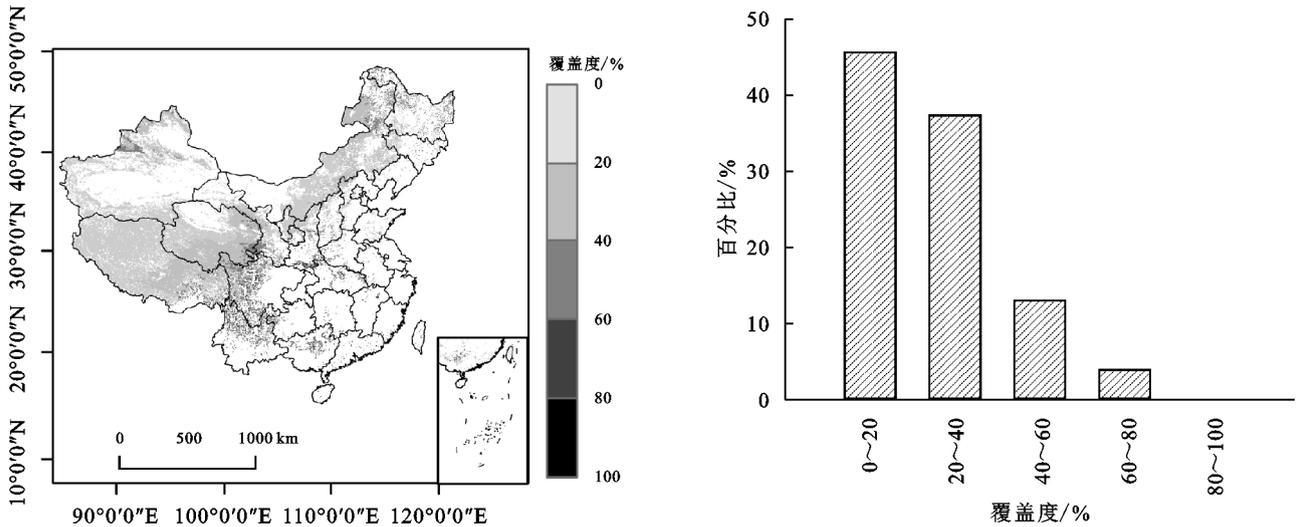


图 3 1982—2016 年中国草地覆盖度的空间分布格局

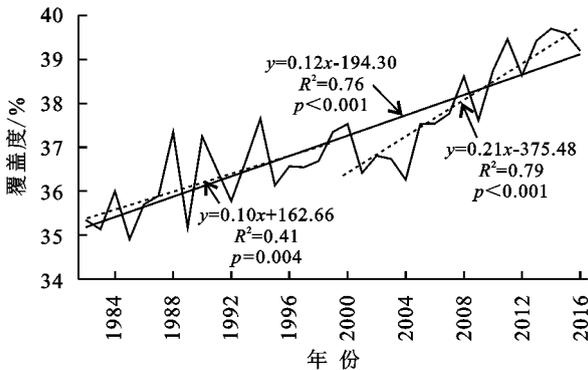


图 4 中国草地覆盖度年际变化特征

由图 5A 可知,1982—1999 年中国草地覆盖度呈现增加趋势较为明显的区域集中在新疆中部和北部、西藏南部及内蒙古的部分地区,而减少较明显的地区集中在呼伦贝尔。显著性检验表明(图 5D 和表 1),1982—1999 年中国草地覆盖度呈现显著增加的地区占草地总面积的 24.63%,集中在新疆中部、西藏南部及黄土高原北部的农牧交错地带,而草地覆盖度呈现显著减少的区域仅占 1.14%,仅仅在内蒙古的呼伦贝尔及云南省的东北部有少量分布。从图 5B 可以看出,2000—2016 年中国草地覆盖度增加率较明显的地区为青海省东部、内蒙古东部、黄土高原的大部分地区及云南等地。而草地覆盖度减少的地区则主要集中在西藏大部分地区及兰州地区。图 5E 和表 1 表明,该时间段中国草地覆盖度呈显著增加的区域占 9.95%,分布在青海省东部及内蒙古东部的大部分地区,而草地覆盖度呈显著减少区域占草地总面积的 15.56%,集中在西藏大部分地区,其余区域草地覆盖度变化不显著。从图 5C 可以看出,1982—2016 年,中国草地覆盖度以增加趋势为主,其中增加较为明显的区域主要分布在西藏北部及云南省的

大部分地区,而草地覆盖度减少较明显的地区则分布在呼伦贝尔及黑龙江等地。图 5F 和表 1 表明,35 a 间中国草地覆盖度增加或减少趋势达到显著的区域面积较小,大部分地区草地覆盖度的变化趋势均不显著。

2.2 不同草地类型草地覆盖度的时空变化特征

中国不同草地类型草地覆盖度的年际变化趋势有很大不同(图 6),总体而言,草地覆盖度均表现出波动增加的变化趋势。草地覆盖度均值最高的草地类型为坡面草地(59.08%),草甸次之(40.25%),而荒漠及高山亚高山草地的植被覆盖度比较低,分别为 19.46%,12.90%。就变化趋势而言,各草地类型的植被覆盖度均表现出极显著增加趋势($p < 0.01$),具体看来,高山亚高山草甸的平均年增加率最大(0.16%),坡面草地次之(0.10%),而草地覆盖平均变化率较小的草地类型主要为平原草地(0.04%)和草甸(0.05%)。荒漠草地和高山亚高山草地的植被覆盖平均变化率分别为 0.087%,0.06%,以上表明高山亚高山草甸和坡面草地对于 35 a 间中国草地覆盖度的增加具有重要贡献。

2.3 不同气候区草地覆盖度的时空变化特征

不同气候区草地覆盖度的年际变化趋势见图 7, AR, SAR, DSH 和 HU 的草地覆盖度均值分别为 27.59%,33.56%,46.41%,51.50%。各气候区草地覆盖度在 1982—2016 年均表现出显著增加趋势。湿润区草地覆盖度的平均年增长率最大(0.11%/a),而干旱区草地覆盖度的平均年增长率最小(0.03%/a),草地覆盖度的平均增长率由 HU-AR 表现为不断减小的趋势,可以表明湿润地区草地的生长状况良好,相比干旱区,湿润地区更有利于草地生长。

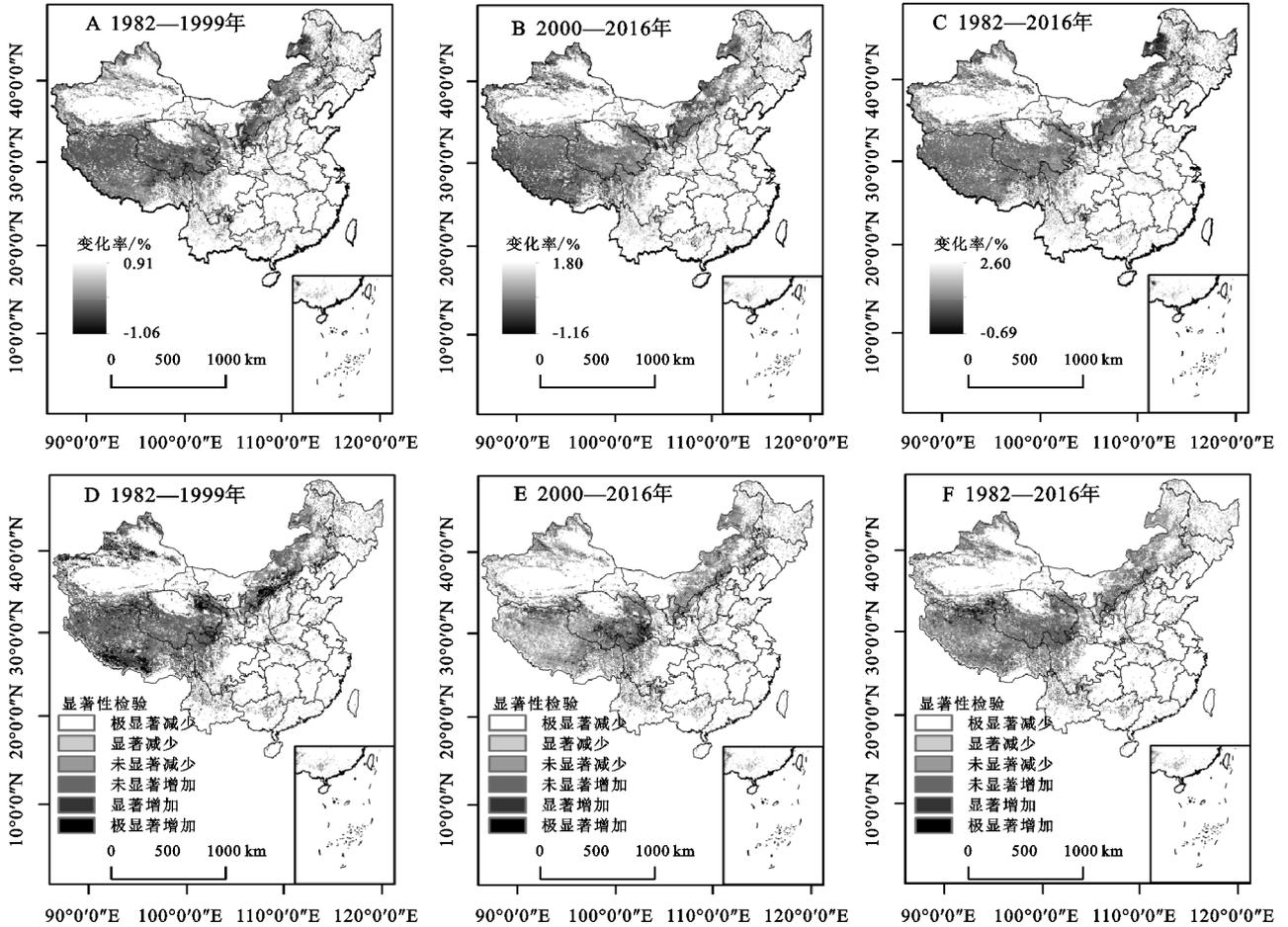


图 5 不同时间段中国草地覆盖度的空间动态特征

表 1 不同时间段草地覆盖度年际变化的显著性检验面积比例 %

变化趋势	1982—1999年	2000—2016年	1982—2016年
极显著减少	0.43	4.62	1.78
显著减少	0.71	10.94	2.10
未显著减少	15.93	41.78	41.74
未显著增加	58.30	32.72	48.40
显著增加	12.71	5.89	2.94
极显著增加	11.92	4.06	3.04

2.4 地形因素对 NPP 时空分布的影响

图 8 表明,中国草地覆盖度随着海拔的升高总体

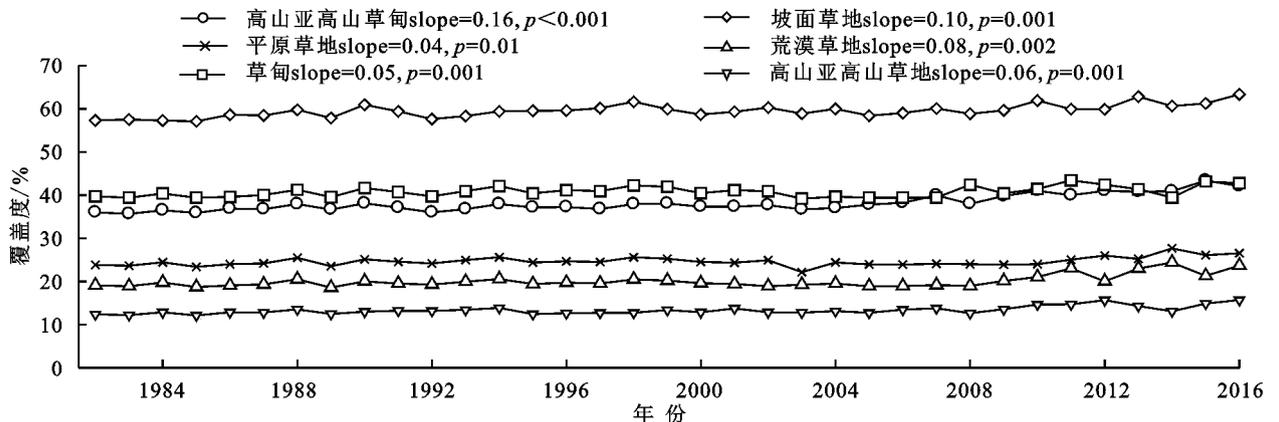


图 6 不同草地类型草地覆盖度的年际变化特征

上呈现降低趋势,其中草地覆盖度均值的最大值集中在海拔低于 500 m 的区域(33.82%),随着海拔的升高,草地覆盖度呈现轻度降低趋势,在海拔处于 500~3 500 m 的区域,草地覆盖度分布在 28.86%左右,当海拔高于 3 500 m 后,草地覆盖度则明显降低,在海拔处于 4 500 m 以上的区域,草地覆盖度均值最低(17.63%)。由图 8B 可以看出,南坡的草地覆盖度最高(33.12%),其次分别为东坡(29.64%)、西南坡(28.35%)以及东南坡(23.88%),而北坡和西北坡的草地覆盖度最低,均在 20%左右。

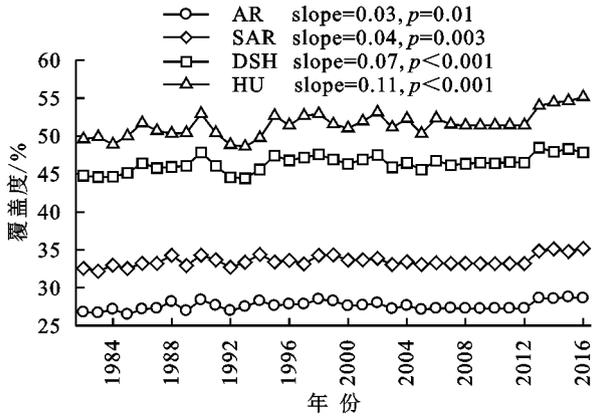


图 7 不同气候区中国草地覆盖度的年际变化特征

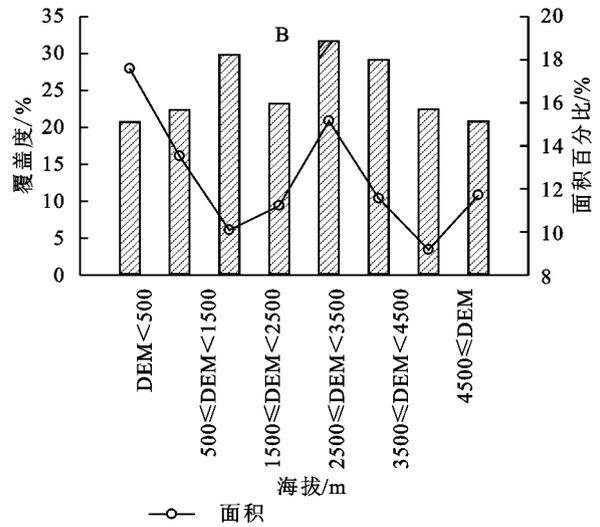
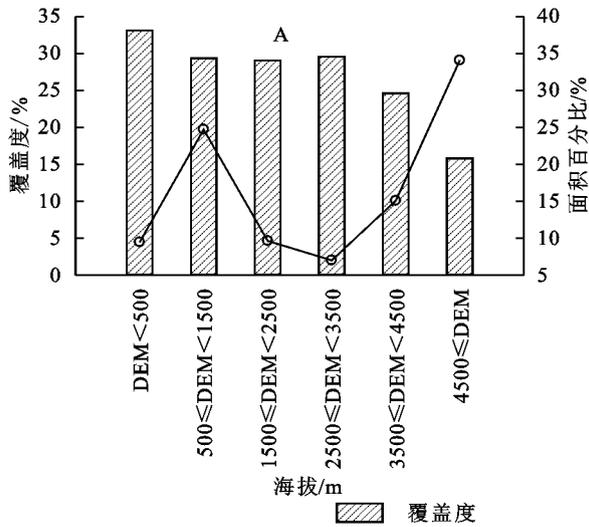


图 8 地形因素对草地覆盖度的影响

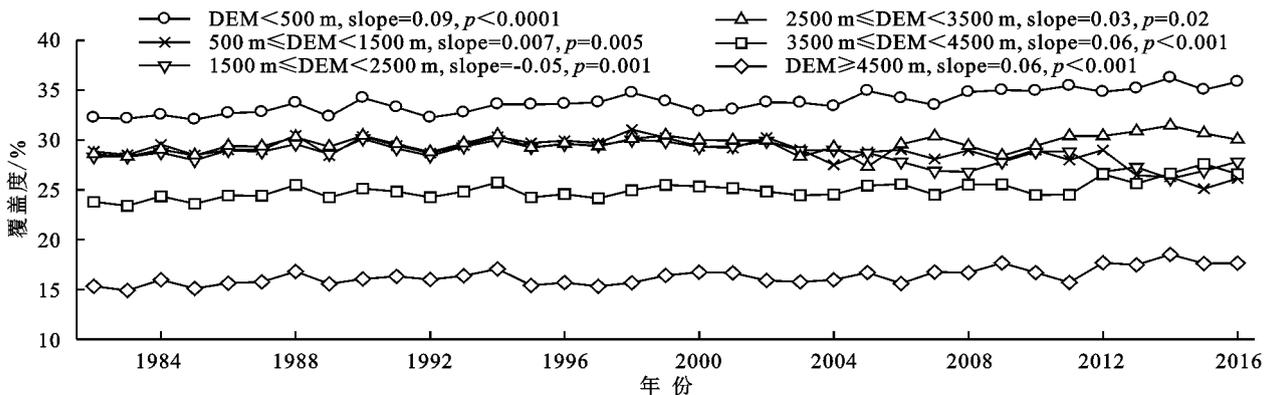


图 9 中国不同海拔草地覆盖度的年际变化特征

1982—2016 年中国不同坡向梯度上草地覆盖度的年际变化特征如图 10 所示,各个坡向草地覆盖度的波动变化趋势大致相符,其中 2000 年之前,各坡向草地覆盖度均表现为轻微的波动上升趋势,而 2000 年之后草地覆盖度均呈现出轻微的下降趋势,但在 2007 年后均陡然上升,表现为明显的上升趋势。总体而言,各坡向草地覆盖度均呈现出极显著增加的变化趋势($p < 0.01$),其中平均年际增加率较高的坡向分别为东南坡、西北坡和西南坡($0.07\%/a$),东北坡向次之($0.06\%/a$),而草地覆盖度增加率最低的坡向为北坡($0.04\%/a$),其他坡向

1982—2016 年,各海拔梯度草地覆盖度的波动变化趋势存在较大差异(图 9)。其中,DEM<500 m 的区域草地覆盖度呈现极显著增加趋势($p < 0.01$),且该海拔梯度下草地覆盖度的平均年增加率最高($0.09\%/a$)。3 500 m \leq DEM 的区域草地覆盖度则以 $0.06\%/a$ 的年增加率呈现极显著增加趋势($p < 0.01$)。500 m \leq DEM < 1 500 m 及 1 500 m \leq DEM < 2 500 m 的区域,草地覆盖度均呈现出极显著减少趋势($p < 0.01$),且平均年减少率分别为 0.07% 、 0.05% 。综上可知,35 a 间中国草地覆盖度的增加主要可归因于 DEM<500 m 以及 3 500 m \leq DEM 两个海拔梯度上大面积区域的草地覆盖度增加。

草地覆盖度年际增加率均为 $0.05\%/a$ 。

2.5 草地覆盖度与气温、降水的关系

图 11 为 1982—2016 年中国草地覆盖度与年均气温和降水的空间相关性。图 11A 表明,中国大部分区域草地覆盖度与年均气温主要以正相关为主,而草地覆盖度与气温呈现负相关关系的区域较少,主要集中在西藏西部和北部及新疆北部。图 11B 表明,草地覆盖度与气温呈现正相关的区域占总草地面积的 74.74% ,其中,极显著(4.30%)和显著(8.45%)正相关的区域集中在新疆中部、西藏西部及青海省南

部。草地覆盖度与气温呈现负相关的区域占总草地面积的 25.26%，而负相关达到显著的区域仅占总草地面积的 0.89%，零星分布在新疆北部地区。草地覆盖度与降水的相关性如图 11C 所示，大部分区域草地覆盖度与降水呈现正相关关系，而草地覆盖度与降水呈现负相关的区域较小，集中在新疆和西藏交界地

带及青海省东南部，图 11D 表明，草地覆盖度与降水呈现正相关的区域占 61.93%，而 5.93%，7.76% 的区域达到极显著和显著正相关，集中在新疆中部和北部、西藏南部及内蒙古中部地带。草地覆盖度与降水呈现负相关的区域占 38.07%，而显著负相关的区域集中在西藏、新疆交汇地带及青海省多数地区。

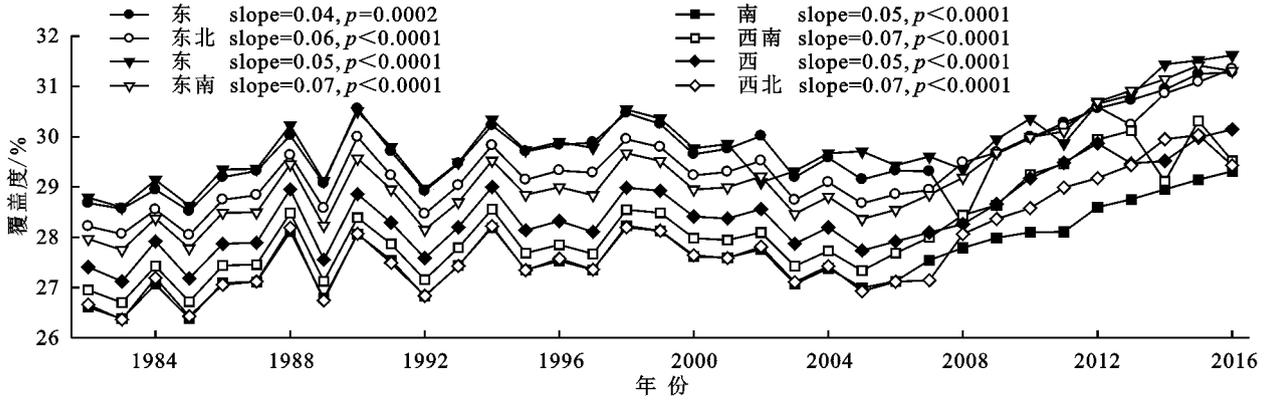
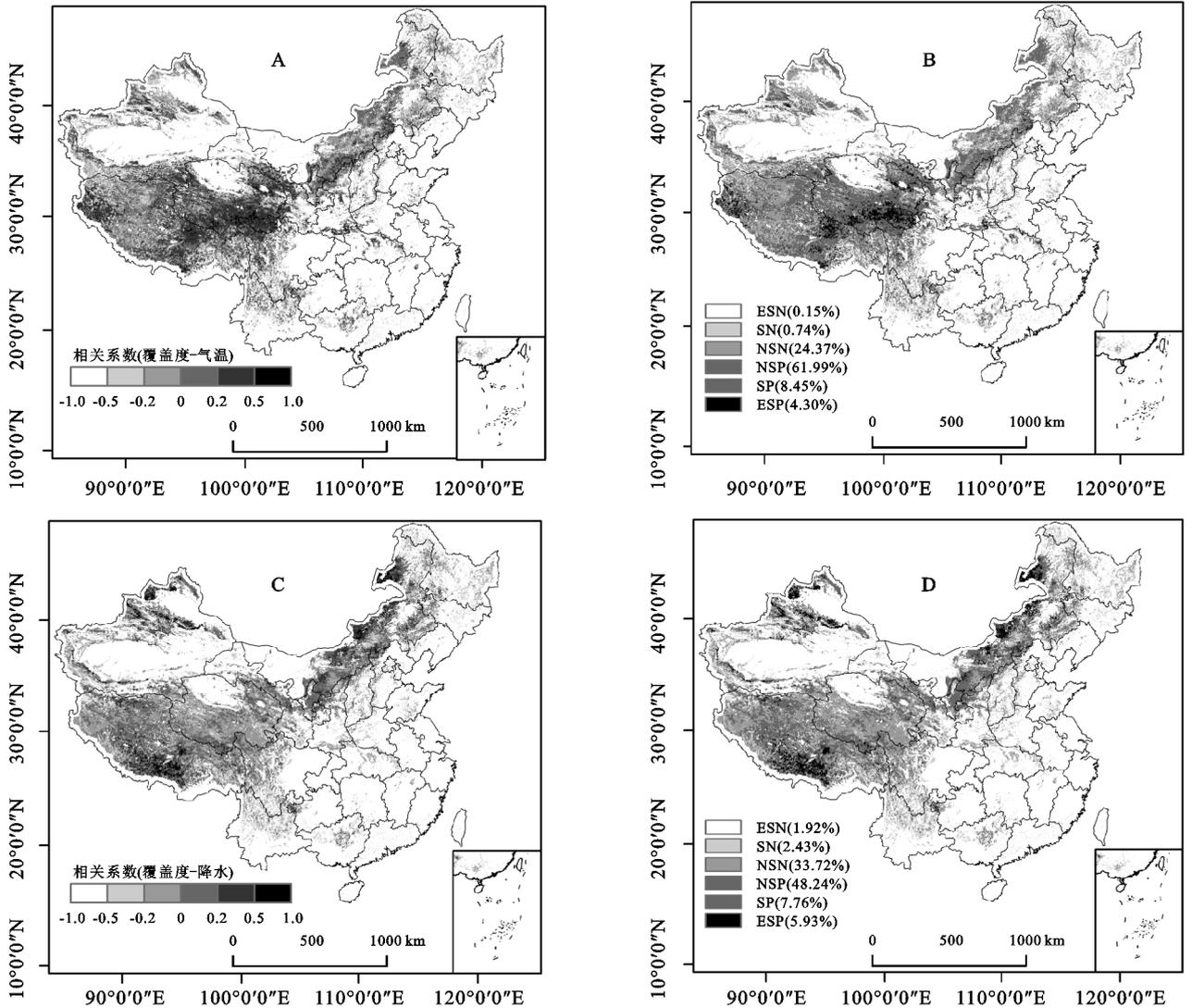


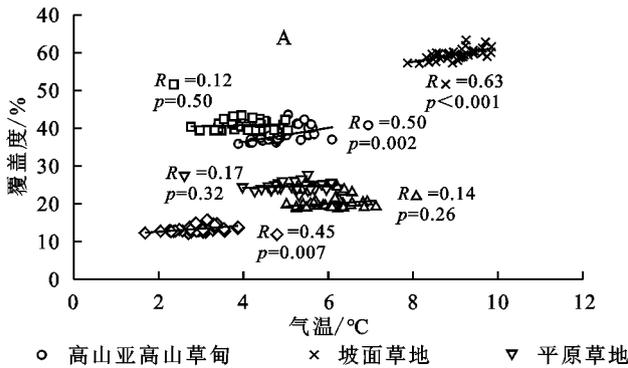
图 10 1982—2016 年中国不同坡向草地覆盖度年际变化特征



注:ESN 为极显著负相关;SN 为显著负相关;NSN 为不显著负相关;NSP 为不显著正相关;SP 为显著正相关;ESP 为极显著正相关,下同。

图 11 中国草地覆盖度与温度、降水量的相关性

从图 12A 可以看出,各草地类型植被覆盖度与气温均呈现正相关关系,其中坡面草地、高山亚高山草甸和高山亚高山草地植被覆盖度与气温均呈现出极显著的正相关关系。而其余 3 种草地类型植被覆盖度与气温之间呈现出较弱的正相关关系,相关性最小的为草甸。图 12B 表明,高山亚高山草甸和坡面草地植被覆盖度与降水呈现出弱的负相关关系,



而其他草地类型植被覆盖度与降水之间均表现出正相关关系,其中荒漠草地植被覆盖度与降水呈现出显著的正相关关系($R=0.42$; $p=0.01$),而正相关性最弱的为高山亚高山草地。综上分析,高山亚高山草甸、坡面草地及高山亚高山草地的生长主要受气温控制,而平原草地、荒漠草地和草甸的生长主要依赖于降水的增加。

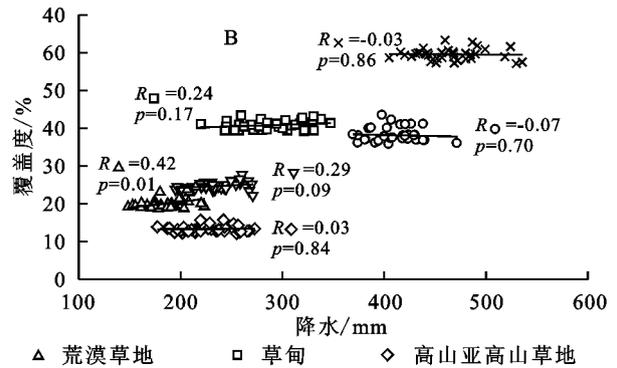


图 12 不同类型草地的草地覆盖度与气象因子的关系

从图 13A 可以看出,AR 和 SAR 区域草地覆盖度与气温呈现轻度的正相关,而 DSH 区域草地覆盖度与气温之间呈现出极显著的正相关关系($p=0.004$),HU 区域草地覆盖度与气温呈现出显著正相关关系($p=0.01$)。此外,图 13B 表明,各个气候区草地覆盖度与降水均呈现出正相关关系,其中,草地覆盖度在 SAR 区域与降水呈现出显著的正相关关系($p=0.03$),紧接着为 AR 区域,草地覆盖度与降水的相关系数为

0.31。而湿润地区草地覆盖度与降水的正相关性较弱且不显著,尤其对于 DSH 区域而言,草地覆盖度与降水的相关系数仅为 0.11。综合以上分析表明,中国干旱区草地生长的主要限制因子为降水,而气温的升高则不利于草地生长,尤其对于绝大多数的半干旱区域(SAR 区域);而湿润地区草地覆盖度则主要受气温控制,降水过多则会加重土壤侵蚀,进而限制草地的生长。

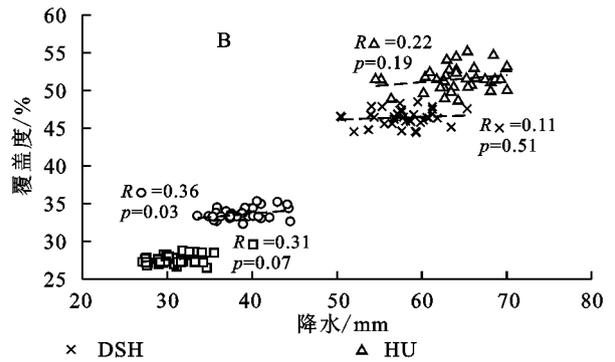
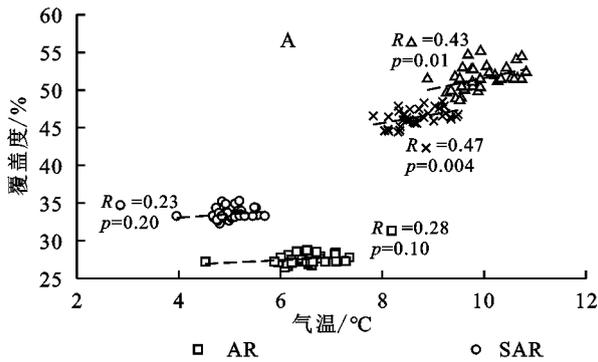


图 13 不同气候区草地覆盖度与气温、降水的关系

各海拔梯度上草地覆盖度与气温之间均表现为正相关(图 14A),其中,DEM<500 m 的区域草地覆盖度与气温呈现出显著的正相关关系,随着海拔的升高,草地覆盖度与气温的正相关关系有所减弱,当 1 500 m<DEM<2 500 m,正相关系数减小至 0.23,随着海拔的升高,正相关性又不断增强,对于大部分中海拔地区(2 500 m<DEM<4 500 m)而言,草地覆盖度与气温同样呈显著正相关,而对于 DEM≥4 500 m 的区域而言,草地覆盖度与气温的正相关程度又有所减弱。图 14B 表明,对于低海拔地区而言(DEM<1 500 m),草地覆盖度与降水之间呈正相关

但并不显著,随着海拔的升高,正相关强度变弱;对于中海拔地区而言,草地覆盖度与降水的关系逐渐转变为弱的负相关,随着海拔进一步升高,这种负相关程度不断增强,对于大部分高海拔地区而言(DEM<3 500 m),草地覆盖度与降水的负相关作用明显加强。综上表明,低海拔地区草地覆盖度对气温和降水的依赖性均较强,而草地对气温和降水的依赖性随着海拔升高会有所减弱;中海拔地区,气温是控制草地生长的主要因素,而降水与草地覆盖度的关系则相对较弱。对于高海拔地区而言,草地生长对气温和降水的依赖性均较弱。

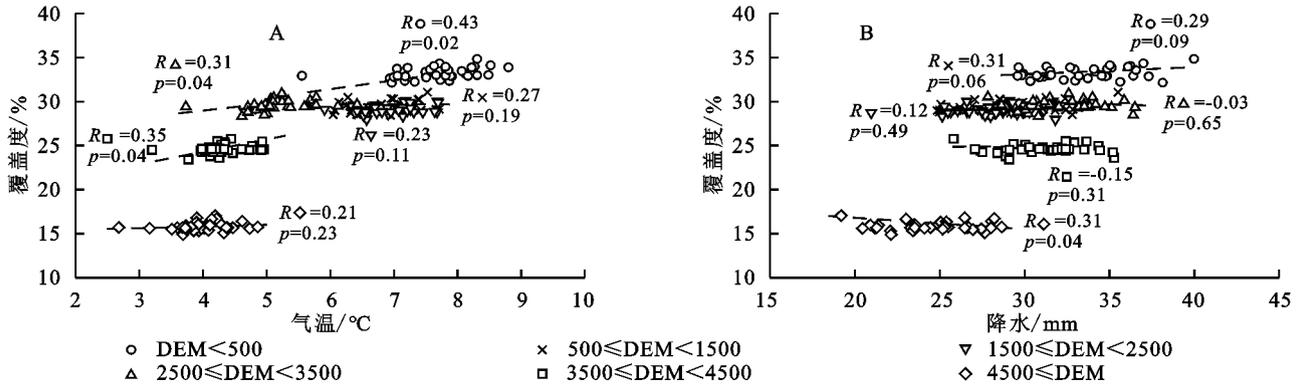


图 14 不同海拔梯度下草地覆盖度与气温、降水的关系

从图 15A 可以看出,草地覆盖度与气温呈现出正相关关系的坡向主要为北坡、东北、东南、西坡和西北坡向,而这些正相关强度均较弱,其中东南坡向上草地覆盖度与气温的正相关性较强。其余坡向草地覆盖度与气温之间则均表现为负相关关系,其中负相关较强的为

西南坡。图 15B 表明,各个坡向草地覆盖度与降水均呈现出正相关关系,除东北坡向外,其余坡向草地覆盖度与降水均呈现出显著的正相关关系,其中正相关系数最大的坡向为南坡,西北坡和东南坡向次之,而东北坡向草地覆盖度与降水的正相关性较弱。

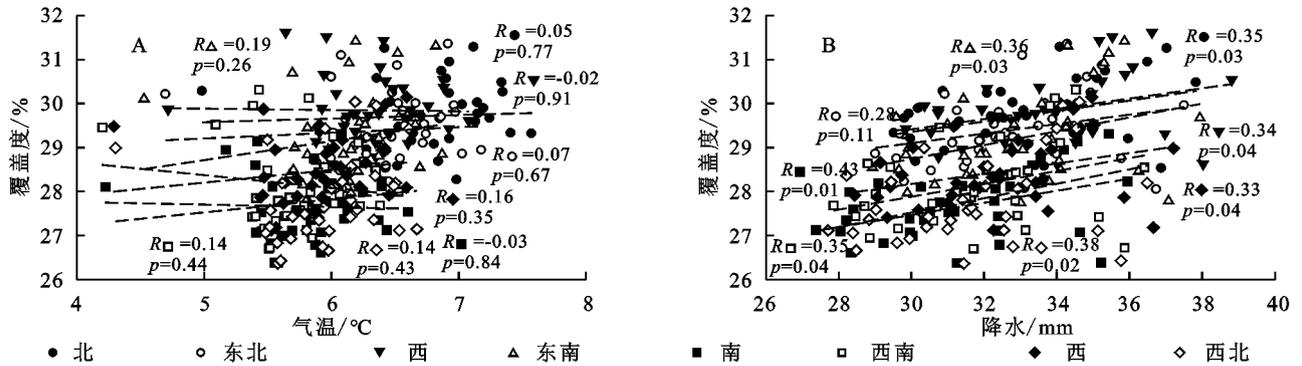


图 15 不同坡向梯度下草地覆盖度与气温、降水的关系

3 讨论

本研究表明,近 35 a 中国不同草地类型、不同气候区的草地覆盖度均呈极显著上升趋势,具体为 1999 年之后草地覆盖度的增加趋势较 1999 年之前更加明显,总体平均增长率为 0.21%,其主要归因于:(1) 该时间段中国草地区域降水格局表现出明显的增加趋势^[10],且多数研究揭示降水对于植被生长具有重要的促进作用^[12],其具体的影响机制将在下文系统分析。(2) 2000 年后中国大面积的实施退耕还林还草、城镇绿化工程及过度放牧状况的不断改善促进了中国草地的恢复^[8-10]。本研究发现 35 a 间干旱区草地覆盖度的年均增加率最小,而湿润区域年均增加率最大且均值最高,表明湿润地区草地生长状况良好,降水对草地覆盖度的增加具有促进作用,而气候干旱不利于草地的生长^[11]。Liu 等^[12]研究了全球不同气候区草地生产力对气候变化的响应特征,同样发现半湿润和湿润地区的草地生产力往往比干旱半干旱区域更高。温度和水的有效性对草地生态系统的生长和分布有着复杂而多变的影响^[13]。本研究发现

干旱区草地生长的限制因子为降水,而气温的升高则不利于草地生长,尤其对于半干旱区域(SAR)。以往研究表明,对于干旱半干旱区域而言,水通常被认为是植被生长的最重要因素,当水分不足会造成植被的较低的比叶面积和高的根冠比,进而限制干旱半干旱生态系统的植被生长^[15]。此外,Liu 等^[12]发现湿润区域草地生态系统的生长与降水之间往往呈现负相关关系,而与气温呈现正相关,该研究结果与本研究一致,即湿润地区草地覆盖度受气温控制,而降水过多会限制草地生长。湿润地区的降水充沛,足以保证植被的正常生长,但过量的水分输入会在一定程度上造成水土流失,土壤有机质减少,此外,过量降水会导致辐射减少输入和土壤含氧量不足,进而限制植被生长^[16-17]。

海拔与坡向对于气温和降水具有明显的分异作用,进而会导致区域的光照、土壤水分及养分产生较大的差别,从而影响着区域的植被空间格局,此外,不同海拔梯度及坡向上地表物质及能量的流动和转换也是限制植被空间分布的主要影响因子^[18]。本研究发现,草地覆盖度随着海拔升高总体上表现为降低特征,各海拔梯度草地覆盖度的波动变化趋势存在着较

大的差异。中国低海拔地区草地覆盖度对气温、降水依赖性均较强,中海拔地区草地生长主要依赖气温,而高海拔地区草地生长对气温和降水的依赖性均较弱,表明高海拔地区太阳辐射对于植被生长的重要性^[19]。就坡向而言,本研究发现南坡的草地覆盖度最高,而北坡和西北坡的草地覆盖度最低,且东南坡、南坡和西南坡等朝阳坡向草地覆盖度的增加速率最大,但总体而言,坡向梯度上草地覆盖度的变化对气温降水的响应特征不存在明显的规律性,由于不同的坡向所经受的光照时间、光照范围存在较大差异,造成各个坡面所接受的太阳辐射以及潜在蒸散产生差异^[20],对于阳坡而言,光照充足,植被光合作用相对较强,但气温过高导致的土壤水分蒸散增强,进而会限制植被的生长,对于阴坡而言,土壤水分充足,但气温和光照强度相对较低,同样会限制植被的光合作用,因此不同坡向植被的生长往往与各个植被类型独特的生物学特性有很大关系^[21-22]。然而,总体上南坡上植被的覆盖度往往更高,该研究结果也与以往大部分学者的结论一致^[23-24]。

4 结论

35 a 间中国草地覆盖度平均值为 36.21%, 呈现极显著增加趋势(0.12%/a)。高山亚高山草甸、坡面草地及湿润地区、半干旱地区草地覆盖度的增加对于中国草地生态系统具有重要贡献。草地覆盖度随海拔的升高呈减少趋势。东南坡、西北坡和西南坡草地覆盖度增加率较高。草地覆盖度与气温呈现显著正相关的区域集中在新疆中部、西藏西部及青海省南部。而与降水呈显著正相关的区域集中在新疆中部和北部、西藏南部及内蒙古中东部地带。高山亚高山草甸、坡面草地及高山亚高山草地植被覆盖度的增加主要受气温控制,而平原草地、荒漠草地和草甸覆盖度的增加主要依赖于降水。干旱区草地生长的限制因子为降水,而湿润地区草地覆盖度受气温控制。中国低海拔地区草地覆盖度对气温、降水依赖性均较强,这种依赖性随海拔升高减弱,中海拔地区草地生长主要依赖气温。

参考文献:

[1] 李娅丽,汪小钦,陈芸芝,等.福建省地表温度与植被覆盖度的相关性分析[J].地球信息科学学报,2019,21(3):445-454.

[2] 孙睿,刘昌明,朱启疆.黄河流域植被覆盖度动态变化与降水的关系[J].地理学报,2001,56(6):667-672.

[3] 梁玲.植被覆盖度对黄土高原地区环境影响的数值模拟[D].兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,

2006.

- [4] 李苗苗.植被覆盖度的遥感估算方法研究[D].北京:中国科学院研究生院,2003.
- [5] 张斯琦.2000—2015年柴达木盆地植被覆盖度时空变化及其与环境因子的关系[D].石家庄:河北师范大学,2019.
- [6] 裴志方,杨武年,吴彬,等.2000—2016年宁夏植被覆盖景观格局遥感动态分析[J].水土保持研究,2018,25(1):215-219.
- [7] 赵明伟,王妮,施慧慧,等.2001—2015年中国陆地植被覆盖度时空变化及驱动力分析[J].干旱区地理,2019,42(2):104-111.
- [8] Liu Y, Wang Q, Zhang Z, et al. Grassland dynamics in responses to climate variation and human activities in China from 2000 to 2013[J]. Science of the Total Environment, 2019,690:27-39.
- [9] Mu S, Zhou S, Chen Y, et al. Assessing the impact of restoration-induced land conversion and management alternatives on net primary productivity in Inner Mongolian grassland, China[J]. Global & Planetary Change, 2013,108(3):29-41.
- [10] 刘洋洋,章钊颖,同琳静,等.中国草地净初级生产力时空格局及其影响因素[J].生态学杂志,2020,39(2):349-363.
- [11] 刘洋洋,王倩,杨悦,等.黄土高原草地净初级生产力时空动态及其影响因素[J].应用生态学报,2019,30(7):2309-2319.
- [12] Liu Y, Yang Y, Wang Q, et al. Evaluating the responses of net primary productivity and carbon use efficiency of global grassland to climate variability along an aridity gradient[J]. Science of the Total Environment, 2019,652:671-682.
- [13] Gang C, Zhou W, Wang Z, et al. Comparative assessment of grassland NPP dynamics in response to climate change in China, North America, Europe and Australia from 1981 to 2010[J]. Journal of Agronomy & Crop Science, 2015,201(1):57-68.
- [14] Bai Y, Wu J, Xing Q, et al. Primary production and rain use efficiency across a precipitation gradient on the Mongolia Plateau[J]. Ecology, 2008,89(8):21-40.
- [15] Chen Y, Mu S, Sun Z, et al. Grassland carbon sequestration ability in China: A new perspective from terrestrial aridity zones[J]. Rangeland Ecology & Management, 2016,69(1):84-94.
- [16] Gao Y, Zhou X, Wang Q, et al. Vegetation net primary productivity and its response to climate change during 2001—2008 in the Tibetan Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2013,444:356-362.

- 求分析[J].人民黄河,2009,31(4):16-18,124.
- [18] You Q, Kang S, Aguilar E, et al. Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961—2003 [J]. *Climate Dynamics*, 2011,36(11/12):2399-2417.
- [19] Soltani M, Laux P, Kunstmann H, et al. Assessment of climate variations in temperature and precipitation extreme events over Iran[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016,126(3):775-795.
- [20] Zhang X, Yang F. RCLim Dex(1.0) user manual[Z]. Ontario Canada;Climate Research Branch Environment Canada Downsview, 2004.
- [21] 王钰,冯起.陕北地区 1960—2013 年极端气温指数[J]. *中国沙漠*,2016,36(4):1097-1105.
- [22] 李双双,孔锋,韩鹭,等.陕北黄土高原区极端降水时空变化特征及其影响因素[J]. *地理研究*,2020,39(1):140-151.
- [23] 刘吉峰,王金花,焦敏辉,等.全球气候变化背景下中国黄河流域的响应[J]. *干旱区研究*,2011,28(5):860-865.
- [24] Liang K, Bai P, Li J, et al. Variability of temperature extremes in the Yellow River basin during 1961—2011 [J]. *Quaternary International*, 2014,336(26):52-64.
- [25] 姬霖,段克勤.1960—2017 年渭河流域极端气温变化及其对区域增暖的响应[J]. *地理科学*,2020,40(3):466-477.
- [26] 曹言,王杰,柴素盈,等.1970—2014 年云南省气温日较差变化特征及影响因素[J]. *水土保持研究*,2018,25(6):100-108.
- [27] Dong X G, Zhang S T, Zhou J J, et al. Magnitude and Frequency of Temperature and Precipitation Extremes and the Associated Atmospheric Circulation Patterns in the Yellow River Basin (1960—2017), China [J]. *Water*,2019,11(11).DOI10.3390/w11112334.
- [28] Liang K, Liu S, Bai P, et al. The Yellow River basin becomes wetter or drier: The case as indicated by mean precipitation and extremes during 1961—2012[J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2015,119(3/4):701-722.
- [29] 曹晴,郝振纯,傅晓洁,等.1960—2017 年中国极端气候要素时空变化分析[J]. *人民黄河*,2020,42(2):11-17.
- [30] Wang W G, Shao Q X, Yang T, et al. Changes in daily temperature and precipitation extremes in the Yellow River Basin, China[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2013,27(2):401-421.

~~~~~  
(上接第 220 页)

- [23] Martens B, Miralles D G, Lievens H, et al. GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture[J]. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10(5):1903-1925.
- [24] Rodríguez-Rodríguez D, Bomhard B. Mapping direct human influence on the world's mountain areas [J]. *Mountain Research & Development*,2012,32(2):197-202.
- [25] Yan J, Jia S, Lv A, et al. Water resources assessment of China's transboundary river basins using a machine learning approach [J]. *Water Resources Research*, 2019,55(1):632-655.
- [26] Breiman L. Random forests [J]. *Machine Learning*, 2001,45(1):5-32.
- [27] 周梦甜,李军,朱康文,等.近 15 a 新疆不同类型植被 NDVI 时空动态变化及对气候变化的响应[J]. *干旱区地理*,2015,38(4):779-787.
- [28] 施雅凤,沈永平,李栋梁,等.中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. *第四纪研究*,2003,23(2):152-164.
- [29] 赵鹏,陈桃,王茜,等.气候变化和人类活动对新疆草地生态系统 NPP 影响的定量分析[J]. *中国科学院大学学报*,2020,37(1):51-62.
- [30] 张强,肖风劲,牛海山,等.我国北方植被指数对土壤湿度的敏感性分析[J]. *生态学杂志*,2005,24(7):715-718.

~~~~~  
(上接第 230 页)

- [17] Chadwick O A, Matson P A. Carbon cycling and soil carbon storage in mesic to Wet Hawaiian Montane Forests[J]. *Ecology*, 2001,82(11):3182-3196.
- [18] 孙海燕,万书波,李林,等.贺兰山西坡不同海拔梯度土壤活性有机碳分布特征及影响因素[J]. *水土保持学报*,2014,28(4):194-199.
- [19] 刘洋洋,王倩,杨悦,等.2000—2013 年中国植被碳利用效率(CUE)时空变化及其与气象因素的关系[J]. *水土保持研究*,2019,26(5):278-286.
- [20] 杨佩国.基于土壤水分分布式动态模型的沙质荒漠化地区生产力估算[D].北京:中国农业大学,2004.
- [21] 张俊佩.贵州石漠化地区主要造林树种耐旱特性及适应性评价[D].北京:中国林业科学研究院,2009.
- [22] 聂莹莹.阳坡—阴坡生境梯度上植物群落物种多样性和地上生物量的变化特点[D].兰州:兰州大学,2010.
- [23] 刘旻霞,刘洋洋,陈世伟,等.青藏高原东缘高寒草甸坡向梯度上植物光合生理特征研究[J]. *土壤与作物*, 2015,4(3):10-18.
- [24] 刘旻霞.亚高寒草甸不同坡向植物光合生理和叶片形态差异[J]. *生态学报*,2017,37(24):8526-8536.