

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

周 伟¹, 刚成诚¹, 李建龙¹, 章超斌¹, 穆少杰¹, 孙政国²

(1. 南京大学生命科学学院, 南京 210093;

2. 南京农业大学动物科技学院, 南京 210095)

摘要: 基于1982–2006年的GIMMS NDVI数据和2001–2010年的MODIS NDVI数据反演中国草地覆盖度的空间格局和变化趋势, 结合1982–2010年中国气象站点气温和降水数据, 分别从不同时空尺度和不同草地类型上分析中国草地覆盖度的年际和月际变化对气候变化的响应。结果表明: (1) 1982–2010年间中国草地分布区气温呈上升趋势 ($0.04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}$), 降水量呈减少趋势 ($-0.39\text{ mm}/\text{年}$), 西北干旱区气候暖湿化趋势明显。 (2) 中国草地覆盖度空间上呈现东南高西北低的特征, 29年间草地覆盖度平均值为34%, 坡面草地覆盖度最高为61.4%, 荒漠草地覆盖度最低为17.1%。 (3) 29年间中国草地覆盖度总体呈现上升趋势, 平均为 $0.17\%/ \text{年}$, 西北干旱和青藏高原地区草地覆盖度增加趋势明显。坡面草地覆盖度增加趋势最明显, 平均值为 $0.27\%/ \text{年}$, 平原草地和草甸增加趋势较小, 平均值仅为 $0.11\%/ \text{年}$ 和 $0.10\%/ \text{年}$ 。总体上, 中国草地覆盖度呈极显著增加 (46.03%) 和显著增加的面积比例 (11%) 大于极显著减少 (4.1%) 和显著减少的面积比例 (3.24%)。 (4) 从年际变化上, 草地覆盖度与气温和降水量均呈不显著正相关 ($R = 0.21$; $R = 0.1$); 从不同草地类型上, 荒漠草地和平原草地覆盖度受降水量影响较大, 而高山亚高山草甸、高山亚高山草地、坡面草地和草甸覆盖度与温度相关性较大。 (5) 从月际变化上, 草地覆盖度与当月气温、降水量具有显著的相关性 ($R = 0.80$; $R = 0.76$), 表明水热因子的季节波动对牧草生长的影响更大; 并且所有类型植被覆盖度与前一月气温和降水量的相关系数最大, 表现出明显的时滞效应。

关键词: 草地覆盖度; 气温; 降水; 时空动态; 相关性; 滞后效应

DOI: 10.11821/dlxb201401002

1 引言

全球气候变化与陆地生态系统关系 (GCTE) 是全球变化研究中最复杂、最核心的研究内容之一^[1]。植被作为陆地生态系统的主体, 对气候变化的响应非常敏感, 全球气候变化必然引起植物生长环境的变化, 进而影响植被的生长动态以及植被的结构和功能^[2]。气候变化对植被覆盖度有重要影响^[3], 并且植被覆盖与气候变化相互关系研究已成为全球变化研究的重要内容^[4]。植被覆盖度反应了植被的茂密程度及植物进行光合作用面积的大小,

收稿日期: 2013-09-10; 修订日期: 2013-10-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2010CB950702); 亚太全球变化研究网络 (APN) 项目 (ARCP 2013- 16NMY- Li); 国家自然科学基金项目 (40871012; J1103512; J1210026); 国家 863 计划专题项目 (2007AA10Z231); 澳大利亚国际发展机构 (AusAID) 项目 (64828) [Foundation: The National Basic Research Program of China, No.2010CB950702; APN Project ARCP 2013- 16NMY- Li; National Natural Science Foundation of China, No.40871012; No.J1103512; No.J1210026; National High Technology Research and Development Program of China, No.2007AA10Z231; The Public Sector Linkages Program supported by Aus AID, No.64828]

作者简介: 周伟 (1985-), 女, 山东泰安人, 在读博士, 主要从事遥感技术应用和全球变化陆地生态系统碳循环方面的研究。E-mail: zhouw866@163.com

通讯作者: 李建龙 (1962-), 教授, E-mail: jlli2008@nju.edu.cn

是表征陆地植被质量和植被群落生长动态的重要参数。植被覆盖度的变化是区域生态环境变化的直接结果^[5]，它对区域生态环境变化具有重要指示作用^[6]。

气候变化是植被活动年际变化的重要影响因素^[7-8]。国内外学者利用 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 数据在植被生长对气候变化的响应方面进行了广泛研究^[9-10]。气候变暖已导致北半球中高纬度地区植被活动显著增强^[11-12]，在我国，大部分地区的植被活动也呈增强趋势^[13]，尤其我国青藏高原、西北干旱区、华北地区植被覆盖度普遍增高^[14-16]。气温和降水量是影响植被生长的主要非生物因素，然而关于植被生长与水热因子相关性研究结论不尽一致，有学者认为降水量是影响我国植被生长状况的重要因子^[17-19]；也有学者认为气温对植被生长的作用较降水量更明显^[20-23]，而在季节变化上植被生长与降水量关系密切^[24]；不同植被类型对水热因子响应不同，并且降水量是制约北方荒漠草地生长的主要因子，并表现出滞后性^[25]。因此对于不同时空尺度和不同生态系统类型，气温和降水对植被覆盖的决定作用不同。

草地作为我国陆地生态系统最大的天然屏障^[26]，近年来随着全球气候变化和人类活动干扰的增加，草地生态系统发生明显变化。目前关于草地覆盖与气候变化关系研究多集中在典型研究区域或某一时间尺度上分析草地植被动态及其与气候变化的相关关系^[27-28]，而从全国尺度和长时间序列上综合分析我国草地覆盖时空变化以及气候变化耦合性的研究较少。我国草地生态系统面积广阔，占中国国土面积 1/3，主要分布在西北干旱、半干旱气候区以及青藏高原高寒气候区，这些区域位于全球变化敏感地带，因此研究我国草地覆盖变化动态以及对气候变化的响应将有助于认识全球变化对陆地生态系统的影响机制。基于以上本文利用 1982-2006 年 GIMMS NDVI 和 2001-2010 年 MODIS NDVI 获取中国草地覆盖度，分析我国草地覆盖度时空变化趋势，同时结合研究区气温、降水数据，分析不同草地类型覆盖度与气候因子在年际和月际尺度上的相关性，旨在探讨不同时空尺度下气候变化对植被生长的影响机制和关键气候因子，以其为未来气候变化情境下草地生态系统动态变化研究以及草地资源保护提供重要理论依据。

2 数据与方法

2.1 数据来源与预处理

2.1.1 GIMMS NDVI 数据与处理 采用美国国家航天航空局 (NASA) 全球监测与模型研究组 (GIMMS) 提供的 GIMMS NDVI 半月最大合成数据作为数据源，时间序列为 1982-2006 年，空间分辨率 8 km×8 km，该数据集是目前最长时间序列的 NDVI 数据，数据集制备过程中已经过辐射校正和几何粗校正、图像几何精校正、除坏线、除云等处理，保证了数据的质量，与其他 NDVI 数据相比，其误差小、精度较高，已广泛应用于全球及区域大尺度植被变化的研究中。最大值合成法 (MVC) 能消除一部分云、大气、太阳高度角的部分干扰，本文采用最大值合成获取每月的 NDVI 数据。

2.1.2 MODIS NDVI 数据 采用 NASA 的 EOS/MODIS NDVI 数据中的 MOD13A2 级数据产品，时间序列为 2001-2010 年，时间分辨率为 16 d，空间分辨率为 1 km×1 km。应用 MODIS Reprojection Tools (MRT) 软件对下载的数据进行数据格式转换、数据拼接与裁剪。虽然两种数据集的 NDVI 数据都经过了几何纠正、辐射校正、大气校正等预处理，且都已经采用了最大值合成法以减少云、大气、太阳高度角等的影响，但卫星的几何视场角和大气中霾、云以及数据合成过程仍然会对 NDVI 数据有影响，为了降低这种影响，本文采用三点平滑方法对 2 种 NDVI 数据进行修正^[29]。在 ArcGIS9.3 软件下对 2 种 NDVI 影像进行了投影转换，统一采用 WGS_1984 地理坐标系统，Albers Equal-Area Conic 投影，并且重采样为 1 km 分辨率影像。

2.1.3 GIMMS NDVI 和 MODIS NDVI 数据一致性检验 由于两种 NDVI 数据采用了不同的传感器,因此需对两种数据的一致性进行检验,分别对 GIMMS 和 MODIS NDVI 数据的 2004, 2005 和 2006 年的 NDVI 进行相关分析,求得其相关系数分别为 0.90, 0.91, 0.89, 均通过了 0.001 置信度检验。基于此,采用线性回归对 2005 年的两种数据进行线性拟合,即以 2005 年 MODIS 最大 NDVI ($NDVI_M$) 为自变量, GIMMS 2005 年最大 NDVI ($NDVI_G$) 为因变量,获取二者回归方程(图 1): $NDVI_G = 0.7629NDVI_M + 0.0454$ (样本数为 117422, $R^2 = 0.8084$, $RMSE = 0.08$),然后利用二者的线性回归方程对 2007-2010 年的 GIMMS 数据进行插补。在利用 MODIS NDVI 对 GIMMS NDVI 数据进行插补时,首先将 MODIS NDVI 的 23 期影像利用最大值合成方法获取每月的 NDVI 值(对于只有 1 期影像的月份,如 2008 年 11 月,2007、2009 和 2010 年 10 月,就用 1 期影像代表本月的 NDVI 值),然后利用每月 NDVI 代入回归方程进行数据插补。

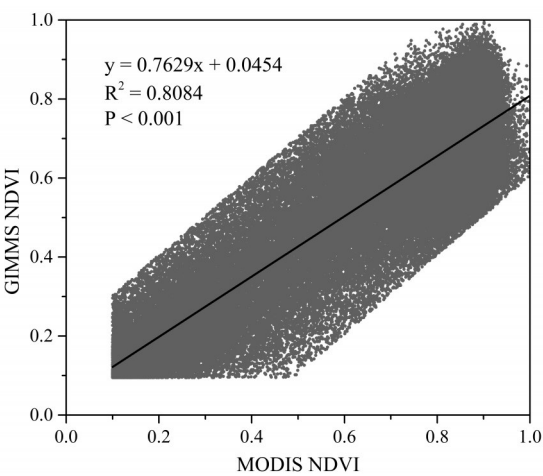


图 1 MODIS NDVI与GIMMS NDVI数据间的回归分析

Fig. 1 The regression analysis between MODIS NDVI and GIMMS NDVI

2.1.4 气象数据 采用中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn>) 提供的 1982-2010 年全国 722 个标准气象站点的月平均温度和月降水量资料。根据各气象站点的经纬度和高程信息,采用 ArcGIS9.3 的 Geostatistical Analyst 模块对气象数据进行空间 Kriging 插值,获取与 NDVI 数据像元大小一致、投影系统相同的气象数据栅格影像。同时对插值的气温和降水量数据进行精度验证(表 1),统计结果表明 Kriging 插值得到的月平均气温和降水量数据与观测站点气温和降水量数据具有显著相关性,气象数据插值精度可靠。

2.1.5 植被类型数据 采用 Global Land Cover 2000 数据集中国区域子集,分辨率为 1 km;与其他类型土地分类数据(IGBP 土地分类数据、MODIS 全球土地分类数据)相比, GLC2000 土地覆盖分类数据的总体分类精度最高,并且草地分类精度达到 66.95%^[30],该分类与中国 2000 年 1:10 万的土地分类数据在面积上一致性也最高^[30]。在该分类系统中,中国草地被划分为 6 类,包括高山亚高山草甸、坡面草地、平原草地、荒漠草地、草甸、高山亚高山草地(图 2);根据该分类数据中国草地面积为 335 万 km^2 , 占中国陆地面积的 35%。

2.2 草地覆盖度的计算及精度验证

2.2.1 草地覆盖度的遥感计算 植被覆盖度和 NDVI 之间存在极显著的线性相关关系,通常通过建

表 1 气象数据插值误差分析以 2001 年气象数据为例

Tab. 1 Error analysis for the interpolated meteorological data, using the year 2001 as an example

月份	气温 (n = 722)			降水 (n = 722)		
	Mean error	RMSE	R ²	Mean error	RMSE	R ²
Jan	0.006	0.958	0.958	0.289	0.987	0.809
Feb	-0.073	0.985	0.935	0.351	1.425	0.815
Mar	-0.115	0.937	0.859	0.509	0.958	0.931
Apr	-0.136	0.883	0.821	3.149	1.491	0.799
May	-0.124	0.925	0.842	0.438	1.677	0.839
Jun	-0.108	0.960	0.869	1.758	0.975	0.877
Jul	-0.113	0.883	0.894	-10.026	1.709	0.841
Aug	-0.095	0.908	0.886	-7.659	1.506	0.792
Sep	-0.098	0.976	0.893	-4.742	0.997	0.828
Oct	-0.085	0.950	0.897	2.768	1.302	0.817
Nov	0.028	0.875	0.927	0.481	1.146	0.784
Dec	0.008	0.887	0.953	-0.447	1.030	0.803

立二者之间的转换关系，直接提取植被覆盖度信息^[31]。采用像元二分模型估算植被覆盖度，假设每个像元的NDVI值可以由植被和土壤两部分合成，则其公式如下：

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

式中： $NDVI_v$ 为植被覆盖部分的NDVI值， $NDVI_s$ 为土壤部分的NDVI值， C_i 为植被覆盖度。在实际计算过程中，分别用年内植被NDVI最大值和最小值代替 $NDVI_v$ 和 $NDVI_s$ ，则植被覆盖度公式如下：

$$C_i = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (2)$$

式中， $NDVI_{max}$ 和 $NDVI_{min}$ 分别为年内草地植被NDVI最大值和最小值。

2.2.2 草地覆盖度的精度验证 基于遥感NDVI计算草地覆盖度，能在长时间序列上反应草地植被覆盖度年际变化。为了验证模型精度，2009年7-8月在草地覆盖度最高的季节，在研究区进行草地盖度调查，共设置样地90个，在每个样地（10 m×10 m）内选择地形平坦，草地均匀分布的样方（1 m×1 m）共5个。在每个样方内进行植被覆盖度调查，5个样方的平均值作为样地草地覆盖度值。遥感模拟草地覆盖度与地表实测草地覆盖度的相关性分析如图3，从图中明显看出，草地覆盖度模拟值和实测值间存在显著的相关性（ $R^2 = 0.9872$ ， $P < 0.001$ ），表明基于遥感植被指数模拟得到的草地覆盖度具有很高的模拟精度和可靠性。

2.3 草地覆盖度年际变化趋势的计算

一元线性回归分析可以在每个像元的基础上，模拟1982-2010年间各年份年最大植被覆盖度的变化趋势，计算公式为：

$$\theta_{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times C_i - (\sum_{i=1}^n i)(\sum_{i=1}^n C_i)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (3)$$

式中： θ_{slope} 为趋势斜率， n 为监测时间段的年数（ $n = 29$ ）， C_i 为第 i 年的年最大植被覆盖度。利用植被覆盖度序列和时间序列（年份）的相关关系来判断覆盖度年际间变化的显著性，斜率为负表示植被覆盖度下降，反之则表示植被覆盖度上升。变化趋势的显著性检验采F检验，显著性仅代表趋势性变化可置信程度的高低，与变化快慢无关。统计量计算公式为：

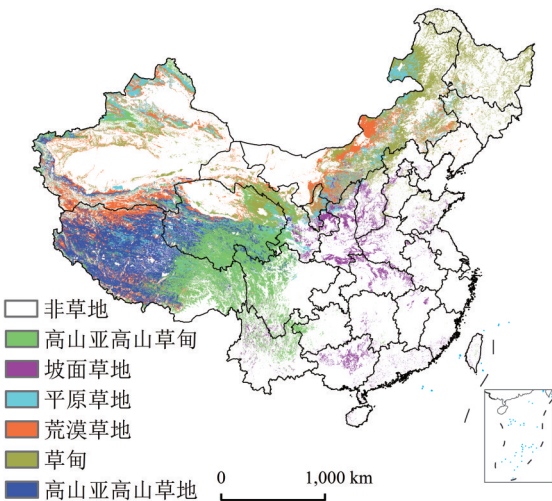


图2 研究区位置及草地分布图

Fig. 2 Location of the study area and grassland distribution

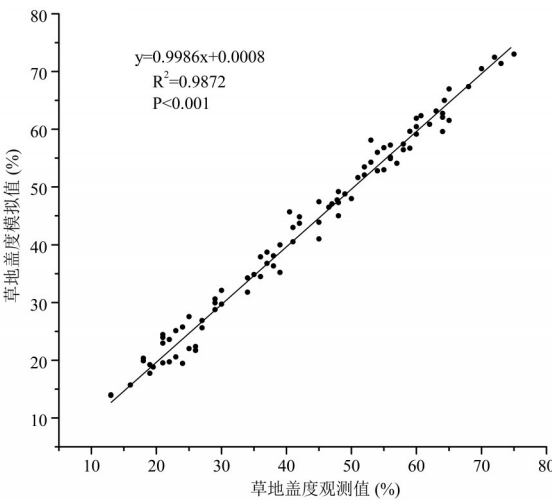


图3 草地覆盖度的遥感模拟值和实测值的相关性分析

Fig. 3 The correlation coefficient between the estimated grass coverage and observed value

$$F = U \times \frac{n-2}{Q} \quad (4)$$

式中： $U = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ 为回归平方和， $Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$ 为剩余平方和， y_i 是第 i 年覆盖度值， \hat{y}_i 为其回归值， \bar{y} 为 29 年覆盖度平均值， $n = 29$ 为年数。根据 F 检验结果将草地覆盖度变化趋势分为以下 6 个变化等级：极显著减少 ($\theta_{slope} < 0$, $P < 0.001$)，显著减少 ($\theta_{slope} < 0$, $P < 0.05$)，不显著减少 ($\theta_{slope} < 0$, $P > 0.05$)；不显著增加 ($\theta_{slope} > 0$, $P > 0.05$)；显著增加 ($\theta_{slope} > 0$, $P < 0.05$)，极显著增加 ($\theta_{slope} > 0$, $P < 0.001$)。

2.4 草地覆盖度与气候因子相关性的计算

本研究采用基于像元的空间分析法分析植被覆盖度与各气候因子的相关性，植被覆盖度与温度或降水量的相关系数计算公式如下：

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中： R_{xy} 为 x 、 y 两变量的相关系数， x_i 为第 i 年/月的植被覆盖度， y_i 为第 i 年/月的温度或降水量， \bar{x} 为多年/年内各月植被覆盖度的平均值， \bar{y} 为多年/年内各月温度或降水量的平均值， i 为样本数。

本文分别基于年尺度和月尺度计算草地覆盖度与气温、降水量的相关系数，其中年尺度上包括 29 年样本数据，月尺度上包括 12 个月的样本数据；其中在年尺度上分析年际间草地覆盖度与气候因子的相关系数时，年草地盖度为年内 12 个月覆盖度经过最大值合成 (MVC) 得到的年内最大草地覆盖度，温度为年平均温度，降水量为年总降水量。以月为时间尺度分析月草地覆盖度与气候因子相关系数时，以 29 年草地覆盖度和气候因子不同月份的多年平均值计算相关系数；此外，为了研究草地生长对气候因子的滞后效应，分别计算草地覆盖度与前一个月，前两个月，前三个月气温、降水量的相关系数。

3 结果与分析

3.1 1982-2010 年中国草地覆盖度的空间分布

1982-2010 年草地覆盖度年平均值的空间分布可以看出 (图 4a)，中国草地覆盖度总体上呈现东南高西北低的特征。29 年间平均草地覆盖度为 34%，其中坡面草地覆盖度最高，荒漠草地覆盖度最低 (图 4b)。

坡面草地分布区在 29 年间平均草地覆盖度为 61.4%，主要分布于秦岭山区、广西省北部和云南省南部地区，降水量丰富植被茂密，草地覆盖度介于 60%~80%。

草甸植被覆盖度平均为 41.5%，主要包括温带半湿润气候区的内蒙古东北部地区，黑龙江和吉林省西部，以及祁连山地区，草地覆盖度介于 40%~60%。

高山亚高山草甸，其草地覆盖度在 29 年间平均值为 40.1%，位于青藏高南部以及祁连山地区，天山南坡和阿尔泰山地区，并且各分布区草地覆盖度从东南往西北呈现递减趋势，草地覆盖度介于 30%~60%。

平原草地主要分布于呼伦贝尔地区，内蒙古中部以及宁夏南部地区，其草地覆盖度 29 年间平均值为 29.8%；草地覆盖度范围为 20%~40%。

高山亚高山草地 29 年间平均覆盖度为 17.5%，主要分布于西藏西部和青海省西部，草地覆盖度变化范围为 10%~30%

荒漠草地，29 年间平均覆盖度为 17.1%，主要分布于内蒙古中西部以及昆仑山地区，

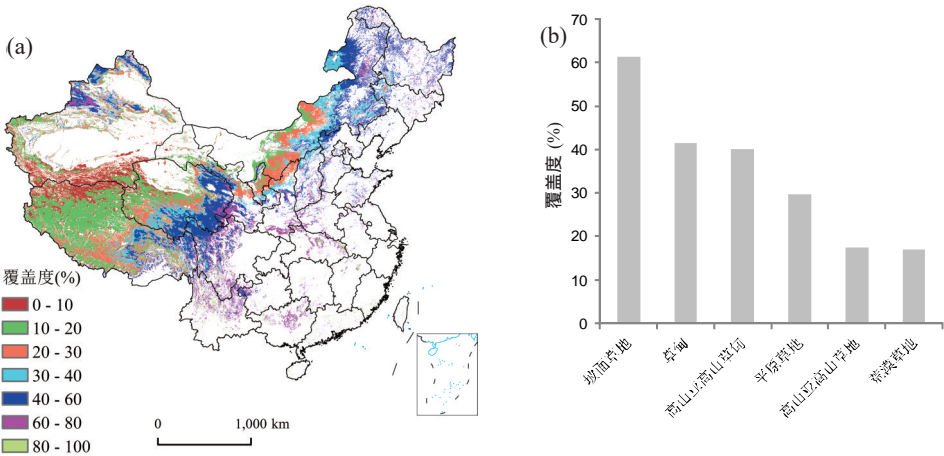


图 4 1982-2010 年中国草地覆盖度的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of grassland coverage in China from 1982 to 2010

覆盖度低于 20%。

3.2 1982-2010 年中国草地覆盖度的时间动态分析

1982-2010 年间中国草地覆盖度总体上呈现上升趋势，平均为 0.17%/年 (图 5a)。坡面草地覆盖度增加趋势最明显，平均为 0.27%/年；高山亚高山草甸次之，平均为 0.174%/年，高山亚高山草地为 0.17%/年；荒漠草地仅为 0.12%/年，平原草地和草甸增加趋势较小，平均值分别为 0.11%/年和 0.10%/年 (图 5a)。草地覆盖度变化速率的显著性检验表明 (图 5b，表 2)，整个研究区草地覆盖度增加趋势的面积比例为 78.86% (呈极显著增加，显著增加和不显著增加的面积分别占总面积的 46.03%，11%和 21.83%)，明显大于草地覆盖度极显著减少，显著减少和不显著减少的面积 (4.1%，3.24%和 13.8%)。其中坡面草地覆盖度呈极显著增加趋势的面积最大(58.36%)，高山亚高山草地次之 (57.46%)，并且所有草地类型植被覆盖度呈增加趋势的面积均大于呈减少趋势的面积，高山亚高山草地 (91.2% vs 8.8%)，坡面草地 (88.44% vs 11.56%)，荒漠草地 (84.04% vs 15.96%)，高山亚高山草甸 (76.58% vs 23.42%)，平原草地 (73.39% vs 26.61%)，草甸 (64.65% vs 35.35%)。

从空间分布上看 (图 5c)，29 年间草地覆盖度极显著增加的区域主要分布在内蒙古毛乌素沙地地区，青藏高原北部昆仑山地区，西藏西部，新疆西部以及天山南坡；草地覆盖度呈显著增加的区域主要分布在青藏高原中部地区，河西走廊中段地区；草地覆盖度不显著增加区域主要分布在内蒙古浑善达克沙地、宁夏东北部和青藏高原中部地区。草地覆盖度呈极显著减少的区域主要分布在内蒙古呼伦贝尔沙地地区，天山和阿尔泰山地区，以及青藏高原东南部地区；草地覆盖度呈显著减少的区域主要集中在科尔沁沙地地区；草地覆盖度减少不显著地区主要分布在浑善达克沙地和呼伦贝尔草地东部地区。不同草地的覆盖度在 1982-2010 年间呈波动增加趋势 (图 5d)。

3.3 草地覆盖度年际变化与温度、降水量变化的关系

3.3.1 草地覆盖度年际变化与温度和降水量变化的相关性分析 1982-2010 年间，中国大部分地区温度呈升高趋势，降水量呈减少趋势 (图 6)。并且本文研究发现我国草地分布区 84%面积气温呈增加趋势，并且温度平均增加速率为 0.04 °C/年，56%草地分布区降水量呈减少趋势，平均减少速率为-0.39 mm/年，尤其内蒙古东部，我国东北地区，以及陕西，山西，四川和云南草地分布区降水量减少明显；而我国西北干旱区的新疆、西藏、青海省，内蒙古中西部地区，气温升高，降水量也呈增加趋势，暖湿化趋势明显。草地覆盖度与温度和降水量在年尺度上相关系数均呈不显著正相关 ($R = 0.21$ ， $P > 0.05$ ； $R =$

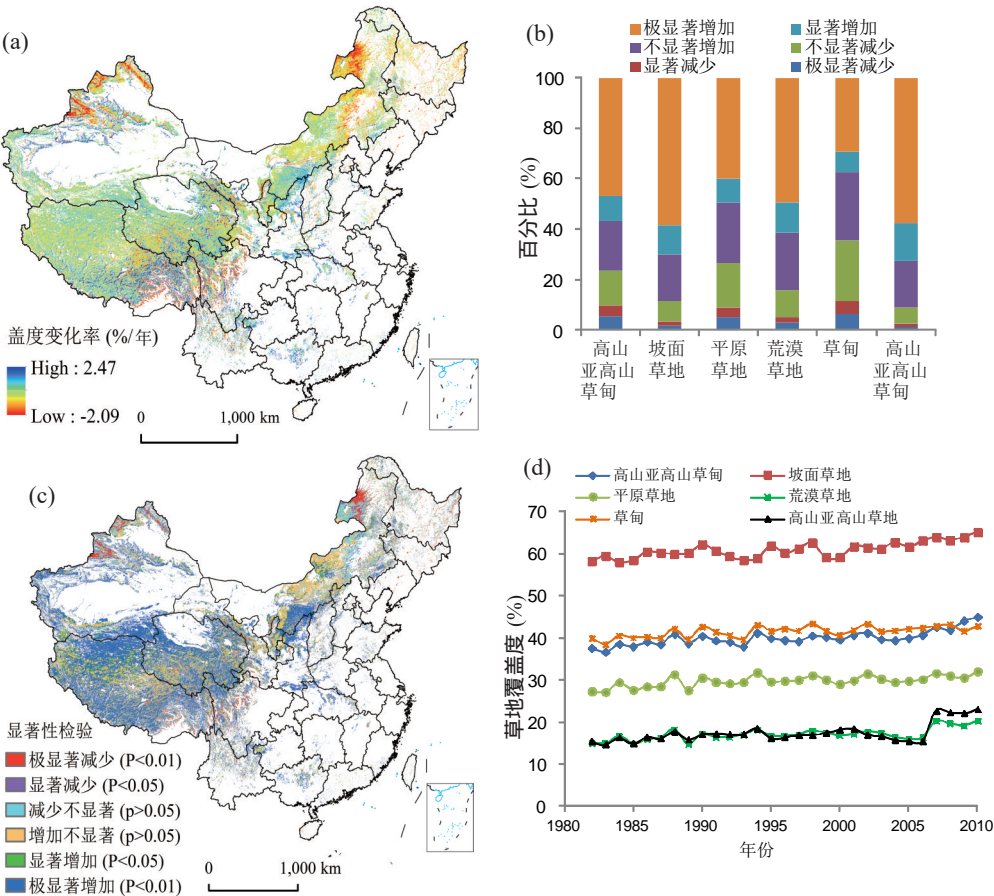


图5 1982-2010年中国草地覆盖度变化速率 (a), 草地覆盖度的显著性变化空间分布图 (b), 不同草地类型显著性水平百分比图 (c), 及草地覆盖度的逐年变化 (d)

Fig. 5 The changing trend of annual grassland coverage (a), the grade proportion of significance change of the different types of grassland coverage (b), spatial distribution of significance test in different biomes (c), and inter-annual change of grassland coverage (d) in China from 1982 to 2010

0.10, $P > 0.05$), 其中与温度呈正相关的面积占草地总面积的78.45%, 并且有13.08%和18.2%的面积通过 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 的显著性检验; 而与降水量呈正相关的面积占草地总面积的62.5%, 并且有9.2%和6.6%的面积通过 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 的显著性检验。

不同区域的草地覆盖度对温度 (图7a) 和降水量 (图7b) 的响应有明显的空间差异。其中青藏高原中西部地区, 昆仑山南侧以及天山南侧高纬度和高海拔地区, 热量是草地植被生长的主要影响因子, 相关系数高于0.35 ($P < 0.05$), 并且该区域在1982-2010年间年平均温度也呈增加趋势 (图6a)。新疆西部地区、青藏高原南部横断山地区、呼伦贝尔地区, 草地覆盖度与气温呈显著负相关 ($P < 0.05$) (图7a), 以上分布区气温较高, 干旱少雨, 尤其是横断山区, 因其位于三江并流

表2 不同草地类型植被覆盖度变化的显著性统计分析
Tab. 2 Statistical analysis of significance test of grassland coverage change of different grassland types

百分比 (%)	高山 亚高山 草甸	坡面 草地	平原 草地	荒漠 草地	草甸	高山 亚高山 草地	整体 草地
极显著减少	5.53	1.64	5.26	2.76	6.27	1.22	4.10
显著减少	4.05	1.68	3.75	2.35	5.30	1.12	3.24
不显著减少	13.84	8.23	17.61	10.85	23.78	6.47	13.80
不显著增加	19.90	18.46	23.96	22.69	27.13	18.72	21.83
显著增加	9.85	11.63	9.55	11.97	8.35	15.02	11.00
极显著增加	46.83	58.36	39.87	49.39	29.17	57.46	46.03

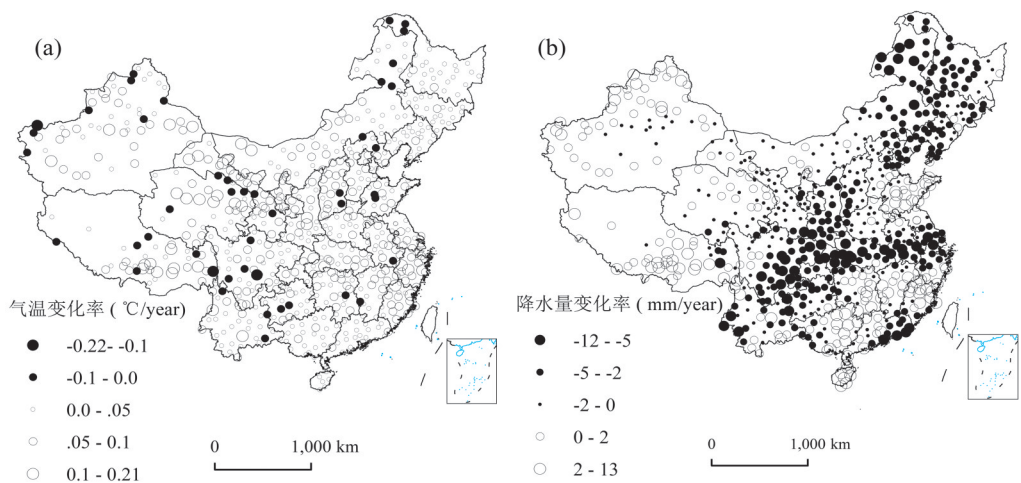


图6 中国1982-2010年均温度 (a)、降水量 (b)的变化趋势空间分布
Fig. 6 Change trend of annual mean temperature and precipitation in China from 1982 to 2010

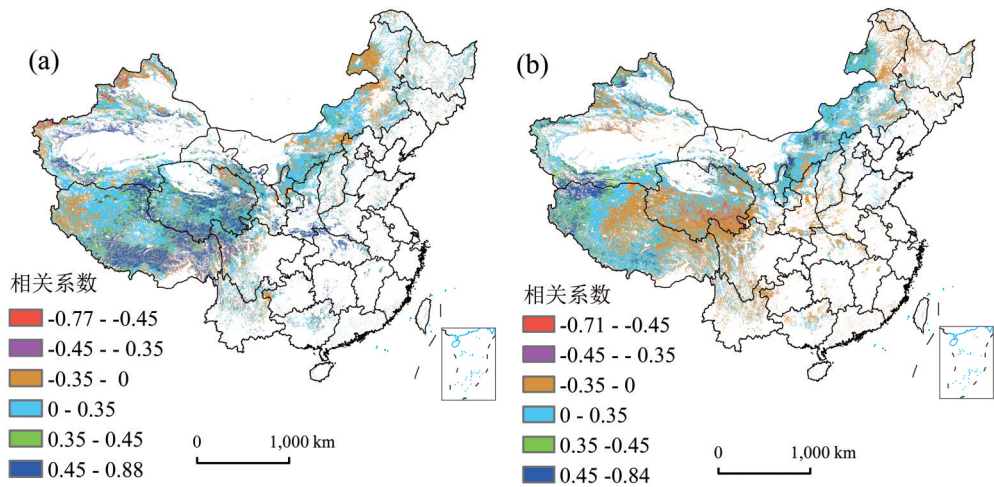


图7 1982-2010年中国草地覆盖度与温度 (a)、降水量 (b) 的相关系数空间分布

Fig. 7 The correlation between grassland coverage and temperature (a), precipitation (b) in China from 1982 to 2010

区形成的干热河谷地区，夏季降雨量稀少，因此水分条件是植被生长的主要限制因子。昆仑山地区、西藏西部地区，以及内蒙古东北部和中部地区草地覆盖度与降水量呈显著正相关 ($P < 0.05$)，该区域主要分布荒漠草地类，降雨量较少，水分条件是植被生长的限制因子，并且近29年降水量呈增加趋势 (图6b)；然而在降水量充足的地区，如三江源地区，西藏中部和南部地区，草地覆盖度与降水量呈负相关性，原因可能是：该区分布高山亚高山草甸，草地生长的水分条件较好，降水量较高，低温是该区域植被生长的限制因子；并且天山、阿尔泰山地区、东北地区草地覆盖度与降水量也呈负相关，由于降水量相对丰富并且在近29年间降水量呈增加趋势 (图6b)，热量是草地生长的主要影响因子。

3.3.2 不同草地类型覆盖度与温度、降水量变化的综合作用分析 利用中国草地分布区的220个气象站点气温与草地覆盖度的相关系数 (x轴-气温)，降水量与覆盖度的相关系数 (y轴-降水量) 绘制不同草地覆盖度对气温、降水量响应的综合作用分布图 (图8)。气温和降水对草地覆盖度变化的影响都是正向的，相关系数大于零 ($x > 0$ 且 $y > 0$) 的点主要分布在第一象限，相关系数小于零 ($x < 0$ 且 $y < 0$) 分布在第三象限的散点很少。但是不同草地类型散点的空间分布不同，高山亚高山草甸散点主要分布在一、二、四象限 (图

8a), 并且草地覆盖度与气温、降水量的相关分析统计发现, 相关系数均为正值 (0.24, 0.005), 草地植被生长受热量的影响更大。坡面草地散点主要分布在一、四象限 (图 8b), 这也体现了坡面草地分布特点, 其中分布于甘肃南部和东部地区, 以及陕西北部 and 山西地区的草地覆盖度受降水量影响较明显, 这样的点主要分布在第一象限; 而分布在秦岭山地和南岭地区的草地, 温度和降水均比较丰富, 温度和降水量的增加反不利于植被生长, 这样的点主要分布在第四象限; 并且相关系数统计发现, 草地覆盖度与气温、降水量相关系数均较低 (0.28, 0.01)。平原草地散点图主要分布在第一、二象限 (图 8c), 由于该草地主要分在降水量较少的内蒙古中部, 宁夏东部以及新疆北部地区, 草地覆盖度与气温、降水量的相关系数基本相同 (0.14, 0.16)。荒漠草地散点主要分布在第一、四象限 (图 8d), 并且草地覆盖度与降水量的相关系数大于与温度的相关系数 (0.23, 0.18), 该草地主要分布在干旱少雨的荒漠地区, 降水量是草地生长的限制因子; 并且当气温超过植株生长的最适温度时, 便会使植株内 Rubisco 的加氧反应大于其羧化反应, 最终使得植物的净光合作用下降。同时温度上升使蒸发量增大, 促进了土壤的干化, 这对于降水原本缺乏的西北荒漠地区的植被生长很不利。草甸草地的散点主要分布在第一、二、四象限 (图 8e), 也反映了该草地分布特点, 东北地区以及内蒙古东部草甸植被生长受温度影响较大, 而分布于西北干旱区的内蒙古中部, 天山南坡的草甸生长受降雨量影响较大; 总体上草甸草地覆盖度与气温的相关系数大于与降水量的相关系数 (0.15, 0.08)。高山亚高山草地散点主要分布在第一、二象限 (图 8f), 该草地主要分布在青藏高原中西部地区, 温度是草地生长的主要影响因子, 并且草地覆盖度与温度的相关系数大于与降雨量的相关系数 (0.24, 0.12)。

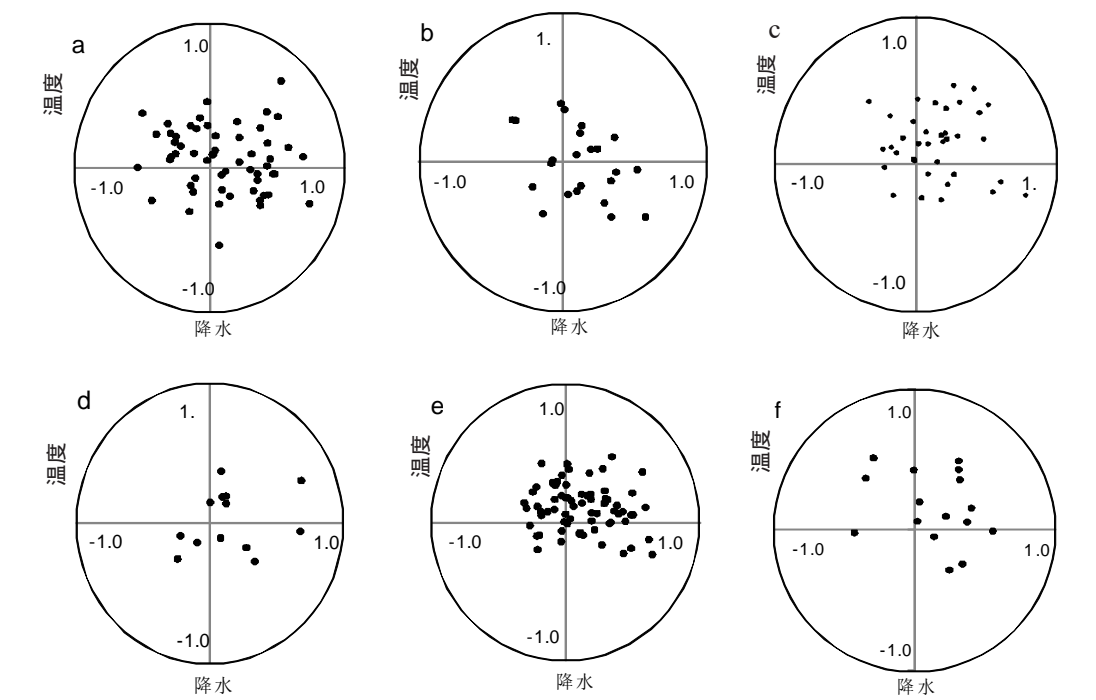


图8 不同草地类型覆盖度与温度、降水量的相关系数分布
(a-高山亚高山草甸, b-坡面草地, c-平原草地, d-荒漠草地, e-草甸, f-高山亚高山草地)

Fig. 8 Distribution of correlation coefficient of temperature, precipitation and grassland coverage of different grassland types (a denotes alpine and sub-alpine meadow, b denotes slope grassland, c denotes plain grassland, d denotes desert grassland, e denotes meadow, and f denotes alpine and sub-alpine grassland)

3.4 草地覆盖度与温度、降水量月变化特征的相关系数及滞后性分析

3.4.1 中国草地覆盖度对气候因子月变化的响应分析 以1982-2010年草地覆盖度与气温、降水量多年月平均值为基础，计算草地覆盖度与前0~3月的温度、降水量的相关系数(图9, 10)。以月为尺度的草地覆盖度与气温的相关系数高于年水平，平均为0.80(图9a)。统计表明，98%的草地覆盖度与当月气温呈正相关性，其中通过 $P < 0.05$ ， $P < 0.01$ 检验的面积比重分别为1%和96.3%，表明草地生长受年内月温度变化影响大。从图11a可明显看出，中国草地覆盖度与前1个月气温的相关性最大，与当月气温相关性次之，表现出明显滞后性。统计发现，草地覆盖度与前1~3个月的相关系数分别为0.90，0.74，0.29，并且草地盖度与前1~3个月温度呈正相关性的面积分别占总草地面积的99.5%，98.0%，85.60%，因此，草地生长受前一个月热量条件影响最大。

草地覆盖度与当月降水量的相关系数为0.76，明显高于年尺度的相关性(图10a)，97.2%的草地覆盖度与当月降雨量呈正相关性，其中通过 $P < 0.05$ ， $P < 0.01$ 检验的面积比例分别为3.6%和93.6%。草地覆盖度与前1个月降水量的相关系数最高(图11b)，统计发现，草地覆盖度与前1~3个月的相关系数分别为0.79，0.56，0.03；并且草地盖度与前1-3个月降水呈正相关性的面积比例分别为99.5%，99%，45.57%，因此，草地生长受前1月降水量的影响最大，受当月降水量的影响次之。总之，草地生长对降水量表现出明显滞

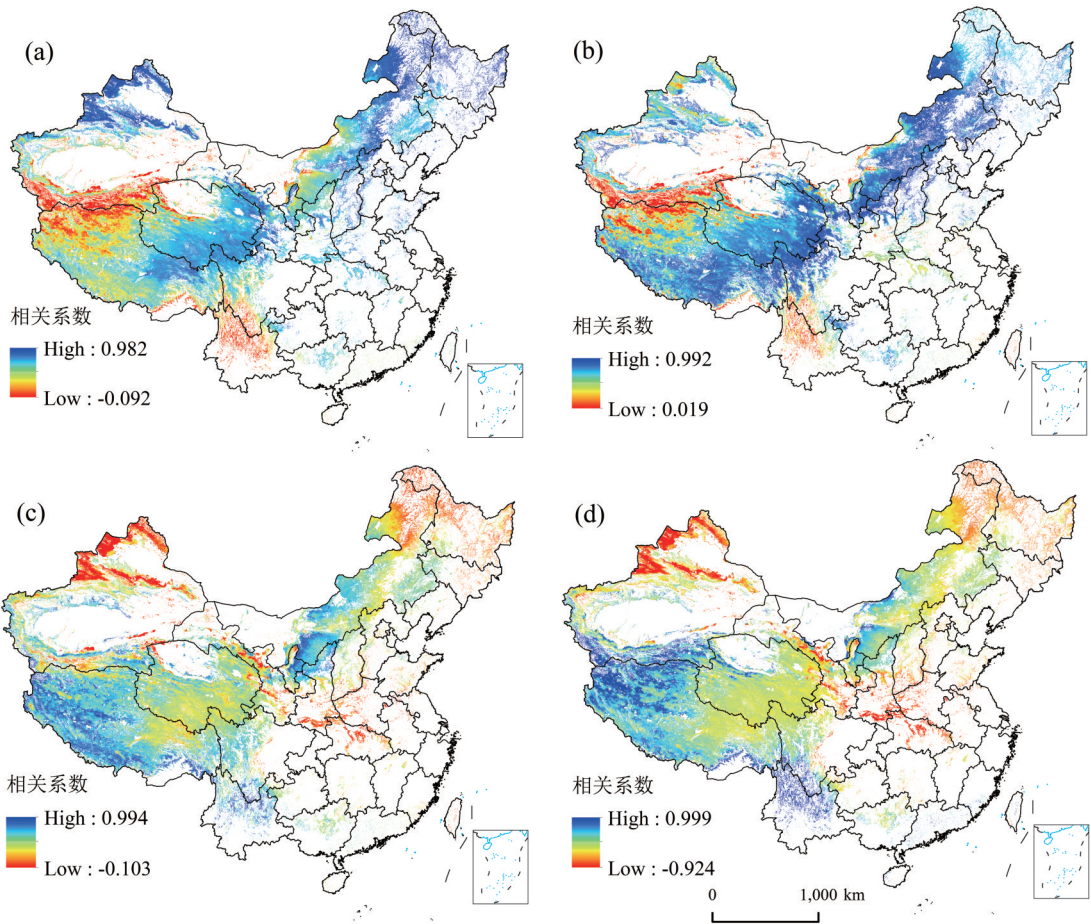


图9 月草地覆盖度与当月气温 (a) 和前一个月 (b)、前两个月 (c)、前三个月 (d) 相关系数空间分布
Fig. 9 The correlation coefficients between month grassland coverage and the current month temperature (a), the preceding month temperature (b), temperature of two preceding months (c), and temperature of three preceding months (d)

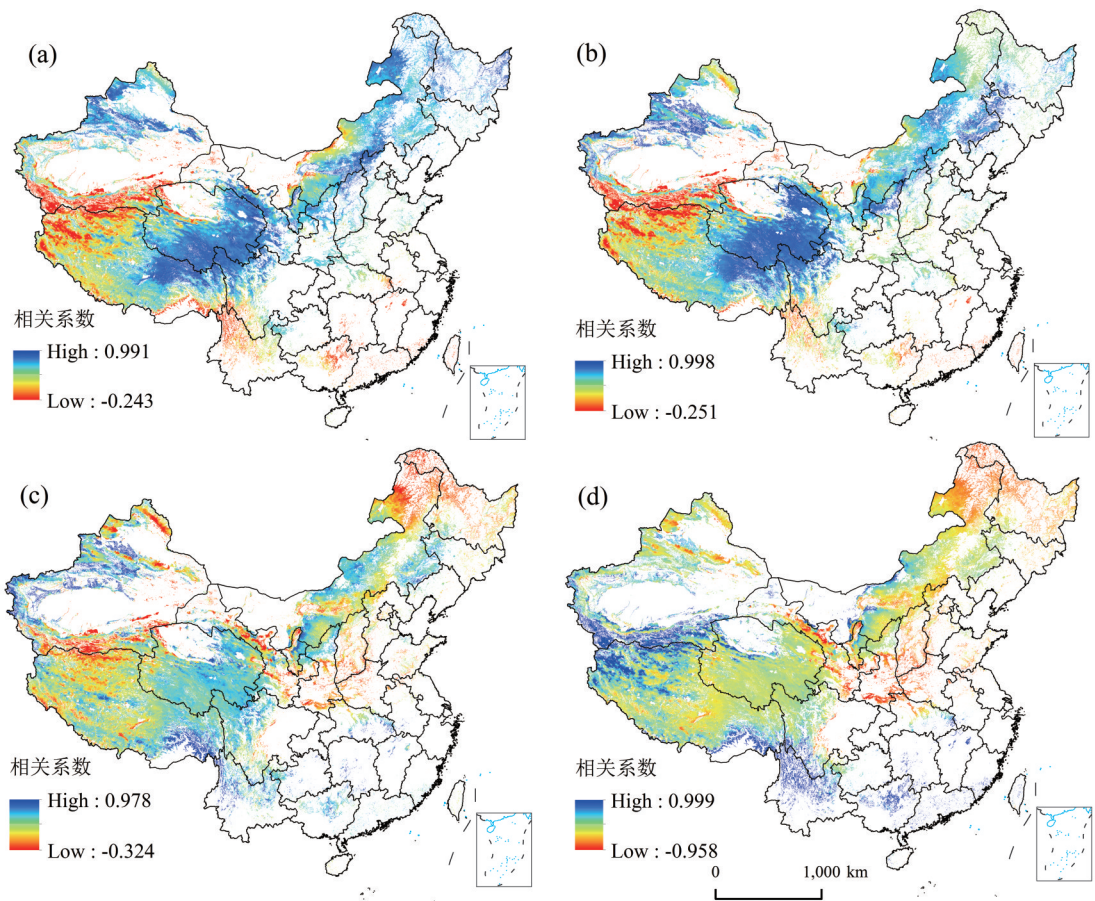


图10 月草地覆盖度与当月降水量 (a)、前一个月 (b)、前两个月 (c)、前三个月 (d) 相关系数空间分布

Fig. 10 The correlation coefficients between month grassland coverage and the current month precipitation (a), the preceding month precipitation (b), precipitation of two preceding months (c), and precipitation of three preceding months (d) 后性。

3.4.2 不同类型草地覆盖度对气候因子月变化的响应分析 不同草地类型植被覆盖度对月温度、降水量变化的响应不同，总体上草地生长与前一个温度、降水量相关系数最大(图11)。

高山亚高山草甸与前0~3月温度相关系数分别为0.82，0.92，0.75，0.28，与降水量的相关系数分别为0.81，0.85，0.61，0.06；这表明对分布在青藏高原的高山亚高山草甸，热量条件是牧草生长的主要因子，并且牧草生长受前一个月温度和降水量影响较大，表现出明显滞后性，也反映了草地生长的雨热同期特点。

坡面草地覆盖度与前0~3月温度相关系数分别为0.82，0.90，0.68，0.07，而与降水量的相关系数分别为0.71，0.74，0.53，0.04；草地生长与前一月水热因子相关性最高，具有明显的滞后性。

平原草地覆盖度与前0~3月温度相关系数分别为0.83，0.91，0.71，0.20，而与降水量的相关系数分别为0.80，0.82，0.55，0.03；草地生长对温度变化的响应大于对降水量；并且表现出明显的时滞效应。

荒漠草地覆盖度与前0~3月温度相关系数分别为0.71，0.85，0.75，0.42，而与降水量的相关系数分别为0.64，0.70，0.54，0.20；草地生长对温度变化的响应比降水量大；并且与一个月的相关性最大，具有明显时滞效应。

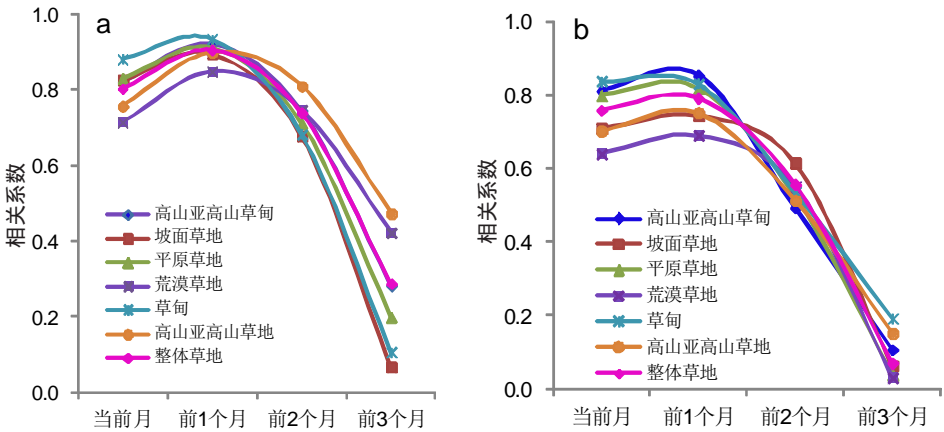


图 11 不同草地类型草地覆盖度与前 0~3 月的温度 (a) 和降雨量 (b) 的相关系数

Fig. 11 The correlation coefficients between different grassland coverages and the preceding 0-3 month temperature (a) and precipitation (b)

草甸草地覆盖度与前 0~3 月温度相关系数分别为 0.88, 0.93, 0.68, 0.11, 而与降水量的相关系数分别为 0.84, 0.84, 0.51, 0.15; 草地生长对温度变化的响应大于对降水量的响应; 具有明显的时滞效应。

高山亚高山草地覆盖度与前 0~3 月温度相关系数分别为 0.76, 0.90, 0.81, 0.47, 而与降水量的相关系数分别为 0.70, 0.75, 0.56, 0.07; 牧草生长对温度和降水量都存在明显滞后性。

4 讨论与结论

4.1 气候变化和人类活动对草地覆盖度变化的影响

气候变化是陆地植被活动年际变化的重要影响因素。近 20 年来我国大部分地区的植被活动呈现增强趋势^[13]。本文研究发现我国 84% 的草地分布区气温呈增加趋势, 平均增加速率为 0.04 °C/年, 稍低于全国 0.042 °C/年^[32]; 56% 草地分布区降水量呈减少趋势, 平均变化速率为 -0.39 mm/年, 尤其内蒙古东部, 我国东北地区, 以及陕西, 山西, 四川和云南省草地分布区降水量减少更明显; 而我国西北干旱区和青藏高原地区在 1982-2010 年间, 气温升高, 降雨量增加, 这与施雅风等^[33]提出的我国西北地区气候由暖干向暖湿转型的结论一致。我国 78.86% 草地面积, 其覆盖度呈增加趋势, 并且极显著和显著增加的区域主要分布于以上气候呈暖湿化的地区。

草原植被的多年动态与水热条件的变化有着密切的联系^[34-35]。本研究中, 年际尺度上, 草地覆盖度与温度、降水量呈不显著正相关性, 并且温度与草地覆盖度相关性较降水量大; 在月尺度上, 温度、降水量与草地覆盖度的相关性较高, 并且达到显著正相关的面积比例分别为 98% 和 97.2%。这与戴声佩等^[36]关于西北地区植被 NDVI 与气候因子关系研究结论一致: 月尺度上植被 NDVI 与气温、降水量的相关性显著, 年际尺度上相关系数较低。国内学者关于草地生长与气候因子研究表明, 牧草生长与降水量呈显著的相关性^[14, 27, 37-38], 而本文结论表明草地覆盖度在年际尺度上与气温和降水量的相关性不显著, 并且牧草生长受温度影响较降水量明显。然而, 植被覆盖变化不但受气候因子的影响, 而且与人类活动也有着密切的关系, 尤其是在人类活动影响日益剧烈的今天, 植被覆盖变化深刻地记录了人类活动的烙印。并且近年来随着中国生态恢复工程的实施, 如 1999 年和 2003 年开始实施的退耕还林还草和退牧还草工程, 对我国草地植被恢复和牧草生长具有重要的促

进作用,一定程度上也降低了牧草生长对气候因子的敏感性,从而使二者的相关性降低。张保庆等^[39]对1982-2009年间黄土高原植被覆盖的时空变化研究有类似结论:在1982-1998年间研究区NDVI年均值与气温和降水表现出良好的相关性,而在1999-2009年,大规模生态措施的实施促进了植被恢复,黄土高原NDVI年均值显著增加,同时使植被覆盖度对气候变化的敏感度降低。穆少杰等^[28]研究也发现2001-2010年内蒙古植被覆盖度在年际尺度上与气候因子呈弱相关性。因此,植被覆盖变化是气候变化和人类活动共同作用的结果^[5],在某种程度上,气候变化对植被覆盖变化起主导作用,而人类活动对植被覆盖的时空变化常常具有决定性影响^[40]。如生态恢复工程重点实施区域,人类活动对草地生长和恢复作用显著,王静等^[41]发现禁牧和休牧措施的实施有利于玛曲县草地生长和恢复;塔拉腾等^[42]研究发现,阿拉善荒漠草地在禁牧4年后草地盖度升高了97%。在生态恢复措施下,科尔沁沙地地区植被盖度显著增加^[43]。总之,人类活动对我国草地覆盖的时空演变具有重要影响,因此草地覆盖度变化的人类因素的定量分析和驱动机制也需要进一步探讨。

4.2 主要结论

本文利用两种类型NDVI遥感数据(MODIS-NDVI和GIMMS-NDVI)反演了中国1982-2010年草地覆盖度,结合研究时段内温度和降水量数据,分析了6类不同草地覆盖度的年际变化动态,以及年际变化和月季变化对气候变化的响应。得出以下结论:

(1) 中国草地覆盖度呈现明显的空间异质性,总体上呈现东南高西北低的特征。中国西南部地区、青藏高原东南部地区 and 新疆北部阿尔泰山和天山山区草地覆盖度较高,而位于西北内陆干旱区的荒漠草地植被覆盖度较低。研究区29年间平均植被覆盖度为34%,其中坡面草地覆盖度最高为61.4%,荒漠草地覆盖度最低为17.1%。

(2) 1982-2010年中国草地覆盖度有78.86%面积呈现上升趋势,覆盖度变化率为0.17%/年,其中西北内陆干旱区草地覆盖度增加趋势最明显。6类草地覆盖度的增加速率为:坡面草地>高山亚高山草甸>高山亚高山草地>荒漠草地>平原草地>草甸;坡面草地覆盖度增加趋势最明显,平均值为0.27%/年,平原草地和草甸覆盖度增加最少,平均为0.11%/年和0.1%/年。总体上,中国草地覆盖度呈极显著增加,显著增加的面积分别占总面积的46.03%,11%;二者之和大于草地覆盖度极显著减少和显著减少的面积比例之和,后者分别为4.1%,3.24%。

(3) 从年际尺度上看,草地覆盖度与温度、降水量均呈不显著正相关,并且与温度的相关系数较与降水量的相关系数大,存在显著的空间异质性。不同草地覆盖度与温度、降水量变化的综合作用分析发现,温度和降水量对草地生长作用都是正向,反应了植被生长的雨热同期特点。不同草地类型对气温、降水的综合响应不同,高山亚高山草甸、高山亚高山草地、坡面草地和草甸受温度的影响大于降水量,而荒漠草地和平原草地的牧草生长与降水量关系更密切。

(4) 从月尺度上看,草地覆盖度与当月气温、降水量呈显著的正相关性,明显高于年尺度上的值,表明水热因子的季节波动对草地生长的影响更大。草地覆盖度受温度的影响较降水量大,所有类型草地植被覆盖度与前一月气温和降水量的相关系数最大,表现出明显的时滞效应。

参考文献 (References)

- [1] WaKer B, Steffen W. IGBP Science No.1: A Synthesis of GCTE and Related Research. Stockholm: IGBP, 1997: 1-24.
- [2] Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 2003, 421(6918): 37-42.
- [3] Xin Z B, Xu J X, Zheng W. Spatiotemporal variations of vegetation cover on the Chinese Loess Plateau (1981-2006): Impacts of climate changes and human activities. *Science in China series D: Earth sciences*, 2008, 51(1): 67-78.
- [4] Roerink G J, Menenti M, Soepboer W et al. Assessment of climate impact on vegetation dynamics by using remote

- sensing. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 2003, 28(1): 103-109.
- [5] Xin Zhongbao, Xu Jiongxin, Zheng Wei. Spatiotemporal variations of vegetation cover on the Chinese Loess Plateau (1981-2006): Impacts of climate changes and human activities. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 37(11): 1504-1514. [信忠保, 许炯心, 郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响. *中国科学: D 辑*, 2007, 37(11): 1504-1514.]
- [6] Gan Chunying, Wang Xizhi, Li Baosheng et al. Changes of vegetation coverage during recent 18 years in Lianjiang river watershed. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(8): 1019-1024. [甘春英, 王兮之, 李保生 等. 连江流域近 18 年来植被覆盖度变化分析. *地理科学*, 2011, 31(8): 1019-1024.]
- [7] Keeling C D, Chin J, Whorf T P. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements. *Nature*, 1996, 382(6587): 146-149.
- [8] Weltzin J F, Loik M E, Schwinning S et al. Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. *Bioscience*, 2003, 53(10): 941-952.
- [9] Hall F G, Huemmrich K F, Goetz S J et al. Satellite remote sensing of surface energy balance: Success, failures, and unresolved issues in FIFE. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 1992, 97(D17): 19061-19089.
- [10] Li Z T, Kafatos M. Interannual variability of vegetation in the United States and its relation to El Nino/Southern Oscillation. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 71(3): 239-247.
- [11] Zhou L M, Tucker C J, Kaufmann R K et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012) 2001, 106(D17): 20069-20083.
- [12] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 1997, 386(6626): 698-702.
- [13] Fang Jingyun, Piao Shilong, He Jinsheng et al. Vegetation of China invigorated in last 20 years. *Science in China: Series C*, 2003, 33(6): 554-565. [方精云, 朴世龙, 贺金生 等. 近 20 年来中国植被活动在增强. *中国科学 C 辑*, 2003, 33(6): 554-565.]
- [14] Li Xia, Li Xiaobing, Wang Hong et al. Impact of climate change on temperate grassland in northern China. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2006, 42(6): 618-623. [李霞, 李晓兵, 王宏 等. 气候变化对中国北方温带草原植被的影响. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2006, 42(6): 618-623.]
- [15] Piao Shilong, Fang Jingyun. Dynamic vegetation cover change over the last 18 years in China. *Quaternary Research*, 2001, 21(4): 294-302. [朴世龙, 方精云. 最近 18 年来中国植被覆盖的动态变化. *第四纪研究*, 2001, 21(4): 294-302.]
- [16] Zhang J, Zhang Q, Yang L H et al. Seasonal characters of regional vegetation activity in response to climate change in West China in recent 20 years. *Journal of Geographical Sciences*, 2006, 16(1): 78-86.
- [17] Zhao Maosheng, Fu Congbin, Yan Xiaodong et al. Study on the relationship between different ecosystems and climate in China using NOAA/AVHRR data. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(3): 287-296. [赵茂盛, 符琰斌, 延晓冬 等. 应用遥感数据研究中国植被生态系统与气候的关系. *地理学报*, 2001, 56(3): 287-296.]
- [18] Sun Yanling, Guo Peng, Yan Xiaodong et al. Dynamics of vegetation cover and its relationship with climate change and human activities in Inner Mongolia. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(3): 407-414. [孙艳玲, 郭鹏, 延晓冬 等. 内蒙古植被覆盖变化及其与气候、人类活动的关系. *自然资源学报*, 2010, 25(3): 407-414.]
- [19] Sun J, Cheng G W, Li W P et al. On the variation of NDVI with the principal climatic elements in the Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 2013, 5(4): 1894-1911.
- [20] Wu Ruifen, Huo Zhiguo, Cao Yanfang et al. Phenophase change of typical herbaceous plants in Inner Mongolia in spring and its response to climate warming. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(8): 1470-1475. [吴瑞芬, 霍治国, 曹艳芳 等. 内蒙古典型草本植物春季物候变化及其对气候变暖的响应. *生态学杂志*, 2009, 28(8): 1470-1475.]
- [21] Luo Ling, Wang Zongming, Song Kaishan et al. Research on the correlation between NDVI and climatic factors of different vegetations in the Northeast China. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, (4): 800-808. [罗玲, 王宗明, 宋开山 等. 1982-2003 年中国东北地区不同类型植被 NDVI 与气候因子的关系研究. *西北植物学报*, 2009, (4): 800-808.]
- [22] Sun Hongyu, Wang Changyao, Niu Zheng et al. Analysis of the vegetation cover change and the relationship between NDVI and environmental factors by using NOAA times series data. *Journal of Remote Sensing*, 1998, 2(3): 204-210. [孙红雨, 王长耀, 牛铮 等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系. *遥感学报*, 1998, 2(3): 204-210.]
- [23] Cui Linli, Shi Jun, Yang Yinming et al. Ten-day response of vegetation NDVI to the variations of temperature and precipitation in eastern China. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(7): 850-860. [崔林丽, 史军, 杨引明 等. 中国东部植被 NDVI 对气温和降水的旬响应特征. *地理学报*, 2009, 64(7): 850-860.]
- [24] Tang Haiping, Chen Yufu. Inter-annual variability of NDVI and its relation to climate in Northeast China transect. *Quaternary Research*, 2003, 23(3): 318-325. [唐海萍, 陈玉福. 中国东北样带 NDVI 的季节变化及其与气候因子的关

系. 第四纪研究, 2003, 23(3): 318-325.]

- [25] Li Xiaobing, Shi Peijun. Sensitivity analysis of variation in NDVI, temperature and precipitation in typical vegetation types across China. *Acta phytocologica Sinica*, 2000, 24(3): 379-382. [李晓兵, 史培军. 中国典型植被类型 NDVI 动态变化与气温、降水变化的敏感性分析. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 379-382.]
- [26] Ren Jizhou, Liang Tiangan, Lin Huilong et al. Study on grassland's response to global climate change and its carbon sequestration potentials. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(2): 1-22. [任继周, 梁天刚, 林慧龙 等. 草地对全球气候变化的响应及其碳汇潜势研究. *草业学报*, 2011, 20(2): 1-22.]
- [27] Zhang Geli, Xu Xingliang, Zhou Caiping et al. Responses of vegetation changes to climatic variations in Hulun Buir grassland in past 30 years. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 47-58. [张戈丽, 徐兴良, 周才平 等. 近 30 年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应. *地理学报*, 2011, 66(1): 47-58.]
- [28] Mu S J, Yang H F, Li J L et al. Spatio-temporal dynamics of vegetation coverage and its relationship with climate factors in Inner Mongolia, China. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(2): 231-246.
- [29] Chen X Q, Tan Z J, Schwartz M D et al. Determining the growing season of land vegetation on the basis of plant phenology and satellite data in northern China. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 44(2): 97-101.
- [30] Ran Y H, Li X, Lu L. Evaluation of four remote sensing based land cover products over China. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(2): 391-401.
- [31] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(8): 1533-1543.
- [32] Piao S L, Fang J Y, Ji W et al. Variation in a satellite-based vegetation index in relation to climate in China. *Journal of Vegetation Science*, 2004, 15(2): 219-226.
- [33] Shi Y F, Shen Y P, Kang E et al. Recent and future climate change in northwest China. *Climatic Change*, 2007, 80(3-4): 379-393.
- [34] Zhang Jun, Ge Jianping, Guo Qingxi. The relation between the change of NDVI of the main vegetational types and the climatic factors in the northeast of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(4): 522-527. [张军, 葛剑平, 国庆喜. 中国东北地区主要植被类型 NDVI 变化与气候因子的关系. *生态学报*, 2001, 21(4): 522-527.]
- [35] Yang Yuanhe, Piao Shilong. Variations in grassland vegetation cover in relation to climatic factors on the Tibetan Plateau. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(1): 1-8. [杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系. *植物生态学报*, 2006, 30(1): 1-8.]
- [36] Dai Shengpei, Zhang Bo, Wang Haijun et al. Spatio-temporal variation characteristics of vegetation cover in Northwest China and its response to climate change. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(1): 69-76. [戴声佩, 张勃, 王海军 等. 中国西北地区植被时空演变特征及其对气候变化的响应. *遥感技术与应用*, 2010, 25(1): 69-76.]
- [37] Piao S L, Mohammad A, Fang J Y et al. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China. *Global Environmental Change*, 2006, 16(4): 340-348.
- [38] Sun J, Cheng G W, Li W P et al. On the variation of NDVI with the principal climatic elements in the Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 2013, 5(4): 1894-1911.
- [39] Zhang Baoqing, Wu Pute, Zhao Xining. Detecting and analysis of spatial and temporal variation of vegetation cover in the Loess Plateau during 1982-2009. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(4): 287-294. [张宝庆, 吴普特, 赵西宁. 近 30a 黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析. *农业工程学报*, 2011, 27(4): 287-294.]
- [40] Chen Youqi, Verburg P H, Xu Bin. Spatial modeling of land use and its effects in China. *Progress in Geography*, 2000, 19(2): 116-127. [陈佑启, Verburg P H, 徐斌. 中国土地利用变化及其影响的空间建模分析. *地理科学进展*, 2000, 19(2): 116-127.]
- [41] Wang Jing, Guo Ni, Cai Dihua et al. The effect evaluation of the program of restoring grazing to grasslands in Maqu County. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1276-1284. [王静, 郭妮, 蔡迪花 等. 玛曲县草地退牧还草工程效果评价. *生态学报*, 2009, 29(3): 1276-1284.]
- [42] Ta, Lateng, Liu Julan, Li Ji et al. Monitoring on the effect of returning grazing desert to grassland in Alashan. *Pratacultural Science*, 2008, 25(2): 124-127. [塔拉腾, 陈菊兰, 李跻 等. 阿拉善荒漠草地退牧还草效果分析. *草业科学*, 2008, 25(2): 124-127.]
- [43] Zhang G L, Dong J W, Xiao X M et al. Effectiveness of ecological restoration projects in Horqin Sandy Land, China based on SPOT-VGT NDVI data. *Ecological Engineering*, 2012, 38(1): 20-29.

Spatial-temporal dynamics of grassland coverage and its response to climate change in China during 1982–2010

ZHOU Wei¹, GANG Chengcheng¹, LI Jianlong¹,

ZHANG Chaobin¹, MU Shaojie¹, SUN Zhenguo²

(1. School of Life Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. College of Animal Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Global climate warming has led to significant vegetation changes in the past half century. Grassland in China, most of which is sensitive to climatic change and ecologically fragile region, undergoes a process of prominent warming and drying. It is necessary to investigate the response of grassland to the climatic variations (temperature and precipitation) for a better understanding of the accumulated consequence of climate change. Vegetation coverage, as an important indicator for evaluating grassland ecosystem condition, is used to monitor grassland change. GIMMS NDVI from 1982 to 2006 and MODIS NDVI from 2001 to 2010 were adopted and integrated in this study to extract the time series of grassland coverage, and to analyze its spatial pattern and changes. The response of grassland coverage to climatic variations at annual and monthly time scales was analyzed using temperature and precipitation time series at Chinese meteorological stations from 1982 to 2010. During the 29 years, the national annual surface air temperature increased with an annual rate of 0.04°C, while national precipitation decreased with an annual rate of -0.39 mm with the exception of Northwest China. Grassland coverage distribution increased from northwest to southeast across China. During 1982- 2010, the mean national grassland coverage was 34% but exhibited apparent spatial heterogeneity being highest (61.4%) in slope grasslands and lowest (17.1%) in desert areas. There was a slight increase of the grassland coverage over the study period with an annual rate of 0.17%. Regionally, the largest increase in the grassland area was observed in Northwest China and Tibetan Plateau. The increase in slope grassland areas was as high as 0.27% per year, while in the plain grassland and meadow, the grassland coverage increase was the lowest (being 0.11% per year and 0.1% per year, respectively). Across China, the grass coverage with extremely significant ($P<0.01$) and significant ($P<0.05$) area increases accounted for 46.03% and 11% of the total grassland area, respectively, while those with extremely significant and significant decrease were only 4.1% and 3.24% , respectively. At the annual time scale, there were no significant correlations between grassland coverage and annual temperature and precipitation for the total grassland area. However, the grass coverage was mainly affected by temperature in alpine and sub-alpine grassland, alpine and sub-alpine meadow, slope grassland and meadow, while grass coverage in desert grassland and plain grassland was mainly affected by precipitation. At the monthly time-scale, there are significant correlations between grass coverage with both temperature and precipitation, indicating that the grass coverage is mainly affected by seasonal fluctuations of the hydrothermal factors. Additionally, there is obvious time lag-effect between grass growth and climate factors for each grassland type: the highest correlations are observed between the grass coverage and temperature and precipitation of the preceding month.

Key words: grassland coverage; temperature; precipitation; spatial- temporal dynamics; correlation; time lag effect