

中国不同干湿区植被变化及其与气候因子的关系研究

韩云环^{1,2,3} 马柱国^{2,3} 李明星² 张安凝⁴

1 河北经贸大学数学与统计学学院, 石家庄 050061

2 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候—环境重点实验室, 北京 100029

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 河北省气象灾害防御和环境气象中心, 石家庄 050021

摘要

中国各区植被覆盖和气候特征多样, 植被覆盖变化和气候变化及植被对气候因子的响应存在明显的区域差异, 研究不同气候区植被变化及其与气候变化的关系可以为各区针对性地应对气候变化、制定植物保护和生态环境修复政策提供科学依据。本文首先基于中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 的土地覆盖数据, 根据植被带的分布确定了划分中国干湿区的指标, 其次利用归一化植被指数 (NDVI) 分析不同干湿区域 NDVI 的时空变化特征, 最后探讨了 NDVI 变化与温度、降水的关系。结果表明: (1) 中国区域 200 mm、500 mm 和 800 mm 年降水量等值线分别与荒漠/草地、草地/农田、农田 (草地)/森林植被带的分界线吻合, 气候过渡带对应着植被过渡带, 这些等值线作为划分干湿气候区的指标比较合理。(2) 中国年平均 NDVI 从东南向西北递减, 从小到大依次为干旱区 (0.11)、半干旱区 (0.35)、半湿润区 (0.57)、湿润区 (0.68)。1982~2015 年中国大部分区域 NDVI 呈显著的增加趋势, 区域平均的 NDVI 在干旱区、半干旱区分别以 0.002/10a、0.008/10a 的趋势显著增加, 在半湿润区和湿润区也呈现增加趋势, 但不显著。(3) 四个干湿区的年平均温度和 NDVI 均呈显著正相关, 仅干旱区、半干旱区年降水和 NDVI 呈显著正相关, 半湿润区和湿润区的年降水与 NDVI 呈微弱负相关。温

收稿日期 2021-12-29; **网络预出版日期**

作者简介 韩云环, 女, 1988 年出生, 博士, 讲师, 主要从事土地利用/覆盖变化和气候变化研究。

E-mail: hanyh@tea.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金 (42075171, 41275085, 41530532), 河北省教育厅科技青年项目 (QN2021055) 和河北经贸大学科学研究与发展计划项目 (2021QN03)

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 42075171, 41275085 and 41530532), Scientific and Technological Project for Young Scientists of Hebei Education Department (QN2021055) and Scientific Research and Development Program Project of Hebei University of Economics and Business (Grant 2021QN03)

度对四个干湿区 NDVI 时间变化的解释率相差不大,均在 30%左右;降水对 NDVI 时间变化的解释率低于温度,降水对干旱区 (18%) 和半干旱区 (20%) NDVI 时间变化的解释率较大,降水主要影响着北方地区植被的生长。(4)月平均 NDVI 随着温度和降水的增加都有显著的增加趋势,半湿润区的 NDVI 随温度升高增长的速率 (0.026/℃) 最快,半干旱区的 NDVI 对降水最敏感,随降水增多增加的速率为 0.027/mm。

关键词: 中国区域 干湿区 植被变化 NDVI 气候因子

文章编号 中国分类号 Q948

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2110.21258

Study on the vegetation changes and its relationship with climate

factors in different dry/wet areas over China

HAN Yunhuan^{1, 2, 3}, MA Zhuguo^{2, 3}, LI Mingxing², and ZHANG Anningzhi⁴

1 College of Mathematics and Statistics, Hebei University of Economics and Business,
Shijiazhuang 050061

2 Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

4 Hebei Provincial Meteorological Disaster Prevention and Environmental
Meteorology Center, Shijiazhuang 050021

Abstract

There are diverse vegetation covers and climate characteristics in various regions of China. And there are obvious regional differences in vegetation cover change, climate change and response of vegetation to climate factors. The study of vegetation changes and its relationship with climate change in different climate regions can provide a scientific basis for responding to climate change and formulating plant protection and ecological environment restoration policies in various regions. Firstly, based on the land cover data of MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer

(MODIS), the indexes for dividing dry and wet areas in China were determined according to the distribution of vegetation zones. Secondly, the temporal and spatial variation characteristics of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in different dry and wet areas were analyzed by using vegetation index NDVI. Finally, the relationship between NDVI and temperature/precipitation was discussed. The results showed that: (1) 200 mm, 500 mm, and 800 mm annual precipitation contours in China are consistent with the boundaries of the vegetation zones of barren land and grassland, grassland and cropland, and grassland/cropland and forest, respectively. The climate transition zones correspond to the vegetation transition zones. These lines are reasonable indexes of dry/wet climate zoning. (2) Annual averaged Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in China decreases from Southeast to Northwest, from small to large followed by the arid area (0.11), semi-arid area (0.35), semi humid area (0.57) and humid area (0.68). The NDVI increases significantly in most regions of China during 1982-2015. Regional averaged NDVI increases significantly in arid area and semi-arid area with a trend of 0.002/10a and 0.008/10a, respectively, and it also increases in semi-humid area and humid area, but not significantly. (3) There are significant positive correlations between annual averaged temperature and NDVI in the four dry and wet areas. The annual precipitation are significantly correlate to NDVI only in arid and semi-arid areas, and there are weak negative correlations between annual precipitation and NDVI in semi-humid and humid areas. The temperature explains about 30% of the temporal changes of NDVI in the four dry and wet areas. The explanation ratios of precipitation to the temporal changes of NDVI

are lower than those of temperature. Precipitation explains greatly to the temporal changes of NDVI in arid areas (18%) and semi-arid areas (20%), and precipitation mainly affects the growth of vegetation in the northern China. (4) The monthly average NDVI has a significant increasing trend with the increase of temperature and precipitation. The increasing rate ($0.026/^{\circ}\text{C}$) of NDVI in semi-humid area is the fastest with the increase of temperature. The NDVI in semi-arid area is the most sensitive to precipitation, and the increasing rate with the increase of precipitation is $0.027/\text{mm}$.

Keywords: China, Dry/Wet Areas, Vegetation Changes, NDVI, Climate Factors

1 引言

植被是陆地生态系统的重要组成部分 (Wu et al., 2018), 其在全球及区域的物质循环和能量流动中扮演着重要的角色 (郑有飞等, 2009), 影响着气候变化; 而气候对植被的生长类型、分布和物候有重要的影响 (Nemani et al., 2003), 植被是气候变化的“指示器”, 对监测环境变化起到重要的指示作用 (Lawley et al., 2016)。因此, 植被与气候的关系是全球变化研究的重要内容。在气候变化背景下, 研究植被变化及其与气候要素之间的响应特征, 可以为应对气候变化、保护生态环境和实现区域可持续发展提供科学依据。

归一化植被指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 对植被的生物物理特征很敏感, 是植物生长状态及植被空间分布密度的最佳指示因子之一 (Pettorelli et al., 2005), 与植物覆盖分布密度呈线性相关 (孙红雨等, 1998), 其作为描述植被生长状况的重要参数, 被广泛应用于植被的动态变化检测及植被对气候的响应等方面的研究中。目前已有许多学者基于遥感数据 NDVI 研究了中国不同区域如北方农牧交错带 (陈海等, 2004)、东北冻土区 (毛德华等, 2011)、三江源区 (Hu et al., 2011)、西南地区 (Hou et al., 2015)、京津冀地区 (徐勇等, 2020)、内蒙古典型草原区 (王雨晴等, 2020)、长江经济带 (刘珞丹等, 2021)、呼伦贝尔市 (李晶等, 2022) 等植被覆盖变化及其与气候因子的关系, 但很少有关于中国整个区域植被对气候变化的响应研究。虽然有一些包含了中国区域的全球尺度的

相关研究 (Seddon et al., 2016; Li et al., 2018; Linscheid et al., 2020; Zhang et al., 2021), 因全球覆盖范围较大, 对中国区域的针对性不强, 导致结果不够具体详细; 但其结果可以为本文中国区域的专门研究提供参考和对照。中国地域辽阔, 气候特征多样, 植被类型丰富, 不同气候区植被类型和气候条件差异很大, 同一气候区的植被和气候特征及其关系有相似的特点, 分气候区研究植被与气候因子的关系可以探索相同区域的规律, 对比不同区域的差异, 从而采取针对性的措施, 因地制宜, 但目前鲜有研究对中国不同气候区植被与气候因子的关系及差异进行对比分析。

关于气候区的划分众多研究提出的等级体系和划分指标各有差异, 可总结为三大类: 一为降水量与蒸散量之比, 二为降水量, 三为从降水量、土壤含水量、植物蒸腾之间的土壤平衡出发制定干湿气候指标, 其受理论和技术条件的影响, 应用受限 (陈明荣, 1974)。第一类指标因采用的变量不同和计算方法的差异产生了很多个指标, 如 Thornthwaite 湿润指数 (Thornthwaite, 1948)、慈龙骏湿润指数 (慈龙骏和吴波, 1997)、干燥度指数 (杨建平等, 2002)、干湿分类指数 (刘波和马柱国, 2007) 等。第二类指标简单, 意义明确, 根据年降水量划分干湿气候区主要有以下三种意见: 年降水量 $<200\text{mm}$ 为干旱区, $200\sim400\text{mm}$ 为半干旱区; 年降水量 $<200\text{mm}$ 为干旱区, $200\sim450\text{mm}$ 为半干旱区; 年降水量 $<250\text{mm}$ 为干旱区, $250\sim500\text{mm}$ 为半干旱区 (王延禄, 1990; 张存杰等, 2016)。气候是地表植被赖以生存的自然条件, 它决定着大范围植被的空间分布 (Stephenson and Nathan, 1990; 周广胜和张新时, 1996a, 1996b), 影响植被生长发育、地理分布、物候、多样性等 (Bachelet et al., 2001; Kelly and Goulden, 2008; Ali, 2013), 每个气候区都对应着特定的植被类型 (谢力等, 2002; 於琍等, 2010), 利用植被带的分布选择划分气候区的合理指标是一个新的思路。

基于以上问题, 本文研究内容如下: (1) 根据植被带的分布选择划分气候区的合理指标, 确定中国干湿区的界限; (2) 分析 1982~2015 年中国不同干湿区 NDVI 的时空变化特征; (3) 分析中国不同干湿区 NDVI 与气候因子 (温度、降水) 之间的关系。

2 数据和方法介绍

2.1 数据

中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 土地覆盖数据由搭载在美国国家航空航天局 (NASA) 发射的地球观测系统 (EOS) 的环境遥感卫星 Terra (AM-1) 和 Aqua (PM-1) 上的中分辨率成像光谱仪反演获取。本文所用 MODIS 土地覆盖集 (MCD12C1) 分为由 IGBP (国际地圈生物圈计划) 定义的 17 类, 其空间分辨率为 0.05° , 时间长度为 2001~2015 年。

NDVI 数据来源于 GIMMS NDVI3g V1.0 数据集, 时间分辨率为 15 天, 空间分辨率为 8 km, 采用最大值合成法处理后, 得到 1982~2015 年共 34 年的月度数据。本文选取生长季 4~10 月的数据进行分析。

温度和降水数据采用中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/data/> [2021-03-01]) 的中国地面气温 (降水) 月值 0.5° (纬度) $\times 0.5^\circ$ (经度) 格点数据集 (V2.0), 该数据是基于 2474 个国家级地面站基础气象资料, 利用薄盘样条法插值生成的格点数据。

2.2 方法

2.2.1 线性倾向估计法

为了更好地了解植被的时间变化特征, 我们使用最小二乘法计算了斜率来描述其变化趋势, 公式如式 (1) 所示。

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \times \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (1)$$

其中, x_i 表示时间序列, y_i 是变量在各时间上的数值, Slope 大于 0 表示 NDVI 呈增加趋势, Slope 小于 0 表示 NDVI 呈减小趋势。气候要素 (温度、降水) 的变化趋势也用此公式计算得到。

2.2.2 相关系数

采用相关系数 r_{xy} 表示 NDVI 与气候因子之间的相关程度, 如式 (2) 所示。

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

其中, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$, r_{xy} 的变化范围为 $[-1, 1]$ 。

根据相关系数 r_{xy} 的平方可以确定决定系数 R^2 , R^2 表示因变量的全部变异性能通过自变量变异解释的比例, 即气候因子可以解释 NDVI 变化的程度。

2.2.3 贡献率分析

根据相关研究（陈伏龙等, 2017; 李秀等, 2021），通过多元线性回归方法求出各气候区 NDVI 与气候因子（温度、降水）的回归方程，根据回归系数计算不同气候区各因子对 NDVI 变化的贡献率（单位：%），表示为：

$$C_X = \Delta NDVI_X / \Delta NDVI \quad (3)$$

其中， $\Delta NDVI_X$ 为气候因子变化导致的 NDVI 的变化量， $\Delta NDVI$ 为实测 NDVI 的变化量。

3 结果分析

3.1 土地覆盖空间分布与干湿气候区划分指标

图 1 是根据 MCD12C1 数据得出的 2001 年中国区域主要土地覆盖类型的空间分布，图 1a~1c 三张图中黑色实线分别对应着多数文章常用的由降水量确定的不同干湿气候区的指标。气候带的划分是建立在多年气候状况的平均水平上的，所以本文以 1981~2010 年的气候平均态来表示近期的气候状况。

图 1a 显示了干旱区/半干旱区分界线分别为 200 mm、250 mm 年降水量等值线的情况，根据植被带与两条曲线的位置可得，200 mm 年降水量线与荒漠和草地的分界线更吻合，其作为干旱区/半干旱区的分界线更合理。根据图 1b 比较半干旱区/半湿润区的分界，得出 500 mm 降水等值线在华北地区恰好是草地和农田的分界，在东北地区 450 mm 年降水量线与植被分布更一致，整体来说 500 mm 年降水量等值线与植被带的分界线更吻合。图 1c 显示 800 mm 年降水量线在东部长江中下游区域和淮河流域没有明显的植被分界，此处全为农田，应该是人类活动影响的结果。值得注意的是青藏高原地区正好在 200 mm 和 800 mm 降水量之间全部为草地，这应该是由于该区域海拔较高，具有太阳辐射强、气温低、气温日较差大、干湿季节分明等气候特征，冻土广布，从而形成了适应此环境的高寒草甸、高寒草原和温性草地等以草为主的植被分布；而此处的 800 mm 是草地和农田/森林的分界，也说明了 800 mm 作为半湿润区/湿润区分界线的合理性。

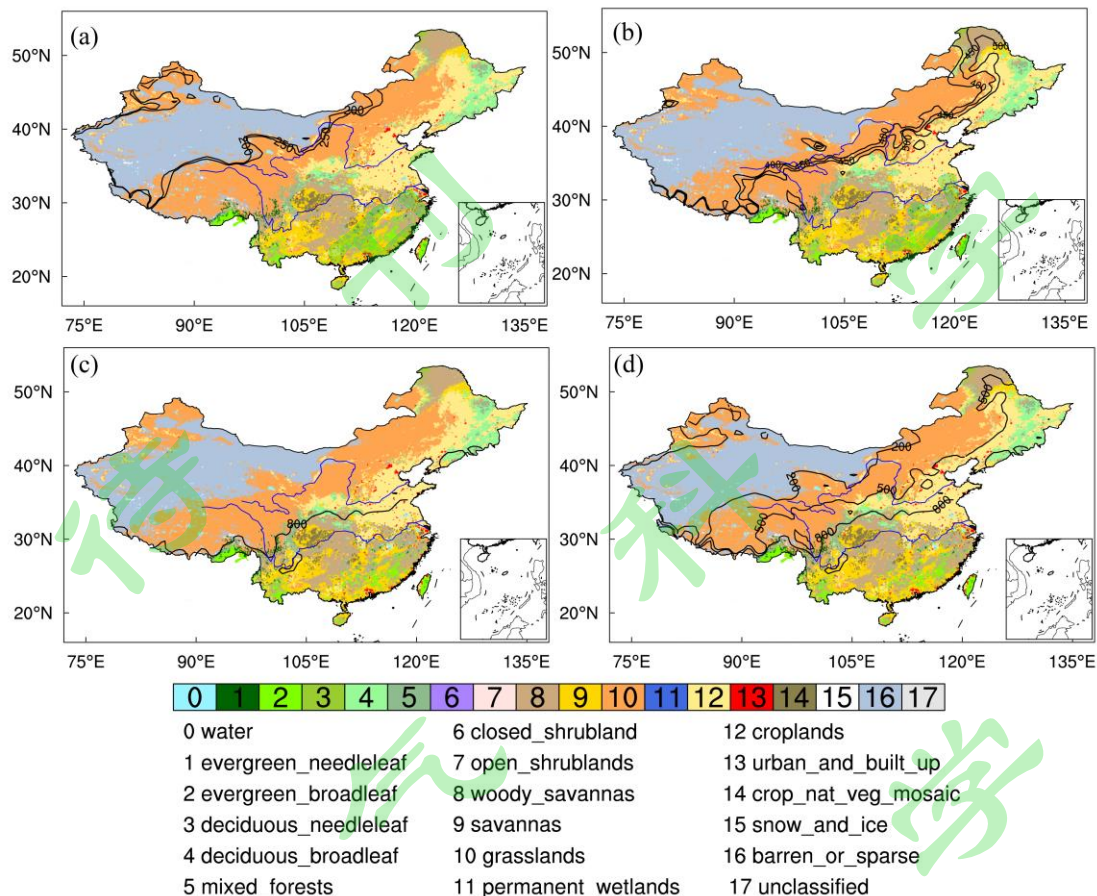


图 1 2001 年中国主要土地覆盖类型空间分布和根据年降水量划分干湿气候区的不同指标
 (a) 干旱区/半干旱区的分界线: 200、250 mm; (b) 半干旱区/半湿润区的分界线: 400、450、500 mm; (c) 半湿润区/湿润区的分界限: 800 mm; (d) 四个气候区最合理的分界线: 200、500、800 mm

Fig.1 Spatial distribution of major land cover types in China in 2001 and different dry and wet climate zoning indexes based on annual precipitation; (a) Arid/Semi-arid regions are divided by 200 or 250 mm, (b) Semi-arid/Semi-humid regions are divided by 400, 450, or 500 mm, (c) Semi-humid/Humid regions are divided by 800 mm; (d) the most reasonable dividing lines of the four climatic zones: 200, 500 and 800 mm.

根据MCD12C1数据显示, 每个格点有都有一种或几种植被类型组成, 因此每个点都会有一个主要土地覆盖类型。图2a是2001~2015年主要土地覆盖类型所占比例均值的空间分布。图2a显示, 南方地区和200 mm、500 mm降水等值线附近主要类型比例明显小于其他地区, 南方地区热量充足, 降水丰沛, 植被种类繁多(图2b), 故主要类型比例较小; 值得注意的是, 在降水等值线附近的气候过渡带上主要类型所占比例较其相邻区域低, 结合图2b的结果显示该区植被组成和

结构比两边相邻的气候区复杂，有较高的物种多样性，进一步说明气候过渡带是由多种植被混合构成的生态过渡带。

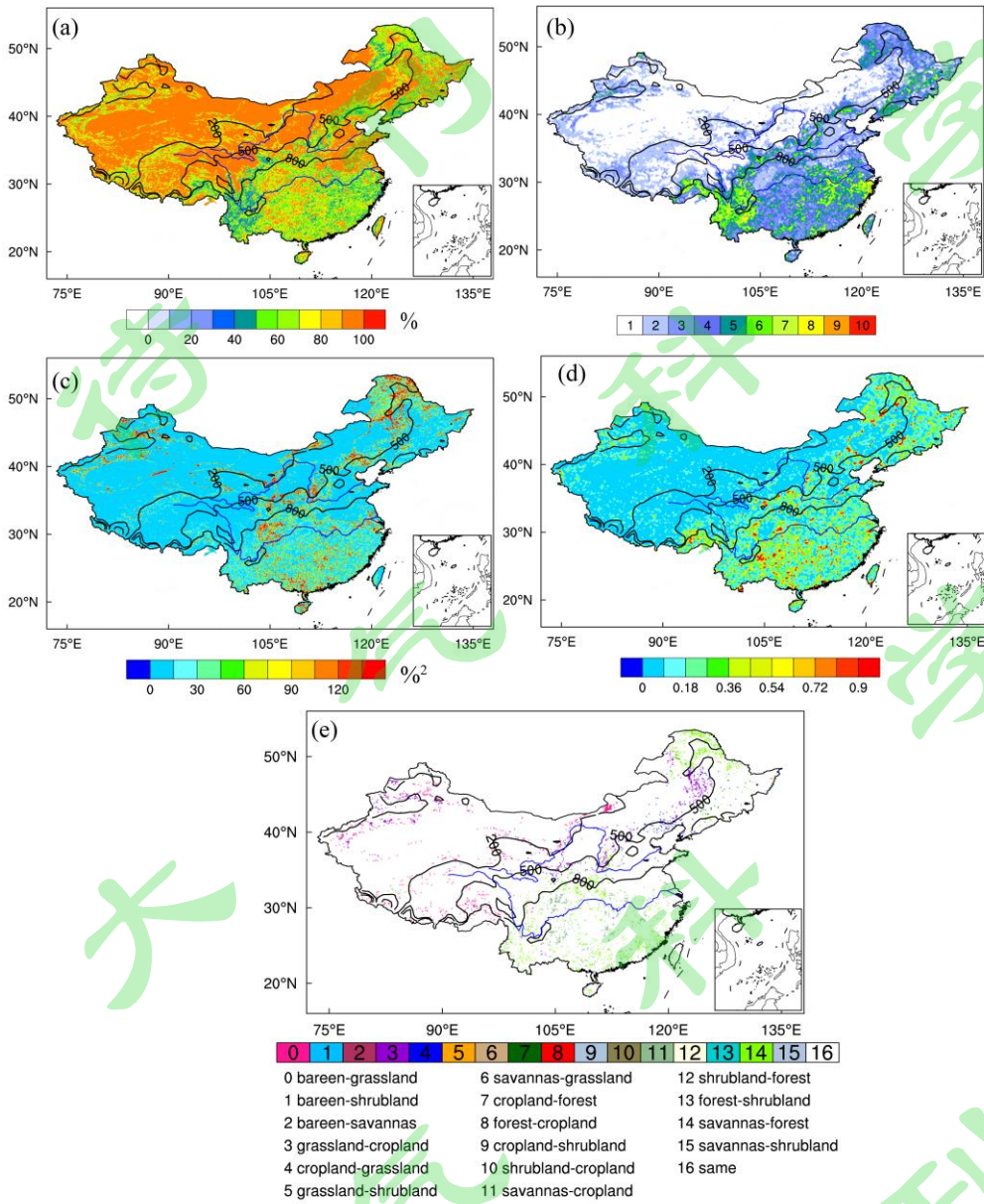


图 2 2001~2015 年 (a) 主要土地覆盖类型所占比例和 (b) 土地覆盖类型数目的均值, (c) 主要土地覆盖类型所占比例和 (d) 土地覆盖类型数目的方差, 以及 (e) 2015 年相对于 2001 年土地覆盖类型变化的空间分布 (黑色曲线同图 1d)

Fig.2 Spatial distribution of the average of (a) the proportion of major land cover types and (b) the numbers of land cover types, the variance of (c) the proportion of major land cover types and (d) the numbers of land cover types during 2001-2015, and (e) the land cover type changes in 2015 relatively to 2001. (Three black lines are the same as figure 1d)

图2c和2d分别是2001~2015年主要类型所占比例的方差和植被种类数目的方差的空间分布,两者均反映了植被类型变化的程度,从两图中可以看出在各降水等值线确定的过渡带上和南方地区主要类型比例和类型数目的变化最大;这些变化较大的区域主要为新疆的荒漠-草地过渡带、河套平原的荒漠-草地过渡带和草地-灌木过渡带、黄河中游的农田-草地过渡带等(图2e),这些区域的植被受降水的影响而快速改变,具有敏感的时空动态性,是土地覆盖类型变化较为剧烈的区域。

综合上述分析可得,中国土地覆盖类型的分布与年降水量密切相关,200mm、500 mm、800 mm的年降水量等值线恰好是荒漠和草地、草地和农田以及草地(农田)和森林的分界线,植被过渡带和气候过渡带的位置相对应(温刚和符淙斌,2000),因此这三个降水量等值线作为干旱区、半干旱区、半湿润区、湿润区四个气候区的分界线是合理的,也说明降水量决定了植被种类的分布,这是植被分布对气候长期适应的结果。

3.2 不同干湿区 NDVI 的时空变化特征

前文根据土地类型分布确定了中国四个干湿气候区,接下来分析四个干湿区的植被指数 NDVI 的时空变化特征。文中年平均采用生长季 4~10 月的数据进行分析,月尺度分析也来自于生长季的各月数据。图 3a 是中国年平均 NDVI 的空间分布,随着降水量的不同,NDVI 从东南向西北递减,年平均 NDVI 从小到大依次为干旱区(0.11)、半干旱区(0.35)、半湿润区(0.57)、湿润区(0.68)。NDVI 和降水的分布也非常吻合,进一步表明降水对植被覆盖有直接的影响。图 3b 是 NDVI 的离散系数(标准差/均值),用以表示单位均值上的离散程度,从图 3b 中可以看出干旱区、半干旱区离散系数较大,干旱区/半干旱区和半干旱/半湿润区过渡带上 NDVI 的离散系数明显大于其相邻区域,过渡带 NDVI 年际变化较大表明此区域是敏感性较高区域,这与 Seddon et al. (2016) 通过其他指数研究的中国植被对气候变化响应较大的生态敏感区的位置基本一致,这应该是此处植被易受降水量波动影响而快速变化的结果。

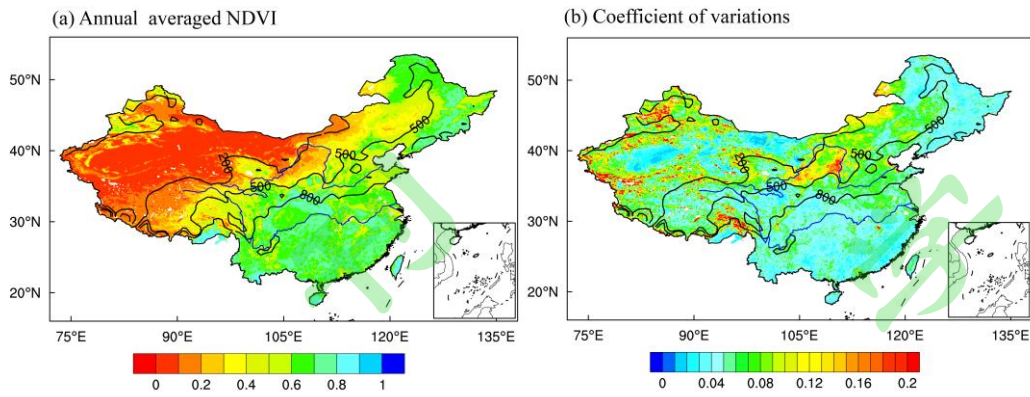


图 3 1982~2015 年 NDVI (a) 均值和 (b) 离散系数的空间分布 (黑色曲线同图 1d)

Fig.3 Spatial distribution of (a) annual averaged NDVI and (b) NDVI coefficient of variances in 1982-2015. (Three black lines are the same as figure 1d)

图 4a 是 1982~2015 年中国区域 NDVI 变化趋势的空间分布, 由此图可得中国大部分地区 NDVI 呈显著的增加趋势, 尤其是黄土高原地区植被增加趋势最明显, 而该区平均 NDVI 数值不大 (图 3a), 又知该地区在 2001~2015 年间森林覆盖率从 9.8% 增至 12.0%, 这应该是该区实施退耕还林/还草政策使植被快速恢复的结果。图 4b 是 1982~2015 年中国及四个干湿气候区 NDVI 的时间序列, 中国整个区域 NDVI 呈现显著的增加趋势, 变化趋势为 $0.006/10a$, 干旱区、半干旱区 NDVI 分别以 $0.002/10a$ 、 $0.008/10a$ 的趋势显著增加, 半湿润区和湿润区 NDVI 也呈增加趋势, 但均不显著。

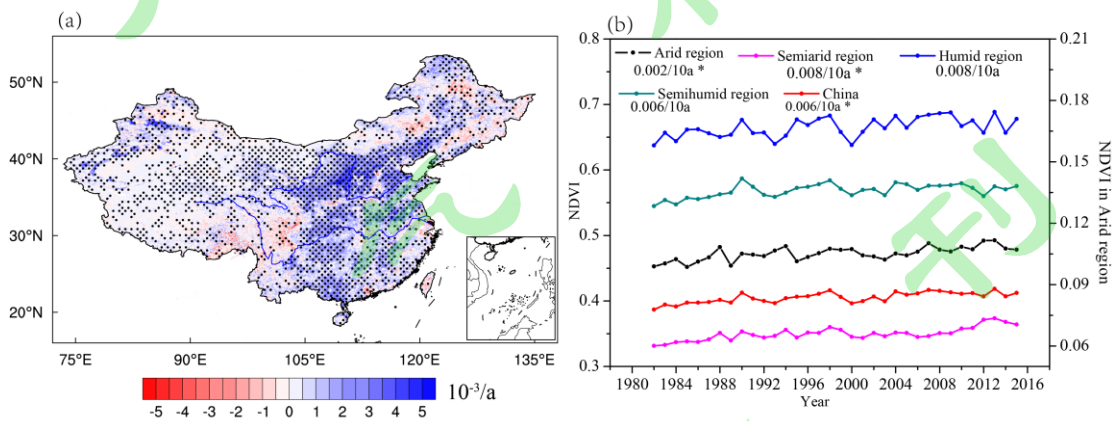


图 4 (a) 1982~2015 年 NDVI 变化趋势空间分布 (黑色圆点表示通过了 95% 的显著性检验) 和 (b) 不同干湿区 NDVI 的时间序列 (干旱区为右侧纵坐标轴)

Fig.4 (a) Spatial distribution of the change trends of NDVI during 1982-2015 (Black dots indicate statistical significance at the 95% level) and (b) Time series of NDVI in different dry and wet

areas (The right ordinate axis is for the arid area)

表 1 1982~2015 年四个干湿区 NDVI、温度和降水的变化趋势

Table 1 The trends of NDVI, temperature and precipitation in the four dry and wet areas during 1982-2015

	干旱区	半干旱区	半湿润区	湿润区
NDVI (/10a)	0.002*	0.008*	0.006	0.008
温度 (°C/10a)	0.46*	0.42*	0.33*	0.29*
降水 (mm/10a)	7.2	3.8	-4.2	-6.7

*表示通过了 95%的显著性检验

3.3 不同干湿区 NDVI 和气候因子的关系

前文分析结果得出降水决定植被种类的分布,中国地区以 200 mm、500 mm 和 800 mm 年降水量等值线划分的四个干湿区域对应着特定的气候背景和植被种类,不同气候区的植被覆盖变化也不相同,那么不同地区的植被覆盖变化和气候因子温度、降水的关系有什么共同特征和差异?接下来分析 NDVI 和温度、降水的关系。

图 5a 是 NDVI 与温度相关系数的空间分布,从图中可以看出,中国大部分区域 NDVI 和温度呈现正相关,其中在东南地区、青藏高原北部、西北东部和东北部分地区相关系数高达 0.6,并且通过了 95%的显著性检验;而内蒙古东北地区、塔里木盆地、青藏高原南部等少数地区 NDVI 与温度呈现微弱的负相关,均不显著,以上结果与 Zhang et al. (2021) 和赵倩倩等 (2021) 基于其他数据分析的结果一致。

从 NDVI 与降水相关系数的空间分布图(图 5b)可得,北方大部分区域 NDVI 与降水呈正相关,半干旱区的 NDVI 与降水呈显著正相关,相关系数高达 0.7。而处于湿润区和半湿润区的南方地区 NDVI 与降水呈负相关 ($P>0.05$),结合表 1 中 NDVI 与降水的趋势系数分析结果来看,发现在 1982~2015 年间,湿润和半湿润区的 NDVI 均呈增加趋势 ($P>0.05$),而降水呈减少趋势 ($P>0.05$),因此该区域的 NDVI 与降水呈负相关。根据半湿润区和湿润区降水与日照时数的相关系数分别为 -0.62 ($P<0.05$) 和 -0.51 ($P<0.05$),可知降水与日照时数呈显著负

相关，降水增多对应着日照时数减少，推测这两个区域 NDVI 与降水呈负相关的可能原因是降水比较充足，降水过多会引起光照不足，反而抑制植被生长。

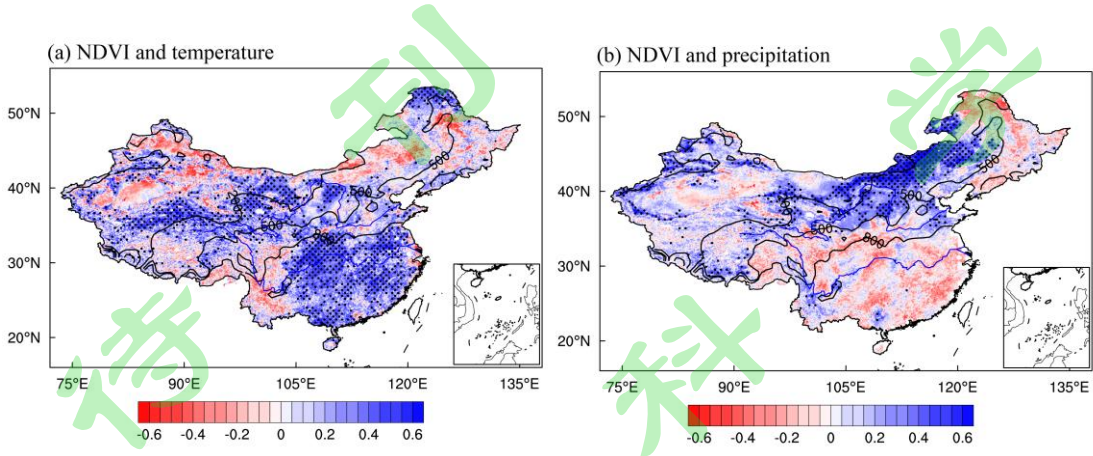


图 5 1982~2015 年 NDVI 与 (a) 温度、(b) 降水相关系数的空间分布 (黑色圆点表示通过了 95% 的显著性检验，黑色曲线同图 1d)

Fig.5 Spatial distribution of correlation coefficients between NDVI and (a) temperature and (b) precipitation in 1982-2015. (Black dots indicate statistical significance at the 95% level. Three black lines are the same as figure 1d)

四个干湿区区域平均的年 NDVI 均与温度呈显著正相关，相关系数均在 0.54 以上 (表 2)，结合各区温度和 NDVI 的趋势系数来看 (表 1)，四个区域的温度和 NDVI 均呈增加趋势，各区温度对 NDVI 均有促进的作用。只有干旱区、半干旱区的降水呈增加趋势 (表 1)，这两个区域的年 NDVI 和降水呈显著正相关 (表 2)，降水主要影响干旱和半干旱区植被的生长；半湿润区和湿润区的降水呈下降趋势，其 NDVI 与降水呈微弱的负相关。

表 2 1982~2015 年四个干湿区区域平均 NDVI 与气候因子的相关系数和决定系数

Table 2 Correlation coefficients and the coefficients of determination between regional averaged NDVI and climate factors in the four dry and wet areas in 1982-2015

系数		干旱区	半干旱区	半湿润区	湿润区
NDVI 与温度	相关系数 R	0.61*	0.61*	0.54*	0.56*
	决定系数 R^2	0.37	0.37	0.29	0.31
NDVI 与降水	相关系数 R	0.42*	0.45*	-0.06	-0.19
	决定系数 R^2	0.18	0.20	0.004	0.04

*表示通过了 95%的显著性检验

决定系数 R^2 表示因变量的全部变异能通过自变量变异解释的比例，即气候因子可以解释 NDVI 变化的程度。通过表 2 中的决定系数 R^2 可得，温度可以解释 NDVI 时间变化的 37%（干旱区）、37%（半干旱区）、29%（半湿润区）、31%（湿润区），温度对各区 NDVI 时间变化的解释率相差不大，均在 30%左右，其中干旱区最大，半湿润区最小；降水对 NDVI 时间变化的解释率较低，分别为 18%（干旱区）、20%（半干旱区）、0.4%（半湿润区）、4%（湿润区），降水主要影响着北方干旱区和半干旱区植被的生长。

相关分析的结果表明温度和降水是影响 NDVI 变化的重要因子，因此接下来建立四个干湿区因变量 NDVI 与自变量温度、降水的多元线性回归模型。干旱区、半干旱区、半湿润区和湿润区的模型拟合优度 R^2 分别为 0.43、0.53、0.30、0.34，说明各干湿区自变量依次可以解释其因变量约 43%、53%、30%、34% 的时间变化。各区回归方程的显著性值（P）均小于 0.05，表明回归方程显著，具体结果见公式（4）~（7）。其中，T 表示温度，P 表示降水。

$$\text{干旱区: } \text{NDVI}=0.0032T+6.58\times 10^{-5}P+0.056 \quad (4)$$

$$\text{半干旱区: } \text{NDVI}=0.0114T+14.23\times 10^{-5}P+0.186 \quad (5)$$

$$\text{半湿润区: } \text{NDVI}=0.0132T-1.89\times 10^{-5}P+0.414 \quad (6)$$

$$\text{湿润区: } \text{NDVI}=0.0211T-3.14\times 10^{-5}P+0.269 \quad (7)$$

由于 1999 年后中国区域植被覆盖显著变好（韩云环等, 2021），因此将 1982~1998 年划分为基期，分析 1999~2015 年相对于基期各气候因子对 NDVI 变化的贡献率。回归方程中温度/降水的系数分别表示温度每增加 1℃/降水每增加 1mm 引起 NDVI 的变化量，要想求得温度/降水引起 NDVI 的具体变化，需要知道温度、降水总的变化量，因此这里温度/降水的变化量（ $\Delta T/\Delta P$ ）表示的是 1999~2015 年与 1982~1998 年（前后各 17 年）的年平均温度/年降水量差的和。根据四个干湿区温度和降水的变化量，以及由公式（3）~（7）可得各气候因子对 NDVI 变化的贡献率，其它因素变化对 NDVI 变化的贡献率 C_Q （单位：%）可表示为： $C_Q=1- C_T- C_P$ ，具体的结果如表 3 所示。

表 3 显示, 1999~2015 年与 1982~1998 年相比, 干旱区温度共增加 15.09 °C, 导致 NDVI 增加 0.048, 降水共增加 191.97 mm, 导致 NDVI 增加 0.013, 温度增加对 NDVI 增加的贡献率为 82.76%, 降水增加对 NDVI 增加的贡献率为 22.41%, 其他因素对该区 NDVI 增加的贡献为-5.17%。同理可得, 半干旱区、半湿润区、湿润区温度变化对 NDVI 增加的贡献率分别为 92.73%、108.20%、94.30%, 降水变化对 NDVI 增加的贡献率分别为-6.06%、3.28%和 2.59% (表 3)。以上结果表明温度对 NDVI 变化的贡献率在四个干湿区均大于降水的贡献率, 温度是影响 NDVI 变化的主要气候因素, 降水的贡献率从大到小的贡献依次为干旱区>半干旱区>半湿润区>湿润区, 可以看出, 随着湿润程度增加, 降水对 NDVI 变化的贡献率会逐渐降低。

表 3 四个干湿区温度、降水对 NDVI 变化的贡献率

Table3 Contributions of temperature and precipitation to NDVI in in the four dry and wet areas

1982-1998 / 1999-2015	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	$\Delta P/\text{mm}$	ΔNDVI_T	ΔNDVI_P	ΔNDVI	$C_T/\%$	$C_P/\%$	$C_Q/\%$
干旱区	15.09	191.97	0.048	0.013	0.058	82.76	22.41	-5.17
半干旱区	13.46	-68.25	0.153	-0.010	0.165	92.73	-6.06	13.33
半湿润区	9.98	-230.34	0.132	0.004	0.122	108.20	3.28	-11.48
湿润区	8.65	-152.39	0.182	0.005	0.193	94.30	2.59	3.11

T 表示温度, P 表示降水

已有研究表明在不同时间尺度上, 植被对气候的响应存在差异 (Linscheid et al., 2020)。为了进一步探讨 NDVI 与气候要素的关系, 文中分析了月 NDVI 分别与温度、降水线性回归的结果, 目的是研究月尺度上不同干湿区 NDVI 对气候因子响应 (温度、降水) 的敏感性, 即单位气候因子变化会引起对应 NDVI 的变化方向和幅度。图 6 是不同干湿区月平均温度和 NDVI 的拟合曲线, 图中显示四个区域的 NDVI 均随温度增加呈现增加的趋势。干旱区植被很少, 大部分为荒漠, 由于其基数小, 随着温度的增加, NDVI 约以 0.0026/°C 的速率增加 (图 6a)。半干旱区、半湿润区的 NDVI 随温度增加升高增长的速率较快, 分别为 0.018/°C、0.026/°C, 湿润区的增长速率为 0.01/°C。

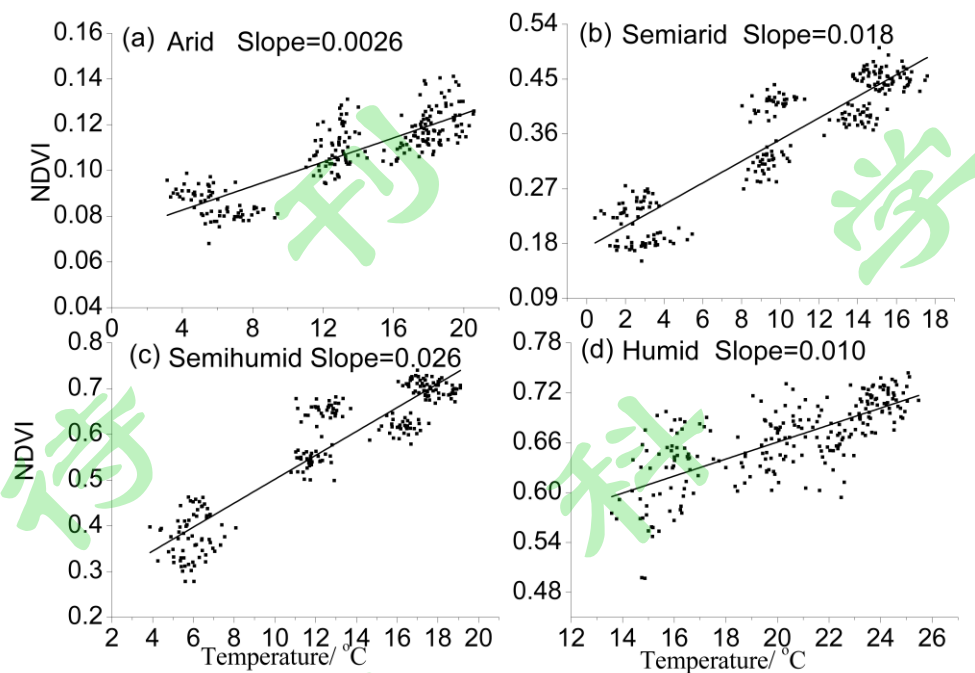


图 6 1982~2015 年 (a) 干旱区、(b) 半干旱区、(c) 半湿润区、(d) 湿润区的月平均 NDVI 和平均温度散点图分布

Fig.6 Scatter distribution of monthly averaged NDVI with monthly averaged temperature in the (a)Arid, (a) Semi-arid, (a) Semi-humid, and (d) Humid Areas during 1982-2015.

图 7 是四个干湿区不同月降水量和 NDVI 的关系。干旱区 NDVI 随降水量增加以 0.0012/mm 的线性趋势增加（图 7a），半干旱区对月降水量最为敏感，降水每增加 1mm，NDVI 的增幅为 0.027（图 7b），可以推断半干旱区的植被生长对降水变化的响应也最为明显。相对于半干旱区，半湿润区 NDVI 对降水的敏感性较低，随降水增加变化的速率为 0.0026/mm（图 7c）。湿润区的 NDVI 随月降水量的增加增长的缓慢，增速为 0.0003/mm（图 7d），该区水分充沛，植被对降水变化的响应较小，降水已不是该区植被生长的主要限制因子。

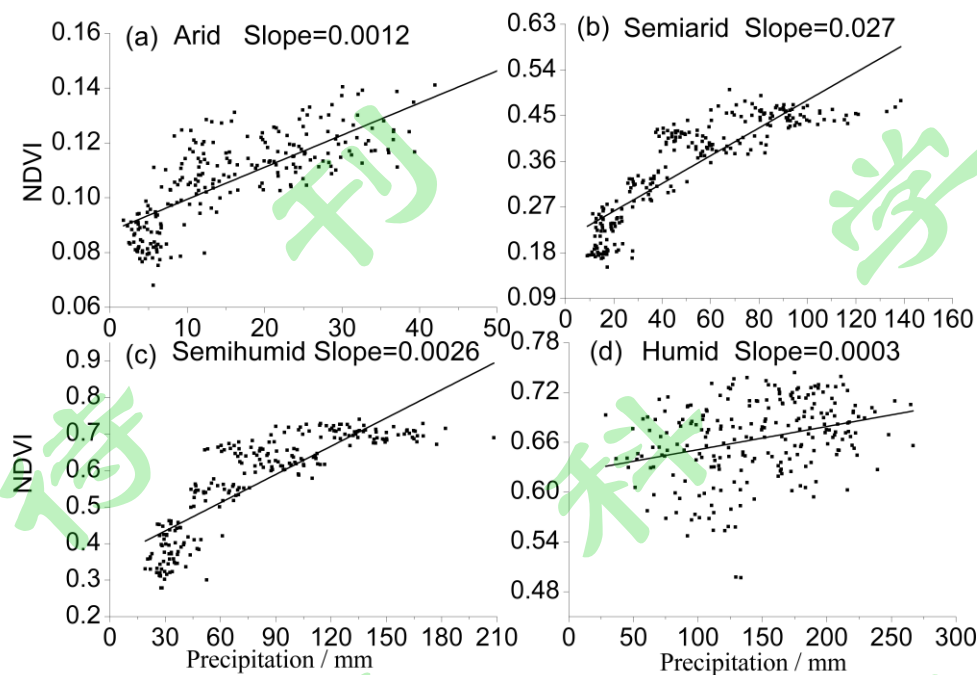


图 7 1982~2015 年 (a) 干旱区、(b) 半干旱区、(c) 半湿润区、(d) 湿润区的月平均 NDVI 和月降水量散点图分布

Fig.7 Scatter distribution of monthly averaged NDVI with monthly precipitation in the (a)Arid, (a) Semi-arid, (a) Semi-humid, and (d) Humid Areas during 1982-2015.

以上结果表明在不同气候带或不同植被类型处, 植被对气候变化的响应存在差异, 而其他相关的全球尺度研究结果也显示由于不同的干湿气候条件和植被类型差异, 中国南方和北方地区植被对气候变化的响应不同 (Linscheid et al., 2020; Zhang et al., 2021), 如最高温度对南方地区有正向影响, 而在较干旱的北方地区, 最高温度通过影响蒸散发限制了水分供应, 从而对植被产生负面影响, 这也进一步说明分析植被与气候要素关系时, 考虑其对应的气候态特征和植被类型是很有必要的。

4 结论和讨论

本文首先基于中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 的土地覆盖数据, 根据植被带的分布确定了划分中国干湿区的指标, 其次利用植被指数 NDVI 分析不同干湿区域 NDVI 的时空变化特征, 最后探讨了 NDVI 与温度、降水的关系。具体结果如下:

(1) 中国区域 200 mm、500 mm 和 800 mm 年降水量等值线与不同植被带的分界线吻合, 气候过渡带对应着植被过渡带, 200 mm、500 mm 和 800 mm 年降水量等值线作为划分干湿气候区的指标比较合理。2001~2015 年间中国区域土地覆盖变化明显的区域多位于由多种植被混合构成的敏感的生态过渡带上。

(2) 中国年平均 NDVI 从东南向西北递减, 从小到大依次为干旱区 (0.11)、半干旱区 (0.35)、半湿润区 (0.57)、湿润区 (0.68)。1982~2015 年中国大部分区域 NDVI 呈显著的增加趋势, 区域平均 NDVI 在干旱区、半干旱区分别以 0.002/10a、0.008/10a 的趋势显著增加, 而在半湿润区和湿润区也呈现出增加趋势, 但均不显著。

(3) 四个干湿区的年平均温度和 NDVI 都呈显著正相关, 仅干旱区、半干旱区年降水和 NDVI 呈显著正相关, 半湿润区和湿润区的年降水与 NDVI 呈微弱负相关。温度对四个干湿区 NDVI 时间变化的解释率相差不大, 均在 30% 左右; 降水对 NDVI 时间变化的解释率低于温度, 降水对干旱区和半干旱区 NDVI 时间变化的解释率较大, 分别为 18%、20%, 降水主要影响着北方地区植被的生长。

(4) 月平均 NDVI 随着温度和降水的增加都有显著的增加趋势, 半湿润区的 NDVI 随温度升高增长的速率 ($0.026/^{\circ}\text{C}$) 最快, 半干旱区的 NDVI 对降水最敏感, 随着降水增多其增加速率为 0.027/mm。

本文根据年降水量等值线 (200、500、800 mm) 和不同植被带分界线吻合确定了中国四个干湿气候区的划分指标。虽然干旱、湿润是相对的, 但是能与植被分布联系起来, 对气候变化背景下的区域农业生产活动、植被恢复和生态环境保护有重要的现实意义。

根据本文研究结果可得在中国区域尺度上, 气候因子降水直接影响着植被种类分布, 但这里对植被进行的是粗略分类, 因此关于植被的分布不够精细; 若要实现植被精细分布的话, 单一因子很难将植被划分详细, 还需全面考虑影响植被分布的综合因素的作用。植被分布是对能量供应 (比如温度、潜在蒸散或辐射等)、水分供应 (降水) 两个非独立因素共同适应的结果, 气候对植被的影响由能量和水分相互作用决定, 不同地区影响植被分布的重要因子不同, 理解气候影响植被分布的机制可以帮助更好地预测气候变化对未来植被类型分布的影响。

此外, 本文分析了中国不同干湿区植被生长和温度、降水的关系, 除了气候

因子外, 随着国家三北防护林体系建设、退耕还林/还草、天然林保护工程等重点生态工程的深入实施, 人类活动对植被的影响也是很大的, 那么气候变化和人类活动对植被覆盖变化的共同影响和各自贡献是怎样的? 植被变化后又如何通过陆气相互作用影响区域气候? 这些问题有待于下一步解决。

参考文献

- Ali M. 2013. Effects of climate change on vegetation [M]//Climate Change Impacts on Plant Biomass Growth. Springer Netherlands, 29-49.
- Bachelet D, Neilson R P, Lenihan J M, et al. 2001. Climate change effects on vegetation distribution and carbon budget in the United States [J]. *Ecosystems*, 4(3): 164-185. doi:10.1007/s10021-001-0002-7
- 慈龙骏, 吴波. 1997. 中国荒漠化气候类型划分与潜在发生范围的确定 [J]. *中国沙漠*, 17(2): 107-111. Ci Longjun, Wubo. 1997. Climate type division and the potential extent determination of desertification in China [J]. *Journal of Desert Research (in Chinese)*, 17(2): 107-111.
- 陈明荣. 1974. 对于干湿气候区划指标问题的探讨 [J]. *西北大学学报:自然科学版*, (2): 111-119. Chen Mingrong. 1974. Discussion on the indexes of dry and wet climate zoning [J]. *Journal of Northwest University, Natural Science Edition (in Chinese)*, (2): 111-119.
- 陈海, 康慕谊, 范一大. 2004. 北方农牧交错带植被覆盖的动态变化及其与气候因子关系 [J]. *地理与地理信息科学*, 20(5): 54-57. Chen Hai, Kang Muiyi, Fan Yida. 2004. Relationship between dynamic change of vegetation and climate factors in Farming-Pastoral zone of North China [J]. *Geography and Geo-Information Science (in Chinese)*, 20(5): 54-57. doi:10.3969/j.issn.1672-0504.2004.05.013
- 陈伏龙, 冯平, 吴泽斌. 2017. 三工河流域平原区蒸发量变化特征及影响因素 [J]. *干旱区地理*, 40(1): 45-53. Chen Fulong, Feng Ping, Wu Zebin. 2017. Changes of evaporation and impact factors in the plain region in Sangong River Basin [J]. *Arid Land Geography (in Chinese)*, 40(1): 45-53.
- 韩云环, 马柱国, 李明星, 等. 2021. 2001~2010 年中国区域土地利用/覆盖变化对陆面过程影响的模拟研究 [J]. *气候与环境研究*, 26(1): 75-90. Han

- Yunhuan, Ma Zhuguo, Li Mingxing, et al. 2021. Numerical simulation of the impact of Land Use/Cover Change on land surface process in China from 2001 to 2010 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (1): 75-90. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20039
- Hou W J, Gao J B, Wu S H. 2015. Interannual variations in Growing-Season NDVI and its correlation with climate variables in the Southwestern Karst Region of China [J]. Remote sensing, 7(9): 11105-11124. doi:10.3390/rs70911105
- Hu M Q, Mao F, Sun H, et al. 2011. Study of normalized difference vegetation index variation and its correlation with climate factors in the three-river-source region [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 13(1): 24-33. doi:10.1016/j.jag.2010.06.003
- Kelly A E, Goulden M L. 2008. Rapid shifts in plant distribution with recent climate change [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 105(33): 11823-11826. doi:10.1073/pnas.0802891105
- Lawley V, Lewis M, Clarke K, et al. 2016. Site-based and remote sensing methods for monitoring indicators of vegetation condition: An Australian Review [J]. Ecological Indicators, 60(1): 1273-1283. doi:10.1016/j.ecolind.2015.03.021
- Li D, Wu S, Liu L, et al. 2018. Vulnerability of the global terrestrial ecosystems to climate change [J]. Global Change Biology, 24(9), 4095–4106. doi:10.1111/gcb.14327
- 李秀, 郎琪, 雷坤, 等. 2021. 1958~2018 年永定河流域蒸发皿蒸发量的变化特征及其影响因子分析 [J]. 气候与环境研究, 26(3): 323-332. Li Xiu, Lang Qi, Lei Kun, et al. 2021. Variation characteristics of pan evaporation and the influencing factors in the Yongding River Basin during 1958–2018 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (3): 323-332. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20108
- 李晶, 刘乾龙, 刘鹏宇. 2022. 1998-2018 年呼伦贝尔市植被覆盖度时空变化及驱动力分析 [J]. 生态学报, 42(1): 1-16. Li Jing, Liu Qianlong, Liu Pengyu. 2022. Spatio-temporal changes and driving forces of fraction of vegetation coverage in

- Hulunbair (1998-2018) [J]. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese), 42(1): 1-16.
doi:10.5846/stxb202003270710
- Linscheid N, Estupinan-Suarez L M, Brenning A, et al. 2020. Towards a global understanding of vegetation-climate dynamics at multiple timescales [J]. *Biogeosciences*, 17(4): 945-962. doi: 10.5194/bg-17-945-2020
- 刘波, 马柱国. 2007. 过去 45 年中国干湿气候区域变化特征 [J]. *干旱区地理*, 30(1): 7-15. Liu Bo, Ma Zhuguo. 2007. Area change of dry and wet regions in China in the past 45 years [J]. *Arid Land Geography* (in Chinese), 30(1): 7-15.
doi:10.3321/j.issn:1000-6060.2007.01.002
- 刘珞丹, 李晶, 柳彩霞, 等. 2021. 2000-2015 年长江经济带植被覆盖时空变化特征及影响因素分析 [J]. *水土保持研究*, 28(6): 330-336. Liu Luodan, Li Jing, Liu Caixia, et al. 2021. Analysis on the characteristics of temporal and spatial changes and influencing factors of vegetation coverage in the Yangtze River Economic Belt from 2000 to 2015 [J]. *Research of Soil and Water Conservation* (in Chinese), 28(6): 330-336. doi:10.13869/j.cnki.rswc.2021.06.026
- 毛德华, 王宗明, 宋开山, 等. 2011. 东北多年冻土区植被 NDVI 变化及其对气候变化和土地覆被变化的响应 [J]. *中国环境科学*, 31(2): 283-292. Mao Dehua, Wang Zongming, Song Kaishan, et al. 2011. The vegetation NDVI variation and its responses to climate change and LUCC from 1982 to 2006 year in northeast [J]. *China Environmental Science* (in Chinese), 31(2): 283-292.
- Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. 2003. Climate-Driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 [J]. *Science*, 300(5625):1560-1563. doi:10.1126/science.1082750
- Pettorelli N, Vik J O, Mysterud A, et al. 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9): 503-510. doi:10.1016/j.tree.2005.11.006
- 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 等. 1998. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系--基于 NOAA 时间序列数据分析[J]. *遥感学报*, 2(3): 204-210. Sun Hongyu, Wang Changyao, Niu Zheng, et al. 1998. Analysis of the vegetation cover

- change and the relationship between NDVI and environmental factors by using NOAA time series data [J]. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 2(3): 204-210. doi:10.11834/jrs.19980309
- Seddon A, Macias-Fauria M, Long P R, et al. 2016. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability [J]. *Nature*, 531, 229-232. doi: 10.1038/nature16986
- Stephenson, Nathan L. 1990. Climatic control of vegetation distribution: The role of the water balance [J]. *American Naturalist*, 135(5): 649-670. doi:10.1086/285067
- Thornthwaite C W. 1948. An approach toward a rational classification of climate [J]. *Geographical Review*, 38(1): 55-94. doi:10.2307/210739
- 温刚, 符淙斌. 2000. 利用卫星遥感数据集确定气候过渡带和植被过渡带 [J]. *大气科学*, 24(3): 324-332. Wen Gang, Fu Congbin. 2000. Definition of climate and ecological transitional zones with satellite data sets [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 24(3): 324-332. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.03.04
- 王延禄. 1990. 我国建立、引用和验证气象干旱指标综述 [J]. *干旱区地理*, 13(3): 80-86. Wang Yanlu, 1990. The summary concerning arid meteorological targets to establish, quote and test in China [J]. *Arid Land Geography (in Chinese)*, 13 (3): 80-86.
- 王雨晴, 张成福, 李晓鸿. 2020. 内蒙古典型草原区 NDVI 对气候变化的响应 [J]. *水土保持研究*, 41(04): 205-209. Wang Yuqing, Zhang Chengfu, Li Xiaohong. 2020. Response of NDVI to climate change in typical steppes of Inner Mongolia [J]. *Research of Soil and Water Conservation (in Chinese)*, 41(04): 205-209.
- Wu C Y, Wang X Y, Wang H J, et al. 2018. Contrasting responses of autumn-leaf senescence to daytime and night-time warming [J]. *Nature Climate Change*, 9(2):177-177. doi: 10.1038/s41558-018-0346-z.
- 谢力, 温刚, 符淙斌. 2002. 中国植被覆盖季节变化和空间分布对气候的响应——多年平均结果 [J]. *气象学报*, 60(2): 181-187. Xie Li, Wen Gang, Fu Congbin, 2002. The response of the vegetation seasonal variability and its spatial pattern to

- climate variation in China: multi-year average. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 60(2): 181-187. doi:10.11676/qxxb2002.022
- 徐勇, 黄雯婷, 靖娟利, 等. 2020. 京津冀地区植被 NDVI 动态变化及其与气候因子的关系 [J]. *水土保持通报*, 40(5): 319-327. Xu Yong, Huang Wenting, Jing Juanli, et al. 2020. Dynamic variation of vegetation cover and its relation with climate variables in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (in Chinese), 40(5): 319-327. doi:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.05.045
- 杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等. 2002. 近 50 年来中国干湿气候界线的 10 年际波动 [J]. *地理学报*, 57(6): 655-661. Yang Jianping, Ding Yongjian, Chen Rensheng, et al. 2002. The interdecadal fluctuation of dry and wet climate boundaries in China in recent 50 Years [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 57(6): 655-661. doi: 10.3321/j.issn:0375-5444.2002.06.004
- 於琨, 李克让, 陶波, 等. 2010. 植被地理分布对气候变化的适应性研究 [J]. *地理科学进展*, 29(11): 1326-1332. Yu Li, Li Kerang, Tao Bo, et al. 2010. Simulating and assessing the adaptability of geographic distribution of vegetation to climate change in China. *Progress in Geography* (in Chinese), 29(11): 1326-1332. doi:10.11820/dlkxjz.2010.11.012
- 赵倩倩, 张京朋, 赵天保, 等. 2021. 2000 年以来中国区域植被变化及其对气候变化的响应 [J]. *高原气象*, 40(2): 292-301. Zhao Qianqian, Zhang Jingpeng, Zhao Tianbao, et al. 2021. Vegetation changes and its response to climate change in China Since 2000 [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 40(2): 292-301. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00025
- 张存杰, 廖要明, 段居琦, 等. 2016. 我国干湿气候区划研究进展 [J]. *气候变化研究进展*, 12(4): 261-267. Zhang Cunjie, Liao Yaoming, Duan Juqi, et al. 2016. The progresses of Dry-wet climate divisional research in China [J]. *Climate Change Research* (in Chinese), 12(4): 261-267. doi:10.12006/j.issn.1673-1719.2015.191
- Zhang D, Geng X, Chen W, et al. 2021. Inconsistency of global vegetation dynamics

driven by climate change: Evidences from spatial regression [J]. Remote Sensing, 13(17). doi.org/10.3390/rs13173442

郑有飞, 牛鲁燕, 吴荣军, 等. 2009. 1982-2003 年贵州省植被覆盖变化及其对气候变化的响应 [J]. 生态学杂志, 28(9): 1773-1778. Zheng Youfei, Niu Luyan, Wu Rongjun, et al. 2009. Vegetation cover change in Guizhou of Southwest China in 1982-2003 in response to climate change [J]. Chinese Journal of Ecology (in Chinese), 28(9): 1773-1778.

周广胜, 张新时. 1996a. 全球变化的中国气候-植被分类研究 [J]. 植物学报, 38(1): 8-17. Zhou Guangsheng, Zhang Xinshi, 1996a. Study on climate-vegetation classification for global change in China [J]. Acta Botanica Sinica (in Chinese), 38(1):8-17.

周广胜, 张新时. 1996b. 中国气候-植被关系初探 [J]. 植物生态学报, 20(2): 113-119. Zhou Guangsheng, Zhang Xinshi, 1996b. Study on Chinese climate-vegetation relationship [J]. Acta Phytocologica Sinica (in Chinese), 20(2): 113-119.