

三北防护林工程区植被绿度对温度和降水的响应

谢舒笛^{1,2}, 莫兴国¹, 胡 实¹, 陈学娟^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 探究三北防护林工程区植被绿度对温度和降水的响应可为该区植被建设提供科学依据。基于2000—2015年的MODIS NDVI数据和气象数据, 采用通径分析法分析了不同生长阶段气温和降水对三北防护林工程区植被绿度的直接和间接影响。研究发现: 生长季多年平均植被绿度整体上呈现东部高西部低的空间格局, 且林地>耕地>草地; 生长季植被绿度呈现增长趋势, 植被覆盖状况得到改善, 其中耕地植被增长趋势最大。生长季升温抑制植被生长, 降水量增加促进植被生长, 降水量是影响三北防护林工程区生长季植被生长的关键气候因子。在不考虑降水变化影响时, 升温促进植被生长, 但生长季温度升高带来的降水量减少使得升温对植被生长表现为抑制作用。生长季不同时期降水量增加对植被生长均是促进作用, 表现为末期>中期>初期; 而气温的影响则表现为生长季初期升温促进植被生长, 中期和末期升温不利于植被生长。生长季末期升温对植被生长的负效应以直接作用为主, 而中期主要通过降水量变化的间接作用体现。识别生长季不同时段气温和降水对植被绿度影响的差异性, 有助于全面认识和评估植被对气候变化的响应。

关键词: 三北防护林工程区; 气候变化; 植被绿度; 响应; 通径分析法

DOI: 10.11821/dlyj020181071

1 引言

为改善三北地区生态环境、遏制水土流失和防治风沙危害, 中国于1978年启动了三北防护林体系建设工程^[1]。经过近40年的建设, 该工程完成了2647万hm²的造林面积, 区域内森林覆盖率已达到13%以上^[2]。虽然三北防护林工程在水源涵养、水土保持、防风固沙和改善小气候等方面发挥着重要作用^[3]。但也面临局部衰退明显, 造林成活率低, 生长缓慢^[4]等诸多问题, 且三北地区的土地退化问题依然突出, 京津地区的沙尘暴频繁发生^[5], 气候变化可能是导致这些问题出现的重要原因。探究三北防护林工程区植被绿度时空变化的规律并揭示其对气候变化的响应, 可为该区植被建设提供科学依据。

归一化植被指数 (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index) 是植被生长状态和植被绿度的最佳指示因子之一^[4,5], 被广泛应用于植被覆盖度监测、植被-气候因子关系研究^[4-9]。基于NDVI数据的研究表明: 全球植被生长状况不断改善, 尤其是北半球中高纬地区^[10,11], 且中国华北、东北、青藏高原和黄土高原等地区植被绿度也在不断增长^[12-15]。

收稿日期: 2018-10-08; 修订日期: 2019-04-10

基金项目: 国家自然科学基金委员会重大项目 (41790424)

作者简介: 谢舒笛 (1996-), 女, 湖南邵阳人, 博士研究生, 主要从事遥感与生态水文模拟研究。

E-mail: xiesd.18b@igsrr.ac.cn

通讯作者: 莫兴国 (1966-), 男, 广西桂林人, 研究员, 主要从事气候变化和陆地生态系统生态水文研究。

E-mail: moxg@igsrr.ac.cn

三北防护林工程区东西跨度较大, 植被覆盖度在空间上表现为西北低, 东北高的特征^[16]。总体上, NDVI呈缓慢上升趋势, 其中风沙区、东北和华北平原区植被绿度增长最明显, 而西北荒漠区NDVI呈微弱下降趋势^[17]。

植被和气候的关系一直是全球变化研究的重要内容, 气温和降水是影响地表植被动态变化的两个重要气象因子。在中国的大部分区域, 气温对植被的影响大于降水^[18], 但在秦岭-淮河以北地区, 降水是植被生长的限制性因子^[19]。三北防护林工程区位于气候变化敏感带, 已有研究发现: 无论是年际尺度还是生长季尺度, 降雨量增加均促进三北防护林工程区植被生长^[20]; 而温度在年尺度上与NDVI呈正相关^[21,22], 在生长季尺度上与NDVI呈负相关^[16]。此外NDVI与气温降水的关系在三北防护林工程区具有明显的空间异质性, 西北大部分地区NDVI与降水量呈现较强的正相关, 气温对植被生长的影响相对较弱^[20]; 而东北地区NDVI与气温的相关性要明显高于降水^[13]。目前针对三北防护林工程区植被绿度驱动因子的研究大多采用相关分析法, 通过气温、降水与NDVI的简单相关系数来确定气候因子对植被的影响, 忽视气候因子之间的相互作用。

本文以2000—2015年MODIS NDVI数据和气象数据为基础, 分析三北防护林工程区气候因子(气温和降水)和植被绿度(以NDVI表征)的时空变化趋势; 运用通径分析法定量区分植被生长季(4—9月)及其不同生长阶段气候因子对植被绿度的直接、间接和综合影响, 旨在了解近年来三北防护林工程区植被变化与气候变化的关系, 为科学评估和应对气候变化提供依据。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

三北防护林工程区(73°26'E~127°50'E, 33°30'N~50°12'N)横跨西北、华北和东北西部的13个省(自治区, 直辖市), 分为东北区、华北区、黄土高原区和蒙新区四大建设区(《中国林业区划》), 其中蒙新区根据内蒙古边界可分为内蒙古区和新疆区, 研究区总面积为406.9万km², 占国土面积的42.4%, 地势西高东低, 海拔高度介于100~5000 m, 未利用土地占比高达42.5%(图1), 其次为草地(33.9%)、耕地(13.7%)和林地(6.2%), 生态环境较为脆弱。三北防护林工程区属于大陆性季风气候, 年均温在2~8℃之间, 降水量由东向西、从南到北递减, 地表径流和地下水资源不足。新疆区和内蒙古区的西部年降水量位于250 mm左右, 日照强、风力大、蒸发量大、土壤普遍瘠薄, 有机质含量低且土体干燥, 荒漠化严重; 黄土高原区和华北区年均降水量在250~500 mm之间, 水热同期, 但降水量分配不均, 水土流失较为严重; 东北区春季干燥多大风, 年均降水量为350~450 mm, 主要集中在夏季。

2.2 数据来源及预处理

主要包括遥感、土地利用和气象数据。遥感数据为2000—2015年16天合成的MOD13A2/NDVI数据, 由美国国家航空航天局地球观测系统数据和信息系统(NASA's Earth Observing System Data and Information System)提供, 空间分辨率为1 km×1 km。为更加有效消除云遮蔽、大气影响以及观测中的几何关系等不利因素影响, 采用最大值合成法MVC(Maximum Value Composites)获取月NDVI值。为识别非植被区, 计算三北防护林工程区每景NDVI的多年平均值, NDVI年内最大和最小的差异小于零的区域即为非植被区, 三北防护林工程区非植被区域主要位于塔里木盆地东部和柴达木盆地分区

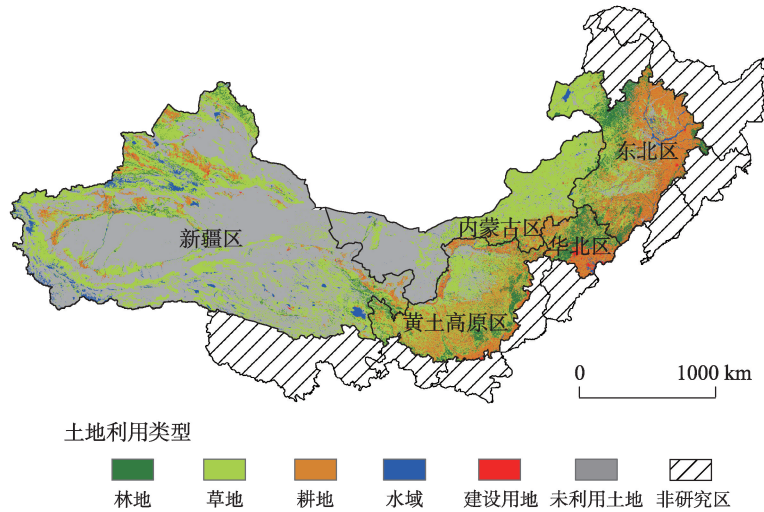


图1 三北防护林工程区土地利用类型及分区

Fig. 1 The land use types and partitions of the Three-North Shelterbelt

注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图（审图号为GS(2019)1699号）绘制，底图无修改。

域（占比为7.2%）。土地利用数据为中国科学院资源环境科学数据中心（<http://www.resdc.cn>）提供的2005年的1:10万土地利用现状数据。气象数据为中国气象科学数据共享服务网（<http://cdc.cma.gov.cn>）提供的2000—2015年月平均气温和月降水量数据，空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。在进行通径分析时，在ArcGIS中用双线性内插法将NDVI重采样为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。

2.3 生长季判定

植被指数时序数据所反映出的植被生长节律可用于识别植被物候期^[23]。三北防护林工程区横跨东北、华北和西北地区，东西跨度大，海拔高度差异明显，各区气候不同，因此生长季时段的确定需要特别考虑。首先采用曲线拟合法^[24]对不同分区的植被指数时序数据进行去除噪声处理，再用导数法^[25]检测植被物候，即通过对植被指数曲线求导，将曲线上升速率最大值对应的日期定义为生长季起始日期，将曲线下降速率最大值对应的日期定义为生长季结束日期^[25]。华北区、黄土高原区和内蒙古区3月底开始返春，而东北区和新疆区4月初植被绿度显著增长，生长季开始；东北区、内蒙古区9月底植被开始枯萎，而华北区、黄土高原区和新疆区10月初植被绿度显著下降，生长季结束（图2）。因此，三北防护林工程区不同分区的生长季时段差异不大，基本可以确定为4—9月。

2.4 研究方法

2.4.1 一元线性回归趋势法 采用一元线性回归趋势法拟合各栅格点的NDVI变化趋势，分析2000—2015年三北防护林工程区的植被绿度变化情况，回归趋势的计算公式^[26]为：

$$\rho = \frac{n \sum_{k=1}^n k \times \bar{Y}_k - \sum_{k=1}^n k \times \sum_{k=1}^n \bar{Y}_k}{n \times \sum_{k=1}^n k^2 - \left(\sum_{k=1}^n k \right)^2} \quad (1)$$

式中： ρ 是趋势线的斜率； n 是监测年数； k 是年序； \bar{Y}_k 是第 k 年的变量值。用F检验法对一元线性回归趋势法的结果进行0.05显著性水平检验。

2.4.2 通径分析法 某自变量与因变量之间的相关关系可分为两部分, 即在不考虑其他自变量影响时自变量对因变量的直接作用和该自变量通过其他自变量对因变量的间接作用。通径分析法^[27]可将自变量对因变量的直接作用和间接作用区分开来, 目前在各行业有较多应用^[28-31], 具体原理^[27]如下:

对于一个相互关联的系统, 若有 n 个自变量 x_i ($i=1, 2, \dots, n$) 和一个因变量 y 之间存在线性关系, 回归方程为:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (2)$$

根据各自变量间的简单相关系数 r_{x_i, x_j} ($i, j \leq n$) 和各自变量与因变量的简单相关系数 $r_{x_i, y}$ ($i \leq n$), 由公式 (2) 通过数学变换, 可建立正规矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} 1 & r_{x_1, x_2} & \dots & r_{x_1, x_n} \\ r_{x_2, x_1} & 1 & \dots & r_{x_2, x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{x_n, x_1} & r_{x_n, x_2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{x_1, y} \\ r_{x_2, y} \\ \vdots \\ r_{x_n, y} \end{bmatrix} \quad (3)$$

解方程 (3) 即可求出通径系数 a_i , a_i 表示自变量 x_i 对因变量 y 的直接通径系数, 为 x_i 对 y 的直接作用效应; $r_{x_i, x_j} \cdot a_j$ 表示自变量 x_i 通过 x_j 对因变量 y 的间接通径系数, 为 x_i 通过 x_j 对因变量 y 的间接作用效应。

气温 (降水) 对植被绿度的直接影响是在不考虑降水 (气温) 变化的影响时, 由于气温 (降水) 的变化对植被绿度产生的影响; 此外, 气温 (降水) 的变化会引起降水 (气温) 变化, 进而影响植被绿度, 即气温 (降水) 对植被绿度的间接影响; 气温 (降水) 对植被绿度的综合影响包括直接影响和间接影响。

为了便于不同单位和量级的指标进行比较, 先用 Z-score 标准化法^[33]对植被绿度、平均气温和降水量进行数据标准化:

$$X_{std} = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad (4)$$

式中: X_{std} 是标准化值; \bar{x} 是平均值; σ 是标准差。

对标准化后的植被绿度 ($NDVI_{std}$)、平均气温 (T_{std}) 和降水量 (P_{std}) 进行多元线性回归:

$$NDVI_{std} = A_t \times T_{std} + A_p \times P_{std} + \varepsilon \quad (5)$$

式中: ε 是残差; A_t 和 A_p 分别表示平均温度、降水量对植被绿度的标准化回归系数 (直接通径系数), 即在不考虑其他变量影响时, 气温、降水对植被绿度的直接影响。

由于平均气温和降水量之间存在相互影响, 其交互作用可表示为:

$$A_{tp} = r_{tp} \times A_p \quad (6)$$

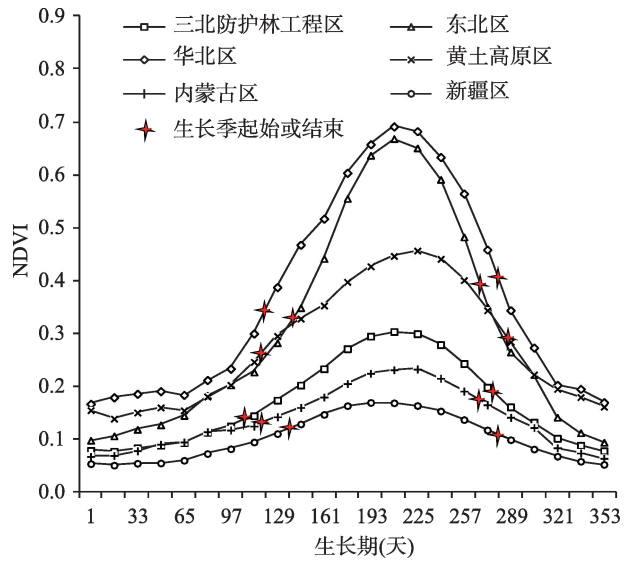


图2 三北防护林工程区不同分区 NDVI 多年均值年内变化
Fig. 2 Inner-annual variations of NDVI in subregions of the Three-North Shelterbelt

$$A_{pt} = r_{tp} \times A_t \quad (7)$$

式中： r_{tp} 表示平均气温和降水量之间的相关系数； A_{tp} 和 A_{pt} 分别表示平均温度、降水量对植被绿度的间接途径系数，即气温、降水通过另一变量对植被绿度的间接影响。

根据途径分析的原理，相关系数等于直接途径系数和间接途径系数之和，即：

$$r_{t-ndvi} = A_t + A_{tp} \quad (8)$$

$$r_{p-ndvi} = A_p + A_{pt} \quad (9)$$

式中： r_{t-ndvi} 和 r_{p-ndvi} 分别表示平均温度、降水量与植被绿度的相关系数，即平均温度、降水量对植被绿度的综合影响。

3 结果分析

3.1 生长季植被绿度空间格局及其变化趋势

3.1.1 生长季多年平均植被绿度空间分布 三北防护林工程区植被生长季NDVI多年均值为0.234，整体上呈现东部高，西部低的空间格局（图3b），林地（0.534）>耕地（0.433）>草地（0.268）。

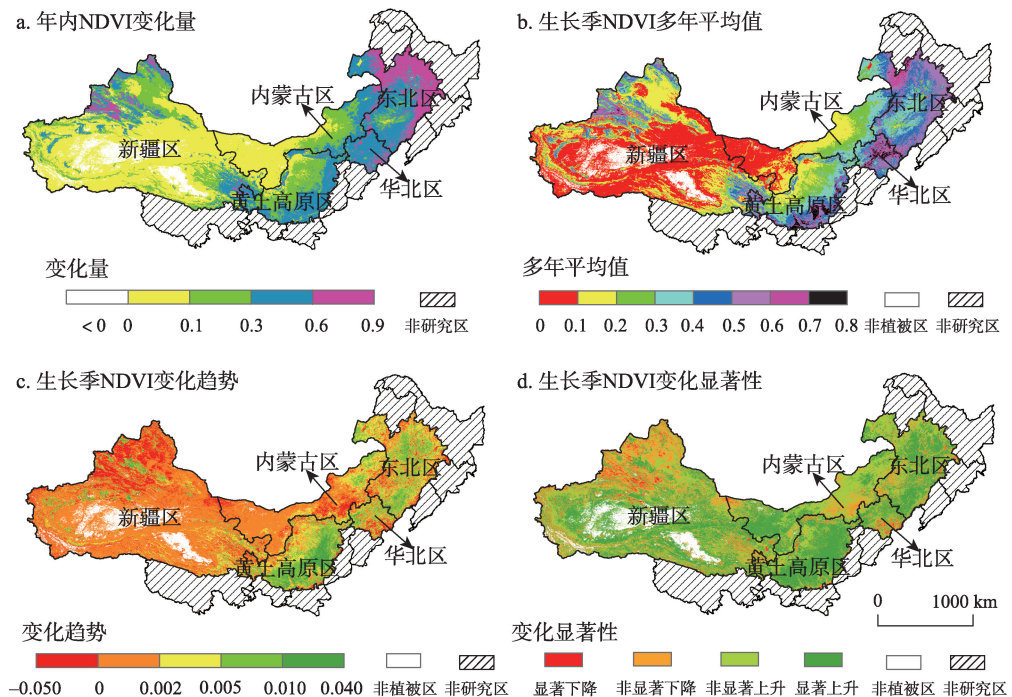


图3 年内NDVI变化量、2000—2015年生长季植被绿度空间分布及变化趋势

Fig. 3 The distributions of the extent of NDVI variation during the year, multi-year mean, linear trend of vegetation greenness in growing season and its significance during 2000-2015

注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图（审图号为GS(2019)1699号）绘制，底图无修改。

塔里木盆地西部、柴达木盆地西部和祁连山等地气候干旱，气温较高而降水量少，不利于植被生长，生长季NDVI多年均值小于0.1； $0.1 < \text{NDVI} \leq 0.3$ 的区域主要位于准格

盆地、内蒙古高原中部、黄土高原西北部和阴山山脉; $0.3 < \text{NDVI} \leq 0.5$ 的区域主要位于大兴安岭西部、阿尔泰山脉、柴达木盆地东部; 长白山山脉西北部、燕山山地、华北地区、太行山和秦岭山脉一带是三北防护林工程区的重点建设区, 气候条件相对较好, 生长季NDVI多年均值大于0.5 (图3b)。总的来说, 三北防护林工程区生长季NDVI的空间分布与气候条件息息相关, 降水多热量足的区域植被绿度高, 气候干旱的区域植被绿度低。

3.1.2 生长季植被绿度的变化趋势 2000—2015年三北防护林工程区74.2%的区域生长季植被绿度呈现增长趋势, 其中呈显著增长趋势(斜率 >0 , $P < 0.05$)的占41.1% (表1), 主要位于燕山山脉、塔里木盆地西部和南部、青藏高原、东北平原和黄土高原大部分地区; 而大兴安岭中南部、小兴安岭中部和阴山山脉北部的增长趋势不显著。受降雨稀少和过度放牧、开垦等的影响, 18.6%的区域生长季植被绿度呈现降低趋势, 主要位于天山山脉、阿尔泰山脉和准格尔盆地, 其中3.5%的区域降低趋势显著, 主要位于天山山脉 (图3d)。对于不同土地利用类型, 耕地NDVI的增长趋势最大, 说明该区自2000年以来实施的退耕还林效果良好。

3.2 生长季气候变化趋势

三北防护林工程区2000—2015年生长季多年平均气温为 15.2°C , 最高值2007年是 15.6°C , 最低值2003年是 14.6°C , 生长季平均气温呈现下降趋势 ($P \geq 0.05$), 降幅为 $0.098^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (图4)。生长季降水量呈现增加趋势 ($P < 0.05$), 增幅为 $21\text{mm}/10\text{a}$, 最小值出现在2000年 (186mm), 最大值出现在2012年 (262mm) (图4)。

2000—2015年三北防护林工程区生长季气温和降水变化具有显著的空间差异, 97.1%的区域生长季气温呈现下降趋势, 昆仑山、塔里木盆地南部区域气温存在上升趋势。61.8%的区域生长季降水量呈上升趋势, 主要集中在大兴安岭附近。生长季降水量呈下降趋势的区域主要位于准格尔盆地、塔里木盆地北部以及阿尔泰山脉区域 (图5)。

3.3 气候因子对植被绿度的影响

3.3.1 气候因子对生长季植被绿度的影响 生长季标准化后的气温、降水和植被绿度的多元线性回归方程统计量 $F=26.653$ ($P < 0.01$), 通径分析过程有效。由表2可以得到, 生长季升温 (降温) 对植被生长表现为抑制 (促进) 作用 (综合影响: -0.379 , $P \geq 0.05$), 在不考虑降水变化的影响时, 升温 (降温) 会直接促进 (抑制) 生长季植被生长 (直接影响: 0.069 , $P \geq 0.05$), 即升温 (降温) 通过减少 (增加) 降水对生长季植被绿度的抑制 (促进) 作用大于其对植被生长的直接促进 (抑制) 作用。生长

表1 生长季植被绿度不同变化趋势所占面积的比例

变化趋势	三北防护林	耕地	林地	草地
显著增长	41.1	55.1	39.2	34.9
非显著增长	33.1	28.6	36.2	39.8
显著降低	3.5	3.9	5.4	4.4
非显著降低	15.1	12.4	19.2	17.7

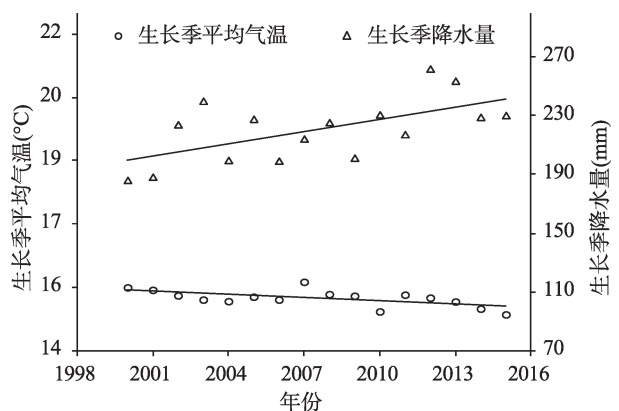


图4 2000—2015年生长季平均气温和降水量年际变化

Fig. 4 Inter annual changes of average temperature and accumulated precipitation in growing season during 2000-2015

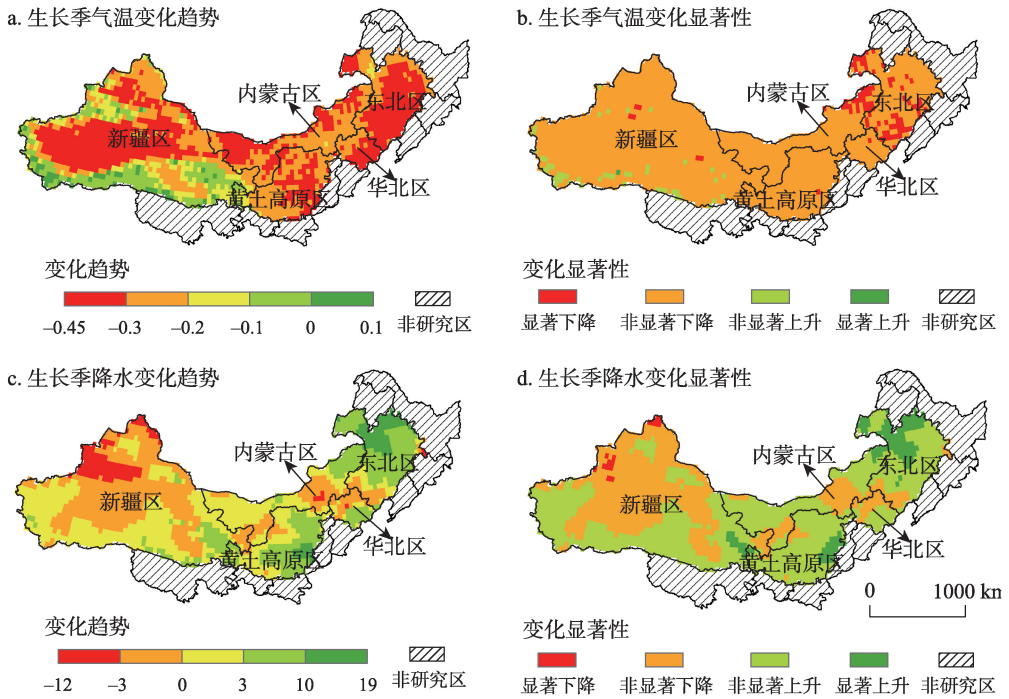


图5 生长季平均气温和降水量变化趋势及其显著性

Fig. 5 Linear trends of mean temperature and accumulated precipitation in growing season and their significances

注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图（审图号为 GS(2019)1699号）绘制，底图无修改。

季升温（降温），增加（减少）了大气水分需求，水分胁迫状况加剧（减弱），抑制（促进）光合作用，不利于（利于）植被生长。

为了简化描述，以升温 and 降水量增加对通径分析的结果为例进行阐述。

在不考虑气温变化影响时，生长季降水增加可以促进 75.4% 的研究区 NDVI 增长，对植被生长有显著促进作用（直接影响：0.928， $P < 0.01$ ）。而生长季降水增多会通过降低气温对 NDVI 产生抑制作用（间接影响：-0.033），使得降水增加对植被生长的促进作用减小 3.5%。总体而言，降水与生长季植被绿度相关系数高于气温，对植被生长影响显著，是影响生长季植被绿度的主要气候因子。

气温和降水对三北防护林工程区生长季植被绿度的影响具有空间异质性，该区位于干旱半干旱地区，气温较高而降水量少，生长季升温会加快蒸散，使土壤干化，抑制大部分区域植被生长。但天山山脉海拔较高，升温加剧积雪融化，水分条件得以改善，促进植被生长（图 6）。生长季降水增加会促进大部分研究区植被生长，但小兴安岭的西南部例外，该区水分状况相对较好，降水增加影响光照条件，减弱光合作用，进而抑制植被生长。

气温和降水对三北防护林工程区生长季植被绿度的影响具有空间异质性，该区位于干旱半干旱地区，气温较高而降水量少，生长季升温会加快蒸散，使土壤干化，抑制大部分区域植被生长。但天山山脉海拔较高，升温加剧积雪融化，水分条件得以改善，促进植被生长（图 6）。生长季降水增加会促进大部分研究区植被生长，但小兴安岭的西南部例外，该区水分状况相对较好，降水增加影响光照条件，减弱光合作用，进而抑制植被生长。

表 2 平均气温和降水量对生长季植被绿度的直接影响、间接影响和综合影响

Tab. 2 The direct effects, indirect effects and combined effects of mean temperature and precipitation on vegetation greening in growing season

气候因子	直接影响	间接影响	综合影响
气温	0.069	-0.448	-0.379
降水	0.928**	-0.033	0.895**

注：**表示 $P < 0.01$ 。

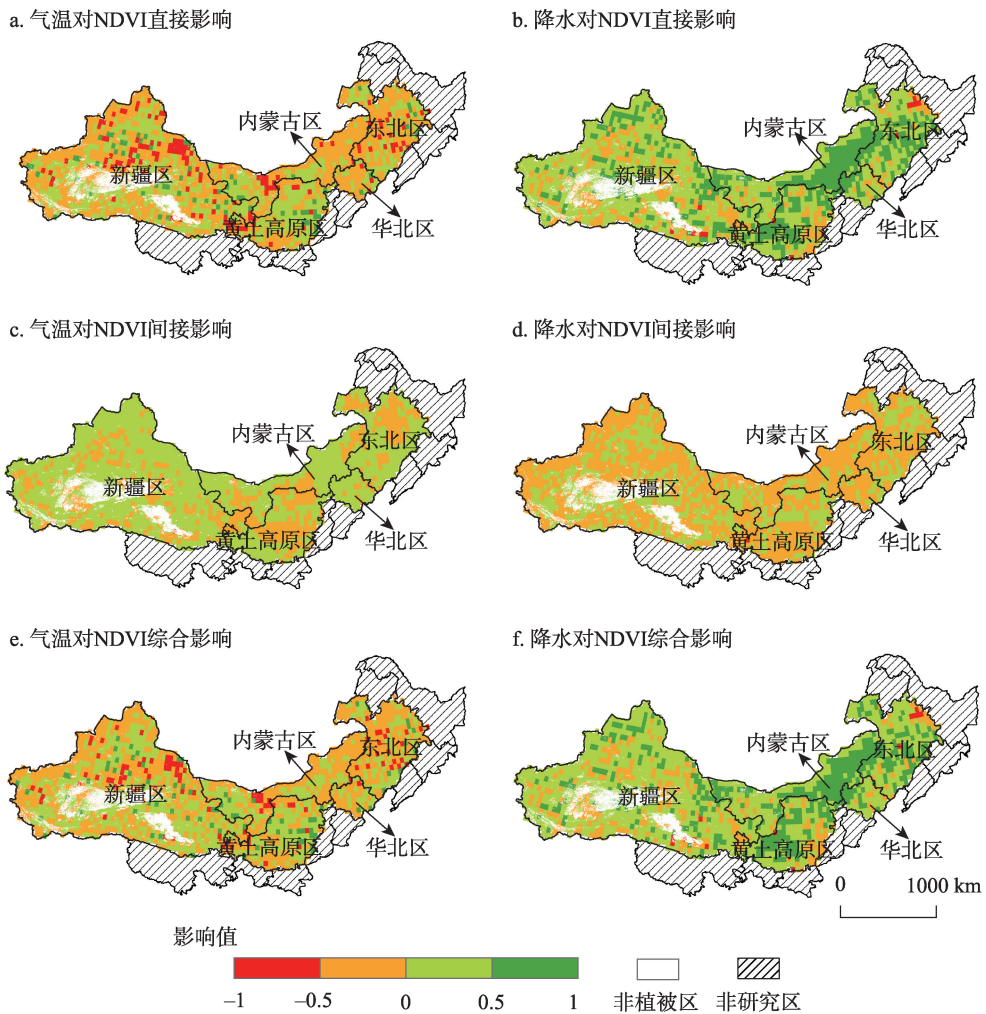


图6 2000—2015年平均气温和降水量对生长季植被绿度影响的空间分布

Fig. 6 Spatial distributions of the effects of mean temperature and precipitation on vegetation greenness in growing season during 2000-2015

注: 该图基于国家测绘地理信息局标准地图(审图号为GS(2019)1699号)绘制, 底图无修改。

3.3.2 气候因子对生长季不同时期植被绿度的影响 生长季初期、中期、末期标准化后的气温、降水和植被绿度的多元线性回归方程统计量分别为 $F=8.981$ ($P<0.01$)、 $F=3.674$ ($P<0.05$)、 $F=4.985$ ($P<0.05$), 通径分析过程均有效。

由图7可以看出, 生长季初期, 在不考虑气温降水的相互作用时, 升温 and 降水增加均会促进植被绿度增长, 其中升温对植被生长的正效应(直接影响: 0.762, $P<0.01$)显著, 且大于降水增加的促进作用(直接影响: 0.201, $P\geq 0.05$)。气温和降水呈非显著性相关(相关系数: -0.132), 升温通过影响降水对植被生长的抑制作用较低(间接影响: -0.027), 基本可以忽略不计, 而降水增加通过降低气温产生的间接抑制作用使得降水对植被绿度的促进作用减少50%(综合影响: 0.100, $P\geq 0.05$)。生长季初期气温对植被绿度的作用大于降水, 是影响植被生长的关键气候因子。

生长季中期, 升温不利于植被生长(综合影响: -0.406 , $P<0.05$), 然而这种负效应

有66%是通过降水的作用而实现的（间接影响： -0.270 ），如果不考虑降水变化的影响，升温对植被的影响降低（直接影响： -0.136 ），气温通过降水对植被绿度的间接负效应大于直接负效应。在不考虑气温影响时，降水增加会促进62.8%研究区植被生长（表3）。生长季中期气温和降水对植被绿度的直接作用均不显著，但气温和降水显著相关，且相关系数达到 -0.521 ，大于生长季初期和末期。生长季中期气温和降水与植被绿度均显著相关，且相关系数的绝对值表现为降水（ $P < 0.01$ ）大于气温（ $P < 0.05$ ），说明降水是影响生长季中期植被绿度的主要气候因子。

生长季末期，升温会抑制植被生长（综合影响： -0.263 ， $P \geq 0.05$ ），虽然气温通过降水变化对植被绿度也产生负效应（间接影响： -0.064 ），但其抑制作用主要通过直接影响实现（直接影响： -0.199 ， $P \geq 0.05$ ）。在不考虑气温影响时，生长季末期降水增加会显著促进植被绿度增长（直接影响： 0.607 ， $P < 0.01$ ），降水是影响生长季末期植被生长的关键气候因子。

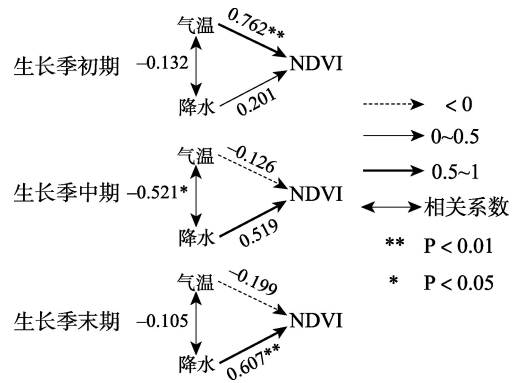


图7 2000—2015年平均气温和降水量对生长季植被绿度影响的通径分析

Fig. 7 Path diagrams of the effects of mean temperature and precipitation on vegetation greenness in growing season during 2000-2015

表3 平均气温和降水量对植被绿度的正负直接影响、间接影响和综合影响所占比例

Tab. 3 The area ratios of direct effects, indirect effects and combined effects of mean temperature and precipitation on vegetation greening (%)

		气温		降水	
		正值	负值	正值	负值
生长季初期	直接影响	66.8	26.0	56.0	36.8
	间接影响	37.7	55.1	37.9	54.9
	综合影响	64.5	28.3	53.3	39.5
生长季中期	直接影响	48.1	44.7	62.8	30.0
	间接影响	63.2	29.6	47.2	45.6
	综合影响	54.9	37.9	63.4	29.4
生长季末期	直接影响	46.4	46.4	58.2	34.6
	间接影响	41.1	51.7	45.5	47.3
	综合影响	44.3	48.5	58.6	34.2

总的来说，生长季初期升温会促进植被生长，而生长季中期和末期升温会抑制植被生长。生长季初期的气温较低，升温会提高植被光合作用，促进有机质分解提高土壤养分，进而促进植被生长^[20]；对于生长季中期和末期，热量条件不再是限制植被生长的主要因素，且升温会加快蒸散，减少土壤水分，此时升温对植被绿度表现为抑制作用。生长季初期、中期和末期降水增加对植被绿度均为促进作用，表现为：生长季末期（综合影响： 0.628 ， $P < 0.01$ ） $>$ 中期（综合影响： 0.590 ， $P < 0.01$ ） $>$ 初期（综合影响： 0.100 ， $P \geq 0.05$ ）（表4）。生长季前期，植被刚刚开始返青，叶面积指数小，蒸散量小，植被需水量较小，由夏季降水和冬季降雪所补充的土壤底墒即可满足，因此生长季前期降水增加

对植被生长的促进作用较小。随着春季温度回升, 植被返青后迅速生长, 叶面积增大, 土壤蒸发和叶面蒸腾作用加快, 植被的需水量增加, 因此植被生长的中后期对降水的响应更加敏感, 降水量增加对植被生长的促进作用更大。

表4 平均气温和降水量对生长季不同时期植被绿度的综合影响

Tab. 4 The combined effects of mean temperature and precipitation on vegetation greenness in different periods of the growing season

气候因子	生长季初期	生长季中期	生长季末期
气温	0.735**	-0.406*	-0.263
降水	0.100	0.590**	0.628**

注: *表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$ 。

4 讨论

本文采用的NDVI和气象数据的空间分辨率不同, 分别为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 、 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 考虑到小尺度上植被绿度主要受其立地的土壤特性和微地形的影响, 而在较大尺度上气候条件起主导作用^[33], 在进行通径分析时, 在ArcGIS中用双线性内插法对NDVI进行重采样升尺度, 使其空间分辨率与气温、降水数据一致。为进一步讨论这样处理的合理性及对结果的影响, 用同样的方法对气温和降水数据进行重采样, 在 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 空间分辨率下将生长季植被绿度对气温和降水的响应进行通径分析, 与 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 进行对比。结果表明, 2000—2015年生长季平均NDVI、气温、降水在两种不同的空间分辨率下, 经过独立样本T检验的显著性分别为 $P = 0.805$, $P = 0.719$, $P = 0.754$, 均大于0.05, 无显著性差异。在 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 空间分辨率下, 生长季升温对植被生长表现为抑制作用 (综合影响: -0.352 , $P \geq 0.05$), 但在不考虑降水变化的影响时, 升温会直接促进生长季植被生长 (直接影响: 0.088 , $P \geq 0.05$), 降水增加促进植被绿度增长 (综合影响: 0.881 , $P < 0.05$), 与 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 分辨率下的结论一致, 说明气温和降水对植被绿度影响的尺度效应不明显。

气温和降水是影响植被生长的主要气候因子, 由于两者之间存在相互作用, 使得它们对植被生长的影响更加复杂。在内蒙古东北部, 降水增多的同时会降低气温, 不利于植被生长^[34], 而在华北地区, 全球变暖会导致降水减少, 对植被生长不利^[35], 说明气温和降水会通过相互作用对植被产生间接影响, 这些影响很少被量化, 而通径分析法可以将气温、降水对植被生长的直接、间接影响进行区分。本文研究发现三北防护林工程区生长季升温不利于植被生长, 而降水增加促进植被绿度增长, 这与吴云等^[16]运用相关分析法得到的结果一致。基于通径分析的进一步研究发现, 三北防护林工程区生长季升温会直接促进植被生长, 但温度升高的同时会影响降水量的变化, 从而对植被生长产生抑制作用, 由于其抑制作用大于直接促进作用, 升温对植被生长总体表现为抑制作用。

作为典型的干旱半干旱地区, 生长季不同时期, 三北防护林工程区的降水增加均会促进植被生长, 进一步说明降水对植被生长的重要性, 但升温对植被绿度增长的影响在生长季不同时期存在差异。温度影响植物的光合、呼吸等生理生化过程, 当气温低于适宜温度时, 升温会促进植被生长; 而当气温高于适宜温度时, 升温会影响植物的代谢, 导致植物出现萎蔫等现象, 生长受到抑制。生长季初期, 研究区气温较低, 升温可以显著提高光合作用酶活性, 提高植物净光合速率, 进而促进植被生长, 这与华北地区、呼伦贝尔草原、科尔沁沙地、浑善达克沙地的研究结果一致^[36-39]。在生长季中期, 气温逐渐上升, 气温高于适宜温度的时间在增加, 对植被生长的影响逐渐以抑制作用为主。生长季末期植被生长对水分变化敏感, 植被生长受降水量的限制, 这与杜家强等^[40]针对新疆地区研究得到的生长季末期植被生长受气温限制结果有所差异, 主要是因为新疆位于三北防护林工程区的西北部, 其中阿尔泰山、天山山脉、昆仑山脉和帕米尔高原均为高海

拔低温地区,因此生长季末期升温依然会促进植被生长。而三北防护林工程区涵盖范围广,各地气候差异较大,气温对植被生长的影响得到平均,生长季末期升温对整个区域表现为抑制作用。

本研究只对降水、气温对植被绿度的影响进行了分析,而植被对气温和降水的滞后响应没有做进一步分析;同时植被绿度的时空变化是自然因素和人类活动共同作用的结果,如何定量分离这些因素对NDVI的影响等也需进一步深入研究。

5 结论

基于2000—2015年MODIS NDVI数据和气象数据,运用通径分析法探究三北防护林工程区植被生长季及其不同阶段气候因子对植被绿度的影响。结果表明三北防护林工程区2000—2015年生长季植被绿度呈现增长趋势,植被覆盖状况得到改善。受2000年以来实施退耕还林政策的影响,耕地植被增长趋势最大。生长季升温抑制植被生长,降水量增加促进植被生长,降水量是影响三北防护林工程区生长季植被生长的关键气候因子。在不考虑降水变化影响时,升温促进植被生长,但生长季温度升高带来的降水量减少使得升温对植被生长表现为抑制作用。生长季初期气温较低,升温有利于叶片光合作用,促进植被生长,而中期和末期升温会抑制植被生长,其中末期升温对植被生长的负效应主要通过直接影响实现,而中期主要通过降水变化间接实现。不同生长阶段降水量增加对植被生长的促进程度不同,表现为生长季末期>中期>初期。

参考文献(References)

- [1] 张泽秀,刘利民,贾燕,等.三北地区防护林气候生态适应性分析.生态学杂志,2009,28(9):1696-1701. [Zhang Zexiu, Liu Limin, Jia Yan, et al. Climatic ecological adaptation of shelter forests in Three-North Regions. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(9): 1696-1701.]
- [2] 毛日昕,陈罡,张少强.三北防护林工程建设中若干问题及应对建议.防护林科技,2017,(10):58-59+61. [Mao Rixin, Chen Gang, Zhang Shaoqiang. Several problems in the construction of the Three-North Shelter Forest Program and suggestions for its countermeasures. Protection Forest Science and Technology, 2017, (10): 58-59+61.]
- [3] 米锋,李吉跃,杨家伟.森林生态效益评价的研究进展.北京林业大学学报,2003,25(6):77-83. [Mi Feng, Li Jiyue, Yang Jiawei. Review on research of evaluation on forest ecological benefits. Journal of Beijing Forestry University, 2003, 25(6): 77-83.]
- [4] 李辉霞,刘淑珍.基于ETM+影像的草地退化评价模型研究:以西藏自治区那曲县为例.中国沙漠,2007,27(3):412-418. [Li Huixia, Liu Shuzhen. Research on grassland degradation assessment model based on ETM+image: A case study in Naqu county of Tibet. Journal of Desert Research, 2007, 27(3): 412-418.]
- [5] 王宇航,赵鸣飞,康慕谊,等.黄土高原地区NDVI与气候因子空间尺度依存性及非平稳性研究.地理研究,2016,35(3):493-503. [Wang Yuhang, Zhao Mingfei, Kang MUYI, et al. Spatial scale-dependent and non-stationarity relationships between NDVI and climatic factors in the Loess Plateau. Geographical Research, 2016, 35(3): 493-503.]
- [6] 石玉琼,郑亚云,李团胜.榆林地区2000-2014年NDVI时空变化.生态学杂志,2018,37(1):211-218. [Shi Yuqiong, Zheng Yayun, Li Tuansheng. The spatiotemporal change of NDVI in Yulin, Shaanxi province, China from 2000 to 2014. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(1): 211-218.]
- [7] 张晓东,朱文博,崔耀平,等.伏牛山地区森林植被动态变化对水热条件的响应.地理研究,2016,35(6):1029-1040. [Zhang Xiaodong, Zhu Wenbo, Cui Yaoping, et al. The response of forest dynamics to hydro-thermal change in Funiu Mountain. Geographical Research, 2016, 35(6): 1024-1040.]
- [8] 常纯,王心源,杨瑞霞,等.基于DEM-NDVI的高山植被带定量刻划.地理研究,2015,34(11):2113-2123. [Chang Chun, Wang Xinyuan, Yang Ruixia, et al. A quantitative characterization method for alpine vegetation zone based on DEM and NDVI. Geographical Research, 2015, 34(11): 2113-2123.]
- [9] 白建军,白江涛,王磊.2000-2010年陕北地区植被NDVI时空变化及其与区域气候的关系.地理科学,2014,34(7):882-888. [Bai Jianjun, Bai Jiangtao, Wang Lei. Spatio-temporal change of vegetation NDVI and its relations with region-

- al climate in northern Shaanxi province in 2000-2010. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(7): 882-888.]
- [10] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1999. *Nature*, 1997, 386(6626): 698-702.
- [11] Myneni R B, Tucker C J, Asrar G, et al. Interannual variations in satellite-sensed vegetation index data from 1981 to 1991. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, 103(D6): 6145-6160.
- [12] 孙艳玲, 郭鹏. 1982-2006 年华北植被指数时空变化特征. 干旱区研究, 2012, 29(2): 187-193. [Sun Yanling, Guo Peng. Spatiotemporal variation of vegetation coverage index in North China during the period from 1982 to 2006. *Arid Zone Research*, 2012, 29(2): 187-193.]
- [13] 神祥金, 吴正方, 杜海波. 东北地区植被 NDVI 变化及对气象因子的响应. 东北师大学报 (自然科学版), 2013, 45(1): 123-130. [Shen Xiangjin, Wu Zhengfang, Du Haibo. Variation of vegetation in the Northeast China and its response to meteorological factors. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 2013, 45(1): 123-130.]
- [14] 孟梦, 牛铮, 马超, 等. 青藏高原 NDVI 变化趋势及其对气候的响应. 水土保持研究, 2018, 25(3): 360-365. [Meng Meng, Niu Zheng, Ma Chao, et al. Variation trend of NDVI and response to climate change in Tibetan Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(3): 360-365.]
- [15] 赵安周, 刘宪锋, 朱秀芳, 等. 2000-2014 年黄土高原植被覆盖时空变化特征及其归因. 中国环境科学, 2016, 36(5): 1568-1578. [Zhao Anzhou, Liu Xianfeng, Zhu Xiufang, et al. Spatiotemporal analyses and associated driving forces of vegetation coverage change in the Loess Plateau. *China Environmental Science*, 2016, 36(5): 1568-1578.]
- [16] 吴云, 曾源, 吴炳方, 等. 基于 MODIS 数据的三北防护林工程区植被覆盖度提取与分析. 生态学杂志, 2009, 28(9): 1712-1718. [Wu Yun, Zeng Yuan, Wu Bingfang, et al. Retrieval and analysis of vegetation cover in the Three-North regions of China based on MODIS data. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(9): 1712-1718.]
- [17] 申丽娜, 孙艳玲, 杨艳丽, 等. 基于 NDVI 的三北防护林工程区植被覆盖度变化图谱特征. 环境科学与技术, 2017, 40(4): 70-77. [Shen Lina, Sun Yanling, Yang Yanli, et al. Spectrum characteristic of vegetation coverage change based on NDVI in the Three-North Shelter Forest Program. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(4): 70-77.]
- [18] 李本纲, 陶澍. AVHRR NDVI 与气候因子的相关分析. 生态学报, 2000, 20(5): 898-902. [Li Bengang, Tao Shu. Correlation between AVHRR NDVI and climate factors. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 898-902.]
- [19] 刘少华, 严登华, 史晓亮, 等. 中国植被 NDVI 与气候因子的年际变化及相关性研究. 干旱区地理, 2014, 37(3): 480-489. [Liu Shaohua, Yan Denghua, Shi Xiaoliang, et al. Inter-annual variability of vegetation NDVI, accumulated temperature and precipitation and their correlations in China. *Arid Land Geography*, 2014, 37(3): 480-489.]
- [20] 周梦甜, 李军, 朱康文. 西北地区 NDVI 变化与气候因子的响应关系研究. 水土保持研究, 2015, 22(3): 182-187. [Zhou Mengtian, Li Jun, Zhu Kangwen. Changes of NDVI in different regions of Northwest area and its responses to climate factor. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(3): 182-187.]
- [21] 王强, 张勃, 戴声佩, 等. 基于 GIMMS AVHRR NDVI 数据的三北防护林工程区植被覆盖动态变化. 资源科学, 2011, 33(8): 1613-1620. [Wang Qiang, Zhang Bo, Dai Shengpei, et al. Dynamic changes in vegetation coverage in the Three-North Shelter Forest Program based on GIMMS AVHRR NDVI. *Resources Science*, 2011, 33(8): 1613-1620.]
- [22] 王强, 张勃, 戴声佩, 等. 三北防护林工程区植被覆盖变化与影响因子分析. 中国环境科学, 2012, 32(7): 1302-1308. [Wang Qiang, Zhang Bo, Dai Shengpei, et al. Analysis of the vegetation cover change and its relationship with factors in the Three-North Shelter Forest Program. *China Environmental Science*, 2012, 32(7): 1302-1308.]
- [23] 范德芹, 赵学胜, 朱文泉, 等. 植物物候遥感监测精度影响因素研究综述. 地理科学进展, 2016, 35(3): 304-319. [Fan Deqin, Zhao Xuesheng, Zhu Wenquan, et al. Review of influencing factors of accuracy of plant phenology monitoring based on remote sensing data. *Progress in Geography*, 2016, 35(3): 304-319.]
- [24] Beck P S A, Atzberger C, Høgdal K A, et al. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100(3): 321-334.
- [25] White M A, Thornton P E, Running S W. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, 11(2): 217-234.
- [26] 宋怡, 马明国. 基于 GIMMS AVHRR NDVI 数据的中国寒旱区植被动态及其与气候因子的关系. 遥感学报, 2008, 12(3): 499-505. [Song Yi, Ma Mingguo. Variation of AVHRR NDVI and its relationship with climate in Chinese arid and cold regions. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(3): 499-505.]
- [27] 杜家菊, 陈志伟. 使用 SPSS 线性回归实现通径分析的方法. 生物学通报, 2010, 45(2): 4-6. [Du Jiayu, Chen Zhiwei. Method of path analysis with SPSS linear regression. *Bulletin of Biology*, 2010, 45(2): 4-6.]
- [28] 贺江舟, 龚明福, 范君华, 等. 逐步回归及通径分析在主成分分析中的应用. 新疆农业科学, 2010, 47(3): 431-437. [He Jiangzhou, Gong Mingfu, Fan Junhua, et al. Application of stepwise regression and path analysis in principal compo-

- nent. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2010, 47(3): 431-437.]
- [29] 蔡甲冰, 许迪, 刘钰, 等. 冬小麦返青后腾发量时空尺度效应的通径分析. *农业工程学报*, 2011, 27(8): 69-76. [Cai Jiabing, Xu Di, Liu Yu, et al. Path analysis on spatio-temporal scaling effect of crop evapotranspiration in growing seasons for winter wheat after reviving. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(8): 69-76.]
- [30] 徐春华, 张华, 张兰, 等. 基于通径分析的兰州北山三种典型植物光合作用影响因子. *生态学杂志*, 2015, 34(5): 1289-1294. [Xu Chunhua, Zhang Hua, Zhang Lan, et al. Factors influencing photosynthesis of three typical species in Beishan Mountain of Lanzhou based on path analysis. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(5): 1289-1294.]
- [31] 谭丽萍, 刘苏峡, 莫兴国, 等. 华北人工林水热碳通量环境影响因子分析. *植物生态学报*, 2015, 39(8): 773-784. [Tan Liping, Liu Suxia, Mo Xingguo, et al. Environmental controls over energy, water and carbon fluxes in a plantation in Northern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(8): 773-784.]
- [32] 张立军, 袁能文. 线性综合评价模型中指标标准化方法的比较与选择. *统计与信息论坛*, 2010, 25(8): 10-15. [Zhang Lijun, Yuan Nengwen. Comparison and selection of index standardization method in linear comprehensive evaluation model. *Statistics & Information Forum*, 2010, 25(8): 10-15.]
- [33] 李双成, 蔡运龙. 地理尺度转换若干问题的初步探讨. *地理研究*, 2005, 24(1): 11-18. [Li Shuangcheng, Cai Yunlong. Some scaling issues of geography. *Geographical Research*, 2005, 24(1): 11-18.]
- [34] Chuai X W, Huang X J, Wang W J, et al. NDVI, temperature and precipitation changes and their relationships with different vegetation types during 1998-2007 in Inner Mongolia, China. *International Journal of Climatology*, 2013, 33(7): 1696-1706.
- [35] 徐康, 祝从文, 何金海. 近50年环贝加尔湖区变暖对中国华北夏季降水的影响机理. *高原气象*, 2011, 30(2): 309-317. [Xu Kang, Zhu Congwen, He Jinhai. Impact of the surface air temperature warming around Lake Baikal on trend of summer precipitation in North China in the past 50 years. *Plateau Meteorology*, 2011, 30(2): 309-317.]
- [36] 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. [Zhang Geli, Xu Xingliang, Zhou Caiping, et al. Response of vegetation changes to climatic variations in Hulun Buir grassland in past 30 years. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 47-58.]
- [37] 孙艳玲, 郭鹏. 1982-2006年华北植被覆盖变化及其与气候变化的关系. *生态环境学报*, 2012, 21(1): 7-12. [Sun Yanling, Guo Peng. Variation of vegetation coverage and its relationship with climate change in north China from 1982 to 2006. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(1): 7-12.]
- [38] 马龙, 王静茹, 刘廷玺, 等. 2000-2012年科尔沁沙地植被与气候因子间的响应关系. *农业机械学报*, 2016, 47(4): 162-172. [Ma Long, Wang Jingru, Liu Tingxi, et al. Response relationship between vegetation and climate factors in Horqin sandy land from 2000 to 2012. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(4): 162-172.]
- [39] 元志辉, 包刚, 银山, 等. 2000-2014年浑善达克沙地植被覆盖变化研究. *草业学报*, 2016, 25(1): 33-46. [Yuan Zhihui, Bao Gang, Yin Shan, et al. Vegetation changes in Otindag sand country during 2000-2014. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(1): 33-46.]
- [40] 杜家强, 赵晨曦, 贾尔恒·阿哈提, 等. 近30a新疆月NDVI动态变化及其驱动因子分析. *农业工程学报*, 2016, 32(5): 172-181. [Du Jiaqiang, Zhao Chenxi, Jiaerheng Ahati, et al. Analysis on spatio-temporal trends and drivers in monthly NDVI during recent decades in Xinjiang, China based two datasets. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(5): 172-181.]

Responses of vegetation greenness to temperature and precipitation in the Three-North Shelter Forest Program

XIE Shudi^{1,2}, MO Xingguo¹, HU Shi¹, CHEN Xuejuan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. School of Natural Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Exploring the responses of vegetation greenness to temperature and precipitation can provide scientific basis for vegetation construction in the Three-North Shelter Forest Program. Based on MODIS NDVI and meteorological data from 2000 to 2015, the path analysis method was used to analyze the direct and indirect effects of climatic factors on vegetation greenness in different growth stages. It was found that the multi-year mean NDVI in the growing season showed a decreasing trend from east to west, and the value was listed as follows: forest > cropland > grassland. Vegetation greenness presented an upward trend during the past 16 years, and the most noticeable increases in NDVI occurred in cropland. In the growing season, temperature rise inhibited vegetation growth, while the contributions of precipitation to NDVI were positive. Precipitation is the key meteorological factor affecting vegetation greenness in the Three-North Shelter Forest Program. When the influence of precipitation change was not considered, the warming promoted the NDVI, but the decrease of precipitation caused by warming in the growing season led to the inhibition effect. Precipitation increase was favorable to greenness enhancement in different periods, the orders of influence degree of precipitation on NDVI were, in turn, the end of growing season, the middle of growing season and the early growing season. The effects of temperature on vegetation greenness varied at different stages of the growing season. Warming in early growing season was beneficial for the vegetation growth, but in the middle and the end of growing season, it showed negative effect on plant productivity enhancement. Among them, the negative effects of warming in the end of growing season were mainly realized by direct effects, while they were mainly realized indirectly through precipitation changes in the middle of growing season. This research showed that the impact of climate change on vegetation depended on the time scale. Therefore, it is necessary to distinguish the periods in assessing the response of vegetation to climate change so that we can obtain a comprehensive understanding.

Keywords: the Three-North Shelter Forest Program; climate change; vegetation greenness; responses; path analysis method