

# 华北地区植被 NDVI 与不同气候指标的相关分析

冯敏<sup>1,2</sup>, 孙艳玲<sup>1</sup>, 刘斌<sup>1</sup>, 王中良<sup>1</sup>

(1. 天津师范大学 城市与环境科学学院, 天津 300387; 2. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 400047)

**摘要:** 对 1982—2006 年华北地区归一化植被指数(NDVI)与不同气候指标(年平均气温、年降水量、干燥度指数、生物热量指数和生物干湿度指数)的相关性进行了分析。结果表明,1982—2006 年华北地区植被 NDVI 总体呈现上升趋势,其中农田和灌丛的植被 NDVI 上升趋势最明显;1982—2006 年华北地区年平均气温和生物热量指数呈显著增加趋势,年降水量、干燥度指数和生物干湿度指数呈减少趋势;整体上华北地区植被 NDVI 年变化与当年的干燥度指数呈极显著负相关,与上一年的年平均气温呈显著正相关关系,其中草地植被 NDVI 与年均气温、年降水量呈现显著正相关,与干燥度指数呈极显著负相关,农田和灌丛植被 NDVI 与年均气温显著正相关。此外,华北地区植被 NDVI 与不同气候指标的相关性存在明显的空间差异。

**关键词:** NDVI; 气候指标; 相关分析; 华北地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)01-0246-06

中图分类号: Q948.1

## Correlation Between NDVI and Different Climate Indices in North China

FENG Min<sup>1,2</sup>, SUN Yan-ling<sup>1</sup>, LIU Bin<sup>1</sup>, WANG Zhong-liang<sup>1</sup>

(1. College of Urban and Environment Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China;

2. College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China)

**Abstract:** This paper analyzed the correlations between normalized difference vegetation index(NDVI) and different climate indices(annual mean temperature, annual precipitation, aridity index, biological heat index and biological humidity index) in North China from 1982 to 2006. Results showed that temporal change of NDVI presented an overall upward trend, especially in farmland and bush land. Mean annual temperature and biological heat index increased significantly, while annual precipitation, aridity index and biological humidity index decreased. Overall, the NDVI was significantly negatively correlated with aridity index in corresponding period and positively correlated with temperature in previous period. The NDVI for grassland had a significantly positive correlation with mean annual temperature and precipitation and a most significantly negative correlation with aridity index. The NDVI for farmland and bush land was significantly positively correlated with mean annual temperature. In addition, there were significant spatial differences in the correlation between NDVI and climatic indices in North China.

**Keywords:** NDVI; climate index; correlation analysis; North China

植被是陆地生态系统的主体,也是大气圈、生物圈和土壤圈相互联系的枢纽,在全球气候变化研究中起到“指示器”的作用<sup>[1]</sup>。一般而言,大尺度上的气候要素是决定陆地植被类型分布格局及其功能特性的最主要因素,植被则是地球气候最鲜明的反映和标志<sup>[2]</sup>。研究植被变化及其与气候因子的关系在全球

变化研究中具有重要的意义。归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)是监测地区或全球植被和生态环境的有效指标,是植被生长状况及植被覆盖度的最佳指示因子<sup>[3]</sup>。长时间序列 NDVI 数据已广泛用于植被变化趋势研究<sup>[4-6]</sup>,而且, NDVI 作为研究植被与气候关系的一个有效工具,也

收稿日期:2013-01-26

修回日期:2013-04-07

资助项目:国家自然科学基金项目“气候变化和人类活动在华北地区植被覆盖变化过程中的相对作用研究”(41001022); 国家科技支撑计划项目“滨海新区及周边地区海岸带生态系统保护与恢复技术及示范”(2012BAC07B02); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0954); 天津师范大学市级重点实验室开发研究基金课题(YF11700102); 天津师范大学教改项目(2011)

作者简介:冯敏(1989—),女(苗族),重庆市人,硕士研究生,主要从事生态环境方面研究。E-mail:fengminqj@163.com。

通信作者:孙艳玲(1977—),女(满族),天津市人,博士,副教授,主要从事植被与气候关系研究。E-mail:flyling99@163.com。

已得到广泛应用。但是,目前大多数研究主要集中在 NDVI 与气温、降水这两个气候指标的相关分析方面,例如,Ichii 等<sup>[7]</sup>研究了气候变化与全球 NDVI 的关系,发现北半球中高纬度地区春秋季节 NDVI 与温度显著相关;利用 NDVI 研究植被对气候的响应时,Rasumsen 等<sup>[8]</sup>发现 NDVI 与降水量高度相关;朴世龙等<sup>[9]</sup>和赵茂盛等<sup>[10]</sup>利用 NDVI 和气温、降水研究中国植被变化,发现植被的增加源于温度的升高,但在区域尺度上则与降水有关。NDVI 与气温、降水等单一气候因子之间的相关性分析固然有一定的意义,但是,植被对气候和其他环境因子的反应是综合的,因此,必须强调气候因子的综合影响。倪健<sup>[11]</sup>提出了以月平均气温 10 °C 为界的生物热量指数(BWI)和生物干湿度指数(BK),发现植被类型分布与热量因子和干湿度因子具有较好的相关性,并被运用到其他相关研究中<sup>[12]</sup>。此外,干燥度指数作为表征一个地区干湿程度的指标也可以用于植被与气候的关系研究<sup>[13]</sup>。张远东等<sup>[14]</sup>分析了西南地区不同植被类型 NDVI 与气候因子的相关性,结果表明,沼泽、灌丛、草原、草甸和栽培植被 NDVI 与干旱指数的相关性最大。

基于上述研究可以发现,NDVI 不仅与单一气候指标有密切关系,而且与综合气候指标也有很好的相关性。目前,关于不同气候指标与植被指数相关关系对比分析研究较少,为此,本文以华北地区作为研究区域,探讨 1982—2006 年华北地区植被动态及其与不同气候指标(年平均气温、年降水量、干燥度指数、生物热量指数、生物干湿度指数)之间的相关关系,旨在寻求华北地区气候变化对植被变化的影响和植被生长对气候的反馈规律,为保护华北地区的生态环境提供理论支持和指导依据。

## 1 数据与研究方法

### 1.1 研究区概况

华北地区地处中国地形的第三阶梯,行政上包含北京市、天津市、河北省、山西省和内蒙古自治区。该区域面积广阔,受季风气候影响明显,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,年平均气温在 7 °C 左右,夏季热量充足,降水量自沿海向内陆逐渐减少,平均年降水量在 400 mm 左右,且降水主要集中在 7—8 月。自然条件比较优越,适合农作物及植被的生长。华北地区的土地覆盖类型复杂多样,主要包括森林、灌丛、草地、农田等<sup>[15]</sup>。此外,华北地区拥有丰富的自然资源,再

加上便利的海陆空交通运输条件以及首都北京的辐射带动作用,使得华北地区经济得到了快速发展。然而同时也给华北地区带来一系列环境问题,使该区时常受到沙尘暴、水土流失等自然灾害的影响,生态环境比较脆弱。

### 1.2 NDVI 数据来源与处理

本文中所采用的 GIMMIS/NDVI(global inventory modeling and mapping studies/normalized difference vegetation index)数据来源于 NASA(national aeronautics and space administration)全球监测的植被指数数据,时间分辨率为 15 d,时间跨度为 1982 年 1 月至 2006 年 12 月,空间分辨率为 8 km×8 km,投影方式为 Albers 投影。首先,利用 ArcGIS 9.3 软件获得华北地区的 NDVI 数据,通过最大值合成法(maximum value composites, MVC)将每月的上、半月每 15 d 的 NDVI 取最大值,每个栅格的 NDVI 值用该月最大的 NDVI 代替,同样采用 MVC 法得到每个栅格的年最大 NDVI 值,进而得到 1982—2006 年 25 a 的 NDVI 序列。

### 1.3 气象数据来源与处理

本文的气象数据来自国家气象局华北地区 85 个气象观测站(附图 3),包括各个站点的经度、纬度和 1982—2006 年逐月的气温、降水数据。分别计算出年平均气温、年降水量、干燥度指数、生物热量指数、生物干湿度指数 5 种气候指标的数值。同时,采用 ArcGIS 软件中的克里格插值法对华北地区的不同气候指标进行空间插值生成各气候指标的栅格图,其投影方式和空间分辨率与植被 NDVI 栅格数据一致。其中,干燥度指数和生物热量指数、生物干湿度指数的计算公式如下。

(1) 干燥度指数。用气温、热量、降水气候因子构成函数表达式,用来研究华北地区 1982—2006 年的气候干燥程度(降水与蒸散量的差值)<sup>[16]</sup>。干燥度指数  $r$  的计算公式如下:

$$r = \frac{E_{pm}}{P} \quad (1)$$

式中: $E_{pm}$ ——一年可能蒸散量(mm); $P$ ——年降水量(mm)。

(2) 生物热量指数和生物干湿度指数。采用倪健等<sup>[11]</sup>提出的修正生物热量指数 BWI(°C)和生物干湿度指数  $B_K$ (mm/°C),用以研究植物生长环境的热量和水分条件,其计算公式如下:

$$BWI = \sum_{i=1}^n (T - 10) \quad (2)$$

$$B_K = \frac{P}{BWI + 40} (BWI \leq 80) \quad (3)$$

$$B_K = \frac{2P}{BWI + 120} (BWI > 80) \quad (4)$$

式中： $T$ —— $10\text{ }^\circ\text{C}$  以上的月平均气温 ( $^\circ\text{C}$ )； $n$ ——月平均气温大于  $10\text{ }^\circ\text{C}$  的月数； $P$ ——年降水量 (mm)。  $B_K$  值越大说明生态环境越湿润， $B_K$  值越小则说明生态环境越干燥。

### 1.4 研究方法

(1) 一元线性回归趋势分析。此方法常用来反映植被 NDVI 和气候指标随时间变化的趋势特征<sup>[17]</sup>。本文以 1982—2006 年 25 a 的时间序列为自变量，对植被 NDVI 值和气候指标进行一元线性回归分析，以此来研究植被 NDVI 及气候指标在时间上的变化规律。其一元线性回归变化斜率计算公式为：

$$\text{slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n i X_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n X_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (5)$$

式中： $\text{slope}$ ——一元线性回归分析的变化斜率； $X_i$ ——第  $i$  年的 NDVI 值或气候指标值； $n$ ——监测时间段的累积年数。 $\text{slope} < 0$  表示植被 NDVI 或气候指标呈减小趋势， $\text{slope} > 0$  表示植被 NDVI 或气候指标呈增加趋势。

(2) 相关系数。采用 Pearson 相关系数分析不同气候指标与植被 NDVI 之间的相关性。相关系数  $|r|$  值越大，表明气候指标与 NDVI 值之间的相关性越好，该气候指标对植被生长情况的影响越大，反之则相关性越差。其计算公式为：

$$r = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n}}{\sqrt{[\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}][\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}]}} \quad (6)$$

式中： $x, y$ ——数据变量； $n$ ——数据变量的个数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 华北地区植被 NDVI 的年际变化特征

由图 1 可以看出，华北地区植被 NDVI 在 1982—2006 年整体处于上升趋势，其线性回归方程的相关系数为 0.470 6，通过了  $p < 0.05$  的显著性检验，说明上升趋势显著。方程斜率表明华北地区平均每年 NDVI 增加 0.001 1，25 a 间年 NDVI 上升了 9.950%。不同土地覆盖类型上植被 NDVI 变化最

明显的是农田 ( $r = 0.664, p < 0.01$ ) 和灌丛 ( $r = 0.582, p < 0.01$ )，呈现出极显著上升；草地 NDVI 显著上升 ( $r = 0.497, p < 0.05$ )；森林和沙漠土地类型上植被 NDVI 上升趋势不明显 (如表 1 所示)。

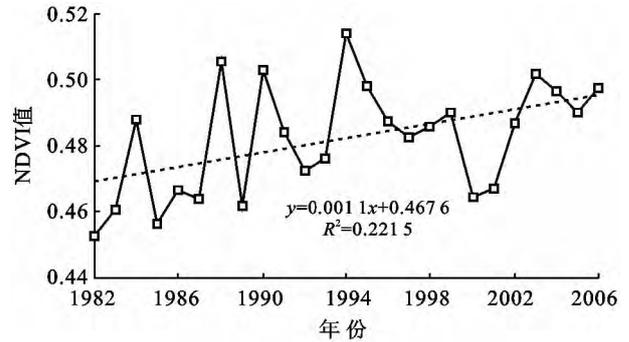


图 1 1982—2006 年华北地区 NDVI 变化趋势

表 1 1982—2006 年华北地区不同土地覆盖类型 NDVI 变化趋势回归分析

土地覆盖类型	线性回归方程	$R^2 (n=25)$
森林	$Y = 0.0004x + 0.3667$	0.1421
灌丛	$Y = 0.0007x + 0.2329$	0.3387
草地	$Y = 0.0006x + 0.2437$	0.2472
沙漠	$Y = 0.0000x + 0.0885$	0.0056
农田	$Y = 0.0011x + 0.3112$	0.4416

注： $R^2$  代表相关系数的平方； $n$  代表年数。

### 2.2 华北地区气候指标的年际变化特征

1982—2006 年华北地区不同气候指标的年变化如图 2 所示。其中，年平均气温以  $0.0607\text{ }^\circ\text{C/a}$  的速度增加，呈现出极显著的增温趋势 ( $p < 0.01$ )；年降水量以  $2.2398\text{ mm/a}$  的速度减少，但未通过显著性检验，降水量减少趋势不明显；干燥度指数的年变化波动较大，但减小趋势不明显。研究区生物热量指数 BWI 总体呈现极显著增加趋势 ( $p < 0.01$ )，而生物干湿度指数 BK 呈现显著减小趋势 ( $p < 0.05$ )。

不同土地覆盖类型上各气候指标的变化特征如表 2 所示。由表 2 可以看出，不同土地覆盖类型的年平均气温上升趋势均达到极显著水平 ( $p < 0.01$ )；森林的年降水量呈现明显的下降趋势 ( $p < 0.05$ )；森林的干燥度指数也呈明显的上升趋势，但其他土地覆盖类型的干燥度指数变化不明显；森林的生物热量指数上升趋势达到显著水平 ( $p < 0.05$ )，草地、农田、灌丛、沙漠的生物热量指数上升趋势极为显著 ( $p < 0.01$ )；森林的生物干湿度指数上升趋势最显著 ( $p < 0.01$ )，其次是草地 ( $p < 0.05$ )，农田、灌丛、沙漠的生物干湿度指数上升趋势不明显。

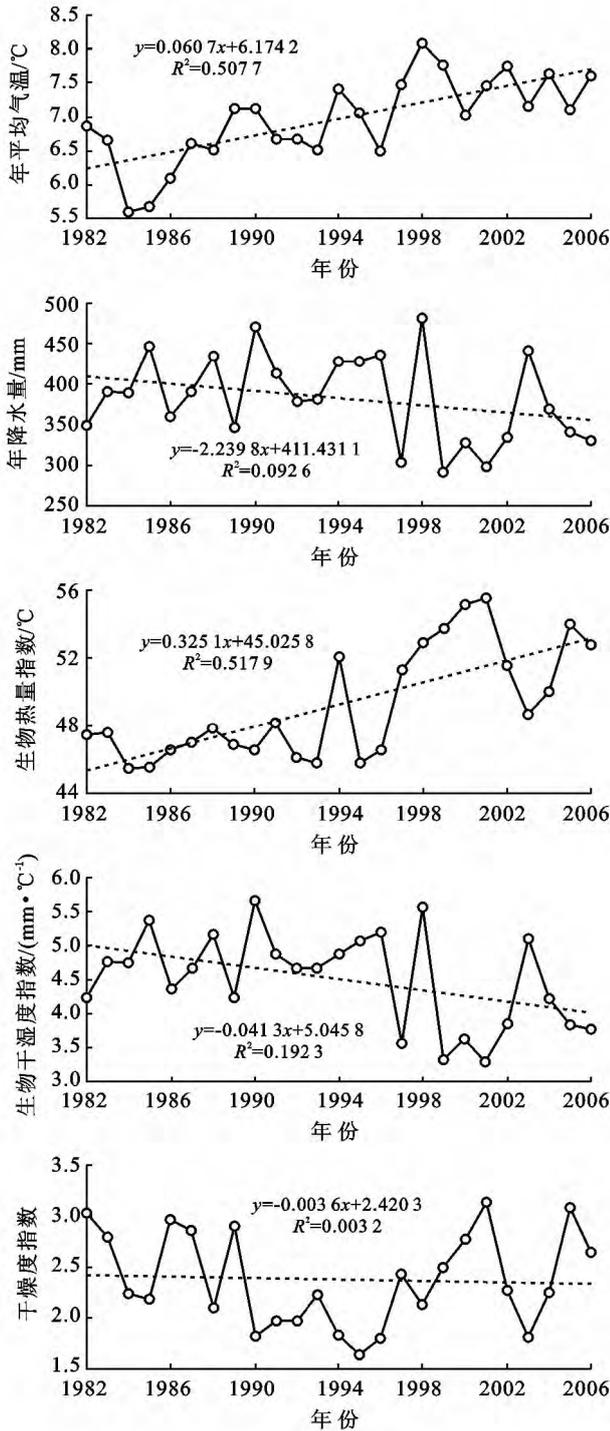


图 2 1982—2006 年华北地区不同气候指标的变化趋势

表 2 1982—2006 年华北地区不同土地覆盖类型气候指标的变化斜率

土地覆盖类型	年平均气温	年降水	干燥度指数	生物热量指数	生物干湿度指数
森林	0.1025**	-5.4966*	0.0187*	0.2463*	-0.1119**
草地	0.0561**	-2.0937	-0.0182	0.3377**	-0.0463*
农田	0.0574**	-2.3701	0.0108	0.2950**	-0.0278
灌丛	0.0652**	-0.2418	0.0133	0.3256**	-0.0142
沙漠	0.0744**	-0.7755	-0.0372	0.4423**	-0.0187

注: \* \*\*, \* 分别代表通过了  $p < 0.01$  和  $p < 0.05$  的显著性检验。下同。

### 2.3 华北地区植被 NDVI 与气候指标的相关关系

通过对 1982—2006 年华北地区植被 NDVI 与逐年的气候指标进行相关性分析(表 3),可以发现植被 NDVI 与干燥度指数呈极显著负相关,相关系数为  $-0.64$ ,通过了  $p < 0.01$  的显著性检验,而生物热量指数和生物干湿度指数与植被 NDVI 的相关性较低。对植被 NDVI 与气候指标进行滞后 1 a 的时滞效应分析发现,年平均气温与滞后 1 a 的 NDVI 呈显著正相关,可以看出华北地区植被 NDVI 与干燥度指数和气温的相关性最为密切。

表 3 1982—2006 年华北地区植被 NDVI 与不同气候指标之间的相关系数

气候指标	当年的 NDVI	滞后 1 a 的 NDVI
年平均气温	0.36	0.47*
年降水量	0.33	0.06
干燥度指数	$-0.64^{**}$	0.03
生物热量指数	0.17	0.12
生物干湿度指数	0.23	0.02

对不同土地覆盖类型的植被 NDVI 与气候指标进行相关性分析的结果表明(表 4),草地、农田和灌丛的植被 NDVI 与当年的年均气温均呈显著正相关,分别通过了  $p < 0.05$  和  $p < 0.01$  的显著性检验;不同土地覆盖类型的植被 NDVI 与年降水量相关分析中只有草地呈现显著正相关,其他均未达到显著性水平;草地的植被 NDVI 与干燥度指数呈极显著负相关,相关系数最大,其他土地覆盖类型的 NDVI 与干燥度指数均呈负相关,但均未通过显著性检验;不同土地覆盖类型的 NDVI 与生物热量指数、生物干湿度指数相关性不明显,但草地的 NDVI 与生物热量指数的相关性最大,沙漠的 NDVI 与生物干湿度指数的相关性最大。

表 4 华北地区不同土地覆盖类型上植被 NDVI 与不同气候指标的相关系数

土地覆盖类型	年平均气温	年降水	干燥度指数	生物热量指数	生物干湿度指数
森林	0.383	0.131	$-0.081$	0.160	0.008
草地	0.470*	0.409*	$-0.600^{**}$	0.314	0.277
农田	0.484*	0.136	$-0.045$	0.266	0.049
灌丛	0.550**	0.302	$-0.156$	0.181	0.206
沙漠	0.124	0.382	$-0.303$	0.091	0.319

通过 1982—2006 年华北地区植被 NDVI 与当年不同气候指标相关系数的空间分布图可以看出(图 3),植被 NDVI 与不同气候指标的相关性在空间上存在很大差异。统计表明,5.82%的地区(内蒙古地区东部和中部的草原地区,河北、山西的农田分布区,

内蒙古、山西、河北交界的灌丛覆盖地区)植被 NDVI 与年均气温呈显著正相关,说明气温升高对草地、农田和灌丛植被的生长具有显著的促进作用,3.67%的地区(内蒙古北部和西部,京津冀晋部分地区)NDVI 与年均气温显著负相关。华北地区 NDVI 与年降水量呈显著正相关的区域主要分布在内蒙古北部、中部和西部草原地区,占整个研究区总面积的 20.00%,这些区域气候干旱,降水成为植被生长的重要限制因子;仅 1.46%的地区 NDVI 与年降水量显著负相关,且主要分布在内蒙古北部的森林地区。华北地区 NDVI 与干燥度呈显著正相关的地区分布在内蒙古东部地区,面积约占 1.11%;呈现显著负相关的区域分布在内蒙古中部的大部分地区,占整个研究区总面积的 17.73%。3.43%的地区(内蒙古的通辽市、呼和浩特市和巴彦淖尔市)植被 NDVI 与生物热量指数呈现显著正相关;8.38%的地区(内蒙古北部的森林地区和西部沙漠地区,河北、山西境内部分区域)NDVI 与生物热量指数显著负相关。华北地区 NDVI 与生物干湿度指数呈显著正相关的范围占总面积的 15.74%,主要分布在内蒙古北部、中部、西部的草原覆盖地区,与年降水量的分布范围相差不大,可见生物干湿度指数对反映草原植被生长情况具有很好的作用;还有 1.59%的地区呈现显著负相关,主要位于内蒙古呼伦贝尔市、通辽市的东部以及华北唐山市内。

### 3 结论

通过对 1982—2006 年华北地区植被 NDVI 与不同气候指标的相关分析可以发现,整体上华北地区植被 NDVI 呈现出上升趋势,其中草地、农田和灌丛的植被 NDVI 上升趋势较为显著。华北地区不同气候指标在 1982—2006 年变化趋势表现为年平均气温和生物热量指数呈显著增加趋势,年降水量、干燥度指数和生物干湿度指数呈减少趋势。在年际尺度上,华北地区植被 NDVI 与当年的干燥度指数呈显著负相关,与上一年的年平均气温呈显著正相关,说明干旱的减缓和气温的升高对华北地区植被生长有直接的促进作用。此外,华北地区植被 NDVI 与当年不同气候指标的相关性存在很大的空间差异,内蒙古境内的草地植被 NDVI 与年均气温、年降水量呈现显著正相关,与干燥度指数呈极显著负相关;农田地区 NDVI 与年均气温显著正相关;灌丛覆盖地区 NDVI 与年均气温呈极显著正相关;所有植被 NDVI 与生物热量指数、生物干湿度指数相关性不明显,但草地地区与生物热量指数的相关度最高,而沙漠地区与生物干湿度的相关度最高。

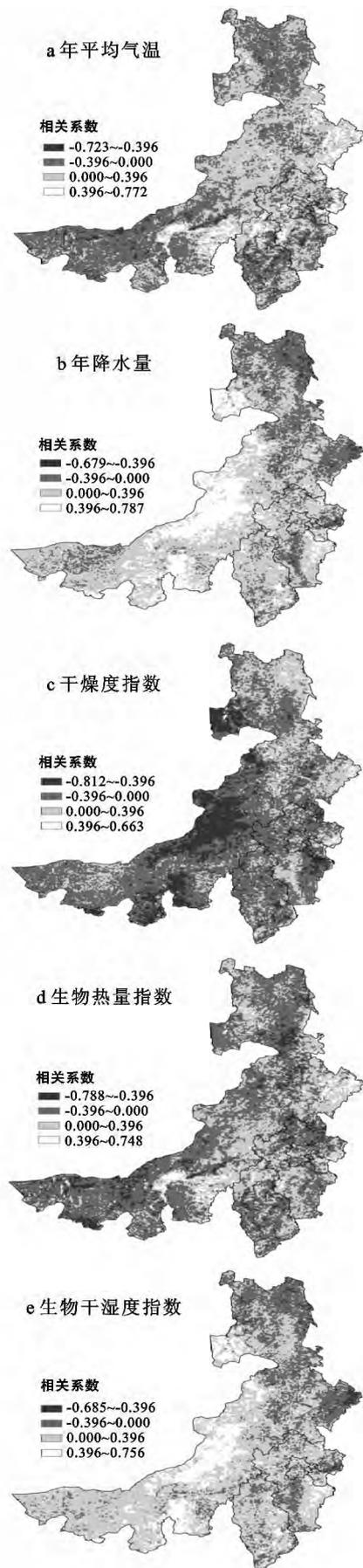


图 3 1982—2006 年华北地区 NDVI 与各气候指标相关系数的空间分布

本研究中所采用的 NDVI 数据的空间分辨率为 8 km,是从较大尺度上分析了华北地区植被变化与不同气候指标的相关关系。实际上地表植被覆盖变化不仅受气候因子的影响,亦受人为活动制约。虽然在较大时空尺度上气候变化可起主导作用,但是在特定地区和时期,社会和经济因素也常常具有决定性作用<sup>[18-20]</sup>。因此,在进行华北地区植被变化与气候指标在特定区域和时期的相关关系研究时,还需要在更小的尺度上进行调查研究,进一步进行验证。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 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:基于 NOAA 时间序列数据分析[J]. 遥感学报,1998,2(3):204-210.
- [2] 张新时. 研究全球变化的植被—气候分类系统[J]. 第四纪研究,1993,13(2):157-169.
- [3] 张学霞,葛全胜,郑景云. 近 50 年北京植被对全球变暖的响应及其时效:基于遥感数据和物候资料的分析[J]. 生态学杂志,2005,24(2):123-130.
- [4] Kawabata A, Ichii K, Yamaguchi Y. Global monitoring of the inter-annual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation [J]. International Journal of Remote Sensing, 2001,22(7):1377-1382.
- [5] Friedl M A, McIver D K, Hodges J C F, et al. Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results [J]. Remote Sensing of Environment, 2002,83(1):287-302.
- [6] 郭锐,王小平,蔡迪花,等. 近 20 多年来西北绿洲植被指数的变化及其成因[J]. 干旱区研究,2010,27(1):75-82.
- [7] Ichii K, Kawabata A, Yamaguchi Y. Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982—1990 [J]. International Journal Remote Sensing, 2002,23(18):3873-3878.
- [8] Rasmusen M S. Developing simple, operational, consistent NDVI-Vegetation models by applying environmental and climatic information(Part II). Crop yield assessment[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998,19(1):119-139.
- [9] 朴世龙,方精云. 最近 18 年来中国植被覆盖的动态变化[J]. 第四纪研究,2001,21(4):294-302.
- [10] 赵茂盛,符淙斌,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[J]. 地理学报,2001,56(3):287-296.
- [11] 倪健. KIRA 指标的拓展及其在中国植被与气候关系研究中的应用[J]. 应用生态学报,1997,8(2):161-170.
- [12] 高大伟,张小伟,蔡菊珍. 浙江省植被覆盖时空动态及其与生态气候指标的关系[J]. 应用生态学报,2010,21(6):1518-1522.
- [13] 孟猛,倪健,张治国. 地理生态学的干燥度指数及其应用评述[J]. 植物生态学报,2004,28(6):853-861.
- [14] 张远东,张笑鹤,刘世荣. 西南地区不同植被类型归一化植被指数与气候因子的相关关系[J]. 应用生态学报,2011,22(2):323-330.
- [15] 徐文婷,吴炳方,颜长珍,等. 用 SPOT-VGT 数据制作中国 2000 年度土地覆盖数据[J]. 遥感学报,2005,9(2):204-214.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T20481—2006 气象干旱等级[S]. 北京:中国标准出版社,2006:1-17.
- [17] 马国明,王建,王雪梅. 基于遥感的植被年际变化及其与气候关系研究进展[J]. 遥感学报,2006,10(3):421-431.
- [18] 杨建平,丁永康,陈仁升. 长江黄河源区高寒植被变化的 NDVI 纪录[J]. 地理学报,2005,60(3):467-478.
- [19] 付新峰,杨胜天,刘昌明. 雅鲁藏布江流域 NDVI 变化与主要气候因子的关系[J]. 地理研究,2007,26(1):60-66.
- [20] 陈佑启, Peter H V, 徐斌. 中国土地利用变化及其影响的空间建模分析[J]. 地理科学进展,2000,19(2):116-127.

(上接第 245 页)

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 冯松,汤懋苍,王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据[J]. 科学通报,1998,43(6):633-636.
- [2] 高懋芳,邱建军. 青藏高原主要自然灾害特点及分布规律研究[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(8):101-106.
- [3] 柯长青,李培基. 青藏高原积雪分布与变化特征[J]. 地理学报,1998,53(3):209-215.
- [4] 董文杰,韦志刚,范丽军. 青藏高原东部牧区雪灾的气候特征分析[J]. 高原气象,2001,20(4):402-406.
- [5] 董安祥,瞿章,尹宪志,等. 青藏高原东部雪灾的奇异谱分析[J]. 高原气象,2001,20(2):214-219.
- [6] 时兴合,李生辰,李栋梁,等. 青海南部冬季积雪和雪灾变化特征[J]. 气候变化研究进展,2007,3(1):36-40.
- [7] 郭晓宁,李林,刘彩虹,等. 青海高原 1961—2008 年雪灾时空分布特征[J]. 气候系统变化,2010,6(5):332-337.
- [8] 周陆生,李海红,汪青春. 青藏高原东部牧区大暴雪过程及雪灾分布的基本特征[J]. 高原气象,2000,19(4):450-458.
- [9] 李培基. 青藏高原雪灾时空分布特征[C]// 中国气象局气象服务与气候司. 牧区雪灾的分析研究. 北京:气象出版社,1998:15-18.
- [10] 李海红,李锡福,张海珍,等. 中国牧区雪灾等级指标研究[J]. 青海气象,2006(1):24-28.