

doi: 10.6046/zrzyyg.2022151

引用格式: 庞鑫,刘珺. 气候变化对亚洲地区植被 NDVI 变化的影响[J]. 自然资源遥感,2023,35(2):295–305. (Pang X, Liu J. Effects of climate changes on the NDVI of vegetation in Asia[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2023,35(2):295–305.)

气候变化对亚洲地区植被 NDVI 变化的影响

庞鑫¹, 刘珺²

(1. 山西水利职业技术学院,运城 044000; 2. 太原理工大学矿业工程学院,太原 030024)

摘要:以亚洲为研究区,选用 1982—2015 年长时间序列 GIMMS NDVI3g、CRU Ts 降雨量、气温和潜在蒸发量(potential evapotranspiration, PET)数据集,运用最大值合成法、Mann-Kendall 检验法和相关性分析法识别了 34 a 间亚洲地区植被覆盖和气候要素的时空变化规律,分析了植被覆盖对气候变化的响应效应,探讨了气候变化对植被动态变化的影响机制。结果表明:①东南亚、日本、印度以及东亚的中国南部沿海等地区的归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)较高,NDVI>0.5,亚洲中部大部分地区植被稀疏;②1982—2015 年间,亚洲 NDVI 呈上升趋势,增长速率为 0.000 7/a,同时季节性增长明显,其中春季对年际 NDVI 增长贡献率最大;③亚洲地区的潜在蒸发量表现为西高东低,如在干旱半干旱的中亚、西亚地区较高,PET>40 mm;④亚洲地区气温南高北低,如中国的南部地区气温较高(>15℃),北部地区气温较低(<15℃);降雨量和气温空间分布相似,南高北低,但两者相比较,降雨量趋势更为显著;⑤气温、降雨量、PET 对 NDVI 的影响呈现出区域性,如亚洲北部 NDVI 的影响因子主要为降雨量与 PET,而在亚洲中南部,影响植被 NDVI 的主要因子则是气温;⑥春、夏季节尤其是夏季,气候变化对 NDVI 影响显著,秋、冬季节不显著;⑦气候变化对 NDVI 的影响有明显的滞后性,滞后期为 1 个月。

关键词: 植被覆盖; NDVI; 气候变化; Mann-Kendall 检验法; 相关性分析

中图法分类号: TP 79; P 236 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2023)02-0295-11

0 引言

全球气候变化对陆地生态系统产生了强烈影响。作为陆地生态系统的主体,植被在调节全球碳平衡、减缓大气温室效应,维持生态系统多样性方面发挥着重要作用^[1-2],是全球气候变化的“指示器”^[3]。开展植被动态变化监测,对正确理解植被与气候变化间的相互作用,研究气候变化对区域植被变化的影响具有重要意义^[4]。

分析长时间序列的植被指数变化是监测植被覆盖变化的主要手段。在众多植被指数中,归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)被证实能够真实评价植被覆盖状况,已被广泛应用于全球和区域尺度的植被覆盖变化监测^[5]。气候变化是引起植被变化的重要因素,为探寻植被变化原因,学者们对气候变化与植被变化间的响应关系进行了研究。崔利芳等^[6]通过研究气温、降雨量和人类活动对长江流域植被 NDVI 的影响,发现流域 NDVI 与气温的相关性较高,与降雨量的相关

性并不显著;崔林丽等^[7]分析了中国东部气候和 NDVI 变化趋势的相关性,发现 NDVI 与气温、降雨的最大相关系数在中国东部由北向南逐渐减小;赵茂盛等^[8]通过 NDVI 与降雨、气温等气象数据间的相互作用,得到气象因子对植被的影响规律,即气温升高,植被覆盖增加,反之降低,降雨量对 NDVI 的显著影响主要在区域尺度上;Ichii 等^[9]发现北半球中高纬度地区春秋季节气温与 NDVI 显著相关。此外,潜在蒸发量对植被变化也存在一定的影响^[10],两者是相互的,张永强等^[11]研究表明:在全球尺度上,植被变绿使得全球蒸散发呈现显著的增加趋势;区域尺度上,植被变化对蒸散发的影响则存在明显的地带性和非地带性特征,蒸散发总量的增加主要是由植被蒸腾增加而引起的。目前针对多种气象数据对亚洲地区长时间序列的植被变化研究相对缺乏,本文在此基础上对植被进行动态变化监测,对探求植被与气候变化间的相互作用具有重要意义。

过去 30 a 间,全球植被活动增强且空间差异显著^[2]。其中,亚洲地区作为植被活动变化剧烈区域之一。过去 20 多 a 来,全球新增绿色 1/4 来自中

国,中国贡献率居全球首位。在厄尔尼诺和拉尼娜现象频发的大形势下,亚洲地区的气候变化对植被有何影响,两者间是否存在一定的内在响应? 研究选用 1982—2015 年的 NDVI 数据,提取了亚洲地区植被覆盖变化的时空特征,结合降雨量、气温、潜在蒸发量 (potential evaptranspiration, PET) 等,探讨了气候变化对区域植被覆盖变化的影响,为全面了解气候变化对植被的影响,探索区域生态环境演变规律提供科学依据。

1 研究数据

1.1 遥感植被数据

研究使用的 GIMMS NDVI 数据来自于美国航空航天局,其空间分辨率为 8 km,时间分辨率为 15 d。对获取的数据进行了格式转换、拼接、裁剪等预处理,得到研究区植被分布影像(图 1)。

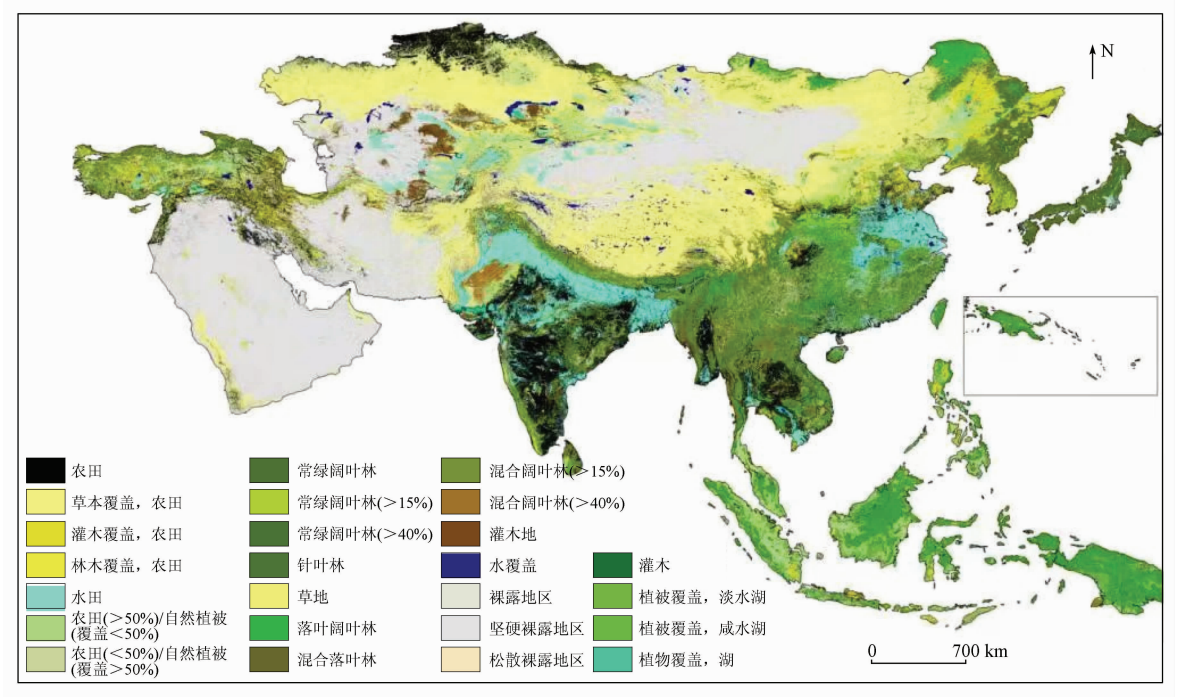


图 1 亚洲地区植被分布
Fig. 1 Vegetation distribution in Asia

1.2 气象数据

气象数据来自东安格利亚大学的 CRU (climate research unit), 其空间和时间分辨率分别为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 和 30 d。获取了 1982—2015 年 CRU 数据集中的降雨量、气温和 PET 数据,并对数据进行预处理,计算得到亚洲地区月、季和年值数据集。

2 研究方法

1) 最大值合成法 (maximum value composite, MVC)。MVC 用于将数据在像元尺度取最大值,得到由时序数据中每个像元的最大值组成的影像。这种方法可以进一步消除云、大气太阳高度角的干扰,是提高遥感数据精度的常用方法^[12]。计算公式为:

$$M_{NDVI} = \max(\sum_{i=1}^{34} NDVI_{ij}), \quad (1)$$

式中: M_{NDVI} 为第 i 年的 NDVI 最大值; $NDVI_{ij}$ 为第 i

年第 j 句的 NDVI 值 ($i = 1, 2, \dots, 34$)。

将获取到的旬 NDVI 数据进行了月尺度的最大值合成,得到研究区月 NDVI 影像,进而计算得到季和年平均 NDVI,用于分析亚洲地区不同时间尺度的植被覆盖变化。

2) 趋势分析法。趋势分析法描述的是 2 个要素之间的线性相关关系,可以用来模拟每个栅格单元的变化趋势^[13],其公式为:

$$Slope = \frac{n \sum_{i=1}^n (iNDVI_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n NDVI_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}, \quad (2)$$

式中: i 为年序号, $i = 1, 2, \dots, n$; n 为年数; $NDVI_i$ 为第 i 年的 NDVI 值; $Slope$ 为 1982—2015 年 NDVI 线性回归斜率。

3) 相关性分析。相关性分析法常用来检验 2

个量之间的相关程度^[14],通常用 R 或者 R^2 定量表示,值越大表示二者相关性越好,反之,相关性越差。其公式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n [(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (3)$$

式中: R 为 x 和 y 变量的线性相关系数; X_i 与 Y_i 分别为 X 和 Y 第 i 年的值; $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 分别表示 2 个变量 n 年的平均值。 $R > 0$, 表明 2 个变量为正相关; $R < 0$, 表明 2 个变量为负相关。

通过计算 NDVI 与降雨量、气温和 PET 的相关系数,探讨 NDVI 与气候变化的关系,从而掌握气候变化与植被变化之间的响应规律。

4) 曼 - 肯德尔 (Mann - Kendall, $M - K$) 检验法。 $M - K$ 检验法是一种气候诊断与预测技术,可以判断气候序列中是否存在气候突变^[15-16]。对于具有 n 个样本量的时间序列 X ,构造一秩序列 S_k ,即第 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的累计数; UF_k 是在时间序列独立的假设下所定义的统计量。计算公式分别为:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i, \quad (4)$$

$$r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, i, \quad (5)$$

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{Var(S_k)}} \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

式中: $Var(S_k)$ 和 $E(S_k)$ 分别为累计数 S_k 的方差和均值; $UF_1 = 0$ 。

按时间序列 x 逆序 $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$,再重复上述过程,同时使 $UB_k = -UF_k (k = n, n-1, \dots, 1), UB_1 = 0$,分析绘出的 UF_k 和 UB_k 曲线图。若 UF_k 值大于 0, 则表明序列呈上升趋势,小于 0 则表明呈下降趋势。当它们超过临界线时,表明上升或下降趋势显著。超过临界线的范围确定为出现突变的时间区域。如果 UF_k 和 UB_k 2 条曲线出现交点,且交点在临界线之间,那么交点对应的时刻便是突变开始的时间,可以判断气候序列中是否存在气候突变。

3 结果与讨论

3.1 NDVI 动态变化特征

3.1.1 NDVI 时序特征

基于亚洲地区长时间序列的 NDVI 数据,得到

研究区 NDVI 总体变化趋势(图 2)和季节变化趋势(表 1)。

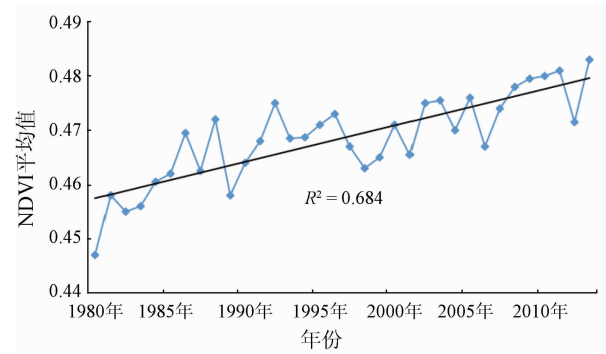


图 2 1982—2015 年亚洲年均 NDVI 时间序列变化
Fig. 2 Annual NDVI time series changes
in Asia from 1982 to 2015

表 1 1982—2015 年亚洲 NDVI 四季变化趋势回归方程

Tab. 1 Regression equation of seasonal variation trend of NDVI in Asia from 1982 to 2015

季节	线性回归方程	$R^2 (n = 34)$
春	$y = 0.000\ 8x + 0.373\ 5$	0.658
夏	$y = 0.000\ 5x + 0.429\ 9$	0.463
秋	$y = 0.000\ 5x + 0.409\ 1$	0.414
冬	$y = 0.000\ 2x + 0.310\ 1$	0.101

从图 2 可知,1982—2015 年期间,亚洲地区 NDVI 年均值线性回归斜率为 0.87,表明植被覆盖显著增强,增长速率为 0.000 7/a,所有数据均通过了 $P < 0.05$ 的检验。其中,2015 年,NDVI 值最高为 0.482;1982 年,NDVI 值最低为 0.448;整体均值为 0.47,表明植被覆盖状态良好。进一步分析发现,1982—1988 年和 1992—1994 年间,NDVI 增长速率较快,1995—1998 年、2000—2006 年和 2008—2012 年间 NDVI 增长速率较慢。

从表 1 统计的四季 NDVI 值可以看出,1982—2015 年期间,亚洲地区四季 NDVI 均呈现增加态势。且随着季节交替,研究区的 NDVI 增加趋势逐渐减弱。春季 NDVI 以 0.000 8/a 的速率增长,夏季和秋季 NDVI 的增长速率相同,为 0.0005/a,冬季 NDVI 的变化较缓,但依然以 0.000 2/a 的速率增长。分析各个季节 R^2 值可知,NDVI 增加程度随季节变化逐渐降低,春季全区 NDVI 呈现显著增加 ($R^2 = 0.658$)。

3.1.2 亚洲地区 NDVI 的空间分布特征

根据 NDVI 值域范围,将研究区年均 NDVI(图 3)分为 5 级^[17]: $NDVI \leq 0$ 表示覆盖区域为非植被, $0 < NDVI \leq 0.3$ 表示稀疏植被, $0.3 < NDVI \leq 0.5$ 表示低植被覆盖, $0.5 < NDVI \leq 0.7$ 表示中植被覆盖, $0.7 < NDVI \leq 1.0$ 表示高植被覆盖。

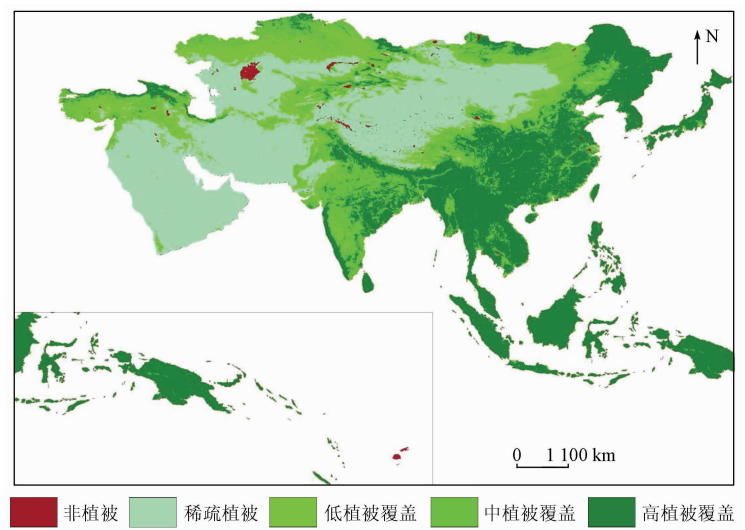


图 3 1982—2015 年亚洲 NDVI 平均分布

Fig. 3 Average distribution of NDVI in Asia from 1982 to 2015

从图 3 可以看出,东亚(日本、中国南部大部分地区和东南亚地区(越南、老挝、柬埔寨、马来西亚附近区域)属于高植被覆盖区域,其中,东南亚地区的植被覆盖高很大程度上与其处于热带或亚热带气候区有关。南亚(印度及其附近区域)大都为中植被覆盖。中国新疆、西藏和蒙古国的南部等地区植被稀疏, $0 < NDVI \leq 0.3$,以及中亚、西亚(哈萨克斯

坦、伊朗、阿富汗、巴基斯坦以及沙特阿拉伯等)、中国的西北部、蒙古国的南部地区等均为稀疏植被覆盖区。

为了获取更加详细的空间分布信息,研究对亚洲区四季 NDVI 分布(图 4)进行了分析,并对其变化进行了统计(表 2)。

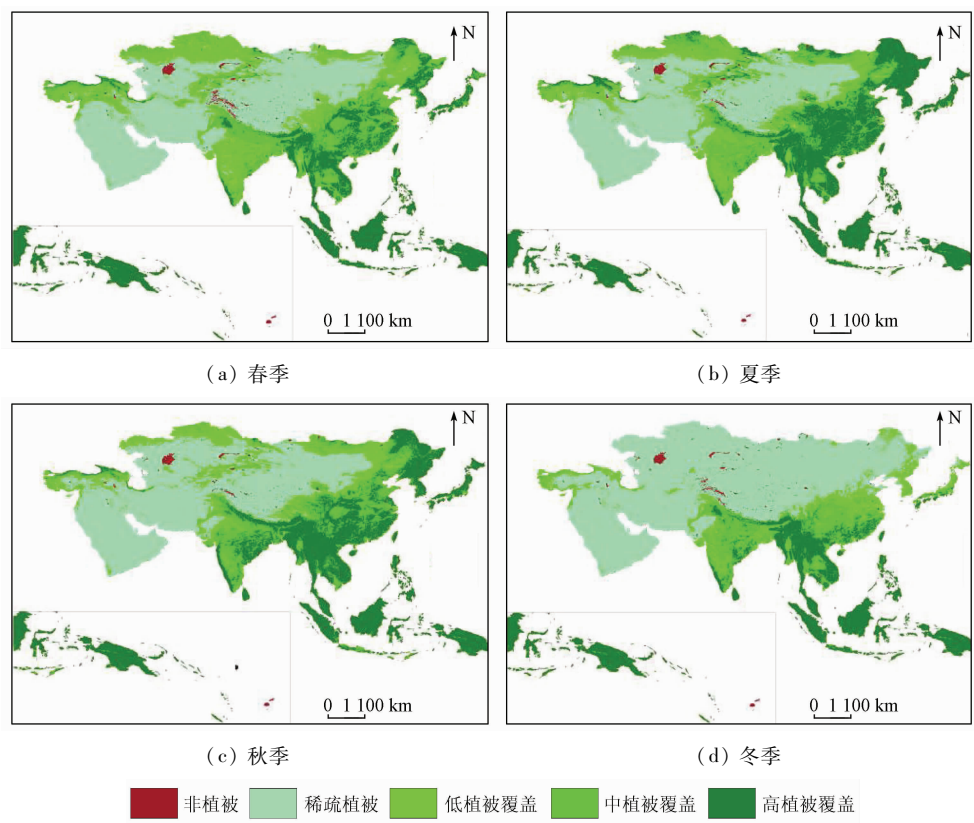


图 4 研究区 NDVI 四季分布

Fig. 4 Four seasons distribution of NDVI in the study area

表 2 NDVI 变化分布统计

Tab.2 Statistics of NDVI change distribution (%)

季节	各类所占像元百分比				
	非植被	稀疏植被	低植被覆盖	中植被覆盖	高植被覆盖
春季	1.67	42.93	20.85	15.87	18.68
夏季	1.37	39.47	15.31	15.77	28.08
秋季	1.35	44.01	13.44	15.00	26.19
冬季	1.61	61.80	9.81	11.66	15.11

从图 4 可以看出,西亚、中东、北亚以及东亚的西北部,中国新疆、西藏等地区四季均为稀疏植被覆盖;东南亚地区四季均为高植被覆盖;在中国的中南部和印度主要表现为中植被覆盖和低植被覆盖。

表 2 表明,从春季到冬季,高植被覆盖地区的 NDVI 值呈现由低到高再到低的变化趋势,夏季高覆盖区所占面积达到峰值,为 28.08%,结合图 4(d)与图 4(a)可以发现冬季稀疏植被区占比较高,为61.80%,春季中国中南部和印度大部等地区植被覆盖明显提升;结合图 4(b)与图 4(c)可以发现夏秋季节,植被覆盖的空间变化并不明显,只在北亚表现出由中到低植被覆盖的过渡。

为了详细描述研究区植被覆盖变化的情况,研究根据式(2)计算得到 34 a 间亚洲地区植被覆盖的变化趋势(图 5),并按照刘启兴等^[18]的方法将 NDVI 的变化趋势分为 7 级(表 3)。

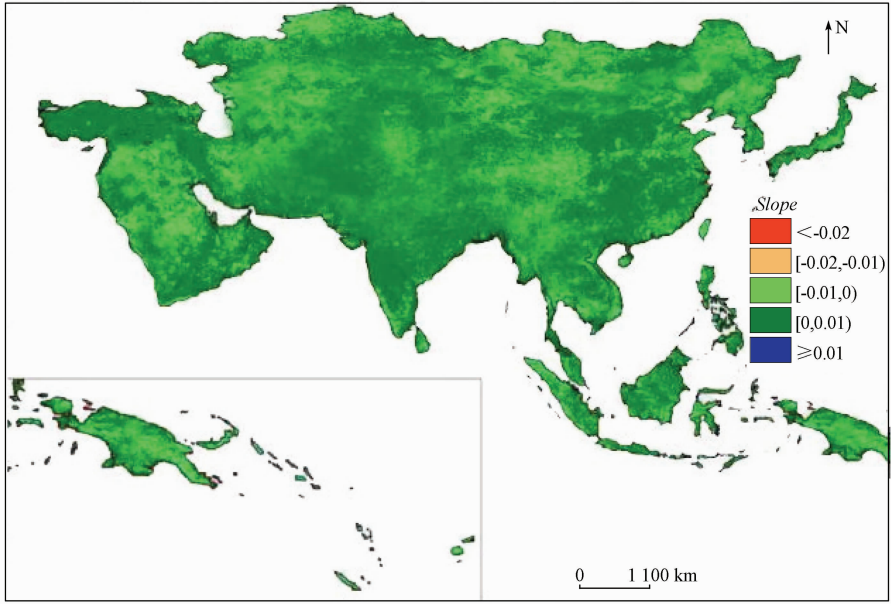


图 5 1982—2015 年亚洲 NDVI 变化趋势

Fig.5 Variation trend of NDVI in Asia from 1982 to 2015

表 3 植被覆盖变化分级

Tab.3 Vegetation coverage change classification

分级标准	变化程度
$Slope \leq -0.1$	严重退化
$-0.1 < Slope \leq -0.05$	中度退化
$-0.05 < Slope \leq -0.01$	轻微退化
$-0.01 < Slope \leq 0.01$	基本不变
$0.01 < Slope \leq 0.05$	轻度改善
$0.05 < Slope \leq 0.1$	中度改善
$Slope > 0.1$	明显改善

从图 5 可知,1982—2015 年期间研究区 NDVI 变化稳定,大多数区域呈现基本不变的趋势 ($-0.01 < Slope \leq 0.01$)。统计发现,处在 $-0.01 < Slope \leq 0.01$ 的像元,所占比例高达 99.82%。即亚洲 NDVI 的变化速率大都集中在 $0 \sim 0.01/a$ (像元所占百分比为 68.54%)和 $-0.01 \sim 0/a$ (像元所占百分比为 31.28%)。综上,研究区 NDVI 的变化速率较缓。

3.2 亚洲地区气候变化特征

3.2.1 亚洲气候变化时序特征

为了探寻气象因子的变化特征,基于式(4)计算出降雨量、PET、气温 3 个因子的 M - K 变化情况(图 6)。由图 6 中 UF 曲线可见,1982—2015 年亚洲降雨、PET 和气温均呈现上升趋势,尤其是气温和 PET,2005 年之后,这种趋势大大超过显著性水平 0.05 临界线,甚至超过 0.001 显著性水平(临界值 $U_{0.05} = \pm 1.96, U_{0.001} = \pm 2.56$),表明亚洲气温和 PET 上升趋势是十分显著的。根据 UF 和 UB 曲线相交部分,确定 1996—2005 年为降雨量增加突变阶段,其他时间,如 1983 年、1987 年、1990 年、1992 年降雨量变化相对较大(图 6(a)); 1995 年之后,PET 的增加为突变现象,具体是从 1997 年开始(图 6(b)); 1993 年之后的增温是一突变现象,具体从 1994 年开始(图 6(c))。

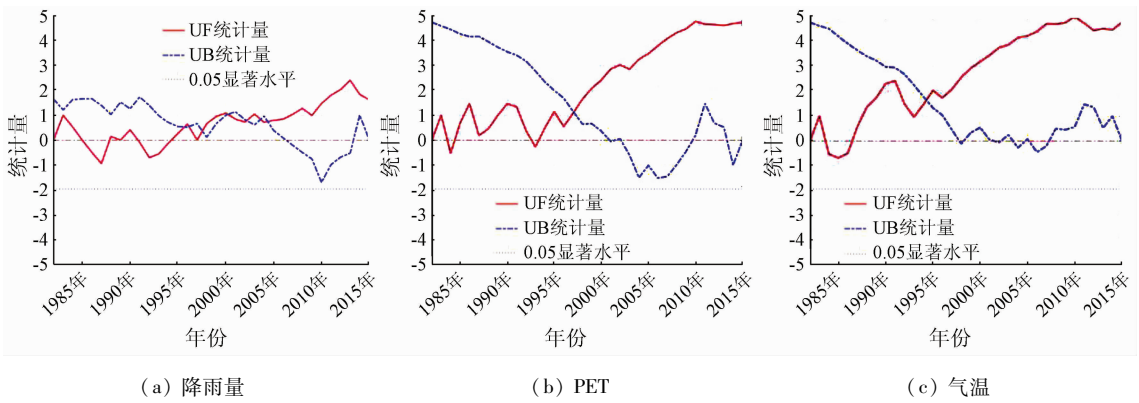


图 6 1982—2015 年气候因子 M - K 统计曲线
Fig. 6 Statistical curve of climate factor M - K from 1982 to 2015

3. 2. 2 亚洲气候变化空间分布格局

将亚洲地区 1982—2015 年的降雨量、PET 和气温

分别求取平均值,得到年际空间分布信息,如图 7 所示。

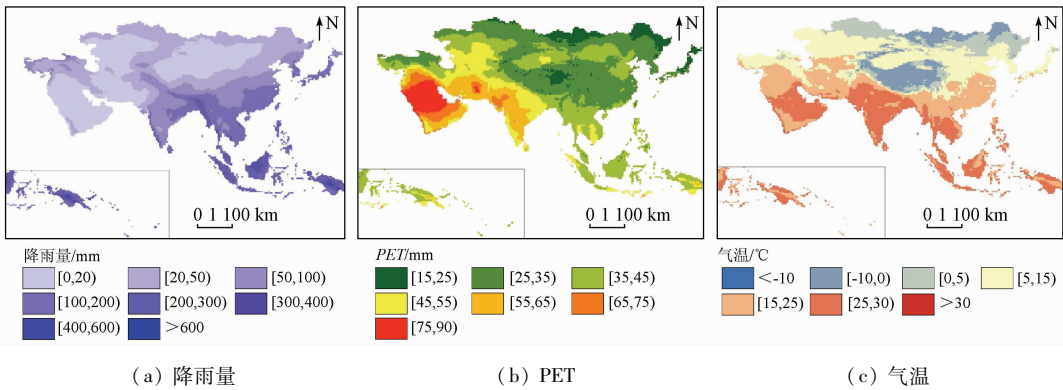


图 7 1982—2015 年亚洲年均气候因子分布
Fig. 7 Distribution of interannual climate factors in Asia from 1982 to 2015

从图 7 可以看出,全区年降雨量分布为东南多西北少:东南部的降雨量远高于其他地区,为全区最高(>1 500 mm),主要位于东南亚以及日本的大部分地区;降雨量较低的地区主要位于中东以及中国西北部地区。这是由于亚洲东南亚地区主要位于北回归线处,受赤道低气压带控制,全年高温多雨,因此降雨充沛。而中东地区位于大陆内部,距海遥远,再加上高原、山地等(地势较高)对湿润气流的阻挡,导致降雨稀少。

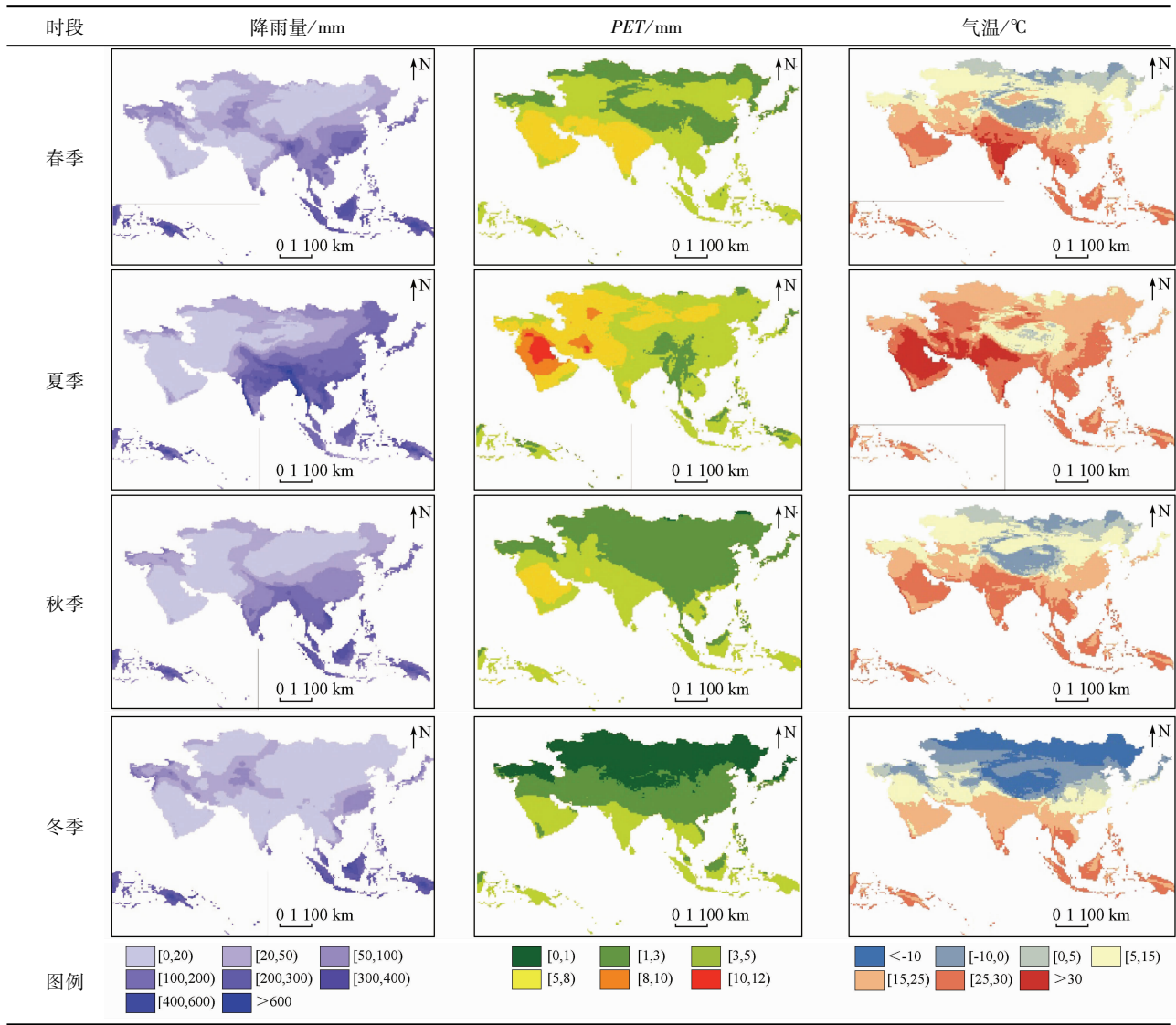
气温的空间分布与降雨量相同。处于低纬度如东南亚、西亚、中东等大部分地区,属于亚热带和热带沙漠气候,全年气温较高;而中国的西藏,海拔较高,受垂直地带性影响,全年气温较低。总体来看,亚洲南部地区相较于北部地区,气温差异明显且普遍较高。

PET 的空间分布情况不同于降雨量。PET 高地区主要分布在西亚($PET > 40$ mm),在降雨量比较

充足的亚洲南部反而较低($PET < 20$ mm)。整体来看,中东及西亚地区的年均 PET 处于较高水平($PET > 50$ mm);亚洲的北部(包括中国的东北部)、日本以及蒙古地区的年均 PET 比较低($PET < 25$ mm);中国的中部以及东南亚地区的蒸发量处于中间水平($25\text{ mm} < PET < 50$ mm)。

年气候变化是季节气候的概括,基于年总变化趋势,进一步获取了亚洲地区降雨量、PET 及气温的季节性变化分布图(表 4)。从表 4 可以看出,全区整体降雨量随春、夏、秋、冬季节交替变化显著,降雨量呈现趋势为先上升后下降,夏季达到顶峰;从空间分布上,降雨量相对较高的区域由东南向东南和南部,再到南部,最终到西北部地区转移,少部分地区降雨量保持稳定,如东南亚地区降雨量一直处于较高水平(>1 000 mm),西亚的干旱半干旱地区降雨量则基本处于较低水平(<50 mm)。

表 4 1982—2015 年亚洲气象因子季节性变化分布
Tab. 4 Seasonal variation distribution of meteorological factors in Asia from 1982 to 2015



PET 随季节变化,亦呈现出春季到夏季上升,夏季到冬季下降的趋势;从空间分布上,在干旱半干旱的中亚、西亚地区春、夏季节蒸发量较高 ($PET > 25\text{ mm}$),秋、冬季节受气温和降雨的综合影响,蒸发量有所缓解。亚洲其他地区潜在蒸发量普遍相对较低。

气温与降雨量的变化趋势和空间分布及其相似。夏季气温最高,且由北向南逐渐升高,气温相对较高的区域常年集中分布在亚洲南部 ($> 15\text{ }^{\circ}\text{C}$),相对较低的区域主要位于中国的西藏 ($< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$)。

3.3 NDVI 与气候指标相关性分析

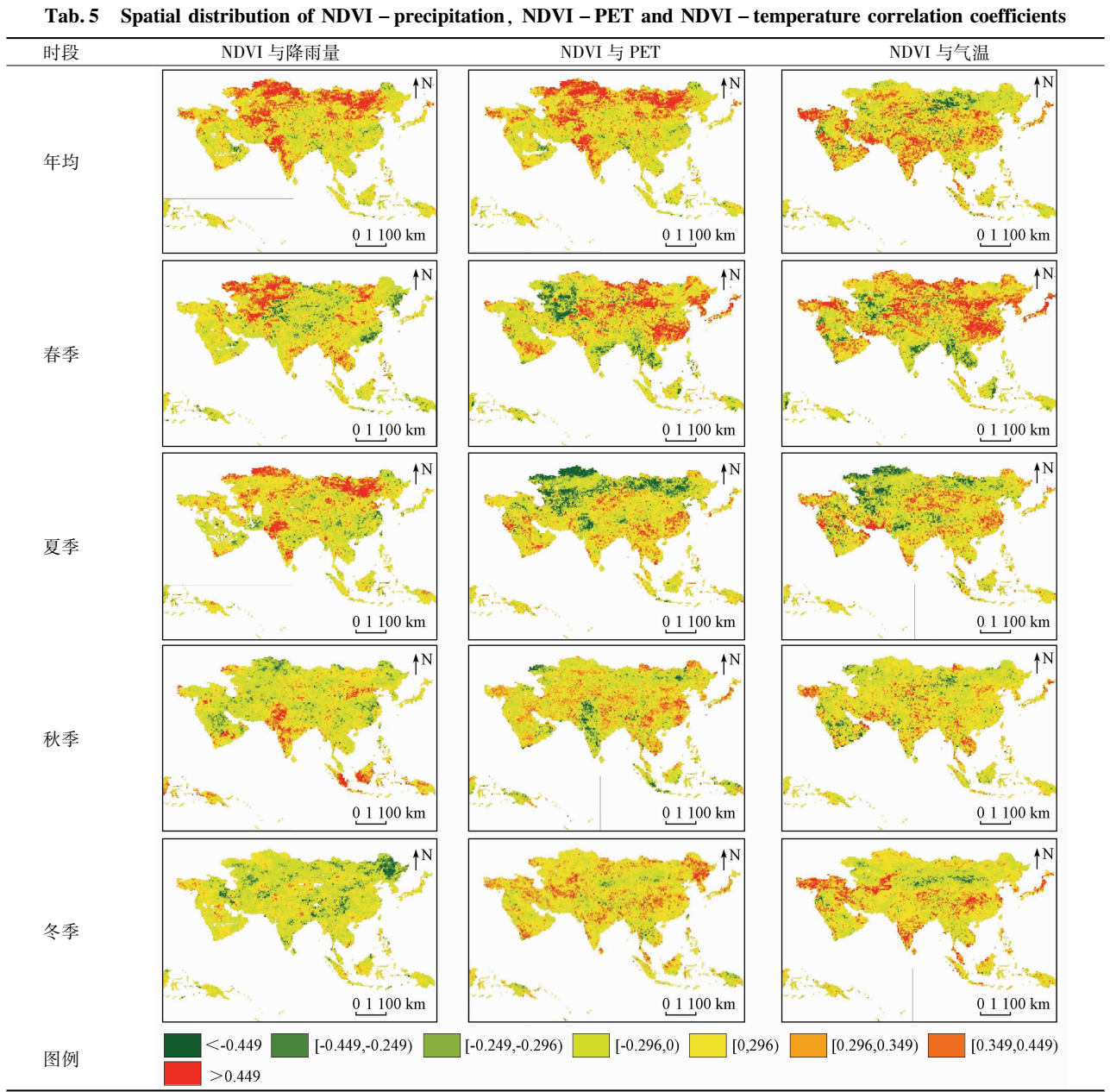
3.3.1 NDVI 与气候指标空间相关性分析

基于式(3)计算得到年和季的降雨量、PET、气温与 NDVI 的相关关系(表 5)。并划分为以下 4 类: $|R| < 0.296$ 为弱线性相关; $0.296 \leq |R| < 0.349$ 为低线性相关; $0.349 \leq |R| < 0.449$ 为高线性相关; $|R| \geq 0.449$ 显著线性相关^[19]。从表 5 中

可以看出,亚洲大部分干旱与半干旱地区年均 NDVI 与降雨量、PET 为显著线性相关,表明降雨量和 PET 对该地区的年均 NDVI 的影响较大 ($R > 0.449$);中国南部、东北、西北部分地区,东南亚,阿拉伯半岛大部分地区以及印度东北部等地区呈现弱线性相关关系 ($-0.296 \geq R \geq 0.296$),表明降雨量与 PET 对 NDVI 的影响较小。季均 NDVI(表 5)与降雨量的相关性春、夏季较强,秋季次之,冬季最弱。其中,春、夏季节亚洲大陆内陆的表现突出,如哈萨克斯坦、阿富汗以及蒙古部分地区均表现出显著正相关关系 ($R > 0.449$),中国的东南和东北地区、朝鲜半岛等地区表现出显著负相关关系 ($R < -0.449$)。季均 NDVI 与 PET 的相关性春、夏季较强,秋、冬季较弱。其中,春季中国的东南沿海地区、辽宁和西北地区,朝鲜半岛、蒙古地区、日本表现出显著的正相关关系 ($R > 0.449$)。秋、冬季节降雨量与 PET 对 NDVI 的影响普遍较小,且 PET 在冬季对 NDVI 的影响要大

于降雨量,如中国的东北地区,但在中国山东、东北地区降雨量与季均 NDVI 呈显著的负相关关系。

表 5 NDVI 与降雨量、PET、气温的相关系数分布



由 NDVI 与气温相关系数的空间分布可以看出,在土耳其中西部、印度东部和中部、中国中部、哈萨克斯坦中部、伊拉克东南部等地区年均 NDVI 与气温存在显著的相关关系($R > 0.449$),表明气温对该地区 NDVI 的影响较大;中国东北地区、东南亚地区对 NDVI 的影响呈现弱相关性($-0.296 \geq R \geq 0.296$),且多为正相关关系。季均 NDVI 与气温的相关性春季极强,夏季较强,冬季次之,秋季最弱。其中,春季如中国的东南部、蒙古、日本和土耳其等地区呈现显著的正相关关系($R > 0.449$);夏季如哈萨克斯坦等地区出现显著的负相关关系($R < -0.449$);冬季如中国中部、日本和印度南部等地区呈现高度相关。

3.3.2 NDVI 与气候指标的滞后效应

结合图 1、图 6 和表 5 可以发现,气温、降雨量等气象因子以及 PET 在 1983 年、1996 年、2010 年的变化对 NDVI 影响较大,且 NDVI 与各因子之间存在相关性。因此,选用 1983 年、1996 年和 2010 年的 NDVI 与各因子进行了同期、滞后 1 月和滞后 2 月的相关性分析^[20],结果如表 6—8 所示,表中**表示 0.05 显著水平相关。分析表 6—8 发现,气温、降雨量以及 PET 对同期的 NDVI 表现出弱相关,对滞后 1 月表现出强相关,对滞后 2 月表现出弱负相关。尤其是在春季和夏季,气温、降雨量、PET 对滞后 1 月的 NDVI 表现出显著的强相关性,如 1983 年 5 月的各因子与滞后 1 月即 6 月的 NDVI 相关系数达到

极值,呈现显著相关性(超过 0.6); 与同期的 NDVI 表现的并不是特别显著,相关系数低于 0.2,相较于

滞后一月表现出弱相关性; 与滞后 2 月即 7 月的相
关系数小于 0,表现出一定的负相关性。

表 6 1983 年 NDVI 对气候因子响应关系分析

Tab.6 Analysis of the response relationship of NDVI to climate factors in 1983									
月份	气温			降雨量			PET		
	同期	滞后 1 月	滞后 2 月	同期	滞后 1 月	滞后 2 月	同期	滞后 1 月	滞后 2 月
1	0.651	0.588	0.564 **	0.654	0.592	0.557 **	0.628 **	0.596	0.515
2	0.618 **	0.559	0.483	0.593	0.574	0.438 **	0.490	0.574 **	0.297
3	0.598	0.575 **	0.294	0.476	0.585 **	0.128	0.307	0.501 **	-0.014
4	0.431	0.635 **	-0.121	0.265	0.588 **	-0.251	0.181	0.547 **	-0.309
5	0.138	0.685 **	-0.531	0.054	0.664 **	-0.577	0.019	0.614 **	-0.567
6	0.045	0.610 **	-0.644	0.005	0.597 **	-0.664	0.021	0.593 **	-0.651
7	-0.077	0.533 **	-0.674	-0.072	0.556 **	-0.694	-0.012 **	0.613	-0.696
8	-0.008	0.500 **	-0.631	0.058	0.584 **	-0.631	0.210	0.688 **	-0.556
9	0.263 **	0.668	-0.427	0.443	0.766 **	-0.282	0.494	0.777 **	-0.216
10	0.510	0.715 **	0.059	0.578	0.756 **	0.127	0.560	0.755 **	0.127
11	0.554	0.574 **	0.370	0.543 **	0.621	0.362	0.5784 **	0.630	0.405
12	0.573	0.563	0.610	0.588 **	0.529	0.517	0.632	0.583	0.545 **

表 7 1996 NDVI 对各因子响应关系分析

Tab.7 Analysis of the response relationship of NDVI to factors in 1996									
月份	气温			降雨量			PET		
	同期	滞后 1 月	滞后 2 月	同期	滞后 1 月	滞后 2 月	同期	滞后 1 月	滞后 2 月
1	0.648	0.491	0.559 **	0.656	0.540	0.561 **	0.639 **	0.548	0.520
2	0.615 **	0.552	0.453	0.592	0.554 **	0.407	0.511	0.564 **	0.314
3	0.585	0.601 **	0.327	0.497	0.622 **	0.221	0.268	0.522 **	0.030
4	0.427	0.727 **	-0.085	0.204	0.641 **	-0.267	0.114	0.600 **	-0.331
5	0.122	0.685 **	-0.530	0.025	0.678 **	-0.590	-0.002	0.629 **	-0.580
6	0.033	0.595 **	-0.644	0.006 *	0.596	-0.655	0.025	0.613 **	-0.653
7	-0.078	0.547 **	-0.655	-0.071	0.597 **	-0.687	0.008 **	0.645	-0.676
8	0.020	0.584 **	-0.630	0.102	0.658 **	-0.623	0.237	0.730 **	-0.538
9	0.232 **	0.606	-0.443	0.430 **	0.709	-0.336	0.488	0.745 **	-0.226
10	0.475	0.673 **	0.070	0.572	0.723 **	0.185	0.570	0.727 **	0.191
11	0.607	0.545 **	0.440	0.60 **	0.564	0.444	0.625 **	0.583	0.459
12	0.596 **	0.498	0.502	0.61 **	0.527	0.517	0.634	0.534	0.536 **

表 8 2010 年 NDVI 对各因子响应关系分析

Tab.8 Analysis of the response relationship of NDVI to factors in 2010									
月份	气温			降雨量			PET		
	同期	滞后 1 月	滞后 2 月	同期	滞后 1 月	滞后 2 月	同期	滞后 1 月	滞后 2 月
x1	0.622	0.526	0.508 **	0.623 **	0.554	0.500	0.589	0.600	0.440 **
2	0.629 **	0.488	0.488	0.593 **	0.545	0.415	0.481	0.564 **	0.293
3	0.539	0.591 **	0.265	0.425	0.618 **	0.122	0.187	0.544 **	-0.084
4	0.356	0.685 **	-0.143	0.134	0.608 **	-0.327	0.035	0.553 **	-0.374
5	0.102	0.689 **	-0.543	0.006	0.664 **	-0.579	0.007	0.647 **	-0.572
6	-0.027	0.535 **	-0.633	-0.048	0.548 **	-0.668	0.000	0.553 **	-0.649
7	-0.113	0.590 **	-0.692	-0.048	0.548 **	-0.668	-0.015	0.702 **	-0.719
8	-0.013	0.583 **	-0.660	0.055	0.656 **	-0.657	0.169	0.686 **	-0.592
9	0.268 **	0.663	-0.474	0.403	0.741 **	-0.395	0.471	0.772 **	-0.317
10	0.399	0.667 **	-0.023	0.478	0.724 **	0.052	0.520	0.733 **	0.110
11	0.544 **	0.518	0.361	0.589 **	0.540	0.413	0.622 **	0.575	0.452
12	0.615	0.550	0.512 **	0.645 **	0.579	0.550	0.642	0.590	0.534 **

4 结 论

基于 NDVI 和气候数据,从年和季节 2 个时间尺度分析了亚洲地区植被变化和气候变化的关系,辅以 M-K 趋势检测检验气象因子的变化情况,并借助 Person 相关分析法分析了气候变化与植被变化的关系以及对突变年份进行滞后性分析,得到以下主要结论:

1)1982—2015 年亚洲地区的 NDVI 呈现上升趋势,且 NDVI 的变幅比较平稳,变化速率介于 $-0.01 \sim 0.01/a$ 之间。其中,东南亚、日本、印度以及中国南部沿海等地区的植被覆盖较高 ($NDVI > 0.5$),西亚以及亚洲的中部绝大部分地区植被稀疏 ($0 < NDVI \leq 0.3$)。

2)1982—2015 年亚洲地区的气温、降雨量和 PET 均呈现上升趋势。降雨量和气温空间分布相似,均呈现东南亚较高,向北逐渐降低。PET 在干旱半干旱的中亚、西亚地区较高,在气候湿润的东南亚较低。随季节交替,气温、降雨量和 PET 均呈现先升高后降低的特点,且夏季达到巅峰。

3)降雨量与 PET 在亚洲北部与 NDVI 表现出较强的相关性 ($R > 0.449$),但是在比较湿润的南部如中国的中南部,气温则对 NDVI 表现较强的相关性。

4)春、夏季降雨,气温和 PET 对 NDVI 的影响较强,秋、冬季尤其是冬季,气候变化对植被 NDVI 的影响较弱。

5)气温、降雨量和 PET 对 NDVI 影响有明显的滞后效应,滞后期为 1 个月。

参考文献 (References):

[1] Piao S L, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. Nature, 2010, 467 (7311): 43 – 51.

[2] 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.

Piao S L, Fang J Y. Dynamic vegetation over change over the last 18 years in China[J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(4): 294 – 302.

[3] 孙红雨, 王长耀, 牛 铮. 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.

Sun H Y, Wang C Y, Niu Z, et al. 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, 1998, 2(3): 204 – 210.

[4] 高江波, 焦珂伟, 吴绍洪. 1982—2013 年中国植被 NDVI 空间异质性的气候影响分析[J]. 地理学报, 2019, 74(3): 534 – 543.

Gao J B, Jiao K W, Wu S H. Revealing the climatic impacts on spatial heterogeneity of NDVI in China during 1982—2013[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(3): 534 – 543.

[5] 覃巧婷, 陈建军, 杨艳萍, 等. 黄河源植被时空变化及其对地形和气候的响应[J]. 中国环境科学, 2021, 41(8): 3832 – 3841.

Qin Q T, Chen J J, Yang Y P, et al. Spatiotemporal variations of vegetation and its response to topography and climate in the source region of the Yellow River[J]. China Environmental Science, 2021, 41(8): 3832 – 3841.

[6] 崔利芳, 王伦澈, 屈 赛, 等. 气温、降水量和人类活动对长江流域植被 NDVI 的影响[J]. 地球科学, 2020, 45(6): 1905 – 1917.

Cui L F, Wang L C, Qu S, et al. Impacts of temperature, precipitation and human activity on vegetation NDVI in Yangtze River basin, China[J]. Earth Science, 2020, 45(6): 1905 – 1917.

[7] 崔林丽, 史 军, 肖风劲, 等. 中国东部 NDVI 的变化趋势及其与气候因子的相关分析[J]. 资源科学, 2010, 32(1): 124 – 131.

Cui L L, Shi J, Xiao F J, et al. Variation trends in vegetation NDVI and its correlation with climatic factors in eastern China[J]. Resources Science, 2010, 32(1): 124 – 131.

[8] 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.

Zhao M S, Fu C B, Yan X D, et al. Study on the relationship between different ecosystems and climate in china using NOAA/AVHRR data[J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(3): 287 – 296.

[9] Ichii K, Kawbata 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.

[10] 侯 静. 基于 GIMMS3g 的近 30 年全球荒漠—草原过渡带植被特征及其对气候变化的响应[D]. 银川: 宁夏大学, 2016.

Hou J. Characteristics of vegetation changes and its responses to climate change in desert/grassland biome transition zone in the last 30 years based on GIMMS3g[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2016.

[11] 张永强, 孔冬冬, 张选泽, 等. 2003—2017 年植被变化对全球陆面蒸散发的影响[J]. 地理学报, 2021, 76(3): 584 – 594.

Zhang Y Q, Kong D D, Zhang X Z. Impacts of vegetation changes on global evapotranspiration in the period 2003—2017[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(3): 584 – 594.

[12] 杨艳萍, 陈建军, 覃巧婷, 等. 2000—2018 年广西植被时空变化及其对地形、气候和土地利用的响应[J]. 农业工程学报, 2021, 37(17): 234 – 241.

Yang Y P, Chen J J, Qin Q T, et al. Temporal and spatial variation of vegetation and its response to topography, climate and land use in Guangxi during 2000—2018[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(17): 234 – 241.

[13] Zhang Y L, Song C H, Band L E, et al. Reanalysis of global terrestrial vegetation trends from MODIS products: Browning or greening[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 191: 145 – 155.

[14] Huang J, Wang H M, Dai Q, et al. Analysis of NDVI data for crop identification and yield estimation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(11): 4374 – 4384.

[15] 靳文姬. 鄂托克前旗近 40a 气候变化特征及突变分析[J]. 农业灾害研究, 2021, 11(3): 28 – 29, 32.

Jin W Y. Characteristics of climate change and abrupt change in Etokeqian Banner in recent 40 years[J]. Journal of Agricultural Catastrophology,2021,11(3):28-29,32.

[16] 于海英,陈淑伶,杨莉琳,等. 贵阳市近 70 年气候突变检测及变化趋势分析[J]. 西南大学学报(自然科学版),2021,43(9):115-123.

Yu H Y,Chen S L,Yang L L,et al. Change point detection of climate in Guiyang during the last 70 years and analysis of its change trend[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition),2021,43(9):115-123.

[17] 李晓兵,王 瑛,李克让. NDVI 对降水季节性和年际变化的敏感性[J]. 地理学报,2000(s1):82-89.

Li X B,Wang Y,Li K R. NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in northern China[J]. Acta Geographica Sinica,2000(s1):82-89.

[18] 刘启兴,董国涛,景海涛,等. 2000—2016 年黄河源区植被 NDVI 变化趋势及影响因素[J]. 水土保持研究,2019,26(3):86-92.

Liu Q X,Dong G T,Jing H T,et al. Change trend of vegetation NDVI and its influencing factors in the source region of the Yellow River in the period from 2000 to 2016[J]. Research of Soil and Water Conservation,2019,26(3):86-92.

[19] 索玉霞,王正兴,刘 闯,等. 中亚地区 1982 年至 2002 年植被指数与气温和降水的相关性分析[J]. 资源科学,2009,31(8):1422-1429.

Suo Y X,Wang Z X,Liu C,et al. Relationship between NDVI and precipitation and temperature in middle Asia during 1982—2002[J]. Resources Science,2009,31(8):1422-1429.

[20] 毕馨予,刘晓静,马东来,等. 辽宁省植被 NDVI 对气候因子的滞后响应研究[J]. 中国农业资源与区划,2021,42(10):233-244.

Bi X Y,Liu X J,Ma D L,et al. Lag response of vegetation NDVI to climate factors in Liaoning Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2021,42(10):233-244.

Effects of climate changes on the NDVI of vegetation in Asia

PANG Xin¹, LIU Jun²

(1. Shanxi Conservancy Technical Institute, Yuncheng 044000, China; 2. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Based on the long-time-series (1982—2015) GIMMS NDVI3g and CRU Ts datasets of precipitation, temperature, and potential evapotranspiration (PET) of Asia, this study identified the spatio-temporal variations in the vegetation coverage and climatic elements in Asia in the past 34 years using the maximum-value composite procedure, Mann-Kendall trend tests, and correlation analysis. Furthermore, this study analyzed the response of vegetation coverage to climate changes and explored the influence mechanisms of climate changes on the dynamic changes of vegetation. The results show that the vegetation in Asia during 1982—2015 is as follows: ① the vegetation coverage was high (NDVI > 0.5) in Southeast Asia, Japan, India, and the southern coasts of China but low in most parts of central Asia; ② the NDVI in Asia showed an upward trend at an increasing rate of 0.000 7/a. Moreover, the vegetation coverage exhibited a significant seasonal increase, with spring contributing the most to the interannual NDVI; ③ The PET in Asia was high in the west but low in the east. For example, the PET was high (> 40 mm) in arid and semi-arid Central Asia and Western Asia; ④ The temperature in Asia was high in the south and low in the north. For example, in China, the temperature was higher than 15 °C in the south and lower than 15 °C in the north. Rainfall exhibited a similar but more significant spatial distribution compared to the temperature; ⑤ The temperature, rainfall, and PET showed regional effects on NDVI. For example, rainfall and PET served as the main factors influencing NDVI in northern Asia, while the temperature was the main factor influencing NDVI in central and southern Asia; ⑥ The effects of climate changes on NDVI were significant in spring and especially summer but were nonsignificant in autumn and winter; ⑦ The effects of climate changes on NDVI showed a significant time lag of one month.

Keywords: vegetation coverage; NDVI; climate change; Mann-Kendall trend test; correlation analysis

(责任编辑: 张 仙)