

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2023.01.033

基于 Copula 函数的北京市气候变化及人类活动对 NDVI 影响的识别

左斌斌^{1,2,3}, 钟伟强^{1,2,3}, 谭超^{1,2,3}, 刘达^{1,2,3}, 程涛^{1,2,3}

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510635;

2. 河口水利技术国家地方联合工程实验室, 广东 广州 510635;

3. 广东省河口水利工程实验室, 广东 广州 510635)

摘要: 在气候变化和人类活动的双重影响下, 城市植被受到严重影响, 识别气候变化和人类活动对植被的影响, 对城市的生态建设具有重要意义。本文依据《北京市城市总体规划》, 运用 Copula 函数的方法考虑气候变化和人类活动对植被的影响进行分析。结果表明: 北京市的植被在各个季节都呈现出较好的增长趋势, 且在生态涵养区的增长趋势更加明显。NDVI-P 的最优 Copula 函数主要为 Frank Copula 和 Clayton Copula, 而 NDVI-T 的最优 Copula 函数主要是 Frank Copula 函数。根据 Copula 函数的依赖结构分析表明, 气候变化主要是通过影响植被的生长期和促进植被的光合作用来影响植被的生长; 人类活动对植被的影响主要是通过建设活动与政策来影响植被的分布。

关键词: 北京市; 归一化植被指数 (NDVI); 气温; 降水; Copula 函数

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)01-0219-07

Identification of the Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI in Beijing Based on Copula Function

ZUO Binbin^{1,2,3}, ZHONG Weiqiang^{1,2,3}, TAN Chao^{1,2,3}, LIU Da^{1,2,3}, CHENG Tao^{1,2,3}

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou, Guangdong 510635, China;

2. State and Local Joint Engineering Laboratory of Estuarine Hydraulic Technology, Guangzhou, Guangdong 510635, China;

3. Guangdong Engineering Laboratory of Estuarine Hydraulic, Guangzhou, Guangdong 510635, China)

Abstract: Under the dual effects of climate change and human activities, vegetation in urban areas has been severely affected. Identifying the impacts of climate change and human activities on vegetation is of great significance to the ecological construction of urban areas. This paper analyzes the impacts of climate change and human activities on vegetation using the method of Copula function based on the Beijing Urban Master Plan. The results showed that the vegetation in Beijing showed a good growth trend in each season, and the growth trend in the ecological conservation area was more obvious. The optimal Copula functions of NDVI-P are mainly Frank Copula and Clayton Copula, and the optimal Copula functions of NDVI-T are mainly Frank Copula functions. According to the analysis of the dependent structure of the Copula function, climate change affect the growth of vegetation through affecting the growth period of vegetation and promoting photosynthesis of vegetation; the impacts of human activities on vegetation is mainly the through construction activities and policies.

Keywords: Beijing; Normalized Difference Vegetation Index (NDVI); temperature; precipitation; Copula function

收稿日期: 2022-09-14

修稿日期: 2022-10-16

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2022A1515010898); 广州市科技计划项目(202201011541); 广东省水利科技创新项目(2022-01)

作者简介: 左斌斌(1995-), 男, 助理工程师, 主要从事水文水资源等方面工作。E-mail: zuobin95@163.com

通讯作者: 钟伟强(1975-), 男, 正高级工程师, 主要从事水力学、河流动力学及应用等方面的工作。E-mail: 281034710@qq.com

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估(AR5)报告指出,全球气候系统正在变暖,在1880年—2012年全球地表温度升高了 0.85°C ,而全球平均地表温度在1951年—2012年的升高速率高达 $0.12^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ^[1]。全球气温的上升速率越快,气温的波动区间也就相应地扩大,这种非线性的变化大大地提高了极端气温发生的概率,进而引发极端降雨事件,使得陆地生态系统的水热条件发生剧烈变化^[2]。植被作为陆地生态系统中最主要的组成部分,发挥着连接土壤、水、大气的功能,对水热条件的变化尤为敏感,也被广泛用于指示气候的变化^[3]。准确地描述植被对气候变化的响应关系及人类活动对植被的影响,可为制定应对气候变化措施、提升区域生态服务功能价值提供有力的依据^[4]。目前,对于植被的研究多是应用植被指数来衡量植被覆盖度的好坏,常用的植被指数主要有归一化植被指数(NDVI)和增强型植被指数(EVI),而NDVI是使用最为广泛的植被指数^[5]。针对NDVI分布特性的研究主要以研究NDVI的时空变化和对气候因子(如气温、降水)的响应关系为主,多采用单变量趋势分析和双变量线性相关性进行分析^[6]。线性分析方法虽然简单实用,但非线性的环境变化使得NDVI的变化规律也呈现出显著的非线性变化^[7]。而Copula函数可以联合不同类型非线性边缘分布的优点,使其在干旱研究中得到了广泛的引用^[8]。Zhao Jing等将Copula函数应用到NDVI分析中,建立其与气候因子的联合分布,并应用极大似然法来寻找断点^[9]。因此,可以运用Copula函数进一步研究环境变化对NDVI的非线性影响。

北京作为全国的首都,也是全国的政治、文化中心,在全国各方面建设中发挥着较好的示范作用。《北京城市总体规划(2016年—2035年)》明确指出北京北部 $2/3$ 的区域为生态涵养区,且提出增加城市绿地面积,提高城市宜居性和生态建设质量。植被作为生态系统最核心的要素之一,识别出对植被分布的影响因素对城市的生态建设是十分有必要的。因此,本文将对北京市的植被分布特性以及影响植被生长的因素进行分析,以期加深对植被分布的认识,从而为北京市生态建设提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

北京市位于华北平原北部,与天津、河北毗邻,占地面积约为 1.64万 km^2 。北京市呈现出西北

高东南低的特点,高程为 $-21\text{ m} \sim 2\,227\text{ m}$,其中62%为西北山区,海拔高程为 $1\,000\text{ m} \sim 1\,500\text{ m}$,38%为东南平原区,海拔高程为 $20\text{ m} \sim 60\text{ m}$ ^[10]。根据《北京城市总体规划(2016年—2035年)》,北京市要构建“一核一主一副、两轴多点一区”的城市空间结构。其中“一核一主一副”分别为首都功能核心区、中心城区和北京城市副中心,主要开展城市建设和经济发展活动,为经济发展区,是保障首都经济发展的重要区域;而“一区”主要是指生态涵养区,生态涵养区包括门头沟区、平谷区、怀柔区、密云区、延庆区,以及昌平区和房山区的山区,是京津冀协同发展格局中西北部生态涵养区的重要组成部分,是北京的大氧吧,是保障首都可持续发展的关键区域,区域分布情况见图1。北京属于半湿润半干旱季风气候,夏季炎热多雨,冬季干旱少雨。据统计北京市多年平均降水量为 540 mm (1980年—2010年),多年平均气温在 $11^{\circ}\text{C} \sim 12^{\circ}\text{C}$ ^[11]。

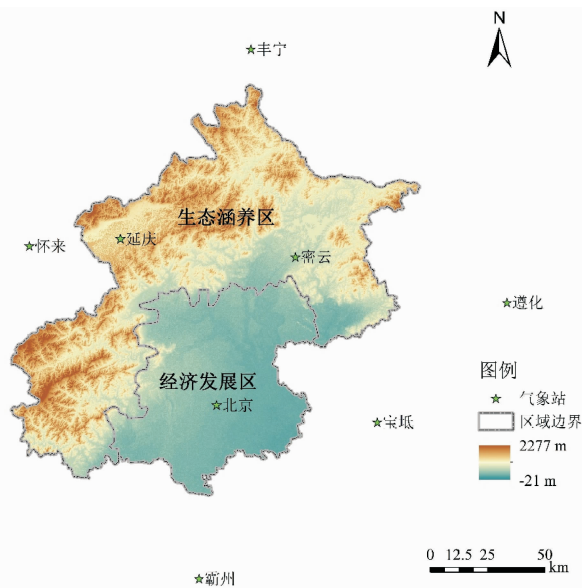


图1 研究区位置图

1.2 数据来源

NDVI可以准确地描述地表植被的覆盖情况,所以常被用来指示植被的变化。本文采用的NDVI序列(1982年—2015年)来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的AVHRR传感器的产品(<http://nex.nasa.gov/nex/projects/1349/>),该数据为每半月一幅,文中采用NDVI在季、年尺度上的平均值来表征NDVI的变化。日尺度的气候站点数据来源于国家气候中心的CMA数据集,文中采用泰森多边形权重法,分别计算得到经济发展区和生态涵养

区的面累积雨量和面平均气温。土地利用数据由 USGS 网站提供的 Landsat 遥感影像解译而来,其中遥感影像主要来源于夏季,采用目视解译的方法进行解译。

1.3 研究方法

1.3.1 MMK 趋势检验

Mann-Kendall 法不受异常值的干扰,计算过程也较为简单,在水文气象领域得到了广泛的应用^[12]。但传统的 Mann-Kendall 方法假设时间序列的变量是随机独立的,如果时间序列具有相关性,就可能会对趋势的判断产生误解,为了克服这个问题,Yue 和 Wang 对现有的 Mann-Kendall 方法进行了改进,以便更好地对具有相关性的时间序列进行检验^[13]。

1.3.2 边缘分布函数

常见的概率分布有离散型概率分布和连续性概率分布,前者常见的分布主要有 0~1 分布、二项分布、几何分布、泊松分布等,后者常见的分布主要有指数分布、正态分布(Normal)、对数正态分布(Log-normal)、伽马分布(Gamma)、广义极值分布(GEV)等^[14]。本文主要采用在水文中得到广泛应用的边缘分布函数来拟合气温、降水和 NDVI 的边缘分布,采用的边缘分布有正态分布、对数正态分布、伽马分布和广义极值分布。为了识别最佳的边缘分布函数,本文中选用柯尔莫可洛夫-斯米洛夫检验(Kolmogorov-Smirnov test, K-S test)。K-S 检验是一种非参数检验,其基于累计分布函数,通过样本的累计分布函数和理论分布函数的比较来做拟合优度检验,从而分析变量是否符合某种分布或优选出最优分布^[15]。

用 $F_n(x)$ 表示样本量为 n 的随机样本观察值的累计分布函数,其计算公式如下:

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{(-\infty, x)}(X_i) \quad (1)$$

式中: $I_{(-\infty, x)}(X_i)$ 为指示函数。

$$I_{(-\infty, x)}(X_i) = \begin{cases} 1 & X_i \leq x \\ 0 & X_i > x \end{cases} \quad (2)$$

当给定累积边缘分布 $F(x)$ 时, K-S 检验的公式为:

$$D_n = \sup_x |F_n(x) - F(x)| \quad (3)$$

式中: \sup_x 是距离的上确界,基于 Glivenko-Cantelli 理论,若 X_i 服从理论分布 $F(x)$,则当 n 趋于无穷时, D_n 等于 0。

1.3.3 Copula 函数

Copula 函数常常被用来刻画多个变量间的联

合分布特征。常用的 Copula 函数可以分为椭圆型、阿基米德型和二次型,由于阿基米德型 Copula 函数具有构造简单、求解容易、只含一个参数等特性,在水文领域得到了广泛的应用^[16]。常用的阿基米德 Copula 函数主要有 Clayton、Frank 和 Gumbel(见表 1) 其中 Clayton 和 Gumbel 呈现出较强的尾部依赖,分别对下尾和上尾更加依赖,而 Frank 没有尾部依赖^[17]。

表 1 常用 Copula 函数

Copula 函数	生成函数 $\varphi(t)$	θ	$C(u_1, u_2, \dots, u_n)$
Clayton	$\frac{1}{\theta}(t^{-\theta} - 1)$	$\theta > 0$	$[\left(\sum_{i=1}^n u_i^{-\theta}\right) - d + 1]^{-\frac{1}{\theta}}$
Frank	$-\ln \frac{e^{-\theta t} - 1}{e^{-\theta} - 1}$	$\theta \neq 0$	$-\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{\prod_{i=1}^n e^{-\theta u_i} - 1}{(e^{-\theta} - 1)^{n-1}} \right]$
Gumbel	$(-\ln t)^\theta$	$\theta \geq 1$	$\exp\left\{-\left[\sum_{i=1}^n (-\ln u_i)^\theta\right]^{\frac{1}{\theta}}\right\}$

2 结果与讨论

2.1 NDVI 与土地利用趋势分析

2.1.1 NDVI 趋势分析

为了探究 NDVI 在不同季节、不同规划区的年际变化情况,根据 NDVI 在不同规划区各季节的年值绘制 NDVI 在年际上的变化情况和趋势,如图 2 所示。从图 2 中可以看出,NDVI 整体上都呈现出增加趋势,生态涵养区的 NDVI 在秋季增加最为明显,增幅达到了 0.0022/a;经济发展区的 NDVI 在夏季增加的最为缓慢,仅为 0.00003/a。在不同的规划区间,生态涵养区的 NDVI 普遍要比经济发展区更高,且增长速度也更快。为了更好地分析 NDVI、气温和降水之间的关系,用 MMK 方法对三者进行趋势检验,见表 2。根据表 2 中 MMK 趋势检验的结果可以看出,在 99% 的置信水平下,NDVI、降水和气温基本上都呈现显著的增加趋势,只有降水在经济发展区和生态涵养区均呈现出显著下降的趋势。经济发展区春季的降水和 NDVI 具有不显著的趋势,夏季的 NDVI 基本上没有趋势变化。

2.1.2 土地利用变化分析

随着城市化进程的推进,城市不断地扩张,土地利用类型的转变将直接影响到区域植被覆盖类型和丰富度。对 Landsat 遥感影像数据进行目视解译,得到北京市土地利用图,见图 3。从图 3 中可以看出,自 1990 年以来,随着北京城市化进程的加剧,土地利用的数量发生了较大改变,以经济建设区为核心

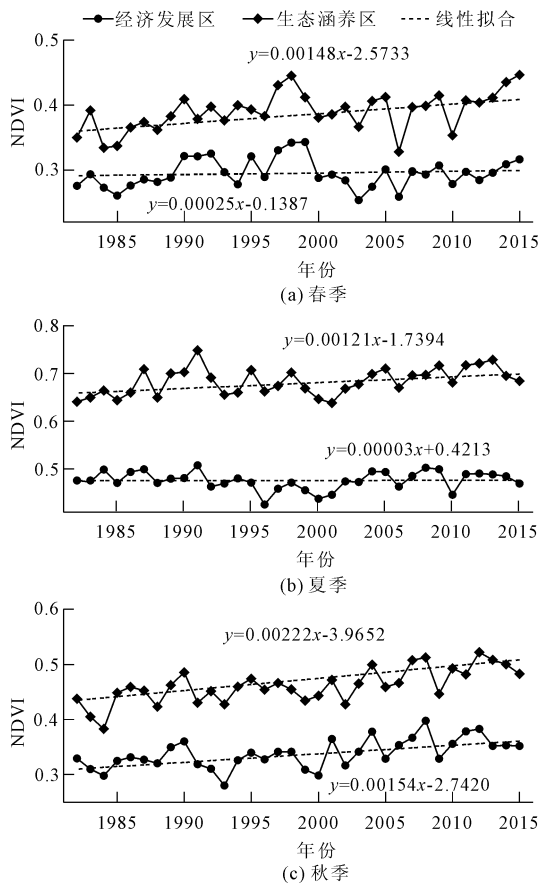


图 2 不同规划区、不同季节的 NDVI 变化情况及线性拟合地带的建设取得了较为迅速地发展,从图 3 中可以

看出,经济建设区的建设用地不断地压缩耕地的空间,而生态涵养区的土地利用几乎没有太大的变化。

表 2 不同季节、不同规划区 NDVI、P 和 T 的 MMK 检验结果

区域	季节	NDVI	P	T
经济发展区	春	1.7	1.3	10.6**
	夏	0.0	-3.9**	10.4**
	秋	7.5**	7.1**	3.9**
生态涵养区	春	5.6**	1.9*	6.7**
	夏	5.4**	-4.4**	5.7**
	秋	11.9**	6.3**	2.9**

注：“*”和“**”分别表示在 95% 和 99% 的置信水平上显著。

为了进一步研究不同规划区的土地利用转移情况,根据解译结果对不同规划区的各种类型的土地利用占比情况进行统计,统计结果见图 4。从图 4 中可以看出,经济建设区的土地利用类型以耕地为主,建设用地次之,但随着时间的推移,建设用地所占的比例不断提高,建设用地所占的比例由 1990 年的 23% 增长到 2015 年的 43%,几乎扩张了一倍。从土地利用类型转移地情况来看,经济建设区的水域、草地、林地几乎没有发生转移,建设用地是由耕地转变而来,耕地所占比例也由 1990 年的 65% 逐渐萎缩至 47%。而生态涵养区的土地利用所占比重几乎没有发生改变,仅在 2000 年—2005 年间,有 1% 的耕地转变为了建设用地。

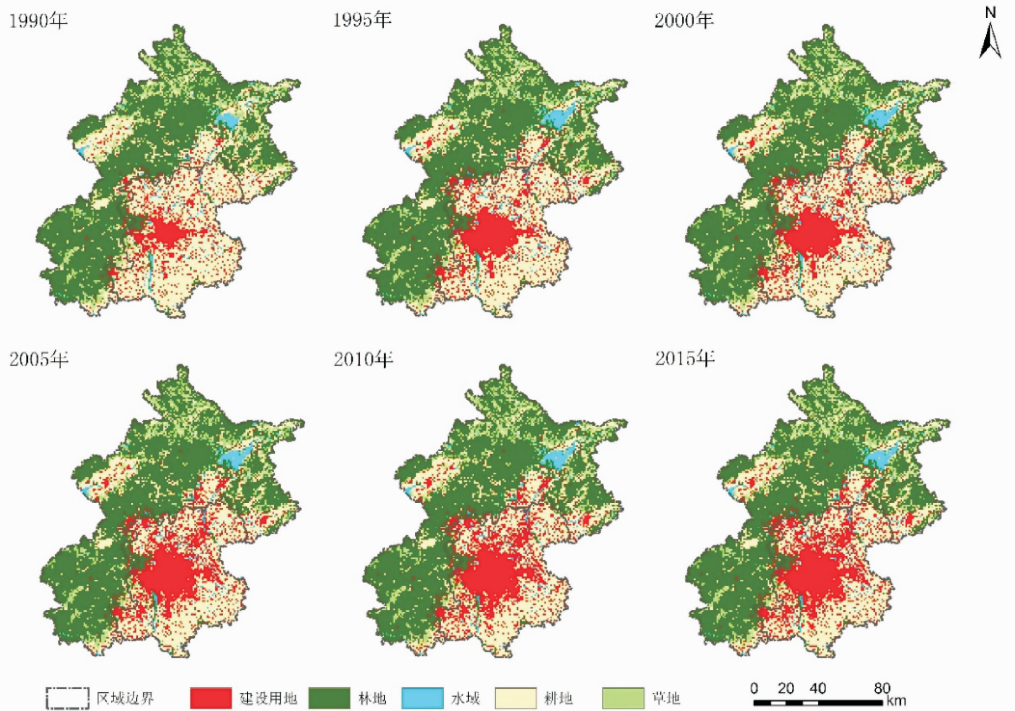


图 3 1990 年—2015 年北京市土地利用动态变化图

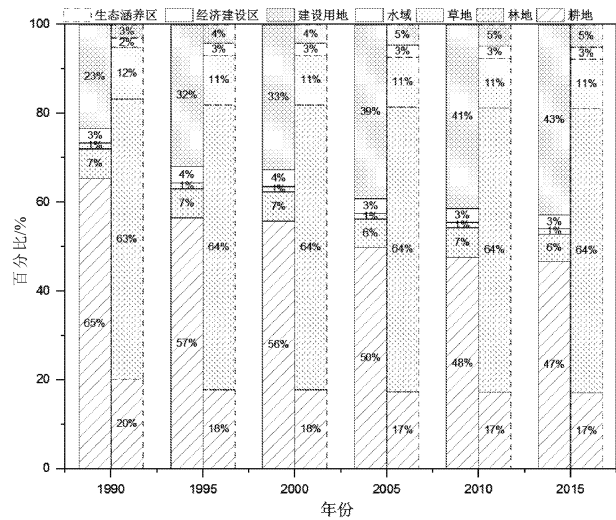


图 4 不同规划区各类土地利用所占比例

2.2 基于 Copula 的依赖关系分析

2.2.1 最优边缘分布的选择

为了更好地探究 NDVI 在不同规划区、季节间的分布情况及气温和降水对 NDVI 的影响,本文选择 Gamma 分、GEV 分布、Lognormal 分布和 Normal 分布来拟合其边缘分布,以期获得最优边缘分布。表 3 中列出了 K-S 检验的拟合优度值,加粗的为最优拟合度概率值。从整体上来看,春季和生态涵养区的降水检验概率值较小,拟合效果较差。对于经济发展区来说,NDVI 在春、夏季 Lognormal 分布拟合较好,秋季 NDVI GEV 分布拟合较好。降水在春、夏季 Normal 分布拟合较好,在秋季 GEV 分布拟合较好;气温在夏、秋季 Lognormal 分布拟合较好,而在春季 GEV 分布拟合较好。对于生态涵养区来说,NDVI 春、夏季 Lognormal 分布拟合较好,而在秋季 GEV 分布拟合较好;降水在春季 Normal 分布拟合较好,在夏季 GEV 分布拟合较好,秋季 Gamma 分布拟合较好;气温在春、秋季 Lognormal 分布拟合较好,而在夏季 GEV 分布拟合较好。

2.2.2 最优 Copula 函数的选择

当确定了 NDVI、气温和降水的最佳边缘分布后,可以利用 Copula 函数对上述最佳边缘分布进行联结,求得变量间的联合分布,从而分析 NDVI 与气候要素之间的依赖关系。本文中主选取的气候要素为气温和降水,因此,采用阿基米德 Copula 函数对 NDVI-P、NDVI-T 的联合分布进行求解,并采用 RMSE 和 AIC 准则来识别出最优联合分布,不同 Copula 函数统计值的计算结果见表 4,识别出的最

优 Copula 函数结果见表 5。从表 4、表 5 中可以看出,对于经济发展区来说, Frank Copula 适合模拟春、秋季 NDVI 和降水的联合分布,夏季用 Gumbel Copula 拟合 NDVI 和降水的联合分布; Frank Copula 模拟春季和秋季的 NDVI 和气温的联合分布,夏季用 Clayton Copula 模拟 NDVI 和气温的联合分布。对生态涵养区而言, Clayton Copula 可模拟春、夏季的 NDVI 和降水的联合分布,秋季用 Frank Copula 来模拟 NDVI 和降水的联合分布; Frank Copula 可用于各个季节 NDVI 和气温的联合分布的模拟。

表 3 不同规划区的季节 NDVI、气温和降水边缘分布 K-S 检验

区域	季节	P 值				
		Gamma	GEV	Lognormal	Normal	
经济发展区	春	NDVI	0.31	0.56	0.58	0.27
		P	0.12	0.00	0.00	0.41
		T	0.29	0.56	0.56	0.16
	夏	NDVI	0.00	0.95	0.96	0.54
		P	0.04	0.16	0.22	0.87
		T	0.10	0.87	0.88	0.09
秋	NDVI	0.00	0.97	0.96	0.72	
	P	0.90	0.99	0.00	0.15	
	T	0.46	0.88	0.89	0.07	
生态涵养区	春	NDVI	0.42	0.69	0.72	0.30
		P	0.01	0.00	0.00	0.72
		T	0.22	0.55	0.55	0.18
	夏	NDVI	0.66	0.91	0.93	0.55
		P	0.05	0.87	0.64	0.53
		T	0.00	0.95	0.05	0.11
秋	NDVI	0.01	0.95	0.91	0.32	
	P	0.22	0.03	0.00	0.07	
	T	0.35	0.89	0.90	0.10	

注:加粗表示最优边缘分布。

2.3 变化环境下各因素对 NDVI 的影响

2.3.1 气候变化对 NDVI 的影响

气候变暖已成为共识,气候变暖最为明显的特征就是水热条件发生了巨大的改变,而这一改变也将对生态系统产生较大的影响,尤其是对植被各个生长阶段的影响。本文结果表明,生态涵养区的土地利用类型和各类型所占的比重几乎没有发生,说明生态涵养区的植被主要受到气候变化的影响。1982 年—2015 年,生态涵养区的植被 NDVI 均表现出较为显著的增长趋势,且在秋季 NDVI 增加的趋势最为明显。

表 4 不同 Copula 函数的 RMSE 和 AIC

规划区	季节	系列	Frank		Clayton		Gumbel	
			RMSE	AIC	RMSE	AIC	RMSE	AIC
经济 发展区	春	NDVI-P	0.055	-4.761	0.043	-5.240	0.072	-4.199
		NDVI-T	0.068	-4.323	0.081	-3.970	0.072	-4.207
	夏	NDVI-P	0.061	-4.516	0.057	-4.662	0.080	-3.977
		NDVI-T	0.089	-3.774	0.094	-3.667	0.088	-3.791
	秋	NDVI-P	0.071	-4.231	0.075	-4.119	0.082	-3.942
		NDVI-T	0.079	-4.008	0.086	-3.831	0.091	-3.719
生态 涵养区	春	NDVI-P	0.093	-3.704	0.071	-4.247	0.121	-3.169
		NDVI-T	0.116	-3.250	0.119	-3.196	0.121	-3.174
	夏	NDVI-P	0.104	-3.460	0.068	-4.295	0.148	-2.752
		NDVI-T	0.144	-2.805	0.155	-2.663	0.154	-2.666
	秋	NDVI-P	0.099	-3.555	0.116	-3.232	0.123	-3.118
		NDVI-T	0.124	-3.110	0.130	-3.007	0.134	-2.951

表 5 植被与气候因子之间的选择

	经济发展区			生态涵养区		
	春	夏	秋	春	夏	秋
NDVI-P	Frank	Clayton	Frank	Clayton	Clayton	Frank
NDVI-T	Frank	Gumbel	Frank	Frank	Frank	Frank

气候变化对植被的影响是气温和降水共同作用的结果,分析 NDVI 与气候要素的共同作用,将有助于进一步加深对植被对气温和降水依赖结构的认识。文中的结果表明,在生态涵养区,春季和夏季均可以用 Clayton Copula 表征 NDVI-P 的联合分布。Clayton Copula 具有很强的下尾相关性,表明植被和降水在低值分布时相关性较强,具有很强的依赖机构,但在高值区域植被和降水间的相关性较弱。而 NDVI 与气温在各个季节和 NDVI 与秋季降水符合 Frank Copula 分布,但 Frank Copula 具有对称的尾部特征,因此无法捕获变量间的不对称尾部特征。当尾部系数趋向于 0 时,表明尾部的变量逐渐独立,没有相依关系。

虽然 Copula 方法只能从统计的角度分析植被与气候因素间的依赖关系,没有任何与植被生长机制相关的理论,但植被在选择气候因子的结果仍然揭示了几个主要的植物学特性。在春季和秋季 NDVI-T 的联合分布可以用 Frank Copula 可以很好的进行描述,虽然没有尾部特征,但也表明在春季和秋季温度将直接影响植被的生长速度和生长期^[18]。NDVI 和气温在春、秋季都呈现出增加的趋势,说明了植被对气温升高的响应呈现正相关关系。Nature 发表说明指出,中国的植被也越来越绿^[19]。气候变暖对植被影响机制主要体现在温度升高,一方面会

促进植被的光合作用,提高植被的净生产力,有利于植被物质的积累;另一方面也会加快土壤中营养物质的释放,为植物生长提供更多的营养物质^[20]。这一有利变化使得植物生长期延长,从而出现“绿得早,黄得晚”的现象。在春节、夏季可以用 Clayton Copula 来描述 NDVI-P 的联合分布,说明植被在夏季降水量增多时,将更有利于植被的生长。水作为很好的溶剂,土壤中的许多养分和矿物质在水溶条件下可以被植被吸收,降水增多将提高土壤营养物质的吸收和转运。同时,降水作为光合作用的原料,也会参与到光合作用过程中,降水增多将进一步促进光合作用。

2.3.2 人类活动对 NDVI 的影响

自改革开放以来,我国的城市化进程加速推进,城市化率逐年提高,北京、上海等地更是高达 86% 以上。城市的快速城市化,对城市生态系统将产生剧烈的改变。经济建设区的土地利用较大程度上发生了由耕地向建设用地的转移,表明该区域受到了人类活动的严重干扰。在 1982 年—2015 年期间,经济建设区的 NDVI 指数也都呈现出增加的趋势,但与耕地面积建设减少的实际不符。这可能是由于根据北京市的规划,对城市生态功能的重视程度逐年提高,且新增了许多城市绿色休闲空间有关。但只有秋季的趋势较为明显,可能是植被的生长期在秋季延迟所致。和相同季节的生态涵养区的 NDVI 指数相比,不仅 NDVI 指数的值更小,而且 NDVI 指数增加的趋势也要更弱。表明温度的升高会导致 NDVI 指数的升高,但由于城市热岛效应的存在,地表温度过高,也会抑制植被的生长,从而表现出增长

速度较为缓慢的特征^[21]。

根据植被与气候因子间的依赖关系分析结果表明,经济发展区的 NDVI-P 在夏季可以使用 Clayton Copula 进行联合分布的描述,和生态涵养区的保持一致,表明植被的 NDVI 指数与降水的低值具有较强的相关性。而经济发展区的 NDVI-T 在夏季更加符合 Gumbel Copula 拟合的联合分布,而 Gumbel 具有上尾相关性,表明 NDVI 与气温在夏季高值区域有较强的相关性,这有可能是在夏季城市绿化部门会对城市植被进行浇灌,致使即使在高温且降水较少的情况下,植被仍能很好地生长。

3 结 论

本文首先应用 MMK 方法对北京市的 NDVI 指数在不同季节的趋势变化情况和北京市的土地利用变化情况进行了分析,并进一步运用 Copula 函数的方法探究归一化植被指数 NDVI 与气候因子(气温和降水)的依赖关系,从而分析气候变化和人类活动对北京 NDVI 的影响。取得以下结论:

(1) 北京市的植被整体在各个季节上都表现出增加的趋势,但生态涵养区较经济发展区相比,植被不仅具有更好的长势,而且增加的也更为明显。经济建设区的发生较为明显的从耕地到建设用地的转移,而生态涵养区的建设用地几乎没有发生改变。

(2) 根据 K-S 检验的结果,NDVI、气温和降水的最佳边缘分布主要为 Lognormal 分布和 GEV 分布。基于最佳边缘分布,识别出 NDVI-P 在经济发展区的春季、秋季和生态涵养区的秋季用 Frank Copula 表征 NDVI 和降水的联合分布;NDVI-P 在其它几个季节则可以用 Clayton Copula 来表征 NDVI 和降水的联合分布。NDVI-T 除了在经济建设区可以用 Gumbel Copula 来表征 NDVI 与气温的联合分布外,其余季节 NDVI-T 的最佳 Copula 函数均为 Frank Copula。

(3) 气候变暖会使得植被的生长期延长,从而植被在春季和秋季呈现出良好的长势。但根据 NDVI 与降水的依赖关系,表明在夏季降水越多,植被的长势越好;人类活动影响土地利用由耕地向建设用地转移,致使天然植被数量减少。但根据 NDVI 与降水的依赖关系表明,植被也会受到政策的影响,且在夏季易受到灌溉的影响。

参考文献:

[1] Stocker T F, Qin D, Plattner G, et al. Climate change

2013: The physical science basis[Z]. Cambridge University Press Cambridge, 2013.

- [2] Wang Xiaoxin, Jiang Dabang, Lang Xianmei. Future extreme climate changes linked to global warming intensity [J]. Science Bulletin, 2017, 62 (24): 1673-1680.
- [3] 左冰洁,孙玉军. 南方亚热带季风区将乐县森林植被动态变化及其对气候变化的响应[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(6): 958-968.
- [4] 傅伯杰,牛 栋,赵士洞. 全球变化与陆地生态系统研究:回顾与展望[J]. 地球科学进展, 2005, 20(5): 556-560.
- [5] 王正兴,刘 闯. 植被指数研究进展:从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 979-987.
- [6] 赵维清,李经纬,褚 琳,等. 近 10 年湖北省植被指数时空变化特征及其驱动力[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7722-7736.
- [7] 焦珂伟,高江波,吴绍洪,等. 植被活动对气候变化的响应过程研究进展[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 2229-2238.
- [8] 顾佳帅,李琼芳,牛铭媛,等. 基于多维 Copula 函数的淮河流域上游气象干旱特征分析[J]. 中国农村水利水电, 2019(8): 83-87.
- [9] Zhao Jing, Huang Shengzhi, Huang Qiang, et al. Copula-based abrupt variations detection in the relationship of seasonal vegetation-climate in the Jing River Basin, China[J]. Remote Sensing, 2019, 11(13): 1628.
- [10] 左斌斌,徐宗学,叶陈雷,等. 基于 Copula 函数的北京市设计降雨研究[J]. 水力发电学报, 2021, 40(2): 77-88.
- [11] Zhai Yuanzheng, Guo Yongli, Zhou Jun, et al. The spatio-temporal variability of annual precipitation and its local impact factors during 1724—2010 in Beijing, China[J]. Hydrological Processes, 2014, 28(4): 2192-2201.
- [12] 徐宗学,孟翠玲,巩同梁,等. 西藏自治区气温变化趋势分析[J]. 自然资源学报, 2009, 24(1): 162-170.
- [13] Hamed K H, Rao A R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data[J]. Journal of Hydrology, 1998, 204(1): 182-196.
- [14] 张 强,李剑锋,陈晓宏,等. 基于 Copula 函数的新疆极端降水概率时空变化特征[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 3-12.
- [15] Kharin V V, Zwiers F W. Changes in the extremes in an ensemble of transient climate simulations with a coupled atmosphere—Ocean GCM [J]. Journal of Climate, 2000, 13(21): 3760-3788.

不及格率在降低的同时,获得高分的学生逐渐增多,学生的学习效果逐年增强,初步的教学改革发挥了积极作用。

5 结 语

根据工程教育专业认证对高等工程教育人才培养的要求,创新高等教育理念,改革教学方法和教学模式。以《结构抗震设计》主干课程为例,将教学内容模块化设计,同时采取线上线下融合、理论与实践融合、案例项目等多组合教学方式,教学改革实践初步表明,多元融合的教学方法能够促进学生对抗震防灾知识的深入理解与思考,能够增强学生自主学习的内驱力。近三年来学生考核成绩明显提升,教学改革发挥了积极作用,有助于培养学生创新思维能力和工程应用能力。此外,以学生为中心,关注学生的成长和发展,还需要根据具体的教学内容,深入挖掘思政要点,将思政元素映射到课程的具体内容中,提升学生自我认知的思政能力。

参考文献:

- [1] 彭亚萍,胡大柱. 应用型高校建筑结构抗震课程教学改革与实践[J]. 高教学刊,2020(10):96-100.
- [2] 潘毅,刘豪,林拥军,等. 基于 SC 教学理念的土木工程专业课程教学改革——以建筑结构抗震设计课程为例[J]. 高等建筑教育,2020,29(2):101-108.
- [3] 张耀军,周翠玲,王新元. 提高《建筑结构抗震设计》课程教学质量的教学改革探索[J]. 东南大学学报(哲学社会科学版),2012,14(S2):119-121.
- [4] 孟丽岩,王涛,张春玉. “结构抗震设计”课程思政教学改革探索[J]. 黑龙江教育(高教研究与评估),2022

(6):84-86.

- [5] 林拥军,李彤梅,潘毅,等. 线上与线下融合的土木工程专业课混合式教学研究[J]. 高等建筑教育,2020,29(1):91-101.
- [6] 任玲玲,董园,梁森奥. 应用型本科院校工程结构抗震设计课程教学实践探索[J]. 高等教育,2020,29(3):120-127.
- [7] 鲁正,龚依捷,周颖,等. 虚拟实验在建筑结构抗震课程教学中的应用[J]. 高等建筑教育,2019,28(2):106-111.
- [8] 梁桥,邹洪波,刘杰. 线上线下混合式教学改革实践——以“土力学与地基基础”课程为例[J]. 教育教学论坛,2021(11):69-72.
- [9] 张男星,张炼,王新风,等. 理解 OBE:起源、核心与实践边界——兼议专业教育的范式转变[J]. 高等工程教育研究,2020,182(3):109-115.
- [10] 吕西林. 建筑结构抗震设计理论与实例[M]. 上海:同济大学出版社,2002.
- [11] 王晓虹. 建筑结构抗震设计[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2014.
- [12] 王社良. 抗震结构设计[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2004.
- [13] 王丽琴,党发宁. 《土力学》课程混合式教学改革的探索与实践[J]. 水利与建筑工程学报,2022,20(1):211-214.
- [14] 曹周阳,薛茹,谢祥兵. 结构力学课程线上混合式教学实践[J]. 高等建筑教育,2022,31(3):164-171.
- [15] 林先其,熊鹰. 项目教学法在本科教育中的应用和思考[J]. 教育教学论坛,2016(25):200-201.
- [16] 郑晓芬,李开阳,刘沈如. 建筑结构抗震课程案例项目教学法探索[J]. 高等建筑教育,2021,30(2):72-78.

(上接第 225 页)

- [16] 郭生练,闫宝伟,肖义,等. Copula 函数在多变量水文分析计算中的应用及研究进展[J]. 水文,2008,28(3):1-7.
- [17] 李艳玲,畅建霞,黄强,等. 基于滑动 Copula 函数的降水和径流关系变异诊断[J]. 水力发电学报,2014,33(6):20-24.
- [18] Lucht W, Prentice I C, Myneni R B, et al. Climatic control of the high-latitude vegetation greening trend and Pinatubo effect[J]. Science, 2002,296:1687-1689.
- [19] Chen Chi, Park Taejin, Wang Xuhui, et al. China and

India lead in greening of the world through land-use management[J]. Nature Sustainability, 2019,2(2):122-129.

- [20] 焦珂伟,高江波,吴绍洪,等. 植被活动对气候变化的响应过程研究进展[J]. 生态学报,2018,38(6):2229-2238.
- [21] 李孝永,匡文慧. 北京、天津和石家庄城市地表覆盖组分与结构特征对地表温度的影响[J]. 生态学报,2019,38(10):3057-3065.