“三北”地区气候与植被时空变化及相关性分析

覃昭勋，谢劭峰，肖玉坤，李瑞宁，陈慧婕
（桂林理工大学 测绘地理信息学院，广西 桂林 541006）

摘　要：［目的］分析中国西北、华北、东北（“三北”）地区气候与植被的时空变化及相关性，为理解干旱半干旱区气候和植被耦合机制提供科学依据，也为“三北”防护林工程等生态建设提供理论指导。［方法］以中国“三北”地区为例，利用Sen+M-K趋势分析法、变异系数法和相关系数法，探讨1982—2024年“三北”地区大气可降水量、风速与归一化植被指数（NDVI）的时空变化及其相关性。［结果］①可降水量、风速、NDVI的年均值均表现出增长趋势，可降水量极显著增加区域（28.49%）集中于青海高原等高海拔地区，风速显著变化区域（增减合计12.68%）主要分布在干旱区盆地，NDVI极显著增加区域（51.65%）集中在生态工程实施区（如黄土高原），而小兴安岭等地呈现显著退化趋势（13.83%）；②可降水量、风速、NDVI的变异系数分别为0.05，0.03，0.07；③可降水量与NDVI呈正相关区域（年尺度79.75%，月尺度84.17%），月尺度相关系数为0.60。风速与NDVI的年相关性存在区域分异：在季风区边缘呈正相关（63.50%），在西北干旱区则表现为负相关（36.50%）。［结论］1982—2024年“三北”地区可降水量、风速与NDVI总体协同上升，表明区域气候与生态环境呈显著改善态势；3者在时空上的相关性受地形、气候及人类活动共同调控，呈现显著的区域差异性。

关键词：归一化植被指数；大气可降水量；风速；相关性；“三北”地区
文献标识码：A　　**文章编号：**1000-288X（2026）03-0194-10　　**中图分类号：**Q948.112

文献参数：覃昭勋，谢劭峰，肖玉坤，等.“三北”地区气候与植被时空变化及相关性分析[J].水土保持通报，2026，46（3）：194-203. Qin Zhaoxun，Xie Shaofeng，Xiao Yukun，et al. Spatiotemporal changes and correlation between climate and vegetation in ‘three-north’ region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2026，46（3）：194-203.

DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.012　　**CSTR：32312.14.stbctb.2026.03.012**

Spatiotemporal changes and correlation between climate and vegetation in ‘three-north’ region

Qin Zhaoxun，Xie Shaofeng，Xiao Yukun，Li Ruining，Chen Huijie
（*College of Geomatics and Geoinformation*，*Guilin University of Technology*，*Guilin*，*Guangxi* 541006，*China*）

Abstract：［Objective］The spatiotemporal changes and correlation between climate and vegetation in northwestern，northern and northeastern China（the three-north region）were analyzed，in order to provide scientific basis for understanding the coupling mechanisms between climate and vegetation in arid and semi-arid regions and to offer guidance for ecological initiatives such as the ‘three-north’ shelterbelt project.［Methods］Taking the ‘three-north’ region of China as the study area，the Sen+M-K trend analysis，coefficient of variation，and correlation coefficient methods were applied to examine the spatiotemporal changes and correlation between precipitable water vapor，wind speed，and normalized difference vegetation index（NDVI）in the ‘three-north’ region from 1982 to 2024.［Results］① The annual average values of precipitable water vapor，wind speed，and NDVI all exhibited an increasing trend. Areas with extremely significant precipitable water vapor increase（28.49%）were concentrated in high-altitude regions such as the Qinghai Plateau. Areas with significant wind speed changes（combined increase/decrease of 12.68%）were primarily distributed in arid basins. Areas with

收稿日期：2025-09-26　　**修回日期：**2025-11-30　　**采用日期：**2025-12-01
资助项目：广西自然科学基金项目“时变性水汽垂直剖面精细建模及GNSS水汽稀疏重建方法研究”（2023GXNSFAA026434）
第一作者：覃昭勋（2000—），男（壮族），广西壮族自治区象州县人，硕士研究生，研究方向为GNSS气象学。Email：qinzhaoxun@glut.edu.cn。
通信作者：谢劭峰（1969—），男（汉族），广西壮族自治区桂平市人，教授，主要从事GNSS气象学研究。Email：xieshaofeng@glut.edu.cn。

extremely significant NDVI increase (51.65%) were concentrated in ecological project implementation zones (e.g. the Loess Plateau), while regions like the Xiaoxing'an Mountains exhibited a significant degradation trend (13.83%). ② The coefficients of variation of precipitable water vapor, wind speed, and NDVI were 0.05, 0.03, and 0.07 respectively. ③ The precipitable water vapor and NDVI exhibited positive correlation in 79.75% of areas on the annual scale and 84.17% on the monthly scale, and the monthly correlation coefficient was 0.60. The annual correlation between wind speed and NDVI exhibited regional differentiation: positive correlation (63.50%) at the periphery of the monsoon zone, and negative correlation (36.50%) in the arid regions of northwestern China. [Conclusion] From 1982 to 2024, precipitable water vapor, wind speed, and NDVI in the 'three-north' region showed an overall increasing trend, indicating significant improvement in the regional climate and ecological environment. Their spatiotemporal correlations are jointly regulated by topography, climate and human activities, exhibiting pronounced regional differences.

Keywords: normalized difference vegetation index; precipitable water vapor; wind speed; correlation; 'three-north' region

植被是自然生态变化的重要指示器,作为自然生态的一部分,与水分、大气、土壤等要素紧密相关。它在保持水土,防风固沙和物质交换等方面发挥着重大作用[1]。降水已被证实为植被生长的重要因素之一,其重要前提是水汽[2],即大气可降水量(precipitable water vapor, PWV),是指在大气柱中从地面到大气顶部的所有水汽。PWV是影响气候变化的主要因素之一[3],在全球水循环和能量循环中起着重要作用,因此,研究PWV的时空分布及变化对于理解气候变化和生态环境的改变至关重要。气候的变化影响植被的生长,植被的生长也在改变着当地的气候。沙尘和土壤风蚀是干旱与半干旱地区的主要生态环境问题之一[4-5],二者受到风速和沙源的影响,降水、植被等因素又能直接影响沙源[6],且归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)作为植物生长状况及地表覆盖变化的有效指标[7],被广泛应用于研究植被变化和植被与气候关系。研究植被与气候的变化规律及其相互作用对于了解地区生态变化的机制,预测未来气候变化影响以及提出合理的生态保护与恢复措施具有重要意义。

“三北”地区(包括中国西北、华北和东北地区)是中国生态环境最为脆弱的地区之一,其生态环境的变化不仅关系到区域生态安全,还对国家社会经济可持续发展具有重要意义。1978年,中国启动了覆盖13个省、自治区和直辖市的“三北”防护林工程,旨在缓解“三北”地区的水土流失和风沙危害[8]。自工程实施以来,项目区的生态状况和经济效益得到显著改善,在维护国家生态安全和促进社会经济可持续发展方面发挥了重要作用[9]。掌握植被与气候的时空分布、变化趋势和相互影响机制,有助于“三北”地区的生态保护、环境恢复和政策制定。为了探究气候和植被变化,已有众多学者对其展开了一系列的研究。姚宜斌等[10]研究了青藏高原地区1979—2014年大气可降水量与地表温度的时空变化特征,结果表明两者均呈现增高趋势。黄小燕等[11]分析发现中国西北地区1960—2015年大气可降水量总体呈增加趋势,且与风速呈负相关。现有大气可降水量变化研究多基于气象参数开展,对于植被变化在其中发挥的作用鲜有讨论,遥感技术具有快速、实时和广泛覆盖的优势,为生态环境质量的监测和评估提供了技术支持[12],利用遥感技术构建的监测指数已成为区域生态环境质量监测和评价的主要手段。夏凯等[13]基于MODIS NDVI数据,系统评估2001—2020年“三北”工程区植被覆盖的时空演变特征,揭示了气候变化和人类活动对植被的主导影响,其中人类活动对植被的影响贡献较大。俞文政等[14]研究指出1987—2019年祁连山南麓气温、降水和风速等气候因子对温性草原面积变化呈非线性响应关系。陈珍等[15]研究发现2001—2023年新疆植被覆盖呈波动改善,并运用地理探测器方法分析风速等多种因子对该现象的影响,得出风速解释力最低的结论。已有对于植被与风速变化的研究多是采用一对多的方式,探讨植被变化的同时将风速和其他因素作为驱动因子,以此来分析植被变化的成因,这种研究范式难以直观揭示植被与风速之间较为具体的、双向的互馈机制,同时也缺少“三北”工程防护林实施以来该地区风速变化的研究以及二者的相关性分析。为此,本文利用Theil-Sen+Mann-Kendall趋势分析法、变异系数法和相关系数法,以多对多的方式研究1982—2024年“三北”地区PWV、风速、NDVI三者的时空变化以及相关性,旨在为该地区的生态保护和恢复提供科学依据,同时为应对气候变化、实现区域可持续发展提供理论支持。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区域为中国的“三北”地区(即中国北部3个地区),位于北纬31°31′—53°34′,东经73°26′—135°06′。该地区包括西北地区(新疆维吾尔自治区、青海省、甘肃省、宁夏回族自治区、山西省),华北地区(内蒙古自治区、山西省、河北省、北京市、天津市)和东北地区(黑龙江省、吉林省、辽宁省),涵盖13个省、自治区和直辖市,总面积约为5.47×10^6 km^2。“三北”地区拥有广阔的沙漠、沙地和戈壁,大部分位于干旱和半干旱气候区。该地区自然环境脆弱,西部以沙漠地带为主,而东部则主要是森林和草原覆盖。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 遥感数据

本文使用遥感数据为GIMMS NDVI(1982—2022年)和MODIS NDVI(2001—2024年),GIMMS NDVI时间分辨率15 d,空间分辨率为8 km,MODIS NDVI根据MODIS MOD13A2数据制作得来,MOD13A2时间分辨率16 d,空间分辨率为1 km,数据均来源于国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn),逐月数据已经过最大值合成、镶嵌和裁剪,然后根据研究区边界裁剪数据。因为GIMMS NDVI和MODIS NDVI的空间分辨率不同,所以先使用双线性插值法将MODIS NDVI的空间分辨率从1 km重采样到8 km。之后选取两数据集的重叠年份数据2001—2022年,对2001—2015年的逐月影像数据建立逐像元的线性回归模型,然后用2016—2022年的数据进行验证。结果表明经重采样后的MODIS NDVI预测得到的GIMMS NDVI与原始GIMMS NDVI,二者的决定系数R^2为0.942,均方根差(RMSE)为0.058,平均绝对误差(MAE)为0.035,在0.05显著性水平下,相关系数通过显著性检验且大于0.8的区域占研究区总面积的67.26%,满足本研究精度要求,最后将预测得到2023—2024年GIMMS NDVI数据用于研究,并对其和GIMMS NDVI(1982—2022年)数据求取平均得到43 a年均NDVI。

1.2.2 气象数据

本文使用的气象数据为ERA5的单层逐月数据,气象要素包括水汽、距离地表10 m风速,时间选取为1982年1月至2024年12月,时间分辨率为1个月,水平分辨率为0.25°×0.25°,其中水汽的单位为mm,风速单位为m/s。对逐月气象数据取平均得到逐年气象数据,再对逐月、逐年数据使用双线性插值法,使其与NDVI数据分辨率相统一,并裁剪得到相同研究区域。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析与检验

为评估要素的长期变化趋势,本研究采用Theil-Sen(Sen)趋势估计结合Mann-Kendall(MK)非参数检验进行趋势分析与显著性检验。这两种方法广泛应用于环境科学、水文学以及气候学等领域,因其对异常值不敏感且不要求数据服从特定分布的特点而受到青睐。Theil-Sen趋势估计是一种非参数方法,用于确定时间序列趋势的方向和大小,详细计算公式详见文献[16]。当斜率$\beta\geqslant0$,检验统计量$|Z|>2.58$,1.96和$|Z|\leqslant1.96$时,数据分别呈现极显著上升、显著上升、不显著上升。当$\beta<0$,$|Z|>2.58$、1.96和$|Z|\leqslant1.96$时,数据分别呈现极显著下降,显著下降,不显著下降。

1.3.2 变异系数

变异系数(coefficient of variation, C_v)是一种用于衡量数据相对离散程度的统计量,它通过标准差与平均值的比例来表示,用于反映变量的波动性[17]。本文根据变异系数的大小将其划分为5个等级:变异系数$C_v\leqslant0.05$,低波动;$0.05<C_v\leqslant0.10$,较低波动;$0.10<C_v\leqslant0.15$,中等波动;$0.15<C_v\leqslant0.20$,较高波动;$C_v>0.20$,高波动。

1.3.3 相关性分析

Pearson相关系数是衡量两变量之间线性关系强度和方向的最常用指标,取值范围为[−1, 1]。其中,相关系数R接近+1表示强正相关,接近−1表示强负相关,接近0则表明几乎没有线性关系。计算公式可参考文献[18]。

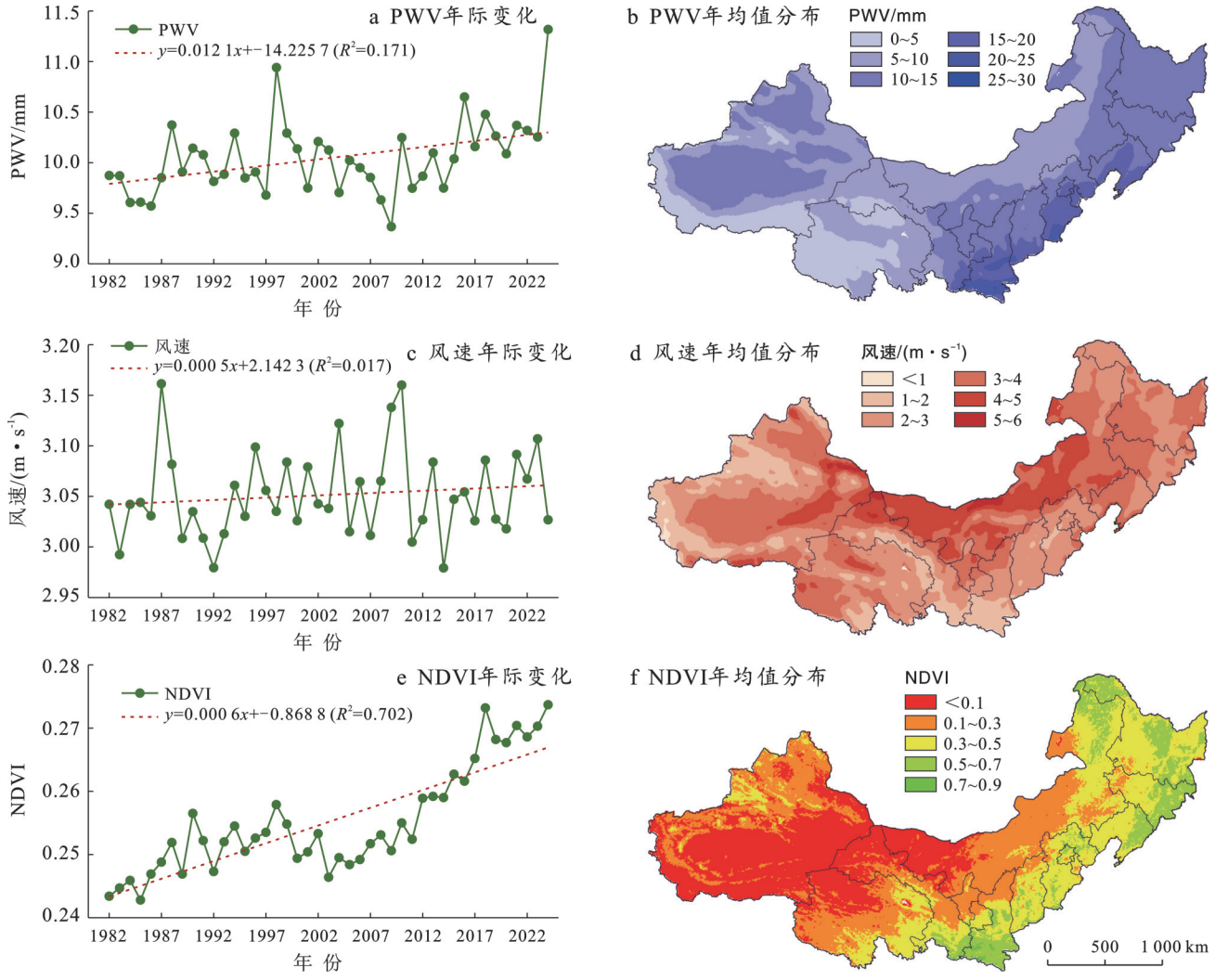
2 结果与分析

2.1 时间变化趋势分析

基于均值法得到43 a间中国“三北”地区PWV、风速、NDVI的年际变化及其年均值空间分布(图1)。由年际变化图可以看出1982—2024年“三北”区域PWV、风速、NDVI总体呈现波动增加趋势。PWV均值为10.045 mm,增速为0.121 mm/10 a,波动范围为9.367~11.318 mm,最大值出现在2024年,最小值出现在2009年。风速均值为3.051 m/s,增速为0.005〔(m/s)/10 a〕,波动范围为2.979~3.161 m/s,最大值出现在1987年,最小值出现在2014年。NDVI均值为0.255,增速为0.006/10 a,波动范围为0.243~0.274,最大值出现在2024年,最小值出现在1985年。

通过年均值分布图(图1)可以发现PWV<5 mm的地区大部分位于昆仑山脉和祁连山脉区域,5~10 mm的地区位于天山山脉、阿勒泰山脉,内蒙古高原、柴达木盆地,10~15 mm的地区则位于更低的塔

里木盆地、准噶尔盆地、黄土高原及东北区域,PWV>15 mm 主要分布在华北及沿海地区,可以看到海拔是影响PWV分布的一个重要因素,整体表现为海拔越高,其值越低的现象。风速<2 m/s的地区大部分集中于天山山脉、第一、二级阶梯分界线、华北地区。风速>4 m/s的地区主要集中在新疆东部和内蒙古高原。NDVI<0.1的区域集中于内蒙古高原西部、西北塔里木盆地和准噶尔盆地周围。NDVI>0.5的区域主要分布在大兴安岭两侧及华北地区,NDVI整体呈现“东南高,西北低”的空间格局。同时可以发现,年均风速低的区域NDVI相对较高。例如东部的东北地区,南部的华北地区以及西部的天山山脉,年均风速高的区域NDVI相对较低,比如内蒙古高原和新疆南部等西北地区。



注:审图号:GS(2020)4619。下同。

图 1　“三北”地区 1982—2024 年大气可降水量(PWV)、风速、NDVI 年际变化及多年均值分布

Fig.1　Interannual variations and multi-year average distribution of precipitable water vapor (PWV), wind speed and NDVI in ‘three-north’ region from 1982 to 2024

由图 2 可以看出,“三北”地区逐月 PWV, NDVI 呈现上凸形,风速则呈现上升、下降后再次上升、下降的趋势。月均 PWV 最小值出现在 1 月,为 2.831 mm,最大值出现在 7 月,为 23.187 mm。月均风速最小值出现在 1 月,为 2.805 m/s,最大值出现在 4 月,为 3.532 m/s。月均 NDVI 最小值出现在 2 月,为 0.142,最大值出现在 8 月,为 0.415。从两组分析可以看出 PWV 和 NDVI 的年均值、月均值趋势相近,年均值呈现上升趋势,月均值的高值和低值出现时间也十分相近,风速年均值波动较大,总体趋于平稳,上升趋势不显著,月均低值与 PWV, NDVI 月均高值出现的时间相同。

2.2　空间趋势和稳定性分析

基于 Sen 和 M-K 检验方法得到上述讨论数据 43 a 间的变化趋势(表 1 和图 3),可以看到“三北”地区 PWV 大部分研究区域呈现不显著变化,极显著上

升区域(28.49%)主要集中于西北地区的高海拔区域,如昆仑山脉北坡、祁连山脉和青海高原。风速大部分区域也是呈现不显著变化(87.32%),风速呈现显著和极显著变化的地区大部分位于西北地区,呈现极显著和显著增加趋势的区域(8.81%)主要集中在太行山脉西侧、祁连山脉北坡、黄土高原、柴达木盆地中部、准噶尔盆地、塔里木盆地南部。风速呈现极显著和显著下降的区域(3.87%)集中在准噶尔盆地周围和天山山脉。北方区域NDVI以上升为主,西北和华北地区呈现较为明显的上升趋势,极显著上升区域(51.65%)主要集中在黄土高原、青海高原,同时零星分布于塔里木盆地和东北平原。NDVI呈现显著和极显著下降的区域(13.83%)主要集中于小兴安岭、长白山脉地区、准噶尔盆地和天山山脉地区。"三北"地区NDVI呈现上升趋势的面积高于呈现下降趋势的面积,表明"三北"地区植被整体上呈现不断增加改善的状态。

通过变异系数量化"三北"地区的PWV、风速、NDVI的稳定性(图3),结果表明PWV总体上呈现低波动的态势,变异系数范围为0.03~0.09,均值为0.05,低波动区域主要位于东北地区和华北地区,面积比例48.11%,而较低波动大部分位于西北的干旱区,面积比例51.89%,这些地方水汽稀疏,易受地形气候、植被及人类活动的影响,基本覆盖了PWV呈现上升趋势的地区。风速变异系数范围为0.01~0.15,均值为0.03,以低波动为主,比例为95.02%,较低波动和中等波动区域主要分布在青海地区的南部和北部的祁连山脉,比例为4.98%。结合趋势图看,研究区风速整体波动较小,尽管部分区域呈现出较为显著的上升和下降趋势。NDVI年际变化的变异系数在0.01~1.43,均值为0.07,低波动区域(37.12%)主要分布在大兴安岭、长白山脉地区和阿拉善高原、塔里木盆地中部。较低波动区域(40.73%)主要集中于东北平原。中等波动区域(15.13%)围绕着较高波动和高波动区域分布,较高波动和高波动区域(7.02%)主要分布在黄土高原、天山山脉、昆仑山脉北坡和祁连山脉地区。

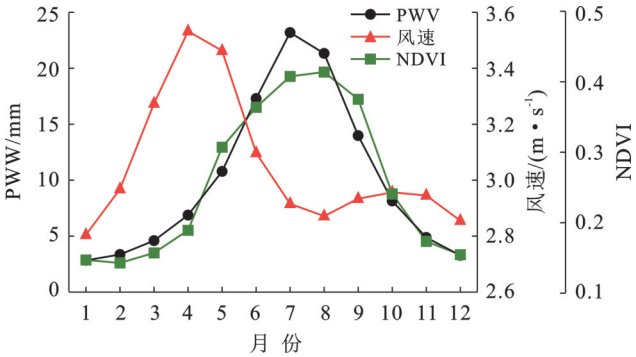


图2 "三北"地区1982—2024年大气可降水量(PWV)、风速、NDVI月均值

Fig.2 Monthly average values of precipitable water vapor (PWV), wind speed, and NDVI in 'three-north' region from 1982 to 2024

表1 "三北"地区大气可降水量(PWV)、风速、NDVI变化分区统计结果

Table 1 Statistical results of precipitable water vapor (PWV), wind speed, and NDVI variation zones in 'three-north' region

区域	类型	面积比例/%					
		极显著上升	显著上升	不显著上升	不显著下降	显著下降	极显著下降
"三北"	PWV	28.49	15.32	50.26	5.93	0.00	0.00
	风速	2.92	5.89	62.23	25.09	2.56	1.31
	NDVI	51.65	6.19	16.36	11.97	2.93	10.90
西北	PWV	24.52	5.69	18.60	5.91	0.00	0.00
	风速	2.12	3.01	25.93	19.81	2.56	1.31
	NDVI	28.18	3.08	8.32	6.57	1.64	6.95
华北	PWV	3.61	3.71	21.95	0.02	0.00	0.00
	风速	0.36	1.67	23.27	3.99	0.00	0.00
	NDVI	17.22	2.07	4.98	2.89	0.59	1.54
东北	PWV	0.36	5.92	9.71	0.00	0.00	0.00
	风速	0.44	1.21	13.03	1.29	0.00	0.00
	NDVI	6.25	1.04	3.06	2.51	0.70	2.41

2.3 相关性分析

将PWV、风速和NDVI三者分别以年、月为尺度进行空间相关性分析(图4,表2),可以看到三者间正负相关并存。PWV与风速以负相关为主,年尺

度上PWV与风速呈正相关的区域(36.71%)主要分布在长白山脉、内蒙古高原中西部、柴达木盆地,正相关较弱的区域零星分布于黄土高原和内蒙古高原东部。负相关区域(63.29%)主要分布在太行山脉、新疆和青海。月尺度上PWV与风速正相关区域(36.13%)分布与年尺度上则有较大不同,主要集中于内蒙古高原西部、柴达木盆地以及昆仑山脉以北的新疆大部分地区,月尺度负相关区域(63.87%)的则主要分布于海拔较高的昆仑山脉、除柴达木盆地外的青海地区、一二级阶梯分界线、长白山脉。PWV与NDVI以正相关为主,年尺度上面积比例达到79.75%。较强相关区域主要集中于天山山脉北坡、祁连山脉、黄土高原和内蒙古高原东部。较强负相关区域主要位于塔里木盆地、昆仑山脉、柴达木盆地,这些区域植被退化较为明显或基本不存在植被覆盖。月尺度上二者的正相关性面积达到84.17%,$R>0.5$的区域达到71.96%,广泛分布于除阿拉善沙漠、柴达木盆地、塔里木盆地及祁连山脉以北等地的西北地区。

风速与NDVI在年尺度上正相关区域(63.50%)主要集中在黄土高原南部、内蒙古高原西部、东北平原,零星分布于“三北”地区,负相关区域则主要分布于黄土高原西部、天山山脉及其两侧的新疆地区。月尺度上二者相关性与PWV与风速相关性的分布大体相同,区别在于风速与NDVI在塔里木盆地及其东部区域表现出负相关性。

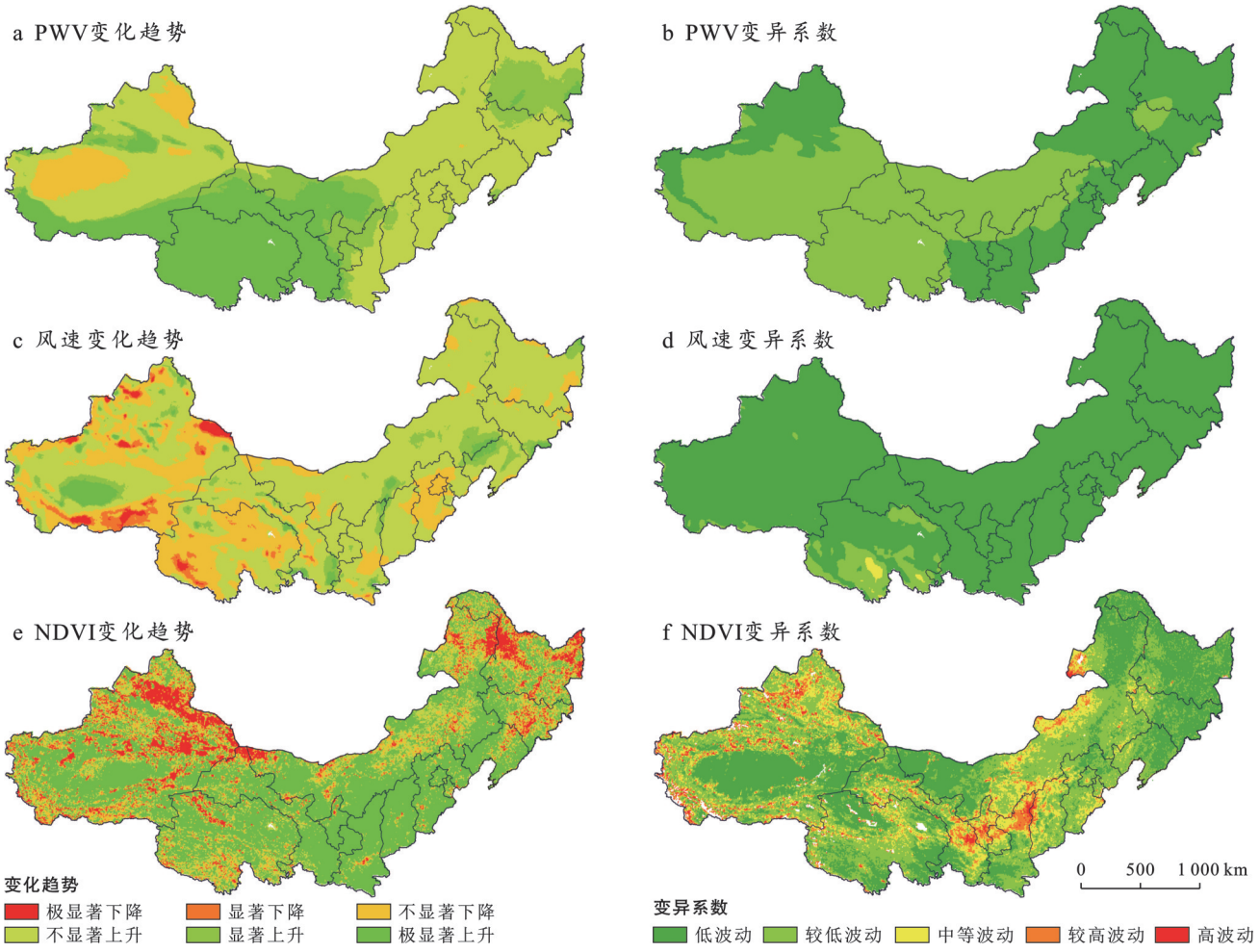


图3　“三北”地区1982—2024年大气可降水量(PWV)、风速、NDVI的变化

Fig.3　Changes in precipitable water vapor (PWV), wind speed, and NDVI in ‘three-north’ region from 1982 to 2024

3　讨　论

1982—2024年“三北”地区的PWV、风速和NDVI整体呈现波动上升的趋势。PWV的年均值均显示出逐渐增加的趋势,上升趋势小于NDVI,PWV的增加可能与近年来气温升高及冰雪融化增加有关[10],特别是在高海拔地区,PWV的增加尤为显著。PWV的月均值在夏季(7—8月)达到最大值,这与我国的季风气候密切相关,来自太平洋的夏季季风带来大量水汽。水汽分布受到海拔高度和地形影响较

大，海拔较高的地区水汽较低，低海拔地区尤其是沿海和华北区域水汽较高，西北地区海拔较高、深居内陆，海洋水汽难以到达，水汽的变化分布与刘丹等[19]对中国地区大气可降水量的研究结果一致。从空间分布上看，PWV的变异系数数值较小，表明即使全球温度上升促进冰川融化，增加了水分蒸发，使得高海拔地区PWV表现出稳定的长期上升趋势，但其增量对于均值而言变化并不明显。

风速整体变化较为平稳，呈现基本持平的趋势，但其年际波动小于0.2 m/s，风速月均值在春季（4月和5月）达到了最大值，1，7，8月和12月呈现出低值的态势，与PWV，NDVI高值出现时间重叠。高风速区域主要集中在内蒙古、新疆、青海、东北等海拔较高的地区，其地形平坦，受西风带以及西北季风影响，风速较大。相比之下，东南部低海拔地区风速整体偏弱。风速的变化较为缓慢，但局部区域仍然呈现出较为显著的增速或减速趋势，这与刘鸿波等[20]研究结论一致，其变化可能由于南北热力差异等自然因素和人为因素（包括土地利用和城市化等）。风速的变化幅度与其所处海拔高度有关，高海拔区域风速变化大，其增强或减弱的趋势大于低海拔区域[21]。风速均值整体偏小可能是由于所选数据集不同[22]，由于研究区域地形复杂，且近地层风速的空间差异显著，在进行再分析时，由于预报系统和模式本身存在一定的系统性误差，地面风速的气候分布和演变趋势出现较大的不确定性，导致其存在一定的误差[23]，但其依旧能体现风速的整体分布和变化趋势，同时包括ERA5在内的多个再分析资料均无法表现出东亚风速的下降趋势，只有日本的JRA-55能再现其下降趋势[24]。由变异系数看，风速变化整体波动小，也符合其年际波动较小的结论。

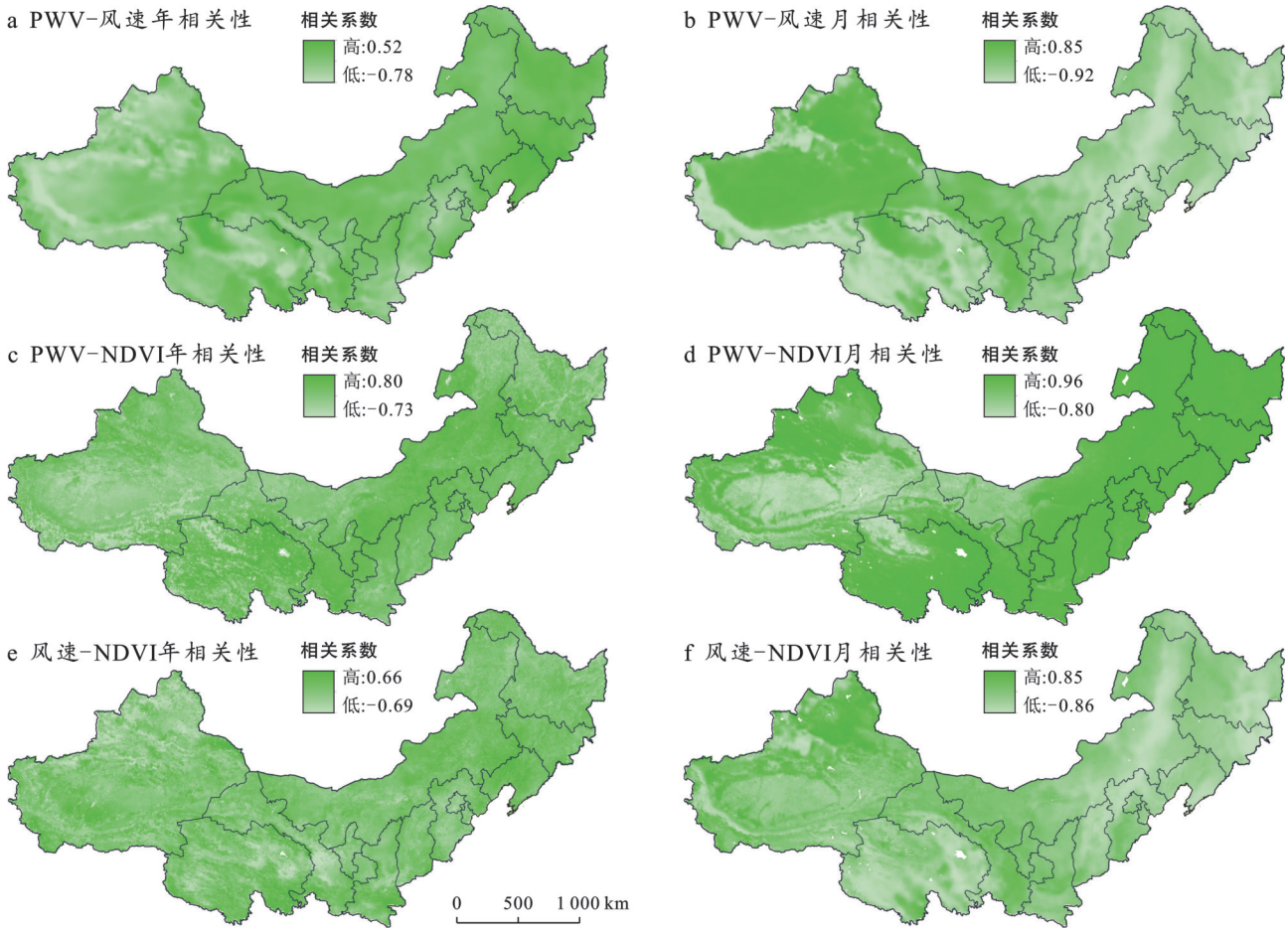


图4 “三北”地区1982—2024年大气可降水量（PWV）与风速、PWV与NDVI、风速与NDVI相关性分析

Fig.4 Correlation between precipitable water vapor (PWV) and wind speed, PWV and NDVI, and wind speed and NDVI in 'three-north' region from 1982 to 2024

NDVI与PWV在时空上变化特征较为相似，月均值在夏季（7—8月）达到高点，雨热同期，有利于植被生长，年均值呈波动上升，改善明显，空间尺度上以上升为主，表明“三北”地区的生态恢复有了明显进展，这可能得益于“三北”防护林工程、退耕还林等一系列生态修复措施的实施[25]。NDVI值呈现东高、

西低的分布特征,植被较为繁茂的区域主要集中在东北、华北等地区,这些地区气候适宜,降水量较多,而西北地区的塔里木盆地、柴达木盆地、阿拉善沙漠等地则呈现出较低的植被覆盖率,原因是这些地区海拔高、气候干燥、土地贫瘠,植被难以存活。部分区域呈现下降趋势,例如天山山脉地区植被的退化可能是由于该地高海拔、低降水、干旱气候造就了植物的脆弱性[26],东北地区、内蒙古西部的植被退化主要是因为过去这些地区人口增长快、过度开荒、毁林放牧加上降水减少且蒸发量大[27],但之后也并没有表现出较大的恢复,因为NDVI的变异系数表现出较强的地域性,所以可以看到该地表现出明显的下降趋势但其变异系数并不大,波动较小。黄土高原的较高波动是因为退耕还林、防沙治沙等政策的实施[27],有利于植被生长,植被覆盖度呈现上升趋势,同时也符合其变异系数较大,数据波动大的特点。

表 2　“三北”地区大气可降水量(PWV)、风速、NDVI相关系数和面积比

Table 2　Correlation coefficients and area ratios of precipitable water vapor (PWV), wind speed, and NDVI in ‘three-north’ region

研究内容	时间尺度	R平均值	相关系数面积比例/%			
			正相关比例	负相关比例	$R>0.5$	$R<-0.5$
PWV与风速	年	−0.09	36.71	63.29	0.01	3.62
	月	−0.12	36.13	63.87	18.95	23.96
PWV与NDVI	年	0.21	79.75	20.25	9.00	0.18
	月	0.60	84.17	15.83	71.96	1.96
风速与NDVI	年	0.05	63.50	36.50	0.26	0.18
	月	−0.18	29.22	70.78	4.36	18.22

PWV、风速、NDVI三者之间在年尺度和月尺度上均存在一定的相关性。月尺度上,PWV和NDVI与风速呈负相关的区域主要位于东部低海拔和青海高原地区,这些地区夏季季风较为温和,风速较小,带来较多水汽,温度适宜,有利于植被生长,增加地表粗糙度,进一步降低了风速,冬季则相反。呈正相关的区域大部分属于西北地区,是温带大陆性气候,同时也是非季风区,干旱区,海拔较高,夏季风难以抵达,但该地区的水汽、植被与风速依旧保持着相同的趋势,即夏季风速大,冬季受北部山脉的阻挡,风速较小。但在塔里木盆地植被与风速表现出相反的相关性,可能是由于该地降水少,夏季风速、温度的增加,进一步增加了植被的蒸发量,导致其难以生长。而PWV与风速在新疆大部分地区表现出较强的正相关性,说明该地二者出现趋势十分接近,全国PWV达到峰值的时间均为夏季,而新疆地区的风速峰值出现的时间区别于东部地区,可见单一因素PWV的增加不一定总是能促进植被的生长,也可能受其地理位置和其他气候因子的共同影响。年尺度上,PWV与风速呈正相关的区域主要集中在东北和内蒙古地区等季风区,可能是由于风速的增加带来更多的水汽,使得空气中的水汽含量上升。华北地区虽表现出一定的负相关性,风速下降,但燕山、太行山脉的阻隔依旧让PWV表现出不显著的上升趋势,这些地区同时也是较高植被覆盖区或植被增加较为显著的地区。高原地区以及西部的山地表现出负相关性,因为温度上升,冰川融化,植被的显著增加,蒸发量增加而风速下降,使得水汽流动减弱,进一步强化了PWV的增加趋势。总体来看,PWV与风速呈负相关,且在一些特定区域表现出较强的相关性。水汽与植被覆盖度之间则普遍呈正相关,尤其是在较湿润地区,这可能表明月尺度上PWV为植被生长的重要因素,年尺度上植被同时有利于保持和提高地区的水汽含量。风速与植被覆盖度则在不同区域表现出不同的相关性,表明风速对植被生长的影响受地形和气候的共同作用。

1982—2024年“三北”地区PWV、风速与NDVI总体协同上升,三者在时空上的相关性受地形、气候及人类活动共同调控,呈现显著的区域差异性。整体上,“三北”地区气候与植被状况稳步向好,未来应对不同区域制定差异性规划。具体而言,地形因素对气候和植被的影响仍然至关重要,尤其是山地与平原地区之间的差异,决定了水汽、风速及植物生长的适宜性。此外,气候变化和降水模式的变化对植物生长的推动作用不可忽视。特别是在干旱与半干旱地区,水资源的供给是影响NDVI变化的关键因素之一。人类活动,特别是植树造林、草地恢复和农业发展,明显改善了这些区域的植被覆盖和生物多样性。随着生态工程的推进,植被恢复取得了显著成效,尤其是在风沙较重的地区。随着气候逐渐温暖

和降水量的增加,NDVI呈现稳定增长趋势。虽然三者均呈上升态势,但不同区域间仍然存在显著差异。例如,西北地区受限于地形和气候,PWV与NDVI呈负相关,而东南地区则表现出较强的协同效应。为了应对这些差异,未来的生态恢复和气候适应策略应根据区域特点进行精准的规划。对于水资源丰富的地区,可以进一步加强生态系统的多样性保护,同时推动农业和生态的双赢局面;而在干旱和半干旱地区,应优先考虑提高水资源利用效率与节水灌溉技术的普及,同时加强植被恢复与防风固沙工作。此外,针对人类活动对植被的干扰,需要制定相应的土地利用政策和生态补偿机制,以确保生态恢复措施能够持续有效地执行。总体来看,随着全球气候变化的深入,"三北"地区的生态系统可能面临新的挑战与机遇。因此,跨学科的综合研究,结合气候模型、遥感监测技术与区域社会经济发展,仍然是制定未来生态规划与政策的基础。

4 结 论

(1)"三北"地区PWV以0.121 mm/10 a的速率显著增加,呈上升趋势面积比例为94.07%,空间分布呈现明显海拔梯度特征,其中昆仑山脉和青海高原区域PWV最低(<5 mm)同时也是PWV极显著增加的区域(28.49%),华北及沿海地区最高(>15 mm)。PWV变化相对稳定,变异系数为0.05,低波动区域占48.11%。

(2)"三北"地区风速变化趋势不显著0.005[(m/s)/10 a],空间分布差异显著,高值区(>4 m/s)主要集中在新疆东部和内蒙古高原。显著增加区域占5.89%,显著减少区域占2.56%。风速变异系数为0.03,低波动区域比例达95.02%。

(3)"三北"地区NDVI以0.006/10 a的速率显著增加,NDVI空间分布呈东南高西北低格局,大兴安岭两侧及华北地区NDVI最高(>0.5)。极显著增加区域占51.65%,主要分布在黄土高原和青海高原。NDVI变异系数为0.07,高波动区域主要分布在黄土高原等地,占4.75%。

(4)"三北"地区PWV与风速正负相关比例相当,与NDVI以正相关为主,年尺度正相关区域占79.75%;风速与NDVI在年尺度上正相关区域占63.50%,但在西北干旱区呈显著负相关。月尺度上PWV与NDVI正相关性较强(R=0.6),面积比例达到84.17%,表明水汽条件是影响植被生长的重要因子,PWV, NDVI二者与风速以负相关为主,面积比例分别达到63.87%和70.78%。

参考文献(References)

[1] 赖金林,齐实,崔冉冉,等.西南高山峡谷区植被变化及影响因素分析[J].环境科学,2023,44(12):6833-6846.
Lai Jinlin, Qi Shi, Cui Ranran, et al. Analysis of vegetation change and influencing factors in southwest alpine canyon area [J]. Environmental Science, 2023,44(12):6833-6846.

[2] 潘锋,何大明,曹杰,等.夏季怒江流域水汽输送多支特征及对降水影响[J].地理学报,2023,78(1):87-100.
Pan Feng, He Daming, Cao Jie, et al. Multiple branches of water vapor transport over the Nujiang River basin in summer and its impact on precipitation [J]. Acta Geographica Sinica, 2023,78:(1)87-100.

[3] Fontaine B, Roucou P, Trzaska S. Atmospheric water cycle and moisture fluxes in the west African monsoon: Mean annual cycles and relationship using NCEP/NCAR reanalysis [J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(3):2002GL015834.

[4] 张璐,宋桂英,范凡,等.2021年3月14—16日中国北方地区沙尘暴天气过程诊断及沙尘污染输送分析[J].环境科学学报,2022,42(9):351-363.
Zhang Lu, Song Guiying, Fan Fan, et al. Diagnosis of sandstorm weather process and analysis of sand pollution transportation in northern China from 14th to 16th, March 2021 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022,42(9):351-363.

[5] Dong Zhibao, Lv Ping, Zhang Zhengcai, et al. Aeolian transport in the field: A comparison of the effects of different surface treatments [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2012,117(D9):2012JD017538.

[6] Wu Jianjun, Zhao Lin, Zheng Yanting, et al. Regional differences in the relationship between climatic factors, vegetation, land surface conditions, and dust weather in China's Beijing-Tianjin sand source region [J]. Natural Hazards, 2012,62(1):31-44.

[7] 皇彦,宋海清,胡琦,等.2000—2020年内蒙古NDVI时空动态及其对水热条件的响应[J].水土保持研究,2024,31(4):197-204.
Huang Yan, Song Haiqing, Hu Qi, et al. Spatial-temporal dynamics of NDVI and its response to hydrothermal conditions in Inner Mongolia from 2000 to 2020 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(4):197-204.

[8] Deng Cuiling, Zhang Baoqing, Cheng Linyin, et al. Vegetation dynamics and their effects on surface water-energy balance over the three-north region of China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019,275:79-90.

[9] Cao Shixiong, Suo Xinhao, Xia Chengqi. Payoff from afforestation under the three-north shelter forest program [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 56

(C):256120461.

[10] 姚宜斌,雷祥旭,张良,等.青藏高原地区1979—2014年大气可降水量和地表温度时空变化特征分析[J].科学通报,2016,61(13):1462-1477.
Yao Yibin, Lei Xiangxu, Zhang Liang, et al. Analysis of precipitable water vapor and surface temperature variation over Qinghai-Tibetan Plateau from 1979 to 2014 [J]. Chinese Science Bulletin, 2016,61(13):1462-1477.

[11] 黄小燕,王圣杰,王小平.1960—2015年中国西北地区大气可降水量变化特征[J].气象,2018,44(9):1191-1199.
Huang Xiaoyan, Wang Shengjie, Wang Xiaoping. Variations of precipitable water in northwest China during 1960—2015 [J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(9):1191-1199.

[12] Zhou Jianbo, Liu Wanqing. Monitoring and evaluation of eco-environment quality based on remote sensing-based ecological index (RSEI) in Taihu Lake basin, China [J] .Sustainability, 2022,14(9):1-21.

[13] 夏凯,黄义忠.三北工程区植被覆盖变化及其对气候变化和人类活动的响应[J].西北林学院学报,2025,40(1):133-143.
Xia Kai, Huang Yizhong. Vegetation cover change and its response to climate change and human activities in the “three-north” project afforestation program [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2025,40(1): 133-143.

[14] 俞文政,于龙辉,周华坤,等.祁连山南麓温性草原时空演变及其对气候变化的响应[J].生态学报,2025,45(8):3700-3715.
Yu Wenzheng, Yu Longhui, Zhou Huakun, et al. Investigation into the spatio-temporal dynamics of the temperate steppe in the southern foothills of Qilian and its response to climate change [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(8):3700-3715.

[15] 陈珍,蔡朝朝,马楠,等.2001—2023年新疆NDVI时空格局与驱动力分析[J].干旱区研究,2025,42(5):922-932.
Chen Zhen, Cai Zhaozhao, Ma Nan, et al. Spatial-temporal pattern and driving force analysis of NDVI in Xinjiang from 2001 to 2023 [J]. Arid Zone Research, 2025,42(5):922-932.

[16] 杨秋琳,米丽娜,刘玉忠,等.2003—2022年宁夏不同生态分区土壤水分时空变化及其影响机制[J].水土保持通报,2025,45(2):102-113.
Yang Qiulin, Mi Lina, Liu Yuzhong, et al. Spatiotemporal variation of soil moisture in different ecological regions of Ningxia and their influencing mechanisms from 2003 to 2022 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(2):102-113.

[17] 王润科,王建,赵泽斌,等.基于MOD13Q1数据的天水市植被覆盖度时空变化分析[J].遥感技术与应用,2024,39(4):987-999.
Wang Runke, Wang Jian, Zhao Zebin, et al. Temporal and spatial variation analysis of vegetation coverage in Tianshui City based on MOD13Q1 data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2024, 39(4): 987-999.

[18] 耿益新,范连连,马学喜,等.中蒙阿勒泰毗邻区植被净初级生产力时空变化及其影响因素[J].水土保持通报,2024,44(6):298-307.
Geng Yixin, Fan Lianlian, Ma Xuexi, et al. Spatiotemporal characteristics of vegetation net primary productivity changes and influencing factors in Altay adjacent area of China and Mongolia [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(6):298-307.

[19] 刘丹,邱新法,史岚,等.基于NCEP资料的我国大气可降水量的计算及其时空分布[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2013,5(2):113-119.
Liu Dan, Qiu Xinfa, Shi Lan, et al. Estimation of atmospheric precipitable water in China with NCEP data and its spatio-temporal distribution [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2013,5(2):113-119.

[20] 刘鸿波,董理,严若婧,等.ERA5再分析资料对中国大陆区域近地层风速气候特征及变化趋势再现能力的评估[J].气候与环境研究,2021,26(3):299-311.
Liu Hongbo, Dong Li, Yan Ruojing, et al. Evaluation of near-surface wind speed climatology and long-term trend over China's mainland region based on ERA5 reanalysis [J]. Climatic and Environmental Research, 2021,26(3):299-311.

[21] Zhang Ruhua, Zhang Shiyan, Luo Jiali, et al. Analysis of near-surface wind speed change in China during 1958—2015 [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 137(3):2785-2801.

[22] 丁一汇,李霄,李巧萍.气候变暖背景下中国地面风速变化研究进展[J].应用气象学报,2020,31(1):1-12.
Ding Yihui, Li Xiao, Li Qiaoping. Advances of surface wind speed changes over China under global warming [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2020, 31(1):1-12.

[23] 杨劲,张双益,王海龙,等.ERA5和ERA5-Land地面风速资料在中国陆地区域的适用性对比初步研究[J].气候与环境研究,2024,29(1):36-44.
Yang Jin, Zhang Shuangyi, Wang Hailong, et al. Preliminarily comparative study on the applicability of ERA5 and ERA5-land ground wind speed data over China's land region [J]. Climatic and Environmental Research, 2024,29(1):36-44.

(下转第222页)