

王萌萌,王晗,李斌,等.德州植被生态质量变化及其对气候变化的响应[J].海洋气象学报,2025,45(2):136-144.

WANG Mengmeng, WANG Han, LI Bin, et al. Changes in vegetation ecological quality and their response to climate change in Dezhou[J]. Journal of Marine Meteorology, 2025, 45(2): 136-144. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240301001. (in Chinese)

德州植被生态质量变化及其对气候变化的响应

王萌萌^{1,2}, 王晗^{1,3}, 李斌^{1,2}, 范佳林^{1,2}, 刘春红^{1,2}

(1.山东省气象防灾减灾重点实验室, 山东 济南 250031; 2.德州市气象局, 山东 德州 253078; 3.山东省气候中心, 山东 济南 250031)

摘要 气候变化背景下,研究植被生态质量状况及其对气候变化的响应,可为生态文明建设提供数据参考。基于多源遥感数据和气象观测资料,利用植被生态质量监测模型,研究德州2000—2022年植被生态质量时空变化特征及其对气候变化的响应。结果表明:23年间,德州植被生态质量明显改善,植被生态质量指数、植被净初级生产力和植被覆盖度每10年分别增加7.3、101.6 $\text{g C}\cdot\text{m}^{-2}$ 和6.8%。植被生态质量空间差异不大。气温和降水是改善植被生态质量的主要气候驱动因子,而且降水的驱动作用大于气温。适宜的气温、降水等水热条件,有助于植被生长发育,促进植被生态质量改善。干旱、高温、寒潮等极端气候事件,特别是多种极端气候事件叠加,会导致植被生态质量下降。

关键词 气候变化;植被生态质量;净初级生产力;植被覆盖度

中图分类号: P49 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2025)02-0136-09

DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240301001

Changes in vegetation ecological quality and their response to climate change in Dezhou

WANG Mengmeng^{1,2}, WANG Han^{1,3}, LI Bin^{1,2}, FAN Jialin^{1,2}, LIU Chunhong^{1,2}

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Dezhou Meteorological Service, Dezhou 253078, China; 3. Shandong Climate Center, Jinan 250031, China)

Abstract The study on vegetation ecological quality and its response to climate change under the background of climate change can provide reference data for the construction of ecological civilization. Based on multi-source remote sensing data and meteorological observing data, the spatio-temporal variations of the vegetation ecological quality and their response to climate change in Dezhou from 2000 to 2022 are studied using the monitoring model for vegetation ecological quality. The results show that the vegetation ecological quality in Dezhou has significantly improved during the 23 years, and the ecological quality index (EQI), net primary productivity (NPP) and fractional vegetation cover (FVC) increase by 7.3, 101.6 $\text{g C}\cdot\text{m}^{-2}$ and 6.8% every 10 years, respectively. The spatial differences in vegetation ecological quality are not significant. Temperature and precipitation are the main climatic driving factors to improve vegetation ecological quality, and the driving effect of precipitation is greater than that of

收稿日期:2024-03-01;修回日期:2024-05-03

基金项目:山东省气象局科研项目(2024SDZDIANXM01,2023sdqxm04);华东区域气象科技协同创新基金合作项目(QYHZ201815);德州市气象局科研项目(2023dzqxzd03,2023dzqxyb02)

第一作者:王萌萌,tiandiwoyi@126.com。

通信作者:王晗,wanghannuist@163.com;李斌,330524520@qq.com。

temperature. Appropriate water and thermal conditions such as precipitation and temperature, are conducive to the growth of vegetation, and can promote the improvement of vegetation ecological quality. Extreme climate events such as drought, high temperature and cold wave, especially the superposition of multiple extreme climate events, lead to the decline of vegetation ecological quality.

Keywords climate change; vegetation ecological quality; net primary productivity (NPP); fractional vegetation cover (FVC)

0 引言

植被生态是表征生态环境质量的重要指标,而植被生长发育及其功能受气候变化直接影响^[1-4]。气候变化大背景下,研究植被生态质量的变化特征及其对气温、降水、极端天气等气候条件的响应,具有重要的现实意义^[5-8]。植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)和植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC)作为表达植被生态质量和植物生长状况的两个关键特征量,被广泛应用于植被生态质量监测评估研究^[9-11]。李超等^[3]利用MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)数据反演总初级生产力(gross primary productivity, GPP)、叶面积指数、FVC、温度植被干旱指数和陆面温度等5项指标,基于构建的植被生态指数,对2000—2018年全国植被生态质量演变趋势进行研究。汲玉河等^[11]基于遥感反演的归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)计算了FVC,利用相关模型计算了草地和林地的NPP,并以此为指标研究了秦岭地区植被生态质量演变特征及驱动力。路利杰等^[12]根据FVC、叶面积指数、GPP等生态系统遥感参量,建立了生态系统质量评估模型,对丹江口库区植被生态质量进行监测分析。毛留喜等^[13]采用NDVI数据,基于对NPP的估算,建立了包括辐射、土壤水分、总第一生产力、呼吸作用、净第一生产力和监测评价指数等6个子模型的生态气象监测评价模型,监测评估了以气象条件为主要驱动因子的全国生态环境质量,奠定了该领域的研究基础。钱拴等^[9]在上述生态气象监测评价模型基础上,采用NPP和FVC两个指标,构建了可以综合反映植被单位面积生产能力和区域覆盖能力的综合生态质量指数,进而修订了植被综合生态质量时空变化动态监测评价模型。这些模型在浙江^[14]、海南^[15]等地均取得了较好的

应用成效。

德州着力推进黄河流域生态保护和高质量发展,业已取得良好的工作成效。近年来德州气候变化形势复杂,干旱、寒潮、暴雨等极端气候事件频发,对植被生态质量造成一定影响。为此,基于成熟的植被综合生态质量时空变化动态监测评价模型^[9],对2000—2022年德州植被生态质量时空变化进行定量化评估,同时利用气象观测资料分析同期气候变化特征,进而揭示植被生态质量对气候变化的响应特征,为生态修复、国土绿化、高质量发展等科学决策提供气候数据支持。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

德州位于山东西北部、黄河下游北侧,属黄河冲积平原,四季分明、雨热同期,春季干旱多风,夏季炎热多雨,秋季凉爽少雨,冬季寒冷干燥,具有显著的温带大陆性季风气候特征。年平均气温为13.2℃,年日照时数为2483.8h,年降水量为531.4mm。土地总面积为10356km²,其中耕地占比60%左右。植被生长季主要集中在3—11月,植被类型以农田为主,农田作物主要为冬小麦、夏玉米。

1.2 数据来源

采用的数据包括2000—2022年气象数据和卫星遥感数据。其中,气温、降水、光照、极端天气气候事件等气象数据来源于德州市气象局气象观测站。卫星遥感数据来源于MODIS月NDVI合成产品,空间分辨率为1km。

1.3 评价指标

1.3.1 植被生态质量评价指标

采用植被生态质量指数(ecological quality index, EQI)作为评价指标,反映德州地区植被生态质量年际变化特征,计算公式如下。

$$I_{EQ} = 100 \times (f_1 \times V_{FVC} + f_2 \times \frac{V_{NPP}}{V_{NPP-max}}) \quad (1)$$

式中: I_{EQ} 为生态质量指数值, 范围为 0~100, 数值越大说明植被生态质量越好; f_1 、 f_2 为权重系数, f_1 和 f_2 之和为 1; V_{FVC} 为植被覆盖度值; V_{NPP} 为植被净初级生产力值, 单位为 $g\ C\cdot m^{-2}$; $V_{NPP-max}$ 为研究时段植被净初级生产力的最大值, 即“最好”气候条件下的植被净初级生产力。

$$V_{FVC} = \frac{I_{NDV} - I_{NDV-S}}{I_{NDV-V} - I_{NDV-S}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: I_{NDV} 为归一化植被指数值, I_{NDV-V} 为植被覆盖区域的归一化植被指数值, I_{NDV-S} 为裸土或无植被覆盖区域的归一化植被指数值。

$$V_{NPP} = V_{GPP} - R_g - R_m \quad (3)$$

$$R_g = 0.2 \times (V_{GPP} - R_m) \quad (4)$$

$$R_m = V_{GPP} \times (7.825 + 1.145 \times t_a) / 100 \quad (5)$$

$$V_{GPP} = \varepsilon \times T_e \times W_e \times V_{FPAR} \times V_{PAR} \quad (6)$$

式中: V_{GPP} 为植被总初级生产力值, 单位为 $g\ C\cdot m^{-2}$; R_g 为植被生长呼吸消耗量, R_m 为植被维持呼吸消耗量, 单位均为 $g\ C\cdot m^{-2}$; t_a 为平均气温, 单位为 $^{\circ}C$; ε 为最大光能利用率, 参考相关研究取值 $0.389\ g\ C\cdot MJ^{-1}$; T_e 为温度胁迫系数, 根据光合作用的最低、最优、最高温度进行计算; W_e 为水分胁迫系数, 根据实际蒸散量和潜在蒸散量计算, 取值范围为 0.5 (极端干旱条件下)~1.0 (非常湿润条件下); V_{FPAR} 为植被吸收光合有效辐射的比例 (fraction of photosynthetically active radiation, FPAR), 根据 I_{NDV} 进行估算; V_{PAR} 为光合有效

辐射 (photosynthetically active radiation, PAR) 值, 利用日照时数观测数据计算太阳总辐射, 由入射光合有效辐射占太阳总辐射的比例计算得到, 单位为 $MJ\cdot m^{-2}$ [9]。首先计算月 V_{NPP} , 其次对全年各月进行累计, 计算得到全年 V_{NPP} 。

1.3.2 气候变化评价指标

采用与植被生长密切相关的气温、光照、降水等指标, 研究气候变化趋势及其对植被生态质量的影响。鉴于德州植被类型中农田面积占比最大, 而农田中种植面积最大的冬小麦在 $0\ ^{\circ}C$ 以下停止生长发育, 因此在研究年平均气温状态的同时, 加入正积温 (对年内超过 $0\ ^{\circ}C$ 的逐日平均气温进行累计, 下同) 参数, 以期体现气温累计量对植被生态质量的影响。决定选用年平均气温 (t)、正积温 (t_{sum})、年日照时数 (S)、年降水量 (P)、年降水日数 (D) 等 5 个指标。

近年来气候变化加剧, 寒潮、干旱、暴雨等极端气候事件增多, 对植被生长造成了显著影响。为此, 在上述 5 个气候变化评价指标的基础上, 进一步研究极端气候因子对植被生态质量的影响。结合德州气候变化情况, 参考现有研究成果, 在广泛应用于极端气候事件研究的气候指数中选择 8 个指数进行分析, 包括 4 个极端气温指数和 4 个极端降水指数 (表 1)。基于 2000—2022 年德州 11 个气象观测站点逐日平均气温、最高 (低) 气温、降水量等气象数据, 计算极端气候指数。

表 1 极端气候指标

Table 1 Indices of extreme climate

指标项目	极端气温指数				极端降水指数			
	霜冻日数	结冰日数	夏日日数	炎热夜数	降水强度指数	中雨日数	连续干旱日数	连续湿润日数
定义	年内日最低气温小于 $0\ ^{\circ}C$ 的日数	年内日最高气温小于 $0\ ^{\circ}C$ 的日数	年内日最高气温大于 $25\ ^{\circ}C$ 的日数	年内日最低气温大于 $20\ ^{\circ}C$ 的日数	年内雨日 (日降水量大于或等于 $1\ mm$) 降水总量与降水日数之比	年内日降水量大于或等于 $10\ mm$ 的日数	年内日降水量小于 $1\ mm$ 的连续日数最大值	年内日降水量大于或等于 $1\ mm$ 的连续日数最大值
代码	FD0	ID0	SU25	TR20	SDII	R10	CDD	CWD

1.4 统计分析方法

1.4.1 趋势分析

对 2000—2022 年德州植被生态质量指数以及温度、光照、降水等气候因子进行变化趋势分析。采用最小二乘法计算线性斜率 (k), 以评价研究对象在研

究时段内的变化趋势, 斜率为正表示呈增加趋势, 反之为减少趋势, 其数值大小表示增加或减少的速率。

$$k = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times X_i) - (\sum_{i=1}^n i) \times (\sum_{i=1}^n X_i)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (7)$$

式中: n 为研究年际跨度, i 为第 i 年, X_i 表示第 i 年的研究指标。

1.4.2 相关分析

采用 Pearson 相关系数评价植被生态质量与气温、降水、光照等气象因子以及极端气候指标之间的相关关系,并利用 t 统计量检验其显著性。相关系数(r)计算公式如下。

$$r = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \sum (Y - \bar{Y})^2}} \quad (8)$$

式中: X 、 Y 分别为待分析的两组指标, \bar{X} 、 \bar{Y} 分别为两组指标的平均值。

2 结果分析

2.1 植被生态质量时空变化

2.1.1 FVC 年际变化

2000—2022年 FVC 计算结果(图1)表明,23年以来德州 FVC 整体呈增大趋势,平均每10年增加6.8%,植被绿度明显提升(显著性检验结果 $p < 0.01$)。其中,2010—2017年 FVC 增幅最大,平均每年增加1.14%;2017—2019年 FVC 出现急剧下降,平均每年减少4.98%,并在2019年出现近10年的最低值,为43.9%。2005—2009年 FVC 相对稳定,平均每年增加0.1%。

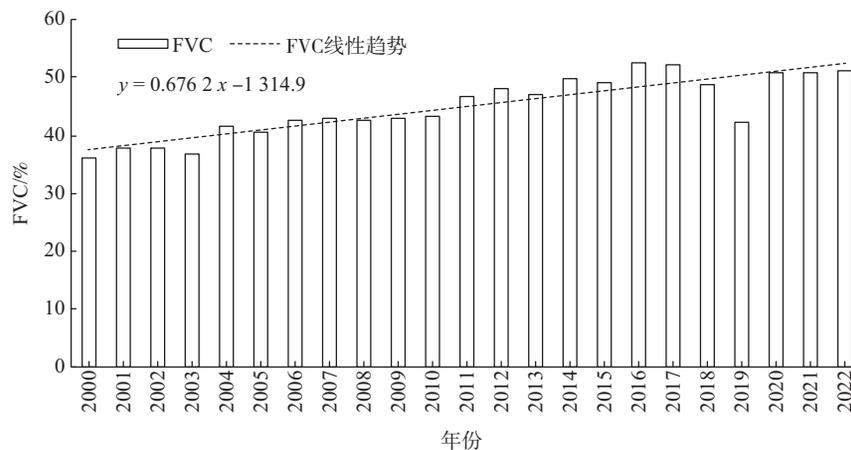


图1 2000—2022年德州 FVC 年际变化趋势

Fig.1 Interannual variation trend of FVC in Dezhou from 2000 to 2022

2.1.2 NPP 年际变化

2000—2022年 NPP 计算结果(图2)表明,23年以来德州 NPP 虽然年际波动较大,但整体呈显著增加趋势($p < 0.01$),平均每10年增加 $101.6 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

最大值出现在2022年,为 $752.2 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$,最小值出现在2002年,为 $260.9 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$,前者约为后者的3倍。2019年以来 NPP 逐年增加,平均每年增加 $75.14 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

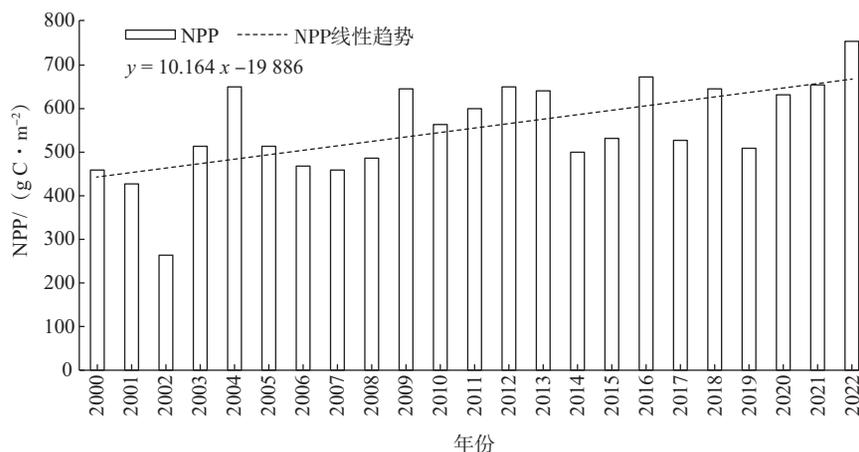


图2 2000—2022年德州 NPP 年际变化趋势

Fig.2 Interannual variation trend of NPP in Dezhou from 2000 to 2022

2.1.3 EQI 年际变化

2000—2022年EQI计算结果(图3)表明,23年以来德州EQI整体呈显著增加趋势($p < 0.01$),平均每

10年增加7.3。2022年EQI达最大值,为52.4,最小值出现在2002年,为28.2,最大值比最小值高85.8%。2019年以来EQI逐年增加,平均每年增加2.81。

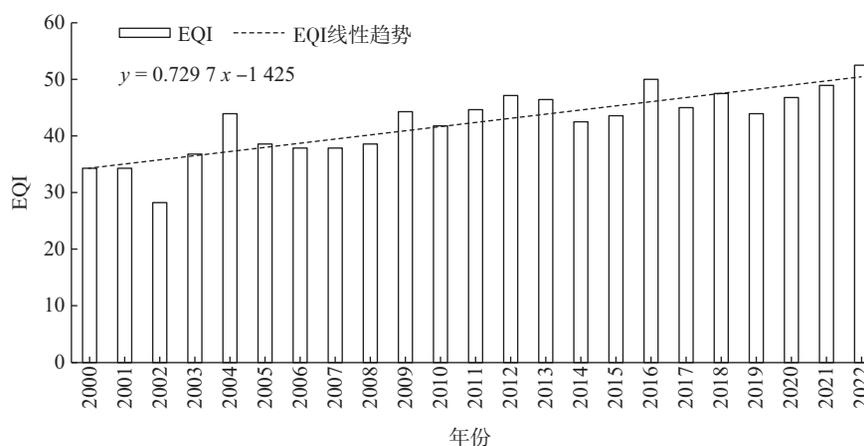


图3 2000—2022年德州EQI年际变化趋势

Fig.3 Interannual variation trend of EQI in Dezhou from 2000 to 2022

2.1.4 植被生态质量空间变化

德州各县(市、区)EQI、NPP和FVC在2000—2022年均呈增加趋势,植被生态质量明显改善(表2)。EQI变化趋势率陵城区最高(0.83),德城区最低(0.59);NPP趋势率乐陵市最高(12.14 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$),夏津县最低(7.79 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$);FVC趋势率平原县最高(0.76%),德城区最低(0.49%)。各县(市、区)植被生态质量均明显变好,EQI趋势率空间差异较小(图4);德城区植被生态质量改善相对较弱,与城市建设不断发展、中心城区面积持续扩大、植被面积有所减少密切相关。

增加趋势($p < 0.01$),变化倾向率分别为 $0.35 \text{ } ^\circ\text{C}/(10 \text{ a})$ 、 $101.17 \text{ } ^\circ\text{C}/(10 \text{ a})$ (图5);年降水量、年降水日数呈增加趋势,变化倾向率分别为 $90.89 \text{ mm}/(10 \text{ a})$ 、 $1.68 \text{ d}/(10 \text{ a})$ (图6);年日照时数呈减少趋势,变化倾向率为 $-27.01 \text{ h}/(10 \text{ a})$ (图7)。可见,23年以来德州地区趋于暖湿化,但光照资源略有减少。其中,年降水量和年降水日数的年际变化趋势基本一致,年平均气温和正积温的年际变化趋势基本一致;而年平均气温与年降水量的年际波动方向基本相反,在年降水量多的年份,年平均气温普遍偏低,在年降水量少的年份,年平均气温普遍偏高。

表2 2000—2022年德州植被生态质量变化趋势

Table 2 Variation trend of vegetation ecological quality in Dezhou from 2000 to 2022

地区	变化趋势率		
	EQI	NPP/ $(\text{g C} \cdot \text{m}^{-2})$	FVC/%
德城区	0.59	8.84	0.49
陵城区	0.83	11.95	0.75
宁津县	0.82	11.95	0.73
庆云县	0.63	10.29	0.50
临邑县	0.75	10.76	0.69
齐河县	0.65	8.26	0.65
平原县	0.82	11.44	0.76
夏津县	0.64	7.79	0.66
武城县	0.73	9.32	0.75
乐陵市	0.82	12.14	0.72
禹城市	0.66	9.21	0.59

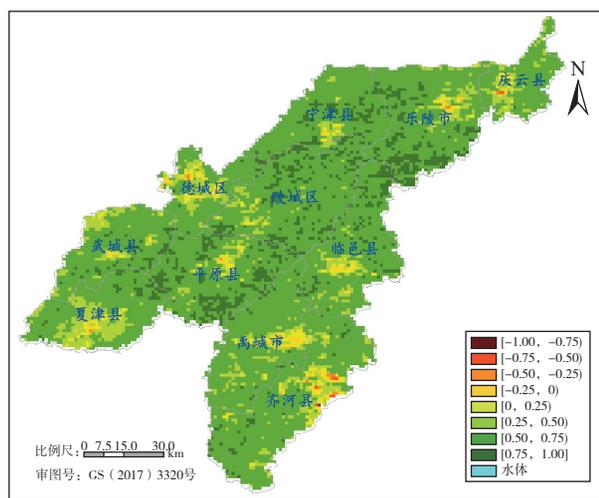


图4 2000—2022年德州EQI变化趋势空间分布

Fig.4 Spatial distribution of variation trend of EQI in Dezhou from 2000 to 2022

2.2 气候变化

2000—2022年,德州年平均气温、正积温呈显著

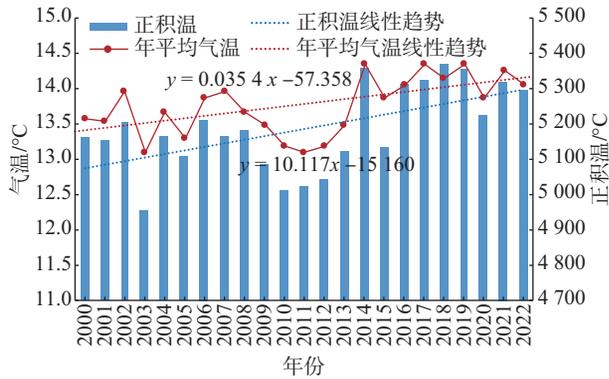


图 5 2000—2022 年德州年平均气温和正积温年际变化趋势
Fig.5 Interannual variation trend of annual mean temperature and accumulated positive temperature in Dezhou from 2000 to 2022

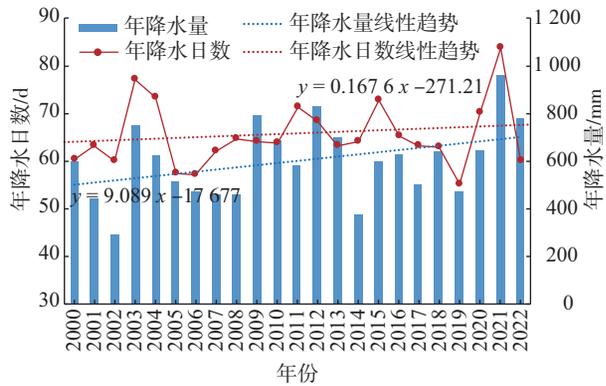


图 6 2000—2022 年德州年降水量和年降水日数年际变化趋势
Fig.6 Interannual variation trend of annual precipitation and precipitation days in Dezhou from 2000 to 2022

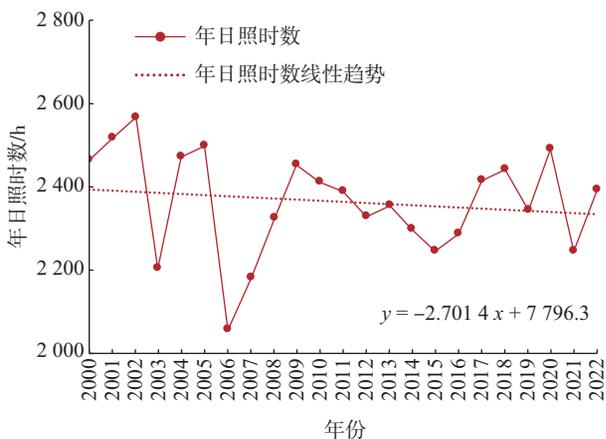


图 7 2000—2022 年德州年日照时数年际变化趋势
Fig.7 Interannual variation trend of annual sunshine duration in Dezhou from 2000 to 2022

此外,历史气象资料显示,近年来暴雨、寒潮、干旱等灾害性极端天气呈频发趋势^[16-20]。例如,2002

年出现严重干旱,降水量为近 23 年的最低值,而年日照时数则为近 23 年的最高值,年平均气温为近 10 年的最高值。2014 年同样出现干旱,降水量为近 23 年的第二低值,年平均气温为近 23 年的最高值。2021 年夏汛秋汛并存,秋季降水量突破历史极值,年降水量为近 23 年的最高值,年日照时数为近 10 年的最低值。

2.3 植被生态质量指标与气候因子的相关性

德州及各县(市、区)植被生态质量评价指标与气温、降水、光照等气候因子相关分析结果(表 3)显示,EQI 与年平均气温为显著的正相关关系;与正积温、年降水量、年降水日数为极显著的正相关关系,其中与年降水量的相关系数最大(0.60);与年日照时数相关性不大。NPP 与年降水量、年降水日数均为极显著的正相关关系,其中与年降水量的相关系数最大(0.74);与年平均气温、正积温、年日照时数的相关性不大。FVC 与年平均气温、正积温、年降水量、年降水日数均为极显著的正相关关系,其中与年平均气温、正积温的相关系数最大(0.32);与年日照时数相关性不大。总体来看,植被生态质量评价指标与气温、降水的相关性较大,与光照的相关性较小,其中与降水的相关系数最大。以上分析说明气温和降水是改善植被生态质量的主要气候驱动因子,而且降水的驱动作用大于气温。

表 3 植被生态质量评价指标与气候因子之间的相关系数
Table 3 Correlation coefficient between evaluation indices of vegetation ecological quality and climatological factors

评价指标	气候因子				
	$t/^\circ\text{C}$	$t_{\text{sum}}/^\circ\text{C}$	S/h	P/mm	D/d
EQI	0.15*	0.19**	-0.09	0.60**	0.27**
NPP	-0.05	0.02	-0.04	0.74**	0.32**
FVC	0.32**	0.32**	-0.11	0.30**	0.23**

注:“**”表示通过 0.01 水平显著性检验,“*”表示通过 0.05 水平显著性检验。

植被生态质量评价指标与极端气候指标的相关分析结果(表 4)显示,EQI 与结冰日数为极显著的负相关关系,与霜冻日数为较弱的负相关关系,与夏日日数、炎热夜数的正相关性较弱;与降水强度指数、中雨日数为极显著的正相关关系,与连续干旱日数为较弱的负相关关系,与连续湿润日数为较弱的正相关关系。NPP 与 4 个极端气温指数的相关性较弱,其中与结冰日数为负相关关系,与其他 3 个气温指数为正相关关系;与降水强度指数、中雨日数为

极显著的正相关关系,与连续干旱日数为不显著的负相关关系,与连续湿润日数为不显著的正相关关系。FVC与霜冻日数、结冰日数为极显著的负相关关系,与炎热夜数为显著的正相关关系,与夏日日数为较弱的正相关关系;与降水强度指数、中雨日数同样为极显著的正相关关系,与连续干旱日数、连续湿润日数为较弱的正相关关系。整体来看,EQI、NPP、FVC与霜冻日数、结冰日数多为负相关关系,说明

年内日最低气温小于0℃的日数、日最高气温小于0℃的日数增多,明显不利于植被生态质量的改善。EQI、NPP、FVC与降水强度指数、中雨日数均为极显著的正相关关系,说明降水强度指数、年内日降水量大于或等于10mm日数增多,明显对植被生态质量的改善有利。此外,EQI、NPP、FVC与极端降水指数的相关性普遍大于极端气温指数,其中与降水强度指数、中雨日数的相关系数最大。

表4 植被生态质量评价指标与极端气候指数之间的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between evaluation indices of vegetation ecological quality and indices of extreme climate

评价指标	极端气温指数				极端降水指数			
	霜冻日数	结冰日数	夏日日数	炎热夜数	降水强度指数	中雨日数	连续干旱日数	连续湿润日数
EQI	-0.07	-0.25**	0.08	0.09	0.57**	0.53**	-0.05	0.03
NPP	0.02	-0.06	0.05	0.01	0.71**	0.68**	-0.11	0.04
FVC	-0.17**	-0.45**	0.10	0.14*	0.24**	0.26**	0.07	0.03

注:“**”表示通过0.01水平显著性检验,“*”表示通过0.05水平显著性检验。

3 讨论与结论

3.1 讨论

由时间尺度看,2000—2022年德州植被生态质量指数呈增加趋势,植被生态质量明显改善,这与全国植被生态质量演变趋势^[3]、黄河流域植被生态质量变化趋势^[1]基本一致。由空间分布看,德州各县(市、区)植被生态质量均明显改善,空间差异不大,其中德城区植被生态质量改善相对较弱。这主要是因为,随着经济社会发展,德城区作为主城区,城市面积扩大^[21],土地利用类型改变,植被面积占比相对于其他县(市、区)偏小。

气候变化对植被生长具有重要影响,是植被生态质量变化的重要限制因素^[22]。2000年以来,德州气温、降水年际波动较大,但整体表现为增加趋势,变化倾向率分别为0.35℃/(10a)、90.89mm/(10a)。对华北地区^[23]以及山东^[24]气候变化的研究结果同样表明,气候呈暖湿化趋势。温暖湿润的气候促进了植被生态质量改善。相关分析结果表明,气温和降水是影响植被生态质量的主要气候因子,而且降水的相关程度高于气温。其中,NPP与降水量的相关性最大,说明降水量的增加可明显提高植被生产功能,这在以往研究^[10-11]中也有体现。相对于其他气候变化评价指标,FVC与气温的相关性最高,与已有研究结论^[25]一致。除了气候因素

外,人类活动直接影响FVC变化^[26-27],特别是近年来的植树造林、城市绿化等措施,使得FVC显著增加。与此同时,气温升高、降水增加不仅延长了植被生长季,也满足了植被生长对水热条件的需求,有利于植被生长发育,从而增加了FVC。

极端气候会显著影响植被生态质量^[28-32]。植被生态质量评价指标与极端气温指数之间的相关分析结果表明,与最低气温相关的霜冻日数和与最高气温相关的结冰日数对植被生态质量的影响一致,以极显著的负相关为主,表明低温日数的增加不利于植被生长发育,导致植被生态质量下降。FVC与炎热夜数为显著的正相关关系,说明高温日数的增加在一定程度上利于植被生长发育,使得植被覆盖度增大,这一点需要在下一步的研究中结合实际数据进行深入分析验证。整体来看,德州植被生态质量对极端低温比较敏感,主要是因为气温偏低会导致植被生长积温不足,对植被生长发育造成不利影响。但高温会导致蒸腾、蒸发加强,影响植被生长水分利用,进而影响光合固碳速率,不利于NPP积累^[33-35]。这也解释了NPP与平均气温之所以呈微弱的负相关关系,可能是因为年平均气温无法体现年内极端高温、极端低温对植被生产功能的影响。考虑到气候变暖和植物的三基点温度指标,气温变化对植被生产能力的影响不是简单的相关关系。因此,关于气温变化对植被生产能力的定量化影响,还

需在今后的工作中进行深入研究。

植被生态质量评价指标与极端降水指数之间的相关分析结果表明,降水强度指数、中雨日数对植被生态质量的影响最显著,同样说明降水增多对植被生长具有积极作用。德州属于水资源相对偏少的地区,而热量资源相对充足,因此降水对植被的影响更加明显。年内阶段性干旱对植被生态质量具有极大的影响。例如,2002年的降水量和EQI、NPP均为近23年的最低值,2014年降水量和EQI、NPP均为近10年的最低值。根据历史气象资料可知,2002年和2014年均出现了较为严重的干旱,2002年降水量较常年偏少105%,2014年降水量较常年偏少61%。此外,高温、干旱以及多种极端气候事件叠加,都会造成植被生态质量下降。例如,2019年FVC在连续多年增加的趋势下出现了急剧下降,EQI、NPP也成为近5年的最低值。这是因为2019年5—6月出现严重的气象干旱,其中6月7—30日全市平均降水量仅为1.9 mm,较常年偏少97.1%,为1951年有气象记录以来历史同期降水量最少,全市平均气温为27.9℃,较常年偏高2.6℃,创1951年有气象记录以来历史同期极值。高温与干旱叠加,导致植被叶片蒸腾作用加快,水分供应不足,叶片出现卷曲、干枯等现象,进而导致FVC减小,与之相应的便是EQI和NPP大幅减少。

在气温、降水较为适宜的年份,植被生态质量相对较好,说明适宜的气象条件能有效促进植被生态质量改善。例如,2022年比2021年降水量偏少19%,但EQI、NPP、FVC分别偏多6.7%、15.1%、1%。进一步分析气象资料可知,2021年1月出现强寒潮,低温接近历史极值,2月异常偏暖,高温突破历史极值,9—10月出现罕见秋汛和阴雨寡照,降水量突破历史极值,日照时数为历史同期最少,秋种作物大面积延迟播种,导致主要作物冬小麦返青前长势持续偏差。而2022年气温、降水、光照等气象条件均较为适宜,植被生态质量相对2021年明显偏好。

植被生态质量除了受气候条件影响以外,还受人类活动的影响,例如城市绿化、土地利用类型改变、农田作物季节性种植等^[3]。因此,综合研究、定量评价气候条件及人类活动和其他因素对植被生态质量的影响,进而充分利用有利气候资源,规避极端气候条件影响,挖掘气候资源在提升植被生态质量

方面的潜力,对于改善生态环境质量具有重要的科学意义。

3.2 结论

(1)2000—2022年德州植被生态质量改善效果显著,EQI、NPP、FVC均呈明显增加趋势,每10年分别增加7.3、101.6 g C·m⁻²和6.8%。就空间分布而言,各地植被生态质量相差不大,EQI变化趋势率陵城区最高,德城区最低;NPP变化趋势率乐陵市最高,夏津县最低;FVC变化趋势率平原县最高,德城区最低。

(2)气温和降水是改善植被生态质量的主要气候驱动因子,而且降水的驱动作用大于气温。2000—2022年,德州气温和降水总体呈增加趋势,是促进植被生态质量改善的重要因素。极端气候对植被生态质量具有显著影响,植被生态质量与极端降水类指数的相关性明显大于极端气温类指数。高温、干旱以及多种极端气候事件叠加,会造成植被生态质量下降。

(3)适宜的气象条件对植被生态质量的改善极为有利。近年来随着国土绿化工作的开展,德州绿化面积不断增大,植被覆盖度明显增加。与此同时,适宜的水热条件,不仅延长了作物生长季,还满足了植被生长发育对温度和水分条件的需求,在促进植被覆盖度增加的同时,也促进了植被的光合作用,对改善植被生态质量具有明显的助益作用。

参考文献:

- [1] 曹云,孙应龙,陈紫璇,等.2000—2020年黄河流域植被生态质量变化及其对极端气候的响应[J].生态学报,2022,42(11):4524-4535.
- [2] 朴世龙,张新平,陈安平,等.极端气候事件对陆地生态系统碳循环的影响[J].中国科学:地球科学,2019,49(9):1321-1334.
- [3] 李超,李雪梅.2000—2018年中国植被生态质量时空变化特征[J].长江流域资源与环境,2021,30(9):2154-2165.
- [4] 方贺,严佩文,石见,等.阿克苏地区植被生态质量时空变化及其驱动机制[J].干旱区研究,2022,39(6):1907-1916.
- [5] STEFFEN W, BROADGATE W, DEUTSCH L, et al. The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration[J]. Anthropocene Rev,2015,2(1):81-98.
- [6] 贾俊鹤,刘会玉,林振山.中国西北地区植被NPP多时

- 间尺度变化及其对气候变化的响应[J].生态学报, 2019, 39(14): 5058-5069.
- [7] SMITH M D. The ecological role of climate extremes; current understanding and future prospects[J]. *J Ecol*, 2011, 99(3): 651-655.
- [8] 韩丹丹, 穆兴民, 高鹏, 等. 黄土高原地区植被变化及其对极端气候的响应[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 247-254.
- [9] 钱拴, 延昊, 吴门新, 等. 植被综合生态质量时空变化动态监测评价模型[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6573-6583.
- [10] 李雨鸿, 李晶, 王婷, 等. 辽宁省森林和草地植被生态质量演变及气候响应研究[J]. 环境科学与管理, 2022, 47(4): 159-163.
- [11] 汲玉河, 周广胜, 王树东, 等. 2000—2019年秦岭地区植被生态质量演变特征及驱动力分析[J]. 植物生态学报, 2021, 45(6): 617-625.
- [12] 路利杰, 王立辉, 李扬, 等. 丹江口库区 2001—2020年植被生态系统质量遥感监测与时空演变分析[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(6): 1291-1304.
- [13] 毛留喜, 李朝生, 侯英雨, 等. 2006年上半年全国生态气象监测与评估研究[J]. 气象, 2006, 32(12): 105-112.
- [14] 方贺, 张育慧, 何月, 等. 浙江省植被生态质量时空变化及其驱动因素分析[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(2): 245-254.
- [15] 韩静, 张国峰, 李伟光, 等. 近 20 年海南岛植被生态质量变化特征分析[J]. 生态科学, 2022, 41(1): 20-30.
- [16] 薛媛, 薛晓萍. 极端降水与干旱同步频发的研究进展[J]. 海洋气象学报, 2022, 42(1): 61-73.
- [17] 赵海军, 曹洁, 潘玲, 等. 2007—2019年山东省短时强降水时空分布特征[J]. 海洋气象学报, 2021, 41(2): 149-155.
- [18] 徐玮平, 孟祥新, 伯忠凯, 等. 2000—2015年华北地区8月极端干旱的异常环流型及其波活动特征[J]. 海洋气象学报, 2021, 41(1): 92-99.
- [19] 董旭光, 周强, 刘焕彬, 等. 山东夏季极端热事件变化特征分析[J]. 海洋气象学报, 2020, 40(3): 60-76.
- [20] 高晓梅, 李峰, 王文波, 等. 台风“利奇马”引发山东极端暴雨的多尺度特征分析[J]. 海洋气象学报, 2022, 42(2): 33-43.
- [21] 夏阳, 李洋洋. 基于遥感和 GIS 的德州市德城区建成区扩展变化及驱动力分析[J]. 高师理科学刊, 2018, 38(11): 49-54, 57.
- [22] 陈强, 陈云浩, 王萌杰, 等. 2001—2010年黄河流域生态系统植被净第一性生产力变化及气候因素驱动分析[J]. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2811-2818.
- [23] 毛喜玲, 殷淑燕, 刘海红. 1960—2020年华北地区玉米单产对气候变化的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(10): 193-200.
- [24] 任建成, 谷山青, 冯存峨, 等. 气候变化背景下山东省气温与降水时空变化特征分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(5): 27-37.
- [25] 宋鹏飞, 季民, 刘泽群, 等. 山东省植被覆盖度变化与气候因子相关性分析[J]. 测绘科学, 2020, 45(3): 81-86.
- [26] 白慧敏, 龚志强, 孙桂全, 等. 气象要素对华北地区夏季植被覆盖度的影响[J]. 大气科学, 2022, 46(1): 27-39.
- [27] 阿多, 赵文吉, 宫兆宁, 等. 1981—2013年华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 576-592.
- [28] 张艳军, 李子辉, 官冬杰, 等. 2000—2020年成渝双城经济圈植被生态质量变化及其对极端气候因子的响应[J]. 中国环境科学, 2023, 43(9): 4876-4885.
- [29] JOHN R, CHEN J Q, OU-YANG Z T, et al. Vegetation response to extreme climate events on the Mongolian Plateau from 2000 to 2010[J]. *Environ Res Lett*, 2013, 8(3): 035033.
- [30] ZHANG J H, JIANG L G, FENG Z M, et al. Detecting effects of the recent drought on vegetation in southwestern China[J]. *J Resour Ecol*, 2012, 3(1): 43-49.
- [31] WANG W, WANG W J, LI J S, et al. The impact of sustained drought on vegetation ecosystem in southwest China based on remote sensing[J]. *Procedia Environ Sci*, 2010, 2: 1679-1691.
- [32] ISLAM A R M T, ISLAM H M T, SHAHID S, et al. Spatiotemporal nexus between vegetation change and extreme climatic indices and their possible causes of change[J]. *J Environ Manage*, 2021, 289: 112505.
- [33] 王晓利, 侯西勇. 1982—2014年中国沿海地区归一化植被指数(NDVI)变化及其对极端气候的响应[J]. 地理研究, 2019, 38(4): 807-821.
- [34] 侯英雨, 柳钦火, 延昊, 等. 我国陆地植被净初级生产力变化规律及其对气候的响应[J]. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1546-1553.
- [35] 曹云, 张称意, 孙应龙, 等. 2000—2020年华北地区植被固碳能力时空变化特征及其气象影响分析[J]. 生态学报, 2023, 43(9): 3488-3499.