

金丽娜,张高健,杨睿,等. 秦岭西安段及各级保护区生态质量时空变化[J]. 陕西气象, 2025(4):59-65.

文章编号:1006-4354(2025)04-0059-07

秦岭西安段及各级保护区生态质量时空变化

金丽娜^{1,2},张高健¹,杨睿¹,蔡惠文³

(1. 西安市气象局,西安 710016;

2. 中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室,西安 710016;

3. 高陵区气象局,陕西高陵 710200)

摘要:利用 2000—2023 年 NDVI、NPP 遥感数据及同期区域气象站观测资料,采用 ArcGIS 反距离权重插值法、最大值合成法、一元线性回归分析模型和相关性分析法,研究了秦岭西安段及各级保护区的气候特征、归一化植被指数、植被覆盖度、植被生态质量指数的时空变化,以期秦岭西安段及各级保护区生态持续发展提供科学依据。结果显示:2000 年以来秦岭西安段气候变化显著,气温逐年上升,核心保护区升温最快;降水量波动增加,增速随海拔升高而减小。2000 年以来秦岭西安段植被状况持续改善,但不同保护区之间存在显著差异。一般保护区归一化植被指数、植被覆盖度、植被生态质量指数增速均为最快;重点保护区归一化植被指数、植被覆盖度最高,植被生态质量指数低于一般和核心保护区;核心保护区相对较为稳定,归一化植被指数、植被覆盖度、植被生态质量指数均位居第二,但植被改善较少而且存在退化现象。

关键词:秦岭西安段;各级保护区;生态质量;时空变化

中图分类号:Q948.1

文献标识码:A

21 世纪以来,全球植被绿化程度显著提升,中国贡献尤为突出,约占 25%^[1]。植被生态作为生态系统的重要组成部分,其生态质量直接关系到陆地生态系统的稳定性。近年来,中国植被生态质量展现出明显的增长趋势^[2],这既是自然环境的影响,也是生态文明建设的重要成果。植被生态作为衡量森林生态环境的关键指标,能够反映出森林区域内生态系统的演变趋势,然而这一演变并非只受自然因素的影响。在气候变化和人为活动的双重影响下,植被生态质量^[3]、气候韧性^[4]的变化更为复杂和多元。气候变化,尤其是气温和降水等关键气候因子的变化,对陆地植被生态系统的影响深远^[5],这也是众多学者研究的焦点之一^[6]。秦岭作为我国重要的自然地理分界线,承担着重要的生态服务功能。依据《陕西省秦

岭生态环境保护总体规划》,海拔低于 1 500 m 的区域为一般保护区,1 500~2 000 m 为重点保护区,高于 2 000 m 为核心保护区。不同等级保护区在涵养水源、水土保持等方面发挥着不同的作用。因此,细化分析秦岭西安段及各级保护区的气候变化、植被生态质量,对于区域生态文明建设具有重要意义^[7]。

近年来,学者们利用多种方法和技术手段,评估植被生态质量并分析其气候影响^[8-12]。这些研究成果不仅有助于更好地理解植被生态质量的演变规律,也为制定有效的生态保护政策提供了科学依据。李雨鸿^[13]等利用中分辨率成像光谱仪(MODIS)归一化植被指数(NDVI)遥感资料和气象观测数据,研究了辽宁省森林和草地净初级生产力(NPP)和植被覆盖度(FVC)的时空变化,基

收稿日期:2024-04-08

作者简介:金丽娜(1981—),女,汉族,陕西西安人,硕士,高级工程师,主要从事气候变化及应用气象研究。

基金项目:秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2023G-18);陕西省自然科学基金基础研究计划一般项目—面上项目(2025JC-YBMS-325)

于相关性分析法探讨了气温和降水变化及其对植被变化的影响。方贺等^[14]利用 NPP、FVC 估算植被生态质量指数(VEQI),并基于多元回归残差分析法研究气候因子对 VEQI 的影响。任丽稳^[15]等以 MODIS NDVI 为数据源,应用 DEM 和土地利用分类图,采用转移矩阵、一元线性回归模型等方法,分析了石羊河流域植被生态质量指数的时空变化特征。本研究通过分析秦岭西安段及各级保护区的 NDVI、FVC、VEQI,以及同时期的气温、降水气象因子,探讨其气候特征、生态指标,对分区域开展精细化生态文明保护具有一定的参考价值。

1 研究区概况

秦岭为陕西省内关中平原与陕南地区的界山。秦岭南北的温度、气候和地形均呈现明显差异。秦岭西安段生态环境保护区东至渭南交界处,西至宝鸡交界处,南至商洛、安康、汉中交界处,北至环山旅游路以北 1 000 m。横跨 107.65°E~109.82°E 和 33.68°N~34.45°N,东西长约 200 km,南北宽约 85 km,最高海拔高达 3 740 m。总面积 5 235.7 km²,占西安市总面积的 51.8%,人口 35.28 万人;涉及临潼区、灞桥区、长安区、鄠邑区、蓝田县、周至县 6 个区县。

2 数据处理和方法

2.1 数据来源

2.1.1 卫星遥感数据 归一化植被指数(NDVI)来源于 NASA 2000—2023 年 MODIS13Q1 植被监测 NDVI 产品,空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d,利用国际通用的最大合成法(maximum value composites, MVC)获取月、年 NDVI 数据。植被净初级生产力(NPP)数据来源于中国气象局的生态气象云服务平台,数据时间范围为 2000—2023 年。

2.1.2 气象观测数据 选取 2000—2023 年秦岭西安段周边 35 个国家气象观测站点的气温、降水资料,所含气象站点覆盖秦岭陕西段以及西安北部平原地区。利用 ArcGIS 反距离权重插值法(inverse distance weighting, IDW)将站点气象数据转换为秦岭西安段 250 m 网格数据^[16],裁剪出研究区域,作为研究区气温、降水气候因子。

2.2 研究方法

2.2.1 归一化植被指数 归一化植被指数是反映土地覆盖植被状况的一种遥感指标,常用于评估植被的生长态势和生长量。它基于植被在近红外波段和红光波段的反射特性,通过计算两个波段的反射率之差与之和的比值得到^[17]。NDVI 取值在 -1~1 之间,正值表示有植被覆盖,负值表示水体或雪覆盖,接近零的值表示岩石或裸土。计算公式为:

$$N = \frac{Q_{NIR} - Q_R}{Q_{NIR} + Q_R} \quad (1)$$

式中: N 为归一化植被指数; Q_{NIR} 为近红外波段反射率; Q_R 为红波段反射率。对于 MODIS 数据, Q_{NIR} 、 Q_R 为大气校正后的第 1 波段、第 2 波段反射率。

2.2.2 植被覆盖度 植被覆盖度主要反映植被的覆盖能力,研究区域为森林地区,故可以近似取 $C_{max} = 100\%$, $C_{min} = 0\%$ ^[17]。计算公式为:

$$C = \frac{N - N_{min}}{N_{max} - N_{min}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: C 为植被覆盖度; N_{max} 和 N_{min} 分别表示区域内 N 的最大和最小值。

参照《陆地植被气象与生态质量监测评价等级》(QX/T 494—2019),将植被覆盖度 C 划分为 6 个等级:极低覆盖($C < 5\%$)、低覆盖($5\% \leq C < 20\%$)、较低覆盖($20\% \leq C < 40\%$)、中覆盖($40\% \leq C < 60\%$)、较高覆盖($60\% \leq C < 80\%$)和高覆盖($C \geq 80\%$)。

2.2.3 植被生态质量指数 为更全面地评估植被的综合生态质量,利用钱拴^[18]建立的植被生态质量指数模型,基于植被净初级生产力 P 和植被覆盖度 C 分析秦岭西安段及各级保护区生态质量指数。计算公式为:

$$Q_i = \frac{1}{2} \times \left(\frac{C_i}{C_{max}} \times 100 + \frac{P_i}{P_{max}} \times 100 \right) \quad (3)$$

式中: Q_i 为第 i 年植被生态质量指数; C_i 为第 i 年植被覆盖度, C_{max} 为该年研究区域内植被覆盖度最大值; P_i 为第 i 年植被净初级生产力, P_{max} 为该年研究区域内植被净初级生产力最大值。 Q_i 的取值范围在 0~100 之间,值越大表示植被综合生态质量越好。

2.2.4 一元线性回归分析模型 一元线性回归分析模型是利用最小二乘法计算逐个像元的线性回归方程斜率 α 作为变化倾向率^[19-20],可反映关注对象在研究期内的变化趋势和速度,计算公式为:

$$\alpha = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times X_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n X_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (4)$$

式中: n 为研究期年份数, X_i 为第*i*年的变量值; α 为趋势线的倾向率,当 $\alpha > 0$ 时说明研究期内该地区的变量值为增加趋势,反之呈减少趋势。

利用一元线性回归分析模型分析秦岭西安段及各级保护区归一化植被指数时空变化趋势,将变化趋势分为7个等级^[19]:严重退化、中度退化、轻微退化、基本不变、轻微改善、中度改善、明显改善。表1为归一化植被指数变化趋势等级划分标准。

表 1 归一化植被指数变化趋势等级划分标准	
等级	变化倾向率(α)范围
严重退化	$\alpha < -0.009\ 0$
中度退化	$-0.009\ 0 \leq \alpha < -0.004\ 5$
轻微退化	$-0.004\ 5 \leq \alpha < -0.000\ 9$
基本不变	$-0.000\ 9 \leq \alpha < 0.000\ 9$
轻微改善	$0.000\ 9 \leq \alpha < 0.004\ 5$
中度改善	$0.004\ 5 \leq \alpha < 0.009\ 0$
明显改善	$0.009\ 0 \leq \alpha$

3 结果与分析

3.1 气候因子时空变化

图1为2000—2023年秦岭西安段及各级保护区年平均气温、年降水量变化趋势分布图。从图1a可以看出,秦岭西安段多年气温变化表现出明显的空间差异。一般保护区尤为显著,大部分

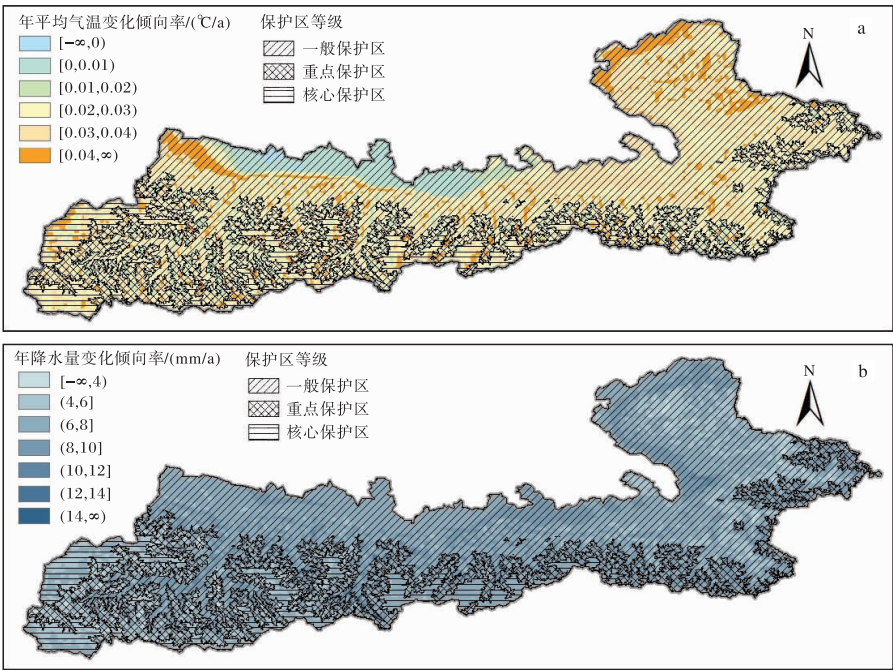


图1 2000—2023年秦岭西安段及各级保护区年平均气温(a)、年降水量(b)变化趋势分布图

区域呈增温趋势,但周至县、鄠邑区、长安区坡脚面区域气温呈略降低趋势;重点和核心保护区气温整体呈缓慢上升趋势。从图1b可以看出,秦岭西安段多年降水量空间差异相对分散。一般保护区呈北部大,南部小的特点;重点保护区空间差异分散,鄠邑区山区变化显著,最高达14 mm/a;核

心保护区差异较小,基本在8 mm以下,这与该区域海拔较高,生态系统和气候特征相对稳定关系较大。

图2为2000—2023年秦岭西安段及各级保护区年平均气温(a)、年平均降水量(b)年际变化图。2000—2023年秦岭西安段多年平均气温为

10.4℃,各级保护区差异明显,其中一般保护区最高(12.1℃),其次为重点保护区(8.5℃),核心保护区最低(6.4℃)。秦岭西安段及各级保护区年平均气温均呈上升趋势,其中一般保护区以0.29℃/10a的速度升高,重点保护区为0.27℃/10a,核心保护区的升温速度最快,达0.30℃/10a。2000—2023年秦岭西安段多年平均降水量为720.9mm,其中核心保护区最多(755.7mm),重点保护区略低于核心保护区(743.0mm),一般保护区最少(703.7mm)。秦岭西安段及各级保护区逐年平均降水量均呈波动增加趋势,其中一般保护区降水量增加速度最快,为87.42mm/10a,重点保护区为83.85mm/10a,核心保护区为81.40mm/10a。降水量增加速度随海拔升高而减小。

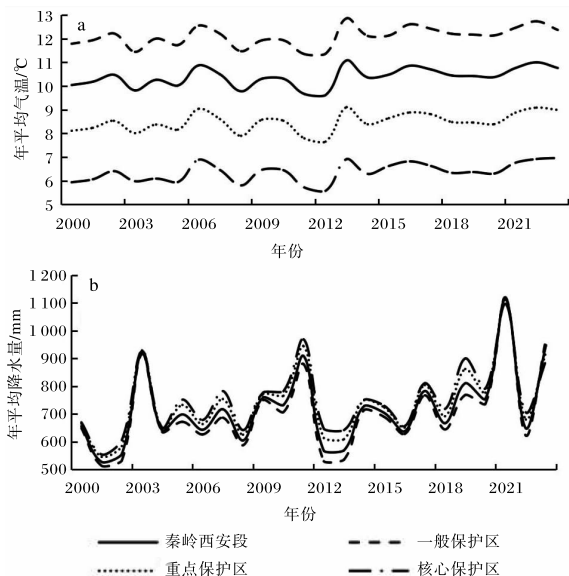


图2 2000—2023年秦岭西安段及各级保护区年平均气温(a)、年平均降水量(b)年际变化图

3.2 归一化植被指数(NDVI)时空变化

2000—2023年秦岭西安段NDVI多年平均值为0.845,呈现稳步增长的态势,增速为0.019/10a。其中,2001年出现最小值0.792,较平均值低0.053;2021年达到最大值0.878,高出平均值0.033。资料显示,2001年降水量为24a来最少,2021年降水量最多,降水量的极端变化与NDVI最低和最高点相对应,进一步证明了气象因素对植被生长和覆盖的显著影响。与2000

年相比,2023年NDVI增加了7.23%,一般保护区增加最快,增速为0.023/10a,其次为重点保护区0.007/10a,核心保护区基本处于持平状态。

图3为秦岭西安段NDVI及其距平年际变化图。利用距平分析法对NDVI进行多年偏离程度分析,2000—2023年秦岭西安段NDVI距平呈“减小—增大—减小—增大”的趋势,特别是在2001年和2021年,分别出现了负距平和正距平的最大值,这种变化与极端气候事件的影响密切相关。2015年以来,NDVI(除2017年外)均高于平均水平,表明2015年以后秦岭西安段NDVI整体水平较高。一般保护区NDVI多年平均值为0.798,增速相对较快,为0.023/10a,2023年比2000年增加9.81%;最小值0.727(2001年),低于平均值0.071,最大值0.842(2021年),高于平均值0.044;NDVI距平呈“减小—增大—减小—增大”的变化趋势,2001年负距平最大,2021年正距平最大,与秦岭西安段趋势一致。重点保护区NDVI多年平均值为0.902,增速略慢于一般保护区,为0.007/10a,2023年比2000年增加4.50%;最小值0.780(2014年),低于平均值0.122,最大值0.940(2021年),高于平均值0.038;NDVI距平呈“增大—减小—增大”的趋势,2014年负距平最大,2021年正距平最大,与秦岭西安段和一般保护区有所不同。核心保护区NDVI多年平均值为0.887,2023年比2000年增加3.16%,基本处于持平状态,表明该区域的植被覆盖状况相对稳定;最小值0.778(2014年),低于平均值0.109,最大值0.919(2021年),高于平均值0.032;与重点保护区一致,NDVI距平呈“增大—减小—增大”的趋势,2014年负距平最大,2021年正距平最大。

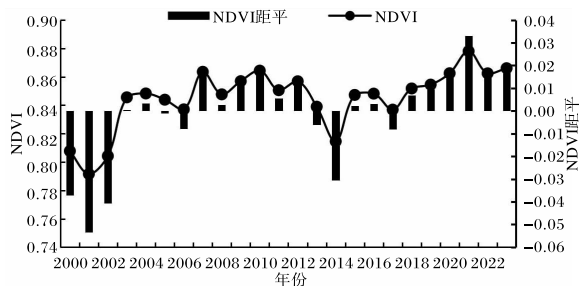


图3 2000—2023年秦岭西安段NDVI及其距平年际变化图

图4为2000—2023年秦岭西安段及各级保护区NDVI变化趋势分布图,表2为2000—2023年秦岭西安段及各级保护区NDVI变化趋势等级占比。2000—2023年秦岭西安段NDVI有所改善的区域占比37.3%,44.4%的区域基本维持不变,18.3%的区域有所退化。一般保护区NDVI改善情况最为显著:56.7%的区域得到改

善;轻微改善面积占比最大,达到39.3%;17.6%的区域有所退化。总体上改善区域明显大于退化区域。重点保护区NDVI变化相对平稳,仅10.8%的区域得到改善,而78.2%的区域基本维持不变,表明重点保护区的生态环境和植被状况已经处于相对稳定的状态。核心保护区NDVI仅有2.2%的区域有所改善,而36.1%的区域出现退化。

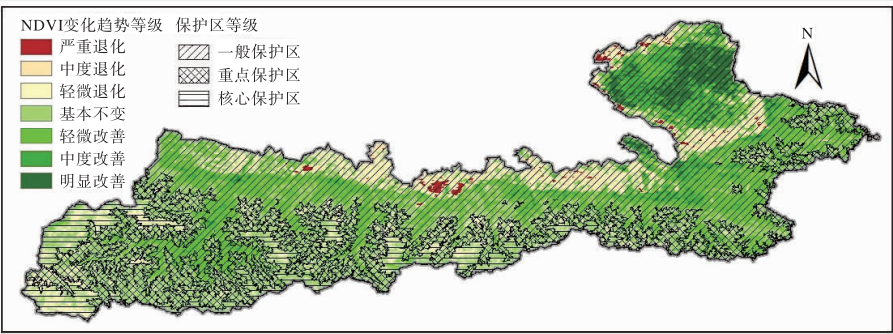


图4 2000—2023年秦岭西安段及各级保护区NDVI变化趋势等级分布图

表2 2000—2023年秦岭西安段及各级保护区NDVI变化趋势等级占比 %

变化趋势等级	秦岭山区西安段	一般保护区	重点保护区	核心保护区
严重退化	0.7	1.1	0.0	0.0
中度退化	2.9	4.9	0.0	0.1
轻微退化	14.7	11.6	11.0	36.0
基本不变	44.4	25.7	78.2	61.7
轻微改善	26.8	39.3	10.7	2.2
中度改善	6.9	11.5	0.1	0.0
明显改善	3.6	6.0	0.0	0.0

3.3 植被覆盖度(FVC)时空变化

2000—2023年秦岭西安段FVC多年平均值为81.76%,增速为2.68%/10a,2023年较2000年增加了8.65%。一般保护区FVC多年平均值为76.63%,增速为3.36%/10a,增速最快,2023年较2000年增加了11.75%,表明该区域植被恢复和生态保护方面取得了显著成效。重点保护区FVC多年平均值最高,为90.27%,增速为1.93%/10a,略低于一般保护区,2023年较2000年增加了5.26%。核心保护区FVC多年平均值为88.30%,增速相对较慢,为1.11%/10a,2023年较2000年增加了3.67%。

图5为2000年和2023年秦岭西安段及各级保护区植被覆盖等级分布图。2000—2023年秦岭西安段高覆盖区域面积多年均值占比为68.82%,表明大部分区域拥有较好的植被覆盖,增速为6.53%/10a,2023年较2000年增加17.27%。一般保护区高覆盖区域面积多年均值占比为49.95%,虽低于秦岭西安段平均水平,但其增速达到10.33%/10a,为各级保护区中最快的,且2023较2000年增加26.88%。重点保护区高覆盖区域面积占比最高,为99.25%,表明植被覆盖状况已经接近最优水平,增速为1.05%/10a,2023年较2000年增加2.83%,因基础值已

接近饱和水平,故增幅不大。核心保护区高覆盖区域面积占比为 94.45%,增速缓慢,为 0.69%/10 a,2023 年较 2000 年增加 3.60%。

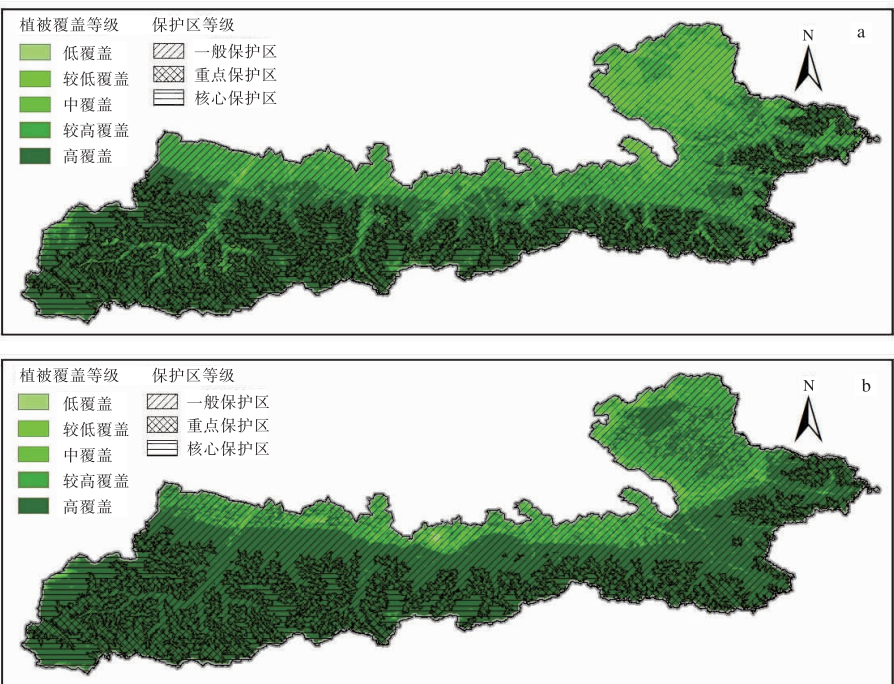


图 5 2000 年(a)和 2023 年(b)秦岭西安段及各级保护区植被覆盖等级分布图

3.4 植被生态质量指数(VEQI)时空变化

2000—2023 年秦岭西安段 VEQI 多年平均值为 72.27,2023 年 VEQI 较 24 a 均值高 7.71。一般保护区 VEQI 多年平均值为 74.62,该区域生态环境相对优越,得益于严格的保护措施和有效的生态修复工作,2023 年较均值高 10.71,增幅显著。重点保护区 VEQI 多年平均值为 69.61,2023 年较均值高 1.54。核心保护区 VEQI 多年平均值为 72.98,与秦岭西安段多年均值接近,说明该区域生态质量保持稳定;2023 年较均值高 6.17。

图 6 为 2000—2023 年秦岭西安段及各级保护区植被生态质量指数变化趋势分布图。秦岭西安段年均 VEQI 由 2000 年的 68.38 增加到 2023 年的 79.98,增速 4.96/10 a。一般保护区由 2000 年的 69.62 增加到 2023 年的 85.33,增速为 5.85/10 a,高于秦岭西安段,进一步说明一般保护区在生态修复和保护方面成效显著。重点保护区由 2000 年的 67.34 增加到 2023 年的 71.15,增速为 3.67/10 a。核心保护区由 2000 年的 64.81 增加到 2023 年的 72.98,增速为 3.47/10 a。虽然增速相对较低,但上升趋势稳定。

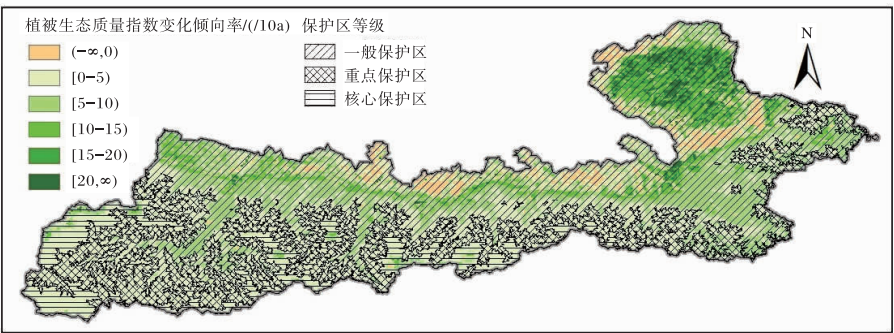


图 6 2000—2023 年秦岭西安段及各级保护区植被生态质量指数变化趋势分布图

4 结论与讨论

(1)秦岭西安段气候变化显著。秦岭西安段及各级保护区平均气温逐年上升且空间差异明显,核心保护区升温最快,一般保护区差异最大。秦岭西安段及各级保护区降水量呈波动增加,增速随海拔升高而减小,降水量变化空间差异相对分散。

(2)2000年以来秦岭西安段 NDVI 稳步增长,极端气候事件对植被生长有显著影响。一般保护区 NDVI 增速最快,重点保护区次之,核心保护区较稳定。秦岭西安段向好改善区域占比约 37%,约 44%区域维持稳定,其中一般保护区改善最为显著,重点保护区趋势平稳,核心保护区改善较少且退化明显。

(3)2000年以来秦岭西安段植被覆盖度持续上升,高覆盖区域增速为 6.53%/10 a。各级保护区差异明显,一般保护区增加最快,尤其是高覆盖区域;重点保护区植被覆盖度均值最高,已接近最优水平;核心保护区增速缓慢。

(4)2000年以来秦岭西安段生态质量保持良好态势,各级保护区生态质量指数均有所增长。一般保护区表现最为显著,增速高于秦岭西安段;重点保护区和核心保护区增速相对较低,但仍保持稳定上升趋势。

参考文献:

- [1] CHEN C, PARK T J, WANG X H, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management[J]. *Nature Sustainability*, 2019(2): 122-129.
- [2] 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.
- [3] 许积层, 穆晓东, 马宇伟, 等. 气候变化和人类活动对生态质量影响的定量解析研究: 以海南岛为例[J]. *环境工程*, 2024, 42(2): 199-210.
- [4] 王丽, 杨睿, 徐丽娜, 等. 秦岭西安段社区气候韧性评价研究[J]. *陕西气象*, 2023(6): 70-76.
- [5] 陈丹, 刘海蓉, 周雪雁, 等. 新疆柯柯牙生态防护林工程实施前后气象因子的对比分析[J]. *陕西气象*, 2024(1): 37-43.
- [6] 戴芳筠, 李柏贞, 占明锦, 等. 2000—2021 年江西省植被生态质量时空分布及其与气候因子的关系[J]. *气象与减灾研究*, 2022, 45(2): 125-133.
- [7] 陈晓宁, 蒋好忱. 25 年来秦岭 NDVI 指数的气候响应[J]. *测绘通报*, 2019(3): 103-107.
- [8] 赵苗苗, 刘熠, 杨吉林, 等. 基于 HASM 的中国植被 NPP 时空变化特征及其与气候的关系[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(2): 215-225.
- [9] 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.
- [10] 李登科, 王钊. 退耕还林后陕西省植被覆盖度变化及其对气候的响应[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(1): 1-10.
- [11] 陈舒婷, 郭兵, 杨飞, 等. 2000—2015 年青藏高原植被 NPP 时空变化格局及其对气候变化的响应[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(10): 2511-2527.
- [12] 唐晓玲, 许翔驰, 马艳敏, 等. 长白山自然保护区植被生态质量变化分析[J]. *气象灾害防御*, 2023, 30(2): 44-48.
- [13] 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]. *环境科学管理*, 2022, 47(4): 159-163.
- [14] 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.
- [15] 任丽雯, 王兴涛, 胡正华, 等. 石羊河流域植被生态质量时空变化动态监测[J]. *中国农业气象*, 2023, 44(3): 193-205.
- [16] 卓静, 何慧娟, 王娟. 秦岭地区水源涵养能力评估[J]. *陕西气象*, 2015(3): 12-16.
- [17] 郭瑞鑫, 蒙仲举, 孟芮冰, 等. 1987—2022 年库布齐沙漠沙化土地时空动态及趋势预测[J]. *地理科学*, 2024, 44(8): 1448-1458.
- [18] 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.
- [19] 陈文静, 杨从从. 2001—2017 年青海省 NDVI 时空变化特征及其对气候因子的响应[J]. *森林工程*, 2020, 39(5): 54-61.
- [20] 金丽娜, 李雄飞, 曲静, 等. 秦岭山区 NDVI 与气候因子时空变化特征及 NDVI 对气候的响应[J]. *甘肃科学学报*, 2022, 34(3): 65-72.