

黄土高原气候舒适度变化及其与植被覆盖的关系

曹乐乐¹, 王飞^{1,2}, 戈文艳^{1,2}, 史尚渝^{1,2}, 陈昊^{1,2}

(1.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 研究黄土高原气候舒适度分布规律及其时空变化特征, 并分析其与植被覆盖的关系, 为生态修复环境效应和生态产品价值实现机制研究提供参考。[方法] 基于1981—2020年黄土高原气象站点日监测数据, 采用温湿指数对黄土高原地区气候舒适度的时空变化状况进行评价, 在此基础上利用PKU GIMMS NDVI数据定量评估了站点周边NDVI与气候舒适程度的关系。[结果] ①在空间上, 黄土高原中部气候舒适期(非常舒适、舒适型)长(135 d/a以上); 西北部夏季舒适期长, 东南部春秋两季舒适期长; 西北部年均极不舒适日数多于东南部, 较不舒适与不舒适日数低于东南部地区。②在时间上, 黄土高原气候舒适期占全年日数的35.46%, 主要集中在5—9月; 气候不适期(较不舒适、不舒适、极不舒适型)占全年日数的64.54%, 主要集中分布在10月至次年4月。黄土高原最主要的气候舒适类型是极不舒适, 占全年总天数的27.59%, 主要集中在11月至次年2月。③研究时段内, 黄土高原85%的站点气候舒适程度呈极显著或显著增加趋势($p < 0.05$), 其中研究区66.67%的站点气候舒适程度呈极显著增加趋势($p < 0.01$)。黄土高原约21.67%的站点舒适日数显著增加, 其中山西省五台山站增加最多(18.89 d/10 a); 约86.67%的站点极不舒适日数呈显著减少趋势; 约56.67%的站点较不舒适日数倾向率呈显著增加趋势($p < 0.05$)。1982—2020年黄土高原年NDVI总体呈现出积极的生长趋势, 53.33%的站点NDVI与气候舒适程度呈现显著或极显著正相关。[结论] 黄土高原1981—2020年气候舒适度不同季节空间分异明显, 研究区总体气候舒适程度有所改善; NDVI值的增加与气候舒适程度提高存在同步变化。通过生态修复有望提高黄土高原区域气候舒适度。

关键词: 黄土高原; 气候舒适度; 植被归一化指数; 生态效应

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)02-0315-10

中图分类号: P463.1

文献参数: 曹乐乐, 王飞, 戈文艳, 等. 黄土高原气候舒适度变化及其与植被覆盖的关系[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 315-324. Cao Lele, Wang Fei, Ge Wenyan, et al. Change of climate comfortability and relationship with vegetation cover on Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 315-324. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.0032; CSTR:32312.14.stbctb.2025.02.032.

Change of climate comfortability and relationship with vegetation cover on Loess Plateau

Cao Lele¹, Wang Fei^{1,2}, Ge Wenyan^{1,2}, Shi Shangyu^{1,2}, Chen Hao^{1,2}

(1.College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The distribution of climate comfortability and its spatiotemporal variations on the Loess Plateau were studied, and the correlation of comfortable climate with vegetation cover was analyzed, in order to provide insights into the environmental impacts of ecological restoration and the mechanisms for realizing the value of ecological products. [Methods] Based on the daily monitoring data of meteorological stations in the Loess Plateau from 1981 to 2020, the temporal and spatial variation of climate comfortability in the Loess Plateau was evaluated by using the temperature and humidity index. On this basis, the

收稿日期: 2023-11-08

修回日期: 2023-12-11

采用日期: 2023-12-11

资助项目: 中国工程科技发展战略宁夏研究院战略咨询研究项目“黄河流域(宁南山区)水土保持与生态环境建设战略研究”(2020NXZD7); 中国科学院国际伙伴计划“气候变化对阿根廷水资源影响评估与综合适应对策研究”(161461KYSB20200001)

第一作者: 曹乐乐(1998—), 女(汉族), 陕西省榆林市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持效益评价。Email: caolele@nwfau.edu.cn.

通信作者: 王飞(1971—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 博士, 研究员, 主要从事水土保持环境效应评价与流域综合管理研究。Email: wafe@ms.iswc.ac.cn.

relationship between NDVI and climate comfortability around the site was quantitatively evaluated by using PKU GIMMS NDVI data. [Results] ① The climatic comfort period (very comfortable and comfortable) exceeded 135 days per annum in the central part of the Loess Plateau. The northwest experienced longer summer comfort periods, whereas the southeast experienced longer spring and autumn comfort periods. The northwest exhibited more uncomfortable days annually than the southeast, with fewer days categorized as less uncomfortable or uncomfortable. ② The climatic comfort period on the Loess Plateau accounts for 35.46% of the annual days, primarily from May to September. The period of climate discomfort (relatively comfortable, uncomfortable, and very uncomfortable) accounted for 64.54% of the days in a year and mainly occurred from October to the April of the following year. Extreme discomfort was the predominant climatic comfortability type in the Loess Plateau, representing 27.59% of the total days, mainly occurring from November to February. ③ The degree of climate comfort significantly or highly significantly increased at 85% of the stations on the Loess Plateau ($p < 0.05$), with climate comfortability highly significantly increasing at 66.67% of the stations ($p < 0.01$). The number of comfortable days significantly increased at 21.67% of the stations, with the largest increase occurring at Wutaishan station in Shanxi Province (18.89 days per 10 years). The number of extremely uncomfortable days significantly decreased at 86.67% of the sites, and the number of less comfortable days significantly increased at 56.67% of the sites ($p < 0.05$). The annual NDVI of the Loess Plateau exhibited significant increasing trend from 1982 to 2020, with a significant or highly significant positive correlation between the NDVI and the degree of climate comfortability at 53.33% of the sites. [Conclusion] The climate comfort spatially varied across the seasons on the Loess Plateau from 1981 to 2020. Overall, the climate comfort ability increased in the study area. The increase in NDVI values was synchronized with the increase in climate comfortability. Ecological restoration shows the potential to further elevate regional climate comfortability.

Keywords: Loess Plateau; climate comfortability; normalized difference vegetation index; ecological effects

气候舒适度是描述气候对人居环境影响的重要指标。受气候演变和人类活动的综合影响^[1-2],该指标现已广泛应用于城市规划^[3]、人类健康^[4]、建筑设计^[5]和旅游发展^[6]等领域。在气候变暖的背景下,科学地评价不同地区的气候适宜性,对改善地区人居环境具有重要价值。

近年来,地球经历了前所未有的快速变暖,预计这种变暖趋势将在未来几十年继续^[7]。有研究报告指出,通过气候舒适度来评估气候变化对人体舒适度的影响比使用温度、湿度等原始气象变量更具有实际意义^[8-9]。目前,在人体舒适度气象指数中,温湿指数应用比较广泛。美国国家气象局最早提出不舒适指数 DI(discomfort index),后改称温湿指数^[10]。一些学者通过温湿指数得出旅游活动与生物气候条件的关系,为旅游发展与规划提供参考^[11]。也有学者基于温湿指数预测了中国温暖不舒适天数的增加趋势与寒冷不舒适天数的减少趋势,为居民健康风险评估提供科学依据^[12]。

黄土高原是世界上水土流失最严重且生态环境最脆弱的地区之一,近几十年来,黄土高原水土保持、生态修复等大规模人类活动已经部分改变了地表植被覆盖格局^[13],对该区气候特征产生了一定影

响^[14],进而影响气候舒适度。植被增长对全球气候变暖有一定减缓作用^[15],还会降低极端事件的发生频率,对改善气候舒适度可能产生积极影响。因此,研究黄土高原气候舒适度与植被覆盖变化的关系具有重要意义。

目前,针对黄土高原地区气候舒适度的研究较为匮乏,植被恢复对气候舒适度的影响研究较少。黄土高原作为生态环境脆弱区,气候舒适度不但可以刻画该区人居环境特征,还能揭示水土保持和生态修复对区域环境的可能影响。本文基于 1981—2020 年气象站点监测数据通过温湿指数评价黄土高原地区的气候舒适度,分析黄土高原地区气候舒适度的时空分布与变化特征,在此基础上利用 PKU GIMMS NDVI 数据定量评估了气候舒适度与植被 NDVI 的关系,可望提高对黄土高原植被恢复与气候舒适度变化之间关系的认识程度,为生态修复环境效应研究和生态产品价值实现机制提供参考。

1 研究区概况

黄土高原地区(100° 54'—114° 33' E, 33° 43'—41° 16' N)位于中国西北部,涉及陕西省、山西省、甘肃省、青海省、河南省、宁夏回族自治区和内蒙古自治区 7 个省(自治区),海拔高度 93~5 101 m,东西长

1 000 余 km,南北宽 750 km,总面积约 $6.35 \times 10^5 \text{ km}^2$,约占全国陆地面积的 6.6%。黄土高原地区属于温带大陆型季风气候,由东南向西北气候从半湿润气候区过渡到半干旱气候区和干旱气候区,年平均温度在 $4 \sim 14 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间。黄土高原地区降水空间差异大,蒸散速率高^[16]。年降水主要集中在 6—9 月,降水量在 200~800 mm 之间,总体趋势为东南高西北低^[17]。蒸发量普遍高于实际降水量,年蒸发量为 1400~2 000 mm。

2 研究方法数据来源

2.1 数据来源

本文以中国黄土高原为研究区,气象观测数据来源于中国气象科学数据共享网(<http://cdc.cma.gov.cn/>),使用中国地面气候资料日值数据集(V3.0)数据。本文选择 1981—2020 年黄土高原地区及其周边地区共 89 个气象站点(图 1)的逐日气温、相对湿度数据。

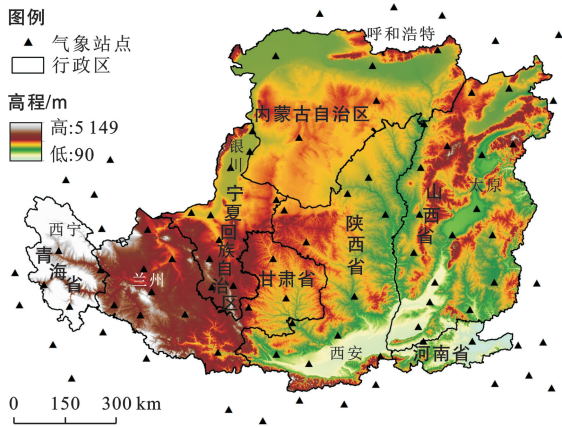


图 1 黄土高原地形及气象站点空间分布

Fig.1 Topography of Loess Plateau and location of meteorological stations

该数据集各要素项数据的实有率普遍在 99% 以上,数据的正确率均接近 100%。日平均气温、相对湿度等要素均为逐日 4 次定时(02:00,08:00,14:00,20:00)观测数据统计的日平均值,并对国家级站地面月报数据文件中的观测数据进行人工核查与更正。

NDVI 数据来源于 PKU GIMMS NDVI V1.2^[18](<https://doi.org/10.5281/zenodo.8253971>),空间分辨率为 8 km,时间分辨率为 15 d。本文使用该数据集 1982—2020 年数据。

2.2 研究方法

2.2.1 气候舒适度评价 本研究采用温湿指数(THI)来评价黄土高原地区的气候舒适度。温湿指

数是通过温度和湿度的组合反映人体与周围环境的热量交换,计算公式^[19-20]为:

$$I_{TH} = 1.8t + 32 - 0.55(1-f)(1.8t - 26) \quad (1)$$

式中: I_{TH} 为温湿指数; t 为气温($^\circ\text{C}$); f 为相对湿度(%)。

根据温湿指数分级标准^[21],将气候舒适度分为非常舒适、舒适、较不舒适、不舒适与极不舒适 5 个类型(表 1)。

表 1 温湿指数分类标准

Table 1 Classification criteria of temperature and humidity index

气候舒适类型	级别	指数范围	人体舒适度	赋值
非常舒适	A	$60 \leq I_{TH} < 65$	非常舒适	2
舒适	B	$55 \leq I_{TH} < 60$	清凉,舒适	1
		$65 \leq I_{TH} < 70$	暖,舒适	
较不舒适	C	$45 \leq I_{TH} < 55$	偏冷,较不舒适	0
		$70 \leq I_{TH} < 75$	偏热,较不舒适	
不舒适	D	$40 \leq I_{TH} < 45$	寒冷,不舒适	-1
		$75 \leq I_{TH} < 80$	闷热,不舒适	
极不舒适	E	$I_{TH} < 40$ $I_{TH} \geq 80$	极冷,极不舒适 极闷热,极不舒适	-2

气候舒适度是一种基于人体与近地大气之间热交换原理来评价不同气候环境下人体舒适性的生物气象指标。由于温湿指数是分类分级的,为揭示气候舒适度的整体变化趋势,同时便于与植被建立关系,将 5 类气候舒适类型综合为气候舒适程度指标。根据表 1 将 A, B, C, D, E 这 5 类气候舒适类型分别赋值 2, 1, 0, -1, -2, 计算出逐年气候舒适程度,表达式为:

$$S_i = \sum_{i=1}^n C_i \quad (2)$$

式中: S_i 为气候舒适程度; C_i 为单日舒适类型赋值; n 为年日数。

2.2.2 一元线性回归趋势分析 线性趋势由线性回归曲线的斜率定义。 y_i 表示样本量为 n 的某个气候变量, t_i 表示对应 y_i 的时间,一元回归方程表达式为:

$$y_i = a + bt_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中: a 为常数; b 为回归系数。

a 和 b 用最小二乘法估计,公式为:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i t_i - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i) (\sum_{i=1}^n t_i)}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n t_i)^2} \quad (4)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{t} \quad (5)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad \bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (6)$$

本文采用线性倾向估计与 t 检验法对各类型气候舒适日数与舒适程度进行时间变化的趋势分析, t 检验法显著性水平设为 0.05。

2.2.3 Theil-Sen Median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验 Theil-Sen median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验法能更好地监测植被轻微变化区域, 变化趋势更加准确^[22]。Theil-Sen Median 趋势分析法是一种用于检测时间序列趋势的非参数统计方法, 计算公式为:

$$\beta = \text{median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), i < j \quad (7)$$

式中: x_i 与 x_j 为第 i 年与第 j 年 NDVI 像元的值, $\beta > 0$ 表示 NDVI 呈上升趋势, $\beta < 0$ 则表示 NDVI 呈上升趋势。

使用 Mann-Kendall 检验法检验植被变化的显著性, Mann-Kendall 检验公式为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=n+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (8)$$

$$\text{其中, } \text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & (x_j - x_i > 0) \\ 0 & (x_j - x_i = 0) \\ -1 & (x_j - x_i < 0) \end{cases} \quad (9)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (10)$$

式中: S 为统计检验量; sgn 为符号函数; Z 为标准化后的检验统计量; x_i 与 x_j 为时间序列数据; n 为序列样本数; 当 $n \geq 8$ 时, S 近似为正态分布, 方差计算公式为:

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (11)$$

标准化后 Z 为标准正态分布。当 $|Z| > 2.58$ 时, 趋势极显著; $|Z| > 1.96$ 时, 趋势极显著; $|Z| \leq 1.96$ 时, 趋势不显著。

2.2.4 相关性分析 采用皮尔逊(Pearson)相关系数表示气候舒适程度与植被 NDVI 的相关性, 公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (12)$$

式中: r 为皮尔逊相关系数; X_i 与 Y_i 为两个变量 X 与 Y 第 i 年的值; \bar{X} 与 \bar{Y} 分别为 X 与 Y 变量的平均值; $r > 0$ 表示 X 与 Y 变量正相关, $r < 0$ 则表示负相关。

在分析黄土高原地区各气象站点气候舒适程度与植被 NDVI 的相关关系中, NDVI 为根据气象站点

坐标建立 50 km 圆形缓冲区(Buffer), 提取缓冲区内 NDVI 像元的均值。使用 t 检验法检验其显著性(显著性水平设为 0.05 与 0.01)。

2.2.5 ArcGIS 空间分析 通过 ArcGIS 地统计分析模块, 使用克里金法(Kriging)对统计数据进行空间内插, 得到研究区气候舒适度的空间分布, 使得计算结果能够空间化。

2.2.6 气候季节划分 为便于数据统计, 同时考虑区域适用性, 本文根据固定月份划分法划分四季, 即 3—5 月为春季, 6—8 月为夏季, 9—11 月为秋季, 12 月至次年 2 月为冬季。

3 结果与分析

3.1 气候舒适度评价

3.1.1 气候舒适类型时间分布特征 通过分析黄土高原地区 1981—2020 年气候舒适度总体情况得知, 最主要的气候舒适类型是极不舒适型, 占全年总天数的 27.59%(图 2a), 主要集中在深秋(11 月)与冬季(图 2b), 占冬季总天数的 80% 以上。各月份极不舒适型天数分别占当月总天数的 46.13%(11 月), 88.17%(12 月), 92.17%(1 月)和 69.84%(2 月)。较不舒适型气候占全年总天数的 25.80%, 主要集中在初春(3—4 月)和 10 月, 月频率约为 43%~58%。舒适型的天数占全年总天数的 23.09%, 主要集中在 4 月至 9 月, 月频率维持在 30%~50%。非常舒适型气候和不舒适型气候所占比例较少, 分别占全年总天数的 12.37%和 11.15%。其中, 非常舒适型主要集中在初夏(5—6 月)与 8—9 月, 5 月和 9 月非常舒适日数所占比例大于 30%。不舒适型气候则主要集中在 2, 3 和 11 月。总体来看, 非常舒适型、舒适型仅占全年总天数的 35.46%, 表明黄土高原不舒适期(较不舒适、不舒适、极不舒适型)长于舒适期(非常舒适、舒适型)。

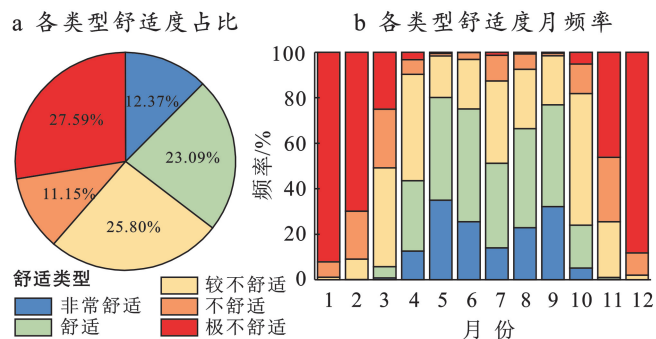


图 2 1981—2020 年黄土高原地区不同类型气候舒适度的占比情况 (a) 和各类型的月频率 (b)

Fig.2 Percentage of different types of climate comfortability (a) on Loess Plateau from 1981 to 2020 and monthly frequency of each type (b)

3.1.2 气候舒适类型空间分布特征 黄土高原地区 1981—2020 年 5 类气候舒适日数空间分布见图 3。非常舒适日数为 28.28~53.06 d/a,其中,黄土高原西北角(西宁市)与中部非常舒适日数较高,为 45 d/a 以上。研究区整体年均舒适日数高于非常舒适日数,舒适日数范围为 48.73~92.42 d/a,除黄土高原最西端与东北角局地外,黄土高原其余地区舒适天数高于 70 d/a。其中,宁夏回族自治区北部、内蒙古自治区南部地区年舒适天数高(达 90 d 以上)。研究区各地较不舒适日

数为 72.86~120.31 d/a,大部分地区较不舒适日数大于 90 d/a,其中东南部较不舒适天数高,达 100 d/a 以上。不舒适日数为 28.04~81.98 d/a,西部与北部较不舒适日数小于 50 d/a;东南部不舒适天数高,达 60 d/a 以上。极不舒适的日数范围为 55.69~150.88 d/a,整体上呈现由北向南减少的趋势,东北角年平均极不舒适日数达 130 d 以上。从 5 种气候舒适度的空间分布来看,极不舒适型具有较大的空间异质性,相比之下非常舒适与舒适型具有较小的空间异质性。

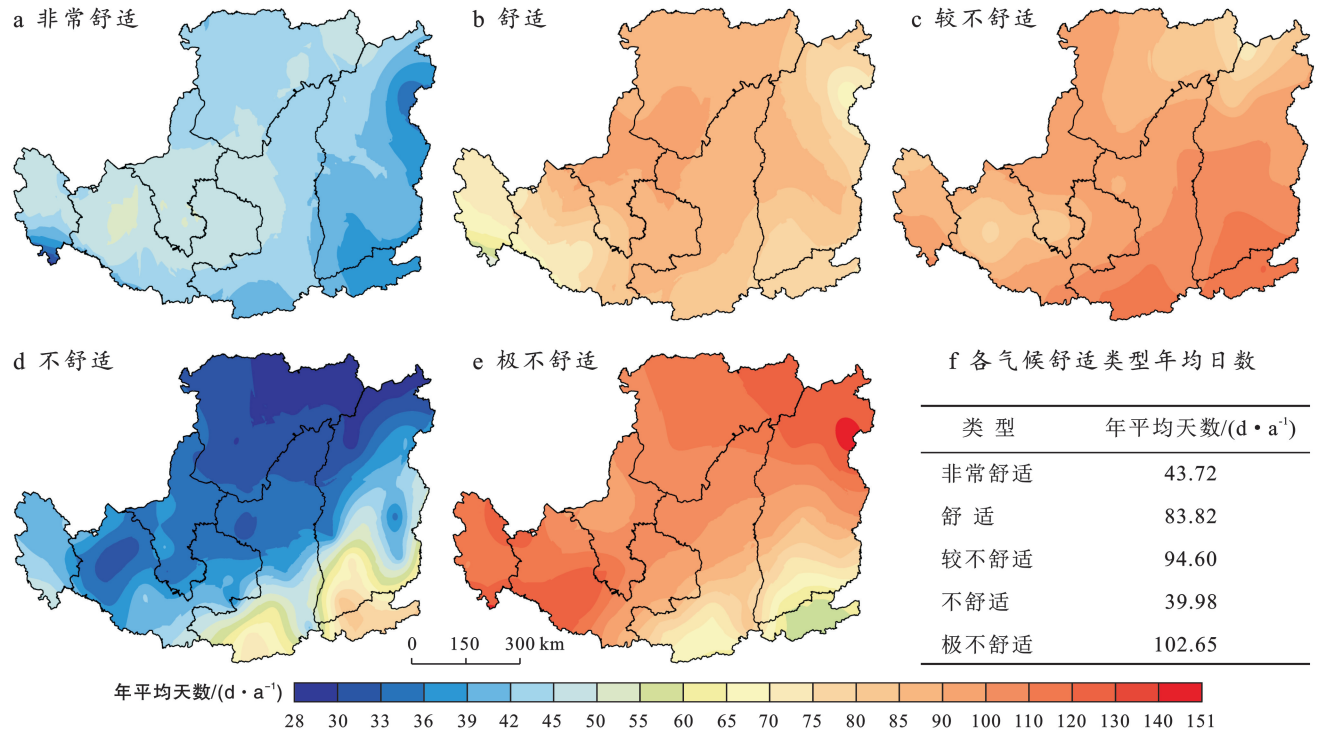


图 3 1981—2020 年黄土高原地区各气候舒适类型日数空间分布

Fig.3 Spatial distribution of different climate comfortability type days on Loess Plateau from 1981 to 2020

1981—2020 年黄土高原地区年舒适期(年均非常舒适与舒适日数求和)空间分布见图 4。研究区舒适期在 74.96~141.03 d/a,黄土高原中部年舒适期长于南部。黄土高原 81.51% 的地区年舒适期大于 120 d,研究区中部大部分地区年舒适期达 135 d 以上。黄土高原西南端以及东北部边缘地区年舒适期较小,为 100 d 以下。舒适期长的地区集中在黄土高原中部,舒适期短的地区主要集中在黄土高原东南部、西南部边缘地区与东北角。

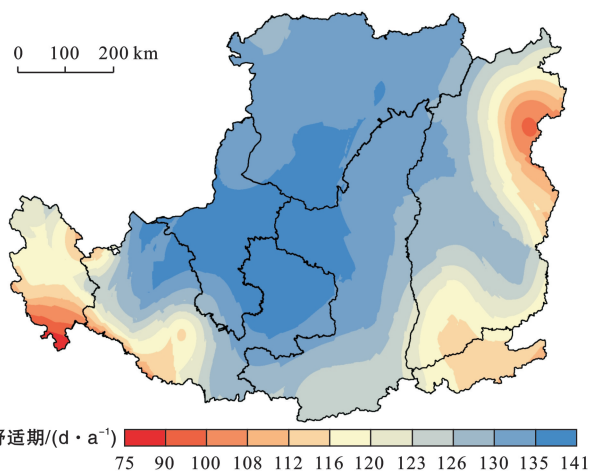


图 4 1981—2020 年黄土高原地区气候舒适期(非常舒适、舒适型)空间分布

Fig.4 Spatial distribution of climatic comfort periods (very comfortable, comfortable type) on Loess Plateau from 1981 to 2020

黄土高原地区 1981—2020 年的 1—12 月不同气候舒适类型日数占当月日数比值的空间分布见图 5。不同月份气候舒适度的空间分布有明显差异。其中,5 和 9 月气候舒适期(非常舒适、舒适型)所占比例大,舒适期所占比例高的地区主要分布在中部与东部,91.67% 的站点 5 月舒适期长于 9 月。

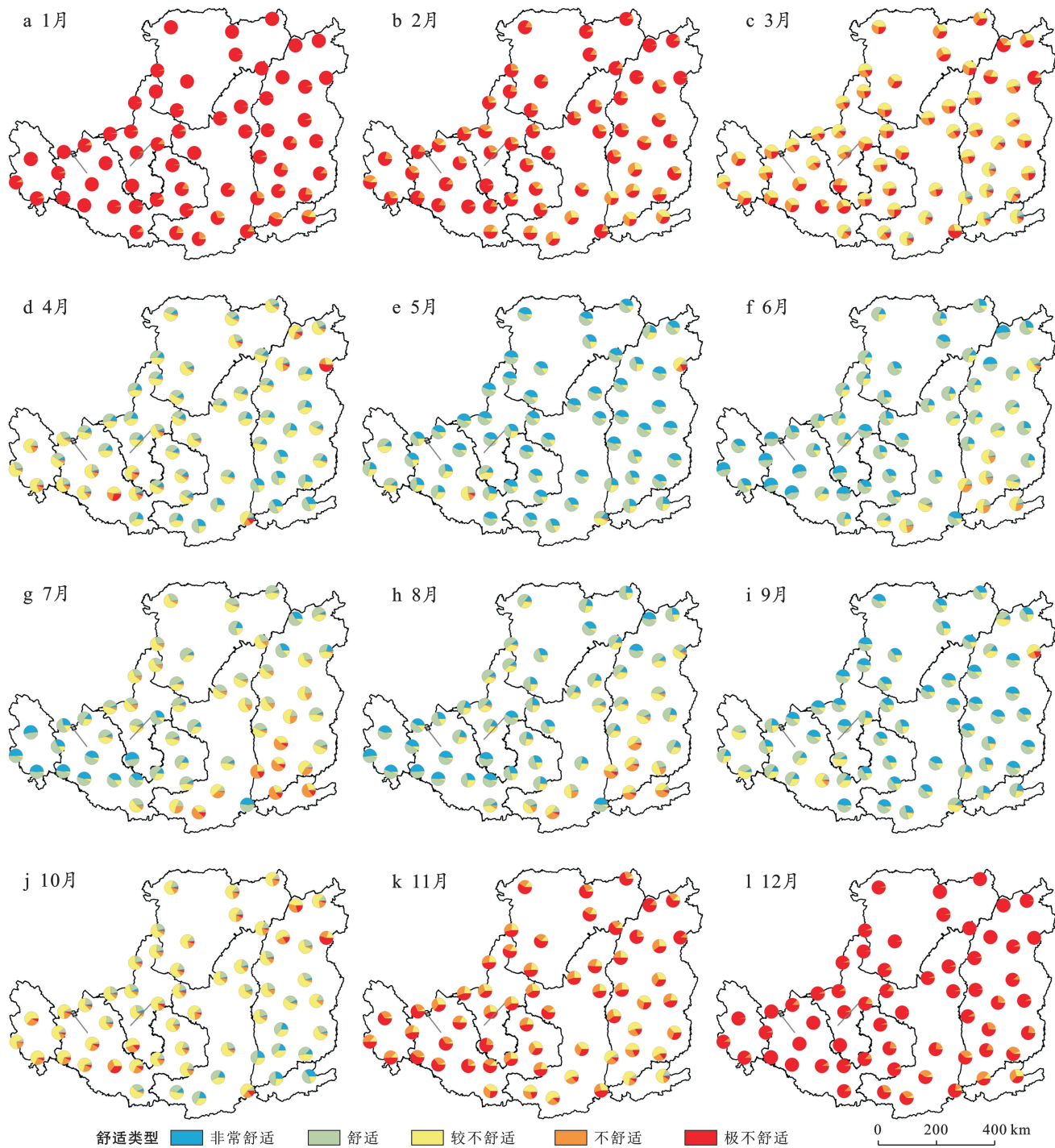


图 5 1981—2020 年黄土高原地区 1—12 月各气候舒适类型的分布
 Fig.5 Distribution of each climatic comfort type on Loess Plateau during January-December from 1981 to 2020

冬季整个黄土高原地区处于气候不舒适期(较不舒适、不舒适、极不舒适型),极不舒适型所占比例最高。3—4 月舒适期分布情况较相似,舒适期所占比例呈现东南高西北低的趋势。3 月黄土高原西北部仍处于不舒适期,全区有 61.67% 的站点舒适期仅占当月日数的 5% 以下。4 月研究区 33.33% 的站点舒适期长于不舒适期,东南角与陕西省西安市周边地区舒适期长,占当月日数的 50 以上%。夏季黄土高原

西北部为主要避暑区,舒适期所占比例呈现西北高东南低的趋势。其中,6 月 56.67% 的地区舒适期占当月日数的 80% 以上,其中西部舒适期所占比例高达 90% 以上。7 与 8 月各地舒适期差异较大,南部不舒适期长。10 月东南部舒适期长于西北地区,东南角舒适期占当月日数的 70% 以上,而研究区最西端局地舒适期占比为 0。11 月黄土高原 50% 的地区舒适期所占比例为 0,西北地区极不舒适型日数所占比例高于东南

部。从全年 12 个月的 5 类气候舒适类型日数分布情况来看,舒适期长的地区在春秋两季主要集中在东南部,夏季集中在西北部,冬季全区均处于不舒适期。

3.2 气候舒适度变化特征

黄土高原地区 1981—2020 年 5 类气候舒适度日数变化趋势见图 6。非常舒适日数倾向率仅在 5 个站点表现为显著增加趋势,其中青海省同仁站增加幅度最大(6.45 d/10 a)。甘肃省皋兰站(-3.70 d/10 a)与靖远站(-2.51 d/10 a)非常舒适日数显著减少。黄土高原 21.67%的站点舒适日数全部表现为显著增加趋势,其中以山西省东北部五台山上倾向最大

(18.89 d/10 a)。56.67%的站点较不舒适日数倾向率呈显著增加趋势,其中甘肃省西峰站上升倾向最大(6.65 d/10 a)。仅 4 个站点不舒适日数表现为显著增加趋势,其中山西省南部临汾站上升倾向最显著(5.19 d/10 a)。同期大部分站点极不舒适日数显著减少,其中山西省五台山站极不舒适日数下降倾向最显著(-25.12 d/10 a)。

综上所述,黄土高原地区 86.67%的站点极不舒适日数呈显著减少趋势,56.67%的站点较不舒适日数倾向率呈显著增加趋势($p < 0.05$),气候舒适度整体上向更舒适变化。

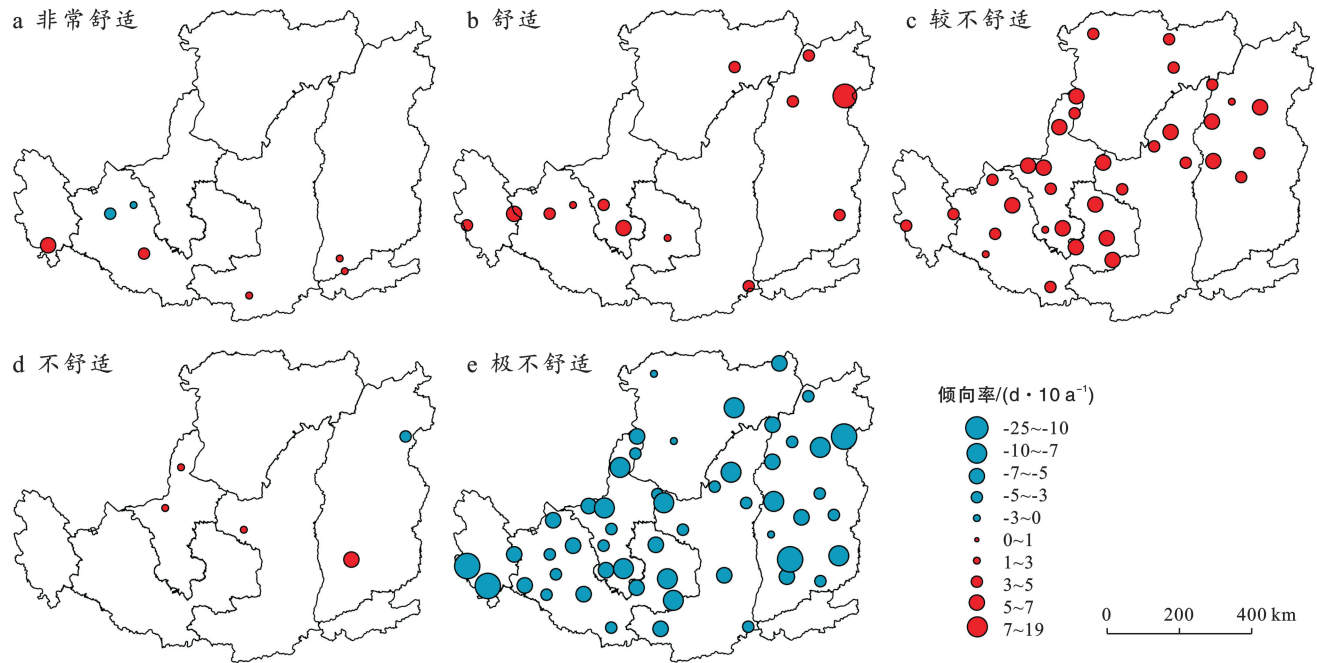


图 6 1981—2020 年黄土高原地区各气候舒适类型日数变化趋势 ($p < 0.05$)

Fig.6 Trends in days for each climate comfort type on Loess Plateau from 1981 to 2020 ($p < 0.05$)

黄土高原地区 1981—2020 年气候舒适程度变化趋势见图 7。研究区气候舒适程度整体呈显著增加趋势。黄土高原 66.67%的站点气候舒适程度呈极显著增加趋势($p < 0.01$),18.33%的站点气候舒适程度呈显著增加趋势($0.01 \leq p < 0.05$)。黄土高原西南部与东北角地区气候舒适程度上升倾向较大。综上所述,1981—2020 年黄土高原 85%的站点气候舒适程度呈显著或极显著增加趋势,表明该区总体气候舒适程度有所改善。

3.3 气候舒适程度与植被关系

退耕还林以来,黄土高原植被覆盖格局已发生部分改变,植被变化可能通过影响下垫面进而对气候舒适度产生影响。为进一步探究黄土高原地区长时序气候舒适度与植被覆盖变化的关系,对 1982—2020 年研究区植被变化进行分析。由图 8 可见,黄土高原

地区的年 NDVI 变化趋势介于-0.007 4~0.008 7/a,结合 NDVI 显著性检验可知,研究区 59.10%的区域 NDVI 呈显著或极显著增加趋势,仅 0.24%的区域 NDVI 呈显著或极显著减少,黄土高原地区年 NDVI 总体呈现出积极的生长趋势。

为探究气候舒适度变化特征与植被 NDVI 的关系,对黄土高原地区 1982—2020 年各站点气候舒适程度与 NDVI 相关性进行分析(图 9)。站点气候舒适程度与 NDVI 相关性整体上呈现正相关,93.33%的站点相关系数大于 0,其中 33.33%的站点气候舒适程度与 NDVI 呈现极显著正相关关系($p < 0.01$),主要集中在研究区西南部与东北部地区;20%的站点气候舒适程度与 NDVI 显著正相关($0.01 \leq p < 0.05$),主要位于黄土高原西南部与东部地区;40%的站点气候舒适程度与 NDVI 不显著正相关,主要位于研究区北部地区。

黄土高原 6.67% 的站点气候舒适度与 NDVI 呈负相关关系,且均为不显著,主要分布在内蒙古自治区与山西省东北部地区。总体而言,1982—2020 年黄土高原地区 53.33% 的站点气候舒适度与 NDVI 呈显著或极显著的正相关关系,这表明黄土高原地区 NDVI 值的增加与气候舒适度提高存在同步变化,水土保持与植被修复能在一定程度上改善气候舒适度。

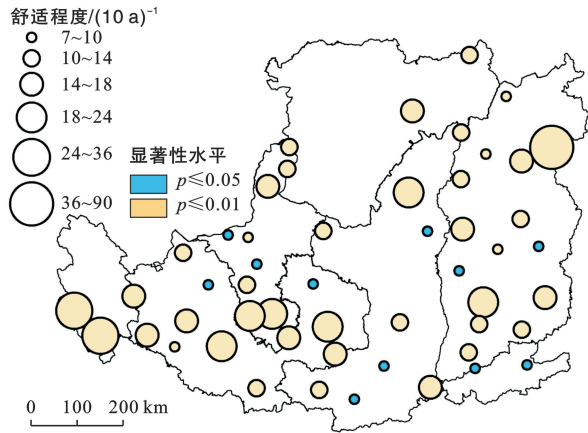


图 7 1981—2020 年黄土高原地区气候舒适度变化趋势
Fig.7 Trends of climate comfortability on Loess Plateau during 1981—2020

4 讨论

本研究基于温湿指数对中国黄土高原地区 1981—2020 年气候舒适度进行评价,并分析了气候舒适度的变化趋势。研究发现,黄土高原 85% 的站点气候舒适度呈显著或极显著增加趋势,86.67% 的站点极不舒适日数呈显著减少趋势,该区总体气候舒适度有所改善。此前有研究结果表明,中国 1981—2010 年热不舒适期基本保持稳定、冷不舒适期波动下降^[23],与本文结果具有一致性。

在全球变暖的背景下,黄土高原大部分地区冬季气候暖湿化,呈现持续偏暖特征^[24-25],极不舒适日数减少。春秋两季黄土高原东南部地区舒适期占比高于西北部。夏季气候舒适期空间差异较大,舒适区域向西北地区偏移,西北部夏季气候舒适期占比高于东南部,较适宜发展避暑旅游业。此外,由于研究区内青海省为高原大陆性气候,春季多雪,夏季凉爽,秋季温和短暂,冬季寒冷漫长^[26],年舒适期较短。

黄土高原地区作为生态脆弱区,经过一系列的水土保持治理与生态修复后,植被总体显著增加^[27-28]。本文的研究结果表明黄土高原总体年 NDVI 总体呈现出积极的生长趋势,且大部分地区气候舒适度与 NDVI 呈显著或极显著正相关关系,此前有研究表明植被恢复能通过对区域气候的调节作用,如降温 and 增湿,来提高气候舒适度^[29],与本文结果一致。总体来看,植被恢复对区域气候特征产生一定影响,进而影响气候舒适度,黄土高原植被恢复与气候舒适度提高存在同步变化,通过生态修复有望提高区域气候舒适度。

此外,研究表明暴雨、沙尘暴等极端天气对气候舒适度有一定负面影响^[30]。对于过敏性人群,花粉高峰期或沙尘天气会影响气候舒适度,可能限制他们的室外活动^[31]。纬度和海拔对区域气候舒适度差异有直接影响^[32-33],但纬度、海拔如何影响气候相关的舒适度尚不明确。是否有更适合黄土高原地区实际的气候舒适度评价方法和指标分级体系还有待进一步的研究和探讨。在大多数情况下,风速和太阳辐射在日平均尺度上的作用相对较小^[34],因此,研究未考虑风速和太阳辐射的影响。未来可增加气候舒适度要素(极端天气、花粉浓度等)综合评价气候舒适度,根据不同人群制定科学的分类标准,进行水土保持与生态修复背景下气候舒适度的细化研究。

5 结论

本研究基于 1981—2020 年黄土高原气象站点监

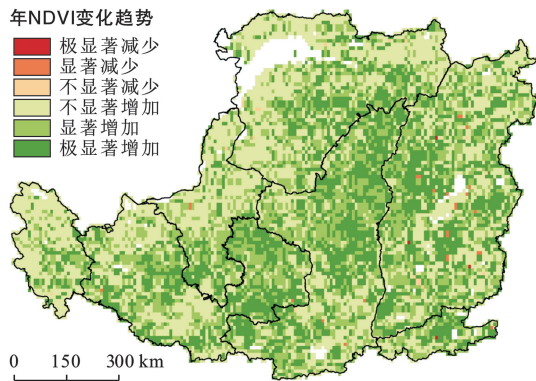


图 8 1982—2020 年黄土高原地区年 NDVI 变化趋势
Fig.8 Annual NDVI trends on Loess Plateau during 1982—2020

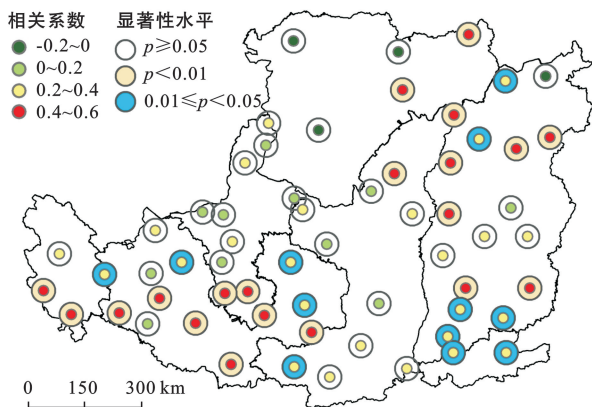


图 9 1982—2020 年黄土高原地区气候舒适度与各气象站点 50 km 缓冲区 NDVI 相关性
Fig.9 Correlation between climate comfortability and NDVI of 50 km buffer zone of each meteorological station on Loess Plateau from 1982 to 2020

测数据,运用温湿指数分析了黄土高原地区的气候舒适度及区域分异特征,在此基础上利用 PKU GIMMS NDVI 数据定量评估了气候舒适度与植被 NDVI 的关系。

(1) 黄土高原地区气候舒适度在不同月份变化明显。舒适期(非常舒适、舒适型)占全年日数的 35.46%,主要分布在 5—9 月;不适期(较不舒适、不舒适、极不舒适型)占全年日数的 64.54%,分布在 10 月至次年 4 月。不适期长于舒适期,对生活和旅游业发展都有一定负面影响。黄土高原最主要的气候舒适类型是极不舒适,占全年日数的 27.59%,主要集中在 11 月至次年 2 月。5 月和 9 月黄土高原整体气候舒适期长,舒适范围较大。

(2) 在空间上,黄土高原东南部春秋两季气候舒适期长,西北部夏季气候舒适期长,全区在冬季均处于不适期。从全年来看,黄土高原中部年舒适期长,为 135 d/a 以上;最西端与东北角年舒适期短,为 100 d/a 以下。西北地区年极不舒适日数高于东南部,年较不舒适与不舒适日数低于东南部地区。

(3) 黄土高原地区总体气候舒适程度有所改善,1981—2020 年黄土高原 85% 的站点气候舒适程度呈显著或极显著增加趋势($p < 0.05$),其中研究区 66.67% 的站点气候舒适程度呈极显著增加趋势($p < 0.01$)。黄土高原 5 个站点非常舒适日数倾向率显著增加,青海省同仁站增加幅度最大(6.45 d/10 a);约 21.67% 的站点舒适日数显著增加,其中山西省五台山站增加最多(18.89 d/10 a);约 86.67% 的站点极不舒适日数呈显著减少趋势;约 56.67% 的站点较不舒适日数倾向率呈显著增加趋势($p < 0.05$)。1982—2020 年黄土高原植被 NDVI 总体呈增加趋势,大部分站点 NDVI 与气候舒适程度呈现显著或极显著正相关,这表明植被覆盖与气候舒适度存在同步变化。通过水土保持与植被修复,能在一定程度上改善气候舒适度。

参考文献 (References)

- [1] Chen Xin, Gao Lixin, Xue Puning, et al. Investigation of outdoor thermal sensation and comfort evaluation methods in severe cold area [J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 749: 1415-20.
- [2] Serrao-Neumann S, Schuch G, Harman B, et al. One human settlement: A transdisciplinary approach to climate change adaptation research [J]. *Futures*, 2015, 65: 97-109.
- [3] Tumini I, Higuera García E, Baereswyl Rada S. Urban microclimate and thermal comfort modelling: strategies for urban renovation [J]. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 2016, 7(1): 22-37.
- [4] Di Napoli C, Pappenberger F, Cloke H L. Assessing heat-related health risk in Europe via the Universal Thermal Climate Index (UTCI) [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2018, 62(7): 1155-1165.
- [5] Rupp R F, Vásquez N G, Lamberts R. A review of human thermal comfort in the built environment [J]. *Energy and Buildings*, 2015, 105: 178-205.
- [6] Ge Quansheng, Kong Qinqin, Xi Jianchao, et al. Application of UTCI in China from tourism perspective [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 128(3): 551-561.
- [7] 米志付,张浩然.IPCC AR6 WGIII 报告解读:城市系统减缓气候变化[J].*气候变化研究进展*, 2023, 19(2): 139-150.
Mi Zhifu, Zhang Haoran. Interpretation of IPCC AR6 report: Climate change mitigation of urban systems [J]. *Climate Change Research*, 2023, 19(2): 139-150.
- [8] Song Xuping, Wang Shigong, Hu Yuling, et al. Impact of ambient temperature on morbidity and mortality: An overview of reviews [J]. *The Science of the Total Environment*, 2017, 586: 241-254.
- [9] Buzan J R, Huber M. Moist heat stress on a hotter earth [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2020, 48: 623-655.
- [10] Thom E C. The discomfort index [J]. *Weatherwise*, 1959, 12(2): 57-61.
- [11] Ciobotaru A M, Andronache I, Dey N, et al. Temperature-humidity index described by fractal Higuchi dimension affects tourism activity in the urban environment of Focșani City (Romania) [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 136(3): 1009-1019.
- [12] Zhang Jintao, Ren Guoyu, You Qinglong. Detection and projection of climatic comfort changes in China's mainland in a warming world [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2022, 13(4): 507-516.
- [13] Chen Yiping, Wang Kaibo, Lin Yishan, et al. Balancing green and grain trade [J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 739-741.10.1038/ngeo2544.
- [14] 张宝庆,田磊,赵西宁,等.植被恢复对黄土高原局地降水的反馈效应研究[J].*中国科学(地球科学)*, 2021, 51(7): 1080-1091.
Zhang Baoqing, Tian Lei, Zhao Xining, et al. Feedbacks between vegetation restoration and local precipitation over the loess plateau in China [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2021, 51(7): 1080-1091.
- [15] Zeng Zhenzhong, Piao Shilong, Li L Z X, et al. Climate

- mitigation from vegetation biophysical feedbacks during the past three decades [J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7: 432-436.
- [16] Dong Lingbo, Li Jiwei, Zhang Yu, et al. Effects of vegetation restoration types on soil nutrients and soil erodibility regulated by slope positions on the Loess Plateau [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 302: 113985.
- [17] Lü Yihe, Fu Bojie, Feng Xiaoming, et al. A policy-driven large scale ecological restoration: Quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China [J]. *PLoS One*, 2012, 7(2): e31782.
- [18] Li Muyi, Cao Sen, Zhu Zaichun, et al. Spatiotemporally consistent global dataset of the GIMMS normalized difference vegetation index (PKU GIMMS NDVI) from 1982 to 2022 [J]. *Earth System Science Data*, 2023, 15(9): 4181-4203.
- [19] 胡毅.应用气象学[M].2版.北京:气象出版社,2005.
Hu Yi, Li Ping, Yang Jiangong, et al. *Applied Meteorology* [M]. 2nd ed. Beijing: Meteorological Press, 2005.
- [20] 刘清春,王铮,许世远.中国城市旅游气候舒适性分析[J].*资源科学*,2007,29(1):133-141.
Liu Qingchun, Wang Zheng, Xu Shiyuan. Climate suitability index for city tourism in China [J]. *Resources Science*, 2007, 29(1): 133-141.
- [21] 李秋,仲桂清.环渤海地区旅游气候资源评价[J].*干旱区资源与环境*,2005,19(2):149-153.
Li Qiu, Zhong Guiqing. Evaluation on climate resource for tourism in the region around Bohai [J]. *Journal of Arid Land Resources & Environment*, 2005, 19(2): 149-153.
- [22] 康雄,曹俊涛,陈成,等.不同趋势法的宁夏长时序植被变化分析[J].*测绘通报*,2020(11):23-27.
Kang Xiong, Cao Juntao, Chen Cheng, et al. Analysis of long-term vegetation change in Ningxia with different trend methods [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2020(11): 23-27.
- [23] 蔚丹丹,李山.气候舒适度的体感分级:季节锚点法与中国案例[J].*自然资源学报*,2019,34(8):1633-1653.
Yu Dandan, Li Shan. Scale of human thermal sensation using seasonal anchor method: A Chinese case study [J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(8): 1633-1653.
- [24] 赵俊虎,宋文玲,柯宗建.2019/2020年冬季我国暖湿气候特征及成因分析[J].*气象*,2020,46(7):982-993.
Zhao Junhu, Song Wenling, Ke Zongjian. Characteristics and causes analysis of the warm and wet winter in China in 2019/2020 [J]. *Meteorological Monthly*, 2020, 46(7): 982-993.
- [25] 杜懿,王大刚,祝金鑫.基于CMIP5的中国西北地区暖湿化演变研究[J].*水资源与水工程学报*,2021,32(5):61-69.
Du Yi, Wang Dagang, Zhu Jinxin. Study on warming and humidification evolution in Northwest China based on CMIP5 [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2021, 32(5): 61-69.
- [26] 郑景云,卞娟娟,葛全胜,等.1981—2010年中国气候区划[J].*科学通报*,2013,58(30):3088-3099.
Zheng Jingyun, Bian Juanjuan, Ge Quansheng, et al. The climate regionalization in China for 1981—2010 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(30): 3088-3099.
- [27] Wang Yuhang, Brandt M, Zhao Mingfei, et al. Major forest increase on the Loess Plateau, China (2001—2016) [J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(11): 4080-4091.
- [28] 傅伯杰,刘彦随,曹智,等.黄土高原生态保护和高质量发展现状、问题与建议[J].*中国科学院院刊*,2023,38(8):1110-1117.
Fu Bojie, Liu Yansui, Cao Zhi, et al. Current conditions, issues, and suggestions for ecological protection and high-quality development in Loess Plateau [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, 38(8): 1110-1117.
- [29] Zhang Xuezhen, Zhang Zefan, Song Shuaifeng. Modulation of vegetation restoration on outdoor thermal comfort over the Loess Plateau, China from 1982 to 2015 [J]. *Environmental Research Communications*, 2021, 3(1): 015002.
- [30] Rosselló J, Becken S, Santana-Gallego M. The effects of natural disasters on international tourism: A global analysis [J]. *Tourism Management*, 2020, 79: 104080.
- [31] Zhou Shumin, Zhang Luying, Lu Senlin, et al. Ambient particulate matter-associated autophagy alleviates pulmonary inflammation induced by *Platanus* pollen protein 3 (Pla3) [J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 758: 143696.
- [32] Wu Feifei, Yang Xiaohua, Shen Zhenyao. Regional and seasonal variations of outdoor thermal comfort in China from 1966 to 2016 [J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 665: 1003-1016.
- [33] Feng Li, Liu Yanxia, Feng Zhaozhong, et al. Analyzing the spatiotemporal characteristics of climate comfort in China based on 2005—2018 MODIS data [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2021, 143(3): 1235-1249.
- [34] Willett K M, Sherwood S. Exceedance of heat index thresholds for 15 regions under a warming climate using the wet-bulb globe temperature [J]. *International Journal of Climatology*, 2012, 32(2): 161-177.