

气候变化背景下河南省耕地气候生产潜力 时空演变特征分析

项鑫^{1,2}, 马泉来^{1,2}, 孙晓兵³, 杨延伟^{1,2}, 路中⁴, 周浩⁵

(1. 河南省资源环境调查一院, 郑州 450007;

2. 河南省资源环境调查工程技术研究中心, 郑州 450007; 3. 天津工业大学 环境科学与工程学院, 天津 300387; 4. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 郑州 450003; 5. 湖南师范大学 地理科学学院, 长沙 410081)

摘要: [目的] 充分挖掘耕地气候生产潜力, 为提升区域耕地粮食生产能力提供理论参考。[方法] 利用气候、耕地利用等数据, 采用 Thornthwaite Memorial 模型测算耕地气候生产潜力, 借助 Theil-Sen 趋势分析、Mann-Kendall 统计检验、变异系数等方法以及构建的耕地气候生产潜力总量和耕地气候资源利用率等指标, 分析了河南省耕地气候生产潜力的时空演变特征。[结果] (1) 1990—2023 年河南省温度和降水均值范围分别为 5.57~16.79°C 和 556.90~1 490.31 mm, 以 10 年为期限的均值分别呈现稳步增加和先增加后降低的趋势。(2) 1990—2023 年河南省耕地气候生产潜力呈现波动增加的趋势, 多年均值为 12 599.93 kg/hm², 总体呈现南高北低的特点, 且具有显著的空间差异性, 以较低波动、中度波动和较高波动为主。(3) 1990—2023 年耕地气候生产潜力总量呈现波动降低的趋势, 年均值为 1.43 亿 t, 变异系数为 6.60%; 耕地和主要粮食作物(小麦、玉米和大豆)的气候资源利用率总体呈现波动增加的趋势, 多年均值分别为 40.26%, 41.84%, 41.08% 和 14.15%, 且不同时段的气候资源利用率变化具有较为显著的差异性。(4) 河南省耕地气候生产潜力以不显著增加为主, 面积占比为 72.07%, 广泛分布于河南省中部、东部、中北部、中南部等区域; 极显著减少面积占比为 6.47%, 零星分布于各个地市, 但多集中分布于城市周边。[结论] 河南省耕地气候生产潜力具有较为显著的空间差异特征, 因地制宜地合理调控作物布局 and 通过土壤改良增强其保水保肥能力可进一步挖掘耕地粮食产出能力。

关键词: 气候要素; 耕地气候生产潜力; Thornthwaite Memorial 模型; 时空变化; 河南省

中图分类号: S162.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0408-11

Analysis of spatiotemporal evolution characteristics of climatic production potential of cultivated land in Henan Province under climate change

Xiang Xin^{1,2}, Ma Quanlai^{1,2}, Sun Xiaobing³, Yang Yanwei^{1,2}, Lu Zhong⁴, Zhou Hao⁵

(1. The First Institute of Resources and Environment Investigation of Henan Province,

Zhengzhou 450007, China; 2. Henan Provincial Engineering Technology Research Center for Resources

and Environmental Investigation, Zhengzhou 450007, China; 3. School of Environmental Science and

Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 4. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd.,

Zhengzhou 450003, China; 5. School of Geographical Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: [Objective] This study aims to fully tap into this potential and provide a theoretical reference for

收稿日期: 2025-08-03

修回日期: 2025-09-22

接受日期: 2025-10-07

资助项目: 河南省软科学研究项目“粮食安全视角下的河南省耕地生产能力评价与实现路径研究”(252400411068); 河南省科技攻关项目“河南典型粮食主产区耕地种植结构变化对水土资源平衡的影响机理及调控研究”(252102321114); 河南省豫地科技集团重点研发项目“基于水土资源平衡过程的河南省沿黄区耕地适水调控关键技术研究”(JTZDKY2026003); 国家自然科学基金项目“种植结构视角下东北三江平原耕地利用变化及其对水土资源平衡的影响研究”(42301300)

第一作者: 项鑫(1974—), 男, 河南南阳人, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事自然资源调查与评价研究。E-mail: xiangxin073@126.com

通信作者: 马泉来(1992—), 男, 河南禹州人, 硕士, 中级工程师, 注册城乡规划师, 河南省自然资源青年科技人才, 主要从事资源环境调查与生态评价研究。E-mail: maquanlai0716@163.com

<https://stbcej.publish.founderss.cn>

enhancing the grain production capacity of regional cultivated land. [Methods] Using climate and cultivated land use data, the Thornthwaite Memorial model was applied to calculate the climatic production potential of cultivated land. The spatiotemporal evolution characteristics of the climatic production potential of cultivated land in Henan Province were analyzed using methods including Theil-Sen trend analysis, Mann-Kendall statistical test, and coefficient of variation, as well as the constructed indicators such as total climatic production potential of cultivated land and utilization rate of climatic resources. [Results] (1) From 1990 to 2023, the average temperature and precipitation ranges in Henan Province were 5.57~16.79 °C and 556.90~1 490.31 mm, respectively. The 10-year average values showed a steadily increasing trend for temperature and a trend of first increasing and then decreasing for precipitation. (2) From 1990 to 2023, the climatic production potential of cultivated land in Henan Province showed a fluctuating increasing trend, with a multi-year average of 12 599.93 kg/hm². Overall, it exhibited a pattern of higher values in the south and lower values in the north, demonstrating significant spatial heterogeneity, mainly characterized by low, moderate, and high fluctuations. (3) From 1990 to 2023, the total climatic production potential of cultivated land showed a fluctuating decreasing trend, with an annual average of 143 million tons and a coefficient of variation of 6.60%. The climatic resource utilization rate of cultivated land and major grain crops (wheat, maize, and soybean) generally showed fluctuating increasing trends, with multi-year averages of 40.26%, 41.84%, 41.08%, and 14.15%, respectively. Moreover, significant differences were observed in the changes in climatic resource utilization rates across different periods. (4) The climatic production potential of cultivated land in Henan Province showed no significant increase, covering 72.07% of the area, widely distributed in the central, eastern, north-central, and south-central regions of the province. Areas with extremely significant decreases accounted for 6.47%, scattered across various prefecture-level cities but predominantly concentrated around urban peripheries. [Conclusion] The climatic production potential of cultivated land in Henan Province exhibits significant spatial heterogeneity. Regulating crop distribution according to local conditions and enhancing water and fertilizer retention capacity through soil improvement can further unlock the grain production potential of cultivated land.

Keywords: climate elements; climatic production potential of cultivated land; Thornthwaite Memorial model; spatiotemporal variation; Henan Province

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告明确指出,工业化以来全球地表平均温度上升 1.07 °C,极端天气事件也因此变得更加频繁和强烈,同时指出气候变化对人类和自然生态系统的影响比预期更为广泛和严重^[1]。在全球变暖背景下,气候变化不仅能够改变区域温度、降水的空间分布,而且能够影响植被的空间分布及生态系统的结构和功能^[2]。耕地是我国最为宝贵的自然资源,是保障国家粮食安全与社会和谐稳定的物质基础。虽然我国用全球约 8% 的耕地养育了世界约 20% 的人口,但是面对当前我国粮食紧平衡的态势,有效保护耕地以提升耕地粮食生产能力仍是当前国家工作的重要内容^[3]。因此,充分揭示气候要素的时空演变特征,评估耕地气候生产潜力,为因地制宜地挖掘耕地气候生产潜力显得尤为重要,可为区域耕地资源利用与保护提供理论支撑。

气候生产潜力(Climatic Production Potential)是

指当土壤、养分等条件处于最佳状态的前提下,降水和温度等气候资源得到充分利用时,单位面积土地可获得最高生物学产量^[4]。以气候生产潜力为基础,可推演出耕地气候生产潜力(Climatic Production Potential of Cultivated Land),耕地气候生产力是指除气候条件之外的其他条件都处于最佳状态的情况下,单位面积耕地可以产出的最大作物产量,其是衡量耕地粮食生产能力的重要指标^[2,5]。国内外学者在气候生产潜力研究方面取得较为丰富的成果,常用的气候生产潜力评估模型主要有 Miami 模型^[6]、Thornthwaite Memorial 模型^[7]、Chikugo 模型^[8]、AEZ 模型^[9]和机制法等^[10],可对国家^[11]、区域^[6]和省域等^[12]尺度气候生产潜力进行评估与分析,如徐雨晴等^[7,11]利用 Thornthwaite Memorial 模型对中国气候生产潜力时空格局进行了测算与分析;陈博等^[6]综合运用 Miami 模型和 Thornthwaite Memorial 模型对东北三省植被气候生产力进行测算,并分析了其对气候变化的响应;同时部分学者也对

陆地生态系统如森林^[13]、草地^[14]和作物等^[15]的气候生产潜力进行分析,例如李秀芬等^[16]运用逐级订正模型对寒地大豆气候生产潜力进行测算,并分析其对气候变化的响应;刘文茹等^[10]运用机制法估算长江中下游麦稻二熟制气候生产潜力,并分析了RCP变化情境下麦稻气候生产潜力变化特征。已有研究多是从整体视角对气候生产潜力进行分析,虽然部分学者从宏观视角对耕地气候生产潜力有所探讨^[5],然而,仍缺少从中观视角对耕地气候生产潜力的分析,特别是对典型农业区长时间序列的耕地气候生产潜力开展研究。

河南省作为我国重要的粮食主产区,是保障国家粮食安全的重要“粮仓”。2024年河南省粮食总产量为671.94亿kg,且连续8a稳定在650亿kg以上,为保障国家粮食安全起到了关键性作用^[17]。同时,受到气候变暖的影响,极端天气对河南省耕地利用和粮食产量也产生着重要影响^[5,7,9]。然而,在河南省耕地面积难以大幅度增加的前提下,如何客观地揭示耕地气候生产潜力,充分挖掘耕地粮食生产潜力,是推进耕地资源利用与管理的基础。因此,本文以河南省为研究区,基于1990—2023年温度和降水数据,在分析温度和降水时空变化特征的基础上,运用Thornthwaite Memorial模型测算耕地气候生产潜力,进而揭示耕地气候生产潜力时空演变特征,以期为河南省挖掘耕地粮食生产能力提供理论基础。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

河南省地处我国中东部,黄河流域中下游,多位于黄河以南而得名河南,位于31°23'N—36°22'N和110°21'E—116°39'E,土地总面积为16.7万km²。河南省隶属暖温带大陆性季风气候和亚热带大陆性季风气候,平均气温15.1~15.9℃,年均降水量为512.6~1133.3mm,年均日照时数为1774.5~2094.0d,适宜的光温水热条件为河南省农业发展提供了良好的基础条件,作物熟制为一年两熟,主要农作物为小麦、玉米、大豆等。河南省粮食产量仅次于黑龙江省,稳居全国第二,近些年来河南省粮食产量均在650亿kg以上,约占全国粮食产量的10%,为保障国家粮食安全做出了重要的贡献^[17]。河南省第三次全国国土调查显示,全省耕地面积为751.41万hm²,约占全省土地总面积的45%,近些年来,随着耕地保护力度的不断加强,全省耕地面积呈现止减回增的趋势,为河南省农业生产提供了宝贵的资源基础。

1.2 数据来源

本文研究数据具体包括气象数据、耕地利用数

据以及相关辅助数据。其中,气象数据主要源自于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn>),具体包括降水和气温两种数据,数据空间分辨率约为1km,该数据主要是根据CRU发布的气候数据集与WorldClim发布的高分辨率气候数据集,通过Delta空间降尺度方案在中国降尺度生成的,并经496个独立样点进行验证以证明结果可信^[18-19]。土地利用数据主要源自于武汉大学杨杰和黄昕教授团队的中国土地利用/覆盖数据集(CLCD),数据分辨率为30m^[20]。此外,粮食产量等相关数据来源于《河南统计年鉴》,部分缺失数据以临近年份数值平均进行补充;行政边界等相关数据来源于2019中国地图(审图号GS(2019)1822号)。本研究借助ArcGIS软件平台进行数据处理与分析,同时借助MATLAB和Origin等软件进行数据处理和图形绘制。

2 研究方法

2.1 变异系数

变异系数是衡量数据离散程度的指标。变异系数越大,数据的离散程度越大;反之,数据的离散程度越小。本文借助变异系数衡量数据之间的离散程度,具体公式为:

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_v 为变异系数; σ 为数据的标准差; μ 为数据的平均值。

2.2 耕地气候生产潜力测算

目前,学术界已经构建了Miami模型、Thornthwaite Memorial模型和GAEZ等多种气候生产潜力模型,不同模型均有其相对的特点^[5]。其中,Thornthwaite Memorial模型是在Miami模型的基础上进一步考虑了植物实际蒸散量对植物产量的影响,其测算结果相比Miami模型更加符合实际。同时,该模型所需参数相对较少,测算精度较高,且操作较为简便,适用于中观和宏观尺度气候生产潜力研究^[5-6]。因此,本文选取Thornthwaite Memorial模型作为测算气候生产潜力的基本模型,具体计算公式如下:

$$E_0 = 300 + 25t + 0.05t^3 \quad (2)$$

$$ET = \frac{1.05p}{\sqrt{1 + \left(\frac{1.05p}{E_0}\right)^2}} \quad (3)$$

$$CCP_CL = 3000 \left(1 - e^{-0.0009695(ET - 20)}\right) \quad (4)$$

式中: E_0 为年均最大蒸散量(mm); t 为年平均气温(℃); ET 为年实际蒸散量(mm); p 为年降水量(mm); CCP_CL 为气候生产潜力[g/m²·a]。

本文通过构建耕地气候生产潜力总量,揭示河

南省耕地气候生产潜力总量的状况,具体计算公式为:

$$TCCP_CL = CCP_CL \times S \quad (5)$$

式中:TCCP_CL为耕地气候生产潜力总量(t);S为耕地面积(hm²)。

同时,本文构建耕地气候资源利用率指数,用耕地实际产量与耕地气候生产潜力之间的比值反映耕地气候生产潜力的实现程度^[15]。具体计算公式:

$$R = \frac{AGP}{CCP_CL} \quad (6)$$

式中:R为耕地气候资源利用率(%);AGP为作物平均产量(kg/hm²);CCP_CL为气候生产潜力(kg/hm²)。为了从多维度揭示耕地气候资源利用率,本文从耕地粮食作物(具体包括夏粮、秋粮、谷物、豆类)总体视角和主要粮食作物(小麦、玉米、大豆)两个维度,分别计算粮食作物平均产量,测算耕地气候资源利用率和主要粮食作物气候资源利用率。

3.3 趋势分析与显著性检验

本文综合采用 Theil-Sen 趋势分析和 Mann-Kendall 统计检验两种方法,分析河南省耕地气候生产潜力变化趋势,并对其显著性进行检验。Theil-Sen 趋势分析是一种稳健程度较高的非参数统计趋势分析方法,对于数据的分布状态无特殊要求,且能够较好地剔除数据序列中的异常值,已经广泛应用于长时间序列的趋势分析^[21]。Theil-Sen 趋势分析的具体计算公式如下:

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

式中: β 为斜率;median为取中值的函数; x_i 和 x_j 分别为第*i*年和第*j*年的耕地气候生产潜力数值。当 $\beta > 0$ 时,表示耕地气候生产潜力呈现增加趋势;当 $\beta = 0$ 时,表示耕地气候生产潜力无发生变化;当 $\beta < 0$ 时,表示耕地气候生产潜力呈现减少趋势。

Mann-Kendall 统计检验是一种非参数检验方法,常用于长时间序列变化趋势的显著性检验,广泛应用于气象、水文、植被、农业等研究^[21]。Mann-Kendall 统计检验需要以 x_1, x_2, \dots, x_n 时间序列为基础,构建统计变量S的计算公式:

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

式中:sgn为符号函数,具体计算公式为:

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

使用检验统计量Z对耕地气候生产潜力变化趋

势进行检验,Z统计量的计算公式为:

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

式中:var(S)为方差。

同时,本文采用双边趋势检验方法,对计算结果进行显著性检验。具体而言,在给定显著性水平 α 下,通过查阅正态分布表确定临界值 $Z_{1-\alpha/2}$,同时明确其显著性程度:当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ 时,表明拒绝原假设,数据序列存在明显的趋势;当 $|Z| \leq Z_{1-\alpha/2}$ 时,表明接受原假设,数据序列无明显变化趋势。本研究给定的 $\alpha = 0.05$,具体的临界值为 ± 1.96 ,当 $|Z|$ 大于1.65,1.96,2.58时,表示变化趋势分别通过了90%,95%和99%的显著性检验^[21-22]。

3 结果与分析

3.1 气候要素的时空变化特征

由图1可知,1990—2023年河南省温度和降水空间分布总体呈现显著的区域差异性。从温度来看,1990—2023年温度为5.57~16.79℃,均值为15.19℃,低值区主要分布于三门峡市、洛阳市以及南阳市西北部等区域,高值区主要分布于南阳市南部和信阳市等区域。1990—2000年、2000—2010年和2010—2023年温度均值与1990—2023年温度均值空间具有较高相似性,但其温度分别为5.18~16.33℃,5.75~16.88℃和5.74~17.09℃,均值分别为14.71℃,15.25℃和15.49℃,表明1990—2023年河南省以10a为期限的温度均值总体呈现稳步增加的趋势。从降水来看,1990—2023年降水量范围为556.90~1490.31mm,均值为779.05mm,总体呈现由南向北依次递减的趋势,低值区主要分布于焦作市、新乡市、安阳市、鹤壁市和濮阳市等区域,高值区主要分布于南阳市。1990—2000年、2000—2010年和2010—2023年降水量均值与1990—2023年降水量均值空间具有较高相似性,但其降水量范围分别为531.86~1459.42mm,544.42~1530.23mm和575.88~1494.47mm,均值分别为763.82mm,812.10mm和778.78mm,表明1990—2023年河南省以10a为期限的降水量均值总体呈现先增加后降低的趋势。由此可知,1990—2023年河南省温度和降水具有较为显著的时空差异性,从空间上总体呈现由北向南依次递增的趋势,从时间上以10a为期限的均值分别呈现稳步增加和先增加后降低的趋势。

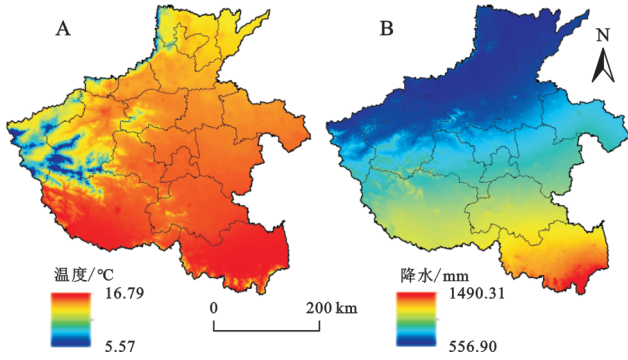


图1 1990—2023年河南省温度均值和降水均值空间分布
Fig. 1 Spatial distribution of average temperature and precipitation in Henan Province (1990—2023)

3.2 耕地气候生产潜力空间分布特征

3.2.1 耕地气候生产潜力时间变化特征 由图2可知,1990—2023年河南省耕地气候生产潜力呈现波动增加的趋势,由1990年的 $13\ 003.54\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 增加到2023年的 $13\ 368.79\ \text{kg}/\text{hm}^2$,最低值年份为2001年 $10\ 531.73\ \text{kg}/\text{hm}^2$,最高值年份为2003年的 $14\ 058.20\ \text{kg}/\text{hm}^2$,多年均值为 $12\ 599.93\ \text{kg}/\text{hm}^2$,变异系数为6.69%。从不同时段来看,1990—2000年、2000—2010年、2010—2020年和2020—2023年耕地气候生产潜力均值分别为 $12\ 308.94\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $12\ 784.26\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $12\ 649.93\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $13\ 269.70\ \text{kg}/\text{hm}^2$,呈现先增加后减少再增加的趋势,其中,1990—2000年和2000—2010年各时段不同年份的耕地气候生产潜力的变异系数分别为7.35%和7.15%,相比2010—2020年和2020—2023年具有较高的变异性,其变异系数分别为4.99%和5.38%。

从各年耕地气候生产潜力的变异程度来看,1990—2023年变异系数均值为9.86%,最高值年份为1997年,耕地气候生产潜力范围为 $7\ 695.56\sim 14\ 398.00\ \text{kg}/\text{hm}^2$,变异系数为15.83%,最低值年份为2023年,耕地气候生产潜力范围为 $10\ 053.00\sim 15\ 862.70\ \text{kg}/\text{hm}^2$,变异系数为8.68%。由图2可知,1990—2010年各年耕地气候生产潜力变异系数波动程度较大,各年耕地气候生产潜力变异系数均值为10.36%,相比2010—2023年各年耕地气候生产潜力变异程度要高,其变异系数均值为9.06%。总体而言,1990—2023年河南省耕地气候生产潜力呈现波动增加的趋势,多年均值为 $12\ 599.93\ \text{kg}/\text{hm}^2$,但各年耕地气候生产潜力变异系数呈现波动降低的趋势,且2010—2023年各年耕地气候生产潜力变异程度明显低于1990—2010年各年耕地气候生产潜力变异程度。

3.2.2 耕地气候生产潜力空间变化特征 1990—2023年河南省耕地气候生产潜力具有显著的空间差异性,总体呈现南高北低的特点(图3)。耕地气候生产潜力多年均值变化范围为 $9\ 655.25\sim 16\ 294.90$

kg/hm^2 ,高值区主要分布于南阳市、驻马店市和信阳市等区域,低值区主要分布于河南省西北部和北部等区域。以1990年、2000年、2010年、2020年和2023年为例,各年份耕地气候生产潜力总体呈现由北向南依次递增的趋势,但各年耕地气候生产潜力空间分布具有一定的差异性。1990年耕地气候生产潜力高值区主要分布于信阳市,低值区主要分布于三门峡市、济源市和洛阳市西北部等区域,均值为 $13\ 003.54\ \text{kg}/\text{hm}^2$,变异系数为7.53%;2000年耕地气候生产潜力高值区主要分布在南阳市、驻马店市和信阳市等区域,低值区主要分布于济源市、新乡市、鹤壁市、安阳市和濮阳市等区域,均值为 $13\ 465.91\ \text{kg}/\text{hm}^2$,变异系数9.92%;从2010—2020年再到2023年,耕地气候生产潜力高值区主要分布于南阳市、驻马店市和信阳市等区域,而低值区呈现由河南省北部地市向中部地市扩展的趋势,3个年份耕地气候生产潜力均值分别为 $12\ 825.86\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $13\ 563.87\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $13\ 368.79\ \text{kg}/\text{hm}^2$,变异系数分别为9.08%、11.20%和8.68%。总体而言,1990—2023年河南省耕地气候生产潜力总体呈现南高北低的特点,但1990年、2000年、2010年、2020年和2023年各年耕地气候生产潜力空间分布状况略有差异。

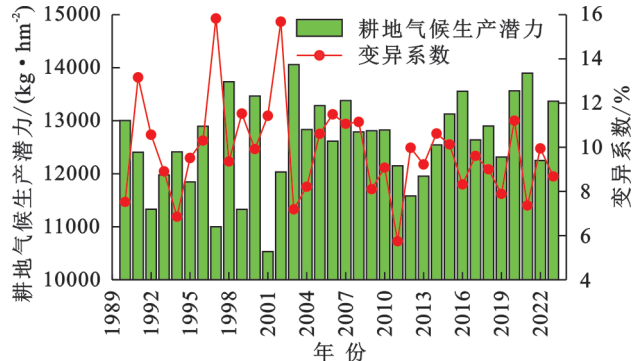


图2 1990—2023年河南省耕地气候生产潜力均值与变异系数

Fig. 2 Average climatic production potential and coefficient of variation of cultivated land in Henan Province (1990—2023)

由图4可知,河南省耕地气候生产潜力的变异系数范围为0.03~0.10,均值为0.072,表明河南省1990—2023年耕地气候生产潜力具有一定的波动性。借助ArcGIS软件平台,基于自然断点法将变异系数以0.058,0.070,0.75,0.085为界将变异系数划分为5个等级,即将耕地气候生产潜力划分为低度波动、较低波动、中度波动、较高波动和高度波动。河南省耕地气候生产潜力为中度波动的面积最大,其面积比例为32.56%,主要分布于河南省中部和东部等区域;较低波动和较高波动的面积相差不大,面积比例分别为

23.77%和20.95%,其中,较低波动主要分布于河南省中西部和南部等区域;较高波动主要分布于河南省西北部、中北部和东北部等区域;高度波动的面积比例为15.58%,主要分布于河南省北部;低度波动面积最小,其面积比例为7.14%,主要分布于南阳市西南部

和信阳市南部等区域。总体而言,河南省耕地气候生产潜力以较低波动、中度波动和较高波动为主,面积比例共为77.28%,广泛分布于河南省东部、中部和西部等区域,低度波动和高度波动面积比例相对较小,主要分布于河南省南部和北部等区域。

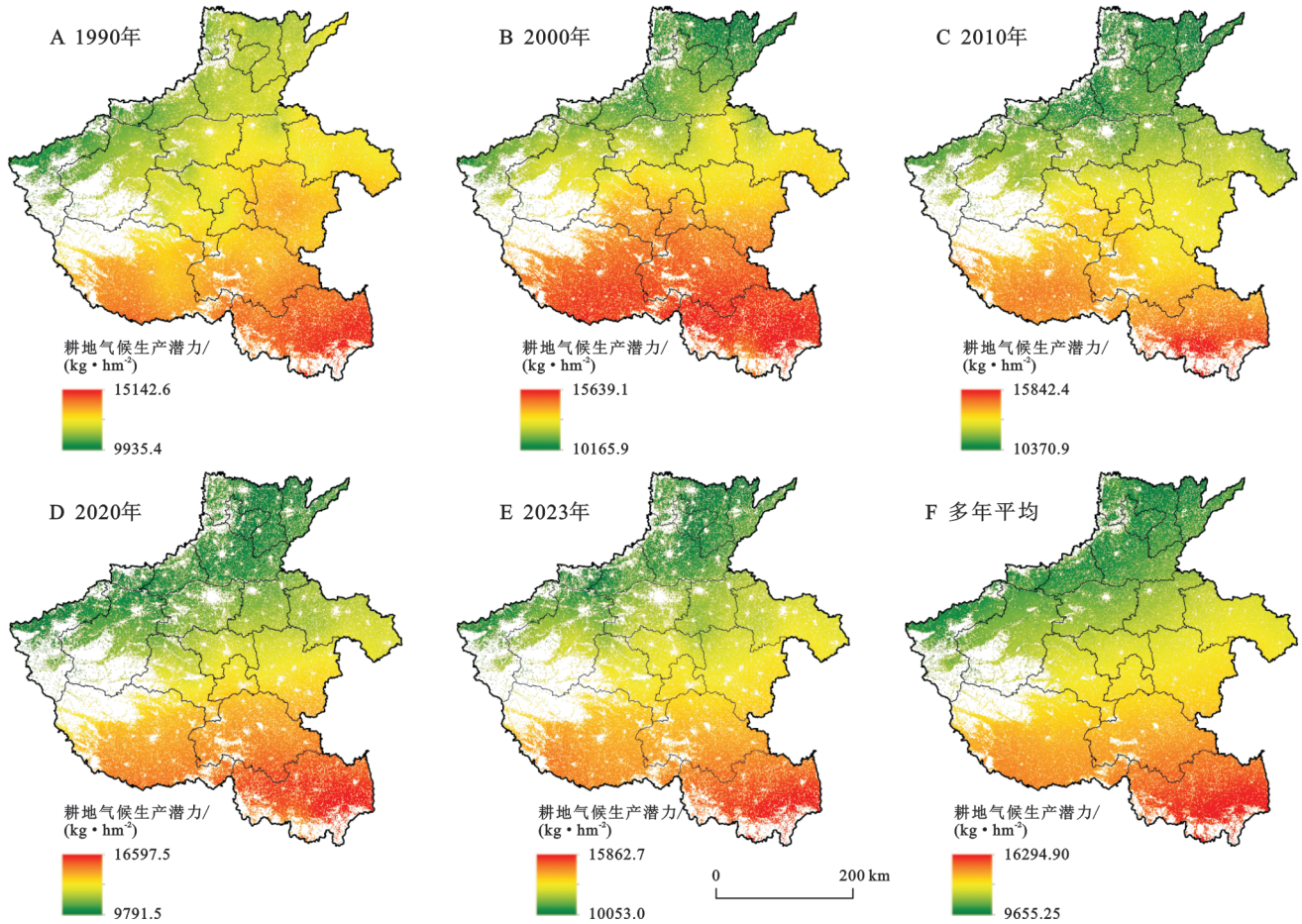


图3 河南省1990—2023年典型年份和多年平均耕地气候生产潜力空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of climatic production potential of cultivated land in typical years and multi-year average in Henan Province (1990—2023)

3.3 耕地气候生产潜力利用基本特征

3.3.1 耕地气候生产潜力总量变化特征 由图5可知,1990—2023年耕地气候生产潜力总量由1990年的1.56亿t变化为2023年的1.43亿t,多年均值为1.43亿t,变异系数为6.60%,最高值为2003年的1.62亿t,最低值为2001年的1.23亿t,以年份为横轴(x)和耕地气候生产潜力总量(y)为纵轴拟合的曲线为 $y = -0.00222x + 5.88523$ ($R^2 = 0.0252$),在一定程度上可反映河南省耕地气候生产潜力总量呈现波动降低的趋势。从各时段耕地气候生产潜力总量来看,1990—2000年和2000—2010年耕地气候生产潜力总量均值分别为1.46亿t和1.47亿t,均略高于1990—2023年耕地气候生产潜力总量年均值,但1990—2000年和2000—2010年各年份耕地气候生产潜力总量的变异系数分别为7.19%和7.02%,表明该时段内

各年份耕地气候生产潜力总量具有较高的变异性;2010—2020年耕地气候生产潜力总量均值为1.39亿t,低于1990—2023年耕地气候生产潜力总量年均值,且2010—2020年各年份耕地气候生产潜力总量的变异系数为4.45%,表明该时段内各年份耕地气候生产潜力总量具有较低的变异性;2020—2023年耕地气候生产潜力总量均值等于1990—2023年耕地气候生产潜力总量年均值,且该时段各年份耕地气候生产潜力总量的变异系数为4.57%,表明该时段内各年份耕地气候生产潜力总量具有较低的变异性。总体而言,1990—2023年河南省耕地气候生产潜力总量呈现波动降低的趋势,但不同时段耕地气候生产潜力总量的均值及其变异系数具有一定的差异性。

3.3.2 耕地气候资源利用率变化的特征 由图6可知,河南省耕地气候资源利用率和主要粮食作物气

候资源利用率变化具有较为显著的差异性。从耕地气候资源利用率来看,1990—2023年河南省耕地气候资源利用率总体呈现波动增加的趋势,由1990年的27.22%增加到2023年的45.94%,多年均值为40.26%,变异系数为17.84%。从不同时段来看,1990—2000年、2000—2010年和2010—2023年耕地气候资源利用率的多年均值分别为32.62%,39.58%和46.56%,且各时段不同年份耕地气候资源利用率的变异系数呈现依次降低的趋势,其值分别为14.17%,12.74%和5.48%,表明河南省耕地气候资源利用率的波动性程度有所降低。

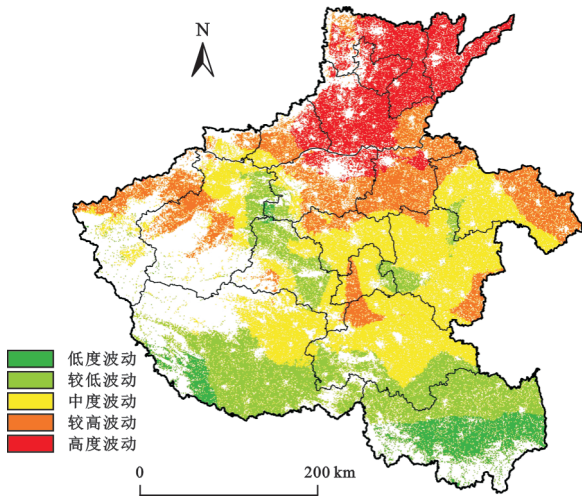


图4 1990—2023年河南省耕地气候生产潜力空间变异程度
Fig. 4 Spatial variation of climatic production potential of cultivated land in Henan Province (1990—2023)

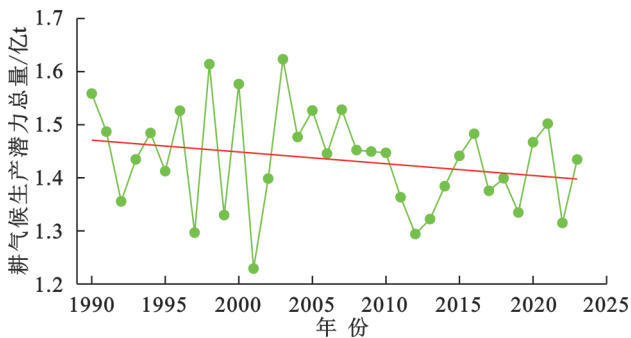


图5 河南省耕地气候生产潜力总量变化趋势与拟合曲线
Fig. 5 Variation trend and fitting curve of total climatic production potential of cultivated land in Henan Province

从主要粮食作物气候资源利用率来看,1990—2023年小麦、玉米和大豆的气候资源利用率总体呈现波动增加的趋势,其多年均值分别为41.84%,41.08%和14.15%,变异系数分别为19.55%,14.17%和22.92%。从不同时段来看,1990—2000年、2000—2010年和2010—2023年小麦的气候资源利用率分别为32.64%,41.29%和49.19%,各时段的变异系数分别为16.83%,11.04%和5.22%,表明河南省小麦气候资源利用率呈现波动增加的趋势,且各时段波动程度

有所降低;1990—2000年、2000—2010年和2010—2023年玉米的气候资源利用率分别为37.46%,40.29%和44.35%,各时段的变异系数分别为10.96%,17.96%和7.73%,表明2010—2023年玉米气候资源利用率的波动性相对其他时段大幅度降低;1990—2000年、2000—2010年和2010—2023年大豆的气候资源利用率分别为13.67%,13.40%和15.23%,各时段的变异系数分别为17.26%,24.26%和23.19%,这不仅表明大豆的气候资源利用率在2000—2010年略微有所降低,而且也显示大豆的气候资源利用率在2000—2010年和2010—2023年两个时段均具有较高的波动性。总体而言,河南省耕地和主要粮食作物的气候资源利用率均呈现稳步增加的趋势,但不同时段耕地和主要粮食作物的气候资源利用率具有较为显著的差异性,且各年份耕地气候资源利用率的变异程度有所不同。

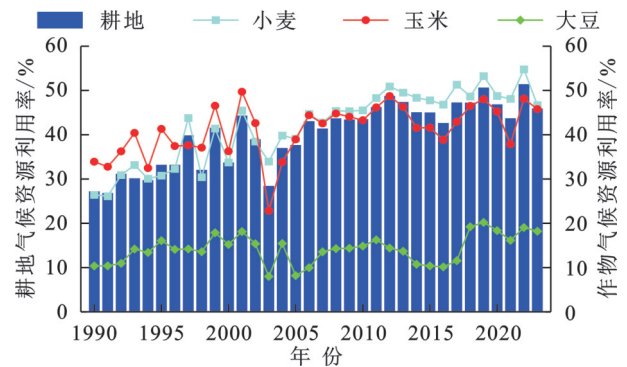


图6 河南省耕地和主要粮食作物的气候资源利用率
Fig. 6 Climatic resource utilization rate of cultivated land and major grain crops in Henan Province

3.4 耕地气候生产潜力变化趋势分析

本文综合运用 Theil-Sen 趋势分析和 Mann-Kendall 统计检验方法揭示河南省耕地气候生产潜力的变化趋势,并将其变化趋势划分为极显著增加、显著增加、微显著增加、不显著增加、不显著、不显著减少、微显著减少、显著减少和极显著减少 9 种类型^[21]。由表 1 和图 7 可知,河南省耕地气候生产潜力以不显著增加为主,面积占比为 72.07%,广泛分布于河南省中部、东部、中北部、中南部等区域;其余各变化趋势类型的面积比例均在 10% 以下,其中,显著增加、微显著增加和极显著减少的面积比例相对较大,其面积比例分别为 8.62%,7.60% 和 6.47%。显著增加主要分布于河南省北部、西部和东南部等区域;微显著增加主要分布于安阳市、济源市、焦作市、洛阳市、南阳市和信阳市等区域;极显著减少零星分布于各个地市,但多集中分布于城市周边,如郑州市、洛阳市、开封市和安阳市等周边区域。极显著增加面积比例为 2.68%,主要分布于河南省西部区域,主要集中于三门峡市,零星分布于

河南省南部、中部和北部等区域;不显著减少、显著减少和微显著减少的面积比例依次递减,其值分别为 1.28%,0.87% 和 0.40%。总体而言,河南省耕地

气候生产潜力以增加趋势的面积为主,面积比例高达 90.98%,广泛分布于各个地市,呈现减少趋势的面积比例相对较低,零星分布于各个地市。

表 1 河南省耕地气候生产潜力变化趋势

Table 1 Variation trend of climatic production potential of cultivated land in Henan Province

β	Z	趋势类别	趋势特征	通过信度	面积比例/%
$\beta > 0$	$2.58 < Z$	4	极显著增加	99%	2.68
	$1.96 < Z \leq 2.58$	3	显著增加	95%	8.62
	$1.65 < Z \leq 1.96$	2	微显著增加	90%	7.60
	$Z \leq 1.65$	1	不显著增加	—	72.07
$\beta = 0$	Z	0	不显著	—	0.00
$\beta < 0$	$Z \leq 1.65$	-1	不显著减少	—	1.28
	$1.65 < Z \leq 1.96$	-2	微显著减少	90%	0.40
	$1.96 < Z \leq 2.58$	-3	显著减少	95%	0.87
	$2.58 < Z$	-4	极显著减少	99%	6.47

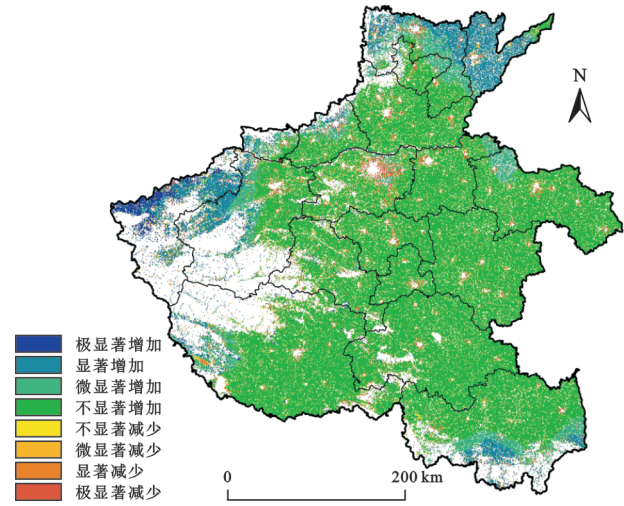


图 7 1990—2023 年河南省耕地气候生产潜力空间变化趋势
Fig. 7 Spatial variation trend of climatic production potential of cultivated land in Henan Province (1990—2023)

4 讨论

本文在气候生产潜力测算的基础上,对耕地气候生产潜力进行分析,以期客观揭示河南省耕地气候生产潜力的时空演变特征。本文选取的时段为 1990—2023 年,共为 34 a,较其他研究相对较短^[2,7],主要是由于本文需要以耕地利用数据为基础,然而,当前缺少长时间序列的耕地利用数据。因此,本文选取当前拥有长时间序列的 CLCD 数据集为基础提取耕地利用数据,以 1990 年为起点,对 1990—2023 年耕地气候生产潜力时空演变特征进行分析。虽然本文选取时段相对较短,但是本文选取时段大于 30 a,符合气象学对气候要素变化规律研究时限的基本要求,也能够较为准确地反映区域气候变化。

本文研究结果显示,1990—2023 年河南省温度

和降水的均值分别为 15.19 °C 和 779.05 mm,与已有研究结果具有较高的相似性^[23],能够在揭示河南省温度和降水时空分布特征的同时,也表明本研究选用基础数据的准确性;同时,本研究结果显示,河南省耕地气候生产潜力多年均值为 12 599.93 kg/hm²,与张志高等^[24]运用 Thornthwaite Memorial 模型测算的 1961—2020 年河南省气候生产潜力均值 12 099.40 kg/hm²的结果基本一致,同时高于罗海平等^[25]运用逐级订正的机制法模型测算的 1981—2015 年我国粮食主产区气候生产潜力均值 9 171.17 kg/hm²,符合河南省作为保障国家粮食安全压舱石的客观实际,同时表明本文结果具有较高的准确性,能够较为客观地揭示河南省耕地气候生产潜力。河南省耕地气候生产潜力空间分布总体呈现由南向北依次递减的趋势,主要原因是河南省温度和降水的空间分布总体呈现由南向北依次递减的趋势,符合客观规律的同时在一定程度上也验证了研究结果的准确性(图 1 和图 3)。此外,本研究得出的耕地气候生产潜力空间分布与马泉来等^[17]得出的 2001—2020 年河南省粮食产量空间分布具有较高的相似性。然而,随着全球气候变化导致温度增加,河南省温度呈现增加趋势,导致河南省气候生产潜力有所增加,使耕地气候生产潜力有所波动,并以较低波动、中度波动和较高波动为主,同时由于河南省北部受到温度的影响较大,此处的耕地气候生产潜力波动性程度最高(图 4)。

耕地作为人与自然交互作用的用地类型,不仅受到自然条件的影响,也受到人文因素的影响^[26]。本文研究结果显示,1990—2023 年河南省耕地气候生产潜力总量均值为 1.43 亿 t,但 1990—2000 年、2000—2010 年、2010—2020 年和 2020—2023 年耕地

气候生产潜力总量呈现波动减少的趋势(图5),除自然因素对耕地气候生产潜力影响外,耕地数量减少是出现此种现象的重要原因(图8)。基于CLCD数据,河南省耕地由1990年的12.00万 km^2 减少到2023年的10.76万 km^2 ,减少比例10.35%,耕地变化区域主要集中于城镇周边,其与我国土地利用变化趋势基本一致^[27]。同时,本文研究结果显示,河南省耕地气候生产潜力超过70%的区域呈现不显著增加的趋势,与耕地利用类型的变化相叠加,特别是郑州市、洛阳市、开封市和安阳市等城市周边耕地减少区域(图6和图7),致使耕地气候生产潜力呈现波动变化的态势。此外,本研究结果显示,1990—2023年河南省耕地气候资源利用率呈现波动增加的趋势,得出的多年均值40.26%与罗海平等^[15]研究结果具有较高的相似性,同时本研究与罗海平等^[15]测算的小麦和玉米的气候资源利用率基本吻合,表明本文研究结果具有较高的准确性。耕地和主要粮食作物的气候资源利用率总体呈现波动增加的趋势,不仅与气候变化有关,也与农业科技投入密切相关^[17]。随着农业科技水平的不断投入,耕地粮食产量的总体呈现波动增加的趋势,粮食产量年际波动性也有所降低,具体反映为1990—2023年耕地和主要粮食作物的气候资源利用率虽有波动,但总体呈现增加趋势,且各时段变异程度有所降低(图5和图6)。

基于本文研究结果,因地制宜地提高耕地气候生产潜力对河南省持续提高耕地粮食产量具有极其重要的作用^[15,17]。一方面,根据河南省温度和降水由南向北依次递减的基本特征,充分发挥光温优势,具体可通过合理调控河南省中北部特别是耕地气候生产潜力高度波动和较高波动等区域的作物布局和种植制度,构建“气候资源—作物需求”精准匹配机制,通过育种技术提升作物对气候胁迫(干旱、高温、低温、洪涝等)的耐受性,进一步适应气候变化,提高作物粮食生产韧性;另一方面,土壤是作物利用气候资源的“载体”,贫瘠或退化的土壤会制约气候生产潜力的发挥,通过土壤改良增强河南省所占范围最大的耕地气候生产潜力不显著增加区的保水保肥能力,降低或消除土壤限制因素对充分发挥耕地气候生产潜力的影响,有效调控郑州市、洛阳市、开封市和安阳市等城市周边优质耕地减少,提升气候资源转化载体能力。因此,未来将充分结合河南省农作物类型,采用适宜的模型评估不同作物的气候生产潜力,以期充分挖掘耕地粮食生产能力提供更加具体的指导。

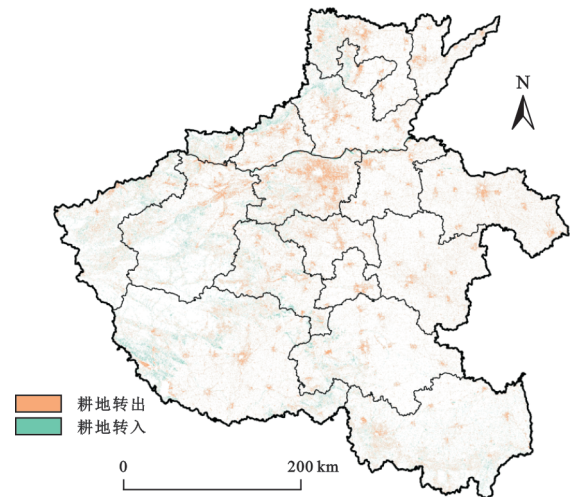


图8 1990—2023年河南省耕地转出和转入的分布特征
Fig. 8 Distribution characteristics of cultivated land transfer-out and transfer-in in Henan Province (1990—2023)

5 结论

(1) 1990—2023年河南省温度均值范围为5.57~16.79 $^{\circ}\text{C}$,多年均值为15.19 $^{\circ}\text{C}$,以10 a为期限的温度均值总体呈现稳步增加的趋势;降水量均值范围为556.90~1490.31 mm,多年均值为779.05 mm,以10 a为期限的降水量均值总体呈现先增加后降低的趋势。

(2) 1990—2023年河南省耕地气候生产潜力呈现波动增加的趋势,由1990年的13003.54 kg/hm^2 增加到2023年的13368.79 kg/hm^2 ,多年均值为12599.93 kg/hm^2 。河南省耕地气候生产潜力具有显著的空间差异性,总体呈现南高北低的特点。河南省耕地气候生产潜力以较低波动、中度波动和较高波动为主,面积比例共为77.28%,广泛分布于河南省中部、东部和西部等区域。

(3) 1990—2023年耕地气候生产潜力总量由1990年的1.56亿t变化为2023年的1.43亿t,年均值为1.43亿t,变异系数为6.60%。1990—2023年河南省耕地和主要粮食作物的气候资源利用率均呈现波动增加的趋势,耕地和小麦、玉米、大豆的气候资源利用率多年均值分别为40.26%,41.84%,41.08%和14.15%,但不同时段耕地和主要粮食作物的气候资源利用率变化具有较为显著的差异性。

(4) 河南省耕地气候生产潜力以增加趋势的面积为主,面积比例高达90.98%,广泛分布于各个地市,其中,以不显著增加为主,面积占比为72.07%,广泛分布于河南省中部、东部、中北部、中南部等区域。不显著减少、显著减少和微显著减少的面积比例依次递减,其值分别为1.28%,0.87%和0.40%。极显

著减少面积占比为6.47%,零星分布于各个地市,但多集中分布于城市周边,如郑州市、洛阳市、开封市和安阳市等周边区域。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate change 2023: Synthesis report[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023.
- [2] 李焱,靳甜甜,高秉丽,等.1901—2017年藏西南高原气候及其生产潜力时空变化[J].自然资源学报,2022,37(7):1918-1934.
Li Y, Jin T T, Gao B L, et al. Spatio-temporal variation of climate and its potential productivity in the Southwest Tibet Plateau during 1901-2017 [J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(7):1918-1934.
- [3] Zuo L J, Zhang Z X, Carlson K M, et al. Progress towards sustainable intensification in China challenged by land-use change[J]. Nature Sustainability, 2018,1(6):304-313.
- [4] 赵慧颖,田宝星,宫丽娟,等.近308年来大兴安岭北部森林植被气候生产潜力及其对气候变化的响应[J].生态学报,2017,37(6):1900-1911.
Zhao H Y, Tian B X, Gong L J, et al. Climate-induced potential productivity of forest vegetation during the past 308 years in northern Da Hinggan Mountain region, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(6):1900-1911.
- [5] 刘泽瑾,焦利民,连喜红.1995—2020年气候变化和耕地利用变化对中国耕地气候生产潜力的影响分析[J].中国土地科学,2022,36(3):62-73.
Liu Z J, Jiao L M, Lian X H. Effects of climate change and cultivated land use change on climatic potential productivity of cultivated land in China from 1995 to 2020 [J]. China Land Science, 2022,36(3):62-73.
- [6] 陈博,李丽光,陈振举.东北三省植被气候生产力的时空变化及对气候变化的响应[J].应用生态学报,2024,35(12):3339-3348.
Chen B, Li L G, Chen Z J. Spatio-temporal variation of climate productivity of vegetation and its responses to climate change in three provinces of Northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35 (12) : 3339-3348.
- [7] 徐雨晴,周波涛,於琰,等.1961—2010年中国气候生产潜力时空格局变化及其潜在可承载人口分析[J].气象与环境学报,2019,35(2):84-91.
Xu Y Q, Zhou B T, Yu L, et al. Climatic potential productivity and population carrying capacity in China from 1961 to 2010 [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2019,35(2):84-91.
- [8] Uchijima Z, Seino H. Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetations [J]. Journal of Agricultural Meteorology, 1985,40(4):343-352.
- [9] 姬兴杰,徐延红,左璇,等.未来气候变化情景下河南省粮食安全气候承载力评估[J].应用生态学报,2020,31(3):853-862.
Ji X J, Xu Y H, Zuo X, et al. Estimating the climatic capacity of food security in Henan Province, China under the future climate change scenarios [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(3):853-862.
- [10] 刘文茹,陈国庆,曲春红,等.RCP情景下长江中下游水稻二熟制气候生产潜力变化特征研究[J].生态学报,2018,38(1):156-166.
Liu W R, Chen G Q, Qu C H, et al. Variations in potential climatic productivity of wheat and rice in the middle and lower reaches of the Yangtze River under RCP scenarios [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(1):156-166.
- [11] 徐雨晴,於琰,周波涛,等.气候变化背景下未来中国气候生产潜力时空动态格局[J].干旱区资源与环境,2019,33(9):72-80.
Xu Y Q, Yu L, Zhou B T, et al. Temporal-spatio dynamic pattern of climatic potential production under the background of climate change in the future in China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019,33(9):72-80.
- [12] 安彬,肖薇薇,张淑兰,等.近58年江西省气候及其生产潜力时空变化特征[J].水土保持研究,2020,27(4):122-127.
An B, Xiao W W, Zhang S L, et al. Spatial and temporal features of climate and its potential productivity in Jiangxi Province during the period 1960-2017 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(4):122-127.
- [13] 徐进勇.中国潜在造林地及其气候生产潜力空间分布估算[J].地理学报,2023,78(3):677-693.
Xu J Y. Estimation of the spatial distribution of potential forestation land and its climatic potential productivity in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78 (3) : 677-693.
- [14] 蔡迪文,刘婉华,谭颖怡,等.基于气候生产潜力基准的2001—2023年新疆草地退化时空特征[J].中国沙漠,2025,45(5):134-144.
Cai D W, Liu W H, Tan Y Y, et al. Spatial-temporal characteristics of grassland degradation in Xinjiang from 2001 to 2023 based on climate production potential baseline [J]. Journal of Desert Research, 2025, 45 (5) : 134-144.
- [15] 罗海平,邹楠,胡学英,等.1980—2019年中国粮食主产区主要粮食作物气候生产潜力与气候资源利用效率[J].资源科学,2021,43(6):1234-1247.
Luo H P, Zou N, Hu X Y, et al. Climatic potential productivity and resources utilization efficiency of major grain crops in the main grain production areas of China,

- 1980—2019[J]. *Resources Science*, 2021, 43(6):1234-1247.
- [16] 李秀芬, 吴双, 赵放, 等. 寒地大豆气候生产潜力特征及其对气候变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(6):1615-1624.
- Li X F, Wu S, Zhao F, et al. Characteristics of soybean climate potential productivity in frigid region and its response to climate change [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(6):1615-1624.
- [17] 马泉来, 吕敏敏, 杨延伟, 等. 河南省耕地粮食生产时空演变及功能分区[J]. *地域研究与开发*, 2024, 43(2):161-167.
- Ma Q L, Lyu M M, Yang Y W, et al. Spatial-temporal evolution of cultivated grain production capacity and functional zoning in Henan Province [J]. *Areal Research and Development*, 2024, 43(2):161-167.
- [18] Peng S. 1-km monthly precipitation dataset for China (1901—2024). National Xizangan Plateau/Third Pole Environment Data Center, 2020.
- [19] Peng S. 1-km monthly mean temperature dataset for China (1901—2024). National Xizangan Plateau/Third Pole Environment Data Center, 2019.
- [20] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8):3907-3925.
- [21] 赵曼宇, 马泉来, 孙晓兵, 等. 河南省黄河流域耕地NPP时空变化特征及其驱动因子[J]. *水土保持通报*, 2025, 45(3):385-396.
- Zhao M Y, Ma Q L, Sun X B, et al. Spatiotemporal variation in NPP of cultivated land and its driving factors in Yellow River Basin of Henan Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2025, 45(3):385-396.
- [22] 杨道涵, 吴静, 李纯斌, 等. 青藏高原土壤热通量估算及时空分布特征[J]. *气候与环境研究*, 2024, 29(2):113-124.
- Yang D H, Wu J, Li C B, et al. Estimation and spatio-temporal distribution of soil heat flux over the Qinghai-Xizangan Plateau [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2024, 29(2):113-124.
- [23] 张志高, 耿益新, 蔡茂堂, 等. 1978—2017年河南省气候生产潜力时空演变及趋势分析[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(6):247-253.
- Zhang Z G, Geng Y X, Cai M T, et al. Spatial-temporal evolution and trend analysis of climatic potential productivity in Henan Province during 1978—2017 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(6):247-253.
- [24] 张志高, 尹纪媛, 郭超凡, 等. 近61年河南省气候生产潜力估算及时空变化特征[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2022, 50(6):53-62.
- Zhang Z G, Yin J Y, Guo C F, et al. Estimation of climatic potential productivity and its spatiotemporal variations in Henan over the past 61 years [J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2022, 50(6):53-62.
- [25] 罗海平, 邹楠, 王圣云. 1981—2015年我国粮食主产区气候生产潜力的时空分异与演化[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(7):1724-1733.
- Luo H P, Zou N, Wang S Y. Spatiotemporal differentiation and evolution of climatic production potential in Chinese major grain area from 1981 to 2015 [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(7):1724-1733.
- [26] 孙晓兵, 孔祥斌, 温良友. 基于耕地要素的耕地质量评价指标体系研究及其发展趋势[J]. *土壤通报*, 2019, 50(3):739-747.
- Sun X B, Kong X B, Wen L Y. Evaluation index system of cultivated land quality and its development trend based on cultivated land elements [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(3):739-747.
- [27] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. *地理学报*, 2014, 69(1):3-14.
- Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1):3-14.