



韩丽冬,沃晓棠,梁素钰,等.基于Miami模型的小兴安岭地区植被气候生产力时空特征研究[J].黑龙江农业科学,2024(12):54-62.

# 基于Miami模型的小兴安岭地区 植被气候生产力时空特征研究

韩丽冬,沃晓棠,梁素钰,张 颀,祝彦杰

(黑龙江省生态研究所,黑龙江 哈尔滨 150081)

**摘要:**为科学诠释气候生产潜力变化规律及其与地形资源配合协调程度、区域差异,基于气候时空序列及DEM数据集,利用气候因子表达农林植被生物量的物理模型,模拟评估北方森林气候敏感区的小兴安岭植被气候生产潜力时空动态。结果表明,1971—2020年,小兴安岭域内北、中、南区气候生产潜力各序列均呈上升趋势(中、南部降水生产潜力除外),各气候生产潜力均为北区较中、南两区(变化较缓且相近)增势显著;不同气候潜力之间差异规律在各区及全域表现一致, $NPP_R$ 最高, $NPP_T$ 次之, $NPP_V$ 最低;蒸散对气候生产潜力的影响占主导地位;小兴安岭地区 $NPP_R$ 、 $NPP_V$ 与高程显著负相关( $P<0.05$ ), $NPP_R$ 与坡度显著正相关( $P<0.05$ ),各气候生产潜力与坡向相关关系均不显著。

**关键词:**小兴安岭地区;植被气候生产力;时空动态

由于温室效应不断积累,导致地气系统吸收与发射的能量不平衡,能量不断在地气系统累积,从而导致温度上升,造成全球气候变暖。伴随着全球变暖进程,气候资源分配格局发生变化,进而诱发植物物候的变化、净初级生产力下降、森林退化等一系列生态问题<sup>[1-2]</sup>。小兴安岭森林生态系统属高纬度北方森林(地处 $45^{\circ}N\sim70^{\circ}N$ 之间),对气候变化高度敏感,变化幅度较全球平均趋势更为剧烈<sup>[3-5]</sup>。小兴安岭地区是我国重点用材林基地,拥有丰富的森林资源,是东北天然的生态屏障,是地区生存发展的重要支柱和自然基础,森林生态系统稳定对维持黑龙江省生态环境的可持续发展有重要作用。随着全球气候变化问题的日益突出,小兴安岭地区森林植被生产力将会如何变化?具体能采取哪些措施保障森林植被?这既是重要的科学问题,也是多方关注的重大现实问题。

植被气候生产潜力是指除气候条件以外的其他条件都得到满足的情况下,由气候资源决定的一定时期内单位面积上的植物生物学产量的最大值,是表征森林生态过程的关键参数和评价森林生态系统可持续发展的一个重要指标<sup>[6-7]</sup>,探究小兴安岭森林生态系统植被生产潜力不但可以揭示森林生态系统生产力与气候要素之间的内在联系,还可以预测生产力的未来发展趋势,有助于回答以上科学问题,可为北方森林小兴安岭地区合

理开发利用气候资源,科学应对气候变化,政府宏观决策等提供科学依据。

目前,众多学者针对气候生产潜力问题给予了一定的关注,研究主要集中在应用不同模型及分析方法针对气候对农作物产量或农业耕地净初级生产潜力的可能影响方面,如小麦<sup>[8-10]</sup>、玉米<sup>[11-12]</sup>等。除农业生态系统,研究还涉及草地等生态系统<sup>[13-14]</sup>。随着研究的不断深入,陆续展开不同生态系统气候生产潜力时空变化特征,如针对平原<sup>[15-16]</sup>、高原<sup>[17]</sup>、山地丘陵<sup>[18-19]</sup>、湿地及江河流域<sup>[20]</sup>、农牧交错带等<sup>[21-22]</sup>。

总体来说,已有研究主要集中在区域农牧业及高原、湿地、河流等生态系统,针对森林生态系统的气候生产潜力相关研究尚少涉及,对气候高度敏感的中国北方森林区植被生产力的研究鲜见报道。因此,本研究在全球变暖的气候变化背景下,基于气候时空序列及DEM数据集,利用气候因子表达自然植被生物量的物理模型,模拟评估北方森林气候敏感区的小兴安岭植被气候生产潜力时空动态,科学诠释气候生产潜力变化规律及其与气候、地形资源配合协调程度、区域差异,可为北方森林科学应对气候变化提供重要数据支持与科学指导,对于提高土地生产力水平、指导森林经营生产、了解气候资源的利用情况、促进社会经济发展都具有重要的理论和现实意义。

收稿日期:2024-06-19

基金项目:黑龙江省科研业务费项目(SCZ2023-02,SCZ2022-06,SCZ2023-06);黑龙江省科研业务费项目基础类竞争项目(CZKYF2022-1-B032)。

第一作者:韩丽冬(1984—),女,博士,副研究员,从事森林生态研究。E-mail:hldruby@163.com。

通信作者:沃晓棠(1976—),女,博士,研究员,从事森林生态研究。E-mail:wtxt200206@163.com。

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区概况

小兴安岭地区位于中国黑龙江省东北部(46°28'N~49°21'N,127°42'E~130°14'E)(图 1),属温带大陆性季风气候。年平均气温 0.4℃,年降水量 630 mm。其北部与俄罗斯隔江相望,是中国

东北边疆的重要门户和天然的生态屏障。全区森林资源丰富,森林覆被率达 72.6%。小兴安岭地区以低山丘陵山地为主,境内山脉呈西北—东南走向,山势和缓,北低南高,呈现北部多台地、宽谷;中部低山丘陵,山势较缓;南部属低山,山势较陡的地形地貌分异特征。



图 1 黑龙江省小兴安岭地区地理位置图

## 1.2 材料

本研究提取小兴安岭域内北(黑河市、嫩江县、孙吴县)、中(逊克县、五大连池市、绥棱县、嘉荫县、庆安县)、南(伊春市、铁力市、萝北县、绥滨县、汤原县、依兰县、巴彦县、通河县、木兰县)分区的地形空间数据,以探究域内各分区植被气候生产潜力及其地形区域分异规律。数据包括研究区行政边界空间矢量数据、数字高程 DEM 数据以及来源于美国国家气候数据中心 NCDC 的气候序列,包括域内辐射的 17 个气象站点近 50 年(1971—2020 年)逐日气温、降水量数据集。

## 1.3 方法

1.3.1 气候生产潜力模型 Miami 模型是从植被的生理生态角度出发,通过计算该区年降水量和平均气温等要素来确定植被生产潜力。有学者通过气象资料将模型进行验证,认为该模型可以应用在自然植被生产潜力研究<sup>[23]</sup>。Miami 模型考虑了温度和降水对作物生产的单独或综合影响,可以用来分析温度和降水分别对气候生产力

的影响。Miami 模型<sup>[24]</sup>的方程如公式(1)~(2):

$$NPP_T = \frac{30\,000}{1 + e^{1.315 - 0.119T}} \quad (1)$$

$$NPP_R = \frac{30\,000}{1 - e^{-0.000\,664R}} \quad (2)$$

式中, $NPP_T$  表示年平均气温决定的气温生产潜力( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ), $NPP_R$  表示年降水量决定的降水生产潜力( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ), $T$  为年平均气温( $^{\circ}\text{C}$ ), $R$  为年降水量( $\text{mm}$ )。

Thornthwaite Memorial 模型是 Miami 模型的演变和延伸,展现植被生产潜力受气候因素变化的影响机理<sup>[20,25]</sup>。Thornthwaite Memorial 模型体现了多种气象要素的综合影响,可以定量表征气候生产潜力与降水、温度和蒸发量之间的关系,被国内外学者广泛应用<sup>[26]</sup>,Thornthwaite Memorial 模型方程如公式(3)~(5):

$$NPP_v = \frac{30\,000}{1 - e^{-0.000\,969\,5(V-20)}} \quad (3)$$

$$V = \frac{1.05}{[1 + (1.05R/L)^2]^{1/2}} \quad (4)$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (5)$$

式中,  $NPP_V$  表示蒸散量决定的植物干物质产量 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ),  $V$  为年平均实际蒸散量 ( $\text{mm}$ ),  $L$  为年平均最大蒸散量 ( $\text{mm}$ )。30 000 是经统计得到的地球自然植物每年在单位面积土地上的最高干物质产量。

根据 Liebig 最小因子定律, 从  $NPP_T$ 、 $NPP_R$ 、 $NPP_V$  中取最小值作为气候生产潜力标准值 ( $NPP_B$ ), 即从三者中挑取同年温度、降水、蒸散生产潜力最小值作为研究地区植被气候生产潜力标准值<sup>[24]</sup>。

1.3.2 气候生产潜力的变化特征分析 线性拟合法是分析模拟气候要素与气候生产潜力随时间的变化趋势<sup>[27]</sup>。通过最小二乘法来计算对气候要素与气候潜力时间序列线性回归系数  $a$ , 并建立一元一次线性回归方程, 得出气候要素的变化趋势,  $a < 0$  时, 说明气候生产潜力呈减小趋势, 反之呈增加趋势, 详见公式(6):

$$\hat{X}_i = aT_i + B \quad (6)$$

式中,  $\hat{X}_i$  为气象要素拟合值;  $T_i$  为时间序列; 回归系数  $a$  和  $B$  由最小二乘法估算, 通常以  $a \times 10$  为气候倾向率, 表示为气候要素每 10 a 的变化速率。气候变化趋势的显著性还需通过  $T$  检验进行判断, 详见公式(7):

$$T = \frac{r}{\sqrt{1-r}} \sqrt{n-2} \quad (7)$$

式中,  $T$  为统计量;  $R$  为相关系数;  $n$  为样本数(个)。  $T$  需服从自由度  $n-2$  的  $T$  分布。在一定的显著性水平  $\alpha$  下, 当  $|T| > T_{(\alpha/2, n-2)}$  时, 则认为气象要素  $X_i$  的变化趋势显著。

1.3.3 气候生产潜力的空间响应分析 为分析地形因子对气候生产潜力的影响及相关性大小, 本研究通过 Pearson 相关分析并绘制散点图分析气候生产潜力的地形空间响应机制, 表达气候生产潜力的高程、坡度、坡向敏感性。

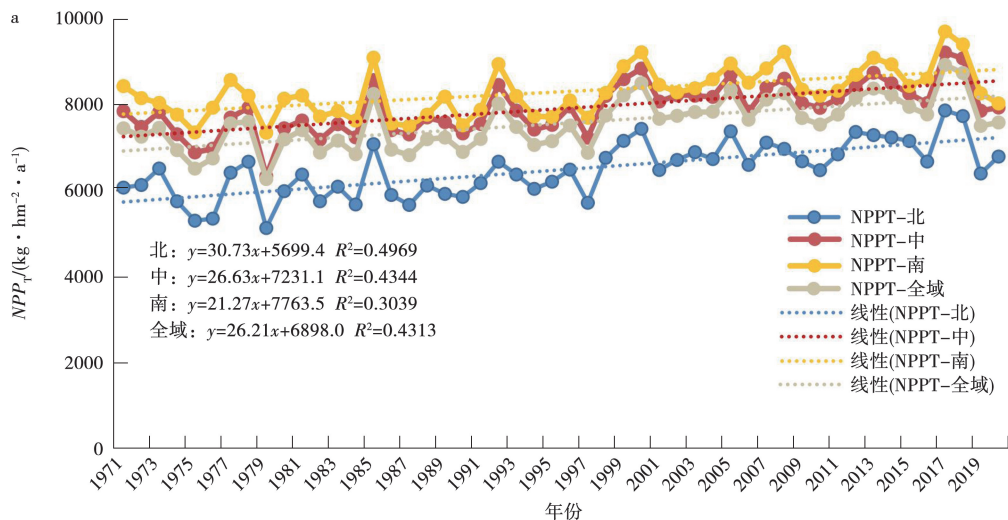
1.3.4 数据分析 本研究采用 Excel 2010 进行数据整理与气候及生产潜力时间序列估算与分析; 采用 SPSS 19.0 软件进行气候生产潜力时间序列趋势拟合、差异显著性分析; 运用地理信息系统软件 ArcGIS 10.2 完成研究区高程、坡度、坡向的空间分析与制图; 采用 Origin pro 2018 软件进行图件分析与绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 各区气候生产潜力序列动态特征

分析小兴安岭不同地形区气候生产潜力趋势特征, 研究结果显示, 1971—2020 年, 北、中、南区气候生产潜力各序列均呈上升趋势(中、南部  $NPP_R$  除外)(图 2)。各气候生产潜力序列趋势性的空间差异均为北区较中、南两区(变化较缓且相近)增势显著( $R^2/NPP_T$ : 1.15 倍~1.44 倍;  $R^2/NPP_R$ : 1.26 倍~4.19 倍;  $R^2/NPP_V$ : 1.74 倍~2.29 倍;  $R^2/NPP_B$ : 1.80 倍~2.55 倍)。

趋势性特征指标(气候潜力倾向率)表现为, 北区最高(中区为 1.27 倍~3.27 倍, 南区为 1.29 倍~3.40 倍), 中区次之(仅  $NPP_R$  中区为南区的 0.70 倍), 南区最低, 全域气候潜力倾向率分别为  $NPP_T$ :  $26.21 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $NPP_R$ :  $7.30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $NPP_V$ :  $14.61 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $NPP_B$ :  $15.73 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。



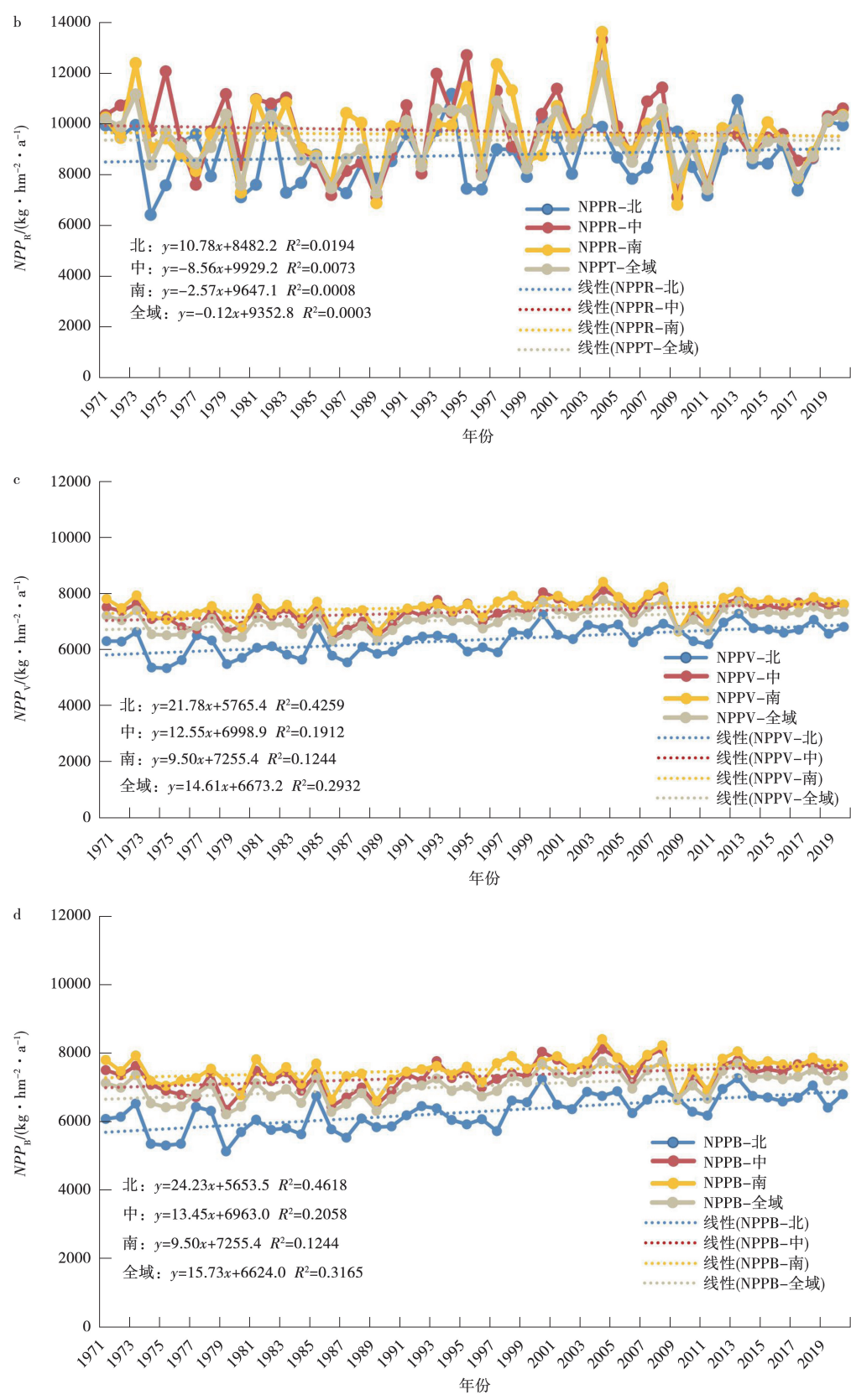


图 2 小兴安岭不同地形区气候生产潜力趋势特征



不同气候潜力之间差异规律各区表现一致。1971—2020年,各区均呈现 $NPP_R$ 最高(时域均值显著高于 $NPP_T$  15.3%~34.0%, $P<0.05$ ,显著高于 $NPP_V$  29.8%~38.4%, $P<0.05$ ), $NPP_T$ 次之, $NPP_V$ 最低的差异规律。

小兴安岭全域,研究时域均值 $NPP_T$ 与 $NPP_V$ 分别占 $NPP_R$ 的79.24%与72.64%,说明气温与蒸散是影响小兴安岭地区气候潜力发挥的主要限制因子,蒸散对气候潜力的影响占主导地位(图3)。

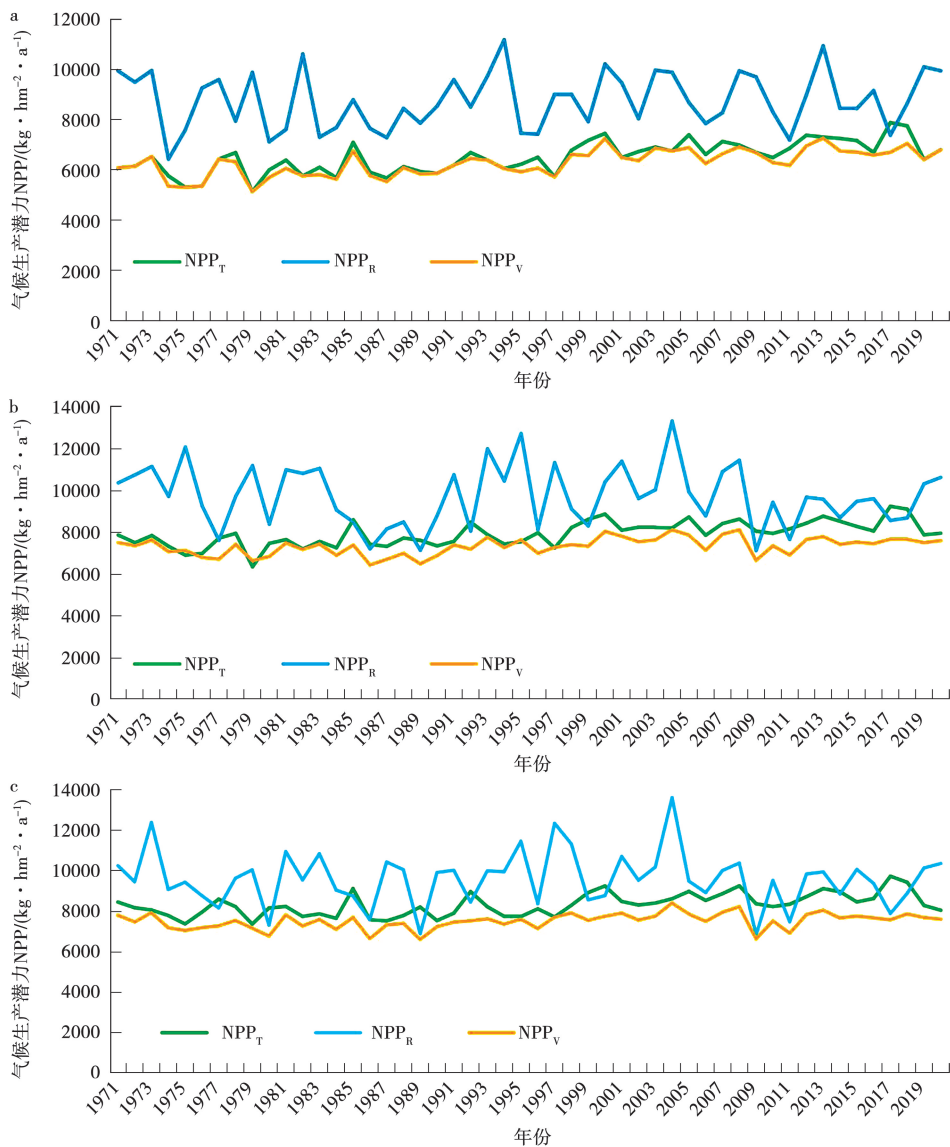


图3 小兴安岭北区(a)、中区(b)、南区(c)不同气候生产潜力差异特征

## 2.2 气候生产潜力的地形空间敏感性分析

2.2.1 各区高程、坡度、坡向 由图4地形空间特征(高程、坡度、坡向)分析显示,小兴安岭地区地势呈东南高、西北低,区域内部高,边缘低的空间格局。南部高山与平地并存,且山势较陡,海拔高差较大,小兴安岭地区海拔高于800m高山均位于南部区域;北部多台地;中部低山丘陵,山势较缓,北、南区海拔高于500m区域面积占比均达

1/4,北、中及南区高程范围分别为90~798m、33~736m及-53~1363m。

依据已有研究中林地坡度分级标准,小兴安岭地区地形坡度分级为3级:平缓坡( $0^{\circ}\sim15^{\circ}$ )、斜陡坡( $16^{\circ}\sim35^{\circ}$ )、急坡( $>36^{\circ}$ )<sup>[28]</sup>。境内由北至南地形坡度随之增加,平均坡度北部最低( $6.11^{\circ}$ ),中部次之( $7.07^{\circ}$ ),南部最高( $8.66^{\circ}$ )。境内地形无急坡,均为平缓坡与斜陡坡,北、中区斜陡坡占

比均较小,分别为 0.03%和 0.06%,二者均显著低于南区(0.13%)。

坡向以度为单位按顺时针方向进行测量,角度范围介于 0°(正北)到 360°(仍是正北,循环一周)之间,阳坡为顺时针方向自南开始至西向的 158°~292°范围,其他为阴坡<sup>[29]</sup>。小兴安岭地区

北、中及南阳坡面积占比差异不明显,分别为北区阳坡占比最高(39.7%),其次为南区(38.2%),中区最低(36.9%)。北、中及南坡向均值分别为 146.96°、145.93°及 133.40°,北、中区坡向均值差异较小,且二者更趋向接近南向,日照强度与时长相对占优势。

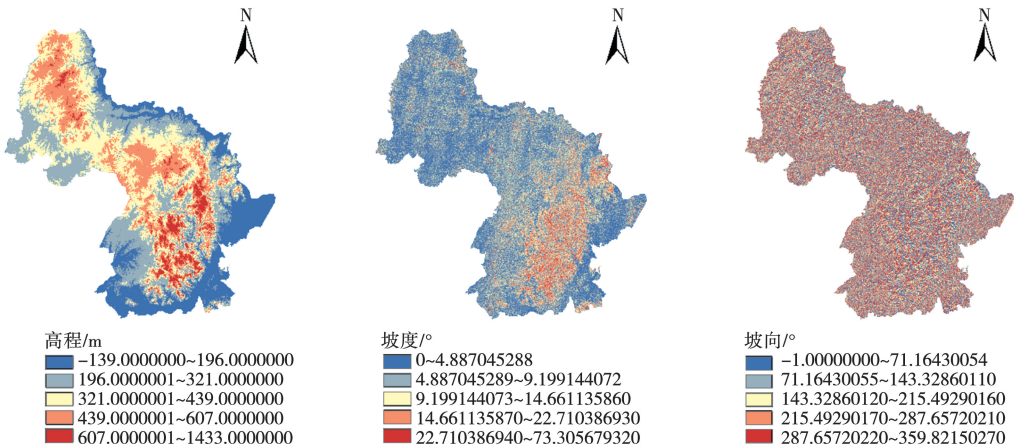


图 4 小兴安岭地区地形因子

2.2.2 地形空间响应分析 小兴安岭地区气候生产潜力与高程、坡度、坡向的关系显示; $NPP_T$ 、 $NPP_R$ 、 $NPP_V$  均与高程呈负相关,其中  $NPP_T$  (气温) 及  $NPP_V$  (蒸散) 生产潜力达显著水平 ( $P<0.05$ ),即随高程海拔的增加,气温、降水及

蒸散气候生产潜力均呈下降趋势;各气候生产潜力与坡度均呈正相关,仅  $NPP_R$  (降水) 生产潜力达显著水平 ( $P<0.05$ ) (图 5),说明降水生产潜力随坡度的增加呈上升趋势;各气候生产潜力与坡向均呈不显著相关关系。

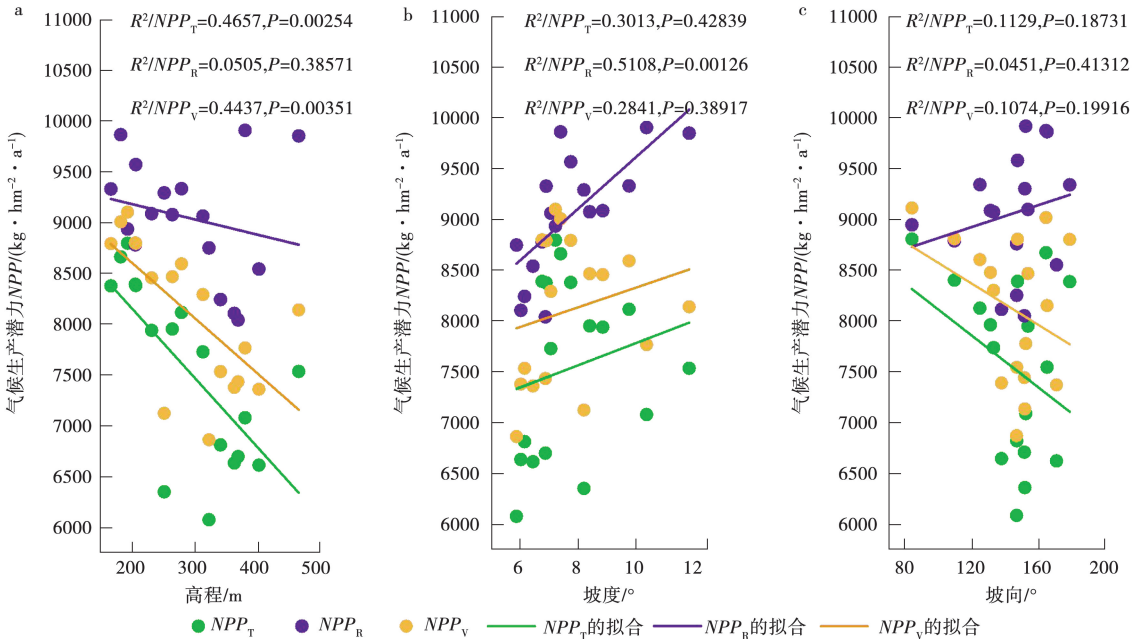


图 5 气候生产潜力与高程、坡度、坡向的关系

## 3 讨论

### 3.1 气候生产潜力趋势性

本研究中小兴安岭各气候生产潜力( $NPP_T$ 、 $NPP_R$ 、 $NPP_V$ 、 $NPP_B$ )年际序列的增加趋势在地形空间上具有统一性。这与田宝星等<sup>[30]</sup>关于黑龙江省 1970—2014 年自然植被气温、降水和蒸散生产潜力变化均呈增加趋势的研究结果相一致。由于本研究区域(小兴安岭)地处黑龙江省境内东北部,与田宝星等<sup>[30]</sup>研究具备相同的自然地理气候环境,且二者运用相同气候潜力模拟模型。这进一步说明,本研究是黑龙江省气候生产潜力相关探索的有力补充和验证,提升了对黑龙江省自然植被气候生产潜力空间分布、变化趋势、周期和突变等规律的科学认识,对高纬度农业、牧业、林业的开发利用和发展规划都有重要意义。

### 3.2 气候生产潜力的地形空间响应

本研究  $NPP_T$ 、 $NPP_R$ 、 $NPP_V$  均与海拔呈负相关,且  $NPP_T$ 、 $NPP_V$  达显著水平( $P < 0.05$ )。针对中国全域、藏西南高原、云南省及西南部等地区气候生产潜力相关研究显示,藏西南高原气候生产潜力呈东南高西北低的空间分布特征;中国气候生产潜力在空间上总体呈现出由西北向东南海拔逐渐降低而逐渐增大的带状分布;云南省气候生产潜力与海拔这一决定气温分布的重要条件呈负相关;西南部气候潜力随着高程的升高而逐渐下降<sup>[31-35]</sup>。上述研究与本研究共同验证了气候生产潜力与海拔的负相关关系。这可能由于海拔是决定气温、降水分布的重要条件,海拔较高、气温较低,气候干燥、降水少,严酷的自然地理条件使得植被不适宜于生产力累积,抑制  $NPP_T$ 、 $NPP_R$ 、 $NPP_V$  的发挥,而海拔相对较低,气候条件较好,草地、森林等植被生长态势好,气候生产潜力则偏高。

本研究地形因子中坡度仅与  $NPP_R$  显著正相关( $P < 0.05$ ),这可能由于较大坡度的山地有促使气流上升的条件,在一定的高度上冷却达到过饱和状态,出现凝结降雨,即地形雨,而坡度较小的地势相对平缓区,地形雨现象较少, $NPP_R$  则较低。高文彬等<sup>[35]</sup>关于西南部气候潜力空间变化分析显示, $NPP_V$  较高的区域主要分布在坡度小于  $25^\circ$  的区域,随着坡度的升高,未形成一定的变化趋势,二者无显著相关关系,本研究  $NPP_V$  与

坡度的正相关同样未达显著水平,这种气候潜力与坡度关系的不确定性可能是由于气温、降水等气候因子除受坡度影响,同时受其他地形、环境等多因子协同调控, $NPP_V$  的发挥是多因素复杂联合作用的结果<sup>[35]</sup>。

本研究各气候潜力与坡向之间无简单相关关系,可能是由于坡向差异等复杂的地形条件,引起光照、温度、湿度、蒸散等生态环境因子复杂的时空变异,直接决定热量和水分的差异,导致研究区域气候生产潜力复杂的变异过程。陈彦清等<sup>[36]</sup>研究显示,国家尺度范围内,坡向与生产潜力不具有明显的相关性( $P > 0.05$ ),这与本研究结果相一致。由于 DEM 数据及数学模型方法的限制,与实际应用存在一定差异,在未来研究中可探索利用可比性、分区域利用更加精细的数据进行局部修正的方法进一步分析坡向对生产潜力的影响。

## 4 结论

1971—2020 年,小兴安岭北、中、南区气候生产潜力各序列均呈上升趋势(中、南部  $NPP_R$  除外),各气候生产潜力均为北区较中、南两区(变化较缓且相近)增势显著;各气候潜力倾向率表现为北区最高,中区次之,南区最低;不同气候生产潜力之间差异规律在各区及全域表现一致, $NPP_R$  最高, $NPP_T$  次之, $NPP_V$  最低;小兴安岭全域,研究时域均值  $NPP_T$  与  $NPP_V$  分别占  $NPP_R$  的 79.24% 与 72.64%,说明气温与蒸散是影响小兴安岭地区气候潜力发挥的主要限制因子,气温对气候潜力的影响占主导地位;小兴安岭地区  $NPP_T$ 、 $NPP_V$  与高程显著负相关( $P < 0.05$ ), $NPP_R$  与坡度显著正相关( $P < 0.05$ ),各气候生产潜力与坡向相关关系均不显著。

### 参考文献:

- [1] BADEA O. Climate change and air pollution effect on forest ecosystems[J]. Forests, 2021, 12(12): 1642.
- [2] MAN Z H, CHE S Q, XIE C K, et al. Effect of climate change on  $CO_2$  flux in temperate grassland, subtropical artificial coniferous forest and tropical rain forest ecosystems[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(24): 13056.
- [3] STOCKER T. Climate change 2013: the physical science basis: working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

- [4] SERREZE M C, WALSH J E, CHAPIN F S, et al. Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment[J]. *Climatic Change*, 2000, 46 (1): 159-207.
- [5] BALLING R C JR, MICHAELS P J, KNAPPENBERGER P C. Analysis of winter and summer warming rates in gridded temperature time series[J]. *Climate Research*, 1998, 9: 175-181.
- [6] 徐雨晴,肖风劲,於琰. 中国森林生态系统净初级生产力时空分布及其对气候变化的响应研究综述[J]. *生态学报*, 2020, 40(14): 4710-4723.
- [7] 程颖,刘鸿雁,王红亚,等. 中全新世以来中国中部高山植被生产力和土壤侵蚀演变的古生态学证据[J]. *中国科学:地球科学*, 2021, 51(12): 2140-2149.
- [8] 赵军,王玉纯,党国锋,等. 基于净初级生产力的春小麦生产潜力及估产研究:以甘肃省白银区为例[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(1): 199-204.
- [9] 李国强,陈丹丹,张建涛,等. 基于 DSSAT 模型的河南省小麦生产潜力定量模拟与分析[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36 (4): 507-515.
- [10] LOBELL D B, SIBLEY A, IVAN ORTIZ-MONASTERIO J. Extreme heat effects on wheat senescence in India[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2: 186-189.
- [11] 高军波,楚冰洋,闫军辉,等. 1960 年以来河南省玉米气候生产潜力估算与种植空间优化[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(1): 245-254.
- [12] 李秀芬,赵慧颖,朱海霞,等. 黑龙江省玉米气候生产力演变及其对气候变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2016, 27 (8): 2561-2570.
- [13] 刚成诚,王钊钊,杨悦,等. 近百年全球草地生态系统净初级生产力时空动态对气候变化的响应[J]. *草业学报*, 2016, 25(11): 1-14.
- [14] TIAN J, XIONG J N, ZHANG Y C, et al. Quantitative assessment of the effects of climate change and human activities on grassland NPP in Altay prefecture [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2021, 12(6): 743-756.
- [15] 杜国明,马敬盼,张露洋,等. 近 50 年气候驱动下三江平原粮食生产潜力时空演变分析[J]. *水土保持研究*, 2018, 25 (2): 361-366.
- [16] 杜国明,张露洋,徐新良,等. 近 50 年气候驱动下东北地区玉米生产潜力时空演变分析[J]. *地理研究*, 2016, 35(5): 864-874.
- [17] 赵雪雁,王伟军,万文玉,等. 近 50 年气候变化对青藏高原青裸气候生产潜力的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(10): 1329-1338.
- [18] 庞艳梅,陈超,潘学标,等. 未来气候变化对四川盆地玉米生育期气候资源及生产潜力的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(12): 1526-1536.
- [19] 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.
- [20] 赵慧颖,顾润源,白晓慧,等. 气象水文因子对呼伦湖湿地区域植物气候生产潜力的影响[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(6): 997-1003.
- [21] LI Y, WANG X, YANG Y, et al. Analysis of corn climatic potential productivity change in the West Liao River Basin[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39(2): 239-247.
- [22] ZHAO Y, HE C, LI X, et al. Impacts of land use and climate change on cultivated land potential productivity in farming-pastoral zone of North China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(1): 123-135.
- [23] 赵俊芳,孔祥娜,姜月清,等. 基于高时空分辨率的气候变化对全球主要农区气候生产潜力的影响评估[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(1): 1-6.
- [24] LIETH H. Modeling the primary productivity of the world [M]//LIETH H, WHITTAKER R H, eds. *Ecological Studies*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1975: 237-263.
- [25] 罗永忠,成自勇,郭小芹. 近 40a 甘肃省气候生产潜力时空变化特征[J]. *生态学报*, 2011, 31(1): 221-229.
- [26] UCHIJIMA Z, SEINO H. Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetations[J]. *Journal of Agricultural Meteorology*, 1985, 40(4): 343-352.
- [27] ANDERSON-TEIXEIRA K J, HERRMANN V, ROLLINSON C R, et al. Joint effects of climate, tree size, and year on annual tree growth derived from tree-ring records of ten globally distributed forests[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(1): 245-266.
- [28] 郭艳荣,刘洋,吴保国. 福建省宜林地立地质量的分级与数量化评价[J]. *东北林业大学学报*, 2014, 42(10): 54-59.
- [29] 史永纯,宋林,梁晶,等. 坡位和坡向对长白落叶松纸浆材材性的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2011, 39(7): 30-31, 41.
- [30] 田宝星,宫丽娟,杨帆,等. 气候变化对黑龙江省自然植被气候生产潜力的影响[J]. *农学学报*, 2021, 11(3): 60-67.
- [31] 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.
- [32] 宫丽娟,刘丹,赵慧颖,等. 西辽河地区植被气候生产潜力及其对气候变化的响应[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(5): 866-875.
- [33] 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.
- [34] 李振杰,段长春,金莉莉,等. 云南省气候生产潜力的时空变化[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(7): 2181-2190.
- [35] 高文彬,江东,杨小唤. 遥感数据驱动的耕地生产潜力模型与应用[J]. *地理科学进展*, 2009, 28(4): 597-602.
- [36] 陈彦清,杨建宇,鄢文聚,等. 国家尺度上基于地形因子的光温及气候生产潜力修正算法[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(11): 2082-2092.



# Spatiotemporal Dynamic Characteristics of Vegetation Climate Productivity in Xiaoxing'an Mountains Area Based on Miami Model

HAN Lidong, WO Xiaotang, LIANG Suyu, ZHANG Di, ZHU Yanjie

(Heilongjiang Ecological Institute, Harbin 150081, China)

**Abstract:** In order to scientifically interpret the variation rules of climate production potential, the degree of coordination with topographic resources and regional differences, based on climate spatio-temporal series and DEM data set, the physical model of agricultural and forestry vegetation biomass was expressed by climate factors to simulate and evaluate the spatio-temporal dynamics of vegetation climate production potential in the Xiaoxing'an Mountains in the climate-sensitive areas of northern forests. The results showed that from 1971 to 2020, the climate production potential of the north, central and south regions all showed an upward trend (except the  $NPP_R$  precipitation production potential of the central and south regions), and the climate production potential of the north region increased significantly than that of the central and south regions (with slower but similar changes). The difference law of different climate production potential was consistent in all regions and the whole region.  $NPP_R$  was the highest, followed by  $NPP_T$ , and  $NPP_V$  was the lowest. The influence of evapotranspiration on climate production potential was dominant.  $NPP_R$  and  $NPP_V$  were significantly negatively correlated with elevation ( $P < 0.05$ ),  $NPP_R$  was significantly positively correlated with slope ( $P < 0.05$ ), and the correlation between climate production potential and slope direction was not significant.

**Keywords:** Xiaoxing'an Mountains Region; vegetation climate production potential; spatial and temporal dynamics

## 协办单位

黑龙江省作物学会

黑龙江省农业科学院水稻研究所

黑龙江省农业科学院克山分院

黑龙江省农业科学院黑河分院

黑龙江省农业科学院绥化分院

黑龙江省农业科学院佳木斯分院

黑龙江省农业科学院牡丹江分院