

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.03.016

呼伦贝尔沙地樟子松生产力及其对气候因子的响应

牛进松^{1,2,3}, 刘小粉¹, SeMyung Kwon⁴, 潘磊磊⁴, 时忠杰^{2,3},
杨晓晖^{2,3}, 张 晓^{2,3*}, 张日升⁵

(1. 河北工程大学园林与生态工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091; 3. 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 北京 100093; 4. 韩国公州国立大学生态修复学院, 忠清南道 32439; 5. 辽宁省沙地治理与利用研究所, 辽宁 阜新 123000)

摘要: [目的] 森林在减缓温室气体浓度和气候变化方面发挥着巨大作用, 研究不同密度下林分生产力及其对气候的响应有助于森林生态系统的功能评估及适应性管理。[方法] 本研究利用树木年轮学方法得到了呼伦贝尔沙地不同密度(用林分胸高断面面积表示)的天然樟子松林净初级生产力, 并结合气象因子分析其对温度、降水及干旱指数的响应。[结果] 表明: 胸高断面面积为 8.83、21.94、24.28、32.36 和 34.9 m²·hm⁻² 的樟子松林的多年平均净初级生产力分别为 1.17、2.99、3.55、4.69 和 4.86 t·hm⁻²·a⁻¹, 随样地密度增加而增加; 高密度樟子松林净初级生产力与上年 7 月和当年 9 月平均气温及平均最高气温显著正相关 ($P < 0.05$); 5 月降水是天然樟子松林净初级生产力的关键限制因子, 所有密度林分的净初级生产力均与当年 5 月降水显著正相关 ($P < 0.05$); 自上年 11 月至当年 7 月, 净初级生产力与帕默尔干旱胁迫指数 (PDSI) 的相关系数随林分密度增加而减小, 表明林分竞争的增加导致了净初级生产力对 PDSI 敏感性的降低。[结论] 林分密度对呼伦贝尔沙地天然樟子松的净初级生产力及其气候响应存在明显影响, 密度调整可能是气候变化下森林适应性管理的关键措施。

关键词: 樟子松; 生物量; 净初级生产力; 气候响应; 密度

中图分类号: S781.45

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2022)03-0141-10

最新发布的第六次气候变化评估报告显示, 2019 年大气 CO₂ 浓度高达 410 ppm, 是工业化前的 148%, 人类活动与气候变化导致全球地表温度进一步升高, 2011—2020 年地表温度比 1850—1900 年升高 1.09 °C^[1]。森林覆盖全球陆地面积的 30.6%, 是陆地生态系统中最大的碳库, 在缓解 CO₂ 浓度升高和全球变暖方面发挥着重要作用^[2-3]。森林净初级生产力是植物在扣除自身呼吸后, 剩余的单位面积单位时间的有机物增量, 能够表示森林的碳汇功能, 因此, 研究森林中主要植被的生物量和净初级生产力及其与气候间的关系, 有助于评估

森林生态系统的固碳功能, 并预测未来气候变化下该系统的功能稳定性。

目前, 森林净初级生产力及碳储量的估算方法主要包括: 基于森林清查资料的估算方法、遥感反演法及模型模拟法等^[4], 但这些方法均难以获取树木生长历史中长时间序列的生物量及生产力, 树木年轮方法利用年轮宽度得到逐年胸径, 并与生物量方程结合, 能够得到树木整个生长历史中的生物量及净初级生产力, 因此, 树木年轮法在研究植被的净初级生产力及其气候响应中具有较大的优势且已有较多的应用, 如于健等^[5]分析了长白山红松

收稿日期: 2021-10-18 修回日期: 2021-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32071558、41701249、32061123005、32001372); 国家重点研发计划课题 (2020YFF0305905)

作者简介: 牛进松, 硕士研究生。主要研究方向: 树轮生态学。Email: 2367465915@qq.com

* 通讯作者: 张晓, 博士, 助理研究员。主要研究方向: 荒漠生态学。Email: zhangxiao978@caf.ac.cn

(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.) 林生产力的年际动态及其对气候因子的响应, 王云霓等^[6]利用华北落叶松年轮宽度反演了其碳密度的历史动态, 刘立斌等^[7]对比了贵州喀斯特地区与非喀斯特地区主要阔叶树与针叶树的地上生物量及生产力。

樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.) 又称欧洲赤松, 天然分布在我国大兴安岭和呼伦贝尔沙地、俄罗斯和蒙古的部分地区^[8]。由于沙地樟子松具有耐寒、耐旱、耐贫瘠及生态适应性强等特点, 已被广泛应用到我国北方沙地造林中, 在防风固沙、水土保持及森林固碳等方面发挥重要的生态功能^[9]。第八次森林资源清查 (2009—2013 年) 结果显示, 目前我国沙地樟子松人工林面积达到 41.7 万 hm^2 , 仅分布在科尔沁、浑善达克和毛乌素沙地的樟子松人工林面积就达 33 万 hm^2 , 赤峰市计划在“十二五”至“十四五”期间完成 100 万 hm^2 樟子松林基地的建设。目前已有学者针对樟子松林净初级生产力及其气候响应展开研究, 丛俊霞等^[10]结合地面调查及遥感数据分析了呼伦贝尔樟子松天然林的地上碳密度及空间分布特征, 并提出了分区经营以提高碳汇的建议; 曹恭祥等^[11]研究了 41 年生呼伦贝尔沙地樟子松人工林的固碳速率及对气候的响应, 目前针对不同密度樟子松林的净初级生产力及其对气候响应的对比研究尚未开展。密度通过调整树木间竞争来影响树木生长及生物量累积, 是影响林分净初级生产力的重要因素, 间伐是通过调整林分密度来改善林分结构、生产力及其功能的一种重要的森林经营管理措施, 更是森林生态研究的热点。

通常, 位于天然分布边缘区的植被具有更高的气候敏感性, 更能预测未来气候变化对该植被的潜在影响。本研究以位于地理分布南缘的呼伦贝尔沙地不同密度的天然樟子松林为研究对象, 结合树木年轮学方法与生物量方程计算樟子松林的生物量及净初级生产力, 对比不同密度天然樟子松林的净初级生产力及其对气候的影响, 不仅有助于预测未来气候变化下天然樟子松林的生态功能, 也为预估我国北方营造的大规模人工樟子松林的固碳潜力及其制定适应未来气候变化的营林措施有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于呼伦贝尔沙地东南端、新巴尔虎左

旗罕达盖苏木中蒙边界附近 (47°38'~47°39' N, 119°09'~119°12' E), 属中温带半干旱大陆性气候, 夏季温暖, 冬季严寒、日照充足, 昼夜温差大, 年均气温 -2.6 °C, 年降水量 270~650 mm (图 1), 多集中于夏秋季, 年蒸发量 1 400~1 900 mm, 无霜期 90~100 d, 积雪期长达 140 d 左右^[12]。研究区以固定沙地和半固定沙地为主, 土壤为风沙土^[13], 处于森林-草原过渡带上, 是沙地樟子松种群在我国地理分布的最南缘。本区的樟子松林多以纯林为主, 并伴生有白桦 (*Betula platyphylla* Suk.)、榛子 (*Corylus heterophylla* Fisch.) 等乔灌木种, 以及线叶菊 (*Filifolium sibiricum*)、大针茅 (*Stipa grandis*)、羊草 (*Leymus chinensis*)、日阴菅 (*Carex pediformis*)、地榆 (*Sanguisorba officinalis*) 等草本物种^[14]。

1.2 样地设置与调查

2017 年 7—9 月, 在人为干扰较小的沙地樟子松天然林选择 5 个不同密度的标准样地 (30 m × 30 m), 记录样地的海拔、坡度等立地因子, 并进行每木检尺, 测定样地内所有树木的胸径、树高、枝下高及东西南北 4 个方位的冠幅等树木生长信息, 胸径径级分布见图 2。樟子松的林分密度利用胸高断面面积来表示, 利用胸径计算每个样地的胸高断面面积分别为 8.83、21.94、24.28、32.36 和 34.9 $\text{m}^2 \text{hm}^{-2}$ (表 1)。利用内径为 5.15 mm 的瑞典产 Haglof 生长锥沿东西、南北两个交叉方向对所有胸径大于 10 cm 的树木进行胸径位置 (1.3 m) 处的树芯取样 (2 芯/树), 尽量取到髓芯。

1.3 树木年轮宽度测定

将采集的树芯带回实验室风干, 利用白乳胶将树芯粘贴、固定于木制树芯凹槽内, 并依次利用由粗到细不同粒度 (240 目、600 目和 800 目) 的砂纸进行打磨直至肉眼清晰可辨树木的年轮界限^[15]。在显微镜下用骨架图法进行目视交叉定年, 利用精度为 0.01 mm 的 Lintab 6 树木年轮分析仪 (Frank Rinn, 德国) 与 TSAP 软件进行年轮宽度测量, 利用 COFECHA 程序^[16]对所有的树轮宽度测量结果进行交叉定年检验, 手动调整或消除定年不准确和相关性较低的树芯样本, 5 个样地的树轮年表统计特征见表 2。5 个天然樟子松林的平均树龄均在 23 a 左右 (表 1), 样地 1 和样地 2 仅个别树木的年龄为 40 a 以上, 因此研究样地樟子松林处于相似的生长发育阶段, 其生产力的差异主要来自于

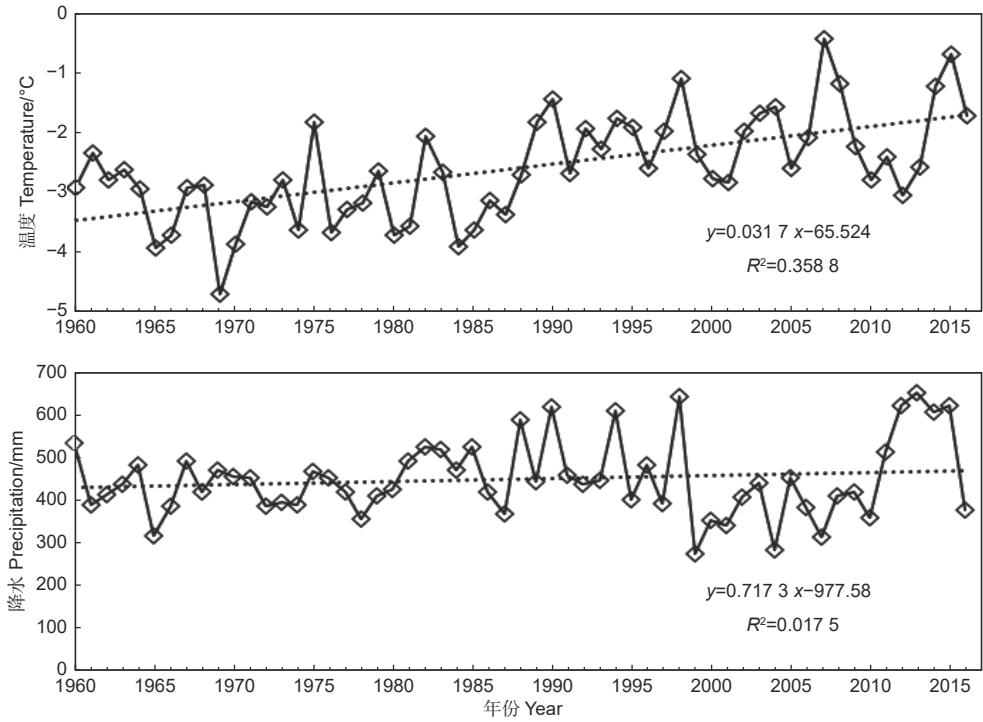


图 1 研究区 1960—2016 年的年平均气温和年降水量

Fig. 1 Changes of annual mean air temperature and precipitation from 1960 to 2016

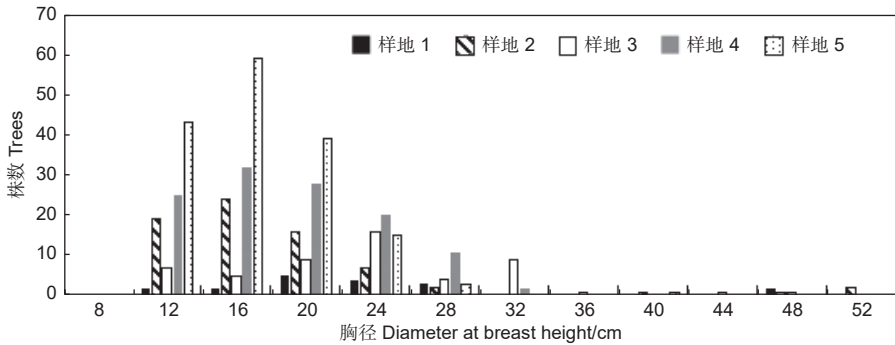


图 2 不同密度天然樟子松林的胸径径级分布

Fig. 2 Diameter at breast height (DBH) distribution of natural *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv. forest with different density

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information of sample plot

样地编号 Plot No.	地理位置 Geographical position	海拔 Altitude/m	坡度 Slope	坡向 Aspect	胸高断面面积 Section area at breast height/ (m ² ·hm ⁻²)	平均胸径 Mean diameter at breast height/cm	平均树高 Average tree height/m	平均树龄 Average tree age/year
1	47°38'55.59 N, 119°11'51.43 E	900	10	ES	8.83	21.67	8.79	24.5
2	47°38'55.48 N, 119°10'57.92 E	910	8	S	21.94	16.80	10.41	23.9
3	47°38'36.35 N, 119°11'24.93 E	900	10	E	24.28	21.55	11.48	23.6
4	47°39'18.81 N, 119°12'02.37 E	900	2	WS	32.36	16.99	11.06	22.8
5	47°39'03.29 N, 119°12'49.36 E	890	1	S	34.9	15.19	10.29	22.6

注: 林分密度利用胸高断面面积表示

Note: The stand density is expressed by the cross-sectional area of breast height

表 2 5 个不同密度样地树轮宽度年表的统计特征参数

Table 2 Chronology statistical characteristic of tree-ring width of 5 sampling plots with different densities

样地编号 Plot No.	1	2	3	4	5
年表时间跨度 Time span	1969—2016	1969—2016	1975—2016	1990—2016	1979—2016
平均轮宽 Mean ring width/mm	3.173	2.593	3.337	2.611	2.374
标准差 Standard deviation	0.688	0.792	0.913	0.740	0.676
树芯间相关系数 Mean inter-series coefficient	0.819	0.805	0.846	0.804	0.653
群体表达信号 Express population signal	0.978	0.994	0.995	0.998	0.992
信噪比 Signal to noise ratio	43.699	171.777	201.715	523.623	124.559

林分密度影响。

1.4 生物量和净初级生产力的估算

根据树芯取样年份（2017 年）测定的树木胸径及逐个树木的年轮宽度原始数据，减去后面所有年份的年轮宽度即得到这一年份的树木胸径值。然后，根据以树木胸径为参数的樟子松生物量方程计算得到这一年份的树木各组分生物量及总生物量，树干、枝、叶的生物量方程来自丛俊霞等^[17]，根的生物量方程来自董利虎^[18]，樟子松林的总生物量为样地内所有树木各组分的累积生物量：

$$W_{\text{干}} = 0.058 1DBH^{2.388 8} \quad (1)$$

$$W_{\text{枝}} = 0.027 1DBH^{2.064 9} \quad (2)$$

$$W_{\text{叶}} = 0.018 5DBH^{2.146 2} \quad (3)$$

$$W_{\text{根}} = 0.068 9DBH^{1.961 3} \quad (4)$$

$$W = \sum_{i=1}^m (W_{\text{干}} + W_{\text{枝}} + W_{\text{叶}} + W_{\text{干根}}) / (S \times 1 000) \quad (5)$$

其中， $W_{\text{干}}$ 、 $W_{\text{枝}}$ 、 $W_{\text{叶}}$ 、 $W_{\text{根}}$ 依次为樟子松树木的干、枝、叶及根的生物量（kg）， W 为样地内所有树木的总生物量（ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ）， DBH 为树木胸径（1.3 m 处）（cm）， m 为每个调查样地的樟子松株数， S 为样地面积（ hm^2 ）。

样地的年净初级生产力（ NPP ）为样地历年单位面积上的生物量之差：

$$NPP_i = W_i - W_{i-1} \quad (6)$$

其中， NPP_i 是第 i 年的净初级生产力（ $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ）， W_i 、 W_{i-1} 分别表示第 i 年与前一年的总生物量（t）。

1.5 数据获取及分析

气象数据来源于国家气象科学数据中心（<http://data.cma.cn>），下载临近的阿尔山气象站

（ $47^{\circ}10' N$ ， $119^{\circ}56' E$ ）1960—2016 年的月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温和月降水量数据。帕尔默干旱胁迫指数（Palmer drought severity index, $PDSI$ ）利用荷兰皇家气象研究所数据共享网（<http://climexp.knmi.nl/>）中的格点数据，该数据集为利用 CRU TS 3.26 计算而来的自校正 $PDSI$ 数据（ $scPDSI$ ，时长 1901—2017），经纬度的精度都为 0.5° ^[19]。下载的 NC 格式 $scPDSI$ 数据利用美国国家航空航天局（NASA）开发的 Panoply 4.11.1 软件（<https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>）读取。本研究选取天然樟子松林树木生长的公共时间段进行净初级生产力与气候因子的相关分析，即 1990—2016 年。考虑到上一年气候对当年树木生长存在明显影响^[20-21]，相关分析的时间跨度为上一年 6 月至当年 12 月。统计分析利用 SPSS Statistics 20 完成，利用 Pearson 相关分析净初级生产力与气候因子间关系，绘图利用 Excel 2010 完成。

2 结果与分析

2.1 净初级生产力及生物量的变化

不同密度樟子松天然林净初级生产力年际波动趋势基本一致，所有密度樟子松林的 1998 年净初级生产力均较大，最大值为样地 4 的 $11.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，最小值为样地 1 的 $1.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，2007 年的净初级生产力较小，所有林分的年净初级生产力均在 $2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以内（图 3）。5 个样地天然樟子松林的多年平均净初级生产力分别为 1.17、2.99、3.55、4.69 和 $4.86 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，平均净初级生产力随胸高断面面积增加而增加。

不同密度天然樟子松林的生物量逐年增高，1990—2016 年的 27 年间样地 1 增长幅度最小，为 $31 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，样地 2 增长了 $79 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，样地 3 增

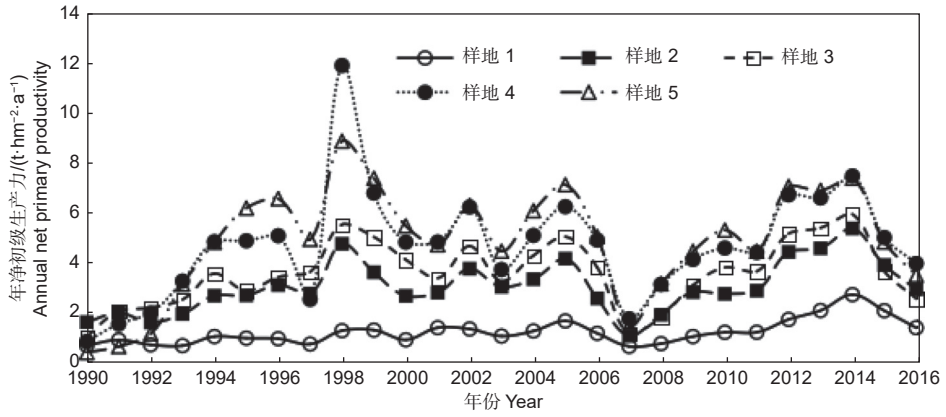


图3 不同密度样地樟子松天然林年净初级生产力

Fig. 3 Annual net primary productivity of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv. natural forest with different density

长了 $100 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 样地 4 增长了 $125 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 样地 5 增长幅度最大为 $130 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (图 4)。随林分胸高断面面积增加, 天然樟子松林的生物量逐渐增加,

2016 年 5 个样地的樟子松林生物量分别为 38.4 、 91.5 、 102.4 、 126.6 和 $132.9 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

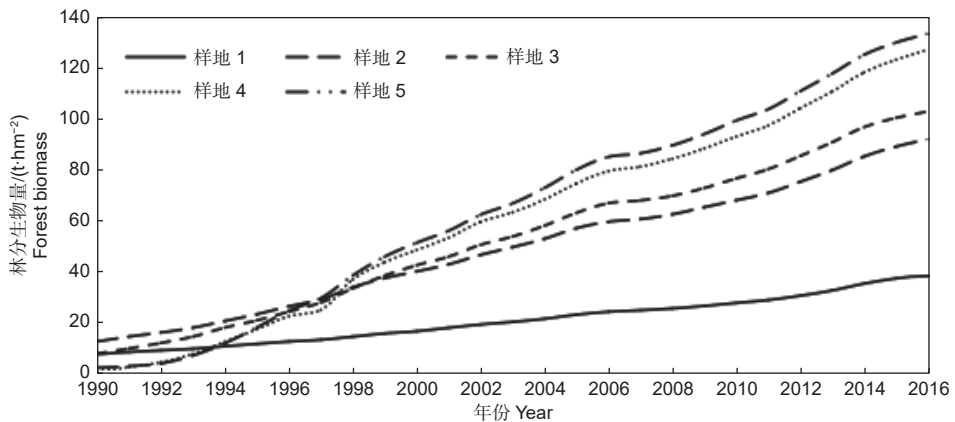


图4 不同密度樟子松天然林生物量

Fig. 4 Biomass of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv. natural forests with different densities

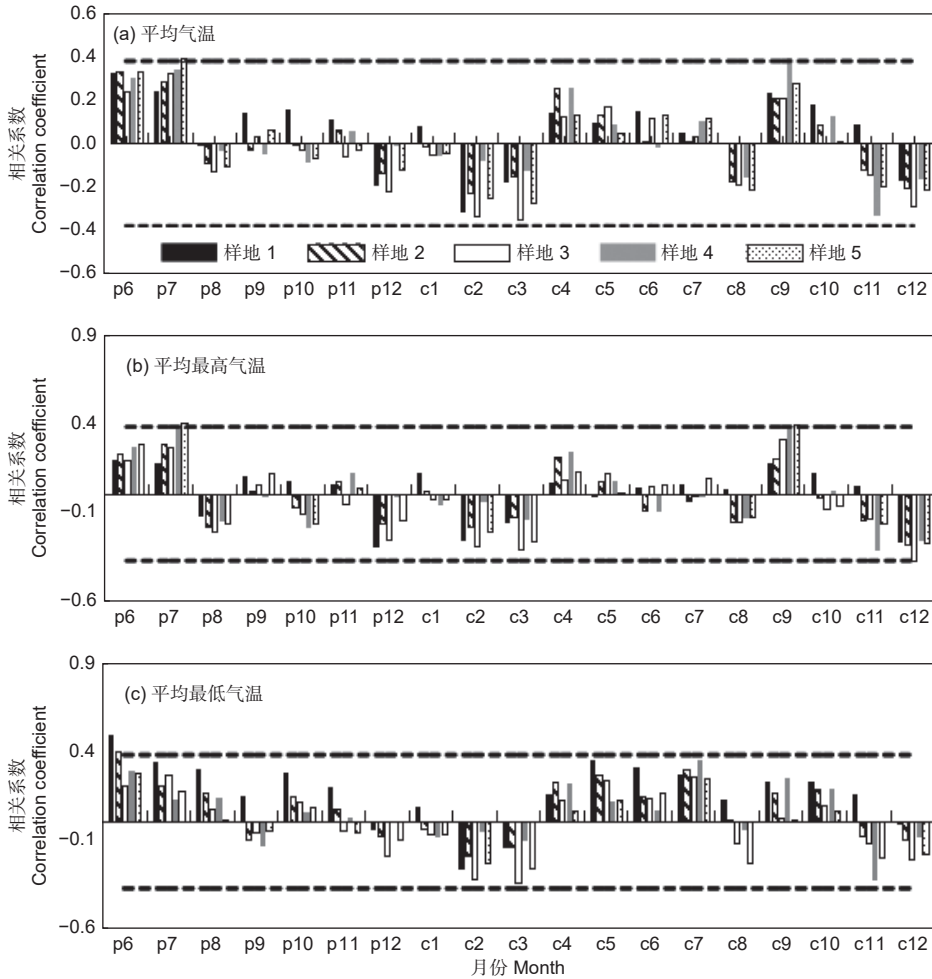
2.2 樟子松净初级生产力对气温的响应

不同密度天然樟子松林的净初级生产力与平均气温的相关分析表明温度对樟子松林净初级生产力无明显影响, 仅样地 5 樟子松林净初级生产力与前一年 7 月平均气温显著正相关 ($P<0.05$), 样地 4 樟子松林净初级生产力与当年 9 月平均气温显著正相关 ($P<0.05$), 其余密度天然樟子松林的净初级生产力与平均气温的相关关系均不显著 (图 5a)。

与平均气温影响一致, 样地 4 和样地 5 天然樟子松林净初级生产力与前一年 7 月的平均最高气温显著正相关 ($P<0.05$), 相关系数分别为 0.392 和 0.407 ; 样地 5 的天然樟子松林与当年 9 月的平均最高气温显著正相关 ($P<0.05$), 其余样地林

分净初级生产力与平均最高气温的相关性均不显著 (图 5b)。

天然樟子松林净初级生产力与前一年及当年的月平均最低气温大多无显著相关关系, 仅低密度天然樟子松林 (样地 1 和样地 2) 净初级生产力与前一年 6 月平均最低气温显著正相关 (图 5c)。天然樟子松林净初级生产力与气温相关性不大, 仅秋季 9 月的月平均气温和月平均最高气温对大密度樟子松林有显著的正相关关系, 表明大密度天然樟子松林生物量累积仅受秋季 9 月最高气温的限制, 较低的月平均最高气温影响了樟子松林的生长。总体来说, 气温不是限制研究区天然樟子松林净初级生产力的主要气候因子。



注: p6...p12 表示前一年 6 月...12 月; c1...c12 表示当年 1 月...12 月; 虚线表示在 0.05 水平上显著。

Note: P6...P12 means June...December of the previous year; C1...C12 means January...December of the current year; the dotted line means significant at the 0.05 level.

图 5 不同密度樟子松天然林与逐月气温的相关系数

Fig. 5 Correlation coefficient between natural forests of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv. with different densities and monthly air temperature

2.3 樟子松净初级生产力对降水的响应

不同密度樟子松天然林净初级生产力与月降水量的相关分析表明: 样地 1 的天然樟子松林净初级生产力与前一年 8 月降水显著正相关 ($P < 0.05$), 所有密度的樟子松林净初级生产力均与当年 5 月降水显著正相关 ($P < 0.05$), 样地 1 的樟子松林净初级生产力与当年 7 月降水显著正相关 ($P < 0.05$), 样地 4 的樟子松林净初级生产力与当年 10 月降水显著正相关 ($P < 0.05$) (图 6)。当年 5 月降水是限制樟子松林净初级生产力的主要气候因子, 这与樟子松树木进入生长期及相对缺乏的降水有关。

2.4 樟子松净初级生产力对干旱指数的响应

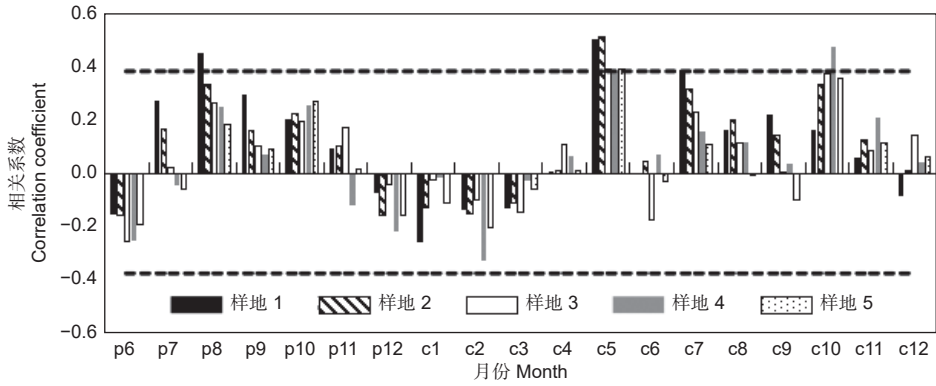
不同密度天然樟子松林净初级生产力与帕尔默干旱胁迫指数的相关性见图 7, 结果表明样地 1 的

天然樟子松林净初级生产力与当年 1 至 7 月的 *PDSI* 均呈显著正相关关系 ($P < 0.05$), 样地 2 的天然樟子松林净初级生产力与当年 6 至 7 月的 *PDSI* 显著正相关 ($P < 0.05$), 样地 3 的天然樟子松林净初级生产力与当年 5 月的 *PDSI* 显著正相关 ($P < 0.05$), 相关系数为 0.409。此外, 在前一年 11 月至当年 7 月, 天然樟子松林净初级生产力与 *PDSI* 的相关系数随密度增加呈减小趋势, 表明相比于高密度天然樟子松林, 低密度天然樟子松林的净初级生产力对 *PDSI* 的响应更为敏感。

3 讨论

3.1 樟子松林的生物量与净初级生产力

2016 年 5 个不同密度的天然樟子松林生物量

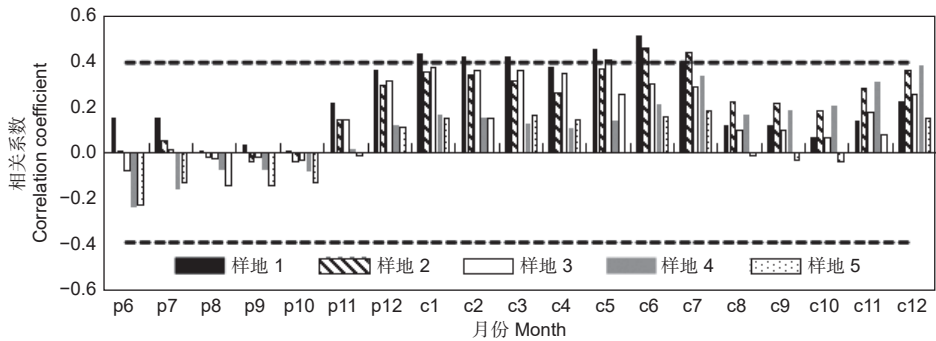


注: p6...p12 表示前一年 6 月...12 月; c1...c12 表示当年 1 月...12 月; 虚线表示在 0.05 水平上显著。

Note: P6...P12 means June...December of the previous year; C1...C12 means January...December of the current year; the dotted line means significant at the 0.05 level.

图 6 不同密度樟子松天然林与逐月降水量的相关系数

Fig. 6 correlation coefficient between natural forest of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv. with different densities and monthly precipitation



注: p6...p12 表示前一年 6 月...12 月; c1...c12 表示当年 1 月...12 月; 虚线表示在 0.05 水平上显著。

Note: P6...P12 means June...December of the previous year; C1...C12 means January...December of the current year; the dotted line means significant at the 0.05 level.

图 7 不同密度樟子松天然林与逐月干旱指数的相关系数

Fig. 7 Correlation coefficient between natural forests of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv. with different densities and monthly drought index

分别为 38.4、91.5、102.4、126.6 和 132.9 t·hm⁻², 5 个不同密度天然樟子松林在 1990—2016 年的年平均净初级生产力分别为 1.17、2.99、3.55、4.69 和 4.86 t·hm⁻²。随林分基面积增加, 天然樟子松林的生物量及多年平均净初级生产力逐渐增加。小兴安岭幼龄、中龄、近熟及成熟的樟子松林生物量分别为 47.25、106.25、143.09 和 185.01 t·hm⁻²[22], 苑增武等[23]研究了两个林场内人工樟子松林的多年平均净初级生产力, 数值分别介于 0.53~8.17 t·hm⁻² 和 0.99~6.68 t·hm⁻², 本研究天然樟子松林的生物量及多年平均净初级生产力值多位于过去研究值范围之内。

本研究中各样地樟子松林地上生物量分别为 31.60、74.51、83.70、101.30 和 105.43 t·hm⁻²,

5 个不同密度的天然樟子松林地上生物量远远低于黑龙江省西部地区的 154.07 t·hm⁻²[23], 而属于高密度林的样地 4 和样地 5 高于黑龙江大兴安岭 45 a 的 (94.87 t·hm⁻²)、小兴安岭 45 a 的 (80.50 t·hm⁻²) [22]、塞罕坝地区 45 a 左右樟子松林地上生物量 (94.20 t·hm⁻²) [24] 和内蒙古科尔沁沙地 35 a 的 (86.45 t·hm⁻²) [25]。

生物量或生产力的差异可能是由立地条件、林龄、林分密度、气候等因素引起的。袁立敏等[25]研究认为: 科尔沁沙地樟子松林生物量随着林龄的增加而增大, 王云霓等[6]发现华北落叶松同龄人工林生物量具有显著的坡位差异, 贾忠奎等[26]发现塞罕坝华北落叶松同龄人工林生产力具有显著的坡向差异, 丛俊霞[10]研究得出结论樟子松天然林植

被碳储量随海拔升高先增加后减少,随坡度增大急速减少,在海拔和坡向上无明显规律。以上因素可能是本研究中樟子松林生物量与生产力与其它研究结果存在差异的原因。

3.2 天然樟子松林净初级生产力对气候因子的响应

不同密度的天然樟子松林净初级生产力均受到温度、降水和 *PDSI* 的影响。高密度的样地 4 和样地 5 天然樟子松林净初级生产力分别与当年 9 月平均气温和当年 9 月平均最高气温显著正相关;所有密度的天然樟子松林净初级生产力均与当年 5 月降水显著正相关,样地 1 与样地 4 的净初级生产力还分别与当年 7 月和 10 月降水显著正相关;样地 1、2 和 3 的净初级生产力分别与当年 1—7 月、当年 6—7 月和当年 5 月的 *PDSI* 显著正相关,还呈现出随胸高断面面积增加,净初级生产力与 *PDSI* 的相关系数减小的趋势。由于呼伦贝尔沙地 9 月气温逐渐降低,影响了樟子松的光合作用及生物量积累,且在密度较大林分竞争大,对温度抑制生长的过程表现更加敏感,这导致了 9 月平均气温、平均最高气温与高密度天然樟子松林净初级生产力的显著正相关关系。

呼伦贝尔沙地天然樟子松树木在 5 月进入树木生长期,树木生长需水与 5 月相对较少的降水导致了所有密度天然樟子松林净初级生产力与 5 月降水间的显著正相关关系^[27]。10 月份进入沙地天然樟子松生长的末期,降水不足也同样导致了样地 4 林分净初级生产力对当年 10 月降水具有较高的敏感性。此外,样地 1 天然樟子松林净初级生产力与上一年 8 月降水显著正相关,可能是由于前一年降水充足为树木体内储存了较多的养分,进而为下一年生长提供了更好的营养条件^[28]。*PDSI* 综合考虑降水、气温等因素的影响,是衡量植物生长可利用水分的重要指标^[29],在前一年 11 月至当年 7 月,天然樟子松林净初级生产力与 *PDSI* 的相关系数随密度增加呈减小趋势,可能是由于相比于气候因素,高密度天然樟子松林的净初级生产力更多地受到了竞争等生物因素干扰的影响。

很多研究表明:树木的气候敏感性随地理位置(纬度、经度或海拔高度)、土壤等立地条件和树木间竞争等影响而存在分异^[30-31]。本研究也表明竞争强度的差异导致了不同密度天然樟子松林净初级生产力对气候因子响应的差异,与气温、水分及水

热综合因子 *PDSI* 等气候因素相比,高密度樟子松林的净初级生产力还受林内树木间竞争的较大影响,使其与 *PDSI* 的相关系数低于低密度的天然樟子松林。气候变化导致全球多地干旱事件的频率与程度增加,并引起大范围的森林衰退与树木死亡^[32],在此背景下,间伐作为重要的森林管理措施,被认为在调节林分结构、竞争及提升应对干旱抵抗力等方面有积极作用^[33],本研究明确了密度对天然樟子松净初级生产力及其气候响应的影响,不仅为未来气候变化对樟子松林生产力影响提供依据,还为樟子松天然林与人工林的经营管理措施制定提供理论依据。

4 结论

天然樟子松林的生物量及多年平均净初级生产力随林分密度增加而增加,高密度天然樟子松林具有更高的生物量及生产力,本研究中最高密度林分生产力及生物量分别是最低密度林分生产力及生物量的 4.2 和 3.5 倍。通过分析不同密度天然樟子松林净初级生产力对气温、降水与帕尔默干旱胁迫指数的响应,发现高密度天然樟子松林的净初级生产力主要受 9 月平均气温及平均最高气温的影响,低密度天然樟子松林的净初级生产力主要受 6—7 月干旱指数影响,所有密度天然樟子松林均与 5 月降水显著正相关,表明 5 月降水是限制天然樟子松林的关键因子。本研究还发现随林分密度增加,净初级生产力与干旱指数的相关系数减小,表明了林分竞争对天然樟子松净初级生产力存在明显影响,林分竞争导致了高密度天然樟子松林净初级生产力对干旱指数的敏感性降低。本研究明确了呼伦贝尔沙地不同密度天然樟子松林的生物量及净初级生产力动态变化,并分析了不同密度天然樟子松林净初级生产力对气候因子的响应,有助于预测未来气候变化下天然樟子松林的生产力及固碳功能,也能为制定相应的森林经营管理措施提供支撑。

参考文献:

- [1] Masson-Delmotte, V, Zhai P, Pirani A, et al. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. In Press.
- [2] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pools and

- flux of global forest ecosystem[J]. *Science*, 1994, 263: 185-190.
- [3] Pan Y, Birdsey R A, Fang J, *et al.* A large and persistent carbon sink in the world's forests[J]. *Science*, 2011, 333: 988-993.
- [4] 方欧娅, 汪洋, 邵雪梅. 基于树轮资料重建森林净初级生产力的研究进展[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(8): 1039-1046.
- [5] 于健, 罗春旺, 徐倩倩, 等. 长白山原始林红松径向生长及林分碳汇潜力[J]. *生态学报*, 2016, 36(9): 2626-2636.
- [6] 王云霓, 邓秀秀, 王彦辉, 等. 宁夏六盘山香水河小流域华北落叶松人工林乔木层生物量的坡面变化和尺度效应[J]. *林业科学研究*, 2015, 28(5): 701-707.
- [7] 刘立斌, 许海洋, 郭银明, 等. 基于树木年轮定量重建过去50年贵州典型森林优势树种的地上生物量与生产力变化[J]. *生态学报*, 2020, 40(10): 3441-3451.
- [8] Zhu J J, Kang H Z, Tan H, *et al.* Effects of drought stresses induced by polyethylene glycol on germination of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seeds from natural and plantation forests on sandy land[J]. *Journal of Forest Research*, 2006, 11: 319-328.
- [9] 闫德仁, 闫婷. 内蒙古森林碳储量估算及其变化特征[J]. *林业资源管理*, 2010(3): 31-33, 103.
- [10] 丛俊霞. 1985-2015年呼伦贝尔沙地樟子松天然林碳储量动态变化[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- [11] 曹恭祥, 郭中, 王云霓, 等. 呼伦贝尔沙地樟子松人工林乔木层固碳速率及其对气象因子的响应[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(4): 1082-1090.
- [12] 闫德仁, 王玉华, 姚洪林, 等. 呼伦贝尔沙地[M]. 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 2010.
- [13] 中国科学院内蒙古宁夏综合考察队. 内蒙古自治区及东北西部地区地貌[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [14] 中国科学院内蒙古宁夏综合考察队. 内蒙古植被[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [15] Stokes M A, Smiley T L. An Introduction to Tree-Ring Dating[R]. Chicago, Arizona University, 1996.
- [16] Holmes R L, Adams R K, Fritts H C. Tree-ring chronologies of western North America: California, eastern Oregon and northern Great Basin with procedures used in the chronology development work including users manuals for computer programs COFECHA and ARSTAN[S]. 1986.
- [17] 丛俊霞, 郑晓, 朱教君, 等. 沙地樟子松天然林地上碳储量估算及其空间分布特征[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(11): 2997-3007.
- [18] 董利虎. 黑龙江省主要树种相容性生物量模型研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- [19] Osborn T J, Barichivich J, Harris I, *et al.* State of the Climate in 2017[R]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018, 99(8): 36-37.
- [20] 李宗善, 刘国华, 傅伯杰, 等. 不同趋势方法对树轮年表气候信号的影响——以卧龙地区为例[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(7): 707-721.
- [21] 张晓, 潘磊磊, Semyung Kwon, 等. 沙地天然樟子松径向生长对干旱的响应[J]. *北京林业大学学报*, 2018, 40(7): 27-35.
- [22] 胡海清, 罗碧珍, 魏书精, 等. 小兴安岭7种典型林型林分生物量碳密度与固碳能力[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(2): 140-158.
- [23] 苑增武, 丁先山, 李成烈, 等. 樟子松人工林生物生产力与密度的关系[J]. *东北林业大学学报*, 2000, 28(1): 21-24.
- [24] 李晓莎, 楚聰颖, 许中旗, 等. 河北省塞罕坝地区樟子松人工林的生物量[J]. *河北林果研究*, 2016, 31(3): 230-234.
- [25] 袁立敏, 闫德仁, 王熠青, 等. 沙地樟子松人工林碳储量研究[J]. *内蒙古林业科技*, 2011, 37(1): 9-13.
- [26] 贾忠奎, 公宁宁, 姚凯, 等. 塞罕坝华北落叶松人工林生产力对坡向的响应[J]. *西北林学院学报*, 2012, 27(4): 1-6.
- [27] 宋来萍, 刘礴, 王玉华, 等. 呼伦贝尔沙地不同树龄樟子松对气候的响应[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2020, 44(2): 159-164.
- [28] 尚建勋, 时忠杰, 高吉喜, 等. 呼伦贝尔沙地樟子松年轮生长对气候变化的响应[J]. *生态学报*, 2012, 32(4): 1077-1084.
- [29] 梁尔源, 邵雪梅, 刘鸿雁, 等. 树轮所记录的公元1842年以来内蒙古东部浑善达克沙地PDSI的变化[J]. *科学通报*, 2007, 52(14): 1694-1699.
- [30] Martin-Benito D, Pederson N, Kose N, *et al.* Pervasive effects of drought on the tree growth across a wide climatic gradient in the temperate forests of the Caucassus[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2018, 27: 1314-1325.
- [31] Calama R, Condea M, de-Dios-Garciab J, *et al.* Linking climate, annual growth and competition in a Mediterranean forests: *Pinus pinea* in the Spanish Northern Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 264: 309-321.
- [32] Anderegg W R L, Kane J M, Anderegg L D L. Consequences of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3: 30-36.
- [33] Schmitt A, Trouvé R, Seynave I, *et al.* Decreasing stand density favors resistance, resilience, and recovery of *Quercus petraea* trees to a severe drought, particularly on dry sites[J]. *Annals of Forest Science*, 2020, 77(1): 660-684.

Productivity of Mongolian Pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) and Its Response to Climate Change in Hulunbuir Sandy Land

NIU Jin-song^{1,2,3}, LIU Xiao-fen¹, Kwon Se-Myung⁴, PAN Lei-lei⁴, SHI Zhong-jie^{2,3},
YANG Xiao-hui^{2,3}, ZHANG Xiao^{2,3}, ZHANG Ri-sheng⁵

(1. School of Landscape and Ecological Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China; 2. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. Institute of Ecological Conservation and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100093, China; 4. Institute of Ecological Restoration, Kongju National University, Chungcheongnam-do 32439, Korea; 5. Liaoning Institute of Sandy Land Control and Utilization, Fuxin 12300, Liaoning, China)

Abstract: [Objective] Exploring the stand productivity in the forests with different densities and its response to climate change is helpful for the functional assessment and adaptive management of forest ecosystems. [Method] In this study, the net primary productivity (*NPP*) of natural Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) forests with different densities (indicated by stand basal area) in the Hulunbuir Sandy Land was obtained by dendrochronology method, and its response to temperature, precipitation and drought index was analyzed. [Result] The results showed that the annual average *NPP* with stand basal area of 8.83, 21.94, 24.28, 32.36, and 34.9 m²·hm⁻² were 1.17, 2.99, 3.55, 4.69, and 4.86 t·hm⁻²·a⁻¹, respectively, which indicated that *NPP* increased with the increase of stand density. The *NPP* in the high-density forests were significantly positively correlated with the average temperature and average maximum temperature in July of previous year and September of the current year ($P < 0.05$). The precipitation in current May was the key limiting factor for the *NPP*. *NPP* in all stands was significantly positively correlated with the precipitation in current May of that year ($P < 0.05$). From previous November to current July, the correlation coefficient between *NPP* and Palmer Drought Severity Index (*PDSI*) decreased with increasing stand density, which indicated that the increase in stand competition led to the reduction of the sensitivity of *NPP* to *PDSI*. [Conclusion] Stand density has a significant impact on the *NPP* of natural Mongolian pine forest, as well as *NPP* response to climate in Hulunbuir Sandy Land. Density management may be a key measure for forest adaptive management under climate change.

Keywords: *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; biomass; net primary productivity; climate response; density

(责任编辑: 崔 贝)