

刘吉敏, 黄泓, 王学忠. 春季东北地区森林火险气象指数及其极值重现期特征[J]. 灾害学, 2018, 33(2): 76–80. [LIU Jimin, HUANG Hong and WANG Xuezhong. Forest Fire Danger Index of Northeast China Region in summer and Its Characteristics of Extreme Value[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(2): 76–80. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.01.015.]

春季东北地区森林火险气象指数及其极值重现期特征^{*}

刘吉敏¹, 黄 泓², 王学忠²

(1. 解放军 92493 部队, 辽宁 葫芦岛 125000; 2. 国防科技大学 气象海洋学院, 江苏 南京 211101)

摘 要:以 1961–2010 年间东北地区逐日气象观测数据为基础, 计算春季逐日森林火险气象指数(FFDI)并用广义帕累托分布(GPD)模型对 FFDI 极值进行了拟合, 结果表明: 东北地区春季 FFDI 高值区分布于吉林西部、辽宁西部和内蒙东四盟市南部区域, 高值区基本位于山脉背风坡一侧。春季各站 FFDI 值的趋势变化大致以大兴安岭山脊为界, 山脊以东站点的 FFDI 趋势系数大部分为负值, 其中部分站点趋势系数通过了 95% 置信水平检验, 山脊以西站点趋势系数为正值, 但趋势均不显著。GPD 模型的概率分布能很好的拟合 FFDI 极值, 96.5% 站点的 FFDI 极值经验分布和理论分布相一致。20 年一遇和 50 年一遇的 FFDI 极值空间分布大体一致, 在 50 年一遇极值高值区中 FFDI 值超过 40, 低值区的 FFDI 值普遍低于 25。

关键词:东北地区; 森林火险; 气象指数; 极值; 重现期

中图分类号: P49; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2018)01–0076–05

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2018.01.015

森林火灾是一种突发性强、破坏性大、处置困难的自然灾害, 严重的森林火灾给当地带来重大的经济损失、人员伤亡和环境污染。Mouillot 等^[1]统计表明森林火灾占每年全球燃烧面积的 14%, 火灾面积约 50~90 hm²。Dempsey 对安大略省森林火灾的环境效应研究显示森林火灾产生的烟和排放物会增加空气中的 PM_{2.5}、O₃、碳氢化合物和氮氧化物浓度, 给风向下游地区带来严重的空气污染^[2]。森林火灾发生原因众多^[3], 如闪电等自然原因, 或高压电线接触植被意外触发, 亦可由人为纵火引起。无论何种原因引发火灾, 森林火灾的蔓延、传播和扑灭都需要一定的有利气象条件, 为了对森林火险等级进行评估, 国内外研究机构开发了一系列利用气象因子预测火险指数的预报系统, 如加拿大火险等级预报系统^[4]、澳大利亚 McArthur 火险尺^[5–6]、美国国家火险等级预报系统^[7]等, 中国国家气象局基于修正的布龙–戴维斯方法开发了业务化运行的森林火险气象指数^[8]。

东北地区森林资源丰富, 在大兴安岭、小兴安岭、长白山地区分布有我国最大的天然林区, 每年春秋季节防火任务繁重, 研究容易引发火灾的天气背景对防火救灾有重要的现实意义。牛若芸等^[8]对国际通用的 5 个森林火险指数进行比较后发现 FFDI 指数在我国东北地区实用性最好。在实际应用中 FFDI 值越大表明火险等级越高, 说明

在当时气象条件下火灾极易发生, 且火灾发生后难以控制, 对于 FFDI 极大值需要引起足够的重视。在极值研究方法中, 广义帕雷托分布(Generalized Pareto Distribution, GPD)近三十年来在气象学极值研究中得到了成功应用^[9], 不同于以往极值研究中选取年最大值 AM(Annual Maximum)构成时间序列, GPD 拟合中通过设定门限值, 建立超过门限值数据的极值概率分布, 即 POT(Peaks over Threshold)抽样^[9]。POT 抽样充分利用了有限的观测信息, 增加了极值的样本量, 使模型的参数估计更加合理、重现期精度更高。本文利用东北地区气象站点观测数据计算了春季 FFDI 值, 分析东北地区春季 FFDI 的空间分布和变化趋势, 并用 GPD 模型对 FFDI 极值进行拟合, 研究了给定重现期下 FFDI 极值的分布特点。

1 资料和方法

1.1 资料说明

本文中东北地区包括黑龙江省、吉林省、辽宁省和内蒙古东四盟市(呼伦贝尔市、通辽市、赤峰市、兴安盟)。东北春季防火期研究时段取为 3 月 1 日至 5 月 31 日。所用资料为中国气象局国家

^{*} 收稿日期: 2017–07–24 修回日期: 2017–09–18

基金项目: 国家自然科学基金(41375049; 40905021; 41275099); 中国博士后科学基金(2011M500894); 国家公益性行业(气象)科技专项(GYHY201206005)

第一作者简介: 刘吉敏(1987–), 男, 甘肃武威人, 助理工程师, 硕士, 从事短期气候预测. E-mail: atmosljm@163.com

气象中心资料室提供的中国 743 测站 1961 – 2010 年逐日资料, 资料中包括了温度、相对湿度和降水等要素。选取东北地区气象记录时间长、缺测率低的 88 个站点, 各站点在 1951 – 2010 年间观测要素缺测率均低于 1%, 东北地区地形和 88 个气象站点分布如图 1 所示。

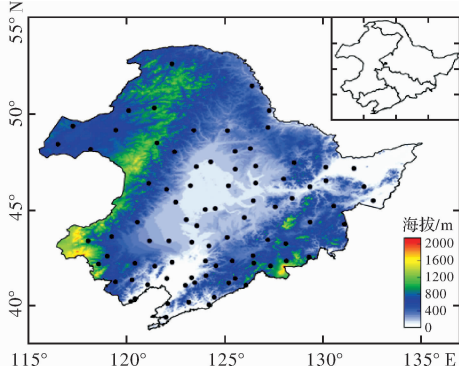


图 1 东北地区气象站点分布(圆点)和地形(阴影区)。

1.2 FFDI 计算

森林火险气象指数(Forest Fire Danger Index, 简称 FFDI)计算中需要风速、气温、相对湿度和干旱因子。Noble 等^[10]通过对 McArthur 火险尺^[5-6]的拟合得到 FFDI 计算公式:

$$FFDI = 2D^{0.987} \exp(-0.45 - 0.0345H + 0.0338T + 0.023V). \quad (1)$$

式中: $D \in [0, 10]$ 为干旱因子; H 为相对湿度(%); T 为摄氏温度($^{\circ}\text{C}$); V 为距地表 10 m 高度处平均风速(km/h)。实际计算中 T 取为日最高温度, H 应取日最高温度对应的相对湿度, 但资料中仅有日平均相对湿度, 故将 H 取为日平均相对湿度。FFDI 的计算主要依赖于干旱因子 D , 求取干旱因子 D 过程中涉及到 Keetch – Byram drought index(KBDI)的复杂计算, KBDI 是用降水和蒸散估计值的差异来表示森林土壤水分的亏缺。

第 t 日的 KBDI 可定义为:

$$KBDI_t = KBDI_{t-1} + ET_{t-1} - NR_{t-1}. \quad (2)$$

式中: ET 为日蒸散量(mm); NR 为日降水量减去植被冠层拦截水量后的净降水量(mm)。蒸散量 ET 的估计值为:

$$ET_t = \frac{(203.2 - KBDI_t)[0.968 \exp(0.0875T_t + 1.5552) - 8.3] dt}{1000[1 + 10.88 \exp(-0.001736 \bar{R})]}. \quad (3)$$

式中: T_t 为第 td 的日最高温度, \bar{R} 为平均年降水量, dt 为时间间隔, 以日为单位, 本文中为逐日资料, 故取 dt 为 1。净降水量 NR 使用植被 – 排水模式来近似, 在该模式中对降水的拦截量为连续湿日的前 5mm 降水量, 其中湿日定义为日降水量大于 0.2mm。用 R_t 表示第 td 的降水量, 并且令 I_t

$= \sum_{i=1}^{N_R-1} R_{t-i}$ 表示当前的植被拦截量, 式中 N_R 是满足 $R_{t-N_R} < 0.2$ 的最小正整数, 则扣除植被冠层拦截水量到达地表的净降水量为:

$$NR_t = \begin{cases} R_t + I_t - 5, & R_t \geq 0.2, I_t < 5; \\ R_t, & R_t \geq 0.2, I_t \geq 5; \\ 0, & R_t < 0.2. \end{cases} \quad (4)$$

在 KBDI 的计算中需要初值和初始化期, 将每年 2 月 1 日的 FFDI 初值设为 0, 每年的 2 月份作为初始化期, 经初始化后可计算 3 – 5 月的逐日 FFDI。由 KBDI 计算干旱因子时参考 Griffiths 定义^[11], 即 $D = \max[\min(D^*, 10), 0]$, 式中 D^* 公式为:

$$D^* = 10.5 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{KBDI + 30}{40} \right) \right] \right\} \frac{\lambda + 42}{\lambda^2 + 3\lambda + 42}. \quad (5)$$

其中 $\lambda = \max\{\psi_*, \psi_t, \psi_{t-1}, \dots, \psi_{t-19}\}$, ψ_t 的算法为

$$\psi_{t-i} = \begin{cases} (R_{t-i} - 2)/i^{1.3}, & i \geq 1, R_t \geq 2; \\ (R_{t-i} - 2)/0.8^{1.3}, & i = 0, R_t \geq 2; \\ 0, & R_t < 2. \end{cases} \quad (6)$$

式中: $i = 0, 1, \dots, 19$, ψ_* 为 Finkel 等^[12]提出的修正项, 公式为:

$$\psi_* = \begin{cases} 0.1135 \times KBDI, & KBDI < 20 \\ 2.607 - 0.01689 \times KBDI, & KBDI \geq 20. \end{cases} \quad (7)$$

2 FFDI 气候特征

2.1 FFDI 和降水空间分布

东北地区各站春季 FFDI 日平均值分布如图 2a 所示, 从图中可看出春季 FFDI 大值区主要分布在内蒙古四盟市南部、辽宁西部和吉林西北部, 这些大值区域对应于东北平原和科尔沁草原, 站点 FFDI 日均值超过 4.4, FFDI 日均值最大值为 6.7。在辽宁中部、黑龙江西部和呼伦贝尔西部地区的 FFDI 日均值在 3.2 ~ 4.4, 而大兴安岭、小兴安岭和长白山山脉海拔较高区域的 FFDI 日均值小于 3.2。在春季各站日均降水分布(图 2b)中, 日均降水量大值区集中在辽宁东部和吉林南部, 日均降水量超过 1mm, 日均降水量最大值为 1.7mm, 黑龙江大部和呼伦贝尔北部的日均降水量在 1.0 ~ 1.0mm, 吉林西部和内蒙古四盟市中南部的日均降水量低于 0.6mm。因为在春季蒙古国被高压脊控制(图略), 冷高压携带冷空气频繁南下, 致使东北地区春季降水量为四季中最小值, 同时春季东北地区高空盛行西北气流, 内蒙古四盟市南部、吉林西部位于大兴安岭背风坡, 辽宁西部也位于努鲁尔虎山背风坡一侧, 背风坡一侧下沉气流也导致这些区域春季干燥少雨, 而在辽宁东部和吉林南部位于长白山迎风坡, 降水相对较多。由 FFDI 和降水量分布比较可看出, FFDI 大值区与降水量低值区能较好对应。

2.2 FFDI 变化趋势

对各站 50 年的春季 FFDI 平均值进行线性趋势分析(图 3), 从图中可看出东北地区春季 FFDI 变化趋势分布大致以大兴安岭山脊为界, 在山脊以东区域大部分站点的 FFDI 趋势系数为负值, 表明这些地区 FFDI 有减小趋势, 尤其在东北平原和

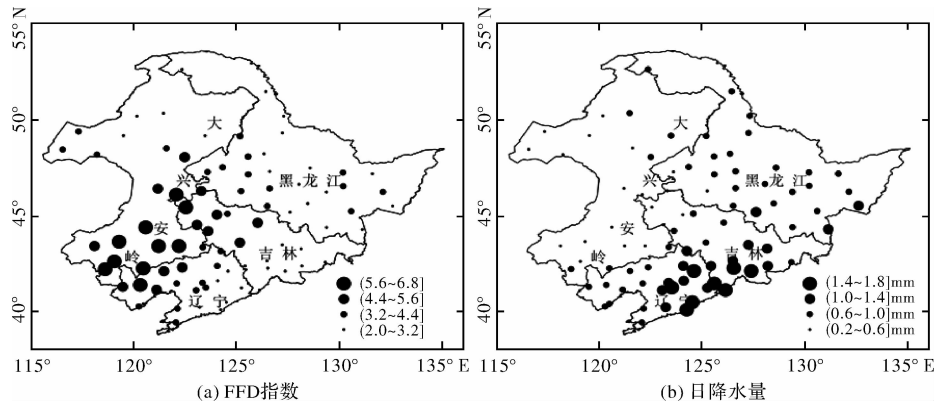


图2 1961–2010年春季平均值空间分布。

辽宁西部地区站点的趋势系数通过了95%置信水平的F检验。在山脊西侧大部分站点的FFDI趋势为正,但各站点趋势系数并不显著。

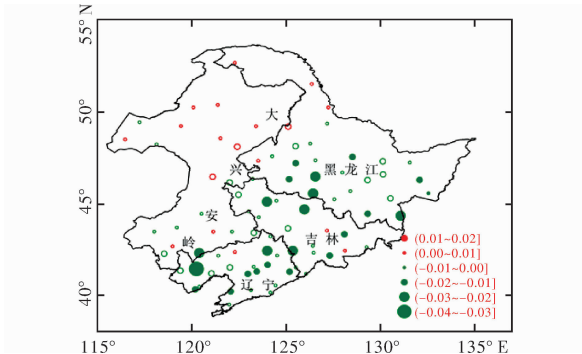


图3 1961–2010年春季FFDI趋势系数。

(注:红色表示趋势为正值,绿色为负值,填色圆点表示趋势系数通过95%置信水平检验。)

3 FFDI 极值 GDP 拟合

广义帕雷托分布(GPD)的分布函数为:

$$F(x) = 1 - \left[1 - \kappa \left(\frac{x - \zeta}{a} \right) \right]^{1/\kappa}, \quad \kappa \neq 0, \quad \zeta \leq x \leq \frac{a}{\kappa}. \quad (8)$$

概率密度函数为:

$$f(x) = \left(\frac{1}{a} \right) \left[1 - \kappa \left(\frac{x - \zeta}{a} \right) \right]^{\frac{1}{\kappa} - 1}. \quad (9)$$

式中: ζ 为门限值; a 称为尺度参数; κ 为线型参数或形状参数。GPD 公式中参数的估计采用极大似然估计法(MLE),具体算法参考文献^[13-14]。

参数确定后可得到 GPD 的极值分位数,该公式为:

$$x_T = \zeta + \frac{a}{\kappa} [1 - (\lambda T)^{-\kappa}]. \quad (10)$$

式中: $\lambda = n/m$, n 为大于门限值的极值数量, m 为总样本量; T 为选定的重现期值。

3.1 FFDI 极值空间分布

对门限值的选取是进行 GPD 模拟的关键步骤,如果门限值选取过高,超门限样本数就太少,估计的参数方差很大;若门限值选取过小,则超门限样本数过多,会导致估计值产生大的偏差。目前关于门限值的选取有多种,如超额限

望法、试凑法、拟合优度法和 Hill 图解法等^[15-17]。万仕全等^[18]对南京过去 100 年极端日降水模拟表明,对于长度不小于 50 年的气候序列,第 91% 百分位点上的数据作为门限值基本能满足 GPD 研究需要,本文采用该方法来确定各站 FFDI 的门限值。Bonsal 等^[19]提出一种百分位阈值的计算方法:

$$p = \frac{(m - 0.31)}{(n + 0.38)}. \quad (11)$$

式中: n 为站点序列 $\{X\}$ 的总样本量, m 为按升序排列的序列 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 中 x_n 的序号 ($m = 1, 2, \dots, n$),而 p 定义为变量 X 的某个观测值小于等于 x_m 的概率。由此,选取 p 为 91% 时的 x_m 作为各站的门限值,若序列中没有 p 值恰好为 91% 的观测值,则门限值由 p 为 91% 相邻的观测值线性内插得到。

图 4 为超过各站门限值的 FFDI 极值平均值分布,从图可看出 FFDI 极值高值区主要分布在吉林白城市到内蒙古赤峰市之间的带状区域内,辽宁西部的朝阳市也有高值区存在。图中也可发现在长春、哈尔滨、大庆一带 FFDI 极值平均值也较高,这可能与这一带为人口密集区有关,研究表明^[20-21]在人口稠密区空气温度比郊区偏高,可能导致这一地带 FFDI 较高。

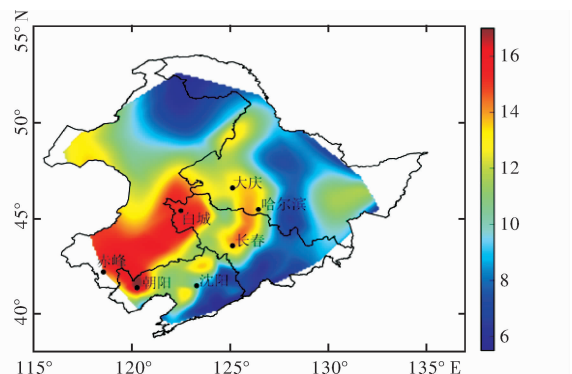


图4 超过门限值的春季 FFDI 指数平均值空间分布。

3.2 GPD 拟合检验

为了对 GPD 模型来拟合 FFDI 极值的合理性进

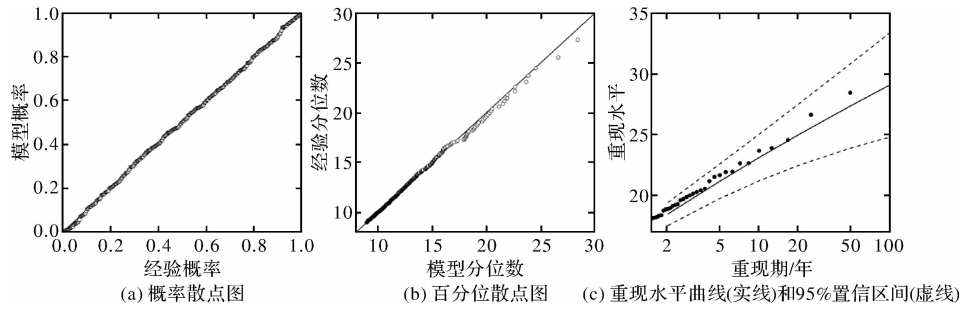


图4 GPD方法对齐齐哈尔站FFDI极值的拟合诊断图。

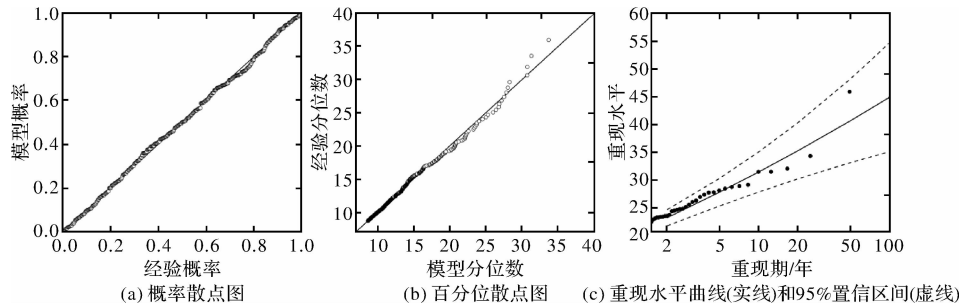


图5 GPD方法对长春站FFDI极值的拟合诊断图。

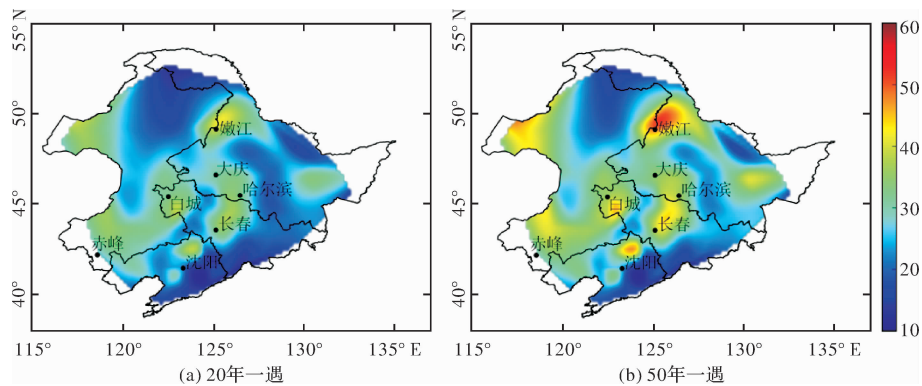


图6 给定重现期下FFDI极值的空间分布。

行诊断, 首先查看 2 个站点的 GPD 拟合诊断图。图 4 为齐齐哈尔站 FFDI 极值的 GPD 拟合效果, 可见图 4a 中 (PP 图) 的点几乎都落在了直线上, 在图 4b 中 (QQ 图) 中除了高分位数有个别点误差较大外, 其余点均能落在直线上, 表明 GPD 模型能很好的拟合样本数据, 图 4c 中重现期水平图上可看出重现期都在 95% 置信区间内, 也说明了模型的合理性。图 5 为长春站的模型诊断图, 图中结果说明 GPD 模型对长春站也同样适用。

Kolmogorov-Smirnov 正态性检验 (K-S 检验) 用来比较一个经验分布 $F(x)$ 和理想分布 $G(x)$ 是否相同。假定 $F(x)$ 和 $G(x)$ 中样本数分别为 m 和 n , 定义:

$$D = \max_x |F(x) - G(x)| \quad (12)$$

D 值越小说明经验分布越接近于理论分布, 拟合效果越好。零假设为经验分布和理想分布相同, 若 $D > D_a$ 则拒绝零假设, 即认为经验分布和理论分布不一致, 其中 D_a 为临界值。当 m 和 n 足够大时,

可给定 $D_a = c(a) \sqrt{\frac{m+n}{mn}}$, 信度标准 a 取 0.10、0.05、0.01 时 $c(a)$ 分别取 1.22、1.36 和 1.63。

表1 FFDI 极端值 GPD 分布的 K-S 检验

	$D < D_{0.10}$	$D > D_{0.10}$	$D > D_{0.05}$	$D > D_{0.01}$
站点数目	83	3	2	0
百分比/%	96.5	3.5	2.3	0.0

用 K-S 检验法对 85 个站点 FFDI 极值的 GPD 拟合进行检验 (表 1), 可在 86 个站点中只有 3 个站点 (约 3.5%) 的经验分布和理论分布在 90% 置信水平下不一致, 在 95% 置信水平下不一致的仅有 2 个, 表明用 GPD 分布来描述各站 FFDI 极值是切实可行的。

3.3 给定重现期极值的分布

图 6 为给定重现期下 FFDI 极值的空间分布, 在 20 年一遇和 50 年一遇重现期下 FFDI 极值分布基本相似。图中可见 FFDI 极值大值中心分布不均匀, 在辽宁铁岭, 吉林白城、长春, 黑龙江嫩江有大值中心存在, 此外内蒙古四盟市西部地区 FFDI 极值也较高。在 50 年一遇重现期下, 大值中心的 FFDI 极值都超过 40, 其中黑龙江嫩江的 FFDI 极值高达 57。图中也可看出, 在大兴安岭和长白山区域的 FFDI 极值普遍较低, 在 50 年一遇重现

期下这些区域的 *FFDI* 极值低于 25。

4 结论与讨论

以东北地区 85 个站点的春季逐日气象观测数据为基础,研究了春季各站 *FFDI* 的空间分布和变化趋势,并用 GPD 拟合研究了 *FFDI* 极值分布和重现期特征,结论如下:

(1)东北地区春季 *FFDI* 高值区分布于吉林西部、辽宁西部和内蒙东四盟市南部区域,这些区域基本位于山脉背风坡一侧。各站 50 年春季 *FFDI* 值的趋势变化大致以大兴安岭山脊为界,山脊以东站点的 *FFDI* 趋势系数大部分为负值,其中部分站点趋势系数通过了 95% 置信水平检验,山脊以西站点趋势系数为正值,但趋势不显著。

(2)利用 GPD 模型的概率分布对各站 *FFDI* 极值的拟合效果较好,96.5% 站点的 *FFDI* 极值分布和理论分布相一致。

(3)20 年一遇和 50 年一遇的 *FFDI* 极值空间分布大体一致,在 50 年一遇中 *FFDI* 极值高值区 *FFDI* 值超过 40,而大兴安岭和长白山区域的 *FFDI* 极值相对较低,这些区域的 *FFDI* 值普遍低于 25。

参考文献:

- [1] Mouillot F, Field CB. Fire history and the global carbon budget: a $1^\circ \times 1^\circ$ fire history reconstruction for the 20th century [J]. *Glob Chang Biol.*, 2005, 11: 398 - 420.
- [2] Dempsey F. Forest fire effects on air quality in Ontario: Evaluation of several recent examples [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2013, 94: 1059 - 1064.
- [3] Beale J and W Jones. Preventing and reducing bushfire arson in Australia: A review of what is known [J]. *Fire Technol.*, 2011, 47: 507 - 518
- [4] Stocks B J, B D Lawson, M E Alexander, et al. The Canadian for-

- est fire danger rating system: An overview [J]. *For. Chron.*, 1989, 65: 450 - 457.
- [5] McArthur A G. Weather and grassland fire behavior [M]. *Forestry and Timber Bureau Leaflet*, 1966, 100: 23.
- [6] McArthur, A. G. Fire behavior in eucalypt forests [M]. *Forestry and Timber Bureau Leaflet*, 1967, 107: 36.
- [7] Deeming J E, R E Burgan and J D Cohen. The National Fire - Danger Rating System [M]. *USDA Forest Service General Tech. Rep. INTUS*, 1978, 39 - 49.
- [8] 牛若芸, 翟盘茂, 余万明. 森林火险气象指数的应用研究 [J]. *应用气象学报*, 2007, 18(4): 479 - 489.
- [9] 丁裕国, 李佳耘, 江志红. 极值统计理论的进展及其在气候变化研究中的应用 [J]. *气候变化研究进展*, 2011, 7(4): 248 - 252.
- [10] Noble I R, G A V Bary and A M Gill. McArthur's fire danger meters expressed as equations [J]. *Aust. J. Ecol.*, 1980, 5: 201 - 203.
- [11] Griffiths D. Improved formula for the drought factor in McArthur's forest fire danger meter [J]. *Aust. For.*, 1999, 62: 202 - 206.
- [12] Finkele K, G A Mills, G Beard, et al. National gridded drought factors and comparison of two soil moisture deficit formulations used in prediction of Forest Fire Danger Index in Australia [J]. *Aust. Meteor. Mag.*, 2006, 55: 183 - 197.
- [13] Martins E S and Stedinger J R. Generalized maximum likelihood extreme value quantile estimators for hydrologic data [J]. *Water Resources Research*, 2000, 36 (3): 737 - 744.
- [14] Martins E S and Stedinger J R. Generalized maximum likelihood Pareto - Poisson estimators for partial duration series [J]. *Water Resources Research*, 2001, 37 (10): 2551 - 2557.
- [15] 司波, 余锦华, 丁裕国. 四川盆地短历时强降水极值分布的研究 [J]. *气象科学*, 2012, 32(4): 403 - 410.
- [16] 江志红, 丁裕国, 朱莲芳, 等. 利用广义帕雷托分布拟合中国东部日极端降水的试验 [J]. *高原气象*, 2009, 28(3): 573 - 580.
- [17] 蔡敏, 丁裕国, 江志红. 我国东部极端降水时空分布及其概率特征 [J]. *高原气象*, 2007, 26(2): 309 - 317
- [18] 万仕全, 周国华, 潘柱, 等. 南京过去 100 年极端日降水量模拟研究 [J]. *气象学报*, 2010, 68(6): 790 - 799.
- [19] Bonsal B R, ZHANG X, Vincent L A et al. Characteristics of Daily and Extreme Temperatures over Canada [J]. 2001, 14: 1959 - 1976.
- [20] 侯学英. 中国城市化水平与城市气温变化的灰色关联分析 [J]. *生态经济*, 2009(1): 59 - 62.
- [21] 邵全琴, 孙朝阳, 刘纪远, 等. 中国城市扩展对气温观测的影响及其高估程度 [J]. *地理学报*, 2009, 64(11): 1292 - 1302.

Forest Fire Danger Index of Northeast China Region in Summer and its Characteristics of Extreme Value

LIU Jimin¹, HUANG Hong² and WANG Xuezhong²

(1. No. 92493 of PLA, Huludao 125000, China;

2. School of Meteorology and Oceanography, National University of Defence Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: Based on daily observational data in northeast China region in the period 1961-2010, the forest fire danger index (*FFDI*) were calculated and Generalized Pareto Distribution (GPD) was also used to fit the extreme value of *FFDI*, the main results show as following: the high value area of *FFDI* were located in western Jilin province, western Liaoning province and Chifeng, Tongliao, Hinggan league in Inner Mongolia, and all these areas are basically located in the leeward slope. The distribution of trend coefficient of *FFDI* were divided into two parts, the stations located to the east of the ridge of the Greater Khingan presented a negative trend and the trend were significant for some stations, the trend were positive for stations west of the ridge of Greater Khingan, but none of them was significant. The probability distribution of GPD model can be well fitted to the extreme value of *FFDI*, and the empirical distributions of 96.5% station were consistent with the theoretical distribution. The spatial distributions were substantial agreement for the 20-year and 50-year return values of extreme *FFDI*, the high value of 50-year return value were greater than 40 and low value were generally less than 25.

Key words: northeast China region; forest fire risk; meteorological index; extreme value; return period