

# 东北地区生长季潜在蒸散量的变化特征分析<sup>\*</sup>

陈 莉<sup>1</sup>, 方丽娟<sup>1</sup>, 李 帅<sup>2</sup>

(1. 黑龙江省哈尔滨市气象局, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 黑龙江省气象科学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150030)

**摘 要:** 采用1998年联合国粮农组织修订的Penman-Monteith模型计算了东北三省1960-2008年期间各地的潜在蒸散量。东北地区潜在蒸散量的基本分布特征为南多北少, 随着纬度的增加, 潜在蒸散量随纬度递减的特征越来越明显。近50年来东北地区生长季潜在蒸散量呈显著的增加趋势, 东北北部增加趋势比南部更为显著, 其中9月增加趋势最为显著。

**关键词:** 潜在蒸散量; Penman-Monteith模型; 变化特征; 东北地区

**中图分类号:** P426.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-811X(2010)02-0092-05

在所有自然灾害中, 旱灾影响的范围最广、影响的人口最多。据民政部统计, 1989-1998年, 干旱所造成的灾害在所有气象灾害中占50%, 1999-2005年, 达到60%以上<sup>[1]</sup>。东北地处我国中高纬度, 是我国重要的商品粮生产基地, 更是气候变化较敏感的季风气候区。近百年来东北温度增加了1.43℃, 是全球增温率的2倍, 全国增温率的3倍<sup>[2]</sup>。在全球气候变暖的背景下, 东北地区对农业生产有直接和决定性影响的水热状况发生了一定的变化, 农业生产受降水制约的矛盾也突显出来。谢安等<sup>[3]</sup>、孙永罡等<sup>[4]</sup>采用气温和降水组成的大气干旱指数, 分析得出东北三省干旱化趋势北部大于南部, 东北三省干旱化日益严重; 王亚平等<sup>[5]</sup>研究得出黑龙江省大部、吉林东部进入1980年代后增湿倾向明显; 孙凤华等<sup>[6]</sup>研究表明, 在东北地区降水总量具有减少趋势的背景下, 降水事件还有向极端化发展的倾向, 从而可能引起更多、更强的旱涝灾害; 侯依玲等<sup>[7]</sup>研究表明, 1980年代起东北北部有暖湿化趋势, 但南部的暖干化一直在加剧。王石立等<sup>[8]</sup>通过对1961-2000年东北地区大气干湿程度及水热匹配状况变化的研究表明, 1990年代中后期出现暖干化趋势, 并由春季转至夏季, 西部和南部比较明显。孙力等<sup>[9]</sup>研究表明潜热蒸发加大和降水共同导致1990年代以来, 东北地区呈现较强的变干趋势。以上研究所得结论不尽相同, 其对农作物的影响也不尽相同, 究竟东北地区在农业生产关键期的5-9月干、湿状况如何, 一个重要的因素就是潜在蒸散量的变化情况, 到目前为止, 有关东北地

区生长季潜在蒸散量研究成果还比较少, 本文将对东北地区生长季潜在蒸散量的空间分布特征及时间变化特征进行分析。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料

采用黑龙江、吉林和辽宁省三省建站时间较早的72个国家基本站(图1)的历年逐月资料。气象要素包括平均气温、平均最高气温、平均最低气温、平均风速、相对湿度、日照时数等6项, 研究年份为1960-2008年, 研究时段为农作物的生长季5-9月。

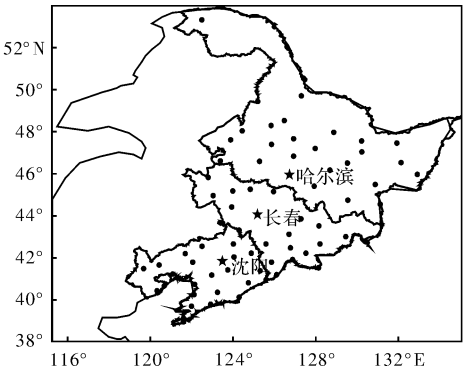


图1 研究选用的东北三省72个台站分布示意图

### 1.2 方法

#### 1.2.1 潜在蒸散量计算方法

潜在蒸散(发)量  $PE$  (Potential evapotranspiration) 称最大蒸发量或蒸发力, 是指下垫面足够湿

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2009-12-03

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(G200925); 中国科技部公益性行业专项(GYHY200706030)

作者简介: 陈莉(1972-), 女, 吉林扶余人, 高级工程师, 主要从事气候变化研究. E-mail: climate\_chenli@163.com

润条件下(包括了地上植被含水量和林地土壤含水量均达到饱和以上的情况), 水体保持充分供应的蒸发量。自然界的各种蒸发过程, 其过程由大气的状况和下垫面自身的状况共同决定。

计算潜在蒸散量的公式比较多, 如用温度计算作物生长季农田蒸发力的谢良尼诺夫法、考虑温度及日长的桑斯威特法、根据水量平衡方程方程进而得出蒸发力经验公式的丘克法、彭曼综合法、布德柯综合法、Thornthwaite、Hargreaves 公式、高桥浩一郎陆面蒸发经验模型等。我国学者采用不同的方法得出了一些有意义的结论<sup>[10-15]</sup>。

联合国粮农组织(FAO)专家认为, 从农业的角度分析气候干湿状况应当考虑农作物生长季的降水量和蒸散量, 而 Penman - Monteith(P - M)模型考虑了植被生理特征, 以能量平衡和水汽扩散理论为基础, 大量的试验结论表明在世界范围用P - M模型计算的参考作物蒸散与实测值最为接近, 1998 年 FAO 就将 P - M 模型确定为计算参考作物蒸散的标准方法。本文就采用 P - M 模型<sup>[16]</sup>计算潜在蒸散量。该模型定义了参考作物, 其高度为 0.12 m, 阻抗为 70 s/m, 反射率为 0.23, 类似于表面开阔, 高度一致, 生长旺盛, 完全遮盖地面而不缺水的绿色草地。该潜在蒸散量亦称为参考蒸散量, 计算式为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}, \quad (1)$$

式中:  $ET_0$  为潜在蒸散 (mm/d);  $R_n$  为净辐射 (MJ/(m<sup>2</sup> · d));  $G$  为土壤热通量 (MJ/(m<sup>2</sup> · d));  $T$  为月平均气温 (°C);  $u_2$  为 2 m 高处风速 (m/s);  $e_s$  为饱和水汽压 (kPa);  $e_a$  为实际水汽压 (kPa);  $\Delta$  为饱和水汽压 - 温度曲线斜率 (kPa/°C);  $\gamma$  为干湿表常数 (kPa/°C)。

逐年 5 - 9 月各月的潜在蒸散量之和, 即为逐年生长季潜在蒸散量。

### 1.2.2 气候统计方法

气候统计方法主要包括经验正交展开 (EOF) 方法、MK 突变分析方法、趋势系数和变化速率分析<sup>[17]</sup>等统计方法。

经验正交函数展开 (EOF)<sup>[18-19]</sup> 是已被气象科学广泛采用的统计方法, 它是把随时间变化的气象要素场分解为空间函数部分和时间函数部分。空间函数部分概括场的空间特征, 它不随时间变化; 而时间函数部分则由空间点 (变量) 的线形组合所构成, 称为主分量, 它只与时间有关, 研究这些主分量随时间变化

的规律就可以代替对场随时间变化的研究。

文中采用 Mann - Kendall (简称 MK) 法对潜在蒸散量进行突变分析。MK 方法<sup>[20]</sup> 以气候序列平稳为前提, 并且这序列是随机独立的, 其概率分布等同。

在原假设  $H_0$ : 气候序列没有变化的情况下, 设此序列为  $x_1, x_2, \dots, x_N$ ,  $m_i$  表示第  $i$  个样本  $x_i$  大于  $x_j$  ( $1 \leq j \leq i$ ) 的累计数。

定义一统计量:

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i, (2 \leq k \leq N). \quad (2)$$

在原序列的随机独立等假定下,  $d_k$  的均值和方差分别为:

$$\begin{cases} E[d_k] = \frac{k(k-1)}{4}, \\ \text{var}[d_k] = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}, \end{cases} (2 \leq k \leq N), \quad (3)$$

将  $d_k$  标准化:  $u(d_k) = \frac{d_k - E[d_k]}{\sqrt{\text{var}[d_k]}}$ , 这里

$u(d_k)$  为标准分布, 其概率  $\alpha_1 = \text{prob}(|u| > |u(d_k)|)$  可以通过计算或查表获得, 给定一显著水平  $\alpha_0$ , 当  $\alpha_1 > \alpha_0$  时, 接受原假设  $H_0$ , 反之, 则拒绝原假设, 它表示此序列将存在一个强的增长或减少趋势。所有  $u(d_k)$  ( $1 \leq k \leq N$ ) 将组成一条曲线  $C_1$ , 通过信度检验可知其是否有变化趋势。

把此方法引用到反序列中,  $\bar{m}_i$  表示第  $i$  个样本  $x_i$  大于  $x_j$  ( $i \leq j \leq N$ ) 的累计数, 当  $i' = N + 1 - i$  时, 如果  $\bar{m}_i = m_{i'}$ , 则反序列的  $\bar{u}(d_i)$  由下式给出:

$$\begin{cases} \bar{u}(d_i) = -u(d_{i'}), \\ i' = N + 1 - i, \end{cases} (i, i' = 1, 2, \dots, N), \quad (4)$$

$\bar{u}(d_i)$  在图中以曲线  $C_2$  表示, 当曲线  $C_1$  超过信度线, 即表示存在明显的变化趋势, 如果  $C_1$  和  $C_2$  的交叉点在信度线之间, 这点便于是突变点的开始。

为了反映潜在蒸散量的长期趋势变化, 本文计算了潜在蒸散量时间序列与自然数列之间的相关系数, 称为趋势系数<sup>[21]</sup>。由于消去了气象要素的均方差和单位对线性回归系数数值大小的影响, 从而可以在不同的地理位置、不同的气候要素之间比较趋势变化的大小, 同时对计算的趋势系数还可以进行相关系数的统计检验。趋势系数为正 (负) 时, 表示气候要素在所统计的时间内有线性增加 (减少) 的趋势。在分析潜在蒸散量的长期变化速率时, 采用最小二乘法计算气象要素值与时间的线性回归系数, 即得到变化速率。

## 2 潜在蒸散量的空间分布特征

### 2.1 空间分布的基本特征

通过式(1), 计算了东北三省 72 个站逐年生长季的潜在蒸散量, 而后得到了各站 1960–2008 年近 50 年的生长季潜在蒸散量平均值(图 2)。

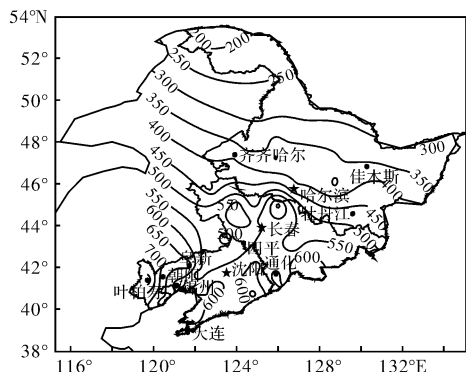


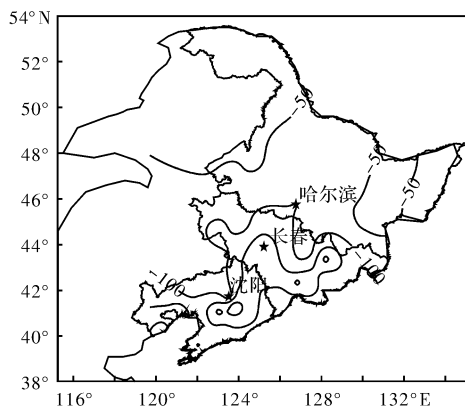
图 2 东北地区生长季潜在蒸散量历年平均值(mm)

从图 2 可以看出, 东北三省生长季潜在蒸散量的历年平均空间分布的总体特征是南多北少, 随着纬度的增加, 等值线的纬向性分布越来越明显; 分省来看, 辽宁、吉林、黑龙江潜在蒸散量依次递减, 辽宁普遍超过 550 mm, 吉林各站普遍超过 500 mm。潜在蒸散量大值区位于辽西地区, 叶柏寿、阜新、朝阳潜在蒸散量均超过 650 mm, 其中叶柏寿潜在蒸散量最大, 达 833 mm。黑龙江各站潜在蒸散量普遍低于 500 mm, 大致在 48°N 以北, 潜在蒸散量普遍小于 350 mm, 极小值位于黑龙江省最北部的漠河, 生长季潜在蒸散量仅为 182.5 mm。

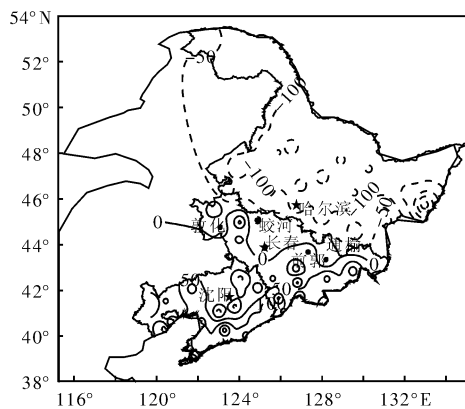
### 2.2 空间分异特征

为了研究东北三省生长季潜在蒸散量的空间分异特征, 对其进行了经验正交展开(EOF)。前两个特征向量的累积方差贡献率为 57.9%, 解释了东北地区生长季潜在蒸散量场的方差的一半以上, 因此就分析前两个特征向量就可以抓到主要信息。图 3 为东北地区生长季潜在蒸散量 EOF 展开的 EOF1 和 EOF2 的空间分布图。

第一特征向量占 43.9%, 全区符号一致, 它反映了东北生长季潜在蒸散量变化在空间上有很好的-一致性, 也就是说, 东北地区生长季潜在蒸散量的多与否并非局地现象, 而是一个大范围的现象。第二特征向量解释方差为 14%, 空间图上反映了东北地区南、北的反向变化(即南正北负或南负北正的特征), 0 线位置大致位于吉林省中北部的敦化、蛟河、长春、前郭尔罗斯、通榆一线。



(a) 空间分布



(b) 时间变化

图 3 东北地区生长季潜在蒸散量 EOF1 和 EOF2 空间分布和时间变化图

## 3 潜在蒸散量与降水、气温的关系

对 1960–2008 年东北三省 72 个站潜在蒸散量与降水进行了相关分析, 相关系数分布如图 4 所示。可以看出, 潜在蒸散量与降水主要呈反相关关系, 即降水越多, 潜在蒸散量越小, 辽宁、黑龙江大部相关系数通过了 0.01 显著性检验, 其大值区位于黑龙江北部的孙吴和北安, 相关系数超过了 -0.6。黑龙江南部部分地区和吉林大部地区, 相关系数没有通过 0.05 显著性检验, 尤其是吉林东部的延吉、三岔河、松江, 潜在蒸散量与降水呈微弱的正相关, 可能是由于这些地区位于长白山迎风坡, 降水不多, 但多云天气较多, 使得潜在蒸散量相对并不多, 这还有待于进一步研究。

对 1960–2008 年东北三省 72 个站潜在蒸散量与气温进行了相关分析, 相关系数如图 4 所示。潜在蒸散量与气温的相关性远远高于与降水的相关, 东北三省大部地区正相关均通过了 0.01 显著性检验, 这说明气温越高、潜在蒸散量越大, 其中大值区位于黑龙江北部, 相关系数超过 0.8。只有吉林东部部分地区正相关没有通过 0.05 显著性检验,

这些地区与上述分析的潜在蒸散量与降水的正相关区大体一致, 可能也是由于多云天气较多, 使得温度相对不高, 潜在蒸散量变化不敏感所致。

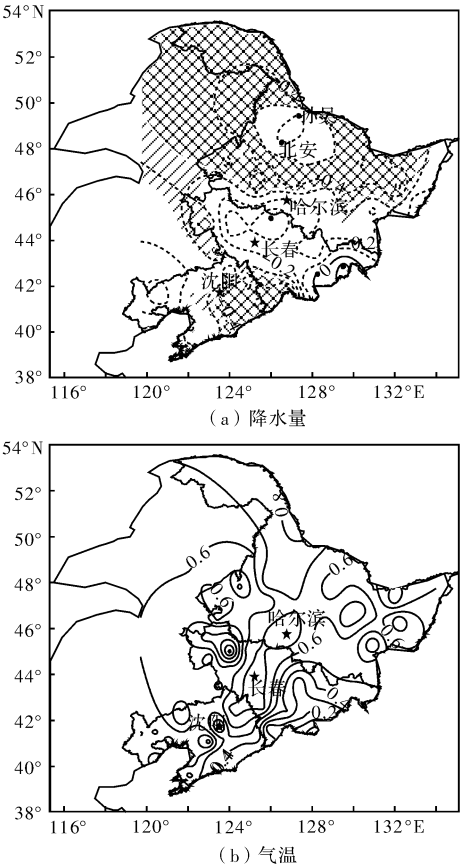


图4 东北地区生长季潜在蒸散量与降水量、气温的相关系数分布图(等值线间隔0.1;网状和条纹状阴影分别代表通过0.01、0.05显著性检验)

4 潜在蒸散量的时间变化特征

4.1 代表东北区、东北南部、东北北部生长季潜在蒸散量序列的定义

由于 EOF1 的空间特征是全区大部一致性, 且占据了较大比重, 我们用东北区全区 72 个站潜在蒸散量的平均值代表东北地区, 该序列命名为  $PE_1$ 。  
EOF2 的空间特征反映的是在全区一致性变化的基础上, 南、北反向变化的特征, 解释方差为 14%。因此, 根据 EOF2 的空间分布, 以 0 线为分界线, 以北的 34 个站均值序列代表东北地区北部, 该序列命名为  $PE_N$ ; 以南的 38 个站均值序列代表东北地区南部, 命名为  $PE_S$ 。

4.2 潜在蒸散量的气候变化趋势

1960–2008 年东北生长季潜在蒸散量呈增加趋势, 变化速率为 21.3 mm/10a。东北北部、东北南部生长季潜在蒸散量也均呈增加趋势, 且北部

增加趋势明显强于南部, 北部和南部近 50 年生长季潜在蒸散量的变化速率分别为 24.5 mm/10a 和 18.4 mm/10a。经计算, 东北区、东北北部、东北南部近 50 年的趋势系数分别为 0.415 4(通过 0.01 显著性检验)、0.494 4(通过 0.01 显著性检验)和 0.283 9(通过 0.05 显著性检验)。可见东北区生长季潜在蒸散量近 50 年增加趋势是显著的(表 1)。

表1 1960–2008 年东北区、东北北部、东北南部生长季(5–9 月)及逐月潜在蒸散量的趋势系数和变化速率

	5–9 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月
东北区	趋势系数 0.415 4 **	0.287 3 *	0.243 2	0.061 4	0.228 4	0.552 6 **
变化速率/(mm/10a)	21.3	15.9	22.1	0.65	20.5	38.0
东北北部	趋势系数 0.494 4 **	0.411 2 **	0.237 9	0.142 7	0.292 1 *	0.534 5 **
变化速率/(mm/10a)	24.5	17.5	22.2	14.2	33.3	35.4
东北南部	趋势系数 0.283 9 *	0.196 2	0.203 1	–0.002 2	0.083 0	0.508 8 **
变化速率/(mm/10a)	18.4	14.4	22.0	–0.03	0.90	40.2

注: \* 和 \*\* 分别为通过 0.05、0.01 显著性检验

在 5–9 月这 5 个月中, 东北区各月潜在蒸散量均表现出增加的趋势, 其中 9 月增加趋势通过 0.01 显著性检验, 变化速率为 38 mm/10a; 5 月增加趋势通过 0.05 显著性检验, 变化速率为 15.9 mm/10a; 7 月增加趋势最微弱。

东北北部各月潜在蒸散量也均表现出增加趋势, 其中 5 月、9 月增加趋势通过 0.01 显著性检验, 变化速率分别为 17.5 mm/10a 和 35.4 mm/10a; 8 月增加趋势通过 0.05 显著性检验, 变化速率为 33.3 mm/10a; 7 月增加趋势较弱。

东北南部潜在蒸散量 5、6、8、9 月表现出增加趋势, 而 7 月则出现较弱的减少趋势。9 月增加趋势通过 0.01 显著性检验, 变化速率为 40.2 mm/10a。

4.3 东北区潜在蒸散量的突变分析

对  $PE_1$ 、 $PE_N$ 、 $PE_S$  三条时间序列进行 5 点高斯滑动后, 进行了 MK 突变分析, 结果如图 5 所示。东北区、东北北部、东北南部潜在蒸散量分别在 1995 年、1994 年、1995 年发生了突变, 也就是说, 无论是东北区、还是东北北部、东北南部, 潜在蒸散量在 1990 年代中期后发生了明显的增加, 这与该区气温在 1990 年代中期显著增加是相一致的。

5 讨论

采用 FAO 推荐的 P–M 模型计算了东北三省 72 个台站近 50 年来生长季的潜在蒸散量, 研究表明: 东北地区生长季潜在蒸散量的变化存在明显的

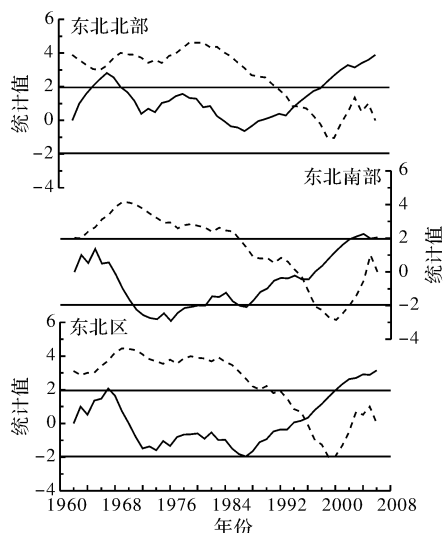


图5 东北区、东北北部、东北南部序列生长季潜在蒸散量的 Mann-Kendall 突变检验曲线(实线为  $C_1$ , 虚线为  $C_2$ )

一致变化性,在变化一致的基础上,具有南北反向变化的特点。近 50 年来,东北全区平均生长季潜在蒸散量变化速率为  $21.3 \text{ mm}/10\text{a}$ ,通过了显著性检验,其中 9 月潜在蒸散量增加趋势最为明显;东北北部生长季潜在蒸散量也呈现显著的增长趋势,变化速率为  $24.5 \text{ mm}/10\text{a}$ ,其中 5、9 月增加趋势显著;东北南部潜在蒸散量增加趋势的显著性弱于东北区和东北北部,但其中 9 月增加趋势仍通过了 0.01 显著性检验。东北全区、东北北部、东北南部生长季潜在蒸散量在 1990 年代中期存在突变。

研究所得到的东北区生长季潜在蒸散量显著增加的结论与文献[5]有所不同,文献[5]中提到东北区 1980 年到 2005 年间全年潜在蒸散量比 1960 – 1979 年略有减少,主要原因是文献[5]把 P-M 模型应用到了全年,而东北地区冬季冰雪覆盖时间较长,下垫面与 P-M 模型所要求的绿色植被差别较大。

## 参考文献:

- [1] 冯金社,吴建安.我国旱灾形势和减轻旱灾风险的主要对策[J].灾害学,2008,23(2):34–36.
- [2] 孙风华,袁健,路爽.东北地区近百年气候变化及突变检测[J].气候与环境研究,2006,11(1):101–108.
- [3] 谢安,孙永罡,白人海.中国东北近 50 年干旱发展及对全球气候变暖的响应[J].地理学报,2003,58(S0):75–82.
- [4] 孙永罡,白人海,谢安.中国东北地区干旱趋势的年代际变化[J].北京大学学报:自然科学版,2004,40(5):806–813.
- [5] 王亚平,黄耀,张稳.中国东北三省 1960–2005 年地表干燥度变化趋势[J].地球科学进展,2008,23(6):619–626.
- [6] 孙风华,吴志坚,杨素英.东北地区近 50 年来极端降水和干燥事件时空演变特征[J].生态学杂志,2006,25(7):779–784.
- [7] 侯依玲,李栋染,施雅风,等.我国东北及邻近地区年平均气温异常及其对北半球气候变暖 and 欧亚雪盖面积的响应[J].冰川冻土,2006,28(6):900–908.
- [8] 王石立,庄立伟,王馥棠.近 20 年气候变暖对东北农业生产水热条件影响的研究[J].应用气象学报,2003,14(2):153–164.
- [9] 孙力,沈柏竹,安刚.中国东北地区地表干湿状况的变化及趋势分析[J].应用气象学报,2003,14(5):542–552.
- [10] 梁洋学,江静.中国北方地区 1961–2000 年干旱半干旱化趋势[J].气象科学,2005,25(1):9–17.
- [11] 孙风华,袁健.近 40 年来辽宁地区气候干湿界线年代际波动及其成因[J].应用生态学报,2006,17(7):1274–1279.
- [12] 王葵,谢贤群,李运生,等.中国北方地区 40 年来湿润指数和气候干湿带界线的变化[J].地理研究,2004,23(1):45–54.
- [13] 吴绍洪,尹云鹤,郑度,等.近 30 年中国陆地表层干湿状况研究[J].中国科学 D 辑:地球科学,2005,35(3):276–283.
- [14] 马柱国,符淙斌.1951–2004 年中国北方干旱化的基本事实[J].科学通报,2006,51(20):2429–2439.
- [15] 安刚,孙力,廉毅.东北地区可利用降水资源的初步分析[J].气候与环境研究,2005,10(1):132–139.
- [16] Richard G Allen, Luis S Pereira, Dirk Raes, et al. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements [EB/OL]. [2009-07-12]. <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>.
- [17] 李帅,陈莉,任玉玉.1951/1952–2004/2005 年中国冬季降水变化研究[J].热带气象学报,2008,24(1):94–98.
- [18] 黄嘉佑.气象统计分析与预报方法[M].北京:气象出版社.1990.
- [19] 马开玉,丁裕国,屠其璞,等.气候统计原理与方法[M].北京:气象出版社.1993.
- [20] 符淙斌,王强.气候突变的定义和检测方法[J].大气科学,1992,16(4):482–493.
- [21] 王颖,施能,顾骏强,等.中国雨日的气候变化[J].大气科学,2006,30(1):162–170.

## Variation Characteristics of Potential Evapotranspiration in Growing Season of Crops in Northeast China

Chen Li<sup>1</sup>, Fang Lijuan<sup>1</sup> and Li Shuai<sup>2</sup>

(1. Harbin Meteorological Bureau, Harbin 150080, China;

2. Heilongjiang Research Institute of Meteorological Science, Harbin 150030, China)

**Abstract:** Potential evapotranspiration of growing season in Northeast China during 1960–2008 is computed by using Penman-Monteith model which was emended by FAO in 1998. Potential evapotranspiration in southern area is higher than that of northern area in Northeast China. With higher latitude, it is more obvious that the potential evapotranspiration becomes lower. There is a significant increasing trend of potential evapotranspiration in recent 50 years, especially in northern area and in September.

**Key words:** potential evapotranspiration; Penman-Monteith model; variation characteristics; Northeast China