

近 60 年来东北地区参考作物蒸散量时空变化

曾丽红^{1,2}, 宋开山¹, 张 柏¹, 王宗明¹, 杜 嘉^{1,2}

(11 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012, 21 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 利用东北地区 106 个站点 1951~2007 年的逐日气象资料, 采用 Penman-Monteith 公式计算得到各站点的逐日、逐年 ET_0 , 并通过反距离插值得到逐年 ET_0 及多年平均 ET_0 网格数据, 最后通过墨西哥帽小波变换、Mann-Kendall 检验、REOF、倾向率等方法探讨了全区平均 ET_0 及多年平均 ET_0 的时空变化特征。研究结果表明: ① 全区平均 ET_0 总体上表现较小幅度的增长趋势, 其倾向率为 31.89 mm/(10a), 分别在 1982、1953 年取得最大、最小值; ② 在 8216 年时间尺度上, 全区平均 ET_0 的周期振荡非常明显, 期间经历了 /少y 多y 少y 多 4 个循环交替过程, 其中又以 8~10 年周期内的振荡最为强烈; ③ 多年平均 ET_0 在 600~1160mm 之间, 空间分异明显, 其总体分布特征为: 南高北低, 西高东低, 从东北向西南逐渐增加, 等值线呈半环状; ④ 从倾向率来看, ET_0 增加、减少的面积比例分别为 72.16%、26.13%, 其中嫩江的增加趋势最明显, 倾向率为 301.6mm/(10a), 叶柏寿的下降趋势最明显, 倾向率为 -241.4 mm/(10a)。

关键词: 参考作物蒸散量; Penman-Monteith 公式; 时空变化; 东北地区

中图分类号: S161.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2679(2010)02-0194-07

参考作物蒸散量 (Reference Evapotranspiration ET_0) 是作物需水量预测中最为关键的参数, 它受制于当地当时的气候条件, 反映了不同地区不同时期的大气蒸散能力对作物需水量的影响, 与作物种类及土壤类型无关^[1]。 ET_0 是生态环境优化协调、水资源优化配置的关键^[2], 是国家通用的评价水文水资源和制定水法、国际河流水资源分配及水环境评估的重要依据^[3]。联合国粮农组织 (FAO) 按照 Penman-Monteith 公式 (简称 PM 公式) 的要求, 将 ET_0 定义为: 一种假想的参考作物冠层的蒸散速率, 假设作物高度为 0.12 m, 表面阻力为 70 s/m, 冠层反照率为 0.123, 相当于表面开阔、高度一致、生长旺盛、完全遮蔽地面而不缺水的绿色草地的蒸散量^[4]。PM 公式以能量平衡方程和水汽扩散理论为基础, 既考虑了作物的生理特征, 又考虑了空气动力学参数的变化, 具有充分的理论依据, 因此 FAO 26 分册将其推荐为计算 ET_0 的标准方法, 并有许多成功的范例^[5,29]。

本文以逐日气象资料为数据源, 采用 PM 公式计算东北地区 1951~2007 年的 ET_0 , 并通过墨西哥帽小波分析、Mann-Kendall 检验、REOF、倾向率等方法探讨东北地区近 60 年来 ET_0 的时空变化特征, 以期为该区域作物需水量研究和制定合理的灌溉措施提供科学依据, 为实现高效管理、合理利用水资源提供参考。

1 资料和方法

1.1 研究区概况

东北地区是一个较为完整而又相对独立的自然地理与经济地理区域, 是中国重要的农、林、牧业和工业生产基地。该区位于中国大陆的东北部, 包括黑龙江、吉林、辽宁三省及内蒙古自治区东部的呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市和赤峰市, 地理范围为 115°31'E~135°05'E, 38°43'N~53°34'N, 总面积约 124 万 km^2 。冬季

收稿日期: 2009-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40871187); 中国科学院知识创新工程资助项目 (C08Y46)

作者简介: 曾丽红 (1983-), 女, 湖南邵阳人, 博士研究生, 主要从事蒸散与地表能量平衡研究。

E-mail: lzhonghell@163.com

通信作者: 宋开山, E-mail: songks@neigad.ac.cn

寒冷漫长; 春季干旱多风; 夏季气温较高, 是主要的降水季节; 秋季多晴朗天气, 盛行西南风, 降水比春季稍多。4 月下旬到 9 月下旬为该区的作物生长季, 平均气温稳定在 10e 以上, 基本上能满足一年一熟作物的需要。

112 数据源

气象数据为从国家气象局下载的逐日气象资料, 研究区 106 个气象站点的分布见图 1(篇幅所限, 站名略, 以代号表示)。由于各站的建站年代、数据质量存在一定差别, 需要进行插补延长, 方法为: 若某站的最高气温、最低气温、平均风速、平均相对湿度、日照时数中有一项缺测或为不合理值, 便由其余站点对应日期的数据通过反距离插值得到该站点的气象要素, 最后建立气象要素的时间序列数据集。

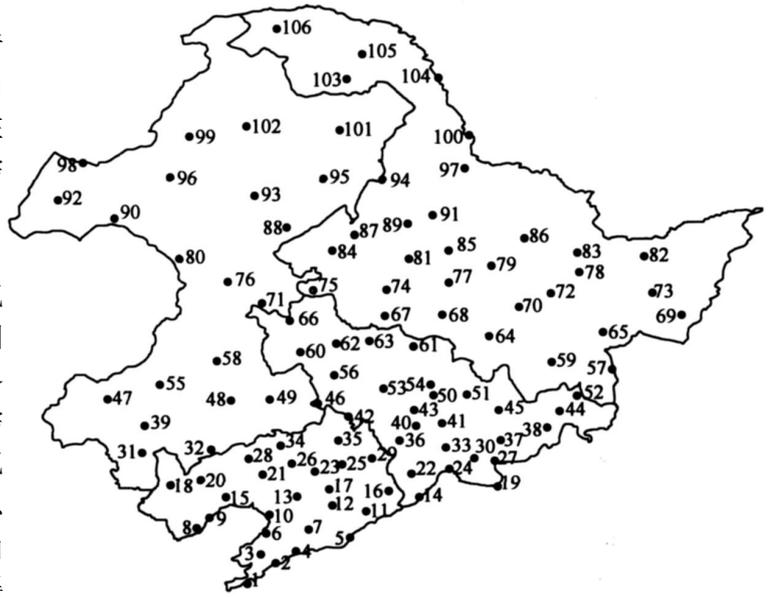


图 1 东北地区气象站点分布

Fig 1 Location of meteorological stations in Northeast China

113 计算 ET_0

利用 FAO256 分册推荐的 PM 公式计算 ET_0 , 表达式为^[1]

$$ET_0 = \frac{0.1408(R_n - G) + C \left(\frac{900}{T_{m, \text{can}} + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\$ + C(1 + 0.134u_2)} \quad (1)$$

式中 R_n 为净辐射量; G 为土壤热通量; C 为湿度计常数; $T_{m, \text{can}}$ 为 2m 高处平均气温; u_2 为 2m 高处平均风速; e_s 、 e_a 分别为饱和水汽压、实际水汽压; $\$$ 为水汽压曲线斜率。 R_n 、 G 、 C 、 e_s 、 e_a 、 $\$$ 的计算方法详见文献 [12, 5]。根据逐日 ET_0 按年份统计得到各站点的逐年 ET_0 , 并通过反距离插值得到分辨率为 0.01 度的逐年 ET_0 网格数据, 并在此基础上得到多年平均 ET_0 网格数据。

114 墨西哥帽小波变换

采用墨西哥帽小波 (Mexican Hat) 函数对 ET_0 时序数据进行连续小波变换, 其小波母函数为 $W(t) = (1 - t^2)e^{-t^2/2}$ [10]。

115 倾向率

年份是逐年递增的, 可以视为自然数列 1, 2, ..., n。因此, 将逐年 ET_0 、自然数列分别当作因变量、自变量建立线性回归方程: $ET_0 = a + bt$, a 、 b 为回归系数, 通过最小二乘法计算。将 b 称为 ET_0 的倾向率, 单位为 $\text{mm}/(10a)$ 。 $b = r_{ET_0} / R_b$, 其中 r 为逐年 ET_0 与自然数列的相关系数, R_{ET_0} 、 R_b 分别为逐年 ET_0 、自然数列的标准差。

2 结果与分析

211 全区平均 ET_0 变化特征

(1) 年际及年代际特征 根据逐年 ET_0 格网数据统计东北地区界线范围内逐年 ET_0 的平均值, 得到逐年的全区平均 ET_0 。图 2 为全区平均 ET_0 的年际变化曲线及线性趋势线, 可以得知: 全区平均 ET_0 的多年平均值为 8451.94 mm, 相当于平均每年有总量约为 10509 亿 m^3 的水通过蒸散从地表运移到大气中; 近 60 年来, 全区平均 ET_0 在 (850? 100) mm 的范围内波动, 在 1982 年取得最高值, 为 9151.11 mm, 在 1953 年取得最

低值, 为 7641.03 mm; 全区平均 ET_0 的倾向率为 3189 mm / (10a), 表明全区平均 ET_0 大致呈上升趋势, 但增幅较小。

表 1 为各年代的全区平均 ET_0 距平, 可以看出, 20 世纪 50、80、90 年代的距平为负, 说明 ET_0 偏少, 50 年代的 ET_0 最低; 其余 3 个年代的距平都大于零, 说明 ET_0 偏多, 其中 70 年代的 ET_0 最高。80 年代全区平均 ET_0 距平为 - 2180 mm, 距平百分比为 - 0133%, 说明这段时间内的全区平均 ET_0 非常接近于多年平均值。

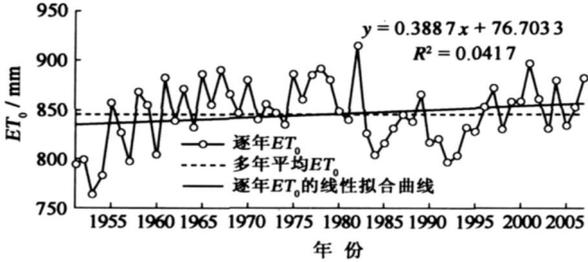


图 2 全区平均 ET_0 的年际变化

Fig 2 Annual variation of regional average ET_0

表 1 全区平均 ET_0 的年代距平

Table 1 Decadal anomalies of regional average ET_0

年代	距平 /mm	距平百分比 /%
1951~1959年	- 291.70	- 31.51
1960~1969年	111.47	11.36
1970~1979年	191.93	21.36
1980~1989年	- 21.80	- 01.33
1990~1999年	- 141.56	- 11.72
2000~2007年	151.87	11.88

(2) 周期特征 图 3(a)为逐年全区平均 ET_0 距平的墨西哥帽小波变换图, 它显示了 ET_0 在不同时间尺度的周期振荡, 小波系数反映了信号的强弱, 实线表示取正值的等值线, 代表 ET_0 偏多的时期, 虚线表示取负值的等值线, 代表 ET_0 偏少的时期, 小波系数为零则对应着转折点。从图 3(a)可以看出, 不同时间尺度所对应的全区平均 ET_0 在结构有很大差别, 存在多重尺度上的复杂嵌套结构现象。在 8~ 16 年时间尺度上全区平均 ET_0 的周期振荡非常明显, 期间经历了 /少 y 多 y 少 y 多 0 4 个循环交替过程。1962 年以前、1983~ 2001 年 ET_0 偏少, 1963~ 1982 年、2002 年以后 ET_0 偏多, 直到 2007 年小波系数等值线仍未闭合, 说明在 2007 年以后的一段时间内 ET_0 仍将偏多。对于 4 年以下的时间尺度来说, 全区平均 ET_0 的变化规律更为复杂, 有更多的偏多期与偏少期交替出现。图 3(b)为小波变换方差图, 它反映了小波能量随时间尺度的变化, 通过小波方差可以确定各种时间尺度扰动的相对强度, 峰值所对应的时间尺度为全区平均 ET_0 变化的主要周期。从图 3(b)可以看出, 小波方差在时间尺度为 9 年的时候取得峰值, 表明全区平均 ET_0 的变化以 8~ 10 年周期内的振荡最强。

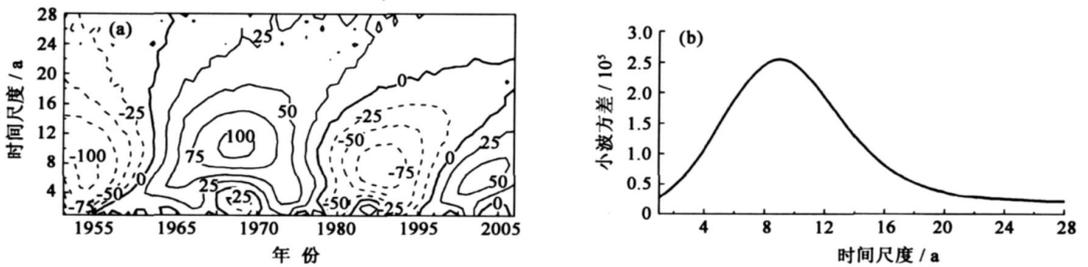


图 3 全区平均 ET_0 距平的墨西哥帽小波变换图 (a)与小波方差图 (b)

Fig 3 Mexican hat wavelet transform (a) and wavelet variance (b) for anomaly regional average

(3) 突变特征 采用 Mann-Kendall 检验 (简称 MK 检验) [11213] 对全区平均 ET_0 进行突变检测, MK 检验的检测范围宽、定量化程度高, 不需要样本遵从一定的分布, 也不受少数异常值的干扰, 更适用于类型变量和顺序变量 [14]。此外, 还通过滑动 t 检验、Yamamoto 来验证 MK 检验的结果, 从而判断突变点的真伪, 增强突变分析的可信度。通过 MK 检验得到统计量 U 的顺序、逆序变化曲线 UF、UB (图 4), 结合滑动 t 检验与 Yamamoto 检验的结果, 可以得知: 取显著性水平 0105 得到两条临界线 $y = ? 1196$ 在临界线之间曲线 UF、UB 相交于 A、B 两点, 分别对应于 1991 年、2001 年, 但是曲线 UF 并没有超出临界线, 说明在 0105

的显著性水平下, A、B 两点只是转折点, 全区平均 ET_0 并没有发生明显突变; 在 1991 年、2001 年两个交点前后时段内做滑动 t 检验、Yanamoto 检验, 取 $n_1 = n_2 = 5、6、7$ 时, 统计量皆不能通过 0.05 的显著性检验, 且信噪比小于 1, 进一步证明了全区平均 ET_0 在 1951~2007 年没有发生明显突变。

2.1.2 ET_0 的空间分布特征

东北地区幅员辽阔, 气候特征差异明显, 从东北到西南经历了湿润、半湿润、半干旱 3 种气候类型, 而多年平均 ET_0 是长时间序列下各种气候要素综合作用的结果, 也

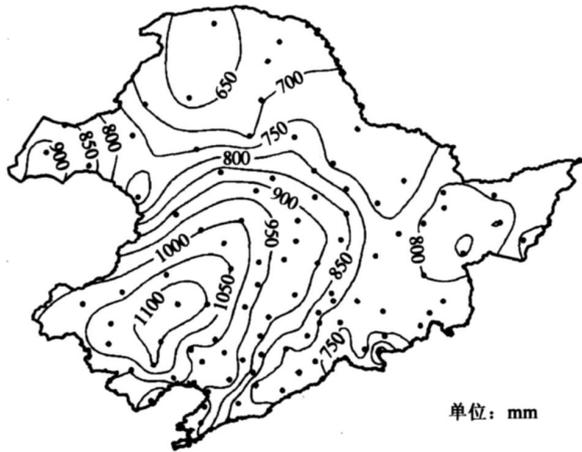


图 5 多年平均 ET_0 等值线图

Fig 5 Contour map of annual average

多年平均 ET_0 高达 1 157 mm。

为进一步分析东北地区 ET_0 的区域结构特性, 利用 106 个站点 57 年的 ET_0 进行旋转主成分分析 (REOF), 即选取主成分变换后的前 12 个载荷向量 (累积贡献 > 87%) 进行方差最大正交旋转, 根据载荷绝对值 > 0.15 对 ET_0 的空间特征进行区划, 得到前 4 个旋转载荷向量及 ET_0 分区图 (图 6)。从图 6 可以看出: ① 南区, 为第 1 旋转载荷向量 (图 6(a)) 的高值区, 位于研究区的南部, 包括辽宁省的大部分区域与内蒙古自治区的赤峰市, 该区气温较高、气候变化明显, ET_0 主要受气温与湿度的影响; ② 东区, 为第 2 旋转载荷向量 (图 6(b)) 的高值区, 位于黑龙江省的东部与吉林省的东北部, 该区地势低平, 降水丰富, ET_0 主要受太阳辐射的影响; ③ 西区, 为第 3 旋转载荷向量 (图 6(c)) 的高值区, 大致位于 45°N~50°N, 主要包括内蒙古自治区的 /满洲里 (98) 海拉尔 (96) 博克图 (93) 扎兰屯 (88) 0 一线附近区域以及黑龙江省的嫩江 (94)、黑河 (100)、孙吴 (97) 附近的区域; ④ 北区, 为第 4 旋转载荷向量 (图 6(d)) 的高值区, 位于黑龙江省的北部, 该区气温较低, 地貌特征复杂, ET_0 对气温的变化较为敏感。

2.1.3 ET_0 的变化趋势

从图 7 可以看出: ① 倾向率为正值 (白色区)、负值 (灰色区) 的区域分别占东北地区总面积的 72.16%、27.13%, 表明绝大部分区域的 ET_0 在总体趋势上表现为随年份递增而逐渐增加的趋势, 倾向率为负值的区域主要分布在 /大兴安岭 (101) 图里河 (102) 额尔古纳右旗 (99) 0 一线以北的山区、吉林省东部的山区、辽宁省的北部与西南部; ② 约 80% 区域的倾向率取值为 -10~10 mm/(10a), 表明东北地区的 ET_0 基本处于稳定状态, 其中倾向率为 0~10 mm/(10a) 的区域约占总面积的 5%; ③ ET_0 的递减幅度大于 10 mm/(10a) 区域的面积比约为 2%, 主要分布在辽宁省渤海湾西部的朝阳 (20)、锦州 (15)、叶柏寿 (18) 附近以及吉林省的汪

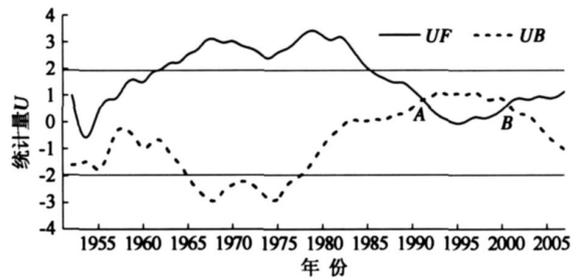


图 4 全区平均 ET_0 的 Mann-Kendall 检验

Fig 4 Mann-Kendall test of regional average ET_0

表现为显著的空间分异特性。由图 5 可知, 多年平均 ET_0 空间分布的总体特征为: 南高北低, 西高东低, 从东北向西南逐渐增加, 大多数等值线呈西南朝向的半环状分布。多年平均 ET_0 的空间分布与气候区分布、气温变化特征具有高度的空间一致性, 表明东北地区的 ET_0 主要受到湿度、气温两项气候因子的控制。与东部湿润区相比, 西部空气湿度较低, 可以加快地表空气流通及水汽运移, 蒸散活动十分强烈; 南部气温明显高于北部, 可以接收更多的太阳辐射, 为蒸散活动提供了较为充足的能量来源。/大兴安岭 (101) 站名代号, 下同) 图里河 (102) 额尔古纳右旗 (99) 0 一线以北、天池附近的区域成为低蒸散区, 多年平均 ET_0 小于 700 mm; 在 /白城 (66) 通榆 (60) 通辽 (49) 彰武 (34) 0 一线的西南部, 形成了高蒸散区, 多年平均 ET_0 在 1 000 mm 以上; 其中, 开鲁 (48) 成为全区的高蒸散中心, 多

清 (44)附近, 其中减少趋势最明显的是叶柏寿 (18), 倾向率为 $-2414 \text{ mm}/(10\text{a})$; $\frac{1}{4}$ 嫩江 (94)、新巴尔虎右旗 (92)、满洲里 (98)附近区域的倾向率在 $20 \text{ mm}/(10\text{a})$ 以上, 其中嫩江的倾向率达到了 $3016 \text{ mm}/(10\text{a})$, 说明这些区域在 1951~2007年的 ET_0 显著增长。

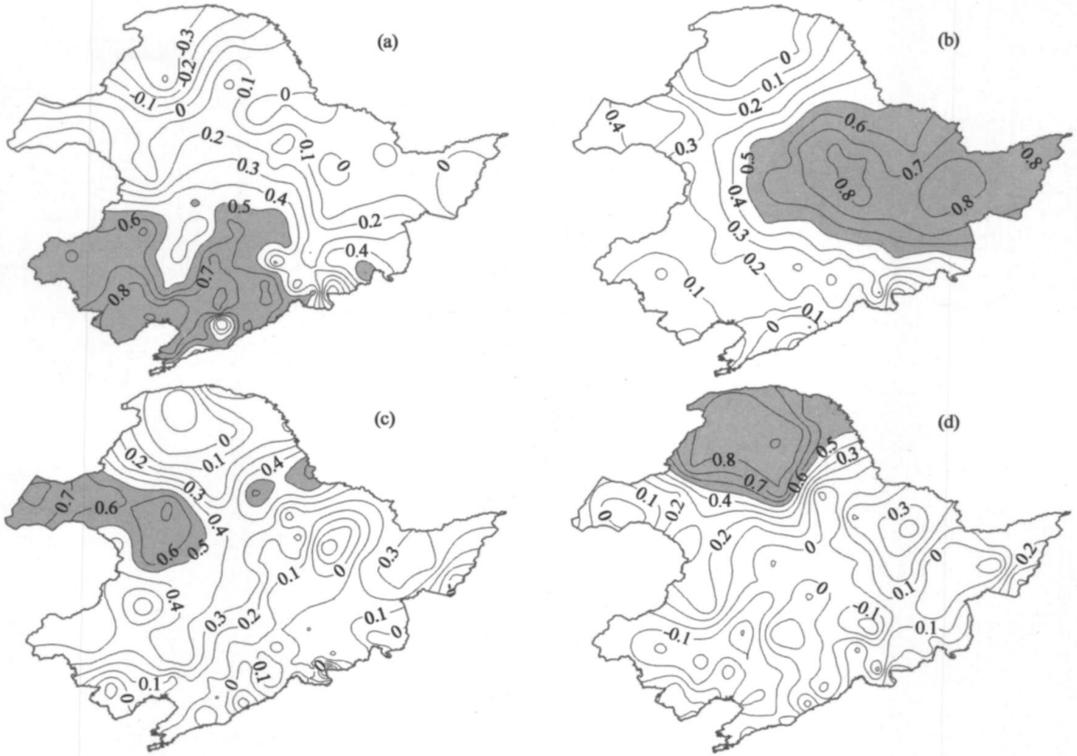


图 6 ET_0 的前 4 个旋转载荷向量及分区

Fig 16 First four rotating loading eigenvectors and subareas of ET_0

嫩江、叶柏寿的 ET_0 的变化趋势分别表现为急剧增长与快速减少的变化趋势, 因此有必要对这两个特殊站点 ET_0 变化的主要原因进行分析。图 8 为嫩江、叶柏寿两站的主要气象要素经过标准化处理后的逐年变化曲线, 可以看出: ¹ 嫩江、叶柏寿两站的平均气温均表现为增长趋势, 平均相对湿度则表现为下降趋势, 气温增高、相对湿度降低是蒸散过程中两个十分有利的条件, 在其它气象要素保持不变的情况下, 这两个站点的 ET_0 应该都表现为增长趋势; ^o 嫩江的平均风速在 1979 年以前呈明显的上升趋势, 1979 年之后则开始下降, 但下降幅度远小于上升的幅度, 因此总体上仍然表现为上升趋势, 日照时数总体上也表现为上升趋势; 叶柏寿则完全相反, 平均风速、日照时数均表现为明显的下降趋势, 风速降低减弱了空气运移水分子的能力, 日照时数降低减少了地表净辐射量的来源, 因此叶柏寿的 ET_0 会急剧下降, 而嫩江在以上 4 个有利条件的综合作用下, 其 ET_0 的上升趋势异常明显。

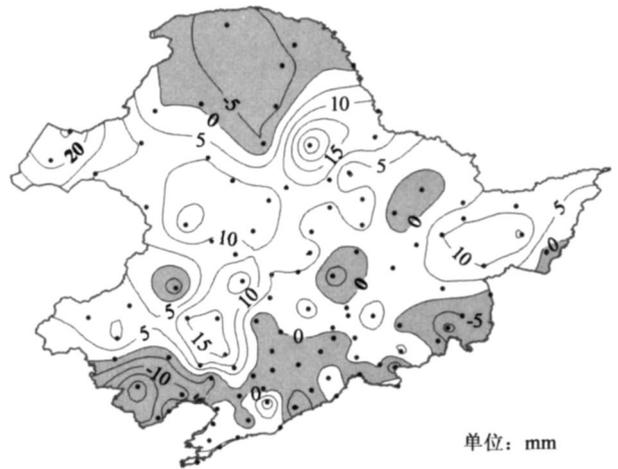


图 7 倾向率等值线图

Fig 7 Contours map of inclination rate

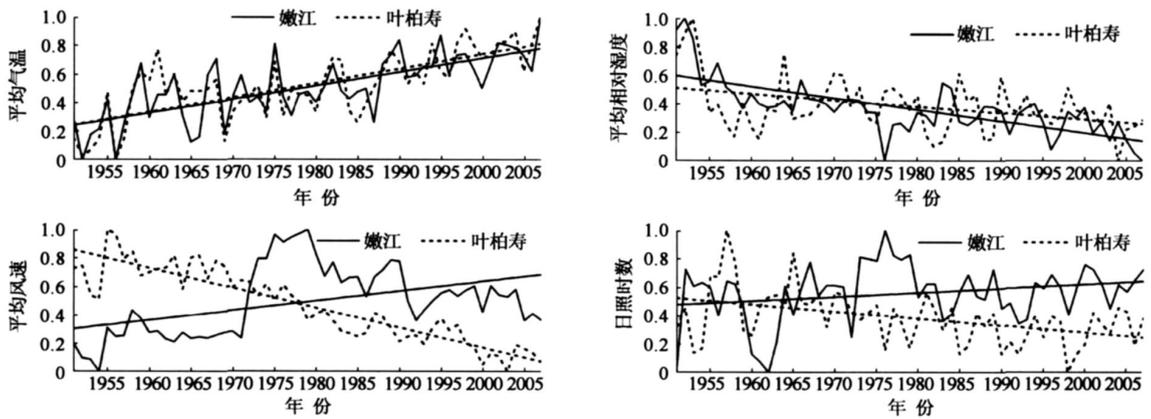


图 8 嫩江、叶柏寿标准化处理后主要气象要素的变化曲线

Fig 8 Variation curves of normalized main climate variables for Nenjiang and Yebaishou

3 结 论

通过逐日气象资料与 PM 公式计算了东北地区 1951~2007 年的逐日、逐年、多年平均 ET_0 及全区平均 ET_0 并探讨其时空变化特征, 可以得到以下几点结论:

(1) 近 60 年来, 东北地区的全区平均 ET_0 表现较小幅度的增长趋势, 其增长速率为 $3189 \text{ mm} / (10\text{a})$, 通过 MK 检验、滑动 t 检验、Yanamoto 检验 3 种突变检验的方法, 都没有发现全区平均 ET_0 有明显突变。在 8~16 年时间尺度上, 全区平均 ET_0 的周期振荡较为明显, 期间经历了 /少 y 多 y 少 y 多 0 4 个循环交替过程, 其中又以 8~10 年周期内的振荡最强。

(2) 东北地区的多年平均 ET_0 大致表现为 /南高北低, 西高东低, 从东北向西南逐渐增加 0 的总体分布特征, 多年平均 ET_0 的等值线大致呈西南朝向的半环状分布。在空间结构上, ET_0 大致可以分为南区、东区、西区、北区 4 个特征明显的区域, 这种空间分布特征与相对湿度及气温的分布具有紧密的关系。

(3) 东北地区绝大部分区域的 ET_0 表现为随年份递增而逐渐增加的趋势。在全球环境变化的影响下, 近 60 年来, 东北地区的气温上升趋势明显, 气候干旱化的程度也逐渐加剧, 气候特征表现为暖干化, 而这两者正是促进蒸散进行的有利因素, 因此东北地区绝大部分区域的 ET_0 在总体上表现为上升的变化趋势。

参考文献:

- [1] ALLEN R G, PERREIRA L S, RAES D, et al Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirement [R] Rome: FAO, 1998
- [2] 梁丽乔, 闫敏华, 邓伟, 等 1 松嫩平原西部参考作物蒸散量变化过程 [J] 地理科学进展, 2006, 25(3): 222311 (LIANG L Qiao, YAN Minhua, DENG Wei, et al Change of reference crop evapotranspiration from west Songnen Plain [J] Progress in Geography, 2006, 25(3): 222311 (in Chinese))
- [3] 苏春宏, 陈亚新, 徐冰 1 ET_0 计算公式的最新进展与普适性评估 [J] 水科学进展, 2008, 19(1): 12921361 (SU Chunhong, CHEN Yaxin, XU Bing Recent development and universality evaluation of ET_0 calculation formulas [J] Advances in Water Science, 2008, 19(1): 12921361 (in Chinese))
- [4] SMITH M, ALLEN R G, MONTEITH J L, et al Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirement [R] Rome: FAO, 1992
- [5] GARCIA M, DIRK R, RICK A, et al Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands: A tipkno [J] Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 125: 672821
- [6] CHONG Y X, GONG L B, TONG J, et al Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment [J] Journal of Hydrology, 2006, 327: 812931
- [7] 白薇, 冯绍元, 康绍忠 1 基于 GIS 的山西省参考作物蒸发量研究 [J] 农业工程学报, 2006, 22(10): 572611 (BAI Wei,

- FENG Shao2yuan, KANG Shao2zhong Reference crop evapotranspiration in Shanxi Province based on GIS [J] Transactions of the CSAE, 2006, 22(10): 572611 (in Chinese)
- [8] 王昊, 许士国, 孙砾石 1 扎龙湿地参照作物蒸散发估算的经验模型 [J] 水科学进展, 2007, 28(2): 24622511 (WANG Hao, XU Shi2guo, SUN Le2shi Empirical model for reference evapotranspiration estimation in Zhalong Wetland [J] Advances in Water Science, 2007, 28(2): 24622511 (in Chinese))
- [9] 史建国, 严昌荣, 何文清, 等 1 黄河流域潜在蒸散量时空格局变化分析 [J] 干旱区研究, 2007, 24(6): 77327781 (SHI Jian2guo, YAN Chang2rong, HE Wen2qing et al Study on spatiotemporal change of evapotranspiration in the yellow river basin [J] Arid Zone Research, 2007, 24(6): 77327781 (in Chinese))
- [10] HARALD K J, KROGATAD P Wavelet2based method for burst detection [J] Fluid Dynamics Research, 2001, 28: 22322361
- [11] 符淙斌, 王强 1 气候突变的定义和检测方法 [J] 大气科学, 1992, 16(4): 48224931 (FU Cong2bin, WANG Qiang The definition and detection of the abrupt climatic change [J] Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1992, 16(4): 48224931 (in Chinese))
- [12] 闫敏华, 邓伟, 马学慧 1 大面积开荒扰动下的三江平原近 45 年气候变化 [J] 地理学报, 2001, 56(2): 15921701 (YAN Min2hua, DENG Wei, MA Xue2hui Climate variation in the Sanjiang Plain disturbed by large scale reclamation during the last 45 years [J] Acta Geographica Sinica, 2001, 56(2): 15921701 (in Chinese))
- [13] 刘引鸽 1 陕西黄土高原降水的变化趋势分析 [J] 干旱区研究, 2007, 24(1): 492551 (LIU Yin2ge Analysis on the change trend of precipitation in north Shanxi province in the Loess Plateau [J] Arid Zone Research, 2007, 24(1): 492551 (in Chinese))
- [14] 马柱国, 邵丽娟 1 中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系 [J] 大气科学, 2006, 30(3): 46424741 (MA Zhu2guo, SHAO Li2juan Relationship between dry/wet variation and the Pacific Decade Oscillation (PDO) in Northern China during the last 100 years [J] Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(3): 46424741 (in Chinese))

Spatiotemporal variability of reference evapotranspiration over the Northeast region of China in the last 60 Years*

ZENG Lihong^{1,2}, SONG Kai2shan¹, ZHANG Ba¹, WANG Zong2an¹, DU Jia^{1,2}

(1 Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China;
2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Based on the daily meteorological measurements of 106 meteorological stations in Northeast China from 1951 to 2007, the daily reference evapotranspiration (ET_0) and yearly ET_0 are estimated using the Penman-Monteith equation. Gridded annual and annual average ET_0 values for the region are produced using the inverse distance weighted interpolation method. The spatiotemporal variability of ET_0 is analyzed using the methods of Mexican hat wavelet transform, Mann-Kendall test, the rotated empirical orthogonal function, and the inclination rate. The results show that (1) a slightly increasing trend (31.89 mm/10a) is detected in the regional average ET_0 time series, and the regional ET_0 minimum and maximum are found in 1953 and 1982, respectively; (2) the temporal variability of regional average ET_0 has a quasi-periodicity of 821.6 years, experiencing four alternating stages (low-high-low-high), and in which an intensified ET_0 oscillation of 821.0 years is observed; (3) the annual average ET_0 ranges from 600 mm to 1160 mm, and appears as obviously spatial difference exhibiting semi-ring-shaped isograms with a gradual ET_0 increment from Northeast to Southwest; and (4) the annual average ET_0 shows a increase trend over 721.61% of the region domain based on the analysis of inclination rate, while the opposite result is obtained for the rest of the region, the maximum and minimum values of inclination rate are 301.6 mm/10a at Nenjiang station and 224.14 mm/10a at Yebaihou station, respectively.

Key words: reference evapotranspiration; Penman-Monteith equation; spatiotemporal variability; Northeast region of China

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40871187) and the Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (No. C08Y46)