

松嫩平原西部参考作物蒸散量变化过程

梁丽乔^{1,3}, 闫敏华², 邓伟², 李丽娟¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012;
3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 采用松嫩平原西部 34 个气象站 1951~2000 年 5 个气象要素资料, 运用 FAO Penman-Monteith 方程计算参考作物蒸散量, 建立了各站与区域蒸散量序列。运用气候数理统计方法对蒸散量序列时空变化特征进行诊断分析, 并以点、面相结合的方式揭示气候突变规律。结果表明, 蒸散量基本上以西南部沙地为高值中心向东北呈带状递减; 近 50 年区域蒸散量略呈增加趋势, 研究区北部的蒸散量增加贡献最大; 区域蒸散量以 1962 和 1982 年为转折点, 呈明显的阶段性变化; 在 50 年的演变过程中, 区域蒸散量被检测到 2 次增加突变和 1 次减少突变, 典型站突变发生时间与区域突变基本相符, 但突变性质存在明显的地域差异。

关 键 词: 松嫩平原西部; 参考作物蒸散量; Penman-Monteith 方程; 时空变化过程

中图分类号: S161.4

参考作物蒸散是一个重要的气象要素, 具有深厚的理论基础。联合国粮食及农业组织(简称“粮农组织”, Food and Agriculture Organization of the United Nations- FAO)于 1977 年给参考作物蒸散量 ET_0 的定义是: 高度一致、生长旺盛、完全覆盖地面而不缺水条件下, 高度为 8~15cm 的开阔草地的蒸散量 (FAO- Food, 1979), 并将 Penman-Monteith 方程作为计算参考作物蒸散的推荐方法。根据 Penman-Monteith 方程的要求, FAO 于 1992 年又将参考作物蒸散量定义为: 从假设作物高度为 0.12m, 并有固定的表面阻力为 $70s \cdot m^{-1}$, 反照率为 0.23 的参考冠层的蒸散量, 相当于高度一致, 生长旺盛, 完全覆盖地面而不缺水的开阔草地的蒸散量^[1]。

参考作物蒸散直接关系到地表的能量平衡和水量平衡, 决定了地理环境的形成和演化; 同时由于参考作物蒸散仅受制于当地的气候条件, 与作物种类、土壤类型等条件无关^[2], 其时空分异特征又可反映区域气候变化过程。因而, 参考作物蒸散变化过程的研究一方面可以反映出气候变化过程及其在区域的响应形式; 同时, 又是区域作物需水的关键系数, 是区域生态环境优化协调、水资源优化配置的关键。

目前已有文献中多以温度、降水等气象因子揭示气候变化过程和规律, 而以参考作物蒸散研究气候变化过程的研究较为少见, 尚处于探索之中。本文以松嫩平原西部 34 个气象站点的气象资料, 借助 Penman-monteith 方程计算获得参考作物蒸散量, 分析作物生长季内参

收稿日期: 2005- 11; 修订日期: 2006- 03.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40571029); 中国科学院知识创新重大项目 (KZCX1- SW- 19- 1- 02; KZCX3- SW- NA- 03; KZCX2- SW- 320- 5)。

作者简介: 梁丽乔 (1980-), 女, 博士研究生, 主要从事水文与水资源研究。E- mail: lianglq.05b@gsnr.ac.cn

考作物蒸散量的时空变异特征,在此基础上,以点、面相结合的方法,对突变过程进行检测,借以反映研究区内气候变化过程。

1 研究区概况

本文研究区域(东经 121°8'~127°28', 北纬 43°4'~49°14') 位于东北地区的中西部,是东北大平原的重要组成部分,以松嫩平原西部为主体,包括松嫩平原中部和松嫩平原以南的部分地区,总面积为 1443.3×10⁴km²(图 1),简称为“松嫩平原西部”。其处于农牧过渡地带和半湿润向半干旱地区的过渡带,年蒸散量大于年降水量,且降水年内分布极不均匀。在全球变化和有序的人类活动干扰下,一方面,区域土地覆被和土地利用方式变化明显,土地的盐碱化、沙化等问题突出;另一方面,区域水环境问题严重,湖沼湿地面积减小,部分河流成为季节性河流等^[3]。以盐渍土为例,20 世纪 90 年代松嫩平原盐渍土面积为 342.0×10⁴hm²,占平原总面积的 19.4%,并且以 1.2~1.4%的速度扩展^[3-5]。研究区生态环境脆弱,属于生态环境较为脆弱地区(Ecotone),是气候变化反应较为敏感的区域之一。

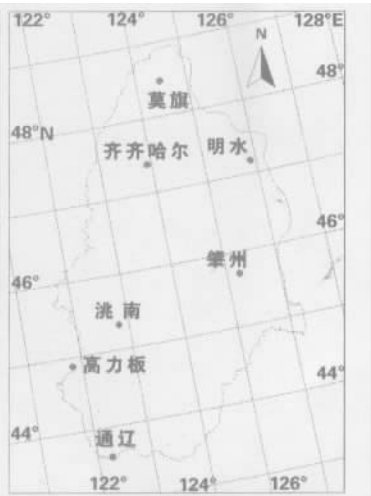
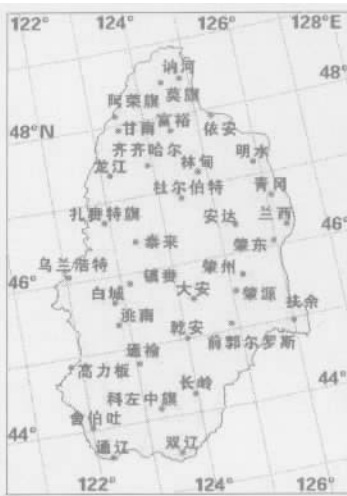
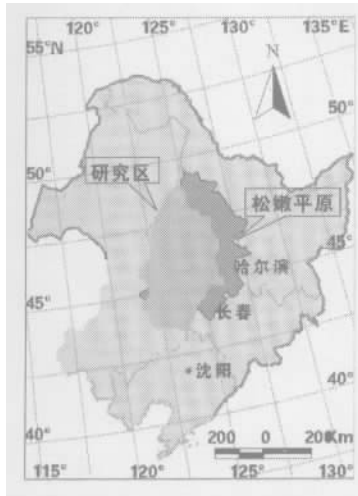


图 1 研究区位置示意图

图 2 研究区站点分布图

图 3 典型站分布图

Fig.1 Location of the study area in Northeast China

Fig.2 Distribution of study weather stations in western Songnen plain

Fig.3 Distribution of typical stations in western Songnen plain

2 资料和方法

2.1 参考作物蒸散量的获取

利用松嫩平原西部近 40 个气象站点,对因仪器更换、站址迁移和热岛效应等引起的资料误差进行必要的订正后,根据气象站观测年代长度、资料使用原则,筛选得到 34 个站点。对 34 个气象站(图 2)的平均最高气温、平均最低气温、平均相对湿度、平均风速和日照时数 5 个要素的月器测资料,进行必要的插补延长,建立 1951~2000 年的气象要素时间序列。通过 FAO 推荐的 Penman-Monteith(P-M)方程^[6],计算了研究区各站 5~9 月的蒸散量,得到区

域平均 5~9 月蒸散量序列。P-M 方程表达式如下:

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

式中, ET_0 为参考作物蒸散量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); R_n 为净辐射 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); G 为土壤热通量密度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), 相对于 R_n 取值很小, 尤其在植被覆盖、计算步长大于或等于一天的情况下, 取值忽略为 0; T 为 2m 高处日平均气温 ($^{\circ}\text{C}$); u_2 为 2m 高处风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e_s 为饱和水汽压 (kPa), e_a 为实际水汽压 (kPa), $e_s - e_a$ 为饱和水汽压差 (kPa); γ 为水汽压曲线斜率 ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$), Δ 为湿度计算常量 ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$).

气温 T 的表达式为:

$$T = \frac{T_{\min} + T_{\max}}{2} \quad (2)$$

式中, T_{\min} 和 T_{\max} 分别为 2m 处的最低气温和最高气温 ($^{\circ}\text{C}$).

水汽压曲线斜率 γ 的表达式为:

$$\gamma = \frac{4098 \left[0.6108 \exp \left(\frac{17.27T}{T+237.3} \right) \right]}{(T+237.3)^2} \quad (3)$$

净辐射 R_n 的表达式为:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (4)$$

公式(4)中, 净长波辐射 R_{nl} 的计算公式为:

$$R_{nl} = \frac{T_{\max,k}^4 + T_{\min,k}^4}{2} (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(\frac{1.35(a_s + b_s n/N)}{a_s + b_s} - 0.35 \right) \quad (5)$$

式中, σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数 ($4.903 \times 10^{-9} \text{W} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{m}^{-2}$); a_s 、 b_s 分别为阴天、晴天总辐射到达陆地表面的系数, 分别取值 0.25 和 0.50; n 为日照时数 (h); N 为最大可能日照时数 (h), 由纬度和月份确定。

公式(4)中, 净短波辐射 R_{ns} 的计算公式为:

$$R_{ns} = (1 - \alpha_s) \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_s \quad (6)$$

式中, α_s 为土壤、植被的反照率, 取值 0.23; R_s 为入射太阳辐射 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); R_a 为总辐射 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), 由纬度和月份确定。

饱和水汽压 e_s 的计算公式为:

$$e_s = \frac{0.6108}{2} \left[\exp \left(\frac{17.27T_{\max}}{T_{\max} + 237.3} \right) + \exp \left(\frac{17.27T_{\min}}{T_{\min} + 237.3} \right) \right] \quad (7)$$

实际水汽压的计算公式为:

$$e_a = e_s RH_{\text{mean}} / 100 \quad (8)$$

式中, RH_{mean} 为相对湿度。

湿度计算常量 Δ 的计算公式为:

$$= \frac{C_p P}{\rho} \quad (9)$$

式中, C_p 为常压比热 $1.013 \times 10^3 \text{ MJ} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$; ρ 为水蒸气与干空气分子重量之比 0.622; 为汽化潜热 $2.45 \text{ MJ} \cdot \text{Kg}^{-1}$; P 为气压 (Pa)。

公式(9)中气压由站点的海拔确定:

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (10)$$

式中, z 为海拔 (m)。

2.2 参考作物蒸散量变化过程分析方法

运用线性倾向率法、距平与累积距平法, 分析了松嫩平原西部蒸散量的变化趋势; 用累积距平法、 J_s 参数法和 Mann-Kendall 法进行突变检测, 突变检测分析中采用了点 (典型站) 与面 (区域) 相结合的方式。运用多种方法和点、面结合可更为准确的识别突变点及过程^[7]。

2.3 典型站点的选取

以 1950s、1960s、1970s、1980s 和 1990s 的 1:5 万和 1:10 万地形图 (共 105 幅) 为主, 同时参考 2000 年土地利用信息, 解译获取各站点的下垫面信息, 兼顾站点在研究区中的位置, 基本可以覆盖全区。选取了 7 个典型站 (图 3), 分别为莫旗、齐齐哈尔、明水、肇州、洮南、高力板和通辽。

3 结果分析

3.1 均值

松嫩平原西部参考作物蒸散量均值分布具有明显的空间分异特征, 由 1951~2000 年参考作物蒸散量分布图 (图 4a) 可以看出, 蒸散量平均变化在 554~725mm 之间, 基本上以西南部沙地为高值中心向东北呈带状逐渐减少, 其高值区位于高力板、通榆和通辽一带。低值区位于研究区北端的阿荣旗、莫旗和讷河一带与洮南, 最低值出现在洮南。在 122°~123°E 之间, 自洮南至通辽, 蒸散量明显增加, 纬向梯度变化最为显著。

世界气象组织规定, 用连续 30 年的资料计算出的平均值可作为气候要素的代表值, 即认为 30 年的平均值是稳定的或基本不变的^[8]。为消除不确定性因子影响, 本文研究选择了 1951~1980 年, 1961~1990 年, 1971~2000 年和 1951~2000 年 4 个气候阶段参考作物蒸散量的平均状态, 来反映研究区蒸散量的基本特征及其气候变化过程。1951~1981 年 (图 4b)、1961~1991 (图 4c) 年和 1971~2000 年 (图 4d), 3 个蒸散量的气候值总体变化不大。1951~1981 年, 除中部地区蒸散量增加 (700mm 等值线范围扩大) 以外, 总体趋势与近 50 年的平均状况一致; 1961~1991 年中部地区蒸散量略有减少; 1971~2000 年, 中部地区蒸散量略有增加 (700mm 等值线范围扩大)。从蒸散量的时间过程中可以看出, 研究区北部和南部的蒸散量变化不大, 中部区域变化最明显, 经历了先减后增的过程, 主要因中部沙地对气候冷热变化响应较为敏感所致。

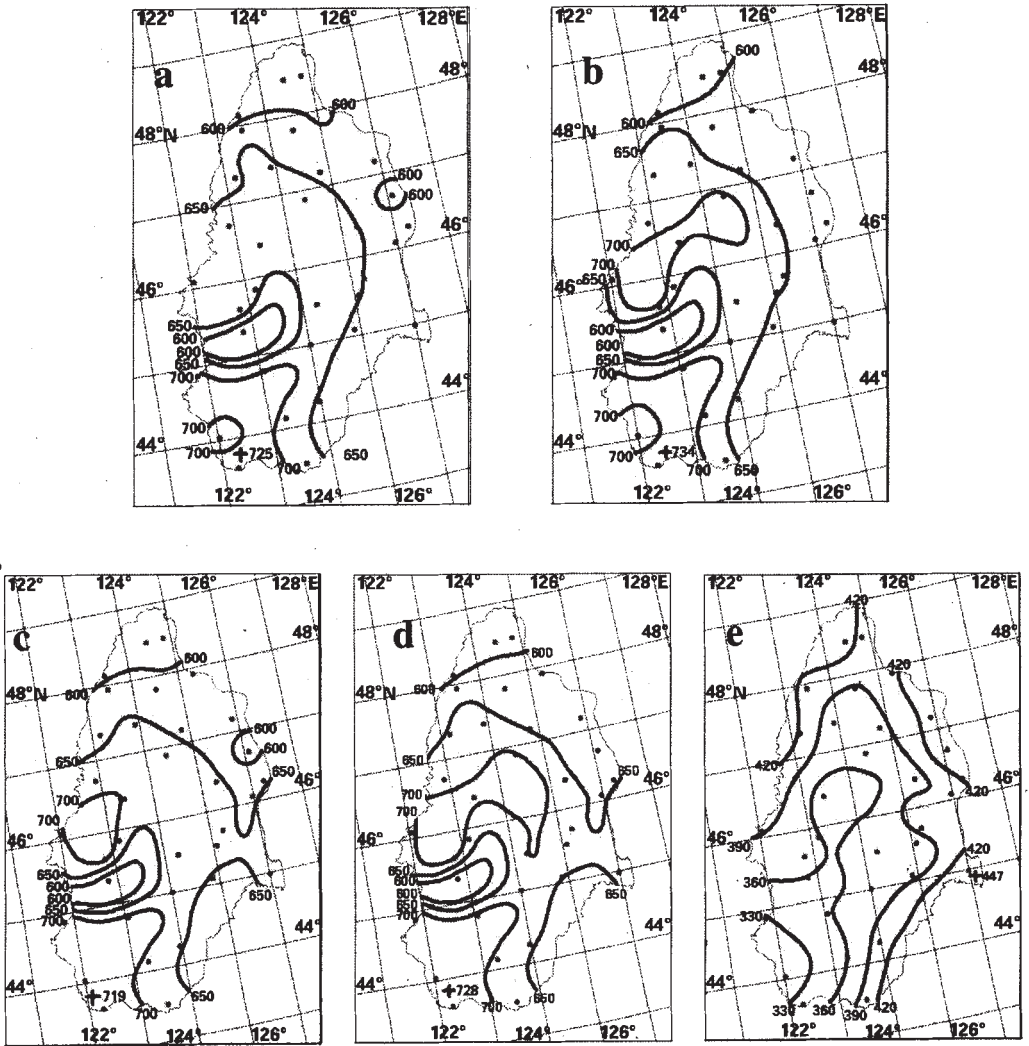


图 4 松嫩平原西部生长季 ET_0 与降水量均值分布图

(a) 1951~2000 年 ET_0 , (b) 1951~1980 年 ET_0 , (c) 1961~1990 年 ET_0 ,
(d) 1971~2000 年 ET_0 , (e) 1951~2000 年降水

Fig.4 Distribution of ET_0 and precipitation in growing season in western Songnen plain

(a) 1951~2000 ET_0 , (b) 1951~1980 ET_0 , (c) 1961~1990 ET_0 ,
(d) 1971~2000 ET_0 , (e) 1951~2000 precipitation

3 个 30 年的蒸散量区域梯度差异 (极值差) 随时间变化有增加趋势 (从 165.8 增加至 183.5mm)。122~123 E 和 45~46 N 之间的蒸散量的梯度差异最大。

3.2 阶段性分析

松嫩平原西部参考作物蒸散量距平是对其 1951~2000 年 50 年平均值的偏差。

累积距平曲线 (图 5b) 显示, 1962 和 1982 年为蒸散量的转折点。距平曲线 (图 5a) 显示

在 1951~1962 年是蒸散量偏少阶段, 正负距平相间, 但负距平偏多, 略呈增加趋势, 其倾向率为 20.1mm/10a($n=12, r=0.2175$); 1963~1982 年是蒸散量偏多阶段, 呈明显增加趋势, 其倾向率为 22.4mm/10a ($n=20, r=0.4537, =0.05$), 蒸散量一直处于较稳定的波动增加状态; 1983~2000 年为蒸散量偏少阶段, 但蒸散量呈明显增加趋势, 其倾向率为 30.0mm/10a($n=18, r=0.5110, =0.05$)。近 50 年来, 松嫩平原西部蒸散量略呈增加趋势, 其线性倾向率为 2.5mm/10a($n=50, r=0.0994$), 最大距平值(+88.7mm) 出现在 1982 年, 最小距平值(-66.0mm) 出现在 1960 年。

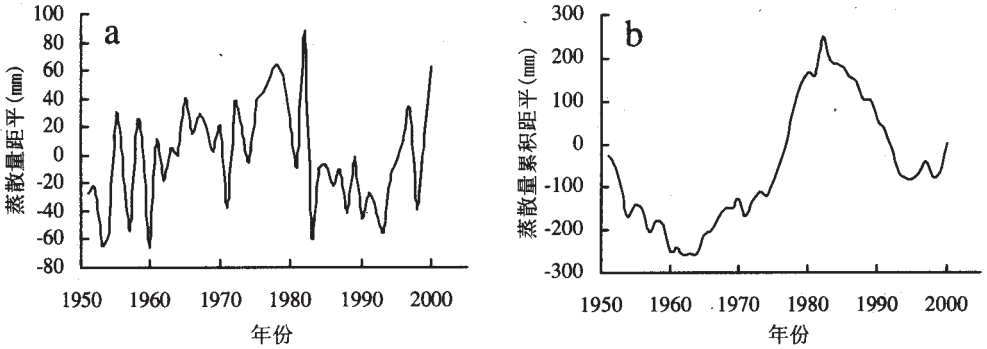


图 5 松嫩平原西部 ET_0 的距平(a)与累积距平(b)曲线图

Fig.5 Anomaly(a) and cumulative anomaly(b) curves of ET_0 from western Songnen plain

3.3 倾向率

为了考察松嫩平原西部参考作物蒸散量变化趋势的空间分布状况, 对各站蒸散量序列分别进行了线性拟合, 各线性拟合方程的斜率表示相应站点的平均蒸散量倾向率。图 6 给出了松嫩平原西部各站点近 50 年的线性倾向率。可以看出, 倾向率高值区分布在研究区北部的讷河、龙江、甘南、富裕、林甸、杜尔伯特、明水和青冈一带, 中心值为 13.3 mm/10a, 出现在甘南和明水。倾向率低值区分布在研究区西南部沙地以及肇东、扶余和长岭一带, 中心值为 -9.3mm/10a, 出现在高力板。研究区大部分站点的倾向率为正值, 表明区域蒸散量增加是普遍性的。其中, 讷河倾向率为 12.8mm/10a ($n=50, r=0.0994, =0.05$), 甘南倾向率为 13.3 mm/10a ($n=50, r=0.0994, =0.05$), 青冈倾向率为 10.1 mm/10a ($n=50, r=0.0994, =0.05$), 三站的参考作物蒸散量呈显著增加趋势。区域平均倾向率为 2.5mm/10a($n=50, r=0.0994$), 略呈增加趋势, 且北部对区域蒸散量的增加贡献更大。

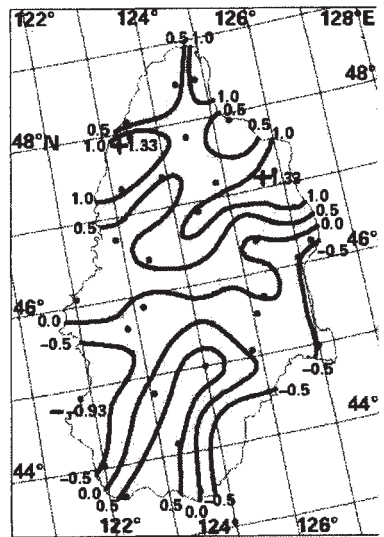


图 6 松嫩平原西部 ET_0 线性倾向率分布图

Fig.6 Linear trends distribution of ET_0 from western Songnen plain

3.4 突变

3.4.1 区域突变

Mann-Kendall 法 (M-K 法) 是一种能检测气候突变的新方法, 具有检测范围宽、定量化程度高的特点; J_y 参数法通过检验两随机样本平均值的显著差异来确定序列是否发生突变, 具有直观、简便的特点。两种方法互为补充, 已被广泛应用, 其具体算法参照文献^[9,10]。

M-K 法和 J_y 参数法采用 5 年滑动平均的区域时间序列检测突变, 并结合累积距平分析结果。以突变年份后 10 年与前 10 年平均值的差值代表蒸散量突变幅度。用 J_y 参数法时, 取平均时段 $n_1=n_2=10$ 和 $n_1=n_2=14$, 仅能从 1961~1990 年 30 年中寻找突变点。

对图 5b 和图 7 的分析结果表明, 松嫩平原西部 1951~2000 年参考作物蒸散量发生了 2 次增加突变和 1 次减少突变。第一次增加突变发生在 60 年代初期 (M-K 法, 1956 年; 累积距平法, 1962 年; J_y 参数法, 1960~1965 年), 1962 年的信噪比 $SNR > 2.0$, 为强突变, 突变增加幅度为 29.8mm; 第二次增加发生在 1997 年附近 (M-K 法, 1997 年)。减少突变发生在 20 世纪 80 年代前期 (J_y 参数法, 1980~1986 年; 累积距平法, 1982 年), 1983 与 1984 年的信噪比 $SNR > 2.0$, 为强突变, 突变减少幅度为 54.1mm。三种方法都检测到了出现在 60 年代初期的增加突变, 因此这一检测结果的确信性更大。M-K 法和 J_y 参数法通过了 $\alpha=0.05$ 的信度检验, 强突变的 J_y 参数法和累积距平法则通过了 $\alpha=0.01$ 的信度检验。在 M-K 法结果中, 曲线 C_1 与 C_2 交叉点对应的 1988 年的统计值通过了信度线 $y=1.96$, 而且在其他两种方法中未检测到该年发生突变, 所以此突变年份忽略。

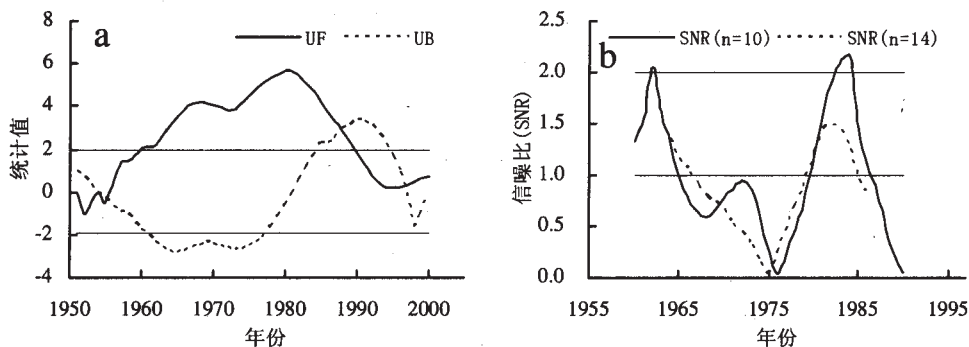


图 7 松嫩平原西部 ET_0 的 M-K 分析(a) 与 J_y 参数分析(b) (直线为显著性水平临界值)

Fig.7 M-K(a) and J_y (b) analyses of ET_0 from Songnen plain

3.4.2 典型站突变

采用 M-K 法对莫旗、齐齐哈尔、肇州、高力板、明水、洮南和通辽 7 站近 50 年来的参考作物蒸散量进行突变检测。检测结果显示 (图 8), 各站参考作物蒸散量均发生突变, 一次或两次, 增加突变或减少突变。突变最早发生在齐齐哈尔和肇州 (1954 年); 最晚也是发生在齐齐哈尔和肇州 (1997 年)。突变点检测通过 $\alpha=0.05$ 的信度检验。高力板蒸散量减少幅度为 -67.5mm, 洮南蒸散量减少幅度为 -36.5mm, 通辽 1973 年的蒸散量突变增加幅度为 47.4mm。分析表明, 研究时段内蒸散量的变化与降水和气温的变化具有高度一致性^[11], 产生突变的原因一方面是全球气候变化尤其是北半球气候变化的影响, 另一方面也受当地土地利用/覆被变化过程的影响, 反映了全球变化及其与区域间的反馈与负反馈作用, 需要进一步深入的探讨物理成因及其机制。

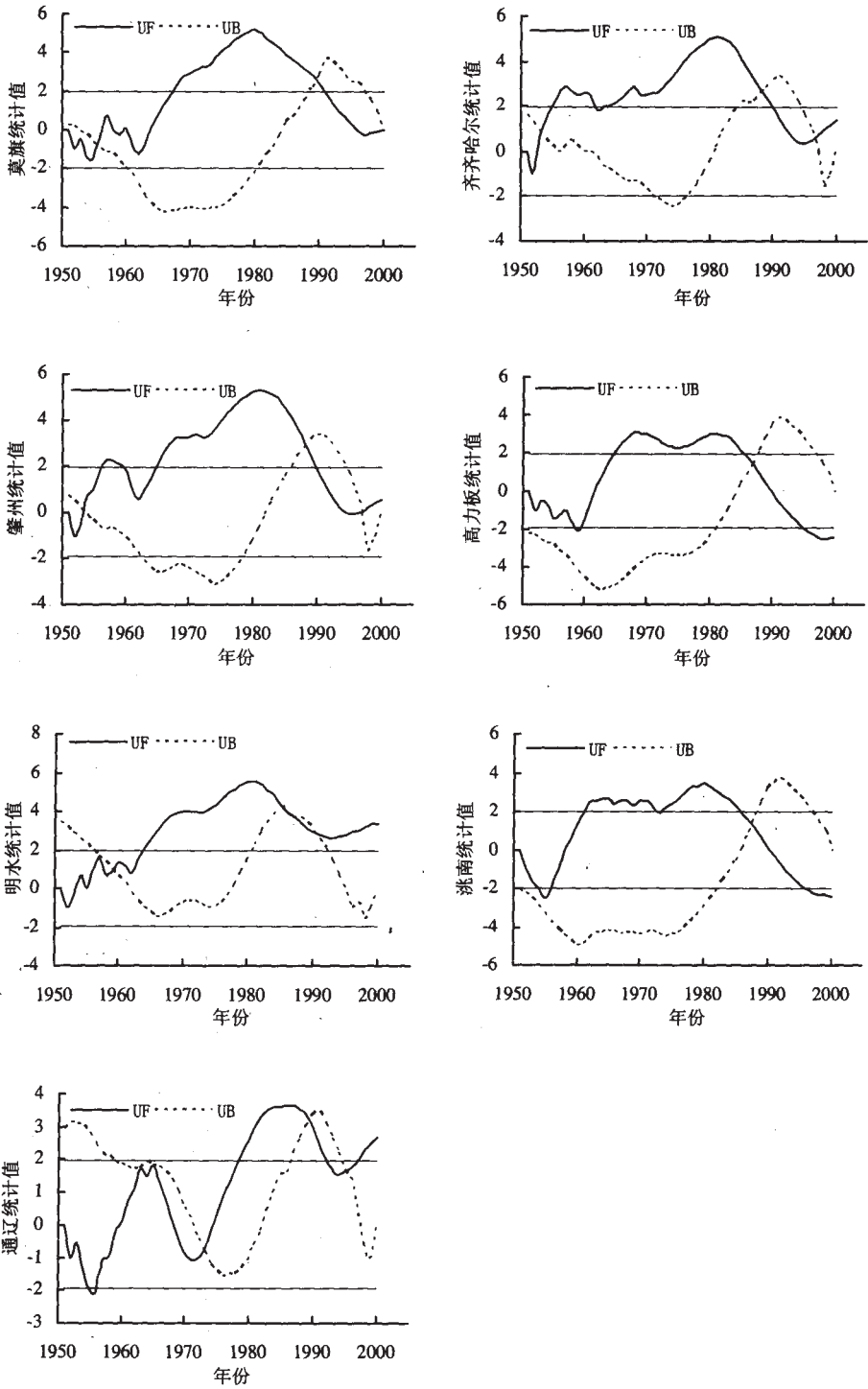


图8 莫旗、齐齐哈尔、肇州、高力板、明水、洮南和通辽的 ET_0 M-K 法分析
(直线为显著性水平临界值)

典型站蒸散量突变具有明显的空间差异特征(表 1)。蒸散量增加突变发生早,减少突变发生晚;增加突变最先发生在研究区的中东部和北部,然后是西南部;增加突变全区均有分布,而减少突变只发生在中部区域。7 个典型站近 50 年的蒸散量序列先后发生了 10 次突变,4 次减少突变和 6 次增加突变。在齐齐哈尔和肇州蒸散量增加突变和减少突变均有发生,说明这 2 站蒸散量变化波动剧烈。

表 1 典型站 ET_0 的 M-K 分析特征比较

Tab.1 Comparison of M-K analyses of ET_0 from typical stations

站 点	突变时间(年)	突变性质	突变幅度(mm)
齐齐哈尔、肇州	1954	增加	—
莫旗	1956	增加	—
明水	1959	增加	—
通辽	1973、1995	增加	47.4(1973年)
高力板、洮南	1987	减少	-67.5和-36.5
齐齐哈尔、肇州	1997	减少	—

4 结论

参考作物蒸散量作为一个重要的气象要素,是多种气象要素综合作用的结果,可以较好的反映出气候变化的过程和特点。松嫩平原西部参考作物蒸散量平均变化在 554~725mm 之间,高于东北地区的平均水平(437~761mm);基本上以西南部沙地为中心向东北呈带状逐渐减少。近 50 年区域蒸散量的线性倾向率为 2.5mm/10a,总体略呈增加趋势。倾向率高值区分布在研究区北部,低值区分布在西南部沙地一带。以 1962、1982 年为转折点,区域蒸散量有偏多、偏少相间的阶段性变化规律;典型站转折点基本与区域相符,但 1960 年附近的转折点具有一定空间差异性。区域蒸散量检测到 2 次增加突变和 1 次减少突变,突变的时间分别为 60 年代初、90 年代末和 80 年代初期。典型站突变发生时间与区域突变基本相符,但突变性质存在明显的空间差异。

参考文献

- [1] Smith M, Allen R G, Monteith J L, et al. Report on the Expert Consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. Rome: FAO, 1992.
- [2] Allen RG, Luis SP, Durk. R et al. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998, 300.
- [3] 宋长春,何岩,邓伟.松嫩平原盐渍土壤生态地球化学.北京:科学出版社,2003.
- [4] 张柏.松嫩平原土地盐碱化扩展的主要自然环境背景因子及治理模式.地理科学,1993,13(2):138-145.
- [5] 李秀军,李取胜,王志春等.松嫩平原西部盐碱地特点及合理利用研究.农业现代化研究,2002,23(5):361-364.
- [6] 杨聪,于静洁,宋献方等.华北山区短时段参考作物蒸散量的计算.地理科学进展,2004,23(6):71-80.
- [7] 杨梅学,姚檀栋.气候突变及其研究进展.大自然探索,1999,18(2):29-33.
- [8] 王效瑞,徐敏.气温基准平均值的差异及其统计检测.气象科技,2003,31(1):33-38.
- [9] 符凉斌,王强.气候突变的定义和检测方法.大气科学,1992,16(4):482-493.

[10] 闫敏华, 邓 伟, 马学慧. 大面积开荒扰动下的三江平原近 45 年气候变化. 地理学报, 2001, 56(2):161~170.

[11] 梁丽乔. 松嫩平原西部参考作物蒸散量研究. 中国科学院东北地理与农业生态研究所硕士学位论文, 2005.

Change of Reference Crop Evapotranspiration from West Songnen Plain

LIANG Liqiao^{1,3}, YAN Minhua², DENG Wei², LI Lijuan¹

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS, Changchun Jilin 130012, China;

3. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Reference crop evapotranspiration (ET_0) is one of important climate factors, mainly affected by local climate. As related to water balance and energy balance, it decides the shaping and evolvement of geographical environment. With 34 meteorological stations' data including minimum and maximum air temperature, wind speed, air humidity and sunlight hours from 1951 to 2000, ET_0 was obtained by FAO Penman-Monteith equation (P-M) for growing season in western Songnen Plain of Northeast China. Then the authors analyzed the temporal-spatial characteristics of ET_0 series with climate diagnostic analysis, and the abrupt change points through point-area integrated analyses by J_r parameter and Mann-Kendall methods. The results show that: (i) the high value of ET_0 appears in southwest sandy land, and ET_0 gradually decreases northeastwards; (ii) ET_0 tends to increase in recent 50 years, and the north area contributes most; (iii) taking 1962 and 1982 as turning points, areal ET_0 series indicates evident phase changes during period of 1951~2000; and (iv) two upward and one downward abrupt changes are examined in areal ET_0 series, and the time of abrupt changes in typical stations is basically consistent with that in study area, but properties of abrupt changes show evident spatial diversity.

Key words: western Songnen Plain; reference crop evapotranspiration; Penman-Monteith equation; process in temporal and special changes