汪 彪,曾新民,刘正奇,等. 中国西北地区参考作物蒸散量的估算与变化特征[J]. 干旱气象,2016,34(2):243-251, [WANG Biao, ZENG Xinmin, LIU Zhengqi, et al. Estimation and Variation Characteristics of the Reference Crop Evapotranspiration in Northwest China During 1956-2011 [J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(2):243-251], doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-02-0243

中国西北地区参考作物蒸散量的估算与变化特征

汪 彪[1,2,3],曾新民[2,3],刘正奇[1],
周霄林[4],所靖东[5]

(1.中国人民解放军海军南海舰队海洋水文气象中心,广东 湛江 524001;2.中国人民解放军理工大学气象海洋学院,江苏 南京 211101;3.教育部中尺度灾害性天气重点试验室,南京大学,江苏 南京 210093;
4.中国人民解放军61741部队气象中心,北京 100081;5.中国人民解放军92872部队,辽宁 绥中 125200)

摘 要:基于中国西北地区42个气象站1956~2011年逐日气象观测资料,采用Penman-Monteith公式,估算该地区的参考作物蒸散量(ET_0),分析西北地区ET_0的时空变化特征,并利用Mann-Kendall检验、小波分析和多元线性回归分析等方法分别对ET_0进行突变检验、周期变化和主要影响因子分析研究。结果表明:(1)西北地区ET_0存在明显的月和季节变化,ET_0自夏季、春季、秋季和冬季依次减少;(2)近56 a来,西北地区年均ET_0呈明显减少趋势,且存在一定的季节性差异,春、夏、秋季ET_0均呈显著减小趋势,且夏季减少率最大,而冬季则呈平缓的增加趋势;(3)ET_0减小幅度最大的地区位于哈密—和田的东北—西南向一带;(4)1956~2011年,春、夏、秋、冬季及全年平均ET_0分别在1984、1986、1981、1995与1980年前后发生了一次减小的突变,且年均ET_0存在2~3 a显著震荡周期和准6 a的震荡周期;(5)ET_0与2 m风速、日照时数呈显著正相关,而与相对湿度和平均气温呈负相关,其中与平均气温的相关性较弱,可见平均气温、相对湿度的升高与日照时数、2 m风速的下降导致西北地区ET_0的减小,同时考虑日照时数、平均气温、风速和相对湿度4个气象因子的多元线性回归方程的均方根误差最小,表明西北地区ET_0的变化是上述多种气象因子综合作用的结果。

关键词:气候变化;Penman-Monteith公式;参考作物蒸散量;西北地区
文章编号:1006-7639(2016)-02-0243-09 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-02-0243
中图分类号:P426.2 **文献标识码**:A

引 言

近年来,由于自然和人类活动的干扰,大气污染物和温室气体浓度的扩散加快了气候变化的速度。蒸散发作为生态系统水分循环与水量平衡的重要组成部分,直接影响着地表能量平衡和水量平衡[1]。气候变化对水循环的各个环节都有影响,除通过降水和气温的变化影响流域径流的时空变化外,还通过不同方式对蒸散发能力产生影响[2]。开展蒸散发的时空变化及其影响因子研究,不仅对深入了解气候变化规律和探讨气候变化成因有重要意义,也对区域社会人与自然和谐发展具有重要作用。

潜在蒸发是表征大气蒸发能力的一个量度,反映大气控制充分湿润下垫面蒸发过程的能力,是评价气候干湿程度、水库设计、作物耗水和作物生产潜力的重要指标,通常基于气象要素计算获得[3]。联合国粮农组织(FAO:Food and Agriculture Organization of the United Nations)在1990年代将Penman-Monteith(P-M)公式确定为计算参考作物蒸散量(ET_0:Reference Crop Evapotranspiration)的标准方法[4]。国内外许多学者从不同区域、不同对象、不同角度开展了ET_0气候变化及其成因等方面的研究[5-19],得到许多有意义的结论。

我国西北地区气候较为干旱,大部分地区降水稀少,且沙尘暴频发[20-21],ET_0对该地区气候变化具有重要影响。ET_0通过控制区域能量和水分平

收稿日期:2015-05-26;**改回日期**:2015-11-06
基金项目:国家自然科学基金项目(41275012)资助
作者简介:汪彪(1988-),男,四川遂宁人,助理工程师,主要从事军事气象学、边界层与陆面过程相关研究. E-mail: wangbiao-climate@foxmail.com

衡,直接影响气候中最为关注的降水和气温变化,进而对气候变化产生重要影响。因此,有必要对西北地区 ET_0 的变化特征及其影响因子做进一步研究分析。本文利用 P－M 公式开展西北地区 ET_0 的估算和变化研究,探索该地区蒸发能力及其时空变化规律,以及 ET_0 的突变、周期变化特征,进一步探讨影响西北地区 ET_0 的主要气象因子,对估算地表风蚀作用、预测沙尘频次具有重要意义,同时也有助于水资源的科学合理利用。

1 资料和方法

1.1 资料

选取中国西北地区 42 个气象站 1956～2011 年逐日平均气温、最高气温、最低气温、日照时数、平均相对湿度、平均风速等资料,并对资料进行质量控制,剔除个别异常数据,站点分布见图 1。该气象资料来自中国国家气象中心逐日观测数据集。季节划分:春季为 3～5 月,夏季为 6～8 月,秋季为 9～11 月,冬季为 12 月至翌年 2 月。

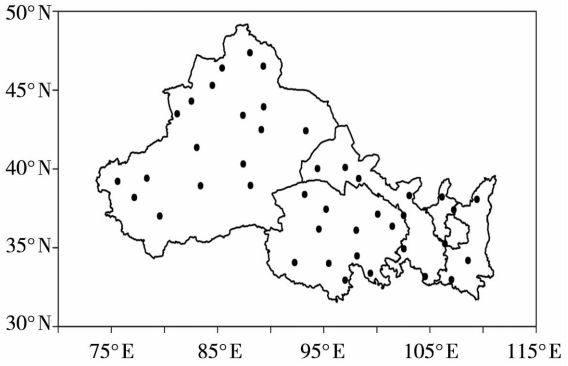

图 1 中国西北地区气象站点空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of meteorological stations in Northwest China

1.2 研究方法

采用 Penman－Monteith(P－M)公式、Mann－Kendall(M－K)检验、小波分析[22-25]和多元线性回归分析[26]等方法对中国西北地区 1956～2011 年参考作物蒸散量进行研究。下面重点介绍 P－M 公式计算方法。

P－M 公式是 FAO 唯一推荐的 ET_0 计算公式,具有较高的精度和较好的通用性,被世界各地广泛使用,FAO 于 1998 年修正了 P－M 模型[4],其计算公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34\ U_2)} \quad (1)$$

式中:ET_0 为 P－M 公式估算的参考作物蒸散量($mm \cdot d^{-1}$);R_n 为参考作物表面冠层接受到的净辐射($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$);$G$ 为土壤热通量($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$);$T_a$ 为平均气温(℃);U_2 为 2 m 高度处风速(m/s);γ 为干湿常数(kPa/℃);Δ 为饱和水汽压—温度曲线的斜率(kPa/℃);e_s 为饱和水汽压(kPa);e_a 为实际水汽压(kPa)。P－M 公式由 2 项组成:一是由辐射平衡引起的蒸发,称为辐射项;二是由空气温度、风速和水汽压差引起的蒸发,称为动力项。

2 结果与分析

2.1 西北地区 ET_0 时间变化特征

2.1.1 月和季节变化

图 2 是中国西北地区平均 ET_0 的月变化。可以看出,西北地区平均 ET_0 的月变化呈现明显的单峰型,1 月开始 ET_0 持续增大,至 7 月达到最大值,为 163.8 mm,而后逐渐减小,12 月最小,为 19.0 mm。经统计,ET_0 自夏季(475.8 mm)、春季(331.2 mm)、秋季(198.8 mm)和冬季(72.3 mm)依次降低。

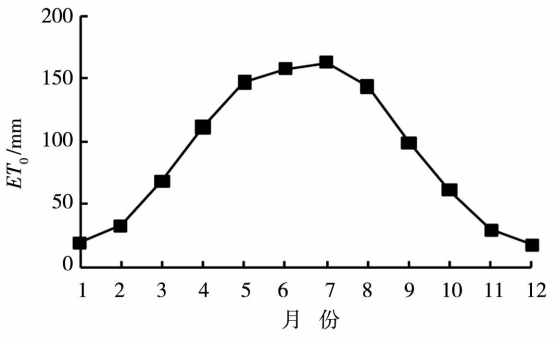

图 2 1956～2011 年中国西北地区逐月平均 ET_0 变化

Fig. 2 Monthly variation of average ET_0 in Northwest China from 1956 to 2011

2.1.2 年变化

图 3 为 1956～2011 年西北地区四季和全年平均 ET_0 的年变化及趋势(除冬季外,其它变化趋势都通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验)。从春季 ET_0 的年变化来看(图 3a),ET_0 最大值出现在 1974 年(350.1 mm),最小值出现在 1996 年(309.7 mm),变化幅度为 40.4 mm,平均值为 331.2 mm,标准差为 10.8 mm;1956～2011 年间春季 ET_0 变化大致经历 3 个阶段,1980 年代以前 ET_0 波动变化,而后快速减少,至 1990 年代初降为最低,随后开始波动增加,但整体呈显著减少趋势,减少趋势为 －2.6 mm/10 a。夏季 ET_0 的年变化特征与春季类似,表现出“先波动、快速减少、后缓慢增加”的特征,只是 1990 年代以

后 ET_0 的增加幅度较春季小,但总体呈显著减少趋势,气候倾向率为 -7.2 mm/10 a(图 3b)。秋季 ET_0 的年变化特征与春、夏季略有不同,差异主要表现在 1960 年代以前呈显著减少趋势,但整体仍呈显著减少趋势,气候倾向率为 -3.1 mm/10 a,介于春季和夏季之间(图 3c)。其中,最大值出现在 1956 年(223.5 mm),最小值出现在 1992 年(182.0 mm),变化幅度为 41.5 mm,平均值为 198.8 mm,标准差为 7.9 mm。冬季 ET_0 的年变化特征与其他季节不同(图 3d),1990 年代以前波动变化,之后出现短暂的减少,至 1990 年代中期开始逐渐增加,近 56 a 整体呈微弱增加趋势,增加速率为 0.2 mm/10 a,最大值出现在 2010 年,为 82.5 mm,最小值出现在 1964 年,为 63.9 mm,平均值为 72.3 mm,标准差为 4.3 mm,冬季 ET_0 变化幅度最小。从全年 ET_0 变化趋势来看(图 3e),近 56 a 整体呈显著减少趋势,阶段性变化特征与春、夏季较相似。其中,年平均 ET_0 最大值出现在 1956 年(1 146.1 mm),最小值出现在 1992 年(1 005.5 mm),变化幅度达 89.6 mm,平均值为 1 069 mm,标准差为 32.4 mm。

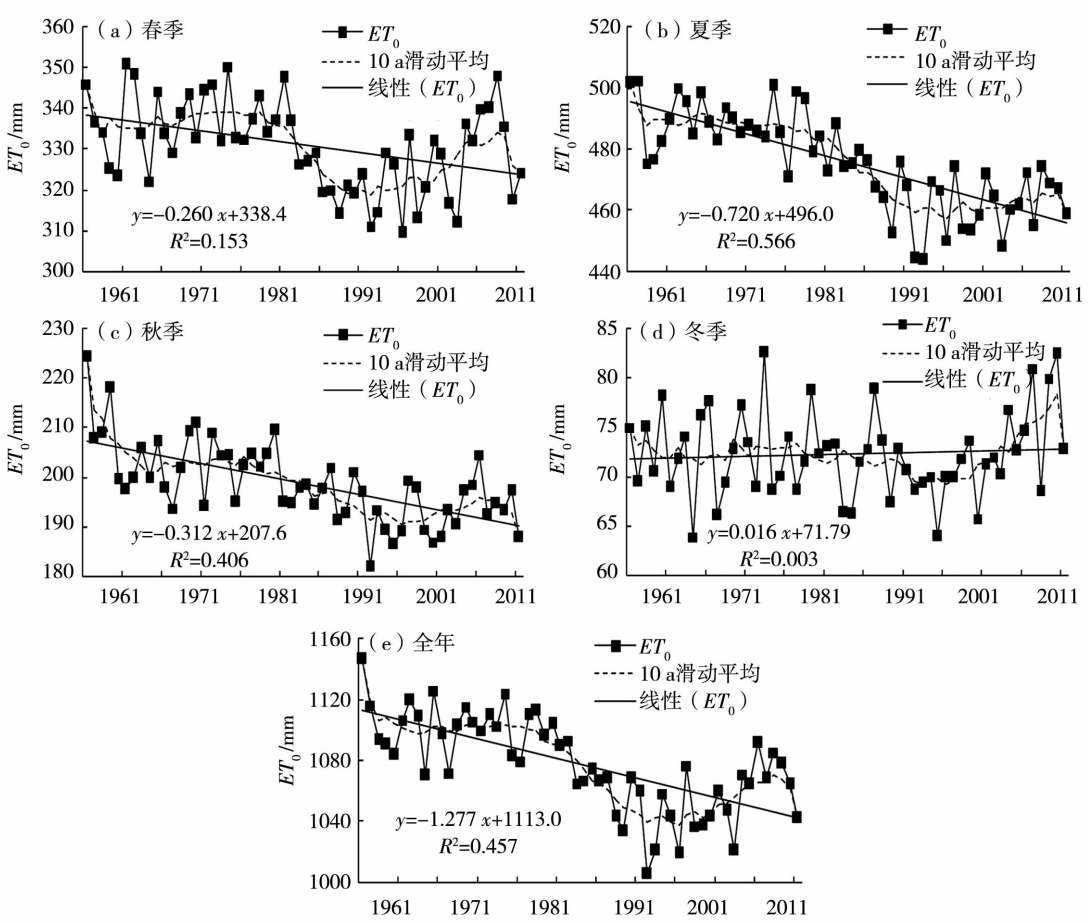

图 3　1956 ~ 2011 年西北地区四季(a、b、c、d)和年(e)平均 ET_0 的年变化

Fig. 3　The annual variations of seasonal (a, b, c, d) and annual (e) average ET_0 in Northwest China from 1956 to 2011

综上所述,近 56 a 来西北地区 ET_0 呈明显减少趋势,但存在一定的季节性差异,其中春、夏、秋季 ET_0 呈显著减少趋势,这与刘健[27]、朱国峰[28]和张瑞钢[29]等研究得出 ET_0 在近几十年来逐年减小的结论一致。但冬季 ET_0 则呈微弱的增加趋势。

2.1.3　年代际变化

表 1 给出 1956 ~ 2009 年西北地区四季和年平均 ET_0 的年代际变化。可知,春、夏、秋季 ET_0 的年代际变化趋势与全年较为一致,1990 年代以前呈下降趋势,1990 年代以后呈明显上升趋势;而冬季 ET_0 年代际变化与其他季节明显不同,尽管 1990 年代前呈小幅度下降趋势,多数年际变化为负距平,但之后上升较为明显。总的来说,近 56 a 西北地区 ET_0 的年代际变化呈先减后增的特征,年代际转换时间在 1990 年代。

表 1 1956～2009 年西北地区各季和年平均 ET_0 的年代际变化（单位：mm）

Tab. 1 Decadal variations of seasonal and annual average ET_0 in Northwest China from 1959 to 2009 (Unit: mm)

	春季		夏季		秋季		冬季		全年	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
1956～1959	330.0	12.2	477.4	24.6	212.2	10.1	72.0	2.9	1 091.6	41.0
1960 年代	331.6	12.4	484.3	9.1	199.2	5.4	72.0	5.9	1 087.0	23.2
1970 年代	335.5	8.0	483.9	12.2	202.6	5.5	72.9	4.6	1 095.0	16.5
1980 年代	325.1	11.0	468.7	11.9	196.1	5.6	71.5	4.0	1 054.3	35.3
1990 年代	318.5	9.9	457.1	14.5	192.8	7.1	70.8	3.3	1 039.2	27.1
2000 年代	331.9	11.1	463.3	8.9	193.9	5.3	73.4	5.0	1 062.6	21.1

2.2 西北地区 ET_0 的空间分布

我国西北地区幅员辽阔，地形地貌差异较大，ET_0 的空间分布存在明显的区域性特征。由图 4 西北地区 42 个气象站四季、年平均 ET_0 的空间分布看出，春季 ET_0 高值区集中在新疆中部地区，最大值为 474.1 mm，低值区集中在青海南部地区，最小值为 168.5 mm；除青海南部外，其余地区夏季 ET_0 均较高，多数在 350.0 mm 以上，最大值为 700.0 mm；秋季 ET_0 普遍较小，多数站点在 200.0 mm 以下，其分布呈现中部高、四周低的特征（最大值为 277. 3 mm，最小值为 143.5 mm）；冬季 ET_0 值为四季最低，其分布与春季、夏季和秋季略有不同，呈现南高北低的特征，南部最高值为 114. 8 mm，北部最低值为 15.5 mm。年平均 ET_0 的空间分布呈现中部高、南北低的特征，ET_0 的高值主要分布在哈密—和田的东北—西南向一带，主要是由于该地带属温带大陆性干旱气候，春季多风，夏季酷热，秋季晴朗，晴天多，年蒸发量较大。综上所述，春、夏、秋季同全年 ET_0 的分布形态较相似，ET_0 均在西北地区中部最高，且高值区基本呈东北—西南向分布。

另外，从 ET_0 的变化趋势来看，西北地区各站点不同季节的变化率差异较大。就春季而言，甘肃中部以西、青海中部以北大部地区 ET_0 呈减小趋势，最大变率为 -23.9 mm/10 a，其他区域呈现增大趋势，最大变率为 7.0 mm/10 a，其中减少的站点远多于增大的站点，且 95% 的站点通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验，未通过显著性检验的站点主要分布在西北地区南部。夏季，除青海南部、甘肃南部、宁夏和陕西北部 ET_0 呈现增加趋势外（最大变率为 5.3 mm/10 a），其余大部分站点的变化率都为负值，最大变率为 -34.9 mm/10 a，其中未通过显著性检验的站点主要集中在西北地区东南部。秋季 ET_0 变化率的分布形式类似夏季，90% 的站点通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验，未通过显著性检验的站点也主要分布在南部地区。冬季 ET_0 减少的站点主要分布在新疆中部和西北部以及甘肃西部，而大多站点呈现增加趋势（最大正变率为 4.1 mm/10 a，最大负变率为 -4.1 mm/10 a），其中 42 个站点中 93% 的站点通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验，未通过显著性检验的站点主要分布在西部地区。就全年而言，甘肃中部以西和青海南部以北以及新疆大多站点呈现减小趋势（最大变率为 -76 mm/10 a），甘肃中部以东和青海南部呈现增加趋势（最大变率为 16.9 mm/10 a）。总体来看，西北地区 ET_0 除冬季略有增加外，春、夏、秋季和全年的 ET_0 都呈现减少趋势。研究表明[30]，在区域变暖的大背景下，由于绿洲的“冷岛效应”，夏季气温呈现下降趋势，相对湿度明显上升，从而造成绿洲站点夏季 ET_0 快速减少。

2.3 M－K 检验

图 5 是 1956～2011 年西北地区 ET_0 标准化处理后的季、年平均 M－K 突变检验。其中，UF 为 ET_0 的正序列曲线，UB 为逆序列曲线，并给定显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的临界线 $u_{0.05} = \pm 1.96$。就全年而言，曲线 UF 和 UB 在 1980 年左右相交于 2 条临界曲线之间，随后 UF 曲线超出临界线，表明西北地区年均 ET_0 自 1980 年代开始减少，至 1980 年代中期以后呈显著减少趋势，在 1980 年左右发生一次显著减少突变。春、秋季 ET_0 的 M－K 检验特征与全年的相似，UF 和 UB 曲线分别在 1984 年、1981 年左右相交于 2 条临界线之间，随后 UF 曲线均超出临界线，表明春、秋季 ET_0 自 1980 年代以后显著减少，突变时间分别为 1984 年和 1981 年。夏季 ET_0 的 M－K 检验与春、秋季略有不同，夏季 ET_0 在 1970 年代后期持续减少，至 1980 年代中期以后呈显著减少趋势，但 UF 和 UB 曲线在 $u_{0.01} = \pm 2.56$ 2 条临界线内有交点，说明夏季 ET_0 在 1986 年发生减少突变。

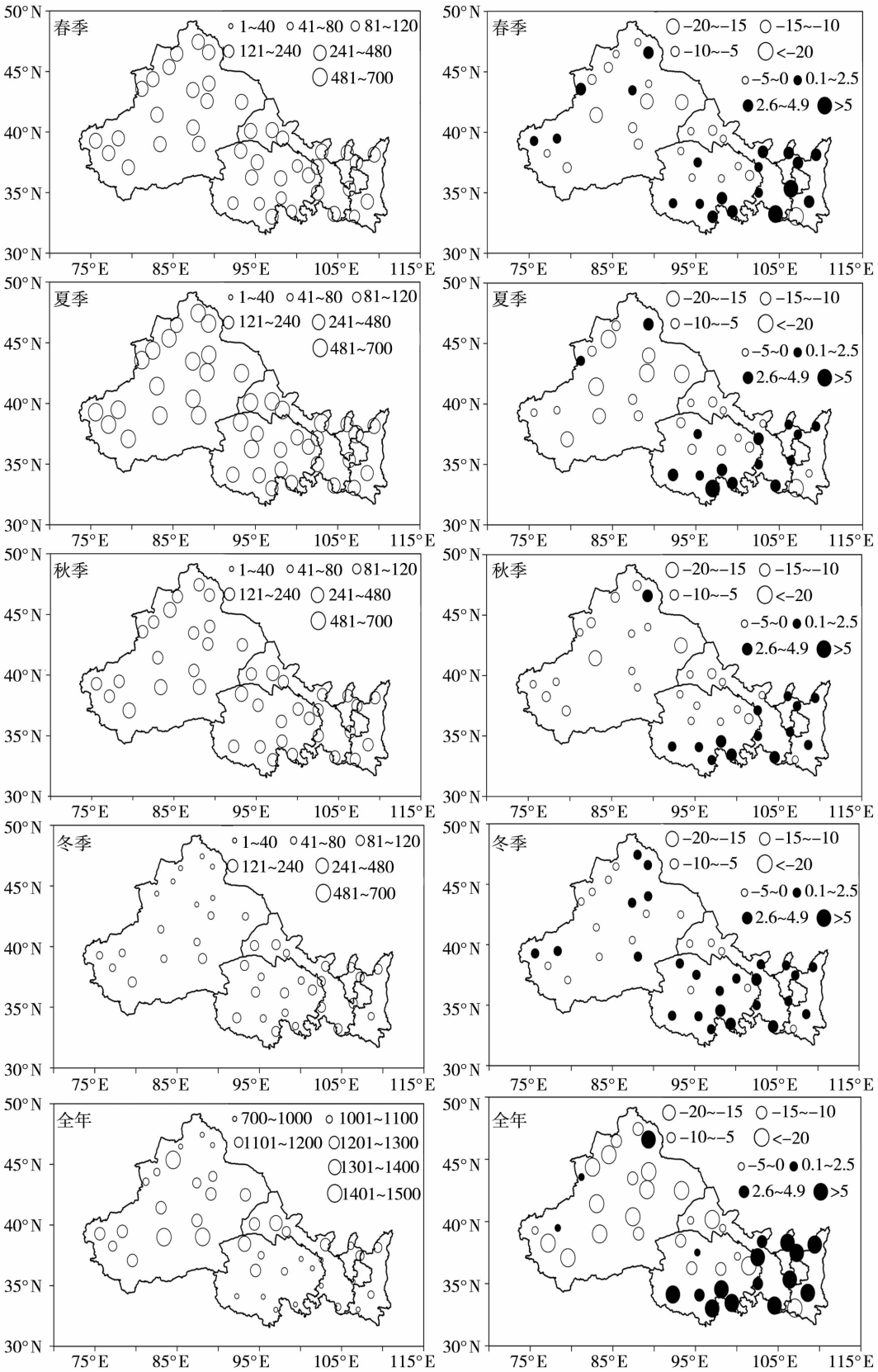

图 4　1956 ~ 2011 年西北地区 ET_0 的空间分布(左,单位:mm)及变化率(右,单位:mm/10 a)
(从上至下依次为春、夏、秋、冬季及全年)

Fig. 4　Spatial distributions (the left, Unit: mm) and variation rates of ET_0 at 42 weather stations in Northwest China during 1956 – 2011 (from top to bottom followed by spring, summer, autumn, winter and the whole year)

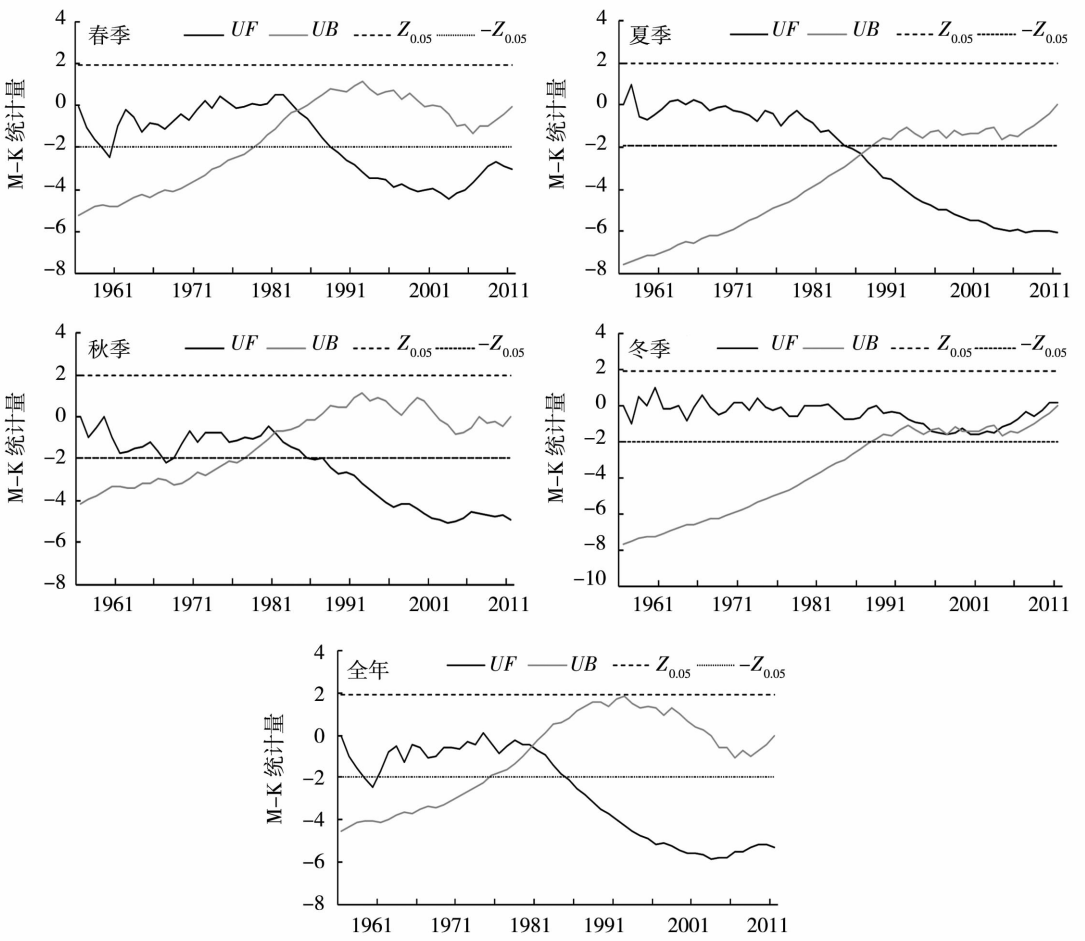

图 5 1956 ~ 2011 年西北地区四季和年平均 ET_0 的 M - K 突变检验

Fig. 5 M - K test of seasonal and annual average ET_0 in Northwest China from 1956 to 2011

冬季，*UF* 和 *UB* 曲线在 1990 年代中期以后在 2 条临界线内存在多个交点，但 *UF* 曲线未超出临界线，表明冬季 ET_0 在 1990 年代中期发生减少的突变，并在 2000 年代以后表现为略微增加趋势，其中突变点在 1995 年。

2.4 小波分析

对西北地区 1956 ~ 2011 年年均 ET_0 时间序列进行 Morlet 小波分析，以考察不同时间尺度的周期变化特征。图 6 是西北地区 1956 ~ 2011 年 ET_0 年均值序列的 Morlet 小波功率谱，其中，黑色粗实线所围部分为置信度 95% 的红噪声检验，虚线为影响锥（COI：Cone of Influence），COI 以下区域表示受边际效应影响功率谱减小；蓝色等值线为负值，表示要素值偏低；绿至红色等值线为正值，表示要素值偏高；等值线中心对应突变点。

由图 6 可知，西北地区年均 ET_0 存在多重时间周期尺度的嵌套复杂结构。年均 ET_0 存在 2 ~ 3 a 的显著性震荡周期和 6 a 的准周期震荡，其中 2 ~ 3 a 的显著周期震荡分别在 1960 年代和 1980 ~ 2000 年代初期较显著；6 a 的准周期震荡分别出现在 1960 年代后期到 1970 年代前期、1970 年代后期到 1980 年代初期和 1980 年代中期到 2000 年代初期。值得注意的是，超过 28 a 的分析中，等值线几乎全为红色，且没有闭合中心，这主要由于 ET_0 的时间序列仅有 56 a，超过 28 a 的周期无法明显地表示出来。

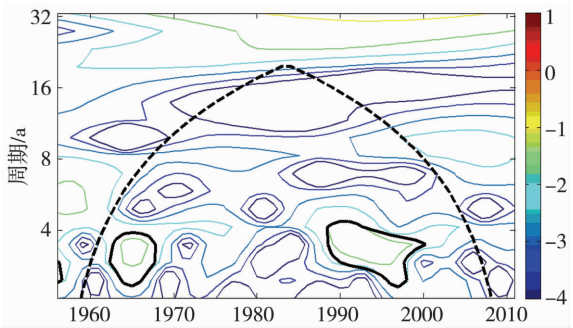

图 6 1956 ~ 2011 年西北地区年均 ET_0 时间序列的小波功率谱

Fig. 6 Morlet wavelet power spectrum of annual average ET_0 in Northwest China from 1956 to 2011

2.5　ET_0 的影响因子分析

2.5.1　相关性分析

由 P－M 公式可知,与 ET_0 相关的气象要素有平均气温 T、日照时数 SD、相对湿度 RH、2 m 风速 U_2 等。为进一步探讨各气象因子与 ET_0 的关系,对西北地区 1956～2011 年年均 ET_0 与各气象因子做相关性分析(表 2)。发现,平均气温与 ET_0 有微弱的负相关关系,表明年均 ET_0 的减少与平均气温的升高无显著相关关系,这与谢贤群等[12]关于中国北方近 50 a 年均 ET_0 与平均气温的相关性检验结论一致;2 m 风速与 ET_0 之间呈显著正相关(通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验),相关系数为 0.81,表明风速减小将引起 ET_0 显著减小;日照时数对 ET_0 的影响是通过影响太阳辐射进而间接地影响蒸散发过程的能量供给条件,最终对 ET_0 产生影响。一般来说,日照时数越长,太阳净辐射量越大,蒸散过程的能量供给越充分,ET_0 也随之加大,反之,日照时数越短,太阳净辐射量越小,蒸散过程的能量供给越缺乏,ET_0 也随之减小[31]。ET_0 与日照时数之间呈显著正相关,二者的相关系数为 0.66。相对湿度是影响蒸散发过程中水汽转移条件的主要因子,相对湿度和水汽压的上升,使得空气饱和度增加,蒸散量相应的减少。这进一步说明相对湿度作为水汽因子之一,对 ET_0 的影响也十分重要。

另外,对 1956～2011 年间西北地区平均气温、日照时数、相对湿度、2 m 风速进行趋势分析发现,近 56 a 来西北地区平均气温呈显著升高趋势,而日照时数、2 m 风速、相对湿度整体呈下降趋势,其中相对湿度下降趋势不显著(图略)。可见,近 56 a 日照时数的缩短、2 m 风速的减小是引起该地区 ET_0 减少的主要原因。

表 2　西北地区 1956～2011 年年均 ET_0 与各气象因子间的相关系数

Tab. 2　Correlation coefficients between the meteorological factors and ET_0 in Northwest China from 1956 to 2011

	平均气温 T	日照时数 SD	相对湿度 RH	2 m 风速 U_2
ET_0	－0.36	0.66*	－0.42*	0.81*

注:* 表示通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验

2.5.2　多元回归分析

为进一步分析和探讨各气象因子对 ET_0 的影响程度,针对各气象因子和 ET_0 进行多元回归分析,表 3 给出各气象因子组合与 ET_0 之间多元线性回归方程的均方根误差(RMSE)。其中各因子组合为 A(T,SD),B(SD,U_2),C(SD,RH),D(T,U_2),E(T,RH),F(U_2,RH),G(SD,T,U_2),H(SD,T,RH),I(SD,U_2,RH),J(T,U_2,RH),K(T,U_2,SD,RH)。

从表 3 可以看出,同时考虑 SD、T、U_2 和 RH 4 个因子的多元回归方程的均方根误差(RMSE)最小(14.3 mm),从而得到西北地区 ET_0 的多元线性回归方程为:

$$ET_0 = 1\,016.8 + 8.6\,SD + 7.9\,T + 133.21\,U_2 - 5.9\,RH \quad (2)$$

综合来看,1956～2011 年西北地区 ET_0 的变化是多种气象因子综合作用的结果。

表 3　各气象因子组合与 ET_0 的多元回归分析的均方根误差(单位:mm)

Tab. 3　The RMSE of multi－regression analysis between the combinational climatic factors and ET_0 (Unit:mm)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
RMSE	23.69	17.50	20.63	17.06	23.88	15.24	15.96	20.19	14.49	15.27	14.28

3　结　论

(1)1956～2011 年西北地区 ET_0 的年均值在 1 005.5～1 146.1 mm 之间,存在明显的月和季节变化,7 月最大,12 月最小,夏季最大,冬季最小。

(2)近 56 a 来,西北地区年均 ET_0 呈现明显减少趋势,变化率为 －12.8 mm/10 a,且存在一定的季节性差异,春、夏、秋季 ET_0 均呈显著减少趋势,冬季 ET_0 则呈微弱的增加趋势,其中夏季减少幅度最大。

(3)近 56 a 来,西北地区年和四季平均 ET_0 变化趋势的空间分布不尽一致,42 个站点各季节的变化趋势都有增有减,其中春、夏、秋季及全年减少趋势的站点多于增加趋势的站点,且减少幅度最大的地区均分布在哈密—和田东北—西南向一带,而冬季则相反,增加的站点多于减少的站点。

(4)M－K 突变检验发现,1956～2011 年西北地区春、夏、秋季和全年平均 ET_0 均在 1980 年代中期发生了一次显著减少的突变,突变时间分别为

1984 年、1986 年、1981 年和 1980 年，而冬季 ET_0 在 1990 年代初期发生了一次减少突变，并在 2000 年代以后表现为微弱增加趋势，突变时间为 1995 年。

(5)通过小波分析发现，1956 ~ 2011 年西北地区年均 ET_0 存在 2 ~ 3 a 显著震荡周期和准 6 a 的震荡周期。

(6)相关性分析显示，ET_0 与 2 m 风速、日照时数均呈显著正相关，与相对湿度呈显著负相关，而与平均气温相关性不明显。同时考虑 T、U_2、SD 和 RH 4 个因子的多元线性回归方程均方根误差最小，说明 ET_0 的变化是多种气象因子综合作用的结果。

参考文献：

[1] 刘小莽，郑红星，刘昌明，等. 海河流域潜在蒸散发的气候敏感性分析[J]. 资源科学，2009，31(9)：1470 - 1476.

[2] Kundzewicz Z W, Somlyody L. Climatic change impact on water resources in a systems perspective[J]. Water Resources Management, 1997, 11(6): 407 - 435.

[3] Liu C M, Zhang D, Liu X M, et al. Spatial and temporal change in the potential evapotranspiration sensitivity to meteorological factors in China (1960 - 2007)[J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(1): 3 - 14.

[4] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome: FAO. Irrigation and Drainage Paper, 1998.

[5] Chen S B, Liu Y F, Axel Thomas. Climatic change on the Tibetan plateau: evapotranspiration trends from 1961 - 2000[J]. Climatic Change, 2006, 76(3): 291 - 319.

[6] Gong L B, Xu C Y, Chen D L. Sensitivity of the Penman - Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin[J]. Journal of Hydrology, 2006, 329(3): 620 - 629.

[7] Wang Y, Jiang T, Bothe O, et al. Changes of pan evaporation and reference evapotranspiration in the Yangtze River basin[J]. Theor Appl Climatol, 2006, 90(1): 13 - 23.

[8] Yin Y H, Wu S H, Chen G, et al. Attribution analyses of potential evapotranspiration changes in China since the 1960s[J]. Theor Appl Climatol, 2010, 101(1): 19 - 28.

[9] Zhang Q, Xu C Y, Chen X H. Reference evapotranspiration changes in China: natural processes or human influences[J]. Theor Appl Climatol, 2011, 103(3): 479 - 488.

[10] Fan Z X, Axel Thomas. Spatiotemporal variability of reference evapotranspiration and its contributing climatic factors in Yunnan Province, SW China, 1961 - 2004[J]. Climatic Change, 2013, 116(2): 309 - 325.

[11] 高歌，陈德亮，任国玉，等. 1956 - 2000 年中国潜在蒸散量变化趋势[J]. 地理研究，2006，25(3)：378 - 387.

[12] 谢贤群，王菱. 中国北方近 50 年潜在蒸发的变化[J]. 自然资源学报，2007，22(5)：683 - 691.

[13] 王幼奇，樊军，邵明安，等. 黄土高原地区近 50 年参考作物蒸散量变化特征[J]. 农业工程学报，2008，24(9)：6 - 10.

[14] 安月改，李元华. 河北省近 50 年蒸发量气候变化特征[J]. 干旱区资源与环境，2005，19(4)：159 - 162.

[15] 段永红，陶澍，李本纲. 北京市参考作物蒸散量的时空分布特征[J]. 中国农业气象，2004，25(2)：22 - 25.

[16] 刘园，王颖. 华北平原参考作物蒸散量变化特征及气候影响因素[J]. 生态学报，2010，30(4)：923 - 932.

[17] 韩松俊，胡和平，杨大文，等. 塔里木河流域山区和绿洲潜在蒸散发的不同变化及影响因素[J]. 中国科学：E 辑，2009，39(8)：1375 - 1383.

[18] 孙小舟，封志明，杨艳昭. 西辽河流域 1952 年 - 2007 年参考作物蒸散量的变化趋势[J]. 资源科学，2009，31(3)：479 - 484.

[19] 张方敏，申双和. 我国参考作物蒸散的空间分布和时间趋势[J]. 南京气象学院学报，2007，30(5)：705 - 709.

[20] 赵景波，杜娟，黄春长. 沙尘暴发生的条件和影响因素[J]. 干旱区研究，2002，19(1)：58 - 62.

[21] 石广玉，赵思雄. 沙尘暴研究中的若干科学问题[J]. 大气科学，2003，27(4)：591 - 606.

[22] 李春强，杜毅光，李保国. 1965 - 2005 年河北省降水量变化的小波分析[J]. 地理科学进展，2010，29(11)：1340 - 1344.

[23] 陈志芳. 佛山降水变化的小波分析[J]. 气象科技，2002，30(4)：214 - 217.

[24] Marie Farge. Wavelet transforms and their applications to turbulence[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1992, 24: 395 - 457.

[25] Christopher Torrence, Gilbert P Compo. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79: 61 - 78.

[26] 薛微. SPSS 统计分析方法与应用[M]. 北京：电子工业出版社，2009.

[27] 刘健，曹升乐，翟建青，等. 近 50 年山东省蒸发皿蒸发量变化趋势及影响因素分析[J]. 山东大学学报(工学版)，2010，40(6)：129 - 133.

[28] 朱国锋，何元庆，蒲焘，等. 1960 - 2009 年横断山区潜在蒸发量时空变化[J]. 地理学报，2011，66(7)：905 - 916.

[29] 张瑞钢，莫兴国，林忠辉. 滹沱河上游山区近 50 年蒸散变化及主要影响因子分析[J]. 地理科学，2012，32(5)：628 - 634.

[30] 沈永平，王国亚，张建岗，等. 人类活动对阿克苏绿洲气候及水文环境的影响[J]. 干旱区地理，2008，31(4)：524 - 534.

[31] 梁桂花，张小平，朱叶. 朔州市近 50 a 蒸发量变化特征及影响因子分析[J]. 干旱气象，2009，27(2)：123 - 126.

Estimation and Variation Characteristics of the Reference Crop Evapotranspiration in Northwest China During 1956 – 2011

WANG Biao[1,2,3], ZENG Xinmin[2,3], LIU Zhengqi[1],

ZHOU Xiaolin[4], SUO Jingdong[5]

(1. *Marine Hydrological and Meteorological Center, China People's Liberation Army Navy South Sea Fleet, Zhanjiang* 524001, *China*; 2. *College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing* 211101, *China*; 3. *Key Laboratory for Mesoscale Severe Weather of Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing* 210093, *China*; 4. *Meteorological Center of* 61741 *Army of PLA, Beijing* 100081, *China*; 5. *The* 92872 *Army of PLA, Suizhong* 125200, *China*)

Abstract: Based on the daily meteorological data at 42 weather stations in Northwest China from 1956 to 2011, the reference crop evapotranspiration (ET_0) was estimated by using Penman – Monteith (P – M) equation, and the temporal and spatial distributions of ET_0 in Northwest China were analyzed. The mutation and period of ET_0 during 1956 – 2011 were studied by using Mann – Kendall (M – K) test and Morlet wavelet analysis methods, and the correlation between ET_0 and main meteorological factors was done by using the multivariable linear regression method. The results are as follows: (1) The monthly and seasonal changes of ET_0 in Northwest China were obvious, the value of ET_0 in July was the maximum, while that in December was the minimum, and that in summer, spring, autumn and winter decreased in turn. (2) In the past 56 years, the annual average ET_0 in Northwest China reduced significantly, and the seasonal difference was significant, the trends of average ET_0 in spring, summer and autumn decreased, and the decreasing rate in summer was the biggest, while the average ET_0 in winter increased slowly. (3) The maximum ET_0 was located in Kumul to Hotan area. (4) The decreasing mutation of ET_0 in spring, summer, autumn and the whole year appeared in the early of the 1980s, and that occurred respectively in 1984, 1986, 1981, 1980, while that in winter mutated in 1995. The annual average ET_0 in Northwest China during 1956 – 2011 had 2 – 3 years obvious periods and 6 years quasi – periods. (5) The ET_0 were positive correlated with wind speed at 2 m and sunshine duration, while that was negative correlated with relative humidity and mean surface air temperature, and the correlation between the ET_0 and air temperature was weak. Therefore, the rising of air temperature and relative humidity, and the decreasing of sunshine duration and wind speed caused the ET_0 reducing in Northwest China during 1956 – 2011. The root mean square error considering the above four climatic factors was the minimum in all multitiple linear regression models. In general, the decreasing of ET_0 was caused by the variation of four meteorological factors.

Key words: climate change; Penman – Monteith model; reference crop evapotranspiration; Northwest China