

DOI: 10.5846/stxb201306101619

王小静,李志,赵姹,张志强.西北旱区 1961—2011 年参考作物蒸散量的时空分异.生态学报,2014,34(19):5609-5616.

Wang Xiao J, Li Z, Zhao C, Zhang Z Q. Spatiotemporal variations of the reference crop evapotranspiration in the arid region of northwest China during 1961—2011. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(19): 5609-5616.

西北旱区 1961—2011 年参考作物蒸散量的时空分异

王小静,李志*,赵姹,张志强

(西北农林科技大学资源环境学院,杨凌 712100)

摘要:全球变化背景下分析参考作物蒸散量的变化特征,对于农业生产和水资源管理等有重要指导意义。根据西北旱区 152 个气象站点 1961—2011 年气象资料计算参考作物蒸散量(ET_0),分析了其空间分布及时间变化趋势,并探讨了其变化原因。1961—2011 年西北旱区年均 ET_0 为 1100.4 mm/a,但存在空间变异,低值出现在黄土高原南部区域,高值出现在西北部沿东南-西北方向的条带上。 ET_0 整体呈不显著的上升趋势,但 64 和 36 个站点分别呈显著的上升和下降趋势;西北旱区 ET_0 发生突变的年份东部较西部晚。 ET_0 的时空变异是气象因子时空变化的组合效应, ET_0 对相对湿度和最高温度的变化最敏感,但过去 50a ET_0 变化中风速和最高温度的贡献率最大。西北旱区 ET_0 的变化发生了重要改变,由 2000 年以前的下降趋势转变为目的的上升趋势,可能加剧该区的水资源短缺状况,需引起足够的重视。

关键词:西北旱区;参考作物蒸散量;时空变异;归因分析

Spatiotemporal variations of the reference crop evapotranspiration in the arid region of northwest China during 1961—2011

WANG Xiaojing, LI Zhi*, ZHAO Cha, ZHANG Zhiqiang

College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

Abstract: Reference crop evapotranspiration (ET_0) is widely considered to be one of the best means to evaluate agriculture water use, which is of great importance for crop production. The agriculture in the arid region of northwest China has suffered from severe water shortage and imbalance between water quantity and land area. Under the background of global warming, it is necessary to evaluate the spatiotemporal characteristics of ET_0 as it is sensitive to climate change. Observed daily data during 1961—2011 from 152 meteorological stations, including temperature, relative humidity, wind speed and sunshine hours, are used to calculate the ET_0 based on Penman-Monteith equation. Mann-Kendall, Pettitt and Inverse Distance Weighted Interpolation are used to analyze the spatiotemporal characteristics of ET_0 . Results show that the annual mean ET_0 is 1100.4 mm/a with obvious spatial variations. Values in the south region of the Loess Plateau are the smallest, while those in a southeast-northwest strip beside the Loess Plateau are the greatest. ET_0 shows a insignificant upward trend during 1961—2011 for the whole region, and the annual increase is 0.45 mm/a; however, significant upward and downward trends are detected for 64 and 36 stations, respectively. ET_0 has occurred abrupt changes from 1970s to 1990s; however, the years occurring abrupt changes in the eastern part are later than those in the western part. Sensitive coefficients and contribution rates are calculated to analyze the reasons of the spatiotemporal pattern for ET_0 . Results show that the spatiotemporal characteristics of ET_0 are from the combined effects of climatic factors. Relative humidity and maximum temperature is the most sensitive factors for ET_0 ; however, wind speed and maximum temperature have the greatest contribution rates for the

基金项目:国家自然科学基金项目(41101022, 51179161);国家“十二五”科技支撑计划项目(No. 2011BAD29B09)

收稿日期:2013-06-10; 修订日期:2014-07-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lizhibox@126.com

changes of ET_0 during the past 50 years. The changes of ET_0 in the arid region of northwest China have transformed from downward trend to upward trend since 2000s, which will exacerbate the water shortage of this region. Therefore, more attentions should be paid to it and some countermeasures should be planned.

Key Words: arid region of northwest China; reference crop evapotranspiration; spatiotemporal variation; attribution analysis

参考作物蒸散量(ET_0)是非常重要的农业气象变量,是制定作物灌溉制度、统筹农业需水量的主要参考^[1]。 ET_0 是各气象因子综合作用的结果,而全球气候变化背景下温度、湿度、日照时数等气象变量发生了显著的变化^[2-6],因此, ET_0 可能受到的影响及发生的变化需进行评估,从而为农业生产提供参考。

我国西北旱区包括陕西、宁夏、甘肃、青海、新疆及内蒙古等地区,土地面积约占全国总面积的 42%,但由于水资源数量有限,加之干旱蒸发强烈,导致水土资源不平衡,特别是水资源过度开发产生了严重的生态环境问题,并影响农业生产^[7-10]。为此,探讨合理的水资源配置模式非常重要。 ET_0 作为水资源管理和农业生产中的重要变量,是统筹农业用水、规划灌溉用水、提高用水效率的重要依据^[11-15]。结合温度、风速、日照时数等气象资料分析 ET_0 的变化,可为该区的水土资源优化配置提供重要的基础信息。

不少研究对我国及西北地区的 ET_0 变化进行了分析。多数研究表明我国年平均 ET_0 整体呈下降趋势,但存在区域差异^[10, 16-18]。对西北地区 ET_0 而言,目前的研究结果存在一定差异。如普宗朝等发现乌鲁木齐河流域 1978—2002 年 ET_0 下降趋势明显^[19],这与王幼奇等对黄土高原 1954—2000 年及倪广恒等对 1976—2000 年干旱半干旱地区的分析结果一致^[20-21];而孙小舟发现西辽河流域 1952—2007 年 ET_0 呈上升趋势^[22],这与李志对黄土高原地区 1961—2009 年 ET_0 变化趋势的研究结论相似^[23]。可见,这些研究结果的差异可能主要是由于研究时段和区域差异造成的。同时,近年来全球气候变化更加显著^[24],黄土高原出现了由暖干向暖湿变化的新趋势^[25],1993 年以后旱区 ET_0 可能由之前的下降趋势转变为上升趋势^[26-27]。因此,针对整个西北旱区、基于长序列的最新气象资料来探究旱区 ET_0 可能发生的新趋势,显得尤为重要。

为了明确西北旱区 ET_0 在全球气候变暖背景下

的趋势变化,本研究基于广泛分布在西北旱区的 152 个气象站点数据分析了旱区 1961—2011 年 ET_0 的空间分布和时间变化特征,并定性和定量探讨了引起 ET_0 变化的原因,以期对旱区农业生产和水分利用提供参考依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源与处理

基于广泛分布在西北旱区的 152 个气象站点 1961—2011 年日气象资料计算 ET_0 。152 个站点分布在新疆、青海、内蒙、陕西、甘肃等省份(图 1)。气象变量包括最高温度(℃)、最低温度(℃)、日照时数(h)、相对湿度(%)、风速(m/s)等。少数缺失数据使用相邻站点的数据插补。

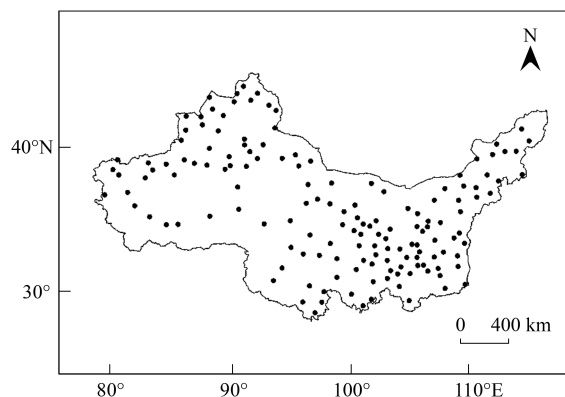


图 1 西北旱区气象站点分布

Fig. 1 Location of the meteorological stations in the arid region of northwest China

1.2 ET_0 计算

采用联合国粮农组织 (FAO) 推荐的 Penman-Monteith 计算 ET_0 :

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

式中, ET_0 参考作物蒸散量 (mm/d); R_n 冠层表面净辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); G 土壤热通量 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); T 日平均气温 (℃); u_2 风速 (m/s); e_s 饱和水汽压 (kPa); e_a

实际水汽压 (kPa); $e_s - e_a$ 饱和水汽压差 (kPa); Δ 水汽压曲线斜率 (kPa/°C); γ 湿度计常数 (kPa/°C)。

净辐射 R_n 的精确性取决于经验系数, 而经验系数有地区局限性, 针对特定地区其值不同, 本文采用尹云鹤在对我国 1971—2008 年潜在蒸散时空分布研究中采用的方法^[28], 其经过校正的辐射值 R_n :

$$R_n = 0.77 \times \left(0.20 + 0.79 \frac{n}{N} \right) R_{so} - \sigma \left[\frac{T_{x,k}^4 + T_{n,k}^4}{2} \right] \times (0.56 - 0.25^{\frac{n}{N}}) \left(0.1 + 0.9 \frac{n}{N} \right)$$

式中, σ 为 Stefan-Boltzmann 常数 ($4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), $T_{x,k}$ 和 $T_{n,k}$ 分别为绝对温标的最高、最低温度 (K), n 为实际日照时数 (h), N 为可照时数 (h), R_{so} 为晴天辐射 (MJ/m^2)。

数据处理严格按照 FAO 的规程进行操作, ET_0 的月值和年值由逐日 ET_0 值加和获得。

1.3 ET_0 的时空分布

对 ET_0 进行了空间分布、单调变化趋势和突变年份等方面的分析。其中, 空间分析使用反距离权重法对气象因素进行空间插值, 该方法假设样点间存在局部影响且随距离越远其影响越小, 站点间气候因子间的影响符合此规律; 单调变化趋势使用 Mann-Kendall 检验, 显著性水平为 95%; 突变年份使用 Pettitt 分析。

1.4 ET_0 时空变异原因分析

从定性和定量两种方法分别探讨 ET_0 时空变异与气象因子 (温度、湿度、风速和日照时数) 的关系。定性方法主要分析 4 种气象因子的空间分布特征和时间变化趋势, 进而探讨其与 ET_0 时空变异的关系。

定量方法通过敏感分析进行, 用以确定对 ET_0 影响最大的因子和对 ET_0 变化贡献率最高的因子。首先需要计算相对敏感系数, 主要根据 Taylor 级数展开的有限差分近似求解:

$$S = \frac{\Delta ET_0}{\Delta X} \frac{|X|}{ET_0}$$

式中, S 为相对敏感系数, 代表气象因子的变化引起 ET_0 的变化, 无量纲。 ΔX 为气候要素 X 的变化, X 取绝对值, ΔET_0 为 ΔX 引起的 ET_0 变化。

相对敏感系数代表气象因子变化导致的 ET_0 变化幅度, 但相对敏感系数大的气象因子是否对 ET_0 变化的贡献大, 需要引入气象因子的多年相对变化量:

$$Con_{vi} = S_{vi} \cdot RC_{vi}$$

$$RC_{vi} = \frac{49 \cdot \text{Trend}}{|av|} \times 100\%$$

式中, Con_{vi} 为气象因子 V_i 对 ET_0 变化的贡献, S_{vi} 为 V_i 的敏感系数, RC_{vi} 是 V_i 的多年相对变化, av 为 51a 的平均值, 逐年变化率 Trend 由趋势分析法计算得到。由于 S_{vi} 是无量纲的, RC_{vi} 以百分比为单位, 因此计算出的贡献 Con_{vi} 的单位也是百分比。

2 ET_0 时空变异

2.1 ET_0 空间分布

1961—2011 年, 西北旱区 ET_0 的年均值为 1100.4 mm/a, 介于 720.6 mm/a (新疆七角井)—1930.6 mm/a (新疆巴音布鲁克)。 ET_0 存在一定的空间差异, 变异系数为 0.18, 属中等变异。但整体而言大部分地区的 ET_0 介于 950—1200 mm/a; 黄土高原南部靠近秦岭的区域是 ET_0 的低值中心, 年均 ET_0 低于 900 mm/a; ET_0 较高的区域出现在西北部沿东南—西北方向的条带上, 包括新疆东南部、甘肃西北部和内蒙中部, 年均值大于 1350 mm/a。

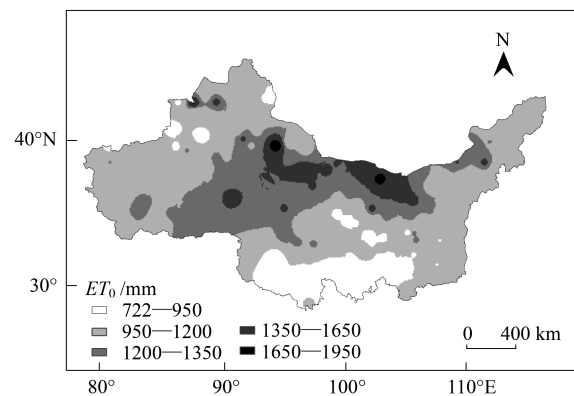
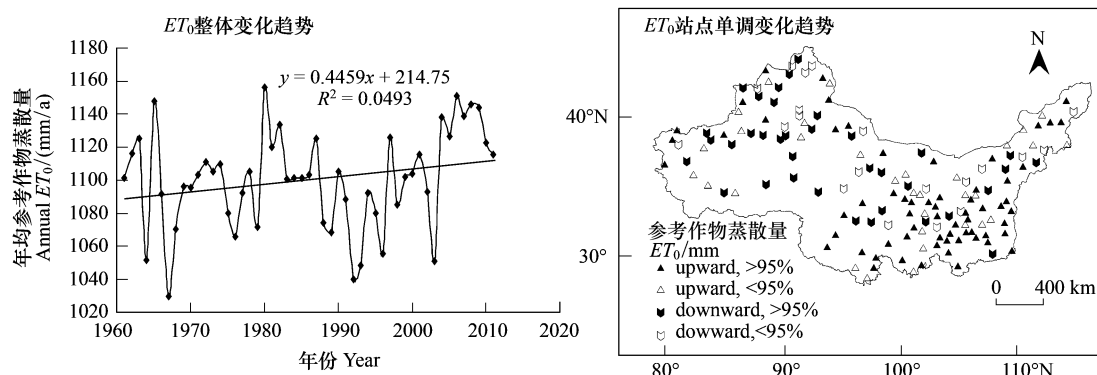


图 2 1961—2011 年西北旱区 ET_0 空间分布

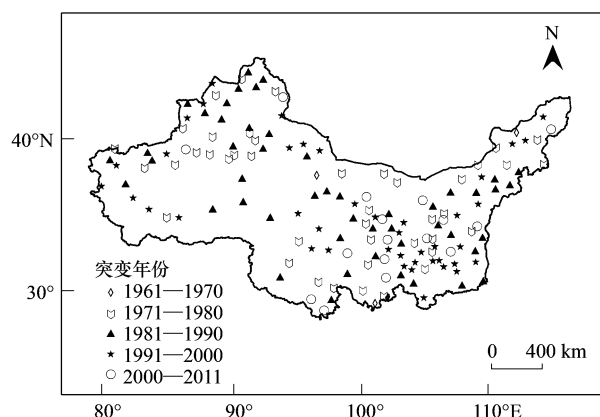
Fig. 2 The spatial distribution of annual average ET_0 in the northwest arid region during 1961—2011

2.2 ET_0 时间变化趋势

1961—2011 年西北旱区 ET_0 整体呈不显著的上升趋势 (图 3)。但其单调变化趋势呈混合模式, 96 和 56 个站点分别呈上升和下降趋势, 通过 95% 显著性检验的站点分别为 64 和 36 个。单调变化趋势存在一定的空间差异 (图 3), 可以看出, 黄土高原以西地区 ET_0 基本呈下降趋势; 黄土高原及其以东地区主要呈上升趋势。

图3 1961—2011 西北旱区 ET_0 时间变化趋势Fig.3 The temporal trend of ET_0 in the northwest arid region during 1961—2011

为进一步分析 ET_0 的时间变化趋势,进行了突变年份检验。可以看出, ET_0 突变年份主要发生在 20 世纪 70、80、90 年代,而 60 年代和 21 世纪很少(图 4)。同时, ET_0 的突变年份存在空间差异。黄土高原以西的区域, ET_0 突变主要发生在 70 和 80 年代;而黄土高原及其以东地区,突变年份主要在 80 和 90 年代,甚至进入 21 世纪也有发生突变的站点。可见,西北旱区东部 ET_0 突变发生的年份较黄土高原以西的区域晚。

图4 1961—2011 年西北旱区 ET_0 的突变年份Fig.4 The distribution of abrupt year of ET_0 during 1961–2011

3 ET_0 时空变异原因分析

3.1 定性分析

ET_0 的空间变异是温度(最低与最高温度空间分布图一致故略)、相对湿度、日照时数及风速等气象因子空间分布综合作用的结果(图 5)。一般来说,高温、长日照、低湿度会导致高蒸散^[20]。可以看出,

长日照时数、低相对湿度和高风速导致西北部沿东南-西北方向条带上 ET_0 值较高,而低温高湿则是黄土高原南部靠近秦岭地区 ET_0 最低的原因。 ET_0 与相对湿度和风速基本具有相似的空间分布模式。为进一步量化 ET_0 与气象因子的相关性,求取了 ET_0 与各因子的相关系数,发现 ET_0 与相对湿度的相关性最高(0.37),其次为风速(0.36)、最高温度(0.30)、日照时数(0.21)和最低温度(0.19)。可见,西北旱区 ET_0 对相对湿度最敏感,这与相关研究在石羊河流域、黄土高原、黄河流域和全国的结论一致^[23, 28–31]。

为分析各种气象因子变化对 ET_0 的影响,表 1 给出了其单调变化趋势(表 1)。西北旱区存在温度上升,而相对湿度、日照日数和风速降低的变化趋势。一般而言,温度变化对 ET_0 具有支配性地位,但尽管最高与最低温度都呈上升趋势,特别是在基本所有站点的最低温度都通过了 95% 置信区间检验呈显著上升趋势的增温背景下,仍有 1/3 的站点 ET_0 呈下降趋势,表明西北旱区 ET_0 变化受气象因子的综合作用。

对气象因子进行突变分析发现(图 6),与 ET_0 相似,气象因子的突变也都发生在 70—90 年代,而 60 年代和 2000—2010 年各因子发生突变的站点都较少。70—90 年代 ET_0 的突变站点数相似,但气象因子的突变站点数差异较大,70 年代相对湿度和日照时数发生突变较多,80 年代各因子都有较多站点发生突变,90 年代各气象因子的突变站点数很相似。这说明 ET_0 的突变是受各因子的突变影响,但可能在不同年代主要的影响因子不同。

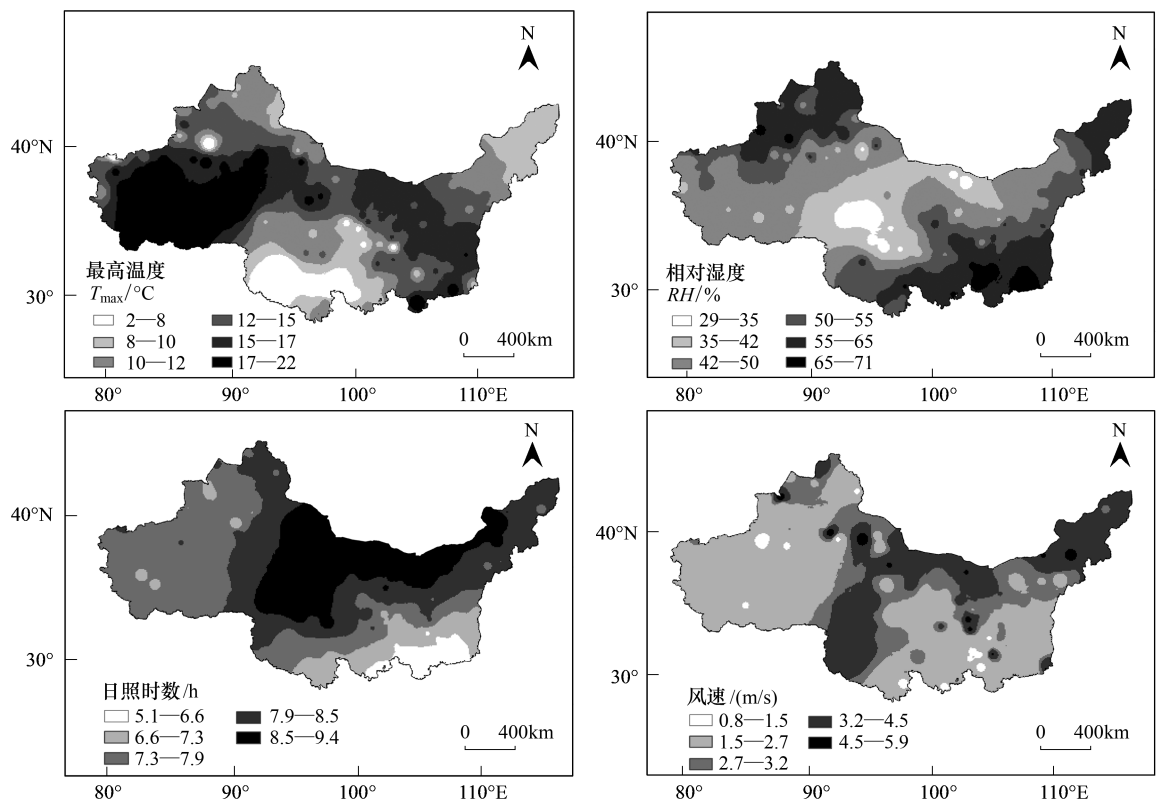


图 5 1961—2011 年西北旱区影响 ET_0 相关气象要素的空间分布

Fig.5 The spatial distribution of meteorological factors affecting ET_0 on the northwest arid region during 1961—2011

表 1 1961—2011 年西北旱区气象因子空间变化显著趋势

气象要素 Meteorological factors	上升趋势 Upward		下降趋势 Downward		增幅 β / $10a^{-1}$	无趋势 No trend
	站点数	显著站数	站点数	显著站数		
	<i>n</i>	<i>n-sig</i>	<i>n</i>	<i>n-sig</i>		
参考作物蒸散量 Reference crop evapotranspiration	96	64	56	36	4.46	0
最高温度 Maximum temperature	146	140	3	0	0.27	3
最低温度 Minimum temperature	147	144	2	2	0.46	3
相对湿度 Relative humidity	52	20	96	50	-0.25	4
日照时数 Sunhrs	41	19	107	67	-0.05	4
平均风速 Wind speed	19	9	130	105	-0.15	3

n: 站点数 Number of stations; *n-sig*: 各趋势的显著站数 Number of stations with significant trend; β : 气象变量变幅 Mean change magnitude of meteorological factors

3.2 定量分析

西北旱区 ET_0 对相对湿度的敏感性为负值, 表明如果其他气候因子不变, 相对湿度增加则导致 ET_0 减少; ET_0 对最高与最低温度、日照时数和风速的敏感性为正值。 ET_0 对相对湿度 (−0.45) 和最高温度 (0.45) 敏感性最高, 即若其它气候因子不变, 相对湿度增加 10% 会导致 ET_0 减少 4.5%, 而最高温度升高 10% 则导致 ET_0 增加 4.5%; ET_0 对其他因子的敏感性

依次为风速 (0.31)、日照时数 (0.23) 和最低温度 (0.01)。 这很好地解释了 ET_0 与相对湿度的相关性, 与曹雯对西北旱区 ET_0 的研究结论一致^[26, 32]。

基于 ET_0 对气象因子的敏感性系数进而计算其贡献率, 发现风速对 ET_0 的贡献率最大 (−9.50%), 其次为最高温度 (4.88%)、相对湿度 (1.01%)、日照时数 (−0.76%) 和最低温度 (0.17%)。 可见, 风速和最高温度是 1961—2011 年西北旱区 ET_0 变化的主要因

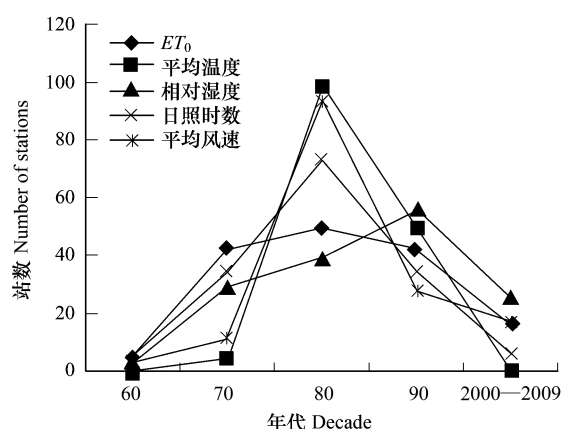


图6 1961—2011年西北旱区气象变量突变年份

Fig. 6 The abrupt year of meteorological factors in the northwest arid region during 1961–2011

子; ET_0 对相对湿度的敏感性高, 但由于其相对变化小导致其贡献率不大, 这与曹雯和尹云鹤等等的结论一致^[28, 33]。同时, 需要注意的是, 导致变化的主导因子存在区域差异, 风速作为最主要的主导因子, 其分布遍布整个区域; 但温度作为主导因子的站点主要在西北旱区东部(图7)。

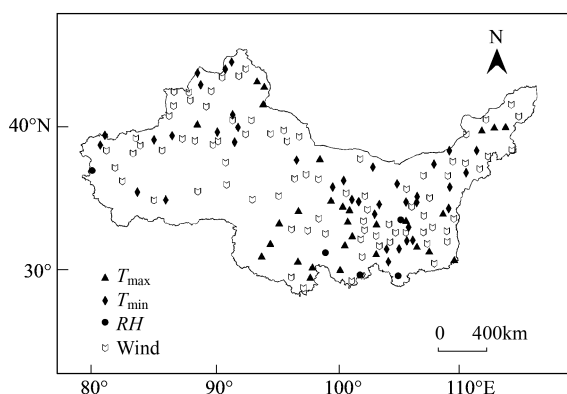


图7 1961—2011年 ET_0 变化的主导因子

Fig. 7 The dominant meteorological factors of ET_0 in the northwest arid region during 1961–2011

虽然风速、日照时数等下降会引起 ET_0 的下降趋势, 但本文的研究表明 ET_0 呈不显著上升, 这说明对 ET_0 敏感性较高的相对湿度及温度引起的 ET_0 上升略高于由风速等因子引起的 ET_0 下降, 1961—2011年 ET_0 不显著上升趋势很有可能是温度及相对湿度等上升导致, 因此, ET_0 整体呈现不显著上升趋势。

4 结论

基于我国西北旱区 152 个气象站 1961—2011

年温度、相对湿度、日照时数、风速等气象因子计算 ET_0 并分析其时空分异规律。1961—2011 年西北旱区 ET_0 年均值为 1100.4 mm, 黄土高原南部靠近秦岭的区域是低值中心, 西北部沿东南—西北方向的条带为高值中心。 ET_0 整体呈不显著上升趋势, 但 64 和 36 个站点分别呈显著的上升和下降趋势; 西北旱区 ET_0 发生突变的年份东部较西部晚。 ET_0 的时空变异是气象因子时空变化的组合效应, ET_0 对相对湿度和最高温度的变化最敏感, 但过去 50 年 ET_0 变化风速的贡献率最大。

需要注意的是, 以黄土高原西界为界线, ET_0 的空间分布、时间变化、以及主导因子都存在明显的空间变异, 如界线以东地区 ET_0 主要呈上升趋势, 发生突变年份较界线以西滞后, 温度作为主动因子主要分布在界线以东。除了气象因子导致了这些显著差异, 还有一个深层次原因, 就是大气环流因子。黄土高原西界与季风和非季风界线非常接近, 而我国夏季风和冬季风系统分别从 70 年代中后期和 80 年代中后期发生了明显变弱的年代际变化^[34]。从引言部分可以发现, 基于 2000 年之前的数据分析时, ET_0 多呈下降趋势^[26-27], 但基于最新数据的研究都表明该区 ET_0 已呈上升趋势。这表明西北旱区的 ET_0 变化趋势发生了重要的改变, 而这种上升趋势可能加剧该区的水资源短缺等状况, 进而影响该区的农业生产和可持续发展, 需要引起足够的重视。

References:

- [1] Yu D P, Zhang X, He Y. Temporal-spatial variations of reference crop evapotranspiration in eastern plateau agricultural region of Qinghai province. Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering, 2012, 28(2): 66-71.
- [2] Chen S Y, Zhang K L, Xing X B, Dong A X. Climatic change of sunshine duration in Northwest China during the last 47 years. Journal of Natural Resources, 2010, 25(7): 1142-1152.
- [3] Lu A G, Xiong Y C. Systematic change in air humidity in China over last 50 years under global climate change. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(1): 141-143.
- [4] Ma Z G, Ren X B. Drying trend over China from 1951 to 2006. Advances in Climate Change Research, 2007, 3(4): 195-201.
- [5] Ren Z X, Yang D Y. Trend and characteristics of climatic change in arid region of Northwest China in resent 50 years. Journal of Earth Sciences and Environment, 2007, 29(1): 99-102.
- [6] Zhang Q, Zhang C J, Bai H Z, Li L, Sun L D, Wang J S, Zhao H Y. New development of climate change in Northwest China and

- its impact on arid environment. *Journal of Arid Meteorology*, 2010, 28(1): 1-7.
- [7] Kang S Z, Xu D, Li W H. Water problem to sustainable agriculture development in dryland of northwest China in the 21st century and the way to deal with it. *Science Foundation in China*, 2002, 16(5): 20-24.
- [8] Yao Y B, Xiao G J, Wang R Y, Zhang X Y. Climatic changes of semi-arid region over the northwest China in recent 50a. *Arid Land Geography*, 2009, 32(2): 159-165.
- [9] Du X L, Wei L, Huang S P, Liu W Y. Calculation of evaporation and its application on evaluating water resources of Agriculture in Jiangxi Province. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2005, 26(3): 161-164.
- [10] Liu Y, Wang Y, Yang X G. Trends in reference crop evapotranspiration and possible climatic factors in the North China Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4): 923-932.
- [11] Yin Q F, Cai H J, Wang J. Experimental study on winter wheat field evaporation. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2000, (4): 1-4.
- [12] Liu X Y, Li Y Z, Hao W P. Trend and causes of water requirement of main crops in North China in recent 50 years. *Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering*, 2005, 19(10): 155-159.
- [13] Wang Y, Zhao C Y, Tian F X, Wang C. Spatial variation of water requirement for spring wheat in the middle reaches of Heihe River basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(9): 2374-2382.
- [14] Zhang B, Zhang D F. Responses of reference crop evapotranspiration in Loess Plateau of Northwest China to climate change in 1961—2010 and estimation of future trend. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(3): 733-740.
- [15] Zhang J P, Wang C Y, Yang X G, Zhao Y X, Liu Z J, Wang J, Chen Y Y. Impact forecast of future climate change on maize water requirement in three provinces of Northeast China. *Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering*, 2009, 25(7): 50-55.
- [16] Ma J H, Liu Y, Yang X G, Wang W F, Xue C Y, Zhang X Y. Characteristics of climate resources under global climate change in the North China Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(14): 3818-3827.
- [17] Zhang F M, Shen S H. Spatial distribution and temporal trend of reference crop evapotranspiration in China. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2007, 30(5): 705-709.
- [18] Gao G, Chen D L, Ren G Y, Chen Y, Liao Y M. Trend of potential evapotranspiration over China during 1956 to 2000. *Geographical Research*, 2006, 25(3): 378-387.
- [19] Pu Z C, Zhang S Q, Li J L, Huang X, Sun Y Q, Apaer. Change characteristics of reference crop evapotranspiration in Urumqi River Basin. *Desert and Oasis Meteorology*, 2008, 2(1): 41-45.
- [20] Ni G H, Li X H, Cong Z T, Sun F B, Liu Y. Temporal and spatial characteristics of reference evapotranspiration in China. *Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering*, 2006, 22(5): 1-4.
- [21] Wang Y Q, Fan J, Shao M A, Bai Y R. Analysis of effects of climate change on reference evapotranspiration on the Loess Plateau in recent 50 years. *Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering*, 2008, 24(9): 6-10.
- [22] Sun X Z, Feng Z M, Yang Y Z. Change Tendency of reference crop evapotranspiration in Xiliaohe Basin. *Resources Science*, 2009, 31(3): 479-484.
- [23] Li Z. Spatiotemporal variations in the reference crop evapotranspiration on the Loess Plateau during 1961—2009. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(13): 4139-4145.
- [24] Solomon S, Qin M M, Chen M M, Averyt K B, Tignor M, Miller H L. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [25] Li Z, Zhao X N. Spatiotemporal analysis of meteorological elements on the Loess Plateau during 1961—2009. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(2): 287-299.
- [26] Cao W, Shen S H, Duan C F. Temporal-spatial variations of potential evapotranspiration and quantification of the causes in Northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(11): 3394-3403.
- [27] Duan C F, Miu Q L, Cao W. Changing characteristics of reference crop evapotranspiration and main causes in the Northwest China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(8): 77-83.
- [28] Yin Y H, Wu S H, Dai E F. Determining factors in potential evapotranspiration changes over China in the period 1971—2008. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(29): 3329-3337.
- [29] Du J Q, Shu J M, Liu C C, Wang L X, Guo Y, Zhang L B. Variation characteristics of reference crop evapotranspiration and its responses to climate change in upstream areas of Yellow River basin. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(12): 92-100.
- [30] Liu C M, Zhang D. Temporal and spatial change analysis of the sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological influencing factors in China. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(5): 579-588.
- [31] Tong L, Kang S Z, Su X L. Impacts of climate change on reference crop evapotranspiration in Shiyang River basin. *Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering*, 2004, 20(2): 15-18.
- [32] Liu Q, Yan C R, Mei X R, Zhang Y Q, Yang J Y, Liang Y S. Spatial evolution of reference crop evapotranspiration in arid area of Northwest China. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2012, 33(1): 48-53.
- [33] Cao W, Shen S H, Duan C F. Quantification of the causes for reference crop evapotranspiration Changes in Growing Season in

Northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 66(3): 407-415.

- [34] Huang R H, Gu L, Chen J L. Recent progresses in studies of the temporal-spatial variations of the East Asian monsoon system and their impacts on climate anomalies in China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 691-719.

参考文献:

- [1] 于东平, 张鑫, 何毅. 青海省东部高原农业区参考作物蒸散量的时空变化. *农业工程学报*, 2012, 28(2): 66-71.
- [2] 陈少勇, 张康林, 邢晓宾, 董安祥. 中国西北地区近 47a 日照时数的气候变化特征. *自然资源学报*, 2010, 25(7): 1142-1152.
- [10] 刘园, 王颖, 杨晓光. 华北平原参考作物蒸散量变化特征及气候影响因素. *生态学报*, 2010, 30(4): 923-932.
- [12] 刘晓英, 李玉中, 郝卫平. 华北主要作物需水量近 50 年变化趋势及原因. *农业工程学报*, 2005, 19(10): 155-159.
- [13] 王瑶, 赵传燕, 田凤霞, 王超. 黑河中游春小麦需水量空间分布. *生态学报*, 2011, 31(9): 2374-2382.
- [14] 张勃, 张调风. 1961—2010 年黄土高原地区参考作物蒸散量对气候变化的响应及未来趋势预估. *生态学杂志*, 2013, 32(3): 733-740.
- [15] 张建平, 王春乙, 杨晓光, 赵艳霞, 刘志娟, 王靖, 陈艳英. 未来气候变化对中国东北三省玉米需水量的影响预测. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 50-55.
- [16] 马洁华, 刘园, 杨晓光, 王文峰, 薛昌颖, 张晓煜. 全球气候变化背景下华北平原气候资源变化趋势. *生态学报*, 2010, 30(14): 3818-3827.
- [17] 张方敏, 申双和. 我国参考作物蒸散的空间分布和时间趋势. *南京气象学院学报*, 2007, 30(5): 705-709.
- [18] 高歌, 陈德亮, 任国玉, 陈峪, 廖要明. 1956—2000 年中国潜在蒸散量变化趋势. *地理研究*, 2006, 25(3): 378-387.
- [19] 普宗朝, 张山清, 李景林, 黄新, 孙月琴, 阿帕尔. 乌鲁木齐河流域参考作物蒸散量时空变化特征. *沙漠与绿洲气象*, 2008, 2(1): 41-45.
- [20] 倪广恒, 李新红, 丛振涛, 孙福宝, 刘钰. 中国参考作物腾发量时空变化特性分析. *农业工程学报*, 2006, 22(5): 1-4.
- [21] 王幼奇, 樊军, 邵明安, 白一茹. 黄土高原地区近 50 年参考作物蒸散量变化特征. *农业工程学报*, 2008, 24(9): 6-10.
- [22] 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. *资源科学*, 2009, 31(3): 479-484.
- [23] 李志. 黄土高原 1961—2009 年参考作物蒸散量的时空变异. *生态学报*, 2012, 32(13): 4139-4145.
- [25] 李志, 赵西宁. 1961—2009 年黄土高原气象要素的时空变化分析. *自然资源学报*, 2013, 28(2): 287-299.
- [26] 曹雯, 申双和, 段春锋. 中国西北潜在蒸散时空演变特征及其定量化成因. *生态学报*, 2012, 32(11): 3394-3403.
- [27] 段春锋, 缪启龙, 曹雯. 西北地区参考作物蒸散变化特征及其主要影响因素. *农业工程学报*, 2011, 27(8): 77-83.
- [28] 尹云鹤, 吴绍洪, 戴尔阜. 1971—2008 年我国潜在蒸散时空演变的归因. *科学通报*, 2010, 55(22): 2226-2234.
- [29] 杜加强, 舒俭民, 刘成程, 王丽霞, 郭扬, 张林波. 黄河上游参考作物蒸散量变化特征及其对气候变化的响应. *农业工程学报*, 2012, 28(12): 92-100.
- [30] 刘昌明, 张丹. 中国地表潜在蒸散敏感性时空变化特征分析. *地理学报*, 2011, 66(5): 579-588.
- [31] 佟玲, 康绍忠, 栗晓玲. 石羊河流域气候变化对参考作物蒸发蒸腾量的影响. *农业工程学报*, 2004, 20(2): 15-18.
- [32] 刘勤, 严昌荣, 梅旭荣, 张燕卿, 杨建莹, 梁瑜珊. 西北旱区参考作物蒸散量空间格局演变特征分析. *中国农业气象*, 2012, 33(1): 48-53.
- [33] 曹雯, 申双和, 段春锋. 西北地区生长季参考作物蒸散变化成因的定量分析. *地理学报*, 2011, 66(3): 407-415.
- [34] 黄荣辉, 顾雷, 陈际龙. 东亚季风系统的时空变化及其对我国气候异常影响的最近研究进展. *大气科学*, 2008, 32(4): 691-719.