

王健,吕新,王江丽. 北疆地区参考作物蒸散量时空变化特征[J]. 干旱气象, 2015, 33(1): 63-69. [WANG Jian, Lü Xin, WANG Jiangli. Change Characteristics of Reference Crop Evapotranspiration in the Northern Xinjiang[J]. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(1): 63-69], doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2015)-01-0063

北疆地区参考作物蒸散量时空变化特征

王健^{1,2}, 吕新^{1,2}, 王江丽^{1,2}

(1. 石河子大学农学院, 新疆 石河子 832003; 2. 新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆 石河子 832003)

摘要:为明确北疆地区在全球气候变暖背景下合理的灌溉制度,利用北疆地区22个气象站49 a (1962~2010年)的逐日气象资料,运用Penman-Monteith公式计算北疆地区1962~2010年的参考作物蒸散量 ET_0 (reference crop evapotranspiration),并用Mann-Kendall方法对其进行突变检验,基于ArcGIS 9.3空间分析功能模块对北疆参考作物蒸散量进行了空间变化分析。结果表明:研究区域的 ET_0 在1983年发生向下突变, ET_0 在时间分布上整体呈下降趋势,主要受该地区相对湿度和风速的影响; ET_0 从北疆的东北部和西南部向中间逐渐升高,东南部和西部表现略高,具有明显的区域差异;4~10月 ET_0 对全年 ET_0 的分布具有显著影响。

关键词: ArcGIS; 参考作物蒸散量; 时空特征; 北疆地区

文章编号: 1006-7639(2015)-01-0063-07 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2015)-01-0063

中图分类号: S161.4

文献标识码: A

引言

参考作物蒸散量(reference crop evapotranspiration, ET_0)是表征大气蒸散能力及评价气候干旱程度、植被耗水量、生产潜力及水资源供需平衡的重要指标之一^[1-2],同时又是某一地区水资源开采、利用、管理及种植结构调整、合理布局区划的依据。联合国粮农组织(FAO)将 ET_0 定义为一种假设参考作物上层的蒸散速率,即假设植株高0.12 m、叶面阻力固定为70 s/m、反射率为0.23,植株高度一致、生长旺盛且地面为完全遮盖的不缺水的绿色草地蒸发量^[3]。

近年来,在全球气候变暖的大背景下,农业科学家们开始积极探讨参考作物蒸散量对农业生产的影响,其中围绕蒸散量的研究也在广泛开展。如佟玲等^[4]对石羊河流域6个气象站近50 a的 ET_0 进行时空分析,结果表明该区域 ET_0 总体呈下降趋势,且与平均相对湿度的相关性最好;Chattopadhyay等^[5]通过对印度近30 a的蒸散量研究发现, ET_0 和水面蒸发值均呈下降趋势;王幼奇等^[6]研究黄土高原地区近50 a的 ET_0 变化,发现 ET_0 与气温、日照时数

呈极显著相关,除西宁站外其它各站点在1980年代后 ET_0 有上升趋势;而李景鑫等^[7]对西宁市52 a的 ET_0 研究表明,蒸散量的减少受平均气温、日照时数、相对湿度的影响,其中夏季的降温及夏、秋季日照时数的减少是蒸散量减小的主要原因,而日照时数减少与云量增加有关;吴文玉等^[8]对安徽省79个气象站近35 a的 ET_0 计算分析表明, ET_0 总体上随年代波动并呈下降趋势,存在明显的区域差异;李春强等^[9]利用河北省85个气象站近35 a的资料对 ET_0 计算分析表明,风速减小和日照时数减少是河北省 ET_0 降低的主要原因,气温升高影响不显著;庄晓翠等^[10]研究表明,阿勒泰地区蒸散量减少与平均风速降低、低云量增加、气温日较差减少有关;张山清等^[11]利用新疆各气象站近48 a的气象资料计算 ET_0 ,分析表明 ET_0 总体呈显著下降趋势;普宗朝等^[12]利用相同的资料对新疆夏半年(4~9月)的 ET_0 分析结果表明, ET_0 与日照时数、风速呈显著正相关,与降雨量、平均相对湿度呈显著负相关,与平均气温相关性不显著。

上述已有的研究表明,一个区域的 ET_0 变

收稿日期:2013-10-31; 改回日期:2014-03-17

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划(2011BAD29B06-1)及博士后项目(82240)共同资助

作者简介:王健(1982-),男,博士研究生,主要从事绿洲生态农业研究. E-mail: wjxbnd3221@126.com

通讯作者:吕新(1964-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事农业生态研究. E-mail: lxshz@126.com

化与气象因子关系密切。北疆地区气候条件特殊,在气候变暖环境下,了解北疆地区 ET_0 的变化特征,对了解区域作物需水量、合理配置水资源具有重要意义。本文利用北疆地区 22 个气象观测站 1962 ~ 2010 年的逐日气象资料,采用 Penman - Monteith 公式计算北疆参考作物蒸散量,并用 Mann - kendall 方法进行了突变检验,利用 ArcGIS 9.3 空间分析功能,分析了北疆地区 ET_0 的空间变化特征,以为北疆地区制定合理作物灌溉制度、合理分配水资源、调整种植业结构和建设节水高效农业提供理论依据。

1 资料与方法

1.1 资料

选择北疆地区年代序列较长、资料较完整的 22 个气象站近 49 a (1962 ~ 2010 年) 的气象资料,包括日最高气温、日最低气温、日平均气温、日相对湿度、日平均风速、日照时数、海拔和经、纬度等指标,气象站点分布见图 1。气象资料由中国气象局和新疆气象局提供,北疆地区地理信息数据由国家基础地理信息中心提供。

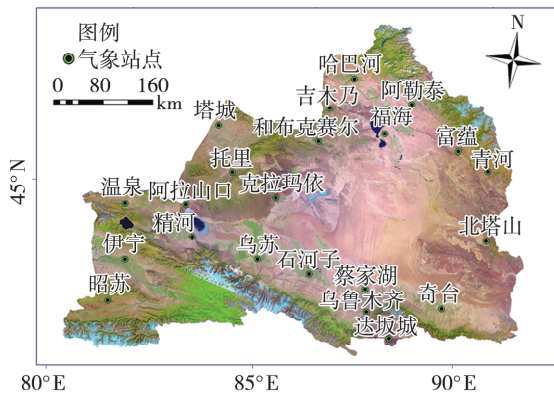


图 1 北疆地区气象观测站点分布图

Fig. 1 Distribution of the meteorological stations in the northern Xinjiang

1.2 研究方法

(1) ET_0 的计算

采用应用效果好、联合国粮农组织推荐的 Penman - Monteith 公式^[11] 计算北疆 ET_0 :

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

式中: ET_0 为参考作物蒸散量 (mm); Δ 为饱和水汽压与温度曲线的斜率 ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); R_n 为净辐射量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); γ 为温

度计常数 ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); T 为空气平均温度 ($^\circ\text{C}$); U_2 为地面上 2 m 高度处的风速 (m/s); e_s 为空气饱和水汽压 (kPa); e_a 为空气实际水汽压 (kPa)。

(2) ET_0 的突变检验

Mann - Kendall^[13] 检验是一种非参数检验方法,不需要样本遵从一定的分布,不受少数异常值的干扰,非常适用于分析非正态分布。其特点是检测范围宽、定量化程度高、计算方便,在进行突变分析时可以明确突变的开始时间。本文采用 Mann - Kendall 方法对 ET_0 序列进行了突变检验。

(3) ET_0 空间变化分析方法

克里格 (kriging) 空间插值法,又称为空间局部插值法,是基于统计学的插值方法之一。其对空间分析具有随机性,而对结构性变量的研究则有较大的优点^[8]。它是利用原始数据和半方差函数的结构特点,对区域化变量的未采样点进行无偏最优估计的插值方法^[14]。本文采用 ArcGIS 9.3 的空间分析功能对基于站点的 ET_0 进行空间栅格化处理,得到每个栅格单元的 ET_0 值,使其在空间上呈连续性分布状态,进而分析研究区 ET_0 突变前后多年平均 ET_0 的空间分布特征。

2 结果与分析

2.1 ET_0 的年际变化

通过对北疆地区 22 个气象站 (1962 ~ 2010 年) 近 49 a 气象数据整理、计算,得到各站点 ET_0 的年值,进一步求得整个研究区 49 a ET_0 的年均值,研究区平均 ET_0 的年际变化和线性趋势见图 2。 ET_0 变化波动范围在 1 238.3 ~ 1 657.7 mm 之间, ET_0 的多年平均值为 1 407.4 mm,平均 ET_0 的年均最大、最小值出现在 1972 年和 1992 年,分别为 1 657.7 mm

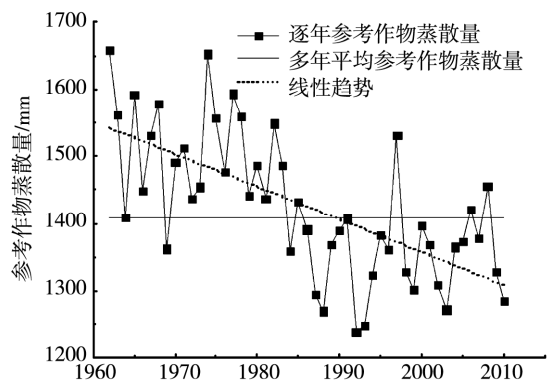


图 2 北疆地区 1962 ~ 2010 年平均 ET_0 的年际变化
Fig. 2 The annual variation of averaged ET_0 during 1962 - 2010 in the northern Xinjiang

和 1 238.3 mm。 ET_0 的年均值随时间呈下降趋势,下降幅度为 1.3 mm/a。对 ET_0 序列进行 Mann - Kendall 突变检验,统计量 $Z = -4.33 < -1.96$,说明存在显著的下陷趋势(置信度水平为 95%)。

2.2 ET_0 的突变特征

表 1 为 22 个气象站 ET_0 序列的 Mann - Kendall 检验结果。在 95% 置信度水平下,除富蕴站、北塔山站、塔城站的 ET_0 呈现显著上升趋势外,其它站点 ET_0 均呈显著下降趋势。采用 Mann - Kendall 检验对 ET_0 序列进行了突变分析(图 3),2 条临界线为 $y = \pm 1.96$ (0.05 水平)。

表 1 北疆地区各气象站 ET_0 的 Mann - Kendall 检验
Tab.1 Mann - Kendall test of ET_0 at each meteorological observation station in the northern Xinjiang

气象站点	统计量 Z 值	气象站点	统计量 Z 值
阿拉山口	-3.71	温泉	-4.52
乌鲁木齐	-2.98	克拉玛依	-5.78
青河	-1.95	阿勒泰	-4.02
和布克赛尔	-4.83	福海	-4.14
伊宁	-3.07	石河子	-1.83
奇台	-5.43	吉木乃	-3.78
达坂城	-3.21	哈巴河	-5.05
昭苏	-3.05	托里	-2.26
蔡家湖	-3.29	富蕴	1.40
乌苏	-5.62	北塔山	0.61
精河	-4.38	塔城	0.33

由图 3 可知, ET_0 减小站点平均 ET_0 从 1979 年开始呈下降趋势,突变前后对比下降幅度约为 160.7 mm,突变点出现在 1984 年; ET_0 增加站点的平均 ET_0 从 1981 年开始呈上升趋势,突变前后对比上升幅度约为 153.4 mm,突变点出现在 2004 年;就整个研究区来看,平均 ET_0 从 1979 年开始呈下降趋势,由于 UF、UB 2 条曲线相交于 1983 年,故研究区平均 ET_0 突变点出现在 1983 年,说明 1980 年代初期 ET_0 出现了突发性的下降,突变前后对比下降幅度约为 128.6 mm。综上所述, ET_0 减小站点与整个研究区的 ET_0 突变时间接近,而 ET_0 增加站点和研究区的突变时间相差较大。

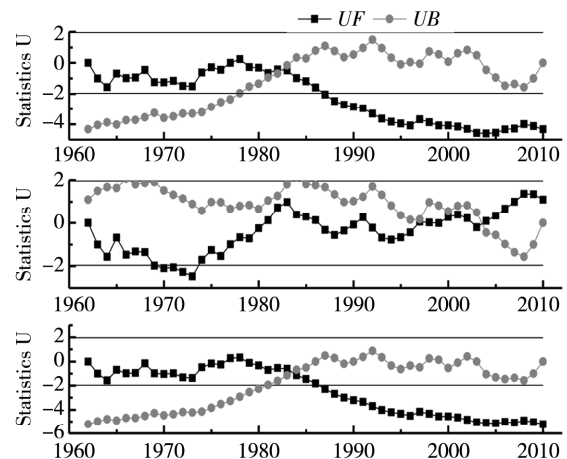


图 3 北疆地区 ET_0 减小(上)、增加站点(中)及整个研究区(下)1962 ~ 2010 年平均 ET_0 的 Mann - Kendall 检验

Fig. 3 The Mann - Kendall test of annual averaged ET_0 in ET_0 decreasing (the top) and increasing stations (the middle) as well as the northern Xinjiang (the bottom) during 1962 - 2010

2.3 ET_0 空间变化特征

由图 4a 可知,突变前(1962 ~ 1983 年) ET_0 在空间上的分布特征为:东北、西南低,东南和西部高,东北、西南往中部逐渐升高。 ET_0 多年平均值的的变化范围为 994.5 ~ 2 518.7 mm,其中东北、西南低值区 ET_0 的变化范围在 994.5 ~ 1 460.5 mm,东南部及西部高值区 ET_0 的变化范围为 1 566.9 ~ 2 518.7 mm,存在明显的地区差异。

由图 4b 可知,突变后(1984 ~ 2010 年) ET_0 在空间上的分布特征为:东北、西南低,西部和东南部高;多年平均 ET_0 值的变化范围为 915.2 ~ 2 357.5 mm,其中西南、东北部低值 ET_0 变化范围在 915.2 ~ 1 417.8 mm,高值区变化范围在 1 602.4 ~ 2 357.5 mm,存在明显区域差异。

图 4c 将突变后图例数值范围调整到和突变前一致,可以看出 ET_0 突变后(1984 ~ 2010 年 ET_0 均值)与突变前(1962 ~ 1983 年 ET_0 均值)相比明显减小,其下降幅度分别为:西南伊犁河谷下降幅度 85.5 ~ 107.2 mm;东北阿勒泰地区下降幅度 79.3 ~ 173.6 mm;沿天山北坡一带下降幅度 98.8 ~ 340.1 mm,北疆西部下降幅度 152.2 ~ 223 mm。

由于 4 ~ 10 月是北疆地区作物生长的主要季节,且 4 ~ 10 月的 ET_0 占全年 ET_0 的 80% 以上,因此本文分析 4 ~ 10 月 ET_0 的空间分布。由图 5 可知,4 ~ 10 月 ET_0 西部、东南高,往中间降低;西南和东北低,往中间逐渐升高。整个研究区 ET_0 变化范

围为 856.5 ~ 2 207.3 mm, 中西部与东南部高值区为 1 201.7 ~ 2 207.3 mm, 西南、东北部低值区在 856.5 ~ 1 135.7 mm, 具有明显的区域差异。4 ~ 10

月的 ET_0 在阿勒泰地区和伊犁河谷呈现出多等级的复杂态势, 这与两地的复杂地理环境如山脉、沙漠等的影响有关, 其它县市变化平缓。

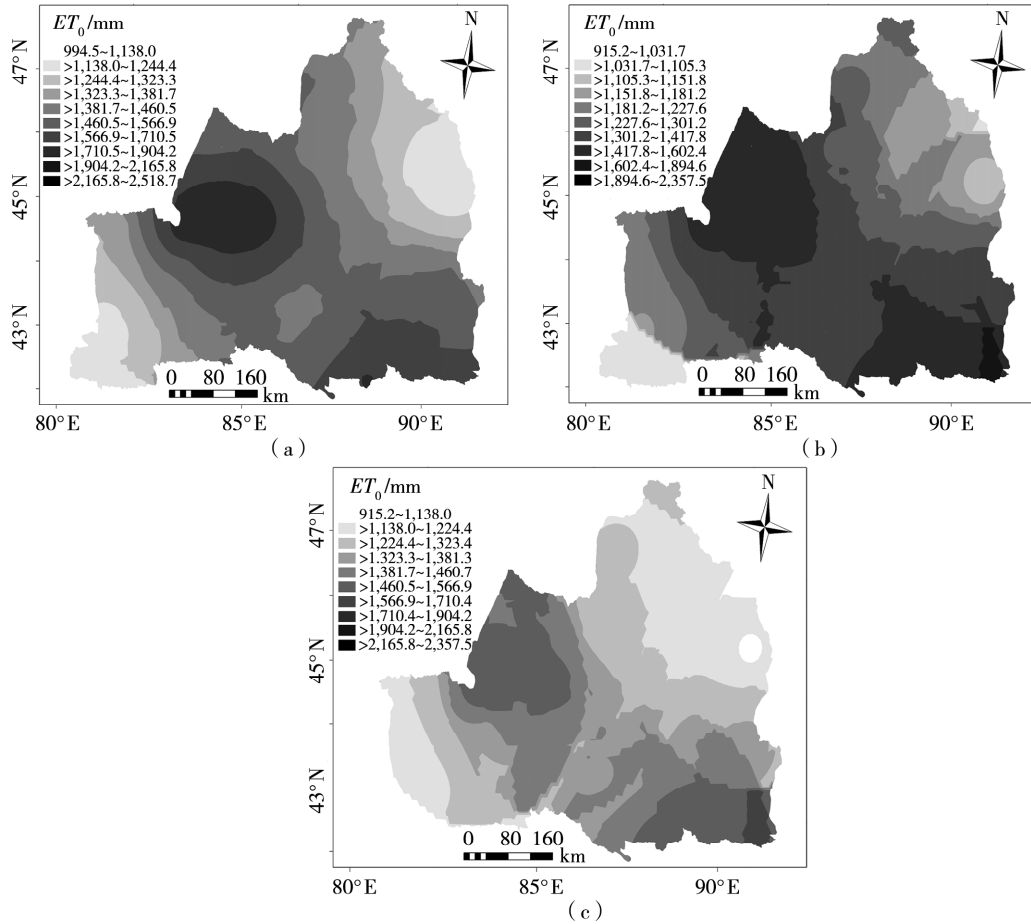


图 4 北疆地区 ET_0 突变前 (1962 ~ 1983) (a)、突变后 (1984 ~ 2010) (b) 及调整突变后 ET_0 图例范围至突变前 (c) 的年平均 ET_0 空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of averaged ET_0 during 1962 - 1983 (a), 1984 - 2010 (b) and adjusting legend from after to before abrupt change (c) in the northern Xinjiang

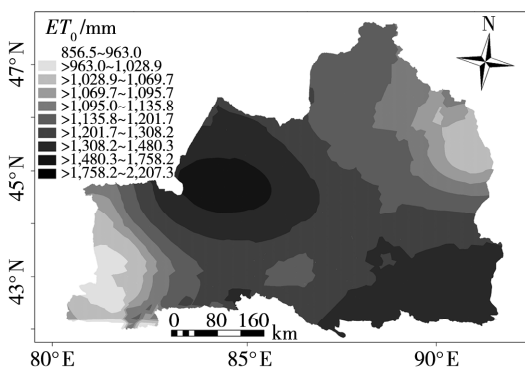


图 5 北疆地区 1962 ~ 2010 年 4 ~ 10 月 ET_0 空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of averaged ET_0 from April to October during 1962 - 2010 in the northern Xinjiang

2.4 ET_0 的时空变化原因

ET_0 的时空变化受多种气象因素共同影响, 本文仅探讨了 7 种主要的气象因子及地形因子 (海拔) 对 ET_0 时空变化特征的影响。表 3 是 ET_0 与各气象因子的偏相关系数, 表 4 是与 ET_0 显著相关的各气象因子的 Mann - Kendall 检验。可以看出: 在全区, 风速与 ET_0 呈极显著的正相关, 相对湿度与 ET_0 呈极显著的负相关; 在 ET_0 减小站点, 风速与 ET_0 呈极显著的正相关, 降雨量和相对湿度与 ET_0 呈显著、极显著的负相关; 在 ET_0 增加站点, 风速与 ET_0 呈极显著的正相关, 相对湿度与 ET_0 呈极显著负相关。

造成 ET_0 减小的主要原因是风速降低与相对湿

度的增大。风速和相对湿度是影响 ET_0 的主要气象因子,虽然日照时数、最高气温、平均气温在一定程度上也会影响 ET_0 ,但在北疆地区影响并不显著,这与陈喜^[15]、Allen R G^[16]、Goyal R K^[17] 等的研究结果有所不同。究其原因主要在以下 3 方面:(1)北疆地区是多风地区,且 ET_0 受风速影响很大;(2)北疆地区冬季降雪量大^[18-19]、且冬季较长,随着气候

变暖,降雨量也在增加^[20],致使空气湿度增大;(3)由于研究区地理环境复杂,山脉、沙漠和盆地等相互作用形成不同类型的小气候,不同小气候中各气象因子(气温、风速、日照、降雨量、相对湿度)也不尽相同,导致 ET_0 出现了明显的地域差异。而海拔高度与 ET_0 的相关系数仅为 0.154,表明海拔高度并不是影响北疆地区 ET_0 的主要因素。

表 3 ET_0 与各气象因子的偏相关系数Tab.3 Partial correlation coefficients between ET_0 and meteorological factors

	风速	相对湿度	日照时数	最高气温	最低气温	降雨量	平均温度
研究区	0.718 **	-0.673 **	0.233	0.216	-0.044	-0.253	-0.058
ET_0 减小站点	0.762 **	-0.614 **	0.079	0.133	0.038	-0.320 *	-0.051
ET_0 增加站点	0.492 **	-0.716 **	0.236	-0.060	-0.071	-0.144	0.192

注: * 表示显著 ($\alpha = 0.05$), ** 表示极显著 ($\alpha = 0.01$)

表 4 与 ET_0 显著相关的各气象因子 Mann - Kendall 检验Tab.4 Mann - Kendall test of meteorological factors significantly associated with ET_0

	风速	相对湿度	降雨量
研究区	-8.01	0.40	—
ET_0 减小站点	-7.71	0.59	5.05
ET_0 增加站点	-2.53	-0.67	—

3 结论与讨论

(1)北疆地区平均 ET_0 的多年平均值为 1 407.4 mm, ET_0 变化范围为 1 238.3 ~ 1 657.7 mm。研究区除 3 个气象站的 ET_0 呈上升趋势外,其余 19 个气象站的 ET_0 均随时间呈明显下降趋势;Mann - kendall 检验结果表明,研究区、 ET_0 减小站点和 ET_0 增加站点平均 ET_0 突变时间分别在 1983 年、1984 年和 2004 年。

(2)研究区东北、西南 ET_0 低值区比突变前扩大明显,沿天山北坡一带的 ET_0 高值区比突变前有明显的缩小。但整体上 ET_0 在东北、西南部较低,往中间逐渐升高,而西部和东南部为高值区。4 ~ 10 月平均 ET_0 的空间分布与年均 ET_0 的空间分布基本一致。

(3)近 49 a 影响北疆地区 ET_0 变化的主要气象因子是风速和相对湿度,日最高气温和最低气温对 ET_0 影响相对较弱,这一结论与前人研究结果一致^[21-22]。降雨量与北疆 ET_0 呈显著负相关,这可能是近些年来降雨量增加的缘故,也是致使 ET_0 减小

的重要因素之一^[22-24]。

对西北地区 ET_0 的研究得出北疆 ET_0 一般在 1 800 mm 左右^[25-26],而本研究 ET_0 最大值出现在达坂城和阿拉山口,分别达 1 935.8 mm 和 2 426.9 mm,与前人研究有一定偏差。究其原因,首先前人研究一般气象站点选取数量有限(大致 13 个站点),覆盖面有限;其次据张学文等^[27]所编《新疆气象手册》显示,达坂城年均风速 4 ~ 5 m/s,阿拉山口年均风速高达 6 m/s,风速是影响 ET_0 的主要气象因素,且与 ET_0 呈极显著正相关,故该类地区 ET_0 也高。

Hulme M^[28] 和 Robock A^[29] 等认为气候变暖会加速水循环的速度,从而影响蒸散量。相关研究表明蒸散量的大小受多因素的共同影响,温度升高并不直接影响蒸散量,而北疆地区风速和相对湿度的变化是影响 ET_0 的主导因素。对乌鲁木齐河流域^[30]、玛纳斯河流域^[31] 的研究表明,日照时数对 ET_0 变化的贡献较小,不属于主要因素,与本研究一致。而在河北^[9]、青海^[32]、黑龙港流域^[33]、新疆^[11]、甘肃^[34] 和青藏高原^[35] 等地对蒸散量的研究表明,风速、日照时数是影响 ET_0 的主要因子。因此,日照时数的影响也是不容忽视的。根据 Mann - kendall 检测结果划分的 ET_0 增加的 3 个站点相隔较远,而周围又都是 ET_0 减小站点,这一现象的出现还待进一步的探讨。

北疆地区近 49 a 间 ET_0 呈下降趋势的结论与澳大利亚^[36]、泰国^[37]、印度^[38] 及中国的西北^[39]、四川^[40]、河南^[41] 等地的年 ET_0 变化趋势一致。因此,

在作物系数不变的情况下, ET_0 减小使北疆地区主要农作物棉花、小麦、玉米、油菜等的周年需水量有所降低,这将在一定程度上缓解农业用水压力,但因该地区属于灌溉农业,故仍需根据各地的实际情况制定相应的灌溉制度。

虽然本研究通过多年的气象资料全面分析了北疆地区 ET_0 的时空变化特征,但气象站数量仍显不足,还需继续完善气象资料,进一步利用 3S (RS、GPS、GIS) 技术等对研究结果进行进一步探讨和完善。

参考文献:

- [1] R G Allen, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 300p [J]. Irrigation and drainage paper, 1998, 56: 377 - 384.
- [2] Thomas A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China [J]. Int J Climatol, 2000, 20: 281 - 296.
- [3] Brutsaert W, Parl M B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox [J]. Nature, 1998, 396: 28.
- [4] 佟玲, 康绍忠, 粟晓玲. 石羊河流域气候变化对参考作物蒸发蒸腾量影响的分析 [J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 15 - 18.
- [5] Chattopadhyay N, Hulme M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 87: 55 - 73.
- [6] 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.
- [7] 李景鑫, 王式功, 李艳, 等. 西宁市蒸发量变化特征及影响因素 [J]. 干旱气象, 2013, 31(3): 497 - 504.
- [8] 吴文玉, 马晓群, 陈晓艺, 等. GIS 支持下安徽省近 35 a 参考作物蒸散量的时空变化 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 251 - 256.
- [9] 李春强, 洪克勤, 李保国. 河北省近 35 年 (1965 - 1999 年) 参考作物蒸散量的时空变化 [J]. 中国农业气象, 2008, 29(4): 414 - 419.
- [10] 庄晓翠, 张林梅, 阿志肯, 等. 阿勒泰地区暖季蒸发变化特征及与气象因子的关系 [J]. 干旱气象, 2009, 29(3): 213 - 219.
- [11] 张山清, 普宗朝. 新疆参考作物蒸散量时空变化分析 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 73 - 79.
- [12] 普宗朝, 张山清. 近 48 年新疆夏半年参考作物蒸散量时空变化 [J]. 中国农业气象, 2011, 32(1): 67 - 72.
- [13] 赵媛媛, 何春阳, 姚辉, 等. 干旱过程对耕地自然生产功能的影响 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 278 - 284.
- [14] 汤国安, 杨析. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2007. 368.
- [15] 陈喜, 姜彤. 不同气候区月蒸散能力计算模式适用性分析 [J]. 水文, 2004, 4(5): 1 - 4.
- [16] Allen R G, Smith M, Pereira L S, et al. An update for the calculation of reference evapotranspiration [J]. ICID bulletin, 1994, 43(2), 35 - 92.
- [17] Goyal R K. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan (India) [J]. Agricultural Water Management, 2004, 69(1): 1 - 11.
- [18] 王秋香, 魏文寿. 新疆积雪对气候变化的响应 [A]. 第 27 届中国气象学会年会应对气候变化分会场——人类发展的永恒主题论文集 [C]. 2010.
- [19] 刘艳, 阮惠华, 张云惠, 等. 1961 年至 2008 年新疆北疆地区积雪的时空演变特征 [J]. 资源科学, 2012, 34(4): 629 - 635.
- [20] 刘波, 肖子牛. 1961 - 2005 年新疆区域分级雨日 (量) 的气候特征 [J]. 干旱区地理, 2011, 34(3): 419 - 428.
- [21] Xu C Y, Gong L, Jiang T, 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(1): 81 - 93.
- [22] 薛燕, 韩萍, 冯国华. 半个世纪以来新疆降水和气温的变化趋势 [J]. 干旱区研究, 2003, 20(2): 127 - 130.
- [23] 蓝永超, 沈永平, 苏宏超, 等. 全球变暖情景下新疆降水的变化 [J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(10): 66 - 71.
- [24] 辛渝, 毛炜峰, 李元鹏, 等. 新疆不同季节降水气候分区及变化趋势 [J]. 中国沙漠, 2009, 29(5): 948 - 959.
- [25] 普宗朝, 张山清, 王胜兰, 等. 近 36 年天山山区潜在蒸散量变化特征及其与南北疆的比较 [J]. 干旱区研究, 2009(3): 424 - 432.
- [26] 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.
- [27] 张学文, 张家宝. 新疆气象手册 [M]. 北京: 气象出版社, 2006. 128 - 130.
- [28] Hulme M, Zhao Z C, Jiang T. Recent and future climate change in East Asia [J]. International Journal of Climatology, 1994, 14(6): 637 - 658.
- [29] Robock A, Vinnikov K Y, Srinivasan G, et al. The global soil moisture data bank [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81(6): 1281 - 1299.
- [30] 普宗朝, 张山清, 李景林, 等. 乌鲁木齐河流域参考作物蒸散量时空变化特征 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2008, 2(1): 41 - 45.
- [31] 李战超, 魏文寿, 陈荣毅, 等. 玛纳斯河流域气候变化对参考作物蒸散量的影响 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2013, 7(1): 33 - 38.
- [32] 于东平, 张鑫, 何毅, 等. 青海省东部高原农业区参考作物蒸散量的时空变化 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 66 - 71.
- [33] 李春友, 张劲松, 孟平, 等. 黑龙江流域参考作物蒸散量的时序变化和分形特征 [J]. 中国农业气象, 2011, 32(1): 81 - 88.
- [34] 贾文雄, 何元庆, 王旭峰, 等. 祁连山及河西走廊潜在蒸发量的时空变化 [J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 159 - 167.
- [35] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 青藏高原近 30 年气候变化趋势 [J]. 地理学报, 2005, 60(1): 3 - 11.
- [36] Roderick M L, Farquhar G D. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002 [J]. International Journal of Climatology, 2004, 24(9): 1077 - 1090.
- [37] Tebakari T, Yoshitani J, Suvanpimol C. Time - space trend analysis in pan evaporation over Kingdom of Thailand [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2005, 10(3): 205 - 215.
- [38] Bandyopadhyay A, Bhadra A, Raghuvanshi N S, et al. Temporal trends in estimates of reference evapotranspiration over India [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2009, 14(5): 508 - 515.
- [39] 曹雯, 申双和, 段春峰. 西北地区生长季参考作物蒸散变化成

- 因的定量分析[J]. 地理学报, 2011, 66(3): 407 - 415.
- [40] 陈超, 庞艳梅, 潘学标, 等. 四川地区参考作物蒸散量的变化特征及气候影响因素分析[J]. 中国农业气象, 2011, 32(1): 35 - 40.
- [41] 姬兴杰, 朱业玉, 顾万龙. 河南省参考作物蒸散量变化特征及其气候影响分析[J]. 中国农业气象, 2013, 34(1): 14 - 22.

Change Characteristics of Reference Crop Evapotranspiration in the Northern Xinjiang

WANG Jian^{1,2}, Lü Xin^{1,2}, WANG Jiangli^{1,2}

(1. Agricultural College of Shihezi University, Shihezi 832003, China; 2. Key Laboratory of Oasis Ecological Agriculture of Xinjiang Production and Construction Group, Shihezi 832003, China)

Abstract: The temporal - spatial variation of reference crop evapotranspiration in northern Xinjiang was analyzed based on daily observations from 22 meteorological stations in the northern Xinjiang during 1962 - 2010 in this paper. Firstly, the reference crop evapotranspiration (ET_0) in northern Xinjiang from 1962 to 2010 was calculated with the Penman - Monteith formula, then the temporal - spatial variations of ET_0 were analyzed by using the Mann - Kedall test and spatial analysis of ArcGIS. The results show that ET_0 in the entire study area had an abrupt change in 1983 and presented a downward trend, which was mainly affected by relative humidity and wind speed there. The reference crop evapotranspiration gradually increased from the northeast and southwest to the center of the northern Xinjiang, and it was slightly higher in the southeast and the west region, which presented an obvious regional difference. The reference crop evapotranspiration from April to October significantly affected the annual distribution of reference evapotranspiration. The results should be useful for identifying an appropriate irrigation system that can be used in the region under environment conditions affected by global warming.

Key words: ArcGIS; evapotranspiration; temporal - spatial characteristics; Northern Xinjiang