

# 基于气候分区的甘肃省参考作物 蒸发蒸腾量时空分布特征

郑健<sup>1,2,3</sup>, 马静<sup>1,3,4</sup>, 王燕<sup>1,4</sup>, 向鹏<sup>1,2</sup>, 齐兴赞<sup>1,2</sup>, 李永春<sup>1,2</sup>

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃兰州, 730050; 2. 兰州理工大学西部能源与环境研究中心, 甘肃兰州, 730050; 3. 甘肃省生物质能与太阳能互补供能系统重点实验室, 甘肃兰州, 730050; 4. 西北低碳城镇支撑技术协同创新中心, 甘肃兰州 730050)

**摘要:** 参考作物蒸发蒸腾量 ( $ET_0$ ) 是计算作物需水量的重要参数, 为了减少甘肃地区因地形和气候跨度大而引起的灌溉参数计算误差, 根据甘肃省的地理特征和干湿程度将甘肃地区划分为陇南-甘南湿润区、陇中南部半湿润区、陇中北部半干旱区和河西干旱区 4 个区域, 利用 26 个国家气象站点 1980-2015 年的逐日气象资料, 采用 FAO-56 Penman-Monteith 方程计算  $ET_0$ , 并通过反距离权重空间插值法和偏相关分析法研究了甘肃省整体和不同分区  $ET_0$  的时空分布特征和影响因素。结果表明: 甘肃省  $ET_0$  年际变化趋势为 1980-1991 年下降, 1991-2015 年上升, 整体呈上升趋势; 甘肃省  $ET_0$  的空间分布总体为自东南向西北逐渐增加;  $ET_0$  与日平均风速、日照时数、日最高气温、日最低气温、日平均气温均表现为极显著正相关, 与平均相对湿度表现为极显著负相关, 且影响程度顺序为, 甘肃省:  $U > N > T_{max} > RH > T_{min} > T_{mean}$ , 陇南-甘南湿润区:  $N > U > T_{max} > RH > T_{min} > T_{mean}$ , 陇中南部半湿润区:  $N > U > RH > T_{max} > T_{min} > T_{mean}$ , 陇中北部半干旱区和河西干旱区:  $U > N > T_{max} > RH > T_{min} > T_{mean}$ 。结论: 地形和气候对  $ET_0$  影响很大, 由湿润区向干旱区依次增加; 各分区  $ET_0$  差异较大, 从东南部向西北部增加; 甘肃省  $ET_0$  主要影响因素为平均风速和日照时数。

**关键词:** 参考作物蒸发蒸腾量; 时空分布; 反距离权重空间插值法; 气象因子; 甘肃省

中图分类号: S161.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)01-0240-08

## Temporal-spatial distribution characteristics of reference crop evapotranspiration in Gansu based on climatic zones

ZHENG Jian<sup>1,2,3</sup>, MA Jing<sup>1,3,4</sup>, WANG Yan<sup>1,4</sup>, XIANG Peng<sup>1,2</sup>, QI Xingyun<sup>1,2</sup>, LI Yongchun<sup>1,2</sup>

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Western Energy & Environment Research Center of China, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. Key Laboratory of Complementary Energy System of Biomass and Solar Energy, Gansu Province, Lanzhou 730050, China; 4. Collaborative Innovation Center of Key Technology for Northwest Low Carbon Urbanization, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Reference crop evapotranspiration ( $ET_0$ ) is an important parameter in calculating water requirement of crops. In order to reduce the error in irrigation parameters calculation due to the differences of climate and topography of Gansu province, the area was divided into four regions (the humid area of Longnan and Gannan, the semi-humid area of south Longzhong, the semi-arid area of north Longzhong and the arid area of Hexi) according to the geographical characteristics and humidity degree to analyze the distribution and impact factors of  $ET_0$ . Daily meteorological data collected from 26 national meteorological stations from 1980 to 2015 was used to calculate  $ET_0$  with FAO-56 Penman-Monteith equation, meanwhile, temporal-spatial distribution characteristics and impact factors of  $ET_0$  in Gansu province and

收稿日期: 2019-09-15; 修回日期: 2019-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51969012、51509122); 甘肃省高等学校科技成果转化项目(2018D-04); 甘肃省自然科学基金项目(18JR3RA154); 杨凌示范区产学研用协同创新重大项目计划(2018CXY-14); 甘肃省高等学校产业支撑引导项目(2019C-13)

作者简介: 郑健(1981-), 男, 甘肃会宁人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事农业水土工程方面的研究。

the four divided regions were analyzed with inverse distance weighted spatial interpolation method (IDW) and partial correlation analysis method. Results showed that the interannual variation trend of  $ET_0$  in Gansu province decreased from 1980 to 1991, increased from 1991 to 2015, with an overall increase trend. The spatial distribution of  $ET_0$  in Gansu province increased gradually from southeast to northwest. Moreover,  $ET_0$  has an extremely significant positive correlation with daily maximum temperature, minimum temperature, daily average temperature, average wind speed and sunshine hours while presents a highly significant negative correlation with average relative humidity. The order of influence degrees of these parameters present a sequence of  $U > N > T_{\max} > RH > T_{\min} > T_{\text{mean}}$  in the whole Gansu Province,  $N > U > T_{\max} > RH > T_{\min} > T_{\text{mean}}$  in the humid area of Longnan and Gannan,  $N > U > RH > T_{\max} > T_{\text{mean}} > T_{\min}$  in the semi-humid area of south Longzhong, and  $U > N > T_{\max} > RH > T_{\min} > T_{\text{mean}}$  both in the semi-arid area of north Longzhong and the arid area of Hexi. Following conclusions can be made, topography and climate have a great influence on  $ET_0$ , which increases from humid area to arid area. The  $ET_0$  was significantly differentiated in each area and increased from the southeast to the northwest. The main influencing factors of  $ET_0$  in Gansu Province were the average wind speed and sunshine hours.

**Key words:** reference crop evapotranspiration; temporal-spatial distribution; inverse distance weight spatial interpolation method; meteorological factor; Gansu Province

## 1 研究背景

参考作物蒸发蒸腾量( $ET_0$ )是指高度在 8~15 cm、生长状态良好、不缺水且完全覆盖地面的绿色矮秆作物的蒸发蒸腾量<sup>[1]</sup>。 $ET_0$ 是作物需水量计算的重要参数,对其进行研究在水文循环、农业灌溉制度和水资源高效利用与转化等方面具有重要意义。国内外学者开展了大量研究<sup>[2-5]</sup>,Dinpashoh 等<sup>[6]</sup>研究了伊朗的参考作物蒸发蒸腾量,结果表明伊朗  $ET_0$  在年尺度和月尺度均有显著的增减趋势,且增长趋势比下降趋势更为明显,并且除冬季外,风速是影响  $ET_0$  的最主要因素。韩洋等<sup>[7]</sup>研究发现河南省参考作物蒸发蒸腾量  $ET_0$  在 1951-2016 年总体呈下降趋势,多年平均  $ET_0$  在 917~1007 mm/a 之间,在空间上呈从西北向东南先递增后递减的趋势。吴文玉等<sup>[8]</sup>研究表明安徽省参考作物蒸发蒸腾量  $ET_0$  在时间尺度上整体呈下降趋势,空间上呈北高南低的趋势,且平原较大、山区较小。Wang 等<sup>[9]</sup>认为新疆北部  $ET_0$  的空间分布从东北、西南向中部逐渐增大;东南和西部的差异略大,具有显著的地区差异,区域内日照时数和风速是影响  $ET_0$  的主要气象因素。王潇潇等<sup>[10]</sup>研究了内蒙古地区的  $ET_0$  变化特征,结果表明该地区  $ET_0$  在空间分布上由西向东逐渐降低,该区域  $ET_0$  主要影响因素是风速,其次是日平均温度和相对湿度。宋悦等<sup>[11]</sup>对陕西省  $ET_0$  研究表明陕西省  $ET_0$  值在空间上呈现出自南向北逐渐增加的变化规律。康燕霞等<sup>[12]</sup>采用云模型对甘肃

省的  $ET_0$  进行了研究,结果表明甘肃省 1951-2013 年  $ET_0$  呈现出增长趋势,  $ET_0$  空间分布总体上呈现出为西北地区大于东南地区。佟长福等<sup>[13]</sup>对内蒙古依据全球干旱指数进行分区研究其  $ET_0$  时空变化,结果表明越湿润的地区  $ET_0$  越小。

上述对  $ET_0$  的研究已取得了大量的研究成果,但研究中考考虑地形和气候分区对  $ET_0$  影响的分析研究还显欠缺。

甘肃省位于我国西北部,农业在其经济发展中居于十分重要的地位,但甘肃省属于水资源极度匮乏且分布不均衡的地区,水资源短缺限制了全省的农业发展<sup>[14]</sup>。同时,甘肃省境内山脉纵横交错,地形地貌复杂,独特的地理位置和地形条件形成了甘肃省多种自然生态环境和气候类型<sup>[15]</sup>。受气候因子和地形地貌的影响,甘肃省不同区域的  $ET_0$  的变化趋势和变化程度具有明显差异。因此,研究甘肃省  $ET_0$  的时空分布特征对于全省提高水资源利用率、制定农业灌溉制度和农业可持续发展具有重要的科学意义。

李栋梁等<sup>[15]</sup>根据甘肃省气候区的温度指标和干燥度指标以及地理特征将甘肃省分为甘南高寒湿润区、祁连山高寒半干旱半湿润区、河西西部暖温带干旱区、河西走廊冷温带干旱区、陇中北部冷温带半干旱区、陇中南部冷温带半湿润区、陇南北部暖温带湿润区和陇南南部河谷北亚热带湿润 8 个气候区,但其中气候带划分较细,国家气象站点未完全覆盖所有气候带,且祁连山地带终年积雪,是难以耕作之



线性趋势线和 6 a 移动平均图,结果如图 3 所示。

由图 3(a)可看出,陇南-甘南湿润区各年  $ET_0$  最小值出现在 1989 年,最大值出现在 2006 年,最大值与最小值相差 463.99 mm/a,均值为 937.14 mm/a,各年  $ET_0$  在平均值上下波动。由 6 a 移动平均  $ET_0$  可知,陇南-甘南湿润区  $ET_0$  在 1980-1991 年呈下降趋势,降幅为 3.5%,在 1991-2015 年呈上升趋势,增幅为 10.3%。由  $ET_0$  线性趋势线可知陇南-甘南湿润区  $ET_0$  整体上随年际变化而呈上升趋势,倾向率为 3.36 mm/a。

由图 3(b)可知,陇中南部半湿润区  $ET_0$  均值为 944.23 mm/a,比陇南-甘南湿润区  $ET_0$  均值增大了 7.09 mm/a,最小值出现在 1989 年,最大值出现在 2004 年,最大值与最小值相差 180.5 mm/a,各年  $ET_0$  在平均值上下波动且波动较小。由 6 a 移动平均  $ET_0$  可知,在 1980-1991 年呈下降趋势,降幅为 6.2%,在 1991-2015 年呈上升趋势,增幅为 9.0%。由  $ET_0$  线性趋势线可知陇中南部半湿润区  $ET_0$  整体

上随年际变化而呈上升趋势,倾向率为 2.18 mm/a。

由图 3(c)可知,陇中北部半干旱区多年  $ET_0$  值为 1 034.04 mm/a,比陇中南部半湿润区  $ET_0$  增加了 89.81 mm/a,最小、最大值出现在 1992 年和 2004 年,最大值约为最小值的 1.2 倍,波动较小。由 6 a 移动平均  $ET_0$  可知,在 1980-1991 年呈下降趋势,降幅为 7.7%,在 1991-2015 年呈上升趋势,增幅为 12%。由  $ET_0$  线性趋势线可知陇中北部半干旱区  $ET_0$  整体上随年际变化而呈上升趋势,倾向率为 2.76 mm/a。

由图 3(d)可知,河西干旱区多年  $ET_0$  最小值出现在 1993 年,最大值出现在 2013 年,均值为 1 143.24 mm/a,比陇中北部半干旱区  $ET_0$  增加了 10%,最大值约为最小值的 1.16 倍。由 6 a 移动平均  $ET_0$  可知,在 1980-1991 年呈下降趋势,降幅为 7.0%,1991-2015 年呈上升趋势,增幅为 9.9%。由  $ET_0$  线性趋势线可知河西干旱区  $ET_0$  整体上随年际变化而呈上升趋势,倾向率为 1.53 mm/a。

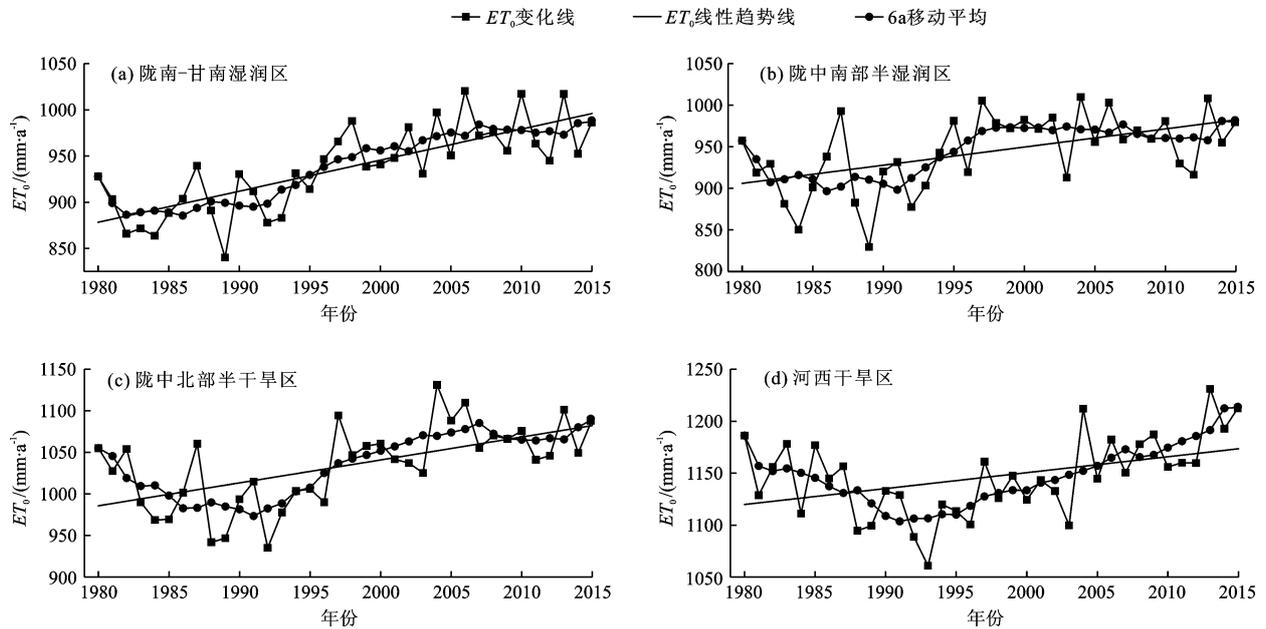


图 3 1980-2015 年甘肃省各气候分区  $ET_0$  逐年变化、 $ET_0$  线性趋势线和 6 a 移动平均

3.1.2 甘肃省  $ET_0$  的年际变化 图 4 为 1980-2015 年甘肃省  $ET_0$  逐年变化、线性趋势线和 6 a 移动平均,分析图 4 可知,甘肃省各年  $ET_0$  最小值出现在 1989 年,最大值出现在 2013 年,均值为 1 056.46 mm/a,最大值为最小值的 1.2 倍,波动较小。由 6 a 移动平均可知,甘肃省  $ET_0$  在 1980-1991 年呈下降趋势,降幅为 6.5%,在 1991-2015 年呈上升趋势,增幅为 9.4%。由  $ET_0$  线性趋势线可知甘肃省  $ET_0$  整体上随年际变化而呈上升趋势,倾向率为 2.34 mm/a。

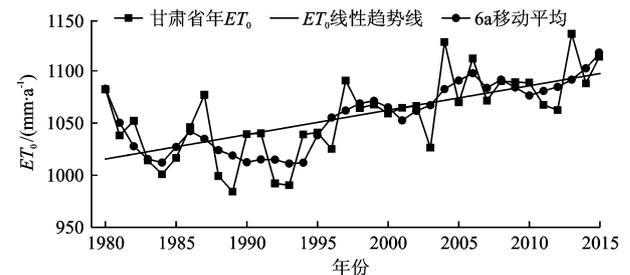


图 4 1980-2015 年甘肃省  $ET_0$  逐年变化、 $ET_0$  线性趋势线和 6 a 移动平均

### 3.2 $ET_0$ 空间变化特征

为进一步揭示甘肃省  $ET_0$  空间分布特征,根据甘肃省的 26 个国家气象站点 36 a 的逐日气象资料计算各地区多年平均  $ET_0$ , 利用 ArcGIS 10.0 的反距离权重插值法绘制了甘肃省的  $ET_0$  和主要因素的分布图,图 5 为甘肃省多年平均风速、日照时数、平均气温和平均相对湿度空间分布图,图 6 为甘肃省 1980-2015 年  $ET_0$  空间分布图。

由图 6 可知,甘肃省  $ET_0$  总体特征为自东南向西北逐渐增加,即依次为陇南-甘南湿润区、陇中南部半湿润区、陇中北部半干旱区、河西干旱区,最小值为

864.68 mm/a,最大值为 1 309.46 mm/a。由图 5 可知甘肃省多年平均风速和日照时数总体呈东南向西北逐渐增加趋势,与  $ET_0$  变化规律一致;多年平均相对湿度自东南向西北逐渐减少,在 38%~75% 之间变化,河西地区最小,陇中地区次之,陇南-甘南地区最大,与  $ET_0$  变化趋势正好相反;除个别站点外平均气温随纬度的增加而减小,呈现自东南向西北,由盆地、河谷向高原、高山逐渐递减,但规律不明显,其中武都纬度高,河川、盆地相间,平均气温最高。综上所述,说明甘肃省  $ET_0$  空间分布受平均风速、日照时数、平均相对湿度和平均气温等的综合影响。

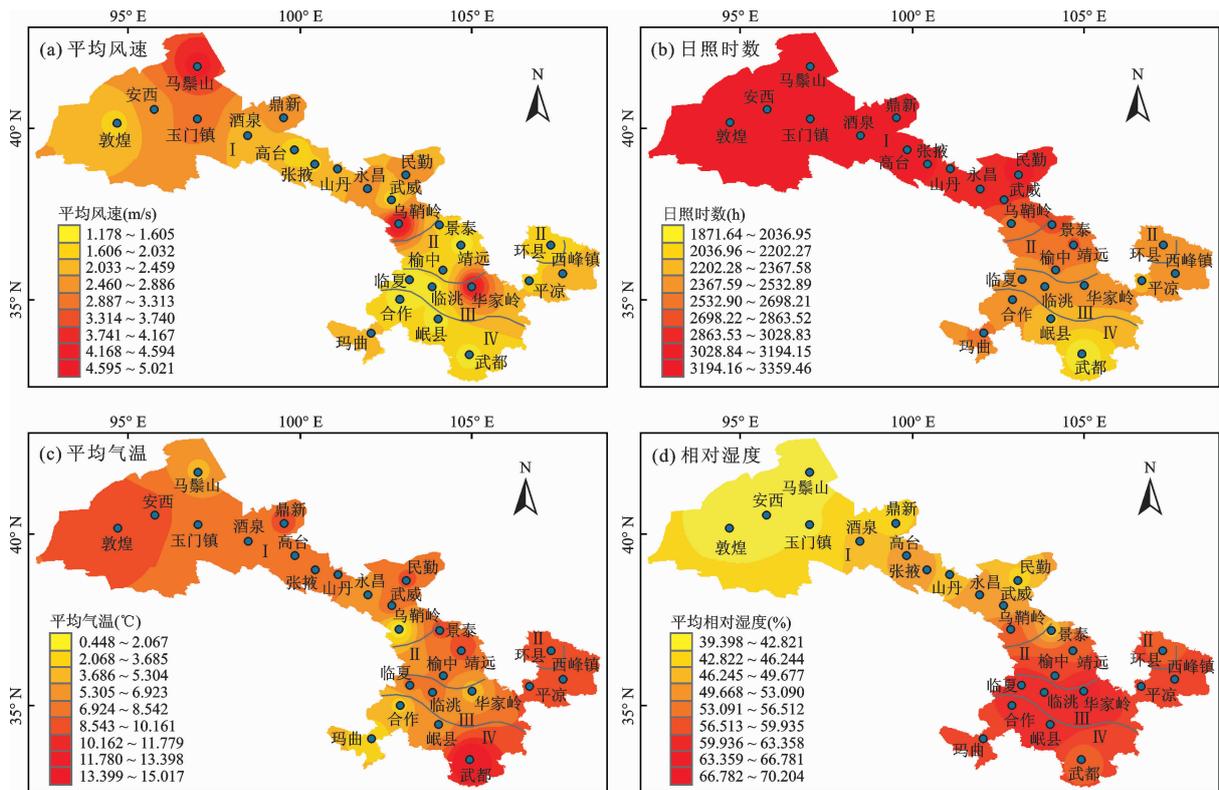


图 5 甘肃省多年平均风速、日照时数、平均气温和平均相对湿度空间分布图

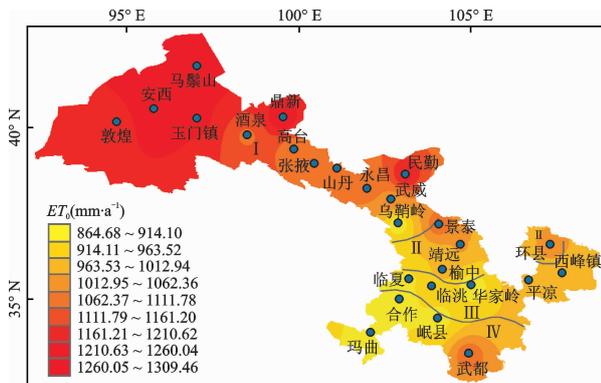


图 6 1980-2015 年甘肃省  $ET_0$  空间分布图

同时,可以看出甘肃省参考作物蒸发蒸腾量  $ET_0$  的空间分布还受地形、植被等因素影响。从图 2 甘肃

省地形分布图中可以看出甘肃省区域呈“哑铃”状,南北跨度大,地域辽阔、山脉交错、地形复杂、气候多样,由东南部的湿润气候逐渐过渡到西北部的干旱气候,自然植被自东南向西北呈现出森林-草原-荒漠的水平分布<sup>[15]</sup>,植被减少导致  $ET_0$  降低,形成了甘肃省  $ET_0$  自东南向西北逐渐增加的趋势。

上述分析表明,参考作物蒸发蒸腾量  $ET_0$  受多种因素的综合影响,但每个因素在不同地区对  $ET_0$  的影响程度不尽相同。位于甘肃西北部的河西干旱区地势平坦,绿洲与沙漠、戈壁相间分布<sup>[24]</sup>,光热充足,其多年  $ET_0$  值在 1 060.96~1 231.14 mm/a 之间波动,明显高于其他区域,这主要是因为河西干旱区

是甘肃省平均风速最大的地区,导致平均相对湿度最小,故多年  $ET_0$  最大;位于东南部的陇南-甘南湿润区多年  $ET_0$  值在 840.15 ~ 1 020.50 mm/a 之间波动,明显低于其他区域,主要原因是该区域日照时数偏低,且甘南地区地势高,气候湿润,导致该区域  $ET_0$  最小。

3.3  $ET_0$  时空变化影响因素的偏相关分析

为进一步探讨甘肃省参考作物蒸发蒸腾量时空变化规律形成的原因,对影响  $ET_0$  的气象因子进行了偏相关分析,由表 1 甘肃省各气象站点日参考作

物蒸发蒸腾量  $ET_0$  与各气象因子的偏相关系数和显著性结果可知,26 个站点的  $ET_0$  与日平均风速  $U$  均表现为极显著正相关,偏相关系数在 0.225 ~ 0.802 之间,均值为 0.682,表明甘肃省日平均风速  $U$  对  $ET_0$  影响很大;各站点  $ET_0$  与日照时数  $N$  均表现为极显著正相关,偏相关系数在 0.317 ~ 0.834 之间,均值为 0.617,表明甘肃省日照时数  $N$  对  $ET_0$  影响也较为显著;各站点  $ET_0$  与日最高气温  $T_{max}$  均表现为极显著正相关,偏相关系数在 0.228 ~ 0.496 之间,均值为 0.383,表明甘肃省日最高气温  $T_{max}$  对  $ET_0$  影响

表 1 甘肃省各气象站点日参考作物蒸发蒸腾量  $ET_0$  与各气象因子的偏相关系数和显著性

分区	气象站名	$ET_0$ 与各气象因子的偏相关系数与显著性					
		日平均风速 $U$	日照时数 $N$	日平均气温 $T_{mean}$	日最高气温 $T_{max}$	日最低气温 $T_{min}$	平均相对湿度 $RH$
河西干 旱区	马鬃山	0.631**	0.358**	0.029**	0.401**	0.145**	-0.332**
	敦煌	0.802**	0.427**	0.085**	0.431**	0.211**	-0.196**
	安西	0.698**	0.317**	0.013**	0.228**	0.122**	-0.282**
	玉门镇	0.696**	0.373**	0.024**	0.377**	0.115**	-0.403**
	鼎新	0.729**	0.410**	0.021**	0.320**	0.153**	-0.380**
	酒泉	0.787**	0.567**	0.025**	0.403**	0.154**	-0.324**
	高台	0.752**	0.602**	0.136**	0.463**	0.191**	-0.280**
	张掖	0.767**	0.604**	0.035**	0.496**	0.210**	-0.366**
	山丹	0.755**	0.537**	0.003	0.358**	0.093**	-0.399**
	永昌	0.681**	0.627**	0.013	0.407**	0.050**	-0.398**
	武威	0.764**	0.673**	0.046**	0.471**	0.257**	-0.316**
	民勤	0.757**	0.534**	0.035**	0.391**	0.181**	-0.347**
陇中北部 半干旱区	乌鞘岭	0.542**	0.606**	0.012**	0.415**	0.078**	-0.669**
	景泰	0.784**	0.633**	0.141**	0.401**	0.248**	-0.421**
	靖远	0.765**	0.730**	0.127**	0.354**	0.182**	-0.164**
	环县	0.680**	0.700**	0.011**	0.327**	0.105**	-0.421**
	榆中	0.689**	0.689**	-0.01**	0.381**	-0.010	-0.394**
陇中南部 半湿润区	临夏	0.675**	0.769**	0.020**	0.459**	0.128**	-0.226**
	临洮	0.666**	0.761**	0.013**	0.456**	0.077**	-0.178**
	华家岭	0.225**	0.563**	0.014**	0.257**	0.059**	-0.649**
	平凉	0.614**	0.714**	-0.016**	0.308**	-0.008	-0.491**
	西峰镇	0.594**	0.671**	0.012**	0.249**	0.129**	-0.582**
陇南-甘南 湿润区	玛曲	0.552**	0.834**	0.092**	0.484**	0.072**	-0.277**
	合作	0.657**	0.809**	0.003	0.418**	0.029**	-0.080**
	岷县	0.670**	0.793**	0.065**	0.422**	0.015	-0.163**
	武都	0.789**	0.738**	0.014**	0.274**	0.147**	-0.364**

注: \* 为显著,  $\alpha = 0.05$ ; \*\* 为极显著,  $\alpha = 0.01$ 。

较大;各站点  $ET_0$  与平均相对湿度  $RH$  均表现为极显著负相关,偏相关系数在  $-0.669 \sim -0.080$  之间,均值为  $-0.350$ ,表明甘肃省平均相对湿度  $RH$  对  $ET_0$  影响较大;除榆中、平凉 2 站的  $ET_0$  与日平均气温  $T_{mean}$  表现为显著负相关,山丹、永昌、合作表现为不显著相关,其他 21 个站点均表现为极显著正相关,偏相关系数在  $-0.01 \sim 0.141$  之间,均值为  $-0.075$ ,表明甘肃省日平均气温  $T_{mean}$  对  $ET_0$  影响很小;除榆中、平凉和岷县 3 站的  $ET_0$  与日最低气温  $T_{min}$  表现为不显著相关,其中榆中和平凉表现为不显著负相关,岷县为不显著正相关,其他 23 个气象站点均表现为极显著正相关,偏相关系数在  $-0.059 \sim 0.257$  之间,均值为  $0.12$ ,表明甘肃省日最低气温  $T_{min}$  对  $ET_0$  影响较小。

总体分析表明,甘肃省的  $ET_0$  与日平均风速  $U$ 、日照时数  $N$ 、日最高气温  $T_{max}$ 、日最低气温  $T_{min}$ 、日平均气温  $T_{mean}$  均表现为极显著正相关,与平均相对湿度  $RH$  表现为极显著负相关。影响甘肃省整体  $ET_0$  的气象因子的顺序为:日平均风速  $U >$  日照时数  $N >$  日最高气温  $T_{max} >$  平均相对湿度  $RH >$  日最低气温  $T_{min} >$  日平均气温  $T_{mean}$ 。而对甘肃省各分区统计可得出,影响陇南-甘南湿润区  $ET_0$  的气象因子的顺序为:日照时数  $N >$  日平均风速  $U >$  日最高气温  $T_{max} >$  平均相对湿度  $RH >$  日最低气温  $T_{min} >$  日平均气温  $T_{mean}$ ;影响陇中南部半湿润区  $ET_0$  的气象因子的顺序为:日照时数  $N >$  日平均风速  $U >$  平均相对湿度  $RH >$  日最高气温  $T_{max} >$  日最低气温  $T_{min} >$  日平均气温  $T_{mean}$ ;影响陇中北部半干旱区  $ET_0$  的气象因子的顺序为:日平均风速  $U >$  日照时数  $N >$  日最高气温  $T_{max} >$  平均相对湿度  $RH >$  日最低气温  $T_{min} >$  日平均气温  $T_{mean}$ 。影响河西干旱区  $ET_0$  的气象因子的顺序为:日平均风速  $U >$  日照时数  $N >$  日最高气温  $T_{max} >$  平均相对湿度  $RH >$  日最低气温  $T_{min} >$  日平均气温  $T_{mean}$ 。

## 4 结论

(1) 陇南-甘南湿润区、陇中南部半湿润区、陇中北部半干旱区和河西干旱区的多年  $ET_0$  值依次增加,从  $937.14 \text{ mm/a}$  上升至  $1\,143.24 \text{ mm/a}$ ;各区域的  $ET_0$  值在 1980-1991 年呈下降趋势,1991-2015 年上升趋势,但总体为上升趋势,其中陇南-甘南湿润区倾斜率最大,上升趋势最显著;甘肃省  $ET_0$  的空间分布总体自东南向西北逐渐增加,且变化程度较明显,最小值与最大值相差  $440.34 \text{ mm/a}$ 。

(2) 甘肃省的  $ET_0$  与日平均风速  $U$ 、日照时数  $N$ 、日最高气温  $T_{max}$ 、日最低气温  $T_{min}$ 、日平均气温  $T_{mean}$  均表现为极显著正相关,与平均相对湿度  $RH$  表现为极显著负相关。

(3) 影响甘肃省及各分区  $ET_0$  的气象因子顺序分别为,甘肃省: $U > N > T_{max} > RH > T_{min} > T_{mean}$ ;陇南-甘南湿润区: $N > U > T_{max} > RH > T_{min} > T_{mean}$ ;陇中南部半湿润区: $N > U > RH > T_{max} > T_{min} > T_{mean}$ ;陇中北部半干旱区和河西干旱区: $U > N > T_{max} > RH > T_{min} > T_{mean}$ 。即平均风速和日照时数是对  $ET_0$  变化影响最大的因素,与段春锋等<sup>[3]</sup>对西北地区  $ET_0$  主要影响因素研究结果相近。

气候变暖和农业水资源缺口不断增大,使得农业水资源的科学利用成为研究热点,而模拟和预测气候变化对  $ET_0$  的影响可为农业水资源高效利用和农业种植结构调整提供理论支撑和科学指导。甘肃省地处西部欠发达地区,农业在国民经济中的地位不容忽视,科学地分析甘肃省  $ET_0$  的时空分布特征,可为甘肃省农业供给结构优化、农业发展方式转变、农作物的空间布局优化、农业生态环境保护提供科学依据。同时,有助于合理分配甘肃省有限的水资源,缓解水资源短缺和分布不均衡的问题,促进甘肃省农业的发展。

本文初步探究了甘肃省和各分区现状  $ET_0$  及其时空分布规律,但并未涉及气候变化条件下甘肃省  $ET_0$  的预测工作,在后续的研究中本团队将对气候变化条件下的甘肃省  $ET_0$  变化开展研究。

## 参考文献:

- [1] 孙庆宇,佟玲,张宝忠,等. 参考作物蒸发蒸腾量计算方法在海河流域的适用性[J]. 农业工程学报,2010,26(11):68-72.
- [2] FAN Junliang, WU Lifeng, ZHANG Fucang, et al. Climate change effects on reference crop evapotranspiration across different climatic zones of China during 1956-2015 [J]. Journal of Hydrology, 2016, 542: 923-937.
- [3] 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[J]. 农业工程学报,2011,27(8):77-83.
- [4] NISTOR M M, GUALTIERI A F, CHEVAL S, et al. Climate change effects on crop evapotranspiration in the Carpathian Region from 1961 to 2010 [J]. Meteorological Applications, 2016, 23(3):462-469.
- [5] LIANG Liqiao, LI Lijuan, LIU Qiang. Spatio-temporal variations of reference crop evapotranspiration and pan evaporation in the West Songnen Plain of China [J]. Hydro-

- logical Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques,2011,56(7):1300-1313.
- [6] DINPASHOH Y, JHAJHARIA D, FAKHERI - FARD A, et al. Trends in reference crop evapotranspiration over Iran [J]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2011, 399(3-4):422-433.
- [7] 韩洋,常迪,黄仲冬,等. 河南省参考作物蒸散量时空分布特征及主要成因分析[J]. 排灌机械工程学报, 2018,36(9):812-818.
- [8] 吴文玉,马晓群,陈晓艺,等. GIS支持下安徽省近35a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] WANG Jian, Lv Xin, WANG Jiangli, et al. Spatiotemporal variations of reference crop evapotranspiration in Northern Xinjiang, China [J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014:1-10.
- [10] 王潇潇,潘学标,顾生浩,等. 内蒙古地区参考作物蒸散变化特征及其气象影响因子[J]. 农业工程学报, 2015,31(S1):142-152.
- [11] 宋悦,栗晓玲,牛纪革,等. 陕西省参考作物蒸发蒸腾量的时空特征及其未来预测[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015,43(9):225-234.
- [12] 康燕霞,齐广平,殷长琛,等. 甘肃省参考作物蒸散量及影响因素的时空分异特征[J]. 干旱地区农业研究, 2015,33(5):154-162.
- [13] 佟长福,李和平,胡翠艳,等. 内蒙古自治区参考作物腾发量的时空变化[J]. 排灌机械工程学报, 2018,36(11):1071-1075.
- [14] 邓建伟,金彦兆,胡想全. 甘肃省水资源投入产出分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018,29(1):62-66.
- [15] 李栋梁,刘德祥. 甘肃气候[M]. 北京:气象出版社, 2000.
- [16] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop Evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements[M]. FAO Irrigation and Drainage, 1998.
- [17] VALIPOUR M. Use of average data of 181 synoptic stations for estimation of reference crop evapotranspiration by temperature-based methods [J]. Water Resources Management, 2014, 28(12):4237-4255.
- [18] PERERA K C, WESTERN A W, NAWARATHNA B, et al. Comparison of hourly and daily reference crop evapotranspiration equations across seasons and climate zones in Australia [J]. Agricultural Water Management, 2015, 148:84-96.
- [19] 樊子德,李佳霖,邓敏. 顾及多因素影响的自适应反距离加权插值方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016,41(6):842-847.
- [20] CHEN Fengwen, LIU Chenwung. Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in the middle of Taiwan [J]. Paddy and Water Environment, 2012, 10(3):209-222.
- [21] 甘少华,刘淑媛,闫炎,等. 反距离权重插值(IDW)在降水预报检验的试用研究[C]//第32届中国气象学会年会 S3 军用数值天气预报技术及应用, 2015:1-6.
- [22] 鲍振鑫,严小林,王国庆,等. 气象因子在海河流域蒸发悖论中的作用机理[J]. 水资源与水工程学报, 2014,25(3):1-7.
- [23] 王海燕,杨方廷,刘鲁. 标准化系数与偏相关系数的比较与应用[J]. 数量经济技术经济研究, 2006,23(9):150-155.
- [24] 范鹏,朱智文. 甘肃省情[M]. 兰州:甘肃民族出版社, 2015.