

四川省湿润气候区参考作物蒸散量趋势变化及成因分析

武剑飞, 康银红*, 梁友鹏

(四川农业大学 水利水电学院, 四川 雅安 625014)

摘 要:【目的】分析四川省湿润气候区参考作物蒸散量(ET_0)的趋势变化及其影响因子, 以期为农业灌溉提供合理的依据。【方法】根据雅安市 1954—2009 年逐日的气象资料, 采用 Penman-Monteith (PM) 公式计算 ET_0 , 通过气候倾向率、Mann-Kendall 法、通径分析对研究区域 ET_0 的趋势变化与成因进行分析。【结果】 ET_0 年际变化不稳定, 多年平均值为 861.2 mm, 且呈现极显著的下降趋势 ($z=-3.06<-1.96$), 气候倾向率为 9.3 mm/10 a; 相对湿度无显著性下降趋势 ($z=-0.52$), 风速 ($z=-7.09$)、日照时间 ($z=-2.61$)、净辐射 ($z=-2.64$) 在 1954—2009 年都呈显著性下降趋势, 而日平均温度 ($z=2.96$) 呈现显著性上升趋势; 影响 ET_0 的因素依次为净辐射、相对湿度、风速、日平均气温; 采用辐射法中 Priestley-Taylor 法计算得到的 ET_0 与 PM 法计算下的 ET_0 相近。【结论】雅安市多年平均 ET_0 呈显著性下降趋势; 日照时间是影响 ET_0 减少的主要因素; 在气象资料缺失的湿润地区, 可以采用 Priestley-Taylor 法代替 PM 公式来计算 ET_0 。

关 键 词: 参考作物蒸散量; Mann-Kendall 检验; 通径分析

中图分类号: S161.4; S274.4

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2019053

武剑飞, 康银红, 梁友鹏. 四川省湿润气候区参考作物蒸散量趋势变化及成因分析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(1): 131-137.

WU Jianfei, KANG YinHong, LIANG Youpeng. Change in reference crop evapotranspiration from humid climate region of sichuan province and its determinants [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(1): 131-137.

0 引 言

参考作物蒸发蒸腾量 (ET_0) 是大气水循环研究中一个不可或缺的组成成分, 同时也是制定合理的农作物灌溉计划以及计算作物蒸散发的一个重要指标^[1]。联合国粮农组织 (FAO) 在 1998 年组织的专家研讨会上对参考作物蒸发蒸腾量作出新的定义, 即 ET_0 是一种假想的作物冠层的蒸发蒸腾速率, 假设作物高度为 0.12 m, 固定的叶面阻力为 70 s/m, 冠层反射率为 0.23, 非常类似于表面开阔、高度一致、生长旺盛、完全覆盖地面而不缺水的绿色草地的蒸散发量^[2], 并且它只与气象要素这一变量有关。近些年, 随着全球气候的变化, 各地区的 ET_0 呈现多样性变化, 国内外学者对 ET_0 的时空变化进行了大量研究。Gong 等^[3]采用敏感性分析对中国长江流域的 ET_0 进行研究, 发现相对湿度是影响 ET_0 的关键因子; She 等^[4]通过对中国黄河流域近 52 a 的 ET_0 研究, 发现太

阳净辐射的敏感系数较大, 其次是相对湿度、平均气温及风速; 梁丽乔等^[5]对松嫩平原西部的 ET_0 研究发现, 相对湿度是主要的影响因素; 邹璐^[6]等对辽宁省的 ET_0 敏感性研究中发现, 相对湿度是最大敏感系数; 赵璐等^[7]对川中丘陵区近 60 a 的 ET_0 研究发现, 日照时数和风速是影响的主要因素; 苗正伟^[8]等采用敏感系数法对京津冀地区的 ET_0 研究发现, 不同季节下的主要气象影响因子有所差异。因此, ET_0 变化具有区域性, 不同的地区由于其独特的气候环境, 导致 ET_0 的变化趋势在不同时期有着不同变化, 其气象因子对 ET_0 的影响程度也就不同。

雅安素有“天漏之称”, 湿度大, 日照少, 是四川省降雨量最多的地区, 因此是研究四川省湿润气候区 ET_0 很好的平台。本文选取雅安 1954—2009 年的逐日气象资料, 采用 Mann-Kendall 检验法分析其 ET_0 趋势变化, 并且分析该地区气象因子对 ET_0 的通径系数, 找出最大的影响因子, 以便为该地区的水资源优化管理以及农业生产灌溉提供依据。

1 材料与方法

1.1 地区概况

雅安位于四川盆地西部, 东经 101°55′—103°20′,

收稿日期: 2019-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41601292); 农业部农业水资源高效利用重点实验室开放课题 (2017002)

作者简介: 武剑飞 (1995-), 男。硕士研究生, 主要从事农业高效用水研究。E-mail: 1105829797@qq.com

通信作者: 康银红 (1979-), 女。副教授, 主要从事农业作物水分利用效率研究。E-mail: kangyinhong@sicau.edu.cn

北纬 28°50′—33°55′, 气候属于亚热带湿润气候, 气候温和, 雨量十分充沛, 年均雨日为 218 d, 降雨量为 1 723 mm^[9]。多年平均相对湿度为 79%, 平均风速为 1.8 m/s, 平均日照时间为 1 011 h, 平均日照百分率为 23%。研究区的数据为雅安 1954—2009 年逐日气象资料, 包括日平均气温、日最高气温、日最低气温、平均相对湿度、10 m 高度处风速、日照时间, 数据来源于中国气象科学数据服务网 (<http://cdc.nmic.cn/home.do>)。

1.2 研究方法

1.2.1 Penman-Monteith 公式

采用 FAO 推荐使用 Penman-Monteith (PM) 公式作为计算 ET_0 ^[10]。

1.2.2 Priestley-Taylor 公式

Priestley-Taylor (PT) 法是在湿润环境下得到的, 且只需要辐射与温度等资料便可计算得 ET_0 , 计算式^[11]为:

$$ET_0 = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G), \quad (1)$$

式中: α 为经验系数, 取 1.26。

1.2.3 气候倾向率

采用最小二乘法对 ET_0 与时间 t 进行线性趋势估计^[12,13], 建立一元线性回归方程, 计算式为:

$$y = a + bt, \quad (2)$$

式中: y 为 ET_0 (mm); a 为回归常数; b 为回归系数; $b \times 10$ 表示气候倾向率 (mm/10a); b 值的大小反映了 ET_0 的变化速率, $b > 0$, ET_0 则呈上升趋势, 反之下降。

1.2.4 Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall (MK) 检验是一种非参数检验, 包括趋势性检验和突变性检验, 通常用于水文、气象等时间序列显著性检验, 该方法对样本不做限制, 检验结果不受异常值影响, 具体原理详见参考文献 [14-15]。本文采用置信度水平 $\alpha=0.05$ 对数据检验, 通过突变性检验找出突变点, 分别对突变前、突变后及全年的气象因子和蒸散量进行趋势分析。

1.2.4 通径分析

通径分析被广泛应用于生物科学研究中, 该方法不仅能分析自变量与因变量之间关系, 还可以分析自变量之间间接作用对因变量的作用方式以及影响程度^[16]。本文利用 SPSS 软件确定各气象因子对 ET_0 的通径系数, 从而定性找出影响 ET_0 的主要气象因素。

2 结果与分析

2.1 ET_0 及气象因子变化

图 1 为 ET_0 及各气象因子的年际变化趋势。由图 1 可以看出, 四川省气候湿润区的 ET_0 及各气象因子

年际变化不均匀, 曲线呈震荡性变化。 ET_0 整体呈下降的趋势, 平均每 10 a 下降 9.3 mm, 最大值出现在 2004 年, 为 944.7 mm, 最小值为 1989 年的 756 mm, 多年平均值为 861.2 mm, 差值变化幅度为 -105.2~83.5 mm; 风速在整个时段内呈下降趋势, 20 世纪 90 年代后期风速低于 1 m/s, 整体变化范围为 0.82~1.6 m/s, 10 a 气候倾向率为 0.133 m/s; 净辐射变化形式与 ET_0 基本相似, 多年呈下降趋势, 平均每 10 a 减少 0.046 MJ/(m²·d); 日照时间呈下降趋势, 最大值为 1978 年的 3.4 h, 最小值为 1989 年的 2 h, 多年日平均时数不足 3 h, 平均每 10 a 减少 0.072 h; 日平均温度呈上升趋势, 平均每 10 a 增加 0.117 °C, 变化范围在 15.5~17.3 °C 之间; 平均相对湿度在整个时段内比较大, 整体在 73% 以上, 多年平均相对湿度为呈下降趋势, 变化趋势不明显, 其倾向率为 0.32%/10 a。日照时间与净辐射及 ET_0 基本呈一致性的变化形式, 最小值出现的时间点相吻合。

2.2 Mann-Kendall 检验

2.2.1 突变性检验

为了研究雅安地区 ET_0 的下降是否是由于突变产生的, 采用 Mann-Kendall 法对该区域进行突变检验, 结果如图 2 所示。图 2 中 UF、UB 二条曲线分别代表顺时间序列和逆时间序列, 若曲线值大于 0, 则呈上升趋势, 反之下降, 水平虚线为临界线, 表示置信度水平为 0.05, 当曲线超过临界线时, 则表示显著上升或下降。由图 2 可以看出, 研究区的 ET_0 在 1966 年开始下降, UF、UB 二曲线相交于 1967 年、1969 年和 1970 年, 说明 ET_0 在 1967 年开始发生突变, 在 1967—1970 年之间发生突变性转变, 并且在 1984 年的统计量 z 值超过了 -1.96, 说明发生显著性突变, 计算得到的下降幅度约为 55.68 mm。

2.2.2 趋势性检验

表 1 为雅安地区突变前后及全时段的 ET_0 及各气象因子的趋势性检验。突变前 (1954—1967 年) ET_0 及气象因子均未通过显著性水平 $\alpha=0.05$ 的检验, 除了温度和湿度外, 其他都呈下降趋势, 突变后 (1970—2009 年) 及全时段 (1954—2009 年) 内除温度外, ET_0 及其余气象因子均呈下降趋势, 除了湿度外, 其他都通过了显著性水平检验。 ET_0 在 3 个时段内均呈下降趋势, 突变后时段内检验结果的统计量 $z=-2.08$, 是突变前的 3 倍多, 说明 1970—2009 年间的 ET_0 下降趋势最大, 在整个时段内占主导地位。平均温度在 3 个时段内呈现上升趋势, 与图 1 (e) 中温度趋势线相应。湿度在 1954—1969 年间统计量 $z=0.13 > 0$, 说明出现上升趋势, 但是在 1970—2009 年间, 其统计量 $z=-0.86 < 0$, 说明呈下降趋势, 但由于下降趋势大于上升趋势, 导致整个研究时段内湿

度呈现下降趋势，在所有气象因子当中，风速变化

趋势最大，这与图 1 (b) 中风速趋势图结果相一致。

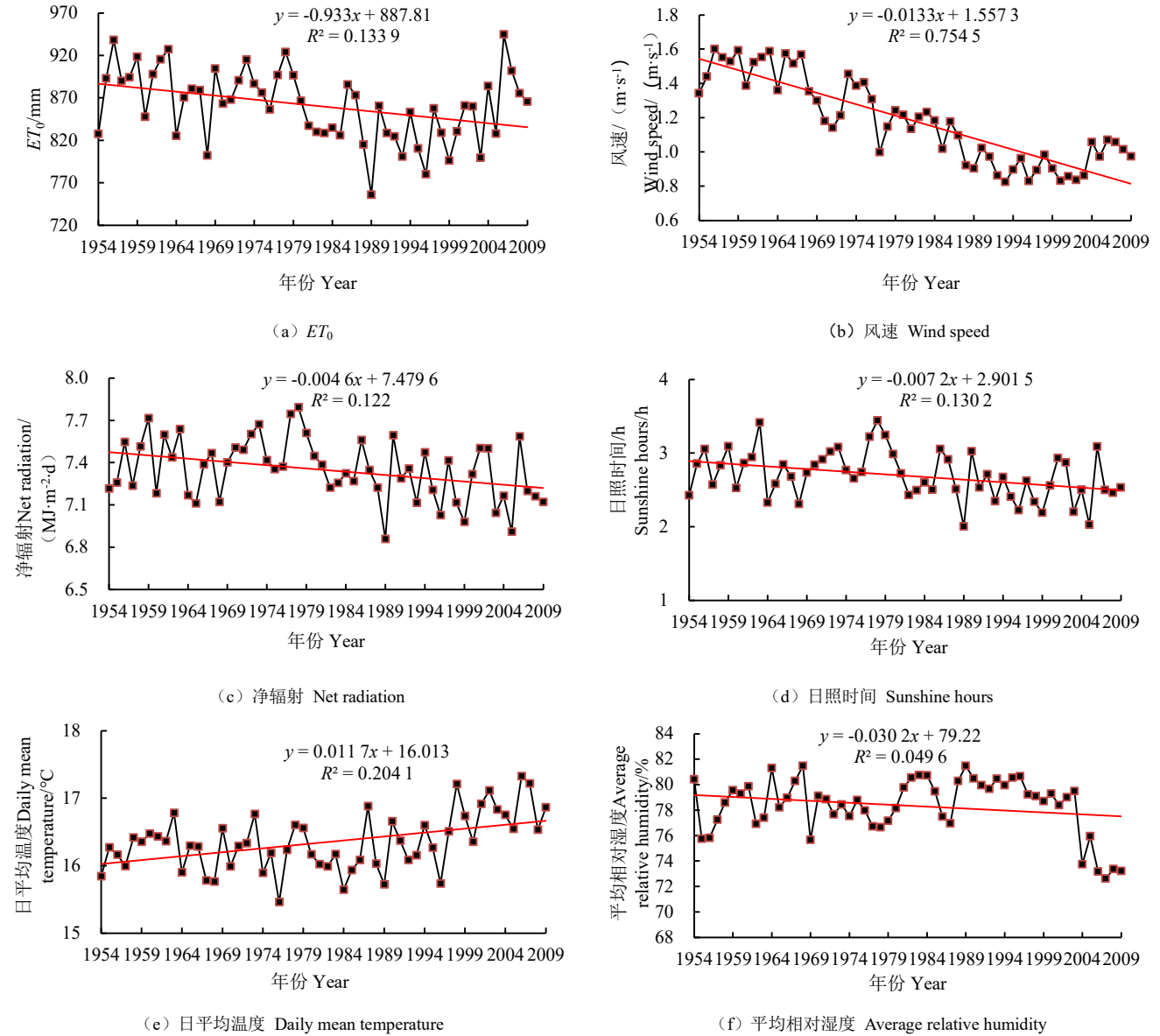


图 1 四川省湿润气候区 ET_0 及各气象因子的变化趋势

Fig.1 Trends of ET_0 and meteorological factors in humid climate regions of Sichuan Province

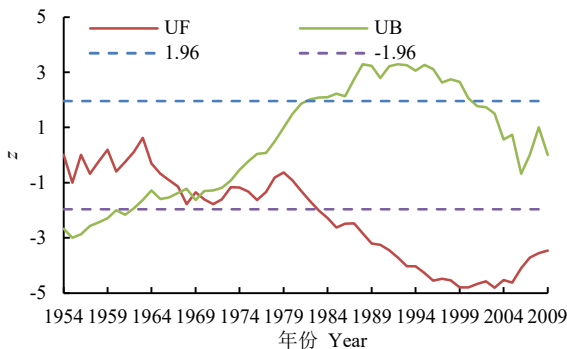


图 2 雅安地区 Mann-Kendall 突变性检测结果

Fig.2 The result of Mann-Kendall mutagenicity test in Ya'an area

2.3 通径分析

表 2 为各气象因子对参考作物蒸散量的通径分析。从表 2 可以看出，净辐射的通径系数和相关系

数最大，分别为 0.747 和 0.524，说明净辐射是影响 ET_0 的主要气象因子；相对湿度对 ET_0 的影响也比较大，其通径系数和相关系数分别为 -0.625、-0.462，说明湿度对 ET_0 起着负效应影响，即 ET_0 随着湿度的增大而减小；风速的通径系数为 0.424，表明对 ET_0 有着较大的正效应影响；日平均温度的通径系数和相关系数都比较小，分别为 0.136、0.358，但也对 ET_0 产生一定的正效应影响。因此，4 个气象因子对 ET_0 影响程度大小为净辐射>相对湿度>风速>日平均温度。由表中各气象因子间的间接作用可以看出，各因子相互影响、相互制约，日平均温度通过平均相对湿度对 ET_0 的间接作用最大，其系数为 0.245，总的间接作用效果大小依次为相对湿度、净辐射、风速、日平均温度。

表 1 雅安地区 ET_0 及气象因子趋势性检验Table 1 Trend test of ET_0 and meteorological factors in Ya'an area

时间 Time	ET_0	u_2	n	T	RH	R_n
突变前 Before mutation (1954—1967)	-0.59	-0.77	-0.05	0.14	0.13	-0.59
突变后 After mutation (1970—2009)	-2.08*	-4.59*	-3.11*	3.13*	-0.86	-3.49*
全时段 Full time (1954—2009)	-3.06*	-7.09*	-2.61*	2.96*	-0.52	-2.64*

注 *表示通过 0.05 的显著性水平检验。 u_2 、 n 、 T 、 RH 、 R_n 分别代表风速、日照时间、日平均温度、平均相对湿度、净辐射。

Note * Indicates a significance level test of 0.05. u_2 、 n 、 T 、 RH 、 R_n represent wind speed, sunshine hours, daily mean temperature, average relative humidity, and net radiation, respectively.

表 2 气象因子对 ET_0 的通径分析Table 2 Path analysis of meteorological factors for ET_0

气象因子 Meteorological factor	相关系数 Correlation coefficient	P	间接作用 Indirect effect				Σ
			T	RH	u_2	R_n	
T	0.358	0.136	-	-0.072	0.033	0.054	0.015
RH	-0.625	-0.462	0.245	-	0.027	0.058	0.33
u_2	0.596	0.424	-0.103	-0.025	-	0.144	0.016
R_n	0.747	0.524	0.114	-0.094	0.254	-	0.274

注 P 、 Σ 分别代表通径系数、系数和。

Note P 、 Σ represent path coefficient and sum of coefficients, respectively.

根据研究区气候类型,分为春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)、冬季(12—2月)。不同季度下气象因子对 ET_0 的通径分析结果如表 3 所示。由表 3 可以看出,净辐射在 4 个季度下的通径系数最大,夏季日照时间最长,使得净辐射的通径系数达到最大,说明夏季时期的净辐射对 ET_0 影响最大;相对湿度在四季都对 ET_0 表现为负效应,并且在冬季寒冷时期,其通径系数为最大值;风速在秋季和冬季的通径系数值比较大,对 ET_0 的影响程度大于日平均温度;日平均温度在春季和冬季对 ET_0 影响较大,其余季节的通径系数值都比较小。

表 3 气象因子在不同季度下的通径系数

Table 3 Path coefficient of meteorological factors in different seasons

气象因子 Meteorological factor	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
T	0.310	0.116	0.201	0.305
RH	-0.360	-0.320	-0.329	-0.396
u_2	0.202	0.230	0.286	0.307
R_n	0.466	0.635	0.551	0.384

研究区气候因子多年平均的月通径系数如图 3 所示。从图 3 中可知,相对湿度在所有月份中的通径系数均为负值,其系数的绝对值从 8—12 月逐渐递增,并且在翌年 1 月达到最大值,为 -0.449;日平均温度曲线大致呈凹型变化,通径系数从 2 月逐渐递减到 8 月的最小值,为 0.084,从 8 月递增到 12 月的最大值,为 0.369;风速的通径系数变化不稳定,

最小值出现在 8 月,为 0.158,然后递增到 12 月,达到最大值,为 0.419;净辐射在 12 月的通径系数值稍低于风速,其余月份的系数值较于其他气象因子都比较大,说明净辐射对 ET_0 影响最大。

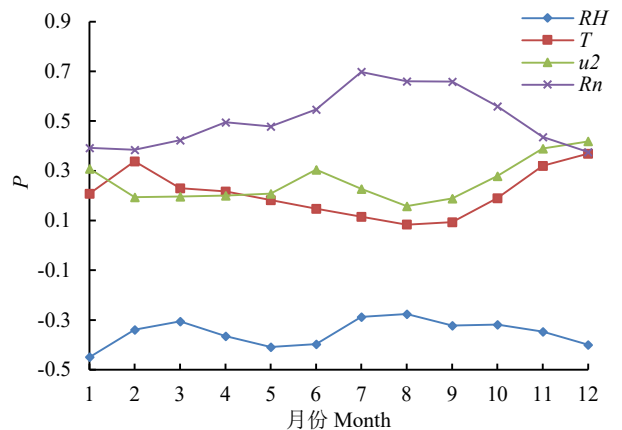


图 3 各气象因子月通径系数

Fig.3 Monthly path coefficient of each meteorological factor

曲线大体上抛物线型变化,在 7 月达到最大值,为 0.698,最小值在 12 月,为 0.376。从各因子的通径系数趋势变化可以看出,在 6—12 月,风速与日平均温度的变化形式基本一致,而净辐射与相对湿度变化一致。

2.4 ET_0 简化公式计算

PM 公式计算 ET_0 需要许多气象因子,计算过程复杂,对于一些缺失资料地区,该方法没有适用性,因此,需要对 ET_0 的模型计算进行简化^[17]。由于该地区净辐射是影响 ET_0 的主要气象因子,采用辐射法中的 Priestley-Taylor (PT) 法,该方法适用于环境湿

润的地区,且忽略了空气动力学项^[18]。图4为PT法估算的 ET_0 与PM计算的 ET_0 线性拟合关系。从图4可以看出,决定系数为0.9836,直线斜率为1.0922,具有较高的拟合度,估算的结果与实际 ET_0 相接近,说明简化算法下的 ET_0 具有较高的精度。因此,在气象资料缺失的情况下,四川省湿润气候区可以采用Pristley-Taylor法代替Penman-Monteith法来计算 ET_0 。

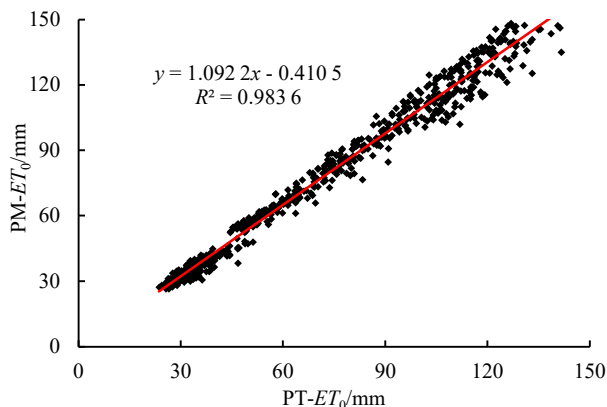


图4 PT法估算的 ET_0 与PM计算 ET_0 的关系

Fig.4 The relationship between ET_0 calculated by PT method and ET_0 calculated by PM

3 讨论

随着全球气候变暖,通常认为水分蒸发会随着温度增加而加快,但是一些学者研究发现存在“蒸发悖论”现象^[19],即温度升高,蒸散发降低。本研究分析发现四川省湿润气候区多年 ET_0 呈下降趋势,平均每10a下降9.3mm,而温度却呈上升变化趋势,很明显温度的升高并没有引起 ET_0 增加,这与陈超^[20]、冯禹^[21]等研究发现四川地区温度在近几十年里呈现上升变化而 ET_0 呈降低的结论一致,同时也间接表明温度的变化并不是影响 ET_0 的主要因子。研究发现, ET_0 发生突变时间为1967年,并且在1984年发生显著性下降趋势, ET_0 的趋势变化主要发生在突变后(1970—2009年),趋势变化值为-2.08,远远大于突变前,相对湿度虽然在全年表现为下降趋势,但是研究发现在突变前(1954—1967年)时段内,湿度呈现出上升趋势,而造成湿度(1954—2009)年下降的原因主要是突变后(1970—2009年)湿度下降幅度较大导致。在全年、四季及各月的通径分析中,净辐射始终是影响 ET_0 的主要气象因子,而净辐射主要是受日照时间影响的(净辐射与日照时间具有很好的联系,相关系数值最大,为0.94,而温度与净辐射相关系数值仅为0.15),说明日照时间对 ET_0 的影响最大,冯禹等^[21]也认为影响四川省盆地 ET_0 的主要气象因子依次为日照时间和风速,而一些学者对新疆艾比湖流域研究中发现日照时间是最不显著影响因子^[22-23],由此表明地理环境不同会使得局部

区域 ET_0 的影响因子有所不同。其次相对湿度对 ET_0 影响较大,造成该地区相对湿度影响程度较大的原因是雅安地区独特地理位置使得全年降水量较多,多年平均湿度在70%以上。考虑到净辐射是主要的气象影响因子,本文采用辐射法中的PT法计算得到的 ET_0 精度较高,这与赵璐等^[10]结论一致,但是由主要气象影响因子得到的简化算法是否是该地区的最优算法,还需要更多的气象站点资料以及算法模型进行深入验证分析。

本文从气候角度分析了四川省湿润气候区参考作物蒸散量的趋势变化及成因分析,而近些年气候变化多样性以及人类活动影响,使得 ET_0 变化更加复杂,这些因素对近些年的 ET_0 综合影响还需进一步研究,以便为该地区的水资源管理提供合理依据。

4 结论

1) 四川省湿润气候区多年 ET_0 呈下降趋势,气候倾向率为9.3mm/10a,最大值为944.7mm,最小值为756mm,多年平均值为861.2mm。

2) ET_0 在1967年发生突变,1984年发生显著性突变,突变后的趋势变化值为-2.08,突变前为-0.59,极值比为3.52。各气象因子在突变前的趋势变化均未通过显著性水平检验,突变后除温度和相对湿度外,其余气象因子都通过了显著性水平检验。在所有气象因子中,除了温度趋势值为正值,其余全部为负值,风速的趋势变化绝对值最大。

3) 气象因子对 ET_0 在全年的影响程度依次为净辐射、相对湿度、风速、日平均气温;夏季时期,净辐射影响最大,相对湿度在四季里全部呈负效应影响;净辐射在各月份下通径系数值都比其他气象因子大,呈抛物线型变化。

4) 在气象资料缺失情况下,四川省湿润气候区可以采用Pristley-Taylor法计算 ET_0 。

参考文献:

- [1] 谢平,陈晓宏,王兆礼,等.气象因子的变化对参考作物蒸发蒸腾量的影响[J].灌溉排水学报,2011,30(5): 12-16.
XIE Ping, CHEN Xiaohong, WANG Zhaoli, et al. The Impact of Change of Climate Factors on the Reference Evapotranspiration[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(5): 12-16.
- [2] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements) [M]. Rome: FAO,1998.
- [3] GONG Lebing, XU Chongyu, CHEN Deliang, et al. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin[J]. Journal of Hydrology, 2006, 329(3/4): 620-629.

- [4] SHE Dunxian, XIA Jun, ZHANG Yongyong. Changes in reference evapotranspiration and its driving factors in the middle reaches of Yellow River Basin, China[J]. Science of The Total Environment, 2017, 607/608: 1 151-1 162.
- [5] 梁丽乔, 李丽娟, 张丽, 等. 松嫩平原西部生长季参考作物蒸散发的敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 1-5.
- LIANG Liqiao, LI Lijuan, ZHANG Li, et al. Sensitivity of the reference crop evapotranspiration in growing season in the West Songnen Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5): 1-5.
- [6] 邹璐, 陈涛涛, 孔凡丹, 等. 辽宁省参考作物腾发量的敏感性分析[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(1): 50-54.
- ZHOU Lu, CHEN Taotao, KONG Fandan, et al. Sensitive Analysis on Reference Evapotranspiration in Liaoning Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(1): 50-54.
- [7] 赵璐, 梁川, 崔宁博, 等. 川中丘陵区参考作物蒸发蒸腾量近 60 年变化成因研究[J]. 水利学报, 2013, 44(2): 183-190.
- ZHAO Lu, LIANG Chuan, CUI Ningbo, et al. Attribution analyses of ET₀ change in hilly area of central Sichuan in recent 60 years[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(2): 183-190.
- [8] 苗正伟, 徐利岗, 张薇. 京津冀地区参考作物蒸散量变化特征与成因分析[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(5): 39-50.
- MIAO Weiheng, XU Ligang, ZHANG Wei. Spatiotemporal Variation of the Reference Crop Evapotranspiration and the Factors Affecting It in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(5): 39-50.
- [9] 彭贵康, 李志友, 柴复新. 雅安地形与降水的气候特征[J]. 高原气象, 1985, 4(3): 230-240.
- PENG Guikang, LI Zhiyou, CHAI Fuxin. The Relationship Between Topography and Precipitation in Ya'an District[J]. Plateau Meteorology, 1985, 4(3): 230-240.
- [10] 赵璐, 梁川, 崔宁博, 等. 不同 ET₀ 计算方法在川中丘陵地区的比较及改进[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 92-98.
- ZHAO Lu, LIANG Chuan, CUI Ningbo, et al. Comparison and improvement of different calculation methods for ET₀ in hilly area of central Sichuan Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(24): 92-98.
- [11] 张倩, 潘旭, 张鹏, 等. 基于温度资料的山东沿海站点参照作物腾发量估算方法比较研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37 (S1): 74-79.
- ZHANG Qian, PAN Xiu, ZHANG Peng, et al. Comparative Study on Estimation of Crop Evapotranspiration in Shandong Coastal Sites Based on Temperature Data[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(S1): 74-79.
- [12] 杨东, 刘洪敏, 郭盼盼, 等. 1956—2008 辽宁省近 53 年的降水量变化[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(1): 96-101.
- YANG Dong, LIU Hongmin, GUO Panpan, et al. The precipitation changes in Liaoning during 1956-2008[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(1): 96-101.
- [13] 林学椿, 于淑秋. 近 40 年我国气候趋势[J]. 气象, 1990, 16(10): 16-21.
- LIN Xuechun, YU Shuqiu. Climatic trend in China for the last 40 years[J]. Meteorology, 1990, 16(10): 16-21.
- [14] 徐丽梅, 郭英, 刘敏, 等. 1957 年至 2008 年海河流域气温变化趋势和突变分析[J]. 资源科学, 2011, 33(5): 995-1 001.
- XU Limei, GUO Ying, LIU Min, et al. Analysis of Temperature Trends and Change Points in the Haihe River Basin Over the Last 50 Years[J]. Resource Science, 2011, 33(5): 995-1 001.
- [15] 奚圆圆, 黄晓荣, 李晶晶, 等. 四川盆地降水量变化特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(1): 95-101.
- XI Yuanyuan, HUANG Xiaorong, LI Jingjing, et al. Analysis of Variation Characteristics of Precipitation in Sichuan Basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(1): 95-101.
- [16] 程新意, 李绍疆. 通径分析的数学模型[J]. 大学数学, 1990, 6(4): 99-105.
- CHENG Xinyi, LI Shaojiang. Mathematical model of path analysis[J]. Journal of Mathematics for Technology, 1990, 6(4): 99-105.
- [17] 李晨, 崔宁博, 冯禹, 等. 四川省不同区域参考作物蒸散量计算方法的适用性评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 127-134.
- LI CHEN, CUI Ningbo, FENG Yu, et al. Adaptation evaluation for reference evapotranspiration methods in different regions of Sichuan[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(4): 127-134.
- [18] 樊军, 邵明安, 王全九. 黄土区参考作物蒸散量多种计算方法的比较研究 (简报) [J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 98- 102.
- FAN Jun, SHAO Ming'an, WANG Quanjiu . Comparisons of many equations for calculating reference evapotranspiration in the Loess Plateau of China [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 98-102.
- [19] 丛振涛, 倪广恒, 杨大文, 等. “蒸发悖论” 在中国的规律分析[J]. 水科学进展, 2008, 19(2): 147-152.
- CONG Zhentao, NI Guangheng, YANG Dawen, et al. Evaporation paradox in China[J]. Advance in Water Science, 2008, 19(2): 147-152.
- [20] 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.
- CHEN Chao, PANG Yanmei, PAN Xuebiao, et al. Analysis on Change of Reference Crop Evapotranspiration and Climatic Influence Factors in Sichuan[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32(1): 35-40.
- [21] 冯禹, 崔宁博, 魏新平, 等. 川中丘陵区参考作物蒸散量时空变化特征与成因分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 78-86.
- FENG Yu, CUI Ningbo, WEI Xinping, et al. Temporal-spatial distribution characteristics and causes analysis of reference crop evapotranspiration in hilly area of central Sichuan[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(14): 78-86.
- [22] 许婧璟, 靳晓言, 强皓凡, 等. 新疆艾比湖流域潜在蒸散变化特征与成因分析[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(2): 89-94.
- XU Jingjing, JI Xiaoyan, QIANG Haofan, et al. Variety Characteristics

-
- | | |
|---|---|
| <p>and Cause Analysis of Potential Evapotranspiration in the Ebinur Lake Basin in Xingjiang[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(2): 89-94.</p> <p>[23] 王媛,董煜,焦黎.艾比湖绿洲参考作物蒸散量的敏感性分析[J].灌溉</p> | <p>排水学报, 2019,38(7): 110-115.</p> <p>WANG Yuan, DONG Yu, JIAO Li. Sensitivity Analysis of the Reference Evapotranspiration in Ebinur Lake Oasis[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(7): 110-115.</p> |
|---|---|

Change in Reference Crop Evapotranspiration from Humid Climate Region of Sichuan Province and Its Determinants

WU Jianfei, KANG Yinhong*, LIANG Youpeng

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agriculture University, Ya'an 625014, China)

Abstract: 【Objective】 Evapotranspiration is the most important water loss from terrestrial ecosystems and understanding its spatiotemporal change is critical for improve water management. We took the humid region in Sichuan province as an example and analyzed the temporal change in reference crop evapotranspiration (ET_0) as well as its determinants in the region. 【Method】 We calculated ET_0 using daily meteorological data measured from 1954 to 2009 in Ya'an based on the Penman-Monteith (PM) equation first, and then analyzed the characteristics in its change as well as its determinants using the Mann-Kendall test and path analysis respectively. 【Result】 The annual ET_0 over the 1954—2009 was 861.2 mm, but the ET_0 had been in decline at 9.3 mm/10a. Although the relative humidity remained almost unhanged ($z=-0.52$), wind speed ($z=-7.09$), sunshine hours ($z=-2.61$) and net radiation ($z=-2.64$) had all been falling accompanied by an significant rise in daily mean temperature ($z=2.9$). Path analysis revealed that the factors that impacted ET_0 more were net radiation, relative humidity, wind speed and daily average temperature. The ET_0 calculated by the Priestley-Taylor method was comparable to that estimated from the PM equation. 【Conclusion】 The annual average ET_0 in Ya'an has been declining, and the sunshine hours is the main determinant. The Priestley-Taylor method can be used to calculate ET_0 for the humid areas lacking of meteorological data.

Key words: reference crop evapotranspiration; Mann-Kendall test; path analysis; Priestley-Taylor method

责任编辑：韩 洋