DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2015.01.043

# 近 30 年甘肃省潜在蒸散发时空变化特征及 演变归因的定量分析

李耀军,魏霞,苏辉东 (兰州大学资源与环境学院,甘肃兰州 730000)

摘 要: 蒸散发是地球系统水量平衡和能量平衡中的重要组成部分,研究潜在蒸散发的变化对于更好地理解气候 变化对水文循环的影响及水资源配置具有重要意义。本文基于 FAO 推荐并修订的 Penman – Monteith 模型,利用 1981 – 2010 年甘肃省内及周边的 32 个气象站点的常规观测资料对甘肃近 30 年内潜在蒸散发的时空变化特征进 行研究,并对潜在蒸散发对气象因子的敏感性及其敏感系数的空间分布进行分析,定量揭示了影响甘肃潜在蒸散 发变化的主导因素。结果可为研究甘肃气候变化对水循环的影响、提高农业灌溉效率和调整水资源利用结构及优 化配置水资源提供参考。

关键词:潜在蒸散发;时空变化;气象因子;主导因子;敏感性;甘肃省 中图分类号:P333.1 文献标识码:A 文章编号:1672-643X(2015)01-0219-07

## Quantitative analysis of causes for temporal and spatial variation characteristics and evolution of potential evapotranspiration in Gansu Province during recent 30 years

#### LI Yaojun, WEI Xia, SU Huidong

(College of Sources and Environment Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Evapotranspiration is an important part in the water and energy balance of earth's system. The research on the variation of potential evapotranspiration ( $ET_p$ ) is of great significance for a better understanding of the impact of climate change on hydrological cycle and water resources allocation. Based on Penman – Monteith model recommended and revised by FAO, by use of meteorological data collected from 32 meteorological stations in or around Gansu, the paper analyzed the spatial and temporal variation characteristics of potential evapotranspiration in recent 30 years. Moreover, it analyzed the sensitivity of meteorological factors to potential evapotranspiration and the spatial distribution of sensitive coefficient, and quantitatively reveal the dominant factor of  $ET_p$  's variation. The result can provide reference for studying the impact of climate change on hydrological cycle, improve agricultural irrigation efficiency, adjust utilization structure of water resources and optimizing the allocation of water resources in Gansu Province.

Key words: potential evapotranspiration; temporal and spatial variation; meteorolgical factor; major factor; sensitivity; Gansu Province

蒸散发是自然条件下的水面蒸发、土壤蒸发以 及植物散发的总称,是水文循环中不可或缺的关键 环节之一。它的发生伴随着能量和水分在土壤-植 被-大气之间的相互转移,是地球系统水量平衡和 能量平衡中的重要组成部分<sup>[1-2]</sup>。陆地表面降水的 2/3 通过蒸散发返回大气<sup>[3]</sup>,将陆面 - 大气系统动态地耦合起来。陆地表面蒸散发可以影响降水和潜热通量,通过这些过程可以控制气温的变化,调节空气湿度,影响区域气候特征<sup>[4]</sup>。潜在蒸散发是指充分供水条件下,某一固定下垫面可能达到的最大蒸

收稿日期:2014-09-24; 修回日期:2014-11-20

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(41001154、51109103);中国博士后科学基金项目(20110490862);兰州 大学中央高校基本科研业务费项目(lzujbky - 2012 - 139) 作者简介:李耀军(1988-),男,山东诸城人,硕士研究生,主要研究方向为水文水资源及土壤侵蚀。 通讯作者:魏 霞(1980-),女,陕西扶风人,副教授,主要从事土壤侵蚀与水土保持、水文水资源等方面的研究。

散发量<sup>[5]</sup>,也称为参考蒸散发<sup>[6]</sup>。潜在蒸散发量与 蒸发皿的蒸发量空间分布一致,无论以季节或年为 研究时间尺度,两者的空间相关性良好<sup>[7]</sup>。由于实 测蒸散发资料的缺乏,人们往往参照潜在蒸散发 (*ET<sub>p</sub>*)来估算实际蒸散发量<sup>[8]</sup>。研究潜在蒸散发 既能为农作物需水量估算、农田灌溉、稀缺资料地区 水量平衡等研究提供重要参考<sup>[4]</sup>,也是地表水量平 衡和能量平衡的重要研究内容<sup>[1]</sup>。影响潜在蒸散 发的因子很多,其变化与各气候要素变化的时空差 异也复杂多样,分析潜在蒸散发对气象因子变化的 响应,对于水资源评价与优化配置、更好地理解水热 转换、研究气候变化对水资源和流域水循环的影响 具有重要意义。

甘肃地处黄河上游,位于干旱气候、高寒气候以 及东亚季风气候的交界区,属于全球气候变化的敏 感区和生态脆弱带<sup>[9]</sup>,自然地理条件和气候特征决 定了甘肃水资源十分缺乏,年均降水量(300mm 左 右)不及全国年均降水的一半,是降水最少的几个 省份之一,且时空分布极为不均,干旱缺水已严重制 约了社会经济的可持续发展。研究潜在蒸散发可以 为甘肃的水资源合理利用和提高农业灌溉效率提供 重要的理论依据<sup>[10]</sup>。封志明等<sup>[11]</sup>对4种潜在蒸散 发计算模型估算结果与相关气象站点 20cm 蒸发皿 实测值进行了相关性分析,发现 FAO 推荐并修订的 Penman – Monteith 模型的相关性最高,王素萍等<sup>[12]</sup> 选取了甘肃4个气象站实测气象资料计算各种潜在 蒸散发及 20cm 蒸发皿的变化特征,并结合分析各 气象因子的变化特征后认为,风速是影响潜在蒸散 发变化的主要动力因子,而热力因子则是影响蒸发 皿蒸发量的主要因子。目前针对甘肃全省的潜在蒸 散发变化及相关气象因素的变化对潜在蒸散发的影 响的定量分析仍比较缺乏。在全球气候变化的研究 中,对现状的分析一般采用 30 a 为基准年<sup>[13]</sup>。综 上所述,本文收集甘肃省境内气象站点1981-2010 年逐月观测资料,利用 FAO 推荐并修订的 Penman - Monteith 模型计算甘肃省潜在蒸散发的空间分布 及时间变化特征以及潜在蒸散发对最高气温、最低 气温、相对湿度、日照时数和风速的敏感性,同时利 用敏感性分析和气候要素的相对变化,定量揭示不 同气候要素变化对潜在蒸散发变化的贡献差异,为 研究甘肃气候变化对水循环的影响、提高农业灌溉 效率和调整水资源利用结构及优化配置水资源提供 参考。

## 1 数据来源与研究方法

## 1.1 数据来源

本文选取甘肃省境内 1981 - 2010 年 26 个气象 站及周边省份的 6 个气象站的常规观测资料,包括 月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温、月 平均相对湿度、月日照时数和平均风速的观测数据。 数据来源于中国气象科学数据共享服务网 http:// cdc. cma. gov. cn。气象站分布如图 1 所示。



图1 甘肃及周边地区气象站点分布

## 1.2 研究方法

1.2.1 潜在蒸散发的计算方法 FAO Penman – Monteith(98)模型是目前在干旱及湿润地区计算潜在蒸散发最合理的方法<sup>[14]</sup>。应用 1998 年 FAO 推荐并修订的 Penman – Monteith 模型<sup>[5]</sup>计算潜在蒸散发,并对其计算辐射方法进行校正,形式如下:  $ET_{o} =$ 

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

式中:  $ET_p$  为潜在蒸散发, mm;  $\Delta$  为饱和水汽压曲线 斜率, kPa/℃; G 为土壤热通量, MJ/(m<sup>2</sup> · d);  $\gamma$  为 干湿常数, kPa/℃;  $U_s$  为2 m高度处风速, m/s;  $e_s$  与  $e_a$  分别为饱和水汽压和实际水汽压, kPa;  $R_n$  为净辐 射, MJ/(m<sup>2</sup> · d), 由净短波辐射  $R_{ns}$  与净长波辐射  $R_{nl}$  之差得出, 即 $R_n = R_{ns} - R_{nl}$ 。

净辐射计算是 Penman – Monteith 模型的基础<sup>[6]</sup>,本文选取 Yin Yuehe 等<sup>[14]</sup>采用的我国 81 个 气象站的逐月辐射观测资料建立了适用于我国的净 短波辐射经验公式, Yin Yuehe 等<sup>[14]</sup>同时指出 Penman 修正式计算我国净长波辐射更符合我国实际状 况,即:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \left( 0.2 + 0.79 \frac{n}{N} \right) R_{so}$$
(2)  
$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{\max,k}^{4} + T_{\min,k}^{4}}{2} \right] (0.56 - 0.25 \sqrt{e_{a}}) \cdot$$

$$\left[0.1 + 0.9\left(\frac{n}{N}\right)\right] \tag{3}$$

式中:  $\alpha$  为地表反射率, 取 FAO 推荐取值 0.23<sup>[5]</sup>;  $R_{so}$  为晴空太阳辐射;  $\sigma$  为 Stefan – Boltzman 常数 (4.093 × 10<sup>-9</sup> MJ/(K<sup>4</sup> · m<sup>2</sup> · d);  $T_{\max,k}$ 、 $T_{\min,k}$ 分别为 绝对温标下的日最高气温(K) 和日最低气温(K), n为日照时间, h; N 为可照时数, h。

1.2.2 敏感性分析 蒸散发气候敏感系数的定义为:潜在蒸散发的变化速率与气象因子的变化速率 之比<sup>[6,8]</sup>。本文利用无量纲的敏感系数表征蒸散发 对气候因素变化的敏感性,无量纲的优势在于对于 不同量纲的气象因子的影响可以进行排序评价<sup>[6]</sup>, 计算公式为:

$$S_{x_i} = \lim\left(\frac{\Delta ET_p/ET_p}{\Delta x_i/x_i}\right) = \frac{\partial ET_p}{\partial x_i}\frac{x_i}{ET_p}$$
(4)

式中: S<sub>xx</sub> 为潜在蒸散发对气象因子的敏感系数;  $ET_{i}$ 为潜在蒸散发;  $x_{i}$ 为气象因子(i分别代表最高 气温、最低气温、相对湿度、风速和日照时间)。敏感 系数为正,表示潜在蒸散发与该气象因子的变化趋 势一致,敏感系数为负,则表示潜在蒸散发与该气象 因子的变化趋势相反。而且绝对值越大表示该气象 因子对 ET, 的影响越大。本文采用尹云鹤等<sup>[6]</sup>提出 的定量化评估潜在蒸散发对气象因子敏感性的计算 方法,即将影响潜在蒸散模型的5个气候要素(最 低气温、最高气温、风速、日照时数和相对湿度)分 别变化±10%,同时假定其他变量保持不变,重新 计算 ET,,然后根据式(4)计算敏感系数。考虑实 际情况中气温变化幅度短时间内不可能达到10%, 本文结合甘肃实际对该方法进行了一定的修改:其 它因子变化10%,最低气温及最高气温变化1%,其 它的方法保持不变。

1.2.3 主导因子分析 气象因子 x<sub>i</sub> 的相对变化与 其敏感系数 S<sub>xi</sub> 的乘积可以表示该气象要素的变化 所引起的潜在蒸散发的相对变化<sup>[6]</sup>,公式如下:

$$G_{x_i} = \frac{\Delta x_i}{x_i} \cdot S_{x_i} \tag{5}$$

式中:  $\Delta x_i$  为 1981 – 2010 年内的气象因子  $x_i$  的变化 量,其为相应的气象因子在该段时间内的平均值的 绝对值。 $G_{x_i}$  绝对值越大,则表明由其相应的气象因 子的相对变化而引起的  $ET_p$  的变化更大,即贡献度 更高,绝对值最大值所对应的气象因子是引起潜在 蒸散发变化的主导因子。

此外,本文采用 Mann – Kendall 趋势检验检测 潜在蒸散发的趋势变化。

## 2 结果分析

## 2.1 甘肃 ET<sub>p</sub> 时空分布及变化特征

根据上述方法,计算可得:1981-2010年甘肃 平均潜在蒸散发(ET,)为723 mm/a。图2为甘肃 多年平均潜在蒸散发空间分布特征,由图2可知甘 肃省平均潜在蒸散发地域差异明显,由东南到西北 逐渐增大。最大值(1036 mm)出现于甘肃西北的 酒泉地区,最小值(515 mm)则出现于陇南及甘南地 区。潜在蒸散发的空间变化特征是由甘肃的气候特 点导致的。甘肃位于欧亚大陆腹地,东西长达1665 km,从东南到西北横跨了热带湿润区到高寒区、干 旱区的各种气候类型。甘肃东南部温湿,年降水达 到 450~760 mm,属于湿润气候,年 ET。在 500~650 mm 之间。位于陇西黄土高原的西北部地处温带半 干旱气候区,温差大,降水少,年 ET。也增大至 660 ~750 mm。而处于甘肃西部的河西走廊地区降水 稀少,年降水量为42~200 mm,是降水量最少的地 区,日照强烈,昼夜温差大,年 ET。也达到了 750~ 1030 mm,这也是甘肃潜在蒸散发最大的地区。



图 2 甘肃多年平均潜在蒸散发空间分布特征

甘肃潜在蒸散发( $ET_p$ )年际变化特征如图 3 所示。近 30 年来,甘肃省潜在蒸散发( $ET_p$ )以 1.39 mm/a的速率递增,30 年内  $ET_p$ 增长接近 42 mm。对 1981 – 2010 各年内甘肃平均潜在蒸散发值 进行曼肯德尔趋势检验,结果为 2.02,大于 1.96,通 过了 95% 的显著性检验。值得注意的是,以 1993 年为分界点,1981 – 1993 年与 1993 – 2010 年甘肃 省潜在蒸散发( $ET_p$ )呈现出截然相反的变化趋势, 在 1981 – 1993 年内,甘肃省内潜在蒸散发( $ET_p$ ) 以 5.87 mm/a 的速率递减,而 1993 – 2010 年, $ET_p$ 以 4.41 mm/a 的速率递增。这一结果与 Li Zhi 等<sup>[16]</sup>关于中国西北地区 1993 年前后蒸散发呈现不 同变化趋势,1993 年以前明显递减,1993 – 2010 年 变化趋势的空间分布及甘肃省内 26 个气象站年潜 在蒸散发的曼肯德尔趋势检验结果如图 4 所示。可 以发现,增长速率大致呈东南向西北逐渐减小的态 势,除甘肃西北部存在递减趋势外,均呈现递增的趋 势。其中,甘肃东南部的潜在蒸散发增长趋势最为 明显,达到 2.3~5.2 mm/a,中部的潜在蒸散发也以 1.0~2.3 mm/a 的速率递增,而递减趋势主要存在 于玉门镇气象站的周边地区,递减趋势为-1.1~ -3.6 mm/a。除玉门镇气象站周边区域外,甘肃西 北其余地区呈现出不明显递减趋势(<-1 mm/a) 或微弱的递增趋势(<1 mm/a)。甘肃省内 26 个气 象站年潜在蒸散发的曼肯德尔趋势检验结果在图 4 (b)中呈现,26 个气象站中 22 个气象站呈现递增趋 势,而其中有 13 个气象站通过了 95% 显著性检验,



2 个气象站通过了 90% 显著性检验(马鬃山站与敦 煌站),7 个未通过显著性检验。仅有 4 个气象站呈 下降趋势(安西站、高台站、山丹站及玉门镇站),4 个气象站中又仅有玉门镇站通过了 90% 显著性检 验。



图 3 1981-2010 年甘肃潜在蒸散发年际变化



图 4 甘肃潜在蒸散发变化趋势及曼肯德尔趋势检验结果空间分布

## 2.2 甘肃潜在蒸散发演变归因

为了探讨甘肃地区潜在蒸散发对气候变化的响应,综合考虑到空间分布及甘肃各地不同的气候特点,我们选取了安西站、酒泉站、张掖站、武威站、靖远站、华家岭站、西峰镇站、武都站、甘南站,玛曲站(图1)10个典型气象站作为分析对象。

2.2.1 潜在蒸散发对气象因子的敏感性 10个典型气象站潜在蒸散发对5个气象因子的敏感系数计算结果如表1所示。

#### 表1 10个典型站潜在蒸散发对气象因子的敏感系数

气象站	最低气温	最高气温	风速	日照时数	相对湿度
安西站	0.053	0.613	0.503	-0.024	-0.391
酒泉站	0.035	0.419	0.415	-0.027	-0.435
张掖站	0.027	0.395	0.381	-0.028	-0.467
武威站	0.028	0.345	0.362	-0.026	-0.439
靖远站	0.034	0.290	0.292	-0.023	-0.432
甘南州站	0.002	0.126	0.164	-0.017	-0.547
玛曲站	-0.015	0.115	0.167	-0.013	-0.585
华家岭站	0.027	0.222	0.209	-0.017	-1.327
武都站	0.096	0.363	0.371	-0.010	-0.572
西峰镇站	0.051	0.284	0.319	-0.023	-0.751

由表1可知,10个气象站的潜在蒸散发都对相 对湿度呈负敏感,而且敏感系数的绝对值也最大 (安西站除外),华家岭站更达到了1.327,表明若相 对湿度增加10%,则ET。减少13.27%。潜在蒸散 发对最低气温、最高气温和风速的敏感性均为正值 (其中玛曲站最低气温的敏感系数为-0.015),这 三者中,敏感性最高的是风速,其次是最高温度,而 且两者敏感系数十分接近,而对最低气温敏感性最 低,敏感系数也远小于前两者,这主要是因为最低气 温一般都发生于夜晚,而夜晚也是蒸散发活动最弱 的时间。值得注意的是,在本文敏感系数计算结果 中,潜在蒸散发对日照时数的敏感系数绝对值最小, 几乎为零,与传统意义上的"日照增加,蒸散发增 大"的观念不符,蒸发主要影响因素是水量(潜在蒸 散发假设水充足)、液面温度、饱和差、大气稳定度 以及液面大小(潜在蒸散发假设该项固定)。而太 阳的日照时数主要是通过影响辐射,辐射再作用于 液面温度,从而间接影响蒸散发。在气温不变的自 然状态下液面温度基本不变,则辐射不可能发生明 显变化。所以在温度一定时候,日照和潜在蒸散发 关系很小。而本文推求敏感系数的方法是认为日照 时数发生变化时,其他因子均保持不变,这也就使得 潜在蒸散发对日照时数的敏感系数绝对值最小。这 10个典型气象站的5个气象因子的敏感系数的空 间分布如图5所示,在3种情景下(经度、纬度、海 拔),*ET*<sub>p</sub>与最低气温、日照时数的敏感系数基本成 水平状态,即在经度、纬度和海拔改变的情况下,敏 感系数基本保持不变。最高气温与风速的敏感系数 在经度(a)、海拔(c)中呈现递减趋势,即敏感系数 由西向东、由低海拔向高海拔递减,而在纬度中呈现 增加的趋势,即由低纬度地区向高纬度地区增加。 而相对湿度在经度、纬度、海拔3种情景下呈现出不 规则的、动荡的变化趋势,无规律可言,但潜在蒸散 发对相对湿度的敏感系数在各种情景下都是绝对值 最大,这说明潜在蒸散发对相对湿度的敏感性最高, 不因地域的变化而改变。这也可能是由于本文样本 即用于分析的站点选取的数量较少,从而难以发现 比较明显的趋势变化。

2.2.2 各气象要素对 ET<sub>p</sub>变化贡献率及各气象站 主导因子分析 根据公式(5)计算5个气象因子 (最低气温、最高气温、平均风速、日照时数与相对 湿度)在10个气象站点的相对变化率及气象因子 对潜在蒸散发的潜在贡献,计算结果如表2所示:



图5 敏感系数与经度、纬度及海拔的关系

表 2 气象因子的相对变化及其对潜在蒸散发的贡献

	最低气温		最高气温		平均风速		日照时数		相对湿度		$ET_p$
	Δ	贡献	$\Delta$	贡献	Δ	贡献	$\Delta$	贡献	$\Delta$	贡献	$\Delta$
安西站	118.68	6.25	8.83	5.42	- 18.73	-9.43*	4.37	-0.10	9.02	-3.53	-5.47
酒泉站	91.57	3.23	9.49	3.97*	0.72	0.30	3.38	-0.09	5.38	-2.34	3.88
张掖站	260.50	7.08*	10.22	4.04	16.14	6.14	0.85	-0.02	-6.40	2.98	15.32
武威站	138.90	3.87	11.27	3.89	13.11	4.75	7.54	-0.20	- 12.49	5.48*	17.44
靖远站	35.89	1.20	10.61	3.07	55.57	16.24*	3.61	-0.08	-8.91	3.84	25.26
甘南州站	44.00	0.10	16.66	2.10	26.85	4.40*	6.57	-0.11	-3.50	1.91	12.57
玛曲站	51.75	-0.79	19.63	2.26*	0.84	0.14	6.23	-0.08	-1.38	0.81	8.05
华家岭站	149.31	3.97	19.05	4.23*	-3.66	-0.76	4.07	-0.07	2.26	-3.00	0.31
武都站	12.97	1.25	10.27	3.72	36.05	13.38*	19.18	-0.20	-8.44	4.82	24.74
西峰镇站	48.05	2.45	15.98	4.54	28.84	9.20*	3.28	-0.08	-7.81	5.86	20.57
	安酒张武靖甘玛华武西站站站站站站站站站站站站站站站站站站站站站站站站	最低           五           安西站         118.68           酒泉站         91.57           张掖站         260.50           武威站         138.90           靖远站         35.89           甘南州站         44.00           玛曲站         51.75           华家岭站         149.31           武都站         12.97           西峰镇站         48.05	最低<	最低气温         最高           Δ         贡献         Δ           安西站         118.68         6.25         8.83           酒泉站         91.57         3.23         9.49           张掖站         260.50         7.08*         10.22           武威站         138.90         3.87         11.27           靖远站         35.89         1.20         10.61           甘南州站         44.00         0.10         16.66           玛曲站         51.75         -0.79         19.63           华家岭站         149.31         3.97         19.05           武都站         12.97         1.25         10.27           西峰镇站         48.05         2.45         15.98	最低气温         最高气温           五         贡献         五         贡献           安西站         118.68         6.25         8.83         5.42           酒泉站         91.57         3.23         9.49         3.97*           张掖站         260.50         7.08*         10.22         4.04           武威站         138.90         3.87         11.27         3.89           靖远站         35.89         1.20         10.61         3.07           甘南州站         44.00         0.10         16.66         2.10           玛曲站         51.75         -0.79         19.63         2.26*           华家岭站         149.31         3.97         19.05         4.23*           武都站         12.97         1.25         10.27         3.72           西峰镇站         48.05         2.45         15.98         4.54	最低气温         最高气温         平均           五         贡献         五         贡献         五         五           安西站         118.68         6.25         8.83         5.42         -18.73           酒泉站         91.57         3.23         9.49         3.97*         0.72           张掖站         260.50         7.08*         10.22         4.04         16.14           武威站         138.90         3.87         11.27         3.89         13.11           靖远站         35.89         1.20         10.61         3.07         55.57           甘南州站         44.00         0.10         16.66         2.10         26.85           玛曲站         51.75         -0.79         19.63         2.26*         0.84           华家岭站         149.31         3.97         19.05         4.23*         -3.66           武都站         12.97         1.25         10.27         3.72         36.05           西峰镇站         48.05         2.45         15.98         4.54         28.84	最低气温最高气温平均风速 $\Delta$ 贡献 $\Delta$ 贡献 $\Delta$ 贡献安西站118.686.258.83 $5.42$ $-18.73$ $-9.43^{\circ}$ 酒泉站91.57 $3.23$ $9.49$ $3.97^{\circ}$ $0.72$ $0.30$ 张掖站260.50 $7.08^{\circ}$ $10.22$ $4.04$ $16.14$ $6.14$ 武威站138.90 $3.87$ $11.27$ $3.89$ $13.11$ $4.75$ 靖远站 $35.89$ $1.20$ $10.61$ $3.07$ $55.57$ $16.24^{\circ}$ 甘南州站 $44.00$ $0.10$ $16.66$ $2.10$ $26.85$ $4.40^{\circ}$ 玛曲站 $51.75$ $-0.79$ $19.05$ $4.23^{\circ}$ $-3.66$ $-0.76$ 武都站 $12.97$ $1.25$ $10.27$ $3.72$ $36.05$ $13.38^{\circ}$ 西峰镇站 $48.05$ $2.45$ $15.98$ $4.54$ $28.84$ $9.20^{\circ}$	最低气温最高气温平均风速日照 $\Delta$ 贡献 $\Delta$ 贡献 $\Delta$ 贡献 $\Delta$ 安西站118.686.258.83 $5.42$ $-18.73$ $-9.43^*$ $4.37$ 酒泉站91.57 $3.23$ $9.49$ $3.97^*$ $0.72$ $0.30$ $3.38$ 张掖站260.50 $7.08^*$ $10.22$ $4.04$ $16.14$ $6.14$ $0.85$ 武威站138.90 $3.87$ $11.27$ $3.89$ $13.11$ $4.75$ $7.54$ 靖远站 $35.89$ $1.20$ $10.61$ $3.07$ $55.57$ $16.24^*$ $3.61$ 甘南州站 $44.00$ $0.10$ $16.66$ $2.10$ $26.85$ $4.40^*$ $6.57$ 玛曲站 $51.75$ $-0.79$ $19.63$ $2.26^*$ $0.84$ $0.14$ $6.23$ 华家岭站 $149.31$ $3.97$ $19.05$ $4.23^*$ $-3.66$ $-0.76$ $4.07$ 武都站 $12.97$ $1.25$ $10.27$ $3.72$ $36.05$ $13.38^*$ $19.18$ 西峰镇站 $48.05$ $2.45$ $15.98$ $4.54$ $28.84$ $9.20^*$ $3.28$	最低气温最高气温平均风速日照时数 $\Delta$ 贡献 $\Delta$ 贡献 $\Delta$ 贡献 $\Delta$ 贡献安西站118.686.258.83 $5.42$ $-18.73$ $-9.43^{*}$ $4.37$ $-0.10$ 酒泉站 $91.57$ $3.23$ $9.49$ $3.97^{*}$ $0.72$ $0.30$ $3.38$ $-0.09$ 张掖站 $260.50$ $7.08^{*}$ $10.22$ $4.04$ $16.14$ $6.14$ $0.85$ $-0.02$ 武威站 $138.90$ $3.87$ $11.27$ $3.89$ $13.11$ $4.75$ $7.54$ $-0.20$ 靖远站 $35.89$ $1.20$ $10.61$ $3.07$ $55.57$ $16.24^{*}$ $3.61$ $-0.08$ 甘南州站 $44.00$ $0.10$ $16.66$ $2.10$ $26.85$ $4.40^{*}$ $6.57$ $-0.11$ 玛曲站 $51.75$ $-0.79$ $19.63$ $2.26^{*}$ $0.84$ $0.14$ $6.23$ $-0.08$ 华家岭站 $149.31$ $3.97$ $19.05$ $4.23^{*}$ $-3.66$ $-0.76$ $4.07$ $-0.20$ 西峰镇站 $48.05$ $2.45$ $15.98$ $4.54$ $28.84$ $9.20^{*}$ $3.28$ $-0.20$	最低气温最高气温平均风速日照时数相对 $\Delta$ 贡献 $\Delta$ 贡献 $\Delta$ 贡献 $\Delta$ 贡献 $\Delta$ 贡献 $\Delta$ 安西站118.686.258.835.42 $-18.73$ $-9.43^*$ 4.37 $-0.10$ $9.02$ 酒泉站 $91.57$ $3.23$ $9.49$ $3.97^*$ $0.72$ $0.30$ $3.38$ $-0.09$ $5.38$ 张掖站 $260.50$ $7.08^*$ $10.22$ $4.04$ $16.14$ $6.14$ $0.85$ $-0.02$ $-6.40$ 武威站 $138.90$ $3.87$ $11.27$ $3.89$ $13.11$ $4.75$ $7.54$ $-0.20$ $-12.49$ 靖远站 $35.89$ $1.20$ $10.61$ $3.07$ $55.57$ $16.24^*$ $3.61$ $-0.08$ $-8.91$ 甘南州站 $44.00$ $0.10$ $16.66$ $2.10$ $26.85$ $4.40^*$ $6.57$ $-0.11$ $-3.50$ 玛曲站 $51.75$ $-0.79$ $19.63$ $2.26^*$ $0.84$ $0.14$ $6.23$ $-0.08$ $-1.38$ 华家岭站 $149.31$ $3.97$ $19.05$ $4.23^*$ $-3.66$ $-0.76$ $4.07$ $-0.07$ $2.26$ 武都站 $12.97$ $1.25$ $10.27$ $3.72$ $36.05$ $13.38^*$ $19.18$ $-0.20$ $-8.44$ 西峰镇站 $48.05$ $2.45$ $15.98$ $4.54$ $28.84$ $9.20^*$ $3.28$ $-0.08$ $-7.81$	最低< 五 支献最高< 五 五 五 五平均风速 五<

注:\*代表该气象站点的潜在蒸散发变化的主导因子。

由表2可知,10个气象站中的5个气象站潜在 蒸散发的主导因子是平均风速,即平均风速的变化 对 *ET<sub>p</sub>* 的贡献率最大。在这5个气象站中,安西站 是由于平均风速的减小导致 *ET<sub>p</sub>* 降低了5.47%,而 其余4个气象站(靖远、甘南州、武都与西峰镇)都 是由于风速的增加而导致了 *ET<sub>p</sub>* 相应的递增。虽然 相对湿度在10个气象站中的敏感系数绝对值最大, 但由于相对湿度的变化幅度较小,这就使得10个站 中只有武威站的潜在蒸散发变化的主导因子为相对 湿度,武威站的相对湿度近 30 a 内降低了 12.49%, 成为该站 *ET*<sub>p</sub> 呈增加趋势的主要因子。而最低气温 的敏感系数尽管最小,但在张掖站由于最低气温的 增大幅度高达 260.50%,这也就使得最低温度成为 张掖站潜在蒸散发增大的主导因子。在最高气温变 化幅度最大的玛曲站,最高气温的增加成为了玛曲 站潜在蒸散发增加的主导因子。而华南岭站,尽管

%

最高气温的增加幅度也十分明显,在10个气象站中 仅次于玛曲站,但由于该站平均风速的降低和相对 湿度的增加,抵消了部分由最高气温变化而引起的 潜在蒸散发的增加,这也就使得华家岭站成为10个 气象站中近30年潜在蒸散发变化幅度最小的气象 站,1981-2010年仅增加了0.31%。

在实际中,不可能只有单个气象因子发生变化 而其余的气象因子保持不变,所以可以将最低气温、 最高气温、平均风速、日照时数和相对湿度各自的贡 献相加,累加就会得到5个因子对潜在蒸散发 ( $ET_p$ )变化的总贡献。将累加之后的总贡献称之 为潜在蒸散发( $ET_p$ )的估计相对变化(%),将利用 FAO56 – PM 模型计算出的潜在蒸散发( $ET_p$ )的变 化成为实际相对变化(%),而 $ET_p$ 的实际相对变化 应近似等于5个气象因子所引起的相对变化之 和<sup>[17-18]</sup>,也就是估计相对变化,即:

$$\frac{\Delta ET_p}{ET_p} \approx \sum_{i=1}^{5} G_{x_i} \tag{6}$$

式中: $G_{x_i}$ 的计算方法见公式(5)。

以武威站为例,武威站各气象因子对潜在蒸散 发的贡献:  $\sum_{i=1}^{5} G_{x_i} = 3.87\% + 3.89\% + 4.75\% +$ (-0.20%)+5.48% = 17.79%,而武威 ET<sub>p</sub> 的实 际相对变化为 17.44%。10个典型气象站潜在蒸散 发的估计相对变化与实际相对变化的对比如图 6 所 示。



相对变化的对比(武威站)

由图 6 可以看出, *ET*<sub>p</sub> 多年实际相对变化与估 计相对变化对比坐标点的趋势线斜率为 1.0007, 相 关系数也达到了 0.8833。这说明了 *ET*<sub>p</sub> 的实际相 对变化应近似等于 5 个气象因子所引起的相对变化 之和, 而且也表明, 结合各气象因子的敏感性分析和 气象因子自身的多年相对变化解释甘肃潜在蒸散发 的变化是可行的<sup>[19]</sup>。因而也验证了本文敏感性分 析和主导因子分析的计算数据是可靠性的。

## 3 结 语

本文基于 FAO 推荐并修订的 Penman – Monteith 模型,利用 1981 – 2010 年甘肃省内及周边 的 32 个气象站点的常规观测资料对甘肃近 30 年内 潜在蒸散发的时空变化特征进行研究,并对潜在蒸 散发对气象因子的敏感性及其敏感系数的空间分布 进行分析,结合各气象因子的相对变化,定量揭示了 影响甘肃潜在蒸散发变化的主导因素。结论如下:

(1) 1981 - 2010 年甘肃平均潜在蒸散发 (*ET<sub>p</sub>*)为723 mm/a,潜在蒸散发的地域分布差异 明显,由东南到西北逐渐增大。最大值出现于甘肃 西北的酒泉地区,为1036 mm,最小值则出现在甘 肃东南部,为515 mm。甘肃东南部年*ET<sub>p</sub>*在500~ 650 mm之间,中部为660~750 mm,而西部的河西 走廊地区则达到了750~1030 mm。

(2)近 30年来,甘肃省潜在蒸散发(*ET<sub>p</sub>*)以 1.39 mm/a 的速率递增。以 1993年分界点,甘肃 *ET<sub>p</sub>*在 1981 - 1993年内,以 5.87 mm/a 的速率递 减,而在 1993 - 2010年中以 4.41 mm/a 的速率递 增。其中,甘肃东南部的潜在蒸散发增长趋势最为 明显,达到 2.3~5.2 mm/a。增长速率大致呈东南 向西北逐渐减小的趋势,玉门镇气象站的周边地区 甚至出现负增长。就显著性检验结果而言,甘肃省 内的 26个气象站中 22个气象站呈现递增趋势,其 中 13个气象站通过了 95%显著性检验,2个气象站 通过了 90%显著性检验。

(3)甘肃潜在蒸散发对最低气温、最高气温和 风速的敏感性均为正值,对相对湿度呈负敏感,对日 照时间的敏感系数绝对值最小。各站潜在蒸散发均 对相对湿度最敏感,对日照时数与最低气温的敏感 性最低。从敏感系数的空间分布上看,最高气温与 风速的敏感系数由西向东、由低海拔地区向高海拔 地区递减,由低纬度地区向高纬度地区递增。最低 气温、日照时数的敏感系数在经度、纬度和海拔改变 的情况下,基本保持不变。相对湿度的敏感系数则 在任何空间分布下都是绝对值最大,即潜在蒸散发 对相对湿度的敏感性最强。

(4) 引起甘肃近 30 年潜在蒸散发变化的主导 因子是风速的改变。用于敏感性及主导因子分析的 10 个气象站,其中有 5 个气象站的主导因子为风 速。玛曲站、华家岭站的主导因子为最高气温,张掖 站的主导因子为最低气温,而引起武威站潜在蒸散 发增加的最主要因素是相对湿度的降低。利用气象 因子对潜在蒸散发作用而引起相对变化之和近似等于 ET, 的实际相对变化。

#### 参考文献:

- [1] 刘昌明,孙 睿.水循环的生态学方面:土壤-植被-大 气系统水分能量平衡研究进展[J].水科学进展,1999, 10(3):251-259.
- [2] 邱国玉,李瑞利. 气候变化与区域水分收支:实测、遥感 与模拟[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [3] Shukla J, Mintz Y. Influence of land-surface evapotranspiration on the Earth's climate[J]. Science, 1982, 215(4539): 1498 - 1501.
- [4]谢虹.青藏高原蒸散发及其对气候变化的响应(1970-2010)[D].兰州:兰州大学,2012.
- [5] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and drainage paper 56[R]. Rome: Food and Agriculture Organization, 1998.
- [6] 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[J].科学通报, 2010,55(22):2226 2234.
- [7] Yang Tao, Zhang Qiang, Wang Weiguang, et al. Review of advances in hydrologic science in China in the last decades: impact study of climate change and human activities
  [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18 (11): 1380 1384.
- [8] 刘昌明,张丹.中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化 特征分析[J].地理学报,2011,66(5):579-588.
- [9] 谢金南,李栋梁,董安祥,等.甘肃省干旱气候变化及其 对西部大开发的影响[J].气候与环境研究,2002,7 (3):359-369.
- [10] 倪广恒,李新红,丛振涛,等.中国参考作物腾发量时空 变化特性分析[J].农业工程学报,2006,22(5):1-4.
- [11] 封志明,杨艳昭,丁晓强,等.甘肃地区参考作物蒸散量 时空变化研究[J]. 农业工程学报,2004,20(1):99-103.
- [12] 王素萍,张存杰,韩永翔.甘肃省不同气候区蒸发量变化特征及其影响因子研究[J].中国沙漠,2010,30(3): 675-680.
- [13] 吴绍洪,尹云鹤,郑度,等.近30年中国陆地表层干湿状况研究[J].中国科学(D辑),2005,35(3):276-283.
- [14] Yin Yunhe, Wu Shaohong, Zheng Du, et al. Radiation calibration of FAO56 Penman—Monteith model to estimate reference crop evapotranspiration in China [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(1):77 - 84.
- [15] 翟禄新.近50a 来中国西北气候变化及其水文响应分析[D].兰州:兰州大学,2008.

- [16] Li Zhi, Chen Yaning, Shen Yanjun, et al. Analysis of changing pan evaporation in the arid region of Northwest China
   [J]. Water Resources Research, 2013, 49 (4): 2205 2212.
- [17] 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.
- [18]马宁,王乃昂,王鹏龙,等.黑河流域参考蒸散量的时 空变化特征及影响因素的定量分析[J].自然资源学报, 2012,27(6):975-989.
- [19] 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[J].地理学报,2011,66(3):407-415.
- [20] IPCC. Climate Change 2007: the physical science basis, summary for policymakers[C] //. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press, 2007.
- [21] 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.
- [22] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength [J]. Nature, 1995, 377 (6551):687 – 688.
- [23] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years [J]. Science, 2002, 298 (5597):1410-1411.
- [24] Lawrimore J H, Peterson T C. Pan evaporation trends in dry and humid regions of the United States [J]. Journal of Hydrometeorology, 2000, 1(6):543 - 546.
- [25] 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(1):55 - 73.
- [26] 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.
- [27] Liu Xiaomang, Luo Yuzhou, Zhang Dan, et al. Recent changes in pan-evaporation dynamics in China [J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(13):13404 - 13407.
- [28] Wild M, Gilgen H, Roesch A, et al. From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at Earth's surface[J]. Science, 2005, 308:847 – 849.
- [29] McVicar T R, Roderick M L, Donohue R J, et al. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near – surface wind speeds: Implications for evaporation [J]. Journal of Hydrology, 2012, 416/417:182 – 205.