

利用 Hargreaves 公式计算青海湖流域 参考作物潜在腾发量的可行性分析

李岳坦^{1,2}, 李小雁¹, 李广泳¹

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本文根据刚察气象站 1958—2006 年的气象资料, 分别利用 Penman-Monteith 公式和 Hargreaves 公式计算了参考作物潜在腾发量, 对比分析表明: 利用 Penman-Monteith 公式计算的年参考作物潜在腾发量值显著大于 Hargreaves 公式计算的年参考作物潜在腾发量值, 在一年中两个公式计算的月参考作物潜在腾发量值差异显著, 风速、气压和降水是造成这种差异的原因。根据两种公式的计算结果, 提出了适用于青海湖流域参考作物潜在腾发量的计算方法。

关键词: 青海湖流域; Penman-Monteith 公式; Hargreaves 公式; 参考作物潜在腾发量

中图分类号: P463.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-9901(2015)01-0035-09

The feasibility of calculating reference crop evapotranspiration by Hargreaves equation over Qinghai Lake basin

LI Yue-tan^{1,2}, LI Xiao-yan¹, LI Guang-yong¹

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the meteorologic data from 1958 to 2006 collected from Gangcha meteorological station, reference crop evapotranspiration was calculated by Penman-Monteith equation and Hargreaves equation, respectively. Owing to wind speed, atmospheric pressure and precipitation, the annual value of the reference crop evapotranspiration calculated by Hargreaves equation is lower than that calculated by Penman-Monteith equation, also the monthly value of reference crop evapotranspiration calculated by the two equations are of great difference. According to the estimating reference crop evapotranspiration by the two equations, the calculation method of reference crop evapotranspiration that is suitable for Qinghai Lake basin was put forward.

Key words: Qinghai Lake basin; Penman-Monteith equation; Hargreaves equation; reference crop evapotranspiration

参考作物潜在腾发量 (ET_0) 是计算植物耗水量的一个重要参数, 也是水资源管理、灌溉工程设计以及规划和环境评价的一个重要依据。联合国粮农组织 (FAO) 给参考作物潜在腾发量规定了明确的定义, 即高度一致、生长旺盛、完全覆盖地面而不缺水的 8~15 cm 高的绿色草地的蒸发蒸

腾量 (Jensen et al, 1971)。目前计算参考作物潜在腾发量的经验公式多达数十种, 相对而言, 利用 Penman-Monteith 公式计算的参考作物潜在腾发量无论在干旱地区还是在湿润地区都与实测值非常接近 (Allen et al, 1998), 1990 年 3 月推荐使用 Penman-Monteith 公式计算参考作物潜在腾发量

收稿日期: 2014-08-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41130640, 41101553); “十一五”国家科技支撑计划项目 (2007BAC30B02)

通讯作者: 李岳坦, E-mail: liyuetan@sohu.com

(Smith, 1991)。1994年,FAO又对参考作物潜在腾发量重新进行了定义,即参考作物潜在腾发量为—假想的参考作物冠层的蒸发蒸腾速率,即假设作物高度为0.12 m,固定的叶片阻力为 $70\text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$,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发蒸腾量(Allen et al, 1994)。使用Penman-Monteith公式所必需的气象资料包括最高气温、最低气温、平均气温、相对湿度、风速、日照时数等,然而在世界范围内许多地区的气象站都难以全部提供这些完整的数据资料(Xu and Singh, 2002),这在很大程度上限制了Penman-Monteith公式的使用。因此,使用较少气象资料的计算方法在许多地方得到了广泛应用。

Hargreaves等人于1985年建立了Hargreaves公式,该公式只需日平均最高气温、日平均最低气温、日平均气温和外太空辐射就可以计算参考作物潜在腾发量。日平均最高气温、平均最低气温和日平均气温在绝大多数气象站点都有观测,外太空辐射资料可以根据当地纬度查阅FAO相关文献得到(Hargreaves and Samni, 1985)。因为Hargreaves公式所需数据资料容易获得,故而该公式自从提出以来,国外学者对该公式进行了大量的研究,并针对不同的气候条件提出了一些改进建议(Saeed, 1986; Jensen et al, 1990; Hargreaves, 1994; Amatya et al, 1995; Allen et al, 1998; Vanderlinden et al, 1999; Droogers and Allen, 2002; Xu and Singh, 2002)。

近年来,国内部分学者开始对Hargreaves公式在国内部分地区的适用性进行了研究和分析,杨永红和张展羽(2009)利用改进的Hargreaves公式计算了拉萨地区的参考作物蒸发蒸腾量;王声峰等(2008)通过利用Hargreaves公式对河南省新乡市4个典型水文年参考作物蒸散量的计算,验证了Hargreaves公式在半干旱区的适用性;王新华等(2006)利用Hargreaves公式计算了甘肃张掖的参照作物需水量,并通过与Penman-Monteith公式的计算结果进行比较从而验证了Hargreaves公式在西北干旱区的适用性;赵永等(2004)利用Hargreaves公式对陕西杨凌地区的参考作物蒸发蒸腾量进行了计算;范丽萍等(2007)通过对Hargreaves公式的计算结果与Priestley-Taylor的计算结果进行比较,验证了Hargreaves公式在西安

地区的适用性。但总体来说,国内对Hargreaves公式的应用和研究相对较少,Hargreaves公式在国内有待于进行进一步的推广和应用。

青海湖流域地处高寒半干旱区,具有独特的高原、水文、气候等环境条件,流域自然条件复杂,它是国际重要湿地和优先保护湿地生态系统。青海湖对于调节青海乃至我国西部和西北地区的气候,起着非常重要的作用,青海湖流域作为青藏高原的重要组成部分,是西部干旱区、东部季风区、青藏高原区三大区域的交汇地带,对全球气候变化的响应较为迅速。近年来,由于气候变化和人类活动的影响,青海湖流域出现了湖泊水位下降、植被退化等一系列生态环境问题。青海湖流域的生态环境变化已经引起了世界范围内的关注,对青海湖流域水资源管理、生态需水量以及水资源优化配置的研究已经成为亟需解决的问题。参考作物潜在腾发量是对这些问题进行研究过程中的一个重要的指标和参数,但是青海湖流域气象站点较少,仅有刚察站一个国家气象站点,地方站点仅有天峻,除此之外还有布哈河口、上涣仓、沙陀寺、黑马河和—郎剑等几个水文站进行着气象资料观测。总体来说,仅有刚察站的观测资料较全,其他站点仅有气温等常规观测资料,从而导致Penman-Monteith公式在该地区的适用性不强。本文利用刚察站1958—2006年的逐日气象资料,以Penman-Monteith公式为参照标准,验证了Hargreaves公式在青海湖流域的适用性,为青海湖流域潜在腾发量的计算提供一种准确并且能够广泛适用的方法。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

刚察站位于青海湖流域的沙柳河子流域,地处高寒半干旱区。地理坐标:100°08'E, 37°20'N, 海拔3302.4 m。刚察地区全年多风,秋、冬、春三季风较大。1958—2006年的年平均降水量为378 mm,降水主要集中在5—9月,占全年降水的90%左右,6、7、8三月占60%左右。

1.2 参考作物潜在腾发量的计算

没有实测的参考作物潜在腾发量资料时,国内外学者通常使用一个标准的方法去校正另一个经验公式。本文以联合国粮农组织推荐的Penman-Monteith公式为参照标准,检验Hargreaves公式在青海湖流域的适用性,并对其进行修正。

1) Penman-Monteith 公式

计算参考作物潜在腾发量的 Penman-Monteith 公式为 (Abdelhadi et al, 2001; David and Jennifer et al, 2005; Gong et al, 2006):

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

式中前者为辐射项, 后者为空气动力学项:

$$ET_{0rad}(PM) = \frac{0.408\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (2)$$

$$ET_{0aero}(PM) = \frac{\gamma \frac{900}{T_a + 273} U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (3)$$

式中, $ET_0(PM)$ 为利用 Penman-Monteith 公式计算的参考作物潜在腾发量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); Δ 为饱和水气压与温度曲线的斜率 ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); R 为参考作物冠层表面净辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); γ 为干湿表常数 ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); U_2 为 2 m 高度处的风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e_s 为饱和水气压 (kPa); e_a 为实际水气压 (kPa)。

2) Hargreaves 公式

$$ET_0(Har) = c_0 R_a (T_{\text{mean}} + 17.8) \sqrt{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}} \quad (4)$$

式中, $ET_0(Har)$ 为利用 Hargreaves 公式计算的参考作物潜在腾发量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); R_a 为大气边缘太阳辐射, 可根据时间与地理位置数据计算; c_0 为转换系数, 当 R_a 以 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 为单位时, $c_0 = 2.3 \times 10^{-3}$, 当 R_a 以 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 为单位时, $c_0 = 9.39 \times 10^{-4}$; T_{mean} 为日平均气温 ($^\circ\text{C}$); T_{max} 为日最高气温 ($^\circ\text{C}$); T_{min} 为日最低气温 ($^\circ\text{C}$)。

1.3 统计分析

本文使用误差分析和线性回归方法比较两种计算方法的计算结果。主要统计量有绝对偏差 (BE)、平均偏差 (MBE)、标准偏差 ($RMBE$)、相对偏差 (R), 计算公式为:

$$BE = ET_0(PM)_i - ET_0(Har)_i \quad (5)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_0(PM)_i - ET_0(Har)_i)}{n} \quad (6)$$

$$RMBE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ET_0(PM)_i - ET_0(Har)_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$R = \frac{ET_0(PM)_i - ET_0(Har)_i}{ET_0(Har)_i} \times 100\% \quad (8)$$

1.4 灰色关联分析

灰色关联分析方法是对系统所包含的相互联系、相互影响、相互制约的因素之间关联程度进行定量比较的一种研究方法, 其基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密, 曲线越接近, 相应序列之间的关联度就越大, 反之就越小。所研究的序列既可以是时间序列, 又可以是空间序列 (邓聚龙, 1992; 刘思峰等, 1999)。

设行序列:

$$X_i = (x_i(1), x_i(2) \cdots x_i(n)) \quad (9)$$

记折线 $(x_i(1) - x_i(1), x_i(2) - x_i(1) \cdots x_i(n) - x_i(1))$ 为 $X_i - X_i(1)$, 令:

$$s_i = \int_0^n [X_i - x_i(1)] dt \quad (10)$$

设序列 X_0 与 X_i 长度相同, s_0 、 s_i 如式 (8) 所示, 则称:

$$\varepsilon_{0i} = \frac{1 + |s_0| + |s_i|}{1 + |s_0| + |s_i| + |s_0 - s_i|} \quad (11)$$

为 X_0 与 X_i 的灰色绝对关联度, 简称绝对关联度。

设序列 X_0 与 X_i 长度相同, 且初值皆不等于零, X_0' 与 X_i' 分别为 X_0 与 X_i 的初值像, 则称 X_0' 与 X_i' 的绝对关联度为 X_0 与 X_i 的灰色相对关联度, 简称相对关联度, 记为 r_{0i} 。

设序列 X_0 与 X_i 长度相同, 且初值皆不等于零, ε_{0i} 和 r_{0i} 分别为 X_0 与 X_i 的灰色绝对关联度和灰色相对关联度, $\theta \in [0, 1]$, 则称:

$$\rho_{0i} = \theta \varepsilon_{0i} + (1 - \theta) r_{0i} \quad (12)$$

为 X_0 与 X_i 的灰色综合关联度, 简称综合关联度。

灰色关联度既体现了序列 X_0 与 X_i 的相似程度, 又可反映出 X_0 与 X_i 相对于起始点的变化速率的接近程度, 是较为全面的表征序列之间联系是否紧密的一个数量指标。

2 结果与分析

2.1 两种计算方法计算参考作物潜在腾发量的年值变化分析

图 1 是用两种方法计算的参考作物潜在腾发量的历年变化情况。从图 1 可以看出, 从 1958 年至 2006 年 Hargreaves 公式计算的结果明显小于 Penman-Monteith 公式的计算结果, 但是二者的年际变化趋势大致相同。利用 Penman-Monteith

公式计算的 1958—2006 年参考作物潜在腾发量为 789~1267 mm，多年平均值为 905 mm；利用 Hargreaves 公式计算的 1958—2006 年参考作物潜在腾发量为 649~766 mm，多年平均值为 714 mm。两种计算方法计算的参考作物潜在腾发量绝对偏差在 135~552 mm，平均偏差 191 mm，相对偏差在 18.5%~77.2%，平均相对偏差 26.8%。经过 t 双侧检验， $|t|=18.535>t_{0.05}=2.02$ ，说明两种方法的计算结果在 0.05 置信水平上具有显著差异。因此，在青海湖流域不能直接用 Hargreaves 公式计算的参考作物潜在腾发量年值替代 Penman-Monteith 公式计算的参考作物潜在腾发量年值。

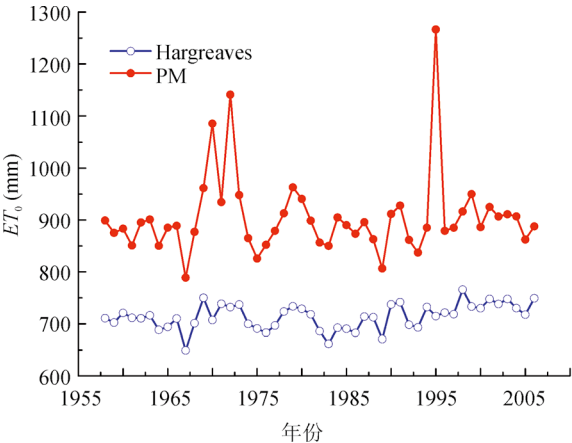


图 1 参考作物潜在腾发量历年变化比较
Fig.1 Comparison of annual variation of reference crop evapotranspiration

表 1 是两种方法计算的参考作物潜在腾发量年值系列的均值、极差、标准差和变异系数。由表 1 可以看出，Hargreaves 公式计算结果的极差、标准差和变异系数明显小于 Penman-Monteith 公式，说明 Hargreaves 公式计算参考作物潜在腾发量的年值变异性小，计算结果更为稳定。两种计算方法计算的参考作物潜在腾发量的标准差和变异系数都较小，说明年参考作物潜在腾发量的计算结果较为稳定。

表 1 Penman-Monteith 公式和 Hargreaves 公式计算的参考作物潜在腾发量年值系列统计特征
Table 1 Statistic characteristics of the annual reference crop evapotranspiration calculated by Penman-Monteith and Hargreaves equation

计算方法	平均值 (mm)	极差 (mm)	标准差 (mm)	变异 系数
Penman-Monteith	905	478	78	0.0866
Hargreaves	714	117	24	0.0342

2.2 两种计算方法计算参考作物潜在腾发量的月均值变化比较

图 2 是两种计算方法计算的参考作物潜在腾发量的逐月均值变化比较。由图 2 可以看出，两种计算方法计算的参考作物潜在腾发量在年内具有相同的变化趋势：从 1 月份开始逐月升高，在 7 月份达到最高值，然后又开始下降。在 7 月、8 月、9 月份，利用 Hargreaves 公式计算的结果与 Penman-Monteith 公式计算的结果较为接近，而在其他月份，利用 Hargreaves 公式计算的结果远远小于 Penman-Monteith 公式的计算结果，这说明在 7 月、8 月、9 月份 Hargreaves 公式在青海湖流域的适用性相对较强。

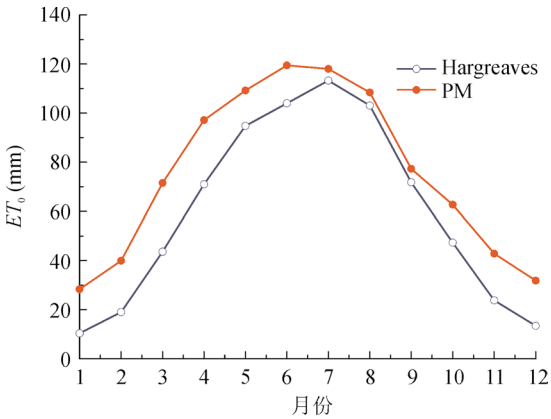


图 2 参考作物潜在腾发量逐月均值变化比较
Fig.2 Comparison of monthly variation of reference crop evapotranspiration

表 2 是两种计算方法计算月参考作物潜在腾发量序列差异的统计特征，从表 2 可以看出，1958—2006 年，两种方法计算的参考作物潜在腾发量在 7 月、8 月、9 三月的差异相对较小，平均偏差分别为 4.7 mm、5.3 mm 和 5.5 mm，标准偏差分别为 5.6 mm、5.5 mm 和 6.2 mm，平均相对偏差分别为 4.2%、5.2% 和 7.9%。而在寒冷季节两种计算方法得到的月平均参考作物潜在蒸散量的差异较大，这与王新华等（2006）在甘肃张掖地区的研究结果是一致的。尤其是在 1—4 月和 11 月、12 月，平均相对偏差高达 40% 以上，其中 11 月份高达 102.31%。对两种计算方法计算的参考作物潜在腾发量的 t 双侧检验结果表明，在一年中用两种方法计算的各月份结果的差异性都达到了极显著水平，这说明在青海湖流域利用两种计算方法计算的各月的参考作物潜在腾发量值不能相互替代，必须进行系数调整，否则将会产生较大的误差。

2.3 Hargreaves 公式系数的调整

由以上分析可知, Hargreaves 公式的计算结果与 Penman-Monteith 公式的计算结果差异较大, 为了便于在青海湖流域使用 Hargreaves 公式精确估算参考作物潜在腾发量, 本文利用上述两种方法的计算结果, 建立了逐月回归方程(见表 3), 由表 3 可知, Hargreaves 公式的计算结果与 Penman-Monteith 公式的计算结果具有较好的相关关系。将利用回归方程计算的结果与利用 Penman-Monteith 公式计算的结果进行比较, 发现年平均参考作物潜在腾发量的平均绝对偏差由原来的 192 mm 降为 18 mm, 平均相对偏差由原来的 58.59% 降为 3.85%, 说明二者非常接近。逐月比较发现 3 月、4 月、6

月和 10 月的平均绝对偏差较大, 偏差值分别只有 3.68 mm、4.95 mm、7.75 mm 和 1.56 mm, 其他各月的平均绝对偏差均低于 0.1 mm, 而在 3 月、4 月、6 月和 10 月平均每天的偏差仅有 0.047 mm、0.061 mm、0.069 mm 和 0.028 mm。最大月标准偏差发生在 6 月份, 仅为 1.88 mm, 该月的平均相对偏差为 $1.03\times 10^{-4}\%$, 趋近于 0, 说明两种方法的计算结果几乎相等。经过 t 检验发现, 所有月份的 $|t|<t_{0.05}=2.02$, 说明以 Hargreaves 公式计算的月参考作物潜在腾发量为自变量建立的回归公式计算结果与 Penman-Monteith 公式计算的月参考作物潜在腾发量没有显著差异, 所建立的回归方程可以代替 Penman-Monteith 公式在青海湖流域使用。

表 2 Penman-Monteith 公式和 Hargreaves 公式计算参考作物潜在腾发量月值统计特征
Table 2 Statistics characteristics of the monthly ET_0 calculated by Penman-Monteith and Hargreaves equation

	MBE (mm)	RMBE (mm)	R (%)	t
1 月	18.0	18.0	177.4	-78.81*
2 月	21.0	22.5	117.5	-74.95*
3 月	23.0	24.0	58.8	-66.04*
4 月	20.4	21.6	30.7	-49.38*
5 月	14.5	14.3	15.4	-22.11*
6 月	7.5	8.4	7.6	-12.02*
7 月	4.7	5.6	4.2	-9.58*
8 月	5.3	5.5	5.2	-15.08*
9 月	5.5	6.2	7.9	-14.71*
10 月	12.8	14.2	30.9	-19.89*
11 月	19.1	19.8	83.5	-102.31*
12 月	18.4	18.4	140.0	-74.02*

注: * 表示两种计算方法的 t 检验结果在 0.05 置信水平上差异显著。

表 3 Penman-Monteith 公式与 Hargreaves 公式计算的参考作物潜在腾发量之间的回归方程
Table 3 Regressions equations of ET_0 calculated by Penman-Monteith and Hargreaves methods

月份 (月)	回归方程	相关系数	t 检验
1	$ET_0(PM)=1.3745\times ET_0(Har)+0.4560$	0.878	0.005
2	$ET_0(PM)=1.2844\times ET_0(Har)+0.5372$	0.986	-0.008
3	$ET_0(PM)=0.9046\times ET_0(Har)+0.9169$	0.972	0.008
4	$ET_0(PM)=0.8646\times ET_0(Har)+1.0268$	0.974	-0.005
5	$ET_0(PM)=0.7004\times ET_0(Har)+1.3823$	0.720	-0.008
6	$ET_0(PM)=0.8747\times ET_0(Har)+0.6915$	0.720	-0.008
7	$ET_0(PM)=1.4880\times ET_0(Har)-1.6301$	0.878	-0.004
8	$ET_0(PM)=1.0919\times ET_0(Har)-0.1336$	0.979	0.006
9	$ET_0(PM)=0.8880\times ET_0(Har)+0.4528$	0.970	0.011
10	$ET_0(PM)=0.5880\times ET_0(Har)+1.0743$	0.936	0.007
11	$ET_0(PM)=0.9871\times ET_0(Har)+0.6455$	0.982	0.009
12	$ET_0(PM)=1.3549\times ET_0(Har)+0.4409$	0.931	-0.009

此外, 本文根据高国栋等 (1978)、曾群柱和谢应钦 (1986) 等的研究结果, 对以 Hargreaves 公式计算的月参考作物潜在腾发量为自变量的回归公式计算结果进行了进一步验证 (表 4), 通过对比发现利用回归方程计算的结果年值与曾群柱、高国栋等人的研究结果基本一致, 月值除 5 月、10 月和 12 月稍大外, 其余各月的结果与他们的研究结果也基本一致, 总的来说 5 月、10 月和 12 月计算结果的偏差也不是很大, 平均每日的偏差不到 1 mm, 进一步证明以 Hargreaves 公式计算的参考作物潜在腾发量为自变量建立的回归公式可以代替 Penman-Monteith 公式在青海湖流域使用。

2.4 Penman-Monteith 公式与 Hargreaves 公式计算结果差异的原因分析

根据 Allen (1995) 和 Droogers and Allen (2002) 的研究结果, Hargreaves 公式的计算精度受风速、降水和大气压的影响。表 5 是利用 Penman-Monteith 公式和 Hargreaves 公式计算的参考作物潜在腾发量年值的绝对偏差、年平均风速、年平均气压和年平均降水量。本文根据表 5 计算了绝对偏差与风速、气压和降水量的相关系数, 并对绝对偏差与风速、气压和降水量的灰色关联度进行了排序 (见表 6)。由表 6 可知, 在青海湖流域风速、气压和降水量对 Hargreaves 公式计算精度影响大小的排序是风速 > 气压 > 降水量, 绝对偏差与风速和气压的关系呈正相关, 与降水的关系呈负相

关, 并且风速对计算结果的影响较为显著。在青海湖流域, 秋、冬、春三季的风速较大, 因而在这三个季节利用 Hargreaves 公式的计算结果相对于 Penman-Monteith 公式的计算结果明显偏小, 而在夏季, 由于风速相对较小, 两种方法计算结果的绝对偏差也较小, 此外, 青海湖流域的降水主要集中在夏季 (王艳姣等, 2003), 也是造成夏季绝对偏差较小的原因之一。

表 4 对以 Hargreaves 公式计算的月参考作物潜在腾发量为自变量建立的回归公式计算结果验证
Table 4 Further comparison with the results of other experts

时间段	比较值 (mm)	计算值 (mm)
1 月	20~30	28
2 月	30~40	39
3 月	50~70	68
4 月	80~100	92
5 月	80~100	109
6 月	100~120	112
7 月	100~120	118
8 月	100~120	108
9 月	60~100	77
10 月	40~60	61
11 月	30~50	42
12 月	20~30	31
年	800~900	889

表 5 利用 Penman-Monteith 公式和 Hargreaves 公式计算的参考作物潜在腾发量年值的绝对偏差、年平均风速、年平均气压和年平均降水量
Table 5 Difference of the annual ET_0 calculated by Penman-Monteith and Hargreaves equation and annual wind speed, atmospheric pressure and annual precipitation

年份 (年)	BE (mm)	风速 ($m \cdot s^{-1}$)	气压 (hPa)	降水 (mm)
1958	188.3	3.8	680.6	415.1
1959	172.7	3.4	680.1	356.7
1960	162.4	3.4	680.5	322.5
1961	139.2	3.2	680.2	347.1
1962	184.6	3.4	680.6	311.9
1963	184.8	3.6	680.9	407.0
1964	161.8	3.4	680.1	407.3
1965	191.0	3.7	680.9	361.0
1966	178.8	3.8	680.3	328.6
1967	139.6	3.5	680.2	499.5
1968	175.9	3.9	680.3	345.4
1969	211.3	4.3	680.1	393.3

(续表 5)

年份 (年)	BE (mm)	风速 (m·s ⁻¹)	气压 (hPa)	降水 (mm)
1970	378.4	4.0	680.5	369.3
1971	196.0	4.1	680.7	425.0
1972	408.6	3.8	680.3	408.3
1973	210.9	4.1	680.8	290.7
1974	165.1	3.9	680.1	393.0
1975	134.6	3.6	680.4	442.8
1976	169.1	3.2	680.0	357.8
1977	182.3	3.7	680.7	329.3
1978	189.1	3.9	680.8	303.3
1979	229.4	4.0	680.8	375.4
1980	211.6	3.9	680.5	325.7
1981	180.3	3.7	680.2	407.2
1982	170.5	3.6	680.3	365.9
1983	188.2	3.7	680.5	384.8
1984	212.2	3.9	679.3	350.7
1985	199.3	3.9	679.8	474.9
1986	190.5	3.5	680.4	384.8
1987	182.0	3.6	680.9	418.1
1988	150.3	3.5	680.4	515.8
1989	135.8	3.1	680.3	458.8
1990	174.3	3.4	680.8	260.1
1991	186.0	3.9	680.3	300.8
1992	163.5	3.6	680.5	308.9
1993	144.0	3.3	681.0	397.1
1994	152.7	3.4	681.3	371.1
1995	551.7	3.7	681.2	349.9
1996	157.4	3.5	680.6	409.7
1997	166.4	3.2	681.4	363.6
1998	150.2	3.3	681.6	380.1
1999	216.6	3.2	681.1	408.5
2000	156.2	3.1	680.3	419.6
2001	177.3	3.4	680.9	297.5
2002	168.4	3.3	681.1	372.2
2003	163.3	3.3	680.3	344.9
2004	176.8	3.3	680.8	427.9
2005	144.5	3.1	680.3	427.7
2006	138.4	3.1	680.8	415.5

表 6 绝对偏差与风速、气压和降水的 Pearson 相关系数和灰色关联度排序
Table 6 Pearson correlation coefficient and Grey integrated incidence among BE, wind wind speed, atmospheric pressure and annual precipitation over Qinghai lake basin

	风速	气压	降水
Pearson 相关系数	0.382*	0.103	-0.128
灰色关联度	0.6769	0.4402	0.5660

注: * 表示在 0.01 置信水平上达到极显著。

3 结论

根据刚察气象站 1958—2006 年的气象资料, 分别利用 Penman-Monteith 公式和 Hargreaves 公式计算了参考作物潜在腾发量, 主要研究结论如下:

(1) 从年值序列看, Penman-Monteith 公式和 Hargreaves 公式的计算结果在青海湖流域具有显著差异, Penman-Monteith 公式的计算结果显著大于 Hargreaves 公式的计算结果, 绝对偏差在 135~552 mm, 平均偏差 191 mm, 相对偏差在 18.5%~77.2%, 平均相对偏差 26.8%。

(2) 偏差受风速、气压和降水的影响, 其中受风速的影响最为显著。

(3) 从月值序列看, 利用 Penman-Monteith 公式和 Hargreaves 公式计算的月值差异显著, 尤其在寒冷季节, 差异更为明显。

(4) 根据 Penman-Monteith 公式和 Hargreaves 公式计算的月参考作物潜在腾发量的差异规律, 利用 Hargreaves 公式计算结果作为自变量建立了逐月回归公式, 经比较发现, 回归公式的计算结果非常接近 Penman-Monteith 公式的计算结果。

参考文献

- 邓聚龙. 1992. 灰色系统理论教程 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 33–78. [Deng J L. 1992. Course of Grey System Theory [M]. Wuhan: Press of Huazhong University of Science & Technology, 33–78.]
- 范丽萍, 贾忠华, 罗 纨. 2007. 西安地区 Priestley-Taylor 和 Hargreaves 方法应用比较 [J]. 水资源与水土保持学报, 18(2): 54–61. [Fan L P, Jia Z H, Luo W. 2007. Comparison with the application of Priestley-Taylor and Hargreaves methods in Xi'an [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 18(2): 54–61.]
- 高国栋, 陆渝蓉, 李怀瑾. 1978. 我国最大可能蒸发量的计算和分布 [J]. 地理学报, 33(12): 102–111. [Gao G D, Lu Y R, Li H J. 1978. The calculation and distribution of the maximum possible evaporation in China [J]. *Acta geographica sinica*, 33(12): 102–111.]
- 刘思峰, 韩天榜, 党耀国. 1999. 灰色系统理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 40–70. [Liu S F, Han T B, Dang Y G. 1999. Grey system theory and its application [M]. Beijing: Science Press, 40–70.]
- 王声峰, 段爱旺, 张展羽. 2008. 半干旱地区不同水文年 Hargreaves 和 P-M 公式对比分析 [J]. 农业工程学报, 24(7): 29–33. [Wang S F, Duan A W, Zhang Z Y. 2008. Comparison and analysis of Hargreaves equation and Penman-Monteith equation during the different hydrological years in the semi-arid region [J]. *Transactions of the CSAE*, 24(7): 29–33.]
- 王新华, 郭美华, 徐中民. 2006. 分别利用 Hargreaves 和 PM 计算西北干旱区 ET_0 的比较 [J]. 农业工程学报, 22(10): 21–25. [Wang X H, Guo M H, Xu Z M. 2006. Comparison of estimating ET_0 in arid-area of Northwest China by Hargreaves equation and Penman-Monteith equation [J]. *Transactions of the CSAE*, 22(10): 21–25.]
- 王艳姣, 周晓兰, 倪绍祥, 等. 2003. 近 40 a 来青海湖地区的气候变化分析 [J]. 南京气象学院学报, 26(2): 228–235. [Wang Y J, Zhou X L, Ni S X, et al. 2003. Analysis on climate change in the region of Qinghai Lake in the last 40 years [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 26(2): 228–235.]
- 杨永红, 张展羽. 2009. 改进 Hargreaves 方法计算拉萨参考作物蒸发蒸腾量 [J]. 水科学进展, 20(5): 614–618. [Yang Y H, Zhang Z Y. 2009. 改进 Hargreaves 方法计算拉萨参考作物蒸发蒸腾量 [J]. *Advances in Water Science*, 20(5): 614–618.]
- 曾群柱, 谢应钦. 1986. 青藏高原陆面可能蒸发量和干湿状况的研究 [J]. 冰川冻土, 8(2): 131–142. [Zeng Q Z, Xie Y Q. 1986. A study on land evaporability and dry-wet state of Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 8(2): 131–142.]
- 赵 永, 蔡焕杰, 王 健, 等. 2004. Hargreaves 计算参考作物蒸发蒸腾量公式经验系数的确定 [J]. 干旱地区农业研究, 22(4): 44–47. [Zhao Y, Cai H J, Wang J, et al. 2004. Determination of the empirical coefficient of Hargreaves formula in computing crop evapotranspiration [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 22(4): 44–47.]
- Abdelhadi A W, Hata T, Tanakamaru H, et al. 2001. Estimation of crop water requirements in arid region using Penman-Monteith equation with derived crop coefficients: a case study on Acala cotton in Sudan Gezira irrigated scheme [J]. *Agricultural Water Management*, 45(2): 203–214.
- Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. 1998. Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements—FAO irrigation and drainage paper 56 [M]. Rome: FAO, 1–300.

- Allen R G. 1995. Evaluation of procedure for estimating mean monthly solar radiation from air temperature [M]. Rome: FAO Report.
- Allen R O, Smith M, Pereira L S. 1994. An update for the definition of reference evapotranspiration [J]. *ICID Bulletin*, 43(2): 1–34.
- Amatya D M, Skaggs R W, Gregory J D. 1995. Comparison of methods for estimating REF-ET [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 121(6): 427–435.
- David M S, Jennifer M J. 2005. Utility of Penman–Monteith, Priestley–Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration [J]. *Journal of Hydrology*, 308(1–4): 81–104.
- Droogers P, Allen R G. 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions [J]. *Irrigation Drainage System*, 16(1): 33–45.
- Gong L B, Xu C Y, Chen D L. 2006. Sensitivity of the Penman–Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin [J]. *Journal of Hydrology*, 329(3–4): 620–629.
- Hargreaves G H. 1994. Defining and using reference evapotranspiration [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(6): 1132–1139.
- Hargreaves G H, Samni Z A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2): 96–99.
- Jensen M E, Burman R D, Allen R G. 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice [M]. New York: American Society of Civil Engineers, 70.
- Jensen M E, Wright J L, Pratt B J. 1971. Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data [J]. *Transactions of the ASAE*, 14(5): 954–959.
- Saeed, M. 1986. The estimation of evapotranspiration by some equations under hot and arid conditions [J]. *Transactions of the ASAE*, 29(2): 434–438.
- Smith M. 1991. Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. Land and Water Development Division [M]. Rome: FAO, 54.
- Vanderlinden K, Romero A, Reina D, et al. 1999. Evaluación del método de Hargreaves en 16 estaciones completas de Andalucía [M]// Proceedings of the XVII Congreso Nacional de Riegos. Spain: Murcia, 92–99.
- Xu C Y, Singh V P. 2002. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland [J]. *Water resource management*, 16(3): 197–219.