

Priestley-Taylor 和 Hargreaves 公式在高矮两种参考作物上的适应性与率定

吕玉平^{1,2}, 徐俊增^{1,2}, 李 斌³, 孙 璐², 杨士红^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 扬州市勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225007)

摘要:以 ASCE 标准 Penman-Montieth 公式为基准,在不同气候区分别对 Priestley-Taylor 和 Hargreaves 这两种常用的参考作物蒸发蒸腾量 EF_{ref} 计算公式在高矮两种参考作物上进行适应性分析、地区率定以及率定公式验证。结果表明:以矮型参考作物为参考面时, Priestley-Taylor 和 Hargreaves 公式分别在湿润区和干旱区具有较好的适应性,但对于 EF_{ref} 的估算仍具有较大的误差,两公式均不能直接应用于高型参考作物;经地区率定后两公式在干旱、半干旱半湿润、湿润 3 个气候区高型参考作物上的计算精度显著改善,但仍低于在矮型参考作物上的精度, Priestley-Taylor 公式在气候区间的差异性不明显, Hargreaves 公式在干旱区有更好的适应性。

关键词:参考作物蒸发蒸腾量; Penman-Montieth 公式; Priestley-Taylor 公式; Hargreaves 公式; 高型参考作物; 矮型参考作物; 地区; 地区适应性; 地区率定

中图分类号: S161.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2015)06-0047-05

Calibration of Priestley-Taylor and Hargreaves and its applicability for both alfalfa and grass reference crops // LÜ Yuping^{1,2}, XU Junzeng^{1,2}, LI Bin³, SUN Lu², YANG Shihong^{1,2} (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydro-power Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Yangzhou Surrey Design Research Institute Co., Ltd., Yangzhou 225007, China)

Abstract: With ASCE standardized reference Penman-Montieth as benchmark reference evapotranspiration equation, two commonly used ET_{ref} estimating methods, namely Priestley-Taylor and Hargreaves, were evaluated, local calibrated and validated in different climate regions in China. The results showed that Priestley-Taylor and Hargreaves performed better for grass reference crop in humid and arid regions, respectively. But the error in ET_{ref} estimating is unneglectable, and its can not be applied directly to alfalfa reference crop without local calibration. The local calibrated Priestley-Taylor and Hargreaves performed better in different climate regions, and the accuracy was significantly improved for alfalfa reference crop. Both methods performed better on grass than alfalfa reference crop. Performance of Priestley-Taylor showed no significant difference in different climate region, and Hargreaves had higher precision in arid region.

Key words: reference evapotranspiration; ASCE standardized reference Penman-Montieth; Priestley-Taylor; Hargreaves; alfalfa reference crop; grass reference crop; local applicability; local calibration

在农业灌溉用水日趋紧张背景下,高效合理地管理农业用水变得至关重要。作物需水量的准确计算是农业灌溉用水管理的核心,目前除试验测定外,最常用的是通过计算参考作物蒸发蒸腾量 EF_{ref} 来计算作物需水量。 EF_{ref} 的计算方法众多,其中 Penman-Montieth 公式物理学基础严密、计算精度较高,是联

合国粮农组织 (FAO) 推荐的标准计算方法^[1], 但该方法需要的气象数据资料较多, 在很多地方应用时往往受到数据不全的困扰; 而 Priestley-Taylor 公式 (以下简称 PT 公式) 仅需温度、Hargreaves 公式 (以下简称 HAR 公式) 仅需要温度和冠层辐射, 且计算精度较高, 在各地区得到广泛应用^[2-7]。

关于参考作物的定义存在高型和矮型两种^[8-10],高型和矮型参考作物分别被定义为一种高度一致、生长旺盛、完全覆盖、充分供水的假想作物,对应的高度为 0.50 m 和 0.12 m、冠层阻抗为 45 s/m 和 70 s/m、反射率为 0.23,分别以苜蓿和开阔草坪为近似作物^[11]。不同 EF_{ref} 计算方法一般针对高型或矮型一种参考作物提出,但国内在开展各种方法的适用性评价时较少考虑这一条件限制。美国土木工程师协会(ASCE)注意到这一问题,通过 Penman-Montieth 公式针对高型和矮型两种参考作物分别给予参数赋值,提出了 ASCE 标准 Penman-Montieth 公式(以下简称 ASCE-PM 公式),通过不同的参数赋值可使同一套公式能够用于高型和矮型两种不同的参考作物^[11];对于被广泛应用的 PT 和 HAR 公式也非常有必要开展这一工作。

本文基于我国干旱、半干旱半湿润、湿润 3 种不同气候类型区的代表性气象站的数据资料,以 ASCE-PM 公式计算的 EF_{ref} 为基准,对 PT 和 HAR 公式进行不同参考面的地区率定及验证,以全面认识并提高公式在不同气候区、不同参考作物上的计算精度。

1 数据与方法

1.1 数据来源

历史观测气象数据(2000—2009 年)来自于中国气象数据共享服务系统(<http://cdc.cma.gov.cn>),数据包括最高气温 T_{max} 、最低气温 T_{min} 、平均气温 T 、气压 P 、空气湿度 R_H 、太阳辐射 R_s 和 2 m 高处的风速 U_2 等。所选站点的基本信息见表 1,其中 2000—2006 年数据用于参数率定,2007—2009 年数据用于验证。

表 1 所选站点基本信息

气候区	站 点	纬度 (北纬)/(°)	经度 (东经)/(°)	海拔/m	多年平均 降雨量/ mm	多年 平均 气温/℃
干 旱	阿克苏	41.17	80.23	110.63	78.84	11.57
	酒 泉	39.76	98.48	1477.20	87.71	8.24
	格尔木	36.40	94.90	2807.60	42.25	6.43
半干旱 半湿润	太 原	37.78	112.55	778.30	425.62	11.04
	乐 亭	39.43	118.88	10.50	519.49	11.85
	延 安	36.60	109.50	958.50	504.66	11.04
湿 润	桂 林	25.32	110.30	164.40	1872.97	19.53
	昆 明	25.02	102.68	189.40	938.61	16.08
	合 肥	31.87	117.23	27.90	994.32	16.79

1.2 计算与率定方法

计算 EF_{ref} 的 ASCE-PM 公式、PT 公式、HAR 公式分别为

$$ET_{ASCE-PM} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{\gamma C_n}{T + 273}U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d U_2)}$$

(1)

$$ET_{PT} = \frac{1}{\lambda} \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G)$$

(2)

$$ET_{HAR} = \frac{\beta(T + 17.8)(T_{max} - T_{min})^\eta R_a}{\lambda}$$

(3)

式中: γ 为湿度计常数, $kPa/^\circ C$; Δ 为饱和水汽压曲线斜率, $kPa/^\circ C$; e_s 为饱和水汽压, kPa ; e_a 为实际水汽压, kPa ; R_n 为净辐射, $MJ/(m^2 \cdot d)$; R_a 为太阳天顶辐射, $MJ/(m^2 \cdot d)$; G 为土壤热通量, $MJ/(m^2 \cdot d)$; U_2 为 2 m 高处风速, m/s ; λ 为水的气化潜热, MJ/kg ; T 为平均气温, $^\circ C$; T_{max} 、 T_{min} 为日最高、最低气温, $^\circ C$; C_n 、 C_d 、 α 、 β 、 η 均为计算参数。ASCE-PM 公式中对高型和矮型参考作物的 C_n 、 C_d 给出的取值分别为 900、0.34 和 1600、0.38; α 、 β 、 η 的取值分别为 1.26、0.0023 和 0.5。基于 2000—2006 年的数据,以 ASCE-PM 在两种参考作物下计算的 EF_{ref} 结果为标准,评价 PT 公式和 HAR 公式,并基于最小二乘法原理分别针对高型和矮型参考作物对 PT 和 HAR 公式中的计算参数进行地区率定;进而基于 2007—2009 年数据开展验证工作。鉴于 HAR 中当平均温度低于 $-17.8^\circ C$ 时,计算出的 EF_{ref} 为负值,在本文中 EF_{ref} 为负值时的结果不参与统计。

1.3 统计参数

采用均方根误差 δ 和加权决定系数 wR^2 来评价各计算公式计算结果与 ASCE-PM 公式计算结果之间的误差以及一致性情况。计算公式如下:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n - 1}}$$

(4)

$$wR^2 = w \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}}$$

(5)

式中: P_i 为 ASCE-PM 公式计算的 EF_{ref} ; O_i 为 PT 或 HAR 公式计算的 EF_{ref} ; $\bar{P}$ 、 $\bar{O}$ 分别为 P_i 和 O_i 的平均值; n 为样本数。在 wR^2 计算中,权重 w 根据比较值和目标值之间回归直线的斜率 k 确定,若 $k \leq 1$, $w = k$; 若 $k > 1$, $w = 1/k$ ^[12]。通常计算结果的 δ 越小, wR^2 越大, EF_{ref} 的计算结果表现越好。

2 结果与讨论

2.1 率定前计算结果比较

PT 和 HAR 公式计算的 EF_{ref} (高、矮型参考作物的 EF_{ref} 分别记为 $EF_{ref,t}$ 和 $EF_{ref,s}$) 结果统计参数如表 2 所示。与 ASCE-PM 公式矮型参考作物计算结果相比,PT 公式计算结果在干旱、半干旱半湿润、湿润 3 个气候区的估算误差分别为 $-22.9\% \sim -16.2\%$ 、

表2 PT和HAR公式率定前的统计参数

气候区	地 区	PT 公式						HAR 公式					
		矮型参考作物			高型参考作物			矮型参考作物			高型参考作物		
		δ	k	wR^2	δ	k	wR^2	δ	k	wR^2	δ	k	wR^2
干 旱	阿克苏	0.87	0.821	0.712	1.95	0.606	0.459	0.88	1.122	0.773	1.26	0.834	0.648
	酒 泉	1.04	0.771	0.670	2.34	0.556	0.431	0.71	0.980	0.864	1.68	0.711	0.573
	格尔木	0.78	0.838	0.748	1.89	0.624	0.494	0.68	0.917	0.801	1.65	0.686	0.541
	均 值	0.90	0.810	0.710	2.06	0.595	0.461	0.75	1.007	0.813	1.53	0.744	0.587
半干旱 半湿润	太 原	0.95	0.790	0.611	2.01	0.565	0.338	1.12	1.152	0.629	1.47	0.831	0.462
	乐 亭	0.74	0.873	0.736	1.61	0.645	0.458	0.84	1.064	0.725	1.29	0.793	0.510
	延 安	0.62	0.876	0.777	1.52	0.663	0.518	0.96	1.221	0.706	1.76	0.693	0.405
	均 值	0.77	0.846	0.708	1.71	0.625	0.438	0.97	1.145	0.687	1.51	0.772	0.459
湿 润	桂 林	0.70	0.928	0.759	1.47	0.707	0.440	1.13	1.137	0.465	1.40	0.871	0.232
	昆 明	0.56	0.935	0.753	1.33	0.722	0.430	0.84	1.078	0.348	1.18	0.834	0.045
	合 肥	0.65	0.881	0.782	1.57	0.658	0.520	0.96	1.060	0.611	1.35	0.797	0.436
	均 值	0.64	0.915	0.765	1.45	0.696	0.464	0.98	1.092	0.475	1.31	0.834	0.238

-21.0% ~ -12.4% 和 -11.9% ~ -6.5% (负值为低估,正值为高估,下同)。PT 公式在湿润区可取得较好的估计结果,且在各气候区 $EF_{ref,s}$ 的估计值均偏低,这主要是由于公式中忽略了空气动力学项,且该公式是在不计平流影响的湿润区提出的^[13]。HAR 公式的 $EF_{ref,s}$ 计算结果在干旱、半干旱半湿润、湿润 3 个气候区的估算误差分别为 -2.0% ~ 12.2%、-1.5% ~ 15.2% 和 6.0% ~ 13.7%,在湿润地区高估而在非常干旱以及有风的地区低估。HAR 公式是依据美国西北部较为干旱地区的资料建立的,这决定了该公式在干旱地区的适应性较强^[14]。

由于 PT 与 HAR 公式均是以矮型参考作物为参考面提出的,直接运用于高型参考作物时适应性较差。在干旱、半干旱半湿润、湿润 3 个气候区,PT 和 HAR 公式分别平均低估 $EF_{ref,t}$ 40.5%、37.5%、30.4% 和 25.6%、22.8%、16.6%。可见如果将以矮型参考作物为参考面提出的 PT 与 HAR 两公式直接应用于高型参考作物,将会大幅度低估 $EF_{ref,t}$ 。原因在于参考作物(以苜蓿为近似作物)假设的阻

抗是 45 s/m,而矮型参考作物(以草坪为近似作物)假设的阻抗是 70 s/m,高型参考作物的计算结果要明显高于矮型参考作物的计算结果^[11]。阻抗定义的差异决定了公式不能也不应该在两种参考作物之间混用,以 FAO56 矮型参考作物作为标准评价高型参考作物或者以高型参考作物为标准评价矮型参考作物都是不合适的,因此需要按照 ASCE-PM 的思路通过对公式参数赋值,将 PT 与 HAR 公式推广到同时适用高矮两种参考作物。

2.2 计算公式的地区率定结果

为了提高 PT 和 HAR 公式的计算精度并扩展其应用范围,分别针对矮型和高型参考作物,以 ASCE-PM 相应结果为标准,对 PT 和 HAR 公式里的参数 α 、 β 、 η 进行率定,结果如表 3 所示。由于原 PT 公式低估 $EF_{ref,s}$,经率定后的 α 参数在各气候区站点均大于原公式给出的建议值 1.26,在干旱、半干旱半湿润、湿润 3 个气候区以矮型参考作物为参考面时的率定值为 1.45 ~ 1.56、1.36 ~ 1.47 和 1.28 ~ 1.38,其中在酒泉的取值最大,达到了 1.56,比原来

表3 PT和HAR公式经地区率定后的统计参数

		PT 公式								HAR 公式									
气候区	地区	矮型参考作物				高型参考作物				矮型参考作物					高型参考作物				
		δ	k	wR^2	α	δ	k	wR^2	α	δ	k	wR^2	β	η	δ	k	wR^2	β	η
干 旱	阿克苏	0.75	0.951	0.825	1.46	1.34	0.910	0.689	1.89	0.66	0.961	0.837	0.0036	0.27	1.12	0.937	0.733	0.0067	0.14
	酒 泉	0.79	0.952	0.828	1.56	1.42	0.918	0.711	2.08	0.70	0.962	0.848	0.0026	0.45	1.22	0.939	0.755	0.0038	0.42
	格尔木	0.63	0.967	0.864	1.45	1.17	0.936	0.741	1.89	0.62	0.969	0.857	0.0048	0.24	1.06	0.948	0.763	0.0075	0.17
	均 值	0.72	0.957	0.839	1.49	1.31	0.921	0.714	1.95	0.66	0.964	0.847	0.0037	0.32	1.13	0.941	0.750	0.0060	0.24
半干旱 半湿润	太 原	0.85	0.921	0.713	1.47	1.53	0.860	0.514	1.92	0.84	0.922	0.682	0.0014	0.62	1.44	0.876	0.514	0.0015	0.67
	乐 亭	0.71	0.941	0.794	1.36	1.27	0.889	0.631	1.74	0.74	0.936	0.730	0.0016	0.60	1.21	0.900	0.596	0.0019	0.65
	延 安	0.61	0.960	0.852	1.38	1.10	0.921	0.719	1.75	0.92	0.909	0.665	0.0017	0.59	1.57	0.864	0.517	0.0021	0.63
	均 值	0.72	0.940	0.786	1.40	1.30	0.890	0.621	1.80	0.83	0.922	0.692	0.0015	0.60	1.41	0.880	0.542	0.0018	0.65
湿 润	桂 林	0.70	0.946	0.774	1.28	1.28	0.888	0.552	1.58	0.87	0.916	0.547	0.0014	0.64	1.39	0.866	0.290	0.0019	0.60
	昆 明	0.55	0.969	0.780	1.31	1.00	0.935	0.558	1.63	0.64	0.957	0.605	0.0009	0.86	1.00	0.935	0.467	0.0009	0.97
	合 肥	0.60	0.962	0.854	1.38	1.08	0.929	0.734	1.78	0.84	0.926	0.640	0.0014	0.68	1.25	0.905	0.548	0.0017	0.70
	均 值	0.61	0.959	0.803	1.32	1.12	0.917	0.615	1.66	0.78	0.933	0.597	0.0012	0.73	1.21	0.902	0.435	0.0015	0.76

取值高出了 23.5%。经地区率定后 $EF_{ref,s}$ 在干旱、半干旱半湿润、湿润地区的 δ 平均值相对于率定前减少了 0.17、0.05 和 0.01; wR^2 平均值增加了 0.128、0.078 和 0.038; $EF_{ref,s}$ 平均估算误差从 -19.0%、-15.4% 和 -8.5% 降低到 -4.3%、-6.0%、-4.1%。对于高型参考作物, α 参数在 3 个气候区的率定值为 1.89~2.08、1.74~1.92 和 1.58~1.78, 均大于矮型参考作物地区率定时的值。这是由于高矮作物两种参考面的阻抗定义标准不同造成高型参考作物的蒸发蒸腾量较大。以高型参考作物为参考面, 经地区率定后在干旱、半干旱半湿润、湿润地区的 $EF_{ref,t}$ 估算误差为 -9.0%~-6.4%、-14.1%~-7.9% 和 -11.2%~-6.5%, 相对于地区率定前在高型参考作物上适应性明显增强。在干旱、半干旱半湿润、湿润 3 个气候区以矮型参考作物为参考面的 δ 平均值比高型参考作物低 0.584、0.578 和 0.504; wR^2 平均值比高型参考作物高 0.125、0.165 和 0.188; $EF_{ref,s}$ 的平均估算误差比高型参考作物低 3.6%、5.0% 和 4.2%。经地区率定后的 PT 公式对 $EF_{ref,t}$ 的估算精度劣于 $EF_{ref,s}$, 在各地地区仍均低估 EF_{ref} , 但适应性比地区率定前明显提高, 气候间的差异性也显著减小, 在 3 个气候区高矮型参考作物均有较好的计算结果。

HAR 公式在不同气候区经地区率定后, 对于矮型参考作物, 在干旱、半干旱半湿润、湿润地区 3 个气候区的 β 、 η 率定值分别为 0.002 6~0.004 8、0.001 4~0.001 7、0.000 9~0.001 4 和 0.24~0.45、0.59~0.62、0.64~0.86。 δ 平均值比率定前减小了 0.10、0.14、0.19; wR^2 平均值增大了 0.034、0.006、0.123; $EF_{ref,s}$ 估算误差为 -3.9%~-3.1%、-9.1%~-6.5% 和 -8.4%~-4.3%, 在各地地区对 $EF_{ref,s}$ 的估计值均偏低, 这改变了率定前在湿润地区

高估而在非常干旱以及有风的地区低估 $EF_{ref,s}$ 这一规律, 且与率定前相比在 3 个气候区的精度平均提高 3.9%、6.8% 和 2.5%。经地区率定后的 $EF_{ref,s}$ 估算精度提高, 地区适应性增强。对于高型参考作物, 在 3 个气候区的 β 、 η 率定值为 0.003 8~0.007 5、0.001 5~0.002 1、0.000 9~0.001 9 和 0.14~0.42、0.63~0.67、0.60~0.97。 $EF_{ref,t}$ 估算误差为 -6.3%~-5.2%、-13.6%~-10.0% 和 -13.4%~-6.5%, 在高型参考作物参考面上有一定的适应性。经地区率定后的 HAR 公式在干旱、半干旱半湿润、湿润 3 种不同气候区的两种不同参考面的统计参数表明, 矮型参考作物的 δ 平均值比高型参考作物低 0.473、0.572 和 0.432, wR^2 平均值比高型参考作物高 0.097、0.150 和 0.163, 精度平均值比高型参考作物高 2.3%、4.3% 和 3.1%, 经地区率定后在矮型参考作物上的适应性优于在高型参考作物上的适应性, 且气候区的适应性与率定前保持一致, 在干旱区的适应性最好。

2.3 率定公式的验证

用所选气候区各地区 2007—2009 年的气象数据对经地区率定后的 PT 和 HAR 公式进行验证, 结果见表 4 和表 5。两率定公式在各气候区两种参考面上均有较好的适应性; 对于适用于湿润地区以矮型参考作物为参考面的 PT 公式经地区率定后, 在矮型参考作物上的适应性仍优于高型参考作物, 两种参考面气候间没有明显的差异性; 对于适用于干旱地区以矮型参考作物为参考面的 HAR 公式经地区率定后, 在矮型参考作物上的适应性仍优于高型参考作物, 两种参考面均在干旱区有更好的适用性。

3 结 论

a. 对于以矮型参考作物为参考面的PT和HAR

表 4 PT 率定公式验证统计参数

气候区	地 区	矮型参考作物						高型参考作物					
		率定前			率定后			率定前			率定后		
		δ	k	wR^2	δ	k	wR^2	δ	k	wR^2	δ	k	wR^2
干 旱	阿克苏	1.18	0.744	0.637	0.94	0.862	0.738	2.57	0.534	0.403	1.67	0.800	0.605
	酒 泉	0.92	0.804	0.714	0.74	0.996	0.884	2.13	0.588	0.470	1.32	0.971	0.777
	格尔木	0.92	0.792	0.715	0.67	0.912	0.823	2.21	0.580	0.476	1.23	0.869	0.715
	均 值	1.01	0.780	0.688	0.78	0.923	0.815	2.30	0.567	0.450	1.40	0.880	0.699
半干旱 半湿润	太 原	0.90	0.772	0.652	0.72	0.901	0.761	1.97	0.558	0.407	0.73	0.851	0.620
	乐 亭	0.70	0.886	0.759	0.67	0.956	0.819	1.53	0.660	0.485	1.20	0.912	0.669
	延 安	0.63	0.862	0.782	0.59	1.047	0.867	1.51	0.652	0.537	1.08	1.056	0.779
	均 值	0.74	0.840	0.731	0.66	0.968	0.816	1.67	0.624	0.476	1.00	0.940	0.689
湿 润	桂 林	0.84	0.870	0.660	0.84	0.884	0.671	1.77	0.647	0.348	1.50	0.811	0.437
	昆 明	0.70	0.898	0.642	0.68	0.934	0.667	1.58	0.672	0.306	1.23	0.870	0.396
	合 肥	0.52	0.961	0.864	0.57	1.052	0.854	1.15	0.746	0.595	1.03	1.053	0.757
	均 值	0.69	0.910	0.722	0.70	0.957	0.731	1.50	0.688	0.416	1.25	0.911	0.530

表 5 HAR 率定公式验证统计参数

气候区	地 区	矮型参考作物						高型参考作物					
		率定前			率定后			率定前			率定后		
		δ	k	wR^2	δ	k	wR^2	δ	k	wR^2	δ	k	wR^2
干 旱	阿克苏	0.82	1.028	0.841	0.80	0.875	0.768	1.69	0.742	0.577	1.36	0.837	0.671
	酒 泉	0.67	1.013	0.884	0.66	1.000	0.895	1.50	0.745	0.616	1.14	0.991	0.817
	格尔木	0.74	0.871	0.777	0.62	0.926	0.837	1.94	0.639	0.530	1.07	0.887	0.752
	均 值	0.74	0.971	0.834	0.69	0.934	0.833	1.71	0.709	0.574	1.19	0.905	0.747
半干旱 半湿润	太 原	1.02	1.158	0.684	0.76	0.964	0.773	1.28	0.842	0.582	1.26	0.855	0.609
	乐 亭	0.84	1.060	0.716	0.73	0.927	0.717	1.28	0.793	0.523	1.19	0.925	0.610
	沈 阳	0.97	1.135	0.682	0.83	1.051	0.745	1.27	0.839	0.537	1.42	1.062	0.620
	均 值	0.94	1.118	0.694	0.77	0.981	0.745	1.28	0.824	0.547	1.29	0.948	0.613
湿 润	桂 林	1.15	1.094	0.410	0.96	0.900	0.466	1.56	0.818	0.129	1.55	0.838	0.191
	昆 明	0.87	1.079	0.356	0.65	0.991	0.663	1.30	0.812	0.016	1.07	0.975	0.505
	合 肥	1.03	1.173	0.569	0.80	1.067	0.680	1.09	0.916	0.512	1.16	1.058	0.603
	均 值	1.02	1.115	0.445	0.80	0.986	0.603	1.31	0.848	0.219	1.26	0.957	0.433

公式,分别在湿润区和干旱区具有较好的适应性,但仍具有较大的误差,两公式均不能直接用于高型参考作物。

b. 在干旱、半干旱半湿润、湿润 3 个气候区,PT 公式在高矮两种参考作物上的 α 率定值分别为 1.45 ~ 1.56、1.36 ~ 1.47、1.28 ~ 1.38 和 1.89 ~ 2.08、1.74 ~ 1.92、1.58 ~ 1.78;HAR 公式在高矮两种参考作物上的 β 率定值分别为 0.002 6 ~ 0.004 8、0.001 4 ~ 0.001 7、0.000 9 ~ 0.001 4 和 0.003 8 ~ 0.007 5、0.001 5 ~ 0.002 1、0.000 9 ~ 0.001 9, η 率定值分别为 0.24 ~ 0.45、0.59 ~ 0.62、0.64 ~ 0.86 和 0.14 ~ 0.42、0.63 ~ 0.67、0.60 ~ 0.97。

c. 经地区率定后的 PT 和 HAR 公式在 3 个气候区的计算精度提高,在高型参考作物上的适应性显著改善,但在矮型参考作物上的适应性仍优于高型参考作物,PT 公式在气候间的差异性不明显,HAR 公式在干旱区有更好地适应性。

参考文献:

[1] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water equirements [M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 56,1998.

[2] TEMESGEN B, ECHING S, DAVIDOFF B, et al. Comparison of some reference evapotranspiration equations for California [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,2005,131(1):73-84.

[3] 刘晓英,林而达,刘培军. 干旱气候条件下 Priestley-Taylor 方法应用探讨[J]. 水利学报,2003,34(9):31-38. (LIU Xiaoying, LIN Erda, LIU Peijun. Study on application of Priestly-Taylor method to dry climate condition[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2003,34(9):31-38. (in Chinese))

[4] BACHOUR R,WALKER W R,TORRES-RUA A F,et al.

Assessment of reference evapotranspiration by the Hargreaves Method in the Bekaa Valley, Lebanon [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,2013,139(11):933-938.

[5] 杨永红,张展羽. 改进 Hargreaves 方法计算拉萨参考作物蒸发蒸腾量[J]. 水科学进展,2009,20(5):614-618. (YANG Yonghong, ZHANG Zhanyu. Method for calculating Lhasa reference crop evapotranspiration by modifying Hargreaves [J]. Advances in Water Science, 2009,20(5):614-618. (in Chinese))

[6] 胡庆芳,杨大文,王银堂,等. Hargreaves 公式的全局校正及适用性评价[J]. 水科学进展,2011,22(2):160-161. (HU Qingfang,YANG Dawen,WANG Yintang,et al. Global calibration of Hargreaves equation and its applicability in China [J]. Advances in Water Science, 2011,22(2):160-161. (in Chinese))

[7] XIAOYING L, ERDA L. Performance of the Priestley-Taylor equation in the semiarid climate of North China [J]. Agricultural Water Management,2005,71(1):1-17.

[8] DOORENBOS J,PRUITT W O. Guidelines for predicting crop water requirements[J]. FAO Irrigation and Drainage Paper,1977,24: 15-29.

[9] WRIGHT J L. New evapotranspiration crop coefficients [J]. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1982,108(1): 57-74.

[10] JENSEN M E, BURMAN R D, ALLEN R G. Evapotranspiration and irrigation water requirements[J]. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, 1990,70:332.

[11] WALTER I A, ALLEN R G, ELLIOTT R, et al. ASCE ’ s standardized reference evapotranspiration equation [C]// Proceedings of 4th National Irrigation Symposium. St. Joseph, Michigan: American Society of Agricultural Engineers,2000:209-215.

[12] KRAUSE P,BOYLE D P,BÄSE F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment [J]. Advances in Geosciences,2005(5):89-97.

(下转第 89 页)

K_{IC} 随着含水率的增大而减小,说明存在一个使黏土 K_{IC} 值最大的含水率且与最优含水率相同。土石坝黏土心墙施工时,保证黏土在最优含水率进行碾压,可使黏土心墙具有较好的抗水力劈裂性能。

3 结 论

- a. 黏土的 K_{IC} 值随着土体干密度的增大而增大,土石坝中的黏土心墙施工时,可增加碾压次数或采用重型碾压设备碾压,以增大心墙密度及其 K_{IC} ,从而提高其抗水力劈裂的能力;黏土 K_{IC} 随着其含水率的增大先增大后减小,存在一个使其 K_{IC} 值最大的含水率。
- b. 在黏土含水率相同的情况下,土体 K_{IC} 值随击实功的增大而增大;在相同击实功、不同含水率情况下, K_{IC} 值随含水率的增大先增大后减小;存在一个最优含水率,此时黏土的 K_{IC} 值最大。水利工程施工时,可按照最优含水率进行填筑,以提高其抗水力劈裂能力。

参考文献:

[1] 张丙印,于玉贞,张建民. 高土石坝的若干关键技术问题[C]//中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议编委会. 中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集. 北京:清华大学出版社, 2003:163-186.

[2] SHI Zihai,SUZUKI M,NAKANO M. Numerical analysis of multiple discrete cracks in concrete dams using extended fictitious crack model [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE,129(3) :324-336.

[3] CHANDLER H W. The use of non-linear fracture mechanics to study the fracture properties of soils [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1984, 29: 321-327.

[4] HALLETT P D, NEWSON T A. A simple fracture mechanics approach for assessing ductile crack growth in soil [J]. Soil Science Society of America Journal,2001,65 (4) :1083-1088.

[5] 丁金栗,刁玉椿,孙亚平. 击实黏性土断裂韧度性质研究[J]. 水利学报,1990,21 (7) :55-60. (DING Jinsu, DIAO yuchun, SUN yaping. Studies on the fracture toughness K_{IC} of cohesive soil [J]. Journal of Hydraulic Engineering. 1990,21(7) :55-60 (in Chinese))

[6] 张振国,丁金栗. 黏性土体断裂韧度 K_{IC} 研究[J]. 岩土力学, 1993, 14 (3) : 47-52. (ZHANG Zhenguo, DING Jinsu. Studies on the fracture toughness K_{IC} of cohesive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 1993, 14 (3) :47-52. (in

Chinese))

[7] 廖培伟,唐红梅. 土体断裂韧度 K_{IC} 试验研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2012,31 (4) :788-791. (LIAO Peiwei,TANG Hongmei. Experimental study on the fracture toughness K_{IC} of soil [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Nautre Science, 2012, 31 (4) : 788-791. (in Chinese))

[8] 王俊杰. 基于断裂力学的土石坝水力劈裂研究[D]. 南京:河海大学,2005.

[9] WANG Junjie. Hydraulic fracturing in earth-rock fill dams [M]. Wiley:New Jersey,2014:4-6.

[10] 王俊杰,朱俊高. 击实黏性土断裂韧度 K_{IC} 的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(21) :3972-3977. (WANG Junjie,ZHU Jungao. Laboratory study on fracture toughness K_{IC} of compacted clay [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2005, 24 (21) : 3972-3977. (in Chinese))

[11] 华国斌. 基于断裂力学的黏土边坡稳定性分析[D]. 南京:河海大学,2007.

[12] 张涟英,黄宏辉,郑甲佳. 贵州高速公路红黏土边坡稳定分析[J]. 贵州大学学报:自然科学版,2014,31(3) : 105-110. (ZHANG Lianying, HUANG Honghui, ZHENG Jiajia. Slope stability analysis of red clay in Guizhou expressway [J]. Journal of Guizhou University: Natural Sciences,2014,31(3) :105-110. (in Chinese))

[13] 王培清,付强. 降雨入渗对裂隙性红黏土边坡的稳定性影响分析[J]. 公路工程,2013,38 (5) :165-170,192. (WANG Peiqing, FU Qiang. Analysis on stability of red clay with cracks based on rainfall infiltration[J]. Highway Engineering,2013,38(5) :165-170,192. (in Chinese))

(收稿日期:2014 -08 -25 编辑:郑孝宇)

+++++

(上接第 51 页)

[13] TABARI H, TALAEI P H. Local calibration of the Hargreaves and Priestley-Taylor equations for estimating reference evapotranspiration in arid and cold climates of Iran based on the Penman-Monteith model[J]. Journal of Hydrologic Engineering,2011,16(10) :837-845.

[14] 王声锋,段爱旺,张展羽. 半干旱地区不同水文年 Hargreaves 和 PM 公式的对比分析[J]. 农业工程学报, 2008,24(7) :29-33. (WANG Shengfeng, DUAN Aiwang, ZHANG Zhanyu. Comparison and analysis of Hargreaves equation and Penman-Montieth equation during the different hydrological years in the semi-arid region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2008,24(7) :29-33. (in Chinese))

(收稿日期:2014 -05 -20 编辑:熊水斌)