

参考作物蒸发蒸腾量计算方法在海河流域的适用性

孙庆宇¹, 佟玲^{1*}, 张宝忠², 汤博¹

(1. 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083; 2. 中国水利水电科学研究院水利研究所, 北京 100048)

摘要: 参考作物蒸发蒸腾量 (ET_0) 的计算公式很多, 各公式所需参数各异, 为寻找一种所需资料少而又精度较高的替代方法, 选用 1998 年 FAO-56 分册推荐的 Penman-Monteith (PM)、Hargreaves、Irmak-Allen 等 6 种方法分别计算海河流域 10 个典型气象站 30 a 的参考作物蒸发蒸腾量, 并以 PM 公式为标准, 对其他方法进行评价。结果表明, 10 个站点中除了五台山地区, Hargreaves 与 FAO-24 Radiation 这 2 种方法更接近于 PM 方法的计算结果, 其误差较小, 在海河流域缺少辐射和风速资料的站点, 可以利用 Hargreaves 方法来代替 PM 方法; 在五台山地区, 可以考虑在 Hargreaves 基础上对其参数进行适当调整。

关键词: 蒸发蒸腾量, 蒸发, 作物, 水资源, 参考作物蒸发蒸腾量, Penman-Monteith 方法, 海河流域

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.11.012

中图分类号: S161.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-11-0068-05

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.

Sun Qingyu, Tong Ling, Zhang Baozhong, et al. Comparison of methods for calculating reference crop evapotranspiration in Haihe River basin of China[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 68-72. (in Chinese with English abstract)

0 引言

参考作物蒸发蒸腾量 (ET_0) 系指高度一致、生长旺盛, 完全覆盖地面而不缺水的 8~15 cm 高的绿色矮秆作物的蒸发蒸腾量^[1]。参考作物蒸发蒸腾量的精确计算对于各地区节水农业和农业水资源的高效利用有很重要的意义^[2]。

有关参考作物蒸发蒸腾量计算方法的研究已有百余年的历史, 其计算方法很多, 现在普遍认为 1998 年 FAO-56 分册的 Penman-Monteith (PM) 公式具有广泛的适用性^[3-6]。这种方法较为全面地考虑了影响蒸发蒸腾的各种因素, 从干旱地区到湿润地区都具有较高精度, 刘晓英^[7]、毛飞^[8]、李为虎等^[9-10]的研究都验证了 PM 方法的准确性。但是该方法需要太阳辐射、相对湿度等较多数据, 常常因缺少某些资料而无法使用该方法。

海河流域总面积 31.82 万 km², 仅占全国总面积的 3.3%, 人口却占全国的近 10%, 人口密集, 水资源极为紧张。因此, 必须大力发展节水农业, 确定合理的灌溉制度, 也必须确定适宜的参考作物蒸发蒸腾量计算方法。为了分析不同计算方法在海河流域的适用性, 筛选最优

方法, 本文采用 PM、Hargreaves、Irmak-Allen、FAO-24 Penman、Priestley-Taylor 和 FAO-24 Radiation 共 6 种方法, 利用海河流域 10 个典型气象站 1978-2007 年的旬气象资料和站点地理位置等计算参考作物蒸发蒸腾量, 并以 PM 方法计算值作为标准, 分析其余各方法在海河流域的适用性, 为海河流域节水规划提供依据和参考。

1 方法与资料

1.1 计算参考作物蒸发蒸腾量的 6 种方法

1) Penman-Monteith (PM) 方法

Penman-Monteith 方法是以能量平衡和水汽扩散理论为基础, 既考虑了空气动力学和辐射项的作用, 又涉及了作物的生理特征, 同时公式还引入了表面阻力参数来表征作物生理过程中叶面气孔及表层土壤对水汽传输的阻力作用。1998 年联合国粮农组织推荐将其作为计算参考作物蒸发蒸腾量的一种标准方法^[11]。基本公式为

$$ET_{0PM} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{900\gamma u_2(e_s - e_a)}{T + 273}}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中, ET_{0PM} 为 FAO-56 PM 法计算的参考作物蒸发蒸腾量, mm/d; e_s 和 e_a 分别为饱和水汽压和实际水汽压, kPa; Δ 为饱和水汽压-温度曲线的斜率, kPa/°C; γ 为干湿计常数, kPa/°C; u_2 为 2 m 高处风速, m/s; T 为平均气温, °C; R_n 为净辐射, MJ/(m²·d); G 为土壤热通量, MJ/(m²·d)。

2) Hargreaves (Har) 方法

由于有些地区缺少太阳辐射数据, 因此 Hargreaves 和 Samani 根据加利福尼亚州 8 a 间的牛毛草蒸渗仪数据推导出了基于温差来反映辐射项的参考作物蒸发蒸腾量计算公式。该方法在缺少辐射资料的地区得到广泛应用,

收稿日期: 2010-01-23 修订日期: 2010-09-10

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划 (IRT0657); 国家重点基础研究发展计划 (973) 课题 (2006CB403406); 国家高技术研究发展计划 (863) 课题 (2006AA100203)

作者简介: 孙庆宇 (1987-), 男, 山东潍坊人, 研究方向为水文学与水资源。北京 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 100083。

Email: tariqqy@126.com

*通信作者: 佟玲 (1979-), 女, 辽宁人, 博士, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究。北京 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 100083。

Email: tongling2001@tom.com

并被证明是一种有效的估算方法^[12]。该公式仅需要最高、最低气温, 其计算公式为

$$ET_{0Har} = 0.0023 \frac{R_a}{\lambda} \sqrt{T_x - T_n} (T + 17.8) \quad (2)$$

式中, ET_{0Har} 为 Hargreaves 法计算的参考作物蒸发蒸腾量, mm/d; R_a 为大气顶层辐射, MJ/(m²·d), 可根据时间与地理位置数据计算; λ 为水汽化潜热, MJ/kg; T_x 、 T_n 为最高、最低气温, °C。

3) FAO-24 Penman (FAO24Pn) 方法

FAO-24 Penman 方法是依据能量平衡和紊流扩散原理导出的计算参考作物蒸发蒸腾量的方法, 同时还包含风函数。该方法需要气温、日照时数、风速、相对湿度等气象资料, 其计算公式为^[13]

$$ET_{0FAO24Pn} = \frac{\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + 6.43 \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} (1 + 0.862u_2)(e_s - e_a)}{\lambda} \quad (3)$$

式中 $ET_{0FAO24Pn}$ 为 FAO-24 Penman 方法计算的参考作物蒸发蒸腾量, mm/d。

4) Priestley-Taylor (Pri-Tylr) 方法

Priestley-Taylor 公式是 Priestly 和 Taylor 于 1972 年在较湿润气候条件下提出的, 假设无平流的条件下, 以平衡蒸发为基础获得的。该公式计算数据较少, 应用方便, 最小计算时间尺度为旬, 公式如下^[14]

$$ET_{0Pri-Tylr} = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \quad (4)$$

式中, $ET_{0Pri-Tylr}$ 为 Priestley-Taylor 方法计算的参考作物蒸发蒸腾量, mm/d; α 为 Priestly-Taylor 系数, 取 1.26^[14]。

5) Irmak-Allen (Irm-All) 方法

该法是 Irmak 和 Allen 根据美国湿润地区资料得到的经验公式^[15], 公式如下

$$ET_{Irm-All} = 0.489 + 0.289R_n + 0.023T \quad (5)$$

式中 $ET_{Irm-All}$ 为 Irmak-Allen 方法计算的参考作物蒸发蒸腾量, mm/d。

6) FAO-24 Radiation (FAORad) 方法

在只有气温、日照、云量或辐射量等数据, 而没有实测风速和平均相对湿度的地区, FAO 推荐采用此方法。采用这种方法需要知道计算时段内的平均实际日照时数、平均温度, 估计相对湿度和风速, 然后根据 FAO 提供的最大可能日照时数等资料进行计算 ET_0 ^[16]。公式如下

$$ET_{0FAORad} = a + b \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_s \quad (6)$$

式中, $ET_{0FAORad}$ 为 FAO-24 Radiation 方法计算的参考作物蒸发蒸腾量, mm/d; R_s 为太阳辐射量, MJ/(m²·d); a 和 b 为经验系数, a 取值为 -0.3, b 的表达式为

$$b = 1.066 - 0.0013RH_{mea} + 0.045u_d - 0.0002RH_{mea}u_d - 0.0000315RH_{mea}^2 - 0.011u_d^2 \quad (7)$$

式中, RH_{mea} 为平均相对湿度, %, u_d 为白天平均风速, m/s。

1.2 数据分析方法

本文采用线性回归方法与均方根误差 (RMSE) 评价 Penman-Monteith 方法与其余 5 种方法之间的差异性。

1.3 研究区与数据来源

本文所研究的海河流域东临渤海, 西倚太行, 南界黄河, 北接蒙古高原。流域内多年平均河川年径流量 264 亿 m³, 地下水资源 255.37 亿 m³, 包括地表水和地下水的水资源总量为 419.43 亿 m³。河川年径流量中, 滦河及冀东沿海诸河为 55.1 亿 m³, 海河子水系北区 61.5 亿 m³、南区 132 亿 m³, 徒骇马颊河 15.2 亿 m³。多年平均降水量一般为 500~600 mm, 滨海地区降水量较多, 约 600~650 mm, 水面蒸发量为 900~1 400 mm, 蒸发量随着气温上升而增加, 大致随纬度增加而递减。

本研究的气象资料由国家气象资料中心提供, 包括位于海河流域的北京、秦皇岛、保定、五台山、丰宁、安阳、惠民县、唐山、天津和新乡共 10 个站点 1978—2007 年的逐旬气象资料。这些站点比较均匀地分布在海河流域, 北京、丰宁、安阳、惠民县、新乡和保定位于平原, 秦皇岛、天津和唐山位于渤海边, 五台山位于黄土高原, 比较有代表性, 而且这些站点的气象资料比较完整, 易于获得数据。10 个气象站的基本情况见表 1。

表 1 海河流域各气象站点基本情况

Table 1 Basic information about weather stations in Haihe River basin

站名	经度	纬度	海拔/m	降水量/mm
北京	116°28'	39°48'	31.3	536.5
秦皇岛	118°09'	39°40'	27.8	601.0
保定	115°31'	38°51'	17.2	498.3
五台山	114°22'	36°07'	2 208.3	704.1
安阳	116°28'	39°48'	75.5	534.2
丰宁	116°38'	41°13'	661.2	452.6
惠民县	117°31'	37°30'	11.7	540.8
唐山	119°09'	39°40'	27.8	589.3
天津	117°04'	39°05'	2.5	519.8
新乡	113°53'	35°19'	72.7	539.6

2 结果与分析

在这 6 种方法中, 各种计算方法的基本假定、所需数据等均不相同, 计算结果必然存在一定差异。现以 FAO 推荐的 PM 方法为标准, 通过将其他方法与其进行比较来分析各种方法的计算精度和地区适宜性。

2.1 参考作物蒸发蒸腾量月平均变化规律比较

用这 6 种方法计算各代表站点的逐旬参考作物蒸发蒸腾量, 进一步统计得到这 6 种方法计算的参考作物蒸发蒸腾量 30 a 逐月均值变化情况, 结果表明, 各种方法计算的 10 个地区参考作物蒸发蒸腾量的变化趋势基本相同, 但在数值上存在一定差异。

本文只列出 4 个典型站点的计算结果 (图 1)。由图 1 可以看出, 在北京、保定等内陆站点, Hargreaves 方法、FAO-24 Radiation 方法与 PM 方法的月平均值差异较小, 在 1—4 月及 11—12 月基本相等, 在 5—7 月略高于 PM 方法的计算值, FAO-24 Penman 方法和

Priestley-Taylor 方法分别明显高于和低于 PM 方法的月平均值。对于秦皇岛、天津等海边站点, FAO-24 Radiation 方法除在 4—5 月份的计算值较大, 其余月份均与 PM 方法结果相当, Hargreaves 方法与 PM 方法的月平均值比较接近。而在高原五台山站点, FAO-24 Penman 方法和 FAO-24

Radiation 方法计算的月平均值间的变化趋势与 PM 方法较一致, 但是明显偏大, 而 Hargreaves 方法计算的月平均值与 PM 方法比较接近, 略低于 PM 方法。总体上, Hargreaves 方法和 FAO-24 Radiation 方法的月平均值与 PM 方法差异最小。

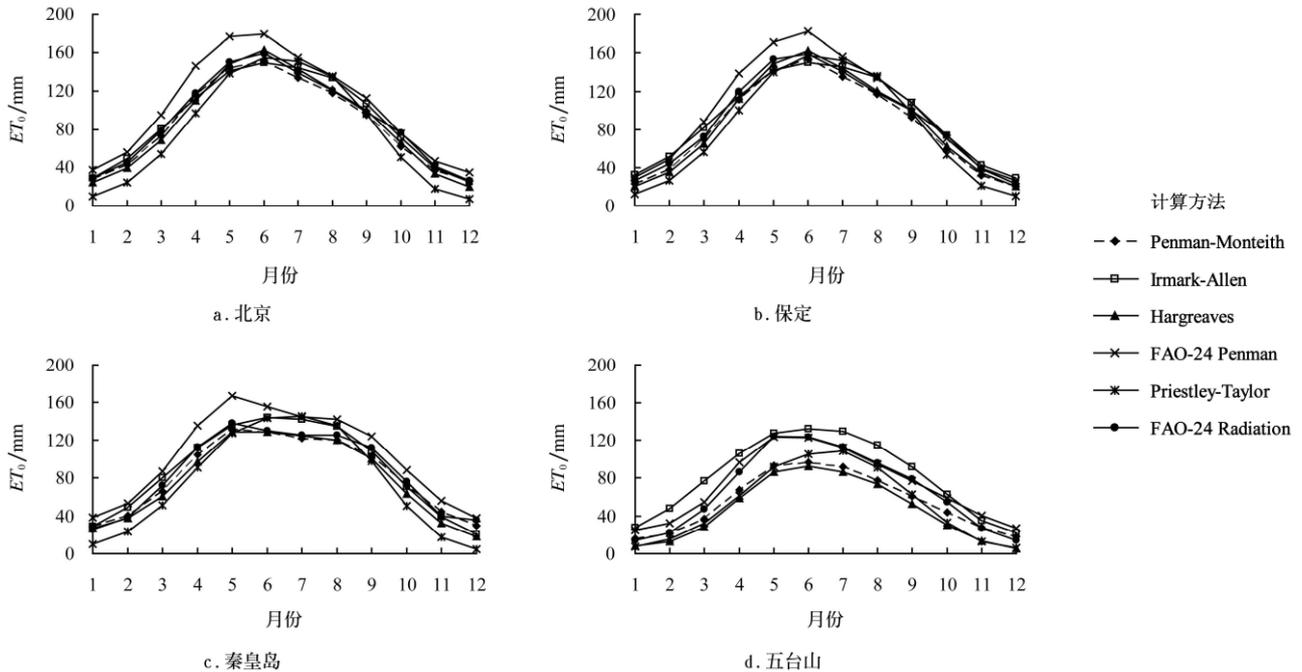


图1 不同方法计算的多年参考作物蒸发蒸腾量 (ET_0) 月平均值对比

Fig.1 Multi-year monthly averaged reference crop evapotranspiration (ET_0) calculated by different methods

2.2 PM 方法与其他各方法计算的月参考作物蒸发蒸腾量相关性分析

为了进一步分析各种方法的计算精度和适宜性, 以 PM 方法为标准, 分析 PM 方法与其他 5 种方法的相关性。从表 2 可以看出, PM 方法参考作物蒸发蒸腾量计算结果与 5 种方法的计算结果的决定系数均大于 0.9, 相关性较好。FAO-24 Penman 方法和 FAO-24 Radiation 方法, 决定系数都接近或超过 0.99, Hargreaves 方法的决定系数超过 0.98。但是 FAO-24 Penman 方法计算结果大于 PM 结果, 因为其斜率 m 值均大于 1, 而 Hargreaves 方法和 FAO-24 Radiation 方法的斜率接近于 1。Priestley-Taylor 方法和 Irmak-Allen 方法在各个站点的决定系数比较小。总体上, Hargreaves 方法和 FAO-24 Radiation 方法与 PM 方法的相关性较好。

2.3 PM 方法与其他各方法计算的参考作物蒸发蒸腾量之间的均方根误差分析

根据公式计算了 PM 方法与其他 5 种方法之间月平均参考作物蒸发蒸腾量的均方根误差, 结果如表 3。从表中可以看出, Hargreaves 与 FAO-24 Radiation 这 2 种方法的计算结果在这 10 个站点中表现最好, 其次是 Priestley-Taylor 方法, FAO-24 Penman 方法在各个站点表现较差。而 Irmak-Allen 方法与 FAO-24 Radiation 在不同站点之间存在明显的差异, 说明在不同的海拔下, 计算结果差异明显。总的来看, Hargreaves 与 FAO-24 Radiation

这 2 种方法较好。

表 2 Penman-Monteith (PM) 方法与 5 种方法之间的线性回归分析
Table 2 Parameters of linear regression relationships between Penman-Monteith (PM) and other 5 methods

地区	参数	计算方法				
		Irmak-Allen	Hargreaves	FAO-24 Penman	Priestley-Taylor	FAO-24 Radiation
北京	R^2	0.9796	0.9906	0.9927	0.9217	0.9922
	m	1.0412	1.0492	1.2044	0.9748	1.0321
保定	R^2	0.9597	0.9879	0.9958	0.9578	0.9909
	m	1.0711	1.0862	1.3918	1.0147	1.0280
秦皇岛	R^2	0.9763	0.9881	0.9921	0.8827	0.9921
	m	1.0887	0.9794	1.2319	0.9846	1.0618
五台山	R^2	0.9442	0.9886	0.9798	0.9347	0.9871
	m	1.4543	0.9370	1.2970	1.0337	1.0617
安阳	R^2	0.9388	0.9857	0.9959	0.9591	0.9941
	m	1.1029	1.0498	1.2176	1.0381	1.0764
丰宁	R^2	0.9710	0.9725	0.9949	0.9358	0.9942
	m	1.1392	1.0754	1.1754	1.0173	1.0065
惠民县	R^2	0.9624	0.9804	0.9955	0.9384	0.9948
	m	1.0879	1.0808	1.2720	1.0255	1.0558
唐山	R^2	0.9732	0.9835	0.9962	0.9470	0.9905
	m	1.1000	1.0860	1.1843	1.0246	1.1188
天津	R^2	0.9687	0.9968	0.9968	0.9422	0.9959
	m	1.0776	1.0810	1.2810	1.0134	1.0950
新乡	R^2	0.9522	0.9911	0.9960	0.9636	0.9903
	m	1.1465	1.0639	1.1661	1.0835	1.1035

注: m 为回归直线斜率。

表 3 PM 方法与各方法计算的 ET_0 值之间的均方根误差值
Table 3 Root mean square error (RMSE) values of ET_0 calculated by PM and other methods

地区	计算方法				
	Irmak-Allen	Hargreaves	FAO-24 Penman	Priestley-Taylor	FAO-24 Radiation
北京	0.3593	0.3882	0.6769	0.5663	0.4386
保定	0.4206	0.3518	0.5782	0.4417	0.4161
秦皇岛	0.4498	0.4512	0.7184	0.6417	0.6760
五台山	1.0108	0.4586	0.6403	0.3637	0.5746
安阳	0.5133	0.5422	0.5548	0.4132	0.3483
丰宁	0.5043	0.5959	0.5096	0.4749	0.6096
惠民县	0.4631	0.3994	0.5672	0.5001	0.2656
唐山	0.4317	0.3754	0.5706	0.4469	0.4243
天津	0.4179	0.3542	0.5748	0.4775	0.3635
新乡	0.5666	0.5401	0.5150	0.4450	0.3927
平均	0.5137	0.4457	0.5906	0.4771	0.4509

3 结 论

本文采用 6 种方法计算了海河流域 10 个典型气象站点参考作物蒸发蒸腾量 30 a 的历年各月平均值, 通过对分析得出各计算方法在海河流域各区域的适用性, 取得的结论主要有:

1) 海河流域 10 个典型站各种方法计算的参考作物蒸发蒸腾量月平均值变化趋势基本一致, 除五台山站外方法间的差异不大; 在平原和海边海拔比较低的地区, FAO-24 Penman 方法计算结果偏高, 其余 5 种方法变化趋势较为一致。

2) 在海河流域地区, Hargreaves 与 FAO-24 Radiation 这 2 种方法更接近于 PM 方法的计算结果, 误差较小, 因此在海河流域缺少辐射和风速资料的站点, 可以考虑使用 Hargreaves 方法代替 PM 方法; 在五台山地区各方法间差异较为明显, 由于地形与气候的复杂性, 应该在 Hargreaves 方法的基础上对其参数进行调整。

[参 考 文 献]

[1] 康绍忠, 刘晓明, 熊运章. 土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用[M]. 北京: 水利水电出版社, 1992.

[2] 史晓楠, 王全九, 王新, 等. 参考作物蒸发蒸腾量计算方法在新疆地区的适用性研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 19-22.
Shi Xiaonan, Wang Quanjiu, Wang Xin, et al. Adaptability of different reference evapotranspiration estimation methods in Xinjiang region[J]. Transaction of CSAE, 2006, 22(6): 19-22. (in Chinese with English abstract)

[3] 樊军, 邵明安, 王全九, 等. 黄土地区参考作物蒸散量多种计算方法的比较研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 98-99.
Fan Jun, Shao Ming'an, Wang Quanjiu, et al. Comparison of many equations for calculating reference evapotranspiration in the Loess Plateau of China[J]. Transaction of the CSAE, 2008, 24(3): 98-99. (in Chinese with English abstract)

[4] 丁加丽, 彭世彰, 徐俊增, 等. 基于 Penman-Monteith 方程的节水灌溉稻田蒸散量模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 31-36.
Ding Jiali, Peng Shizhang, Xu Junzeng, et al. Estimation of rice evapotranspiration under controlled irrigation by using Penman-Monteith method[J]. Transaction of the CSAE, 2010, 26(4): 31-36. (in Chinese with English abstract)

[5] 谢平, 陈晓宏, 刘丙军. 湛江地区适宜参考作物蒸发蒸腾量计算模型分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 6-11.
Xie Ping, Chen Xiaohong, Liu Bingjun. Analysis of appropriate calculation models for reference crop evapotranspiration in Zhanjiang[J]. Transaction of the CSAE, 2008, 24(5): 6-11. (in Chinese with English abstract)

[6] 刘晓英, 林而达, 刘培军. 干旱气候条件下 Priestly-Taylor 方法应用探讨[J]. 水利学报, 2003, (9): 31-37.
Liu Xiaoying, Lin Erda, Liu Peijun. Study on application of Priestly-Taylor method to dry climate condition[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, (9): 31-37. (in Chinese with English abstract)

[7] 刘钰, 蔡林根. 参照蒸发量的新定义及计算方法的对比[J]. 水利学报, 1997, (6): 27-33.
Liu Yu, Cai Lin'gen. Update definition and computation of reference evapotranspiration comparison with former method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, (6): 27-33. (in Chinese with English abstract)

[8] 毛飞, 张光智, 徐祥德. 参考作物蒸散量的多种计算方法及其结果的比较[J]. 应用气象学报, 2000, (11): 128-136.
Mao Fei, Zhang Guangzhi, Xu Xiangde. Several methods of calculating the reference evapotranspiration and comparison of the results[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2000, (11): 128-136. (in Chinese with English abstract)

[9] 李为虎, 杨永红. 参考作物蒸发蒸腾量计算方法在拉萨的适用性对比分析[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(34): 16745-16748.
Li Weihu, Yang Yonghong. Comparative analysis on applicability of reference crop evapotranspiration calculation methods in Lhasa[J]. Journal of Anhui Agriculture, 2009, 37(34): 16745-16748. (in Chinese with English abstract)

[10] 李玉霖, 崔建垣, 张铜会. 参考作物蒸散量计算方法的比较研究[J]. 中国沙漠, 2002, 22(4): 372-376.
Li Yulin, Cui Jianyuan, Zhang Tonghui. Comparative study on calculation methods of reference evapotranspiration[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(4): 372-376. (in Chinese with English abstract)

[11] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements: FAO irrigation and drain paper 56[Z]. Rome, 1998: 17-64.

[12] Hargreaves G H, Samani Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1985, 1(2): 96-99.

[13] Doorenbos J, Pruitt W O. Guidelines for predicting crop water requirements: FAO irrigation and drain paper 24[Z]. Rome, 1977: 15-20.

[14] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters[J].

- Monthly Weather Review, 1972, 100(2): 81—92.
- [15] Irmak S, Allen R G, Whittv E B. Daily grass and alfalfa-reference evapotranspiration estimates and alfalfato-grass evapotranspiration ratios in Florida[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 2003, 129(5): 360—370.
- [16] Hauser V L, Gimon D M, Horin J D. Draft Protocol for Controlling Contaminated Groundwater by Phytostabilization [R]. Prepared for Air Force Center for Environmental Excellence, 1999: 64—66.

Comparison of methods for calculating reference crop evapotranspiration in Haihe River basin of China

Sun Qingyu¹, Tong Ling^{1*}, Zhang Baozhong², Tang Bo¹

(1. Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: There are a lot of estimation methods for reference crop evapotranspiration (ET_0), however, different parameters are required. Therefore, it is particularly important to find accurate alternative methods. Based on the data of ten weather stations in Haihe River basin for 30 years, ET_0 was estimated with six methods, such as FAO-56 Penman-Monteith (PM), Hargreaves and Irmak-Allen etc. taking PM equation as the standard, the other methods were evaluated. The results showed that for stations except Wutaishan station in Haihe River basin, the estimated ET_0 by the Hargreaves and the FAO-24 Radiation equations were closer to the values of ET_0 estimated by the PM method than by other methods. Therefore, it is concluded that Hargreaves methods can replace the PM method at these stations which are short of radiation and wind speed data; whereas, in Wutaishan Mountain area, the empirical parameters of the Hargreaves equations should be changed before being used in given local stations.

Key words: evapotranspiration, evaporation, crops, water resources, reference crop evapotranspiration, Penman-Monteith Method, Haihe River basin