

# 三江源温性草原蒸散量计算方法的比较<sup>\*</sup>

赵双喜<sup>1,2</sup>, 张耀生<sup>1</sup>, 赵新全<sup>1</sup>, 冯承彬<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院 西北高原生物研究所, 高原生物适应与进化重点实验室, 青海 西宁 810001;

2 中国科学院 研究生院, 北京 100001)

[摘要] =目的> 对比分析了三江源温性草原蒸散量的计算方法, 为牧区蒸散量的合理使用提供依据。=方法> 以小型自动气象站气象观测资料为基础, 采用 FAO Penman-Monteith (FAO P2M)、Penman 1948 (P248)、Priestley-Taylor (P2T) 和 FAO Penman 1979 (P279) 4 种不同方法, 估算了三江源温性草原参考作物蒸散量, 并对计算结果进行了对比分析。=结果> 三江源温性草原的参考作物蒸散量季节分布极不均匀, 表现出春季、夏季、秋季、冬季依次减小的趋势。并且 FAO P2M 公式的计算结果与其他 3 种方法 (P248、P2T 和 P279) 的计算结果呈正相关, 但与 P279 公式计算结果间差异不大, 与另两种方法计算结果间的差异显著。通过偏差分析可知, P248 公式计算的结果偏大, P2T 公式计算的结果偏小, 造成偏差的主要原因是 4 种模型各自选用了不同的辐射项和动力项。=结论> 在利用气象数据计算蒸散量的过程中, 要根据当地需要采用不同的公式。在三江源温性草原, 可采用 P279 修正式代替标准的 FAO P2M 公式计算参考作物蒸散量。

[关键词] 三江源; 温性草原; 参考作物蒸散量

[中图分类号] S812.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1672-9387(2009)01200792-05

## Comparative study on calculation methods of warm steppe's evapotranspiration in the source region of Three Rivers

ZHAO Shuangxi<sup>1,2</sup>, ZHANG Yaosheng<sup>1</sup>, ZHAO Xinquan<sup>1</sup>, FENG Chengbin<sup>1,2</sup>

(1 Northwest Plateau Institute of Biology, Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Chinese Academy of Sciences,

Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810001, China;

2 Postgraduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100001, China)

Abstract: =Objective> Comparative study on calculation methods of warm steppe's evapotranspiration in the source region of three rivers was conducted to provide basis for rational use of evapotranspiration. =Method> Based on meteorological data of HOB0 Weather Station, different methods were used to calculate the reference evapotranspiration of grassland in the source region of three rivers (Yellow river, Jinsha river and Lanchang river). =Result> The analysis showed that dynamic variation of warm steppe's evapotranspiration in the source region of three rivers was different. Seasonal reference evapotranspiration was in a sequence of spring> summer> autumn> winter. And the Penman 1948, Priestley Taylor formula and the FAO Penman 1979 were all correlated well with the FAO Penman-Monteith. The FAO Penman 1979 was in agreement with FAO Penman-Monteith estimates, but Priestley-Taylor and the Penman 1948 estimates were obviously deviated from FAO Penman-Monteith estimates. The cause of the deviation was the difference in calculating the radiation and dynamics. =Conclusion> It is necessary to take appropriate formula to calculate the evapotranspiration. The FAO Penman 1979 was approximately equivalent to FAO Penman-Monteith.

\* [收稿日期] 200712226

[基金项目] 国家科技支撑计划项目/高寒草地退化生态系统综合整治技术研究0(2006BAC01A02)

[作者简介] 赵双喜(1981-),男,山东济宁人,在读硕士,主要从事土壤水分和蒸散研究。

E-mail: zhaoshuangxi05@mails.gucas.ac.cn

[通信作者] 张耀生(1953-),男,陕西凤翔人,副研究员,硕士生导师,主要从事草地土壤水分研究。E-mail: zys@nwpb.ac.cn

Monteith to calculate warm steppe's evapotranspiration in the source region of three rivers.

Key words: Three Rivers; warm steppe; reference evapotranspiration

作物需水预测对合理利用和节约用水, 缓解水资源的供需矛盾具有重要意义。作物需水预测的关键参数是参考作物蒸散量。该参数受多重因素影响, 在较大区域范围内实际测定有较大难度, 通常采用模型进行估算<sup>[1]</sup>。国内外对农作物的蒸散模型研究较多, 并有了较成熟的方法<sup>[23]</sup>, 而牧草与大多数作物的蒸散有共性<sup>[4]</sup>, 因此可参照作物蒸散的方法来研究牧草。过去已有学者对不同区域天然草地的蒸散进行了研究<sup>[29]</sup>, 而有关三江源天然草地蒸散的研究还未见报道。本研究以气象观测资料为基础, 采用不同模型估算了三江源温性草原的参考作物蒸散量, 并对其估算结果进行了对比分析, 旨在为三江源牧区蒸散量的合理利用、草地退化的防治以及区域草地生态环境建设等提供理论依据。

## 1 试验区概况

试验区设在黄河上游的同德县, 地处海南、黄南、果洛三州交界处, 是三江源的自然保护区, 属于大陆高原性气候。该地区年均气温 $-3.0\sim 6.1\text{ e}$ , 最热月 7 月的月平均气温 $11.9\text{ e}$ , 最冷月 1 月的月平均气温 $-13.2\text{ e}$ ; 年降水量为 $230\sim 540\text{ mm}$ , 各地降水量差异悬殊, 雨量分布呈南多北少、东多西少的趋势, 降水多集中在 $5\sim 9$ 月, 占年总降水量的 $85\%$ 以上, 季节分布极不均匀; 年蒸发量为 $1\ 466\text{ mm}$ ; 无霜期 $28\sim 64\text{ d}$ ; 年日照时数 $2\ 550\sim 2\ 760\text{ h}$ <sup>[10]</sup>。

试验区天然草地类型主要是温性草原, 呈带状分布于海拔 $2\ 800\sim 3\ 500\text{ m}$ 。温性草原是优良冬春场, 总面积达 $12.76\times 10^4\text{ hm}^2$ , 占同德县草原总面积的 $29.61\%$ , 其中针茅(*Stipa spp.*)、青海固沙草(*Orinus kokonorica* (hao) Keng ex Tavel.)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、苔草(*Carex spp.*)为优势群落, 群落总盖度为 $35\%\sim 65\%$ 。试验区土壤为栗钙土, 表层土壤 pH $8\sim 9$ 。

## 2 研究方法

在试验区设立小型自动气象站(HOBO Weather Station, U. S. A), 按照地面气象观测规范和试验的要求, 对空气温度、空气相对湿度、气压、风速、太阳辐射和降水量进行观测。数据自动采集并储存在 H212001 采集器内, 由计算机取出。本研究采用

2006211201~ 2007210231 一个完整年度的数据。

## 3 参考作物蒸散量的计算方法

### 3.1 FAO Penman2Monteith(FAO P2M)公式

为解决 Penman2Monteith 模式中空气动力学阻力和植被冠层表面阻力取值较为困难的问题, 1992 年 Smith 在总结前人试验的基础上, 提出了计算蒸散量的 P2M 简化公式<sup>[11]</sup>。该公式全面考虑了影响田间水分散失的大气因素和作物因素, 将能量平衡、空气动力学参数和表面参数结合在一起, 可应用于世界各个地区, 估值精度较高且具有良好的可比性<sup>[12]</sup>。其公式为:

$$ET_o = \frac{0.408 \$ (R_n - G) + \frac{C_n @C@L_2 (e_s - e_a)}{(T + 273)}}{\$ + C(1 + C_d @L_2)} \quad (1)$$

式中:  $ET_o$  为参考作物蒸散量( $\text{mm/d}$ );  $\$$  为饱和水汽压曲线对温度的斜率( $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ );  $R_n$  为净辐射( $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ );  $G$  为地热通量( $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ );  $C$  为干湿表常数( $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ );  $C_n$  和  $C_d$  均为以天数为步长的彭曼公式设置常数,  $C_n = 900$ ,  $C_d = 0.34$ ;  $L_2$  为距地面 $2\text{ m}$  高的风速( $\text{m/s}$ );  $T$  为日平均温度( $\text{e}$ );  $e_s$  和  $e_a$  分别为饱和水汽压( $\text{kPa}$ )和实际水汽压( $\text{kPa}$ )。

### 3.2 Penman 1948(P248)公式

1948 年 Penman 首先提出了无水汽水平输送情况下的参考作物蒸散量计算公式<sup>[13]</sup>, 后经多次修改其表达形式如下:

$$ET_o = \$ (R_n - G) + 6.34C(1 + 0.535L_2) @ (e_s - e_a) / K \$ + C \quad (2)$$

式中:  $K$  为汽化潜热( $\text{MJ/kg}$ ),  $K = 2.051 - (2.361 @ 10^{-3})T$ ; 其余符号意义同式(1)。

### 3.3 Priestley2Taylor(P2T)公式

近年来, 随着作物生长模拟模型的兴起, Priestley2Taylor 方法由于需要的输入参数较少而得到广泛应用<sup>[14]</sup>。其计算公式为:

$$ET_o = A \$ (R_n - G) / K \$ + C \quad (3)$$

式中:  $A = 1.26$ ;  $K$  为汽化潜热, 其计算公式同式(2); 其余符号意义同式(1)。

### 3.4 FAO Penman(F279)修正式

FAO 在 1979 年所推荐的 FAO Penman 修正式

在世界范围内得到了广泛的应用<sup>[15]</sup>,是目前世界上应用较广泛的公式之一。FAO Penman 修正式为:

$$ET_o = \frac{\frac{P_o \cdot SR_n}{PC} + 0.26(e_s - e_a)(1 + 0.54L_2)}{\frac{P_o \cdot S}{PC} + 1} \quad (4)$$

式中:  $P_o$  为海平面气压(101.3 kPa),  $P$  为试验区气压(67.9 kPa);其余符号意义同式(1)。

## 4 结果与分析

### 4.1 三江源温性草原参考作物蒸散量的动态变化和回归分析

由于 Penman2Monteith 方法是以能量平衡和水分扩散论为基础,既考虑了作物的生理特征,又考虑了空气动力学参数的变化,从而具有较充分的理论依据和较高的计算精度。1998 年联合国粮农组织(FAO)对 Penman2Monteith 模型进行了进一步

修订,定义了一个高 0.12 m、表面阻力为 70 m/s、反射率为 0.23 的假想参考作物面来计算参考作物蒸发,假想面类似于同一高度、生长旺盛、完全覆盖地面、水分充足的广阔绿色植被。在这种假想的统一垫面下,不但其与陆面蒸发的机理相同,而且避免了各种与气候要素无关的因素(如植被类型、高度、生长状况)等对  $ET_o$  的影响,保证了  $ET_o$  仅为气候要素的函数,增加了地区和季节年份间的可比性,可适应于不同的自然环境条件<sup>[1]</sup>,并在气候条件差异较大的不同地区(湿润、干旱或风速变化范围较大等)应用中,也取得了较好的结果<sup>[16]</sup>,因此其成为计算三江源温性草原  $ET_o$  的首选方法。本研究利用自动气象站取得的气象资料和 4 种参考作物蒸散量的计算方法,对研究区 2006211~2007210 的牧草参考作物蒸散量进行了计算,结果见图 1。

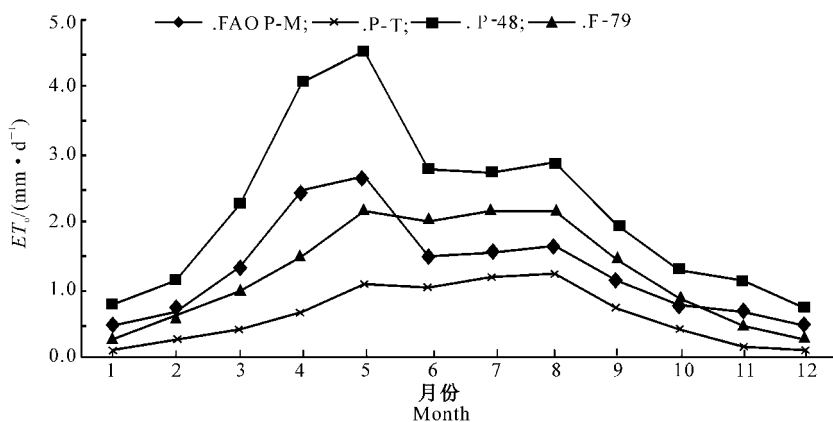


图 1 不同方法计算的三江源温性草原参考作物蒸散量的动态变化

Fig. 1 Dynamic variation of reference evapotranspiration with different methods

图 1 表明,三江源温性草原的参考作物蒸散量季节分布极不均匀,总体上,春季(3~5月) > 夏季(6~8月) > 秋季(9~11月) > 冬季(12月~翌年2月)。由于参考作物蒸散量主要受气温、湿度、日照时数、风速等因素的影响造成了蒸散分布不均匀,因

此表现出春季蒸散高,冬季蒸散小的特征。这与史建国等<sup>[1]</sup>对黄河流域的研究结论基本一致。

以 FAO P2M 公式的计算结果为参照,与其他 3 种方法进行了 t 检验及回归分析,结果见表 1。

表 1 FAO P2M 公式与其他 3 种方法计算结果之间的回归分析

Table 1 Regression statistics between FAO P2M and other methods of reference evapotranspiration

方法 Method	回归方程截距 Constant of regression	回归方程斜率 Slope of regression	相关系数(R) Coefficient of correlation	t2检验(p= 0.05) t test
P248	- 0.002	0.587	0.997	- 6.058
P2T	0.520	1.238	0.725	4.473
F279	0.326	0.772	0.803	0.306

注:  $t_{0.05} = 2.201$ ;  $t_{0.01} = 3.106$ 。

Note:  $t_{0.05} = 2.201$ ;  $t_{0.01} = 3.106$ 。

表 1 表明,FAO P2M 公式的计算结果与其他 3 种方法之间均呈正相关,其中与 F279 修正式计算结

果的差异不显著,与其他两种方法计算结果之间差异显著。可知用 F279 修正式估算三江源温性草原

参考作物蒸散量,可以得到与 FAO P2M 公式相近的结果。

#### 4.2 三江源温性草原参考作物蒸散量计算结果之间的偏差分析

由图 2 可以看出, P248 公式与 FAO P2M 公式计算结果的绝对偏差为正,说明 P248 公式计算的参考作物蒸散量比 FAO P2M 公式偏大;而 P2T 公式与 FAO P2M 公式计算结果的绝对偏差为负,说明 P2T 公式计算的参考作物蒸散量比 FAO P2M 公式

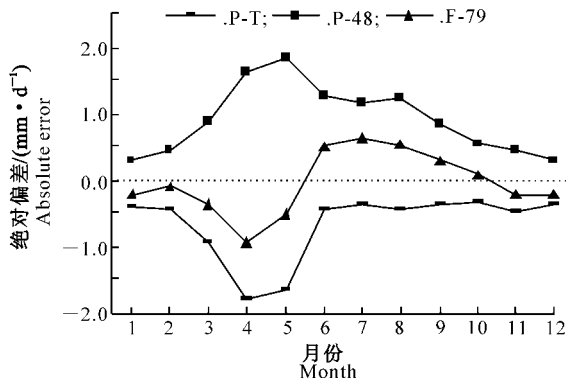


图 2 FAO P2M 公式与其他 3 种方法计算结果之间的绝对偏差

Fig. 2 Absolute errors between FAO Penman2Monteith and other three methods

P248 公式、F279 修正式,均采用了与 FAO P2M 公式不同的风速修正方法,这是造成偏差的主要原因,尤其在相对湿度较小、风速和温差较大的干旱地区,偏差会更大<sup>[16]</sup>。另外,F279 修正式未考虑土壤热通量,当净辐射值比较小时,其与 FAO P2M 公式的偏差就会较大<sup>[17]</sup>。而在 P2T 公式中,缺少空气动力项而引入了常数( $A=1.26$ ),相当于将空气动力项的影响折算为辐射项的 26%。而常数  $A=1.26$  是 Priestley 和 Taylor 利用海面和湿润陆面的资料得出的经验值,但许多学者通过分析各自的资料得到了不同的  $A$  值,并且发现  $A$  有日变化和季节变化<sup>[14]</sup>。这表明  $A$  不是一个常数,它实际上反映了平流的变化情况,在不同平流条件下,  $A$  可以有不同的值。因此,在三江源使用 P2T 公式,应根据不同季节和月份对  $A$  重新进行修订。综上所述,造成偏差的主要原因是 4 种模型各自选用了不同的辐射项和动力项所致。

## 5 结 论

(1) 运用 FAO Penman2Monteith 公式对三江源温性草原参考作物蒸散量的计算结果表明,三江

偏小。

由图 2 和图 3 可见, P248 公式、P2T 公式、F279 修正式计算的参考作物蒸散量,与 FAO P2M 公式计算结果之间的平均绝对偏差分别为 0.67, 0.91 和 0.04 mm/d,最大绝对偏差分别为 1.80, 1.83 和 0.93 mm/d;而平均相对偏差分别为 54.37%, 70.03% 和 5.44%,最大相对偏差为 79.31%, 82.50% 和 44.19%。

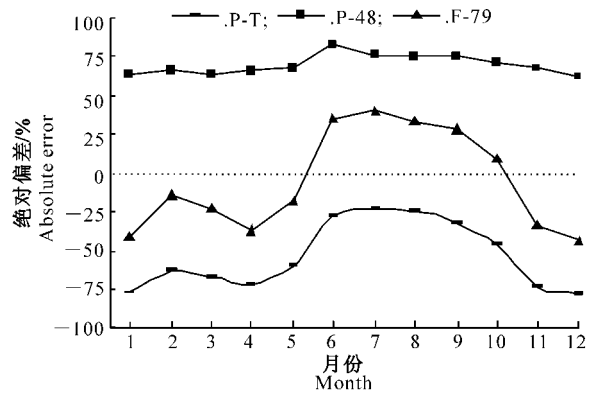


图 3 FAO P2M 公式与其他 3 种方法计算结果之间的相对偏差

Fig. 3 Relative errors between FAO Penman2Monteith and other three methods

源温性草原的参考作物蒸散量季节分布极不均匀,表现出春季、夏季、秋季、冬季依次减小的趋势。以 FAO Penman2Monteith 公式的计算结果为对照,与其他 3 种方法进行了  $t$  检验及回归分析,结果表明, F279 与 FAO P2M 公式的计算结果相近,与其他两种方法的计算结果有显著差异。

(2) 就三江源温性草原而言, P248 公式计算的参考作物蒸散量比 FAO P2M 公式偏大,而 P2T 公式计算的参考作物蒸散量比 FAO P2M 公式偏小。造成偏差的主要原因是 4 种模型各自选用了不同的辐射项和动力项。

(3) 在利用气象数据计算蒸散量的过程中,要根据当地的需要采用不同的公式。在三江源温性草原,可采用 F279 修正代替标准的 FAO P2M 公式计算参考作物蒸散量。

## [参考文献]

- [1] 史建国,严昌荣,何文清,等. 黄河流域潜在蒸散量时空格局变化 [J]. 干旱区研究, 2007, 24(6): 773-778.  
Shi J G, Yan C R, He W Q, et al. Study on spatiotemporal change of evapotranspiration in the Yellow River basin [J]. Ar2

- id Zone Research, 2007, 24(6): 7732778. (in Chinese)
- [2] Rana G, Katerji N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under mediterranean climate: a review [J]. European Journal of Agronomy, 2000, 13: 122-153.
- [3] 王笑影. 农田蒸散估算方法研究进展 [J]. 农业系统科学与综合研究, 2003, 19(2): 82-84.  
Wang X Y. Study of the estimating methods for evapotranspiration in farmland [J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2003, 19(2): 82-84. (in Chinese)
- [4] 赵炳祥, 陈佐忠, 胡林, 等. 草坪蒸散研究进展 [J]. 生态学报, 2003, 23(1): 142-157.  
Zhao B X, Chen Z Z, Hu L, et al. Turfgrass evapotranspiration: a review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(1): 142-157. (in Chinese)
- [5] 宋炳煜. 草原区不同植物群落蒸发蒸腾的研究 [J]. 植物生态学报, 1995, 19(4): 312-328.  
Song B Y. Studies on evapotranspiration from different plant communities in steppe region of inner monglia [J]. Acta Phytologica Sinica, 1995, 19(4): 312-328. (in Chinese)
- [6] 程积民. 黄土丘陵半干旱区几种牧草蒸腾作用的研究 [J]. 干旱区研究, 1989(2): 62-65.  
Cheng J M. A study on the transpiration of a few species of herbage in the semiarid zone of loess hills [J]. Arid Zone Research, 1989(2): 62-65. (in Chinese)
- [7] Nagakawa S. Study on Evapotranspiration from Pasture [R]. Japan: Annual Report of Environmental Research Center, The University of Tsukuba, 1984: 322-33.
- [8] 王根绪, 沈永平, 钱鞠, 等. 高寒草地植被覆盖变化对土壤水分循环影响研究 [J]. 冰川冻土, 2003, 25(6): 653-659.  
Wang G X, Shen Y P, Qian J, et al. Study on the influence of vegetation change on soil moisture cycle in alpine meadow [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(6): 653-659. (in Chinese)
- [9] 宋克超, 康尔泗, 金博文, 等. 黑河流域山区植被带草地蒸散发试验研究 [J]. 冰川冻土, 2004, 26(3): 342-356.  
Song K C, Kang E S, Jin B W, et al. An experimental study of grassland evapotranspiration in the mountain watershed of the hei river basin [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(3): 342-356. (in Chinese)
- [10] 陈孝全, 苟心境. 三江源自然保护区生态环境 [M]. 青海西宁: 青海人民出版社, 2002: 102-108.  
Chen X Q, Gou X J. Ecological environments of Sanjiang yu an natural reserve [M]. Xining Qinghai: Qinghai People Press, 2002: 102-108. (in Chinese)
- [11] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. FAO irrigation and drainage, crop evapotranspiration [M]. Rome Italy: FAO, 1998.
- [12] 李晓军, 李取生. 东北地区参考作物蒸散确定方法研究 [J]. 地理科学, 2004, 24(2): 212-216.  
Li X J, Li Q S. Study on calculating methods for reference crop evapotranspiration in Northern China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2004, 24(2): 212-216. (in Chinese)
- [13] Burman R, Pochop L O. Developments in atmospheric science, evaporation, evapotranspiration and climate data [M]. Netherlands: Elsevier Science, 1994: 732-104.
- [14] Mc Ananey K J, Itier B. Operational limits to the Priestley-Taylor formula [J]. Irrig Sci, 1996, 17: 37-43.
- [15] Frere M, Popov G F. Agrometeorological crop monitoring and forecasting [M]. Rome: FAO, 1979.
- [16] Martin S. The application of climatic data for planning and management of sustainable rain fed and irrigated crop production [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 103: 92-108.
- [17] 杜晓东, 刘作信, 张运福. 参考作物蒸散方法及其评价 [J]. 河南农业大学, 2001, 35(1): 57-61.  
Du Y D, Liu Z X, Zhang Y F. Evaluation of two reference crop evapotranspiration calculation methods [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2001, 35(1): 57-61. (in Chinese)