

甘肃地区参考作物蒸散量时空变化研究

封志明, 杨艳昭, 丁晓强, 郑海霞
(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要: 区域水土平衡模型的建立通常需要确定计算参考作物蒸散量的模型, 这一模型的精确与否, 直接影响整体预测模型的最终预报精度。运用 FAO-24 Blaney-Criddle 法、FAO-24 Radiation 法、FAO PPP-17 Penman 法及 FAO Penman-Monteith (98) 4 种方法, 对甘肃省 1981~ 2000 年 33 个站点的月参考作物蒸散量进行了计算。对比分析结果表明, FAO Penman-Monteith (98) 模型的精度与灵敏度均显示了较强的优越性。运用该模型对甘肃省参考作物蒸散量的时空分布特征进行研究表明: 甘肃省参考作物蒸散量年内逐月演变曲线呈单峰状; 年际蒸散量变化与夏季年际波动变化存在较高一致性; 全年参考作物蒸散量分布具有从东南向西北递增的趋势。
关键词: 参考作物蒸散量; Penman-Monteith; 时空变化; 甘肃地区
中图分类号: S152.7; S274.1 文献标识码: A 文章编号: 1002-6819(2004)01-0099-05

0 引 言

参考作物蒸散量是一个完全覆盖土地、不缺水、茁壮生长、高 8~ 15 cm 的植被扩大面积上的蒸散率^[1]。它是区域能量平衡和水分平衡的重要组成部分。无论是研究农田尺度上的水分平衡, 还是建立区域水土平衡模型, 准确地测定和估算参考作物蒸散量不仅是制定作物灌溉制度和区域灌溉需水量计划的基本依据, 而且业已成为监测农业旱情、提高区域水资源利用效率的关键环节。

依据估算方法采用数据源的差异, 参考作物蒸散量的估算方法主要有 4 种, 即温度法、辐射法、综合法和皿蒸法^[2]。温度法是将温度作为计算蒸散量主要指标的一种方法, 主要包括 Thornthwaite、Blaney-Criddle、Hargreaves 等模型; 辐射法主要采用辐射与温度两项指标, FAO-24 Radiation 及 Priestley-Taylor 是该种方法的典型代表; 综合法全面考虑了蒸散过程中的辐射、温度、湿度、风速及作物本身特性等要素, Penman、Penman-Monteith 公式及其修正模型构成目前国内外应用最普遍的综合法模型; 皿蒸法是根据实测的蒸发皿数据进行估算蒸散量的一种方法, 主要有 FAO-24 Pan 等。A SCE 用 11 种不同气候条件下测取的蒸渗仪资料作参照, 分析比较了 20 种参考作物蒸散量计算公式的精度。结果表明, 在干旱地区计算结果较好的方法分别是 FAO-24 Blaney-Criddle (温度法)、FAO-24 Radiation (辐射法)、FAO PPP-17 Penman (综合法) 及 FAO Penman-Monteith (综合法)。

结合前人工作, 本文选取上述 4 种方法逐月计算了甘肃省 33 个气象站点、1981~ 2000 年的参考作物蒸散量, 并对各种模型的精度与灵敏度进行了检验, 最后选

取最优模型对全省参考作物蒸散量的时间及空间变化特征进行了分析。

1 资料与方法

1.1 数据来源

以甘肃省境内的 33 个气象台站作为样本点, 其分布位置介于 33°40'N~ 41°58'N、94°68'E~ 107°63'E 之间。所采用数据为 1981~ 2000 年各个站点逐日或逐月资料。原始气象数据均来自于国家气象局气象信息中心。表 1 中列举了数据处理后玉门、张掖、兰州、天水 4 个代表性站点多年平均的部分气象资料数据。

表 1 典型站点多年平均气象资料数据

Table 1 Climatic data in typical stations					
站名	温度 /℃	降水 /mm	平均相对湿度 /%	日照 /h	风速 /m·s ⁻¹
玉门	7.51	63.06	41.94	3214.32	2.54
张掖	8.16	127.33	51.93	3092.28	1.32
兰州	10.85	308.02	54.81	2372.76	0.68
天水	11.83	494.38	66.18	1805.40	0.72

1.2 参考作物蒸散量计算方法

1.2.1 FAO-24 Blaney-Criddle 模型

该方法认为在土壤水分供应充足的条件下, 参考作物蒸发蒸腾量随着月平均气温和每月白昼小时数占全年白昼小时数的百分数而变化^[3], 在国外较为通用。其计算公式为^[4,5]

$$E_{TP} = a + b \cdot p (0.46T + 1.83)$$

式中 $a = 0.0043RH_{min} - n/N - 1.41$;
 $b = 0.81917 - 0.0040922RH_{min} + 1.0705n/N$
 $+ 0.065649U_d - 0.0059684RH_{min}/N -$
 $0.0005967RH_{min}U_d$

式中 E_{TP} ——参考作物蒸散量, mm/d; T ——月平均气温, °C; p ——月内日平均昼长时数与全年昼长时数的比值; n/N ——实测日照时数和可能最大日照时数的比值; U_d ——白昼平均风速, m/s; RH_{min} ——最小相对湿度, %。

收稿日期: 2003-06-13 修订日期: 2003-09-29
基金项目: 国家自然科学基金项目 (70173023); 中科院地理科学与资源所知识创新领域前沿项目 (KZCX3-SW-333)
作者简介: 封志明 (1963-), 男, 河北平山人, 研究员, 博士生导师。主要从事农业资源高效利用与区域可持续发展研究, 及资源科学的理论探讨。北京 中国科学院地理科学与资源研究所, 100101

1.2.2 FAO-24 Radiation 模型

该方法源于Makkink 公式, 主要根据太阳辐射资料来估算参考蒸散量。其计算公式为^[6]

$$E_{TP} = a + b \left(\frac{\Delta}{\Delta + r} R_s \right)$$

其中 $a = -0.3$;
 $b = 1.066 - 0.0013RH_{mea} + 0.045U_d - 0.0002RH_{mea}U_d - 0.0000315RH_{mea}^2 - 0.0011U_d^2$

式中 R_s ——太阳辐射量, MJ·m⁻²·d⁻¹; U_d ——白昼平均风速, m/s; RH_{mea} ——平均相对湿度, %; Δ ——饱和水汽压 - 温度曲线斜率, kPa/°C; r ——干湿计常数, kPa/°C。

1.2.3 FAO PPP-17 Penman 模型

Penman 公式是国内外应用最普遍的综合法公式。它在能量平衡法的基础上, 引用干燥力的概念, 经过简捷的推导, 得到了一个用普通气象资料就可计算参考作物蒸散量的公式。目前应用较广的是 FAO PPP-17 Penman 修正式, 其计算公式如下^[7,8]

$$E_{TP} = \frac{\frac{p_0}{p} \frac{\Delta}{r} R_n + 0.26(es - ea)(1 + 0.54U_2)}{\frac{p_0}{p} \frac{\Delta}{r} + 1}$$

式中 E_{TP} ——参考作物蒸散量, mm/d; R_n ——净辐射, mm/d; es ——饱和水汽压, hPa; ea ——实际水汽压, hPa; Δ ——饱和水汽压 - 温度曲线斜率, hPa/°C; r ——干湿计常数, hPa/°C; p_0, p ——分别为海平面气压和站点地面气压, hPa。

1.2.4 FAO Penman-Monteith (98) 模型

Penman-Monteith 模型是以能量平衡和水汽扩散理论为基础的, 它将整个作物看成一个整体, 假定作物冠层为一片大叶, 潜热交换发生在叶面上, 从而得出计算植被状况下参考蒸散量的值, 1998 年联合国粮食及农业组织推荐将 FAO Penman-Monteith 模型作为计算参考作物蒸散量的唯一标准方法^[9]。其具体计算公式为

$$E_{TP} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + r \frac{900}{T + 273} U_2 (es - ea)}{\Delta + r(1 + 0.34U_2)}$$

式中 E_{TP} ——参考作物蒸散量, mm/d; R_n ——净辐射, MJ·m⁻²·d⁻¹; G ——土壤热通量, MJ·m⁻²·d⁻¹; es ——饱和水汽压, kPa; ea ——实际水汽压, kPa; Δ ——饱和水汽压 - 温度曲线斜率, kPa/°C; r ——干湿计常数, kPa/°C。

2 结果分析

2.1 各种模型的精度分析

由于研究时间及空间尺度均较大, 获取实测数据较困难。因此, 研究中我们将上述 4 种模型的估算结果与各个站点 20 cm 蒸发皿实测值进行了相关性分析。尽管因参考作物蒸散量不仅受区域气候因子的影响, 还与作物自身的特性有关, 导致水面蒸发量的实测值与各个模型估算的参考作物蒸散量的绝对值差异较大。但由于所处气候条件的一致性, 各个模型的计算结果与实测蒸发皿值依然显示了较强的相关性。其典型年(1998 年)的结果如图 1 所示。

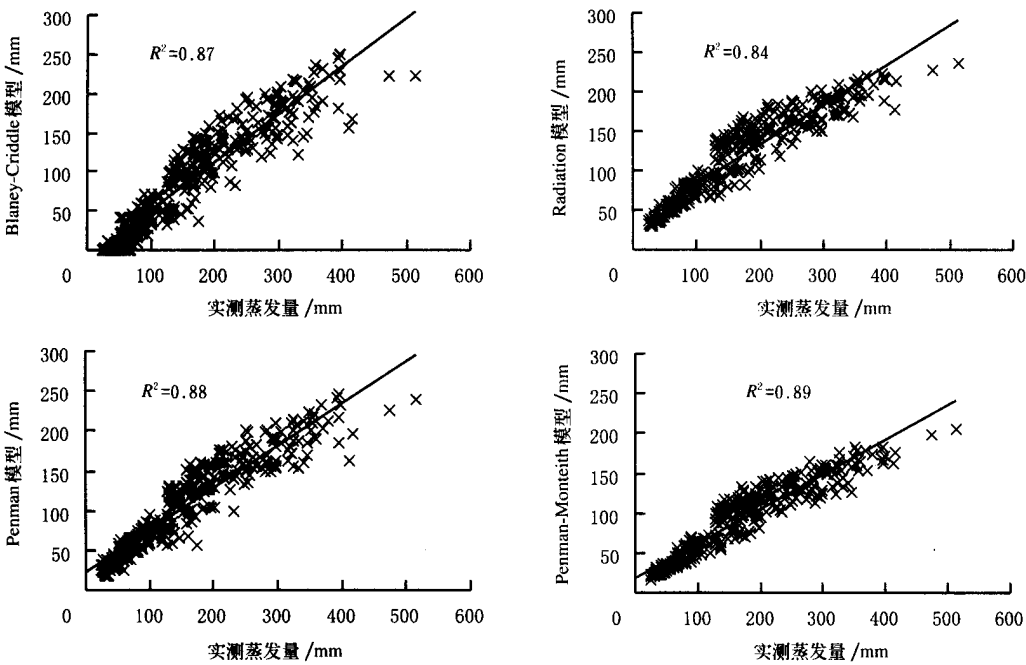


图 1 各种模型估算的蒸散量与实测值相关性

Fig. 1 Correlation between the calculated reference crop E_{TP} with the measured ones

从图 1 中可看出, FAO Penman-Monteith 与 20 cm 蒸发皿的实测值具有最好的相关性, 其相关系数平方达 0.89; FAO PPP-17 Penman 法次之; FAO-24 Blaney-Criddle 温度法与实测值的相关系数平方虽达到了 0.87, 但由于其将温度作为计算的唯一主要指标, 因而对于温度较低时, 其值明显偏低; FAO-24 Radiation 法的相关系数平方值最小, 仅为 0.84。

2.2 各种模型的灵敏度分析

灵敏度是模型中某一参数在其取值发生微小变化时, 使模型的输出结果发生数值变化的大小程度^[10]。依据这一指标, 可以对各个模型的稳健程度进行分析。在本文中, 模型对参数的灵敏度由下式求得^[11]

$$S_x = \frac{E_{TP}(1.1X_i) - E_{TP}(0.9X_i)}{E_{TP}(X_i)}$$

式中 S_x ——模型的蒸散量; X_i ——模型中的某一参数。

从表 2 中我们可以看出, FAO-24 Blaney-Criddle 方法对温度最为敏感, 灵敏度高达 0.58, 其次是最小相对湿度、日照时数及白昼风速; FAO-24 Radiation 方法对太阳辐射量最为敏感, 其值为 0.23, 因此太阳辐射量的测量或计算方法是该模型精度的关键; FAO PPP-17 Penman 对各种参数的灵敏度均较小, 其中影响最大的为净辐射量和饱和水汽压值, 均为 0.13; FAO Penman-Monteith 98 模型的稳定性较好, 饱和水压对其精度影响最大, 值为 0.15, 其次是净辐射量。对其影响最小的是土壤热通量, 其值仅为 0.01。总之, FAO Penman-Monteith 98 和 FAO PPP-17 Penman 显示了较强的稳定性, FAO-24 Radiation 次之, FAO-24 Blaney-Criddle 最差。

表 2 各模型的灵敏度分析

Table 2 The parameter sensitivity of several models				
参数	Blaney-Criddle	Radiation	Penman	Penman-Monteith
T	0.58			
RH	0.40	0.07		
n	0.30			
U	0.09	0.01	0.03	0.05
R_s		0.23		
Δ		0.10	0.02	0.02
r		0.10	0.02	0.02
R_n			0.13	0.11
G				0.01
e_s			0.13	0.15
e_a			0.04	0.05
p			0.03	

根据对各模型的精度和灵敏度进行分析, 我们认为 FAO Penman-Monteith 98 模型精度较高且稳定, 利用此模型对甘肃省近 20 年的参考作物蒸散量的时空变化特征进行了分析。

2.3 参考作物蒸散量的时间变化

由上述对 FAO Penman-Monteith 模型的稳定性分析可知, 影响蒸发量大小的主要因子是水汽压, 其次是日照、风速等。由于对水汽压起决定作用的因子是气

温, 因此温度成为支配蒸散量年内变化的主要因子。图 2 为甘肃省典型站点多年逐月平均蒸散量变化曲线。从图中我们可以发现, 全省各地蒸散量逐月变化曲线均呈单峰型, 存在明显的季节变化特征。夏季达到全年的最高值, 春、秋季次之, 冬季最小。可见蒸散量受温度变化的影响十分显著。

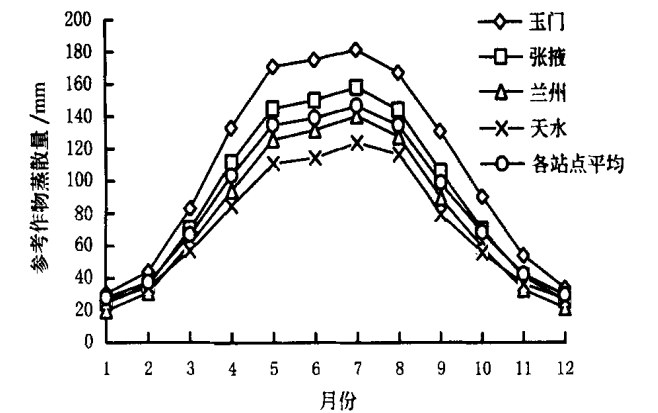


图 2 甘肃省典型站点多年逐月平均蒸散量变化曲线
Fig. 2 Multi-year monthly average of reference crop E_{TP}

蒸散量的大小不仅受温度的影响, 同时也受日照和湿度等因子的作用。1981~2000 年, 玉门、张掖、兰州 3 个站点 5 月份的平均温度分别为 15.54、15.81、17.73, 而 8 月份的值依次为 20.37、20.78、21.95。可是我们从图 2 中发现, 这 3 个站点 5、6 月份的蒸散量要高于 8 月份的值, 整个变化曲线呈偏峰状。造成这种偏离的主要因子即为日照和湿度等要素。以 20 年的平均值来计, 这 3 个站点 8 月份降水量分别是 5 月份的 186%、227% 和 192%, 可见由于 8 月份处于雨季, 云量多, 日照时数少, 相对湿度大, 从而形成蒸散量反而相对较少的状况。而对于天水, 因其温度 8 月较 5、6 月份高, 而降水等因子的差异较小, 从而蒸散量 8 月稍高于 5、6 月份。

图 3 为玉门 a 与天水 b 两个站点年际蒸散量变化曲线图。从图中可以看出, 两个典型站点均是夏季蒸散量的年际波动最大, 春季高于秋季, 冬季最小, 且夏季蒸散量的波动趋势与全年蒸散量的年际波动趋势基本一致。研究中对各季节的蒸散量波动趋势与全年波动趋势进行相关分析, 结果表明: 夏季蒸散量与全年蒸散量的相关性最好, 玉门与天水两个站点的相关系数分为 0.82 和 0.77; 冬季最差, 两个站点分为 0.05 和 0.12。因此我们认为夏季蒸散量的年际波动是全年蒸散量年际波动的主导因子。

2.4 参考作物蒸散量的空间变化

甘肃省位于我国东部季风区、西北干旱区和青藏高原区三大自然区划交汇处, 其地貌类型多样, 气候条件复杂。因此, 其参考作物蒸散量的空间差异也较大。整体分布具有从东南向西北递增的趋势。河西走廊西部年平均蒸散量在 1300 mm 以上, 为全省最高。甘南高原西部和陇南东南部的微成盆地年平均蒸散量仅为 810

mm 左右, 是全省蒸量最小的地区。其典型月份的蒸散量分布情况如图 4 所示。

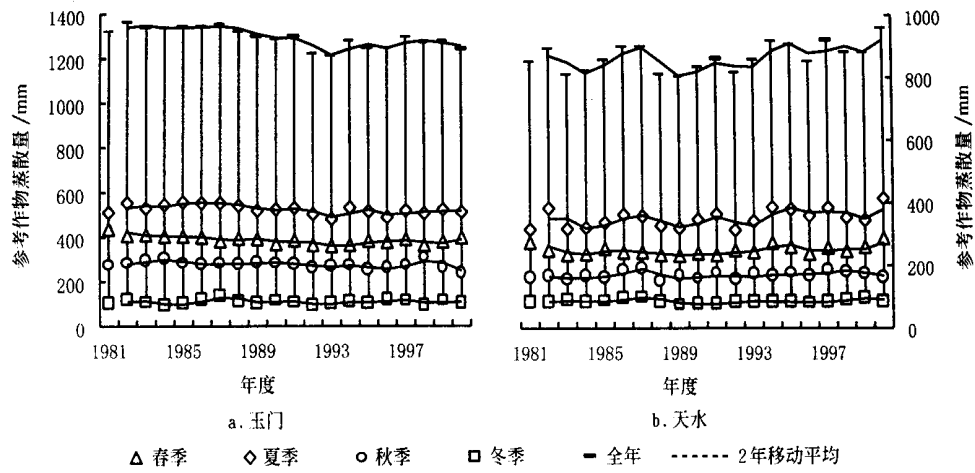


图 3 甘肃省典型站点年际蒸散量变化曲线图
Fig 3 Variation of annual reference crop E_{TP} in typical stations

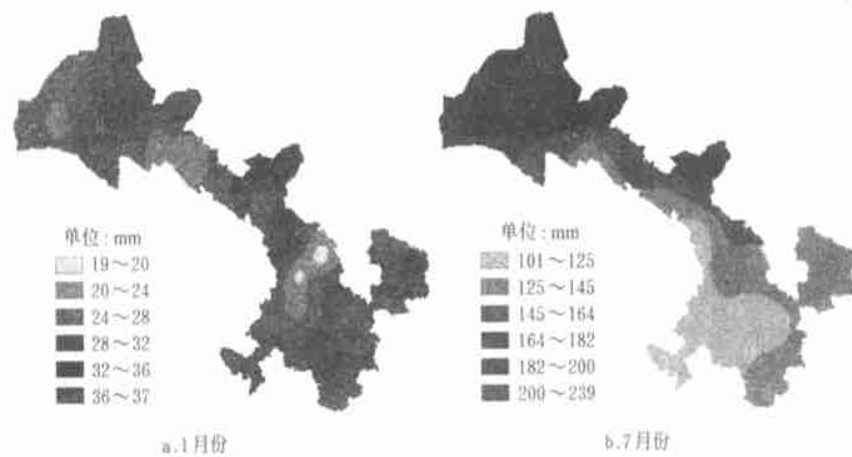


图 4 甘肃省参考作物蒸散量分布图
Fig 4 Distribution of reference crop E_{TP} in Gansu Province

由图 4a 我们可以看出, 1 月份全省蒸散量变化范围在 19~ 37 mm 之间, 各个站点之间差异较小, 最小值出现在靖远至兰州一带; 最大值位于陇南的文县、武都等地。由于 1 月为全省温度最低的月份且各个地区的温度差异不大, 因此蒸散量的空间变化差异不明显。受局部地形及小气候的影响, 全省蒸散量的分布形成了诸多以极值区域为中心的斑块地区。文县等地蒸散量最大是因其 1 月份平均温度均在 0 以上, 为全省最高区; 靖远和兰州地区则是因其海拔高度较低, 风速较小等局部因子的作用所致。

由图 4b 我们可以看出, 7 月份全省蒸散量变化范围在 101~ 239 mm 之间, 各个站点之间的差异显著。其分布具有明显的纬度地带性规律, 即表现为从东南向西北递增的变化趋势。甘南高原地区 7 月因降水量增大, 月日照时数仅为 185 h 左右, 因而成为全省蒸散量的低值区; 西北部的金塔等地, 降雨量稀少, 月日照时数高达 320 h 余, 相对湿度在 15% 以下, 从而形成全省 7 月份蒸散量的最高区。

3 结论与讨论

本文在整理甘肃省近 20 年气象资料的基础上, 对计算参考作物蒸散量的 FAO-24 Blaney-Criddle 法、FAO-24 Radiation 法、FAO PPP-17 Penman 法及 FAO Penman-Monteith (98) 4 种方法进行了对比分析, 在各模型估算结果与实测值的相关性分析和模型的灵敏度分析的基础上, 对甘肃省参考作物蒸散量的时空分布特征进行了研究, 主要结论如下。

- 1) 在本文验证的 4 种计算参考作物蒸散量的模型中, FAO Penman-Monteith (98) 精度最高, FAO PPP-17 Penman 次之, FAO-24 Blaney-Criddle 较差, FAO-24 Radiation 最差。
- 2) 对各模型进行灵敏度分析结果表明: FAO Penman-Monteith (98) 和 FAO PPP-17 Penman 对各参数都不太灵敏, 显示了较强的稳定性, FAO-24 Radiation 次之, FAO-24 Blaney-Criddle 最差。
- 3) 受温度影响, 甘肃省参考作物蒸散量年内逐月演变曲线呈单峰状。综合湿度、日照、风速等因子, 其分布模式呈偏峰状态。参考作物蒸散量的年际波动与夏季

年际波动曲线有较高的一致性, 夏季蒸散量的年际波动是全年蒸散量年际波动的主导因子。

4) 甘肃省参考作物蒸散量分布具有从东南向西北递增的趋势, 夏季各地区差异显著, 冬季差异较小。

[参 考 文 献]

- [1] FAO-Food and Agriculture Organization Relationship Between Crop Production with Water Resources [M]. Rome: FAO-Food and Agriculture Organization Press, 1979.
- [2] Amir K, Martin S. FAO methodologies on crop water use and crop water productivity[Z]. Rome, 2001.
- [3] Chen Yumin. Main Crop Water Requirement and Irrigation of China [M]. Beijing: China Water Power Press, 1995.
- [4] Li Yulin, Cui Jianhuan, Zhang Tonghui. Comparative study on calculation method of reference evapotranspiration[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(4).
- [5] Hussein M, Ghobari A L. Estimation of reference evapotranspiration for southern region of Saudi Arabia[J]. Irrigation Science, 2000, 19.
- [6] Victor L, Hauser, et al. Draft protocol for controlling contaminated groundwater by phytostabilization[R]. Prepared for Air Force Center for Environmental Excellence, 1999, 11.
- [7] Mao Fei, Zhang Guangzhi, Xu Xiangde. Several methods of calculating the reference evapotranspiration and comparison of their results[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2000, (11).
- [8] Gong Yuanshi. Comparison of the reference evapotranspiration estimated by the Penman-Monteith and FAO-PPP-17 Penman methods[J]. Acta Agriculturae Universitatis Pekinensis, 1995, 21(1).
- [9] FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations. Crop Evapotranspiration-guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56 [M]. Rome: FAO-Food and Agriculture Organization, 1998.
- [10] Rana G, Katerji N. A measurement based sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration model for crops of different height and in contrasting water status[J]. Theoretical and Applied Climatology, 1998, 60.
- [11] Liu Shaomin, Sun Zhongping, Li Xiaowin, et al. A comparative study on models for estimating evapotranspiration[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2).

Temporal-spatial changing characteristics of reference crop evapotranspiration in Gansu Province

Feng Zhiming, Yang Yanzhao, Ding Xiaoqiang, Zheng Haixia

(Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: It is important to estimate reference crop evapotranspiration precisely in the process of regional water resources and land use balance evaluation. Some methods for estimating reference crop evapotranspiration were validated, which include FAO-24 Blaney-Criddle method, FAO-24 Radiation method, FAO PPP-17 Penman method and FAO Penman-Monteith (98) method. Analysis of the correlation between the calculated reference crop ET with the evaporation measured by 20 cm pan, FAO Penman-Monteith (98) performed the best, with R^2 value equaling 0.89, whereas values of R^2 for FAO PPP-17 Penman, FAO-24 Blaney-Criddle and FAO-24 Radiation was 0.88, 0.87, 0.84 respectively. Sensitivity analysis of these models showed that FAO Penman-Monteith (98) model and FAO PPP-17 Penman method were better in performance, while FAO-24 Blaney-Criddle method and FAO-24 Radiation method were worse. Furthermore, FAO Penman-Monteith (98) model was applied to calculate reference crop evapotranspiration in Gansu Province from 1981 to 2000 year. The results showed that the highest E_{TP} of multi-year monthly average was in July, and the variation of annual reference crop E_{TP} was consistent with the evapotranspiration variation of summer season, furthermore ET was the highest in southeast and the lowest in northwest.

Key words: reference crop evapotranspiration; Penman-Monteith; temporal-spatial changing; Gansu Province