

潜在蒸散发模型计算软件  
1.0

设计说明书

## 目录 2

1. 背景.....	4
1.1 设计目的.....	4
1.2 设计原理.....	4
1.3 软件用途和技术特点.....	5
2. 计算过程.....	5
2.1 Penman-Monteith formula (daily) .....	5
2.2 Hamon model (daily) .....	7
2.3 Thornthwaite method (daily or monthly) .....	8
2.4 Linacre method (daily) .....	8
2.5 Blaney-Criddle method (daily) .....	9
2.6 Kharrufa method (daily) .....	9
2.7 Hargreaves method (daily) .....	9
2.8 Romanenko method (monthly) .....	10
2.9 FAO-24 Radiation Method[11] .....	11
2.10 Priestley-Taylor Method (1972)[12] .....	11
2.11 Makkink Method (1957) .....	11
2.12 Turc Method (1961) .....	11
2.13 评价指标.....	12
3. 软件使用.....	12
3.1 硬件环境.....	12
3.2 软件环境.....	12
3.3 软件运行.....	13
3.3.1 软件前言 .....	13
3.3.2 模型选择 .....	14
3.3.3 资料输入 .....	15
3.3.4 蒸散发计算 .....	18
4. 计算结果.....	21
参考文献.....	22



## 1. 背景

### 1.1 设计目的

近百年来，地球气候系统正经历着显著的变化，加之剧烈的人类活动影响，不同程度地改变了水文循环过程。水资源是人类生存和发展不可或缺的自然资源，目前水资源短缺已成为全世界关注的热点问题，而蒸散发既是水量平衡和地表热量的组成部分，又是影响水循环的重要因子。因此，蒸散发对水资源的形成过程、变化规律和水资源评价方面都有重要作用。用于表述蒸发变量的主要有水面蒸发、潜在蒸发和实际蒸散发。而潜在蒸散发（PE）是参考作物蒸散发即充分供水情况下自由水面或下垫面有植被覆盖的区域的蒸散发能力，能够全面地反映一个地区的蒸散发能力，是实际蒸散发的上限值。潜在蒸散发（PE）在作物需水量、水资源合理配置、水库设计、现有项目灌溉效率评估、未来排水设计、气候干湿状况分析以及灌溉决策制定等方面研究得到广泛得重视与应用。此外潜在蒸散发与降水是大多数水文模型的输入，用于流域级别的水文水资源评价。直到如今，存在多种用于估算蒸发的方法，其可以分为五类：（i）水量平衡法；（ii）物质输移法；（iii）水热耦合法，（iv）基于辐射的方法和（v）基于温度的潜在蒸散发估算方法。许多这些方法的概述可在评论文章或书籍中找到。确定潜在蒸散发模型的可用性，所需各种数据类型以及正确使用各种方程所需的广泛专业知识使得难以选择最合适的蒸发方法。

本软件依据 12 种不同的潜在蒸散发模型计算公式，编写计算程序，比较不同潜在蒸散发模型的效用与可靠性。每种模型的计算原理、数据要求和使用情况各不相同，为广大水文科研工作者提供了方便而有力的计算工具。

### 1.2 设计原理

潜在蒸散发是实际蒸散发的理论上限，潜在蒸散发的估算一直是一个备受气象学家和水文学家关注的问题。常用的潜在蒸散发量的估算方法大致可以分为五种类型：综合法、温度法、辐射法、水量平衡法和质量传导法。其中，基于能量平衡和水汽扩散理论的 FAO56 Penman-Monteith 方法，既考虑了作物的生理特征，又涉及空气动力学参数的变化，具有充分的理论基础和较高的精度，在 1998

年被世界粮农组织（FAO）推荐为计算参考作物蒸散量的标准方法。但由于该方法需要的气象资料较多，很大程度上限制了其应用，因此国内外都在研究发展简单且精度满足要求的潜在蒸散发量估算方法，然而，这些潜在蒸散发量计算方法是在特定区域的试验基础上建立的，有其隐含的适用性。

### 1.3 软件用途和技术特点

本软件的主要用途：依据 12 种不同的潜在蒸散发模型计算公式，编写计算程序，比较不同潜在蒸散发模型的效用与可靠性。每种模型的计算原理、数据要求和使用情况各不相同，为广大水文科研工作者提供了方便而有力的计算工具。软件采用 R 语言进行编写，计算效率高、界面友好；软件运行环境要求简单，具有较强的稳定性和安全性。

## 2. 计算过程

### 2.1 Penman-Monteith formula (daily)

Input elements: 年月日；日平均、最高、最低气温（℃）；相对湿度（%）；日照时数（h）；气压（kPa）；风速(m3/s)；站点纬度(°)

世界粮农组织（FAO）推荐的 Penman-Monteith 潜在蒸散发模型以水汽扩散理论和能量平衡为基础，相对全面的考虑了影响潜在蒸散发的各个因素，是目前世界上工人的在干旱区和湿润区精度较高，相对误差较小的方法，计算日潜在蒸散发的公式如下：

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

其中  $ET_0$  是潜在蒸散发量（ $mm/d$ ）； $\Delta$  为饱和水汽压曲线斜率（ $kPa \cdot ^\circ C^{-1}$ ）； $G$  为土壤热通量密度（ $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ），当计算时长大于等于一天或者地表植被良好状态下  $G$  相对  $R_n$  值较小，可以忽略不计； $\gamma$  为干湿常数（ $kPa \cdot ^\circ C^{-1}$ ）； $u_2$  是 2 米高处的风速； $T$  为日平均气温（℃）， $T = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2}$ ； $R_n$  为净辐射（ $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ）； $e_s$  为饱和水汽压（kPa）； $e_a$  为实际水汽压（kPa）。

气象站数据仅包括温度、相对湿度、风速、日照时数和大气压，部分参数气象站取法获取，主要统计间接结算求得。

$$e_s = \frac{e^0(T_{\max}) + e^0(T_{\min})}{2} \quad (2)$$

$$e^0(T) = 0.6108 e^{\frac{17.277T}{T+273.3}} \quad (3)$$

$$e_a = \frac{RH}{100} \left[ \frac{e^0(T_{\max}) + e^0(T_{\min})}{2} \right] \quad (4)$$

式中： $e^0$  为瞬时饱和水汽压（kPa）； $RH$  为平均相对湿度（%）。

2m 高处的风速可由观测到的风速计算得到：

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} P \quad (6)$$

式中： $u_z$  为  $z$  米高处的风速，一般  $z=10$ ； $P$  为大气压（kPa）。

净辐射  $R_n$  是收入的短波辐射  $R_{ns}$  和支出的净长波辐射  $R_{nl}$  之差，即

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (7)$$

$$R_{ns} = (1 - a) R_s \quad (8)$$

$$R_{nl} = \sigma \left( \frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2} \right) \left( 0.34 - 0.14 \sqrt{e_a} \right) \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{s0}} - 0.35 \right) \quad (9)$$

式中： $a$  为反照率，取值为 0.23； $R_s$  为接收的太阳辐射（ $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ）；

$\sigma$  为斯蒂芬-玻尔兹曼常数，取值为  $4.903 \times 10^{-9} (MJ \cdot K^{-4} \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$ ； $R_{s0}$  为晴空辐射； $T_{\max}, T_{\min}$  为一天中的最高和最低温度，且  $K = ^\circ C + 273.16$ ；计算公式为：

$$R_s = \left( a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (10)$$

$$R_{s0} = (a_s + b_s) R_a \quad (11)$$

$$H = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (12)$$

式中：  $n$  为实际日照时数（h）；  $N$  为最大可能日照时数（h）；  $n/N$  为相对日照；  $a_s, b_s$  分别取值为 0.25 和 0.5；  $R_a$  为地球外辐射（ $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ），其计算公式为：

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r \left[ \omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) \right] \quad (13)$$

$$d_r = 1 + 0.33 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (14)$$

$$\delta = 0.408 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad (15)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\varphi) \tan(\delta)) \quad (16)$$

式中：  $G_{sc}$  为太阳常数，取值为  $0.082 MJ \cdot m^{-2} \cdot min^{-1}$ ；  $d_r$  为反转日地平均距离；  $\omega_s$  为日出时角（rad）；  $\varphi$  为纬度（rad）；  $\delta$  为太阳磁偏角（rad）；  $J$  为日序（number of day，这一天是一年中的第几天）。

## 2.2 Hamon model (daily)

Input elements: 年月日；日平均气温（ $^{\circ}C$ ）日照时数（h）

Hamon [1] 依据日平均气温推导出了一个计算潜在蒸散发的公式，表述为：

$$ET = 0.55 D^2 P_t \quad (17)$$

其中  $ET$  为潜在蒸散发，单位为：inch/day = 25.4mm/day，单位转换：

$$ET = 13.97 D^2 P_t \quad (18)$$

则此时  $ET$  的单位为：mm/day， $D$  为当天的日照时数（以 12h 计）， $P_t$  是饱和水蒸汽密度， $kg/m^3$ ：

$$P_t = \frac{4.95 e^{0.062T}}{100} \quad (19)$$

其中  $T$  是日平均气温， $^{\circ}C$ 。

### 2.3 Thornthwaite method (daily or monthly)

Input elements: 年月日; 日平均气温 (°C); 日照时数 (h)

需要说明的是, Thornthwaite 潜在蒸散发模型是经验性再分配式蒸散发模型, 在再分配过程考虑日尺度或者月尺度, 这可能会对计算精度产生影响。

Thornthwaite (1948)[4]基于水量平衡于水汽充足的山谷地区建立月平均气温与蒸散发的关系, 计算步骤如下:

$$i = \left( \frac{T_m}{5} \right)^{1.51} \quad (20)$$

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j \quad (21)$$

其中:  $I$  是年热指数 (heat index);  $i$  是  $j$  月平均热指数, 且当月平均气温低于 0°C 时,  $i=0$ ;  $T_m$  是  $j$  月的平均气温 (°C)。潜在蒸散发  $ET$  (单位: mm) 计算公式为:

$$ET = C \left( \frac{10T_m}{I} \right)^a \left( \frac{d}{12} \right) \left( \frac{N}{30} \right) \quad (22)$$

式中: 常数  $C$  为 16;  $a = 67.5 \cdot 10^{-8} I^3 - 77.1 \cdot 10^{-6} I^2 + 0.0179 I + 0.492$ , 参数  $a$  值的取值范围为 [0, 4.25][5]; 年热指数  $I$  的取值范围为 [0, 160]; 当月平均温度低于 0°C 时,  $ET=0$ ;  $N$  为月的天数 (取值为 28, 29, 30 或者 31);  $d$  为月或日的日照时间 (以 12h 计), 可以根据纬度和季节来确定。

### 2.4 Linacre method (daily)

Input elements: 年月日; 日平均气温 (°C); 相对湿度 (%); 站点纬度 (°)

在水分充足的植被环境, 反射率约为 0.25 的情形下, Linacre (1977) [6]简化了 Penman 公式, 表述如下:

$$ET = \frac{500T_h / (100 - A) + 15(T_a - T_d)}{80 - T_a} \quad (23)$$

其中  $ET$  是潜在蒸散发 (mm/d);  $T_h = T + 0.006h$ ,  $h$  是高程 (m), 通常取值为 2m, 与 Ponman-Monteith 模型相匹配;  $A$  是纬度 (°);  $T_d$  是露点温度,



$T_a$  是日平均气温,  $T_a, T_d, T_h$  都以 $^{\circ}\text{C}$ 为单位; 公式中的变量只与位置和温度有关。

## 2.5 Blaney-Criddle method (daily)

Input elements: 年月日; 日平均气温 ( $^{\circ}\text{C}$ ); 日照时数 (h)

Blaney 和 Criddle (1950)[7]在美国西部广为使用, 计算表述如下:

$$ET = kp(0.46T_a + 8.13) \quad (24)$$

其中  $ET$  是一段时期 (月或日) 内的潜在蒸散发 (mm);  $p$  是指这段时期内的日照时间与全年的日照时间的比值, 取值范围为[0,1];  $k$  是每月消耗系数, 与植被类型, 位置和季节有关[7], 在生长季  $k$  值的变化范围为[0.5,1.2], 一般情况下取均值 0.85, 也可以根据气象站点用新率定。一般而言,  $k$  值需要调节;

## 2.6 Kharrufa method (daily)

Input elements: 年月日; 日平均气温 ( $^{\circ}\text{C}$ ); 日照时数 (h)

Kharrufa (1985) [2]依据  $ET/P$  与  $T$  的关系, 得到如下公式:

$$ET = 0.34pT_a^{1.3} \quad (25)$$

式中  $ET$  是 Kharrufa 潜在蒸散发量 (mm/month),  $T_a, p$  的解释与上式一样。

## 2.7 Hargreaves method (daily)

Input elements: 年月日; 日平均、最高、最低气温 ( $^{\circ}\text{C}$ ); 相对湿度 (%); 站点纬度( $^{\circ}$ )

由于太阳辐射数据通常情况下难以获得, Hargreaves (1985)[8]用地球外辐射  $R_a$  代替太阳辐射  $R_s$  计算潜在蒸散发量,

$$ET = 0.0023R_a \cdot TD^{1/2}(T_a + 17.8) \quad (26)$$

其中  $TD$  为最高与最低气温差 ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $R_a$  为地球外辐射 ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ), 以等效蒸发单位表示; 其计算公式为:

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (27)$$

$$d_r = 1 + 0.33 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (28)$$

$$\delta = 0.408 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad (29)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\varphi) \tan(\delta)) \quad (30)$$

式中：  $G_{sc}$  为太阳常数，取值为  $0.082 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ ； $d_r$  为反转日地平均距离； $\omega_s$  为日出时角（rad）； $\varphi$  为纬度（rad）； $\delta$  为太阳磁偏角（rad）； $J$  为日序（number of year，这一天是一年中的第几天）。

## 2.8 Romanenko method (monthly)

Input elements: 年月日；日平均气温（℃）；相对湿度（%）

Romanenko (1961)[9]依据平均气温与相对湿度的关系建立潜在蒸散发模型，

$$ET = 0.0018(25 + T_a)^2 (100 - RH) \quad (31)$$

其中  $T_a$  是平均气温（℃）； $RH$  为月平均相对湿度，计算公式表示为：

$$RH = \frac{e^0(T_d)}{e^0(T_a)} \times 100\% \quad (32)$$

其中  $e^0$  是瞬时饱和水汽压，计算为：

$$e^0(T) = 33.8679 \left[ (0.00738T + 0.8072)^8 - 0.000019|1.8T + 48| + 0.001316 \right] \quad (33)$$

露点温度[10]的计算公式如下：

$$T_d = \frac{B_1 \left[ \ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{A_1 T}{B_1 + T} \right]}{A_1 - \ln\left(\frac{RH}{100}\right) - \frac{A_1 T}{B_1 + T}} \quad (34)$$

式中： $T_d$  为露点温度（℃）； $RH$  为相对湿度（%）； $T$  为环境气温（℃）；  
两个常数取值分别为  $A_1=17.625, B_1=243.04^\circ\text{C}$ 。

## 2.9 FAO-24 Radiation Method[11]

$$ET = c \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_s \quad (35)$$

式中： $c$  为调整系数，与平均湿度，日照风速有关； $\Delta$  为饱和水汽压曲线斜率（ $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ）； $R_s$  为接收的太阳辐射（ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ）；

## 2.10 Priestley-Taylor Method (1972)[12]

$$ET = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n - G}{\lambda} \quad (36)$$

式中： $\alpha$  是经验常数，取值为 1.26； $\lambda$  为汽化潜热（latent heat of vaporization:  $\text{MJ/kg}$ ）

## 2.11 Makkink Method (1957)

$$ET = 0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{2.45} - 0.12 \quad (37)$$

式中各项符号解释同上。

## 2.12 Turc Method (1961)

$$ET = \alpha_T 0.013 \frac{T}{T + 15} \frac{23.8856 R_s + 50}{\lambda} \quad (38)$$

式中： $\alpha_T$  是湿度矫正系数，

$$\alpha_T = 1.0, RH \geq 50\% \quad (39)$$

$$\alpha_T = 1 + \frac{50 - RH}{70}, RH < 50\% \quad (40)$$

其中  $RH$  是平均湿度，%。

### 2.13 评价指标

满意指数  $D$  (index of agreement) :

$$D = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (41)$$

模型效率  $EF$  (modeling efficiency) :

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n [(O_i - \bar{O})^2 - (P_i - O_i)^2]}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (42)$$

均方根误差 ( $RMSE$ ) :

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (43)$$

式中:  $P_i$  为模型计算值,  $O_i$  为参考值,  $\bar{O}$  为参考值的平均值,  $n$  为系列长度。

当  $D$  和  $EF$  越接近于 1,  $RMSE$  越小, 则说明计算值与参考值越吻合。

## 3. 软件使用

### 3.1 硬件环境

Intel(R) Core(TM) 2 Quad CPU Q9550/4G RAM/500 G

### 3.2 软件环境

Windows 7 及以上(或其他操作系统)、R 语言环境和 Shiny 与 ggplot2 程序包

### 3.3 软件运行

软件界面包括 4 个模块：软件前言、模型选择、资料输入和蒸散发计算。



图 1 软件界面主要模块

#### 3.3.1 软件前言

介绍软件开发单位，开发人员信息，并简要介绍了该软件的作用。内容如下：

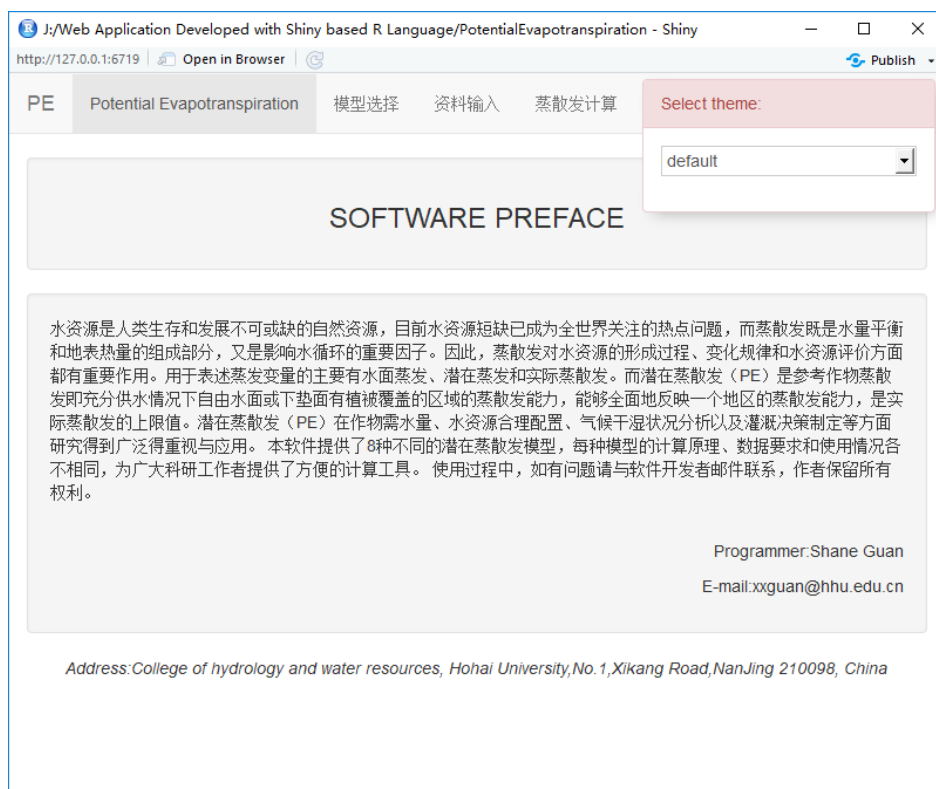


图 2 软件前言

水资源是人类生存和发展不可或缺的自然资源，目前水资源短缺已成为全世界关注的热点问题，而蒸散发既是水量平衡和地表热量的组成部分，又是影响水循环的重要因子。因此，蒸散发对水资源的形成过程、变化规律和水资源评价方面都有重要作用。用于表述蒸发变量的主要有水面蒸发、潜在蒸发和实际蒸散发。而潜在蒸散发（PE）是参考作物蒸散发即充分供水情况下自由水面或下垫面有植被覆盖的区域的蒸散发能力，能够全面地反映一个地区的蒸散发能力，是实际蒸散发的上限值。潜在蒸散发（PE）在作物需水量、水资源合理配置、气候干

湿状况分析以及灌溉决策制定等方面研究得到广泛得重视与应用。

本软件提供了 12 种不同的潜在蒸散发模型，每种模型的计算原理、数据要求和使用情况各不相同，为广大科研工作者提供了方便的计算工具。

### 3.3.2 模型选择

模型选择模块主要包括：对 12 个潜在蒸散发模型的介绍，并选择用户使用的模型，界面如图 3 所示。

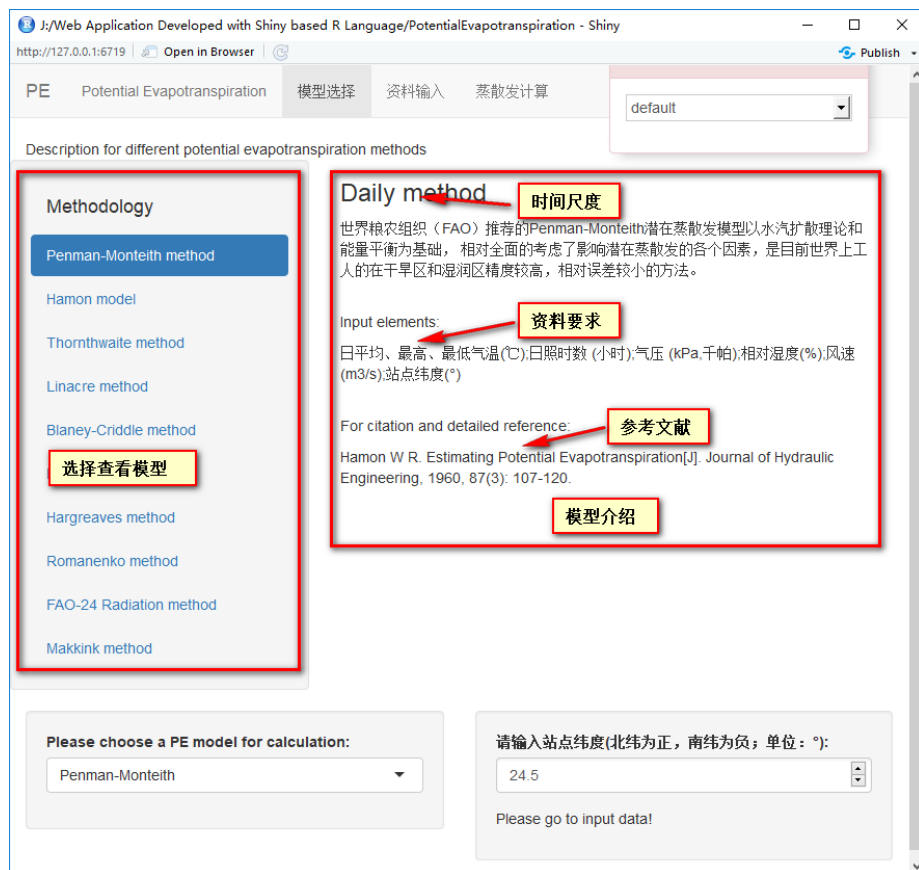


图 3 模型选择界面

点击左侧 Methodology 选择栏（如图 3），选择查看的潜在蒸散发计算模型的基本信息，信息包括：模型计算的时间尺度，模型输入的气象资料种类，模型算法的参考文献。



图 4 潜在蒸散发模型选择

在界面下方可以点击选择实际计算中应用的具体潜在蒸散发模型，模型选择

下拉列表如图 5 所示，当选择需要输入气象站点纬度的模型方法时，则出现图 6 纬度数值输入框，否则显示如图 7 所示。

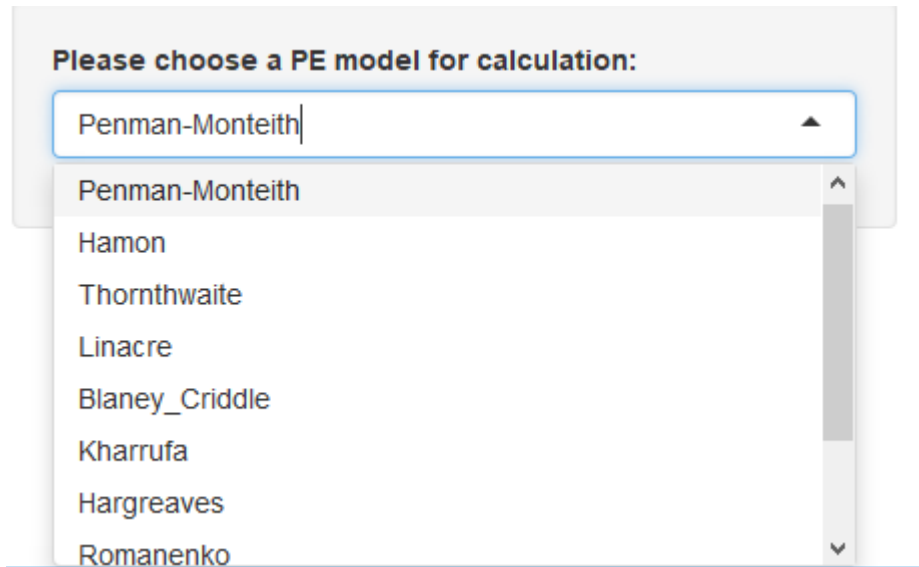


图 5 模型选择下拉列表



图 6 输入气象站点纬度

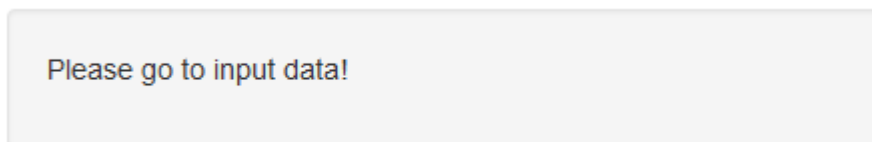


图 7 无需纬度信息

### 3.3.3 资料输入

资料输入界面如图 8 所示。

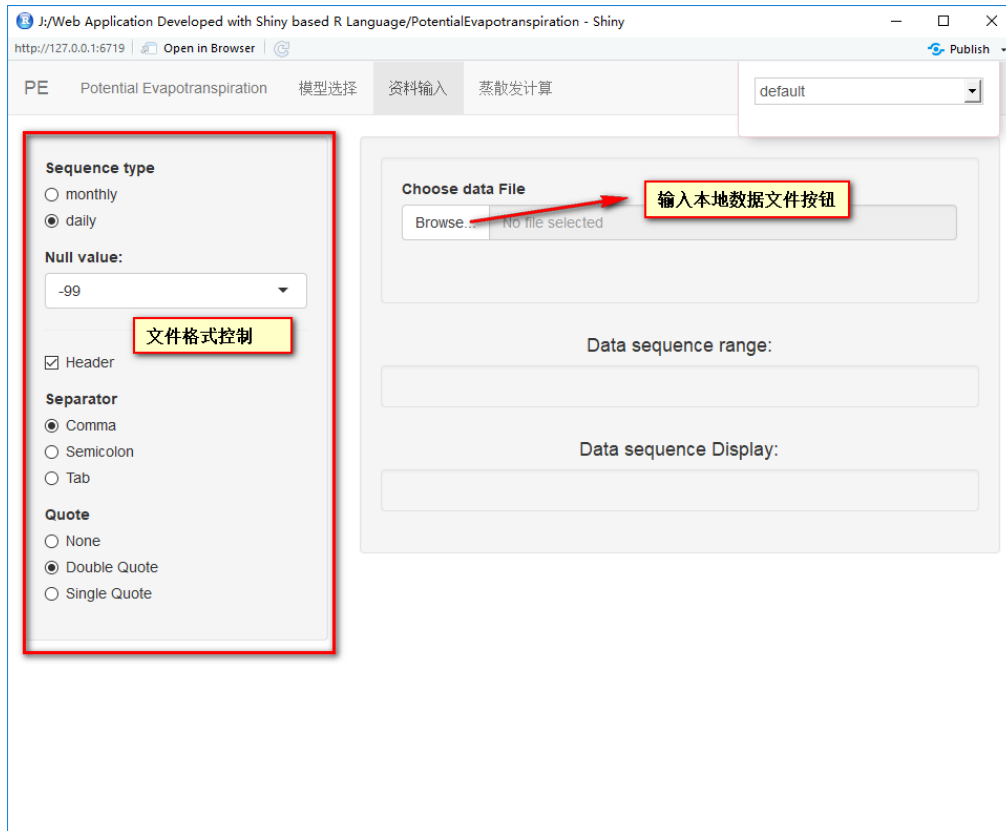


图 8 资料输入界面

侧边框红框内按钮可以控制读取数据文件的参数选择：

系列类型（Sequence type）：流域资料系列类型，如果资料是日资料，则选择“daily”；

资料缺失值(Null)：有-99、-99.9 和 NA 可供作选择；

列标题(Header)：数据文件第一行是字段名称，则选中；

分隔符(Sepator)：数据分隔符：逗号（Comma）、分号（Semicolon）和制表符（Tab）；

引号(Quote)：引号设置：双引号（Double Quote），单引号（Single Quote）；

选择本地资料文件导入后结果如图 9 所示，



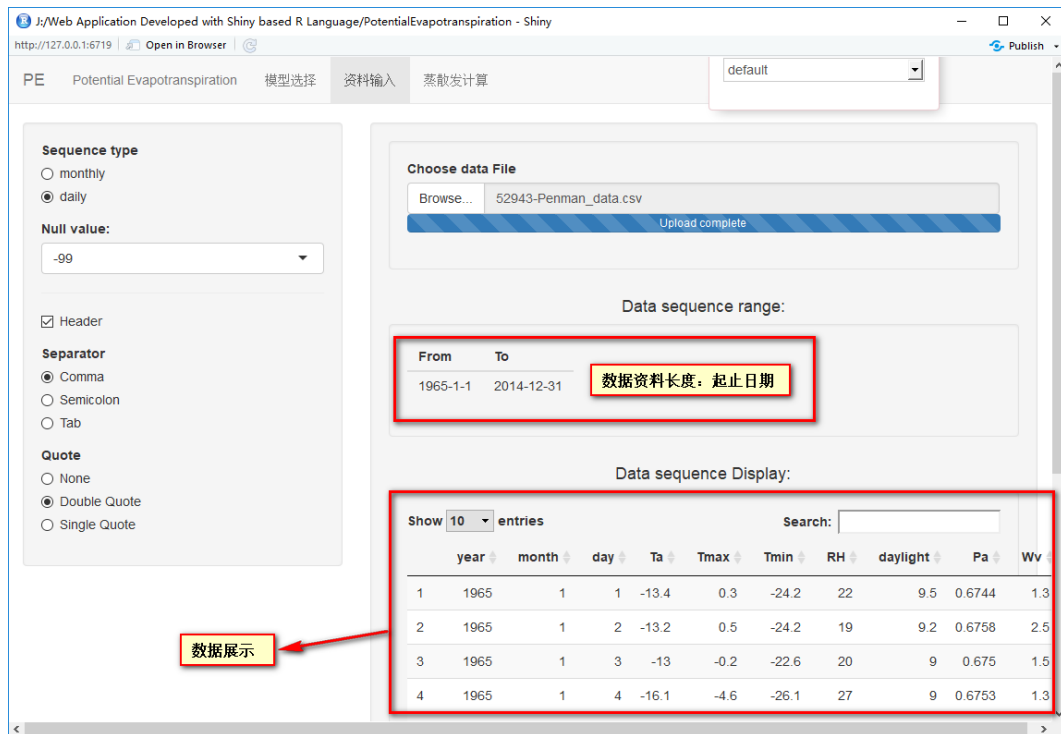


图 9 资料导入

不同的模型要求输入的气象要素类型是不一样的，例如 Penman-Monteith 公式，则需要日平均、最高、最低气温，相对湿度，日照时间，气压和风速。数据整合如图 10 所示，数据文件第一行为各要素名简写：“y,m,d,Tmean,Tmax,Tmin,RH,SSD,Pa,Wv”。

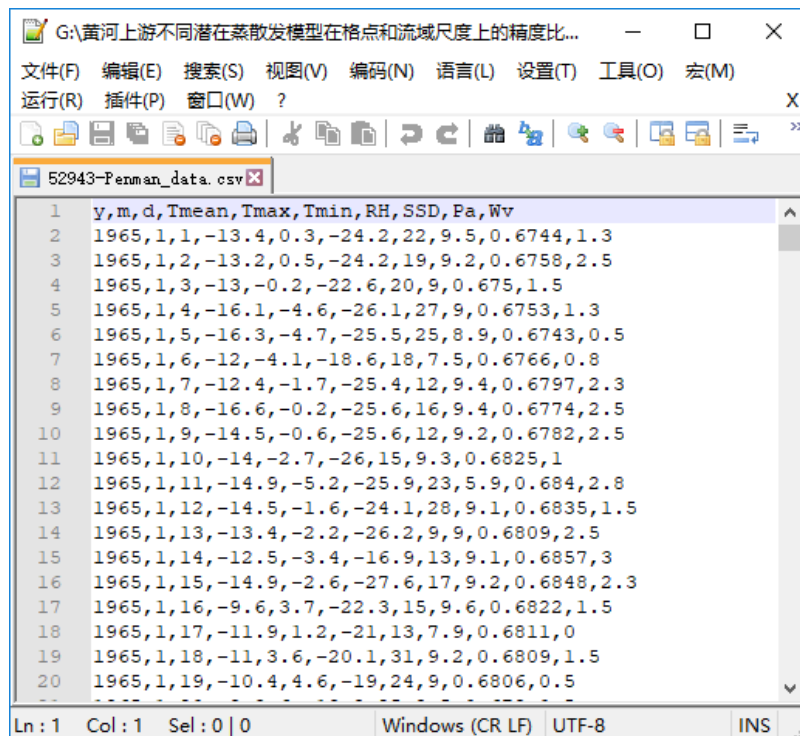


图 10 Penman-Monteith 模型输入资料

其余各个潜在蒸散发模型需要输入的气象要素以及数据组织方式如表 1 所示(要素列排列顺序如表中应一致)。

表 1 各模型输入要素汇总表

模型	要素	尺度
Hamon, Blaney_Criddle, Kharrufa	年月日; 日平均气温 (°C) 日照时数 (h)	daily
Linacre	年月日; 日平均气温 (°C); 相对湿度 (%)	daily
Hargreaves	年月日; 日平均、最高、最低气温 (°C); 相对湿度 (%)	daily
Romanenko	年月; 月平均气温 (°C); 月平均相对湿度 (%)	monthly
Thornthwaite	年月; 月平均气温 (°C); 日照时数 (h)	monthly
Makkink, FAO-24 Radiation	年月日; 日平均气温 (°C); 日照时数 (h), 气压 (kPa)	daily

### 3.3.4 蒸散发计算

潜在蒸散发模型计算界面如图 11 所示, 首先应依据输入的资料长度和要素值的完整性, 选择合适的潜在蒸散发计算的年限, 如果没有实测蒸散发与之比较, 可以点击“点击下载潜在蒸散发计算结果”按钮, 下载计算值到本地。

当有参考潜在蒸散发数据时, 可以点选“是否有蒸发资料作比较”的“yes”按钮, 在跳出的条件面板中导入参考蒸散发资料, 并确定资料时间尺度, 如图 12 所示。

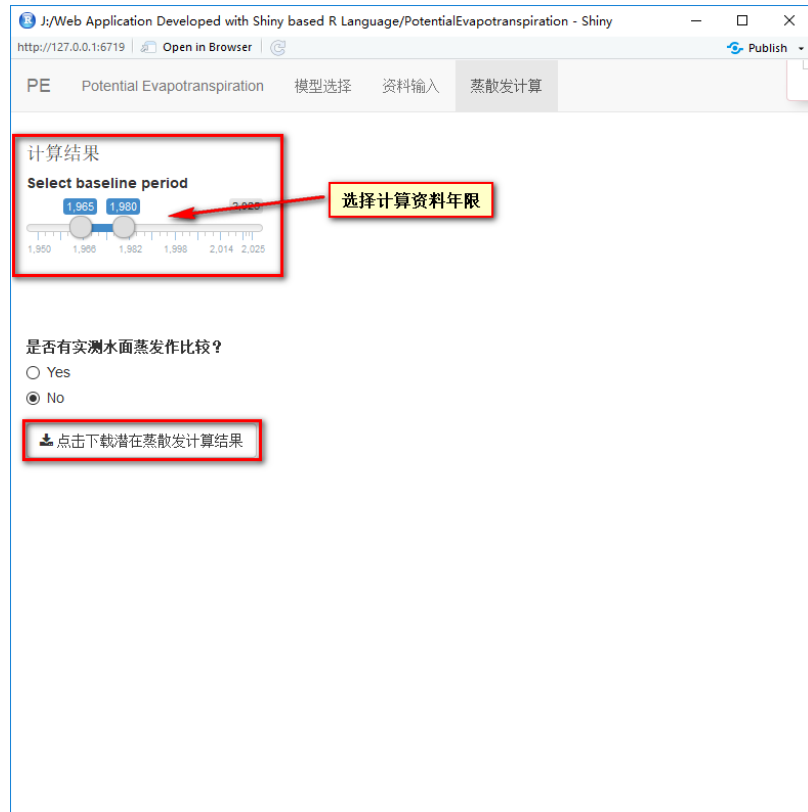


图 11 潜在蒸散发模型计算界面

模型计算的潜在蒸散发比较有三种角度：相关关系统计（Summary），散点图和线性回归（Scatter & Linear regression）和过程线展示（Process graph），样例展示如图 13，图 14 和图 15 所示。

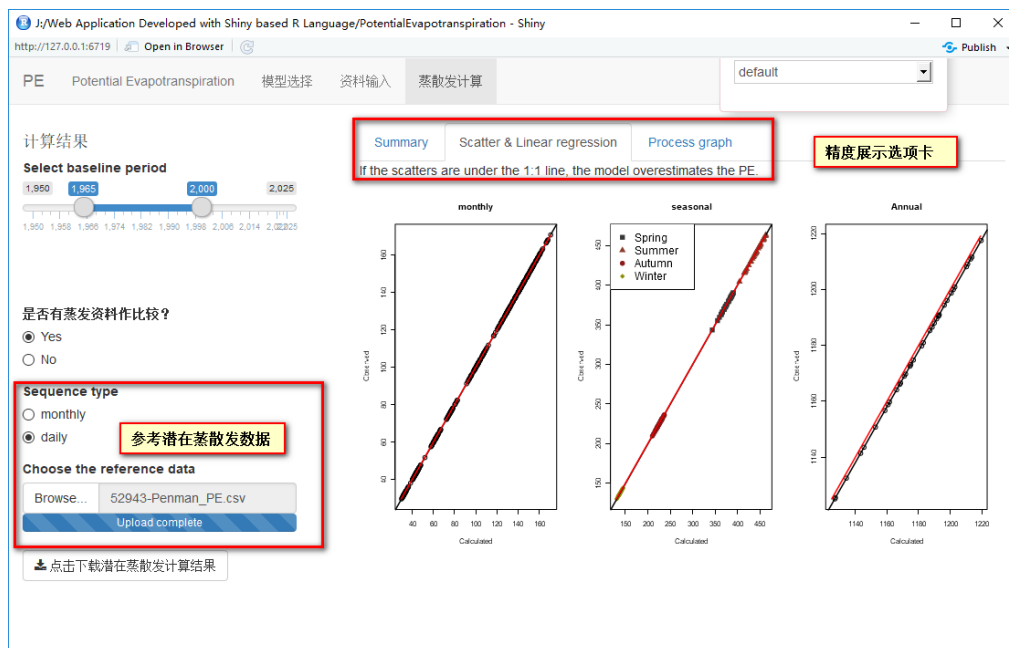


图 12 潜在蒸散发计算比较

Summary

Scatter &amp; Linear regression

Process graph

## 不同时间尺度潜在蒸散发计算精度

If the slope is less than 1, the model overestimates the PE.

Scale	Intercept	Slope	Correlation	index of agreement:D	Modeling efficiency	RMSE
daily	-1.21	1.00	1.00	1.00	1.00	0.01
monthly	-0.41	1.00	1.00	1.00	1.00	0.20
seasonal	-1.21	1.00	1.00	1.00	1.00	0.58
annual	-0.92	1.00	1.00	1.00	0.99	2.00

图 13 计算值与参考值精度统计

Summary

Scatter &amp; Linear regression

Process graph

If the scatters are under the 1:1 line, the model overestimates the PE.

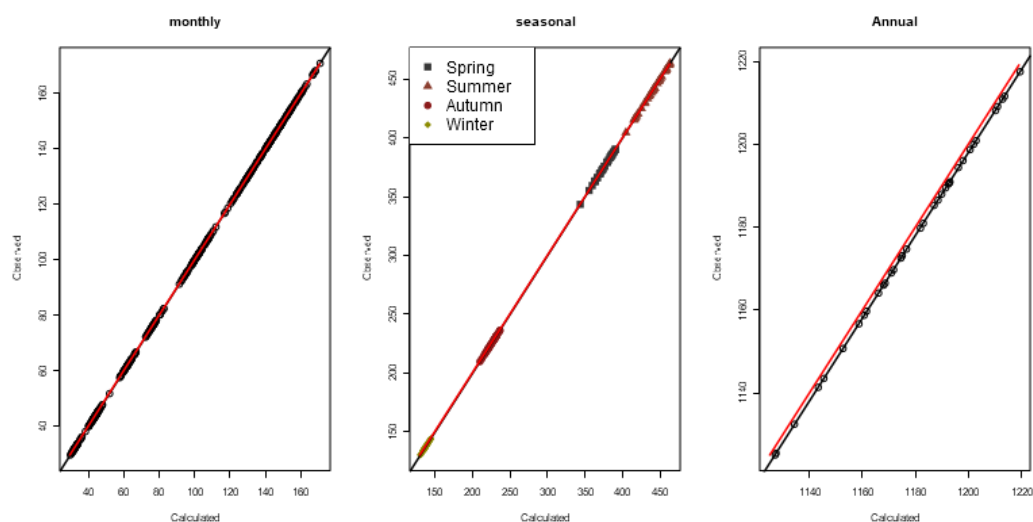


图 14 计算值与参考值散点图和线性回归

Summary

Scatter &amp; Linear regression

Process graph

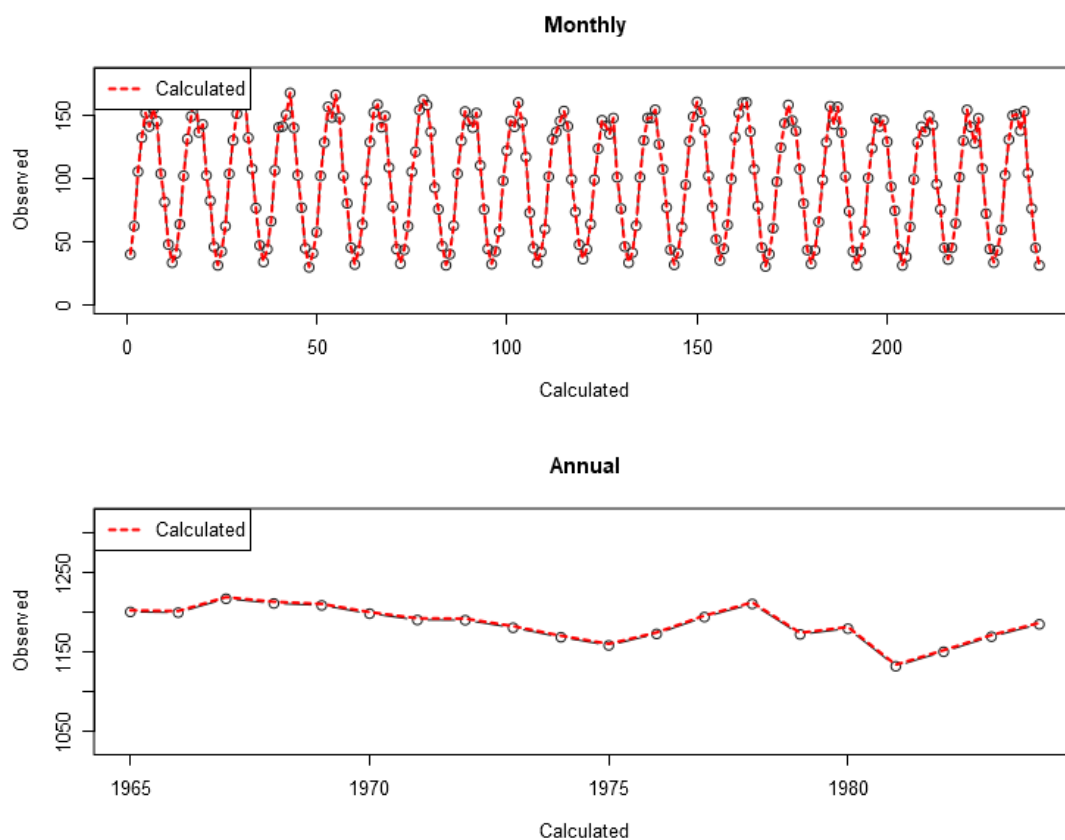
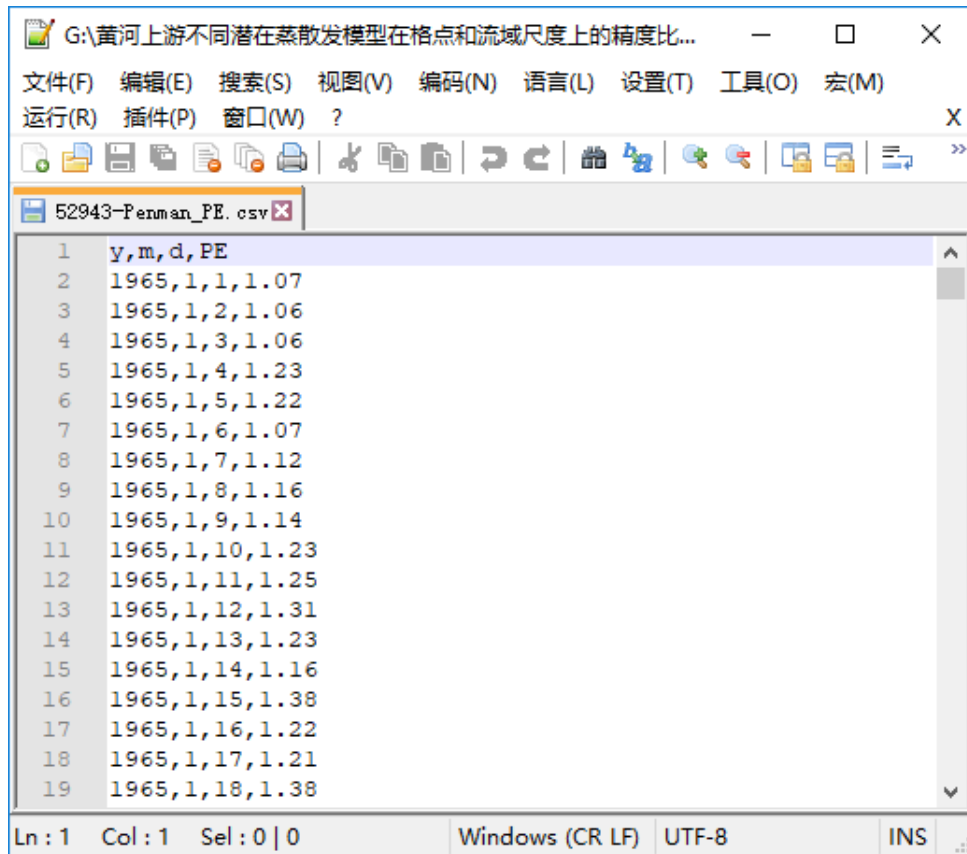


图 15 月尺度和年尺度计算值与参考值过程图

#### 4. 计算结果

以中国地面日值数据集 V3 中的 52943 气象站点为例, 该数据集提供了日平均、最高和最低气温, 日平均相对湿度, 气压, 日照时间和风速的数据, 足够用来计算最为复杂的 Penman-Monteith 潜在蒸散发模型, 计算结果输出如图 16 所示。



Ln	PE
1	1.07
2	1.06
3	1.06
4	1.23
5	1.22
6	1.07
7	1.12
8	1.16
9	1.14
10	1.23
11	1.25
12	1.31
13	1.23
14	1.16
15	1.38
16	1.22
17	1.21
18	1.38

图 16 52943 站点潜在蒸散发 Penman 公式计算结果

## 参考文献

1. Hamon, W.R. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Hydraulic Engineering* **1960**, 87, 107-120.
2. Xu, C.Y.; Singh, V.P. Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes* **2001**, 15, 339-349.
3. Forsythe, W.C.; Rykiel, E.J.; Stahl, R.S.; Wu, H.; Schoolfield, R.M. A model comparison for daylength as a function of latitude and day of year. *Ecological Modelling* **1995**, 80, 87-95.
4. Thornthwaite, C.W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* **1948**, 38, 55-94.
5. Jain, P.K.; Sinai, G. Evapotranspiration model for semiarid regions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-asce* **1985**, 111, 369-379.
6. Linacre, E.T. A simple formula for estimating evaporation rates in various

- climates, using temperature data alone. *Agricultural Meteorology* **1977**, *18*, 409-424.
7. Blaney, H.F.; Criddle, W.D. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. **1952**.
8. H. Hargreaves, G.; Samani, Z. *Reference crop evapotranspiration from temperature*. 1985; Vol. 1.
9. Romanenko V.A. Computation of the autumn soil moisture using a universal relationship for a large area. **1961**.
10. Lawrence, M.G. The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air - a simple conversion and applications. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2005**, *86*, 225-233.
11. Rahimikhoob, A.; Mashal, M. A comparison between conventional and m5 model tree methods for converting pan evaporation to reference evapotranspiration for semi-arid region. *Water Resources Management* **2013**, *27*, 4815-4826.
12. Priestley, C.H.B.; Taylor, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review* **1972**, *100*, 81-92.