

大尺度蒸发模型研究

黄贤庆, 刘新仁

(淮海大学水文水资源及环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要 选用淮河流域及其周边的 10 个气象站的 35 年气象资料和 29 个蒸发站的 35 年月蒸发资料作分析, 同时对 Dalton 公式、Penman 公式作了简化, 进而提出了具有较为明确的物理基础的淮河流域分区蒸发模型, 该模型可用于大尺度水文模型中的蒸散发能力估算。

关键词 月蒸发; 大尺度; 线性回归; 非线性估计

中图分类号 P333 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2000)04-0013-06

大尺度水文问题是人们在对许多全球性问题的关注中, 尤其是在全球气候模型(GCM)的研究中提出的, 对地球上水和能量平衡过程的深入了解和模拟, 是气候变化可靠预测的前提。传统水文模型中的蒸发计算方法引入了一个经验的蒸散发折算系数 K , 以蒸发皿观测值乘以 K 值作为蒸散发能力值。蒸散发折算系数不仅要反映流域的自然地理与气候条件, 而且还受蒸发皿型号的影响。由于预测未来可能不会有实测的皿蒸发资料, 在研究未来气候变化对水资源的影响时, 就需要建立一种不依赖于蒸发皿实测资料的蒸发计算模型。然而, 从能量平衡法、水汽输送法推出的公式由于方法复杂、测定困难及有些气象数据的不可获得也仅限于在小块区域的研究中使用。所以, 目前根据未来能够获得的、现有的淮河流域及其周边的 10 个气象站的月气象资料和淮河流域内部 29 个蒸发站的月蒸发资料先作分析, 再依据这些气象要素的全部或部分建立一个具有较为明确物理基础的经验蒸发模型。

1 蒸发能力计算

计算蒸发能力目前有许多气象学方法和经验公式, 简单的如桑斯威特公式, 仅需要月平均气温资料就可计算月蒸发, 但在计算较短时段的可能蒸发量时误差会很大。道尔顿公式把蒸发量与水汽压差、风速联系起来, 必须提供水汽压差与风速的精确资料, 空气动力学方法及涡动相关法是水汽输送法的分支, 一般能准确地计算蒸发, 但由于方法本身复杂及测定困难决定了其不可能普及使用, 而把热量平衡方程与质量输送方程结合得出计算蒸发的彭曼公式存在假定的蒸发条件, 当现实条件与之不同时就得不出正确的结果。总之, 气象学方法相对较精确, 但计算复杂, 资料不易测定, 已有的经验公式也不能简单地套用, 因此有必要选择几个常规易测的气象因子建立蒸发能力计算的公式, 来满足预测未来气候变化的需要。

2 大尺度蒸发模型研究方法

大尺度水文模型最终要与气候模型耦合, 模型中的蒸发计算也应考虑与气候模型网格尺度的匹配。大尺度蒸发模型考虑的时间计算尺度为月或天, 空间尺度在经纬网格上位于“分”这一量级以上, 是对大流域蒸发的粗分辨率研究。从大尺度角度出发, 首先对气象要素进行预处理。对于以月为时间尺度的蒸发研究, 在大流域内, 最多风向, 风向频率的影响很小, 可以忽略; 月平均最高、最低温度反映该月内的平均温差变化, 它们对蒸发的贡献可以用月平均温度一个因子来代表; 在淮河流域, 降雪日数很少, 也可忽略。因此, 本文主要考虑月平均气压、月平均温度、月平均相对湿度、月总降水量、月总日照时数、月平均总云量和月平均风速七项气象因子。

模型推求采用统计回归方法, 做 35 年月蒸发的拟合系列, 采用的目标函数为效率系数, 表征拟合的形状

收稿日期: 1999-04-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目淮河流域能量与水分循环实验与研究(49794030)的成果之一

作者简介: 黄贤庆(1966—)男, 江西萍乡人, 水文学及水资源专业, 主要从事流域水文模拟与水文预报研究。

好坏,由于是拟合系列,量相误差为零.

3 主要气象因子的确定

3.1 初步分析及检验

选用的气象站和蒸发站均有完整的 1953~1987 年共 35 年的月资料,蒸发全部为 E601 蒸发皿实测得或由其它蒸发皿转换为 E601 蒸发皿的观测值.表 1 为 10 个气象站 7 个气象要素分别对 29 个蒸发站月蒸发的相关系数均值及其排序.

表 1 气象站气象要素与 29 个蒸发站月蒸发相关系数均值

Table 1 The mean correlation coefficient between meteorologic factors and evaporation							
气象站	月平均气压 (PRES)	月平均温度 (MEANT)	月总降水量 (PRECIP)	月总日照时数 (SUN)	月平均总云量 (CLO)	月平均相对湿度 (RH)	月平均风速 (WSPD)
安 庆	- 0.833 63	0.855 949	0.413 665	0.612 751	0.049 890	- 0.093 91	0.230 165
武 汉	- 0.830 54	0.853 633	0.413 522	0.610 535	0.049 484	- 0.091 33	0.229 332
上 海	- 0.829 09	0.852 330	0.415 121	0.607 341	0.050 981	- 0.087 37	0.227 317
南 京	- 0.829 41	0.852 462	0.411 517	0.610 957	0.052 640	- 0.092 42	0.231 945
清 江	- 0.831 29	0.853 787	0.406 969	0.616 694	0.054 895	- 0.101 49	0.238 716
徐 州	- 0.834 26	0.855 951	0.402 319	0.623 231	0.056 940	- 0.110 93	0.244 207
西 安	- 0.836 61	0.858 595	0.409 333	0.618 225	0.053 361	- 0.100 75	0.239 705
郑 州	- 0.839 50	0.861 345	0.406 579	0.621 029	0.054 696	- 0.104 61	0.241 435
青 岛	- 0.841 44	0.862 823	0.402 985	0.624 409	0.054 681	- 0.111 49	0.245 460
济 南	- 0.843 13	0.865 178	0.408 931	0.622 131	0.050 083	- 0.103 66	0.245 003
排 序	2	1	4	3	7	6	5

r 检验表明 4 个气象要素(MEANT ,PRES ,SUN ,PRECIP)在置信水平 $P < 0.05$ 时都有显著的线性关系,3 个气象要素 MEANT ,PRES ,SUN 与各蒸发站的月蒸发显示有十分显著的线性关系,而 MEANT 反映了太阳辐射的变化情况,是影响蒸发的第一位因子.

3.2 分析及确定主要气象因子

蒸发与气象要素的散点图及表 1 表明月平均温度 MEANT 与月蒸发量 E 有很好的线性关系.然而,从原始资料及 35 年的连线图中发现每一年的 $T-E$ 连线均是一种逆时针绳套关系(见图 1),35 年连线基本上以配置直线为中心,呈现在相同温度下上半年 E 值要小于下半年 E 值的现象,存在系统性偏差.为此作南湾站 35 年蒸发的距平分布图(见图 2),分析发现郑州、徐州、安庆三气象站—淮河上游亳县等 17 个蒸发站的误差呈现相同规律的分布,特别在 5~9 月份误差值都出现由负值转为正值这样的变化趋势.笔者通过分析相关的气象因子来研究这种季节性偏差产生的原因.

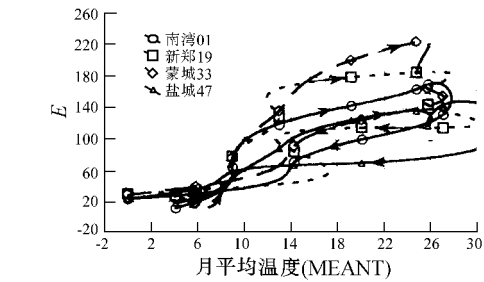


图 1 安庆站月蒸发(E)—南湾、新郑、蒙城、盐城站月平均温度(MEANT)分布
Fig.1 Relation between monthly mean temperature and evaporation

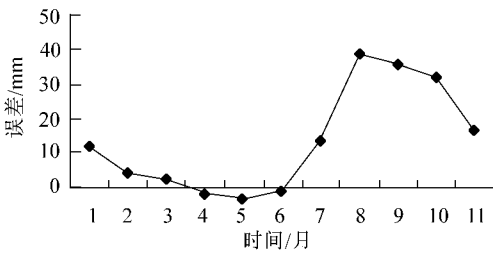


图 2 误差分布(南湾—安庆)
Fig.2 Monthly error distribution of evaporation estimated

月平均本站气压与 E 也有良好的负相关关系, 但整个淮河流域气象站、蒸发站的高程变化不大, 因而高程对气压的影响可不考虑, 它说明气压的年内变化与月蒸发的年内变化正好在季节上同步, 而对月蒸发变化的反应并不敏感, 两者之间没有因果关系, 因此可忽略月平均本站气压对蒸发的影响. 月平均日照总时数反映了气象站当地太阳能的影响, 但它对蒸发的贡献已为影响蒸发的最主要因子月平均气温所反映. 月平均相对湿度反映了气温、降水变化等综合因素的影响, 结合蒸发与饱和水汽压差的密切关系, 我们认为月平均湿度对月蒸发有较大的作用. 笔者作了 10 个气象站月平均湿度分布图(见图 3), 发现图 3 与图 2 有相似的季节分布, 5~9 月都出现相同的变化趋势, 6~7 月之间出现折线反转, 对这种同步性敏感反应, 笔者推测 RH 对 $T-E$ 回归产生的系统性偏差起了作用. 其理由 (a) 对蒸发站而言, 气象站的气象资料在代表当地的气象条件上会有偏差, 特别是南北与东西相离较远的两站之间的代表性更差, 可用月平均湿度来补偿修正偏差; (b) 月平均相对湿度本身反映了饱和水汽压差的影响, 蒸发产生的根本机制就在于饱和水汽压差($e_s - e$), 蒸发率与($e_s - e$)成正比, 而($e_s - e$)反映了蒸发面上的湿度梯度.

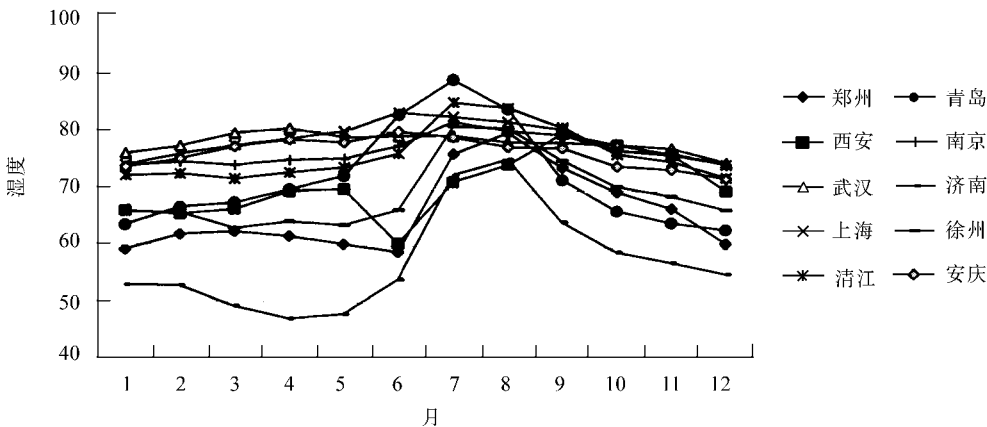


图 3 10 个气象站的月平均湿度分布

Fig.3 Monthly means of relative humidity at weather-stations

笔者考虑用分区控制来解决代表性问题, 因此提出选站原则 (a) 从地理位置分布上考虑可确定为就近原则, 即与蒸发站相离较近的气象站代表性要好于较远的; (b) 从气候变化上考虑可确定为气候同步原则, 即蒸发站与气象站应在相同的气候变化带以内. 对蒸发而言, 气候同步显得尤为重要.

为了确证这种推断, 计算发现用 $T + R$ 因子回归较 T 单因子回归在所有包括 T 的二元线性回归中效率系数提高最多, 且与全因子回归的差值很微小. 考虑到蒸发模型既要保证精度, 又要节省的原则, 选择月平均温度和月平均相对湿度两个气象因子来建模.

4 淮河流域的蒸发区域规律

通过分区域控制来解决蒸发站选择对应气象站的问题. 结合两条选站原则, 发现以下几个特点 (a) 南边的气象站对北边的蒸发站与北边的气象站对东南的蒸发站线性回归拟合效果都差. 这主要是因为气象站与蒸发站不在同一气候变化带中, 气候不同步(超前或者滞后), 导致产生系统偏差. (b) 全部气象站与 29 个蒸发站 $E-(T + R)$ 的效率系数都大于或等于 $E-T$ 的效率系数, 而加进 SUN 因子有小于的情况, 表明该气象站的月平均日照总时数不能反映蒸发站当地太阳辐射的变化状况. (c) 分析发现 29 个蒸发站回归效率系数的相对大值主要集中在南京、徐州、郑州、安庆 4 个气象站上.

根据效率系数最大、位置就近以及与气候同步的原则, 在淮河流域选择了安庆、南京、徐州、郑州 4 个气象站作为控制站, 它们分别控制的蒸发站群见图 4.

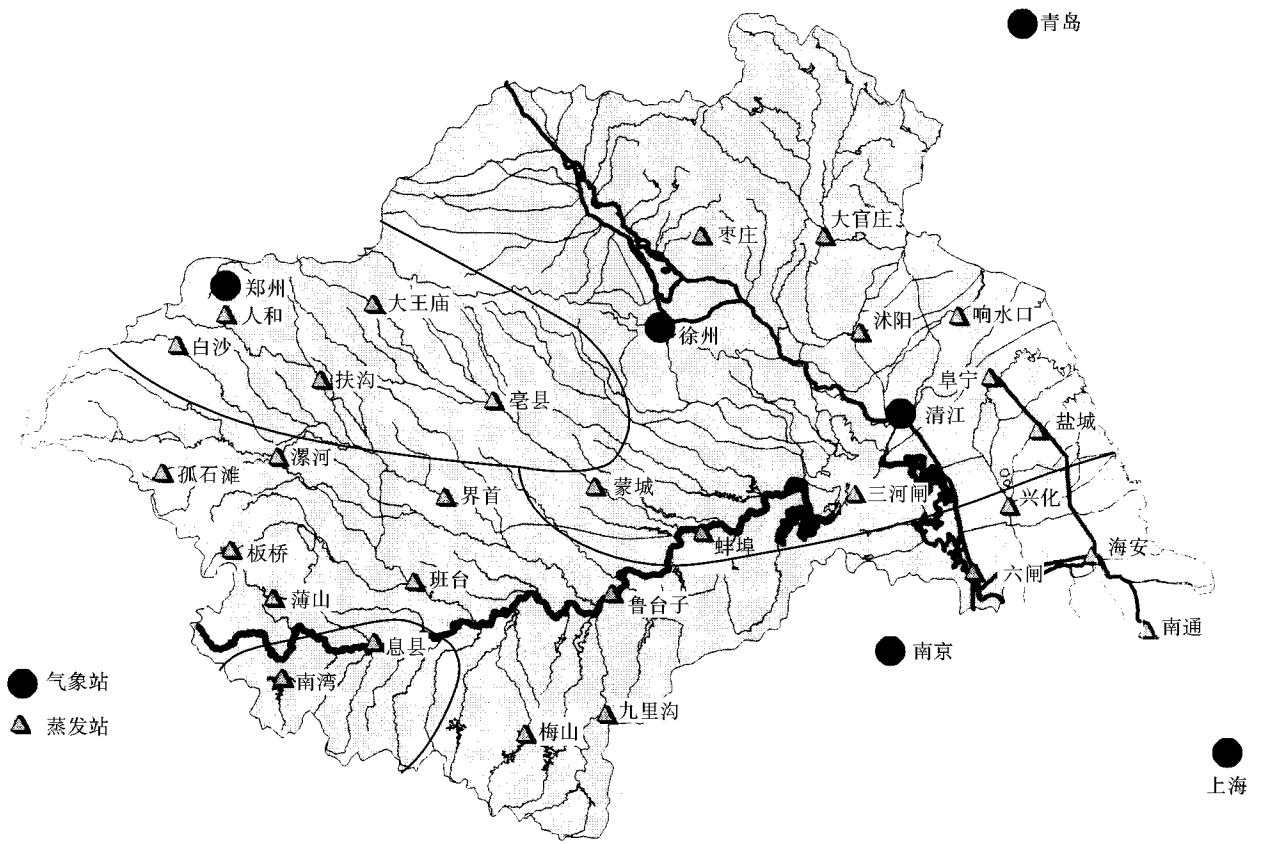


图 4 气象站对蒸发站的分区控制情况

Fig.4 Subarea controlled by weather stations

5 淮河流域大尺度蒸发模型

5.1 蒸发模型的可能形式

线性回归仍然是一种均化,在气象站控制分区的基础上,从适线的角度考虑,另一种近似可以应用非线性估计方法来求得蒸发的非线性回归方程及其效率系数,通过比较,最终确定流域蒸发模型的可能形式.

线性回归形式:

$$E = b_0 + b_1 \times T + b_2 \times R \tag{1}$$

非线性估计设计成二次多项式的和指数的形式,指数形式设计为 10 的方次:

$$E = b_0 + b_1 \times T + b_2 \times T^2 \tag{2}$$

$$E = b_0 + b_1 \times T + b_2 \times T^2 + b_3 \times R \tag{3}$$

$$E = (1 - R)^{b_0} \times 10^{b_1 + b_2 \times T} \tag{4}$$

$$E = (1 - R)^{b_0} \times 10^{b_1 + b_2 \times T + b_3 \times T^2} \tag{5}$$

$$E = (1 - R)^{b_0} \times 10^{b_1 + b_2 \times T + b_3 \times T^2 + b_4 \times T^3} \tag{6}$$

$$E = (1 - R)^{b_0} \times 10^{b_1 + b_2 \times T + b_3 \times T^2} \times (b_4 + b_5 \times T) \tag{7}$$

式中 $b_0 \sim b_5$ 为回归系数.

对所列的模型形式作计算,得到其效率系数比较见表 2.

表 2 七种形式的效率系数比较
Table 2 R-square of seven regressions

蒸发形式	1	2	3	4	5	6	7
回归系数个数	3	3	4	3	4	5	6
效率系数均值	0.803 07	0.733 83	0.806 90	0.812 21	0.821 69	0.825 14	0.820 93

5.2 回归系数的稳定性

分析回归系数的稳定性 ,选择南湾—安庆 ,回归公式 $\log(E)=b_0+b_1\times t+b_2\times\log(1-R)$.表 3 表明回归系数基本稳定.

表 3 回归系数稳定性分析
Table 3 Stability analysis of regression coefficients

年数	回归系数			效率系数	年数	回归系数			效率系数
	b_0	b_1	b_2			b_0	b_1	b_2	
5	1.570 62	0.030 05	0.284 37	0.816	12	1.644 89	0.029 11	0.386 97	0.856
6	1.611 94	0.029 48	0.338 54	0.827	15	1.617 74	0.029 20	0.346 90	0.866
7	1.610 35	0.029 59	0.338 86	0.846	20	1.620 90	0.028 86	0.345 05	0.861
8	1.597 38	0.029 46	0.312 87	0.851	25	1.620 84	0.028 67	0.329 63	0.855
9	1.602 61	0.029 55	0.322 66	0.852	30	1.640 38	0.028 51	0.347 11	0.857
10	1.620 98	0.029 27	0.345 56	0.857	35	1.630 87	0.028 58	0.329 52	0.858

5.3 蒸发模型方案的确定

表 2 说明用非线性模型拟合月蒸发比用线性的好 ,其中式(5)的模拟效果相对更好 ,它的回归系数少而效率系数高 .图 5 为枣庄站与徐州站三种回归形式的误差分布(线性回归 : $E-T$ 和 $E-(T+R)$;非线性回归 :表 2 中第 5 种蒸发形式) .

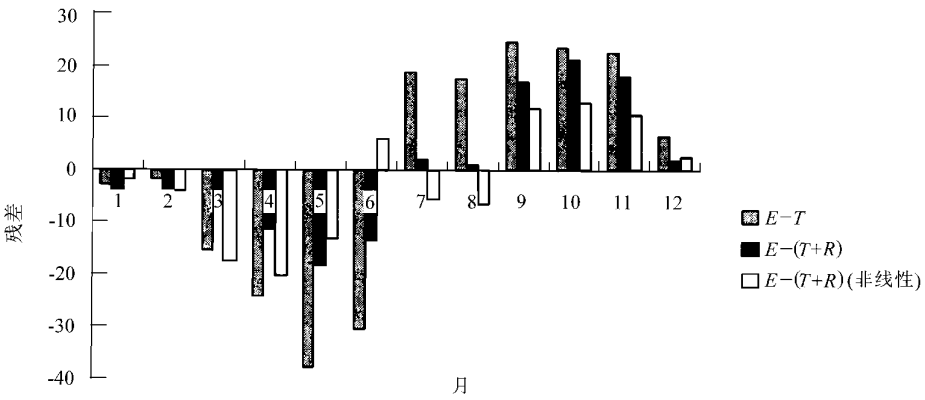


图 5 枣庄站与徐州站三种回归形式的误差分布

Fig.5 Distribution of Residual(Xuzhou-Zaozhuang)

6 成果分析

a. 水汽饱和差 e_s-e_d 与相对湿度 R 有如下关系 :

$$e_s-e_d=e_s\times(1-R)$$
(8)

由道尔顿公式 $E=f(u)\times(e_s-e_d)=f(u)\times e_s\times(1-R)$ (9)

以为月为时间尺度 ,风速的影响很小 ,可以忽略 ,则

$$E=c(e_s-e_d)=ce_s(1-R)$$
(10)

式中 c 为系数 .而理论上饱和水汽压是水面温度的增函数 ,根据前人实验观测到 e_s 的经验表达式 ,在此设定

E 的形式为 $E = c(e_s - e_d) \times 10^{(T)}$, 简单的表示式为两种形式:

$$f(T) = a + bT \quad f(T) = aT/(b + T) \quad (11)$$

式中 a, b 为系数. 从回归的情况来看, 式(11)的前者拟合效果好, 后者的效果不佳. 因此确定从湍流扩散理论出发得出的简化公式为

$$E = (1 - R)^2 \times 10^{(T)} \quad (12)$$

式中 $f(T)$ 为月平均温度的多项式. 而(4)(5)(6)三式恰好正是道尔顿公式的简化形式, 从而说明这种回归形式有一定的物理基础, 是较为合理的.

b. 对于彭曼公式 $E = \frac{\Delta \cdot H + r \cdot E_a}{\Delta + r}$, 不考虑地气之间的热交换, 即不考虑 $H \cdot \Delta / (\Delta + r)$ 项及风速, 则

$$E = \frac{r \cdot E_a}{\Delta + r} = E_a - \frac{E_a}{1 + r/\Delta} \quad E_a = f(u)(e_a - e_d) \quad (13)$$

在假定大气压 $p = 1013 \text{ Pa}$ 的条件下, 依格森用下列公式近似计算了 $1/(1 + r/\Delta)$ 的值:

$$\frac{1}{1 + r/\Delta} = 0.42 + 0.013 \times T$$

代入式(13), 有 $E = f(u)(e_a - e_d) \times (1 - 0.42 - 0.013 \times T)$ (14)

从而 $E = (1 - R)^2 \times 10^{(T)} \times (1 - 0.42 - 0.013 \times T)$ (15)

式(15)与式(6)形式相同, 可以认为式(15)是彭曼公式的一种简化.

7 结 语

蒸发是水量平衡的重要组成部分, 是影响水资源估算的重要因素, 也是大尺度水文模型中的一个重要参数. 解决蒸发的估算问题对于大尺度水文模型研究有着十分重要的意义. 本文通过分析, 确定了月平均温度是影响月蒸发的最主要的气象因子, 用月平均温度和月平均相对湿度两项因子来拟合月蒸发有较好的效果. 整个淮河流域有明显的气候分带性, 尤其在5~9月份, 随着梅雨的活动, 月蒸发亦表现出更为显著的南北规律. 因此以效率系数为目标函数选择安庆、南京、徐州、郑州4个气象站作为控制站分别控制淮河流域的29个蒸发站, 并提出了淮河流域蒸发的分区模型. 另外, 用气象要素来模拟蒸发, 去除了以往高程对蒸发的影响, 如果有都属当地的蒸发与气象资料, 效果理应更好.

参考文献:

- [1] William P Kustas. Recent advances associated with large scale field experiments in hydrology[M]. New York: Reviews of geophysics, Supplement, 1995. 959~965.
- [2] 刘新仁. 大尺度水文——一个新的水文领域[J]. 黑龙江水专学报, 1993, 2(3): 8~13.
- [3] 陈英, 刘新仁. 气候变化对淮河流域水资源的影响[J]. 河海大学学报, 1996, 24(5): 111~114.
- [4] 刘新仁. 淮河流域大尺度水文模型研究——流域水文月模型[J]. 水文科技信息, 1993(3/4): 35~41.

Study on Large Scale Evaporation Modeling

HUANG Xian-qing, LIU Xin-ren

(College of Water Resources and Environment, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract In many conventional hydrological models, potential evaporation is estimated by pan evaporation. However, this method is not suitable for large scale modeling. So a study is made in-depth to simulate potential evaporation. A 35-years series of monthly data of ten weather stations and twenty-nine evaporation stations in and nearby the Huaihe basin are selected for analysis, which shows a regional distribution regularity and correlation between monthly evaporation and seven meteorological factors significantly. Based on the recommendation and comparison of several models, a simplified method to estimate potential evaporation is proposed and the method is suggested to be applied to the Huaihe basin modeling in HUBEX.

Key words monthly evaporation; large scale; linear regression; nonlinear estimation