浙 江 农 林 大 学 学 报，2013，**30**(5)：748 - 754
Journal of Zhejiang A & F University

Priestley-Taylor 模型参数修正及在蒸散发估算中的应用

李菲菲[1,2]，饶良懿[1,2]，吕琨珑[1,2]，李会杰[1,2]，宋丹丹[1,2]

（1. 北京林业大学 水土保持学院，北京 100083；2. 北京林业大学 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室，北京 100083）

摘要：准确估算和模拟植被蒸散可为提高水分利用效率、合理配置水资源，及生态系统可持续经营管理提供科学依据。Priestley-Taylor 模型因其所需参数较少而在蒸发散估算中得到广泛应用。介绍了该模型的计算方法和发展情况，总结分析了 Priestley-Taylor 模型参数 α 的各种修正方法及适用条件，简要介绍了其在农田生态系统和森林生态系统蒸散估算研究中的应用情况，并指出了该模型今后的应用和发展方向，以期为 Priestley-Taylor 模型的进一步深入研究和广泛应用提供参考。表 1 参 42

关键词：森林生态学；Priestley-Taylor 模型；蒸散发估算；α 系数修正；综述

中图分类号：S714.7；S715.3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2095-0756(2013)05-0748-07

Parameter corrections for the Priestley-Taylor Model and applications in evapotranspiration estimation

LI Feifei[1,2]，RAO Liangyi[1,2]，Lü Kunlong[1,2]，LI Huijie[1,2]，SONG Dandan[1,2]

（1. School of Soil and Water Conservation，Beijing Forestry University，Beijing 100083，China；2. Key Laboratory for Soil and Water Conservation & Desertification Combating of Ministry of Education, Beijing Forestry University，Beijing 100083，China）

Abstract：Accurate estimation and simulation of evapotranspiration could help promote water use efficiency and could also use provide a scientific basis for reasonable development of water resources and sustainable management of forest vegetation. The Priestley-Taylor equation has been widly used for estimating evapotranspiration because it needs fewer parameters. Various correction methods for the Priestley-Taylor model parameterαand their application conditions were summarized in this paper. The application in the agro-ecosystem and forest ecosystem was outlined with present state and future possibilities for use of the Priestley-Taylor equation. This could provide a reference for future study and wider application of the Priestley-Taylor equation. [Ch，1 tab. 42 ref.]

Key words：forest ecology；Priestley-Taylor equation；evapotranspiration estimation；correction factor α；review

蒸散发包括地球表面各种伴随着液态水转化为大气中的水汽的自然过程，如植被冠层截留降水的蒸发、植被的蒸腾、冰雪的升华和土壤的蒸发，选择合理精确的蒸散发估算方法对于评价和管理处在土地利用变化和气候变化影响下的水资源和生态环境有着重要意义。对蒸散发的估算，各国学者先后提出了诸多理论或经验模型，其中具有代表性的包括 Penman-Monteith 模型[1]、Jensen-Haise 模型[2]、Hargreaves 模型[3]、Blaney-Criddle 模型[4]、Radiation 模型[4]、Priestley-Taylor 模型[5]、Makkink 模型[6]、刘振兴公式[7]、周国逸公式[8]等。除上述进行蒸散量计算的单一模型外，还有应用系统分析方法基于土壤—植物—大气

收稿日期：2012-10-09；修回日期：2013-02-17

基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(TD2011-03)；国家自然科学基金资助项目(30500389)

作者简介：李菲菲，从事森林生态水文研究。E-mail: li_feifei_1314@126.com。通信作者：饶良懿，副教授，博士，从事森林生态水文、水土保持等研究。E-mail: raoliangyi@bjfu.edu.cn

系统(SPAC)中大气降水、土壤供水、植物生理耗水和生态需水耦合作用的系统模型，如 SWAT 模型[9]、TOPOG 模型[10]等。在蒸散量计算的单一模型中，Penman-Monteith 模型(以下简称 P-M 模型)以其理论基础坚实、计算精度高，成为蒸散发估算的首选方法，但是其应用于非均匀下垫面(植被组成复杂、稀疏植被或裸土地表等）时，计算误差较大，所需数据量也较大，在缺乏数据的地区受到限制，而Priestley-Taylor 模型(简称 P-T 模型)因其不考虑空气动力学项的影响，所需数据较少而得到广泛应用，但其估算的准确度与 P-M 模型相比还存在一定差距。作者总结分析了 P-T 模型的几种常见的修正方法并对其应用现状进行了介绍，以期为 P-T 模型的进一步深入研究和广泛应用提供参考和借鉴。

1　Priestley-Taylor 模型理论与计算方法

P-T 模型是 Priestley 和 Taylor 对 Penman 公式的修正式，以平衡蒸发为基础，引进常数，导出了估算无平流条件下蒸发的模式，即 P-T 公式。他们利用海面和湿润陆面的资料得出 α=1.26。模型计算需要的基本气象数据包括：冠层净辐射、平均气温(或最高、最低气温)。其公式[11]如下，其中各符号所代表的意义见表 1。

$$E_{\mathrm{Tpri}}=\alpha\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\ (R_n-G)。\tag{1}$$

因 $G \ll R_n$，则忽略土壤热通量，式(1) 变为：

$$E_{\mathrm{Tpri}}=\alpha\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}R_n。\tag{2}$$

表 1　Priestley-Taylor 公式计算过程及相关中间变量

Table 1　Calculation process and related intermediate variables of Priestley-Taylor equation

名称	公式	单位
Priestley-Taylor 系数	α=1.26（不同条件需修正）	
饱和水汽压-气温关系斜率	$\Delta=4\ 098e_a/(T+237.3)^2$	kPa·℃$^{-1}$
饱和水汽压	$e_a=6.108\exp[(17.27T/(T+237.3)]$	kPa
实际水汽压	$e_d=e_aH_{mean}/100$	kPa
干湿计常数	$r=1.614\ 52P/\lambda$	kPa·℃$^{-1}$
水汽化潜热	$\lambda=2.501-(2.361\times10-3)T$ 或 $\lambda=2.45$	MJ·kg^{-1}
海拔 H 处的气压	$P=101.3\ (\frac{293-0.006\ 5H}{293})$	kPa
冠层表面净辐射	$R_n=R_{ns}-R_{bl}$	MJ·m^{-2}·d^{-1}
净短波辐射	$R_{ns}=(1-a)(a_2+b_2n/N)\ R_a$ $a=0.23$，$a_2=0.21$，$b_2=0.56$	MJ·m^{-2}·d^{-1}
理论太阳总辐射	$R_a=15.54\ (\omega_s\sin\varphi\sin\delta+\cos\varphi\cos\delta\sin\omega_s)\ /d_r^2$	MJ·m^{-2}·d^{-1}
黑体长波辐射	$R_{bl}=1.983\ 8\times10^{-9}(0.3+0.7n/N)\ \times(0.32-0.026\theta_d)\ T_k^4$	MJ·m^{-2}·d^{-1}
日-地相对距离	$d_r=1-0.016\ 73\cos(2\pi J/365)$	
太阳磁偏角	$\delta=0.409\ 3\sin(2\pi J/365-1.405)$	rad
日落时角度	$\omega_s=\arccos(-\tan\varphi\tan\delta)$	rad
理论日照时数	$N=24\omega_s/\pi+0.1$	h

说明：表中多数内容来自文献[12]。G 为土壤热通量，n 为每天日照时数，N 为最大天文日照时数，α 为纬度；J 为在年内的天数，H_{mean} 为平均相对湿度，T_k 为绝对温度，式(1)(2)中基础数据均来自实地测量或遥感方法。λ 可理解为在特定压强下单位质量的水变为蒸汽所需要的能量；λ= 2.45 是在平均温度 20 ℃时所取得的，对于 λ 的值，在使用日最高及最低气温计算出饱和蒸汽压的值后，可以由 Tetens[13]和Murray[14]所给出的如表中的饱和水汽压-气温关系斜率公式来帮助确定。

2　Priestley-Taylor 模型的修正

P-T 模型是目前估算潜在蒸散发的一种重要方法，因它所需参数较少而得到广泛应用，但其估算的准确度因此会有所下降。造成这种情况的原因主要有 2 点：一是因为 P-T 模型是在无平流假设条件下得到的，下垫面粗糙度不均匀、土壤湿度不一致等，都会导致平流的发生，而且不同地区平流的强度、持

续时间等特性也不尽相同；二是因为 P-T 模型没有考虑空气动力学项对估算结果的影响，从而造成不可避免的误差。为了修正平流对蒸散发的影响，P-T 公式给出了一个经验系数 α，在一定程度上反映平流的影响，并根据海洋和大范围饱和陆面的观测资料，给出了 α 的推荐值为 1.26。但大量研究表明[15-19]，α 值随着研究区的地理特征而变化，同时受海陆间平流输送的季节性变化和年降水量变化的影响，具有年际和季节等时间变化特性，因此需要对经验系数 α 进行必要的修正。

2.1 与实测资料的对比修正

对于已有实测资料比较全面的地区，该方法为首选方法，同时可以与其他模型结合使用，进行对比，如涡度相关法、波文比法等。这种方法主要是利用 P-T 模型所计算出的蒸散发数据与实测数据进行比较，然后用 SPSS 等分析软件分析其线性相关性，并在置信度一定的区间内进行回归分析，从而确定出更适合本地区的 α 系数值。赵玲玲等[20]采用月水量平衡模型中估算蒸散发的方法，利用研究区 15 个降水观测站和 6 个蒸发观测站 1973-1983 年逐月资料，计算月实际蒸散发量，然后利用流域水量平衡对 P-T 模型中的 α 系数值调整为 α=1.16，同时加入平流常数项来描述平流对蒸散发的影响，即引入平流系数 b_1，改进后的公式形式如下：

$$E_{\text{P-T}}=b_1+\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\frac{R_n}{\lambda}。\tag{3}$$

式(3)中：符号代表的意义与表 1 相同，平流项参数 b_1 的取值根据实际流域水量平衡关系确定，即基于历史观测的降水、径流等数据，及水量平衡方法计算的蒸散发量，来调整参数 b_1 的取值。理论上，b_1 的取值随降水等气象条件而变化，具有年内和年际变化的特性。但对于多年平均而言，参数 b_1 在统计上反映流域平流作用的统计均值。为了简化计算，参数 b_1 可取统计均值。通过实例分析，基于改进 P-T 公式的 AA 模式估算各个季节的蒸散发均值和方差与月水量平衡模型估算的蒸散发量的均值和方差更接近，从而验证了该方法的有效性，更好地反映平流对蒸散发的影响，提高流域蒸散发的模拟精度，类似研究也被用于麦田蒸散计算[21]。孙丽等[22]利用涡度相关技术对三江平原典型沼泽湿地蒸散发进行了连续观测，在分析生长季内沼泽湿地蒸散发时间动态的基础上，采用 P-T 模型分别模拟了沼泽湿地的日蒸散发，并利用实测值对 2 种模型的模拟精度进行了验证， 其中 α 取值为 1.03，P-T 模型模拟值与实测值在整个生长季内的一致性较好。

2.2 以 Penman-Monteith 模型为对照的修正

美国土木工程师学会(ASCE)将 20 种计算蒸散量的方法在不同地区各种气候条件下进行了详细的分析评价，认为 P-M 模型无论在干旱还是湿润地区都能够得到准确度高的估算值[1]。P-M 模型由于具有充分的理论依据和较高的精度，被联合国粮农组织(FAO)推荐为计算 E_{T0} 的首选方法。因此，在实测值难以获取的地方，可采用以 P-M 模型为对照的方法，比较并修正 P-T 模型的 α 系数值。

Xu 和 Singh 以 P-M 模型为对照，在瑞士 Changins 站对不同类型的 13 种蒸散发方法进行了比较，并对 P-T 模型中 α 系数进行了修正。修正之前，α 值取 1.26，通过回归分析可以看出这个值明显偏高了，需进行校正。校正的最优方法就是求最小均方差[23]，令 P-M 模型计算出的蒸散发量为 $E_{\text{t,p-m}}$，P-T 模型计算出的蒸散发量为 $E_{\text{t,p-t}}$，则目标函数 F_0 表达方式如下：

$$F_0=\sum(E_{\text{t,p-m}}-E_{\text{t,p-t}})^2=\text{minimum}SSQ。$$

其中：最优的模型参数就是目标函数的最小值。经过上述方法的修正，重新获得 α 值为 0.9，从而使 P-T 模型估算的结果更符合研究地区蒸散发的实际情况。

范丽萍等[24]在西安地区的蒸散发研究中，基于 P-T 与 P-M 初始计算结果的良好线性关系，在置信度为 95%的区间内应用 Excel 数据分析工具进行回归，得到方程：$E_{\text{TP-T, 0}}=1.32E_{\text{TP-T}}+0.8$。其中：将 α 系数值修正为 1.32，同时利用 2004 年气象资料对方程进行了检验，可见修正后的P-T 方法的计算结果得到了很好的校正，与 P-M 结果变化趋势基本一致。

2.3 利用相关经验公式的校正

为了更准确的确定 α 系数的值，一些学者根据 α 系数的理论基础，寻找它与其他气象、环境等要素的关系，从而推导出相关关系式。Lhomme[25]从潜在蒸散发与实际蒸散发的关系着手，利用对流边界层的闭合模型进行研究，得出潜在蒸散(E_{p0})的均衡公式为 $E_{p0}=\alpha E_0$，其中 E_0 是均衡蒸散发量，α 是类似

于 P-T 公式的系数，可以表示为：

$$a=1+\frac{1}{1+e}\frac{<\gamma_s>}{\gamma_a}。\tag{4}$$

式(4)中：r_s 为区域表面阻力，r_a 为当地空气阻力，e 为空气温度下饱和湿度的无量纲斜率。由式(4)可见：α 值与$\frac{<\gamma_s>}{\gamma_a}$的值成正比例关系，它表明在干旱地区（$\langle r_s \rangle$高），α 值就大，从而潜在蒸散发量就相对较大，但是这个公式的提出还只是一个理论框架，而实用性较差，只能大致确定 α 值的范围，还需要进一步的研究和修正。

Flint 和 Childs 利用波文比的方法计算实际蒸散发量的公式，通过不断的公式代入和整合，得到 α′与土壤相对含水饱和度 α 的关系：$\alpha'=A[1-\exp(B\alpha)]$。其中：$A$，$B$ 都是回归系数。

$$\theta=\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}。\tag{5}$$

式(5)中：θ 是土壤含水量，θ_r 是残余土壤含水量，θ_s 是土壤饱和含水量。

Flint 和 Childs 利用美国俄勒岗州皆伐森林的数据，用上述方法对 P-T 模型中 α 系数进行了修正，所修正的 α′在土壤湿度接近田间持水量时大约取到 0.9[26]。在这个研究的基础上， Fisher 和 DeBiase 等将 P-T 模型中 α 系数定义为：$\alpha=0.84M+0.72$。其中：M 为上层 20 cm(根区)土壤体积含水量。该研究基于土壤水分回归方程和相似站点的测量工作确定了 α 值，对 P-T 模型进行了大幅度改进[27]。Semalty 等[28]对印度 Uttarakhand 州森林生态系统蒸散发的研究中，也使用了这个修正方程，结果表明修正后的模型更适用于当地的蒸散情况。

3　Priestley-Taylor 模型在蒸散发估算中的应用

3.1　Priestley-Taylor 模型在农田生态系统蒸散发估算中的应用

参考作物蒸发蒸腾量一直是计算作物需水量的关键，是实时灌溉预报和农田水分管理的主要参数。针对这方面的研究开始较早，用 P-T 模型估算蒸散发量最初就是基于农田生态系统来研究的。

彭世彰等[29]在江西鹰潭市对 4 种分属于不同类型的参考作物蒸发蒸腾量计算公式进行了日蒸散发值的验证计算。选取 FAO-56 Penman-Monteith 公式计算结果为标准，P-T 方法结果与之最为接近，阴天的情况下，且其日均和最大相对误差仅为 0.003 8% 和 0.280 0%，而其他方法随 n/N 的减小，误差急剧增加， 尤其是 Hargreaves 方法，进一步验证了 P-T 模型的准确度和优越性。Papaioannou 和 Louisakis 也使用 P-T 模型对大豆作物的田地进行了蒸散发的估算，P-T 模型参数值的确定是根据赖特的程序，确定一个广义的基础作物系数曲线，从蒸渗仪的数据和土壤湿度廓线的时间演化得到了一个相当高的峰值，为大豆作物系数 1.4，这主要是由于作物蒸散量高，以及 1988 年的希腊热浪和方法的差异所造成的[30]。米娜等[31]对锦州地区玉米田的蒸散发研究表明，在基于常规气象数据计算蒸散量的 3 种方法中，以 P-T 法最优，其次是 Hargreaves 法和 FAO-56P-M 法。P-T 法与实测值的线性相关系数最大为 0.74，说明该方法的计算值可以解释 74%的日蒸散的变化情况，相对均方差在 3 种方法中也较小，决定系数为 0.47，总体上较观测值偏高 20%~26%。因此，从整体上来看，虽然由于一些特定因素的影响，P-T 模型估算还存在一些误差，但其精确度还是比较高的，又因所需要的参数较少，适合在农田蒸散估算中推广使用。

3.2　Priestley-Taylor 模型在森林生态系统蒸散发估算中的应用

应用 P-T 模型对森林蒸散的研究落后于农田蒸散。森林生态系统在结构层次、物种丰富程度、植被发育水平等方面要比农田生态系统复杂得多，系统机制方面的理论研究需要更加深入，实测数据的获取难度较大。由于森林生态系统的这些特点，准确地估算蒸散发较为困难。多数文献研究表明，P-T 的估算值偏高，需要对 α 系数进行修正，修正后的值均更能符合当地情况，估算结果也相对精确。

Semalty 等 [28]收集了雪松 *Cedrus deodara*，西藏长叶松 *Pinus roxburghii* 和橡树*Quercus* spp.等 3 个林种站点的数据，使用修正后的 P-T 模型分别对其蒸散发量进行估算，研究表明 3 个站点蒸散发趋势大体一致，在不同季节会出现不同林种的差异和逆转。通过对这种变化的分析可得出雪松林的密度是最高的，而松林最低，这对于森林火险等级的确定也有重要意义。另外，在美国内华达州黄松林森林生态系统中，Fisher 等[27]对比研究了 Shuttleworth-Wallace，Penman-Monteith，McNaughton-Black，Penman，P-T

等 5 种估算蒸散发量的模型方法，并对 P-T 模型中 α 系数进行了修正，应用修改后的 P-T 模型进行蒸散发的估算，估算结果与 Penman 模型估算结果符合度较好，且计算过程相对简单。

4 Priestley-Taylor 模型研究与发展的方向

4.1 模型的适应性规律研究

P-T 模型估算的准确性受不同下垫面状况、太阳辐射、水汽压差、大气温度、土壤含水量、风速等外界因素[32-37]的影响，在不同区域、不同气候条件下的适用性有很大差异。这也逐渐成为限制 P-T 模型应用的一大瓶颈，因此对 P-T 模型修正及其区域适应性规律的研究已成为全球热点和难点问题。刘晓英等[11]根据华北地区 6 个气象站点的历史气象资料，以 P-M 结果为对照，对 P-T 方法的适用性问题进行探讨。结果表明：空气动力项与辐射项之比是影响 P-T 方法应用效果的重要因素，且两者呈显著负相关。该比值越小，2 种方法的吻合程度越好，P-T 方法应用效果也越好；反之，应用效果越差。Bhaw 等[38]对美国东部落叶林蒸散发情况的研究表明：温度和净辐射值的关系将对模型估算结果产生较大影响，且基于辐射值的 P-T 模型比基于温度的模型更能反映蒸散发值的变化。Irmak 等[39]的研究也认为太阳辐射是以生长季为时间尺度的植被蒸散的最主要驱动力，而气象因子则主要影响逐时的蒸散估算量。

因此，基于目前研究现状，进一步探索 P-T 模型估算值与 α 系数值及相关环境要素的关系，找到 P-T 模型在不同地区(尤其是干旱地区)的适用规律，这将促进蒸散发估算研究的发展。

4.2 与遥感、地理信息系统技术(GIS)及高精仪器结合

模型估算的准确性很大程度上取决于所取基础参数数据的准确性，因此，与现代遥感、地理信息系统技术及高精仪器结合使用，将有助于提高模型估算的准确性。其中，遥感数据中可见光、近红外和热红外波段能反映植被覆盖于地表温度的时空分布特征，可用于能量平衡中净辐射、土壤热通量等的计算[40]。在今后的研究中努力克服遥感技术受时间和空间分辨率的影响，结合水文模型以获取不同时间步长的森林植被蒸散量。地理信息系统作为新的技术手段，可以为蒸散的模拟计算提供数字高程模型(DEM)、土地利用、植被分布等特征参数，并且具有强大的数据编辑与处理功能，可为蒸散量的计算提供有效帮助。 另外，模型中经验系数会对模型模拟精度产生影响，目前已有众多学者运用涡动相关法[41]、热技术方法[42]等实测方法对不同地区不同生态系统中的植被蒸散量进行了精度较高的测定，随着蒸散测定手段和方法的不断进步，可运用精密仪器测量结果来修正 P-T 模型的参数值，提高 P-T 方法蒸散估算的精度。

参考文献：

[1] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, *et al*. *Crop evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements* [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998 .

[2] JENSEN M E, HAISE H R . Estimating evapotranspiration from solar radiation[J]. *J Irrig Drain Div ASCE*, 1963, **89**: 15 – 41 .

[3] HARGREAVAS G H, ALLEN R G. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation [J]. *J Irrig Drain Eng*, 2003, **129**(1): 53 – 63 .

[4] DOOREENBOS J, PRUITT W O. *Guidelines for Predicting Crop Water Requirements*[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1977.

[5] PRIESTLEY C H B, Taylor R J. On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters [J]. *Mon Weather Rev*, 1972, **100**: 81 – 92 .

[6] MAKKINK G F. Testing the Penman formula by means of lysimeters [J]. *Water Eng*, 1975, **11**(3): 277 – 288 .

[7] 刘振兴. 论地面蒸发的计算[J]. 气象学报，1956，**27**(4)：15 – 27 .
LIU Zhenxing. Study on the calculation of surface evaporation [J]. *Meteorology*, 1956, **27**(4): 15 – 27.

[8] 周国逸，潘维俦. 森林生态系统蒸发散计算方法的研究[J]. 中南林学院学报，1988，**8**(1)：22 – 27 .
ZHOU Guoyi, PAN Weichou. Method of estimating evapotranspiration from forest ecosystem [J]. *J Cent South For Univ*, 1988, **8**(1): 22 – 27 .

[9] 于峰，史正涛，李滨勇，等. SWAT 模型及其应用研究[J]. 水科学与工程技术，2008(5)：4 – 8.

YU Feng, SHI Zhengtao, LI Binyong, *et al*. Discussion on SWAT model and its application[J]. *Water Sci Eng Technol*, 2008(5): 4 – 8.

[10] KARVONEN T, KOIVUSALO H, JAUHIAINEN M. A hydrological model for predicting runoff from different land use area [J]. *J Hydrol*, 1999, **217**(3/4): 253 – 265.

[11] 刘晓英，林而达，刘培军. 干旱气候条件下 Priestley-Taylor 方法应用探讨[J]. 水利学报，2003，**34**(9)：31 – 38.
LIU Xiaoying, LIN Erda, LIU Peijun. Study on application of Priestly-Taylor method to dry climate condition [J]. *J Hydr Eng*, 2003, **34**(9): 31 – 38.

[12] 刘钰，蔡林根. 参照腾发量的新定义及计算方法的对比[J]. 水利学报，1997，**28**(6)：27 – 33.
LIU Yu, CAI Lingen. Update def inition and computation of reference evapotranspiration comparison with former method [J]. *J HydrEng*, 1997, **28**(6)：27 – 33.

[13] TETEN O. Uber einige meteorologische Begriffe [J]. *Geophys*, 1930, **6**: 297 – 309.

[14] MURRAY F W. On the computation of saturation vapor pressure [J]. *Appl Meteor*, 1967, **6**: 203 – 204.

[15] 邱新法，曾燕，缪启龙，等. 用常规气象资料计算陆面年实际蒸散发量[J]. 中国科学 D 辑，2003，**33**(3)：81 – 88.
QIU Xinfa, ZENG Yan, MIU Qilong, *et al*. Calculate the actual land surface evapotranspiration with conventional meteorological data [J]. *Sci China Ser D*, 2003, **33**(3): 81 – 88.

[16] 刘绍民，孙睿，孙中平，等. 基于互补相关原理的区域蒸散量估算模型比较[J]. 地理学报，2004，**59**(3)： 331 – 340.
LIU Shaomin, SUN Ri, SUN Zhongping, *et al*. Comparison of different complementary relationship models for regional evapotranspiration estimation [J]. *Acta Geogr Sin*, 2004, **59**(3): 331 – 340.

[17] 曾燕，邱新法，刘昌明，等. 1960 – 2000 年中国蒸发皿蒸发量气候变化特征[J]. 水科学进展，2005，**18**(3)：311 – 318.
ZENG Yan, QIU Xinfa, LIU Changming, *et al*. Changes of pan evaporation in China in 1960–2000 [J]. *Adv Water Sci*, 2005, **18**(3): 311 – 318.

[18] 马耀明. 非均匀陆面上区域蒸发(散)研究概况[J]. 高原气象，1997，**16**(4)：446 – 452.
MA Yaoming. A survey in the study of area evaporation (evapotranspiration) over the heterogeneous landscape[J]. *Plat Meteorol*, 1997, **16**(4): 446 – 452.

[19] XU C Y, SINGH V P. Evaluation of three complementary relationship evapotranspiration models by water balance approach to estimate actual regional evapotranspiration in different climatic regions[J]. *J Hydrol*, 2005, **308**(1/4): 105 – 121.

[20] 赵玲玲，王中根，夏军，等. Priestley-Taylor 公式改进及其在互补蒸散模型中的应用[J]. 地理科学进展，2011，**30**(7)：805 – 810.
ZHAO Lingling, WANG Zhonggen, XIA Jun, *et al*. Improved Priestley-Taylor method and its application in complementary relationship evapotranspiration mode [J]. Prog Geogr, 2011, **30**(7): 805 – 810.

[21] 莫兴国. 用平流-干旱模型估算麦田潜热及平流[J]. 中国农业气象，1995，**16**(6)：1 – 4.
MO Xingguo. An advection-aridity evaporation model for wheat field evapotranspiration and advection[J]. *Agric Meteorol*, 1995, **16**(6): 1 – 4.

[22] 孙丽，宋长春. 三江平原典型沼泽湿地蒸散发估测[J]. 应用生态学报，2008，**19**(9)：1925 – 1930.
SUN Li, SONG Changchun. Estimation of evapotranspiration from a typical marsh in Sanjiang Plain [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2008, **19**(9)：1925 – 1930.

[23] XU C Y, SINGH V P. Cross comparison o f empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland [J]. *Water Resour Manage*, 2002, **16**: 197 – 219.

[24] 范丽萍，贾忠华，罗纨，等. 西安地区 Priestley-Taylor 和 Hargreaves 方法应用比较[J]. 水资源与水工程学报，2007，**18**(2)：53–60.
FAN Liping, JIA Zhonghua, LUO Wan, *et al*. Comparison with the application of Priestley-Taylor and Hargreaves methods in Xi'an [J]. *J Water Resour Water Eng*, 2007, **18**(2): 53 – 60.

[25] LHOMME J P. A theoretical basis for the Priestley-Taylor coefficient [J]. *Boundary-Layer Meteorol*, 1997, **82**(2):

179 – 191.

[26] FLINT A L, CHILDS S W. Use of Priestley-Taylor evaporation equation for soil water limited conditions in a small forest clearcut [J]. *Agric For Mereorol*, 1991, **56**: 247 – 259.

[27] FISHER J B, DeBIASE T A, QI Ye, *et al*. Evapotranspiration models compared on a Sierra Nevada forest ecosystem [J]. *Environ Mod & Software*, 2005, **20**(6): 783 – 796.

[28] SEMALTY P D, DEV K, KUMAR S, *et al*. Estimation of forest evapotranspiration over Uttarakhand hills, India [J]. *Indian J Phys*, 2011, **85**(8): 1277 – 1285.

[29] 彭世彰，徐俊增. 参考作物蒸发蒸腾量计算方法的应用比较[J]. 灌溉排水学报，2004，**23**(6)：5 – 9.
PENG Shizhang, XU Junzeng. Comparison of reference crop evapotranspiration computing methods[J]. *J Irrig Drain*, 2004, **23**(6): 5 – 9.

[30] PAPAIOANNOU G, LOUISAKIS A, KERKIDES P. Evapotranspiration measurement over soybeanfield [J]. *Water Resour Manage*, 1991, **5**(3/4): 251 – 259.

[31] 米娜，陈鹏狮，张玉书，等. 几种蒸散模型在玉米农田蒸散量计算中的应用比较[J]. 资源科学，2009，**31**(9)：1599 – 1606.
MI Na, CHEN Shipeng, ZHANG Yushu, *et al*. A comparative study on estimation models for field evapotranspiration [J]. *Resour Sci*, 2009, **31**(9): 1599 – 1606.

[32] PRENGER J J, FYNN R P, HANSEN R C. *An Evaluation of Four Evapotranspirarion Models* [R]. Sacramento: ASAE Annual International Meeting, 2001.

[33] 粟晓玲，石培泽，杨秀英，等. 石羊河流域干旱沙漠区滴灌条件下苹果树耗水规律研究 [J]. 水资源与水工程学报，2005，**16**(1)：19 – 23.
LI Xiaoling, SHI Peize, YANG Xiuying, *et al*. Water consumption variation and growth of apple trees under drip irrigation in Shiyanghe river basin of Gansu Province[J]. *J Water Resourd Water Eng*, 2005, **16**(1): 19 – 23.

[34] 李敏. 浑善达克沙地重叠植被生态需水量分析研究[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2008 .
LI Min. *The Analysis of Ecological Water Requirement of the Overlapping Vegetation in the Otinday Sandy Area* [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008.

[35] 赵双喜，张耀生，赵新全，等. 祁连山北坡草地蒸散量及其与影响因子的关系[J]. 西北农林科技大学学报：自然科学版，2008，**36**(1)：109 – 115.
ZHAO Shuangxi, ZHANG Yaosheng, ZHAO Xinquan, *et al*. Research on evapotranspiration and its impact factors on grassland in the northern slopes of Qilianshan Mountains [J]. *J Northwest A & F Univ Nat Sci Ed*, 2008, **36**(1): 109 – 115.

[36] 邴龙飞，李秀珍，胡远满，等. 大兴安岭北坡参考植物蒸发蒸腾的经验公式[J]. 生态学杂志，2009，**28**(1)：167 – 171 .
BING Longfei, LI Xiuzhen, HU Yuanman, *et al*. An experiential formula about the evapotranspiration of reference vegetation on northern slope of Great Hing'an Mountains [J]. *Chin J Ecol*, 2009, **28**(1): 167 – 171 .

[37] 程根伟，余新晓，赵玉涛，等. 贡嘎山亚高山森林带蒸散特征模拟研究[J]. 北京林业大学学报，2003，**25**(1)：23 – 27 .
CHENG Genwei, YU Xinxiao, ZHAO Yutao, *et al*. Evapotranspiration simulation of subalpine forest area in Gongga Mountain [J]. *J Beijing For Univ*, 2003, **25**(1): 23 – 27.

[38] BHAW S B, RIHA S J. Assessing temperature-based PET equations under a changing climate in temperate, deciduous forests [J]. *Hydrol Proc*, 2001, **25**(9): 1466 – 1478.

[39] IRMAK S, ISTANBULLUOGLU E, IRMAK A. An evaluation of evapotranspiration model complexity against performance in comparison with Bowen ratio energy balance measurements [J]. *Amer Soc Agric Boil Eng*, 2008, **51**(4): 1295 – 1310 .

[40] COLL C, CASELLES V. A split window algorithm for land surface temperature from advanced very high resolution radiometer data: validation and algorithm comparison [J]. *J Geophys Res*, 1997, **102**(D14): 16697 – 16713.

[41] SOBRINO J A, RAISSOUNI N. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: application to Morocco [J]. *Int J Rem Sens*, 2000, **21**(2): 353 – 366.

[42] NEALE C M U, JAYANTHI H, WRIGHT J L. Irrigation water management using high resolution airborne remote sensing [J]. *Irrg Drain Syst*, 2005, **19**(3/4): 321 – 336 .