

## 基于唯象理论的蒸发速率的分析与启示

贺兴龙, 闫珉, 史顺平

(成都理工大学 地球物理学院应用物理系, 四川 成都 610059)

**摘要:** 改变以往以实验为主的研究思路, 尝试从唯象理论角度对蒸发速率分析与定量计算. 在无风条件下导出了蒸发速率的基本公式, 分析结果显示最主要的影响因素是温度与湿度, 且蒸发速率在温度一定时与湿度存在线性关系. 与道尔顿蒸发模型的比较, 得到了道尔顿模型参数的物理含义. 在非线性区和引入风速两种情况下, 计算出无风条件下蒸发唯象系数的具体表达式. 非线性模型结果与实验结果较好吻合; 风速模型与实验数据经比较后也显示一定的合理性.

**关键词:** 唯象方程; 蒸发速率; 化学势; 风速; 湿度

**中图分类号:** O 414. 12

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0712(2015)02-0061-05

蒸发是一种非常常见的现象, 蒸发速率是指单位时间某物质的蒸发量. 经过人们的实验研究得出, 影响蒸发速率的影响因素为蒸发的物质、湿度(一种表征气态蒸发物质分子数密度的物理量, 如果是在空气中则有多种计算方法)、温度、蒸发面积和风速. 蒸发是一个相变过程, 其本质是由于气液两相存在化学势之差而发生的. 平时所谓的蒸发实质是一个总效应, 蒸发和凝结过程是同时存在的, 液体中的分子由于碰撞而获得一个较大动能从而摆脱液体分子引力而逃逸到气体中叫做蒸发, 气体中的分子由于分子碰撞而回到液体中的过程叫做凝结. 通常所讨论的蒸发速率就是单位时间内蒸发量减去凝结量<sup>[1]</sup>.

蒸发研究对人类生产生活具有重要意义, 特别是对水蒸发研究显得尤为重要. 地表水蒸发, 地下水蒸发, 雾, 汽等过程与蒸发理论都有直接关系, 当然其中也有许多问题有待解决. 在以往蒸发速率研究中, 呈现两种研究特点, 一是对自然环境中或者自然条件下的水分蒸发研究为主, 其中 Shammiri 和 Sartori 较系统和全面地总结了关于水的表面蒸发速率的研究成果, 并且给出了水在大气环境下蒸发的经验公式<sup>[2]</sup>:

$$r = (k_1 + k_2 v)(p_0 - p)^{k_3} \quad (1)$$

式中  $r$  为水的蒸发速率,  $k_1$ 、 $k_2$  和  $k_3$  为模型参数, 其

中  $k_3$  通常情况下取 1,  $p_0$  为水表面温度下的饱和蒸汽压,  $v$  为风速,  $p$  为空气中水蒸气的分压. 该公式比较简单地概括了蒸发速率与风速和湿度之间的关系. 第二是研究的方法大多以实验为主, 基本上都是通过实验得到经验公式, 并没有从理论高度给出太多实际物理含义, 其中耿江涛等<sup>[3]</sup>所进行的就是此类研究.

综上所述, 虽然现在已经能够对蒸发进行一些定量的计算, 但是大多数的模型是半经验半理论的公式, 公式本身也是由许多复杂模型参数组成, 或是采用复杂的计算机模拟方法模拟出需要的结果<sup>[4]</sup>. 本文尝试着改变以往研究思路, 从纯粹的理论出发, 使用热力学理论对蒸发过程进行分析与定量计算, 通过理论分析可以让我们对蒸发过程有更清晰的了解.

### 1 基于唯象理论的蒸发速率分析

#### 1.1 非平衡态热力学分析过程

首先考虑孤立体系的单元蒸发, 设液相为  $\alpha$ , 气相为  $\beta$ . 气液两相的温度认为近似相等. 孤立系统的条件为<sup>[5]</sup>

$$\begin{aligned} \delta U_\alpha + \delta U_\beta &= 0 \\ \delta V_\alpha + \delta V_\beta &= 0 \\ \delta n_\alpha + \delta n_\beta &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

由于是孤立系统, 且两相温度一样, 所以两相熵变不

收稿日期: 2014-03-04; 修回日期: 2014-06-20

基金项目: 高校博士点专项科研基金联合资助课题(20095122110016); 成都理工大学“物理教学创新团队”(JXTD20130); 成都理工大学应用物理专业综合改革(14x003-09)资助

作者简介: 贺兴龙(1992—), 男, 湖北随州人, 成都理工大学地球物理学院应用物理系 2011 级本科生.

通讯作者: 闫珉, email: yanmin@cdu.cn

存在外部熵,或者说是两相之间没有熵流动.

对于两相的内部熵变为

$$\delta S_{\alpha} = \frac{\delta U_{\alpha} + p_{\alpha} \delta V_{\alpha} - \mu_{\alpha} \delta n_{\alpha}}{T} \quad (3a)$$

$$\delta S_{\beta} = \frac{\delta U_{\beta} + p_{\beta} \delta V_{\beta} - \mu_{\beta} \delta n_{\beta}}{T} \quad (3b)$$

所以系统总的熵产生为

$$\delta S = \delta V_{\alpha} (p_{\alpha} - p_{\beta}) \frac{1}{T} - \delta n_{\alpha} (\mu_{\alpha} - \mu_{\beta}) \frac{1}{T} \quad (4)$$

该熵是体系的内部熵,即熵的产生,而非转移(因为孤立系统).由于  $p_{\alpha} = p_{\beta}$ , 所以有

$$\delta S = -\delta n_{\alpha} \frac{\mu_{\alpha} - \mu_{\beta}}{T} \quad (5)$$

从而得到熵的产生,即<sup>[6,7]</sup>

$$\sigma = \frac{dS}{dt} = \frac{dn_{\beta}}{dt} \frac{\mu_{\alpha} - \mu_{\beta}}{T} \quad (6)$$

式中  $\mu_{\alpha}, \mu_{\beta}$  为  $\alpha$  和  $\beta$  相的化学势. 上式将熵产生率表示成了力与流的关系,从而得出力与流的具体形式:

$$J = \frac{dn_{\beta}}{dt} \quad (7)$$

$$X_{\beta} = \frac{\mu_{\alpha} - \mu_{\beta}}{T}$$

式中  $J$  为蒸汽流,即蒸气物质质量的增加速率,  $X_{\beta}$  为蒸发的推动力. 虽然这是从孤立系统推导出来的,但它却刻画了蒸发中力与流的普遍关系(在开放系统中大系统与子系统总体可以看做孤立系统,所以结论是普适的).

如果给式(6)两端同除以蒸发表面面积,则  $\frac{dn_{\beta}}{dt}$

就可以看做为蒸发速率,即单位时间蒸发的物质.

如果蒸发是在空气中,则空气中的物质必然要对蒸发产生影响,其表现就是空气中其他成分的扩散流对蒸发的耦合<sup>[8]</sup>,在宏观的蒸发效应不是很强的情况下,由线性唯象律有如下唯象关系<sup>[9]</sup>:

$$V = \frac{dn_{\beta}}{dt} = J_{\beta} = L_{11} X_{\beta} + L_{12} X_{\gamma} \quad (8)$$

$$J_{\gamma} = L_{21} X_{\beta} + L_{22} X_{\gamma}$$

式中  $V$  为蒸发速率,  $J_{\gamma}$  为空气中其它物质的扩散流,  $X_{\gamma}$  为扩散流的推动力,  $L_{11}, L_{22}$  为蒸发本征唯象系数和扩散本征唯象系数<sup>[10]</sup>,  $L_{12}, L_{21}$  为两者的耦合唯象系数. 由于蒸发引起的扩散流比较弱,在强蒸发条件下是可以忽略的,即  $J_{\gamma} \approx 0$ , 又由昂萨格对易关系<sup>[10]</sup>:

$$L_{12} = L_{21} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)可以求得

$$V = \left( L_{11} - \frac{L_{12}^2}{L_{22}} \right) X_{\beta} \quad (10)$$

则蒸发速率可以简单表示为

$$V = L X_{\beta} \quad (11)$$

一般来说  $L$  只与温度和液体性质有关.

在通常情况下,空气中其他成分因为蒸发而扩散的现象很微弱,近似可以忽略,所以在一般环境下  $J_{\gamma} \approx 0, X_{\gamma} \approx 0$ , 于是  $L_{21} \approx 0$ .

同样由对易关系可得到  $L_{12} X_{\gamma}$  为二阶小量. 此时蒸发唯象系数就等于本征蒸发唯象系数  $L = L_{11}$ . 而从单纯热力学角度来看空气中其他成分对蒸发的影响只有扩散流的耦合作用,可以等效地认为是压强(除去蒸发物质气体浓度对蒸发的影响之外的影响效果)对蒸发的影响,所以得到的结论是:压强在一定范围对蒸发的影响是较小的,其主要还是蒸发物质气体浓度对蒸发的影响. 而许多实验已经证实,气压对蒸发的影响是可以忽略的,即使气压下降  $2 \times 10^4$  Pa 至  $3 \times 10^4$  Pa, 对水而言,其蒸发量也只增加 2% 到 3%<sup>[11]</sup>.

如果从蒸发分子动力学的角度分析,这一点便不难理解. 前文已经提到,单向蒸发就是液体分子挣脱液体分子引力而跃入到气体中的过程,只与液体本身属性和温度有关. 于是压强、湿度等对蒸发影响的主要还是微观的气体分子回到液体的过程,所谓压强对蒸发的影响应该理解为空气中其它分子对蒸发物质扩散的影响,而这种影响只能通过空气中其他物质的扩散流对蒸发的耦合作用来体现. 从上面的计算可以得出

$$V = \frac{L_0}{T} (\mu_{\alpha} - \mu_{\beta}) \quad (12)$$

在此过程中,由于  $\mu_{\alpha}$  为液相化学势,而它与浓度、压强有关. 由于液相浓度几乎不改变(由于  $V_{\alpha}, V_{\beta}$  变化较小),压强也对其影响较小. 所以  $\mu_{\alpha}$  在蒸发过程中是近似不变的. 对于  $\mu_{\beta}$ , 可以使用统计力学中正则系综来做近似代替,在的温度  $T$  时有<sup>[5]</sup>

$$\mu_{\beta} = N_A k T \ln \left[ c \left( \frac{h^2}{2\pi m k T} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (13)$$

式中  $N_A$  为阿伏伽德罗常数,  $k$  为波尔兹曼常量,  $T$  为气体温度,  $c$  为气相  $\beta$  的分子数密度,  $h$  为普朗常量,  $m$  为气体分子质量,于是便得到蒸发速率公式为

$$V = -N_A k L \ln \left[ c \left( \frac{h^2}{2\pi m k T} \right)^{\frac{3}{2}} \right] + \frac{\mu_{\alpha} L}{T} \quad (14)$$

$$L = L_{11} - \frac{L_{12}^2}{L_{22}} \quad (15)$$

式中  $V$  为蒸发的速率,  $c$  为单位体积的气态分子的数密度. 式(14)仅在接近平衡态的线性区成立, 因为只有在接近平衡态时线性唯象率才成立. 另外需要说明的是上式虽然只给出了蒸发速率与蒸发物质的气体分子浓度和温度的关系, 却刻画出了蒸发的本质. 蒸发的分子动力学过程分析可清晰看出蒸发最直接的影响因素是蒸发物质的气体分子密度和速度, 从这个角度来讲, 蒸发速率的影响因素只有温度和湿度, 而通常认为风速对蒸发有影响是因为风速改变了液体上方蒸发气体的分子浓度. 由于在蒸发时, 蒸发气体分子并没有均匀扩散在全空间, 而是在液体上方呈一定聚集, 由于空气流动使得浓度低的空气置换掉了聚集在上方的高浓度蒸发物质的空气, 减小了蒸发气体的分子数密度, 从而加快了蒸发速率.

## 1.2 与道尔顿蒸发速率模型的比较

首先简单介绍一下道尔顿蒸发速率公式. 在1802年道尔顿提出了著名的蒸发速率定律, 主要是针对水的蒸发, 用数学公式通常表示为<sup>[11]</sup>

$$E = C \frac{e_0 - e}{p} \quad (16)$$

式中  $E$  为蒸发速率,  $C$  为模型参数, 不同风速下有不同的值,  $e_0$  为饱和水汽压,  $e$  为空气中的水汽压,  $p$  为气压. 由于一般气压的影响可以忽略, 所以常常有以下形式:

$$E = C(e_0 - e) \quad (17)$$

现将式(14)得到的结论与道尔顿蒸发速率公式作简单对比.

在平衡时有

$$\mu_\alpha = N_A k T \ln \left[ c_0 \left( \frac{h^2}{2\pi m k T} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (18)$$

式中  $c_0$  为饱和蒸汽的分子数密度. 则蒸发速率公式可以化为如下简单形式:

$$V = RL \ln \frac{c_0}{c} \quad (19)$$

当接近平衡时,  $\frac{c_0}{c}$  接近于 1, 于是有如下近似关系成立:

$$\ln \frac{c}{c_0} \approx \frac{c}{c_0} - 1 \quad (20)$$

于是有

$$V = RL \frac{c_0 - c}{c_0} \quad (21)$$

特别的对于水的蒸发借用相对湿度的概念, 则公式化为

$$V = RL(1 - H) \quad (22)$$

$H$  为空气中水的湿度.

这和道尔顿蒸发公式得到的结论是一致的. 在其它条件不变的情况下, 蒸发速率与湿度, 饱和湿度之差成正比. 其次进一步对比得出在可以忽略风速的情况下道尔顿蒸发公式的模型参数, 即  $RL$ . 由此可以认为道尔顿蒸发模型的参数就是一阶动力学系数  $L$  (式(15)). 另外式(22)和采用所谓的湿度势得出的结论是一致的.

## 2 基本蒸发速率公式的推广

### 2.1 在非线性区的推广和蒸发唯象系数的具体表达形式

用蒸发平衡常数对蒸发速率公式做简单的一般性讨论. 由于不管是化学反应还是蒸发, 本质都是化学势差异所致<sup>[6]</sup>, 所以借用化学反应的亲势的概念定义蒸发亲势为<sup>[5]</sup>

$$a_p = \mu_\alpha - \mu_\beta \quad (23)$$

设  $\omega_+$  为单向蒸发速率,  $\omega_-$  为单向的凝结速率, 并且由上文中分子动力学对蒸发的微观分析可知, 单向蒸发或凝结的速率和分子数密度是成正比的. 设蒸发的比例系数为  $k_+$ , 凝结的比例系数为  $k_-$ , 对总的净蒸发速率为

$$\omega_p = \omega_+ - \omega_- = k_+ c_\alpha - k_- c_\beta = k_+ c_\alpha \left( 1 - \frac{k_- c_\beta}{k_+ c_\alpha} \right) \quad (24)$$

当  $\omega_p = 0$  时, 即蒸发凝结达到动态平衡时, 平衡系数为

$$K_p(T, p) = \frac{c_\beta}{c_\alpha} \quad (25)$$

于是得到如下关系:

$$\frac{k_-}{k_+} = \frac{1}{K_p(T, p)} \quad (26)$$

代入式(24)得

$$\omega_p = k_+ c_\alpha \left[ 1 - \frac{1}{K_p(T, p)} \frac{c_\beta}{c_\alpha} \right] \quad (27)$$

实验证明在局域平衡下理想流体(液体和气体)的化学势<sup>[5]</sup>可以表示为

$$\mu_i = g_i(T, p) + kT \ln c_i \quad (28)$$

于是

$$\mu_\alpha - \mu_\beta = kT \ln K_p(T, p) \frac{c_\alpha}{c_\beta} \quad (29)$$

代入式(27)有

$$\omega_p = k_+ c_\alpha (1 - e^{-\frac{\omega_p}{kT}}) = \omega_+ (1 - e^{-\frac{\omega_p}{kT}}) \quad (30)$$

上式就是在没有风速影响下一般蒸发速率的公式, 当在接近平衡态的线性区即  $a_p$  接近于 0 时, 有

$$\omega_p = \omega_+ \frac{a_p}{kT} \quad (31)$$

对比式(12)得蒸发唯象系数

$$L = \frac{\omega_+}{k} \quad (32)$$

而求单向蒸发速率  $\omega_+$  的计算可以借用真空物理中蒸发速率公式算出, 这里不再详细讨论.

在一般情况下, 如果气体化学势用式(13)代替, 则有一般的蒸发公式:

$$V = \omega_+ \left[ 1 - c_1^{\frac{1}{kT}} e^{\frac{\mu_g}{kT}} \left( \frac{h^2}{2\pi m k T} \right)^{\frac{3}{2kT}} \right] \quad (33)$$

文献[3]中实验得到无风条件下蒸发速率与空气相对湿度的关系曲线. 可以看到, 湿度在接近饱和时, 蒸发速率与湿度的确是线性的关系. 该结论与本论文得到的结论是相同的. 同时, 实验结果也较好地验证了蒸发速率与湿度关系曲线非线性区的存在.

## 2.2 引入风速后的蒸发速率公式推广

虽然一般认为风速对蒸发速率的影响还是通过改变蒸发面的表面蒸发物质的气体浓度来改变蒸发速率的, 但具体如何对蒸发速率影响, 目前还没有比较统一的认识. 本文将根据风速对蒸发表面浓度的影响方式提出两种不同的假设, 并计算在两种假设下引入风速后的蒸发速率公式. 为了叙述方便, 以下分析都是以在空气中水的蒸发为例.

由于水在蒸发后, 水蒸气会成一定的聚集, 而风速导致的空气流动又必然使水面周围的低水蒸气浓度的空气来混合并降低原来水表面的水蒸气的浓度, 于是便加快风速. 对引入风速后的模型修正现在学术界普遍的做法是在原有的道尔顿蒸发公式上引入风速函数<sup>[11]</sup>, 在计算时只需带入不同的风速值, 这样风速与浓度的影响就分立开来了. 但是用微观分子动力学的观点可知由于风速带给微观分子的只是平行水面的动量, 并没有使垂直水表面的分子平均速度增大, 理应对蒸发速率没有影响, 但事实是风速的确可以很显著的影响蒸发速率. 暂且先不讨论经典方法对流动空气湿度测量是否精确的问题, 本文尝试尽量绕开空气流动时对湿度的测量, 转而使用简单的处理方法来修正蒸发模型.

### 2.2.1 直接修正浓度项

要得到引入风速后对蒸发速率的具体影响, 只需修正式(14)中浓度项即可. 由于不同大小的风速

会对水表面的空气有不同的混合作用, 现在分情况来具体讨论. 当风速不是太大又不能忽略时, 风速对水表面的空气影响的扰动效果可以看成是湍流. 由于湍流, 周围低湿度的空气与水面上方的高湿度空气充分混合均匀, 此时产生了一个新的浓度值  $c'$ , 正是  $c'$  在实际作用. 欲求出  $c'$  具体值, 先假设已知在无风条件下水表面的空气浓度为  $c_1$ , 在远离蒸发表面的空气浓度为  $c_\infty$ , 假设存在临界风速  $v_0$ , 当大于  $v_0$  时表面的空气可以看作瞬时被周围空气代替, 此时  $c' = c_\infty$ . 具体可以在单位时间单位表面上方的长方体来分析, 这样就可以看作是一个速度大小为长度的低浓度长方体来代替同体积的低浓度长方体, 又是均匀混合后, 所以风速的影响必是线性的. 设风速为  $v$ , 给出

$$c' = \frac{c_\infty - c_1}{v_0} v + c_1 \quad (34)$$

代入到式(21)用湿度表示, 有

$$V = RL \left[ 1 + H_1 - \frac{v}{v_0} (H_\infty - H_1) \right] \quad (35)$$

$H_\infty$  为离水面较远处的空气湿度,  $H_1$  为无风条件下水表面附近的空气湿度. 具体可以用菲克扩散方程求出.

当风速  $v > v_0$  时, 由于水表面附近的湿度可以由  $c_\infty$  近似代替, 此时蒸发公式变为  $V = RL(1 - H_\infty)$ . 由文献[12]实验中蒸发速率和风速的实验关系曲线可以看出, 当风速增大到一定的值后风速继续加快对蒸发速率的增加不再显著, 存在临界风速点  $v_0$ , 在  $v_0$  以前, 蒸发速率与风速近似成线性关系. 这和模型结论是一致的.

### 2.2.2 单纯唯象理论考虑风速影响

式(8)中我们用  $\frac{dV_\beta}{dt}$  来代替风速引起的扩散流, 由于一般风速影响都是一维的, 所以体积的变化主要就是一维方向上的长度的改变, 所以  $v = \frac{dV_\beta}{dt}$ ,  $v$  就是风速, 这个时候很显然不能再按线性率展开, 当在二阶泰勒展开时

$$\begin{aligned} W &= L_{11} X_\alpha + L_{12} X_\beta + \frac{1}{2} L_{111} X_\alpha^2 + \frac{1}{2} L_{122} X_\beta^2 + L_{112} X_\alpha X_\beta \\ V &= L_{21} X_\alpha + L_{22} X_\beta + \frac{1}{2} L_{211} X_\alpha^2 + \frac{1}{2} L_{222} X_\beta^2 + L_{212} X_\alpha X_\beta \end{aligned} \quad (36)$$

而  $X_\alpha = \frac{\mu_\alpha - \mu_\beta}{T}$ , 一般  $L_{111}$ 、 $L_{122}$ 、 $L_{211}$ 、 $L_{222}$  都是小量, 力的二次方那一项可以忽略, 于是有

$$\begin{aligned} W &= L_{11}X_{\alpha} + L_{12}X_{\beta} + L_{112}X_{\alpha}X_{\beta} \\ V &= L_{21}X_{\alpha} + L_{22}X_{\beta} + L_{212}X_{\alpha}X_{\beta} \end{aligned} \quad (37)$$

很显然这种模型解得蒸发速率公式比起式(11)要复杂得多(此处不再继续深入讨论),但是我们仍然可以得出结论:在蒸发速率公式中风速和湿度存在耦合项.这说明风速对蒸发速率的影响还是比较复杂的,这也是对蒸发速率做粗略计算时大多选择实验方法的原因.

### 3 结论和讨论

本文主要采用了唯象的思想来对蒸发做宏观的热力学分析,而不去具体计算微观过程,从而使得分析大大简化,并且还可以结合其它研究成果将蒸发速率在不引入任何经验参数下完全计算出蒸发速率.对于封闭空腔内的蒸发,甚至可以建立蒸发速率的时间演化方程,可以进一步研究其动力系统性质.由于模型不再含有未知参数,所以模型公式是普适的.

### 参考文献:

- [1] Tang R S, Etzion Y. Molecular dynamics simulation of a thin water layer evaporation and evaporation coefficient [J]. Building and Environment, 2004, 39: 77-86.
- [2] Inoue H I. Water evaporation amount in surface [J]. The air conditioning sanitary engineering, 1962, 36 (1): 144-145.
- [3] 耿江涛,李相一,邢广磊,等. 水表面蒸发速率的实验研究[J]. 电源技术与设计, 2010, (5): 470-472.
- [4] 张峰榛,魏文韞,余徽,等. 连续液柱流表面真空蒸发模型[J]. 化工学报, 2011, (12): 3323-3329.
- [5] 汪志诚. 热力学·统计物理[M]. 北京:高等教育出版社, 2008.
- [6] 李卫东. 非平衡系统中的熵产生与能耗散函数[J]. 延安大学学报. 2002. 21(4): 28-28.
- [7] 彭少方,张昭. 线性和非线性非平衡态热力学进展和应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2006.
- [8] 张士宪,李运刚,何小凤. 非平衡态热力学的研究进展及应用[J]. 湿法冶金, 2007, (4): 169-174.
- [9] 薛明明. 非平衡态热力学的综合应用[J]. 吉林省教育学院学报. 2010 (9): 151-152.
- [10] 毛治宇,孙彦平. 用昂萨格唯象关系估算嵌入型电极材料中锂离子表面扩散系数[J]. 太原理工大学学报, 2011(5): 462-465.
- [11] 闵骞. 道尔顿公式风速函数的改进[J]. 水文, 2005 (1): 37-41.
- [12] 吕志刚,闫双景,崔旭龙. 风速和湿度对硅溶胶干燥过程的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2003 (4): 48-49.

## Analysis and enlightenment of the evaporation rate based on phenomenological theory

HE Xing-long, YAN Min, SHI Shun-ping

(Department of Applied Physics, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

**Abstract:** Changing the previous research technique relying mainly on experiment, we attempt to analyze and calculate quantificationally the evaporation rate from the perspective of phenomenological theory. The basic formula of evaporation rate is deduced under the condition of no wind, and the result has shown that the main influence factor are temperature and humidity; the humidity and evaporation rate are in a certain linear relationship with certain temperature. Comparing with Dalton evaporation model, the physical meaning of the Dalton model parameters is obtained. In the case of nonlinear area, the wind speed model is generalized, the concrete expression of evaporation phenomenological coefficient is calculated under the condition of no wind. The nonlinear model coincides with the experimental results preferably. It also shows certain rationality after comparing the wind speed model with the experimental data.

**Key words:** phenomenological equation; evaporation rate; chemical potential; wind speed; humidity