

基于液相整体蒸发定律重新解释液相内部的冷热对流现象——兼谈蒸发浮力现象

江正杰¹, 朱韵之², 冯跃春³

1. 山东工商学院, 人文与传播学院, 山东烟台

2. 江苏省扬州中学, 江苏扬州

3. 扬州市青少年科技教育协会, 江苏扬州

摘要: 基于液相整体蒸发定律可以对冷热温差引起的对流现象的原因进行新的解释。对流从现象上是因为温差产生的液相密度的大小差别引起的。但是对流从本质上说可以归结为是由液相整体蒸发产生的一种效应。温差之所以会产生液相密度的差别, 原因在于液相内部存在液相单元结构, 这个结构的外围存在从自由液相水分子过渡到气相水分子的结构。蒸发不仅是液面发生的相变过程, 而且主要是液相整体发生的从液相到气相的相变过程。比纯液相更低密度的气相分子产生之后, 在浮力作用下获得了趋向于液面运动的动能, 这个就是推动对流的动力根源。根据液相整体蒸发定律, 位于底部的低温液相也会有蒸发, 故可以预期: 在对流实验中也可以观察到对应的有颜色标记的冷液相的向上流动过程, 已有的对流实验正是如此。因此与被理解为是纯液相产生的浮力(阿基米德浮力)不同的是, 也存在由内部蒸发产生的蒸发浮力, 由之造成了纯液相产生的浮力之差别, 这个差别通常被看作是由温度不同的液相密度差别造成的, 实质上是由液相内部由总气相空间中存在的气相分子的体积差别决定的。据此可以给出蒸发浮力的计算公式: $F_z = \rho_{\text{气}} g (V_s + V_k)$ 。蒸发浮力可以通过波义耳自流瓶的虹吸实验加以验证。最重要的是, 蒸发浮力还可以通过保温桶水从均温开始的蒸发引起上热下冷效应实验加以验证。

关键词: 整体蒸发定律; 对流; 内部蒸发; 液相单元结构; 蒸发浮力; 波义耳自流瓶

Reinterpretation of Cold and Hot Convection in Liquid Phase Based on the Law of Overall Evaporation of Liquid Phase

Zhengjie Jiang¹, Yuechun Feng², Yunzhi Zhu³

1. School of Humanities and Communication, Shandong Technology and Business University, Yantai, Shandong

2. Jiangsu Association of Science and Technology Education for Teenagers, Yangzhou, Jiangsu

3. Yangzhou High School of Jiangsu Province, Yangzhou, Jiangsu

* 作者简介: 江正杰(1968—)男, 汉族, 福建闽清人, 哲学硕士, 副教授。研究方向: 自然哲学, 基础物理, 引力学, 中国文化经典研究、经典教育学。

冯跃春(1960—), 扬州市新华中学, 理科学士, 中国江苏扬州。研究方向: 青少年科技教育。扬州市青少年科技教育协会。

朱韵之(2008—), 江苏省扬州中学高一学生, 中国江苏扬州。江苏省中学生英才计划学员。

Abstract: Based on the Law of Whole-Phase Evaporation, the convection produced by a temperature difference can be reinterpreted. Phenomenologically, convection appears to arise from the density gradients caused by the temperature gradient; essentially, however, it can be traced to an effect produced by whole-phase evaporation. The reason a temperature difference creates density gradients is that the liquid contains unitary structural entities whose periphery consists of water molecules that are transitioning from the free-liquid state to the vapor state. Thus evaporation is not merely a surface phenomenon but, more fundamentally, a bulk process in which the entire liquid phase undergoes the liquid-to-vapor transition. Once vapor molecules—whose density is lower than that of the pure liquid—are generated, they acquire upward kinetic energy under the action of buoyancy, and this energy is the ultimate driving force for convection. In accordance with the Law of Whole-Phase Evaporation, even the cold liquid at the bottom of the vessel undergoes evaporation; consequently, one should expect that in convection experiments the upward motion of cold, dye-marked liquid can be observed—exactly what existing experiments reveal. Therefore, contrary to the conventional view that convection is driven solely by the buoyant force acting on the pure liquid (Archimedean buoyancy), there exists an additional “evaporation buoyancy” generated by internal evaporation. The difference between this evaporation buoyancy and the buoyancy of the pure liquid is ordinarily attributed to the density difference between warmer and cooler liquid; in reality, it is determined by the difference in the volume occupied by vapor molecules present throughout the total vapor space inside the liquid. From these considerations, the following formula for evaporation buoyancy can be derived: $F_e = \rho_{\text{g}} g (V_v + V_l)$. This buoyancy can be verified by the siphon experiment of Boyle artesian flask. The most important thing is that it can also be verified through experiments on the effect of heating up and cooling down (hot top effect) caused by the evaporation of water from the uniform temperature in the insulated bucket.

Keywords: Integral evaporation law; Convection; Internal evaporation; Liquid phase unit structure; Evaporation buoyancy; Boyle self-flowing bottle

1 研究背景——液相水整体蒸发定律的发现

1.1 液相的对流现象可以用内部整体蒸发定律加以解释

关于水及其它液体由冷热不均引起的对流现象，似乎是一个再简单不过的物理概念。对有关对流的各种简单实验，几乎每一个中学生都耳熟能详，似不值得再进行认真的学术探讨，也很少有人认为这里还存在什么样未解决的问题。

事实果真是如此吗？不是的。许多学者之所以觉得这个问题没有再加探讨的必要，是因为大家都确信：冷热对流现象是由于温度高低不同引起的液体密度差别产生的，这是一个显然的真理，似乎不可能有比这个真理更深刻的解释了。但是，对于科学真理的探索，最忌讳的就是这样简单的想当然而产生的偏见。

笔者一旦得到了液相整体蒸发定律（整体蒸发定律将水的蒸发不仅理解为是液面的高动能气相水分子逸出水面的过程，而主要是液相整体发生相变蒸发产生的内部水蒸气上升到液面并逸出的过程[1]），就立马想到，对流现象的本质其实是一个内部整体蒸发引起的现象。这个现象还有更为深刻的微观解释：只有在温度的变化引起了液相内部的液相分子与气相分子的相互转化状态改变的情况下，才会进而引起液相密度的改变。这样可以进一步推论，可能并非所有的液相分子团或分子组合都会随着温度的改变而同等改变其密度，而可能主要是其中整体蒸发产生的气相分子的数量及其密度变化才是液相整体密度变化的主要原因，这应该是一个十分显然的道理。关于这一点笔者将另文加以讨论，给出反映液相水密度变化的定量公式，并以之解释水在4℃附近的反常膨胀现象[2]。

1.2 液相整体蒸发定律的实验验证

依据现有的物理学常识观点，蒸发从微观上看就是液面(高动能的)分子摆脱液相分子的分子间作用力束缚而离去的过程。笔者最早提出不同于上述常识的对于蒸发的理解——液相水整体蒸发定律。液相整体蒸发定律建立在气液相混态（与气液相溶

态相区分）的基础上。气体溶质溶于水所得到的水溶液可以分为两种基本形态：气液相溶态、气液相混态，气液相溶态是气体溶质和液体溶剂（水）发生极性反应或其他化学反应后得到的液态与液态相溶态，相溶前后气体溶质经过一个液化放热（相变的表现）的过程；气液相混态是气体溶质和液体溶剂（水）没有发生极性反应、水合反应或离解和缔合现象后得到的气态与液态相混态，是气体溶质均匀扩散到液体溶剂中的结果，即水溶液中的气体溶质从气体分子运动能量的角度来看仍然保持特殊的“气态”，相混前后气体溶质由于温度没有达到液化点，故没有经过一个液化放热的过程[3]。

根据液相整体蒸发定律，如同空气溶于水还是气相的空气一样，水蒸气溶于水，在大多数水蒸气分子已经变成液相水分子的前提下，还有部分水蒸气在水中仍然以气相存在，因此蒸发首先是液相内部的液相水分子相变为内部的气相水蒸气分子的过程，然后才发生水蒸气上升和逸出液面的过程。

笔者认为，液相（水）整体蒸发定律可以通过蒸发速率或蒸发量与水量的相关性实验得到验证[4]，并且已经做过多个关于蒸发量与水量关系的实验。实验发现在蒸发液面相同的情况下，水量相差1到3倍，水量大的容器蒸发量高出10-30%，甚至也有多出50%的例子，随着空气湿度的不同而不同[5]。

液相整体蒸发定律将液相内部的水蒸气看作是一个整体，由其组成液相内部的气相空间，蒸发就好像是用抽气机将水蒸气抽出，由此导致水的蒸发速率与水量的相关性。笔者假定对于液相水的动能而言，麦克斯韦气体分子速率分布曲线也是成立的，液相内部存在的那些高动能的水分子已经成为气相水分子。那些在动能上已经气化的水分子，由于其密度较液相水分子较小，故倾向于朝向液面的运动，就会溢出液面形成蒸发。

1.3 液相整体蒸发定律的三大实验验证

近期由笔者负责总的理念指导，与朱韵之、冯跃春又设计了3大类实验项目来验证液相整体蒸发定律[6]：

（一）对于液体深度与蒸发速度相关性的重复

与扩展实验研究,其中又包含三个实验:(1)同液面不同高度的容器蒸发速度与水量的关系实验。实验结果显示,在同蒸发液面的水体高度比例为3.6:2.5:1.7:1的情况下,蒸发量之比1.31:1.17:1.05:1。(2)异形容器水量与蒸发量关系实验。这个实验证明了在相同蒸发液面和水量的情况下,如果有更多水量更接近于液面,蒸发量也会越大。(3)2米长管与4.75厘米短管水量与蒸发量关系的对比实验。外径为108mm,内径为105mm。这个实验的结果是蒸发量差别超过了51%。

(二)蒸发引起的上下液面同步降温效应实验,其中又包含4个实验:(1)室温环境下的开口蒸发引起上下同步降温的实验。(2)冰柜冷却环境下的蒸发引起上下同步降温的实验。每5分钟降温 0.5°C 以上。(3)酒精在冰柜冷却环境中的蒸发引起同步降温实验。(4)圆塑料杯内上热下冷的水在冰柜内开口蒸发引起上下同步降温的实验。这个实验数据清楚而无可置疑地显示,在侧面和底部加隔热膜保温的情况下,热量可以从圆塑料杯底部通过内部蒸发自发上传到较高温的顶部。这个实验与水蒸气气泡现象一起给出了热力学第二定律的反例。

(三)从均温开始的蒸发引起微弱上热下冷效应的实验,其中又包含3个实验:(1)保温茶水桶水的蒸发引起上热下冷效应实验。这个实验分上开口与上封口两种情况,分别测到 0.3°C - 0.4°C 上热下冷效应(2)2米管水(其侧面和底面用绝热漆和隔热膜经过保温和隔热处理)的蒸发引起上热下冷效应实验。这个实验分上开口与上封口两种情况,分别测到 0.5 - 4.8°C 上热下冷效应。(3)酒精在冰柜内的蒸发引起上热下冷效应的实验。随着时间进程分别测到 0.1 - 0.3°C 的上热下冷效应。以上这些实验的结论都符合基于液相整体蒸发定律的预期,因此验证了整体蒸发定律是成立的。

1.4 关于液相水中水分子基本结构的解释模型

笔者从整体蒸发定律和姆潘巴效应的研究中总结出关于液相的一般结构是:液体本身是一个短程有序、长程无序的单元结构,从单元的核心到边

缘分别分布着固相-液相-气相的结构,亦即是从单元核心到边缘的固相分子-液相分子-气相分子的结构分布。更具体一点说的,从液相单元结构的核心沿着水分子链或水线,是从强氢键结构过渡到弱氢键结构,再过渡到范德华力束缚的无氢键结构的过程,接着就是从自由液相水分子过渡到气相水分子的外围结构。这个过程链条也可以简称为是“强氢键-弱氢键-无氢键范德华力-自由态”的链接过渡结构。水的整体蒸发就是自由液相水分子过渡到气相水分子的转化过程。无疑的,液相水中存在越多自由液相水分子,其过渡转化到气相水分子的过程的速率就会越大,进而整体蒸发速率也越大[7]。

2 冷热对流的基本实验现象和解释

2.1 冷热对流的基本概念

对流是液体或气体中热传递的主要方式。对流只能发生在流体中,因为在流体中才会发生部分的相对位移。流体中较热的部分上升,较冷的部分下降,循环流动,互相掺和,使温度趋于均匀。在流体(如气体或液体)中,温度较高的部分密度较小,会发生上升运动;而温度较低的部分密度较大,会发生下沉运动。这种密度差异导致的相对流动就是对流。

水的对流原理是通过流体的宏观运动,导致流体各部分之间发生相对位移,特别是冷热流体相互掺混所引起的热量传递过程。对流可以自然发生,也可以由外部力量(如风扇)强制产生。这两种对流的本质完全不同,前者与水的温度差别导致的密度差别有必然的联系,后者则与密度差别没有必然的联系。本文只涉及由液相的冷热差别引起的对流现象。

2.2 水的冷热对流的实验观察

在一个小学甚至学前儿童都知道的实验中,我们可以观察到水的对流现象。在一个透明瓶子中装入热水,再滴入数滴红墨水;另一瓶子则只装入冷水或常温水。然后将红色热水瓶上加盖一张硬纸片,压紧硬纸片使它与瓶口密合,翻转瓶身置于无色冷水瓶上,使瓶口相对,再快速抽出硬纸片。此

时可以看到红色水并没有往下流，跟下方的无色冷水还是壁垒分明，没有混合在一起。但是当将红色热水瓶置于无色冷水瓶的下面，红色热水很快就跟无色冷水混合在一起了（图1a、b）。

或者我们分别将染上红色的热水和染上绿色的冷水分别倒入常温水的两边，可以观察到热水和冷水对流时热水位于上方，冷水位于下方的景观（图1c、d）。

这两个实验都是利用了水的冷热不同而导致密度不同引起的对流作用原理完成的，和风行成原理一

致。如图1d:高温一侧气压上升，低温一侧气压下降，之后低温近地面气压会往高温近地面一侧补充，高空则相反，最后形成一个循环（如图1e、f）。

更为精彩的是水对流造成的烟囱和瀑布实验：将染上红色的热水开口向上沉入冷水的底部，就会观察到“大漠孤烟直”的景观，如图2a、b。

当红色的热水积累在液面达到一定厚度的时候，又将一块冰块放入冷水，浮于水面，冰块造成周围热水的迅速降温，密度降到冷水以下时就会形成瀑流一样下落的景观，如右图2：c。

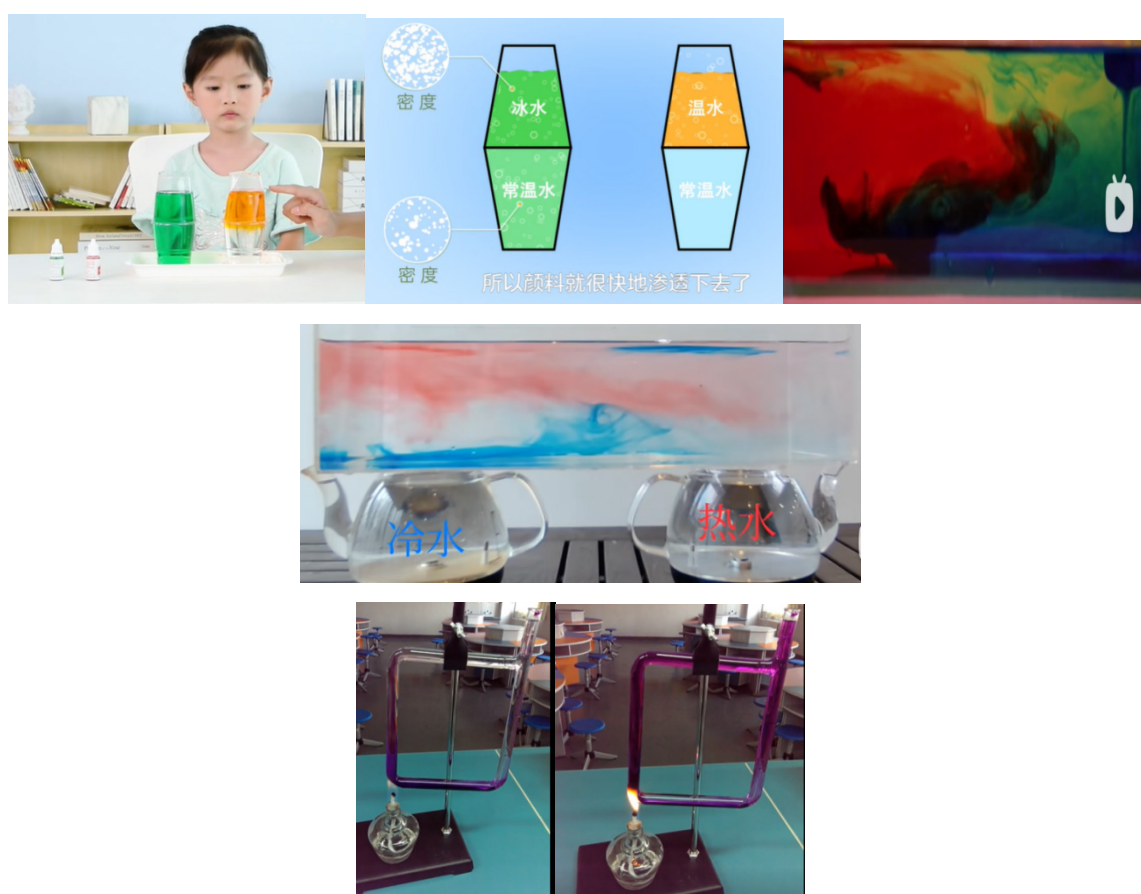


图1. 水对流的实验观察（从左到右、从上到下a、b、c、d、e、f）



图2. 对流造成的烟囱和瀑布实验（从左到右a、b、c）

3 “蒸发浮力”概念的提出及其实验验证

3.1 从水对流实验的整体蒸发定律解释中引出“蒸发浮力”概念

对于以上对流实验的解释问题，一般都是从水的冷热不同导致密度的不同，进而引起对流作用的角度来解释。这样的解释当然是合理的，其前提是密度会随着温度的变化而变化。

但是，从整体蒸发定律的角度将会得出十分不同的解释方法。我们认为以上所有的对流现象都仅仅是现象，甚至于密度随着温度的变化而变化也不过是现象而已。依据整体蒸发定律，对流的本质乃是一种内部蒸发现象。容器中温度升高的水，其密度之所以变小，并不是因为其全部的水体密度都减小了，而是因为其内部的气相分子的含量随着温度的升高而增加，故导致就液相整体而言密度减小。且因密度减小导致液相水的上升运动，并非就是全部液体的浮力都增加的结果，而主要是其中的气相水分子的上浮力作用于液相水分子推动的结果。我们可以把这个浮力称为“蒸发浮力”。也就是说，本质上是“蒸发浮力”构成了对流现象的本质动力。所谓蒸发浮力指的是液相内部的气相分子和气相分子泡在阿基米德浮力原理的作用下产生的一种特殊的浮力。

只要我们从液相整体蒸发定律来看待对流问题，这样的“蒸发浮力”说的解释是极为自然的事情。

3.2 水在4℃时为什么密度最大

水的反常膨胀现象是指在0℃到4℃的温度范围内，水的体积随温度的升高而减小，至4℃（或3.98℃）时水的密度达到最大，而在4℃以上则恢复正常热胀冷缩的现象。对此现象，目前只有定性的解释，还缺乏定性和定量一致的解释。

在水的反常膨胀现象中，水在4℃时为什么密度最大，这个原因肯定要从4℃时水的气相分子含量最少得到理解。至于低于4℃时为什么密度又减小了呢？就要同时考虑空气溶解度变化的影响了。笔者将在《基于液相水内部存在空气和水蒸气气相

空间的假定定量解释水的反常膨胀现象》一文中予以系统的回答，基本的结论是这样的：

依据液相分子的单元结构理论和液相整体蒸发定律，蒸发的原理在于液相水中的饱和水蒸气浓度与空气中的水蒸气浓度之差形成的扩散机制。据此可以假定：在一定环境温度下，液相内部的水蒸气浓度与同样体积的饱和空气的含湿量相等。这个假定与道尔顿蒸发速率定律是一致的。空气在水中的溶解度随温度升高而减小的规律，不可以只从空气分子运动论的角度加以完全的解釋，还应该从水的内部蒸发产生的水蒸气气相空间的不断增大来解释。因此液相内部气相空间是空气溶解度与水蒸气气相空间之和。由此可以定量计算蒸气泡的水蒸气与空气的成分比。进而可以从纯液相水的密度基本不变的假定出发，再考虑水中的空气溶解度和水蒸气含量的变化过程的规律，从而得到1m³水密度的新计算公式： $\rho = (1 - V_q \rho) \rho_0 + V_s \rho_s + V_k \rho_k$ ，并对水的反常膨胀现象进行定性和定量一致的解释 [8]。

计算显示：水的反常膨胀与水中含有的空气和水蒸气随着温度变化的规律有关。空气和水蒸气随着温度变化的规律是相反的，空气在水中的溶解度随着温度的升高从最大量开始递减。而随着温度的升高，饱和空气的含湿量是从最小量开始递增的。于是所谓水的反常膨胀现象，就是水中的空气和水蒸气含量在变化过程中表现出来的必然现象，因此不属于反常现象。

3.3 蒸发浮力与阿基米德浮力的差别及其数学表示

公元前245年，阿基米德发现了浮力原理。阿基米德浮力的定义是：指物体在流体（包括液体和气体）中，各表面受流体（液体和气体）压力的差（合力）。或者浮力等于物体下沉时排开液体的重力，即

$$F_a = G_{排} = \rho_{液} g V_{排} \quad (1)$$

液体的阿基米德浮力（如果没有特别注明，一般说“浮力”时即指阿基米德浮力）公式也适用于气体。就液体的阿基米德浮力而言，它是包含蒸发浮

力在内的.由于液体内部也存在气相分子,故我们可以
通过计算液体内部总的气相分子体积来计算蒸发
浮力的大小.对于水的情况,液相水内部的总气相
分子的总体积等于空气溶解度加上水蒸气的体积.笔
者已经在《基于液相水内部存在空气和水蒸气气相
空间的假定定量解释水的反常膨胀现象》[9]一文中
给出了计算液相内部的总气相体积的方法和计算结
果.即总气相体积等于纯气相空气和纯气相水蒸气占
有的空间之和可以表示为,

$$V_q = V_s + V_k \quad (2)$$

其中 v_q 表示液相内部的总气相体积; v_s 表示液
相内部的水蒸气之和,可以通过同等体积的空气饱
和湿度中纯水蒸气的体积计算而得; v_k 表示对应于
一定液相内部的空气溶解度计算而得,则蒸发浮力
可以表示为

$$F_z = \rho_{\text{液}} g V_q \quad (3)$$

$$\text{亦即 } F_z = \rho_{\text{液}} g (V_s + V_k) \quad (4)$$

考虑到蒸发浮力,阿基米德浮力就其公式而
言,在适用于液体本身受到的浮力的情况,未必是
绝对正确的。

根据液体的密度随着温度变化的规律,对于一
定体积的液体而言,如果它的温度上升,其密度减
小,体积就膨胀.如果这个部分液体外面的液体的
温度没有变化,膨胀后的液体其受到的外来的浮力
实际上是变大了,因此倾向于上升运动,这个就是
对流的动力产生的原因。

如果考虑到蒸发浮力的影响,温度上升会导致
液体内部的蒸气含量增加,进而其受到的蒸发浮力
也增大,这就是根据(4)所计算出来的受到的外
在浮力的增大量。

所以结论是,温度变化导致液体内在的气相空
间的拓展,是导致液体密度变化的原因,由此导致

蒸发浮力随温度变化是对流动力产生的根本原因。

3.4 冷液体的蒸发引起的对流

如果我们仅仅根据密度的差别来解释水的冷热
对流现象,那么我们只能观察到密度小的热水的上
升运动,不可能观察到密度大的冷水的上升运动。
可是,我们依据整体蒸发定律,无论热水还是冷水
都会发生内部蒸发的.因此无论是热水在上,还是
冷水在上,向上的对流本质上都是存在的,只不过
产生的蒸发浮力大小有不同,因此其引起的对流流
速也有差别而已.这种蒸发浮力引起的对流的不同
流速竞争的结果就是我们通常的对流实验所看到
的现象。

我们很容易可以观察到,在对流实验中,热的
液体的颜色显示上移运动,这是因为热的液体密度
比较小.实际上这个现象的本质原因不是其液相整
体的液体密度小,而是这部分密度小的液体其内
部的气相分子的数量比较多,才导致其整体密度比
较小,造成其引起的对流流速比较大。

对于这一点的证明,我们可以在流行的对流实
验中看到,带蓝颜色的冷水处于底部时虽然不易上
浮,但是根据整体蒸发定律,它也会发生蒸发,因
此也会上浮,只是不明显而已.事实上在实验中
观察到的也是如此,如下图3(a、b、c)各图都
如此。

图3中底部冷水的颜色也有部分上浮.这个是不
能完全用密度差加以解释的对流现象,它的本质是
蒸发引起的气相水分子对于液相的蒸发浮力推动作
用的结果.这样的对流实验现象是常见的,只是因
为我们缺乏整体蒸发定律的观念,才不会加以关
注和如此解释,而是将其归结为扩散现象而不加
注意。

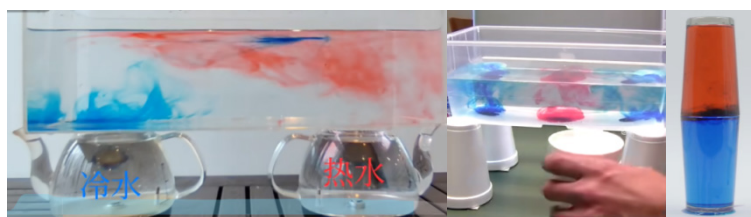


图3. 冷水蒸发与热水蒸发的对流实验 (从左到右: a、b、c)

3.5 上下同步降温效应的整体蒸发解释

对流是整体蒸发产生的气相分子推动液相的流动，而整体蒸发本身只是气相的流动，当这个气相流动慢的时候，对于液相的推动不明显。如果温度提高，蒸发产生的气相分子不仅自身速度快，由其形成的气泡就会增多增大，上升的时候其所产生的对液相的推动作用就会更加明显。

以上这些实验体现了蒸发产生的气相分子对液相分子的实际移动速度，但是它不就是热量的传递速度，因为热量的传递还是受到气体在整体上的定向移动的传播速度的影响，这个速度几乎是瞬间的。这就好像我们吹气球，在吹的瞬间空气分子就将我们的吹力传递给气球球面的任何地方。这个就是我们对于同步降温效应的解释。这个过程也就像是导体中的电场传播速度与电子的移动速度是不同的一样，两者相差无数倍[10]。由此可见，虽然单纯由整体蒸发引起的气相分子本身的向上移动是不明显的，但在同步降温效应实验中，上下液面的温度变化几乎是同时同步的。这是因为温度变化取决于液相内部的气相分子组成的“气球”的放气效应。气球放气的时候，气球体积会收缩，这个收缩会瞬间传递给整个气球，这个传递速度超过了气球内部的气体的移动速度。在发生内部整体蒸发的时候情况也类似，蒸发的时候实际上是气体在膨胀，膨胀的气体体积被排除出液面，这个过程不是意味着排出液面的气体一定有来自容器的底部的蒸发气体，而是意味着液相内部蒸发的气体发生了整体的定向挤出式的移动，故整体内部蒸发会产生同步降温效应[11]。

3.6 波义耳自流瓶

以上我们在解释对流现象的时候用到了“蒸发浮力”这个概念，认为蒸发浮力是推动对流发生的最本质的动力。蒸发所产生的气相分子的上移运动的来源，从表面上看是由密度差产生的，实际上这个密度差是由于内部蒸发产生的气相分子及由之组成的气泡的浮力产生的，我们称这个力为“蒸发浮力”。

关于蒸发浮力的实验验证问题，除了以上的对

流实验之外，我们还可以从波义耳自流瓶实验中得到更加显明的验证。

波义耳自流瓶在历史上最初是由17世纪的化学家罗伯特·波义耳（Robert Boyle，1627—1691，英国化学家。化学史家都把罗伯特·波义耳发表《怀疑派化学家》的1661年作为近代化学的开始年代。波义耳被革命导师马克思、恩格斯誉称为“把化学确立为科学”的人）提出的一个能够实现永动的装置，即自流瓶最初只是一个理论设想的概念，而不是实际存在的装置。

波义耳自流瓶的原理涉及到毛细管效应和液体的表面张力。根据波义耳的理论，波义耳自流瓶这个装置可以通过毛细管效应使得水能够在一定的高度下自动循环，从而无需外力即可持续运动。

毛细管效应是指在毛细管中，液体能够上升或下降的现象。它是由于液体与固体表面的相互吸引力导致的，是由于液体表面张力和曲面内外压强差作用的结果。波义耳推论说毛细管效应——液体与物体表面的相互吸引力会把水在这个容器中向上拔，并使水在这个容器中循环。当毛细管插入浸润液体中时，管内液面上升，高于管外；当毛细管插入不浸润液体中时，管内液体下降，低于管外。这种现象在自然界和日常生活中十分常见，例如毛巾吸水、地下水沿土壤上升等。毛细管效应的原理可以从能量的角度来解释，即液体在毛细管中的上升或下降能够降低体系的能量，因此是一个自发的过程。

在自流瓶的设计中，波义耳认为通过适当的设计，毛细管的力量可以克服重力，使得水能够在容器中循环流动。然而，尽管波义耳提出了这个概念，但实际上这样的永动机是不可能实现的。因为任何制造自流瓶的尝试都违反了热力学的基本定律，即能量守恒定律。这个定律意味着在没有外部能源输入的情况下，自流瓶无法产生足够的能量来维持其持续的运动。为了让永动机永远运行，必须要介入外部的能量来使这些系统越过它们的停滞点，所以这并不符合永动机的设计初衷。

但是，不知从何时开始，波义耳自流瓶真的被实现了，条件是在壶中注入有气的液体，在有气的

状态下可以产生无限循环。这似乎是一个真的永动机。网上有一个视频展现了一个国外的青年网友利用虹吸原理再现英国化学家罗伯特·波义耳设想的波义耳瓶[12]。

首先是用水做的实验，没有出现自流现象。视频的文字说：“这是因为水没有能量”。但是我们看到的现象是，右边软管中的水的液面似乎还是略高于左边的漏斗的液面（图4a）。

其次是用苹果汁做的实验，显示也没有出现自流现象。但是，我们看到的现象也是右边软管里的苹果汁的液面还是略高于左边漏斗的液面，且比起水的液面要更高一些（图4b）。

再次用牛奶做的实验显示也没有出现自流现象，但是右边软管里的牛奶的液面也是略高于左边的漏斗中牛奶的液面，但是比起水和苹果汁的液面都要更高一些（图4c）。

用可口可乐做的实验显示出现了完美的自流现象，这显然是因为可口可乐含有较多的二氧化碳。我们在开可口可乐瓶盖时就会看到冒出的气泡中含有

二氧化碳（图4d）。

用啤酒做的实验也显示出现了完美的持续的自流现象。但是啤酒由于有太多的泡沫，最后管中液体似乎都变成了泡沫（图4e）。

用Heineken Brouwerijen（中文译名为喜力，是一个世界著名的荷兰啤酒品牌）做实验效果也很好，没有泡沫出现（图4f）。

效果最好的是用Budweiser（百威啤酒）做的实验，也显示出清晰而持续的自流现象（图4g、h、i）。

3.7 波义耳自流瓶的蒸发浮力解释

以上就是用所谓“有气”的液体注入波义耳自流壶出现的现象，也就是说，波义耳自流壶出现的条件是液体中有气体。含有的气体越多，自流现象也越明显。这个现象应该如何解释呢？这个实验视频的作者把有气体看作是有能量的标志，含气体越多，越有能量。显然在这里液体内的气体实际上是起到了蒸发（或挥发）浮力的作用，如同在液体中的气泡要受到



图4. 波义耳自流瓶实验（从左到右从上到下a、b、c、d、e、f、g、h、i）

浮力作用一样。因此，很显然，实际上就是气泡在液体中产生的浮力对于液体的上推作用力让波义耳自流壶打破了浮力定律的局限，产生了类似自流的现象。

我们注意到，虽然用水做的波义耳自流壶的实验没有成功，但是我们也观测到了两边的液面有微弱的差距，而且是截面积小的软管出现了更高的液面。假如我们让这个管的出水口变得足够低，低到十分接近于左液面，但是又没有超过或低于液面变成虹吸现象，我们当然也可以观测到水的自流现象。

笔者不明白的是，为什么没有人从这里得出否定或修改阿基米德浮力定律的结论。笔者一看到这个实验就知道应该怎样去解释它，那就是显然是水中的水蒸气（以及其它气体的蒸气）造成的结果。因为水中的水蒸气含量比不上以上实验中用的可口可乐、喜力啤酒、百威啤酒含有的 CO_2 多，故水没有发生自流，但是水中含有水蒸气的本质与可口可乐、啤酒含有 CO_2 的本质没有任何区别。

事实上，网上也有人用类似波义耳自流瓶的原理做出了“喷泉饮水器”，经过一番的操作之后实现了水的自流，即从漏斗形的管口注入的水会从细管流出，如下图5。



图5. 波义耳自流瓶的原理做的喷泉饮水器[13]

那么水中的水蒸气是如何可能造成两边的高度差呢？对于可口可乐、啤酒等而言，气体是在一定时间内不断产生的，所以会对软管中的液体产生向上的推力。这个推力在左边的漏斗内也是有的，问题在于这边的表面积比较大，产生的气体很容易就挥发掉，导致气体的蒸发浮力有所削弱。而在右边的长条状的软管中，其所生成的气体则被不断累积于管中，又由于液面以上的出口受到了限制，故产生的气体或气泡更多被累积在液面上下，这样气体就会对液体产生更大的向上推力，所以产生了液面

高度差，即右边小管中的液面高度超过了左边。

3.8 蒸发浮力的验证实验

对于水而言同样的问题也是存在的，只是因为水里含有的水蒸气很少，所以产生的蒸发浮力很弱，看不到明显的高度差。但是我们一旦知道了这个道理，就会想出办法将这个高度差放大。如将右边细管的下部加大水量，上面让管道搞得更细些，那么它产生的蒸发出来的水蒸气就会往上堆积在管口和液面下方，产生更大的蒸发浮力，一样可以产生自流现象。

一旦我们将这个实验做成功了，就可以证明液相水中存在气相的水蒸气，并且有力地证明蒸发就是水蒸气的内部蒸发。同时我们也可以提出对于浮力定律的修正，因为它并没有考虑蒸发浮力的影响。

笔者已经尝试做过这样的实验，方法是用一个10升的塑料水桶，将其底面剪去，在开口处链接一条直径5mm长度20cm的透明小软管，并胶好接缝。将制作好的设备放置于大水桶内，观察小软管内外的液面差。依据整体蒸发定律的预期，10升塑料水桶内的水体的内部蒸发将会将其蒸发出来的蒸气汇集于小软管，即小软管内的蒸气含量可能要高于其外的大水桶内的水的液面的含气量，因此小软管内的液面因为更多的蒸气产生更大的蒸发浮力，因此有更高的液面。

笔者用常温水实验的结果，没有观察到明显的效应，大约只有1到2mm的液面高度差。将水温提高，可以预期会有更大的液面差，但是没有明显的变化。

于是笔者改为用酒精做这个实验，装备如下图6a：上细管内直径从大到小分别为：6mm、4mm、3mm，下塑料罐截面从大到小分别为： 3419mm^2 、 1963mm^2 、 1200mm^2 。用20升的酒精做同样的实验。因为酒精的蒸发速度比水快，网上有资料说快2到3倍，但是笔者利用浓度为98%的酒精进行的蒸发实验取得的经验是最多相差可能达到8倍以上。因此，酒精的液面差可能更加明显。

实验结果果然发现，对于用酒精的蒸发浮

力实验观察到了5-10mm左右的内外液面差，管子越细，液面差越长，如图6d管内的液面差约10mm，大于图6c的6mm和图6b的4mm。

有的人可能质疑这个实验现象是单纯的管道效应所致。笔者为此可能的质疑，又做了单用内径为3mm的细管插入酒精的实验，结果发现还是有内外液面差，不过这个液面大约只有5mm,比下接大针筒时产生的约10mm内外液面差小得多。显然这里的5mm的液面差也是由内部蒸发浮力作用的结果，因为在管内液面以上蒸发产生的酒精气体密度比管外大，故抑制了蒸发逸出液面的速率。但是,因此也就在细管内的液相酒精内部累积了更多的气相酒精，故产生了比之管外更大的蒸发浮力。如果下接宽直径的塑料瓶或大针筒，就可能产生更大的内部气体酒精的累积，因此蒸发浮力也更大，故产生更大的内外液面差。

这样我们也就用理论和简单的实验证明了内部蒸发产生的蒸发浮力的存在。这个实验并不是只是证明了小软管内才存在蒸发浮力，而是内外都有。实验数据只是显示了内外蒸发浮力之差。

3.9 毛细现象和表面张力作用的影响

以上实验数据有没有可能是因为毛细现象和表面张力作用的结果呢？完全是有可能的。但是问题在于，我们认为毛细现象和表面张力可能恰恰与蒸发浮力是有关的。

毛细现象是指液体在细管中上升或下降的现象，这是由于液体表面张力与液体和固体管壁之间相互作用力的结果。具体来说，当液体浸润管壁（即液体能够附着在管壁上）时，毛细管内的液面会上升，高于管外的液面。这是因为液体表面张力在管壁处产

生了向上的拉力，这种拉力克服了液体的重力，导致液面上升。

表面张力是液体表面分子之间的相互吸引力，它使得液体表面尽可能缩小。在毛细管中，由于管径较小，液体表面张力的作用更加显著。对于浸润液体，表面张力会在管壁处产生一个向上的合力，这个合力与液体的重力达到平衡时，就会导致管内液面高于管外液面。

对于浸润液体：如果液体能够浸润管壁（如水在玻璃管中），毛细管内的液面会呈现凹形，并且高于管外的液面。这是因为在管壁处，液体分子与固体分子之间的附着力大于液体内部的内聚力，导致液体上升。

对于非浸润液体：如果液体不能浸润管壁（如水银在玻璃管中），毛细管内的液面会呈现凸形，并且低于管外的液面。在这种情况下，液体分子与固体分子之间的附着力小于液体内部的内聚力，导致液体下降。

在实际实验中，可以观察到，即使吸管不密封，只要管径足够细，管内的液面也会由于毛细现象而高于管外的液面。这种现象在透明的吸管中尤其明显，可以看到液面上升的高度取决于管径的粗细。

综上所述，管内液面高于管外液面的主要原因是毛细现象和表面张力的作用，特别是当液体能够浸润管壁时，这种现象更为显著。

3.10 保温桶水从均温开始的蒸发引起上热下冷效应实验

可以证明存在蒸发浮力的最重要实验现象是从均温开始的“热顶效应”。

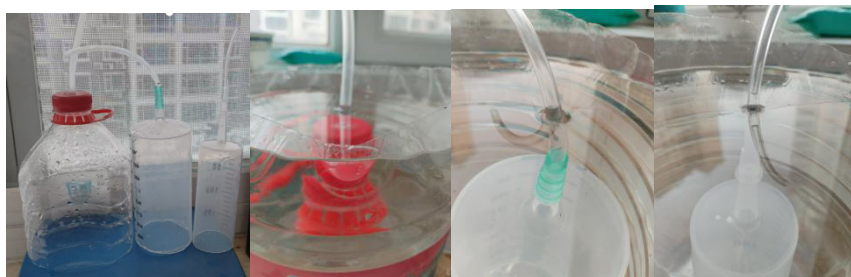


图6. 蒸发浮力实验装置与实验 (a、b、c、d)

热顶效应原来的意思是“热穹顶效应”，是指在大气中，由于高压系统的存在，导致热空气被困在一定区域内，形成像穹顶一样的结构。这种现象通常会引起地面温度的显著升高，导致热浪事件。但是我们这里讲的热顶效应则是指水因蒸发而冷却时的对流造成的水的温度不均匀。密度和温度之间的关系是这样的:温度的升高导致水的密度降低。这就产生了热水流向液面，形成热顶部的现象，即水的顶部比底部更热。温水的冷却速度比冷水的冷却速度快，但由于它的顶部更热，它比最初的冷水损失更多的热量。有的人将姆潘巴效应的原因归结为热顶效应。姆潘巴效应是指相同质量的热水和冷水被放置在同一冷却环境下，热水比冷水结冰快的现象，关于这个问题请参考专文，这里我们不谈（如表1、表2）。

根据传统的理解，液体的热顶效应对流的基本原理造成的。根据液体对流的基本原理，从上下均温开始是会产生对流并形成热顶的，但是因为存在液面蒸发，就必然会产生上下不均温，随即就

可能产生对流，并形成热顶。即对流一般倾向就是形成上热下冷的格局。由于通常情况下这个格局也是不稳定的，形成热顶之后液面还会继续蒸发，结果引起液面更快降温，所以上热下冷的格局会被打破。但是根据理论的预期，热顶有可能还会因为蒸发而转化为“冷顶”，特别是如果底部的散热途径被封死的话。这种情况下就还会发生对流，转化为热顶。

但是根据我们的整体蒸发定律理论，上热下冷的格局并不会被打破，因为存在从下到上的整体蒸发将热量上传。而且笔者通过实验证明，整体蒸发并不必然会产生上冷下热的格局，而是在冷却条件下的蒸发反而存在同步降温的现象。但是在蒸发容器内外等温后近似等温的情况下的整体蒸发会产生微弱的上热下冷的格局，即这是一种不同于对流产生的热顶效应，因为它会稳定存在，不会转化为新的冷顶。因为这样的热顶有蒸发浮力支撑作用保证了密度小的热水（液体）位于上部也能够实现平衡。笔者的保温桶（杯）的冷却实验，已经测到了

表1. 保温茶水桶水的蒸发引起上热下冷效应实验数据表[11]

8.19密闭茶水桶	16:00	19:00	22:00	8.20盖子打开	16:00	18:00	20:00
室温（℃）	31.0	30.3	30.3	室温（℃）	31.0	30.5	30.3
上（℃）	30.5	30.3	30.3	上（℃）	28.9	29.0	28.9
中（℃）	30.5	30.2	30.3	中（℃）	28.8	29.0	28.7
下（℃）	30.2	30.0	29.9	下（℃）	28.5	28.7	28.6
上下温差（℃）	0.3	0.3	0.4	上下温差（℃）	0.4	0.3	0.3

表2. 保温茶水桶水的蒸发引起上热下冷效应实验数据表[11]

上开口	日期8.19				上封口8.24		
	16:00	18:00	20:00	22:00	11:00	12:00	13:00
室温（℃）	33.3	31.2	30.4	30.1	30.0	32.5	32.0
上（℃）	33.0	30.4	29.2	29.0	31.3	34.4	34.6
中（℃）	32.3	30.3	28.7	28.6	30.7	32.5	31.9
下（℃）	31.6	29.9	28.7	28.5	29.3	29.8	29.8
上下温差（℃）	1.4	0.5	0.5	0.5	2.0	4.6	4.8



图7. 保温茶水桶和2米管水的蒸发引起上热下冷效应实验（从左到右a、b、c、d）

稳定的热顶现象。

3.11 保温桶水的蒸发引起上热下冷效应实验

在笔者整体蒸发定律理念的指导下，朱韵之和冯跃春用学校食堂的保温茶水桶做这个实验，保温桶内径35cm，外径36cm，高35cm，不锈钢材质。最初观测到了微弱的上热下冷的效应。后来考虑到保温茶水桶的不锈钢热传导系数比较大，利于传热，可能会削弱上热下冷的效应。后来就在茶水桶内侧面和底面刷一层隔热油漆（如图7）。

实验时放入自来水搅动均匀后静置2小时，用电子温度计测量水温，得到一组室温和茶水桶上、中、下部数据，以后每隔3小时测温一次。数据结果如下：

数据显示：保温的茶桶密闭（相对密闭，测温孔和水面上的空隙导致少量蒸发）时茶桶内水的表面温度与室温相当，只有微量蒸发，但是依然有水底温度低于液面的现象。说明在茶桶密闭情况下还是存在内部蒸发，气相水分子向上运动导致下部温度降低和上部温度较高。

在盖子打开的情况下，保温茶桶内水体水面温度与室温相差1.4-2.1℃。盖子闭合与打开时上下温差都为0.3-0.4℃。有的人可能会认为，液面较高温度是受到室温影响的结果，这是存在的，但是不能认为这个影响会超过假定的液面蒸发引起的蒸发散热，保温茶桶内水体整体低于室温证明了这一点。因此液面较高温应该是室温对于液面散热和保温茶桶内水体整体蒸发散热引起的同步降温效应叠加的结果。

这个由整体蒸发产生的热顶效应实验的结果用液面蒸发理论没有办法解释，因为液面蒸发只能产生上冷下热的效应，不可能产生相反的效应，故这个实验结果只能用整体蒸发定律加以解释。最为重要的是，这个实验结果表明，在已经出现上热下冷效应的情况下，蒸发仍然会引起上下基本同步降温，在这个过程中热量可以自发地从低温的底部向较高温的上部传导。不过这一点对于这个实验来讲还不够明显。

3.12 2米管水的蒸发引起上热下冷效应实验

考虑到如果增加水体的高度，水的蒸发引起上热下冷效应可能更加明显，故笔者想到用以上实验中2米管作为容器做蒸发实验。2米管侧面和底面经过保温加工，外侧增加一个保温膜层，内侧面和底面刷一层隔热油漆。

实验分为两种情况读数：上开口与上封口。封口方法是用塑料袋扎口。封口后在水面与塑料袋之间依然有空间。实验数据如下：

由以上数据显示，在两种情况下保温2米管水上部温度都明显高于下部温度。上热下冷效应比保温茶桶实验明显得多。上开口时上热下冷的温差范围为0.5℃-1.4℃。封口后，水的液面温度高于室温，且上下温度差扩大，达到2.0℃-4.8℃。这显然是内部整体蒸发上升的蒸气堆积在液面附近的结果。

4 整体蒸发引起的热顶效应是否违背热力学第二定律的讨论

以上本文从理论上和实验上都充分揭示了，冷热对流从本质上说可以归结为是液相整体蒸发产生的一种效应。现在我们要关注的是，假定从上下均温开始的热顶效应形成的上热下冷的格局是真实的效应，其本身是否违背了热力学第二定律。

实验表明，在热顶效应的形成过程中，温差有自发扩大的趋势，这个过程不能被归结为是由温差引起的对流的结果。与通常理解的冷热对流源于温差而终于温度的均匀状态相反的是，从均温开始形成的热顶效应恰恰表明，上热下冷的温差恰恰可以是一个热力学平衡的新状态。

笔者在最新的实验中发现，一个接近于封闭的简单液相系统可以持续停留于这样的热顶温差状态长达两个星期，直到实验结束，温差仍没有消退的迹象。这意味着在液相整体蒸发定律起作用的情况下，系统的最终状态并非一定是热平衡的等温状态，而可以是某种存在温差的热不平衡状态，或者说是热不平衡与内部蒸发达到的某种平衡状态。这个过程在热力学上就是从无序到有序的自发过程，这是与简单体系热力学第二定律在一定程度上产

生了表观矛盾。因为简单体系热力学第二定律所揭示的规律是：在自然状态下，热能只能从高温物体转移到低温物体，而不能自发地反向转移。该定律也与熵的概念有关，表明在一个封闭系统中，熵总是趋向于增加。这是否预示着液相整体蒸发定律的发现与热力学第二定律发生了某种程度上的冲突呢？

有的人说蒸发的过程是一个非平衡态的过程，不属于相平衡态。我们现在姑且同意这样的观点，但是我们的实验还表明，将容器的出口完全封闭，由于存在整体蒸发，这样从均温开始的温差扩大的趋势也会持续到某个最大值。特别是在保温桶内的这种实验，清楚地显示出：热量自发地从底部的较低温区域可以持续传递给顶部的高温区域。我们现在假定在这样的上热下冷的热顶格局下，用某种针筒往底部的液相低温区域打入较高温的液相，这个液相会因为密度更小而上移，依据我们的观点这个过程也是属于整体内部蒸发产生的效应。但是，依据我们通常的热力学解释模型，实际上这个就是热量自发地从低温区域到高温区域的过程。

有人认为这个从低温到高温的过程是受到了引力场影响的结果，不能认为完全是自发的。事实上引力场的影响当然是存在的，但是能不能认为完全是引力场作用的结果呢？对于现有已经在液相内部存在的水蒸气和气泡而言，如果认为其上升到液面的运动是受到引力场影响的结果，这个是事实，是有道理的。但是，问题在于，整体内部的蒸发是一个持续产生水蒸气和气泡的过程，这个过程的持续会不断增加液相内部气相的密度，因此，水蒸气和气泡上升到液面的运动过程也是一个受到水蒸气浓度差别引起的扩散规律支配的结果，遵守扩散定律，即液面发生整体蒸发的原理在于液相水中的水蒸气浓度与空气中的水蒸气浓度之差形成的扩散机制。所以可以设想，在不存在引力场或在微重力的环境条件下，只要存在蒸发出口，这样的蒸发依然会发生。甚至于在不存在大气压的情况下，液相整体内部蒸发的速率会更快，因而其所产生的上热下冷的温差会更大。

所有这些情景都显示整体蒸发定律引起的这

种热顶效应都倾向于不遵守简单体系的热力学第二定律。假如我们这里的分析准确的话，那就意味着，我们至少应该修正对于热力学第二定律适用范围的理解，应该考虑到：在凡是液相整体蒸发定律起作用的地方，都有可能发生热量自发地从高温传导到高温的现象，因此都有违反热力学第二定律的可能性。关于这个问题的详细探讨留给专文进行[14]。

参考文献

- [1]江正杰.从非相平衡下的蒸发打破热平衡的实验预期相平衡下的蒸发打破热力学平衡的实验[J].山西科技报, 2023(1). DOI: 10.28712/n.cnki.nshxk.2023.000106.
- [2]江正杰.基于液相水内部存在空气和水蒸气气相空间的假定定量解释水的反常膨胀现象[J].环球科学与工程.2025,2(6).
- [3]江正杰, 王全杰.论气液相溶态与气液相混态的区分及其验证实验设计[J]. 物理化学进展.2017(2):26-36.DOI: 10.12677/JAPC.2017.61004
- [4]江正杰, 王全杰. 论气液相溶态与气液相混态的区分及其验证实验设计[J]. 物理化学进展.2017(2):26-36. DOI:10.12677/JAPC.2017.61004.
- [5]江正杰, 王全杰.液态水中含有气态水的实验验证[J].大学物理实验2017(4).DOI:10.14139/j.cnki.cn22-1228.2017.04.004.
- [6]朱韵之, 冯跃春, 江正杰等.同蒸发液面下液体深度与蒸发速度相关性的实验研究[J].物理科学与技术研究.2025,5(1).DOI: 10.12208/j.pstr.20250001.
- [7]江正杰, 朱韵之, 冯跃春.基于整体蒸发定律解开姆潘巴效应之谜[J].环球科学与工程.2025, 2(7).
- [8]江正杰.基于液相水内部存在空气和水蒸气气相空间的假定定量解释水的反常膨胀现象[J].环球科学与工程. 2025, 2(6).
- [9]江正杰.基于液相水内部存在空气和水蒸气气相空间的假定定量解释水的反常膨胀现象[J].环球科学与工程. 2025,2(6).
- [10]李永乐.李永乐亲测电流速度：每秒200000公里，可绕地球5圈！[EB/OL].(2025-05-01). <https://www.douyin.com/video/7160919524760374565>.

- [11]江正杰.基于液相整体蒸发定律解释水的蒸发引起的上下同步降温效应实验和上热下冷效应实验[J].物理科学与技术研究. 2025,5(1).
- [12]西瓜视频.网友利用虹吸原理再现英国化学家罗伯特波义耳研制的波义耳瓶 [EB/OL].(2025-05-01). <https://www.ixigua.com/6410502093781991682>.
- [13]腾讯视频.用波义耳瓶原理制作的喷泉饮水器，用它喝水是不是很有趣呢 [EB/OL]. (2025-05-01).<https://v.qq.com/x/page/k0534v6ualg.html>.
- [14]江正杰.基于整体蒸发定律探讨热量从低温处自发传递到高温处的现象是否违背热力学第二定律[J].环球科学与工程. 2025,2(6).

