

从亨利定律的适用条件看蒸发与挥发概念的等同性及液相整体蒸发定律

江正杰

山东工商学院人文与传播学院, 山东烟台

摘要: 通常我们将“挥发”与“蒸发”看作是不同性质的两个概念, 其实就液相的挥发与蒸发而言, 两者不可能有本质性的区别, 其区别来自我们对于蒸发和挥发的理解误差。水的蒸发定义被想当然地理解为在液面发生的相变过程。亨利定律的适用条件: 在“挥发性溶质”和“稀薄溶液”中的溶质在液相和气相里都以相同的质点存在, 据此可知挥发可以看作是在液相整体的气相质点逸出到气相里的相同质点的过程, 因此这个过程不一定就是相变, 真正的挥发相变可能发生在液相整体, 这个就叫做整体挥发定律。受到亨利定律适用条件的启发, 我们也应当将蒸发理解为两个连续的过程: 液相整体发生的相变过程, 以及整体相变生成的气相上升到液面并逸出的过程。这样我们也就得到了液相整体蒸发定律: 水的蒸发速率与水量的相关性。于是我们就得到了对于蒸发与挥发两个概念就液相而言的完全一致的理解。这种全新的认知已经得到了全部新的蒸发实验的验证。从液相整体蒸发定律可以预期蒸发时会出现同步降温效应和上热下冷效应的现象, 由此可以解释海洋温度的垂直三层分布结构。

关键词: 亨利定律; 蒸发; 挥发; 液相整体蒸发定律; 同步降温效应; 海温梯度

On the Essential Equivalence of the Concepts of Evaporation and Volatilization Based on the Applicable Conditions of Henry's Law, and the Inspired Law of Overall Evaporation in Liquid Phase

Zhengjie Jiang

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

Abstract: Usually, we regard “volatilization” and “evaporation” as two concepts with different properties. In fact, as far as the volatilization and evaporation of liquid phase are concerned, there can be no essential difference between them. The difference comes from our understanding error of evaporation and volatilization. The definition of water evaporation is taken for granted as a phase change process occurring on the liquid surface. According to the applicable conditions of Henry's Law: the solute in “volatile solute” and “dilute solution” exists as the same particle

* 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, 物理化学, 引力学, 中国文化经典研究、经典教育学。

in the liquid phase and gas phase. It can be seen that volatilization can be seen as the process of gas particle escaping from the whole liquid phase to the same particle in the gas phase. Therefore, this process is not necessarily a phase transition. The real volatilization phase transition may occur in the whole liquid phase, which is called the whole volatilization law. Inspired by the applicable conditions of Henry's law, we should also understand evaporation as two continuous processes: the phase transition process of the liquid phase as a whole, and the gas phase generated by the phase transition process rises to the liquid level and escapes. In this way, we also get the law of liquid phase evaporation: the correlation between the evaporation rate of water and the amount of water. So we got a completely consistent understanding of the two concepts of evaporation and volatilization in terms of liquid phase. This new cognition has been verified by new evaporation experiments. From the law of liquid phase evaporation, it can be expected that there will be synchronous cooling effect and upper heating and lower cooling effect during evaporation, which can explain the three-layer vertical distribution structure of ocean temperature.

Keywords: The law of overall evaporation in liquid phase; Light molecule effect; Hydrogel; Internal evaporation; High kinetic energy water molecules

1 “挥发”与“蒸发”是不同的概念吗？

我们在网络（如百度百科）和AI上看到对于“挥发”的定义，通常是指液体或固体在常温下变为气体而散发的现象，并举例说，如酒精、汽油、樟脑精等物质，在常温常压下能够逐渐变成气体散发到周围环境中。液体在低于沸点的温度下也可变为气体向四周散发，像醚这种物质就容易挥发。它可以是液体，也可以是固体。此外还认为大多数溶液存在挥发现象，因为它们的分子间的吸引力相对较小，并且在做着永不停息的无规则的运动，所以它们的分子就运动到空气中，慢慢挥发了。但溶液的挥发性会因溶质不同而表现出差异。

如果在网上提问“挥发与蒸发的区别是什么？”就会发现没有人认为这两个概念是没有区别的。向AI提同样的问题，回答是这样的：挥发与蒸发是两个描述物质状态变化的术语，它们都是物质从液态或固态转变为气态的过程，虽然它们在日常语言中有时会被互换使用，但在科学上，它们之间存在一些关键的区别。如(1)两者发生的条件不同：蒸发是在任何温度下都能发生的气化现象，通常指的是液体表面的水分子转变为气态的过程，受

温度影响，温度越高蒸发速度越快。挥发是一种物理变化，是物质分子的自由散发和移动，不受温度影响，可以是液体也可以是固体，挥发一般是指有机物，如酒精、汽油、樟脑精等。(2)涉及的对象不同：蒸发通常指的是液体表面的水分子转变为气态的过程，主要涉及液体中的溶剂。挥发可以涉及液体或固体，主要是指物质分子的自由散发和移动，通常涉及有机物。(3)过程和适用范围不同：蒸发是一个物理变化过程，液体中的分子由于受到热能的作用，克服了分子间的引力，从液体表面逸出进入气相。蒸发可以在任何温度下发生，但在高温下速度更快。挥发也是一个物理变化过程，指物质分子的自由散发和移动，且不受温度影响。挥发通常适用于有机物，如酒精、汽油、樟脑精等。(4)分类不同：蒸发可以分为常压蒸发和减压蒸发。常压蒸发是在大气压下进行的蒸发过程，而减压蒸发是在低于大气压的条件下进行的蒸发过程。挥发没有明确的分类，但它可以发生在液体或固体中，主要取决于物质的性质。

挥发真的不受温度影响吗？AI的回答又变成是：挥发性确实受到温度的影响。温度升高通常会增加物质的挥发性，这是因为分子运动加剧和蒸气

压增加的结果。这一现象在许多实际应用中都有体现。

从以上对于挥发与蒸发的表述中看不出蒸发与挥发对于液相而言究竟有怎样的本质性区别，似乎区别只是在于这样两点：一挥发可以用于指固体的挥发而言，而蒸发一般不用于固体，但是有时候也用，如说黑洞的蒸发；二挥发通常是强调指的是溶质，而蒸发是指溶液本身。如我们可以说：“ H_2SO_4 溶液是难挥发性酸溶液，但可以蒸发。”这就是说 H_2SO_4 溶液的溶剂——水是可以蒸发的，但是其溶质——硫酸是难挥发的。似乎这里挥发与蒸发的区别仅仅是用词习惯的问题。此外就只有：蒸发只是指液相向气相的转化，而挥发也可以指固体向气体的转化，大约与升华概念所指的是是一样的。另外，就用词习惯而言，似乎蒸发与挥发的最大区别在于：蒸发可以用以指水，而通常我们似乎都不说水可以挥发。但是很显然，将水的蒸发说成是挥发似乎也没有任何不妥之处。

总之，以上所谓的挥发与蒸发的区别，除了挥发可以用以指固体外，没有任何的区别是真实存在的。也就是说，就液相的挥发和蒸发而言，我们找不到任何可以区分它们的理由。如酒精可以是溶剂，也可以做溶质，难道说酒精的挥发与蒸发有区别吗？

AI的水平就是常识的水平，也是通常学者的水平的反映，看起来许多学人存在一笔糊涂账。

2 溶质的挥发只是在液面发生吗

蒸发与挥发存在上述区别的说法似乎是有原因的，细究起来好像关于挥发的说法与亨利定律有某种不够明确的关系。

我们的物理化学教科书讲到亨利定律（亨利定律可表述为：在一定温度和平衡状态下，气体在液体里的溶解度和该气体的平衡分压成正比）的适用条件通常被表述为：只有当溶质在液相和在气相里都以相同的质点存在时亨利定律才适用，亦即只有溶质在气相和液相中的分子状态相同时，亨利定律才是适用的[1]。这一点在亨利那里可能只是根据亨

利定律的内容所作出的假设性的推断，并非事实性的认定。但是我们事实上并没有重视这个推断的实际内涵：溶质在气相和液相中的分子状态相同的实质意思是，溶质同时处于液相的溶剂之中的状态和处于溶剂之外的气相其实是相同的相，即都是气相。因为我们在另文中已经阐明，在气液相混态那里，处于溶剂中的气体溶质依然保持自身的气态，这就表明亨利定律实际上是适用于气液相混态的定律[2]。

教科书还将亨利定律的适用条件看作是适用于“挥发性溶质”和“稀薄溶液”，这就是说，我们通常将溶质从处于液相的溶剂之中的状态到溶剂之外的气相的过程看作是挥发，而不是理解为是蒸发。这就是说，依据一般的不言而喻的观点，所谓挥发是与蒸发不同的概念。讲到液体的挥发的时候，由于讲的是溶质的挥发，因此通常不明确涉及是否只是液面的溶质才挥发。而蒸发则是通常是溶剂（常常是水）的事情。如果就溶质与溶液都是液相而言，挥发与蒸发真的就有区别了吗？这个问题实际上并没有被认真思考过。

我们不能确定，当我们说溶质的挥发的时候，通常没有强调只是液面的挥发，那么有没有明确也可以发生于整个溶液呢？对于这个问题似乎没有答案，也不知道是否受到亨利定律的适用条件的影响。笔者也查不到哪一本教科书明确了这一点。于是笔者继续提问AI：“溶质的挥发只是在液面发生吗？”AI回答说：

“溶质的挥发不仅仅是在液面发生的，它是一个涉及整个溶液的过程。”以下是详细的解释：

“溶质的挥发是指溶质分子从液相转化为气相的过程。这个过程可以在溶液的任何位置发生，而不仅仅是液面。挥发的速度和程度取决于多种因素，包括溶质和溶剂的性质、温度、压力以及溶液的浓度等。挥发过程的微观机制：在溶液中，溶质分子不断地进行热运动。当溶质分子获得足够的能量时，它们可能会克服液相中的分子间作用力，进入气相。这个过程可以在溶液的內部发生，而不仅仅是液面。然而，由于液面处的溶质分子直接暴露在空气中，因此挥发主要发生在液面上。”

“在实际应用中，溶液的挥发度和浓度的控制是非常重要的。挥发度是指溶液中溶质在一定温度和压力下的蒸气压，它反映了溶液中溶质挥发的难易程度。一般溶质的浓度越大，也越容易挥发。而浓度的大小是一个整体的概念，不是只是涉及液面。”

“综上所述，溶质的挥发不仅限于液面，它是一个涉及整个溶液的过程。尽管液面处的挥发更为明显，但溶液内部的溶质分子在满足特定条件下也可以挥发。理解这一过程对于各种工业和日常应用都具有重要意义。”

以上AI的回答是很到位的，明确说了溶质的挥发不只是在液面发生，且挥发发生与挥发度有关，而挥发度是指溶液中溶质在一定温度和压力下的蒸气压，它反映了溶液中溶质挥发的难易程度。这样的说法不见于教科书，其依据来自 AI 资料引用的网上 pptx（“溶液的挥发度和溶液浓度”. pptx, www.renrendoc.com）如果这个说法有更深的权威来源的话，这就是说，挥发与溶液的整体相关。这个就大有“整体挥发”的概念，已经内涵了液相内部含有气相的溶质的概念，为什么我们的物理学界对于通常作为溶液的水提出也存在类似溶质挥发的概念——“液相整体蒸发定律”，感到这样陌生呢？这看起来不是知识出了问题，而是科学潜意识中的偏见在作怪。

3 对于水的蒸发定义的想当然理解

《基础化学》的教科书关于水的蒸发的严格定义是：“密闭容器中的纯水，在一定温度下，一部分动能较高的分子克服液体分子间的引力自水面逸出，扩散到水面上部的空间形成气相分子，这一过程称为蒸发[3]。”

实际上不仅水会发生蒸发，所有液体都会发生这样的蒸发。可是，值得注意的是，以上这一定义并没有强调蒸发一定在液面发生，只是表述了蒸发的事实是自“自水面逸出”。我们也无法保证动能较高的分子一定在液面，但我们一般都将蒸发理解为是在液面发生。这样理解的蒸发被非常明确地看作是一种物相变化，是指液体受温度的影响，其液

体里面的液相分子（如水分子）无规则运动加快，使液体表面的液相分子转化成气体而挥发出去。这个过程受温度的影响，温度越高，蒸发也越快。这样的理解其实并不是基于严格的科学探讨和实验，只是基于直观所见的想当然而已。因为我们并没有用任何实验试图证明，如果将蒸发也理解为如挥发那样可以从液相整体发生有什么不对。

这里的问题在于我们的已有物理知识一方面对于挥发可以在液相内部发生没有明确的确认，笔者没有查到哪一本教科书的说法是如上述AI所述。另一方面，我们也查不到对于液面蒸发的说法，在物理学史上曾经有一个首次提出的物理学家，也没有任何物理学家曾经对于液面蒸发理论加以实验的验证。一旦我们开始做实验试图区分液面蒸发与整体蒸发哪一个理论更加正确，我们就会立刻证明整体蒸发无疑是更加正确的理论说法。

其实即使从直观的角度我们也很容易就能够理解液相整体蒸发定律，因为我们每个人在日常生活中都能司空见惯这样的现象：刚倒出来的汽水或可乐冒出 CO_2 气体的过程，不是单从液面冒气，而是从汽水或可乐液面下的整体冒气。我们还可以见到杯子底部和侧面立刻出现许多气泡，这个就是整体蒸发（或挥发）的过程。难道对于 CO_2 是如此是可以想象的，对于水里含有水蒸气也是如此就难以想象了？真是岂有此理。只不过我们通常不将这个现象理解为蒸发，而是理解为挥发，但是这个区分也是基于虚妄的理由。

如果我们再细想一下就会发现，蒸发与挥发除了存在用词习惯不同之外，本质上并无其它的任何区别，难道我们说液相水的蒸发也是一个挥发过程有任何不妥或错误吗？如果说蒸发是一个相变的过程，我们没有任何理由认为挥发不是一个相变的过程。如酒精的挥发难道不就是酒精的蒸发吗？常温下极高纯度的酒精的蒸发无非就是大大快于水的蒸发而已，此外没有任何区别。

4 蒸发与挥发在说到相变时的区别和产生的矛盾

我们也要注意，通常说到“蒸发”的时候，

也可以用“挥发”一词来替代，如说“蒸发是液体里面的水分子无规则运动加快使液体转化成气体而挥发出去的过程”。但是，在说液体的“挥发”的时候，我们似乎通常习惯于不明确说挥发也是如蒸发一样是一个液体转化成气体的相变过程。这看起来或许是受到亨利定律适用条件的表述方式的影响，既然只有当溶质在液相和在气相里都以“相同的质点”存在时亨利定律才适用，那么相同质点的挥发转化似乎就不能说是相变，即挥发似乎不必然与相变相连。

这样理解的挥发，与被作为相变过程的蒸发之间产生了矛盾，如有人就将两者的区别看作是性质不同：蒸发是物质从液态转化为气态的相变过程；而挥发是物质分子向四周自由散发、移动。但是，即使是这种理解也不敢明确说挥发不是相变，只是回避了这个问题。如果说液相挥发就是相变的过程，那挥发与蒸发就不可能有任何区别。另一方面，如果说挥发是相变，那亨利定律的适用条件，即只有当溶质在液相和在气相里都以相同的质点存在时亨利定律才适用，就没有办法理解。

我们习惯于在说到液相挥发时一般不讲是一个相变过程，我们之所以会产生这样一个印象，可能与亨利定律的适用条件的表述有关，只有当溶质在液相和在气相里都以相同的质点存在时亨利定律才适用，即亨利定律适用于挥发性溶质和稀薄溶液。于是这样的表述似乎意味着，挥发性溶质的挥发过程的前后可以没有相变，因为它在液相里和在气相里都以相同的质点存在，也就是说，挥发是从液相里溶质的气相质点变成溶液外的气相质点。

这样我们究竟该如何理解两者间的真正关系呢？难道我们能够否定挥发也是一个相变过程呢？这个是不可能的。溶质虽然可以以气相的方式存在于溶液中，如酒精溶液中当然就存在了酒精的气相。但是，溶液中当然也存在液相的酒精，这个溶液内液相酒精到溶液内气相酒精的过程就是酒精的相变过程。当溶液内的酒精发生挥发，逸出液面，引起溶液内的气相酒精的浓度下降，于是就通过这种内部的相变补充气相的酒精，以供继续的挥发过程。汽水溶液的挥发过程也完全是这样。任何

液相溶液的溶质的挥发都是这样。可是，难道溶剂的挥发不是如此吗？这样的溶剂的挥发难道不就是蒸发吗？事实是，溶剂与溶质的区分不是绝对的，而是相对的。如酒精溶于水，水就是溶剂，酒精就是溶质。但是也可以将这个溶液理解为是水溶于酒精，于是酒精就是溶剂，水就是溶质。这样挥发与蒸发就完全不可区分。

因此，我们也可以如将挥发分为两个过程一样，将蒸发也同样分为两个过程，如水的蒸发首先是液相水内部的水相变为内部的水蒸气，然后才是这个液相内部已经气化的水蒸气逸出液面的过程。这样理解的蒸发就与挥发完全没有区别了。事实上也只能这样理解对于液相而言的蒸发与挥发的等同关系。

我们通常之所以不能想象液相的水中含有水蒸气，是因为我们想当然地认为水蒸气溶于水的溶解度是无限大。但是，事实是，如果水蒸气溶于水的溶解度是无限大的，就不可能在 0°C - 100°C 之间的任何温度都可以发生蒸发，且蒸发的速度越来越快。任何蒸发出来的水蒸气都会重新百分之百地溶于水，事实上这个现象是不可能发生的。水的蒸发过程是要受到在一定温度下空气中的饱和蒸气压制约的，达到饱和蒸气压，水的蒸发与水蒸气的液化就会达成平衡。从这个现象可以推测，水中含有的水蒸气的浓度至少与空气处于饱和水蒸气压时的浓度相等，在通常情况下，水之所以会发生蒸发，是因为水中的水蒸气的浓度大于空气中的水蒸气的浓度。这个浓度差的大小决定了水的蒸发速度的大小，这个是很清楚的事实。

5 从对水的蒸发的一个全新理解中得到液相整体蒸发定律

一旦我们接受了挥发与蒸发完全等同的认知，我们就不得不对水的蒸发有一个全新的理解，即水的蒸发首先应该是液相水中的水蒸气挥发出液面的过程，而不只是液相的水分子发生相变为气相水分子的过程。当然这个相变过程也是存在的，那也不能想当然的认为只在液面才有可能发生，而是也可以在液相整体发生，且是在液相水中的高动能的水

蒸气在不断逸出液面被消耗掉的情况下，依据液相水中水分子动能的麦克斯韦分布，持续不断产生新的高动能的气相水分子，但是有所消减。

在教科书关于水的蒸发的定义中，看起来是动能较高的水分子先发生了蒸发是肯定的，但是仅仅指出这一点还是不够的，还应该指出这部分动能较高的分子可能在液体内部就已经气化了，所以才是最容易逸出液面发生蒸发的原因。这样的蒸发就不仅是在液面发生，而是在液相整体发生的一个持续过程。这样的蒸发当然不是只与液面的条件相关，而是也与整体相关的。于是我们就得到了液相整体蒸发定律。

这样一个对于水的蒸发过程本质的理解的理论，是我们后面一切理论和实验设计的基础。尤其是液相整体蒸发定律构成我们在系列论文中所讲述的一系列蒸发速率与水量（或液相的量）的相关性实验[4,5]的理论基础。

这样我们就不是将液相的蒸发和挥发两者简单地理解为都是在液面发生的相变过程，而是在液相整体发生的相变过程，而两者在液面处发生的主要只是液相中的气相分子逸出液相之外的空气或气相空间中的过程。这样理解之后的液相蒸发与挥发就完全一致起来了，没有任何本质性的区别，任何液相的挥发都是蒸发，任何蒸发也都是挥发。如果有区别的话，那也仅仅在于用词的场合可以有区别，挥发通常用于蒸发速度快的场合或有味气体（如酒精、汽油）的逸出过程。其余的场合则用蒸发，如水的蒸发。所有这些区别都不是绝对的和本质性的，而只是约定俗成的。

6 液相水整体蒸发定律预期存在温差散热和蒸发散热的区别

以上得到的液相的整体蒸发定律，并非只是理论的设想和推论的结果，每一步推论是否是正确的，最终需要实验的检验。我们认为解释海洋的温度梯度问题的关键在于要知道存在海洋的整体蒸发定律。

从蒸发速率或蒸发量与水量的关系实验可以得到液相水整体蒸发定律：水的蒸发不仅是液面的（气

态）水分子逸出水面的过程，也是或可能主要是液相水整体发生蒸发的水蒸气上升到液面并逸出的过程。与液相水整体蒸发定律对称的是气相整体液化定律：液化过程不仅在液面发生，也在气相整体发生，故液化热不仅产生于液面，或主要产生于气相整体。

依据液相水整体蒸发定律及其相关实验，空气与液面之间的温差散热和蒸发散热存在本质区别，两者同时共存。温差散热的方向取决于温度差，从高温传到低温，而整体蒸发散热的方向只取决于发生蒸发的方向，即液相到气相的方向，也是从液相底部到液相顶部，且不依温差的方向为转移。由此可以设计在非相平衡下的蒸发打破热平衡的实验：在常温空气条件下，从热平衡开始的自发蒸发过程，气相与液相的温差会持续扩大到某个最大温差值。这是由于气化在液相整体发生，气化带走的气化热引起了液相整体的降温。实验证实了这个预期[6]。

由此可以进一步预期，将这个实验设置于封闭而隔热的容器中进行，可以得到趋向于相平衡（气化与液化的平衡）条件下的蒸发实验：从热平衡开始的自发蒸发过程会一直持续到蒸发与液化的相平衡。由于液化是在气相整体发生，故液化热不仅在液面产生，或主要在气相整体产生。故知液化和气化两个过程都倾向于扩大气相与液相之间的温差，这个温差止于温差散热与蒸发和液化散热的平衡，所以可以预期最后的相平衡不是与热平衡同时建立，而是与热平衡构成两者不可兼得的悖论局面。这个结果与热力学平衡概念和热力学第二定律大为违背，或即意味着热力学第二定律只适用于温差散热，或不适用于蒸发散热[7]。

由上文中根据液相水的整体蒸发定律而设计的保温瓶内水的蒸发实验可知，在空气温度等于液面温度的情况下，开口的保温容器中的水向外散发热量主要是通过蒸发，而蒸发主要不是在液面发生，而可能主要是在水体内部发生，然后上升通过液面逸出。因为在液面与空气直接接触的液相水分子只占总水量的水分子之极小的部分，所以，通过这部分水分子而发生的蒸发可能只是占总蒸发量的很小

比例。具体占多大的比例还需要更精确的实验数据分析和计算。实际上有很大的可能是，绝大部分的蒸发都发生在液面以下，我们之所以有蒸发只在液面发生的感受，是因为液面以下接近液面处发生的蒸发，可以很容易就到达液面而不经过程大的蒸发衰减。

蒸发量与液面以下水量的相关性，并非指水量在影响水面温度变化时，水面蒸发与水下水量存在关联，而是指在任何其他条件都一样的情况下发生的，逸出水面的蒸发速率也是与水量相关的，也就是说，这种相关性是因为水体内部发生蒸发的结果。水体内部的蒸发上升与液面的蒸发汇聚在一起构成了实际的总蒸发量和蒸发速率。笔者的实验证明了这个相关性是很强的，水量的差别越大，液面的蒸发量差别也越大，这种差别完全不能忽略不计。后来这个实验数据得到冯跃春、朱韵之的实验发现的修正，冯跃春实验发现液面以上的试管壁的高度差别对试管内的空气湿度有影响，进而影响到蒸发速率[8]。

7 保温瓶内水的蒸发实验结果证明存在内部蒸发和液相水上热下冷的温度梯度

笔者后来特别注意到，在根据液相水的整体蒸发定律而设计的保温瓶内水的蒸发实验中，起始条件是空气与水的同温。在接下来的实验进程中，可以预期，在一定的时间内，蒸发散热要大于空气与液面之间的温差散热，因此水体总体上是降温的。在这种情况下，如果我们将蒸发过程完全理解为液面的蒸发，那么必然是液面的水首先丧失能量，因此在液面与液底面之间必然存在温度差，且是上冷下热。

但是，我们在整个实验过程中只有一次观测到这种情况，或许是偶然误差造成的，最大量观测到的是均温的情况。其次是下冷上热的情况，共有14次，最大的温差达到0.2℃。这后面两种情况只有通过内部蒸发的假定才能得到合理的解释[9]。

我们假定将液相的水体分为上、中、下相等的三部分。在假定存在内部蒸发的情况下，那么就必

然存在内部向液面的蒸发散热过程，这样上部的水体在向上蒸发散热的同时，也得到中部水体的蒸发散热的补充。同样，中部的水体在向中部蒸发散热的同时，也得到下部水体的蒸发散热的补充。因此相较于下部水体而言，中部水体的温度可能较高；相较于中部水体而言，上部水体的温度可能更高。但是上部水体会因为水蒸气逸出液面而丧失部分能量，但是也会得到空气与液面之间的温差散热的部分补充。如果我们只是考虑液面存在蒸发散热，应该是靠近液面的水体散热最多，结果是上冷下热。如果只考虑到是整体蒸发散热，那散热叠加的结果应该是液面的温度最高。或者是如果我们考虑液面的蒸发更强一些，也可能靠近液面的水体因蒸发散热更多一些，但是这个倾向也可能被空气与液面水之间开始发生的温差散热所中和，所以，综合考虑这些情况的结果，我们可以预期：大概率会观测到上热下冷的温度梯度现象，或至少是均温现象。而在上文的实验中，我们果然观测到了这个现象。

经过认真思考这个问题，笔者进一步认识到了，这个实验是证明存在液相整体蒸发定律的更加关键的直接证据。因为这个现象不可能通过液面蒸发的传统理论加以解释。因此，可以认为这次实验初步证明了存在内部的整体蒸发。

另外，液相整体蒸发定律也可以通过蒸气泡现象得到解释。笔者在《论蒸气泡现象是存在“麦克斯韦妖”的一个明显案例》[10]一文中讲到蒸气泡的时候，内部蒸发的直接现象的证明就是蒸气泡的产生，这个蒸气泡不仅会生于管壁，且呈现上管壁多下管壁少的局面，而且也可以产生于中间放障碍物的情况，特别是障碍物的向下面相比于向上面，以及管壁或障碍物的侧面的上方相比于下方更容易产生更多的蒸气泡，这些都证明了存在内部的蒸发现象，这些蒸发产生的蒸气正在向上运动，遇到障碍就聚集成气泡。笔者亲眼见到，这个蒸发产生的蒸气进入气泡，气泡随之不断长大的过程。几天之前笔者还发现这样的现象：在蒸气泡长大到一定程度停止生长了之后，我们可以通过敲击使气泡上浮，使气泡消失。但是，在原来产生气泡的地方还会生长出新的气泡来。在保持量筒或试管静止的情

况下，气泡会持续多天。

有的人认为这些气泡是空气泡，笔者已经通过充氧机对气泡已经消失的水体冲空气，这样并不会重新产生气泡，这个实验否定了纯空气泡说。因此内部蒸发定律的假定可以说已经基本被证实了。

8 冯跃春与朱韵之做的保温桶水的密闭蒸发引起上下同步降温效应实验和上热下冷效应实验

可以证明液相整体蒸发定律还有如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[11]。

笔者基于液相整体蒸发定律设计了二大类实验，这两类实验也是对液相整体蒸发定律的进一步验证：

一类实验：蒸发引起的上下液面同步降温实验，其中又包含4个实验：实验（1）室温环境下的开口蒸发引起上下同步降温的实验；实验（2）冰柜冷却环境下的蒸发引起上下同步降温的实验；实验（3）酒精在冰柜内的冷却过程中蒸发引起同步降温实验；实验（4）保温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。

二类实验：蒸发引起上热下冷的实验，其中又包含3个实验：实验（1）保温桶水的蒸发引起的上热下冷效应实验；实验（2）保温2米管水的蒸发引起上热下冷效应实验；实验（3）酒精在冰柜内的蒸发引起的上热下冷效应实验。

以上这二大实验的全部结论都符合基于液相整体蒸发定律的预期，因此也确证了整体蒸发定律是普遍成立的。

9 蒸发引起温度梯度实验的最大实验室是海洋

根据液相水的整体蒸发定律，可知海洋的蒸发过程一定也遵守这个定律。洋面的蒸发可能不仅是表层的蒸发，同时还是整个海洋海水深度蒸发的结果。由于洋面的开阔无比，我们可以判断，在选择足够大的特定面积且具有相同蒸发速率的海面的情况下，因为对于任何单位面积的洋面及其下海水柱体而言，其周围的海洋温度都是相同的，故相互之

间横向的热传导是均衡的，可以忽略不计，故这样的海洋的蒸发实际上就是最好的在周围保温条件下的蒸发。

根据以上实验中的密闭蒸发实验，我们所能找到的最大的实验室就是地球的海洋。由于大气的外层空间大气稀薄，我们可以认为地球大气是一个密闭的空间。世界海洋每年蒸发的淡水有450万立方公里，其中90%通过降雨返回海洋，10%变为雨雪落在大地上，然后顺河流又返回海洋。所以，这是海水的蒸发与大气水蒸气的液化所构成的一个平衡系统，至少可以说以一年为期，这个系统基本上是平衡的。完全按照密闭蒸发实验的模型，可以预期，海洋的垂直方向应该存在从上到下逐渐降低的均匀变化的温度梯度。

但是，对于这个海洋模型系统来说，不同的是阳光的照射增加的能量，和陆地对于海洋底部的传热。由于这两个热源的存在，就可能存在对于上述预期的均匀的温度梯度的偏离，这导致温度梯度的变化更为和缓均匀，而海洋温度的垂直分层恰好符合这一特征。

海洋温度呈现从上往下从高温到低温的三层垂直分布结构：混合层、温跃层、恒温层。海洋混合层深度（h）定义为温度比表层冷0.5℃的深度，即 $|T(z)-T(0)| < 0.5$ 。混合层的深度一般为0~100m，或者深度为20~200m，该层中的温度比较均匀。中间层为温跃层（Thermocline）。温跃层的海水温度一般随深度而递减。海洋恒温层是指距海水表层300~350m以下的地方，那里的水层温度常年不变。海底的温度不高，一般深海的温度仅略高于0℃，且这是一个稳定的现象。虽然海面的温度高于海底10℃—20℃，但是也没有证据表明海面的温度在向海底扩散。

由于陆地存在地温梯度又称地热梯度或地热增温率，指的是地球不受大气温度影响的地层温度随深度增加的增长率。由此可以推知，海底陆地必有地热传递给海底水体。海底海水在吸收海底陆地不可避免的传热之后，之所以没有升温，而是保持温度稳定，必然乃是因为海底的热量有一个机制在向海面传导，即因为整体蒸发，必然存在从低温的海

底海水自发地往上传热量, 传热给较高温的温越层和混合层及海面的机制。只有当这个过程与向下的温差传热过程平衡时, 海洋的垂直分层才能保持稳定。而依据热力学第二定律的克劳修斯表述, 这个现象必然违背热力学第二定律。于是, 我们也就找到了符合液相整体蒸发定律和可能违背热力学第二定律的一个最大的案例[12]。

参考文献

- [1]天津大学物理化学教研室编. 物理化学(上册)[M]. 第5版. 北京: 高等教育出版社, 2009: 169.
- [2]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.
- [3]魏祖期. 基础化学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2011年第7版.12.
- [4]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): 16-22.
- [5]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(PSTR). 2025, (1).

- [6]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[N]. 山西科技报. 2023年1月15日.
- [7]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[N]. 山西科技报. 2023年1月15日.
- [8]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(PSTR). 2025, (1).
- [9]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[N]. 山西科技报. 2023年1月15日.
- [10]江正杰. 论蒸发过程产生的蒸汽泡现象是存在“麦克斯韦妖”的一个明显案例[J]. 科技风. 2023(05):71-75.
- [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(PSTR). 2025.5(1).
- [12]江正杰. 整体蒸发引起热量从低温自发传递到高温物体的现象是否违背热力学第二定律的探讨[J]. 环球科学与工程. 2025, 2(7).

