

同蒸发液面下液体深度与蒸发速率相关性的实验研究

朱韵之¹, 冯跃春², 江正杰³, 吴永萍⁴

¹扬州中学 江苏扬州

²扬州市青年科学技术协会 江苏扬州

³山东工商学院 山东烟台

⁴扬州大学物理与技术学院 江苏扬州

【摘要】本文是对同蒸发液面下液体深度与蒸发速率相关性实验的初次和重复扩展研究。实验证明了液体蒸发速率受液面至管口的距离影响较大。用注射器制作了液面离管口距离可调节的“量筒”，用塑料量筒制作了量程不同，但能保证初始液面到管口的距离一样的量筒，克服了液面到管口的距离影响蒸发速率这个变量的影响。除用水之外，还用乙醇、汽油进行类似实验。最近的实验又包含三个实验：（1）同液面不同高度的容器蒸发速率与水量的关系实验；（2）异形容器水量与蒸发量关系实验；（3）2米长管与短管水量与蒸发量关系的实验。这些实验的结论都符合基于液相整体蒸发定律的预期，因此进一步确证了液相整体蒸发定律是普遍成立的。

【关键词】整体蒸发定律；水量与蒸发量的相关性实验；乙醇蒸发实验；汽油蒸发实验；异形容器

【收稿日期】2025 年 2 月 5 日

【出刊日期】2025 年 3 月 7 日

【DOI】10.12208/j.pstr.20250001

Experimental study on the correlation between liquid depth and evaporation rate under the same evaporation level

Yunzhi Zhu¹, Yuechun Feng², Zhengjie Jiang³, Yongping Wu⁴

¹Yangzhou middle school, Yangzhou, Jiangsu

²Yangzhou Youth Science and Technology Association, Yangzhou, Jiangsu

³Shandong Institute of business and technology, Yantai, Shandong

⁴College of Physics and Technology, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu

【Abstract】 This paper is an extended study of the experiment on the correlation between the depth of liquid below the liquid surface and the evaporation rate which was first studied and then replicated. The experiment proved that the evaporation rate of the liquid is greatly affected by the distance from the liquid surface to the tube. A graduated cylinder with adjustable liquid surface distance from the tube opening was made using a syringe, and plastic graduated cylinders with different ranges but the same initial liquid distance from the tube opening were made to overcome the variable of the distance from the liquid surface to the tube opening affecting the evaporation rate. In addition to water similar experiments were conducted with ethanol and gasoline. The latest experiment includes three experiments: (1) the relationship between the evaporation rate and the amount of water in with the same liquid surface but different heights; (2) the relationship between the amount of water and the evaporation in containers with different shapes; and (3) the relationship between the amount of water and the evaporation in a 2-meter-long tube and a short tube. The conclusions of these experiments are consistent with the based on the overall evaporation law of the liquid phase,

作者简介：朱韵之（2008-），扬州第一中学高一学生，江苏省中学生英才计划学员；冯跃春（1960-），扬州市新华中学，理科学士，研究方向：青少年科技教育。扬州市青年科学技术协会秘书长；江正杰（1968-），山东工商学院人文与传播学院副教授，工学学士，哲学硕士，研究方向：自然哲学、基础物理等；吴永萍（1978-），扬州大学物理与技术学院教授，研究方向：气候变化、大气水分循环、生态环境、短期气候模式及大气污染成因等。

thus further confirming that the overall evaporation law of the liquid phase is universally valid.

【**Keywords**】 Correlation experiment between water and evaporation; Ethanol evaporation experiment; Gasoline evaporation experiment; Overall evaporation law; Special-shaped container

1 研究背景——液相水整体蒸发定律

依据现有的物理热力学常识, 蒸发从微观上看就是液面的液相分子脱离液面到周围空气中的过程。江正杰最早提出不同于上述常识的对于蒸发过程的理解——液相整体蒸发定律^[1]。液相或水的整体蒸发定律将水的蒸发不仅理解为是液面的(高动能气态)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。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^[2])的基础上, 认为如同空气溶于水还是以气相的形式存在的一样, 水蒸气溶于水, 在绝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。

江正杰认为液相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, 并且已经做过多个关于蒸发量与水量相关性的实验^[3]。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, 具体数据随着空气湿度的不同而有差别。

液相整体蒸发定律将液相内部的水蒸气看作是一个可以连通的整体, 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。江正杰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。

朱韵之发现江正杰的以上实验存在的问题在于, 没有看到液面到容器口的距离不同会影响到蒸发速率或蒸发量。他们在排除了这个因素之后, 继续通过实验深入研究整体蒸发问题, 在冯跃春老师的指导下重复做了许多液体深度与蒸发速率相关性的实验, 得到更为精确的数据, 并把水的蒸发问题扩展

到汽油和酒精的蒸发, 进一步验证了江正杰提出的整体蒸发定律是正确的。

本文主要部分为朱韵之所写, 实验也主要是朱韵之设计。最后朱韵之同学参与于 2023 年 3 月 31 日—4 月 2 日在苏州市太仓市举办的第三十四届江苏省青少年科技创新大赛, 并且获得一等奖, 参赛题目为《液体深度与蒸发速率相关性的实验研究》。这个实验在 2023 年 8 月 20-26 日, 在武汉举行的第 37 届全国青少年科技创新大赛中获得二等奖, 参赛题目也是《液体深度与蒸发速率相关性的实验研究》。

2 朱韵之对于液体深度与蒸发速率相关性的第一次实验研究

2.1 朱韵之实验的创新要点

冯跃春老师指导朱韵之同学在重复了江正杰的实验, 得到了类似结果后, 想到液面到试管口的距离可能对蒸发速率产生影响, 于是设计了液面到试管口等距离条件下的类似实验, 还是发现了水量与蒸发速率的相关性。在水量相差一倍的情况下, 蒸发速率只相差约 4%, 在水量相差三倍(1:3)的情况下, 蒸发速率只相差 14%。这个差别与江正杰的类似实验对比起来是偏小的, 或与当时扬州的空气湿度比烟台更大相关。最重要的是, 朱韵之将蒸发实验扩展到酒精和汽油, 发现了乙醇和汽油的蒸发速率与其体积或深度也存在相关性, 且比水蒸气的关系更加明显些。朱韵之设计的蒸发实验结果证明: 水的深度会影响蒸发速率, 但影响不显著, 比不上笔者后来在福州闽清做的类似实验那么显著。这或是由于扬州市区有较多湖泊, 且温度较高导致湿度较大的缘故。乙醇、汽油的液相体积或深度也会影响蒸发速率, 较水显著, 这主要是因为相对于乙醇和汽油, 常温下水的蒸发速率或挥发性远小于前者所致。这样就将新发现的整体蒸发定律的实验研究大大推进了一步。归结起来, 朱韵之设计的蒸发实验的创新点体现在:

(1) 实验证明了液体蒸发速率受液面至管口的距离影响较大。

(2) 用注射器制作了液面到管口的距离可调节的“量筒”, 用塑料量筒制作了量程不同, 但能保证

液面到管口的距离一样的量筒, 克服了液面到管口的距离影响蒸发速率这个变量的影响。

(3) 除用水之外, 还想到了用乙醇、汽油进行实验。

2.2 实验器材准备

准备 2 只 100ml 规格相同的玻璃量筒, 5 只 100ml 和 5 只 500ml 规格相同的塑料量筒 (便于加工成截面相同, 高度不同的柱形容器), 5 只 100ml 和 5 只 500ml 的塑料注射器, 锯掉前端安装针头的部位, 即成为可调节液面至管口距离的容器。

准备好加工量筒的工具——小型钢锯。

用水、汽油和乙醇三种挥发性不同的液体做实验。乙醇用工业乙醇 (浓度 99%), 汽油选择从加油站购买的 92 号汽油。

精度 0.01 克、量程 500 克的精密电子秤和精度 0.01 克、量程 1000 克的精密电子秤。

2.3 实验发现液面离管口的高度不同会影响蒸

发速率

朱韵之考虑到: 不同液柱高度的蒸发量区别不会受到液面距离管口的高度不同的影响。为此朱韵之经过多次尝试实验, 最后设计了这样的实验: 取两只 100ml 的量筒, 其中一只里面用细沙和蜡烛的蜡 (细沙在下, 蜡在上) 填满 50ml 量筒, 再用燃烧的蜡烛滴入 5ml 蜡烛油。待蜡油凝固后加 50ml 水, 就可进行对比实验: 相同容量的水在距离管口的高度不相同的情况下, 其蒸发量是否相同, 如图 1。得到的实验结果果然证实了预期, 且差别很大, 不可忽略不计。实验数据如下。

可以看出同样 50ml 的水离管口近的蒸发量要比离管口远的蒸发量大得多。从 120h 到 600h 的蒸发量差别达到 37.5%—50%。这就说明最初的疑虑是有道理的, 前面做的实验就有较大的缺陷, 没有很好地控制变量, 这样来比较水量与蒸发量的相关性就不精确。

表 1 液面离管口的高度不同对蒸发量的影响实验数据表

量筒 (ml)	水 (ml)	120h 蒸发量 (ml)	240h 蒸发量 (ml)	360h 蒸发量 (ml)	480h 蒸发量 (ml)	600h 蒸发量 (ml)
100	50	0.2	1.0	1.6	2.1	2.3
100	50 (与 100ml 水距管口距离一样)	0.3	1.5	2.2	2.9	3.4



图 1

图 2

图 3

图 4

图 5

图 6

2.4 确定实验方案

怎样解决液面距离管口的高度不同会影响蒸发速率这个问题呢? 如果都用沙子和蜡封试管太耗时间, 而且不容易保证量筒容积大小的精确度。由于随着不同蒸发速率的进程, 液面距离管口的高度也是变化的, 因此单纯保持液面距离管口高度的初始不变, 不足以解决问题。因此朱韵之想到用大号注射器制作量筒, 锯掉注射器顶部, 推动注射器活塞就可调节液面到管口的距离。于是通过网购买了 5 只 100ml 和 5 只 500ml 塑料注射器, 锯掉注射器顶部, 这样就做成了 10 只液面距离管口高度可以调节

成一样的“量筒”, 如图 2。在 2 只 100ml 注射器中分别倒入 100ml 和 40ml 的汽油。另外两只 100ml 注射器中分别倒入 100ml 和 40ml 的乙醇, 如图 2。调节注射器活塞使乙醇和汽油的液面到管口的距离相等。每 12 小时调节 4 只“量筒”中乙醇和汽油液面到管口的距离, 保持与初始时距离相等。

再用一只 500ml 和一只 100ml 注射器制作的量筒装入高度相同的水, 让它们距离管口距离一样, 做对比实验, 观察单位面积蒸发量是否相同。

在 500ml 注射器分别装 500ml、400ml、300ml、200ml 的水, 调节注射器活塞使其液面到管口的距

离相等。

一天后发现装汽油的量筒下面的活塞橡胶圈变形严重, 不能继续使用。

最后只好又用经过锯割的量筒做水、汽油及乙醇的蒸发对比实验。这样是实验都是从液面到管口的等距离开始, 如果持续时间越长, 大小水量的蒸发量误差越大, 但是只要蒸发量差别不是很大, 误差就在可控的范围内。为此在选择蒸发量读数的时候, 都要尽可能选择最短时期内的读数, 因为持续蒸发的时间越短, 读数就越准确。

以下只公布有代表性的几组实验数据。

2.5 水的蒸发实验结果

水的蒸发用注射器制作的量筒做实验, 如图 2, 在排除了液面到管口的距离不同的影响后, 得到的实验数据如下。这组数据出现的蒸发量与液柱高度的关系也大约存在液柱越高, 蒸发越快的现象, 但是不明显。这大约与注射器存在渗漏有关。后又采用将 3 只 500ml 的量筒锯割成量程为 300ml、200ml、100ml 的量筒, 装进不同量的水后, 用精密电子秤 (量程 500g、精度 0.01g 如图 6 所示) 测量蒸发量。经过 3 天时间, 即得到一组数据如下表。由表格数

据可以看出, 以上两个实验都证明蒸发量与液柱高度有关系, 液柱越高, 蒸发越快。

2.6 汽油的蒸发实验结果

汽油蒸发的实验起先也是用注射器制作的量筒做的, 由于注射器活塞上的橡胶圈变形, 实验不成功。后来改为将相同容积的 100ml 量筒来做, 在截去初始液面以上的量筒高度多余部分的情况下, 重做如图 3 的实验。经过 36 小时得到数据如下。由表格可以看出, 汽油的蒸发快慢与液柱高度有关, 液柱高度越高, 蒸发越快。第一次 12 小时的观测相对科学, 第二次、第三次由于液面到管口距离不同, 产生新的变量, 故稍微不够精确些。

2.7 乙醇的蒸发实验

乙醇的蒸发实验起先也是用注射器制作的量筒做, 由于最后阶段乙醇发生泄漏, 因此改为用相同容积的 100ml 量筒来做, 在截去初始液面以上的量筒高度多余部分的情况下, 重做如图 5 的实验。24 小时蒸发量数据如下表。由表格中数据可以看出, 乙醇蒸发快慢与液柱高度有关系, 液柱越高, 蒸发越快。以上实验的失误之处是没有对液面的温度变化进行测量。

表 2 用改装的针筒做水的蒸发对比实验数据表

量筒	水量 (ml) 11.9, 21: 00	120h 蒸发量 (ml) 11.14, 21: 00	240h 蒸发量 (ml) 11.19, 21: 00	360h 蒸发量 (ml) 11.24, 21: 00	360h 蒸发量差百分比 (%)
1	500	20	20+16	20+22	7.69
2	400	19	19+15	19+21	2.56
3	300	18	18+15	18+21	0
4	200	17	17+16	17+22	0

表 3 用经过锯割的量筒做水的蒸发对比实验数据表

量筒质量 (g)	水量 (g) 11.25, 21: 00	24h 蒸发量 (g) 11.26, 21: 00	48h 蒸发量 (g) 11.27, 21: 00	72h 蒸发量 (g) 11.28, 21: 00	72h 蒸发量差百分比 (%)
50.57	103.56	1.44	2.89	3.95	0
73.52	198.78	1.52	3.09	4.21	7.34
97.92	300.01	1.59	3.36	4.50	13.92

表 4 汽油的对比蒸发实验数据表

量筒	汽油量 (ml) 11.18, 6: 00	12h 蒸发量 (ml) 11.18, 18: 00	24h 蒸发量 (ml) 11.19, 6: 00	36h 蒸发量 (ml) 11.19, 18: 00	36h 蒸发量差百分比 (%)
1	100	9.0	12.8	20.0	23.46
2	80	8.0	11.1	17.6	8.64
3	60	7.6	10.5	16.2	0

表 5 乙醇的对比蒸发实验数据表

量筒	乙醇量 (ml)	12h 蒸发量 (ml)	24h 蒸发量 (ml)	24h 蒸发量差百分比 (%)
1	100	13.2	22.1	8.89
2	80	12.5	21.0	3.45
3	60	12.1	20.3	0

3 江正杰做的水量与蒸发速率相关性实验的补充实验

3.1 江正杰在广州与闽清做的补充实验

江正杰之前的类似实验都没有考虑到朱韵之、冯跃春发现的液面到管口的距离会影响实验数据。在排除这个影响因素之后, 江正杰在广州重复了水蒸发的实验。最先用 1000ml 的塑料量筒做实验, 实验初始时保持液面与管口的距离相同, 或接近于 0, 将超出水量液面以上的量筒管壁锯掉。在水量相差一倍的情况下, 蒸发速率相差约 10% 或更多, 比朱韵之、冯跃春提供的实验数据要明显得多, 这或许是因为空气湿度的差别造成的。之后江正杰在 2023 年 8 月 28 日到 2023 年 9 月 16 日, 在福州闽清家中又做了类似实验, 在水量相差 3 倍 (330ml 与 1000ml) 的情况下, 18 天累积的蒸发量差别是 30% (130ml 与 100ml)。这个实验的室温一般在 30℃ 以上浮动 1 到 3℃, 两个量筒的温度随室温变化基本同步, 相差约 0.1℃。在这个实验中开始时候 1000ml 量筒与 330ml 量筒液面到管顶的距离都为 30ml 刻度。越是到后来, 1000ml 量筒与 330ml 量筒液面到管顶的距离差别越大, 所以排除了这个因素后, 蒸发量差别在 30% 这个数据应该是偏小的。之后江正杰在 2023 年 11 月 13 日到 2023 年 12 月 7 日在闽清家中又做了在水量比为 3 倍 (330ml 与 1000ml) 情况下的蒸发量差别实验, 得到如下表 6 实验数据:

表 6 在闽清做的水的蒸发对比实验数据表

	6 天	12 天	18 天	24 天
1000 (ml) 量筒	30	50	82	100
330 (ml) 量筒	23	40	67	82
蒸发量差 (ml)	7	10	15	18
蒸发量差百分比 (%)	30	25	23	22

这个实验的情况与广州实验类似。实验结果是: 1000ml 与 330ml 18 天的蒸发速率或蒸发量分别是 82ml 与 67ml 相差 15ml, 约有 23% 的差距。在蒸发

过程中, 两个量筒的温差基本相等, 最多时候的差别是 0.1℃, 即大量筒的量筒温度稍微高一点。这或许是因为在室温变化的时候, 大量筒的水温变化稍微滞后了一点; 又或许是因为蒸发引起了降温的情况下, 由于大量筒的水量大, 故其温变下降稍微滞后了一点。可见, 蒸发速率受到温度差别影响的结果基本上可以忽略不计。此外, 由上表数据还可以看出, 大小量筒的蒸发量区别有缩小的趋势, 如开始 6 天的蒸发量差别分别是 30ml 与 23ml 相差 7ml, 约有 30% 的差距。到了第 12 天, 蒸发量差别分别是 50ml 与 40ml 相差 10ml, 约有 25% 的差距。到了第 24 天, 蒸发量差别分别是 100ml 与 82ml 相差 18ml, 约有 22% 的差距。这个大约是由于时间越长, 大小量筒的蒸发量差别越大, 使得液面与管口的距离差别也越大。总的来说, 大量筒的蒸发量受到影响最大, 使得观察数据比实际数据偏小。如果考虑这个因素, 加以扣除, 以上百分比的数据差别就可能大部分被抹平。2023 年 12 月 30 日到 2024 年 1 月 16 日, 江正杰在闽清家中又做了类似实验, 在水量比为 3 倍 (1000ml 与 330ml) 的情况下, 17 天累积的蒸发量差别是 65ml 与 50ml。最后约有 30% 的差距, 这个差距也呈现出递减的趋势, 最先的最高差距接近于 40%。2024 年 1 月 4 日到 2024 年 1 月 14 日, 江正杰在闽清家中又重复做了一个类似实验, 在水量比为 4 倍 (125ml 与 500ml) 的情况下, 10 天累积的蒸发量差别是 20ml 与 15ml。最后约有 33% 的差距, 这个差距也呈现出递减的趋势, 最先最高的差距接近于 50%。两个量筒温度基本相同, 或大量筒比小量筒温度高约 0.1℃。

因此, 江正杰实验的结论是: 在保持液面与管口的距离一样的情况下, 蒸发量差别与小量筒的蒸发量的比值应该是稳定的。

3.2 江正杰在烟台做的水的蒸发实验数据

3.3 在烟台做的浓度为 98% 的酒精的蒸发实验数据

表 7 在烟台做的水的蒸发对比实验数据

对照组别	规格 (ml)	量差 (ml)	24h 读数 (ml)	48h 读数 (ml)	初始水量比	蒸发量增加的百分数 (%)	实验时间
1	1000	500	14	30	2	30.4%	2024.6.10
		250	12	23			-6.12
2	1000	1000	15	30	3	50%	2024.6.10
		330	10	20			-6.12
3	500	500	7.5	15	4	66.7%	2024.6.10
		125	5	9			-6.12

表 8 在烟台做的浓度为 98% 的酒精的蒸发对比实验数据

对照组别	量筒规格 (ml)	量差 (ml)	3h 蒸发量读数 (ml)	6h 蒸发量读数 (ml)	9h 蒸发量读数 (ml)	初始酒精量比 n	蒸发量增加的百分数 (%)	实验时间
1	1000	500	30	57	80	2	14.3	2024.5.24
		250	25	50	70			9: 00-18: 00
2	1000	1000	20	38	55	3	27.9	2024.5.24
		330	12	26	43			9: 00-18: 00
3	500	500	15	30	45	4	40.6	2024.5.24
		125	10	20	32			9: 00-18: 00



图 7 烟台做的水和酒精的蒸发实验

3.4 对于以上两个实验结果的补充说明

(1) 以上在烟台的实验都是笔者在家中靠窗的位置做的, 且都是在保持液面到管口的距离一样的情况下开始进行的。

(2) 考虑到随着蒸发的进程, 由于蒸发速率存在差别也会累积液面到管口的距离的差别, 故只是选择最初的蒸发量数据。由于水的蒸发速率远远小于酒精的蒸发速率, 故对于水的蒸发数据只选择 48 小时, 读取 2 次读数。对于酒精的蒸发数据只选择 9 小时, 读取 3 次读数。

(3) 根据整体蒸发定律可以预期, 水(或酒精)的内部蒸气的上行, 使得靠近液面的液体的蒸气含量或密度增加, 因此温度可能上升, 或高于底部。且可以预期水(或酒精)量较大的液面, 相对量较小的液面, 温度较高。

(4) 实际测量的结果显示, 对于水的蒸发对照实验而言, 量大的液面较之量小的液面温度高出 0.1-0.3℃。对于 98% 酒精蒸发的对照实验而言, 由于蒸发速率远快于水, 量大的液面较之量小的液面温度高出 1-2℃。无论是水, 还是酒精, 这样小的温度差别不足以解释蒸发量的差别。

(5) 可见, 蒸发实验对照组的温差不能作为否定整体蒸发实验的根据, 而恰恰是整体蒸发定律发生作用的结果。

(6) 酒精的蒸发实验没有出现气泡。但是实验中水的蒸发都出现了不同程度的大量气泡, 气泡的规律是下少上多, 下小上大。联想到扬州以及笔者在南方(福州、广州)的水蒸发实验没有出现或很少出现可见的气泡, 可知出现气泡与否与空气的湿度有关, 空气湿度越小, 蒸发越快, 气泡越多。

(7) 从出现气泡与否与空气湿度的相关性可推知, 气泡应该是水蒸气, 以水蒸气含量为主, 而不是空气泡。

4 对于液体深度与蒸发速率相关性的重复与扩展实验研究

从 2024 年 9 月开始, 同样是为了参与全国青少年科技创新大赛, 已经入学扬州一中高一的朱韵之, 在冯跃春老师的带领下, 在初中实验的基础上又继续做了大量有关水量与蒸发速率相关性的实验, 进一步研究水体的整体蒸发定律。朱韵之和冯跃春的最新实验主要是考虑到影响蒸发的热量传导因素较多, 因此新的蒸发实验设计多采取了保温措施, 试图隔绝容器器身与空气之间的传热, 只保留管口的蒸发与传热。先是设计了管口截面相等且高低不同的柱形容器进行蒸发的对比实验。

设计并制作绝热(外部保温材料包裹、内部刷绝热油漆)、内径相同且高度依次递减的圆柱形容器, 用自来水放入水桶静置 1 小时, 搅动后用量杯舀水依次倒入圆柱形容器至水面离容器口约 3mm。用精密电子秤称其质量, 每隔 24 小时后再称一次, 测出高矮不同的圆柱形容器的蒸发量。再设计不同的异形容器进行实验。

最后考虑到在扬州进行的蒸发实验, 同液面大小不同的水量的蒸发量差别不大, 朱韵之、冯跃春

设想通过放大水柱高度差别的对比蒸发实验, 可能会观测到更大的蒸发速率的差别。于是就设计经过保温膜和隔热漆处理过的长管(2 米)和短管容器进行对比蒸发实验。

实验得出的结论是: 更加精确地证明了, 在水的表面积相同的情况下, 水的蒸发速率与水量有关, 亦即水的蒸发速率不仅与水的表面积有关, 而且与整个水体水量有关, 水量越大, 蒸发速率也越快, 且局部靠近液面的水量越大, 蒸发速率也越快。这就证明了水的蒸发确实是一种整体行为, 而不仅是液面在蒸发。

4.1 同液面不同高度的容器蒸发速率与水量的关系实验

如图 7(a), 经过保温油漆处理的、截面相同、高度依次递减的圆柱形容器, 分别取名 1、2、3、4 号容器, 内径皆为 80mm, 高度分别为 15.8cm、10.8cm、7.5cm、4.4cm, 其比例约为 3.6: 2.5: 1.7: 1。用自来水放入水桶静置 1 小时, 搅动后用量杯舀水依次倒入圆柱形容器至水面距离容器口约 3mm。用精密电子秤称其质量, 每隔 24 小时后再称一次, 测出它们的蒸发量数据如下表 9。

根据数据画图, 由蒸发量随时间变化图线可以看出: 1、2、3、4 容器的高度由高到低, 水量由大到小, 对应的蒸发量也由大到小。

表 9 同液面不同高度的容器蒸发速率与水量的关系实验数据表

记录时间、 温度、湿度	9.22, 8: 30, 27°C, 38%	9.23, 8: 30, 27°C, 42%	9.24, 8: 30, 26°C, 46%	9.25, 8: 30, 27°C, 52%
水量或蒸发量 (g)	水量 (g)	蒸发量 (g)	蒸发量 (g)	蒸发量 (g)
容器 1 (H15.8cm)	792.32	9.43	19.22	25.22
容器 2 (H10.8cm)	540.20	8.58	17.11	22.63
容器 3 (H7.5cm)	376.39	7.64	14.81	20.29
容器 4 (H4.4cm)	222.08	7.50	14.27	19.31

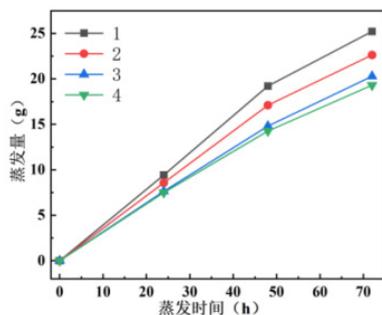


图 8 对比验证蒸发快慢的系列容器



图 9 水量不同的蒸发量折线图

设容器 1、2、3、4 中水 3 天后的蒸发量分别为 Δm_1 、 Δm_2 、 Δm_3 、 Δm_4 ，分别计算：

$$\frac{\Delta m_1 - \Delta m_4}{\Delta m_4} = \frac{25.22 - 19.31}{19.31} = 30.6\%$$

$$\frac{\Delta m_2 - \Delta m_4}{\Delta m_4} = \frac{22.63 - 19.31}{19.31} = 17.2\%$$

$$\frac{\Delta m_3 - \Delta m_4}{\Delta m_4} = \frac{20.29 - 19.31}{19.31} = 5.1\%$$

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 $\Delta m_1: \Delta m_2: \Delta m_3: \Delta m_4 = 1.31: 1.17: 1.05: 1$ 。可见，以容器 4 的蒸发量为准，超出容器 4 的水量越大，其超出部分的蒸发量在 4 容器水的总蒸发量中的占比越大。

结论：水的表面积相同的情况下，水的蒸发与水量有关，水量越大蒸发量越大。

4.2 异形容器水量与蒸发量关系实验

如图 7 (b、c)，制作三个异形容器，这三个容器储水高度相同，上口截面积也相同。

(A) 上小下大容器：上部用 108mmPVC 管制作，下部用 160mmPVC 管制作，做成如图 7 (b) 左侧容器。做过保温后如图 7 (c) 左侧容器，为以后实验方便起见，将该容器称之为 A 容器。

(B) 上天下小容器：上部用 160mmPVC 管制作，下部用 108mmPVC 管制作。为保证管口蒸发面积相同，在 160mmPVC 管上部再加一节 1cm 长的 108mmPVC 管，做成如图 7 (b) 中间的容器。做过保温后如图 7 (c) 中间的容器，将该容器称之为 B 容器。

(C) 水量较小的容器：上部用 108mmPVC 管制作，下部用 80mmPVC 管制作，做成如图 1 (b) 右侧的容器。做过保温后如图 1 (c) 右侧的容器，将该容器称之为 C 容器。

用自来水放入水桶静置 1 小时，搅动后用量杯舀水依次倒入 A、B、C 容器如图 1 (c))，尽量保持 A 和 B 容器中水量相等。三个容器中水深也近似相等。用精密电子秤称其质量，每隔 24 小时后再称一次，测出异形容器的蒸发量。实验数据如下表 10。

表 10 三个异形容器 A、B、C 的水量与蒸发量关系实验数据表

记录时间、 温度、湿度	8.31, 21: 30, 30℃, 52%	9.1, 21: 30, 30℃, 57%	9.2, 21: 30, 31℃, 52%	9.3, 21: 30, 30℃, 48%
水量或蒸发量 (g)	水量 (g)	蒸发量 (g)	蒸发量 (g)	蒸发量 (g)
容器 A	703.87	9.13	15.38	26.01
容器 B	703.49	9.86	16.87	28.95
容器 C	310.04	7.65	13.26	23.14

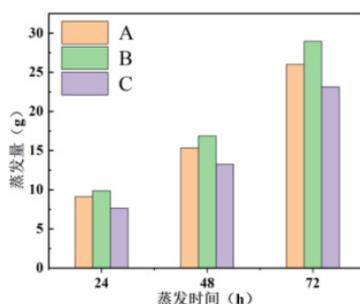


图 10 异形容器蒸发量对比柱形图

可以看出，蒸发量与空气湿度关系很大。最后一天，空气湿度最低为 48%，A、B、C 容器水的蒸发量相对前几天全部增大。由柱形图 3 可见，A 和 B 容器，水量相同，水的表面积相同，但 B 容器靠近水面的水量多，因此蒸发量最大。C 容器水量最

小，靠近水面的水量与 A 相当，远离水面的水量小，故蒸发量最小。

结论是：在水的蒸发液面面积相同的情况下，水的蒸发与总的水量有关，水量越大蒸发量越大，且靠近水面的水量越大 (B 容器)，蒸发量也越大。

在水量相等的情况下, 因为部分水量更加靠近液面, 而产生更大的蒸发速率差别达到 8.0%—11.3%。在水量相差一倍的情况下, 最大蒸发速率差达到 25.1%—28.9%。

4.3 2 米长管与短管水量与蒸发量关系的实验

以上的蒸发对比实验差别不是很大, 为了扩大差别, 可以考虑加大管长的差别。为此朱韵之和冯跃春设计制作 2 米管和 4.75cm 管的对比蒸发实验。用 108mmPVC 管制作 2 米高和 4.75cm 高的容器, 外径为 108mm, 内径为 105mm 如图 1 (d)。为了进一步做蒸发引起的上热下冷的实验, 后来又对长管与短管做保温处理, 处理结果如图 1 (f)。又在 2 米管上、中、下部分别开有温度观测孔。蒸发实验时用隔热棉盖住, 测温时揭开保温棉, 用红外测温仪测量 2 米管上、中、下部的温度。

如图 1 (f), 用自来水放入水桶静置 1 小时, 搅动后用量杯舀水依次倒入 2 米管和 4.75cm 管, 用精密电子秤测出短管加水的质量为 554.28g。10 天后再用精密电子秤测出短管加水的质量为 319.8g, 其蒸发量 Δm_1 为 155.22g。再用补偿法测出长管 10 天内的蒸发量 Δm_2 为 234.45g。

$$\frac{\Delta m_2 - \Delta m_1}{\Delta m_1} = \frac{234.45 - 155.22}{155.22} = 51\%.$$

即在管的长度比为 42 倍的情况下, 长管中水的蒸发量超出短管中水的蒸发量占短管蒸发量的 51%。朱韵之用经过保温处理的 2 米管和 4.75cm 管重复以上实验的结果, 长管中水的蒸发量超出短管中水的蒸发量占短管蒸发量的 97%。这个就在更大的幅度内证明了蒸发不仅与液面相关, 而且与水的整体相关。

4.4 2 米长管与短管水量与蒸发量关系的实验

以上主要介绍本次实验研究中的同液面不同高度和形状的容器蒸发速率与水量的关系实验。在本次实验研究过程中, 朱韵之、冯跃春根据江正杰提出的从均温开始的整体蒸发可能引发上热下冷效应的预言^[1], 发现水体在整体蒸发时出现了微弱的上热下冷效应, 在用常温水 and 热水实验时, 水体下部温度略低于上部温度。其中用保温茶水桶水的蒸发引起上热下冷效应的实验, 分上开口与上封口两种情况, 分别测到 0.3℃-0.4℃上热下冷效应。用 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的实验, 实验结果发现这个微弱的上热下冷效应被放大, 出现意想不到的结果。这个实验分上开口与上封口两种情况, 分别测到 0.5-4.8℃上热下冷效应。这个结果也与整体蒸发定律的预期一致。这一现象似乎违背了热力学第二定律。

5 可能实验误差的解释和分析

本文实验虽然避免了液面到管口的距离不同对于初始阶段的蒸发速度的影响产生的误差, 但是没有避免随着时间的进程因蒸发速度不同所累积的液面到管口距离的差别而产生的误差, 且这个误差越来越大。笔者充分注意到了这一点, 为了避免累积误差的产生, 所以选择蒸发量读数的时候都尽可能选择最短时期的读数, 因为持续蒸发的时间越短, 读数就越准确。就目前实验结果来看, 已经足以在定性上证明存在整体蒸发定律。如果要进一步寻找蒸发速率与水量的定量关系, 需要更加精确地考虑这个问题。

如果我们要怀疑这样的实验结果是对整体蒸发定律的证明, 最多学者的最多质疑是: 同蒸发液面下液体蒸发速率的差别可能是受到水量中不同潜存热量影响的结果。依据通常的液面蒸发理论, 蒸发通常要引起水体的降温, 且首先是液面的降温, 这样就形成上下温差, 下热上冷, 下面的热量就会上传, 如此就增加了液面的蒸发速度。这样的影响其中部分事实的确是存在的, 但是这个事实也完全可以包含在符合液相整体蒸发定律的预期之中。

实验证明单纯以上这个液面蒸发的影响不足以解释以上实验显示的蒸发量的巨大差别, 因为整体蒸发的效应是不依赖于温差而存在的, 任何温度都存在整体蒸发。特别可以肯定的是, 在保证大小水量之间均温的条件下, 一定也存在蒸发速率的差别。关于蒸发引起的液面温差是否是造成大小水量同液面蒸发速率差别的原因, 这个影响因素可以通过观测蒸发引起的温度变化来估算。依据液面蒸发理论可以预期, 液体量越大, 引起的水温降低幅度越小, 这个现象也会造成水量大者更大的蒸发速率。但是, 对于水的蒸发而言, 水温因蒸发而引起的温度降低的差别只有 0.1-0.3℃左右, 其中多数实验观察的结果是大小水量从均温开始的温差稳定在 0.1℃附近。如此小的温差不足以产生这么大的蒸发速率的差别,

或者说这个影响可以忽略不计。水文气象研究表明“气温与蒸发能力之间具有良好的正相关关系, 在气温升高 1°C 的情况下, 流域蒸发能力约增加 $5.0\% - 7.0\%$ 。”^[5]还有未注明来源的网上资料说: “当气温升高 1°C , 窟野河流域蒸发能力平均约增加 6.7% ; 气温升高 2°C , 蒸发能力平均约增加 13.8% 。”以大小水量温差一般在 $0.1 - 0.3^{\circ}\text{C}$ 计, 引起的蒸发量差别在 $0.5\% - 2.3\%$ 。而我们观察到的蒸发量差别多数超过这里的最大量10倍以上。基于这个原因, 笔者就没有继续进行在控制同温下的蒸发对比实验。

但是文中介绍的实验也显示, 考虑到影响蒸发的热量传导因素较多, 朱韵之和冯跃春的最近实验设计多采取保温措施, 如对容器内外面都进行保温油漆的处理, 试图隔绝容器器身与空气之间的传热, 以避免常温下的蒸发实验导致的水体降温之下室内空气热量的传入。这个设计的初衷是为了避免更多的变量。尝试在常温环境下的蒸发实验的结果也表明, 经过保温处理的容器比没有经过保温处理的容器出现了更大的蒸发速率的差别。这是因为在蒸发引起的降温过程中, 因为失去了边壁和底部的外界热量传入, 故大水量的内热都对蒸发速率产生了更大的影响。这似乎更加有利于证明液面蒸发理论。但是事后更精细的思考分析表明, 考虑到这一点并不总有利于达到本次实验目的。在不保温的情况下, 即存在边壁和底部的外界热量传入的情况下, 恰恰更有利于保持大小水量之间的同温蒸发。因此, 本文介绍的保温容器的蒸发实验仅仅供历史的参考, 不作为更精确的实验例证, 最精确的实验恰恰是笔者完成的在室温条件下普通不保温容器和常温水的自发蒸发实验。

还需要知道的是, 根据液面蒸发理论的预期, 假定是在保温容器内进行开口蒸发实验, 必然是下热上冷。可是根据整体蒸发定律的预期, 会出现相反的现象: 在常温环境下出现上热下冷, 或在冰柜冷却的条件下可能出现同步降温效应。实验事实很好验证了这个预期。实验表明, 一般并不存在下热上冷的温差效应, 所以不存在单纯的液面蒸发。而如果根据整体蒸发定律, 出现上热下冷的效应是正常的, 且一般是水量差别更大的容器之间出现更大的上下温差, 而这个恰恰是符合整体蒸发定律的预期, 所以用蒸发出现的大小水量之间的表面温差并

不一定构成支持液面蒸发理论的根据。

对于酒精的蒸发而言, 酒精温度降低的差别较大, 达到 $1 - 2^{\circ}\text{C}$, 虽然不可忽略不计, 目前笔者没有查到关于酒精温度变化对于其蒸发影响的文献资料。估计也不足以产生这么大的蒸发速率的差别。更为重要的是这样的温差正好符合酒精整体蒸发定律的预期。

6 结论: 液相整体蒸发定律及其验证实验的意义

综上所述, 以上所有关于同蒸发液面下液体深度(或水量)与蒸发速率相关性的实验, 都证明了蒸发速率与水量是相关的, 而不是仅仅与液面的条件相关。这样就充分证明了液相整体蒸发定律是普遍成立的。

当然笔者的以上研究还有很大的不足之处, 没有得到同蒸发液面下液体深度(或水量)与蒸发速率相关性的经验公式, 这个工作留给拥有更好更精密实验条件的专家学者继续研究。我们的主要任务只是为了让物理学界确信液相整体蒸发定律是普遍成立的。

虽然笔者的上述实验用的都是简易自制的设备, 按照一般的业界规则是不合格的, 但是这些实验涉及的理念却是纯粹创新的, 且属于基础物理学问题范畴, 因此其意义是极为重大的。我们知道关于液面蒸发的理论是任何一个中学生都必须学的内容, 也是任何一个物理专业人员都知道的。可是这个理论没有经过任何的实验对比验证, 只是一个想当然的理论, 是完全错误的理论, 至少笔者没有得到任何与验证液面蒸发理论有关的实验资料。笔者之所以能够判断没有这方面的实验数据, 是因为任何这一类的实验都要与相反的观点进行对比才能设计出来, 而一旦进行任何对比, 就会发现蒸发只与液面条件相关的教条是完全错误的。可是就是这样简单的实验一百多年来却没有人做过, 这可以说是物理学的一个巨大的“漏网之鱼”, 现在终于被我们捕获了。从此之后, 任何中学和大学的物理学一旦讲到这个问题, 就必然要讲到我们发现的液相整体蒸发定律及其验证实验。

因此可以说我们可能发现了中国人百年来最重要的物理定律—液相整体蒸发定律, 并可以用三大实验加以验证: (1) 同液面面积下水量与蒸发速度

(蒸发量)相关性实验;(2)在冷却条件下在保温容器内从上下均温开始的液相蒸发引起的上热下冷效应实验;(3)在常温条件下或低温差下在保温杯内的从上下均温开始的液相蒸发引起的同步降温效应实验。接下来继续可以用这个定律解决的五个重大谜题包括:(1)解开了困扰物理学界 60 年之久的姆潘巴效应之谜;(2)计算出了蒸发引起的气泡内空气和水蒸气含量之比谜;(3)定量解释了水的反常膨胀现象:为什么水在 4℃时密度达到最高值;(4)最后用明明白白的实验——冷却条件下保温杯内从上热下冷开始的液相蒸发引起的同步降温效应实验,证明在整体蒸发之下,热量可以在液体内部自发从保温杯的低温底部传到高温上部,此外的 2 米长管实验还证明可以自发扩大上热下冷的温差。这个就推翻了热力学第二定律的克劳修斯表述。(5)最后根据液相整体蒸发定律可知人体经络的实质是组织液内的气体推动组织液的液体运动的气液混合态,即“经络是组织液气的通道”。

据杨振宁先生在视频中说,在回答记者的问题“为什么要做看起来成功可能性很小的验证宇称不守恒的实验”时,吴健雄说,因为这是个基础物理的实验,是我不得不做的。与液相整体蒸发定律相关的实验无疑也是基础物理的实验,其意义当然也是巨大的。如果考虑到水与液相对于人类生存的更为重要的意义,可以说,与液相整体蒸发定律及其相关实验是比宇称不守恒定律及其实验意义更大更加基本的物理定律和实验,也无疑是比与超导问题相关的物理原理及其实验的意义更大得多的实验。大约正是因为这个原因,《科学》(Science)杂志在其 125 周年之际,公告天下 125 个悬而未决的科学问题,水的结构问题赫然位列其中。关于水的结构问

题,江正杰提出的水的基本结构是液气混合态^[2],并且用液气混合态这个概念来解释液相水整体蒸发定律,似乎是对这个基础科学问题的一个基本性的回答。物理学史最终将证明,以上实验对于解决这个问题是至关重要的一个开始,接下来就是整体蒸发引起的同步降温效应实验和上热下冷效应实验,我们将另文公布这个实验。

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.2023-1-15.
- [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] 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 2017,30(4):16-22.
- [4] 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.
- [5] 王国庆;张建云;贺瑞敏;荆新爱.黄河中游气温变化趋势及其对蒸发能力的影响[J].水资源与水工程学报.2007(04):32-36.
- [6] 涂育松;方海平.液态水微观结构研究的新进展[J].物理, 2010, 39(02):79-84.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS