

温度变化对空气中水汽的影响分析



刘俊红*, 徐振红, 张修诚

山东建筑大学热能工程学院, 山东济南 250101

摘要: 水汽作为含量最丰富的温室气体, 对全球变暖有很大的影响。在目前全球变暖的文献资料中, “温度每升高 1℃, 空气中将能多容纳 7% 的水汽”得到广泛引述。本文结合焓湿图分析温度上升 1℃ 空气相对湿度和含湿量的变化, 对该数据进行验证, 结果表明该结论只有在某些特定的温度和相对湿度/含湿量的交点上才能成立。含湿量不变时, 温度每升高 1℃, 空气基础温度越高则所减少的相对湿度差值越小; 相对湿度不变时, 温度每升高 1℃, 空气基础温度越高则所增加的含湿量差值越大。相同基础温度时, 温度每升高 1℃, 随着含湿量增加空气所能多容纳的相对湿度差变大, 随着相对湿度增加, 空气所能多容纳的含湿量差变大。即温度升高 1℃ 时低纬度和潮湿地区的空气可以吸收和容纳的水汽更多。全球变暖影响下, 随着温度升高空气中水汽含量也在增加; 即使是存在“热岛效应”和“干岛效应”的城市, 不仅具有更强的吸湿能力, 还具有较高的水汽含量。

关键词: 水汽; 全球变暖; 相对湿度; 含湿量; 焓湿图

DOI: [10.57237/j.jsts.2023.01.001](https://doi.org/10.57237/j.jsts.2023.01.001)

Analysis of the Impact of Temperature Changes on Water Vapor in the Air

Liu Jun-hong*, Xu Zhen-hong, Zhang Xiu-cheng

School of Thermal Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China

Abstract: Water vapor, as the most abundant greenhouse gas, has a significant impact on global warming. In the current literature on global warming, it is widely cited that 'for every 1°C increase in temperature, the air can accommodate an additional 7% of water vapor'. This article analyzes the changes in relative humidity and moisture content of air when the temperature rises by 1°C using an enthalpy humidity chart, and verifies this data. The results show that this conclusion can only be established at certain specific intersections of temperature and relative humidity/moisture content. When the moisture content remains constant, for every 1°C increase in temperature, the higher the basic air temperature, the smaller the decrease in relative humidity difference; When the relative humidity remains constant, for every 1°C increase in temperature, the higher the basic air temperature, the greater the difference in moisture content. At the same basic temperature, for every 1°C increase, the relative humidity difference that the air can accommodate increases as the humidity content increases. As the relative humidity increases, the difference in humidity that the air can accommodate increases. That is to say when the temperature rises by 1°C, the air in low latitude and humid areas can absorb and hold more water vapor. Under the influence of global warming, the water vapor content in the air also increases as the temperature increases; Even cities with "heat island effect" and "dry island effect" not only have stronger moisture absorption capacity, but also have higher water vapor content.

基金项目: 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目 (2022TSGC2566).

*通信作者: 刘俊红, ljhruby@sdu.edu.cn

收稿日期: 2023-06-21; 接受日期: 2023-08-22; 在线出版日期: 2023-08-29

<http://www.joscitechsoc.com>

Keywords: Water Vapor; Global Warming; Relative Humidity; Moisture Content; Enthalpy Hygrogram

1 引言

近年来全球极端气候事件频发，原因主要在于全球变暖趋势加剧。《中国气候变化蓝皮书（2021）》[1]指出，气候系统变暖仍在持续，高温、强降水等极端天气气候事件风险进一步加剧。这将影响人类健康甚至威胁人类的生存。

全球变暖的主因是由包括水汽、二氧化碳、甲烷、氧化亚氮和其他气体的温室气体引发的温室效应。目前主流观点认为，温室效应的主要驱动气体分别为：二氧化碳、甲烷，氧化亚氮和氟化气体[2]。每年世界气象组织发布的《全球气候状况》都会通过追踪全球主要温室气体浓度的变化来研究气候变化驱动因子。大量全球变暖的研究集中于控制和减少二氧化碳、甲烷，氧化亚氮的排放，尤其是二氧化碳的排放。中国基于此提出了“碳达峰、碳中和”的目标以减缓全球变暖。

但仅用 CO_2 的增温效应很难解释全球变暖，而水汽作为含量最丰富的温室气体，其对全球变暖的影响引起的关注度不够。杨新兴[3]根据大气中的水汽含量和 CO_2 含量，认为水汽对温室效应的贡献率约占 95%； CO_2 的贡献率约为 3.62%。 CO_2 对温室效应的贡献率，远远小于水汽的贡献率。Loiy [4]认为水汽对温室效应的贡献率占 2/3。此外水汽对全球气候变暖有很强的正反馈，这是由水汽反馈作用造成的。水汽反馈是气候系统中最强的一种正反馈作用，能够放大其他温室气体的增暖效应[5]。水汽还能通过大气环流和相变过程影响全球的水文循环与能量平衡[6]。Hall 等[7]模型验证水汽的热效应可把大气中二氧化碳造成的全球变暖效应加强一倍。Flohn 等[8]认为水汽的地球内部循环将二氧化碳和其他微量气体的“干”温室效应放大了约 5 倍，并从热带海洋向极地扩散；在全球变暖的背景下水汽对流层-平流层的垂直交换有明显增强趋势[9]。水汽的变化与全球变暖下的气候变化之间相互关联，相互影响，是目前全球气候变化研究的一个难点和重点。

目前有关全球变暖的期刊、报纸、学位论文等文献资料中，“温度每升高 1 ℃，空气中将能多容纳 7% 的水汽”得到广泛引述，表达方式不尽相同。如“气候变暖响应最强的是接近地表的大气水汽含量，并按照

Clausius-Clapeyron 方程以气温每升高 1 ℃ 增加 7% 的速率增加[10]”，“全球温度每升高 1 ℃，水汽含量可增加 7% [11]”。但笔者认为这并不是一个普遍适用的结论，不能无条件广泛应用。本文结合焓湿图分析温度上升 1 ℃ 对相对湿度、含湿量的影响，对该值求证，并分析温度变化对空气中水汽的影响，以引起人们对此结论的关注和重视。

2 表示水汽含量的参数

相对湿度作为衡量大气中水汽含量的物理参数，常被用来表征气候变化。相对湿度定义为湿空气（即平时所说的空气）中水蒸气压力与同温度下饱和湿空气的水蒸气压力之比[12]，即水汽压与相同温度下饱和水汽压的百分比。因此相对湿度只能表示空气中水汽接近饱和的程度，却不能表示水汽的含量。

由于统计时间和站点气象数据的不同，仅用相对湿度来表征气候变化时研究者甚至会得出相反的结论。钟珂等[13]通过对覆盖不同气候区的 83 个站点气象数据进行系统分析后认为，近 20 年来（1996~2016 年），空气相对湿度在中国大部分地区均呈上升趋势。而谢云等[14]利用 1961~2010 年中国 824 个气象站订正后均一性较好的相对湿度数据得出：全国年均相对湿度呈减小趋势的站点占 64.1%。因此需要其他参数来更好地表征大气中的水汽变化。

湿空气中水蒸气单独占用湿空气的容积，并具有与湿空气相同的温度时所产生的压力，称之为水蒸气分压力。水蒸气分压力大小直接反映了水蒸气含量的多少。在一定温度下，空气中的水蒸气含量越多，空气就越潮湿，水蒸气分压力也越大。

空调工程中用含湿量作为空气中含有的水汽量指标。含湿量为空空气中水汽密度与干空气密度之比，即取对应于 1kg 干空气中的空气中所含有的水蒸气量。考虑到空气中水汽含量较少，含湿量的单位可用 $\text{g}/\text{kg}_{\text{干}}$ 表示。含湿量可以根据容易获得的温度和相对湿度来计算，表征水汽的变化。

当大气压力一定时，水蒸气分压力仅取决于含湿量。在焓湿图中含湿量线与水蒸气分压力线平行，数

值对应。下面分析中仅以焓湿图中含湿量线来表征空气中水汽的变化。

3 温度升高 1 ℃ 相对湿度的变化

3.1 焓湿图上的表示

在焓湿图上绘制空气温度升高 1 ℃ 时其相对湿度的变化, 如图 1 所示。

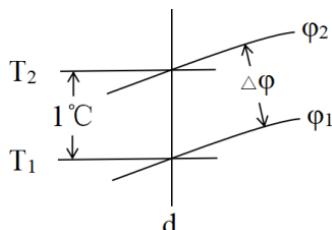


图 1 温度升高 1 ℃ 相对湿度变化图

从图 1 可以看出, 在水汽含量保持不变的情况下, 空气温度升高 1 ℃ 其相对湿度会减少 $\Delta\varphi$ 。

相对湿度减少, 表示空气中的水汽离饱和程度更远, 可以吸收更多的水汽, 这增大了空气的吸湿能力, 加速与空气接触的水蒸发。因此说温度上升可以使空气容纳更多水汽, 这是水汽增加的客观原因。温度上升 1 ℃ 使空气多容纳 $\Delta\varphi$ 的水汽。

如果温度上升 1 ℃ 后空气的相对湿度减幅不等于 $\Delta\varphi$, 说明其含湿量也同时发生变化。如果相对湿度减幅小于 $\Delta\varphi$, 则含湿量增加, 如果相对湿度减幅大于 $\Delta\varphi$, 则含湿量减少。 $\Delta\varphi$ 的值与基准温度 T_1 及含湿量有关。

3.2 相对湿度减少值

结合图 1 计算标准大气压下, 处于不同基础温度和含湿量时, 温度每升高 1 ℃, 空气相对湿度减少的 $\Delta\varphi$ 值, 计算结果见表 1。

表 1 温度升高 1 ℃ 时空气减少的 $\Delta\varphi$ (%)

	$T_1=10$ ℃	$T_1=15$ ℃	$T_1=20$ ℃	$T_1=25$ ℃	$T_1=30$ ℃	$T_1=35$ ℃
$d=5\text{g/kg}$ ±	4.15	2.88	2.02	1.43	1.03	0.75
$d=10\text{g/kg}$ ±	-	5.71	4.01	2.85	2.05	1.49
$d=15\text{g/kg}$ ±	-	-	5.96	4.24	3.05	2.22
$d=20\text{g/kg}$ ±	-	-	-	5.6	4.04	2.93
$d=25\text{g/kg}$ ±	-	-	-	-	5.00	3.65
$d=30\text{g/kg}$ ±	-	-	-	-	-	4.34
$d=35\text{g/kg}$ ±	-	-	-	-	-	5.02

因为有的温度与含湿量在焓湿图上无交点, 无法计算出相对湿度变化, 所以表 4 中有数据欠缺。

从表 1 可以看出, 含湿量不变时, 温度每升高 1 ℃, 空气基础温度越高则所减少的 $\Delta\varphi$ 值越小。而基础温度越高表示其在地球上纬度越小。因此在低纬度地区空气温度每升高 1 ℃ 引起的相对湿度变化小, 而高纬度地区的相对湿度变化大。

相同基础温度时, 温度每升高 1 ℃, 随着含湿量增加空气所能容纳的 $\Delta\varphi$ 变大。含湿量大表示空气中的水汽含量大, 空气潮湿。因此对于温度相同的地区, 温度每升高 1 ℃ 潮湿空气可以容纳更大的 $\Delta\varphi$, 反之亦然。

4 温度升高 1 ℃ 含湿量的变化

4.1 焓湿图上的表示

在焓湿图上绘制空气温度升高 1 ℃ 时其含湿量的变化, 如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 当相对湿度不变时, 空气温度升高 1 ℃ 其含湿量增加 Δd , 即水汽增多 Δd 。

如果温度上升 1 ℃ 后空气的含湿量增幅不等于 Δd , 说明其相对湿度也同时发生变化。如果含湿量增幅小于 Δd , 则相对湿度减少, 如果含湿量增幅大于 Δd , 则相对湿度增大。 Δd 的值与基准温度 T_1 及相对湿度有关。

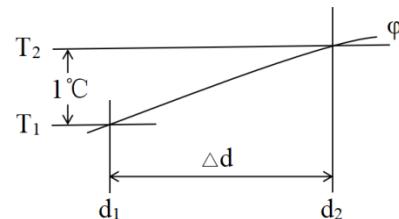


图 2 温度升高 1 ℃ 含湿量变化图

结合图 1 和图 2 可以看出, 如果空气温度升高后其相对湿度增加, 则表示空气中水汽含量大大增加。但如果空气温度升高后其相对湿度减少, 则需要计算变化前后的含湿量来判断水汽是否增加。

4.2 含湿量增加值

结合图 2 计算标准大气压下, 处于不同基础温度

表 2 温度升高 1 ℃ 时空气增加的 Δd (g/kg_干)

	T _i =10 ℃	T _i =15 ℃	T _i =20 ℃	T _i =25 ℃	T _i =30 ℃	T _i =35 ℃
φ=40%	0.22	0.29	0.38	0.50	0.65	0.84
φ=45%	0.24	0.33	0.43	0.57	0.73	0.96
φ=50%	0.27	0.36	0.48	0.63	0.82	1.07
φ=55%	0.30	0.40	0.52	0.70	0.90	1.18
φ=60%	0.32	0.44	0.58	0.77	1.00	1.29
φ=65%	0.35	0.47	0.63	0.83	1.08	1.41
φ=70%	0.38	0.51	0.68	0.90	1.17	1.53

从表 2 可以看出, 相对湿度不变时, 温度每升高 1 ℃, 空气基础温度越高则所增加的 Δd 值越大。因此在低纬度地区空气温度每升高 1 ℃ 引起的含湿量变化大, 而高纬度地区的含湿量变化小。

相同基础温度时, 温度每升高 1 ℃, 随着相对湿度增加, 空气所能容纳的 Δd 变大。相对湿度大表示空气越接近饱和, 空气越湿润。因此对于温度相同的地区, 温度每升高 1 ℃ 湿润地区的空气可以容纳的 Δd 大, 而干燥地区的小。

空气每升高 1 ℃, 随着基础温度和相对湿度的增加, 空气含湿量增加的 Δd 变大, 即低纬度和湿润地区能够容纳的水汽更多。因此, 在不同的气候区空气每升高 1 ℃ 空气中所能容纳的水汽量不一样, 且相差较大, 低纬度和湿润地区可以吸收更多的水汽。

在表 2 计算的 Δd 值范围内, 基础温度 10 ℃ 和相对湿度 40% 时的 Δd 增量为 6.47%, 而基础温度 35 ℃ 和相对湿度 70% 时的 Δd 增量为 5.36%, 其他 Δd 增量在这两个值之间。而表 1 中温度每升高 1 ℃ 空气相对湿度减幅也没有出现 7% 的数值。因此有关全球变暖的文献资料中引述的“温度每升高 1 ℃, 空气中将能多容纳

和相对湿度时, 温度每升高 1 ℃, 空气含湿量增加的 Δd 值, 计算结果见表 2。

表 2 温度升高 1 ℃ 时空气增加的 Δd (g/kg_干)

7% 的水汽”, 应该是在某些特定的温度和相对湿度/含湿量的交点上才能成立, 并不是一个广泛成立的结论。

5 温度升高时空气的相对湿度和含湿量变化

从焓湿图的分析中可知, 空气温度升高后如果相对湿度不变或增加, 则其含湿量会大幅增加。如果相对湿度减少, 必须与该温升下可容纳的相对湿度减幅比较才能判断含湿量是否增加。目前在全球变暖影响下, 随着温度升高, 空气中水汽含量往往也在增加。

5.1 相对湿度与含湿量都增加

根据国家统计局发布的《中国统计年鉴》中主要城市的平均气温和相对湿度, 计算出全国平均气温和相对湿度, 以及相应的全国平均含湿量, 如表 3 所示。因为 2017 年开始统计的主要城市中增加了大连、W 岛和桂林, 为了保证数据的连续性, 2017~2020 年统计的数据中不包括这三个城市。

表 3 近十年 (2010~2020 年) 中国的全国平均含湿量变化表

时间 (年)	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
全国平均气温/ (℃)	13.88	13.82	14.38	14.41	14.56	14.60	14.73	14.51	14.73	14.65
全国平均相对湿度/ (%)	63.35	65.05	64.58	65.32	66.52	67.06	65.03	65.13	65.00	66.58
全国平均含湿量/(g/kg _干)	6.23	6.37	6.56	6.65	6.84	6.92	6.76	6.68	6.76	6.89

注: 数据来源: 2011~2020 年中国统计年鉴

从表 3 可以看出, 近十年来我国平均气温、相对湿度和含湿量都呈逐步上升趋势, 即中国在变暖的同时空气中的水汽含量也在增加。

5.2 相对湿度减少与含湿量增加共存

典型事例是对于存在“热岛效应”和“干岛效应”的

城市，其相对湿度减少的同时含湿量可能增加。

郑思轶等[15]利用 1961-2000 年北京 13 个台站的气候观测资料及北京统计年鉴资料，分析北京城区、郊区的气温、相对湿度等气候因子造成的“热岛效应”

和“干岛效应”。根据文中数据，取北京的大气压为 99.86KPa，计算得北京城区、郊区 40 年来的含湿量变化，如表 4 所示：

表 4 “热岛效应”和“干岛效应”下北京城区、郊区的含湿量变化表

	北京城区			北京郊区		
	年均温度/℃	年均相对湿度/%	年均含湿量/(g/kg _干)	年均温度/℃	年均相对湿度/(%)	年均含湿量/(g/kg _干)
1961 年	11.58	59.8	5.12	11.49	55.0	4.68
2000 年	13.14	54.8	5.20	12.11	57.5	5.10

从表 4 可以看出，热岛效应体现在北京城区在计算时间内的年平均温度及其上升幅度都大于郊区；而干岛效应体现在近年来城区年平均相对湿度比郊区小，2000 年城区的年均相对湿度比郊区小了 2.7%。但在 1961 年城区的年均相对湿度要大于郊区的，在这 40 年里年平均相对湿度城区下降了 5%，而郊区上升了 2.5%。城区的温度和湿度的变化符合大气变暖下的气候表征。

但随着城区温度的上升，即使相对湿度减少，但减幅大于其温度上升区间对应的 $\Delta\varphi$ ，所以其含湿量仍是增加的，只不过增幅小于郊区的。另外，城区的年平均含湿量大于郊区的，即干岛效应下的城区水汽含量仍大于郊区的。因此存在“热岛效应”和“干岛效应”的城市，虽然其温度高、相对湿度小，但同时不仅具有更强的吸湿能力，还具有较高的水汽含量。

6 结束语

通过焓湿图的分析可知，如果仅给出相对湿度的变化，而没有相应的温度变化作为参考，则无法分析空气含湿量的变化。当温度升高 1 ℃ 时，空气中将能多容纳 7% 的水汽是有条件限制的，不适用于常规引用。

低纬度地区空气温度每升高 1 ℃ 引起的相对湿度变化小而含湿量变化大，而温度相同的地区，温度每升高 1 ℃ 潮湿湿润的空气可以容纳更大的 $\Delta\varphi$ 和 Δd ，反之亦然。因此，空气每升高 1 ℃ 空气中所能多容纳的水汽量不是一个固定值，而且相差较大，低纬度和湿润地区的空气可以吸收更多的水汽。

全球变暖影响下，随着温度升高，空气中水汽含量也在增加，即使是存在“热岛效应”和“干岛效应”的城市也适用。如果像减少碳排放一样减少空气中的水汽，则既能减缓全球变暖，又可增加水资源。

参考文献

- [1] 中国气象局气候变化中心, 中国气候变化蓝皮书 (2021). 北京: 科学出版社, 2021.
- [2] Kweku D, Bismark O, Maxwell A, et al. Greenhouse Effect: Greenhouse Gases and Their Impact on Global Warming [J]. Journal of Scientific Research & Reports, 2018, 17 (6): 1-9.
- [3] 杨新兴. “气候变暖”论的误区 [J]. 前沿科学, 2010, 4 (04): 31-34.
- [4] Loiy Al-Ghussain. Global warming: review on driving forces and mitigation [J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, Volume, 2019, 38 (1): 13-21.
- [5] Held I M, Soden B J. Water vapor feedback and global warming [J]. Annu Rev Energy Environ, 2000, 25: 441-475.
- [6] Held I M, Soden B J. Robust responses of the hydrological cycle to global warming [J]. Journal of Climate, 2006, 19 (11): 5686-5699.
- [7] Hall A, Manabe S. The Role of Water Vapor Feedback in Unperturbed Climate Variability and Global Warming [J]. Journal of Climate, 1999, 12 (8): 2327-2346.
- [8] Flohn H, Kapala A, Knoche H R. Water Vapor as an Amplifier of the Greenhouse Effect: New Aspects [J]. Meteorologische Zeitschrift, 1992, 1 (2): 122-138.
- [9] 徐可飘. 青藏高原大气水汽含量及水汽输送特征研究 [D]. 中国科学技术大学, 2020.
- [10] 刘春蓁, 巢清尘, 王守荣等. 水文气象学领域的水文循环研究进展 [J]. 气候变化研究进展, 2023, 19 (01): 1-10.
- [11] Trenberth K E, Dai A, Rasmusen R M, et al. The changing character of precipitation [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2010, 84 (9): 1205-1217.
- [12] 赵荣义等编. 空气调节 (第四版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

- [13] 钟珂, 陈春美, 陈勇航等. 近年气候变化对中国不同地区供暖供冷度日数的影响 [J]. 东华大学学报 (自然科学版), 2020, 46 (01): 112-115.
- [14] 谢云, 张汝正, 殷水清等. 1961-2010 年全球变暖背景下中国空气湿度长期变化特征 [J]. 水科学进展, 2020, 31 (05): 674-684.
- [15] 郑思轶, 刘树华. 北京城市化发展对温度、相对湿度和降水的影响 [J]. 气候与环境研究, 2008 (02): 123-133.