



科学文化工程

科学探索系列



大自然的礼物

关于空气和水的科学之旅

〔法〕勒内·莫罗 / 著
王晓东 陶 震 倪明玖 / 译

L'AIR ET L'EAU

Alizés, cyclones, Gulf Stream, tsunamis
et tant d'autres curiosités naturelles



科学出版社

大自然的礼物

关于空气和水的科学之旅

〔法〕勒内·莫罗 / 著

王晓东 陶 震 倪明玖 / 译

科学出版社

北 京

图字：01-2015-5620 号

Translation from French language edition:

L'Air et l'Eau

Alizé, cyclones, Gulf Stream, Tsunamis et tant d'autres curiosités naturelles

by René Moreau

Copyright© EDP Sciences 2013

Université Joseph Fourier de Grenoble

All Rights Reserved

The front cover picture is reused with permission by EDP Sciences.
Front cover copyright © EDP Sciences - Grenoble Sciences collection

图书在版编目(CIP)数据

大自然的礼物：关于空气和水的科学之旅/(法)勒内·莫罗(Rene Moreau)著；
王晓东，陶震，倪明玖译.—北京：科学出版社，2016.7

ISBN 978-7-03-049049-0

I.①大… II.①勒… ②王… ③陶… ④倪… III.①空气—普及读物 ②水—
普及读物 IV.①P42-49 ②P33-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 141767 号

丛书策划：侯俊琳 牛 玲

责任编辑：朱萍萍 吴春花 / 责任校对：刘亚琦

责任印制：张 倩 / 封面设计：有道文化

编辑部电话：010-64035853

E-mail: houjunlin@mail.sciencep.com

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 7 月第 一 版 开本：720×1000 1/16

2016 年 7 月第一次印刷 印张：15 1/2

字数：320 000

定价：68.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

序 言

科学始于好奇。

——亚里士多德

空气和水是对人类最重要的两种流体。从童年记事起我们就开始了解这两种流体了。然而，它们的行为却很难预测，限于认识水平，我们对许多问题还不清楚。如何精确地预测风、暴雨、台风？为什么雨是下在这里而不是那里？明年夏天是赤日炎炎，还是凉爽宜人？海浪永不停息地拍打着岸边，究竟是潮涨还是潮落？

工程师和技工在参观大型水电设施、港口、空港的过程中接受培训，他们有机会看到或感受到这两种流体在这些场合中的流动。在惊叹于这些奇特现象的同时越来越了解它们的本质。渐渐地，对这些现象的理解促进了工程师对它们的研究，并演变成分析这些现象的手段。除了用于科学研究外，这些认知规律对每位读者也有参考价值。本书描述这两种流体的行为时将不使用方程推导和抽象概念，而是采用观察、感悟的方式，使读者了解更多的内容。

空气与水涉及哪些领域？本书先带领读者了解静态的空气和水，然后介绍一些连续的、难以预测的波动现象，从地球尺度的流动到小规模的自然现象，如低大气压、云、雨、潮水及浪花。本书还会介绍一些庞大的水域网络，使我们有机会欣赏到很多了不起的水利工程。例如，为水利发电而建造的大坝，它们汇集河水灌溉着田地，并对周围大地的生态环境产生影响。本书采用相对简单的方式解释从自然界中观察的现象，读者群是关切当前环境问题的大众。

本书大部分的科学知识对于具有高中以上学历的读者都是可以理解的。例如，流体的温度、流体内部的压力等物理量都是大家所熟悉的。然而，有些现象是需要用到在大学里所学的较难知识和概念来解释的。为了使读者阅读起来顺畅，这些概念被单独列于相关章节。尚未学过这些知识的读者不用担心，可以先略过这些内容，在给出的例子中接触并逐渐掌握这些概念。此外，为了满足理工科读者的需求，我们在一个与本书相配套的网站上提供了很多的补充信息。例如，为善于推导方程的读者提供了一些理论解析，以及一些关于实验技术等方面的信息。

本书正文摒弃了方程的使用，而是探讨了与现象有关的物理量的量级，并给出了必要的说明，这些量的量级非常重要。例如，大气运动的时间尺度为数周，而海洋运动的时间尺度却超过了千年：海水环旅世界需 1600 年！大气和海洋之间的相互作用涉及气象学和气候学，它对研究气候变暖非常重要。认识这些知识的目的在于可以了解一些重大挑战的科学基础，学习获取知识的方法，而不用深入具体的细节之中。

总之，我希望给读者一种感受，是我向他们讲述了一个美丽的故事，向他们转述一种对自然的惊叹，关于这点，请允许我追念儒勒·凡尔纳，在我眼中，他是一个对科学知识的了解让人惊叹的老师之一，当我还是一个孩子的时候，就被他的作品《奇异的旅行》深深地吸引。我希望引用其中两篇和本书内容最相近的章节，这两篇的内容分别为本书第二章和第五章：《气球上的五星期》和《海底两万里》^①，相较于这部作品的科学知识，儒勒·凡尔纳丰富的想象力点燃了更多的梦想。本书有助于读者在读完对空气与水的现象的合理描述后，跟随自己的步伐，把梦想逐渐变为现实。

勒内·莫罗

2013 年 2 月

① 译者注：由儒勒·凡尔纳所著的《海底两万里》一书已有中译本，由沈国华、钱培鑫、曹德明翻译，译林出版社出版。

致中国读者

迄今为止，我与中国科学家已经合作 15 个年头了，这个经历令我感到非常的高兴和荣幸。其中一些科学家曾经在我所在的格勒诺布尔市法国国家科研中心工作过，并与我们的研究组合作多年。现在，我们仍然保持着良好的合作关系。2013 年，我有幸被邀请到中国科学院大学（UCAS）讲学。在北京，我愉快地完成了为期两个月的学术交流访问工作。这次交流访问使我有机会近距离地了解到中国科学界的研究水平和研究生层面的高等教育情况。我意识到，我的中国同事当初也是出于同样的想法和目的远赴西方大学及研究机构访问与工作的，并积极地参与到国际会议等各个层面的科研活动中。他们都是中国科学家中的佼佼者。在与他们指导的研究生的日常交流讨论中，我确信这些年轻学子将拥有辉煌的未来。他们努力地学习，积极地汲取着科学前沿知识，享受着科研所带来的乐趣。

写就本书法文版的主要目的是帮助法语区的人们了解我们身处的大自然环境中的常见自然现象，并回答天空为什么是蓝色的，海水为什么是咸的，比空气重得多的飞机怎么能够飞起来等诸多科学问题。尽管一些问题看起来很简单，但是要给出完全令人满意的答案却并非易事。个中原因很多，其中两点是非常重要的：以物理和化学为必要知识背景的理解与解释；采用丰富的特定词汇足够清楚地阐释自然现象的机制。幸运的是，我的中国朋友——中国科学院大学（UCAS）材料科学与光电技术学院的王晓东教授、陶震博士和工学院的倪明玖教授具备了非常雄厚的专业背景和语言功底，卓著的教育与科研背景使他们具备了上述能力，足以完成本书从法文到中文的翻译工作。我深深地感激他们值得信

赖的专业能力和雄厚的语言功底，使得本书的中文版能够与广大的中国读者见面。

勒内·莫罗

2016年5月5日

于法国格勒诺布尔

译者序

本书是法国两院院士、磁流体力学专家勒内·莫罗教授最新的一本科普杰作。他以一种独特的、颇具吸引力的科学视角为我们清晰、透彻地阐述了这些自然现象，诠释了自然界的神奇之处。莫罗教授深厚的流体力学专业功底和精湛的学识，使得本书得以一种深入浅出、简洁明快的语言风格，循序渐进、丝丝入扣地介绍了和空气与水休戚相关的自然现象。在这趟科学之旅中，莫罗教授带领我们倘佯在知识的海洋中，引领读者走进神奇的大自然，领略大自然的奥秘，极大地满足了读者了解自然现象的好奇之心。

今天，人类的生存面临着诸多交织在一起的环境因素。环境污染不仅直接影响了我们的生活质量，还关系到我们的蓝色星球何去何从，有些环境问题的严重程度已经迫在眉睫，人类是时候要采取紧急行动了。然而，在当今信息爆炸的时代，一些科普知识和概念存在着被滥用、泛化的现象，公众的环境保护认识还有很多模糊之处。究竟我们每天身处其中的自然环境是什么样的呢？

众所周知，空气和水是人类生存必不可少的两种流体，可是我们真的了解它们吗？我们周围时常发生的和空气与水有关的自然现象，如台风、龙卷风、海啸、洪水等自然灾害，常常带来严重的后果。那么，它们是怎么产生的？进一步发展的机制又是什么样呢？

本书配有大量的插图，每章都以点题的优美诗句为始。全书的逻辑层次分明，现象分析透彻，科学知识严谨，值得广大读者，特别是在校的各个年龄层的莘莘学子阅读。

在本书中译本出版之际，译者要特别感谢莫罗教授给了我一个将他的科普著作介绍给中国读者的机会，更借此感谢他十多年来的科研合作。他

的渊博学识和人格魅力深深地鼓舞和感染了我。感谢中国科学院科学传播局对本书翻译和出版工作的大力支持。由衷地感谢倪明玖教授和陶震博士两位合译者的通力合作。还要谢谢我的研究组的八位研究生对本书认真、细致的校对工作。最后，我要衷心地感谢科学出版社的牛玲、朱萍萍、邢晓晨编辑，没有他们极为负责的、艰苦卓绝的编辑工作，这本译著绝无可能摆到读者的案头。

限于译者的学识和外语水平，书中一定会有很多贻误和疏漏，敬请读者不吝批评指正。

王晓东

2016年5月17日

于中国科学院大学雁栖湖校区

致 谢

首先，我要感谢我的学生（包括我的博士生）和我的同事，在我的整个职业生涯中，正是他们寻求尽可能简单地解释从空气、水和其他所有流体介质中观察到的现象的问题和意见，引导我前进。也正是他们，使我认识到这些流体的行为是可以用日常语言描述的，也让我萌生了写这本书的想法。

我还要感谢审阅委员会的成员。他们提出了非常有建设性的建议，使得本书更为完善。

我也要感谢那些慷慨地提供或帮我获取显示壮观自然现象和伟大水利工程成就的大量照片和插图的摄影师以及公司和组织。感谢他们为使本书更为增色而做出的卓越贡献。

我特别感谢格勒诺布尔出版社的编辑团队，在让·博纳雷尔（Jean Bornarel）的领导下，本书得以付梓，考虑到插入的所有内容和众多的图片，这十分不易。特别是要感谢劳拉·卡波洛（Laura Capolo）、塞尔维·博达赫（Sylvie Bordage）、安妮-劳拉·帕萨旺（Anne-Laure Passavant）、安妮-克莱尔·勒孔特（Anne-Claire Lecomte）和爱丽丝·吉罗（Alice Giraud）在书籍出版和相关网站建设的这几个月中表现出的真正专业精神和耐心。

勒内·莫罗

目 录

序言	勒内·莫罗 i
致中国读者	勒内·莫罗 iii
译者序	王晓东 v
致谢	勒内·莫罗 vii
第一章 静态的大气	1
第一节 大气层的结构	1
第二节 大气的组成	7
第三节 大气中波的传播	13
第四节 大气层热力学	20
第五节 结论	25
第二章 大气流动	26
第一节 大尺度的大气环流	26
第二节 大气低压与气旋	36
第三节 大气中的周期性现象	48
第四节 结论	56
第三章 变幻莫测的大气	58
第一节 暴雨和龙卷风的形成与演化	58
第二节 暴雨的声光效应	67
第三节 降水	78
第四节 天气预报是如何实现的?	82

第五节 结论·····	84
第四章 飞机为什么比空气重还能飞起来? ·····	86
第一节 升力与阻力 ·····	87
第二节 飞机噪声是如何产生的? ·····	95
第三节 激波与声障 ·····	98
第四节 结论·····	101
第五章 风平浪静 ·····	102
第一节 静态的大海 ·····	102
第二节 声、光在海洋中的传播 ·····	112
第三节 舰艇的稳定性 ·····	114
第四节 全球范围内的洋流 ·····	117
第五节 结论·····	121
第六章 潮起潮落与翻江倒海·····	122
第一节 潮汐·····	122
第二节 厄尔尼诺现象 ·····	127
第三节 涌浪与海浪 ·····	129
第四节 结论·····	142
第七章 江河、溪流·····	143
第一节 大江大河的主要特征 ·····	143
第二节 弯曲和河曲（河套） ·····	154
第三节 瀑布·····	156
第四节 结论·····	158
第八章 湖泊、水库与大型水利工程·····	159
第一节 从沼泽地到水库发电 ·····	160

第二节	大型水坝的选址与生态平衡	165
第三节	江河的开发	170
第四节	水利发电站的一般结构	173
第五节	主要的港口设施	180
第六节	结论	184
附录	不稳定性与湍流	185
第一节	流动的突发性	186
第二节	界面剪切不稳定性或开尔文-亥姆霍兹不稳定性	191
第三节	其他形式的涡流	194
第四节	转捩	197
第五节	充分发展的湍流	200
第六节	结论	206
术语表		208
跋		225

第一章 静态的大气

空气中充满着想逃逸的、神奇的东西。

——查尔斯·波德莱尔，《巴黎画家》

地球是一个两极稍扁平的球体。它的平均半径约为 6370km，赤道周长近 4 万公里。地球被一种奇妙的混合气体——空气所组成的大气层包围着，人类与种类繁多的动植物生活在其中。我们呼吸着空气并穿行其间，我们的目光穿透其中，我们感受着天气的变幻莫测。这样的场景是如此的熟悉，我们的生命离不开空气，然而，我们真的很了解这样的大气层吗？几个世纪以来，随着对空间的不断探索，人类获得越来越精确的大气信息，直至今日，我们对大气层有了更好的了解，已能理解大气变化的主要原理和属性。为了对它有一个全面的认识，本章先从讨论静态的大气层开始。

第一节 大气层的结构

大气层的范围向上可延伸到两个区域：地磁层和非均质层，在这两个层中大气已经变得非常稀薄了，接近真空（见附栏 1.1）。地磁层是为地磁场的磁力线所包围的区域，可以保护地面生物不受太阳发出的宇宙射线的直接影响。由于会被太阳风^①吹变形而趋于太阳风的下游，地磁层的厚度随昼夜交替变化很大，白天背向太阳的一侧可达数千千米，而

① 太阳风是由太阳发出来的基本粒子流组成的，主要为质子和电子。较重的质子的能级是 100 keV~10 MeV。电子伏特（eV）不属于国际标准单位，但在基本粒子物理中被广泛使用（ $1\text{eV}=1.60217653\times10^{-19}\text{J}$ ，1 keV 表示 1000 电子伏特，1 MeV 表示 1 兆电子伏特）。极光是由极少数粒子穿越地磁层进入大气层中所引起的，它只出现在极地，那里的地磁场方向几近垂直于地面。

面向太阳的一侧却会收缩很多。在非均质层中，各种物质的浓度都变得极低，均小于它们在土壤中浓度的十万分之一。非均质层是外层空间与地球之间的过渡区域^①。这里，我们不进一步描述这一过渡区域的属性，而是将我们考察的区域限定为大气中密度更大、更接近于地面的部分，这个区域被称为均质层，厚度为 100km 左右。相对而言，均质层为我们所熟知，可通过飞机和气象气球等对其观测。

附栏 1.1 词源点滴

很多地球物理的概念需要在知道精确的希腊词汇和拉丁语根的基础上才能了解它的意义。例如，下面 3 个基础希腊词汇：*sphaira*（球），也可指非球形的闭合体；*genos*（希腊语意为“起源”），也衍化为“基因”的意思；动词 *skopein*（希腊语意为“观察”），该词广泛用于光学领域，取“观察”或“测量”之意。此外，以某些拉丁单词为前缀，可以知道一些希腊词汇的含义。例如，*Pausa*，拉丁语意为“停止”或“删除”。此外，还有与《homo》类似的 *homos*（希腊语意为“相似”），《hétéro》，希腊语 *heteros* 意为“其他”，《Macro》，希腊语 *makros* 意为“很大”，《Méso》，希腊语 *mesos* 意为“中间”，《Micro》，希腊语 *mikros* 意为“很小”，《tropo》，希腊语 *trepein* 意为“改变者”。两个前缀：《Magnéto》，希腊语写为 *Magnes*，意为“磁石”或“磁铁矿”；《Strato》，希腊语 *stratos* 意为“层”。大部分地球物理词汇均源于此，尤其是一些较晚定义的大气层词汇：地磁层（*magnétosphère*）、非均质层（*hétérosphère*）、均质层（*homosphère*）、中间层（*mésosphère*）、平流层（*stratosphères*）、对流层（*tropshpères*）、平流层顶（*stratopause*）和对流层顶（*tropopause*）。一些经常用到的词汇：宏观（*macroscopique*）、介观（*mésoscopique*）和微观（*microscopique*），使用范围已经超出了物理学范围。

如果把地球比喻成一个漂亮的苹果，均质层也就仅相当于数毫米厚的苹果皮！在均质层中的所有气体物质受地心引力的作用都紧紧地包围着陆地和海洋，根据主要物理属性的差异，均质层还可分成 3 个明显相互区别的亚层：最远的是中间层，它是到非均质层的过渡区域，靠近地

^① 关于地磁层和非均质层的介绍可参阅由让·立兰斯坦和让·博纳海合著的《太阳之火》一书，该书于 2001 年由格勒诺布尔科学出版社（EDP）出版。

面的是对流层，而平流层位于中间层与对流层之间。在日常用语中，大气层的基本概念相对比较模糊，要么是指对流层，要么是指整个均质层。图 1.1 示出了 3 个层内温度随高度增大的变化。根据物理机制的不同将均质层分为由平流层顶和对流层顶间隔的 3 个亚层。这里，我们不讨论常见于专业文献的细节，而是更多地关注各层的物理效应与机制。首先要指出的是，仅对流层的质量就占了大气层总质量的 80% 以上，这部分质量的一半所对应的海拔高度为 5500m。

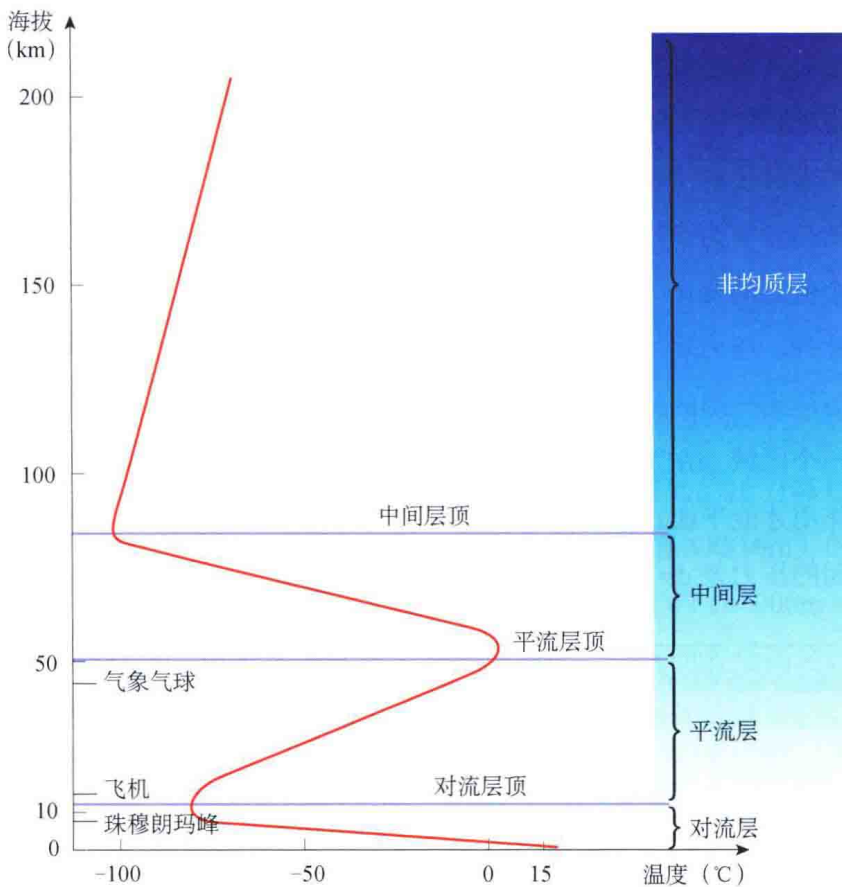


图 1.1 均质层（对流层、平流层和中间层）中温度随海拔变化的典型分布

对流层中的温降主要是由地表附近的传导和对流所决定的。平流层中的升温则源自于臭氧层吸收了太阳的紫外线辐射。在中间层中没有显著的加热效应，因此气温重新呈现随海拔升高而降低的规律

[© NASA]

对流层的特点是温度和压力都随海拔的升高而逐渐下降。海平面处的平均温度为 15°C ，平均压力为 1013hPa （或 mbar ），密度为 1.2 kg/m^3 ，是水的密度的 $1/800$ 。温度^①随海拔近似线性变化，即海拔每上升 1km 温度约下降 6.5°C 。到达对流层顶的温度为 -56°C ，这一温降可由对流层与地表之间的传导和对流传热进行很好的解释。这也意味着任何海拔处的空气温度都比下方低而比上方高，而比它上面空气的温度要高。地表的热量也源于穿过几近透明大气层的太阳辐射。更多的相关内容将在后面（第一章第四节大气层热力学）介绍。对流层也会吸收部分由地面反射来的红外辐射热，其余的热量则全部散失到了外层空间。温度在对流层中线性下降反映出了传导和对流在空气相对稠密的对流层中的传热机制，其平均温降为 $6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ，温降的差异反映了该区域内空气的热导率的显著变化，水蒸气饱和时潮湿空气的热导率为 $5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ，而干燥空气的热导率为 $9^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ，其余情形则在这两个值之间变化。

此外，压力随海拔升高而呈指数下降。这一属性是整个对流层在重力作用下达到平衡的结果，这易于从直观的表达式中导出。如图 1.2 所示，任取一个区域 $ABCD$ ，区域内的空气必然受到两个方向相反、大小相等的力的作用才能平衡。 $ABCD$ 区域内的空气受到的重力方向向下。 AB 和 CD 线之间的压力差 dp 产生向上的推力^②。显然， AB 线上的压力要大于 CD 线

① 上面的温度单位采用的是摄氏度 ($^{\circ}\text{C}$)，它是由瑞典天文学家安德斯·摄尔修斯(1701—1744) 提出的，因而以其名字命名。温度还可以用绝对温度（开氏温度）表示，开氏温度以威廉·汤姆森（1824—1907）即后来的开尔文勋爵命名。它的值要在摄氏温度的基础上加上 273.15 。在对流层中，温度是从地面处的 288K 随高度线性减少到 217K ，此时，温度相对变化量为 25% ，而周围的压力变化却达到了约 100% 。这就是为什么在对流层底部密度的变化可由压力的变化根据波义耳-马略特（Boyle-Mariotte）定律（ $p/\rho = \text{常数}$ ）直接导出。如果想获得更为精确的值，则要根据状态方程来计算，这在后面要讲到。

② 此例可帮助读者理解这一问题的重要特性，在一定条件下，通过一种非常普通而有力的物理解释方法来理解物理现象，该模型做了最大程度的简化，并力求避免简化过度而影响实际结果。实际上，在 $ABCD$ 区域内存在着大量的、快速的、无序的分子运动，物质并不处于平衡状态。虽然如此，该模型仍可将该部分介质从周围环境中分离出来讨论，从而可以很好地认识其宏观行为：压力衰减呈指数变化。这一观点以及受限条件等的讨论可参见由劳伦斯·微亚诺所著的《物理，如何理解它》一书，该书由格勒诺布尔科学出版社于 2001 年出版。