

Mass Transfer in Built Environment

建筑环境传质学

张寅平 张立志 刘晓华 莫金汉 著

中国建筑工业出版社

建筑环境传质学

张寅平 张立志 刘晓华 莫金汉 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑环境传质学/张寅平等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2006
ISBN 7-112-08286-2

I. 建... II. 张... III. 建筑物-室内空气-传质学 IV. TU111.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 038536 号

建筑环境传质学

张寅平 张立志 刘晓华 莫金汉 著

*

中国建筑工业出版社出版 (北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787 × 1092 毫米 1/16 印张: 25 $\frac{1}{4}$ 字数: 610 千字

2006 年 8 月第一版 2006 年 8 月第一次印刷

印数: 1—2,500 册 定价: 40.00 元

ISBN 7-112-08286-2

(14240)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.cabp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

《建筑环境传质学》是介绍建筑环境（室内热湿环境和室内空气品质）领域传质原理及其应用的学术专著，内容分为绪论、基础篇和应用篇，共 14 章。第 1 章绪论中主要阐述了室内环境中传质学原理和应用的重要性；基础篇根据传质特征分 6 章系统地介绍了传质学的基本原理：扩散传质，对流传质，吸附原理，吸收原理，多孔介质和膜的扩散传质，热量和质量的同时传递；应用篇分 7 章介绍了室内环境领域传质学应用情况，着重介绍了作者近年来的科研成果，内容为：水-空气热湿交换，吸附除湿和应用，吸收除湿和应用，建筑中的湿传递，室内挥发性有机化合物散发特性，室内空气化学污染净化和其他专题。本书的特点是：（1）注重物理概念、基本原理的介绍；（2）注重从实际应用中提炼建筑环境传质问题；（3）注重利用数学方法深入、简明地描述和解决传质问题；（4）注重融入建筑环境传质及相关领域的最新研究成果（包括作者自身的研究成果）；（5）注重章节编排的逻辑性和系统性。本书可作为建筑环境与设备工程专业课“热质交换原理和设备”的教学参考书，也可供工程热物理、暖通空调工程、化学工程、环境工程领域的研究和设计人员参考。

* * *

责任编辑：齐庆梅

责任设计：董建平

责任校对：张景秋 张 虹

序

一般说来,人们 80% 以上的时间在建筑环境中度过。室内空气环境对人们的舒适、健康和工作效率有着十分重要的影响。

我认为现代室内空气环境从研究内容上可分为以下两方面:(1) 人与室内环境的关系及室内环境特性——重点研究人需要什么样的室内环境,以及不同的建筑与围护结构形式将产生什么样的室内环境;(2) 室内环境控制原理和技术。前者属认识世界的范畴,后者属改造世界的范畴。无论从认识世界层次还是改造世界层次,室内空气环境涉及的主要独立参数都为四“度”:温度、湿度、浓度、速度。建筑环境学介绍了这四“度”与人的关系问题,传热传质学、流体力学、工程热力学,则构成了建筑环境四“度”分析的专业知识基础,在这基础上,又由若干课程构建了建筑环境科学和工程的主要专业平台。

在室内空气环境参数的四“度”中,湿度、浓度、速度与传质直接相关,即使对于温度,也和传质有着紧密联系——传统空调的冷凝除湿法就是典型的例子。近年来建筑环境领域的许多热点研究方向也与传质密切相关,譬如空气温度、湿度独立控制问题,室内空气品质问题等。传统涉及室内空气环境控制的教科书中,没有系统地介绍传热传质的基本原理及其在室内空气环境中的应用;大量的传热传质教科书中介绍的传质理论和应用实例又多局限于化工中的传质问题,忽略了与我们生活和工作息息相关的室内环境中的传质问题。因此,建筑环境领域的研究人员或工程师解决涉及室内环境传质问题时往往力不从心。为此,清华大学 1997 年开设了“热质交换原理和设备”课程,由许为全教授主讲,当时张寅平同志刚刚从中国科学技术大学调入我校,他一方面参加了课程学习,一方面着手准备本课程的教学,从 1998 年开始,他主讲了“热质交换原理和应用”课程至今,8 年中他两次编写了课程讲义,2001 年他参加了高校建筑环境与设备工程专业指导委员会规划推荐教材《热质交换原理和设备》(连之伟主编)的编写工作。

1997 年以来,我们研究所开展了大量建筑环境传质问题研究,承担了一些国家级和省部级科研课题,内容涉及:膜法除湿,吸附除湿,溶液调湿式空调技术和系统研发,室内有机化学污染源散发特性、传播规律和空气净化新机理和新方法研究,传质强化,冷却塔和喷水室的热质交换性能分析等,本书的几位作者都先后作为相关研究工作的主要承担者或研究骨干。近 10 年来,他们与合作者在国内外重要学术期刊上发表论文百余篇,其中被 SCJ 摘引的国际期刊论文 50 余篇,申报专利 20 余项。这些科研工作成为他们撰写本书的基础。

作为一部专著,该书的特点正如作者在前言中所说,在于“(1) 注重物理概念、基本原理的介绍;(2) 注重从实际需求中提炼建筑环境传质问题;(3) 注重利用数学方法深入、简明地描述和解决传质问题;(4) 有机融入作者自身及其合作伙伴的研究成果;(5) 注重章节编排的逻辑性和系统性。”可以说,本书是作者近 10 年来在建筑环境传质领域科研和教学的结晶之作,相信会对我国室内空气环境及相关领域的研究者有一定的帮助。



2006 年 7 月

前 言

广义的建筑环境除人们通常理解的建筑环境外，还包括车、船、飞机等内部环境。统计结果表明，人的一生 90% 左右的时间在建筑环境中度过，因此，建筑环境对于人们的舒适、健康和工作效率有着至关重要的影响。

建筑环境可分为：室内空气环境 (Indoor air) (包括室内热湿环境即 Indoor climate、室内空气品质即 Indoor air quality)、建筑光环境、建筑声环境等。传统室内空气环境控制对象主要为室内的热湿环境，具体来说为室内空气温度和湿度，这一过程当中涉及大量传质问题。譬如：具有除湿功能的表冷器的热工计算，建筑湿负荷的确定，喷水室或冷却塔热湿性能计算、吸附或吸收式空气热湿处理问题等。随着人们生活水平的不断提高，可以毫不夸张地说，城市大部分建筑空间都会涉及空气热湿控制问题。值得一提的是，近年来由于多种原因造成世界上许多国家室内空气品质下降。据报道，美国每年因室内空气品质低劣造成的直接经济损失高达 400 亿美元以上，全世界每年有 2400 万人的死亡与室内空气污染有关；近年来我国每年由室内空气污染引起的死亡人数达 11 万之多，每年因室内环境污染危害健康导致的经济损失约千亿人民币，因此，室内空气品质改善和控制成为许多国家政府、研究人员和百姓普遍关注的问题。室内空气品质改善和控制中也存在大量的传质问题，譬如：建材中有机挥发物的散发规律，室内有机挥发物的传播规律，室内空气中有机化学污染物的净化问题。传质是物质在浓度势驱动下在空间上转移、传递的动力学过程，具体在建筑环境中反映了热、湿、空气品质在不同浓度势之间迁移和变化的特征。传质是建筑环境中普遍存在的现象之一，现代建筑空气环境研究的五大对象：空气温度、湿度、室内空气品质（成分和浓度）、气流组织（气流速度、温度、浓度及其分布）、建筑空调和采暖能耗大多和传质有直接或间接的关系。因此，建筑环境传质学是认识和控制建筑环境的重要应用基础科学之一。

大学建筑环境相关专业中（如暖通空调、制冷、工程热物理、建筑物理、环境工程、化学工程等），传热学讲授较多，传质学讲授很少，而且大多数传质学教材或专著，其内容也基本局限于化工领域，从而使得建筑环境领域的研究人员或工程师解决涉及室内环境传质问题时往往力不从心，甚至无从下手。为此，2000 年以来，全国“建筑环境与设备工程专业教学指导委员会”建议在全国该专业本科生中开设“热质交换原理和设备”专业骨干课，补充和强化传质学部分的教学，取得了较好的效果。但由于全国具有建筑环境与设备工程专业的学校逾百所，教学要求和学生水平很不一致，作为统编教材，《热质交换原理和设备》难以深入地介绍一些难度较大的建筑环境传质学的内容。因此，仅通过《热质交换原理和设备》教材的学习，仍很难透彻解决建筑环境领域一些较为复杂的传质问题，如何解决上述矛盾，是笔者近年来教学和科研中经常思考的问题。

与此同时，本书的几位作者开展了大量建筑环境传质问题的研究，了解了国内外该领域的最新研究动态，承担了一些国家级和省部级科研课题，内容涉及：膜法除湿，吸附除

湿,吸收式空调技术和系统研发,室内有机化学污染物散发特性、传播规律和空气净化新技术和新方法研究,传质强化,冷却塔和喷水室的热质交换性能分析等,在国内外重要学术期刊上发表论文百余篇,其中被SCI摘引的国际期刊论文50余篇,申报专利20余项。这些科研经历、体会和成果为本书的撰写提供了很好的素材和基础。

结合教学和科研,我们认为有必要深入、系统地介绍建筑环境传质学的基础知识,并针对建筑环境传质方面的社会需求和科研热点,将我们了解到的最新科研成果(包括我们自身的科研成果)介绍给读者。为此,我们撰写了这本介绍建筑环境领域传质原理及应用的学术专著。它分为绪论、基础篇和应用篇三大部分。绪论中主要阐述了建筑环境传质学在建筑环境控制中的重要性;基础篇主要介绍建筑环境传质学的基本原理、基本知识和常用分析方法,旨在引导读者“利其器”——夯实基础;应用篇着重介绍建筑环境领域一些典型传质应用问题的分析和求解,重在启发读者“善其事”——学以致用,使读者掌握在建筑环境领域发现、归纳、描述和解决传质科学问题的能力。此外,本书还列出了大量习题,供读者研习,较难的习题,用*标注。

全书分工如下:张寅平撰写了第1至4章,第7章,第8.1和8.2节,第12章;张立志撰写了第6章,第9章,第11章,第14.1、14.2节;刘晓华撰写了第5章,第8.3、8.4节,第10章;莫金汉撰写了第13章;钱科撰写了第14.3节。全书由张寅平统稿。付梓前,张立志、刘晓华又通览了全书。

撰写过程中,作者力求做到:(1)注重物理概念、基本原理的介绍;(2)注重从实际需求中提炼建筑环境传质问题;(3)注重利用数学方法深入、简明地描述和解决传质问题;(4)有机融入作者自身及其合作伙伴的研究成果;(5)注重章节编排的逻辑性和系统性。

在本书编写过程中,得到了许多同志的鼓励、帮助和支持。1998年以来,第一作者每年在清华大学讲授“热质交换原理和设备”课程,本书的一些内容源自该课程自编讲义,对当初讲义的提纲和本书的名称江亿院士提出了很好的建议,本书中介绍的许多研究是在他的大力倡导和支持下开展的,同时他也是一些项目的负责人(见附录10);朱颖心教授审校了当时的讲义;赵荣义教授审阅了本书的目录、前言和绪论,并提出了中肯的修改意见。书中介绍的许多研究成果系作者与合作者(包括第一、二作者的研究生)共同完成的,他们的名字和贡献详见本书附录10-作者相关项目、论著和专利目录。中国建筑工业出版社齐庆梅编辑对本书的出版提供了多方面的帮助;杨瑞博士、成通宝博士、王新珂博士生、谢晓云博士生提供了有价值的参考资料;姚远博士生做了大量的录入、校对和修改工作。“热质交换原理和设备”教学过程中,本科生、研究生提出的问题和对讲义的修改建议也为本书的编写提供了帮助。在此一并致谢。

由于作者水平和学识有限,虽做了很大努力,但仍难免有不妥之处,恳请读者批评指正,不仅对我们是一种帮助,而且有利于本书在今后的修订过程中不断充实、提高。

本书可供建筑环境、暖通空调、工程热物理、环境工程、化学工程领域的研究人员和工程技术人员参考,也可作为建筑环境与设备工程专业课“热质交换原理和设备”的教学参考书,还可供从事学科交叉领域研究、需要补充建筑环境传质学知识的研究者和专业技术人员参考。

目 录

主要符号表	1
第 1 章 绪论	3
1.1 学习建筑环境传质学的重要性和必要性	3
1.2 建筑环境传质学的特点	4
1.3 本书撰写目的和背景	5
1.4 本书的特点	5
1.5 学习建筑环境传质学的方法	6
习题	7
参考文献	7

基 础 篇

第 2 章 扩散传质	11
2.1 扩散传质现象和基本概念	11
2.2 菲克扩散定律	14
2.3 扩散系数	16
2.4 热扩散和其他形式的扩散	19
2.5 质量守恒及组分扩散方程	21
2.6 边界条件和初始条件	23
2.7 扩散传质问题分析	25
习题	38
参考文献	43
第 3 章 对流传质	44
3.1 对流传质问题	44
3.2 浓度边界层	46
3.3 边界层的重要意义	48
3.4 对流传质方程	48
3.5 近似和特殊条件	50
3.6 传热传质的无量纲关系式	51
3.7 边界层类比	54
3.8 对流传热、传质的常用经验公式	60
3.9 对流传热和传质强化的再认识	67
习题	70

参考文献	73
第 4 章 吸附和吸附相际传质	75
4.1 吸附的基本知识和概念	75
4.2 吸附等温线及常用公式	80
4.3 多组分竞争吸附	88
4.4 吸附传质	88
习题	90
参考文献	90
第 5 章 吸收和吸收相际传质	92
5.1 吸收的基本知识和概念	92
5.2 相律	92
5.3 拉乌尔定律	93
5.4 亨利定律	99
5.5 双膜理论	102
习题	108
参考文献	109
第 6 章 多孔介质和膜中的扩散传质	110
6.1 多孔介质基本结构参数	110
6.2 多孔介质内的扩散传质	111
6.3 多组分扩散-尘气模型	115
6.4 多孔介质中的粘性流动	118
6.5 膜中的扩散传质	121
6.6 膜的传质机理	124
习题	128
参考文献	128
第 7 章 热量和质量的同时传递	129
7.1 薄膜热质交换模型	129
7.2 刘易斯关系	130
7.3 表面上传质对传热的影响	132
7.4 湿球温度测量	135
7.5 人体皮肤散热分析	137
习题	143
参考文献	143

应 用 篇

第 8 章 水-空气热湿交换系统	147
-------------------------------	------------

8.1	表冷器热湿交换性能计算	147
8.2	水-空气直接接触系统全热交换模型和性能分析	159
8.3	夏季干燥地区直接蒸发冷却空调系统传质分析	164
8.4	夏季干燥地区间接蒸发冷却空调系统传质分析	167
	习题	171
	参考文献	172
第 9 章	吸附除湿和应用	173
9.1	吸附除湿的原理和特点	173
9.2	常用吸湿剂	178
9.3	固体吸附床除湿	180
9.4	转轮除湿	185
9.5	膜法全热回收中的热湿传递	200
	习题	214
	参考文献	214
第 10 章	吸收除湿和应用	216
10.1	吸收除湿的原理与特点	216
10.2	液体吸湿剂的类型与性能	218
10.3	液体吸湿剂的传热传质过程	222
10.4	吸收式空气除湿/再生单元模块的性能	236
10.5	溶液全热回收器的传热传质分析	240
10.6	典型的除湿/再生装置的传热传质性能分析	243
10.7	溶液除湿系统和应用简介	246
	习题	248
	参考文献	249
第 11 章	建筑中的湿传递	251
11.1	空调房间湿负荷	251
11.2	送风状态与送风量	255
11.3	建筑中湿传递的数值模型	256
11.4	用含盐吸水性树脂调节室内湿度	259
	习题	266
	参考文献	266
第 12 章	室内挥发性有机化合物散发特性	268
12.1	室内挥发性有机物散发问题	268
12.2	室内干建材挥发性有机物散发解析模型及传质分析	269
12.3	室内干建材挥发性有机物散发特性的无量纲分析	284
12.4	一种干建材散发特性的测定新方法-C-history 法	289

习题	297
参考文献	297
第 13 章 室内空气化学污染净化原理和应用	300
13.1 室内空气中化学污染净化	300
13.2 吸附净化室内化学污染	303
13.3 纳米光催化降解 VOCs	309
13.4 空间流动影响因子及其在室内空气化学污染控制中的应用	328
习题	337
参考文献	338
第 14 章 其他专题	342
14.1 FLEC 传质分析及应用	342
14.2 利用 FLCE 测膜层扩散系数	350
14.3 逸度在建筑环境传质中的应用	363
习题	370
参考文献	370
附录	373
附录 1 二元系的扩散系数	373
附录 2 根据伦纳德-琼斯势函数确定 Ω_D 值	374
附录 3 由黏度数据确定的伦纳德-琼斯势参数 σ 和 ϵ/k	374
附录 4 中等压力下一些气体对水的亨利常数	375
附录 5 一些气体在固体中的溶解度	375
附录 6 常压下气体热物性表	376
附录 7 一些饱和液体热物性表	379
附录 8 饱和水蒸气热物性表	380
附录 9 误差函数或概率积分值	383
附录 10 作者相关科研项目、论著、论文和专利目录	384

主要符号表

A	面积, m^2
a	吸附单层中一个分子所占的面积, m^2
b	吸附平衡常数, Pa^{-1}
c_p	比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
C	浓度, kmol/m^3 或 mol/m^3
D	扩散系数, m^2/s
d	直径, m ; 含湿量, kg 水蒸气/ kg 干空气
d_0	平均孔径, m
E	活化能, kJ/kmol
f	逸度, Pa ; 阻力系数
G	空气质量流量, kg/s
H	亨利常数, Pa^{-1}
H^*	热湿比
h	对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
h_m	对流传质系数, m/s
i	焓, J/kg 干空气
k	导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
K	分离系数; Langmuir 吸附平衡常数
l	膜厚度, m
$\dot{m}$	污染物产生速率, mg/m^3
$\dot{m}_A$	组分 A 的传质速率, kg/s
M	质量, kg ; 分子量, kg/kmol
$\dot{n}_A$	组分 A 的质量产生率, $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^3)$
N	扩散通量, $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
p	压力, Pa
p_{sat}	水蒸气的饱和压力, Pa
Pe	透过度, Barrer
q	热流密度, W/m^2 ; 吸附热, kJ/kg ; 水蒸气汽化潜热, kJ/kg
q_m	吸附剂表面饱和吸附量, 又称单分子层吸附容量, g 吸附质/ g 吸附剂
Q	能量, J ; 热负荷, kW ; 风量, m^3/h
R	孔半径, m ; 普适气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
s	溶解度, kmol/m^3 固体 (或液体) $\cdot \text{bar}$
t	时间, s
T	温度, K 或 $^\circ\text{C}$
u	x 方向速度, m/s
v	y 方向速度, m/s
V	体积, m^3
w	瞬时吸附量, kg/kg ; 吸附剂含水量, kg/kg
W	平衡吸附量, kg/kg ; 散湿量, kg/s
x_i	组分 i 的摩尔分数

z 长度, m
 Z_i 组分的电荷数, C (库仑)

希腊字母

σ 波尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
 ω 溶质透过度, $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$
 γ 表面张力, 达因; 活度系数; 热阻, $\text{m}^2 \text{ K}/\text{kW}$; 湿阻, $\text{m}^2 \text{ s}/\text{kg}$
 ϵ 孔隙率; 有效度或交换效率
 ξ 溶液质量浓度, %
 λ 分子平均自由程, m
 ρ 密度, kg/m^3
 Ω 比表面积, m^2/g
 Φ 电场强度, V/m (伏/米)
 α 黏性选择因子; 凝聚系数; 角度坐标, rad
 β 总传湿系数与总传热系数之比; 集群系数
 ν 运动黏度, m^2/s
 η 表面换热强化度; 效率; 反应有效度
 θ 表面覆盖度; 无量纲时间
 μ 动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; 化学势, kJ/kmol
 τ 曲折因子; 吸附时间
 Π 渗透压, Pa
 Γ 吸附量, mol 吸附质/g 吸附剂
 ϕ 相对湿度
 δ 厚度, m
 π 圆周率, 3.14

准则数

Bi 传热 Biot 数
 Bi_m 传质 Biot 数
Da 德沃克数
 Fo_m 传质傅立叶数
Kn 努森数
Le 刘易斯数
Nu 努塞尔数
Pr 普朗特数
Re 雷诺数
Sc 施密特数
Sh 舍伍德数
St 传热斯坦顿数
 St_m 传质斯坦顿数

下 标

ms 固体材料-空气界面材料侧
s 固体材料-空气界面空气侧
sat 饱和

第 1 章 绪 论

介绍了学习建筑环境传质学的重要性与必要性、建筑环境传质学的特点、本书撰写的目的与背景、本书的特点、适用对象和学习建筑环境传质学的方法。

1.1 学习建筑环境传质学的重要性和必要性

人的一生 90% 左右的时间在建筑环境（这里指的是广义建筑环境-内部空间环境，包括车、船、飞机等内部环境）中度过^[1]，因此，建筑环境对于人们的舒适、健康和工作效率至关重要。

建筑环境可分为：室内空气环境（Indoor air）（包括室内热湿环境（Indoor climate）和室内空气品质（Indoor air quality））、建筑光环境、建筑声环境等。传统室内空气环境控制对象主要为室内空气温度和湿度，其中涉及大量的传热和传质问题。纯粹的传热问题，传热学中做了详细的介绍。在室内空气环境领域，还存在大量传质问题。譬如：具有除湿功能的表冷器的热工计算，建筑湿负荷的确定，喷水室或冷却塔热湿性能计算、吸附或吸收式空气热湿处理问题等。室内环境领域涉及传质的设备有：表冷器、喷水室、冷却塔、全热交换器、加湿器和空气净化器等^[2~4]。

实际上，暖通空调领域中涉及空气湿度调节和潜热负荷的问题一定涉及传质。随着人们生活水平的不断提高，采用暖通空调的建筑空间面积不断增长，不夸张地说，城市大部分建筑空间都会涉及空气热湿控制问题，从而涉及传质问题。因此，建筑环境中的湿度传递和控制是建筑环境传质学的重要内容。

但建筑环境传质学不局限于建筑环境中湿度的传递和控制。近年来，室内空气品质越来越受关注，人们已经认识到，室内空气品质不仅影响人的舒适和健康，而且对室内人员的工作效率有显著影响^[5]。现代建筑室内空气品质恶化，引发了以下三种病症：病态建筑综合症（SBS），建筑相关疾病（BRI），多种化学污染物过敏症（MCS）。造成近年来室内空气品质出现问题的主要原因如下：（1）强调节能导致的建筑密闭性增强和新风量减少：20 世纪 70 年代的能源危机后建筑节能在许多国家普遍受到重视，作为建筑节能的有效手段，很多建筑物密闭性增强，新风供给量减少，以降低空调负荷，而新建的大量大型建筑及其配套空调系统普遍采用此策略；（2）新型合成材料在现代建筑中大量应用：一些合成材料由于价格低廉、性能优越作为建筑材料和建筑装饰材料广泛获得应用，但其中一些会散发对人体有害的气体，如有机挥发物；（3）散发有害气体的电器产品的大量使用：随着电子技术的发展，一些电器产品在办公室和家庭日益普及，其中如复印机、打印机、计算机等会散发有害气体如臭氧、有机挥发物等，造成室内空气品质的下降；（4）传统集中空调系统的固有缺点以及系统设计和运行管理的不合理：传统集中空调冷凝除湿的方式，使空调箱和风机盘管系统往往成为霉菌的滋生地，过滤网不及时清洗或更换和新风口

设计不合理等也常是造成室内空气品质低劣的原因；(5) 厨房和卫生间气流组织不合理：厨房和卫生间是特殊的生活空间，由于对这一空间的特殊性缺乏足够的认识，在气流组织上缺乏很好的应对措施，不仅造成这一特殊空间室内空气品质低劣，而且影响了普通生活或工作空间的室内空气品质；(6) 室外空气污染：世界上一些国家室外空气环境恶化，我国这一问题尤其突出，如燃煤发电和采暖等过程中往往导致 SO_x 、 NO_x 及颗粒污染物的大量排放，城市大量汽车尾气的排放降低了室外空气品质。

据美国环境保护署 (EPA) 统计，美国每年因室内空气品质低劣造成的直接经济损失高达 400 亿美元^[5]，EPA1989 年给美国国会关于室内空气品质风险评价的报告中指出：“室内空气污染是对人口造成最大危害的环境问题之一^[6,7]”。改善室内环境会提高人们的健康水平和劳动生产率，就美国而言，由此带来的经济受益为 400~2000 亿美元^[8]；近年来我国每年由室内空气污染引起的死亡人数达 11 万之多，与每年交通事故造成的死亡人数相当，每年因室内环境污染危害健康导致的经济损失约千亿元人民币^[9]。因此，室内空气品质改善和控制成为许多国家政府、研究人员和百姓普遍关注的问题。室内空气品质领域中存在大量的传质问题，譬如：确定建材中有机挥发物的散发规律^[10~20]，室内污染物的传播规律研究^[21~25]，室内空气中有机化学污染物的净化原理、方法研究和设备研发等^[26~31]。室内空气污染物散发、传递和控制正在成为建筑环境传质学的重要研究内容。

传质是物质在浓度势驱动下在空间上转移、传递的动力学过程，具体在建筑环境中反映了热、湿、空气组分或所含其他成分在不同浓度势之间迁移和变化的特征。传质是建筑环境中普遍存在的现象之一，现代建筑空气环境研究的五大对象：空气温度、湿度、室内空气品质（成分和浓度）、气流组织（气流速度、温度、浓度及其分布）及建筑空调和采暖能耗大多和传质有直接或间接的关系。因此，建筑环境传质学是认识和控制建筑环境的重要应用基础科学之一。

1.2 建筑环境传质学的特点

(1) 它涉及几乎所有传质学的机理问题。建筑环境中的传质问题涉及范围很广，解决这些问题几乎涉及传质学的全部内容：扩散传质问题，对流传质问题，多孔介质传质问题，吸附和吸收问题，等等。

(2) 传质学和传热学存在紧密联系。一方面，传热学和传质学在很多方面存在相似性。譬如，分子热运动和碰撞是产生热传导的原因。同样，分子热运动和碰撞引起分子扩散，是造成不同组分的分子扩散传质的原因。因为两者存在本质的联系，因此描述两者的物理定律-傅立叶热传导定律和菲克扩散传质定律形式上也很相似。同理，对流传热方程和对流传质方程形式上也很相似，这种对流传热和传质本质上的相似性导致大量的对流传热方程的经验公式可很方便地改写为相应情况的对流传质经验公式。另一方面，在很多情况下传热和传质是同时发生的，人们为了认识的方便，采用隔离、抽象、简化的方法，将传热和传质彼此独立出来，分别形成了传热学和传质学，即使在传热传质学的教科书中，传热和传质也是联系颇少、分别介绍。而实际问题中，两者往往同时出现，不可分割。

(3) 它以建筑环境领域为对象，解决其中涉及到传质的相关问题。建筑环境传质学顾名思义，解决的是建筑环境中的传质问题。与普通传质学相比，它的涉及范围更集中、更

有针对性,从而更便于学习和掌握。一般说来,空气中的水蒸气尤其是污染物的浓度较低,因此,其浓度场一般不会对流场有显著影响。不仅如此,室内环境传质学中还较少涉及化学反应问题。

1.3 本书撰写目的和背景

大学建筑环境相关专业中(如暖通空调、制冷、工程热物理、建筑物理等),传热学讲授较多,传质学讲授很少,而且大多传质学教材或专著,其内容也较少涉及建筑环境的传质问题^[32~38],因此,面对大量涉及传质的建筑环境控制问题,许多人往往感到力不从心,甚至无从下手。

为此,2000 以来,全国“建筑环境与设备工程专业教学指导委员会”建议在全国该专业本科生中开设“热质交换原理和设备”专业骨干课,补充和强化传质学部分的教学,取得了较好的效果。但由于全国具有建筑环境与设备工程专业的学校逾百所,教学要求和学生水平不一致,作为统编教材,《热质交换原理和设备》难以深入地介绍一些难度较大的建筑环境传质学的内容。因此,仅通过《热质交换原理和设备》教材的学习,仍很难解决一些建筑环境领域复杂的传质问题。如何解决上述矛盾,是笔者近年教学和科研中经常思考的问题。

与此同时,本书的几位作者开展了大量建筑环境传质问题的研究,了解了国内外该领域的研究动态,承担了一些国家级和省部级科研课题,内容涉及:膜法除湿,吸附除湿,吸收式空调技术和系统研发,室内有机化学污染源散发特性、传播规律和空气净化新机理和新方法研究,传质强化,冷却塔和喷水室的热质交换性能分析等,在国内外重要学术期刊上发表论文近百篇,其中 SCI 摘引的国际期刊论文 50 余篇,申报专利 20 余项(详见附录 10)。这些科研经历、体会和成果为建筑环境传质学的教学提供了很好的素材和基础。

结合教学和科研,我们认为有必要深入、系统地介绍建筑环境传质学的基础知识,并针对建筑环境传质方面的社会需求和科研热点,将我们了解到的最新科研成果(包括我们自身的科研成果)介绍给读者。为此,撰写了这本介绍建筑环境(建筑热湿环境和室内空气品质)领域传质原理及应用的学术专著。本书的主要内容在清华大学“热质交换原理和应用”课程中曾多次讲授。

1.4 本书的特点

本书在写作上力求做到以下几点:(1)注重物理概念、基本原理的介绍;(2)注重从实际需求中提炼建筑环境传质问题;(3)注重章节编排的逻辑性和系统性;(4)注重利用数学方法深入、简明地描述和解决传质问题;(5)注意介绍建筑环境传质领域国内外最新研究成果;(6)有机融入作者自身及其合作伙伴的研究成果。

本书内容分为绪论、基础篇和应用篇。绪论中主要阐述建筑环境传质学在建筑环境控制中的重要性;基础篇主要介绍建筑环境传质学的基本原理、基本知识和常用分析方法,旨在引导读者“利其器”——夯实基础;应用篇着重介绍建筑环境领域一些典型传质问题的分析和求解,重在启发读者“善其事”——学以致用。书后有附录供读者参考。此外,本

书还列出了大量习题，供读者研习。值得一提的是，其中一些习题系作者自己编撰，具有一定的开放性和研究性，且答案未必惟一，甚至没有现成答案。

1.5 学习建筑环境传质学的方法

根据建筑环境传质学的特点，我们认为在建筑环境传质学的学习中要注意以下几点：

- (1) 注意理解和掌握建筑环境传质学的基本概念和基本原理；
- (2) 利用传热和传质的相似性以及已掌握的传热学知识，学习建筑环境传质学的基本原理和解决问题的方法；
- (3) 善于从书本中学习，对习题透彻理解、深入解析并能举一反三；
- (4) 做有心人，善于从实际问题中提炼建筑环境传质问题；
- (5) 注意提高数学素养，在可能的情况下尽量利用数学方法深入、简明地描述和解决传质问题；
- (6) 建筑环境传质领域涉及的面较广，需要善于学习相关领域的知识，并灵活运用；
- (7) 勤于利用所学知识，解决书本上、文献中尤其是生活和实践中的建筑环境传质学问题；
- (8) 善于和同行、同事、同学研讨和交流并互相学习；
- (9) 注意了解建筑环境传质领域国内外最新研究成果和动态。

关于 (9)，现在有很多方法，譬如通过网络上的 Science Citation Index Extended on Web of Science (科学引用索引，简称 SCI)、Engineering Index (工程索引，简称 EI) 和中国期刊网，用关键词检索，可方便、快捷地查询有关论文全文或相关信息。此外，以下期刊可经常浏览，上面会刊载有关建筑环境传质方面的论文：

- Atmospheric Environment
- Building and Environment
- Environment Science and Technology
- Energy and Buildings
- Heat and Mass Transfer
- HVAC & R Research
- Indoor Air
- Indoor and Built Environment
- International Journal of Heat and Mass Transfer
- Journal of Air & Waste Management Association
- Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology
- Separation and Purification Methods
- 工程热物理学报
- 暖通空调
- 化工学报
- 环境科学
- 中国环境科学