

新能源学科前沿丛书之一

邱国玉 主编



水与能:

陆地蒸散发、热环境及其能量收支

邱国玉 熊育久 等 著

Water versus Energy:

Evapotranspiration, Thermal Environment and
Energy Budget



科学出版社

新能源前沿丛书之一

邱国玉 主编

水与能：蒸散发、热环境 及其能量收支

**Water versus Energy: Evapotranspiration,
Thermal Environment and Energy Budget**

邱国玉 熊育久 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

水资源和能源都是极其贵重的紧缺资源,关注水输送、水分配、水处理过程中的能源消耗是实现低碳发展的关键之一。长期以来,水与能源这种复杂而微妙的关系并未引起社会的足够关注。针对这些挑战,本书将从水与能的关系,蒸散发、水分收支和能量收支,蒸散发观测方法、原理及其应用,蒸散发、水循环和城市热环境等四个方面,详细介绍相关的理论基础、观测方法和应用实例。本书涉及环境、能源、城市、水资源等多个学科,是典型的跨学科著作。

本书作为环境、能源相关学科大学高年级学生、研究生的专业教材,也供对环境、能源问题感兴趣的读者参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

水与能:蒸散发、热环境及其能量收支/邱国玉,熊育久著. —北京:科学出版社, 2014. 6

(新能源前沿丛书; 1)

ISBN 978-7-03-041139-6

I. ①水… II. ①邱… ②熊… III. ①环境水文学—研究 IV. ①X143

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 127635 号

责任编辑:李 敏 刘 超 / 责任校对:桂伟利

责任印制:赵德静 / 封面设计:无极书装

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>

骏杰印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



*

2014 年 6 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2014 年 6 月第一次印刷 印张: 11

字数: 200 000

定价: 50.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

致 谢

本书在实验、资料收集、数据解析、案例研究和出版等方面得到深圳市发展和改革委员会新能源学科建设扶持计划“能源高效利用与清洁能源工程”项目的资助，深表谢意。

作者简介

邱国玉 北京大学教授、博士生导师

1963年出生于内蒙古阿拉善。1984年获农学学士学位（内蒙古农业大学）；1987年获理学硕士学位（中国科学院）；1996年在日本鸟取大学干燥地研究中心获农学博士学位；2002~2003年为美国加利福尼亚大学戴维斯分校博士后。

1987~1992年任中国科学院研究实习员、助理研究员。1996~1999年任日本国立农业工学研究所研究员。1999~2009年先后任日本国立环境研究所研究员、日本鸟取大学客座副教授、日本东京大学客座教授、北京师范大学教授等。2009年开始任北京大学环境与能源学院教授，担任过副院长、常务副院长等职务。已经指导博士后、博士研究生和硕士研究生多人。主要从事新能源信息工程、城市水资源与水环境、环境与能源生态方面的教学与研究。在国内外主要学术刊物上发表研究论文100多篇。主持和承担包括“973”项目、国家基金项目在内的研究课题多项。讲授“环境与能源生态学”、“城市水资源与水环境学”、“生态水文学”等课程。

熊育久 博士，中山大学教师

1982年出生于贵州省麻江县。2003年毕业于中南林学院林学专业，获农学学士学位；2006年在中南林业科技大学获得农学硕士学位；2009年在北京师范大学获得理学博士学位。2009~2011年为中山大学博士后。2011年开始，在中山大学水资源与环境系从事教学与科研工作。

主要研究领域为陆地蒸散发遥感估算，包括森林资源遥感监测、生态水文过程、水质遥感等。目前主持国家自然科学基金（青年）1项、教育部高等学校博士学科点专项科研基金1项，主持完成中国博士后科学基金1项，多次参与国家自然科学基金（面上）、国家基础研究计划“973”项目等。迄今以第一/通讯作者发表论文11篇，SCI/EI收录6篇；合作作者发表论文约20篇。

总 序

至今，世界上出现了三次大的技术革命浪潮（图 1）。第一次浪潮是 IT 革命，从 20 世纪 50 年代开始，最初源于国防工业，后来经历了“集成电路—个人计算机—因特网—互联网”阶段，至今方兴未艾。第二次浪潮是生物技术革命，源于 20 世纪 70 年代 DNA 的发现，后来推动了遗传学的巨大发展，目前，以此为基础的“个人医药”（personalized medicine）领域蒸蒸日上。第三次浪潮是能源革命，源于 20 世纪 80 年代能源的有效利用，现在已经进入“能源效率和清洁能源”阶段，是未来发展潜力极其巨大的领域。

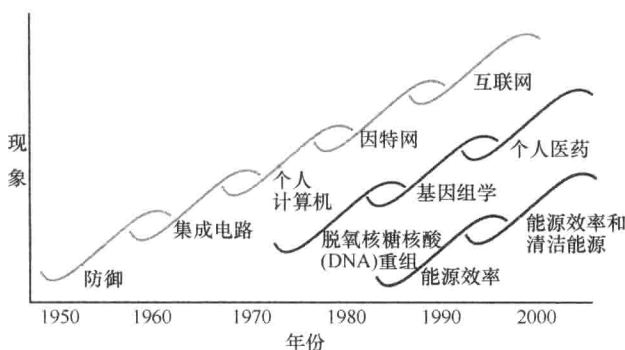


图 1 世界技术革命的三次浪潮

资料来源：<http://tipstrategies.com/blog/trens/innovation/>

在能源革命的大背景下，北京大学于 2009 年建立了全国第一个“环境与能源学院”（School of Environment and Energy），以培养高素质应用型专业技术人才为办学目标，围绕环境保护、能源开发利用、城市建设与社会经济发展中的热点问题，培养环境与能源学科领域具有明显竞争优势的领导人才。“能源高效利用与清洁能源工程”学科是北京大学环境与能源学院的重要学科建设内容，也是国家未来发展的重要支撑学科。“能源高效利用与清洁能源工程”包括新能源工程、节能工程、能效政策和能源信息工程 4 个研究方向。教材建设是学科建设的基础，为此，我们组织了国内外专家和学者，编写了这套新能源前沿丛书。该丛书包括 13 分册，涵盖了新能源政策、法律、技术等领域，具体名录如下：

基础类丛书：

《水与能：蒸散发、热环境及其能量收支》

《水环境污染和能源利用化学》

《城市水系统与碳排放》

《环境与能源微生物学》

Environmental Research Methodology and Modeling

技术类丛书：

Biomass Energy Conversion Technology

Beyond Green Building: Transformation in Design and Human Behavior

《城市生活垃圾管理与资源化技术》

《能源技术开发环境影响及其评价》

《节能技术及其可持续设计》

政策管理类丛书：

《环境与能源法学》

《碳交易》

《能源审计与能效政策》

众所周知，新学科建设不是一蹴而就的短期行为，需要长期不懈的努力。优秀的专业书籍是新学科建设必不可少的基础。希望这套新能源前沿丛书的出版，能推动我国“新能源与能源效率”等学科的学科基础建设和专业人才培养，为人类绿色和可持续发展社会的建设贡献力量。

北京大学教授 邱国玉

2013年10月

前 言

(Preface)

水可发电，产生能源。同时，水的输送、分配和处理过程也会消耗大量能源。自然界中，水的运动和三态转化会吸收或释放巨大能量，对地球和我们居住环境的温度环境维持方面有极其巨大的作用。例如，水的蒸散发能消耗大量的太阳能，降低周围环境的温度。在当今全球变暖和城市化加速发展的背景下，水资源和能源都是极其贵重的紧缺资源。关注水输送、水分配、水处理过程中的能源消耗是实现低碳发展的关键之一；有效地利用蒸散发消耗多余的太阳能，维护稳定的环境温度，是保证宜居环境的基础；也是人类应对全球变暖的有效手段。但是，长期以来，水与能源这种复杂而微妙的关系并未引起社会的足够关注。针对这些挑战，本书将从水与能的关系，蒸散发、水分收支和能量收支，蒸散发观测方法、原理及其应用，蒸散发、水循环和城市热环境四个方面，详细介绍相关的理论基础、观测方法 and 应用实例。

本书涉及环境、能源、城市、水资源等多个学科，是典型的跨学科著作。可以作为大学高年级学生、研究生的课外读物或专业教材，也可以作为对环境、能源问题感兴趣人士的入门教材和专业书籍。

本书在编辑过程中得到了北京大学柴民伟博士的大力支持。书稿的写作还得到了很多其他人的帮助，第3章部分内容由薛亮执笔，第10章、第13章的部分内容由谢芳执笔，第11章由北京师范大学的王佩博士执笔，第17章的部分内容由李宏永执笔，第21章的部分内容由陈婉执笔。另外，参加本书资料收集和整理工作的还有北京大学环境与能源学院的博士研究生薛亮，硕士研究生李程、李宏永、李苏、黄水平、王璐、冯文娟、余业夔、陈婉和夏青。由于本书涉及多学科的内容，很多问题是目前的前沿热点。有些内容在国际上的研究还不是很多，加之作者的水平有限，不足之处在所难免。权且当做抛砖引玉，诚请读者批评指正。

邱国玉

2013年10月于北京大学

目 录

第一篇 水 与 能

第 1 章 太阳能及其特征	(3)
1.1 太阳能简介	(3)
1.2 太阳能的特征	(6)
1.3 太阳能的光谱特征	(8)
1.4 太阳能开发利用技术概述	(10)
1.4.1 光-热技术 (光能-热能)	(10)
1.4.2 光-电技术 (光能-电能)	(10)
1.4.3 光-化学技术 (光能-化学能)	(11)
1.4.4 光生物技术 (光能-生物能)	(11)
1.5 水循环在能量收支中的作用	(11)
第 2 章 水行业的能源消耗——以中国灌溉农业行业的能耗为例	(13)
2.1 引言	(13)
2.2 中国农业用水行业的能源消耗	(13)
2.2.1 中国有效灌溉面积	(14)
2.2.2 中国农业灌溉中的能源消耗	(15)
2.3 中国与美国加利福尼亚州的农业灌溉能耗对比	(16)
2.4 小结	(17)
参考文献	(17)
第 3 章 中国能源行业的水消耗	(18)
3.1 引言	(18)
3.2 中国能源行业的水消耗现状分析	(19)
3.2.1 中国能源行业的年总耗水量	(19)
3.2.2 六大能源行业耗水量占行业总耗水量的比例	(19)
3.3 中国六大能源行业水耗分析	(21)
3.3.1 技术因素	(21)

3.3.2 政策因素	(23)
3.4 讨论	(25)
3.5 小结	(26)
参考文献	(26)

第二篇 蒸散发、水分收支和能量收支

第4章 蒸散发及其物理过程	(31)
4.1 蒸发	(31)
4.1.1 蒸发的概念	(31)
4.1.2 水面蒸发	(31)
4.1.3 土壤蒸发	(33)
4.2 植物蒸腾	(35)
4.2.1 蒸腾过程	(35)
4.2.2 影响植物蒸腾的因素	(36)
4.3 蒸散发	(37)
参考文献	(38)
第5章 蒸发和蒸腾界面上的能量交换	(40)
5.1 显热	(40)
5.2 潜热	(41)
5.3 土壤热通量	(42)
第6章 水分收支与水量平衡	(43)
6.1 水量平衡原理	(43)
6.2 全球的水分收支与水量平衡	(43)
6.3 陆地的水分收支与水量平衡	(46)
6.3.1 流域的水分收支与水量平衡	(48)
6.3.2 农田生态系统的水分收支与水量平衡	(48)
6.4 城市的水分收支与水量平衡	(49)
参考文献	(51)
第7章 能量收支与能量平衡	(52)
7.1 能量平衡原理及一般方程	(52)
7.2 全球能量收支与能量平衡	(53)
7.3 城市的能量收支与能量平衡	(55)
7.4 生态系统的能量收支与能量平衡	(56)
参考文献	(57)

第三篇 蒸散发观测方法、原理及其应用

第 8 章 植物生理学方法	(63)
8.1 小室法	(63)
8.2 示踪法	(63)
8.3 快速称重法	(64)
8.4 整树容器法	(64)
参考文献	(65)
第 9 章 微气候学方法	(67)
9.1 波文比法	(67)
9.2 涡度相关法	(68)
9.3 彭曼公式	(69)
9.4 Penman-Monteith 联合方法	(69)
9.5 温度差方法	(70)
9.6 三温模型	(70)
9.6.1 土壤蒸发子模型	(70)
9.6.2 植被蒸腾子模型	(71)
9.6.3 蒸散发计算	(71)
参考文献	(72)
第 10 章 水量平衡方法	(73)
10.1 水量平衡方法简介	(73)
10.2 案例：内蒙古太仆寺旗退耕草地水分收支的研究	(73)
10.2.1 研究区和研究意义	(73)
10.2.2 不同退耕年龄草地在生长季的水分收支	(74)
10.2.3 退耕还草对水分收支的影响	(76)
第 11 章 同位素方法	(77)
11.1 同位素基础	(77)
11.2 同位素技术在蒸散发研究中的应用	(79)
11.2.1 蒸散发中的同位素估算	(79)
11.2.2 土壤蒸发和植物蒸腾的分离	(80)
11.2.3 利用同位素方法分离蒸散发的实例	(80)
参考文献	(81)
第 12 章 基于遥感技术的蒸散发反演理论与方法	(82)
12.1 经验统计回归模型	(82)
12.2 基于地表能量平衡方程的估算模型	(83)

12.2.1 余项法	(83)
12.2.2 三温模型	(85)
参考文献	(86)
第13章 研究案例1：波文比方法在内蒙古草原蒸散发观测中的应用	(88)
参考文献	(95)
第14章 研究案例2：基于三温模型的蒸散发遥感反演研究	(96)
14.1 研究区概况	(96)
14.1.1 内蒙古半干旱草原	(96)
14.1.2 甘肃典型内陆河——石羊河流域	(96)
14.2 内蒙古半干旱草原的蒸散发	(97)
14.3 内陆河——石羊河流域的蒸散发	(100)
参考文献	(102)

第四篇 蒸散发、水循环和城市热环境

第15章 城市化与城市热岛效应	(105)
15.1 城市热岛效应	(105)
15.2 城市化与城市热岛效应关系	(107)
15.3 中国的城市化与城市热岛效应	(108)
参考文献	(109)
第16章 城市热岛效应的研究	(111)
16.1 热岛的识别及其演变	(111)
16.2 城市热岛效应的机制研究	(112)
参考文献	(113)
第17章 城市热岛的研究方法	(115)
17.1 城市热岛效应的气象站点观测法	(115)
17.2 运动样带法	(115)
17.3 城市热岛遥感监测研究	(118)
17.4 城市热岛模型模拟研究	(119)
参考文献	(120)
第18章 植被蒸腾对城市热岛效应的缓解	(121)
18.1 城市中的绿色植被	(121)
18.2 绿色植被蒸腾对城市热岛效应的缓解	(122)
参考文献	(125)
第19章 绿色屋顶对城市热岛效应的缓解	(126)
19.1 绿色屋顶	(126)

19.2 绿色屋顶的降温效果	(126)
19.3 绿色屋顶的类型	(128)
19.4 案例 1: 日本福岡奥古罗斯大厦	(129)
19.4.1 “大棒”政策	(129)
19.4.2 “胡萝卜”政策	(130)
19.5 案例 2: 美国芝加哥市政厅绿色屋顶花园	(132)
参考文献	(133)
第 20 章 城市水体蒸发对城市热岛效应的缓解	(135)
20.1 城市水体对城市热岛的缓解效应研究	(135)
20.1.1 实测研究	(136)
20.1.2 模型试验研究	(136)
20.1.3 数值模拟研究	(136)
20.2 案例介绍: 上海中心城区水体案例	(138)
参考文献	(139)
第 21 章 案例研究: 基于遥感的深圳市城市热岛效应研究	(140)
21.1 深圳市城市热岛空间分布特征	(140)
21.1.1 深圳市地表温度变化特征	(140)
21.1.2 深圳市城市热岛强度空间分布特征	(146)
21.2 深圳市城市热岛年际变化规律	(150)
21.2.1 深圳市城市热岛效应日间变化规律	(150)
21.2.2 深圳市城市热岛效应夜间变化规律	(151)
21.3 深圳市城市热岛季相变化规律	(153)
21.3.1 深圳市城市热岛季相日间变化规律	(153)
21.3.2 深圳市城市热岛季相夜间变化规律	(154)
21.4 深圳市热岛强度变化与社会经济关系	(156)
21.5 讨论	(158)
21.6 小结	(159)
参考文献	(160)

第一篇 水 与 能

Water versus energy

充足的水资源和能源是人类社会赖以存在发展的基础。一方面，水可发电，产生能源；另一方面，水的蒸发消耗了大量的太阳能。长期以来，水与能源这种复杂而微妙的关系并未引起社会的足够关注。本篇将从学科基础入手，探讨这个问题。

水资源是人类和社会最基本的自然资源，是维持生态系统正常运转的基础。水资源同时也是战略性经济资源，是一个国家综合国力的有机组成部分。在全球范围内，水资源是 21 世纪人类面临的最重要的自然资源问题之一，水资源短缺和水质污染将会给各国经济和社会发展造成很大的威胁。

在我国，能与水的问题尤为突出。总体来说，水行业是我国最大的能耗部门之一。加上中国面临水资源短缺、水质污染和水资源分布不均等问题，保障供水所需的能耗更大。我国人均水资源量只有世界平均水平的 $1/4$ ，而且地区间分布不均、季节分布不均。在北方部分地区，水资源开发利用已经超过资源环境的承载能力，水资源面临的形势非常严峻，需要“南水北调”等项目从南方调水，这会消耗大量能量。实际上，全国范围内水资源可持续利用问题已经成为国家可持续发展战略的主要制约因素。因此，中国必须进行大规模的改革并实施强有力的措施，通过建立节水型产业、提高用水效率、加强水污染防治、开发非常规水资源等措施，保障水资源安全，降低水行业的能耗。

能源行业的水资源消耗是能与水问题的另外一个重要内容。众所周知，能源是人类生存和发展的重要物质基础，也是当今国际政治、经济、军事、外交关注的焦点。目前世界能源供应主要依赖化石能源（石油、天然气、煤炭等）。在化石燃料的勘探、开采、运输、加工和分配过程中，会消耗大量的水资源。同时，化石燃料的大量使用，也是造成全球环境问题和水污染的主要因素。在中国，能源的缺口日益严重，而且现有的能源供给以煤炭为主，占能源消费的 $2/3$ 以上。由于煤炭会产生污染物多、采煤过程对地下水资源破坏严重等问题，我国能与水的关系会更加紧张。

水的蒸散发是地球上太阳能的最大消耗方式。到达地球表面 50% 以上的太

太阳能被水分的蒸散发所消耗。水的蒸散发耗能是维持地球能量平衡的最重要因素。除了海洋以外，蒸散发最大的生态系统是天然植被。工业革命以来，天然植被的减少和退化十分明显。尤其是 20 世纪以来，随着人口的增加，大量天然植被遭到砍伐，用于农田和城市建设。由于天然植被的蒸散发减少，消耗的太阳能减少，这也是全球变暖的原因之一。

本篇从上述视点出发，就太阳能的规模、性质、社会和自然系统的能水关系进行讨论。

第 1 章 | 太阳能及其特征

Solar energy and its characteristics

1.1 太阳能简介

太阳能，又称太阳辐射，是由太阳内部核聚变放射出的电磁辐射，其中约二十二亿分之一到达地球大气层，是地球上多种能量形式的源泉。除了地热能和潮汐能之外，地球上的所有能源都是由太阳能转变过来的。植物通过光合作用的方式把太阳能转变成化学能而储存下来。许多化石燃料（包括煤炭、石油和天然气等）也是由古代理在地下的动植物经过漫长的地质年代形成的，本质上是由古代生物固定下来的太阳能。此外，由太阳能转化而来的还包括水能和风能等。

地球上的所有生物全部依赖太阳的光和热，因此太阳是地球上生命的源泉。假如没有太阳，地面上便不会有生命。如果太阳的辐射特征稍微改变，对地球上的生物就会有重大影响。例如，如果太阳能量减少一半，地面上温度便会下降到零摄氏度以下，导致河海的冻结。如果太阳的能量增加三倍或四倍，海洋里的水将会沸腾成为蒸汽。在地球上，正是由于太阳能的收入和地球能量的支出之间的微妙平衡，才使地球上的生物得以生存。

在人类文明的进程中，人类不断地向大自然索取，并探求适合自身生存和发展所需的各种能源。因此，能源的利用水平折射出了人类文明的前进步伐。我国人民利用太阳能的历史可以追溯到春秋战国时期，那时人们就已发现并开始利用太阳能。史书中记载了“司恒氏掌水夫燧，取火于日”和“阳燧见日，则燃而为火”。据考证，其中“夫燧”和“阳燧”就是类似凹面镜的聚光集热装置。目前在世界各国广泛应用的太阳能热水器（图 1-1）就是利用太阳能直接给水加温的装置。“光电效应”及其原理早在 19 世纪就已被发现；到 20 世纪 30 年代，这一原理在照相机中得到了广泛应用。随着半导体材料的发展，第一个太阳能电池于 1954 年由美国的贝尔实验室首先研制发明问世。此后，太阳能光伏产业迅速发展。1973 年的石油危机促使世界各国意识到了能源开发的重要性。太阳能以其储量巨大、产物清洁，且能够避免垄断等优点吸引了世界各国的关注，太阳能应用技术也得到了积极的发展。各国均期望由增加太阳能的利用来减轻对化石燃料的依赖。

太阳能可以被捕获，并转化为可以利用的能量，如热能、电能等。然而，无论技术上的可行性还是经济上的可行性，都要考虑具体地点所接收到的太阳辐射