

高铁锰地下水 生物净化技术

李 冬 曾辉平 著
张 杰 审

中国建筑工业出版社

高铁锰地下水生物净化技术

李 冬 曾辉平 著
张 杰 审

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

高铁锰地下水生物净化技术/李冬等著. —北京:
中国建筑工业出版社, 2014. 12
ISBN 978-7-112-17605-2

I. ①高… II. ①李… III. ①地下水-生物净化
IV. ①X523

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 292491 号

本书介绍了含铁锰地下水的成因、分布和水质类型, 并用试验和工程示范阐明各类含铁锰地下水的净化方法和流程, 是给水排水工程师、本科生及研究生的参考用书。

责任编辑: 俞辉群 王美玲
责任设计: 董建平
责任校对: 陈晶晶 党 蕾

高铁锰地下水生物净化技术

李 冬 曾辉平 著
张 杰 审

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)
各地新华书店、建筑书店经销
北京楠竹文化发展有限公司制版
北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 13½ 字数: 332 千字
2015 年 8 月第一版 2015 年 8 月第一次印刷

定价: 39.00 元

ISBN 978-7-112-17605-2
(26809)

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)

前 言

水是地球的基本组成要素，是地球环境、地球地质和地球化学中最活跃的因素。地下水径流是地球水文循环系统的重要组成部分。水通过地下径流与上覆层、含水层相互接触，发生了一系列化学、物理化学和生物化学反应。因而在某些区域形成了含铁锰地下水。由于各地域不同的水文地球化学还原环境又造就了千差万别的含铁锰地下水水质。含铁锰地下水主要分布于松花江、嫩江干支流、长江中下游、珠江三角洲等流域的 18 个省市地区，是一些中心城市和广大农村地区的重要水资源。用水中铁锰过量会影响工业生产和居民生活，因此含铁锰地下水的净化是水质工程学长久研究的课题。

21 世纪初我们课题组和中国市政工程东北设计研究总院的工程师们开始致力于浑河流域含铁锰地下水净化的研究，在众多工程实践的基础上突破了接触氧化除锰理论，发现了生物固锰除锰机制，由此创建了“弱曝气 + 一级过滤除铁除锰”的简捷流程，成功建设并运行了沈阳张士开发区生物除铁除锰水厂。

然而，浑河流域的微铁高锰地下水仅仅是含铁锰地下水类型之一。随着工程实践的扩展和研究的深入，逐渐发现浑河流域含铁锰地下水净化的成功经验往往不能复制应用于我国广大地域各种类型含铁锰地下水的净化，尤其是对于寒冷地区伴生氨氮高铁锰水质，几乎无效。鉴于此，我们课题组在哈尔滨松北区前进水厂经 3 年的潜心实验研究和对全国各地除铁除锰技术的调研，最终解决了特殊水质含铁锰地下水的净化，创建了针对不同水质类型的含铁锰地下水的净化流程，建设了寒冷地区伴生氨氮高铁锰地下水生物净化示范水厂。

本书是前述研究与实践的总结，是我们课题组 2005 年出版《生物固锰除锰机理和工程应用》的姊妹篇，是生物固锰除锰机理的完善和补充。全书共分 10 章，由李冬、曾辉平分章撰写，李冬统稿，张杰审。第 1 章从地球水的循环入手，讨论含铁、锰地下水的成因、分布和类型；第 2 章介绍铁、锰元素化学性质，迁移循环规律，铁锰与人体健康及各国各地区生活和工业用水标准；第 3 章回顾除铁除锰科学技术的发展历程；第 4 章探求接触氧化除铁机制和生物固锰除锰机理的协同作用，建立生物除铁除锰滤池的理论模型；第 5 章解析高铁锰水质生物净化滤层中 Mn^{2+} 的氧化还原反应动力学基础，从而探求加速生物除锰滤层成熟的滤层结构；第 6 章研究地下水中 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 NH_4^+ 等还原物质在生物滤池中对溶解氧的需求和利用规律，探求伴生氨氮高铁锰地下水的生物净化流程；第 7 章通过现场模拟试验和生产性试验确立伴生氨氮高铁锰水质生物净化水厂工程设计方案和运行参数；第 8 章研究伴生氨氮高铁锰地下水生物净化滤层的微生态系统和锰氧化菌生理、生态特性；第 9 章研究高铁锰地下水供水系统的规划、总体布局及水厂设计；第 10 章介绍不同含铁锰地下水生物净化流程及其工程示范。

愿本书能对给水排水工程师的工程设计实践，对本科生、研究生的研修有所增益。

李冬

目 录

| | |
|------------------------------|----|
| 第1章 水循环与水资源 | 1 |
| 1.1 地球上的水储量 | 1 |
| 1.2 自然界水文循环 | 2 |
| 1.3 地球水资源分布 | 4 |
| 1.3.1 各大洲的水资源及分布 | 5 |
| 1.3.2 中国的水资源及分布 | 6 |
| 1.4 我国含铁锰地下水的分布及水质类型 | 10 |
| 1.4.1 含铁锰地下水的成因 | 10 |
| 1.4.2 我国含铁锰地下水的分布及水质类型 | 12 |
| 第2章 生活与生产用水中铁锰的危害及允许浓度 | 15 |
| 2.1 天然水中的铁和锰 | 15 |
| 2.2 生活饮用水与生产用水中铁锰的危害 | 16 |
| 2.3 铁锰与人类健康 | 17 |
| 2.3.1 铁的生理功能 | 17 |
| 2.3.2 锰的生理功能 | 20 |
| 2.4 生活饮用水与工业用水中铁锰浓度标准 | 22 |
| 第3章 饮水除铁除锰科学技术的发展历程 | 24 |
| 3.1 早期饮用水除铁技术 | 24 |
| 3.1.1 曝气直接氧化除铁 | 24 |
| 3.1.2 氯氧化除铁 | 25 |
| 3.2 早期饮用水除锰技术 | 26 |
| 3.2.1 锰沸石法 | 27 |
| 3.2.2 高锰酸钾氧化法 | 27 |
| 3.2.3 氯接触氧化除锰法 | 28 |
| 3.2.4 碱化除锰 | 32 |
| 3.3 曝气接触过滤除铁除锰技术的发展 | 32 |
| 3.3.1 曝气接触过滤除铁技术研究历程 | 32 |
| 3.3.2 空气氧化接触过滤除锰工艺的探求 | 33 |
| 3.4 生物固锰除锰机理与工程技术 | 34 |
| 3.4.1 生物固锰除锰机理的发现与确立 | 34 |
| 3.4.2 生物除铁除锰水厂的工艺技术变革 | 35 |

| | |
|--|-----------|
| 第4章 生物除铁除锰滤池理论模型 | 37 |
| 4.1 接触氧化除铁机制 | 37 |
| 4.1.1 接触氧化除铁工艺的基本流程与特点 | 37 |
| 4.1.2 接触氧化除铁滤池的活性定位 | 39 |
| 4.1.3 滤砂表面披覆物中的触媒物质 | 40 |
| 4.1.4 除铁触媒的矿物学特征 | 41 |
| 4.1.5 除铁滤砂表面披覆物的结构 | 42 |
| 4.1.6 接触氧化除铁机制与接触氧化反应 | 44 |
| 4.2 生物除锰滤池中生物量与除锰率的相关性研究 | 44 |
| 4.2.1 模拟滤柱试验 | 44 |
| 4.2.2 生产性试验 | 48 |
| 4.2.3 试验室试验 | 48 |
| 4.2.4 分析与讨论 | 49 |
| 4.3 生物滤层除锰能力的活性定位 | 53 |
| 4.3.1 生物滤层除锰活性的验证 | 53 |
| 4.3.2 生物滤层滤料的除锰活性分析 | 56 |
| 4.4 Fe^{2+} 对生物除锰滤层的作用 | 58 |
| 4.4.1 无 Fe^{2+} 含锰地下水成熟生物滤层过滤试验 | 58 |
| 4.4.2 无 Fe^{2+} 含锰水的除锰生物滤层培养试验 | 60 |
| 4.4.3 天然地下水除铁除锰生物滤层培养试验 | 60 |
| 4.5 生物滤层与无菌滤层的除铁性能研究 | 63 |
| 4.5.1 生物滤层与无菌滤层的除铁性能研究 | 63 |
| 4.5.2 化学接触氧化除铁滤层与生物除铁除锰滤层内铁泥的性状 | 64 |
| 4.6 生物滤层中铁锰同时去除的研究 | 65 |
| 4.6.1 鞍山大赵台水厂的生物滤柱试验研究 | 65 |
| 4.6.2 抚顺开发区除铁除锰水厂生产性试验研究 | 68 |
| 4.6.3 长春市双阳除铁除锰水厂滤柱试验 | 69 |
| 4.6.4 生物滤层铁锰同池去除的规律研究 | 70 |
| 4.6.5 生物固锰除锰理论 | 72 |
| 4.7 生物除铁除锰滤池理论模型 | 72 |
| 第5章 伴生氨氮高铁锰地下水净化技术初探 | 75 |
| 5.1 伴生氨氮高铁锰地下水深度净化课题的提出 | 75 |
| 5.1.1 松北区供水系统概况 | 76 |
| 5.1.2 松北区供水系统改扩建工程 | 77 |
| 5.1.3 一期净水间工艺改造效果 | 77 |
| 5.1.4 研究方向和内容 | 77 |
| 5.2 高浓度 Fe^{2+} 与 Mn^{2+} 氧化还原互动关系 | 78 |
| 5.2.1 铁锰的氧化还原电位与氧化还原反应 | 79 |
| 5.2.2 双层滤料在高铁高锰地下水净化中的应用 | 83 |

| | |
|---|------------|
| 第6章 地下水中 Fe^{2+}、Mn^{2+}、NH_4^+ 等还原物的氧化需氧量 | 88 |
| 6.1 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 NH_4^+ 的溶解氧需求及消耗规律的试验研究 | 89 |
| 6.1.1 生产系统除铁除锰生物滤层的培养 | 89 |
| 6.1.2 溶解氧充足情况下除锰生物滤层的培养试验 | 91 |
| 6.1.3 成熟生物除锰滤池短期停产对活性的影响 | 93 |
| 6.2 生物除锰滤层的硝化活性及氨氮去除极限浓度研究 | 97 |
| 6.2.1 伴生氨氮高铁锰地下水生物滤层的氨氮去除极限 | 97 |
| 6.2.2 伴生氨氮微铁高锰地下水生物滤层的氨氮去除极限 | 100 |
| 6.3 生物除锰滤层中氨氮转化过程及对 Mn^{2+} 生物氧化的影响 | 103 |
| 6.3.1 生物除锰滤层中氨氮的转化规律 | 103 |
| 6.3.2 氨氮对生物滤层除锰活性影响的研究 | 106 |
| 第7章 伴生氨氮高铁锰地下水净化试验研究 | 110 |
| 7.1 滤柱模拟试验研究 | 110 |
| 7.1.1 生产滤池未成熟滤砂模拟滤柱试验 | 111 |
| 7.1.2 新砂模拟滤柱试验 | 112 |
| 7.1.3 成熟滤砂模拟柱试验 | 113 |
| 7.2 生产性试验研究 | 114 |
| 7.2.1 生产性试验系统改造 | 114 |
| 7.2.2 生产性试验效果 | 114 |
| 第8章 伴生氨氮高铁锰地下水生物净化滤层微生物学研究 | 116 |
| 8.1 伴生氨氮高铁锰地下水净化滤层中锰氧化菌群落结构分析 | 116 |
| 8.1.1 滤料表面形态及能谱分析 | 116 |
| 8.1.2 滤料微生物群落结构及演替规律分析 | 117 |
| 8.2 广谱锰氧化菌的分离与筛选 | 118 |
| 8.3 典型锰氧化菌的形态特征 | 119 |
| 8.3.1 MSB-4 的形态特征 | 119 |
| 8.3.2 MS604 的形态特征 | 120 |
| 8.3.3 MB4 的形态特征 | 120 |
| 8.3.4 MB5 的形态特征 | 121 |
| 8.4 典型锰氧化菌功能定位 | 122 |
| 8.5 典型锰氧化菌生理生化特性 | 124 |
| 8.6 典型锰氧化菌的 16SrDNA 系统发育分析 | 125 |
| 8.6.1 MSB-4 16SrDNA 系统发育分析 | 125 |
| 8.6.2 MS604 16SrDNA 系统发育分析 | 126 |
| 8.6.3 MB4 16SrDNA 系统发育分析 | 127 |
| 8.7 典型锰氧化菌锰代谢特征分析 | 130 |
| 8.7.1 MSB-4 锰代谢特征分析 | 131 |
| 8.7.2 MS604 锰代谢特征分析 | 134 |

| | | |
|-------------|-------------------------------|------------|
| 8.7.3 | MB4 锰代谢特征分析 | 136 |
| 8.7.4 | MB5 锰代谢特征分析 | 138 |
| 8.8 | 典型锰氧化菌酶学特性 | 139 |
| 8.8.1 | 酶活性功能定位 | 139 |
| 8.8.2 | 温度对胞外酶活性的影响 | 140 |
| 8.8.3 | pH 对胞外酶活性的影响 | 141 |
| 8.8.4 | 金属离子对胞外酶活性的影响 | 143 |
| 8.8.5 | 胞外酶 K_m 和 V_{max} 的确定 | 145 |
| 8.9 | 典型锰氧化菌铁锰同步去除特征 | 147 |
| 8.9.1 | MSB-4 铁锰同步去除特征 | 147 |
| 8.9.2 | MS604 铁锰同步去除特征 | 148 |
| 8.10 | 高效锰氧化菌群的构筑与工程应用研究 | 148 |
| 8.10.1 | 高效锰氧化菌群的构筑 | 149 |
| 8.10.2 | 固定化微生物滤柱的启动与工艺运行 | 150 |
| 8.10.3 | 反应器运行过程中微生物系统动态研究 | 153 |
| 第9章 | 高浓度铁锰地下水供水系统规划与设计 | 159 |
| 9.1 | 供水系统规划 | 159 |
| 9.1.1 | 水源地选择与井群布置 | 159 |
| 9.1.2 | 高浓度铁锰地下水供水系统的总体布局 | 159 |
| 9.2 | 生物除铁除锰水厂流程设计 | 160 |
| 9.2.1 | 标准流程 | 160 |
| 9.2.2 | 高铁锰地下水生物净化流程 | 161 |
| 9.2.3 | 伴生氨氮高铁锰地下水生物净化流程 | 161 |
| 9.2.4 | 两级曝气+两级过滤流程 | 161 |
| 9.3 | 单体构筑物设计 | 161 |
| 9.3.1 | 曝气装置 | 161 |
| 9.3.2 | 生物除铁除锰滤池设计 | 166 |
| 9.4 | 生物除铁除锰滤池的培养与运行 | 170 |
| 9.4.1 | 除铁除锰生物滤层的建立 | 170 |
| 9.4.2 | 伴生氨氮高铁锰地下水生物滤层的快速启动 | 176 |
| 9.4.3 | 生物除铁除锰滤池运行中的维护和管理 | 178 |
| 第10章 | 各种典型含铁含锰地下水生物净化流程和工程示范 | 182 |
| 10.1 | 含铁锰地下水典型生物净化流程 | 183 |
| 10.1.1 | 沈阳经济开发区生物除铁除锰水厂的设计 | 183 |
| 10.1.2 | 生物除铁除锰滤池的接种培养与成熟 | 187 |
| 10.1.3 | 生物除铁除锰滤池的正常运行 | 189 |
| 10.1.4 | 讨论 | 190 |
| 10.1.5 | 结论 | 191 |
| 10.2 | 高浓度铁锰地下水生物净化流程 | 192 |
| 10.2.1 | 东丰县水资源概况 | 192 |

| | |
|------------------------------|-----|
| 10.2.2 第二水厂扩建工程 | 192 |
| 10.3 超高浓度铁锰地下水二级生物净化流程 | 197 |
| 10.4 伴生氨氮高铁锰地下水生物净化流程 | 198 |
| 10.5 哈尔滨松北区前进水厂 | 199 |
| 10.5.1 水源与水质 | 199 |
| 10.5.2 净水厂设计 | 200 |
| 10.5.3 生产运行效果 | 202 |
| 参考文献 | 203 |

第1章 水循环与水资源

水是地球的基本组成要素，循环于大气圈、岩石圈、生物圈与水圈之中，是地球环境、地球地质和地球化学中最活跃的因素。水的循环维系着地表层的物质迁移，热与能量的平衡，创造了欣欣向荣的生态系统。水是世界万物赖以生存、繁衍的生命之源。各种生物体内水含量占70%~99%，如果没有水，物种就要灭绝，地球就要变成死寂的星球。

水是人类社会经济发展的基础自然资源，是人们生存、生活不可替代的生命源泉。自古以来，在奔流不息的江河边，涌现了一个又一个的地球文明。从埃及的尼罗河到古巴比伦的两河流域，从印度的恒河到中国的黄河，这些地球上最早的文明起源无不是与水息息相关。与此同时，无论是苏美尔文明的衰落，还是楼兰古国的湮没，无不是灾难性的水危机所致。

水，尤其是淡水，是现代人类社会极其稀缺的自然资源。对于各个国家和地区，对于一切社会经济部门都具有生死攸关的重要意义。早在1972年联合国第一次环境与发展大会就指出：“石油危机之后的下一个危机就是水危机。”1977年联合国大会进一步强调：“水，不久将成为一个深刻的社会危机。”1991年第七届世界水大会发出警告：“在干旱或半干旱地区，国际河流和其他水源地的争夺可能成为两国间战争的导火索。”2012年6月，联合国可持续发展大会上，又重申了以往的国际行动计划，总结了过去可持续发展道路存在的种种问题，通过了《我们希望的未来》，在政治上重申了可持续发展的重要性，将水问题纳入可持续发展的内容，深刻地指出水是可持续发展的核心，强调水和环境卫生对可持续发展的极端重要意义。可见，水环境恢复与水资源可持续利用在人类可持续发展战略中的地位不可替代。

1.1 地球上的水储量

从卫星上看地球，是一个蔚蓝色的大水球。地球表面洼地是一片汪洋大海，占地球总表面积的71%。全球水总储量约为13.86亿 km^3 。其中海水占96.54%，剩下的3.46%分布于地球表层的岩石圈、大气圈和生物圈，与海水一起组成了地球表层的水圈。全球贮存的水量及分布详见表1-1。从表1-1可以看出地球上的水绝大部分是咸水（除海水外还有内陆咸水湖和地下咸水）。咸水总量为全球水总储量的97.47%，只有2.53%为大陆淡水。而且淡水的绝大部分封存于南极洲、格陵兰岛等高山冰川的永久性冰雪和深层地下水中。

全球水储量及分布

表 1-1

| 序号 | 水体种类 | 体积 × (10 ³ km ³) | 占总水量比例 (%) | 占咸水量比例 (%) | 占淡水量比例 (%) |
|----|-----------------|---|------------|------------|------------|
| 1 | 海水 | 1338000 | 96.538 | 99.041 | — |
| 2 | 含盐地下水 | 12870 | 0.929 | 0.953 | — |
| 3 | 咸水湖 | 85 | 0.006 | 0.006 | — |
| 4 | 咸水合计 | 1350955 | 97.473 | 100 | — |
| 5 | 南极、格陵兰岛等高山冰川及积雪 | 24064.1 | 1.7360 | — | 68.697 |
| 6 | 地下淡水 | 10530 | 0.7597 | — | 30.061 |
| 7 | 永冻区冻结水 | 300 | 0.0216 | — | 0.856 |
| 8 | 淡水湖 | 91 | 0.0065 | — | 0.260 |
| 9 | 土壤水 | 16.5 | 0.0012 | — | 0.047 |
| 10 | 大气水汽 | 12.9 | 0.0009 | — | 0.037 |
| 11 | 沼泽水 | 11.5 | 0.0008 | — | 0.033 |
| 12 | 河川水 | 2.12 | 0.0002 | — | 0.006 |
| 13 | 生物体水 | 1.12 | 0.0001 | — | 0.003 |
| 14 | 淡水合计 | 35029.24 | 2.5270 | — | 100 |
| 15 | 总计 | 1385984.24 | 100 | — | — |

1.2 自然界水文循环

在太阳辐射能和地心引力的作用下,水从海洋表面蒸发形成水蒸气进入大气层中,在天空经大气环流输送到全球上空,遇冷成云,以雨雪形式降落到地球表面。降到陆地表面的水量,部分蒸发,部分汇入江河湖泊或渗入地下,形成地表、地下径流,又流向大海。这种周而复始不断的水循环运动,称为自然水文循环。陆地上各种水体包括河川、湖泊以及土壤和生物体中的水也在重复不断地进行蒸发(蒸腾)和降水过程,构成自然水文循环的重要组成部分。地球上的各种水体通过蒸发(蒸腾)、水汽输送、下渗、地表径流和地下径流等一系列过程和环节,将大气圈、岩石圈、生物圈和水圈有机地联系起来,构成了一个庞大而复杂的水文循环系统,如图 1-1 所示。

在水文循环系统中,地球上各种水体处于连续不断的更新状态,从而维系着全球水的动态平衡。在这一动态循环运动中,自然水循环产生了丰富的水资源和万千的气象变化。

地球上的水总储量约 13.86 亿 km³,与外空的水量交换可以忽略不计,因此地球上水的总储量可认为是恒定的,每年参与水文自然循环的水量仅是其中极少部分。海洋的蒸发量约为 50.5 万 km³/a,可以粗略核算为 1.4m 厚的海水层,陆地年蒸发量为 7.2 万 km³/a,全球年蒸发量为 57.7 万 km³/a;全球每年降水量与蒸发量相平衡(57.7 万 km³/a),这就

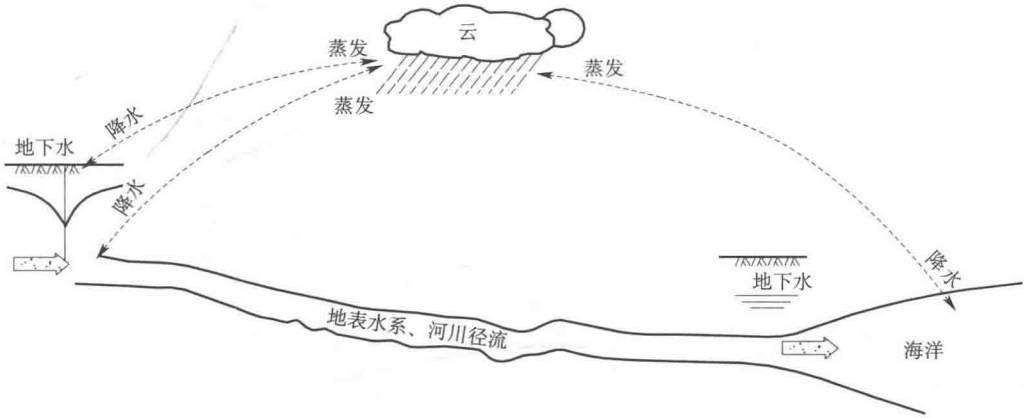


图 1-1 水的自然循环示意图

是全球水文循环的总量。全球水文循环平衡如表 1-2 和图 1-2 所示。从表 1-2 和图 1-2 可见，在全球水文循环运动中，海洋的蒸发量（50.5 万 km^3/a ）大于降水量（45.8 万 km^3/a ），而陆地的蒸发量（7.2 万 km^3/a ）小于降水量（11.9 万 km^3/a ）。正是这种差别产生了由陆地流向海洋的大陆地表和地下径流，其总量为 4.7 万 km^3/a ，这就是海洋蒸发量与降水量之差，或是陆地降水量与蒸发量之差。

全球年水文循环量平衡表

表 1-2

| 分区 | 面积 ($\times 10^6 \text{km}^2$) | 水量 (万 km^3) | | | 水深 (mm) | | | |
|----|----------------------------------|-----------------------|------|------|---------|------|------|-----|
| | | 降水 | 径流 | 蒸发 | 降水 | 径流 | 蒸发 | |
| 海洋 | 361 | 45.8 | -4.7 | 50.5 | 1270 | -130 | 1399 | |
| 陆地 | 149 | 11.9 | 4.7 | 7.2 | 800 | 315 | 483 | |
| 其中 | 外流区 | 119 | 11.0 | 4.7 | 6.3 | 920 | 395 | 529 |
| | 内流区 | 30 | 0.9 | — | 0.9 | 300 | — | 300 |
| 全球 | 510 | 57.7 | — | 57.7 | 1131 | — | 1131 | |

由于每年气候的差异，各年的蒸发量和降水量是有变化的，图中和表中的数值是多年平均值。自然水文循环具有许多显著的特点。①水文循环是一个相对稳定的动态系统，各种水体的量与质及其分布状况是自然历史发展的产物，它既有历史继承性的一面，又有不断变化发展新生性的一面。虽然目前还难以详细地研究水文循环历史演化的全貌，但地史学、地貌学、古水文地质及古气候的研究成果已经证明了水文循环是个不断演化的过程。②水文循环还是一个错综复杂的动态系统，远非蒸发与降水的重复过程。在水循环中涉及蒸发、蒸腾、降水、下渗、径流等各个环节，这些环节错综复杂交错地进行。蒸发现象既存在于海洋、江河、湖泊和冰雪等水体表面，也存在于土壤、植物的蒸发和蒸腾过程，甚至连动物、人体也无时无地不在进行水的蒸发。虽然我们常常将蒸发看成水循环的起点，但实际上，水的整个循环过程无始无终，无休无止。在降水、径流过程中随时随地都存在着蒸发现象。正是水循环的这种复杂动态系统特性，使得地球上各种水体得以循环往复更新，滋养着地球上的万物。③在水文循环中，不但存在着水量的动态平衡关系，也存在着

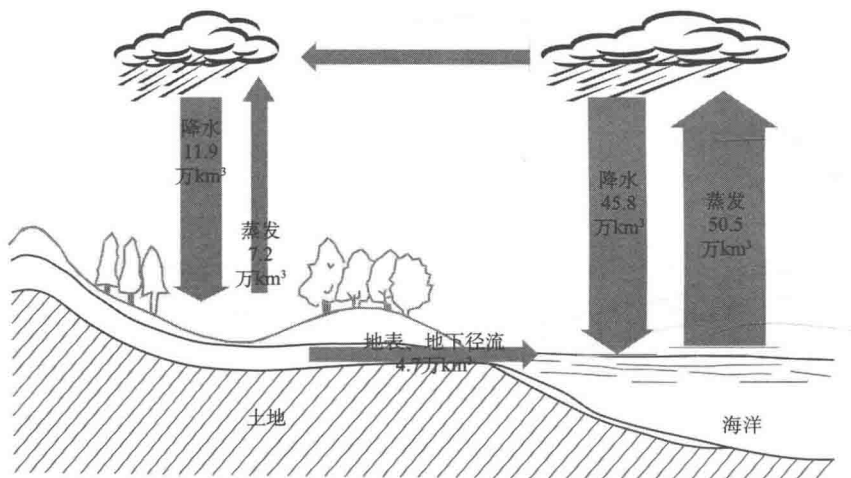


图 1-2 全球年水循环水量的平衡

水质的动态平衡关系。体现在蒸发中水质的纯化，在降水与径流过程中，水中携带的有机、无机杂质通过物理化学反应和生物分解使水得以净化，使得地球上各种水体维系水量与水质的动态平衡。

1.3 地球水资源分布

“水资源”一词在各学科之间，在历史上存在着两种相关的概念。一种是来源于《不列颠百科全书》中的条目定义：“自然界一切形态（液态、固态和气态）的水。”另一种是来源于联合国教科文组织（UNESCO）及世界气象组织（WMO）的定义：“水资源应当是可供利用或有可能被利用，并有足够数量和可用质量，可供地区长期采用的水体。”从实际意义上讲，称得上人类社会水资源的应该是通过水文循环可以不断更新的有足够数量的淡水水体。据此，水资源的定义必须是可积极参与水文循环足够大的淡水水体，在水文循环的运动中，年年得到降水和径流的可靠补给，水量、水质年年更新的水体方可作为人类社会可靠的水资源。

由于各种水体的水量、形态和储存条件的不同，更新的周期和速度也截然不同。表 1-3 是各类水体的更新周期。从表 1-3 和表 1-1 可以明了：河川径流是天然良好的水资源，地表浅层地下径流（潜水与承压水）可与河川有良好的水力交换，参与水文循环也是重要的水资源；湖泊水也是良好的水资源。但是，深层地下水虽占地下水总量的 99%，但由于其水文循环微弱，更新年代久远，不应该视为水资源。

各类水体的更新周期

表 1-3

| 水体类别 | 更新周期 | 水体类别 | 更新周期 |
|---------|--------|------|------|
| 海洋 | 2500 年 | 沼泽 | 5 年 |
| 深层地下水 | 1400 年 | 河流 | 16 天 |
| 极地冰川和雪盖 | 9700 年 | 土壤水 | 1 年 |
| 高山冰川 | 1600 年 | 大气水 | 8 天 |

续表

| 水体类别 | 更新周期 | 水体类别 | 更新周期 |
|-------|---------|------|------|
| 永冻层中冰 | 10000 年 | 生物水 | 几小时 |
| 湖泊 | 17 年 | | |

降水、径流是大陆各种水体的唯一补给源。地球水文循环总量为地球水总储量的 0.0416%，即 $57.7 \text{ 万 km}^3/\text{a}$ ，形成大陆地表、地下径流总量约为 $4.7 \text{ 万 km}^3/\text{a}$ ，为地球水总储量的 0.0034%。这些地表、地下径流在大陆的分布并不均匀，往往由于气候和地形、地貌条件的不同而差异甚大。还有相当部分分布于不适宜人类居住之处。而且大陆径流并非是人类社会的独有资源，需要与水生态环境共享才能获得长久的水源供应。所以地球的淡水资源非常短缺，是稀缺的天然资源。

1.3.1 各大洲的水资源及分布

地球上的淡水资源稀少，全球大陆多年平均径流量约为 47000 km^3 ，径流深为 314mm。这些径流大部分流入海洋，各大陆之间河川径流分布极不均匀。

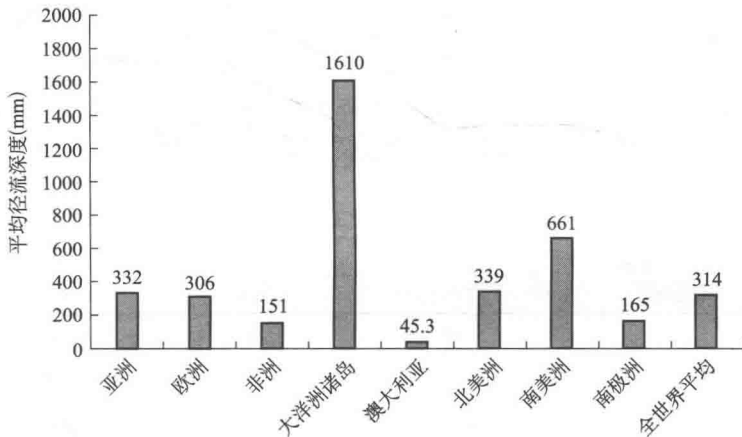


图 1-3 世界各大洲的平均径流深

地球上大洋洲中某些岛屿的径流量非常丰富，远远超过了全球径流的平均值。例如新西兰、新几内亚、塔斯马尼亚等年径流深大于 1500mm 南美洲年径流也深达 661mm，相当于全世界平均值的 2 倍。而澳大利亚全国有 2/3 的陆地面积为无水、无永久性河流的荒漠、半荒漠地区，年平均径流深只有 45mm。南极洲降雨量虽然不多，径流深为 165mm，但以冰川形式储存了全球 68.7% 的淡水量。世界各大洲的径流深度情况如图 1-3 所示。

全球主要大陆地区平均每年水平衡（降水、蒸发和径流量）的估算如图 1-4 所示。所有径流中，半数以上发生在亚洲和南美洲，很大一部分发生在同一地方——亚马孙河，它每年的径流量高达 6000 km^3 。

全球径流量的多少曾经引起了各国科学家的广泛关注，在过去 200 多年间许多科学家致力于世界径流量的估算。不同来源的数据稍有出入，《全球环境展望 3》、《国际人口行动计划》和《简明不列颠百科全书》对全球径流量的估算分别为 4.7 万 km^3 、 4.1 万 km^3 和 $3.7 \sim 4.1 \text{ 万 km}^3$ 。

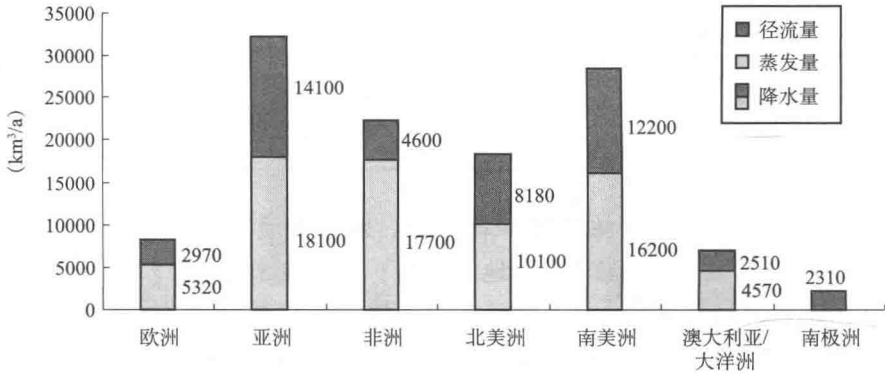


图 1-4 世界各地区的降水、蒸发和径流量

注：径流包括流入地下水、内陆盆地的水流和北极的冰流。

1.3.2 中国的水资源及分布

1. 我国水资源总量

在中国，可通过水循环更新的地表水和地下水的多年平均水资源总量约为 $2.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。仅次于巴西、苏联、加拿大、美国和印尼，居世界第六位。但是按 1997 年人口统计，我国人均水资源量仅 2220 m^3 ，约为世界人均的 1/4，列世界第 121 位，是一个贫水国家。预测到 2030 年我国人口增至 16 亿时，人均水资源量将降到 1760 m^3 ，基本进入用水紧张国家的行列（按国际上一般承认的标准，人均水资源量少于 1700 m^3 即为用水紧张国家）。

我国主要流域年径流及平均水量

表 1-4

| 流域 | 河川年径流 (亿 m^3) | 人口 (万人) | 耕地 (万亩) | 人均水量 ($\text{m}^3/\text{人}$) | 亩均水量 ($\text{m}^3/\text{亩}$) |
|-----|----------------------------|------------|------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 松花江 | 762 | 5112 | 15662 | 1490 | 487 |
| 辽河 | 148 | 3400 | 6643 | 435 | 223 |
| 海滦河 | 288 | 10987 | 16953 | 262 | 170 |
| 黄河 | 661 | 9233 | 18244 | 716 | 362 |
| 淮河 | 622 | 14169 | 18453 | 439 | 337 |
| 长江 | 9513 | 37972 | 35171 | 2505 | 2705 |
| 珠江 | 3338 | 8202 | 7032 | 4070 | 4747 |

除了人均水资源量偏低外，我国水资源的时空分布也很不均衡。由于季风气候的影响，各地降水主要发生在夏季。由于降水季节过分集中，大部分地区每年汛期连续 4 个月的降水量占全年的 60% ~ 80%，不但容易形成春旱夏涝，而且水资源量中大约有 2/3 左右是洪水径流量，形成江河的汛期洪水和非汛期的枯水。而降水量的年际剧烈变化更造成了江河的特大洪水和严重枯水，甚至发生连续大水年和连续枯水年。

我国的年降水量在东南沿海地区最高，逐渐向西北内陆地区递减。水资源的空间分布和我国土地资源的分布不相匹配。黄河、淮河、海河三流域的土地面积占全国的 13.4%，耕地占 39%，人口占 35%，GDP 占 32%，而水资源量仅占 7.7%，人均水资源量约

500m³，耕地亩均水资源少于400m³，是我国水资源最为紧张的地区。我国主要流域年径流及人均、亩均占有量见表1-4所列。

2. 地下水资源

地下径流在水文循环中占据重要地位，发挥不可替代的作用。地壳表层第4纪、第3纪巨大空间是天然的地下水库，能贮藏暴雨洪水，在枯水期源源不断补给河川径流，滋养植物生长，是生态环境的良好补给水源。合理利用地下空间水源，合理开采地下水是水资源可持续利用的重要方面。

2003年国土资源部公布了新一轮全国地下水资源评价的结果，全国地下淡水天然资源多年平均为8837亿m³，约占全国水资源总量的1/3，其中山区为6561亿m³，平原为2276亿m³；地下淡水可开采资源多年平均为3527亿m³，其中山区为1966亿m³，平原为1561亿m³。另外，全国地下微咸水天然资源（矿化度1~3g/L）多年平均为277亿m³，半咸水天然资源（矿化度3~5g/L）多年平均为121亿m³，各省市地下水资源量分布见表1-5所列。

从各流域各地区的地下水资源分布来看，以珠江流域和雷琼地区最为丰富，其地下水天然资源补给模数（每年每平方公里补给量）分别达32.2万m³和41.5万m³；长江流域平均补给模数为14.8万m³，其中洞庭湖流域达23.1万m³；华北平原补给模数在5万m³左右；西北地区最小不足5万m³，见表1-6所列。

各省（区、市）地下水资源量表（亿m³/a）

表1-5

| 省（区、市） | 天然补给资源量 | | | | 可开采资源量 |
|--------|---------|-------|-------|--------|--------|
| | 淡水 | 微咸水 | 半咸水 | 小计 | 淡水 |
| 北京 | 33.76 | | | 33.76 | 26.33 |
| 天津 | 5.44 | 5.45 | 4.86 | 15.75 | 2.84 |
| 河北 | 131.60 | 31.98 | 6.68 | 170.26 | 99.54 |
| 山西 | 87.32 | 4.08 | | 91.40 | 53.78 |
| 内蒙古 | 263.52 | 24.95 | 4.04 | 292.51 | 140.17 |
| 辽宁 | 164.91 | | | 164.91 | 91.76 |
| 吉林 | 123.00 | 7.53 | | 130.53 | 86.09 |
| 黑龙江 | 310.89 | 3.96 | | 314.85 | 211.45 |
| 上海 | 8.38 | 4.30 | 0.26 | 12.94 | 1.14 |
| 江苏 | 117.84 | 15.11 | 51.92 | 184.87 | 80.68 |
| 浙江 | 113.92 | | | 113.92 | 46.78 |
| 安徽 | 216.25 | | | 216.25 | 135.21 |
| 福建 | 306.88 | 0.39 | 0.52 | 307.79 | 33.51 |
| 江西 | 230.48 | | | 230.48 | 73.37 |
| 山东 | 139.95 | 66.24 | 10.19 | 216.38 | 114.31 |
| 河南 | 158.27 | 4.87 | 1.44 | 164.58 | 155.89 |

续表

| 省(区、市) | 天然补给资源量 | | | | 可开采资源量 |
|--------|---------|--------|--------|---------|---------|
| | 淡水 | 微咸水 | 半咸水 | 小计 | 淡水 |
| 湖北 | 410.57 | | | 410.57 | 165.21 |
| 湖南 | 461.67 | | | 461.67 | 146.00 |
| 广东 | 694.78 | 5.72 | | 700.50 | 284.94 |
| 广西 | 754.64 | | | 754.64 | 273.38 |
| 海南 | 158.19 | | | 158.19 | 60.45 |
| 重庆 | 143.86 | | | 143.86 | 40.79 |
| 四川 | 545.98 | | | 545.98 | 174.94 |
| 贵州 | 437.71 | | | 437.71 | 132.59 |
| 云南 | 747.31 | 0.99 | 4.14 | 752.44 | 190.35 |
| 西藏 | 795.83 | 62.56 | 25.76 | 884.15 | 202.04 |
| 陕西 | 158.16 | 10.99 | 1.51 | 170.66 | 55.86 |
| 甘肃 | 108.47 | 16.75 | 7.57 | 132.79 | 42.34 |
| 青海 | 265.82 | | | 265.82 | 98.29 |
| 宁夏 | 17.15 | 10.75 | 2.63 | 30.53 | 13.44 |
| 新疆 | 629.55 | | | 629.55 | 234.87 |
| 台湾 | 90.57 | | | 90.57 | 56.86 |
| 香港 | 3.75 | 0.10 | | 3.85 | 2.55 |
| 澳门 | 0.06 | | | 0.06 | 0.03 |
| 全国 | 8836.48 | 276.72 | 121.51 | 9234.72 | 3527.78 |

我国不同地区地下淡水资源数量表

表 1-6

| 资源区 | 天然补给资源量 | | 可开采资源量 | | |
|-------|------------------------------|--|------------------------------|--|-------|
| | 资源量 (亿 m ³ /a) | 模数 [万 m ³ /(km ² ·a)] | 资源量 (亿 m ³ /a) | 模数 [万 m ³ /(km ² ·a)] | |
| 黑松流域 | 520.51 | 5.86 | 328.34 | 3.66 | |
| 辽河流域 | 246.47 | 8.63 | 154.74 | 10.91 | |
| 黄淮海地区 | 635.33 | 11.46 | 512.1 | 10.18 | |
| 黄河流域 | 黄河下游 | 40.45 | 16.22 | 40.53 | 16.21 |
| | 黄土高原 | 130.54 | 5.42 | 93.75 | 6.40 |
| | 鄂尔多斯高原及银川平原 | 72.85 | 5.61 | 39.58 | 3.14 |
| | 黄河上游 | 141.44 | 6.25 | 43.78 | 2.09 |
| | 小计 | 385.28 | 6.11 | 217.64 | 4.30 |