

● 张锡辉 编著

水环境修复工程学

原理与应用



化学工业出版社
环境科学与工程出版中心

水环境修复工程学 原理与应用

张锡辉 编著

化学工业出版社
环境科学与工程出版中心
·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

水环境修复工程学原理与应用/张锡辉编. —北京:
化学工业出版社, 2002.1
ISBN 7-5025-3618-3

I. 水… II. 张… III. 水污染-生物防治 (环境
污染) IV. X52

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 001989 号

水环境修复工程学原理与应用

张锡辉 编著

责任编辑:董琳 管德存

责任校对:马燕珠

封面设计:蒋艳君

*

化学工业出版社 出版发行
环境科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

发行电话:(010)64918013

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷厂印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 9¼ 字数 248 千字

2002 年 2 月第 1 版 2002 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3618-3/X·126

定 价:26.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

内 容 提 要

本书以工程学的概念和方法为基础综合了受污染水环境修复过程基本概念、原理和工程步骤。水环境包括湖泊水库、河流和地下水。水环境修复基本内容包括具体水环境系统的特点、污染物在其中的迁移转化规律、修复技术基本原理、工程设计原理和步骤等。为满足读者的实际应用需要,对于比较成熟的修复技术,本书都特别提供了各种代表性的设计方法、典型图表数据和丰富的参考文献。

本书综合性强,兼具理论和应用两方面功能。章节段落层次分明,逻辑性强;叙述简练准确,明白易读。适合作为高等学校教师和研究生的教学参考书。

前 言

受污染水环境的修复在我国变得越来越迫切。根据国家有关部门的统计,我国 75% 的湖泊、90% 以上的城市河流、50% 以上的地下水都受到不同程度的污染。水环境的污染已经严重影响到我国生态环境和人民生活健康。在我国,受污染的典型湖泊有滇池、太湖和巢湖,典型河流有淮河、辽河和珠江,受污染地下水主要分布在大型城市地区和大型工业企业所在地。

掌握相关的工程原理已经成为我国进行受污染水环境修复的关键之一。目前,由于国家各级部门的重视,受污染水环境得到了广泛的研究。但是,将各种科学研究成果转化为实际行动,则需要严谨的工程方法。在水环境修复实践中,不遵从工程原则,容易导致科学研究成果应用的失败或者走弯路,这方面的例子不胜枚举。

受污染水环境的工程修复涉及许多工程分支,是典型的跨学科工程。水环境修复工程涉及环境工程、水利工程、地质工程、土木工程和生态工程等。而且,湖泊、河流和地下水等不同类型的水体,其内在规律差别非常大,工程原理也相应变化。

水环境修复工程的难点之一是其复杂性和不可重复性。与传统的水处理工程不同,水体修复并不是在限定的反应器中进行,不可能有控制性地进行反复实验,修复工程不确定性大,工程失败容易造成不可挽回的巨大损失。

本书是相对于水处理工程而论的,从水体环境基本原理、修复工程学和设计步骤等方面进行了比较系统和详细的论述。但是,由于学科的限制,不足之处在所难免,需要随着工程实践而不断丰富。

张锡辉

2001 年秋季于深圳

目 录

| | |
|--------------------------|----|
| 1 总论 | 1 |
| 1.1 水环境概论 | 1 |
| 1.2 河流 | 2 |
| 1.3 湖泊水库 | 3 |
| 1.4 地下水 | 4 |
| 1.5 水与自然生态系统 | 5 |
| 1.6 水与自然生态系统的进化 | 9 |
| 1.7 水与人类生态系统 | 12 |
| 1.8 农牧业与水环境污染 | 16 |
| 1.9 水环境修复 | 19 |
| 1.10 水环境修复的基本原则和内容 | 20 |
| 1.10.1 水环境现场调查 | 20 |
| 1.10.2 设计原则 | 20 |
| 参考文献 | 21 |
| 2 湖泊水库水环境修复 | 24 |
| 2.1 基本特征 | 24 |
| 2.2 湖泊水库水动力学 | 26 |
| 2.2.1 水来源 | 26 |
| 2.2.2 水量动态平衡 | 26 |
| 2.2.3 吞吐量 | 26 |
| 2.2.4 水团运动 | 27 |
| 2.2.5 水体分层 | 28 |
| 2.3 水质化学 | 31 |
| 2.3.1 氮 | 31 |
| 2.3.2 磷 | 32 |
| 2.3.3 有机污染物 | 34 |
| 2.3.4 金属离子 | 35 |

| | | |
|---------|---------------------|----|
| 2.3.4.1 | 活性金属离子:铁锰金属离子 | 35 |
| 2.3.4.2 | 重金属污染 | 38 |
| 2.3.5 | 悬浮泥沙 | 39 |
| 2.3.5.1 | 泥沙来源 | 39 |
| 2.3.5.2 | 淤积过程 | 40 |
| 2.3.5.3 | 淤积量计算 | 40 |
| 2.4 | 湖泊水库生态系统 | 41 |
| 2.4.1 | 宏观生态系统 | 41 |
| 2.4.2 | 微生物生态 | 44 |
| 2.4.3 | 底泥 | 48 |
| 2.5 | 富营养化 | 51 |
| 2.5.1 | 定义 | 51 |
| 2.5.2 | 蓝藻特性 | 51 |
| 2.5.3 | 富营养化原因分析 | 53 |
| 2.5.4 | 富营养化评级 | 55 |
| 2.6 | 湖泊水库水环境综合评价 | 57 |
| 2.6.1 | 基础资料收集 | 57 |
| 2.6.2 | 参数计算 | 59 |
| 2.6.3 | 综合模型 | 63 |
| 2.7 | 湖泊水库水环境修复技术 | 65 |
| 2.7.1 | 修复技术选择原则 | 65 |
| 2.7.2 | 控制外源性污染的技术 | 66 |
| 2.7.3 | 稀释和冲刷 | 68 |
| 2.7.3.1 | 原理 | 68 |
| 2.7.3.2 | 设计 | 68 |
| 2.7.4 | 深层水抽取技术 | 70 |
| 2.7.4.1 | 原理 | 70 |
| 2.7.4.2 | 设计 | 71 |
| 2.7.5 | 水动力学循环技术 | 71 |
| 2.7.5.1 | 原理 | 71 |
| 2.7.5.2 | 设计 | 73 |
| 2.7.6 | 深水曝气 | 76 |
| 2.7.6.1 | 原理 | 76 |

| | | |
|----------|----------------|------------|
| 2.7.6.2 | 设计 | 77 |
| 2.7.7 | 磷的沉淀和钝化 | 78 |
| 2.7.7.1 | 原理 | 78 |
| 2.7.7.2 | 投药量的确定 | 79 |
| 2.7.8 | 底泥疏浚 | 80 |
| 2.7.8.1 | 疏挖技术种类 | 80 |
| 2.7.8.2 | 底泥疏挖方案的制定 | 84 |
| 2.7.8.3 | 设计 | 85 |
| 2.7.9 | 底泥氧化 | 94 |
| 2.7.10 | 底泥覆盖 | 95 |
| 2.7.11 | 生态控制技术 | 96 |
| 2.7.12 | 酸化湖泊水体的修复 | 99 |
| 2.7.13 | 其他技术 | 99 |
| 2.7.14 | 关于组合技术 | 100 |
| | 参考文献 | 100 |
| 3 | 河流水环境修复 | 106 |
| 3.1 | 河流基本概念 | 106 |
| 3.2 | 河流水力学 | 108 |
| 3.3 | 河流泥沙 | 109 |
| 3.3.1 | 泥沙颗粒特征 | 110 |
| 3.3.2 | 泥沙沉降 | 111 |
| 3.3.3 | 泥沙的堆积 | 112 |
| 3.3.4 | 泥沙的起动 | 112 |
| 3.3.5 | 泥沙的输送 | 113 |
| 3.4 | 泥沙与河流相互作用 | 114 |
| 3.5 | 河流生态 | 115 |
| 3.6 | 河流污染 | 117 |
| 3.7 | 污染物在河流中的传输 | 121 |
| 3.7.1 | 泥沙对污染物的传输 | 121 |
| 3.7.2 | 有机物迁移转化 | 122 |
| 3.7.3 | 河床底泥化学变化过程 | 123 |
| 3.7.4 | 重金属离子污染物 | 124 |
| 3.7.5 | 河流活性金属元素铁的变化 | 126 |

| | | |
|----------|---------------------------|------------|
| 3.7.6 | 营养盐的累积输送和释放 | 128 |
| 3.8 | 河流水质综合模型 | 129 |
| 3.8.1 | 河流水量水质平衡方程 | 130 |
| 3.8.2 | 河流传质 | 131 |
| 3.8.3 | 河流溶解氧模型 | 133 |
| 3.8.4 | QUAL-II 水质模型 | 135 |
| 3.9 | 河流修复的目标和原则 | 137 |
| 3.9.1 | 河流修复目标的选择 | 137 |
| 3.9.2 | 河流修复基本原则 | 138 |
| 3.10 | 河流水力稳定性设计 | 138 |
| 3.11 | 河流稀释 | 143 |
| 3.12 | 自然净化修复 | 144 |
| 3.13 | 城市河流护岸工程技术 | 146 |
| 3.13.1 | 必要性 | 146 |
| 3.13.2 | 工程设计原理 | 147 |
| 3.13.3 | 河岸整治常用材料 | 150 |
| 3.14 | 其他河流修复技术 | 151 |
| 3.14.1 | 岸边植被 | 151 |
| 3.14.2 | 裁弯工程 | 153 |
| 3.14.3 | 河床隔离和覆盖 | 153 |
| 3.14.4 | 河流维护 | 154 |
| | 参考文献 | 154 |
| 4 | 地下水水环境修复 | 160 |
| 4.1 | 地下水形态 | 160 |
| 4.2 | 地下水污染物分布 | 161 |
| 4.2.1 | 污染物不同相态之间的平衡关系 | 161 |
| 4.2.2 | 污染物在地下水中的浓度与蒸气之间的关系 | 162 |
| 4.2.3 | 土壤吸附与污染物之间的作用关系 | 163 |
| 4.2.4 | 污染物总量计算方法 | 163 |
| 4.2.5 | 计算示例 | 164 |
| 4.3 | 地下水污染化学特征 | 166 |
| 4.4 | 污染物迁移动力学 | 169 |
| 4.4.1 | 地下水流动特征 | 169 |

| | | |
|--------|-------------|-----|
| 4.4.2 | 污染带迁移 | 172 |
| 4.4.3 | 污染物在包气带中的迁移 | 174 |
| 4.4.4 | 计算示例 | 176 |
| 4.5 | 地下水修复工程设计步骤 | 177 |
| 4.5.1 | 修复现场调查 | 177 |
| 4.5.2 | 设计步骤 | 178 |
| 4.6 | 传统修复技术 | 178 |
| 4.6.1 | 技术原理 | 179 |
| 4.6.2 | 设计原理 | 180 |
| 4.7 | 气体抽提技术 | 184 |
| 4.7.1 | 技术原理 | 184 |
| 4.7.2 | 抽提过程操作 | 187 |
| 4.7.3 | 现场中试实验 | 189 |
| 4.7.4 | 设计原理 | 189 |
| 4.8 | 空气吹脱技术 | 194 |
| 4.8.1 | 技术原理 | 194 |
| 4.8.2 | 现场中试实验 | 196 |
| 4.8.3 | 设计原理 | 197 |
| 4.9 | 生物修复技术 | 200 |
| 4.9.1 | 技术原理 | 200 |
| 4.9.2 | 各种生物修复过程工艺 | 205 |
| 4.9.3 | 技术可行性研究 | 206 |
| 4.9.4 | 设计原理 | 208 |
| 4.9.5 | 典型原位生物修复系统 | 209 |
| 4.9.6 | 自然生物修复 | 211 |
| 4.10 | 植物修复技术 | 214 |
| 4.11 | 污染带阻截墙技术 | 215 |
| 4.12 | 原位化学反应技术 | 218 |
| 4.12.1 | 重金属沉淀 | 218 |
| 4.12.2 | 原位化学氧化 | 219 |
| 4.13 | 水力和气压裂缝方法 | 220 |
| 4.14 | 稳定和固化技术 | 222 |
| 4.15 | 电动力学修复技术 | 223 |

| | | |
|---------|--------------|-----|
| 4.15.1 | 技术原理 | 223 |
| 4.15.2 | 去除重金属污染 | 226 |
| 4.15.3 | 去除有机物 | 227 |
| 4.16 | 其他技术 | 229 |
| | 参考文献 | 229 |
| 附录 I | 中华人民共和国水法 | 235 |
| 附录 II | 中华人民共和国水土保持法 | 244 |
| 附录 III | 土壤环境质量标准 | 251 |
| 附录 IV | 地表水环境质量标准 | 255 |
| 附录 V | 景观娱乐用水水质标准 | 264 |
| 附录 VI | 农田灌溉水质标准 | 269 |
| 附录 VII | 渔业水质标准 | 275 |
| 附录 VIII | 地下水质量标准 | 280 |

1 总 论

1.1 水环境概论

水是地球上分布最广的物质，是地球环境的重要组成部分。水的总量约为 13.6 亿 km^3 ，覆盖了地球 70.8% 的表面。其中 97.5% 的水是咸水，无法直接饮用。在余下的 2.5% 的淡水中，有 89% 是人类难以利用的极地和高山上的冰川和冰雪。因此，人类能够直接利用的水仅仅占地球总水量的 0.26% 。

本书的对象是与自然生态环境和人类社会直接相关的陆地水环境，主要包括河流、湖泊水库和地下水，河流和湖泊水库中的水又统称为地表水。陆地水主要来自降雨。根据粗略统计，每年全球陆地降雨量约 9.9 万 km^3 ，蒸发水量约 6.3 万 km^3 ，江河径流量约为 4.3 万 km^3 ，流入海洋的约 3.6 万 km^3 。从世界范围来说，我国的水资源总量丰富，居世界第 6 位，位于巴西、俄罗斯、加拿大、美国和印度尼西亚之后，约占全球河川径流总量的 5.8% 。但是，我国人口众多，以占世界陆地面积 7% 的土地，生活着占世界 22% 的人口，人均水资源量非常少，是世界人均水量的 $1/4$ 。按 1997 年人口计算，我国人均水资源量为 $2\,220\text{ m}^3$ ，预测到 2030 年，人口增加至 16 亿时，人均水资源量将降到 $1\,760\text{ m}^3$ ，用水总量将达到 $(7\,000\sim 8\,000)\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ ，人均综合用水量将达到 $400\sim 500\text{ m}^3/\text{a}$ 。按照国际上一般承认的标准，人均水资源量少于 $1\,700\text{ m}^3$ 时，属于用水紧张的国家。这一特点决定着，水是我国发展的制约因素。

我国水汽主要从东南和西南方向输入，水汽出口主要是东部沿海，陆地上空水汽输入量多年平均为 18.2 万亿 m^3 ，输出总量为 15.8 万亿 m^3 ，年净输入量为 2.4 万亿 m^3 ，约占输入总量的 13% 。

输入的水汽，在一定条件下凝结，形成降水。我国平均年降水总量为 $61\ 889\ \text{亿}\ \text{m}^3$ ，其中的 45% 转化为水资源，而 55% 被蒸发散发。降水中的大部分经东北的黑龙江、图们江、绥芬河、鸭绿江、辽河，华北的滦河、海河、黄河，中部的长江、淮河，东南沿海的钱塘江、闽江，华南的珠江、西南的元江、澜沧江以及台湾省各河注入太平洋；少部分经怒江和雅鲁藏布江等流入印度洋。降水径流中的一部分还形成湖泊水库，还有一部分渗入到地下土壤和岩石孔隙。

我国多年平均年径流量约为 $27\ 115\ \text{亿}\ \text{m}^3$ ，是我国水资源的主体，约占我国全部水资源总量的 94.4%。但是，我国地表水资源分布极不均匀，南方河多水多，北方河水径流小，西北大部分地区水系稀少，水量非常小，是最干旱的区域。地下水资源的分布是北方可采量多而南方少。我国北方许多地区，包括东北、华北和华东部分地区，地下水资源比较丰富，几乎占我国平原地下水资源量 $8\ 288\ \text{亿}\ \text{m}^3$ 的 78%。

1.2 河流

河流与人类进化有着密切的关系。人类的文明大多起源于河流江畔，例如中国、印度和埃及等古国的文明分别发源于黄河、恒河和尼罗河沿岸。而河流的发源、演化和生命周期等是与全球气候的变化密切地联系在一起。例如，河流的流量由气候的湿润程度和降水等决定，河流的水位、流速、封冻和解冻等过程由气候决定。

河流由降水径流形成，大小不同的河流形成的相互流通的水道系统称为水系或者水系，而供给地面和地下径流的集水区域称为流域。河流的水文特征包括水流的补给、径流在空间和时间上的变化、洪水的形成和运动情况、枯水特性、河流的冻结以及河床泥沙运动情况等。

在中国，据统计，流域面积在 $100\ \text{km}^2$ 以上的河流达 5 万多条。这些河流分为两类：流入海洋的外流河和不与海洋相通的内陆河。大多数河流分布在气候比较湿润的东南部，而西北内陆干燥少

雨，河流稀少。外流河占全国的 $\frac{2}{3}$ ，顺地势向东或者东南流入太平洋；内陆河占全国的 $\frac{1}{3}$ ，主要分布在内蒙古、河西、准噶尔、中亚细亚、塔里木、青海等地区。长江是我国位居首位的第一大河，全长 6 300 km，流域面积约 180 万 km^2 ，接近全国总面积的 $\frac{1}{5}$ 。黄河是我国第二条大河，流域面积 75 万 km^2 ，干流河道全长 5 464 km。

我国主要河流的一个显著特征是多沙。据估算，平均每年进入河流的悬移泥沙达 35 亿 t，其中的 21 亿 t（占 60%）沉积于河流的中下游河道、水库及沿岸湖泊和灌区内。例如，黄河中游黄土高原的土壤侵蚀模数高达 3 700 $\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ，是世界土壤侵蚀模数平均水平 134 $\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 的 7.6 倍。黄河平均每年有 7 亿 t 泥沙沉积在干流河道，致使下游河道逐年增高成为夹在两堤间的地上悬河。长江每年也有 2.6 亿 t 泥沙沉积在宜昌以下的干流河道和沿江湖泊内。泥沙沉积改变了河流沿岸的地质环境和生态环境，导致沿途湖泊水库容量减小，水深变浅，效益下降。同时，泥沙是水体污染物的载体，输送大量污染物，或者沉积在河床上，成为内在二次污染物。

我国的大多数河流已经受到污染。大江大河的一级支流受污染极为普遍，支流级别越高，污染程度也越严重。根据 1983~1987 年的调查，在调查的 532 条河流中，有 82% 的河流受到不同程度的污染，7 大江河流经的 15 个主要城市河段中，有 13 个河段受到污染。河流的主要污染源是：工业废水和城市生活污水，又称为“点源”，以及来自农业的面源污染。主要污染因素包括：悬浮物，有机物浓度，pH，有害病菌，有毒物质，其他包括温度、颜色、放射性物质等。

1.3 湖泊水库

湖泊是陆地上低洼的地方，终年积蓄着大量的水分而不与海洋直接相连的都称为湖泊。湖泊分为天然湖泊和人造水库或者池塘。水库又分为湖泊型水库和河床型水库。后者是水坝拦截形成，水面

与河床形态类似，调蓄能力相对较差。我国湖泊水库总数达到 8 万余座。一般，蓄水量大于 1 亿 m^3 的划分为大型水库，蓄水量介于 1 千万 m^3 至 1 亿 m^3 的属于中型水库，而库容小于 1 千万 m^3 的水库是小型水库。在中国，面积 1 km^2 以上的湖泊达 2 300 多个，总面积约 71 787 km^2 ，总贮水量为 7 088 亿 m^3 ，其中淡水贮量为 2 260 亿 m^3 ，比例为 32%，其他为咸水或者盐水。

上游径流是湖泊水库的主要补给水源，决定着湖泊水库的水文变化特征。例如，夏秋季节，降雨集中，水面上涨；而冬春季节，降水少，水面降落。湖泊水库起着调节水系水流，维持局部地方生态的重要作用。

我国湖泊水库污染日趋严重，主要表现是“富营养化”。湖泊水库的污染不仅仅影响水体的功能例如供应生活用水，以及危害水生生物，而且正在导致湖泊水库本身的消亡。根据国家环保局于 1993 年对 131 个湖泊水库的监测，其中 89 个湖泊水库受到不同程度的污染，占调查数量的 68%；有 67 个湖泊水库达到富营养程度，占 50% 以上；超过 V 类水质的严重污染的湖泊水库有 28 个，占调查总数的 21% 以上。由于污染严重，有的湖泊水库甚至丧失了作为生活用水水源的功能，例如，著名的滇池和巢湖已经不能再用作当地的饮用水水源。

1.4 地下水

地下水是存在于土壤空隙和地下岩层裂隙溶洞中的水，是陆地水资源重要的赋存形式，全球绝大部分水资源是以地下水的形式存在。我国地下水资源比较丰富，达到 8 700 亿 m^3/a ，但是实际可开采量仅为 2 900 亿 m^3/a 。地下水是我国人民生活、城市和工农业用水的重要水源。全国 2/3 的城市以地下水为供水水源，农业灌溉用水占了地下水总开采量的 81% 左右。

在我国，地下水污染有逐渐严重的趋势，主要是人类在生产和生活过程中产生的污染物质直接或者间接进入土壤和地下水。主要污染源包括：①农业中化肥和农药的过量施用；②工业和城市的垃

圾、污水侵入土壤和地下水；③大气沉降，包括“干降”和“湿降”，大气中的 SO_2 和重金属等进入土壤和地下水，导致土壤“酸化”和重金属污染；④采矿废弃物，主要是重金属污染；⑤地下储罐和输送管线等。地下水中的主要污染物分为：硝酸盐污染，难降解性的有机物污染，例如农药和稠环芳烃，重金属污染，例如铬、镉、铅、汞、镍、砷、铜和锌等。

据 1986 年的调查，50% 的城市地下水受到污染。城市近郊区由于多年过量开采以及人为活动的污染，水质比远郊区污染严重。在污染程度上，北方城市地下水污染重于南方城市地区，其中华北地区地下水污染比较突出。地下水过量开采，导致地下水水位下降，例如，河北和山东等地形成漏斗区面积达数万平方公里，漏斗中心区水位下降 30~90 m，北京也形成了 1 000 多 km^2 的降落漏斗。地下水过量开采还导致地面沉降，例如天津和上海等地都发生比较严重的地面沉降现象，西安市出现了地面裂缝，损坏地面建筑、供水、通讯以及其他市政设施等。在沿海地区，地下水水位下降还能导致海水直接侵入淡水层，土壤盐碱化，建筑物受侵蚀等。

地下水不同于地表水例如湖泊水库和河流，一旦污染后，治理起来更加困难。因为受污染的地下水在土壤岩石孔隙中，地质条件复杂，调动起来非常困难，不容易像地表水那样集中处理；地下水中相当一部分污染物吸附在土壤和岩石表面，给地下水的处理增加了难度；另外，地下水所处区域人类活动频繁，地上建筑物密集，限制了相关处理技术的实施。

1.5 水与自然生态系统

水是生态系统的命脉。地球上动物、植物和微生物所存在和活动的圈层称为生物圈。根据估算，生物圈中生物水的总量约为 $1\ 120\ \text{km}^3$ 。水是所有生命机体的重要组成部分，例如一个成年人体重含有 60%~70% 的水。人如果没有水，只能活几天。缺水 1%~2% 时，人会感到口渴；缺水 5% 时，人会口干舌燥，甚至意识开

始不清；失掉 15% 的水，人就有生命危险。人体一天平均需要 2.5 L 的水。

在生物圈中，自然生态系统是在一定的空间内由生物-化学-物理学活动所组成的，是物质-能量-信息相互依存和作用的一个整体系统。在地球上，生态系统分为生命系统和环境系统，进一步又可以分为四个基本成分包括生产者、消费者、分解者和环境要素，人是其中的高级消费者，如图 1-1 所示。

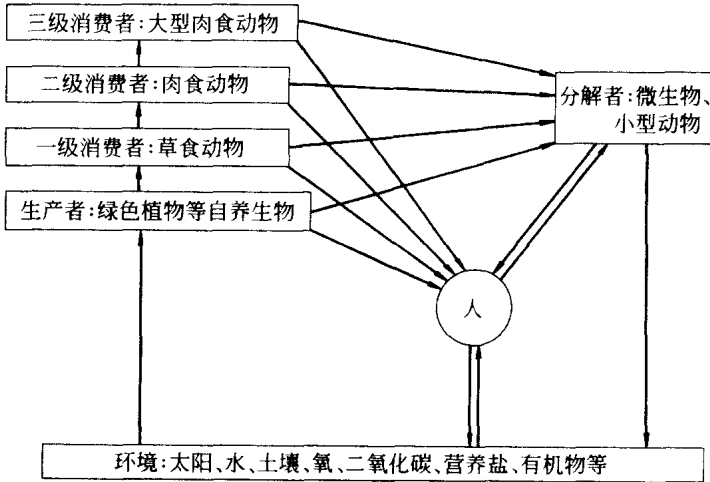


图 1-1 地球自然生态系统示意图

在自然生态系统中，太阳能是地球表面自然生态系统的原动力，土壤是自然生态系统的载体，是其生存和进化的场所，而水是自然生态系统的介质，是其赖以生存的“血液”。

太阳辐射实际上为地球提供了一种连续流能量，相当于 $1\ 353\ \text{W}/\text{m}^2$ ，考虑到吸收和散射降到约 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ ，阴云遮挡将其降为 $100\ \text{W}/\text{m}^2$ 。太阳能不仅提供了生态系统光合过程的能量，而且驱动了水在生态系统的转化。流动的水被太阳能蒸发，通过气候输送和凝结，水汽转化液体状态的水，形成降雨，进入陆地生态系统。因此，水体在太阳能和地球引力的驱动下，不断循环转化和迁移。