



WUSHUI ZIRAN JINGHUA
SHENGTAI GONGCHENG FANGFA

污水自然净化 生态工程方法

王书文 刘德祥 孙铁珩 编著



化学工业出版社
环境·能源出版中心

WUSHUI ZIRAN JINGHUA
SHENGTAI GONGCHENG FANGFA

污水自然净化 生态工程方法

王书文 刘德祥 孙铁珩 编著



化学工业出版社
环境·能源出版中心

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

污水自然净化生态工程方法/王书文, 刘德祥, 孙铁珩编著. —北京: 化学工业出版社, 2006.3

ISBN 7-5025-8426-9

I. 污… II. ①王…②刘…③孙… III. 污水处理-净化-研究 IV. X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 024129 号

污水自然净化生态工程方法

王书文 刘德祥 孙铁珩 编著

责任编辑: 刘兴春

文字编辑: 周 侗

责任校对: 李 林

封面设计: 胡艳玮

*

化学工业出版社 出版发行
环境·能源出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

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

*

新华书店北京发行所经销
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 13 字数 292 千字

2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8426-9

定 价: 36.00 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

前 言

人类对自然环境的经营管理，若能了解其环境生态系统的结构与机能，采取顺应自然生态原理的工程方法，才有可能在维护自然生态系统稳定与平衡的前提下，达到人类在安全基础上可持续发展的目的。生态工程方法是指人们基于对生态系统的深切认知，为落实生物多样性保护及可持续发展而采取的以生态为基础、安全为导向的工程方法，旨在减少对自然环境的伤害。近年来，随着经济的发展，世界上许多先进国家均极力倡导应用生态工程方法，来维护自然生态系统的结构与机能。

本书主要论述在污水自然净化和回用领域生态工程方法的意义、缘起、演变、原理、技术、设计和实施步骤，着重介绍构造湿地、土壤渗滤、植被处理和地面径流处理等水污染控制生态工程方法及案例。本书具有较强的系统性和实用性，可供环境科学与工程、生态工程等领域的工程技术人员、科研人员和管理人员参考，也可供高等院校相关专业师生参阅。

本书主要由王书文和刘德祥编写，其中沈阳环境工程重点实验室李英华编写第7章，邹轶编写第8章；辽宁水利水电勘测设计研究院郭志全编写第9章。全书由王书文、刘德祥校阅定稿。本书编写过程中孙铁珩院士给予了悉心指导，同时写作中参考了一些国内外同行的技术资料，并得到了一些专家、学者和同行的支持、帮助和指导，在此表示衷心的感谢！

由于编著者水平和经验有限，书中不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编著者
2006年2月

目 录

1 环境问题的生态学审视	1	6.3 人工湿地的类型	101
1.1 面临的环境问题	1	6.4 湿地运作机制与原理	103
1.2 生态学审视	9	6.5 人工湿地规划原则与 流程	107
参考文献	11	6.6 人工湿地系统设计原理和 方法	114
2 生态工程方法的缘起与演变	13	6.7 人工湿地应用案例	121
2.1 生态工程方法概念	13	6.8 结语	123
2.2 生态工程方法的演进	17	参考文献	124
2.3 生态工程方法遵循的原则	20	7 生活污水土壤渗滤生态处理 系统	125
2.4 问题讨论	21	7.1 土壤渗滤处理系统工艺与 设计	125
参考文献	22	7.2 应用案例分析	131
3 生态工程方法的生态学基础	24	参考文献	137
3.1 生态系统	24	8 城市污水生态处理工程案例	139
3.2 生态学基本规律与观点	36	8.1 概述	139
3.3 生态工程方法的设计	40	8.2 示范工程概况	140
参考文献	43	8.3 技术方案的选择与确定	142
4 生态工程方法的科技组成	44	8.4 方案工艺与初步设计	146
4.1 生态工程方法的内涵	44	8.5 示范工程运行情况	148
4.2 基本设计原则	47	参考文献	148
4.3 生态工程的科技组成	49	9 地面径流管理与雨水回用生态 工程方法	149
4.4 生态技术	50	9.1 城市雨水利用综述	149
4.5 环境技术(河流净化)	58	9.2 水库集水区最佳管理作业	158
4.6 生态环境监测	69	9.3 非农用地的绿色最佳管理 作业	163
4.7 小结	73	9.4 植被与生态最佳管理作业	166
参考文献	73	9.5 径流最佳管理作业	167
5 水质自然净化生态工程方法	75	9.6 水质净化最佳管理作业	183
5.1 水质自然净化原理与机制	75	参考文献	188
5.2 水质自然净化方法	77		
5.3 水质自然净化计划的执行	92		
参考文献	96		
6 人工湿地生态工程方法及应用	97		
6.1 湿地与人工湿地	97		
6.2 湿地多样性的功能	98		

10 河流湖泊植被净化生态工程

方法 189

10.1 概述 189

10.2 植被净化的计划和管理 ... 192

10.3 植被净化设施的设计思路 ... 197

10.4 关于植被净化设施的维护 管理 199

参考文献 201

1 环境问题的生态学审视

长期以来,人类对自然资源无节制地开发和利用导致了一系列全球性的环境问题。这些问题已严重威胁到人类在地球上的生存和社会的发展。从历史的角度看,全球环境问题的根源,究其实质可归结为 500 年来所谓的西方文明向全球扩张所造成,而中国环境问题则是中国为了应付西方文明的挑战而产生的。生态工程方法则是在无法避免人工开发情况下,使人类能与地球共生的工程方法,是指人类基于对生态系统的深切认知,为达到生物多样性保护及可持续发展的目的,采取以生态为基础、安全为导向的方法,尽量减少对生态系统造成伤害的可持续系统工程设计。本章对制约我国经济和社会可持续发展的环境问题进行了分析,通过对这些问题的生态学审视,提出了解决环境和经济协调发展的生态工程方法思路。

1.1 面临的环境问题

当今,世界人口呈指数增长,同时每个人消耗的能源和资源也呈指数膨胀,二者的乘积呈指数更高的几何级数增长。例如,1974 年世界人口是 1830 年的 4 倍,与此同时,能源的消耗达到了约 3 倍,那么地球所承受的生态压力百年前后就相差了 12 倍。1999 年世界人口 60 亿,根据联合国机构统计:世界人口预计在 2050 年增长到 94 亿,2100 年 104 亿,2150 年 108 亿,到 2200 年接近 110 亿。正像阿西摩夫的预言“如果地球人口继续像现在这样每过 35 年就增加 1 倍,到 3550 年,人类机体的总质量就会等于地球的质量”。

根据世界自然基金会发表的报告,在 1970~1995 年,地球自然资源损失 1/3,淡水生态系统指数 25 年中降低 50%,海洋生态系统指数 25 年中下降 30%,世界森林覆盖面 25 年中下降 10%,自然资源的消费压力每年以 5% 的速度递增。二战后地区性环境问题成为全球性环境问题,简单问题变成了复杂问题。简单问题是可分类、可定量、易解决、低风险的问题,而复杂问题是不可分类、不可量化、不易解决、高风险、长期性的问题。这些问题包括气候变化、臭氧层破坏、森林破坏与生物多样性减少、大气及酸雨污染、土地荒漠化、国际水域与海洋污染、有毒化学品污染和有害废物越境转移等。

中国正是在上述情况下,大踏步地迈向工业化的。与发达国家相比,中国的发展一直背着沉重的人口包袱。自康熙 51 年(公元 1712 年)实行赋税改革以来,中国的人口急剧增长,与此同时,能源和资源的消耗也同步增加,从秦汉时期到现在中国人每天消耗的能源增长 40 倍。

据《中国土地承载力研究报告》估计,中国能够承受的人口根限为 16 亿左右,中国人口在 21 世纪中期将达到峰值 16 亿左右,而中国的适宜人口为 6.5 亿~8.0 亿(马

寅初)。与所有发达国家一样,中国的环境问题是与工业化相伴相生的。20 世纪 50 年代,中国工业刚起步,工业基础薄弱,环境污染问题尚不突出;80 年代,随着工农业的发展,环境污染加剧,生态破坏的范围也在扩大。环境问题和人口问题一样成为制约中国经济和社会发展的两大难题。

1.1.1 温室效应

气候变化是一个最典型的全球尺度的环境问题。20 世纪 70 年代,科学家把气候变暖作为一个全球环境问题提了出来;80 年代,随着对人类活动和全球气候关系的认识深化,以及几百年来最热天气的出现,这一问题开始成为国际政治和外交的议题。1992 年联合国里约环保大会通过并开始签署《气候变化框架公约》;1997 年 12 月,149 个国家和地区的代表在日本东京召开《联合国气候变化框架公约》缔约方第三次会议,12 月 11 日会议通过了旨在限制发达国家温室气体排放量以抑制全球变暖的《京都议定书》。

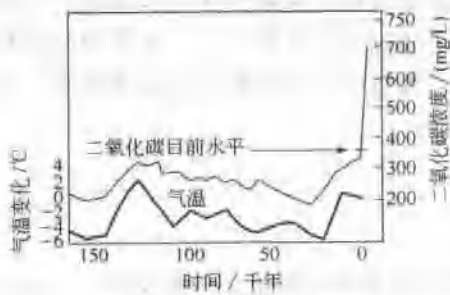


图 1-1 自然状态下二氧化碳随时间浓度变化

在地质历史上,地球的气候发生过显著的变化。10000 年前,最后一次冰河期结束,地球的气候相对稳定在当前人类习以为常的状态。地球的温度取决于太阳辐射照到地球表面的速率和吸热以后地球将红外辐射线散发到空间的速率。地球温度若要保持常态,则地球从太阳吸收的能量应等于向外散发的辐射能。大气中水蒸气、二氧化碳和其他微量气体如氟里昂、甲烷、氧化亚氮等可以使太阳的短波辐射几乎无衰减地通过,但却可以吸收地球的长波辐射,并再反射回地球成为温室气体。大气中能产生温室效应的气体已经发现有近 30 种,其中二氧化碳所起作用最大,达 50%,如表 1-1 所列。通过长期的数据观察,气温和二氧化碳之间存在显著的相关关系,如图 1-1 所示。

表 1-1 主要温室气体及其特征

气 体	浓度/(mg/L)	生长期/年	温室效应(CO ₂ =1)	贡献率/%	主 要 来 源
CO ₂	355	50~200	1	55	煤、石油、天然气、森林砍伐
氟里昂(CFC)	0.00085	50~102	3400~15000	24	发泡剂、气溶胶、制冷剂、清洗剂
甲烷	1.714	12~17	11	15	湿地、稻田、化石、燃料、牲畜
氧化亚氮(NO ₂)	0.31	120	270	5	化石燃料、化肥、森林砍伐

温室效应是由来自石油及煤燃烧而排放过量的二氧化碳与氮氧化物、各种产品中大量使用的氟里昂(CFC)、水田及掩埋场所排放的甲烷等造成的。以上种种物质,称为温室效应气体,其在大气中的含量日增,会加速破坏大气自动调节地球温度的能力,使得地球的温度逐渐上升。据推测,到 2050 年,地球平均温度将上升 2℃,在过去 10000 年中,地球平均温度也只不过上升 2℃。

1750 年之前, 大气中二氧化碳含量基本维持在 280mg/L; 目前已上升到近 360mg/L, 每年大约上升 1.8mg/L (约 0.4%)。在过去一个世纪里, 全球表面平均温度已经上升了 0.3~0.6℃, 全球海平面上升了 10~25cm。

气候变化的主要影响和危害是海平面上升, 破坏农业和自然生态系统, 加剧洪涝、干旱及其他气象灾害和影响人类健康。大气中的二氧化碳含量若照目前的速率增加, 预测到 2050 年, 地球平均温度将上升 2℃, 将使南北极的冰山逐渐融解, 海平面上升。地球表面是由臭氧层所包围, 这层大气犹如温室的透明塑料, 在阳光照射地面时具有防止地面湿度、温度散失的功能, 使地面温度不会下降得太快, 地表平均温度保持在 15℃左右。但是温室效应不断增加的结果, 使得地球温度慢慢升高。

温室效应的直接影响是使全球气候变异, 造成干旱和南北极冰山融化。如果所有的冰山全部融化, 海平面会上升 60cm, 到那时整个荷兰会被淹没, 孟加拉国将消失无踪; 甚至使全球气候变迁造成干旱, 将导致工业、农业全面停滞。近年来地球最高气温纷纷打破历年来同月最高气温纪录, 即为地球气温在变迁的明显证据。2001 年 11 月 15 日, 太平洋岛国图瓦卢领导人宣布举国迁往新西兰, 图瓦卢人口 1.1 万, 9 个岛屿面积 26km², 现在侵袭 9 个小岛的海浪最高已经达到了 3.2m, 而图瓦卢海拔最高的地方不过 4.5m。专家预言, 如果地球环境继续恶化, 在 50 年之内, 图瓦卢 9 个小岛将全部没入大海中。

如果无法有效控制温室效应, 其所造成的气候改变, 将使人类付出极大的代价。如气温上升会损害人体的抗病能力, 若再加上全球气候变迁引发动物大迁徙, 届时极有可能促使脑炎、狂犬病、登革热、黄热病的大规模蔓延, 后果相当可怕。可见温室效应的影响绝不只限于气温而已。

1.1.2 空气污染与酸雨

大量长期使用不可再生能源虽然提升了人类的物质文明, 却也给人类造成了始料未及的祸害。由于人类大量使用煤、石油等化石燃料, 燃烧后产生的硫氧化物 (SO_x) 或氮氧化物 (NO_x), 在大气中经过复杂的化学反应, 形成硫酸或硝酸气悬胶, 或为云、雨雪、雾捕捉吸收, 降到地面成为酸雨。一般未被污染的雨水, pH 值呈弱酸性, 低于 5.0 便为酸雨; 如今却频频出现 pH 值小于 3 的强酸雨 (几乎与乙酸相当), 不禁令人忧心忡忡。酸雨会使存在于土壤、岩石中的金属元素溶解, 流入河流或湖泊, 使得鱼类大量死亡, 并使水生植物及引水灌溉的农作物积累有毒金属, 再经过食物链进入人体, 影响人类的健康。酸雨会影响农林作物叶部的新陈代谢, 同时土壤中的金属元素因被酸雨溶出, 造成矿物质大量流失, 植物无法获得充足的养分而枯萎、死亡。湖泊酸化后, 可能使生态系统改变, 甚至使湖中生物死亡, 生态功能因而无法进行, 最后变成死湖。

空气污染是慢性谋杀的刽子手, 在无形、无声、无息中逐渐侵蚀你的肺部、黏膜、神经系统及骨骼组织。1 个健康的成人每天吃 1~2kg 的食物、喝 2L 的水, 每分钟却需 13L 的空气, 因此若不吃饭还可活 5 个星期, 不喝水可活 5d, 但只要 5min 没空气, 就活不了。空气一旦被污染, 会影响所有的人, 使人生病, 甚至死亡。

(1) 空气污染的成因

① 悬浮微粒 火山爆发, 森林大火, 火力发电厂燃烧煤炭、石油及柴油车排烟, 以及工厂和营建道路工程所产生的粉尘。

② 二氧化硫 工厂使用含硫燃料, 如燃烧重油、生煤, 以及汽油引擎车所排放。

③ 一氧化碳 机动车排放燃烧不完全的废气, 以及炼焦厂、电石工厂等产生的污染源。

④ 氮氧化物 机动车辆、火力电厂及工厂锅炉的燃料在高温燃烧时, 由于燃料中氮化物与空气中过量的氮和氧反应产生氮氧化物, 温度越高时越易产生。

⑤ 碳氮化合物 正常大气下以气态存在, 是产生臭氧和光化学空气污染物的主因。

⑥ 光化学高氧化物 石化燃料生产过程中, 排放出的氮氧化物和碳氢化合物在空气中累积, 经日光照射而发生一系列光化学反应产物。

⑦ 铅 使用有铅汽油及烧煤, 以及炼铅、铅蓄电池制造工厂所排放。

(2) 空气污染的影响

① 对人体健康的影响 不论是气体还是颗粒性污染物, 当浓度太高、量太多或吸入的气体毒性太强时, 均促使呼吸器官内正常防御功能及清除功能丧失而危及生命。

② 对植物的影响 空气污染会损毁果蔬, 使植物叶子组织破坏, 而导致枯黄、掉叶、卷叶等病态; 同时也会使河流湖泊及土壤酸化, 终至破坏整个生态系统。

③ 对金属、建筑等的影响 空气污染可使金属腐蚀生锈, 如电缆、铁轨、桥梁、屋顶等; 另外也会使粉刷墙、纺织品褪色且降低耐久性; 或引起轮胎的龟裂, 造成经济损失。

④ 对艺术宝藏的影响 空气污染致使艺术品逐渐被损坏, 甚至面目全非。

1.1.3 臭氧层破坏和损耗

大气中的臭氧含量仅一亿分之一, 但在离地面 20~30km 的平流层中存在着臭氧层, 其中臭氧的含量占这一高度空气总量的十万分之一。臭氧层中的臭氧含量虽然极其微少, 却具有非常强烈的吸收紫外线功能, 可以吸收太阳光紫外线中对生物有害的部分 (UV-B)。

1985 年, 英国科学家观测到南极上空出现臭氧层空洞, 并证实空洞与氟里昂 (CFC) 分解产生的氯原子有直接关系。1994 年, 南极上空的臭氧层破坏而积已达 $24 \times 10^6 \text{ km}^2$, 北半球上空的臭氧层比以往任何时候都薄, 欧洲和北美上空的臭氧层平均减少了 10%~15%, 西伯利亚上空甚至减少了 35%。氟里昂是 20 世纪 20 年代合成的, 其化学性质稳定, 不具有可燃性和毒性, 被当作制冷剂、发泡剂和清洗剂。80 年代后期, 氟里昂的生产达到了高峰, 产量达到了 $144 \times 10^4 \text{ t}$ 。在对氟里昂实行控制之前, 全世界向大气中排放的氟里昂已达到了 $2 \times 10^7 \text{ t}$ 。

氟里昂在大气中的平均寿命达数百年, 相当稳定的氟里昂从对流层上升进入平流层后, 在一定的气象条件下, 会在强烈紫外线的作用下分解, 分解释放出的氯原子同臭氧会发生连锁反应, 不断破坏臭氧分子。如果平流层的臭氧总量减少 1%, 预计到达地而的有害紫外线将增加 2%, 使皮肤癌和白内障患者增加, 降低人的免疫力, 使传染病的

发病率增加。据估计，臭氧减少1%，皮肤癌的发病率将提高2%~4%，白内障的患者将增加0.3%~0.6%。过量的紫外线辐射会使植物的生长和光合作用受到抑制，浮游生物的生产力下降，可能导致某些生物物种的突变。

2000年10月9日，南极上空的臭氧层空洞扩大到智利南部城市蓬塔阿雷纳斯上空，使当地居民处于强度极高的紫外线辐射下。为此，该市及邻近地区宣布进入紧急状态。为了确保当地12万居民的健康，蓬塔阿雷纳斯市卫生部门启动了二级警报，告诫市民不要在中午11点到下午3点之间外出，因为在阳光下暴晒7min左右皮肤就会受到损伤。

1991年，中国政府签署《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》。1993年，中国政府批准实施《中国消耗臭氧层物质逐步淘汰国家方案》。如能按照方案的计划实施，2007年消耗臭氧层物质ODS量可低于《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》的控制目标，并在2010年彻底禁用ODS。

1.1.4 水资源危机

世界上水的总体积约为 $14.1 \times 10^8 \text{ km}^3$ 。这些水如果均匀分布在地球表面，地球水深将近3000m。但其中只有2%是淡水，淡水的87%又被封冻在两极及高山的冰层和冰川中；12%为地下水；地表淡水中大约15%是便于人类利用的，约 42000 km^3 ，人均约 7000 m^3 。人类生活一刻也离不开水（如表1-2列出了人类对水的直接需求量）。由于水资源在时空上分布不均，加上人类的不合理利用，世界上许多国家和地区面临着严重的水资源危机（表1-3列出了生活用水和生产用水）。

表 1-2 人类对水的直接需求量			单位：L/(人·d)		
原始社会	BC8000	12	工业前期	AD1800~AD1900	60
农业前期	BC8000~AD1000	20	工业后期	AD1900~AD1960	120
农业后期	AD1000~AD1800	40	现代社会	AD1960 至今	500

注：BC表示公元前，AD表示公元。

表 1-3 生活用水和生产用水			
用 途	用水量/ m^3	用 途	用水量/ m^3
饮水	0.001~0.002	1t 大米	1500~2000
冲厕所	0.005~0.015	1t 牛奶	20000~50000
生产		提炼 1t 石油	20~50
1t 糖	110	制造 1 辆汽车	250
1t 小麦	300~500	发射 1 枚洲际导弹	2000

根据国际经验，每人每年 1000 m^3 可重复使用的淡水资源是一个基本指标，中国（1998年）： $2285 \text{ m}^3/(\text{人} \cdot \text{年})$ 。世界生活在缺水国家的人口：1990年，1.32亿；2025年，6.53亿~9.04亿；2050年，10.6亿~24.3亿，约占全球预测人口的13%~20%。

2000年中国7大水系的污染状况：57.7%的断面满足Ⅲ类以上水质要求；21.6%的断面为Ⅳ类水质；6.9%的断面属Ⅴ类水质；13.8%的断面属劣Ⅴ类水质。7大水系

污染程度由重到轻依次为辽河、海河、淮河、黄河、松花江、珠江、长江。

2000 年大型淡水湖泊富营养化问题严重。1954 年以来, 长江中下游的天然水面积减少了约 $1.3 \times 10^4 \text{ km}^2$; 在江汉平原, 20 世纪 80 年代与 50 年代相比, 湖泊总水面积减少了 33.6%, 湿地减少。新疆 50 年代湖泊总面积为 9700 km^2 , 现已缩小了 4952 km^2 ; 最大湖泊罗布泊, 历史上面积曾达 3000 km^2 , 50 年代为 2006 km^2 , 1972 年已完全干涸。

地下水超采, 引起地面下沉、海水入侵。河北、河南、豫北地区和山东西北地区的地下水降落漏斗已连成一片, 形成包括北京和天津在内的华北平原地下水漏斗区, 面积超过 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。2000 年, 局部地区地下水部分水质指标超标, 主要有矿化度、总硬度、硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮、铁、锰、氯化物、硫酸盐、氟化物、pH 值等。在污染程度上, 北方城市重于南方城市, 华北地区污染尤为突出。全国 20 多个城市, 包括天津、上海、北京、太原、西安及其他一些沿海城市发生了不同程度的地面沉降, 其中塘沽和汉沽沉降速率达 188 mm/年 。目前全国有 200 个县市共发现地裂缝 757 处, 其中西安市最为严重, 已发现较大裂缝 13 条。海水大面积入侵, 使土地盐碱化, 这一现象在山东、河北、辽宁、江苏、天津和上海等省市均有发生, 以山东胶东半岛沿海最为严重。

海洋资源同时遭到严重破坏。1993 年, 在全世界捕获的 $1.01 \times 10^8 \text{ t}$ 鱼中, 海洋捕捞占 77.7%, 内陆捕捞占 6.8%, 水产养殖占 15.5%。日本是世界上首要的海洋捕鱼国, 同时也是最大的海产食物输入国, 海洋捕鱼的极限为 10^8 t/年 , $2/3$ 以上的海洋鱼类被过度捕捞, 其中 25% 已经灭绝或濒临灭绝, 44% 的鱼类的捕捞已达到生物极限。分布最广、影响最大的污染源是排放的污水和土地开垦及侵蚀的沉积物, 污染和沿海开发对湿地、红树林、珊瑚礁的破坏, 船舶、钻井平台原油泄漏和农药等有机合成物倾倒, 塑料、废弃渔网和石油泄漏形成的焦油团等对海鸟和海洋哺乳动物造成很大危害。污水造成世界许多沿海水域出现富营养化, 过量的氮、磷等营养物造成藻类和其他水生植物的迅速生长, 有可能发生由有毒藻类构成的赤潮, 2000 年, 中国海域共记录到赤潮 28 起, 比 1999 年增加了 13 起, 累计面积 10000 多平方千米。

1.1.5 土地荒漠化和污染

(1) 土地荒漠化 在风力作用下, 出现风蚀地、粗化地表和流动沙丘; 在流水作用下, 出现劣地和石质坡地; 在物理和化学作用下, 主要表现为土壤板结、细颗粒减少、土壤水分减少所造成的土壤干化和有机质的显著下降, 结果出现土壤养分的迅速减少和土壤的盐渍化; 工矿开发造成的土地荒漠化主要表现为土地资源损毁和土壤严重污染, 致使土地生产力严重下降甚至绝收。

世界荒漠化约占全球陆地面积的 $1/4$, 并造成沙尘暴频繁, 已影响到了全世界 $1/6$ 的人口、100 多个国家和地区。土地荒漠化的成因包括自然和人为两个方面。自然因素: 异常的气候条件, 特别是严重的干旱条件, 由此造成植被退化、风蚀加快; 人为因素: 过度放牧、乱砍滥伐、开垦草地并进行连续耕作等, 由此造成植被破坏、地表裸露、加快风蚀或雨蚀。

亚太地区人类活动对土地退化的影响：植被破坏占 37%；过度放牧占 33%；不可持续农业耕种占 25%；基础设施建设过度开发占 5%。中国现有耕地 20 亿亩（约 1.34×10^8 ha），人均耕地仅为 1.5 亩（0.1 ha），不及世界平均水平（0.24 ha）的一半，中低产田比例大，占整个耕地面积的 78.55%，中国以占世界 10% 的耕地养活占世界 22% 的人口。我国是世界上荒漠分布最多的国家，1999 年总面积约 267.4×10^4 km²，占国土陆地总面积的 27.9%，分布在新疆、青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、辽宁、吉林和黑龙江共 9 个省区，形成南北宽 600 km，东西长 4000 km 的荒漠带，其中沙漠面积 71×10^4 km²，占国土面积的 7.4%，戈壁面积 57×10^4 km²，占国土面积的 5.9%。我国沙漠每年正以 2100 km² 的速度扩展，相当于每年减少两个香港的土地。2002 年沙化土地已达 174×10^4 km²，占国土总面积 18.2%。位于新疆塔里木盆地的塔克拉玛干沙漠面积 33.76 km²，是我国最大的沙漠，也是世界上第二大流动沙漠。中国受荒漠化影响的土地面积 332×10^4 km²，其中沙质荒漠化土地 153×10^4 km²，占国土面积的 15.9%；受荒漠化危害的人口有近 4 亿，农田 1500×10^4 ha，草地 10^8 ha，另外还有数以千计的水利工程设施和铁路、公路交通等。84.4% 的草地分布在西部，面积约 3.31×10^8 ha。由于不合理的利用，草原生态系统遭到了严重破坏，草地退化面积不断扩大，西北地区沙漠逐渐扩展，荒漠化日益严重，沙尘暴频繁发生。2001 年 3 月 19 日，10 年以来最大的 1 次沙尘暴席卷甘肃、内蒙古、宁夏、山西、陕西、河北、天津、北京，面积达 140×10^4 km²，影响人口 1.3 亿。强度最大时，能见度 500 m 以下。

(2) 土壤污染 现有耕作土壤已遭污染蚕食，如再不有效遏制污染，将严重威胁人类赖以生存的基地。土壤污染源如下：工业废水、废污泥或其他面体、液态废弃物；农药及肥料；畜牧业废弃物；城市污水及垃圾；废气、落尘及酸雨。

土壤遭受污染，不仅土壤品质恶化，根着其上的作物、食用作物的生物也受波及，甚至影响到地下水源的品质，进而威胁到饮用水的安全。工业废水中所含的铅、镉等重金属沉积在土壤中，对作物有加成作用，增加对稻作危害的程度；并经食物链进入人体，累积到一定限量后，就会产生中毒现象。塑料、石化、纸厂、电镀、染整、制革、食品、肥料等工厂的废水，会增高农田的水溶性盐分，增加电导率。食品、酵母制造工厂的废水，会造成土壤缺氧现象，影响作物产量。钢铁、砂石、煤矿厂废水皆含有极高的悬浮面体，超量时会使土壤造成缺氧现象，并降低土壤对水及空气的通透性，使作物生长受阻。使用被污染的水灌溉，会增加土壤中的有机质和钾，有效性磷降低，pH 值降低，含氮量大增，使稻作徒长、倒伏，结实不佳，多病虫害和米粒中的镉含量增高。流进土壤中的含砷农药，经由食物生物链浓缩而进入人体、牲畜及野生动物体内造成疾病等不良影响。猪粪尿为高浓度的有机废水，一旦进入土壤，一两天内土壤氧气就被消耗殆尽，植物根部则因缺氧而易枯死。以猪粪尿为肥料，施肥超量会使土壤的 pH 值升高，电导率增加，交换性钾及可抽取性锌和锰增加，有机物不完全分解而产生有毒物质，导致产量的降低。土壤中的剧毒性物质（如多氯联苯、戴奥辛）通常都属化学工业废弃物，这些物质因无适当的处理或回收就排到环境中，危害生物，引起公害。肥料大部分为无机盐类，可溶于土壤中，使用化学肥料过多会造成土壤酸化，并影响到农作物的生长。施用过多含氯肥料，将导致重金属有效性增加。汽车使用含铅汽油，其排放的废

气中含有铅化合物，经雨水洗刷沉积于土壤中，造成铅污染，再经由食物链进入人体。使用含汞的农业杀虫剂，进入土壤后为稻米所吸收、累积，最后为人所食用。酸雨使土壤酸化、矿物质流失，影响作物的生长。土壤中污染物经传输影响到地下的水质，可能间接造成饮用水的污染。

1.1.6 生物多样性减少

生物多样性 (biodiversity) 包括以下 3 个层次。

① 基因或遗传多样性 (genetic diversity) 是指种内基因的变化，包括同种的显著不同的种群 (如水稻的不同品种) 和同一种群内的遗传变异。

② 物种多样性 (species diversity) 是指一个地区内物种的变化。目前国际上讨论最多的是物种的多样性。科学家估计地球上大约有 1400 万种物种，其中有 170 万种经过科学描述，其中热带雨林几乎包含了世界上半以上的物种。

③ 生态系统多样性 (ecosystem diversity) 是指群落和生态系统的变化。

从恐龙灭绝以来，如今地球上生物多样性损失的速度比历史上任何时候都快，鸟类和哺乳动物现在的灭绝速度或许是它们在未受干扰的自然界中的 100~1000 倍，如果目前的灭绝趋势继续下去，在下一个 25 年间，地球上每 10 年大约有 5%~10% 的物种将要消失。生物多样性减少的原因：大面积采伐森林，过度放牧和垦殖草原；过度捕猎和采集生物物种；工业化和城市化的发展、占地、污染；外来物种的大量引入或侵入；无控制的旅游；土壤、水和空气污染；全球变暖等。由低等生物进化到原始人类，经历了亿万年漫长的发展过程。进化的成功取决于正确地选择元素，几百年来现代化使人体的必需元素减少，有害元素增加。中国有高等植物 30000 种，占世界的 10%，居世界第三位，其中属于中国特有的高等植物 17300 种，裸子植物 250 种；脊椎动物 6347 种，占世界的 14%，其中属于中国特有的脊椎动物 667 种，鸟类 1244 种，鱼类 3862 种。中国目前濒危高等植物 1009 种，占中国高等植物总数的 3.4%，《国家重点保护植物名录》公布的珍稀濒危植物共 354 种，主要濒危代表物种有无喙兰、双蕊兰、海南苏铁、印度三尖杉、姜状三七、人参、天麻、草苈蓉、肉苈蓉、罂粟牡丹等；濒危脊椎动物 398 种，占中国脊椎动物总数的 7.7%，《国家重点保护野生动物名录》公布的珍稀濒危野生动物共 405 种，其中陆栖动物 305 种，水生动物 70 种，主要濒危代表物种有东北虎、华南虎、云豹、大熊猫、叶猴类、多种长臂猿、儒艮、坡鹿、白暨豚等。

1.1.7 森林植被破坏

森林减少，不仅使资源减少，同时会产生系列影响和危害：产生气候异常；减少二氧化碳吸收；物种灭绝和生物多样性减少；加剧水土侵蚀、荒漠化；减少水源涵养；加剧洪涝灾害。

1991 年，全球森林和林地所覆盖的面积是 38.6×10^8 ha，约占地球陆地面积的 29.6%。1995 年，这个数字减少到 25.1%，全球森林面积的减少主要发生在 20 世纪 50 年代以后。在 1960~1990 年期间，全球丧失了 4.5×10^8 ha 的热带森林。森林减少的主要原因：①在工业化过程中，欧洲、北美等地的温带森林有 1/3 被砍伐掉了；②热

带森林的大规模开发只有 30 多年的历史,从欧洲国家进入非洲,从美国进入中南美洲,从日本进入东南亚;在 1986 年全球进口的 $94 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的木材中,日本消费了其中的 2/3,虽然日本的森林覆盖率达 66.7%。

中国的森林与草原情况也不容乐观。1991 年森林覆盖率为 13.6%,1995 年为 14.3%。根据第五次全国森林资源调查结果,2000 年森林覆盖率为 16.55% (世界平均水平 27%),活立木总蓄积量[●] $124.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,森林蓄积量 $112.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,除中国台湾省外,全国人工林蓄积量为 $10.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,中国人工林面积居世界首位,全国林木年均净增长量为 $45752.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,年均净消耗量为 $37075.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

中国拥有草地近 $4 \times 10^8 \text{ ha}$,约占国土面积的 40%,居世界第二位,人均占有草地仅 0.33ha,约为世界人均草地面积 0.64ha 的一半。中国 90% 的草地不同程度地退化,其中中度退化以上草地面积已占半数。

1.2 生态学审视

1.2.1 增长的极限

《列子·天瑞》中说:“杞国有人忧天地崩裂,身亡所寄,废寝食者”。1972 年,罗马俱乐部一群“现代杞人”,在世界财富高度增长的年代,发表了《增长的极限》一书,给还陶醉在高增长和高消费的西方发达国家提出了严厉的警告。书中开篇第一句却是引用中国古代智者韩非子的名言:“今人有五子不为多,子又有五子,大父未死而有二十五孙。是以人民众而货财寡,事力劳而供养薄。”韩非子死后,西方一个叫马尔萨斯的经济学家在 1798 年出版了著名的《人口论》,他认为:人口是按几何级数增长的,如 1、2、4、8、16、32、64、… ,而食物是按算术级数增长的,如 1、2、3、4、5、6、7、…。几代之后,粮食供给与需求差距急剧增大,于是产生疾病、瘟疫,甚至战争,导致人口锐减,才能使粮食供给与人口到达新的平衡。这是杞人忧天吗?

千万年来,人们处心积虑的是如何开垦土地,面从未想到无边无际的土地会用尽;千万年来,人们想方设法引水灌田,从未想到滔滔江水会干枯;千万年来,人们勤奋地砍伐参天大树,从未想到原始森林会变成沙漠;千万年来,人们勇敢地划着独木舟在大海里捕鱼,从未想到茫茫大海中的鱼能捕完;千万年来,人们梦想着飞上天空,从未想到广阔的天空也会拥挤不堪。历史上杞人之忧为什么被人们认为是多余的?这主要是当时人类的扩张规模与速度一直没有达到地球生物圈的承受极限,人们历来相信大自然有着自我修复的功能。

根据罗马俱乐部发布的著名世界模型预测:如果现有系统没有重大变化,人口和工业的增长,最迟在下一个世纪内停止。即使科学有重大进步:核动力会使可以利用的资

● 活立木总蓄积量指一定范围内土地上全部树木蓄积的总量,包括森林蓄积、疏林蓄积、散生木蓄积和四旁树蓄积。

源储藏量翻一番, 75%的资源获得循环利用, 污染减少到1970年的1/4, 土地产量翻一番, 生育得到控制。整个世界最后的命运仍然是: 当资源枯竭、污染积累、粮食生产下降时, 工业的增长停止, 死亡率上升。

1.2.2 生态学思考

面对以上问题, 人们会想到科技进步能否缓解人与自然的紧张关系? 也许科技进步可以解决能源问题, 但是根据热力学第二定律, 人类活动每创造一个单位的有序, 就一定给周围环境带来一个(以上)单位的无序, 治理环境的效率不可能是100%(没有永动机), 人类生态系统创造无序的速度必须限制在自然生态系统韵律可消化的程度以内。因此, 人类必须在物质财富、生态损失和净福利三者之间做出平衡。

事实上, 科技进步也许只能延缓问题, 而在疏解问题过程中, 可能会带来更严重的问题。为此, 人们的观念必须从解决经济系统中的环境问题转变到生态环境中的经济问题, 只有这样才有可能寻求一条出路。

经济系统不能凭空循环, 它要吞噬自然资源和排放垃圾废物。达到生态极限以前, 经济循环速度愈快, 财富愈多; 达到生态极限以后, 经济循环速度愈快, 垃圾愈多。

如果能够使经济系统循环速度与生态系统循环韵律相协调, 可以实现可持续发展。基本条件是: 在源头, 可更新资源消耗速度小于自然更新速度, 不可更新资源消耗速度小于被可更新资源替代的速度; 在末端, 废物垃圾的排放速度小于被自然降解的速度。

从经济系统与生态系统之间的关系出发, 考虑经济系统的运行规律和理性标准, 自然资源具有经济和生态双重属性, 不仅要考虑到经济运行周期的尺度, 同时更注重生态循环的时间尺度; 不单以经济系统的运行效率和金钱财富的增长, 也以生态系统的循环畅顺、经济系统与生态系统的协调等因素, 作为衡量人的福利指标。

1.2.3 生态工程方法

人类是生活于地球上的特殊生物, 因为智力发展与进化快于其他在地球上的任一物种, 基于自身的优越感与文明科技的快速演进, 而破坏了地球上的生物与生物之间的关系。生物与生物间的关系有互利共生、抗生、寄生、剥削、竞争等, 但是人类与地球其实只有寄生的关系, 而宿主就是地球。

所谓寄生, 是指寄生物消耗宿主而其自己受益的关系, 寄生物生活在另一物种的体内或身体上, 并且依靠消耗该物种而生存, 寄生物通常小于它的宿主, 而且具有特殊的适应性, 以配合宿主的生活方式。人类一方面消耗宿主的资源与生命精力, 另一方面又会担心宿主的生存能力, 因为当宿主死亡时, 寄生者也会灭亡。如上所述, 工业化与污染造成了全球的温室效应, 还有热带雨林的破坏、臭氧层的空洞。加上过度开发造成森林的滥垦滥伐, 造成生态物种的生存空间大幅缩减, 进而造成其他物种的灭绝。就在人类的宿主即将被寄生者吸干之余, 许多人开始萌生地球环保与共生的观念, 各种以科技战胜环境的想法由此而生, 也就是近年来绿色建筑、环境共生、生态工程方法被高度提倡的原因。1986年的一个封闭型生态系统生物圈2号的失败, 更证明人类无法独立生存

于地球之外。

这个计划实施于美国亚利桑那州的沙漠区，耗资 2 亿美金，希望用人类有限的科技与工程技术，模仿一个类似地球缩小版封闭的生态与环境系统，并对人类与其他物种是否能在该系统内自行生存与循环进行实验。此生态工程的主体结构由玻璃帷幕与钢架组成，其系统内仿真各种生态环境，如热带雨林、沼泽海洋、沙漠，并且包含地球应有的能量：气、水、土、生，也就是大气、海水、淡水、土壤、生物多样性（约 4000 种生物）及 4 男 4 女的人类，并靠太阳能发电，完全密闭且自给自足成为一个小生态圈。但是经过 2 年实验终于宣告失败，因为其内部的氧气与二氧化碳无法自行平衡，生物繁衍速度缓慢，再次证明生物无法脱离地球这个宿主独自生存。从而说明了维持地球生物多样性与完整性及自然环境的相互作用关系对人类生存而言是极为重要的，人类无法复制一个类似地球的环境，所以更加要去保护，并将寄生的心态转为与地球共生的关系。

生态工程方法则是在无法避免的人工开发又能与地球共生的情况下的工程方法，是指人类基于对生态系统的深切认知，为达到生物多样性保护及可持续发展的目的，采取以生态为基础、安全为导向，以减少对生态系统造成伤害的可持续系统工程设计。生态工程的目标很广泛，防灾、景观、休憩、保护、文化或教育等功能与目标，都要能够同时涵盖，不会为了任何一个目标而牺牲其他，即各种目标都同时共生。

就像是人类对地球的观念从寄生到共生一样，心态与观念的改变，重于行为与技术的改变。当对环境的心态由消耗与破坏转变为爱护与珍惜，当每个人都意识到自己没有地球而无法生存下来时，不要说是生态工程方法，任何只要牵涉生态的变动或破坏生态系统的行为与动作，大家都会去关心、去思考如何才能使自然与人文兼合。

近年来随着经济的发展，世界上许多先进国家均极力倡导应用生态工程方法来维护自然生态系统的结构与功能，同时保障人类安全及达到可持续发展的目标。人类对自然环境的经营管理，若能了解其环境生态系统的结构与功能，采取顺应自然生态原理的工程方法，才有可能在维护自然生态系统稳定与平衡的前提下，达到人类在安全基础上可持续发展的目标。

本书主要介绍生态工程方法的意义、缘起、演变、原理、技术、设计和实施步骤，以水质自然净化为重点，介绍湿地处理、土壤渗滤处理、植被处理和地面径流处理等水污染控制生态工程方法和案例，同时还涵盖了河道修复生态工程方法等生态城市设计建设必需的理论和工具。目前在污水生态处理领域理论相对比较成熟，但具体工程方法和措施还需研究开发，因此，本书的出版希望能弥补此缺憾，特别是为当今建设和谐社会和节约型社会贡献绵薄之力。

参 考 文 献

- 1 林镇洋. 生态工程技术参考手册. 中国台北：明文书局，2004
- 2 内贝尔著. 环境科学——世界存在与发展的途径. 范淑琴等译. 北京：科学出版社，1987
- 3 李有工. 第二次变局——中国人的绿色视野. 北京：北京大学出版社，1995