

饮用水安全评价

王子健 主编
王东红 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书针对目前饮用水中可能存在的污染物,包括有机物、金属、臭味物质、藻毒素、病原微生物、消毒副产物和含氮化合物等的来源、特点以及分析方法进行了系统的介绍。以作者近几年在饮用水安全评价和健康风险评价方面的主要工作为基础,结合国内外该领域相关的研究进展,系统地阐述了饮用水安全评价的组成体系和评价方法,并给出了应用方法和应用实例。除了针对微量有毒污染物、病原微生物和藻毒素的分析和监测技术外,本书首次系统地阐述了饮用水中生物毒性测试和毒性评估的方法、水源水质生物监测与预警的技术原理和方法,以及基于生态和健康风险开展饮用水安全性评价的原理和方法,为提高我国饮用水安全评价的总体水平提供了新的思路。

本书可作为自来水供给和饮用水生产企业技术人员的参考书,也可供从事环境科学研究和环境工程的人员以及高等院校师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

饮用水安全评价/王子健主编. —北京:化学工业出版社,
2008.2

ISBN 978-7-122-01941-7

I. 饮… II. 王… III. 饮用水-给水卫生-评价 IV. R123.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第006648号

责任编辑:侯玉周

文字编辑:张春娥

责任校对:宋夏

装帧设计:蔡擎

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市万龙印装有限公司

720mm×1000mm 1/16 印张25½ 字数510千字 2008年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:60.00元

版权所有 违者必究

序 言

水质是水和其中所含杂质（impurities）所共同形成的综合体系。现代社会取用的天然水源水质是水在自然循环和社会循环过程中容纳各种外来物质形成的复杂产物。城镇给水系统把天然水质转化成为对人体健康安全无害的生活饮用水，要经过一系列物理、化学、生物处理的工艺单元和输配过程，其中各个关键环节都需要对微量及痕量杂质进行分析检测，以对整个水质体系做出安全评价。

我国的生产经济水平和人们的生活需求都在迅速发展提高，但环境保护相对滞后，天然水环境的污染日趋严重，水质污染突发事件也有发生。预计在相当时期内水体治理未必能达到满意程度。因此，饮用水的水质安全要算是当前环境保护的最后一道关口，是保护人体健康和社会和谐的重要因素，而科学的水质检测和风险评估规范更是不可缺少的保证条件。

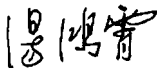
在当前世界各国及世界卫生组织（WHO）的饮用水水质标准中，除水中常规污染物的水质指标外，随着健康医学和仪器鉴定及生物检测技术的进步，还包括水中病原微生物、潜在致癌作用的有机和无机化学品、内分泌干扰物等多种含量限定指标。例如，若干水质调查资料显示，实地饮用水样品中能够鉴定出数百种对人体健康有害的化学物质，它们具有持久难降解性、潜在积累性，在人体内对细胞、DNA等生命要素诱发变异，产生致病、致癌、致畸等效应。这些污染物就浓度而言对常用综合指标如生化需氧量（BOD）、化学需氧量（COD）、有机碳总量（TOC）等贡献极小，但潜在的危害却极大，而且绝大部分不在水质日常监控指标范围之内。由于这类污染物在环境中的持久性（P）、生物富集性（B）以及进入生物体后的慢性毒性（T），从科学的角度分析长期饮用时的潜在健康风险非常必要。当然，人群对有关污染物的接触量和暴露时间也是实时实地需加以区别的另一重要考虑因素。

面对饮用水水质安全问题的发展趋势，世界各发达国家和一些国际组织历年不断修改和补充新的水质指标和标准，并且逐步建立了基于风险评估的管理体系。我国目前仍缺乏自主的环境基准和标准的研究体制，有关检测指标和水质标准大多参考国外现有数据，不能体现中国的自然环境、社会生活、人体特征，特别是当前环境污染的特点，不能适应随着工业生产发展和产业结构改变导致水体污染物种类不断趋于复杂化的形势。2007年7月颁行了新一版的我国《生活饮用水卫生标准》

(GB 5749—2006)。其中规定的水质指标由原来的 35 项大幅增多到 106 项，部分指标的限值也更加严格。面对我国水质分析监测能力、水质处理设施和管理技术水平以及经济投入和城乡居民生活需求状况，认真推行这一水质标准存在一定的挑战。如何科学地、务实地审视我国国情以及面临的饮用水安全威胁，进而建立我国自主的饮用水安全健康评价体系和研究体制是迫切的任务。

《饮用水安全评价》一书针对当前饮用水安全性评价涉及的几个重要方面，全面地分析了在水源水及饮用水生产和输配过程中产生的主要水质问题，对持久性有毒污染物、藻毒素、消毒副产物、病原微生物等特殊污染物，以及水源地质量评价、水生态系统评价和健康风险评价等新的环境安全性评价方法逐一展开讨论评述，系统地介绍了不同安全评价指标及其分析方法，尤其结合了作者在大量实际研究工作中积累的实际案例，内容十分丰富。本书内容在我国水质学领域中具有创新性、导向性和实用性，相信对广大的环境科学与技术工作者们会起到相应的启迪与参考作用，以共同为我国环境保护事业的科学化做出贡献。

中国科学院生态环境研究中心，环境水质学国家重点实验室

中国工程院院士 

2007 年 9 月

前 言

本书针对饮用水安全评价体系，以作者近几年在饮用水安全评价和健康风险评价方面的主要工作为基础，结合国内外该领域相关的研究进展，系统地阐述了饮用水安全评价的组成体系和评价方法，并给出了应用方法和应用实例，以期为从事环境科学和环境工程研究以及饮用水处理工业的技术人员提供参考。

第1章详细介绍了水源地和水源水的形成和评价方法，阐述了生态风险评价的概念、发展和评价体系，并以太湖为案例对水源地生态风险评价的过程进行了解析，主要由黄圣彪和乔敏撰写。第2章系统阐述了水中嗅味物质的来源、分类以及分析与监测方法，并介绍了已经建立的饮用水中嗅味物质的分析方法及其去除工艺，主要由王东升、梁存珍和周益奇撰写。第3章介绍了产毒蓝藻和蓝藻毒素的来源、分布、毒性特征、产毒机理和环境风险评价方法，主要由宋立荣、甘南琴、陈伟、李林、郑凌凌和朱运芝撰写。第4章介绍了饮用水中存在的消毒副产物的种类、来源、分析方法和去除工艺，同时还介绍了饮用水中卤酸根的分析与监测方法，主要由陈颖和周益奇（4.5节）撰写。第5章对水中可能存在的含氮化合物的危害、来源与分布、去除工艺和监测方法进行了系统的描述，主要由王东红撰写。第6章系统阐述了饮用水中有毒化学物质的类型和来源，包括挥发性有机物、消毒剂与消毒副产物、农药、持久性有机卤化物、多环芳烃、具有内分泌干扰效应的酚类和酯类化合物、雌激素、金属以及其他有机污染物和无机污染物，并对它们的前处理方法、仪器分析方法和质量控制方法进行了详细的介绍，主要由许宜平撰写。第7章从生物标记物的生物毒性的测试的基本概念和发展现状、饮用水安全性评价中生物测试指标选择及测试方法、应用成组生物毒性测试方法进行的饮用水安全评价以及生物毒性测试的样品富集与因果关系分析4个方面详细介绍了生物毒性测试与毒性评估鉴定方法，主要由马梅和饶凯锋撰写。第8章介绍了饮用水中病原微生物污染及其检测方法，包括饮用水中病原微生物类型和来源、常规检测方法和分子生物学检测方法，并介绍了饮用水中病原微生物控制标准和一些应用实例，主要由何晓青撰写。第9章阐述了水源水质生物监测与预警的技术原理和方法，并对作者所在课题组研制的一种新型水质安全在线生物仪的原理和生物安全预警系统监测水质变化和污染事故方法进行了详细的介绍，主要由任宗明撰写。第10章介绍了饮用水健康风险评价体系，包括健康风险评价概念以及发展、饮用水健康风险评价方

法及应用、风险表征，以及健康风险评价的发展趋势，主要由徐鹏、黄圣彪和王东红撰写。此外，环境水化学国家重点实验室的研究生如李剑、骆坚平、李志良、程莉、张德友等为本书的撰写提供了大量的实验数据和研究方法。

本书所采用的具体案例来自国家自然科学基金、国家高技术研究发展计划(863计划)、中国科学院方向课题和北京市重点基金等科研课题。期间得到了北京市水务局、北京市自来水集团、北京市排水集团、天津自来水公司、深圳水务集团的大力支持和协作。

饮用水安全性涉及面十分宽广，由于主编及其他作者的专业水平有限以及时间的限制，对诸多问题的认识还不够深刻和完全，难免存在错误和疏漏之处，敬请读者批评指正。

编者

2007年9月

目 录

第 1 章 水资源、水源地和水源水质评价	1
1.1 我国水资源和生活用水的总体概况	2
1.2 水污染	5
1.2.1 我国水污染形势	5
1.2.2 水污染产生原因和污染类型	6
1.2.3 水源污染给城市给水水质处理带来的问题	10
1.3 水源水质保护的法律和法规	11
1.3.1 我国保护水源水质的有关法律和法规	11
1.3.2 水质基准和标准	12
1.3.3 饮用水水源地应急保护体系	14
1.4 未来水源水保护应开展的主要研究工作	15
1.4.1 水源地安全性评价	15
1.4.2 加强水源水应急保障	16
1.5 水源地水生态系统的健康评价	16
1.5.1 基于指示物种的评价	17
1.5.2 基于群落水平的评价	17
1.5.3 包含多种测度指标的生态系统结构评价	23
1.5.4 水生态系统健康评价存在的问题及发展重点	23
1.6 基于生态风险分析水源地安全性评价	24
1.6.1 生态风险评价概述	24
1.6.2 风险评价的发展历史	25
1.6.3 风险评价的一般过程	27
1.6.4 生态风险评价过程中急需解决的关键技术问题	27
1.7 案例——太湖梅梁湾水源地生态风险评价	34
1.7.1 研究背景情况	34
1.7.2 风险评估计划	35
1.7.3 太湖梅梁湾水源地化学胁迫因子筛选	37
参考文献	45
第 2 章 水中嗅味物质的分析与监测	49
2.1 概况	49
2.1.1 饮用水中嗅味物质的来源	50

2.1.2	嗅味物质年轮的建立	51
2.1.3	饮用水中嗅味的种类及其代表性的化合物	54
2.2	饮用水中嗅味物质分析方法的研究进展	57
2.2.1	仪器分析方法	58
2.2.2	感官分析方法	64
2.2.3	电子鼻和感官 GC 分析	66
2.3	饮用水嗅味物质分析方法的建立及应用	68
2.3.1	概述	68
2.3.2	固相微萃取法的研究	69
2.3.3	同时蒸馏萃取法的研究	72
2.3.4	闭路气提分析方法的研究	73
2.3.5	分析监测实例	75
2.4	饮用水中嗅味物质的去除工艺研究	80
2.4.1	氧化去除工艺	80
2.4.2	活性炭吸附处理	84
2.4.3	生物处理	87
	参考文献	89
第3章	产毒蓝藻和蓝藻毒素环境风险评价	92
3.1	藻类与产毒藻类	92
3.1.1	藻类的分类及产毒藻类各门(纲)主要特征	92
3.1.2	有毒藻类	92
3.2	蓝藻毒素简介	96
3.2.1	蓝藻毒素的类型	96
3.2.2	微囊藻毒素的结构	98
3.2.3	微囊藻毒素的毒性	99
3.3	微囊藻毒素的测定方法	99
3.3.1	高效液相色谱法	100
3.3.2	酶联免疫吸附测定法	100
3.3.3	蛋白磷酸酶抑制法	101
3.3.4	产毒微囊藻的全细胞 PCR 检测法	101
3.3.5	水中微囊藻毒素的测定案例	102
3.4	蓝藻毒素的分布与归趋	107
3.4.1	蓝藻毒素在水体中的分布	107
3.4.2	蓝藻毒素在底泥及土壤中的分布	108
3.4.3	蓝藻毒素的自然降解	109
3.5	分子生物学技术在蓝藻毒素研究中的关键作用	110
3.5.1	产毒机制	110
3.5.2	微囊藻毒素致毒分子毒理学机制	111
3.6	蓝藻毒素的环境风险评价	113

3.6.1	微囊藻毒素风险评价方法	114
3.6.2	微囊藻毒素的生态风险评价	114
3.6.3	人类健康风险评价	119
	参考文献	120
第4章	饮用水中的消毒副产物	123
4.1	饮用水处理中常用的消毒工艺综述	123
4.1.1	DBP 的产生与饮用水消毒方法的发展	123
4.1.2	目前常用的消毒方法及其安全性	124
4.1.3	DBP 的种类及毒性	126
4.1.4	不同消毒工艺产生 DBP 量的比较	128
4.1.5	DBP 的分析手段和监测方法	129
4.1.6	饮用水中 DBP 污染	130
4.1.7	卫生标准的制订与 DBP 的治理措施	131
4.2	氯消毒副产物及分析监测方法	132
4.2.1	氯化消毒副产物的种类	133
4.2.2	影响氯化消毒 DBP 的生成因素	134
4.2.3	卤代消毒副产物的分析监测方法	135
4.3	臭氧和二氧化氯消毒工艺产生 DBP 的分析和监测方法	141
4.3.1	臭氧消毒副产物	141
4.3.2	二氧化氯消毒副产物	142
4.3.3	ClO_2^- 、 ClO_3^- 和 BrO_3^- 等 DBP 的分析方法	143
4.3.4	ClO_2 消毒中半挥发性有机副产物的检测	145
4.4	其他消毒工艺及其潜在健康影响	145
4.4.1	活性炭吸附法	145
4.4.2	膜技术应用于饮用水处理	146
4.4.3	活性炭与膜组合消毒工艺	147
4.4.4	电化学法	147
4.4.5	光催化消毒法	148
4.4.6	液溴和碘消毒法	148
4.4.7	高锰酸钾与过氧化氢消毒法	148
4.5	水中卤酸根的分析与监测	148
4.5.1	概况	149
4.5.2	来源和毒副作用	150
4.5.3	生成机制、预测模式和控制技术	152
4.5.4	分析测试方法	156
4.5.5	应用实例	157
	参考文献	161
第5章	饮用水中的含氮化合物	164
5.1	饮用水中的含氮化合物及其对健康的危害作用	164

5.1.1	硝酸盐和亚硝酸盐对健康的危害	164
5.1.2	N-亚硝基族化合物对健康的危害	165
5.1.3	其他含氮化合物对健康的危害	170
5.2	地表水和地下水中含氮化合物的来源和形态转化	171
5.2.1	地表水和地下水中硝酸盐和亚硝酸盐的来源	171
5.2.2	地表水和地下水中硝酸盐和亚硝酸盐的形态转化	173
5.2.3	饮用水中亚硝胺的来源	176
5.3	去除饮用水中含氮化合物的处理工艺	177
5.3.1	去除硝酸盐和亚硝酸盐的水处理工艺过程	177
5.3.2	饮用水中其他含氮化合物的去除工艺	185
5.4	硝酸盐和亚硝酸盐以及其他含氮化合物的监测方法	185
5.4.1	硝酸盐的监测方法	185
5.4.2	亚硝酸盐的监测方法	187
5.4.3	硝酸盐和亚硝酸盐的其他监测方法	189
5.4.4	其他含氮化合物的监测方法	190
	参考文献	191
第6章	饮用水中有毒有机污染物和金属污染物的分析监测方法	194
6.1	饮用水中有毒化学物质的类型和来源	194
6.1.1	挥发性有机物	195
6.1.2	消毒剂与消毒副产物	199
6.1.3	农药	199
6.1.4	持久性有机卤化物	210
6.1.5	多环芳烃	212
6.1.6	具有内分泌干扰效应的酚类、酯类化合物	214
6.1.7	雌激素	216
6.1.8	其他有机污染物	216
6.1.9	金属	218
6.1.10	无机盐及其他无机污染物	218
6.1.11	放射性核素	224
6.2	有毒有机污染物和金属污染物分析监测中的样品前处理方法	224
6.2.1	样品前处理技术简介	224
6.2.2	水样的采集方法	232
6.2.3	水样的富集方法	233
6.2.4	水样的浓缩与净化	235
6.2.5	样品衍生化	236
6.3	有毒有机污染物和金属污染物的仪器分析方法	237
6.3.1	有毒有机污染物的仪器分析方法简介	237
6.3.2	饮用水中典型有毒有机污染物的仪器分析方法	243
6.3.3	金属污染物的仪器分析方法	245

6.4	分析工作中的质量保证和质量控制	246
6.4.1	质量保证和质量控制的几个基本概念	246
6.4.2	饮用水水质监测项目中的质量保证/质量控制要素	247
6.4.3	采样过程中的质量保证和质量控制	247
6.4.4	实验室分析的质量保证和质量控制	248
6.4.5	数据分析与审核中的质量保证与质量控制程序	251
	参考文献	252
第7章	生物毒性测试与毒性评估鉴定方法	255
7.1	基于生物标记物的生物毒性测试基本概念和发展现状	255
7.1.1	应用生物毒性测试进行水质评价的重要性和发展趋势	255
7.1.2	生物标记物的概念和分类	256
7.2	饮用水安全性评价中生物测试指标选择及测试方法	259
7.2.1	“三致”效应	260
7.2.2	生殖和发育毒性	267
7.2.3	芳香烃受体效应	277
7.2.4	急性毒性	282
7.3	应用成组生物毒性测试方法进行的饮用水安全评价	287
7.3.1	内分泌干扰物效应的检测	287
7.3.2	类二噁英效应检测	288
7.3.3	细胞毒性检测	289
7.3.4	遗传毒性测试	289
7.3.5	总结	290
7.4	生物毒性测试的样品富集与因果关系分析	290
7.4.1	水中污染物的富集方法	290
7.4.2	水中污染物的分级富集方法	293
7.4.3	应用分级富集和生物毒性测试方法相结合进行饮用水中毒性因果关系分析	293
	参考文献	295
第8章	饮用水中病原微生物污染及其检测方法	297
8.1	饮用水中病原微生物类型和来源	298
8.1.1	饮用水中病原微生物类型	298
8.1.2	饮用水中病原微生物来源	309
8.2	病原微生物的常规检测方法	310
8.2.1	细菌	311
8.2.2	真菌	315
8.2.3	病毒	316
8.2.4	原生动物	317
8.3	病原微生物的分子生物学检测方法	317
8.3.1	聚合酶链反应	318
8.3.2	荧光原位杂交技术检测水体中微生物	322

8.3.3	变性梯度凝胶电泳技术	323
8.3.4	基于核酸序列的扩增技术	324
8.4	饮用水中病原微生物控制标准和实践	325
	参考文献	327
第9章	水源水质生物监测与预警的技术原理和方法	330
9.1	利用生物监测技术评价水质	330
9.1.1	水体污染对水生生物的影响	330
9.1.2	生物监测技术	331
9.2	利用水生生物的行为变化监测水质变化和污染事故	333
9.2.1	环境污染胁迫下生物的行为改变	333
9.2.2	环境压力模型	339
9.2.3	基于行为生态学改变的在线生物监测技术	341
9.3	在线生物监测仪的原理和应用	343
9.3.1	原理	343
9.3.2	利用水质安全在线生物预警系统监测水质变化和污染事故	347
	参考文献	353
第10章	饮用水健康风险评价	355
10.1	健康风险评价简介	355
10.1.1	健康风险评价定义及发展历史	355
10.1.2	健康风险评价的一般过程	356
10.2	饮用水健康风险评价	361
10.2.1	饮用水健康风险评价的现状以及存在的问题	361
10.2.2	饮用水健康风险评价体系以及研究进展	364
10.2.3	饮用水暴露评价方法	379
	参考文献	388

第 1 章 水资源、水源地和 水源水质评价

水是生命之源，是不可替代的自然资源，在经济发展和人类生活中发挥着重要的作用，获得充足、洁净的饮用水是城乡居民最基本的生活需要。社会对水的第一需求就是保障饮用水的安全供给，我国新《水法》第五章第 54 条明确规定“各级人民政府应当积极采取措施，改善城乡居民的饮用水条件”。

人类可利用的水资源主要包括大气水、地表水、地下水、再生水和淡化海水等。其中，大气水（也称空中水）包含大气中的水汽及其派生的液态水和固态水，可通过雨和雪等形式向地表输送，是地表水和地下水的最终补给来源。随着人工催雨技术的快速发展，人类对大气水的利用水平正在逐渐提高。地表水是河流、冰川、湖泊、沼泽 4 种水体的总称，亦称“陆地水”，是人类生活用水的重要来源之一，也是各国水资源的主要组成部分。地表水一般以常年的径流量或径流深度表示，主要来源是大气降水、冰雪融水、流出地面的地下水，是可再生的水资源；地下水指储存在地面以下饱和岩土孔隙、裂隙及溶洞中的水。地下水又分浅层地下水和深层地下水。浅层地下水指地表以下的潜水和微承压水，可以直接接受大气降水和地表水的补给，是农业用水的主要水源以及城市工业和生活用水的后备或辅助水源；而深层地下水通常指基岩以下的含水层，一般难以在短时间内得到补给，通常被视为不可再生资源。再生水主要是指以城市污水为原水，通过人为处理恢复其使用价值，成为可使用的水资源。再生水回用是提高水资源重复利用效率和减少对天然水资源的依赖程度的重要途径。再生水的水量 and 水质取决于污水的再生能力（即污水的社会再生能力），即社会经济实力和科学技术发展水平，是社会经济投入的函数。海水淡化是利用蒸馏法或膜技术从海水中提取淡水水资源的重要途径，也是解决沿海城市和地区水资源严重不足的主要手段之一。目前，海水淡化主要考虑的是其经济可行性，国内最高水平海水淡化技术已降到 6 元/t 的水平，国际上约为 5 元（0.6 美元）/t。随着技术的进步和大规模应用，海水淡化单位造价还会进一步降低。同时随着水价和对水质要求的提高，规模化的海水淡化产业正在形成。

水资源按照用途可以分为生活用水（城镇生活用水和农村生活用水）、工业用水（电力用水、一般工业用水和乡镇用水）、农业用水（农田灌溉用水、林牧渔业用水）和生态环境用水等。目前在我国用水总量中，农业用水占 70% 以上，工业和城市用水不足 30%。一般情况下，生活用水分为居民饮用水、居民卫生用水、

城市公共设施和绿地用水。生产用水分为第一、二、三产业和第四产业——高新技术产业的用水。生态环境用水又分为两个层次：首先是环境用水，指要有足够的洁净水量使江河湖库水体可以达到水生生态系统平衡的自净能力；其次是生态用水，指在一定地域内达到水生生态系统平稳所需的水量。根据基本需求和可持续发展的总战略，以上3种用水方式之间的关系应为：生活用水优先，生产与生态用水并重。

1.1 我国水资源和生活用水的总体概况

我国水资源并不丰富，年平均降水量为 $6.119 \times 10^7 \text{ km}^3$ ，折合降水深 648mm，年径流总量 $27100 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，净可利用水资源总量为 $28100 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，水资源总量居世界第6位。人均占有量仅 2300 m^3 ，约为世界人均水平的 $1/4$ ，列世界第121位，是世界上13个水资源贫乏的国家或地区之一。

我国水资源与人口、经济布局和城镇发展不相称，加之长期以来水源工程建设滞后，供水增长速度不能满足国民经济发展、人口增长及城市化发展的要求，全国和区域性缺水越来越严重，特别是北方地区和重要城市的水资源供需矛盾十分突出。据对全国669个城市调查，有400个城市常年供水不足，其比例达 $2/3$ ，日缺水量 $1600 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，其中110个城市严重缺水。农业每年缺水 $300 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，在农村尚有2400多万人饮水困难。由于气候变化及人类活动的影响，华北、西北、东北地区都面临着缺水的威胁。从历史资料分析，黄河流域曾14次出现连续干旱，海河流域曾连续14年干旱。南方及其他一些地区也存在着局部资源性缺水、水质性缺水或工程性缺水等问题。据预测，到2030年我国人口增至16亿时，人均水资源量将降低到 1760 m^3 ，按国际一般承认的标准，人均水资源量少于 1700 m^3 为用水紧张的国家。按照正常用水需求和不超过采地下水，我国年缺水量约 $300 \times 10^8 \sim 400 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

我国水资源严重短缺的主要原因在于：①水资源时空分布不均的自然条件导致资源型缺水。我国幅员辽阔，地势存在三个大阶梯分布，气候带的分布存在着纬度地带性、经度地带性和隐域性分布，进而各种因素耦合导致我国生态环境空间差异明显。降水和蒸发在不同的地区变化很大，各地水资源的空间分布很不平衡。包括长江在内的南方水系的流域面积占全国国土面积的 36.5% ，人口约占全国的 53.5% ，但其水资源却占全国水资源的 81% ；而长江以北水系的流域面积占全国国土面积的 63.5% ，人口约占全国的 46.5% ，其水资源量却只占全国的 19% ，其中，西北内陆地区面积占全国国土面积的 35.3% ，其水资源量仅占全国的 4.6% 。水资源分布的严重失衡，不仅加剧我国水资源供需的矛盾，而且还导致我国北方地区易干旱、沙漠化，南方地区易形成洪涝灾害。②人类社会经济活动的急剧增加，对水不合理开发和利用效率低下，加之雨洪资源、中水资源、海水资源等非传统水

资源尚未得到充分开发利用, 缺乏合理配置和有效管理的机制, 导致管理型缺水。全国用水量从 1949 年的 1000 多亿立方米增加到 1997 年的 5566 亿立方米。在水资源短缺的情况下, 我国水资源的有效利用率只有 16%。20 世纪 80 年代我国单位国民生产总值取水量分别为美国和日本的 15 倍和 31 倍, 居世界首位。1999 年, 我国每万元工业增值取水量约为 330m^3 , 是日本的 18 倍、美国的 22 倍。中国造纸业生产 1t 纸需消耗 $400\sim 500\text{m}^3$ 水, 而在欧盟国家只需 $5\sim 200\text{m}^3$ 水、企业之间单位产品取水量相差悬殊, 一般相差几倍, 甚至有的超过 40 倍。1980~1993 年间, 中国的城市水消费量增长了 350%, 工业水消费量也翻了一番。据原建设部城市水资源中心的资料表明, 由于许多城市自来水管老化和质量低劣, 我国城市生活用水的 1/3 由于水资源供给和使用过程中的跑、冒、滴、漏现象而白白损失了。每年我国由于管道漏损的水量就占自来水管网供水的 20% 以上, 达到 60 亿立方米。随着我国工业化、现代化、城市化水平的提高, 全国用水量仍将增加。一般来讲, 使用 110m^3 水就可产生 17m^3 污水, 使用越多, 浪费越多, 即意味着排污越大。③水污染形势逐渐加剧, 导致的水质型缺水。我国部分地区地下水和地面水本底就含氟、含砷, 并且严重超标, 加之我国 20 多年经济快速发展, 如污水不合理排放, 则导致一些地方水体污染严重, 有毒、有害物质含量超标, 缺乏符合要求的饮用水。例如, 我国东南地区降水丰富, 河流众多, 但随着经济的快速发展, 未经处理的污水大量排放, 该地区湖泊与河流水污染严重, 普遍面临水质型缺水, 其中尤以长江三角洲和珠江三角洲地区最为严重。其中, 长江三角洲平均每 300m 就有一条河流, 但许多城市有水而不能用, 不得不大量超采地下水, 造成地表沉降, 恶化了洪水危害。珠江三角洲集中了全国 13% 的径流量, 但各大城市污水泛滥, 饮用水水质堪忧。④水资源调控能力不足, 不少地区存在工程型缺水。建国以来, 我国兴建了大量水库, 但由于水源工程建设投资额大, 投资回报率不高, 难以吸引更多建设资金。这种由工程滞后原因造成的工程型缺水在中部和西部地区尤其明显。例如, 在我国西南、华南、华中部分地区, 年降雨量虽在 1000mm 以上, 但由于地形、地貌和地质条件复杂, 山高坡陡, 沟谷深切, 蓄水工程设施不足, 有水蓄不住。

在可利用的水资源中, 城乡居民生活用水是消耗淡水资源的主要部分, 也是水污染的主要来源。生活用水的水源主要有地表水源和地下水源两种。地表水源指由于降雨、降雪和冰山融化作用而进入江、河、湖泊、水库的水, 地表水源的水质特点与其形成过程密切相关。降水经地面径流汇集到江河, 由于接触了岩层及其风化产物和土壤等, 溶入了一些盐类, 其含盐量稍高于雨雪。我国江河水的平均含盐量为 166mg/L 。江河水还由于其冲刷作用, 卷带了大量的泥沙、黏土等悬浮物质, 因此水中含有较高的悬浮物和胶体, 水的浑浊度较高。江河水受地理环境和气候条件的影响差异很大, 并且随季节波动水质容易变化, 不稳定。同时, 江河水易受工农业废水、生活污水等的污染。湖泊与水库由于湖面宽广、流动缓慢, 长期的自然

沉淀使水中悬浮物含量较小。如果流入和排出湖泊和水库的水量都较大时，湖库内水的蒸发量相对较小，因而可以保持较低的含盐量而成为淡水湖；如果流入的水量大部分被蒸发，湖水浓缩而含盐量增高，就变成咸水湖或盐湖。另外由于湖泊光照面积大，流动性小，有利于微生物和藻类的生长与繁殖，使水中腐殖质的含量增高。同样，湖泊与水库水也较易受到人为的污染。地下水源主要是指雨水经过土壤及地层的渗透流动而形成的浅层地下水，在漫长的流程和广泛的接触中，溶入了较多的可溶性矿物质，因而地下水源的硬度、含盐量、含铁量通常比地表水高。另一方面，地下水源由于土壤及地层的层层过滤，悬浮物和胶体含量很少，水质清澈而透明，浊度较低。由于地下水的溶解氧浓度极低，甚至没有，细菌无法生存，而且二价亚铁离子能稳定存在于水中，但当地下水与大气接触时，二价铁离子会迅速氧化成三价高铁离子，并形成絮状物沉淀。总的来说，地下水源的水质要优于地表水源的水质，只要经过简单和适当的处理就可作为生活饮用水，但随着地面污染及空气污染的加重，已经造成对浅层地下水的污染，影响到后续处理工艺的选择。此外，随着近年来海水淡化技术的不断发展，淡化海水在人民生活和工业生产中的水源中所占比例正逐年增大。海水中各种盐类的重量比例基本稳定，其中氯化物含量高，氯离子占离子总量的 55% 左右，其次是钠离子，约占 30%，其他盐类离子主要是钾离子、钙离子、硫酸根离子、重碳酸根离子、溴离子等，还有微量元素、溶解气体和有机物等。由于海水污染相对较轻，用于海水淡化的反渗透工艺能够去除大部分污染物，以海水作为水源的生活饮用水水质基本能够得到保障。

一般而言，生活用水包括三个部分：一是居民饮用水；二是居民卫生用水；三是城市公共设施和绿地用水。以 1997 年为例，我国人均年生活用水量是 10^4m^3 /人，同期以色列人均年生活用水量为 60m^3 /人，德国为 58m^3 /人，英国为 41m^3 /人，荷兰更少，仅为 26m^3 /人。其中，饮用水是指作为人们日常生活饮用或炊事用的水，饮用水仅占生活用水的 2% 左右，其水质是否良好直接影响人们的健康。饮用水的水源可采用河水、湖沼水和地下水等自然水，但由于其中含有一定数量的杂质，需要经过适当处理才能饮用。目前我国大、中城市给水设施较完备，通过自来水厂能为人们提供比较合乎卫生的饮用水。但广大农村绝大多数仍以河水、井水等自然水直接作饮用水，饮用水卫生状况堪忧。居民卫生用水主要是指居民家庭冲厕、淋浴及厨房等用水，占居民生活用水总量的 70%。近年来，随着生活水平的提高和卫生设备的普及，人均卫生用水量逐年上升，年平均增长率约为 8%。城市生活用水量的提高主要源于人均生活用水量的提高。城市公共设施和绿地用水主要包括景观、绿化、卫生、市政建设用水等。近几年，机关、商业、宾馆等单位用水量有显著的增长趋势，食品加工、科研等用水单位的用水量及其占公共用水量的比例有明显下降，其余用水单位用水量基本持平。由于很多城市绿化用水地未装水表计量，缺少统计数字使得我国绿化用水量很难准确统计。

1.2 水污染

1.2.1 我国水污染形势

我国不仅水资源贫乏,而且还伴随着日益严重的饮用水资源环境污染问题。近年,我国废水每年排放约1000亿吨,80%左右的废水未经处理就直接排入水体。2000年,全国废水排放总量为415亿吨(其中工业废水194亿吨,生活污水221亿吨),废水中COD排放量1445万吨。据专家预测,按十大水系多年平均径流量计算,我国地表水全部达到国家三类水质标准时的COD容量为800万吨。由于废水排放总量大且相对集中,已对地表水体产生了普遍影响,对地下水水质产生威胁,导致了我国85%水域和92%的地下水水源水被污染。

全国七大江河和内陆河的110个重点河段统计表明,符合《地面水环境质量标准》Ⅰ类、Ⅱ类的仅占32%,Ⅲ类的占29%;属于Ⅳ类、Ⅴ类的占39%。即使长江和珠江,其水质为Ⅳ类、Ⅴ类的江段已超过20%;黄河、松花江、辽河属Ⅳ类、Ⅴ类水质的江段已超过60%;淮河枯水期的水质已达不到Ⅲ类,其大部分支流的水质常年在Ⅴ类以上。根据2004年的监测数据,七大水系的412个水质监测断面中,Ⅰ~Ⅲ类、Ⅳ~Ⅴ类和劣Ⅴ类水质的断面比例分别为41.8%、30.3%和27.9%;27个重点湖库中,Ⅱ类水质的湖库2个,Ⅲ类水质的湖库5个,Ⅳ类水质的湖库4个,Ⅴ类水质湖库6个,劣Ⅴ类水质湖库10个。47个重点城市中,饮用水源地水质达标率为100%、99.9%~80%、79.9%~60%、59.9%~0.1%和0的城市分别为25个、8个、3个、10个和1个;全国187个城市中,与上年相比,地下水污染减轻的有39个,污染加重的有52个,水质稳定的有96个。主要城市和地区的地下水水质受人为活动影响较大,硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮和氯化物等组分的含量普遍升高。全国75%的湖泊出现不同程度的富营养化,尤以巢湖、滇池、太湖为重。近岸海域以二类和超四类海水为主,主要超标污染物为氮和磷,赤潮发生次数和面积明显增加。

此外,各种水体中的有机物种类和数量相当大,污染问题也相当突出。据对全国35个江段有机污染物调查结果表明,水体中痕量有机物种类繁多,致癌、致畸、致突变的“三致”物超标倍数高。在7个流域14个典型江段中共检出197种有机化合物,其中,致癌化合物25种,属于美国环境保护局(简称美国EPA, USEPA)的优先污染物53种。例如,上海黄浦江水中有机物种类至少在500~700种之间,气相色谱/质谱(GC/MS)定性检出的218种有机物中,属USEPA的优先污染物达39种。

从目前的状况来看,水资源环境污染日益严重,受污染的水源范围日益扩大。近年来,虽然我国在水污染防治方面做了许多工作,但不少江河湖泊的水质仍在逐