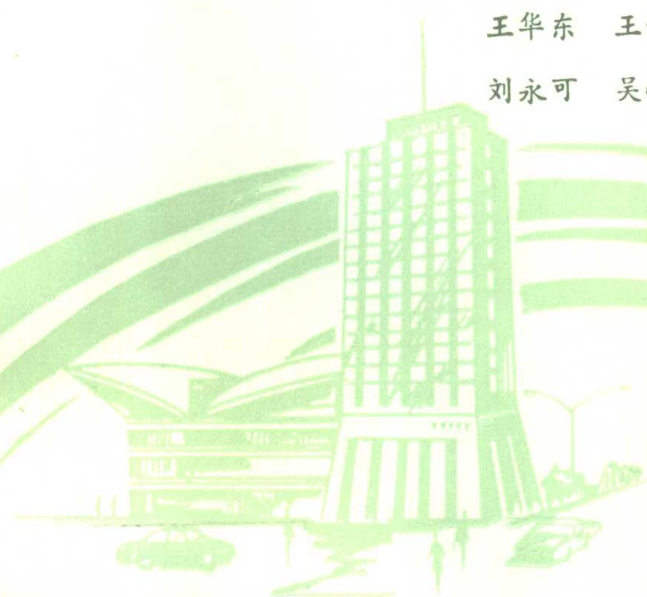


水环境污染概论

王华东 王健民

万国江 编

刘永可 吴峙山



北京师范大学出版社

水 环 境 污 染 概 论

王华东 王健民
刘永可 吴峙山 万国江 编

北京师范大学出版社

水 环 境 污 染 概 论

王华东 王健民 万国江 编
刘永可 吴峙山

*

北京师范大学出版社出版

新华书店北京发行所发售

七二二六工厂印刷

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 11.875 字数: 250千

1984年10月第1版 1984年10月第1次印刷

印数: 1—10, 700

统一书号: 13243·50 定价: 1.50元

前 言

随着工农业的发展，地表水体遭到污染，对人类健康、水生生物造成严重的危害。目前河流、湖泊等的污染已引起世界各国的重视。环境科学界正在广泛开展有关水环境污染发生、水环境污染机制、水环境质量评价、水环境污染综合防治及水环境规划的研究工作。

为了介绍近年来水环境污染研究工作的主要成果，参考了国内外大量文献，我们编辑了这本书。首先介绍水资源，其次介绍水污染的发生和水污染的机制，着重介绍了典型的水污染现象及水质评价的各种方法，叙述了水体自净及水质规划的数学模型，最后对水污染的防治对策进行了讨论。

本书由王华东、王健民、刘永可、吴峙山及万国江负责编写，王建参加了部分整理工作。

限于作者的水平，加之编写时间急促，书中内容不当及谬误之处在所难免，请读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 水是人类宝贵的自然资源..... (1)

第一节 自然界的水..... (1)

1. 水的起源..... (1)
2. 水的物理性质和形态变化 (3)
3. 自然界水的类型 (7)
4. 水在地球上的分布及其循环..... (15)

第二节 天然水的化学性质..... (21)

1. 天然水的物质组成 (21)
2. 天然水质的形成 (28)
3. 溶质径流..... (33)
4. 环境中水体的水质特征 (38)

第三节 水是人类宝贵的自然资源..... (43)

1. 水是生命的命脉 (43)
2. 水是人类社会发展的必要条件..... (45)
3. 水对人类环境的影响 (49)
4. 水质在社会实践中的意义 (51)

第二章 水污染的发生和过程..... (65)

第一节 水污染的发生..... (65)

1. 水污染 (65)
2. 水体污染物..... (65)
3. 水体污染源..... (68)

4. 承受水体的特点	(74)
第二节 水污染作用过程	(75)
1. 水污染过程	(75)
2. 水污染的机制	(77)
第三章 典型水污染	(98)
第一节 病原微生物污染	(98)
第二节 需氧有机物污染	(100)
第三节 富营养化污染	(109)
第四节 恶臭	(115)
第五节 酸、碱、盐污染	(118)
第六节 地下水硬度升高	(119)
第七节 毒污染	(125)
1. 非金属无机毒物 (以氰化物为例)	(126)
2. 重金属与类金属无机毒物 (主要以汞为例)	(131)
3. 易分解有机毒物类 (以酚类化合物为例)	(141)
4. 难分解的有机毒物类 (以有机氯农药为例)	(147)
第八节 油污染	(156)
第九节 地面径流污染	(164)
第十节 热污染	(169)
第十一节 放射性水污染	(176)
第十二节 酸雨 (雾)	(180)
第四章 陆地水污染监测与评价	(187)
第一节 陆地水污染监测	(187)
第二节 水污染现状评价	(190)
1. 水质评价	(190)
2. 底质评价	(237)

3. 生物评价	(237)
4. 水体的综合评价	(239)
第五章 水体自净及水质规划的数学模型	(248)
第一节 水体中污染物扩散的数学模型	(248)
第二节 BOD—DO水质模型	(254)
1. Streeter-Phelps模型	(254)
2. Streeter-Phelps模型的几种修正式	(256)
3. 水环境容量	(258)
第三节 河流的水质模拟	(259)
1. 一维河流的水质模拟	(260)
2. 扩散段的二维水质模拟	(266)
第四节 河流水质规划	(275)
1. 水质规划的基本依据	(275)
2. 水质规划的一般形式	(276)
3. 水质约束方程	(278)
4. 实例研究	(284)
第五节 重金属污染物在河流中迁移的数学模型	(292)
第六章 水污染的防治对策	(296)
第一节 概述	(296)
第二节 原则	(298)
第三节 措施	(300)
1. 行政措施	(300)
2. 法律措施	(300)
3. 经济措施	(302)
4. 技术措施	(302)

第四节	实例.....	(306)
附表		(337)
附表一	有广泛国际意义的污染物类型.....	(337)
附表二	美国饮水中检出的有机污染物及 EPA 制 定的“优先污染物”	(364)
附表三	已知有机强致癌物、可能致癌物及剧毒、剧 害（致畸、致突变）物	(367)

第一章 水是人类宝贵的自然资源

第一节 自然界的水

1. 水的起源

水是地球上分布最广泛的一种物质，它存在于大气和地壳中，并为动植物生命体的重要组成部分。可是地球刚刚诞生时，地球上没有河流，也没有海洋，更没有生命，地球表面是干燥的，大气层中也很少有水分。那么如今浩瀚的海洋，奔腾不息的河流，烟波浩渺的湖泊，奇形怪状的万年冰雪，还有那地下的清泉伏流和那天空的彩云雾幕，这些水是从哪儿来的呢？目前虽未定论，但一般认为地球上的水与地球的发生和发展有密切联系，它是地球演化过程中的一种产物。

地球是太阳星云分化出来的星际物质聚合体，其基本组成有氢和氦气体及一些固体尘埃。固体尘埃聚集结合为地球的内核，外面围绕着大量气体，这时地球结构松散，质量不大，引力亦小，温度还很低。后来由于某些现在还没有弄清楚的因素作用，地球组成物质集合收缩，内核放射性物质产生能量，致使地球温度不断增高，有些物质慢慢变软熔化，较重物质，如铁、镍等聚集在中心部位形成地核，最轻物质

浮于地表，而空间气体一方面在太阳辐射驱赶下进入宇宙空间；另一方面大气层的气体分子运动速度随着温度增高迅速增大，最后终于摆脱地球引力逃逸到宇宙中去，这样一来地球外围的大气层逐渐消失殆尽，氢和氦等成分也就不复存在。

随着地球表面温度逐渐降低，地表开始逐步形成坚硬的地壳。但因地球内部温度很高，岩浆活动非常激烈，火山喷发频繁，地壳亦不断发生变动，有些地方隆起形成高原和山峰，有些地方则下陷而成低地和山谷，同时喷发出来的大量气体，由于地球体积不断缩小，质量大大增加，地球引力也随之增强，此时这些气体无法摆脱地球引力，从而构成“原始地球大气”，其中主要成分有二氧化碳、甲烷、氮、氨、硫化氢及水蒸汽等。

喷发出来的水蒸汽就是地球上的水的先驱，那么水蒸汽又是从何而来的呢？如前所述，组成原始地球的固体尘埃，实际上就是衰老了的星球爆炸而成的大量碎屑，这些碎屑多是些无机盐类的东西，其晶格内部往往隐藏着许多水分子，即所谓结晶水合物，如 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ，这些结晶水在高温之下，离析出来变成水蒸汽。喷到空中的水蒸汽达到饱和时便冷却成云，以降水形式落到地面上来，聚集在低洼处，逐渐积累成湖泊和河流，最后汇集到地表最低洼区域形成海洋。

地球上的水在开始形成时，不论湖泊或海洋，其水量不会很多，随着地球内部产生的水蒸汽不断送入大气层，地面水量也不断增多，经历几十亿年地球演变过程，终于最后形成现代的江河湖海的巨大规模。

2. 水的物理性质和形态变化

纯水是一种无嗅无味无色的液体。在天然条件下的水,若含有机物及水藻甚多,就容易有鱼腥气及霉味,浑浊的河水常有泥腥、土气,某些温泉水常含有硫化氢等。水中含氧多则味甜,含泥质多则味涩,含矿物盐多则苦咸。由此可见,天然水的臭味主要取决于水中生长的动植物的大量繁殖、衰亡与腐败;水中溶解的气体 and 矿物盐分以及有机物及微生物的腐败分解;还有人为造成的,如饮用水消毒、污水排放。而这些因素也常常使天然水呈现各种不同的颜色,尤其腐殖质,它是土壤微生物生命活动综合作用的产物,在水中小部分呈真溶液存在,大部分近似胶体溶液,这是大陆水体水色产生的主导因素。有机体的生命活动也会使水带不同颜色,如水中有大量球藻呈绿色,硅藻大量繁殖使水呈棕绿色,甲藻很多时呈暗褐色,蓝绿藻大批生长时呈绿宝石色。这在水流缓慢,生物营养物丰富的大陆湖泊或海湾水域均为常见。若有工业污水排入时可能产生各种颜色,因某些污染物本身就具有颜色,如铬酸盐呈黄色,铬盐呈绿色,铜盐呈青色,镍盐呈黄色,亚铁盐呈褐色。

在标准大气压力下,水的凝固点是 0°C 。当水的温度降至 0°C 以下时,水分子运动减弱,同时分子取得比较固定的彼此相对有序的位置,此时只要稍稍振动,水就由液态变成固态。给固态水加热,使一些分子的振动动能变得很大并足以克服在晶格中分子的吸引时,固体就开始融解,逐渐变成液体。冰在 0°C 时的融化热是80卡/克。随着温度升高,水分子运动速度加快,以至逸出液面蒸发到空间中去。在标准大气压下,水的沸点是 100°C ,此时水的蒸发热为540卡/克。

水蒸汽遇冷而凝结或凝华。

不论固态水、液态水或气态水，其水分子均在不停地运动，由于其运动速度不同而体现出水的三态变化。其运动速度快慢不仅取决于获得能量大小，温度愈高能量愈大；同时还取决于压力大小，如果压力不是标准大气压，那么水的沸点就不是 100°C ，水的凝固点（或熔点）也不是 0°C （即使差别很小）。水的沸点随着压力增大而升高，但当压力增大时，水的熔点几乎保持不变。水的三种状态彼此处于平衡状态的点，称三相点，即三态同时存在。此时的压力为 4.6 毫米水银柱，温度为 0.01°C 。如果把水的压力降低到三相点压力之下，水直接从固态变成气态，而不经液态。在自然界中，不论蒸发和凝结，还是凝华和升华，或是凝固和溶解，这一系列变换过程随时都在进行着。

水的自然循环就是以其三态的互变为中心进行的。水还具有许多异常物理性质（表 1-1）在自然界中表现出某些独特的行为影响着自然景观。

地表受到太阳热力作用，地表中水分子所具有的动能大于水分子间内聚力而蒸发，蒸发的速度固然取决于水的温度，同时液态水内所含的杂质多少及所处的环境条件，如风力强弱，湿度大小，气压高低等均有一定影响。水蒸汽随气流进入上空后，其形态变化可引起复杂的天气现象：时而晴空万里，时而乌云密布，也可洒下一场绵绵细雨，也可酿成倾盆大雨，寒冷季节也许飘下一场瑞雪，炎热的夏季也许倾泻一场冰雹。

大气中水汽含量在一定温度条件下有一个限量，即饱和含量。它随温度升降而变化，大约气温每升高 10°C ，饱和

表 1-1 液态水一些异常物理性质 (Sverdrup 等, 1942)

性 质	同其他物质比较	在物理的环境和生物环境中的重要作用
热容量	所有固体和液体中最高 (NH_3 除外)	能防止温度变化范围过大; 水体运动所产生热输送量很大, 能使体温趋于均一
溶解潜热	最大 (NH_3 除外)	由于吸收, 放出潜热, 能使在冰点有恒温作用
蒸发潜热	所有物质中最高	巨大的蒸发潜热对大气层中的热与水的输送起了非常重要作用
热膨胀	最高密度的温度随盐度的增加而下降, 纯水是在 4°C	淡水和稀海水中的最高密度的温度在冰点之上, 这个性质在控制湖泊中的温度分布和垂直循环中起重要作用
表面张力	所有液体中最高	在细胞生理学中很重要, 控制某些表面现象和水滴的形成与行为
溶解能力	一般地说比其他液体能溶解较多物质并有较大溶解度	与物理和生物现象有显著的联系
介电常数	所有液体中纯水最高	对于无机溶解物的行为有头等重要性, 因为能造成高度的电离
电离度	很小	为中性物质, 但既有 H^+ , 也含有 OH^- 离子
透明度	相当大地大	对红外与紫外部分的辐射能的吸收大, 对能谱的可见光部分的选择性吸收比较小, 因此, 水是“无色”的, 具有特征性的吸收在物理和生物现象中是很重要的。
热传导	所有液体中最高	虽然在小尺度范围内有其重要性, 如在活细胞中, 但分子热传导过程远不如涡动热传导过程的剧烈

摘自《海洋化学》(水的结构与水圈的化学) [美] R.A. 霍恩著 科学出版社 1976 年

含量则增加一倍，反之亦然。在通常情况下，气温下降到露点温度时就会发生饱和状态，若温度持续下降就会有多余的水汽凝结成水。但这种液态水滴粒径很小，表面张力较大，很容易发生破裂而散失掉，若大气中含有一定质点，如微尘、煤烟等杂质作为水汽凝结中心（凝结核）以减弱表面张力的作用，使水汽容易凝结在凝结核上。大气中液态微滴随气流上升到温度低于 0°C 的高度上时，并未立刻冻结，而呈过冷状态——过冷水。大气中这些体积大小不相同的液态和固态水滴所具有的饱和水汽压各不相同，随着气流升降运动和乱流交换过程，而发生各种凝聚过程，如迁移过程、冰晶过程、重力合并过程，致使凝结物不断增大，当其重量大于浮力时而降落地表。一般来说，高空形成的或降落的凝结物是雪，降落过程中若遇到的温度足以使其融化，则落到地表的便是雨，在寒冷的冬季仍然是雪，若降落过程中遇到过冷水滴的云层便发生凝聚作用，在强烈的空气动力作用下，这种凝聚作用将持续不断地发展，就有可能形成雹，降雹多发生在炎热的雷雨季节。

地表水面几乎能把太阳辐射全部吸收，转变为热并传至相当深部。普通水在 4°C 时密度最大，当水温大于或小于 4°C 时密度减小， 0°C 和 10°C 时密度相等。冬季表层水温不断下降，密度随之增大并向底部沉降，底部密度小的水则上升，从而产生对流作用，一直进行到所有的水都冷却到 4°C 时才停止。若水温持续下降，表层水降到 0°C 以下就会结冰，表层结冰多为由细针状的冰晶所组成的薄片，紊动混和较强的水流，不仅在水面结冰，同时在水内还会形成水内冰。当冰冻出现以后，各种冰块随水流漂浮而成淌凌，若遇阻塞而

成冰坝，于是浮在上游的冰块相继冻结起来，终于逆流而上逐渐封冻。结冰以后，若温度继续下降而开始收缩，冰体开裂，开裂的冰缝被水填充并冻结成冰，这时冰的比重大大增加并开始下沉，进而形成连底冻。一旦气温回升至零度以上，水体开始融化，由于岸边土壤增温较快，所以解冻常从岸边开始，从而逐渐形成淌凌，以至融化成液态水。

水体冰冻现象对水生生物至关重要，由于冰的导热性差，可以保护冰下水层不至于很快冷却结冰，使水中生物仍能生存，但冰层阻碍大气中氧气溶解到水里去，使水中溶解氧得不到补充，如若严重缺氧就会使鱼介类生物死亡。由于冰体的膨胀和收缩将威胁水工建筑物的结构，淌凌将会撞毁船体。在冰冻条件下不利于水中化学过程和生物化学过程，影响对污染物的净化作用。

3. 自然界水的类型

地球上的水在太阳热力作用下，形成巨大的循环系统。按其存在的部位可分为大气水、地表水及地下水三种类型。

地球表面的广大自由水面、潮湿地面，土壤表层和植物叶茎的水分在太阳辐射能的作用下，以蒸发状态存在于大气中。这些蒸发而成的水汽随着气流传播各处，在特定条件下，遇冷凝结成高度分散的液态和固态的凝结物，在低层大气中形成的这种凝结物（大小水滴或冰晶）的集聚叫雾，在自由大气中则为云，如以雨、雪、雹等形式降落下来，则统称为大气降水。有时也把直接在地面上和地面物体上的水汽凝结物，如霜、露、淞等也列入大气降水范畴，不论其属何种类型都是空气中水汽凝结物。进入大气圈的水分统称为大气水或空中水。

大气水主要存在于对流层；对流层由于受地面冷热不均的影响而产生水平方向和垂直方向的空气对流，水汽也随之流动，它可以被输送到很远的地方，也可以被气流带至高空或从高空沉降下来，于是大气水遍及整个对流层。大气水分的多少随气温而变化，从赤道向两极逐渐减少，空中水汽的高度受到对流层的限制，对流层以上水分踪迹就非常罕见。

降水降到地表顺着地面坡度逐渐汇集成集中的水流，沿着地表呈线形凹槽泄水谓之河流，积于湖盆凹地的水流谓之湖泊，最终注入海洋，这些水体水面暴露于地面，统称为地表水，其中河流、湖泊等陆地水流称为大陆水，但在习惯上往往将其称之为地表水，而将海洋单独归为一类。

海洋具有广阔水面可以直接接纳大量降水，大多数陆地水体则不然，其水面面积与其流域面积相比是非常小的，它的水量主要是由流域内降水汇集而成的。陆地水形成一般要经过植物截留、土壤下渗、地面填洼、坡面漫流、河槽集流等径流形成过程。因此大陆水主要取决于气候因素（降水、蒸发），其次是地形、森林植被、土壤蓄水能力及流域面积等汇流条件。

河流是陆地水体中最重要的组成部分。按照河川径流的循环形式，可把河流分成注入海洋的外流流域和不与海洋沟通的内陆流域两大部分。河水补给类型有三种，降雨充沛地区的河流以雨水补给为主；气候干燥、降雨稀少地区的河流以高山冰雪融水补给为主；岩溶地区的河流以地下水补给为主，但大多数河流，特别是大河流往往有多种补给来源。以雨水补给为主的河流水情随降雨量的增减而变化，从而影响河川径流年内分配不均匀，年际变化不稳定；以冰雪融水补

给为主的河流水情与气温变化关系密切；以地下水补给为主的河流水情变化，不论年内和多年变化都较稳定。根据河流水位、流量可将一年内水流变化划分为洪水期、枯水期、平水期。洪水期河流水位明显上涨，流量增加，逐渐占据整个洪水河床，在中国大部分河流是由夏季降雨引起的。北方河流在春季由于冰雪融水常有春汛出现，但此时的水量和水位均不及夏季洪水。枯水期是一年中水位最低，流量最小，河川径流仅限于在基本河床内，此时以地下水补给为主。中国大部河流枯水期多在雨季到来之前，唯西北以冰雪融水补给为主的河流，枯水期出现在气温最低的冬季。间于两者之间概称为平水期。

河道内水的流动多呈紊流状态，水流每点瞬时流速，不论大小和方向均在不断地变化，即所谓流速脉动，其脉动的数值在水流动力轴附近最小，而以糙度较大的底部和岸边最大。过水断面纵向流速分布呈对数方程或抛物线方程形式，即河底最小，水面或水面以下某深度最大。弯曲河段由于离心力影响而形成内环流，表面指向凹岸，底部指向凸岸。例如河流向左转弯，水流将顺时针旋转，若河流向右转弯，水流则呈逆时针方向旋转。在直线河段，由地球自转偏力、水面的凸凹、水流深浅、流速大小、断面形状等因素影响也将会产生相向的或者反向的一组或几组环流。水流的脉动和环流现象对污染物的扩散、混合有重要影响，凹岸流速大，污染物易于稀释扩散，凸岸流速相对较小，则不利于稀释扩散，而有利于微量重金属污染物沉降。河道纵断面的水流状况随着河道比降、糙度、横断面形态变化而变化，上游河段落差大、水流急、水侵蚀力强；中游比降和流速均较上游平