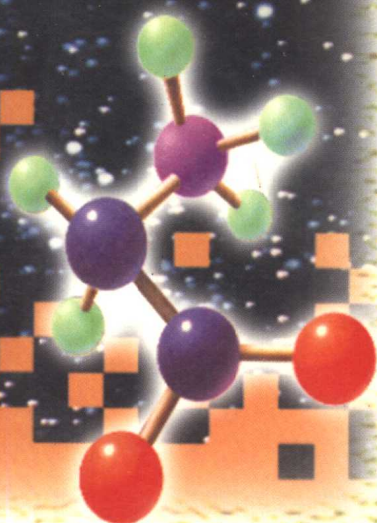




中国科学院研究生教学丛书



高级水生生物学

主编 刘建康

科学出版社

内 容 简 介

本书是中国科学院水生生物研究所的专家教授在历年为研究生讲授水生生物学课程的基础上编著而成的,着重基础,兼及应用。全书16章:总论部分包括水环境、淡水生物种群、淡水生物群落、生态系统和水体生物生产力等5章;各论部分包括水细菌、浮游植物、浮游动物、大型水生植物、底栖动物、周丛生物和淡水鱼类等7章,着重于生态功能;应用水生生物学部分包括水污染生物学问题、渔业生物学问题、水生生物资源与保护,以及数学在水生生物学中的应用等4章。

本书可作为水生生物学博士、硕士学位研究生的教材,对大学生物系师生、环境科学工作者、水产科学工作者和生态学研究工作者也有重要参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

高级水生生物学/刘建康主编.-北京:科学出版社,1999.3

ISBN 7-03-006987-0

I.高… II.刘… III.水生生物学 IV.Q17

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第31632号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

北京双青印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1999年3月第一版 开本:787×1092 1/16
1999年3月第一次印刷 印张:25 1/4
印数:1—3 500 字数:596 000

定价:45.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

《中国科学院研究生教学丛书》序

在 21 世纪曙光初露，中国科技、教育面临重大改革和蓬勃发展之际，《中国科学院研究生教学丛书》——这套凝聚了中国科学院新老科学家、研究生导师们多年心血的研究生教材面世了。相信这套丛书的出版，会在一定程度上缓解研究生教材不足困难，对提高研究生教育质量将起到积极的推动作用。

21 世纪将是科学技术日新月异、迅猛发展的新世纪，科学技术将成为经济发展的最重要的资源和不竭的动力，成为经济和社会发展的首要推动力量。世界各国之间综合国力的竞争，实质上是科技实力的竞争。而一个国家科技实力的决定因素是它所拥有的科技人才的数量和质量。我国要想在 21 世纪顺利地实施“科教兴国”和“可持续发展”战略，实现邓小平同志规划的第三步战略目标——把我国建设成中等发达国家，关键在于培养造就一支数量宏大、素质优良、结构合理、有能力参与国际竞争与合作的科技大军。这是摆在我国高等教育面前的一项十分繁重而光荣的战略任务。

中国科学院作为我国自然科学与高新技术的综合研究与发展中心，在建院之初就明确了出成果出人才并举的办院宗旨，长期坚持走科研与教育相结合的道路，发挥了高级科技专家多、科研条件好、科研水平高的优势，结合科研工作，积极培养研究生；在出成果的同时，为国家培养了数以万计的研究生。当前，中国科学院正在按照江泽民同志关于中国科学院要努力建设好“三个基地”的指示，在建设具有国际先进水平的科学研究基地和促进高新技术产业发展基地的同时，加强研究生教育，努力建设好高级人才培养基地，在肩负起发展我国科学技术及促进高新技术产业发展重任的同时，为国家源源不断地培养、输送大批高级科技人才。

研究生的培养质量是研究生教育的生命，全面提高研究生培养质量是当前我国研究生教育的首要任务。研究生教材建设是提高研究生培养质量的一项重要基础性工作。由于各种原因，目前我国研究生教材的建设滞后于研究生教育的发展。为了改变这种情况，中国科学院组织了一批在科学前沿工作，同时又具有相当教学经验的科学家撰写研究生教材，并以专项资金资助优秀的研究生教材的出版。希望通过数年努力，出版一套面向 21 世纪科技发展，体现中国科学院特色的高水平的研究生教学丛书。本丛书内容力求具有科学性、系统性和基础性，同时也兼顾前沿性，使阅读者不仅能获得相关

学科的比较系统的科学基础知识，也能被引导进入当代科学研究的前沿。这套研究生教学丛书，不仅适合于在校研究生学习使用，而且也可以作为高校教师和专业研究人员工作和学习的参考书。

“桃李不言，下自成蹊。”我相信，通过中国科学院一批科学家的辛勤耕耘，《中国科学院研究生教学丛书》将成为我国研究生教育园地的一丛鲜花，也将似润物春雨，滋养莘莘学子的心田，把他们引向科学的殿堂，不仅为科学院，而且也为全国研究生教育的发展作出重要贡献。

钱用群

前 言

水生生物学 (Hydrobiology) 是研究水环境中生命现象和生物学过程规律的一门科学。水环境有淡水与海洋之分, 所以就词义来说, 水生生物学可以涵盖淡水生物学和海洋生物学这两门学科的内容; 《词海》对水生生物学这一条目就是这样定义的。国际性的水生生物学期刊 “Hydrobiologia” 和 “Archiv für Hydrobiologie”, 在征文简则里至今仍都保留海洋生物学字样。但是实际上这两种刊物以及其他诸如俄罗斯的水生生物学杂志中, 绝大多数论文都是淡水或内陆水域方面的, 涉及海洋生物学的仅是个别文章。根据这种情况, 我们在编写这本教材时, 考虑的范围仅限于淡水环境中的生物, 约略相当于西方的淡水生物学 (Freshwater Biology) 和湖沼学 (Limnology), 或日本的陆水生物学教材中的生物学部分。

在界定了本书涉及的水域范围之后, 还需要划定本书着重介绍的学科范围。早期的淡水生物学基本上是淡水生物的分类检索和形态特征。美国 1918 年出版 Ward 和 Whipple 的《淡水生物学》名著, 对北美的淡水动植物区系作了比较系统的阐述。这从认识过程来看非常必要也是很自然的。但是到了 1959 年, Edmondson 在该书的再版前言中指出: “再版本保留了原版的主要功能, 即基本上是一本帮助读者鉴定北美内陆水域动植物区系的工具书, 而不能再作为普通生物学或湖沼学原理的教科书了”。这是因为, 自从 40 年代 Lindeman 的水生生物营养动力学 (Trophodynamics) 理论发表以后, 水生生物学就越来越跳出原来水生动物、植物和微生物分类学的圈子和分割研究的格局, 而趋向于以生态系统的概念作为指导原则来研究各类水生生物在水域生态系统的结构和功能中所起的作用, 也就是说越来越突出其生态学意义。1977 年, 前苏联水生生物学杂志在一组专栏文章里, 开头第一篇的标题就是 “作为生态科学的水生生物学”。文章指出: “如果把水生生物学理解为关于水生生物……的任何知识的总和, 就等于否定它作为独立的生态科学的存在……” 基于上述情况, 以及在水生生物区系和分类学方面我国已出版了不少专著, 所以本书不再详述这方面的内容, 而将注意力集中于水生生物的生态学方面。

本书各章的撰写人都是多年从事水生生物学研究的专家学者, 教材内容既反映了国际上这门学科的研究动态和理论进展, 又展示了我国科技工作者在淡水水域的资源与环境研究领域里科学知识的长期积累, 信息量大, 理论与应用并重。本书适宜于用作水生生物学硕士、博士学位研究生的教材, 专业教师和相关专业技术人员的参考书, 所以书名在 “水生生物学” 之前冠以 “高级” 字样。

需要说明的是, 关于水生生物学研究的方法论, 由于不同类群的水生生物研究方法各异, 而且主要类群的研究方法在国内已出版的有关类群的专著中已有介绍, 所以这本书在方法论方面一般从略, 只是对有了新发展的方法作扼要的说明, 还配合系统生态学, 专门组织了一章 “数学在水生生物学中的应用”。此外, 关于内陆水域的非生物控制因素, 尤其是地理、水文和物理方面的有关知识, 将在另一本供研究生用的教材《湖沼学》里详细讲述, 本书仅作简要介绍。

本书所阐述的内容难免有疏漏、谬误之处，诚望研究生和其他读者提出宝贵意见，以便在再版时予以修订，使这本教材臻于完善。

刘建康

一九九八年二月

目 录

《中国科学院研究生教学丛书》序	路甬祥 (i)
前言	刘建康 (iii)

第一篇 总 论

第一章 水环境	徐小清 (1)
第二章 种群生态	黄祥飞 (52)
第三章 群落生态	梁彦龄 王洪铸 (77)
第四章 生态系统	阮景荣 (100)
第五章 水体生物生产力	王 骥 (128)

第二篇 各 论

第六章 水细菌生态	沈韞芬 (151)
第七章 浮游植物	宋立荣 (176)
第八章 浮游动物	黄祥飞 (199)
第九章 大型水生植物	倪乐意 (224)
第十章 底栖动物	梁彦龄 王洪铸 (241)
第十一章 周丛生物	沈韞芬 (260)
第十二章 鱼类	陈宜瑜 刘焕章 (278)

第三篇 应用水生生物学

第十三章 水污染生物学问题	沈韞芬 章宗涉 (305)
第十四章 渔业生物学问题	吴清江 (339)
第十五章 水生生物资源与保护	陈宜瑜 刘焕章 (362)
第十六章 数学在水生生物学中的应用	蔡庆华 (376)
《高级水生生物学》教材总复习题	(401)
后记	(402)

第一篇 总 论

第一章 水 环 境

第一节 水的结构与性质

一、水的结构

- (一) 气体状态水的结构
- (二) 冰的结构
- (三) 液体水的结构

二、水的性质

- (一) 水的液体性
- (二) 水的某些热学性质
- (三) 水的密度
- (四) 水的表面张力及粘度
- (五) 水的介电常数及其溶解能力
- (六) 水的离解

第二节 水环境的特性

一、水环境中的光

- (一) 水环境中光的反射与折射
- (二) 水环境中光的吸收与散射
- (三) 透明度和水色

二、水环境中的热

- (一) 热的输入和支出
 - 1. 辐射热流量 φ_r
 - 2. 蒸发热流量 φ_e
 - 3. 对流热流量 φ_c
 - 4. 总热流量 $\varphi_0 (T)$
- (二) 水环境中热量的分布
 - 1. 水的温度与深度的关系
 - 2. 水的温度与密度的关系
 - 3. 水环境的结冰现象

三、天然水的化学特性

- (一) 溶解气体和氢离子浓度
- (二) 天然水中的主要离子

四、天然水的分类

第三节 天然水体

一、河流

- (一) 河流的溶解氧
- (二) 河流的 pH
- (三) 河流的化学组成特征
- (四) 河流的化学稳定性

二、湖泊

- (一) 湖泊的形态
- (二) 湖泊的分类
- (三) 湖水中溶解气体及 pH 值
- (四) 湖水的变型作用
- (五) 盐湖

第四节 水环境的物质循环

一、有机物的生物化学氧化作用

- (一) 生物化学氧化中微生物的作用
 - 1. 生物化学氧化中微生物的作用
 - 2. 有机物的生物化学氧化的基本反应
- (二) 耗氧有机物的生物化学降解过程
 - 1. 碳水化合物降解
 - 2. 脂肪和油类的降解
 - 3. 蛋白质的降解

二、碳的循环

- (一) 水环境中有机物质的种类及浓度
 - 1. 可溶态有机物质
 - 2. 悬浮态有机物质
 - 3. 沉积物的有机物质
 - 4. 水环境中有机物质的浓度

- (二) 水环境中有机物质的形成、变化与破坏过程
 - 1. 水环境中有机物质的形成与补充过程
 - 2. 水环境中有机物质的破坏与分解过程
 - 3. 湖泊泥积物中的有机物质
- (三) 水环境中碳循环的途径
 - 1. 湖水中生物群落间的代谢
 - 2. 表层和底层水间的物质交换
 - 3. 湖水-泥积物界面间的物质交换
 - 4. 湖底泥积物中的物质交换
- 三、氮的循环
 - (一) 湖泊中氮的形态
 - (二) 湖水中的氮
 - 1. 氮的同化作用
 - 2. 湖水中氮的分布
 - 3. 湖水氨氮浓度季节变化
- (三) 湖水中的亚硝酸盐及羟胺
- (四) 湖水中的硝酸盐
 - 1. 细菌的硝化与硝酸盐的还原
 - 2. 湖泊中硝酸盐的分布与季节变化
- (五) 湖水中含氮有机物
- (六) 湖水中氮的循环
- 四、磷的循环
 - (一) 水环境中磷的形态
 - (二) 水环境中磷的分布特征
 - 1. 湖泊中磷含量的季节性周期变化
 - 2. 湖泊磷含量的垂直分布
 - (三) 湖泊中磷的循环
 - (四) 铁离子在湖泊磷循环中的作用

环境是以人类为主体的客观物质体系。它是人类生存发展的基础，也是人类开发利用的对象。环境具有一定的特征结构和动态变化规律。在不同层次、空间和地域中，它的结构方式、组成程度、能流和物流的规模及途径以及它的稳定性都有相对的特点，即在自然与人类共同作用下，环境内部结构与外部状态始终处于不断变化的过程中。因此，环境具有整体性、区域性、变动性等最基本的特点。

环境按空间尺度大小可划分为不同层次，如居室环境、车间环境、城市环境、区域环境及全球环境等。按组成要素可划分为水环境、大气环境、土壤环境等。从生态学角度还可划分为陆地环境、水域环境、森林环境等。水环境主要由地表水环境和地下水环境两部分组成。地表水环境包括海洋、河流、湖泊、沼泽、池塘、冰川等。地下水环境包括泉水、浅层地下水、深层地下水等。水是构成环境最基本的要素之一，是人类社会赖以生存和发展的最重要资源，也是水生生物生存繁衍的基本条件。

第一节 水的结构与性质

水是我们地球上的一个非常重要的介质。它是环境中能量和物质自然循环的载体和必要条件，也是地球生命的基础。生物体中的水作为生物化学代谢的支撑点是依赖于它独有的物理和化学性质。这些性质是由水的特殊结构所决定的。

在地球的正常温度与压力下，水以气态、液态和固态存在于自然界中。气态水以分子状态极其广泛地存在于地球上，分子间的相互作用极小。水的固态结构与压力有关。已知水有许多不同结构的晶体，统称为冰。水为液体状态时，它的结构变得相当复杂。

一、水的结构

(一) 气体状态水的结构

解释水的许多反常的物理性质是 19 世纪自然科学理论研究的一个内容。气态水是以单分子形式存在的。它是由一个氧原子和两个氢原子组成，氢氧原子间的键长均为 0.96\AA (10^{-8}m)，其键角为 105° (图 1.1A)。这与 SP^3 杂化轨道理论计算值极为一致 (104.5°)。

我们可将水分子的电子云描绘成一个包含在立方体中的变形球 (图 1.1B)。这个球的两臂具有两个未填满电子的 SP^3 杂化轨道与氢原子形成共价键，成为正电荷密度大的区域。同时，由另两个填满电子的 SP^3 轨道形成负电荷密度大的两个臂。由于氢原子斥电子性，水分子在某种程度上趋于离子化。因此，这类分子具有显著的电偶极矩。又因氧原子与氢原子形成具有较强极性的共价键，同时本身具有两个孤电子对，水分子间可以通过形成氢键相互缔合在一起，使水具有许多反常的物理性质。正是水分子具有形成氢键的能力，在地球上才会有海洋和江河，有美丽的云彩和繁花似锦的生物世界，否则地球将是一个不堪设想的荒漠。

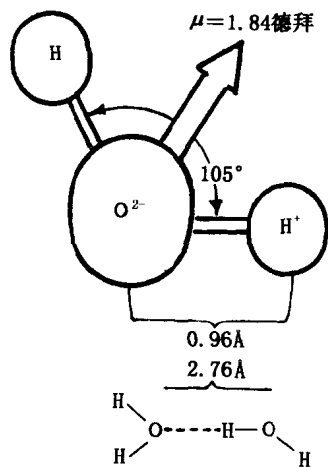


图 1.1A 水分子的结构与氢键

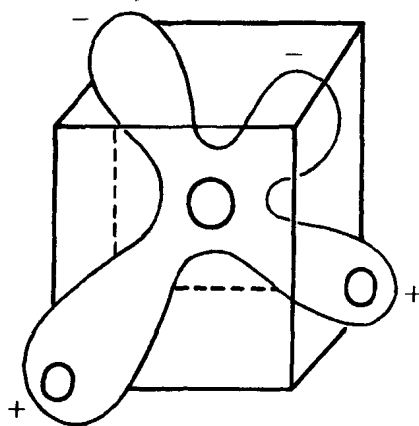


图 1.1B 水分子的电子云示意图

(二) 冰的结构

冰的结构与其生成条件有关。已知在大于 2000kg/cm^2 压力下有 5 种形式的冰是稳定的，但这些高压冰在自然界里不存在。这里只讨论天然条件下普通冰的结构。

普通冰具有 SiO_2 (石英) 的晶体结构 (图 1.2)。氧原子按正四面体排列，任何一个氧原子与位于四面体每一个顶点的氧原子结合。如果把位于正四面体中心的氧原子作为参比点，从这个参比原子中心到四面体顶点的 4 个氧原子中心之间的距离是 2.76\AA ，

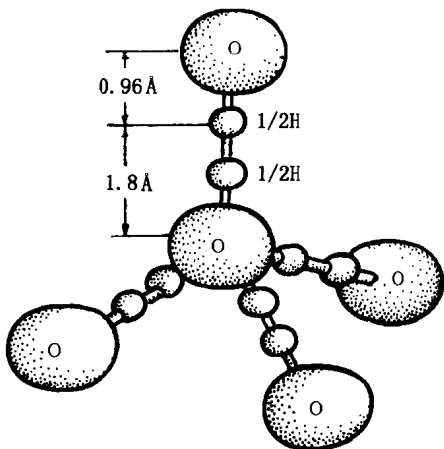


图1.2 氧原子在冰晶格中的位置

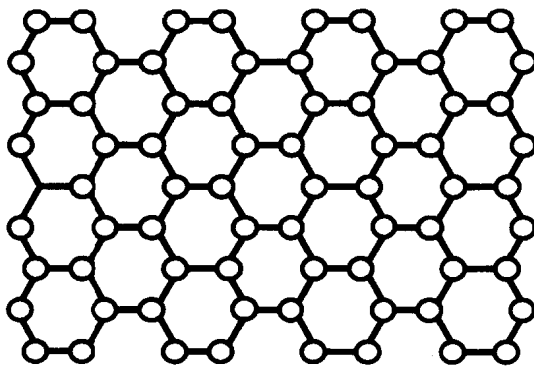


图1.3 冰的笼式结构图

在远离参比氧原子的 4.51 \AA 处，存在着 12 个氧原子，即正四面体配位的 4 个氧原子分别与 3 个氧原子配位又形成 4 个正四面体。依此类推，由这种方法组成一个正四面体配位的开放晶体。由此，可以把普通冰的晶格示意地表示成一系列平行而又彼此相连的由六角环组成的层状结构，也称笼式模型结构（图1.3）。

在这种结构中，由于形成氢键，氢原子不在两个氧原子的中心位置，而是距一个氧原子 0.96 \AA ，距另一个为 1.80 \AA 。鲍林（1939）曾指出，对任何一个正四面体配位氧原子而论，如果每个氢原子能标记的话，就有 16 种可能的几何排列。按 H_4O^{2+} ，4 个氢原子全处于 0.96 \AA 处，只有 1 种排列； H_3O^+ 有 4 种排列；中性水分子 H_2O 两个氢原子可能位于 0.96 \AA ，另两个氢原子可能位于 1.80 \AA ，这有 6 种可能的排列； OH^- 离子有 4 种可能的排列；而荷双电荷的 O^{2-} 只有 1 种排列。因为氢离子和氢氧根离子比较少，双电荷离子则更少，显然在冰中几乎所有的氧原子是与两个氢原子以共价键紧密结合，而与另两个氢原子以氢键分别与两个氧原子结合。

（三）液体水的结构

早在 1829 年就提出用水分子缔合程度的变化解释水的反常性质的理论。以后陆续提出了水分子的聚合假设。这些假设认为液体水是由二聚体水 H_4O_2 和三聚体水 H_6O_3 组成。当接近冰点，这些聚合体的比例就越多。

现在，这些老的概念已被基于 X 光衍射技术发展的理论所取代。当 X 光通过液体水时，所产生的衍射图随温度而变化，并且显示出水具有的准晶体结构。氢原子相对氧原子是非常小的，可以把水看成是单原子组成的物质。若将此物质的 X 光衍射图转变成一个随参比原子距离 r 变化的函数时，该函数则描述半径为 r 的球壳上原子数目变化的状况。如果考虑的是具有冰的笼式结构的物质，那么从任一原子开始，随距离 r 增加，函数以整数倍给出参比原子周围紧密相连的原子数。当 $r = 2.76 \text{ \AA}$ 时，函数上升到极大值，相连原子数目为 4；当 $r = 4.15 \text{ \AA}$ 时，函数出现第 2 个极大值，其原子数为 12。如此类推，不过 r 越大其图形越复杂。

水的 X 光衍射试验结果与上述冰的笼式结构理论预计值基本一致。Morgan 与 Warren (1938) 给出 15℃ 时径向分布函数的第 1 个极大值, 相应原子间的距离为 2.90 Å; 在 83℃ 时, 在 3.05 Å 处出现第 1 个极大值, 它们的配位数值分别为 4.4 和 4.9。Danford 与 Levy (1962) 测定了水在 25℃ 时的 X 光衍射的径向分布曲线, 并与笼式模型的理论值进行了比较, 更加证实水是具有类似冰结构的物质。

现在, 液体水结构的新理论还在不断地发展, 提出了许多模型。在这些模型中, 最可接受的模型认为液体水是由氢键结合成的水分子簇和游离的水分子组成的混合物。这种水分子簇或水分子聚合物被认为是随机变化的, 即在一个微区域内, 水分子簇既能生成又能分解, 它们的半衰期为 10^{-12} 到 10^{-1} 秒。这种结构与冰相似, 因此液体水具有固态的结构。

二、水的性质

(一) 水的液体性

除水外, 自然存在于地球表面唯一的无机液体就是汞元素。在地球表面的温度及压力下, 由氧、硫、硒和碲的氢化物的熔点及沸点的比较可以显示出水的液体性。从 3 个氢化物外推, 水应当在 -80℃ 沸腾。但由于形成氢键, 水的熔点和沸点明显升高。同样由元素周期表的水平方向比较, 氨和氟化氢的分子间分别也能生成氢键。它们的熔点和沸点也相应升高, 但比水还是低得多。因为氨分子间形成氢键的能力比水低, 氟化氢由氢键结合为聚合的线性分子, 并成为气相。

表 1.1 元素氢化物的熔点与沸点

氢化物	H ₂ O	H ₂ S	H ₂ Se	H ₂ Te	H ₄ C	H ₃ N	HF
熔点 ℃	0	-82.9	-64	-48	-182.6	-77.7	-83
沸点 ℃	100	-59.6	-42	-2	-161.4	-33.4	19.4

(二) 水的某些热学性质

水的热学性质与其氢键密切相关。冰的升华温度为 679cal¹⁾/g, 大约有 25% 的能量破坏固体的范德瓦耳力, 余下的用于破坏氢键。冰的溶解热为 79.7 cal/g, 其中约 15% 的能量在汽化时用于破坏氢键。当液体水汽化时, 还需要能量破坏剩余的氢键, 所以水具有较高的比热和汽化热。此外, 水的热容量值在 30℃ 最小。由于氢键的特性, 其蒸发热为 540cal/g, 地球上的水具有明显的热稳定性, 要改变水温或使水发生相变都需要极大的能量。因此, 水对调节空气及陆地上的温度起着重大的作用。

1) 1 cal = 4.187 J

(三) 水的密度

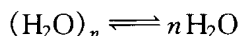
水的密度随温度变化,并具有反常的性质。冰在 0℃ 的密度是 0.9168 g/cm³,但相同温度的水的密度为 0.9999 g/cm³。这种融化收缩现象是冰的晶格破坏造成的。当把 0℃ 的水加热时,它的密度增加,在 3.94℃ 其值最大,为 1.000g/cm³,当温度继续增加,密度则下降。在水环境研究中,这种现象是极其重要的。

水的密度随压力而变。在一定温度下,不同深度的水具有不同的密度,其变化趋势随压力增高密度加大。当水由高压处或较深地方移动到低压或浅处时,因水的体积膨胀产生绝热致冷作用。在海洋、深水湖泊或水库里,如果水由深处移到 1 大气压处,可用焦耳-汤姆逊系数描述因绝热致冷作用产生的每单位压力变化的温度改变量。这个系数在低于最大密度的温度是负值。在高于此温度时,在固定压力下,该系数随温度增加。

(四) 水的表面张力及粘度

在水-空气界面上,水的表面张力在 15℃ 时为 $373.5 \times 10^{-5} \text{N}$,粘度为 $0.114 \times 10^{-1} \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。从直观上讲,氢键缔合的液体的表面张力和粘度要比非缔合的液体高。从粘度资料可以估计水里氧原子的配位状况,它是氢键缔合程度或液体水结构的一个很好的标志。比较多而紧密结合在一起的分子,它的粘度高,分子活动比较困难。当水的温度增加时,粘度降低,水分子簇被融化,氢键的数目减少。0℃ 时水分子簇里平均有 65 个水分子,但在 100℃ 时只有 12 个。

如果将压力加到液体水上,粘度则首先降低,然后在较高压力下开始增加。粘度降低表明水分子簇破碎,水分子簇的比容大于自由水的比容。这个过程可用下述平衡方程描述:



当加压时,平衡向右移动,水分子簇分解,伴随体积减小。当进一步加压,更多的水分子簇被破坏,水分子紧密地挤在一起,活动的自由度降低,粘度复又增加。

(五) 水的介电常数及其溶解能力

一般说物质的介电常数随它的偶极矩值有规律的增加。但由于存在氢键,水的介电常数比预计值高得多。在 20℃ 水的介电常数值为 80c.g.s 单位。只有过氧化氢(87 c.g.s 单位)和氟化氢(116c.g.s 单位)超过它。水的高介电常数决定它具有很强的形成离子溶液和胶体溶液的能力。在这些溶液中,大的荷电粒子完全分散在水相中。有些非电解质,如乙醇、丙酮等,能形成氢键,它们可与水分子生成氢键形成非电解质真溶液。

(六) 水的离解

冰和水中大部分氧原子与两个较近的氢原子和两个较远的氢原子或质子结合。此种

质子可以从离氧原子较远的位置跳跃到较近的位置，当然也会发生相反的过程。伴随此过程产生与水结合的氢离子 H_3O^+ 、氢氧根离子 HO^- ，以及数量极少的双电荷离子 H_4O^{2+} 、 O_2 。氢离子和氢氧根离子常常被看作是水解的产物。但这仅仅是水生成离子的瞬间晶体结构的另一种说法。水在电解时，并不是 H_3O^+ 和 HO^- 分别朝两个电极迁移，而是由质子连续跳跃地生成这些离子。质子朝阴极方向从一个氧原子转移到另一个氧原子，同时按质子运动的方向留下孔穴。实验证明这些离子在水中都有很高的迁移系数。

按物理化学原理，用 $[\text{H}_3\text{O}^+]$ 和 $[\text{HO}^-]$ 分别表示每 1000g 水中氢离子与氢氧根离子的克分子浓度，在一定温度和压力下，水中存在如下平衡：



并且 $[\text{H}_3\text{O}^+]$ 与 $[\text{HO}^-]$ 的乘积始终保持为一常数：

$$[\text{H}_3\text{O}^+] \times [\text{HO}^-] = k_w = 1.0 \times 10^{-14}$$

在水中， $[\text{H}_3\text{O}^+] = \sqrt{k_w}$ ，其 pH 值与水的密度有如下关系：

$$\text{pH} = -\lg(\rho \sqrt{k_w})$$

式中 ρ 为水的密度。水中氢离子与氢氧根离子的浓度随温度升高而增加。

第二节 水环境的特性

水环境是一个开放和动态的体系。在这个体系中生物与它们的非生物环境是相互关联和相互作用的。由于不断输入维持生命所需要的太阳能，体系中发生着物理、化学及生命活动的各种复杂过程，并在系统内外广泛地进行物质与能量的循环与交换，体系永远不会处于热力学的平衡状态。这些过程反映出水环境与光、热、物质，以及水的运动和水量平衡间相互作用的许多特性。而这些特性又会影响系统中各种生命活动。

一、水环境中的光

太阳辐射是水生态系统的主要能源。太阳能通过光合作用直接影响和控制水体的生产力和它的代谢作用。太阳光是由波长 1000~30 000Å 的电磁辐射组成。各波长光的能量分布中，紫外光 (<3600Å) 占 5%，可见光占 52%，红外光 (>7600Å) 占 43%。由于紫外光强烈地被臭氧与氧吸收，红外光被大气中的臭氧、水蒸气和二氧化碳吸收，进入地球表面的太阳光主要为可见光和红外光，它们的能量分布为可见光占 40%，红外光占 60%，被大气吸收的能量占总能量的 12%。当臭氧层出现空洞时，将会增加地球表面的紫外光辐射，特别是 UV-B (2800~3200Å) 对生态系统的影响已引起人们的注意。

进入水体的太阳光，像在大气中一样服从折射、反射和散射定律。太阳光的能量可见光部分供作光合作用，红外光部分对水环境产生热影响。

(一) 水环境中光的反射与折射

太阳光射到水面上，一部分被水面反射，另一部分折射进入水中。这种现象遵守反

射定律和折射定律，即入射线、反射线和折射线在同一平面上，入射角等于反射角，入射角 i 的正弦值等于折射角 r 与折射率 n 的乘积。太阳光的反射程度与入射角的大小，水体表面的性质，周围的地形以及气象条件等有极大的关系。非偏振太阳光的直接反射强度是 Fresnel 定律的函数：

$$R = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(i - r)}{\sin^2(i + r)} - \frac{\tan^2(i - r)}{\tan^2(i + r)} \right]$$

这个函数简单地描述了反射率与太阳的高度有关。太阳高度 (h) 定义为射入某点的太阳光线与通过该点的水平面间的夹角。太阳高度越小，反射率则越大。天空中的散射光同样在水面反射，但受太阳高度的影响小。当波浪作用使水面受到扰动时，反射作用增加。当太阳由东方升起时，反射光的强度迅速减少，折射光的能量迅速增加。因此，深层水的照度将决定于太阳的高度。射到水面而透入不同深度的光强因太阳位置的改变，在一年和一昼夜间都在不断地变化。

(二) 水环境中光的吸收与散射

太阳光射到水面经折射进入水中后，由于光被吸收和散射，其强度很快减弱。进入水中的太阳光强度可用朗格 - 比耳定律计算：

$$I = I_0 e^{-kl}$$

k 为光的吸收系数，对一定波长的光是常数。在自然情况下，太阳光不是单色光，式中的 k 值是受天然水本身的吸收系数 (k_w)，水中悬浮颗粒的吸收系数 (k_p)，特别是溶解有色化合物吸收系数 (k_c) 的影响。悬浮颗粒物浓度低时对吸收的影响较小，当高浓度时影响相当明显，尤其是对可见光谱中低波长的光影响更大。

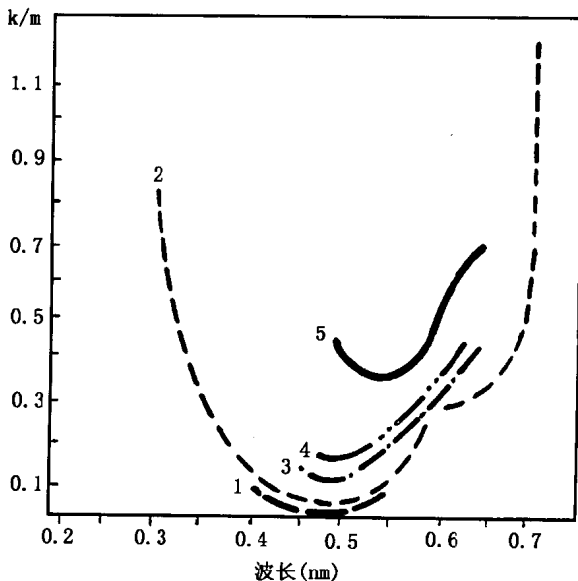


图1.4 不同海水的吸收系数与波长的关系

1. 过滤的海水
2. 蒸馏水
3. 太平洋离岸 200km 海水
4. 太平洋离岸 50km 海水
5. 太平洋近岸水

对所有物质而言，吸收系数是随波长改变的，通常是有选择的吸收。图1.4表明不同海水的吸收系数与波长的关系。蒸馏水的吸收系数最小值在紫外光位置，近岸海水 k 的最小值在绿光位置，可见海水对紫外光和绿光的吸收最少，对红光和红外光的吸收最强。例如，在蒸馏水中波长为 5000\AA 的绿光的吸收系数为 0.02，在水深 1m 处绿光强度为入射光强度的 98%，绿光被蒸馏水吸收了 2%。而在同样条件下波长为 6700\AA 的红光则有 26% 的光能被吸收。如果都以射到水面的光强度作基准，红光比绿光的吸收要大 13 倍。此外，水越清洁，吸收系数越小，被过滤的海水对可见光的吸收接近蒸馏水，而浅海和近海区

因有大量的悬浮物，其吸收比过滤海水大得多。

光线射入水中不仅被水吸收，同时还发生散射现象，使光强减弱。其散射光强度可用下式表示：

$$I = I_0 e^{-rl}$$

式中 r 为散射系数。光的散射作用还遵从雷莱定律：

$$r \propto \nu^4 = \frac{1}{\lambda^4}$$

即散射系数与光的频率的 4 次方成正比，或者是与波长的 4 次方成反比。短波光的散射现象比长波光强。 $0.03 \mu\text{m}$ 的质点散射紫外光 (3200\AA) 比散射红外光 (6400\AA) 的散射系数大 16 倍。此定律只适用于在含粒径 $< 0.35 \mu\text{m}$ 的不带电的无色小质点的浑浊介质中的光散射作用。对于 $> 0.35 \mu\text{m}$ 的质点，光的散射正比于波长的负 3 次方至负 2 次方，并随质点的增大，散射光中长波部分的比重也会增大。

当考虑光同时被水吸收与散射时，则

$$I = I_0 e^{-(k+r)l}$$

若悬浮质点不特别大，可近似用雷莱公式计算：

$$I = I_0 \exp\left[-\left(K + \frac{a}{\lambda^4}\right)l\right]$$

式中 $(K + a/\lambda^4)$ 为消光系数。此式指出水对光的吸收和散射使其强度迅速降低。用不同波长的光经过不同厚度的水层后，其实际光强与射达水面的光强比的测定结果很好地证明在表层 10m 内不同波长的光几乎全部被吸收 (表 1.2)。在该深度的光强仅为表面光强的 18%，并且紫外光透射能力极强，红外光极容易被水吸收。

表 1.2 不同波长的光在水中的吸收 (%)

波长 (μm)	0 cm	0.1 cm	1.0 cm	10 cm	100 cm	1000 cm
0.2~0.6	24	24	24	24	23	17
0.6~0.9	36	36	36	30	13	1
0.9~1.2	19	17	12	1		
1.2~1.5	9	6	2			
1.5~2.1	10	3				
2.1~3.0	2					
Σ	100	96	74	55	36	18

(三) 透明度和水色

透明度是用直径 30cm 的黑白色相间的圆盘 (萨克斯盘) 垂直放入水中，从水面算起，直到刚分辨不出黑白颜色为止，这个深度称为透明度。它表示水的透光能力。它不是光线达到的绝对深度。湖水的透明度与影响太阳光强度的地理纬度、悬浮物浓度以及浮游生物的含量有很大的关系。位于难溶性岩石区域的大型深水湖泊，湖水的透明度最大。如西伯利亚的贝加尔湖的透明度达 40m。而浮游生物生长旺盛和悬浮物含量高的湖泊，透明度一般是低的。如东湖，根据 1973~1985 年的实测资料，东湖 I 站湖水的透

明度为 30~270 cm, 年均 65~118 cm; II₁ 站为 45~440 cm, 年均 140~193 cm; II₂ 站为 36~380 cm, 年均 106~183 cm; III 站为 70~364 cm, 年均 86~219 cm; IV 站为 17~110 cm, 年均 25~34 cm。湖水透明度的大小与入射光强、水中的悬浮物质、浮游生物, 以及湖水中营养盐类的含量等因素密切相关, 是水体富营养化的特征指标之一。水体透明度越低, 富营养化程度越高。这是因为生长的大量藻类及其分泌物与其他有机和无机悬浮物使湖水浑浊不清。实测资料表明, 透明度与悬浮物和叶绿素 a 的含量呈明显的双曲线关系 (图1.5)。

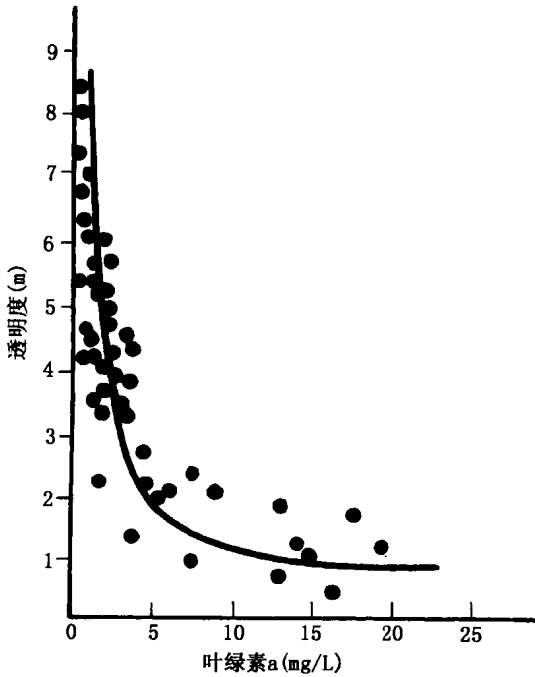


图1.5

水色是指光线从水中经水分子和悬浮颗粒物质散射和反射而达到观察者眼中的光线。它不包括水面的反射光。

水色按目视比色法原理用水色计测定。水色计由盛有不同颜色液体的玻璃管组成, 其颜色由蓝到黄顺序排列, 最蓝为 1 号, 最黄为 21 号。号码越小, 水色越蓝, 也就是常说的水色越高。用水色计测量水色时, 在避光的一侧将透明度板置入水深等于透明度一半处, 垂直地观察透明板上的颜色, 并与水色计的颜色进行比较即可获得水的色阶。由于水对光具有选择性地吸收, 在清水里长波光线 (如黄、红光) 在水表面一薄层内就已经被水吸收, 而短波光线易被水散射。因此, 我们见到的水色自然是蓝色。但是, 雷莱公式表明不同粒径的质点对光的散射具有不同的性质。如果质点越大, 透出水面散射光中长波的比例就越多。这就是水越浑浊水色越低的原因。东

湖水在 1979 年常呈绿色或黄绿色, 基本属绿黄色调, 受污水影响较重的筲箕渡呈褐色, 其水色为 14~15 号。

表1.3 东湖各子湖的水色 (1979 年)

湖泊名称	水果湖	郭郑湖	汤林湖	牛巢湖	筲箕渡
1 月	10	10	12	10	14.5
4 月	12	11.5	11	10	15
8 月	11	11	10	11	14
10 月	13	13	11		15

二、水环境中的热

水环境吸收太阳能产生的热运动明显地影响它的物理、化学过程及其生物特性。这些受太阳辐射影响的过程与特性在不同地区、不同时间, 以至在整个地质时期都是呈动