

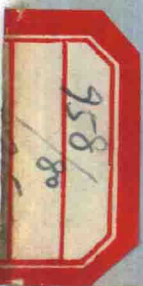
958/80

28715

地理环境 污染与保护译文集

(第五集)

科学技术文献出版社



农研所

地理环境污染与保护译文集

(第五集)

(只限国内发行)

编辑者: 中国科学技术情报研究所

出版者: 科学技术文献出版社

印刷者: 北京印刷三厂

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

开本 $787 \times 1092 \cdot \frac{1}{16}$ 9.25 印张 237 千字

统一书号: 17176·60 定价: 0.80 元

1975年4月出版

107

前 言

本译文集选译了国外有关水体污染与净化等方面的文献共23篇。内容包括天然水的自净作用；水体中酚、氰、汞、铅的自净作用；河流自净的实验研究及统计方法；水质改良以及活性污泥研究等某些治理方法的资料。可供从事环境保护、城市规划、环境卫生等方面工作的同志及高等院校有关专业的师生参考。

鉴于译文来源不同，希读者对其中的某些观点采取分析的态度。由于我们对马列主义、毛泽东思想学习不够，专业和外文水平有限，缺点和错误在所难免，欢迎读者批评指正。

中国科学技术情报研究所

中国科学院地理研究所

北京师范大学地理系

北京大学地质地理系

6000160/10

目 录

1. 天然水体中的自净作用.....	(1)
2. 天然水的污染与净化.....	(20)
3. 水体的负荷能力和自净能力.....	(27)
4. 论汞离子从天然水中自然净化的机制.....	(31)
5. 好气和嫌气水生环境中汞甲基化作用的动力学.....	(35)
6. 汞污染地区的污染消除与复原.....	(48)
7. 天然水的铅离子自净问题.....	(50)
8. 关于陆地地表水酚的化合物的自净机制.....	(54)
9. 在水体自净过程中底部沉积物对酚类化合物的作用.....	(60)
10. 在污染的天然水中多元酚和萘酚的分解与温度的关系.....	(64)
11. 在水体中氰化物的行为.....	(69)
12. 利用土壤做净化系统.....	(75)
13. 通过反硝化作用控制土壤中硝酸盐的积累.....	(81)
14. 多摩川净化实验.....	(83)
15. 可供改良水质选择的途径.....	(90)
16. 河流质量管理中统计方法的应用.....	(96)
17. 研究河流自净的一个简易模拟方法.....	(101)
18. 说明有机物质生化分解和流动水体含氧量的数学模型。.....	(108)
19. 研究一个影响河流水质的随时间变化的污染物负荷的模型.....	(111)
20. 用 FeO_4^{2-} 做水净化试验.....	(116)
21. 关于山谷水库集水区农田的施磷肥意见.....	(119)
22. 微生物对土壤中马拉硫磷的化学降解作用.....	(123)
23. 实验室和工厂活性污泥呼吸作用和反硝化作用的研究.....	(128)

天然水体中的自净作用

Richard J. Benoit

I、前言

自净作用包括物理过程、化学过程和生物过程。用不着说,这些过程是相互作用的并且是同时发生的,本文对这三种过程都要加以讨论。河流、湖泊、河口和海洋都有独特之处——在地文上,地球化学上和生物上——但是在所有生境类型中这些重要过程又基本上是相似的。因此,我们的研究途径不是把这些地理单元分开,而是着重研究所有生境共同的过程。

放入水体的废弃之物直接地和间接地影响其生物界。这种影响可能是明显致命性的,或者可能是更为险恶,它对生物的习性或繁殖起不利作用。混合的废物物质的毒性是使用鱼类、昆虫幼虫、和其他无脊椎动物或微生物的生物试验来予以确定。虽然许多种实验室方法都使用,但是 Doudoroff 等人的方法(1)已成为这方面的标准。

除去实验室方法之外,还有一种很普通和适用的方法,就是放一些动物在环境笼子或其他容器里来观察这些动物的生存,生长或其他习性对污染的反应。Benoit 等人(3)利用收集于专门捕机〔硅藻计(diatometers), Patrick 等人(4)〕中的硅藻的生理状况来测定一条接受铜矿酸性排水的封禁的河水中的生物质量。

在一般意义上,我们要弄清楚那些变化是由于水污染造成的结果,这些变化进行的有多快、以及这些变化为什么产生(并包括其机制)。我们感兴趣的是哪些因素在绝对的意义影响了这些变化及其变化的速度。可以举一

个简单的例子,假定我们投一种重金属盐到河流中去,而其量达到足以使现有的某些(而不是所有生物)生物遭到毒害。某些种将被杀死以致达到局部灭绝程度,其他一些种将会死去许多,但是在生物群中仍有不少幸存者,还有一些种则受到很大影响。如果这些幸存下来的种是属于能从环境中的溶液里富集重金属的种,并且富集重金属是这些生物的一种突出的性能(5),则河流受影响河段的长度就会缩短。上述情况真实到何种程度?自然界的这些生物过程通常是比从溶液中消除重金属的化学程度更快吗?从已知自然科学原理不容易获得对这些问题以及同类问题的答案,这是因为自然生态系统是复杂的;对实际河流各点进行仔细的和彻底的研究是必要的,而可靠的和有效果的概括很少可以作出。

似乎对自净过程的兴趣会随着要求在一切情况下对废物进行高度处理的比较严格的法律 and 政策的通过而有所减弱,但是就许多地区和河流来说,处理程度的经济上限在最近的将来就要达到,仍将要求接受废物的河流来承受未能处理尽的剩余污染物。因此,这些“无法减去的”剩余污染物对水质及河流同化能力或自净能力的影响仍然是科学研究的一个重要课题。从废物生产者的立场来看,依靠自净能力,不过是把问题推给下游,并且在某程度上减少了下游用水者的用水权。

海洋是代表所有河流的最下游场所,自然是这样,但由于世界人口和城市化的不断增加,海洋自净能力将变得更为重要。海洋是辽阔的,但不是无限的,人们已经看出海洋的能力在局部范围内显然是负担过重。

定 义

1. 自净作用

自净作用的意思是,在投进河流中(通常是通过人的作用)的外界物质在质上和在量上足以使河的物理特点、化学特点和/或生物特点有可以测出的改变时,由于自然过程,河流的原来状况得到部分的或完全的恢复。

Lee (6) 根据发生的反应来给自净作用下定义,自净作用中的反应产生物质转变,“转变的结果是生成一种对水质的有害影响较原来化合物为小的化合物。”他将这些反应分为八类:酸-碱反应,沉淀作用,转化成气体,络合物的形成,氧化还原作用,光化学反应,吸着作用,和生物化学反应。

2. 同化能力

从广义上说,同化能力是指一个水体在其有益的用途不致受到明显损害的前提下,能接受废物的程度。水体对某种用途的适合性是根据水质标准来确定的,在某种程度上,这些标准也是武断地规定的。最广泛应用的标准是溶解氧,虽然这个参数决非总是合适的。与溶解氧有关的同化能力后面将加以详细讨论。

3. 富营养化作用

Kenton 和 Rohlich(7)对富营养化作用这一问题作了一个综合性的评述,Rohlich(8)对这一评述发表了一篇简短的但值得一谈的概要。富营养化作用是使水体,尤其是湖里植物可利用的营养物质(特别是磷酸盐和含氮的盐类)增多的一种作用,其结果是该水体的生物生产量增加。在自然界中,这一过程的进行在时间规模上要以千年来计算,但是人类的活动能够大大加速这一过程。这一过程对本文主题的特殊意义是,富营养化情况存在于河流自净过程已经发生的河段的下游。在富营养化水体中藻类和水草的生长,可能正像上游因遭受污染而河水恶化令人讨厌一样是件令人讨厌的事。目前实践上能作到的所谓完全的污水处理(一级的,二级的,和消毒作用)所排出的水,与未经处理的污水相比较,实际上并没有把植物的营养物质减少。污水处理和自然净化二者在作用上的

相似性曾多次指出。完全的污水处理就其最新的含意来说,是包括消除植物营养物质的第三级处理在内的。

在地面上积有雨水并暴露于大气中的低地里最终会发展出现一个包括有微生物、植物、和动物的生物界。哪些种类的生物出现,这显然是决定于自然界的偶然性。早晚这里的水会与地壳的物质接近于化学平衡,这时环境也就变得更加有利于生物。所有的天然盆地都有某些流入物和流出物,从动态系统这个名词最简单意义来说,它们就是动态系统。盆地的功用就像是某些流入物质的捕机,这些流入物的积累随时间的推移而改变着水体的性质。当注意的方面是生物生产量时,这时连续不断的变化过程就称之为富营养化作用。生产量最低的水体称之为贫养的,生产量较高的水体称之为富养的;超富营养化这一名词是最近用来描述一种极端情况的,这种极端情况是当营养物质(主要是各种氮和磷酸盐)通过人的活动而加到水中的量超过在原来情况下所存在的量时所观察到的一种情况。在一个湖盆从贫养湖变为富养湖的演化中决不是肯定有一个有规则的连续变化;事实上,像许多生物系统一样,在长久的时间范围内,这个系统有一种强烈地自动催化特性〔参考文献(7),特别是其中的图1〕。此外,据报道,在许多湖中某些种的浮游生物和其他生物突然大量出现,这种现象可以认为是一种生物量突增现象。还有,在湖中所观察到的动植物群落如果被当作是代表湖泊演化中的各个时期或阶段,确实似乎有一个暂时的稳定,这种现象所表明的是各个演替阶段的存在,而不是均匀的连续发展,但是现有的全部知识和适当了解所化的时间都不允许我们将这一议论发挥得过多。

II、物理过程

A. 稀释作用和混合作用

在自净作用中稀释作用是一个重要的物理过程,这是扩散作用和搬运现象所造成的结

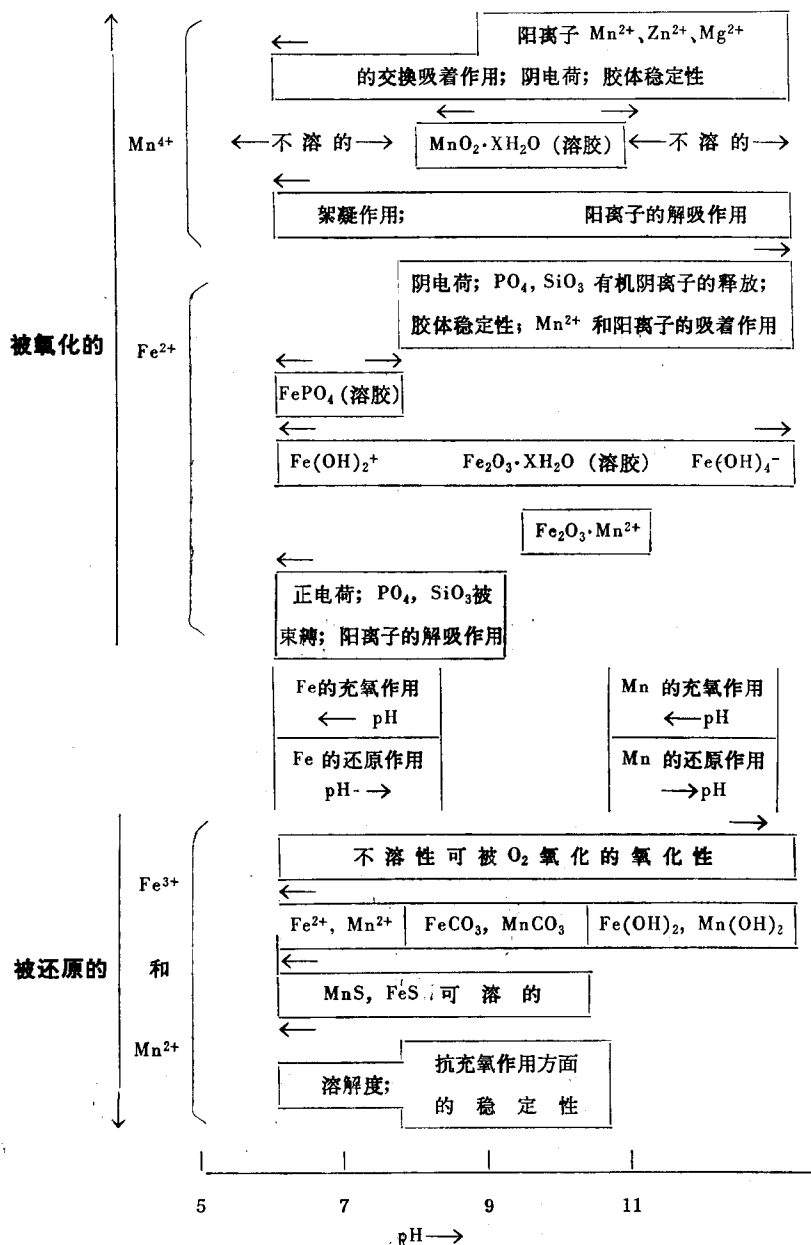


图1. 天然水中铁和锰的动态

果。在天然地表水所特有的温度状况下, 分子扩散作用是一个缓慢的和不太重要的过程。

可是, Cowgill(9) 提出康涅狄格州 North Branford 地方 Linsley 湖里的中等深度层 (5—7 米) 的垂直热传导系数, 在夏季 (六月—八月) 水温分层时是与分子的热转运相一致的。Cowgill 所说的这种现象无疑是代表一

种特殊的情况; 在流水中, 水平流动和湍流 (旋涡扩散作用) 是主要的。

混合作用发生主要是旋涡扩散作用的结果, 从概念上来说, 是由密度梯度或不均匀的密度场所产生的一种过程, 主要是由于温度原因, 但在某些实际情况下, 也由于溶解盐的原因。在河流中, 河床的坡度支配搬运和混合的

情况。在河口和靠近海岸地带，潮汐的影响是很重要的。在海洋和湖中，风也能支配混合作用，尤其是在表层。洋流是包括风力、垂直密度梯度、潮汐和科锐奥利（Coriolis）力在内的各种力综合作用的结果。主要的表层洋流相对来说已经了解的比较详细（10），但是对下层洋流（尤其是深水中的洋流）了解的很少（11、12），这种洋流对“最终”处理放射性废物是特别重要的。分散的放射性元素集中起来所引起来的化学过程和生物过程是同样重要的。根据 Revelle 和 Schaefer 两人（13）的看法，我们对控制投入大海中去的放射性废物去向的物理过程、化学过程以及生物过程方面的知识是（在1957年）“极不全面的”，“迫切需要对这些过程要有足够的了解以便为工程估计提根据。”1957年美国科学院研究委员会（NAS-NRC）关于海洋中放射性废物的报告（13）其整个主题已经被仔细研究了十年，不久将会发表一篇题为“海洋环境中原子放射作用”的新报告。

除去人为的放射性核素(radionuclides)以外，另外一类人造的物质已经成为一个全球性的潜在污染问题。从像欧洲北美这样一些世界上广泛使用氯化有机农药的地区来的这种农药，通过全球范围的混合作用已经散布到世界上最遥远的地方。

稀释作用和混合作用虽然是极普遍的现象，但却是相当复杂的过程；其一般理论在概念上虽然是简单的，但是在机制上却是相当复杂的。Eckart(14)用简单的措词说明了这个概念的大意。一部分水体相对于另一部分水体运动的水平运动，能提高浓度或物理性质的梯度的平均值。Eckart 把这种水平运动的效果称之为搅动，并且他指出搅动与涡流强度无关；也就是说，这种现象出现在涡流中，也出现在层流中。传导和扩散的效果是减弱梯度，而梯度却是混合作用的要素。在搅动和混合都出现的一种过程的早期阶段，水平运动是主要的，这样平均梯度逐渐增加，以致最终混合作用超过了搅动作用。粘滞性在没有被动量所抵消的程

度内倾向于制止搅动作用，因而也就抑制了混合作用。Von Karman(15)评论了根据Dryden, Heisenberg, Kolmagoroff, Navier, Onsager, Prantal, Reynolds, Stokes 和 G. I. Taylor 等人的经典著作所作出的关于湍流的统计理论。在海洋和淡水中扩散作用讨论会的会议录中记载有关于河流、河口和海洋中混合作用的另一些理论根据(16)，会议录里也包括有萤光染料追踪物来对主要河流与河口的扩散作用作野外研究的说明材料。Kisiel(17)根据在俄亥俄河作的染料追踪物研究所得出的结论是特别值得注意的：“需要有更精心设计的排污入河系统，而不是仅仅在海岸边布置一个排放口就算了事。就河流而论，处理过程的百分数效率多大不是关键性的。应当注意的是将要由河流去同化那些已处理过的废物的剩余为害力量。

B. 吸着作用和沉淀作用

吸着作用的定义可以说是指溶液中的离子或分子被束缚于固相的颗粒上。在这种形式中，固然这些离子或分子的性质有了变化，但束缚于粒子物质上的有毒离子能影响摄取这种颗粒的滤食性动物，并且食软泥的动物也可能受到吸着有毒离子的沉淀颗粒的毒害。一个颗粒上一种离子的吸着可把另一种离子转移到溶液里去，在这种情况下就认为是发生了离子交换吸着作用。在水圈中，对某些元素来说，吸着作用具有地球化学上的意义，这一点已被土壤科学广泛证明了。在水中和土壤中，吸着作用与化学平衡相对照，其相对重要性在数量上的差别无疑是由于很不相同的液相对固相之比所造成的。

吸着作用通常被当作并且也被说成是一种物理过程，但是 Stumm(18)指出，某些所谓的吸着现象同样可以很容易用溶解度平衡来加以解释。根据 Hsu (19)的意见，在酸性土壤中磷酸盐的固定是受非晶形的氢氧化铝和氧化铁的吸着作用所控制，而不是由各种结晶的铝或铁的磷酸盐溶解度所控制；可是，这种过程可以被当作一种化学平衡系统来对待，并且 Hsu 讨论了酸性土壤中 pH 和参与元素的浓

度对磷酸盐溶解度的影响。在中性和基性土壤中,各种结晶的磷酸钙的溶解度似乎更比吸着现象占支配地位。

可是,对于河流和湖泊受污染的地段来说,根据平衡的定义来看,显然我们遇到的是和平衡不相干的情况。而且,整个生物圈的活动把太阳能与地球化学平衡联系起来,使和严格的化学动态平衡不相同的情况很稳定。这也就是说,在大气中毕竟存在有氧这一事实是依赖于阳光和光合作用的结果,并且光合作用的有机产物是用来当作一种燃料,为逆着浓度梯度把离子运过细胞和组织的膜的所谓积极转运提供能量。为进一步讨论这一问题,人们或许说人类通过污染破坏了这种稳定状态,而自净过程就是恢复这些稳定状态。污染作用如何影响到生物的稳定状态的细节在第四部分作了叙述。

沉淀作用可以将悬浮着的离子状的废物消除掉,同时含有被吸着的离子和分子的悬浮物质不论是加进去的还是原来的,当沉淀时还能消除水体中的可溶物。沉淀的物质按其性质和数量的不同以各种方式影响着底栖生物。这些物质可供作为食物以促进底栖动物的生长,或者能够成为埋葬这些动物的坟墓。已经多次观察到,在浅处的流水中光合作用或第一性生产量主要是水底附生动物区系(生长于靠近水底水层中的附生微藻类)的作用,而不是浮游植物的作用。在河流中即使只有相对少量的沉淀,这种沉淀埋葬这些附生在动物体上的藻类的速度也可能比促进它们生长要快。

在河流的稀少的高流速时期内,沉积物的再悬浮起来可能对水体的性质产生很大的影响,这一事实在卅年代首先被 Imhoff 所强调。事实上,具有低的短期的生物化学耗氧量(BOD)的相对稳定的有机物质,在沉积物中经过一段嫌气分解时期之后,就逐渐提高了其短期生物化学耗氧量。这样的沉积物再悬浮起来能突然招致溶解氧的大量消耗(20)。

Jamsa 和 Akerlindh(21)检验了实验室中所作的关于可沉淀的固体的实验与流速不同的河流中悬浮固体在沉淀以前被携带的距离之间

的关系。他们指出,在污水排出口的下流,有一个沉淀作用达到平衡的地方,也就是说那里每天沉淀下去的物质的 BOD 量等于每天氧化掉物质的 BOD 量。如果只是涉及悬浮固体的可以氧化的部分,则这种假设是简明的也是合理的,肯定这可以运用到受污染的河流中由于水流波动而引起的沉积物再悬浮对水中溶解状况不发生的河段中去。Jansa 和 Akerlindh 认为,表示由于沉积物的 BOD 而使氧气被消耗的这项可以加到 Streeter-Phelps 方程式中去,本章第三部分 E 这一节中讨论了这一方程式:

$$\frac{dl_s}{dt} = K_s L_s e^{-K_s t} \quad (1)$$

这里 l_s 是指 t 在时沉淀的淤泥的 BOD, L_s 是全部可沉淀的淤泥的 BOD, K_s 是沉淀的速度常数, t 是沉淀的时间。

他们发现这种关系在说明瑞典一条受到污水污染的河流中溶解状况时是有用的,这里的 K_s 发现是属于每天达到40的数量级。他们进一步提出,在河流流速超过 50 厘米/秒时,含有 BOD 的固体的沉淀是微不足道的,并提出作为初步近似值,携带淤泥的能力在流速低的时候可以看作是与速度成正比,在流速高(大于12厘米/秒)的时候,则与速度平方成正比。总之,悬浮固体的 BOD 可以按经验来判断,正如速度等于零时或甚至在模拟的流动条件下可以判断其沉淀能力一样;但是人们希望将来在处理厂里能普遍实现 BOD 固体的适当沉淀,这样就使 Streeter-Phelps 方程式中的沉积这一项只有学术上的意义罢了。

Hoak 和 Bramer (22—25) 为进行盆地的设计提出一个普遍模式,表明了盆地的几何形状、流水速度、以及颗粒特点为大小、密度、和重量等的影响。这个模式加以修改就应当可以应用到河流中沉积作用上去。

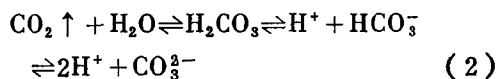
III、化学过程

A. 溶解度平衡

自净作用中重要化学过程的一般分类上面

已经作了叙述。Benoit(26) 近来关于淡水的化学成份与水与岩石圈主要矿物间化学平衡的关系的研究作过评述。

Kramer(27) 和 Sutherland 等人 (28) 为淡水的成份提出一个模式。这个模式所依据的是含有在考虑中各种元素的一般岩石圈物质的溶解度(或活度)平衡, 和相当于 $P_{CO_2} = 3.5 \times 10^{-4}$ 大气压的大气二氧化碳浓度。这里所说的一般岩石圈物质即方解石、白云石、高岭土、三水铝矿、钠长石和钾长石。这个模式预测五大湖中的实际主要离子十分有效, 但是 Kramer(27)指出, 除了雨水中氯化物和硫酸盐的量下降到最少之外, 湖水中这两种物质的量并没有天然的控制。由人所加进的氯化物和硫酸盐(主要是钠盐)根据 Kramer 的模式来说是以已知的方式影响溶解度平衡。这主要是通过钠被粘土和长石所吸附而实现的, 因为这种吸附引起 pH 和碱度的改变, 从而也就影响到碳酸盐的离解。钠被吸附或钠和碱性较弱的阳离子相交换, 显然会降低 pH 和碱度, 并驱使碳系统的反应向左。

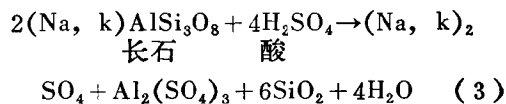


Livingstone 和 Boykin (29) 联系涉及到磷酸盐吸着现象指出了把盐加到天然水中的另一个最重要的后果。磷酸盐在溶液和因子相的湖中淤泥之间的分配情况是冲洗淤泥的溶液中阴离子总量的一个函数, 或者用另一种形式说, 其他阴离子像硫酸盐和氯化物, 即使这些阴离子不是像磷酸盐那样可以很容易地束缚于吸着位置上, 但它们为了能够占据现有的这种位置而与磷酸盐相竞争, 因此, 就增加了平衡溶液中的磷酸盐量。这样, 在溶解固体总量不大但受到具有较高离子强度的水冲洗的情况下所形成的淤泥中的磷酸盐就可能被释放出来。因此, 排放出在生理学上是惰性的食盐或硫酸钠盐水就可能加快富营养化作用。

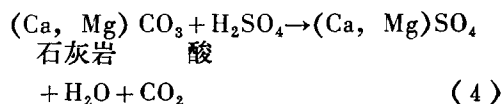
B. 酸碱反应

检查河流中酸性废物同化作用的最简单方法是无机酸和结晶岩中最普通的矿物长石所起

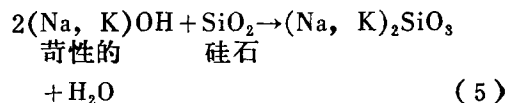
的反应。粘土(长石风化所产生的非结晶物质)和其他硅酸盐也能起类似的反应。在石灰岩地区, 酸性同化作用反应包括石灰岩和白云岩:



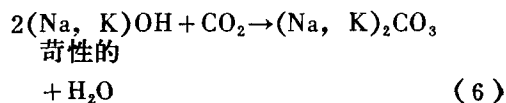
或



苛性废物主要是通过硅石、碳酸氢盐和游离碳酸的反应而被同化的:



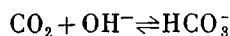
和



在自然界中, 这些反应是发生于和大气及各种矿物相接触的复杂的含水离子环境中。从河流对废物的同化能力这点来看, 这种反应发生的速度比其反应本身更有实际意义, 因为它影响到河流被未同化的酸或苛性物质所恶化的范围的大小。

在没有大量无机酸或碱的情况下, 水体的 pH 就受碳系统的控制, 这一点 Hutchinson (30) 已作了详细的讨论。

溶液—离解反应在方程式 (2) 中已经表明, 但当二氧化碳进入到碱性溶液中去时, 会出现一种方程式 (2) 所没有表明的普通情况:



Hutchinson(30)指出, 在水中 CO_2 较氧更容易溶解, CO_2 的可溶性为氧的 200 倍。可是在天然水中所存在的 CO_2 和 O_2 数量主要与空气中的 CO_2 和 O_2 数量有关, 空气中 CO_2 的含量只占约 0.03%, 而氧却占 20%。因此, 当天然水含有的氧是属于每升为 5—10 毫克的数量级时, 而含有的 CO_2 则只是每升大约 0.5—

1.0毫克。Hutchinson 说道，水中的 CO_2 由于光合作用而被消除之后，空气中的 CO_2 进入溶液是一个缓慢的过程；这需要“一个长的时间，要几天或几周……才能跨过一种通常是激荡的膜而达到与大气保持平衡。”按照 Hutchinson 所说，企图测量所谓侵入系数所获得的数值，其变化差别超过 200 倍。可是，方程式（2）中所表明的其他平衡反应所需要的时间是以分钟计的。显然 Keuntzel (31) 没有注意到这一事实，他的一篇关于在藻类繁荣时细菌产生的 CO_2 的意义在第四部分 D. 2 中作了讨论。在具有生物学意义的 pH 值的幅度内各种含碳的化学物质的比例已列于表 1 中。

表 1 不同 pH 值时二氧化碳、碳酸氢盐和碳酸盐的分子比例*

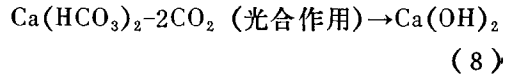
pH	CO_2	HCO_3^-	CO_3^{2-}
4	0.996	0.004	$\sim 10^{-9}$
7	0.21	0.79	$\sim 10^{-4}$
9	0.003	0.966	0.03
10	10^{-4}	0.76	0.24

* 本表是根据文献 30 第 657 页重印

在与普通空气相平衡的水中碳酸钙的溶解度也是很有意义的。Hutchinson (30) 把每升中含有 55—60 毫克 CaCO_3 作为 CaCO_3 在温度 20°C 时的溶解度，这相当于每升含 HCO_3^- 为 70—77 毫克。即使分析所确定的质量有很大差别，以及在术语上有很多混乱，但很明显， CaCO_3 的溶解度和空气中 CO_2 的分压左右着大多数天然水中 CO_2 的状况和 pH 值。最近有一篇文章 (31a) 阐明了在哥伦比亚河中这些因素对 CO_2 分压的影响。为了对较旧文献中特别是外国文献中所使用的术语进行充分讨论，读者可以参考 Hutchinson 一篇令人赞赏的论文 (30)。

生物的光合作用和呼吸作用活动直接影响水中 CO_2 的含量，水中 pH 值的日变化为 ± 0.5 单位，这些 Lee 和 Hoadley (32) 已经指出。在藻类大量生长的地方，在一日之后，

pH 值可能接近生理的上限。说明发生这种变化的最简单方法是由下面简单的反应引致，这一种反应只考虑了淡水中所有盐类中的碳酸氢钙：



这种反应显然会导致 pH 值的升高。另一方面，在湖水深处和土壤中，尤其是水浸的土壤中，各种含碳物质的总量可能由于细菌的嫌气性代谢作用而比溶解度平衡所表示的数值要高得多〔参看方程式 (17)〕。

C. 天然水体中的有机物质

在天然水体中有机物质存在形式有：活着的动植物躯体及细胞，无生命的颗粒状动植物残体（称为碎屑），以及可溶的有机物残余和动植物的排泄物。Parsons (33) 曾经估计，就北大西洋表层水来说这些物质的比例数字（毫克/升）通常如下：可溶解的有机物质，2；碎屑，0.2；浮游植物，0.04；浮游动物，0.004；鱼类，0.00004。

在淡水中，可溶解的有机物质含量通常约为上述数字的十倍，没有多的理由相信其他各类物质的比例有很大的不同。淡水水体和海洋二者的不同不是由于第一性生产量的关系，而是由于陆地物质的更深刻和更直接的影响。根据用来估计这些物质的方法，细菌应包括在碎屑那一部分物质中，根据实际的微生物的分析，河水中的细菌比海洋中丰富的多。淤泥和水之间直接交换在小的水体中也显然比海洋中更为重要。同时，在 Parsons 的分类中所分出的“鱼类”这一类生物与河流和湖泊中的无脊椎动物及底栖鱼群是不能相比的。从有机物质被同化的观点来看，重要的问题是加进可溶性有机废物或粒子状有机废物能改变 Parsons 的物质分类金字塔的比例到什么程度。大家都知道，活着的这类物质中的动植物部分可被有机污染所改变；这种现象的细节在第四部分的 C 中作了讨论。

D. 氧化还原反应

我们所讨论的氧化还原反应只限于本问题

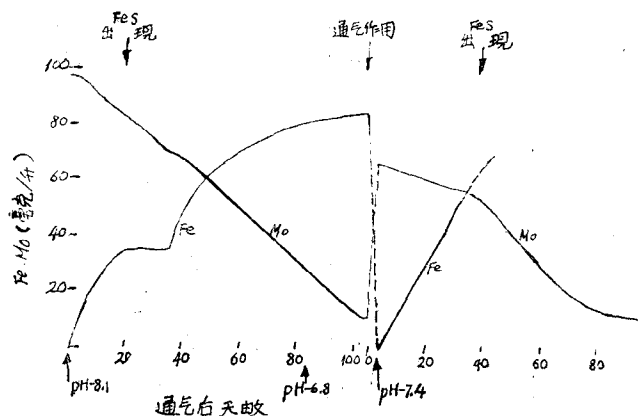


图2. 有淤泥时铅在水中氧化还原变化中的性质

的某些化学方面，这与量测和说明水中和沉积物中的电化势是不同的。关于氧化还原电位和 pH 对淡水中铁和锰的吸着作用和沉淀作用的影响，Margan 和 Stumm(34) 已作出了很清楚的图解（图 1）。将他们的图解对处理和处置含有重金属和酸的废物的意义是很明显的。其他重金属如锌、镉、铬、镍和钼在同样的氧化还原和 pH 的条件下的行为则是未来研究的一个重要课题。这些重金属几乎总是会受到铁和锰的影响（被吸着、被沉淀等等），铁和锰存在的量通常超过像铜、钴和钼这些元素。Sugawara 等人 (35)（图 2）研究了实验室中简单的淤泥和水系统中钼的行为，先使此系统是气环境，然后再让它变为嫌气环境。现代简单而又可靠的分析溶液中重金属的仪器分析方法应当有利于对其他重金属作同样的广泛研究。

E. 溶解氧的关系

正如早先所提到的那样，溶解氧是一个非常普遍应用的水质标准；尽管它不能说明一切，但它是一个重要的一般质量指标。在参考文献 (36) 中对这问题有一个全面的综合评述。Loucks 等人 (37) 提出一个一般性的方程式来说明接受耗氧废物的河中的溶解氧关系，方程式如下：

$$\frac{dB}{dt} = -(K_1 + K_3)B + R \quad (9)$$

dB/dt 是 BOD 随时间而变化的速度，B 是现有的 BOD，R 代表由于迳流和冲刷而使 BOD 增加的速度。 K_1 和 K_3 分别代表脱氧作用和沉淀作用速度常数。一个用溶解氧亏缺 (D) 而不用 BOD (B) 的有关式子如下：

$$\frac{dD}{dt} = K_1B - K_2D - A \quad (10)$$

这里 dD/dt 是溶解氧亏缺随时间而变化的速度，D 是指当前所亏缺的氧（现有的溶解氧浓度和饱和值的差数），A 是由于浮游植物和/或水草的光合作用和呼吸作用而造成的氧的净增率， K_2 是再充气作用的速度常数。

这两方程的积分结果是：

$$B_t = \left(B_0 - \frac{R}{K_1 - K_3} \right) e^{-(K_1 + K_3)t} + \frac{R}{K_1 + K_3} \quad (11)$$

和

$$D_t = \frac{K_1}{K_2 - K_1 - K_3} \left[\left(B_0 - \frac{R}{K_1 + K_3} \right) (e^{-(K_1 + K_3)t} - e^{-K_2t}) \right] + \frac{K_1}{K_2} \left[\left(\frac{R}{K_1 + K_3} - \frac{A}{K_1} \right) (1 - e^{-K_2t}) \right] + D_0 e^{-K_2t} \quad (12)$$

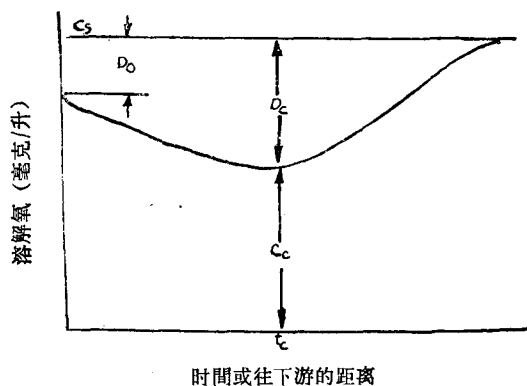


图3. 氧下降曲线。 C_s 是溶解氧 (DO) 饱和； D_0 是最初的 DO 亏缺； t_c 是临界时间的 DO 亏缺； C_c 是临界时间的 DO 量 (37)

方程式 (12) 表明典型的氧量下降曲线, 这如图 3 中所表示。该图中 t_c 左边脱氧作用超过再充气作用; t_c 右边的情况则相反。所谓临界时间即 t_c 是指溶解氧达到其最低值的时刻。根据河流的流水资料 (流速方面), 河道中的临界点位置是可以确定的。应当仔细地注意是这个表明氧量下降的方程式的应用是假定 K_1 , K_2 , K_3 , A 和 R 这些参数基本上都是保持不变, 并假定它们的实际值可以得到或者可以合理地作出假设。如果把 A , K_3 和 R 都当作是 0, 则该方程式 (12) 就简化成为典型的 Streeter-Phelps (38) 方程式。

Loucks 等人 (37) 的模式可以用表来确定为了符合一个盆地系统中各个河段的任何一套溶解氧规定标准 (政策的) 所需要的最低费用; 而且, 这类模式也可以确定当任何特殊河段的允许最低标准有改变时总费用的变化是多少。此模式的每一个解答都是以固定不变的 (或设计的) 流水条件为根据的, 但是当情况与设计的流水条件不符时和/或实际得到的水质如何, 都可以根据模式预测出来。

值得注意的是, 温度没有作为一个变量用到溶解氧状况的模式中去, 但是显然它对微生物和动物机能、对再充气作用、对沉淀作用 (通过它对粘着性的影响) 和对氧的溶解度都有深刻的影响。Davidson 和 Bradshaw (39) 列举了增加温度对污染的影响和对提高净化的效果, 并举出已研究的特殊实例。Davidson 和 Bradshaw 提出一个数学模式来说明温度对负荷有 BOD 的河流的溶解氧状况的影响。这个模式表明当河流受一个 BOD 污染源污染时, 其下游存在着一个理论上的最适温度剖面。即使作者强调所解决的用来作为例子的问题是假设性的, 人们仍可期望将经过改进的模式应用到决定政策上去和应用到对可以任意选择热排除位置的河流盆地作流域规划上去。

数学模式要受到实际的检验, 当然, 这一点是极其重要的。Torpey 在最近几篇非常重要的论文中 (40, 41) 对上纽约港和泰晤士河口 (英国) 多年内夏季的溶解氧浓度和所负

荷的 BOD 的实际变化情况作了总结。特别值得庆幸的是关于这些地方已收集到大量的系统资料, 历史实例应当成为证明规划长期性水质监测计划是有价值的例证。Torpey 解释了纽约和泰晤士河的资料, 认为这些资料表明, 在平均深度约为 30 呎的河口, 负荷速率相当于每呎水体每天需氧 20 磅和 135 磅之间时, 存在着一个饱和和在约 30% 和 50% 之间的溶解氧的大致平稳状态。图 4 表示 Torpey 所说的反应。他指出, 在这个平稳状态存在的时期内含氮物质被氧化成为硝酸盐的现象是不明显的。Torpey 把这个平稳状态解释为由于藻类 (光合作用提供氧) 和细菌 (矿化作用为藻类提供营养物质) 之间的共生关系造成的。可惜, 在

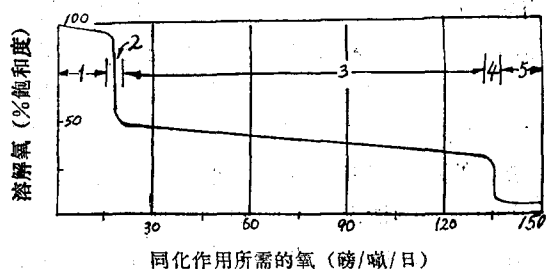


图4. 纽约港和泰晤士河口的反应 (根据参考文献40)

有溶解氧资料的时间内并没有关于微生物调查方面的资料作为直接证明。Torpey 认为第一个带的生态学特点是能供养包括食物链中较高等的生物如甲壳类, 软体类和鱼类在内的生物群; 第三个带, 即情况是大致平稳状态的那个带, 是以微生物群占优势。哈德逊河的捕鲱量在该河由属于第一带的情况 (1901) 逐渐转变为属于第三个带的情况 (1904) 的时期内, 从每年 1700 万磅下降到 500 万磅, 这肯定不是偶然的。Torpey 警告说, 当接受排出物的水体其负荷增加速率向着平稳状态的右方改变时, 进行污水处理就不一定会使溶解氧有引人注目的增加。至少对于水文参数与纽约港和泰晤士河口相似的河流来说, “将受到污染的水体恢复

* 原文如此, 从图 4 来看, 应为 30% 和 50%。——译者注

到能够用以维持大量鱼群的状况, 往往要比氧下降公式所表示的要高得多的处理程度以降低排放负荷。”虽然 Torpey 的研究中所包含的资料可以作他种解释, 但是毫无疑问, 他所表明的关系代表了对河口化学动态中所包括的所有复杂参数的总反应。

底部淤泥沉积物对一个河段的总需氧量的影响已经提到过。Oldaker 等人 (42) 在一个用许多20升容积的酸瓶和一些有关配件组成的实验室系统内, 测定了与污物出口有联系的新、老河流沉积物的需氧量。这些作者对于在静止条件下沉积物的深度对需氧量的影响发生兴趣, 但是他们的资料也提供了关于因严重冲刷作用(在湍流条件下沉积物的再悬浮)而引起的最大负担这一方面的知识。在底栖动物影响沉积物到某种程度的野外, 其正常状况将是代表处在沉积物完全悬浮和完全沉淀之间的一种需氧量状况。Fair 等人 (43) 比较早地观察到淤泥的极限需氧量直到一年之后才达到。在静止的实验室情况下, 限制淤泥耗氧速度的作用是可氧化的物质从淤泥中进入水中的扩散作用和氧气进入淤泥的扩散速度。因此, 这种过程的动力学与微生物代谢动力学大体上是无关的, 但是 Oldaker 等人和 Fair 等人的实验室实验还是有意义的。Oldaker 等人 (42) 发现 Merrimac 河中老沉积物的最初极限面积需氧量 (initial ultimate areal oxygen demand) 与研究深度范围(1.5—20cm)内的深度成比例, 大体每增加一厘米厚的沉积物每平方米的极限需氧量增加32克。对新沉积物只研究了一个深度 (1.5cm), 结果表明所测验深度处的极限需氧量为120克/平方米, 或深度每加厚一厘米极限需氧量增加80克/平方米。Fair 等人和 Oldaker 等人用 L_a 表示极限面积需氧量, L_a 在概念上可以与极限含碳物质需氧量 BOD_u 相比较, BOD_u 的意义可表示如下:

$$BOD_t = BOD_u(1 - 10^{-Kt}) \quad (13)$$

这里不涉及面积基础, BOD_t 是时间为 t 时的数值, K 是速度常数。沉积物的面积 BOD 总量用下式表示:

$$L_d = L_{a_0} \times 10^{-K_d t} \quad (14)$$

这里的 L_{a_0} 如上面所说是最初极限面积需氧量。速度常数 K_d 表示在对老沉积物所作的实验中随着深度成指数下降, 从 1.5cm 深度处的 0.0033 下降到 20cm 深度处的 0.0006。对新近的沉积物来说, 只对一个深度 (1.5cm) 作了研究, 在这种情况下 K_d 的值为 0.0051。从对流进水和流出水中的硝酸盐进行分析, 可以计算出由于硝化作用而出现的需氧量。在新近期的沉积物中 (1.5cm 厚), 硝化作用在七十天中上升到一个高峰, 然后在第90天下降到很低的数值。由于硝化作用而出现的需氧量其最高比值是50%左右。对老沉积物 (1.5cm 厚) 来说, 硝化过程的时间变化更是难以捉摸, 在第50天有一个数值约等于总需要量的90%, 到第65天下降到一个约为10%的低数值, 而后在第80天又上升到40%左右, 最后再下降到非常低的数值。就自然界中能发现或预报的情况来说, 对实验室瓶子实验的意义强调太过是不明智的。但是这个问题并不限于对沉积物的同化作用来说是如此。实验室研究至少必须用来确定那些在野外不易测量的参数值的变化幅度。

Velz (20) 根据广泛的研究指出, 有机固体沉降的临界速度是每秒 0.6 呎 (或每秒 18 厘米) 或不足 0.6 呎, 使沉积物受冲刷现象出现时的速度是每秒 1.0—1.5 呎 (或每秒 30—40 厘米)。他提出了一个表明淤泥沉积物中平衡发展的经验函数, 在这平衡中消灭需氧量的速度恰好等于沉降的速度。应当想起, Jamsa 和 Akerlindh (21) 所估算的沉淀临界值是每秒 50 厘米。

F. 再通气作用

天然水体吸收氧气的速度可以用函数表示如下:

$$\frac{dc}{dt} = K_2(C_s - C) \quad (15)$$

这里的 C 是测量出的溶解氧的浓度, C_s 是在一定温度下的饱和值, t 是时间, K_2 是再通气作用系数, 即 Streeter-Phelps 方程中的第二系数。Langbein 和 Durum (44) 曾说明水文特

点(速度 v 和深度 H)对 K_2 值的影响。他们证明用 $0.01/1^\circ\text{F}(0.55^\circ\text{C})$ 这一因数把实验室和野外资料校正至 $68^\circ\text{F}(20^\circ\text{C})$ 时的情况, 则 K_2 将等于 $3.3v/H^{1.33}$ 。对于坎萨斯—米苏里—密西西比河流系统来说, 他们证明通气作用系数向着下游按平均流量(每秒立方呎)的平方根大小而下降。这与河水速度和河流高度随着流量而变化(速度按流量的0.10次方增加, 而深度按流量的0.40次方增加)的方程式是一致的。Langbein 和 Durum 证明这种关系存在着地区上的差别。对沿海平原的河流来说 K_2 是按照 $801/\sqrt{Q}$ 而变化, 这里的 Q 是代表以每秒若干立方呎来计算的平均流量。这种差别是由于河床坡度不同造成的, 他们所代表的区域在坡度方面是属于极端情况。

再通气系数 K_2 的一般趋势是随着一个河流的级位(指高度)的增加而减少, 但是浅的河段(浅滩)所表现的情况和水深的地方(深潭)是不一样的。图(5)表示出, 在浅滩处当流量增加时该系数就迅速下降, 而在深潭处, 该系数仅有很少的上升。在某一高的级位这些河流特点的区别就消失掉。在坎萨斯州 Bonnex Spring 处的坎萨斯河段来说, 在浅滩和深潭都被淹没的这一级位该系数的值为每天 0.43。

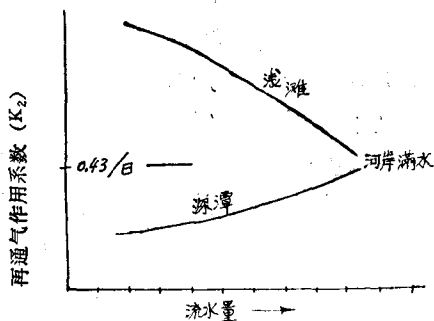


图5 流量对通气作用的效果(根据文献44)

Langbein 和 Durum(44) 根据全面范围的情况, 估算了大小不同的八种河流的总的同化能力。这些对本文的内容来说关系不大, 但是这些资料可以用来估算每哩的同化能力(按每

一单位的溶解氧亏缺), 也就是说, 估算在将会把溶解氧降低一个单位(毫克/升)的条件下每哩可能同化的耗氧物资(看作 BOD)的吨数。最小的一类河流(I)的平均流量 Q 是 $14\text{ 呎}^3/\text{秒}$, 平均深度为 0.55 呎, 平均速度为 1.2 呎/秒, 再通气作用系数为每天 9.5。对这一类来说, 降低一个单位溶解氧亏缺时每哩的同化能力估计为 0.04 吨 BOD, 最大的第 III 类河流的同化能力估计为 5.2 吨 BOD/哩, 这可以密西西比河为代表, 其平均流量是 $700,000\text{ 呎}^3/\text{秒}$, 平均深度为 45 呎, 平均速度为 5.0 呎/秒, 系数为每天 0.10。以坎萨斯河, Allegheny 河和 Rio Grande 河为代表的属于中间一类, 即第 II 类河流, 其同化能力约为 1.0 吨/哩。对每一呎深每哩的同能力加以考虑, 如表 2 中所表示的那样出现一个明显的矛盾。所有这三类河流尽管

表 2 同化能力和河流大小的关系^a

河流分类	同化能力 ^b	平均深度(呎)	每呎深的同化能力	$K_2/\text{日}$
I	0.04	0.55	0.07	9.5
II	1.0	5.0	0.2	—
III	5.2	45.0	0.12	0.1

a. 摘自文献44,

b. BOD吨数/哩/一个单位的 O_2 亏缺。

它们的宽度有很大不同, 而每一呎深的同化能力却是属于同一个数量级, 根据 Langbein 和 Durum 的资料, 可以算出 I, II 和 III 这三类河流的宽度分别为 21 呎, 560 呎和 3100 呎。这个明显的矛盾在考虑到下列两点时是得到解决的, 首先, 第一类河流的通气作用系数很高, 几乎等于密西西比河的系数的 100 倍, 其次垂直方向的混合作用在河的深度内都有。前两类河流, 由于它们的深度浅, 实际上总是达到完全混合, 但是最大的一类, 尤其是在速度低于平均速度的情况下, 可能会出现某种垂直分层的现象(不完全的垂直混合作用), 在考虑废物处置方法时不应忽略这一情况。直接影响河流中溶解氧关系的生物化学过程将在下面加以讨论。

IV、生物过程

生物过程与水污染的关系有二个主要方面。首先，在自净过程中显然有活的动植物的活动，它们将有害的物质转变成无害的产物，这通常要牺牲溶解氧，并且常常会牺牲一般出现在未受污染河流里的各种生物群中的某些生物种。其次，由于污染而生物群本身有变化，那就是利用生物群作为评定污染对环境响的一个复合质量标准。近来对污水管理的生物方面进行综合研究的有 Hynes(45), Doudroff(46), Tarzwell(47), Bratsch 和 Ingram(47a) 以及 Keup 等人(48)。Keup 等人的研究是收集某些迄今很难获得的经典著作，其中包括 Kolkwitz 和 Marsson (49、50) 的重要的开创性研究。

A. 正常生物过程

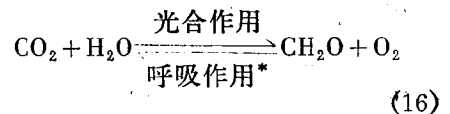
在废物的同化作用中，最主要的生物过程是：（1）包括原生动物和极微小的多细胞动物在内的各种动物的吃食、消化作用和呼吸作用；（2）包括微小藻类在内各种植物的光合作用和呼吸作用。细菌和真菌当然是作为植物来划分的。虽然它们能吸收和消化溶液中的有机物质，但它们通常是与有机颗粒表面联系，因而它们进食的很重要一部分必须通过细胞外的酶的帮助。而且，细菌和真菌可以在对动植物不利的条件下生活和繁殖，因此，在河流最严重污染的地段它们就在生物群中占优势。

大多数原生动物生活是靠摄取食物颗粒，然后在细胞体中的液胞内把它们消化掉。细胞和微小藻类都是大多数原生动物种的正常食物。它们同样地构成极微小的滤食性无脊椎动物和大的滤食性无脊椎动物的正常食物的一大部分。

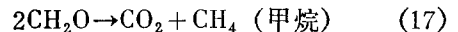
有一句中国古老的谚语说道：“大鱼吃小鱼，小鱼吃小虾，小虾吃淤泥”。这一种说法以朴素的方式表明了一个重要的生态学原则——食物链或食物网的原则。这一原则在第四部分 C 中将详细地予以讨论。这一谚语忽略了“淤泥”（食物网的基点）的由来。通常淤泥所代

表的是光合作用的细胞状产物或部分分解的植物残体；食植物的动物残体；或者捕食其他动物或吞食细菌的动物残体，而这种细菌是侵袭它所发现的任何形式的有机物质的。光合作用和呼吸作用在下面作为生物化学过程加以讨论。

河流中的充气作用可分两方面：一方面是来自大气扩散作用的，另一方面是光合作用超过呼吸作用的净剩余部份。这后一部分又可分成是水底植物群附着生物 epiphyton 或周丛生物 periphyton 提供的和自由飘浮的极微小植物（浮游植物）提供的。根据经典的概括方程式由光合代谢作用所产生的氧的净值在理论上是等于零。



在方程式（16）和（17）中， CH_2O 代表碳水化合物。脂肪、蛋白质和其他细胞状物质都是由碳水化合物合成的。为了合成蛋白质和核酸，植物当然需要氮、硫和磷酸盐的来源。这些合成活动需要能量，那种能量则是来自碳水化合物呼吸作用。这样，氧的净增加只有在植物组织被转移到有关水层之外以后才能存在，转移走的情况或者是流往下游或者是沉到水底，在水底里分解作用受到抑制，或者在嫌气条件下进行。嫌气性微生物反应种类十分广泛，这种反应将有机物分解成二氧化碳和比碳水化合物更有还原性的各种分子物质，例如：



包括氮和硫在内的氧化还原反应在嫌气性的微生物代谢作用中也起着突出的作用（51）。

Stay 等人（52）叙述了一种直接测量与河流充氧有关的各种作用——扩散作用，呼吸作用，近底植物的光合作用和浮游植物的光合作用——的仪器和方法。普通所有的亮瓶和暗瓶的方法产生一个异常高的面积对体积之比，并且瓶中静水条件能阻止营养物质和废物之间的

* 其意义是氧化分解。本文以后各处均如此——译者注

正常交换。此外，底栖生物的作用（在浅水中是最重要的）而被否定了。Stay 等人（52）在他们野外研究中用了三个大塑料箱子，分为三种类型：类型 1—透明的并且与大气隔绝，类型 2—不透明的并且与大气隔绝，类型 3—透明的并且与大气相通。这些箱子里可以放进天然的或人工的被作用物。用划水轮来模拟天然流水的速度，划水轮是用人工开动或靠外部的水轮开动。作好准备对气体采样和分析，而把液体留在箱子里，还作好准备采取水样供作测定溶解氧、CO₂ 和其他各项分析之用。在类型 1 中，光合作用和呼吸作用同时进行，但是没有水和大气（扩散作用）之间的氧或 CO₂ 的物理交换。在类型 2 中，只发生呼吸作用。在类型 3 中，光合作用、呼吸作用和扩散作用都发生。通过利用所有这三种类型的箱子，就能测出河流里气体交换中各种不同过程的作用。例如类型 1 可测净光合作用，即光合作用超过呼吸作用的剩余部分；类型 1 加类型 2 可测总光合作用；类型 3 减类型 1 可测空气和水之间的气体交换。各种可能性列于表 3 中。

表 3 由箱子—溶解气体测定得出的
河流代谢作用中的各种过程^a

箱子类型	结 构	过程的发生	溶解气体的变 化
1	透 明 与大气隔绝	光 合 作 用 呼 吸 作 用	O ₂ ↑; CO ₂ ↓ O ₂ ↓; CO ₂ ↑
2	不 透 明 与大气隔绝	呼 吸 作 用	O ₂ ↓; CO ₂ ↑
3	透 明 与大气相通	光 合 作 用 呼 吸 作 用 扩 散 作 用	O ₂ ↑; CO ₂ ↓ O ₂ ↓; CO ₂ ↑ O ₂ ↑; CO ₂ ↓

a. 摘自文献52

将被作用物与箱子的上部隔开，底栖生物作用和浮游植物作用的对比就可以测量出来。Stay 等人（52）的关于俄克拉何马州兰河的初步资料清楚地表明底栖生物和浮游植物及上述该系统中的其他方面相比是有显著的影响的。此外，光线强度的自然日变化和一天到另一天的变化对光合作用的影响也可看出。所报导的实验进行过程中，在几个长为24小时的时间

期内，呼吸作用速度相对不变，由此可以看到该系统的稳定性。因为这些资料还是初步性质的，其细节这里不去叙述，为了进行有意义的概括，需要有几个地理区域的对照资料。

气体交换只是河流中生物界的许多活动表现之一。其他方面可以用相对简单的物理方法和化学方法去研究。可是生物界动态，即植物、动物和微生物群之间的关系是不能用任何简单的方法进行测量的。不过，人们试图要尽可能全面地对生物界进行描述并设计出一种说明生物动态的简单模式。生态系统的各种理论模式下面进行讨论。

B. 一般系统的模式

河流、湖泊和河口对科学家来说是容易接近的地方，它们都是复杂而又吸引人的环境，而且它们都是有价值的水资源。由于这些原因，所以这些地方被人们进行广泛地研究，存在有大量文献。可是，这不是说现有的关于水体的物理学、地质学、地球化学和生物等方面特点的资料都已经汇集、分类、选择、分析完毕，并已综合成为有意义的一般性结论，可以用来供对资源作精心规划、调整和管理等用。分类、分析和综合现有资料应当用运算分析和资料处理方面的新技术来作。一般系统最终是为所需要的综合提供一个构架，但是，完全不能肯定凭现有的知识水平就能设计出一个关于生态系统动态（包括社会科学方面）的有用的一般系统模式来。无论如何，这样一种模式应当是一个主要的长期目标，作为开端应当设计出一个粗糙的概念性的一般系统模式。Klir(54)已提出确定一个一般系统的一些特殊性质，本章所讨论的工作副模式某一天可以集合成为一个一般系统模式，为可靠性地来预测系统的各部分在对干扰起反应时的表现，提供一个很有效的应用工具。

这种最终必然会合并的副模式包括已经讨论过的水流动态模式（转运和混合）、溶解氧状况模式和地球化学平衡模式，以及下面将要讨论的营养动态模式。关于在制作模式方面已知的一般情况，Hem(55)在其“天然水系统