

水工建筑物的生态学探讨

(美国) J·J·马格纳逊

序

生态学所研究的是生物及其环境之间的相互作用和相互关系，是科学中的一门学科或一个分支学科。环境是由生境、或物理化学世界，以及处理有机物质的消费者（动物）、生产者（植物）和分解者（细菌、真菌等）等生物群落所组成。对于生物之间，以及生物与无生命的环境之间在生态上的相互作用，生态学家们在不同组织结构的水平上，从单个生物，到单一物种的种群、多物种的群落，乃至一个生态系统内相互作用的整体，进行了各种观察。这门学问的基本著作的作者有：奥达姆⁽¹²⁾、克莱勃斯⁽⁷⁾、利克莱夫斯⁽¹⁴⁾、哀梅伦⁽¹⁶⁾和片卡⁽¹³⁾等，其中奥达姆的著作可能是最全面的。

水利工程在这里看作是直接改变地表水和地下水自然运动的建筑物或改变物理生境的设施。它们是为了满足人类社会对饮水、灌溉、防洪、发电、运输、旅游和水生物繁殖等需要而特意设计的。

从生态学家的观点来看，水工建筑物的作用是输水、挡住天然水流流向大海，或使一个水体与另一个历史上被隔离的水体相连通。水作为人类的重要资源，携带着溶解的离子、无生命的颗粒状物质、有生命的有机物、以及一定数量的热能、动能和势能。水也为水生物通过地表提供运输通道；输水、挡水和消除水体之间的障碍，其对水生生态系统各有利弊和重要后果。本文旨在简要地讨论水工建筑物和水生生态系统中生物群之间的相互作用（图1），并着重于探讨对水利工程的评价和设计可能有用的某些生态学问题。

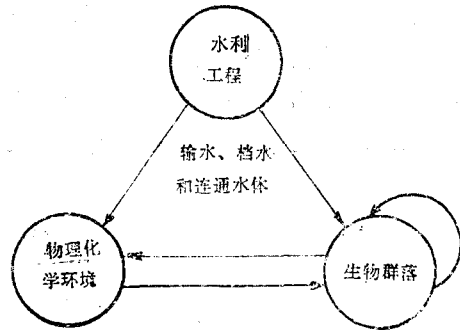


图1 水利工程和水生生境以及水生生物群落之间的直接和间接相互作用图（引自[3]）

概 述

输水影响到一系列的过程和状况。例如抽取地下水供市镇、工业或农业用水，可能明显地使地下水位降低，就会减少地表水或使之消失，对不易发现的地下洞穴水生境，也会有同样的影响。抽取湖泊、河流、海湾、以及海洋中的地表水时，会将一些动物和藻类与水一起带

走。例如在发电机的一次循环冷却系统中、较大生物受阻于栅栏外,而较小生物则被吸入并通过冷凝器环行一周再回到地表水中。抽水灌溉中的溶解离子,由于蒸发损失较大、就会使地表水和土壤中的含盐量增加。经过输送的水,通常是在改变了的条件下回到水体中来的,往往含有发电厂的余热、工业污染物和城市污水中的养分。

当兴建大坝和形成水库时,水流受阻和拦蓄。较高的水头可以改变地下水流;较大的蓄水表面积使吸热量和蒸发损失增大,并减少下游流量。各种有机和无机物质在水库的静水中沉淀、并吸附在底部沉积物中。养分和微小的污染物又被水库中的生物所摄取、而当这些生物死亡时,又沉淀到底部。沉积物起着收集器的作用,从而减少了颗粒、养分和污染物的下泄。大坝也会阻碍或大大影响河流中的鱼类及其幼鱼的习性活动。

自大陆的最后一次冰川侵袭以来,在南部地区甚至更早,河流和湖泊通常是与邻近的系统相隔离的。当修建运河、渡槽或管道而将历史上形成的障碍消除时,生物就到达了过去无法到达的生境。如尼加拉瀑布附近的威伦德运河、巴拿马运河、伊里运河,以及纽约游艇运河系统,可作为例证。威伦德运河使海中的八目鳗等新物种进入上游的大湖泊。

以上提到的在输水、挡水和连通水体时可能发生的种种状况,这种状况又怎样影响到所涉及水体的水生生态呢?在每一个实例中,都有着直接和间接的影响(图1)。例如,当幼鱼带进电站的冷却系统时,有一部分被杀死;而大量起了变化的这一鱼种,又间接地在生物群落中减小捕食和竞争能力;这就会改变鱼类群落,从而改变了浮游动物群落;依次又可以改变浮游植物群落,这对藻类摄取养分,进一步对水的透光性起调节作用,因此又影响湖面动荡层的深度等等。事实上,这样一种多米诺骨牌效应会永远继续下去,在某种情况下逐渐扩大,或逐渐衰减,或最后消失。

生态学探讨

为了认识和予测水利工程的潜在后果,我想提出一套生态学的探讨标本,选择了四个重要方面。第一、是检查受电站影响的物种种群动态,在运行过程中对物种起着捕杀者的作用;第二、涉及动物地理学及挡水和解除挡水对水生生境中群落结构的影响;第三、考虑筑坝使生境改变或改变后的生境中,物种利用资源的问题;第四、是把河流看作是连续生态系统,这对评价水工建筑物可能是有用的。

种群动态

种群动态涉及种群大小和结构随时间的变化。可以估计其出生率和死亡率,并予测将来种群的个体数。在最简单的情况下,如果出生率等于死亡率,则种群大小保持不变。但如果出生率和死亡率不同,种群就将增大或减小,直至出生率和死亡率再度相等时为止。水工建筑物会改变水生生物的出生率和死亡率,从而直接造成种群的减小或增大。

幼鱼或小鱼进入发电厂的冷却水系统,就是死亡率增大的明显实例^[18, 16]。一部分从进水建筑物卷入的动物,通过冷凝器至泄水的流程中被杀死。一种用以观察种群大小予期后果的图示方法(图2)表明死亡率增大会降低种群的大小。暂且不考虑因进入冷却水而增大死亡的这一情况,一般来讲出生率和死亡率都和种群大小有关。在中等水平情况下,出生率等于死亡

率,平衡的种群大小在 x 轴上用 N_b 表示。进入冷却水系统引起死亡率增大,这就使死亡率和出生率曲线的交点向左方移动,结果是降低种群的平衡,在 x 轴上以 N_a 表示。对于种群动态较为复杂的定量方法,在本文序言所提及的著作和范温克尔⁽¹⁸⁾有关进入冷却水系统引起死亡的论文中都作了介绍。

由于整个生物群落中捕食率的变化,特定鱼种数量的减少,可通过该群落反映出来。任何消费者种群丰度的减小,将导致其捕捉物种群的增大(图2b);进入冷却水系统引起的死亡,使摄食浮游动物的某鱼类种群减小。因此,浮游动物种群就增大,于是浮游动物的食物就大量减少。这是因为浮游动物摄食量大,而使浮游植物更多地死亡。这些关系在瓦伦的著作⁽¹⁹⁾中作了评论和论述,其定量方法目前正在研究中。

扼要地说,水利工程设施,可以直接影响某种生物的死亡率,利用简单的模型即可估算其死亡率增大后对水生生物种群大小的影响。

动物地理学

动物地理学是研究动物的地理分布,以及说明和予测这种分布的原理。一种熟知的方法,即岛生物地理学,它说明不同岛上生物物种数量不同的原因^(8,9)。认为湖泊、河流中的急流区、河源等水域岛与陆地岛的性质是类似的^(2,10)。在被隔离的生境中,生物物种的数量决定于新物种的迁入率和移殖的成功率,以及该地现有物种的灭绝率或损失率。当迁入率与灭绝率相等时,物种数量就维持不变。在这里所讨论的物种数量问题和前述种群个体数量问题之间,相似性是很明显的。岛生物地理学的理论,特别适用于水工建筑物,因为这种建筑物,或在水生生境之间增加隔离程度(例如大坝),或在原来的被隔离生境之间提供输水通道(例如运河)。

物种处于隔离状态的生境中,其数量与灭绝和迁入之间的平衡有关(图3),它可能受水工建筑物的影响。首先,对于任何岛型生境,当物种数量增大时,迁入率将会减小,而灭绝率则增大。若原有物种较少时,每一种迁入的物种对这个岛来说有较大的可能是一个新的物种,且因为捕食它和与之竞争的其他物种很少,这一物种具有较好的生存机会。同样,随

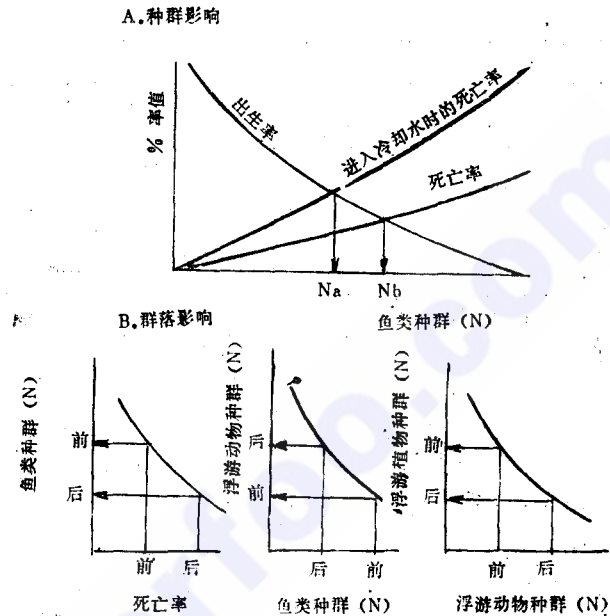


图2 予期变化图

- (A) 由于进入电厂冷却水系统使死亡率增大而引起种群大小的变化⁽⁸⁾
 (B) 由所研究特定鱼类影响的食物链中低等生物数量的予期变化⁽⁹⁾

着物种数量的增多，而许多物种之间相互作用较强烈，灭绝率也将随之增大。图中迁入与灭绝曲线的交点在 x 轴上的 S 值表示物种的平衡数量。

大坝和运河这样一些建筑物带来的预期后果，就是岛型生境中物种数量的变化。挡水会减小迁入率，因而降低物种的平衡数量、在 x 轴上以 S_0 表示（图 3）。连通会增大迁入率，并增大物种数量，在 x 轴上以 S_c 表示。在此图中，假定灭绝不受挡水或连通的影响，但这是一种简化。大家知道，在侵入物种和原有物种之间的相互作用，会造成次生灭绝。海中的八目鳗通过威伦德运河侵入上游大湖泊，导致密执安湖中湖鱒的天绝，因此正在执行一项巨大投资计划来控制八目鳗并使湖鱒再生的计划。

从岛生物地理学观点出发，可以想像，如沿着一条河流修建一系列大坝，仅由于改变了迁入率，大坝之间被隔离的流水段中的不同物种将会减少。运河通水初期，将使物种增多，但原有物种与入侵物种之间在生态上的相互作用，将产生严重的消极后果。

资源利用

每一物种都需要有一特定的资源组合，藉以繁殖、成长和避免过多的死亡。以同样方式利用相同资源的各物种的群体，称为依赖集团(16)。鱼类的捕食依赖集团有捕食其它鱼类的依赖集团、摄食浮游动物的依赖集团或食用水面昆虫的依赖集团。在鱼类之间，存在着明显的繁殖依赖集团(1)，这些集团对产卵具有同样的要求：如岩基、植物或流水等。也存在着明显的温度依赖集团(6,11)，同一集团对生长、生存和繁殖的热要求是相同的。

修建水工建筑物会改变水域资源的利用，从而影响到依赖集团在特定水生生境中的统治地位，甚至生存问题。物种对于环境的要求，是预测由于人类活动而造成的群落变化所应考虑的基本问题。我们选择了在有鱒鱼的河流上筑坝后产生的影响（图4）。作为对比，一个是壅水坝，一个是防洪坝。在鱒鱼河流中，鱼类的繁殖依赖集团包括在光洁的砾石上产卵的鱼类，而热依赖集团将是要求冷水的鱼类。冷水鱼类在水温 20°C 以下对生理上最为有利，这与凉水鱼类在 20 和 28°C 之间、温水鱼类在 28°C 以上最为有利是不相同的(6)。

修建壅水坝，会改变冷水生境和产卵基岩的状况（图 4）。由于蓄水使水温升高，夏季对鱒鱼栖息不利。蓄水较之自然河流，混浊程度较小，悬浮物沉淀在原来光洁的砾石上，失去了鱒鱼所需要的资源，因此各鱒鱼鱼种的种群将衰减或消失。较热的水和在新沉积物上生长的植物对其它不同的依赖集团提供了资源，从而鱒鱼将部分地被适于温水和在植物上产卵的鱼

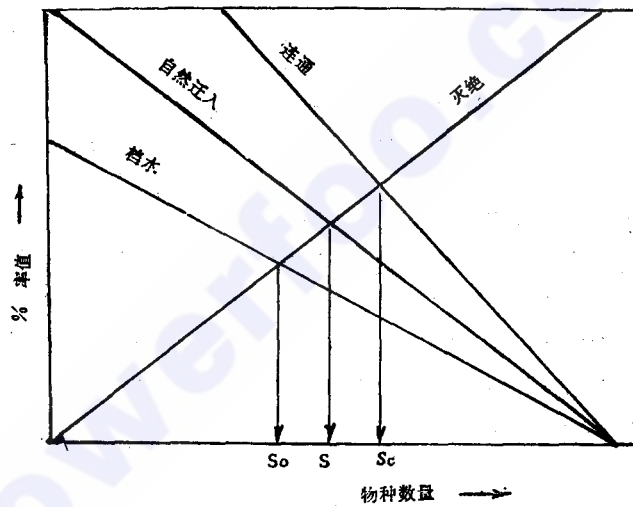


图 3 岛型生境内物种迁入率和天绝率之间的平衡以及修建大坝（挡水）和运河（连通）对原有物种的可能影响图示

种所取代。

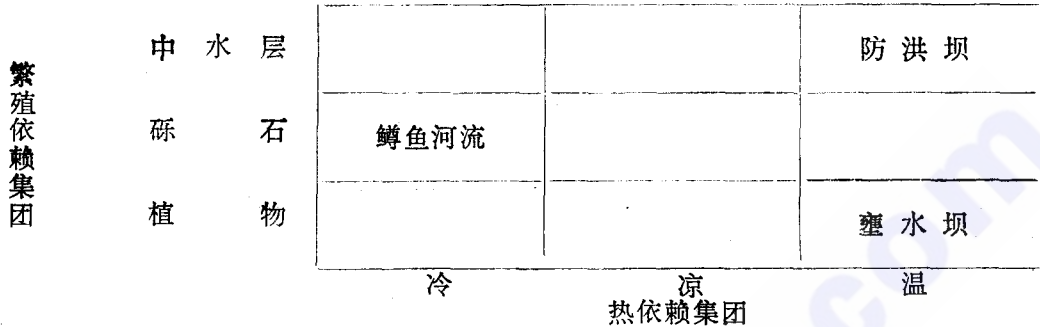


图4 在鱈鱼河流上修建壅水坝或防洪坝，预期在蓄水前后主宰该河流的鱼类繁殖和热依赖集团图示

予测鱈鱼河流上的防洪水库发生的情况，与壅水坝会有些不同。蓄水后水流仍将变暖，有利于需要这种条件的鱼类，沉积物也将掩盖砾石基层。不管水库的入流量如何，为了调节下泄流量以满足社会要求，迫使水库水位有很大变幅。因此沿岸植物生长带和滩地，不能正常地形成和发展，对于不需要这类条件产卵的鱼类是有利的。可以予期，包括可在水中或底部软沉积物上产卵的温水鱼种群落，将会发展起来。

以上实例明确地阐明了一种方法，即按照已知各依赖集团的资源要求和水工建筑物引起的予期生境变化，来予测生物群落变化。根据我的见解，相应于目前的科学发展水平，这一方法适用于许多水生生物的优势群体和水工建筑物的典型类别。

河流生态系统

生态系统科学试图予测整个环境系统的性状。与种群生态学比较，生态系统科学尚处于萌芽阶段；但是如果科学家们要有效地进行予测和控制，他们现在就应认识到了解整个系统的必要性。国家科学基金会生态系统研究的前计划主任P·里塞尔博士把生态系统描述如下：

它是包括给定地区内与物理环境互相作用的所有生物在内的任何单元，使能量流导致明确规定的营养结构、生物的多样性和物质循环。其结构成分为无机质、有机化合物、地质与天气状况；以及按有机物质处理方式分类为生产者、消费者和分解者或还原者的生物本身。因为这些都是以有机方式作用的系统，它们具有可予测的一系列属性，这些属性包括能量流、食物链、时间和空间中的物种差异性形态、养分循环、发展和进化，以及最后对系统的控制。

为了便于现场工作，河流的研究一般在分散地靠近桥梁的地点进行。采用这种依靠“路桥”的办法，阻碍我们获得从上游至海洋整个河流作用的概念。近来研究人员(4,17)在整条河流上进行工作，得到了在河流的“路桥”观点中所缺乏的一种观念。首先，当河流

从上游流向海洋时,它是逐渐变化的;因此,它不是几个离散的地带,而是一个包括物理性质、能源以及能量过程带的连续体。其次,由于其非常的多样性,河流中的生物应作为官能团来研究,无需按传统的分类法,如物种等,或按传统的食性分类法,如原初生产者和次生消费者等举例说明。

河流暴露于阳光的程度,与其宽度和毗连的植被状况有关,它是确定沿河流连续体的能量输入和能量处理的一个因素。在狭窄的河流中,阳光作为起光合作用的能源被森林蓬盖所阻挡。当河槽较宽时,森林蓬盖就分离了,使河流得到较多的阳光和光合作用。生根的大型植物繁殖茂密,而藻类则生长在较硬的基层上。在下游的较远处,由于水流从上游和泛滥平原带来了颗粒状物质和淤泥,因此河水混浊,使进入水中的光线也受限制。河流中有机碳的另一个来源是生长在陆地上的植物。树叶、嫩枝、松果、花粉、倒下来的树木提供了粗颗粒的有机物。在河源森林区,这样的输入物相对地较多。在宽阔的河流中,输入物为来自上游或泛滥平原的细颗粒有机物。扼要地说,输入河流的有机物能使连续体随河流大小而系统地变化,从地表来的粗颗粒,主要出现在林地的小溪中;河流中的光合作用,主要出现在林地的小溪中;河流中的光合作用,主要出现在中间地区;而细颗粒则主要出现在河流的泛滥平原河段。

很多人把河流看成是物质进入并输向的下游、直至海洋的简单水道。这种看法不仅缺乏概念上的复杂性,而且也是不正确的;几乎所有进入自然河流特定河段的有机质或者在那里被处理,或者贮存下来,而不仅仅是输向下游。

生物群所处理的能量与能源的类型有关。在小河流中,新跌落的树叶很快被微生物和菌类所栖居。这种栖居使树叶发生变化,成为下一个处理集团(碎裂者)更好的滋养物。碎裂者,首先是水生幼虫,把粗颗粒有机物碎裂成较细的颗粒。细颗粒的收集者,首先仍然是水生幼虫,将有机质进一步处理。在碎裂者和收集者体内储存的能量被捕食者所利用。

官能团的这种组合,可以在河流连续体中看出。在两岸种植小树的河流上,大量碎裂者把树叶处理成较小的颗粒,它进一步由收集者加以处理,或输送至下游。在中等大小的河流上,粗颗粒物质输入能量相对地较少,生物群落仍然是收集者,但除此之外,在这些开敞的清水河流中,植物材料的取食者很多。在宽阔的大河流中,处理者进一步改变。由于光线限制着植物生长,植物材料的取食者就消失了。底栖群落和中水层浮游动物群落几乎完全由收集者构成。在沿着连续体的所有点上,动物种群连续地把有机基质转化成 CO_2 和 H_2O ,能量的输入、处理和效率与沿连续体的生物处理和对策有着非常重要的联系。

在河流连续体的研究中,运用基本概化方法可使系统便于掌握。这种概化消除了复杂系统中的许多枝节问题,并把空间差别联系起来成为合理的生态系统的一部分。这种抽象的巨大价值,在于它提供了整体观点和检验思想的纲目。水利工程常常是在真实世界中的试验,而予期的环境影响是不完全知道的。采用河流连续体研究这样的整体方法,对于观察这类变化怎样与自然系统相互作用,可以使之更为现实。

结 论

上述四方面的例证,给我们概略地提供了某些方法,说明生态学能对水利工程予期影响

的评价作出贡献。在图1中指出了建筑物与水生生境和生物群落之间的相互作用。这里没有考虑两种重要的相互作用，现在予以指出是必要的。一是图1的箭头还应从生境和生物群落再回头指向水利工程。二是有关工程与水生环境的相互作用的知识，曾经并将继续影响工程的效能和实际建筑物的设计。

对影响的评价，看来常常由于建筑物修建前后的实际资料过多，以及理论和概念方面的薄弱而发生困难。生态学在理论上是强有力的，或许较之我们根据实际资料论证更为充分。但是，我的努力是认真地致力于理论生态学和生态系统生态学可以利用的处理和机理方面的探讨，以便更现实地评价拟建水工建筑物的可行性、选址和设计等任务。

参 考 文 献 (略)

译自《Environmental Effects of Hydraulic Engineering Works》，1979，第11~28页。

朱忠德译 曹秉铨校

编 后

《四川水力发电》于1982年7月创刊后，两年共出版期四期，这是在我省水力发电工程学会直接领导和关怀下，通过各专委、全体会员和广大读者的大力支持，挂靠单位的协作配合，以及编委和编辑组同志们的通力合作的结果。

水能资源是我省的一大优势，水力发电又是一种十分经济的再生能源，既不污染环境，又可兼顾防洪、灌溉、航运、水产养殖等多种经济效益。但如何加快水电建设步伐，解决好我省能源日趋紧张的被动局面，是本刊一项艰巨的任务。因此，办好这个刊物，活跃学术空气，总结交流经验，探讨水电建设中的各种重大课题，对促进我省水电建设，加速四川的四化进程都具有极其重要的意义。

由于我们办刊经验欠缺，在选稿，编辑、印刷以及版面等方面都还存在着许多不足之处。为了改进我们的工作，把《四川水力发电》办得更好，借此机会将征求意见表随本期发送，热诚希望广大读者、作者和有关领导积极支持我们的工作，踊跃提出您的宝贵意见，以便在今后的编辑出版工作中加以改进，共同来办好这个学术刊物。