

试论生态水利工程的基本设计原则

摘要:文章简要分析了水利工程对于河流生态系统胁迫问题,提出应重视河流生态系统健康和可持续性的需求。生态水利工程是水利工程学与生态学相融合产生的新分支学科,目的是改进和完善水利工程的规划设计方法。本文归纳了生态水利工程的五项基本原则,它们是:工程安全性与经济性原则,提高河流形态的空间异质性原则;生态系统自设计与自我恢复原则;景观尺度与整体修复原则;反馈和调整设计原则。

关键词:生态 水利 工程 设计 原则

水利工程对经济与社会发展的巨大作用毋庸置疑。但是也必须看到水利工程对河流生态系统造成了不同程度的干扰【1】。水利工程对于河流生态系统的胁迫主要表现在两方面:一是自然河流的渠道化。包括平面布置上的河流形态直线化,即将蜿蜒曲折的天然河流改造成直线或折线型的人工河流。包括河道横断面几何规则化,即把自然河流的复杂形状变成梯形、矩形及弧形等规则几何断面。还包括河床和边坡材料的硬质化,即渠道的边坡及河床采用混凝土、砌石等硬质材料。二是指自然河流的非连续化。筑坝是顺水流方向的河流非连续化,流动的河流生态系统变成了相对静止的人工湖,流速、水深、水温及水流边界条件都发生了重大变化。库区内原来的森林、草地或农田统统淹没水底。陆生动物被迫迁徙。水库形成后也改变了原来河流营养盐输移转化的规律。由于水库截留河流的营养物质,气温较高时,促使藻类在水体表层大量繁殖,产生水华现象。藻类蔓延遮盖住大植物的生长使之萎缩,而死亡的藻类沉入水底,在那里腐烂的同时还消耗氧气。溶解氧含量低的水体会使水生生物“窒息而死”。由于水库的水深高于河流,在深水处阳光微弱,光合作用也弱,导致水库的生态系统比河流的生物生产量低,相对要脆弱,自我恢复能力弱。河流泥沙在水库淤积,而坝下清水下泄又加剧了对河道的冲蚀,这些变化都大幅度改变了生境。由于靠水库进行人工径流调节,改变了自然河流年内丰枯的水文周期规律,即改变了原来随水文周期变化形成脉冲式河流走廊生态系统的基本状况。最后,众所周知,不设鱼道的大坝对于洄游鱼类是致命的屏障。另一类非连续化是由于河流两岸建设的防洪堤造成的侧向水流的非连续性。堤防妨碍了汛期主流与岔流之间的沟通,阻止了水流的横向扩展。堤防把干流与滩地和洪泛区隔离,使岸边地带和洪泛区的栖息地发生

改变。原来可能扩散到滩地和洪泛区的水、泥沙和营养物质，被限制在堤防以内的河道内，植被面积明显减少。鱼类无法进入滩地产卵和觅食，也失去了避难所。鱼类、无脊椎动物等会减少，导致滩区和洪泛区的生态功能退化。

概况地讲，被改造过的河流生态系统是由三个子系统组成。即：由动物、植物和微生物组成的生命系统，这是生态系统的主体。广义的水文系统，包括地表和地下水体、土地、气候系统等。再有就是工程设施系统，这是人类改造河流的结果。后面两个子系统组成生境，是生命支持系统。由于水利工程系统改变了河流形态，水库调度运行又改变了原有的水文规律，造成河流生态系统的生境变化，其结果可能造成河流生态系统生物群落多样性的下降，使生态系统退化。

对于水利工程对河流生态系统的胁迫，应该采取正视而不是回避的态度。传统意义上的水利工程学作为一门重要的工程学科，以建设水工建筑物为手段，目的是改造和控制河流，以满足人们防洪和水资源利用等多种需求。现代科学发展使我们认识到，传统意义上的水利工程学在力图满足人的需求时，却在不同程度上忽视了河流生态系统本身的需求。而河流生态系统的功能退化，也会给人们的长远利益带来损害。未来的水利工程在权衡社会经济需求与生态系统健康需求这二者关系方面，似应强调水利工程在满足人类社会需求的同时，兼顾水域生态系统的健康和可持续性。从学科发展角度看，现在的水利工程学的学科基础主要是工程力学和水文学，水利工程规划设计主要对象是水文系统，往往忽视生命系统的现状和未来风险等问题。学科的进一步发展应吸收生态学的理论及方法，促进水利工程学与生态学的交叉融合，用以改进和完善水利工程的规划及设计理论，形成水利工程学的新的学科分支—生态水利工程学

(Eco-Hydraulic Engineering)。生态水利工程学作为水利工程学的一个新的分支，是研究水利工程在满足人类社会需求的同时，兼顾水域生态系统健康与可持续性需求的原理与技术方法的工程学【2】 【3】。

生态水利工程的内涵是：对于新建工程，是指进行传统水利建设的同时（如治河、防洪工程），兼顾河流生态修复的目标。对于已建工程，则是对于被严重干扰河流重点进行生态修复。

生态水利工程将与传统治污技术、清洁生产（生态产业）以及环境立法和资源管理一起，成为河流

生态建设的主要手段之一。图1表示了生态水利工程在河流生态建设中的地位。图中右侧表示人类活动对自然河流生态系统的干扰过程，左侧表示人类活动对被干扰的河流生态系统的修复过程。

这里讨论的生态水利工程学的基本原则也是生态水利工程规划设计的基本原则，笔者试归纳为以下五项内容。

1. 工程安全性和经济性原则

生态水利工程是一种综合性工程，在河流综合治理中既要满足人的需求，包括防洪、灌溉、供水、发电、航运以及旅游等需求，也要兼顾生态系统可持续性的需求。生态水利工程既要符合水利工程学原理，也要符合生态学原理。生态水利工程的工程设施必须符合水文学和工程力学的规律，以确保工程设施的安全、稳定和耐久性。工程设施必须在设计标准规定的范围内，能够承受洪水、侵蚀、风暴、冰冻、干旱等自然力荷载。按照河流地貌学原理进行河流纵、横断面设计时，必须充分考虑河流泥沙输移、淤积及河流侵蚀、冲刷等河流特征，动态地研究河势变化规律，保证河流修复工程的耐久性。

对于生态水利工程的经济合理性分析，应遵循风险最小和效益最大原则。由于对生态演替的过程和结果事先难以把握，生态水利工程往往带有一定程度的风险。这就需要在规划设计中需要进行方案比选，更要重视生态系统的长期定点监测和评估。另外，充分利用河流生态系统自我恢复规律，是力争以最小的投入获得最大产出的合理技术路线。

2. 提高河流形态的空间异质性原则

有关生物群落研究的大量资料表明，生物群落多样性与非生物环境的空间异质性 (spacial heterogeneity) 存在正相关关系。这里所说的“生物群落”是指在特定的空间和特定的生境下，由一定生物种类组成，与环境之间相互影响、相互作用，具有一定结构和特定功能的生物集合体。一般所说的“生物群落多样性”指生物群落的结构与功能的多样性。实际上，生物群落多样性问题是在物种

水平上的生物多样性。

非生物环境的空间异质性与生物群落多样性的关系反映了非生命系统与生命系统之间的依存和耦合关系。一个地区的生境空间异质性越高，就意味着创造了多样的小生境，能够允许更多的物种共存。反之，如果非生物环境变得单调，生物群落多样性必然会下降，生物群落的性质、密度和比例等都会发生变化，造成生态系统的某种程度的退化。

河流生态系统生境的主要特点是：水—陆两相和水—气两相的联系紧密性；上中下游的生境异质性；河流纵向的蜿蜒性；河流横断面形状的多样性；河床材料的透水性等。水—陆两相和水—气两相的紧密关系，形成了较为开放的生境条件；上中下游的生境异质性，造就了丰富的流域生境多样化条件；河流纵向的蜿蜒性形成了急流与缓流相间；河流的横断面形状多样性，表现为深潭与浅滩交错；河床材料的透水性为生物提供了栖息所。由于河流形态异质性形成了在流速、流量、水深、水温、水质、水文脉冲变化、河床材料构成等多种生态因子的异质性，造就了丰富的生境多样性，形成了丰富的河流生物群落多样性。所以说，提高河流形态异质性是提高生物群落多样性的重要前提之一【4】。

由于人类活动，特别是大规模治河工程的建设，造成自然河流的渠道化及河流非连续化，使河流生境在不同程度上单一化，引起河流生态系统的不同程度的退化。生态水利工程的目标是恢复或提高生物群落的多样性，但是并不意味着主要靠人工直接种植岸边植被或者引进鱼类、鸟类和其它生物物种，生态水利工程的重点应该是尽可能提高河流形态的异质性，使其符合自然河流的地貌学原理，为生物群落多样性的恢复创造条件。

在确定河流生态修复目标以后，就应该对于河流地貌历史和现状进行勘查和评估。包括河流与相关湿地、湖泊的形状与构成、水下地形勘测、水位变化幅度、河流平面弯曲度、河流横断面形状及河床材料、急流与深潭比例、河床的稳定性及淤积及侵蚀状况等，建立河流地貌数据库。河流生物调查，包括植物、鱼类、鸟类、两栖动物和无脊椎动物等的物种分布地图以及规模和存量，建立生物资源数据库。遥感技术

和地理信息系统（GIS）是水文、河流地貌和生物调查的有力工具。

关键的工作步骤是在以上两种调查工作的基础上，确定环境因子与生物因子的相关关系，必要时建立某种数学模型。河流环境因子包括河流河势、蜿蜒度、横断面形状及材料、流速、水位、水质、水温、泥沙、营养盐的迁移转化、水文周期变化等。研究的内容包括：调查单个生物因子的基本需求，评估各种生物因子的相互关系和制约条件，对于“关键种”或标志性生物的环境因子进行分类和评估。需要强调的是，在众多的环境因子中，识别那些对于系统的结构和功能具有重要意义的环境因子，在此基础上进行河流地貌学设计和生物栖息地设计。

3. 生态系统自设计、自我恢复原则

有关生态系统的自组织功能的讨论始于上世纪 60 年代，以后有不同学科的众多学者涉足这个领域。以各种不同形式构成的自组织功能，是自然生态系统的重要特征。

生态学用自组织功能来解释物种分布的丰富性现象，也用来说明食物网随时间的发展过程。生态系统的自组织功能表现为生态系统的可持续性。自组织的机理是物种的自然选择，也就是说某些与生态系统友好的物种，能够经受自然选择的考验，寻找到相应的能源和合适的环境条件。在这种情况下，生境就可以支持一个能具有足够数量并能进行繁殖的种群。自组织功能原理与达尔文的进化论有相似之处，只是研究的尺度不同而已。达尔文的进化论研究是在地球生物圈所有种群的尺度上进行的，而自组织功能是在生态系统中种群之间发生的。

生态系统的自组织功能对于生态工程学的意义是什么呢？H. T. Odum 认为：“生态工程的本质是对自组织功能实施管理。”（1989）【5】。Mitsch 认为：“所谓自组织也就是自设计”（2004）【6】。将自组织原理应用于生态水利工程时，生态工程设计与传统水工设计有本质的区别。像设计大坝这样的人工建筑物是一种确定性的设计，建筑物的几何特征、材料强度都是在人的控制之中，建筑物最终可以具备

人们所期望的功能。河流修复工程设计与此不同，生态工程设计是一种“指导性”的设计，或者说是辅助性设计。依靠生态系统自设计、自组织功能，可以由自然界选择合适的物种，形成合理的结构，从而完成设计和实现设计。成功的生态工程经验表明，人工与自然力的贡献各占一半【7】。

我国古代传统哲学注重人与自然的和谐相处，老子主张：“人法地，地法天，天法道，道法自然”。反映了一种崇尚自然，遵循自然规律的哲学观。在建筑理念方面，提倡“工不曰人而曰天，务全其自然之势”（《管子地理指蒙》），“虽由人作，宛自天开”（《园冶》），都提倡一种效法自然，依靠自然的思想。国际生态学界一些学者认为，系统生态学的哲学理念应该追溯到公元前 11 世纪中国的周代。其中“阴阳五行”、万物竞争共存和相生相克等哲学思想，体现了促进与抑制，成长与腐朽，合成与异化之间的平衡与转化，这些正是现代生态学的哲学基础。

传统的水利工程设计的特征是对自然河流实施控制。而设计生态水利工程时，要求工程师必须放弃控制自然界的动机，树立新的工程理念。因为依靠人力和技术控制自然界是不可能的，这种一厢情愿的企图最终往往归于失败。人们要善于利用生态系统自组织、自设计这个宝贵财富，实现人与自然的和谐。需要强调的是，地球上没有两条相同的河流，每一条河流的特点都是各不相同的。因此，每一项生态水利工程必须因地制宜，充分尊重每一条河流的自然属性和美学价值，寻求最佳的生态工程方案。

自设计理论的适用性还取决于具体条件。包括水量、水质、土壤、地貌、水文特征等生态因子，也取决于生物的种类、密度、生物生产力、群落稳定性等多种因素。在利用自设计理论时，需要注意充分利用乡土种。引进外来物种时要持慎重态度，防止生物入侵。

要区分两类被干扰的河流生态系统。一类是未超过本身生态承载力的生态系统，是可逆的。当去除外界干扰即卸荷以后，有可能靠自然演替实现自我恢复的目标。另一类是被严重干扰的生态系统，它是不可逆的。在去除干扰即卸荷后，还需要辅助以人工措施创造生境条件，再靠发挥自然修复功能，有可能使生态系统实现某种程度的修复。这就意味着，运用生态系统自设计、自我恢复原则，并不排除工程师和科学

家采用工程措施、生物措施和管理措施的主观能动性。

4. 景观尺度及整体性原则

河流生态修复规划和管理应该在大景观尺度、长期的和保持可持续性的基础上进行，而不是在小尺度、短时期和零星局部的范围内进行。在大景观尺度上开展的河流生态修复效率要高。小范围的生态修复不但效率低，而且成功率也低。

所谓“整体性”是指从生态系统的结构和功能出发，掌握生态系统各个要素间的交互作用，提出修复河流生态系统的整体、综合的系统方法，而不是仅仅考虑河道水文系统的修复问题，也不仅仅是修复单一动物或修复河岸植被。

这里说的“景观”（landscape）是指生态学中的景观尺度。关于生态学的尺度问题，O' Neill, 认为：“生态学不可能建立在单一的时空尺度上，它应该适应所有尺度的调查研究。”（1986）【8】。按照这种观点，尺度和层次成为生态学发展的关键。目前生态学理论把生物圈划分为 11 个层次，依次是生物圈、生物群系、景观、生态系统、群落、种群、个体、组织、细胞、基因和分子。景观的尺度如何掌握？景观尺度包括空间尺度和时间尺度。

为什么在景观的大尺度上进行河流修复规划？首先，水域生态系统是一个大系统，其子系统包括生物系统、广义水文系统和人造工程设施系统。一条河流的广义水文系统包括从发源地直到河口的上中下游地带的地下水与地表水系统，流域中由河流串联起来的湖泊、湿地、水塘、沼泽和洪泛区。广义水文系统又与生物系统交织在一起，形成自然河流生态系统。而人类活动和工程设施作为生境的组成部分，形成对于水域生态系统的正负影响。水域生态系统受到胁迫时，需要对于各种胁迫因素之间的相互关系进行综合、整体研究。如果仅仅考虑河道本身的生态修复问题，显然是把复杂系统简单割裂开了。

其次，必须重视水域生境的易变性、流动性和随机性的特点，表现为流量、水位和水量的水文周期变化和随机变化，也表现为河流淤积与侵蚀的交替变化造成河势的摆动。这些变化决定了生物种群的基本生存条件。水域生态系统是随着降雨、水文变化及潮流等条件在时间与空间中扩展或收缩的动态系统。生态系统的变化范围从生境受到限制时期的高度临界状态到生境扩张时期的冗余状态。

再者，要考虑生境边界的动态扩展问题。由于动物迁徙和植物的随机扩散，生境边界也随之发生动态变动。Gosselink (1990)在研究水域生态系统物种管理的尺度问题时认为，对于给定需要修复的物种，考虑的范围应是这个物种的分布区【9】。举例来说，为便于理解，可以借用“流域”这个概念，比如一个地区野鸭的种群也有一个“鸭域”。所谓“鸭域”的范围应该包括物种个体在恶劣的条件下迁徙到的任何地方以及支持此物种的生态系统。这个范围的边界，应划定在某特定物种经常利用的一个很大的空间内。如果进一步扩展，还应该包括所谓“临时生境”，指在自然界对于物种产生胁迫的时期，成为该物种的避难所的地区。如果这个地区有若干种标志性动物，那么物种管理的范围边界将是这些物种“域”的包络图。另外，还要考虑流域之间的协调问题。考虑到河流生态系统是一个开放的系统，与周围生态系统随时进行能量传递和物质循环，一条河流的生态修复活动不可能是孤立的，还需要与相邻的流域的生态修复活动进行协调，

最后，河流生态修复的时间尺度也十分重要。河流系统的演进是一个动态过程。每一个河流生态系统都有它自己的历史。需要对历史资料进行收集、整理，以掌握长时间尺度的河流变化过程与生态现状的关系。河流生态修复是靠时间作工作的。有研究指出，湿地重建或修复需要大约 15 到 20 年的时间。因此对于河流生态修复项目要有长期准备，同时进行长期的监测和管理。

需要说明的是，对于规划、评估、监测这些不同的任务，工作对象的空间尺度可能是不同的。监测工作应该在尽可能大的尺度内进行。比如修复一块湿地以吸引鸟类，经过一年或者更长的时间均告失败。这就需要考虑是否有质量更好的生境吸引了候鸟而改变了它们的迁徙路线，监测工作可能在大陆的范围开展。而评估工作可能在跨流域的尺度上进行。规划工作的尺度可能是流域或河流廊道。所谓“河流廊道”

(River corridor) 泛指河流及其两岸与生物栖息地相关的土地，也有定义其范围为河流与对应某一洪水频率的洪泛区。至于河流修复工程项目的实施，一般在关键的重点河段内进行。

5. 反馈调整式设计原则

生态系统的成长是一个过程，河流修复工程需要时间。从长时间尺度看，自然生态系统的进化需要数百万年时间。进化的趋势是结构复杂性、生物群落多样性、系统有序性及内部稳定性都有所增加和提高，同时对外界干扰的抵抗力有所增强。从较短的时间尺度看，生态系统的演替，即一种类型的生态系统被另一种生态系统所代替也需要若干年的时间，期望河流修复能够短期奏效往往是不现实的。

生态水利工程设计主要是模仿成熟的河流生态系统的结构，力求最终形成一个健康、可持续的河流生态系统【10】【11】。在河流工程项目执行以后，就开始了自然生态演替的动态过程。这个过程并不一定按照设计预期的目标发展，可能出现多种可能性。最顶层的理想状态应是没有外界胁迫的自然生态演进状态。在河流生态修复工程中，恢复到未受人类干扰的河流原始状态往往是不可能的，可以理解这种原始状态是自然生态演进的极限状态上限。如果没有生态修复工程，在人类活动的胁迫下生态系统的进一步恶化，这种状态则是极限状态的下限。在这两种极限状态之间，生态修复存在着多种可能性。针对具体一项生态修复工程实施以后，一种理想的可能是：监测到的各生态变量是现有科学水平可能达到的最优值，表示生态演进的趋势是理想的。另一种差的情况是，监测到的各生态变量是人们可接受的最低值。在这两种极端状态之间，形成了一个包络图。一项生态修复工程实施后的实际状态都落在这个包络图中间。

意识到生态系统和社会系统都不是静止的，在时间与空间上常具有不确定性。除了自然系统的演替以外，人类系统的变化及干扰也导致了生态系统的调整。这种不确定性使生态水利工程设计不同于传统工程的确定性设计方法，而是一种反馈调整式的设计方法。是按照“设计—执行（包括管理）—监测—评估—调整”这样一种流程以反复循环的方式进行的。在这个流程中，监测工作是基础。监测工作包括生物监测和水文观测。这就需要在项目初期建立完善的监测系统，进行长期观测。依靠完整的历史资料和监测数

据，进行阶段性的评估。评估的内容是河流生态系统的结构与功能的状况及发展趋势。常用的方法是参照比较方法，一种是与自身河流系统的历史及项目初期状况比较，一种是与自然条件类似但未进行生态修复的河流比较。评估的结果不外乎有几种可能：1) 生态系统大体按照预定目标演进，不需要设计变更；2) 需要局部调整设计，适应新的状况；3) 原来制定的目标需要重大调整，相应进行设计。

在反馈调整式设计过程中，提倡科学家、管理者和当地居民及社会各界的广泛参与，通过对话、协商，以寻求共同利益。提倡多学科的交流 and 融合，提高设计的科学性。

Design Principles of Eco-hydraulics Engineering

DONG Zheren

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research)

Abstract :The concept of eco-hydraulic engineering is proposed. It integrates the technology of hydraulic engineering with ecology. Based on the analysis of stress of hydraulic engineering on river ecosystem the requirements for ensuring healthy ecosystem and sustainable development for river are suggested. These requirements include the principles in five scopes: engineering safety and economy, spatial heterogeneity of river morphology, self-design and self-restoration of ecosystem, landscape scale and integrated river ecosystems restoration and design methodology process based on feedback and adjustment.

参 考 文 献

- 【1】 董哲仁, 水利工程对生态系统的胁迫 [J], 水利水电技术, 2003 年 7 期, P1-5
- 【2】 ASCE River Restoration Subcommittee on Urban Stream Restoration, Urban stream Restoration [J], Journal of Hydraulic Engineering ASCE, July 2003, pp 491-493
- 【3】 董哲仁, 生态水工学的理论框架 [J], 水利学报, 2003 年第 1 期 P1-6
- 【4】 董哲仁, 河流形态多样性与生物群落多样性 [J], 水利学报, 2003 年第 11 期, P1-7
- 【5】 Odum, H. T. 1989. Ecological engineering and self-organization [D]. Pages 79-101. In: W. J. Mitsch and S. E. Jorgensen, eds., Ecological Engineering: An Introduction to Ecotechnology. Wiley, New York.
- 【6】 Mitsch W. J. & Jorgensen S E., Ecological Engineering and Ecosystem Restoration [M]. PP 134-137, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004
- 【7】 董哲仁, 荷兰围垦区生态重建的启示[J]. 中国水利, 2003 年 11A 期, P45-47
- 【8】 O' Neill, R.V., D.L.DeAngelis, J.B. Waide, and T.F.H.Allen. 1986. A Hierarchical Concept of Ecosystems [M]. Princeton University Press, Princeton, NJ. 153pp
- 【9】 Gosselink, J.G., 1990, Landscape Conservation in a forested Wetland Watershed[J]. Bioscience 40:588-600
- 【10】 Mitsch, W. J. and J.G.Gosselink. 2000. Wetland[M], 3rd ed. Wiley, New York. 920pp.
- 【11】 董哲仁 河流生态恢复的目标[J]. 中国水利, 2004 年第 10 期, P1-5

【12】董哲仁 美国基西米河生态恢复工程的启示，水利水电技术，2004年第9期，

P8-12

