

水域生态系统的的时间尺度与空间尺度

李煜¹ 夏自强²

(1.河海大学环境科学与工程学院,江苏 南京 210098;2.河海大学水文水资源与水利工程国家重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要 水域生态系统的动态平衡是多重尺度的生物过程和非生物过程相互影响和作用的结果,动态平衡状态容易受到干扰而破坏.在分析水域生态系统干扰因素的基础上,结合系统组成,从工程角度将水域生态系统划分为 4 个尺度,即微小尺度、小尺度、中尺度和大尺度,然后对这 4 个尺度所对应的时间和空间尺度进行了概化,讨论了各尺度之间的关系,说明了时间尺度和空间尺度在生态修复工程中的应用效果.

关键词 水域生态系统;时间尺度;空间尺度;生态修复工程

中图分类号 X171.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2007)02-0168-04

尺度是生态学的一个重要概念^[1-3].通常意义上的尺度包括时间尺度和空间尺度,是指观察或研究对象(包括物体、现象或过程)的时间单位和空间分辨率.由于生态修复是一个全新的课题,目前还没有较系统的水域生态系统修复的理论体系.在水域生态系统修复的尺度研究方面,同样少有研究成果.文献[4]从生态学角度对河流生态修复的尺度特征进行了论述,定性地讨论了河流生态系统修复的时间和空间尺度.目前,对于生态修复的定义、目标、方法和手段等有许多不同看法^[4-7].本文首先分析水域生态系统中的内在与外在干扰因素,尝试从工程角度来定量阐述水域生态系统中的尺度概念.

1 水域生态系统的干扰因素

水域生态系统在长期的演变进化过程中,各要素或各成分之间建立了相互协调与补偿的关系,这种关系使系统处于一定限度的稳定状态.由于存在外在的破坏因素,系统结构和功能遭到破坏,物质循环和能量交换受到阻碍,从而系统失去平衡.

破坏因素包括自然干扰和人为干扰^[1,3].自然干扰是指在自然界发生的异常变化或自然界本来就存在的有害因素,如水旱灾害、台风和地震等.人为干扰是指人类对资源的过度开发、工农业等发展带来的问题.人为因素主要有 3 种:外来物种引起的破坏、环境因素改变和生物信息系统的破坏.在生态修复过程中,自然因素是无法改变的.

由于影响水域生态系统的环境因素是水,系统特性很大程度上与水及其携带物质的物理化学特征有关.水域生态系统中的生产者主要是体积小而数量巨大的浮游植物,这类生产者具有代谢率高、繁殖速度快和种群更新周期短的特点.由于水的流动性较大,系统自身物质循环的功能较差、内源性营养较少,汇入的外源性营养占有很重要的地位.

在水域生态系统的干扰因素中,水流及其携带物质是最活跃的外在因素,它们与水质、床面形态等构成了重要的非生物条件.水流及其携带物质的变化对水域生态的间接影响源于水域时间和空间的复杂性以及水与其携带物质相互作用的改变.直接影响包括对水生生物生命周期(水生植物的繁殖和生长,水生动物的产卵、繁殖和生长)以及无脊椎动物和鱼类栖息地的影响,间接影响包括对水域生态系统的系统连续性、生物多样性(栖息地异质性、功能过程和物种多样性)的影响以及外来物种入侵的影响.从生态环境功能来看,直接影响往往比间接影响小得多.要进一步认识和理解水流及其携带物质变异后的生态响应,必须进一步认识水文过程、水流携带物质过程与生态系统之间的关系.因水文过程与水流携带物质的过程在不同的时间尺度

与空间尺度的特性不同,它们对水与生态系统的影响也不一样。

2 水域生态系统的时间和空间尺度

生态系统可以划分出一系列尺度^[8-10]。在一定程度上,这些尺度可分别考虑,它们形成阶梯状结构(图 1)。在同一时间和空间尺度上,不同的生物过程和非生物过程的相互作用是动态变化的。微观尺度上的分子运动、紊动、对流与扩散等对较大尺度的影响可以通过时间或空间上的平均尺度来进行。从工程角度来看,水域生态系统的尺度划分为微小尺度、小尺度、中尺度和大尺度 4 种。

不同生物过程具有不同的时间和空间尺度,时间和空间尺度与生物的生命周期和活动范围关系密切。综合考虑不同生物的生命周期和活动范围,可以划分出一系列的时间和空间尺度。例如:鱼群的活动范围尽管与较大和较小尺度都相关,但可以界定在河段范围上;而底栖动物或浮游生物,因其活动空间较小、生命周期较短,主要与较小尺度相关。

在水域生态系统中 (a)微小尺度的生物过程包括浮游植物的繁殖和生长、浮游动物的产卵、繁殖、生长,对应的是生产者和分解者所存在的时间和空间尺度。时间尺度的量级大约为 a ,即生产者的生命周期;空间尺度的量级大约为 m ,即水域深度的尺度。(b)小尺度的生物过程包括水生植物和水生动物种群的生长发育,对应的是初级消费者所存在的时间和空间范围以及次级消费者生命存在的某些时期和活动范围,其空间尺度定义在水域宽度的范围上,时间尺度为初级消费者的生命周期。(c)中尺度的生物过程包括次级消费者的生长发育,其空间尺度定义在河流河段、湖泊或海洋区域的范围上,是次级消费者所存在的时间和空间尺度。空间尺度的范围在几十到几百倍的水域宽度,时间尺度为次级消费者的生命周期。(d)大尺度的生物过程包括大型鱼类生活生长,所对应的尺度为大型鱼类生存的空间和时间范围。对于河流,可以定义在河流的范围上;对于湖泊,可以定义在湖泊以及与湖泊相连的水体的范围上;对于海洋,可以定义在某一海域范围上。

以上应用生态系统中的生产者和消费者等概念,按照生产者和消费者活动的范围和区域以及生长时间定义了水域生态系统的不同尺度。具体生态系统的尺度可通过类似方法来定义。河流生态系统尺度的量级如表 1 所示^[11]。其中:空间尺度给出的是纵向距离的量级;时间尺度给出的是生物或物理过程的周期或时间的量级。

相邻尺度之间的过程相互影响和制约。若干小尺度合起来就变成一个 大尺度。大尺度过程对小尺度过程的影响可视为外部影响,小尺度过程对大尺度过程的影响可视为小扰动。小尺度过程的影响可综合反映在大尺度过程上。在考虑大尺度过程对小尺度过程的影响时,可以认为大尺度过程相对于小尺度过程是缓慢变化或不变的。这方面关于流水地貌过程的研究可以通过泥沙运动把不同尺度的过程相互作用联系起来。在生态学方面,生物种群之间的关系还不太容易建立起来^[12]。然而,近几年,人们对生态系统尺度重要性的认识在不断提高^[8-11]。应用尺度概念可以更好地理解生态系统中的生物过程和非生物过程的相互影响。本文强调的是尺度概念,对时间和空间尺度的量化也只给出了一个近似的量级。实际上,时间和空间尺度应根据研究问题的实际情况而定。

3 尺度概念在生态修复工程中的应用

一般来说,生态修复工程的实施都是在中、小尺度中进行的,是为了改善局部的生态环境而进行的。有了定量的时间和空间尺度,不但可以根据生态修复工程所要解决的问题来初步估计工程所处的尺度范围,而且可以预估工程实施所需要的时间和可能的影响范围,更好地评价修复工程。

由于水域生态系统中的生物过程或物理过程大多具有非线性、耦合等特点^[11-12],为了说明时间和空间尺度,本文以一些简单问题为例来建立数学模型。其中,公式推导只是为了介绍时间和空间尺度的估计方法。实际问题的时间和空间尺度也可以通过类似方法来确定。

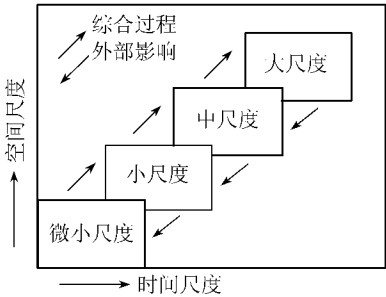


图 1 水域生态系统的尺度
Fig.1 Scale cascades
for aquatic ecosystem

表 1 河流生态系统的时间
和空间尺度量级

Table 1 Spatial and temporal scales for river ecosystem		
尺度 类别	空间 尺度/ m	时间 尺度/ a
大	$10^5 \sim 10^7$	10^5
中	$10^3 \sim 10^5$	$10 \sim 10^4$
小	$10 \sim 10^3$	$0.1 \sim 10$
微小	$0.1 \sim 10$	< 1

3.1 时间尺度

以一个湖泊的水质污染问题为例,用一个简单的充分混合的输入输出水质模型来描述时间尺度.为简化问题,假定输入、输出湖泊的流量相等.如图 2 所示,若入湖、出湖流量和污染物质量浓度分别为 Q_i, ρ_i, Q_o, ρ_o , 湖泊容积为 V , 污染物排放量为 L , 生物降解时间尺度为 T_r , 则湖泊污染物的质量守恒方程为

$$\frac{d}{dt}(V\rho) = Q(\rho_i - \rho) + L - V\rho/T_r \tag{1}$$

求解这个方程时需给出合适的初始条件:初始质量浓度、流量和排污量.稳态时,平衡质量浓度为

$$\rho_e = (L + Q_i\rho_i)/(Q_i + V/T_r) \tag{2}$$

由上述方程可得

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{\rho}{T} = \frac{\rho_e}{T} \tag{3}$$

其中

$$T = V/(Q_i + V/T_r)$$

若湖泊初始质量浓度为 ρ_0 , 则式(3)的解析解为

$$\rho(t) - \rho_e = (\rho_0 - \rho_e)\exp(-t/T) \tag{4}$$

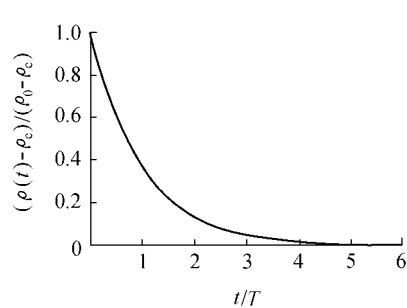


图 3 湖泊水质恢复的时间尺度
Fig.3 Temporal scale for water quality rehabilitation of a lake

式中 t 为时间.式(4)所描述的湖泊污染物相对质量浓度差 $(\rho(t) - \rho_e)/(\rho_0 - \rho_e)$ 与相对时间 (t/T) 的关系如图 3 所示.若定义时间尺度为 T , 则经过 3 倍的时间尺度后, 污染物质量浓度将接近于其平衡质量浓度.因此, 此湖泊水质的修复, 可采取不同的修复方法, 如减少排污量、增加入湖流量、降低入湖物质的质量浓度、加快湖泊中的生物降解速度等.无论哪一种方法, 其反应都需要一定的时间.

假定某湖泊容积为 50 亿 m^3 , 其入湖流量为 $200 \text{ m}^3/\text{s}$, 如果不考虑湖泊中的生物降解, 则由式(4)可知时间尺度为 1 a, 水质修复时间尺度大于或等于 3 a.由于实际问题要比此模型所描述的问题复杂得多, 实际问题的时间尺度应超过此尺度.

修复工程可以在几年内完成, 生态系统对于修复工程的反应不是修复工程一完成就可以显示出来的.因此, 生态修复工程评价的依据不应仅仅以刚完成时的初期效应为依据, 还要考虑长期效应.例如, 阿斯旺大坝对其下游生态的影响^[1]是大坝建成较长时间后才显现出来的.有的生态系统的初期效应非常明显, 长期效应并不明显, 而有的修复工程初期效应不明显, 长期效应非常明显.因此, 应以一个更大的时间尺度来评价生态修复工程有效性, 着眼于其长期效应.例如, 对污水排放引起生态破坏的河道进行清污可以看作对河道的生态(水质)修复工程.如果污染物排放量没有减少, 而且不是持续地进行, 那么, 初期效应是明显的, 但是随着时间的推移, 河道的水质会恢复到工程前的状况.如果是从减少污染物排放的角度来进行, 没有配套的河道清理过程, 那么这项工作的初期效应就不明显, 然而其长期效应将是明显的.国内的若干城市河道治理的实践已经证明了这一点.

3.2 空间尺度

以水库泄水下游河道水温恢复问题为例, 用一元水温模型来描述空间尺度.水库下游的水体温度根据其所引水库的水位高低不同, 与环境温度有差异.下游水体水温是逐渐恢复到环境温度的.

如图 4 所示水库下游河道, 河段长为 dx , 河道宽度为 B , 其入流、出流的流量均为 Q , 其入流、出流的水温分别为 $T, T + dT$.为简化问题, 仅考虑水面散热, 水库下泄的流量和温度均随时间不变.即考虑一个恒定的水面散热过程, 则该河段的热量平衡方程为

$$d(c_pQT) = -KTBdx \tag{5}$$

式中: Q ——流量; K ——热交换系数; T ——温度; c_p ——比热容, 习惯上取值为 1.在适当的条件下, 初始断面的水体与环境温度差为 ΔT_0 , 流量

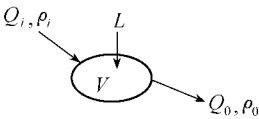


图 2 湖泊的水质修复
Fig.2 Water quality rehabilitation of a lake linked with rivers

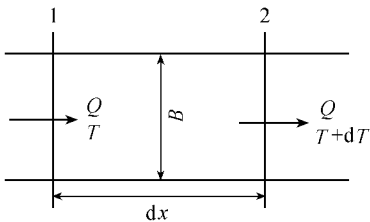


图 4 河道散热
Fig.4 Heat exchange between air and river water

Q 其解析解为

$$\Delta T = \Delta T_0 \exp(-KBx/Q)$$

(6)

如果定义 $X = Q/(KB)$ 为空间尺度,图 5 为式(6)所描述河道水体的相对温度差 $\Delta T/\Delta T_0$ 与相对空间尺度的关系.水流经过约 3 倍的空间尺度后,水温与环境温度一致.

生态修复工程是在一定空间区域进行的,影响范围与工程的空间尺度是相关的.修复工程的尺度决定了它能影响的空间尺度.小尺度上的修复工程对大尺度的影响是比较小的,而大尺度上的修复工程对小尺度的影响是决定性的.如对城市河道的生态修复工程,若仅对某一河段或者局部河道进行修复,而在其他区域上没有相应措施,那么这项工程的影响范围只能是局部的,而整体区域进行的修复工程可以改善其中局部区域的生态环境.

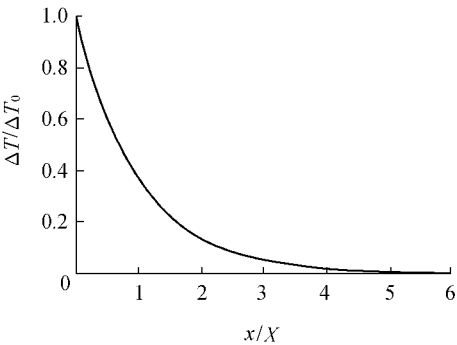


图 5 河道散热的空间尺度
Fig.5 Spatial scale for river heat exchange

4 结 语

尺度是水域生态系统中一个重要概念.本文基于水域生态系统的干扰因素与其系统组成,将水域生态系统划分为 4 个尺度,讨论了相邻尺度之间的相互关系并定量地分析其时间尺度与空间尺度,指出了具体问题的时间尺度与空间尺度的估计方法.把握和理解水域生态系统的尺度概念,既有利于对生态修复工程的规划和实施,又有利于对生态修复工程的科学性和有效性进行客观的评价.

参考文献：

[1] FEDERAL INTERAGENCY STREAM RESTORATION WORK GROUP. Stream corridor restoration :Principles , processes , and practice [R].[s. n.] : National Engineering Handbook , Part (NEH) 653 , 1998 :483.
[2] O'NEILL R V ,DEANGELIS D L ,WAIDE J B et al. A hierarchical concept of ecosystem[M]. New Jersey :Princeton University Press ,1986.
[3] 张金屯,李素.应用生态学[M].北京 :科学出版社,2003.
[4] 赵彦伟,杨志峰.河流生态系统修复的时空尺度探讨[J].水土保持学报,2005,19(3) :196-200.
[5] 董哲仁.河流生态恢复的目标[J].中国水利,2004(10) :1-5.
[6] 董哲仁.试论生态水利工程的设计原则[J].水利学报,2004,35(10) :1-6.
[7] 董哲仁.河流健康评估的原则和方法[J].中国水利,2005(10) :17-19.
[8] 吕一河,傅伯杰.生态学中的尺度及尺度转换方法[J].生态学报,2001,21(12) :2096-2015.
[9] 邬建国.景观生态学——格局、过程、尺度与等级[M].北京 :高等教育出版社,2000.
[10] 肖笃宁,布仁仓,李秀珍.生态空间理论与景观异质性[J].生态学报,1997,17(5) :453-461.
[11] HABERSACK H M. The river-scaling concept (RSC) :a basis for ecological assessment[J]. Hydrobiologia, 2000, 422/423 :49-60.
[12] MURRAY J D. Mathematical biology :I. An introduction[M]. Heideberg :Springer, 2002.

Temporal and spatial scales of aquatic ecosystem

LI Yu¹ , XIA Zi-qiang²

(1. College of Environmental Science and Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering ,
Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract The dynamic equilibrium of aquatic ecosystems is the result of the interaction between multi-scale biological process and non-biological process , and it is easy to be disturbed. Based on an analysis of the interference factors and composition of the aquatic ecosystems , the ecosystems were classified into 4 scales from the angle of engineering , i. e. the micro-scale , the small -scale , the medium-scale , and the macro -scale , and the temporal and spatial scales corresponding to the 4 scales were generalized. Furthermore , the relationships between the different scales were discussed , and the application and effectiveness of the temporal and spatial scales in ecological rehabilitation were introduced.

Key words aquatic ecosystem ; temporal scale ; spatial scale ; ecological rehabilitation