

文章编号: 1000-0585(2000)02-0180-09

游荡河型造床实验过程中河型的 时空演替和复杂响应现象

张欧阳, 金德生, 陈 浩

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 运用过程响应模型实验方法, 在游荡型模型小河塑造过程中, 分析了游荡河型发育过程中出现的时间和空间演变过程, 发现其时、空演替过程可以相互替代, 从而在实验室内证实了空代时假说的存在性, 为空代时假说提供了新的证据。并据此把复杂响应过程分为时间复杂响应过程和空间复杂响应过程, 分析了游荡河型发育过程中出现的时空复杂响应现象。

关 键 词: 空代时假说; 复杂响应; 实验研究

中图分类号: P931.92 **文献标识码:** A

1 前言

空代时假说是现代地貌学的基本理论之一。空代时假说认为^[1]: 在特定的环境条件下, 对空间过程的研究和对时间过程的研究是等价的。在缺少绝对数量方法的情况下, 有时我们可以认为地貌空间集合体可以代表地貌体的时间序列。实际上, Davis 的侵蚀循环学说在很大程度上是基于空代时假说的, Davis 将地貌的发育分成青年期、壮年期、老年期, 各个时期地貌的发育表现出不同的地貌学特征^[2], 这一发育模式可从空间分布上清楚地看出来。Lobeck 把从华盛顿山到大西洋海岸作了一剖面, 在这一剖面中, 地貌的发育体现出明显的阶段性, 从西北到东南即从山顶、坡麓到冲积平原, 分别从青年期变到老年期^[3]。Ruhe^[1]和 Savigear^[4]对野外资料的研究表明, 地貌体确实存在时、空替代现象: 在空间上分布的不同类型可以推演到时间序列上, 代表地貌发育的不同阶段。用空间变量代替时间变量曾为一种非常流行的解决地表过程长期演化的地貌学方法。由于地貌演化具有不同的时间和空间尺度, 因而空间变量与时间变量的代换必须涉及到时间及空间的尺度问题。对应于不同的时间和空间尺度, 地貌体的控制因素又存在明显差异^[5,6], 在应用空代时假说分析问题时, 必须明确所研究区域的时间、空间尺度及其主要控制变量, 在找不准主要控制变量的前提下使用空代时假说是很危险的。因而空代时假说在得到广泛应用的同时, 也受到普遍批

* 本文曾蒙许炯心先生审阅并提出宝贵意见, 郭庆伍先生参加了实验工作, 谨此致谢。

收稿日期: 1998-10-07; 修订日期: 2000-02-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (49271013) 及国家自然科学基金委和水利部联合资助重大项目 (59890200)

作者简介: 张欧阳 (1971-), 男, 重庆酉阳人, 1995 年毕业于西南师范大学城环系, 1998 年在中科院地理所获硕士学位, 现为该所博士研究生。主要从事地貌实验与模拟、河流地貌系统与环境等方面的研究, 已发表论文 4 篇。

评^[7]。空代时假说应用的合理性面临着许多困难, 需要得到理论证明和实践的检验。首先是它在理论上难以得到严格的证明; 在实践上, 野外资料的观测通常只能得到空间分布的资料, 而时间序列资料的观测则很困难, 需要长时间的积累。因而检验空代时假说合理性的较为可行方法是实验, 目前有关空代时假说的实验还未见报道。本文就是在游荡河型造床实验的基础上, 分析河床演变的时空过程, 以证实空代时假说的存在性。

2 实验概况

1.1 实验装置

实验是在中国科学院地理研究所河流海岸模拟实验室内进行的。实验装置由三个系统组成: ① 循环供水加沙系统: 实验采用此循环供水装置, 在水入口处设置自动加沙器, 模型河道水流经二级沉沙池汇入地下水库, 供循环使用。② 实验水槽系统: 主要由 $4.5 \times 1.0 \times 1.5 \text{ m}^3$ 前池(附有稳水设备)、 $4.5 \times 25 \times 0.8 \text{ m}^3$ 的固定实验水槽以及 $4.5 \times 5 \times 1.8 \text{ m}^3$ 主沉沙池组成。在水槽出口与主沉沙池之间, 还增设 $4.5 \times 3 \times 0.8 \text{ m}^3$ 的副沉沙池。③ 数据、图像采集系统: 由置于实验水槽两侧固定轨道上的电动测桥及电动摄影架两部分组成。我们曾花大量时间和精力对钢轨和测桥进行了精度校正, 基本能满足实验精度的要求。

1.2 实验设计及过程

在进行造床试验的模型设计时, 我们采用过程响应模型设计方法^[8], 通过控制边界条件、比降、流量和加沙量的关系来塑造河型。在设计时侧重运用河道比降-流量临界关系确定来水量和床面的原始比降。选取河谷比降 $J_v = 0.01$, 为了更好地控制实验过程, 在铺设床面时取横比降为 0.005 。根据流量-比降关系曲线, 由选取的河谷比降确定与之相适应的造床流量, 取 $Q_b = 1.5 \text{ l/s}$ 。再根据流量与输沙量临界关系曲线^[9], 确定与造床流量相适应的加沙量。由于游荡河型的河床组成物质主要是粉沙和细沙, 缺乏粘性的细泥沙颗粒, 因此我们在加沙时采用中径为 $D_{50} = 0.142 \text{ mm}$ 的铺设模型床面用的自然沙, 使河道系统来沙与河床边界组成一致。

实验前根据设计要求铺设了适合造床所需比降 (0.01) 的床面, 开挖了底宽约 20 cm , 顶宽约 24 cm , 深约 5 cm , 边坡为 $1:3$, 具有梯形断面的原始顺直模型小河。造床实验分 7 个测次 ($-1 \sim -7$), 每次的流量、加沙量及中径保持不变 (加沙量有微小的变化), 分别为 1.5 l/s 、 0.6 g/s 、 0.142 mm 。测量时每隔一米布设一个断面。从原始顺直模型小河到游荡河型造床过程结束放水总历时 80 小时 , 河床形态经历了较大的变化。其间观察和分析了河床在演变过程中的自我调整过程、时空演替及复杂响应现象。

3 造床过程中河型的时空演替现象

3.1 河床发育的时间过程

图 1 表示了从原始顺直模型小河到游荡河型造床结束河床平面形态演化过程。从时间序列上看, 图中从 I-2 测次到 I-6 测次依次大致经过弯曲-过渡 (切滩)-游荡三个阶段。模型小河从 I-1 测次开始变弯曲, 到 I-3 测次全河段基本成为弯曲河流, I-4 测次上游段已发育为游荡型, 中游段发生切滩, 向游荡河型过渡, 下游段仍较弯曲, I-5 测次上、中游

段已发育成游荡河型，下游段向游荡河型过渡，但仍较弯曲，而 I- 6 测次则全河段已发育成较典型的游荡河型。如果只看中游段 (8- 15# 断面)，则从 I- 2 测次到 I- 7 测次依次经过弯曲- 过渡 (切滩) - 游荡三个阶段。我们以河床的中游段 (8- 15# 断面的平均情况) 为例，讨论中游段河床随时间的演化过程。河床各要素的演化过程包括物质 (河床质中径 D_{50})、形态 (河宽 B 、平均水深 H 、最大水深 H_{max} 、宽深比 \overline{B}/H 、河道比降 J_{ch} 、曲率 p) 和能量 (消能率 E) 的调整过程。将 I- 2 至 I- 7 表征河床随时间变化的调整过程的形态、物质、能量指标点绘于图 2 中，可以清楚地看到河床系统各要素随时间的变化过程。

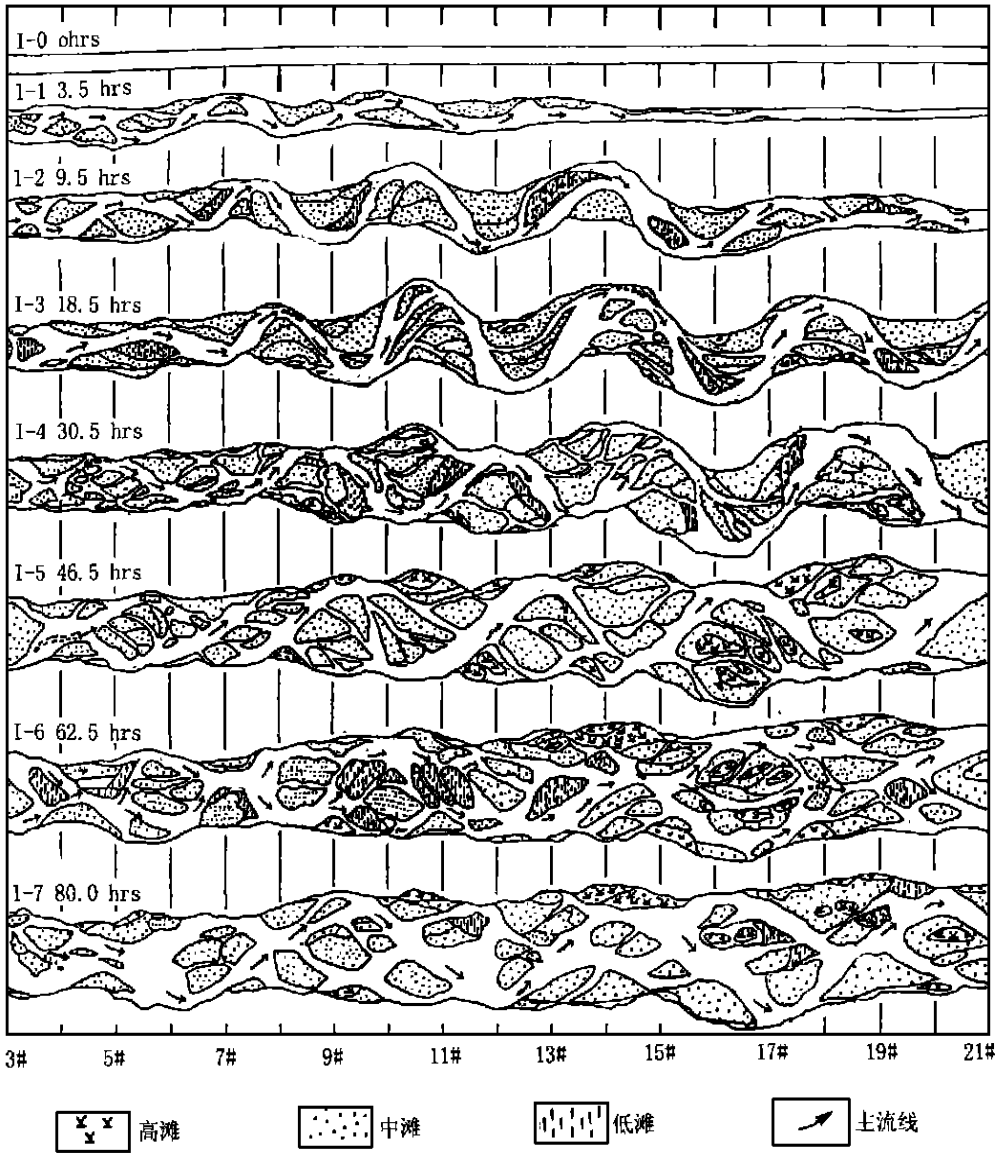


图 1 实验过程中河床平面演变图

Fig.1 Variations of the channel planeform during the experiment

3.2 河床发育的空间过程

从空间序列上看, 把 I-4 测次分为上、中、下游三段, 从下游段向上游段也依次反映

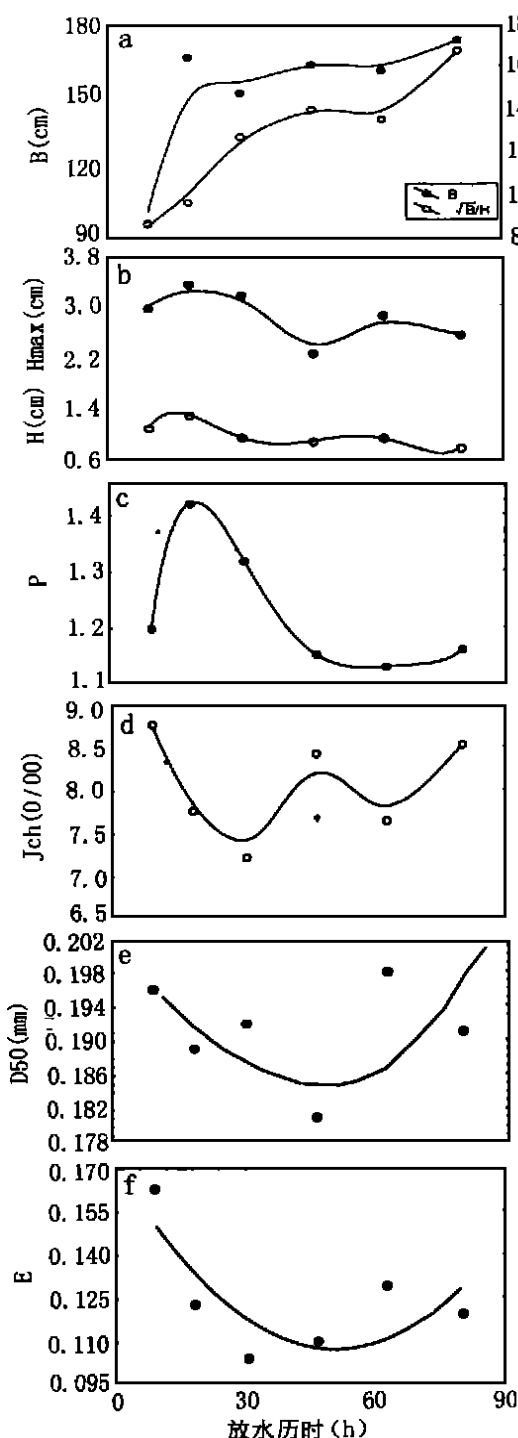


图2 河床各变量随时间的变化过程

Fig. 2 Temporal variations of the variables of model river channel from run I-2 to I-7

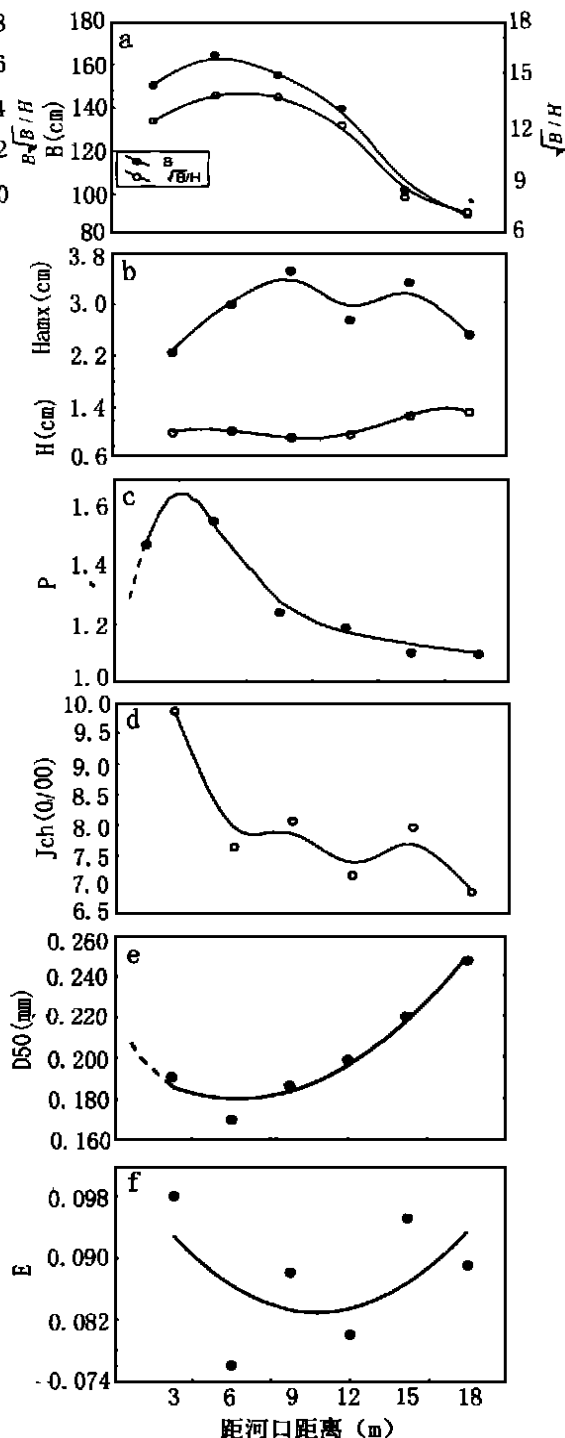


图3 河床各变量随空间的变化过程

Fig. 3 Spatial variations of the variables of model river channel at run I-4

弯曲-过渡(切滩)-游荡三个发育阶段,即表明下游段发育较上游滞后,河床先由上游段开始发育,然后向下游段扩展。和时间过程的分析一样,我们选择同样的指标,运用 I-4 测次上、中、下游不同河段在同一时间的空间变化规律来分析河床的空间演变过程。我们把整河段人为地分为六小段并取各要素均值,以便与时间变化过程对比,所得结果见图 3。

3.3 时间过程和空间过程的替代

从时间序列上看,图 1 中 I-2~I-6 测次依次分别经过弯曲-过渡(切滩)-游荡三个阶段;从空间序列上看, I-4 测次从下游段向上游段也依次反映弯曲-过渡(切滩)-游荡三个发育阶段,河床由上游段开始发育,向下游段推进。I-3 为弯曲型, I-4 上游段已发育为游荡型,中游段发生切滩,为过渡阶段,下游段仍保持弯曲, I-5 上、中游段已发育成游荡河型,下游段仍较弯曲,而 I-6 则全河段已发育成较典型的游荡河型。从平面上看(图 1),这种河型在时间上和空间上的演替序列可以相互代替,对比图 1 和图 2 河床要素的变化更能说明这一点。时间变化过程从 I-1~I-7,以放水历时为参数, I-4 测次空间变化过程以距河口的远近为参数,将这两种变化过程作比较,很容易看出:时间过程和空间过程各指标在时间过程上的变化和在空间过程上的变化除 B 、 \overline{B}/H 外,其余各项的变化趋势基本一致,特别是水深、曲率、比降、消能率的调整过程更相似。这表明时间过程和空间过程具有密切的关联性,此时可用 I-4 测次的空间过程代替实验过程中的时间演变过程,或者相反,用时间演变过程代替空间过程。实验中的这种河型演变过程从一个侧面证实了空代时假说能够成立。

实验中河床边界条件、初始比降、流量、加沙量都保持不变,并且基面也无升降变化,河床的演变过程主要受入口处来水来沙量的影响,河床由入口处开始向下游方向发育,属上游控制型,体现出上游段较老、下游段较新的特点,其主要控制变量是时间,河型沿程在空间上的分布实质上体现出的河床的时间演化过程。当地貌体随时间过程变化时,给定地貌类型也随空间推移作相应变化,表现出时间和空间过程的相似性。

实验室中出现的河床时间演变序列和空间演变序列,只有 I-4 测次才体现空间演变过程的阶段性。在一定的区域,河床在某种条件下,演化的时间过短则某些发育过程还没体现出来,过长则某些发育阶段已完成并进入下一阶段,在空间上就不可能完整地体现出所有的发育阶段。因而河型的演化只有到了一定的时间才能使其体现出空间过程的阶段性,这使得在野外观察时空演替现象较困难。

4 河床演变过程中的时空复杂响应现象

4.1 时空复杂响应的概念

70 年代初, Schumm 首先将复杂响应原理用于地貌系统的解释^[10]。地貌系统的复杂响应是指系统的输入条件发生变化时,系统某些组成要素为适应外界输入的变化而作出自我调整,在自我调整过程中,又链锁式地引起其它要素的变化,这些变化常常交互作用,引起各种正负反馈过程,使系统的调整过程出现复杂的面貌^[11]。在上述阐述中,输入条件的改变可细分为相对于时间过程的改变和相对于空间过程的改变。系统的调整过程也同样可以细分为相对于时间过程的调整 and 相对于空间过程的调整两个方面。我们可以把相对于时间过程的复杂响应称为时间复杂响应,把相对于空间过程的复杂响应叫空间复杂响应。空

代时假说指出, 在某种条件下, 地貌体的时间过程和空间过程可以相互替代。因而, 地貌体在适当的时间和空间条件下, 同一空间位置的不同时间过程可能存在时间复杂响应, 同一时间在不同空间位置上也可能存在空间复杂响应, 时间复杂响应和空间复杂响应有着密切的联系, 并且可以相互替代, 称为时空复杂响应。实际上, Schumm^[10]、许炯心^[11~13]等所用的复杂响应的概念只相当于这里的时间复杂响应的概念, 而对于空间复杂响应, 却少有提及。下面利用实验资料进一步分析河型的时空复杂响应过程。

4.2 河床演变过程中的时间复杂响应现象

因河床的调整过程涉及到河床的抵抗力与水流作用力的对比关系, 选择了许炯心所用的河床边界条件指标^[11]:

- ① 河岸抗冲性: $K_a = M / 0.76 \gamma H J_v$ (γ 为水的容重, 这里取 1);
- ② 河底抗冲性: $K_d = D_{50} / \gamma H J_v$;
- ③ 发生冲刷的临界剪切力: $\tau_c = 0.254 M^{0.99}$ (M 为湿周中粉粘粒百分比);

仍以中游段 (8-15# 断面的平均值) 为例, 讨论河床随时间的调整过程。将表征河床随时间变化的边界条件指标点绘于图 4 中, 结合图 2, 便可以清楚地看出河床对外界输入变化的响应过程。顺直模型小河开始施放定常流量时, 在一定的比降条件下, 水流势能转化的动能, 对河床产生冲刷。由于河岸、河底抗冲性小于发生冲刷的临界剪切力 τ_c , 且河岸抗冲性小于河底抗冲性, 河岸和河底都受到冲刷, 使河宽和水深都增大, 由于河岸冲刷得更强烈, 河宽的增幅大于水深的增幅, 宽深比也增大。根据最小能耗理论^[14], 从顺直河道开始发育的河流为了用最小能量消耗率输送水沙, 唯一可采取的流路是弯曲型。河道的变弯使水流出现弯道环流, 加强了对凹岸的冲刷, 并不断后退而展宽, 凸岸则有泥沙淤积, 逐渐形成浅滩, 细颗粒泥沙在边滩的淤积使 D_{50} 减小。河岸的后退又加强了弯道环流, 使曲率迅速增大, 河床形成交错边滩并进一步发展, 使曲率进一步增大, 河道比降减小, 水深加深。这些过程为正反馈过程, 彼此相互促进。河床上游段的淤积小于下游段, 使比降减小。这一阶段模型小河主要以增加河长, 减小比降, 形成交错边滩来降低消能率, 向弯曲型发展。

当这些正反馈过程发展到一定程度时, 河底和河岸的抗冲性增加, 前述正反馈过程变为负反馈过程, 各因子间相互制约, 河宽和曲率的增长变慢。由于河床是在由粉沙质组成的单一边界条件下发育而成, 河岸抗冲性差, 所形成的边滩的组成物质也较粗, 缺乏固滩物质。在这样的比降和边界条件下, 弯曲河型不能保持稳定。当河宽增加到一定程度时, 再增加将会引起水深的减小, 这将使流速减小, 以致消能率减小, 河岸的侵蚀加大了河流含沙量, 河流不能输送必要的泥沙。这样, 河道将分成若干更陡更小的河道, 增大消能率以输送泥沙, 从而保持进出泥沙间的平衡^[15]。模型小河也是按这种方式演变的, 水流向岸侵蚀的同时也在向下游方向侵蚀, 主流下移。当这种下移达到一定临界值时, 水流切滩, 流路发生突变, 河道分叉, 流路变直, 曲率突发变小, 比降增大, 水深减小, 宽深比增大。河流形态的改变有效地增大了因输沙要求而需要增大的能耗率。切滩向下游方向发展便发生连串切滩, 使滩面细颗粒物质被带走, D_{50} 变粗, 固滩物质更少, 水流又直接作用于滩地, 使河床可动性增大, 弯曲河型所需的交错边滩不能形成。切滩使水流对凹岸的冲刷减弱而对另一岸的冲刷相对加强, 河宽仅缓慢增加而曲率进一步减小并逐渐趋于稳定。在新的条件下, 为了有效地减小能耗率, 河流主要通过增大河宽来进行调整, 并主要通过形成心滩来

增大河床阻力，模型小河也变为游荡河型。从上述变化过程还可以看出，各因子变化的临界点并不同步，反映了河床对水沙过程响应的复杂性。

4.3 河床演变过程中的空间复杂响应现象

和时间复杂响应的分析过程一样，我们选择同样的指标，运用 I-4 测次上、中、下游不同河段在同一时间的空间变化规律来分析河型空间复杂响应过程。对 K_a 、 k_d 、 τ 等项则取上、中、下三段平均值点绘于图 5 中。

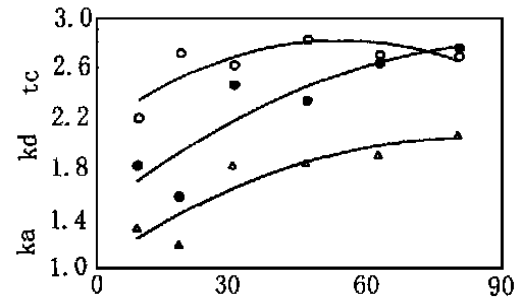


图 4 河型边界条件指标随时间的变化过程
Fig. 4 Temporal variation of channel boundary condition indices from run I-1 to I-7

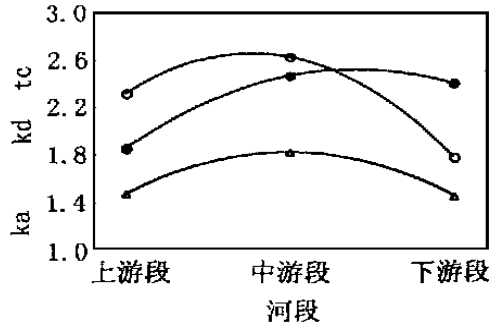


图 5 河型边界条件指标随空间的变化过程
Fig. 5 Spatial variation of channel boundary condition index of run I-4

根据上文的定义，图 3 所示的河床要素的空间变化过程实际上体现了河型空间复杂响应过程。由于水、沙对河床的作用时间不同，使同一时间不同河段的水沙过程、水流作用力并不相同，河床各段的响应也不一致，下游段的发育较上游段滞后。模型小河从尾门向入口的变化过程实际上和它从 I-2 到 I-7 的实间变化过程是一致的，反映了河型发育时间过程的先后顺序。从图 3 可以看出，河型在空间分布上对水沙过程的响应也呈现出复杂的特性，空间上的差异是由于时间变化的滞后引起的，这种变化的复杂性通过空间为载体表现出来，可用与时间复杂响应过程一样的原理来解释，把时间过程换成空间过程即可，不再赘述。

4.4 河床演变过程中的时空复杂响应现象

如前所述，I-4 河型沿程在空间上的分布反映河型的时间演化过程。当地貌体随时间过程变化时，给定地貌类型也随空间推移作相应变化，表现出时间和空间过程的相似性。将图 2 和图 3 所示的时间复杂响应过程和空间复杂响应过程作比较，各指标在时间过程上的变化和在空间过程上的变化除 B 、 \overline{B}/H 外，其余各项的变化趋势基本一致，这表明时间复杂响应过程和空间复杂响应过程具有密切的关联性，它们既可以相互代替，又对水沙的响应过程表现出复杂性，体现出了河型演变过程中的时空复杂响应现象。

5 结语

本文分析了游荡河型发育过程中出现的时间和空间演变过程，发现其时、空演替过程可以相互替代，从而在实验室内证实了空代时假说的存在性，为空代时假说的合理性提供了实验证据。结合 Ruhe^[1]、Savigear^[4]等人的野外分析，说明空代时假说是合理的，我们在

进行地貌分析时视方便可以把时间过程和空间过程相互替代。但如前所述, 时间过程和空间过程的替代并不总是成立, 应用空代时假说时, 必须明确所研究对象的时空尺度、主要控制方式及控制变量, 否则会得出错误的结论。进行野外分析时, 人们通常可以观测到的是空间分布特征, 而时间演变过程则很难得到长序列的资料, 大时间尺度的资料甚至不可能直接得到。对于小尺度的时间和空间, 时间跨度短, 空间范围小, 可以同时观测到。对于大的时空尺度, 我们几乎不可能知道其时间过程, 但可以在弄清时、空尺度和主要控制变量的情况下, 依据空代时假说, 用空间分布代替时间演变过程。通常, 空代时假说一般适用于宏观分析, 象 Craig^[16]那样运用空代时理论, 以空间变量代替时间变量建立严格的数学模型是值得进一步商榷的。

利用空代时假说, 我们可以用地貌空间分布特点来粗略地预测其发育的时间过程, 为工程建设和灾害预测提供依据, 或者以地貌发育的时间过程来预测其空间过程, 为规划部门提供参考依据。在我们的实验过程中出现了时间复杂响应过程和空间复杂响应过程, 时空复杂响应过程得到了很好的体现。时间复杂响应反映某一特定空间各要素随时间的变化过程, 空间复杂响应反映某一特定时间各要素随地域空间的变化过程, 但在本质上, 空间上的差异是由于时间变化的滞后引起的, 只是二者的表现形式不同。

本文初步揭示了河型演变过程中的时空复杂响应现象, 要说明它是否是一种普遍规律只通过一个室内实验得出的结论是不够的, 还需要大量野外资料的检验, 同时还需要其它相关实验的验证。

参考文献:

- [1] Chorley R J, Schumm S A, Sugden D E. *Geomorphology*[M]. Mechuen, Landon & New York, 1985. 626.
- [2] Davis W M. The geographic cycle[J]. *Geogr J.*, 1899 (14): 481 ~ 504.
- [3] Beckinsale R P, Chorley R J. The history of the study land forms or the development of geomorphology, vol. 3: Historical and regional geomorphology 1890– 1950[M]. Routledge, London and New York, 1991. 496.
- [4] Savigear R A. Some observations on slope development in South Wales[J]. *Transactions of the Institute of British Geomorphology*, 1952, **18**: 31 ~ 51.
- [5] Schumm S A, Lichty R W. Time, space and causality in geomorphology[J]. *American Journal of Science*, 1965, **263**: 110 ~ 119.
- [6] Lane S N, Richards R S. Linking river channel form and process: Time, space and causality revisited[J]. *Earth Sur. Pro. and Land.*, 1997, **22**: 249 ~ 260.
- [7] Church M, Mark D M M. On size and scale in geomorphology[J]. *Prog. Phys. Geog.*, 1980(4): 342 ~ 390.
- [8] 金德生, 刘书楼, 郭庆伍. 应用河流地貌实验与模拟研究[M]. 地震出版社, 1992.
- [9] 李保如. 自然河工模型试验[A]. 水利水电科学研究论文集第二集(水文、河渠)[C]. 北京: 中国工业出版社, 1963.
- [10] Schumm S A. Geomorphic threshold and complex response of drainage system[M]. In: Morisawa M (ed). *Fluvial Geomorphology*, George Allen & Unwin: London, 1973. 299 ~ 310.
- [11] 许炯心. 渭河下游河道调整过程中的复杂响应现象[J]. *地理研究*, 1989, **8**(2): 82 ~ 89.
- [12] 许炯心. 水库下游河道复杂响应的实验研究[J]. *泥沙研究*, 1986(4): 50 ~ 57.
- [13] 许炯心. 汉江丹江口水库下游河床调整过程中的复杂响应[J]. *科学通报*, 1989(6): 450 ~ 452.
- [14] Yang C T. On river meanders[J]. *Journal of hydrology*, 1971, **13**(3): 231 ~ 253.
- [15] Yang C T. Potential energy and stream morphology[J]. *Water Resources Research*, 1971, **7**(2): 311 ~ 322.
- [16] Craig R G. The ergodic principle in erosional models[M]. In: Thorn C E (ed.). *Space and Time in Geomorphology*, George Allen and Unwin, Landon, 1982. 379.

An experimental study on spatial and temporal processes and complex response of river channel evolution

ZHANG Ou-yang, JIN De-sheng, CHEN Hao

(Institute of Geography, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Based upon the experimental study on bed-making of wandering braided river channel by using process-response model method, both the spatial and temporal channel evolution processes are analyzed. It is found out that the spatial and temporal processes can substitute each other by comparing the horizontal processes and the variations of variables of river channel system. Thus, the existence of ergodic hypothesis in laboratory which provides a new evidence for the hypothesis. Based upon this finding, the complex response can be subdivided into spatial complex response and temporal complex response according to the objective situation, and the concept of temporospatial complex response is consequently put forward and verified with the experimental data.

In fact, S. A. Schumm and Jiongxin Xu have only studied the temporal complex response, but rarely mentioned the spatial complex response. Experimental study illustrates that there is a temporal complex response in the same region at different stages and a spatial complex response at the same time in different regions under certain conditions. Temporal complex response is often and firmly related to spatial ones and can be substituted for another one according to the ergodic hypothesis, and vice versa. It is so called temporospatial complex response.

Key words: ergodic hypothesis; complex response; experimental study