沙质河床与砾石河床水流及能耗特征的比较及其地貌学意义

许炯心

(中国科学院地理研究所, 北京 100101)

摘要 以百余条河流的大样本对沙质河床与砾石河床的水流切力及能耗特征进行了系统的比较, 在二维平面中分别建立了沙质河床与砾石河床的形态指标(宽深比)与动力指标(水流切力及能耗率)的关系. 这些关系清楚地表明, 沙质弯曲型、沙质分汊型、砾石弯曲型、砾石分汊型等河型位于不同的区域, 其分界线可以用直线关系来定量表达.

关键词 沙质河床 砾石河床 河型 判别

沙质河床与砾石河床的组成物质在物理力学性质上表现出很大的差异, 服从不同的运动规律, 著名的 Hjulstrom 关系和 Shields 曲线都清楚地表明了这种差异. 这使得沙质河床与砾石河床的发育演变特性有很大的不同, 河型特征也有一定的差异. 然而, 从本质上说, 与沙质河床和砾石河床的形成演变相联系的泥沙运动都服从同样的物理学定律, 对这两种河床进行比较研究, 将有助于深化对于河床演变基本规律的认识.

1 方法

河床形态是水流与河床组成物质相互作用的结果. 因此, 描述河床过程的定量指标包括物质、动力和形态 3 个方面. 为了对沙质河床与砾石河床进行比较, 采用了下列指标.

1.1 水流动力

(1) 水流切力与相对切力. 河床泥沙的运动取决于水流作用力与床面泥沙颗粒抵抗力的对比关系. 前者可用水流切力 $\tau_0 = \gamma H J$ 来表达, 这里 γ 为水的比重, H 为平均水深, J 为比降; 后者则可以用泥沙颗粒的临界起动切力 τ_c 来表达. 对于非粘性粗颗粒物质而言, 临界起动切力与代表粒径 D 之间存在着简单的关系, 即 $\tau_c \propto D$. 本文中以水流切力与临界起动切力之比来表示相对切力. 为了用一个简单的指标来表达, 采用 HJ/D , 这里分子和分母分别反映水流作用力和床面泥沙颗粒抵抗力. 这一指标与输沙强度有很好的关系, 事实上 Einstein 输沙公式的主要变量 Ψ 即可简化为这一形式^[1], 此指标亦可视为无量纲水流切力指标.

(2) 水流能耗. 能耗在河型形成中的意义有 3 个方面: () 能耗直接与河流的输沙特征相联系; () 能耗是水流阻力的表达方式, 而水流阻力也直接与输沙特征有关; () 能耗在河流系统中的分布趋向于满足一定的规律, 这种规律往往决定着某种河型的出现^[2]. 不同床沙组成的河流, 其能耗表现出不同的水平, 能耗与床沙中径 D_{50} 有密切的关系. 由于临界切力与水流能耗都与粒径有关, 沙质河床与砾石河床的差异, 便可以在一定程度上通过临界起动切力与水流功率的差异而表现出来.

本研究中采用的能耗指标为 γQJ , $\gamma QJ/B$ 和 VJ , 分别表示单位河长上、单位床面上和单位水体中的能耗率, 这里 γ 为水的比重, Q 为流量, J 为河床比降, B 为河宽, V 为流速.

1.2 河床组成物质

用床沙中值粒径 D_{50} 来定量表达河床组成物质特征. 一方面, 它可以反映河床在水流作用下变形的难易程度, 另一方面也与河床糙率有密切关系.

1.3 河床形态

本文用平滩流量下的河床水面宽 B 与平均水深 H 之比来表示河床横断面形态. 河床平面形态可以用弯曲系数和分汊指标来表达, 但由于缺乏系统的资料, 本研究中以河型来定性表示. 按河型进行分组, 以考察不同河型的沙质、砾石河流的水流及能耗特征的差异.

对沙质、砾石河床的比较研究, 是在上述指标的基础上进行的. 将这些指标在二维平面中分别建立关系, 以揭示两种河床的差异, 进而对这种差异的地貌学意义进行解释.

2 资料来源

广泛收集了世界上不同地区的河流资料, 包括文献[3~5]中的资料和若干中国河流的资料, 总共 200 余条, 其流量变化于 $2 \sim 56000 \text{ m}^3/\text{s}$, 床沙粒径变化于 $0.06 \sim 229 \text{ mm}$, 具有广泛的代表性. 其中能够用于建立上述各项指标的完整资料共有 111 组, 按床沙分, 包括沙质河流 (D_{50} 小于 2 mm) 33 条, 砾石河流 (D_{50} 大于 2 mm) 78 条; 按河型分, 包括弯曲河流 77 条, 分汊河流 34 条. 这里河型分类方法据 Leopold 等人^[6], 但弯曲型以弯曲系数大于 1.3 为标准, 略低于原作者的标准 1.5. 在该分类中, 分汊型 (Braided) 是广义的, 既包括了国内习称的分汊型 (江心洲型), 又包括了游荡型. 本文所称的分汊型, 含义同此. 本文的目的在于确定弯曲与分汊之间的临界条件, 故未包括顺直微弯型河流. 因此, 本研究共涉及 4 种类型, 即沙质弯曲型、沙质分汊型、砾石弯曲型、砾石分汊型.

本文在计算能耗率和水流切力时所采用的流量为平滩流量, 当平滩流量的资料无法得到时, 则采用多年平均洪峰流量. 河宽和水深是与这一流量相应的河宽和水深, 比降则为河床比降. 河床宽深比采用无量纲形式 B/H . 流速则按 $V = Q/(BH)$ 计算而得到.

3 水流切力与宽深比的关系

以所研究的沙质及砾石河流的资料为基础, 图 1 给出了水流切力与宽深比的关系. 虽然在整体上点据十分分散, 但将不同河型与床沙组成的点据加以区分后, 则表现出十分明显的规律. 从图中可以看到, 所有的点据被两条相交直线分为 4 个区间, 沙质弯曲河流、砾石弯曲河流、沙质分汊河流、砾石分汊河流各自位于不同的区间. 这两条直线可以用下列方程来表示:

$$B/H = 0.1254(\sqrt{HJ})^{-0.441},$$

$$B/H = 134871(\sqrt{HJ})^{-2.64}.$$

前一直线将弯曲型与分汊型加以区分, 后一直线则进一步将弯曲型或分汊型中的沙质河床与砾石河床加以区分. 显然, 前一直线代表了河床分汊的临界条件. 该直线意味着,

图 1 水流切力 ($\sqrt{HJ}$) 与河床宽深比 (B/H) 的关系

■ — 砾石弯曲型, □ — 沙质弯曲型, + — 砾石分汊型,
x — 沙质分汊型

水流切力较大,宽深比也较大时,则河床趋于分汊.由于较大的水流切力意味着输沙强度较大,而较大的宽深比意味着河岸约束性较小,这实际上表明,当推移质输沙强度较大而河床约束性较小时,出现分汊,反之则可能向弯曲发展.这与前人所得到的认识是一致的.将砾石与沙质河床相区分的直线,则反映了砾石河床的水流切力大于沙质河床这一事实.

4 能耗率与宽深比的关系

在图2中分别建立了3项能耗指标与河床宽深比的关系.从图中可以看到,代表弯曲与分汊河型的点据分别分布在不同的区域内(图2(a)),图中临界直线的方程为

$$B/H = 0.02541(\sqrt{QJ})^{-0.455}.$$

但在弯曲与分汊的区间中,虽然沙质与砾石河床仍有不同的分布,但彼此混杂较多,不能用一条直线来进一步区分.研究表明,单位床面和单位水体能耗率与宽深比的关系对于4种河型均能加以区别.其中单位水体能耗率关系(图2(b))的判别效果又明显优于单位床面能耗率判别关系(图2(c)).对于单位床面能耗率而言,图2(c)中的两条判别直线为

$$B/H = 0.06678(\sqrt{QJ}/B)^{-0.345},$$

$$B/H = 2.91 \times 10^{10}(\sqrt{QJ}/B)^{-5.18}.$$

前者将弯曲型与分汊型加以区分,后者则进一步在这两种河型中将沙质和砾石河床加以区分.

对于单位水体能耗率而言,图2(b)中的两条直线为

$$B/H = 0.06256(VJ)^{-0.292},$$

$$B/H = 2.21 \times 10^8(VJ)^{-3.52}.$$

前者将弯曲型与汊型加以区分,后者在这两种河型中进一步将沙质河床和砾石河床加以区分.

图2(b)和(c)中显示出沙质河床与砾石河床能耗特征的差异.砾石河床的单位床面能耗率大都大于 $0.004 \text{ t} \cdot \text{m}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ ($= 40 \text{ W}/\text{m}^2$),其单位水体能耗率大都大于 $0.003 \text{ t} \cdot \text{m}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ($= 30 \text{ W}/\text{m}^3$),而大部分沙质河流则在这两个数值以下.与这两种河床相联系的能耗背景是迥然不同的.

图2 水流能耗与宽深比的关系

(a) 单位河长能耗($\sqrt{QJ}$)与宽深比; (b) 单位床面能耗($\sqrt{QJ}/B$)与宽深比; (c) 单位水体能耗(VJ)与宽深比. (a)~(c) 符号同图1注

从图 2(a) ~ (c) 中还可以看出, 分汊型河流分布在分汊-弯曲临界直线的右侧, 即它所需要的条件是大的能耗率与大的宽深比相配合, 而弯曲河床则相反. 还可以看出, 当能耗率较大时, 在较小的宽深比之下也能发育成分汊河型. 能耗较大意味着输沙强度较大, 而较低的河岸约束性所导致的宽浅河床, 则意味着冲淤变幅大的可能性较大. 在河段平均单位面积能耗相同时, 断面越宽浅, 则能耗(或水流切力)的横向分布越不均匀, 容易导致主流线的分汊, 而主流线与各支汊之间的缓流区, 则成为最易发生淤积的场所, 因而导致心滩的出现, 使河道向分汊发展.

5 无量纲切力与宽深比的关系

无量纲切力指标 HJ/D 既反映了水流强度, 又反映了床面泥沙的抵抗力, 与只反映水流强度的切力或能耗率指标相比, 它更好地反映了河床泥沙的运动状况. 因此应该与河型的形成有密切的关系. 事实上, 这一指标即是钱宁^[7]所提出的河床稳定性指标的倒数.

图 3 为无量纲切力指标与宽深比的关系. 其中的粒径采用中径 D_{50} . 可以看到, 代表 4 种不同类型的点据处在不同的区域内, 彼此间相距较远, 说明判别效果甚佳. 对于 $HJ/D-B/H$ 判别关系, 两条判别直线的方程分别为

$$B/H = 0.009\ 358(HJ/D_{50})^{0.344}, \quad B/H = 0.052\ 82(HJ/D_{50})^{-1.12}.$$

前者将分汊型与弯曲型相区分, 后者则在这 2 个河型中进一步将沙质与砾石河床相区分.

6 地貌学意义

我们已在二维平面中分别建立了沙质河床与砾石河床的形态指标(宽深比)与动力指标(水流切力及能耗率)的关系. 通过这些关系, 可以清楚地看到, 沙质河床与砾石河床的形态及动力关系各自形成一定的组合, 同时这种组合还明显地因河型的不同而异. 自从 Leopold 等人^[6]1957 年提出著名的比降-流量关系来判别弯曲(Meandering)与分汊(Braided)河型以来, 人们发现, 这一关系不能很好地判别包括沙质与砾石河床在内的冲积河流的河型^[8]. 此后, 不断有人尝试建立沙质与砾石河床河型统一判别关系, 但迄今未成功. 在本文所给出的各项关系所对应的二维平面中, 沙质弯曲型、沙质分汊型、砾石弯曲型、砾石分汊型等河型位于不同的区域, 且其分界线可以用直线关系来定量表达. 因此, 本文的成果在河型判别上有重要意义, 可以用来阐明不同河床物质组成条件下河型的形成机理.

致谢 本工作为中国科学院留学经费择优支持回国工作基金及国家自然科学基金(批准号: 49671011)资助项目.

参 考 文 献

- 1 Einstein H A. The bedload function of sediment transportation in open channel flows. United States Department of Agriculture. Techni-
<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb1999-44-1-74>

图 3 无量纲切力与宽深比的关系
图内符号同图 1 注

- cal Bulletin, 1950(1 026): 70
- 2 Yang C T. On river meanders. Journal of hydrology, 1971, 13: 231~ 253
 - 3 Van Der Berg J H. Prediction of alluvial channel pattern of perennial rivers. Geomorphology, 1995, 12: 259~ 279
 - 4 Chitale S V. Theories and relations of river channel patterns. Journal of Hydrology, 1973, 19: 285~ 308
 - 5 Church M, Ferguson R I, Kellerhals R. On the relation of river channel gradient and pattern to discharge and grain size. Research Report, Department of Geography. The University of British Columbia, 1982. 40
 - 6 Leopold L B, Wolman M G. River channel patterns: braided, meandering and straight. U S Geol Surv, 1957, 282E: 85
 - 7 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学. 北京: 科学出版社, 1987
 - 8 Carson M. The meandering-braiding river threshold: a reappraisal. Journal of Hydrology, 1984, 41: 302~ 327

(1998-01-02 收稿, 1998-08-10 收修改稿)

赤道太平洋大气低频振荡与海表水温的关系

李崇银 李桂龙

(中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100080)

摘要 通过对 80 年代赤道太平洋地区海表水温(SST) 资料及欧洲中期数值天气预报中心(ECMWF) 大气资料的分析, 发现热带大气低频振荡(LFO, 包括季节内振荡及半年尺度以内的大气振荡) 与赤道太平洋 SST 异常存在反相变化特征, SST 正异常对应弱的大气低频振荡, SST 负异常对应强的大气低频振荡. 相关场分析进一步证实了这种负相关, 并指出印度尼西亚地区大气低频振荡的异常对赤道中东太平洋 SST 变化起着很重要的作用.

关键词 热带大气低频振荡 海表水温(SST) 太平洋地区

热带大气低频振荡(LFO), 它包括季节内(30~ 60 d) 振荡及半年时间尺度以内的大气振荡, 是 80 年代以来国际大气科学界研究的热点之一, 因为它同短期气候变化和异常有直接关系^[1, 2]. 而以赤道东太平洋海表水温(SST) 异常为主要标志的厄尔尼诺/南方涛动(ENSO) 更以其对年际气候异常的重要影响而引起世界各国科学家和政府的关注, 已开展了广泛的研究^[3~ 5]. 在已有工作中, 虽然从资料诊断指出了热带大气季节内振荡与 ENSO 存在相互作用^[6, 7], 但是热带太平洋 SST 的变化究竟与热带大气 LFO 的关系如何尚不十分清楚. 在一个有关机理的研究中, Lao 等人^[8]的结果表明了 SST 热高热带大气季节内振荡应越强, 但这个结果不仅与 El Niño 期间较弱季节内振荡的观测事实不符, 而且我们已在一个动力学研究中指出了产生这种不一致的原因同季节内振荡机制研究中的参数化方法有关^[9]. 在最近的有关资料分析和对大气环流模式(GCM) 模拟结果的研究中^[10], 人们又提出了大气低频振荡与 SST 异常的关系问题, 但仍没有给出令人满意的结果. 因此, 进一步搞清热带大气低频振荡与 SST 的关系, 是十分必要且有意义的.

本文将通过对 80 年代赤道太平洋地区 SST 资料和 ECMWF 大气资料的分析, 进一步揭露 LFO 与 SST 的确切关系, 为深入研究热带大气低频振荡和 ENSO 的机理提供更多的事实依据.