

城市河流形态及稳定性演变研究进展

尹小玲^{1,2}, 李贵才¹, 刘莹^{1,2}, 钟愉佳^{1,2}

(1. 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 深圳 518055; 2. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

摘要:人为干扰导致的城市河流退化在地理科学和水文学领域引发了广泛关注, 针对城市河流形态及演变过程的研究成为退化河流生态修复的一项重要内容, 然而, 目前国内相关基础理论的系统梳理相对缺乏。本文回顾了半个多世纪以来城市河流形态及稳定性演变的研究成果, 从研究内容和方法两方面对不同城市化阶段河流形态及稳定性变化的特征和原因进行总结, 同时评述了不同研究方法的特点与局限。本文认为, 城市化进程改变了河流自然演化过程, 破坏了河流原有形态及稳定性, 其中, 沉积和径流体系变化是其根本原因。为了更好地运用河流演变机理进行河流修复, 学者们发展了河流分类体系, 主要包括形态导向法、过程导向法和综合分类法, 重点从河流退化的地貌形态、沉积和径流变化过程、河流演变的时间周期等方面概述各分类体系的优缺点, 阐述具有预测功能的河流分类体系不断完善的过程。本文通过梳理城市河流演变的研究成果, 以期为中国城市河流修复与管理提供科学依据和现实借鉴。

关键词:城市化; 河流形态变化; 河流稳定性; 河流调整; 河流分类

1 引言

城市河流形态是地表形态的重要组成部分, 城市河流演化进程及其稳定性研究是现代地理科学和水文学的重要研究内容之一, 也是当前重要的科学前沿之一^[1]。全世界有超过50%的人口居住在城市^[2]。土地利用变化和基础设施不断完善以适应日益增多的人口, 这对河流系统造成持续地巨大压力, 破坏了河流原有的平衡。掌握城市河流形态及稳定性变化规律, 对多类型河流的生态修复与管理具有重要的意义^[3-5]。

早在20世纪60年代, 英美地貌学家就发起了河流形态演变的研究, 重点研究城市发展对河流产生的水文效应和沉积效应^[6]; 70年代, 英美温带地区水系研究为随后河流演变研究奠定了基础; 随着理论不断完善, 80年代研究区逐步扩展到东南亚和非洲等热带地区的河流沉积、径流及水气候变化; 由于城市河流位于人类活动频繁区的特殊区位, 遭受人类的干扰最为强烈。近年来, 学者们更是将关注点转移到城市河流的退化和修复与水系形态演变的关系^[7], 通常包括河床与河岸的演变特征、稳定

性及河流分类方法等。

本文通过回顾文献, 梳理了城市河流沉积体系和径流体系的变化规律, 评估了人类高强度活动下城市河流形态的演变特征, 归纳了河流形态及稳定性的研究方法, 重点解决2大问题: ①河流形态及稳定性在城市化过程中的变化及机理; ②河流形态分类方法及其对揭示河流形态及稳定性演变机理的贡献。

2 城市河流形态及稳定性的演变过程

河流的侵蚀、传输和沉积改变河流的稳定性, 决定河流演化的形态^[8]。Strahler指出当人类活动破坏了河流系统的平衡状态时, 侵蚀和沉积作用就会发生, 河流的形态与稳定性就会显著改变^[9]。

2.1 沉积体系的变化

流域产沙量与城市建设强度存在高度相关性。大多数学者认为, 在同一流域范围内, 不同土地覆被的产沙量存在较大差异, 城市开发强度不同是导致这种差异的重要原因^[6,10]。表1列举了对Tahiti和Maryland的研究成果^[6,10], 数据表明: 自然发

收稿日期: 2010-08; 修订日期: 2010-12.

基金项目: 国家自然科学基金重点基金项目(40830747)。

作者简介: 尹小玲(1980-), 女, 陕西省渭南人, 博士后, 研究方向为资源环境演变与区域可持续发展。

E-mail: yinxiaoling2001@yahoo.com.cn

通讯作者: 李贵才(1958-), 男, 天津人, 教授, 博士生导师, 主要从事区域规划和景观生态学研究。E-mail: ligc@szpku.edu.cn

展地区的流域产沙量最低,快速城市化地区的产沙量最高;且研究的流域规模越小,该特征越明显。在小规模流域内,施工区制造了80%的产沙量,土地开发导致产沙量呈数量级增长,高于森林地区的 $10^2 \sim 10^4$ 倍;一旦建设活动完成,产沙量则显著下降,仅高于自然土地覆被类型时的2~5倍^[11]。

河流沉积作用的强弱随城市化进程发生变化。城市化初期,地表裸露及工程建设加剧了地表侵蚀^[11-12],流域产沙量显著增加。统计分析20世纪60-70年代美国流域城市化进程的历史数据表明,小于 1 km^2 的流域,产沙量为 $1194 \sim 55\,000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$,是建设前的45~300倍;面积较大的流域($98.4 \sim 128 \text{ km}^2$)产生“稀释效应”^[11],产沙量降低为 $44 \sim 714 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$,但仍是建设前的2~5倍^[6],城市建设产生的泥沙成为河道淤积的主要原因。随着城市建设逐步完成,产沙量减少,河道沉积作用下降,侵蚀作用增强。Trimble研究了1980-1993年的加利福尼亚州圣地亚哥流域,经估算发现河道侵蚀提供了总产沙量2/3的泥沙,是城市化地区产沙量的主要来源^[13]。实际上,目前这方面的研究仍缺乏足够的定量研究^[14]。

2.2 径流体系的变化

城市发展导致洪水规模和频率增大,主要表征参数为洪峰流量增加、涨水段及洪水历时缩短、洪水频率增加等^[15-16]。Gregory等对英国埃克塞特市周边一处集水区的城市化水文效应研究发现,从1969-1972年,城市河流的洪峰流量增大2~4倍,洪水频率从171次/年增加到423次/年,滞后时间缩短了1/2^[17]。史培军等对中国的快速城市化典型地区——深圳布吉河流域进行了研究,1980-2000年20年间,径流历时明显缩短,洪水位显著提高,洪峰流量平均增加12.9%^[18]。

径流作用变化还表现为地表径流、径流总量、径流深等特征值通常在不同程度上有所增加^[9]。Choi等基于GIS技术、利用长期水文评估模型(The

Long-Term Hydrologic Impact Assessment)研究了美国印第安纳州首府周边一处快速城市化流域,结果显示:1973-1991年,径流总量略有增加,而径流系数大幅增长16%^[19],表明城市化对地表径流的影响大于对径流总量影响。Kim等以1986、1994和2002年3期TM数据为基础,利用修正的日常水文模型(The Daily Hydrologic Model)对城市化的水文效应进行评估,结果表明,相对于径流总量和径流系数的变化,城市地区的地表径流增加更显著^[20]。

对于城市化是否改变基流量这一议题仍存在争议。部分学者认为,地表径流增加使地下水补给减少,基流降低^[21]。另一部分则持反对意见,因为建成区扩张减少了土壤蒸发^[22],潜在减少地下水损失;同时,灌溉、地下排水、跨流域调水等人工排水网络建设进一步缓解地下水损失对基流补给的影响^[23]。Brandes对美国特拉华州中部6个城市化流域(空间尺度从 $25 \sim 200 \text{ km}^2$)进行了60年的研究发现,仅有一个研究区出现基流下降,说明城市化和不透水层增加并不能导致基流降低,地下水利和排水设施的建设促使部分地区基流更加稳定,甚至增加^[24],体现人工排水网络作为基流资源的功效。

城市化进程中,河流径流体系发生显著变化,主要原因是不透水层增加和透水层渗透性下降^[25],土地利用变化和地表渗透性降低导致降雨快速转化为地表径流^[25-26],进而通过排水系统汇入城市水系^[25],最终破坏河流稳定性^[27-28]。的确,城市土地利用及不透水层结构的变化已经成为预测城市河流演变的一种简单而有效的方法^[29]。目前,学者们的研究重点是不透水层(Impervious Surface Cover, ISC)在流域中所占的比例。与森林集水区相比,ISC比例小于10%,径流体系不发生变化^[30];ISC增大到10%~20%,地表径流增大2倍;ISC为35%~50%,地表径流增大3倍;ISC达到75%~100%,地表径流增大到5倍以上^[31]。因此,学者们认为ISC为10%是临界值^[32],许多河流的退化始于ISC在

表1 不同城市化发展阶段河流产沙量差异

Tab.1 Sediment yield comparison for developing and developed basins

| 研究区 | 森林/乡村地区 | | | 快速城市化地区 | | | 城市化基本完成地区 | | |
|-----------------------------|----------------|------------------------|--|---------------------|------------------------|--|-----------|------------------------|--|
| | 河流名称 | 面积 /km ² | 产沙量 /t·km ⁻² ·yr ⁻¹ | 河流名称 | 面积 /km ² | 产沙量 /t·km ⁻² ·yr ⁻¹ | 河流名称 | 面积 /km ² | 产沙量 /t·km ⁻² ·yr ⁻¹ |
| Tahiti, 法国 ^[10] | Matatia | 8.6 | 59 | Atiue | 0.9 | 713 | Vaiami | 2.6 | 142 |
| Maryland, 美国 ^[6] | Broad Ford Run | 7.4×10^6 | 4.2 | Little Falls Branch | 4.1×10^6 | 896 | Stony Run | 2.5×10^6 | 21 |

10%~20%的区间^[21],但对于这种变化的影响机理有待更深入地研究。

2.3 形态变化特征

土地利用变化、水利设施和排水网络建设等多项城市活动影响了河流形态及演变过程^[33-36]。尽管区位和城市化差异是河流形态及稳定性的主导因素^[6],但宏观层面上,城市河流的演变仍呈现出一些普遍特征:城市化导致河流先减小再变大、河流蜿蜒度普遍降低、河网密度增大以及河床质粗化等。

城市化初期,城市建设产生大量泥沙,导致城市河流泥沙输移量增大,河流收缩。城市建设破坏了河流原有的稳定性,在几个月到几年的时间段内,河流形态发生变化,滞后时间缩短,与自然状态的河流相比,滞后时间通常缩短到城市化前1/5~1/2^[6,21]。沉积作用增强还导致河床抬高^[37]、沙洲和沙丘随之增长^[38]、平滩水位下降、河漫滩扩大^[39]。

随后,城市河流流量增大,尤其在热带潮湿地区和温带环境下更为明显^[6],这也是城市河流河岸及河床被广泛加固的主要原因,以便限制城市河流拓展空间,保护基础设施及城市建筑免受河流扩大的破坏^[25]。然而,河流扩大的方式及程度存在明显的空间差异。Gregory统计了一些典型的城市河流,流量扩大率为1.0~4.0^[40],而热带和温带环境下的河流扩大率普遍高于干旱地区,热带和温带的城市河流通常扩大2~3倍,甚至15倍^[6,41],主要是因为热带地区强降雨造成的河岸侵蚀作用更强,尽管热带潮湿地区土壤粘度高、侵蚀特征相对较低^[3,18]。

河流流量增大表现为河流拓宽或加深。通常情况下,河流扩大表现为河流变宽,河道宽度平均增大26%^[42],但也可能表现为河道变深、变窄^[43]。与美国及全球其他地方相比,英国河流通常变得更深、更窄,这可能是由于英国河流含沙量更低、河床及河岸的岩土粘着性更高以及特殊的植被等原因所致^[6]。显然,河流扩大增加了河岸剪切应力^[44]。Booth和Henshaw在美国华盛顿西部的研究显示,与城市化前的森林覆被状态相比,城市河流的下切速率是1~20 mm·yr⁻¹,明显增大^[26]。Simon研究了1959-1978年20年间美国田纳西州西部水系,选取人工干扰最大的流域作为研究区,在人类活动强烈干扰的第10~15年的时间,上游水系发生退化,河床降低1~6 m;同时,过度下切和坡度降低,使下游地区的沉积幅度达到10~12 m^[45],造成大量河道和支流的形态改变^[46-47]。

城市化还有可能改变河床质粒度特征^[48],通常情况下会发生床沙粗化。Finkenbine的研究显示,城市河流的河床质粗化很可能是越来越高的洪峰流量和细沙冲刷所致^[49]。当然,并非所有的城市河流都会发生河床质粗化^[42],因为城市化期间会有大量的泥沙被引入河道^[38]。

水利工程的完善提高了防洪及通航能力,但人工取直导致河流蜿蜒度普遍降低^[42]。通过与乡村河流进行对比研究,美国宾夕法尼亚州东南部的河流蜿蜒度降低8%^[42];1935-1973年,英国柴郡杰明博林河(the River Bollin)整条流域的蜿蜒度从2.34降至1.37^[50]。建设活动对城市水系密度产生巨大影响。城市化初期,小的河道被填埋,河网密度大幅下降^[51]。随着城市建设加快,城市河网密度增大,主要表现在2方面:①水利及排水设施等人工排水网络建设促使河网密度明显增大,增大范围从50%到80%^[17,46,53-54];②基础设施建设与土地利用景观变化引发河道下切,导致冲沟的形成和发展,河网密度随之增大,因为人为干扰类似于大型自然灾害事件,引发上下游间的水动力失衡,进而缩短了河流下切的时间及过程^[55]。例如,道路、桥梁及排水设施建设通常会在临近地方形成冲沟,引发城市河流的局部侵蚀和下切,改变河流原有边界,比降低,河网密度增大^[17,56];针对退化的河流进行修复也会促进河网发展,因为河流修复行为实际上也属于人类干扰河流自然发展的一种方式^[1]。

3 河流形态及稳定性研究方法

河流在城市中发挥的生态、经济及社会功能与河流退化之间的矛盾与日俱增,众多学者致力于河流修复来缓解此项矛盾,通过对河流形态及其演变过程进行分类分级,以期对河流形态与稳定性的演变提供基础理论与研究方法,进而为城市河流修复提供基础信息和设计思路^[57-58]。表2通过文献总结将适用于城市河流的分类方法概括为3大类:形态导向的分类方法、过程导向的分类方法以及将形态与演变过程结合起来的综合分类法。

3.1 形态导向法

基于形态的河流分类方法更能直观地提供地貌基础信息,典型代表是Rosgen的水系分类法。以自然河流的形态特征为基础,根据地貌的相似度,将河流划分为8大一级类型,可以通过6个表征

表 2 现有城市河流分类方法回顾

Tab.2 Review of existing urban stream classification systems

| 已有的分类体系 | 特征描述 |
|---|--|
| 形态导向法 | |
| Horton (1945) | 经验分类方法,制定 Horton 定律、比降、河长等将河流分成多个等级。 |
| Leopold, Wolman (1957) | 以形态为基础将河流分为 3 类模式:顺直河、曲流河、辫状河。 |
| Strahler (1957) | 流域尺度分类法,依据上游支流进入给定排水区的数目分类。 |
| Culbertson, 等(1967) | 通过淤积特征、植被、河网形状、弯度、蜿蜒度、河岸高度、堤岸构成、漫滩类型等对河流进行分类。 |
| Khan (1971) | 对具有砂砾河床的河流进行量化分类,依据弯度、坡度和渠道模式。 |
| Brice (1973) | 依据弯曲性、汇流和支流分叉的程度和特征对河道模式进行分类。 |
| Kellerhals, 等(1972, 1976); Galay,等(1973);Mollard (1973) | 描述航拍图的效用与河流类型的逐步变迁,应用于加拿大河流。 |
| Brice, Blodgett (1978) | 分为 4 类河流模式:辫状河、辫状点沙坝河、宽湾点沙坝河以及等宽点沙坝河。 |
| Nanson, Croke (1992) | 不需要分析对象具备原型的所有特征,仅根据能量和河床阻力(粒度、河床形态、河岸岩石类型等参数)定义 3 种主要河漫滩类型,按照符合程度来划分河段类型。 |
| Rosgen (1994) | 按照河道的几何特征提出的地貌分类构架,将河流分为 8 大一级类型、94 种二级类型。该体系分类标准是客观的测量数据,属定量分类法(详见正文)。 |
| 过程导向法 | |
| Davis (1899) | 采用“地理循环”理论,基于河流地貌的成熟阶段将河流分为 3 类:青年、成熟、老年。 |
| Wolman (1967) | 河流演变是一个循环过程,针对 3 个城市化阶段分别做出响应:①地区以农业或森林景观为主时,河流保持最初的稳定状态;②在城市建设中,土地裸露引发土壤侵蚀,进而影响河流形态及演变过程;③城市建设完成后,由屋顶、铺设路面、排水沟和地下排水系统等构成了新的城市排水体系,河流再次达到平衡状态。 |
| Schumm (1963,1977,1981) | 依据大尺度系统的沉积物搬运过程,基于河道稳定性(稳定、侵蚀或沉积)和泥沙传输模式(最小挟沙量、悬移质、推移质),提出了沉积物源区、搬运区和堆积区 3 类模型。 |
| Hill (1979) | 以河道类型为基础,设定一个多元数据程序,最终生成有序双向表,实现双跨度分类。 |
| Brice (1981) | 将河道分为退化、淤积、拓宽、双侧或单侧河岸横向迁移几种类型。 |
| Simon (1989) | 将河流对抗干扰的演变分为 6 个阶段,在美国广泛用于城市河流修复(详见正文)。 |
| Downs (1994, 1996) | 将观察到的趋势和调整的模式与河流和沉积的演变过程相结合进行分类,以探寻河流变化的驱动因素。 |
| Miall (1996) | 识别河流沉积环境、并按照已有河流的主要特征首先将河流分为 3 大类,出现新的样例后,再增加类型。属于用具体的例子来定义类别的方法。 |
| Woolfe, Balzary (1996) | 将河流进程分为 8 类,代表从河道到漫滩的淤积和退化图谱。 |
| 综合分类法 | |
| Rhodes (1977) | 基于河道水动力的经验分类方法。 |
| Mosley (1987) | 回顾大量河流分类方法得出结论:所有分类方法必须能够反映河流演变的空间分布和变化频率,而不仅仅是这些特征的平均值(概率审查)。 |
| Brookes (1988) | 分类依据:河床退化、深泓线曲度、河流分枝及河岸侵蚀等。 |
| Raven, 等(1997) | 河流生境调查:英国国家河流生境分类法。主要依据:地形和图片材料、干支流形态、河床维度、河床与河岸岩石类型、自然与人工特征等。 |
| Schueler (2000) | 基于不透水层的比例将城市河流分为 3 个主要类别:敏感河流(不透水层 $\leq 10\%$)、退化河流(11%~25%)和应立刻改变的河流(>25%)。 |
| Anne Chin(2005) | 城市化破坏了河流平衡状态,河流从不稳定到新的稳定存在一个调整周期。主要通过泥沙产量(S)、不透水层面积(I)、水文效应(径流)(H)、河流形态(M)以及河流退化程度(包括物理退化和生物退化)(D)等 5 项主要指标表征河流演变过程。(详见正文) |

注:经文献[7]修改而成。

参数来描述其特点,如河道下切比、宽深比、蜿蜒度、河道数量、水面比降以及床沙粒度等,每种类型的河流都具有不同的参数值;并对美国、加拿大和新西兰等国家的450条河流按照从小到大的规模进行分类,将其应用于水利工程、鱼类栖息地保护、河流治理等河流开发管理方面^[59]。

尽管Rosgen分类系统已经从单纯的描述性工具发展为预测性工具,并被大量政府部门采纳^[60],广泛用于河流地貌研究与河流治理工程^[60],但以形态为导向的“自然河流设计”方法仍然存在较大的局限性,无法定量评估河流不稳定的原因、无法定量河流响应的因果关系、不能准确预测河流再次达到稳定状态时的地貌形态^[61],主要包括以下几点:

(1) Rosgen以类似形态的河流具有相似的演变方式为前提,将分类方法从描述性工具转变为预测性工具,但前提本身是否正确存在较大争议^[62]。

(2) “自然河流设计”法存在重大缺陷:①自然河流的平滩水位^[63]无法准确测定。“自然”河流不一定等同于“稳定”河流——即便自然河流,但实际上仍处于不稳定状态,平滩水位很难确定,因此难于在修复河流和自然河流之间进行有效比对;②床沙质界定不清晰^[64]——将河床与河岸岩石粒度混为一体,通过混合取得完全一致的特征值,导致不同河流获得相同的床沙质指标^[60],进而对治理方案产生重大影响^[65]。

(3) 该分类方法忽略了修复河道的动态特征:修复会诱发河道淤积,但淤积的河流仍然是个开放系统,能够根据水、沙自行调节,趋于平衡状态。而忽略河道形态演变中的某些关键驱动力和阻力^[59],则会导致设计的河流治理与工程方案存在重大技术问题。

由于Rosgen分类方法简化了河流系统的复杂性,体现不出河流动态以及河流形态与河流过程的相互调整等复杂过程,在一些关键问题上缺乏合理的解释,因此,它可能更适用于描述河流形态,而不适合诊断河道不稳定的机制,更不适合预测外在干预下的河流响应,比如河流的城市化。

3.2 过程导向法

既然单独依据形态的河流分类方法无法准确地推断河流的发展趋势,使用以河流演变过程为导向的分类方法进行河流评估、预测河流地貌响应并探讨相关生态过程或许更为有效。Simon的分类方法最初用于渠道化和已退化的河流,并以河流修复

为目标,提出基于河流演化过程的分类方法。①I自然河流阶段,假定河岸与河床是自然河流冲淤与土地利用综合作用的结果;②II建设新河道,包括对已有河岸的改造或整个河道水利设施的重新配置(如排洪通道的设置),城市河流通常被渠道化或硬化,因此归入该类;③III施工完成后的退化阶段,主要特征是河床被快速侵蚀,河岸抬高;④IV门槛阶段,河流下切与基底侵蚀持续增强,河槽扩宽成为该阶段的主要特征;⑤V沉积作用加强,深泓线曲度增加,河流分叉,河道比降与流速持续降低;⑥VI再次稳定阶段,一个重要标志是平滩水位显著降低,主要原因是河床淤积与低岸一侧沉积作用加强^[44]。除此,Simon还将河流演变的不同阶段类同于上游至下游纵向分布的6种类型:河源处于干扰前状态,随着水能增加及河道的堆积、拓宽,在下游某处达到新的平衡。

Simon分类方法便于判断河流的演变阶段及关键的演化过程,也有利于通过沉积和径流变化动态预测未来的河流响应,因此,被广泛地应用于退化的城市河流。但该法在渠道化和退化河流的应用中仍存在局限性:①土地利用的持续变化和人工护岸等基础设施建设导致城市河流横向收缩,很难发现河流经历沉积和再稳定阶段(阶段V和VI);②假定在无人类干扰的环境下,给予河流自发演化足够的时间和空间,下切河流从不稳定到稳定的演变过程中又可能重新经历所有的阶段,使修复计划变得无序可循。因此,Simon分类法更适用于城市水系修复计划的初级阶段^[7]。

3.3 综合分类法

将河流的形态调整与演化过程有机结合起来,综合评估河流对于不同城市化阶段的响应是众多学者目前在探索的研究方法。Chin以Wolman模型为基础,通过对1956-2006年全球100多个地区的河流变化结果进行统计分析,建立了河流形态演变的概念模型,既分析了河流形态与演变过程的关系,又强调了城市活动干扰下河流调整的理论周期:不变形阶段-河流变形-城市化完成后再次稳定;同时,曲线综合考虑了变量本身与整体的变化,代表了近似的趋势,显示了峰值的变化规律^[6]。

Chin等认为在城市建设初期,土地开发会导致地表侵蚀增强,河道产沙量增多;随着城市建设不断完善,铺设路面与构筑物等不透水表面增多,产沙量减少,地表径流增大,从而导致河流侵蚀,河道

变大^[66];同时,河道蜿蜒度降低,床沙质粗化,排水系统密度增加。城市建设完成后,城市河流将达到新的平衡状态。

该模型正视城市河流调整的时间问题,当城市建设完成后,城市河流将再次趋于稳定,但调整周期的时间范围研究还有待深入研究。如图1所示,反应期(a)即河流系统遭受城市活动干扰后不会立刻做出反应,需要经历一段时间才能开始形态调整,始于城市建设初期的地表覆被清除,终于河流形态开始发生变化。弛豫期(b、c、d)也就是在城市化进程中,河道先收缩后增大,直至达到新的稳定状态的整个过程。如此推论,城市河流需要变得更大以适应日益增长的城市径流,从而降低河流流速和剪切应力确保河流不再侵蚀,最终达到新的平衡状态。

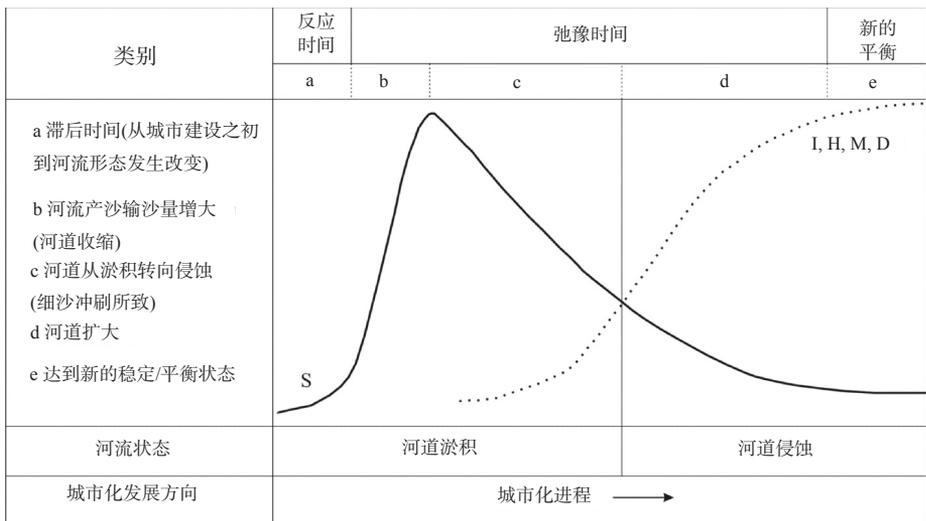
4 结论

城市化进程改变了河流面貌和自然演化过程,尤其是受人类活动影响最大的城市河流。针对这一问题,本文通过回顾文献梳理了相关研究成果,概述了城市河流形态及稳定性演变的主要特征和演变机理,并对相关研究方法进行了归纳。主要结论如下:

(1) 沉积体系及径流体系变化是城市河流稳定性改变的主要原因。城市化初期,建设活动导致产

沙量增多,河道淤积,流量下降,河流形态收缩。随着人类干扰作用的不断增强,不透水层增加和透水体渗透性下降显著改变了河流径流体系,河道侵蚀作用增强,洪峰流量、洪水历时、地表径流、基流等特征发生变化,河形改变加速。随着城市建设的完成,河流将再次达到新的稳定状态,河形拓展,河流蜿蜒度降低、河网密度增大、河床质粗化等特征发生改变。

(2) 为了更好地运用河流形态及稳定性的演变机理来进行河流修复,学者们发展了河流分类体系,归纳为3大类:形态导向法、过程导向法和综合分类方法。①形态导向的河流分类方法能更加直观地提供地貌基础信息,典型代表是Rosgen的水系分类法,但存在无法定量评估河流不稳定的原因、无法定量河流响应的因果关系、不能准确预测河流再次达到稳定状态时的地貌形态等局限性。②Simon分类方法是过程导向法的代表,既可以掌握不同河流演化阶段的大量信息,又可以针对变化的泥沙和水流输入,掌握关键的河道演变过程用以预测未来的河流响应,适用于退化的河流,但在渠道化和城市水系的应用中存在局限性,忽略了退化的城市河流调试时间与不同城市化发展阶段之间的关系。③为了避免上述两种方法的缺点,学者们将河流形态和演变进程相结合,并以此为基础提出了综合分类法,Chin在Wolman的模型上进行了完善,建立了河流演变的概念模型,重点强调了城市



S 产沙输沙量; I 不透水层面积; H 水文变量+径流变量-滞后时间; M 河流形态; D 河流退化。

图1 Chin的河流演变概念模型^[6]

Fig. 1 A conceptual model of river channel change

化干扰下河流调整经历"不变形-河流变形-城市化完成后再次稳定"3个阶段,但其中调整周期的时间范围则需要通过更多定量研究加以解答。

参考文献

- [1] Chin A, Gregory K. From research to application: Management implications from studies of urban river channel adjustment. *Geography Compass*, 2009, 3(1): 297-328.
- [2] The United Nations Population Fund. State of world population 2007[R/OL]. 2007[2012-01-02]. <http://www.unfpa.org/swp/2007/english/introduction.html>, 2007.
- [3] Gregory K J, Benito G, Downs P W. Applying fluvial geomorphology to river channel management: Background for progress towards a palaeohydrology protocol. *Geomorphology*, 2008, 98(1-2): 153-172.
- [4] Gregory K J. Urban channel adjustments in a management context: An Australian example. *Environmental Management*, 2002, 29(5): 620-633.
- [5] Gregory K J, Chin A. Urban stream channel hazards. *Area*, 2002, 34(3): 312-321.
- [6] Chin A. Urban transformation of river landscapes in a global context. *Geomorphology*, 2006, 79(3-4): 460-487.
- [7] Niezgoda S L, Johnson P A. Improving the urban stream restoration effort: Identifying critical form and processes relationships. *Environmental Management*, 2005, 35(5): 579-592.
- [8] Church M. Geomorphic thresholds in riverine landscapes. *Freshwater Biology*, 2002, 47(4): 541-557.
- [9] Strahler A N. The nature of induced erosion and aggradation.//William L, Thomas J R. *Man's Role in Changing the Face of the Earth*. Chicago: University of Chicago Press, 1956: 621-638.
- [10] Wotling G, Bouvier C. Impact of urbanization on suspended sediment and organic matter fluxes from small catchments in Tahiti. *Hydrological Processes*, 2002, 16(9): 1745-1756.
- [11] Wolman M G. A cycle of sedimentation and erosion in urban river channels. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, 1967, 49(2/4): 385-395.
- [12] Harbor J. Engineering geomorphology at the cutting edge of land disturbance: Erosion and sediment control on construction sites. *Geomorphology*, 1999, 31(1-4): 247-263.
- [13] Trimble S W. Contribution of stream channel erosion to sediment yield from an urbanizing watershed. *Science*, 1997, 278(5342): 1442-1444.
- [14] Nelson E J, Booth D B. Sediment sources in an urbanizing, mixed land-use watershed. *Journal of Hydrology*, 2002, 264(1-4): 51-68.
- [15] White M D, Greer K A. The effects of watershed urbanization on the stream hydrology and riparian vegetation of Los Penasquitos Creek, California. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 74(2): 125-138.
- [16] 李丽娟, 姜德娟, 杨俊伟, 等. 陕西大理河流域土地利用/覆被变化的水文效应. *地理研究*, 2010, 29(7): 1233-1243.
- [17] Gregory K J, Park C C. The development of a Devon gully and man. *Geography*, 1976, 61(2): 77-82.
- [18] Shi P J, Yuan Y, Zheng J, et al. The effect of land use/cover change on surface runoff in Shenzhen region, China. *Catena*, 2007, 69(1): 31-35.
- [19] Choi J Y, Engel B A, Muthukrishnan S, et al. GIS-based long term hydrologic impact evaluation for watershed urbanization. *Journal of the American Water Resources Association*, 2003, 39(3): 623-635.
- [20] Kim S J, Kwon H J, Park G, et al. Assessment of land-use impact on streamflow via a gridbased modelling approach including paddy fields. *Hydrological Processes*, 2005, 19(19): 3801-3817.
- [21] Paul M J, Meyer J L. Streams in the urban landscape. *Urban Ecology*, 2008, 3: 207-231.
- [22] 张淑兰, 于澎涛, 王彦辉. 泾河上游流域实际蒸散量及其各组分的估算. *地理学报*, 2011, 66(3): 385-395.
- [23] Hirsch R M, Walker J F, Day J C, et al. The influence of man on hydrologic systems. *The Geology of America*, 1990, 0-1: 329-359.
- [24] Brandes D, Cavallo G J, Nilson M L. Base flow trends in urbanizing watersheds of the Delaware River Basin. *Journal of the American Water Resources Association*, 2005, 41(6): 1377-1391.
- [25] Gurnell A, Lee M, Souch C. Urban rivers: Hydrology, geomorphology, ecology and opportunities for change. *Geography Compass*, 2007, 1(5): 1118-1137.
- [26] Booth D B, Henshaw P C. Rates of channel erosion in small urban streams.//Wigmosta M, Burges S. *AGU Monograph Series. Water Science and Application*, 2001, 2: 17-38.
- [27] Bledsoe B P, Watson C C. Effects of Urbanization on Channel Instability. *Journal of the American Water Resources Association*, 2001, 37(2): 255-270.
- [28] Jennings D, Jarnagin T. Changes in anthropogenic impervious surfaces, precipitation and daily streamflow discharge: A historical perspective in a mid-Atlantic subwatershed. *Landscape Ecology*, 2002, 17(5): 471-489.
- [29] Akan A O, Houghtalen R J. *Urban Hydrology, Hydraulics, and Stormwater Quality: Engineering Applications and Computer Modeling*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003: 279-287.
- [30] Olivera F, DeFee B B. Urbanization and its effect on runoff in the Whiteoak Bayou Watershed, Texas. *Journal of the American Water Resources Association*, 2007, 43(1): 170-182.

- [31] Arnold C L, Gibbons C J. Impervious surface coverage: The emergence of a key environmental indicator. *Journal of the American Planning Association*, 1996, 62(2): 243-258.
- [32] Schueler T R. The importance of imperviousness. *Watershed Protection Techniques*, 1994, 1(3): 100-111.
- [33] 宫兆宁, 张翼然, 宫辉力, 等. 北京湿地景观格局演变特征与驱动机制分析. *地理学报*, 2011, 66(1): 77-88.
- [34] Hu B Q, Wang H J, Yang Z S, et al. Temporal and spatial variations of sediment rating curves in the Changjiang (Yangtze River) basin and their implications. *Quaternary International*, 2011, 230(1-2): 34-43.
- [35] Walsh C J, Roy A H, Feminella J W, et al. The urban stream syndrome: Current knowledge and the search for a cure. *Journal of the North American Benthological Society*, 2005, 24(3): 706-723.
- [36] Taylor K G, Owens P N. Sediments in urban river basins: A review of sediment-contaminant dynamics in an environmental system conditioned by human activities. *Journal of Soils and Sediments*, 2009, 9(4): 281-303.
- [37] Daniels J M. Distinguishing allogenic from autogenic causes of bed elevation change in late Quaternary alluvial stratigraphic records. *Geomorphology*, 2008, 101(1-2): 159-171.
- [38] Fox H L. The urbanizing river: A case study in the Maryland Piedmont//Coates D R. *Geomorphology and engineering*. Stroudsburg: Dowden, Hutchinson, and Ross, 1976: 245-271.
- [39] Graf W L. The impact of suburbanization on fluvial Geomorphology. *Water Resources Research*, 1975, 11(5): 690-692.
- [40] Gregory K J. The human role in changing river channels Human activity and environmental processes. *Geomorphology*, 2006, 79(3-4): 172-191.
- [41] Gregory K J, Davis R J, Downs P W. Identification of river channel change to due to urbanization. *Applied Geography*, 1992, 12(4): 299-318.
- [42] Pizzuto J E, Hession W C, McBride M. Comparing gravel-bed rivers in paired urban and rural catchments of southeastern Pennsylvania. *Geology*, 2000, 28(1): 79-82.
- [43] Segura C, Booth D B. Effects of geomorphic setting and urbanization on wood, pools, sediment storage, and bank erosion in Puget Sound Streams. *Journal of the American Water Resources Association*, 2010, 46(5): 972-986.
- [44] 刘怀湘, 王兆印, 陆永军, 等. 山区下切河流地貌演变机理及其与河床结构的关系. *水科学进展*, 2011, 22(3): 367-372.
- [45] Simon A. A model of channel response in disturbed alluvial channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1989, 14(1): 11-26.
- [46] Simon A, Rinaldi M. Disturbance, stream incision, and channel evolution: The roles of excess transport capacity and boundary materials in controlling channel response. *Geomorphology*, 2006, 79(3-4): 361-383.
- [47] Simon A, Doyle M, Kondolf M, et al. Critical evaluation of how the Rosgen classification and associated "Natural Channel Design" methods fail to integrate and quantify fluvial processes and channel response. *Journal of the American Water Resources Association*, 2007, 43(5): 1117-1131.
- [48] Yang S L, Milliman J D, Li P, et al. 50,000 dams later: Erosion of the Yangtze River and its delta. *Global and Planetary Change*, 2011, 75(1-2): 14-20.
- [49] Finkenbine J K, Atwater J W, Mavinic D S. Stream health after urbanization. *Journal of the American Water Resources Association*, 2000, 36(5): 1149-1160.
- [50] Mosley M. Channel changes on the River Bollin, Cheshire, 1872-1973. *East Midland Geographer*, 1975, 6: 185-199.
- [51] Meyer J L, Wallace T B. Lost linkages and lotic ecology: Rediscovering small streams//Press M C, Huntly N J, Levin S. *Ecology: Achievement and Challenge*. Boston: Blackwell Science, 2001: 295-317.
- [52] Graf W L. The rate law in fluvial geomorphology. *American Journal of Science*, 1977, 277(2): 178-191.
- [53] Hannam I D. Urban soil erosion: An extreme phase in the Stewart subdivision, West Bathurst. *Journal of the Soil Conservation Service of NSW*, 1979, 35: 19-25.
- [54] Whitlow J R, Gregory K J. Changes in urban stream channels in Zimbabwe. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1989, 4(1): 27-42.
- [55] Chin A, Gregory K J. Urbanization and adjustment of ephemeral stream channels. *Annals of the Association of American Geographers*, 2001, 91(4): 595-608.
- [56] Chin A, Purcell A H, Quan J W, et al. Urbanization and adjustment of ephemeral stream channels. *Annals of the Association of American Geographers*, 2001, 91(4): 595-608.
- [57] 袁雯, 杨凯, 吴建平. 城市化进程中平原河网地区河流结构特征及其分类方法探讨. *地理科学*, 2007, 27(3): 401-407.
- [58] 孙崇亮, 王卷乐. 基于DEM的水系自动提取与分级研究进展. *地理科学进展*, 2008, 27(1): 118-124.
- [59] Rosgen D L. A classification of natural rivers. *Catena*, 1994, 22(3): 169-199.
- [60] Hey R D. Fluvial geomorphological methodology for natural stable channel design. *Journal of the American Water Resources Association*, 2006, 42(2): 357-386.
- [61] Scherman D J. To interpret the earth: Ten ways to be wrong. *Geographical Review*, 1993, 83(4): 496-498.
- [62] Miller J R, Ritter J B. An examination of the Rosgen classification of natural rivers. *Catena*, 1996, 27(3-4): 295-299.

- [63] Juracek K E, Fitzpatrick F A. Limitations and implications of stream classification. *Journal of the American Water Resources Association*, 2003, 39(3): 659-670.
- [64] Kuhnle R, Simon A. Evaluation of sediment transport data for clean sediment TMDLs. National Sedimentation Laboratory, Oxford: USDA Agricultural Research Service, 2000, 17: 65-66.
- [65] Kondolf G M, Piégay H. *Tools in Fluvial Geomorphology*. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2003: 231-269.
- [66] Chin A, Daniels M D, Urban M A, et al. Perceptions of wood in rivers and challenges for stream restoration in the United States. *Environmental Management*, 2008, 41 (6): 893-903.

Progress on Urban Stream Transformation of Critical Forms and Stability Relationships

YIN Xiaoling^{1,2}, LI Guicai¹, LIU Kun^{1,2}, ZHONG Yujia^{1,2}

(1. School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School of Peking University, Shenzhen 518055, China;

2. College of Urban and Environmental Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Urban river degradation under human impacts has aroused wide attention in the areas of geography science and hydrology. But in domestic academic field there is still a lack of systematic theory study on fluvial geomorphology and process which is the important work in river restoration design. Based on the study of river geomorphology and stabilization for nearly half a century, this paper reviews the research results from the content and method, summarizes the features and reasons about river changes in the process of urbanization, and analyzes the advantages and limitations of river classification. In conclusion, urbanization has transformed river landscapes across the Earth's surface, caused great damage to fluvial equilibrium, and highly altered river natural progress. The main parameters include river enlargement, reductions in sinuosity, an overall increase in drainage densities, and a tendency for bed material to coarsen. The root cause of these changes is the change of hydrologic system and sediment discharge regiments in that urban construction can induce river aggradation due to soil erosion at the beginning of urbanization; and accompanied by the gradual completion of the construction, channel erosion has been the main source of river sediment; and that hydrological system is upset by a decrease in the perviousness of the catchment, driven by land-use changes. Therefore, scholars have been studying the classification of river evolution on form and stability. In this paper, a summary of existing urban stream classification systems can be classified primarily into three broad types by synthesizing literature methods: form-based method, process-based method and synthesis method. Form-based method is appropriate for concluding river morphological characteristics, but the classification scheme lacks significant explanation and has a limited basis in channel processes and stability. Process-based method can provide important information at the stage of evolution and the dominant channel processes that can help predict the future response to changing sediments and discharge inputs. However, it ignores the correlation between river degradation, adjustment time and different stages of urbanization. The synthesis method with form and process-based feature, which is currently widely used, avoids the lack in application of above two methods and emphasizes the theory period of river adjustment which include three phases "the onset of a morphological response-significant morphology change-a new equilibrium", but still needs future quantitative research. Combing the existing experiences is beneficial to provide a scientific basis and practical references for watershed restoration and management in China.

Key words: urbanization; river form; fluvial equilibrium; channel adjustments; river classification

本文引用格式:

尹小玲, 李贵才, 刘堃, 等. 城市河流形态及稳定性演变研究进展. *地理科学进展*, 2012, 31(7): 837-845.