

基于树木年轮的弯曲河流河湾迁移速率估算

刘 桉^{1,2}, 刘 成³, 何 耘⁴

(1. 中国水利水电科学研究院研究生院, 北京 100048; 2. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014;
3. 国际泥沙研究培训中心研究培训处, 北京 100048; 4. 中国水利水电科学研究院信息中心, 北京 100038)

摘要: 针对河源区缺乏长期的河流监测数据, 难以确定河湾迁移速率的问题, 通过 2016 年和 2017 年 2 次对黄河源区的实地考察和采样情况, 以典型弯曲河流白河的 9 处河湾为例, 根据河湾凸岸淤长与植被演替的关系, 利用树木年轮分析判断树龄, 依据树木位置和树龄的关系估算弯曲河流河湾迁移速率。估算得出白河 9 处河湾迁移速率为 0.38 ~ 6.10 m/a, 迁移速率与水流流速、河道比降、凹岸滩高和河谷宽相关, 最大迁移速率出现在河湾弯曲度最小的 9 号河湾。

关键词: 弯曲河流; 河湾; 迁移速率; 树木年轮; 黄河源区; 白河

中图分类号: TV143⁺.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2021)03-0061-05

Estimation of migration rate of meandering river bends based on tree rings//LIU An^{1,2}, LIU Cheng³, HE Yun⁴
(1. Graduate School of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 2. Power China Zhongnan Engineering Co., Ltd., Changsha 410014, China; 3. Training Department of International Research and Training Center on Erosion and Sedimentation, Beijing 100048, China; 4. Information Center of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In view of the lack of long-term river monitoring data in river source regions, it is difficult to determine the migration rate of river bends. Through field investigation and sampling in the Yellow River source region in 2016 and 2017, nine river bends of the Baihe River, a typical meandering river, were selected as research examples. The ages of trees were determined by tree rings analysis, and a method for estimating the migration rate of river bends based on the relationship between tree positions and tree ages according to vegetation succession of trees growing on scroll bars in convex bank was used. The migration rates of nine river bends of the Baihe River were estimated to be 0.38-6.10 m/a, and the migration rates were found to be related to the flow rate, channel slope, height of the concave bank and width of the river valley. The maximum migration rate appears in the No. 9 river bend where the river curvature is the smallest.

Key words: meandering river; river bend; migration rate; tree rings; Yellow River source region; Baihe River

河湾迁移速率为河湾每年摆动的距离,多指横向迁移,即河湾沿河道中心线垂向距离的变化。河湾迁移速率是弯曲河流演变的重要参数,与河湾的曲率半径、河宽、流量、输沙量和滨河植被发育情况等有关。河湾迁移速率多采用不同年代的地图、航空照片和遥感影像的比较分析获取^[1-2]。Hickin 等^[3-6]研究了加拿大 Beaton 河等河湾迁移速率,指出河湾迁移速率与河流功率、凹岸滩高及其物质组成相关,最大河湾迁移速率可表达为河湾弯曲度(即河湾曲率半径与河宽的比值 R/W)的函数。Furbish^[7]指出河湾平均迁移速率与河湾弯曲度相关。Thorne^[8]认为河岸侵蚀及河湾迁移受到河岸物质组成及特性的影响,凹岸物质的自然特性影响着

河湾迁移速率和方向,从而改变了整个河道演化形式。Burckhardt 等^[9]发现凹岸无森林的河湾平均局部迁移速率比凹岸有森林的高 3 倍。Hudson 等^[10]指出最大河湾迁移速率出现在河湾弯曲度为 1.0 ~ 2.0 时。Shields 等^[11]研究了建坝对美国密苏里河河湾迁移的影响,结果表明河湾平均迁移速率从建坝前的 6.6 m/a 降低至建坝后的 1.8 m/a。Micheli 等^[12]发现尽管有建坝影响,但由于滨河平原逐渐由森林转变为农业植被,临近河湾迁移速率增加了近 50%。Richard 等^[13]提出河湾迁移速率与单位河宽河流功率成正比。Nicoll 等^[14]认为限制性河湾的迁移速率与自由河湾基本一致,指出河流功率是影响河湾迁移速率的最主要因子,其余为河谷坡度、河宽

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0505400)
作者简介:刘桉(1995—),男,工程师,硕士,主要从事河流动力学研究。E-mail:liuan64@foxmail.com
通信作者:刘成(1964—),男,正高级工程师,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:chliu@iwhr.com

和洪水量。Giardino 等^[15]指出河湾迁移速率受土地覆盖、水文、河岸物质组成及地质条件的影响,河流流量为最主要的影响因素,河岸是否有植被以及是否存在地下水影响也对河湾迁移速率有一定的影响。在我国,李玲^[16]计算了黄河上游宁蒙河段河道摆动速率的时空变化,认为河床中值粒径的大小对河道摆动速率有很大的影响,平滩流量的变化在一定程度上影响了河湾迁移,河湾迁移是对水沙变化的一个适应。Li 等^[17]分析了塔里木河的河湾迁移与裁弯取直,认为洪水导致河湾迁移速率高。上述河湾迁移速率的研究中,以 Hickin 等的系列成果较为系统^[3-6],他们在对 Beaton 河研究的基础上,结合其他河流研究数据,给出了对河湾迁移的通用性描述,将河湾迁移分为 4 个阶段:①初始阶段($R/W>10$),曲率半径大,河湾发展缓慢;②增长阶段($3<R/W\leq 10$),随着河湾发展,侵蚀速率快速增大;③迁移阶段($2<R/W\leq 3$),河湾维持其基本形状,迁移速率最大;④结束阶段($R/W\leq 2$),当河湾发展到一定程度,侵蚀速率急剧下降,河湾发生自然裁弯取直。

树木年轮保存了当地的地形、水文、气候条件变化等历史数据,有定年精确、连续性强、分辨率高和易于获取多个相似样本等特点,树木年轮分析广泛应用于考古、气候变化、生态演变、水文历史、地貌变迁、历史灾害等多学科的研究中。美国天文学家 Douglass^[18]于 20 世纪初建立起树轮年代学(dendrochronology),之后树木年轮分析有了长足的发展,已广泛应用于气温、降水量、干湿度等多项环境因子的历史重建工作^[19]。在河湾迁移速率研究中,Hickin 等^[3]和 Burckhardt 等^[9]应用了树轮年代学分析方法;Hickin 等^[3]假定 10 处河湾新淤积而成的沙洲与沙洲上新生长树木的时间间隔较短且基本一致,在每个沙洲选择约 10 株树木采集树芯样本,其中树龄最大的年数代表沙洲形成的时间,结合航空照片绘制树龄分布地图,得出河湾迁移速率。

笔者在黄河源区实地考察时发现,白河多处河湾的凸岸植被发育良好,树木呈条带分布,层次分明,离岸远的树木较离岸近的树木更为高大,呈现出明显的随凸岸淤进而植被渐进演替现象。基于这一发现,本文通过采集树木样本,尝试利用树木年轮分析估算白河河湾迁移速率。

1 研究区域概况

白河位于黄河源区西南部,发源于四川省红原县查勒肯,由南向北流经红原县的龙日坝、安曲、县城和阿木,至若尔盖县唐克镇附近汇入黄河。白河干流全长约 270 km,河道平均比降为 0.061%,沿程

有数条支流汇入。白河流域地处高寒山区,流域面积为 5 488 km²,高程超过 3 400 m,年平均气温为 0.7~1.1℃,极端最低气温达-33.7℃。流域上游降雨充沛,年平均降水量为 640~750 mm,为整个黄河流域内雨量最大的地区之一。图 1 为白河流域及中游 9 处研究河湾分布图,流域内沼泽密布,蓄水性强,为高原地区罕见的平原型河流,沿程植被丰富,覆盖度较高^[20]。

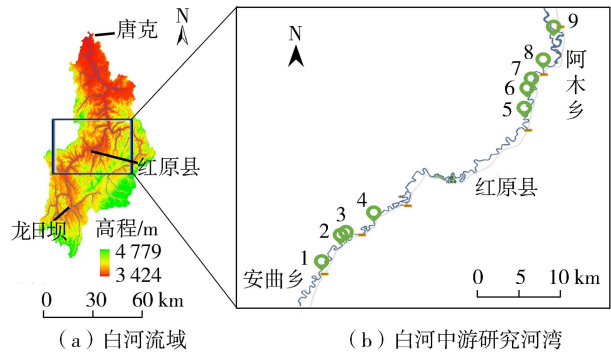


图 1 研究区域及研究河湾

图 2 为利用 Google Earth 遥感影像提取得到的白河自龙日坝至唐克的河宽、河谷宽与高程沿程变化(图中横轴坐标以龙日坝为起点,河宽通过测量遥感影像中水面宽度获得,河谷宽为河底以上 10 m 处的宽度),可见白河上游局部河段河宽较窄、河床比降较大,中下游河床比降较小且比较稳定。河宽沿程呈下凹型曲线逐渐增大,白河下游唐克镇附近汇入黄河处河宽急剧增大,最宽处超过 500 m。白河河谷呈藕节状变化,沿程总体呈增大趋势。下游河段河谷宽迅速增大,但存在不少山口和收缩地带。9 处研究河湾位于白河中游,河谷宽均不超过 3 km。

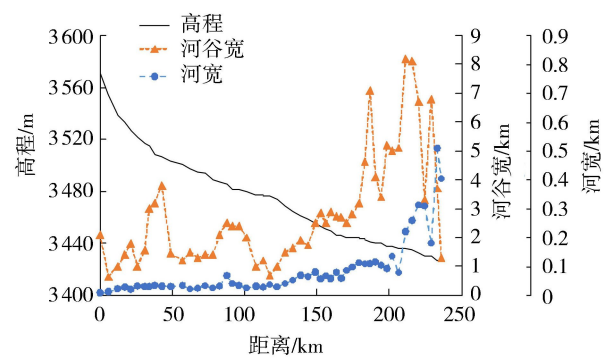


图 2 白河河谷宽、河宽与高程沿程变化

2016 年 7—8 月和 2017 年 7 月,笔者对白河进行了实地考察与取样。考虑弯曲程度不同、受历史河道裁弯影响较小、植被茂盛以及便于取样等因素,选取了白河中游 9 处河湾采样。在各河湾采集树木年轮样本和滨河植被样本,测量得到水动力、河湾几何形态、滨河植被分布、河岸泥沙粒径、河道比降等数据如表 1 所示。

表 1 白河中游研究河湾测量数据

河湾	河宽/m	曲率半径/m	水流流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	凹岸滩高/m	泥沙中值 粒径/mm	弯曲系数	河谷宽/m	河宽与 河谷宽之比	河道比降/%	弯曲度
1 号	23	204	0.70	1.8	0.66	1.51	1400	0.026	0.065	8.87
2 号	44	181	0.65	1.4	0.35	3.59	690	0.064	0.048	4.11
3 号	46	181	0.63	1.8	2.99	2.53	910	0.051	0.044	3.93
4 号	32	116	0.91	1.8	8.26	1.34	1660	0.019	0.039	3.63
5 号	43	207	0.83	1.7	0.11	2.54	1690	0.069	0.045	4.81
6 号	40	229	0.81	2.0	1.55	1.60	940	0.043	0.036	5.73
7 号	54	162	0.78	1.6	1.21	2.77	1260	0.043	0.044	3.00
8 号	59	424	0.45	1.9	0.81	1.66	680	0.087	0.046	7.19
9 号	51	118	1.11	2.3	5.68	2.18	2360	0.022	0.070	2.31

注:弯曲系数为河湾曲线长度与直线长度的比值。

白河 9 处河湾凸岸为明显的淤进滩地,湾顶发育有宽阔的月牙形卵砾石带,最大垂向宽度为 18 ~ 43 m。淤进滩地上逐渐开始进行植被的演替,近岸侧形成 2 个或 3 个圆弧形植被带,一般为稀疏草本植被带、密集草本植被带和木本植物带,或仅有草本植被带和木本植物带。木本植物的主要物种为奇花柳,为杨柳科柳属灌木,在高原地区广泛分布,环境适应能力强,幼苗生长需水量大^[21]。

图 3 为白河 3 号河湾的平面图和凸岸剖面图,可见河湾近岸侧高程整体呈上升趋势,存在多处起伏。距河湾顶端 34 m 内为卵砾石河滩,坡度较大,此区域属于新淤积而成的滩地,无植被发育。其后高程起伏上升,出现较为明显的 3 个植被带,依次为:①稀疏草本植被带,主要物种为赖草和狗牙根;②密集草本植被带,主要物种为高原毛茛、金露梅、葛缕子;③木本植物带,以奇花柳为主。奇花柳丛后侧发育有大片密集草本植被,仅有少量低矮的灌木类植被分布。

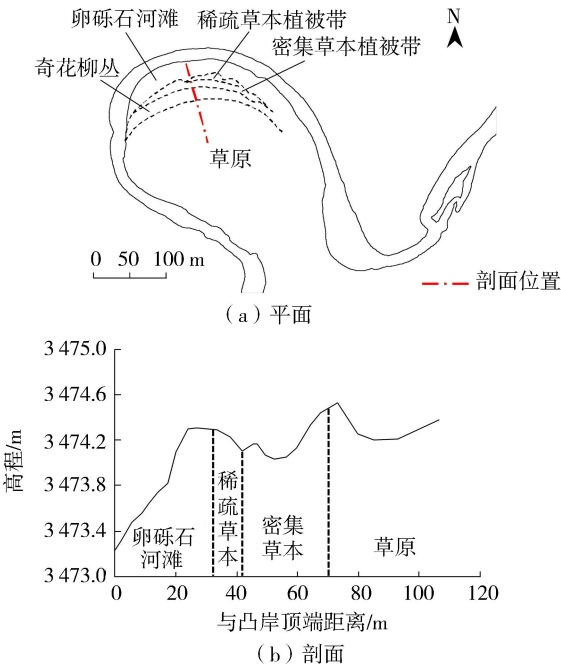


图 3 白河 3 号河湾卵砾石河滩及植被分布

2 研究方法

2.1 树木年轮采样及分析

研究河段河湾凸岸滩地发育的木本植被以奇花柳居多,树高均低于 6 m。选取距离河湾顶端不同距离的树木进行采样,使用差分 GPS 进行定位。树木年轮样本以树芯为主,使用树木生长锥采集。对于部分死树或较细的树木,用木锯采集底部圆盘。树芯采集位置为树干根部,为便于操作,一般选取地面以上 20 ~ 30 cm 范围进行样品钻取。对于同一株树木,从不同方向采集 2 个或 3 个树芯。9 处河湾共采集了 80 个树芯和 58 个圆盘。

树芯样本自然干燥后放置在定做的凹槽内,固定后使用不同粒度的砂纸打磨至显微镜下早材、晚材细胞的分界轮廓清晰可见。以靠近树皮部分为采样年份,从外向内髓心进行定年。一般情况下树木年轮与树龄一致,但也存在不一致现象。当树木一年生长的年轮超过一圈,额外生长的年轮称作伪轮;一年内没生长年轮称作缺轮。为获取准确的年轮值,需对树芯样本进行交叉定年以剔除伪轮、补上缺轮的年数。交叉定年是将一棵树与另一棵树的年轮进行比对的过程,两棵树同一时段的宽年轮及窄年轮分布应当完全吻合。采用美国亚利桑那大学树木年轮研究实验室的交叉定年方法,通过画骨架示意图方法对树木年轮进行交叉定年^[22],检查出伪轮或缺轮现象,得出准确的年轮数据。最后使用专用软件 COFECHA^[23]对交叉定年的结果进行检验,确认每个年轮的有效性。树干圆盘样的年轮数据获取方法与树芯样基本一致。

2.2 河湾迁移速率估算方法

在弯曲河流的河湾中,随着河湾凹岸的崩岸蚀退,凸岸滩地逐渐淤长,草本植物和木本植物依次在不断淤进的滩地上发育、生长。一般而言,新淤积形成的滩地经过一定的时间后会生长出树木。在同一河湾内,新淤积带的形成与该淤积带上最早发育同种木本植物的时间间隔基本一致,因此前后两个淤

积带上最早生长树木的树龄差相当于两个淤积带形成的时间差,据此可依据凸岸树木的树龄分析推算凸岸淤长的速率^[24]。假定河湾凸岸滩地同一淤积带上树龄最大的树木为关键样本,选取2个树木关键样本,则此2个样本的垂向距离与树龄差之比相当于凸岸淤长速率,即河湾迁移速率。据此,可得河湾迁移速率估算公式如下:

$$v = \frac{L}{a_2 - a_1} \tag{1}$$

式中: v 为河湾迁移速率, m/a ; L 为2个关键样本沿河道中心线垂向距离, m ; a_1 、 a_2 分别为2个关键样本的树龄, a 。

计算中,河湾迁移的主方向选择在各淤积带和植被带中部且垂向宽度最大处所连的直线上,如图3(a)中红色线所示。

3 河湾迁移速率估算

研究河段河湾凸岸内奇花柳呈带状分布,每个树木带的大多数奇花柳粗细相近,近岸树木带的奇花柳较为细矮,远岸的奇花柳较为粗高。为了较为准确地估算河湾迁移速率,选取同一树木带内目测树干最粗、树龄最大的树木进行取样,并在同一凸岸多处取样。根据树木年轮分析获得的样本树龄和差分GPS测量得到的样本位置信息,绘制河湾采样树木位置与树龄的关系图。通过树龄分布确定用于估算河湾迁移速率的关键样本,利用式(1)可估算出河湾迁移速率。

表2为研究河段河湾采样树木数量、树龄及估算的河湾迁移速率。白河2号和5号河湾由于凸岸树木稀少,仅采样3或4棵奇花柳,其他河湾采样8~16棵。树龄分布为4~41 a,估算的河湾迁移速率为0.38~6.10 m/a 。以下以白河1号河湾和8号河湾为例具体分析。

表2 白河河湾采样树木情况及估算的河湾迁移速率

河湾	采样 树木数/棵	最小树龄/a	最大树龄/a	迁移速率/ ($\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$)
1号	16	5	14	2.52
2号	3	17	25	0.49
3号	8	10	18	0.38
4号	9	4	11	2.60
5号	4	6	14	4.30
6号	14	9	39	1.66
7号	10	10	22	0.63
8号	16	6	41	0.70
9号	10	4	11	6.10

3.1 1号河湾迁移速率

1号河湾临近红原县安曲乡,为研究河湾中最靠上游的河湾(图4(a))。该河湾为较规则的半圆

形,曲率半径为204 m,凸岸前端是最大垂向宽度为18.5 m的月牙形卵砾石河滩。卵砾石河滩后方分布有3个植被条带,第1个为稀疏草本植被带,最大垂向宽度为22 m;第2个为密集草本植被带,最大垂向宽度为14.5 m;第3个为奇花柳丛,由前至后树木从低矮到高大逐渐变化。目测选择同一树木带内最高、最粗的奇花柳进行取样,总计16棵。

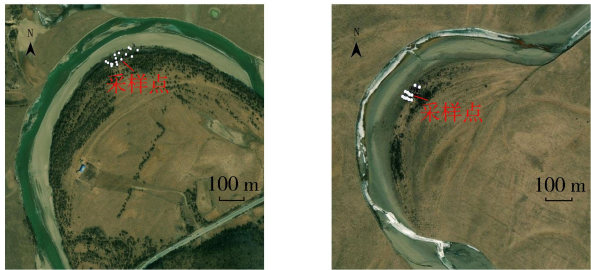


图4 河湾形状

由图5(a)可知,1号河湾采样树木的树龄在5~14 a之间,基本上距湾顶越远树龄越大。但离湾顶距离不同的多个样本树龄一样,说明仅依靠目测判断树龄大小存在误差。由关键样本的定义可判断图中树1-1和树1-5为关键样本,根据式(1)利用两处关键样本估算的河湾迁移速率即为图5(a)中所有样本的下包络线斜率,则1号河湾迁移速率约为2.52 m/a 。包络线上方的样本应是在演替出现首批木本植被之后开始生长的,说明树木样本采集数量越多,估算得出的河湾迁移速率结果越准确。

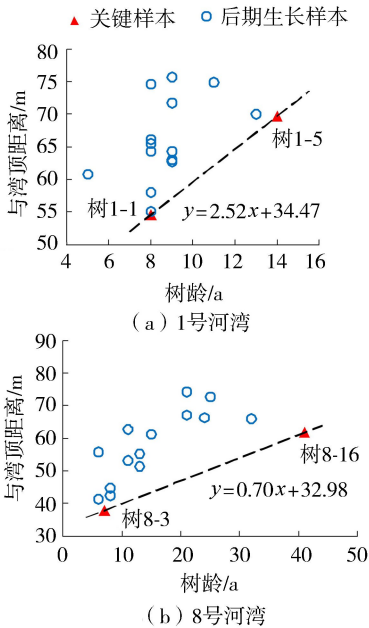


图5 采样树木位置与树龄关系

3.2 8号河湾迁移速率

白河8号河湾位于白河阿木乡上游,呈规则的半圆形(图4(b)),曲率半径较大,达424 m。凸岸卵砾石河滩最大垂向宽度为29 m,此后为奇花柳

丛,无单一的草本植被带。奇花柳丛呈带条状分布,条带之间的树木大小差异较为明显。采样树木总共16棵,树龄为6~41 a。由图5(b)可确定关键样本为树8-3和树8-16,河湾迁移速率为0.70 m/a。

3.3 讨论

1~9号河湾迁移速率的估算值为0.38~6.10 m/a,其中2号和5号河湾的估算值因采样树木量少可能存在较大误差。由于采样的河湾数量少,难以得出可靠的河湾迁移速率与潜在影响因素统计学意义上的关系,因此本文仅作粗略分析。检测表1所列10个潜在影响因素与河湾迁移速率估算值之间的相关性和显著性,可得出水流流速、河道比降、凹岸滩高和河谷宽与河湾迁移速率的相关系数分别为0.806、0.710、0.625和0.619,显著性均小于0.05,说明这4个因素在一定程度上与河湾迁移速率相关^[25]。其他因素均未显示明显的相关性。水流流速和河道比降与河湾迁移速率的相关性与相关研究^[5,13-14]得到的河湾迁移速率与河流功率相关的结论一致,凹岸滩高与河湾迁移速率的相关性与文献^[5]结论一致。1~8号河湾弯曲度在3~10之间,9号河湾弯曲度为2.31,分别属于河湾“增长阶段”和“迁移阶段”^[3-6],最大河湾迁移速率出现在9号河湾,与“迁移阶段”河湾迁移速率最大的结论一致,与文献^[10]得出的最大河湾迁移速率出现在弯曲度为1.0~2.0时的结论相近。现场考察情况也佐证了9号河湾迁移速率最大,其凸岸的卵砾石河滩发育最长,凹岸滩高2.3 m,卵砾石层上有30 cm厚的表层土壤,能观察到多处崩塌块,说明该河湾凹岸侵蚀、凸岸淤进速率高。

白河河湾凹岸滩高均大于1.5 m,滩槽高差大于2 m,而河岸表层植被根土复合体厚度仅0.3~0.6 m,河岸崩塌后形成的根土复合体崩塌块易被水流破坏并冲走,因此表层植被对河湾迁移速率的影响较小。相比较而言,同期考察的兰木错曲河湾由于河流尺度小(河宽小于5 m),滨河草甸型植被分布茂密,其凹岸植被生物量对河湾迁移速率影响明显^[26]。

4 结 语

本文通过树木年轮分析估算河流源区缺乏实测资料河湾的迁移速率,在河湾凸岸滩地生长有条带分布、层次分明树木的弯曲河流中,依据树木位置和树龄的关系确定关键样本,关键样本的垂向距离与树龄差之比为河湾迁移速率。估算得出白河9处河湾迁移速率为0.38~6.10 m/a,迁移速率与水流流速、河道比降、凹岸滩高和河谷宽相关。1~8号河湾处于河湾的“增长阶段”,9号河湾弯曲度为

2.31,处于“迁移阶段”,迁移速率最大(6.10 m/a)。本文对将树木年轮分析应用于弯曲河流演变研究进行了有益的尝试,可为缺乏长期实测资料的河流进行河流演变研究提供参考。

参考文献:

[1] BRICE J C. Lateral migration of the middle Sacramento River, California[R]. Reston:USGS,1977.

[2] 刘桢.黄河源区典型弯曲河流演变与滨河植被的作用研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2018.

[3] HICKIN E J, NANSON G C. The character of channel migration on the Beatton River[J]. Geological Society of America Bulletin,1975,86:487-494.

[4] NANSON G C, HICKIN E J. Channel migration and incision on the Beatton River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983,109(3):327-337.

[5] HICKIN E J, NANSON G C. Lateral migration rates of river bends[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1984,110(11):1557-1567.

[6] NANSON G C, HICKIN E J. A statistical analysis of bank erosion and channel migration in western Canada[J]. Geological Society of America Bulletin,1986,97(4):497-504.

[7] FURBISH D J. River-bend curvature and migration: how are they related? [J]. Geology,1988,16:752-755.

[8] THORNE C R. A bank erosion and meander migration of the Red and Mississippi Rivers [M]. Vienna: IAHS Publisher,1991.

[9] BURCKHARDT J C, TODD B L. Riparian forest effect on lateral stream channel migration in the glacial till plains [J]. Journal of the American Water Resources Association,1998,34(1):179-184.

[10] HUDSON P F, KESEL R H. Channel migration and meander-bend curvature in the lower Mississippi River prior to major human modification[J]. Geology,2000,28(6):531-534.

[11] SHIELDS F D, SIMON A, STEFFEN L J. Reservoir effects on downstream river channel migration[J]. Environmental Conservation,2000,27(1):54-66.

[12] MICHELI E R, KIRCHNER J W, LARSEN E W. Quantifying the effect of riparian forest versus agricultural vegetation on river meander migration rates, central Sacramento River, California, USA [J]. River Research and Applications,2004,20(5):537-548.

[13] RICHARD G A, JULIEN P Y, BAIRD D C. Statistical analysis of lateral migration of the Rio Grande, New Mexico[J]. Geomorphology,2005,71(1):139-155.

[14] NICOLL T J, HICKIN E J. Planform geometry and channel migration of confined meandering rivers on the Canadian prairies[J]. Geomorphology,2010,116(1/2):37-47.

(下转第71页)