

文章编号:1672-3031(2018)05-0495-09

白河河湾迁移速率及影响因素分析

刘 成^{1,2}, 刘 桢^{1,3}, 徐梦珍⁴

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 2. 国际泥沙研究培训中心, 北京 100048;

3. 中国电建集团 中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014;

4. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 白河为黄河源区典型弯曲河流, 2016年和2017年对白河9处典型河湾进行了考察采样。分析表明, 白河河湾凸岸植被呈环形条带状分布, 一般有2~3个植被群落; 湾顶从前至后的树木尺寸显示出明显的由低矮到高大的梯度变化。对凸岸树芯和圆盘样本进行年轮分析, 获取了树木的分布和树龄数据, 提出了通过树木年轮和距离计算河湾迁移速率的方法。通过绘制树龄分布云图找出关键样本, 测算白河河湾迁移速率为0.38~6.1 m/a, 与遥感影像估算得出的迁移速率基本一致。对白河河湾迁移速率与水流流速、河宽、滩高等数据进行回归分析, 建立多元线性回归模型, 结果表明水流流速和比降是白河河湾迁移速率的主要影响因素, 迁移速率与流速和比降均成正比。

关键词: 白河; 植被演替; 迁移速率; 年轮; 回归分析

中图分类号: TV143

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2018.05.020

1 引言

弯曲河流是自然界中最为常见的河流形态, 具有蜿蜒蠕动的动态地貌演变特征, 是最具活力的地表过程系统之一。弯曲河流在冲积平原或河谷内随时间不断地迁移、摆动和迂回, 产生曲折回旋的平面形态^[1-2]。由于水流、泥沙、滨河植物、人类活动等因素影响, 弯曲河流的形态演变过程具有一定复杂性和非线性特征^[3]。弯曲河流演变的研究对河流修复、航道整治和河流生态等都具有科学意义和工程价值^[4-5]。黄河源区位于青藏高原东北部, 是黄河上游的主要产流区之一, 弯曲河流在这里广泛发育, 其径流量变化对黄河中下游水资源综合利用有重要影响^[6]。白河是黄河源区典型的弯曲河流, 流域内发育形成优质的草原, 受人为因素干扰较小, 研究其迁移特性和植被作用, 对认识弯曲河流演变规律, 并对黄河上游河流生态保护具有重要的科学价值和现实意义^[7]。

河湾的形成和迁移是多个因素共同作用的结果, 各种影响因素之间的权重也可能不同。Swamee等^[8]对Ganges河形态变化情况进行分析, 认为地质、水沙和河床条件是控制其弯曲度的主要因素; Howard等^[9]测量了33条弯曲河流, 分析得出河湾形态主要与河湾波长、河湾不规则程度、弯曲系数、横向振幅4个参数相关; Chang等^[10]对印度两条弯曲河流的研究得出, 流域内土壤、地质条件和水流流速及比降是弯曲河流演变和迁移的主要控制因素。此外, 滨河植被对弯曲河流河湾的迁移和几何形态的稳定性也具有重要作用, 在河湾凹岸植被加固河岸, 在凸岸植被降低了近岸流速, 拦截了部分泥沙, 是河流地貌形成的参与者和调控者, 其作用强弱取决于植被的种类、密度和分布等因素。本文主要研究白河河湾的形态和凸岸滨河植被特征, 通过树轮采样研究河湾的迁移速率, 并分析影响河湾迁移速率的主要因素。

收稿日期: 2018-01-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0505400, 2016YFC0402407); 国家国际科技合作专项项目(2014DFG72010)

作者简介: 刘成(1964-), 男, 安徽涡阳人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水力学及河流动力学研究。

E-mail: chliu@iwhr.com

通讯作者: 刘桢(1995-), 男, 江西萍乡人, 硕士生, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: liuan64@foxmail.com

2 研究区域与方法

2.1 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,呈南北走向,流经四川省红原县和若尔盖县,为高寒山区流域,整体高程超过 3400 m,年平均气温为 0.7 ~ 1.1 ℃,极端最低气温可达-33.7 ℃。白河干流全长约 270 km,平均比降为 0.61 ‰,流域面积为 5488 km²,沿程有数条支流入汇,在唐克镇附近汇入黄河,入黄口附近形成分汊河道。

白河流域上游降雨充沛,河道沿岸蓄水能力较强,为高原地区罕见的平原河流,沿程大量植被发育,覆盖度较高。印度洋温暖空气沿青藏高原东部横断山脉河谷流动,与青藏高原冷锋相遇,产生切变和低涡形成大量降水,使白河流域成为整个黄河流域内雨量最大的地区之一。白河流域年平均降水量为 640 ~ 750 mm,夏季降水量约占全年降水量的三分之二,流域内沼泽密布,蓄水性较强,暴雨造成的水土流失较微弱,形成的洪水较小。白河沿岸沼泽地区泥炭层发育较弱,河水相对于邻近的黑河较为清澈,因而得名为白河^[7]。

2.2 研究方法 2016 年 7—8 月和 2017 年 7 月,对白河进行了实地考察。挑选了 9 处弯曲程度各异,受历史裁弯影响小,植被密集且方便到达的河湾,采样河湾的分布及其编号如图 1 所示,使用树木生长锥(树芯取样器)、手锯和差分 GPS 获取了河湾凸岸的树木年轮样本和位置信息,并测量获得滨河植被分布、河流几何形态、河道比降、河岸泥沙粒径等数据。

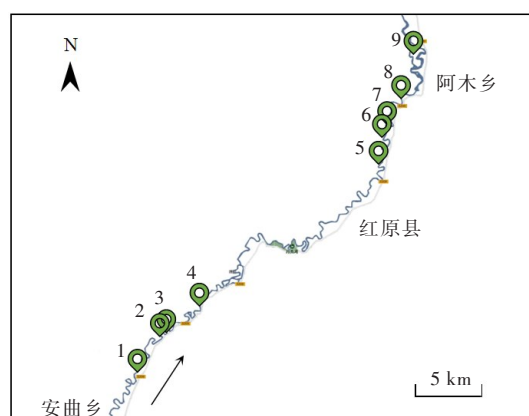


图 1 白河沿程研究河湾分布

在研究河段,上游安曲乡附近河宽为 30 m 左右,下游瓦切乡附近最宽处达 150 m,河湾凸岸发育有大量木本植被,多为奇花柳,高度不超过 6 m。选取距离河湾凸岸不同距离的奇花柳条带进行采样,对于枝干较细、年龄较小的样本,使用木锯采集圆盘样本;对于较粗的不易锯断的树木,使用树木生长锥获取树芯。树芯采集于树干根部,为便于操作生长锥,采样位置一般在地面以上 20 ~ 30 cm 范围,对于同一株树木,从不同方向取 1 ~ 2 个树芯作为样本,将采集到的树芯样本标号并放入纸筒中保存,以防止树芯发霉和折断。使用差分 GPS 对每颗采样树木进行定位,获取经纬度数据。在白河沿程 9 处河湾,共采集到奇花柳圆盘 58 个,树芯 80 个。对样本进行固定、打磨和交叉定年,剔除了部分样本的个别伪轮,获取了样本的树龄数据^[11-12]。样本的构成情况如图 2 所示,在白河 8 号河湾采集到的样本树龄最大达 41 年。

河湾测量的数据包括河宽、流速、滩高、中值粒径和比降。在凸岸顶端使用激光测距仪测量河宽,精度为 0.1 m,测量多次后取平均值。由于河流宽度较大,无法下水测量,因此流速的测量使用浮标法,在上游将浮标抛入河道中间,记录距离和时间,每个河湾至少测量 3 次,去除有明显漩涡影响的数据并取平均值。在河湾凹岸测量滩高并在土壤下方采集泥沙样本。河湾纵比降使用差分 GPS 测量,在河湾凸岸沿程定点,少数河湾没有差分 GPS 测量数据则使用邻近河湾的首末数据取平均值代替。其他可能影响河湾迁移速率的因素如河湾曲率半径、弯曲系数和河谷宽则直接在

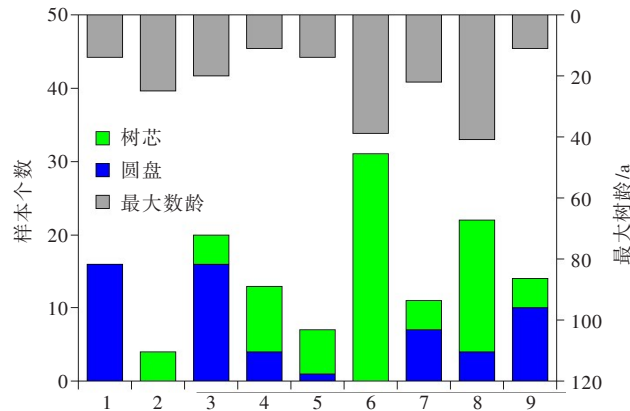


图2 白河沿程采集样本分布情况

Google Earth 软件提取，精度达 0.5 m。在河湾凸岸，对各个植被带进行形态测量，借助差分 GPS 仪器沿植被带边缘定点，记录经纬度和高程数据，测点间距离为 2 ~ 4 m，并通过 ArcGIS 软件描绘出植被带分布图。

随着河湾凹岸的崩岸蚀退和凸岸的淤进，木本植物和草本植物均向前推进生长，由于植被的原生演替，前端木本植物的生长滞后于凸岸的形成，但同一河湾内植被原生演替至木本植物开始生长的时长基本一致，树木的年轮记录了其开始生长的时间。木本植物在泥沙沉积形成边滩若干年后开始生长，凸岸前端的树木比后方的树木更小，有一定的树高和树龄差异，结合凸岸内侧和外侧的木本植物年龄差和沿湾顶方向上的距离，可以计算出凸岸植被推移的速率，即为河湾迁移速率。计算公式如下：

$$V = \frac{L}{a_2 - a_1} \quad (1)$$

式中：V 为河湾迁移速率；L 为两处关键样本之间沿凸岸弯顶轴线方向上的长度； a_2 、 a_1 分别为树龄较大样本和树龄较小样本的树龄。

河湾凸岸内不同大小的奇花柳呈带状分布，树木密集，需要选择树木带内树龄最大的树木进行测量，以保证数据的准确性。

3 滨河植被分布特征

由于洪水的影响，白河河湾凸岸顶端均发育有宽阔的卵砾石带，研究河湾的弯顶处卵砾石带宽度为 18 ~ 43 m。河湾凸岸在淤进的过程中，逐渐形成边滩并开始进行植被的原生演替，草本植物逐渐生长，内侧形成 2 ~ 3 个植被带，植被带环绕着整个凸岸，一般分为稀疏草本植被带、密集草本植被带和奇花柳丛，或者仅有草本植被带和奇花柳丛两个植被带。若干年后凸岸演替出现木本植物，木本植物主要物种为奇花柳，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^[13]。图 3(a) 为白河 3 号河湾的植被分布图，该河湾有 3 个植被带，第 1 个植被带为稀疏草本植被带，由狗牙根、赖草两种植被；第 2 个植被带为密集植被带，主要为金露梅、高原毛茛、葛缕子等植被；奇花柳丛为第 3 个植被带，呈规则的带状分布，其中外侧的奇花柳较小，内侧的较大，如图 3(b) 所示。奇花柳丛内侧为草原，植被十分密集，仅有少量低矮的灌木分布。

汛期稀疏草本植被带时常被淹没，水流挟带的泥沙沉积在凸岸，覆盖了表层植被，影响植被的生长，因此该条带植被较少。图 4 为白河 3 号河湾和 9 号河湾的凸岸剖面图，剖面图的起点为凸岸弯顶处，剖面高程整体呈上升趋势，但存在多处起伏。汛期洪水挟带的大量泥沙沉积于凸岸地势相对较高的位置，形成环形沙脊条带；非汛期水位较低，泥沙沉积量相对较少，形成高程相对较低的环形低洼条带，该过程在弯曲河流发育时不断往复进行，在河湾凸岸形成了高低相间的地势，同时也记录了弯曲河流水文过程的周期性变化^[14]。

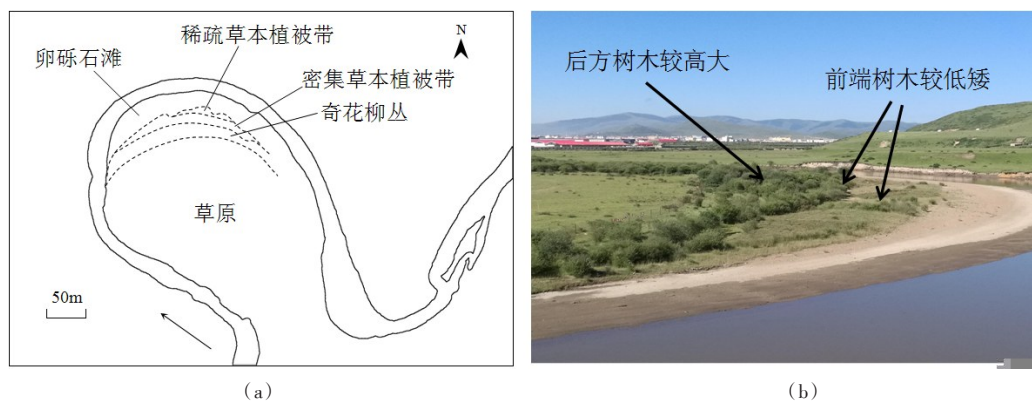


图3 白河3号河湾植被分布

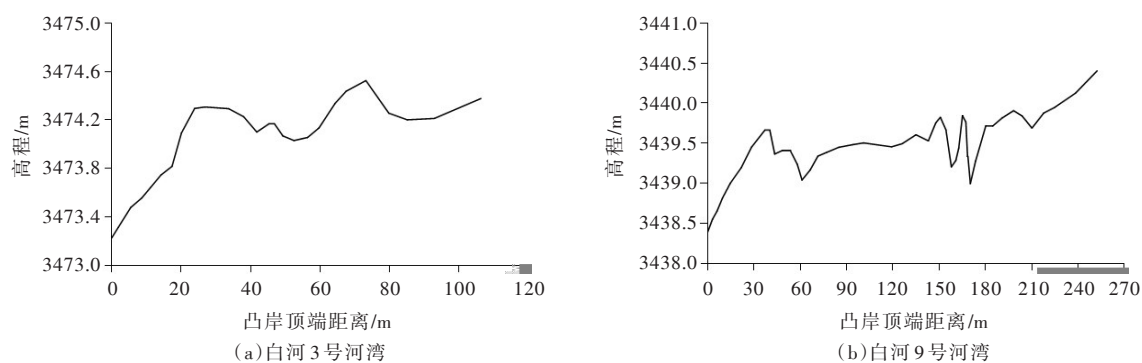


图4 典型河湾剖面

4 河湾迁移速率的估算

树芯和圆盘样本经过处理后可得到树龄，差分GPS测量获得了树木的位置信息，使用MATLAB软件将树木位置和树龄信息绘制成矩形边界的分布云图，并绘制树龄与凸岸距离的分布图，可以较为直观地看到树木分布特征。以白河1号河湾和9号河湾做具体分析。

4.1 白河1号河湾 白河1号河湾位于安曲乡与红原县城之间，是最靠上游的采样河湾，该河湾与邻近的几个河湾形成较规则的S形弯曲，曲率半径为204 m，凸岸前端是宽度为18.5 m的沙滩，表面覆盖有薄层淤泥，时常被水流淹没。凸岸卵砾石滩后方分为3个植被条带，第1个植被条带为稀疏草本植被带，宽度为22 m，被洪水带来的淤泥覆盖了表面，植被难以大量生长；第2带为密集草本植被带，宽度为14.5 m，从凸岸顶端沿轴线方向密度逐渐增大；第3带为奇花柳丛，从此处到河谷两侧均有大量奇花柳分布，奇花柳丛前端较为低矮，树龄较小。在1号河湾对16颗奇花柳进行了采样，将样本位置、距凸岸顶端距离和树龄绘制成图5所示的树龄分布云图和树龄与凸岸顶端距离分布图。

图5(a)为白河1号河湾树龄分布云图，采集的样本均位于奇花柳植被带前端，后方奇花柳比前方的更高，在50 m×50 m区域内，云图中的颜色对应于树龄。从云图中可知奇花柳没有按照年龄顺序依次排列，前端一处样本树龄最小为5年，后方样本年龄大多为8~9年，但中间有少数样本树龄超过十年，因此造成了云图中出现显著波动的情况。说明样本中有部分树木不是河湾植被演替出现灌木的最初时期生长的，仅通过树高来判断是否采样的方法准确性并不够，找到具有指示作用的样本是采样的关键。

测量沿河湾轴线方向上各样本与凸岸弯顶的距离，绘制成图5(b)所示的树龄-距凸岸顶端距离分布图，轴线方向上树木的推进生长速率与凸岸淤积速率一致，树木生长滞后于凸岸形成，两者之间的间隔为演替时长^[15]。在树木推进生长的过程中，相同树龄的样本中距凸岸顶端最近的样本最为关键，即为植被演替至该植被带时最早生长的树，因此图5(b)中树1-1和树1-5为关键样本，两处样本

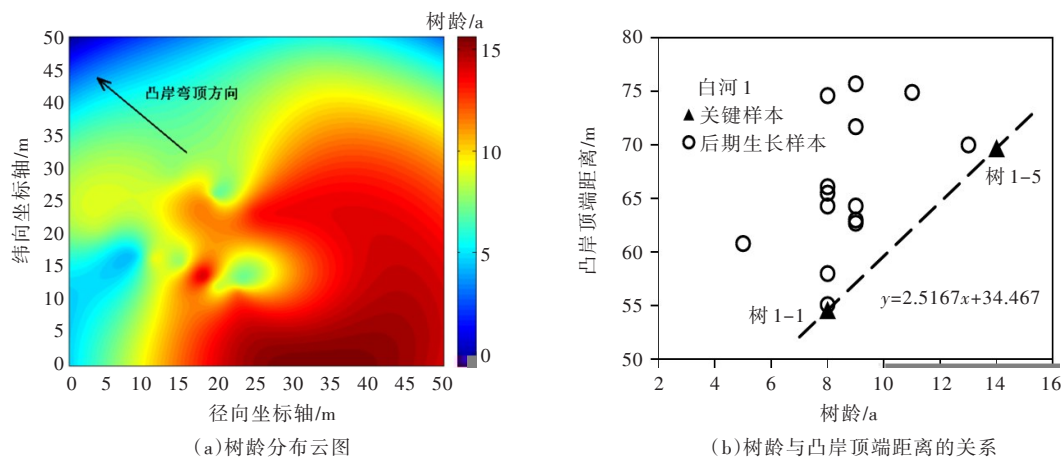


图5 白河1号河湾树龄分布图

之间的连线为植被演替中树木推进生长的轨迹，在图中所有样本的下方形成一条包络线，该线段的斜率为树木推进生长的速率，即河湾迁移速率，得出白河1号河湾迁移速率为2.52 m/a。线段上方的树木大多是在演替出现木本植被之后生长的，因此采集的树木样本越多，估算得到的河湾迁移速率越准确，但往往工作量比较大。

4.2 白河9号河湾 9号河湾位于阿木乡下游，是最靠下游的采样河湾。从遥感影像判断，该河湾的迁移速率很大，相邻几个河湾呈S形。凸岸顶端是宽度为43 m的卵砾石边滩；内侧第1个植被带为稀疏草本植被带，宽度为32 m；第2带为密集植被带，宽度为20 m，主要为草本植物，有零星的奇花柳分布；第3带为奇花柳丛，呈带状分布，条带之间的大小差别不明显。凹岸滩高2.3 m，表层土壤厚30 cm，下层为卵砾石，有少量崩塌块。

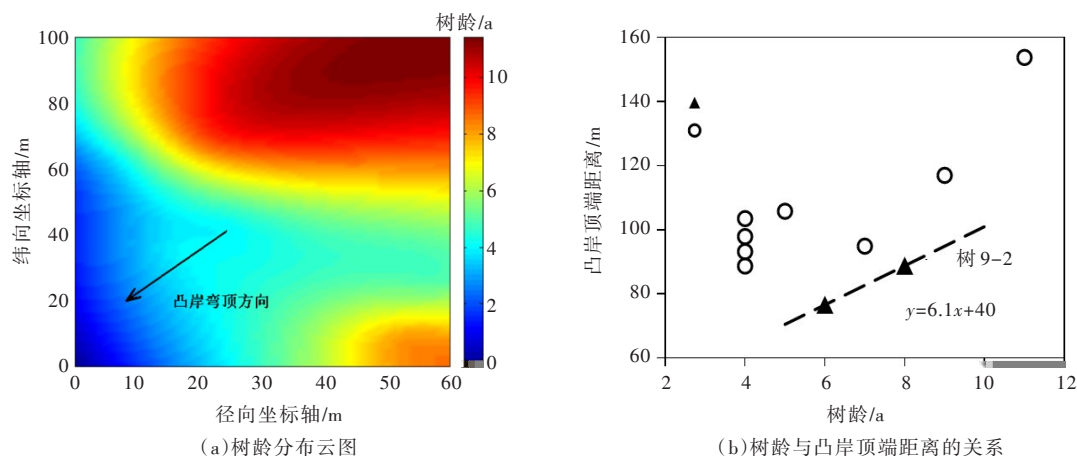


图6 白河9号河湾树龄分布图

白河9号河湾的样本分布在60 m×100 m范围内，树龄为4~11年，图6(a)分布云图中有规则树龄变化梯度，凸岸植被呈带状分布，基本平行于河道，内侧奇花柳的树龄比外侧的大。图6(b)中关键样本为树9-1和树9-2，由连线的斜率得出河湾迁移速率为6.1 m/a。

4.3 其他河湾 图7为其他几处采样河湾的树龄-凸岸顶端距离分布图，其中白河2号和5号河湾由于凸岸奇花柳树木稀少，因此仅采集了3~4个样本。

河湾凸岸奇花柳树龄的分布显示出植被的推进生长并不是完全规则的，在采样过程中，虽然都是选取奇花柳丛前端最高大的树木进行采样，但仍有部分树龄较小树木混杂，因此树木样本的甄别尤为关键。

4.4 河湾迁移速率的验证 根据奇花柳样本的树龄分布情况，分析得出各研究河湾的迁移速率如表1所示。在中科院“地理空间数据云”网站下载遥感TM影像，在研究区域内，可获取到30 m精度的

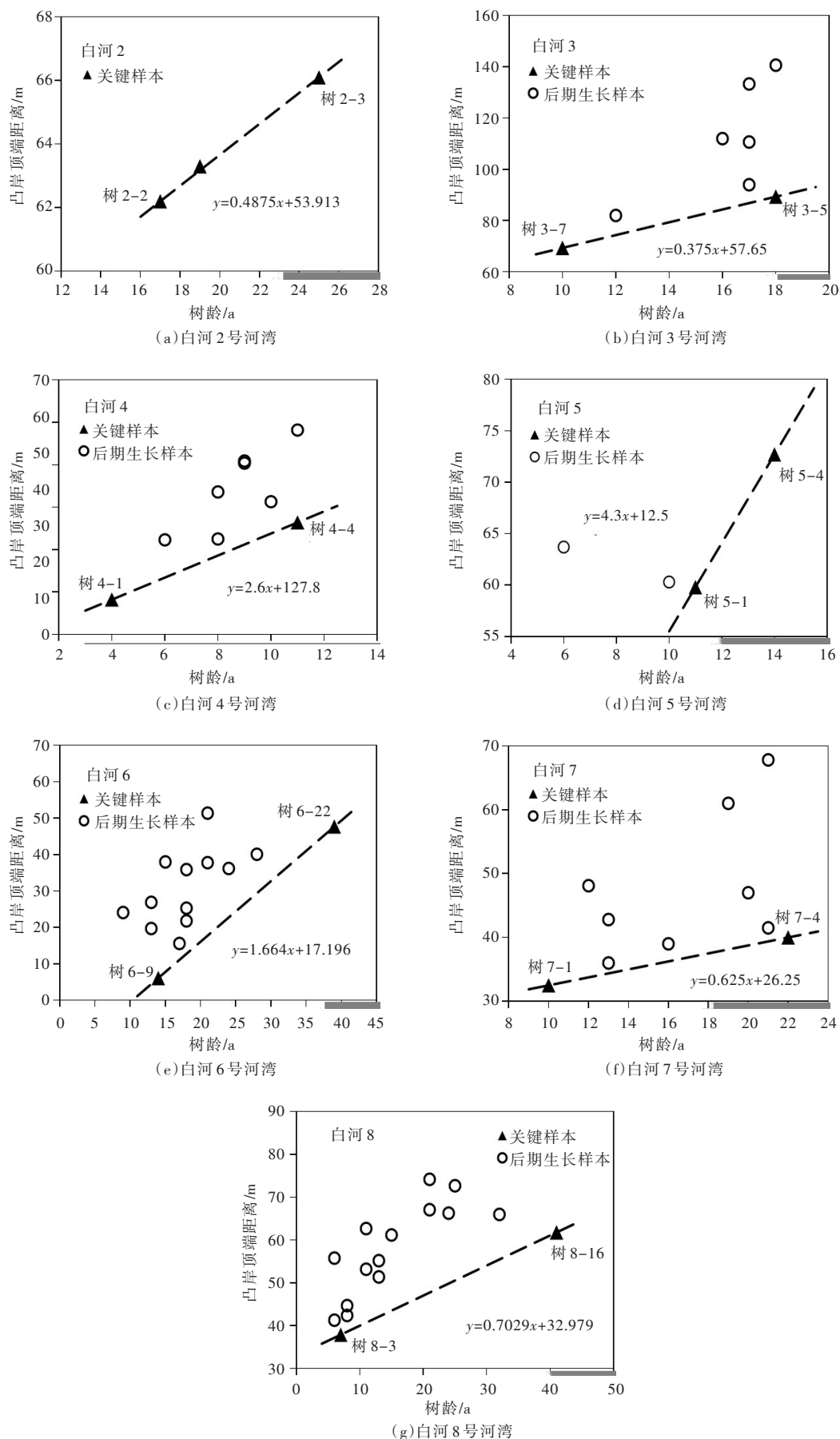


图7 其他河湾树龄与凸岸顶端距离的关系

Landsat 4—Landsat 8 影像, 日期最早且清晰可用的影像为 1989 年 1 月 2 日, 截止考察前最新的影像日期为 2016 年 12 月 22 日, 中间跨度约为 28 年。通过 ENVI 软件拉伸校正和对比, 可粗略判断出 28 年内河湾的位置变化, 但遥感影像的分辨率有限, 精度较低, 无法获得准确的迁移速率数据。为了验证树龄分析得出的迁移速率数据的可靠性, 将遥感影像判断出的迁移速率分为大、中、小 3 个梯度, 分别对应于数值 3、2、1, “3”表示迁移速率大于 5 m/a, “2”表示迁移速率在 2 ~ 5 m/a 之间, “1”表示迁移速率小于 2 m/a。

表 1 各河湾迁移速率

	白河 1	白河 2	白河 3	白河 4	白河 5	白河 6	白河 7	白河 8	白河 9
树龄方法/(m/a)	2.52	0.49	0.38	2.60	4.30	1.66	0.63	0.70	6.10
影像判断(等级)	1	1	1	2	2	1	1	1	3

树龄分析得到白河 1 号河湾的速率比影像判断的稍大, 其他河湾的迁移速率基本相符。白河 9 号河湾的迁移速率最快, 达 6.1 m/a, 从影像中可以分辨出该河湾迁移最快, 凸岸的卵砾石边滩最长。因此本研究中将树龄分析的结果作为河湾迁移的速率, 采样河湾的迁移速率为 0.38 ~ 6.10 m/a。

5 河湾迁移速率的主要影响因素

白河凹岸滩高超过 1.5 m, 滩槽高差超过 2 m, 而表层根土复合体厚度仅有 0.3 ~ 0.6 m, 且河岸崩塌后形成的崩塌块容易被水流破坏和冲走, 因此白河凹岸只有零星分布的崩塌块, 表层植被的影响较小, 在分析过程中不作为影响因素。白河研究河湾测量数据如表 2 所示。

表 2 白河河湾测量数据

河湾	迁移速率/(m/a)	河宽/m	曲率半径/m	流速/(m/s)	滩高/m	中值粒径/mm	弯曲系数	河谷宽/m	河宽/河谷宽	比降/‰
白河 1	2.52	23	204	0.70	1.8	0.66	1.51	1400	0.026	0.65
白河 2	0.49	44	181	0.65	1.4	0.35	3.59	690	0.064	0.48
白河 3	0.38	46	181	0.63	1.8	2.99	2.53	910	0.051	0.44
白河 4	2.60	32	116	0.91	1.8	8.26	1.34	1660	0.019	0.39
白河 5	4.30	43	207	0.83	1.7	0.11	2.54	1690	0.069	0.45
白河 6	1.66	40	229	0.81	2.0	1.55	1.60	940	0.043	0.36
白河 7	0.63	54	162	0.78	1.6	1.21	2.77	1260	0.043	0.44
白河 8	0.70	59	424	0.45	1.9	0.81	1.66	680	0.087	0.46
白河 9	6.10	51	118	1.11	2.3	5.68	2.18	2360	0.022	0.70

在河湾迁移速率的影响因素分析中考虑的潜在影响因素有 9 个, 分别为河宽(X_1)、曲率半径(X_2)、流速(X_3)、滩高(X_4)、中值粒径(X_5)、弯曲系数(X_6)、河谷宽(X_7)、河宽/河谷宽(X_8)、比降(X_9), 但采样的河湾数量太少, 无法直接进行回归分析, 因此先检测各自变量与因变量迁移速率之间的相关性和显著性, 挑选出有效的因素。分析得出水流流速、凹岸滩高、河谷宽和比降与迁移速率的相关系数分别为 0.806、0.625、0.619、0.710, 显著性均小于 0.05, 因此排除其他变量, 用这 4 个变量进行回归分析。

采用多元线性回归模型, 使用 SPSS 软件中回归分析模块进行分析, 由于因变量之间可能存在相关性, 需要消除共线性对回归模型的影响, 采用逐步回归方法建立模型, 剔除影响小的影响因素。根据回归参数表, 得出多元线性回归方程为:

$$Y = -6.973 + 6.637X_3 + 8.41X_9 \quad (2)$$

式中: Y 为白河河湾迁移速率; X_3 为水流流速; X_9 为比降, 两者均与迁移速率成正比, 是白河河湾迁移速率的主要影响因素, 其他的因素没有显示有显著相关关系。

虽然河谷宽度被排除在模型之外,但其对河道的迁移具有明显的限制作用,当河道迁移至河谷边缘或山脚下时,由于山体基岩的影响其凹岸掏刷的阻力增大,迁移速率会明显降低,并逐渐向其他方向发展。由于测量仪器和采样数量的限制,影响河湾迁移速率的潜在因素可能没有充分考虑,其他因素的影响作用还需要进一步深入研究。

6 结论

对白河河湾滨河植被与河湾迁移的研究得到以下结论:(1)白河河湾凸岸植被呈环形条带状分布,一般分为2~3个植被带,凸岸顶端为卵砾石滩,草本植被的密度受水流的影响显著,凸岸边滩剖面呈起伏状。凸岸树木存在大小梯度变化,前端的树木比较矮小,后方较高大。(2)根据植被演替的方向和凸岸树木的分布情况,提出了通过树木年轮和距离计算河湾迁移速率的方法。选取凸岸轴线方向某一位置附近树龄最大的树木为关键样本,关键样本之间沿轴线方向上的距离差除以树龄差即为河湾迁移速率。根据关键样本得出的河湾迁移速率为0.38~6.10 m/a,与遥感影像分析得到的迁移速率等级基本一致。白河河湾迁移速率与潜在影响因素的多元线性回归分析表明,河湾迁移速率的主要影响因素为水流流速和河道比降,且均呈正相关关系。

参 考 文 献:

- [1] HICKIN E J, NANSON G C . Lateral migration of river bends[J] . Journal of Hydraulic Engineering, 1984, 110 (11): 1557-1567 .
- [2] 许栋. 蜿蜒河流演变动力过程的研究[D] . 天津: 天津大学, 2008 .
- [3] COLLINSON J D, LEWIN J . Meander changes in relation to bend morphology and secondary flows [M] . Blackwell Publishing Ltd . , 1983 .
- [4] 许栋, 白玉川, 谭艳. 蜿蜒河流演变动力过程及其研究进展[J] . 泥沙研究, 2011(4): 73-80 .
- [5] 姚冠荣, 高全洲. 河流碳输移与陆地侵蚀-沉积过程关系的研究进展[J] . 水科学进展, 2007, 18(1): 133 - 139 .
- [6] 李志威, 王兆印, 田世民, 等. 黄河源水沙变化及与气温变化的关系[J] . 泥沙研究, 2014(3): 28-35 .
- [7] 赵资乐. 黄河上游黑河、白河流域水沙规律[J] . 甘肃水利水电技术, 2005, 41(4): 336-338 .
- [8] PRABHATA, SWAMEE, BARHAM, et al . Changes in channel pattern of river Ganga between Mustafabad and Rajmahal [J] . International Sediment Research, 2003, 18(3): 219-231 .
- [9] HOWARD A D, HEMBERGER A T . Multivariate characterization of meandering[J] . Geomorphology, 1991, 4 (3/4): 161-186 .
- [10] CHANG T P, TOEBES G H . A statistical comparison of meander planforms in the Wabash Basin[J] . Water Resources Research, 1970, 6(2): 557-578 .
- [11] 吴祥定. 树木年轮分析在环境变化研究中的应用[J] . 第四纪研究, 1990, 10(2): 188-196 .
- [12] 彭剑锋, 勾晓华, 陈发虎. 阿尼玛卿山地不同海拔青海云杉树轮生长特性及其对气候的响应[J] . 生态学报, 2007, 27(8): 3268-3276 .
- [13] 冯秋红, 程瑞梅, 史作民, 等. 海拔梯度对巴郎山奇花柳叶片 $\delta^{13}C$ 的影响[J] . 应用生态学报, 2011, 22 (11): 2841-2848 .
- [14] HICKIN E J . The development of meanders in natural river-channels[J] . American Journal of Science, 1974, 274(4): 414-442 .
- [15] SCHOOK D M, RATHBURN S L, FRIEDMAN J M, et al . A 184-year record of river meander migration from tree rings, aerial imagery, and cross sections [J] . Geomorphology, 2017: 227-239 .

(下转第509页)

Review and perspective on water-land-forage-livestock balance in pastoral areas of China

LI Heping^{1, 2}, BAO Xiaoqing^{1, 2}, LU Haiyuan^{1, 2}, WANG Jun^{1, 2}

(1. Institute of Water Resources for Pastoral Area,

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Hohhot 010020, China;

2. Institute of Water Resources for Pastoral Area, MWR, Hohhot 010020, China)

Abstract: In recent years, the grassland ecological degradation in pastoral areas has seriously threatened the national ecological security of China. This paper summarizes the evolution process of grassland ecological protection, and points out that it is essential to study on balance among water, land, forage and livestock. Based on the research process and progress of water-land-forage-livestock balance in pastoral areas, this paper summarizes and analyzes the achievements and shortcomings of forage-livestock balance research, water-forage-livestock balance research and water-land-forage-livestock balance research. Finally, the technical framework of the balance among water, land, forage and livestock are put forward, and expectations on the future are proposed. The paper can provide references for promoting sustainable use of water and land resources and maintain sustainable development of society and economy in pastoral areas.

Keywords: water-land-forage-livestock balance; technical framework; balance regulation; pastoral areas

(责任编辑: 祁 伟)

(上接第 502 页)

Analysis on the Baihe River bend migration rate and its influencing factors

LIU Cheng^{1, 2}, LIU An^{1, 3}, XU Mengzhen⁴

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, 100048;

2. International Research and Training Center on Erosion and Sedimentation, Beijing, 100048;

3. POWERCHINA Zhongnan Engineering Co. Ltd, Changsha, 410014;

4. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Abstract: The Baihe River is a typical meandering river in the Yellow River source region. Field investigations and samplings were carried out in 9 river bends of the Baihe River in 2016 and 2017. The analysis of them shows that the vegetation distributes in a shape of zonal arc along the convex bank of the Baihe River, with 2-3 vegetation communities in general, and the sizes of trees present evident gradient changes from low to high in the direction from front to back of the bend. The tree distribution and tree ages in the convex bank are obtained through tree ring analysis on the sampled tree cores and disks, and a method for estimating bend migration rate based on tree ages and tree distance is proposed. The key samples are identified by drawing the tree-age distribution cloud map, and the bend migration rates of the Baihe River are estimated to be 0.28-6.1 m/a, which is basically consistent with the migration rate estimated by remote-sensing image. A multiple linear regression model is established based on the regression analysis of bend migration rate with its potential influencing factors. It is concluded that the flow velocity and river slope are the main influencing factors for the bend migration rate, and the migration rate is proportional to flow velocity and river slope.

Keywords: Baihe River; vegetation succession; migration rate; tree rings; multiple linear regression

(责任编辑: 李福田)