

黄河源区弯曲河流滨河植被与河湾迁移的关系

刘 桉¹, 刘 成^{1,2}, 冀自青³, 徐梦珍³, 李志威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. 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; 4. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为了解滨河植被对河湾横向迁移的作用, 以及河湾迁移对滨河植被群落分布的影响, 对黄河源区兰木错曲弯曲河段崩塌块、凹岸植被生物量和凸岸植被多样性进行现场调查统计, 给出了河湾迁移速率的估算方法。结果表明: 其迁移速率与凹岸植被生物量呈指数关系; 河湾凸岸边滩的泥沙沉积在不同重现期洪水作用下, 形成不同的植被条带, 对应于 5 种典型的植被群落; 河湾的横向迁移对滨河植被生态系统具有调节作用, 形成一种牧草先增多后减少再增多的草场更新机制, 原生演替不断循环进行, 以维持草场的长期可持续放牧功能。

关键词: 弯曲河流; 河湾迁移; 崩塌块; 植被群落; 植被演替; 黄河源区

中图分类号: TV147 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2018)02-0057-05

Relationship between riparian vegetation and migration of a meandering river in the Yellow River Source Region// LIU An¹, LIU Cheng^{1,2}, JI Ziqing³, XU Mengzhen³, LI Zhiwei⁴ (1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 2. International Research and Training Center on Erosion and Sedimentation, Beijing 100048, China; 3. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To study the role of riparian vegetation in the lateral migration of a riverbank and the effect of migration on the distribution of vegetation community, in-situ investigation and analysis of vegetation biomass in the slump blocks and vegetation diversity of the convex bank were carried out along the meanders of the Lanmucuo River in the source region of the Yellow River. A method for estimation of the migration rate of the riverbank was proposed. The results indicate that the migration rate is exponentially correlated with the vegetation biomass. Siltation of the convex bank under different recurrence floods formed five different vegetation bands corresponding to five typical vegetation communities. The lateral migration of the river has a moderating effect on the riparian vegetation ecosystem. A pasture regeneration mechanism was formed with a characteristic that the amount of pasture increased first and then decreased. The continuous primary vegetation succession played an important role in maintaining the long-term sustainable grazing function.

Key words: meandering river; meander migration; slump block; vegetation community; vegetation succession; Yellow River Source Region

中小尺度弯曲河流的滨河植被对河湾横向迁移及河岸稳定性具有重要影响。河湾平面形态的变化由近岸水流引起的河岸侵蚀驱动。水流对河湾凹岸的顶冲作用和弯道环流引起的横向输沙, 使河湾凹岸崩塌, 崩塌带来的部分泥沙被水流带到下游凸岸^[1]。由于植被根系对河岸土体的加固作用, 滨河植被的存在一定程度降低了河岸失稳崩塌的速率, 限制了河道的横向展宽^[2]。同时, 滨河植被能够增大河岸的糙率, 降低河道的横向迁移速率, 在弯曲河流凹岸土体表面的植被覆盖层与水流交界面附近形成强烈紊动, 阻碍水流的通畅行进, 减弱水流冲刷^[3,4]。草本植物根系部分对减少土体冲刷量起着决定性作用^[5]。在弯曲河流主要滨河植被面密度大的位置, 河岸迁移速率明显降低^[6]。Micheli等^[7,8]的野外调查表明, 同一弯曲河流, 滨河干旱草场地区河湾迁移速率为滨河湿润草场地区的 6 倍。由此可见, 滨河植被与河湾横向迁移存在密切联系。不同类型植被对河湾迁移的影响有所差异。黄河源区弯曲河流发育密实的高寒草甸型滨河植被, 物种丰富, 覆盖度高。滨河植被可有效降低洪水期

基金项目: 国家国际科技合作专项(2014DFG72010); 国家自然科学基金(91547204); 黄河水利委员会黄河水利科学研究院研究项目(HKY-JBYW-2016-03)

作者简介: 刘桉(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事河流动力学研究。E-mail: liuan64@foxmail.com

间凹岸蚀退速率和水流输沙量,洪水期过后大量泥沙沉积于凸岸,构成新的河岸部分。高寒草甸型弯曲河流的滨河植被主要为莎草科和禾本科植被,具有密集根系网络,能够固定土壤和抵抗水流冲刷^[9,11]。根系范围以下的砂卵石层易受近岸水流淘刷,下部砂卵石层被大量淘刷后,上部植被层悬空,在自重作用下达到临界状况并崩塌,崩塌块在水中将受到浸泡和冲刷,直到植被根系腐烂和分解,失去根土咬合作用后才被水流冲走。河岸土体失稳崩塌作用持续进行,使河湾凹岸不断迁移延伸,并与凸岸泥沙沉积速率基本保持一致,以维持河湾横向迁移的整体性。以往的研究集中于河湾塌岸机理的分析和数值模拟,本文主要侧重于对滨河植被特征与河湾迁移关系的研究,通过实地采样和统计分析,探讨草甸型弯曲河流滨河植被对河湾迁移的影响及其在河床演变过程中的分布特性。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

以黄河源区河南蒙古族自治县的兰木错曲为研究区域,于2012—2016年6—7月对该河进行考察和采样。兰木错曲位于青藏高原东缘地形开阔的低丘宽谷区,是黄河上游右岸的一级支流,具有高寒半湿润的气候特征,属于高寒森林草甸带,河谷区域广泛分布着高山嵩草和华扁穗草草甸。兰木错曲上游和下游为弯曲河段,下游为限制基岩河段。中下游河段基本与泽曲平行,从玛曲县下游多松乡附近汇入黄河。该区海拔为3400~4200 m,年均气温低于-4℃,多年平均降水量为329~505 mm^[10-12]。兰木错曲的植被类型以山地草甸、高寒草甸和高山草原化草甸为主^[9],植被覆盖度高,是典型的草甸型弯曲河流。采样位置位于兰木错曲中游(图1),该河段全长1.5 km,弯曲系数为3.4,为卵砾石河床,实测河床

中值粒径为5~40 mm。研究区域以中生、湿中生植物为优势种,草地植物以莎草科、禾本科、毛茛科、蔷薇科、菊科、豆科等植物为主,并有少量灌木分布。

1.2 采样与分析方法

兰木错曲河湾的演变主要受水流、泥沙、植被以及其他自然条件影响,人为干扰较少。进行了河湾凹岸崩塌块、凹岸植被生物量统计和凸岸植被多样性统计。在兰木错曲研究河段选取7处河湾,如图1所示,从上游至下游依次编号为1~7。所选择河段河宽较窄且变化不大,仅3.5~6.0 m,水深小于1.5 m,且河段内不同河湾的水流条件、弯曲系数、曲率半径和滩槽高差总体变化不大。由于河湾在横向演变过程中来回迁移,使各河湾凹岸植被有所差异,处于不同的植被演替阶段。

草甸型弯曲河流边岸在水流冲刷作用下发生破坏,形成崩塌块。河湾迁移速率的计算通过崩塌块的总面积除以崩塌时间得到。崩塌块表面基本呈矩形,其面积由实测获得。统计的崩塌大多是1 a内发生的,崩塌块河岸植被与未崩塌的基本一致,崩塌块侧面开裂位置基本没有植被生长,在部分倾斜崩塌的崩塌块表面可见植物弯曲后竖直向上生长。崩塌块内植物根系缠绕土体产生的咬合作用使水流难以将其直接破坏,上一年产生的崩塌块在秋冬季的冻融循环和植物自身枯萎腐烂等作用下发生分解,被次年水流冲刷带走,即崩塌块对河岸的保护作用约为1 a^[10,13]。小部分崩塌块由于破碎严重、植被较少且有枯萎根系残留,崩塌时间为2 a。河湾平均迁移速率 v 定义为

$$v = \sum_{i=1}^N \frac{l_i d_i}{a_i L} \tag{1}$$

式中: N 为崩塌块数量; l_i 、 d_i 分别为第 i 崩塌块的平均长度和平均宽度; a_i 为第 i 崩塌块的崩塌年限; L 为河湾崩塌带的长度。

草甸型植被发达的地下根系是影响河流边岸抗冲刷性能的主要因素,可作为边岸稳定性的指示变量。凹岸植被生物量的采样方法:在研究河段的7处河湾挖取样方,选取的样方位于河湾边缘2 m内,大小为30 cm×30 cm,深度为30 cm,以保证获得的生物量数据具有可比性。首先调查样方植被组成及物种多样性等,其次将样方洗净后进行晾晒风干,分离出植被根系,并按照植被类型分为草本植被、灌木植被和零碎根系,分别称重,计算植被生物量。由于野外试验条件有限,且植被与土壤分离后不易保存,因此未能将植被完全烘干。采样过程中,当地气象条件变化较小,采样时间均为11:00—14:00,且植被根系与土壤的分离方法相同,可用于比较该河

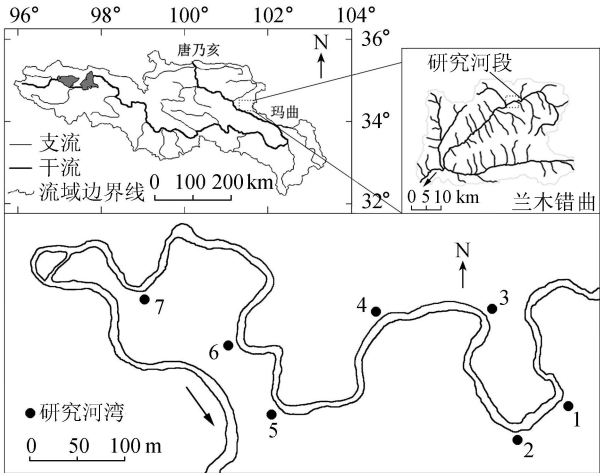


图1 兰木错曲位置及研究河段

段不同凹岸植被生物量对河湾迁移速率的影响。在河湾凹岸顶部附近测得滩槽高差,通过崩塌断面出露的根系测得平均根系长度,研究河段 7 个河湾采样点的统计数据见表 1。

表 1 兰木错曲的河湾基本特征

河湾编号	迁移带长度/m	迁移速率/(m·a ⁻¹)	植被覆盖度/%	滩槽高差/cm	平均根系长度/cm
1	10	0.14	96	150	50
2	18	0.20	93	180	50
3	16	0.02	68	120	60
4	69	0.06	79	122	50
5	45	0.20	85	162	60
6	40	0.05	95	118	55
7	15	0.17	72	105	60

植被多样性统计方法:从凸岸边滩顶端向外侧原生草原方向设立基线,在基线两侧各个植被带内随机抽取 2~4 个样点,用相同方法对各个采样点进行植被调查。植被调查的内容包括植被覆盖度、植被种类、植株数目,选取物种丰度、Shannon-Wiener 多样性指数和 Shannon 均匀度指数作为分析指标^[13,15]。样点的面积为 30 cm×30 cm 或 100 cm×100 cm,由于灌木植被的单株占地面积较大,因此在含有灌木植被的区域采用 100 cm×100 cm 的网格进行统计。对各个植被带做形态测量,借助差分 GPS 仪器沿植被带边缘定点,记录经纬度数据,测点间距离为 2~4 m,并通过 ArcGIS 软件描绘出植被带分布图。

2 植被分布格局与特征

河湾凸岸在洪水过后,泥沙沉积产生淤进,植被在凸岸的原生演替开始。对凸岸边滩植被类型和数目的统计发现,河岸植被呈带状分布,不同的植被带对应于不同洪水位。凸岸植被的演替主要形成了 5 种植物群落类型,按照群落演替的阶段排列分别为:近岸水草群落、华扁穗草群落、华扁穗草-高原毛茛群落、华扁穗草-高山嵩草群落、金露梅-鹅绒委陵菜群落。群落名称对应于各群落中的优势种,各群落植被组成见表 2。

表 2 兰木错曲的河湾植被群落组成

植被条带	植物群落	主要物种组成
第 1 条	近岸水草群落	水葫芦苗、狗牙根、华扁穗草
第 2 条	华扁穗草群落	华扁穗草
第 3 条	华扁穗草-高原毛茛群落	华扁穗草、高原毛茛、矮火绒草、鹅绒委陵菜、蓝白龙胆、三脉梅花草、风毛菊
第 4 条	华扁穗草-高山嵩草群落	华扁穗草、高山嵩草、甘肃棘豆、金露梅、三脉梅花草、矮火绒草、乳白香青、风毛菊、醉马草、高原毛茛、高山豆、独一味
第 5 条	金露梅-鹅绒委陵菜群落	金露梅、鹅绒委陵菜、甘肃棘豆、高原毛茛、甘肃马先蒿、蓝白龙胆、多茎委陵菜、高山豆、华扁穗草、风毛菊

凸岸相邻植被条带之间高程有一定跃升,条带边缘的不同海拔高度对应于不同重现期的洪水,对于典型的凸岸边滩,不同植被群落呈月牙形分布。代表性河湾 3 和河湾 7 的群落分布表明,植被群落宽度对应于不同的演替时长。两处河湾中,华扁穗草-高山嵩草群落面积最大,表明其向金露梅-鹅绒委陵菜群落的演替需要漫长的时间(图 2)。由于弯曲河流河床演变过程中裁弯的大量发生,植被演替后期的群落形状较不规则。

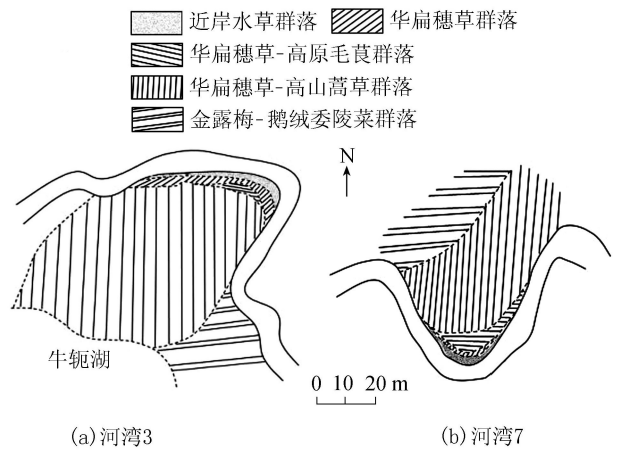


图 2 滨河植被群落分布

凸岸边滩顶端附近区域,由于水面的浮动,时常被淹没,边滩表面有卵砾石覆盖,植被较少,仅稀疏分布,发育有单一的耐水植被,如狗牙根或水葫芦苗。凸岸边滩顶端起第 2 条植被带为华扁穗草群落,发育有低矮的单一植物,且离河岸越远密度越大,植株相对越高,实测得该区域华扁穗草密度超过 9000 株/m²。华扁穗草-高原毛茛群落有多种多年生植物发育,植被总体比较低矮。华扁穗草-高山嵩草群落边缘位置有明显跃升,更高重现期的洪水发生时才会淹没,物种数达到最大值,发育有大量多年生植被,且有少量灌木,其中华扁穗草和高山嵩草的密度均在 6000 株/m² 以上,形成稳定的植被群落。金露梅-鹅绒委陵菜群落一般距河岸较远,长时间内未受洪水干扰,有大量金露梅发育,植被覆盖度接近 100%,金露梅面积约占植被总面积的 50%,牧草类植物较少,说明在此条带中,由于植被演替的推进,草场功能逐渐退化。灌木植被的增加意味着适宜放牧的牧草类植被减少,草场开始向灌丛结构方向演进,该区域将来可能发展为灌丛地。

沿河湾顶点向外侧植被方向延伸,植被群落逐渐成熟,群落间交界处地形有明显变化,图 3 为河湾 2 凸岸边滩剖面。河湾 2 形状较为规则,受到历史裁弯的影响较小,因此仅列举河湾 2 凸岸边滩植被多样性统计数据。近岸水草群落、华扁穗草群落和

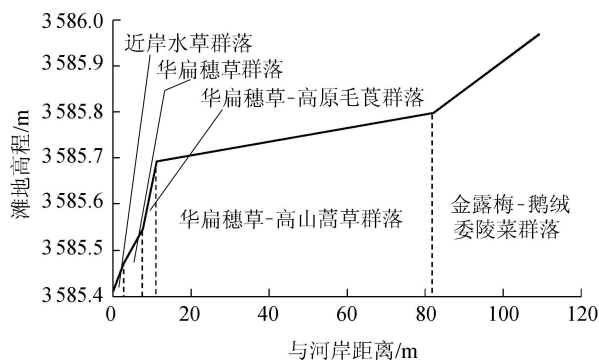


图3 河湾2 凸岸边滩剖面

华扁穗草-高原毛茛群落带相对较窄。河湾2 凸岸迁移速率为0.2 m/a,由迁移速率和各植被条带宽度可估算出原生演替至某一类型群落所需的时间。凸岸边滩原生演替至密集的单一种华扁穗草群落需要15 a左右;演替至以华扁穗草为主、其他植被种类较少的华扁穗草-高原毛茛群落需要40 a左右;形成植物丰度最大、植物充分生长、草皮密集的华扁穗草-高山蒿草群落需要60 a左右。图4 为河湾2 各条带植被群落的植被多样性变化,Shannon-Wiener 多样性指数(H)和 Shannon 均匀度指数(E)总体呈增长趋势,由于华扁穗草群落仅有1种植物,所以 H 和 E 均为零。

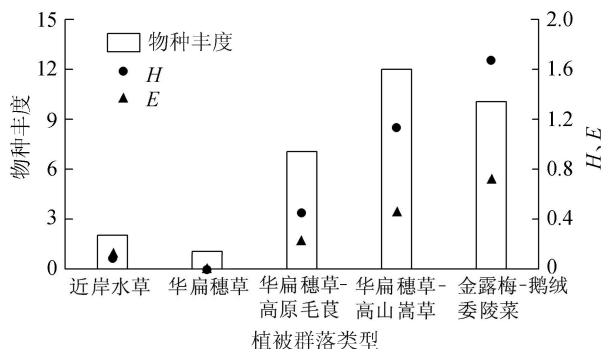


图4 河湾2 凸岸植被群落多样性

3 滨河植被与河湾迁移速率的关系

兰木错曲河岸土壤分为上下两层,上层为50~70 cm的土壤层,主要为根土复合体;下层为粗砂和卵砾石,黏性较小。河岸下层易受水流破坏,崩塌块一方面对河岸具有一定的保护作用,阻止了水流对河岸下层的直接掏刷,使河岸糙率增大^[16];另一方面,兰木错曲河流尺度较小,大规模崩塌块的产生使河流主流偏离凹岸,减小了河岸的近壁切应力,因此崩塌块不需要完全覆盖河岸就能减小水流对河岸下层的侵蚀^[17-18]。

河湾凹岸在坍岸蚀退的同时,凸岸发生相应的淤进,且两者的迁移速率基本一致,弯曲河流在迁移过程中能保持河宽基本稳定,河岸的黏性土壤和滨

河植被为凸岸的泥沙沉积提供了条件。对于缺乏植被的无黏性土壤河岸而言,凸岸不易形成稳定持续的泥沙沉积,当较大洪水发生时,凸岸易产生切滩,河道可能会朝分叉或辫状河道方向演变^[3]。

在河湾凸岸,洪水过后水位下降使边滩出露,边滩泥沙的沉积为植被生长提供了条件,植被在加固边滩的同时也拦截泥沙,使凸岸边滩高度不断增加,形成一种循环,使得边滩在洪水作用下不易受到切滩而破坏,从而使凸岸持续淤进。河湾的迁移同时受到凹岸蚀退和凸岸淤进的影响,保持一个总体稳定的河宽。Pizzuto^[19]通过长期观测,认为大洪水对河湾凹岸的侵蚀作用大于凸岸的沉积作用;小洪水使沉积作用大于侵蚀作用,并略使河道束窄。不同重现期洪水规律性地循环,是导致河宽稳定的因素之一。

由于研究河流的尺度较小,无法从遥感影像中获取迁移速率,本研究通过塌块统计,采用式(1)估算了迁移速率(表1)。在高寒草甸型植被的控制下,弯曲河流的迁移速率极慢,实测得到的速率为0.02~0.2 m/a,略低于朱海丽等^[10]的估计。河湾迁移速率与凹岸植被生物量呈指数关系(图5),即凹岸植被生物量越大,河湾迁移速率越小,与国内外学者关于植被对河湾迁移速率影响的研究结果基本一致^[6-7,20]。由于河流长期演变形成的自然裁弯使河谷不同区域处于不同的植被演替阶段,植物群落组成有所差异,因此生物量是较为恰当的替代指标,但受到采样数量和仪器的限制,还需要进一步深入研究。

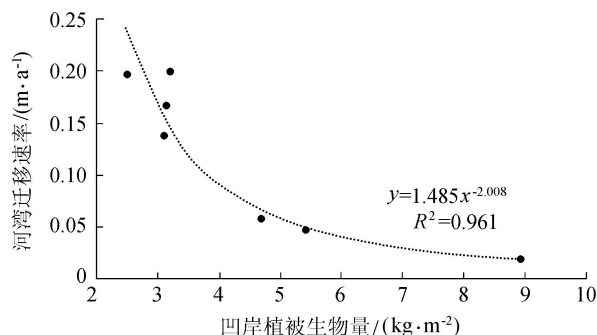


图5 河湾迁移速率与凹岸植被生物量的关系

滩槽高差和植被覆盖度与河湾迁移速率无显著趋势性关系,但在滩槽高差超过1.5 m的几个河湾,迁移速率明显较大,平均根系长度均为50~60 cm。对于滩槽高差较大的河湾,表面植被可能由于河水补给不足而出现水分胁迫的现象,河湾1 和河湾2 凹岸有大量干枯的金露梅,草本植被的种类较单一。此外,草甸型弯曲河流的滨河植被发育茂盛,植被覆盖度与采样点的选择密切相关,区分度有限,这是造成植被覆盖度对河湾迁移速率的指示效果不明显的主要原因。

兰木错曲河谷地形开阔,在高寒气候条件下,耐寒旱的草原植被可以存活和生长,但植被类型较简单。植株矮小的中旱生华扁穗草和高山嵩草在整个流域占优势,高度为 3 ~ 10 cm。区域内草甸根系密集,草皮坚实,富有弹性,能耐牲畜践踏,是良好的天然草场^[21],且此类牧草柔软,营养价值高,蛋白质含量高,具有发展畜牧业的有利条件。草场虽然经过长期放牧,但总体依然保持较旺盛的生命力,不见大规模的牧草减少,这与河湾在发育过程中的迁移密切相关。研究区域河湾的迁移速率为 0.02 ~ 0.2 m/a,单个河湾从开始形成到最后自然裁弯需要上百年的时间,未受到河流洪水干扰的区域内植被有充分的时间进行演替。

在河湾凸岸边滩形成之后,先锋植物开始少量生长,在十余年内演变为单一的草甸型群落,在此之后多种叶形小、茎少分支的典型高山植物生长,后来灌木类植物演替形成,并逐渐扩展,占据大部分面积。随着河湾凸岸植被群落的演替,以高山嵩草和华扁穗草为代表的牧草类植被密度呈先增大后减小的趋势。在金露梅尚未发育的区域,牧草在演替过程中密度逐渐增大,河湾 2 各植被群落中牧草的密度分别为 2 832、9 152、7 500、12 600、425 颗/m²,其他植被的密度分别为 48、0、1 128、2 192、2 160 颗/m²,金露梅作为研究区域内典型的灌木植被,具有丛生植物的特征,为河谷中植被演替后期群落的优势种。金露梅的根系相对较长,发育有大量须根,在与其他植物的竞争中明显占据优势地位。在金露梅-鹅绒委陵菜群落内,草本植物主要为鹅绒委陵菜,其他高山植物的种类少、密度小,牧草的生长在竞争中受到抑制。

河湾的迁移以凹岸侵蚀崩塌的形式将土壤和植被破坏并分解,水面高差较大的河湾凹岸多数为金露梅占优势的植被群落。河流迁移和截弯,将破坏不适宜放牧的植被带并在凸岸形成边滩,开始新的原生演替。因此,形成了一种牧草先增多后减少再增多的草场更新机制,使得河谷中植被演替长期不断循环进行,灌木无法占据整个河谷的优势地位,给牧草的生长提供了有利条件,但不同位置更新时长有所差别。在亚马逊河弯曲河段的研究中,存在类似的循环机制,研究认为秘鲁境内亚马逊河的弯曲河段的演变对平原植被具有更新作用,每年约有 130 km² 的滨河森林被侵蚀破坏,占总面积的 0.2%,同理也形成了同等面积的原生演替植被^[22]。

对黄河源区草甸型弯曲河流兰木错曲的河湾崩塌块进行调查统计和估算,得到河湾迁移速率为 0.02 ~ 0.2 m/a,迁移速率与河湾凹岸植被生物量呈指数关系,凹岸植被生物量越大,河湾迁移速率越小。凸岸边滩植被在演替过程中对应于不同的演替阶段形成 5 种植被群落,呈 5 个带状分布,植被带之间高程有明显的跃升。由河湾迁移速率可粗略估计原生演替至各植被群落阶段需要的时间:演替至单一华扁穗草群落需要 15 a 左右,演替至华扁穗草-高原毛茛群落需要 40 a 左右,演替至华扁穗草-高山嵩草群落需要 60 a 左右。滨河植被从凸岸边滩顶端向草原方向多样性和均匀度总体呈增加趋势。河床演变造成的凹岸淘刷将演替至后期的植被群落破坏,开始新的原生演替,使牧草类植被重新占据优势,形成一种草场更新机制,对草场的长期可持续放牧具有重要意义。鉴于采样数据和研究时间所限,兰木错曲的横向演变与滨河植被规律并不全面,仅可为同一流域或类似河流尺度、植被条件下弯曲河流的研究提供参考,机制层面还需要进一步深入调查研究。

参考文献:

[1] 许栋,白玉川. 蜿蜒河流横向摆动及河谷地形沉积过程数值模拟[J]. 泥沙研究,2010(4): 68-72. (XU Dong, BAI Yuchuan. Numerical simulation of the lateral migration of meandering rivers and floodplain development processes[J]. Journal of Sediment Research, 2010(4): 68-72. (in Chinese))

[2] HUBBLE T C T, DOCKER B B, RUTHERFURD I D. The role of riparian trees in maintaining river bank stability: a review of australian experience and practice [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(3): 292-304.

[3] PARKER G, SHIMIZU Y, WILKERSON G V, et al. A new framework for modeling the migration of meandering rivers [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2011, 36(1): 70-86.

[4] 王付,赵振兴. 河岸植被对水流影响的研究现状[J]. 水资源保护, 2003, 19(6): 50-53. (WANG Cun, ZHAO Zhenxing. A review of the impact of riparian vegetation on river flow[J]. Water Resources Protection, 2003, 19(6): 50-53. (in Chinese))

[5] 宋孝玉,康绍忠,史文娟,等. 长武黄土沟壑区不同下垫面条件农田产流产沙规律及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 28-30. (SONG Xiaoyu, KANG Shaozhong, SHI Wenjuan, et al. Laws and affected factor of runoff and sediment yield in farmland with different under layer condition in loess hilly areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(2): 28-30. (in Chinese))

(下转第 76 页)

- al. Study of maximum aseismic capability of high earth-rock dam on deep riverbed alluviums[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (Sup1): 41-47. (in Chinese))
- [17] 杨昕光,迟世春. 土石坝坡抗震极限分析上限法[J]. 岩土力学, 2013, 34 (3): 721-726. (YANG Xinguang, CHI Shichun. Upper bound method for seismic stability limit analysis of earth-rock dams [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34 (3): 721-726. (in Chinese))
- [18] 顾淦臣. 土石坝地震工程[M]. 南京:河海大学出版社, 1989.
- [19] 李子阳,谷艳昌,张磊. 基于 MSC. Marc 的高拱坝蓄水期变形分析[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28 (4): 15-19. (LI Ziyang, GU Yanchang, ZHANG Lei. MSC. Marc-based deformation analysis of high arch dam in water storage period [J]. Advances in Science and Technology of Water resources, 2008, 28 (4): 15-19. (in Chinese))
- [20] 杨贵,何敦明,刘汉龙,等. 土石坝动力离心模型试验颗粒流数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39 (3): 296-301. (YANG Gui, HE Dunming, LIU Hanlong, et al. Advancement of technology on shaking table model test and dynamic analysis of CFRD [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39 (3): 296-301. (in Chinese))
- [21] 赵剑明,常亚屏,陈宁. 强震区高混凝土面板堆石坝地震残余变形与动力稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (增刊 1): 4547-4552. (ZHAO Jianming, CHANG Yaping, CHEN Ning. Study on earthquake-induced permanent deformation and dynamic stability of high concrete-faced rockfill dam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (Sup1): 4547-4553. (in Chinese))

(收稿日期:2017-05-10 编辑:熊水斌)

(上接第 61 页)

- [6] PIZZUTO J E, MECKELNBURG T S. Evaluation of a linear bank erosion equation [J]. Water Resources Research, 1989, 25: 1005-1013.
- [7] MICHELI E R, KIRCHNER J W. Effects of wet meadow riparian vegetation on streambank erosion: 1. remote sensing measurements of streambank migration and erodibility[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2002, 27 (6): 627-639.
- [8] MICHELI E R, KIRCHNER J W. Effects of wet meadow riparian vegetation on streambank erosion: 2. measurements of vegetated bank strength and consequences for failure mechanics [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2002, 27 (7): 687-697.
- [9] 朱海丽,王兆印,李志威. 黄河源区滨河草甸对弯曲河流河道演变的影响[J]. 人民黄河, 2013, 35 (4): 41-44. (ZHU Haili, WANG Zhaoyin, LI Zhiwei. Influence of riparian meadow to the meandering rivers evolution in the Yellow River Source Region [J]. Yellow River, 2013, 35 (4): 41-44. (in Chinese))
- [10] 朱海丽,李志威,胡夏嵩,等. 黄河源草甸型弯曲河流的悬臂式崩岸机制[J]. 水利学报, 2015, 46 (7): 836-843. (ZHU Haili, LI Zhiwei, HU Xiasong, et al. Cantilever bank failure mechanism of meadow meandering river in the Yellow River Source Region [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46 (7): 836-843. (in Chinese))
- [11] NILSSON C, GUNNEL G, JOHANSSON M, et al. Patterns of plant species richness along riverbanks [J]. Ecology, 1989, 70 (1): 77-84.
- [12] LI Z W, YU G A, BRIERLEY G, et al. Vegetative impacts upon bedload transport capacity and channel stability for differing alluvial planforms in the Yellow River Source Zone [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20 (7): 3013-3025.
- [13] 李志威. 三江源河床演变与湿地退化机制研究[D]. 北京:清华大学, 2013.
- [14] 张萍,哈斯,王帅,等. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑积沙区的植被分带性[J]. 自然资源学报, 2008, 23 (2): 237-244. (ZHANG Ping, HASI Eerdun, WANG Shuai, et al. Zonation of vegetation on depositional area of blowout in Hulun Buir Grassland [J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23 (2): 237-244. (in Chinese))
- [15] 王立新. 内蒙古草原区河流河滨带湿地植被分布格局、过程与功能研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2012.
- [16] THORNE C R. Processes and mechanisms of river bank erosion[C]//HEY R D, BATHURST J C, THORNE C R. Gravel-bed Rivers. Chichester: John Wiley and Sons, 1982: 227-271.
- [17] KEAN J W, SMITH J D. Form drag in rivers due to small-scale natural topographic features: 1. regular sequences [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111 (4): 160-176.
- [18] KEAN J W, SMITH J D. Form drag in rivers due to small-scale natural topographic features: 2. irregular sequences [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111 (4): 177-192.
- [19] PIZZUTO J E. Channel adjustments to changing discharges, Powder River, Montana [J]. Geological Society of America Bulletin, 1994, 106 (11): 1494-1501.
- [20] BEESON C E, DOYLE P F. Comparison of bank erosion at vegetated and non-vegetated channel bends [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1995, 31 (6): 983-990.
- [21] 武吉华,张绅,江源,等. 植物地理学[M]. 北京:高等教育出版社, 2004.
- [22] PUHAKKA M, KALLIOLA R. River types, site evolution and successional vegetation patterns in Peruvian Amazonia [J]. Journal of Biogeography, 1992, 19 (19): 651-665.

(收稿日期:2017-06-20 编辑:骆超)