

若尔盖盆地黑河的牛轭湖沿程变化与形态特征

李 想^{1,2}, 李志威^{1,3}, 胡旭跃^{1,2}, 田世民^{3,4}

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 3. 水利部黄河泥沙重点实验室, 河南 郑州 450003; 4. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

摘要:基于 SPOT(1990 年和 2000 年)和 Google Earth(2000—2014 年)遥感影像的图像分析,对黑河干流及上游的 3 条支流(格曲、麦曲、哈曲)的 216 个典型牛轭湖以及相应的河曲带进行形态参数的定义与分析。沿黑河上游至下游,河曲带的宽度是增加的,增长率的变化趋势为“急—缓—急”;中游牛轭湖数量最多;下游受到泥沙淤积的影响更大,牛轭湖从 Ω 形发展成 U 形和 C 形所需时间远小于上中游。1990—2013 年黑河干流仅发生 2 次裁弯,分别形成 Ω 形和 U 形牛轭湖,说明黑河牛轭湖的发育速率较慢。

关键词:牛轭湖;弯曲河流;形态特征;自然裁弯;黑河;若尔盖盆地

中图分类号:TV147 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2017)06-0019-06

Analysis on morphological features of oxbow lakes along Heihe River in Zoige Basin//LI Xiang^{1,2}, LI Zhiwei^{1,3}, HU Xuyue^{1,2}, TIAN Shimin^{3,4}(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water & Sediment Science and Water Hazard Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China; 3. Key Laboratory of Yellow River Sediment, MWR, Zhengzhou 450003, China; 4. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Heihe River is a typical meandering river located in the Zoige Basin, which is an important tributary of the Yellow River source. Many oxbow lakes developed along Heihe River due to natural cutoffs, which record the cutoff frequencies and old channel morphologies. By processing the remote sensing images of SPOT (1990 and 2000) and Google Earth (2000-2014), 216 oxbow lakes in the mainstream and three tributaries (i. e., Gequ, Maiqu, and Haqu Rivers) along the river channel were identified and the morphological parameters of the meander belts were further defined and analyzed. The results show that the width of the meander belt along the channel increases with a trend of “quick-slow-quick” and moreover most of the oxbow lakes developed in the middle reach. Due to the impact of sediment deposition in the lower reach, the formation time of Ω -shape oxbow lakes is much less than that of U-shape and C-shape oxbow lakes in the middle and upper reaches. Only two cutoffs occurred during 1990-2013 and a Ω -shape and U-shape oxbow lake gradually formed, indicating that the formation rate of oxbow lakes in the Zoige basin is slow.

Key words: oxbow lake; meandering river; morphological features; natural meander cutoff; Heihe River; Zoige Basin

黑河位于青藏高原东北部的若尔盖盆地,地理位置为 32°20′~34°16′N,102°11′~103°30′E,是黄河源的主要支流。黑河发源于若尔盖县南部的山谷中,河长约 450 km,流域面积约 7 608 km²,从玛曲县东南部汇入黄河干流。黑河源头由麦曲、哈曲、格曲 3 条支流组成。在这 3 条支流所处的地带,除了放牧以外,其他人类活动少,其演变属于自然过程。黑河的河道弯曲程度高,是典型的弯曲型河流,因此长期而言,自然裁弯发生的次数较多,遗留牛轭湖数

量也多,但是其牛轭湖数量沿程变化与平面形态尚未见报道。

牛轭湖是弯曲河流裁弯的产物,通过牛轭湖的形态及分布特征研究,对于了解弯曲河流的演变具有重要的科学和实际意义。早期,Weihaupt 等^[1]研究了 Yukon 河的 817 个牛轭湖,以形态复杂程度的不同将牛轭湖分为简单型、复合型、乱序型,依据闭合度的不同分为开放型、正常型、闭合型。牛轭湖的最新形态分析,将牛轭湖分为 Ω 形、U 形和 C 形,这也表征了

基金项目:水利部黄河泥沙重点实验室开放课题基金(2017005);黄河水利科学研究院院长基金(HKY-JBYW-2016-03);湖南省研究生科研创新项目(CX2017B477)

作者简介:李想(1993—),男,硕士研究生,主要从事河流动力学研究。E-mail:396714153@qq.com
通信作者:李志威(1984—),男,副研究员,博士,主要从事河流动力学研究。E-mail:lzhiwei2009@163.com

牛轭湖的3个发展阶段^[2]。基于遥感图像解译,前人已对河湾形态与牛轭湖进行较多研究^[3-5],发现牛轭湖的弯曲度小于2.2时,其弯曲度与平均湖长呈指数关系,并得到了弯曲度、河道长度、牛轭湖发育速率三者关系的表达式。针对辽河下游近50年的牛轭湖演变的遥感解译表明,人为因素对牛轭湖演变过程的影响在增加,牛轭湖的发育速率趋缓^[6]。

对牛轭湖的沉积物样柱分析得知,沉积物颗粒在剖面上呈现粗—细—粗的特点,并且可较好地记录流域洪水事件^[7]。Rowland等^[8]通过沉积物光释光的测年方法发现密西西比河的牛轭湖沉积物在距今 (25 ± 10) a至 (928 ± 144) a,记录了河道的变化过程以及部分洼地消失的过程。Babka等^[9]发现牛轭湖水量补给并不只来自于丰水期原河道漫过沙栓的洪水和自然降雨,还有沙栓地下水的渗透补给。Galbarczyk-Gasiorowska等^[10]对维斯杜拉河流域的牛轭湖进行钻孔采样发现,泥芯对于化学沉积物记录良好,并证实了防洪堤坝的建设是引起牛轭湖富营养化的主要因素。对于悬移质输移为主的弯曲河流,牛轭湖进口段通常先由厚黏土层迅速的涌入并持续淤积,而这些黏性细颗粒扩散进入牛轭湖,在洪水期有利于维持牛轭湖与主河道的营养物的连通性^[11]。但是,若尔盖黑河牛轭湖的进口段是以卵砾石推移质淤积为主,这个问题有待开展机理研究。

本文基于SPOT(1990年和2000年)和Google Earth(2000—2014年)遥感影像的辨识及野外调查(2011—2016年),分析了黑河牛轭湖形态特征与类型以及牛轭湖沿程密度的变化、演变过程所需的时间,探讨了影响牛轭湖演变过程的因素。

1 黑河概况及其河曲带

黑河全长450 km,源头海拔高程4 335 m,河道比降为0.016%(图1)。通过黑河大水水文站的水文数据可知,黑河多年平均流量为 $32.6\text{ m}^3/\text{s}$,径流量

为 10.3 亿 m^3 ,多年平均悬移质输沙量为 34.2 万 t ,多年平均含沙量为 0.33 kg/m^3 ^[12]。流经若尔盖县嫩哇乡,最后在玛曲县东南部汇入黄河干流。黑河上游部分的主要支流麦曲、哈曲、格曲都受到了两侧丘陵的限制,主要是南北向^[13]。树枝状的河网分布是黑河最明显的特征,每一条支流都是典型的弯曲型河道。

河曲带是指弯曲河流在河谷内,由于横向迁移或自然裁弯,弯道在河谷内横向移动的最大范围。统计黑河从麦曲汇入口开始至黄河入汇口沿程168个断面的河曲带宽度(图2),可发现黑河的河曲带沿程突出“增—平—增”的特点。根据河曲带变化规律将黑河分成3个部分,第1个部分为源头至格曲汇入口,第2个部分为格曲汇入口至嫩哇乡,第3个部分为嫩哇乡至黄河入汇口。黑河流域的地势总体较开阔,其河谷相对较宽,地势相对平坦,沿程的坡降只有0.016%,所处的条件都适合弯曲河型的发展。

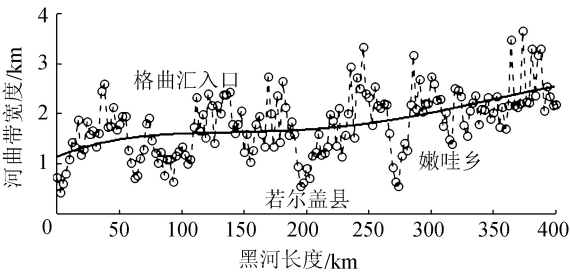


图2 黑河河曲带宽度的沿程变化

在黑河源头的部分,河道两岸丘陵地势对河道的横向摆动起到一定的限制作用。在格曲、哈曲汇入黑河之后,黑河水量增加,流量增大使得黑河横向迁移能力增强,同时该地段的河谷相较于黑河源头也有所展宽。源头处河谷平均宽度2.03 km,而此段平均河谷宽度3.74 km。因此第2部分的河曲带发展平稳,唯一突变的部位就是若尔盖县城所在河段。在若尔盖县城有热曲的汇入,黑河流量进一步加大,该部分为冲积平原,黑河河曲带却并没有自由发展,

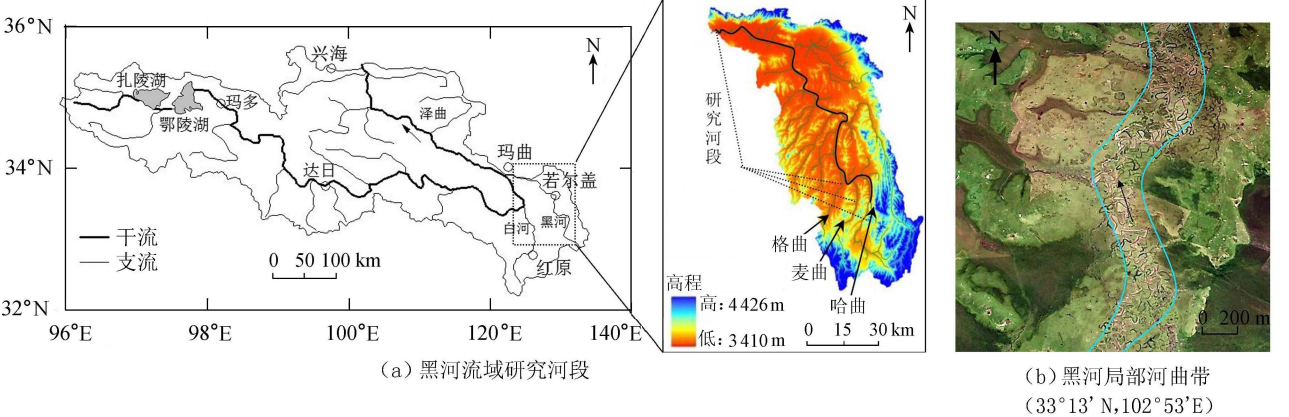


图1 主要地区及其河曲带

直接流经若尔盖县城,人类影响导致河曲带突然缩窄。

不同于若尔盖县城,嫩哇乡部分的黑河自由发展痕迹明显,其遥感影像可看出嫩哇乡西侧黑河曾发生多次裁弯。在最后一部分,海拔从 3 440 m 减少至 3 417 m,坡降为 0. 025% ,黑河呈现自然发展的状态,河曲带宽度稳步提升。

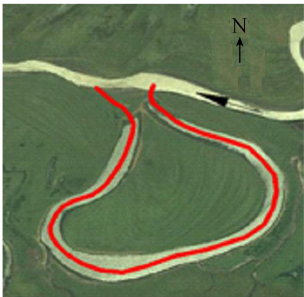
2 牛轭湖形态分类及数量

牛轭湖的选取必须搜寻大空间尺度下的黑河流域,而最理想的情况便是这些牛轭湖是从正发生裁弯时或裁弯之后依然清晰可辨的情况下选取。该条件下选取的牛轭湖代表性强,对河道的演变最具有指示作用。运用 ArcGIS 对 Google Earth (2000—2014 年,精度 0. 6 m)和 SPOT(1990 年和 2000 年,精度 10 m)的遥感影像进行预处理,经过仔细的对比筛选,获得了黑河沿程不同形态的 217 个牛轭湖,可分类为 Ω 形(76 个)、U 形(88 个)和 C 形(52 个)(图 3)。这些牛轭湖的原河湾进口与出口清晰可辨。有一部分牛轭湖已远离现在的河道,这类牛轭湖不作统计。

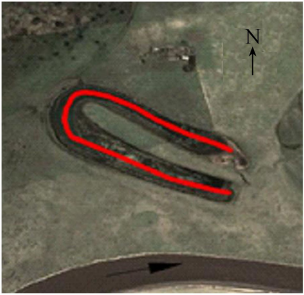
从源头开始,C 形牛轭湖所占数量最少,U 形最多。按照主要变化趋势,可分为 3 段。

牛轭湖的演变过程并不复杂,可分为 3 个时期,分别对应 3 种不同形态。Ω 形为牛轭湖初期形态,U 形为中期形态,C 形为末期形态。图 4 表明 Ω 形和 C 形牛轭湖的密度随着黑河沿程而降低,U 形则类似正态分布(第 1 段和第 3 段密度小,第 2 段密度大)。在第 1 段中(0 ~ 100 km),Ω 形最多可达 0. 8 个/km,U 形和 C 形平均有 0. 5 个/km。而在第 2 段(100 ~ 200 km)从格曲汇入直到若尔盖县城,Ω 形稳定在 0. 25 个/km,C 形则是 0. 15 个/km,U 形牛轭湖分布则较无序,时有时无,最多可到 0. 7 个/km,最少则为 0 个/km。第 3 段(200 ~ 400 km)中,3 种形态的牛轭湖分布都相对较均匀,Ω 形平均 0. 15 个/km,U 形平均 0. 25 个/km,C 形平均 0. 05 个/km。

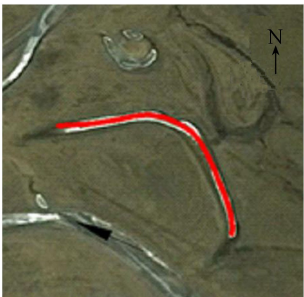
黑河沿程牛轭湖总数统计如图 5 所示。在第



(a) Ω 形(33°18' N,102°56' E)



(b) U 形(33°39' N,102°44' E)



(c) C 形(33°20' N,102°54' E)

图 3 3 种典型类型的牛轭湖影像

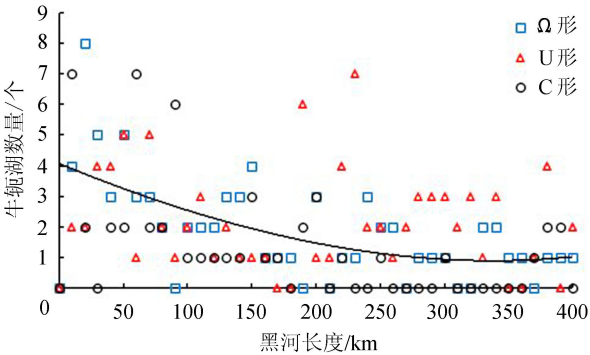


图 4 黑河沿程不同类型牛轭湖的密度

表 1 黑河牛轭湖分段说明

分段	河谷长度/ km	所处河道 位置/km	海拔/m	坡降/%	牛轭湖数量/个			河曲带宽度/km		说明
					Ω 形	U 形	C 形	最宽	最窄	
第 1 段,麦曲 汇入口至 格曲汇入口	27. 41	0 ~ 100	3 464 ~ 3 445	0. 069	31	25	23	2. 61	0. 44	中部地势较为平坦,横向变化较大,裁弯痕迹较多
第 2 段,格曲 汇入口至 若尔盖县	33. 49	100 ~ 200	3 334 ~ 3 440	0. 014	20	12	16	3. 29	0. 92	靠近若尔盖县城牛轭湖相对较少,在若尔盖县附近 7 km 长河段,只有一个河道裁弯痕迹
第 3 段,若尔 盖县至 黄河入汇口	92. 56	200 ~ 400	3 440 ~ 3 417	0. 025	25	51	13	3. 66	0. 55	河曲带先扩大再缩小,靠近黄河入汇口的部分多为大型弯道的裁弯

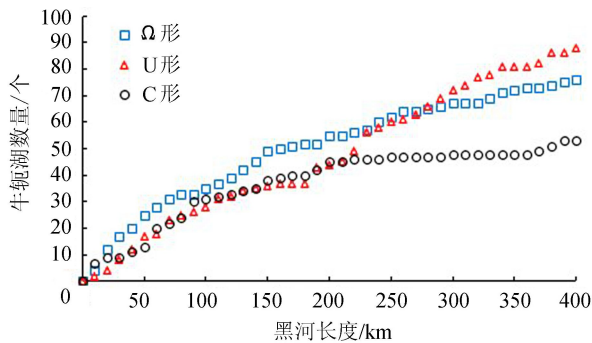


图5 黑河沿程不同类型牛轭湖沿程累积数量

1段(0~100 km),黑河沿程的3种形态的牛轭湖数量增长趋势差异并不大。在第2段(100~200 km)中,U形和C形牛轭湖长势相较于 Ω 形显得更加平稳, Ω 形则持续增加。第3段(200~400 km)中,U形开始大量增加;C形变化小,200 km河长中只增加了8个; Ω 形也有增加,但远不如第1段的增长趋势。

从河流源头开始,3种形态的牛轭湖应保持同样的变化趋势。牛轭湖所形成的沙栓高度和长度主要是由最大流量决定^[3],在有充足水量的时候,河水有能力越过沙栓重新为 Ω 形牛轭湖补充水量,而当流量下降之后,就不能给 Ω 形牛轭湖补充水量。缺少河水补充后,在渗透、蒸发和植物需水的作用下, Ω 形牛轭湖会逐渐演变为U形牛轭湖。U形牛轭湖进一步演化成C形牛轭湖,直到最后消失。黑河沿程牛轭湖总数是增多的,同时沿程的径流量也是增大的(图5)。

3 黑河牛轭湖形态分析

3.1 形态统计规律分析

通常牛轭湖的形态各异,需用形态参数表达其一般性规律:河曲带宽度 W_b ;牛轭湖残留开口宽度 b ;牛轭湖中心线 L_c ;牛轭湖与主河道最短距离 D ;牛轭湖平行于河曲带的平行河长 λ (图6)。

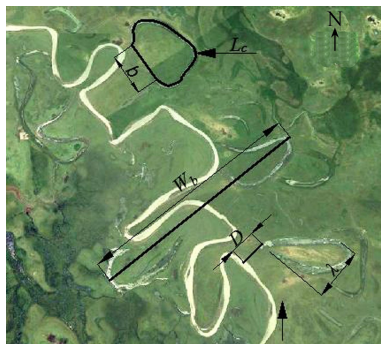


图6 河曲带和牛轭湖形态参数示意图(33°18'N, 103°04'E)

引入无量纲残留弯曲度 S_r 来反映牛轭湖的当前状态, S_r 的值越大,牛轭湖越新;反之越老。

$$S_r = \frac{L_c}{b} \quad (1)$$

对黑河沿程的216个牛轭湖的 S_r 的统计可知, S_r 在1~2之间的牛轭湖最多,处在消亡的边缘,且这63个牛轭湖中有36个为C形牛轭湖,超过50%(图7)。C形牛轭湖是牛轭湖发展的末期形态。剩下20个为U形牛轭湖,7个为 Ω 形牛轭湖。这7个 Ω 形牛轭湖是非常长距离的河湾裁弯,其残留开口度非常大,因此 S_r 值偏小。

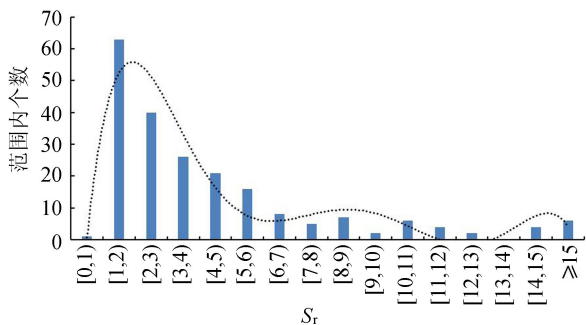


图7 黑河的牛轭湖残留弯曲度的统计分布

近半数(103个)的牛轭湖的 S_r 在2~6之间,这说明黑河沿程的牛轭湖主要处于发展中期。年轻的牛轭湖有44个,与黑河的连通性强,是黑河流域在非洪水期重要的储水器。处于中期的牛轭湖数量远大于新生的牛轭湖。

为了说明黑河干流的裁弯后的偏移情况,引入相对河道连通性 ζ 。牛轭湖的相对河道连通性定义为

$$\zeta = \frac{D}{W} \quad (2)$$

式中: ζ 为相对河道连通性,无量纲; W 为主河道对应处的河道宽度,m。

ζ 的值越大,说明裁弯后的牛轭湖离黑河主干越远; ζ 的值越小,说明牛轭湖越年轻(图8)。在整个黑河流域,有5个地方,黑河干流在被裁弯后并没有远离牛轭湖,而是从原来所在的位置逐渐靠近牛轭湖,最终吞并牛轭湖,其连通性为负,代表牛轭湖的萎缩速率小于黑河的横向发展速率。

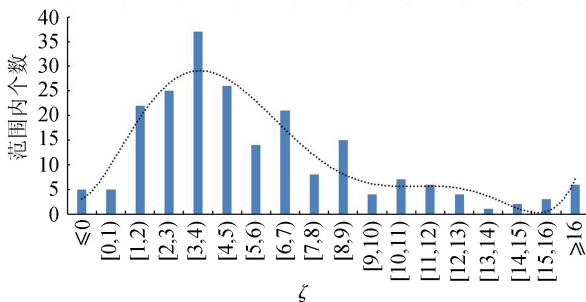


图8 黑河所有牛轭湖相对河道连通性的统计分布

连通性小于3的牛轭湖有57个,与黑河连通性较好,在黑河水量充足的时可获得补给,因此消亡的速度很慢。这57个牛轭湖中有25个 Ω 形牛轭湖,

而这 25 个 Ω 形牛轭湖的 S_r 都大于 3, 所以这也可表明 Ω 形牛轭湖是年轻牛轭湖的主要特征。连通性超过 15 的牛轭湖, 其 S_r 都非常小, 平均为 1.12, 说明这一类牛轭湖已处于消亡的边缘。黑河流域的牛轭湖绝大部分处于发展中期, 末期的牛轭湖与年轻的牛轭湖少于中期的牛轭湖。

3.2 形态参数相关性分析

形态参数统计分析可获得牛轭湖的形态变化规律, 以及牛轭湖的演化情况。黑河沿程的牛轭湖演化随机性较强, 并无明显规律, 其原因是黑河绝大部分区域为自然湿地, 牛轭湖演化过程主要是自然演化, 因此随机性较强(图 9)。但是在若尔盖县附近(200 km 处)不存在 ζ 与 S_r 较大的牛轭湖, 说明附近年轻的牛轭湖非常少, 而在黑河源头以及黄河入汇口处均有年轻的牛轭湖形成。以若尔盖县城为分界线, 黑河上游存在 4 个较年轻的牛轭湖, 黑河下游存在 5 个较年轻的牛轭湖, 说明在近代, 黑河发生的自然裁弯最少有 9 次。

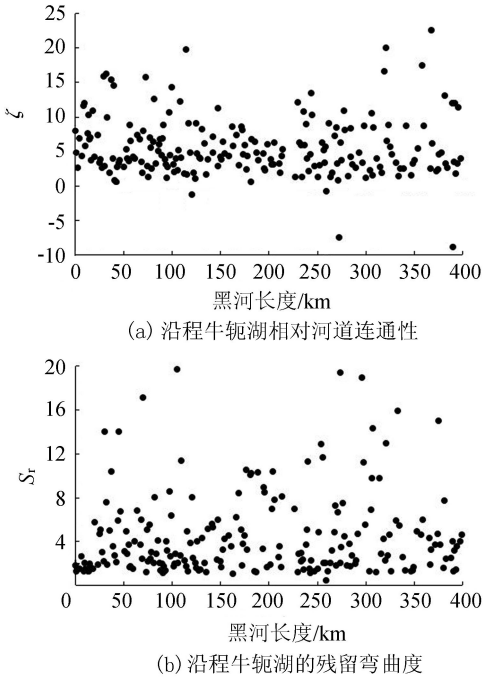


图 9 黑河沿程牛轭湖的 ζ 与 S_r

将牛轭湖形态特征参数 ζ 与 S_r 相结合分析之后, 可发现两者之间有较显著的相关性。 ζ 随着 S_r 的增大而减小, 其分布如图 10 所示。

在忽略极个别的特殊点之后, 通过拟合得到 ζ 与 S_r 的定量关系 ($R^2=0.3643$) 为

$$\zeta = \frac{10}{S_r} \tag{3}$$

牛轭湖越年轻, 其残留弯曲度 S_r 将越大, 相对河道联通性 ζ 也会越强。因此这 2 个系数具有一般性, 对于牛轭湖形态特征具有参考价值。

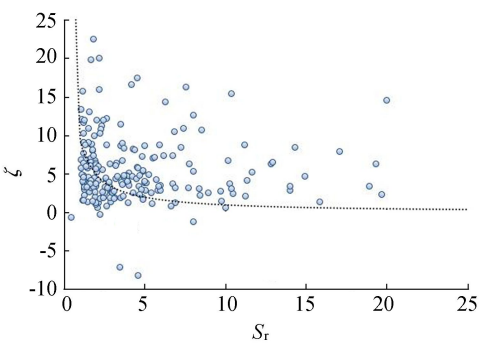


图 10 ζ 与 S_r 的相关关系

3.3 与其他地区的牛轭湖对比分析

黑河沿程的牛轭湖是青藏高原弯曲河流长期演变的产物, 形成过程的主要影响因素是黑河的来水来沙条件。黑河所处的若尔盖草原表层覆盖的是泥炭层(约 1~3 m), 下层为粉砂或卵砾石。在牛轭湖进口段沙栓形成过程中, 通过打孔取样, 发现沙栓为二元结构, 下层为褐黄色淤泥, 是泥炭与粉沙混合物, 上层为推移质粗沙, 其 D_{50} 为 2 mm。沙栓的淤积物还是以褐黄色淤泥为主, 在出口段则主要是以悬移质的细颗粒泥沙为主。与其他河流对比中可知(表 2), 黑河的径流量不大, 但是推移质输沙量的比例却偏高, 牛轭湖进口段的淤积速率也较快^[14-15]。

表 2 不同流域的牛轭湖基本情况对比

地区	沉积物	多年平均径流量/亿 m ³	输沙量/(万 t·a ⁻¹)	形成时间/a
若尔盖黑河流域	泥炭、粉砂混合物	11	34	25
日本北部石狩河	火山灰、泥沙混合物	107	210	20~100
法国 Ain River	床沙质	37.8	6	15~30

4 黑河流域的自然裁弯

经过遥感影像对比, 1990—2013 年黑河干流总共发生了 2 次裁弯(图 11), 历时 10 a 左右, 分别形成了一个 Ω 形牛轭湖和一个 U 形牛轭湖。裁弯前, 河湾弯曲度已超过 3, 这预示此弯道极有可能随时发生裁弯。图 11(a) 中形成的 Ω 形牛轭湖位于麦曲下游 1 km 处、黑河流经的冲积平原南部, 河道比降为 0.041‰, 在整条黑河中属于比降较大的河段。

此 Ω 形牛轭湖历经 20 年并未消退, 说明该处的河流洪水期的径流量大, 使得主河可越过已经形成的沙栓, 向牛轭湖补充水量。此类的牛轭湖可在汛期时候提供一定的蓄水能力。在水流的冲刷作用下, 裁弯形成的新河道会向下游偏移; 随着偏移的加大, 与原河道口对接的部分会逐渐消失, 河流难以向牛轭湖补充水量, 牛轭湖逐渐走向消亡。

在该 Ω 形牛轭湖直线距离 68 km 的下游发现另

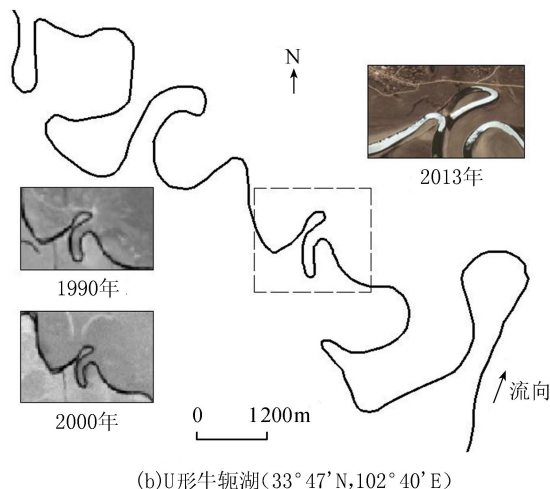
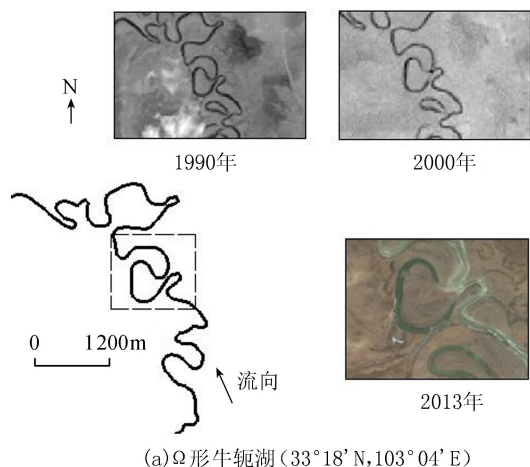


图 11 黑河上的两处裁弯并形成牛轭湖的过程

一个裁弯(图 11(b)),其形成的 U 形牛轭湖已演变成 C 形牛轭湖,出口段在悬移质的淤积作用下,沙栓已发展到 0.33 km,而整个牛轭湖长度为 0.78 km,因此该牛轭湖处于消亡过程中。2016 年 7 月对此沙栓进行了打孔取样,土样变化过程均匀,靠近地面 20 cm 为粗细颗粒泥沙混合物, D_{50} 为 2.0 mm;往下 20 cm 为黑色淤泥,为原河道形成之前的泥炭层;再往下 20 cm 为褐黄色淤泥。该 U 形牛轭湖所在位置为黑河下游段部分,比降为 0.007%。经历 20 年,U 形牛轭湖已消退 42.3%,发展成为 C 形牛轭湖。该牛轭湖在 20 年中并未受到黑河的水量长年补给,这是与上述 Ω 形牛轭湖的最重要区别。由于泥沙淤积、水量的下渗与蒸发,此牛轭湖消亡只是时间问题。

5 结 论

a. 黄河源的黑河河曲带宽度自源头开始,沿程是增加的,增长率的变化趋势为“急—缓—急”。残留弯曲度与相对河道连通性存在负相关关系,即牛轭湖越年轻,其残留弯曲度越大,相对河道连通性也越强。

b. 黑河源头部分 Ω 形牛轭湖密度大,中游 U

形牛轭湖密度大,C 形牛轭湖在靠近黄河入汇口的 200 km 下游段非常少,仅有 8 个。若尔盖县城之后的黑河流域,因多条支流的汇入导致流量增加,塑造出平面尺度很大的 U 形河湾,裁弯后产生 U 形牛轭湖,使得 U 形牛轭湖数目远超过 Ω 形。

c. 黑河流域牛轭湖指示着局部河湾裁弯过程。1990—2013 年黑河发生了 2 次裁弯,分别形成一个 Ω 形和一个 U 形牛轭湖,间接说明黑河流域裁弯频率较低,可能与河岸上层泥炭抑制冲刷作用有关,其裁弯过程与机制有待进一步探索。

参考文献:

- [1] WEIHAUPT J G. Morphometric definitions and classifications of oxbow lakes, Yukon River Basin, Alaska [J]. *Water Resources Research*, 1977, 13(1): 195-196.
- [2] 李志威,王兆印,潘保柱. 牛轭湖形成机理与长期演变规律[J]. *泥沙研究*, 2012(5): 16-25. (LI Zhiwei, WANG Zhaoyin, PAN Baozhu. Formation mechanism and long-term evolution of oxbow lakes [J]. *Journal of Sediment Research*, 2012(5): 16-25. (in Chinese))
- [3] CONSTANTINE J A, DUNNE T. Meander cutoff and the controls on the production of oxbow lakes[J]. *Geology*, 2008, 36(1): 23-26.
- [4] 张斌,艾南山,黄正文,等. 中国嘉陵江河曲的形态与成因[J]. *科学通报*, 2007, 52(22): 2671-2682. (ZHANG Bin, AI Nanshang, HUANG Zhengwen, et al. The formation and origin of the meander with Jialing River in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(22): 2671-2682. (in Chinese))
- [5] 李志威,方春明. 天然河湾极限弯曲度[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2011(3): 176-182. (LI Zhiwei, FANG Chunming. Limit sinuosity for river bends [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2011(3): 176-182. (in Chinese))
- [6] 王丹桂,马鹏飞,高婕,等. 基于 RS 的辽河下游牛轭湖 50 年演变研究[J]. *海洋与湖沼*, 2014, 45(6): 1168-1175. (WANG Dangui, MA Pengfei, GAO Jie, et al. Evolution of oxbow lakes of Liao River over last 50 years based on Remote-Sensing method [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2014, 45(6): 1168-1175. (in Chinese))
- [7] 贾铁飞,王峰,袁世飞. 长江中游沿江牛轭湖沉积及其环境意义:以长江荆江段天鹅洲、中洲子为例[J]. *地理研究*, 2015, 34(5): 861-871. (JIA Tiefei, WANG Fei, YUAN Shifei. Oxbow lake sedimentary characteristics and their environmental significance: in Tianezhou and Zhongzhouzi lakes in the middle Yangtze River [J]. *Geographical Research*, 2015, 34(5): 861-871. (in Chinese))

(下转第 94 页)

on the transport timescale in a river-influenced macro-tidal estuary[J]. *Journal of Coastal Research*, 2016 (Sup75): 193-197.

[35] MERCIER C, DELHEZ E J M. Diagnosis of the sediment transport in the Belgian Coastal Zone [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 74(4): 670-683.

[36] GONG Wenping, SHEN Jian. A model diagnostic study of age of river-borne sediment transport in the tidal York River estuary[J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2010, 10(1/2): 177-196.

[37] DELHEZ E J M, WOLK F. Diagnosis of the transport of adsorbed material in the Scheldt estuary: a proof of concept [J]. *Journal of Marine Systems*, 2013, 128: 17-26.

[38] 马俊超, 李琼芳, 陆国宾, 等. 三峡-葛洲坝梯级水库不同蓄水阶段对其下游泥沙特性的影响分析[J]. *水资源保护*, 2016, 32(1): 75-78. (MA Junchao, LI Qiongfang, LU Guobin, et al. Analysis of impacts of different impound phases of Three Gorges-Gezhouba cascade reservoirs on sediment regime in downstream [J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32(1): 75-78. (in Chinese))

[39] 王鹏, 李琼琼, 蔡赟杰. 太湖沉积物再悬浮对双酚 A 吸附性能的影响[J]. *水资源保护*, 2015, 31(5): 35-41. (WANG Peng, LI Qiongfong, CAI Yunjie. Effect of sediment resuspension on BPA adsorption in Taihu Lake [J]. *Water Resources Protection*, 2015, 31(5): 35-41. (in Chinese))

(收稿日期: 2016-12-14 编辑: 熊水斌)

(上接第 24 页)

[8] ROWLAND J C, LEPPER K, DIETRICH W E, et al. Tie channel sedimentation rates, oxbow formation age and channel migration rate from optically stimulated luminescence (OSL) analysis of floodplain deposits[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 39(9): 1161-1179.

[9] BABKA B, FUTÓ I, SZABÓ S. Clustering oxbow lakes in the Upper-Tisza Region on the basis of stable isotope measurements[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 410(1/2): 105-113.

[10] GALBARCZYK-GASIOROWSKA L, GASIOROWSKI M, SZEROCZYŃSKA K. Reconstruction of human influence during the last two centuries on two small oxbow lakes near Warsaw (Poland) [J]. *Hydrobiologia*, 2009, 208(1): 173-183.

[11] TOONEN W H J, KLEINHANS M G, COHEN K M. Sedimentary architecture of abandoned channel fills [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 37(4): 459-472.

[12] 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. (ZHAO Zile. Water and sediment regulation of Black River and White River basin in the upper reaches of the Yellow River [J]. *Gansu Water Conservancy and Hydropower Technology*, 2005, 41(4): 336-338. (in Chinese))

[13] 李志威, 王兆印, 李艳富, 等. 黄河源区典型弯曲河流的几何形态特征[J]. *泥沙研究*, 2012(4): 11-17. (LI Zhiwei, WANG Zhaoyin, LI Yanfu, et al. Planform geometry characteristics of typical meandering rivers in Yellow River Source [J]. *Journal of Sediment Research*, 2012(4): 11-17. (in Chinese))

[14] ISHII Y, HORI K. Formation and infilling of oxbow lakes in the Ishikari lowland, northern Japan [J]. *Quaternary International*, 2015, 397: 136-146.

[15] DIERAS P L, CONSTANTINE J A, HALES T C, et al. The role of oxbow lakes in the off-channel storage of bed material along the Ain River, France [J]. *Geomorphology*, 2013, 188: 110-119.

(收稿日期: 2016-12-07 编辑: 郑孝宇)

(上接第 80 页)

[11] 杨文俊, 朱红兵, 柏林, 等. 三峡工程大江截流平抛垫底砂砾石料漂移特性研究[J]. *长江科学院院报*, 1997, 14(4): 36-40. (YANG Wenjun, ZHU Hongbing, BO Lin, et al. Investigation on drift characteristics of sand gravel materials in forming closure gap's bedding course for TGP [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1997, 14(4): 36-40. (in Chinese))

[12] 韩海骞, 杨永楚, 王卫标, 等. 钱塘江河口闻家堰段护底抛石研究[J]. *泥沙研究*, 2002, 27(2): 29-35. (HAN Haiqian, YANG Yongchu, WANG Weibiao, et al. The research for protecting the riverbed of Wenjiayan on Qiantang River by rock riprap [J]. *Journal of Sediment Research*, 2002, 27(2): 29-35. (in Chinese))

[13] 陈凯华, 石崇, 梁邦炎, 等. 水下抛石基床动态形成过程数值模拟研究[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(31): 314-319. (CHEN Kaihua, SHI Chong, LIANG Bangyan, et al. Numerical simulation research of the falling process for the underwater riprap [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(31): 314-319. (in Chinese))

[14] 李小超, 常留红, 宋俊强, 等. 复杂水流条件下抛石漂移距离的试验研究[J]. *水运工程*, 2017(6): 1-8. (LI Xiaochao, CHANG Liuhong, SONG Junqiang, et al. Experimental study on drift distance of riprap on the condition of complex water flow [J]. *Port and Waterway Engineering*, 2017(6): 1-8, (in Chinese))

(收稿日期: 2016-12-28 编辑: 郑孝宇)