

1988—2018 年黄河内蒙古段河道 边界演变特征及影响因素

冀鸿兰¹, 樊宇¹, 翟涌光¹, 罗红春¹, 张宝森², 牟献友¹

(1. 内蒙古农业大学 水利与建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450000)

摘要: [目的] 获取河道边界演变特征, 为黄河内蒙古段的堤岸防护建设提供重要的理论依据。[方法] 基于 1988—2018 年期间 7 期 Landsat 卫星影像, 利用修正的归一化水指数 (MNDWI), 对黄河内蒙古段 7 期的河道边界信息进行提取, 并计算不同时期河道摆动面积、最大摆动面积、摆动方向等指标, 分析近 30 a 河道的时空变化特征。[结果] 黄河内蒙古段在上游巴彦高勒—三湖河口和三湖河口—包头弯道区域曲率较大的河段摆动较严重, 整体呈现向右岸迁移的趋势。河道摆动的时空差异受河床物质组成、水动力条件、水利工程、水土保持工程等人类活动因素的综合影响。[结论] 黄河内蒙古段的堤岸防护建设重点应集中在巴彦高勒—三湖河口全段以及三湖河口—包头弯道曲率较大的河段。

关键词: 河道摆动; 堤岸防护; 弯道; 黄河内蒙古段

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)05-0242-08

中图分类号: TV147

文献参数: 冀鸿兰, 樊宇, 翟涌光, 等. 1988—2018 年黄河内蒙古段河道边界演变特征及影响因素[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 242-249. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.05.035; Ji Honglan, Fan Yu, Zhai Yongguang, et al. River boundary evolution characteristics and influencing factors in Inner Mongolia reach of Yellow River during 1988—2018 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 242-249.

River Boundary Evolution Characteristics and Influencing Factors in Inner Mongolia Reach of Yellow River During 1988—2018

Ji Honglan¹, Fan Yu¹, Zhai Yongguang¹, Luo Hongchun¹, Zhang Baosen², Mou Xianyou¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou, He'nan 450003, China)

Abstract: [Objective] The boundary characteristics of the Inner Mongolia reach of the Yellow River were studied in order to provide an important theoretical basis for the construction of embankment protection in the reach. [Methods] The river boundary information of the Inner Mongolia reach of the Yellow River for the past 30 years was extracted based on the modified normalized difference water index (MNDWI) and seven phases of the Landsat satellite images taken from 1988—2018. After calculating the swing area, the maximum swing area, the swing direction, and the other indicators of the river in different periods, the spatial-temporal variations of the river were analyzed. [Results] The upper sections of the Inner Mongolia reach of the Yellow River in the Bayangaole-Sanhuhekou and the Sanhuhekou-Baotou bend (both with greater curvatures than other locations) section oscillated more seriously than the other sections, and the whole reach showed a trend of migration to the right bank. The spatial and temporal differences in the channel swing were influenced by the material composition of the riverbed, hydrodynamic conditions, water conservancy projects, soil and water conservation projects, and other human activities. [Conclusion] Embankment protection construction in the Inner Mongolia reach of the Yellow River should focus on sections of Bayangaole-Sanhuhekou, and the

收稿日期: 2020-05-28

修回日期: 2020-07-08

资助项目: 国家重点研发计划“变化环境下黄河凌汛洪水致灾成灾过程及演化机制”(2018YFC1508401); 国家自然科学基金项目(51969020); 2018 自治区应用技术与开发资金项目(201802104)

第一作者: 冀鸿兰(1970—), 女(汉族), 内蒙古呼和浩特市人, 博士, 教授, 博导, 主要从事寒区河冰过程与河流泥沙运动力学研究。Email: honglanji@sinac.om.

通讯作者: 翟涌光(1986—), 男(汉族), 内蒙古呼和浩特市人, 博士, 副教授, 主要从事遥感技术应用研究。Email: ychia@imau.edu.cn.

Sanhuhekou-Baotou bend, with their large curvature.

Keywords: river swing; river levee protection; bend; Inner Mongolia reach of the Yellow River

黄河是中国第二大长河,以含沙量高、水沙关系不协调、洪涝灾害频繁等特点而备受学者们的关注^[1-2]。黄河内蒙古段河道地形复杂,河床物质松散,泥沙含量大,在一定的水力条件下,内蒙古河段河道较上下游更频繁^[3]。河道摆动造成的河岸侵蚀严重影响了当地的生态环境,威胁着两岸居民和基础设施安全,制约了当地的社会经济发展^[4]。因此,研究黄河内蒙古段的河道演变特征意义重大。

国内外众多学者采用野外实测数据研究黄河内蒙古段的河道演变特征,积累了大量的成果。申冠卿等^[5]对宁蒙河段上游水库运行前后的河道水沙条件变化及河道冲淤演变进行了分析,得出水库运行增加了宁蒙河道干支流交汇处淤堵的几率和淤堵程度。李秋艳等^[6]对宁蒙河段的河道演变过程及影响因素进行了分析,发现风成沙直接入黄使河道泥沙粗化,影响了河床的冲淤状态。王随继等^[7]运用输沙平衡方法对宁蒙河段 6 个水文站 1952—2003 年的悬沙冲淤量时空变化规律进行了分析,得出宁蒙河段处于构造沉降区,淤积是总的趋势。除此之外,对河道演变的研究工作主要针对河道的平面形态变化^[8-9]、不同河段冲淤量的时空变化^[10-11]、洪水过程中河道断面的响应变化^[12]及河道演变的影响因素等^[13-14]。但是,由于黄河内蒙古段较长,河段、河型之间的差异较大,仅利用几个水文站的测量数据很难把握整个河流的变化^[15]。随着遥感技术的应用与发展,众多学者将目光转向利用遥感影像监测河道长时间序列的演变特性。赵水霞等^[16]基于 3S 技术揭示了黄河内蒙古段河道形态大尺度、长序列的演变规律,得出河床地质条件及来水来沙条件是影响河道演变的主要因素。Yao 等^[17]利用卫星影像数据对宁蒙河段 1958—2008 年的河道变化信息进行了提取,估算了河岸区冲淤面积,发现黄河宁蒙段侵蚀面积自 1958 年起呈现持续下降的趋势。但是,有关黄河内蒙古段河道演变的时

空变化特征及其沿程分布特征的研究报道仍然较少。

本文利用 1988—2018 年 7 期 Landsat 卫星影像资料,基于 MNDWI 水体指数提取黄河内蒙古段的河道边界信息,在分析近 30 a 河道摆动年际变化趋势的基础上,对演变范围较大,河槽摆动较严重的河段进行了重点分析。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

黄河内蒙古段地处黄河的中上游,从宁夏石嘴山入内蒙古境,流经河套平原,以及库布其、乌兰布和毛乌素沙漠之间,到河口镇出境,全长 823 km。其中乌海至巴彦高勒站河长为 55 km,河道发育,宽窄相间,平均河宽约 360 m,河床由砂砾质组成,河道右岸稳定,左岸常发生冲淤现象,断面形态相对稳定。巴彦高勒站至三湖河口站河长为 221 km,该断面的河宽为 700~760 m,属于游荡型河段,河岸由砂质组成,左岸筑有堤坝和砌石护岸,右侧主要是砂质滩地,常年发生横向摆动。三湖河口站至头道拐站之间河长为 300 km,其中,三湖河口为弯曲型河段,弯曲系数为 1.33,河宽约 360 m,河岸以泥质砂质二元结构为主;头道拐断面为顺直型河段,平均河宽为 280 m,河岸以泥质为主。本研究水文地质资料来源于水利部黄河水利委员会实测资料。

1.2 研究方法

1.2.1 数据源 选取美国陆地资源卫星 Landsat 5 TM(1988, 1993, 1998, 2003, 2008 年)和 Landsat 8 OLI(2013, 2018 年)7 期多光谱遥感影像为数据源(<https://www.usgs.gov/>)。影像数据覆盖范围为 83°S 到 83°N 之间的陆地区域,空间分辨率为 30 m(见表 1)。河道边界影像为当年汛期结束后 10, 11 月的影像,便于识别主河道,且要求色调均匀、反差适中,云量均小于 10%,确保了研究结果的准确性。

表 1 黄河内蒙古段遥感影像参数

卫星编号	轨道号	成像时间
Landsat 5	126—032	20081026
	127—032	19881111, 19931024, 19981022, 20031121, 20081102
	128—032	19881114, 19931015, 19981114, 20031128, 20081109
	129—032	19881008, 19931107, 19981020, 20031205, 20081031
Landsat 8	126—032	20181006
	127—032	20131116, 20181029
	128—032	20131107, 20181121
	129—032	20131029, 20181112

1.2.2 河道边界提取方法 提取水体区域再进行边界转化是现阶段水体边界提取的主流方法,而其中水体指数法最为有效^[18]。常用遥感影像指数有NDWI, MNDWI,EWI等,为避免部分河段陡峻河岸影像阴影可能造成的影响,选取修正的归一化水指数 MNDWI^[19]为指数。MNDWI的计算公式如下:

$$\text{MNDWI} = (\text{Green} - \text{SWIR}) / (\text{Green} + \text{SWIR}) \quad (1)$$

式中:Green为绿波段;SWIR为短红外波段,分别对应TM数据的2波段和5波段,以及OLI数据的3波段和6波段。

基于MNDWI水体指数提取进行河道边界提取的详细步骤如下所示:①利用ENVI5.5软件对遥感影像进行预处理(包括波段合成、辐射定标、大气校正及图像裁剪等预处理)。②运用波段运算生成MNDWI图像。③本文运用直方图双峰法确定阈值,进行河道边界提取。基本思想是:当直方图具有较为典型的双峰特性时(见图1),选取两峰之间的谷底对应的MNDWI值作为影像分割即水体提取阈值^[20]。在本研究中1988,1993,1998,2003,2008,2013,2018年所选取的阈值依次为0.26,0.259,0.284,0.289,0.389,0.385,0.242。④本文研究区部分河段河岸宽浅,河道边界受水位变化影响较大,以水域边界作为河道边界会产生较大误差。Tiegs等^[21]“以植被边界来定义河道边界”的方法也是一种有效的方法。因此将利用MNDWI水体指数提取出的河道边界导入ArcGIS 10.4软件中,将受水位影响较大的河段的水域边界修正为植被边界。并将一些漏提、误提的河道边界进行人工修正。⑤最后,分别在河道内和河道两岸每期各随机选取150个训练样本点,并通过Google Earth和地形图等辅助资料对提取出的河道边界进行精度评价。

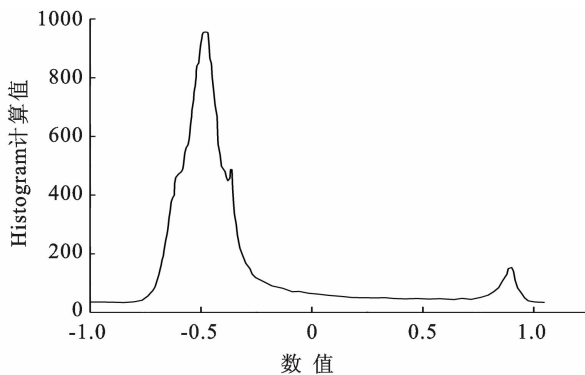
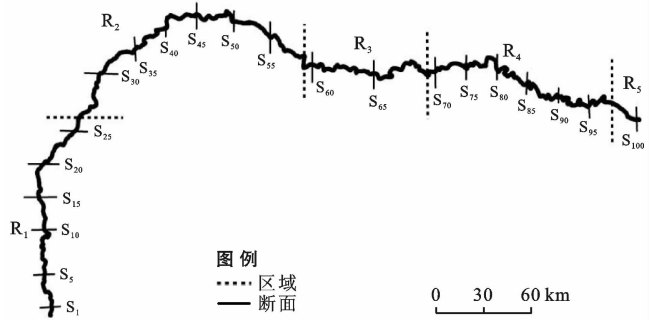


图1 黄河内蒙古段MNDWI图像

1.2.3 河道摆动面积的计算方法 该研究结合黄河内蒙古段河道地形、水文站位置及河道摆动特性,将研究区划分为了5个区域,分别为:R₁(石嘴山—巴彦高勒)、R₂(巴彦高勒—三湖河口)R₃(三湖河口—昭

君坟)、R₄(昭君坟—头道拐)、R₅(头道拐—河口镇),为保证研究结果精度,明确河道沿程摆动特征,对各区域进行加密处理,每隔5 km设置一个断面,等距离共分割了s₁₋₁₀₀共100段(见图2)。



注:图中R表示不同的区域。R₁为石嘴山—巴彦高勒;R₂为巴彦高勒—三湖河口;R₃为三湖河口—昭君坟;R₄为昭君坟—头道拐;R₅为头道拐—河口镇。s₁₋₁₀₀表示不同断面。下同。

图2 黄河内蒙古段断面位置示意图

河道摆动面积即河道横向移动所扫过区域的面积可以用作分析河道摆动变化特征的指标。将解译获得的河道边界导入ArcGIS数据处理系统,测量计算1988—1993,1993—1998,1998—2003,2003—2008,2008—2013,2013—2018各河段的河道摆动面积S_i。基于公式(2)和(3)计算5个区域的平均摆动面积 \bar{S} 和最大摆动面积S_{max}。

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} \quad (2)$$

$$S_{\max} = \max S_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

1.2.4 河道摆动方向 统计河段的河道摆动方向,基于公式(4)和(5)计算5个区域向左岸的摆动面积S_L及向右岸的摆动面积S_R。为了进一步确认河道侧向迁移的距离和方向,分别计算1988年和2018年各河段的质心,并通过质心点之间的距离对河道侧向迁移的距离进行估算。其中R₁区域以南北走向为主,R₂,R₃和R₄区域以东西走向为主,因此1988—2018年间河道侧向移动的距离d_x和d_y分别利用公式(6)和(7)计算得出。

$$S_L = \sum_{i=1}^n S_{Li} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

$$S_R = \sum_{i=1}^n S_{Ri} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

$$d_x = x_{2018i} - x_{1988i} \quad (6)$$

$$d_y = y_{2018i} - y_{1988i} \quad (7)$$

2 结果与分析

2.1 河道边界提取结果

对黄河内蒙古段1988,1993,1998,2003,2008,

2013,2018年的河道边界提取结果进行分析,其对应的精度分别为90.38%,93.81%,93.88%,94.53%,94.94%,94.26%,可以满足该研究的需要。 R_1 区域河道形态比较稳定,摆动幅度较小; R_2 区域河道1988年时顺直但心滩较多;2018年时河道向弯曲发展,心滩数量减少,主槽单一;30 a间河道摆动频繁且幅度较大; R_3, R_4 区域河曲发育,河湾逐渐增多,河道摆动剧烈; R_5 区域河道顺直,河道形态并未发生明显变化,摆动幅度微弱。

2.2 河道摆动的时空变化特征

2.2.1 河道摆动的年际变化

黄河内蒙古段5区域1988—2018年河道最大摆动面积及平均摆动面积见图3。由图3可以看出,河道最大摆动面积整体呈下降趋势;与1988—1993年相比,2013—2018年 R_1 — R_5 区域的最大摆动面积分别下降了18.85%,27.79%,36.36%,47.51%,100%。平均摆动面积变化情况是: R_1 区域1988—2008年的平均摆动面积变化幅度并

不是很大,2008年后的平均摆动面积开始下降,两个时段分别下降了23.61%,38.18%; R_2, R_3, R_4 区域平均摆动面积在30 a间整体呈现先减后增再减的趋势;1988—2003年河道平均摆动面积大幅下降,与1988—1993年相比,1998—2003年 R_2 — R_4 区域的平均摆动面积分别下降了37.23%,30.48%,58.76%。各区域河道摆动范围变小,河道趋于稳定;2003—2013年,各区域的河道平均摆动面积开始上升,河道摆动范围变大;2013年后各区域河道摆动范围变小,河道重新趋于稳定,相比前一时段2013—2018年 R_2 — R_4 区域平均摆动面积分别降低了47.73%,30.48%,58.76%。 R_5 区域平均摆动面积呈下降趋势,1998年后几乎不再发生摆动。综上所述,受上游来水来沙的影响,河道的平均摆动面积在30 a间变化较为剧烈;而受两岸堤防影响,河道最大摆动面积会限制在一定范围内,因此相较于平均摆动面积河道的最大摆动面积变化幅度较小。

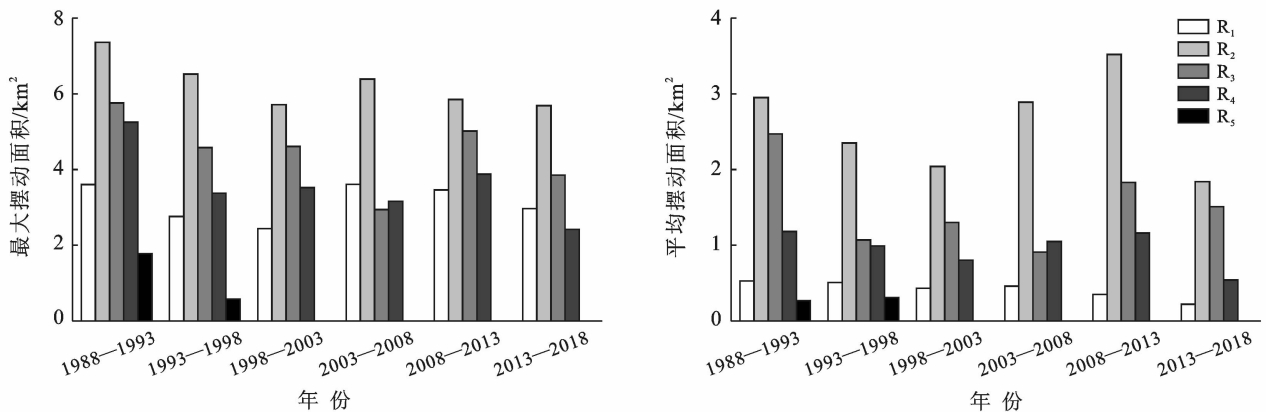


图3 各区域不同时期最大摆动面积以及平均摆动面积变化情况

2.2.2 河道摆动的空间变化

黄河内蒙古段1988—2018年各区域向左岸以及向右岸摆动的总面积见表2。向左岸摆动的总面积为386.83 km²,而向右岸摆动的总面积为466.68 km², R_5 区域由于变化微小,不予考虑。可以看出,黄河内蒙古段整体有向右岸迁移的趋势。图4表现了各区域侧向迁移的距离, R_1 区域河道总体为南北走向,迁移距离为正值的表示河道向东迁移(右岸),迁移距离为负值的表示河道向西迁移(左岸);而 R_2, R_3 和 R_4 区域河道总体为东西走向,迁移距离为正值的表示河道向北(左岸)迁移,迁移距离为负值的表示河道向南(右岸)迁移。分析不同区域的迁移距离和迁移方向得出: R_1 区域6处向西迁移,11处向东迁移,河道整体向东迁移; R_2 区域21处向南迁移,10处向北迁移,河道整体向南迁移; R_4 区域13处向南迁移,7处向北迁移,河道整体向南迁移; R_3 区域向北以及向南迁移的河段数都

为9处但迁移距离相差较大,向北迁移的平均距离为563.33 m;向南迁移的平均距离196.56 m,整体表现为向北迁移的趋势。这主要是由于 R_3 区域河段受十大孔兑偶发性洪水冲泻的泥沙堆积与黄河主河道的影响,河道被挤压向北迁移^[15]。

表2 黄河内蒙古段各区域的摆动距离 km²

区域	R_1	R_2	R_3	R_4
向左岸摆动	36.19	209.94	92.92	39.6
向右岸摆动	39.36	270.85	79.43	73.04

2.3 河道摆动沿程分布特征

黄河内蒙古段1988—2018年各区域沿程河道摆动变化特征见图5。由图5可以看出,摆动幅度较大河段主要集中在 R_2 区域, R_3 区域摆幅次之, R_1, R_4 区域整体摆动幅度较小,部分断面在2013—2018年期间不再发生摆动。 R_5 区域摆动幅度最小,1998年后几乎不再发生摆动。

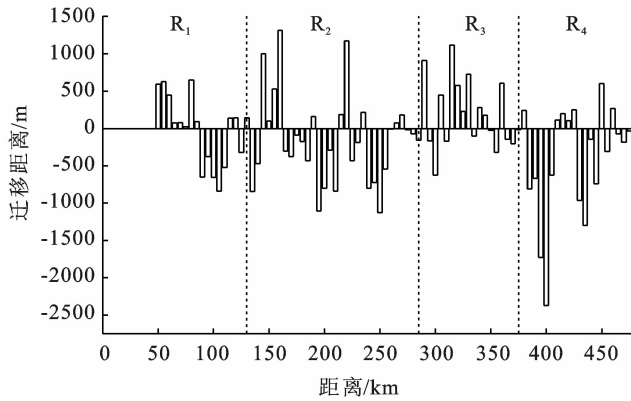


图4 1988—2018年黄河内蒙古段河道侧向迁移距离

以2008—2013年为例看河道摆动的沿程分布特征(见表3)。R₁区域88.24%河段摆动面积小于1 km²,最大面积(3.46 km²);R₂区域70.97%河段摆动面积大于3 km²,最大面积为5.85 km²;R₃区域16.66%河段摆动面积大于3 km²,最大面积为5.02 km²;R₄区域60%河段摆动面积小于1 km²,最大面积为3.88 km²;R₅区域河段进入1998年后几乎不再发生摆动。

综上所述,黄河内蒙古段R₂区域摆动面积大于3 km²的河段,在2008—2013年占全研究河段的78.57%。R₃河段弯曲度较大的断面主要集中在曲率较大的河段,研究时段内会发生较大幅度的摆动。

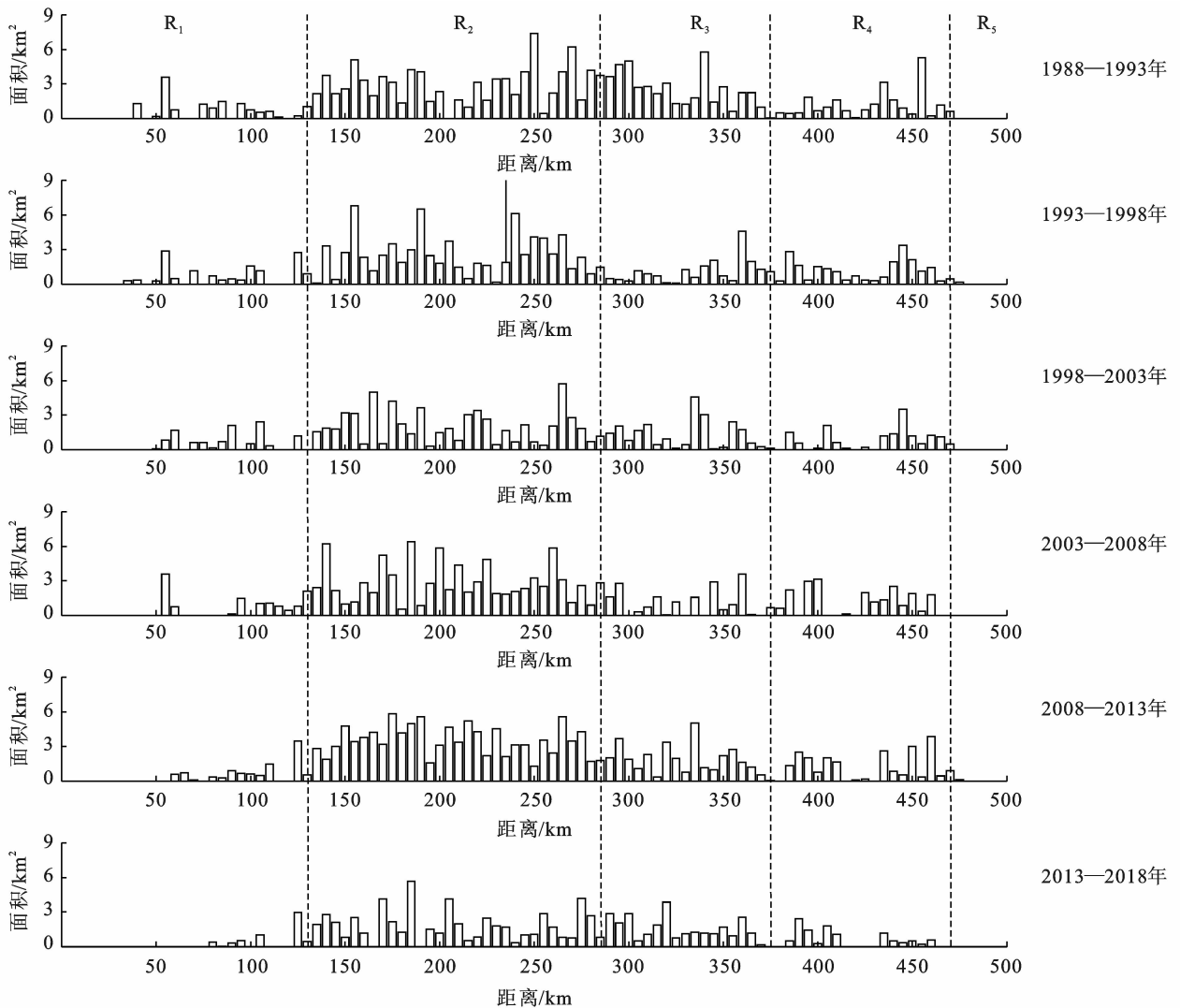


图5 黄河内蒙古段河道摆动沿程变化特征

由上述分析可知,黄河内蒙古河段中巴彦高勒—三湖河口全段和三湖河口—包头曲率较大的河段河道横向摆动较为严重,堤岸防护的重点应放在巴彦高勒—三湖河口全段和三湖河口—包头曲率较大的河段。

3 讨论

河道受自然因素或人工建构筑物影响发生变化。河道演变是含沙水流与河床在相互作用中产生的累积形变,在这个过程中水力条件是主动力因素,

河岸物质构成是响应水动力的从属因素。因此,水力条件与河岸物质构成是影响河道摆动的主要因素。除此之外,各种水利设施的修建、引水工程及水土保持工程等人类活动也会对河道演变造成一定的影响。

表 3 黄河内蒙古段 2008—2013 年河道摆动沿程分布情况

区域	摆动面积/km ²			
	<1	1~2	2~3	>3
河段数	15	1	0	1
R ₁ 总摆动面积/km ²	5.31	1.5	0	3.46
占总段数的比例/%	88.24	5.88	0	5.88
河段数	0	5	4	22
R ₂ 总摆动面积/km ²	0	8.24	9.62	91.48
占总段数的比例/%	0.00	16.13	12.90	70.97
河段数	5	5	5	3
R ₃ 总摆动面积/km ²	2.68	7	11.23	12.06
占总段数的比例/%	27.78	27.78	27.78	16.66
河段数	12	2	4	2
R ₄ 总摆动面积/km ²	4.29	2.99	9.17	6.89
占总段数的比例/%	60	10	20	10
河段数	0	0	0	0
R ₅ 总摆动面积/km ²	0	0	0	0
占总段数的比例/%	0	0	0	0

3.1 水动力因素

流量是影响河道摆动的主要水动力因素,黄河内蒙古段上游刘家峡水库(1968 年)以及龙羊峡水库(1986 年)联合运行以来,下游汛期平均流量发生了较大的变化。图 6 为黄河内蒙古段巴彦高勒水文站 1980—2013 年汛期(7—10 月)流量变化,在 1988—2003 年日均最大流量整体呈现下降的趋势。

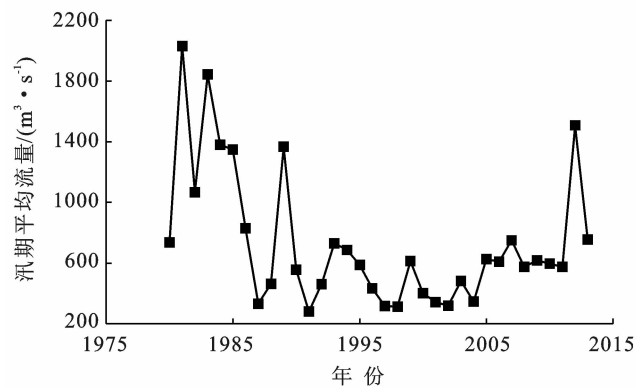


图 6 巴彦高勒站汛期平均流量

1988—1993 年巴彦高勒站汛期平均流量为 643.38 m³/s,1998—2003 年巴彦高勒站汛期平均流量为 431.61 m³/s,下降了 32.92%,流量的变化是引起该水文站下游河段总摆动面积由 1988—1993 年的 162.99 km² 降低到了 1998—2003 年的 102.49 km² 的主要原因。在 2003—2013 年日均最大流量开始上

升,其中 2012 年洪水是内蒙古河段 1989 年以来历时最长、洪峰流量最大的洪水过程^[22]。汛期平均流量的上升引起该水文站下游河段总摆动面积由 1998—2003 年的 102.49 km² 上升到了 2008—2013 年的 166.17 km²。对 1988—2013 年各时期巴彦高勒汛期的平均流量与该站下游河段的平均摆动面积进行相关分析后得出(见图 7):河道摆动面积随汛期平均流量的增大而增大。(R²=0.862, p<0.05)。

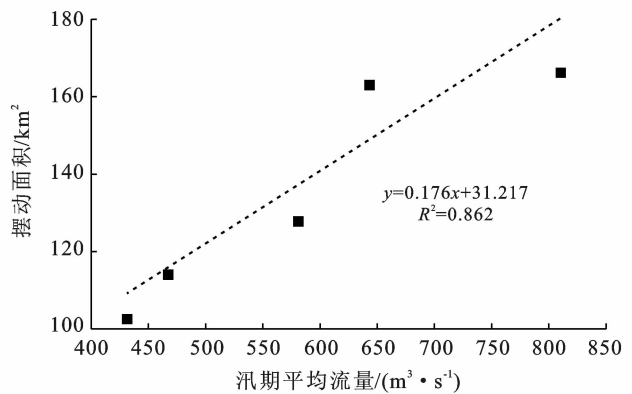


图 7 黄河内蒙古段河道摆动面积与汛期平均流量关系

3.2 河岸地质因素

黄河内蒙古段不同区域的河岸物质组成是造成河道演变空间差异的主要原因。R₁ 区域河段主要由基岩组成,抗冲刷能力强,河道边界较为稳定,从而导致该区域顺直河段的发育。在 30 a 间该区域河段主要以纵向冲淤为主,横向摆动幅度相对较小。R₂ 区域的河岸组成主要以砂质为主,受河流水动力条件的影响最不稳定^[23],因此其单个河道的摆动、展宽较为迅速,当河道宽度达到一定条件后,河道中就会形成心滩,而当心滩扩展到一定程度后会使得河道分化为两个河道,其单个河道的频繁变化造就了游荡型河段,易蚀的河道边界也使得该区域河段成为黄河内蒙古段横向摆动幅度最大的区域河段;R₃,R₄ 区域河段河岸物质主要由泥沙质和粉砂质组成,其中上层的泥质层较薄,下层的沙质层较厚,泥质层难以有效阻止河流的侵蚀作用,这是该弯曲河段得以形成的主要原因,同时由于一岸侵蚀下来的泥沙会由于弯道环流带往对岸,使得河岸一边遭受侵蚀后退时另一边则堆积前进,从而使得该河段河道单一,不会分化为多条河道^[8]。由于该区域河岸的物质组成相较于 R₂ 区域河段抗冲刷能力强,导致该区域河道整体摆动幅度小于 R₂ 区域河段,但部分弯曲度大的断面也发生了较大幅度的摆动;R₅ 区域河段河岸的细粒泥质沉积层远厚于上游的弯曲河段,抗冲刷能力强,并且该河段河

道比降大致为 0.27‰,水流动力条件较弱,从而导致该区域顺直河段的发育。该区域河段平均弯曲度为 1.05,加之该河段河岸较强的抗冲刷能力,使得该区域在 30 a 间河道横向摆动微弱,近年来该区域河段几乎不再发生横向摆动。 R_1 区域河段主要由基岩组成,抗冲刷能力强,河道边界较为稳定,从而导致该区域顺直河段的发育。在 30 a 间该区域河段主要以纵向冲淤为主,横向摆动幅度相对较小。

3.3 板块构造运动

内蒙地区板块构造运动是影响黄河内蒙古段迁移方向的重要因素之一^[16]。贺兰山和大青山有较强烈隆升;其平均活动速率为 0.2~0.3 mm/a^[24-25]。随着贺兰山和大青山的继续隆升,黄河河道在宁夏段逐渐向东移动,黄河河道在内蒙古段逐渐向南移动^[26-27]。本文研究结果支持这一结论,其中南北走向的 R_1 区域河段整体向东迁移,东西走向的 R_2 , R_4 区域河段有整体向南迁移的趋势。

3.4 水土流失影响因素

黄河流域多是开放的复杂环境系统。就地貌学的角度而言,该系统是由以坡面为主的能量聚集区子系统和以河道为主的能量及物质输移通道子系统构成的。相关研究认为,不同时期不同河段上摆动速率的差异取决于径流量,同一时期不同河段上的差异则取决于河床物质。黄河内蒙古段虽然经历了建国以来几次大规模水土流失治理,水土流失得到了极大地遏制,但内蒙古段作为黄河上游泥沙淤积的主要来源,对不同时期河道的演变及侵蚀堆积影响依然很大。相关资料表明,近 30 年来,内蒙古段河道岸线、深泓线、深槽、冲淤等方面变化均变化剧烈,因此,从全面提升黄河流域生态保护和高质量发展角度而言,水土流失对河床演变影响的问题应当引起高度重视。

3.5 气候因素

(1) 气温。黄河内蒙古段属于温带半干旱气候,近几年随着全球气温变暖的趋势,黄河内蒙古段流域的气候也发生了变化。20 世纪 80 年代以来,该流域气温有了明显的升高,气温是反应气候变化的一个重要指标,它同样与流域水体的蒸发、降雨量有着密切的联系,从而影响着河道的径流量,进一步改变着所处河道的演变。

(2) 降雨、蒸发。河流主要靠降水来补给,因此,降水是影响径流量一个重要因素。黄河内蒙古段降水主要是集中在 6—9 月,从而导致该河段的汛期一般发生在 7—10 月。如图 8 所示,1973—2017 年,各站多年平均降水量分别为 173.62, 145.52, 302.51, 402.34 mm;石嘴山和巴彦高勒站年降水量小,三湖河

口和头道拐站年降水量相对较大;多年来各站降水量波动较为剧烈,但并未发生明显的上升或者下降趋势。除此之外,该研究区域日照充足,年均蒸发量较大。蒸发量与降水量对径流量有很大的影响,而径流量的变化势必会对河道演变造成影响。

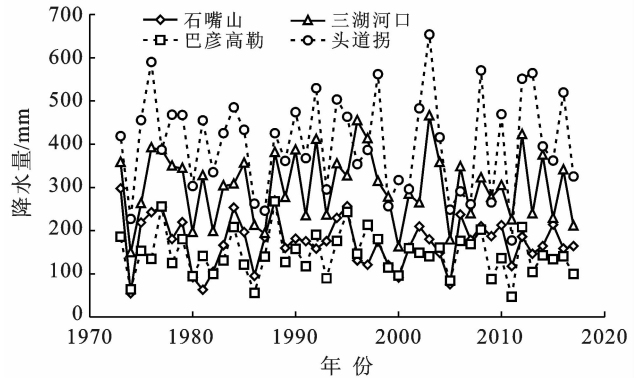


图 8 1973—2017 年黄河内蒙古段各站降水量变化

(3) 风。内蒙古是全国大风、沙尘暴较多的地区之一。一年之中,春冬季节风速最大。在黄河内蒙古段周围包括:库布齐沙漠、乌兰布和沙漠、腾格里沙漠、毛乌素沙漠在内的众多沙漠。年均大风日数 10~32 d,沙尘暴日数 19~22 d。风沙活动对于黄河泥沙有明显影响。在风的直接或间接作用下,风成沙进入黄河有以下几种方式:①在沙尘暴作用下直接进入黄河;②河岸上沙堆慢慢向河道移动进入黄河;③随着河道的摆动,河岸发生坍塌进入黄河;④冬春风季,风成沙进入黄河支流十大孔兑进行堆积,汛期洪水将十大孔兑内的沙带入黄河。风成沙占入黄沙量很大一部分,故不可忽略。尤其在巴彦高勒—头道拐这段表现的尤为明显。

3.6 人类活动因素

人类活动也是影响河道演变的重要因素。堤防工程和水库工程的建设对河道摆动起着重要作用,其中,护岸结构会影响河道形态和水流流态;堤防的修建加强了河岸的抗冲刷能力及河道的稳定性。黄河内蒙古段河道左岸的城市、铁路、公路和大面积的农田等较为集中,因此,左岸的堤防设施建设较右岸多(左岸 524 km,右岸 458 km)^[28],这也是影响河段向右岸侵蚀的原因之一。有“黄河百害,唯富一套”之称的河套灌区是内蒙古自治区有名的“塞外粮仓”。它位于内蒙古后套平原,正因为大面积灌区的存在,使得人们大量引用黄河河道内的水进行农作物的灌溉,使得灌区内干流的水量减少,泥沙大量游积在河道,有利于游荡河型的形成。1986 年龙羊峡水库和刘家峡水库联合调度后,黄河内蒙古段的径流量发生了极

大的变化。通过多年来石嘴山站径流量的距平值以及累积距平曲线可以看出(见图 9),该站在 1986 年以前径流量的距平值以正值为主,累积距平曲线呈上升趋势,而在 1986 年之后径流量的距平值以负值为主,累积距平曲线呈下降趋势。由此可以得出在水库运行后,石嘴山站的径流量发生了突变,径流量大幅度下降。因此,水库的调节调度极大的改变了黄河内蒙古段的径流过程,从而进一步影响着该河段的河道演变过程。

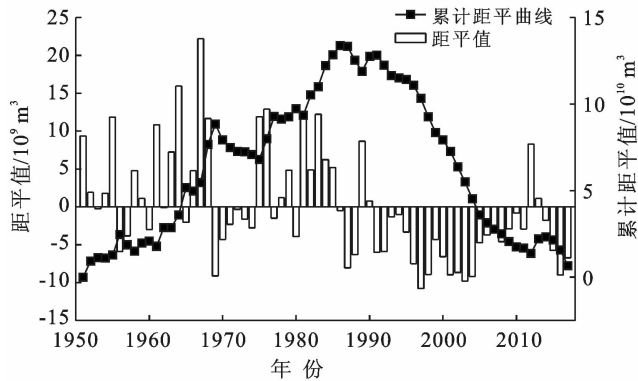


图 9 石嘴山站径流量距平变化

4 结论

本文利用 1988—2018 年期间共 7 期 Landsat 卫星影像,基于 MNDWI 水体指数对黄河内蒙古段近 30 a 的河道边界信息进行提取,计算不同时期河道摆动面积、最大摆动面积、摆动方向等指标,分析河道摆动的变化特征。得出以下结论:

(1) 河岸摆动面积在时序上的变化主要受制于汛期流量的变化情况,河道摆动面积随汛期平均流量的增大而增大。

(2) 河岸物质特征是影响河道摆动的重要因素, R_2 区域(巴彦高勒—三湖河口)河段受砂质河岸的影响,摆动幅度较大; R_1 区域河段为基岩河岸,强抗冲刷性使得河道摆动变化相对平缓。

(3) 黄河内蒙古段河道 1988—2018 年总体向右岸侵蚀, R_2 区域河道摆动范围最大, R_3 区域河段由于弯道较多,河道摆动变化多端,整体呈现向左岸迁移的趋势,且摆动范围主要集中在曲率较大的 270~315 km 处。由于中巴彦高勒—三湖河口全段(R_2)和三湖河口—包头(R_3)曲率较大的河段河道横向摆动较为严重,所以应将黄河内蒙古河段堤岸防护的重点定位在(R_2, R_3)河段。

(4) 水力条件与河岸物质构成是影响河道摆动的主要因素,摆动过程中水力条件是动力因素,河岸

物质构成是响应水动力的从属因素。另外,各种水利设施的修建、引水工程、水土保持工程等人类活动也会对河道演变造成一定的影响。

[参 考 文 献]

- [1] Fu Guobin, Chen Shulin, Liu Changming, et al. Hydroclimatic trends of the Yellow River Basin for the last 50 years [J]. *Climatic Change*, 2004, 65(1/2): 149-178.
- [2] Yu Liansheng. The Huanghe (Yellow) River: A review of its development, characteristics, and future management issues [J]. *Continental Shelf Research*, 2002, 22(3): 389-403.
- [3] 侯素珍, 常温花, 王平, 等. 黄河内蒙古河段河床演变特征分析[J]. *泥沙研究*, 2010(3): 44-50.
- [4] Ta Wanquan, Xiao Honglang, Dong Zhibao. Long-term morphodynamic changes of a desert reach of the lower Colorado River: 1976—2000 [J]. *Geomorphology*, 2005, 69(1/2/3/4): 14-27.
- [5] 申冠卿, 张原峰, 侯素珍, 等. 黄河上游干流水库调节水沙对宁蒙河道的影响[J]. *泥沙研究*, 2007(1): 67-75.
- [6] 李秋艳, 蔡强国, 方海燕. 黄河宁蒙河段河道演变过程及影响因素研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(2): 68-73.
- [7] 王随继, 范小黎, 赵晓坤. 黄河宁蒙河段悬沙冲淤量时空变化及其影响因素[J]. *地理研究*, 2010, 29(10): 1879-1888.
- [8] 王随继. 黄河流域河型转化现象初探[J]. *地理科学进展*, 2008, 27(2): 10-17.
- [9] Ran Lishan, Wang Suiji, Lu X X. Hydraulic geometry change of a large river: A case study of the upper Yellow River [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(4): 1247-1257.
- [10] Wang Suiji, Yan Yunxia, Li Yingkui. Spatial and temporal variations of suspended sediment deposition in the alluvial reach of the upper Yellow River from 1952 to 2007 [J]. *Catena*, 2012, 92: 30-37.
- [11] 王随继. 黄河银川平原段河床沉积速率变化特征[J]. *沉积学报*, 2012, 30(3): 565-571.
- [12] 王随继, 范小黎. 黄河内蒙古不同河型段对洪水过程的响应特征[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(4): 501-506.
- [13] 范小黎, 王随继, 冉立山. 黄河宁夏河段河道演变及其影响因素分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2010, 21(1): 5-11.
- [14] 冉立山, 王随继, 范小黎, 等. 黄河内蒙古头道拐断面形态变化及其对水沙的响应[J]. *地理学报*, 2009, 64(5): 531-540.
- [15] 颜明, 王随继, 闫云霞, 等. 近三十年黄河上游冲积河段的河道平面形态变化分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(3): 74-79.

[参 考 文 献]

- [1] 余新晓,吴岚,饶良懿,等.水土保持生态服务功能评价方法[J].中国水土保持科学,2007,5(2):110-113.
- [2] 冯磊,王治国,孙保平,等.黄土高原水土保持功能的重要性评价与分区[J].中国水土保持科学,2012,10(4):16-21.
- [3] 王振平,汪小钦,曾舒娇,等.福建省水土流失现状分析[J].水土保持通报,2017,37(5):169-175.
- [4] 阮伏水,韩永刚.新中国成立以来福建省水土保持工作情况[J].中国水土保持,2019(10):8-12.
- [5] 曾舒娇,汪小钦,陈贤干,等.福建省水土流失的时空变化[J].水土保持通报,2017,37(6):305-312.
- [6] 王春菊,汤小华,郑达贤,等. GIS支持下的土壤侵蚀敏感性评价研究[J].水土保持通报,2005,25(1):68-70.
- [7] 陈思旭,杨小唤,肖林林,等.基于RUSLE模型的南方丘陵山区土壤侵蚀研究[J].资源科学,2014,36(6):1288-1297.
- [8] 生态环境部,国家发展改革委.生态保护红线划定指南[Z].北京:生态环境部,2017.
- [9] 李该霞,宋蒙亚,谢丽芳,等.江苏省水土保持功能的重要性评价[J].水土保持通报,2016,36(1):236-241.
- [10] 柏松,景连东,冯文兰,等.四川省水土保持生态保护红线划定方法研究[J].生态环境学报,2018,27(4):699-705.
- [11] 刘海,黄跃飞,林苗,等.基于GIS的汉江流域水土保持时空变化特征分析(2001—2017年)[J].地域研究与开发,2019,38(3):154-159.
- [12] 蔡崇法,丁树文,史志华.应用USLE模型与地理信息系统IDRISI预测小流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持学报,2000,14(2):19-24.
- [13] 周伏建,陈明华,林福兴,等.福建省降雨侵蚀力指标R值[J].水土保持学报,1995,9(1):13-18.
- [14] 刘宝元,毕小刚,符素华,等.北京土壤流失方程[M].北京:科学出版社,2010:7-13.
- [15] 陆建忠,陈晓玲,李辉,等.基于GIS/RS和USLE鄱阳湖流域土壤侵蚀变化[J].农业工程学报,2011,27(2):337-344.

(上接第249页)

- [16] 赵水霞,李畅游,李超,等.基于3S技术的黄河内蒙古段河道演变特性分析[J].水利水电科技进展,2016,36(4):70-74.
- [17] Yao Zhengyi, Ta Wanquan, Jia Xiaopeng, et al. Bank erosion and accretion along the Ningxia-Inner Mongolia reaches of the Yellow River from 1958 to 2008 [J]. Geomorphology, 2010,127(1) 99-106.
- [18] 李健锋,叶虎平,张宗科,等.基于Landsat影像的斯里兰卡内陆湖库水体时空变化分析[J].地球信息科学学报,2019,21(5):781-788.
- [19] 徐涵秋.利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J].遥感学报,2005,9(5):589-595.
- [20] 杨修国.图像阈值分割方法研究与分析[D].上海:华东师范大学,2009.
- [21] Tieg S D, Pohl M. Planform channel dynamics of the lower Colorado River: 1976—2000 [J]. Geomorphology, 2005,69(1/2/3/4):14-27.
- [22] 李子文,秦毅,陈星星,等.2012年洪水对黄河内蒙古段冲淤影响[J].水科学进展,2016,27(5):687-695.
- [23] 冉立山,王随继.黄河内蒙古河段河道演变及水力几何形态研究[J].泥沙研究,2010(4):61-67.
- [24] 吴中海,吴珍汉.大青山晚白垩世以来的隆升历史[J].地球学报,2003,24(3):205-210.
- [25] 刘建辉,张培震,郑德文,等.贺兰山晚新生代隆升的剥露特征及其隆升模式[J].中国科学:地球科学,2010,40(1):50-60.
- [26] 李炳元,葛全胜,郑景云.近2000年来内蒙后套平原黄河河道演变[J].地理学报,2003,58(2):239-246.
- [27] 汪一鸣.历史时期黄河银川平原段河道变迁初探[J].宁夏大学学报(自然科学版),1984(2):52-60.
- [28] 王富强,韩宇平.黄河宁蒙河段冰凌成因及预报方法研究[M].北京:中国水利水电出版社,2014.

(上接第261页)

- [10] 范建忠,李登科,周辉.陕西省退耕还林工程区植被覆盖度的变化分析[J].干旱地区农业研究,2013,31(4):207-213,223.
- [11] 李旺君,吕昌河.生态建设对陕北植被变化的影响分析[J].干旱区地理,2014,37(2):318-324.
- [12] 曹艳萍,庞营军,贾晓红.2001—2016年毛乌素沙地植被的生长状况[J].水土保持通报,2019,39(2):29-37.
- [13] 闫峰,吴波,王艳姣.2000—2011年毛乌素沙地植被生长状况时空变化特征[J].地理科学,2013,33(5):602-608.
- [14] 刘登峰,王心睿,黄强,等.毛乌素沙漠南部植被指数的变化规律研究[J].水资源与水工程学报,2017,28(3):5-9.
- [15] 张翀,任志远.黄土高原地区植被覆盖变化的时空差异及未来趋势[J].资源科学,2011,33(11):2143-2149.
- [16] 刘旻霞,赵瑞东,邵鹏,等.近15a黄土高原植被覆盖时空变化及驱动力分析[J].干旱区地理,2018,41(1):99-108.
- [17] 陈振宏.浅谈榆林地区退耕还林的现状成效问题及对策[J].农业与技术,2015,35(13):82-83.