

# 1977年以来黄河临河段河岸冲淤变化 及河道萎缩速率

梅艳国<sup>1,2</sup>, 王随继<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 不同时段河道的侧向侵蚀/加积面积变化的定量研究可以揭示河道的变化特征。以黄河临河段213 km长的河段为研究对象, 利用1977年以来19个时段基于遥感影像绘制的河道平面形态图的面积变化来估算其4个亚河段(S1、S2、S3和S4)在不同时段的河岸侧向侵蚀/加积面积以及全河段的河道平均萎缩速率。研究表明, 黄河临河段左右河岸在37年间都表现为侧向净加积, 其4个亚河段左岸的侧向累计加积面积分别为33.16 km<sup>2</sup>、49.59 km<sup>2</sup>、29.52 km<sup>2</sup>和30.85 km<sup>2</sup>, 其中1995-2000年的加积面积分别占到其总加积面积的85.5%、51.2%、47.2%和104.6%; 右岸的侧向累计加积面积分别为30.83 km<sup>2</sup>、8.74 km<sup>2</sup>、26.44 km<sup>2</sup>和18.76 km<sup>2</sup>, 而1995-2000年的加积面积分别占到其总加积面积的57.2%、111.9%、65.7%和61.6%。该河段河道面积1977-2001年具有减小趋势, 2001年之后河道表现为侧向侵蚀、加积的交替变化, 1977-2014年间河道平均萎缩速率为6.16 km<sup>2</sup>/yr。该河段河道平面形态值最明显的变化也发生在1990s, 与1995年相比, 2000年的河道长度增加了5.8%, 河道面积减少了39.4%, 河道平均宽度减小了42.8%, 弯曲系数增加了6.6%。黄河临河段河道形态剧烈变化及河道严重萎缩都发生在1990s, 这主要是黄河上游刘家峡和龙羊峡水库联合运行导致汛期水沙量大量减小所致, 4个亚河段的河岸冲淤变化还受到局部河岸物质结构、护岸工程及水动力差异的影响。随着2000年后河流综合管理措施的调整, 黄河临河段河道的上述变化趋势明显弱化, 河流健康程度有所好转。

**关键词:** 河道平面形态; 河岸; 冲淤变化; 河道萎缩; 黄河

DOI: 10.11821/dlxb201609004

## 1 引言

黄河上游宁蒙冲积河段的河道演变非常复杂, 呈现出时空分异性<sup>[1]</sup>。同时, 多种河型共存于该河段, 不同河型之间的河道演变也有着明显的差异性。近几十年来由于流域来水来沙改变及人类活动等因素的影响, 河道的淤积呈现加速趋势, 主河槽萎缩严重, 排洪排凌能力降低, 给两岸人民的生产和生活带来潜在危害<sup>[2-7]</sup>。因此, 前人对该河段的河道演变进行了大量研究。李炳元等根据河道演变历史文献记录、地貌、遥感影像及其他相关资料分析了近2000年黄河后套河道演变的时空变化规律<sup>[8]</sup>。杨根生等认为黄河内蒙古河道泥沙主要来源于乌兰布和沙漠和库布齐沙漠, 粒径主要为大于0.1 mm的颗粒, 而

收稿日期: 2016-01-06; 修订日期: 2016-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271027, 41571005); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB403305)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41271027, No.41571005; Special Program of the Study of National Basic Research Program (973 Program), No.2011CB403305]

作者简介: 梅艳国(1990-), 男, 山东菏泽人, 硕士生, 研究方向为河流地貌学。E-mail: meiyg.13s@igsrr.ac.cn

通讯作者: 王随继(1966-), 男, 甘肃静宁人, 博士, 副研究员, 中国地理学会会员(S110001472M), 主要研究方向为河流沉积学、地貌学及流域地表过程。E-mail: wangsj@igsrr.ac.cn

1509-1519 页

且80%为风成沙<sup>[9]</sup>。王彦成等从水库运行对黄河内蒙古河段水沙变化、河床冲淤演变及河道平面形态变化的角度进行了分析<sup>[12]</sup>。苏腾等以黄河内蒙古河段为例研究了大型水库的联合运行对汛期库下河道断面形态参数变化的影响,认为大型水库联合运行使黄河内蒙古河道与之前相比明显萎缩<sup>[13]</sup>。针对该河段的其他研究工作主要集中在不同河道的河道断面形态变化、水力几何形态对比和河型变化、河道演变及其原因、凌汛过程和特点等方面<sup>[14-20]</sup>。王随继等采用不同年份的遥感影像通过设定固定横断面的方法对黄河银川平原段河岸的摆动速率变化及其原因进行了分析<sup>[1]</sup>。Yao等通过不同年份卫星影像的对比对黄河宁蒙河段1958-2008年河道平面形态变化进行了分析,并通过对不同年份河岸线叠加形成的不规则多边形面积进行统计估算了河岸区冲淤变化<sup>[10-11]</sup>。在黄河宁蒙河段,临河辫状河段是演变最为复杂的河段,也是地上悬河发育的河段,采用遥感方法对其河势时空变化的定量研究还很少见。为此,本文以黄河临河辫状河段(巴彦高勒水文站至三湖河口水文站之间)为研究对象,利用1977-2014年共20幅遥感影像绘制当年河道平面形态,通过统计左右河岸与固定边界形成多边形的面积变化来估算河岸侧向侵蚀/加积面积及其变化速率,同时对河道面积及其变化速率进行了定量研究,揭示了河岸冲淤及河道萎缩变化规律。该研究有助于了解黄河临河段的河道演变特征,对于该河段的河道治理具有参考作用。

## 2 研究区概况

本文研究的黄河临河段河道指巴彦高勒水文站和三湖河口水文站之间的河道(图1,其中三盛公为位于巴彦高勒站上游422 m的水利枢纽),长约213 km,位于阴山山脉和鄂尔多斯高原之间,穿越后套平原。其河道平均宽度在1.3 km

左右,平均比降为0.16‰<sup>[5]</sup>,河床宽浅,河道横向变化幅度大,滩槽高差不超过2 m,属于游荡型(辫状)河道<sup>[21]</sup>。河岸由砂质组成,在左岸有堤坝和砌石护岸,右岸以砂质滩地为主。该河段无支流汇入,河道泥沙主要为细沙<sup>[12]</sup>。

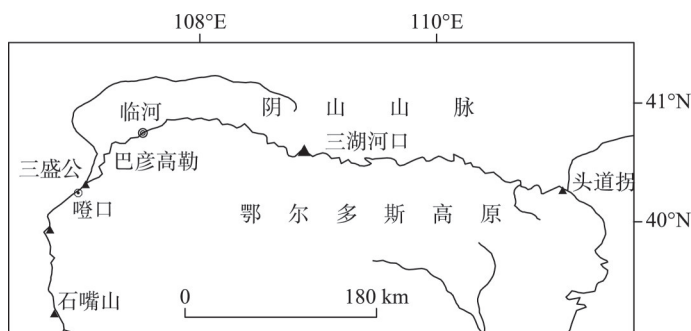


图1 研究区简图

Fig. 1 Schematic map of the study area

## 3 研究方法

遥感技术较传统监测手段具有快速、宏观、跨时段、可供系统地进行大尺度调查与监测的优势而成为研究者进行河道演变研究的一种方法<sup>[22-24]</sup>。本文选用研究区1977-2014年37年间共20期遥感影像(表1),全部申请自美国地质调查局并从其网站(<http://glovis.usgs.gov/>)下载,其中1977年为60 m分辨率的MSS数据,2010-2014年为15 m分辨率的ETM影像,其余年份为30 m分辨率的TM影像。为了减小河岸提取误差,选择成像日期为汛期(6-9月)的遥感影像,同时考虑到黄河临河段河道宽浅、水位对河道边界影响较大,在绘制汛期河道边界时为了消除水位涨落对河道宽度的影响,主要以河畔植被边界作为河道的边界,这也是研究者在提取河道边界时普遍采用的方法<sup>[1, 11, 25-26]</sup>,而对于缺少河岸植被的个别河段,以遥感图像上可辨别的最新形成的河岸为其河道边界。

在 WGS84 坐标系下, 对遥感图像进行以下处理: ① 为了突出反映河道边界及主流线信息, 在 Envi 5.0 中对 MSS 数据进行 5、4、3 波段的假彩色合成, TM 数据和 ETM 数据进行 4、3、2 波段的假彩色合成; ② 利用 Envi 的图像处理功能, 对 2014 年的遥感影像采用 1:5 万地形图选取同名地物点, 采用二次多项式方法进行纠正, 再以 2014 年的遥感影像的几何精校正为基础, 对其他各年份遥感影像按像元间点对应进行配准 (误差控制在 0.5 个像元之内); ③ 利用 ArcGIS 9.3 对不同年份的遥感图像河岸边界进行数字化, 绘制各年份的河道平面形态图和不同年代河道套绘图; ④ 在 ArcGIS 9.3 中对河道岸线长度、岸线面积变化及河道面积变化进行定量计算。

为了进行空间差异性对比, 根据 Yao 等<sup>[11]</sup>的研究结果及左右河岸 1977-2014 年摆动特点的初步判断将研究河段分为河长相差不大的 4 段 (图 2), S1 至 S4 段 2014 年的河道长度分别为 61 km、42.5 km、56.5 km 和 54 km。在这 4 个亚河段的河道右侧分别设定 2~3 个固定边界, 通过计算河岸边界与固定边界围成多边形的面积差来估算河岸的侧向侵蚀/加积面积 (图 2 展示的多边形为 2014 年河道右岸与固定边界所形成的区域, 其他年份的多边形则由各自年份左、右河岸与固定边界所组成)。根据这种方法计算多边形面积时, 每次只针对一个可变的河岸边界和 2 个或者 3 个给定的固定边界, 因此, 比计算由河道左、右两个可变的河岸边界及上下端两个固定边界所构成的多边形面积具有更小的误差。

4 研究结果

4.1 河道平面形态参数变化

从黄河临河段 1977-2014 年河道平面形态参数值及其变化趋势 (图 3) 可以看出, 河

表 1 1977-2014 年黄河临河段河道平面形态参数  
Tab. 1 Geometry parameters of the channel planforms in the Linhe reach of the Yellow River from 1977 to 2014

年份	河道长度 (km)	河道面积 (km <sup>2</sup> )	河道平均宽度 (km)	弯曲 系数
1977	204.82	469.11	2.29	1.07
1988	205.63	401.44	1.95	1.07
1989	202.23	462.03	2.28	1.05
1991	206.84	391.67	1.89	1.08
1992	204.39	411.88	2.02	1.07
1993	205.75	374.60	1.82	1.07
1995	204.30	396.42	1.94	1.06
2000	216.07	240.18	1.11	1.13
2001	219.04	222.40	1.02	1.14
2002	214.35	245.71	1.15	1.12
2003	219.92	217.39	0.99	1.15
2004	213.87	241.69	1.13	1.11
2005	220.88	227.83	1.03	1.15
2006	211.65	229.91	1.09	1.10
2007	208.87	245.14	1.17	1.09
2009	210.74	278.79	1.32	1.10
2010	209.70	248.01	1.18	1.09
2011	211.10	230.92	1.09	1.10
2013	212.71	266.21	1.25	1.11
2014	213.82	241.22	1.13	1.11

注: 河道平均宽度为河道面积除以河道长度, 河道弯曲系数为河道长度除以河谷长度 (即围绕鄂尔多斯北缘的弧长)。

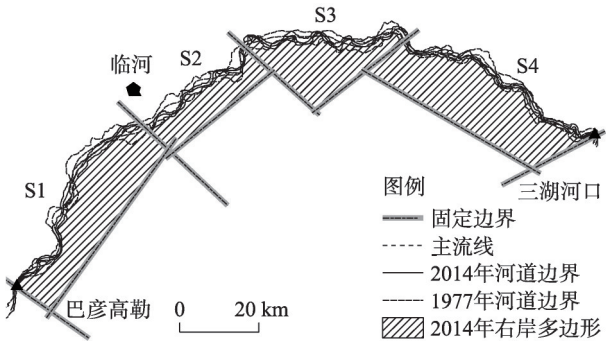


图 2 1977 年和 2014 年河势对比及河段位置  
Fig. 2 Locations of sub-reaches and channel planforms in 1977 and 2014

河道平面形态参数值 1995-2000 年间发生了显著的变化。河道面积 1977-2000 年间具有显著减小趋势, 2000 年之后则为小幅度波动变化。河道长度在 2000 年之前大致在 205 km 左右波动, 其中 1995-2000 年间大幅增加; 而 2005-2007 年间显著减小, 此后出现增加趋势, 增幅较小。

河道弯曲系数与河道长度具有相同的变化趋势。1995-2000 年间黄河临河段的河道长度增加了 11.77 km (由 204.3 km 增加到 216.07 km), 变化率为 5.8%。河道面积减少了 156.24 km<sup>2</sup> (由 396.42 km<sup>2</sup> 减少到 240.18 km<sup>2</sup>), 变化率为 39.4%。河道平均宽度的减小更为显著 (河道的平均宽度值为河道面积值除以河道长度值), 减小了 0.83 km (由 1.94 km 减少到 1.11 km), 变化率为 42.8%; 弯曲系数增加了 0.07 (由 1.06 变为 1.13), 变化率为 6.6%。

从河道平均宽度的变化趋势 (图 4a) 可以看出, S1 至 S4 的 4 个亚河段河道平均宽度的变化趋势相似, 而变化幅度有所不同。4 个亚河段的河道平均宽度在 2000 年之前总体上在减小, 其中 1995-2000 年间减小幅度最显著; 2000 年之后处于最窄时期, 且有略微增大的趋势。1995 年之前 4 个亚河段之间的河道平均宽度差距较大, 其中 1977 年差距最大, 宽度值最大的 S2 段达到了 2.8 km, 最小的 S4 段为 1.8 km, 而 2000 年之后 4 个河段的河道平均宽度值差距显著变小。在 4 个河段中 S1 段和 S4 段的变化幅度较小, 尤其在 1995 年之前。

从弯曲系数变化趋势 (图 4b) 可以看出, 4 个亚河段的弯曲系数的变化趋势较河道宽度变化更为复杂。其中 S1 段在 1990 年之前基本维持在 1.16, 之后河道弯曲系数围绕 1.20 波动, 波动幅度不大。S2 段的弯曲系数在 1995 年之前具有减小趋势 (由 1977 年的 1.15 降到了 1995 年 1.06), 1995-2003 年增

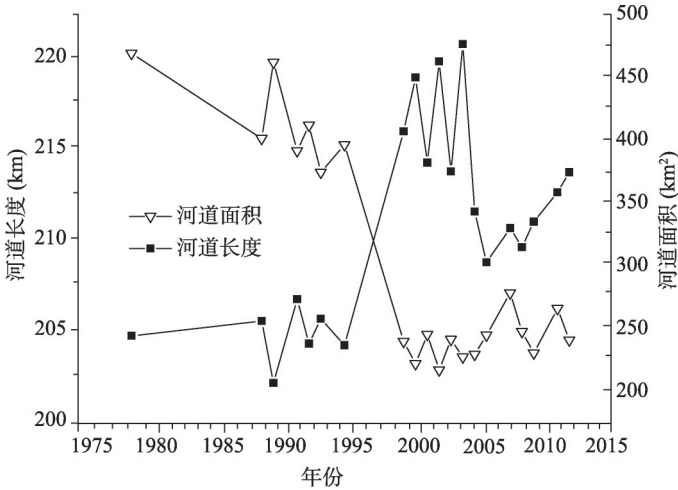


图 3 1977-2014 年黄河临河段河道长度及面积变化趋势  
Fig. 3 Variation trends of the channel length and area in the Linhe reach of the Yellow River from 1977 to 2014

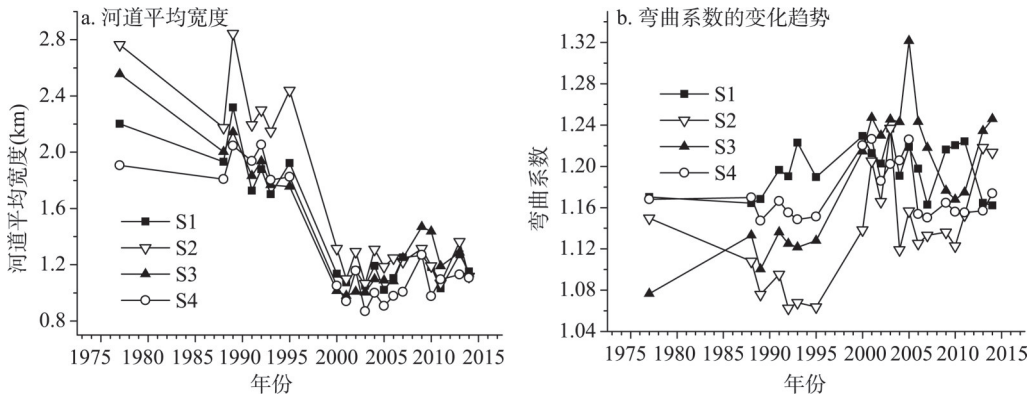


图 4 黄河临河段不同亚河段河道平均宽度及弯曲系数的变化趋势  
Fig. 4 Variation trends of the mean channel width and sinuosity in the Linhe reach of the Yellow River



加幅度较大, 2004-2010年维持在1.13附近, 2011年起则明显增大。S3段1977-2005年间增加明显(由1977年的1.08增加到2005年的1.32), 之后至2010年显著减小, 此后又出现增大趋势。S4段的弯曲系数1995年之前基本维持在1.16, 波动不大, 1995-2000年间出现了小幅增加, 之后到2004年在1.20附近波动, 到2005年之后维持在1.16附近。弯曲系数的变化趋势能反映一个河段河道的摆动情况, 结合河道平均宽度的变化, 37年间黄河临河段河道摆动较为剧烈的为S2段和S3段, S4段是最为缓和的。

## 4.2 左岸侧向冲淤面积变化

将黄河临河段不同亚河段相邻年份中后一年与前一年左岸与固定边界构成的多边形的面积相减即可得到不同亚河段相邻年份间河道左岸侧向侵蚀/加积面积(正值表示侵蚀, 负值表示加积, 图5a), 其左岸的侧向侵蚀/加积面积在不同年份、不同亚河段间差别较大。1977-2014年的37年间, 黄河临河段及其4个亚河段的河道左岸都表现为侧向净加积, 累计加积总面积分别为143.12 km<sup>2</sup>、33.16 km<sup>2</sup>、49.59 km<sup>2</sup>、29.52 km<sup>2</sup>和30.85 km<sup>2</sup>。其中1995-2000的短短5年间整个临河段及其4个亚河段左岸的侧向加积面积分别为99.92 km<sup>2</sup>、28.34 km<sup>2</sup>、25.37 km<sup>2</sup>、13.93 km<sup>2</sup>和32.28 km<sup>2</sup>, 分别是1977-2014年河岸侧向加积面积的69.8%、85.5%、51.2%、47.2%和104.6%。另外, 4个河段河道左岸同步表现为净侵蚀的时段有5个, 其中最大侵蚀面积发生在1988-1989年, 4个亚河段的侧向侵蚀面积分别为11.07 km<sup>2</sup>、17.29 km<sup>2</sup>、5.36 km<sup>2</sup>和3.7 km<sup>2</sup>; 次大值发生在2001-2002年间。

## 4.3 右岸侧向冲淤面积变化

黄河临河段右岸在不同亚河段、不同年份间的侧向侵蚀/加积面积(正值表示加积, 负值表示侵蚀, 图5b)。从中可以看出临河段右岸的侧向侵蚀/加积面积在不同年份、不同亚河段间的差距是比较明显的。37年间黄河临河段及4个亚河段右岸以侧向加积为主, 其侧向加积面积分别达到84.77 km<sup>2</sup>、30.83 km<sup>2</sup>、8.74 km<sup>2</sup>、26.44 km<sup>2</sup>和18.76 km<sup>2</sup>。1989-1991年和1995-2000年发生较大面积的侧向加积, 其中1995-2000年的5年间4个亚河段的侧向加积面积分别为17.64 km<sup>2</sup>、9.78 km<sup>2</sup>、17.36 km<sup>2</sup>和11.55 km<sup>2</sup>, 分别占1977-2014年间右岸侧向加积面积的57.2%、111.9%、65.7%和61.6%。1988-1989年右岸以侧向侵蚀为主, S1、S2和S4段的侧向侵蚀面积分别为12.73 km<sup>2</sup>、3.49 km<sup>2</sup>和8.7 km<sup>2</sup>。

## 4.4 河道冲淤面积变化及其萎缩速率

**4.4.1 河道面积变化特征** 不同年份黄河临河段4个亚河段的河道面积如图6所示, 总体

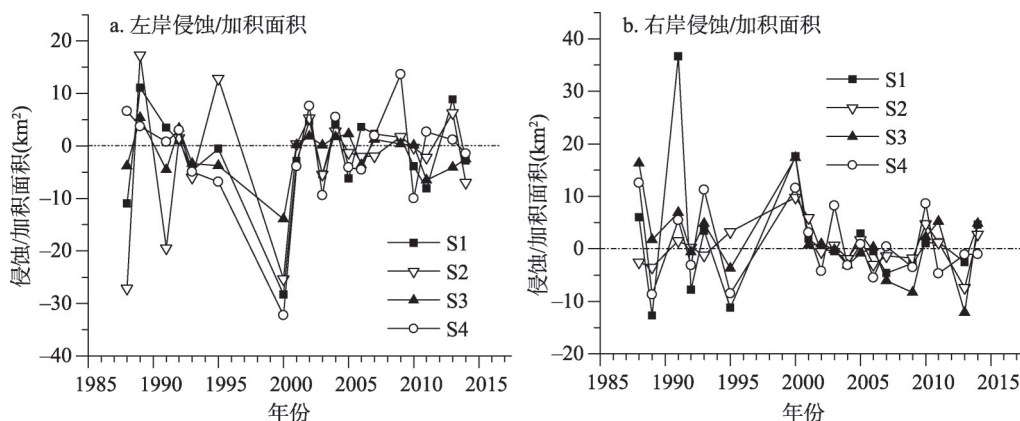


图5 1977-2014年黄河临河段不同亚河段左岸和右岸侵蚀/加积面积变化趋势

Fig. 5 Variation trends of erosion or accretion area on the left channel bank and the right channel bank of the sub-reaches in the Linhe reach of the Yellow River from 1977 to 2014

上以减小为特征,但可以划分为两个不同演变阶段:1977-2001年河道面积明显减小;2001年之后变化不大或者略有增加。利用不同时段河道面积的差值可以得到不同河段河道的侵蚀/加积面积(正值表示侵蚀,负值表示加积)(表2,图7a)。2000年之前的,4个亚河段的河道呈现出侧向加积、侧向侵蚀的交替变化,且变化幅度大,尤其是S1段和S2段。其中1977-1988年、1988-1989年和1989-1991年整个临河段的河道面积变化值分别为-67.67 km<sup>2</sup>、60.59 km<sup>2</sup>和-70.35 km<sup>2</sup>,变化最为明显。1977-2014年37年间河道以侧向加积为主,4个亚河段和整个临河段河道的侧向加积面积分别为63.98 km<sup>2</sup>、58.34 km<sup>2</sup>、55.96 km<sup>2</sup>、49.61 km<sup>2</sup>和227.89 km<sup>2</sup>,其中4个亚河段河道1995-2000年间的侧向加积面积分别为45.98 km<sup>2</sup>、35.15 km<sup>2</sup>、31.28 km<sup>2</sup>和43.83 km<sup>2</sup>,整个临河段河道加积面积为156.25 km<sup>2</sup>,分别占全时段各亚河段和临河段河道侧向加积面积的71.87%、60.25%、55.91%、88.35%和68.56%。

**4.4.2 河道面积变化速率** 将黄河临河段不同河段的河道侵蚀/加积面积除以其影像间相差年份可以得到不同亚河段的河道面积变化速率(表2,图7b),从中可以看出,S1段和S2段2000年之前河道面积变化速率较为剧烈,1988-1989年和1989-1991年分别达到23.8 km<sup>2</sup>/yr、-16.61 km<sup>2</sup>/yr和20.78 km<sup>2</sup>/yr、-10.49 km<sup>2</sup>/yr,其他各年份间的面积变化速率基本在5 km<sup>2</sup>/yr附近波动。S3段和S4段的河道面积变化速率2000年之后要大于2000年之前的,S4段2000年之后有6个时期的河道面积变化速率要大于8.5 km<sup>2</sup>/yr;S3段2000年以前的河道面积变化速率仅为5 km<sup>2</sup>/yr左右,最近几年超过10 km<sup>2</sup>/yr。2000年之前,S1至S4段河道平均侵蚀速率分别为12.65 km<sup>2</sup>/yr、8.95 km<sup>2</sup>/yr、3.81 km<sup>2</sup>/yr和6.43 km<sup>2</sup>/yr,河道平均加积速率分别为8.86 km<sup>2</sup>/yr、6.13 km<sup>2</sup>/yr、4.41 km<sup>2</sup>/yr和6.96 km<sup>2</sup>/yr;

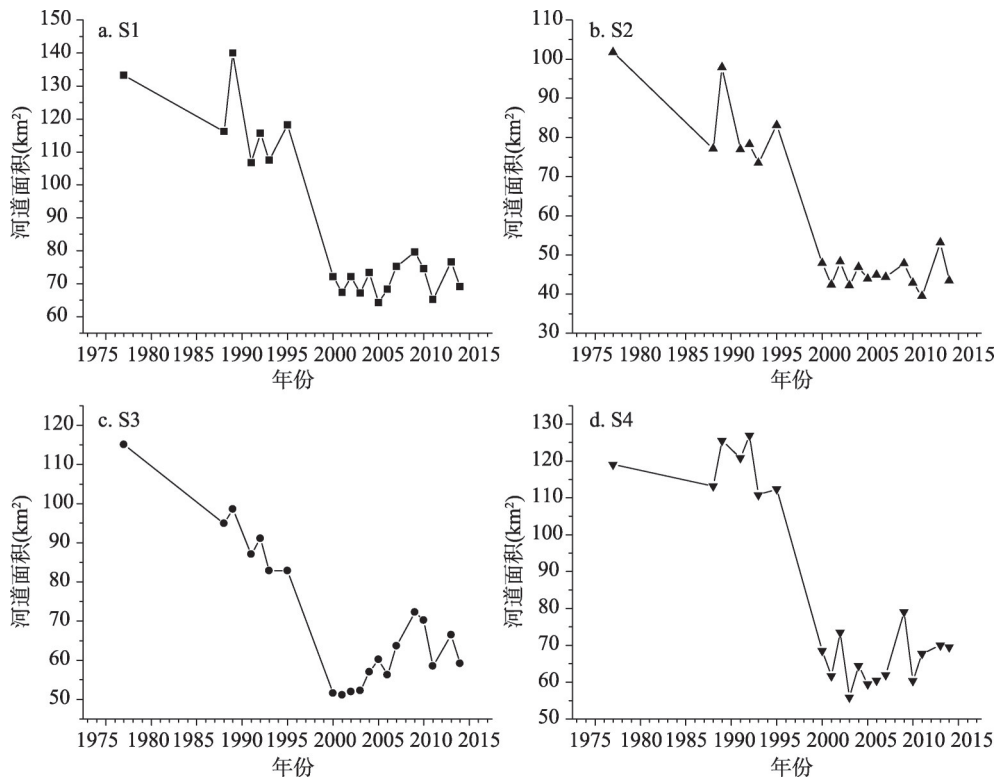


图6 黄河临河段不同亚河段河道面积变化趋势

Fig. 6 Variation trends of the channel area for the different sub-reaches in the Linhe reach of the Yellow River

表2 不同时期不同亚河段河道的冲淤面积及其变化速率(正值为冲刷, 负值为淤积)

Tab. 2 The area and rate of channel erosion (positive value) or accretion (negative value) for the sub-reaches in the study area

影像年份	冲淤面积(km <sup>2</sup> )					冲淤速率(km <sup>2</sup> /y)				
	S1段	S2段	S3段	S4段	临河段	S1段	S2段	S3段	S4段	临河段
1977-1988年	-16.97	-24.60	-20.16	-5.93	-67.67	-1.54	-2.24	-1.83	-0.54	-6.15
1988-1989年	23.80	20.78	3.61	12.40	60.59	23.80	20.78	3.61	12.40	60.59
1989-1991年	-33.22	-20.98	-11.46	-4.69	-70.35	-16.61	-10.49	-5.73	-2.35	-35.18
1991-1992年	8.83	1.27	4.02	6.08	20.20	8.83	1.27	4.02	6.08	20.20
1992-1993年	-8.10	-4.76	-8.22	-16.20	-37.28	-8.10	-4.76	-8.22	-16.20	-37.28
1993-1995年	10.63	9.62	-0.05	1.62	21.83	5.32	4.81	-0.02	0.81	10.91
1995-2000年	-45.98	-35.15	-31.28	-43.83	-156.25	-9.20	-7.03	-6.26	-8.77	-31.25
2000-2001年	-4.82	-5.53	-0.49	-6.94	-17.78	-4.82	-5.53	-0.49	-6.94	-17.78
2001-2002年	4.76	5.84	0.85	11.85	23.31	4.76	5.84	0.85	11.85	23.31
2002-2003年	-4.96	-6.06	0.32	-17.63	-28.32	-4.96	-6.06	0.32	-17.63	-28.32
2003-2004年	6.21	4.69	4.79	8.61	24.30	6.21	4.69	4.79	8.61	24.30
2004-2005年	-9.07	-2.96	3.16	-4.98	-13.86	-9.07	-2.96	3.16	-4.98	-13.86
2005-2006年	4.04	1.02	-3.91	0.94	2.08	4.04	1.02	-3.91	0.94	2.08
2006-2007年	6.91	-0.57	7.34	1.56	15.23	6.91	-0.57	7.34	1.56	15.23
2007-2009年	4.37	3.49	8.69	17.10	33.65	2.19	1.74	4.34	8.55	16.82
2009-2010年	-4.97	-5.02	-2.12	-18.67	-30.78	-4.97	-5.02	-2.12	-18.67	-30.78
2010-2011年	-9.37	-3.38	-11.71	7.37	-17.10	-9.37	-3.38	-11.71	7.37	-17.10
2011-2013年	11.35	13.72	8.01	2.22	35.29	5.67	6.86	4.00	1.11	17.65
2013-2014年	-7.42	-9.76	-7.33	-0.47	-24.99	-7.42	-9.76	-7.33	-0.47	-24.99
1977-2014年	-63.98	-58.34	-55.96	-49.61	-227.89	-1.73	-1.58	-1.51	-1.34	-6.16

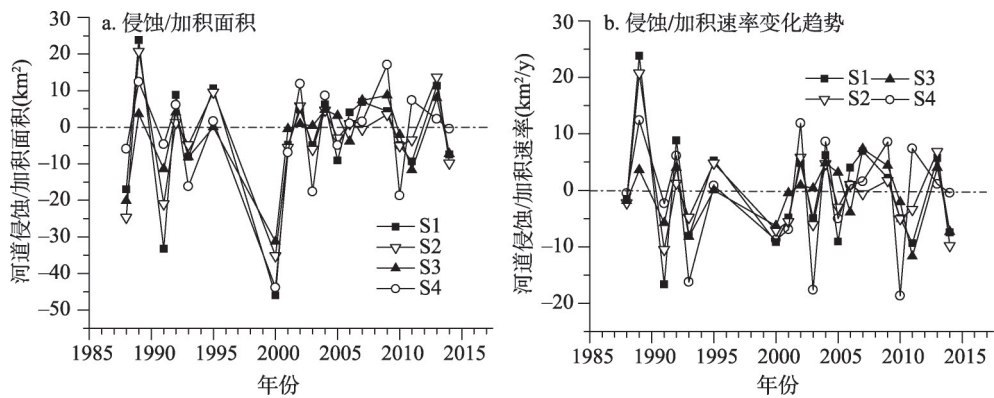


图7 1977-2014年间黄河临河段不同亚河段河道侵蚀/加积面积及其速率变化趋势

Fig. 7 Variation trends of the channel lateral erosion/accretion area and the channel lateral erosion/ accretion rate of the sub-reaches in the study area during the period 1977-2014

2000年之后4个亚河段河道平均侵蚀速率分别为4.96 km<sup>2</sup>/yr、4.03 km<sup>2</sup>/yr、3.54 km<sup>2</sup>/yr和5.71 km<sup>2</sup>/yr,河道平均加积速率分别为6.77 km<sup>2</sup>/yr、4.76 km<sup>2</sup>/yr、5.11 km<sup>2</sup>/yr和9.74 km<sup>2</sup>/yr。2000年之后河道平均加积速率要略大于侵蚀速率,在4个亚河段中河道面积变化速率较小的为S2段和S3段,变化速率最大的为S4段。

年份相差较小的河道面积变化速率要大于年份相差较大的面积变化速率。黄河临河段最大的河道面积变化速率发生在1988-1989年,达到了60.58 km<sup>2</sup>/yr,最小的为1977-1988年的-6.15 km<sup>2</sup>/yr。1977-2014年间黄河临河段及4个亚河段的河道加积速率分别为

6.16 km<sup>2</sup>/yr、1.73 km<sup>2</sup>/yr、1.58 km<sup>2</sup>/yr、1.51 km<sup>2</sup>/yr 和 1.34 km<sup>2</sup>/yr, 1977-1988 年 4 个亚河段的河道面积变化速率仅为 2 km<sup>2</sup>/yr 左右, 要远小于 2000 年之后河道面积变化速率 5 km<sup>2</sup>/yr。而 1995-2000 年间 4 个亚河段的河道加积速率分别达到 9.2 km<sup>2</sup>/yr、7.03 km<sup>2</sup>/yr、6.26 km<sup>2</sup>/yr 和 8.77 km<sup>2</sup>/yr, 要略大于河道面积变化速率。

## 5 讨论

河流的水沙变化是河床形变的动力因素, 汛期造床流量的变化可以最大限度的改变河道形态。河床及河岸物质的组成是河道形态变化的从属因素, 含沙水流和河床及河岸物质相互作用的过程则是导致河道发生形变的过程。随着社会经济的发展, 人类对于河流的干预逐渐加强, 例如河道两岸堤岸的建设会改变河道的抗冲性, 水库及水坝的建设、流域水土保持措施的实施则会改变河流的水沙过程, 进而影响河道的形变过程及形变速率。

黄河临河段的河道平面形态在上述 37 年间发生了显著变化, 其影响因素有年水沙量变化、河岸抗冲性的差异化以及河段水动力变化等。图 8 为巴彦高勒水文站年径流量和年输沙量的变化趋势, 结合图 3 可看出, 黄河临河段河道长度随着巴彦高勒站年径流量增加而减小、年输沙量增加而增加, 而河道面积随年径流量增加而增加、年输沙量增加而减小的趋势。这与 Yao 等<sup>[11]</sup>对青铜峡站的水沙数据和黄河宁蒙河段形态变化之间关系的研究结果相一致。

黄河临河段河岸由砂质泥沙组成, 在河道左岸有堤岸和砌石护岸, 心滩发育, 主流流路不定, 常发生横向摆动, 属于典型的辫状河道<sup>[5]</sup>。该河道 1977-2014 年间的侧向加积总面积为 227.89 km<sup>2</sup>, 其中左岸和右岸的侧向加积面积分别为 143.12 km<sup>2</sup> 和 84.77 km<sup>2</sup>。河道在 37 年间明显萎缩、左岸向内萎缩更大、且河流中线整体上向右岸摆动, 这主要与汛期水沙量减小及河道左岸护岸工程有关。该河段的 4 个亚段中, S2 段和 S3 段河道侧向摆动较其他两个河段更为剧烈, 而且其河道也是最宽的 (图 4a), 这是由这两段天然河道边界的抗冲性相对较弱、水流分散宽浅使河流能耗较大有关。S1 段河道接近巴彦高勒站上游 422 m 处的三盛公河流枢纽, 该枢纽下泄水流短距离内侧向扩散不易, 同时河岸防护较强, 不利于河道大幅摆动。S4 段位于该辫状河段尾部, 由于其上游段的能耗较大, 使得该亚段水动力减弱, 其河岸的摆动能力也要较其他 3 个亚河段更小。

黄河临河段 1977-1988 年和 1977-2014 年的河道面积变化速率分别为 6.15 km<sup>2</sup>/yr 和 6.16 km<sup>2</sup>/yr, 要远小于其他遥感影像间隔一到两年的河道面积变化速率, 这主要和多年间河岸摆动出现往复有关。无论如何, 该河段在这 11 年和 37 年间的侧向加积面积分别为 67.67 km<sup>2</sup> 和 227.89 km<sup>2</sup>, 表明河道整体上仍处于萎缩状态。1995-2000 年的 5 年间河道

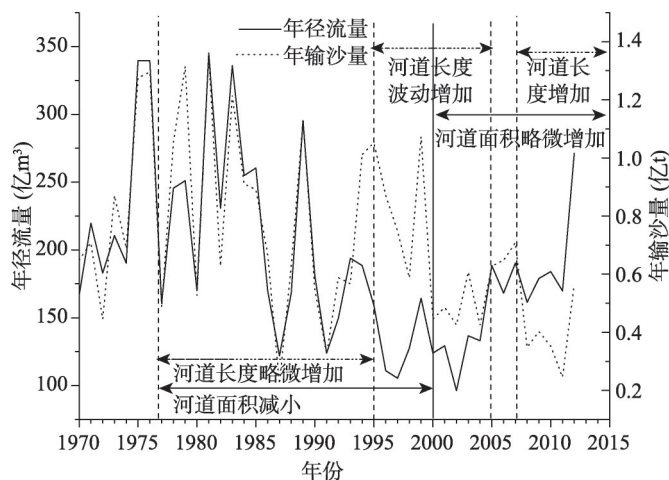


图8 巴彦高勒站年径流量及年输沙量的变化趋势  
Fig. 8 Temporal variations of annual mean runoff and sediment load at Bayangaole gauging station



侧向加积面积达到了  $156.25 \text{ km}^2$ , 其河道侧向加积速率也达到  $31.25 \text{ km}^2/\text{yr}$ , 1988-1989年和 1989-1991年河道面积变化速率分别达到了  $60.59 \text{ km}^2/\text{yr}$  和  $35.18 \text{ km}^2/\text{yr}$ , 显然, 1990s 是该河段河道萎缩最显著的阶段, 这主要是黄河上游大坝联合运行导致的结果。结合图 5 和图 6 可以发现, 1990 年之前 4 个亚河段的河道左右河岸及河道的侧向侵蚀/加积面积要大于 1990 年之后的, 这一方面跟相隔年份间河道的持续萎缩有关, 结合河道侧向侵蚀/加积速率 (图 6b) 可以发现, 除 1977-1988 年外, 1990 年之前河道的侧向侵蚀/加积速率也是要略大于 1990 年之后的。1986 年建成的龙羊峡水库与早前建成的刘家峡水库的联合运行, 主要表现为汛期来水减少, 非汛期来水增加, 洪峰流量减小<sup>[4, 12]</sup>, 这引起 1990 年代河势的大幅度调整, 造成河道的侧向加积显著, 也是河道急剧萎缩的主要原因。2000 年之后, 流域管理者为了减小黄河下游河道断流的影响而完善了水库联合运行制度, 使得研究河段的河道侧向冲淤变化强度相对减弱。

## 6 结论

(1) 黄河临河段河道平面形态参数在 2000 年前后明显不同, 其中 1995-2000 年间发生显著变化。相对于 1995 年, 2000 年的河道长度增加 5.8%, 河道面积减少 39.4%, 河道平均宽度减小 42.8%, 弯曲系数增加 6.6%。从 4 个亚河段河道形态变化可见, 中部两个河段变化最为剧烈, 而首尾两个河段变化相对缓和。

(2) 黄河临河段左右河岸 1977-2014 年的 37 年间都表现为侧向净加积, 河岸的侧向净加积导致河道面积明显萎缩, 其河道面积平均萎缩速率为  $6.16 \text{ km}^2/\text{yr}$ 。1995-2000 年的 5 年间, 4 个亚河段左岸的加积面积分别为  $33.16 \text{ km}^2$ 、 $49.59 \text{ km}^2$ 、 $29.52 \text{ km}^2$  和  $30.85 \text{ km}^2$ , 分别占其总加积面积的 85.5%、51.2%、47.2% 和 104.6%; 4 个亚河段右岸的加积面积分别为  $30.83 \text{ km}^2$ 、 $8.74 \text{ km}^2$ 、 $26.44 \text{ km}^2$  和  $18.76 \text{ km}^2$ , 分别占到了其总加积面积的 57.2%、111.9%、65.7% 和 61.6%。

(3) 1977-2014 年间, 黄河临河段河道总体上处于萎缩状态, 表现为河岸因侧向加积而致河道面积减小、河道弯度及长度略有增加。而 1990s 的河道平面形态参数的变化量几乎占有 37 年间总变化量的 50% 以上, 这主要是黄河上游刘家峡及龙羊峡水库联合运行导致汛期水沙量大量减小所致。随着 2000 年后为解决黄河下游断流问题而对水库管理措施进行的相应调整, 黄河临河段河道的上述变化趋势明显弱化, 河流健康程度有所好转。

## 参考文献(References)

- [1] Wang Suiji, Li Ling. Lateral shift rate variation of the river banks in the Yinchuan Plain reach of the Yellow River and its causes. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(3): 399-408. [王随继, 李玲. 黄河银川平原段河岸摆动速率变化及原因. *地理学报*, 2014, 69(3): 399-408.]
- [2] Zhao Wenlin, Cheng Xiuwen, Hou Suzhen, et al. Analysis of scouring and sedimentation in the channel from Ningxia to Inner Mongolia in the upper Yellow River. *Yellow River*, 1999, 21(6): 11-14. [赵文林, 程秀文, 侯素珍, 等. 黄河上游宁蒙河道冲淤变化分析. *人民黄河*, 1999, 21(6): 11-14.]
- [3] Yang Zhongmin, Ren Hongbin. Preliminary study on scour-silt ing and water-sand relationship with Ningxia-Inner Mongolia reach of Yellow River. *Northwest Hydropower*, 2004(3): 50-55. [杨忠敏, 任宏斌. 黄河水沙浅析及宁蒙河段冲淤与水沙关系初步研究. *西北水电*, 2004(3): 50-55.]
- [4] Shen Guanqing, Zhang Yuanfeng, Hou Suzhen, et al. Impact of water and sediment regulation by reservoirs in the upper Yellow River on Inner-Mongolia reaches. *Journal of sediment research*, 2007(1): 67-75. [申冠卿, 张原锋, 侯素珍, 等. 黄河上游干流水库调节水沙对宁蒙河道的影响. *泥沙研究*, 2007(1): 67-75.]
- [5] Ran Lishan, Wang Suiji. Study on channel evolution and hydraulic geometry in the Inner Mongolia reach of the Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 2010(4): 61-67. [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. 泥沙研究, 2010(4): 61-67.]
- [ 6 ] Liu Xiaoyan, Hou Suzhen, Chang Wenhua. Cause of main channel shrinkage occurred to the Inner-Mongolia reaches of Yellow River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(9): 1048-1054. [刘晓燕, 侯素珍, 常温花. 黄河内蒙古河段主槽萎缩原因和对策. *水利学报*, 2009, 40(9): 1048-1054.]
- [ 7 ] Wang S, Yan M, Yan Y, et al. Contributions of climate change and human activities to the changes in runoff increment in different sections of the Yellow River. *Quaternary International*, 2012: 66-77.
- [ 8 ] Li Binyuan, Ge Quansheng, Zheng Jingyun. Evolution of the Yellow River in the Houtao Plain of Inner Mongolia in the past 2000 years. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(2): 239-246. [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. *地理学报*, 2003, 58(2): 239-246.]
- [ 9 ] Yang Gensheng, Ta Wanquan, Dai Fengnian, et al. Contribution of sand sources to the silting of riverbed in Inner Mongolia section of Huanghe River. *Journal of Desert Research*, 2003, 23(2): 152-159. [杨根生, 拓万全, 戴丰年, 等. 风沙对黄河内蒙古河段河道泥沙淤积的影响. *中国沙漠*, 2003, 23(2): 152-159.]
- [10] Yao Z Y, Ta W Q, Jia X P, et al. Bank erosion and accretion along the Ningxia-Inner Mongolia reaches of the Yellow River from 1958 to 2008. *Geomorphology*, 2011, 127: 99-106.
- [11] Yao Z, Xiao J, Ta W, et al. Planform channel dynamics along the Ningxia-Inner Mongolia reaches of the Yellow River from 1958 to 2008: Analysis using Landsat images and topographic maps. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 70(1): 97-106.
- [12] Wang Yancheng, Feng Xuewu, Wang Lunping, et al. Influence of reservoirs in the stream of the Upper Yellow River on the reach within Inner Mongolia Autonomous region. *Yellow River*, 1996(1): 5-10. [王彦成, 冯学武, 王伦平, 等. 黄河上游干流水库对内蒙古河段的影响. *人民黄河*, 1996(1): 5-10.]
- [13] Su Teng, Wang Suiji, Mei Yanguo. Impact of joint operation of reservoirs on the change ratio of downstream cross-sectional geometry parameters. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(3): 488-500. [苏腾, 王随继, 梅艳国. 水库联合运行对库下汛期河道过水断面形态参数变化率的影响. *地理学报*, 2015, 70(3): 488-500.]
- [14] Yang Leifei. Analysis of the thaw flood discharge in the Ningxia-Neimenggu reach of the Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 1992(6): 62-68. [杨赓斐. 黄河宁夏河段凌汛洪水流量分析研究. *泥沙研究*, 1992(6): 62-68.]
- [15] Wu Jiamin, Wang Runsheng, Yao Jianhua. Remote sensing monitoring and study on the change of the Yellow River course in Yinchuan Plain sector. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2006(4): 36-39. [吴加敏, 王润生, 姚建华. 黄河银川平原段河道演变的遥感监测与研究. *国土资源遥感*, 2006(4): 36-39.]
- [16] Wang Suiji. Analysis of river pattern transformations in the Yellow River Basin. *Progress in Geography*, 2008, 27(2): 10-17. [王随继. 黄河流域河型转化现象初探. *地理科学进展*, 2008, 27(2): 10-17.]
- [17] Ran Lishan, Wang Suiji, Fan Xiaoli, et al. River channel change at Toudaoguai Section and its response to water and sediment supply of the upper Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(5): 531-540. [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. *地理学报*, 2009, 64(5): 531-540.]
- [18] Qin Yi, Zhang Xiaofang, Wang Fenglong, et al. Scour and silting evolution and its influencing factors in Inner Mongolia reach. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(3): 324-330. [秦毅, 张晓芳, 王凤龙, 等. 黄河内蒙古河段冲淤演变及其影响因素. *地理学报*, 2011, 66(3): 324-330.]
- [19] Li Qiuyan, Cai Qiangguo, Fang Haiyan. Channel evolvement and influence factors in Ningxia-Inner Mongolia reach of the Yellow River. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(2): 68-73. [李秋艳, 蔡强国, 方海燕. 黄河宁夏河段河道演变过程及影响因素研究. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(2): 68-73.]
- [20] Fan Xiaoli, Wang Suiji, Ran Lishan. Analysis of the channel evolution and influence factors in Ningxia reach of the Yellow River. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2010, 21(1): 5-11. [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. *水资源与水工程学报*, 2010, 21(1): 5-11.]
- [21] Shi Changxing, Fan Xiaoli, Shao Wenwei, et al. Channel change of the Inner Mongolian reach of the Yellow River and its causes. *Geographical Research*, 2013, 32(5): 787-796. [师长兴, 范小黎, 邵文伟, 等. 黄河内蒙古河段河床冲淤演变特征及原因. *地理研究*, 2013, 32(5): 787-796.]
- [22] Nicoll T J, Hickin E J. Planform geometry and channel migration of confined meandering rivers on the Canadian prairies. *Geomorphology*, 2010, 116: 37-47.
- [23] Zhong Kaiwen, Liu Wanxia. A riverway evolution analysis based on remote sensing technique. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2006(3): 69-73. [钟凯文, 刘万侠. 河道演变的遥感分析研究. *国土资源遥感*, 2006(3): 69-73.]
- [24] Kang Qing, Wang Xingling. Application of remote sensing technology in riverbed changes. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1999, 38(5): 109-113. [亢庆, 王兴玲. 河道演变的遥感研究方法及应用. *中山大学*

学学报(自然科学版), 1999, 38(5): 109-113.]

- [25] Winterbottom S. Medium and short-term channel planform changes of the Rivers Tay and Tummel, Scotland. *Geomorphology*, 2000, 34: 195-208.
- [26] Gurnell A M. Channel change on the River Dee meanders, 1946-1992, from the analysis of air photographs. *Regulated Rivers-Research & Management*, 1997, 12: 13-26.

## Variation of channel lateral erosion/accretion and channel shrinkage rate in the Linhe Reach of the Yellow River since 1977

MEI Yanguo<sup>1,2</sup>, WANG Suiji<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Taking the Linhe reach of the Yellow River with a channel length of 213 km as an example, this paper evaluated the area changes of channel bank erosion/accretion in four sub-reaches (S1, S2, S3 and S4) during 19 different periods on the basis of remote sensing images since 1977. Furthermore, the mean channel shrinkage rate for the whole river reach was obtained. The results show that the left and right banks of the Linhe reach were dominant in lateral net accretion during the period 1977-2014. For the left bank of the four sub-reaches, the accumulative lateral accretion areas during 1977-2014 were 33.16 km<sup>2</sup>, 49.59 km<sup>2</sup>, 29.52 km<sup>2</sup> and 30.85 km<sup>2</sup>, respectively, while the lateral accretion areas during 1995-2000 accounted for 85.5%, 51.2%, 47.2% and 104.6% of the accumulative values, respectively. For the right bank of the four sub-reaches, the accumulative lateral accretion areas in 1977-2014 were 30.83 km<sup>2</sup>, 8.74 km<sup>2</sup>, 26.44 km<sup>2</sup> and 18.76 km<sup>2</sup>, respectively, while the lateral accretion areas during the period 1995-2000 accounted for 57.2%, 111.9%, 65.7% and 61.6% of the accumulative values, respectively. The channel area of the Linhe reach was characterized by a reduction tendency from 1977 to 2001, and alternate erosion and accretion after 2001. The channel mean shrinkage rate of the Linhe reach was 6.16 km<sup>2</sup>/yr during the period 1977-2014. The most remarkable change of channel planform of the Linhe reach also occurred in the 1990s. Compared with 1995, the channel length and sinuosity increased by 5.8% and 6.6% and the channel area and mean width decreased by 39.4% and 42.8% in 2000, respectively. Significant channel planform changes and channel shrinkage for the Linhe reach occurred in the 1990s, which was mainly influenced by the joint-operation of the Longyangxia and Liujiaxia reservoirs since 1986, which resulted in substantial reductions of runoff and sediment fluxes in flooding season in a year. In addition, the bankerosion-accretion for the the four sub-reaches was also affected by the physical properties of local bank, protection engineering of channel bank and hydrodynamic differences. With the implementation of integrated river management measures since 2000, these changes have been significantly weakened and the river's health has been restored.

**Keywords:** channel planform geometry; riverbank; erosion- accretion variation; channel shrinkage; Yellow River