

黄河玛曲砾质网状河段河间湿地形态特征及发育程度

刘博一^{1,2}, 王随继^{1,2}

(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. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 河间湿地是网状河流体系中与多河道系统同等重要的地貌单元,其特征和发育程度与河道系统共同决定着网状河流的特性。本文以黄河玛曲网状河段作为研究对象,利用高分辨率Google Earth影像对研究河段河道与河间湿地等微地貌单元进行提取,利用湿地面积与湿地数对河间湿地的组成进行了分析,利用河间湿地面积占比、岸线密度、分汊点密度3个地貌参数,对河间湿地群体(河间湿地与分支河道特定组合体)的平面形态及多河道发育程度进行了研究。结果表明,河间湿地个体以中小型的为主,河间湿地群体则以大型和巨型的为主。河间湿地群体的发育程度与河间湿地群体面积(S_w)明显相关,河间湿地面积占比(P)随 S_w 的增大而增大, P 值70%是河间湿地发育成熟的指标,而 P 值80%基本是河间湿地发育的上限值,此时河间湿地与分支河道基本达到动态平衡态。岸线密度、分汊点密度随 S_w 的增加呈减小趋势,这种变化主要是由于不同大小河间湿地群体中河道发育过程差异导致。黄河玛曲段河间湿地群体的形成在于弯曲主河道的主导作用、地形限制因素削弱导致的河道带的发育,以及植被维护的河岸使得河间湿地群体得以较长时间保存。

关键词: 河道平面形态;砾质网状河;河间湿地;地貌参数;黄河

DOI: 10.11821/dlxb201707006

1 引言

河间湿地(岛屿)或河漫滩分隔形成的稳定的多河道体系是网状河区区别于其它河型最主要的特征^[1]。网状河多河道的平面形态与顺直河道,弯曲河道有明显差异^[2],而分隔河道的稳定的河间湿地(岛屿)或河漫滩则是其与辫状河的最大区别^[3-5]。近年来,随着网状河作为一种独立河型被识别出来,其沉积特征^[6-8]、河流水动力特征^[9-12]、多河道形成过程^[13-17]及其维持机制^[18-19]也得到了更广泛研究。河道加积导致的冲决作用被认为是网状河多河道形成的主要原因^[18],相对频繁的冲决作用以及相对较慢的河道废弃使得稳定的多河道得以维持^[17]。对于网状河河道平面形态特征的研究最早源于区分网状河型的需要,弯曲度、辫状指数^[3, 20]、辫状参数^[21]以及辫状比率^[22]都被用来描述网状河的平面形态特征。但是,这些源于对顺直河道、弯曲河道以及辫状河道形态特征进行描述的定量参数并不能总是很好地表征网状河多河道以及河间湿地的特征。网状河中不同河道可能展现为顺直或弯曲形态^[8],单一的弯曲度不能体现网状河多河道的特征,而辫状指数、辫状参数以及辫状比率则忽略了河间湿地与河道面积上的特征。

收稿日期: 2017-01-03; 修订日期: 2017-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571005, 41271027) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41571005, No.41271027]

作者简介: 刘博一(1993-), 男, 湖南湘潭人, 硕士研究生, 研究方向为河流地貌学。E-mail: liuby.14s@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), 研究方向主要为河流沉积学、地貌学及流域地表过程。E-mail: wangsj@igsrr.ac.cn

1195-1206 页

河间湿地是网状河流体系中与多河道系统同等重要的地貌单元,其特征和发育程度与河道系统共同决定着网状河流的特性。在其它多河道河型的研究中,有学者利用历史地图以及航片提取河间湿地(岛屿)与洲滩的平面形态特征^[23-24],进而分析了其形成、发育^[25-26]以及动态变化过程^[27-30]。河间湿地的发育与河道的发育是密不可分的。多河道形成的途径主要有两种方式,一是冲决作用切割河间湿地形成新河道^[13],二是洲滩在植被作用下稳定化,进而形成河间湿地,分隔原河道,产生新河道^[19]。两种河道发育方式都伴随着河间湿地的演化。

黄河玛曲段由于存在包括网状河在内的多河型的转换现象,受到了研究者的重视^[31-35],其中河床比降^[32]、支流汇入^[33]、河谷构造^[34]以及水沙和植被条件^[35]在河型转化过程中都起到了重要作用。而与此相比黄河玛曲段砾质网状河中的河间湿地发育的独特性相对受到了忽略。该河段中对河道起分隔作用的主要是广泛发育的在汛期也能够出露的河间湿地,位置相邻、发育上具有相似性的一系列河间湿地常以河间湿地群体的形式出现。由于上下游河型的转化,网状河段内河道与河间湿地的发育程度也存在明显差异。因而本文选择了黄河玛曲段砾质网状河作为研究对象,利用高分辨率 Google Earth 影像提取了河道、河间湿地以及河间湿地群体等微地貌单元。选择面积和湿地数量作为衡量河间湿地群体规模特征的地貌参数,选择河间湿地面积占比^[27]、岸线密度^[36]与分汊点密度^[37]作为衡量河间湿地群体发育程度的地貌参数,对该砾质网状河的河间湿地及其群体的平面形态特征、多河道发育程度进行研究。该研究有助于深入认识砾质网状河流多河道体系与河间湿地体系的组合模式,为揭示砾质网状河流演变机制而提供基本范例。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

研究区位于甘肃省西南部的玛曲县,地处青藏高原东端的甘、青、川三省区交界处^[38]。气候类型属高寒湿润型气候,年均降水量为 564 mm,年均气温 1.1 °C^[39]。境内大面积分布着高寒草原,高寒草甸草原以及沼泽类草原^[40]。玛曲全县地貌可分为西北部高山区、中南部丘陵区和东部河谷平原三大区,阿尼玛卿山由西向东横贯全县中部^[41]。黄河玛曲段干流围绕阿尼玛卿山东段,发生了 180°大转弯,形成“U”型的黄河第一湾^[31-33]。本文研究河段选择的砾质网状河段位于黄河第一湾的湾顶,黄河干流自甘肃省甘南藏族自治州玛曲县齐哈玛乡智卡至四川省阿坝藏族自治州若尔盖县沃琼公玛之间的河段(图 1),长约 65 km。河段内稳定的多河道体系与河间湿地广泛发育,形成了典型的网状河。该河段位于中南部丘陵与东部河谷平原的过度区域;上游河段为峡谷限制的弯曲河道,下游向单一的弯曲河道转变^[33]。河岸植被以区域典型的亚高山草甸草原为主,而河间湿地则主要发育了灌木林地^[39]。从沉积物来看,河岸及河间地以泥质和粉砂质为主,而河床则主要是砾石,粒度一般为 4~7 cm^[31]。根据黄河水文年鉴玛曲水文站的流量数据可知,玛曲河段 12 月-次年 4 月为枯水期,其中 2 月月均流量最小为 113.72 m³/s; 5 月-11 月为丰水期,洪峰流量主要出现在 7 月与 9 月,月均流量分别为 1046.74 m³/s、955.19 m³/s。除 1981 年 9 月出现 4320 m³/s 的极端峰值流量外,峰值流量在 7 月和 9 月分别可达 2670 m³/s、2870 m³/s。

2.2 数据来源与处理

水文数据来源于黄河水文年鉴,时间序列为 1959-1989 年和 2008-2013 年。用于地貌单元提取的高分辨率遥感数据来源于 Google Earth 中 GeoEye-1 (GE01) 以及 Worldview-2

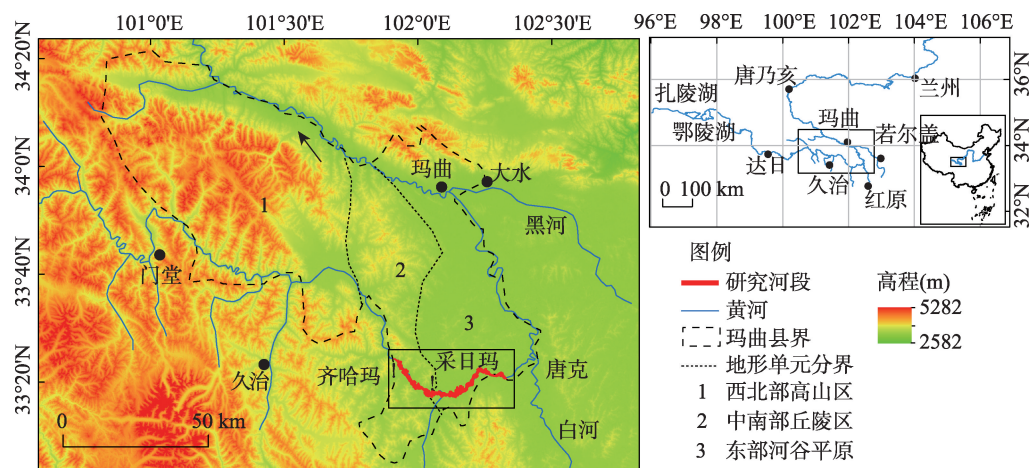


图1 研究区位置与地形条件

Fig. 1 Location and topography of study area

(WV02) 的遥感图像, 通过谷歌卫星地图下载器^[42]进行下载, 分辨率为 0.6 m。研究区域遥感影像 (图 2a) 由两颗卫星分在 3 个时段获取, 图像获取时间、覆盖河段、获取图像时的日平均流量等列于表 1 (图像 1、2、3)。图像 1 获取时下游玛曲水文站的日平均流量为 627 m³/s, 远低于 2011 年峰值流量 1860 m³/s, 是洪峰过后的遥感影像; 图像 2 和图像 3 获取时下游玛曲水文站的日平均流量分别为 1640 m³/s、1920 m³/s, 此时接近 2013 年峰值流量 1930 m³/s。考虑到网状河型相对稳定的河道形态, 短时间平面形态变化小, 受到流量影响也较小, 认为通过 3 幅图像拼接而成的影像能够有效反映该研究河段平面形态特征。

将遥感影像投影至横轴墨卡托北纬 48 带投影 (UTM 48N)、WGS84 基准面, 在 ArcGIS 平台中以 1:1000~1:2000 的比例尺进行目视解译。河道与河间湿地的边界利用植被

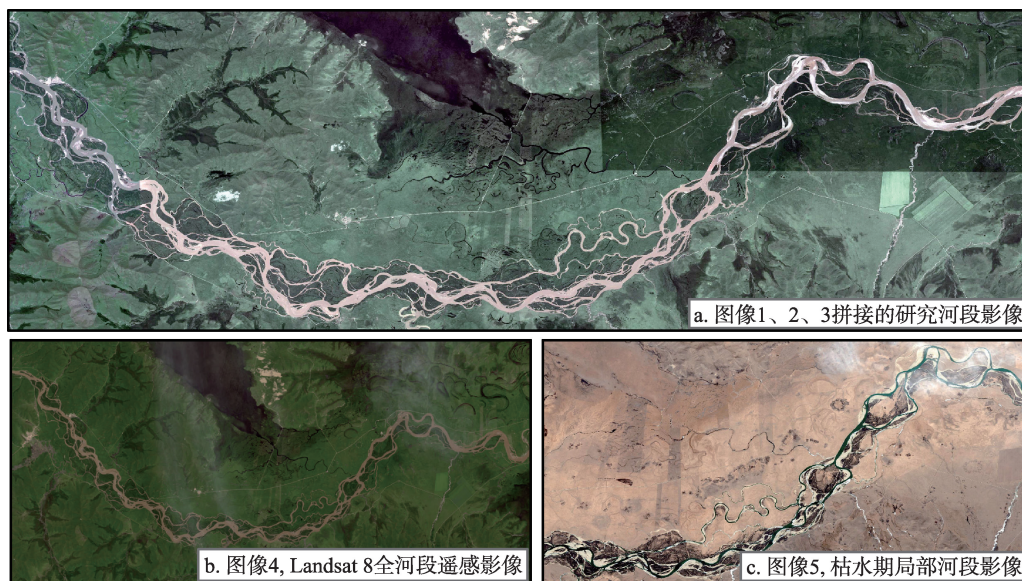


图2 研究区卫星遥感图像

Fig. 2 Satellite images of the study reach

边界进行提取。研究区提取的湿地植被覆盖几乎都超过 90% 以上, 远高于 Zanolini^[27] 的认定标准, 即植被面积覆盖 > 75%。将矢量化的河道与河间湿地边界与地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>) 下载的 2013 年 7 月 23 日 Landsat8 全河段遥感影像 (图 2b) 以及局部河段 2011 年 3 月 8 日枯水期高分辨率 Google Earth 遥感影像 (图 2c) 的实际植被边界进行比较, 发现其吻合度高, 获取条件列于表 1 (图像 4、5)。因而认为提取出的河道边界未受到遥感图像获取的时间以及流量条件的显著影响, 能够有效反映网状河的平面形态特征。

3 结果与分析

3.1 微地貌单元与特征参数

为了对研究河段形态特征进行分析, 首先需要对其典型微地貌单元进行定义并且选取合适的表达参数。黄河玛曲网状河段的微地貌单元主要有河道带、主河道、分支河道、河间湿地以及河间湿地群体。其具体定义如表 2 所示, 分布如图 3 所示。

在河道带、主河道和分支河道进行定义时主要参照了 Rice 等^[43] 对于河道等级的划分。主河道是水沙输移最主要的河道, 而其他河道在本文中都被划分为分支河道, 包括次级河道、季节性分汊河道以及滩上河道。对河间湿地进行定义时主要参照了 Gurnell

表 1 遥感图像获取条件
Tab. 1 Satellite imagery information

图像	卫星	获取日期	覆盖河段(km)	流量(m³/s)
1	WV02	2011.08.27	0~13.34	627
2	GE01	2013.07.29	13.41~45.18	1640
3	GE01	2013.08.01	45.18~64.81	1920
4	Landsat8	2013.07.23	0~64.81	1610
5	WV02	2011.03.08	25.25~59.81	113

表 2 网状河主要微地貌单元

Tab. 2 Definition of micro geomorphologic units of an anastomising river

微地貌单元	定义
河道带	网状河中所有河道发育的范围, 河道体系最外侧河道及其之间所有河道与河间湿地的集合
主河道	网状河中, 常年有活动水流, 一般情况下为河道体系中最宽的河道
分支河道	网状河中主河道以外的所有河道
河间湿地(岛屿)	汛期能够出露的由植被覆盖的河道间高地
河间湿地群体	位置相邻, 发育上具有连续性的河间湿地与分割这些河间湿地的分支河道的群体

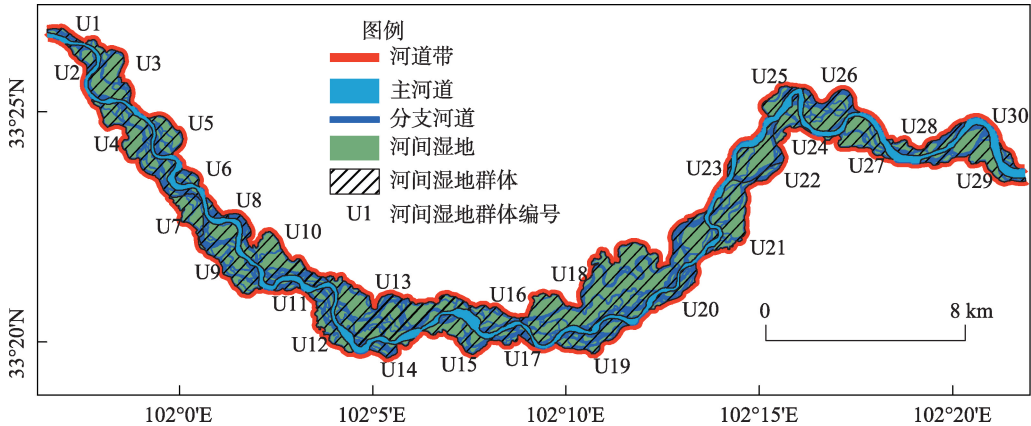


图 3 研究河段微地貌单元分布图

Fig. 3 Micro geomorphologic units in the study reach

等^[44]对建成岛屿 (established island) 的定义, 包括植被固定洲滩形成的湿地, 以及从泛滥平原上切割形成的泛滥平原切割岛。而对于河间湿地群体的划分主要参照了Rice等^[43]对复合洲滩 (compound bar) 的定义, 区别在于复合洲滩是一个连续的滩地, 洲滩上有不同程度的植被覆盖, 滩上河道和裸露滩地也是其重要组成。而本文中所述的河间湿地群体则是一系列河间湿地以及分支河道组成, 其中湿地是最主要的组成部分, 植被覆盖度高。枯水期出露的滩地在网状河中相对较少, 对河道没有起到有效的分隔作用, 在本文中被认为是河道的一部分。不同河间湿地群体由一级分支河道与部分次级分支河道分隔而成。其中一级分支河道为由主河道流出又汇入主河道的分支河道, 次级分支河道为由一级分支河道流出 (汇入主河道或者一级分支河道) 的分支河道。

面积和数量特征是河间湿地以及河间湿地群体在平面形态上最基本的特征, 因而本文选用河间湿地群体面积 S_u , 以及河间湿地群体湿地数 I 作为衡量河间湿地群体规模特征的地貌参数。以河间湿地面积占比 P 、岸线密度 D_l 和分汊点密度 D_n 来描述河间湿地群体的发育程度特征。

河间湿地面积占比 P , 表示河间湿地群体中河间湿地面积的占比 (%), 计算公式为:

$$P = S_i / S_u \quad (1)$$

式中: S_i 表示河间湿地群体中所有河间湿地的总面积; S_u 表示河间湿地群体的总面积。

岸线密度 D_l , 单位河间湿地群体中湿地岸线的长度 (km/km^2), 岸线长度一方面反映河间湿地的周长, 另一方面可间接反映分支河道的长度。计算公式为:

$$D_l = L_i / S_u \quad (2)$$

式中: L_i 表示河间湿地群体中所有河间湿地的岸线总长。

分汊点密度 D_n , 单位面积河间湿地群体中分汊点的个数 ($\text{个}/\text{km}^2$), 分汊点密度实际上反映的是分支河道的数量特征。计算公式为:

$$D_n = N / S_u \quad (3)$$

式中: N 表示河间湿地群体中所有河道分汊点数, 包括河道分汊点及河道汇合点, 参照了Bertoldi等^[37]所说的节点 (node)。

从网状河的整体平面形态结构来看, 网状河由主河道与由主河道分隔的一系列河间湿地群体组成。除极少数独立介于主河道范围内的小微型河间湿地外, 研究河段的河间湿地主要集中分布在30个河间湿地群体中, 沿程依次命名为U1, U2,, U30, 其分布如图3所示, 地貌参数如表3所示。

3.2 河间湿地的规模参数分布特征

3.2.1 单个河间湿地面积分布特征 面积与数量是河间湿地最基本的参数, 研究河段共计有河间湿地848个, 其中识别的最小河间湿地的面积为 0.0028 hm^2 , 最大的河间湿地面积为 258.75 hm^2 , 差异显著。

从不同面积等级的河间湿地数量来看, 中小型的河间湿地是其主要的组成部分 (表4)。其中面积 $< 0.1 \text{ hm}^2$ 的微型河间湿地231个, 湿地数占比为27.24%; 面积介于 $0.1 \sim 1 \text{ hm}^2$ 的小型河间湿地284个, 湿地数占比为33.49%; 面积介于 $1 \sim 10 \text{ hm}^2$ 的中型河间湿地232个, 湿地数占比为27.36%; 而面积介于 $10 \sim 100 \text{ hm}^2$ 的大型河间湿地和面积 $\geq 100 \text{ hm}^2$ 的巨型河间湿地共计103个, 湿地数占比为11.91%。

从不同面积等级河间湿地的总面积来看, 大型河间湿地面积占比最高。微小型的河间湿地共计515个, 湿地数占比达60.73%, 但总面积占比仅为2.55%。中型河间湿地总面积占比17.54%。大型河间湿地97个, 湿地数占比为11.44%, 但总面积占比高达64.87%。巨型河间湿地4个, 湿地数占比仅为0.47%, 但总面积占比也达到了15.03%。

表3 河间湿地群体的地貌参数

Tab. 3 Geomorphologic parameters used in the assessment for the development of interchannel wetlands clusters

名称	面积 S_w (hm ²)	湿地数 I (个)	河间湿地面积占比 P (%)	岸线长度 L_i (km)	岸线密度 D_i (km/km ²)	分汊点个数 N (个)	分汊点密度 D_n (个/km ²)
U1	28.58	5	44.89	4.32	15.13	7	24.49
U2	63.51	16	65.40	8.08	12.72	33	51.96
U3	250.27	22	77.32	19.50	7.79	41	16.38
U4	404.15	47	73.51	43.70	10.81	83	20.54
U5	136.88	17	74.15	14.73	10.76	29	21.19
U6	44.21	15	66.02	6.93	15.67	24	54.29
U7	128.55	16	81.96	13.62	10.59	28	21.78
U8	25.31	9	37.56	3.94	15.58	12	47.42
U9	345.31	53	75.80	39.65	11.48	65	18.82
U10	331.36	44	71.27	32.82	9.90	64	19.31
U11	27.77	8	40.83	3.64	13.12	11	39.61
U12	163.57	28	73.58	21.67	13.25	36	22.01
U13	672.94	85	79.12	71.11	10.57	143	21.25
U14	54.45	14	50.81	7.75	14.23	28	51.42
U15	170.26	27	74.86	17.73	10.41	31	18.21
U16	119.13	15	70.07	13.97	11.73	16	13.43
U17	67.94	20	50.52	10.00	14.72	31	45.63
U18	1336.17	131	79.24	110.94	8.30	202	15.12
U19	177.93	48	63.95	24.47	13.75	56	31.47
U20	95.34	41	57.09	17.20	18.04	63	66.08
U21	321.44	54	78.85	35.77	11.13	67	20.84
U22	239.77	12	73.98	14.48	6.04	15	6.26
U23	6.46	2	33.25	0.82	12.66	3	46.47
U24	96.14	13	78.33	11.31	11.76	21	21.84
U25	70.64	4	71.70	5.92	8.37	7	9.91
U26	243.44	18	71.57	22.62	9.29	32	13.15
U27	183.42	26	83.21	18.86	10.28	45	24.53
U28	114.00	14	55.55	11.24	9.86	22	19.30
U29	260.51	29	73.11	20.06	7.70	40	15.35
U30	25.73	4	52.71	3.54	13.77	7	27.21

3.2.2 河间湿地群体的面积与湿地数分布特征 河间湿地群体的规模参数主要包括面积与湿地数。研究河段的30个河间湿地群体的面积和湿地数差异显著。从面积来看（表3），最大的河间湿地群体面积达1336.17 hm²，其中河间湿地面积达1058.75 hm²；最小的仅6.46 hm²，其中河间湿地面积2.14 hm²。根据面积大小河间湿地群体可分为4个等级（表5）：面积< 100 hm²的为小型、介于100~200 hm²的为中型、介于200~500 hm²的为大型、> 500 hm²的为巨型。

不同面积等级的河间湿地群体的总面积占比存在明显差异（图4），面积> 100 hm²的

表4 不同大小河间湿地的数量与总面积

Tab. 4 Total number and total area of interchannel wetlands with different sizes

面积(hm ²)	描述	湿地数 (个)	湿地数占比 (%)	总面积 (hm ²)	总面积占比 (%)
< 0.1	微型	231	27.24	8.70	0.19
0.1~1	小型	284	33.49	108.92	2.36
1~10	中型	232	27.36	808.19	17.54
10~100	大型	97	11.44	2988.96	64.87
≥ 100	巨型	4	0.47	692.67	15.03

表5 不同大小河间湿地群体的面积与河间湿地数

Tab. 5 Total area and total number of interchannel wetlands of interchannel wetland clusters with different sizes							
面积(hm ²)	描述	群体数	总面积(hm ²)	总面积占比(%)	河间湿地数	群体数	总湿地数占比(%)
< 10		1	6.46	0.10	< 10	6	5.14
10~50	小型	5	151.59	2.44	10~20*	10	20.31
50~100		6	448.02	7.22	20~50	10	36.80
100~200	中型	8	1193.74	19.24	50~100	3	22.10
200~500	大型	8	2396.24	38.62	> 100	1	15.65
> 500	巨型	2	2009.11	32.38			

注: *表示不含20。

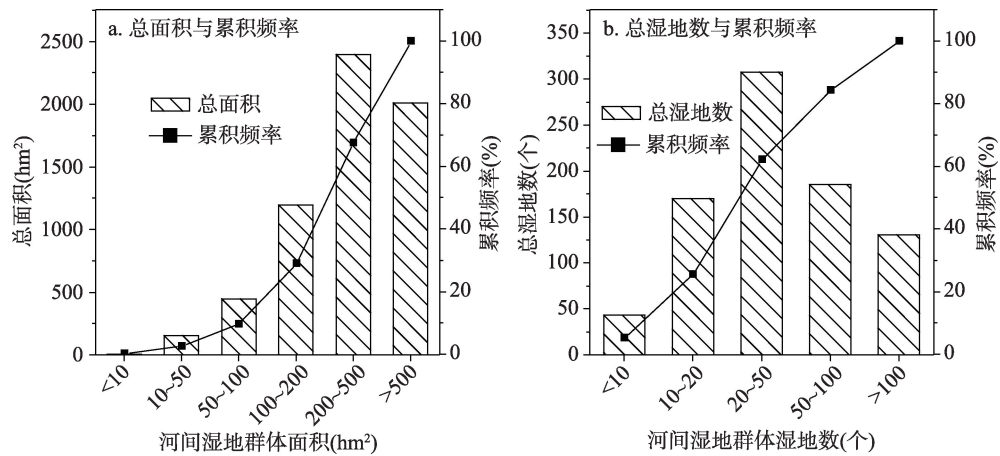


图4 不同大小河间湿地群体面积与湿地数分布

Fig. 4 Total area and total number of interchannel wetlands in interchannel wetland clusters with different sizes

三类河间湿地群体共计18个, 占河间湿地群体数和总面积的60%和90.34%。其中大型河间湿地群体的总面积占比最高, 达38.62%; 巨型河间湿地群体仅有2个, 但总面积占比高达32.38%。可见大型和巨型的河间湿地群体是网状河流体系最主要组成部分。

河间湿地群体内的湿地数也存在明显差异。最多的群体内包含了131个河间湿地, 而最少的群体仅包含2个。其中湿地数< 20的河间湿地群体共计16个(表5), 占群体数的53.33%, 湿地数≥ 20的群体14个, 占群体数的46.67%。河间湿地群体湿地数的分布与湿地面积的分布存在差异, 未出现向多湿地的河间湿地群体集中的现象。拥有最多总湿地数的河间湿地群体的湿地数介于20~50个, 总湿地数占比为39.67%。

4 讨论

4.1 河间湿地群体面积与发育程度特征参数的关系

不同大小河间湿地群体的河间湿地面积占比 P 值存在明显差异(图5), 随着河间湿地群体面积的增大 P 值也存在明显增加。当 S_w 介于0~100 hm²时, 河间湿地面积占比 P 值随 S_w 的增大快速增加, 逐步达到70%附近。当 S_w 介于100~500 hm²时, P 值增长明显放缓, 由70%逐渐增加并稳定在80%附近。当 S_w 超过500 hm²时, P 值保持稳定在80%的附近。

可见70%的 P 值应标志着河间湿地发育接近成熟。在70%以下, 随着河间湿地群体面积的增加, 河间湿地的面积占比也随之快速增加。当 P 值超过70%时, 河间湿地面积

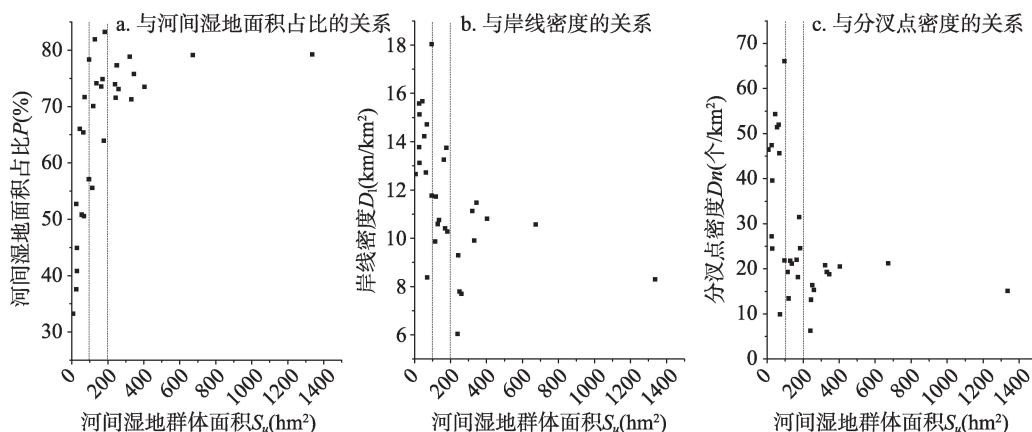


图5 河间湿地群体面积与发育程度参数的关系

Fig. 5 Relationship between area and other geomorphologic parameters of interchannel wetland cluster

占比随河间湿地群体面积增长的速度明显放缓。而80%的 P 值是该段网状河流河间湿地群体发育的一个上限值, 这种情况下河间湿地面积占比总是维持在80%左右, 而分支河道总面积占比则维持在20%, 二者之间维持着一种平衡关系, 表明网状河流系统处于形态最为稳定、分支河道及河间湿地发育的成熟阶段。

P 值随 S_w 的增长得益于稳定的水沙条件。在网状河河间湿地群体发育的过程中, 由于水沙条件的相对稳定^[32], 总河道面积也会保持相对稳定, 此时伴随河间湿地群体面积增加的以河间湿地面积的扩大为主, 表现为 P 值增加。80%的限制值的出现则是网状河中新河道形成与旧河道废弃达到动态平衡的结果^[8, 17]。网状河中河道的形成与废弃实际上是河间湿地的切割与合并过程, 在网状河中同样也处于动态平衡的状态。随着河间湿地面积的增加, 河道容量下降, 为适应过水过程的需要, 冲决作用产生, 河间湿地发生切割^[13], P 值增长受限。

岸线密度 D_l 值与河间湿地群体的面积大小有关(表6), 面积小于100 hm^2 的河间湿地群体有较高的岸线密度。 S_w 为<10 hm^2 、10~50 hm^2 和50~100 hm^2 的河间湿地群体的 D_l 均值介于12.66~14.65 km/km^2 , 整体均值为13.81 km/km^2 。而 S_w 介于100~200 hm^2 时, D_l 均值明显下降至11.33 km/km^2 , 较 $S_w < 100 \text{ hm}^2$ 的河间湿地群体低了17.96%, 当 $S_w > 200 \text{ hm}^2$ 时, D_l 均值进一步下降至9.30 km/km^2 并开始保持稳定, 相较 $S_w < 100 \text{ hm}^2$ 的河间湿地群体低了32.64%。

河间湿地群体的分汊点密度 D_n 值差异与岸线密度 D_l 值的变化存在相似的趋势。当 $S_w < 100 \text{ hm}^2$ 时, 分汊点密度 D_n 均值保持在38.60~46.47个/ km^2 , 整体均值为40.53个/ km^2 。当 S_w 介于100~200 hm^2 时, D_n 均值明显减小至21.49个/ km^2 , 较 $S_w < 100 \text{ hm}^2$ 时下降了46.97%。当 $S_w > 200 \text{ hm}^2$ 时, D_n 均值进一步下降至16.70个/ km^2 并且开始保持稳定。

显然, 对于该网状河道体系的发展来说河间湿地群体面积 S_w 值在100 hm^2 和200 hm^2 是重要的分界值, 当 $S_w < 100 \text{ hm}^2$ 时, 岸线密度和分汊点密度保持相对稳定, 当 S_w 在100~200 hm^2 时, 岸线密度和分汊点密度出现显著的下降; 当 $S_w > 200 \text{ hm}^2$ 时, 岸线密度和分汊点密度都保持在较低值。

这种发育程度上的差异是由于随着河间湿地面积变化而产生的河间湿地和分支河道主要发育过程的改变。在小型的河间湿地群体中, 由于面积的限制, 以小型分支河道和河间湿地的发育为主, 分支河道的数量和长度快速稳定增加, 表现为岸线密度和分汊点

表6 不同大小河间湿地群体的发育程度特征参数

Tab. 6 Developing level parameters of interchannel wetland clusters with different sizes

面积(hm ²)	河间湿地面积占比 P (%)			岸线密度 D_l (km/km ²)			分汊点密度 D_n (个/km ²)		
	均值	最小	最大	均值	最小	最大	均值	最小	最大
< 10	33.25			12.66			46.47		
10~50	48.40	37.56	66.02	14.65	13.12	15.67	38.60	24.49	54.29
50~100	62.31	50.52	78.33	13.31	8.37	18.04	41.14	9.91	66.08
100~200	72.17	55.55	83.21	11.33	9.86	13.75	21.49	13.43	31.47
200~500	74.46	71.27	78.85	9.27	6.04	11.48	16.33	6.26	20.84
> 500	79.18	79.12	79.24	9.43	8.30	10.57	18.18	15.12	21.25

密度保持稳定高水平。在中型的河间湿地群体发育中,随着面积的扩大,河间湿地的合并使得部分小型的分支河道发生废弃^[8, 25, 44],进而被泛滥水流的悬沙沉积填充而逐渐消失,分支河道数量增加变慢,而其长度发育则更为凸显,表现为岸线密度和分汊点密度的显著下降,其中分汊点密度下降更为明显。在大型和巨型的河间湿地群体发育过程中,河间湿地合并,分支河道消失更为明显,小型河间湿地和分支河道的发育受到限制,以中大型的河间湿地和分支河道发育为主,表现为岸线密度和分汊点密度都稳定维持在较低值。

4.2 河间湿地群体形成条件

黄河玛曲段网状河的河间湿地与分支河道局部组合形成的不同的河间湿地群体是该河段网状河的重要特征。该河段河间湿地群体的形成主要有以下原因。

第一,研究区明显存在的主河道(图3)是河间湿地群体形成的重要分割单元和联通诸多支流的主要通道。网状河流体系往往由一个主河道和众多分支河道共同组成^[13],主河道水沙输运能力高于分支河道,在河道形态的形成与演化过程中具有主导作用。与其它中小型网状河相比^[13, 15, 17, 22],黄河干流由于其规模较大,其主导作用也更为明显。研究河段主河道呈现出弯曲河道的特征,其左右两侧的水动力条件存在明显差异,河道中出现局部集中加积的现象^[13],进而导致了两侧河间湿地发育的差异。弯曲主河道在空间上形成了的不规则河曲控制了其两岸的河间湿地发育的规模和范围。使得大型的河间湿地群体主要集中在主河道的凸岸外侧,而凹岸外侧的往往较小。

第二,地形控制削弱条件下的广阔河道带为河间湿地群体的形成提供发育空间。河谷构造的控制是研究河段河型转化的重要原因^[32-33],网状河上游的下切型弯曲河道受到了两岸山地的控制,在山谷地区形成相对狭窄的河道,没有发育河间湿地的空间。随着河流从中南部丘陵区流入东部河谷平原区(图1),地形限制因素的减弱,河道带展宽,在研究河段前段,河间湿地得以发育,逐渐形成不同的河间湿地群体;而到了研究河段中段,地形限制因素进一步削弱,特别是主河道左侧,形成了两个巨型的河间湿地群体。

第三,河间湿地上灌木林地的发育是河间湿地群体得以发育并且长时间保存的重要原因。研究河段河间湿地上以灌木林地发育为主,与该区域广泛发育的亚高山草甸草原植被存在明显差异^[39]。一方面灌木林地的发育使得洲滩稳定化^[44],新的河间湿地形成,河间湿地群体发育。另一方面灌木林地增加了河间湿地对侧向侵蚀的抵抗能力^[13],特别是很大程度上削弱了主支河道侧向摆动的能力。河岸的这种强抗蚀能力使得形成的河间湿地能够有效保存,进而形成各类的河间湿地群体。

5 结论

(1) 研究区玛曲网状河段的平面形态上主要由一个弯曲的主河道以及一系列的河间

湿地和分支河道组成。河间湿地与分支河道以河间湿地群体的形式出现。从河间湿地的组成上来看河间湿地个体以中小型为主,河间湿地群体以大型和巨型为主。

(2) 河间湿地群体中河间湿地面积占比 P 值是衡量网状河流体系河间湿地与河道发育组合特征的参数。80% 的 P 值标志着此时网状河流系统处于形态最为稳定、分支河道及河间湿地发育的成熟阶段,此时河间湿地与河道的形成与消亡达到动态平衡状态。

(3) 岸线密度 D_l 值与分汊点密度 D_n 值分别反映了分支河道的长度与数量发育特征。两者随河间湿地群体面积 S_n 的增大呈减小趋势,这是由于不同面积河间湿地群体中分支河道在长度和数量上的发育差异导致。

(4) 黄河玛曲段砾质网状河中河间湿地以河间湿地群体的形式出现主要有三方面原因:弯曲主河道的分隔作用,研究河段地形控制因素的削弱以及植被对河岸的维护作用。

参考文献(References)

- [1] Schumm S A. Speculations concerning paleohydrologic controls of terrestrial sedimentation. *Geological Society of America Bulletin*, 1968, 79(11): 1573-1588.
- [2] Miall A D. A review of the braided river depositional environment. *Earth Science Reviews*, 1977, 13(1): 1-62.
- [3] Rust B R. A classification of alluvial channel systems//Miall A D. *Fluvial Sedimentology*. Canada Calgary: Canadian Society of Petroleum Geologists, 1978: 187-198.
- [4] Smith D G, Smith N D. Sedimentation in anastomosed river systems: Examples from alluvial valley near Bannf, Alberta. *Journal of Sedimentary Research*, 1980, 50(1): 157-164.
- [5] Wang S, Chen Z, Smith D G. 2005. Anastomosing river system along the middle Yangtze River Basin, Southern China. *Catena*, 60(2): 147-163.
- [6] Wang Suiji, Ren Mingda. A new classification of fluvial rivers according to channel planform and sediment characteristics. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(2): 240-246. [王随继, 任明达. 根据河道形态和沉积物特征的河流新分类. *沉积学报*, 1999, 17(2): 240-246.]
- [7] Yin Shoupeng, Xie Qingbin, Guan Shourui. Study on anastomosed river with comparative sedimentology. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(2): 221-226. [尹寿鹏, 谢庆宾, 管守锐. 网状河比较沉积学研究. *沉积学报*, 2000, 18(2): 221-226.]
- [8] Makaske B. Anastomosing rivers: A review of their classification, origin and sedimentary products. *Earth Science Reviews*, 2001, 53(3): 149-196.
- [9] Wang Suiji, Yin Shoupeng. Discussion on channel patterns of anastomosing and anabranching river. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(B08): 79-86. [王随继, 尹寿鹏. 网状河流的分汊河流的河型归属讨论. *地学前缘*, 2000, 7(B08): 79-86.]
- [10] Wang Suiji. Comparison of formation model and channel stability between two different sorts of multiple channel river patterns. *Acta Geoscientia Sinica*, 2002, 23(1): 89-93. [王随继. 两类多河道河流的形式模式及河道稳定性比较. *地球学报*, 2002, 23(1): 89-93.]
- [11] Wang Suiji. Architectures, relationships between discharges and width/depth ratios of stream cross profiles, and stream powers of anastomosing rivers. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(4): 565-570. [王随继. 网状河流的构型、流量—宽深比关系和能耗率. *沉积学报*, 2003, 21(4): 565-570.]
- [12] Wang S, Ni J, Wang G, et al. Hydrological processes of an anastomosing river system on the Zhujiang River delta, China. *Journal of Coastal Research*, 2004, 43: 124-133.
- [13] Miller J R. Development of anastomosing channels in south-central Indiana. *Geomorphology*, 1991, 4: 221-229.
- [14] Bryant M, Falk P, Paola C. Experimental study of avulsion frequency and rate of deposition. *Geology*, 1995, 23(4): 365-368.
- [15] Tabata K K, Hickin E J. Interchannel hydraulic geometry and hydraulic efficiency of the anastomosing Columbia River, southeastern British Columbia, Canada. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, 28(8): 837-852.
- [16] Wang S. Simulation experiment of anastomosing multiple channel formation//Hu C, Tan Y. *Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation*. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 1747-1753.
- [17] Abbado D, Slingerland R, Smith N D. Origin of anastomosis in the Upper Columbia River, British Columbia, Canada//Blum M D, Marriott S B, Leclair S F. *Fluvial Sedimentology VII*. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd., 2005: 1-15.

- [18] Jones L S, Schumm S A. Causes of avulsion: An overview//Smith N D, Rogers J. *Fluvial Sedimentology VI*. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd., 1999: 171-178.
- [19] Roza M G, Nogueira A C R, Truckenbrodt W. The anastomosing pattern and the extensively distributed scroll bars in the middle Amazon River. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 37(14): 1471-1488.
- [20] Brice J C. Channel patterns and terraces of the Loup Rivers in Nebraska. U.S. Geological Survey Professional Paper 422-D, Washington DC, 1964.
- [21] Friend P F, Sinha R. Braiding and meandering parameters//Best J L, Bristow C S. *Braided Rivers*. London, UK: Geological Society of London, 1993, 75: 105-111.
- [22] Makaske B, Smith D G, Berendsen H J A. Avulsions, channel evolution and floodplain sedimentation rates of the anastomosing upper Columbia River, British Columbia, Canada. *Sedimentology*, 2002, 49(5): 1049-1071.
- [23] Belletti B, Dufour S, Piégay H. What is the relative effect of space and time to explain the braided river width and island patterns at a regional scale? *River Research and Applications*, 2015, 31(1): 1-15.
- [24] Hooke J M, Yorke L. Channel bar dynamics on multi-decadal timescales in an active meandering river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(14): 1910-1928.
- [25] Osterkamp W R. Processes of fluvial island formation, with examples from Plum Creek, Colorado and Snake River, Idaho. *Wetlands*, 1998, 18(4): 530-545.
- [26] Wyrick J R, Klingeman P C. Proposed fluvial island classification scheme and its use for river restoration. *River Research and Applications*, 2011, 27(7): 814-825.
- [27] Zanoni L, Gurnell A, Drake N, et al. Island dynamics in a braided river from analysis of historical maps and air photographs. *River Research and Applications*, 2008, 24(8): 1141-1159.
- [28] Church M, Rice S P. Form and growth of bars in a wandering gravel-bed river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(10): 1422-1432.
- [29] Picco L, Mao L, Rainato R, et al. Medium-term fluvial island evolution in a disturbed gravel-bed river (Piave River, Northeastern Italian Alps). *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 2014, 96(1): 83-97.
- [30] Mikuš P, Wyžga B, Kaczka R J, et al. Islands in a European mountain river: Linkages with large wood deposition, flood flows and plant diversity. *Geomorphology*, 2013, 202: 115-127.
- [31] 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.]
- [32] Li Z, Wang Z, Pan B, et al. Analysis of controls upon channel planform at the First Great Bend of the Upper Yellow River, Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(5): 833-848.
- [33] Li Zhiwei, Wang Zhaoyin, Yu Guo'an, et al. River pattern transition and its causes along Maqu reach of Yellow River source region. *Journal of Sediment Research*, 2013, 31(3): 51-58. [李志威, 王兆印, 余国安, 等. 黄河源玛曲河段河型沿程变化及其原因. *泥沙研究*, 2013, 31(3): 51-58.]
- [34] Yu G, Liu L, Li Z, et al. Fluvial diversity in relation to valley setting in the source region of the Yangtze and Yellow Rivers. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(5): 817-832.
- [35] Yu G, Brierley G, Huang H Q, et al. An environmental gradient of vegetative controls upon channel planform in the source region of the Yangtze and Yellow rivers. *Catena*, 2014, 119: 143-153.
- [36] Kidová A, Lehotský M, Rusnák M. Geomorphic diversity in the braided-wandering Belá River, Slovak Carpathians, as a response to flood variability and environmental changes. *Geomorphology*, 2016, 272: 137-149.
- [37] Bertoldi W, Zanoni L, Tubino M. Planform dynamics of braided streams. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(4): 547-557.
- [38] Qi Dengchen, Li Guangyu. Status, causes and protection counter measures of wetland degradation in Maqu County in the Upper Yellow River. *Wetland Science*, 2008, 5(4): 341-347. [戚登臣, 李广宇. 黄河上游玛曲湿地退化现状、成因及保护对策. *湿地科学*, 2008, 5(4): 341-347.]
- [39] Chu Lin, Huang Chong, Liu Gaohuan, et al. Changes in ecological patterns of Maqu alpine wetland in Yellow River Source Area during 2000-2010. *Progress in Geography*, 2014, 33(3): 326-335. [褚琳, 黄冲, 刘高焕, 等. 2000-2010年黄河源玛曲高寒湿地生态格局变化. *地理科学进展*, 2014, 33(3): 326-335.]
- [40] Jiang Shizhong. Analysis on variety trend of runoff between Dari and Maqu in the headwater region of Yellow River in the past 50 years. *Geographical Research*, 2008, 27(1): 221-228. [姜世中. 黄河源区达日至玛曲段近50年径流量变化趋势分析. *地理研究*, 2008, 27(1): 221-228.]
- [41] Liu Hujun, Xu Xianying, Wang Jihe, et al. Type and distribution of aeolian geomorphology at Marqu Region of Upstream Yellow River. *Arid Land Geography*, 2012, 35(3): 348-357. [刘虎俊, 徐先英, 王继和, 等. 黄河上游玛曲地区

风沙地貌的类型及其分布. 干旱区地理, 2012, 35(3): 348-357.]

- [42] Singh M, Evans D, Friess D, et al. Mapping above-ground biomass in a tropical forest in Cambodia using canopy textures derived from Google Earth. Remote Sensing, 2015, 7(5): 5057-5076.
- [43] Rice S P, Church M, Wooldridge C L, et al. Morphology and evolution of bars in a wandering gravel-bed river; lower Fraser river, British Columbia, Canada. Sedimentology, 2009, 56(3): 709-736.
- [44] Gurnell A M, Petts G E, Hannah D M, et al. Riparian vegetation and island formation along the gravel-bed Fiume Tagliamento, Italy. Earth Surface Processes and Landforms, 2001, 26(1): 31-62.

Planform characteristics and developing level of interchannel wetlands in a gravel-bed anastomosing river, Maqu Reach of the Upper Yellow River

LIU Boyi^{1,2}, WANG Suiji^{1,2}

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

Abstract: Interchannel wetlands as well as multiple channels are crucial geomorphologic units in an anastomosing river system. Planform characteristics and developing level of interchannel wetlands and multiple channels have effect on anastomosing rivers. To understand the role that interchannel wetlands play in the development of the anastomosing river, a study was carried out at the Maqu reach of the Yellow River, a gravel-bed anastomosing river characterized by highly developed interchannel wetlands and anabranches. Geomorphologic units in the study reach were extracted from high resolution satellite imagery in Google Earth, size distribution of interchannel wetlands and interchannel wetland clusters (special combination of interchannel wetlands and anabranches) were investigated, and geomorphologic parameters including ratio of interchannel wetland area to interchannel wetland cluster area (P), shoreline density (D_l) and node density (D_n) were used to examine planform characteristics of interchannel wetland clusters and the development level of multiple channels in the study reach. The results suggest that interchannel wetlands with small or medium size and interchannel wetland clusters with large or mega size are more common in the study reach. The area of interchannel wetland cluster (S_u) is highly related to other geomorphologic parameters, P increases with the increase of S_u , with 80% of P value being basically the upper limit, indicating that the development of interchannel wetlands and anabranches in an interchannel wetland cluster has entered a equilibrium stage. In contrast, D_l and D_n show a tendency to decrease with the increase of S_u due to evolution processes diversity in interchannel wetland clusters with different sizes. There are three main reasons for the formation of interchannel wetland clusters: stream power diversity caused by the meandering principal channel; development of river corridor due to the weakening of geologic structure control; and high stability of interchannel wetlands due to conservation by shoreline vegetation.

Keywords: channel planform; gravel-bed anastomosing river; interchannel wetland; geomorphologic parameter; Yellow River