

潮沟对黄河三角洲湿地典型景观格局的影响

于小娟^{1,2}, 薛振山², 张仲胜², 宋晓林², 张红日¹

(1. 山东科技大学测绘科学与工程学院, 青岛 266590;
2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102)

摘要: 为揭示潮沟发育对黄河三角洲典型湿地景观类型空间分布格局的影响, 通过对 1989-2016 年黄河三角洲 7 期遥感影像进行目视解译, 在获取潮沟及湿地景观类型空间分布基础上, 通过冗余分析识别影响黄河三角洲典型湿地景观特征的主要潮沟指标。结果表明: 光滩面积占比的变化趋势与芦苇(*Phragmites australis*)、碱蓬(*Suaeda salsa*)相反; 黄河三角洲北部区域湿地景观的斑块密度整体上大于南部, 景观破碎化程度相对较高; RDA 结果显示前两个排序轴能够解释潮沟发育指标与景观格局指数关系的 85.7%, 较好地反映了两者的相关关系; 潮沟长度、数量、网络连通度和曲率对区域景观格局的影响程度较大; 潮沟分维值对景观格局影响程度最小; 潮沟长度、数量、分维值与芦苇和碱蓬的面积占比及斑块密度呈负相关关系, 与光滩面积占比呈正相关关系。

关键词: 潮沟发育; 景观格局; 冗余分析; 黄河三角洲

潮沟是滩涂上最活跃的微地貌类型单元, 是潮水与泥沙输入输出的主要通道^[1-2], 并通过潮汐涨落促进潮滩与外界海域进行物质、能量与信息的交换^[3-4]。潮沟发育的网络结构在一定程度上反映了河口区特殊的水文连通模式。潮沟网络的水文连通性越高, 越有助于促进营养物质的循环流通及生物定殖, 有利于保持栖息地生物群落的稳定性和提高群落对外界干扰的抵抗力^[5]。潮沟发育对周边植物群落演变过程有重要影响, 并与植被群落结构之间存在复杂的反馈关系^[6]。例如, 在长江口九段沙地区, 当四级潮沟向一级潮沟过渡时, 湿地地表植被逐渐演替为以芦苇(*Phragmites australis*)为主的群落^[7]。同时, 植被覆盖可以增强潮滩抗水侵蚀能力, 从而抑制潮沟的形成^[8]。例如, 在崇明东滩高植被覆盖的潮滩地区, 潮沟大多不发育, 潮沟密度较低^[9]。

景观格局是指类型、大小、形状不同的景观要素在空间的分布与配置^[10]。湿地景观格局是指大小、形状和类型不一的湿地景观斑块在空间上的排列与组合, 是各种生态过程在不同尺度上综合作用的结果, 它对景观过程和功能有重要影响^[11-12]。河口地区湿地景观格局的形成与维持受海陆双向营力控制, 而潮沟作为联系海陆物质循环过程的主要通道, 在河口三角洲地区湿地景观格局的演变过程中发挥着重要作用。因此, 量化潮沟发育指标对黄河三角洲湿地景观格局的影响至关重要, 但目前鲜有有关潮沟发育与湿地景观格局之间关系的研究。

黄河三角洲位于黄河入海口处, 是中国最年轻的新生湿地生态系统, 景观类型多样, 但也同样遭受着河道断流、植被退化等问题^[13-14]。目前大多数研究重点在黄河三角洲

收稿日期: 2019-06-10; 修订日期: 2019-10-08

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0505901); 国家自然科学基金项目 (41771103, 41671081, 41671087)

作者简介: 于小娟 (1992-), 女, 江苏徐州人, 硕士, 研究方向为水文连通响应。E-mail: yxjke02@163.com

通讯作者: 张仲胜 (1982-), 男, 山东烟台人, 副研究员, 研究方向为湿地生态。E-mail: zzslycn@163.com

湿地景观格局变化及驱动力定性分析上,且多考虑人为因素影响^[13-16],对本地区潮沟发育及其对黄河三角洲湿地景观形成与维持的影响研究较少。本文通过遥感数据提取黄河三角洲潮沟和景观空间分布图,分析潮沟发育及其形态特征对典型湿地景观类型(芦苇、碱蓬 [*Suaeda salsa*] 和光滩)的影响,量化潮沟发育各指标与景观特征的关系,以期揭示潮沟发育与湿地景观格局演变间的作用机制,为黄河三角洲湿地保育与生态恢复提供参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

黄河三角洲主要位于山东省滨州市和东营市境内,地处中纬度,地势低平,四季分明。本文研究的黄河三角洲范围(37°35'53"~37°50'56"N, 118°55'53"~119°17'31"E)北靠渤海,南临莱州湾,是位于东营市东北部黄河入海口处的潮滩部分(图1),由宋春荣沟向北延伸至30 km左右处(潮滩结束处),东部边界为海岸线(潮滩临海处),西部则以1989年内陆潮滩为界线。依据黄河河道的位置,将研究区域进一步划分为黄河三角洲北部(YRD_N)和黄河三角洲南部(YRD_S),分别对其潮沟及景观格局指数进行研究。

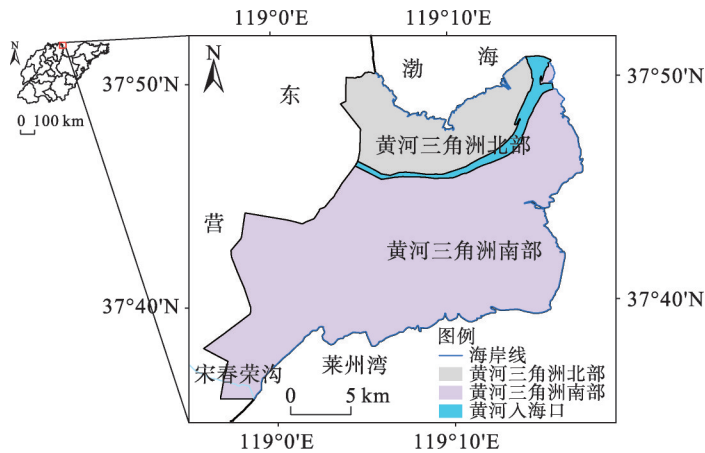


图1 研究区域
Fig. 1 Study area

1.2 数据来源

以1989-2016年遥感影像为基础(表1),获取黄河三角洲的潮沟与景观格局数据。除2016年的Landsat 8 OLI影像外,其他六期的潮沟数据来源于SPOT影像。由于SPOT影像的成像时间与植被的生长季节存在冲突,因而湿地景观类型的提取影像选取为8月底至10月初的TM/ETM/OLI影像(<http://earthexplorer.usgs.gov/>)。首先通过ENVI 5.3对影像预处理,进行辐射定标和FLAASH大气校正;其次,为了消除或减小遥感影像的几何误差,以2016年遥感影像为基准影像,选取控制点,对其他遥感影像进行几何精校正(RMS<1.0)。对于潮沟数据提取,SPOT影像的空间分辨率为20 m×20 m, Landsat 8 OLI影像的多光谱空间分辨率为30 m×30 m,因而为了消除因空间分辨率不同而产生的误差,在ArcGIS 10.3中首先将2016年的Landsat 8 OLI影像进行图像融合,即采用Gram-Schmidt算法将全色波段(Band 8)与多光谱波段融合,得到空间分辨率为15 m×15 m的

表1 主要遥感影像的成像时间及类型

Table 1 Remote sensing images used in the present work

		1989年	1992年	1998年	2003年	2009年	2012年	2016年
潮沟	类型	SPOT1	SPOT2	SPOT4	SPOT4	SPOT4	SPOT4	OLI
	时间	08-08	02-05	04-25	10-18	12-07	05-01	08-26
景观类型	类型	TM	TM	TM	ETM	ETM	ETM	OLI
	时间	10-03	08-24	09-10	08-31	09-31	08-23	08-26

影像；而后采用双线性内插方法对融合后的遥感影像进行重采样，获得空间分辨率为 20 m×20 m 的影像。最后结合研究区实际情况，在 ArcGIS 10.3 上对潮沟与景观类型（以植被有无及优势群落划定为光滩、芦苇、碱蓬、互花米草 [*Spartina alterniflora* Loisel.] 及其他）进行目视解译，得到其矢量化数据。由于潮沟数据与景观类型数据所使用的遥感影像不同，成像时间的不同导致两者在研究区域空间范围上存在一定的误差，因此以湿地景观分类图为基础，对潮沟数据进行了空间范围上的修改，以保证两者数据在空间上的一致性。2016 年遥感解译结果在 2018 年进行了野外调查验证，解译精度均大于 0.7，表明此目视解译结果是可信的。

1.3 研究方法

1.3.1 景观格局指数选取

将 1989-2016 年七期黄河三角洲景观分类图转化为栅格图层，保存为像元大小为 20 m×20 m 的 Tiff 格式，借助 Fragstats 4.2 软件计算每个时期 YRD_N 与 YRD_S 的主要景观类型（芦苇、碱蓬和光滩）的景观格局指数。为了使样本数据量达到一定统计要求，并结合研究区实际情况，将统计数据划分为黄河北部和南部三角洲，共计 14 个样本单元。考虑到本文的研究目的，湿地景观分类图里的潮沟为面状数据，以此探讨潮沟发育对湿地景观结构的影响。选取斑块面积比（*PLAND*）和斑块密度（*PD*）分别表征景观类型的扩张程度与破碎化程度；选择斑块密度（*PD*）和周长—面积分维数（*PAFRAC*）分别表征 YRD_N 和 YRD_S 整体景观的破碎度和复杂性（表 2）。

表2 景观格局指数及其描述

Table 2 Landscape indexes used in the present work

景观格局指数	缩写	应用尺度	描述	单位
斑块面积比	<i>PLAND</i>	斑块	反映某一斑块类型面积占整个景观面积的百分比，其值越大，则表明该斑块类型越多，为优势斑块类型	%
斑块密度	<i>PD</i>	斑块/景观	反映景观破碎化程度，斑块密度越大，则斑块越小，斑块数量越多，景观破碎化程度越高	个/km ²
周长—面积分维数	<i>PAFRAC</i>	景观	反映景观形状的复杂度（1~2），值越接近于 1，则表明该景观斑块形状越简单，而越接近于 2，则表明景观的斑块形状越不规则，斑块周边越复杂	—

1.3.2 潮沟发育指标选取

选取潮沟长度、密度、数量、频数、曲率、分维值及网络连通性（ α 、 β 和 γ ）9 个指标来表征黄河三角洲潮沟发育状况。这里涉及到的潮沟是线状要素。各指标计算方式及意义如下所示：

潮沟长度（*L*，km）是指研究区内所有潮沟长度之和，而潮沟密度（*d*，km/km²）则

是单位潮滩面积上的潮沟总长度^[17-18],用来描述潮沟发育的密集程度。潮沟长度越长,密度越大,代表潮沟发育和演化越好。

潮沟数量(N ,条)是指研究区内所有潮沟数量之和,而潮沟频数(f ,条/ km^2)则是单位潮滩面积上的潮沟数量^[19],二者是从数量方面来表征潮沟发育的密集程度。潮沟数量越多,频数越大,则表明潮沟发育程度越高。

潮沟曲率(c , $c \geq 1$)是指潮沟实际长度与其两端点间的直线长度之比^[20],用来描述潮沟发育的弯曲程度。 c 值越大,表明潮沟弯曲程度越高。分形维数(D)表示潮沟发育的复杂程度,是指 $\ln N(r)$ 与 $\ln 1/r$ 的斜率。其中, $N(r)$ 是指使用相同边长的小网格去完全覆盖潮沟的非空网格数量, r 则是小网格边长^[21]。 D 值越大,则表明潮沟支流越多,潮沟发育程度越好^[22-23]。

潮沟的网络连通性是通过网络环通度(α 指数)、节点连接率(β 指数)和网络连通度(γ 指数)三个指标来评价的。 α 指数是潮沟网络中实际的环路数与其可能存在的最大环路数之比,是网络中物质、能量、信息或者物种迁移路线的可选择程度^[24],即 $\alpha = (N - V + 1) / (2V - 5)$,其中 N 为沟渠数量, V 为节点数且 $V \geq 3$ 。 β 指数是潮沟网络中每个节点平均连接的潮沟数量,反映每个节点连接水系能力的强弱,即 $\beta = N / V$ 。 γ 指数是潮沟网络中的实际潮沟数量与其可能存在的最大潮沟数量之比^[25],是用来描述潮沟网络中所有节点的被连接程度,即 $\gamma = N / N_{\max} = N / 3(V - 2)$,其中 $V \geq 3$,且当 γ 接近 $1/3$ 时,潮沟网络发育呈树状结构^[26]。 α 、 β 及 γ 的取值范围分别为 $0 \sim 1$ 、 $0 \sim 3$ 及 $0 \sim 1$,值越大,表明潮沟发育的网络连通性越好,网络复杂性越强。

1.3.3 冗余分析

为了量化潮沟发育对黄河三角洲湿地典型景观的影响,选择冗余分析(Redundancy Analysis, RDA)探讨二者的关系。RDA是一种约束性直接梯度排序分析方法,能够将多个解释变量和响应变量进行多元回归分析,在两条排序轴上可视化两者的关系。以14期数据为样本,分别建立湿地景观格局指数和潮沟发育指标矩阵。为了消除量纲之间的差异,分别对两个矩阵进行标准化处理(max-min标准化),处理后的变量取值范围均在 $0 \sim 1$ 之间。然后借助Canoco 4.5软件进行RDA分析及绘图。但在进行RDA分析前,首先要对数据进行去趋势对应分析(DCA),得到4个排序轴的梯度长度分别为1.409、0.644、0.777和0.688,均小于3,说明该数据使用RDA分析比典范对应分析(CCA)更合适。

2 结果分析

2.1 典型景观类型空间变化与景观格局指数分析

2.1.1 典型景观类型空间变化分析

由于黄河水动力学等的影响,黄河三角洲潮滩面积一直在发生变化,特别是在1996年清8出汉工程实施后,新黄河入海口处泥沙淤积,而原黄河口(沙嘴)处泥沙有一定的减少^[27]。借助ArcGIS得到七期黄河三角洲湿地景观分类图,图2中的“其他”景观类型主要是指人类活动,如盐田、虾池、水库及建筑用地等。在1989-2016年间,它从内陆边界向海岸一侧延伸,范围不断扩大,侵占自然景观位置,表明人类活动日益强烈,诸如水产养殖业的发展。互花米草生长于盐度较高的海陆交界处^[28],自1990年前后引入黄河三角洲。

芦苇是淡水植物,多长于河道两侧。由于人类活动的加强,内陆边界处的芦苇面积明显在减少。自1996年黄河改道后,新黄河入海道附近由于淡咸水交互作用,芦苇面积

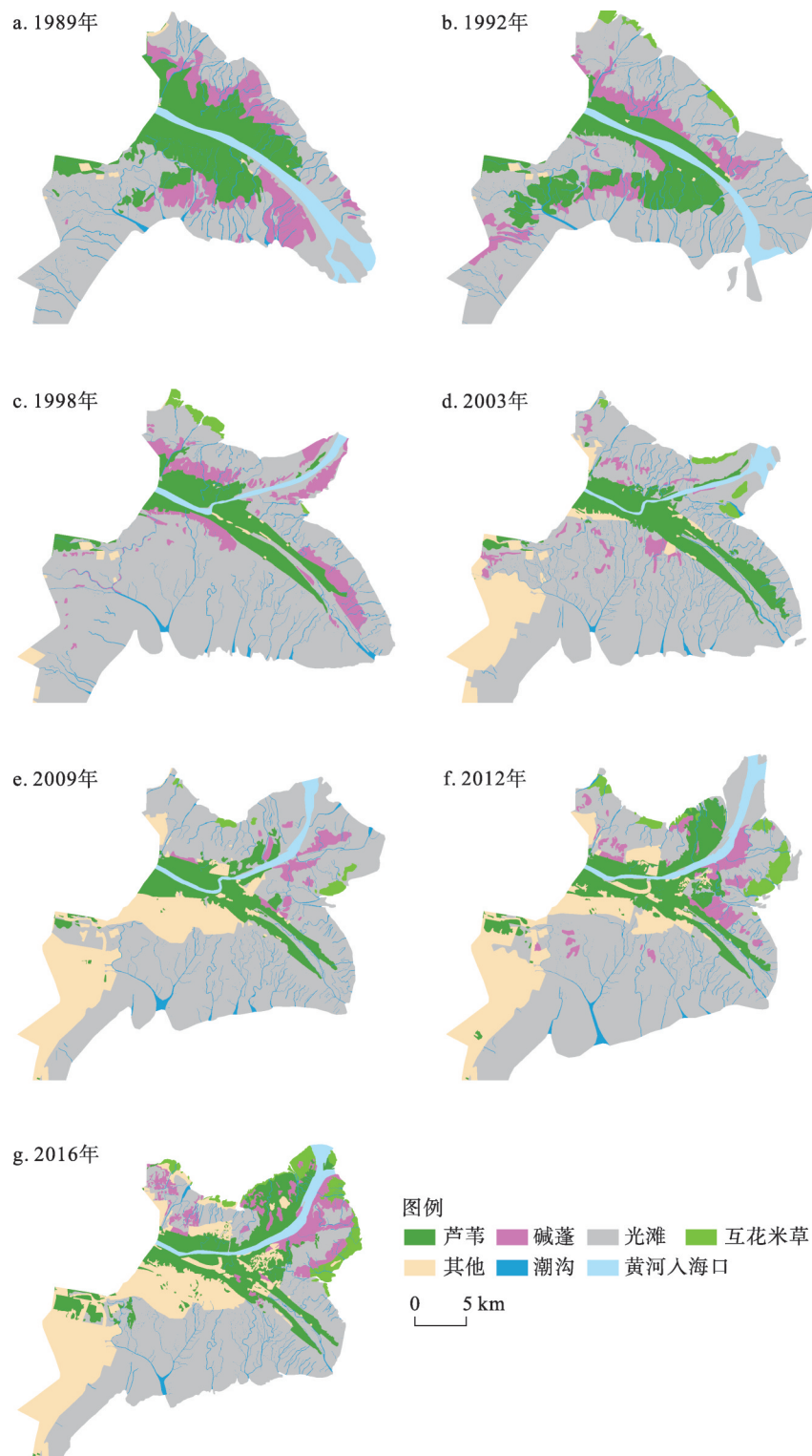


图2 1989-2016年黄河三角洲湿地景观分类

Fig. 2 Landscape distribution in the Yellow River Delta during 1989-2016

在增加,而原黄河道附近由于河道废弃,再加上人类活动的阻隔,导致一些潮沟河道被切断,阻碍了淡咸水交互,咸水趋于增多,部分芦苇死亡或退化。碱蓬与芦苇生境不同,喜盐水,耐盐碱,多分布于滩涂内^[29]。1989-2016年黄河三角洲碱蓬的空间分布明显减少,特别是1996黄河改道后,位于原黄河河道以南的碱蓬不断萎缩,到2016年几乎完全退化为光滩。而在新黄河河道附近,碱蓬趋于增长状态。但在原河道南部区域,淡水的减少和芦苇的退化并没有引起碱蓬的生长,这是一个值得去探究的问题,本文目前尚没有得出原因。光滩是指不长植被,处于退化状态的滩涂,面积最大,分布最广,是黄河三角洲主要的景观类型之一,潮沟在其领域广泛分布。

2.1.2 景观格局指数分析

在 YRD_N (图 3a) (G_PLAND 表示光滩的 $PLAND$ 结果, L_PLAND 表示芦苇的

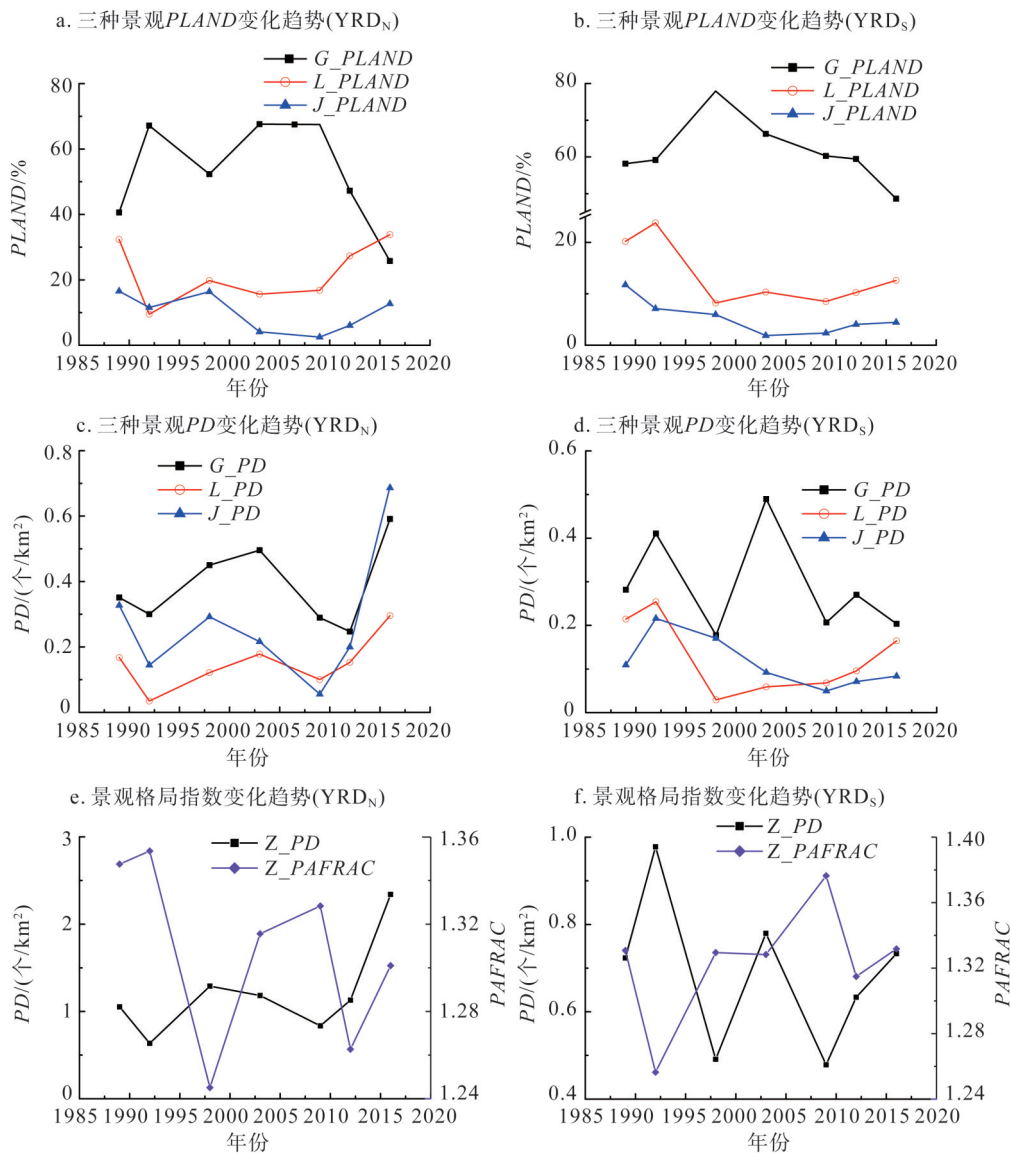


图3 1989-2016年黄河三角洲典型景观类型的格局指数变化趋势

Fig. 3 Changes of landscape indexes of typical types in the Yellow River Delta during 1989-2016

*PLAND*结果, *J_PLAND*表示碱蓬的*PLAND*结果)中, *G_PLAND*呈先增加后减少, 再增加最后持续减少的过程, 最大值与最小值分别为2003和2016年的67.60%和25.78%, 除2016年外, 光滩一直为YRD_N的优势景观类型。除1992年外, 芦苇的*PLAND*值一直高于碱蓬。1989-2016年间, 芦苇和碱蓬的*PLAND*值变化趋势与光滩基本相反。而在YRD_S (图3b)中, 光滩的*PLAND*值一直大于芦苇, 而芦苇一直大于碱蓬。虽然自1998年后, *G_PLAND*一直处于不断下降的趋势, 但其仍是优势群落, 最小值是2016年的48.63%, 最大值是1998年的77.93%。

在YRD_N (图3c) (*G_PD*表示光滩的*PD*结果, *L_PD*表示芦苇的*PD*结果, *J_PD*表示碱蓬的*PD*结果)中, 三种典型景观类型的斑块密度均处于减小与增加波动变化的过程, 且到2016年光滩、芦苇和碱蓬的斑块密度均达到最大值, 分别为0.591个/km²、0.296个/km²和0.690个/km², 说明2016年YRD_N的三种典型景观的破碎化程度最高。在YRD_S (图3d)中, 光滩的破碎化程度均高于芦苇和碱蓬, 2003年斑块密度达到最大值, 为0.490个/km²。近几年, 芦苇和碱蓬的斑块密度呈逐渐增加的状态, 破碎化不断加剧。

不管是在YRD_N还是YRD_S中, 从景观水平角度出发, *PD*和*PAFRAC*都大致呈“W”趋势上下波动 (图3e、图3f) (*Z_PD*表示整体景观水平的*PD*结果, *Z_PAFRAC*表示整体景观水平的*PAFRAC*结果)。相对于2012来, 2016年的各景观格局指数均为增大状态, 说明近五年来景观破碎化程度在提高, 景观形状和景观结构逐渐趋于复杂。在YRD_N中, *PD*最小值为1992年的0.635个/km², 最大值则为2016年的2.340个/km², 是最小值的3.69倍左右, 说明整体上北部湿地的景观破碎化加剧较为严重; *PAFRAC*最大值为1992年的1.54, 最小值为1998年的1.245, 说明北部三角洲的景观形状和结构在1992年最为复杂, 在1998年最为简单。对YRD_S来说, 除1992年外, 其*PD*值均小于YRD_N, 而*PAFRAC*值除1989年和1992年外均大于YRD_N, 说明相对于北部三角洲来说, 南部三角洲的景观破碎化程度较低, 而景观形状与结构较为复杂。

2.2 潮沟形态变化

从1989-2016年, YRD_N的潮沟长度平均值为102.897 km, 最大值与最小值分别为1992年的199.961 km和2012年的52.070 km (表3); 平均潮沟密度为0.960 km/km², 最大值与最小值分别为1989年的1.373 km/km²和2012年的0.612 km/km²。在YRD_S区域, 潮沟长度平均值为371.219 km, 最大值与最小值分别为2003年的549.334 km和1989年的328.365 km; 平均潮沟密度为1.109 km/km², 最大值与最小值分别为1992年的1.409 km/km²和2012年的0.856 km/km²。1992-1998年YRD_N潮沟长度的突然减少, 是由于1996年清8出汊工程的实施, 迫使黄河改道^[30], 北部潮滩及潮沟大幅度减少, 而YRD_S潮沟长度在1998年只增长了29.000 km, 且密度反而下降 (1992 vs. 1998=1.409 vs. 0.880), 可能是因为原入海口海域失去沙源补给, 有利于潮沟产生, 但潮沟形成需要一定的时间, 加之南部潮滩增大, 因此潮沟密度有一定的减小。在2003年, YRD_S的潮沟长度和潮沟密度异常增大, 这是由于2002年7月4日对黄河进行的首次调水调沙试验, 大大改善了水少沙多、水沙不平衡的状况, 显著冲刷了下游河槽, 减少了下游的泥沙淤积^[31]。而YRD_N的潮沟长度和密度变化幅度相对较小, 可能是因为黄河三角洲北部的光滩面积和潮沟较少, 加上人类活动较多, 比如油田开采和道路修建, 阻碍了调水调沙工程的实施, 而三角洲南部区域光滩面积较大, 且自然景观偏多, 易受调水调沙的影响。

1989-2016年YRD_N平均每年潮沟数量为56条, 平均每年潮沟频数为0.548条/km²,

表3 1989-2016年YRD_N和YRD_S潮沟发育指标计算结果
Table 3 Indexes of tidal channels in the YRD_N and YRD_S during 1989-2016

	年份	<i>L</i>	<i>N</i>	<i>d</i>	<i>f</i>	<i>c</i>	<i>D</i>	α	β	γ
YRD _N	1989	172.216	90	1.373	0.718	1.173	1.041	0.137	1.250	0.429
	1992	199.961	83	1.154	0.479	1.121	1.038	0.113	1.203	0.413
	1998	66.237	33	0.806	0.402	1.199	1.028	0.308	1.500	0.550
	2003	75.055	46	0.954	0.585	1.165	1.034	0.230	1.394	0.495
	2009	73.671	45	0.820	0.501	1.226	1.023	0.321	1.552	0.556
	2012	52.070	34	0.612	0.400	1.178	1.008	0.485	1.789	0.667
	2016	81.071	61	0.998	0.751	1.185	1.049	0.293	1.525	0.535
YRD _S	1989	328.365	186	1.381	0.782	1.126	1.053	0.044	1.081	0.365
	1992	332.911	166	1.409	0.703	1.179	1.044	0.032	1.057	0.357
	1998	361.911	200	0.880	0.486	1.119	1.040	0.107	1.205	0.407
	2003	549.334	381	1.408	0.977	1.124	1.085	0.009	1.016	0.340
	2009	337.553	2267	0.883	0.594	1.131	1.049	0.121	1.234	0.416
	2012	348.682	240	0.856	0.589	1.130	1.051	0.119	1.231	0.415
	2016	339.779	260	0.947	0.725	1.129	1.060	0.111	1.215	0.409

最大潮沟频数为2016年的0.751条/km²，最小潮沟频数为2012年的0.400条/km²；YRD_S平均每年潮沟数量为237条，平均每年潮沟频数为0.694条/km²，最大潮沟频数为2003年的0.977条/km²，最小潮沟频数为1998年的0.486条/km²。与潮沟长度和密度类似，都是表征潮沟发育密集程度的指标。

1989-2016年YRD_N和YRD_S潮沟曲率的平均值和方差分别为1.178 vs. 1.134和0.00104 vs. 0.00041，说明潮沟曲流发育变化波动较小，潮沟发育较为稳定。1989-2016年YRD_N和YRD_S潮沟平均分维值分别为1.032和1.055，所有的*D*值都大于1，但同时，这些分维值都较低，很大程度上跟黄河三角洲潮滩宽阔平缓的地形有很大的关系。一般认为，山区排水系统的分维值较高，而位于低地平原的流域具有较低的分形维数^[22]。

1989-2016年YRD_N和YRD_S的平均 α 指数分别为0.270和0.076，数值相对较低，表明相对于YRD_N来说，YRD_S潮沟呈现较高线性连接和较低环状连接的网络特征，网络结构更简单^[26]。2003年YRD_S的 α 值为最低，只有0.009，表明2003年潮沟发育几乎没有环路存在。1989-2016年YRD_N和YRD_S的平均 β 指数分别为1.459和1.148，低的 β 值表明节点间的连接性较低，所形成的连接途径可能相对比较薄弱，网络连接能力较差。在2003年，YRD_S的 γ 值为0.340，最接近1/3，表明2003年潮沟发育呈树状结构。1989-2016年间，YRD_N和YRD_S的 α 、 β 及 γ 值变化趋势基本一致，且YRD_N的值始终大于YRD_S的值，表明YRD_N潮沟发育的网络连通性相对较好，网络结构较为复杂。

2.3 潮沟发育对典型景观类型的影响分析

由潮沟发育指标和各景观格局指数的RDA分析结果（表4）可知，环境因子前两个排序轴的相关系数为0，表明这两个排序轴是完全垂直的；物种前两个排序轴的相关系数为0.0214（<0.05），说明这两个排序轴也是几乎完全垂直的。物种排序轴与环境因子轴的相关性大于0.85，可知潮沟发育指标与各景观格局指数之间的RDA排序结果是可信的，能够较好地反映潮沟发育程度与黄河三角洲典型景观类型之间的相关关系。前两个

排序轴的特征值分别为0.527和0.097，环境变量对物种的累计解释百分比分别为72.3%和85.7%，即第一轴解释了潮沟发育指标与景观格局关系的72.3%，第二轴解释了13.4%，说明RDA排序轴反映了两者关系的大部分信息。

RDA分析的结果以二维形式展示在排序图上(图4)(水平方向为第一轴，垂直方向为第二轴)，可以直观地看到潮沟发育指标与黄河三角洲典型景观格局指数之间的关系。潮沟发育指标与景观格局指数箭头连线的夹角代表两者的相关性，夹角越小，则正相关越强；若两者几乎成直角，则表示两者几乎不相关；若夹角越大($>90^{\circ}$)，则负相关越强。潮沟发育指标的箭头连线的长短代表着各指标与景观格局指数相关程度的大小，连线越长，则表示该指标对景观格局指数的影响程度越大。

由图4可知，景观格局指数主要受 N 、 L 、 γ 和 c 等潮沟发育指标的影响，其中 N 、 L 与轴1呈负相关，相关系数分别为-0.506与-0.523； γ 、 c 与轴1呈正相关，相关系数分别为0.352和0.539。 d 与 J_PLAND 、 c 与 L_PLAND 、 γ 与 L_PD 、 L 与 Z_PAFRAC 的箭头方向最为一致，夹角最小，说明 d 与 J_PLAND 、 c 与 L_PLAND 、 γ 与 L_PD 、 L 与 Z_PAFRAC 有很大的相关性，即潮沟密度与碱蓬的面积占比、潮沟曲率与芦苇的面积占比、潮沟的网络连通度与芦苇的破碎化、潮沟长度与整体景观的斑块复杂性有较强的正相关。 N 、 L 、 D 与 J_PD 、 J_PLAND 的箭头连线夹角均为钝角，方向相反，说明 N 、 L 、 D 与 J_PD 、 J_PLAND 有较大的相关性，即潮沟数量、长度及分维值与碱蓬的面积占比和破碎化程度有较强的负相关关系，可能是因为伴随黄河而来的泥沙加快了潮沟积水，在一定程度上阻碍了咸水入侵，使碱蓬长期处于盐度较小的生境中，因此导致了碱蓬退化甚至消失。这种情况在盘锦湿地出现过^[32]。 N 、 L 与 L_PD 、 L_PLAND 的箭头连线夹角也均为钝角，说明潮沟数量、长度与芦苇的面积占比和破碎化程度也呈较大的负相关关系，但原因有待进一步详查。 N 、 L 与光滩的面积占比呈正相关，与光滩的破碎化呈负相关。 D 的箭头长度最短，说明潮沟分维值对于景观格局指数的影响程度是最小的； c 的箭头长度最长，说明潮沟曲率是对黄河三角洲景观格局贡献最强的潮沟指标。

3 结论与讨论

1989-2016年黄河三角洲芦苇和碱蓬面积占比整体上呈先下降再小幅度增大的趋势，而光滩面积占比则在近十年来呈显著下降趋势。在黄河北部三角洲，不管是芦苇、碱蓬和光滩，还是景观水平上的斑块密度，都在逐渐增加，景观破碎化程度在提高，而南部景观类型的斑块密度呈波动变化的过程。潮沟发育各指标对黄河三角洲典型景观格局有不同的影响，潮沟密度

表4 RDA前两轴的统计结果
Table 4 Summary of RDA for the first two axes

	SPX1	SPX2
特征值	0.527	0.097
物种—环境相关性	0.894	0.917
物种—环境变异累计百分比/%	72.3	85.7
前两轴相关性	0.0214	

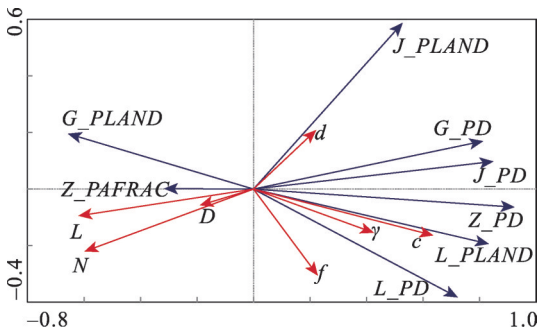


图4 潮沟发育指标与景观格局RDA排序结果
Fig. 4 RDA results between tidal development index and landscape index of typical vegetation

与碱蓬面积占比呈正相关性;潮沟长度、数量、分维值与芦苇和碱蓬的面积占比及斑块密度呈负相关关系,与光滩面积占比呈正相关关系;潮沟频数与芦苇斑块密度存在正相关性;而网络连通度和潮沟曲率对芦苇面积占比及芦苇破碎化度有很大的正相关性;潮沟分维值对黄河三角洲景观格局影响程度最小,潮沟曲率的影响程度最大。但本文中研究仍存在一定的不足,如受潮位的影响,所使用的遥感影像成像时间的不同会导致潮沟分布存在差异,潮沟提取存在误差;某些潮沟指标对景观格局影响的原因还没有完全理解,这些依旧是未来工作中的重点所在。

参考文献(References):

- [1] VANDENBRUWAENE W, MEIRE P, TEMMERMAN S. Formation and evolution of a tidal channel network within a constructed tidal marsh. *Geomorphology*, 2012, 151: 114-125.
- [2] 吕亭豫, 龚政, 张长宽, 等. 粉砂淤泥质潮滩潮沟形态特征及发育演变过程研究现状. *河海大学学报: 自然科学版*, 2016, 44(2): 178-188. [LYU T Y, GONG Z, ZHANG C K, et al. Reviews of morphological characteristics and evolution processes of silty mud tidal creeks. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2016, 44(2): 178-188.]
- [3] TEAL J M. Energy flow in the salt marsh ecosystem of Georgia. *Ecology*, 1962, 43(4): 614-624.
- [4] 陈勇, 何中发, 黎兵, 等. 崇明东滩潮沟发育特征及其影响因素定量分析. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2013, 43(1): 212-219. [CHEN Y, HE Z F, LI B, et al. Spatial distribution of tidal creeks and quantitative analysis of its driving factors in Chongming Dongtan, Shanghai. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2013, 43(1): 212-219.]
- [5] 崔保山, 蔡燕子, 谢湑, 等. 湿地水文连通的生态效应研究进展及发展趋势. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2016, 52(6): 738-746. [CUI B S, CAI Y Z, XIE T, et al. Ecological effects of wetland hydrological connectivity: Problems and prospects. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2016, 52(6): 738-746.]
- [6] KEARNEY W S, FAGHERAZZI S. Salt marsh vegetation promotes efficient tidal channel networks. *Nature Communications*, 2016: 7.
- [7] 陈秀芝, 郭水良, 朱莉莉, 等. 长江口九段沙不同等级潮沟附近主要植物种群的分布格局. *湿地科学*, 2011, 9(1): 52-60. [CHEN X Z, GUO S L, ZHU L L, et al. Distribution pattern of main plant populations around tidal creeks in different grades in the Jiuduansha shoals in the Mouth of Yangtze River. *Wetland Science*, 2011, 9(1): 52-60.]
- [8] 邵虚生. 潮沟成因类型及其影响因素的探讨. *地理学报*, 1988, 43(1): 35-43. [SHAO X S. Genetics classification of tidal creek and factors affecting its development. *Acta Geographica Sinica*, 1988, 43(1): 35-43.]
- [9] 郑宗生, 周云轩, 田波, 等. 植被对潮沟发育影响的遥感研究: 以崇明东滩为例. *国土资源遥感*, 2014, 26(3): 117-124. [ZHENG Z S, ZHOU Y X, TIAN B, et al. Effects of vegetation on the dynamic of tidal creeks based on quantitative satellite remote sensing: A case study of Dongtan in Chongming. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2014, 26(3): 117-124.]
- [10] 宁立新, 周云凯, 白秀玲, 等. 鄱阳湖区景观格局季相变化及其优化调控研究. *自然资源学报*, 2018, 33(3): 439-453. [NING L X, ZHOU Y K, BAI X L, et al. Research on the seasonal variations and optimization of landscape pattern in Poyang Lake region, China. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(3): 439-453.]
- [11] 白军红, 欧阳华, 杨志锋, 等. 湿地景观格局变化研究进展. *地理科学进展*, 2005, 24(4): 36-45. [BAI J H, OUYANG H, YANG Z F, et al. Changes in wetland landscape patterns: A review. *Progress in Geography*, 2005, 24(4): 36-45.]
- [12] 徐晓龙, 王新军, 朱新萍, 等. 1996-2015年巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地景观格局演变分析. *自然资源学报*, 2018, 33(11): 1897-1911. [XU X L, WANG X J, ZHU X P, et al. Landscape pattern changes in alpine wetland of Bayanbulak Swan Lake during 1996-2015. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(11): 1897-1911.]
- [13] 陈建, 王世岩, 毛战坡. 1976-2008年黄河三角洲湿地变化的遥感监测. *地理科学进展*, 2011, 30(5): 585-592. [CHEN J, WANG S Y, MAO Z P. Monitoring wetland changes in Yellow River Delta by remote sensing during 1976-2008. *Progress in Geography*, 2011, 30(5): 585-592.]
- [14] 王永丽, 于君宝, 董洪芳, 等. 黄河三角洲滨海湿地的景观格局空间演变分析. *地理科学*, 2012, 32(6): 717-724. [WANG Y L, YU J B, DONG H F, et al. Spatial evolution of landscape pattern of coastal wetlands in Yellow River Delta. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(6): 717-724.]

- [15] 韩美, 张翠, 路广, 等. 黄河三角洲人类活动强度的湿地景观格局梯度响应. 农业工程学报, 2017, 33(6): 265-274. [HAN M, ZHANG C, LU G, et al. Response of wetland landscape pattern gradient to human activity intensity in Yellow River Delta. Transactions of the CSAE, 2017, 33(6): 265-274.]
- [16] 吴晶晶, 栗云召, 于良巨, 等. 黄河三角洲自然湿地景观连接度动态变化及其驱动因素分析. 生态环境学报, 2018, 27(1): 71-78. [WU J J, LI Y Z, YU L J, et al. Dynamic changes and driving factors of landscape connectivity for natural wetland in Yellow River Delta. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(1): 71-78.]
- [17] MARANI M, BELLUCO E, D'ALPAOS A, et al. On the drainage density of tidal networks. Water Resources Research, 2003, 39(2): 5029-5035.
- [18] 时海东, 沈永明, 康敏. 江苏中部海岸潮沟形态对滩涂围垦的响应. 海洋学报, 2016, 38(1): 106-115. [SHI H D, SHEN Y M, KANG M. Rapid response of tidal creek network patterns to the reclamation on the central Jiangsu coast. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 38(1): 106-115.]
- [19] HORTON R E. Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. Journal of the Japanese Forestry Society, 1945, 56(3): 275-370.
- [20] 吴德力, 沈永明, 方仁建. 江苏中部海岸潮沟的形态变化特征. 地理学报, 2013, 68(7): 955-965. [WU D L, SHEN Y M, FANG R J. A morphological analysis of tidal creek network patterns on the central Jiangsu coast. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(7): 955-965.]
- [21] 孙效功, 赵海虹, 崔承琦. 黄河三角洲潮滩潮沟体系的分维特征. 海洋与湖沼, 2001, 32(1): 74-80. [SUN X G, ZHAO H H, CUI C Q. The fractal characteristics of tidal flat and tidal creek system in the Huanghe River Delta. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2001, 32(1): 74-80.]
- [22] ANGELES G R, PERILLO G M E, PICCOLO M C, et al. Fractal analysis of tidal channels in the Bahía Blanca estuary (Argentina). Geomorphology, 2004, 57(3): 263-274.
- [23] 冯平, 冯焱. 河流形态特征的分维计算方法. 地理学报, 1997, 52(4): 324-330. [FENG P, FENG Y. Calculation on fractal dimension of river morphology. Acta Geographica Sinica, 1997, 52(4): 324-330.]
- [24] 卢涛, 马克明, 傅伯杰, 等. 三江平原沟渠网络结构对区域景观格局的影响. 生态学报, 2008, 28(6): 2746-2752. [LU T, MA K M, FU B J, et al. Effects of ditch network structure on landscape pattern in the Sanjiang Plain, Northeast China. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6): 2746-2752.]
- [25] COOK E A. Landscape structure indices for assessing urban ecological networks. Landscape & Urban Planning, 2002, 58(2): 269-280.
- [26] 王云才. 上海市城市景观生态网络连接度评价. 地理研究, 2009, 28(2): 284-292. [WANG Y C. The connectivity evaluation of Shanghai urban landscape eco-network. Geographical Research, 2009, 28(2): 284-292.]
- [27] 谷源泽, 姜明星, 徐丛亮, 等. 黄河口清8出汉工程的作用及对河口演变的影响. 泥沙研究, 2000, (5): 57-61. [GU Y Z, JIANG M X, XU C L, et al. The impact on the project of the Yellow River estuary Qing8 and its influence on estuary evolution. Journal of Sediment Research, 2000, (5): 57-61.]
- [28] 杨俊芳, 马毅, 任广波, 等. 基于国产高分卫星遥感数据的现代黄河三角洲入侵植物互花米草监测方法. 海洋环境科学, 2017, 36(4): 596-602. [YANG J F, MA Y, REN G B, et al. Monitoring method of invasive vegetation *Spartina alterniflora* in modern Yellow River Delta based on remote sensing data. Marine Environmental Science, 2017, 36(4): 596-602.]
- [29] 李敏, 刘帅帅, 徐飞. 黄河三角洲芦苇—碱蓬群落结构和功能对3种人为干扰的响应. 湿地科学, 2017, 15(1): 92-98. [LI M, LIU S S, XU F. Response of structure and functions of *Comm. Phragmites australis*+*Suaeda salsa* in Yellow River Delta to 3 kinds of human-caused disturbances. Wetland Science, 2017, 15(1): 92-98.]
- [30] 黄海军, 刘艳霞, 樊辉, 等. 黄河清8出汉河口泥沙异重流特征及其时空分布. 海洋与湖沼, 2008, 39(1): 90-96. [HUANG H J, LIU Y X, FAN H, et al. Spatial-temporal change of density current at new outlet of the Huanghe (Yellow) River. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2008, 39(1): 90-96.]
- [31] 徐国宾, 张金良, 练继建. 黄河调水调沙对下游河道的影响分析. 水科学进展, 2005, 16(4): 518-523. [XU G B, ZHANG J L, LIAN J J. Effect of water-sediment regulation of the Yellow River on the lower reach. Advances in Water Science, 2005, 16(4): 518-523.]
- [32] 李建国, 杨德明, 胡克, 等. 盘锦市红海滩碱蓬空间特征研究. 吉林大学学报: 地球科学版, 2006, 36(s1): 113-117. [LI

J G, YANG D M, HU K, et al. Study on heteroptera kitag spatial characteristics in Honghai beach of Panjin city. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36(s1): 113-117.]

Impacts of tidal channels on typical landscapes of wetland in the Yellow River Delta

YU Xiao-juan^{1,2}, XUE Zhen-shan², ZHANG Zhong-sheng²,
SONG Xiao-lin², ZHANG Hong-ri¹

(1. College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China;

2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China)

Abstract: Tidal channels play important roles in governing landscape succession in the estuary areas. In the present work, tidal channels and landscapes types of the Yellow River Delta (YRD) were extracted by visual interpretation based on remote sensing images combined with field investigation during 1989-2016, aiming to decipher effects of tidal channel development on *Phragmites australis*, *Suaeda salsa* and mudflats in the last 20 years through Redundancy Analysis (RDA). Results indicated that area ratio of mudflats was in the fluctuation of increase and decrease during the past 20 years, and the change trend is opposite to that of *Phragmites australis* and *Suaeda salsa*. Patch density was larger in the Northern YRD than that in the Southern YRD, and fragmentation is relatively high. RDA analysis showed that the first two sequence axes could explain about 85.7% variations of landscape indexes, which better reflected the correlation between the two. Length, number, network connectivity and curvature had greater effects on landscape features; the effect of fractal dimension was the smallest. Length, number, and fractal dimension were negatively correlated with the area ratio and patch density of *Phragmites australis* and *Suaeda salsa* while they were positively correlated with the area ratio of mudflats.

Keywords: tidal channels; landscapes; RDA; Yellow River Delta