

基于景观指数的黄河口湿地水文连通动态分析*

冯久格¹⁾ 李谦维¹⁾ 梁晨¹⁾ 张晓雅¹⁾ 乐艺¹⁾ 高俊琴^{1,2)†}

(1)北京林业大学生态与自然保护学院, 100083, 北京;

2)黄河流域生态保护国家林业和草原局重点实验室, 100083, 北京)

摘要 基于2019年逐月 Sentinel-2 遥感影像,采用基于图论的景观连通度指数,分析了黄河口湿地水文连通的年内动态变化及水文连通频率变化,计算了不同湿地斑块的重要性指数,评估了水文连通的分布格局.结果表明:黄河口湿地水文连通具有明显的季节变化特征,汛期和生态补水期的水文连通整体增加;湿地斑块的重要性指数分布特征与水文连通频率分布特征较为一致,水文连通性较高;连通频率高的斑块主要分布在黄河南岸恢复区、近海潮滩与主潮沟,这些区域对整个研究区的水文连通起到重要作用,该研究结果可为黄河口湿地生态保护与修复提供参考.

关键词 水文连通性;重要斑块;季节变化;黄河口湿地

中图分类号 X143

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2020427

河口湿地位于河流和海洋之间的生态交错带,具有巨大的生态环境效应,发挥着廊道、过滤器和屏障作用^[1].近年来,湿地围垦、堤坝建设和资源过度开发等人类活动和气候变化造成湿地面积急剧萎缩,湿地生态功能严重受损^[2-3].研究表明:湿地生长和衰退的本质是人类活动和气候变化对水文循环的破坏^[4-6].水文连通性描述水文循环过程以及水文与生态过程之间的关系^[7-9].良好的水文连通,能促进能量和营养物质的流通,使营养物质在复杂湿地环境中保持相对稳定^[10-11],从而为鸟类、鱼类以及底栖动物等提供适宜的生存条件,维持较高的生物多样性,保证生态服务功能^[4].水文连通受阻会影响物种的生境间迁移,导致种群孤立程度增加,影响生境稳定性,造成生态系统服务功能受损^[9,12].因此,评价水文连通及其对湿地生态系统过程和功能的影响,逐渐成为湿地生态学研究热点.

定量评估河口湿地水文连通变化,确定湿地保护与修复的优先次序,可提高湿地恢复的有效性^[13].目前国内外已探讨了多种水文连通定量评估方法,包括原位监测^[14]、水文模型^[15]、连通性函数、图论^[16]和累积法/瓶颈法以及综合评估法^[17].其中,基于图论的景观连通度指数可较好地识别生境要素与生态过程的联系,在识别生态阈值及重要生境斑块等方面具有优势^[18],已在关键生境保护、生态恢复与景

观设计^[19-20]等领域得到广泛应用.

黄河口湿地位于山东省东营市黄河入海口处,是我国暖温带面积最大、增长最快的新生河口湿地,是东北亚内陆和环西太平洋鸟类迁徙的重要中转站^[21].由于具有潮沟、潮滩等多种滨海湿地类型,同时受上游径流与上溯潮流双重影响,淡咸水交互作用剧烈.又因自然因素和人类活动的影响,水文连通非常复杂^[22].近年来,由于黄河口湿地淡水输入量减少、堤坝建设等人类活动和气候变化的影响,水文连通受到明显扰动,严重威胁湿地生态系统功能^[23].目前关于黄河口湿地水文连通研究,主要集中在空间尺度上基于潮沟形态和分布的水文连通^[24],基于土壤和地形等特征的水文连通参数量化^[9,25],以及从景观格局角度探究水文连通的生态效应^[18-19]等,但时间尺度上水文连通动态变化的分析较为缺乏.

本研究基于2019年逐月 Sentinel-2 遥感影像,采用基于图论的景观连通度指数,分析黄河口湿地水文连通的季节动态,评估水文连通的分布格局,为黄河口湿地生态保护与修复提供参考.

1 研究区概况

黄河口湿地(37°43'~37°50'N, 119°03'~119°13'E)位于山东省东营市黄河入海口处(图1),是世界范围内具有代表性的河口湿地,受河道变动、上游径

* 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0505903)

† 通信作者:高俊琴(1978—),博士,教授.研究方向:湿地生态过程与湿地修复. E-mail:gaojq@bjfu.edu.cn

收稿日期:2020-10-21

流与海水冲刷等影响,属于典型的咸淡水交互区^[21]。该区气候属暖温带季风性气候区,四季分明,雨热同期,年平均气温 12.1 ℃,年降水量 551.6 mm,70%的降水集中于 7—8 月份^[26]。区域内地势平坦,自然坡降为 1/8 000~1/12 000,生态格局复杂^[21]。土壤类型主要为隐域性潮土和盐土,主要植被群落为芦苇群落、碱蓬群落与怪柳群落等^[27],研究区域如图 1 所示(美国 USGS 地球资源观测与科学中心 2019 年 6 月 Landsat 遥感影像, <http://earthexplorer.usgs.gov/>)。研究区西侧以潮沟和道路等标志物为界,面积约 490.67 km²。

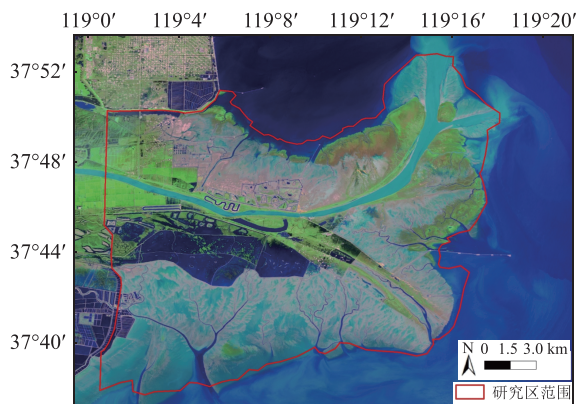


图 1 研究区位置

2 研究方法

2.1 数据来源及预处理 以 2019 年黄河口湿地 Sentinel-2 遥感影像作为主要数据源,采用 SNAP 软件对 Sentinel-2 遥感影像进行处理(数据来源于 ESA 欧空局数据分发网站, <https://scihub.copernicus.eu/>)。选取 2019 年 1—12 月无云覆盖、品质好的 Sentinel-2 遥感影像共 24 幅。辅助数据为 DEM 高程数据以及黄河口水文、植被的文献资料(地理空间数据云, <http://www.gscloud.cn>)。

使用 Sentinel-2 L1C 产品数据,在数据提取之前需要进行预处理,包括大气校正、格式转换、波段融合和研究区裁切等。Sentinel-2 L1C 产品已经过几何精校正,因此使用 SNAP 软件中的插件 Sen2Cor-02.08.00 进行大气校正。采用 SNAP 软件中 Resampling 工具进行重采样至 10 m 分辨率,并转换为 Envi 格式。采用 ENVI 5.3.1 软件中 Layer Stacking 工具进行波段合成,最后进行研究区精剪裁,得到黄河口湿地 2019 年 1—12 月的 Sentinel-2 影像数据。

2.2 数据提取 选用地表水体及其连通性来反映研究区湿地的水文连通。由于黄河口湿地部分地表水体被挺水植物(芦苇)等覆盖,采用 WIW 法提取水体以避免植被覆盖导致的漏分,采用 ENVI 5.3.1 中的

ROI 工具对 NIR(波段 8)、SWIR2(波段 12)数据进行提取,采用 ENVI 5.3.1 中的 Band Math 工具计算 WI₂₀₁₅ 水体指数,进行水体辅助识别^[28]。

WIW 法的判断方式^[29]为

$$W_{WI} = R_{NI} \leq 0.1804, \quad R_{SW12} \leq 0.1131.$$

WI₂₀₁₅ 水体指数公式^[28]为

$$I_{W2015} = 1.7204 + 171N_{GREE} + 3D_{RE} - 70R_{NI} - 45R_{SW11} - 71S_{R_{SW12}},$$

式中, N_{GREE} 为波段 3, D_{RE} 为波段 4, R_{NI} 为波段 8, R_{SW11} 为波段 11, R_{SW12} 为波段 12。在 IDL 中采用 OATU 大津法识别阈值^[30],将影像分为“水体斑块”“非水体斑块”,并基于 Sentinel-2 全色影像进行人工目视校正,最终得到黄河口 2019 年不同月份水体斑块分布图。为保证提取结果的准确性,随机选取 100 个样本点,根据黄河口的文献资料对水体斑块分布数据集进行精度评价,总体解译精度 >90%。

2.3 水文连通性评价 根据景观连通度原理,利用 Conefor Sensinode 2.6 和 ArcGIS 10.2 软件,采用组分数(number of components, NC)、可能连通性指数(probability of connectivity index, PCI)和整体连通性指数(integral index of connectivity, IIC)对黄河口湿地 2019 年水文连通性动态进行评价,采用斑块重要性指数识别重要的湿地斑块。

2.3.1 黄河口湿地水文连通阈值选取 采用 ArcGIS 10.2 软件中的 Conefor 插件(Conefor input)生成 Conefor Sensinode 2.6,计算水文连通性指数所需的输入文件,包括节点文件(水体斑块)、连接文件(以欧几里得距离所描述的一对节点之间的连接),将文件以表的形式输出。使用 Conefor Sensinode 2.6 软件计算连通性指数。计算时需要确定斑块连通的阈值距离^[31]。研究表明,当阈值达到 3 000 m 时,多数景观组分达到 1 并不再变化^[18, 20]。因此,本研究选取 30、50、100、250、500、750、1 000、1 500、2 000、2 500 和 3 000 m 共 11 个距离阈值^[18],分别计算 NC、IIC 和 PCI。

选取 2019 年 1 月 22 日(枯水期)、11 月 8 日(平水期)、7 月 21 日(丰水期)影像对距离阈值进行确定。结果显示:研究区域不同时期的 IIC 和 PCI 呈现一致的变化趋势,均随距离阈值的增加而增加(图 2);距离阈值为 30~500 m 时, IIC 和 PCI 迅速增长,此区间内斑块的连通性不稳定,易受阈值影响;距离阈值为 >500~3 000 m 时, IIC 和 PCI 增长但趋近于平稳,区域内斑块连通性较稳定,受阈值变化影响较小;距离阈值 >3 000 m 时, IIC 和 PCI 保持平稳,整个生境内的斑块被认为是连通的。综上,将计算水文连通性的距离阈值定为 500 m。

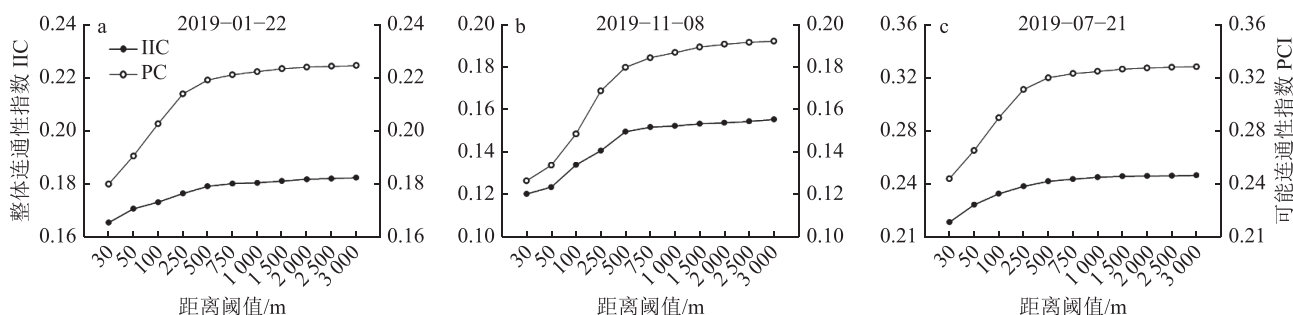


图 2 不同距离阈值下 IIC 和 PCI 的变化

2.3.2 黄河口湿地水文连通性指数计算 采用 NC、PCI、IIC 和斑块重要性指数,对黄河口湿地 2019 年水文连通性动态进行评价。NC 是由功能或结构上相互连接的斑块组成的整体,组分之间是不存在生态过程联系的孤立个体,节点(斑块)之间若存在连接路径,则被识别为一个组分;若不存在连接路径,则被识别为不同组分。NC 为 1 时,表明整个研究区域仅存在 1 个景观组分^[19, 32]。IIC 和 PCI 表示研究区整体的水文连通性。IIC 计算原理是基于二元连接模型,表示 2 个斑块之间直接连通或不连通和直观结构的连通;PCI 是基于概率连接模型计算斑块之间的连通概率,即随机分布在景观中的 2 个点落入彼此可到达斑块的概率(表示功能的连通)^[33]。研究区的连通性越高,IIC、PCI 值越大。连通性指数的计算式^[33-34]为

$$I_{IC} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{A_i \cdot A_j}{1 + nl_{ij}} \right)}{A_t^2}, \quad I_{PC} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_i \cdot A_j \cdot P_{ij}^*}{A_t^2},$$

式中: n 为研究区域斑块数目; A_i 和 A_j 是斑块 i 和 j 的面积; nl_{ij} 为斑块 i 和 j 之间的最小连接数目; P_{ij}^* 为斑块 i 和 j 之间所有可能路径的最大乘积概率,由斑块边与边之间距离的递减函数获得,表征 i 和 j 之间不经过其他斑块而直接相连的可行性,当 2 个斑块彼此完全隔离时, $P_{ij}^* = 0$;当 $i = j$ 时 $P_{ij}^* = 1$ ^[32-35]; A_t 为研究区总面积。 I_{IC} 的取值范围为 0~1; $I_{IC} = 0$ 时,斑块之间没有连接; $I_{IC} = 1$ 时,整个景观都为生境斑块。 I_{PC} 的取值范围为 0~1, I_{PC} 越大,斑块之间连通的可能性越大。

IIC 和 PCI 无法定义单一斑块的水文连通性,斑块重要性指数 dIIC 和 dPC 可表示某个斑块对区域整体水文连通性的贡献程度。采用斑块重要性指数对水体斑块的重要性进行识别与排序,计算公式为

$$C_{dII} = 100 \times (I_{IC} - I'_{IC}) / I_{IC}, \quad C_{dIP} = 100 \times (I_{PC} - I'_{PC}) / I_{PC},$$

式中: I'_{IC} 和 I'_{PC} 为去除单个斑块 i 后的连通性指数; C_{dII} 和 C_{dIP} 表示单个斑块 i 对整个区域连通性的贡献程度, C_{dIP} 可在一定程度上反映斑块 i 与其他斑块的

连通性。 C_{dII} 对斑块结构变化敏感,但 C_{dIP} 的计算模拟了生态流过程,对于斑块功能的分析更有优势。

采用 Jenks 自然断点法对各月份水体斑块重要性指数进行统一分级^[18],将 C_{dII} 分为低重要性(I. 0~0.499),中重要性(II. 0.500~1.499),较高重要性(III. 1.500~34.999),高重要性(IV. 35.000~99.000)共 4 级;将 C_{dIP} 分为低重要性(I. 0~0.999),中重要性(II. 1.000~3.999),较高重要性(III. 4.000~14.999),高重要性(IV. 15.000~99.000)共 4 级,即 2019 年不同时期重要斑块分布图。基于 C_{dII} 、 C_{dIP} 的分级结果,采用 ArcGIS 10.2 软件栅格计算器对各月份影像图进行叠加,分为 4 类,分别为无水分布、低重要性(重要性指数在 I、II 梯度波动)、中重要性(重要性指数在 III、IV 梯度波动)和高重要性(重要性指数一直在 IV 梯度)。

在 ArcGIS 10.2 中根据不同区域地表淹水时长,统计水文连通频率,并随机生成 500 个点,提取每个点的水文连通频率,分析水文连通频率与斑块重要性的关系。

3 结果

3.1 黄河口湿地地表水体分布 根据 Sentinel-2 遥感影像解译结果,提取了 2019 年逐月的水体斑块分布。结果表明,水体斑块面积有明显的季节变化(图 3)。1—5 月上旬为枯水期至平水期,水体斑块面积处于年内较低水平,5 月 7 日面积最小,为 120.80 km²,占研究区总面积的 24.6%。5—6 月由平水期至丰水期,水体斑块面积波动较大。5 月下旬进入丰水期,水体面积迅速增加至 297.04 km²,占研究区总面积的 60.5%。6—9 月为丰水期,水体斑块面积最大,为 292.27 km²,占研究区总面积的 59.53%。10—12 月为平水期至枯水期,水体斑块面积在 210 km² 左右波动。

3.2 黄河口湿地水文连通动态

3.2.1 黄河口湿地水文连通频率 根据黄河口不同区域地表淹水时长,统计了水文连通频率(图 4)。结

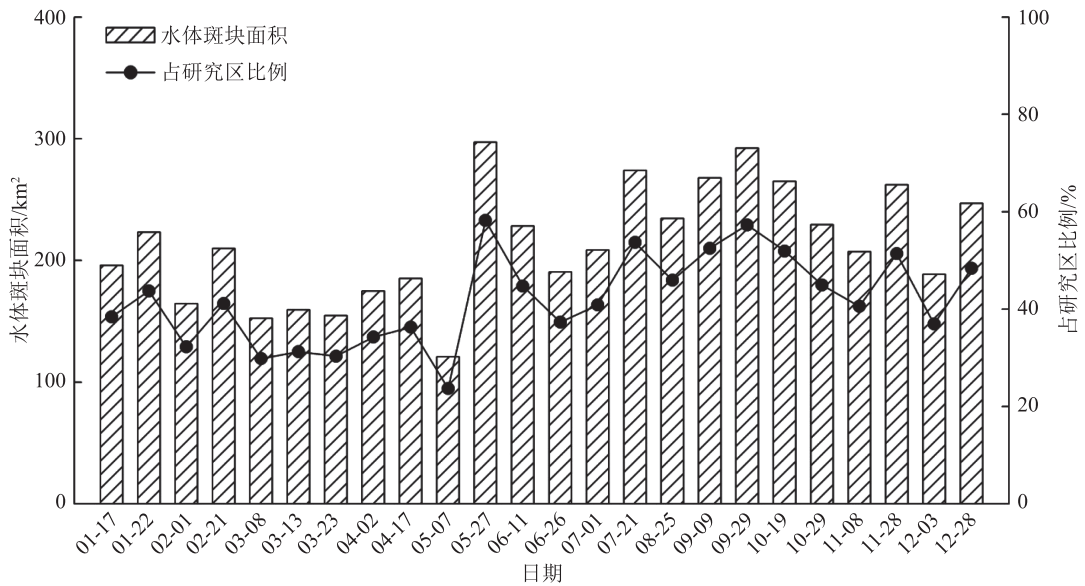


图 3 黄河口湿地 2019 年不同时期水体斑块面积及比例变化

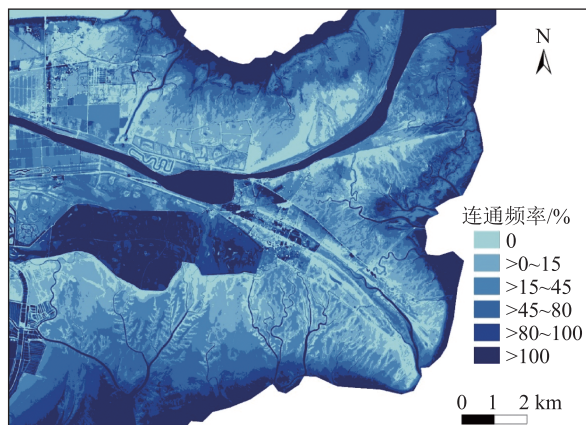


图 4 黄河口湿地 2019 年水文连通频率分布

果表明：潮汐区的水文连通频率从潮滩边缘向内部递减，潮滩边缘水文连通频率为 80%~100%；黄河南岸恢复区和主潮沟水文连通频率较高，大部分范围在 45%~100%，南岸恢复区大部分湿地连通频率 100%；黄河故道上靠近现河道和恢复区也存在水文连通频率 100% 的区域。

3.2.2 黄河口湿地水文连通指数变化 以 500 m 为距离阈值，选取组分数 I_{NC} ，整体连通性指数 I_{IC} 和可能连通性指数 I_{PC} 来评价 2019 年逐月的研究区水文连通变化(图 5)。结果表明： I_{IC} 和 I_{PC} 的变化趋势一致，但 I_{IC} 值低于 I_{PC} 值。2019 年 1—5 月，黄河口湿地 I_{NC} 总体呈现上升趋势，由 8 升至 18； I_{IC} 和 I_{PC} 呈下降趋势， I_{IC} 由 0.13 降至 0.03， I_{PC} 由 0.17 降至 0.05。5—7 月期间， I_{NC} 、 I_{IC} 和 I_{PC} 出现较大波动，5 月下旬 I_{NC} 迅速下降至 5， I_{IC} 和 I_{PC} 达到一年内最高值， I_{IC} 上升至 0.33， I_{PC} 上升至 0.38；6 月下旬—7 月下旬， I_{NC} 减小到最低值 3， I_{IC} 和 I_{PC} 分别增加至 0.24 和 0.31。7 月之

后至年底， I_{NC} 、 I_{IC} 和 I_{PC} 在固定值前后小幅度波动， I_{NC} 为 5， I_{IC} 为 0.2， I_{PC} 为 0.25。

3.3 黄河口湿地重要斑块及其分布 湿地斑块的重要性指数分布有明显的季节性变化，同时期不同湿地斑块的重要性指数跨度较大(图 6)：1—5 月上旬，近海潮滩、黄河南岸恢复区、一级潮沟、二级潮沟为高重要性，其他区域大多无地表水体分布。5—10 月，高重要性斑块面积增加且大面积相连，低重要性斑块均小面积零散分布，周围无水体分布。7 月，黄河北岸恢复区东侧由低重要性上升为较高重要性，北岸恢复区西侧为中等重要性，北岸恢复区与黄河河道之间的人工沟渠在 7—10 月长期保持在高重要性。11 月之后，重要性指数的分布情况与 1—5 月类似。

黄河三角洲 C_{all} 高重要性湿地面积为 49.04 km²，主要分布在潮滩靠海区域和主潮沟；中重要性湿地面积为 117.64 km²，分布在南岸恢复区和近海潮滩；低重要性湿地面积为 230.09 km²，潮滩内部大部分区域为低重要性(表 1，图 7)。 C_{ap} 和 C_{all} 值的分布在潮滩区域较为一致，在南岸恢复区有所差别，南岸恢复区西侧水体的 C_{ap} 值为高重要性。 C_{ap} 高重要性湿地面积为 68.93 km²，中重要性为 96.64 km²，低重要性为 231.20 km²(表 1，图 7)。

湿地斑块重要性分布与水文连通频率分布较为一致(图 8)。无水体分布区域水文连通频率为 0，全年无地表水体。低重要性区域水文连通频率主要为 4%~55%，中位数为 15%，个别区域连通频率较高，此区域不同季节的 C_{ap} 值在低重要性、中重要性波动，中重要性区域水文连通频率在 58%~100%，中位数

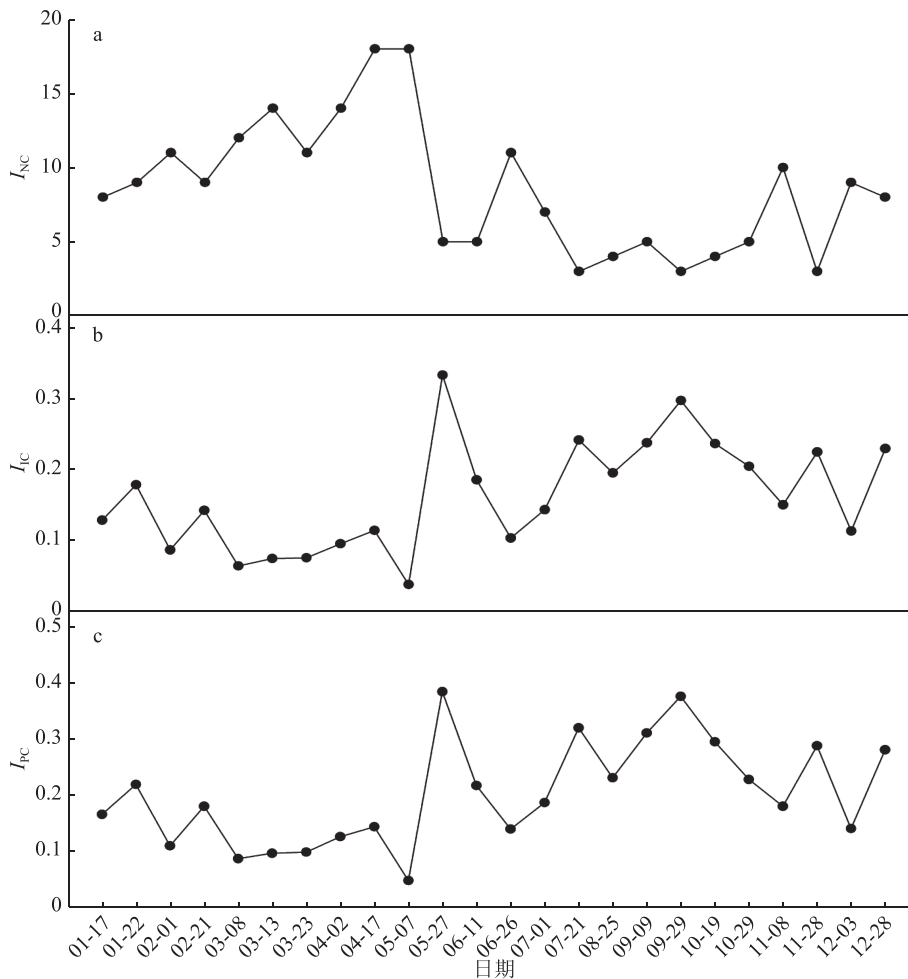


图 5 黄河口湿地 2019 年不同时期 I_{NC} 、 I_{IC} 、 I_{PC} 变化

为 85%，此区域不同季节的 C_{dp} 值在较高重要性、高重要性波动。高重要性区域的水文连通频率均为 100%，湿地斑块全年被地表水体覆盖。

4 讨论

4.1 黄河口湿地整体水文连通动态 黄河口湿地水文连通性有明显的季节变化，且与湿地斑块面积变化趋势较为一致。气候因素是水文连通性季节变化的主要驱动力之一^[22]。Sentinel-2 影像与黄河水文网 (www.hwsj.com.cn) 显示，11 月—次年 6 月一般为黄河枯水期。2019 年 1 月 2 日黄河河口河段开始历时 23 d 的封冻期，封河长度 31 km。相关研究表明：流域水文连通性的时间变化受主河流上游集水区的降水影响^[36-37]，2019 年 1—6 月为枯水期，降水量与径流量处于较低水平，流域水文连通性较低。5 月及 12 月流域水文连通性波动较大，这是流域短期降水的结果，这与 Dawidek 等^[37]的研究结果一致，径流量小且流域内有少量稳定降水时，水文连通的可变性较高。2019 年 6 月下旬、7 月上旬和 9 月中旬，黄

河下游出现洪水过程，至 10 月均为汛期；8 月受第 9 号台风“利奇马”影响，降水量和径流量较大；黄河河道两侧及潮滩大面积斑块数量较多，较低的 I_{NC} 、较高的 I_{IC} 和 I_{PC} 说明斑块间结构和功能上联系紧密，流域现有以及潜在的水文连通性都较高^[19, 38]。人为活动也是水文连通性变化的主要影响因素^[39]。为了改善湿地生态环境品质，自 2007 年起，保护区每年 7 月会对黄河南岸和北岸的恢复区进行生态补水，持续时间 20~30 d。生态补水增加了恢复区的水体面积，同时也促进了三级潮沟的增加，水体斑块之间得以相连^[19]。因此，7 月水文连通性显著增加，至年底封冻期前一直保持较高水平。本研究反映了黄河口湿地水文连通性的年内动态特征，未来可进一步分析长时间序列上水文连通的年际变化特征，为深入了解黄河口湿地水文连通的历史演变及修复提供支撑。

4.2 黄河口重要湿地斑块分布 黄河口湿地斑块重要性指数分布有明显的季节变化，同时期不同斑块之间重要性指数跨度较大，面积较大的湿地斑块一

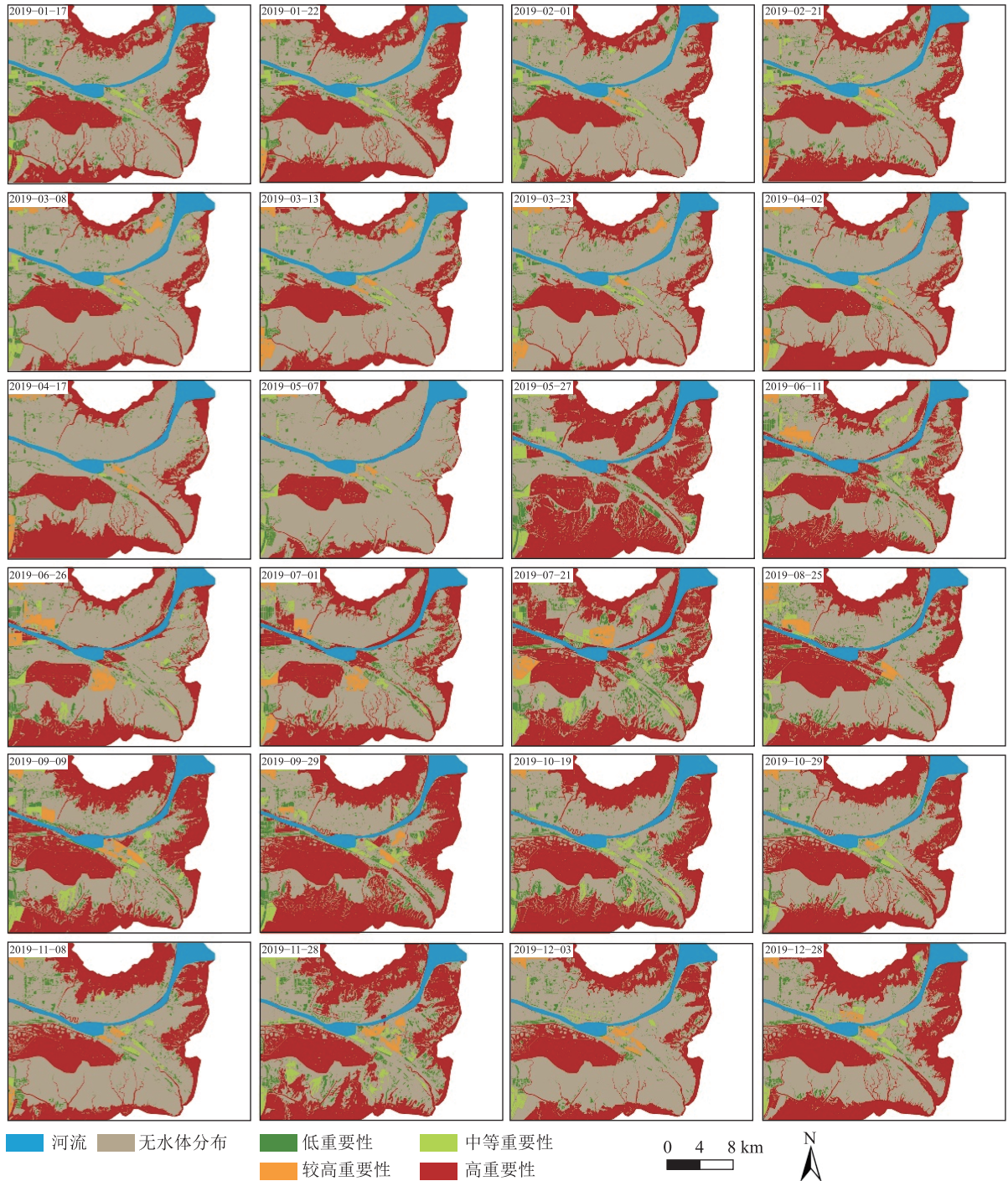


图 6 基于 dPC 指数的黄河口不同时期重要湿地斑块分布变化

表 1 研究区不同重要性湿地斑块分布面积 km²

重要性分级	基于dIIC	基于dPC
无水体分布	94.54	94.54
低重要性	230.09	231.20
中重要性	117.64	96.64
高重要性	49.04	68.93

般都具有较高的重要性。研究表明: 面积较大的斑块对维持区域整体的连通性与生态系统功能的稳定性有重要作用, 大型斑块数量的减少会造成研究区

水文连通性明显降低^[40], 这与本研究的结果一致, 季节变化下的湿地斑块面积的改变导致斑块重要性随之改变。黄河口湿地位于海陆交互地带, 受潮汐作用影响强烈, 潮汐对湿地水文连通性起到重要作用, 涨落潮过程对主河道的流量有明显影响: 涨潮时河道排水不畅, 流量较小; 落潮时受拉动作用, 流量较大, 通过潮汐-风-流量的信息流传递, 对整个区域水文连通性产生影响^[12, 36]。潮下带为平均低潮线以下的部分, 常年处于水淹状态, 水文连通频率为 100%,

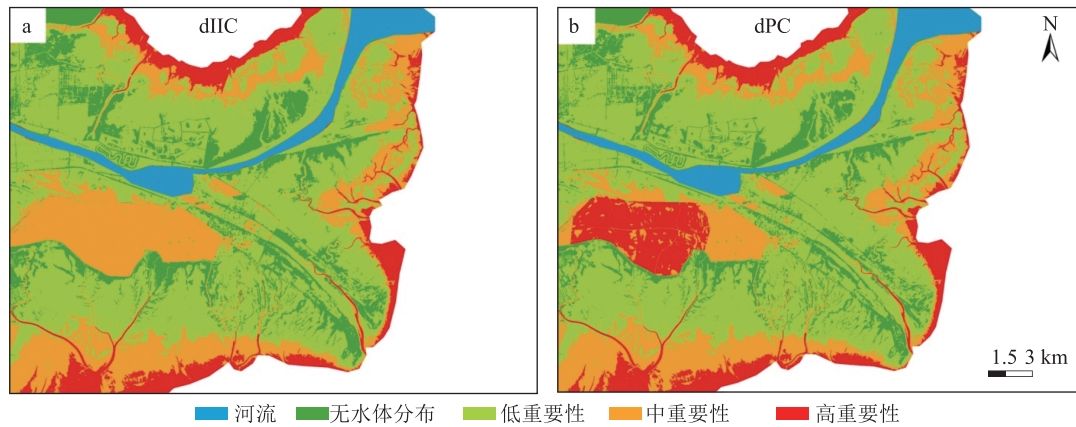


图 7 基于 dIIC 和 dPC 的黄河口重要湿地斑块分布

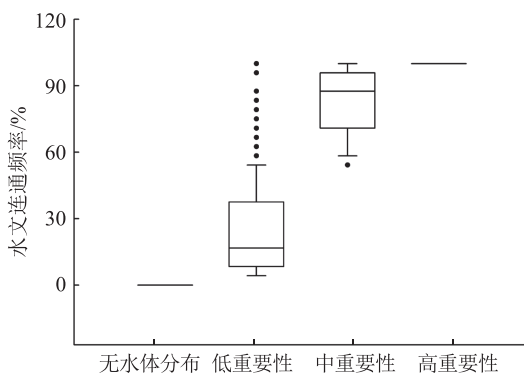


图 8 不同重要性级别下水文连通频率特征

海水较浅,有大量植物和底栖生物分布,具有高重要性;潮间带潮汐作用频繁,发育有复杂的潮沟系统,部分区域受气候因素影响,具有高重要性;潮上带潮沟较细,水文连通频率相对较低^[41]。

基于 C_{dII} 和 C_{dPI} 重要性分析结果,潮滩近海区域以及主潮沟为高重要性,南岸恢复区的 C_{dII} 值为中重要性, C_{dPI} 值为中等和高重要性,这是由于 I_C 和 I_{PC} 计算机制不同导致的^[34]。采油运输道路将恢复区东西两侧分割,西侧淹水频率为 45%~100%,东侧淹水频率大部分为 100%。以 C_{dII} 值识别的重要斑块是基于 I_C 值的计算,斑块之间二元距离是唯一判定标准,影像显示 4 月平水期南岸恢复区与其他湿地斑块的距离超过距离阈值,因此 C_{dII} 值未识别为高重要性斑块,全年 C_{dII} 值叠加结果为中等重要性^[34]。以 C_{dPI} 值识别的重要斑块考虑了斑块位置以及斑块扩散的可能性,反映生态流连接的强弱;南岸恢复区西侧相比东侧人为干扰更少,常年存在大面积水体,有助于维持区域生态流流动,具有高重要性^[31-32]。同时,基于 C_{dPI} 识别的重要性分布特征与水文连通频率分布较为一致,南岸恢复区水体、近海潮滩和主潮沟具有最高的连通频率和重要性, C_{dPI} 值反映出了斑块之间的连通性^[32, 34],也表明南岸恢复区水体、近海潮滩和主潮沟水文连通性较高,是维持整个黄

河口湿地水文连通性的关键区域。

4.3 基于水文连通评估结果的黄河口湿地管理策略

湿地水文连通管理作为一种基于自然资源的管理方案,具有成本低、管理效率高和可持续性^[13]。7 月黄河口湿地进行生态补水,湿地生境间的连接得到了增强,斑块面积增加,黄河口湿地水文连通性上升,说明生态补水措施对区域湿地生态系统结构和功能的维持起到了一定的促进作用^[22]。生态补水期间,黄河北岸恢复区重要性指数较高。补水期过后,北岸恢复区重要性指数迅速下降,甚至无水体分布。而南岸恢复区一直保持高的重要性指数,生态补水后湿地斑块面积增加,并维持至年底封冻期。北岸恢复区为人工修建的补水区域,一年一次的补水模式在短期内能促进整体向良性发展,但长期会出现反复和停滞。南岸恢复区本身自然性较高,生态补水放大了南岸恢复区对湿地整体水文连通性的作用^[42-43]。因此,根据湿地自然水文状态进行持续调控,维持自然的水文变化,可为湿地生态系统管理与修复提供有效的保障^[42]。

适当的潮汐调控也是维持与修复黄河口湿地水文连通性的有效方法。目前,河口区域通过人工措施调控来修复和调整堤坝内的潮汐水文连通,进而修复潮间带湿地生境^[44-47]。此外,可对潮沟进行适当干预,修复主潮沟和次级潮沟,引导潮汐进出,从而调控湿地与海洋生态系统之间的营养物质通量与存留,有利于湿地生态系统生物多样性的维持^[18, 48]。然而,由于水文连通变化受多种因素驱动,水文连通调控也受多种生态因子影响,通过水利工程措施调控的成功率并不高^[45]。研究表明,过高或过低的水文连通都不利于生物多样性的维持,修复水文连通的关键在于恢复自然或近自然状态下的水文连通^[49]。因此,掌握水文连通与其他生态因子的关系,以及识别湿地水文连通修复阈值是提高修复与管理成效的关键。

5 结论

受气候与人工补水等因素影响, 黄河口湿地水文连通性有明显的季节变化特征. 湿地斑块的重要性指数分布特征与水文连通频率分布较为一致, 水文连通性较高、连通频率高的斑块, 主要分布在黄河南岸恢复区、近海潮滩与主潮沟, 这些区域对整个研究区的连通性起重要作用. 未来研究应在水文连通时空尺度评价的基础上, 探讨水文连通和生物连通耦合对生态系统功能维持的意义及机制, 为河口湿地生态保护与修复提供理论参考与技术支持.

6 参考文献

- [1] 曹梓豪, 赵清贺, 左宪禹, 等. 基于坡面水文连通性的黄河下游河岸缓冲带植被格局优化[J]. 应用生态学报, 2018, 29(3): 739
- [2] COSTANZA R, GROOT R, SUTTON P, et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. *Global Environmental Change*, 2014, 26(1): 152
- [3] DENG X J, XU Y P, HAN L F, et al. Spatial-temporal changes in the longitudinal functional connectivity of river systems in the Taihu Plain, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 566: 846
- [4] DOU P, CUI B S, XIE T, et al. Macrobenthos diversity response to hydrological connectivity gradient[J]. *Wetlands: The Journal of the Society of Wetland Scientists*, 2016, 36(Sup.1): S45
- [5] ALA-AHO P, SOULSBY C, POKROVSKY O S, et al. Using stable isotopes to assess surface water source dynamics and hydrological connectivity in a high-latitude wetland and permafrost influenced landscape[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 556: 279
- [6] HIGLEY M, CONROY J. The hydrological response of surface water to recent climate variability: a remote sensing case study from the central tropical Pacific[J]. *Hydrological Processes*, 2019, 33(16): 2227
- [7] BRACKEN L, WAINWRIGHT J, ALI G, et al. Concepts of hydrological connectivity: research approaches, pathways and future agendas[J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 119: 17
- [8] HARVEY J, GOMEZ-VELEZ J, SCHMADEL N, et al. How hydrologic connectivity regulates water quality in river corridors[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2019, 55(2): 369
- [9] LIU J K, ENGEL B A, WANG Y, et al. Multi-scale analysis of hydrological connectivity and plant response in the Yellow River Delta[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 702: 1
- [10] MEANS M, AHN C, KOROL A, et al. Carbon storage potential by four macrophytes as affected by planting diversity in a created wetland[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 165: 133
- [11] REID M A, REID M D, THOMS M C. Ecological significance of hydrological connectivity for wetland plant communities on a dryland floodplain river, Macintyre River, Australia[J]. *Aquatic Science*, 2016, 78(1): 139
- [12] HIATT M, PASSALACQUA P. Hydrological connectivity in river deltas: the first-order importance of channel-island exchange[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(4): 2264
- [13] 陈月庆, 武黎黎, 章光新, 等. 湿地水文连通研究综述[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(1): 26
- [14] KEESSTRA S D, DAVIS J, MASSELINK R H, et al. Coupling hysteresis analysis with sediment and hydrological connectivity in three agricultural catchments in Navarre, Spain[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(3): 1598
- [15] KOMPANIZARE M, PETRONE R M, SHAFII M, et al. Effect of climate change and mining on hydrological connectivity of surficial layers in the Athabasca Oil Sands Region[J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32(25): 3698
- [16] TEJEDOR A, LONGJAS A, ZALIAPIN I, et al. Delta channel networks: 1. a graph-theoretic approach for studying connectivity and steady state transport on deltaic surfaces[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(6): 3998
- [17] SHUSUKE M, TAKASHI G, ROY C S, et al. Assessing spatially distributed infiltration capacity to evaluate storm runoff in forested catchments: implications for hydrological connectivity[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 148
- [18] 王倩, 崔圆, 王晨, 等. 基于浮游生物群落和水文连通的黄河三角洲湿地优先恢复节点筛选[J]. 湿地科学, 2019, 17(3): 324
- [19] 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[J]. 生态环境学报, 2018, 27(1): 71
- [20] 杜志博, 李洪远, 孟伟庆. 天津滨海新区湿地景观连接度距离阈值研究[J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6534
- [21] ZHAO Q Q, BAI J H, LIU Q, et al. Spatial and seasonal variations of soil carbon and nitrogen content and stock in a tidal salt marsh with *Tamarix chinensis*, China[J]. *Wetlands*, 2016, 36(Sup.1): S145
- [22] 崔保山, 蔡燕子, 谢焜, 等. 湿地水文连通的生态效应研究进展及发展趋势[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(6): 738
- [23] LI X W, HOU X Y, SONG Y, et al. Assessing changes of

- habitat quality for shorebirds in stopover sites: a case study in Yellow River Delta, China[J]. *Wetlands*, 2019, 39(1): 67
- [24] 骆梦, 王青, 邱冬冬, 等. 黄河三角洲典型潮沟系统水文连通特征及其生态效应[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(1): 17
- [25] DAI L Y, ZHANG Y H, ZHANG Z M, et al. Hydrological connectivity assessment based on solute penetration[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2020, 34(6): 909
- [26] 卢晓宁, 张静怡, 洪佳, 等. 基于遥感影像的黄河三角洲湿地景观演变及驱动因素分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(增刊1): 214
- [27] 王建步, 张杰, 马毅, 等. 基于GF-1 WFV的黄河口湿地植被碳储量估算研究[J]. *海洋科学进展*, 2019, 37(1): 75
- [28] FISHER A, FLOOD N, DANAHER T. Comparing landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 175: 167
- [29] LEFEBVRE G, DAVRANCHE A, WILLM L, et al. Introducing WIW for detecting the presence of water in wetlands with landsat and sentinel satellites[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(19): 2210
- [30] LI W, DU Z, LING F, et al. A comparison of land surface water mapping using the normalized difference water index from TM, ETM+ and ALI[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(11): 5530
- [31] 齐珂, 樊正球. 基于图论的景观连接度量化方法应用研究: 以福建省闽清县自然森林为例[J]. *生态学报*, 2016, 36(23): 7580
- [32] LUCÍA PASCUAL-HORTAL, SAURA S. Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation[J]. *Landscape Ecology*, 2006, 21(7): 959
- [33] LIANG J, HE X Y, ZENG G M, et al. Integrating priority areas and ecological corridors into national network for conservation planning in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 22
- [34] SAURA S, LUCÍA PASCUAL-HORTAL. A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: comparison with existing indices and application to a case study[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 83(2/3): 91
- [35] DOU P, XIE T, LI S Z, et al. A network perspective to evaluate hydrological connectivity effects on macroinvertebrate assemblages[J]. *Wetlands*, 2020(4): 1
- [36] SENDROWSKI A, PASSALACQUA P. Process connectivity in a naturally prograding river delta[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(3): 1841
- [37] DAWIDEK J, FERENCZ B. Historical changes of hydrological connectivity of selected polish floodplain lakes[J]. *River Research and Applications*, 2016, 32(9): 1862
- [38] 赵清贺, 马丽娇, 刘倩, 等. 黄河中下游典型河岸缓冲带植被景观连接度及其网络构建[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(7): 983
- [39] DENG X J, XU Y P, HAN L F. Impacts of human activities on the structural and functional connectivity of a river network in the Taihu plain[J]. *Land Degradation and Development*, 2018, 29(8): 2575
- [40] 蒙古军, 王晓东, 尤南山, 等. 黑河中游生态用地景观连接性动态变化及距离阈值[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(6): 1715
- [41] 游冲. 滨海不同生境盐地碱蓬的化学计量关系与代谢调节策略[D]. 天津: 天津理工大学, 2019
- [42] 杨薇, 裴俊, 李晓晓, 等. 黄河三角洲退化湿地生态修复效果的系统评估及对策[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(1): 98
- [43] FRITZ K, SCHOFIELD K, ALEXANDER L, et al. Physical and chemical connectivity of streams and riparian wetlands to downstream waters: a synthesis[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2018, 54(2): 323
- [44] PAILLEX A, DOLEDEC S, CASTELLAE, et al. Functional diversity in a large river floodplain: anticipating the response of native and alien macroinvertebrates to the restoration of hydrological connectivity[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2013, 50(1): 97
- [45] RUPP-ARMSTRONGS, NICHOLS R. Coastal and estuarine retreat: a comparison of the application of managed realignment in England and Germany[J]. *Journal of Coastal Research*, 2017, 23(6): 1418
- [46] KALLER M, KEIM R, EDWARDS B, et al. Aquatic vegetation mediates the relationship between hydrologic connectivity and water quality in a managed floodplain[J]. *Hydrobiologia*, 2015, 760(1): 29
- [47] CONTE P, FERRO V. Standardizing the use of fast field cycling NMR relaxometry for measuring hydrological connectivity inside a soil[J]. *Magnetic Resonance in Chemistry*, 2020, 58(1): 41
- [48] 杨欢, 于瑞宏, 郝瑞英, 等. 河口潮汐栖息地生态恢复新技术CRT原理与应用: 以比利时Schelde河口为例[J]. *海洋工程*, 2015, 33(2): 58
- [49] TEUCHIES J, SINGH G, BERVOETS L, et al. Land use changes and metal mobility: multi-approach study on tidal marsh restoration in a contaminated estuary[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 449: 174

Landscape index analysis of hydrological connectivity dynamics in the Yellow River Delta

FENG Jiuge¹⁾ LI Qianwei¹⁾ LIANG Chen¹⁾ ZHANG Xiaoya¹⁾ YUE Yi¹⁾ GAO Junqin^{1,2)†}

(1) School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, 100083, Beijing, China;

2) The Key Laboratory of Ecological Protection in the Yellow River Basin of National Forestry and Grassland Administration, 100083, Beijing, China)

Abstract Characterization of wetland hydrological connectivity is important to maintain and restore structure and function of wetland ecosystem. Sentinel-2 remote sensing images obtained monthly in 2019 were used to examine hydrological connectivity changes and frequency in the Yellow River Delta, and to analyze important patches using a graph theory-based landscape connectivity index. Hydrological connectivity in the Yellow River Delta was found to have undergone marked seasonal changes. Flood season and ecological water compensation were found to increase overall hydrological connectivity. Importance index distribution was found consistent with hydrological connectivity frequency. Patches with higher hydrological connectivity and frequency were found mainly distributed in recovery area on the south shore, in offshore tidal flats and main tidal ditches. These data would help ecological protection and restoration in the Yellow River Delta.

Keywords hydrological connectivity; important patch; seasonal change; Yellow River Delta