DOI:10.15928/j.1674-3075.2020.05.009

基于InSAR的白洋淀湿地潜在水力阻碍物分布格局

刘 丹[1,2],王 烜[1,2],张云龙[1,2],闫胜军[1,2],杨 薇[1],崔保山[1]

(1.北京师范大学 环境学院水环境模拟国家重点实验室,北京 100875;
2.北京师范大学 环境学院水沙科学教育部实验室,北京 100875)

摘要:探究潜在水力阻碍物的分布格局,对于识别连通受损区域、分析受损原因以及采取针对性连通措施具有重要的科学指导意义。鉴于传统光学遥感方法在植被信息抑制下的湿地水文监测方面具有一定局限性,提出了采用干涉合成孔径雷达(InSAR)技术,反演水域和非水域的地表形变差异,确定阻隔物形变阈值,从而识别潜在水力阻碍物的方法。采用哨兵1号(Sentinel-1)雷达卫星数据确定了白洋淀潜在水力阻碍物的分布格局,并结合分析其对应的景观格局,揭示了导致白洋淀水文连通受阻的主要景观类型。结果表明:(1)InSAR干涉质量受到不同景观类型的显著影响,相干性从高至低分别为村庄>耕地>芦苇台田>水域,其中水域各期平均值均小于0.4,芦苇台田区域对白洋淀湿地整体的干涉质量影响最为显著;(2)不同类型景观的地表形变值差异大,其中芦苇台田区域和水域对应的形变为0~4.5 cm,均大于村庄和耕地;(3)白洋淀的潜在水力阻碍物主要为村庄、耕地和部分芦苇台田,潜在水力阻碍物的时空差异大。建议根据具体情况,采取水位控制和景观格局塑改等多重手段进行连通性调控。

关键词:潜在水力阻碍物;水文连通;干涉合成孔径雷达;白洋淀湿地

中图分类号:X143,P901 **文献标志码**:A

文章编号:1674-3075(2020)05-0070-07 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

水文连通是影响湿地健康或导致湿地退化的重要因素,表征了水流运动通畅程度,关系到湿地系统中以水为介质的物质、能量和生物交换效率,一定程度上可以反映湿地格局和功能的稳定性(崔保山等,2016;刘丹等,2019)。越来越多的学者认为,维持良好的水文连通有利于保持或提升湿地生态系统服务功能(闫丹丹,2014;Liu et al,2019)。随着经济社会的不断发展,人为活动对水文连通的影响越来越广泛和显著。如城市、台田等景观和闸坝、道路、圩堤等构筑物都可能会阻碍水流通过、削弱湿地的水文连通(Jaramillo et al,2018;王坤等,2019);这些可能阻碍水文连通的景观和构筑物,即为潜在水力阻碍物。明晰潜在水力阻碍物的分布格局,对于识别连通受损区域、分析受损原因以及采取针对性连通措施具有重要的科学指导意义。

水力阻碍物主要是依赖其相对于水位较高的地势而阻碍水流漫过其表面。因此,非淹没区均可能成为水力阻碍物,即辨识非淹没区是确定潜在水力阻碍物的关键。遥感方法省时省力,被广泛应用于识别湿地的淹没区和非淹没区(姚晓磊等,2019)。很多学者采用光学遥感影像基于目视解译或监督分类等(半)自动化方法来识别水域空间(刘晓沐等,2006;管玉莹等,2019)。然而,湿地通常生长着大量挺水植被,比如红树林、芦苇、荷花等;而光学遥感影像缺乏对植被冠层的穿透性,导致难以准确辨析植被覆盖的湿地淹没状况,如芦苇被淹难以通过光学遥感影像观测到。

干涉合成孔径雷达(Interferometric synthetic aperture radar,InSAR)技术是一种微波遥感新技术,空间分辨率高,受大气和季节的影响不敏感,是对地观测中最重要的前沿技术之一;其利用两幅或多幅合成孔径雷达影像图,根据卫星或飞机接收到的回波相位差来计算两次成像中微波的路程差,可以计算出数日或数年间厘米级的地表形变(Lee et al,2015;Chen et al,2020)。由于雷达波长可穿透植被冠层,使得植被叶冠以下的信息也能被获取,能够弥补光学遥感影像在植被影响下的湿地水文监测中的不足(胥为等,2018);因其具有时空高精度以

收稿日期:2020-05-24

基金项目:国家重点研发计划课题(2017YFC0404505);水体污染控制与治理科技重大专项课题(2018ZX0711001);国家自然科学基金(51679008,51721093)。

作者简介:刘丹,1991年生,女,博士研究生,研究方向为流域水环境管理。E-mail:danliu@mail.bnu.edu.cn

通信作者:王烜,1973年生,女,教授,主要从事水环境精细模拟、气候变化下水文生态响应、流域水资源安全评价与调控教研工作。E-mail:wangx@bnu.edu.cn

及对植被具有一定穿透性，InSAR 技术在湿地水文监测中具有极大潜力(Jaramillo et al，2018)。本文以白洋淀湿地为研究区，通过 InSAR 技术辨识湿地淹没区和非淹没区，分析白洋淀水力阻碍物的分布格局，以期为该区域水文连通评估、生态效应研究以及工程实施提供科学依据。

1　研究区概况

白洋淀湿地(115°45′～116°09′E，38°43′～38°45′N)是华北平原最大的淡水湿地(图 1－a)，其在调节气候、涵养水源、降解污染物和保护生物多样性等方面有极其重要的生态服务价值，是维系京津冀乃至华北生态平衡的核心(Kumar et al，2015)。由于地处东部季风区暖温带半干旱地区，白洋淀平均气温 7.3～12.7℃，年均降水量仅 523 mm，加之近几十年来受到上游河道径流量拦截、芦苇种植、围湖养鱼等人类活动的影响，水资源短缺，湿地面积严重萎缩，导致其生态环境质量和功能大幅下降(高楠楠等，2013；杨泽凡等，2018)。

白洋淀湿地总面积为 366 km²，蓄水量为 13.2 亿 m³，平均水深 2～4 m。淀区内共有 143 个大小不等的淀泊，3 700 多条沟壕和 80 km² 芦苇台田纵横交错，零星分布于 39 个村庄。白洋淀湿地景观类型主要分为村庄、耕地、芦苇台田和水域四类(图 1－b)，破碎化严重，水文连通状况不佳，水文过程极其复杂(Yang et al，2012)。

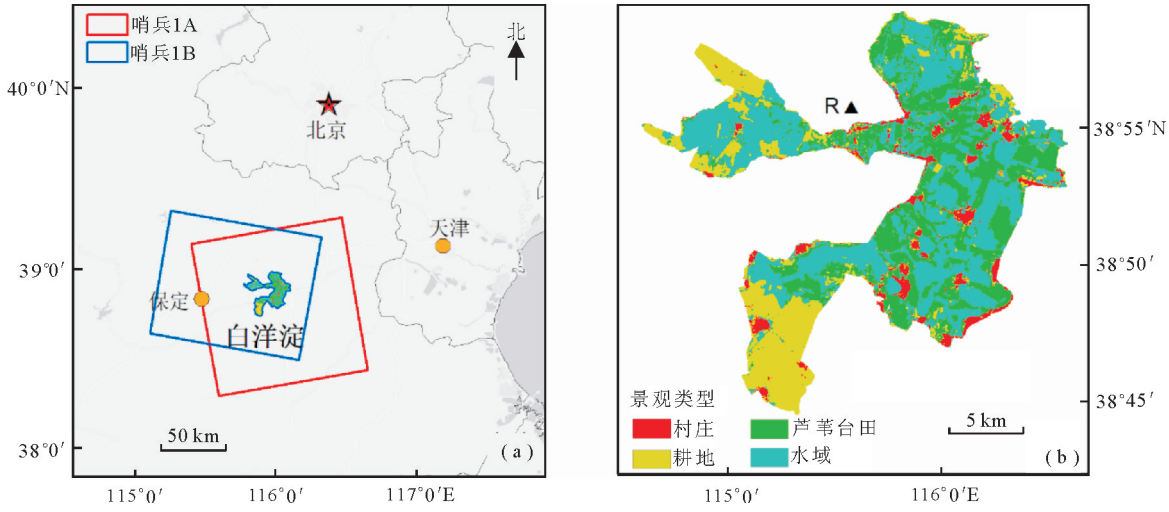

图 1　白洋淀湿地的地理位置(a)及其景观类型(b)

Fig.1　Location (a) and the landscapes (b) of Baiyangdian wetland

2　研究方法

2.1　湿地 InSAR 技术

InSAR 技术是一种独特的空间大地测量新技术，其利用雷达向目标区域发射微波，然后接收目标反射的回波，得到同一目标区域成像的 SAR 复图像对，若复图像对之间存在相干条件，SAR 复图像对共轭相乘可以得到干涉图，根据干涉图的相位值，得出两次成像中微波的路程差，从而计算出测量数日或数年间厘米级的地表形变，通常被用于评估陆面形变，如由地震、火山、滑坡等自然灾害和地下水超采引起的地表沉降以及冰川移动等。对于湿地而言，由于存在大量植被，雷达波在植被和水面间可形成二次角反射(图 2；何敏等，2015)，通过获得两次角反射雷达信号就可以利用 InSAR 技术监测湿地水位变化。水位变化(h)可由干涉相位(Φ)计算得到(Palomino-Ángel et al，2019)：

$$h=\frac{\lambda\Phi}{4\pi\cos\theta} \tag{1}$$

式中：λ 为雷达波长(cm)；θ 为入射角。

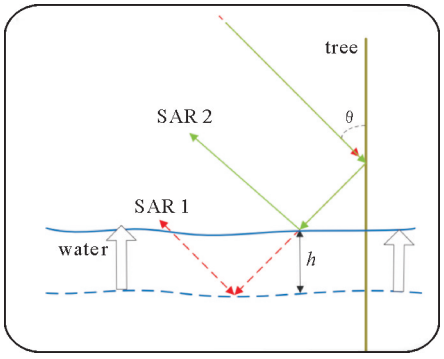

图 2　InSAR 湿地监测原理

Fig.2　Diagram of how InSAR was used to monitor water level change in wetlands

2.2 水力阻碍物识别

采用InSAR对白洋淀湿地(包括淹没区和非淹没区)进行形变监测。理论上,在没有地震、地下水抽采等引起的地表突然沉降发生情况下,短时间内非淹没区(潜在水力阻碍物)几乎没有地表形变,即形变接近于0。但考虑到大气、植被的时变性或数据处理引起的误差,假设非淹没区的地表形变在以0为均值、ε_0为阈值的一定区间($-\varepsilon_0$,ε_0)内波动;而对于淹没区,由于受到水位波动的影响,其表面形变应是大于非淹没区的。因此,可通过判断形变范围来确定是否为非淹没区域(潜在水力阻碍物),即当地表形变满足式(2),则认为该区域对应景观或构筑物为水力阻碍物。

$$|H| \leqslant \varepsilon_0 \tag{2}$$

式中:H为InSAR计算得到的地表形变值。

2.3 数据源及数据处理

哨兵1号(Sentinel-1)卫星是欧洲航天局哥白尼计划中的地球观测卫星,由Sentinel-1A和Sentinel-1B两颗雷达卫星组成,载有C波段合成孔径雷达,可提供白天、夜晚和各种天气条件下的连续图像。Sentinel-1A雷达卫星于2014年4月发射,重访周期为12 d,Sentinel-1B雷达卫星于2016年4月发射,重访周期为6 d。本研究选择2016年1月至2019年12月的Sentinel-1A或Sentinel-1B雷达影像(覆盖范围如图1-a中框选所示),共获取77张升轨、入射角39.1°、极化模式为VV(vertical transmit/vertical receive)的单视复数图像,形成58组干涉对。每组干涉对中,影像获取时间较早的为主影像,而获取时间较晚的为从影像。

采用SARscape软件对雷达图像进行干涉处理和特征分析,包括基线估算、干涉图生成、干涉图去平、干涉图自适应滤波、相干性计算、相位解缠、轨道重定义、高程/形变转换等;其中,雷达图像配准以及干涉图去平采用的是30 m数字高程模型(DEM),相位滤波采用的是Goldstein 5×5相位滤波器。以图1-b的R处为无形变参考点(该参考点位于安新县城,非淹没区无强烈地质运动),采用Minimum Cost Flow方法进行相位解缠,该方法可不对相干性差的区域进行解缠,适用于有大量低相干性区域存在情况下的相位解缠。相干性是指主影像和从影像相位的空间一致性,是对干涉图中信号质量的一种度量。通过对每个干涉图的相干性进行评估,共15组干涉图具有相对较好的相干性(平均相干性大于0.4),几乎全部处于春季或冬季,而夏季和秋季的雷达图像干涉质量较差,可能是由于生长期的芦苇变化快、密度大所致。潜在水力阻碍物分析见表1。

表1 相干性较好干涉图的雷达影像特征

Tab.1 Radar image features of interferograms with good coherence

干涉图读取时段	季节	基线/m	平均相干性
2017/02/01-2017/02/13	冬季	113.46	0.42
2017/02/25-2017/03/09	春季	25.06	0.44
2017/04/02-2017/04/14	春季	77.57	0.41
2017/11/28-2017/12/10	冬季	111.33	0.49
2017/12/10-2017/12/12	冬季	55.64	0.49
2017/12/22-2018/01/03	冬季	71.66	0.50
2018/01/27-2018/02/08	冬季	59.51	0.42
2018/02/08-2018/02/20	冬季	70.30	0.49
2018/11/11-2018/11/23	秋季	72.06	0.45
2018/11/23-2018/12/05	冬季	112.13	0.47
2019/01/10-2019/01/22	冬季	15.12	0.47
2019/03/11-2019/03/23	春季	13.96	0.44
2019/03/23-2019/04/04	春季	14.72	0.43
2019/04/04-2019/04/16	春季	38.32	0.43
2019/12/12-2019/12/24	冬季	62.49	0.51

3 结果与分析

3.1 不同景观类型的相干性

为分析不同景观类型对干涉质量的影响,在15组干涉图中选择分别获取于2017-2019年初或年末的6期干涉图(包括2017/02/01-2017/02/13;2017/02/25-2017/03/09;2017/11/28-2017/12/10;2018/11/23-2018/12/05;2019/01/10-2019/01/22;2019/12/12-2019/12/24)作为典型代表,研究不同景观类型下平均相干性的差异,以规避不同年份自然条件对干涉质量的影响(图3)。由图3可知,6期干涉图均存在相似的规律,景观类型对相干性影响显著,相干性从高至低分别为村庄>耕地>芦苇台田>水域。村庄和耕地能够产生较高的相干性,主要是因为其表面结构特征相对比较稳定,因此两次影像获取时微波在地表的后向散射特性较为相似。对于不同干涉对,村庄、耕地和水域的平均相干系数相对较为稳定,而芦苇台田区域的相干系数变化较大,表明该区域的干涉质量随时间变化差异大,可能与其当时生长密度有关。白洋淀全淀平均相干系数主要与芦苇台田区域的相关系数成正相关,表明整体干涉质量也主要取决于芦苇台田区域的干涉质量;水域干涉性差,各期平均值均小于0.4,因此默认相干性差、不能进行相位解缠的区域为水域,即非水力阻碍物。

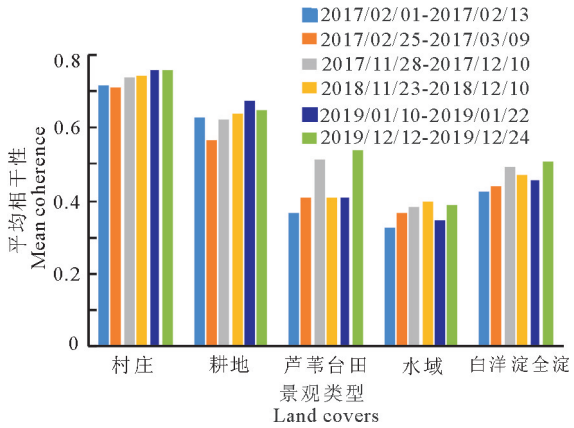

图 3　不同景观类型下典型干涉图的平均相干性

Fig.3　Average coherence of typical interferograms for different landscapes

3.2　不同景观类型的解缠相位

基于 6 期干涉解缠相位文件，以村庄、耕地、芦苇台田和水域为掩膜逐像素提取解缠相位，其分布状况如图 4 所示。村庄和耕地的解缠相位分布更为聚集，波动范围较小，说明村庄和耕地各个区域的解缠相位较为一致；而芦苇台田和水域的解缠相位几乎均分布于 0～8，根据式(1)计算得到的对应形变值为 0～4.5 cm，表明各个区域的形变值空间差异大，其中较高的相位解缠值可能是由于强烈的水位波动引起的；而较低相位解缠值对应的区域则可能是非淹没区域，由于无水位波动，导致两次影像获取时地表无形变或形变较小。村庄的平均相位值最小，表明村庄的形变最小，可能是由误差造成的。

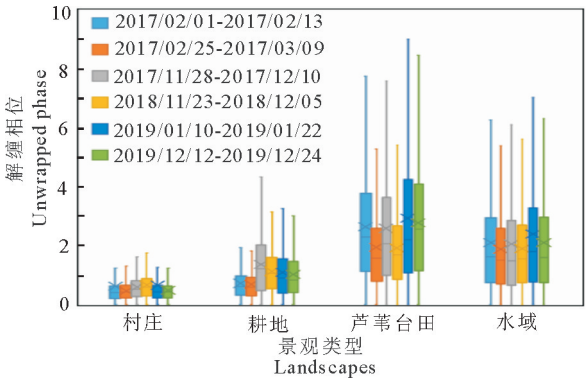

图 4　不同景观类型下典型干涉图的解缠相位特征

Fig.4　Boxplot of unwrapped phase for the typical interferograms of different landscapes

3.3　潜在水力阻碍物分布格局

3.3.1　形变阈值　形变阈值的合理界定是准确识别潜在水力阻碍物的关键。如果阈值过高，非水力阻碍物可能被误认为阻隔物；而阈值过低时，一些阻隔物可能无法被有效识别出来。本研究获取雷达影像时间为 2016－2019 年的春季或冬季，由于村庄地势较高，没有被洪水淹没，几乎均为非淹没区。因此，将白洋淀村庄作为已知的潜在水力阻碍物，并以其为参照，确定潜在水力阻碍物的形变阈值。

为确定合理的形变阈值，本文研究了不同梯度形变阈值下水力阻碍物的识别情况，并与村庄的空间位置和重叠面积相比较，进而计算出村庄被识别为水力阻碍物的比率(图 5)。随着设置形变阈值的增大，村庄识别率也逐渐增大；当村庄识别率增大至接近 100％时，此时对应的形变阈值是识别水力阻碍物的最佳形变阈值。如垂直虚线所示，对于干涉对 2017/02/01－2017/02/13，其最佳形变阈值为 0.357 cm，即当某栅格形变绝对值小于0.357 cm时，该栅格所在地理位置对应的景观或构筑物将被判别为潜在水力阻碍物；而对于干涉对 2018/11/23－2018/12/05，其最佳形变阈值为 0.490 cm。形变阈值差异可能是由于不同时期的微波特性、大气状态和地表覆盖特征所造成的不同噪声引起。

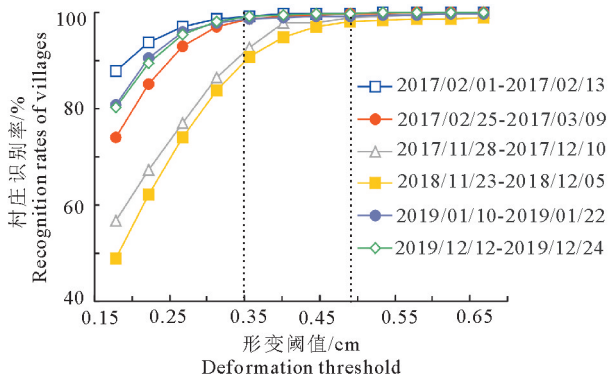

图 5　不同形变阈值下的村庄识别率

Fig.5　Recognition rates of villages under different deformation thresholds

在对应的形变阈值下，根据式(2)判别各栅格是否为潜在水力阻碍物，并提取出所有被识别为潜在水力阻碍物的栅格，如图 6 所示。由图 6 可直观观察到各个干涉对中村庄与潜在水力阻碍物空间重合度均较高，表明由图 5 确定的形变阈值较为合理。通过与图 1－b 中的景观类型进行分析比较，可发现有的芦苇台田区域被识别成为潜在水力阻碍物，而有的芦苇台田区域则不是，表明该方法具有较高精度来区分和判别芦苇植被覆盖下的水位波动情况，并据此确定芦苇台田区域是否为潜在水力阻碍物。图 6 中，不同时期白洋淀的潜在水力阻碍物的空间分布有所差异；其中，2017/02/01－2017/02/13 和 2019/01/10－2019/01/22 的潜在水力阻碍物面积较小，而 2017/02/25－2017/03/09 和 2019/12/12－

2019/12/24中则明显有更多的潜在水力阻碍物存在，这可能与水位波动相关。当水位较高时，淹没面积较大，潜在水力阻碍物较少；而当水位下降时，更多的芦苇台田、圩堤等裸露在地表，被识别为潜在水力阻碍物。也就是说，对于部分栅格或区域而言，其是否成为水力阻碍物是不确定的，取决于当时特定的水文条件或人为活动。对于此类潜在水力阻碍物是需要重点关注的，因为通过改变水文条件或较小的人为干预即可显著减少潜在水力阻碍物的面积，从而提升白洋淀的水文连通性。

3.3.2　空间分布概率　通过对其他9期干涉图进行形变阈值确定、水力阻碍物提取，共得到15幅不同时期的潜在水力阻碍物的栅格图。对这些栅格图层进行叠加，并计算各栅格被识别为潜在水力阻碍物的概率(p)：

$$p = n/15 \tag{3}$$

式中：n 是某栅格被识别为潜在水力阻碍物的图层数。

各栅格的 p 值结果如图7-a所示。p 值介于0～1，越接近于1，表明其对应的景观越有可能成为潜在水力阻碍物，即在白洋淀水位正常波动范围内的各种情景下，这些景观都会是潜在水力阻碍物。

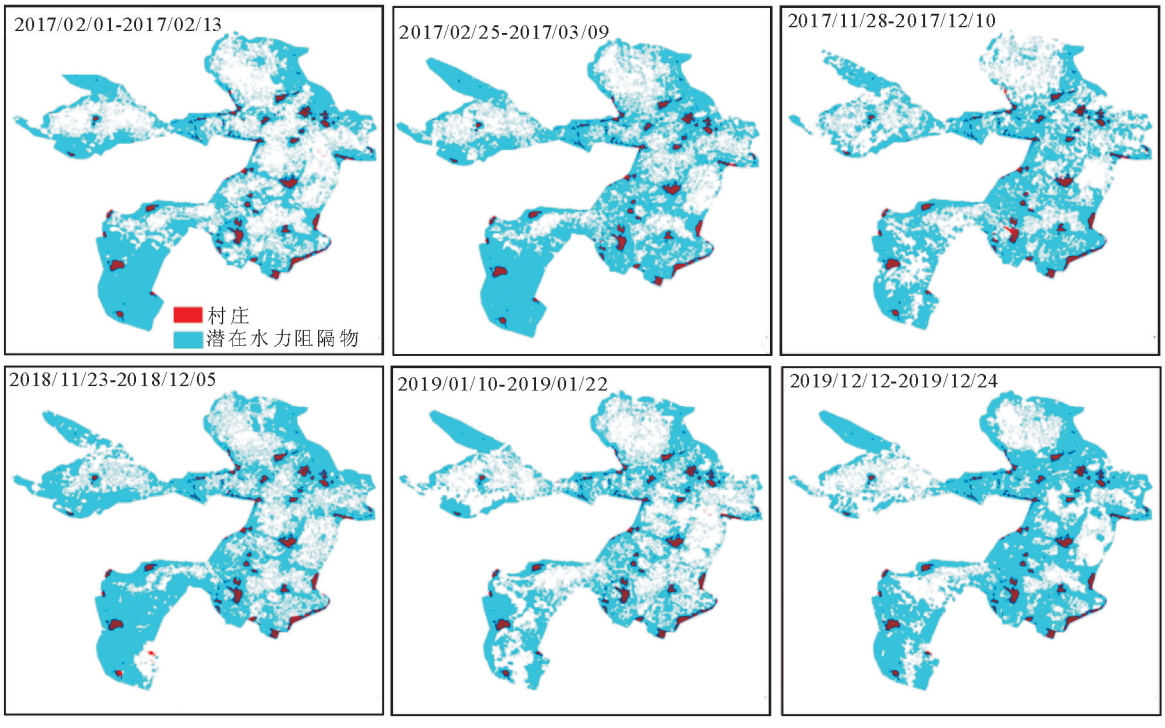

图6　村庄与潜在水力阻碍物的空间分布

Fig.6　Spatial distributions of villages and potential hydraulic barriers

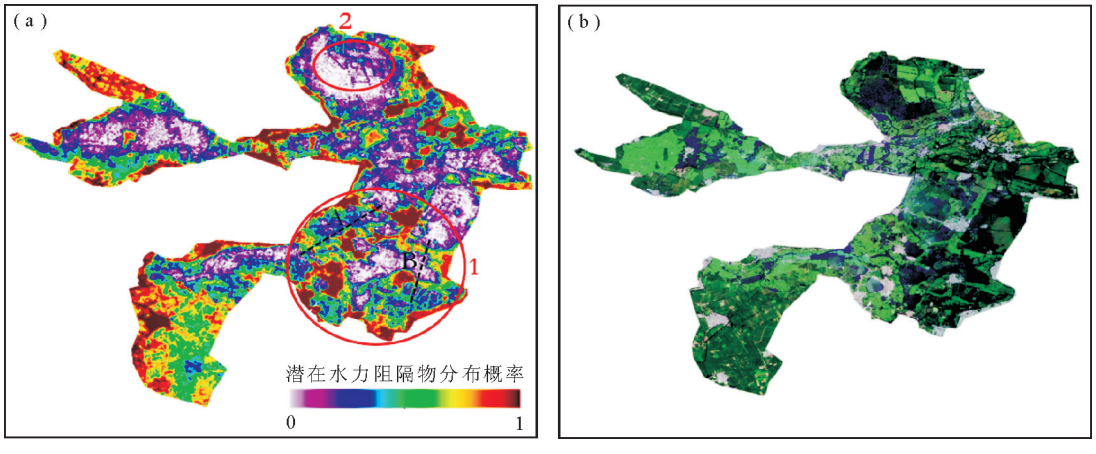

图7　白洋淀湿地潜在水力阻碍物的空间分布概率(a)和Landsat遥感影像(b)

Fig.7　Spatial distribution probability of potential hydraulic barriers (a) and Landsat image(b) of Baiyangdian wetland

通过比较图 7－a 与图 7－b 的 Landsat 遥感影像相，可以发现村庄（图 7－b 白色区域）几乎都是潜在水力阻隔物，而明水面（图 7－b 黑色区域）成为潜在水力阻隔物的概率几乎接近于 0，这与理论结果是一致的，表明结果基本可信。结合图 7－a 与图 1－b 分析发现，概率接近于 1 的区域多为村庄景观和耕地，此外有部分芦苇台田，这些景观通常地势较高，对水体流动会产生一定的阻碍作用。相比于其他区域，白洋淀南部区域（图 7－a 红色圈选 1）中较多的芦苇台田具有较大概率成为潜在水力阻碍物，并且其与附近的村庄形成闭环，很可能导致水体在此区域交换不畅，阻碍水文连通。因此，建议在概率接近 1 的部分截面新建或拓宽沟渠，比如图 7－a 红色圈选 1 中虚线 A 和 B 处；此外，白洋淀北部和中部有很多区域的景观也都可能成为潜在水力阻碍物，但概率大多小于 0.5（图 7－a 红色圈选 2），表明这些景观是否成为水力阻碍物有较大的时变性，可能与当时的水位有关。

4　结论

1）InSAR 干涉质量受到不同景观类型的显著影响，相干性从高至低分别为村庄＞耕地＞芦苇台田＞水域，白洋淀湿地整体干涉质量主要取决于芦苇台田区域的干涉质量。

2）白洋淀不同类型景观的地表形变值差异大，芦苇台田区域和水域的形变值普遍高于村庄和耕地；村庄、耕地和部分芦苇台田是阻碍水文连通的主要潜在水力阻碍物。

3）潜在水力阻碍物分布格局时空变异大，不仅与景观格局相关，也可能受到水位变化的影响。建议根据具体情况，采取水位控制和景观格局塑改等多重手段，对白洋淀湿地的水文连通性进行调控。

参考文献

崔保山，蔡燕子，谢湉，等，2016. 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），52(6)：738－746.

高楠楠，李晓文，诸葛海锦，2013. 白洋淀台田结构与水体富营养化程度变化的关系研究[J]. 湿地科学，11(2)：259－265.

管玉莹，虞功亮，韩睿明，等，2019. 近 30 年来高邮湖（含邵伯湖）自然水域面积变化及其影响因素[J]. 环境科学研究，32(12)：2057－2064.

何敏，顾利红，何秀凤，2015. 利用 InSAR 技术监测湿地水位变化[J]. 地理空间信息，13(6)：132－141.

刘丹，王烜，李春晖，等，2019. 水文连通性对湖泊生态环境影响的研究进展[J]. 长江流域资源与环境，28(7)：1702－1715.

刘晓沐，季艳，万寿红，2006. 单源可见光遥感图像中的水域识别[J]. 仪器仪表学报，27(6)：2086－2087.

王坤，许超，王文杰，等，2019. 1980－2015 清水河流域水系连通变化研究[J]. 北京大学学报（自然科学版），55(4)：747－754.

胥为，周云轩，沈芳，等，2018. 基于 sentinel－1A 雷达影像的崇明东滩芦苇盐沼植被识别提取[J]. 吉林大学学报（地球科学版），48(4)：1192－1200.

闫丹丹，2014. 松花江下游沿江湿地水文连通性恢复研究[D]. 北京：中国科学院大学.

杨泽凡，胡鹏，赵勇，等，2018. 新区建设背景下白洋淀及入淀河流生态需水评价和保障措施研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报，16(6)：563－570.

姚晓磊，鱼京善，李占杰，等，2019. CCI 遥感土壤水在东北粮食主产区表征干旱的准确性评估[J]. 北京师范大学学报（自然科学版），55(2)：233－239.

Chen Y，Qiao S，Zhang G，et al，2020. Investigating the potential use of Sentinel－1 data for monitoring wetland water level changes in China′s Momoge National Nature Reserve[J]. Peer J，8：1－24.

Jaramillo F，Brown I，Castellazzi P，et al，2018. Assessment of hydrologic connectivity in an ungauged wetland with InSAR observations[J]. Environ Res Lett，13(2)：1－10.

Kumar A，Mishra S，Sharma M P，2015. Assessment of ecological health of Baiyangdian lake in China using ecological health index[J]. J Appl Nat Sci，7(2)：955－959.

Lee H，Yuan T，Jung H C，et al，2015. Mapping wetland water depths over the central Congo Basin using PALSAR ScanSAR，Envisat altimetry，and MODIS VCF data[J]. Remote Sens Environ，159：70－79.

Liu D，Wang X，Zhang Y L，et al，2019. A landscape connectivity approach for determining minimum ecological lake level：Implications for lake restoration[J]. Water (Switzerland)，11：1－14.

Yang W，Yang Z F，Zheng C，2012. Sustainable environmental flow management based on lake quality protection：The case of Baiyangdian Lake，China[J]. Procedia Environ Sci，13：730－741.

（责任编辑　万月华）

Visualizing Potential Hydraulic Barriers in Baiyangdian Wetland Using InSAR

LIU Dan[1,2], WANG Xuan[1,2], ZHANG Yun-long[1,2], YAN Sheng-jun[1,2], YANG Wei[1], CUI Bao-shan[1]

(1.State Key Laboratory of Water Environment Simulation, Beijing Normal University, Beijing 100875, P.R.China;
2.Key Laboratory for Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, P.R.China)

Abstract: Hydrological connectivity is important and can be the difference between a healthy wetland ecosystem and one that is degrading. An understanding of potential hydraulic barriers in wetlands is crucial for identifying disconnected areas, analyzing the causes and choosing specific measures to restore connectivity. In this study, we analyzed the spatial distribution of hydraulic barriers in Baiyangdian wetland (Baoding, Hebei) using data collected with interferometric synthetic aperture radar (InSAR). Overcoming the limitation of traditional optical remote sensing methods affected by vegetative cover, InSAR technology was implemented by first recognizing the differences in surface deformation between water and non-water from wrapped phases of the interferograms and then determining the deformation thresholds of hydraulic barriers. The distributions of potential hydraulic barriers in Baiyangdian wetland were then determined using Sentinel-1 data from January, 2016 to December, 2019. Finally the locations of potential hydraulic barriers, combined with the analysis of the corresponding landscape patterns, were used to identify land covers associated with a lack of hydrological connectivity. The results led to three primary findings: (1) The quality of InSAR interferograms was significantly affected by different land covers, with progressively reduced coherence of villages, cultivated lands, reed grasslands and open water. The average coherence of open water was less than 0.4, and the reed grassland most significantly influenced image quality. (2) The surface deformation of different land covers varied greatly, with reed grassland and open water in the range of 0-4.5 cm, generally higher than that of villages and farm land. (3) The potential hydraulic barriers of Baiyangdian wetland were mainly villages, farm land and reed grassland, with significant temporal and spatial variation. The distribution of the potential hydraulic barriers in Baiyangdian wetland was primarily influenced by landscape pattern, but is affected by water level. Therefore, multiple measures, such as water level control and landscape reconstruction, should be combined to restore hydrological connectivity in Baiyangdian wetland.

Key words: potential hydraulic barriers; hydrological connectivity; InSAR technology; Baiyangdian wetland