

DOI: 10.5846/stxb201809302127

闫欣,牛振国.白洋淀流域湿地连通性研究.生态学报,2019,39(24):9200-9210.

Yan X, Niu Z G. Preliminary study on wetland connectivity in Baiyangdian basin. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(24): 9200-9210.

白洋淀流域湿地连通性研究

闫 欣^{1,2}, 牛振国^{1,*}

1 中国科学院空天信息研究院, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100094

2 中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049

摘要: 湿地在流域防洪减灾、水资源调节、缓解环境污染、保护生物多样性和维持区域生态环境方面具有重要功能和价值。作为我国北方平原湿地系统之一,白洋淀流域湿地对于保障雄安新区的水资源安全和良好生态环境等方面具有关键性作用。了解目前白洋淀流域湿地生态系统的现状对于新区建设和未来科学规划也具有重要意义。以 2017 年 9 月欧空局提供的 10 米分辨率的 Sentinel-2B 影像为主要数据源,并结合谷歌地球高分辨率卫星影像(分辨率 0.23m),通过人工目视解译和机器自动分类等多种方式,绘制了白洋淀流域最新的湿地生态系统网络分布图;在此基础上,利用地理信息系统分析了白洋淀流域湿地的连通性(包括水文连通性和景观连通性)。结果显示:(1)2017 年白洋淀流域湿地面积为 4596.6km²,包括沼泽、洪泛区、沟渠、湖泊、河流,主要分布在坡度为 0°至 2°,海拔在 100m 以下的平坦地区;而流域内非湿地面积约 86%,以耕地和林地为主。(2)2017 年白洋淀流域河道长度为 2440km,面积为 514 km²,其中山区河道 177 km²,平原河道 337 km²。河道内耕地面积比例达 27%,建设用地比例约为 8%,河道占用明显。河道两侧 1km、2km 和 3km 距离范围内耕地比例分别占 61.77%、62.53%、62.63%。随着距离的扩大,湿地面积减少,非湿地面积增加。(3)由于人类活动的直接和间接影响,河道的水文连通性下降,与河道没有受到干扰时的连通性水平相比,减少了三分之一。(4)从景观格局指数 SPLIT 和 DIVISION 指示的流域湿地连通性看,景观级别上流域内自然湿地的景观连通性最差,人工湿地次之。在类型级别上沼泽类型的连通性最差,河流、沟渠与洪泛区湿地类型的连通性较好,湖泊的景观连通性最好。为保障白洋淀流域水安全,以流域湿地网络为整体,恢复和增强流域湿地网络连通性,将有效提高雄安新区水资源安全和生态环境保护的能力。

关键词: 白洋淀流域;湿地遥感;湿地连通性;Sentinel-2B;河道占用

Preliminary study on wetland connectivity in Baiyangdian basin

YAN Xin^{1,2}, NIU Zhenguo^{1,*}

1 State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, Beijing 100049, China

Abstract: Wetlands have important functions and values in flood control and disaster mitigation, water resource regulation, mitigation of environmental pollution, protection of biodiversity, and maintenance of regional ecological environment. As one of the wetland systems in the northern plain of China, the Baiyangdian basin wetlands play a key role in safeguarding the water resources security and good ecological environment in Xiong'an New Area. It is of great significance to understand the current status of wetland ecosystem in the Baiyangdian basin for the construction of new area and future scientific planning. Based on the 10-meter resolution Sentinel-2B image provided by the European Space Agency in September 2017 as main data source, and combined with Google earth high-resolution satellite image (resolution 0.23m), this paper has drawn the latest wetland ecosystem network distribution map of Baiyangdian basin using manual visual interpretation and automatic

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFA0603004); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA19030203); 国家自然科学基金项目(41271423)

收稿日期:2018-09-30; 网络出版日期:2019-09-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: niuzg@radi.ac.cn

machine classification. On this basis, the connectivity of Baiyangdian basin wetland (including hydrological connectivity and landscape connectivity) was analyzed with GIS (Geographic Information System). The results show that: (1) In 2017, the wetland area of Baiyangdian basin was 4596.6km^2 , including marshes, floodplains, irrigation canals, lakes, and rivers. Those wetlands mainly distributed in flat areas with a slope of 0° to 2° and an altitude of 100m or less. The area of non-wetland in the basin accounted for about 86%, mainly cultivated land and forestland. (2) In 2017, the length of the river courses in the Baiyangdian basin was 2440 km, with an area of 514 km^2 , including 177 km^2 in the mountainous area and 337 km^2 in the plain area. The river course was obviously occupied, in which the proportion of the cultivated land reached 27%, and the proportion of construction land was about 8%. The proportion of cultivated land within the range of 1km, 2km and 3km on both sides of the river took up 61.77%, 62.53% and 62.63%, respectively. With the increase of distance, the area of wetland decreases and the area of non-wetland increases. (3) As a result of the direct and indirect effects of human activities, the hydrological connectivity of river courses has decreased by one third compared with the level of connectivity when the river courses were undisturbed. (4) From the perspective of the wetland landscape connectivity indicated by SPLIT and DIVISION, the natural wetland in the basin had the worst landscape connectivity, followed by constructed wetlands at the landscape level. At the type level, the marsh type had the worst connectivity, and the connectivity of rivers, irrigation canals and floodplains wetlands was better, and the lake had the best landscape connectivity. In order to guarantee the water security of Baiyangdian basin, restoring and enhancing the connectivity of the wetland network in the basin as a whole will effectively improve the ability of water resources safety and ecological environment protection capacity in the Xiong'an New Area.

Key Words: Baiyangdian basin; wetland remote sensing; wetland connectivity; Sentinel-2B; river course occupation

作为“地球之肾”的湿地生态系统,在为众多野生动植物提供栖息地的同时,也为人类提供多种生态服务,如涵养水源、调蓄洪水、调节气候、降解污染、固碳释氧、控制侵蚀、营养循环等。湿地生态系统网络的连通性是维系湿地上述功能的重要指标之一,但日益增强的人类活动使得湿地生态格局发生改变,割断了不同湿地斑块间的联系,导致湿地连通性急剧下降,进而导致湿地功能出现了不同程度的退化。

水安全和生态环境是“雄安新区”面临的关键问题之一^[1]。白洋淀水资源量的时空分布本质上受控于流域的自然地理特征,也受到流域间人为调水的影响。但多年来为满足农业发展的需要,白洋淀流域上游大量修建水库,下游农灌用水量也不断增加,地表水已开发 90%以上,超负荷开采地下水、占用河道问题越来越严重^[2]。对湿地的开发占用极大影响了湿地的连通性,进而影响了湿地功能的发挥。保护和恢复湿地,增强湿地连通性,对于提高水生态安全具有重要意义^[3]。分析白洋淀流域的湿地连通性,对于提高雄安新区的水安全和生态环境建设将具有重要的参考价值。

本文以白洋淀流域整体为研究对象,基于最新(2017 年)的多源高分辨率遥感卫星数据,①提取白洋淀流域河道及湿地生态网络信息;②结合地形等资料,分析白洋淀流域的湿地分布现状;③在此基础上评价白洋淀流域湿地的连通性。

1 国内外研究现状

虽然目前国内外关于湿地连通性的研究较多,但没有建立专门的评价指标体系。像最小成本路径模型^[4-7]、形态学空间格局分析法(MSPA)^[7-8]、整体连通性指数(IIC)^[9]、障碍影响指数^[5]、图论算法^[9-11]、多指标评价法^[12]、景观指数方法^[13]等多种方法被广泛应用在绿地、水文等生态领域的连通性研究中,均从不同角度反映了湿地连通性的研究内容。总体而言,湿地的连通性研究包括湿地的水文连通性和景观连通性两方面的内容。

水文连通性的狭义概念是指流域内物质以水为媒介,在空间异质性景观或斑块内(间)进行传输的便利

程度,是指空间上的连通状态^[14]。长江水利委员会^[15]将水文连通性定义为河道干支流、湖泊及其他湿地等水系的连通情况,体现水流的连续性和水系的连通状况。评估水文连通性对于了解湿地生态系统中沉积物和其他污染物的水流和水文传输是非常必要的。Van Looy^[16]利用图论理论对河流廊道与河网进行建模,分析其结构与功能连通性。由于湿地(尤其是河流)独特的空间分布特征,可以将河流和水系看作景观中的廊道和网络,利用廊道与网络的分析方法比较不同条件下河流廊道与水系网络的特征指标,以反映水文结构连通的情况。如今水文连通性已经被广泛运用于描述河流、湿地景观的空间连接。

然而,只有水文连通性无法定量描述不同斑块之间的物理联系及生态行为、生态功能和生态过程上的有机联系。景观格局与生态过程是相互联系、相互影响的,景观连通性作为景观格局分析中的一大研究热点,可以很好的指示斑块间的连接程度。Merriam^[17]最初基于生态学角度引入景观连通性的概念,来解释物种分布和景观结构之间的交互作用在决定生境斑块之间生物迁移的作用。邬建国^[18]从景观生态学的角度认识连通性概念,定义为斑块间通过廊道、网络而连结在一起的程度。景观格局的分析方法主要采用数量研究方法,其定量分析可以从景观指数的变化上反映出来^[19]。景观指数是反映景观构成、组合、联系等方面的简单定量指标,在景观生态学及地理学领域已经得到广泛应用^[20]。采用不同景观指数可以开展湿地的生态特征和景观结构的评价^[21-22]。如宫兆宁等^[22]利用景观指数方法分析了北京湿地 20 多年湿地景观动态变化特征。景观连通性是景观指数中专门反映景观斑块连通程度方面的定量指标,包括 SPLIT、DIVISION、COHESION 等计算景观连通性、景观分离度、景观破碎度、分维数等,都可以用来定量描述景观的连接状况。

2 研究区与数据源

2.1 研究区概况

白洋淀流域(38°7'43"—39°39'56"N,114°10'50"—116°8'51"E)属于大清河流域,上游有 5 座大型水库,分为南北两大支流。如图 1 所示,南部支流中,横山岭水库、口头水库、王快水库分别通过磁河、沙河注入潞龙河,最后注入白洋淀;西大洋水库通由唐河注入白洋淀;中部支流中,由漕河注入白洋淀;北部支流中安各庄水库通由中易水河与北拒马河、南拒马河等由白沟引河注入白洋淀。白洋淀流域处于华北平原,降水相对集中,在夏秋两季的 7—8 月份,属于典型温带大陆性季风气候。白洋淀及其所在大清河上游流域跨越太行山和华北平原,在春夏时分有来自太行山的高山融水汇入流域。

2.2 数据源

白洋淀流域湿地的遥感分类使用 2017 年 9 月 20 日的 Sentinel-2B 遥感影像为数据源,“哨兵(Sentinel)”系列地球观测卫星是欧盟委员会和欧洲航天局共同倡议的全球环境与安全监测系统(即哥白尼计划)的重要组成部分,目的是帮助欧洲监测陆地和海洋环境并满足其应对自然灾害等安全需求。Sentinel-2B 卫星携带高分辨率多光谱成像装置,共有 13 个波段(表 1)。本文使用的波段为 10 米分辨率的第 2、3、4、8 波段。

3 研究方法

3.1 土地利用/覆盖分类

本研究在对哨兵影像数据进行大气和几何校正的基础上,采用 4、3、2 波段进行彩色合成,采用支持向量机(Support Vector Machines, SVM)分类方法进行研究区土地利用/覆盖类型的分类。支持向量机是一种基于结构风险最小化的分类器,通过解二次规划问题,寻找将数据分为两类的最优超平面,其理论最初来自于对数分类问题的处理。基于统计学习理论的支持向量机算法具有理论完备、全局优化、适应性强、推广能力好等优点,是机器学习研究的新热点。它在最小化经验风险的同时,有效提高了算法的泛化能力,具有良好的应用价值和前景^[23]。

训练和验证样本的选取。通过目视解译与对照 Google Earth 高分辨率影像相结合的方式(图 2),对 8 种地物类型进行样本判别选取,共计选取样本总量 5199 个,其中 67%用于监督分类,33%用于混淆矩阵精度验证。



图 1 白洋淀流域水系图

Fig.1 Drainage of Baiyangdian basin

表 1 Sentinel-2 图像数据基本参数

Table 1 Basic parameters of Sentinel-2 image data

波段号 Band number	空间分辨率/m Spatial resolution	中心波长/nm Central wavelength	频宽/nm Bandwidth	参考分辨率 Reference resolution/ ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$)	信噪比 Signal-to-noise ratio
1	60	443	20	129	129
2	10	490	65	128	154
3	10	560	35	128	168
4	10	665	30	108	142
5	20	705	15	74.5	117
6	20	740	15	68	89
7	20	783	20	67	105
8	10	842	115	103	172
8b	20	865	20	52.5	72
9	60	945	20	9	114
10	60	1375	30	6	114
11	20	1610	90	4	100
12	20	2190	180	1.5	100

国家林业和草原局于 1999 年发布的中国湿地分类标准将我国湿地分为近海与海岸湿地、沼泽湿地、湖泊湿地、河流湿地与人工湿地五大类,依据白洋淀流域内土地利用/覆盖状况以及影像分辨率,本文将流域内土

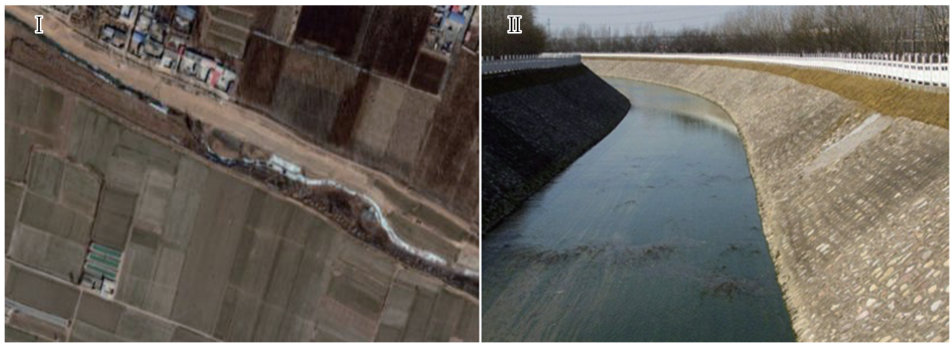


图 2 谷歌影像河堤示例

Fig.2 An example of the Google image embankment

(I):谷歌地球高分真彩色影像,经度 115°34'17"至 115°34'45",纬度 39°02'34"至 39°02'48",成像日期 2018 年 2 月 3 日;(II):实际河堤照片

地利用/覆盖划分为河流、洪泛区、湖泊、沼泽、沟渠、耕地、林地、建设用地等八种类型(表 2)。

平原地区的河道在湿地网络系统中具有重要的意义,但是由于季节性降水等原因,河道的识别和提取具有很大的挑战。河堤是平原地区识别河道的重要标志。根据《中华人民共和国河道管理条例(2017 年)》,有堤防的河道,范围为两岸堤防之间的水域、沙洲、滩地(包括可耕地)、行洪区,两岸堤防及护堤地。无堤防的河道,其范围根据历史最高洪水位或者设计洪水位确定。由于河道是潜在的洪水泛滥区域,任何开发都存在一定的风险。

河道的提取。由于河堤堤身材料的复杂性及遥感影像不同地物光谱特征具有一定的相似性,使得河道自动提取难度很大。为了有效识别河道和保证提取的精度,以 0.23m 空间分辨率的谷歌影像数据为基础,采用 LocaSpaceViewer 软件,以人工目视判读的方法进行河道的识别和提取。对于有河堤的河道,沿着河堤进行识别和勾绘;对没有河堤的河道的提取,依据河道与周围土地利用/覆盖类型的光谱差异以及经验知识进行判别,不确定的区域进行标记,后期进行实地调查,保证能够识别的河道都能被提取。识别的河道包括主河道以及各个分级河道、废弃河道等,且所有河道保持连续。

表 2 白洋淀流域土地利用/覆盖类型

Table 2 Land use/cover type in Baiyangdian basin

一级分类 Primary classification	二级分类 Secondary classification	描述 Description
湿地 Wetland	河流	指地表上有相当大水量且常年或季节性流动的天然水流
	洪泛区	指河水、洪水泛滥淹没的河流两岸地势平坦地区
	湖泊	指陆地表面洼地积水形成的比较宽广的水域
	沼泽	指地表及地表下层土壤经常过度湿润,地表生长着湿性植物和沼泽植物,有泥炭累积或虽无泥炭累积但有潜育层存在的土地
	沟渠	指为灌溉或排水而人工开挖的水道
非湿地 Non-wetland	耕地	指农作物在生长与暂处于闲置的农田,以种植农作物为主,间有零星果树、桑树或其他树木的土地
	林地	指覆盖在某一地区地面上具有一定密度的乔木、竹类、灌木土地及林地山,不包括居民绿化用地
	建设用地	指建造建筑物、构筑物的土地,包括城乡住宅和公共设施用地、工矿用地、交通水利设施用地、旅游用地、军事设施用地等

3.2 湿地连通性分析

本文将湿地连通性从水文连通性和景观连通性两个方面进行分析。狭义上的水文连通性,是指河流中水体的连通状况,主要考虑河道干支流与流域内湖泊等水系的连通情况。景观连通性主要取决于景观的组成特

征和空间分布格局,反映某种斑块类型的不同斑块之间的物理联系。因此可以看作水文连通性是从水文形态学的角度对流域中河流廊道连通性的定量描述,而景观连通性是从景观生态学的角度对流域中湿地斑块连通性的定量描述。

3.2.1 水文连通性

目前水文连通性的评价方法是多指标评价法,评价体系构建一般采用的指标是节点度数 β 、实际结合度指标 γ 等^[24]。其中节点度数又被称为连接率指标,是指与该节点相关联的边的个数,反映了节点与其他节点连接的难易程度,节点度数越高,连接越容易,连通性越高。 γ 指数是一个网络中实际廊道数目与最大可能连接廊道数目之比, γ 指数以拓扑空间为基础,主要揭示节点与连接数的关系,反映网络的复杂程度,便于计算,不反映实际距离、线性程度、廊道的方向及节点的确切位置。其计算公式为:

$$\beta = \frac{2L}{N} \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{L}{L_{\max}} = L/(N-2) \quad (2)$$

式中, N 是河网节点数, L 代表河网中的河链数,是指现存的由河流廊道抽象成的线段数目,连接两个节点。 $L_{\max}$ 为最大可能连接廊道的数目。如果有3个节点,那么最多只有3条连接廊道;但若有4个节点,则另外增加3个连接廊道,总数为6。假设无新的交叉形成,则每增加一个节点,最大可能的连接廊道数以3的倍数增加。 γ 取值为0—1,0表示节点没有连线,1表示每个节点都相互连通,对于网络连接来说, γ 多在1/3到1之间取值,接近1/3时,网络呈树状;接近1时,网络近似于最大平面网络。即指数越大,表明网络的连接度越好。

3.2.2 景观连通性

通常在三个水平上计算景观指数,分别为斑块水平、斑块类型水平和景观水平。斑块(水平)指数是基于单个斑块的指数;斑块类型(水平)指数是针对某类斑块中所有斑块的指数;景观(水平)指数是针对整个景观中所有类型斑块的指数。由于白洋淀流域面积较大,单一景观类型的小斑块较多,计算斑块级别的数据量大但意义不大,因此本文只在类型水平与景观水平上(表3)对流域内自然湿地、人工湿地及河道内景观进行景观连通性分析。

表3 景观连通性指数

Table 3 Landscape connection index

二级指标 Secondary index	公式 Formula	指标意义 Index significance
分离度指数 SPLIT	$SPLIT = \frac{A^2}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij}^2}$	SPLIT表示根据某类斑块在整个景观中的加权平均面积计算的斑块数,用于观测景观破碎度,其值越大,景观破碎度越严重
景观分离指数 DIVISION	$DIVISION = 1 - \sum_{j=1}^m \left(\frac{a_{ij}}{A} \right)^2$	DIVISION反映的是景观镶嵌体中同一景观类型的不同斑块个体的分布情况,表示斑块间的离散程度,数值越大表明斑块之间的距离越大

4 结果

4.1 白洋淀流域湿地分布

分类结果表明白洋淀流域土地利用/覆盖的总体分类精度为84.25%,Kappa系数为0.82,具有较好的精度,错分误差较小,可供研究使用。

遥感监测显示,2017年白洋淀流域土地利用/覆盖以耕地和林地为主,而各类湿地面积占13.90%,建设用占地占7.31%(表4)。湿地类型中沼泽面积最大,洪泛区面积次之,沟渠约占1%,湖泊与河流比例均不足

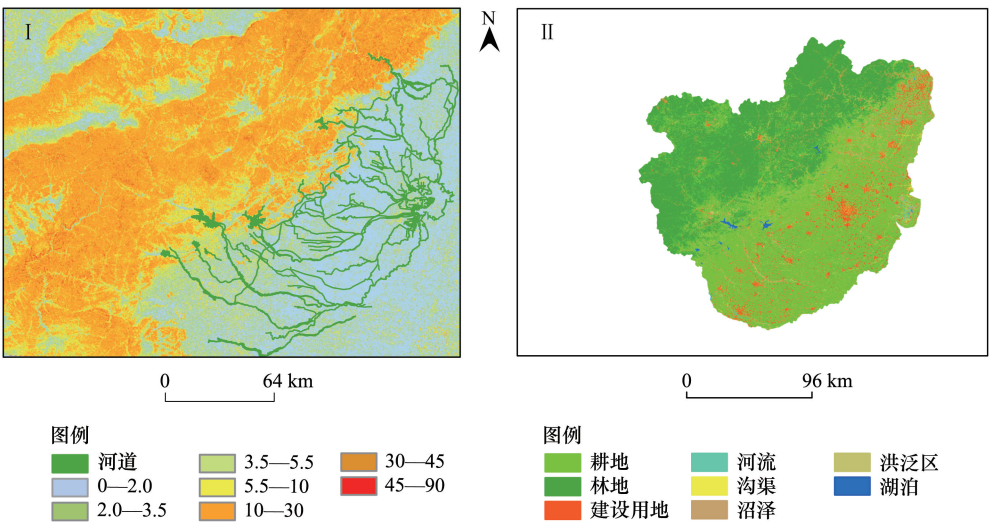


图 3 2017 年白洋淀流域坡度图(I)和土地利用/覆盖图(II)

Fig.3 Distribution map of slope (I) and land use/cover (II) maps in 2017

0.5%。河道内主要土地利用类型为湿地,沼泽、洪泛区、湖泊类型居多,沟渠与河流类型偏少。

表 4 白洋淀流域内土地利用/覆盖类型和河道内各类用地面积及所占比例/km²

Table 4 Statistics of area and ratio of land-use type in the river course and its 1km, 2km and 3km buffer zones									
面积/比例 Area/Ratio	建设用地 Construction land	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	沟渠 Irrigation canal	河流 River	湖泊 Lake	沼泽 Marsh	洪泛区 Floodplain	总计 Sum
河道	45.05	140.62	28.80	31.97	24.88	73.75	79.11	90.19	514.37
River course	8.76%	27.34%	5.60%	6.21%	4.84%	14.34%	15.38%	17.53%	100%
流域	2417.20	12988.08	13066.64	341.41	86.73	101.43	2780.92	1286.10	33068.51
Basin	7.31%	39.28%	39.51%	1.03%	0.26%	0.31%	8.41%	3.89%	100%

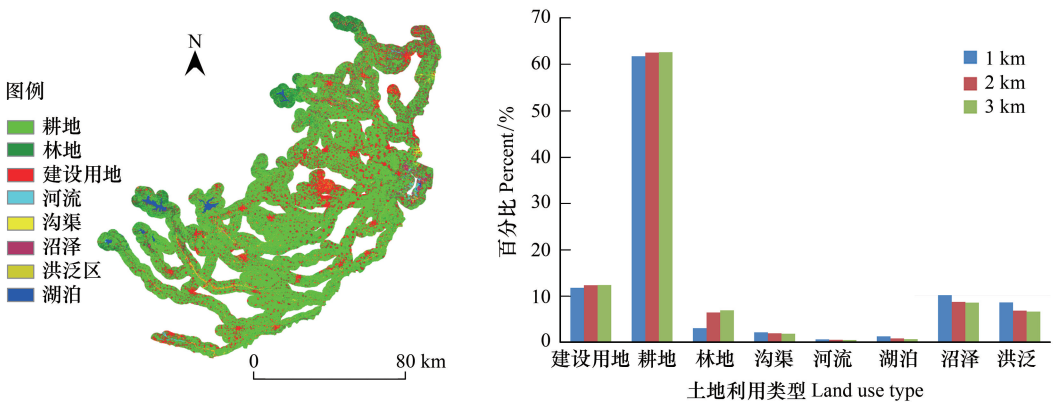


图 4 白洋淀流域河道 3km 范围内土地利用/覆盖分布图

Fig.4 Map of 3km buffer zone of river course of Baiyangdian basin

为分析人类活动对湿地的影响,以河道为中心,分别在两侧建立 1km、2km、3km 的范围的缓冲区,对基于 Sentinel 影像提取的土地利用/覆盖分类结果进行统计分析(图 4)。随着缓冲区范围的增大,非湿地类型所占比例逐渐增加,湿地类型所占比例逐渐减少。河道两侧 1—3km 缓冲区范围内的土地利用类型主要是耕地类型,其次是湿地,沼泽与洪泛区是主要的湿地类型,开阔水体面积较少。

结合 GDEM 30m 分辨率数字高程数据,利用 ArcGIS10.2 软件对白洋淀流域进行坡度计算,得到坡度分布图。结合土地利用/覆盖分类图(图 3)以及不同土地利用/覆盖类型的坡度、高程分布(表 5、表 6)可以看出除林地有近 60%的面积分布在 10°至 30°的山区外,其余土地利用/覆盖类型主要分布在 0°至 2°的区域上。而高程统计值显示近 80%的湖泊、大型水库分布在 100m 至 300m 高度上,沼泽的分布比较均匀,主要在 20m 至 300m 的较高海拔区域,建设用地、洪泛区与耕地类型主要集中在 20m 至 100m 区域,河流、沟渠主要集中在 0m 至 100m 的区域内。

表 5 白洋淀流域不同土地利用/覆盖类型坡度分布/%

Table 5 Slope distribution of different land use/cover types in Baiyangdian basin

土地利用/覆盖类型/坡度(度) Land use/cover type/Slope	0—2	2—3.5	3.5—5.5	5.5—10	10—30	30—45	45—89	总计 Sum
耕地 Cultivated land	49.92	20.56	10.31	7.74	10.06	1.31	0.10	100
林地 Forest land	5.82	3.78	4.66	12.15	59.95	12.84	0.79	100
建设用地 Construction land	59.36	25.12	8.64	3.68	3.05	0.15	0.01	100
河流 River	56.43	23.65	9.24	5.51	4.73	0.39	0.06	100
沟渠 Irrigation canal	56.35	22.03	7.58	4.71	8.02	1.19	0.11	100
沼泽 Marsh	32.50	15.94	9.58	13.11	25.68	2.96	0.22	100
洪泛区 Floodplain	53.86	22.20	9.37	6.94	7.18	0.43	0.02	100
湖泊 Lake	30.29	21.21	15.66	13.83	13.48	4.60	0.93	100

表 6 白洋淀流域不同土地利用/覆盖类型高程分布/%

Table 6 Elevation distribution of different land use/cover types in Baiyangdian basin

土地利用/覆盖类型/高程/m Land use/cover type/Elevation	<0	0—20	20—100	100—300	300—500	500—1000	>1000	总计 Sum
耕地 Cultivated land	2.36	21.76	44.55	18.52	5.43	3.74	3.63	100
林地 Forest land	0.94	1.34	3.13	5.53	10.72	35.29	43.06	100
建设用地 Construction land	0.60	27.90	57.13	9.32	1.61	2.21	1.24	100
河流 River	9.57	32.39	38.55	12.36	2.32	3.83	0.97	100
沟渠 Irrigation canal	4.49	37.39	37.37	10.79	4.63	4.48	0.84	100
沼泽 Marsh	1.91	13.32	28.14	21.10	11.90	14.08	9.56	100
洪泛区 Floodplain	0.75	19.16	55.94	10.96	4.57	4.52	4.10	100
湖泊 Lake	2.32	4.68	4.55	78.49	1.97	3.59	4.39	100

4.1.2 白洋淀流域的河道分布及河道占用

根据人工目视解译结果,白洋淀流域河道总长度约为 2440km,总面积为 514km²(图 5),占流域面积的 1.55%。以坡度 10°和高程 100m 为界,将流域内河道划分为山区河道和平原河道。统计得到山区河道共有 177km²,长度为 866km,呈东北-西南向分布,多位于林地与耕地交界处;平原河道面积共 337km²,其长度为 1574km。

由表 4 可以看出,河道内耕地面积比例达 27.34%,接近三分之一的河道属于耕地,河道占用情况严重。河道内洪泛区与沼泽的面积远高于明水面积,与白洋淀流域的河流基本处于断流状态有关。一方面反映了北方河流季节性显著的特性;另一方面,与水资源利用强度大密切相关。与此同时河道内还存在部分建设用地,包括了河道内修筑的河堤河坝等水工建筑物和其他与水利无关的建设用地。通过对河道内建设物进行人工目视解译,计算出非水利建筑物面积 5.51km²,占总建设用地的 12.23%。

河道内不同湿地类型面积与白洋淀流域整体湿地相比,流域内约有 1/3 的河流和 3/4 的湖泊分布在河道内,河道内的沼泽面积占整个流域沼泽面积 3%左右。可以看出,流域内大部分水体被人类控制,而沼泽湿地等则较少。

4.2 河道内湿地水文连通性

本文从河道整体、河道内湿地、河道内水体(包括河流和湖泊)三个方面对河道水文连通性进行分析。河道水文连通性是假设河道没有任何占用,将河道作为一个整体计算其水文连通性,河道水文连通性可以表征不受影响的情况下的原始水文连通性。河道湿地的水文连通性分析,是将河道内所有湿地类型(包括沼泽、洪泛湿地和水体等)作为一个整体,计算水文连通性。排除了耕地、建设用地与林地等非湿地类型。此种情况表示河道水系受人类开发占用后河道的水文连通性。河道内水体的水文连通性是只考虑河道内现状地表水体类型(包括河流与湖泊)时的水文连通性,它反映的是现状情况下(如地表水被大量开发利用)的河道的水文连通性。这三个不同的水文连通性可以代表人类活动对河道的影响程度。河道的开发占用和水资源的高强度利用,是现状下河道的水文连通性状况,人类影响最强;而河道水文连通性代表了没有人类活动的直接和间接影响下的水文连通性;河道内湿地的水文连通性介于上述二者之间。

经计算河道的河链数为 2592,节点数为 2528,求得实际结合度指标 γ 为 0.34,节点度最小值为 1,最大值为 5,平均节点度数为 2.91,标准差为 0.689。实际结合度指标与节点度数在三种情况下均为最高,节点度数越高表示与该节点相关联的边的个数越多,即节点与其他节点连接越容易,而 γ 越大表示该网络越接近最大平面网络,其连接度也越好。另外节点度数的标准差最小,说明节点度数的值处于相对较高且稳定的状态。总体来看河道的水文连通性在三者中是最好的。

河道内湿地的河链数为 19174,节点数为 20583,求得实际结合度指标 γ 为 0.31,节点度最小值为 1,最大值为 5,平均节点度数 β 为 2.47,标准差为 0.898。从数值上看,河道内湿地的河链数与节点数远远高于其他两种情况下的数值,由此可见其内部网络十分复杂,但实际结合度指标、节点度数及节点度数的标准差均介于河道整体与河道内河流湖泊之间,说明在水文连通性方面,河道内湿地的连通性处于中等。

河道内河流湖泊的河链数为 1296,节点数为 1436,求得实际结合度指标 γ 为 0.30,节点度最小值为 1,最大值为 4,平均节点度数 β 为 1.81,标准差为 0.998。河流湖泊的河链数、节点数在三者中是最少的,这是因为在当前气候与人类活动的影响下导致的地表水严重匮乏,流域内的几大河流均出现很大程度的断流现象,只有水库、堤坝等截留了一部分地表径流,导致水体分布不连续且比较分散。实际结合度指标与节点度数在三者之中最低,表明节点间连接的容易程度与网络连接度最差。节点度数远低于上述两者但标准差最大,说明节点度数的值较不稳定。总体来看只有河流湖泊参与计算的河道实际水文连通性最差。

从上述结果可以看到河道的水文连通性最好,河道内湿地的水文连通性次之,河道内河流湖泊的水文连通性最差,与理论分析结果一致。由于将河道作为整体表示的是在不受人类影响的假设条件下水文连通性最好的状态,可以作为衡量其他条件下水文连通性大小的标准。河道内本应全部为湿地类型却因人类活动的影响,出现不同程度的湿地退化与占用,导致其连通性降低。而地表径流更是少之又少,天然入淀河流只占极少一部分,白洋淀只能靠“引黄济淀”、“引岳济淀”等跨流域调水缓解干淀危机,连通性出现大幅度降低,与理想状态相比节点度数的值减少了 1/3,实际结合度指标比河道内湿地的计算值略低,但也远低于理想状态。表明当前白洋淀流域的实际水文连通性状况不容乐观,需要引起足够的重视。

4.3 流域的湿地景观连通性

利用 ArcGIS10.2 软件对流域和河道内的湿地在类型级别进行景观分析,对流域内的自然湿地、人工湿地

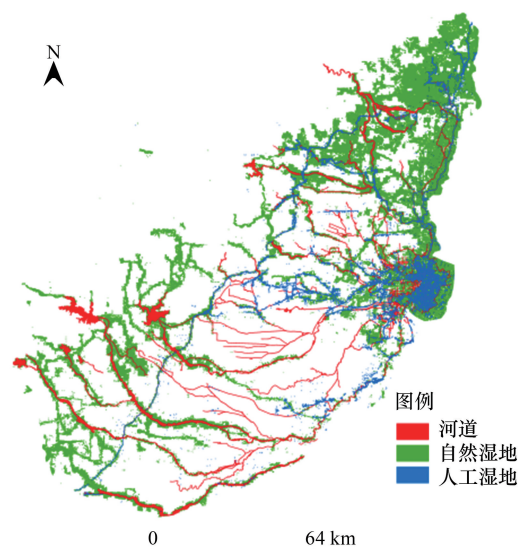


图5 2017年白洋淀流域河道分布图

Fig.5 Distribution of river course of Baiyangdian basin in 2017

与河道进行景观级别的分析(表 7)。景观连接的过程可以看作是生境破碎化的反过程,景观连通性将影响物种在生境斑块中运动的顺利程度。从斑块类型水平对河道和流域内的湿地类型进行分析,可以掌握具体湿地类型的连通状况,将决定该种斑块类型是否可被某个生物体占据利用以及影响到生物体在该类型斑块中转移的能力,其连通性大小也会对生物多样性高低产生影响。从景观水平对自然湿地、人工湿地与河道进行连通性分析可以从流域尺度上把握其整体的连通性。

表 7 景观指数计算结果

Table 7 Results of landscape indices

类型级别 Class level	SPLIT		DIVISION	
	河道 River course	流域 Basin	河道 River course	流域 Basin
沼泽 Marsh	467.48	412.67	0.997861	0.997577
沟渠 Irrigation canal	112.98	316.54	0.995174	0.996841
河流 River	118.11	178.74	0.991533	0.994405
洪泛区 Floodplain	37.49	192.70	0.733260	0.994811
湖泊 Lake	3.96	5.70	0.747696	0.824519
景观级别 Landscape level	SPLIT		DIVISION	
河道 River course	158.67		0.993697	
人工湿地(流域) Constructed wetland(Basin)	316.54		0.996841	
自然湿地(流域) Natural wetland(Basin)	503.89		0.998015	

分离度越高表明斑块间的距离越大,斑块分布越离散,连通性越低。由景观指数结果可以看出,在类型级别上,流域内各湿地类型的 SPLIT 和 DIVISION 值显示出一致性,由大到小排序为沼泽、沟渠、洪泛区、河流、湖泊。虽然湖泊的分布比较分散,但由于湖泊内部的像素比较聚集所以总体上计算的湖泊分离度的值最小,连通性最强。本文河流表示的是狭义上的地表径流,分布与洪泛区类似,多小规模出现,斑块间的距离比较小,所以其景观连通性也相对较好。而沼泽与沟渠的分布比较广泛,几乎遍布整个流域,斑块与斑块间的距离较远,其连通性最差。河道内湿地类型的分离度值与流域内各湿地类型计算的值得略有差异,但也可以明显看出沼泽的分离度仍然最高,河流、沟渠次之,洪泛区、湖泊最低,连通性好坏与分离度的值成反比。而景观级别上的 SPLIT 与 DIVISION 值也表现出了一致性,即自然湿地的分离度最高,人工湿地次之,河道的分离度最低。产生这种现象的主要原因是自然湿地的斑块类型与数量远远多于人工湿地,且分布更加广泛,而人工湿地也就是沟渠类型在人类的控制下,一般不会出现部分沟渠有水、部分沟渠无水的情况,连通性较好。河道由于是人工勾绘,不出现不连续的情况,所以其连通性最好。

从上述计算可以看出在湿地类型方面湖泊的连通性最好,沟渠、洪泛区、河流的连通性次之,沼泽的连通性最差。从景观级别看河道的连通性最好,人工湿地次之,自然湿地最差。表明对河道与人工湿地进行管理可以有效促进加强湿地的连通性,保持河道与沟渠良好的连通性对增强流域的供水安全与洪水防控安全有重要意义。而自然湿地尤其是沼泽类型不易进行管控,导致其景观连通性很差。建议湿地管理部门在进行决策时多关注沼泽等自然湿地的连通性问题。

5 结论与讨论

水生态安全是“雄安新区”面临的关键生态环境问题之一。白洋淀承接了流域内 9 条河流水体的汇入,规划在淀区周围的“雄安新区”的水生态安全不仅直接受淀区湿地生态环境的影响,也间接受到流域内湿地生态功能状况的影响。因此整个流域湿地的连通性对于“雄安新区”水安全起着关键性的作用。

由于长期的开发,2017 年白洋淀流域内湿地面积只占流域面积的 13.90%。白洋淀流域内的水体在很大程度上被人类控制。通过人工目视解译提取的河道分布表明,到 2017 年,白洋淀流域河道总长度约为 2440km,河道面积为 514km²。流域内 27%的河流与 73%的湖泊分布在河道内。同时河道被开发占用显著。

近三分之一的河道被农田占用,以河道为中心,向两侧不同距离范围增大,非湿地类型所占比例逐渐增加。河道的开发占用不仅妨碍了河道的输水功能,农田中的农药进入河道也会污染水质,若遇洪水更会使人民生命财产受到威胁。

人类对湿地的影响分为直接的开发占用和间接的水资源的高强度利用。在假设不考虑人为情况下,白洋淀河道具有较好的水文连通性。但受到人类活动影响后河道的水文连通性下降。现状情况下河道的水文连通性与河道没有受到干扰时候的连通性水平相比,减少了三分之一。同时在流域整体上看,受人类活动影响,流域内湿地破碎,自然湿地的景观连通性最差,人工湿地略好于自然湿地。

流域内湿地的连通性降低,不仅会直接降低甚至破坏湿地的生态和环境功能,进而对流域水安全带来极大威胁;同时对于流域内的耕地等也存在潜在的威胁。对湿地进行合理恢复和管理将有助于提高白洋淀流域湿地的连通性,对流域内的湿地生态系统服务功能发挥、动植物生境保护以及景观规划等都具有重要影响作用。将白洋淀流域作为整体,通过提高湿地的连通性,增强流域内湿地的生态和环境功能,将有助于增强雄安新区以及白洋淀流域的水生态和环境安全。

参考文献 (References):

- [1] 夏军, 张永勇. 雄安新区建设水安全保障面临的问题与挑战. 中国科学院院刊, 2017, (11): 1199-1205.
- [2] 刘文具, 赵小花. 白洋淀流域节水农业与水资源可持续利用对策. 海河水利, 2007, (3): 12-13.
- [3] 周振民, 刘俊秀, 郭威. 郑州市水系格局与连通性评价. 人民黄河, 2015, 37(10): 54-57.
- [4] 胡炳旭, 汪东川, 王志恒, 汪翡翠, 刘金雅, 孙志超, 陈俊合. 京津冀城市群生态网络构建与优化. 生态学报, 2018, 38(12): 4383-4392.
- [5] 武剑锋, 曾辉, 刘雅琴. 深圳地区景观生态连接度评估. 生态学报, 2008, 28(4): 1691-1701.
- [6] 傅强, 宋军, 毛锋, 吴永兴, 姚涵, 唐剑波. 青岛市湿地生态网络评价与构建. 生态学报, 2012, 32(12): 3670-3680.
- [7] 许峰, 尹海伟, 孔繁花, 徐建刚. 基于 MSPA 与最小路径方法的巴中西部新城生态网络构建. 生态学报, 2015, 35(19): 6425-6434.
- [8] 张梦媛, 吴秀芹. 近 20 年白洋淀湿地水文连通性及空间形态演变. 生态学报, 2018, 38(12): 4205-4213.
- [9] 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. 生态学报, 2016, 36(23): 7580-7593.
- [10] Sahraoui Y, Foltête J C, Clauzel C. A multi-species approach for assessing the impact of land-cover changes on landscape connectivity. Landscape Ecology, 2017, 32(9): 1819-1835.
- [11] Qi K, Fan Z Q, Ng C N, Wang X R, Xie Y J. Functional analysis of landscape connectivity at the landscape, component, and patch levels: a case study of Minqing County, Fuzhou City, China. Applied Geography, 2017, 80: 64-77.
- [12] 韩龙飞, 许有鹏, 邵玉龙, 石怡. 城市化对水系结构及其连通性的影响——以秦淮河中、下游为例. 湖泊科学, 2013, 25(3): 335-341.
- [13] 陈富强. 鸭绿江口滨海湿地景观格局变化及驱动力分析. 海洋信息, 2016, (1): 48-55.
- [14] 高常军, 高晓翠, 贾朋. 水文连通性研究进展. 应用与环境生物学报, 2017, 23(3): 586-594.
- [15] 长江水利委员会. 维护健康长江, 促进人水和谐研究报告. 武汉: 长江水利委员会, 2005.
- [16] Van Looy K, Piffady J, Cavillon C, Tormos T, Landry P, Souchon Y. Integrated modelling of functional and structural connectivity of river corridors for European otter recovery. Ecological Modelling, 2014, 273: 228-235.
- [17] Merriam G. Connectivity: a fundamental ecological characteristic of landscape pattern//Proceedings of the 1st International Seminar on Methodology in Landscape Ecological Research and Planning. Denmark: Roskilde University, 1984, 1: 5-15.
- [18] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2000. 213-256.
- [19] 陈慧中. 不同地貌类型景观格局分析及尺度效应研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [20] 陈文波, 肖笃宁, 李秀珍. 景观指数分类、应用及构建研究. 应用生态学报, 2002, 13(1): 121-125.
- [21] Lee J, Ellis C D, Choi Y E, You S, Chon J. An integrated approach to mitigation wetland site selection: a case study in Gwacheon, Korea. Sustainability, 2015, 7(3): 3386-3413.
- [22] 宫兆宁, 张翼然, 宫辉力, 赵文吉. 北京湿地景观格局演变特征与驱动机制分析. 地理学报, 2011, 66(1): 77-88.
- [23] 张冬生. 支持向量机在分类问题中的应用研究. 黑龙江科技信息, 2010, (35): 64-64, 264-264.
- [24] 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.