DOI:10.15928/j.1674-3075.2020.05.008

# 白洋淀水系结构连通性评价

高 婷,尹心安,何 山,赵彦伟

(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)

**摘要**:水系结构连通性评价是实现河湖连通的基础,可为构建生态水网、提升水体连续性提供决策依据。鉴于现有评价方法多集中于连通概率及强度方面,忽略了结构稳定性的评估;为有效探究水系在外界干扰下的连通稳定程度及科学指导水资源开发利用,以白洋淀为例,基于网络分析法,将湖泊概化为节点,河流通道概化为边,考虑水网稳定性,建立包括水面率、水系连通度及水系结构稳定性三大要素,共7个指标的评价体系,采用熵权法与层次分析法耦合赋权及综合指数评价法,评估淀区水系结构连通性。结果表明,较之2007年,2017年淀区综合连通指数由0.7524下降至0.4235,区域孤立湖泊增多,连通强度及结构稳定性均有所降低。

**关键词**:白洋淀;水系结构;连通性;稳定性

**中图分类号**:X143 **文献标志码**:A

**文章编号**:1674-3075(2020)05-0063-07 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

河湖水系的连通格局是影响水资源配置与保障、关系自然生态环境和人类社会经济系统发展与稳定的重要因素(王中根等,2011)。现阶段城市化程度不断提高,使得区域水资源压力持续增大,大规模的水源开发及水利设施修建,导致水系结构破碎化加重,造成系统生态弹性萎缩、生态承载力及服务功能大大受限(黄草等,2019;杨莹等,2019);在此背景下,河湖连通成为改善水环境、修复水生态的重要手段(崔国韬,2011)。水系结构连通性评价是河湖连通性调控的基础(胡尊乐等,2016);符传君等(2016)将其作为河湖水系连通需涵盖的6项核心指标之一着重强调。全面量化评估当前水体位置间的物理连接关系以及空间准确定位连通受损状况,可为科学高效构建水网提供重要依据。

水系结构连通性评价在近20年来逐渐发展(夏继红等,2017),目前主要以图论法、综合指标法及景观分析法为主。将水系概化为模型图,利用图形连通度或建立评价指标体系,常用指标包括河网密度、河频率、河网发育系数、水系环度、实际结合度等(邵玉龙等,2012;徐光来等,2012;李普林等,2018)。有学者从景观学角度出发,认为河流水系是由不同等级廊道和斑块组成的网状或树状景观结构(夏继红等,2017);还有学者运用连接度指数、蔓延度指数、斑块结合度等景观指数进行评价,将斑块间物质能量及信息传递等因素考虑在内,为连通性加入了生态学意义(Bracken & Croke,2007;粟海军等,2015;赵凌栋等,2019);此外,景观巧合概率指数、整体连通性指数和可能连通性指数常用于湿地评价(Lucia & Saura,2006)。

以上方法大都集中在连通河湖数量方面,忽略了连通结构抵御外界干扰的能力。人为适度开发及过度利用水资源造成的河湖干涸萎缩等情况,均可视为对水环境的外界攻击,评价水系抗攻击能力是衡量人类活动影响下系统能够保持正常结构与功能的重要途径,可为水资源开发限度及水环境保护提供决策参考。本研究以白洋淀为例,尝试基于复杂网络分析法,将水网抗干扰能力纳入评价体系,从水面率、水系连通度及水系结构稳定性等方面全面量化水系连通性,为淀区水系网络构建提供依据。

## 1 研究区概况

白洋淀位于河北省保定市(115°45′~116°16′E,38°44′~38°59′N),淀区78.1%的面积集中在安新县境内,其余涉及容城、雄县、任丘市、高阳市等地(徐卫华等,2005)。白洋淀是海河流域大清河水系中重要的缓洪蓄水枢纽,潴龙河、孝义河、唐河、府

**收稿日期**:2020-05-26

**基金项目**:国家重点研发计划项目(2017YFC0404504);国家自然科学基金创新研究群体项目(51721093);水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07110001)。

**作者简介**:高婷,1997年生,女,硕士研究生,研究方向为水生态保护与修复。E-mail:13121169839@163.com

**通信作者**:尹心安,1981年生,男,教授,主要从事生态水利、水生态系统保护与修复研究。E-mail:yinxinan@bnu.edu.cn

河、漕河、瀑河、萍河及北支白沟引河的洪沥水汇入淀内,经调蓄后由枣林庄枢纽控制下泄(江波等,2017)。淀区景观以水体为主,兼顾湿地特性,由白洋淀、藻苲淀、马棚淀等143个大小不等的淀泊组成(邱琳,2017)。

20世纪80年代以来,由于人为原因加之气候影响,天然入淀量急剧减少,1983-1988年曾出现连续5年的干淀情况。村镇园田镶嵌的自然特色及闸坝等水利设施大量修建,进一步加剧了湿地破碎化,导致水系整体连通性受阻、水环境状况较差。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

以白洋淀湿地保护区2007年5月快鸟影像及2017年1月高分二号卫星影像为主要数据源,空间分辨率分别为0.5 m和2.4 m。基于ENVI 5.3及ArcGIS 10.5平台,选择最大似然监督分类法进行原始影像解译,结合实地调查,确定出淀区主要土地类型,包括水体、植被、裸地、建设用地四类。影像分类Kappa系数在0.91以上,总体精度大于96%。

### 2.2 研究方法

2.2.1 复杂网络分析法 该方法可将复杂系统简化为节点与边相连的组合,节点表示复杂系统的基本单元,边表示基本单元间的作用关系(王戈等,2019)。将抽象的概念问题以图形方式直观表达,通过网状结构实现具象化。复杂网络的研究方法在社交网络、交通网络、航空网络等方面广泛应用。于强等(2018)将该方法用于生态网络结构研究,体现出其在环境领域较好的适用性。采用复杂网络分析法将湖泊与河流通道概化为网状结构,通过节点间连接关系评估白洋淀水系结构连通性。

2.2.2 评价指标体系 水系连通性重点在于水体连续性及流动性,包括水体的连接通道及满足一定需求且保持流动的水流两个主要因素,分别对应水系结构及功能的连通状况。判断结构连通好坏的关键条件即为水体是否连续、连接通道是否畅通、连通结构是否稳固(张欧阳等,2010)。结合以上3个方面,构建包括水面率、水系连通度及水系结构稳定性等要素的评价指标体系。水面率指标从水域面积方面反映区域水系当前发育程度及其在空间上连通的可能性。连通度指标从连接通道角度反映水系中各节点的连通性以及物质能量交换能力(窦明等,2015)。水系结构稳定性指标反映湖泊及河流通道连通结构抵抗外界攻击能力(表1)。

**表1 白洋淀水系结构连通性评价指标**

**Tab.1 Evaluation indices for the water system connectivity of the Baiyangdian Lake system**

| 要素 | 指标 | 权重 |
|---|---|---|
| 水面率 | 湖泊密度(LD) | 0.2478 |
| | 河流通道频率($R_f$) | 0.0352 |
| 水系连通度 | 节点连通度($K$) | 0.2908 |
| | 节点连接能力($\beta$) | 0.0838 |
| | 平均路径长度($L$) | 0.0003 |
| 水系结构稳定性 | 节点连接鲁棒性指数($S_p$) | 0.1376 |
| | 边连接鲁棒性指数($S_l$) | 0.2046 |

湖泊密度及河流通道密度是水系水面率的两大关键要素,分别反映区域河湖的发育程度,密度越大,表示连通性好的趋势越强。选用以上两个指标进行水面率评价,具体解释如下:

1)湖泊密度(LD):表示单位面积研究区内的湖泊面积,反映湖泊发育状况。

$$LD=\frac{LA}{A} \tag{1}$$

式中:LA为研究区内湖泊面积;$A$为研究区面积。

2)河流通道频率($R_f$,个/km$^2$):表示单位面积研究区内的河流通道数量(孟祥永等,2014),通道数量越多,湖泊间结构连通性越好。

$$R_f=\frac{N}{A} \tag{2}$$

式中:$N$为河流通道数量;$A$为研究区面积。

通过节点间的连通情况评估白洋淀水系结构连通度,主要从整体连通概率及连通强度两个方面考虑。整体连通概率即连通的节点数量,数量越多,则连通性越强,采用节点连接度指标表示。连通强度通过节点与外界连通能力及平均路径长度两个指标反映,通常与节点相连的边越多,平均路径越短,则连通强度越大。

3)节点连通度($K$):节点的度定义为与该节点连接的其他节点数目,网络中所有节点度的平均值为网络平均度(汪小帆等,2006)。基于度的概念,节点连通度表示为网络平均度与节点数量的比值,从连通节点数量方面量化连通性,$0\leqslant K\leqslant 1$。

$$K=\frac{k_p}{n-1} \tag{3}$$

式中:$k_p$为网络平均度;$n$为节点数。

4)节点连接能力($\beta$):表示节点平均连接边数,通过边数与节点数的比值计算,反映节点与外界的连通强度(窦明等,2015)。

$$\beta=\frac{M}{n} \tag{4}$$

式中：$M$ 为边数；$n$ 为节点数。

5）平均路径长度（$L$）：网络分析中两个节点之间的距离定义为连接两点最短路径的边数，平均路径长度为任意两节点间距离的平均值（汪小帆等，2006）。全局耦合网络的平均路径长度为 1，即两两节点间皆存在至少一条连接边；该指标为负向指标，为便于综合评价，通过取倒数的形式变负为正，将指标值限制在 0～1 之间，越接近 1，连通强度越大。

$$L=\frac{n(n-1)}{2}\sum_{i>j}d_{ij} \tag{5}$$

式中：$i$、$j$ 为节点；$d_{ij}$ 为节点距离；$n$ 为节点数。

水系结构稳定性为当外界条件变化导致节点或边发生损害时系统仍保持连通的能力。将湖泊及河流通道分别考虑，湖泊破坏后水网的连通状况以节点连接鲁棒性指数表示，河流通道则以边连接鲁棒性指数表示。

6）节点连接鲁棒性指数（$S_p$）：衡量网络节点在遭受外界攻击时保持连通的能力。经典网络攻击分为随机攻击与恶意攻击，恶意攻击通常破坏对结构影响较为重要的点（杜巍等，2010）。人类活动对湖泊水系造成的影响可看作恶意攻击。采用最大连通子网络相对大小表征节点连接鲁棒性，通过部分节点遭受攻击后最大连通子网络节点数与原网络节点总数的比值计算（徐凤等，2015）。复杂网络通常在恶意攻击 10%～20% 节点后陷入瘫痪（汪小帆等，2006；刘小峰等，2007）。因此，本研究设定按照介数一次性恶意攻击 20% 的节点。介数表示经过该节点的最短路径数量比例，是其在全网络中作用及影响力的体现（赵国锋等，2016）。

$$S_p=\frac{c_1}{n} \tag{6}$$

式中：$c_1$ 为去除节点后最大连通子网络节点数量；$n$ 为节点总数。

7）边连接鲁棒性指数（$S_l$）：衡量连接边在遭受攻击后网络保持正常结构的能力。采用边攻击后最大连通子网络相对大小表示（王玉伟，2018）。研究设定按照介数一次性恶意攻击 20% 连接边，边介数与节点介数相似，表示经过该边的最短路径数量比例（赵国锋等，2016）。

$$S_l=\frac{c_2}{n} \tag{7}$$

式中：$c_2$ 为边攻击后最大连通子网络节点数量；$n$ 为节点总数。

2.2.3　综合指数评价　为综合水面率、水系连通度及结构稳定性对连通性的不同表征，以各指标为变量，构建综合连通指数（$C$），定量化直接反映白洋淀水系结构连通性变化情况。

$$C=\omega_1\mathrm{LD}+\omega_2R_f+\omega_3K+\omega_4\beta+\omega_5L+\omega_6S_p+\omega_7S_l \tag{8}$$

式中：$\omega_1$ - $\omega_7$ 为各指标权重。

采用熵权法与层次分析法耦合赋权。层次分析法实现定性与定量分析相结合，采用 1～9 标度法将下一层次的各因素相对于上一层次因素的重要性进行两两比较，得出判断矩阵；通过求取矩阵的最大特征值，进而得到特征向量，以此得出矩阵所对应各属性的权向量。该方法可通过专家的主观经验予以量化，具有将目标复杂问题简单化的优点，适用于缺乏绝对数据的相对重要性判断问题（陈雪等，2014；高化雨等，2019）。

熵权法的基本思路是根据指标变异性大小确定客观权重，当指标在各被评价方案之间差异较大时，表明其分辨能力越强，包含的信息量越多，权重相应增大。根据信息论确定信息熵，然后计算各指标熵值权重（施龙青等，2020），计算公式如下：

$$P(X_{ij})=X_{ij}/\sum_{i=1}^{m}X_{ij} \tag{9}$$

$$E_j=\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m}P(X_{ij})\ln P(X_{ij}) \tag{10}$$

$$\omega_j^2=\frac{1-E_j}{\sum_{j=1}^{n}(1-E_j)} \tag{11}$$

式中：$n$ 为指标个数；$m$ 为评价对象项数；$X_{ij}$ 为第 $i$ 个评价对象第 $j$ 个指标属性值；$P(X_{ij})$ 为 $X_{ij}$ 概率；$E_j$ 为指标 $j$ 熵值；$\omega_j^2$ 为指标熵值权重。

利用乘数归一法将两者权重耦合为综合权重 $\omega_j$（施龙青等，2020）。结合主客观进行赋权，消除单一判断造成的误差。赋权结果见表 1。

$$\omega_j=\frac{\omega_j^1\omega_j^2}{\sum_{j=1}^{m}\omega_j^1\omega_j^2} \tag{12}$$

式中：$\omega_j$ 为综合权重；$\omega_j^1$ 为层次分析法权重；$\omega_j^2$ 为熵权法权重。

## 3　结果与分析

### 3.1　水系网络构建

利用 ArcGIS 10.5 得出的白洋淀土地利用类型图，提取其中的水域部分，筛选淀区主要湖泊及河流通道（图 1）。由于淀区内湖泊数量众多，分布较为杂乱，湖泊面积差异较大，选取大于 20 $hm^2$ 的湖泊进行连通性评价（表 2）。

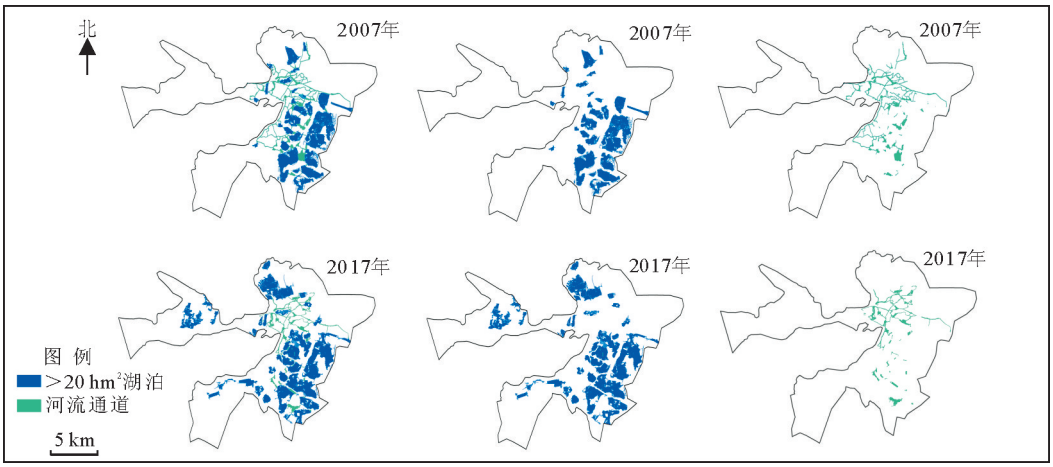


**图1 2007年和2017年白洋淀湖泊及河流通道分布**

**Fig.1 Lake and river channel distribution of the Baiyangdian Lake system in 2007 and 2017**

**表2 水系数据统计**

**Tab.2 Statistical data on the Baiyangdian Lake system**

| 年份 | 湖泊面积/km² | 湖泊数量/个 | 河流通道数量/个 | 研究区总面积/km² |
|---|---|---|---|---|
| 2007 | 38.74 | 26 | 74 | 530.02 |
| 2017 | 94.01 | 33 | 57 | |

基于复杂网络分析法，用点线元素表示湖泊与通道，以网状结构模拟水系实际物理分布，得出2007年及2017年白洋淀水系概化图。

较之2007年，2017年白洋淀湖泊面积增长2.4倍，数量由26个增至33个，河流通道数量由74个降至57个。新增湖泊主要集中于淀区西部，多数为孤立水域，缺少与外界物质能量交换的通道，水体自然流动受限。2007年及2017年白洋淀水系概化结果见图2。

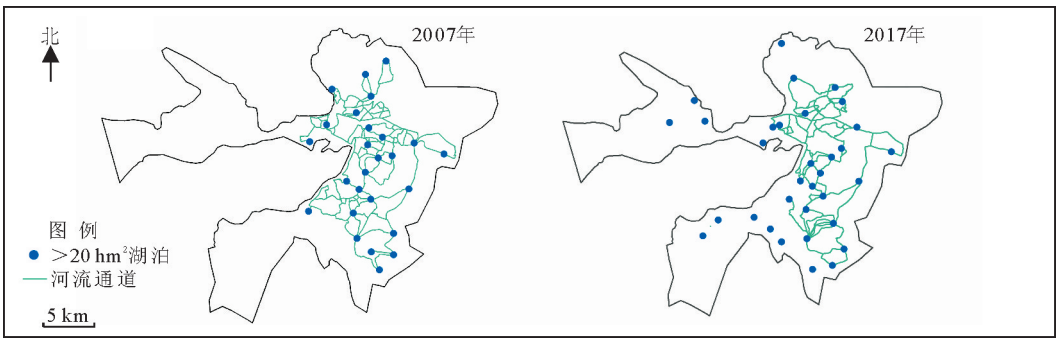


**图2 2007年及2017年白洋淀水系概化**

**Fig.2 Water system generalization of the Baiyangdian Lake system in 2007 and 2017**

### 3.2 水系结构连通性评价

根据评价指标体系，采用熵权法与层次分析法耦合赋予指标权重。基于河湖水系网络概化结果，计算各指标对应值，进而得出综合评价指数，评估2007年及2017年白洋淀水系结构连通性，探究淀区两期水系结构连通情况。总体来看，白洋淀2017年水系结构连通性较之2007年有所下降，综合指数由0.7524降至0.4235。除水面率略有上升外，水系连通度及结构稳定性均为下降趋势(表3)。

水面率方面，较之2007年，2017年淀区整体水面率由0.0230上升为0.0477，主要表现为湖泊密度由0.0731增至0.1774，而河流通道密度由0.1396降为0.1075，说明淀区内湖泊面积增大，但对应河流通道减少。

水系连通度方面，淀区河湖连通状况呈减弱趋势，由0.5294降为0.2720，说明湖泊连接通道减少，连通概率及强度均有所下降。2007年湖泊间两两皆为连通状态，节点连通度为1，而2017年有50%以上湖泊为阻隔状态。节点连接能力由2.8461降至1.7273，湖泊与外界连接能力整体降低。平均路径长度是连通区域连接强度的重要表征。2017年平均路径长度为0.2347，2007年为0.2283，说明去除孤立湖泊的连通部分，2017年的连接强度略大于2007年。

从结构稳定性来看，2007年水系结构更加稳定，节点及边的连接鲁棒性皆大于2017年，按照介

数分别恶意攻击 20%节点与边后，网络连通性仍能保持 0.5385 及 0.6154，该年份湖泊及河流通道连通状态对人类活动干扰具有较强抵抗能力，而 2017 年则相对较弱，连接鲁棒性仅为 0.3030。

**表 3　白洋淀水系结构连通性评价结果**

**Tab.3　Evaluation results of structural connectivity in the Baiyangdian Lake system**

| 要素 | 指标 | 2007 年 | 2017 年 |
|---|---|---|---|
| 水面率 | 水面率 | 0.0230 | 0.0477 |
| | 湖泊密度 | 0.0731 | 0.1774 |
| | 河流通道频率 | 0.1396 | 0.1075 |
| 水系连通度 | 水系连通度 | 0.5294 | 0.2720 |
| | 节点连通度 | 1.0000 | 0.4375 |
| | 节点连接能力 | 2.8461 | 1.7273 |
| | 平均路径长度 | 0.2283 | 0.2347 |
| 水系结构稳定性 | 水系结构稳定性 | 0.2000 | 0.1037 |
| | 节点连接鲁棒性 | 0.5385 | 0.3030 |
| | 边连接鲁棒性 | 0.6154 | 0.3030 |
| 综合指数 | | 0.7524 | 0.4235 |

## 4　讨论

### 4.1　孤立水域导致淀区整体连通性下降

本研究显示，2017 年白洋淀河湖水系结构连通性较 2007 年呈减弱趋势，主要是由于淀区孤立水域增加导致整体连通性下降。该原因与张梦嫚等(2018)研究结果相似，1990－2015 年淀区孤岛湿地增加 38.89%，孤岛出现增加了斑块个数，导致区域整体连通性降低。2017 年节点连通度与节点连接能力分别为 0.4375 及 1.7273，尽管与闫欣等(2019)对同一时期白洋淀流域河湖连通评价采用指标略有不同，但结论基本一致，表明此研究结果较为可靠。

### 4.2　气候和人为因素减弱了水系连通性

淀区水系结构连通性减弱主要表现为水面率上升而水系连通度降低，该现象与气候变化及大量水利设施修建等因素有关。2007－2017 年，白洋淀年均降雨量不断下降，入淀水量仅为 20 世纪 60 年代的 5.71%，而蒸发量却呈现上升趋势，气候变化加之人为因素使得淀区最高水位下降，1988－2011 年，水位由 8.42 m 下降至 6.61 m(刘世存等，2020)。为缓解干淀危机，上游水库调水、跨流域调水等工程不断完善。2008－2012 年，淀区先后 4 次通过“引黄济淀”工程引水入淀，并在 2015 年由王快及西大洋水库再次向白洋淀补水0.4 亿 $m^3$(程磊，2016)。调水工程大大缓解了淀区的水资源危机，使得区域水位上升，水面面积增大。虽水面率上升，但水利工程的修建却在一定程度上破坏了水体连接通道，使得水系空间结构趋于破碎化，水网连通度有所下降。从土地利用类型来看，2017 年淀区建设用地较 2007 年增加 1.4 倍。已有研究表明，1990－2015 年白洋淀新增建设用地约1 489 $hm^2$，增幅达 1 倍以上。建设用地增长，源自居住点扩张及水利工程建设，居民点扩张导致用水量剧增，抽取地下水的方式破坏下垫面条件，降低区域蓄水能力(张梦嫚等，2018)；其次，建设用地总体分布散乱，加剧湖泊破碎化，使得水系结构连通性减弱。

### 4.3　水系连通性影响水生动植物的生存环境

水系结构连通性是水生态系统物质与能量传递的基础，直接影响水系的生态和环境功能(闫欣等，2019)。2017 年白洋淀水系结构连通性较差，湖泊连通受阻，影响了水体流动，淀区内孤立湖泊中生物的繁殖、觅食等活动受到影响，不利于生态系统长期稳定发展；此外，由于水体连通性较差，污染物进入水体后难以有效稀释扩散，使得水质加速恶化。水环境恶化继续作用于水生生物，破坏水系健康，降低水系生态服务功能。刘世存等(2020)研究表明，1988－2016 年淀区水污染日趋严重，浮游动植物及鱼类种类下降，白洋淀整体生态环境呈恶化趋势。

### 4.4　水资源利用应将整体连通结构影响降至最小

水系连通的稳定性反映了系统在自然条件变化及人为活动影响下的可持续连通能力。高强度的水资源开发与水利设施修建，严重影响区域水网连通状况。根据研究结果，白洋淀 2017 年水系结构稳定性较差，湖泊及河流通道受破坏后，系统连通强度均小于 2007 年。因此，淀区不宜进行大规模的水源开发活动，且在实施调水措施时，应重视工程修建强度及位置；此外，探究各湖泊及河流对维持水网连通的重要性，选择连接作用较小的水体进行开发利用，是平衡水资源应用及水环境保护的关键要素(王京等，2010)。本研究以介数即经过湖泊及河流的最短路径数量比例，反映各湖泊及河流对整体连通结构的贡献率，在水资源开发利用时，应优先考虑介数较小、对整体结构影响较小的水体。

### 4.5　点边概化有利于简化湖泊网络结构关系

研究局限性在于对指标设置存在简化处理，为进行综合评价，连接鲁棒性计算中将恶意攻击节点及边的数量规定为 20%，虽具有一定代表性，但无法具体反映随着河湖破坏数量增长及水系整体连通状态的变化情况；此外，鉴于白洋淀水环境主要由淀泊组成的特殊性，研究将湖泊概化为节点，河流通道概化为边，通过网络结构关系分析白洋淀水系连通

性。在常规以河流为主的水系中,可同样将河流作为边,而将河流间的交界处及湖泊等皆作为节点,以此探究整体连通状况及各连接点的重要性。

**参考文献**


陈雪,王岩,赵眉芳,等,2014. 基于层次分析法的森林生态环境评价体系的研究[J]. 林业科技,39(6):61-63.

程磊,2016. 白洋淀水环境现状分析[J]. 水科学与工程技术,(5):50-52.

崔国韬,左其亭,窦明,2011. 国内外河湖水系连通发展沿革与影响[J]. 南水北调与水利科技,9(4):73-76.

窦明,靳梦,张彦,等,2015. 基于城市水功能需求的水系连通指标阈值研究[J]. 水利学报,46(9):1089-1096.

杜巍,蔡萌,杜海峰,2010. 网络结构鲁棒性指标及应用研究[J]. 西安交通大学学报,44(4):93-97.

符传君,陈成豪,李龙兵,等,2016. 河湖水系连通内涵及评价指标体系研究[J]. 水力发电,42(7):2-7.

高化雨,韩会玲,张晶,等,2019. 基于生态脆弱性评价的松花湖湖滨带功能区划研究[J]. 水生态学杂志,40(6):1-7.

胡尊乐,汪姗,费国松,2016. 基于分形几何理论的河湖结构连通性评价方法[J]. 水利水电科技进展,36(6):24-43.

黄草,陈叶华,李志威,等,2019. 洞庭湖区水系格局及连通性优化[J]. 水科学进展,30(5):661-672.

江波,陈媛媛,肖洋,等,2017. 白洋淀湿地生态系统最终服务价值评估[J]. 生态学报,37(8):2498-2505.

李普林,陈菁,孙炳香,等,2018. 基于连通性的城镇水系规划研究[J]. 人民黄河,40(1):31-49.

刘世存,王欢欢,田凯,等,2020. 白洋淀生态环境变化及影响因素分析[J]. 农业环境科学学报,39(5): 1060-1069.

刘小峰,陈国华,2007. 基于复杂网络的供应链鲁棒性分析[J]. 东南大学学报(自然科学版),37(S2):237-242.

孟祥永,陈星,陈栋一,等,2014. 城市水系连通性评价体系研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),42(1):24-28.

邱琳,2017. 白洋淀干淀原因与对策分析[J]. 水科学与工程技术,(4):38-41.

邵玉龙,许有鹏,马爽爽,2012. 太湖流域城市化发展下水系结构与河网连通变化分析——以苏州市中心区为例[J]. 长江流域资源与环境,21(10):1167-1172.

施龙青,张荣遨,韩进,等,2020. 基于熵权法——层次分析法耦合赋权的多源信息融合突水危险性评价[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),39(3):17-25.

粟海军,喻理飞,吴际通,2015. 贵州3处保护区生物廊道景观格局与连通性浅析[J]. 福建林业科技,42(1):55-61.

汪小帆,李翔,陈关荣,2006. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京:清华大学出版社.

王戈,于强,Yang Di,等,2019. 基于复杂网络分析法的层级生态网络结构研究[J]. 农业机械学报,50(7):258-266,312.

王京,卢善龙,吴炳方,等,2010. 近40年来白洋淀湿地土地覆被变化分析[J]. 地球信息科学学报,12(2):2292-2300.

王玉伟,2018. 基于边攻击的复杂网络静态鲁棒性研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学.

王中根,李宗礼,刘昌明,等,2011. 河湖水系连通的理论探讨[J]. 自然资源学报,26(3):523-529.

夏继红,陈永明,周子晔,等,2017. 河流水系连通性机制及计算方法综述[J]. 水科学进展,28(5):142-149.

徐凤,朱金福,苗建军,2015. 基于复杂网络的空铁复合网络的鲁棒性研究[J]. 复杂系统与复杂性科学,12(1):40-45.

徐光来,许有鹏,王柳艳,2012. 基于水流阻力与图论的河网连通性评价[J]. 水科学进展,23(6):776-781.

徐卫华,王效科,苗鸿,等,2005. 白洋淀地区近16年芦苇湿地面积变化与水位的关系[J]. 水土保持学报,19(4):181-184.

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

杨莹,侯凯旋,岳卫峰,等,2019. 基于复合系统相互作用关系的水资源承载力研究——以巩义市为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),55(5):669-676.

于强,杨斓,岳德鹏,等,2018. 基于复杂网络分析法的空间生态网络结构研究[J]. 农业机械学报,49(3):214-224.

张梦嫚,吴秀芹,2018. 近20年白洋淀湿地水文连通性及空间形态演变[J]. 生态学报,38(12):4207-4213.

张欧阳,熊文,丁洪亮,2010. 长江流域水系连通特征及其影响因素分析[J]. 人民长江,41(1):1-5.

赵国锋,苑少伟,慈玉生,2016. 城市路网的复杂网络特性和鲁棒性研究[J]. 公路交通科技,33(1):119-124,146.

赵凌栋,车丁,张晶,等,2019. 基于景观指数的高邮湖湿地生态水文连通性分析[J]. 水利水电技术,50(1):126-133.

Bracken L J, Croke J, 2007. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems[J]. Hydrological Processes, 21(13):1749-1763.

Lucia Pascuall-Hortal, Saura S, 2006. Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the priorization of habitat patches and corridors for conservation[J]. Landscape Ecology, 21(7):959-967.


(责任编辑 万月华)

# Structural Connectivity Evaluation of the Baiyangdian Lake Water System

GAO Ting, YIN Xin-an, HE Shan, ZHAO Yan-wei

(School of Environment, State Key Laboratory of Water Environmental Simulation, Beijing Normal University, Beijing　100875, P.R.China)

**Abstract**: Evaluation of the structural connectivity of water systems is the basis for connecting rivers and lakes and provides scientific evidence to support decision-making for constructing ecological water networks and connecting water bodies. Previous studies focused primarily on evaluating connection probability and strength, and ignored evaluation of structural stability. Here, we took Baiyangdian Lake as a case study and the structural connectivity of the water system was evaluated based on complex analysis of the network and a comprehensive evaluation index. The aim of the study was to explore the connection stability of the Baiyangdian water system under external interference and provide scientific guidance for the development and utilization of water resources. Quickbird satellite images from May 2007 and GF-2 satellite images from January 2017 were selected as the data source, and the connectivity of the Baiyangdian Lake was visualized as a network structure. The evaluation system consisted of seven indicators of water surface ratio, water system connectivity and water system structural stability. The weighting of each index factor was calculated using the entropy method and analytic hierarchy process, and the comprehensive connectivity index of Baiyangdian Lake was then calculated using a generalized network of Baiyangdian water system in 2007 and 2017. Results show that the lake area of the Baiyangdian Lake system in 2017 was 2.4 times that in 2007 and the number of lakes in the system increased from 26 to 33, but the number of river channels decreased from 74 to 57. The lakes added were primarily in the western area of the Baiyangdian Lake system, and most were isolated, without a channel allowing for exchange of material and energy. In general, the structural connectivity of the Baiyangdian Lake system in 2017 decreased compared to 2007, and the comprehensive connectivity index dropped from 0.7524 to 0.4235. Except for the small increase in water surface ratio, the strength and stability of connectivity had weakened.

**Key words**: Baiyangdian Lake; water system structure; connectivity; stability