

DOI: 10.5846/stxb201901280209

朱金峰, 周艺, 王世新, 王丽涛, 刘文亮, 李海涛, 梅军军. 白洋淀湿地生态功能评价及分区. 生态学报, 2020, 40(2): 459-472.

Zhu J F, Zhou Y, Wang S X, Wang L T, Liu W L, Li H T, Mei J J. Ecological function evaluation and regionalization in Baiyangdian Wetland. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2): 459-472.

白洋淀湿地生态功能评价及分区

朱金峰¹, 周 艺^{1,*}, 王世新¹, 王丽涛¹, 刘文亮¹, 李海涛², 梅军军²

¹ 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101

² 中国地质环境监测院, 北京 100081

摘要: 白洋淀湿地在雄安新区建设过程中具有重要生态安全保障作用。开展白洋淀湿地生态功能评价及分区研究, 为生态环境治理和保护提供科学依据, 是当前普遍关切和急需解决的问题之一。面向白洋淀湿地生态保护和管理的需要, 在明确白洋淀自然环境特征和主要生态环境问题的基础上, 结合外业调查、遥感、综合评价等方法, 从水产品供给功能、水生植物供给功能、气候调节功能、生物多样性维护功能、水质改善功能 5 个方面评价了白洋淀湿地生态系统服务功能重要性, 从水污染敏感性、湿地变化敏感性、重要自然与文化价值敏感性 3 个方面评价了白洋淀湿地生态系统敏感性。基于评价结果, 将白洋淀湿地初步划分为 7 个一级生态功能区和 19 个二级生态功能区。在分区方法方面体现了白洋淀湿地人地关系动态特征, 分区结果注重现状与历史相结合, 有助于服务未来淀区生态保护规划决策实施。建议在实施白洋淀生态环境治理和保护过程中, 依据白洋淀湿地生态功能分区特征, 实行分区管制, 制定对应的生态环境治理和保护措施。

关键词: 生态系统服务功能重要性; 生态系统敏感性; 生态功能分区; 白洋淀湿地

Ecological function evaluation and regionalization in Baiyangdian Wetland

ZHU Jinpeng¹, ZHOU Yi^{1,*}, WANG Shixin¹, WANG Litao¹, LIU Wenliang¹, LI Haitao², MEI Junjun²

¹ Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

² China Institute for Geo-environmental Monitoring, Beijing 100081, China

Abstract: Baiyangdian Wetland is located in Xiong'an New Area, with important ecological functions and special strategic position. For a long time, the Baiyangdian Wetland has gradually shrunk and even dried up under the combined effects of human activities and climate change. It is of great significance to study the carrying capacity of ecological and environmental in the Xiong'an New Area by understanding the ecological function and regionalization of the Baiyangdian Wetland ecosystem. This is one of the current widespread concerns and urgent problems to be solved. In order to meet the needs of ecological protection and management of Baiyangdian Wetland, this study evaluated and regionalized the ecological functions by combining methods of field survey, remote sensing, and comprehensive evaluation. Images of Landsat MSS/TM/ETM+/OLI in 1975—2018 and GF-2 PMS in 2017 and 2018 were acquired to analyze land use/land cover change. Firstly, on the basis of clarifying characteristics of natural environment and main ecological problems of Baiyangdian wetland, the indicators system was constructed for evaluating ecosystem service function and ecological sensitivity. Secondly, the ecosystem service functions were evaluated from five aspects: supplying of aquatic products, supplying of aquatic plants, climate regulation, biodiversity maintenance, and improvement of water quality. The ecosystem sensitivities were evaluated from three aspects: water pollution, wetland changes as well as importance of natural and cultural values. Finally, based on results of evaluation, the Baiyangdian Wetland was initially regionalized into seven first-level ecoregions and nineteen second-level

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20189142); “白洋淀湿地演化及生态功能评价” (WT2018161B)

收稿日期: 2019-01-28; 网络出版日期: 2019-11-04

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

ecoregions. We combined ecological processes and impacts of human activities into ecological regionalization, reflecting the dynamic characteristics of human-land relationships in Baiyangdian Wetland. The results covered spatial and temporal characteristics of the ecological environment, which could help manager to make decisions for the ecological protection planning in the future. We suggested that regionalization-oriented measures should be formulated according to the ecoregions characteristics in the process of implementing project of ecological environment protection and management in Baiyangdian Wetland.

Key Words: ecosystem services function importance; ecosystem sensitivity; ecological regionalization; Baiyangdian Wetland

2017年4月1日,中共中央、国务院印发通知决定设立河北雄安新区,这是继深圳经济特区和上海浦东新区之后又一具有全国意义的新区,是千年大计、国家大事^[1]。白洋淀是雄安新区的重要组成部分,作为华北平原最大的淡水湿地生态系统,白洋淀湿地在雄安新区建设过程中具有“以淀兴城、城淀共荣”的重要生态功能。

历史上,白洋淀湿地具有缓洪滞沥、蓄水灌溉、调节局部地区气候、改善生态环境、补充地下水、保护生物多样性等多种生态功能^[2-3]。然而,长期以来在人类活动和气候变化综合作用下,白洋淀湿地出现水源不足、湿地萎缩、水体污染、泥沙淤积、生物多样性减少等危机^[3-6]。据统计,20世纪50年代白洋淀年均入淀水量为18.27亿m³,80年代降为1.47亿m³,2000—2002年仅为0.65亿m³^[2]。与此同时,20世纪50年代白洋淀流域地下水年均开采量为1.78亿m³,80年代增加到27.08亿m³,2001—2005年仍高达28.45亿m³^[7]。淀区大部分水域水质为V类或劣V类,属重度污染^[8]。20世纪60年代以来,淀区水体富营养化程度加剧,清水生物种群和数量减少,鸟类也日益减少^[3]。

为了“把白洋淀修复好、保护好”,国家和地方采取一系列措施持续性开展了生态保护工作。2002年,河北省政府批准《白洋淀湿地自然保护区规划》,设立了白洋淀湿地省级自然保护区^[9]。2012年,《白洋淀省级自然保护区总体规划(修编版)》对保护区进行了调整,进一步扩大了保护区范围与面积^[10]。2015年,河北省发改委编制了《白洋淀环境综合整治与生态修复规划(2015—2020年)》,指出实施引水补水调水、污染源综合治理、村镇综合整治、入淀河流整治、淀区管护维护、区域产业转型和能力设施建设等八项重点任务^[11]。2017年,白洋淀与洱海、丹江口一起被纳入环境保护部“新三湖”水污染治理体系^[12]。2019年1月,经党中央、国务院同意,河北省委、省政府印发了《白洋淀生态环境治理和保护规划(2018—2035年)》,对未来近20年白洋淀生态环境治理和保护的基本方向、路径和具体措施进行了科学规划^[13]。白洋淀之于雄安新区的重要生态安全保障作用由此充分体现。

在白洋淀生态环境治理和保护过程中,湿地生态功能评价及分区是一项重要内容。生态功能分区是根据区域生态环境要素、生态环境敏感性与生态服务功能空间分异规律,确定不同地域单元的主导生态功能,将区域划分成不同生态功能区的过程^[14]。生态功能分区是实施区域生态分区管理、构建区域生态安全格局的基础,可为生态保护与建设规划、维护区域生态安全、促进社会经济可持续发展与生态文明建设提供科学依据,具有重要理论与现实意义^[15-16]。国外关于生态区划的最早研究可追溯到1962年加拿大森林学家Orie Loucks首次提出生态区的概念^[17]。1967年Crowley根据气候和植被的宏观特征绘制了加拿大生态区地图^[18]。1976年Bailey从生态系统角度提出了首个真正意义上的生态区划,并编制了美国生态区划图^[19-20]。此后各国生态学家对生态区划原则、指标体系、等级和方法等进行了深入探讨^[21-23],对生态区划的一些普遍问题也十分关切,如生态系统定义、生态区的复杂性、定性和定量方法、流域边界整合等^[24],使得上世纪末至本世纪初生态区划理论与方法取得快速发展。近几年国际上对于生态系统服务的制图和区划也逐渐开始重视^[25-26]。国内生态区划起步相对较晚,是继气候区划、自然区划、农业区划之后逐渐发展起来的^[27-28]。1999年傅伯杰等建立了中国生态环境综合区划的原则、方法和指标体系^[29],并于2001年提出了中国生态区划方案,为全国各区

域进一步开展生态功能区划建立了宏观框架^[30]。在此基础上,环境保护部和中国科学院于 2008 年发布了《全国生态功能区划》^[15],并根据生态环境保护新的要求于 2015 年发布了《全国生态功能区划(修编版)》^[16]。国务院在 2010 年发布的《全国主体功能区规划》也将全国生态功能区划纳入其中,将全国重点生态区域划分为水源涵养、土壤保持、防风固沙、生物多样性维护等生态功能区,使生态功能区划上升到国家战略、制度层面^[31]。在流域、区域、省级行政区尺度上,学者们也开展了大量的研究工作,如在辽河流域^[32-33]、海河流域^[34]、澜沧江流域^[35]、黑河中游^[36]、塔里木河流域^[37],以及安徽省^[38]、辽宁省^[39]等开展的研究工作。近年来开始侧重于对不同生态要素的归纳和集成,尤其是伴随着遥感技术和数据的推广,在植被生态分区、河流生态分区、湖泊和湿地生态分区等有较大进展^[40]。关于湿地生态功能评价与生态分区的研究案例主要集中在三峡库区^[41]、洞庭湖^[42-43]、鄱阳湖^[44]、巢湖^[45]、太湖^[46-48]、丹江口水源区^[49]等重要湿地区域。上述不同尺度、不同生态系统类型的生态功能评价与生态分区研究工作的开展为全国或区域生态环境治理和保护提供了重要科技支撑。

目前,关于白洋淀湿地生态系统的研究工作多集中在湿地水域变化^[50]、土地利用/覆被变化^[51-52]、景观格局变化^[53-55]、生态系统服务价值评估^[56-59]等方面。在生态区划方面,仅开展了湿地生态特征区划及功能定性分析工作^[60],而对于湿地生态功能评价及分区的研究鲜有论述。因此,开展白洋淀湿地生态功能评价及生态功能分区研究,明晰生态功能的空间分异规律,为白洋淀生态环境治理和保护提供科学依据,成为当前普遍关切和急需解决的问题之一。本研究面向白洋淀湿地生态保护和管理需求,在明确白洋淀自然环境特征和主要生态环境问题的基础上,结合外业调查、遥感、综合评价等方法,建立基于水资源的湿地生态功能评价指标,开展白洋淀湿地生态功能评价,初步划定生态功能分区,以为雄安新区资源环境承载能力综合监测和透明雄安数字平台建设提供空间信息支撑。

1 白洋淀湿地概况及其主要生态环境问题

白洋淀位于太行山东麓永定河冲积扇与滹沱河冲积扇相夹峙的低洼地区,是河北平原上常年积水的最大湖淀^[61],地理范围在北纬 38°43′—39°02′,东经 115°38′—116°07′,海拔 5.5—6.5m(大沽高程),总面积 366km²,由白洋正淀、马棚淀、藻荇淀、烧车淀等诸多大小不一的淀泊和沟壕组成,统名白洋淀^[61-62]。白洋淀属大清河水系,水源主要来自八条入淀河流,南支潞龙河、孝义河、唐河汇入马棚淀,府河、漕河、瀑河、萍河汇入藻荇淀,北支河流通过白沟引河入烧车淀,在白洋淀出口处建有枣林庄水利枢纽^[2,54]。白洋淀动植物资源丰富,水生动物主要有鱼类、蟹类、虾类、底栖动物、浮游动物等,水生植物主要有水生维管束植物和浮游植物^[54]。行政区划上,白洋淀位于雄安新区,分属保定市和沧州市所辖的安新、容城、雄县、高阳和任丘五个县(市),其中 85%的水域在保定市安新县境内。

长期以来,在人类活动和气候变化综合作用下,白洋淀生态环境问题逐渐凸显,主要包括以下几点:

(1) 水源不足、湿地萎缩。白洋淀水源主要来自流域内上游山区降水形成的地表径流。20 世纪 50 年代至 21 世纪初期,白洋淀流域平均年降水量从 661.6mm 减少到 459mm^[7]。降水量减少导致径流量变化亦呈减少趋势^[63-64],由于流域气候干旱而间接导致白洋淀干涸的频次不断增加^[7]。叠加上游城镇工农业及生活用水量不断增加、水库截流以及地下水超采等影响^[2],致使入淀水量减少、淀区水位下降,湿地萎缩趋势严重。为了缓解白洋淀湿地萎缩的变化态势,当地政府实施了跨流域调水、引水补给白洋淀,在一定程度上缓解了淀区水位下降、湿地萎缩现象^[3,65-66]。

(2) 水体污染。白洋淀 15 处水质监测断面的水质类别数据显示,除同口、北何庄全年淀干外,留通、郭里口、王家寨为Ⅳ类水质,其他 10 个断面均为Ⅴ类水质,表明白洋淀水体污染形势严峻^[67]。淀区水质的主要超标项目为化学需氧量、五日生化需氧量、高锰酸盐指数、氨氮等^[68],主要污染源来自入淀河流上游工业和生活污水、淀区居民生活污水、垦殖活动污染等^[69]。府河等汇入淀区的河流带来了上游保定市的大量工业和生活污水,大部分直接进入白洋淀^[68]。淀内现有 39 个纯水村、10 万居民,主要从事种植、养殖业等经济活动,淀区

生活污水、排泄物、家禽畜牧业的废弃物、粪便直接或间接入淀^[69],网箱养鱼的饵料含有大量氮和磷,除少量被鱼食用,大部分的剩余物沉积水体。另外,随着白洋淀旅游业的兴起,旅游业机动船舶管理不规范,废水随意排放,游客丢弃的垃圾废物处理不善等,都成为白洋淀主要污染源。

(3)生物多样性减少。20 世纪 50 年代以前,白洋淀水质清澈,水生生物种类较多。然而,自 20 世纪 60 年代以来,水体富营养化程度加剧,鱼虾大量死亡,鸟类日益减少^[3]。近年来在实施上游水库补给、跨流域调水补给白洋淀等工程作用下,白洋淀生态环境逐渐改善,鱼类和鸟类的种类和数量逐渐增加。

(4)农业开垦活动加剧。白洋淀围淀造田现象比较突出,耕地扩展改变了白洋淀湿地生态系统类型结构与空间格局,从而影响了白洋淀调洪治淤、生物多样性维护等生态功能。

2 数据与方法

2.1 数据

2.1.1 外业调查数据

2018 年 7 月 24—27 日开展了白洋淀湿地外业考察与调研,获取了 204 个考察点位资料和信息,包括经纬度、所属地类、地表自然环境特征、周围环境等,考察了白洋淀堤坝分布信息。考察路线 110km,其中水域路线 22km,陆域路线 88km,明确了主要生态系统类型的表征信息,确定了白洋淀范围与边界。

2.1.2 土地利用/覆被数据

收集了白洋淀湿地 Landsat MSS/TM/ETM+/OLI、GF-2 PMS 卫星遥感影像,在外业调查的基础上,从不同地类影像特征差异性、空间分布异质性、不同植被类型物候差异性三个方面开展了白洋淀湿地土地利用/覆被分类人机交互解译。运用 ArcGIS 软件 Editor 模块,以 2018 年 GF-2 号 PMS 影像为主、以 2018 年 Landsat-8 OLI 影像为辅,人机交互解译获取 2018 年分类信息,并将解译结果叠加到 2018 年 Landsat-8 OLI 影像上。对比分析不同湿地类型和其他非湿地类型在 Landsat-8 OLI 影像上的色调、形状等特征,建立 Landsat-8 OLI 影像人机交互解译的“先验知识”。在此基础上,基于 2015 年 Landsat-8 OLI 影像对 2018 年分类信息进行人机交互更新解译,得到 2015 年分类结果。以此类推,分别基于 2011 年、2005 年、…、1975 年 Landsat 影像,对 2015 年、2011 年、…、1980 年分类信息进行人机交互更新解译,得到 1975—2018 年 10 期白洋淀湿地土地利用/覆被分类图(图 1)。土地利用/覆被类型包含湿地、耕地、建设用地、林地 4 个一级地类。其中,湿地包含水体、水生植被、滩地 3 个二级地类,耕地包含水田、旱地 2 个二级地类。水生植被又包含挺水植物、浮叶植物 2 个三级地类。

2.1.3 其他数据源

其他数据源包括:植被净初级生产力(NPP)数据为 2015 年 MOD17A3 NPP 产品。基础地理数据为 2012 年国家测绘地理信息局版《1:100 万中国数据》。统计数据包括《2016 年保定市水资源公报》^[67]、2008—2017 年《河北经济年鉴》^[70]。

2.2 方法

2.2.1 生态系统服务功能重要性评价方法

依据研究区自然地理特征、生态环境状况,充分借鉴国内其他湿地、湖泊生态功能评价已有研究案例^[42-49],确定了白洋淀湿地生态系统服务功能重要性评价指标,包括水产品供给功能、水生植物供给功能、气候调节功能、生物多样性维护功能、水质改善功能 5 项。

(1)水产品供给功能:指白洋淀湿地提供鱼类、浮游动物、底栖动物等水产品的能力。基于 2015 年 Landsat-8 OLI 卫星遥感影像,通过人机交互解译获取了白洋淀湿地人工养殖鱼塘空间数据。以此将水产品供给功能重要性分为 2 个级别,即人工养殖鱼塘区水产品供给功能为极重要(Ⅳ级),非人工养殖鱼塘区水产品供给功能为不重要(Ⅰ级)。

(2)水生植物供给功能:指白洋淀湿地提供挺水植物、沉水植物、浮水植物、漂浮植物等水生植物的能力。

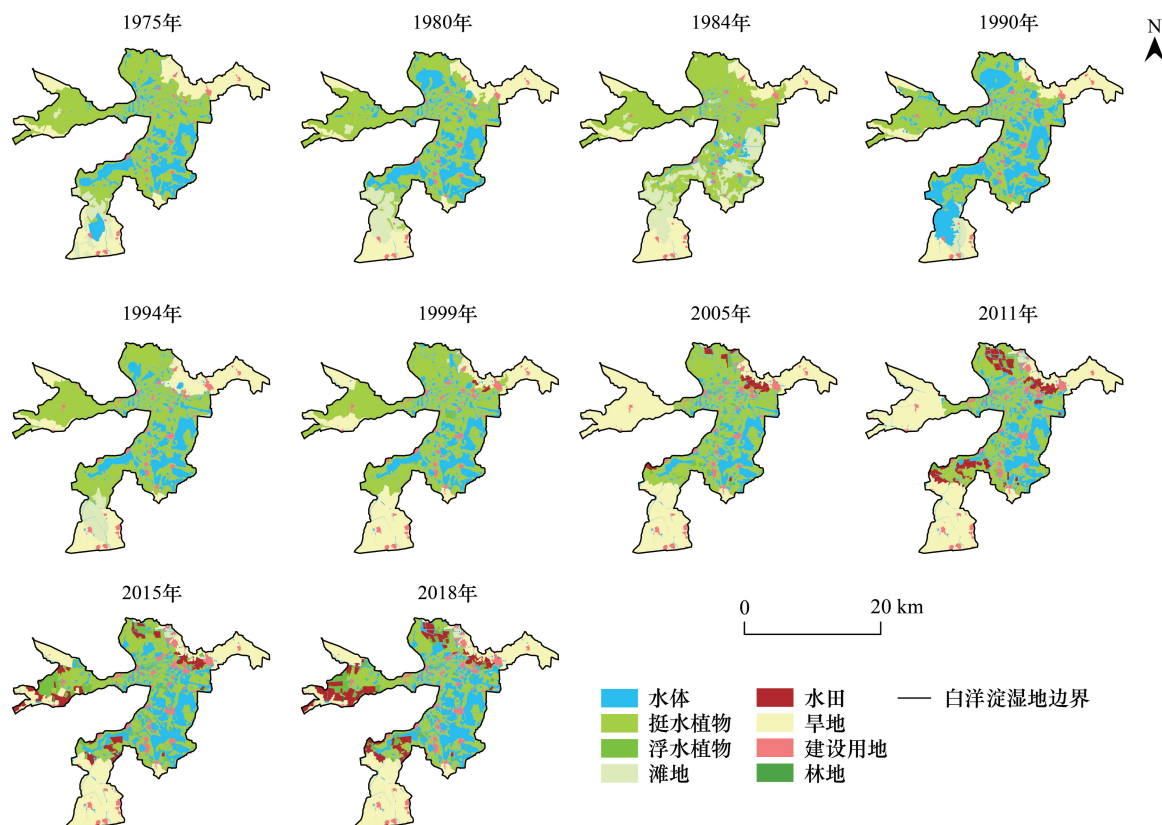


图1 1975—2018 年白洋淀湿地土地利用/覆被

Fig.1 Maps showing land use/land cover of Baiyangdian Wetland during 1975—2018

基于水生植物覆盖度量化水生植物供给功能,利用 2015 年 Landsat-8 OLI 卫星遥感影像,采用像元二分模型方法估算水生植物覆盖度,以此将水生植物供给功能重要性分为 4 个级别,即不重要(Ⅰ级)、较重要(Ⅱ级)、中等重要(Ⅲ级)和极重要(Ⅳ级)。

(3)气候调节功能:指通过湿地生态系统中的光合作用等生理生态过程实现对 CO_2 的吸收与贮存,同时释放 O_2 ,并通过食物链(网)进行有机物质循环和能量流动,起到调节大气组分、减缓温室效应的作用^[71-72]。本研究基于植被净初级生产力(NPP)测算固碳量和释氧量,从而评估白洋淀湿地气候调解功能。由植物光合作用方程可知,植物每生产 1kg 干物质,能固定 1.63kg CO_2 ,同时释放 1.2kg O_2 ^[73]。以 MODIS NPP 产品为参照,建立 Landsat-8 OLI NDVI 与 MODIS NPP 产品的统计模型。随机在白洋淀湿地选取 100 个点,统计这些点所在 Landsat-8 OLI NDVI 与 MODIS NPP 的回归模型,建立基于 Landsat-8 OLI NDVI 的白洋淀湿地 NPP 统计模型为: $\text{NPP} = 0.1877 \times \text{NDVI} + 0.261$ ($P < 0.001$)。基于 NPP 测算固碳量和释氧量模型如下:固碳量: $V_{\text{CO}_2} = A \times \text{NPP} \times 1.63$;释氧量: $V_{\text{O}_2} = A \times \text{NPP} \times 1.2$ 。其中, A 为湿地生态系统面积,NPP 为净初级生产力, V_{CO_2} 为固碳量, V_{O_2} 为释氧量。气候调节功能重要性评价结果分为 4 个级别。

(4)生物多样性维护功能:指白洋淀湿地提供动植物栖息地从而维护生物多样性的能力。本研究采用生境质量指数方法,基于 InVEST 模型^[74],选择其中的生境质量模块,评价生物多样性维护功能重要性,将评价结果分为 4 个级别。

(5)水质改善功能:指湿地生态系统净化水质的能力。本研究基于《2016 年保定市水资源公报》中白洋淀 15 处水质监测断面的水质类别评价水质改善功能,水质类别(受污染)程度越高,认为需要提供的品质改善功能越重要。利用普通克里格方法对各断面水质类别进行空间插值,得到白洋淀湿地水质类别栅格数据,将评价结果分为 4 个级别。

白洋淀湿地生态系统服务功能重要性指标分级标准如表 1 所示。利用 GIS 空间分析功能,将上述各指标重要性分布值逐像元求最大值,得到生态系统服务功能重要性等级分布值。在此基础上,绘制出白洋淀湿地生态系统服务功能重要性综合评价图。

表 1 白洋淀湿地生态系统服务功能重要性指标分级标准

Table 1 Grading rules of indicators for evaluation of ecosystem services function importance of Baiyangdian Wetland

生态系统服务功能 Ecosystem services function	评价指标 Evaluation indicator	不重要(Ⅰ级) Unimportant (grade I)	较重要(Ⅱ级) Important (grade II)	中等重要 (Ⅲ级) More important (grade III)	极重要(Ⅳ级) Most important (grade IV)
水产品供给 Supplying of aquatic products	人工养殖鱼塘				√
水生植物供给 Supplying of aquatic plants	水生植物覆盖度(%)	0—30	30—60	60—80	>80
气候调解 Climate regulation	固碳量(kg/m ²)	≤0.45	0.45—0.50	0.50—0.55	>0.55
	释氧量(kg/m ²)	≤0.30	0.30—0.35	0.35—0.40	>0.40
生物多样性维护 Biodiversity maintenance	生境质量(无量纲)	0—0.3	0.3—0.6	0.6—0.9	0.9—1.0
水质改善 Improvement of water quality	水质类别(无量纲)	<Ⅳ	Ⅳ	Ⅴ	>Ⅴ

2.2.2 生态系统敏感性评价方法

依据研究区生态环境状况及主要问题,参考《生态功能分区技术规范》(征求意见稿)^[14],确定了白洋淀湿地生态系统敏感性评价指标,包括水污染敏感性、湿地变化敏感性、重要自然与文化价值敏感性 3 项。

(1)水污染敏感性:指白洋淀水体受到来自入淀河流上游城镇工业和生活污水、淀区居民生活污水、垦殖活动污染、旅游业污染等影响而引起的原有水体污染的敏感程度,包括城镇工业生活污染、村落非点源污染、养殖业污染、农业开垦污染、旅游业污染。其中,城镇工业生活污染对淀区水体污染影响最大,村落非点源污染、养殖业污染对淀区水体污染影响次之,农业开垦污染、旅游业污染等对淀区水体污染也产生一定影响。根据入淀河流、农村居民点、鱼塘、耕地、景区设施等分布,考虑污染程度随与污染源距离的变化关系,设置不同空间缓冲距离。距离污染源越近,其水体受到污染的敏感性等级越高^[44]。在此基础上,评价白洋淀湿地水污染敏感性,将评价结果分为 5 个级别,即不敏感(Ⅰ级)、轻度敏感(Ⅱ级)、中度敏感(Ⅲ级)、高度敏感(Ⅳ级)和极度敏感(Ⅴ级)。

(2)湿地变化敏感性:指白洋淀湿地年际变化引起的不同湿地(水体、水生植被、滩地)类型和面积变化的敏感程度。基于 1975—2018 年间 10 期白洋淀湿地土地利用/覆被数据,分析各类湿地变化类型、变化时间。在此基础上,评价白洋淀湿地变化敏感性,将评价结果分为 5 个级别。

(3)重要自然与文化价值敏感性:指有代表性的自然生态系统、珍稀濒危野生动植物的天然集中分布地、有特殊价值的自然遗迹所在地和文化遗址、重要景观与旅游资源分布区等对因人类活动干扰而引起的原有价值损失的敏感程度^[14]。重要自然与文化价值敏感性主要体现在经过国家或省、市、县级认可的保护区,如各类自然保护区、自然文化遗产、风景名胜区、森林公园、地质遗迹和地质公园等。分析白洋淀各类保护区级别,将重要自然与文化价值敏感性的评价结果分为 5 个级别。

白洋淀湿地生态系统敏感性指标分级标准如表 2 所示。利用 GIS 空间分析功能,将上述各指标敏感性分布值逐像元求最大值,得到生态系统敏感性等级分布值。在此基础上,绘制出白洋淀湿地生态系统敏感性综合评价图。

表 2 白洋淀湿地生态系统敏感性指标分级标准

Table 2 Grading rules of indicators for evaluation of ecosystem sensitivity of Baiyangdian Wetland

生态系统敏感性 Ecosystem sensitivity	评价指标 Evaluation indicator	不敏感(Ⅰ级) Not sensitive (gradeⅠ)	轻度敏感(Ⅱ级) Mildly sensitive (gradeⅡ)	中度敏感(Ⅲ级) Moderately sensitive (gradeⅢ)	高度敏感(Ⅳ级) Highly sensitive (gradeⅣ)	极度敏感(Ⅴ级) Extremely sensitive (gradeⅤ)
水污染敏感性 Sensitivity of water pollution	城镇工业生活污染	距入淀河流 1km 之外的湿地	—	—	—	距入淀河流 1km 之内的湿地
	村落非点源污染	距淀区居民点 200m 之外的湿地	—	距淀区居民点 100—200m 之间的湿地	距淀区居民点 100m 之内的湿地	—
	养殖业污染	非人工养殖鱼塘区	人工养殖鱼塘区	—	—	—
	农业开垦污染	无农业开垦	—	湿地转为耕地	—	—
	旅游业污染	距船舶航线 100m 之外的湿地	—	距船舶航线 50—100m 之间的湿地	距船舶航线 50m 之内的湿地	—
湿地变化敏感性 Sensitivity of wetland changes	变化类型	无变化	水体转为水生植被	水生植被转为滩地	水体转为滩地	湿地转为非湿地
	变化时间(年)	0	0—5	5—10	10—20	≥20
重要自然与文化价值敏感性 Sensitivity of importantly natural and cultural values	自然保护区	无	县级	市级	省级	国家级
	自然文化遗产	无	县级	市级	省级	国家级
	重点风景名胜区	无	县级	市级	省级	国家级

2.2.3 生态功能分区方法

(1)分区目的与原则:面向白洋淀湿地生态保护和管理的需要,开展白洋淀湿地生态功能评价,初步划定生态功能分区,其目的是明晰白洋淀湿地生态功能的空间分异规律,为雄安新区资源环境承载能力综合监测和透明雄安数字平台建设提供空间信息支撑。白洋淀湿地生态功能分区遵循主导生态功能原则、生态系统类型完整性原则、区内相似性原则、区间差异性原则以及等级性原则。

(2)分区方法:依据生态系统服务功能重要性和生态系统敏感性评价结果,将两者评价分级图进行叠加分析,得到如下三种综合分区结果及其对应的处理方法^[14]:①生态系统服务功能重要性级别达到Ⅲ级(即中等重要)和Ⅳ级(极重要)的地区,以其主导生态系统服务功能重要性覆盖区域作为边界划分依据。②生态系统服务功能重要性级别为Ⅲ级以下(即不重要(Ⅰ级)和较重要(Ⅱ级))的地区,若生态系统敏感性级别达到Ⅳ级和Ⅴ级区域(即高度敏感和极度敏感区),以重要生态系统敏感性覆盖区域作为边界划分依据。③其余地区(即生态系统服务功能重要性Ⅲ级以下且生态系统敏感性Ⅳ级以下的地区),结合白洋淀实际自然与经济状况,并参考白洋淀地区相关规划文件,选择相对最重要的生态系统服务功能的覆盖区域作为其边界划分。最后,在考虑生态系统类型完整性的基础上,结合白洋淀地区自然地理条件、生态环境状况、生态保护和管理的需要等,作为分区参考,对上述综合分区结果图进行合理的调整和完善,形成科学完整的分区结果图。

(3)分区命名:白洋淀湿地生态功能区命名采用服务功能命名优先、敏感性命名补充的方式^[14]。生态功能区名称组成为:区位+主导生态服务功能(或生态敏感性)+功能管控名称。其中,区位包括东部、南部、西部、北部、东南部、西南部、东北部、西北部八个方位名称;主导生态服务功能为主:区位+主导生态服务功能+“功能区”;主导生态敏感性为主:区位+生态敏感性+“保护区”/“恢复区”/“重建区”(按照敏感性影响程度由轻到重依次确定)。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务功能重要性

白洋淀湿地生态系统服务功能重要性各指标评价结果如图 2 所示。(1)水产品供给功能重要性:2007—

2016 年白洋淀湿地水产品产量从 25612 吨增加到 37404 吨,增长 46%^[70]。遥感解译结果显示,2015 年白洋淀湿地人工养殖鱼塘共 307 处,总面积 36.25km²,占白洋淀水体面积 44.7%。从空间分布来看,人工养殖鱼塘主要围绕淀区居民地周围密集分布,表明了淀区人民居住与水产养殖的空间相互作用关系。(2)水生植物供给功能重要性:2015 年白洋淀湿地挺水植物面积 113.78km²,占白洋淀湿地总面积 31.1%,广泛分布在白洋淀北部烧车淀、西部藻苻淀、中部大麦淀、西南部小白洋淀等淀泊区域;浮叶植物面积 19.60km²,占白洋淀湿地总面积 5.4%,仅在白洋淀湿地北部烧车淀、西部藻苻淀等局部区域集中分布。水生植物覆盖度总体较高,且与水生植物种类关系密切,浮叶植物覆盖度高于挺水植物,主要是由于浮叶植物叶片较大、分布密集。(3)气候调节功能重要性:根据白洋淀湿地 2015 年固碳、释氧反演结果可知,生态系统固碳量位于 0.36—0.62kgC/m²之间,释氧量位于 0.27—0.46kgC/m²之间。(4)生物多样性维护功能重要性:白洋淀湿地生境质量总体处于较高水平,呈现出从白洋淀中心地区向外逐渐递减的趋势。白洋淀湿地中部的大麦淀及其附近地区的生境得分值多在 0.6 以上。北部烧车淀、西部藻苻淀、南部小白洋淀的局部地区,受到的威胁程度较大,生境得分多在 0.6 以下。此外,东部、西北、南部等地区(多为建设用地、旱地、水田),生境得分多在 0—0.3。(5)水质改善功能重要性:受府河、唐河等河流上游水源污染,淀区西部藻苻淀、南部小白洋淀区域水质类别>V,水体污染严重,需要提供的水质改善功能极重要。

生态系统服务功能重要性综合评价结果表明,白洋淀湿地生态系统服务功能重要性高,重要性等级为极重要区域的面积为 166.93km²,面积占比 45.7%;中等重要区域面积为 50.73km²,占比 13.9%;较重要区域面积为 25.28km²,占比 6.9%;不重要区域面积为 122.64km²,占比 33.5%。生态系统服务功能重要性等级为较重要及以上的区域面积共 242.94km²,占比 66.5%。

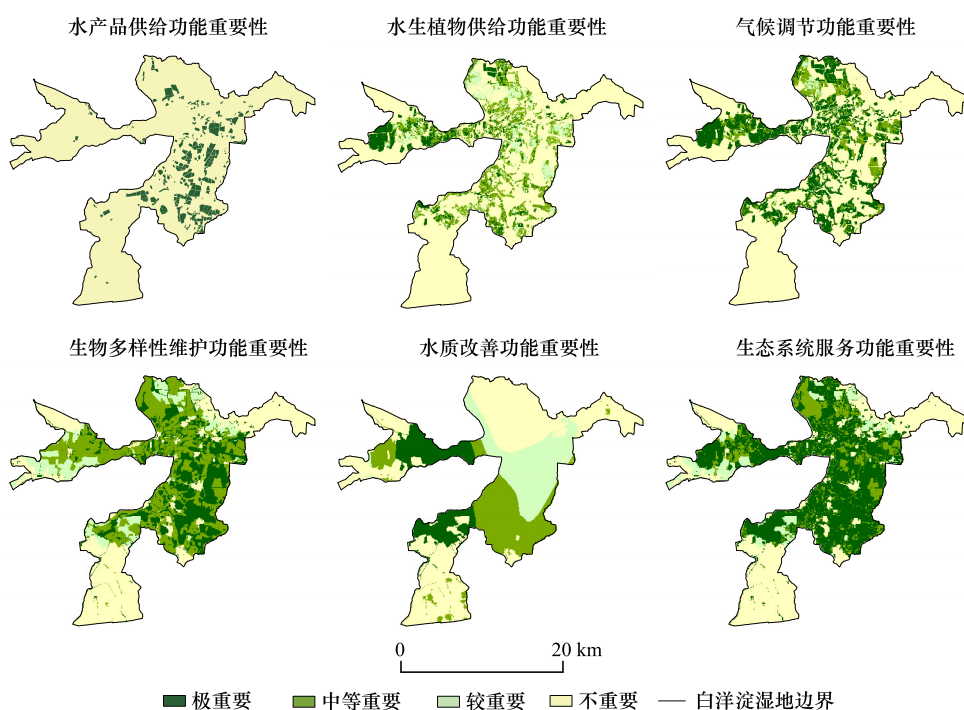


图 2 白洋淀湿地生态系统服务功能重要性评价结果

Fig.2 Evaluation results of ecosystem services function importance in Baiyangdian Wetland

3.2 生态系统敏感性

白洋淀湿地生态系统敏感性各指标评价结果如图 3 所示。(1)水污染敏感性:白洋淀湿地水污染敏感性总体较为严重。其中,极度敏感区域面积 57.35km²,占比 15.7%,主要表现为城镇工业生活污染,分布于淀区

南部马棚淀、西部藻苻淀、北部烧车淀区域;高度敏感区域面积 20.37km^2 , 占比 5.6% , 主要表现为村落非点源污染;中度敏感区域面积 85.35km^2 , 占比 23.4% , 主要表现为农业开垦污染;轻度敏感区域面积 30.94km^2 , 占比 8.5% , 主要表现为养殖业污染;不敏感区域面积 171.42km^2 , 占比 46.9% 。(2)湿地变化敏感性:白洋淀湿地变化敏感性空间分异性大,极度敏感区域分布于淀区南部马棚淀、西部藻苻淀、北部烧车淀区域,这些区域湿地转变为旱地、水田等非湿地类型,面积 127.04km^2 , 占比 34.8% ;高度敏感区域面积较小,为 0.14km^2 , 占比 0.0% , 这些区域为变化时间大于 20 年的不同类型湿地之间相互转变;中度敏感区域面积 1.64km^2 , 占比 0.4% ;轻度敏感区域面积 34.48km^2 , 占比 9.4% , 主要分布于淀区中部;不敏感区域面积 139.50km^2 , 占比 38.2% , 湿地类型没有发生变化。此外,1975—2018 年始终为非湿地类型的区域面积 62.60km^2 , 占比 17.1% 。(3)重要自然与文化价值敏感性:白洋淀湿地省级自然保护区总面积为 296.96km^2 , 其中核心区面积 94.40km^2 , 缓冲区面积 53.68km^2 , 实验区面积 148.88km^2 [10]。白洋淀自然文化遗产包括容城县晾马台遗址、上坡遗址,以及安新县留村遗址、梁庄遗址、陈调元庄园。白洋淀风景名胜区总面积 366 平方公里,是国家 5A 级旅游景区。

生态系统敏感性综合评价结果表明,白洋淀湿地生态系统服务功能重要性表现出高等级的同时,生态系统敏感性亦表现出较高等级分布,湿地变化敏感性最高,水污染敏感性次之,重要自然与文化价值敏感性较小。综合来看,生态系统敏感性程度为极度敏感区域面积为 177.99km^2 , 占比 48.7% ;高度敏感区域面积为 16.00km^2 , 占比 4.4% ;中度敏感地区面积为 15.73km^2 , 占比 4.3% ;轻度敏感地区面积为 78.25km^2 , 占比 21.4% ;不敏感区域面积为 77.61km^2 , 占比 21.2% 。

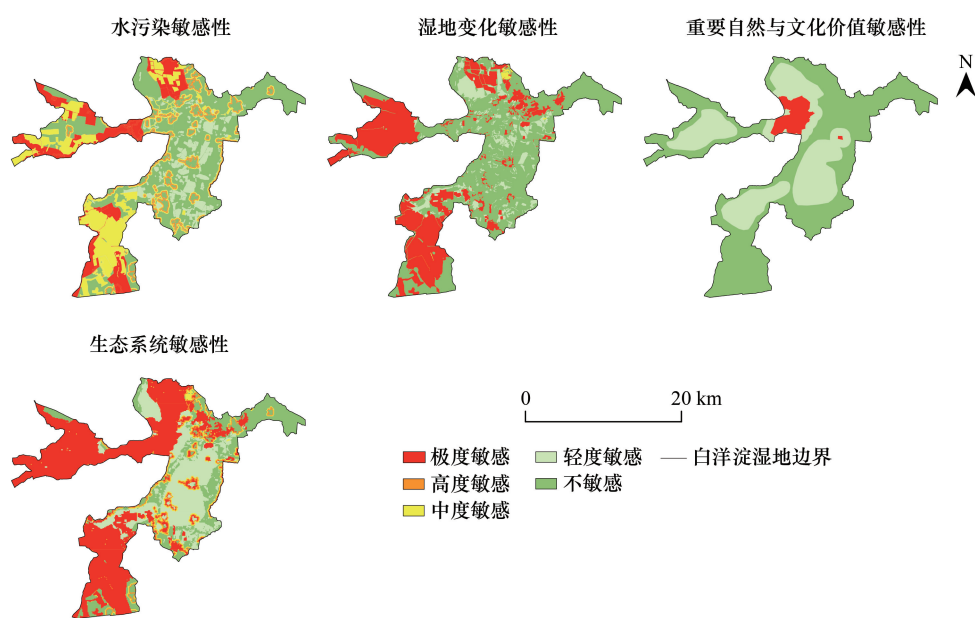


图3 白洋淀湿地生态系统敏感性评价结果

Fig.3 Evaluation results of ecosystem sensitivity in Baiyangdian Wetland

3.3 生态功能分区

白洋淀湿地生态分区处理结果及分区参考如图 4 所示。从图中可知,生态重要性程度为Ⅳ级和Ⅲ级的区域位于白洋淀湿地的中部,为核心区域。淀区南部、西部多为生态敏感性Ⅴ级。淀区东北部为其余地区,即生态系统重要性评价Ⅲ级以下且生态敏感性Ⅳ级以下的地区。将生物多样性维护重要性Ⅳ级、湿地变化敏感性Ⅴ级、Ⅳ级、重点风景名胜区、水产品供给区等空间分布特征作为分区参考。其中,生物多样性维护重要性与湿地变化敏感性分别是白洋淀湿地最显著的生态系统功能和敏感性因素;重点风景名胜区是白洋淀湿地重要旅游景点,空间上具有完整性;鱼塘作为水产品供给的载体提供重要的生态功能。

基于白洋淀湿地生态系统服务功能重要性、生态系统敏感性评估结果,考虑生态系统类型完整性、生态敏

感区域完整性,结合白洋淀地区地形地貌、土地覆被现状、生态保护和管理的需要等,并通过多次调整和完善,最终形成白洋淀湿地生态系统功能分区成果图(图 5),各功能分区特征及保护目标与发展方向如表 3 所述。

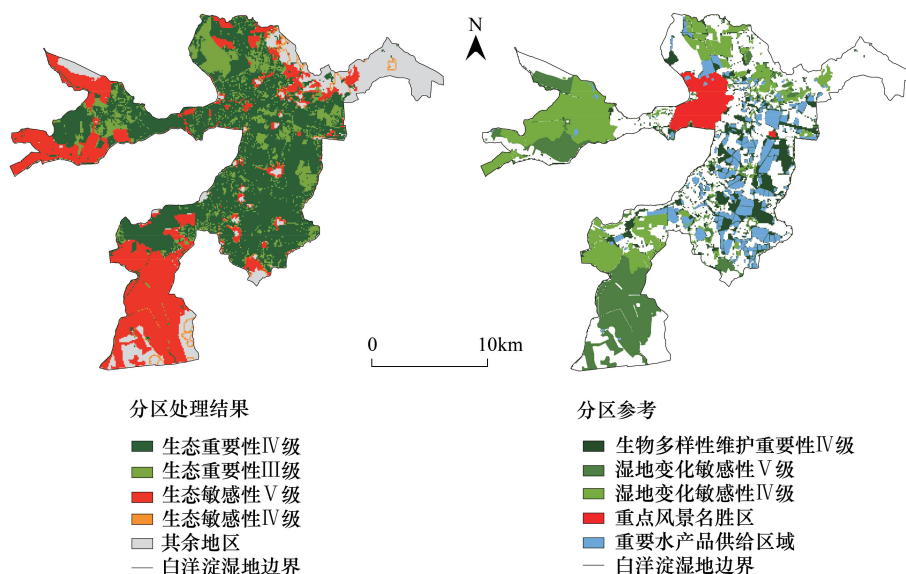


图 4 白洋淀湿地生态分区处理结果及分区参考

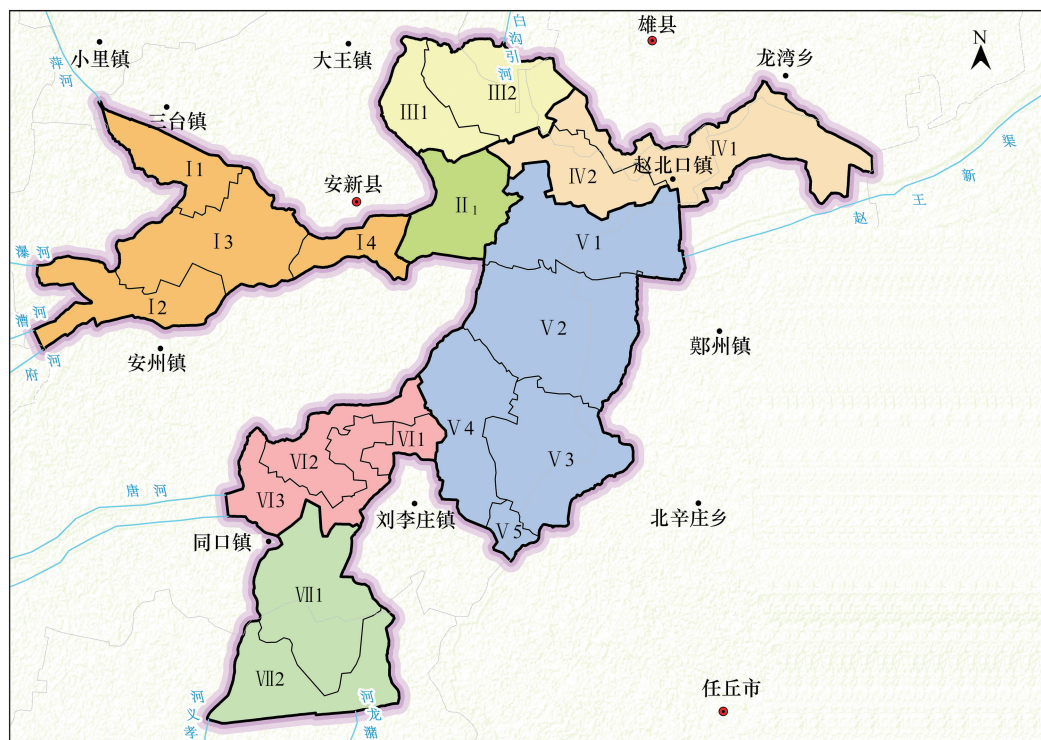
Fig.4 Processing results and reference of ecological function regionalization in Baiyangdian Wetland

4 讨论

(1) 分区方法体现了人地关系动态特征。生态特征区划和生态功能区划是生态区划的两大组成部分^[27]。从生态特征区划到生态功能区划,推动了生态区划从自然特征的归纳和概括发展到生态功能的监测和管理,并在国家和地方层面得到广泛实践应用,为我国生态系统保护与管理发挥了关键指引作用^[28,34]。本文面向白洋淀湿地生态保护和管理的需要,从生态环境状况及主要问题出发,依据《生态功能分区技术规范》(征求意见稿)生态功能分区方法,并充分借鉴国内其他湿地、湖泊生态功能评价已有研究案例,基于生态系统服务功能、生态系统敏感性,开展了白洋淀湿地生态功能分区研究。该方法不仅表现了白洋淀主要生态系统服务功能空间特征,而且考虑了水污染、湿地变化、自然与文化价值等生态系统敏感性特征,将自然生态过程与人类社会经济活动影响相结合,体现了人地关系动态特征,有助于提升对淀区可持续发展规划的支持能力和改变湿地生态系统管理方式。在生态系统服务功能重要性评价指标选取方面,由于资料和数据受限,对水资源供给功能、文化服务功能(如历史文化、科研与教育文化)等指标评价尚未分析,是本研究不足之处。

(2) 分区结果注重现状与历史相结合。本文基于 2015 年现状数据开展生态系统服务功能重要性评价,基于 1975—2018 年土地利用/覆被数据开展湿地变化敏感性评价,反映了湿地生态功能现状特征,体现了湿地历史变化特征,注重现状与历史的结合,分区结果涵盖了淀区生态环境时空特征,有助于服务未来淀区生态保护规划决策实施。由于本文将白洋淀自然保护区已列为评价指标之一,因此综合分区结果与《白洋淀省级自然保护区总体规划》(修编版)中的保护区总面积不具可比性。唯一可比较的文献是赵英魁等 1995 年研究的白洋淀功能区划,该研究根据白洋淀地形地貌及海拔高程的差异,同时参照其水质、现状用途及人口密度等,将白洋淀 99 个淀泊划分为 9 个不同的区域。由于本研究与赵英魁等在指标选取、分区方法方面均有所不同,因此二者研究结果在分区边界划分尺度、部分核心功能区划分上有所差异。

(3) 基于生态功能分区的决策建议。①实行分区管制:针对不同生态功能区特征,实行生态环境治理与保护分区管制。对于生态功能区,重点保护水生植物种植种类和范围,恢复湿地面积,为重要动植物栖息地提



图例

- 河流 县级界 一级分区界线 二级分区界线 县级居民点 乡镇居民点
- | | |
|---|---|
| <p>I 西部湿地变化敏感性恢复区</p> <p>I 1 人居保障农业生产功能区</p> <p>I 2 人居保障农业生产功能区</p> <p>I 3 湿地变化敏感性恢复区</p> <p>I 4 水污染敏感性恢复区</p> | <p>V 中部生物多样性维护产品供给功能区</p> <p>V 1 生物多样性维护水生植物产品供给功能区</p> <p>V 2 生物多样性维护水生动物产品供给功能区</p> <p>V 3 生物多样性维护水生产品综合供给功能区</p> <p>V 4 生物多样性维护水生植物产品供给功能区</p> <p>V 5 人居保障农业生产功能区</p> |
| <p>II 西北部重要自然与文化价值敏感性保护区</p> <p>II 1 重要自然与文化价值敏感性保护区</p> | <p>VI 西南部湿地变化敏感性恢复区</p> <p>VI 1 生物多样性维护功能区</p> <p>VI 2 生物多样性维护水生动物产品供给功能区</p> <p>VI 3 湿地变化敏感性恢复区</p> |
| <p>III 北部生物多样性维护功能区</p> <p>III 1 生物多样性维护功能区</p> <p>III 2 湿地变化敏感性恢复区</p> | <p>VII 南部人居保障农业生产功能区</p> <p>VII 1 湿地变化敏感性重建区</p> <p>VII 2 人居保障农业生产功能区</p> |
| <p>IV 东北部人居保障农业生产功能区</p> <p>IV 1 人居保障农业生产功能区</p> <p>IV 2 湿地变化敏感性恢复区</p> | |

图 5 白洋淀湿地生态功能分区

Fig.5 Map showing ecological function regionalization in Baiyangdian Wetland

供保障;对于生态敏感区,重点治理水体污染、清理淤化水体、实施退耕还湿,其中生态敏感性保护区重点保护自然生态景观,生态敏感性恢复区重点治理水体污染、清理淤化水体,生态敏感性重建区重点实施退耕还湿、恢复湿地范围与面积。②加强水陆统筹:白洋淀湿地水源不足、水体污染等问题需要水陆统筹综合治理。以流域为单元,在白洋淀流域水资源科学合理分配的前提下,持续性实施跨流域、跨区域生态调水补给白洋淀水资源,确保淀区水位和水量均衡长期保持为正均衡状态。严控上游地区水污染源,转变经济发展方式,规划绿色、清洁产业布局。③强化制度保障:优化完善生态环境管理机制和管理模式,建立以白洋淀湿地国家级自然保护区、国家级风景名胜区、重要自然与文化遗产为核心的“国家公园”管理体系,建设生态环境监测网络,持续性开展生态环境监测与评价工作,为白洋淀湿地保护提供科技支撑。

表 3 白洋淀湿地生态系统功能分区特征、保护目标与发展方向

Table 3 Characteristics, protection goals and development direction of ecological function regionalization in Baiyangdian Wetland

一级分区 First-level ecoregions	二级分区 Second-level ecoregions	分区特征 Characteristics of ecoregions	保护目标与措施 Goals and measures of protection	发展方向 Development direction
I 西部湿地变化敏感性恢复区 Restored zones of sensitivity of wetland changes in west	I 1 人居保障农业生产功能区	主要生态服务功能表现为气候调节和水生植物产品供给,主要生态敏感性表现为湿地变化敏感性,并伴有水体污染等生态问题	重点恢复湿地面积、保护水生植物,治理水体污染,清理淤化水体	重要动植物栖息地
	I 2 人居保障农业生产功能区			
	I 3 湿地变化敏感性恢复区			
	I 4 水污染敏感性恢复区			
II 西北部重要自然与文化价值敏感性保护区 Protected zones of sensitivity of importantly natural and cultural values in northwest	II 1 重要自然与文化价值敏感性保护区	主要生态服务功能表现为文化服务,包括自然景观、科学研究与教育,主要生态敏感性表现为重要自然与文化价值敏感性,是白洋淀风景名胜区的核心区域	重点保护自然景观,科学规划与管理景区,使白洋淀风景名胜区发展成为国家级风景名胜区	国家级风景名胜区、重要自然与文化遗产
III 北部生物多样性维护功能区 Function zones of biodiversity maintenance in north	III 1 生物多样性维护功能区 III 2 湿地变化敏感性恢复区	主要生态服务功能表现为生物多样性维护和水生植物产品供给,主要生态敏感性表现为湿地变化敏感性和水污染敏感性	重点恢复湿地面积、保护水生植物,治理水体污染,清理淤化水体	重要动植物栖息地
IV 东北部人居保障农业生产功能区 Function zones of human settlement protection and agricultural production in northeast	IV 1 人居保障农业生产功能区 IV 2 湿地变化敏感性恢复区	主要以耕地覆盖为主,为白洋淀湿地与耕地过渡区域,主要功能是农业生产	重点恢复湿地面积、保护水生植物,实施退耕还湿,合理开展农业生产	重要动植物栖息地 人居保障农业生产地
V 中部生物多样性维护农产品供给功能区 Function zones of biodiversity maintenance and products supplying in center	V 1 生物多样性维护水生植物产品供给功能区	主要生态服务功能表现为生物多样性维护和水生动植物产品供给功能,主要生态敏感性表现为重要自然与文化价值敏感性,是白洋淀自然保护区的核心区域	重点保护动植物栖息地,维护湿地生态系统生物多样性,实施水生动植物保护、退耕还湿	重要动植物栖息地 重要水生产品供给地
	V 2 生物多样性维护水生动物产品供给功能区			
	V 3 生物多样性维护水生产品综合供给功能区			
	V 4 生物多样性维护水生植物产品供给功能区			
	V 5 人居保障农业生产功能区			
VI 西南部湿地变化敏感性恢复区 Restored zones of sensitivity of wetland changes in southwest	VI 1 生物多样性维护功能区 VI 2 生物多样性维护水生动物产品供给功能区 VI 3 湿地变化敏感性恢复区	主要生态服务功能表现为生物多样性维护功能,主要生态敏感性表现为湿地变化敏感性	重点保护动植物栖息地,实施退耕还湿	重要动植物栖息地
VII 南部人居保障农业生产功能区 Function zones of human settlement protection and agricultural production in south	VII 1 湿地变化敏感性重建区 VII 2 人居保障农业生产功能区	湿地变化敏感性、水污染敏感性问题突出	重点恢复湿地面积,实施退耕还湿	重要动植物栖息地 人居保障农业生产地

5 结论

本研究基于水产品供给功能、水生植物供给功能、气候调节功能、生物多样性维护功能、水质改善功能,综合评价了白洋淀湿地生态系统服务功能重要性,从水污染敏感性、湿地变化敏感性、重要自然与文化价值敏感

性方面,综合评价了白洋淀湿地生态系统敏感性。基于生态系统服务功能重要性、生态系统敏感性评价结果,综合考虑生态系统类型完整性、生态敏感区域完整性,并结合白洋淀地区地形地貌、土地覆被现状、生态保护和管理的需要等,将白洋淀湿地初步划分为 7 个一级生态功能区和 19 个二级生态功能区。本研究在分区方法方面将白洋淀湿地自然生态过程与人类社会经济活动影响相结合,体现了人地关系动态特征;分区结果注重现状与历史的结合,涵盖了淀区生态环境时空特征,有助于服务未来淀区生态保护规划决策实施。建议在实施白洋淀生态环境治理和保护过程中,依据白洋淀湿地生态功能分区特征,实行分区管制,制定对应的生态环境治理和保护措施。

参考文献 (References):

- [1] 新华社. 中共中央、国务院决定设立河北雄安新区. (2017-04-01) [2019-01-28]. http://news.xinhuanet.com/politics/2017-04/01/c_1120741571.htm.
- [2] 李英华, 崔保山, 杨志峰. 白洋淀水文特征变化对湿地生态环境的影响. 自然资源学报, 2004, 19(1): 62-68.
- [3] 张素珍, 田建文, 李贵宝. 白洋淀湿地面临的生态问题及生态恢复措施. 水土保持通报, 2007, 27(3): 146-150.
- [4] 贾毅. 白洋淀环境演变的人为因素分析. 地理学与国土研究, 1992, 8(1): 31-33.
- [5] 弓冉. 白洋淀水量变化原因分析. 地理学与国土研究, 1993, 9(2): 36-40, 49-49.
- [6] 温志广. 白洋淀湿地生态环境面临的危机及解决措施. 环境保护, 2003, (9): 33-35.
- [7] 白德斌, 宁振平. 白洋淀干涸原因浅析. 中国防汛抗旱, 2007, (2): 46-48, 62-62.
- [8] 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, 32(11): 1199-1205.
- [9] 河北省政府. 《白洋淀湿地自然保护区规划》. 石家庄: 河北省政府, 2002.
- [10] 河北省政府. 《白洋淀省级自然保护区总体规划(修编版)》. 石家庄: 河北省政府, 2012.
- [11] 河北省委办公厅, 河北省政府办公厅. 《白洋淀环境综合整治与生态修复规划(2015-2020)》. 石家庄: 河北省委办公厅, 河北省政府办公厅, 2015.
- [12] 郗建荣. 环保部将白洋淀纳入“新三湖”予以保护. (2017-07-12) [2019-01-28]. <http://epaper.legaldaily.com.cn/fzrb/content/20170712/Article06004GN.htm>.
- [13] 河北省政府. 河北省委、省政府印发《通知》安排部署《白洋淀规划》组织实施工作. (2019-01-04) [2019-01-28]. <http://www.hebei.gov.cn/hebei/11937442/10761139/14515723/index.html>.
- [14] 环境保护部. 《生态功能分区技术规范》(征求意见稿). (2014-05-15) [2019-01-28]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgh/201405/t20140521_275396.htm.
- [15] 环境保护部, 中国科学院. 《全国生态功能区划》. (2008-07-18) [2019-01-28]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/200910/t20091022_174499.htm.
- [16] 环境保护部, 中国科学院. 《全国生态功能区划(修编版)》. (2015-11-13) [2019-01-28]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201511/t20151126_317777.htm.
- [17] Loucks O L. A forest classification for the Maritime Provinces//Proceedings of the Nova Scotian Institute of Science. Fredericton: Forest Research Branch, Canada Department of Forestry, 1962: 85-167.
- [18] Crowley J M. Biogeography. The Canadian Geographer, 1967, 11(4): 312-326.
- [19] Bailey R G. Ecoregions of the United States (1:7500000 Colored). Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Region, 1976.
- [20] Bailey R G. Ecoregions of the United States (Map). Ogden, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, 1976.
- [21] Bailey R G. Identifying ecoregion boundaries. Environmental Management, 2004, 34(S1): S14-S26.
- [22] Bailey R G. Ecoregions: the Ecosystem Geography of the Oceans and Continents. 2nd ed. New York: Springer, 2014.
- [23] Olson D M, Dinerstein E, Wikramanayake E D, Burgess N D, Powell G V N, Underwood E C, D'Amico J A, Itoua I, Strand H E, Morrison J C, Loucks C J, Allnutt T F, Ricketts T H, Kura Y, Lamoreux J F, Wettengel W W, Hedao P, Kassem K R. Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on Earth: a new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity. Bioscience, 2001, 51(11): 933-938.
- [24] Omernik J M. Perspectives on the nature and definition of ecological regions. Environmental Management, 2004, 34(S1): S27-S38.
- [25] Darvill R, Lindo Z. Quantifying and mapping ecosystem service use across stakeholder groups: implications for conservation with priorities for cultural values. Ecosystem Services, 2015, 13: 153-161.
- [26] Vigl L E, Depellegrin D, Pereira P, de Groot R, Tappeiner U. Mapping the ecosystem service delivery chain: capacity, flow, and demand pertaining to aesthetic experiences in mountain landscapes. Science of the Total Environment, 2017, 574: 422-436.
- [27] 蔡佳亮, 殷贺, 黄艺. 生态功能区划理论研究进展. 生态学报, 2010, 30(11): 3018-3027.
- [28] 刘焱序, 傅伯杰, 王帅, 赵文武. 从生物地理区划到生态功能区划——全球生态区划研究进展. 生态学报, 2017, 37(23): 7761-7768.
- [29] 傅伯杰, 陈利顶, 刘国华. 中国生态区划的目的、任务及特点. 生态学报, 1999, 19(5): 591-595.

- [30] 傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 马克明, 李俊然. 中国生态区划方案. 生态学报, 2001, 21(1): 1-6.
- [31] 国务院. 《全国主体功能区规划》. (2010-12-21) [2019-01-28]. http://www.gov.cn/zw/gk/2011-06/08/content_1879180.htm.
- [32] 孟伟, 张远, 郑丙辉. 辽河流域水生生态分区研究. 环境科学学报, 2007, 27(6): 911-918.
- [33] 刘星才, 徐宗学, 张淑荣, 徐华山. 流域环境要素空间尺度特征及其与水生生态分区尺度的关系——以辽河流域为例. 生态学报, 2012, 32(11): 3613-3620.
- [34] 孙然好, 程先, 陈利顶. 基于陆地-水生态系统耦合的海河流域水生生态功能分区. 生态学报, 2017, 37(24): 8445-8455.
- [35] 陈龙, 谢高地, 张昌顺, 刘春兰, 陈操操, 王海华. 澜沧江流域典型生态功能及其分区. 资源科学, 2013, 35(4): 816-823.
- [36] 尤南山, 蒙古军. 基于生态敏感性和生态系统服务的黑河中游生态功能区划与生态系统管理. 中国沙漠, 2017, 37(1): 186-197.
- [37] 邓铭江, 樊自立, 徐海量, 周海鹰. 塔里木河流域生态功能区划研究. 干旱区地理, 2017, 40(4): 705-717.
- [38] 贾良清, 欧阳志云, 赵同谦, 王效科, 肖懿, 肖荣波, 郑华. 安徽省生态功能区划研究. 生态学报, 2005, 25(2): 254-260.
- [39] 王治江, 李培军, 王延松, 胡涛, 巩宗强, 孙铁珩, 万忠成, 陈大光. 辽宁省生态功能分区研究. 生态学杂志, 2005, 24(11): 1339-1342.
- [40] 孙然好, 李卓, 陈利顶. 中国生态区划研究进展: 从格局、功能到服务. 生态学报, 2018, 38(15): 5271-5278.
- [41] 李潇然, 李阳兵, 王永艳, 邵景安. 三峡库区县域景观生态安全格局识别与功能分区——以奉节县为例. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1959-1967.
- [42] 柳易林. 洞庭湖湿地生态系统生态服务功能价值评估与生态功能区划[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2005.
- [43] 曹小娟. 洞庭湖 AQUATOX 模拟与生态功能分区[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
- [44] 谢冬明, 邓红兵, 王丹寅, 田野. 鄱阳湖湿地生态功能重要性分区. 湖泊科学, 2011, 23(1): 136-142.
- [45] 王传辉, 吴立, 王心源, 王官勇, 孙叶根, 胡降临. 基于遥感和 GIS 的巢湖流域生态功能分区研究. 生态学报, 2013, 33(18): 5808-5817.
- [46] 高永年, 高俊峰. 太湖流域水生生态功能分区. 地理研究, 2010, 29(1): 111-117.
- [47] Gao Y N, Gao J F, Chen J F, Xu Y, Zhao J H. Regionalizing aquatic ecosystems based on the river subbasin taxonomy concept and spatial clustering techniques. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2011, 8(11): 4367-4385.
- [48] 高永年, 高俊峰, 陈炯烽, 许妍, 赵家虎. 太湖流域水生生态功能三级分区. 地理研究, 2012, 31(11): 1941-1951.
- [49] 胡圣, 夏凡, 张爱静, 龚治娟, 周正, 王英才. 丹江口水源区水生生态功能一二级分区研究. 长江流域资源与环境, 2017, 26(8): 1208-1217.
- [50] 王长耀, 张金胜, 胡征宇. 利用遥感资料对白洋淀水域变化进行定量分析的探讨. 环境遥感, 1987, 2(2): 106-113.
- [51] 王京, 卢善龙, 吴炳方, 闫娜娜, 裴亮. 近 40 年来白洋淀湿地土地覆被变化分析. 地球信息科学学报, 2010, 12(2): 292-300.
- [52] 江波, 肖洋, 马文勇, 欧阳志云. 1974-2011 年白洋淀土地覆盖时空变化特征. 湿地科学与管理, 2016, 12(1): 38-42.
- [53] 庄长伟, 欧阳志云, 徐卫华, 白杨. 近 33 年白洋淀景观动态变化. 生态学报, 2011, 31(3): 839-848.
- [54] 白军红, 房静思, 黄来斌, 邓伟, 李爱农, 孔博. 白洋淀湖沼湿地系统景观格局演变及驱动力分析. 地理研究, 2013, 32(9): 1634-1644.
- [55] 张敏, 宫兆宁, 赵文吉, 阿多. 近 30 年来白洋淀湿地景观格局变化及其驱动机制. 生态学报, 2016, 36(15): 4780-4791.
- [56] 李建国, 李贵宝, 王殿武, 解惠贤. 白洋淀湿地生态系统服务功能与价值估算的研究. 南水北调与水利科技, 2005, 3(3): 18-21.
- [57] 张素珍, 李贵宝. 白洋淀湿地生态服务功能及价值估算. 南水北调与水利科技, 2005, 3(4): 22-25.
- [58] 张素珍, 王金斗, 李贵宝. 安新县白洋淀湿地生态系统服务功能评价. 中国水土保持, 2006, (7): 12-15.
- [59] 江波, 陈媛媛, 肖洋, 赵娟娟, 欧阳志云. 白洋淀湿地生态系统最终服务价值评估. 生态学报, 2017, 37(8): 2497-2505.
- [60] 赵英魁, 张秀清, 马大明, 张玉田. 白洋淀功能区划分原则. 环境科学, 1995, 16(S1): 40-41, 46-46.
- [61] 王会昌. 一万年来白洋淀的扩张与收缩. 地理研究, 1983, 2(3): 8-18.
- [62] 刘春兰, 谢高地, 肖玉. 气候变化对白洋淀湿地的影响. 长江流域资源与环境, 2007, 16(2): 245-250.
- [63] 高彦春, 王金凤, 封志明. 白洋淀流域气温、降水和径流变化特征及其相互响应关系. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 467-477.
- [64] 刘茂峰, 高彦春, 甘国靖. 白洋淀流域年径流变化趋势及气象影响因子分析. 资源科学, 2011, 33(8): 1438-1445.
- [65] 杨春霄. 白洋淀入淀水量变化及影响因素分析. 地下水, 2010, 32(2): 110-112.
- [66] 周奕帆, 阎广聚. 引水补源对维系白洋淀生态影响对策研究. 水科学与工程学报, 2012, (6): 29-32.
- [67] 保定市水利局. 2016 年保定市水资源公报. 保定: 保定市水利局, 2017.
- [68] 姜海. 白洋淀区域环境问题研究[D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [69] 孙添伟, 陈家军, 王浩, 史震天. 白洋淀流域府河干流村落非点源负荷研究. 环境科学研究, 2012, 25(5): 568-572.
- [70] 河北省人民政府. 河北经济年鉴(2008-2017 年). 北京: 中国统计出版社, 2008-2017.
- [71] 王其翔, 唐学玺. 海洋生态系统服务的产生与实现. 生态学报, 2009, 29(5): 2400-2406.
- [72] 李丽锋, 惠淑荣, 宋红丽, 苏芳莉. 盘锦双台河口湿地生态系统服务功能能值价值评价. 中国环境科学, 2013, 33(8): 1454-1458.
- [73] 国家林业局. LY/T 1721—2008 森林生态系统服务功能评估规范. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [74] Sharp R, Tallis H T, Ricketts T, Guerry A D, Wood S A, Chaplin-Kramer R, Nelson E, Ennaanay D, Wolny S, Olwero N, Vigerstol K, Pennington D, Mendoza G, Aukema J, Foster J, Forrester J, Cameron D, Arkema K, Lonsdorf E, Kennedy C, Verutes G, Kim C K, Guannel G, Papenfus M, Toft J, Marsik M, Bernhardt J, Griffin R, Glowinski K, Chaumont N, Perelman A, Lacayo M, Mandle L, Hamel P, Vogl A L, Rogers L, Bierbower W, Denu D, Douglass J. InVEST 3.5.0 User's Guide. Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund, 2018.