

# 使用自组织特征映射神经网络对 湖泊水生态功能分区\*

田艺苑<sup>1)</sup> 孙立鑫<sup>1)</sup> 杨 薇<sup>1,2)†</sup>

(1)北京师范大学环境学院, 100875, 北京; (2)北京师范大学水环境模拟国家重点实验室, 100875, 北京)

**摘要** 以白洋淀淀区为研究案例,在水文、气象、水化学、水生态以及人类活动干扰多要素基础上,耦合生态系统服务空间分布,形成水生态分区指标体系框架,通过自组织特征映射(self-organizing feature map, SOFM)神经网络,并将案例区划分为核心湿地保护区、湿地生态缓冲区、入淀河流缓冲区和生态屏障区4类水生态功能区域,面积分别为9763.81、9538.59、5953.15和5417.53 hm<sup>2</sup>,分别占白洋淀淀区面积的31.83%、31.10%、19.41%、17.66%。分区结果体现了一定的层次结构与空间特征差异,可为未来科学识别不同区域压力源、淀区精准修复以及差别化水质管理提供科学的数据支撑。

**关键词** 生态功能分区;自组织特征映射神经网络;生态系统服务;白洋淀

**中图分类号** X171

**DOI:** 10.12202/j.0476-0301.2020442

湖泊等水生态系统区域划分方法包括水环境功能分区、水生态地理分区及水生态功能分区等<sup>[1]</sup>,均是精细化湖泊水质及生态目标、提升湖泊科学管理能力、充分发挥湖泊功能的重要内容,具有重要理论与现实意义。水环境功能分区更注重水环境保护,周晨等<sup>[2]</sup>依据污染物的空间分布特征及湖泊的营养状况划分草海湿地水质区域,以提升草海湿地的水环境容量。彭兆亮等<sup>[3]</sup>基于太湖水环境条件,提出可促进水质改善水环境区划方案,为太湖水环境精细化管理提供了可能。水生态地理分区更注重自然要素与资源,强调自然地理要素(水文、温度、生物)的差异,不考虑人类活动对水体环境的影响<sup>[4]</sup>。近年来,水生态功能分区在满足区域水资源的可持续开发利用和环境保护需要考虑的诸如水质指标等单要素指标时,综合考虑水生态服务功能对分区的影响<sup>[5]</sup>,成为功能区划的研究热点:樊灏等<sup>[6]</sup>在滇池流域完成水生态功能二级分区的基础上,基于水生态系统结构特征进一步对滇池流域进行三级区划;高俊峰等<sup>[7]</sup>根据湿地生态系统服务功能特点,初步将中国湿地生态功能划分成3个一级区、7个二级区;许杨等<sup>[8]</sup>利用水文、水质、河岸带地貌和水生生物等构建水生态功能指标体系,对深圳茅洲河流域进行生态分区。研究方法也从空间叠加法<sup>[9]</sup>、相关分

析法<sup>[10]</sup>、层次分析法<sup>[11]</sup>等分区过程主观性较强的定量或半定量描述方法<sup>[12]</sup>,走向大数据分析机器学习等方法(如神经网络分区法等),其中自组织特征映射(self-organizing feature map, SOFM)神经网络分区方法具有层次明显、客观性强等优点<sup>[13]</sup>,得到学者们的关注:马程等<sup>[14]</sup>在识别京津冀生态系统服务功能的基础上,利用SOFM方法将京津冀划分为4个不同生态系统服务类型的区域;刘娅等<sup>[15]</sup>重点考虑了水源涵养功能,利用SOFM神经网络将京津冀地区划分为6个具有显著差异的水源涵养功能区,分区效果良好。

为高质量完成白洋淀生态环境保护和水资源科学配置的目标任务,亟需对白洋淀淀区进行科学合理的分区,明确淀区不同区域的生态功能定位。综合分析不同文献关于白洋淀分区结果发现,现有资料大部分为对白洋淀流域或周边城市进行大尺度区域分析,均将白洋淀规划为水源涵养区及生态红线保护区<sup>[16-17]</sup>,而小尺度区域上仅开展了湿地生态特征区划及功能定性分区工作。例如:赵英魁等<sup>[18]</sup>以各区域的水质使用目的和保护目标对白洋淀淀区进行水环境功能区域划分;朱金峰等<sup>[19]</sup>采用空间叠加法对白洋淀淀区进行了生态功能分区,分区结果仍具有一定主观性。

\* 国家水体污染控制与治理科技重大专项资助项目(2018ZX07110001);国家重点研发计划资助项目(2017YFC0404505)

† 通信作者:杨薇(1979—),女,博士,副教授。研究方向:湿地生态流量调控效应。E-mail: yangwei@bnu.edu.cn

收稿日期:2020-09-15

本文综合考虑水文、水生物、水化学、气象、人类活动及生态系统服务等多层次要素指标,构建湖泊尺度水生态功能分区指标体系,并采用 SOFM 神经网络进行水功能区划,提高分类判断科学性和可靠性,可为科学识别不同湖区压力源、完成不同湖区的生态功能定位和精准修复、维持淀区生态系统平衡及差别化水质管理提供科学数据支撑。

## 1 模型与方法

### 1.1 湖泊水生态功能分区

**1.1.1 分区原则** 湖泊湿地生态功能分区原则是湖泊水生态功能分区的依据、准则与基础,其决定着结果的正确性与可信度。因此,在考虑湖泊湿地空间结构、水生态系统原理进行不同级别水功能分区时,应该遵循以下原则<sup>[7,20]</sup>:

1) 分区结果科学合理性。要考虑湖泊水生态系统的潜在功能与各分区(如水功能区、水环境功能区、生态功能区、生态红线等)的衔接。

2) 区域共轭性和连通性。区域共轭性原则要求每个具体区划单元为连续地域单元,不能存在独立

于区域之外而又从属于该区的单元;连通性原则是结合景观格局的空间分布情况及湖泊与相连河流的连通情况,强调区划单元水文结构与生态系统完整性。

3) 区内相似性及区间差异性。不同级别水功能分区应体现湖泊水生态系统的空间差异和分布规律;而同一级别水功能区的水生态状况应属同一级别,其重要物种及其栖息地不与相邻区形成交叉。

4) 主导功能。分区时非主导功能要服从于主导功能,满足主导功能的相应目标。

**1.1.2 指标体系构建** 湖泊水生态系统由湖泊水文、水质、水生生物群落、气象等因素构成,与水生态系统功能完整性息息相关<sup>[21]</sup>,此外大部分湖泊受人类活动干扰强烈,将人类活动要素也作为评价要素之一;水生态功能分区不同于其他分区的根本原因在于具有生态系统服务功能,主要分为支持、调节、文化及供给 4 大功能,故将其纳入评价要素。因此,湖泊水生态功能分区指标体系包括生态系统服务、水文要素、水化学要素、气象要素、水生生物要素、人类活动要素 6 个类型,具体详见表 1。

表 1 湖泊水生态功能分区要素指标描述

要素类型	要素指标	内涵	计算方法
生态系统服务	生境质量	反映生物栖息地质量状况,表征生物生境适宜栖息度	Invest模型模拟 (课题组已有成果)
	碳储量	反映淀区碳储和调节能力	
	文化服务	表征研究区文化功能,反映文化遗产、美学价值、教育科研价值和生态旅游等价值	专家咨询法
	物质生产服务	表征研究区供给功能,反映淀区各主导产业所带来的经济价值	市场价值法
水文	水位	反映水体水情最直观的因素,它的变化主要由于水体水量的增减变化所引起	采样点数据, GIS空间插值
	坡度	影响水流速度、物质运输及生态响应过程	DEM数据基础上, GIS空间分析
	流速	表征水动力条件的重要指标,影响泥沙传输、养分运移等物理化学过程	采样点数据, GIS空间插值
水化学	总氮(TN)	营养物循环流动,体现生境差异	采样点数据, GIS空间插值
	总磷(TP)		
水生生物	浮游植物香农威纳指数	表征生物分布状况,反映生境差异	采样点数据, GIS空间插值
	浮游动物香农威纳指数		
	大型底栖动物香农威纳指数		
	叶绿素a	反映水体初级生产力	
气象	降水	反映研究区自然气候状况	气象数据网, GIS插值
	蒸发		
人类活动	淀中村人口/人类活动干扰指数	白洋淀独特人口分布形式	政府公报, 文献调研

**1.1.3 基于 SOFM 神经网络的水生态功能分区** 自组织特征映射网络是一种非监督型的人工神经网络模型<sup>[22]</sup>,通过网络初始化、训练和检验等步骤自动

形成并调节各要素间的权重,最终以系统终态的连接权重对客体进行识别或分类<sup>[23]</sup>。该神经网络是由 2 层网络(竞争层和输入层)组成的二维阵列,2 层神

神经元完全相互连接(图 1)。

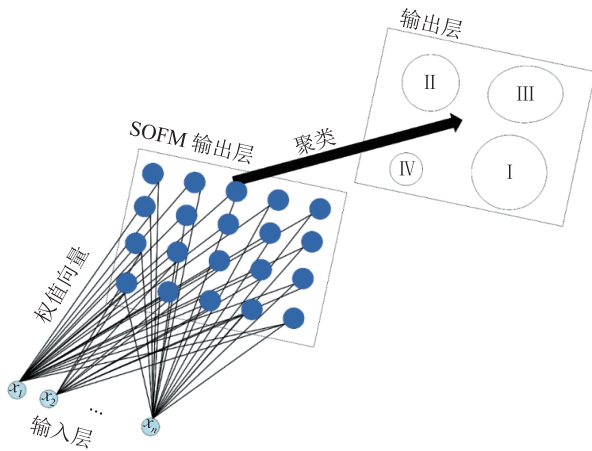


图 1 SOFM 神经网络拓扑结构

输入层接收样本,其节点数等于能够代表分类问题模式的维数,神经元功能相同的输入距离比较近,不同的距离比较远,以此将一些无规则的输入自动排除,最终形成一个二维节点矩阵<sup>[24]</sup>。竞争层则对样本进行分类,输出节点数视具体应用问题确定。学习算法包括以下几步:

- 1) 初始化权重系数  $w_{ij}$ , 即被赋予  $[0, 1]$  区间的随机值, 选择邻域半径  $r$ , 以及学习速率  $\eta(t)$ 。
- 2) 输入样本  $P_k$ , 并对权重矢量作归一化处理。
- 3) 计算  $w_{ij}$  与  $P_k$  间的欧氏距离, 找出最小的距离  $d$ , 确定获胜神经元  $g$ ,

$$d_g = \min[d_j], j = 1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

- 4) 调整处于获胜神经元邻域内的所有神经元。
- 5) 更新学习速率  $\eta(t)$  和拓扑邻域  $N_g(t)$ ,

$$\eta(t) = \eta(0) \left[ 1 - \frac{t}{T} \right], \quad (2)$$

式中:  $\eta(t)$  为初始学习率;  $t$  为学习次数;  $T$  为总的学习次数。

$$N_g(t) = \text{int} \left\{ N_g(0) \left[ 1 - \frac{t}{T} \right] \right\}, \quad (3)$$

式中  $N_g(0)$  为  $N_g(t)$  的初始值。

- 6) 重复上述 3)~5), 直至满足停止条件(例如最大的迭代次数)。

通过训练, 最终输出层中的获胜神经元及其邻域内的权值向量逼近输入矢量, 进而实现模式分类。

## 1.2 案例研究区

**1.2.1 背景简介** 选择白洋淀湖泊作为水生态功能分区案例区。白洋淀位于河北省雄安新区境内, 是新区内最重要的水体功能区, 具有蓄洪滞沥、生态涵养、生产生活 and 休闲游憩等多元功能。淀区由

143 个大小淀泊和 3 700 多条沟壕组成, 生境异质化较为明显。而近年来由于人类活动干扰, 白洋淀湿地生态环境遭到破坏, 生物多样性降低, 湿地功能逐渐减退, 生态服务功能也逐步退化<sup>[25]</sup>。虽跨流域调水、补水在一定程度上缓解了白洋淀湿地萎缩现象<sup>[26]</sup>, 但尚需实行白洋淀生态功能分区以实现精细化补水, 有针对性地对淀区进行治理。

**1.2.2 数据收集及处理** 所用数据包括 2015 年 5 月 18 日 TM 遥感影像数据(用于生态系统服务评估)、DEM 数字高程数据、坡度数据、气象数据、人类活动干扰指数数据及实地采样数据。其中: TM 遥感影像数据、DEM 数字高程数据来源于地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/>), 分辨率为  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ ; 坡度数据尚需经 ArcGIS 水文分析处理后获得; 气象数据来源于中国气象数据共享服务网 (<http://www.nmic.cn/>), 本文选取研究区及周边 7 个气象站点(容城、徐水、保定、高阳、安新、任丘和雄县)的年平均降水和年平均气温数据; 人类活动干扰指数数据来自于中国科学院资源环境数据平台的人口空间分布数据集 (<http://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx?DOIid=32>); 实地采样数据包括水文水质数据(水深、流速、TN、TP、叶绿素 a)和生物数据(浮游植物/浮游动物/大型底栖动物的香农威纳指数)。

SOFM 神经网络输入样本的各指标要素具有不同的量纲和单位, 数值差异大, 故采用标准差标准化方法对原始数据进行处理, 使分类结果更加准确。

将经 Matlab 转换的 32 373 264 ( $16 \times 2023 \ 329$ ) 个数据输入到 SOFM 神经网络进行训练, 设置训练步数为 1000 步。神经元数目由 4 类逐渐增加到 12 类, 得到的聚类结果通过 ArcMap10.2 实现空间化。使用不同类别的最大权值向量衡量每个分区方案的聚集程度, 从而确定最优的分区数目。

## 2 结果

### 2.1 各生态功能各要素空间分区

**2.1.1 生态系统服务分区结果** 在课题组已有白洋淀生态系统服务核算成果<sup>[25]</sup>的基础上, 对标准化后的碳储量、栖息地质量、物质生产和文化等 4 项白洋淀生态系统服务指标进行 SOFM 神经网络分区, 形成白洋淀生态系统服务分区(图 2-a)。共包括 3 个区域: 紫色区域为白洋淀生态系统服务高值区域, 对应土地利用类型主要为浅水域及芦苇草地区域; 黄色区域为服务中值区域, 主要对应为深水域; 蓝色区域为服务低值区域, 对应为耕地、裸地及居民用地。

**2.1.2 水文要素分区结果** 对于水文要素指标进行

SOFM 神经网络分区如图 2-b 所示. 当水文要素分为 5 类(I~V)时, 淀区差异化最大, 流速呈现收缩(由四周至中心递减)趋势, 水深呈现发散(由中心至四周递减)趋势, 其中淀区南部、中部、藻竿淀和烧车淀可形成单独聚类结果, 4 个区域的水文要素具有明显差异.

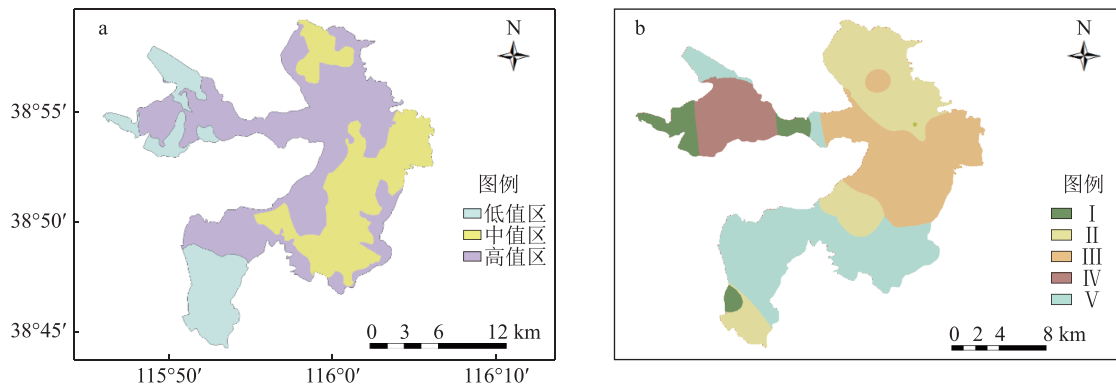


图 2 生态系统服务 (a) 及水文要素 (b) SOFM 聚类结果

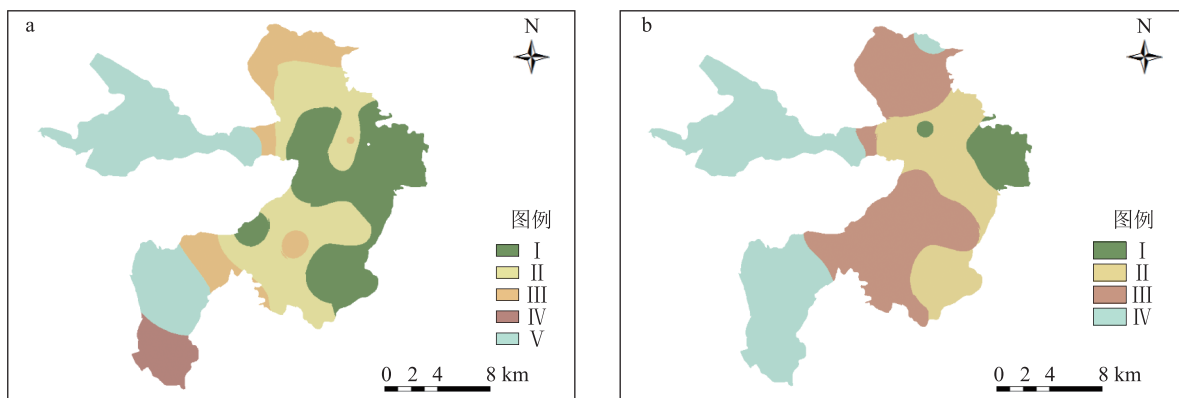


图 3 水化学要素 (a) 及水生生物要素 (b) SOFM 聚类结果

**2.1.4 水生生物要素分区结果** 水生生物要素的 SOFM 神经网络分区结果显示, 当权值向量距离最小值为 0.55, 淀区划分为 4 个区域时, 差异化最大(图 3-b). 结合 4 种水生态指标的空间分布情况, 可知白洋淀叶绿素 a 呈现由西至东逐渐下降的趋势, 而淀区中部最小; 大型底栖动物香农威纳指数呈现由四周至中心逐渐下降的趋势, 端村多样性指数最大, 采蒲台、圈头和府河入淀口处多样性指数最小; 浮游植物多样性指数分布呈现由西至东逐渐减小的趋势, 枣林庄(淀区最东部)多样性指数最小; 浮游动物多样性指数分布呈现由东至西逐渐减小的趋势, 杨庄子和枣林庄区域最大, 府河入淀口处最小. 因此结合水生态要素 SOFM 聚类结果及 4 种指标空间分布情况, 淀区可分为 4 个区域, 分别为枣林庄区域, 藻竿淀及淀区西南部区域, 端村、东田庄和烧车淀区域, 淀区中部及其余区域.

**2.1.3 水化学要素分区结果** 水化学要素的 SOFM 神经网络分区结果表明, 当水化学要素分为 5 类(I~V)时, 权值向量距离最小(0.15), 淀区的差异最大(图 3-a). 白洋淀 TN 和 TP 质量浓度空间分布呈现由西至东逐渐降低的趋势, 深水区(枣林庄) TN 与 TP 质量浓度比值最小, 入淀河流入口处最大.

**2.1.5 气象要素及人类活动干扰指数分区结果** 气象要素的 SOFM 神经网络分区结果显示, 淀区分为 5 个区域时(图 4-a), 权值向量距离最小(0.64). 且根据气象指标空间分布情况可知, 白洋淀气温呈由东至西逐渐升高趋势, 降水呈由东至西逐渐下降趋势.

人类活动干扰指数 SOFM 神经网络分区结果显示, 当淀区划分为 4 个区域时, 权值向量距离最小(0.039), 差异化最大, 其中, 孝义河入淀(淀区西南部)区域人类干扰最强, 藻竿淀及烧车淀区域呈梯级分区, 人类活动干扰次之, 淀区中部人类活动扰动最小(图 4-b).

**2.2 白洋淀淀区水生态功能分区** 根据水生态功能分区各个指标的分类结果及区域共轭性原则, 结合白洋淀生态功能定位, 将白洋淀分为 4 个区域, 分别为核心湿地保护区、湿地生态缓冲区、入淀河流缓冲区和生态屏障区(图 5).

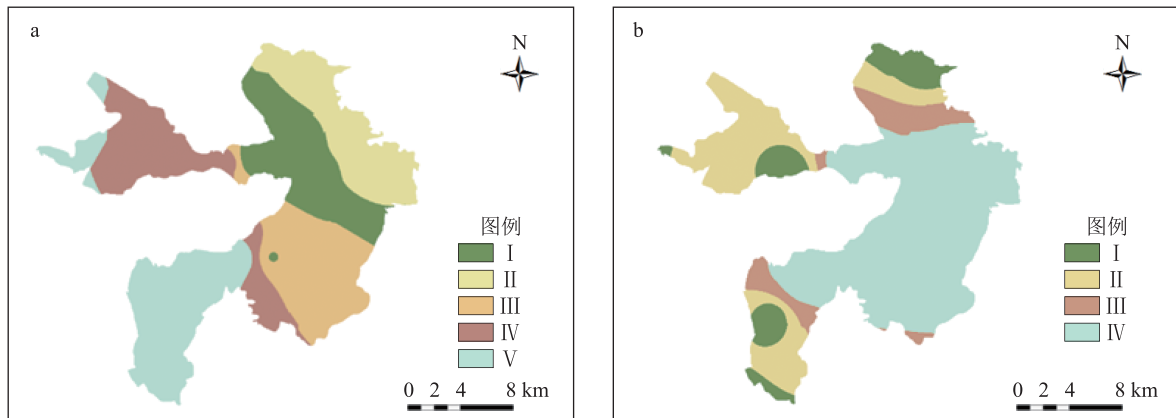


图 4 气象要素 (a) 及人类活动干扰指数 (b) 的 SOFM 聚类结果

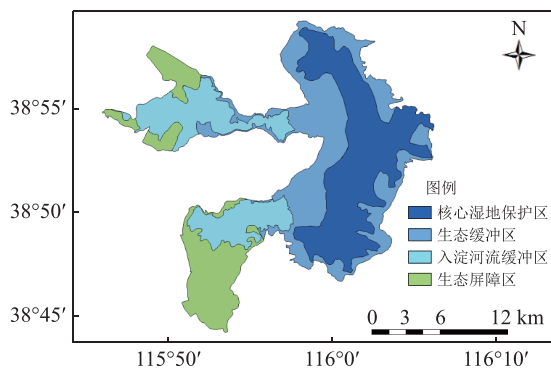


图 5 白洋淀淀区水生态功能分区结果

白洋淀核心湿地保护区占地 9763.81  $\text{hm}^2$ , 为淀区总面积的 31.83%, 包含烧车淀、枣林庄、光淀张庄、圈头和采蒲台等区域。核心湿地保护区的主导功能是依托天然湿地资源, 维持生物多样性, 保护生物栖息地。该区的生态环境保护与建设的重点是: 建立多水源补水机制, 合理调控淀泊生态水文过程, 维持白洋淀正常水位 6.5~7.0 m, 提升淀泊水环境质量, 将白洋淀水质逐步恢复到 III~IV 类, 加强湿地保护和湿地生态修复, 禁止侵占湿地进行生产性开发, 努力改善湿地生态环境, 为水生生物和湿地生物创造一个良好的栖息地。

白洋淀生态缓冲区占地 9538.59  $\text{hm}^2$ , 为淀区总面积的 31.10%, 包含端村、捞王淀、寨南和王家寨等区域。主导功能是水源涵养、调蓄洪水, 保障并维持淀区内正常生产生活用水安全。该区生态环境保护与建设重点是: 通过种植芦苇、香蒲等大型水生植物, 建设人工湿地项目, 增加区域水源涵养能力, 以减轻外来污染对淀区的直接影响; 继续实施退田还淀整治战略, 巩固和扩大退田还淀治理成果, 加强蓄洪坑建设和主要行洪通道的清障工作, 提升淀区堤防防洪等级, 恢复白洋淀调蓄洪水的功能; 摒弃传统的旅游模式, 推进以自然景观和人文景观为主导的

生态旅游。

白洋淀入淀河流缓冲区占地 5953.15  $\text{hm}^2$ , 为淀区总面积的 19.41%, 主要涉及藻竿淀、府河及孝义河入淀周围的浅水区及芦苇草地。主导功能是缓解外来水源对淀区水生态的直接冲击, 初步净化水质和驱散外来物种影响, 并包含水土保持功能。本区建设重点是规范保护区过渡区域的开发建设行为, 进行河道清淤工作, 种植芦苇、香蒲等大型水生植物, 恢复原有湿地面积, 缓解外来水源对白洋淀淀区带来的生态影响。

白洋淀生态屏障区占地 5417.53  $\text{hm}^2$ , 为淀区总面积的 17.66%, 主要涉及淀区西南部的耕地和裸地, 以及藻竿淀周边耕地区域。主导功能是水土保持, 发展现代生态农、牧、渔业。该区域水土保持条件好, 农业种质资源丰富, 居民住宅村庄化, 庭院经济发达, 农田林网成型, 是淀区重要的农、林生产基地和人口聚集地。本区建设重点是严格规范基本农田面积, 加强农业基础设施和农业生态环境建设, 完善区域排灌等生产服务体系, 改善农业生产条件。积极开发利用现代农业新技术, 提高农药、化肥的使用效率, 加快发展循环经济农业, 减少农业面源污染。大力发展庭院果园、庭院苗圃和庭院养殖等特色庭院经济。

可将核心湿地保护区、湿地生态缓冲区和入淀河流缓冲区共同划定为生态红线保护区, 它们对维护自然生态系统的完整性、区域生态资源可持续发展、保护珍稀濒危动植物物种及其栖息地、保护重要水源地、保存自然文化遗产和保障人类生存发展的生态安全阈值起着重要的支持作用。

### 3 讨论

3.1 考虑生态系统服务的水生态功能分区更具科学性与优势 传统分区研究中, 多重点考虑水体中污

染物种类、质量浓度以及水质类型进行水环境功能区划,更多考虑的是水环境容量大小及水体水质管理目标,对水体的自然特征、水生态特征及水生态系统的完整性考虑不足.完全基于土地利用类型的生态区划方法,则过度依赖于遥感影像的精度、年份季节及人工解译过程,较难实现河流、湖泊等较小尺度上的精细化分区,其缺乏对水生态服务及功能等方面的考虑.本研究以白洋淀淀区为案例,对其进行水生态功能分区,白洋淀植被、水面、台田等景观格局多样,沟壑纵横使得各个小淀面积、水深差异明显,水质、水生态管理较为复杂,因此在水体自然、生态、水质特征的基础上,进一步耦合了水生态系统服务功能对白洋淀进行生态功能分区,使得分区结果更具科学性.由于生态系统服务功能可从支持、调节、文化及供给等多角度揭示生态系统的空间差异性,有助于确定各区域的主导功能,明晰淀区不同区域的生态保护区域和方向.与单一考虑白洋淀水源涵养功能或生态红线划定的分区结果<sup>[16-17]</sup>相比,本研究进一步将淀区划分为核心湿地保护区、湿地生态缓冲区、入淀河流缓冲区和生态屏障区,为白洋淀淀区实现精细化资源管理提供可能.相比仅仅考虑水环境功能区划研究<sup>[18]</sup>,本文构建的分区指标体系中不仅考虑了水文、水环境、水生生物、人类活动等单方面要素,而且综合考虑了生态系统服务功能,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,使分区结果更加精确,有助于提升淀区精细化管理与可持续发展能力.

### 3.2 湖泊水生态功能分区有利于提升精细化管理

湖泊水生态功能分区是实现湖泊精细化管理的重要环节,是实现分布式管理的基础.本文将白洋淀淀区水域划分为核心湿地保护区、湿地生态缓冲区、入淀河流缓冲区和生态屏障区 4 类水生态功能区域.4 类水生态功能区域的主导功能不同,水量和水质也有一定差异:核心区主要保障水环境质量,维持淀区生物多样性;生态缓冲区保障水源涵养、调蓄洪水,及维持淀区内正常生产生活用水安全;入淀河流缓冲区是缓解外来水源对淀区水生态的直接冲击,初步净化水质和驱散外来物种影响;而生态屏障区主要是水土保持,发展现代生态农、牧、渔业.因此,对淀区进行水生态功能分区,有利于水资源的合理配置,实现长效生态修复及水生态系统精细化管理.实行水生态功能分区后,为建立与实施高效利用保护水资源的各种措施法规提供理论支撑,为实现水资源可持续利用提供可能;同时为构建具有空

间尺度的生态系统管理框架,为生态系统实行分区域精准修复、识别生态系统不同阶段压力源、进行长效生态修复水生态系统差别化管理和水质目标管理提供支撑.

## 4 结论

通过构建基于 SOFM 神经网络的水生态功能分区方法,并应用于白洋淀淀区的水生态功能区划,得到以下结论:

1) 将人类活动要素、生态系统服务等要素纳入白洋淀淀区生态功能分区指标体系,通过 SOFM 神经网络获得各要素间权重,有利于克服权重确定的主观性,提高分类判断科学性和可靠性,为水生态功能分区方法创新提供了思路.

2) 将白洋淀分为核心湿地保护区、湿地生态缓冲区、入淀河流缓冲区和生态屏障区等 4 个区域.其中核心湿地保护区占地 9763.81 hm<sup>2</sup>;湿地生态缓冲区占地 9538.59 hm<sup>2</sup>,主要为浅水区及芦苇草地;入淀河流缓冲区占地 5953.15 hm<sup>2</sup>,主要为入淀河流周围浅水区及芦苇草地;湿地生态屏障区占地 5417.53 hm<sup>2</sup>,主要为位于淀区西南部的耕地和裸地,及藻管淀周边耕地.

3) 本研究结果可为进一步开展白洋淀的分区域精准修复、压力源识别、水质管理等提供科学支撑,促进白洋淀水域相融、蓝绿呼应、生态宜居的发展格局形成.

## 5 参考文献

- [1] 李艳梅,曾文炉,周启星.水生态功能分区的研究进展[J].应用生态学报,2009,20(12):3101
- [2] 周晨,喻理飞,蔡国俊,等.草海高原湿地湖泊水质时空变化及水质分区研究[J].水生学杂志,2016,37(1):24
- [3] 彭兆亮,胡维平.基于水生态改善的太湖分区分时动态水质目标制定方法[J].湖泊科学,2019,31(4):988
- [4] 傅伯杰,刘国华,陈利顶,等.中国生态区划方案[J].生态学报,2001,21(1):1
- [5] 陈龙,谢高地,张昌顺,等.澜沧江流域典型生态功能及其分区[J].资源科学,2013,35(4):816
- [6] 樊灏,黄艺,曹晓峰,等.基于水生态系统结构特征的滇池流域水生态功能三级分区[J].环境科学学报,2016,36(4):1447
- [7] 高俊峰,高永年,张志明.湖泊型流域水生态功能分区的理论与应用[J].地理科学进展,2019,38(8):1159
- [8] 许杨,纪道斌,何金艳,等.基于生态修复治理下的茅洲河流域生态分区[J].三峡大学学报(自然科学版),2020,42(4):8
- [9] 高喆,曹晓峰,黄艺,等.滇池流域水生态功能一二级分区

- 研究[J]. 湖泊科学, 2015, 27(1): 175
- [10] 赵雪霞, 于鲁冀, 王燕鹏. 清渭河流域(许昌段)水生态环境功能分区指标体系构建[J]. 水利水电技术, 2018, 49(9): 162
- [11] 高俊刚, 吴雪, 张懿铨, 等. 基于等级层次分析法的金沙江下游地区生态功能分区[J]. 生态学报, 2016, 36(1): 134
- [12] 牛泽鹏, 王晓峰, 罗广祥, 等. 基于SOFM网络的西藏自治区流域尺度生态功能分区[J]. 水土保持通报, 2020, 40(4): 116
- [13] 李慧蕾, 彭建, 胡熠娜, 等. 基于生态系统服务簇的内蒙古自治区生态功能分区[J]. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2657
- [14] 马程, 李双成, 刘金龙, 等. 基于SOFM网络的京津冀地区生态系统服务分区[J]. 地理科学进展, 2013, 32(9): 1383
- [15] 刘娅, 朱文博, 韩雅, 等. 基于SOFM神经网络的京津冀地区水源涵养功能分区[J]. 环境科学研究, 2015, 28(3): 369
- [16] 王晶晶, 迟妍妍, 许开鹏, 等. 京津冀地区生态分区管控研究[J]. 环境保护, 2017, 45(12): 48
- [17] 李倩, 汪自书, 刘毅, 等. 京津冀生态环境管控分区与差别化准入研析[J]. 环境影响评价, 2019, 41(1): 28
- [18] 赵英魁, 张秀清, 马大明, 等. 白洋淀功能区划分原则[J]. 环境科学, 1995(1): 40
- [19] 朱金峰, 周艺, 王世新, 等. 白洋淀湿地生态功能评价及分区[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 459
- [20] 李博, 孟庆庆, 赵然, 等. 基于水生态功能分区的流域水环境监测与评价研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(12): 110
- [21] 董哲仁. 论水生态系统五大生态要素特征[J]. 水利水电技术, 2015, 46(6): 42
- [22] 陈泯融, 邓飞其. 一种基于自组织特征映射网络的聚类方法[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(12): 1864
- [23] 彭建, 胡熠娜, 吕慧玲, 等. 基于要素-结构-功能的生态功能分区: 以大理白族自治州为例[J]. 生态学杂志, 2016, 35(8): 2251
- [24] 江志猛, 陈文波, 郑蕉. 基于SOFM神经网络的土地整治时空配置分区研究[J]. 中国土地科学, 2019, 33(11): 89
- [25] 杨薇, 孙立鑫, 王烜, 等. 生态补水驱动下白洋淀生态系统服务演变趋势[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1077
- [26] 付显婷, 杨薇, 赵彦伟, 等. 白洋淀浮游动物群落结构与水环境因子的关系[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1271

## Eco-functional regionalization of Baiyangdian Lake water system according to self-organizing feature map of neural networks

TIAN Yiyuan<sup>1)</sup> SUN Lixin<sup>1)</sup> YANG Wei<sup>1,2)†</sup>

(1) School of Environment, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

2) State Key Laboratory of Water Environment Simulation, 100875, Beijing, China)

**Abstract** Under constant pressure for improvement in water quality and restoration of water ecology, rational eco-functional regionalization plays an important role in resources utilization and management promotion of lakes. An index framework for Baiyangdian Lake was developed here aiming at eco-functional regionalization using self-organizing feature map( SOFM), taking into account hydrological, meteorological, chemical indicators, human disturbances, and evaluation of ecosystem services. Consequently, Baiyangdian Lake was divided into 4 functional zones: core protection zone, ecological buffer zone, ecological buffer zone of upstream rivers, ecological barrier zones, each area measured 9763.81, 9538.59, 5953.15, and 5417.53 hm<sup>2</sup>, accounting for 31.83%, 31.10%, 19.41% and 17.66% of the total lake area respectively. This eco-functional regionalization reflected fully lake spatial heterogeneity. This work will support identification of pressure sources in different regions and enable efficient administration of the lake water quality.

**Keywords** eco-functional regionalization; SOFM neural network; ecosystem services; Baiyangdian Lake