

# 湖北省鄂州市湿地净初级生产力及固碳释氧量估算

詹长根, 吴金涛

(武汉大学 资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** [目的] 估算湖北省鄂州市净初级生产力(net primary productivity, NPP)以及固碳释氧量,探索一种适用于中小尺度上,涉及大量水体的湿地 NPP 估算方法,为制定相关湿地生态保护政策提供更为准确的数据支撑。[方法] 构建湿地分类模型,将鄂州市湿地划分为浅水地表湿地与深水水体湿地。对浅水地表湿地,采用基于遥感影像的光能利用率模型进行 NPP 估算;对深水水体湿地,引入叶绿素 a 与生物量指标,构建回归模型,对湿地水体 NPP 进行估算。汇总两者的估算结果,得到鄂州市湿地 2020 年度 NPP 总量及其空间分布和固碳释氧量。[结果] 鄂州市湿地 2020 年度净初级生产力总量为  $2.99 \times 10^5$  t(以 C 计),CO<sub>2</sub> 的固定量为  $4.87 \times 10^5$  t,O<sub>2</sub> 的释放量为  $3.59 \times 10^5$  t,整体上呈现南高北低的分布格局。[结论] 采用湿地分类的方法,对深水水体湿地 NPP 单独进行估算,弥补了基于遥感影像的模型估算方法中对湿地水体部分估算的不足,使估算结果更接近湿地真实水平,采用的模型方法可为类似涉及水体的湿地 NPP 估算工作提供一种新思路和方法。

**关键词:** 净初级生产力; 固碳释氧; 光能利用率模型; 叶绿素 a; 生物量

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2022)05-0321-08

**中图分类号:** Q948.1, Q146

**文献参数:** 詹长根, 吴金涛.湖北省鄂州市湿地净初级生产力及固碳释氧量估算[J].水土保持通报,2022,42(5):321-328.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2022.05.039; Zhan Changgen, Wu Jintao. Estimation of net primary productivity, carbon fixation, and oxygen release in a wetland of Ezhou City, Hubei Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(5):321-328.

## Estimation of Net Primary Productivity, Carbon Fixation, and Oxygen Release in a Wetland of Ezhou City, Hubei Province

Zhan Changgen, Wu Jintao

(School of Resources and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

**Abstract:** [Objective] The net primary productivity (NPP), carbon fixation, and oxygen release in a wetland of Ezhou City, Hubei Province were estimated, and a method for estimating wetland NPP on small and medium-scale wetlands involving large areas of water was established in order to provide accurate data support for related policies. [Methods] A wetland classification model was constructed to divide Ezhou wetlands into surface wetlands and water wetlands. Remote sensing data and a light energy utilization model were used to estimate NPP for surface wetlands. For water wetlands, chlorophyll a and biomass were introduced as indicators to build a regression model to estimate NPP. The annual total NPP in 2020 was obtained by summarizing the results for both surface wetlands and water wetlands at the same time, and the spatial distribution of NPP, carbon fixation, and oxygen release were obtained. [Results] The annual total NPP was  $2.99 \times 10^5$  tons of carbon, the fixation of CO<sub>2</sub> was  $4.87 \times 10^5$  tons, and the release of O<sub>2</sub> was  $3.59 \times 10^5$  tons. The overall spatial distribution pattern indicated that NPP was high in southern part of the study region and low in the northern part. [Conclusion] A wetland classification model was used to estimate the NPP of water wetlands separately from the NPP of surface wetlands. This method made up for the deficiencies arising from estimating NPP only with a light energy utilization model, and provided estimation results that were closer to observed values for wetlands. This model and method is applicable to similar wetland NPP estimation research involving water bodies.

收稿日期:2022-04-12

修回日期:2022-06-19

资助项目:湖北省湿地、水资源专项调查试点项目(ZQLY-DL-20210511FW)

第一作者:詹长根(1964—),男(汉族),江西省临川市人,博士,教授,主要从事现代地籍理论与方法、自然资源调查监测方面研究。Email:290477215@qq.com。

通信作者:吴金涛(1998—),男(汉族),广西壮族自治区南宁市人,硕士研究生,研究方向为自然资源调查监测。Email:woodwartz@foxmail.com。

**Keywords: net primary productivity; carbon fixation and oxygen release; light energy utilization model; chlorophyll a; biomass**

近年来,随着中国自然资源统一调查监测评价体系的逐步建立与完善,自然资源部开展了许多对林、草、水、湿、海等各类资源的调查评估工作,旨在利用详细的数据资料,统筹山水林田湖草系统治理,为生态修复及绿色发展工作提供依据。湿地作为全球三大生态系统之一<sup>[1]</sup>,同时参与大气碳循环及水循环,对生态环境具有不可或缺的重要意义。由于湿地的环境敏感性,湿地中的各项指标能够高效地反映当地的生态环境状况,其中植被净初级生产力(net primary productivity, NPP),表征着湿地中的生物存量及其在碳循环中的固碳释氧能力<sup>[2]</sup>,是反映湿地生态环境及判定碳汇量的重要指标。NPP 的具体定义为,单位面积内的植物由光合作用生产的有机物总量减去自身呼吸作用所消耗的有机物后的剩余部分<sup>[3]</sup>,通常会以年作为时间单位进行统计。高效、准确地估算湿地净初级生产力,能为制定绿色发展规划,评价湿地环境状态起到重要的作用。

针对湿地净初级生产力的估算,国内外学者在研究中常采用的模型主要有生态系统过程模型<sup>[2]</sup>、经验统计模型<sup>[1]</sup>,以及光能利用率模型<sup>[4]</sup>。生态系统过程模型通过模拟植被的整个生长过程来实现 NPP 估算,涉及到的参数众多,需要对研究区域中植被的生长、呼吸、凋亡等一系列状态进行全面观测,存在模型复杂度高,数据获取难度大的局限性。经验统计模型主要通过建立气候条件与植物干物质量之间的拟合模型来实现 NPP 估算,该模型重视拟合结果而忽略了植被生物特性等其他因素,且存在对于中小尺度范围估算精度低的局限性。光能利用率模型,最早由 Monteith 提出<sup>[5]</sup>,他认为植被吸收的光合有效辐射(APAR)与其净初级生产力(NPP)之间具有强相关性,在此基础上利用相关算法模型,如 CASA(carnegie-ames-atanford approach)模型<sup>[6]</sup>,结合遥感影像及气象、土壤等数据对湿地净初级生产力进行估算<sup>[7]</sup>。相较于前两种模型方法,光能利用率模型中的相关参数大多来自于遥感数据,省去了大量的野外观测步骤,估算结果精度高,且估算方法具有较好的可移植性,能够应用于各种范围的研究区域。本文对研究区鄂州市湿地进行净初级生产力估算时,也采用了光能利用率模型的方法,但在前期研究中发现,采用该模型对中小尺度的湿地 NPP 进行估算时,由于鄂州市河流湖泊众多,水面的电磁辐射特征与陆地植被不同,常用的算法估算的湿地水体中的 NPP 值严重偏低,一些数据产品中甚至会直接用特殊值标出该地为水

体无法估算 NPP 值,进而造成了对涉及水体湿地的植被生长状态以及固碳释氧能力的低估。

针对这一问题,为了能准确高效地估算鄂州市湿地 NPP,本文提出湿地 NPP 分类估算模型方法,将研究区域湿地分为“浅水地表湿地”与“深水水体湿地”两种类型,在充分保留光能利用率模型精度优势的基础上,引入叶绿素 a(Chlorophyll a)与生物量(biomass)数据,针对前期结果中偏低的湿地水体部分重新估算 NPP 值,对原有的模型方法改进补充,使得湿地的净初级生产力估算结果更接近真实情况,为中国自然资源及环保部门进行的相关调查监测与规划工作提供更为准确的数据支撑,同时也为探索湿地净初级生产力的估算方法提供一种新的思路。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

鄂州市位于湖北省东南部,长江中游南岸,处于 114°32′—115°05′E, 30°00′—30°06′N 之间,属于亚热带季风气候过渡区,光照充沛,降雨充足,年平均气温为 17℃,多年平均降雨量 1 331.9 mm。地势东南高,西北低,中部低平,由梁子湖、鸭儿湖、三山湖横贯鄂州市腹地,形成了滞水冲积平原,河港纵横交叉,江湖相通,湖泊众多,有大小湖泊共 133 个,水库 36 座,其中鸭儿湖、三山湖、红莲湖等 7 hm<sup>2</sup> 以上湖泊 78 个,水域面积达 254.83 km<sup>2</sup>,其中梁子湖湿地和洋澜湖湿地为湖北省重要湿地。同时还存在着大量零散的水田、坑塘、沟渠等人工湿地。鄂州市湿地分布密集,水体众多,且河流、湖泊水体面积大,覆盖范围广。

### 1.2 模型构建与数据来源

在前期研究中,直接采用光能利用率模型估算,得到的净初级生产力估算结果分布存在大量的空缺(图 1a),研究发现这些空缺大多为鄂州市内大型的湖泊水库等水体湿地,结果表明该方法在针对中小尺度中涉及水体的湿地 NPP 估算时效果不佳。为了弥补这一缺陷,本文构建 1 种湿地 NPP 分类估算模型,针对中小尺度湿地中地表与水体植被的特征差异,采用两种估算方法,分别对湿地地表植被 NPP 和湿地水体中浮游藻类 NPP 进行估算,将两种方法估算出的结果进行统一汇总后,得到湿地总体净初级生产力。该模型构建的关键在于对湿地水体与地表进行分类界定。

本文中根据研究区域遥感影像提取有关信息。

去除非湿地的部分,得到鄂州市的湿地图斑矢量数据,湿地面积共 76 409 hm<sup>2</sup>。这些湿地主要以永久性淡水湖泊、永久性河流、坑塘、水田湿地为主。参考中国林业部门发布的《湿地分类》中的分类依据,结合鄂州市当地重点湖泊保护名录,以多年平均水深是否达到 6 m 为主要划分依据,将研究区域内的湿地分为两类,分别定义为“浅水地表湿地”和“深水水体湿地”。

其中浅水地表湿地为水深低于 6 m 且不属于湖泊保护名录中,主要为水田、沟渠、坑塘湿地;深水水体湿地为水深大于 6 m 或包含在湖泊保护名录中,主要为湖泊、河流、水库等大水体湿地。由此得到鄂州市湿地分布范围(图 1b),分类结果中深水水体湿地与前期结果中的空缺部分存在大量重合,符合本文构建模型方法的初衷。

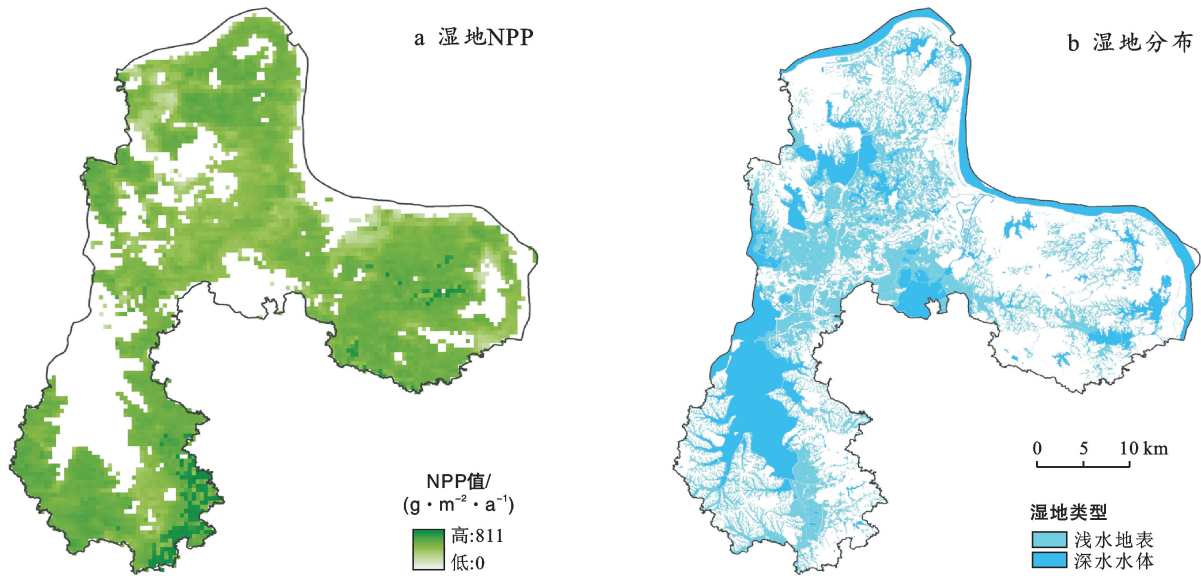


图 1 鄂州市湿地净初级生产力(NPP)前期结果与鄂州市湿地分布范围

对研究区域内的湿地进行分类后,针对浅水地表湿地,重新采用光能利用率模型,选用来自于 Terra 卫星的数据 ([https://lpdaac.usgs.gov/products/mod17\\_a3\\_hgfv006/](https://lpdaac.usgs.gov/products/mod17_a3_hgfv006/)) 对融合后的浅水湿地图斑进行 NPP 估算;针对深水水体湿地,由于湿地水体中参与大气碳循环和光合作用的主体为各种浮游藻类,故在模型中引入了叶绿素 a(chl a) 和生物量(biomass)两项指标用于构建回归分析模型,这两项指标常用于水质环境监测相关研究中,模型中所采用的叶绿素 a 与生物量数据是通过在研究区域水体中实地采样送检后得到。将两类湿地的估算结果汇总得到最终结果。

1.3 估算方法

1.3.1 光能利用率模型估算方法 根据研究区域湿地分类结果,浅水地表湿地部分植被较为茂盛,对电磁辐射的反射特征明显,通过遥感影像可以清晰地观察到其与深水水体湿地的不同。由 Monteith 提出的光能利用率理论<sup>[5]</sup>中认为,植被净初级生产力(NPP)与植被所吸收的光合有效辐射(APAR)之间呈线性相关,两者之间的比值系数即为光能利用率  $\epsilon$ , 公式为:

$$NPP=\epsilon\times APAR \tag{1}$$

光能利用率  $\epsilon$  主要受地表的气象特征所影响,通常结合遥感影像与当地气象数据进行估算。植被所吸收的光合有效辐射(APAR)表现为植被对红外和近红外波段电磁波的反射特征<sup>[8]</sup>,是研究区光合有效辐射(PAR)与植被冠层对光合有效辐射的吸收比例(FPAR)的乘积,公式为:

$$APAR=PAR\times FPAR \tag{2}$$

PAR 由当地太阳总辐射与气象数据结合,利用遥感数据观测并计算得到,FPAR 与不同种类的植被对光能的吸收能力有关,同时与归一化植被系数(NDVI)存在线性关系<sup>[9]</sup>,公式为:

$$FPAR=\frac{NDVI-NDVI_{min}}{NDVI_{max}-NDVI_{min}}\times (FPAR_{max}-FPAR_{min})+FPAR_{min} \tag{3}$$

式中:NDVI 最小和最大值由研究区内的 NDVI 值经统计后的 5%和 95%累计百分位值来确定,FPAR 的最大与最小值分别取 0.05,0.95。

本文中所选用的 MOD17A3 HGF 数据,是由一种基于总初级生产力(GPP)的算法计算得到的。该算法的核心是将光能利用率模型进行改进,从理想状



态下的直接得到 NPP 值转换为将模型应用于每日 GPP 值的预测<sup>[10]</sup>,即:

$$GPP=\epsilon\times APAR \tag{4}$$

之后再估算植被维持生长和呼吸的消耗量(MR),由总初级生产力减去生长呼吸消耗量得到植被净初级生产力,公式为:

$$NPP=GPP-MR \tag{5}$$

以 8 d 为一个数据组,根据以往研究得到的经验模型,该数据集制定有参考的生物群落属性查找表(BPLUT)<sup>[11]</sup>,从中对应该像素的生物群落,选出其光能利用率参数  $\epsilon$ ,计算得到该像素 8 d 的累计 GPP 值,将结果除以 8 后得到该时间段内的每日 GPP 值。每日 MR 值可以根据 MODIS 卫星遥感影像估算的叶片面积指数(LAI)<sup>[12]</sup>以及该像素植被的比叶面积(叶片的单面面积与其干重之比,简称 SLA)计算得到,SLA 值同样可以从 BPLUT 表中获取,公式为:

$$MR=LAI/SLA \tag{6}$$

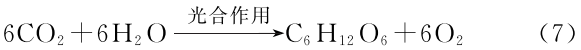
由 GPP 值减去 MR 值得到每日的 NPP 估算值,将一年内的结果累积,得到该年的 NPP 估算结果。

1.3.2 叶绿素 a 与生物量回归估算方法 针对水位较深的河流湖泊等水体湿地,使用光能利用率模型的方法,对估算其净初级生产力的效果不佳,原因在于常应用于陆地的模型方法,是根据地表植被叶片、根茎等的光谱反射特征为基础设计的<sup>[13]</sup>,直接应用于湿地水体中会使结果产生较大误差,因此需要采用一种替代的方式来估算湿地水体净初级生产力。

与地表湿地不同,在湿地水体中参与大气碳循环和光合作用的主体为各种浮游藻类,它们也是河流与湖泊生态系统中最主要的初级生产者<sup>[14]</sup>,因此测量湿藻类的生物量(biomass)成为了反映湿地水体净初级生产力的关键指标。测量藻类生物量的方法通常有细胞计数法<sup>[15]</sup>和叶绿素 a 含量测定法<sup>[16]</sup>,细胞计数法工作量大,并且存在人工误差,其结果与 NPP 之间的转换较为困难,故本研究中采用叶绿素 a 含量测定法。以往的研究表明,藻类生物量与叶绿素 a 呈现显著的正相关关系<sup>[17]</sup>,研究中通常采用线性模型拟合两者之间的关系。本研究中通过在鄂州市湿地水体中实地取样,测量其叶绿素含量,结合相关研究<sup>[18]</sup>得到回归模型,计算出取样点的藻类生物量,再经过数据转换后得到 NPP 值,通过插值计算,得到深水体湿地的净初级生产力。

1.3.3 固碳释氧量估算方法 估算得到鄂州市湿地净初级生产力,根据对应的湿地图斑面积统计后计算

年度总量,将结果用于湿地的固碳释氧量估算。植被在参与大气碳循环的过程中,通过自身光合作用,吸收水分和空气中的二氧化碳,同化为自身的营养物质(研究中多以葡萄糖等碳水化合物表示),同时释放氧气,其化学方程式表示为:



经过物质的量与相对分子质量转换,换算净初级生产力结果<sup>[19]</sup>,每生产 1.00 g 的干物质,能够固定 1.63 g 的 CO<sub>2</sub> 和释放 1.20 g 的 O<sub>2</sub>。以此比例关系来估算鄂州市湿地 2020 年度固碳释氧量。

## 2 结果与分析

### 2.1 浅水地表湿地 NPP 值估算

针对浅水地表湿地,本文中使用了 2020 年度的 MOD17A3 HGF 数据,以反映鄂州市湿地近期的净初级生产力状况。首先对数据进行预处理,使用软件对其进行重投影<sup>[20]</sup>,再将影像转换为 WGS84 坐标系,最后以鄂州市行政界线范围对栅格数据进行裁剪,对比提取后剔除异常值。将所得的处理结果乘以该数据产品的比例系数 0.000 1<sup>[21]</sup>,再将单位转换为研究中常用的 g/(m<sup>2</sup>·a)(以 C 计)。

由于鄂州市浅水地表湿地细碎图斑较多,而数据中每个栅格像元分辨率为 500 m,即覆盖面积约为 25 hm<sup>2</sup>,大量水田、坑塘等零散图斑面积不足 1 hm<sup>2</sup>,直接进行叠加分析将会达不到软件算法中的上图面积,因而被忽略,造成实际结果偏低。为了保证估算结果的准确性,同时又能充分体现空间差异,按照湿地坐落位置的临近关系对图斑进行融合处理,最终将鄂州市浅水地表湿地图斑整理为 340 个。图斑面积与数量适中后,进行区域统计,得到每一块浅水地表湿地图斑涉及到的栅格属性表(部分见表 1),以图斑平均值作为 NPP 估算值,最终得到鄂州市浅水地表湿地 2020 年度 NPP 估算结果(图 2)。

表 1 鄂州市部分湿地净初级生产力栅格数据

图斑 编码	面积/ hm <sup>2</sup>	涉及 栅格/个	净初级生产力栅格数据/ (g·m <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> ,以 C 计)		
			平均值	标准差	总和
0	166.8	4	296.7	296.76	1 187
1	135	7	474	195.76	3 318
2	94.1	2	511	4	1 022
3	17	1	549	0	549
4	8.1	1	300	0	300
5	21.6	10	482.7	78.55	4 827
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
339	366.8	16	453.06	35.48	7 249



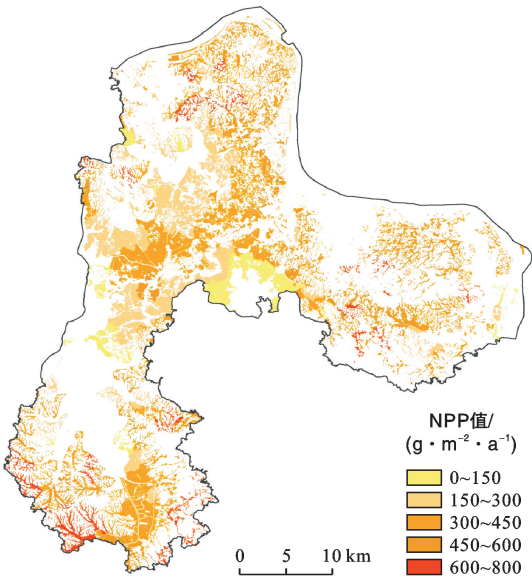


图 2 鄂州市浅水地表湿地 NPP 估算结果

2.2 深水水体湿地 NPP 值估算

针对深水水体湿地,选用测量叶绿素 a 及生物量的方式来估算 NPP 值。有关叶绿素 a 的测定,在许多环境监测相关的研究中已经得到广泛应用,技术相对成熟<sup>[22]</sup>。本文中采用实地取样的方式,根据鄂州市湿地分类确定的深水水体湿地分布范围,共设立 28 个监测点,均匀分布于各主要湖泊、水库及周边流域中,其中再均匀选取 10 个监测点进行额外采样,采用密封隔绝阳光的方式运送样本,该部分样本仅用于检测生物量。考虑到不同藻类之间的优势种群季节性对结果的影响,根据其他研究者对长江流域周边浮游藻类的研究结果<sup>[23]</sup>,选择在 9—10 月进行取样检测,以避免各藻类的优势种群时间段,同时正处于当地夏秋交替时节,藻类生物量接近全年平均

水平,其结果能较好地代表生物量年度值。具体检测过程中,为了便于对水体湿地的环境状态做进一步研究分析,参照《地表水资源质量评价技术规程》(SL395-2007),除了测量叶绿素 a 之外,还选取总磷、总氮、高锰酸钾指数和透明度 4 项指标,采用多因子评价的方法计算营养状态指数 EI,以反映水体的营养状态分级。

$$EI = \frac{\sum_{n=1}^N E_n}{N}$$
 (8)

式中: $E_n$  为各项指标分值; $N$  为指标个数。对监测点样本中抽取的 10 个测站样本进行生物量检测,检测结果见图 3。

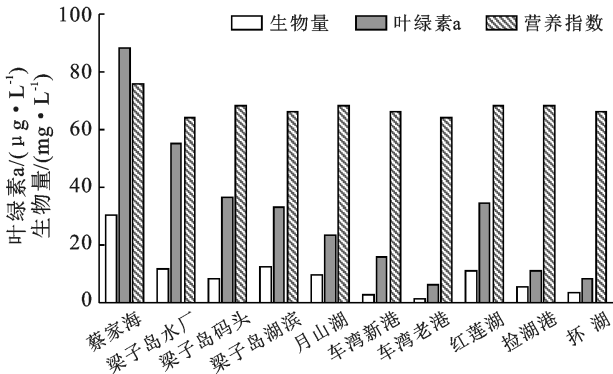


图 3 鄂州市深水水体湿地 NPP 值抽样检测结果

在以往研究中,常采用回归方程来建立起湿地水体中叶绿素 a(chla)与藻类生物量(B)的关系<sup>[18]</sup>,横向对比其他研究者的拟合结果(表 2),其中大部分学者选用的是线性回归方程,回归曲线中叶绿素 a 与生物量呈现显著相关,拟合精度较好;也有少部分学者选择了对数回归方程,但相关性结果不佳。

表 2 鄂州市湿地水体中叶绿素 a 与生物量关系研究

研究者	试验地	回归方程	相关系数
王伟等 <sup>[24]</sup>	华南沿海地区水库	$\ln(\text{chla}) = 0.279 \ln(B) + 2.108$	0.24
孙凌等 <sup>[25]</sup>	新开湖	$\text{chla} = 1.64 \times B + 18.53$	0.85
Desortova 等 <sup>[26]</sup>	Hubenov(水库)	$\text{chla} = 3.2 \times B + 1.93$	0.83
Kalff <sup>[27]</sup>	Lake Naivasha(湖泊)	$\text{chla} = 2.02 \times B + 4.82$	0.78

因此,本文选用线性回归的方式,将同时进行了生物量与叶绿素 a 含量检测的 10 个监测点样本生物量与其叶绿素 a 含量进行相关性分析,得到二者的回归曲线(图 4),相关系数  $R^2$  为 0.89, $p$  值为 0.019,回归方程为:

$$\text{chla} = 2.89 \times B + 3.36$$
 (9)

从回归曲线可以看出, $p < 0.05$ ,鄂州市水体湿地中的生物量与叶绿素 a 呈现显著线性相关,使用叶绿

素 a 检测结果来拟合计算生物量具有一定的可行性。根据式(9)的回归方程将其余 18 个监测点得到的叶绿素 a 数据拟合为藻类生物量数据。此时生物量的单位为 mg/L,结合每个监测点所处水体的多年平均水深数据,将单位体积内的生物量乘以对应的水深,得到单位水体面积中的生物量,并进行单位换算,将其转换为与 NPP 值统一的  $\text{g}/\text{m}^2$ ,用于代表年度 NPP 值,得到测算结果(表 3)。将监测点的年度净初级生

产力插值为栅格数据,再结合鄂州市水体湿地矢量范围,最终得到鄂州市深水水体湿地 2020 年度 NPP 估算结果(图 5)。

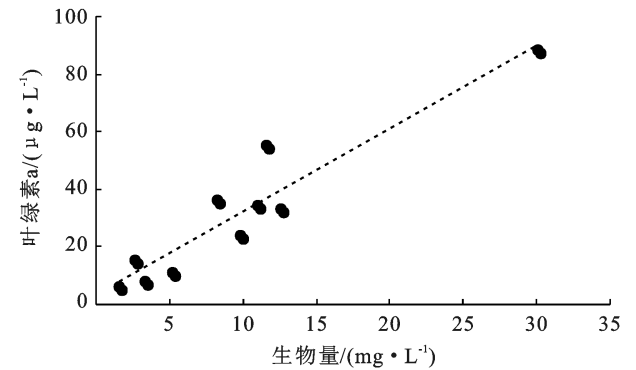


图 4 鄂州市深水水体湿地生物量与叶绿素 a 回归曲线

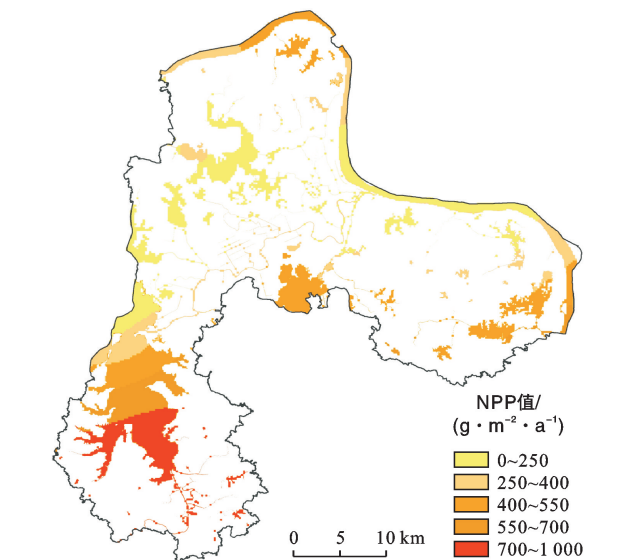


图 5 鄂州市深水水体湿地 NPP 值估算结果

表 3 鄂州市深水水体湿地叶绿素 a 与年度生物量监测点测算结果							
样 点	叶绿素 a/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	年度生物量/ ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )	营养状 态指数	样 点	叶绿素 a/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	年度生物量/ ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )	营养状 态指数
长岭码头	111	665.0	72	花马港	121	874.4	74
涂镇码头	136	817.5	70	花家湖	75	532.5	74
蔡家海	88	537.9	76	吴兴塘	111	651.0	78
梁子岛水厂	55	206.9	64	青天湖	5	7.8	50
梁子岛码头	36	147.4	68	薛家沟港	36	226.6	66
梁子岛湖滨	33	225.2	66	黄柏山港	15	72.2	70
月山湖	24	158.8	68	汀桥港	14	60.7	74
车湾新港	16	44.5	66	严家湖	82	417.0	70
车湾老港	6	25.7	64	南迹湖	110	626.8	72
红莲湖	35	198.0	68	新港河	22	110.2	60
拾湖港	11	101.8	68	黄山湖	59	312.0	66
杯 湖	8	59.7	66	石桥水库	40	443.9	64
洋澜湖	53	318.6	74	白雉山水库	36	795.5	60
山塘水库	14	63.1	60	三山湖	81	461.9	72

### 2.3 结果汇总及分析

将浅水地表湿地与深水水体湿地的 NPP 估算结果汇总,得到鄂州市湿地 2020 年度净初级生产力结果及其空间分布(图 6),将该结果与相应的湿地图斑面积相乘并进行统计,得出鄂州市 2020 年度净初级生产力总量为  $2.99\times 10^5$  t 碳,再根据式(7)所反映的比例关系,计算得到鄂州市湿地 2020 年  $\text{CO}_2$  的固定量为  $4.87\times 10^5$  t,  $\text{O}_2$  的释放量为  $3.59\times 10^5$  t(表 4)。

估算结果中,采用两种不同的方法估算出的净初级生产力范围比较接近,浅水陆地湿地 NPP 范围为  $31\sim 794\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,深水水体湿地 NPP 范围为  $97\sim 967\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,表明本文中采用的光能利用率模型和叶绿素 a 与生物量回归模型对两种湿地类型的 NPP 估算具有针对性和适用性,估算结果与预期相符,能够较好地反映湿地中的实际净初级生产力状况。

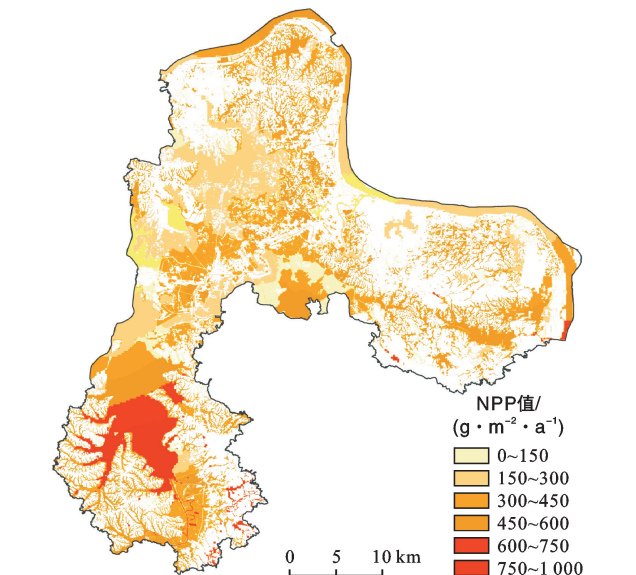


图 6 鄂州市 2020 年度净初级生产力估算结果

表 4 鄂州市湿地年度 NPP 总量及固碳释氧量

项 目	面积/hm <sup>2</sup>	NPP 总量/t	CO <sub>2</sub> 固定量/t	O <sub>2</sub> 释放量/t	比例/%
浅水地表湿地	44 797	1.68×10 <sup>5</sup>	2.74×10 <sup>5</sup>	2.02×10 <sup>5</sup>	56.19
深水水体湿地	31 612	1.31×10 <sup>5</sup>	2.13×10 <sup>5</sup>	1.57×10 <sup>5</sup>	43.81
总 计	76 409	2.99×10 <sup>5</sup>	4.87×10 <sup>5</sup>	3.59×10 <sup>5</sup>	100

NPP 空间分布特征上,鄂州市湿地植被 NPP 呈现出南北分异规律,鄂州市南部的梁子湖流域(本文中特指鄂州市属东梁子湖)周边湿地植被 NPP 明显高于鄂州市北部及东部,同时梁子湖自身也存在 NPP 由北向南递增的趋势。梁子湖湿地作为湖北省重点保护湿地,在当地的大气碳循环中发挥着重要的作用,同时也是各类野生动植物的栖息地,周边各支流、水库等湿地净初级生产力较高。鄂州市中部偏北的五四湖周边流域湿地植被 NPP 处于一个较为稳定的水平,大部分介于 200~400 g/(m<sup>2</sup>·a)之间,这片区域中除了几个较大的湖泊外,还涉及大量的水田、沟渠等用于农业生产的湿地,其中相当一部分的净初级生产力源自农作物的光合作用。鄂州市中部偏南的三山湖周边流域 NPP 呈现出明显的分层,湖泊水体湿地中估算的 NPP 结果为 450~600 g/(m<sup>2</sup>·a),且南部略高于北部;而环湖的地表湿地大多为水田,大部分低于 150 g/(m<sup>2</sup>·a)。鄂州市最北部的临长江区域中,南迹湖流域周边植被 NPP 较中部地区有所上升,南迹湖是长江冲积平原与南边垄岗地交接地带的河流拥塞湖,与长江直接相连,该结果能够反映出长江流域周边 NPP 的变化情况。在对深水水体湿地 NPP 进行估算时,由于长江鄂州市段中水流量较大,其中各项水质指标变化性强,故没有在长江中直接设置取样监测点,长江水体中的 NPP 值估算结果是由与其临近的湖泊水库的监测结果插值得到,其结果也同样反映着周边湿地的净初级生产力情况。鄂州市东部存在许多山峰,因此选取的湿地图斑大多为湖泊及支流组成的流域网,周围植被茂密,自然环境优越,湿地的净初级生产力也较中部地区有所升高,主要集中在花马湖流域周边。NPP 估算的整体结果与调研的实际情况大致吻合。

固碳释氧量与 NPP 存在比例关系,在空间分布趋势上具体相近的特征,可以从分布上看出在鄂州市南部的梁子湖、中部的三山湖以及东部的花马湖湿地流域,固碳释氧量明显比周围要高,且呈现出由中心向四周递减的趋势。原因在于这些湿地都是鄂州市重点进行保护的景观湿地公园,得益于近年来的湿地保护政策,这些湿地公园未受到大量的人工开发,其中的湿地植被以及水体都保留了其原有的生态功能。

而周围一些未划入保护区的湿地,部分用于农业与渔业生产,开发为水田、鱼塘与沟渠等人工湿地,相较于保护区内的湿地公园,固碳释氧能力有所下降。若需要进一步量化湿地固碳释氧所带来的经济效益,还可以再根据拟定的碳税标准、氧气的市场价值,计算湿地固碳释氧能力的参考经济价值。由于中国尚未明确出台统一的碳税标准,本文参考欧洲部分国家实行的碳税制度与中国的经济水平,折中取碳税标准 50 元/t(CO<sub>2</sub>),氧气生产价值取 1 100 元/t,计算得到鄂州市湿地在 2020 年中固碳释氧功能所带来的参考经济价值为 4.19×10<sup>8</sup> 元。固碳释氧量及参考经济价值的估算结果可以作为湿地评价相关指标体系中的参数,为全面评估湿地状况提供数据支撑。

3 讨论

鄂州市湿地 NPP 空间分布中,南部的梁子湖湿地、东部的花马湖湿地以及北部的南迹湖湿地 NPP 都明显高于周边其他湿地,得益于这些地区被当地列为保护湿地,尽可能减少了人为开发,当地政府部门也对野生动植物做了大量的保护工作,使得这些湿地的生态状况处于一个优良的水平。而位于中部五四湖流域湿地,由于开发了大量的水田、沟渠等人工湿地,NPP 水平明显低于前面提到的几个湿地,三山湖湿地周围甚至出现了分层现象,原因在于其开发了大量的鱼塘。此外,由于本文中采用的分类估算模型的特点,湿地 NPP 状况能够从浅水和深水两个视角去观察,可以更有对比性地观测出鄂州市水体与地表湿地存在的状态差异,结果表明,鄂州市湿地整体状态较为均衡,没有出现极端的分化异常。NPP 估算结果充分印证了人为干预能够对湿地的生态状况产生影响,指明了湿地政策制定的方向与目标,要更加注重协调生产需求与生态承载力之间的关系,平衡经济效益与生态效益。

随着对绿色发展和生态保护工作的重视程度不断增加,各地自然资源部门纷纷将湿地 NPP 估算研究纳入湿地资源调查监测的工作范畴。这样的背景下就需要一种适宜的 NPP 估算方法以便于开展相关的工作。本文中所采用的湿地 NPP 分类估算模型正切合这样的需求,针对湿地调查工作中经常面对的中



小尺度范围湿地所具有的特征,通过运用分类模型方法,有效弥补了以往估算工作中所存在的不足之处。同时,本文中所采用的遥感影像数据是开源的公开数据,且具多年连续观测的数据产品;相关的水质数据可以与各地环保部门开展的环境监测工作同步进行,在保证精度的同时极大地降低了数据获取难度,减少了对特定数据的依赖,使得该模型方法具有较强的可操作性和可移植性。本文中仅针对鄂州市湿地 2020 年度 NPP 进行了试点研究,从估算结果中可以反映出分类估算模型具有一定的可行性,但也存在着现有实测数据较少的局限性。后续应继续深入研究,通过多年连续观测得到的数据,不断完善与改进方法,提高模型拟合精度,同时研究湿地 NPP 的时空变化规律,进一步分析其驱动因子,为相关部门提供数据支撑,精准评估包括固碳释氧能力在内的各项湿地状态指标,有针对性、科学有序地开展对湿地的修复与保护工作。

## 4 结论

(1) 鄂州市 2020 年度净初级生产力总量为  $2.99 \times 10^5$  t,其中浅水地表湿地 NPP 总量为  $1.68 \times 10^5$  t,占全体总量的 56.19%,此类湿地在遥感影像中的辐射规律符合研究中常用的 NPP 算法模型,该结果直接由光能利用率模型得到,保留了算法的估算精度,具有较高的分辨率。深水水体湿地 NPP 总量为  $1.31 \times 10^5$  t,占全体总量的 43.81%,该结果依靠叶绿素 a 与生物量回归模型估算得到,将常应用于环境水质监测的指标引入 NPP 估算模型中,对原有的光能利用率模型在面对水体湿地时存在的缺陷与不足之处进行了有效补充。

(2) 鄂州市湿地 NPP 空间分布上呈现出由南向北逐渐递减的分布规律,在梁子湖等保护湿地中 NPP 明显高于周边,反映了人工干预对湿地带来的影响。鄂州市湿地 2020 年对  $\text{CO}_2$  的固定量为  $4.87 \times 10^5$  t,  $\text{O}_2$  的释放量为  $3.59 \times 10^5$  t,通过拟定的价值标准计算出固碳释氧功能所带来的参考经济价值为  $4.19 \times 10^8$  元,固碳释氧量的分布规律与 NPP 保持一致。

### 【参 考 文 献】

- [1] 罗玲,毛德华,张柏,等.芦苇湿地植被 NPP 估算方法探索与应用[J].遥感技术与应用,2021,36(4):742-750.
- [2] 宫兆宁,熊凯,孙伟东,等.官厅水库小流域植被净初级生产力估算[J].湿地科学,2021,19(3):285-294.
- [3] 孔春芳,岳永财,徐凯.2000—2015 年江汉平原区域植被 NPP 时空特征及其对气候变化的响应[J].长江流域资源与环境,2019,28(6):1460-1469.
- [4] 吴琴,尧波,朱丽丽,等.鄱阳湖典型苔草湿地生物量季节变化及固碳功能评价[J].长江流域资源与环境,2012,21(2):215-219.
- [5] Monteith J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems [J]. The Journal of Applied Ecology, 1972, 9(3):747.
- [6] 石志华,刘梦云,吴健利,等.基于 CASA 模型的陕西省植被净初级生产力时空分析[J].水土保持通报,2016,36(1):206-211.
- [7] 杨潇,郭兵,韩保民,等.青藏高原 NPP 时空演变格局及其驱动机制分析[J].长江流域资源与环境,2019,28(12):3038-3050.
- [8] 朱文泉,潘耀忠,张锦水.中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J].植物生态学报,2007,31(3):413-424.
- [9] Ruimy A, Saugier B, Dedieu G. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data [J]. Journal of Geophysical Research, 1994,99(D3):5263.
- [10] 王军邦,杨屹涵,左婵,等.气候变化和人类活动对中国陆地生态系统总初级生产力的影响厘定研究[J].生态学报,2021,41(18):7085-7099.
- [11] Zhang Yangjian, Yu Guirui, Yang Jian, et al. Climate-driven global changes in carbon use efficiency [J]. Global Ecology and Biogeography, 2014,23(2):144-155.
- [12] Liu Yangyang, Wang Qian, Zhang Zhaoying, et al. Grassland dynamics in responses to climate variation and human activities in China from 2000 to 2013 [J]. Science of the Total Environment, 2019,690:27-39.
- [13] 宗玮,林文鹏,周云轩,等.基于遥感的上海崇明东滩湿地典型植被净初级生产力估算[J].长江流域资源与环境,2011,20(11):1355-1360.
- [14] 尚毅威,肖武鹏,柳欣,等.南海 SEATS 站超微型浮游植物类群及其碳生物量和叶绿素 a 浓度比值的变化[J].厦门大学学报(自然科学版),2018,57(6):811-818.
- [15] 胡洋洋,王鑫.基于细胞面积估计的蓝藻细胞计数[J].江南大学学报(自然科学版),2015,14(5):523-526.
- [16] 于海燕,周斌,胡尊英,等.生物监测中叶绿素 a 浓度与藻类密度的关联性研究[J].中国环境监测,2009,25(6):40-43.
- [17] 孙凌,金相灿,钟远,等.不同氮磷比条件下浮游藻类群落变化[J].应用生态学报,2006,17(7):1218-1223.
- [18] 杜胜蓝,黄岁樑,臧常娟,等.浮游植物现存量表征指标间相关性研究(I):叶绿素 a 与生物量[J].水资源与水工程学报,2011,22(1):40-44.
- [19] 张岩,韦振锋,黄毅.1999—2012 年三江源区植被净初级生产力及固碳释氧量测评[J].水土保持通报,2016,36(1):100-105.

的关联测度及其特征解释[J].中国土地科学,2010,24(11):4-9.

[25] 赵荣钦,黄贤金.基于能源消费的江苏省土地利用碳排放与碳足迹[J].地理研究,2010,29(9):1639-1649.

[26] 赵景峰,李妍.黄河流域城市群综合承载力评价及时空分异演进[J].生态经济,2022,38(2):75-83.

[27] 郑伯铭,明庆忠,刘安乐,等.西部省区旅游经济效率与区域经济水平的重心耦合及互动响应研究[J].世界地理研究,2022,31(2):350-362.

[28] 郑子豪,吴志峰,陈颖彪,等.基于 Google Earth Engine 的长三角城市群生态环境变化与城市化特征分析[J].生态学报,2021,41(2):717-729.

[29] 李平星,周健,刘申伟.国土空间规划的自然要素评价与集成:进展与展望[J].生态环境学报,2021,30(12):2431-2440.

[30] 孙阳,王佳韡,伍世代.近 35 年中国资源环境承载力评价:脉络、热点及展望[J].自然资源学报,2022,37(1):34-58.

[31] 高喜红,许文豪,林宇晨,等.区域生态承载力评价方法及指标研究[J].西部人居环境学刊,2021,36(1):57-65.

[32] 王垚,朱美琳,王勇,等.长三角城市群碳中和潜力评价与实现策略研究[J].规划师,2022,38(3):61-67.

[33] 吴健生,许娜,张曦文.中国低碳城市评价与空间格局分析[J].地理科学进展,2016,35(2):204-213.

[34] 俞艳波,杨立涛,赵兴哲,等.一种基于熵权法理论的水准网平差定权方法[J].测绘地理信息,2022,47(2):30-33.

[35] 黄志启,郭慧慧.基于熵权 TOPSIS 模型的郑州市资源环境承载力综合评价[J].生态经济,2019,35(2):118-122.

[36] 匡丽花,叶英聪,赵小敏,等.基于改进 TOPSIS 方法的耕地系统安全评价及障碍因子诊断[J].自然资源学报,2018,33(9):1627-1641.

[37] 叶菁,谢巧巧,谭宁焱.基于生态承载力的国土空间开发布局方法研究[J].农业工程学报,2017,33(11):262-271.

[38] 宋苑震,覃盟琳,袁倩文,等.碳平衡导向下北部湾城市群碳汇用地布局优化研究[J].广西大学学报(自然科学版),2020,45(5):1071-1082.

(上接第 328 页)

[20] 刘文瑞,李晓婷,李彤,等.基于 MODIS 和 CASA 模型的伊春市森林植被 NPP 变化特征及其影响因子分析[J].生态学杂志,2022,41(1):150-158.

[21] Wang Lunche, Zhu Hongji, Lin Aiwen, et al. Evaluation of the latest MODIS GPP products across multiple biomes using global eddy covariance flux data [J]. Remote Sensing, 2017,9(5):418.

[22] 林少君,贺立静,黄沛生,等.浮游植物中叶绿素 a 提取方法的比较与改进[J].生态科学,2005,24(1):9-11.

[23] 徐兆礼,沈新强.长江口水域浮游动物生物量及其年间变化[J].长江流域资源与环境,2005,14(3):282-286.

[24] 王伟,顾继光,韩博平.华南沿海地区小型水库叶绿素 a 浓度的影响因子分析[J].应用与环境生物学报,2009,15(1):64-71.

[25] 孙凌,金相灿,杨威,等.硅酸盐影响浮游藻类群落结构的围隔试验研究[J].环境科学,2007,28(10):2174-2179.

[26] Desortová B. Relationship between chlorophyll- $\alpha$  concentration and phytoplankton biomass in several reservoirs in Czechoslovakia [J]. Internationale Revue Der Gesamten Hydrobiologie Und Hydrographie, 1981,66(2):153-169.

[27] Watson K J. Phytoplankton and its dynamics in two tropical lakes: A tropical and temperate zone comparison [J]. Hydrobiologia, 1986,138(1):161-176.

(上接第 347 页)

[67] Yue Junwei, Guan Jinhong, Deng Lei, et al. Allocation pattern and accumulation potential of carbon stock in natural spruce forests in northwest China [J]. PeerJ, 2018,6:e4859.

[68] Nakano K, Shibahara N, Nakai T, et al. Greenhouse gas emissions from round wood production in Japan [J]. Journal of Cleaner Production, 2018,170:1654-1664.

[69] Li Nian, Wei Caidi, Zhang Hui, et al. Drivers of the national and regional crop production-derived greenhouse gas emissions in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,257:120503.