

基于回声探测监测沉水植物盖度的插值方法研究:以杭州西湖沉水植物盖度监测为例*

彭 雪^{1,2}, 张 璐^{1,3}, 黄素珍^{1,2}, 蔺庆伟⁴, 刘碧云^{1**}, 张 义¹, 吴振斌¹

(1: 中国科学院水生生物研究所淡水生态和生物技术国家重点实验室, 武汉 430072)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

(3: 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430072)

(4: 河南师范大学生命科学学院, 新乡 453007)

摘 要: 沉水植物作为水生态系统的重要组成成分,在水生态系统物质循环和能量流动中发挥着重要作用,其覆盖度和生物量是评价湖泊等浅水水体系统稳定性的关键参数。随着高效和无损伤监测的回声探测仪在沉水植物盖度监测中的应用,其精确度算法也受到了越来越多的关注。本研究以成功恢复沉水植物的浅水湖泊杭州西湖为研究对象,利用 Bio-Sonics 便携式回声探测仪——MX 采集沉水植物回声样本。同时结合人工样方设置,采集与回声探测对应位点的沉水植物样本,验证回声探测结果的精确性。通过建立回归模型分析回声探测得到的沉水植物体积百分比(PVI)与人工样方获得的对应平均鲜重关系,结果表明二者具有较好的相关性。分别采用普通克里金法、反距离权重法、径向基函数法3种插值方法对同一季节的不同湖泊和同一湖泊的不同季节未采集区域沉水植物的盖度数据进行插值分析,并对插值结果进行交叉验证,以确定方法的精确度。交叉验证结果表明,插值精确度反距离权重法>径向基函数法>普通克里金法。研究结果为回声探测与插值分析方法结合在大尺度浅水水体中沉水植物监测应用提供了技术支撑。

关键词: 沉水植物;盖度;回声探测;GIS;空间插值;杭州西湖

Interpolation method for monitoring the coverage of submerged plants based on echo detection: Taking the monitoring of submerged plant coverage in West Lake of Hangzhou as an example*

PENG Xue^{1,2}, ZHANG Lu^{1,3}, HUANG Suzhen^{1,2}, LIN Qingwei⁴, LIU Biyun^{1**}, ZHANG Yi¹ & WU Zhenbin¹

(1: State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P.R.China)

(2: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

(3: School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430072, P.R.China)

(4: College of Life Science, Henan Normal University, Xinxiang 453007, P.R.China)

Abstract: Submerged plants are an important component of aquatic ecosystems and play a significant role in the matter cycling and energy flowing of aquatic ecosystems. The coverage and biomass of submerged plants are key parameters for evaluating the stability of shallow water systems such as lakes. Owing to the echo detector has the feature of high efficiency and no damage monitoring, it has been used in submerged plant coverage monitoring. Its accuracy algorithm has also received more and more attention. Hangzhou West Lake, a shallow lake that submerged plants restored successfully, was chosen in this study. The BioSonics portable echo detector—MX was used to collect submerged plant echo samples. It combined with the artificial sample setting simultaneously, the

* 2019-06-12 收稿; 2019-09-05 收修改稿。

国家自然科学基金重点项目(31830013)、淡水生态与生物技术国家重点实验室项目(2017FB05)和宁夏回族自治区重点研究发展规划项目(2017BY087)联合资助。

** 通信作者; E-mail: liuby@ihb.ac.cn.

submerged plant samples corresponding to the echo detection spot location are collected to verify the accuracy of the echo detection results. By establishing regression model, the relationship between the percentage of submerged plant volume (PVT) and the corresponding average fresh weight respectively obtained by echo detection and artificial sample was analyzed, the results show that the two parameters have good correlation. Interpolation analysis was carried out on the coverage data of submerged plants through the same season of different lakes and different seasons of the same lake in the unacquired area by using three interpolation methods called Ordinary Kriging, Inverse distance weighted interpolation and Radial Basis Function (RBF). The interpolation results are cross-validated to ensure the accuracy of the method. The accuracy of three methods are Inverse distance weighted interpolation > Radial Basis Function > Ordinary Kriging. The results will provide the technical support for monitoring submerged plant using the echo detection and interpolation analysis methods combined in large-scale shallow water bodies.

Keywords: Submerged plants; coverage; echo detection; GIS; spatial interpolation; West Lake of Hangzhou

沉水植物作为水生态系统中的初级生产者,在水生态系统的物质循环和能量流动中发挥重要作用^[1-2],因此其覆盖度和生物量常常被作为评价湖泊等浅水水体系统稳定性的重要参数.目前针对沉水植物的覆盖度及生物量研究的主要方法有人工样方法、遥感监测法^[3]和水声学技术.人工样方法属于劳动密集型,不仅费时费力、主观性强,无法准确地绘制沉水植物的空间分布,且通常会对沉水植物造成损伤,这对于恢复期的沉水植物生长不利.遥感技术可以通过卫星遥感数据监测水生植物的时空分布^[4-5],但是该技术遥感数据的获取容易受到云层覆盖、水体清澈度等的影响,且在遥感影像提取时沉水植物容易与水体中的悬浮物和浮游植物等产生“异物同谱”现象^[6],这些因素都会导致利用遥感技术监测沉水植物的空间分布时研究结果与实际结果的误差.相比之下,水声学技术在富营养化水体中沉水植物监测方面具有更好的优势.

目前基于水声学的回声探测仪已广泛应用于水生态多个领域,Dufour等^[7]在美国伊利湖中利用多功能回声探测仪DT-X对鱼类丰度进行调查,利用回声探测结果与刺网调查结果进行耦合,用以计算鱼类丰度,结果表明两种方法结合能有效提高鱼类丰度估计值.Rotta等^[8]在巴西圣保罗州的水库中利用回声探测仪对沉水植物的高度进行评估并与遥感结果相比,结果表明二者具有良好的相关性.回声探测技术可以在不同类型的水体中精确和快速地监测沉水植物,还可将回声探测导出的数据与地统计学的插值方法结合,准确地绘制出研究水体中沉水植物的空间分布^[9].

在沉水植物调查中通常是按照人工布点进行采样,获得离散数据,但实际沉水植物分布特征是具有连续性的,所以需要能将离散点进行平面拟合的空间插值分析方法,能更加客观准确地反映沉水植物的分布特点^[10].地统计学中的空间插值方法是通过一定已知样本点数据,利用其统计规律,找到一个这些样本点间的函数关系式,通过这个关系式求出区域范围内未测量点的值^[11].目前,基于空间插值的方法很多,不同的插值方法结果差别较大,在实际应用中并不存在一种普适性的插值方法,所以,根据实测数据特点及研究区域特征选择插值方法一直是地学研究的一个热点^[12].刘春洋等^[13]在海洋底栖生物密度调查中,利用不同插值方法对未采样区域的底栖生物分布状况进行绘制,结果表明普通克里金法的插值效果最好.郑兰香等^[14]利用反距离权重插值法对抽水型水库中的总氮、总磷等水质参数的空间分布进行分析,结果表明反距离权重插值法能准确地反映水库区域内污染物的分布状况.目前缺少空间插值法在沉水植物空间分布系统研究.

本研究选择在水生态学领域最常使用的3种插值方法:普通克里金插值法(Ordinary Kriging, OK)、反距离权重插值法(Inverse distance weighted interpolation, IDW)、径向基函数插值法(Radial basis function, RBF).以便携型回声探测仪——MX为手段,以成功恢复沉水植物的杭州西湖子湖——茅家埠、乌龟潭、小南湖3个浅水湖泊为研究场地,采用回声探测技术与地统计学的插值方法结合,研究便携型回声探测仪MX在浅水湖泊中进行沉水植物探测的可行性,探究不同插值方法的误差范围及灵敏度,找到适合且能降低评价误差的浅水湖泊沉水植物盖度分布的插值方法,为后期更大尺度的湖泊沉水植物空间分布研究提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 调查断面及采样点设置

杭州西湖为典型南方城市景观湖泊,依托国家重大科技专项“十一五”和“十二五”水专项课题,对杭州西湖子湖——茅家埠、乌龟潭、小南湖、鹤湖湾等西湖西进水域开展沉水植物群落恢复生态工程,并形成了以黑藻和苦草为优势种的稳定沉水植物群落,平均盖度达 30% 以上^[15]. 本研究以茅家埠 (30.240123°N, 120.128882°E, 面积 0.487 km², 平均水深 1.4 m)、乌龟潭 (30.232301°N, 120.133413°E, 面积 0.10 km², 平均水深 1.3 m)、小南湖 (30.229643°N, 120.142121°E, 面积 0.089 km², 平均水深 1.9 m) 3 个浅水水体为研究对象,采用断面式开展沉水植物盖度的回声探测,断面沿湖区长轴方向设计(图 1),间隔为 80 m. 在实际回声探测时,通过测距仪使得调查断面尽量与设计断面一致.

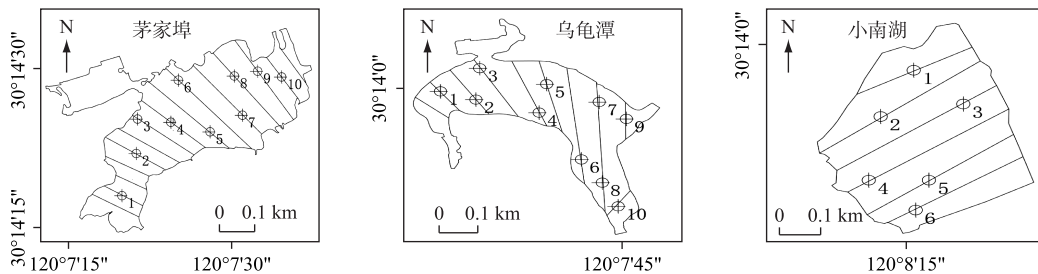


图 1 3 个湖区回声探测断面及采样点位

Fig.1 Echo detection sections and sampling sites of three lakes

1.2 采样周期

于 2018 年 7 月(夏季)、10 月(秋季)、12 月(冬季)对茅家埠、乌龟潭、小南湖 3 个湖泊的沉水植物进行回声探测,选择 3 个湖泊沉水植物生物量最高的秋季数据进行空间插值分析,选择茅家埠沉水植物盖度不同季节的数据进行空间插值分析.

1.3 监测方法

本研究使用美国 BioSonics 公司生产的便携型回声探测仪——MX 进行回声样本采集,它将多种功能进行集成,内置 DGPS 传感器,换能器的工作频率为 200 kHz,发射波束角为 8.5°~9°. 该装置置于手划船上,平均船速为 1.5 km/h,数据采集过程中,将换能器垂直固定于船头,入水深 10 cm. 使用 BioSonics 的 Visual Acquisition 6.0 进行声学数据的记录,同时将水温(7 月 30℃、10 月 20℃、12 月 9℃)及盐度(7 月 0.11 ng/L、10 月 0.11 ng/L、12 月 0.11 ng/L)等参数输入数据采集程序. 数据采集中,数字脉冲报告频率为 5 ping/s,每个 ping 的持续时间为 0.1 ms,“ping”为声纳脉冲.

使用 BioSonics 的沉水植物分析软件 Visual Habitat 处理回声探测记录数据,Visual Habitat 软件中所有的控制参数、特征识别参数、系统和环境参数的设置均按软件中的默认值设置,底部特征强度为 -38 dB,植物特征强度为 -70 dB. 该软件可以利用多步算法通过检查回波信号来提取植物属性的信息(图 2),同时导出水深、沉水植物冠盖高度、百分比覆盖度、探测样点的经纬度等,导出的数据中每个 GPS 经纬度对应 10 ping 的平均值. 为了防止底部的枯枝等杂物被错误分类为植物特征,将植物检测高度设为 10 cm(即低于 10 cm 的值软件处理时不判为是植物).

1.4 回声探测仪与人工样方比较

在回声探测仪原位采集沉水植物数据的同时,使用样方方法(30 cm×47 cm)人工采集对应采样点的沉水植物,每个样点重复采集 3 次,并带回实验室称重,求得平均湿重. 人工样方采样点设置在回声探测断面上(图 1),并在 Visual Acquisition 6.0 软件上进行标记. 为验证回声探测结果的准确性,根据式(1)求出回声探测得到的沉水植物生物体积百分比(PVI)^[16]. 将 PVI 与人工样方采集到的沉水植物湿重进行线性回归分析.

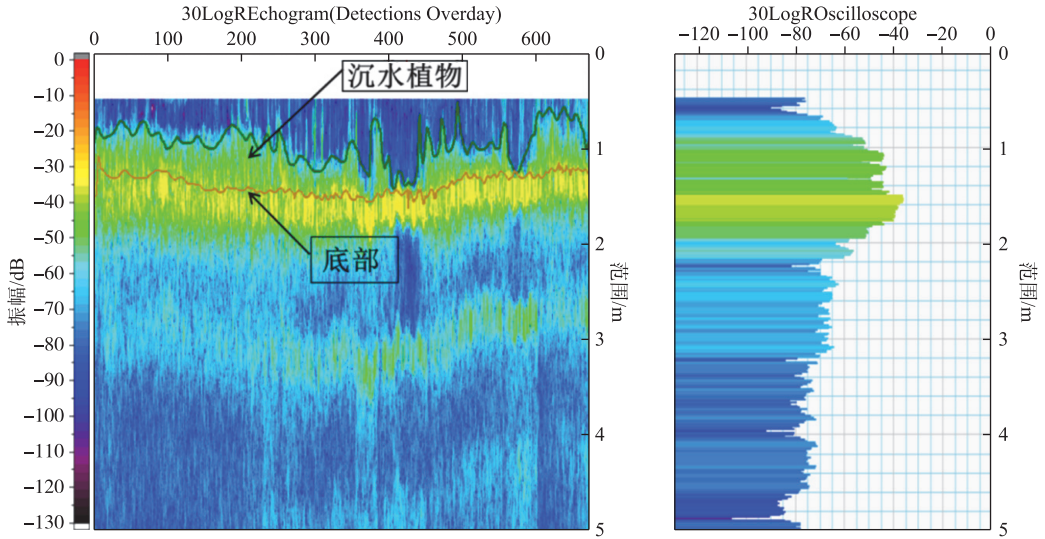


图2 回声探测仪数据处理回波图
Fig.2 Echo detector data processing echogram

$$PVI = MC(MH/BD) \quad (1)$$

式中, MH 、 BD 和 MC 分别为回声探测仪在 1 min 内测量 1 个采样点的平均沉水植物高度、平均底部深度和沉水植物盖度.

1.5 插值方法

普通克里金插值法在获得已知点间统计关系的基础上,从变量相关性和变异性出发,使用变异函数模型以估计非采样区域的值^[17],一般公式为:

$$Z_{(x0)} = \sum_{i=1}^n k_i Z_{(xi)} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n k_i = 1 \quad (3)$$

式中, $Z_{(x0)}$ 为 $x0$ 处的预测值; $Z_{(xi)}$ 为原始测量值; k_i 为赋予插值点的一组权重系数,其和等于 1, n 为参与插值的样本点数. 该方法中变量为半变异函数,扇区类型为 4 个扇区,每个扇区最大相邻要素为 5,最小相邻要素为 2,插值图输出像元大小为 1.3188×10^{-5} ,当同一位置存在两个或多个采样点时使用平均值.

反距离权重插值法是一种基于相似原理的局部插值方法,其估计值为周围样本点的加权平均值,被赋予的权重是样本点与估计点间的距离^[10],离估计点越近的样本点被赋予的权重越大,一般公式为:

$$z = \sum_{i=1}^n \frac{1}{(D_i)^p} Z_i / \sum_{i=1}^n \frac{1}{(D_i)^p} \quad (4)$$

式中, Z 为估计点的预测值; Z_i 实测样本点的值; n 为参与预测计算过程中的实测样本点数; D_i 为样本点 i 与预测点间的距离; p 为权重参数,是距离的幂,其显著影响内插的结果. 该方法中幂为 2,扇区类型为 4 个扇区,每个扇区最大相邻要素为 15,最小相邻要素为 10,插值图输出像元大小 1.3188×10^{-5} ,当同一位置存在两个或多个采样点时使用平均值.

径向基函数插值法定义为空间中任一点 xi 到某一中心 $x0$ 之间欧氏距离的单调函数,当 xi 越远离 $x0$ 时函数取值越小,径向基函数法具有 5 种基函数,分别为薄板样条函数、张力样条函数、规则样条函数、高次曲面函数、反高次曲面函数,本文选择规则样条函数进行分析. 该方法中核函数为规则样条函数,核参数为 17140442.5471,扇区类型为 4 个扇区,每个扇区最大相邻要素为 15,最小相邻要素为 10,插值图输出像元大小 1.3188×10^{-5} ,当同一位置存在两个或多个采样点时使用平均值.

表 1 3 个湖泊水深、沉水植物高度、盖度、沉水植物体积百分比和单位面积平均湿重
Tab.1 Water depths,height and coverage of submerged plant,submerged plant volume and
average wet weight per unit area of three lakes

湖泊	位点	水深/m	植物高度/m	盖度/%	PVI/%	平均湿重/(g/m ²)
茅家埠	1 [#]	2.356	1.005	96.0	40.96	2280.1
	2 [#]	1.325	0.885	100.0	66.78	3715.2
	3 [#]	1.083	0.343	80.0	25.32	2559.5
	4 [#]	1.741	0.855	100.0	49.10	3452.8
	5 [#]	1.999	0.681	100.0	34.05	2584.3
	6 [#]	1.228	0.249	70.0	14.17	889.8
	7 [#]	1.812	0.425	100.0	23.47	2357.4
	8 [#]	2.3152	1.148	99.0	49.09	3084.2
	9 [#]	2.181	0.412	89.0	16.83	1520.8
	10 [#]	1.584	0.541	65.6	22.40	2190.8
乌龟潭	1 [#]	1.808	0.124	20.9	1.43	1153.9
	2 [#]	1.640	0.204	48.1	5.98	2355.3
	3 [#]	1.505	0.552	73.0	26.77	3131.2
	4 [#]	1.893	0.371	10.0	1.95	0.0
	5 [#]	1.834	0.126	37.7	2.59	1295.7
	6 [#]	1.621	0.354	73.0	15.94	2851.1
	7 [#]	1.493	0.614	58.8	24.18	4404.3
	8 [#]	1.071	0.918	99.8	85.54	5517.7
	9 [#]	1.352	0.730	70.0	37.80	5007.1
	10 [#]	1.008	0.908	100.0	90.10	9595.7
小南湖	1 [#]	2.052	0.000	0.0	0.00	110.6
	2 [#]	1.999	0.673	35.5	11.97	2467.3
	3 [#]	2.149	0.525	15.4	3.76	816.1
	4 [#]	1.726	0.408	6.3	1.50	717.5
	5 [#]	1.602	0.509	16.1	5.10	1882.4
	6 [#]	1.506	0.631	1.7	0.71	467.2

1.6 交叉验证

本文采用交叉验证的方法对杭州西湖沉水植物盖度的空间插值结果进行评估,交叉验证是在建模时用于评价某一插值方法准确性的方法,本研究不同季节每个湖泊采集的样本约为 3000~4000 个,将 4/5 的样本点用作插值建模,通过建立的模型对剩下 1/5 的样本数据进行预测,求出样本原始数据与预测数据间的偏差,用于比较 3 种插值方法的优化程度,以得出最佳的插值方法. 选择误差绝对值均值(MEAN)和误差均方根(RMSE)作为交叉验证的评定指标^[18],MEAN 可以估算预测值的误差范围,RMSE 可以反映插值模型利用样点数据的估值灵敏度和极值效应^[19],RMSE 越小说明误差均值的变化范围越小. 计算公式如下:

$$MEAN = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i - Z_{ki}| \tag{5}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - Z_{ki})^2} \tag{6}$$

式中, Z_i 为第 i 个采样点的实测值, Z_{ki} 为第 i 个采样点的预测值, n 为用于验证的样本数.

1.7 数据处理

使用 Excel 2016 软件对导出数据进行整理,SPSS 19.0 软件进行回归模型分析,Origin 软件进行图表绘制,使用 ArcGIS 10.2 地统计分析模块进行空间插值分析.

2 结果与分析

2.1 回声探测与人工采样结果对比

表1显示了3个湖泊人工样方获得的单位面积沉水植物的平均湿重与PVI。茅家埠和乌龟潭样方中采集到的沉水植物主要为苦草、黑藻、金鱼藻,小南湖样方中采集到的沉水植物主要为苦草和狐尾藻。为验证回声探测结果的准确性,对二者进行线性回归分析(图3)。茅家埠、乌龟潭和小南湖沉水植物体积百分比(y)与平均湿重(x)的线性回归方程分别为 $y = 0.0179x - 9.7505$ ($R^2 = 0.7927$)、 $y = 0.0109x - 9.1871$ ($R^2 = 0.8211$)、 $y = 0.0047x - 1.4442$ ($R^2 = 0.8789$)。从3个湖泊回归方程的相关系数可以看出,PVI与单位面积沉水植物平均湿重具有良好的相关性。PVI与平均湿重虽然量纲不同,但两者为不同方式获得的沉水植物生物量的特征指标,这说明利用MX回声探测仪进行浅水湖泊的沉水植物监测具有良好的可行性。

2.2 插值分析及交叉验证结果

2.2.1 不同湖泊沉水植物盖度插值分析 以回声探测的沉水植物盖度秋季结果为基础数据,分别选择3种插值方法对茅家埠、乌龟潭、小南湖进行沉水植物盖度空间插值分析,得到9张沉水植物盖度空间分布图(图4~6),用不同颜色直观地描绘不同沉水植物的盖度,绿色表示高覆盖度,红色表示低覆盖度。从图中可以看出,3种插值方法均能基本反映出沉水植物的盖度分布。3个湖泊沉水植物的总体盖度茅家埠最高,其次是乌龟潭,小南湖最低。茅家埠沉水植物盖度最大值出现在中部及西南片,最低值出现在东北部,这是由于东北部生长有大量的芦苇和荷花等挺水植物。乌龟潭的西北片沉水植物分布较少,这是由于该片位于西湖引水工程的入水口附近,由引水工程输入的残留絮凝剂附着在沉水植物叶片上,导致沉水植物生长状况不好^[20]。且该区域底质较硬,不利于沉水植物生长。小南湖湖区水体透明度较高,平均为1.5 m左右,适合沉水植物生长。湖心区沉水植物盖度高于岸边浅水区原因主要为:小南湖东南角区域为西湖引水工程的最大入水口(30万 t/d),水力的冲刷不利于沉水植物生长;小南湖沿岸西边区域为游船码头,人为干扰较大;北边为小南湖与西里湖连通的航道区,行船不利于沉水植物生长。

3种方法的插值精确度采用交叉验证法来验证,交叉验证结果如表2所示。对于茅家埠和小南湖沉水植物的盖度插值,3种插值方法的RMSE排序均为 $\text{IDW} < \text{RBF} < \text{OK}$;MEAN排序均为 $\text{IDW} < \text{RBF} < \text{OK}$,IDW的RMSE和MEAN值均为最小,在3种方法中插值效果最好。

对于乌龟潭沉水植物的盖度插值,3种插值方法的RMSE排序为 $\text{IDW} < \text{OK} < \text{RBF}$,其值分别为25.375、26.669、30.225;MEAN排序为 $\text{IDW} < \text{RBF} < \text{OK}$,分别为16.282、18.168、19.463,RBF方法的MEAN值比OK方法的小1.295,2种方法的MEAN值相差不大;但RBF方法的RMSE值比OK方法的大3.556,OK方法的优势较明显。3种方法中IDW的RMSE和MEAN值均为最小,插值效果最好。

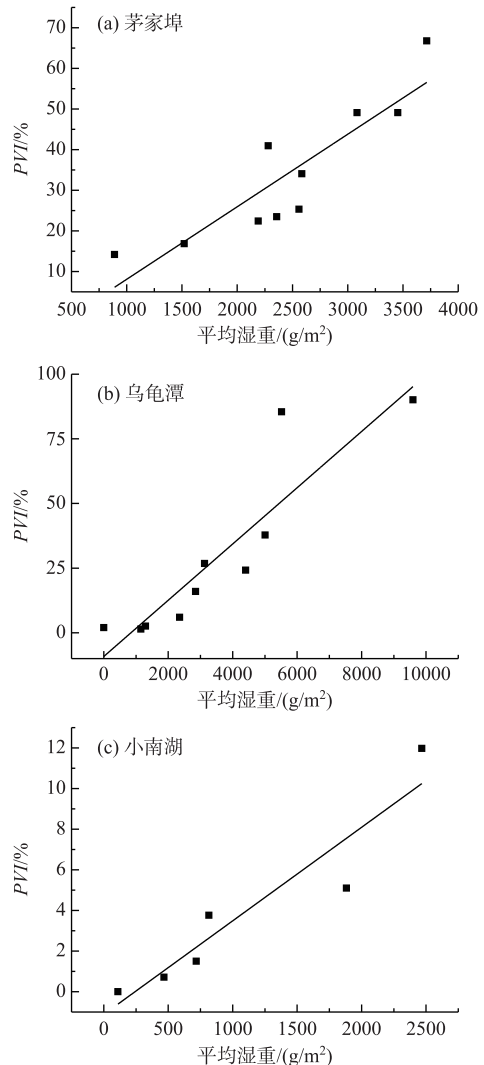


图3 3个湖泊沉水植物体积百分比(y)与平均湿重(x)的线性回归分析

Fig.3 Linear regression analysis of submerged plant volume (y) and average wet weight (x) of submerged plants in three lakes

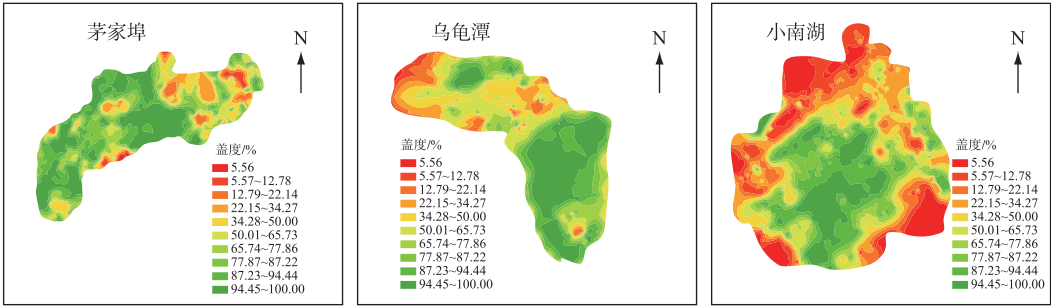


图 4 反距离权重法插值沉水植物盖度分布

Fig.4 Interpolation results of submerged plants coverage distribution by IDW

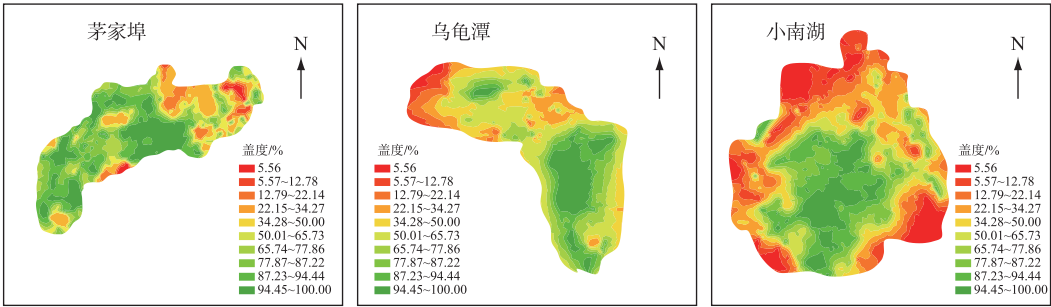


图 5 径向基函数法插值沉水植物盖度分布

Fig.5 Interpolation results of submerged plants coverage distribution by RBF

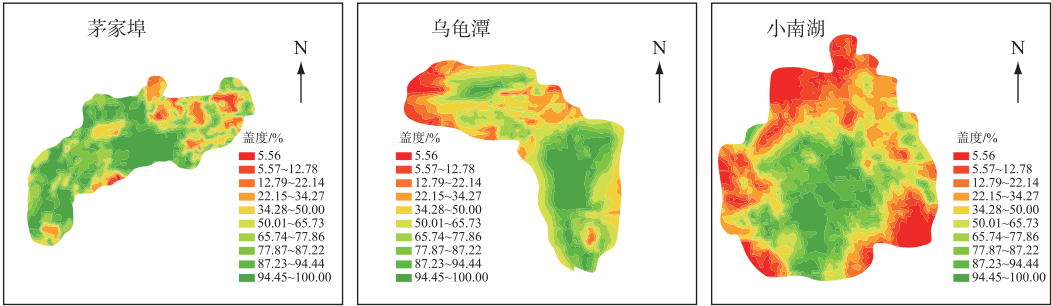


图 6 普通克里金法插值沉水植物盖度分布

Fig.6 Interpolation results of submerged plants coverage distribution by OK

表 2 3 个湖泊 3 种插值方法的交叉验证结果

Tab.2 Cross-validation results of three interpolation methods in three lakes

插值方法	茅家埠		乌龟潭		小南湖	
	RMSE	MEAN	RMSE	MEAN	RMSE	MEAN
IDW	20.006	11.848	25.375	16.282	23.594	16.154
RBF	20.565	13.285	30.225	18.168	24.752	17.326
OK	22.059	13.776	26.669	19.463	26.677	20.365

2.2.2 不同季节沉水植物盖度插值分析 以茅家埠回声探测的沉水植物盖度结果为基础数据,分别选择3种插值方法对夏季、秋季、冬季进行沉水植物盖度空间插值分析.通过交叉验证方法探究3种插值方法对不同季节沉水植物盖度空间插值分析的精确度.交叉验证结果见表3,对于3个季节茅家埠沉水植物盖度的插值分析,3种插值方法的 *RMSE* 排序均为 $IDW < RBF < OK$;夏季和秋季的 *MEAN* 排序为 $IDW < RBF < OK$,冬季 *MEAN* 的排序为 $IDW < OK < RBF$.不同季节沉水植物盖度的插值分析结果 *IDW* 的 *RMSE* 和 *MEAN* 值均为最小,在3种方法中插值效果最好.

表3 不同季节3种插值方法的交叉验证结果

Tab.3 Cross-validation results of three interpolation methods under different seasons

插值方法	夏季		秋季		冬季	
	<i>RMSE</i>	<i>MEAN</i>	<i>RMSE</i>	<i>MEAN</i>	<i>RMSE</i>	<i>MEAN</i>
IDW	17.437	8.683	20.006	11.848	21.294	12.335
RBF	18.499	10.508	20.565	13.285	22.092	15.019
OK	20.445	11.617	22.059	13.776	23.718	13.348

综合上述结果,对同一季节不同湖泊和同一湖泊不同季节回声探测沉水植物盖度进行插值分析,由于反距离权重法综合考虑不同已知样点的权重值,在估算预测值误差范围及插值模型的灵敏度上均好于径向基函数法和普通克里金法,采用反距离权重法对茅家埠、乌龟潭、小南湖3个湖泊沉水植物盖度空间分布进行插值效果最好,与茅家埠不同季节沉水植物盖度进行插值分析结果一致.

2.3 茅家埠、乌龟潭、小南湖沉水植物季节变化

对3个湖泊沉水植物盖度的季节变化进行分析,结果如图7、图8所示,3个湖泊中茅家埠沉水植物的盖度最高,其次为乌龟潭,盖度最低的为小南湖.茅家埠沉水植物盖度在季节间存在显著差异.乌龟潭沉水植物盖度夏季与冬季存在显著差异,冬季较夏季下降了6.9%.小南湖沉水植物盖度秋季最高,与夏季和冬季存在显著差异,冬季盖度下降了30.3%.回声探测是利用沉水植物对入射声波回声信号反映沉水植物的状况,由于沉水植物物种间产生的回声信号差异较小,目前不能通过回声探测仪区分沉水植物种类,因此分析小南湖沉水植物冬季盖度下降还需要结合具体的沉水植物种类和生境.

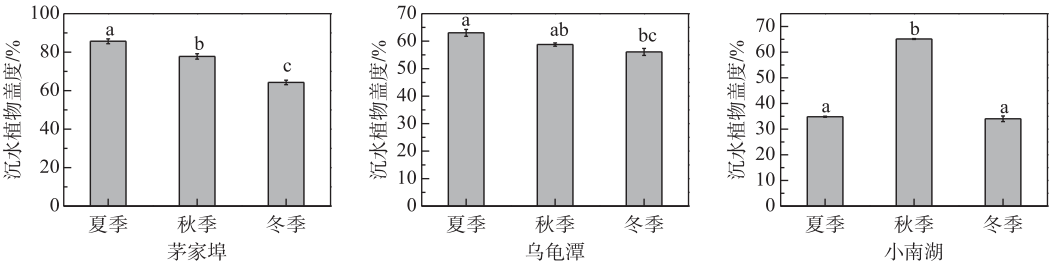


图7 3个湖泊沉水植物盖度不同季节的比较(不同字母代表显著差异($P < 0.05$))

Fig.7 Seasonal variation of the submerged plants coverage in three lakes
(Different letters indicated that differences were significant($P < 0.05$))

对3个湖泊沉水植物高度进行分析,由图9可知,茅家埠沉水植物高度夏季(0.62 m)明显高于秋季(0.51)和冬季(0.44) ($P < 0.05$).乌龟潭沉水植物高度仅夏季(0.51)与冬季(0.40)存在显著差异,冬季与夏季相比下降了0.13 m.小南湖沉水植物高度秋季最高(0.93 m),显著高于夏季(0.43)和冬季(0.41) ($P < 0.05$),这与小南湖秋季湖区大量生长的狐尾藻和大茨藻有关.本研究进行回声探测的3个湖泊平均水深均在1 m以上,沉水植物为直立生长.对于沉水植物冠层高大,生物量在水面上有堆积的水体,可以通过人工采集沉水植物样本测量其株高,与回声探测结果建立模型,用以消除回声探测所造成的沉水植物株高误差.Sabol等^[22]在海草生长茂密的河口设计30 cm × 30 cm样方采集沉水植物测量其株高,与回声探测结果进行

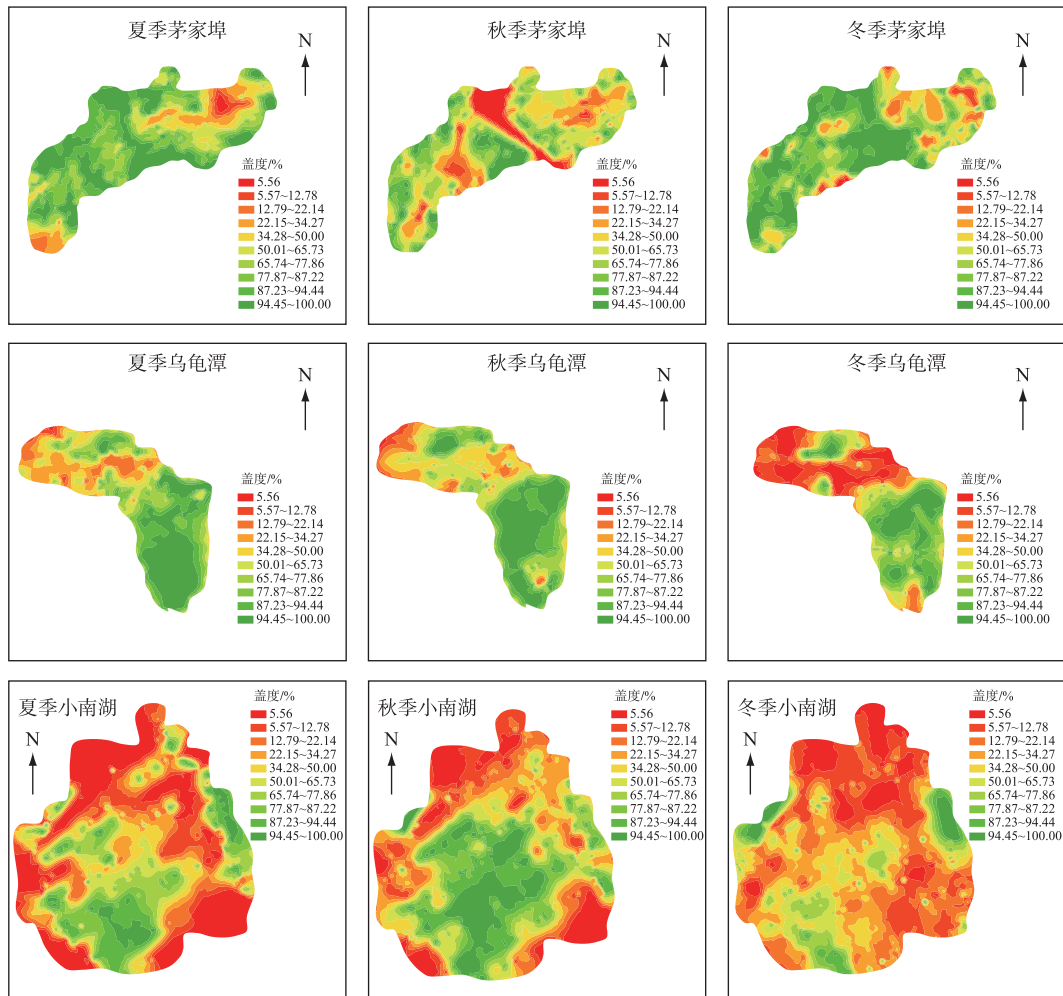


图 8 反距离权重法插值沉水植物不同季节的盖度分布

Fig.8 Interpolation results of submerged plants coverage in different seasons by IDW

对比,结果显示误差大约为 ± 0.08 m.

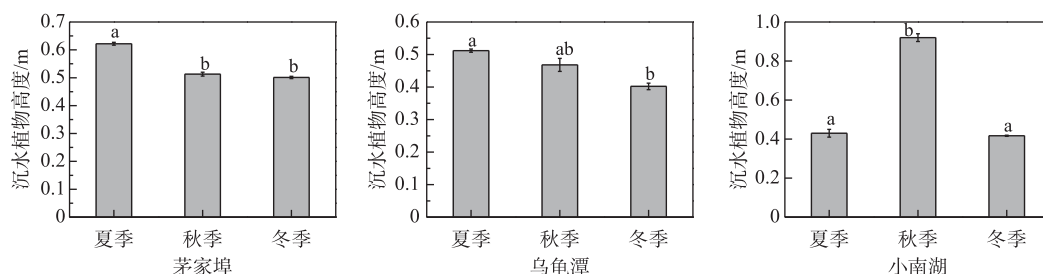
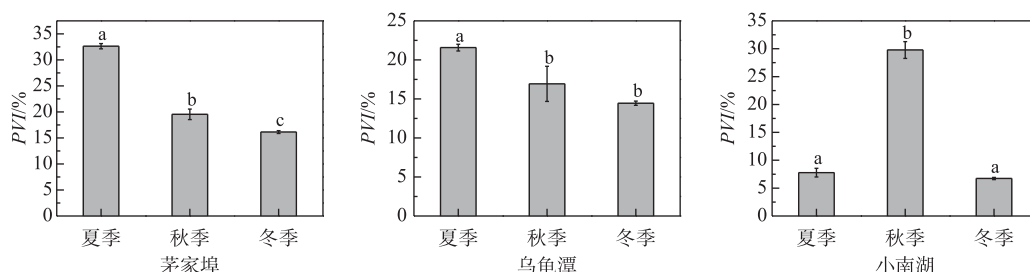
3个湖泊沉水植物生物体积百分比(PVI)季节变化如图10所示, PVI 由水深、沉水植物盖度和高度计算所得,茅家埠、乌龟潭、小南湖3个湖泊平均水深分别为1.64、1.59、2.04 m. 茅家埠沉水植物 PVI 夏季最高,3个季节间存在显著差异. 乌龟潭沉水植物的 PVI 夏季最高,秋季和冬季不存在显著差异. 小南湖沉水植物 PVI 与盖度和高度变化一致,秋季显著高于夏季和冬季.

3 结论与展望

通过对回声探测结果计算的沉水植物体积百分比与人工样方采样获得的沉水植物湿重建立回归模型,发现两者具有较好的相关性. 利用回声探测仪对3个湖泊沉水植物不同季节进行监测,结果表明茅家埠沉水植物盖度最高,其次是乌龟潭,小南湖最低,这与实际人工监测结果(每月常规监测,未发表)一致.

分析对比普通克里金、反距离权重法、径向基函数3种插值方法对不同湖泊及同一湖泊不同季节回声探测沉水植物盖度结果的空间插值效果,结果显示反距离权重法插值效果相对最好.

本研究结果表明便携式回声探测——MX应用于浅水湖泊进行沉水植物的监测具有良好可行性. 由于

图 9 3 个湖泊沉水植物高度的季节变化(不同字母代表显著差异($P < 0.05$))Fig.9 Seasonal variation of the submerged plants height in three lakes
(Different letters indicated that differences were significant($P < 0.05$))图 10 3 个湖泊沉水植物 PVI 的季节变化(不同字母代表显著差异($P < 0.05$))Fig.10 Seasonal variation of the submerged plants PVI in three lakes
(Different letters indicated that differences were significant($P < 0.05$))

在进行空间插值时分析的指标中仅包括经纬度和植物盖度,在以后的调查过程中还可以采集更多的环境参数,如底部沉积物类型、湖泊地形等,以提高插值模型的精确度,便于获得更优模型。

致谢:感谢上海泽泉科技公司提供回声探测仪及黄亚东工程师的技术帮助。

4 参考文献

- [1] Lin QW. The study on patches mosaic pattern building and stabilization of submerged plant in the west area of West Lake, Hangzhou [Dissertation]. Xinxiang: Henan Normal University, 2015. [蔺庆伟. 杭州西湖西进水域沉水植物斑块镶嵌格局优化及稳定化研究[学位论文]. 新乡: 河南师范大学, 2015.]
- [2] Tian CC, Wu XQ, Feng SS *et al.* Relationship between the distribution of submerged plants and environment factors in Dongping Lake. *Environmental Science and Technology*, 2018, **41**(11): 15-20. [田翠翠, 吴幸强, 冯闪闪等. 东平湖沉水植物分布格局及其与环境因子的关系. 环境科学与技术, 2018, **41**(11): 15-20.]
- [3] Wang Q, Zhou XD, Luo JH *et al.* Remote sensing monitoring and analysis of dominant species of submerged vegetation in Taihu Lake over last 30 years. *Water Resources Protection*, 2016, **32**(5): 123-129, 135. [王琪, 周兴东, 罗菊花等. 近30年太湖沉水植物优势种遥感监测及变化分析. 水资源保护, 2016, **32**(5): 123-129, 135.]
- [4] Zhao D, Jiang H, Yang T *et al.* Remote sensing of aquatic vegetation distribution in Taihu Lake using an improved classification tree with modified thresholds. *Journal of Environmental Management*, 2012, **95**(1): 98-107.
- [5] Zhu B, Fitzgerald DG, Hoskins SB *et al.* Quantification of historical changes of submerged aquatic vegetation cover in two bays of lake ontario with three complementary methods. *Journal of Great Lakes Research*, 2007, **33**(1): 122-135.
- [6] Wang Q, Zhou XD, Luo JH *et al.* The remote sensing monitoring of dominant species of submerged vegetation of Lake Taihu with the consideration of their living histories. *J Lake Sci*, 2015, **27**(5): 953-961. DOI: 10.18307/2015.0523. [王琪, 周兴东, 罗菊花等. 考虑生活史的太湖沉水植物优势种遥感监测. 湖泊科学, 2015, **27**(5): 953-961.]

- [7] Dufour MR, Qian SS, Mayer CM *et al.* Evaluating catchability in a large-scale gillnet survey using hydroacoustics: Making the case for coupled surveys. *Fisheries Research*, 2019, **211**: 309-318.
- [8] Rotta LHS, Mishra DR, Watanabe FS *et al.* Analyzing the feasibility of a space-borne sensor (SPOT-6) to estimate the height of submerged aquatic vegetation (SAV) in inland waters. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, **144**: 341-356.
- [9] Valley RD, Drake MT, Anderson CS. Evaluation of alternative interpolation techniques for the mapping of remotely-sensed submersed vegetation abundance. *Aquatic Botany*, 2005, **81**(1): 13-25. DOI: 10.1016/j.aquabot.2004.09.002.
- [10] Deng XB. Comparison between two space interpolation methods based on ArcGIS. *Geospatial Information*, 2008, **6**(6): 85-87. [邓晓斌. 基于 ArcGIS 两种空间插值方法的比较. 地理空间信息, 2008, **6**(6): 85-87.]
- [11] Zhu QA, Zhang WC, Yu JH. The spatial interpolations in GIS. *Journal of Jiangxi Normal University: Natural Science*, 2004, (2): 183-188. [朱求安, 张万昌, 余钧辉. 基于 GIS 的空间插值方法研究. 江西师范大学学报: 自然科学版, 2004, (2): 183-188.]
- [12] XU L, Zhang LP, Si JN. A comparative study on spatial interpolation method of precipitation based on GIS in Ningxia. *Ningxia Journal of Agri and Fores Sci & Tech*, 2018, **59**(2): 35-37. [徐良, 张丽萍, 司建宁. 基于 GIS 的宁夏降水量空间插值方法对比分析. 宁夏农林科技, 2018, **59**(2): 35-37.]
- [13] Liu CY, Li YP, Dong J. Study on spatial interpolation method of benthos density based on GIS. *Marine Environmental Science*, 2012, **31**(3): 443-447. [刘春洋, 李轶平, 董婧. 基于 GIS 的海洋底栖生物栖息密度空间插值方法. 海洋环境科学, 2012, **31**(3): 443-447.]
- [14] Zheng LX, Yang C, Huang LX *et al.* Distribution of water quality in a pumped storage reservoir based on inverse distance weighted interpolation. *Ningxia Engineering Technology*, 2018, **17**(3): 270-273. [郑兰香, 杨程, 黄凌霄等. 基于反距离权重插值法的抽水型水库水质空间分布分析. 宁夏工程技术, 2018, **17**(3): 270-273.]
- [15] Hu SH, Lin QW, Dai ZG *et al.* Change of species diversity during the restoration process of submerged macrophyte in Xihu Lake, Hangzhou. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(8): 1440-1445. [胡胜华, 蔺庆伟, 代志刚等. 西湖沉水植物恢复过程中物种多样性的变化. 生态环境学报, 2018, **27**(8): 1440-1445.]
- [16] Winfield IJ, Onoufriou C, O'connell MJ *et al.* Assessment in two shallow lakes of a hydroacoustic system for surveying aquatic macrophytes. *Hydrobiologia*, 2007, **584**(1): 111-119. DOI: 10.1007/s10750-007-0612-y.
- [17] Bilonick RA. An introduction to applied geostatistics. *Technometrics*, 1989, **33**(33): 483-485.
- [18] Gu CL, Yang Y, Zhu ZC *et al.* Accuracy Cross-validation of several interpolation methods of DEM. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2011, **34**(5): 99-102. [顾春雷, 杨漾, 朱志春. 几种建立 DEM 模型插值方法精度的交叉验证. 测绘与空间地理信息, 2011, **34**(5): 99-102.]
- [19] Li JJ, Wang AH. Comparison of spatial interpolation methods based on monthly precipitation observation data of station in Southwest China. *Climatic and Environmental Research*, 2019, **24**(1): 50-60. [李金洁, 王爱慧. 基于西南地区台站降雨资料空间插值方法的比较. 气候与环境研究, 2019, **24**(1): 50-60.]
- [20] Zhang Y, Xu D, Zhang Y *et al.* Effects of residual aluminum flocculant on aluminum salt distribution of water and sediment in West Lake (Hangzhou). *J Lake Sci*, 2017, **29**(4): 796-803. DOI: 10.18307/2017.0402. [张玥, 徐栋, 张义等. 引水工程絮凝剂余铝对杭州西湖水体、底泥铝盐分布的影响. 湖泊科学, 2017, **29**(4): 796-803.]
- [21] Li W, Cheng Y eds. Higher hydrophyte. In: Chen YY, Xu YG eds. *Honghu aquatic organisms and its resource development*. Beijing: Science Press, 1995: 44-63. [李伟, 程玉. 水生高等植物. 见: 陈宜瑜, 许蕴珩编. 洪湖水生生物及其资源开发. 北京: 科学出版社, 1995: 44-63.]
- [22] Sabol BM, Melton RE, Chamberlain R *et al.* Evaluation of a digital echo sounder system for detection of submersed aquatic vegetation. *Estuaries*, 2002, **25**(1): 133-141.