

利用 Landsat 5 TM 影像估算沉水植物 地上生物量的研究

——以江西省鄱阳湖国家自然保护区为例

邬国锋^{1,2} 刘耀林^{1,2} 纪伟涛³

(1 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 武汉大学教育部地理信息系统重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(3 江西省鄱阳湖自然保护区管理局, 南昌市龙腾大道 97 号, 330008)

摘要: 阐述了利用 Landsat 5 TM 影像在鄱阳湖国家自然保护区进行沉水植物地上生物量估算的方法和过程。研究结果显示, 采用该影像, 结合传统的采样策略和估算方法进行生物量的估算, 在此研究区域中具有|一定的局限性。分析了产生这| 问题的原因, 并对后续的研究工作提出了具体的建议。

关键词: 沉水植物; 地上生物量; 遥感

中图法分类号: P237.9; P237.4

沉水植物生物量信息对于湖泊生态系统的监测、保护、管理和理解很有必要, 获取这种信息也非常困难^[1-3]。

沉水植物生物量主要通过野外测量、遥感以及各种建模方法得到。传统方法持续时间长、费用高、劳动强度大、样点数目有限, 因此, 仅仅局限于小区域, 并且无法对生物量连续的空间分布进行描述。另外, 自然条件的复杂性以及植物分布知识的匮乏性也制约着这种方法的使用, 使得采样点不具有代表性, 导致出现不可靠的量测结果^[4]。Armstrong^[5] 利用 Landsat 5 TM 影像, 建立了实地量测的生物量信息和波段及其变换得到的与水深度无关变量之间的回归模型。Zhang^[2] 借助 Landsat 5 TM 影像, 使用可见光、近红外波段及其主成分变量与实地量测数据的线性关系模型进行生物量信息的估算。另外, 一些研究人员从影响植物生物量的环境因子的角度着手进行生物量的估算^[6-8]。同时, 一些模拟和预测植物生长的经验模型和机理模型也相继出现^[9, 10]。

本文研究利用 Landsat 5 TM 影像在江西鄱阳湖国家自然保护区进行沉水植物地上生物量估算的可能性。

1 研究区域及数据收集

1.1 研究区域

江西鄱阳湖国家自然保护区位于鄱阳湖西北角, 其地理坐标为东经 115°55′ ~ 116°03′, 北纬 29°05′ ~ 29°15′, 总面积为 22 400 ha。保护区月平均水位 7 月最高, 1 月最低, 年均气温为 17.1℃。在冬季, 由于水位的回落而形成的众多浅水湖和洲滩是越冬水鸟的主要栖息地。在高程 14.2 m 以下的湖区主要分布着以马来眼子菜和苦草为主的沉水植物群落带。其中苦草的冬芽是越冬白鹤的主要食物, 它的数量和分布对白鹤的越冬栖息地的分布有着重要的影响^[10]。在此研究区域中, 各个湖泊具有相似的地形特征, 即边缘比较平缓, 湖底平坦。在夏季, 水位受长江和 5 河(赣、抚、信、饶、修)的控制, 水位变化比较一致, 因此沉水植被的地带分布也比较一致。本文仅以保护区中的大湖池作为典型研究区域。

1.2 植被遥感的光谱特征

植被的反射光谱特征是植被遥感的理论基础。对于陆生植物, 在可见光区域, 由于色素的强

烈吸收, 植被的光谱反射率很低。叶绿素大体上在以 $0.45 \mu\text{m}$ 为中心的蓝波段及以 $0.67 \mu\text{m}$ 为中心的红波段吸收大量的辐射能, 而在这 2 个吸收带之间吸收相对较少, 因此在 $0.54 \mu\text{m}$ 附近形成绿色反射峰。在近红外区域, 植物的反射及透射能量约各占入射能量的 50%, 被吸收的能量极少, 不到 5%, 因而在 $0.74 \sim 1.13 \mu\text{m}$ 之间形成高反射。随着植物种类、结构、生物量的不同, 它的反射光谱的能量也有差异^[2]。对于沉水植物, 它们的反射光谱受水体的影响而有别于陆生植物。可见光和近红外波段有着不同的水体穿透能力。蓝光的穿透能力最强, 对于清水, 在 $0.48 \mu\text{m}$ 处能穿透 20 m; 红光的穿透能力小于 3 m; 对于近红外波段, 由于水体的强烈吸收作用, 它的穿透能力小于 2 m。因此, 可见光和近红外对于存在于清澈的潜水中的沉水植物具有一定的探测能力。

1.3 数据收集及预处理

1.3.1 Landsat 5 TM 影像

影像获取时间为 2004 年 10 月 28 日。Landsat 1~5 和 7 波段空间分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$, 没有云层覆盖。借助 ERDAS IMAGING 软件, 采用 1:5 万地形图进行影像的几何校正, 整体 RMSE 为 10.13 m, 满足该研究的需要。

1.3.2 地上生物量的野外采样

地上生物量的野外采样时间为 2004 年 10 月 21 日至 25 日, 采样区域包括梅西湖、寺下湖、大湖池和沙湖。在每个湖区, 根据面积的大小, 设计 2~5 条采样线。在每条样线上以大约 50 m 的间隔布置采样点, 在每个采样点收集的信息包括地理位置、水深、透明度和地上生物量。为了估算地上生物量, 在每个采样点, 用采样夹 (面积为 $27 \text{ cm} \times 13 \text{ cm}$) 随机 4 次取样。对于每次取样, 记录植物的物种类型、每种物种的个体数目以及它们的地上生物量鲜重, 然后根据 4 次取样的数据估算每个样点的总体地上生物量 (g/m^2)。

2 数据处理与分析

2.1 开放水体的提取

湖区的部分区域存在浮叶植物和沉水植物混生现象。由于浮叶植物的存在, 不可能精确地利用遥感技术估算同一位置的沉水植物地上生物量, 所以有必要剔除浮叶植物分布区域, 以保证结果的可信度。本文利用 NDWI^[11] 和掩膜技术相结合方法从 Landsat 5 TM 影像获得开放水域 (无浮叶植物)。

2.2 波段信息分析

在开放水域提取的基础之上, 提取位于开放水域内的 57 个采样点用作波段信息的分析以及后续回归模型的测试。

借助 ArcGIS 软件, 从开放水域的 Landsat 5 TM 影像以及野外采集数据中提取每个采样点的信息, 包括采样点的位置、地上生物量以及 Landsat 5 TM 影像的 1~4 波段的数值。

利用 SPSS 软件进行统计分析, 发现波段 1 与波段 2 ($R^{0.000} = 0.684$)、波段 2 与波段 3 ($R^{0.000} = 0.794$) 以及波段 4 与水深 ($R^{0.000} = 0.612$) 之间存在显著的相关性。这表明波段 1~3 在估算地上生物量时应该具有相似的结果。因为波段 4 与水深的相关性, 在估算地上生物量时具有一定的局限性。

2.3 回归关系的建立

尽管波段 1~3 之间具有显著的相关性及波段 4 的局限性, 本文仍采用波段 1~4 进行波段值及其变换值与生物量之间回归关系的测试, 以便发现最优波段及潜在的其他可能性。

1) 原始波段的单变量线性与非线性回归模型。本文建立了 10 个单变量线性与非线性回归模型, 包括 Linear、Logarithmic、Inverse、Quadratic、Cubic、Power、Compound、S-Curve、Growth 和 Exponential 模型。其形式如下:

$$Y = f(X)$$

其中, Y 代表生物量; X 代表波段值或其变换值; f 为回归函数。

2) 原始波段的与水深无关变换值的单变量线性与非线性回归模型。水体对光具有吸收和散射作用, 这种作用与水深相关。本文采用 Armstrong^[5] 的方法得到与水深无关的变换值, 然后用这些变换值和生物量建立与 1) 同样的模型^[5]。

3) 波段或者其变换值组合的单变量线性与非线性回归模型。分别以原始波段及其对数变换值、水深无关变换值为基础, 尝试多种原始波段或者其变换值的组合运算, 然后用这些组合运算得到的值和生物量建立与 1) 同样的模型, 以试图发现潜在的估算生物量的可能性。这些组合主要包括:

$$Y = X_i/X_j, Y = (X_i - X_j)/(X_i + X_j),$$

$$Y = (X_i/X_j)/(X_i + X_j)$$

其中, X_i, X_j 为原始波段或者其对数变换值、水深无关变换值; Y 为 X_i, X_j 的各种组合运算得到的值。

4) 多元线性回归模型。分别建立原始波段

及其对数变换值、水深无关变换值与生物量的多元线性回归模型:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + K + b_nX_n$$

其中, Y 代表生物量; X 代表波段值或它们的变换值; b_0, b_1, \dots, b_n 为常数。

3 实验结果

表 1 显示了生物量与波段 1~ 4 及其与水深无关变量之间的线性与非线性的相关系数 R^2 。

表 1 生物量与波段 1~ 4 以及其与水深无关变量之间的相关系数 R^2

Tab. 1 Correlations with R^2 Between Biomass and Band 1~ 4, and Their Depth-independent Variables

模型	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	DIB12	DIB13	DIB14	DIB23	DIB24	DIB34
线性	0.104	0.145	0.116	0	0.010	0	0.020	0.003	0.061	0.104
对数	0.107	0.135	0.126	0	0.010	0	-	0.003	0.048	0.104
倒数	0.110	0.141	0.136	0	0.010	0	0.030	0.003	0.033	0.104
二次	0.139	0.138	0.132	0.011	0.010	0	0.020	0.003	0.104	0.104
三次	0.139	0.138	0.132	0.012	0.010	0	0.020	0.003	0.101	0.104
幂	0.066	0.089	0.093	0.014	0.012	0.005	-	0	0.010	0.058
复合	0.064	0.084	0.085	0.017	0.012	0.005	0.007	0	0.018	0.058
S-曲线	0.068	0.093	0.085	0.012	0.012	0.005	0.005	0	0.018	0.058
增长	0.064	0.084	0.085	0.017	0.012	0.005	0.007	0	0.018	0.058
指数	0.064	0.084	0.085	0.017	0.012	0.005	0.007	0	0.018	0.058

注: B₁、B₂、B₃ 和 B₄ 代表 TM 影像的蓝、绿、红和近红外波段; DIB12、DIB13、DIB14、DIB23、DIB24 和 DIB34 代表它们与水深无关的变量。

表 2 给出了生物量与 X_i/X_j 以及 $(X_i - X_j)/(X_i + X_j)$ 之间的线性与非线性的相关系数。由

于波段组合的多样性, 上面提及的其他组合运算结果未在此列出。

表 2 生物量与 X_i/X_j 以及 $(X_i - X_j)/(X_i + X_j)$ 之间的相关系数

Tab. 2 Correlations with R^2 Between Biomass and X_i/X_j , and $(X_i - X_j)/(X_i + X_j)$ Combinations

模型	$\frac{B_1}{B_2}$	$\frac{B_1}{B_3}$	$\frac{B_1}{B_4}$	$\frac{B_2}{B_3}$	$\frac{B_2}{B_4}$	$\frac{B_3}{B_4}$	$\frac{B_1 - B_2}{B_1 + B_2}$	$\frac{B_1 - B_3}{B_1 + B_3}$	$\frac{B_1 - B_4}{B_1 + B_4}$	$\frac{B_2 - B_3}{B_2 + B_3}$	$\frac{B_2 - B_4}{B_2 + B_4}$	$\frac{B_3 - B_4}{B_3 + B_4}$
线性	0.144	0.124	0.022	0.034	0.065	0.075	0.140	0.117	0.015	0.035	0.050	0.062
对数	0.141	0.119	0.017	0.035	0.053	0.066	0.136	0.107	0.012	-	0.015	0.042
倒数	0.138	0.113	0.013	0.034	0.040	0.054	0.132	0.096	0.009	0.020	0	0.021
二次	0.142	0.137	0.044	0.035	0.093	0.089	0.142	0.141	0.053	0.035	0.107	0.100
三次	0.142	0.136	0.042	0.035	0.090	0.087	0.142	0.139	0.053	0.105	0.106	0.100
幂	0.098	0.095	0	0.044	0.012	0.023	0.095	0.085	0	0.029	0	0.007
复合	0.098	0.100	0.001	0.044	0.020	0.030	0.097	0.094	0	0.044	0.012	0.020
S-曲线	0.098	0.100	0.001	0.044	0.020	0.014	0.097	0.094	0	0.044	0.012	0.020
增长	0.098	0.100	0.001	0.044	0.020	0.030	0.097	0.094	0	0.044	0.012	0.020
指数	0.098	0.100	0.001	0.044	0.020	0.030	0.097	0.094	0	0.044	0.012	0.020

表 3 列出了生物量与波段 1~ 4 以及对数变换、与水深无关变换之间多元线性模型的相关系数, 其中, B₁₋₄ 代表 B₁、B₂、B₃ 和 B₄。

表 3 生物量与波段 1~ 4 以及对数变换、与水深无关变换之间多元线性回归模型的相关系数 R^2

Tab. 3 Multi-variate Linear Correlations with R^2 Between Biomass and Band 1-4, Their Logarithm Transformations, and Water Depth-independent Variables

模型	B ₁₋₄	B ₁₋₄ 的对数变化	B ₁₋₄ 的与水深无关变换
多元线性回归模型	0.103	0.109	0.109

采用以上方法可以发现, 最好的回归模型是生物量与波段 2 (绿波段) 之间的线性模型, 但 R^2 在置信度为 0.003 时相关系数仅为 0.145。

4 结论及建议

尽管原始波段或者其变换值与沉水植物的生物量具有一定的相关性, 但这种相关性不足以信任到用来建立生物量预测模型, 进行生物量估算。产生这一结果的原因如下。

- 1) 水体内悬浮物的影响。水体内存在多种悬浮的有机物和无机物。根据自身特点, 它们对各个波段有选择地吸收或反射。研究发现, 这些悬浮物与 Landsat 5 TM 影像的可见光和近红外波段存在非常强的相关关系^[12, 13], 制约着利用 Landsat 5 TM 影像进行沉水植物生物量的估算。
- 2) 遥感影像波谱分辨率、空间分辨率的局限

性。可以用来进行此研究的波谱范围仅仅局限于可见光和近红外波段。然而 Landsat 5 TM 影像只有 4 个波段位于这个波谱范围,且波段 1~3 具有很大的相关性,波段 4 与水深也具有很强的相关性。Landsat 5 TM 影像的波段 1~4 的 30 m 空间分辨率对估算的结果也产生一定的影响。

3) 野外采样的不精确性。野外采样通常沿着预先设计的样线,采用固定的间隔进行。这些样线以及样点可能不能精确地反映生物量的实际分布。并且,在每个采样点,用采样夹(面积为 $27\text{ cm} \times 13\text{ cm}$)随机 4 次取样,然后估算此样点的生物量,这种方法也存在很多随机性。再者,由于 Landsat 5 TM 影像的空间分辨率为 30 m,而采样使用的单位为 m^2 ,这种采样方法不可能真实地反映一个像素($30\text{ m} \times 30\text{ m}$)内的生物量。

4) 估算方法的局限性。尽管本文尝试了多种从遥感影像估算生物量的方法,但其他潜在的方法有待于进一步的探讨。

5) 湖区沉水植物地上生物量分布的一致性。本研究的前提假设是湖区沉水植物地上生物量的空间分布是不均匀的。从野外采样也可以发现这种不均匀性,但由于采样具有很大的随机性,也不能否定生物量空间分布的一致性。

尽管在利用遥感影像进行沉水植物生物量估算方面存在一些成功的案例,而且个别案例的研究区域与本研究区域具有很大的相似性,但从本研究发现,采用 Landsat 5 TM 影像,结合传统的采样策略和本文涉及的估算方法,在本文特定的研究区域是不可行的。为此,本文提出如下建议。

1) 尝试采用高空间分辨率或者高光谱影像,结合精确的野外采样策略和先进的算法探究遥感技术估算沉水植物生物量的可能性;

2) 尝试采用沉水植物生长的机理模型,结合影响其生长的环境因子,采用数学模型来模拟植物的生长,并对其生物量进行预测。

参 考 文 献

- [1] Carr G M, Duthie H C, Taylor W D. Models of Aquatic Plant productivity: a Review of the Factors that Influence Growth[J]. *Aquatic Botany*, 1997, 59: 195-215
- [2] Zhang X. On the Estimation of Biomass of Submerged Vegetation Using Landsat Thematic Mapper (TM) Imagery: a Case Study of the Honghu Lake, PR China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19: 11-20
- [3] Vis C, Hudon C, Carignan R. An Evaluation of Approaches Used to Determine the Distribution and Biomass of Emergent and Submerged Aquatic Macrophytes Over Large Spatial Scales [J]. *Aquatic Botany*, 2003, 77: 187-201
- [4] Li R, Liu J. Wetland Vegetation Biomass Estimation and Mapping from Landsat ETM Data: a Case Study of Poyang Lake[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2002, 12: 35-41
- [5] Armstrong R A. Remote Sensing of Submerged Vegetation Canopies for Biomass Estimation[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14: 621-627
- [6] Duarte C M, Kalf J. Littoral Slope as a Predictor of the Maximum Biomass of Submerged Macrophyte Communities [J]. *Limnol Oceanogr*, 1986, 31: 1 072-1 080
- [7] Chambers P A, Kalf J. Depth Distribution and Biomass of Submersed Aquatic Macrophyte Communities in Relation to Secchi Depth[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1985, 42: 701-709
- [8] Lenssen J P M, Menting F B J, van der Putten W H, et al. Effects of Sediment Type and Water Level on Biomass Production of Wetland Plant Species [J]. *Aquatic Botany*, 1999, 64: 151-165
- [9] Van Nes E H, Scheffer M, Berg M S. Charisma: a Spatial Explicit Simulation Model of Submerged Macrophytes[J]. *Ecological Modelling*, 2003, 159: 103-116
- [10] Wu Yinghao, Ji Weitao. Study on Jiangxi Poyang lake National Nature Reserve[M]. Beijing: Forest Publishing House, 2002
- [11] McFeeters S K. The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17: 1 425-1 432
- [12] Kloiber S M, Brezonik P L, Bauer M E. Application of Landsat Imagery to Regional-scale Assessments of Lake Clarity[J]. *Water Research*, 2002, 36: 4 330-4 340
- [13] Nelson S A C, Soranno P A, Cheruvilil K S, et al. Regional Assessment of Lake Water Clarity Using Satellite Remote Sensing[J]. *Journal of Limnology*, 2003, 62: 27-32

第一作者简介: 邬国锋, 副教授, 主要从事地理信息系统、遥感和湿地生态研究。

E-mail: guofengwu@gmail.com

Estimating Aboveground Biomass of Submerged Vegetation Using Landsat 5 TM Imagery: a Case Study of Jiangxi Poyang Lake National Nature Reserve, China

WU Guofeng^{1, 2} LIU Yaolin^{1, 2} JI Weitao³

(1 School of Resource and Environment Science, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Key Laboratory of Geographic Information System, Ministry of Education, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(3 Bureau of Jiangxi Poyang Lake National Nature Reserve, 97 Longteng Road, Nanchang 330008, China)

Abstract: Firstly, the methods used to estimate the aboveground biomass of submerged vegetation are briefly reviewed. Secondly, on the basis of the reviewing, the process using Landsat 5 TM imagery to estimate aboveground biomass of submerged vegetation in Jiangxi Poyang Lake National Nature Reserve is discussed in detail. The results showed that it was infeasible to estimate the aboveground biomass using Landsat 5 TM imagery combined with traditional field sampling method and computation technologies in this particular study area. Finally, the reasons causing this infeasibility were analyzed, and suggestions for future research were presented.

Key words: submerged vegetation; aboveground biomass; remote sensing

About the first author: WU Guofeng, associate professor, engaged in research on GIS, remote sensing and wetland ecosystem
E-mail: guofengwu@gmail.com

武汉大学测绘学科喜迎 50 华诞

2006 年 10 月 28 日, 武汉大学测绘学科迎来了 50 华诞。为了进一步增强测绘学科和测绘行业的凝聚力, 与社会各界携手共创更加美好的未来, 学校以“凝聚校友、携手行业、弘扬测绘、共谋发展”为主题, 隆重举行了武汉大学测绘学科创建 50 周年盛大庆典活动。

1956 年, 国务院集中同济大学、天津大学、南京工学院、华南工学院、青岛工学院等 5 所院校测绘专业的师资和设备, 创办了我国第一所民用测绘高等学府——武汉测量制图学院。1958 年, 学校由高等教育部划归国家测绘总局领导。同年 12 月, 更名为武汉测绘学院。1985 年 10 月, 更名为武汉测绘科技大学。2000 年 8 月, 与武汉大学、武汉水利电力大学、湖北医科大学合并组建新的武汉大学, 融入武汉大学后, 测绘学科成为学校独具特色的优势学科, 在全国高校同类学科中, 整体实力和社会影响处于领先地位, 在国际上享有盛誉。