

新型水体指数的构建及在滨海湿地水域提取中的有效性验证

张永永^{1,2}, 刘丽娟^{1,2}, 赵盼盼^{1,2}

(1. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 省部共建亚热带森林培育国家重点实验室, 浙江 杭州 311300)

摘要: 湿地是“地球之肾”, 对地球生物生存具有重要意义。由于湿地水域面积的破碎化程度高, 常规利用遥感技术提出的水体指数不够有效, 简单快速的实时监测技术还需完善。以 2009 年杭州湾湿地的 Landsat TM 影像为基础数据, 选择不同水域类型, 构建新型水体指数(water zscore-band5, WZ5), 与常用的改进的归一化差异水体指数(modified normalized difference water index, MNDWI), 混合水体指数(combined index of NDVI and NIR for water body identification, CIWI)进行对比, 分析各指数湿地水域信息提取的准确性和完整性。结果表明: 所构建的指数 WZ5 水体信息提取精度优于 MNDWI 和 CIWI, 特别是含有大量塘基且分布复杂的水产池塘破碎区, WZ5 计算水体与塘基的区分度为 41.78%, 大于 MNDWI(21.59%)和 CIWI(34.56%); 总体识别精度为 82.00%, 也大于 MNDWI(58.00%)和 CIWI(77.00%)。利用 WZ5 对遥感影像进行水体增强的方法, 不仅能够很好地提取出湿地开阔水域的水体信息, 边缘清晰可靠; 对于破碎水域, WZ5 水体提取精度最高, 并且相比基于复杂数学理论的分类提取过程, 操作相对简单, 易于推广, 能够较好地提高湿地水域实时监测的精度。图 4 表 3 参 18

关键词: 湿地科学; 滨海湿地; 破碎水域; 遥感信息提取; WZ5; 杭州湾

中图分类号: P33; S714

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2018)04-0735-08

WZ5 water index and validation of its effectiveness in a coastal wetland water extraction

ZHANG Yongyong^{1,2}, LIU Lijuan^{1,2}, ZHAO Panpan^{1,2}

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: Wetlands have a high degree of fragmentation with their water areas. While it is not effective enough to use an existing water body index based on routine remote sensing technology so far. This study tries to find an improvement with a simple and fast real-time monitoring technology. Based on different types of water bodies from a Landsat TM image of Hangzhou Bay Wetlands in 2009, An analysis was conducted for water extraction with a new index [Water Zscore-Band 5 (WZ5)], and compared to the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) and the Combined Index of NDVI and NIR for Water Body Identification Index (CIWI) which were commonly accepted. The extraction result was verified by random sample of points in research area. Results showed that for the broken zone of an aquatic pond with a large pond base and a complex distribution, the extraction accuracy of the WZ5 index, having a degree of distinction between water and pond of 41.78%, was better than MNDWI (21.59%) and CIWI (34.56%). Overall accuracy of the WZ5 index was 82.00%, which was also better than MNDWI (58.00%) and CIWI (77.00%). The WZ5 index not only extract-

收稿日期: 2017-07-24; 修回日期: 2017-10-19

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(LY18D010002); 国家自然科学基金资助项目(41201365); 浙江农林大学科研发展基金资助项目(2014FR004)

作者简介: 张永永, 从事遥感技术与应用研究。E-mail: 925847688@qq.com。通信作者: 刘丽娟, 讲师, 博士, 从事遥感技术与应用研究。E-mail: llj7885@163.com

ed precise water information well with a clear and reliable edge, but also had very high extraction accuracy. Compared to a classification process based on complex mathematical theory, operation was relatively simple with a favorable application. Thus, WZ5 could improve accuracy for real-time monitoring of wetland water bodies. [Ch, 4 fig. 3 tab. 18 ref.]

Key words: wetland science; coastal wetland; fragile waters; information extraction of remote sensing; water z-score-band 5 (WZ5); Hangzhou Bay

湿地被誉为“地球之肾”，为众多生物提供生存环境，在生态环境发展、地下水补给、防洪防灾、侵蚀控制、保护生物多样性等方面都发挥着巨大作用，有蓄水防洪的天然“海绵”之称，是重要的生态系统。滨海湿地的水体信息提取对于海岸线变化及侵蚀监测，海岸带管理，洪水预测，水资源评估等有重要的意义^[1-2]。随着中国城市化程度的加深，人们居住环境的改善，农业及基础设施的发展，使得许多天然海滨湿地变为建设用地和人工湿地，生境破碎化严重^[3]。到20世纪90年代中期，50.00%的滨海沼泽已经消失，近1000个天然湖泊消亡。因此，及时、精确地掌握湿地的面积变化等是进行湿地保护的基本条件。近年来，卫星遥感技术在空间和时间的分辨率已达到较高水平，可在水体监测方面发挥重要作用。将遥感与地理信息系统技术相结合，计算各种水体指数^[4-5]、机器学习算法分类^[6-9]来开展水体自动或半自动的提取研究^[10-11]。由于湿地环境复杂，位于水陆交汇处，水体类型多样，异质化程度高，“同谱异物”等现象影响了湿地信息的提取精度^[12]。相对简单快速的水体提取方法主要是单波段阈值法和谱间分析法^[4,13-14]。单波段阈值法是利用水体在近红外波段上反射率低，易与其他地物区分的特点，选取一个阈值来分离水体与其他地物。但是使用该方法提取时，会同时提取山体阴影区域，并且阈值会随时间、环境而变化，不易确定。谱间分析法是通过分析水体与其他地物之间的光谱特征，寻找其中的规律，建立数学模型来分离水体与其他地物，效果优于单波段阈值法，应用较为广泛，但受使用条件和精度范围等限制。将严谨的数学理论、多数据源等相结合，可提高水体提取精度^[2,15-16]，如PANG等^[17]基于小波变换的图像纹理特征的水体遥感信息提取，在边缘信息提取和分割上取得了很好的效果。虽然上述方法在某些特征水域提取方面具有优势，但实验发现，对于湿地中大量存在的零星破碎水域的提取还不能达到满意的精度，直接影响水体提取的总体精度。鉴于此，本研究构建了新的水体指数模型，以滨海湿地水域为研究对象，开展水域特别是破碎度高的水域信息的提取研究，并验证了构建模型的水域提取有效性。

1 研究地区与数据来源

1.1 研究区概况

杭州湾滨海湿地(30°02'~30°24'N, 121°02'~121°42'E)位于浙江省东北部(图1)，是慈溪市湿地的主要组成部分，地理位置独特，受人为干扰严重，其南岸是沪、杭、甬三角地区结合部，外型呈喇叭状，是中国八大咸水湿地之一。20世纪50年代海岸线大部分处于自然演替状态，从60年代开始，围海造田使得原本处于自然演变的岸堤完全由人工海堤充当。湿地类型以浅海水域和潮间淤泥海滩为主，包括潮间盐水沼泽和岩石性海岸，北岸属于侵蚀型海岸，南岸属于淤涨型海岸并有大量的人工湿地。土壤类型以潮滩盐土为主，其海岸线内侧分布有滨海盐土、潮土和水稻土等。湿地植被群落以盐生沼泽的互花米草 *Spartina alterniflora*，海三棱藨草 *Scirpus mariqueter* 和芦苇 *Phragmites communis* 为主。杭州湾滨海湿地水域类型复杂多样，具有典型性，区域生物多样性高，在浙江省资源可持续利用和保护中具有独特的地位和作用。

1.2 数据来源

遥感数据为研究区无云的 Landsat TM 影像，轨道号 118/39，成像时间为 2009 年 7 月 17 日，数据来自美国地质调查局官网(<http://glovis.usgs.gov/>)的 1 级产品。研究采用基于 MODTRAN4+辐射传输模型进行大气校正来还原地表的真实反射率。为保持影像原始的光谱值，影像除了进行辐射校正外，未做其他的预处理。

根据遥感影像和实地踏勘，确定了该区域 4 种水体类型(蓄水区、沼泽、排水渠和水产池塘)作为重

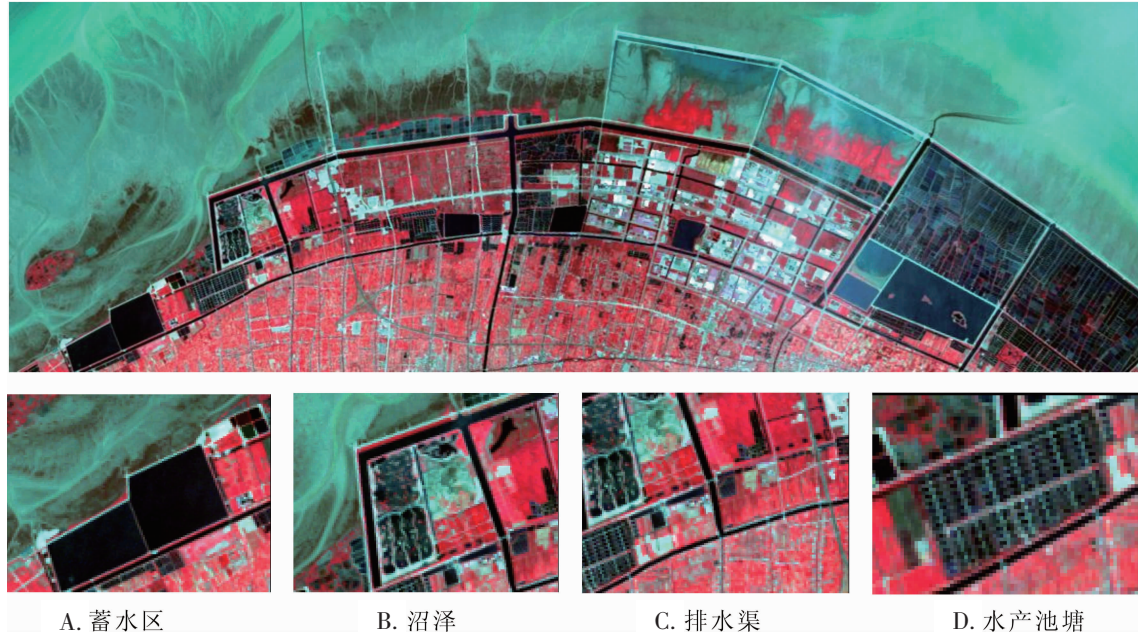


图 1 研究区遥感影像示意图(总体和局部)

Figure 1 Images of the study area (overall and local)

点研究(图 1)。蓄水区用以研究指数在提取开阔水域信息的精度；其他 3 种水体类型主要用以研究指数在提取破碎区域水体信息的完整性。

2 研究方法

2.1 水体提取方法

2.1.1 改进的归一化差异水体指数(MNDWI) 徐涵秋^[5]观察分析影像的光谱曲线发现：建筑物的反射光谱范围为近红外波段到中红外波段(MIR)，将 McFEETERS^[4]的归一化水指数(NDWI)做了修改，用中红外波段替换近红外波段，得到的建筑物的指数值明显减少，从而增大了水体和建筑物的差别，提高了水体提取的精确度。改进的归一化差异水体指数的公式为：

$$I_{MNDWI} = (G - M_{IR}) / (G + M_{IR}) \quad (1)$$

式(1)中： I_{MNDWI} 为改进的归一化差异水体指数； G 为绿波段； M_{IR} 为中红外波段。

MNDWI 能够较好地地区分建筑物与水体，但是对于水体分布破碎的密集人工围垦区还不适用。

2.1.2 混合水体指数(CIWI) 凌成星等^[14]通过分析 NDWI 和 MNDWI 的优缺点和各波段光谱特征的基础上，为了增强水体、植被和建筑的差异，将归一化差分植被指数和近红外波段进行求和，其公式为：

$$I_{CIWI} = I_{NDVI} + N_{IR} \quad (2)$$

式(2)中： I_{CIWI} 为混合水体指数； I_{NDVI} 为归一化植被指数，其公式为： $I_{NDVI} = (N_{IR} - R) / (N_{IR} + R)$ ， R 代表红波段， N_{IR} 为近红外波段。

2.1.3 构建 WZ5 水体指数 上述指数多基于单个像元的数学运算，对于异质性高的破碎水域，像元的数值变化跨度较大，很难通过单一阈值确定破碎水域范围，因此该类型水域提取精度较低。本研究借鉴 HUANG 等^[18]提出的联合植被指数(IFZ)对森林区域快速提取的方法，利用 Landsat TM 遥感数据，改进并构建新型水体指数 WZ5(water zscore-band5)拟提高对破碎水域水体提取的精度。在影像中水体训练样

表 1 杭州湾滨海湿地水体解译标志

Table 1 Interpret sign of water in Hangzhou Bay Wetland

类型	遥感影像特征 [R(红):G(绿):B(蓝)=4:3:2 波段]
蓄水区	呈现黑色，边界清晰，面积较大，表面平滑(开阔水域研究区，图 1A)
沼泽	呈现黑色，形状较破碎(水体、植被、泥沼混合研究区，图 1B)
排水渠	呈现黑色，为细长形状(细长规则的破碎水域研究区，图 1C)
水产池塘	呈现黑色，面积较小，边界不易确定(有塘基交错的不规则形状破碎水域研究区，图 1D)

本选取时,不是仅局限于单个像元的样本提取,而是选取典型面状水体或破碎水域中多个像元,统计其均值和标准差,对影像基于水体特征进行标准化,构建水体指数 WZ5。湿地水域分布广,但多为浅水区域,可见光、近红外波段特征与其他类型区分度低。中红外 B5 波段(1.55~1.75 μm)位于 2 个吸收带之间,对土壤和植被的水分含量敏感。经过重复实验发现, B5 波段水体区分度最好,相对于其他各波段,中红外波段(B5)的水体与塘基的像元值差异最大。所以研究选用 B5 构建水体指数 WZ5。由于样本均值反映水体像元辐射值的平均水平,标准化后会产生水体像元 WZ5 值小于 0 的情况,为保持一致性,利用样本均值的 10%进行标准化。

$$I_{WZ5}=(P_{B5}-0.1M)/S_{DB5} \quad (3)$$

式(3)中: I_{WZ5} 为新型水体指数; P_{B5} 表示中红外波段第 5 波段 B5 各像元反射率; M 表示水体样本的平均值; S_{DB5} 表示第 5 波段 B5 标准差。

2.2 水体提取结果的精度评价

为了验证指数 WZ5 的有效性,对研究区分别计算 MNDWI, CIWI 和 WZ5 指数值,进行水体信息提取实验。由于不同指数计算方法不同,导致量纲不同,不适合采用方差等统计量表达差异;另外,此处需要区分不同指数对水体与其他类型的区分程度,即类间差异比较。因此,本研究利用表达各类均值差异的区分度指标对各指数的提取精度进行评价,其计算公式如下:

$$D_D=\frac{|\overline{W}_x-\overline{W}_y|}{|\overline{W}_x+\overline{W}_y|} \quad (4)$$

式(4)中: D_D 为区分度,反映 2 种类型之间的差异程度,其值越大,表示两者的可分离程度越高,反之,则相反^[16]; \overline{W}_x , \overline{W}_y 分别表示待区分的 2 种类型的均值。

3 结果与分析

3.1 水体提取结果

开阔水域具有面积大,边界清晰,背景单一等特点。分别计算指数 MNDWI, CIWI 和 WZ5,对水体增强并用阈值法提取水体信息(图 2)。

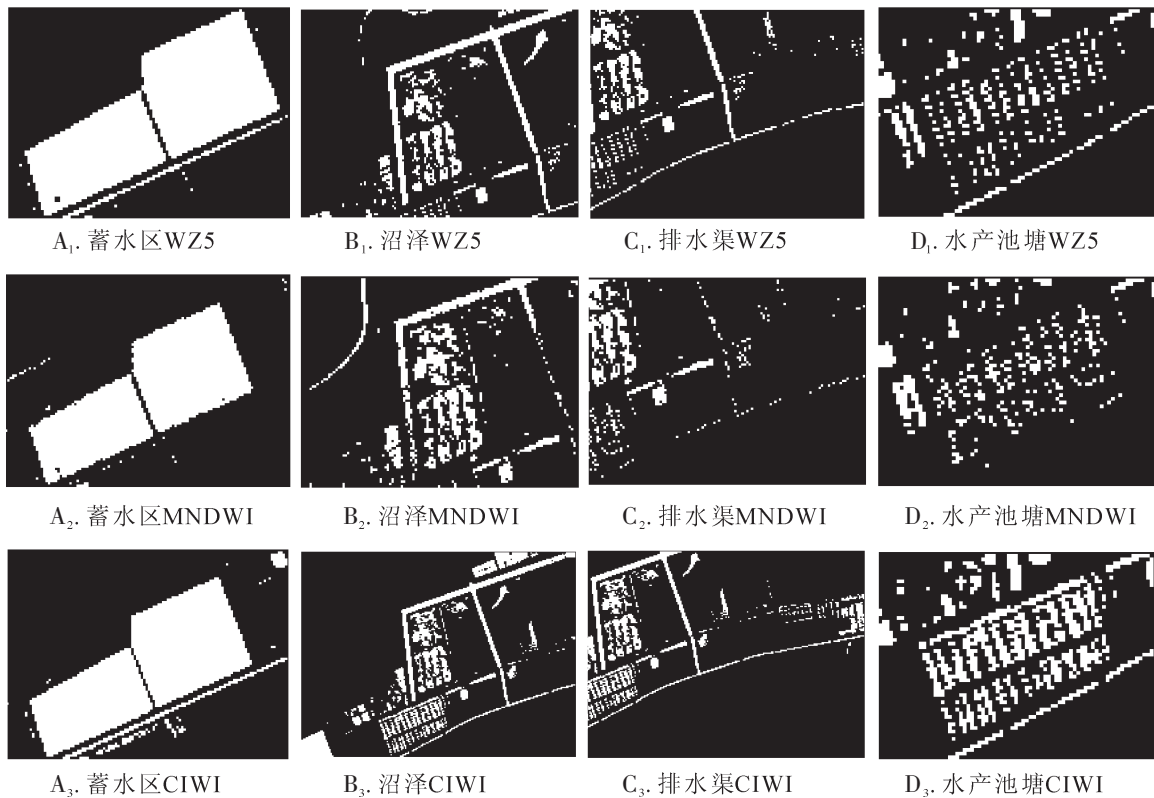


图 2 不同水体类型各指数提取结果影像

Figure 2 Images of extraction results of all different kinds of indexes in 4 wetland types

比较分析提取结果可以看出：对于开阔水域，3 个指数的提取结果都较好，但 WZ5 和 CIWI 提取的结果边界更加清晰(图 2)。破碎水域水体分布零散，面积较小，边界不易区分，如沼泽中的水体，排水渠，混有塘基的围垦区等分布复杂的背景，极大影响了水体提取的精度。沼泽区，各指数的提取结果没有明显差异；然而对于排水渠，WZ5 和 CIWI 能够完整的分离水体与人工筑坝，提取出不规则水域，MNDWI 只能稀疏显示轮廓；对于水产池塘内存在的塘基，WZ5 能够很好地剔除，而其他指数明显不能区分。

3.2 4 种地物类型水体指数数值比较

图 3 可以看出：对于破碎区域水体，能否有效分离水域及人工建筑(如围垦区的塘基)是关键。因此，研究提取 4 种主要的地物类型(塘基、水体、植被、建筑)各 20 个样本，计算 MNDWI，CIWI 和 WZ5，并将值域拉伸至相同范围，比较指数值差异(图 3)。

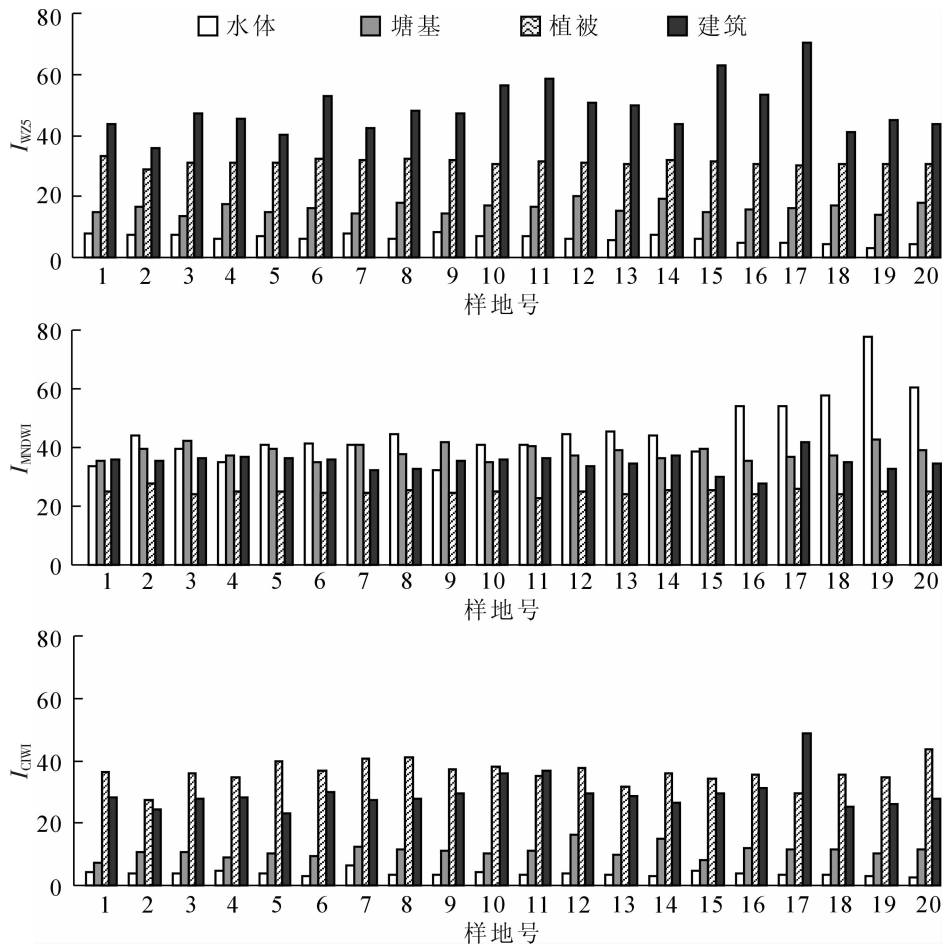


图 3 不同地物类型的各指数曲线

Figure 3 Curves of different objects

对于提取结果差异较大的排水渠和水产池塘区域，结合图 3 各类指数值可以看出：WZ5 各要素区分度最明显，而 MNDWI 和 CIWI 的指数值都有不同程度的重合。其中，MNDWI 对塘基、水体和建筑的区分度最差，这导致了对排水渠、水产池塘识别的错误率高，特别受塘基的影响较大，不能很好地从大量塘基中提取出水体，提取结果像元分布杂乱，很多像元没有很好地识别；CIWI 的植被和建筑区分度较差，而水体和塘基基本无重叠区域，但指数值差异较小，可以将排水渠中的水体、人工堤坝、周围植被很好地分离，塘基与水体虽然也可以区分，但是分界线不是很明显，有些非水体部分也同时被提取，不能辨别水体间较小的塘基；4 个地物类型间 WZ5 数值差异较大，图 3 的 4 种水体类型提取效果均优于另外 2 个指数，特别是排水渠边界提取光滑，水产池塘水体信息提取完整，分布均匀有序，与实际最为符合，较好地剔除了水体间较小的塘基。

3.3 区分度计算

以破碎水域区的水产池塘为例，随机选取了25个水体样点和附近的25个塘基样点，统计各像素的指数平均值，计算3种指数破碎水域的区分度(表2)。

表2 各指数区分度

Table 2 Division of different indexes

项目	I_{MNDWI}		I_{CIWI}		I_{WZ5}	
	水体	塘基	水体	塘基	水体	塘基
最小值	38.48	28.67	2.98	7.15	4.31	10.98
最大值	78.00	38.46	7.13	15.93	9.02	18.43
均值	54.13	34.91	5.21	10.71	6.21	15.12
区分度/%	21.59		34.56		41.78	

从表2可以看出：WZ5的区分度高达41.78%，大于MNDWI(21.59%)和CIWI(34.56%)的区分度，表明通过WZ5增强后能够有效提高破碎水域水体的提取精度。

3.4 精度验证

利用外业采样及Google Earth等高空间分辨率影像转绘部分验证样点进行精度评价，在水体和非水体分别选取了100个样点作为验证信息，其中WZ5湿地水体与非水体的总体精度达82.00%，高于58.00%的MNDWI和77.00%的CIWI，WZ5的Kappa系数为0.64，也高于指数MNDWI(0.16)和CIWI(0.54)。具体分类精度见表3。

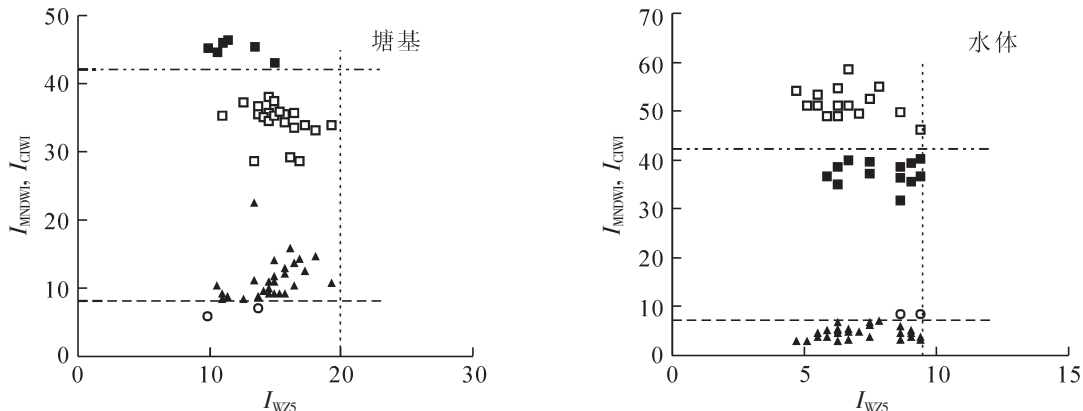
表3 各指数精度分类评价

Table 3 Classification evaluation of different indexes

指数	MNDWI 精度		CIWI 精度		WZ5 精度	
	水体	非水体	水体	非水体	水体	非水体
水体	61	45	91	27	74	26
非水体	39	55	8	73	20	80
总体精度/%	58.00		77.00		82.00	
Kappa 系数	0.16		0.54		0.64	

从表3得出：在破碎度很大的水体、塘基混合区域，WZ5的识别精度最高，而指数MNDWI和CIWI受塘基的影响较大，提取精度不是很高。为直观比较本研究构建水体指数WZ5在破碎水域提取的准确度高于MNDWI和CIWI，在研究区选取塘基、水体典型区域各若干像元，制作二维散点分布图，并设置各指数提取的阈值，比较3种指数提取结果的差异(图4)。

结果表明：塘基的MNDWI和CIWI范围跨度较大，导致塘基识别率较低，难以从水体中分离出来，



■ WZ5正确识别, MNDWI未正确识别 □ WZ5和MNDWI均正确识别 ▲ WZ5和CIWI均正确识别
○ WZ5正确识别, CIWI未正确识别 WZ5阈值 - - - - MNDWI阈值 - - - - CIWI阈值

图4 不同水体指数对塘基和水体提取结果的对比

Figure 4 Comparison of extraction results of pond and water with different water indexes

而 WZ5 值相对较集中, 塘基提取较为完整; 对破碎水域的提取, 阈值设置对结果影响较大, WZ5 能够提取完整, 而 MNDWI 和 CIWI 却不能提取完整。

4 结论

对于开阔水域的研究以蓄水区为例, 由于开阔水域边界清晰, 面积较大, 且受其他类型影响小, 所以各指数都能提取出大部分水体信息, 但是 WZ5 和 CIWI 在边缘方面更加清晰, 效果更好。

对于沼泽研究区, WZ5 略占优势; 而对于排水渠研究区, MNDWI 几乎不能识别水体信息, 而 WZ5 和 CIWI 都能获得较好的结果; 对于含有大量塘基等分布复杂的水产池塘研究区, MNDWI 和 CIWI 都不能较好地提取出水体信息, 其区分度分别为 21.59% 和 34.56%, 而 WZ5 区分度高达 41.78%, 并且水体与塘基的指数值有明显的分界线, 提取结果与实际最为相符, 精度最高, 从而显示了 WZ5 的优势。由于该指数只需将校正后的影像进行简单的波段计算及阈值的设置就能较好地提取水体信息, 操作方面优于复杂数学模型的提取方法, 且该指数对开阔水域及破碎水域都具有较高的提取精度, 适用范围广, 有利于提高湿地水域实时监测的精度, 有助于提高决策的正确性。

虽然本研究 WZ5 提取水体精度较高, 但也受较多因素的影响。首先该指数是采用中红外波段, 所以对于 SPOT 1-3 系列, IKONOS 和 Quick Bird 等的无中红外波段的传感器影像不适用。其次, 如果影像云层含量较高, 需要进行影像校正, 减少错误分类。后期研究中, 将进一步优化该指数, 并运用该指数结合决策树分析及各方面的知识通过编程实现自动化提取, 提高信息提取速率。

5 参考文献

- [1] GHOBADI Y, PRADHAN B, SHAFRI H Z M, *et al.* Spatio-temporal remotely sensed data for analysis of the shrinkage and shifting in the Al Hawizeh wetland [J]. *Environ Monit Assess*, 2015, **187**(1): 1 – 17.
- [2] SARP G, OZCELIK M. Water body extraction and change detection using time series: a case study of Lake Burdur, Turkey [J]. *J Taibah Univ Sci*, 2016, **11**(3): 381 – 391.
- [3] ADADE R, NYARKO B K, AHETO D W, *et al.* Fragmentation of wetlands in the south eastern coastal savanna of Ghana [J]. *Reg Stud Mar Sci*, 2017, **12**: 40 – 48.
- [4] McFEETERS S. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features [J]. *Int J Remote Sens*, 2012, **17**(7): 1425 – 1432.
- [5] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. *遥感学报*, 2005, **9**(5): 589 – 595.
XU Hanqiu. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI) [J]. *J Remote Sens*, 2005, **9**(5): 589 – 595.
- [6] 骆剑承, 盛永伟, 沈占锋, 等. 分步迭代的多光谱遥感水体信息高精度自动提取[J]. *遥感学报*, 2009, **13**(4): 610 – 615.
LUO Jiancheng, SHENG Yongwei, SHEN Zhanfeng, *et al.* Automatic and high-precise extraction for water information from multispectral images with the step-by-step iterative transformation mechanism [J]. *J Remote Sens*, 2009, **13**(4): 610 – 615.
- [7] SAGHEBIAN S M, SATTARI M T, MIRABBASI R, *et al.* Ground water quality classification by decision tree method in Ardebil region, Iran [J]. *Arabian J Geosci*, 2014, **7**(11): 4767 – 4777.
- [8] MISHRA K, PRASAD P R C. Automatic extraction of water bodies from landsat imagery using perceptron model [J]. *J Comput Environ Sci*, 2015, **2015**: 903465. doi: 10.1155/2015/903465.
- [9] CRASTO N, HOPKINSON C, FORBES D L, *et al.* A LIDAR-based decision-tree classification of open water surfaces in an Arctic delta [J]. *Remote Sens Environ*, 2015, **164**(46): 90 – 102.
- [10] PARDO-PASCUAL J E, ALMONACID-CABALLER J, RUIZ L A, *et al.* Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM⁺ multi-temporal images with subpixel precision [J]. *Remote Sens Environ*, 2012, **123**(6): 1 – 11.
- [11] GRINGS F, SALVIA M, KAESZENBAUM H, *et al.* Exploring the capacity of radar remote sensing to estimate wetland marshes water storage [J]. *J Environ Manage*, 2009, **90**(7): 2189 – 2198.

- [12] 邢丽玮, 牛振国, 张海英. 不同湿度指数在湿地分类中的对比研究[J]. 地理与地理信息科学, 2015, **31**(6): 35 – 40.
XING Liwei, NIU Zhenguo, ZHANG Haiying. Study on capability of wetness indexes for wetland classification [J]. *Geogr Geogr-Inf Sci*, 2015, **31**(6): 35 – 40.
- [13] XU Hanqiu. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery [J]. *Int J Remote Sens*, 2006, **27**(14): 3025 – 3033.
- [14] 凌成星, 张怀清, 林辉. 利用混合水体指数模型(CIWI)提取滨海湿地水体的信息[J]. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(2): 152 – 157.
LING Chengxing, ZHANG Huaiqing, LIN Hui. Research on extraction coastal wetlands water information using composition CIWI water index [J]. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2010, **19**(2): 152 – 157.
- [15] 朱宝山, 张绍华, 徐大龙, 等. 综合水体指数及其应用[J]. 测绘科学技术学报, 2013, **30**(1): 19 – 23.
ZHU Baoshan, ZHANG Shaohua, XU Dalong, *et al.* Comprehensive water index and its application [J]. *J Geomat Sci Technol*, 2013, **30**(1): 19 – 23.
- [16] ZHAO Xin, WANG Ping, CHEN Chao, *et al.* Waterbody information extraction from remote-sensing images after disasters based on spectral information and characteristic knowledge [J]. *Int J Remote Sens*, 2017, **38**(5): 1404 – 1422.
- [17] PANG Kun, XIE Wenbin, AO Zhigang, *et al.* The extraction of water based on texture features form remote sensing information [J]. *Adv Mater Res*, 2012, **546/547**: 1444 – 1447.
- [18] HUANG Chengquan, SONG Kuan, KIM S, *et al.* Use of a dark object concept and support vector machines to automate forest cover change analysis [J]. *Remote Sens Environ*, 2008, **112**(3): 970 – 985.