

DOI: 10.5846/stxb201405040881

付波霖,李颖,朱红雷,幸泽峰.基于 RS 的湖岸带物理结构完整性评价方法——以查干湖为例.生态学报,2015,35(23): - .
Fu B L, Li Y, Zhu H L, Xin Z F. Assessment of the Integrity of the Physical Structure in the Lakeshore Zone of Chagan Lake, China, Based on Remote Sensing. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(23): - .

基于 RS 的湖岸带物理结构完整性评价方法 ——以查干湖为例

付波霖^{1,2}, 李 颖¹, 朱红雷^{1,2}, 幸泽峰^{1,2}

1 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 长春 130102

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:以查干湖流域为研究区,利用 RS 和 GIS 技术,基于水利部《河流(湖)健康评估指标、标准与方法 V1.0》并加以改进,以 500m * 1000m 为评价基本单元,整个研究区共有 315 个物理结构基本评价单元,建立基于 RS 的湖岸带物理结构完整性评价体系,该评价体系由目标层、准则层和指标层构成,其中准则层由湖岸带状况、湖岸线发育率和湖泊萎缩率 3 项组成,指标层由地形坡度、植被覆盖率等 8 项指标构成。研究表明:38 个监测点中,查干湖 23 个,新庙泡 15 个,基于 RS 物理结构评价结果分别为 0.67—0.76 和 0.35—0.45,地面实测评价结果分别是 0.64—0.77 和 0.35—0.55。两种评价方法结果一致,并表明查干湖的湖岸带物理结构健康状态属于健康,新庙泡则属于亚健康。

关键词:湖岸带;物理结构完整性;指标体系;RS 和 GIS;基本评价单元

Assessment of the Integrity of the Physical Structure in the Lakeshore Zone of Chagan Lake, China, Based on Remote Sensing

FU Bolin^{1,2}, LI Ying¹, ZHU Honglei^{1,2}, XIN Zefeng^{1,2}

1 Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: In this study, we propose a new physical structure integrity assessment method, using Chagan Lake, China, as the study area. The method is based on the improved "river (lake) health assessment index, standard and method of V1.0" of the Ministry of Water Resources. A 500 m * 1000 m grid was selected on the lakeshore zone as the basic evaluation unit. An evaluation system of lakeshore physical structural integrity was established with 315 evaluation units by remote sensing and geograpy information system technology. The system was composed of target layer, a criterion layer, and an indicator layer. The criterion layer was composed of lakeshore condition, shoreline development rate, and lake atrophy rate. The index layer was composed of slope, vegetation coverage rate, and water level change rate, in addition to 8 other indicators. For 23 sampling points in Chagan Lake and 13 monitoring points in Xinmiao Lake, the RS evaluation were 0.60—0.74 and 0.35—0.52, respectively, while the field evaluation results were 0.64—0.77 and 0.35—0.55, respectively. The evaluation results were in good agreement with the two evaluation methods, and consistently indicated that the physical structural integrity of the lakeshore area of Chagan Lake was in a healthy state, while that of Xinmiao Lake was in a sub-healthy state.

Key Words: Lakeshore zone; physical structural integrity; indicator system; RS and GIS; basic evaluation unit

基金项目:国家自然科学基金项目(41271113)

收稿日期:2014-05-04; 网络出版日期:2015-

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liying@neigae.ac.cn

湖岸带是水陆生态系统间进行物质、能量和信息交换的生态过渡地带,对维持湖泊健康生命,保障社会和经济的健康发展具有十分重要的意义^[1]。随着全球气候变化和人类活动加剧,湖泊面积急剧减少、污染加剧、生态环境恶化等问题日益凸显,湖岸带已经成为区域自然环境变化和人与自然相互作用最为敏感、影响最为深刻的地理单元^[2]。湖岸带的保护和修复也正面临着严峻的挑战,湖岸带健康问题已成为湖泊研究的热点^[3]。湖岸带物理结构完整性是湖泊健康的重要组成部分,其与湖泊健康密切相关,是评价湖泊生态系统是否健康的基础,对湖泊保护、管理以及湖泊社会服务功能的发挥具有重要意义^[4]。

目前,国内外对湖泊的研究主要集在 3 个方面:湖泊生态系统健康、湖泊形态结构健康和湖泊健康^[5-8]。湖泊健康的内涵尚未明确,对湖岸带完整性评价研究较少,也未形成完整、公认的综合的指标评价体系。现行的湖岸带物理结构完整性评价方法主要是基于水利部《河流(湖)健康评估指标、标准与方法 V1.0》(简称 V1.0)。该评价方法是基于专家经验在湖岸带选取监测点位,布设 10m * 50m 的样方,采用人工统计方法求得评价结果^[9]。受自然条件限制和人为主观因素双重影响,基于监测样方的地面监测无法兼顾代表性、便利性和安全性,也很难全面准确的反映湖岸带结构稳定性状况。同时,湖岸带物理结构综合评价涉及内容广泛,所需数据繁多,目前较多采用的还是人工统计方法,在人力、效率和准确性等方面很难满足要求。

RS 和 GIS 技术具有实时获取地表信息的能力和强大的空间分析能力,在研究湖岸线形态、水域面积动态变化、水质和土地利用之间关系以及湖泊形态结构健康评价等方面已得到了大量应用^[10-12],但基于 RS 和 GIS 的物理结构完整性评价方面研究甚少。鉴于此,本文拟结合水利部 V1.0 和湖泊形态结构健康评价的相关理论和方法,形成基于 RS 的物理结构完整性评价方法,并以查干湖作为研究区,通过遥感监测评价结果与野外实测评价结果对比分析,对遥感监测评价方法的科学性和合理性进行论证,以期丰富和建立适合我国的基于 RS 的湖泊健康评价方法。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

查干湖地处松嫩平原腹地,霍林河末端与嫩江的交汇处。其东临嫩江及第二松花江,南为前郭灌区(第二松花江河谷冲积平原)及第二松花江与霍林河的低平原分水岭,西为霍林河河谷平原,北为大安台地及嫩江古河道(见图 1)。地势低平、起伏和缓,东南高,西南略高,中央及东北低^[13]。地貌类型为冲积湖积平原与河谷冲积平原,其中冲积湖积平原分布于查干湖湖区低洼处,河谷冲积平原分布于霍林河河谷及嫩江古河道^[14]。目前霍林河已断流,查干湖周边地区的人类活动(过度放牧、围垦湿地、油田和旅游开发等)改变了湖泊岸线、水面等的自然形态,破坏了湖岸带结构稳定性,极大影响了查干湖生态系统和湖泊健康,故对其进行湖岸带物理结构完整性评价已是势在必行的。

1.2 数据源

1.2.1 遥感数据

综合考虑遥感影像的可影像本身的质量和野外实地监测的时间,选取研究区 2009 年 7 月空间分辨率为 30m 的 Landsat 5 TM 遥感影像,轨道号是:119/29,其他数据包括,中国科学院地理所基于 TM 和 CBERS 遥感影像解译的 2005 年的 1:100000 的土地利用数据,中国科学院地理所(周成虎)编制的 1:500000 的地貌数据,1950s1:100000 地形图。

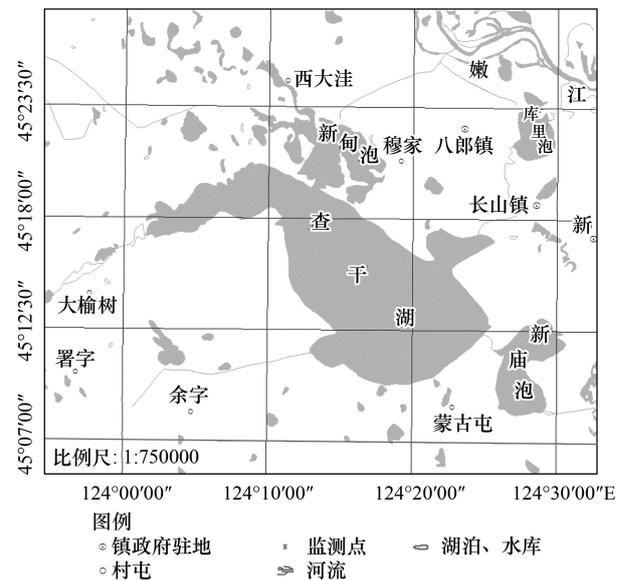


图 1 研究区位置
Fig. 1 location of Study area

参考 2005 年土地利用数据,采用人机交互的方式解译 2009 年的遥感影像,最终生成 2010 年土地利用数据并进行重分类,将水田、旱地、城镇用地、农村居民用地、工矿用地等重分类为人工干扰活动。

1.2.2 地面实测数据

考虑监测湖泊周边的地貌特征、景观格局、交通可达性等方面,在研究区湖岸带共布设 38 个监测点(见图 2),每个监测点划设 10m * 50m 的调查评价样方区。用 Leica DISTO D5 激光测距仪直接测量斜坡倾角和斜坡长度,进而反求斜坡高度,现场观察并记录湖岸带基质;采用多人目视估计取平均值的方法调查样方内植被覆盖率;在调查评价样方区内再选择多个 1m * 1m 的样方,利用尼康 D90 相机从上往下垂直照相,最后利用图像处理软件,采用二值分割法,计算各小样方草本植物覆盖度,继而推算调查样区草本覆盖度,采用多人目视估计求平均值的方法估算乔木和灌木覆盖度;利用尼康 D90 相机拍摄照片记录湖岸带人类干扰活动类型。

2 研究方法

2.1 评价范围界定

基于水利部 V1.0 的物理结构完整性实地监测对象主要有:湖岸带和陆域(湖岸带临近陆域 50m 以内),调查基本单元是 10m * 50m 的调查样方。而研究区位于松嫩平原腹地,湖岸带发育在冲积湖积平原与河谷冲积平原上,用 Leica DISTO D5 激光测距仪直接测量其宽度 500—1000m 之间,调查样方布设很难完全覆盖监测对象,所得评价结果显然不能全面、准确的反映湖岸带的结构稳定性。同时 del Tánago M G 和 de Jalón D G 等人研究评价河岸带状况的各种指标属性,指出在平原性较大的河流,合理的河岸带评价对象范围 200—1000m^[15]。

另外,大量研究结果表明湖岸带的结构稳定性和功能完整性取决于其植被类型及其覆盖度和连续性,还受制于一定距离和宽度的土地利用方式等人类活动的强度^[16,17]。同时,湖区周围一定范围内土地利用状况与湖泊水质存在相关关系^[18]。胡建等人将太湖流域分为 13 个水文生态单元,在景观尺度上研究土地利用格局与水质之间的相关关系,结果表明水质与林地面积占比呈正相关,与农田和居民用地的面积占比呈负相关^[19]。张殷俊等以江苏吴江为例,采用缓冲区方法研究区平原河网水质与土地利用的格局关系,结果表明耕地在 200 缓冲区内比重的增加有利于改善水质,而耕地和居民用地在 1000m 缓冲区内比重增加易造成面源污染^[20]。杨莎莎等人以苏子河流域内 54 个水质采样点为基点,研究结果表明,当缓冲区距离为 300m 时,耕地和居民地为主要景观类型,其斑块密度等指数均较高,耕

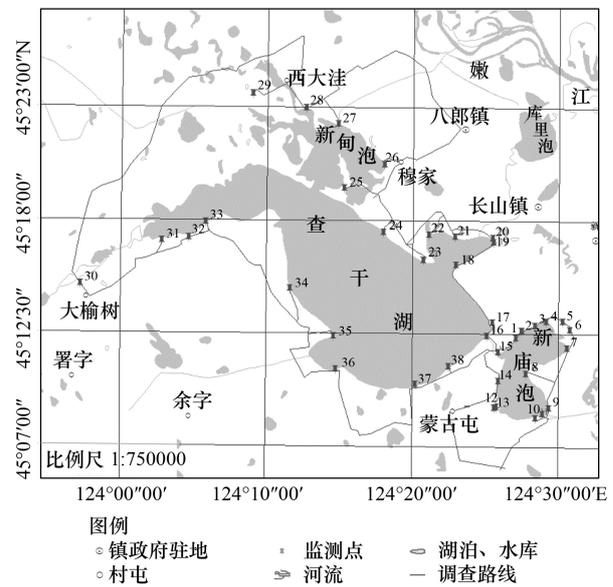


图 2 野外调查路线

Fig. 2 Field survey route

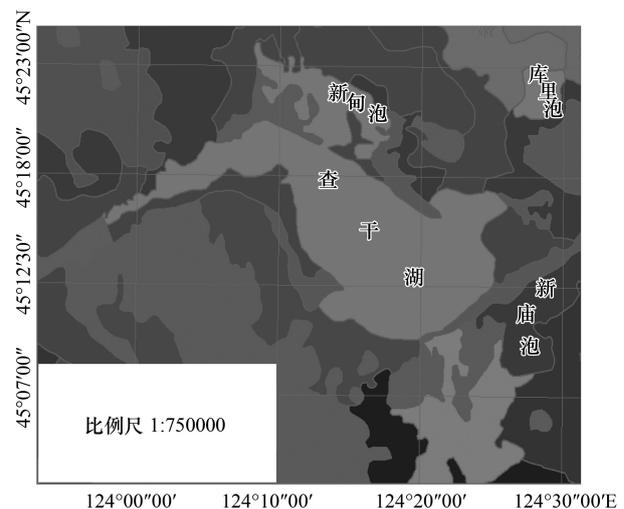


图 3 研究区地貌类型

Fig. 3 study area landforms

地的连通性较高,对水质的影响较大。缓冲区距离大于 300m,林地面积比例较高,林地聚集连通程度较好,对水质改善具有一定作用^[21]。

综合以上 3 个方面再结合研究区的地貌类型(具体见图 3),将查干湖水边线向陆域 1km 范围作为评价对象,并以 500m 为步长等分评价对象,形成 315 个基本评价单元(监测对象),具体见图 9。

2.2 评价指标体系构建及指标的获取

2.2.1 评价指标体系的构建

借鉴目前国内外已践行的河流(湖)健康评价方法中的物理结构完整性评价指标体系,再结合湖泊形态健康和 V1.0 的指标体系,选取 RS 技术易获取和具有湖岸带结构稳定性指示意义指标,建立基于 RS 的物理结构完整性评价体系,具体见表 1。

表 1 物理结构评价指标结构体系

Table 1 The physical structure of evaluation system

准则层 Criterion layer	指标层 Indicator layer	监测层指标 Indicators of Measuring layer	
		地面实测评价方法	基于 RS 评价方法
湖岸带状况 Lakeshore condition	湖岸带稳定性(BKS)	岸坡倾角(SA)	地形坡度(SA)
		岸坡高度(SH)	水面变化区域差异(WD)
		植被覆盖率(VCR)	植被覆盖率(VCR)
		湖岸带基质(SM)	湖岸带基质(SM)
	坡脚冲刷强度(ST)		
	植被覆盖度(BVC)	湖岸带植被郁闭度	反演植被覆盖度(BVC)
	人工干扰程度(SHD)	湖岸带硬性砌护、采砂、沿岸建筑物、道路、滨河公园、采矿、农业耕种等 9 类人类活动	影像解译出的水田、旱地、城镇用地、农村居民用地、工矿用地等人工干扰活动
湖岸线发育率 Shoreline development rate			评估年湖岸发育系数(SDI _C)与历史年(1950s)湖岸线发育系数(SDI _R)
湖泊萎缩率 Lake atrophy rate		评估年湖泊面积(A _C)与历史年(1950s)湖泊面积(A _R)	遥感解译提取湖泊面积

LC, Lakeshore condition; SDR, Shoreline development rate; LAR, Lake atrophy rate; BKS, Bank slope stability; BVC, Bank vegetation coverage; SHD, Shore human disturbance; SA, Slope angle; SH, Slope height; VCR, Vegetation cover rate; SM, Shore matrix; ST, Scour intensity; WD, Water difference

2.2.2 部分指标体系的生态学意义

文中指标体系中部分指标(如:自然植被覆盖率、植被覆盖度等)和水利部 V1.0 一致,其含义和生态意义在其标准与方法中已得到详细解释,在此不再赘述。重点解释以下两个指标:

水面变化区域差异。即以 500m 为步长等分湖岸线,由湖岸线向水域生成与监测对象相对应的 500m * 1000m 的格网中历史年和评价年湖泊水面面积变化差异,其计算公式为

$$WDr = \frac{U_b - U_a}{U_a} * 100\% \quad (1)$$

式中, U_a 、 U_b 分别是历史年和评价年湖泊面积,该指标直接反映了湖泊水面的涨落情况,水面的涨落进一步可以反映湖岸带岸坡的坡度陡缓程度,格网单元内,水面涨落变化越大,则岸坡坡度越小,反之坡度越大。

湖岸线发育率。其计算公式如下:

$$SDI = \frac{S}{2\sqrt{\pi A}} \quad (2)$$

式中 SDI 为岸线发育系数, S 为湖泊周长, A 为湖泊面积。该指标主要是反映湖岸带的不规则程度, SDI 值越大,湖岸线越不规则,相对能够提供的沿岸带生境多样性越高,同时相应的沿岸带面积也较高,这就有可能支

持更高的湖泊初级生产力^[22]。

2.2.3 指标的获取

在评价对象范围内,利用 1:100000 地形图数据计算研究区坡度,重分类之后的 2010 年 LUC 数据,提取自然植被覆盖率和人工干扰,1:500000 地貌数据再结合地貌分区表(表 2)获取地表岩性及提取 1950s 湖岸线。为保证湖岸线的精确性,Landsat TM 影像先计算 NDVI 再提取湖岸线和反演植被覆盖度。500m 为步长等分湖岸线,由湖岸线向陆域生成覆盖整个研究区的 315 个矩形缓冲区,格网化研究区建立基本评价单元,详细过程见(图 4)。

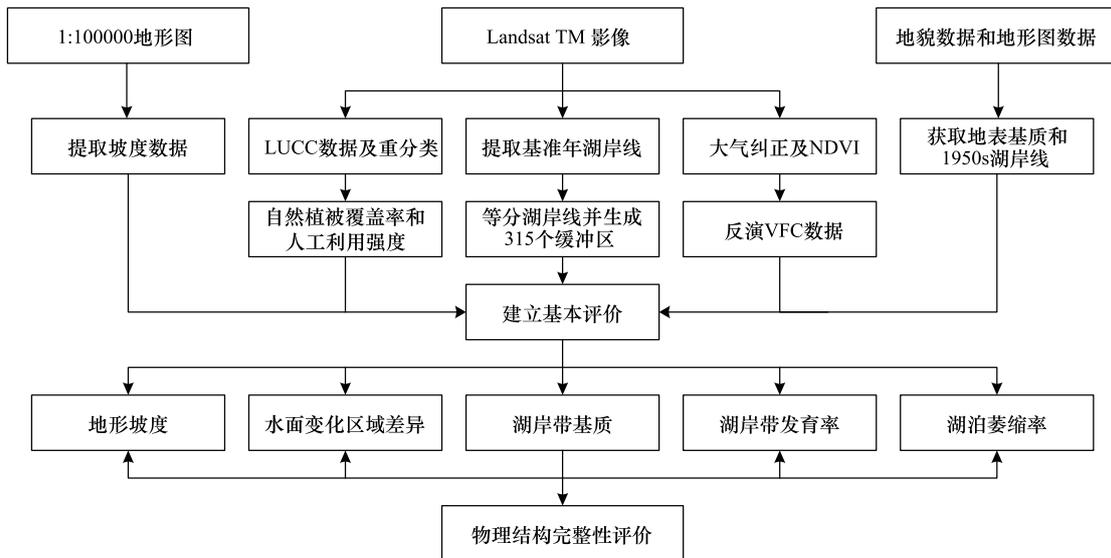


图 4 提取指标技术流程

Fig. 4 Technical process of extracting indicators

表 2 研究区地貌分区表

Table 2 Study area landforms distribution

地貌类型 Geomorphological types	地表高程(m) The elevation	地表岩性 Lithology	分布位置及特征 Place and character
冲积湖积地平原 Alluvial lacustrine plain	132—160	黄土状壤土	乾安县北部、查干湖北部等地。
	131—140	黄土状壤土	查干湖南部、西部等地。
	129—132	壤土、粘土	冲积湖积低平原的地形低洼处。
河谷冲积平原 River valley alluviation	127—135	粘性土及砂	呈带状分布于二松左岸。
	127—132	粘性土及砂	霍林河河谷两侧。
	129—132	壤土、粘土	查干湖区。

2.3 评价方法及赋分准则

构建定量或者定性指标体系是物理结构完整性评价的基础,其具体量化赋分标准是:植被覆盖度和湖泊萎缩率参照水利部 V1.0 的赋分标准,湖岸线发育率赋分标准参照湖泊萎缩率;其余指标赋分标准见表 5,其计算方法,见表 3。

物理结构层包括 3 个指标,其赋分 PFR 通过下式(3)计算,

$$PFR = LCr * LCw + SDRr * SDRw + LARr * LARw \quad (3)$$

式中变量和权重(表 4)。

3 结果分析与讨论

根据岸线发育率的计算方法,查干湖和新庙泡的岸线发育率分别是 10%、16%,湖泊萎缩率分别是 -27%、

26%,基于水利部 V1.0 和 RS 的物理结构评价指标赋分准则,岸线发育率赋分是 60 和 40,湖泊萎缩率赋分分别是 100、20;物理结构评价结果见图 5,湖岸带状况见图 6,图中的数值都是物理结构评价和河岸带状况结果除以 100 后得到的。

表 3 基于 RS 的物理结构指标计算方法

Table 3 The calculation method of index based on RS

准则层 Criterion layer	指标层 Indicator layer	权重 Weight	基于 RS 物理结构评价计算方法 Calculation method of indicator based on RS
LCr	BKSr	0.25	$BKSr = (VCRr + SAR + SMr + WDr)/4$
	BVCr	0.5	$BVCr = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min})$
	SHDr	0.25	
SDRr			$SDRr = 1 - \frac{SDI_C}{SDI_R}$
LARr			$LARr = 1 - \frac{A_C}{A_R}$

表 4 物理结构评价指标的权重赋值

Table 4 The weight of physical structure evaluation

物理结构指标 Indicator of physical structure	权重标记 Weight sign	RS 的权重数值 Weight coefficient based on RS	实测的权重值 Weight coefficient based on field survey
湖岸带状况 Lakeshore condition	LCw	1/2	2/3
湖岸线发育率 Shoreline development rate	SDRw	1/4	
湖泊萎缩率 Lake atrophy rate	LARw	1/4	1/3

表 5 基于 RS 的湖岸稳定性评估指标赋分标准

Table 5 The score criteria of lakeshore stability evaluation

岸坡特征 Bank slope condition	稳定 Stable	基本稳定 basically stable	次不稳定 Metastable	不稳定 Unstable
分值 Value	90	75	25	0
地形坡度 Slope angle(度)(<)	15	30	45	75
植被覆盖率 Vegetation cover rate(%)(>)	75%	50%	25%	0%
水面变化率 Water difference(%)(<)	15	30	45	60
人工干扰强度 Shore human disturbance(%)(<)	15	30	45	60
基质 Shore matrix(类别)	基岩	岩土湖岸	黏土湖岸	非黏土湖岸

为便于对比地面实测方法的评价结果,基于 RS 的评价结果也分为两个尺度:监测点尺度和整体评价尺度,通过对两种方法的评价结果的对比分析,再结合河(湖)健康评估分级表(表 6),可以得到如下结论:

(1)在监测点尺度上,38 个监测点(查干湖 23 个,新庙泡 15 个)中,基于 RS 和地面实测物理结构评价结果分别是 0.67-0.76 和 0.64-0.77,新庙泡的评价结果分别是 0.35-0.45 和 0.35-0.55,对应监测点位中,评价数值存在差异,但绝大部分差异均在 0.2 之内,没有超越判定健康类型等级的阈值,不影响最终评价结果(图 5)。这种差异主要原因是:监测结果中,部分点位的实测值高于 RS 计算的值,这个主要是由于遥感影像的时相性和空间分辨率的影响,反演植被覆盖度略低于实测值;部分点位实测值低于 RS 计算的值,则是由于地面实测结果都是基于湖岸带 10m * 50m 样方区,考虑样方区的可达性,选取的样方区往往是人为干扰强度大的区域,同时目视判别样方区植被覆盖率,主观性较大,导致地面实测结果数值较低;另外,虽然水域面积区域变化和湖岸线发育率在指标体系中所占的权重值较少,但也会带来些许误差,特别是研究区为浅水湖,丰、枯水期水域面积的变化为 26.5%,受限于遥感影像分辨率,提取水域面积会存在 0.1 个像元左右的误差,也会给最终的评价结果带来些许误差。

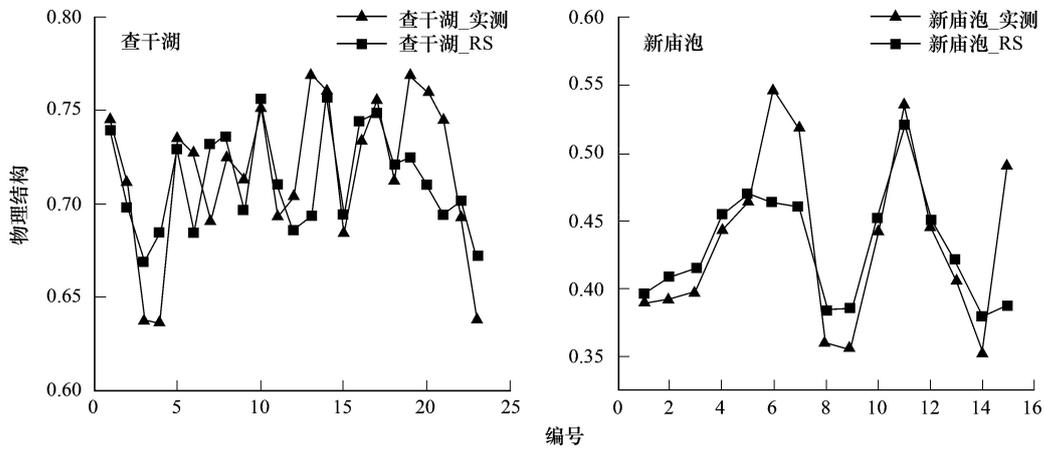


图 5 物理结构评价结果

Fig. 5 physical structure evaluation results

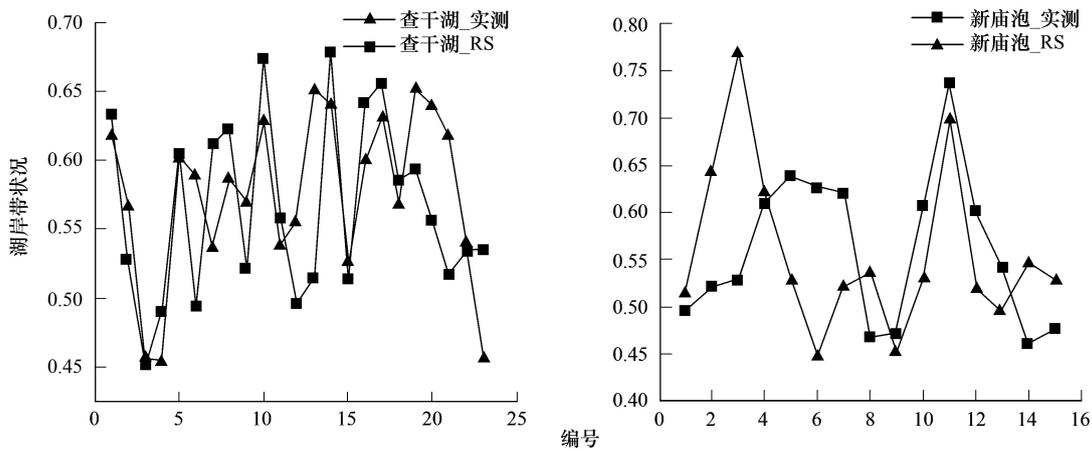


图 6 查干湖湖岸带状况评价结果

Fig. 6 Lakeshore's status evaluation results

(2) 在整体评价尺度上,其物理结构评价结果分别是0.7和0.4,两种方法的物理结构评价结果在判断研究区的物理结构完整性状况上是吻合的(见图5),根据表6判定,查干湖物理结构均处于健康状态,新庙泡处于亚健康状态,具体见表7。

(3) 两种尺度上,基于RS的物理结构评价结果和地面实测基于V1.0的实测评价结果的一致性进一步论证了1km评价对象的可靠性和将岸线发育系数作为评价指标引入物理结构评价指标体系的合理性。另外,基于RS的物理结构评价方法可以连续地获取整个湖岸带物理结构的健康状态(图9),优于地面实测方法,同时从图9中,可以看到有一部分湖岸带的物理结构因受人为干扰较强而处于不健康状态的,但是地面实测的整体评价方法没有反映出来。

表 6 河(湖)健康评估分级表

Table 6 river (lake) Health Assessment classification

等级 Rank	类型 Classification	赋值范围 number range
1	理想状况	0.8—1
2	健康	0.6—0.8
3	亚健康	0.4—0.6
4	不健康	0.2—0.4
5	病态	0.0—0.2

表 7 湖岸带尺度物理结构数值

Table 7 physical structure value of Lakeshore's scale

湖泊名称 Name	实测物理结构平均值 physical structure value based on field survey	基于 RS 物理结构平均值 physical structure value based on RS	健康状态 Health status
查干湖 Chagan Lake	0.72	0.71	健康
新庙泡 Xinmiao Lake	0.44	0.40	亚健康

4 结语

(1) 本文提出了基于 RS 的湖岸带物理结构完整性评价方法, 并与传统的地面实测方法进行了对比, 评价结果在监测点尺度和河岸带尺度两个尺度上与地面实测的评价结果一致, 充分论证了该方法的可行性和评价指标体系合理性。

(2) 河流(湖)健康评价目前还处于探索阶段, 其指标体系、评价标准和评价方法都有待于进一步研究和完善。本文提出的基于 RS 的物理结构评价方法是以平原性湖泊(查干湖)为研究区的, 该方法在平原性湖泊得到了论证, 适用性较好, 其他类型湖泊的适用性还需今后进一步论证。

参考文献 (References):

- [1] 尹志杰, 刘晓敏, 陈星. 湖岸带健康状况综合评价与生态环境保护—以常熟市南湖荡为例. 安徽农业科学, 2011, 39(6): 3485-3487.
- [2] 冷辉, 张凤太, 王腊春, 李娜. 湖泊形态健康内涵及其集对分析评价—以大纵湖为例. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, 40(5): 514-519.
- [3] 周鹏飞. 湖泊健康综合评价指标体系研究. 安徽农业科学, 2012, 40(21): 11005-11007.
- [4] 李灿, 李永, 李嘉. 湖泊健康评价指标体系及评价方法初探. 四川环境, 2011, 30(2): 71-75.
- [5] 李春华, 叶春, 赵晓峰, 王秋光, 陈小刚, 孔祥龙, 卢少勇, 徐东炯, 陈桥. 太湖湖滨带生态系统健康评价. 生态学报, 2012, 32(12): 3806-3815.
- [6] Xu F L, Zhao Z Y, Zhan W, Zhao S S, Dawson R W, Tao S. An ecosystem health index methodology (EHIM) for lake ecosystem health assessment. *Ecological Modelling*, 2005, 188(2-4): 327-339.
- [7] Hu Z X, Hu W P, Gu X H, Chen Y W, Ji J. Assessment of ecosystem health in Lake Taihu. *Journal of Lake Science*, 2005, 17(3): 256-262.
- [8] Xu F L. Ecosystem health assessment of Lake Chao, a shallow eutrophic Chinese lake. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 1996, 2(1/2): 101-109.
- [9] 全国河湖健康评估技术工作组. 河流(湖)健康评估指标、标准与方法(1.0版). 水利部水资源司政府文件, 2010.
- [10] 赵鹏, 夏北成, 秦建桥, 赵华荣. 流域景观格局与河流水质的多变量相关分析. 生态学报, 2012, 32(8): 2331-2341.
- [11] Johansen K, Phinn S, Dixon I, Douglas M, Lowry J. Comparison of image and rapid field assessments of riparian zone condition in Australian tropical savannas. *Forest Ecology and Management*, 2007, 240(1-3): 42-60.
- [12] Xu F L, Tao S, Dawson R W, Li B G. A GIS-based method of lake eutrophication assessment. *Ecological Modelling*, 2001, 144(2): 231-244.
- [13] 苗成凯. 查干湖保护区可持续发展对策研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2008.
- [14] 李庆坤. 吉林省查干湖湿地恢复保护中洪水资源利用与配置研究[D]. 南京: 河海大学, 2003.
- [15] González del Tánago M, García de Jalón D. Attributes for assessing the environmental quality of riparian zones. *Limnetica*, 2006, 25(1/2): 389-402.
- [16] Wasson J G, Villeneuve B, Iital A, Murray-Bligh J, Dobiasova M. Large-scale relationships between basin and riparian land cover and the ecological status of European rivers. *Freshwater Biology*, 2010, 55(7): 1465-1482.
- [17] Fernández D, Barquín J, Álvarez-Cabria M, Peñas F J. Land-use coverage as an indicator of riparian quality. *Ecological Indicators*, 2014, 41:

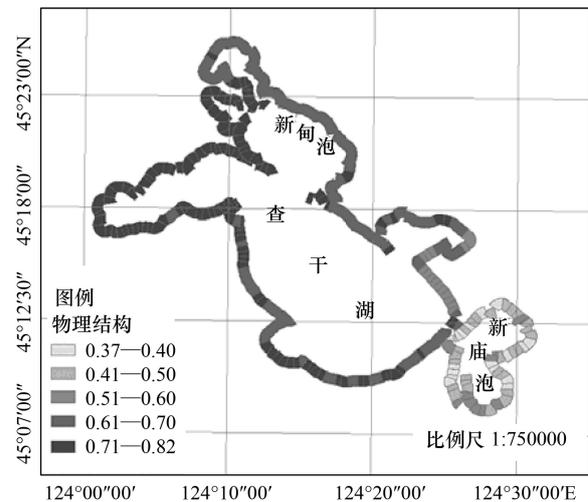


图 7 湖岸带物理结构 315 个基本评价单元评价结果

Fig. 7 Lakeshore's physical structure evaluation results in 315 basic units

165-174.

- [18] 于术桐, 黄贤金, 程绪水, 马其芳. 流域土地利用变化的水质响应研究进展. 中国人口资源与环境, 2011, 21(S1): 422-426.
- [19] 胡建, 刘茂松, 周文, 徐驰, 杨雪姣, 张少威, 王磊. 太湖流域水质状况与土地利用格局的相关性. 生态学杂志, 2011, 30(6): 1190-1197.
- [20] 张殷俊, 陈爽, 彭立华. 平原河网地区水质与土地利用格局关系——以江苏吴江为例. 资源科学, 2009, 31(12): 2150-2156.
- [21] 杨莎莎, 汤萃文, 刘丽娟, 李小玉, 叶寅. 流域尺度上河流水质与土地利用的关系. 应用生态学报, 2013, 24(7): 1953-1961.
- [22] 潘文斌, 黎道丰, 唐涛, 蔡庆华. 湖泊岸线分形特征及其生态学意义. 生态学报, 2003, 23(12): 2728-2735.