

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2020.0079

李昭阳,王瑶,汤洁,等. 1985—2015年吉林省湖泊资源演化的时空动态特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(4): 121-129. LI Z Y, WANG Y, TANG J, et al. Spatiotemporal dynamic characteristics of lake resource evolution in Jilin Province from 1985 to 2015[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(4): 121-129. (in Chinese)

1985—2015年吉林省湖泊资源演化的时空动态特征

李昭阳,王瑶,汤洁,曹旂丹,段宇聪

(吉林大学 新能源与环境学院, 长春 130012)

摘要:利用 Landsat 遥感影像,采用面向对象分类法,获取 30 年(1985—2015)序列的吉林省湖泊空间分布图。基于 GIS 通过时间动态指数、空间分布矢量密度指数以及多个景观指数对湖泊演化的时空动态特征进行系统分析。结果表明:30 年间吉林省湖泊面积总体呈萎缩趋势,面积由 2 667.12 km² 减少到 2 131.25 km²,湖泊数量减少了 72 个,减少比例为 13.74%;吉林省湖泊资源以小型湖泊(0~<10 km²)为主,占比超过 90%,30 年间不同面积等级的湖泊数量均有所减少,其中小型湖泊减少了 63 个,占 13.04%;空间分布矢量密度显示吉林省湖泊资源的分布呈现显著的分区特点,其中东部湖泊资源稀少且密度指数最低,湖泊数量增加了 10.39%,但总体面积减少了 10.83 km²;西部湖泊资源丰富,以小型湖泊为主,30 年间湖泊数量和面积均显著减少,面积减少 266.85 km²,数量减少 25.54%,中部湖泊资源变化波动较大,面积总体减少 237.75 km²,数量减少 5.33%。

关键词:吉林省;遥感;湖泊资源;动态变化;景观指数

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Spatiotemporal dynamic characteristics of lake resource evolution in Jilin Province from 1985 to 2015

LI Zhaoyang, WANG Yao, TANG Jie, CAO Yidan, DUAN Yucong

(College of New Energy and Environment, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: The object-oriented classification method is utilized for Landsat remote sensing imagery and obtain spatial distribution maps of lakes in Jilin Province during the 30 years (from 1985 to 2015). The temporal and spatial dynamic characteristics of lake evolution are systematically analyzed using GIS through time dynamic index, spatial distribution vector density index, and multiple landscape indexes. The results showed that: The area of lakes in Jilin Province showed a shrinking trend in 30 years, the area has decreased from 2 667.12 km² to 2 131.25 km², respectively, the number of lakes has decreased by 72, with a reduction ratio of 13.74%; lake resources in Jilin Province are mainly small lakes (0~<10 km²), accounting for more than 90%, the number of lakes in different sizes has decreased in 30 years, of which 63 small lakes have decreased, accounting for 13.04%; the spatial distribution vector density shows that the distribution of lake resources in Jilin Province presents different characteristics in different regions, the lake resources in the east are scarce and have the lowest density index, the number of lakes has increased by 10.39%, but the total area has decreased by 10.83 km²; the lake resources in the west are rich and mainly small lakes, the number and area of lakes in 30 years have decreased significantly, the area has decreased by 266.85 km² and the number has decreased by 25.54%, respectively, the lake resources in the central region fluctuate greatly, the area has decreased by 237.75 km² and the number has decreased by 5.33%.

Key words: Jilin Province; remote sensing; lake resource; dynamic change; landscape index

收稿日期:2019-11-25 修回日期:2020-01-15 网络出版时间:2020-02-28

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20200227.1624.002.html>

基金项目:国家自然科学基金(41471152);吉林省环境保护科研项目(吉环科字第 2016-16 号)

作者简介:李昭阳(1978—),女,吉林长春人,副教授,博士,主要从事环境遥感研究。E-mail: lizhaoyang227@163.com

通信作者:王瑶(1995—),女,吉林吉林人,主要从事环境遥感研究。E-mail: 13166834746@163.com

湖泊作为水系的重要组成部分,在调节径流、改善区域生态环境和保持生物多样性方面起着重要作用。近年来,在全球变化和人类活动共同作用下,湖泊资源退化严重、面积萎缩、水质恶化、系统服务功能下降。Zhang 等^[1]对过去 50 年中国湖泊演变的研究表明,在中国东部地区有 333 个湖泊消失。2018 年《中国生态环境状况公报》显示,我国 111 个重点湖泊中 33.3% 的淡水水质达不到生活饮用水标准。为了避免走“先污染,后治理”的老路,2014 年环境保护部制定了《水质较好湖泊生态环境保护总体规划(2013—2020 年)》,2015 年 4 月国务院发布了《水污染防治行动计划》(“水十条”),实施最严格的水环境管理制度,全面推进水环境的治理和保护,系统监测湖泊的动态变化,全面了解湖泊的发展趋势,能够有针对性地开展湖泊的保护与治理工作,对科学利用和保护湖泊资源具有重要的指导作用。

对湖泊动态变化的监测主要通过遥感技术实现,其主要特点是实时性、宏观性、经济性,能够客观且准确地提取湖泊变化信息^[2]。近些年,利用遥感技术研究不同地区的湖泊变化成为研究热点。Liao 等^[3]利用 Landsat TM / ETM+ 和中国 HJ-1 卫星图像,通过面向对象分类方法以及人机交互解译进一步优化和改进了分类结果,实现了全球水的高分辨率遥感制图,准确率可达 96%;罗玲等^[4]基于 Landsat TM、ETM+、OLI 和中国环境资源卫星多时相遥感影像,利用 eCognition 软件和面向对象分类方法提取松嫩平原西部湖泊和水库/坑塘蓄水面积;Landsat 影像的广泛应用还体现在学者们对青藏高原内陆湖泊^[5]、喜马拉雅山的冰川湖泊^[6]、城市(上海)湿地^[7]、东北湖区^[8]动态变化的研究。此外,不同地区的研究还包括对杞麓湖和异龙湖^[9]、黄土高原地区湖泊^[10]、青海省湖泊^[11]、鄱阳湖^[12]以及艾比湖^[13]进行水体识别和提取。在湖泊提取方法方面,很多国内外学者通过开发算法、优化模型实现对水体的提取,且都取得了较高的精度。Verpoorter 等^[14]使用高分辨率卫星图像生成 GLObal WAtER BODies 数据库(GLOWABO);Bracht-Flyr 等^[15]针对难以获取水文数据的偏远地区,建立了区域稳态湖泊水量平衡模型;Cai 等^[16]通过优化水平面积模型,实现了对鄱阳湖面积变化研究;Wang 等^[17]提出了 L-V-NSCT 方法,并利用此方法分析了洞庭湖的变化;朱小强等^[18]建立温度植被水体指数(TVWI),对艾比湖、博斯腾湖、鄱阳湖、阿拉湖水体进行提取,总精度在 97% 以上。此外,目前应用较为广泛的水体

提取方法还包括归一化差异水指数(NDWI)^[19]、面向对象方法^[20-22]、比值植被指数(RVI)^[23]、混合水体指数模型(CIWI)^[24]等诸多方法。

近年来基于遥感技术开展对吉林省湖泊资源的研究较少,许诗等^[25]利用目视解译获取了 1986、1995、2008 年共 3 期吉林省土地利用数据,对湖泊变化特征进行了分析;马建行等^[26]利用灰色关联度模型,反演了吉林省中西部湖泊透明度;龙振宇等^[27]对吉林省西部 10 个浅水湖泊水环境质量和大型底栖动物群落特征进行了研究;李雪菲等^[28]以水化学特征为出发点,对吉林省西部 6 个湖泊开展水质评价。以上研究多为针对省内少数重点湖泊,以吉林省西部居多,缺少对全省湖泊资源长时间尺度变化特征的总体把握。近年来,随着吉林省“河湖连通”工程的实施,进一步改变了湖泊生态系统的分布格局,因此,本文对吉林省湖泊资源变化展开长时间跨度研究,可为保证湖泊环境的治理与保护工作提供理论依据和数据支撑。

1 研究区概况

吉林省位于东北亚几何中心地带,地跨东经 121°38′~131°19′,北纬 40°50′~46°19′(见图 1),属于温带大陆性季风气候,四季分明,雨热同季。土地面积 18.74 万 km²,占中国国土面积的 2%^[29]。

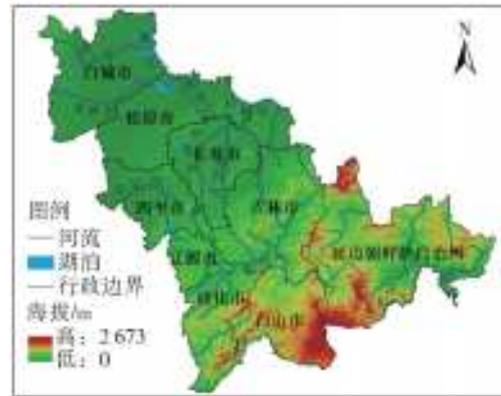


图 1 研究区概况

Fig. 1 General situation map of the study area

吉林省河流众多,五大水系有图们江、鸭绿江、辽河、绥芬河和松花江水系,支流有辉发河、伊通河、牡丹江、拉林河、饮马河、洮儿河、嫩江等。吉林省是我国湖泊资源较为丰富的省(区)之一。东部以长白山地为主,水能资源丰富,水库众多,水能资源 98% 分布在东部山区,自然湖泊与人工湖泊均较多。中部以台地为主,人口分布集中,水资源需求大,湖泊资源主要以人工湖泊为主,多为水源地。西部以低平原为主,地貌上为由松花江、嫩江及其支流冲积和

洪积而成的漫岗低丘及岗丘间洼地,大量小型湖泊星罗棋布,形成对气候变化敏感的自然湖泊群。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文遥感影像数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)及USGS(<https://glovis.usgs.gov/>),包括1985—2015年每5年间隔的吉林省Landsat 1-4多光谱扫描仪MSS、Landsat 5专题制图仪(TM)、Landsat 7增强专题制图仪(ETM+)和Landsat 8陆地成像仪(OLI)所获取的遥感卫星影像,共计7期、140景。除MSS数据重采样后空间分辨率为60 m外,其他数据空间分辨率均为30 m。为避免不同季节降雨对湖泊的影响,所下载影像均为9、10月,含云量均低于5%。

2.2 影像信息提取与属性库建立

面向对象法利用影像的空间信息,结合光谱统计特征、纹理特征、空间关系等因素,能够得到较高精度的信息提取结果,因此首先对影像进行正射校正、图像拼接和裁剪的预处理,再基于面向对象分类法,利用ENVI 5.3对1985—2015年遥感影像进行解译,在ArcGIS 10.7软件平台对湖泊的矢量边界进行人工目视校正后,获取了1985—2015年吉林省湖泊空间分布图。通过查阅相关资料建立了空间属性库,确定了湖泊的名称、面积、所在区域、是否为人工湖泊等属性,对湖泊进行统计(面积小于1 km²的,仅统计有记载的湖泊),为后续分析提供基础信息。

2.3 时间特征分析方法

应用湖泊动态度分析长时间尺度湖泊面积变化特征,该指标可以反映区域某一时段湖泊面积(或数量)变化的速率,能够将湖泊资源变化的剧烈程度定量化,其公式为

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: K 为某一时段内湖泊变化动态度,即湖泊面积(或数量)的年均变化率; U_a 、 U_b 分别为研究期初、期末的湖泊面积(或数量); T 为研究时间段长。

2.4 空间特征分析方法

2.4.1 空间分布矢量密度分析

在湖泊空间分布图的基础上,应用空间格网工具(generate tessellation)生成覆盖研究区的正六边形要素的镶嵌格网。利用研究区边界裁剪

格网后,按相同字段与湖泊分布图进行空间关联运算,当单位正六边形面积设定为80 km²时,能使研究区内湖泊空间分布矢量密度具有较好的区分效果。

2.4.2 景观指数方法

景观指数是指能够高度浓缩景观格局信息,反映其结构组成和空间配置某些方面特征的简单定量指标^[30]。本研究结合研究对象及研究区情况,在类型水平选取斑块密度(PD)、周长-面积分维数(PAFRAC)、斑块结合度指数(COHESION),利用Fragstats 4.2计算后得出研究区近30年湖泊景观变化特征。景观指数描述及意义见表1,具体计算公式详见参考文献^[30-32]。

表1 景观格局指数及其描述
Tab. 1 Landscape indexes and their discription

景观指数	缩写	描述
斑块密度	PD	每平方千米类型的斑块个数,反映景观破碎化程度。斑块密度越大,则斑块越小;斑块数量越多,景观破碎化程度越大。
周长-面积分维数	PAFRAC	反映景观形状的复杂程度,取值在1~2。越接近1,表示该景观斑块形状越规则、简单;反之则表明景观的斑块形状越不规则,斑块周边越复杂。
斑块结合度指数	COHESION	反映景观组分的空间配置特征。数值越大,表明该类型斑块结合程度越高,斑块连接程度越好。

3 结果与分析

3.1 吉林省湖泊总体动态变化特征

对吉林省湖泊空间数据集进行空间可视化处理后,生成1985—2015年吉林省湖泊空间变化(见图2)。30年间全省湖泊总面积为1 988.66~2 667.12 km²,见图3(a),湖泊面积总体呈波动下降趋势,共萎缩535.87 km²,动态度为-0.67%(表2)。自然湖泊面积变化较明显,30年动态度为-0.73%,人工湖泊面积动态度为-0.55%。2000—2005年面积扩张最大,共增加497.42 km²;2005—2010年面积萎缩最为显著,共减少565.33 km²。

近30年湖泊数量为429~526个,相邻时间点湖泊数量呈波动性变化,见图3(b)。1995—2000年湖泊数量动态度最小,为-2.89%,个数减少76个,减少幅度为14.45%;2000—2005年湖泊数量动态度最大,个数增加28个,增长比为6.22%;从整体上看,1985—2015年湖泊总数量呈下降趋势,湖泊减少72个,减少比例为13.74%。

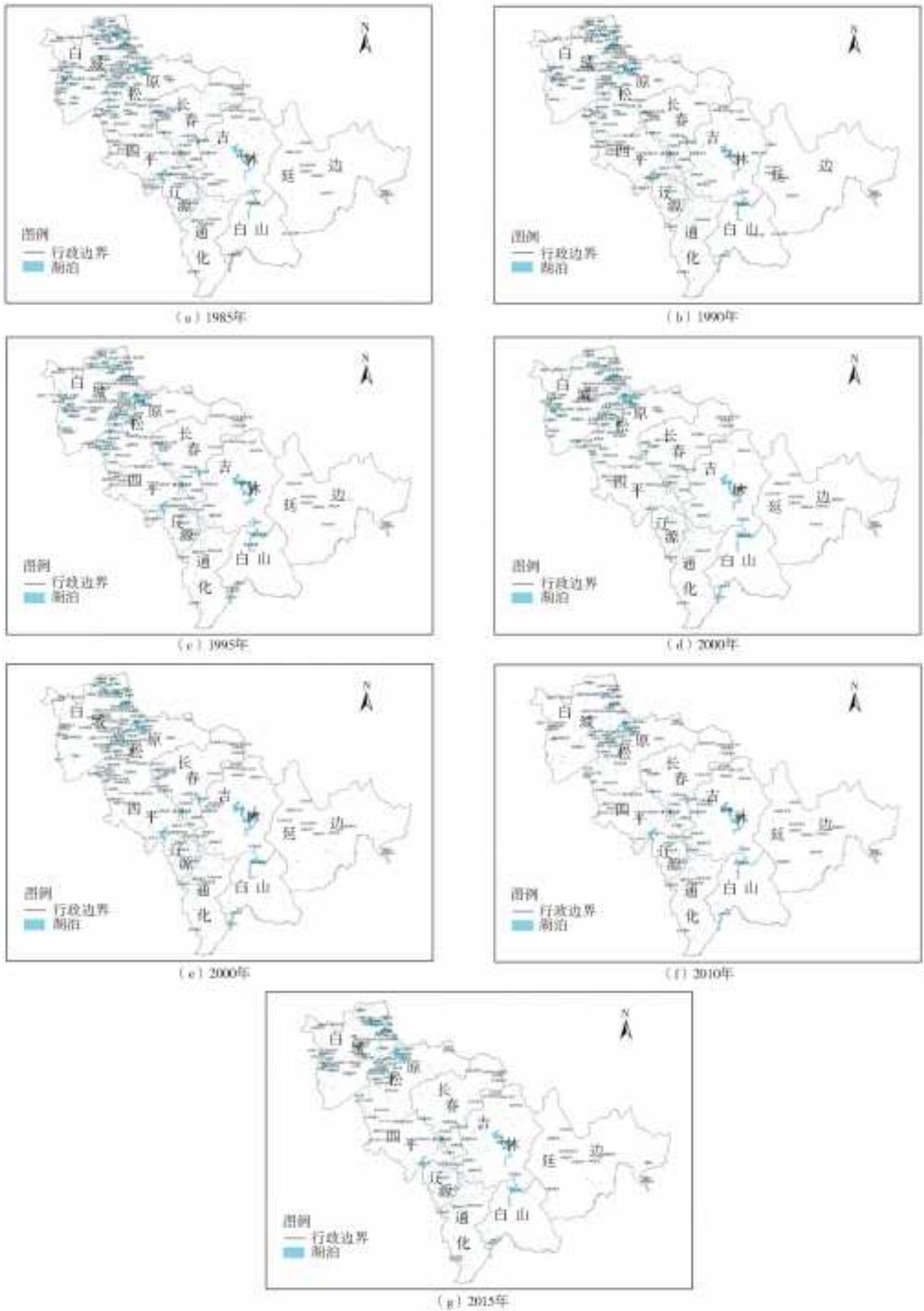


图 2 1985—2015 年吉林省湖泊空间变化

Fig. 2 Spatial variation of lakes from 1985 to 2015 in Jilin Province

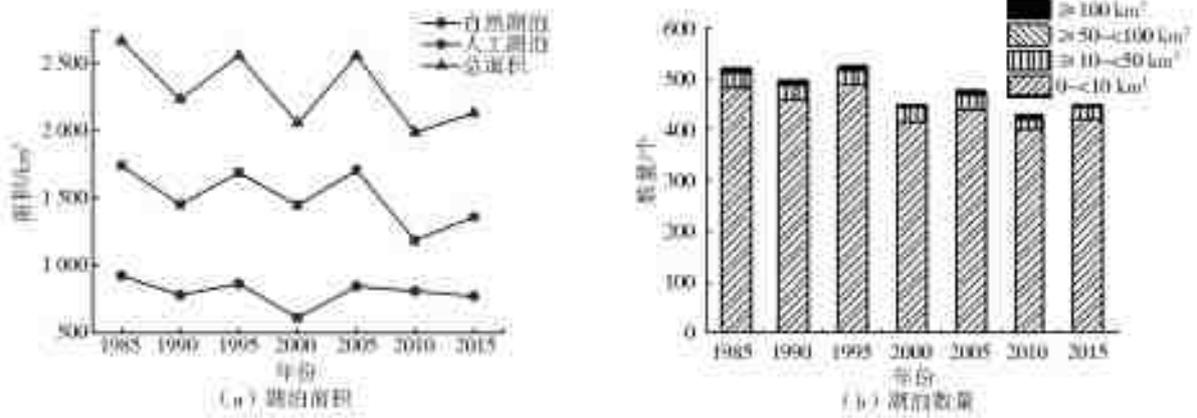


图3 1985—2015年吉林省湖泊面积、数量变化

Fig. 3 Lake area and quantity change in Jilin Province from 1985 to 2015

表2 1985—2015吉林省湖泊面积、数量动态度

Tab. 2 Lake area and number of dynamic degrees from 1985 to 2015 in Jilin Province

年份	湖泊面积动态度/%			湖泊数量动态度/%				总个数
	自然	人工	总面积	0~<10 km ²	≥10~<50 km ²	≥50~<100 km ²	≥100 km ²	
1985—1990	-3.34	-3.11	-3.26	-0.95	-0.63	0	-5.00	-0.95
1990—1995	3.30	2.15	2.90	1.17	0.65	-4.00	0	1.08
1995—2000	-2.89	-5.89	-3.91	-2.83	-2.50	-15.00	0	-2.89
2000—2005	3.62	7.71	4.84	1.10	1.43	40.00	6.67	1.24
2005—2010	-6.09	-0.84	-4.43	-1.72	-7.33	6.67	-5.00	-2.05
2010—2015	2.89	-0.96	1.43	0.84	7.37	-5.00	0	1.07
1985—2015	-0.73	-0.55	-0.67	-0.43	-0.63	-1.33	-0.83	-0.46

注:表中数值为年份区间内的数值,不是某一年的数值。

为进一步揭示不同规模大小湖泊的变化规律,根据面积大小将湖泊分为4个等级:小型湖泊(0~<10 km²)、中型湖泊(≥10~<50 km²)、大中型湖泊(≥50~<100 km²)、大型湖泊(≥100 km²),并分别分析其变化特征。

吉林省湖泊资源中0~<10 km²的小型湖泊数量占湖泊总数的92%以上,大型湖泊数量较少,占比不到总数量的1%。30年4种类型的湖泊数量均呈下降趋势,湖泊数量动态度从小到大依次为:小型湖泊、中型湖泊、大型湖泊及大中型湖泊。小型湖泊的数量减少最多,共减少13.04%;大中型湖泊由于基数小,因此数量动态度最大,为-1.33%,数量减少25.00%。

3.2 吉林省湖泊空间分布特征分析

通过计算1985—2015年吉林省湖泊景观生态指数(图4)可知:湖泊的斑块密度在0.22~0.38,1990年达到峰值后持续下降,2005—2015年又有所上升,表明研究区内湖泊斑块破碎化情况并无改善;1985—2005年周长-面积分维数由1.30降至1.28,下降1.53%,斑块形状趋于简单,表明湖泊景观受人为干扰程度较大,2005—2015年有所上升,整体

变化不明显;研究期内,吉林省湖泊斑块结合度指数由97.30上升至98.02,但在2005—2010年急剧下降,湖泊斑块连接性受到破坏,2010后开始回升,湖泊的连接性有所提高,“河湖连通”工程对改善区域水循环及水资源的高效利用作用显著。

通过进行空间分布的矢量密度分析可见,吉林省湖泊资源的分布存在明显的分区特征(图5),受吉林省东、中、西部地区不同的地形地貌因素的影响,湖泊在3个区域的分布也呈现出不同的特点。东部区域主要包括通化市、白山市、延边朝鲜族自治州等地,湖泊空间密度指数最低,湖泊率为0.25%~0.32%;中部区域包括长春市、吉林市、四平市、辽源市等地,湖泊率在0.80%~1.46%,但密度指数偏低;西部区域主要指松原市和白城市,湖泊密集程度最高,湖泊率也最高,为1.89%~3.29%。

不同规模的湖泊在空间分布上也存在明显差异(图6),小型湖泊(0~<10 km²)主要集中在吉林省西部和中部偏南地区;中型湖泊(≥10~<50 km²)的分布以西部为主,少量分布在中部地区;大中型湖泊(≥50~<100 km²)散落在中、东部地区;大型湖泊(≥100 km²)平均分布于西部、中部。

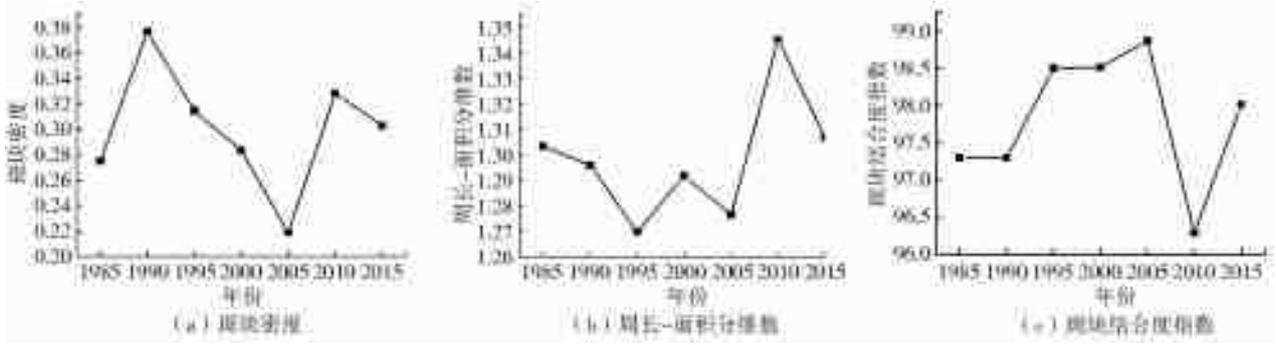


图 4 1985—2015 年吉林省湖泊景观生态指数变化

Fig. 4 Lake landscape ecological index change from 1985 to 2015 in Jilin Province

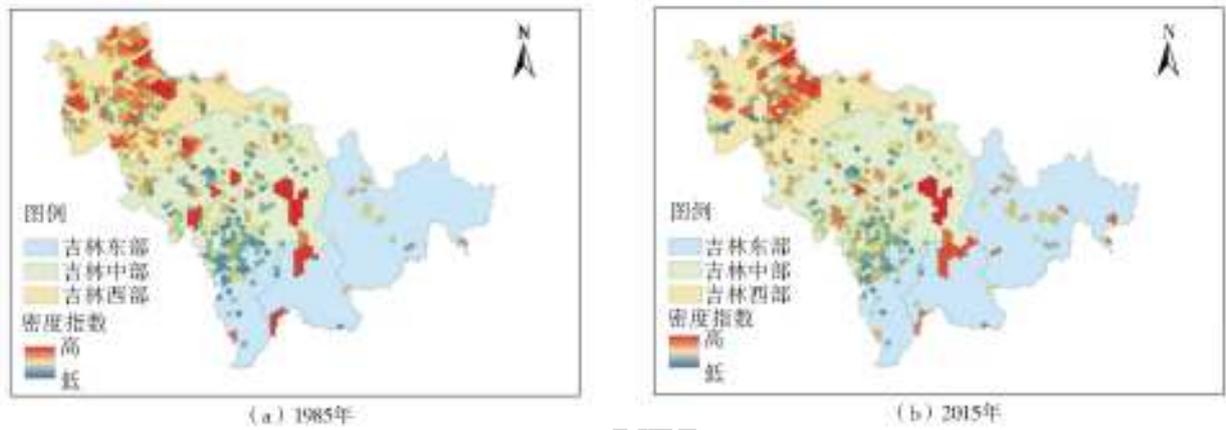


图 5 1985—2015 年吉林省湖泊空间分布密度

Fig. 5 Lake spatial distribution density map from 1985 to 2015 in Jilin Province

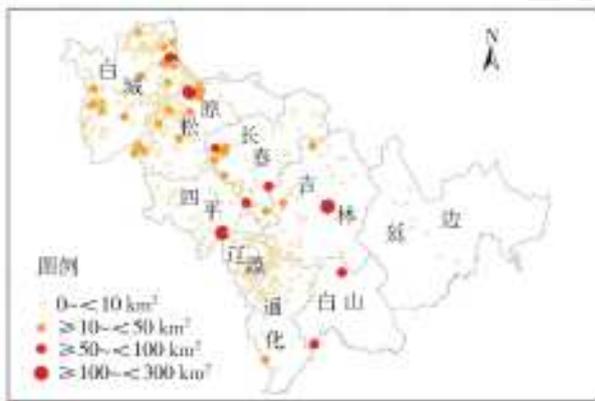


图 6 不同规模湖泊分布

Fig. 6 Distribution of lakes of different sizes

3.3 吉林省东、中、西部分区域湖泊动态变化特征

根据上述对吉林省湖泊资源分布特点的分析可知,不同的自然环境使得吉林省湖泊分布呈现东、中、西部不同的特点。为了更好地对吉林省不同地区的湖泊保护提供技术支撑,本研究分别对吉林省东、中、西部的湖泊变化特征进行分析。

吉林省东部以长白山区为主,自然湖泊主要为

火山活动形成的众多山区湖泊。此外,由于对长白山区丰富的地表水资源开发利用,形成了较多的人工湖泊,其中面积较大的包括白山水库、海龙水库、龙山水库和曲家营水库(图 7)。30 年间吉林省东部湖泊总面积较稳定,呈现轻微波动,年平均湖泊面积 220.90 km^2 (表 3)。1990—1995 年湖泊面积扩张最大,共增加 49.08 km^2 ;2010—2015 年湖泊面积萎缩最大,共减少 47.96 km^2 。湖泊数量则是呈逐渐增加趋势,增加比例为 10.39% ,湖泊破碎化现象严重。

吉林中部是人口集中分布地区,也是吉林省经济发展的中心,生产生活需水量较大。该区分布有较多不同规模的人工湖泊,其中面积最大的为松花湖水库,是中部重要的水源地(图 8)。近 30 年中中部湖泊面积波动较大,在 2000 年到达最低值,总面积为 $539.63\sim 988.86 \text{ km}^2$,年平均湖泊面积为 807.31 km^2 。2000—2005 年湖泊面积增加幅度最大,共增加 449.23 km^2 ;2010—2015 年湖泊面积萎缩幅度最大,共萎缩 210.14 km^2 。湖泊数量变化较为稳定,但总数量呈减少趋势,减少比例为 5.33% 。

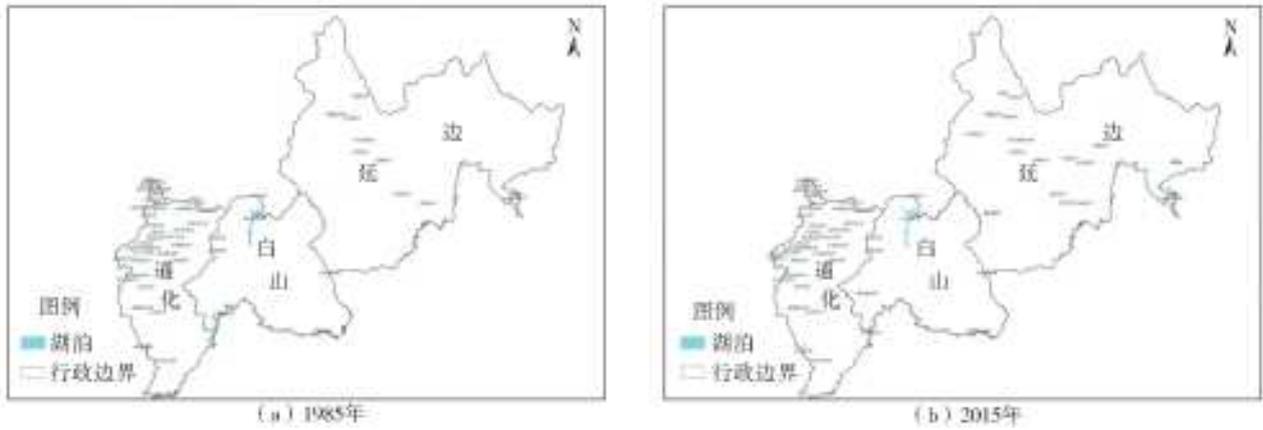


图 7 1985—2015 年吉林省东部湖泊空间变化

Fig. 7 Spatial variation of lakes from 1985 to 2015 in eastern Jilin Province

表 3 1985—2015 吉林省东、中、西部湖泊面积、数量变化

Tab. 3 Lake area and number of variations from 1985 to 2015 in eastern, central and western Jilin Province

年份	东部		中部		西部	
	面积/km ²	湖泊数量/个	面积/km ²	湖泊数量/个	面积/km ²	湖泊数量/个
1985	210.09	77	893.40	169	1 542.89	278
1990	190.79	79	775.41	172	1 266.60	248
1995	239.87	83	931.81	169	1 384.51	274
2000	223.94	83	539.63	163	1 293.00	204
2005	235.11	84	988.86	168	1 330.02	226
2010	247.22	85	866.09	164	885.35	180
2015	199.26	85	655.95	160	1 276.04	207

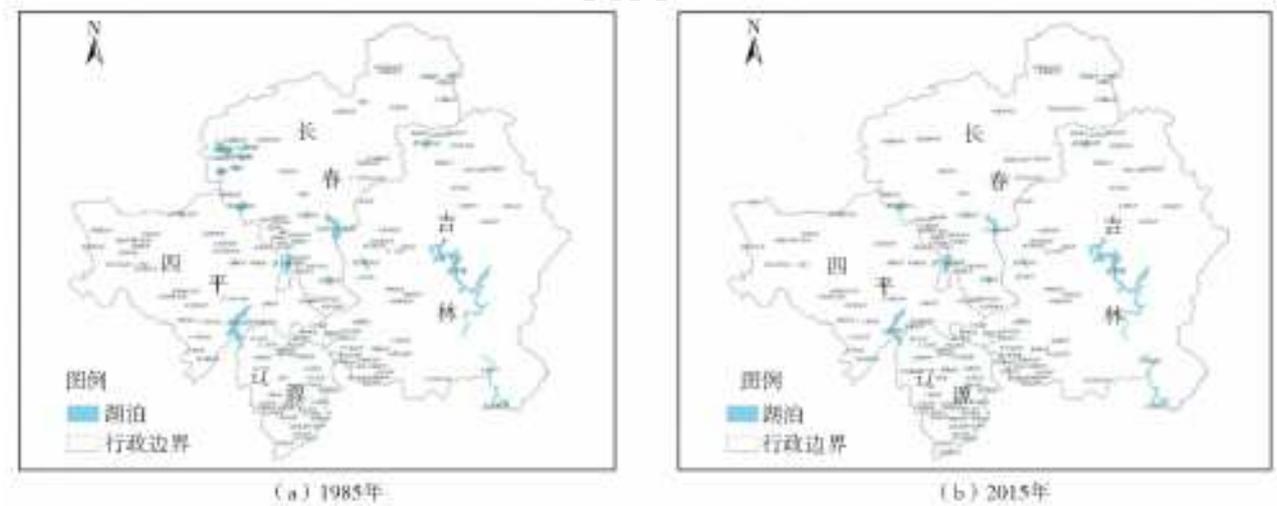


图 8 1985—2015 年吉林省中部湖泊空间变化

Fig. 8 Spatial variation of lakes from 1985 to 2015 in central Jilin Province

吉林西部湖泊资源非常丰富,拥有大片湖泊湿地,湖泊浅且小,主要以自然湖泊为主。其中查干湖、月亮泡、莫莫格湿地、哈尔挠泡、花敖泡和沙洋泡是西部较大的自然湖泊,自然湖泊占湖泊总面积的90%以上(图9)。近30a西部湖泊总面积呈不断萎缩趋势,年平均湖泊面积为1 282.63 km²。1990—1995年湖泊面积扩张最大,动态度为1.86%,共增加117.91 km²;2005—2010年湖泊面积萎缩最大,动

态度为-6.69%(表4),共萎缩444.67 km²。湖泊数量减少较为明显,共减少25.54%。

4 结论与讨论

本文应用 Landsat 遥感影像提取并建立了30年序列的吉林省湖泊数据集,数据集包括自然湖泊和人工湖泊,以5年为时间间隔采样,在研究区范围内还未有同类研究。在此基础上对湖泊资源演变的时

空特征进行了定量分析,对比分析了东、中、西不同区域湖泊演化的特征,得出结论如下。

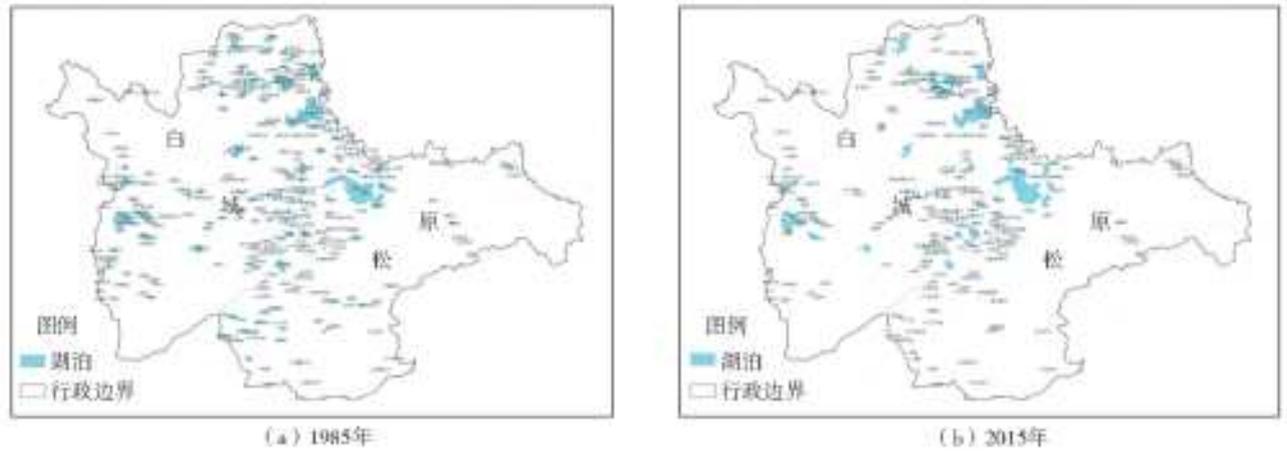


图 9 1985—2015 年吉林省西部湖泊空间变化
Fig. 9 Spatial variation of lakes from 1985 to 2015 in western Jilin Province

表 4 1985—2015 吉林省东、中、西部湖泊面积、数量动态度

Tab. 4 Lake area and number of dynamic degrees from 1985 to 2015 in eastern, central and western Jilin Province 单位: %

年份	东部		中部		西部	
	面积动态度	湖泊数量动态度	面积动态度	湖泊数量动态度	面积动态度	湖泊数量动态度
1985—1990	-1.84	0.52	-2.64	0.36	-3.58	-2.16
1990—1995	5.14	1.01	4.03	-0.35	1.86	2.10
1995—2000	-1.33	0	-8.42	-0.71	-1.32	-5.11
2000—2005	1.00	0.24	16.65	0.61	0.57	2.16
2005—2010	1.03	0.24	-2.48	-0.48	-6.69	-4.07
2010—2015	-3.88	0	-4.85	-0.49	8.83	3.00
1985—2015	-0.17	0.35	-0.89	-0.18	-0.58	-0.85

注:表中数值为年份区间内的数值,不是某一年的数值。

(1)1985—2015 年吉林省湖泊面积整体呈现萎缩趋势,面积由 2 667.12 km² 减小为 2 131.25 km²,湖泊数量由 524 个减少为 452 个。湖泊面积和数量减少在 2005—2010 年最为显著。

(2)吉林省小型湖泊和大型湖泊均主要分布在中、西部。湖泊资源中以小型湖泊(0~<10 km²)为主,占湖泊总数的 92% 以上。30 年间 4 类湖泊数量均呈减少趋势,其中,小型湖泊数量减少最多,减少 13.04%。

(3)通过湖泊分布的空间矢量密度分析可知,吉林省湖泊资源的空间分布呈显著的分区特征,基于地形地貌特征可划分为东、中、西部 3 个区域。东部自然湖泊以火山活动形成的湖泊为主,与此同时依托长白山区丰富的水资源形成了众多的人工湖泊,湖泊面积较为稳定,数量略有增加;中部地区湖泊面积变化不显著,湖泊数量略有减少;西部湖泊资源最为丰富,主要以自然湖泊为主,占西部湖泊总面积的 90% 以上,湖泊数量减少较多。

根据对 30 年序列吉林省湖泊时空动态特征的

分析,湖泊总体面积和数量呈现萎缩的趋势,应加强监测,进一步揭示自然与人为因素对湖泊演变的影响过程,根据不同区域湖泊分布和演变的不同特点,科学规划,保护和合理开发利用湖泊资源,协调好湖泊资源环境保护和经济发展的关系,促进区域可持续发展。

参考文献:

[1] ZHANG G Q, YAO T D, CHEN W F, et al. Regional differences of lake evolution across China during 1960s-2015 and its natural and anthropogenic causes [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 221: 386-404. DOI:10.1016/j.rse.2018.11.038.
[2] 邵佳丽,郑伟,刘诚. 卫星遥感洞庭湖主汛期水体时空变化特征及影响因子分析[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 24(8):1315-1321. DOI:10.11870/cjlyzyyhj201508008.
[3] LIAO A P, CHEN L J, CHEN J, et al. High-resolution remote sensing mapping of global land water [J]. Science China (Earth Sciences), 2014, 57(10):2305-2316. DOI:10.1007/s11430-014-4918-0.

- [4] 罗玲,毛德华,王宗明,等. 松嫩平原西部湖泊与水库/坑塘动态变化及驱动因素分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 285-291. DOI: 10. 11975/j. issn. 1002-6819. 2015. 22. 039.
- [5] LEI Y B, YANG K, WANG B, et al. Response of inland lake dynamics over the Tibetan Plateau to climate change[J]. Climatic Change, 2014, 125(2): 281-290. DOI: 10. 1007/s10584-014-1175-3.
- [6] LI J L, SHENG Y W. An automated scheme for glacial lake dynamics mapping using Landsat imagery and digital elevation models: a case study in the Himalayas[J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(16): 5194-5213. DOI: 10. 1080/01431161. 2012. 657370.
- [7] 田娜. 基于遥感的上海市湿地分类及其动态变化研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2013.
- [8] 李宁, 刘吉平, 王宗明. 2000—2010年东北地区湖泊动态变化及驱动力分析[J]. 湖泊科学, 2014, 26(4): 545-551. DOI: 10. 18307/2014. 0408.
- [9] 肖茜, 杨昆, 曹璨, 等. 杞麓湖与异龙湖水体提取及湖泊面积变化动态监测[J]. 安徽农学通报, 2017, 23(24): 123-124, 141. DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-7731. 2017. 24. 050.
- [10] 孙娜, 高志强, 王晓晶, 等. 基于高分遥感影像的黄土高原地区水体高精度提取[J]. 国土资源遥感, 2017, 29(4): 173-178. DOI: 10. 6046/gtzyyg. 2017. 04. 26.
- [11] 崔锦霞, 郭安廷, 杜荣祥, 等. 1990—2015年青海省湖泊时空变化及其对气候变化的响应分析[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(3): 658-670. DOI: 10. 11870/cjlyzyyhj201803022.
- [12] 吉红霞, 范兴旺, 吴桂平, 等. 离散型湖泊水体提取方法精度对比分析[J]. 湖泊科学, 2015, 27(2): 327-334. DOI: 10. 18307/2015. 0218.
- [13] 张飞, 王娟, 周梅, 等. 1998—2013年新疆艾比湖湖面时空动态变化及其驱动机制[J]. 生态学报, 2015, 35(9): 2848-2859. DOI: 10. 5846/stxb201407021362.
- [14] VERPOORTER C, KUTSER T, SEEKEII D A, et al. A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(18): 6396-6402. DOI: 10. 1002/2014GL060641.
- [15] BRACHT-FLYER B, ISTANBULLUOGLU E, FRITZ S. A hydro-climatological lake classification model and its evaluation using global data[J]. Journal of Hydrology, 2013, 486: 376-383. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2013. 02. 003.
- [16] CAI X B, GAN W X, JI W, et al. Optimizing remote sensing-based level-area modeling of large lake wetlands: Case study of Poyang Lake[C]. IEEE. Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(2): 471-479. DOI: 10. 1109/JSTARS. 2014. 2342742.
- [17] WANG X, TANG C, WANG W, et al. Change detection of water resources via remote sensing: An L-V-NSCT approach[J]. Applied Science, 2019, 9(6): 1223. DOI: 10. 3390/app9061223.
- [18] 朱小强, 丁建丽, 夏楠, 等. 一种稳定阈值的湖泊水体信息提取方法[J]. 资源科学, 2019, 41(4): 790-802. DOI: 10. 18402/resci. 2019. 04. 15.
- [19] 彭定志, 徐高洪, 胡彩虹, 等. 基于MODIS的洞庭湖面积变化对洪水位的影响[J]. 人民长江, 2004(4): 14-16, 48. DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-4179. 2004. 04. 006.
- [20] 李艳华, 丁建丽, 闫人华. 基于国产GF-1遥感影像的山区细小水体提取方法研究[J]. 资源科学, 2015, 37(2): 408-416.
- [21] 殷亚秋, 李家国, 余涛, 等. 基于高分辨率遥感影像的面向对象水体提取方法研究[J]. 测绘通报, 2015(1): 81-85. DOI: 10. 13474/j. cnki. 11-2246. 2015. 0016.
- [22] 童李霞, 燕琴, 骆成凤, 等. 基于NDWI分割与面向对象的水体信息提取[J]. 地理空间信息, 2017, 15(5): 57-59, 11. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-4623. 2017. 05. 018.
- [23] 杜涛, 熊立华, 易放辉, 等. 基于MODIS数据的洞庭湖水体面积与多站点水位相关关系研究[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(6): 756-765.
- [24] 凌成星, 张怀清, 林辉. 利用混合水体指数模型(CI-WD)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.
- [25] 许诗, 刘志明, 王宗明, 等. 1986—2008年吉林省湖泊变化及驱动力分析[J]. 湖泊科学, 2010, 22(6): 901-909.
- [26] 马建行, 宋开山, 邵田田, 等. 基于HJ-CCD和MODIS的吉林省中西部湖泊透明度反演对比[J]. 湖泊科学, 2016, 28(3): 661-668. DOI: 10. 18307/2016. 0323.
- [27] 龙振宇, 孙世军, 欧洋, 等. 吉林省西部10个浅水湖泊水环境质量和大型底栖动物群落特征[J]. 湿地科学, 2018, 16(5): 642-650. DOI: 10. 13248/j. cnki. wetland-sci. 2018. 05. 010.
- [28] 李雪菲, 赵庆英, 柴社立, 等. 吉林省西部主要湖泊的水化学特征及其水质评价[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(27): 6722-6726. DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-1815. 2010. 27. 026.
- [29] 高镜婷. 近20年吉林省湖泊资源动态变化及驱动力研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [30] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [31] 李广东, 戚伟. 中国建设用地扩张对景观格局演化的影响[J]. 地理学报, 2019, 74(12): 2572-2591. DOI: 10. 11821/dlxb201912011.
- [32] 于小娟, 薛振山, 张仲胜, 等. 潮沟对黄河三角洲湿地典型景观格局的影响[J]. 自然资源学报, 2019, 34(12): 2504-2515. DOI: 10. 31497/zrzyxb. 20191202.