基于时序 *NDVI* 的东平湖菹草 (*Potamogeton crispus* L.) 遥感提取及时空格局*

梁莉莉¹, 于泉洲^{1,2**}, 邓焕广^{1,2}, 刘恩峰³, 张保华^{1,2}, 牛振国⁴, 刘加珍^{1,2}

(1: 聊城大学环境与规划学院, 聊城 252059)

(2: 聊城大学东平湖湿地研究所, 聊城 252059)

(3: 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250014)

(4: 中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101)

摘要: 东平湖是国家南水北调东线工程的重要枢纽。但近年来, 东平湖菹草 (*Potamogeton crispus* L.) 大量繁殖引起河道阻塞、鱼类死亡等事件频发, 导致湖区面临很多生态风险。为维护区域生态安全, 迫切需要了解菹草群落在东平湖的时空演变特征及驱动因素。利用 MODIS 植被指数时序数据结合野外调研, 建立菹草群落独特的物候曲线, 并结合 Landsat 数据进行了 1985—2017 年东平湖菹草识别分析。结果表明: 32 年间菹草群落不断扩张, 生境由 1991 年前零星分布于湖岸发展到 2013 年蔓延至全湖且连片式分布。菹草群落的增长分为 3 个阶段: 1996 年之前, 面积增长缓慢, 1996 年其面积仅 10.34 km²; 1996—2001 年菹草呈暴发式增长, 菹草变为区域优势种; 2001—2017 年, 菹草面积继续增长, 到 2017 年达 49.07 km², 约占湖区水域面积的 40%。经 Spearman 秩相关分析, 菹草面积与湖水营养化水平显著正相关。南水北调东线工程的通水虽使水质有所改善, 但东平湖菹草群落仍呈增长态势, 应引起足够重视。

关键词: 东平湖; 菹草; *NDVI* 时序; 水体富营养化; Landsat; MODIS

Spatio-temporal pattern of *Potamogeton crispus* L. in Lake Dongping based on *NDVI* time series

LIANG Lili¹, YU Quanzhou^{1,2**}, DENG Huanguang^{1,2}, LIU Enfeng³, ZHANG Baohua^{1,2}, NIU Zhenguo⁴ & LIU Jiazhen^{1,2}

(1: School of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252059, P.R.China)

(2: Research Institute of Dongpinghu Wetlands, Liaocheng University, Liaocheng 252059, P.R.China)

(3: College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Ji'nan 250014, P.R.China)

(4: State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, P.R.China)

Abstract: Lake Dongping is the second largest freshwater lake in Shandong Province. It is also an important junction on the east route of south to north water transfer project and on the route of the west to east water transfer. However, *Potamogeton crispus* L. community's expansion has caused a series of ecological issues, including the waterway blocking and a large number of fish death. In order to maintain the ecological environment security in Lake Dongping, there is an urgent need to understand the spatial and temporal characteristic and the inducements of *P. crispus* community's expansion. We employed moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) *NDVI* data and the field investigation to extract the phenological characteristic curve of *P. crispus*. According to the *P. crispus* growth characteristics, the Landsat images at *P. crispus* flowering phase and decline phase in eight different years during 1985 and 2017 were used to extract and analyze the *P. crispus* distribution characteristics. The results showed that *P.*

* 中国科学院重点部署项目 (KFZD-SW-310)、国家自然科学基金项目 (31800367, 41401563) 和聊城大学博士基金项目 (318051530) 联合资助。2018-07-12 收稿; 2018-08-15 收修改稿。梁莉莉 (1994~), 女; E-mail: 319171163@qq.com.

** 通信作者; E-mail: yuquanzhou2008@126.com.

crispus community expanded continuously in the past 32 years. Its habitat changed from the scattered distribution in near shore in 1991 to the continuous distribution in whole lake in 2013. The period of *P. crispus* community growth was divided into three stages. Before 1996, it is a slow growth, with 10.34 km². During 1996–2001, it was an explosive growth feature and *P. crispus* has become the dominant species in Lake Dongping. During 2001–2017, the area continues to increase to 49.07 km² in 2017, accounting for 40% of the water area of Lake Dongping. Spearman rank correlation analysis showed that there was a significant correlation between *P. crispus* area and lake eutrophication level. Although with the opening of east route of south to north water transfer project and increased management for Lake Dongping, *P. crispus* community still shows continuous growth and the ecological risk caused by *P. crispus* is still not solved. The managers should pay more attention to this issue.

Keywords: Lake Dongping; *Potamogeton crispus*; NDVI time series; lake eutrophication; Landsat; MODIS

湖泊湿地是陆地生态系统的重要组成部分,也是水资源的载体和生物多样性保护的屏障^[1]. 健康的湖泊湿地生态系统对于区域水资源的时空优化配置、生物多样性的保护、区域经济发展极为重要^[2]. 然而随着全球变化和人类活动的不断加剧,湖泊湿地受到了强烈的冲击和破坏,导致湖泊湿地的面积减少、固碳能力下降、水体污染加重、水生植被多样性减少、外来物种入侵和湿地功能退化等问题^[2-3]. 因此,及时掌握湖泊湿地的生态环境状况,对于湖泊湿地的保护、管理和治理具有重要意义.

近年来遥感技术在湖泊湿地生态环境监测领域得到了广泛应用^[4-6],而基于遥感的 NDVI 时序数据也逐渐应用于湿地环境变化及土地覆被的研究^[7-8]. 然而,当前沉水植被的遥感监测主要还是基于光谱特征差异的识别方法. 譬如国际上,Armstrong^[9]利用地面光谱观测结合 Landsat TM 可见光波段,监测了巴哈马地区近海海草(*Thalassia testudinum*)生物量. Santos 等^[10]通过多期遥感数据对美国圣华金河河口三角洲入侵沉水植物群落进行了空间识别,并分析了入侵沉水植物群落的扩散规律和分布格局特征. Tian 等^[11]利用地物光谱仪测量结合 IKONOS 高分遥感数据对美国马塞诸塞州河流中沉水植物群落的优势种的分布范围和覆盖度进行了识别和反演. Hill 等^[12]利用机载高光谱遥感手段研究了美国佛罗里达海岸沉水海草的生物量. 在国内,袁琳等^[13]研究了上海苏州河沉水植物旋叶苦草(*Vallisneria spiralis*)群落的光谱特征. 宋挺等^[14]基于环境 1 号卫星 CCD 影像对太湖水域的菹草群落进行了遥感监测. 侍昊等^[15]以 Landsat 8 遥感数据为基础,利用光谱指数及图像变换方法构建特征变量,采用随机森林分类模型提取了太湖沉水植被的空间分布信息. 这些研究多是借助于菹草等沉水植物的光谱特征进行遥感识别,然而水生植物的光谱特征比较相似,这导致在多种水生植被混杂的湖泊湿地进行遥感分类较为困难. 并且,当前利用 NDVI 时序特征进行菹草等沉水植物遥感提取的研究还较少^[16-17]. 因此,在沉水植被光谱维信息的基础上加入时间维的信息,然后进行沉水植被遥感提取应是行之有效的方法.

东平湖是山东省第二大淡水湖泊,也是国家南水北调东线工程和山东省西水东送输水干线的重要枢纽,战略地位重要^[18]. 然而随着区域经济的发展,近年来东平湖生态环境状况并不乐观,水体富营养化逐渐加重^[19],耐污性菹草群落大量繁殖,并已成为绝对优势种^[20]. 菹草作为沉水植物,虽然可以吸收湖水和湖底沉积物中的营养盐,对控制湖泊富营养化具有一定价值^[21-22]. 但是菹草在爆发式生长之后会迅速衰亡,残体在水中微生物作用下将氮、磷等营养物质返还水体,同时消耗水中大量溶解氧,造成湖水的“二次污染”并危及到湖区鱼类生存^[23].

因此,本研究利用 MODIS NDVI 数据提取菹草群落 NDVI 时序特征作为其物候特征的标志,结合菹草在不同生长时期的 Landsat 数据,对东平湖近 30 多年来菹草群落格局的时空变化规律进行遥感监测研究,并分析可能的原因. 本研究一方面为菹草群落的遥感识别提供了一种基于 NDVI 时序特征的新思路. 另一方面,研究也将有助于揭示水体富营养化背景下菹草在东平湖的扩张过程,为东平湖菹草生态风险的防控及菹草资源化利用提供基础科学数据.

1 数据与研究方法

1.1 研究区概况

东平湖(35°30′~36°30′N, 116°00′~116°30′E)地处黄河下游,行政区划隶属于山东省泰安市东平县(图 1). 东平湖包括新湖区与老湖区两部分,以二级湖堤分开. 新湖区为滞洪区,以低洼农用地为主. 老湖区为蓄

水区,平均水深约 2.5 m,其面积在不同文献中给出的不一致^[24-25],但一般认为约为 160 km²,其中常年有水面面积约 124 km². 本文所指的研究区为东平湖老湖区,该区是湖泊湿地的集中区域. 东平湖作为山东省第二大湖泊和南水北调东线工程重要的调蓄枢纽,在南水北调工程蓄水、黄河洪峰削峰蓄洪、保障区域生态环境安全等方面具有重要作用^[26].

图1 东平湖 2017 年 5 月 Landsat 标准假彩色影像

Fig.1 Landsat standard false color image of Lake Dongping in May, 2017

1990s 之前,东平湖为寡污型湖泊,优势种主要为菱、芡等沉水植物^[27-28]. 但 1990s 末以来,由于东平湖污染加重,水体富营养化加剧,菱、芡等沉水植物生境空间急剧减少,同时茭草这一早期的伴生物种逐渐转变成成为优势种,并持续扩张分布^[23,29]. 茭草为多年生眼子菜科沉水植物,其生长规律与一般水生植被不同,在秋季发芽,冬季缓慢生长,次年 4—5 月开始繁殖并且逐渐出露水面,6 月中上旬迅速衰亡腐烂^[23]. 近年来,东平湖茭草的大规模繁殖导致了一系列生态环境问题,使其逐渐成为研究热点.

1.2 数据源

本研究采用的遥感数据包括中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 的 MOD13Q1 数据和陆地资源卫星 (Landsat) 系列影像数据. 为与 2016 年 5 月初的东平湖野外调研相匹配,选取了 2016 年全年的 16 天合成的 MOD13Q1 的归一化植被指数 (*NDVI*) 数据,并利用其提取东平湖不同地类 *NDVI* 时序曲线. 同时,选取了茭草生长期特征时段 (出露水面和衰亡腐烂时期) 的 Landsat 系列遥感数据. 本研究用到 1985 年以来 8 个年份的 16 景 Landsat 系列卫星数据,具体见表 1.

1.3 研究方法

1.3.1 实验设计方案 *NDVI* 可以反映植被绿度和覆盖度,已被广泛应用于全球植被和生态环境变化的监测^[30]. 研究对 MODIS 数据和 Landsat 数据进行预处理,分别得到东平湖 2016 年 MODIS *NDVI* 时序融合图像和不同时期的 Landsat *NDVI* 数据. 结合 2016 年野外调查的典型地类坐标,从当年 MODIS 的 *NDVI* 时序融合影像中提取出其对应的 *NDVI* 时序曲线 (每种地类提取 5 条),以便分析东平湖茭草群落生长的 *NDVI* 时序

表 1 使用的 Landsat 系列卫星遥感数据信息
Tab.1 Landsat imagery information in this study

时间	类型	DOY	行列号
1985 年	Landsat5-TM	128	35/122
		176	35/122
1988 年	Landsat5-TM	105	35/122
		169	35/122
1991 年	Landsat5-TM	129	35/122
		168	35/123
1996 年	Landsat5-TM	134	35/122
		159	35/122
2001 年	Landsat7-ETM ⁺	123	35/123
	Landsat5-TM	156	35/122
2006 年	Landsat5-TM	122	35/122
		161	35/123
2013 年	Landsat8-OLI	132	35/123
		164	35/123
2017 年	Landsat8-OLI	120	35/122
		191	35/123

特征以及与其他地类时序特征的区别. 再结合 Landsat *NDVI* 影像进行菹草提取, 最后进行像元统计和整饰出图, 整个流程见图 2. 数据处理过程在 ENVI+IDL 平台及 ArcGIS 10.3 软件中完成.

1.3.2 不同地类 *NDVI* 时序特征与菹草判据确定 由不同地类的 *NDVI* 时序图(图 3 与图 4)可知, 菹草的生长规律与东平湖另一重要种芦苇有明显的差别, 其在每年的第 100~140 天左右, 菹草生长旺盛, *NDVI* 最大介于 0.5~0.6 之间, 在第 140~180 天左右, 菹草迅速衰亡, *NDVI* 下降明显, 其值在 -0.2~0 之间, 而在第 140~180 天, 芦苇等其他湿地植被则生长旺盛. 同时, 东平湖的芡、菱等沉水植被在 6 月份涨势旺盛, 亦不具有菹草的生长物候特征^[31-32]. 因此可以利用“前后两个时期的 *NDVI* 差值大于某一阈值”的规则将菹草群落提取出来. 经过多次遥感影像特征分析, 并结合其对 2013 和 2017 年菹草分布的提取结果, 提取菹草群落的阈值设定为 0.1, 目的是为了减小不同时相影像成像条件的差异及其他水生植被的影响.

由于人为收割, 在第 100~180 天左右农田的 *NDVI* 时序特征与菹草具有一定相似性, 但农田植被在第 140 天左右的 *NDVI* 明显高于菹草群落(图 3 和图 4). 因此为避免遥感数据误分类, 先行把大汶河口处的农田掩膜去除. 同时, 由于水体的 *NDVI* 值在 -0.2~0.2 之间波动, 为减小水体的影响, 亦先将敞水面水体掩膜去除, 再进行菹草群落的提取(图 2). 经过两次掩膜去除保证了利用菹草提取判据可以有效提取出菹草群落.

图 2 菹草群落遥感提取流程

Fig.2 The flowchart of *P. crispus* remote sensing

图 3 东平湖典型地物 *NDVI* 时序曲线

Fig.3 *NDVI* time-series curves of typical landscapes in Lake Dongping

图 4 东平湖及周边流域典型地物 *NDVI* 时序

Fig.4 *NDVI* time-series features of typical landscapes in Lake Dongping Basin

2 结果与讨论

2.1 菹草群落扩张的时空格局特征

基于 Landsat 系列影像,利用菹草群落 *NDVI* 时序特征,提取得到了 1985—2017 年间 8 个时期的东平湖菹草群落空间分布特征图谱(图 5)。

由图 5 可见,1985 年菹草群落主要分布于大汶河入湖口附近,1988 年除在河口附近分布外,在北部陈山口闸附近也有一定分布,1996 年东平湖南岸附近存在带状分布。总体而言,1996 年之前东平湖菹草群落分布面积较小,且呈零星式分布于近湖岸地带。1996—2001 年期间,菹草群落分布面积明显增大,且表现出由湖岸地带向湖心蔓延的趋势,但此时湖心区还没有大面积的菹草群落出现。直到 2006 年,菹草群落开始向

图 5 1985—2017 年东平湖菹草群落分布

Fig.5 The spatio-temporal of *P. crispus* habitat in Lake Dongping from 1985 to 2017

表 2 1985—2017 年东平湖菹草群落面积* 湖心蔓延,已有全湖分布之势. 再到 2013—2017 年,菹草群落已几乎遍布整个东平湖,生境面积达到最大.

Tab.2 *P. crispus* community area in Lake Dongping from 1985 to 2017

时间	面积/km ²	面积百分比/%
1985 年	4.2210	3.404
1988 年	2.5371	2.046
1991 年	4.6584	3.757
1996 年	10.3401	8.339
2001 年	32.6187	26.305
2006 年	33.1803	26.758
2013 年	44.6310	35.993
2017 年	49.0653	39.569

* 面积百分比为菹草面积与东平湖常年有水面积的比值.

通过栅格统计得到不同年份的菹草群落面积(表 2). 并采用 Logistics 4 参数方程对逐年的菹草群落面积进行趋势拟合,拟合效果显著(图 6). 由表 2 和图 6 分析可见,1985—2017 年间,东平湖菹草群落面积总体呈显著增加趋势. 具体而言大致分为 3 个增长阶段:第 1 阶段是 1996 年之前,湖内菹草面积呈动态波动缓慢增加特征,但总体面积较小,到 1996 年也只占到全湖面积的 8.34%,该时期菹草生境面积增加较慢. 第 2 阶段是 1996—2001 年间,菹草呈爆发式增长,增速最快,5 年间菹草面积增长超过 300%,从生境面积的角度亦说明 1996—2001 年期间是菹草由东平湖伴生种转变成优势种的关键期. 第 3 阶段是 2001—2017 年,菹草面积增速亦较快,是菹草成为东平湖优势种后继续巩固的时期,到 2017 年菹草

面积几乎增长为 1996 年的 5 倍,几乎占东平湖水域面积的 40%.

2.2 水体富营养化对菹草群落扩张的影响

影响东平湖菹草群落扩张的因素较多,但首要因素应为湖泊水体富营养化的加剧. 1980s 初东平湖水质较好,此时优势种为寡污类的水生植物——菱、芡等,而菹草的分布较小^[27]. 但 1998 年以后,东平湖水质恶化,富营养化迅速加快^[19]. 2006 年对东平湖进行野外调查,发现湖内水生植物优势种群发生了明显变化,由过去的寡污性种类演替为耐污种类,此时菹草已成为东平湖水生维管束植物的优势种群^[33].

除大汶河污水直接注入外,东平湖流域内面源污染也进一步加剧了水体的富营养化^[34]. 到 2011—2012 年间,东平湖处于中营养向富营养过渡状态,部分湖区已经呈富营养化^[29];菹草是耐污性极强的沉水植物,在其他水生植物因水体富营养化而趋于减少的同时,菹草还可茂盛生长^[35],因此这一时期菹草依旧呈增加趋势. 由此可见,东平湖菹草生境的扩张与水体富营养化的加剧应有密切的关系.

图 6 东平湖菹草植被生境面积变化趋势

Fig.6 The change tendency of *P. crispus* community area in Lake Dongping

同时,采用 Spearman 秩相关分析方法定量分析了东平湖水体营养化水平与菹草群落规模的关系. 首先根据文献^[19]将 1985 和 1988 年的营养水平定为中营养水平,再利用已有文献资料^[36-45],统计了 1990—2017 年东平湖水体营养化状态(表 3). 按照水体营养化水平将对应年份的中营养设为 1,中—富营养设为 2,富营养设为 3,采用 Spearman 秩相关分析发现东平湖水体富营养化水平与菹草群落面积之间存在显著相关性,相关系数 $R=0.79(P<0.05)$. 这证明了东平湖水体营养化水平的加剧显著促进了菹草群落的大面积扩张.

2.3 其他因素对菹草群落扩张的影响

南水北调东线工程的蓄水可能对菹草群落扩张产生一定的促进作用. 虽然 2013 年南水北调东线通水一定程度上改善了东平湖的水质(表 3),但在此之前菹草群落已经形成相当规模,且湖区底泥沉积物中的氮、磷等元素在前期已大量积累,养分水平能够满足其生长需要,故这一时期水质的改善未引起菹草生境规模的下降. 相反,2013 年南水北调工程调水后使得东平湖水位有所上升,水位的升高会使水生植被的生长环境发生较大变化,水生种群可能趋于单一化,挺水植物有减少趋势^[24],因此可能会使菹草群落进一步扩张. 另外,水体的透明度也是菹草繁殖的重要因素^[46]. 东平湖为浅水型湖泊,水体透明度良好,且 3—5 月湖水温度为 14~21℃,为菹草最适宜生长温度^[23]. 考虑到这些适宜的自然条件,研究认为在当前南水北调东线工程的大背景下,如不加入人为干预,菹草群落生境仍可能会维持较大规模的分布. 因此有关部门应该加强管理,制定恰当的治理方案,探索菹草资源化利用模式,将菹草的生长规模控制在合理范围内,以确保东平湖生态环境健康,为南水北调东线工程提供安全的水质保障.

表 3 1990—2017 年东平湖水体营养化状态

Tab.3 The eutrophication state of the Lake Dongping from 1990 to 2017

时间	水体营养化状态	时间	水体营养化状态
1990—1993 年	中营养—富营养 ^[36]	2004—2005 年	富营养—超富营养 ^[42]
1994 年	中营养—富营养 ^[37]	2006—2008 年	富营养 ^[43]
1995 年	中营养—富营养 ^[38]	2009 年	中营养 ^[43]
1996—1999 年	中营养—富营养 ^[36]	2010 年	富营养 ^[43]
2001 年	富营养 ^[39]	2011 年	中营养—富营养 ^[44]
2002 年	中营养 ^[40]	2012—2016 年	中营养 ^[45]
2003 年	中营养—富营养 ^[41]	2017 年	富营养 ^[45]

2.4 不确定性分析

由于不同年份气候和水文环境的波动,菹草生长旺盛期与衰亡期的具体时间无法精准确定,对遥感数据时相的选择造成一定的限制. 因此,提取的东平湖菹草群落信息可能存在一定误差,这也是下一步研究需要细化解决的问题.

3 结论

1) 1985 年以来, 菹草已由东平湖伴生物种转变为绝对优势物种, 1996—2001 年的 5 年是菹草成为优势种的关键期。

2) 1985 年以来, 东平湖菹草群落生境的时空演变呈现由湖岸向湖心逐渐蔓延的特征。1996 年以前, 菹草主要零星散布于湖区边缘, 之后开始逐渐向湖心扩张, 到 2013 年菹草群落几乎蔓延到全湖且呈现连片式分布特征。

3) 1985 年以来, 东平湖菹草群落面积不断增加, 且不同时期增速不一。1985—1996 年之间, 东平湖菹草群落面积较小且增加缓慢, 1996 年菹草面积只有 10.34 km²; 随后暴发式增长, 2017 年菹草面积达到最大, 为 49.07 km², 约占湖泊水域面积的 40%。

4) 东平湖水体富营养化的加剧是促使菹草暴发式增长的主要原因。Spearman 秩相关分析发现东平湖菹草群落面积的增加与水体富营养化水平的加剧具有显著正相关关系 ($R=0.79, P<0.05$)。另外, 南水北调东线工程的水文调蓄可能会间接地促进菹草群落的进一步扩张。

致谢: 感谢何振芳老师和冯若昂同学在野外调查过程中提供的帮助! 感谢美国地质勘探局 (United States Geological Survey, USGS) 提供的 MODIS MOD13Q1 和 Landsat 系列卫星遥感数据!

4 参考文献

- [1] Cui BS, Yang ZF eds. Wetland science. Beijing: Beijing Normal University Press, 2006. [崔保山, 杨志峰. 湿地学. 北京: 北京师范大学出版社, 2006.]
- [2] Chen YY, Lv XG. The wetland function and research tendency of wetland science. *Wetland Science*, 2003, **1**(1): 7-12. [陈宜瑜, 吕宪国. 湿地功能与湿地科学的研究方向. 湿地科学, 2003, **1**(1): 7-12.]
- [3] Moomaw WR, Chmura, Davies GT *et al.* Wetlands in a changing climate: science, policy and management. *Wetlands*, 2018, **38**(2): 1-23.
- [4] Wang HB, Ma MG. A review of monitoring change in lake water areas based on remote sensing. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009, **24**(5): 675-684. [王海波, 马明国. 基于遥感的湖泊水域动态变化监测研究进展. 遥感技术与应用, 2009, **24**(5): 675-684.]
- [5] Zhang B, Zhang B, Hong M *et al.* Advance in remote sensing of lake water quality. *Advances in Water Science*, 2007, **18**(2): 302-309. [张博, 张柏, 洪梅等. 湖泊水质遥感研究进展. 水科学进展, 2007, **18**(2): 302-309.]
- [6] Ke CQ. A review of monitoring lake environment change by means of remote sensing. *Transaction of Oceanology and Limnology*, 2014, **21**(4): 81-86. [柯长青. 湖泊遥感研究进展. 海洋湖沼通报, 2014, **21**(4): 81-86.]
- [7] Yu QZ, Liang CL, Zhang ZL *et al.* Analysis of the NDVI changes and control factors of the Nansi Lake wetland in Shandong province during the past 40 years. *J Lake Sci*, 2014, **26**(3): 455-463. DOI:10.18307/2014.0317. [于泉洲, 梁春玲, 张祖陆. 近 40 年来南四湖湿地 NDVI 变化特征及其控制因子分析. 湖泊科学, 2014, **26**(3): 455-463.]
- [8] Chen XH, Yang DD, Chen J *et al.* An improved automated land cover updating approach by integrating with downscaled NDVI time series data. *Remote Sensing Letters*, 2015, **6**(1): 29-38.
- [9] Armstrong RA. Remote sensing of submerged vegetation canopies for biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, **14**(3): 621-628.
- [10] Santos MJ, Khanna S, Hestir EL *et al.* Measuring landscape-scale spread and persistence of an invaded submerged plant community from airborne remote sensing. *Ecological Applications*, 2016, **26**(6): 1733-1744.
- [11] Tian YQ, Yu Q, Zimmerman MJ *et al.* Differentiating aquatic plant communities in a eutrophic river using hyperspectral and multispectral remote sensing. *Freshwater Biology*, 2010, **55**(8): 1658-1673.
- [12] Hill VJ, Zimmerman RC, Bissett WP *et al.* Evaluating light availability, seagrass biomass, and productivity using hyperspectral airborne remote sensing in Saint Joseph's Bay, Florida. *Estuaries and Coasts*, 2014, **37**(6): 1467-1489.
- [13] Yuan L, Zhang LQ. Identification of the spectral characteristics of a submerged plant *Vallisneria spiralis*. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(4): 1005-1011. [袁琳, 张利权. 大型沉水植物苦草的光谱特征识别. 生态学报, 2006, **26**(4): 1005-1011.]

- [14] Song T, Huang J, Yan F *et al.* Monitoring of submerged plant in Taihu Lake based on environmental satellite CCD image. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2014, (6): 12-19. [宋挺, 黄君, 严飞等. 环境卫星 CCD 影像在太湖沉水植物监测中的应用. 环境监控与预警, 2014, (6): 12-19.]
- [15] Shi H, Li XW, Niu ZC *et al.* Remote sensing information extraction of aquatic vegetation in Lake Taihu based on Random Forest Model. *J Lake Sci*, 2016, **28**(3): 635-645. DOI:10.18307/2016.0320. [侍昊, 李旭文, 牛志春等. 基于随机森林模型的太湖水生植被遥感信息提取. 湖泊科学, 2016, **28**(3): 635-645.]
- [16] Sun C, Liu YX, Zhao SS *et al.* Classification mapping and species identification of salt marshes based on a short-time interval NDVI time-series from HJ-1 optical imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, **45**(PartA): 27-41.
- [17] Xu PP, Niu ZG, Tang P *et al.* Comparison and assessment of NDVI time series for seasonal wetland classification. *International Journal of Digital Earth*, 2017. DOI: 10.1080/17538947.2017.1375563.
- [18] Hou XK, Gao W, Xu P *et al.* Impacts of watershed socio-economic development on Lake Dongping ecosystems of Shandong Province: Assessment and joint-mitigation. *J Lake Sci*, 2014, **26**(2): 313-321. DOI: 10.18307/2014.0219. [后希康, 高伟, 徐鹏等. 流域社会经济发展对山东省东平湖水环境影响评估及优化调控. 湖泊科学, 2014, **26**(2): 313-321.]
- [19] Liu XL, Yao X, Dong J *et al.* Water environment of Lake Dongping. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, **32**(11): 82-87. [刘学利, 姚昕, 董杰等. 东平湖水环境研究进展与展望. 中国农学通报, 2016, **32**(11): 82-87.]
- [20] Zhang J, Deng HG, Wu AQ *et al.* Decomposition of *Potamogeton crispus* and its effect on the aquatic environment of Lake Dongping. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(9): 2590-2596. [张菊, 邓焕广, 吴爱琴等. 东平湖菹草腐烂分解及其对水环境的影响. 环境科学学报, 2013, **33**(9): 2590-2596.]
- [21] Gao JQ, Xiong ZT, Zhang JD. Phosphorus removal from water of eutrophic Lake Donghu by five submerged macrophytes. *Desalination*, 2009, **242**(1-3): 193-204.
- [22] Wang JQ, Zheng YF, Wang GX. Influences of *Potamogeton crispus* population on the lake water quality distribution. *Environmental Science*, 2011, **32**(2): 416-423. [王锦旗, 郑有飞, 王国祥. 菹草种群对湖泊水质空间分布的影响. 环境科学, 2011, **32**(2): 416-423.]
- [23] Zhang JL, Duan DX, Wang ZZ. The hazard of *Potamogeton crispus* decline in Lake Dongping and its control measures. *Environmental Study and Monitoring*, 2009, (2): 31-33. [张金路, 段登选, 王志忠. 东平湖菹草大面积衰亡的危害及防治对策. 环境研究与监测, 2009, (2): 31-33.]
- [24] Qiu T, Yu QZ, Liu JZ *et al.* Study of vegetation coverage change in the last 30 years in Lake Dongping wetland based on Landsat data. *Shandong Forestry Science and Technology*, 2017, (1): 6-10. [邱挺, 于泉洲, 刘加珍等. 基于 Landsat 数据的近 30 年东平湖湿地植被覆盖演变研究. 山东林业科技, 2017, (1): 6-10.]
- [25] Wang SM, Dou HS eds. Chinese lakes. Beijing: Science Press, 1998: 304-306. [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998: 304-306.]
- [26] Chen SY, Dong J, Zhang CY. Countermeasure study on eco-environmental status of Lake Dongping and sustainable development of its catchment. *Anhui Agricultural Sciences*, 2007, **35**(5): 1436-1437. [陈诗越, 董杰, 张重阳. 东平湖生态环境现状及流域可持续发展对策研究. 安徽农业科学, 2007, **35**(5): 1436-1437.]
- [27] Lin WP, He FN. An approach on the exploitation of the sweet-water lake resource in China—taking the Lake Dongping as an example. *Journal of Natural Resources*, 1990, **5**(1): 11-19. [林文盘, 何凡能. 我国淡水湖泊资源开发探讨——以东平湖为例. 自然资源学报, 1990, **5**(1): 11-19.]
- [28] Guo PY, Lin YZ, Li YX. Study on phytoplankton and evaluation of water quality in Lake Dongping. *Transaction of Oceanology and Limnology*, 1997, **4**(7): 37-42. [郭沛涌, 林育真, 李玉仙. 东平湖浮游植物与水质评价. 海洋湖沼通报, 1997, **4**(7): 37-42.]
- [29] Liu SS, Chen SY, Yao M *et al.* Water environment revealed by aquatic communities of lakes: A case study on Lake Dongping. *Chin J Appl Environ Biol*, 2017, **23**(2): 318-323. [刘双爽, 陈诗越, 姚敏等. 水生生物群落所揭示的湖泊水环境状况—以东平湖为例. 应用与环境生物学报, 2017, **23**(2): 318-323.]
- [30] Tucker CJ, Pinzon JE, Brown ME *et al.* An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, **26**(20): 4485-4498.
- [31] He XC, Zhou XJ, Yang DY *et al.* Occurrence and damage of major diseases and insect pests on Lotus Root and Water Cal-

- trap and their controlling strategies. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2013, (10): 59-62. [何晓婵, 周小军, 杨德毅等. 莲藕、菱角主要病虫害种类及其防治技术. 长江蔬菜, 2013, (10): 59-62.]
- [32] Xu X, Liu X, Li LJ. Research progress on *Euryale ferox*. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2017, (18): 62-68. [徐旭, 刘娴, 李良俊. 芡实研究进展. 长江蔬菜, 2017, (18): 62-68.]
- [33] Shi JH, Wang QD, Li XQ *et al.* Aquatic ecosystem changes and eutrophication assessment in Lake Dongping. *Journal of Yangtze University: Nat Sci Edit*, 2011, 8(4): 242-245. [师吉华, 王钦东, 李秀启等. 东平湖水生生态系统变迁及富营养化评价. 长江大学学报: 自然科学版, 2011, 8(4): 242-245.]
- [34] Hou HP, Ge YX, Pan N. Water quality assessment and water pollution prevention countermeasures of Lake Dongping. *Yellow River*, 2013, 35(12): 43-46. [侯慧平, 葛颜祥, 潘娜. 东平湖水质评价及水污染防治对策. 人民黄河, 2013, 35(12): 43-46.]
- [35] Li Y. Inhibition of *Potamogeton crispus* on algae and its resistance mechanism to the stress of eutrophication. Wuhu: Anhui Normal University, 2013. [李源. 菹草的抑藻效应及其对富营养盐胁迫的抗性机制. 芜湖: 安徽师范大学, 2013.]
- [36] Mao WB, Pang QJ, Fu LS. Effects and countermeasures of soil and water loss on water quality of Lake Dongping. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(5): 27-29. [毛伟兵, 庞清江, 符连申. 水土流失对东平湖水质的影响研究. 水土保持通报, 2001, 21(5): 27-29.]
- [37] Dou SZ, Yu QR, Li DY *et al.* Zooplankton and control of eutrophication in Lake Dongping, Shandong Province. *Chongqing Environmental Science*, 2002, 24(2): 58-62. [窦素珍, 喻亲仁, 李东元等. 山东省东平湖浮游动物与富营养化防治. 重庆环境科学, 2002, 24(2): 58-62.]
- [38] Pang QJ. Investigation and analysis of water quality of Lake Dongping and improvement measures. *Water Resources Protection*, 2000, 16(2): 15-21. [庞清江. 东平湖水质现状的调查分析及改善对策. 水资源保护, 2000, 16(2): 15-21.]
- [39] Jiang DS, Liu CG, Liu GZ *et al.* Analysis of the water environment in Lake Dongping and its vicinity. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2002, 9(4): 12-15. [姜东升, 刘存功, 刘桂珍等. 东平湖及周围水环境分析. 海洋湖沼通报, 2002, 9(4): 12-15.]
- [40] Pang QJ, Li BY. Evaluation of eutrophication in Lake Dongping. *Water Resources Protection*, 2003, 19(5): 42-44. [庞清江, 李白英. 东平湖水体富营养化评价. 水资源保护, 2003, 19(5): 42-44.]
- [41] Yu SP, Sun GY, Dou SZ *et al.* The declining of hydrophyte of Lake Dongping and the influence of the south-to-north water transfer project on it. *China Environmental Science*, 2005, 25(2): 200-204. [于少鹏, 孙广友, 窦素珍等. 东平湖水生植物的衰退及南水北调工程对其影响. 中国环境科学, 2005, 25(2): 200-204.]
- [42] Sun D, Duan DX, Wang ZZ *et al.* Water quality monitoring and evaluation of Lake Dongping. *Freshwater Fisheries*, 2006, (4): 13-16. [孙栋, 段登选, 王志忠等. 东平湖水质监测与评价. 淡水渔业, 2006, (4): 13-16.]
- [43] Liu HC. The research of water environment condition and the influencing factor of Lake Dongping [Dissertation]. Jinan: Shandong University, 2012. [刘红彩. 东平湖水环境状况与影响因素研究[学位论文]. 济南: 山东大学, 2012.]
- [44] Feng YW, Hou K, Pei HY *et al.* Desmid community characteristics and its relationship with environmental variables in Nansi Lake and Lake Dongping. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(6): 1738-1746. [冯亚威, 侯坤, 裴海燕等. 南四湖和东平湖鼓藻种群特征及其与环境因子的相关性. 生态学杂志, 2015, 34(6): 1738-1746.]
- [45] Ministry of Ecological Environment, People's Republic of China. China Environmental Status Bulletin (2012-2017 years). <http://www.zhb.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/index.shtml>, 2013-05-28 to 2017-06-05/2018-05-26. [中华人民共和国生态环境部. 中国环境状况公报(2012-2017年度). <http://www.zhb.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/index.shtml>, 2013-05-28 至 2017-06-05/2018-05-26.]
- [46] Wang JQ, Song YZ, Wang GX. Causes of large *Potamogeton crispus* L. population increase in Xuanwu Lake. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 24(6): 5144-5151.