

青藏高原湿地研究进展

赵志龙^{1,2,3}, 张镜铨¹, 刘林山¹, 刘峰贵^{1,2}, 张海峰²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 青海师范大学 生命与地理科学学院, 西宁 810008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:全球湿地资源约有80%正在退化或丧失,湿地生态系统已成为世界上受威胁最为严重的生态系统之一。青藏高原作为全球变化敏感区和亚洲生态安全屏障,其湿地面积约为 $13.19 \times 10^4 \text{ km}^2$,是中国重要的湿地分布区之一。本文基于1992-2013年间青藏高原湿地遥感研究文献,分析了青藏高原湿地遥感研究的监测方法、研究主题及其进展与存在的问题,得出以下结论:①30年来,青藏高原湿地基于遥感技术开展全高原湿地面积、景观格局、生态环境等方面的动态变化监测,并注重以生态系统视角构建模型分析高原湿地三维方向上的变化趋势;②高原湿地遥感研究的主要进展为:1990-2006年间,青藏高原湿地面积总体上以 $-0.13\%/a$ 的速率减少,景观多样性以 $-0.17\%/a$ 的速率下降;但湖泊湿地变化趋势则相反,湖泊深度在2003-2009年间以 0.20 m/a 的速率加深,水量在1970-2011年间以 $2.2 \text{ km}^3/a$ 的速率增加,内流区域湖泊面积在1976-2009年间以 $0.83\%/a$ 的速率扩张。1965-2002年间,高原湿地变化态势总体上受气候变化控制,人类活动区域周边湿地退化及近期变化是人类活动强度增大所致;③高原湿地遥感研究面临的主要问题包括,计算机解译精度和去云处理技术精度有待提高,缺乏综合视角研究青藏高原湿地系统等;④高原湿地遥感研究近期重点应围绕青藏高原湿地综合研究、资料匮乏区湿地遥感研究、全球变化背景下的青藏高原湿地生态系统的响应与适应机制等方面展开。

关键词:湿地;青藏高原;遥感研究;进展;问题

doi: 10.11820/dlkxjz.2014.09.009

中图分类号: TP79

文献标识码: A

1 引言

根据《湿地公约》(The Ramsar Convention Bureau, 2000)和《全国湿地资源调查技术规程(试行)》(国家林业局, 2008),湿地是指天然的或人工的,永久的或间歇性的沼泽地、泥炭地、水域地带,带有静止或流动、淡水或半咸水及咸水水体,包括低潮时水深不超过6 m的海域。它是自然界最富生物多样性的生态景观和人类最重要的生存环境之一(陈宜瑜, 1995)。据估计,全球约有 $860 \times 10^4 \text{ km}^2$ 湿地,但由于不合理利用而导致80%的湿地资源正在丧失或退化(孙广友, 2000; 孙志高等, 2006),导致湿地生态系统成为世界上受威胁最为严重的生态系统之一(Lemly et al, 2000)。中国是湿地资源最丰富的国家之一,湿地面积位居世界第四,达 65.94×10^4

km^2 , 占全球湿地面积的8%(赵魁义, 1999; 孙志高等, 2006),几乎囊括了国际湿地公约的所有湿地类型,并拥有世界上独特的青藏高原湿地(杨永兴, 2002b)。分布于青藏高原,具有高寒气候背景的湖泊、河流、沼泽和水库等湿地类型可统称为青藏高原湿地,其湿地面积约为 $13.19 \times 10^4 \text{ km}^2$ (邢宇等, 2009),是全国沼泽湿地面积最大的区域(赵魁义, 1999),占全国湿地面积的20%,其湖泊面积约占全国湖泊总面积的50%(闫立娟等, 2012),既是中国重要的湿地分布区,也是全球气候变化的敏感区(谢高地等, 2003)和中国乃至亚洲的重要生态安全屏障(孙鸿烈等, 2012)。因此,青藏高原湿地在全球变化研究中占有特殊的重要地位(白军红等, 2004)。在20世纪80年代之前,青藏高原湿地的研究主要通过科学考察等形式对湿地类型、面积、地形、土

收稿日期: 2013-11; 修订日期: 2014-09。

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAC04B02); 科技部基础性工作专项重点项目(2012FY111400); 国家自然科学基金项目(41271123, 41371120)。

作者简介: 赵志龙(1988-), 河北张家口人, 博士研究生, 主要研究方向为青藏高原湿地遥感, E-mail: geozhao@163.com。

通讯作者: 刘林山(1978-), 湖北黄冈人, 博士, 主要从事青藏高原土地利用/覆被变化研究, E-mail: liuls@igsnnr.ac.cn。

壤、气候、动植物区系等方面开展了基础调查;之后,遥感技术被引进青藏高原湿地研究,凭借自身具有的观测范围广、信息量大、获取信息快、可比性强等优点,在青藏高原湿地类型转变、面积变化、景观格局演变、生态环境监测等研究中得到了较为广泛的应用。本文通过综合青藏高原湿地遥感监测与研究进展,探讨青藏高原湿地遥感的发展趋势,以期今后青藏高原湿地研究提供科学参考。

2 高原湿地遥感的理论与方法研究进展

2.1 基于遥感技术的高原湿地分类系统

湿地的科学分类是湿地科学理论的核心问题之一,也是湿地科学发展水平的标志(杨永兴, 2002a)。一般地可将湿地分为成因分类和特征分类两大类(倪晋仁等, 1998)。青藏高原湿地类型独特,国内学者以不同空间尺度提出了相关湿地分类系统(赵魁义, 1999; 陈桂琛等, 2002; 张继承等, 2007; Zhang et al, 2010),以适应青藏高原湿地遥感研究的需要。一种是对高海拔地区从空间上开展了不同区域的湿地系统划分,将位于青藏高原腹地的三江源区湿地划分为湿原、湖泊、河流、河床等4类(李来兴等, 1998),另一种是将藏南谷地复杂的拉萨河流域湿地划分为开阔水域、高寒草甸、草丛沼泽、灌丛、森林、滩地等6类13型(Zhang et al, 2010)。2010年西藏自治区林业厅也将该区湿地划分为河流、湖泊、沼泽、人工湿地等4类17型(西藏自治区林业厅, 2011)。运用遥感技术进行高原湿地分类的主要依据是各类地物不同的光谱特征。根据研究区域的等级尺度和湿地类型的复杂程度,选用符合研究区域实际情况的湿地分类系统。以上所提及的西藏自治区湿地分类系统和拉萨河流域湿地分类系统对于青藏高原全高原面尺度和流域尺度的湿地分类工作有较大借鉴意义。

2.2 湿地信息的识别与提取

湿地信息的识别与提取是湿地变化分析的基础,其为湿地生态系统的分类、合理保护和科学管理提供依据。针对青藏高原不同时期卫星遥感影像的特点(表1)(李建平等, 2007),采用了不同的湿地信息提取技术:目视解译、人机交互解译、计算机自动解译。

2.2.1 人工目视解译的湿地信息提取

人工目视解译可以凭借判读人员解译经验,并结合高程、地形、土壤、土地利用等辅助数据进行综合分析,尤其在地物空间关系处理方面优于计算机自动解译。例如国内学者采用该方式对若尔盖湿地(周华茂等, 1999; 沈松平等, 2005)及长江源区(Huang et al, 2011)湿地的变化趋势进行了分析,发现了相关区域1970s-2000s湿地面积等指标的变化规律。但是,目视解译工作存在知识储备时间长、效率较低、解译质量与解译人员的经验和对研究区域的熟悉程度密切相关等局限性。

2.2.2 计算机自动解译的湿地信息提取

随着计算机数字图像解译方法的发展,计算机分类方法代表了湿地识别分类模型的未来方向(周德民等, 2006)。

(1) 基于单分类器的计算机自动解译

随着计算机图像处理技术的发展,单分类器自动解译出现了一些新的分类方法,包括面向对象分类、基于知识的决策树分类、人工神经网络分类、支持向量机分类等(柏延臣等, 2005)。例如相关学者通过构建决策树模型探讨了三江源区湿地分类方法(邹文涛等, 2011)和大喜马拉雅地区的湿地分类(International Centre for Integrated Mountain Development, 2009; Li et al, 2012),以及通过面向对象分类法分析了长江源区当曲流域湿地的结构特征和空间分布规律,并探讨了构建适宜于高海拔河源地区的湿地分类系统(张继平, 2011)。但是,运用单分类器不可能对所有湿地类型进行有效提取,在一定程度上限制了湿地分类的精度。

(2) 基于复合分类法的计算机自动解译

近年来,多分类器结合的思想及关于多分类器结合方法的研究在模式识别领域兴起,并且在遥感图像分类领域也逐渐得到应用(柏延臣等, 2005)。复合分类法是将不同分类器组合起来对遥感影像信息进行识别分类,是湿地遥感监测发展的必然趋势(李建平等, 2007)。例如,相关学者运用谱间关系法、归一化水体指数、修正归一化水体指数及非监督分类等4种分类方法提取玛多县湿地信息,并以修正归一化水体指数方法为最优选择(杨永顺等, 2012)。还有学者采用监督分类法、最大似然分类法和目视解译等方法对三江源区土地覆被类型划分开展了研究(Wang et al, 2011)。选用复合分类法

表1 青藏高原湿地遥感影像性能概要(李建平等, 2007)

Tab.1 Summary of the performance of remote sensing images for Tibetan Plateau wetland research (Li et al, 2007)							
分辨率参数		空间分辨率		光谱分辨率		时相分辨率	
分辨率等级	高空间分辨率	中空间分辨率	低空间分辨率	高光谱分辨率	多光谱分辨率	单时相	多时相
数据源	航空影像、 ALOS	Landsat、SPOT、 CBERS、HJ-1A/ 1B、ENVISAT	MODIS、 AVHRR	MODIS、 HJ-1A	Landsat、SPOT、 CBERS、HJ- 1B、 AVHRR、 ALOS、 ENVISAT	各种遥感 影像	各种遥感 影像
优点	1、高空间分辨率影像分类精度高,分类层次多,适用于小区域的湿地分类 2、中、低空间分辨率影像价格低廉,易于获取,分别适用于中型区域和大区域的湿地分类,并且 Landsat 数据时间序列长,目前在青藏高原湿地研究中应用最为广泛			1、高光谱分辨率影像波段宽度小,波段数量多,信息量大,并且影像中每个像元拥有连续光谱,湿地分类精度高,并在湿地植被监测、湿地植被分类以及生物量估算方面具有优势 2、多光谱分辨率影像分类精度较高,影像处理过程简便,目前在青藏高原湿地研究中应用最为广泛		1、单时相分辨率影像有助于快速提取湿地信息,与高空间分辨率影像配合效果更好 2、多时相分辨率影像信息量大,分类精度高,拥有多个时间点信息,有助于湿地监测,并且对湿地影像中的“异物同谱”“同物异谱”现象处理具有优势,目前在青藏高原湿地研究中应用最为广泛	
缺点	1、高空间分辨率影像数据量大,影像处理复杂,价格昂贵,并且 ALOS 卫星 2011 年与地面失去联系 2、中、低空间分辨率影像难以实现湿地多层次分类,应用中空间分辨率影像进行湿地分类一般到二级类,并且 ENVISAT 卫星 2012 年与地面失去联系,低空间分辨率影像的分类效果则更差			1、高光谱分辨率影像获取较难,影像处理过程较为复杂,并且在湿地分类中要与中、高空间分辨率影像相配合 2、多光谱分辨率影像波段宽度大,波段数量少,信息量小,地物光谱不连续,一般只能进行湿地二级分类		1、单时相分辨率影像信息量小,分类精度低,仅代表地物单个时间点信息,目前应用很少 2、多时相分辨率影像的处理过程较为复杂	

进行计算机自动解译,不仅可以通过各分类法提取精度间的比较来选择最佳湿地分类方法,而且可以通过各分类方法的最优组合来提高湿地分类精度。

3 高原湿地时空变化研究进展

3.1 研究关注的区域与时段

从1972年美国第一颗Landsat系列卫星发射升空以来,遥感在湿地变化分析中起着日益重要作用。现在,遥感技术已经被认为是监测湿地最重要的工具(Ozesmi et al, 2002)。中国运用遥感技术开展青藏高原湿地研究则开始于20世纪80年代后,中国科学院东北地理与农业生态研究所、西北高原生物研究所等单位(陈桂琛等, 1992; 李来兴等, 1998; 赵魁义等, 1999)运用遥感技术对高原湿地资源进行了调查。自1992年开始,基于遥感数据分析的青藏高原湿地研究文献开始陆续发表(陈桂琛

等, 1992), 2000年以后遥感湿地研究成果迅速增加。这些研究集中在中小尺度的典型区,其中,中等尺度的典型区包括若尔盖高原(周华茂等, 1999; 王长科等, 2001; 雍国玮等, 2003; 孙妍, 2009)、拉萨河流域(张镔锂等, 2000; 王春连, 2010)、雅鲁藏布江(Li et al, 2013)、喜马拉雅地区(李国庆, 2010; 聂勇, 2010)、三江源(李来兴等, 1998; Feng et al, 2006; 陈永富, 2012)、祁连山地区(李英年等, 2003; Hirota et al, 2007)、青藏铁路沿线(汪芳, 2008)等。小尺度典型区则以湖泊湿地(陈桂琛等, 1992; 陈毅峰等, 2001; 袁军等, 2002; 宗浩等, 2004; 赵培松, 2008; 王君波等, 2010; 尚文等, 2012; 张雪芹等, 2012; Nie, Liu et al, 2013; Song et al, 2013a; 孙瑞等, 2013)研究为主。相比之下,大尺度的高原湿地(贺桂芹等, 2007; 谭雅懿等, 2011; Kropacek et al, 2012)遥感研究则相对较少,如羌塘高原、阿里高原、柴达木盆地等地区的研究尤其匮乏。同时,青藏高原湿地遥感

研究工作所使用的遥感影像在时间上集中于1970、1975、1990、2000、2005、2010等时间点前后,影像信息基本涵盖了20世纪70年代-20世纪前10年的青藏高原湿地系统年代际变化状况。

3.2 湿地面积与湖泊湿地三维变化遥感监测

湿地面积的变化,是湿地变化监测的基础性工作之一。研究表明,青藏高原不同区域湿地的面积变化总体特征(表2)为:①随着时间的推移,青藏高原内部多处湿地出现退化(Zhang et al, 2010)或者消

失的现象(李英年等, 2009; Zhang Y et al, 2011; 尚文等, 2012),且退化或消失的区域逐渐呈现广布的态势,从高原边缘地区到高原腹地均有分布;②湿地面积变化速率存在明显垂直分异,例如1985-2005年,雅鲁藏布江流域湿地面积在海拔4500 m以上地区增加了0.37%,在3500-4000 m区域则减少0.42%(Li et al, 2013);③不同的湿地类型变化趋势存在明显差异,例如1976-2006年,拉萨河流域自然湿地面积减少9%,而人工湿地面积增加了2.7%(王

表2 青藏高原湿地面积与湖泊湿地三维变化特征表

Tab.2 Characteristics of change in wetland area and lake area, volume, and depth on the Tibetan Plateau

研究区域	研究时段	研究内容	数据类型	变化率或 变化值	年均变化率 或变化值	文献
青藏高原	1990-2006	湿地面积	TM、ETM、CBERS	-2.2%	-0.13%	邢宇等, 2009
青藏高原	1976-2009	湖泊面积	MSS、TM、ETM	27.3%	0.83%	李均力等, 2011
内流区域	1970-2011	湖泊水量	MSS、TM、ETM、 ICESat/GLAS	92.43 km ³	2.2 km ³ /a	Song et al, 2013b
青藏高原						
青藏高原	2003-2009	湖泊深度	ICESat/GLAS		0.20 m/a	Phan et al, 2012
青藏高原	2003-2009	湖泊深度	ICESat/GLAS		0.20 m/a	Zhang et al, 2011
若尔盖高原	1989-2004	湿地面积	TM	-12.89%	-0.42%	王根绪等, 2007
若尔盖高原	1990-2009	泥炭沼泽 面积	TM	-13.39%	-0.67%	Yao et al, 2011
三江源	1954-2005	沼泽面积	1:10万地形图、 MSS、TM、CBERS	-77%	-1.48%	Wang et al, 2011
青海湖	1991-2004	湖泊面积	AVHRR	-105.73 km ²	-7.55 km ² /a	刘瑞霞等, 2008
柴达木盆地	1956-2000	湿地面积	航片、TM、ETM	-36.14%	-0.80%	张继承等, 2007
纳木错	1971-2004	湖泊面积、 湖泊水量	航片、TM、CBERS	4.97% 10.28%	0.15% 0.30%	Zhu et al, 2010
班戈错	1959-2001	湖泊面积	航片、MSS、TM、 ETM	152.57%	3.55%	赵元艺等, 2006
色林错	1975-2008	湖泊面积	地形图、TM、 CBERS	35.4%	1.04%	边多等, 2010
达则错	1976-2000	湖泊面积	MSS、ETM	-3.5%	-0.14%	乔程等, 2010
当惹雍错	1999-2009	湖泊面积	TM	1.8%	0.16%	拉巴等, 2012
喜马拉雅地区	1990-2010	湖泊面积	TM、ETM	17.11%	0.81%	Nie, Zhang et al, 2013b
雅鲁藏布江	1985-2005	湿地面积	1:10万土地覆被 数据集	-0.50%	-0.02%	Li et al, 2013
拉鲁湿地	1965-1999	湿地面积	航片	-36.5%	-1.04%	张镱锂等, 2000
拉萨河流域	1976-2006	湿地面积	MSS、TM、CBERS	-8.8%	-0.28%	王春连, 2010
羌塘自然保护区	1975-1990	湖泊面积	MSS、TM、ETM	-16.1%	-1.07%,	李林等, 2013
	1990-2005			74.2%	12.37%	

春连, 2010); ④湿地存在不同的季节变化和年际变化, 且近年来年际变化率呈显著增加的态势。例如在青藏高原内流区域, 湖泊每年最稳定的时段是9-12月, 最大湖泊面积变化率不超过2%(李均力等, 2011); 纳木错湖面面积和水量在1971-1991年的增加速率分别为 $2.06 \text{ km}^2/\text{a}$ 和 $1.60 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 而在1992-2004年则分别为 $4.01 \text{ km}^2/\text{a}$ 和 $3.61 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (Zhu et al, 2010)。

湖泊湿地三维方向上的变化特点(表2)可归纳为以下3个方面:

(1) 青藏高原内各区域湖泊湿地面积的变化特点在不同时期存在: ①逐年萎缩与波动式萎缩。例如位于尼玛县的达则错在1976-2000年间以 $0.352 \text{ km}^2/\text{a}$ 的速率萎缩(乔程等, 2010), 而位于珠穆朗玛峰周边地区的佩枯错在20世纪70年代呈轻微萎缩态势, 湖泊面积减少0.15%; 90年代呈明显萎缩态势, 湖泊面积减少2.53%; 2000年扩张, 湖泊面积增加0.82%; 2000年后呈加速萎缩态势, 湖泊面积减少1.98%(Nie, Zhang et al, 2013); ②萎缩与增加交替。例如羌塘自然保护区湖泊面积在1975-1990年减少16.1%, 但在1990-2005年间增加74.2%(李林等, 2013); ③逐年增加。例如色林错面积在1970-1999年扩大了 152.61 km^2 , 而在1999-2010年继续扩大了 440.81 km^2 (Lei et al, 2013)。

(2) 青藏高原湖泊深度总体上呈逐年增加态势。例如2003-2009年, 青藏高原湖泊深度总体上以 0.20 m/a 的速率增加(Zhang G Q et al, 2011; Phan et al, 2012), 其中, 青海湖水深以 0.11 m/a 的速率增加, 纳木错水深以 0.25 m/a 的速率增加(Zhang G Q et al, 2011)。

(3) 青藏高原湖泊水量的动态变化特点, 相关研究通过遥感数据监测和模型动态模拟得出了高原湖泊储水量自20世纪70年代以来的变化态势, 例如青藏高原湖泊储水量在1970-2011年间以 $2.2 \text{ km}^3/\text{a}$ 的速率增加(Song et al, 2013b)。

3.3 湿地景观格局变化监测进展

景观格局通常是指景观的空间结构特征, 包括景观组成单元的类型、数目以及空间分布与配置(王宪礼等, 1997)。应用遥感技术对湿地景观格局进行变化监测通常是指对湿地景观的空间结构特征变化进行监测。目前, 青藏高原湿地景观格局的变化监测主要以斑块数量、斑块面积、景观类型、景观面积等要素为基础, 建立不同侧重点的相关指

数, 从斑块面积、斑块密度与形状、景观多样性和景观聚散性等方面来分析青藏高原湿地不同时期的空间结构变化特征。近年来, 相关研究探索了20世纪70年代-21世纪前10年青藏高原不同区域湿地的景观格局变化特征, 得到以下初步认识: ①在斑块尺度上, 各湿地类型的斑块面积与斑块密度等要素的变化趋势存在显著的区域差异。例如, 若尔盖高原湖泊湿地的斑块密度在20世纪70年代-2006年增长2.31%, 表明该湿地类型逐渐破碎, 而盐沼湿地的斑块密度在20世纪70年代-2006年下降27.27%, 说明该湿地类型有稳定增长趋势(孙妍, 2009); 但在拉萨河流域, 湖泊的斑块密度在1988-2006年下降了0.05%(王春连, 2010); ②在景观尺度上, 湿地景观的多样性、类型分布均匀性、破碎化程度等要素的变化态势也存在较为显著的区域差异。例如, 青藏高原湿地在1990-2006年间的景观多样性相对变化率为-2.82%, 表明青藏高原湿地的景观多样性变小, 复杂程度趋于减少, 显示青藏高原湿地的退化趋势(邢宇等, 2009)。而在1990-2007年间, 若尔盖高原的景观多样性指数呈现先下降后上升的态势, 其中, 2000-2007年, 景观多样性指数上升了0.28%(邓茂林, 2010)。总之, 尽管青藏高原湿地景观在斑块尺度和景观尺度上存在区域差异, 但在两级尺度上均表现为总体退化趋势。

3.4 湿地生态与环境变化监测

运用遥感技术开展青藏高原湿地生态与环境变化研究, 主要包括生态系统空间格局、生态系统健康状况、生态系统功能、生态系统服务、湿地植被生物量、湿地生态需水量等。目前, 相关研究基本涵盖了20世纪70年代-21世纪前10年青藏高原不同区域湿地的生态环境变化特征, 研究表明: ①青藏高原生态与环境变迁较为剧烈。例如, 相关研究指出, 20世纪70年代末-21世纪初, 生态与环境轻度、中度恶化区面积占青藏高原总面积的36.6%, 特别是青海湖周边等湿地区发生了较为严重的环境恶化(张继承, 2008); ②不同的本底生态环境导致生态与环境波动的差异(张继承, 2008); ③青藏高原湿地生态系统每年的生态服务价值为 1371.7×10^8 元, 占青藏高原生态系统每年服务价值的14.7%(谢高地等, 2003); ④青藏高原湿地生态系统健康状况在不同区域呈现出分异, 例如在拉萨河流域, 河流上游水分充足, 人口牲畜较少, 生态健康状况良好; 中游生态健康状况一般, 但敏感性较强, 极易向退化

状态转化;下游由于人口密集,生态健康状况较差(王春连, 2010)。同时,湿地生态与环境变化监测还将遥感技术与数学建模、计算机技术结合起来开展相关研究,主要有:①运用遥感技术分析湿地生态系统NPP的空间分布,并探讨分布格局与地形的关系,监测NPP的季节性变化和年际变化状况,分析不同湿地植被类型区的NPP差异规律,进而分析湿地生态系统的健康状况。例如,若尔盖高原湿地在2000-2009年表现出退化态势,退化区面积达67%(Bian et al, 2010);②在生态需水量研究中,应用相关模型估算出维持湿地基本生态功能的最低储水量和合理储水量。例如,相关研究估算出若尔盖高原湿地最低储水量为 $62.18 \times 10^8 \text{ m}^3$,合理储水量为 $66.39 \times 10^8 \text{ m}^3$ (Tan et al, 2012)。

3.5 湿地变化驱动力分析

在青藏高原湿地遥感工作中,国内外学者(张继承, 2008; Qiu et al, 2009; 邢宇等, 2009; 聂勇, 2010; 王春连, 2010; Yao et al, 2011; 田蓉等, 2011; 张继平, 2011)分析了导致湿地变化的驱动力。研究表明,湿地变化驱动力包括自然驱动力和人为驱动力两方面:①自然驱动力包括气候变暖导致气温升高、地表蒸发量增大、降水量增加、冰雪融化速度加快、鼠害等,并认为自然因素对青藏高原湿地影响显著。例如,相关研究指出青藏高原气温1978-1999年以高于全球气温变化速率的态势持续上升,导致青藏高原冰川面积减少 $0.44 \times 10^4 \text{ km}^2$,湖泊面积增加 $0.16 \times 10^4 \text{ km}^2$ (张继承, 2008);②人为驱动力,包括牲畜数量增加、资源开采、工程排水、道路建设、旅游等人类活动加剧,并认为人类活动对一些典型区的湿地退化起主导作用。例如城市扩张导致拉鲁湿地面积在1965-1999年间以1.04%/a的速率减少(张懿锂等, 2000);由于人口增长导致资源需求的增加,使得若尔盖高原的泥炭沼泽被开发,人为工程排水导致1970-1977年间消失的泥炭沼泽面积达 $12 \times 10^4 \text{ km}^2$,但随着自然保护区的设立,1998-2008年泥炭沼泽面积又增加了 181.42 km^2 。同时,在分析湿地变化驱动力的基础上,提出湿地退化的恢复措施,提倡对湿地进行可持续性管理(朱万泽等, 2003; Zhang et al, 2012)。

综上所述,应用遥感技术对青藏高原湿地的研究取得了以下认识(表3):

(1) 在研究范式方面,①研究区域由原来青藏高原部分地区(如西藏、若尔盖等)向全高原延伸,研

究范围更广;②研究类型由较为单一的湿地类型向综合多样的湿地类型转变;③研究过程由静态监测向变化监测、模型构建、动态监测模拟转变;④研究要素由湿地分布状况、类型、面积监测向湿地时空变化趋势、景观格局、生态环境监测发展;⑤研究层次由单一要素描述向综合系统研究转变,由水平方向向立体方向转变,更加注重运用遥感技术,并以生态系统的角度来研究高原湿地。

(2) 在青藏高原湿地现状、变化、过程监测、驱动力等方面分别取得了下述新认识:①1990-2006年间,青藏高原湿地总体以-0.13%/a的速率退化,但不同湿地类型的变化趋势存在显著差异,以湖泊湿地为例,青藏高原内流区域湖泊面积在1976-2009年间以0.83%/a的速率扩张,青藏高原湖泊深度在2003-2009年间以0.20 m/a的速率加深,湖泊水量在1970-2011年间以 $2.2 \text{ km}^3/\text{a}$ 的速率增加;②青藏高原湿地景观多样性在1990-2006年间以-0.17%/a的速率减少,反映出青藏高原湿地景观总体退化态势;③青藏高原湿地生态系统年服务价值占整个高原生态系统年服务价值的14.7%,但在20世纪70年代-2000年间,发生轻、中度恶化的区域面积占青藏高原总面积的36.6%,由此导致高原湿地生态环境发生了较为严重的恶化;④自然驱动力是青藏高原湿地变化的主导因素,但人为驱动力也是高原湿地变化的重要影响因素,并在一些区域的湿地变化中起主导作用。

4 存在问题与展望

4.1 存在的主要问题

目前,青藏高原湿地遥感研究主要关注的问题是青藏高原湿地的分类与识别、湿地面积变化与湖泊湿地三维变化监测、湿地景观格局变化监测、湿地生态环境变化监测和湿地变化驱动力分析等方面。其中,存在以下几方面的问题:

(1) 在青藏高原湿地遥感监测方法中,应用遥感技术初步构建了青藏高原高原面、典型区、单一湿地型等3级不同空间尺度的湿地分类体系,但是,基于遥感技术的青藏高原湿地分类体系尚未形成统一规范。建立统一的湿地遥感分类系统对于今后的青藏高原湿地分类提取工作十分重要,需要综合地理、生态、环境、水文、气象等多学科的知识,并结合遥感技术的发展阶段来共同建立。

表3 遥感技术使用前后的青藏高原湿地研究对比

Tab.3 Tibetan Plateau wetland research before and after using remote sensing technique

遥感技术使用前			遥感技术使用后	
研究项目	研究内容	文献	研究内容	文献
湿地分布	主要依靠野外考察在西藏、若尔盖等地开展湿地调查,观测并描述湿地分布状况、地理位置等要素,量算湿地面积等,绘制湿地分布图	柴岫等, 1963 赵魁义等, 1981	依靠遥感技术和野外考察相结合,在青藏高原全高平原开展湿地遥感动态监测,对于湿地空间分布状况及变化趋势开展年代际、年际、季节性的监测分析	边多等, 2010; 聂勇, 2010; 王君波等, 2010; Tan et al, 2012; 拉巴等, 2012; 尚文等, 2012; 田园等, 2012
湿地类型	河流、湖泊、沼泽,其中沼泽根据地貌类型分至二级类,根据优势植物群丛分至三级类	关志华等, 1980 赵魁义等, 1981 陈传友等, 1983	河流、湖泊、沼泽、森林、人工等湿地类型,可分至四级类,并可以开展湿地类型变化的长时间序列监测	张德锂等, 2000; 陈毅峰等, 2001; 袁军等, 2002; 宗浩等, 2004; 赵元艺等, 2006; 乔程等, 2010; 王春连, 2010
湿地生态环境	主要描述湿地的地貌、气候、动物、植物等环境特征	孙广友等, 1987	开展青藏高原湿地生态环境变化研究,对生态系统空间格局、健康状况、生态系统功能、生态系统服务、湿地植被生物量、湿地生态需水量等生态环境变化问题开展遥感动态监测	张继承, 2008; Bian et al,2010; 王春连, 2010; Tan et al, 2012

(2) 基于计算机技术的遥感解译是今后高原湿地遥感解译工作的趋势。但目前,计算机解译精度仍存在一些问题,尤其是在青藏高原湿地分类提取工作中,不同湿地类型的提取精度存在差异。湖泊、河流等水体湿地易于区分,而沼泽湿地易于与其他地物类型相混淆,并被错分到其他地物中;同时,应用复合分类法提取湿地信息虽然能比较显著地提高遥感数据的总体分类精度,但也存在以下不足:①在采用复合分类法后,单个湿地类别的分类精度不一定高于单分类器对单个湿地类别的分类精度。②一些分类方法(例如决策树分类法)需要划定参数阈值,而阈值确定存在主观性。③各分类器之间如何组合才能发挥复合分类法的最佳效能,需要研究人员拥有丰富经验。

(3) 青藏高原复杂多变的气象条件使得云的干扰成为获取清晰遥感影像以及进行湿地识别、信息提取的主要障碍之一,特别是植被生长季(6-9月)的多云情况会给沼泽湿地的提取带来一定的难度。尽管有一些去云处理技术,但是往往存在图像变形、信息丢失的问题。因此,去云的处理技术精度的提高也是青藏高原湿地遥感研究工作亟待解决的问题。

(4) 缺乏以地理、遥感、生态、环境、水文、气象、资源等多学科的综合视角来研究青藏高原湿地系统。目前,青藏高原湿地遥感研究的相关工作主要注重单一问题的研究,如湿地面积变化监测为各项研究中最常见的,缺乏以多学科的综合视角来探讨青藏高原湿地生态系统的格局演变、环境变化、驱动机制等问题。同时,需要综合遥感技术、数学建模与计算机技术,来构建驱动力与湿地变化之间的相关关系模型,使得青藏高原湿地变化驱动力分析能以更准确的定量研究方式进行。

4.2 重点与方向

利用遥感技术对青藏高原湿地进行动态监测和信息提取是对高原湿地资源进行有效保护和管理的重要手段之一,也是及时获取青藏高原科研资料匮乏区基础数据的需求。随着青藏高原湿地的重要性越来越得到认可,高原湿地遥感也将成为研究热点。本文认为未来青藏高原湿地遥感研究的重点和需要突破的方向为:

(1) 加强青藏高原湿地综合研究,建立统一的基于遥感技术的青藏高原湿地分类系统。在总结高原湿地遥感特征相似性和高寒湿地自身属性的基础上,建立和完善具有高原区域适应性、分层性

和技术可操作性的湿地遥感分类系统,并开展青藏高原湿地遥感分类系统调试、应用等基础性研究工作。

(2) 加强青藏高原资料匮乏区湿地遥感研究工作,充分发挥遥感技术监测湿地的多时相、多光谱、实时、动态、反复的优势,积极配合资料匮乏区湿地资源野外调查,继续采用野外调查与室内判读相结合的方式开展青藏高原湿地遥感研究工作,并突出遥感技术在湿地调查等基础性研究工作中的作用。

(3) 在研究内容上,注重以地理、生态、环境、水文、气象等多学科的综合视角来研究青藏高原湿地,加强全球气候变化背景下的湿地生态系统的响应与适应研究。这是未来青藏高原湿地研究的重点之一,其中需要突破的方向是:不同时间和空间尺度上的湿地响应与适应差异,并耦合水文、生态、气象、土壤和环境模型预测湿地退化趋势,揭示全球变化背景下青藏高原不同区域间湿地变化的共有规律和特有属性,同时,更加重视高原湿地生态系统功能参数遥感的定量研究、高原湿地生态系统服务研究和管理决策支持系统构建,以及探讨定量研究方式在青藏高原湿地系统变化驱动力分析中的应用。

(4) 在研究技术上,需要突破的方向包括:①加强多时相、多分辨率遥感影像在地物识别方面的结合使用,尤其是将雷达数据与光学数据相结合;②加强多分类器在湿地分类方面的应用,并优化其组合方式;③增加包括湿地预测模型在内的计算机智能应用模型研究,以及基于虚拟现实与三维可视化技术的湿地动态模拟研究,以期更准确、快速地分析青藏高原湿地不同尺度的动态变化特征;④改进去云处理技术、加强3S技术融合,促进青藏高原湿地信息平台建设,进一步满足地理、遥感、生态、环境、水文、气象等多学科科研工作的需要。

参考文献(References)

白军红, 欧阳华, 徐惠风, 等. 2004. 青藏高原湿地研究进展. 地理科学进展, 23(4): 1-9. [Bai J H, Ouyang H, Xu H F, et al. 2004. Advances in studies of wetlands in Qinghai-Tibet Plateau. Progress in Geography, 23(4): 1-9.]

柏延臣, 王劲峰. 2005. 结合多分类器的遥感数据专题分类方法研究. 遥感学报, 9(5): 555-563. [Bai Y C, Wang J F. 2005. Combining multiple classifiers for thematic classification of remotely sensed data. Journal of Remote Sens-

ing, 9(5): 555-563.]

边多, 边巴次仁, 拉巴, 等. 2010. 1975-2008年西藏色林错湖面变化对气候变化的响应. 地理学报, 65(3): 313-319. [Bian D, Bian B, La B, et al. 2010. The response of water level of Selin Co to climate change during 1975-2008. Acta Geographica Sinica, 65(3): 313-319.]

柴岫, 金树仁. 1963. 若尔盖高原沼泽的类型及其发生与发展. 地理学报, 29(3): 219-240. [Chai X, Jin S R. 1963. Ruorgai gaoyuan zhaoze de leixing jiqi fasheng yu fazhan. Acta Geographica Sinica, 29(3): 219-240.]

陈传友, 范云崎. 1983. 羌塘高原的河流、湖泊及水资源. 资源科学, (2): 38-44. [Chen C Y, Fan Y Q. 1983. Qiangtang gaoyuan de heliu, hupo ji shuiziyuan. Resources Science, (2): 38-44.]

陈桂琛, 黄志伟, 卢学峰, 等. 2002. 青海高原湿地特征及其保护. 冰川冻土, 24(3): 254-259. [Chen G C, Huang Z W, Lu X F, et al. 2002. Characteristics of wetland and its conservation in the Qinghai Plateau. Journal of Glaciology and Geocryology, 24(3): 254-259.]

陈桂琛, 彭敏, 周立华. 1992. 青海湖地区沼泽草甸遥感解译及其群落特征//中国科学院西北高原生物研究所. 高原生物学集刊. 北京: 科学出版社: 23-30. [Chen G C, Peng M, Zhou L H. 1992. Qinghaihu diqu zhaoze caodian yaogan jieyi jiqi qunluo tezheng//Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences. 1992. Gaoyuan shengwuxue jikan. Beijing, China: Science Press: 23-30.]

陈永富. 2012. 三江源高寒湿地动态变化趋势分析. 林业科学, 48(10): 70-76. [Chen Y F. 2012. Analysis of dynamic change trend of alpine wetlands in Three Rivers' source region. Scientia Silvae Sinicae, 48(10): 70-76.]

陈毅峰, 陈自明, 何德奎, 等. 2001. 藏北色林错流域的水文特征. 湖泊科学, 13(1): 21-28. [Chen Y F, Chen Z M, He D K, et al. 2001. Hydrographic features of Seling Co, North Tibetan Plateau. Journal of Lake Sciences, 13(1): 21-28.]

陈宜瑜. 1995. 中国湿地研究. 长春: 吉林科学技术出版社. [Chen Y Y. 1995. Zhongguo shidi yanjiu. Changchun, China: Jilin Science and Technology Publishing House.]

邓茂林. 2010. 若尔盖高原湿地国家级自然保护区景观格局变化及驱动力[D]. 昆明: 西南林业大学. [Deng M L. 2010. The change of landscape and its driving forces in Ruorgai Plateau national wetland reserve in Sichuan, China[D]. Kunming, China: Southwest Forestry University.]

关志华, 陈传友. 1980. 西藏河流水资源. 资源科学, (2): 25-35. [Guan Z H, Chen C Y. 1980. Xizang heliu shuiziyuan. Resources Science, (2): 25-35.]

- 国家林业局. 2008. 全国湿地资源调查技术规程(试行). [State Forestry Administration of China. 2008. Standards of surveying wetland resource of China(Tentative version).]
- 贺桂芹, 杨改河, 冯永忠, 等. 2007. 青藏高原湿地生态系统结构及功能分析. 干旱地区农业研究, 25(3): 185-189. [He G Q, Yang G H, Feng Y Z, et al. 2007. Analysis on alpine wetland's eco-system structure and function in Tibet Plateau. Agricultural Research in the Arid Areas, 25 (3): 185-189.]
- 拉巴, 边多, 陈涛, 等. 2012. 基于TM影像的西藏当惹雍错湖面积变化及可能成因. 气象科技, 40(4): 685-688. [La B, Bian D, Chen T, et al. 2012. Possible causes of area change of Lake Tangra Yumco, Tibet based on TM images. Meteorological Science and Technology, 40(4): 685-688.]
- 李国庆. 2010. 珠峰自然保护区湿地空间分布与退化原因研究[D]. 成都: 成都理工大学. [Li G Q. 2010. Distribution and degradation factors analysis of wetlands in Qomolangma National Nature Reserve[D]. Chengdu, China: Chengdu University of Technology.]
- 李均力, 盛永伟, 骆剑承, 等. 2011. 青藏高原内陆湖泊变化的遥感制图. 湖泊科学, 23(3): 311-320. [Li J L, Sheng Y W, Luo J C, et al. 2011. Remotely sensed mapping of inland lake area changes in the Tibetan Plateau. Journal of Lake Science, 23(3): 311-320.]
- 李建平, 张柏, 张冷, 等. 2007. 湿地遥感监测研究现状与展望. 地理科学进展, 26(1): 33-43. [Li J P, Zhang B, Zhang L, et al. 2007. Current status and prospect of researches on wetland monitoring based on remote sensing. Progress in Geography, 26(1): 33-43.]
- 李来兴, 周兴民, 王启基, 等. 1998. 江河源地区的湿地及其主要生物类群. 青海环境, 8(3): 108-114. [Li L X, Zhou X M, Wang Q J, et al. 1998. Jiangheyuan diqu de shidi jiqi zhuyao shengwu lei qun. Journal of Qinghai Environment, 8(3): 108-114.]
- 李林, 杨秀海, 扎西央宗, 等. 2013. 羌塘自然保护区湖泊变化及其原因分析. 干旱区研究, 30(3): 419-423. [Li L, Yang X H, Zhaxi Y Z, et al. 2013. Change of the lakes in the Qiangtang Nature Reserve. Arid Zone Research, 30 (3): 419-423.]
- 李英年, 赵亮, 赵新全, 等. 2009. 高寒金露梅灌丛草甸植被反射率特征. 山地学报, 27(3): 265-269. [Li Y N, Zhao L, Zhao X Q, et al. 2009. The dynamic features of alpine potentilla fruticosa shrub meadow vegetation reflectivity. Journal of Mountain Science, 27(3): 265-269.]
- 李英年, 赵新全, 赵亮, 等. 2003. 祁连山海北高寒湿地气候变化及植被演替分析. 冰川冻土, 25(3): 243-249. [Li Y N, Zhao X Q, Zhao L, et al. 2003. Analysis of vegetation succession and climate change in Haibei alpine marsh in the Qilian Mountains. Journal of Glaciology and Geocryology, 25(3): 243-249.]
- 刘瑞霞, 刘玉洁. 2008. 近20年青海湖湖水面积变化遥感. 湖泊科学, 20(1): 135-138. [Liu R X, Liu Y J. 2008. Area changes of Lake Qinghai in the latest 20 years based on remote sensing study. Journal of Lake Science, 20(1): 135-138.]
- 倪晋仁, 殷康前, 赵智杰. 1998. 湿地综合分类研究: I. 分类. 自然资源学报, 13(3): 214-221. [Ni J R, Yin K Q, Zhao Z J. 1998. Comprehensive classification for wetlands I: classification. Journal of Natural Resources, 13(3): 214-221.]
- 聂勇. 2010. 珠穆朗玛峰地区土地覆被变化研究[D]. 北京: 中国科学院大学. [Nie Y. 2010. Land cover changes in MT Qomolangma region[D]. Beijing, China: University of Chinese Academy of Sciences.]
- 乔程, 骆剑承, 盛永伟, 等. 2010. 青藏高原湖泊古今变化的遥感分析: 以达则错为例. 湖泊科学, 22(1): 98-102. [Qiao C, Luo J C, Sheng Y W, et al. 2010. Analysis on lake change since ancient and modern ages using remote sensing in Dagze Co, Tibetan Plateau. Journal of Lake Sciences, 22(1): 98-102.]
- 尚文, 杨永兴. 2012. 滇西北高原纳帕海湖滨湿地退化特征、规律与过程. 应用生态学报, 23(12): 3257-3265. [Shang W, Yang Y X. 2012. Degradation characteristics, patterns, and processes of lakeside wetland in Napahai of Northwest Yunnan Plateau, Southwest China. Chinese Journal of Applied Ecology, 23(12): 3257-3265.]
- 沈松平, 王军, 游丽君, 等. 2005. 若尔盖沼泽湿地遥感动态监测. 四川地质学报, 25(2): 119-121. [Shen S P, Wang J, You L J, et al. 2005. Remote sensing dynamic monitoring of the Zoige Marsh wet land. Acta Geologica Sichuan, 25 (2): 119-121.]
- 孙广友. 2000. 中国湿地科学的进展与展望. 地球科学进展, 15(6): 666-672. [Sun G Y. 2000. Development and prospect of wetland science in China. Advance in Earth Science, 15(6): 666-672.]
- 孙广友, 张文芬, 张家驹, 等. 1987. 若尔盖高原沼泽生态系统环境及其合理开发的研究. 自然资源学报, 2(4): 359-368. [Sun G Y, Zhang W F, Zhang J J, et al. 1987. A study of ecological environment and rational exploitation of the mires in Ruergai Plateau. Journal of Natural resources, 2(4): 359-368.]
- 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 2012. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. 地理学报, 67(1): 3-12. [Sun H L, Zheng D, Yao T D, et al. 2012. Protection and construction of

- the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 67(1): 3-12.]
- 孙瑞, 张雪芹, 郑度. 2013. 藏南羊卓雍错流域水化学区域差异及其成因. *地理学报*, 68(1): 36-44. [Sun R, Zhang X Q, Zheng D. 2013. Spatial variation and its causes of water chemical property in Yamzhog Yumco Basin, South Tibet. *Acta Geographica Sinica*, 68(1): 36-44.]
- 孙妍. 2009. 基于RS和GIS的若尔盖高原湿地景观格局分析[D]. 长春: 东北师范大学. [Sun Y. 2009. The analysis of Zoige Plateau alpine wetland's landscape pattern based on RS and GIS[D]. Changchun, China: Northeast Normal University.]
- 孙志高, 刘景双, 李彬. 2006. 中国湿地资源的现状、问题与可持续利用对策. *干旱区资源与环境*, 20(2): 83-88. [Sun Z G, Liu J S, Li B. 2006. The actuality, problems and sustainable utilization countermeasures of wetland resources in China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 20(2): 83-88.]
- 谭雅懿, 王烜, 王育礼. 2011. 中国寒区湿地研究进展. *冰川冻土*, 33(1): 197-204. [Tan Y Y, Wang X, Wang Y L. 2011. Progress of wetland researches in cold regions of China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 33(1): 197-204.]
- 田蓉, 曹春香, 马广仁, 等. 2011. 玛多县高原湿地变化及其驱动因素分析. *湿地科学*, 9(1): 61-68. [Tian R, Cao C X, Ma G R, et al. 2011. Changes and driving factors of plateau wetlands in Maduo County. *Wetland Science*, 9(1): 61-68.]
- 田园, 张雪芹, 孙瑞. 2012. 基于多源、多时相遥感影像的高原湖泊提取及其不确定性: 以西藏羊卓雍错流域为例. *冰川冻土*, 34(3): 563-572. [Tian Y, Zhang X Q, Sun R. 2012. Extracting alpine lake information based on multi-source and multi-temporal satellite images and its uncertainty analysis: a case study in Yamzhog Yumco Basin, south Tibet. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 34(3): 563-572.]
- 汪芳. 2008. 青藏铁路沿线湿地生态风险评价研究[D]. 成都: 西南交通大学. [Wang F. 2008. Ecological risk assessment for the wetland aside Xizang railway[D]. Chengdu, China: Southwest Jiaotong University.]
- 王长科, 王跃思, 张安定, 等. 2001. 若尔盖高原湿地资源及其保护对策. *水土保持通报*, 21(5): 20-23. [Wang C K, Wang Y S, Zhang A D, et al. 2001. Wetland resources and its protection in Zoige Plateau. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 21(5): 20-23.]
- 王春连. 2010. 拉萨河流域湿地变化研究[D]. 北京: 中国科学院大学. [Wang C L. 2010. The study of wetland changes in Lhasa River Basin[D]. Beijing, China: University of Chinese Academy of Sciences.]
- 王根绪, 李元寿, 王一博, 等. 2007. 近40年来青藏高原典型高寒湿地系统的动态变化. *地理学报*, 62(5): 481-491. [Wang G X, Li Y S, Wang Y B, et al. 2007. Typical alpine wetland system changes on the Qinghai-Tibet Plateau in recent 40 years. *Acta Geographica Sinica*, 62(5): 481-491.]
- 王君波, 彭萍, 马庆峰, 等. 2010. 西藏当惹雍错和扎日南木错现代湖泊基本特征. *湖泊科学*, 22(4): 629-632. [Wang J B, Peng P, Ma Q F, et al. 2010. Modern limnological features of Tangra Yumco and Zhari Namco, Tibetan Plateau. *Journal of Lake Sciences*, 22(4): 629-632.]
- 王宪礼, 李秀珍. 1997. 湿地的国内外研究进展. *生态学杂志*, 16(1): 58-62. [Wang X L, Li X Z. 1997. Advances in wetlands researches. *Chinese Journal of Ecology*, 16(1): 58-62.]
- 西藏自治区林业厅. 2011. 西藏自治区湿地资源调查报告. 西藏自治区林业厅内部资料: 27-28. [Xizang zizhiqu linyeting. 2011. Xizang zizhiqu shidi ziyuan diaocha baogao. Xizang zizhiqu linyeting neibu ziliao: 27-28.]
- 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 2003. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 18(2): 189-196. [Xie G D, Lu C X, Leng Y F, et al. 2003. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau. *Journal of Natural Resources*, 18(2): 189-196.]
- 邢宇, 姜琦刚, 李文庆, 等. 2009. 青藏高原湿地景观空间格局的变化. *生态环境学报*, 18(3): 1010-1015. [Xing Y, Jiang Q G, Li W Q, et al. 2009. Landscape spatial patterns changes of the wetland in Qinghai-Tibet Plateau. *Ecology and Environmental Sciences*, 18(3): 1010-1015.]
- 闫立娟, 齐文. 2012. 青藏高原湖泊遥感信息提取及湖面动态变化趋势研究. *地球学报*, 33(1): 65-74. [Yan L J, Qi W. 2012. Lakes in Tibetan Plateau extraction from remote sensing and their dynamic changes. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(1): 65-74.]
- 杨永顺, 钞振华, 宣勇, 等. 2012. 基于TM影像的玛多县湿地变化监测方法. *草业科学*, 29(7): 1039-1043. [Yang Y S, Chao Z H, Xuan Y, et al. 2012. Monitoring methods for wetland changes of Maduo County of China based on Landsat TM data. *Pratacultural Science*, 29(7): 1039-1043.]
- 杨永兴. 2002a. 国际湿地科学研究的主要特点、进展与展望. *地球科学进展*, 21(2): 111-120. [Yang Y X. 2002. Main characteristics, progress, and prospect of international wetland science research. *Advance in Earth Science*, 21(2): 111-120.]
- 杨永兴. 2002b. 国际湿地科学研究进展和中国湿地科学研究优先领域与展望. *地球科学进展*, 17(4): 508-513.

- [Yang Y X. 2002. New knowledge on the progress of international wetland science research and priority field and prospect of Chinese wetland science research. *Advance in Earth Science*, 17(4): 508-513.]
- 雍国玮, 石承苍, 邱鹏飞. 2003. 川西北高原若尔盖草地沙化及湿地萎缩动态遥感监测. *山地学报*, 21(6): 758-762.
- [Yong G W, Shi C C, Qiu P F, et al. 2003. Monitoring on desertification trends of the grassland and shrinking of the wetland in Ruorgai Plateau in North-West Sichuan by means of remote-sensing. *Journal of Mountain Science*, 21(6): 758-762.]
- 袁军, 高吉喜, 吕宪国, 等. 2002. 纳木错湿地资源评价及保护与合理利用对策. *资源科学*, 24(4): 29-34. [Yuan J, Gao J X, Lv X G, et al. 2002. Assessment on wetland resources in Namucuo and countermeasures for conservation and rational use. *Resources Science*, 24(4): 29-34.]
- 张继承. 2008. 基于RS/GIS的青藏高原生态环境综合评价研究[D]. 长春: 吉林大学. [Zhang J C. 2008. Study on comprehensive assessment of eco-environment based on RS/GIS in the Qinghai-Tibet Plateau[D]. Changchun, China: Jilin University.]
- 张继承, 姜琦刚, 李远华, 等. 2007. 近50年来柴达木盆地湿地变迁及其气候背景分析. *吉林大学学报: 地球科学版*, 37(4): 752-758. [Zhang J C, Jiang Q G, Li Y H, et al. 2007. Changes of wetland in Qaidam Basin in the past 50 years and analysis of climatic background. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 37(4): 752-758.]
- 张继平. 2011. 长江源区当曲流域湿地、湿地植被净初级生产力动态变化及影响因素分析[D]. 北京: 中国科学院研究生院. [Zhang J P. 2011. Changes of wetland and NPP of wetland vegetation in Damqu River Basin in source region of the Yangtze River and the influencing factors[D]. Beijing, China: Graduate University of Chinese Academy of Sciences.]
- 张雪芹, 孙瑞, 朱立平. 2012. 藏南羊卓雍错流域主要湖泊水质状况及其评价. *冰川冻土*, 34(4): 950-958. [Zhang X Q, Sun R, Zhu L P. 2012. Lake water in the Yamzhog Yumco Basin in South Tibetan region: quality and evaluation. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 34(4): 950-958.]
- 张懿锂, 李秀彬, 傅小锋, 等. 2000. 拉萨城市用地变化分析. *地理学报*, 55(4): 395-406. [Zhang Y L, Li X B, Fu X F, et al. 2000. Urban land use change in Lhasa. *Acta Geographica Sinica*, 55(4): 395-406.]
- 赵魁义. 1999. 中国沼泽志. 北京: 科学出版社. [Zhao K Y. 1999. *Zhongguo zhaoezhi*. Beijing, China: Science Press.]
- 赵魁义, 王德斌, 宋海远. 1981. 西藏高原沼泽的初步研究. *资源科学*, (2): 14-21. [Zhao K Y, Wang D B, Song H Y. 1981. Xizang gaoyuan zhaoze de chubu yanjiu. *Resources Science*, (2): 14-21.]
- 赵培松. 2008. 西藏色林错地区湿地遥感研究[D]. 成都: 成都理工大学. [Zhao P S. 2008. Study on the remote sensing for wetland of the Selincuo Lake in Tibet[D]. Chengdu, China: Chengdu University of Technology.]
- 赵元艺, 赵希涛, 郑绵平, 等. 2006. 西藏班戈错近50年来的湖面变化. *地质学报*, 80(6): 876-884. [Zhao Y Y, Zhao X T, Zheng M P, et al. 2006. The denivellation of Bankog Co in the past 50 years, Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 80(6): 876-884.]
- 周德民, 宫辉力, 胡金明, 等. 2006. 中国湿地卫星遥感的应用研究. *遥感技术与应用*, 21(6): 577-583. [Zhou D M, Gong H L, Hu J M, et al. 2006. Application of satellite remote sensing technology to wetland research. *Remote Sensing Technology and Application*, 21(6): 577-583.]
- 周华茂, 曾良修, 喻歌农, 等. 1999. 川西北高原湿地资源现状及合理利用. *西南农业学报*, 12(S1): 69-74. [Zhou H M, Zeng L X, Yu G N, et al. 1999. Analysis, utilization and protection of wetland resources in the northwest plateau of Sichuan Province. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 12(S1): 69-74.]
- 朱万泽, 钟祥浩, 范建容. 2003. 西藏高原湿地生态系统特征及其保护对策. *山地学报*, 21(Z1): 7-12. [Zhu W Z, Zhong X H, Fan J R. 2003. The floristic features and conservation of the rare and endangered plants in Tibet. *Journal of Mountain Science*, 21(Z1): 7-12.]
- 宗浩, 王成善, 黄川友, 等. 2004. 纳木错流域自然生态特征与生物资源保护研究. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 31(5): 551-557. [Zong H, Wang C S, Huang C Y, et al. 2004. Diversity protection of vertebrate species and fauna analysis of Nam Co valley in Tibet, China. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 31(5): 551-557.]
- 邹文涛, 张怀清, 鞠洪波, 等. 2011. 基于决策树的高寒湿地类型遥感分类方法研究. *林业科学研究*, 24(4): 464-469. [Zou W T, Zhang H Q, Ju H B, et al. 2011. Study on highland wetlands remote sensing classification based on decision tree algorithm. *Forest Research*, 24(4): 464-469.]
- Bian J H, Li A N, Deng W. 2010. Estimation and analysis of net primary productivity of Ruorgai wetland in China for the recent 10 years based on remote sensing. *Procedia Environmental Sciences*, 2: 288-301.
- Feng J M, Wang T, Xie C W. 2006. Eco-environmental degradation in the source region of the Yellow River, Northeast

- Qinghai-Xizang Plateau. Environmental Monitoring and Assessment, 122(1-3): 125-143.
- Hirota M, Kawada K, Hu Q W, et al. 2007. Net primary productivity and spatial distribution of vegetation in an alpine wetland, Qinghai-Tibetan Plateau. The Japanese Society of Limnology, 8(2): 161-170.
- Huang L, Liu J Y, Shao Q Q, et al. 2011. Changing inland lakes responding to climate warming in Northeastern Tibetan Plateau. Climatic Change, 109(3-4): 479-502.
- International Centre for Integrated Mountain Development. 2009. A manual for an inventory of greater Himalayan wetlands[EB/OL]. 2009-11-16[2013-11-14]. <http://www.icimod.org/>
- Kropacek J, Braun A, Kang S C, et al. 2012. Analysis of lake level changes in Nam Co in Central Tibet utilizing synergistic satellite altimetry and optical imagery. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 17: 3-11.
- Lei Y B, Yao T D, Broxton W B, et al. 2013. Coherent lake growth on the Central Tibetan Plateau since the 1970s: characterization and attribution. Journal of Hydrology, 483: 61-67.
- Lemly A D, Kingsford R T, Thompson J R. 2000. Irrigated agriculture and wildlife conservation: conflict on a global scale. Environmental Management, 25(5): 485-512.
- Li F P, Xu Z X, Feng Y C, et al. 2013. Changes of land cover in the Yarlung Tsangpo River Basin from 1985 to 2005. Environment Earth Sciences, 68(1): 181-188.
- Li Z Q, Xu J C, Shilpakar R L, et al. 2012. Mapping wetland cover in the greater Himalayan region: a hybrid method combining multispectral and ecological characteristics. Environment Earth Sciences, 71(3): 1083-1094.
- Nie Y, Liu Q, Liu S Y. 2013. Glacial lake expansion in the central Himalayas by Landsat images, 1990-2010. PLoS ONE, 8(12): doi: 10.1371/journal.pone.0083973.
- Nie Y, Zhang Y L, Ding M J, et al. 2013. Lake change and its implication in the vicinity of Mt. Qomolangma (Everest), central high Himalayas, 1970-2009. Environment Earth Sciences, 68(1): 251-265.
- Ozesmi S L, Bauer M E. 2002. Satellite remote sensing of wetlands. Wetlands Ecology and Management, 10(5): 381-402.
- Phan V H, Lindenbergh R, Menenti M. 2012. ICESat derived elevation changes of Tibetan lakes between 2003 and 2009. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 17: 12-22.
- Qiu P F, Wu N, Luo P, et al. 2009. Analysis of dynamics and driving factors of wetland landscape in Zoige, Eastern Qinghai-Tibetan Plateau. Journal of Mountain Sciences, 6(1): 42-55.
- Song C Q, Huang B, Ke L H. 2013a. Inter-annual changes of alpine inland lake water storage on the Tibetan Plateau: detection and analysis by integrating satellite altimetry and optical imagery. Hydrological Processes, 28(4): 2411-2418.
- Song C Q, Huang B, Ke L H, et al. 2013b. Modeling and analysis of lake water storage changes on the Tibetan Plateau using multi-mission satellite data. Remote Sensing of Environment, 135: 25-35.
- Tan Y Y, Wang X, Li C H, et al. 2012. Estimation of ecological flow requirement in Zoige Alpine wetland of Southwest China. Environment Earth Sciences, 66(5): 1525-1533.
- The Ramsar Convention Bureau. 2000. Ramsar handbook for the wise use of wetlands[EB/OL]. 2011-06-17[2013-11-14]. http://www.ramsar.org/cda/en/ramsar-pubs-handbooks-ramsar-toolkit-21323/main/ramsar/1-30-33%5E21323_4000_0__
- Wang Z M, Song K S, Ma W H, et al. 2011. Loss and fragmentation of marshes in the Sanjiang Plain, Northeast China, 1954-2005. Wetlands, 31(5): 945-954.
- Yao L, Zhao Y, Gao S J, et al. 2011. The peatland area change in past 20 years in the Zoige Basin, Eastern Tibetan Plateau. Frontiers of Earth Science, 5(3): 271-275.
- Zhang G Q, Xie H J, Kang S C, et al. 2011. Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau using ICESat altimetry data (2003-2009). Remote Sensing of Environment, 115(7): 1733-1742.
- Zhang X H, Liu H Y, Baker C, et al. 2012. Restoration approaches used for degraded peatlands in Ruorgai (Zoige), Tibetan Plateau, China, for sustainable land management. Ecological Engineering, 38(1): 86-92.
- Zhang Y L, Wang C L, Bai W Q, et al. 2010. Alpine wetland in the Lhasa River Basin, China. Journal of Geographical Sciences, 20(3): 375-388.
- Zhang Y, Wang G X, Wang Y B. 2011. Changes in alpine wetland ecosystems of the Qinghai-Tibetan Plateau from 1967 to 2004. Environmental Monitoring and Assessment, 180(1-4): 189-199.
- Zhu L P, Xie M P, Wu Y H. 2010. Quantitative analysis of lake area variations and the influence factors from 1971 to 2004 in the Nam Co Basin of the Tibetan Plateau. Chinese Science Bulletin, 55(13): 1294-1303.

Advances in research on wetlands of the Tibetan Plateau

ZHAO Zhilong^{1,2,3}, ZHANG Yili¹, LIU Linshan¹, LIU Fenggui^{1,2}, ZHANG Haifeng²

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. College of Biologic and Geographic Sciences, Qinghai Normal University, Xi'ning 810008, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: About 80% of the global wetlands are being degraded or lost, and wetland ecosystem has become one of the most endangered ecosystems in the world. As a sensitive area to global change and protective barrier for the security of ecosystems in Asia, the Tibetan Plateau has a wetland area of about $13.19 \times 10^4 \text{ km}^2$, which is an important part of the wetland ecosystem in China. With increasingly more remote sensing technology applied, Tibetan Plateau wetland research entered a new period of rapid development. This article summarizes remote sensing research literature of the Tibetan Plateau from 1992 to 2013, aiming to provide a reference for Tibetan Plateau wetland research in the future. The following aspects of research are reviewed: monitoring methods, research topics, and existing problems. The analysis shows that: (1) In the past 30 years, the research on Tibetan Plateau wetlands was focused on dynamic change monitoring of wetland area, landscape patterns, and ecological environment based on remote sensing technology. Attention was paid to building models to analyze the trend of change of the wetlands in three dimensions, taking an ecological system perspective. (2) Such research concludes that: 1) From 1990 to 2006, the wetland area generally decrease at an annual rate of 0.13%, and the landscape diversity decline at an annual rate of 0.17%. 2) In contrast, from 2003 to 2009, the depth of the lakes on the Tibetan Plateau had increased at an annual rate of 0.20 m; from 1970 to 2011, water storage of the lakes increased at an annual rate of 2.2 km^3 ; from 1976 to 2009, lake area of the interior drainage area of the plateau increased at an annual rate of 0.83%. 3) From 1965 to 2002, change of the Tibetan Plateau wetlands was controlled by the climate. Wetland degradation and change around areas of human activity are a result of increased human activities. The existing problems of remote sensing research of the Tibetan Plateau wetlands are that: accuracy of digital analysis of remote sensing images and cloud removal need to be improved; a comprehensive perspective is needed for the research of the Tibetan Plateau wetland system. Based on the review, this article identifies the following key areas of future research: (1) Taking full advantage of remote sensing monitoring of wetlands characterized by multirate, multispectral, real-time, dynamic, and repeated coverage. Strengthening comprehensive research and remote sensing research of areas lacking conventional data; (2) Establishing a regional specific wetland remote sensing classification system that is technically operable, and conducting basic research on improving the Tibetan Plateau wetland remote sensing classification system and applications; (3) Focusing more on quantitative study on ecosystem functions of wetlands and decision support system for wetland ecosystem management; (4) Discussing responses and adaptation mechanisms of the Tibetan Plateau wetland ecosystem under the background of global change, especially the differences in responses and adaptation mechanisms under the impacts of different temporal and spatial scales. Coupling the models of hydrology, ecology, meteorology, soil, and environment to predict the trend of wetland degradation and revealing regional differences of response between different areas of the plateau in the face of global change; (5) Advancing remote sensing methods for Tibetan Plateau wetland research, strengthening the integration of RS, GIS, and GPS methods, and promoting the construction of a Tibetan Plateau wetland information platform.

Key words: wetland; research of remote sensing; progress; problem; Tibetan Plateau