

1990—2011 年若尔盖高原土地覆盖变化

游宇驰¹,李志威¹,李希来²

(1. 长沙理工大学水利工程学院,湖南 长沙 410114;
2. 青海大学省部共建三江源生态和高原农牧业国家重点实验室,青海 西宁 810016)

摘要:以 1990—2011 年的 Landsat TM 遥感影像为数据源,利用 ENVI 的面向对象法和 Google Earth 提取地物信息及自然水系与人工沟渠的分布格局,结合 1967—2012 年降水量和气温数据,分析气候变化对土地覆盖的趋势性影响。结果表明:2011 年建设用地的面积分别是 1990 年的 5.84 倍和 1.35 倍,林地面积主要受人口增长和伐木等人类活动影响以 0.66 km²/a 的速率不断减少,水面面积受水文周期和降水量影响呈现波动性变化,草地面积增加,植被覆盖度先减后增,泥炭沼泽湿地面积由于气候变暖、人工开渠和自然水系溯源下切的叠加作用影响以 78.62 km²/a 的速率快速萎缩;若尔盖高原人工沟渠控制的泥炭沼泽有完全由人工沟渠排水和自然水系与人工沟渠共同排水两种输水模式;持续的人工沟渠排水活动显著影响着泥炭沼泽的蓄水量,制约着泥炭沼泽的维持并加速泥炭沼泽脱水萎缩。

关键词:遥感影像;土地覆盖;泥炭沼泽;自然河网;人工沟渠;若尔盖高原

中图分类号:P931.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2018)02-0062-08

Land cover change in Zoige Plateau during 1990–2011//YOU Yuchi¹, LI Zhiwei¹, LI Xilai² (1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: Based on the data source of the remote-sensing images of Landsat TM in 1990–2011, object-oriented ENVI method and Google Earth were used to analyze the land cover as well as spatial distribution patterns of natural river networks and artificial ditches. Combined with the annual precipitation and temperature data in 1967–2012, the impact of climatic change on land cover was analyzed. The results show that the area of construction land and desert in 2011 is 5.84 and 1.35 times of that in 1990, respectively. Forestland area decreased with a rate of 0.66 km²/a under the influence of population increase and human activities. Water surface area was in a fluctuating variation due to the influence of both hydrological cycle and precipitation. Grassland area always increased, in which the vegetation coverage decreased first and then increased. The peatland swamps rapidly shrank at a rate of 78.62 km²/a due to the combined effects of climatic warming, artificial ditches and headward erosion of natural river networks. There are two primary dewatering patterns of peatland swamps in Zoige Plateau, dewatering by artificial ditches and joint dewatering by both natural river networks and artificial ditches. Persistent dewatering by artificial ditches significantly influences the water storage capacity, restricts the maintenance of peatland swamps and accelerates their shrinkage.

Key words: remote sensing image; land cover; peatland swamp; natural river networks; artificial ditches; Zoige Plateau

高强度的人类活动和缓慢的气候变暖,促使全球土地覆盖发生显著的变化,也间接影响水文过程、环境质量、生态系统等^[1-2]。若尔盖高原泥炭沼泽是中国最重要的高原湿地,是若尔盖高原主要的土地覆盖类型,具有极高的生态系统服务价值。湿地对区域的生物多样性、水文循环、气候变化、碳循环等方面具有重要的作用及意义^[3-4],更关键的是直接影

响着黄河上游水源涵养、生态建设以及区域社会经济发展^[5]。

近 30 年来若尔盖高原泥炭沼泽已明显萎缩且功能退化,地表水位下降,敏感且脆弱的湿地或草原正发生着局部沙漠化的现象^[6-10]。据记载,若尔盖湿地于 20 世纪 50 年代便开始开挖人工沟渠,70 年代全面开展,2000 年以后政府又实施生态环境保护

基金项目:省部共建三江源生态和高原农牧业国家重点实验室开放研究项目(2017-KF-01);青海省科技厅项目(2016-ZJ-Y01);国家自然科学基金(91547112)

作者简介:游宇驰(1993—),女,硕士研究生,主要从事高原湿地演变研究。E-mail: 18711017497@163.com

通信作者:李志威(1984—),男,副研究员,博士,主要从事河流动力学与高原湿地研究。E-mail: lzhiwei2009@163.com

政策,因此部分专家认为土地覆盖的演变,特别是泥炭沼泽萎缩、草地退化主要受人类活动(挖沟排水、过度放牧)直接影响^[7,10-11]。如今,气候变化已成为全球性的趋势,其对湿地生态环境的影响明显,并影响湿地的水源与水量分配^[12],从而进一步影响河流湖泊、沼泽分布以及植被生长。因此有学者研究认为气候的暖干化趋势与若尔盖高原湿地生态存在紧密的关系^[13]。随着遥感技术的发展,遥感和 GIS 技术在湿地动态监测研究中得到了广泛应用^[11,14-15]。对若尔盖高原土地覆被变化,可利用遥感和 GIS 技术实现湿地信息特征提取与分类,进而研究其动态变化^[9,16-18]。多种遥感图像解译的方法中,面向对象法因其分类单元为同质对象而非单个像素而优于传统解译方法^[19],因其包含的形状、纹理、光谱等特征具有更丰富的语义信息而分类精度高,而免费的中低分辨率的 Landsat 数据使其应用最为普遍。总体而言,若尔盖高原湿地面积减少并斑块化、草地退化、荒漠化突显已是共识^[6-10,13],但是变化速率与幅度则因研究区范围、影像精度和影像时间的不同而不同。

目前关于若尔盖高原土地覆盖变化,尤其是沼泽湿地的研究多从宏观角度阐述其与人类活动、气候变化、土地利用及土地覆盖变化的关系,而较少考虑具体的人类活动(如人工挖沟)和降水量变化。若尔盖高原土地覆盖已受到一定程度的人为干扰和破坏,准确有效地了解土地覆盖的现状和动态变化对当地生态环境、湿地生态保护与修复有着重要的意义。本文利用 1990—2011 年遥感影像(Landsat)分析土地覆盖变化和人工河网分布情况,同时结合 1967—2012 年气候要素数据,解释土地覆盖演变的气候因素,并主要从泥炭沼泽人工沟渠的输水模式切入以较深入地阐述泥炭沼泽变化原因。

1 研究区概况与研究数据

1.1 研究区概况

若尔盖高原位于青藏高原东北部的黄河源区(图 1),主要包括四川省阿坝藏族羌族自治州的若尔盖县、红原县和甘肃省的玛曲县等,面积 22 716 km²。若尔盖高原湿地是黄河上游重要的水源地,两条支流黑河和白河每年补给黄河主干流水量约 40 亿 m³。本区湿润寒冷,长冷短暖,年平均降水量 560 ~ 860 mm,降水强度小,50% ~ 80% 的降水量集中在 5—8 月,年平均气温只有 0.6 ~ 1.2℃,年平均相对湿度达到 64% ~ 73%,年蒸散发量 1 260 ~ 1 290 mm^[5]。这样的气候特点有利于沼泽的发育,特别是黑河中上游地区,支流较少而闭流、伏流宽谷较多,地势较平坦,多分布着高原沼泽土,沉积物细颗粒含量高,排水能

力差而地表长时间积水,沼泽较多。白河支流少,河谷比降略大,沉积物颗粒粗,其排水状况相比黑河流域要好,泥炭沼泽湿地分布因此也相对较少^[5]。据统计资料,自建县至 2005 年,红原县人口从 500 多人增长到 3.9 万人,若尔盖县则从几千人扩张到 7 万多人。与此同时,人类活动越来越频繁,自然资源消耗量增长,挖沟排水开辟草场,发展畜牧业,加上林木砍伐导致若尔盖县森林占地面积在 1975—2005 年由 16.7% 减少到 12.8%^[20]。

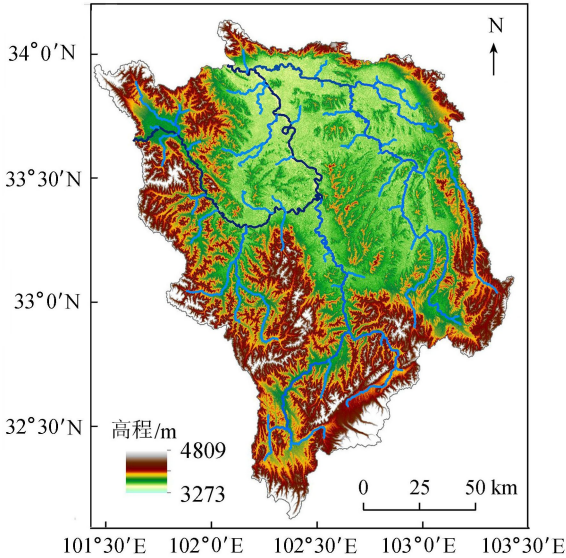


图 1 若尔盖高原地形

1.2 研究数据

1967—2012 年的降水量和气温采用中国气象网的中国地面气象资料日数据集,选取玛曲县(56076)、若尔盖县(56079)和红原县(56173)的月降水和月气温资料统计分析。1990—2011 年遥感影像采用地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)提供的 Landsat TM 数据,部分数据的时间、条带号等信息如表 1 所示。由于若尔盖高原大部分区域位于行列号为(131,37)的影像中,表 1 中遥感影像时间以该幅影像时间为主。由于研究区域

表 1 部分遥感影像的基本信息

序列	遥感影像来源	遥感影像时间	空间分辨率/m
(131,36)(131,37) (131,38)(130,37)	Landsat 5	1990-07-08	30
(131,36)(131,37) (131,38)(130,37)	Landsat 5	1995-08-04	30
(131,36)(131,37) (131,38)(130,37)	Landsat 7	2000-10-31	30
(131,36)(131,37) (131,38)(130,37)	Landsat 5	2004-09-16	30
(131,36)(131,37) (131,38)(130,37)	Landsat 5	2010-10-06	30
(131,36)(131,37) (131,38)(130,37)	Landsat 5	2011-10-06	30

较大,为保证数据质量,所下载数据的云量均保持在20%以下,基本为无云状态,部分数据选取同一季节或者相邻年份相同时相的影像镶嵌而成。

2 数据处理过程

遥感数据处理过程中主要利用 ENVI 5.3 软件中的面向对象特征提取方法(feature extraction)得到土地覆盖动态结果,其中主要有图像分割合并和规则建立两部分。图像分割与合并过程是基于边缘分割算法,图像分割过程中同时考虑了影像的光谱特性、空间特性和形状特性^[21]。通过试错法定性地对影像进行不同尺度的快速直接分割,获得对地物具代表性的图像对象,以提取出更多的分类辅助信息,继而实现对地物的精确分类。分割时可通过预览窗口查看分割效果,进行调整以得到合理的分割尺度参数。经过多次试验,设置分割尺度参数为30~40,融合尺度参数为80~90。

区域土地覆盖类型主要是草地和泥炭沼泽,光谱特征明显,表面纹理差异大,地势分布不同。考虑地区特点及研究内容,综合遥感影像的光谱特征和形状特征,辅助 DEM 数据,设定分割规则中的阈值范围,将土地覆盖类型分为泥炭沼泽湿地、水体、林地、草地、荒漠、建设用地进行提取,其中草地分为高覆盖度草地、中覆盖度草地和低覆盖度草地。同时,运用 Google Earth 遥感影像和假彩色波段融合进行对比,对规则集的阈值不断修正,结合人工目视解译以满足研究的分类精度要求。植被覆盖度 f_c (fractional vegetation cover) 是地表植被的空间分布特征参数及反映生态环境的要素,基于 NDVI 利用像元二分模型估算^[22]。为了验证遥感解译的精度,在研究区范围内随机生成验证点 99 个,利用 Google Earth 获取验证点的实际地物类型,以对分类精度进行评估,结果显示 1990—2011 年总体精度在 83.7%~86.5%。

3 研究结果

3.1 气象要素变化趋势

采用趋势线法分析 1967—2012 年若尔盖、玛曲和红原 3 个站点的降水量变化趋势。根据气象日数数据资料整理得到线性趋势,若尔盖高原年降水量呈现不显著的下降趋势(图 2(a)),平均减小速率为 0.40 mm/a,具体表现为若尔盖 0.33 mm/a、红原 0.53 mm/a、玛曲 0.34 mm/a(图 2(b))。南北降水量及变化情况有一定的差异,区域降水量则为北少南多,而降水量减少速度呈北慢南快。气温呈升高趋势(图 3),3 个站点的升高速率分别为若尔盖 0.075℃/a、红原 0.021℃/a、玛曲 0.038℃/a。从气

候要素来看,红原站纬度偏低且海拔最高,年降水量丰富;若尔盖站降水量居中,空气湿度较大;玛曲站降水相对较少。湿润度对沼生生境的发育和作用特别重要,因此若尔盖县的沼泽分布最广^[5]。

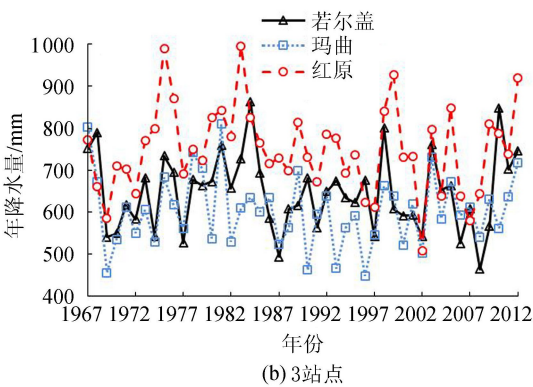
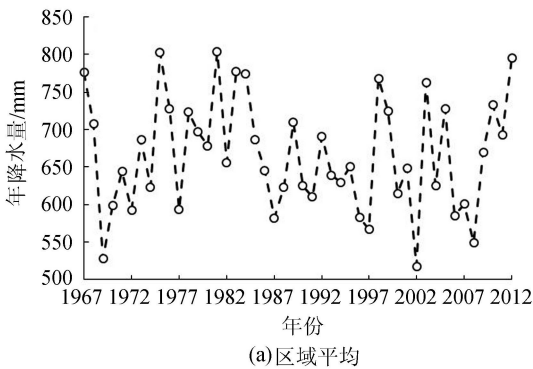


图 2 1967—2012 年年降水量变化趋势

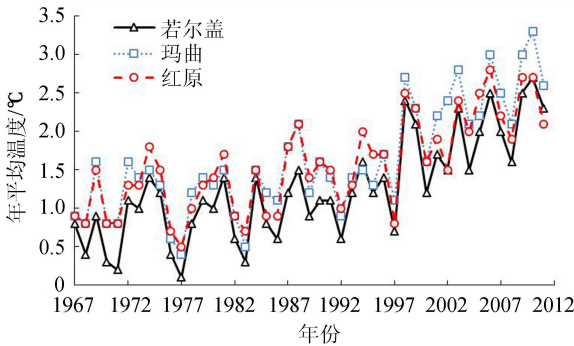


图 3 1967—2012 年 3 站年平均气温

3.2 土地覆盖动态变化

利用 ENVI 软件提取出 1990—2011 年土地覆盖类型的空间分布及植被覆盖度(图 4),并统计主要土地覆盖类型的面积(表 2)。若尔盖高原土地覆盖以植被覆盖和泥炭沼泽湿地为主,其次是水体、荒漠和建设用地。总体上看,各类型的土地覆盖面积年际变化方式主要为单调增减和波动变化。其中,变化最大的为建设用地($y=1.1627x-2315.1, R^2=0.842$)和荒漠($y=0.3531x-664.16, R^2=0.172$)。2011 年建设用地面积是 1990 年的 5.84 倍;荒漠面积则从 1990 年的 29.51 km² 增长到 2011 年的 39.86 km²,增加速率达 0.49 km²/a,主要分布于黄河

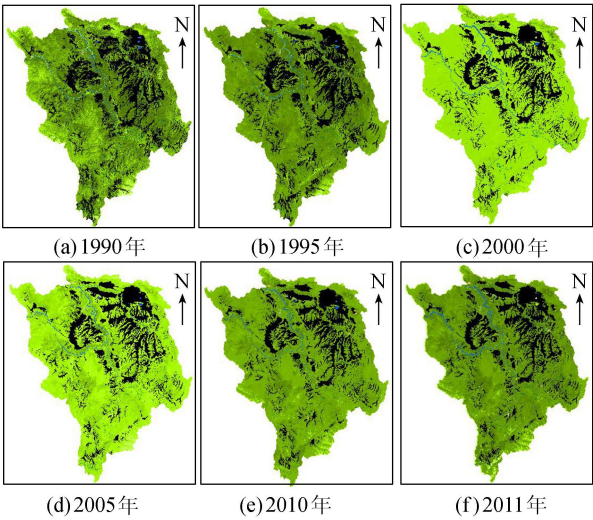


图4 若尔盖高原土地覆盖变化

表2 若尔盖高原 1990—2011 年土地覆盖面积 km²

年份	草地	泥炭沼泽湿地	水体	林地	建设用地	荒漠
1990	16321.95	5515.35	202.35	70.65	4.57	29.51
1994	17248.03	4628.22	167.91	55.17	4.37	40.81
1995	16745.41	5127.71	160.26	60.24	5.45	45.43
1999	17268.15	4422.22	331.41	73.29	6.03	43.40
2000	17502.00	4263.11	257.63	72.42	8.08	41.27
2001	17547.91	4270.46	207.61	66.88	7.68	43.95
2003	17734.10	4142.55	146.88	65.74	11.30	43.92
2004	17761.13	4055.62	204.61	66.19	12.26	44.68
2005	17668.17	4122.59	224.4	66.19	14.12	49.01
2006	17874.31	4021.84	132.15	58.12	14.20	43.87
2008	17778.98	4017.34	218.12	54.70	21.55	53.80
2009	18023.93	3871.94	130.12	56.65	22.85	39.01
2010	17985.40	3863.51	158.42	69.31	26.45	41.39
2011	17917.57	3864.27	239.40	56.72	26.68	39.86

干流、白河下游和黑河下游两岸坡面,以及黑河中游的山坡,这与前人的研究结果基本一致^[6-7,16]。

表2表明,水体面积呈不明显的波动减小趋势($y = -1.1405x + 2482.6$, $R^2 = 0.017$),这可能与降水情况以及当前水位变化有关。相应地,图4则表现为各细小的弯曲河流在降水量较大的年份提取结果较好,因为当降水较大时,河流宽度达到遥感影像所能分辨的空间分辨率大小。草地面积呈明显的上升趋势($y = 71.337x - 125326$, $R^2 = 0.8603$),林地主要分布在若尔盖西部,其占地面积缓慢减少($y = -0.3217x + 708.02$, $R^2 = 0.0958$)。

图4表明高、中、低植被覆盖度空间分布发生了明显的变化。植被覆盖度年平均值为0.68,主要分为2个阶段,1990—2000年植被覆盖度呈明显的减小趋势,且在1990年和1995年的植被覆盖度分别为0.76和0.82,以高植被覆盖度为主,但空间分布

的差异化明显,而2000年的植被覆盖度减小到0.48,整个区域的植被覆盖度趋于均一化,即中植被覆盖度达96.35%;在2000年之后,植被覆盖度呈上升趋势,2005年和2010年的植被覆盖度分别为0.55和0.77,并以中高植被覆盖度为主。

1990—2011年间泥炭沼泽湿地面积呈明显减少的趋势($y = -71.389x + 147255$, $R^2 = 0.8606$),减少幅度达29.9%,减小速率为78.62 km²/a。针对泥炭沼泽湿地的遥感解译,众多研究结果不一,孙妍^[23]研究表明若尔盖高原近30%的沼泽发生萎缩,王石英等^[17]认为1987—2001年沼泽减少了31.86 km²,沈松平等^[24]认为2001年沼泽湿地面积为3462 km²,20年内减少了20.2%。由于对若尔盖高原沼泽的界定、研究时段等不同,监测结果不尽相同,但已有的共识是泥炭沼泽在近60年的不同时间段内发生着不同程度的萎缩退化。泥炭是若尔盖高原沼泽的最基本特征,反映沼泽的发育过程与程度^[5]。沼泽受水分条件影响而萎缩退化,反过来又改变着水分条件,从而影响着整个若尔盖高原的生态环境^[6,8]。

4 讨论

4.1 土地覆盖变化分析

若尔盖高原属于气候变化的敏感区和生态脆弱带,区域演变方式为沼泽—沼泽化草甸—草甸—草原—沙漠化。从湿地的发育演变来看,气候要素发挥着关键的作用。多雨、潮湿且低温都有利于其发育^[5],并且影响湿地的各种生态过程以及湿地的动态变化规律。过湿或者水分蓄存是沼泽形成的基本条件,由此若尔盖的低洼地因夏季降水(5—9月)易出现沼泽湿地特征。

若尔盖高原降水量从长时间序列分析呈不明显的减小趋势,而不同的短时期内有上升或下降的趋势,从而说明降水量的变化不是若尔盖沼泽迅速萎缩的主要原因。此外,由于全球气温普遍上升的影响,若尔盖区域的气温近年来呈现上升趋势,有学者认为若尔盖高原沼泽萎缩退化的主要原因是因气温上升而增加的蒸发蒸腾量^[13],这种长期而缓慢的影响过程不容忽视,但本地区降水量并未显著变化,气温变化速率及蒸发蒸腾的增量较为有限,还不足以导致若尔盖泥炭沼泽湿地在近几十年内的快速萎缩^[25]。因此,若尔盖高原近几十年的气候变化并不是土地覆盖,尤其不是泥炭沼泽湿地发生变化的主要原因。

植被覆盖度的变化尤其是高植被覆盖度在2000年的剧烈减小可能与遥感数据的月份有关。但更重要的是,早期的人工沟渠排水减小了泥炭沼泽湿地的蓄水量以及蓄水能力,植被生长情况不如

以往,导致 2000 年的植被覆盖度明显减小且趋于均一化。此后若尔盖高原实施了填堵沟渠等恢复工程^[26],同时由于排水输干泥炭表层水分,可能发生塌陷、裂缝、滑坡等情况^[26],人工沟渠排水能力也会降低^[27]。当地采取填堵沟渠为主的恢复工程后^[27],土壤透气性的增大可促进沟道植物的生长,因此 2000 年后植被处于恢复期;2008 年后降水量呈短期的上升趋势,降水量较多时植被生长较好。蒋锦刚等^[28]研究表明若尔盖县在 1974—2007 年高植被覆盖度的面积变化趋势为先减后增,草地面积呈增长趋势,且在 1994—2000 年增长速率最大。研究表明草地植被对气候变化的响应较为敏感^[29],因此植被变化情况与缓慢上升的气温、变化的降水量等因素有一定的关联^[30]。

林地主要分布在若尔盖南部区域,其面积呈减小趋势,主要与当地伐木和建筑用地等人类活动有关。有记载表明若尔盖县的沼泽周边山坡上暗针叶林遭到砍伐,导致森林面积在 1975—2005 年减少 4.3%^[20]。建设用地和荒漠化面积呈稳定的增长趋势,前者是因当地的人口增长及经济增长、城镇建设及旅游业发展迅速;后者则是由于在气候暖干化的自然条件下,人工沟渠排水、过度放牧、泥炭开采等不合理无节制的人类活动直接对生态环境造成破坏,导致沼泽退化并沙漠化。

4.2 典型泥炭沼泽人工沟渠影响

在脆弱敏感的若尔盖高原,湿地排水工程直接地改变了该区水系分布及其水文连通性,导致土地覆盖发生变化,引起湿地生态环境的恶化。早在 1955 年,本地区便开始挖沟排水,开辟牧场。随着经济发展及人类频繁的干扰,若尔盖县和红原县累计开挖排水沟 700 多条,总长度超过 1 000 km。沟渠开挖影响沼泽面积约 2 000 km²,排水疏干胁迫下严重退化沼泽面积达 648.3 km²,约占沼泽总面积的 27%^[25]。目前,若尔盖高原湿地现存的人工沟渠约有 920 km,在若尔盖县、红原县和玛曲县分别有 44 条、288 条和 66 条^[25]。

为进一步讨论人工沟渠对泥炭沼泽湿地萎缩退化的影响,基于此前对人工沟渠的判读和测量,利用 ArcGIS 软件对数据进行计算处理并制图(图 5)。若尔盖高原人工沟渠控制的泥炭沼泽湿地可分为 2 种排水输干模式,即完全由人工沟渠排水和由人工沟渠与自然河网交织共同排水,图 6 的日干乔大沼泽和哈合目乔沼泽系统即为两种典型的人工沟渠排水系统。

日干乔大沼泽是若尔盖高原最重要湿地之一,其类型为封闭式泥炭沼泽湿地。经影像处理计算得到日干乔大沼泽的人工沟渠有 100 余条,总长度

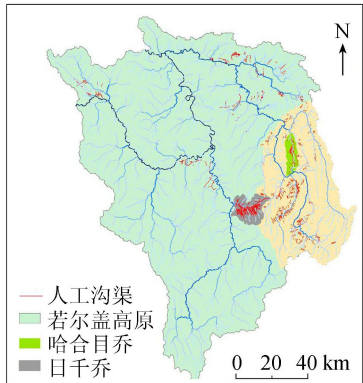


图 5 若尔盖高原的自然水系和人工沟渠分布

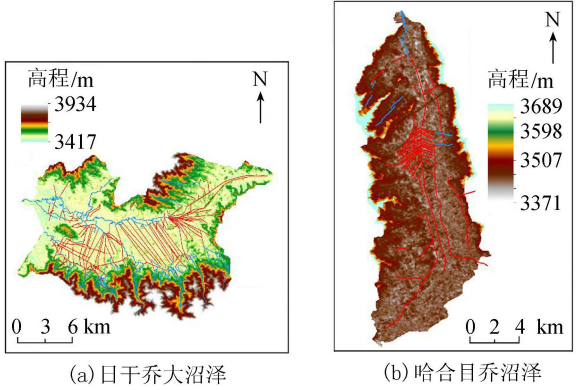


图 6 典型的人工沟渠排水系统

292.8 km,控制面积为 208.7 km²。这些人工沟渠已经将沼泽湿地排水疏干,转化为草地,而只在 5—8 月强降水期,在低洼和河道两侧残留季节性湿地景观。根据沟渠的空间分布特点,可将人工沟渠分为放射式分布、平行式分布、网状式分布和零散式分布(图 6(a))。日干乔大沼泽的绝大部分地表水和地下水通过人工沟渠排向弯曲小河,再从瓦切乡汇入白河。日干乔大沼泽的人工沟渠在 5—8 月加速排走降雨径流从而减少沼泽的储水量,而在非降水期则继续以地下水横向补给的方式,将湿地和草地内蓄存的水量排向河道。已有研究指出人工沟渠使泥炭沼泽湿地年平均地下水位降低了 50 ~ 70 cm^[31]。在早期无人工沟渠之前,日干乔大沼泽为常年片状积水^[27],如今已完全变成放牧草原,表明人工沟渠是日干乔大沼泽从湿地转向草原景观的最根本原因。

哈合目乔沼泽位于黑河流域的中东部,其人工沟渠特点是沼泽中间有一条较大的人工沟渠贯穿南北,并以此主干沟道为中心向东西两边发散,形成鱼骨状的人工沟渠分布格局(图 6(b)),现存人工沟渠 38 条,总长 113.9 km,控制面积 152.3 km²。这类沟渠排水模式为水汇流至主干沟渠,再由两侧沟渠分别向东西方向输水。本类型的排水结构加速了封闭沼泽内部脱水,引起沼泽萎缩,沙漠化突显。地表水是维持沼泽湿地的关键要素^[5],日干乔大沼泽和哈

合目乔沼泽均为若尔盖高原的局部封闭性沼泽湿地,人工沟渠开挖之后的几十年内,大量的地表水被排走,泥炭沼泽迅速脱水,发生侵蚀、坍塌,产生裂缝并斑块化^[26],两处沼泽湿地都发生了显著的变化^[27,32]。

4.3 自然河流和人工沟渠的双重影响

若尔盖高原湿地萎缩除了人工沟渠的影响之外,自然河流的发育和沟道溯源下切也是湿地脱水萎缩的一个重要原因。若尔盖的黑河流域上游是典型的自然河流和人工沟渠的双重叠加作用区,两者共同作用加速该区域的排水效率。黑河上游的干流与支流河道下切明显,深度可达0.5~3m,一旦切穿泥炭层,增加了泥炭层地表水和地下水的横向水力梯度,使得原来蓄存于泥炭层的地下水源源不断流出,而且脱水之后也造成紧密构造的泥炭湿地破碎化、松散化,从而更加促进沟道下切及溯源侵蚀,直至逐渐深入沼泽湿地中心地带。该典型流域总面积为3865 km²,1990—2015年泥炭湿地面积变化明显(图7),由1990年的919.4 km²减小到2015年的643.67 km²,减小速率达11 km²/a。

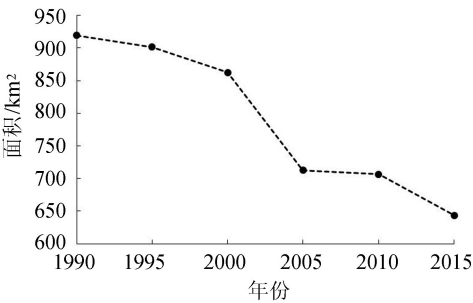


图7 黑河上游泥炭湿地面积变化

图8为黑河流域上游的自然河网和人工沟渠空间分布。自然河网总长3477.64 km,人工沟渠756条,总长796.74 km。大量的封闭或半封闭的泥炭沼泽湿地已被大大小小的细沟贯穿,使得沼泽湿地排水效率增大,蓄水能力持续减小。研究表明黑河的径流量减少速率为0.15亿 m³/a^[25],这间接说

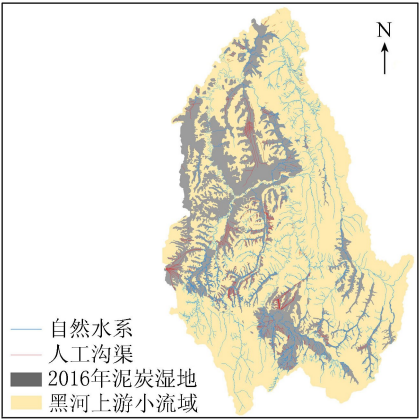


图8 黑河上游泥炭湿地、自然水系和人工沟渠分布格局

明黑河流域的沼泽湿地的蓄水能力减弱。黑河上游泥炭地的地下水位下降,再加之人工沟渠的加速排水作用,增加了自然河网与人工沟渠的连通性,破坏了流域的整体性,并且加速了水源的外排。在自然河网与人工沟渠共同作用下,雨季大量的地表水通过自然河网与人工沟渠组成的通道迅速排走,枯水期又排出一定水量的地下水以补给河道,因此疏干沼泽范围进一步扩大,沼泽湿地快速萎缩。另一方面,沼泽的萎缩又引起蓄水能力的下降,这一恶性循环强化了沼泽—沼泽化草甸—草甸—草原—沙漠化过程。

5 结 论

a. 不断增强的人类活动导致若尔盖高原的建设用地和荒漠面积发生的变化最为明显,2011年的面积分别是1990年面积的5.84倍和1.35倍。林地面积以速率0.66 km²/a减小。在暖干化气候、人工沟渠排水输干和自然水系溯源下切的叠加作用下,泥炭沼泽的湿地面积以78.62 km²/a的速率呈持续减少趋势。水面面积波动性变化主要受降水量变化的影响。植被覆盖度变化呈先减后增,且趋于均一化,2000年减小的幅度最为剧烈,2000年以后由于生态保护政策的实施,植被覆盖度有所回升。

b. 1967—2012年期间,若尔盖高原的降水量以0.4 mm/a的速率呈微弱的减小趋势,气温则表现为增高趋势,但气候要素变化幅度尚不能在短时间内改变若尔盖高原土地覆盖。

c. 在自然河流过程和人工沟渠排水的叠加作用下,若尔盖高原泥炭沼泽的地表水与地下水流失存在2种最主要的输水模式:①以日干乔和哈合目乔为典型的大面积封闭式泥炭湿地的人工沟渠排水模式;②以黑河上游的半封闭式泥炭沼泽湿地为代表的由平行或交织的自然水系和人工沟渠共同排水的模式。大规模人工沟渠破坏了湿地的完整性,将湿地内的地表水快速且持续地排走,导致泥炭沼泽湿地脱水,同时容易发生侵蚀、坍塌、产生裂缝及斑块化,从而显著减小泥炭沼泽的蓄水量,制约泥炭沼泽的维持,使泥炭沼泽萎缩速率加快。

参考文献:

[1] MOONEY H A, DURAIAPPAH A, LARIGAUDERIE A. Evolution of natural and social science interactions in global change research programs[J]. PNAS, 2013, 110: 3665-3672.

[2] TIAN Hanqin, CHEN Guangsheng, ZHANG Chi, et al. Century-scale response of ecosystem carbon storage to multifactorial global change in the Southern United States [J]. Ecosystems, 2012, 15(4): 674-694.

- [3] 曹明奎,李克让. 陆地生态系统与气候相互作用的研究进展[J]. 地球科学进展,2000,15(4):446-452. (CAO Mingkui, LI Kerang. Perspective on terrestrial ecosystem climate interaction[J]. Advance Earth Sciences,2000,15(4):446-452. (in Chinese))
- [4] SCHIMEL D S, BRASWELL B H, HOLLAND E A, et al. Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils [J]. Global Biogeochemical Cycles,1994,8(3): 279-294.
- [5] 柴岫,朗惠卿,金树仁,等. 若尔盖高原的沼泽[M]. 北京: 科学出版社,1965.
- [6] BAI Junhong, LU Qiongqiong, WANG Junjing, et al. Landscape pattern evolution processes of alpine wetlands and their driving factors in the Zoige Plateau of China [J]. Journal of Mountain Sciences,2013,10(1): 54-67.
- [7] HU Guangyin, DONG Zhibao, Lu Junfeng, et al. Driving forces of land use and land cover change (LUCC) in the Zoige Wetland, Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Sciences in Cold and Arid Regions,2012,4(5): 422-430.
- [8] ZHANG Yu, WANG Genxu, WANG Yibo. Changes in alpine wetland ecosystems of the Qinghai-Tibetan Plateau from 1967 to 2004 [J]. Environmental Monitoring & Assessment,2011,180(1-4):189-199.
- [9] ZHANG Wenjiang, LU Qifeng, SONG Kechao, et al. Remotely sensing the ecological influences of ditches in Zoige Peatland, eastern Tibetan Plateau [J]. International Journal of Remote Sensing,2014,35(13):5186-5197.
- [10] LI Yao, YAN Zhao, GAO Shujun, et al. The peatland area change in past 20 years in the Zoige Basin, eastern Tibetan Plateau [J]. Frontiers of Earth Science,2011,5(3): 271-275.
- [11] GONG Peng, NIU Zhenguo, CHENG Xiao, et al. China's wetland change (1990-2000) determined by remote sensing[J]. Science China Earth Sciences,2010,53(7): 1036-1042.
- [12] JONATHAN S P, BRAIN A B, WADDINGTON H M, et al. Advances in Canadian wetland hydrology, 1999-2003 [J]. Hydrological Processes,2005,19:201-214.
- [13] 郭洁,李国平. 若尔盖气候变化及其对湿地退化的影响[J]. 高原气象,2007,26(2):422-428. (GUO Jie, LI Guoping. Climate change in Zoige Plateau marsh wetland and its impact on wetland degradation [J]. Plateau Meteorology,2007,26(2):422-428. (in Chinese))
- [14] 张柏. 遥感技术在中国湿地研究中的应用[J]. 遥感技术与应用,1996,11(1): 67-71. (ZHANG Bai. Application of remote sensing technology on research of the wetland in China[J]. Remote Sensing Technology and Application,1996,11(1): 67-71. (in Chinese))
- [15] 朱玉华. 流域规划环评生态环境现状及其动态评价方法研究[J]. 水资源保护,2011,27(5): 25-27. (ZHU Yuhua. Research on ecological environmental situation and dynamic assessment methods for environmental impact assessment of river basin planning [J]. Water Resource Protection,2011,27(5): 25-27. (in Chinese))
- [16] 陈玲,王根绪,王惠林. 基于数据的若尔盖县时空特征研究[J]. 遥感技术与应用,2006,39(1): 84-89. (CHEN Ling, WANG Genxu, WANG Huilin. Spatial-temporal characteristics of LUCC in Zoige County using Landsat TM sensor data [J]. Remote Sensing Technology and Application,2006,39(1): 84-89. (in Chinese))
- [17] 王石英,张宏,杜娟. 青藏高原若尔盖高原近期土地覆被变化[J]. 山地学报,2008,26(4): 496-502. (WANG Shiyang, ZHANG Hong, DU Juan. Recent land cover changes in Zoige region of Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Journal of Mountain Science,2008,26(4): 496-502. (in Chinese))
- [18] 姜烨,孙建国,谢家丽,等. 近20年若尔盖湿地水土流失变化的遥感评估[J]. 遥感技术与应用,2013,28(6):1088-1093. (JIANG Ye, SUN Jianguo, XIE Jiali, et al. Remote sensing assessment of water and soil loss changes of Zoige wetland in last 20 years [J]. Remote Sensing Technology and Application,2013,28(6):1088-1093. (in Chinese))
- [19] 夏朝旭,何政伟,于欢,等. 面向对象的土地覆被变化检测研究[J]. 遥感技术与应用,2014,29(1):106-113. (XIA Chaoxu, HE Zhengwei, YU Huan, et al. Study on land cover change detection based on object oriented analysis [J]. Remote Sensing Technology and Application,2014,29(1):106-113. (in Chinese))
- [20] 李斌,董锁成,蒋小波,等. 若尔盖湿地草原沙化驱动因素分析[J]. 水土保持研究,2008,15(3):112-120. (LI Bin, DONG Suocheng, JIANG Xiaobo, et al. Analysis on the driving factors of grassland desertification in Zoige wetland [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008,15(3):112-120. (in Chinese))
- [21] 于欢,张树清,孔博,等. 面向对象遥感影像分类的最优分割尺度选择研究[J]. 中国图象图形学报,2010,15(2):352-360. (YU Huan, ZHANG Shuqing, KONG Bo, et al. Optimal segmentation scale selection for object-oriented remote sensing image classification [J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(2): 352-360. (in Chinese))
- [22] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. 资源科学,2004,26(4): 153-158. (LI Miaomiao, WU Bingfang, YAN Changzhen, et al. Estimation of vegetation fraction in the upper basin of Miyun Reservoir by remote sensing [J]. Resources Science,2004,26(4): 153-158. (in Chinese))
- [23] 孙妍. 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,2009.
- [24] 沈松平,王军,游丽君,等. 若尔盖沼泽湿地遥感动态监测[J]. 四川地质学报,2005,25(2):119-121. (SHEN Songping, WANG Jun, YOU Lijun, et al. Remote sensing dynamic monitoring of the Zoige marsh wet land [J]. Acta Geologica Sichuan,2005,25(2):119-121. (in Chinese))
- [25] 李志威,王兆印,张晨笛,等. 若尔盖沼泽湿地的萎缩机

- 制[J]. 水科学进展, 2014, 25 (2): 170-180. (LI Zhiwei, WANG Zhaoyin, ZHANG Chendi, et al. A study on the mechanism of wetland degradation in Ruoergai swamp[J]. Advances in Water Science, 2014, 25 (2): 170-180. (in Chinese))
- [26] KVARNER J, SNILSBERG P. The Romeriksporten railway tunnel-drainage effects on peatlands in the Lake Northern Puttjern area[J]. Engineering Geology, 2008, 101 (3): 75-88.
- [27] 蒲珉锴, 杨满业, 杜笑村, 等. 日干乔湿地恢复的可行性分析[J]. 草业与畜牧, 2010 (10): 50-52. (PU Mingkai, YANG Manye, DU Xiaochun, et al. Feasibility analysis of the recovery of Riganqiao Wetland[J]. Prataculture & Animal Husbandry, 2010(10): 50-52. (in Chinese))
- [28] 蒋锦刚, 李爱农, 边金虎, 等. 1974—2007 年若尔盖县湿地变化研究[J]. 湿地科学, 2012, 10 (3): 318-326. (JIANG Jingang, LI Ainong, BIAN Jinhu, et al. Change of wetlands in Zoige County from 1974 to 2007[J]. Wetland Science, 2012, 10(3): 318-326. (in Chinese))
- [29] 杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系[J]. 植物生态学报, 2006, 30 (1): 1-8. (YANG Yuanhe, PIAO Shilong. Variations in grassland vegetation cover in relation to climatic factors on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30 (1): 1-8. (in Chinese))
- [30] 刘晓帆, 任立良, 袁飞, 等. 老哈河流域 NDVI 动态变化及其与气候因子的关系[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38 (1): 1-5. (LIU Xiaofan, REN Liliang, YUAN Fei, et al. Dynamic variation of NDVI in Laoha River Basin and its relationship with climatic factors[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38 (1): 1-5. (in Chinese))
- [31] 杨福明, 杨宗荣. 龙口坝泥炭沼泽改造途径的实验研究[J]. 地理科学, 1986, 6(3): 284-289. (YANG Fuming, YANG Zonglong. A study on transformation way of the peat moor of Longriba region[J]. Scientia Geographica Sinica, 1986, 6(3): 284-289. (in Chinese))
- [32] ZHANG Xiaohong, LIU Hongyu, BAKER C, et al. Restoration approaches used for degraded peatlands in Ruoergai (Zoige), Tibetan Plateau, China, for sustainable land management[J]. Ecological Engineering, 2012, 38 (1): 86-92.

(收稿日期: 2017-04-15 编辑: 郑孝宇)

(上接第 38 页)

- [7] 刘沛清, 高季章, 李桂芬. 五强溪水电站右消力池底板块失事分析[J]. 水利学报, 1999, 30 (1): 9-17. (LIU Peiqing, GAO Jizhang, LI Guifen. Study on failure cause of bottom slabs in stilling basin for Wuqiangxi Hydropower Station[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 30 (1): 9-17. (in Chinese))
- [8] 雷中俊. 安康水电站表孔消力池破损原因分析及加固处理[J]. 水力发电, 2000 (11): 48-49. (LEI Zhongjun. Analysis on the damage causes of the stilling basin for the Ankang Hydropower Station and its reinforcement[J]. Water Power, 2000(11): 48-49. (in Chinese))
- [9] 哈焕文. 透水护坦上动水荷载及其脉动的研究[J]. 水利学报, 1964 (2): 14-26. (HA Huanwen. Research on dynamic loads and its fluctuating characteristics on pervious apron[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1964 (2): 14-26. (in Chinese))
- [10] 杨敏, 孙勉. 水垫塘透水底板上举力试验研究[J]. 水力发电学报, 2007, 26 (6): 88-90. (YANG Min, SUN Mian. Experiment study on the uplifting force of the previous slabs in stilling basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(6): 88-90. (in Chinese))
- [11] 张少济, 杨敏. 消力塘透水底板脉动压力特性试验研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29 (6): 85-89. (ZHANG Shaoji, YANG Min. Experimental study on characteristics of pressure fluctuations on the pervious bottom slab of a stilling basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(6): 85-89. (in Chinese))
- [12] 杨敏, 李树宁. 平底水垫塘透水底板下表面脉动压力试验研究[J]. 水利学报, 2011, 42 (11): 1368-1378. (YANG Min, LI Shuning. Experimental investigation of fluctuating pressure on the undersurface of pervious slabs in flat-bottom stilling basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(11): 1368-1378. (in Chinese))
- [13] 刘安富, 杨敏, 李会平, 等. 宽尾墩消力池透水底板脉动压力试验研究[J]. 水科学进展, 2012, 23 (2): 243-248. (LIU Anfu, YANG Min, LI Huiping, et al. Experimental study of the fluctuating pressure on previous slab in sting basin under jet flow form tail-flaring piers[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 243-248. (in Chinese))
- [14] 李会平, 杨敏, 董天松. 消力池底板透水孔内脉动压强试验研究[J]. 水利水电技术, 2015, 46 (9): 105-108. (LI Huiping, YANG Min, DONG Tiansong. Experimental study on fluctuating pressure in previous hole of the bottom slab of the stilling basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46 (9): 105-108. (in Chinese))
- [15] FIOROTTO V, RINALDO A. Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps[J]. Journal of Hydraulic Research, 1992, 30(4): 499-520.
- [16] 刘昉, 练继建, 辜晋德. 基于自回归模型的水流脉动压力频谱特征研究[J]. 水利学报, 2009, 40 (11): 1397-1402. (LIU Fang, LIAN Jijian, GU Jinde. Spectral analysis of pressure fluctuation signals of flow using AR method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40 (11): 1397-1402. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-03-01 编辑: 骆超)