■ 灌溉水源与输配水系统 ■

文章编号: 1672 - 3317 (2023) 01 - 0138 - 07

# 灌区衬砌工程防盐效果遥感评估方法研究

王敬浪<sup>1</sup>, 庞治国<sup>1\*</sup>, 江威<sup>1</sup>, 李根东<sup>2</sup>, 张晓红<sup>2</sup>

(1.中国水利水电科学研究院,北京100038; 2.内蒙古河套灌区水利发展中心,内蒙古巴彦淖尔015000)

摘 要:【目的】河套灌区实施了一系列的渠道工程措施来保护渠道,防止渠道渗水,抑制土壤盐渍化,但缺少针对 灌区衬砌工程防盐效果的评估研究。本文旨在探究利用卫星遥感技术开展河套灌区渠道衬砌工程防盐效果评估。 【方法】收集多时相的 Landsat8 多光谱卫星遥感影像,采用 ISODATA 聚类方法自动提取河套灌区内的盐碱地,然 后利用空间分析方法生成渠道两侧宽度为 d 的缓冲区,统计缓冲区内盐碱地面积 S,构建盐碱地密度指标 φ,得到 φ-d 关系曲线。【结果】衬砌后的渠道两侧盐碱地面积显著下降,盐碱地面积分布曲线呈阶梯状特征。2013—2016 年间,衬砌后的渠道两侧 500 m 范围内盐碱地面积下降最低 49.63%,最高 86.81%;1000 m 范围内盐碱地面积下降 最低 47.95%,最高 95.06%;1500 m 范围内,盐碱地面积下降幅度最低 54.56%,最高 95.68%。土壤质地会影响盐 碱地的面积变化,土壤黏粒较低的区域,盐碱地的面积减少更快。【结论】①卫星遥感技术对大范围渠道工程防盐 效果开展评估是可行的。②盐碱地的空间分布模式在渠道衬砌后发生变化,由均匀分布转变为聚集性分布。③渠道 衬砌工程有效地抑制了盐碱地两侧的土壤盐碱化过程。④土壤质地间接影响工程衬砌的治理效果,土壤黏粒较低的 区域,衬砌工程的治理效果越明显。

关键词:灌区;渠道衬砌;遥感;盐碱地 中图分类号: S156.4; S127 文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022036



王敬浪, 庞治国, 江威, 等. 灌区衬砌工程防盐效果遥感评估方法研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(1): 138-144. WANG Jinglang, PANG Zhiguo, JIANG Wei, et al. Evaluating the Efficacy of Channel Lining in Ameliorating Soil Salinization in Hetao Irrigation District Using Satellite Imageries[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(1): 138-144.

# 0 引 言

【研究意义】河套灌区是我国最大的一首制大型自流灌区,地处干旱和半干旱地区,受地形地势、 气候条件和水资源管理利用等因素的影响,区域内 存在严重的土壤盐碱化问题<sup>[1]</sup>。作为我国西北地区 重要的商品粮生产基地,土壤盐碱化对当地的农业 生产活动的正常开展造成阻碍。关于盐碱地的形成发 展及防治等方面的研究一直是该地区的科研重点<sup>[2-3]</sup>。 但由于盐碱地形成原因的复杂性,大多数研究从地 下水位、灌溉水等方面讨论大范围的盐碱地面积变 化<sup>[4]</sup>,将渠道渗水等因素忽略。土壤的盐碱化过程 和土壤中的水盐息息相关,渠道渗水会影响渠道两 侧土壤的含水率,而衬砌工程的目的是防止渠道渗 水<sup>[5-6]</sup>。渠道衬砌工程是否会间接影响渠道两侧盐碱 地面积,达到防治盐碱地的效果缺少一个合理有效 的评估方法。

【研究进展】随着遥感技术的发展,卫星影像 的时间分辨率和空间分辨率都得到极大提升。利用 遥感影像来监测盐碱地的面积可以大幅节省人工和 资金的投入[7-8]。同时,多光谱卫星遥感数据可以为 监测评估渠道衬砌工程的防盐效果提供数据支撑。 盐碱地的遥感监测相关研究可追溯至 20 世纪 70 年 代,通过人工目视解译识别盐碱地。20世纪80年代 后,随着大量光学卫星的投入使用,利用监督分类 和非监督分类方法提取盐碱地逐渐成熟<sup>19]</sup>。随着对土 壤盐碱化各方面研究的不断深入,提取方法多种多 样,但基本的思路都是寻找真彩色合成影像中的白 色高反射区域[10-12]。刘焕军等[13]以吉林省西部盐碱 土及其光谱反射率为研究对象,表明盐碱土的反射 峰集中于可见光和近红外波段。花锦溪等[14]在反演 松嫩平原盐碱化,孙广福<sup>[15]</sup>在基于 Landsat/OLI-TIRS 数据的盐碱地模式识别,张俊华等<sup>[16]</sup>在宁夏银北地 区盐碱地盐分预测等研究中也都是基于这一特点构 建盐碱地的光谱特征空间,从而将盐碱地与其他地 物相分离。【切入点】目前,关于盐碱地的防治主 要集中在大范围治理方面,如生物防治,化学防治 等。河套灌区内有着庞大数量的灌排水渠,受制于 资金、人力、技术的限制,针对大范围区域渠道衬

收稿日期: 2022-01-17

**基金项目**: 国家自然科学基金项目(51779269);"十三五"国家重点研发计划课题(2016YFC0501309-2)

作者简介:王敬浪(1997-),男。硕士研究生,主要从事遥感智能提取研究。E-mail: wangjinglang\_iwhr@163.com

通信作者: 庞治国(1975-), 男。正高级工程师, 主要从事遥感技术应用研究。E-mail: pangzg@iwhr.com

砌工程的防盐效果评估尚且缺乏一定研究。

【拟解决的关键问题】因此,本研究旨在探究 利用遥感技术来监测评估渠道衬砌工程效果的可行 性。利用地理信息系统中的空间分析法分析渠道两 侧的盐碱地面积变化情况,从而分析典型渠道衬砌 工程对盐碱地时空分布变化的影响。

1 材料与方法

## 1.1 研究区概况

河套灌区(图1)位于内蒙古自治区西部,黄河 北岸,灌区包含巴彦淖尔市的磴口县、五原县、临 河区、杭锦后旗和乌拉特前旗共5个县区旗。灌区多 年平均降水量为160 mm,多年平均蒸发量2251 mm, 降水量和蒸发量差距显著,易发生土壤盐碱化,形 成盐碱地。受地下水和地面渍涝积水影响,盐碱地 的面积变化本身呈现周期性变化特征,具有明显的 季节性积盐和脱盐频繁交替反复的特点[17]。在灌溉 期间,土壤表层的盐分被水溶解后随水下渗,盐碱地 的面积随之减小<sup>[18]</sup>。夏季,灌溉水分也会受剧烈的 蒸发影响将土壤中的盐分向上转运反向增加盐碱地 的面积。所以,灌溉活动、天气条件对盐碱地的面 积变化造成的扰动特别显著。自 1998 年至今,河 套灌区实施了一系列的节水改造工程,通过改善渠 基土渗透性能、设置防渗层等工程措施<sup>[19-20]</sup>减少水 资源在渠道输送过程中的损失。



图1河套灌区位置

Fig.1 Location of Hetao Irrigation district

义长灌域是河套灌区最大的灌域,规划灌溉面积 32.8万 hm<sup>2</sup>,现灌溉面积 19.58万 hm<sup>2</sup>,担负着五 原县、乌拉特中旗、乌拉特前旗共 13 个乡镇和 4 个 国营农场的灌排任务。丰济渠位于五原县,作为义 长灌域的干渠保障着区域内的灌溉用水,渠道管理 维护措施良好,在 2016年以后进行了大量续建配套 与节水改造工程。五原县的土壤类型主要为盐土和 盐化灌淤土,二者在质地上存在差异。根据砂粒、 粉粒、黏粒量进行土壤质地划分,盐土区域砂粒占 70%,粉粒占 19%,黏粒占 11%,盐化灌淤土区域 砂粒占 50%,粉粒占 32%,黏粒占 18%。丰济渠横 穿五原县,渠道两侧的区域同时存在着盐土和盐化 灌淤土,但是不同位置的空间分布状态不同。

2016 年 3 月, 丰济渠实施了渠道衬砌工程。根 据内蒙古河套灌区管理局义长分中心公开信息可知 (http://www.zghtgq.com/plus/view.php?aid=29231), 丰济渠的衬砌工程是分段进行的,对渗漏严重区域 先行修缮衬砌,且完工时间不一致。为保证外部影 响因素相对一致,本研究共选取丰济渠上四段 4 月 前完成衬砌的渠道,如图 2 所示。4 条渠段相对均匀 地分布于丰济渠上,相互间影响的可能性较小,起 始桩号分别为:11+373—12+764、18+466—20+368、 29+100—31+500、37+241—38+588,高程自南向北 递减,在下文中分别以丰济 a、丰济 b、丰济 c、丰 济 d 代替。



图 2 渠道位置 Fig.2 Typical channels location

	表1	电型渠道属性
Table1	Typic	al channels attributes

	Table 1 Typical chamlers attributes					
渠段号	起始桩号	首端经纬度	末端经纬度	长度/m	两侧土壤类型	
丰济 a	11+373-12+764	40°56′53″N, 107°43′30″E	40°57′40″N, 107°44′20″E	1 391	盐土(0~500 m)/盐化灌淤土(500~1 500 m)	
丰济 b	18+466-20+368	41°0′21″N, 107°45′5.9″E	41°1′43″N, 107°44′46″E	1 902	盐化灌淤土(0~1500 m)	
丰济 c	29+100-31+500	41°6'19"N, 107°44'46"E	41°7′27″N, 107°44′19″E	2 400	盐土(0~1 500 m)	
丰济 d	37+241-38+588	41°10′20″N, 107°45′44″E	41°11′2.5″N, 107°46′58″E	1 347	盐土(0~1 500 m)/盐化灌淤土(0~1 500 m)	

# 1.2 数据筛选

为提高盐碱地的提取精度,减少天气、灌溉等 因素的影响,同时保证数据在历年的同一时期获取, 需要对遥感影像的时间进行筛选。研究采用的是 Landsat8 OLI 多光谱数据,重访周期为 16 d,成像 期间河套地区必须保持低云量,且前后一段时间没 有降水。

综合河套灌区的灌溉制度、盐碱地的形成条件

以及遥感影像的重访周期,每年的 4 月初至 4 月中 旬的 Landsat8 OLI 影像为最佳的数据来源。在这期 间,灌区的农作物尚处于幼苗阶段,对地表覆盖度 有限,不会遮挡盐碱地。丰济渠衬砌于 2016 年,为 评估衬砌工程的效果,同时对比未衬砌前的盐碱地 变化情况,需要选择 2016 年前后 2 个时期的数据。 经筛选,满足条件的数据有 2013、2016、2020 年共 6 景影像数据。

表 2 数据列表

Table 2	Data list	
名称	数据来源	日期
LC81290312013110LGN01	Landsat8 OLI	20130420
LC81290322013110LGN01	Landsat8 OLI	20130420
LC81290312016103LGN00	Landsat8 OLI	20160412
LC81290322016103LGN00	Landsat8 OLI	20160412
LC81290312020114LGN00	Landsat8 OLI	20200423
LC81290322020114LGN00	Landsat8 OLI	20200423

## 1.3 衬砌效果监测评估方法

渠道衬砌效果监测评估包含 3 个步骤:首先是盐 碱地的提取,其次是多重缓冲区的生成,最后叠加 统计分析得到渠道衬砌防盐效果的遥感评估(图 3)。





被识别出来,不会像监督分类一样因为样本划分问题 被分析者丢失<sup>[21]</sup>。盐碱地由于盐碱化程度的差异, 在轻度盐碱化区域,盐碱化土壤和裸土的光谱曲线趋 于一致,依靠人工划分样本区分二者差异的难度变大。 ISODATA 方法可以最大限度地划分地类,然后通过 人工目视解译对地类合并分组,减小盐碱地混分的可 能。ISODATA 算法具体参数设置如下:最大分类数 为 10,变化阈值为 5%,最大类间标准差为 1,最小 类间距离为 5,迭代次数为 10。

盐碱地和渠道的空间分布关系采用空间分析的 方法。以渠道为中心,在渠道两侧构建缓冲区,对 缓冲区域内的盐碱地面积进行统计,并建立单位长 度下的盐碱地密度指标,具体公式为:

$$\Phi = \frac{3}{L},\tag{1}$$

式中: *S* 为缓冲区域内的盐碱地面积(m<sup>2</sup>); *L* 为渠 道长度(m)。

通过生成多重缓冲区,可以得到盐碱地密度 **Φ** 与缓冲区宽度 **d** 的分布曲线,为保证结果曲线足够 平滑同时减少大量的计算任务,缓冲区的宽度步长 设置为 10 m。

渠道两侧盐碱地的密度变化曲线是盐碱地的空 间分布特征的抽象表现,如果渠道衬砌对盐碱地有 明显的防治作用,曲线会出现拐点。

# 2 结果与分析

## 2.1 盐碱地提取结果

基于上述数据和方法,提取了2013、2016年和2020年的河套灌区盐碱地(图4),利用高分辨率影像样本对结果精度验证,盐碱地提取总体精度优于85%。从提取结果来看,河套灌区土壤表层的盐碱地呈明显的下降趋势,2013年灌区内盐碱地面积为646.74 km<sup>2</sup>,2016年灌区内盐碱地面积为279.16 km<sup>2</sup>,2020年灌区内盐碱地面积为255.18 km<sup>2</sup>,呈明显的下降趋势。





图4 2013—2020盐碱地提取结果

Fig.4 Extraction results of saline-alkali soil from 2013 to 2020

#### 2.2 衬砌效果评估分析

以10 m为采样间隔,得到渠道两侧1 500 m范围

内的盐碱地面积变化数据,在此基础上绘制*φ-d*关系曲线,如图5所示。由图5可知:

1)对比3 a缓冲区内盐碱地面积,2016年和2020 年显著下降,说明工程措施整体对盐分运移有抑制 效果。

 2)对比曲线的形态,盐碱地呈现阶梯状特征, 说明衬砌工程改变了盐碱地分布格局,从均匀分布 演变成聚集分布,因此,阶梯状特征明显。

3) 从阶梯状可以看出,衬砌工程影响盐碱地范 围基本集中2个范围,第一个是100~300 m范围内, 第二个是600~800 m范围内,2020年主要是800~1 000 m范围,说明衬砌工程对于盐分影响存在一定距离 效应,主要集中1 300 m范围内。





丰济a、丰济b、丰济c、丰济d共4条渠段同属丰 济渠,在2013—2016年,渠道两侧土地并未采取盐

碱地改良措施,作物种植结构也未发生明显改变, 选取的遥感影像也都在4月,温度、降水等条件基本 一致。土壤质地数据表明,丰济a,丰济b,丰济c, 丰济d四段渠道两侧的土壤质地分布情况存在差异, 丰济a两侧500 m范围内为盐土,500~1 500 m范围内 为盐化灌淤土,丰济b两侧1 500 m范围内均为盐化灌 淤土,丰济c两侧1 500 m范围内均为盐土,丰济d两 侧1 500 m范围内为盐土和盐化灌淤土混合分布。盐 碱地面积变化如表3所示。

表3 渠道周围盐碱地面积变
---------------

Tuble 5° Change of sume area area area included						
渠段号	缓冲区范围/m	2013—2016年变化率/%	2016—2020年变化率/%	总面积变化率/%		
	500	21.74	-89.17	-86.81		
丰济 a	1 000	-37.70	-92.08	-95.06		
	1 500	-54.25	-90.56	-95.68		
	500	-17.97	-38.60	-49.63		
丰济 b	1 000	-28.55	-27.15	-47.95		
	1 500	-52.85	-3.63	-54.56		
	500	-29.59	-62.96	-73.92		
丰济 c	1 000	-20.63	-72.64	-78.28		
	1 500	-16.29	-69.66	-74.60		
	500	-33.29	-52.62	-68.39		
丰济 d	1 000	-39.62	-48.93	-69.16		
	1 500	-52.66	-61.99	-82.01		

Table 3 Change of saline-alkali area around the channel

由表3可知, 丰济a到丰济d在2013—2020年期间, 两侧的盐碱地面积变化明显。丰济a变化幅度最大, 500 m范围的盐碱地面积由2013年的120 751.6 m<sup>2</sup>降至2020年的15 924.7 m<sup>2</sup>, 面积减少86.81%; 1 000 m 范围的盐碱地面积由2013年的487 588.9 m<sup>2</sup>降至2020年的24 071 m<sup>2</sup>, 面积减少95.06%; 1 500 m范围的盐碱地面积由2013年的690 477.4 m<sup>2</sup>降至2020年的29 824.7 m<sup>2</sup>, 面积减少95.68%。丰济b变化幅度最小, 从2013—2020年, 1 500 m范围内盐碱地面积减少642 544.5 m<sup>2</sup>, 减少了54.56%。4条渠段的两侧盐碱地面积减少70%左右。

2016—2020年比2013—2016年的变化幅度大。 1 500 m范围内,2013—2016年盐碱地面积变化率最 大的为丰济a的-54.25%,2016—2020年盐碱地面积 变化率最大的为渠段丰济a的-90.56%。

盐土和盐化灌淤土中砂粒/粉粒/黏粒的占比不同 造成土壤中的水分渗透速度不同,黏粒占比大的土 壤,水分入渗越慢<sup>[22]</sup>。渠道衬砌后,渠道渗水被阻 断,土壤中的水分来源改变。丰济a,丰济c,丰济d 两侧土壤中黏粒占比大,衬砌后,盐碱地面积变化 率均大于丰济b。

# 3 讨 论

## 3.1 遥感的工程应用

在以往的研究中,渠道衬砌的防渗效果得到肯 定,但关于其对渠道周边土地盐碱化的防治效果研 究较少。许多文献从盐分运移机理上讨论了地下水 位,灌溉方式等因素对盐碱地面积的影响。本研究 考虑到渠道渗水也会改变土壤含水率,对于这部分 水分是否参与土壤中的盐分运移过程,本研究不做 深究,仅从其对盐碱地面积影响的角度来建立渠道 衬砌和盐碱地面积变化的关系,探讨利用遥感评估 渠道衬砌效果的可能性,充分利用了遥感技术大范 围、多时相、低成本的特点。河套灌区的节水改造 工程还在建设之中,同时有许多老旧的渠道需要翻 新整治。传统的渠道监测需要布设一定量的探测设 备<sup>[23-24]</sup>,不仅价格高昂,而且后期维护压力大。本 研究是遥感技术在渠道衬砌工程效果评估方面的一 次尝试,在未来的研究中,可以进一步讨论渠道渗 水过程对盐碱地减少的影响程度,实现利用遥感监 测渠道渗水,估测渗水量的目的。

## 3.2 不足之处

1)本研究数据为 2013、2016 年和 2020 年的遥 感影像,空间分辨率为 30 m。像元混分对提取结果 影响较大。在未来的研究中可以丰富数据源,采用 分辨率更加精细的遥感影像,刻画长时间序列下的 盐碱地的空间分布变化情况。

2)本研究考虑的影响因素较少。未来通过添加 地下水,地形方面的数据,可以完善渠道渗漏过程 中的水盐运移机制,为本研究的结论作出更加全面 的阐释。

# 4 结 论

1)本研究采用的渠道衬砌评估方法可以有效地

反映渠道衬砌的防盐效果。利用遥感评估渠道衬砌 的工程效果是可行的。

2) 衬砌前后,盐碱地的分布模式发生变化,由 原来的均匀分布转变为现在的聚集分布,盐碱地密 度关于缓冲区宽度的关系曲线呈阶梯状,阶梯出现 在 2 个位置,第一个是 100~300 m 范围内,第二个 是 600~800 m 范围内。

3) 2013—2020 年, 丰济 a、丰济 b、丰济 c、 丰济 d 的 4 条典型渠段两侧 500 m 范围内, 盐碱地 面积下降幅度最低 49.63%, 最高 86.81%; 1 500 m 范围内, 盐碱地面积下降幅度最低 54.56%, 最高 95.68%。渠道衬砌可以有效地防治渠道两侧的盐碱 地, 衬砌后的渠道两侧盐碱地面积显著减少。

 4)土壤质地间接影响工程衬砌的治理效果,土 壤黏粒较低的区域,衬砌工程的治理效果越明显。

#### 参考文献:

 李琴. 建国以来河套灌区水利事业发展视域下的社会变迁研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2019.
 LI Qin. Research on social changes in the view of water conservancy development in Hetao irrigation area since the founding of the People's republic of China[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2019.

[2] 张义强, 王瑞萍, 白巧燕. 内蒙古河套灌区土壤盐碱化发展变化及治 理效果研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(S1): 118-122. ZHANG Yiqiang, WANG Ruiping, BAI Qiaoyan. Development and change of soil salinization in Hetao irrigation area of Inner Mongolia[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(S1): 118-122.

[3] 李争争, 屈忠义, 杨威, 等. 暗管排水对鄂尔多斯地区重度盐碱地盐分 迁移规律的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(7): 122-129.
LI Zhengzheng, QU Zhongyi, YANG Wei, et al. The influence of subsurface drain on solute movement in soils severely affected by salinity and alkalinity in Ordos region[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(7): 122-129.

- [4] 杜秉晨曦,程勇翔,吴玲. 准噶尔盆地植被与土壤盐渍化关联性变化 趋势分析[J]. 生态学报, 2021, 41(23): 9 364-9 376.
  DU Bingchenxi, CHENG Yongxiang, WU Ling. Analysis of negative correlation between vegetation and soil salinization in Junggar Basin[J].
  Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(23): 9 364-9 376.
- [5] 王孜. 宁夏引黄灌区渠道衬砌与渗漏试验研究[D]. 西安: 西安理工大 学, 2018.
   WANG Zi. Experimental study on canal lining and seepage in irrigation area of Yellow River in ningxia[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology. 2018.
- [6] MARTIN C A, GATES T K. Uncertainty of canal seepage losses estimated using flowing water balance with acoustic Doppler devices[J]. Journal of Hydrology, 2014, 517: 746-761.
- [7] 史晓艳, 李维弟, 余露, 等. 玛纳斯河流域农灌区土壤盐渍化遥感定量 评价[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(11): 69-75, 83.
  SHI Xiaoyan, LI Weidi, YU Lu, et al. Using Remote Sensing to Evaluate Soil Salinization Distribution Over the Irrigation Areas in the Manas River Basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(11): 69-75, 83.
- [8] 靳三玲,郑志荣,刁兆岩,等. 呼伦贝尔草原辉河湿地表层土壤盐分分 布特征[J]. 草地学报, 2021, 29(4): 749-756.
   JIN Sanling, ZHENG Zhirong, DIAO Zhaoyan, et al. Distribution

characteristics of topsoil salinity in Hui River wetland, Hulunbuir grassland[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(4): 749-756.

[9] 霍东民,张景雄,孙家抦.利用 CBERS-1 卫星数据进行盐碱地专题信息提取研究[J]. 国土资源遥感, 2001, 13(2): 48-52.
HUO Dongmin, ZHANG Jingxiong, SUN Jiabing. Using the cbers-1 satellite data to study the thematic information extraction of saline dryland[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2001, 13(2): 48-52.

[10] 乔玉良. 彩红外航片在忻定盆地水浇地清查及盐碱地动态监测中的应用[J]. 国土资源遥感, 1993, 5(2): 17-21. QIAO Yuliang. Application of aerial remote sensing to surveying irrigated fields and dynamic monitoring salinized soil in xinding basin[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 1993, 5(2): 17-21.

- [11] 关元秀, 刘高焕, 刘庆生, 等. 黄河三角洲盐碱地遥感调查研究[J]. 遥 感学报, 2001, 5(1): 46-52, 86.
  GUAN Yuanxiu, LIU Gaohuan, LIU Qingsheng, et al. The study of saltaffected soils in the Yellow River Delta based on remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 2001, 5(1): 46-52, 86.
- [12] 邓小炼,于嵘, 亢庆, 等. 基于遥感的黄河三角洲地区盐碱地分布监测[J]. 遥感信息, 2006, 21(5): 34-36, 76.
  DENG Xiaolian, YU Rong, KANG Qing, et al. Monitoring of the saline-alkali land distribution in Yellow River Delta based on remote sensing[J]. Remote Sensing Information, 2006, 21(5): 34-36, 76.
  [13] 刘焕军,张柏, 王宗明,等. 基于反射光谱特征的土壤盐碱化评价[J].
- 红外与毫米波学报, 2008, 27(2): 138-142. LIU Huanjun, ZHANG Bai, WANG Zongming, et al. Soil salinealkalization evaluation basing on spectral reflectance characteristics[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2008, 27(2): 138-142.
- [14] 花锦溪, 臧淑英, 那晓东. 松嫩平原盐碱化反演及其动态变化过程[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 155-160.
  HUA Jinxi, ZANG Shuying, NA Xiaodong. Retrieval of soil salinization process and its dynamic change in Songnen plain[J].
  Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(1): 155-160.
- [15] 孙广福. 基于 Landsat/OLI-TIRS 数据的盐碱地模式识别[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学, 2016. SUN Guangfu. Pattern recognition of the saline-alkali land using landsat/OLI-TIRS data[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2016.
- [16] 张俊华,秦君琴,李明. 基于土壤光谱特征的宁夏银北地区盐碱地盐 分预测研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(5): 123-129, 164. ZHANG Junhua, QIN Junqin, LI Ming. Prediction of soil salt content based on spectral characteristics of soil in northern Yinchuan City, ningxia Hui autonomous region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(5): 123-129, 164.
- [17] 化骞寂, 冯绍元, 葛洲, 等. 河套灌区典型区周年内耕层土壤盐分时空变异研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 26-34.
  HUA Qianji, FENG Shaoyuan, GE Zhou, et al. Intra-annual spatiotemporal variation in salt content in the plough layer in Hetao irrigation district[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8): 26-34.

[18] 刘显泽,岳卫峰,倪宝锋,等.秋浇对内蒙古义长灌域地下水动态的影响[J].北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(3): 380-386. LIU Xianze, YUE Weifeng, NI Baofeng, et al. Impact of autumn irrigation on groundwater dynamics in Yichang Irrigation Sub-district, Inner Mongolia[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2016, 52(3): 380-386.

- [19] 杨会峰. 次生盐渍化地区包气带水盐运移试验及地下水位动态调控研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2011. YANG Huifeng. The experiment on water and salt transport of unsaturated zone and the study on dynamic regulation of groundwater depth in soil secondary salinization area[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2011.
- [20] 孙晓庆, 卞建民, 赵玉红, 等. 盐渍土水分下渗能力及水盐动态运移试

验[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(2): 12-17. SUN Xiaoqing, BIAN Jianmin, ZHAO Yuhong, et al. An experimental study on water infiltration capacity and water-salt dynamic transport of saline soil[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2021, 40(2): 12-17.

- [21] 李少兰. 基于高精度遥感图像的多种土地利用分类方法研究:以杨凌区为例[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2012.
  LI Shaolan. Studies on several classifications of land use based on high-precision remote sensing images: Take Yangling as example[D].
  Yangling: Northwest A & F University, 2012.
- [22] 张国祥, 申丽霞, 郭云梅. 微润灌溉条件下土壤质地对水分入渗的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(7): 35-39.
   ZHANG Guoxiang, SHEN Lixia, GUO Yunmei. Effect of soil structure on water infiltration under moistube irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(7): 35-39.
- [23] 何宁, 丁勇, 吴玉龙, 等. 基于分布式光纤测温技术的堤坝渗漏监测[J]. 水利水运工程学报, 2015(1): 20-27.
  HE Ning, DING Yong, WU Yulong, et al. Experimental study of distributed optical fiber temperature measurement technology for measuring leakage in embankment dam[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(1): 20-27.
- [24] 刘明堂,田壮壮,齐慧勤,等.基于 Kalman-BP 融合的南水北调高填 方渠道渗漏监测模型研究[J].南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 179-185.

LIU Mingtang, TIAN Zhuangzhuang, QI Huiqin, et al. Research on leakage monitoring model for high-filled canal of the middle route of South-to-North water diversion project based on Kalman-BP fusion network[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 179-185.

# **Evaluating the Efficacy of Channel Lining in Ameliorating Soil Salinization in Hetao Irrigation District Using Satellite Imageries**

WANG Jinglang<sup>1</sup>, PANG Zhiguo<sup>1\*</sup>, JIANG Wei<sup>1</sup>, LI Gendong<sup>2</sup>, ZHANG Xiaohong<sup>2</sup>

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Inner Mongolia Hetao Irrigation District Water Conservancy Development Center, Bayannur 015000, China)

Abstract: [Objective] Most channels in Hetao irrigation district have been linned in attempts to reduce seepage and ameliorate soil salinization, but there is lack of understanding of its efficacy at district scales. This paper is to fill this knowledge gap using remote sensing technologies. [Method] The analysis was based on Landsat8 multispectral satellite imageries, and saline-alkali soils in the irrigation district were automatically extracted using the ISODATA clustering method. A buffer zone wide d on both sides of each channel was identified using a spatial analysis method, saline-alkali area and the salinization index ( $\varphi$ ) in which were statistically analyzed. [Result] Saline-alkali soil area decreased significantly on both sides of the channel after the lining, and spatial distribution of the saline-alkali soils is in a trapezoid-shape. From 2013-2016, the salt-alkali soils within the 500m proximal to the channels had reduced from 49.63% to 86.81%, depending on locations, while within the 1 000 m and 1 500 m adjacent to the channels, they had reduced from 47.95% to 95.06%, and from 54.56% and 95.68%, respectively. Soil texture will affect the change of saline-alkali land area, and the area of saline-alkali land decreases faster in the region with low soil clay. [Conclusion] ① Satellite remote sensing technology is feasible to evaluate the salt control effect of large-scale channel projects. 2) The spatial distribution pattern of saline-alkali land changed from uniform distribution to aggregation distribution after canal lining. (3) The channel lining project effectively inhibited the soil salinization process on both sides of the saline-alkali land. ④ Soil texture indirectly affects the treatment effect of lining engineering. The treatment effect of lining engineering is more obvious in the area with lower soil clay. Key words: irrigation district; channel lining; remote sensing; saline-alkali land

责任编辑:赵宇龙