

基于3S技术的大庆地区土壤盐渍化时空变化分析

刘福全, 杜崇^{1*}, 韩旭¹, 李瑞¹, 胡子浩¹, 郭佳桐²

(1.黑龙江大学 水利电力学院, 哈尔滨 150080;

2.辽宁省石佛寺水库管理局有限责任公司, 沈阳 110166)

摘要:【目的】监测大庆地区土壤盐渍化的时空变化规律。【方法】基于不同深度土壤含盐量实测数据结合 Landsat 系列遥感影像反射率进行相关性分析, 筛选出敏感波段, 以多元逐步回归分析的方法构建土壤盐渍化反演模型, 用 ArcGIS 绘制盐碱化等级分布图, 分析 2001—2021 年土壤盐渍化时空变化特征。【结果】①表层(0~10 cm)土壤含盐量与反射率相关性更强, 将反射率经过数学变换之后相关性也会有所提升。②B1 波段对数、B7 波段和 B7 波段的指数构建的反演模型精度和稳定性都表现良好, $R^2=0.842$, $RMSE=0.290$, 可以用作研究区的反演模型。③ 2001—2021 年研究区轻度盐碱化、中度盐碱化和盐土面积先增加后减少, 重度盐碱化面积呈先减再增后减的趋势, 到 2021 年为止研究区盐碱化总面积为 102 262 hm^2 。【结论】2001—2021 年大庆地区盐碱化面积总体来说先增加后减少, 特别是大庆市区盐碱化面积减少幅度最大, 在今后的工作中应该重点监测盐渍土面积较多的杜蒙和林甸 2 个县, 确保盐碱化程度不再继续加重。

关键词: 大庆地区; 土壤含盐量; 遥感; 时空变化

中图分类号: X53

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2021494

OSID:



刘福全, 杜崇, 韩旭, 等. 基于3S技术的大庆地区土壤盐渍化时空变化分析[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(5): 132-138.

LIU Fuquan, DU Chong, HAN Xu, et al. Spatiotemporal Variation in Soil Salinization in Daqing Calculated Using the 3S Technology[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(5): 132-138.

0 引言

【研究意义】我国盐碱土面积已有 9 913 万 hm^2 , 并且盐渍化的面积还在继续扩大, 程度还在继续加重^[1]。遥感技术作为一种新型的技术手段, 为土壤盐渍化的监测与研究提供强大的技术支持, 对提高土地利用、农业生产力和土壤环境的保护都有重大的指导意义^[2-3]。【研究进展】利用遥感技术对盐渍化土壤构建反演模型进行盐分反演可以取得理想效果^[4-5]。BAO 等^[6]发现不同含盐量土壤的光反射率不同, 且含盐量高的土壤在可见光和近红外波段的光谱反射率存在明显的正相关。吴霞等^[7]利用时间跨度较长的 Landsat 系列遥感影像分析了宁夏银北灌区多年来表层土壤盐渍化时空变化规律。马驰^[8]基于哨兵卫星遥感数据, 对遥感反射率做适当的数学变换后定量反演吉林白城市表层土壤(0~15 cm)含盐量取得较好的效果。陈建军等^[9]利用 Landsat5 TM(专题制图仪)遥感影像结合地理背景数据, 通过遥感解译方式对大庆市 1986—2001 年盐碱土动态反演, 阐述了盐碱土

时空变化规律。【切入点】前人对土壤盐分遥感反演均取得重要科研成果, 但对于像大庆地区这样典型的苏打盐碱地, 利用遥感技术和野外实测数据相结合, 进行多年不同土层土壤盐分反演并且分析其影响因素的研究未见报道。【拟解决的关键问题】为此, 以黑龙江省大庆为研究区, 以 Landsat8 OLI(陆地成像仪)2021 年、2015 年和 Landsat5 TM 2008 年、2001 年遥感影像为数据源, 结合野外取样实测土壤含盐量, 分析表层(0~10 cm)、浅层(10~20 cm)和混合层(0~20 cm)土壤与遥感反射率的相关性。采用反射率经过数学变换的多元线性回归模型构建土壤盐分反演模型, 定量反演研究区土壤含盐量, 探寻土壤含盐量的时空变化规律, 为今后大庆地区土壤健康和可持续利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

大庆市位于黑龙江省西部, 松嫩平原中部沉陷地带。市区地理坐标北纬 45°46'—46°55', 东经 124°19'—125°12'之间, 东部与安达市、肇州接壤; 南部与肇源相邻; 西部与杜蒙(杜尔伯特蒙古族自治县)相连; 北部与林甸交接。大庆地区属中温带大陆性季风气候, 冬季寒冷干燥, 冻结期长。大庆地区包

收稿日期: 2021-10-14

基金项目: 黑龙江省高校基本科研业务费项目(RCCXYJ201912)

作者简介: 刘福全(1997-), 男。硕士研究生, 主要研究方向为水务工程管理。E-mail: 2651563319@qq.com

通信作者: 杜崇(1978-), 男。硕士生导师, 博士, 主要从事水务工程管理方面研究。E-mail: 149596471@qq.com

括萨尔图、让胡路、红岗、大同、龙凤 5 个区和肇州、肇源、林甸、杜蒙 4 个县。选大庆地区为研究区域主要因为该研究区草甸面积较大和水泡特别多，也是黑龙江省典型的苏打盐渍土区域，而且越靠近水泡子附近土壤含盐量越高。

1.2 遥感数据获取与处理

本文使用的遥感数据可以在美国地质调查局：
(<https://earthexplorer.usgs.gov/>) 下载^[10]。Landsat5 TM 有 7 个波段，Landsat8 OLI 有 9 个波段，包括 Landsat5 TM 波段中的 1~5 和 7 波段信息，重返周期都为 16 d，具体参数见表 1。

表 1 Landsat8 OLI 与 Landsat5 TM 波段参数对比

Table 1 Comparison of band parameters between Landsat8 OLI and Landsat5 TM

遥感影像	波段名	波段长/ μm	分辨率/m
Landsat8 OLI	B1 Coastal	0.433~0.453	30
	B2 Blue	0.450~0.515	30
	B3 Green	0.525~0.600	30
	B4 Red	0.630~0.680	30
	B5 NIR	0.845~0.885	30
	B6 SWIR 1	1.560~1.660	30
	B7 SWIR 2	2.100~2.300	30
	B8 Pan	0.500~0.680	15
	B9 Cirrus	1.360~1.390	30
Landsat5 TM	B1 Coastal	0.45~0.52	30
	B2 Blue	0.52~0.60	30
	B3 Green	0.63~0.69	30
	B4 Red	0.76~0.90	30
	B5 NIR	1.55~1.75	30
	B7 SWIR 2	2.08~2.35	30
	B6 SWIR 1	10.40~12.50	120

在遥感影像上对应的每个采样点处，各个波段都有不同像元值，但是这些像元值不能作为遥感反射率直接使用，需要在 ENVI 中进行转化，通过将大气表观反射率转化为真实地表反射率，最后才能作为本试验所需的遥感反射率值。本试验选择与采样时间同步的 4 景影像，成像具体时间经过时区转化为北京时间 10:00 左右，云层覆盖率均小于 1%，能见度高，可以用作建立反演模型。影像的预处理工作包括辐射定标、Flaash 大气校正、根据研究区 1:5 万地形图进行几何精校正、拼接和裁剪等。

1.3 土壤采样与处理

土壤采样工作于 2021 年 7 月 3—5 日完成，在研究区内共采集 72 个样本(表层和浅层土壤共 36 对样本)，利用手持 GPS 记录采样点坐标，具体采样点见

图 1。采样过程用五点采样法分别采取表层(0~10 cm)和浅层(10~20 cm)土壤各 0.5 kg，做好标号装入密封袋中，在实验室中自然风干后，经过研磨挑出小石块杂草等，过 2 mm 孔径筛，将 1/2 的表层、浅层土壤按等质量均匀混合在一起得到混合层(0~20 cm)土样。配制土水比 1:5 的土壤溶液，用电导率仪测得电导率($EC_{1:5}$, dS/m)后通过经验公式计算土壤含盐量(SSC, %): $SSC = (0.288 2EC_{1:5} + 0.018 3)$ ^[11]。

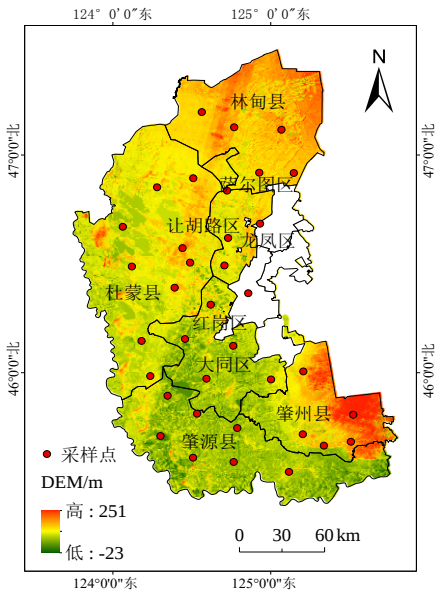


图 1 研究区土壤采样点示意图

Fig.1 Soil sampling points in the study area

1.4 不同土层土壤含盐量与反射率相关性分析

将不同土层土壤含盐量的实测值与采样点在遥感影像上提取的反射率值进行相关性分析，二者的相关性用相关系数 R 表示， $0 < R < 1$ 表示土壤含盐量与反射率呈正相关， $-1 < R < 0$ 表明土壤含盐量和反射率呈负相关，且 R 越接近-1 或 1，表明相关性越强。

目前用于土壤含盐量的反演波段组合有单波段、多波段及其将反射率进行适当的数学变换等多种方法。本文先对选取的影像做单波段 Pearson 相关性分析，再将波段组合做相关性分析，最后将反射率进行数学变换与单波段或多波段组合与土壤含盐量进行相关性分析，相关性最高的波段作为敏感波段用作土壤含盐量的反演。

1.5 建模与模型精度检验

随机筛选处理好的表层、浅层和混合层 3 组样本各 25 个用于建模，建模样本在 SPSS 软件中做相关性分析，相关性高的土层用于一元和多元回归模型的建立，选出拟合度最高的模型作为最终的反演模型。剩余的每组 11 个样本用于模型的检验，模型精度用 R^2 表示， R^2 越大说明拟合效果越好，模型稳定性用 $RMSE$ 表示， $RMSE$ 越小说明模型越稳定。

2 结果与分析

2.1 不同深度土壤含盐量与反射率相关性分析对比

将表层、浅层和混合层土壤样本数据与遥感反射率做相关性分析,不同深度土壤含盐量与波段反射率相关系数见表 2。

表 2 不同深度土壤含盐量与反射率的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between soil salinity and reflectance at different depths

波段	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
表层	0.564**	0.518**	0.437*	0.469*	0.432*	0.536**	0.645**
浅层	0.469*	0.419*	0.386	0.395	0.349	0.427*	0.533**
混合层	0.512**	0.466*	0.423*	0.451*	0.412*	0.483*	0.597**

注 **表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著。*表示在 0.05 级别(单尾),相关性显著。

由表 2 可知,土壤含盐量与波段反射率有明显的正相关关系,相关性整体都不高,相关性最差的波段是 B5,最高的波段为 B7,其次是 B1,通过比较表层、浅层和混合层土壤含盐量与反射率的相关性,本研究选择相关性最强的表层(0~10 cm)土壤样本数据构建土壤含盐量的反演模型。

2.2 单波段反演模型的建立与检验

在 SPSS 26.0 软件中对 B1—B7 各个波段分别进行反射率的 S 曲线、指数、对数、幂函数、倒数变换,筛选出每种变换后精度和稳定性最高的波段,并以 B7 波段的线性模型作为参考,单波段土壤含盐量的反演模型如表 3 所示。研究表明反射率经过变换之后指数、幂函数、倒数模型精度和稳定性均有所提高。在 7 个波段中利用 B3 波段反射率建立的 S 曲线模型、B7 波段反射率的指数模型、B1 波段反射率的对数模型、B1 波段反射率建立的幂函数模型、B1 波段反射率的倒数模型精度最高。

2.3 多波段反演模型的建立与检验

参考单波段土壤含盐量反演模型,将 Landsat8 影像各波段反射率及其变换形式与研究区土壤含盐

量在 SPSS 软件中进行多元逐步回归分析,建立如表 4 所示的多波段反演模型。结果显示,由 B1 波段对数、B7 波段、B7 波段指数建立的多元回归模型 $SSC=-131.14-155.044\times B7+0.353\times \ln(B1)+133.45\times e^{B7}$,模型决定系数 $R^2=0.842$,均方根误差 $RMSE=0.290$,相比其他模型精度和稳定性有明显提升,回归效果最好,因此可以利用该多元回归模型作为反演模型,通过输入剩余 11 个验证样本,建立如图 2 所示的土壤含盐量预测值与实测值散点图。图 2 显示,研究区土壤含盐量实测值和预测值的散点均匀地分布在趋势线两侧,拟合模型表达式为 $y=1.1788x-0.1157$, $R^2=0.8978$, $RMSE=0.331$,模型决定系数接近 1,均方根误差较小,说明模型精度高、稳定性好,可以用该模型进行大庆地区土壤盐渍化遥感反演。

表 3 土壤含盐量的单波段反演模型

Table 3 Single band inversion model of soil salinity

模型	模型表达式	R^2	RMSE
线性模型	$SSC=-0.260+4.842\times B7$	0.416	0.533
对数模型	$SSC=3.25+0.896\times \ln(B1)$	0.264	0.598
S 曲线模型	$SSC=e^{(0.697-0.134/B3)}$	0.410	0.740
指数模型	$SSC=0.098\times e^{7.733\times B7}$	0.555	0.642
幂函数模型	$SSC=60.089\times B1^{1.622}$	0.475	0.689
倒数模型	$SSC=-0.333+0.035/B1$	0.543	0.471

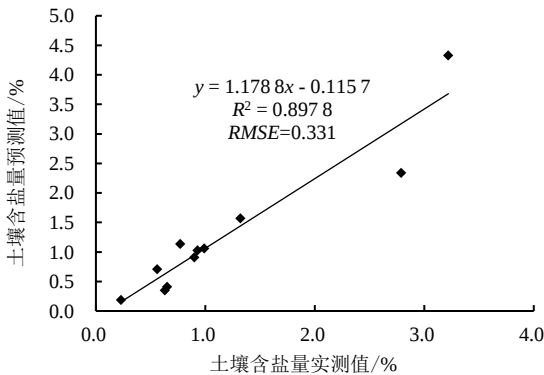


图 2 验证样本土壤含盐量实测值与预测值散点图

Fig.2 Verify scatter plots of measured and predicted values

表 4 土壤含盐量多波段反演模型

Table 4 Multi-band inversion model of soil salinity

入选波段	模型表达式	R^2	RMSE
B2、B6、B7	$SSC=-0.104+2.22\times B2-16.15\times B6+22.5\times B7$	0.656	0.427
B7、 $\ln(B1)$ 、 e^{B7}	$SSC=-131.14-155.044\times B7+0.353\times \ln(B1)+133.45\times e^{B7}$	0.842	0.290
B1+B7	$SSC=-0.423+4.453\times (B1+B7)$	0.508	0.621
e^{B7} 、B7、 $1/B1$	$SSC=-94.36+0.003/B1-105.371\times B7+94.74\times e^{B7}$	0.813	0.316
$\ln(B1)$ 、 $B1^a$ 、 e^{B7}	$SSC=-6.6-0.663\times \ln(B1)+96.6\times B1^{3.42}+3.9\times e^{B7}$	0.544	0.492
e^{B7} 、 $B1+B7$ 、B7	$SSC=-97.4-102.02\times B7-2.9\times (B1+B7)+97.9\times e^{B7}$	0.799	0.327

注 表中的 a 为常数,通过计算 a 的值为 3.42。

2.4 土壤盐渍化时空演变分析

根据《中国盐渍土》^[12]在半湿润半干旱区的苏打盐碱地分类标准,将大庆地区表土含盐量分别处于<0.1%、0.1%~0.2%、0.2%~0.4%、0.4%~0.5%、>0.5%时,依次对应非盐渍土、轻度盐渍土、中度盐渍土、

重度盐渍土和盐土进行分类。利用反演模型 $SSC = -131.14 - 155.044 \times B7 + 0.353 \times \ln(B1) + 133.45 \times e^{B7}$ 反演研究区多年表层土壤含盐量,利用 ENVI 中决策树对影像中 DN 值进行归纳分类,并用 ArcGIS10.2 制图。分类结果如图 3 所示。

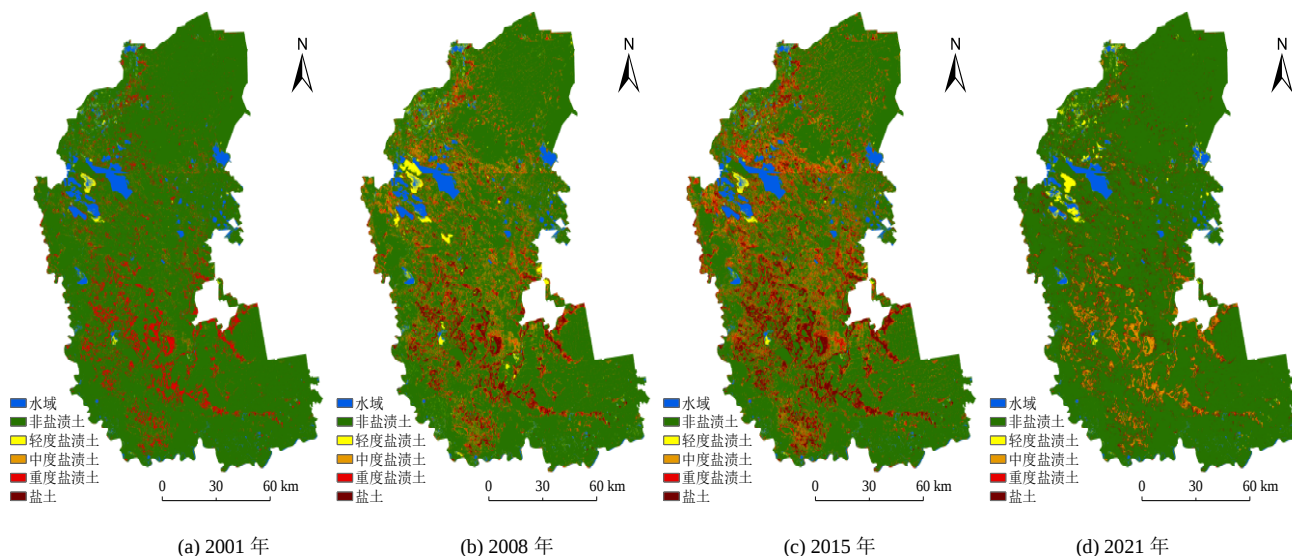


图 3 大庆地区土壤盐渍化反演图

Fig.3 Inversion map of soil salinization in Daqing Area

盐渍化等级分布图显示由东到西、由北向南方向盐渍化程度逐渐加重,杜蒙和大庆市区交界处盐土分布较集中,盐土占据比例也很大;轻度盐渍土更多落在研究区边界;中度和重度盐渍土在大庆市中心周围分布较密集。研究区的盐渍土这样分布主要因为西部地势低、水泡多,泡中的水属重碳酸盐类钠组 I 型水,矿化度极高,再加上无尾河流供给大量的地表水汇集在排水不畅的低洼处,强烈蒸发作用致使土壤水分自下至上迁移积累在地表,在水泡边缘形成碱斑,积累成盐土^[13],在风化作用下盐土颗粒迁徙至非盐土中致使盐碱化程度愈来愈重。研究区周边大多是草原、林地和耕地,人类过度放牧、乱砍滥伐和开荒耕地导致土壤结构改变,易发生次生盐碱化。这样的空间特征说明盐碱土的形成与地质条件和人为干扰有一定联系。为了明确盐碱土变化规律,从 ArcGIS10.2 中提取出肇州、肇源、大庆市、杜蒙、林甸 2001、2008、2015 年和 2021 年各个等级盐渍土面积,统计结果见表 5。由表 5 可知,2001—2021 年研究区轻、中度盐渍土和盐土面积呈先增后减的趋势,重度盐渍土面积先减少再增加最后大幅度减少,2015 年之前盐渍土总面积持续增加,其中盐土面积在 2001—2015 年共增加 105 409 hm^2 ,相比轻度盐渍土面积增加的多,而中度和重度盐渍土面积在减少,说明中度和重度盐

渍土部分转化为盐土,各等级盐渍土之间进行了转化。2015—2021 年为止,盐渍土总面积大幅度下降,共减少 334 049 hm^2 ,重度盐渍土和盐土面积减少比例最大,在各区域中大庆市盐渍土面积减少最为明显,林甸县盐渍土减少程度较小。

2001—2015 年盐碱化程度加重除了上述的地质条件和人为干扰外,还可能与:①夏季多雨、冬季冻融有关。全年降雨多集中于夏季,且蒸发量远大于降雨量;冬季霜冻,冬季土壤盐分随地下水垂直向上,从未冻层向冻层迁移,融化时盐分聚集地表^[14]。②人类引用河水灌溉作物时不注意用量,多余积水抬高地下水位,导致盐分从土壤毛细水上升至地表。其次,盐渍化的加重也与地下水位下降时人们对易发的次生盐渍化不重视有一定关系。③早期大庆石油资源丰富,在开采、加工时通常向油田中注入大量江河水,注入的水矿化度高,含有大量可溶性矿物质和碳水化合物也会造成当地土壤盐分增加^[15]。近年来,盐渍化土壤得到生物措施、化学措施及其一些其他综合措施等治理,加大治理力度和管理制度,严禁放牧和乱砍乱伐,对水利工程灌排设备更加完善以及对研究区进行绿化等,导致 2015 年之后盐碱土面积呈逐渐较少的趋势。

表 5 2001、2008、2015、2021 年各区域盐渍土面积分布

Table 5 Regional distribution of saline soil in 2001, 2008, 2015 and 2021

hm²

盐渍化程度	年份	大庆市	肇源	肇州	林甸	杜蒙	合计
轻度盐渍土	2001	15 004	5 206	3 320	10 233	19 744	53 507
	2008	25 506	13 787	5 277	10 054	18 406	73 030
	2015	23 598	11 821	4 839	10 543	17 243	68 044
	2021	2 033	2 965	3 754	5 172	4 959	18 883
中度盐渍土	2001	33 301	15 513	16 278	4 445	24 169	93 706
	2008	35 096	14 313	8 067	21 071	32 006	110 553
	2015	23 722	10 419	6 524	16 100	31 653	88 418
	2021	4 853	7 640	8 296	6 868	10 532	38 189
重度盐渍土	2001	56 145	22 900	17 941	11 555	34 336	142 877
	2008	31 803	11 154	17 315	5 769	17 160	83 201
	2015	45 118	18 710	30 199	7 620	19 621	121 268
	2021	1 135	3 001	4 683	7 319	5 076	21 214
盐土	2001	22 844	7 388	5 663	7 111	10 166	53 172
	2008	43 926	23 757	22 309	16 454	38 342	144 788
	2015	48 606	28 013	16 440	21 745	43 777	158 581
	2021	3 055	3 568	2 863	10 856	3 634	23 976

3 讨论

本文利用 Landsat8 和 Landsat5 遥感影像结合野外实地采样数据,将土壤分层分析含盐量与遥感反射率的相关性,构建适宜的大庆地区多年土壤含盐量反演模型,较采用某个土层厚度均值和用单一年份数据进行简单反演更具有普适性,反演结果细化到研究区的各个区域,对土壤盐分监测以及治理更加明确。分析表明遥感反射率与土壤含盐量存在正相关性,在第 7 波段相关性最大,其次是第 6 波段。该分析结果与王洋洋^[6]利用 Landsat8 影像构建耕地盐渍土含盐量反演模型相同;将反射率经过适当的数学变换后可以起到降噪的效果提高反射率相关性,与马驰^[17]研究结论相同;对表层、浅层和混合层土壤含盐量分别进行相关性分析,表层土壤相关性更好,与张智韬等^[18]基于雷达遥感的不同深度土壤含盐量反演结果一致。经过分析发现 2015 年之前盐碱化面积快速增加,2015 年之后盐渍化程度减轻,盐渍化面积急剧下降,说明近年针对盐碱化地区改良措施得当,治理效果显著,制定的宏观政策对植被覆盖度及生态恢复有一定作用,但是仍然不能放松警惕,因为盐碱地的发展受自然地理因素和人为因素的双重影响。土壤盐碱化发生这样的时空变化与地质条件、气候、地表植被覆盖、地下水埋深、地表径流及人类的生产活动都有关系,虽然自然因素是内因,但是短期内人类活动更为直接^[19-20]。对研究区进行遥感反演能取得理想效果,一

方面因为选择的是时间跨度较长的 Landsat 系列卫星,将遥感影像辐射定标、大气校正等处理削弱了大气对传感器影响,另一方面因为采样时间与影像获取时间较接近,选择天气晴朗且云量小于 1%的影像数据更加准确,反演精度有所提升。本研究采样时间为 7 月初,为多雨的季节,研究中没有考虑降雨量对实测数据的影响,也没有通过某种方法比较这些影响因素中哪些是主要原因,哪些是次要原因,在以后的研究中将进一步改进,以此提高反演模型精度,为大庆地区土壤盐分监测提供更加精确的理论基础。

4 结论

1) 基于 Landsat 系列卫星获取的遥感数据分辨率可以达到盐碱化反演的要求,用于时空序列的反演是很好的选择。

2) 将反射率经指数、幂函数和倒数的数学变换后相关性显著提升,多波段反演模型精度和稳定性优于单波段反演模型,研究区土壤含盐量反演模型为: $SSC=-131.14-155.044 \times B7+0.353 \times \ln(B1)+133.45 \times e^{B7}$, $R^2=0.842$, $RMSE=0.290$ 。

3) 2001—2021 年大庆地区盐渍土面积先增加后减小,在今后的工作中应该重点监测盐渍土面积较多的杜蒙和林甸 2 个县,确保盐碱土面积不再继续扩大,盐碱化程度不再继续加重。

参考文献：

- [1] 王娜, 何俐蓉. 盐渍化土壤的成因及改良材料的应用[J]. 南方农机, 2021, 52(5): 72-73.
WANG Na, HE Lirong. Causes of salinized soil and application of improved materials[J]. South Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 72-73.
- [2] 贾萍萍, 张俊华, 孙媛, 等. 基于实测高光谱和 Landsat 8 OLI 影像的土壤盐化和碱化程度反演研究[J]. 土壤通报, 2020, 51(3): 511-520.
JIA Pingping, ZHANG Junhua, SUN Yuan, et al. Inversion of soil salinization and alkalization based on measured hyperspectral and Landsat 8 OLI images[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(3): 511-520.
- [3] 程彬. 遥感和地理信息系统在吉林西部盐碱地管理中的应用研究[J]. 中国管理信息化, 2017, 20(22): 165-166.
CHENG Bin. Study on application of remote sensing and GEOGRAPHIC information system in saline-alkali land management in western Jilin province[J]. China Management Informatization, 2017, 20(22): 165-166.
- [4] 韩思淇, 麻泽龙, 庄文化, 等. 2000—2018 年黄河源植被叶面积指数时空变化特征[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(12): 57-62.
HAN Siqi, MA Zelong, ZHUANG Wenhua, et al. Spatial-temporal change of leaf area index (LAI) in the source region of the Yellow River during 2000—2018[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(12): 57-62.
- [5] 高凡, 何兵, 闫正龙, 等. 2000—2016 年叶尔羌河中下游植被覆盖动态变化遥感分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(4): 92-99.
GAO Fan, HE Bing, YAN Zhenglong, et al. Using remote sensing to unravel spatiotemporal change in vegetation coverage in middle-low reaches of the Yarkant basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(4): 92-99.
- [6] BAO B R M, SANKAR T R, DWIVEDI R S et al. Spectral Behavior of salt-affected soils[J]. International Journal of Remote Sensing, 1995, 16(12): 2 125-2 136.
- [7] 吴霞, 张永宏, 王长军, 等. 基于 MODIS 的宁夏植被覆盖时空变化特征分析[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(2): 204-208.
WU Xia, ZHANG Yonghong, WANG Changjun, et al. Analysis of temporal and spatial variation characteristics of vegetation cover in Ningxia based on MODIS[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(2): 204-208.
- [8] 马驰. 基于 Sentinel-2A 遥感数据对吉林白城市土壤含盐量的反演[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 591-597.
MA Chi. Retrieval of soil salt content based on Sentinel-2A remote sensing data in Baicheng City, Jilin Province[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 591-597.
- [9] 陈建军, 张树文, 陈静, 等. 大庆市土地盐碱化遥感监测与动态分析[J]. 干旱区资源与环境, 2003 (4): 101-107.
CHEN Jianjun, ZHANG Shuwen, CHEN Jing, et al. Remote sensing monitoring and Dynamic analysis of land salinization in Daqing city[J]. Arid land Resources and Environment, 2003 (4): 101-107.
- [10] 麦麦提吐逊·麦麦提, 马合木江·艾合买提, 陶洪飞, 等. 基于遥感的疏勒县植被覆盖时空变化研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(4): 121-129.
MAIMAITITUXUN·Maimaiti, MAHEMUJIANG·Aihemaiti, TAO Hongfei, et al. Spatial-temporal variation of vegetation coverage in Shule County based on remote Sensing[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(4): 121-129.
- [11] 黄权中, 徐旭, 吕玲娇, 等. 基于遥感反演河套灌区土壤盐分分布及对作物生长的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 102-109.
HUANG Quanzhong, XU Xu, LYU Lingjiao, et al. Soil salinity distribution based on remote sensing and its effect on crop growth in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(1): 102-109.
- [12] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 《中国盐渍土》[M]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2000.
WANG Zunqin, ZHU Shouquan, YU Renpei, et al. Saline Soil of China[M]. Nanjing: Nanjing Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2000.
- [13] 李云鹏, 李怡庭, 刘景哲, 等. 松嫩平原湖泊湿地水化学特征及净化水质作用研究[J]. 东北水利水电, 2001, 19(11): 39-43, 56.
LI Yunpeng, LI Yiting, LIU Jingzhe, et al. Study on hydrochemistry character and purifying water quality effect of Songnen Plain wetland[J]. Water Resources and Hydropower Northeast, 2001, 19(11): 39-43, 56.
- [14] WANG L, SEKI K, MIYAZAKI T. The causes of soil alkalization in the Songnen Plain of northeast China[J]. Paddy and Water Environment, 2009, 7(3): 259-270.
- [15] MCGENITY T J. Halophilic hydrocarbon degraders[C]//Timmis KN (Ed.). Handbook of hydrocarbon and lipid microbiology. Berlin: Springer-Verlag, 2010: 1 940-1 948.
- [16] 王洋洋. 基于 LandSat8 影像的耕地盐渍土含盐量反演模型[D]. 太谷: 山西农业大学, 2016.
WANG Yangyang. Inversion model of salt content in cultivated land based on LandSat8 image[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2016.
- [17] 马驰. 基于 GF-1 遥感图像土壤含盐量反演研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(5): 5-8,13.
MA Chi. Soil salinity inversion based on GF-1 remote sensing image[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(5): 5-8, 13.
- [18] 张智韬, 杜瑜燕, 劳聪聪, 等. 基于雷达遥感的不同深度土壤含盐量反演模型[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 243-251.
ZHANG Zhitao, DU Yuyan, LAO Congcong, et al. Inversion model of soil salinity at different depths based on radar remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 243-251.
- [19] 冯志密, 黄彦, 曹凯华, 等. 基于 RS 的安达市土地盐碱化面积提取研究[J]. 水利科学与寒区工程, 2020, 3(1): 16-19.
FENG Zhimi, HUANG Yan, CAO Kaihua, et al. Research on extraction of land salinization area based on RS in Anda City[J]. Water Conservancy Science and Cold Area Engineering, 2020, 3(1): 16-19.
- [20] 刘莹. 大庆地区土壤盐碱化成因及改良对策[J]. 黑龙江水利科技, 2015, 43(6): 151-152.
LIU Ying. Causes of soil salinization and improvement measures in Daqing area[J]. Heilongjiang Water Conservancy Science and Technology, 2015, 43(6): 151-152.

Spatiotemporal Variation in Soil Salinization in Daqing Calculated Using the 3S Technology

LIU Fuquan¹, DU Chong^{1*}, HAN Xu¹, LI Rui¹, HU Zihao¹, GUO Jiatong²

(1. College of Water Resources and Electric Power, Harbin 150080, China;

2. Liaoning Shifosi Reservoir Administration Co. LTD, Shenyang 110166, China)

Abstract: **【Objective】** Soil salinization is an abiotic stress affecting crop production in most countries across the world. Understanding spatiotemporal dynamics of soil salt at catchment and regional scales is crucial to improving soil management but challenging because of its spatial heterogeneity over different scales. The purpose of this paper is to present a new method to estimate soil salinity distribution at regional scale. **【Method】** The proposed method is based on satellite imagery. Using salt contents measured at different soil depths and the reflectance of Landsat remote sensing images, an inversion model linking soil salinization with the most sensitive imagery-bands was constructed by multiple stepwise regression analysis methods. The spatial distribution of soil salinization was calculated using the Arcgis. We applied the model to soil salinization data measured from 2001 to 2021 in Daqing, Heilongjiang province. **【Result】** ①Correlation between soil salt content and the reflectance was better for the surface soil layer (0~10 cm) than for the subsoil; its accuracy can be further improved by mathematical transformations of the reflectance. ②The inversion model constructed by the logarithm of B1 band, the index of B7 band and B7 bands was accurate and stable with $R^2=0.842$ and $RMSE=0.290$. ③From 2001 to 2021, the areas with mild, moderate salinized soils increased first followed by a decline, while the areas with severe salinization decreased first, following by an increase before falling again. By 2021, the total salinized areas in the studied region were 102 262 hm². **【Conclusion】** From 2001 to 2021, the salinized areas in Daqing increased first and then declined. In particular, salinization areas in the urban areas decreased fastest. We recommended that soil salinization monitoring should focus on the salinity-laten region at Dumeng and Lindian counties to control their increase.

Key words: Daqing; soil salinity; remote sensing; spatiotemporal variation

责任编辑：白芳芳