文章编号:1000-7601(2022)05-0252-08 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2022.05.27

# 基于 Sentinel-1/2 的土壤盐分含量反演研究

马 驰[1],刘晓波[2]

(1.辽宁省交通高等专科学校,辽宁 沈阳 110122;2.中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司,北京 100024)

**摘 要**:本试验利用 Gram-Schmidt(GS)变换将 Sentinel-1A 雷达影像与 Sentinel-2A 多光谱影像进行融合,并分析雷达影像、多光谱影像及融合影像各波段与吉林省白城市表层土壤含盐量的相关性,建立研究区土壤含盐量的反演模型,对研究区土壤含盐量进行制图。研究结果表明:Sentinel-1A 的 VH、VV 波段后向散射系数与研究区土壤含盐量均呈显著正相关,可用作土壤盐碱化监测的遥感数据源;合适的数学变换可以提升 Sentinel-1A、Sentinel-2A 及融合影像与土壤含盐量的相关性,其中,Sentinel-1A 的 VV 波段与 Sentinel-2A 第 5 波段融合后,其二次方变换与土壤含盐量的相关系数达到 0.820;引入合适的盐分指数可以有效改善 Sentinel-2A 及融合影像与土壤含盐量的相关性,其中,融合影像的盐分指数$(D_2D_4)/D_3$与土壤含盐量相关系数达到 0.889;利用融合影像及盐分指数$(D_2D_4)/D_3$建立的研究区土壤含盐量反演模型 $Y=86.260X-66.206X^2-5.312$,模型决定系数达到 0.791,均方根误差为 1.884 $g\cdot kg^{-1}$,表明将 Sentinel-1A 雷达影像与 Sentinel-2A 多光谱影像进行融合来提升土壤含盐量反演精度的方法切实可行。

**关键词**:土壤含盐量;反演;Sentinel-1A;Sentinel-2A;Gram-Schmidt 变换

**中图分类号**:S155.2+93 **文献标志码**:A

# Inversion of soil salt content based on Sentinel-1/2

MA Chi[1], LIU Xiaobo[2]

(1. *Liaoning College of Communication*, *Shenyang*, *Liaoning* 110122, *China*;
2. *China Power Beijing Engineering Corporation Limited*, *Beijing* 100024, *China*)

**Abstract**: In this experiment, Sentinel-1A radar image and Sentinel-2A multispectral image were fused by Gram Schmidt (GS) transform, and the correlation between radar image, multispectral image and each band of fusion image and surface soil salt content in Baicheng City, Jilin Province was analyzed. The inversion model of soil salt content in the study area was established to map the soil salt content in the study area. The results showed that there was a significant positive correlation between the VH and VV band backscattering coefficients of Sentinel-1A and the soil salt content in the study area, which could be used as a remote sensing data source for land salinization monitoring. Appropriate mathematical transformation improved the correlation between Sentinel-1A, Sentinel-2A and fusion images and soil salt content. After the fusion of VV band of Sentinel-1A and the fifth band of Sentinel-2A, the correlation coefficient between quadratic transformation and soil salt content reached 0.820. The introduction of appropriate salinity index effectively improved the correlation between Sentinel-2A and fusion image and soil salt content. Among them, the correlation coefficient between salinity index $(D_2D_4)/D_3$ of fusion image and soil salt content was 0.889. The inversion model of soil salt content in the study area established by using the fusion image and salt index $(D_2D_4)/D_3$ is $Y=86.260X-66.206X^2-5.312$. The model determination coefficient was 0.791, and the root mean square error was 1.884 $g\cdot kg^{-1}$, indicating that the method of combining Sentinel-1A radar image and Sentinel-2A multispectral image to improve the accuracy of soil salt content inversion was feasible.

**Keywords**: soil salt content; inversion; Sentinel-1A; Sentinel-2A; Gram Schmidt transform

**收稿日期**:2021-12-05 **修回日期**:2022-05-08

**基金项目**:国家自然科学基金 (41371332);辽宁地矿职业教育集团项目(Ldk2102、Ldk2106);辽宁省交通高等专科学校项目(lnccjykyz202101)

**作者简介**:马驰(1975-),男,辽宁省义县人,博士,副教授,主要从事 RS 与 GIS 应用研究。E-mail:7552442@qq.com

土壤盐碱化是土壤环境灾害的重要表现,一般发生在地势低平且水位较高、排水不畅的干旱与半干旱地区,已成为世界性有待解决的生态环境难题[1-2]。因此,实时监测、评估土壤盐碱化严重地区的土壤含盐量对于区域土壤环境的恢复与保护具有重要意义。传统的监测区域土壤含盐量的方法多为实地调查土壤采样,并在实验室化验土样的含盐量。此方法虽然精度较高,但费时费力,只能获得一定数量的点状数据。遥感技术具有数据获取方便迅捷、影像覆盖范围广泛、数据成本低廉等优点,已广泛应用于土地盐碱化的监测与评估中[3-5]。

合成孔径雷达(Synthetic aperture radar,SAR)具有全天时、全天候等特点,对植被、云雾、雨雪具有一定的穿透能力,能够更好地探测地表信息[6-7]。然而,于合成孔径雷达属于主动微波遥感,SAR 影像的后向散射系数容易受到地形、极化方式、入射角等因素的影响,降低了对地表地物识别的精度[8-10]。光学遥感影像能够反映地表地物的光谱信息,在一定程度上可以弥补 SAR 数据在地物识别中的缺陷。研究表明,将光学遥感影像与 SAR 影像进行融合应用,可以增加融合影像中的有用信息,减少地物识别过程中的差异性与不确定性,从而增强对地物的识别能力。

本文试验利用 Gram-Schmidt(GS)融合算法将 Sentinel-1A 双极化雷达数据与 Sentinel-2A 多光谱影像进行融合,以我国典型苏打盐碱土区——吉林省白城市为研究对象,结合野外调查的土壤采样实验室化验数据,建立白城市土壤含盐量的反演模型,实现对研究区土壤含盐量的监测与制图,为区域土壤环境监测提供数据支持,为 Sentinel-1A 雷达数据与 Sentinel-2A 多光谱数据融合及应用提供参考。

# 1　材料与方法

## 1.1　研究区概况

白城市地处吉林省西部,是世界三大苏打盐碱土区域之一,面积约 2.6 万 $km^2$,气候属于中温带大陆性季风气候。白城市西部、北部地区为山地地貌,海拔较高,中部、东部和南部地区为平原地貌,地势低平。多年来,受自然条件、土壤质地、人为因素等影响,白城市土壤盐碱化严重,实时监测土壤含盐量对于精确改良土壤质量意义重大。

## 1.2　技术路线

将 Sentinel-1A SAR 影像与 Sentinel-2A 多光谱影像融合,反演白城市土壤含盐量的技术路线如图 1。

## 1.3　研究区土壤采样及化验

根据白城市气候及地表植被情况,选择 2019 年春季 5 月 5 日至 11 日对研究区进行土壤采样,此时研究区地表无冰雪且绿色植被稀少。首先,参考研究区遥感影像设计采样路线,采样点选择在视野开

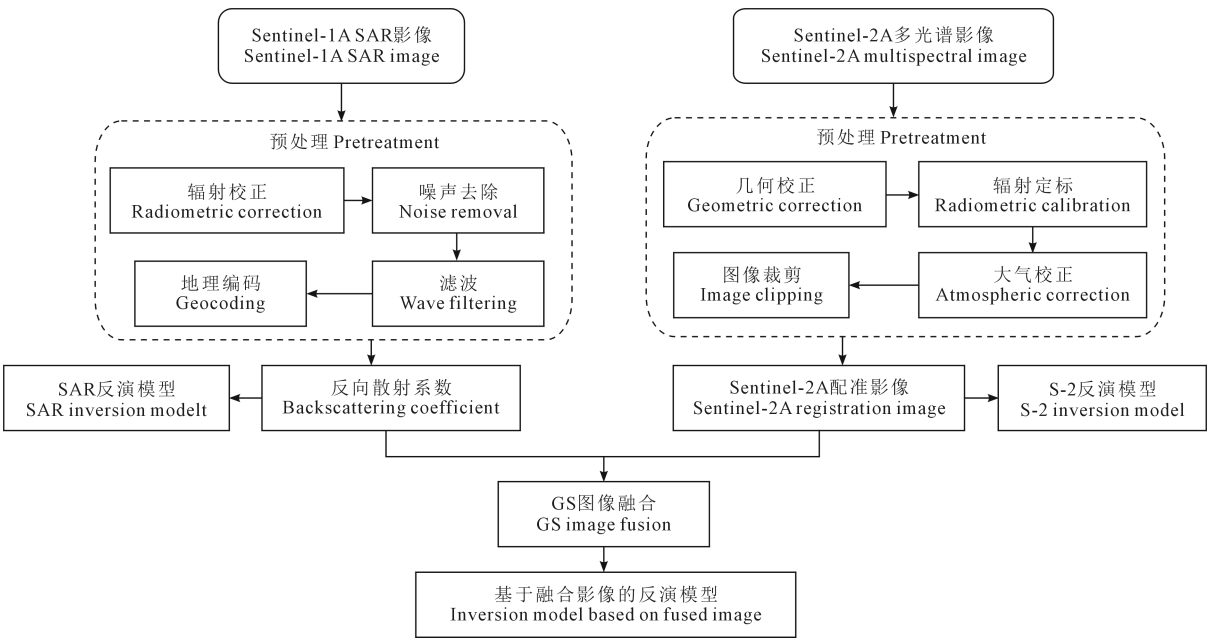



**图 1　技术路线图**

Fig.1　Technology roadmap

阔的裸土区域,且均匀地分布于研究区内,采样点及采样路线如图 2(见 257 页)所示。采样过程采用多点采样法,即:在采样位置 20×20 m 范围内采集 4~5 点表层(0~15 cm)土壤样品,混合后收取约 1 kg 土壤装入采集袋,同时利用 GPS 接收机测定采样位置坐标,共采得土壤样品 54 个。在实验室化验土壤样品的含盐量,为研究区表层土壤含盐量的反演提供数据。本试验将土壤样品随机分组:建模样品 38 个、检验样品 16 个,其含盐量的描述统计见表 1。

### 1.4 遥感数据选择与处理

为了真实反映土壤采样时刻研究区地表信息,选择与采样时间相近的遥感影像数据。其中,选取 Sentinel-1A SAR 影像 2 景,成像时间为 2019 年 5 月 8 日;选取 Sentinel-2A 多光谱遥感影像共 4 景,成像时间为 2019 年 5 月 7 日。Sentinel-1 SAR 影像预处理采用欧空局发布的 SNAP 软件,主要完成 SAR 影像的辐射定标、噪声去除、Lee 滤波、地理编码等,生成具有 WGS 84/UTM 坐标系的后向散射系数影像。利用欧空局发布的 Sen2cor 和 SNAP 两种软件读取 Sentinel-2A 多光谱遥感影像并对其进行影像预处理工作,主要包括辐射定标和大气校正,生成具有 WGS 84/UTM 坐标系的地表反射率影像。Sentinel-2A 多光谱影像的几何校正和裁剪等工作在 ENVI5.3 软件中完成。

**表 1 土壤样品分组及含盐量统计**

Table 1 Grouping of soil samples and statistics of salt content

| 分组 Grouping | 样品个数 Number of samples | | | | 最小值 Minimum /(g·kg$^{-1}$) | 最大值 Maximum /(g·kg$^{-1}$) | 平均值 Mean /(g·kg$^{-1}$) | 标准差 Standard deviation /(g·kg$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 轻度盐碱化 Slight salinization | 中度盐碱化 Moderate salinization | 重度盐碱化 Severe salinization | 盐碱土 Saline-alkali soil | | | | |
| 建模样品 Modeling sample | 12 | 9 | 10 | 7 | 1.16 | 14.47 | 6.63 | 3.05 |
| 检验样品 Test sample | 5 | 4 | 4 | 3 | 1.49 | 13.25 | 6.92 | 2.98 |

注:轻度盐碱化土壤含盐量为 1~3 g·kg$^{-1}$;中度盐碱化土壤含盐量为 3~5 g·kg$^{-1}$;重度盐碱化土壤含盐量为 5~7 g·kg$^{-1}$;盐碱土土壤含盐量大于 7 g·kg$^{-1}$。

Note: The salt content of slightly salinized soil is 1~3 g·kg$^{-1}$. The salt content of moderately salinized soil is 3~5 g·kg$^{-1}$. The salt content of severely salinized soil is 5~7 g·kg$^{-1}$. The salt content of saline-alkali soil is more than 7 g·kg$^{-1}$.

### 1.5 遥感影像融合

本文采用 Gram-Schmidt 变换将 Sentinel-1A SAR 影像与 Sentinel-2A 多光谱遥感影像进行融合处理。GS 变换能够保证影像融合前后波谱信息的一致性,是一种高保真的遥感影像融合方法[11-12]。GS 波段融合表示如下:

$$GS_T(i,j) = B_T(i,j) - \mu_T - \sum_{l=1}^{T-1} \varphi(B_T, GS_l) \times GS_l(i,j) \quad (1)$$

式中,$B$ 表示原始波段,$T$ 表示已转换波段的编号,$\mu_T$ 表示 $T$ 波段的均值,$\varphi(B_T, GS_l)$ 表示高分辨率全色波段的协方差。

$$\mu_T = \frac{\sum_{j=1}^{C}\sum_{i=1}^{R} B_T(i,j)}{C \times R} \quad (2)$$

式中,$C$ 为图像总列数,$R$ 为图像的总行数。

$$\varphi(B_T, GS_l) = \frac{\delta(B_T, GS_l)}{\delta(B_T, GS_l)^2} \quad (3)$$

计算得到平均值 $\mu_T$、方差 $\delta T$ 以及协方差 $\varphi$ 后,按以下公式调整高分图像:

$$\delta_T = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{C}\sum_{i=1}^{R} (B_T(B_T(i,j) - \mu_T))}{C \times R}} \quad (4)$$

最后,利用 Gram - Schmidt 逆变换生成融合图像。融合后影像的反射率表示为:

$$\hat{B}_T(i,j) = GS_T(i,j) + \mu_T + \sum_{l=1}^{T-1} \varphi(B_T, GS_l) \times GS_T(i,j) \quad (5)$$

融合工作主要包括:将预处理后的 SAR 波段作为模拟的全色波段,将预处理后的 Sentinel-2A 影像作为多光谱波段;对全色和多光谱波段进行 GS 变换,其中模拟的全色波段为第一波段,并将 GS 变换后的第一波段替代全色波段;最后,应用 GS 反变换生成融合波段,实现 SAR 与多光谱影像的融合。

## 2 结果与分析

### 2.1 影像的后向散射系数或反射率与土壤含盐量的相关性分析

2.1.1 SAR 影像与土壤含盐量的相关性 参考前人的研究[10,13-14],将 Sentinel-1A SAR 影像后向散

射系数及其波段组合与研究区土壤含盐量进行相关性分析,本文将 Sentinel-1A SAR 影像的 VH、VV 波段后向散射系数进行函数变换及波段组合。波段的函数变换包括 VH、VV 两个波段的倒数、对数、幂、指数、二次方等,波段组合包括 VH 和 VV 两个波段求商、两个波段的平方求商、两个波段的和与两个波段的差求商、两个波段的平方和与平方差求商等。相关性分析结果显示(表 2),Sentinel-1A SAR 影像的 VV 波段后向散射系数与研究区土壤含盐量的相关性较好,相关系数为 $r=0.628$;将两个波段进行函数变换后,VV 波段后向散射系数的二次方与土壤含盐量相关性有较明显的改善,相关系数达到 0.641;将波段进行组合并对波段组合进行函数变换,并未提高与土壤含盐量的相关性。

**表 2　影像的后向散射系数或反射率与土壤含盐量的相关性分析**

Table 2　Correlation analysis between backscattering coefficient or reflectance of image and soil salt content

| Sentinel-1A | | Sentinel-2A | | 融合影像 Fusion image | |
|---|---|---|---|---|---|
| 变量 Variable | 相关性 Relevance | 变量 Variable | 相关性 Relevance | 变量 Variable | 相关性 Relevance |
| VV | 0.628 | $B_5$的反射率 Reflectivity of $B_5$ | 0.696 | $B_2$(VV) | 0.735 |
| VV 对数 Logarithm of VV | 0.601 | $B_1$的幂函数 Power of $B_1$ | 0.608 | $B_1$(VV)的二次方 Quadratic of $B_1$(VV) | 0.780 |
| VV 倒数 Reciprocal of VV | 0.473 | $B_2$的幂函数 Power of $B_2$ | 0.691 | $B_2$(VV)的二次方 Quadratic of $B_2$(VV) | 0.803 |
| VV 二次方 Quadratic of VV | 0.641 | $B_3$的指数 Index of $B_3$ | 0.643 | $B_3$(VV)的对数 Logarithm of $B_3$(VV) | 0.764 |
| VH 幂 Power of VH | 0.611 | $B_4$的二次方 Quadratic of $B_4$ | 0.764 | $B_4$(VV)的幂函数 Power of $B_4$(VV) | 0.755 |
| VH 指数 Index of VH | 0.596 | $B_5$的幂函数 Power of $B_5$ | 0.768 | $B_5$(VV)的二次方 Quadratic of $B_5$(VV) | 0.820 |
| VH 对数 Logarithm of VH | 0.601 | $B_6$的对数 Logarithm of $B_6$ | 0.749 | $B_6$(VV)的倒数 Reciprocal of $B_6$(VV) | 0.771 |
| VV/VH | 0.591 | $B_7$的指数 Index of $B_7$ | 0.735 | $B_7$(VV)的反射率 Reflectivity of $B_7$(VV) | 0.752 |
| $VV^2/VH^2$二次方 Quadratic of $VV^2/VH^2$ | 0.549 | $B_8$的幂函数 Power of $B_8$ | 0.750 | $B_8$(VV)的二次方 Quadratic of $B_8$(VV) | 0.772 |
| (VV+VH)/(VV-VH)对数 Logarithm of (VV+VH)/(VV-VH) | 0.551 | $B_{8A}$的对数 Logarithm of $B_{8A}$ | 0.729 | $B_{8A}$(VV)的指数 Index of $B_{8A}$(VV) | 0.759 |
| $(VV^2+VH^2)/(VV^2-VH^2)$二次方 Quadratic of $(VV^2+VH^2)/(VV^2-VH^2)$ | 0.583 | $B_9$的二次方 Quadratic of $B_9$ | 0.529 | $B_9$(VV)的二次方 Quadratic of $B_9$(VV) | 0.784 |
| | | $B_{10}$的二次方 Quadratic of $B_{10}$ | 0.417 | $B_{10}$(VV)的对数 Logarithm of $B_{10}$(VV) | 0.752 |
| | | 盐分指数$(B_4-B_8)/(B_4+B_8)$ Salinity index $(B_4-B_8)/(B_4+B_8)$ | 0.506 | $B_{11}$(VV)的对数 Logarithm of $B_{11}$(VV) | 0.612 |
| | | 盐分指数 $B_2/B_4$ Salinity index $B_2/B_4$ | −0.663 | $B_i$(VV)盐分指数$(D_4-D_8)/(D_4+D_8)$ $(D_4-D_8)/(D_4+D_8)$ Salinity index of $B_i$(VV) | −0.206 |
| | | 盐分指数$(B_2-B_4)/(B_2+B_4)$ Salinity index $(B_2-B_4)/(B_2+B_4)$ | −0.649 | $B_i$(VV)盐分指数 $D_2/D_4$ $D_2/D_4$ Salinity index of $B_i$(VV) | −0.759 |
| | | 盐分指数$(B_2B_4)/B_3$ Salinity index $(B_2B_4)/B_3$ | 0.822 | $B_i$(VV)盐分指数$(D_2-D_4)/(D_2+D_4)$ $(D_2-D_4)/(D_2+D_4)$ Salinity index of $B_i$(VV) | −0.734 |
| | | 盐分指数 $\sqrt{B_2B_4}$ Salinity index $\sqrt{B_2B_4}$ | 0.762 | $B_i$(VV)盐分指数$(D_2D_4)/D_3$ $(D_2D_4)/D_3$ Salinity index of $B_i$(VV) | 0.889 |
| | | 盐分指数 $\sqrt{B_2^2+B_4^2}$ Salinity index $\sqrt{B_2^2+B_4^2}$ | 0.777 | $B_i$(VV)盐分指数 $\sqrt{D_2D_4}$ $\sqrt{D_2D_4}$ Salinity index of $B_i$(VV) | 0.856 |
| | | | | $B_i$(VV)盐分指数 $\sqrt{D_2^2+D_4^2}$ $\sqrt{D_2^2+D_4^2}$ Salinity index of $B_i$(VV) | 0.852 |

注:表中将 Sentinel-2A 遥感影像的第 $i$ 波段反射率与 Sentinel-1A SAR 影像的 VV 波段融合表示为 $D_i$。

Note: In the table, the $i$-band reflectance of Sentinel-2A remote sensing image and the VV band fusion of Sentinel-1A SAR image are expressed as $D_i$.

2.1.2　Sentinel-2A 影像反射率与土壤含盐量相关性分析　由表 2 可见,Sentinel-2A 遥感影像反射率与研究区土壤含盐量呈正相关性,其中第 5 波段相关性最好,达到了 $r=0.696$;反射率经过适当的函数变换可以改善与土壤含盐量的相关性,其中,反射率的幂函数变换与土壤含盐量的相关性在第 5 波段达到峰值,相关系数为 $r=0.768$,也是与土壤含盐量相关性最好的函数变换形式;第 11、12 两个波段的反射率及其函数变换与研究区土壤含盐量的相关性较低,均未达到显著相关性标准;本文参考前人研究成果引入多种盐分指数,并分析盐分指数与研究区土壤含盐量的相关性。结果显示,盐分指数$(B_2B_4)/$

$B_3$与土壤含盐量相关性较高,达到 $r=0.822$。

2.1.3 融合影像与土壤含盐量相关性分析 将 Sentinel-1A 遥感影像的 VH、VV 两个波段分别与 Sentinel-2A 各个波段进行 GS 融合,并分析融合后各波段、各波段的函数变换及盐分指数变换与土壤含盐量的相关性。相关性分析结果显示,与 VH 波段融合相比,Sentinel-2A 各波段和 Sentinel-1A 的 VV 波段融合后与研究区土壤含盐量的相关性更好(表 2),其中,VV 波段与 Sentinel-2A 第 2 波段融合与土壤含盐量相关系数达到了峰值,为 $r=0.735$;第 12 融合波段与土壤含盐量的相关性较差,未达到显著相关性标准;融合波段的函数变换中,Sentinel-2A 的第 5 波段与 VV 波段融合后,其二次方函数变换与土壤含盐量相关系数最大,达到 0.820;融合波段的盐分指数变换中,$(D_2D_4)/D_3$、$\sqrt{D_2D_4}$、$\sqrt{D_2^2+D_4^2}$ 3 个盐分指数与土壤含盐量的相关性较好,分别达到 0.889、0.856 和 0.852。

## 2.2 反演模型的建立

在 54 个土壤样本中随机选取 38 个作为建模样本,在 SPSS 软件中以建模样本土壤含盐量为因变量、遥感影像的反射率(反射率的变换)为自变量,利用回归分析的方法建立研究区土壤含盐量的反演模型(表 3)。建模结果显示,以 Sentinel-1A SAR 影像 VV 波段的后向散射系数建立的研究区土壤含盐量反演模型 $Y=13.937X+4.255$,模型决定系数为 0.405,均方根误差 *RMSE* 为 2.626 g·kg$^{-1}$;以 VV 波段建立的曲线模型 $Y=19.763X-6.224X^2+3.285$,模型精度有所改善,模型决定系数为 0.418;以 Sentinel-2A 影像建立的研究区土壤含盐量反演模型中,以盐分指数 $(B_2B_4)/B_3$ 建立的幂函数模型精度最好,模型的决定系数 $R^2$ 达到 0.675,均方根误差为 2.286 g·kg$^{-1}$;SAR 影像与多光谱影像经过 GS 融合后建立的土壤含盐量反演模型,模型精度被显著改善。其中,将 SAR 影像的 VV 波段分别与 Sentinel-2A 影像的第 2、第 3、第 4 波段融合后,以盐分指数 $(D_2D_4)/D_3$ 建立的曲线模型 $Y=86.260X-66.206X^2-5.312$ 精度最好,模型决定系数 $R^2$ 达到 0.791,均方根误差为 1.884 g·kg$^{-1}$。

**表 3 土壤含盐量反演模型**

Table 3 Inversion model of soil salt content

| 数据类型 Data type | 变量 Variable | 反演模型 Inversion model | $R^2$ | *RMSE*/(g·kg$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|
| Sentinel-1A | VV | $Y=13.937X+4.255$ | 0.405 | 2.626 |
| | $VV^2$ | $Y=19.763X-6.224X^2+3.285$ | 0.418 | 2.681 |
| | $(VV^2+VH^2)/(VV^2-VH^2)$ | $Y=-15.651X+16.176X^2+10.553$ | 0.341 | 2.863 |
| Sentinel-2A | $B_5$ | $Y=-5.113X+52.771$ | 0.485 | 2.584 |
| | $B_5$的幂函数 Power of $B_5$ | $Y=82.408X^{1.729}$ | 0.590 | 2.427 |
| | $(B_2B_4)/B_3$ | $Y=108.55X^{1.817}$ | 0.675 | 2.286 |
| 融合影像 Fusion image | $B_2$(VV) | $Y=71.448X-2.903$ | 0.586 | 2.454 |
| | $B_5$(VV)的二次方 Quadratic of $B_5$(VV) | $Y=60.145X-24.904X^2-2.583$ | 0.672 | 2.293 |
| | $B_i$(VV)盐分指数$(D_2D_4)/D_3$ $(D_2D_4)/D_3$ Salinity index of $B_i$(VV) | $Y=86.260X-66.206X^2-5.312$ | 0.791 | 1.884 |

## 2.3 模型精度检验

将除去建模样本而剩余的 16 个土壤样本作为模型检验样本,参考建模结果,选择以 Sentinel-1A SAR 影像 VV 波段与 Sentinel-2A 第 2、3、4 波段融合建立的盐分指数 $(D_2D_4)/D_3$ 为因变量,建立的土壤含盐量反演模型 $Y=86.260X-66.206X^2-5.312$,反演检验样本土壤含盐量,以式(6)计算检验样本土壤含盐量的相对误差,相对误差如图 3。

$$\delta=(L_{测}-L_{反})/L_{测} \quad (6)$$

式中,$\delta$ 为相对误差,$L_{测}$ 为检验样本土壤含盐量的实验室测试值,$L_{反}$ 为检验样本土壤含盐量的反演值。

检验样本土壤含盐量的相对误差统计结果显

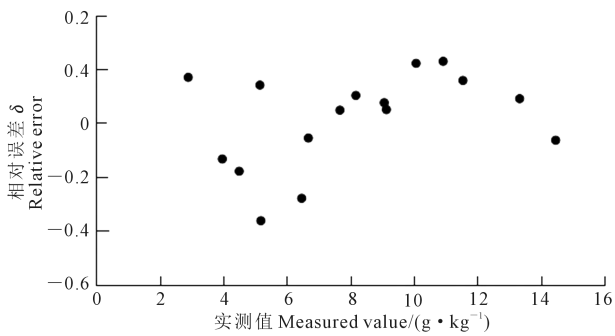



**图 3 相对误差散点图**

Fig.3 Relative error scatter diagram

示,16 个检验样本含盐量实验室测试值与反演值最大相对误差为-36.49%,最小相对误差为 4.76%,其中,共有 12 个检验样本的相对误差在-20%~20%区间,占总检验样本的 75%,表明土壤含盐量反演模型 $Y=86.260X-66.206X^2-5.312$ 具有较高的反演精度。

### 2.4　研究区土壤含盐量制图

将 Sentinel-1A 的 VV 极化波段与 Sentinel-2A 第 2、3、4 波段融合并引入盐分指数 $(D_2D_4)/D_3$ 建立的白城市土壤含盐量反演模型 $Y=86.260X-66.206X^2-5.312$,反演研究区的土壤含盐量,见图 4。制图结果显示,研究区西南部、南部及北部地区土壤盐分含量较高,局部地区土壤含盐量甚至高于 5 g·kg$^{-1}$,研究区中部、东部以及西北部地区土壤含盐量普遍低于 1 g·kg$^{-1}$。

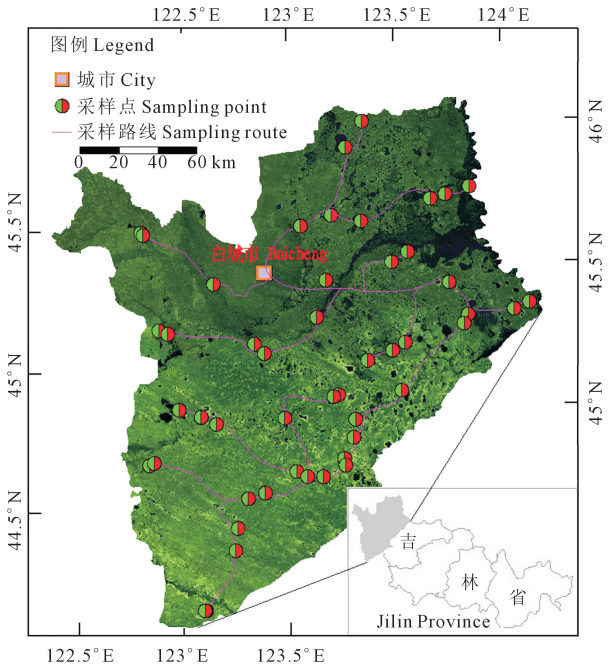
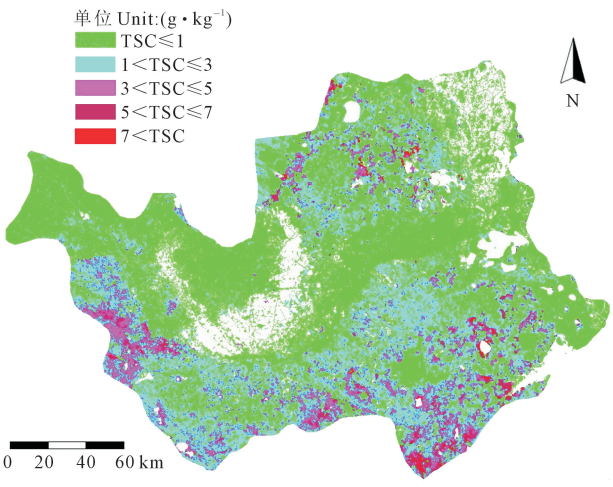



**图 2　采样路线图**

Fig.2　Sampling roadmap




TSC:全盐含量 Total salt content

**图 4　土壤含盐量反演结果图**

Fig.4　Inversion results of soil salt content

## 3　讨　论

本文以 Sentinel-1A、Sentinel-2A 主动与被动遥感影像为数据源,以我国典型苏打盐碱土区——白城市为研究对象,结合研究区调查、土壤采样化验数据反演了白城市土壤盐分含量。刘全明等[13-14]研究表明,土壤中盐分含量的升高会影响土壤的介电常数以及表层土壤的后向散射系数,为利用雷达遥感监测土壤含盐量变化提供了可能。本文将 Sentinel-1A 遥感影像 VH、VV 波段后向散射系数与研究区土壤含盐量进行相关性分析,分析结果显示 VH、VV 波段的后向散射系数与土壤含盐量呈正相关,且 VV 波段的相关性较好,相关系数达到 0.628,其显著性 $P<0.001$,表明在超过 99%的置信区间内两者显著相关。将 SAR 影像与多波段影像融合后,融合波段与土壤含盐量的相关性较 SAR 影像及多波段影像均有显著提升。本文研究结果表明,Sentinel-2A 各波段反射率与土壤含盐量相关系数在第 5 波段达到峰值,为 $r=0.696$,而 SAR 影像与 Sentinel-2A 的第 2 波段融合后与土壤含盐量相关系数达到 0.753。将 SAR 影像后向散射系数及多波段反射率进行适当的数学变换后与土壤含盐量的相关性有不同程度的改善,其中,将 VV 波段后向散射系数进行二次方变换后与土壤含盐量相关系数由 0.628 提升至 0.641;将多波段影像第 5 波段进行幂函数变换后,与土壤含盐量的相关系数由 0.696 提升至 0.768;将融合波段进行二次方变换后与土壤含盐量的相关系数由 0.735 提升至 0.820。前人研究发现[15-17],遥感影像的可见光与近红外波段对含盐土壤较敏感,将影像反射率与土壤含盐量相关联构成适当的盐分指数,可以有效地监测表层裸土含盐量。本文引入 $(B_4-B_8)/(B_4+B_8)$、$(B_2B_4)/B_3$ 等多种盐分指数,与土壤含盐量进行相关性分析,结果显示:利用 Sentinel-2A 第 2、3、4 波段建立的盐分指数 $(B_2B_4)/B_3$ 与研究区土壤含盐量相关系数达到 $r=0.822$,SAR 影像 VV 波段与 Sentinel-2A 第 2、3、4 波段融合建立的 $(D_2D_4)/D_3$ 盐分指数与土壤含盐量相关系数达到 $r=0.889$;庞治国等[18-19]对覆盖白城市的遥感影像进行人机交互式解译提取土地盐碱化信息,并对盐碱化土地面积进行统计分析时发现,盐碱化土壤主要分布于白城市南部的通榆县、北部的镇赉县以及东部的大安市,在对研究区进行

调研、土壤采样时发现,白城市东部、南部及北部地区中小型湖泊众多,受气候及人为影响,湖泊周围土地盐碱化严重。

本文以融合波段盐分指数$(D_2D_4)/D_3$建立的土壤含盐量反演模型$Y=86.260X-66.206X^2-5.312$,反演白城市表层裸土含盐量,获得了较好的反演效果,究其原因:(1)本文选取的遥感影像与土壤采样时间同步,能够真实反映地表地物信息;(2)在遥感影像获取时刻及实地调查时刻、土壤采样时刻,研究区地表无植被及冰雪覆盖;(3)采用Gram-Schmidt(GS)变换将SAR影像与多光谱影像进行融合,避免了传统融合方法造成个别波段信息过量集中及光谱响应范围不一致等问题,较好保持了影像的纹理和光谱信息,提升了融合影像光谱信息的丰富度;(4)引入合适的盐分指数改善了遥感影像对土壤中盐分的敏感度。

然而,本试验未考虑研究区土壤中有机质及含水量对遥感影像光谱信息的影响,在今后的实践中将予以研究。

## 4 结 论

本文利用Sentinel-1A的SAR影像、Sentinel-2A多光谱影像及两者的融合影像反演白城市裸土含盐量,获得了以下结论:

(1)Sentinel-1A遥感影像的VH、VV波段后向散射系数与白城市表层土壤含盐量呈显著正相关性,表明Sentinel-1A影像可作为研究区土壤盐碱化监测的数据源。

(2)Gram-Schmidt(GS)影像融合方法适用于Sentinel-1A雷达影像与Sentinel-2A多光谱影像融合,融合后的遥感影像与研究区土壤含盐量的相关性较融合前得到明显改善。

(3)引入合适的盐分指数可以有效提升Sentinel-2A多光谱影像及Sentinel-1/2A融合影像与研究区土壤含盐量的相关性,利用融合影像的第2、3、4波段建立的盐分指数$(D_2D_4)/D_3$与研究土壤含盐量相关系数达到0.889,表明利用Sentinel-1A SAR影像与Sentinel-2A多光谱影像进行融合是一种监测土壤含盐量的有效方法。

(4)反演结果显示,白城市西部、南部的中小型湖泊周围土壤盐碱化较严重,与实地调研结果相吻合。

**参 考 文 献:**


[1] 雷磊,塔西甫拉提·特依拜,丁建丽,等.实测高光谱和HSI影像的区域土壤盐渍化遥感监测研究[J].光谱学与光谱分析,2014,34(7):1948-1953.
LEI L, TASIPRATTI TEYIBAI, DING J L, et al. Study on the soil salinization monitoring based on measured hyperspectral and HSI data [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(7): 1948-1953.

[2] 张成雯,唐家奎,于新菊,等.黄河三角洲土壤含盐量定量遥感反演[J].中国科学院研究生院学报,2013,30(2):220-227.
ZHANG C W, TANG J K, YU X J, et al. Quantitative retrieval of soil salt content based on remote sensing in the Yellow River delta[J]. Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2013, 30(2): 220-227.

[3] 张雅莉,塔西甫拉提·特依拜,阿尔达克·克里木,等.艾比湖湿地干湿季土壤水分和土壤盐分空间异质性研究[J].中国农村水利水电,2017,(1):37-42.
ZHANG Y L, TASIPURATI TEYIBAI, ALDAK KERIM, et al. Monitoring heterogeneity of soil salinity in dry and wet seasons in Xinjiang Ebinur Lake Wetland[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017, (1): 37-42.

[4] 王爽,丁建丽,王璐,等.基于地表光谱建模的区域土壤盐渍化遥感监测研究[J].干旱区地理,2016,39(1):190-198.
WANG S, DING J L, WANG L, et al. Remote sensing monitoring of soil salinization based on surface spectral modeling[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(1): 190-198.

[5] 孙媛,贾萍萍,尚天浩,等.基于地表高光谱与OLI影像的土壤含盐量和pH值估测[J].干旱地区农业研究,2021,39(1):164-174.
SUN Y, JIA P P, SHANG T H, et al. Estimation of soil salinity and pH value based on surface hyperspectral and OLI images[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(1): 164-174.

[6] 李鹏,黎达辉,李振洪,等.黄河三角洲地区GF-3雷达数据与Sentinel-2多光谱数据湿地协同分类研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2019,44(11):1641-1649.
LI P, LI D H, LI Z H, et al. Wetland classification through integration of GF-3 SAR and sentinel-2B multispectral data over the Yellow River Delta[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(11): 1641-1649.

[7] 罗家顺,邱建秀,赵天杰,等.基于Sentinel-1数据的黑河中游土壤水分反演[J].遥感技术与应用,2020,35(1):23-32.
LUO J S, QIU J X, ZHAO T J, et al. Sentinel-1 based soil moisture estimation in middle reaches of Heihe River Basin[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(1): 23-32.

[8] 王平,周忠发,殷超.基于全极化SAR与多光谱的喀斯特山区农村林地提取[J].中国农业资源与区划,2017,38(7):41-50.
WANG P, ZHOU Z F, YIN C. Rural woodland extraction based on full polarization SAR and multispectral in Karst mountain areas [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2017, 38(7): 41-50.

[9] 童莹萍,冯伟,全英汇,等.基于GF-3与Sentinel-2A图像融合的高精度水体提取算法[J].无线电工程,2021,51(8):750-753.
TONG Y P, FENG W, QUAN Y H, et al. High precision water extraction algorithm based on GF-3 and Sentinel-2A image fusion[J]. Radio Engineering, 2021, 51(8): 750-753.

[10] 赵建辉,张蓓,李宁,等.基于Sentinel-1/2遥感数据的冬小麦覆盖地表土壤水分协同反演[J].电子与信息学报,2021,43(3):692-699.
ZHAO J H, ZHANG B, LI N, et al. Cooperative inversion of winter

wheat covered surface soil moisture based on Sentinel-1/2 remote sensing data[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(3): 692-699.

[11] 李存军,刘良云,王纪华,等.两种高保真遥感影像融合方法比较[J].中国图象图形学报,2004,9(11):1376-1385.
LI C J, LIU L Y, WANG J H, et al. Comparison of two methods of fusing remote sensing images with fidelity of spectral information[J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(11): 1376-1385.

[12] 于海洋,闫柏琨,甘甫平,等.基于 Gram Schmidt 变换的高光谱遥感图像改进融合方法[J].地理与地理信息科学,2007,23(5):39-42.
YU H Y, YAN B K, GAN F P, et al. Hyperspectral image fusion by an enhanced gram schmidt spectral transformation[J]. Geography and Geo-Information Science, 2007, 23(5): 39-42.

[13] 刘全明.含盐土壤盐渍化雷达反演模拟研究[J].测绘通报,2014,(9):43-46.
LIU Q M. On radar inversion and simulation of salty soil salinization [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014,(9): 43-46.

[14] 马驰.基于 Sentinel-1 双极化雷达影像的土壤含盐量反演[J].农业工程学报,2018,34(2):153-158.
MA C. Quantitative retrieval of soil salt content based on Sentinel-1 dual polarization radar image[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(2): 153-158.

[15] 吴霞,王长军,樊丽琴,等.基于多光谱遥感的盐渍化评价指数对宁夏银北灌区土壤盐度预测的适用性分析[J].国土资源遥感,2021,33(2):124-133.
WU X, WANG C J, FAN L Q, et al. An applicability analysis of salinization evaluation index based on multispectral remote sensing to soil salinity prediction in Yinbei irrigation area of Ningxia [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2021, 33(2): 124-133.

[16] 王雪梅,周晓红.渭干河-库车河三角洲绿洲棉田土壤盐分估算及遥感反演[J].干旱地区农业研究,2018,36(6):250-254,262.
WANG X M, ZHOU X H. Estimation and inversion modeling of salinity of cotton field soil using remote sensing in the Delta Oasis of Weigan and Kuqa Rivers [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(6): 250-254, 262.

[17] 王飞,丁建丽,魏阳,等.基于 Landsat 系列数据的盐分指数和植被指数对土壤盐度变异性的响应分析——以新疆天山南北典型绿洲为例[J].生态学报,2017,37(15):5007-5022.
WANG F, DING J L, WEI Y, et al. Sensitivity analysis of soil salinity and vegetation indices to detect soil salinity variation by using Landsat series images: applications in different oases in Xinjiang, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(15): 5007-5022.

[18] 庞治国,李纪人,李取生.吉林西部盐碱化土地空间变化及防治措施[J].国土资源遥感,2004,(2):56-60.
PANG Z G, LI J R, LI Q S. Spatial variation of saline-alkalized land in western Jilin Province and countermeasures for its prevention and treatment[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2004,(2): 56-60.

[19] 陈凤臻,姜琦刚,程彬,等.基于遥感技术的松辽平原盐渍化动态研究[J].生态环境,2008,17(5):1921-1925.
CHEN F Z, JIANG Q G, CHENG B, et al. Dynamic changes of soil salinization in Songliao Plain based on RS technology [J]. Ecology and Environment, 2008, 17(5): 1921-1925.

(上接第 229 页)

[30] 杨林,陈亚梅,和润莲,等.高山森林土壤微生物群落结构和功能对模拟增温的响应[J].应用生态学报,2016,27(9):2855-2863.
YANG L, CHEN Y M, HE R L, et al. Responses of soil microbial community structure and function to simulated warming in alpine forest[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(9): 2855-2863.

[31] 郭天财,宋晓,马冬云,等.氮素营养水平对小麦根际微生物及土壤酶活性的影响[J].水土保持学报,2006,20(3):129-131,140.
GUO T C, SONG X, MA D Y, et al. Effect of nitrogen fertilizer on soil enzymatic activity and rhizosphere microorganisms of wheat[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(3): 129-131, 140.

[32] 李明,马飞,张俊华.种稻年限对盐渍化土壤理化性质和细菌群落多样性的影响[J].干旱地区农业研究,2021,39(4):194-202.
LI M, MA F, ZHANG J H. Effects of rice planting years on physico-chemical properties and bacterial community structure in saline-alkali soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(4): 194-202.

[33] 郑顺安,薛颖昊,李晓华,等.山东寿光设施菜地土壤-农产品邻苯二甲酸酯(PAEs)污染特征调查[J].农业环境科学学报,2016,35(3):492-499.
ZHENG S A, XUE Y H, LI X H, et al. Phthalate acid esters(PAEs) pollution in soils and agricultural products of vegetable greenhouses in Shouguang City, Shandong Province[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(3): 492-499.

[34] 董合干,刘彤,李勇冠,等.新疆棉田地膜残留对棉花产量及土壤理化性质的影响[J].农业工程学报,2013,29(8):91-99.
DONG H G, LIU T, LI Y G, et al. Effects of plastic film residue on cotton yield and soil physical and chemical properties in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(8): 91-99.

[35] 刘岳燕.水分条件与水稻土壤微生物生物量、活性及多样性的关系研究[D].杭州:浙江大学,2009.
LIU Y Y. Relationship between soil moisture regime and microbial biomass, activity, diversity in paddy soils[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.