

渭干河—库车河三角洲绿洲棉田土壤 盐分估算及遥感反演

王雪梅^{1,2}, 周晓红¹

(1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054;

2. 新疆维吾尔自治区新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要: 基于研究区的野外采样数据与 Landsat 8 遥感影像提取的增强型植被指数, 构建渭干河—库车河三角洲绿洲棉田土壤盐分估算模型, 并对土壤盐分的空间分布格局进行预测。结果表明: (1) 由土壤含盐量与增强型归一化植被指数 (ENDVI) 构建的线性回归模型 ($y = -56.494x + 22.687$) 拟合效果最好 ($R^2 = 0.886$, $RMSE = 0.907$)。 (2) 通过选取的 82 个采样点, 依据最佳遥感反演模型, 预测出研究区土壤含盐量在 $9.33 \sim 26.99 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间变化, 平均值为 $17.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 标准差为 $2.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 预测结果与土壤盐分的实测值较为一致。 (3) 利用地统计分析方法制作研究区棉田土壤盐分的空间分布图, 分析可知土壤盐分从绿洲内部向外围呈逐渐增加的趋势。

关键词: 棉田; 土壤盐分; 增强型归一化植被指数; 遥感反演; 渭干河—库车河三角洲绿洲

中图分类号: S156.4⁺1 **文献标志码:** A

Estimation and inversion modeling of salinity of cotton field soil using remote sensing in the Delta Oasis of Weigan and Kuqa Rivers

WANG Xue-mei^{1, 2}, ZHOU Xiao-hong¹

(1. College of Geography Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang 830054;

2. Xinjiang Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Urumqi, Xinjiang 830054)

Abstract: Based on data from the field sampling and the enhanced vegetation index from Landsat 8 remote sensing images, we tried to construct the salinity inversion estimation model of cotton field soil in the Delta Oasis of Weigan and Kuqa Rivers. Also, the model was used to predict the spatial distribution pattern of soil salinity in the region. The results showed that: (1) By using soil measured salinity and Enhanced Normalized Difference Vegetation Index (ENDVI), a linear model, $y = -56.494x + 22.687$, was constructed with a R^2 of 0.886 and $RMSE$ of 0.907. (2) The predicted salinity by the inversion model based on the remote sensing data varied from 9.33 to 26.99 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ with an average value of 17.42 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and a standard deviation of 2.30 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$. Compared the data from the selected 82 sampling points with the predicted results, the predicted results of soil salinity were consistent with the measured results. (3) A spatial distribution map of soil salinity of cotton field in the study area was developed by using the method of geo-statistical analysis. The analysis demonstrated that soil salinity was rising gradually from the interior to the periphery of the oasis.

Keywords: cotton field; soil salinity; enhanced normalized vegetation index; remote sensing inversion; the Delta Oasis of Weigan and Kuqa Rivers

在干旱和半干旱区, 土壤盐分离子随着水分向上聚集到地表并产生积累, 进而形成土壤盐渍化^[1-2]。作为干旱农业区主要的土地荒漠化问题,

土壤盐渍化造成了区域性的土壤肥力下降、土壤板结, 同时还破坏了水土资源和地表生态环境, 造成了农业生产损失严重, 经济产能下降^[3]。目前, 许

多国家已经将土壤盐渍化问题纳入到国家未来的发展规划当中,并且已经成为全球变化研究框架下的重要研究内容^[4]。而中国的盐渍土比例明显高于世界平均水平,约有盐渍土 0.17 亿 hm^2 ,近 1/3 的地区都存在土壤盐渍化问题^[5]。作为土壤盐渍化大区,新疆地处亚欧大陆中心,远离海洋,干旱的气候条件造就了新疆的土壤盐渍化问题十分普遍,盐渍土种类较多。同时,作为重要的商品棉基地,新疆的盐渍化土壤严重影响着该区棉花的产量和质量。

土壤盐渍化在某种程度上会使植被状况发生改变,植被指数的变化可以预测土壤盐渍化的程度和发展趋势。因而,根据植被指数等参量反演土壤盐分含量已成为判别土壤盐渍化程度的重要方法之一^[6-9]。已有众多学者进行了类似研究,如姚远等^[10]利用 Landsat TM 7 的植被指数和电磁感应技术对塔里木盆地北缘绿洲进行土壤盐分线性回归建模和空间分布反演;Bouaziz 等^[11]基于 MODIS 遥感影像提取出了多种植被指数,可反映巴西东北部土壤盐渍化问题,并建立了 LSU 模型用于评价半干旱区的土壤盐渍化。然而研究表明,虽然通过提取遥感影像的归一化植被指数、比值植被指数和差值植被指数等传统植被指数可以监测土壤盐渍化信息,但识别准确度仍然较低^[12]。而增强型植被指数是一个优化的植被指数,不仅提高了对高生物量区域的敏感性,而且通过对冠层物理参数的提取和大气效应减少改进了植被监测能力^[13]。王飞等人^[14]的研究进一步表明,增强型植被指数对土壤盐度具有较强的敏感性,用增强型植被指数可定量评估新疆典型绿洲的土壤盐度状况。因此,本研究在传统的植被指数中引入短红外波段得到增强型植被指数,并以渭干河—库车河三角洲绿洲棉田土壤为研究对象,提取采样点土壤盐分含量和获取该地区的同时期的遥感影像,利用该采样点的增强型植被指数反演出该地区棉田土壤盐分的空间分布状况。

1 研究区概况

渭干河—库车河三角洲绿洲是个典型而完整的扇形平原绿洲,其北部是峻峭的天山山脉,海拔介于 3 000~5 000 m 之间,是渭干河—库车河三角洲绿洲的重要水源地;中部是残丘和低山,它们主要以秋里塔格山为主,海拔介于 1 500~2 000 m 之间,东西走向;南部是山前平原区,库车、沙雅和新和 3 个县都属于其管辖范围。该研究区属于温带大陆性极端干旱气候,降水稀少,夏季炎热、冬季寒

冷,年平均气温为 10.7℃,日照时数为 2 888.7 h,全年无霜期为 209 d,年平均降水量介于 51.0~68.1 mm 之间,其中,沙雅县的降水量最低,库车县的降水量最高,年平均蒸发量介于 1 195.0~1 506.0 mm 之间,蒸降比从北向南逐渐增大。在该区北部的高山地带常年存在的冰山积雪,是该区主要灌溉水源渭干河和库车河的发源地,除此之外该区还有少量的水源来自塔里木河和地下泉水。由于研究区地下土层是由较细的颗粒物所构成的,且透水性较差和地下水位较高,因此,在该区土壤盐渍化非常普遍,在古河道、河漫滩、泉水溢出带等地下水浅埋区,分布着大面积的盐渍化土和盐土,严重影响了该区绿洲农业的发展。

2 数据来源与研究方法

2.1 土壤数据采集与处理

根据研究区气候特征、棉田生长情况和土壤盐分的季节性变化特征,在 2013 年 10 月上旬进行了野外调查与观测,这一时期研究区气温较高,蒸发强烈、棉花生长成熟,土壤盐分向土壤表层聚集。由于棉花的生长状况不同,选择不同生长状况的棉田作为采样点,且均匀分布在整個研究区,使土壤采样点更具代表性。现利用 GPS 测量每一个采样点的经纬度并做记录,在 0~20 cm 土层深度进行取样,共采集 46 个土壤样本(见图 1)。将采集的土壤样本进行编号入袋,经实验室自然风干、研磨过筛,参照中国科学院南京土壤研究所编写的《土壤理化性质分析》,采用土水比 1:5 浸提土壤样品测定土壤含盐量^[15]。

2.2 遥感影像处理

选择与采样时间相对应的 2013 年 10 月 13 日的由陆地成像仪(OLI)获取的 Landsat 8 遥感影像。利用 ENVI5.1 软件,首先对遥感影像进行几何

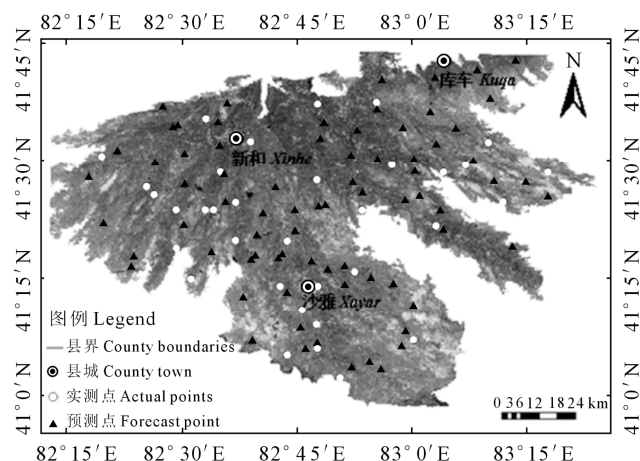


图1 样点空间分布图

Fig.1 The spatial distribution map of sampling points

精校正、辐射定标和 Flash 大气校正;然后进行影像的投影变换、配准和裁剪等预处理,获得研究区影像图。最后利用 ArcGIS 10.3 软件从研究区遥感影像中提取出采样点所对应的光谱反射数据,从而进行建模和反演土壤盐分的空间分布。

2.2.1 植被指数计算 在传统植被指数的基础上,对各种植被指数进行扩展^[16],公式内加入短红外波段的反射率,可得到 4 种增强型植被指数,分别为:增强型归一化植被指数(ENDVI)、增强型比值植被指数(ERVI)、增强型差值植被指数(EDVI)和增强型植被指数(EVI),计算公式如表 1 所示。首先在 ENVI 5.1 软件中提取各采样点的各波段的反射率,利用公式计算 4 种增强型植被指数,然后利用 SPSS 22.0 软件对增强型植被指数与土壤含盐量进行相关分析。

2.2.2 土壤盐分反演模型构建 将研究区土壤样本进行分组,46 个实测数据随机分为两组,一组 34 个用于模型构建,另一组 12 个用于验证,然后分别用 4 种增强型植被指数与土壤含盐量进行线性回归分析,构建土壤盐分含量的遥感反演模型。通过对不同模型进行对比分析,选择最佳反演模型,并进一步用验证样本对所选模型进行精度检验。

2.2.3 土壤盐分空间分布遥感反演 首先在渭干河—库车河三角洲绿洲的不同棉田分布区均匀选取 82 个样点作为预测点(其空间分布见图 1),并记录其经纬度和求出样点的增强型归一化植被指数(ENDVI)。根据最佳反演模型求出其预测点的土壤含盐量,并检验土壤含盐量是否满足正态分布。根据棉田土壤盐分的实际观测值与期望正态值的累积概率生成的 P-P 散点图的分布来看,图中散点基本围绕对角线分布,说明土壤含盐量近似服从正态分布。利用 ArcGIS10.3 对土壤含盐量进行地

表 1 植被指数计算公式

Table 1 Computation formula for the vegetation indexes	
植被指数 Vegetation index	计算公式 Computation formula
增强型归一化植被指数 ENDVI	$(b5+b7-b4)/(b5+b7+b4)$
增强型比值植被指数 ERVI	$(b5+b7)/b4$
增强型差值植被指数 EDVI	$b5+b6-b4$
增强型植被指数 EVI	$2.5 \times (b5+b6-b4) / (b5+b6+6 \times b4-7.5 \times b2+1)$

注:表中 b2、b4、b5、b6 和 b7 为 Landsat8 遥感影像的各个波段,其中 b2、b4 为可见光波段,b5 为近红外波段,b6、b7 为短波红外。
Note: b2、b4、b5、b6, and b7 are all bands of Landsat 8 remote sensing images in the table. Among them, b2 and b4 are visible bands, b5 is near-infrared bands, and b6 and b7 are short-wave infrared bands.

统计学普通克里格插值分析,最终得到基于遥感反演模型的土壤盐分空间分布图。

3 结果分析

3.1 植被指数分析

利用 SPSS 22.0 软件分别对 4 种增强型植被指数与土壤含盐量进行相关分析(表 2),可知 4 种增强型植被指数与土壤含盐量均有极显著的相关性($P<0.001$),比较它们的相关系数,可知增强型归一化植被指数(ENDVI)与研究区采样点土壤含盐量的相关系数($R=-0.869$)的绝对值最大,因而它与土壤盐分的相关性最强,为极显著的负相关关系($P<0.001$);增强型比值植被指数(ERVI)和增强型差值植被指数(EDVI)与土壤含盐量都具有极显著的负相关性($P<0.001$);增强型植被指数(EVI)与土壤含盐量为极显著的正相关关系($P<0.001$),相关系数为 0.608。

3.2 土壤盐分反演模型构建与分析

通过线性回归分析方法构建研究区棉田土壤盐分含量的遥感反演模型(图 2),可分别得到 4 种增强型植被指数与土壤含盐量的线性回归模型,对比 4 种线性关系可知,ENDVI 与土壤含盐量的拟合指数最大($R^2=0.824$),通过进一步分析 4 种植被指数与土壤含盐量之间的相关系数,可得知增强型归一化植被指数(ENDVI)与土壤含盐量的相关关系最为密切。由此可说明,增强型归一化植被指数(ENDVI)与土壤含盐量线性拟合效果最好,通过此模型,可得到较好的土壤盐分遥感反演结果,则增强型归一化植被指数(ENDVI)与土壤含盐量所建立的线性回归模型就是最优回归模型,其线性回归模型如下所示:

$$y = -56.494x + 22.687 \tag{1}$$

式中, y 表示土壤含盐量; x 为增强型植被指数(ENDVI)。

表 2 植被指数与土壤盐分的相关系数

Table 2 The correlation coefficients between vegetation indexes and soil salinity		
植被指数 Vegetation index	相关系数 Correlation coefficient	显著水平(P) Significance level
增强型归一化植被指数 ENDVI	-0.869	<0.001
增强型比值植被指数 ERVI	-0.835	<0.001
增强型差值植被指数 EDVI	-0.825	<0.001
增强型植被指数 EVI	0.608	<0.001

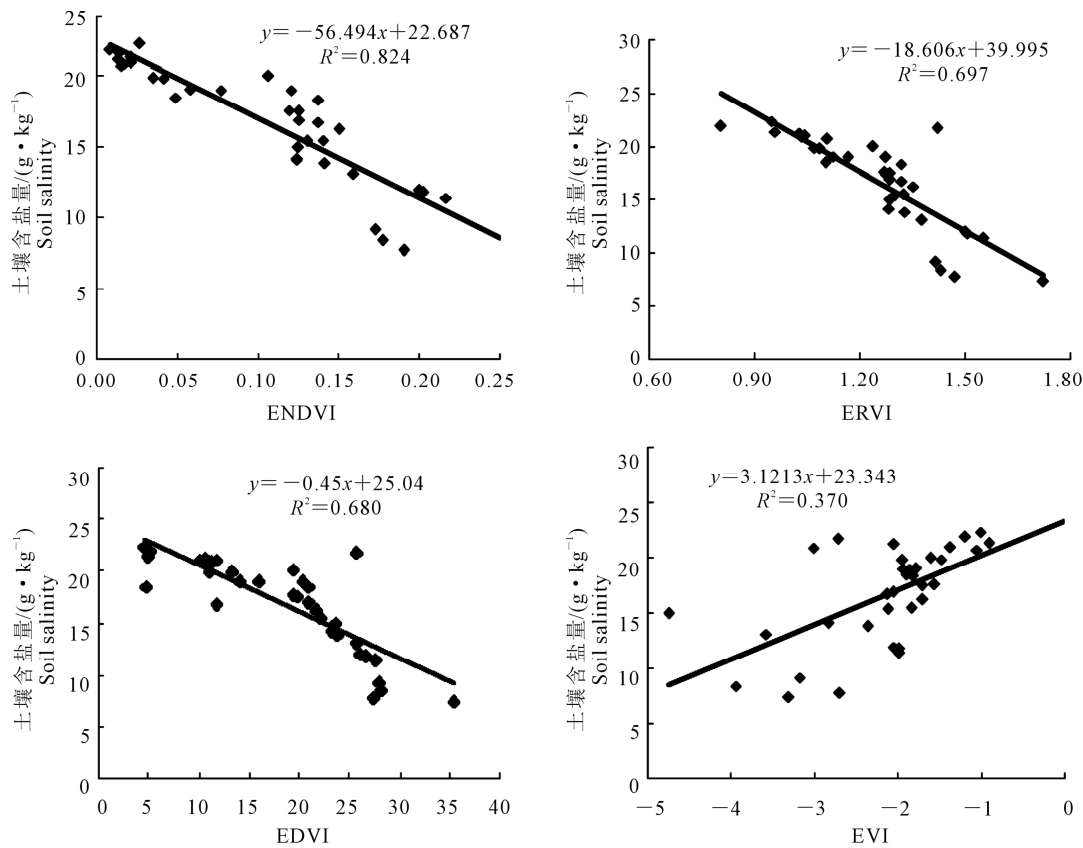


图 2 土壤含盐量反演模型

Fig.2 Inversion models of soil salinity

3.3 土壤盐分反演模型验证

通过在研究区随机选取的 12 个验证采样点,利用所建立的最优线性回归模型,对土壤含盐量进行预测。比较分析 12 个验证采样点的反演结果和实测数据,相对误差均小于 30%。同时,根据土壤含盐量的实测值和预测值绘制的散点图分析(图 3),发现预测值与实测值基本上都在直线的两侧紧密分布。拟合指数($R^2=0.886$)和均方根误差($RSME=0.970$)均表现出较好的线性关系,这说明模型的拟合效果较为理想。进一步对提取出的 82 个样点进行土壤盐分的预测,结果显示:研究区 82 个预测点的土壤含盐量介于 $9.33\sim26.99\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 $17.20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,标准差为 $3.90\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,与研究区样本实测值的统计结果较为一致。

3.4 土壤盐分空间分布

3.4.1 土壤盐分正态分布检验 利用 SPSS 22.0 统计分析软件中的 P-P 图分析功能,对研究区 82 个样点反演的土壤含盐量进行正态分布性检验。从检验结果可看出(图 4),研究区土壤含盐量观测值的累积概率与正态分布期望值的累积概率构成的散点集中分布在对角线周围,因此可认为观测变量近似服从正态分布,这表明利用增强型归一化植被指数(ENDVI)反演的土壤含盐量满足地统计学分析的要求,可根据这 82 个采样点的土壤含盐量进行空间插值分析。

表 3 土壤含盐量预测误差

Table 3 Prediction errors of soil salinity

样点编号 Sample number	土壤含盐量实测值 Measured soil salinity /(g·kg ⁻¹)	土壤含盐量预测值 Predicted soil salinity /(g·kg ⁻¹)	相对误差 Relative error/%
1	22.34	22.23	-0.49
2	7.77	9.74	25.35
3	21.24	21.50	1.22
4	9.19	10.47	13.93
5	18.75	17.41	-7.15
6	19.82	21.82	10.09
7	18.99	19.61	3.26
8	11.42	14.70	28.72
9	17.58	19.92	13.31
10	16.89	15.62	-7.52
11	13.12	15.64	19.21
12	15.41	14.21	-7.79

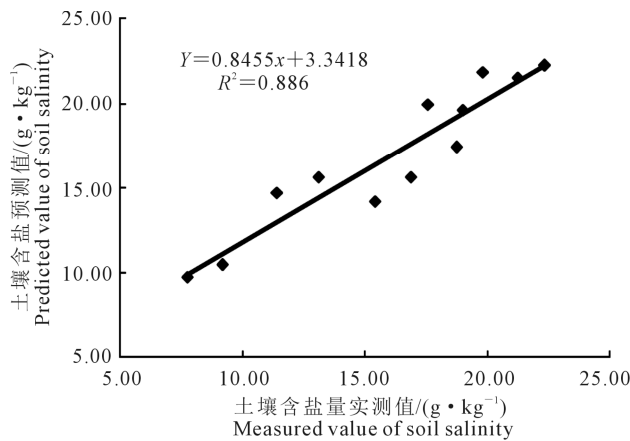


图 3 土壤含盐量反演结果

Fig.3 Inversion results of soil salinity

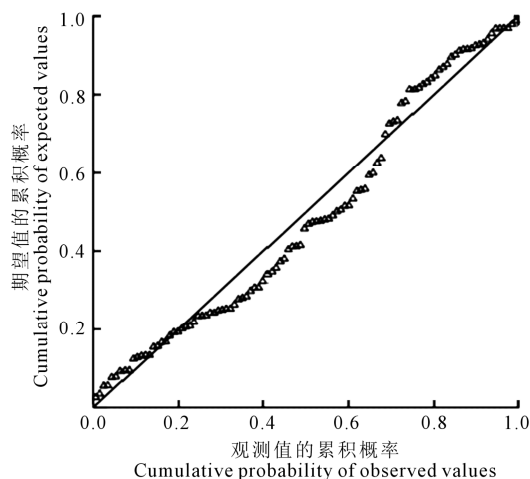


图 4 土壤含盐量正态分布检验 P-P 图

Fig.4 Normal distribution test P-P graph of soil salinity

3.4.2 土壤盐分空间格局分布 利用 ArcGIS 10.3 软件中地统计分析方法对反演模型预测得到的 82 个采样点的土壤含盐量进行普通克里格空间插值。变异函数的最佳拟合模型为球状模型,通过模型的拟合指数和均方根误差 ($R^2 = 0.701$; $RSME = 0.467$) 显示,该模型预测值与实测值较接近,拟合效果较好。通过绘制的土壤盐分含量空间分布预测图,可看出研究区棉田土壤盐分在 $9.33 \sim 26.99 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内发生变动,平均值为 $17.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,标准差为 $2.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。其中,土壤含盐量主要集中分布于 $14.87 \sim 18.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,且由绿洲内部向外围呈递增的趋势,与该区地理环境分布较为一致。由于该研究区是远离海洋的内陆盆地且是个封闭的单元,绿洲内部是洪积扇,地势较高,坡度较大,地表水的径流量较大,加之人为活动的干预,内陆水系、地表水、地下水所含的土壤盐分不易在此蓄积,土壤中的盐分含量较少。沿着绿洲外围的方向,地势、坡度都呈现递减的趋势,水的径流量较差且在水层中分布着亚黏土,因此土壤的透水性较差,会慢慢产生积盐,土壤盐分含量从绿洲内部向外围呈现递增的趋势,而棉花的生长情况却呈现出与此相反的变化趋势,说明土壤中的盐分含量越低,棉花的长势愈好。

4 讨论与结论

4.1 讨论

由于植被与土壤间存在密切的相关性,故常利用植被作为判断土壤盐分含量的指示因子,通过获取植被类型和生长状况可间接反映土壤盐分的空间分布特征^[17]。王飞等^[18]学者通过利用植被指数与土壤盐度指数构建土壤盐度推理模型对塔里木盆地西北部土壤盐渍化进行高精度的遥感监测研究。

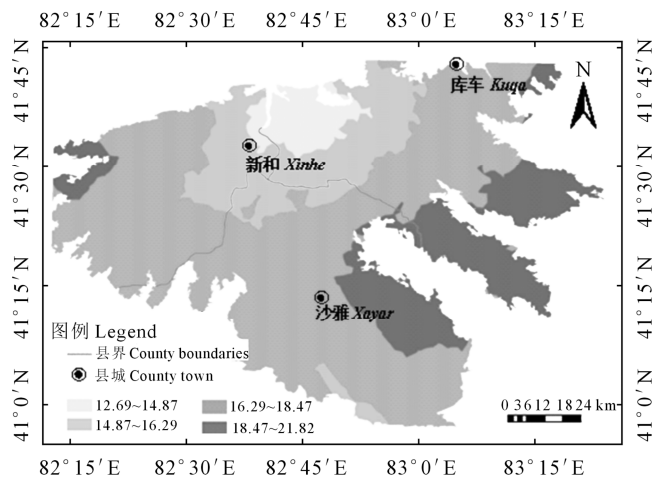


图 5 土壤含盐量空间分布预测图

Fig.5 Prediction of spatial distribution of soil salinity

丁建丽等学者的研究进一步表明基于扩展的增强型植被指数,对土壤盐分具有较高的敏感性,可获得较好的土壤盐分空间分布反演结果,更适宜于土壤盐分信息的挖掘^[14,16,19]。

由于渭干河—库车河三角洲绿洲地势呈北高南低的趋势,内陆水系、地表水及地下水在下游汇集,造成绿洲下部积水严重,强烈的蒸发运动使土壤盐分随水分积聚到地表,土壤含盐量从绿洲内部向外围呈现递增的趋势,且绿洲东北部棉田的土壤盐分含量较高。通过建立增强型植被指数与土壤含盐量的遥感反演模型,使用地统计分析方法对渭干河—库车河三角洲绿洲棉田土壤盐分分布状况进行研究,可定量分析研究区棉田土壤盐分的空间分布状况及其分布特征,对该区农业的可持续发展与区域土壤盐渍化的综合防治具有一定的指导意义。

4.2 结论

通过对渭干河—库车河三角洲绿洲棉田土壤盐分进行遥感反演其空间分布规律进行研究,可得到如下结论:

(1)在传统的植被指数中加入短红外波段,可得到 4 种增强型植被指数,分别将 4 种增强型植被指数采用线性回归分析方法构建土壤盐分遥感反演模型。4 种增强型植被指数 (ENDVI、ERVI、EDVI、EVI) 对应的相关系数分别为 -0.869 、 -0.835 、 -0.825 、 0.608 ,拟合指数 R^2 分别为 0.824 、 0.697 、 0.680 、 0.369 。通过对相关系数与线性回归方程的拟合指数进行比较分析,认为由增强型归一化指数 (ENDVI) 与土壤含盐量构建的线性回归模型 ($y = -56.494x + 22.687$) 预测效果最好,检验结果显示模型拟合指数 R^2 为 0.886 ,均方根误差 ($RSME = 0.970$) 较小。

(下转第 262 页)