

张素铭, 赵庚星, 王卓然, 等. 滨海盐渍区土壤盐分遥感反演及动态监测[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(4): 349-358.

ZHANG Su-ming, ZHAO Geng-xing, WANG Zhuo-ran, et al. Remote sensing inversion and dynamic monitoring of soil salt in coastal saline area[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(4): 349-358.

滨海盐渍区土壤盐分遥感反演及动态监测

张素铭, 赵庚星*, 王卓然, 肖 杨, 郎 坤

(山东农业大学资源与环境学院, 土壤资源高效利用国家工程实验室, 山东 泰安 271018)

摘 要:为探索快速提取滨海盐渍土信息的有效方法,实现对滨海盐渍区土壤盐分含量变化趋势的分析,本研究以黄河三角洲垦利区作为研究区,采用野外实测土壤盐分数据与遥感影像相结合的方法,通过土壤盐分敏感波段和光谱参数的筛选,构建土壤盐分估测模型;优选出最佳模型用于反演,并结合土壤盐分含量指数、土壤盐分动态度和重心向量模型3个指标对研究区土壤盐分含量动态变化进行统计和分析。结果显示:土壤盐分的敏感波段为绿光、红光和近红外波段;波段组合可以提高其与盐分的相关性,运用敏感波段与波段组合相结合的方法建模更优;土壤盐分最佳估测模型为: $Y = -6.94 - 281.762B_{nir} + 60.625B_g \times B_r + 1178.14B_g \times B_{nir} - 152.396B_r \times B_{nir} - 1495.491B_g \times B_r \times B_{nir}$,建模精度和验证精度分别为0.878和0.854,说明模型拟合度好,预测能力强,具有可行性。2001—2005年、2005—2009年和2009—2015年3个时段,研究区土壤盐渍化程度的变化趋势表现为加重-减轻-减轻趋势,盐化重心总体向东部沿海方向迁移,各时段土壤盐渍化变化程度较高。本研究提出了利用卫星遥感影像对土壤盐分含量进行预测和动态监测的快捷方法,对滨海盐渍土地资源的利用管理有积极意义。

关键词:滨海盐渍土;土壤盐分;遥感反演;动态变化

中图分类号:S127

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2018)04-0349-10

doi: 10.13254/j.jare.2018.0016

Remote sensing inversion and dynamic monitoring of soil salt in coastal saline area

ZHANG Su-ming, ZHAO Geng-xing*, WANG Zhuo-ran, XIAO Yang, LANG Kun

(National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: In order to explore an effective method for extracting coastal saline soil information rapidly to analyze the change trend of soil salt content in coastal saline soil area, this study took the Kenli District of the Yellow River Delta as the research area, combined the field measured data of soil salinity with remote sensing images. The soil salinity estimation model was constructed by soil salt sensitive bands and spectral parameters which were screened. Then the best estimation model was selected for inversion, and combined with soil salinity index, soil salinity dynamic degree and barycenter vector model, to count and analyze the dynamic changes of soil salinity in the study area. The results showed that the sensitive bands of soil salinity were green, red and near infrared, combination of bands could improve its correlation with soil salinity, and it was better to incorporate sensitive band with band combination. The best estimation model for soil salinity with fitting accuracy of 0.878 and verification precision of 0.854, which indicated that the model had good fitting and great forecast ability. From the three periods of 2001 to 2005, 2005 to 2009 and 2009 to 2015, the degree of soil salinization in the study area was in trend of aggravation, reduction and reduction. The salinization center was generally migrated to the east coast, and soil salinization had a higher degree of change in each period. This study proposes a quick way to predict and monitor the soil salt content using satellite remote sensing images, which is of positive significance for the utilization and management of coastal saline soil resources.

Keywords: coastal saline soil; soil salinity; remote sensing inversion; dynamic change

收稿日期:2018-01-13 录用日期:2018-02-11

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目课题(2015BAD23B0202, 2013BAD05B06-5);国家自然科学基金项目(41271235);“双一流”奖补资金项目(SYL2017XTTD02)

作者简介:张素铭(1994—),女,山东潍坊人,硕士研究生,主要研究方向为土地遥感与信息。E-mail:981563305@qq.com

*通信作者:赵庚星 E-mail:zhaogx@sdaa.edu.cn

土壤盐渍化是我国干旱、半干旱和滨海地区最常见的土地退化问题^[1],黄河三角洲作为我国滨海土壤盐渍化典型地区,土壤盐渍化严重制约着该区的生态环境和农业可持续发展。遥感和 GIS(地理信息系统)技术的发展应用,为及时获取盐渍土信息,进行区域土壤盐渍化动态监测提供了一种快速准确的新途径。

早在 20 世纪 70 年代,运用卫星遥感影像数据对土壤盐渍化进行相关研究已开始。Hick 等^[2]采用多元技术分析法研究旱地农业的土壤含盐量与遥感影像反射率之间的关系,发现土壤的光谱反射率会随着土壤盐分含量的变化而改变。Rao 等^[3]专门对盐渍化土壤的光谱特征进行研究,发现土壤盐渍化程度越高,在可见光和近红外波段的光谱响应越强。这些研究为土壤盐分含量的遥感信息提取奠定了理论基础,之后,学者们开始关注如何提高遥感影像提取土壤盐分含量的精确度。Metternicht^[4]结合实测的土壤退化特征以及实验室数据,采用最大似然法,利用 Landsat TM 遥感影像,成功提取了土壤盐渍化的分布信息。许迪等^[5]利用 Landsat 卫星遥感影像数据,采用监督分类、归一化植被指数(NDVI)等方法对遥感图像进行处理,实现了对黄河上游宁夏青铜峡灌区土壤盐碱分布的监测应用。何祺胜等^[6]利用 TM 遥感影像,采用决策树分类方法提取了库车河绿洲的土壤盐渍地信息,效果较好,精度较高。在此基础上,学者们开始致力于在 GIS 技术的支撑下,探索对土壤盐分含量的动态监测方法。李晓燕等^[7]以 GIS 技术为支撑,基于地形图和 MSS、TM 影像,分析了大安市盐碱地景观的动态变化及其成因。张雅丽等^[8]运用经典统计学、地统计学以及 GIS 相结合的方法研究了春秋两季艾比湖湿地表层土壤盐分和水分的空间变异特征,分析了其主要影响因素。

从目前的研究看,研究区域主要分布在干旱、半干旱气候的内陆地区^[9-10],对滨海盐渍区土壤盐分的系统研究需要加强;研究方法多以野外调查和采样分析相结合为主^[11-12],需要耗费较多人力、物力和财力,难以实现对土壤盐分快速获取的需求,缺少普适性的土壤盐分遥感模型及可操作性的土壤盐分定量遥感监测技术方法。因此,本研究选择滨海盐渍土典型地区——黄河三角洲垦利区,以遥感和 GIS 技术为支撑,采用多时相遥感方法,试图建立一个适用于反演滨海盐渍区春季土壤盐分含量的普适性模型,以实现土壤盐分含量的定量反演与动态监测,旨在为滨海盐渍土地区土壤盐分状况的遥感定量获取及快速监测

提供可行及有效的方法。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选择滨海盐渍土典型区域——山东省垦利区作为研究区。垦利区位于 $37^{\circ}24' \sim 38^{\circ}10'N$ 、 $118^{\circ}15' \sim 119^{\circ}19'E$,是黄河三角洲核心地区,属于暖温带大陆性季风气候,春季干旱多风,植被覆盖度低,蒸发量远大于降水量,蒸降比高达 7.6,土壤季节性返盐与积盐现象严重。该区域地势自西南至东北呈扇形微倾斜,地下水埋深浅且矿化度高,主要土地利用类型为农用地和未利用地,主要土壤类型为滨海潮盐土,质地偏轻,毛管作用强烈,土壤盐渍化程度重、分布广,严重影响了区域土地资源的开发利用和社会经济的持续发展。

1.2 土壤盐分数据采集与分析

在研究区内根据其土地利用现状和植被覆盖类型等因素,选择植被覆盖度相对均一且具代表性的地区均匀布设观测样区 61 个,每个面积约为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ (Landsat 影像像元面积大小,图 1)。野外调查采用 EC110 便携式盐分计(仪器已对电导率进行了温度校正),采用五点取样法对土壤表层(0~15 cm)的电导率值进行测定,取 5 点的盐分平均值作为该样区的土壤盐分实测值,并使用手持 GPS 定位仪测定各样区中心采样点的实地坐标,同时记录地点、方位、植被类型等环境因素信息。采样日期为 2014 年 4 月 28—30 日

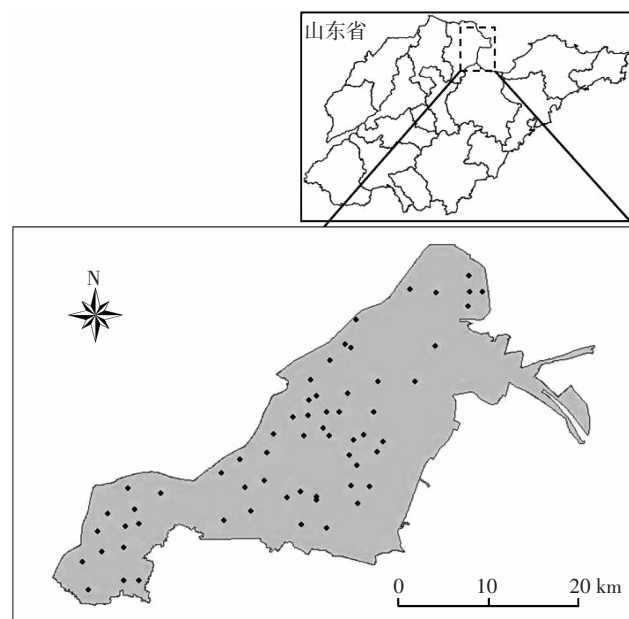


图 1 研究区位置与采样点分布图(2015 年)

Figure 1 Soil sampling sites and study areas(2015)

和2015年4月23—25日,两次采样点均随机选取,不具有重复性。

以采用EC110便携式盐分计测定的土壤浸提液电导率对野外电导率数据进行校正,得到野外实测土壤电导率(EC_o)与含盐量(St)之间的关系方程 $St=0.000\ 22EC_o+0.072\ 7(n=61, R^2=0.938\ 7)$ 。并以此关系方程对全部野外实测土壤电导率数据进行校正,得到各个样点的土壤盐分含量值^[13]。

1.3 遥感影像数据获取与预处理

本文选取垦利区2001年3月18日(Landsat7)、2005年3月29日(Landsat5)、2009年5月3日(Landsat5)和2015年5月4日(Landsat8)四期遥感影像用于研究垦利区土壤盐分含量动态变化。

在Envi软件中对影像进行几何精校正、辐射定标与图像裁剪等预处理,得到研究区各时相假彩色合成卫星图像(图2)。然后,将野外实测的61个采样点的经纬度导入到2015年5月4日Landsat遥感影像中,根据实地记录的地物类型,在影像中确定相应像元,导出其全部波段的反射率值,用于土壤盐分含量

反演模型的构建。

1.4 遥感反演模型的构建与验证

将同时期的野外实测土壤盐分数据与Landsat遥感影像数据进行相关性分析,筛选土壤盐分敏感波段。然后,通过波段组合形成包含多波段信息的新的光谱参量并对其进行优选。最后,将筛选出的敏感波段与光谱参量作为变量,运用多元回归分析法进行土壤盐分反演模型的构建。并采用决定系数 R^2 来评价拟合精度,选择最佳估测模型。

模型的验证分为两个方面:一是利用2014年4月28—30日获取的研究区野外实测数据,随机选取30个点作为验证集,对最佳估测模型的预测能力和普适性进行验证,由验证精度 R^2 评价模型的预测能力和普适性;二是基于最佳估测模型对2015年5月4日影像进行土壤盐分反演,得到土壤盐分含量空间分布图和各等级土壤面积,与实测插值结果相比较,以评价该模型的遥感反演精度。由于土壤盐分含量是一种连续性变化的指标变量,且本文样点相对较稀、较少,因此,本研究选取克里格插值方法。

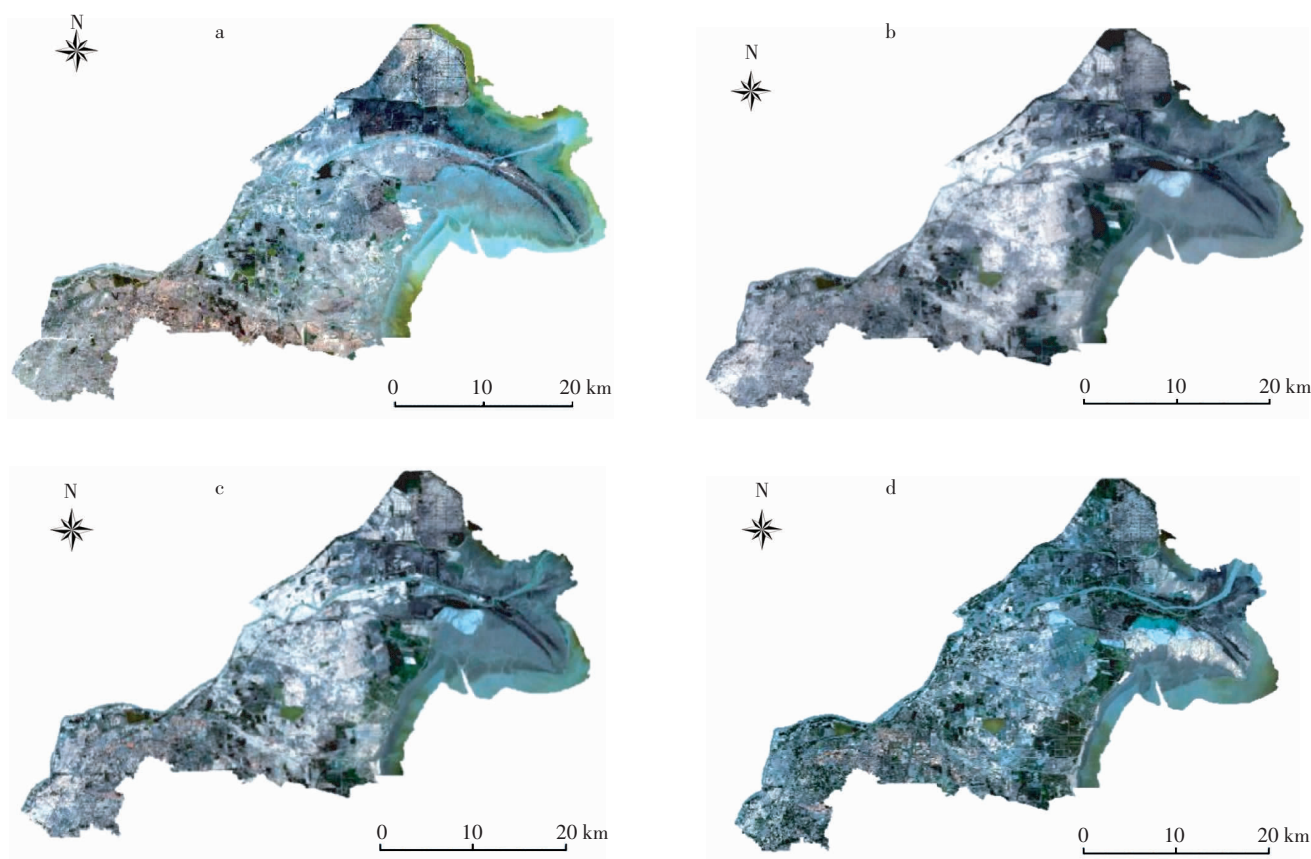


图2 垦利区2001年3月18日(a)、2005年3月29日(b)、2009年5月3日(c)、2015年5月4日(d)遥感影像

Figure 2 Remote sensing image of Kenli canton on March 18, 2001(a), March 29, 2005(b), May 3, 2009(c), May 4, 2015(d)

1.5 研究区土壤盐渍化遥感监测

基于土壤盐分最佳估测模型得到各时相春季的土壤盐分含量反演结果,将土壤盐化程度划分为非盐渍化($<1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、轻度盐渍化($1 \sim 2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、中度盐渍化($2 \sim 4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、重度盐渍化($4 \sim 6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和盐土($>6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)5 个等级,得到土壤盐分等级分布图并统计分类结果。将 4 期研究区春季土壤盐分含量反演等级分布图两两叠加,分别得到 3 个时段的垦利区土壤盐分含量等级空间变化图。并引入土壤盐分含量变化指数、土壤盐分动态度和重心向量模型 3 个指标对土壤盐分含量的时空动态变化进行分析。

1.5.1 土壤盐分含量指数

借鉴土地利用程度综合指数及其变化模型^[14],构建了土壤盐分含量指数,以定量描述研究区土壤盐分含量的变化程度与趋势。其公式为:

$$W_t = \sum_{i=1}^n A_i \times P_i \quad (1)$$

式中: A_i 为经 0~1 标准化处理的第 i 级盐化土壤的盐分含量平均值; P_i 为对应土壤盐化等级所占的面积百分比; W_t 表示研究区 t 年份土壤盐分含量指数值; n 为 5 个土壤盐化等级。

通过土壤盐分含量指数的对比,监测研究区土壤盐分含量的变化。若升高,则该阶段盐渍化程度加重,反之减轻。

1.5.2 土壤盐分动态度

为对土壤盐分含量的动态变化特征进行定量分析,本研究构建了单一土壤盐分动态度(D_t)和综合土壤盐分动态度(C_t)^[15]。土壤盐分单一动态度能够反映某土壤盐分含量等级在某时期内的变化幅度;综合土壤盐分动态度则能够刻画某时期内土壤盐分含量变化的剧烈程度,其公式分别为:

$$D_t = (S_{t2} - S_{t1}) / S_{t1}; \quad (2)$$

$$C_t = \sum_{i=1}^n |A_{i2} - A_{i1}| / \sum_{i=1}^n A_{i1} \quad (3)$$

式中: S_{t1} 、 S_{t2} 分别为研究时段开始与结束时该级的面积; $D_t > 0$ 说明在该时段内该等级土壤的面积比例增加,反之,则减少。 A_{i1} 为研究初期第 i 级面积; A_{i2} 为研究末期第 i 级面积。

1.5.3 盐分重心向量模型

首先,利用各等级盐渍土的几何中心,结合标准化处理后的土壤盐化指数,运用重心模型计算研究区各年份的盐化重心^[16]。重心模型的数学表达为:

$$X_t = \sum_{i=1}^n (W_i \times X_i) / \sum_{i=1}^n W_i; \quad (4)$$

$$Y_t = \sum_{i=1}^n (W_i \times Y_i) / \sum_{i=1}^n W_i \quad (5)$$

式中: X_t 、 Y_t 分别表示 t 年份盐化土地的重心坐标; W_i 表示该年份第 i 等级土壤盐分含量变化指数; X_i 、 Y_i 分别表示该年份第 i 土壤盐分等级的重心坐标。定义 X_t 、 Y_t 的正方向分别为正东、正北。

4 期重心坐标相减获得 2001—2005 年、2005—2009 年、2009—2015 年的土壤盐分含量变化的动态向量,分析研究区土壤盐化重心的空间迁移特征。

2 结果与分析

2.1 土壤盐分敏感波段与光谱参量的筛选

各波段反射率与土壤盐分的相关性见表 1,绿光、红光、近红外 3 个波段的反射率值与盐分含量的相关性系数 R^2 较高,分别为 0.661、0.729、0.712,均在 0.01 水平上呈显著相关。

波段组合得到的光谱参量与土壤盐分含量实测值相关性明显增加,最高相关系数达到 0.757(表 2),由此,选择相关系数 $R^2 > 0.7$ 的 6 个波段组合 Bg×Bnir、

表 1 波段反射率值与盐分含量相关性
Table 1 Correlation between spectral reflectance and salt content

波段名称	R^2
Band Blue	0.136
Band Green	0.661**
Band Red	0.729**
Band NIR	0.712**
Band SWIR1	0.071
Band SWIR2	0.321**

注:**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

Note:**indicate the significant correlation at the 0.01 level(bilateral).

表 2 $R^2 > 0.7$ 的波段组合
Table 2 Band combination of $R^2 > 0.7$

ID	波段组合	R^2
1	Bg×Bnir	0.757**
2	Bg+Br+Bnir	0.736**
3	Bg×Br×Bnir	0.733**
4	Bg+Br	0.725**
5	Bg×Br	0.710**
6	Br×Bnir	0.708**

注:Bg 为绿光波段;Br 为红光波段;Bnir 为近红外波段。下同。

Note:Bg is green band, Br is red band and Bnir is near infrared band. The same below.

Bg+Br+Bnir、Bg×Br×Bnir、Bg+Br、Bg×Br、Br×Bnir 参与估测模型的构建。

2.2 土壤盐分反演模型的构建

2.2.1 基于敏感波段的多元线性回归模型

以3个敏感波段为自变量,土壤盐分实测值为因变量,进行多元线性回归分析,得到结果(表3)。从表3中可以看出,建模精度较高的模型为: $Y=-3.565+47.825Bg-15.011Br$,该模型的 $F=29.048$, $Sig.=0.000$,建模精度 $R^2=0.513$,说明该方程拟合度较好,显著性较高。

表3 敏感波段多元线性回归结果

Table 3 Multiple linear regression results of sensitive band

ID	模型	系数	建模精度		
			R^2	F	Sig.
1	(常量)	-3.565	0.537	29.048	0.000
	Bg	47.825			
	Br	-15.011			
2	(常量)	-3.932	0.533	28.481	0.000
	Br	31.123			
	Bnir	3.855			
3	(常量)	-4.064	0.532	57.878	0.000
	Br	36.932			

2.2.2 基于光谱参量的多元线性回归模型

以敏感光谱参量为变量,进行多元回归分析,得到结果(表4)。从表4可以看出,建模精度较高的模型为: $Y=5.673+233.348Bg\times Bnir-20.857Bg\times Br-24.107Br\times Bnir+157.274Bg\times Br\times Bnir$,该模型的 $F=15.939$, $Sig.=0.000$,建模精度 R^2 达到0.844,说明该方程拟合度较好,显著性高。

2.2.3 基于敏感波段与光谱参量的多元线性回归模型

以敏感波段与光谱参量为变量,进行多元回归分析,得到结果(表5)。从表5可以看出,模型的建模精度总体较高,最高的模型为: $Y=-6.94-281.762Bnir+60.625Bg\times Br+1178.14Bg\times Bnir-152.396Br\times Bnir-1495.491Bg\times Br\times Bnir$,该模型的 $F=18.057$, $Sig.=0.000$,建模精度 $R^2=0.878$,说明该方程拟合度较好,显著性高。

2.2.4 估测模型的优选与验证

综合上述方法构建的模型,分别选出建模精度较高的模型运用验证集进行进一步的验证,结果如表6。验证精度越高,模型的预测能力越强,普适性越高; F 越大, $Sig.$ 越小,表明方程显著性越高。

从表6可以看出,由敏感波段与光谱参量结合构建的模型Ⅲ: $Y=-6.94-281.762Bnir+60.625Bg\times Br+1178.14Br\times Bnir-152.396Br\times Bnir-1495.491Bg\times Br\times Bnir$

表4 光谱参量多元线性回归结果

Table 4 Multiple linear regression results of spectral parameters

ID	模型	系数	建模精度		
			R^2	F	Sig.
1	(常量)	5.673	0.844	15.939	0.000
	Br×Bnir	233.348			
	Bg×Br	-20.857			
	Br×Bnir	-24.107			
	Bg×Br×Bnir	157.274			
2	(常量)	8.562	0.698	15.939	0.000
	Bg×Bnir	264.676			
	Bg×Br	-101.559			
	Br×Bnir	34.045			
	Bg×Br×Bnir	778.433			
3	Bg+Br+Bnir	-474.45	0.623	41.373	0.000
	(常量)	3.733			
	Br×Bnir	-30.067			
	Bg×Bnir	278.268			

表5 敏感波段与光谱参量多元线性回归结果

Table 5 Multiple linear regression results of sensitive band and spectral parameters

ID	模型	系数	建模精度		
			R^2	F	Sig.
1	(常量)	-6.940	0.878	18.057	0.000
	Bnir	-281.762			
	Bg×Br	60.625			
	Bg×Bnir	1178.140			
	Br×Bnir	-152.396			
	Bg×Br×Bnir	-1495.491			
2	(常量)	9.966	0.839	18.826	0.000
	Bg	-23.70			
	Bnir	32.044			
	Bg×Br	-82.646			
	Bg×Br×Bnir	832.767			
	Bg+Br+Bnir	-180.528			
3	(常量)	-6.940	0.799	18.057	0.000
	Br	281.762			
	Bg×Bnir	1178.140			
	Bg×Br	60.625			
	Br×Bnir	-152.396			
	Bg×Br×Bnir	-1495.491			

的建模精度和验证精度均最高,分别高达0.878和0.854, $Sig.=0.000$,说明显著性高,为最佳估测模型。

由图3可知,2015年春季土壤盐分含量反演等级插值图与该区实际相符,证明该插值方法准确可用。

表 6 反演模型优选及其参数比较

Table 6 Optimization of inversion model and comparison of its parameters

模型	方法	表达公式	建模精度			验证精度
			R^2	F	Sig.	R^2
I	基于敏感波段	$Y = -3.565 + 47.825B_g - 15.011B_r$	0.537	29.048	0.000	0.202
II	基于光谱参量	$Y = 5.673 + 233.348B_g \times B_{nir} - 20.857B_g \times B_r - 24.107B_r \times B_{nir} + 157.274 \times B_g \times B_r \times B_{nir}$	0.846	15.939	0.000	0.624
III	基于敏感波段和光谱参量	$Y = -6.94 - 281.762B_{nir} + 60.625B_g \times B_r + 178.14B_g \times B_{nir} - 152.396B_r \times B_{nir} - 1495.491B_g \times B_r \times B_{nir}$	0.878	18.057	0.000	0.854

注: Y 为土壤盐分反演值。

Note: Y is the soil salinity inversion value.

将反演结果图与插值结果图相对比,发现土壤盐分含量分布特征较为一致,反演精度较高。对分类结果影像进行信息统计,得到影像的分类结果(表7)。可见,反演得到的各土壤盐分含量等级的土壤面积与空间插值得到的结果大致相同,符合研究区实际,可用性较强。

2.3 土壤盐分含量遥感反演

利用最佳估测模型反演得到 4 个年份春季土壤盐分含量等级分布图(图 4),并统计各土壤盐分含量等级面积比例(表 8)。

总体看,垦利区的土壤盐分含量等级以黄河为轴

线呈对称分布,越靠近黄河盐化程度越低,淡水资源丰富的东北部黄河沿岸以及地势较高的西南部是该区土壤盐分含量等级相对较低的区域。

2.4 土壤盐分动态监测

图 5 是 2001—2005 年、2005—2009 年、2009—2015 年垦利区土壤盐分含量等级空间变化图,以分析研究区土壤盐分含量的动态变化。

2.4.1 土壤盐分面积变化

表 9 为垦利区各年份土壤盐分含量指数,可以看出,2001—2015 年,研究区轻度等级土壤盐分含量指

表 7 2015 年影像分类结果统计对比(%,扣除滩涂、水体等)

Table 7 The statistical comparison of the results of the image classification in 2015(%, deducting the tidal flat, water, etc.)

对比项目	非盐渍化土	轻度盐渍化	中度盐渍化	重度盐渍化	盐土
反演结果	0	2.00	29.70	15.65	52.63
空间插值数据	0	1.77	35.30	13.75	49.45

表 8 研究区各时相土壤盐分含量等级统计

(%,扣除滩涂、水体等)

Table 8 Soil salinity statistics of each time phase in the study area(%, deducting the tidal flat, water, etc.)

年份	非盐渍化土	轻度盐渍化	中度盐渍化	重度盐渍化	盐土
2001	0	4.73	31.92	16.30	47.04
2005	0	2.86	31.26	17.70	48.18
2009	0	2.06	25.30	14.59	58.05
2015	0	2.00	29.70	15.65	52.63

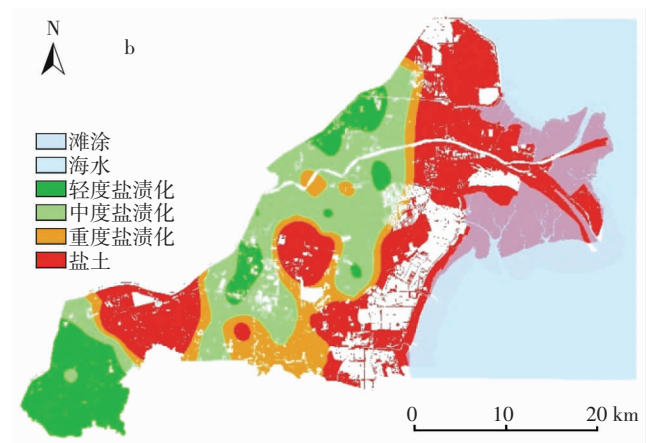
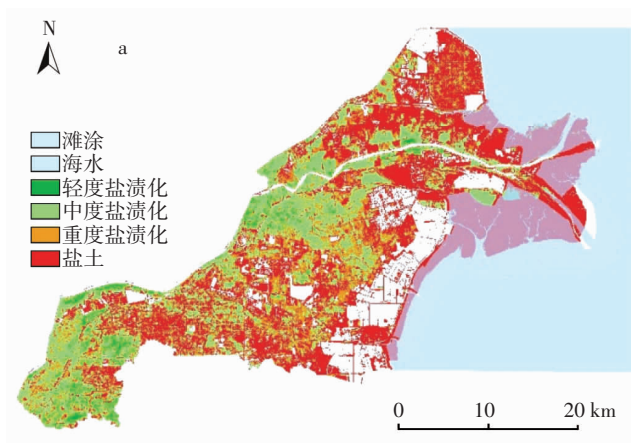


图 3 2015 年春季土壤盐分含量反演等级分布图(a)与插值图(b)比较

Figure 3 Distribution map of soil salt content inversion(a) and interpolating(b) graph in spring of 2015

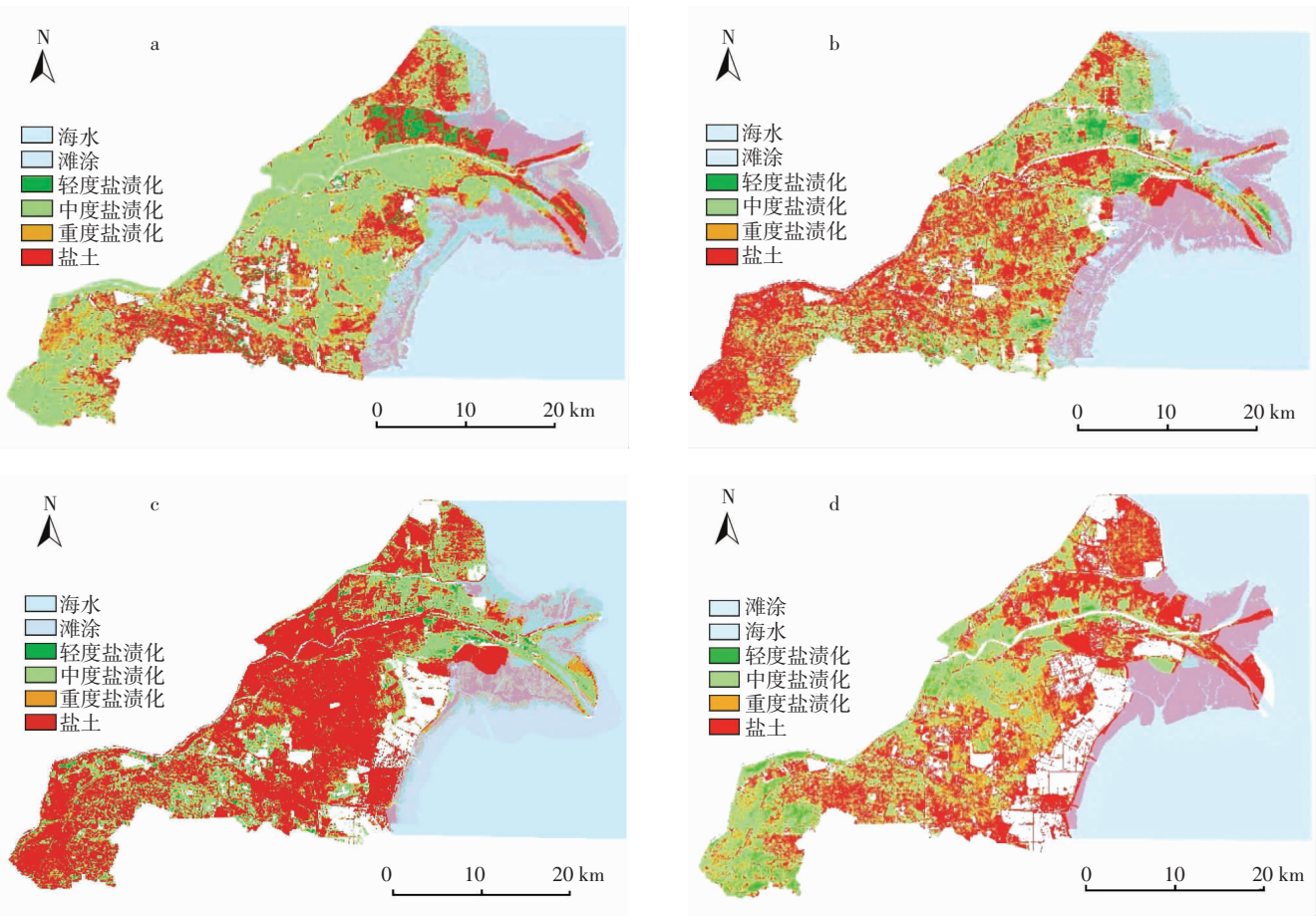


图 4 2001 年(a)、2005 年(b)、2009 年(c)、2015 年(d)春季土壤盐分含量反演等级分布图
Figure 4 Distribution map of soil salinity in spring of 2001(a), 2005(b), 2009(c), and 2015(d)

表 9 垦利区各年份土壤盐分含量指数
Table 9 Soil salt content index of each year in Kenli Canton

年份	轻度盐渍化	中度盐渍化	重度盐渍化	盐土	综合	
					盐分指数	变化率/%
2001	1.99	25.22	15.49	47.04	89.74	—
2005	1.55	26.53	17.03	48.18	93.29	3.95
2009	1.03	20.24	13.13	58.05	92.45	-0.89
2015	0.80	23.77	13.77	52.63	90.97	-1.60

数呈不断减少趋势;中度等级土壤盐分含量指数为先略增,后锐减,又小幅增加;重度等级土壤盐分含量指数呈现先增加,后减少并趋于稳定趋势;盐土等级土壤盐分含量指数则表现为前期增加后期显著减少趋势。总体看,研究区土壤盐分含量综合指数呈现为先增大后减小。从其变化率可以看出,2001—2005 年盐渍化程度增加 3.95%,2005—2009 年盐渍化程度减轻 0.89%,2009—2015 年盐渍化程度减轻 1.60%,可见,研究区年际间盐渍化的总体变化程度不高。

2.4.2 土壤盐分的空间变化分析

由图 5 可以看出:2001—2005 年土壤盐分含量加重区域主要集中于东北部沿海及中部区域,而东部及东北部黄河沿岸则减轻,西南部基本不变;2005—2009 年土壤盐分含量加重区域分布较广,主要集中于东部和东北部,中部则有所减轻;2009—2015 年土壤盐分含量则普遍减轻和保持稳定,加重区域主要集中于东北部沿海,黄河沿岸则减轻。

根据重心模型计算出不同年份的盐化重心坐标,

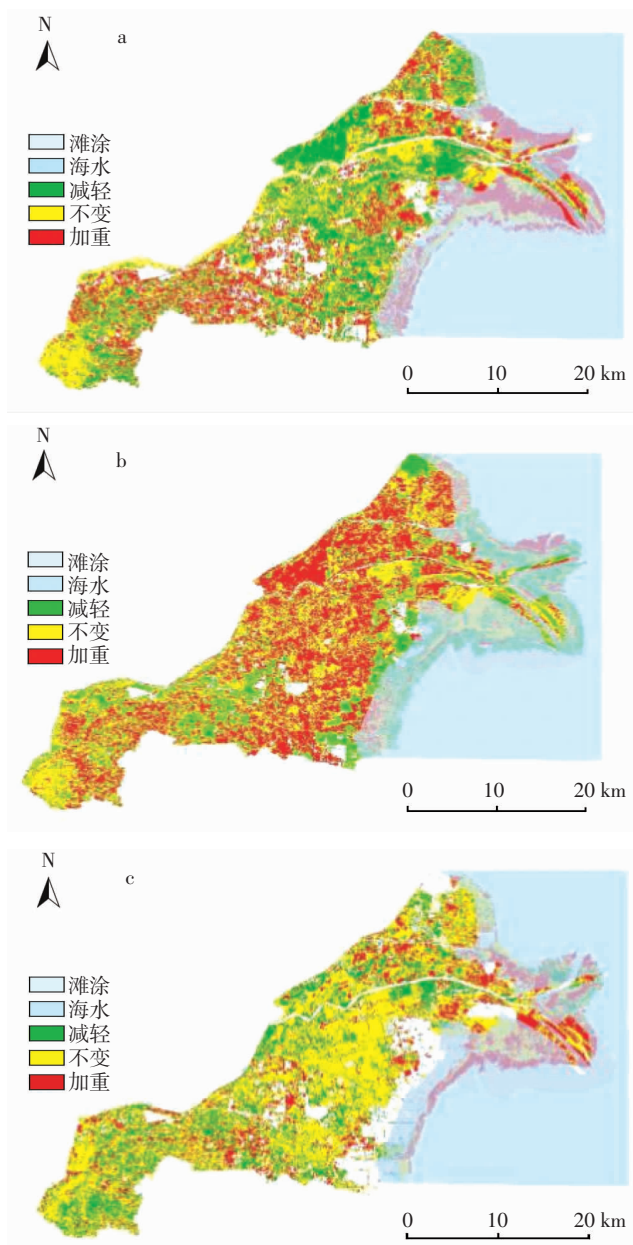


图 5 2001—2005 年(a)、2005—2009 年(b)、2009—2015 年(c)
垦利区土壤盐分含量等级空间变化图

Figure 5 Spatial variation map of soil salinity level in Kenli Canton
in 2001—2005(a), 2005—2009(b), 2009—2015(c)

分别以前一时期为基准,得到 3 个时段的垦利区土壤盐化重心迁移向量(表 10),可以看出,盐化重心整体上呈现出向东部沿海迁移的趋势,其中前两个时段均为东北方向,后一时段则向东南方向迁移。

2.4.3 土壤盐分变化程度分析

表 11 为垦利区各年份的土壤盐分动态度。由各时段的土壤盐分单一动态度可以看出:轻度盐渍化土壤的变化程度在前 2 个时段减幅较高,后一时段减幅

表 10 垦利区各时段土壤盐化重心转移向量(m)

Table 10 Transfer vector of soil salinization center in
Kenli Canton(m)

时段	X	Y
2001—2005	1 387.46	31.19
2005—2009	384.52	1 787.80
2009—2015	288.26	-283.41

表 11 垦利区土壤盐分动态度(%)

Table 11 Soil salinity dynamics in Kenli Canton(%)

时段	单一动态度				综合动态度
	轻度盐渍化	中度盐渍化	重度盐渍化	盐土	
2001—2005	-39.53	-2.07	8.52	2.42	61.99
2005—2009	-27.97	-19.07	-17.57	20.49	69.98
2009—2015	-2.91	17.47	7.27	-9.34	45.84

较小;中度盐渍化土壤则第一时段减幅较小,第二时段减幅较高,后一时段有大幅增高;重度盐渍化土壤的变化程度呈现增大-减小-增大的趋势,其中第二时段减幅较高;盐土的变化程度先增大,2009—2015 年则减小。研究区土壤盐渍化综合动态度分别为 61.99%、69.98%和 45.84%,表明研究区内不同区域土壤盐分含量等级间的年际变化较大,其中在 2005—2009 年时段土壤盐渍化状况波动最为剧烈,接近 80%的土壤盐分等级发生变化。

3 讨论

研究发现,绿光、红光与近红外波段的反射率与土壤盐分含量的相关性最高,这与相关的研究结果基本一致^[17-18]。通过敏感波段间两两组合形成的包含多波段信息的光谱参量与土壤盐分实测值相关性显著升高,同时,运用敏感波段与光谱参量结合的方法建模效果更优,反演精度高于仅以敏感波段或光谱参量为变量的方法,可以有效提取和凝聚土壤盐分敏感波段谱信息,对于土壤盐分含量的估测及反演甚为重要。

为降低植被对土壤盐分获取的影响,本研究在试验处理方法上首先选取了植被覆盖度较低的春季,其次选择植被覆盖度相对均一的代表性区域为采样区,观测面积与 Landsat8 像元面积保持一致,以便在进行遥感反演时将植被因素考虑在内。同时,调查发现,研究区不同盐渍化程度下的植被差异明显,植被覆盖状况也可以作为反映土壤盐分含量的间接指标^[19-20]。

总体看,研究区土壤盐化程度总体较高,以盐土等级分布为主。空间分布呈现出滨海盐渍土共性特

点:东部滨海区受海水入侵的影响显著,地下水矿化度高,土地盐化程度重;而黄河沿岸受淡水顶托,通过种植农作物、灌溉排水,在一定程度上缓解了土壤的盐渍化,因此黄河沿岸的土壤盐分含量等级多为轻度或中度盐渍化;中部地区地势较低,人口密度大,土地类型转换以及人类活动频繁,使该地区的土壤盐分含量波动较大;西南部地势相对较高,盐化程度则相对较轻。因此,随着研究区盐地资源的开发利用,盐化重心整体上呈现出向东北滨海方向迁移的趋势。在时间尺度上,研究区盐渍化程度的年际变化程度总体不高,但具体到不同区域土壤盐分含量等级间则差异明显。由此也反映了本文模型对研究区盐分总体及细微变化特征的准确描述。

结合本文研究结果,研究区盐渍土改良利用应针对不同区域的盐分含量及变化特点,因地制宜选择适宜的盐渍土改良措施。西南部及黄河沿岸盐碱较轻区域,应加强灌排管理,注重有机肥的施用,培肥地力,建立良好的土壤生态体系。中部地区应从稻田发展、耐盐植物利用和平整土地入手,防止土壤盐渍化程度进一步加深。东部滨海区土壤盐分含量高且动态变化剧烈,不适合农业的发展,可发挥该区养殖业优势。

4 结论

本文以滨海盐渍土典型地区垦利区作为研究区,通过野外实测数据与多时相遥感数据相结合的方法构建土壤盐分反演模型,对4期遥感影像进行反演,并结合土壤盐分含量指数、土壤盐分动态度和重心向量模型对研究区土壤盐分动态变化进行统计和分析。得到如下结论:

(1)土壤盐分敏感波段为绿光、红光和近红外波段,敏感光谱参量主要为 $Bg \times Bnir$ 、 $Bg \times Br$ 、 $Br \times Bnir$ 、 $Bg \times Br \times Bnir$ 等。

(2)土壤盐分最佳估测模型为: $Y = 6.94 - 281.762 Bnir + 60.625 Bg \times Br + 1178.14 Bg \times Bnir - 152.396 Br \times Bnir - 1495.491 Bg \times Br \times Bnir$, 建模精度为 0.878, 验证精度为 0.854, $Sig. = 0.000$, 显著性高, 预测能力强, 同时具有较好的普适性。

(3)2001—2005年、2005—2009年和2009—2015年3个时段,研究区土壤盐渍化程度表现为加重—减轻—减轻趋势,盐化重心总体向东部沿海方向迁移,各时段土壤盐渍化变化程度较高。

本研究提出了滨海盐渍区土壤盐分遥感反演及

动态监测的有效方法,较好摸清了研究区土壤盐化动态特征及规律,为盐渍土地资源的利用管理提供了科学手段和依据。

参考文献:

- [1] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 837-845.
YANG Jin-song. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 837-845.
- [2] Hick P T, Russell W G R. Some spectral considerations for remote sensing of soil salinity[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1990, 28(3): 417-431.
- [3] Rao B R M, Sharma R C, Ravisankar T, et al. Spectral behaviour of salt-affected soils[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16(12): 2125-2136.
- [4] Metternicht G I. Remote sensing of soil salinity—potentials and constraints[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85(1): 1-20.
- [5] 许迪, 王少丽, 蔡林根, 等. 利用 NDVI 指数识别作物及土壤盐碱分布的应用研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(6): 5-8.
XU Di, WANG Shao-li, CAI Lin-gen, et al. Applied study on identification of crops and salinity distribution by NDVI index[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003, 22(6): 5-8.
- [6] 何祺胜, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽. 基于决策树方法的干旱区盐渍地信息提取研究——以渭干河—库车河三角洲绿洲为例[J]. 资源科学, 2006, 28(6): 134-140.
HE Qi-sheng, TASHPOLAT·Tiyip, Ding Jian-li. The extraction of saline soil information in arid area based on decision tree algorithm: A case study in the delta oasis of Weigan and Kuqa Rivers[J]. *Resource Science*, 2006, 28(6): 134-140.
- [7] 李晓燕, 张树文. 吉林省大安市近 50 年土地盐碱化时空动态及成因分析[J]. 资源科学, 2005, 27(3): 92-97.
LI Xiao-yan, ZHANG Shu-wen. Tempo-spatial dynamics and driving factors of saline-alkali land in Daan City of Jilin Province[J]. *Resource Science*, 2005, 27(3): 92-97.
- [8] 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 Ya-li, TASHPOLAT·Tiyip, ARDAK·Kelimu, et al. Monitoring heterogeneity of soil salinity in dry and wet seasons in Xinjiang Ebinur Lake wetland[J]. *Rural Water Conservancy and Hydropower of China*, 2017(1): 37-42.
- [9] 丁建丽, 王飞. 干旱区大尺度土壤盐度信息环境建模——以新疆天山南北中低海拔冲积平原为例[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 64-78.
DING Jian-li, WANG Fei. Environmental modeling of large-scale soil salinity information in an arid region: A case study of the low and middle altitude alluvial plain north and south of the Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 64-78.
- [10] 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 Fei, DING Jian-li, WEI Yang, 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.
- [11] 范晓梅, 刘高焕, 唐志鹏, 等. 黄河三角洲土壤盐渍化影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1):139-144.
- FAN Xiao-mei, LIU Gao-huan, TANG Zhi-peng, et al. Analysis on main contributors influencing soil salinization of Yellow River Delta[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1):139-144.
- [12] 王 军, 顿耀龙, 郭义强, 等. 松嫩平原西部土地整理对盐渍化土壤的改良效果[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18):266-275.
- WANG Jun, DUN Yao-long, GUO Yi-qiang, et al. Effects of land consolidation on improvement of salinity soil in western Songnen Plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(18):266-275.
- [13] 王卓然, 赵庚星, 高明秀, 等. 黄河三角洲典型地区春季土壤水盐空间分异特征研究——以垦利县为例[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 44(6):762-769.
- WANG Zhuo-ran, ZHAO Geng-xing, GAO Ming-xiu, et al. Characteristics of soil water and salt spatial variations in the spring season in typical Yellow River Delta areas of Kenli County, China[J]. *Journal of Agricultural Resources & Environment*, 2015, 44(6):762-769.
- [14] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. 地理学报, 2003, 8(5):643-650.
- ZHU Hui-yi, LI Xiu-bin. Discussion on the index method of regional land use change[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 8(5):643-650.
- [15] 王卓然. 黄河三角洲典型地区土壤水盐动态规律、影响因素与预测模型[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- WANG Zhuo-ran. Spatial and temporal variability of soil moisture and salinity, affecting factors and forecasting model in the typical area of the Yellow River Delta[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2017.
- [16] 李百红, 赵庚星, 董 超, 等. 基于遥感和 GIS 的黄河三角洲盐化土地动态及其驱动力分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(2):310-318.
- LI Bai-hong, ZHAO Geng-xing, DONG Chao, et al. Dynamic and driving force analysis of salinized land in the Yellow River Delta based on RS and GIS[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(2):310-318.
- [17] 安德玉. 黄河三角洲滨海盐渍土盐分含量野外高光谱估测与遥感反演[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016.
- AN De-yu. Hyperspectral field estimation and remote sensing inversion of salt content in coastal saline soils of the Yellow River Delta[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2016.
- [18] 张同瑞, 赵庚星, 高明秀, 等. 基于近地多光谱和 OLI 影像的黄河三角洲冬小麦种植区盐分估算及遥感反演——以山东省垦利县和无棣县为例[J]. 自然资源学报, 2016, 31(6):1051-1060.
- ZHANG Tong-rui, ZHAO Geng-xing, GAO Ming-xiu, et al. Soil salinity estimation and remote sensing inversion based on near-ground multispectral and TM imagery in winter wheat growing area in the Yellow River Delta: Case study in Kenli County and Wudi County, Shandong Province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(6):1051-1060.
- [19] 刘庆生, 刘高焕, 励惠国. 辽河三角洲土壤盐分与上覆植被野外光谱关系初探[J]. 中国农学通报, 2004, 20(4):274-278.
- LIU Qing-sheng, LIU Gao-huan, LI Hui-guo. Preliminary study on relationships between soil salinity and above vegetation field-derived spectra in Liaohe River Delta, Liaoning Province, China[J]. *Chinese Agricultural Science*, 2004, 20(4):274-278.
- [20] 马玉蕾, 王 德, 刘俊民, 等. 黄河三角洲典型植被与地下水埋深和土壤盐分的关系[J]. 应用生态学报, 2013, 24(9):2423-2430.
- MA Yu-lei, WANG De, LIU Jun-min, et al. Relationships between typical vegetations, soil salinity, and groundwater depth in the Yellow River Delta of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(9):2423-2430.