



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

基于卫星遥感的黄三角濒海区土壤水盐及其耦合关系时空分析

张术伟, 常春艳, 王卓然, 赵铭, 赵庚星, 李因帅, 赵环三, 赵永昶, 王启尧, 周家豪

引用本文:

张术伟, 常春艳, 王卓然, 赵铭, 赵庚星, 李因帅, 赵环三, 赵永昶, 王启尧, 周家豪. 基于卫星遥感的黄三角濒海区土壤水盐及其耦合关系时空分析[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(4): 792–804.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0614>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

王卓然, 赵庚星, 高明秀, 姜曙千, 常春艳, 贾吉超

农业资源与环境学报. 2015(2): 154–161 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0293>

典型绿洲灌区棉田土壤盐分多光谱遥感反演与季节差异性研究

刘旭辉, 白云岗, 柴仲平, 张江辉, 江柱, 丁邦新, 张超

农业资源与环境学报. 2023, 40(3): 598–609 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0248>

秸秆和植被覆盖对江苏滨海盐土土壤盐分变化的影响

崔士友, 张蛟

农业资源与环境学报. 2017, 34(6): 509–516 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0112>

基于SWAP模型的耕地-盐荒地-沙丘-海子水盐动态分析

曾揭峰, 刘霞, 李就好, 夏玉红, 王丽萍

农业资源与环境学报. 2018, 35(6): 540–549 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0226>

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

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 349–358 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0016>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张术伟, 常春艳, 王卓然, 等. 基于卫星遥感的黄三角滨海区土壤水盐及其耦合关系时空分析[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(4): 792–804.

ZHANG S W, CHANG C Y, WANG Z R, et al. Spatio-temporal analysis of soil water and salt and their coupling relationship in the Yellow River Delta coastal area based on satellite remote sensing[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(4): 792–804.

基于卫星遥感的黄三角滨海区土壤水盐及其耦合关系时空分析

张术伟, 常春艳*, 王卓然, 赵铭, 赵庚星*, 李因帅, 赵环三, 赵永昶, 王启尧, 周家豪

(山东农业大学资源与环境学院, 土肥高效利用国家工程研究中心, 山东 泰安 271018)

摘要: 水盐时空特征及耦合关系是盐渍化土壤治理和区域生态保护管理的重要基础。本研究选择黄河三角洲代表性滨海区域——垦利区, 采用野外实测与遥感影像相结合的方法, 筛选相关性较高的土壤水盐光谱参量, 基于敏感光谱参量构建土壤水盐定量遥感反演模型, 利用经典统计分析、耦合度模型、缓冲区分析、支持向量机分类等方法, 分析研究区土壤表层水盐时空分异特征及其耦合关系。结果表明: 基于水分敏感光谱指数 $LSWI$ 、 $NDII$ 和盐分敏感光谱指数 $SI-T$ 、 $NDSI$ 建立的各季节土壤水盐估测模型, 验证集 R^2 均大于 0.650, $RMSE$ 均小于 7, $Sig < 0.001$; 研究区土壤水盐含量总体较高, 含盐量以中度盐渍化为主; 不同季节土壤含水量排序为夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季, 土壤含盐量排序为春季 > 秋季 > 冬季 > 夏季, 水盐耦合度排序为春季 > 秋季 > 冬季 > 夏季; 不同植被类型土壤含水量排序为荒草地 > 光板地 > 耕地 > 林地, 土壤含盐量排序为光板地 > 荒草地 > 耕地 > 林地, 水盐耦合度排序为光板地 > 荒草地 > 耕地 > 林地; 由近海到内陆, 研究区土壤表层含水量、含盐量以及水盐耦合度呈现逐步递减的趋势, 但土壤含盐量在距海 > 40~50 km 处、含水量在距海 > 30~40 km 处明显上升, 耦合度也有所提高。本研究提供了滨海区域土壤水盐及其耦合关系的高效定量时空分析方法, 研究结果可为滨海盐碱土改良利用与资源管理提供参考和依据。

关键词: 土壤含水量; 土壤含盐量; 耦合关系; 时空分异; 滨海盐碱土

中图分类号: S153.6; TP751; S156.41 文献标志码: A 文章编号: 2095-6819(2023)04-0792-13 doi: 10.13254/j.jare.2022.0614

Spatio-temporal analysis of soil water and salt and their coupling relationship in the Yellow River Delta coastal area based on satellite remote sensing

ZHANG Shuwei, CHANG Chunyan*, WANG Zhuoran, ZHAO Ming, ZHAO Gengxing*, LI Yinshuai, ZHAO Huansan, ZHAO Yongchang, WANG Qiyao, ZHOU Jiahao

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

Abstract: The spatio-temporal characteristics and coupling relationship of water and salt are important basis of salinization soil management and regional ecological protection management. This study examined representative coastal areas of the Yellow River Delta: Kenli. The method of combining field measurement with remote sensing image was used to screen the soil water and salt spectral parameters with high correlation, and a soil water and salt quantitative remote sensing inversion model based on the sensitive spectral parameters was constructed. The spatio-temporal variability and coupling of soil surface water and salt in the study area were analyzed using classical statistical analysis, coupling degree model, buffer zone analysis, and support vector machine classification. The results showed that the estimation models of soil water and salt based on $LSWI$, $NDII$, $SI-T$, and $NDSI$ were established. The verification set R^2 was

收稿日期: 2022-09-05 录用日期: 2022-10-14

作者简介: 张术伟 (1998—), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 从事土地资源与信息研究。E-mail: zsw00019@163.com

*通信作者: 常春艳 E-mail: chyan0103@sdau.edu.cn; 赵庚星 E-mail: zhaogx@sdau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41877003); 山东省重大科技创新工程项目 (2019JZZY010724); 山东省“双一流”奖补资金项目 (SYL2017XTTD02)

Project supported: National Natural Science Foundation of China (41877003); Major Scientific and Technological Innovation Project in Shandong Province (2019JZZY010724); Funds of Shandong “Double Tops” Program (SYL2017XTTD02)

more than 0.650, and $RMSE$ was below 7, $Sig < 0.001$. The soil water and salt content in the study area was generally high, and the salt content was mainly moderate salinization. The order of soil water was summer>spring>autumn>winter, the order of soil salinity was spring>autumn>winter>summer, and the order of coupling degree was spring>autumn>winter>summer. Soil water ranked as grassland>bare land>arable land>forest land, soil salinity ranked as bare land>grassland>arable land>forest land, and the coupling degree was as follows: bare land>grassland>arable land>forest land. The soil surface water content, salt content, and water-salt coupling degree showed a gradually decreasing trend from offshore to inland in the study area. The soil salt content increased obviously at the distance of >40–50 km and the soil water content increased obviously at the distance of >30–40 km from the sea, the coupling also improved. This study provides an efficient quantitative spatio-temporal analysis method of soil water and salt and their coupling relationship in coastal areas. The results of this study can provide a reference and basis for the improvement, utilization, and management of coastal saline-alkali soil resources.

Keywords: soil moisture; soil salinity; coupling relationship; spatial and temporal variability; coastal saline soil

盐渍化土壤在我国干旱区、半干旱区以及滨海地区分布广泛^[1],严重影响农业生态环境的稳定性和农业经济的发展^[2-3]。受海水侵蚀、高地下水位、人类不合理开垦等自然和人为驱动力的影响^[4],黄河三角洲滨海盐碱土分布广泛,土壤盐渍化已成为当地生态系统和农业可持续发展最重要的环境问题^[5]。因此,运用遥感和GIS(地理信息系统)技术,及时掌握区域土壤水盐的时空分布特征及耦合关系,对于监测盐渍化动态发展、治理利用盐渍土资源具有重要意义。

土壤水盐状况在一定程度上反映了土壤盐渍化的程度和状态,是气候、地形、土壤、植被和水文等多种因素影响的结果^[6],运用遥感和GIS研究土壤水盐分布已成为研究的热点之一,已取得了较好的研究成果。王庆明等^[7]基于遥感和地面监测数据,通过盐分指数和植被指数的特征空间建立盐渍化遥感监测模型,由此分析民勤绿洲区植被质量、土壤盐分和地下水埋深三者关系。窦旭等^[8]将野外实测与室内试验分析结合,采用统计学方法分析土壤表层及深层含水率与盐分时空分布和变异规律,并探求地下水埋深对土壤盐分的影响。陈红艳等^[9]基于Landsat 8 OLI多光谱影像,在改进植被指数的基础上采用多种方法构建最佳土壤盐分含量的遥感反演模型,进行了垦利区土壤盐分含量的空间分布反演和分析。张子璇等^[10]基于Landsat影像,运用偏最小二乘回归法构建土壤盐分定量反演模型,反演土壤盐分的时空变化特征并探讨水文气候因素的影响。李萍等^[11]将近地高光谱和Landsat 8遥感影像数据结合,选取敏感光谱参量建立估测模型,实现了黄河三角洲垦利区土壤含水量的遥感反演。

总体来看,目前内陆地区有关土壤盐渍化的研究相对较多,也有不少地下水和土壤水分、盐分关系的分析报道,而滨海地区的水盐变化更为复杂,值得更多的研究关注,目前研究多集中于单一水分或盐分的

反演监测,定量反演滨海地区表层水盐耦合关系并分析其时空分异特征的研究相对缺乏。不同季节、不同植被类型、距海远近情况下的土壤表层水盐耦合规律的系统研究尚鲜见报道。

鉴于此,本研究选择黄河三角洲滨海区域垦利区为代表区域,分别建立土壤水分、盐分定量反演模型,并结合耦合度模型,从不同季节、不同植被类型、距渤海远近等方面研究土壤水盐时空变异及其耦合特征,旨在探索基于遥感的土壤水盐及其耦合关系研究方法,为黄河三角洲滨海盐碱地开发利用、生态环境保护及管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

垦利区(37°24'~37°57'N, 118°15'~119°19'E)隶属于山东省东营市,地处黄河入海口,东部受渤海浸渍影响,土壤发育差,土壤盐碱化严重;西部耕地相对集中,土壤条件较好,土壤盐碱化程度相对较低。该区地处暖温带大陆性季风气候区,春季干旱多风,夏季高温多雨,秋季降温少雨,冬季寒冷干燥,春旱及夏涝灾害频繁。该区地形较为平缓,具有典型的三角洲地貌特征,地貌类型有海滩地、倾斜平地 and 河滩高地等,坡降比仅1/8 000~1/12 000,黄河流经贯穿入海。土壤类型主要为盐化潮土和滨海盐土,耕层质地以砂壤和轻壤为主,毛细管作用强烈,加之地下水埋深浅且矿化度高,受黄河水侧渗和海水浸渍的影响,土壤盐渍化现象较为普遍,这给农业生产和区域生态带来严重影响。

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 野外调查与采样

按代表性、均匀性原则布设调查样点(图1,不含滩涂区域),实地观测记载采样时间、采样点编号、坐标、植被类型、水盐状况等信息,野外调查采用EC110

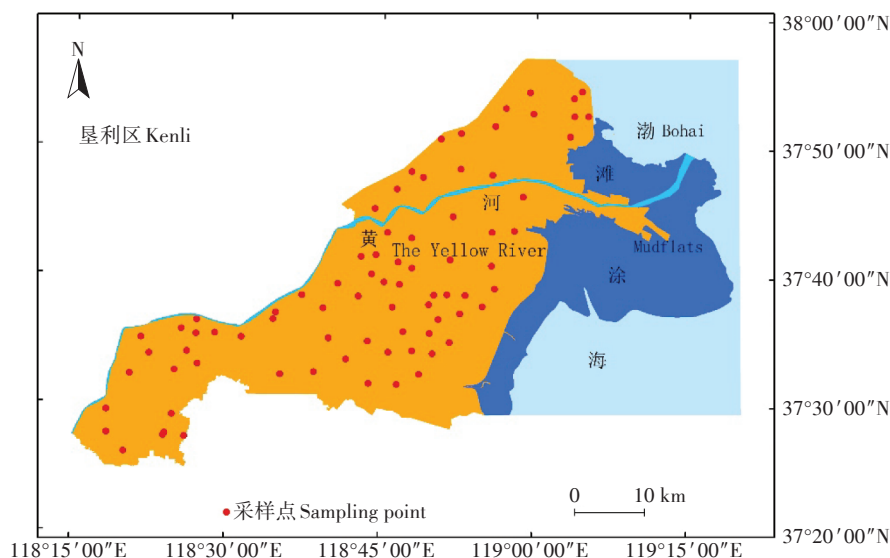


图1 研究区地理位置及样点分布

Figure 1 Geographical location and sample point distribution in the study area

便携式盐分计测定土壤表层(0~15 cm)电导率,采用T系列土壤水分温度速测仪测定0~15 cm土壤表层水分含量。采用单点取样法采集0~15 cm的土壤表层样品,以手持GPS定位仪测定实地坐标。为了准确反映季节性,分别选择4月、8月、11月、2月(次年)表层(0~15 cm)土壤水盐样点数据代表一年四季土壤水盐含量。获取2015年4月23—25日春季样点数据105个,2013年8月14—15日夏季样点数据74个,2016年11月14—16日秋季样点数据116个,2014年2月26日—3月1日冬季样点数据103个。

1.2.2 样品检测分析与数据处理

(1) 土壤表层含水量

将带有土壤样品的铝盒置于 $(105\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 的恒温箱内烘至恒质量,测定质量并计算出各土样的质量含水量;采用环刀法测定土样的容重,进而计算其容积含水量。将室内分析与野外实测得到的2组土壤表层含水量数据进行相关性分析,方程为 $W_0=0.911W_1+0.242$ ($n=81, R^2=0.989$),其中 W_0 为室内分析土壤表层含水量(%), W_1 为野外实测土壤表层含水量(%),并以此对野外含水量数据进行校正。

(2) 土壤表层含盐量

将采集的土壤带回实验室内自然风干,磨碎、过2 mm筛后用于测定含盐量。所有的土样均配制成水土比为5:1的浸提液,振荡5 min,静置30 min,采用烘干法测定土壤含盐量。同时,采用EC110便携式盐分计测定土壤浸提液的电导率,建立土壤浸提液电导率 $EC_i(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$ 和含盐量 $S_i(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$ 之间的关系方程 $S_i=$

$0.004\times EC_i+0.237$ ($n=81, R^2=0.974$)。在此基础上,以土壤浸提液电导率对野外电导率数据进行校正,得到垦利区野外实测土壤电导率 $EC(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$ 与含盐量 $S_i(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$ 之间的关系方程 $S_i=0.00218EC+0.727$ ($n=81, R^2=0.938$)。将验证土样数据代入该方程,得到的拟合结果与室内分析结果的比较精度均大于0.93,因而以此关系方程对全部野外电导率数据进行转换,得到土壤盐分含量数据。

将数据分别按不同季节、不同植被类型、距渤海远近等划分为土壤表层含水量和含盐量数据组。参照我国滨海地区的土壤盐渍化分级标准,将土壤盐渍化分为5级:非盐渍化土($<1.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),轻度盐渍化土($1.0\sim 2.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),中度盐渍化土($>2.0\sim 4.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),重度盐渍化土($>4.0\sim 6.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),盐土($>6.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

1.2.3 遥感影像数据与预处理

研究使用与采样时间相同或相近的Landsat 8遥感影像,轨道号为121/034,获取时间分别为2013年8月18日、2014年2月26日、2015年5月14日、2016年11月14日。遥感数据均来源于“地理空间数据云”网站。在ENVI5.3中进行影像预处理,包括辐射定标、大气校正、图幅配准、裁剪等,最终得到研究区去除滩涂后的遥感影像。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤样本水盐统计特征分析

利用SPSS和Excel软件,采用统计学方法分析采样点土壤表层(0~15 cm)水盐的描述性统计特征,根据变异系数对土壤表层含水量和含盐量变异程度进

行分级^[12]: $CV<0.1$ 为弱变异, $0.1\leq CV\leq 1$ 为中等变异, $CV>1$ 为强变异。

1.3.2 水盐光谱指数的构建及筛选

(1)水分光谱指数

有研究表明,相较于可见光组合,近红外、短波红外波段参与建立的光谱指数在反映土壤含水量时,参数更稳定,效果更好^[13]。因此,基于以往研究,本研究选取近红外、短波红外波段参与构成的地表含水量指数(Surface Water Capacity Index, *SWCI*)、陆地表面水分指数(Land Surface Water Index, *LSWI*)、修正型地表含水量指数(Modified Surface Water Capacity Index, *MSWCI*)、归一化差异红外指数(Normalized Difference Infrared Index, *NDII*)等水分光谱指数^[14-16],用于反演研究区土壤表层水分状况,详见表1。

(2)盐分光谱指数

有研究表明,绿光、红光、近红外3个波段的反射率值与盐分含量的相关系数较高,反映土壤含盐量时,光谱响应更稳定,效果更好^[17]。因此选取了绿光、红光、近红外参与构成的盐分指数(Salinity Index, *SI*)*SI-T*、*SI1*、*SI3*和归一化盐分指数(Normalized Differences Salinity Index, *NDSI*)^[18-20],用于反演研究区土壤表层盐分状况,详见表2。

(3)特征光谱参量筛选

使用SPSS分别分析水盐光谱指数与水盐含量的相关性,并进行显著性分析,在此基础上,筛选出相关性较高的光谱指数,作为水盐反演模型的输入变量。

1.3.3 水盐反演及耦合度模型构建

(1)水盐反演模型构建

对四季采集的样品进行分类和分离,随机选择2/3样品建立建模集,其余为验证集。春季采集的105个样品中,70个用于建模,其余35个用于验证;夏季采集的74个样品中,50个用于建模,其余24个用于验证;秋季采集的116个样品中,76个用于建模,其余40个用于验证;冬季采集的103个样品中,68个用于建模,其余35个用于验证。

采用多元线性回归(Multivariable Linear Reggres-

表2 研究所使用的盐分光谱指数

Table 2 Salt spectral indices used in the study

盐分光谱指数 Salt spectral index	公式 Expression	参考文献 Reference
盐分指数 Salinity index (<i>SI-T</i>)	$Red/NIR\times 100$	[18]
盐分指数 Salinity index 1 (<i>SI1</i>)	$\sqrt{Green\times Red}$	[19]
盐分指数 Salinity index 3 (<i>SI3</i>)	$\sqrt{Green^2+Red^2}$	[19]
归一化盐分指数 Normalized Differences Salinity Index (<i>NDSI</i>)	$(Red-NIR)/(Red+NIR)$	[20]

sion, *MLR*)方法,以选取的相关性较高的光谱指数为输入变量,水盐为输出变量进行建模,所有模型均通过决定系数(R^2)与均方根误差(*RMSE*)评价反演模型的预测精度。其中, R^2 反映土壤水盐反演模型构建和验证的稳定性,当 R^2 的数值与1相近时,模型稳定性较强、拟合度较高;*RMSE*主要用来检验模型的估测能力,当*RMSE*的数值越小时,模型的估测能力越好,反之,估测能力越差。

(2)水盐耦合度模型构建

耦合作为物理学概念,是指2个(或2个以上)系统或运动形式通过各种相互作用而彼此影响的现象^[21]。耦合度是描述系统或要素相互影响的程度,可以更好地揭示“盐随水来、盐随水去、水散盐留”的水盐运动规律。

借鉴物理学中的容量耦合(Capacitive coupling)概念及容量耦合系数模型^[22]。即:

$$C_n=\{(u_1\times u_2\times\cdots\times u_m)/[\prod(u_i+u_j)]\}^{1/n}$$
 (1)

构建得到土壤表层含水量 u_1 与含盐量 u_2 的耦合度函数模型:

$$C=2\{(u_1\times u_2)/[(u_1+u_2)(u_1+u_2)]\}^{1/2}$$
 (2)

显然,耦合度值 $C\in[0,1]$ 。当 $C=0$,耦合度极小,表示水盐处于无关状态;当 $C=1$,耦合度最大,表示水盐之间达到共振耦合。耦合度越大则水盐的有序状态越高,水盐相互影响的程度越大。根据水盐相关区间,对比计算水盐耦合度,在水多盐少情况下,水盐耦合度多分布在[0.35,0.59];水少盐少、水多盐多情况下,多集中分布在(0.59,0.76];随着水盐再次升高,集

表1 研究所使用的水分光谱指数

Table 1 Water spectral indices used in the study

水分光谱指数 Water spectral index	公式 Expression	参考文献 Reference
地表含水量指数 Surface Water Capacity Index (<i>SWCI</i>)	$(SWIR1-SWIR2)/(SWIR1+SWIR2)$	[14]
陆地表面水分指数 Land Surface Water Index (<i>LSWI</i>)	$(NIR-SWIR)/(NIR+SWIR)$	[15]
修正型地表含水量指数 Modified Surface Water Capacity Index (<i>MSWCI</i>)	$(Green-SWIR2)/(Green-SWIR2)$	[14]
归一化差异红外指数 Normalized Difference Infrared Index (<i>NDII</i>)	$(Red-NIR)/(Red+NIR)$	[16]

中分布在(0.76, 1.00]。由此,将耦合度划分为[0.35, 0.59]、(0.59, 0.76]、(0.76, 1.00]三个区间,分别对应低、中、高度耦合水平。

1.3.4 植被类型信息提取

利用研究区 Landsat 影像,结合高分辨率 Google Earth 影像和实地调研资料,在 ArcGIS 中随机生成 545 个样点,选取 363 个作为训练样本,182 个作为验证样本。采集研究区耕地、林地、光板地、荒草地、居民点、道路、水体样本,使用 SVM(支持向量机)分类方法,并用实地考察获取的各类型样本点进行地物分类精度验证,统计对比各地物类别的分类精度、总体精度(OA)、用户精度。在 ArcGIS 中将分类栅格结果图转换为矢量图,剔除非植被类型,得到垦利区植被类型图。

1.3.5 水盐及耦合特征分析

利用各季节水盐估测模型反演得到4个季节的水盐分布,分析比较不同季节的水盐含量及分布特征;将土壤表层水盐相关性较高的春季土壤水盐分布图与植被类型图进行空间连接,分析比较不同植被类型的土壤水盐特征;以离海实际距离 10 km 间隔构建渤海缓冲区,并分析离渤海不同距离的土壤水盐变异特征。运用耦合度函数模型在 ENVI 中对研究区表层含水量和含盐量进行时空耦合,得到水盐耦合度影像图,分析垦利区水盐耦合度不同季节、不同植被类型和不同距海距离的时空特征。为直观比较土壤表层含水量、含盐量及耦合度的差异,在 ArcGIS 中运用 Zonal statistics 统计水、盐及耦合度的均值,并进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 土壤样本水盐统计特征分析

表3为垦利区不同季节采集的土壤样本表层水盐含量的统计分析,结果表明,各时期土壤含水量变异系数为0.13~0.42,含盐量变异系数为1.03~1.51,各

时期土壤含水量均属于中等变异,含盐量则均属于强变异程度,相较于水分,盐分波动更为剧烈。含水量大小排序为夏季>春季>秋季>冬季,含盐量大小排序为春季>秋季>冬季>夏季,其中春、秋季土壤水盐含量差异不明显,而夏、冬季水盐含量均与其他时期存在显著差异。

2.2 敏感光谱指数的筛选

表4为四季各水盐光谱指数与土壤水盐含量的相关性分析结果,可以看出,各水盐光谱指数与水盐含量相关系数较高,均在0.01水平上呈显著相关。其中,水分光谱指数中的 *LSWI*、*NDII* 与四季水分相关性较强;盐分光谱指数中的 *SI-T*、*NDSI* 与四季盐分相关性较强,因此分别筛选出水分指数组和盐分指数组的敏感指标作为输入变量,用于土壤水盐反演模型的构建。

2.3 土壤水盐反演模型及精度验证

2.3.1 四季土壤水分反演模型及精度验证

分别以相关性较高的水分光谱指数 *LSWI*、*NDII* 为自变量,土壤水分实测值为因变量,建立基于光谱指数的土壤含水量估测模型(表5),分别运用验证集

表4 四季水盐光谱指数与土壤水盐含量的相关性
Table 4 Correlation between seasonal water-salt spectral indices and soil water-salt content

光谱指数类型 Spectral index type	光谱指数 Spectral index	相关系数 Correlation coefficient			
		春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
水分光谱指数 Water spectral index	<i>SWCI</i>	0.638**	0.642**	0.660**	0.658**
	<i>MSWCI</i>	0.645**	0.639**	0.652**	0.661**
	<i>LSWI</i>	0.738**	0.773**	0.764**	0.728**
	<i>NDII</i>	0.732**	0.753**	0.756**	0.721**
盐分光谱指数 Salt spectral index	<i>SI-T</i>	0.721**	0.729**	0.747**	0.725**
	<i>SI1</i>	0.632**	0.648**	0.652**	0.658**
	<i>SI3</i>	0.646**	0.670**	0.695**	0.665**
	<i>NDSI</i>	0.755**	0.754**	0.760**	0.735**

注:**表示在0.01水平(双侧)上显著相关。

Note:** indicates significant correlation at the 0.01 level(two-sided).

表3 土壤水盐样本的描述性统计

Table 3 Descriptive statistics of soil water and salt samples

季节 Season	样本数 Sample number	水分样本 Water sample				盐分样本 Salt sample			
		最小值 Minimum/%	最大值 Maximum/%	平均值±标准差 Mean±Standard deviation/%	变异系数 Coefficient of variation	最小值 Minimum/(g·kg ⁻¹)	最大值 Maximum/(g·kg ⁻¹)	平均值±标准差 Mean±Standard deviation/(g·kg ⁻¹)	变异系数 Coefficient of variation
春 Spring	105	12.80	49.80	37.80±8.27b	0.21	1.25	47.59	7.91±10.30a	1.30
夏 Summer	74	30.55	55.22	43.25±5.72a	0.13	1.32	31.63	5.01±6.03c	1.20
秋 Autumn	116	13.90	51.90	36.44±9.44b	0.25	1.04	45.06	7.43±11.25a	1.51
冬 Winter	103	6.33	49.80	27.88±11.72c	0.42	1.17	33.25	6.79±7.02b	1.03

注:同列不同字母表示各季节间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different letters in a column indicate the significant difference among seasons ($P<0.05$). The same below.

表5 四季土壤含水量估测模型

Table 5 Estimation model of soil moisture in four seasons

季节 Season	估测模型 Estimation model	R^2	RMSE
春 Spring	$23.358NDII+16.752LSWI+35.302$	0.676	6.512
夏 Summer	$16.377NDII+23.457LSWI+31.682$	0.674	3.933
秋 Autumn	$21.271NDII+22.902LSWI+37.623$	0.651	6.862
冬 Winter	$19.876NDII+25.170LSWI+23.074$	0.687	6.285

对模型进行验证(图2)。结果表明,验证集 R^2 均大于0.650, $RMSE$ 均小于7, $Sig<0.001$,模型的预测精度较高,可用于各季节水分反演。

2.3.2 四季土壤盐分反演模型及精度验证

分别以相关性较高的盐分光谱指数 $SI-T$ 、 $NDSI$ 为自变量,土壤盐分实测值为因变量,建立基于光谱指数的土壤含盐量估测模型(表6),分别运用验证集对模型进行精度验证(图3)。结果表明,验证集 R^2 均大于0.650, $RMSE$ 均小于7, $Sig<0.001$,模型的预测精度较高,可用于各季节盐分反演。

2.4 研究区植被类型分类结果

图4为垦利区春季植被类型支持向量机分类方法的分类结果,总体精度为86.26%, $Kappa$ 系数为0.816 2,耕地、林地、光板地、荒草地的分类精度分别为86.79%、86.04%、87.17%、85.10%,分类结果较好。

总体来看,研究区耕地多分布于中部及西南部区域,光板地、荒草地主要分布在沿海及中部地势较低的区域,林地则零散分布于耕地区及东北部黄河两岸。

2.5 土壤水盐状况的时空特征分析

2.5.1 土壤水盐的季节性特征

(1)土壤水分的季节性特征

表6 四季土壤含盐量估测模型

Table 6 Estimation model of soil salinity in four seasons

季节 Season	估测模型 Estimation model	R^2	RMSE
春 Spring	$0.190SI-T+16.313NDSI+9.229$	0.686	4.907
夏 Summer	$0.320SI-T+30.417NDSI+7.210$	0.668	3.902
秋 Autumn	$0.194SI-T+17.969NDSI+8.614$	0.695	6.775
冬 Winter	$0.189SI-T+23.456NDSI+6.116$	0.675	5.632

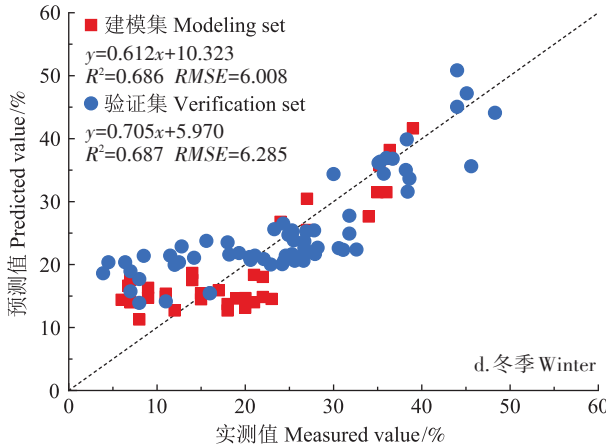
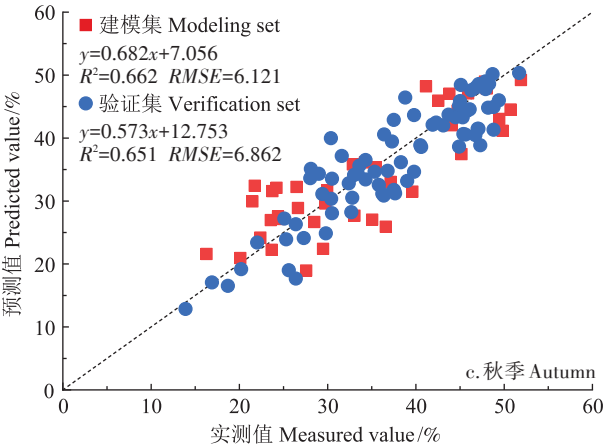
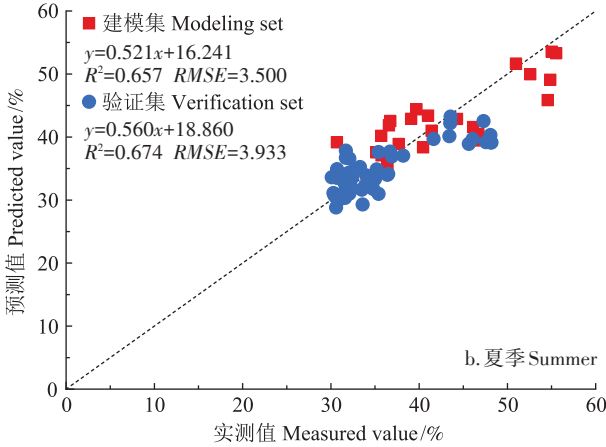
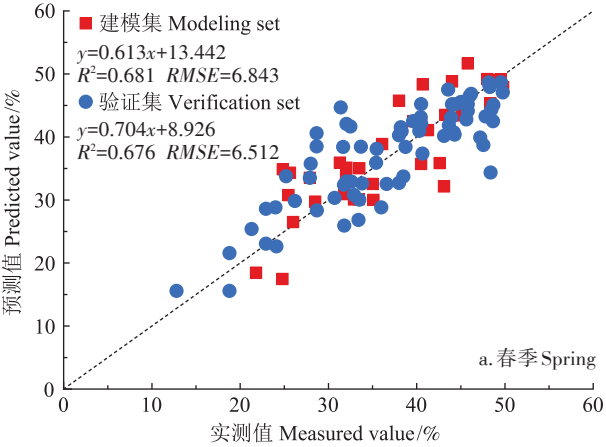


图2 四季水分反演模型及精度验证

Figure 2 Four-season moisture inversion model and its precision verification

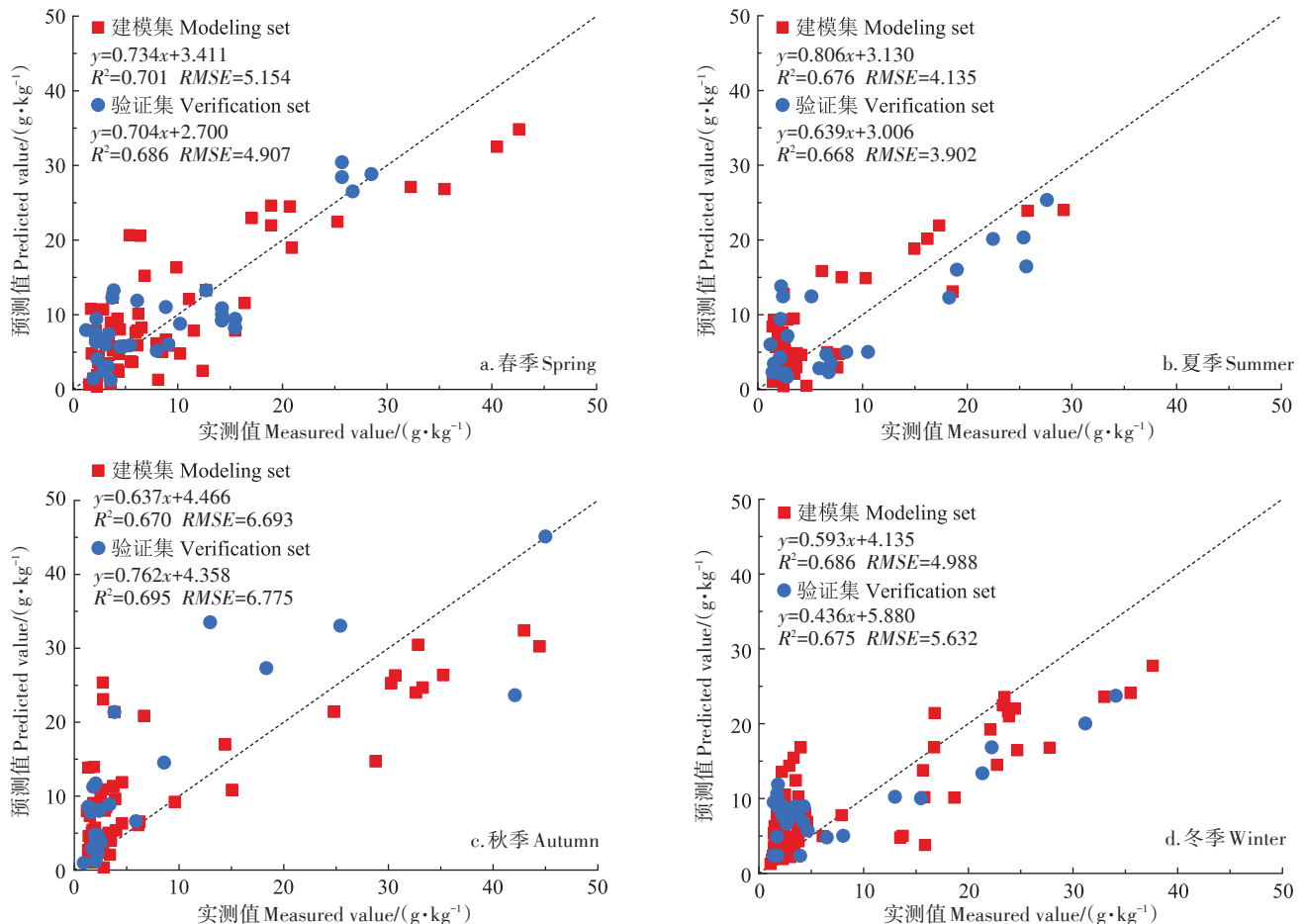


图3 四季盐分反演模型及精度验证

Figure 3 Four-season salinity inversion model and its precision verification

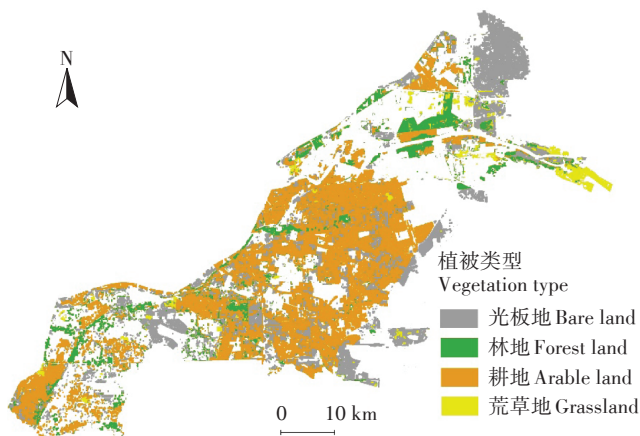


图4 垦利区春季植被类型分布

Figure 4 Distribution map of vegetation types in spring in Kenli District

表7为垦利区不同季节土壤含水量分级面积比例,可以看出,垦利区夏季土壤含水量主要处于>30%等级范围,其中>40%的面积比例高达73.84%。冬季土壤含水量主要为>20%~30%和>30%~40%,二者的面积比

例达到91.99%。春、秋两季土壤含水量>40%的面积比例分别为45.07%和40.54%,其次为>30%~40%等级,占比分别为36.82%和33.85%,而秋季>20%~30%含水量等级的面积比例则明显高于春季。含水量高低的季节顺序为夏季>春季>秋季>冬季,随季节变化含水量呈现先升高后降低的趋势,而根据多重比较结果,春、秋两季的土壤含水量差异不显著。

图5为研究区4个季节土壤含水量的空间分布,可以看出,研究区土壤含水量总体以中部、中南部和

表7 垦利区不同季节土壤含水量均值和分级面积占比
Table 7 Mean value and gradation area proportion of soil moisture in four seasons in Kenli District

季节 Season	占比 Proportion/%				均值 Mean value/%
	0~20%	>20%~30%	>30%~40%	>40%	
春 Spring	6.34	11.77	36.82	45.07	37.34b
夏 Summer	0.19	3.31	22.66	73.84	44.86a
秋 Autumn	3.82	21.79	33.85	40.54	37.01b
冬 Winter	5.74	45.48	46.51	2.27	30.05c

东北沿海区居高,春季至夏季的含水量增加和夏季至秋季的含水量降低主要发生在中部区域,而秋季至冬季整个研究区土壤含水量则普遍降低。

(2)土壤盐分的季节性特征

表8为研究区不同季节土壤含盐量分级面积统计,可以看出,研究区各季节1~2 g·kg⁻¹的轻度盐渍化等级面积比例均极低,占比约1%。春、秋、冬三季土壤含盐量均集中分布在>6 g·kg⁻¹的盐土等级,面积比例均超过40%,其次为>2~4 g·kg⁻¹中度盐渍化等级,面积比例均超过30%,再次为>4~6 g·kg⁻¹的重度盐渍化等级,面积比例均超过20%。夏季则以中度盐渍化等级居多,面积比例达到44.53%。各季节按含盐量高低的顺序为春季>秋季>冬季>夏季,呈现年内积盐-降盐-积盐-降盐的季节特征,根据多重比较结果,春、秋两季的土壤含盐量差异不显著。

图6为研究区各季节土壤盐分的空间分布,总体看,较高的土壤含盐量集中分布在东部沿海,自东向西南呈降低趋势。春季至夏季的降盐和夏季至秋季的返盐主要集中在中部偏东和偏南区域,冬季的盐分分布与秋季基本一致,保持相对稳定。

2.5.2 土壤水盐的植被类型分异特征

(1)土壤水分的植被类型分异特征

表8 垦利区不同季节土壤含盐量均值和分级面积占比
Table 8 Mean value and gradation area proportion of soil salt in four seasons in Kenli District

季节 Season	占比Proportion/%				均值 Mean value/ (g·kg ⁻¹)
	1~2 g·kg ⁻¹	>2~4 g·kg ⁻¹	>4~6 g·kg ⁻¹	>6 g·kg ⁻¹	
春Spring	1.18	30.12	20.56	48.14	7.56a
夏Summer	1.21	44.53	22.32	31.94	3.82c
秋Autumn	1.19	31.12	22.07	45.62	7.47a
冬Winter	0.54	36.06	20.06	43.34	5.86b

表9为垦利区春季不同植被类型土壤含水量分级面积统计,可以看出,未利用的荒草地和光板地、已利用的耕地和林地具有相似的水分特征。荒草地、光板地土壤含水量>40%的面积比例均超过50%,远高于耕地和林地。而>30%~40%含水量等级4种地类的面积比例则较为接近,均为36%左右。0~20%和>20%~30%等级的土壤面积比例表现为耕地、林地明显高于荒草地、光板地。整体看,土壤含水量从高到低的植被类型为荒草地>光板地>耕地>林地,而根据多重比较结果,耕地、林地的土壤含水量差异不显著,荒草地和光板地土壤含水量均与其他植被类型存在显著差异。

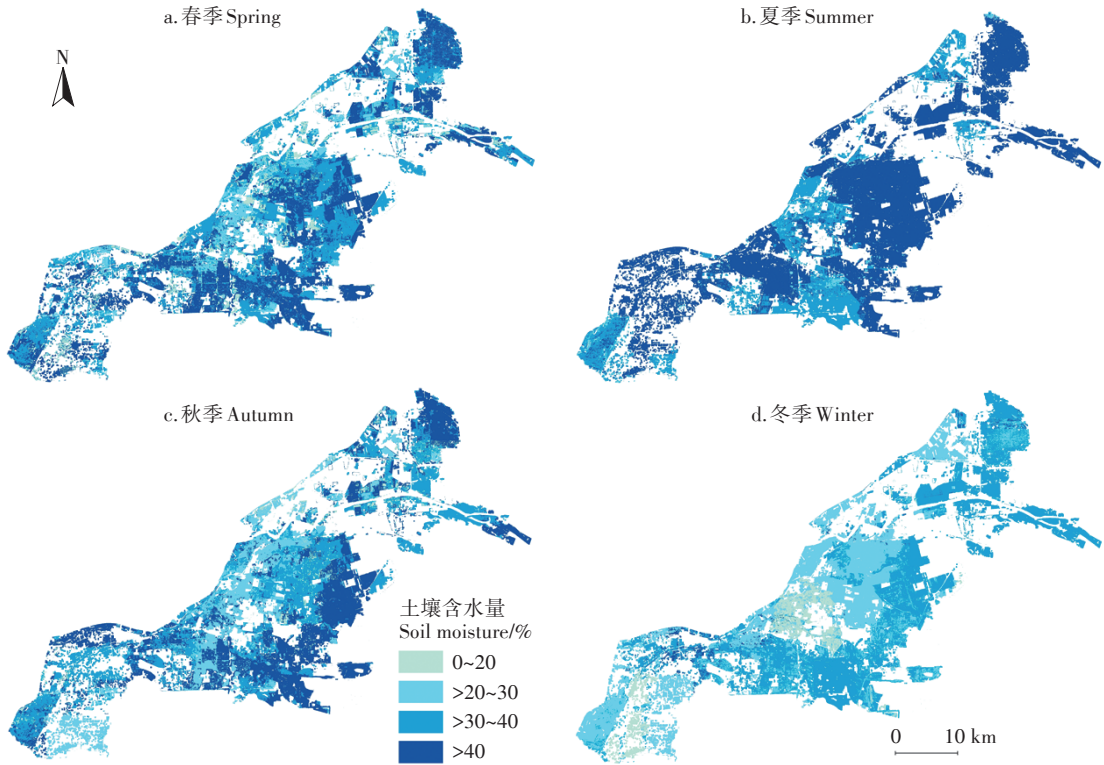


图5 垦利区不同季节土壤含水量分布
Figure 5 Distribution map of soil moisture in different seasons in Kenli District

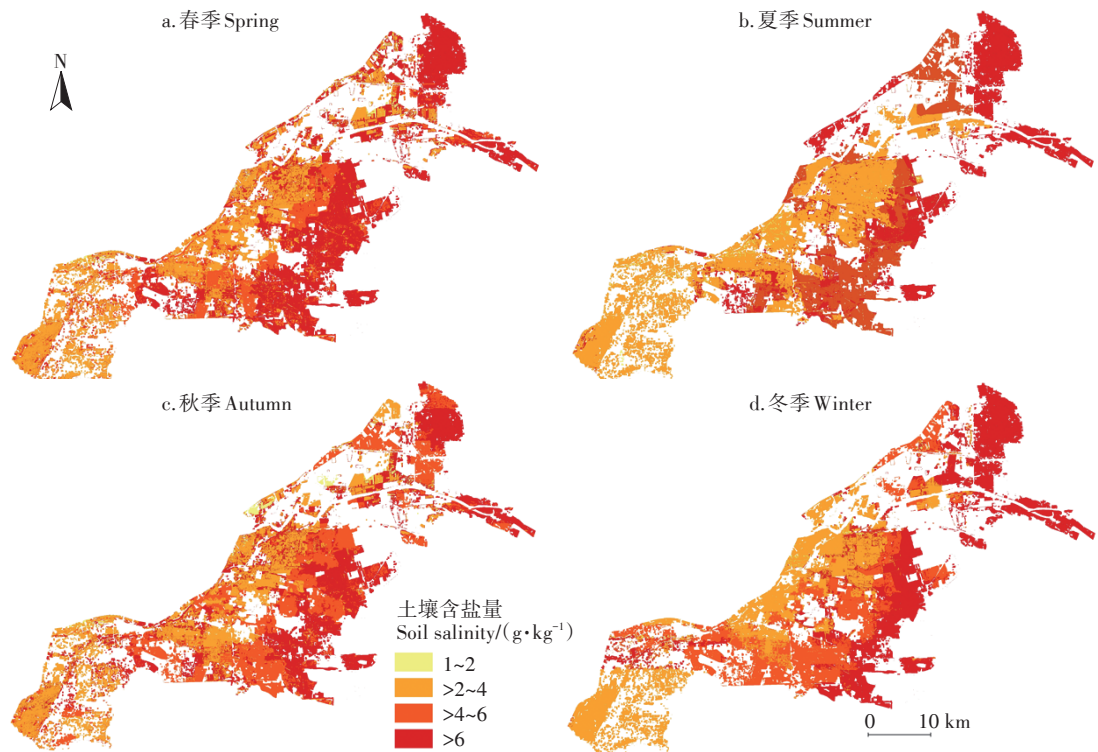


图6 垦利区不同季节土壤含盐量分布

Figure 6 Distribution map of soil salinity in different seasons in Kenli District

(2)土壤盐分的植被类型分异特征

表10为垦利区春季不同植被类型土壤含盐量面积统计,可以看出,光板地、荒草地盐分特征相似,约1/2的土壤属于盐土等级,重度盐渍化土壤面积比例亦超过耕地、林地,且光板地重度盐渍化、盐土等级面积比例高于荒草地。耕地、林地土壤面积比例均以盐土和轻度盐渍化等级居多,其面积比例合计分别为79.34%、82.05%。各类型轻度盐渍化土壤面积比例均较低,占比约1%。整体看,土壤含盐量从高到低的植被类型为光板地>荒草地>耕地>林地,根据多重比较结果,耕地、林地的土壤含盐量差异不显著,荒草地和光板地土壤含盐量均与其他植被类型存在显著差异。

2.5.3 土壤水盐距海距离分异特征

(1)土壤水分距海距离分异特征

表11为垦利区春季不同距海距离土壤含水量分级面积统计,可以看出,近海0~10、>10~20 km的东部滨海区域土壤含水量较高,水分含量>40%的土壤面积比例约占1/2,随着离海渐远,距海>20~30 km处,含水量>30%的较高等级土壤面积显著降低至31%左右,随着向内陆深入,高等级土壤含水量的面积比例则又呈增加趋势。总体看,土壤含水量随距海距离增加呈现先下降后上升的趋势。根据多重比较结果,

表9 垦利区春季不同植被类型土壤含水量均值和分级面积占比
Table 9 Mean value and gradation area proportion of soil moisture of different vegetation types in spring in Kenli District

植被类型 Vegetation type	占比 Proportion/%				均值 Mean value/%
	0~20%	>20%~30%	>30%~40%	>40%	
耕地 Arable land	10.08	14.92	36.97	38.03	35.85c
林地 Forest land	10.19	19.36	35.71	34.74	33.67c
荒草地 Grassland	2.07	2.85	36.18	58.90	43.26a
光板地 Bare land	2.38	6.15	37.71	53.76	38.25b

表10 垦利区春季不同植被类型土壤含盐量均值和分级面积占比
Table 10 Mean value and gradation area proportion of soil salt of different vegetation types in spring in Kenli District

植被类型 Vegetation type	占比 Proportion/%				均值 Mean value/ (g·kg ⁻¹)
	1~2 g·kg ⁻¹	>2~4 g·kg ⁻¹	>4~6 g·kg ⁻¹	>6 g·kg ⁻¹	
耕地 Arable land	0.86	36.02	19.80	43.32	3.37c
林地 Forest land	1.48	39.99	16.47	42.06	3.21c
荒草地 Grassland	1.31	24.73	25.40	48.56	15.91b
光板地 Bare land	1.11	20.28	28.47	50.14	28.25a

离海较远的内陆区土壤含水量差异不显著,而近海区土壤含水量存在显著差异。

(2)土壤盐分距海距离分异特征

表12为垦利区春季不同距海距离土壤含盐量分

级面积统计,可以看出,近海0~10、>10~20 km处土壤含盐量较高,盐土面积比例达69.10%、62.99%,随着向内陆深入,含盐量面积占比逐渐向中、重度盐渍化程度转移,距海>50~60 km处中度盐渍化土壤分布高达76.44%。在距海>40~50 km部分地势较低区域,重度盐渍化、盐土面积比例稍有增加。总体来看,盐渍化程度随离海距离增加有降低趋势,由盐土转为中度盐渍化。根据多重比较结果,距海较远的内陆区土壤含盐量差异不显著,而近海区土壤含盐量存在显著差异。

2.6 土壤水盐状况的耦合关系分析

2.6.1 不同季节土壤水盐耦合关系

表13为垦利区各季节土壤水盐耦合度分级面积

表11 垦利区春季不同距海距离土壤含水量均值和分级面积占比
Table 11 Mean value and gradation area proportion of soil moisture of different distance from sea in spring in Kenli District

缓冲区 Buffer zone/km	占比 Proportion/%				均值 Mean value/ %
	0~20%	>20%~30%	>30%~40%	>40%	
0~10	3.54	5.08	38.48	52.90	43.98a
>10~20	3.76	10.75	40.08	45.41	40.69b
>20~30	15.13	22.40	31.47	31.00	33.79d
>30~40	7.46	17.88	33.97	40.69	36.68c
>40~50	5.95	15.92	36.54	41.59	36.81c
>50~60	6.73	13.00	35.45	44.82	36.94c

表12 垦利区春季不同距海距离土壤含盐量均值和分级面积占比
Table 12 Mean value and gradation area proportion of soil salt of different distance from sea in spring in Kenli District

缓冲区 Buffer zone/ km	占比 Proportion/%				均值 Mean value/ (g·kg ⁻¹)
	1~2 g·kg ⁻¹	>2~4 g·kg ⁻¹	>4~6 g·kg ⁻¹	>6 g·kg ⁻¹	
0~10	1.53	12.09	17.28	69.10	22.28a
>10~20	1.49	18.35	17.17	62.99	15.16b
>20~30	0.26	40.80	35.99	22.95	8.63c
>30~40	1.39	50.18	27.14	21.29	5.39d
>40~50	0.67	45.48	28.74	25.11	6.05d
>50~60	1.23	76.44	15.09	7.24	5.81d

表13 垦利区各季节土壤水盐耦合度均值和分级面积占比
Table 13 Mean value and gradation area proportion of soil water-salt coupling degree in each season in Kenli District

季节 Season	占比 Proportion/%			均值 Mean value
	0.35~0.59	>0.59~0.76	>0.76~1.00	
春 Spring	25.18	19.62	55.20	0.67a
夏 Summer	56.13	21.67	22.20	0.53b
秋 Autumn	26.96	20.10	52.94	0.64a
冬 Winter	34.97	39.91	25.12	0.62a

统计,可以看出,垦利区春、秋两季土壤表层水盐耦合度较高,高耦合度土壤面积比例均超过50%。冬季以中耦合度为主,面积比例为39.91%,明显高于其他季节。夏季则以低耦合度居多,面积比例达到56.13%。整体看,各季节水盐耦合度高低顺序为春季>秋季>冬季>夏季。根据多重比较结果,春、秋季和冬季的土壤水盐耦合度差异不显著。

图7为垦利区各季节土壤水盐耦合度的空间分布,总体看,各季节水盐耦合度较高区域主要分布在研究区沿海区域以及腹部地势较高区域。春季至夏季水盐耦合度降低区域及夏季至秋季水盐耦合度升高区域主要集中在黄河沿岸及西南部地区,秋季至冬季除了区域中部水盐耦合度有所提高外,其他区域水盐耦合度普遍降低。

2.6.2 不同植被类型土壤水盐耦合关系

表14为研究区不同植被类型土壤水盐耦合度分级面积统计,可以看出,光板地、荒草地水盐耦合度较高,高耦合度土壤面积比例分别达到62.39%和56.11%,远高于耕地和林地。耕地、林地土壤水盐耦合主要为低耦合度水平,面积比例均超过40%,其次为中耦合度水平,面积比例在30%左右。整体看,各植被类型水盐耦合度从高到低依次为光板地>荒草地>耕地>林地。根据多重比较结果,耕地、林地上土壤水盐耦合度以及荒草地、光板地上土壤水盐耦合度差异不显著。

2.6.3 不同距海距离土壤水盐耦合关系

表15为研究区距海距离不同缓冲区土壤水盐耦合度分级面积统计,可以看出,近海区(0~10、>10~20 km)土壤水盐耦合度较高,高耦合度土壤面积比例达55.75%、47.07%,随着向内陆延伸,土壤水盐耦合度面积比例逐渐向低、中等程度转移,距海>50~60 km处低水盐耦合度土壤面积分布高达77.22%。在距海>30~40 km处水盐耦合度稍有提升。总体看,水盐耦合度随离海距离增加有降低的趋势。根据多重比较结果,距海较远的内陆区土壤水盐耦合度差异不显著,而近海处土壤水盐耦合度存在显著差异。

3 讨论

本研究结果显示,黄河三角滨海区域土壤盐化程度普遍较高,以中度盐渍化为主,这与相关的研究结果^[23-24]一致。本研究以不同年份的水盐数据研究土壤水盐及耦合关系的季节性差异,结果显示该区水盐季节特征呈现春秋两季水盐较多、夏季水多盐少、冬

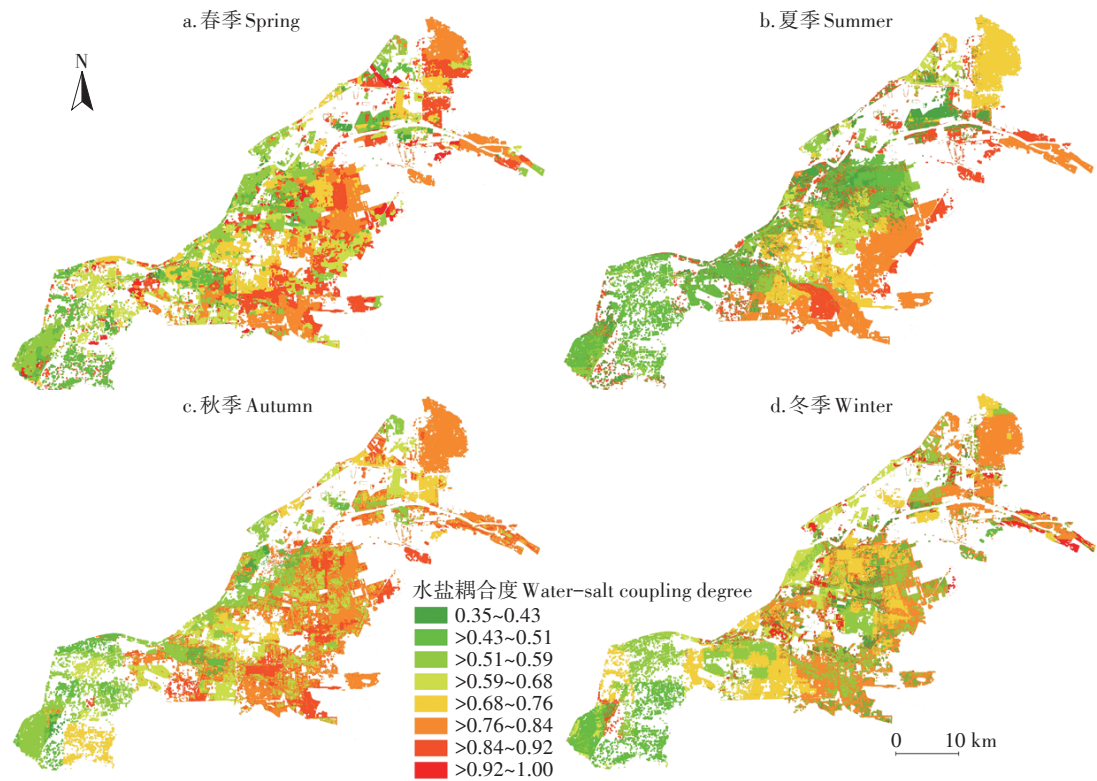


图7 垦利区各季节水盐耦合度分布

Figure 7 Distribution of water-salt coupling degree in each season in Kenli District

表14 垦利区不同植被类型土壤水盐耦合度均值和分级面积占比
Table 14 Mean value and gradation area proportion of soil water-salt coupling degree of different vegetation types in Kenli District

植被类型 Vegetation type	占比Proportion/%			均值 Mean value
	0.35~0.59	>0.59~0.76	>0.76~1.00	
耕地 Arable land	41.04	28.63	30.33	0.57b
林地 Forest land	45.49	30.39	24.12	0.55b
荒草地 Grassland	20.25	23.64	56.11	0.83a
光板地 Bare land	13.12	24.49	62.39	0.86a

季水少盐较多的特征,与相关的研究结果^[25]一致,表明不同年份水盐特征具有基本相同的季节性差异。就耦合度而言,相较于水多盐少的夏季和水少盐较多的冬季,水盐均较多的春秋两季水盐耦合度较高,显示了土壤盐渍化在春秋积盐季节的较高敏感性,这也可能是大量的土壤盐渍化研究选择春秋季节的原因^[26-27]。

研究发现,不同植被类型具有明显不同的水盐变异及耦合特征,显示滨海盐渍土地区不同植被类型对土壤水盐的较好指示性,与相关研究结论^[28]相同,也进一步证实植被覆盖度可作为评估盐碱程度的重要指标^[29]。荒草地及光板地土壤水盐含量均较高的情况下,其水盐耦合度较高,而耕地土壤水盐含量均较低的

表15 垦利区不同距海距离土壤水盐耦合度均值和分级面积占比

Table 15 Mean value and gradation area proportion of soil water-salt coupling degree of different distance from the sea in Kenli District

缓冲区 Buffer zone/km	占比Proportion/%			均值 Mean value
	0.35~0.59	>0.59~0.76	>0.76~1.00	
0~10	15.72	28.53	55.75	0.85a
>10~20	22.17	30.76	47.07	0.78b
>20~30	45.83	33.86	20.31	0.65d
>30~40	31.31	35.41	33.28	0.72c
>40~50	56.85	25.17	17.98	0.63d
>50~60	77.22	10.07	12.71	0.61d

情况下,其水盐耦合度亦偏高,这与相关研究结果^[30]一致,说明植被类型对水盐含量及其耦合度高低有显著的影响,濒海地区植被类型、覆盖特征、时空分异及其对土壤水盐的定量响应值得进一步的研究探索。

研究区黄河沿岸和东部近海区含水量较高,而地势高、埋水深的西南部土壤含水量较低,这与本地区其他相关研究结果^[31]一致。距渤海距离越近,盐渍化程度越高,东南、东北近海的生态脆弱区多为盐土及重度盐渍化土壤,反映了地势抬升及淡水补给

对土壤盐渍化的影响,与范晓梅等^[31]的研究结果一致,而与我国西部内陆地区的相关研究结果^[32]不同。这反映了滨海与内陆土壤盐渍化程度的差异,说明黄河三角洲地区黄河、渤海对土壤水盐空间分异的重要影响。

沿海区域在海水倒灌的影响下,土壤水分及盐分均朝双高方向发展,水盐耦合关系较强。腹部地势较高区域,土壤水分储存有限,盐分相应较低,土壤水盐均朝双低方向发展,土壤耦合关系同样较强。黄河沿岸及西南部地区淡水补给充足,土壤水多盐少,呈现非同向发展的状态,因而水盐耦合关系较弱。综合来看,高矿化地下水位的高低对研究区的水盐耦合关系格局起着主导作用。

本研究尝试了利用耦合度函数和遥感影像量化土壤水盐耦合关系的可行性。但滨海地区表层水盐耦合关系还受自然和人为多方面因素的影响,因此后续可通过多指标因子耦合叠加分析以更全面衡量水盐协调程度及因子影响,并从土壤改良利用的角度提出水盐调控等相关建议。

4 结论

(1)本研究选取土壤水分敏感光谱指数 $LSWI$ 、 $NDII$,盐分敏感光谱指数 $SI-T$ 、 $NDSI$,采用多元线性回归方法建立的不同季节土壤水盐估测模型,验证集 R^2 均大于0.650, $RMSE$ 均小于7, $Sig<0.001$,模型的预测精度较高,可用于各季节土壤水盐反演。

(2)研究区土壤含盐量和含水量整体较高,土壤含盐量以中度盐渍化为主,绝大部分土壤含水量高于30%。不同季节盐分特征为春季>秋季>冬季>夏季,水分特征为夏季>春季>秋季>冬季,水盐耦合度季节排序为春季>秋季>冬季>夏季。

(3)不同植被类型土壤盐分特征为光板地>荒草地>耕地>林地,水分特征为荒草地>光板地>耕地>林地,水盐耦合度植被类型排序为光板地>荒草地>耕地>林地。

(4)由近海到内陆,土壤表层含水量、含盐量总体呈下降趋势,分别在距海>30~40、>40~50 km处明显上升。因渤海对水盐条件的影响,水盐耦合度分布存在复杂的地域性差异,总体呈现逐步下降趋势。

本研究基于卫星遥感和实测数据构建了不同季节的土壤水盐光谱估测模型和耦合度模型,系统探讨了滨海区域土壤水盐及耦合度时空特征,为土壤水盐及其耦合关系定量高效时空分析提供了有效方法,研

究结果可为滨海区域盐渍土改良和生态环境治理提供参考。

参考文献:

- [1] LIU G M, ZHANG X C, WANG X P, et al. Soil enzymes as indicators of saline soil fertility under various soil amendments[J]. *Agriculture, Ecosystem & Environment*, 2017, 237:274-279.
- [2] MASOND A A, KOIKE K, ATWIA M G, et al. Mapping soil salinity using spectral mixture analysis of Landsat 8 OLI images to identify factors influencing salinization in an arid region[J]. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 2019, 83:101944.
- [3] XIE X F, PU L J, ZHU M, et al. Linkage between soil salinization indicators and physicochemical properties in a long-term intensive agricultural coastal reclamation area, eastern China[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2019, 19(11):3699-3707.
- [4] 吕真真, 杨劲松, 刘广明, 等. 黄河三角洲土壤盐渍化与地下水特征关系研究[J]. *土壤学报*, 2017, 54(6):1377-1385. LÜ Z Z, YANG J S, LIU G M, et al. Relationship between soil salinization and groundwater characteristics in the Yellow River Delta[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(6):1377-1385.
- [5] 王卓然, 赵庚星, 高明秀, 等. 黄河三角洲垦利县夏季土壤水盐空间变异及土壤盐分微域特征[J]. *生态学报*, 2016, 36(4):1040-1049. WANG Z R, ZHAO G X, GAO M X, et al. Spatial variation of soil water and salt and microscopic variation of soil salinity in summer in typical area of the Yellow River Delta in Kenli County[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(4):1040-1049.
- [6] CHAMAKI S N, TAGHVAELAN S, ZHANG H L, et al. Soil salinity variations in an irrigation scheme during a period of extreme dry and wet cycles[J]. *Soil Systems*, 2019, 3(2):35-50.
- [7] 王庆明, 张越, 郑荣伟, 等. 基于遥感模型SDI的土壤盐渍化临界水位研究[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(3):98-104. WANG Q M, ZHANG Y, ZHENG R W, et al. A remote sensing model to determine the critical groundwater depth for soil salinization[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(3):98-104.
- [8] 窦旭, 史海滨, 苗庆丰, 等. 盐渍化灌区土壤水盐时空变异特征分析及地下水埋深对盐分的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(3):246-253. DOU X, SHI H B, MIAO Q F, et al. Temporal and spatial variability analysis of soil water and salt and the influence of groundwater depth on salt in saline irrigation area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(3):246-253.
- [9] 陈红艳, 赵庚星, 陈敬春, 等. 基于改进植被指数的黄河口区盐渍土盐分遥感反演[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(5):107-114. CHEN H Y, ZHAO G X, CHEN J C, et al. Remote sensing inversion of saline soil salinity based on modified vegetation index in estuary area of Yellow River[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(5):107-114.
- [10] 张子璇, 宋雨桐, 张惠中, 等. 水文气候影响下黄河三角洲土壤盐分时空动态[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(4):1393-1405. ZHANG Z X, SONG Y T, ZHANG H Z, et al. Spatiotemporal dynamics of soil salinity in the Yellow River Delta under the impacts of hydrology and climate[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(4):1393-

- 1405.
- [11] 李萍, 赵庚星, 高明秀, 等. 黄河三角洲土壤含水量状况的高光谱估测与遥感反演[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1262–1272. LI P, ZHAO G X, GAO M X, et al. Hyperspectral estimation and remote sensing retrieval of soil water regime in the Yellow River Delta[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(6): 1262–1272.
- [12] 赵亚楠, 周玉蓉, 王红梅. 宁夏东部荒漠草原灌丛引入下土壤水分空间异质性[J]. 应用生态学报, 2018, 29(11): 3577–3586. ZHAO Y N, ZHOU Y R, WANG H M. Spatial heterogeneity of soil water content under introduced shrub (*Caragana korshinskii*) in desert grassland of the eastern Ningxia, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(11): 3577–3586.
- [13] LOBELL D B, ASNER G P. Moisture effects on soil reflectance[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(3): 722–727.
- [14] 程若曦. 基于改进SWCI指数的农田土壤水分遥感估算及在干旱监测中的应用[D]. 武汉: 湖北大学, 2016. CHENG R X. Soil moisture monitoring of farmland based on modified SWCI index: a case study on Jiangnan Plain[D]. Wuhan: Hubei University, 2016.
- [15] 刘元亮, 李艳, 吴剑亮. 基于LSWI和NDVI时间序列的水田信息提取研究[J]. 地理与地理信息科学, 2015, 31(3): 32–37. LIU Y L, LI Y, WU J L. Study on extraction of paddy fields based on LSWI and time-series NDVI[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2015, 31(3): 32–37.
- [16] MATHICHA F, MBATHA N. Comparison of long-term changes in non-linear aggregated drought index calibrated by MERRA-2 and NDII moisture proxies[J]. *Water*, 2022, 14(1): 26.
- [17] 王丹阳. 基于不同盐渍度的黄三角滨海盐渍土水盐定量反演[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020. WANG D Y. Quantitative inversion of soil moisture and salinity according to different salinization grades in coastal saline soil of Yellow River Delta[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2020.
- [18] ALBED A, KUMAR L, ALDAKHEEL Y Y. Assessing soil salinity using soil salinity and vegetation indices derived from IKONOS high-spatial resolution imagery: applications in a date palm dominated region[J]. *Geoderma*, 2014, 230/231: 1–8.
- [19] DOUAOU A E K, NICOLAS H, WALTER C. Detecting salinity hazards within a semiarid context by means of combining soil and remote-sensing data[J]. *Geoderma*, 2006, 134(1/2): 217–230.
- [20] KHAN N M, RASTOKUEV V V, SHALINA E V, et al. Mapping salt-affected soils using remote sensing indicators: a simple approach with the use of GIS IDRISI[J]. *Ratio*, 2001, 11: 5–9.
- [21] 周宏. 现代汉语辞海[M]. 北京: 光明日报出版社, 2003. ZHOU H. Modern Chinese vocabulary[M]. Beijing: Guangming Daily Press, 2003.
- [22] VALERIE I. The penguin dictionary of physics[M]. Beijing: Foreign Language Press, 1996: 92–93.
- [23] 崔昆, 赵庚星, 王卓然, 等. 黄河三角洲夏季典型田块土壤盐分的多尺度空间变异[J]. 应用生态学报, 2020, 31(5): 1451–1458. CUI K, ZHAO G X, WANG Z R, et al. Multi-scale spatial variability of soil salinity in typical fields of the Yellow River Delta in summer[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(5): 1451–1458.
- [24] 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 S M, ZHAO G X, WANG Z R, 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.
- [25] 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 Z R. Dynamics of soil water and salt in the Yellow River Delta, influencing factors and prediction model[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2017.
- [26] 胡盈盈, 王瑞燕, 陈红艳, 等. 黄河三角洲春秋两季土壤盐分遥感反演及时空变异研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(8): 78–81. HU Y Y, WANG R Y, CHEN H Y, et al. Research on remote sensing retrieval and temporal variation of soil salinity in the spring and autumn of the Yellow River Delta[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2018, 41(8): 78–81.
- [27] 孙亚楠, 李仙岳, 史海滨, 等. 基于多源数据融合的盐分遥感反演与季节差异性研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 169–180. SUN Y N, LI X Y, SHI H B, et al. Remote sensing inversion of soil salinity and seasonal difference analysis based on multi-source data fusion[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(6): 169–180.
- [28] 李珊, 杨越超, 姚媛媛, 等. 不同土地利用方式对山东滨海盐碱土壤理化性质的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 1012–1024. LI S, YANG Y C, YAO Y Y, et al. Effects of different land-use types on physical and chemical properties of coastal saline-alkali soils in Shandong Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(4): 1012–1024.
- [29] 巩腾飞. 盐碱地植被覆盖度与土壤盐分含量时空耦合关系研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016. GONG T F. Spatio-temporal coupling relationship between fractional vegetation cover and soil salinity on saline-alkali land: a case study of Wudi County, Shandong Province[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2016.
- [30] 张术伟, 王卓然, 常春艳, 等. 黄三角滨海区土壤水盐时空分异特征及耦合关系分析[J]. 水土保持学报, 2022, 36(4): 299–308. ZHANG S W, WANG Z R, CHANG C Y, et al. Spatial-temporal characteristics of soil water and salt and its coupling relationship in the coastal area of Yellow Triangle[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(4): 299–308.
- [31] 李萍. 黄河三角洲土壤含水量状况的高光谱估测与遥感反演[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016. LI P. Hyperspectral estimation and remote sensing retrieval of soil water regime in the Yellow River Delta[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2016.
- [32] 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 X M, LIU G H, TANG Z P, 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.
- [33] 王维维, 麦提吐尔逊·艾则孜, 艾提业古丽·热西提, 等. 焉耆盆地农田耕层土壤盐分的空间变异及分布格局[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(2): 195–201. WANG W W, EZIZ M, RIXIT A, et al. Spatial variability and distribution pattern of soil salinity factors in topsoil of farmland in Yanqi Basin, Xinjiang[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(2): 195–201.