

李生勇,霍轶珍,王海霞. 内蒙古自治区河套灌区冻结期土壤盐分的多极化雷达响应分析[J]. 江苏农业科学,2016,44(3):348-352.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.03.098

内蒙古自治区河套灌区冻结期土壤盐分 的多极化雷达响应分析

李生勇, 霍轶珍, 王海霞

(河套学院土木工程系, 内蒙古巴彦淖尔 015000)

摘要:土壤盐渍化严重影响河套灌区的农业生态和社会经济的发展,了解土壤盐渍化现状已成为亟待解决的问题。传统测量方法已无法满足人们对大面积土壤盐渍化分布的需求,相比之下,遥感能够快速获取盐渍地的宏观分布及变化情况。遥感作为一种新的技术手段应运而生,由于可见光、红外遥感存在一定局限性,具有全天候、穿透性强等优点的雷达遥感成为研究热点。以内蒙古自治区河套灌区磴口县为研究区,结合 Radarsat-2 四极化雷达遥感数据,对冻结期土壤的盐渍化进行响应分析。结果表明,极化组合 $(HV^2 + HH^2)/(HV^2 - HH^2)$ 对不同盐渍土有较强的响应性与分离性,利用该极化组合建立回归模型,进而对研究区进行反演分析。经实测数据检验,该方法可在一定程度上满足盐渍化监测的需要,优于传统盐渍土分类方法。

关键词:雷达遥感;土壤盐分;极化组合;河套灌区;精度分析

中图分类号: S156.4; P628⁺.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)03-0348-04

土壤盐渍化是指土壤底层或地下水的盐分随水分上升到表层,经水分蒸发后使盐分在表层土壤积累的过程^[1]。土壤盐渍化问题对河套灌区的农业生态系统造成破坏性影响,给当地农民带来直接经济损失,河套灌区的盐渍化土地面积约占内蒙古自治区盐渍化土地面积的70%^[2]。对河套平原的盐渍化程度进行遥感监测和反演,是该地区制定灌溉制度、编写盐渍化土壤治理方案的基础资料。遥感技术具有实时性强、观测范围广等特点,适用于研究土壤盐渍化问题。自20世纪70年代以来,国外学者和专家从不同学科领域对盐渍化进行了研究和预测^[3-4]。Dwivedi等利用TM数据研究发现,1、3、5波段为最佳组合波段,遥感所含信息量最大,但盐渍土信息提取精度并不高^[5]。Kirky通过高光谱影像制作土壤盐渍化专题图,并在野外监测与影像同时相的圣彼得草光谱特性;研究发现,圣彼得草在可见光和近红外波段呈不同的光谱特性^[6]。Saysel等通过研究地下水盐运移的规律,成功建立了土壤盐渍化的动力学模型,达到预报土壤盐渍化的水盐动态目的^[7]。Metternicht等结合遥感、地理信息系统、专家系统对盐渍化进行模拟与预测,并在盐渍化时空动态变化方面取得一定成果^[8]。Eenyamini等利用遥感手段发现,地下水的高低直接影响土壤次生盐渍化,地下水位1.5 m为临界值,低于该值可抑制盐渍化产生^[9]。Jeffrey等利用电磁感应手段结合水质化学分析,对土壤盐渍化进行定量研究^[10]。国内对土

壤盐渍化的研究比国外晚10余年。刘庆生等将资源一号卫星与高分辨率全色数据进行融合,结合HIS和PCA变换的相关知识,对不同级别盐渍土进行了清晰的分类^[11]。霍东民等利用CBERS-1遥感数据对黄河三角洲的盐碱地光谱信息进行了深入研究,结合GIS实现对盐碱地专题信息的提取,为盐碱地监测提供良好基础^[12]。牛博等利用干旱区盐渍土的光谱及空间特征,对盐渍土进行了专题信息提取研究,得出盐渍化土壤的演变趋势^[13]。李晓燕等利用TM影像、地形图数据并结合地理信息系统,对吉林省大安市盐碱地动态变化及成因进行了研究^[14]。何祺胜通过TM影像与雷达影像的结合,对盐渍地信息进行提取,提取精度得到很大提高^[15]。综上所述,利用光学遥感监测盐渍地信息已取得一定成果;而在微波遥感方面,学者大多基于被动雷达遥感或单极化雷达遥感,关于精细四极化主动微波遥感的相对研究较少。以盐渍地较为明显的河套灌区为研究区域,本研究成果对该区域盐渍化的治理具有一定指导意义。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

磴口县地处内蒙古自治区河套地区西南部,是巴彦淖尔市的旗县之一。该地区的地理坐标为106°9′~107°10′E、40°9′~40°57′N,属于中温带干旱大陆性季风气候,平均气温为8.5℃,气候较干燥^[16]。研究区以荒漠植被小灌木为主,地域辽阔、地势平坦、土质条件较好,是典型的河套灌区之一。引黄灌溉制度对发展当地农业生产、改善农业生态环境起着非常重要的作用,但其负面影响也较为显著。渠系水渗漏、大水漫灌是导致地下水居高不下的直接原因,潜水蒸发严重,诱发地下盐分向表层聚集,矿化度严重,产生土壤次生盐渍化。

1.2 数据源

Radarsat-2是由MAD(MacDonald Dettwiler and Associ-

收稿日期:2015-03-24

基金项目:内蒙古自治区高等学校研究项目(编号:HJZY263);内蒙古自治区高等学校创新团队发展计划(编号:NMGIRT-B1611);河套学院校级重点课题(编号:HTXYZZ13002)。

作者简介:李生勇(1970—),女,硕士,副教授,主要从事农业水利工程的教学与研究。E-mail:1410874859@qq.com。

通信作者:霍轶珍,教授,主要从事节水灌溉的教学与研究。

E-mail:hyz6998@163.com。

ates Ltd)和CAS(Canadian Space Agency)于2007年共同出资开发的星载合成孔径多极化雷达系统,雷达频率为C波段,该波段可提取地表0~5 cm的土壤信息^[17]。雷达影像接收时间为2015年1月10日,河套灌区正值冻结期,影像为四极化精细模式(HH+HV+VH+VV极化),标称分辨率为8 m,处理级别为SLC,一景影像的覆盖面积为25 km×25 km,微波入射角范围为35.310 939 8°~36.881 595 6°,影像覆盖区为裸露地表,加之季节原因处理影像时不考虑植被覆盖的影响。

在磴口县试验区采集与RADARSAT-2影像时相一致的50个土壤样本,每个土壤样本取4个重复,样本以边长小于8 m的正方形组成,并用手持GPS记录土壤样本中心点的地理坐标信息。室内试验通过EDTA滴定法计算土壤样本的含盐量信息,土壤样本含盐量最终以4个样本的平均值代表。根据试验规范将土壤样本的含盐量划分为非盐渍土、轻度盐渍土、中度盐渍土、重度盐渍土4个大类,划分标准见表1,土壤样本采样点分布见图1。

	g/kg		
非盐渍土	轻度盐渍土	中度盐渍土	重度盐渍土
<0.2	[0.2,0.4)	[0.4,0.6)	≥0.6

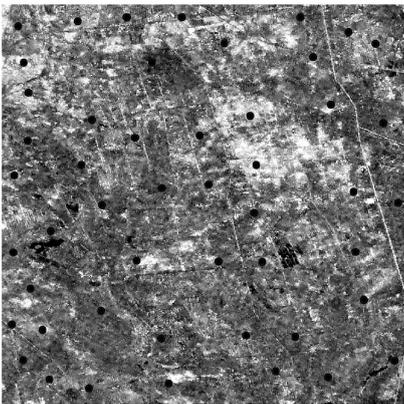


图1 土壤样本采样点分布

2 影像数据处理

2.1 雷达影像处理

雷达影像不同于可见光遥感,其采用相干微波源照射,各散射中心回波的相干叠加,造成合成矢量的振幅和相位均有

一定起伏,最终得到的雷达影像出现相干噪声^[18]。为抑制雷达影像的斑点噪声,对影像采取多视、滤波处理;雷达影像的SLC格式属于斜距坐标,通过地理编码处理对影像进行相应的地距转换,处理后的影像可设置为WGS-84坐标系。结合研究区的DEM数据,经辐射定标处理后,雷达影像上的每个像元值均由亮度值转换为后向散射系数值。利用定标公式^[19]可完成亮度值与后向散射系数值的转换,公式为:

$$\sigma_{i,j}^0 = \frac{DN_{i,j}^2}{K} \frac{1}{G(\theta_{i,j})^2} \left[\frac{R_{i,j}}{R_{ref}} \right]^4 \sin(\alpha_{i,j})$$

式中: i,j 为遥感影像像元的行列号, DN 为雷达影像像元的亮度值, K 为绝对定标系数, G 为天线的增益, $\theta_{i,j}$ 为雷达影像每个像元的天线高度角, $R_{i,j}$ 为雷达影像的斜距距离, R_{ref} 为雷达影像的参考基准斜距, $\alpha_{i,j}$ 为卫星入射角。以上部分可通过影像软件处理获得,部分为购买雷达影像时自带的头文件。

2.2 雷达影像配准

利用谷歌卫星地图下载器,下载与雷达影像区域相同的Google Earth影像,该下载器可完好保留影像的地理坐标信息。影像配准是将图像纠正在某种地理编码的坐标系统中,使其与某个参考影像具有相同几何属性。此次影像配准以Google Earth影像作为参考影像,在配准过程中尽量选择易于分辨的特征点(路的交叉点、房子的拐角等),特征点尽可能均匀分布于整幅影像中,纠正结果最终小于0.5个像元,满足精度要求。将采集的土壤样本位置信息与雷达影像相结合,提取采样点的后向散射系数值,并对采样点覆盖区域进行裁剪。

3 数据分析

3.1 冻结期盐渍土的后向散射系数

内蒙古自治区河套灌区属于寒冷地区,季节间温差较大,蒸发量远大于降水量,且土壤的冻融变化是引起土壤盐渍化的主要原因。河套灌区秋浇具有压盐保墒的作用,秋浇前后土壤盐分含量将产生较大变化,冻结期土壤的水分、盐分会向冻结层移动,此次主要进行河套灌区冻结期雷达影像对土壤盐渍土的响应分析。雷达影像的均一性较差,最大值与最小值相差很大,提取雷达后向散射系数值时,可围绕采样点中心提取多个值并取平均值。均值并非最优方法,却是最常用、最简单的方法,均值可代替采样点的后向散射系数值^[20]。部分采样点数据见表2。

表2 部分采样点数据

点号	纬度(°)	经度(°)	HH(dB)	HV(dB)	VH(dB)	VV(dB)	总盐量(g/kg)
1	40.595 291	107.015 130	-23.442 0	-28.329 0	-25.267 9	-20.700 1	0.135
2	40.595 137	107.011 519	-16.208 7	-27.092 2	-31.865 7	-17.206 4	0.106
3	40.593 718	107.053 111	-24.370 6	-27.248 7	-29.214 9	-26.108 9	0.117
4	40.595 625	107.020 349	-19.023 2	-33.210 4	-37.260 5	-12.543 0	0.285
5	40.593 583	107.051 562	-16.242 8	-31.144 0	-30.805 4	-27.824 4	0.345
6	40.504 048	106.582 765	-14.197 5	-26.497 0	-23.662 4	-12.254 0	0.421
7	40.480 344	106.592 293	-13.321 0	-30.937 2	-26.283 7	-13.071 8	0.452
8	40.593 086	107.060 192	-8.009 7	-21.539 7	-20.135 1	-12.239 4	1.219
9	40.485 200	107.094 425	-15.172 1	-33.351 5	-29.902 6	-20.301 4	1.204

注:HH、HV、VH、VV分别表示雷达影像的4种极化方式。

均值可反映土壤的散射特征,将不同土壤类别的四极化后向散射系数均值分离出来,绘制不同程度盐渍土后向散射系数特征图(图2)。

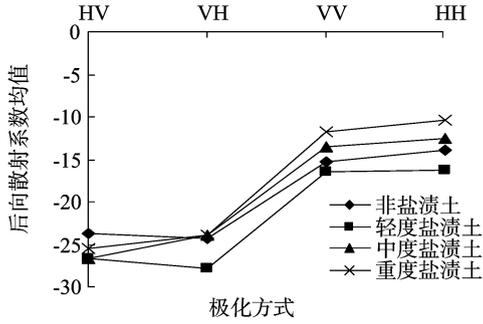


图2 不同盐渍土后向散射系数特征

由河套灌区冻结期不同盐渍化程度的土壤对四极化后向散射系数响应分析可知,雷达影像同极化方式(VV/HH)对盐

渍土响应明显高于不同极化方式(HV/VH);HH极化方式的后向散射系数高于其他极化组合方式;HV/VH极化组合之间的后向散射系数较相近。VV极化方式影像的后向散射系数对重度盐渍化土壤的响应较强烈,HH极化方式影像的后向散射系数对不同盐渍化程度土壤的响应均较强烈。

为准确分离不同程度的盐渍土,须分析不同土壤对应的后向散射系数值情况。由表3可知,在冻结期同极化上,不同盐渍化程度土壤的后向散射系数均值相差较小,VV极化影像的均值最大值与均值最小值相差为12.64,HH极化影像的均值最大值与均值最小值相差为11.86;在交叉极化上,HV极化影像的均值最大值与均值最小值相差为24.41,VH极化影像的均值最大值与均值最小值相差为21.48。可见,不同盐渍化程度的土壤在交叉极化上的分离性比同极化上的分离性好。分析可知,同种极化方式HH对土壤的响应较强烈,交叉极化HV对土壤的分离性较好;因此,利用Radarsat-2雷达影像的C波段提取盐渍地信息时,须考虑这两种极化方式。

表3 不同盐渍土的后向散射系数均值

极化方式地物	HV (dB)		VH (dB)		VV (dB)		HH (dB)	
	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值
非盐渍土	-37.15	-14.40	-31.98	-15.78	-20.63	-10.18	-21.61	-9.75
轻度盐渍土	-33.69	-19.50	-37.26	-20.33	-22.82	-12.26	-20.39	-10.96
中度盐渍土	-26.50	-19.71	-26.40	-19.50	-14.87	-12.25	-14.20	-12.00
重度盐渍土	-33.70	-12.74	-29.90	-15.79	-20.30	-12.52	-15.57	-10.19

3.2 冻结期盐渍土不同极化组合的后向散射系数

单极化雷达影像数据提取的土壤信息量相对较少,研究结果将受到影响。本试验获取了雷达精细四极化数据,可对极化方式进行组合,进一步分析不同极化组合对地物后向散射特性的响应。在冻结期,HH极化雷达后向散射系数对盐渍土的响应最强烈,HV极化雷达后向散射系数对盐渍土的分离性较好。选取2个极化的组合进行分析,极化组合为HV+HH、HV/HH、(HV-HH)/(HV+HH)、(HV²+HH²)/(HV²-HH²),计算出这些极化组合的后向散射系数,分析其与盐渍土响应关系(图3)。

势,对轻度、中度、重度盐渍土的分离性较好,但难以区分出非盐渍土。对于HV/HH极化组合,后向散射系数在非盐渍化土壤至中度盐渍化土壤呈上升趋势,而在重度盐渍化土壤则呈下降趋势,无法区分重度盐渍土。对于(HV-HH)/(HV+HH)极化组合,后向散射系数在轻度盐渍土壤为转折点,对非盐渍土、轻度盐渍土、中度盐渍土易于混淆。对于(HV²+HH²)/(HV²-HH²)极化组合,后向散射系数随盐渍化程度的增强而减小,且各种盐渍化程度的分离性较好,不易产生混淆,因此该极化组合方式可作为研究区冻结期盐渍化土壤信息提取的指数。

由图3可知,HV+HH极化组合呈先上升、后下降的趋

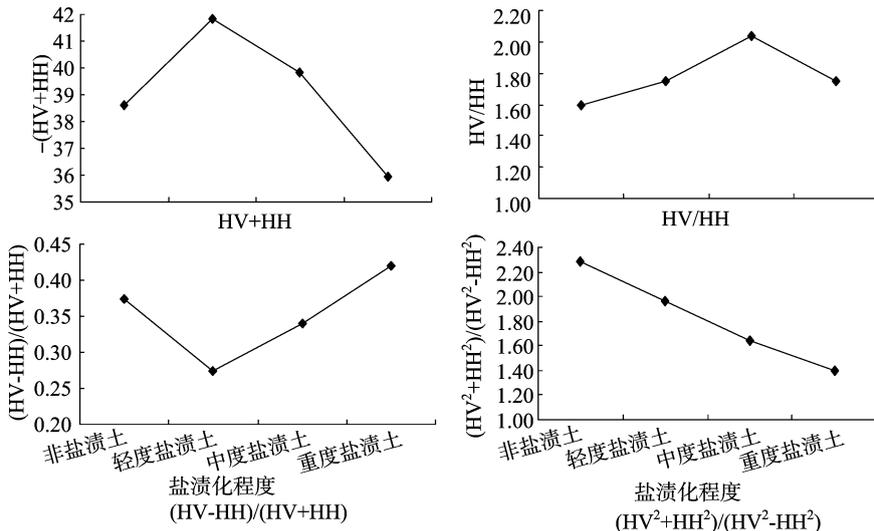


图3 不同极化组合对盐渍土响应

3.3 回归分析

在土壤冻结期选择 $(HV^2 + HH^2)/(HV^2 - HH^2)$ 极化组合建立模型,研究雷达图像的后向散射系数与含盐量的关系。将该极化组合设为变量 X ,即 $X = (HV^2 + HH^2)/(HV^2 - HH^2)$,将其中 35 个土壤样点的含盐量数据与 X 进行线性回归分析模拟。建立的回归方程为 $S = -0.227 2X + 0.770 2$,式中 S 为全盐量, X 为极化组合 $(HV^2 + HH^2)/(HV^2 - HH^2)$ 。 S 与 X 达到了良好的相关性, $r^2 = 0.753 4$ (图 4)。

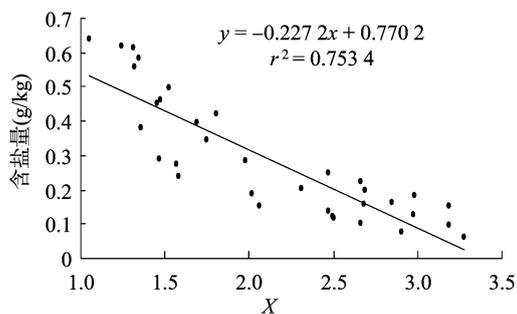


图4 回归模型

4 精度分析

4.1 对 RADARSAT-2 影像进行决策树分类

根据建立的盐分回归方程,通过 ENVI 决策树方法对影像进行分类,分类结果见图 5,分类结果统计见表 4。其中,非盐渍地所占比重最大,高达 57.824%;其次为重度盐渍地,达到 27.972%。可见,研究区内盐渍化程度比较严重,且分类结果与研究区地表的盐渍化现象较为一致。

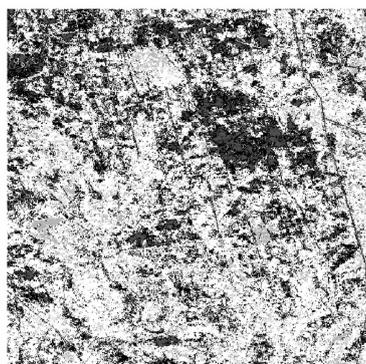


图5 盐渍化分类结果

表4 盐渍化分类结果统计

分类	非盐渍土	轻度盐渍土	中度盐渍土	重度盐渍土
面积比例(%)	57.824	6.307	7.898	27.972

4.2 精度检验

利用线性回归方程对研究区进行不同程度盐渍化分类,为验证模型及分类结果的可靠性,采用剩余的 15 个点进行精度检验。根据土壤采样点的地理位置信息与盐渍化分类图相匹配,提取 15 个土壤采样点对应的反演值,并与实测值进行比较分析。由表 5 可知,多数土壤样本点的相对误差小于 10%,反演精度比较可观。

表5 全盐量反演结果

编号	实测值 (g/kg)	反演值 (g/kg)	误差 (g/kg)	相对误差 (%)
1	0.108	0.098	0.010	9.432
2	0.167	0.157	0.010	6.156
3	0.189	0.196	-0.007	3.962
4	0.116	0.121	-0.005	4.089
5	0.114	0.118	-0.004	3.687
6	0.396	0.407	-0.011	2.885
7	0.358	0.272	0.086	23.980
8	0.218	0.235	-0.017	7.659
9	0.358	0.328	0.030	8.484
10	0.460	0.433	0.027	5.969
11	0.496	0.472	0.024	4.862
12	0.744	0.689	0.055	7.330
13	0.863	0.934	-0.071	8.256
14	0.924	0.935	-0.011	1.178
15	0.667	0.746	-0.079	11.840

5 结论

土壤盐渍化问题是影响河套灌区农业生产的重要因素。雷达数据具有全天候、全天时、受天气及气候影响较小等优点,常作为土壤盐分信息提取的基础数据,这对于干旱、半干旱、季节气温变化较大地区的土地盐渍化监测极其有利。采用四极化精细模式 C 波段的 Radarsat-2 数据对研究区域进行监测,弥补了可见光遥感提取盐渍地信息的受限性,经过对雷达影像的处理准确获取了土壤冻结期的后向散射系数值。分析不同程度盐渍土与后向散射系数的关系发现,同极化 HH 对盐渍土的响应较强烈,交叉极化 HV 对盐渍地的分离性较好;通过 HH 和 HV 不同极化组合后向散射系数对土壤盐渍化响应分析得出, $(HV^2 + HH^2)/(HV^2 - HH^2)$ 极化组合可将非盐渍地、轻度盐渍地、中度盐渍地、重度盐渍地区分开。以极化组合作为变量建立线性模型 $S = -0.227 2X + 0.772$,通过决策树利用模型对研究区进行盐渍化分类,并验证分类结果及模型精度。结果表明,多数样本点的相对误差小于 10%,反演精度较高,研究结果可作为巴彦淖尔市磴口县土壤盐渍化监测的理论基础。

雷达影像对土壤水分较为敏感,本研究未能有效分析土壤水分对极化方式的影响,建立的回归模型未除去土壤水分干扰。本研究结论针对河套灌区,是否具有普适性仍须进一步验证。

参考文献:

- [1] 朱庭芸. 灌区土壤盐渍化防治[M]. 北京:农业出版社,1992: 32-38.
- [2] 刘俊廷,潘洪捷,彭志帆,等. 河套灌区土壤盐渍化现状及危害研究[J]. 内蒙古水利,2011(2):138-139.
- [3] Smedema L K, Shiati K. Irrigation and salinity: a perspective review of the salinity hazards of irrigation development in the arid zone[J]. Irrigation and Drainage Systems,2002,16:161-174.
- [4] Clarke C J, Bell R W, Hobbs R J, et al. Incorporating geological effects in modeling of revegetation strategies for salt-affected landscapes[J]. Environmental Management,1999,24(1):99-109.

侍永乐,石春林,李映雪,等. 江淮地区春季湿渍害时空分布特征[J]. 江苏农业科学,2016,44(3):352-355.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.03.099

江淮地区春季湿渍害时空分布特征

侍永乐¹,石春林²,李映雪¹,刘杨²,宣守丽²,魏秀芳²

(1. 南京信息工程大学应用气象学院,江苏南京 210044;

2. 江苏省农业科学院农业经济与信息研究所/农业部长江下游农业环境重点实验室,江苏南京 210014)

摘要:春季湿渍害是江淮地区越冬作物生长的主要农业气象灾害,利用1961—2010年江苏省与安徽省155个县站逐日气象资料,分析了江淮地区春季湿渍害平均持续时间、平均发生次数、春季湿渍害过程降水量空间分布特征及不同灾害等级发生次数的时空分布规律。结果表明:春季湿渍害平均发生次数、过程的平均持续时间和累积降水量3个指标均呈随纬度降低而增加的特征;江淮地区春季湿渍害过程平均持续时间无明显的年际变化,但春季湿渍害过程发生次数呈减少趋势,而其累积降水量呈增加趋势;轻度湿害(4~6 d)发生的次数最多,约占57.3%,中度湿害(7~9 d)占25.5%,重度湿害(≥ 10 d)最少,约占17.2%。总体看出,江苏、安徽2省轻度湿渍灾害次数在波动减少,中度、重度湿渍灾害次数总体变化不大。

关键词:江淮地区;春季;湿渍害;时空分布

中图分类号: S422 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)03-0352-04

连阴雨导致的湿渍害是我国农业生产的主要气象灾害之一,分春季湿渍害和秋季湿渍害。江淮地区春季由于受南方暖气团和北方冷气团相互作用,在双方势力相当的情况下,经常会发生连阴雨过程,从而导致大面积湿渍害^[1]。春季又是

江淮地区夏收作物(小麦、油菜等)群体发育、产量形成的关键时节,因此,春季湿渍害是该地区夏收作物产量低而不稳的最主要诱因^[2-4]。

近年来,国内外学者在湿渍害对作物的生理生态^[5-6]、作物生长过程中受到湿渍灾害对产量的影响^[7-11]、灾害评估方法和风险区划^[12-13]、湿渍害的损失风险评估模型^[14-15]、灾害损失定量化评估与预警^[16-17]等方面进行了较为深入的研究。在湿渍害的时空分布方面,一些学者以连阴雨过程为指标,讨论了江淮地区连阴雨时空分布规律^[18-20]。但上述研究中一方面使用的连阴雨指标不统一,另一方面连阴雨指标与湿渍害指标^[21]存在一定差异。本研究采用相关报道建议的湿渍害指标^[19],利用江淮地区(江苏省77个站点、安徽省78个站

收稿日期:2015-06-02

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(编号:201203032);江苏省科技支撑计划(编号:BE2012391);江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(12)3055]。

作者简介:侍永乐(1991—),女,江苏盱眙人,硕士研究生,主要从事农业气象研究。E-mail:YongleShiNuisit@163.com。

通信作者:石春林,博士,研究员,主要从事农业气象研究。E-mail:shicl@jaas.ac.cn。

[5] Dwivedi R S, Rao B R M. The selection of the best possible Landsat TM band combination for delineating salt-affected soil[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1992, 13(11):2051-2058.

[6] Kirkby S D. Integrating a GIS with an expert system to identify and manage dryland salinization[J]. *Applied Geography*, 1996, 16(4):289-303.

[7] Saylor A K, Barlas Y. A dynamic model of salinization on irrigated lands[J]. *Ecological Modelling*, 2001, 139(2/3):177-199.

[8] Metternicht G I, Zinck J A. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85(1):1-20.

[9] Eenyamini Y, Mirlas V, Marish S, et al. A survey of soil salinity and groundwater level control systems in irrigated fields in the Jezre'el Valley, Israel[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 76:181-194.

[10] Amezketa E. An integrated methodology for assessing soil salinization, a pre-condition for land desertification[J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 67(4):594-606.

[11] 刘庆生, 骆剑承, 刘高焕. 资源一号卫星数据在黄河三角洲地区的应用潜力初探[J]. *地球信息科学*, 2000, 2(2):56-57.

[12] 霍东民, 张景雄, 孙家. 利用 CBERS-1 卫星数据进行盐碱地

专题信息提取研究[J]. *国土资源遥感*, 2001(2):48-52.

[13] 牛博, 倪萍, 塔西甫拉提, 特依拜. 遥感技术在干旱区盐渍化动态变化分析中的应用——以新疆玉田县为例[J]. *地质灾害与环境保护*, 2004, 15(4):78-82.

[14] 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.

[15] 何祺胜. 星载雷达图像在干旱区盐渍地信息提取中的应用研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2007:17-19.

[16] 刘芳, 郝玉光, 张景波, 等. 磴口县土地景观变化遥感监测研究[J]. *内蒙古农业大学学报:自然科学版*, 2009, 30(3):112-116.

[17] Zhou P, Ding J L, Wang F, et al. Retrieval method of soil water content in vegetation covering areas based on multi-source remote sensing data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(5):959-965.

[18] 王超, 张红, 陈曦, 等. 全极化合成孔径雷达图像处理[M]. 北京:科学出版社, 2008:55-56.

[19] 喻忠伟. 基于BP人工神经网络和Radarsat-2遥感影像的土壤墒情监测研究[D]. 郑州:郑州大学, 2013:39-41.

[20] 韦建波. RADARSAT-2数据在干旱区盐渍地信息提取中的应用[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2009:32-35.