

基于三维特征空间的土壤盐渍化遥感模型

李艳华, 丁建丽, 孙永猛, 王刚, 王璐

(新疆大学 资源与环境科学学院, 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

摘要:针对目前干旱半干旱地区出现的土壤盐渍化问题,以渭干河—库车河流域绿洲为研究区,在分析修改型土壤调整植被指数(MSAVI)、湿度指数(WI)、盐分指数(SI)与土壤盐渍化之间关系的基础上,提出了 MSAVI-WI-SI 三维特征空间,进而建立了土壤盐渍化监测指数(MWSI)模型。结果表明:该模型与土壤盐分实测值的相关系数 $R=0.896$,精度高于三个指数两两构建的特征空间(MSAVI-WI 特征空间,MSAVI-SI 特征空间,WI-SI 特征空间)的土壤盐渍化监测指数模型(MWI,MSI,WSI),其与土壤盐分实测值的相关系数分别为:0.891,0.894,0.809,突出了三维特征空间的优越性。同时,通过 MWSI 的差异矩阵分析,表明该指数对土壤的盐渍化程度反映灵敏。MWSI 能较好地反映盐渍化土壤地表植被、土壤水分及土壤盐分的组合变化,具有明确的生物物理学意义。并且指数简单,易于获取,操作方便,对今后干旱区土壤盐渍化的监测与分析具有重要意义。

关键词:三维特征空间;盐渍化;遥感监测模型

中图分类号:S153.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)04-0113-05

Remote Sensing Monitoring Models of Soil Salinization Based on the Three Dimensional Feature Space of MSAVI-WI-SI

LI Yanhua, DING Jianli, SUN Yongmeng, WANG Gang, WANG Lu

(Key Laboratory of Oasis Ecology, College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: Monitoring of soil salinization is very important in the arid and semiarid regions. We chose the delta oasis located between the Weigan River and the Kuqa River as the study area. By analyzing the relationship among modified soil-adjusted vegetation(MSAVI), wet index(WI), salinity index(SI) and soil samples, we proposed a concept of MSAVI-WI-SI three dimensional feature space and built a soil salinity monitoring index (MWSI) model. The result indicates that there is a strong correlation between MWSI and surface soil salinity($R=0.896$). Monitoring soil salinization with MWSI is more precise than MWI, MSI, WSI based on two dimensional feature space. The correlation coefficients were 0.891, 0.894, 0.809, respectively. Meanwhile, by MWSI difference matrix analysis, the index is sensitive to the level of soil salinization. It suggests that MWSI detect the change of different combination of the vegetation, soil moisture and soil salinity better in the study area. Besides, this index has the clear biophysical meaning. The MWSI has the potential to provide a simple and low-cost monitoring tool for assessment of salt-affected areas.

Keywords: three dimensional feature space; soil salinization; remote sensing monitoring model

土壤盐渍化是当今世界上土地荒漠化和土地退化的主要类型之一,也是世界性资源问题和生态问题^[1]。土壤盐渍化通常发生在气候干旱、地表蒸发强烈、地下水位较高且含有较多可溶性盐类的地区。土壤盐渍化直接和间接地影响人类生存、农业生产、资源与环境的可持续发展,已引起国内外学者的广泛关注。准确提

取土壤盐渍化信息,对促进农业生产以及防止非盐渍化土壤转化为盐渍化土壤具有重要意义^[2]。

近年来,国内外许多学者开展了一系列盐渍化遥感监测研究,提出了丰富的盐渍化遥感监测的理论与方法^[3]。其中,基于指数与指数之间和指数与敏感波段/盐渍化敏感因子之间构建的遥感监测模型,取得

收稿日期:2014-09-14

修回日期:2014-10-12

资助项目:国家自然科学基金资助项目(U1303381,41261090,41161063);新疆维吾尔自治区青年科技创新人才培养工程(2013711014);2013 新疆研究生科研创新项目(XJGRI2013026)

第一作者:李艳华(1989—),女,河南济源人,硕士研究生,主要从事干旱区资源环境及遥感应用研究。E-mail:li_yanhua_cool@126.com

通信作者:丁建丽(1974—),男,山东成武人,教授,博士生导师,主要从事干旱区资源环境及遥感应用研究。E-mail:Ding_jl@163.com

了较好的盐渍化监测的效果,且具有准确性、简易性的特点。哈学萍等^[4-5]建立的 SI-Albedo 特征空间很好地区分了不同程度的盐渍地;王飞等^[6]基于 NDVI-SI 特征空间建立了土壤盐渍化监测指数(SDI),结果表明土壤表层含盐量与 SDI 相关性较高。丁建丽等^[7]提出了用 MSAVI-WI 特征空间构建土壤盐渍化遥感监测指数模型(MWI),结果表明 MWI 与土壤表层含盐量具有很好的相关性。然而这些模型多是基于二维特征空间,土壤的盐渍化过程受到多种因素的影响,若能综合考虑土壤盐渍化过程中的多维空间信息,对于土壤盐渍化信息的提取以及定量模型的构建将会有一定的意义。

目前国内利用三维特征空间进行建模的研究相对较少,徐涵秋^[8]在研究城市不透水层与植被覆盖和地表温度关系时,在三维空间中显示了三者之间的关系,但只是停留在空间表达上。王飞^[9]在提取盐渍化信息时提出了构建三维特征空间,结果显示模型提取出的盐渍化信息与土壤盐分实测值相关性较高。因此本文试图利用三维特征空间,构建盐渍化信息提取模型,并根据实测点对建立的模型进行验证,进而确定图像的土壤盐渍化程度分级,或将对土壤盐渍化信息的提取提供新的研究方法。

1 研究区概况、数据与方法

1.1 研究区概况

渭干河—库车河三角洲绿洲位于新疆塔里木盆地中北部,包括库车、新和、沙雅三县。北部为山区,南部为冲积平原,属典型的温带大陆性干旱气候。本研究区的边界坐标为:41°6′—41°44′N,82°10′—83°36′E。该区降水稀少且分布极不均匀,年均降水量为 64.5 mm,表层土壤含水率为 8%~14%;多年平均气温为 11.4℃,蒸发作用强烈,年均蒸发量达 1 992~2 863.4 mm^[10]。高蒸降比,以及矿化度和地下水位偏高,土层构成物颗粒细,透水性差,导致土壤盐渍化现象普遍^[11]。0—30 cm 土层的平均含盐量达 53.9 g/kg,pH 值为 8.0~9.0,盐渍土中的盐类型主要是氯化物和硫酸盐类型。该区植被稀少,主要植被有:芦苇(*Phragmites australis*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、怪柳(*Tamarix ramosissima*)、盐爪爪(*Kalidium gracile*)和花花柴(*Karelinia caspica*)等灌木和草本植被,且多分布于绿洲边缘和水渠两侧。

1.2 遥感数据预处理及实地采样

根据 Bui 的研究^[12],以植被为探测盐渍土间接指征,最佳观测时期为 8—9 月,因为这一时期植被的生物量达到最大。因此本研究采用覆盖研究区的

2011 年 9 月 6 日的 Landsat TM 影像。首先用已校正过的 ALOS 影像对 TM 影像进行几何校正,选取 25 个控制点,将误差控制在 0.5 个像元以内,图像分辨率为 30 m×30 m。之后根据影像的头文件参数,采用 COST 模型对影像进行大气校正,裁剪出研究区范围:41°6′—41°44′N,82°10′—83°36′E。

本研究区实地采样时间为 2011 年 9 月下旬。由于遥感图像对表层土壤的盐渍化程度较为敏感,因此本文选取地表 0—10 cm 的土壤进行研究。样点的采集是利用 GPS 仪定位,并结合研究区的土壤专题图和地形图来选取样点。所选取的样点基本覆盖了研究区的土地利用类型。实地采样的 35 个点散布于四个样区:非盐渍化区 9 个点,该区为农田种植区,农作物长势良好;轻度盐渍化区 9 个点,该区位于农田绿洲边缘,与绿洲相间分布,植被覆盖度在 15%~30%;中度盐渍化区 10 个点,该区为农田灌溉的主要接受区,受地势的影响,形成地下水位较高的湿地,在毛管引力的作用下易形成土壤盐渍化现象,植被覆盖度约在 10%~15%左右;重度盐渍化区 7 个点,该区出现有明显的盐霜或盐壳,地表裸露或仅生长有盐穗木等耐盐植被。在每个样点取表层 0—10 cm 土样 250 g,带回实验室,待自然风干后碾碎,过 0.25 mm 筛,各个样点取出 20 g 土样制备 1:5 土水质量比的溶液,静置 24 h,后用滤纸过滤出土壤溶液浸提液,并测定其土壤盐分含量。

1.3 研究方法

1.3.1 特征参量选取 盐渍化专题信息提取的关键在于选取合理的盐渍化土壤光谱响应特征参量。通过大量的对比和分析,最终选取了修改型土壤调整植被指数(MSAVI)、土壤水分(WI)和土壤盐分指数(SI)构建特征空间。

盐分是土壤化学因子中制约植被生长的重要因子,盐生植被的类型、生物量以及演替特征与土壤盐分含量的相关性较高^[13]。研究发现,随着表层土壤含盐量的增加,归一化植被指数(NDVI)逐渐降低,土壤电导率不断升高^[14]。然而 NDVI 在低密度植被覆盖区受土壤背景的影响较大,因而低估了一些植被信息。因此采用修改型土壤调整植被指数(MSAVI)可以有效地提取植被稀少地区的植被信息。

秋季为第二个积盐高峰期,该时期包气带整个土壤剖面上土壤水势梯度为负值,土壤水分受到强烈蒸发,土壤表层积盐。同时矿化潜水不断补充土壤水的蒸发损耗,将盐分大量带入包气带,同时引起潜水位持续下降^[15]。说明土壤水分(WI)是反映盐渍化程度的重要指标。

Khan 等^[18]研究表明,ETM+ 的红波段(0.62~0.68 nm)对土壤盐分具有敏感响应特征。他们还通过比较典型地物的波谱特征及波段混合试验发现,由遥感图像蓝波段和红波段构成的土壤盐分指数(SI)能较好地反映土壤盐渍化信息。使用土壤盐分实测值与影像上反演的盐分指数做相关性分析,相关系数 $R=0.847\ 762$,相关性较高,因此本文选用盐分指数(SI)作为反映土壤盐渍化程度的生物物理参数。

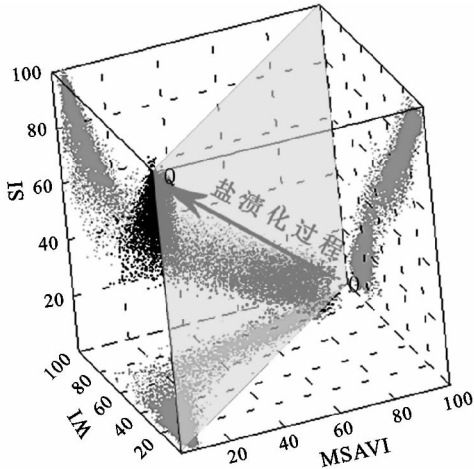


图1 MSAVI-WI-SI 三维特征空间

从图1的散点图可以看出,散点在三维特征空间中从 $O(100, 100, 0)$ 点向斜对角方向 $Q(0, 0, 100)$ 点方向延伸。在三个指数两两构成的二维特征空间(图1中落在三个平面上的投影)中可以清晰地看出,MSAVI 与 WI 呈正相关关系,MSAVI 和 WI 分别与 SI 呈明显的负相关关系。

本文提取对角线 OQ 所在的平面,对三维空间中的各点在该平面上的投影,将其抽象为一个三角形 ABC(图2)。图2中,A 点(MSAVI 高, WI 高, SI 低)为低盐区,B 点(MSAVI 高, WI 高, SI 低)为非盐渍化干旱裸土区,C 点(MSAVI 低, WI 低, SI 高)为重度盐渍化区,尤其是地表盐霜区。AB 边为低盐边,从 A 点到 B 点,土壤水分和植被覆盖率呈递减趋势,土壤盐渍化程度变化不大。A 点到 C 点表征了土壤的盐渍化过程。图中 A, B, C 三点分别代表 MSAVI-WI-SI 三维特征空间中的极端状态,反映了在各种生物物理机制的驱动下,地表覆盖及各种生物物理参数的动态变化,因此具有明确的生态学内涵。

综上所述,本文选择修改型土壤调整植被指数(MSAVI)、湿度指数(WI)、盐分指数(SI)三个特征参量构建三维特征空间,建立土壤盐渍化遥感监测模型。

1.3.2 特征参量反演

根据本研究区植被较少的特点,本文采用 Qi 等^[16]发展的修改型土壤调整植被指数(MSAVI, Modified Soil-adjusted Vegetation)来反

以上分析表明,土壤盐渍化与修改型土壤调整植被指数(MSAVI)、湿度指数(WI)、盐分指数(SI)都存在显著的相关关系。因此本文以 MSAVI 为 X 轴, WI 为 Y 轴, SI 为 Z 轴,建立 MSAVI-WI-SI 三维特征空间。在研究区选取地表覆盖类型比较全面的典型区,利用 IDL 编程构建 MSAVI-WI-SI 三维特征空间的散点图(图1),以便进一步研究盐渍化在 MSAVI-WI-SI 组成的三维特征空间中的变化特征。

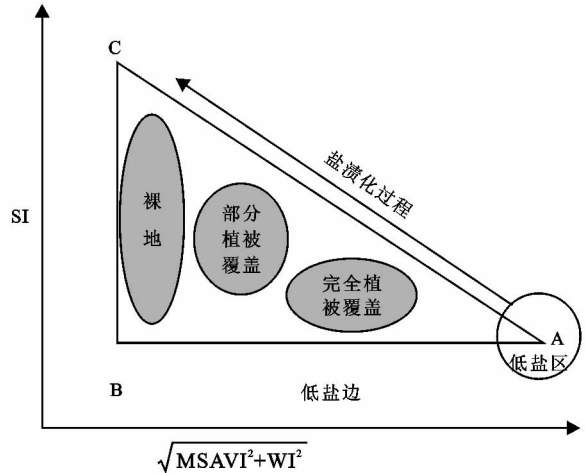


图2 MSAVI-WI-SI 三维特征空间的生态学解释

演植被信息,考虑了裸土土壤线,能较好地消除土壤及植被冠层背景的影响,指示研究区的植被信息。植被信息 MSAVI 可表示为:

$$MSAVI = \frac{[(2TM_4 + 1) - \sqrt{(2TM_4 + 1)^2 - 8(TM_4 - TM_3)}]}{2} \quad (1)$$

对于 TM 的各个波段而言,其蕴含了丰富的植被和土壤信息,经过穗帽变换后的第三个分量主要反映的是湿度特征,则湿度(Wetness)^[17]可表示为:

$$WI = 0.1446TM_1 + 0.1761TM_2 + 0.3322TM_3 + 0.3396TM_4 - 0.6210TM_5 - 0.4186TM_7 \quad (2)$$

盐分指数(Salinity Index, SI)^[18]公式如下:

$$SI = \sqrt{TM_1 \times TM_3} \quad (3)$$

式中: $TM_1, TM_2, TM_3, TM_4, TM_5, TM_7$ ——Land-sat5 影像中的第 1, 2, 3, 4, 5, 7 波段。

1.3.3 模型参数正规化处理

由于各个因子的数值和量纲不统一,则根据统计学的要求,先对各因子进行正规化处理:

$$M = \frac{MSAVI - MSAVI_{\min}}{MSAVI_{\max} - MSAVI_{\min}} \times 100\% \quad (4)$$

$$W = \frac{WI - WI_{\min}}{WI_{\max} - WI_{\min}} \times 100\% \quad (5)$$

$$S = \frac{SI - SI_{\min}}{SI_{\max} - SI_{\min}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $MSAVI_{\max}, MSAVI_{\min}$ ——MSAVI 的最大值和

最小值; M ——MSAVI 的归一化指数; WI_{\max} , WI_{\min} ——WI 的最大值和最小值; W ——WI 的归一化指数; SI_{\max} , SI_{\min} ——SI 的最大值和最小值; S ——SI 的归一化指数。

1.3.4 特征空间盐渍化监测模型的构建 从图 3 中,可以看出,空间中任意一点 M 到点 $O(100,100,0)$ 的距离越大,土壤盐渍化程度就越严重,反之,则土壤的盐渍化程度就越小。因此三维特征空间中的任意一点到低盐区的距离可用来表征土壤的盐渍化程度。从空间中任取一点 M ,根据三维空间中两点间的距离公式,得到 M 点到 O 点的距离 L :

$$L=\sqrt{(\text{MSAVI}-1)^2+(\text{WI}-1)^2+\text{SI}^2}\quad(7)$$

进而构建三维特征空间土壤盐渍化监测模型:
$$\text{MWSI}=\sqrt{(\text{MSAVI}-1)^2+(\text{WI}-1)^2+\text{SI}^2}\quad(8)$$
式中: MWSI ——土壤盐渍化监测指数。

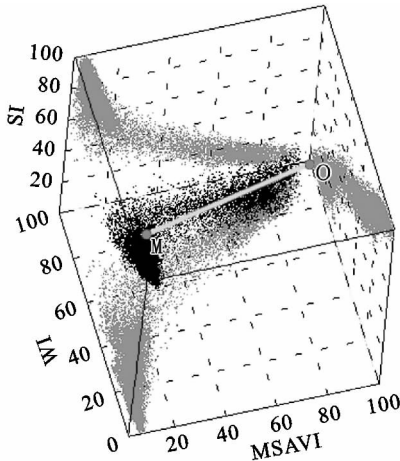


图 3 MWSI 模型构建示意图

2 结果与分析

2.1 土壤盐渍化信息提取

利用本文构建的 MWSI 模型对研究区的遥感影像进行处理,并利用水体指数,提取水域,对研究区的水域进行掩膜,所得结果如图 4 所示。根据模型的定义, MWSI 的取值范围为 $0\sim\sqrt{3}$,其值越大说明盐渍化程度越高,其值越小说明盐渍化程度越低。从图 4 的灰度图可以看出低值主要分布在农田绿洲区,高值主要分布在绿洲边缘及外围,与沙漠的交错带上。实地调查中,该区地势北高南低,流域上游在进行灌溉时,盐分会随水向中下游地势低的地区聚集,因此在渭干河和库车河的下流分布着大量的盐渍化土,尤其在研究区东北的裸露地土壤的盐渍化程度最为严重。

2.2 精度对比验证

根据采样点的坐标值在 ArcGIS 中提取各点的盐分监测指数 (MWSI),并对土壤盐分实测值与

MWSI 值进行回归分析,回归模型为指数形式,相关系数 $R=0.896$ 。相关性较高,表明土壤盐渍化监测指数 MWSI 用于土壤盐渍化的监测非常有效,对研究区不同盐渍化程度有良好的反映,其结果真实可信。而回归模型之所以为指数形式,并非线性,可能是由于本研究区的部分地区为重度盐渍化区,存在明显的盐分表聚现象,且土壤湿度、土壤温度、土壤质地、土壤盐分的高低,都将影响分析曲线的线性。

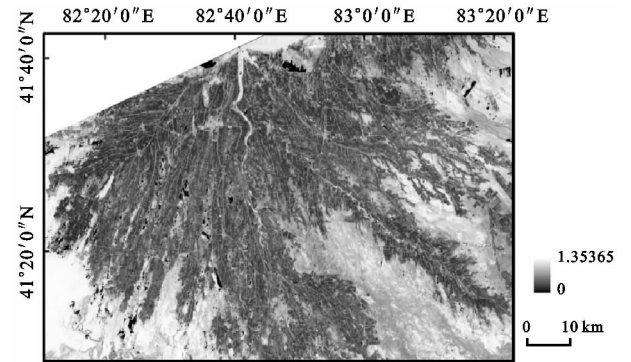


图 4 研究区的 MWSI 值分布图

此外,我们提取了各采样点在三个指数两两构成的特征空间中的土壤盐渍化监测指数,公式分别如下:

基于 $\text{MSAVI}-\text{WI}$ 特征空间的土壤盐渍化监测指数:

$$\text{MWI}=\sqrt{(\text{MSAVI}-1)^2+(\text{WI}-1)^2}\quad(9)$$

基于 $\text{MSAVI}-\text{SI}$ 特征空间的土壤盐渍化监测指数:

$$\text{MSI}=\sqrt{(\text{MSAVI}-1)^2+\text{SI}^2}\quad(10)$$

基于 $\text{WI}-\text{SI}$ 特征空间的土壤盐渍化监测指数:

$$\text{WSI}=\sqrt{(\text{WI}-1)^2+\text{SI}^2}\quad(11)$$

土壤盐分实测值与以上三个指数的图像值进行回归分析,并建立回归模型(表 1)。

表 1 不同土壤盐渍化监测指数(MWSI , MWI , MSI , WSI)与实测值的拟合结果

| 盐渍化监测指数 | 回归方程 | R |
|---------|-------------------------|-------|
| MSAVI | $y=0.067\ln(x)+0.6493$ | 0.896 |
| MWI | $y=0.0663\ln(x)+0.5488$ | 0.891 |
| MSI | $y=0.0683\ln(x)+0.6252$ | 0.894 |
| WSI | $y=0.0265\ln(x)+0.3522$ | 0.809 |

从表 1 中,我们可以看出,由 $\text{MSAVI}-\text{WI}-\text{SI}$ 三维特征空间构建的土壤盐渍化监测指数 MSAVI 与土壤盐分实测值的相关性最高($R=0.896$),说明该综合指数较其他基于二维特征空间构建的模型具有一定的优越性。其次是基于 $\text{MSAVI}-\text{SI}$ 特征空间的土壤盐渍化监测指数 MSI ($R=0.894$),和基于 $\text{MSAVI}-\text{WI}$ 特征空

间的土壤盐渍化监测指数 MSI($R=0.891$),这两种特征空间对于土壤盐渍化的监测也十分有效。相关系数最低的是基于 WI-SI 特征空间的土壤盐渍化监测指数 WSI($R=0.809$),说明该二维特征空间在土壤盐渍化程度的监测方面处相对较劣。

目前,土壤盐渍化分级标准的主要依据为新疆维吾尔自治区水利厅制定的《新疆县级盐碱地改良利用规划工作大纲》,该大纲将土壤盐渍化程度划分为以下四类:非盐渍化土壤,土壤盐分 $<1.0\text{ g/kg}$,包括农作物长势较好的耕地,乔木、灌木的林地,畜牧为主的草地以及芦苇地等;轻度盐渍化土壤,土壤盐分 $1.0\sim3.0\text{ g/kg}$,与非盐渍地间布,植被覆盖度在 $15\%\sim30\%$;中度盐渍化土壤,盐分 $3.0\sim5.0\text{ g/kg}$,呈片状分布,植被盖度较小,约 $10\%\sim15\%$ 左右;重度盐渍化土壤,盐分 $5.0\sim10.0\text{ g/kg}$,有明显的盐结皮,仅生长有盐穗木等耐盐植被,植被覆盖度极小,有 $5\%\sim10\%$ 左右。图 5 为根据以上分类标准,以及多次的实地调查获得的采样点信息数据库,并结合样点的土壤盐分实测值,通过建立与实地情况相符合的训练场地,进行监督分类的结果。从图 5 中可以看出非盐渍土主要分布在农田绿洲区;轻度盐渍土分布在绿洲边缘,与绿洲相间分布;中度盐渍土分布在轻度盐渍土外围;重度盐渍土分布在绿洲外围,与沙漠的交错带上。通过将图 5 与图 4 的叠加分析,得到研究区不同盐渍化程度的 MWSI 阈值分别为:非盐渍化地(<0.547),轻度盐渍化地($0.547\sim0.803$),中度盐渍化地($0.803\sim1.016$),重度盐渍化地(>1.016)。

表 2 显示的是不同盐渍化地类的 MWSI 的平均值。利用差异性矩阵对其进行分析(表 3),发现非盐渍地和盐渍地的土壤盐渍化监测指数(MWSI)值的差异明显。其中,非盐渍化地与重度盐渍化地的 MWSI 值差异性最大,达到 0.793;非盐渍化地与中度盐渍化地的 MSWI 值差异为 0.520;非盐渍化地与轻度盐渍化地的 MWSI 值差异最小为 0.285,但仍然比较显著。说明利用土壤盐渍化监测指数(MWSI)对土壤的盐渍化程度反映较为敏感,用于土壤盐渍化信息提取的方法可行有效,可以作为土壤盐渍化监测的指标。

| 表 2 不同盐渍化土壤 MWSI 平均值 | |
|----------------------|-------|
| 盐渍化土壤 | MWSI |
| 非盐渍化地 | 0.390 |
| 轻度盐渍化地 | 0.675 |
| 中度盐渍化地 | 0.910 |
| 重度盐渍化地 | 1.183 |

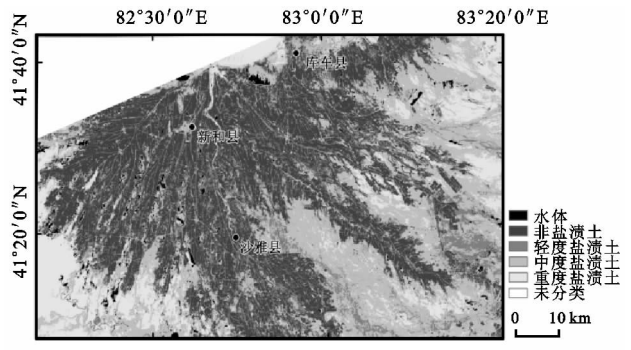


图 5 渭河绿洲土壤盐渍化分级

表 3 不同程度盐渍化土壤 MWSI 差异矩阵

| | 非盐渍化地 | 轻度盐渍化地 | 中度盐渍化地 |
|--------|-------|--------|--------|
| 轻度盐渍化地 | 0.285 | | |
| 中度盐渍化地 | 0.520 | 0.235 | |
| 重度盐渍化地 | 0.793 | 0.507 | 0.272 |

3 结 论

土壤盐渍化是干旱半干旱区土地退化的主要形式之一,正确评价和预防土壤盐渍化对促进农业生产及区域可持续发展具有重要的现实意义。通过本文研究,结论如下:

- (1) 修改型土壤调整植被指数(MSAVI)、湿度指数(WI)、盐分指数(SI)三个特征参数构建的三维特征空间能够良好地反映土壤盐渍化的趋势和过程,具有明确的生物物理学意义。
- (2) 土壤盐渍化监测指数 MWSI, MWI, MSI, WSI 和土壤盐分实测值的相关系数分别为 0.896, 0.891, 0.894, 0.809,表明通过 MSAVI-WI-SI 三维特征空间建立的 MWSI 指数与盐分实测值的相关性最好。说明考虑综合信息的土壤盐渍化监测指数 MWSI 对于土壤盐渍化的监测非常有效。
- (3) 根据现有土壤盐渍化分级图将 MWSI 指数值分为四级:非盐渍化地(<0.547),轻度盐渍化地($0.547\sim0.803$),中度盐渍化地($0.803\sim1.016$),重度盐渍化地(>1.016)。同时通过差异性矩阵分析表明不同盐渍化程度 MWSI 均值差异明显。说明土壤盐渍化监测指数(MWSI)对土壤的盐渍化程度反映较为敏感,可以作为土壤盐渍化监测的指标。

参考文献:

[1] 李凤全,吴樟荣.半干旱地区土地盐碱化预警研究:以吉林省西部土地盐碱化预警为例[J].水土保持通报,2002,22(1):57-59.

[2] 李新国,樊自立,李会志,等.开都河下游灌区土壤盐渍化动态变化研究[J].水土保持研究,2011,18(3):64-67.

[3] 翁永玲,宫鹏.土壤盐渍化遥感应应用研究进展[J].地理科学,2006,26(3):369-375.

3 结论

通过连续 3 a 的春玉米定位覆盖试验表明,各处理在 0—600 cm 的土壤含水量的规律变化较大。随覆盖时间的增加,秸秆覆盖和地膜覆盖处理的保墒效果逐渐明显,且与 CK 处理的差异幅度不断增大,影响土层深度也不断下渗至 400 cm 以下。

地膜覆盖处理具有良好的蓄水保墒效果,能够显著提高玉米产量和水分利用效率。连续 3 a 的产量和水分利用效率较不覆盖处理平均提高 20.8% 和 11.8%,而秸秆覆盖处理阻碍了玉米的前期生长,影响了玉米植株在整个生育期的正常生长,进而造成玉米产量和水分利用效率的降低。

参考文献:

- [1] 康绍忠. 立足国情,积极发展节水农业[J]. 科技导报, 1999(7):17-21.
 - [2] 宋孝玉,刘贤赵,沈冰,等. 陕西渭北旱塬种植业结构调整的水资源问题及对策[J]. 干旱区地理, 2004, 27(2): 199-201.
 - [3] Tolck J A, Howell T A, Evett S R. Effect of mulch, irrigation, and soil type on water use and yield of maize[J]. Soil & Tillage Research, 1999, (50):137-147.
 - [4] 王晖,刘泉汝,张圣勇,等. 秸秆覆盖下超高产夏玉米农田产量和土壤水分的动态变化[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5):261-264.
 - [5] 王喜庆,李生秀. 地膜覆盖对旱地春玉米生理生态和产量的影响[J]. 作物学报, 1998, 24(3):348-353.
 - [6] 张俊鹏,孙景生,刘祖贵,等. 不同水分条件和覆盖处理对夏玉米籽粒灌浆特性和产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3):501-506.
 - [7] 雷金银,吴发启,王健,等. 保护性耕作对土壤物理特性及玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10):40-45.
 - [8] 卜玉山,苗果园,邵海林,等. 对地膜和秸秆覆盖玉米生长发育与产量的分析[J]. 作物学报, 2006, 32(7): 1090-1093.
 - [9] 宋淑亚,刘文兆,王俊,等. 覆盖方式对玉米农田土壤水分、作物产量及水分利用效率的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2):210-212.
- ~~~~~
- (上接第 117 页)
- [4] 哈学萍,丁建丽,罗江燕,等. 基于 SI-Albedo 特征空间的干旱区盐渍化土壤信息提取研究:以克里雅河流域绿洲为例[J]. 土壤学报, 2009, 46(3):381-390.
 - [5] 哈学萍,丁建丽,高婷婷,等. 基于 SI-Albedo 特征空间的土壤盐渍化遥感监测指数研究[J]. 土壤学报, 2009, 46(4):698-703.
 - [6] 王飞,丁建丽,伍漫春. 基于 NDVI-SI 特征空间的土壤盐渍化遥感模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8):168-173.
 - [7] 丁建丽,瞿娟,孙永猛,等. 基于 MSAVI-WI 特征空间的新疆渭干河—库车河流域绿洲土壤盐渍化研究[J]. 地理研究, 2013, 32(2):223-232.
 - [8] 徐涵秋. 城市不透水面与相关城市生态要素关系的定量分析[J]. 生态学报, 2009, 29(5):2456-2462.
 - [9] 丁建丽,姚远,王飞. 基于三维光谱特征空间的干旱区土壤盐渍化遥感定量研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(5):853-861.
 - [10] 吉别克·哈力克巴义,丁建丽,谢力扎提·哈布尔,等. 干旱区土地盐渍化时空动态变化及影响因子分析[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4):112-116.
 - [11] 江红南,丁建丽,赵睿,等. 基于 ETM+数据的干旱区盐渍化土壤信息提取研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(2): 222-228.
 - [12] Bui E N, Henderson B L. Vegetation indicators of salinity in northern Queens land[J]. Austral Ecology, 2003, 28(5):539-552.
 - [13] 王雪梅,柴仲平. 渭干河—库车河三角洲绿洲土壤盐分对植被分布格局的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(1):219-223.
 - [14] 杨劲松,姚荣江,邹平,等. 海涂区不同植被类型下土壤盐渍剖面及其电磁感应响应特征[J]. 应用生态学报, 2008, 19(10):2117-2124.
 - [15] 韩双平,荆继红,孙继朝,等. 银川北部平原土壤水分运动状态类型及水盐运移机理研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(5):148-152.
 - [16] Qi J, Chehbouni A, Huete A R, et al. A modified soil adjusted vegetation index[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 48(2):119-126.
 - [17] Crist E P. A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data[J]. Remote Sensing of Environment, 1985, 17(3):301-306.
 - [18] Khan N M, Sato Y. Monitoring hydro-salinity status and its impact in irrigated semi-arid areas using IRS-1B LISS-II data[J]. Asian J. Geoinform, 2001, 1(3):63-73.