

DOI: 10.5846/stxb201605090890

王飞, 丁建丽, 魏阳, 周倩倩, 杨晓东, 王前锋. 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. 生态学报, 2017, 37(15): 5007-5022.

Wang F, Ding J L, Wei Y, Zhou Q Q, Yang X D, Wang Q F. 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. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(15): 5007-5022.

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

王 飞^{1,2}, 丁建丽^{1,2}, 魏 阳^{1,2}, 周倩倩^{1,2}, 杨晓东^{1,2}, 王前锋³

1 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

2 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

3 福州大学环境与资源学院, 福州 350116

摘要: 基于不同地理区域, 借助目前已有或者构建新的盐分和植被指数定量评估研究区的土壤盐度状况。但多数指数并未在盐渍化较为严重的中国新疆地区进行系统性对比分析。因此, 以新疆阜北地区(采样数=37), 玛纳斯河绿洲(采样数=68)和渭干河-库车河绿洲(采样数=38)为研究区, 以灌区农田和盐渍地采样数据和 Landsat TM/ETM+/OLI 为数据源, 利用线性模型和多个非线性模型(10个)测试上述指数(14个指数)和原始波段对于研究区土壤盐度的敏感性。结果显示, 阜北地区基于遥感获取的扩展的增强型植被指数 Extended Enhanced Vegetation Index (EEVI) 在全样本和部分样本(盐渍化样本, 土壤盐度>0.3%)两种模式下(0—10cm), 较其他指数和波段而言较为敏感。在全样本和部分样本(土壤饱和溶液电导率<2ds/m)两种模式下, 与玛纳斯流域各层土壤盐度最为敏感的为 band 2, 部分样本模式下土壤盐度变异性显著性探测最大下探深度为 30cm。渭干河-库车河绿洲全样本模式下, 最大土壤盐度变异性显著性探测深度为 40cm, 0—10cm 和 10—20cm 深度表现最为敏感的是土壤盐分指数 SI-T, 20—40cm 深度则为植被指数 TGDVI。部分样本下(土壤饱和溶液电导率>2ds/m), 0—10cm 深度最为敏感的为 band 5, 10—20cm 深度最为敏感的为 TGDVI, 20—40cm 深度则为 EEVI。其他指数因地理环境的差异性(气候, 土壤盐分类型, 土壤类型, 采样时间), 与土壤盐度之间并未达到显著性(sig=0.05 或者 0.01)的水平。以上结果只是初步结论, 但也暗示其中的某些指数在本区具有一定土壤盐度的识别潜力。此外, 由于土壤本身的复杂性, 需要采集更多的样本以深入分析不同盐度等级下上述指数的具体表现。

关键词: 土壤盐渍化; 盐分指数; 植被指数; 干旱区; Landsat

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

WANG Fei^{1,2}, DING Jianli^{1,2}, WEI Yang^{1,2}, ZHOU Qianqian^{1,2}, YANG Xiaodong^{1,2}, WANG Qianfeng³

1 College of Research and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Laboratory of Oasis Ecosystems, Ministry of Education, Urumqi 830046, China

3 College Environment and Resources of Fuzhou University, Fuzhou 350116, China

Abstract: Several indices of vegetation and soil salinity have been developed to quantitatively evaluate soil salinization. This

基金项目: 国家自然科学基金-新疆联合基金(U1603241); 新疆维吾尔自治区科技支疆项目(201591101); 国家自然科学基金(41661046); 中国博士后基金(2016M602909); 新疆大学博士启动基金(BS150248); 新疆维吾尔自治区重点实验室专项基金(2014KL005)

收稿日期: 2016-05-09; 修订日期: 2016-09-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: watarid@xju.edu.cn

study was conducted to assess the soil salinity levels in the Fubei region (FG), Manas River Basin (MRB), and Werigan-Kuqa River Delta Oasis (WKRDO), which are distributed in the northern and southern Tianshan Mountains in Xinjiang, China. Ground measurements and remote sensing data were used to evaluate the sensitivity of vegetation and soil salinity indices to soil salinity variation in farmland and salt-affected land. A random sampling approach was used to collect soil samples from FG ($n=37$, only at 0–10-cm depth), MRB ($n=58$), and WKRDO ($n=38$). A total of 14 broadband indices encompassing vegetation and soil salinity indices were extracted from Landsat images. The correlation coefficient based on linear and non-linear models (10 models) between these indices, Landsat bands, and soil salinity was examined. The results showed that the extended enhanced vegetation index (EEVI) was the most effective for explaining the soil salinity variation at depths of 0–10 cm in two modes (all samples and partial samples with soil salinity (soil salt content) $>0.3\%$) in FG. With the mode of all samples and partial samples (soil electric conductivity <2 dS/m) in MRB, band 2 yielded the best results for assessing the soil salinity of cultivated lands at the early stage of crop growth in April. The maximum depth of the significance test by using indices for detecting variation of soil salinity in this area was 30 cm. For all samples in WKRDO, the salinity index (SI-T) interpreted more variation of soil salinity than that by other indices at depths of 0–10 and 10–20 cm, and the three-band maximal gradient difference index (TGDVI) exhibited the highest significant correlation with salinity at 20–40 cm. In the mode of partial samples (soil salinity >2 dS/m), the most sensitive index for variation of soil salinity at 0–10, 10–20, and 20–40 cm were band 5, TGDVI, and EEVI. In addition, the correlation of other indices (excluding those mentioned above) and soil salinity was highly dependent on land cover heterogeneity and sample period, and showed no significant relationships ($p > 0.05$ or $p > 0.01$). These results are preliminary conclusions, but in general, the soil salinity in Xinjiang dominated by different salt types was successfully assessed by broadband vegetation and soil salinity indices extracted from the Landsat images. However, relationships between remote sensing indices and soil salinity within fields are highly complex and require further investigation with additional samples and by using various soil salinity classifications.

Key Words: soil salinization; salinity index; vegetation index; dryland; Landsat

新疆维吾尔自治区堪称干旱区盐碱土博物馆,分布范围广,种类多样,作为西北最大的农业用地储备区,快速精确地评估本地土壤盐度则有利于本地水资源管理,农业用地规划和防止土壤盐渍化的扩张和反复性。新疆灌区盐渍化土地占灌区总面积比例高达 32.07%^[1],多数城市和县级地区都有分布。整体而言,以天山为界,南疆地区比北疆地区严重。盐渍化土地主要分布在该区洪积扇中下部,绿洲-荒漠交错带,新开垦地区或老灌区内部的弃耕地^[2]。放眼未来,随着人口的增加,人类活动将不断加剧,及时升级土壤环境数据(物理化学,生物,生态水文等)的需求相比从前更为强烈^[3]。新疆天然的地理环境,加之水土资源的不合理利用,势必会造成更多的土地面临土壤盐渍化问题。另外,干旱区生态环境脆弱,准确高效地诊断本地土壤盐度对于评估土壤健康和优化管理尤为重要。相对于传统技术而言,遥感数据因其覆盖面积广,寻访周期快,且非侵入土壤等优势得以广泛应用。

借助遥感光谱探测土壤盐度的方式主要有两种。首先,在植被覆盖度较低(植被覆盖度小于 15%)或盐渍化较为严重的裸土地区,可利用遥感原始波段光谱直接测量其土壤光谱信息,并与土壤盐分进行关联,定量获取其盐度值。基于目前实地测量的光谱信息所总结的理论基础,许多学者尝试建立盐度指数定量描述土壤盐度信息。这些指数包括:盐分指数(SI-T)^[4],归一化盐分指数(NDSI)^[5],盐分指数(Salinity Index 2, SI2)^[6],盐分指数(S2)^[7],盐分指数(SI3)^[6],以上指数在其上述文献研究区内相比其他盐分指数而言,对于盐度信息更为敏感。其次,盐渍化土壤因其盐分含量超过正常阈值进而影响到植被的生理参数,因此出现红光波段反射率增加和近红外波段反射率降低的现象^[8-9]。鉴于此发现,诸多研究学者利用植被光谱间接推理土壤中的盐分含量。涉及的植被指数有归一化植被指数(NDVI)^[10],增强性植被指数(EVI)^[11],土壤调节植被

指数(SAVI)^[12], 广义植被指数(GDVI)^[13], 冠层响应盐度指数(CRSI)^[14], 大气阻抗植被指数(GARI)^[15], 联合光谱响应指数(COSRI)^[16], 扩展的增强型植被指数(ENDVI)^[17], 扩展的增强型植被指数(Extended Enhanced Vegetation Index, EEVI)^[17], 等。除以上指数外,Zhang 等(2016)^[18]研究发现 TGDVI(three-band maximal gradient difference, TGDVI)相对 EVI 和 NDVI 而言,与植被生物量的相关性更高。Zhang 等^[19]研究显示植被序列积分函数——类生物量参数 SI(Seasonal Integral)具备评估大尺度下盐分信息的潜力。因此,基于以上研究,研究增加三波段差分指数 TGDVI^[20]联合其他植被指数共同考量植被指数对土壤盐度的敏感性。然而,基于波段组合构建的盐分和植被指数与土壤盐度之间的关系随着时空的变异表现出诸多变化。因其地理环境的不同,本地表现出的高敏感性,在其他地区是否依然能够保持,值得商榷。上述指数被应用到世界各地,仅 Brunner 等^[10]利用 NDVI 在新疆的博斯腾湖地区评价过土壤盐度,其他指数均较少应用到新疆地区。上述指数应用区之间在地貌特征,植被类型,气候,人文因素等方面表现出的一定的差异性,使得土壤中的盐分类型呈现类型多样的特点。至此,不同盐分类型下的土壤/植被光谱与土壤盐度信息之间的关系可能会参差不齐,指数模型的通用性(transferability)有待考量。上述指数并没有在新疆地区不同绿洲进行对比,而挖掘指数与土壤盐度之间的定量关系,对于识别潜在的土壤盐渍化土地及制定相关措施,以最小代价防止土壤盐渍化,成为目前较为高效的工具。因此,本研究借助 Landsat 系列数据,以天山北麓阜北地区,玛纳斯河绿洲和天山南麓渭干河-库车河绿洲三个地区为研究区,评估上述指数在新疆多个灌区盐渍化分布区的敏感性。

1 研究区

阜北地区(44°17'—44°22'N and 87°47'—88°01'E)地处西北干旱地区,是典型的绿洲沙漠过渡带,位于三工河(发源于天山北麓)流域的末端。该地区高程范围 454.3—485.4 m,地势东南方向至西北方向缓慢递减,平均坡度为 0.17%。年际平均降水量为 163mm,年际蒸发皿 1780—2460mm。因地势平缓,径流速度缓慢,蒸发量大等因素,土壤盐渍化发生较为普遍。土壤类型依据 FAO/UNESCO (1990) 统计,盐土(Solonchak)约占 37%,其次为筒育钙积土(Haplic calcisols)和底层较为肥沃的潮性变性土(Aquert)^[21]。自然植被包括耐旱和耐盐的植被群落,如,荒漠灌丛的多枝怪柳(*Tamarix ramosissima*, 梭梭(*Haloxylon ammodendron*)和琵琶柴(*Reaumuria soongorica*)。作物类型包括棉花(cotton),小麦(wheat),啤酒花(hops),葡萄(grapes)和玉米(corn)。

玛纳斯河绿洲(46°00'—44°00'N and 84°30'—86°30'E)坐落于中国西北地区,位于新疆天山北麓。该地属于温带大陆性干旱性气候,年际气温变化剧烈。平均温度为 6.5 °C,年际平均降水和潜在蒸发量为 170mm 和 1800mm^[22]。该区整体地形较为平坦,农业生产潜力巨大。土壤类型以灰漠土为主。生长季农田整体长势较好,作物类型以玉米(*Zea may L.*),小麦(*Triticum spp.*)和棉花(*Gossypium hirsutum L.*)为主。该绿洲是新疆最为重要的粮食生产基地,灌溉措施齐全,因地理环境的影响,但仍受土壤盐渍化的威胁。

渭干河-库车河绿洲(41°06'N — 41°40'N and 82°10'E — 83°50'E)位于塔里木盆地北麓中段。典型的温带大陆性干旱气候,日平均温度变化剧烈(夏天最高温度超过 40°C),年平均降水量 67.5mm。由于极端的气候,地质环境和不合理的农业管理的影响,导致本地土壤盐渍化现象普遍^[23-24]。自然条件下植被覆盖较低,优势植被群落包括芦苇(*Phragmites australis*),怪柳(*Tamarix ramosissima*),骆驼刺(*Allhagi sparsifolia*),花花柴(*Karelinia caspica*), and 盐爪爪(*Kalidium gracile*)。严重的地区出现盐壳风化现象(Salt efflorescence)。相比阜北地区和玛纳斯河绿洲而言,该地区盐渍化现象更为典型和严重。

2 数据与方法

2.1 野外调查和地面数据获取

玛纳斯河绿洲的采样时间为 2010 年 5 月 1 日,采用较为均匀的随机布点方式。每个样点处,采集 3 个土壤样本并混合,样本之间的距离为 25m 左右。采样深度间隔为 0—10cm, 10—20cm, 20—30cm, 30—50cm,

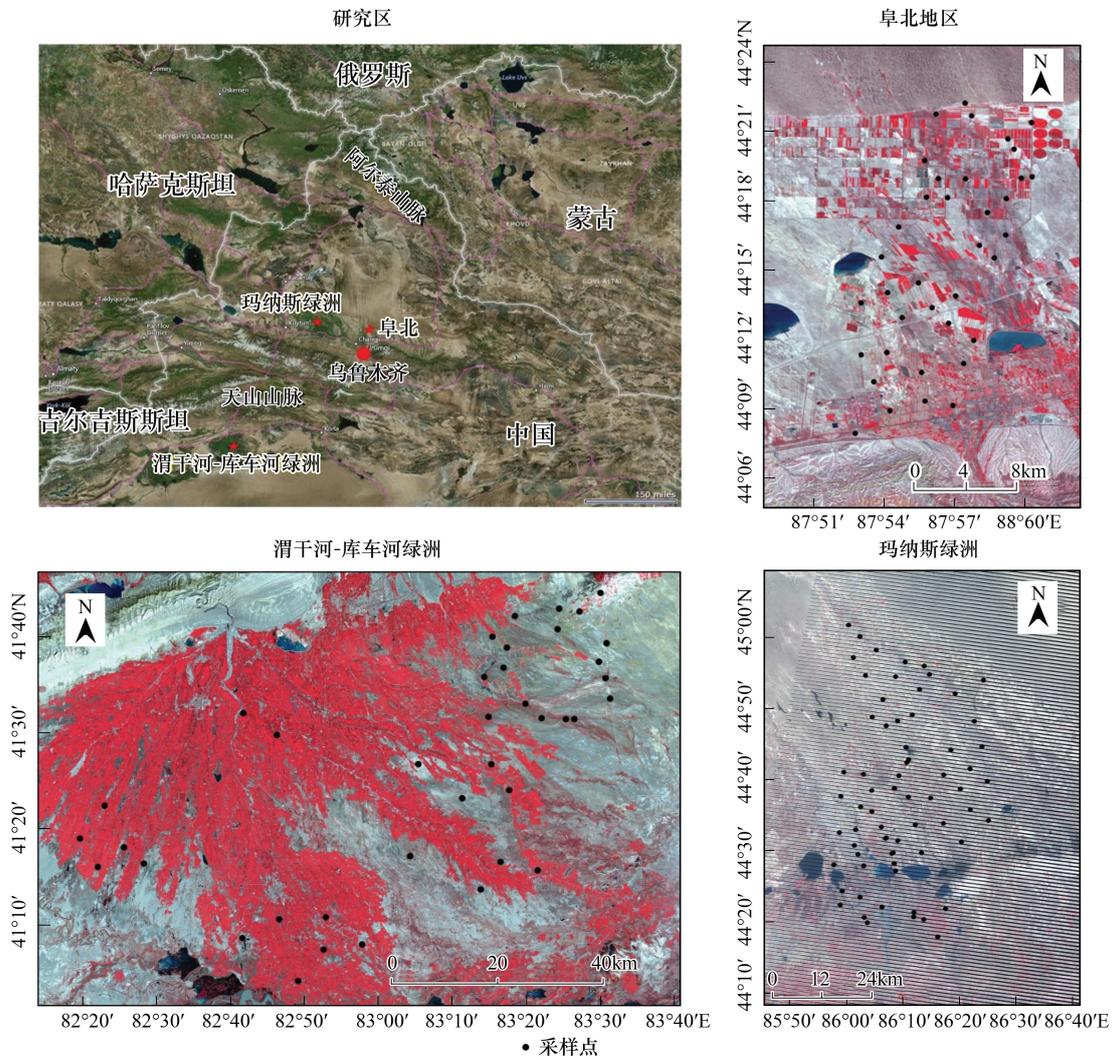


图1 研究区示意图

Fig.1 Study sites. Location of Fubei region, Werigan-Kuqa River Delta Oasis and Manas River Basin

假彩色合成 543:红色为植被,蓝色和黑色是水体,白色和灰色是裸土

50—70cm。该地共采集 68 个混合样本。样本自然风干后,经研磨和过滤制备成待测标本。样本利用 1:5 的土水比例混合过滤后,借助电导率仪(Walklab con 60 conductivity meter)获取土壤溶液电导率 E_{CE}(dS/cm)数据。

阜北地区共采集 37 个样本,深度为 0—10cm,采样时间为 2009 年 5 月 12 日至 19 日。因为该区地处绿洲-荒漠交错带,地表特征复杂,为此,布点尽量覆盖不同盐分等级且样点布局相对均匀。为了减少遥感数据与地面样点之间的匹配误差,每个样点共采集 5 个样本进行混合。每个样品重量为 500g。样品送至中国科学院新疆生态与地理研究所理化测试中心进行测量,最终的盐分含量(%)为 8 大离子之和。

渭干河-库车河绿洲共采集 38 个样地,每个样地采集 3 个样本。样本覆盖以下几种土地利用类型:农业用地(9 个),盐土(8 个),荒漠(1 个),低覆盖草地(5—20%)(16 个),中等覆盖草地(20—50%)(3 个),灌丛(1 个)。采样时间为 2013 年 8 月 24 日至 9 月 1 日。每个样点采集 5 个样本进行混合。采样深度间隔为:0—10 cm, 10—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm, 80—100cm。样本去除杂质,经过 2mm 筛子,以 20g 和 100ml 蒸馏水进行充分混合,待过滤后,利用土壤溶液电导率仪(Merck Millipore, Billerica, MA, USA)进行 EC 测量。

2.2 卫星数据

2.2.1 Landsat 数据

本研究应用的遥感数据包括 Landsat TM, Landsat-7 ETM+ 和 Landsat-8 OLI images 3 种数据(表 1)。遥感数据源于美国地质调查局(United States Geological Survey) (<http://glovis.usgs.gov/>)。图像投影坐标系统为 Universal Transverse Mercator (UTM) coordinate system, 地理坐标系统为 World Geodetic System (WGS) 1984, 图像的空间分辨率为 30m。数据描述信息见文献^[25-26]。

表 1 不同研究区 Landsat 系列数据获取时间及其行列号
Table 1 Data acquired in Day (DOY) format for study regions

研究区 Location	传感器类型 Sensor Type	行列号 Path/Row	获取时间 Date acquired
玛纳斯河绿洲 Manas oasis	Landsat-7 ETM+	144/29	April 29, 2010
阜北地区 Fubei region	Landsat TM	143/29	May 29, 2009
渭干河-库车河绿洲 Werigan-Kuqa River Delta Oasis	Landsat-8 OLI	145/31	August 26, 2013

2.2.2 大气校正

为了更好的拟合图像数据与地面实测土壤盐度数据,且减少大气对最终结果的影响,研究利用遥感软件 ENVI5.1 (ITT VIS, 2014) 中的 FLAASH (Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) 模块对原始数据进行大气校正。模型中的主要参数包括大气模块(设定为中纬度夏天(Mid-Latitude Summer)), 气溶胶模式(选择乡村(Rural))。最终将辐射率转化为地表反射率,为计算指数提供相对精确的数据支持。

2.3 研究方法

2.3.1 土壤盐度指数和植被指数获取及其计算

研究共选择了 10 个植被指数和 4 个盐度指数用于分析其与土壤盐度之间的定量关系(表 2)。具体指数计算则利用 ENVI5.1 中的 Band Math Function 模块完成。

2.3.2 数据分析

采用线性和非线性相关性方式检验和分析土壤盐分指数和植被指数对土壤盐度的敏感性。

$$\text{线性(Linear): } E(Y_t) = \beta_0 + \beta_1 t \quad (1)$$

$$\text{对数(Logarithmic): } E(Y_t) = \beta_0 + \beta_1 \ln(t) \quad (2)$$

$$\text{逆模型(Inverse): } E(Y_t) = \beta_0 + \beta_1/t \quad (3)$$

$$\text{二次函数(Quadratic): } E(Y_t) = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 \quad (4)$$

$$\text{立方函数(Cubic): } E(Y_t) = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3 \quad (5)$$

$$\text{复合函数(Compound): } E(Y_t) = \beta_0 \beta_1^t \quad (6)$$

$$\text{幂函数(Power): } E(Y_t) = \beta_0 t^{\beta_1} \quad (7)$$

$$\text{S 函数: } E(Y_t) = \exp(\beta_0 + \beta_1/t) \quad (8)$$

$$\text{增长函数(Growth): } E(Y_t) = \exp(\beta_0 + \beta_1 t) \quad (9)$$

$$\text{指数函数(Exponential): } E(Y_t) = \beta_0 e^{\beta_1 t} \quad (10)$$

$$\text{逻辑函数(Logistic): } E(Y_t) = (1/u + \beta_0 \beta_1^t)^{-1} \quad (11)$$

式中, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, u$ 为拟合系数, Y_t 为土壤盐度, t 为土壤盐分指数, 植被指数和波段。

表 2 用于评价土壤盐度的盐分指数和植被指数

Table 2 Summary of some widely used vegetation and soil salinity indices for soil salinity assessments

公式 Formulation	研究区 Study area	参考文献 References
$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$	中国西部的焉耆盆地	[10]
$EVI = G \times \frac{(NIR - R)}{(NIR + 6 \times R - 7.5 \times b + 1)}$	美国明尼苏达州与达科他州的交界处	[11]
$GARI = \frac{NIR - [G + \gamma \times (B - R)]}{NIR + [G + \gamma \times (B - R)]}$	美国加利福尼亚的中心山谷	[15]
$CRSI = \sqrt{\frac{(NIR \times R) - (G \times B)}{(NIR \times R) + (G \times B)}}$	美国加利福尼亚的中心山谷	[14]
$COSRI = (G + B) / (R + NIR) \times NDVI$	墨西哥盆地的墨西哥湖	[16]
$GDVI = (NIR^n - R^n) / (NIR^n + R^n)$	伊拉克的 Dujaila	[13]
$SAVI = (NIR - R) / (NIR + R + L) \times (1 + L)$	沙特阿拉伯的 Al-Hassa 绿洲	[12]
$TGDVI = \frac{NIR - R}{\lambda_{NIR} - \lambda_R} - \frac{SWIR_1 - NIR}{\lambda_{SWIR_1} - \lambda_{NIR}}$	并未用于土壤盐度评价	[20]
$ENDVI = \frac{(NIR + SWIR_2 - RED)}{(NIR + SWIR_2 + RED)}$	中国黄河三角洲	[17]
$EEVI = 2.5 \times \frac{(NIR + SWIR_1 - RED)}{(NIR + SWIR_1 + 6 \times RED - 7.5 \times b + 1)}$	中国黄河三角洲	[17]
$SI-T = (R / NIR) \times 100$	印度恒河平原附近的 Kanpur	[4]
$S2 = (B - R) / (B + R)$	巴基斯坦的 Faisalabad	[7]
$SI2 = \sqrt{G^2 + R^2 + NIR^2}$	Lower Chélif 平原, Algeria	[6]
$NDSI = (R - NIR) / (R + NIR)$	巴基斯坦的 Punjab 省	[5]
$SI3 = \sqrt{G^2 + R^2}$	Lower Chélif 平原, Algeria	[6]

B: 蓝波段, G: 绿波段 red band, NIR: 近红外; SWIR1: 短波红外 550—1750nm in Landsat ETM+/TM; 1570—1650nm in Landsat 8 OLI); SWIR2: 短波红外 (在 Landsat ETM+/TM 该长为—2350nm; 在 andsat 8 OLI 该长为 2100—2290nm); n 等于 2, 3, 4; λ is 波长; $L=1$ 和 $\gamma = 0.9$ 是气溶胶和大气相关参数

本文首先将不同研究区获取的样点整体(全样本)参与计算和统计分析,其次按照土壤盐度等级标准分析不同等级下(部分样本)土壤盐分指数,植被指数和波段与土壤盐度之间的敏感性。每个研究区按照等级划分后的样点数量的多寡,具体选择可对比的等级进行统计分析。

为了评价上述函数的拟合精度,研究引用决定系数 R^2 和显著性检验 (Sig.) (2-tailed),定量评估不同地区每个指数与不同深度土壤盐度之间的敏感性。其中 Sig.<0.05 为显著性, Sig.<0.01 为极度显著。数据分析和检验均在 SPSS16.0 中完成。

3 结果

3.1 土壤盐度数据统计

表 3 中显示了 3 个研究区土壤盐度的统计结果。由表 3 得知,渭干河-库车河绿洲和阜北地区土壤盐度范围横跨所有盐度等级,即非盐渍化至极度盐渍化,而玛纳斯河绿洲样品经分析之后得知其中 94% 的样点属于非盐渍化。

表 3 研究区不同土壤深度的统计描述

Table 3 Descriptive statistics of the actual soil salinity (soil salt content% used in Fubei and Electrical conductivity used in Manas oasis/ Werigan-Kuqa River Delta Oasis)

	阜北地区 FG/%		玛纳斯河绿洲 MRB/(ECe ds/m)			
	0—10	0—10	10—20	20—30	30—50	50—70
最小值 Min	0.91	0.09	0.09	0.08	0.08	0.09
最大值 Max	4.65	3.66	3.80	4.59	5.53	4.47
平均值 Mean	1.00	0.70	0.83	1.00	1.23	1.38
标准差 SD	1.06	0.75	0.89	1.10	1.28	1.24
变异系数 CV	1.06	1.07	1.07	1.1	1.04	0.89
Q25	0.32	0.15	0.14	0.15	0.17	0.32
Q50	0.56	0.30	0.37	0.46	0.73	0.94
Q75	1.36	1.18	1.45	1.71	1.96	2.02

	渭干河-库车河绿洲 WKRDO/(ECe ds/m)					
	0—10	10—20	20—40	40—60	60—80	80—100
最小值 Min	0.27	0.260	0.31	0.24	0.72	0.87
最大值 Max	92.10	30.60	45.80	14.80	12.84	9.88
平均值 Mean	22.23	8.40	7.34	5.85	5.12	5.13
标准差 SD	23.41	6.93	8.14	3.65	2.87	2.53
变异系数 CV	1.05	0.825	1.11	0.62	0.56	0.49
Q25	4.08	3.74	2.42	3.01	2.99	3.09
Q50	18.02	7.38	4.35	5.43	4.89	5.86
Q75	27.50	11.59	11.08	8.39	6.88	6.34

此外,图 2—图 4 显示了不同研究区不同深度的土壤盐度的分布情况,结果表现出了一定的本地化特征。

阜北地区五月采集的野外数据中,89%的样品土壤盐分含量小于 1%,即样品土壤盐度覆盖等级集中于非-轻度-中度盐渍化区域(图 2)。整体变异系数(变异系数 CV 值反映样点值的离散程度,CV<0.1 为弱变异性;0.1<CV<1 中等变异;CV>1 为强变异)接近 106%,属于强变异水平。此系数代表本地土壤受到不同程度土壤盐渍化的强烈影响。分析实测数据发现,该区土壤表层含盐量较高且变化范围较大,表明空间变异较大。土壤盐分中阳离子含量最多的是 Na⁺,约占阳离子总量的 87.9%;阴离子中含量最多的是 SO₄²⁻,约占阴离子总量的 80.5%。而且 SO₄²⁻、Na⁺和全盐量的相关系数也分别达到 0.99,这表明土样中 SO₄²⁻ 和 Na⁺ 是主要的结合方式^[26]。

玛纳斯河绿洲统计结果显示,5 个不同采样深度整体平均盐度介于 0.3—1.38 dS/m 之间,属于非盐渍化范畴,各层之间盐度变异水平相似。表层至 50cm 深处,变异系数大于 100%,预示属于强变异水平,而大于 50cm 深度,则变异系数小于 100%,代表中等变异强度。随着深度的增加,土壤盐度呈轻度递增趋势。此外,在离子数据分析中(未显示),Na⁺ 含量最高,,Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 为主要的阴离子组分,各土层中 CO₃²⁻ 的含量均较

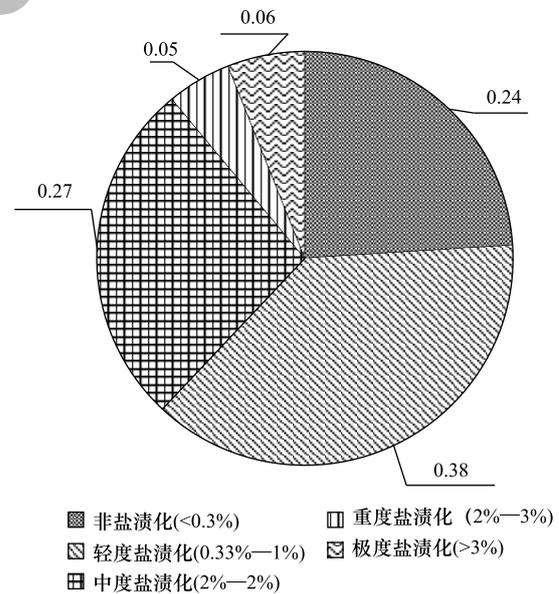


图 2 阜北地区不同土壤盐渍化(土壤盐分, g/kg) 等级下采样点的分布比例

Fig.2 The percentage of the samples under different level of soil salinization (soil salt, g/kg) in FG

低,大部分土壤样品中未能检测出。

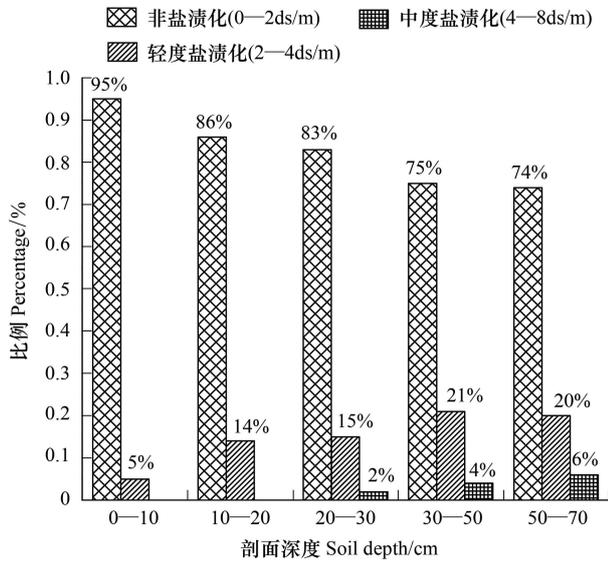


图3 玛纳斯绿洲不同土壤盐渍化等级下采样点的分布比例

Fig.3 The percentage of the samples under different level of soil salinization in MRB

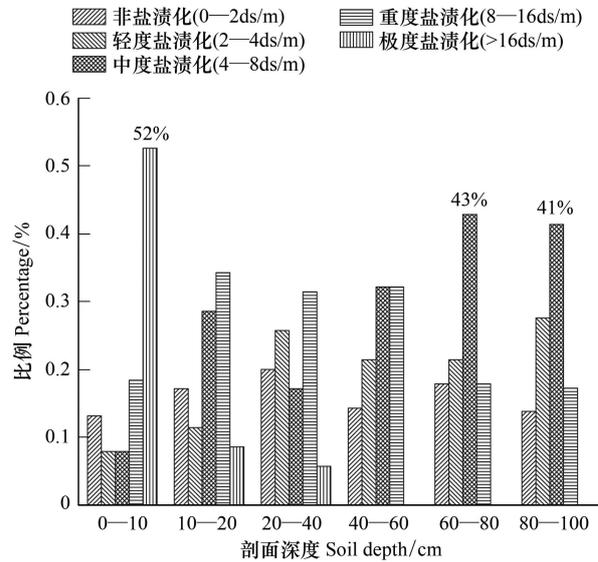


图4 渭干河-库车河绿洲不同土壤盐渍化等级下采样点的分布比例

Fig.4 The percentage of the samples under different level of soil salinization in WKRDO

渭干河-库车河绿洲不同深度盐度统计结果显示,土壤盐度的平均值和中值范围分别为 5.13—22.23 dS/m, 5.86—18.02 dS/m,覆盖整个盐度类别。其中,0—10cm 和 20—40cm 处属于强变异水平,其他深度属于中度变异程度。土壤盐分主要集中于表层(针对采样期而言)。随着深度的增加,盐分呈递减趋势。值域范围 0.24—92.10 dS/m 暗示该区具备更为宽泛的盐度分布范围。由实测数据得知(数据表未显示),Cl⁻的平均含量明显高于 SO₄²⁻ 和 CO₃²⁻ 的含量。由于在易溶性盐类上行过程中,氯化物表聚性最为强烈,硫酸盐次之,碳酸盐最弱。由此可得出,此时该绿洲土壤盐类主要以氯化物为主,同时还伴有少量的硫酸盐-氯化物类;

3.2 研究区土壤盐度与指数之间的相关性分析(全样本)

利用 SPSS 16 软件中的曲线估计(Curve Estimation)模块拟合研究区样点土壤盐度与指数及波段之间的定量关系。表 4—表 8 为 3 个研究在全样本下的统计结果。

表 4 阜北地区全样本下植被指数与土壤盐度之间的拟合关系

Table 4 Relationships between soil salinity and vegetation indices with all samples in FG

统计模型	指数 Index					
	EEVI		ENDVI		TGDVI	
	R ²	Sig.	R ²	Sig.	R ²	Sig.
线性模型 Linear	0.43	0.00	0.22	0.00	0.15	0.02
对数 Logarithmic	0.28	0.00	0.19	0.01	0.22	0.00
逆模型 Inverse	0.13	0.03	0.13	0.03	0.19	0.01
二次函数 Quadratic	0.48	0.00	0.24	0.01	0.22	0.01
立方函数 Cubic	0.59	0.00	0.31	0.01	0.23	0.04
复合函数 Compound	0.47	0.00	0.30	0.00	0.17	0.01
幂函数 Power	0.25	0.00	0.23	0.00	0.27	0.00
S 函数(S)	0.09	0.06	0.13	0.03	0.22	0.00
增长函数 Growth	0.47	0.00	0.30	0.00	0.17	0.01
指数函数 Exponential	0.47	0.00	0.30	0.00	0.17	0.01
逻辑函数 Logistic	0.47	0.00	0.30	0.00	0.17	0.01

基于线性和非线性曲线模型计算土壤盐分指数,植被指数模型和原始波段与阜北地区土壤盐分之间的相关性,统计结果显示(表4),EEVI, ENDVI 和 TGDVI 三个植被指数相对其他指数和波段而言,与该区土壤盐度之间存在较好的相关性。其中,基于 Cubic 模型的 EEVI 指数表现最好($R^2 = 0.59$),极度显著,其次为 Quadratic 模型, Growth 模型, Compound 模型, Logistic 模型和线性模型,与土壤盐度的敏感程度相当, R^2 值域范围在 0.43—0.48 之间。ENDVI 指数中 Cubic 模型表现最优($R^2 = 0.31$), Growth 模型, Compound 模型, Logistic 模型与之表现相当($R^2 = 0.30$)。TGDVI 指数中 Power 模型表现最优($R^2 = 0.27$), Logarithmic 模型, Quadratic 模型, Cubic 模型和 S 模型敏感性相当, $R^2 = 0.20$ 左右。

表 5 玛纳斯绿洲全样本下植被指数与土壤之间的拟合关系

Table 5 Relationships between soil salinity and salinity index, bands with all samples in MRB

		土壤深度 Soil depth											
		0—10cm						10—20cm					
指数 Index	模型 Model	SI3		Band2		Band3		SI3		Band2		Band3	
		R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.
Linear		0.30	0.00	0.34	0.00	0.27	0.00	0.28	0.00	0.37	0.00	0.28	0.00
Logarithmic		0.24	0.00	0.27	0.00	0.22	0.00	0.22	0.00	0.28	0.00	0.22	0.00
Inverse		0.17	0.00	0.18	0.00	0.15	0.00	0.15	0.00	0.18	0.00	0.15	0.00
Quadratic		0.31	0.00	0.35	0.00	0.27	0.00	0.29	0.00	0.40	0.00	0.29	0.00
Cubic		0.31	0.00	0.36	0.00	0.27	0.00	0.30	0.00	0.41	0.00	0.30	0.00
Compound		0.29	0.00	0.33	0.00	0.25	0.00	0.26	0.00	0.35	0.00	0.26	0.00
Power		0.24	0.00	0.27	0.00	0.21	0.00	0.21	0.00	0.27	0.00	0.21	0.00
S		0.16	0.00	0.18	0.00	0.15	0.00	0.15	0.00	0.18	0.00	0.15	0.00
Growth		0.29	0.00	0.33	0.00	0.25	0.00	0.26	0.00	0.35	0.00	0.26	0.00
Exponential		0.29	0.00	0.33	0.00	0.25	0.00	0.26	0.00	0.35	0.00	0.26	0.00
Logistic		0.29	0.00	0.33	0.00	0.25	0.00	0.26	0.00	0.35	0.00	0.26	0.00
		深度 Soil depth											
		20—30cm						30—50cm					
指数 Index	模型 Model	SI3		Band2		Band3		SI3		Band2		Band3	
		R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.
Linear		0.32	0.00	0.37	0.00	0.28	0.00	0.34	0.00	0.39	0.00	0.30	0.00
Logarithmic		0.25	0.00	0.27	0.00	0.22	0.00	0.26	0.00	0.29	0.00	0.23	0.00
Inverse		0.14	0.00	0.15	0.00	0.13	0.00	0.13	0.01	0.14	0.00	0.11	0.01
Quadratic		0.32	0.00	0.37	0.00	0.28	0.00	0.34	0.00	0.39	0.00	0.30	0.00
Cubic		0.33	0.00	0.38	0.00	0.28	0.00	0.35	0.00	0.40	0.00	0.31	0.00
Compound		0.30	0.00	0.36	0.00	0.26	0.00	0.32	0.00	0.38	0.00	0.28	0.00
Power		0.24	0.00	0.27	0.00	0.22	0.00	0.26	0.00	0.29	0.00	0.23	0.00
S		0.14	0.00	0.15	0.00	0.13	0.00	0.13	0.01	0.14	0.00	0.12	0.01
Growth		0.30	0.00	0.36	0.00	0.26	0.00	0.32	0.00	0.38	0.00	0.28	0.00
Exponential		0.30	0.00	0.36	0.00	0.26	0.00	0.32	0.00	0.38	0.00	0.28	0.00
Logistic		0.30	0.00	0.36	0.00	0.26	0.00	0.32	0.00	0.38	0.00	0.28	0.00
		深度 Soil depth											
		50—70cm											
指数 Index	模型 Model	SI3		Band2		Band3							
		R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.						
Linear		0.19	0.00	0.22	0.00	0.17	0.00						
Logarithmic		0.15	0.00	0.16	0.00	0.14	0.01						
Inverse		0.10	0.02	0.11	0.02	0.10	0.02						
Quadratic		0.22	0.00	0.25	0.00	0.19	0.00						
Cubic		0.23	0.00	0.26	0.00	0.20	0.01						
Compound		0.19	0.00	0.22	0.00	0.17	0.00						
Power		0.15	0.00	0.17	0.00	0.13	0.01						
S		0.11	0.02	0.11	0.01	0.10	0.02						
Growth		0.19	0.00	0.22	0.00	0.17	0.00						
Exponential		0.19	0.00	0.22	0.00	0.17	0.00						
Logistic		0.19	0.00	0.22	0.00	0.17	0.00						

玛纳斯流域统计结果显示(表5和图5—图7),该区采样时间内,与不同深度土壤盐度显著相关的指数为土壤盐分指数 SI3, Band2 和 Band3,其他指数和波段并未表现出显著性。此外,研究分析发现表5的数值分布呈现出一定特点:1)与不同深度土壤盐度敏感的指数均为 SI3, Band2 和 Band3; 2)上述3个指数的线性模型和非线性模型统计结果相近,部分非线性模型统计结果 R^2 值域接近;3)整体而言,随着深度的增加,基于遥感数据计算获取的盐分指数和波段对于土壤中的盐度敏感程度呈现下降趋势;4) SI3, Band2 和 Band3 三者与不同深度土壤盐度相对最为敏感的同为 Band2,其线性模型的 R^2 值,随深度增加依次为 0.34, 0.37, 0.37, 0.39 和 0.22,非线性模型中表现最优者为 Cubic 模型,其次为 Quadratic 模型,不同深度 R^2 值域范围 0.22—0.41。除了 S 模型和 Inverse 模型相对表现一般之外(R^2 值域范围 0.10—0.15),其他非线性模型表现接近, R^2 值域范围 0.27—0.39。

表6—8为渭干河-库车河绿洲研究区遥感指数与土壤盐度的统计结果,该研究显示,基于遥感获取的各类指数和波段只与 40cm 深度以上土壤盐度(0—10cm, 10—20cm, 20—40cm)具备显著性,而与其他深度则 sig. 值大于 0.05,所以其他深度统计结果未列出。

表6 渭干河-库车河绿洲全样本下指数与 0—10cm 处土壤盐度之间的拟合关系

Table 6 Relationship between soil salinity at depth of 0—10cm and vegetation indices with all samples in WKRO

模型 Model	指数 index													
	EEVI		ENDVI		NDSI		SAVI		SIT		TGDVI		EVI	
	R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.
Linear	0.20	0.00	0.15	0.02	0.16	0.01	0.16	0.01	0.15	0.02	0.17	0.01	0.17	0.01
Logarithmic	0.56	0.00	0.53	0.00	0.51	0.00	0.53	0.00	0.46	0.00	0.55	0.00	0.54	0.00
Inverse	0.58	0.00	0.63	0.00	0.60	0.00	0.62	0.00	0.51	0.00	0.65	0.00	0.62	0.00
Quadratic	0.37	0.00	0.33	0.00	0.34	0.00	0.35	0.00	0.32	0.00	0.36	0.00	0.36	0.00
Cubic	0.47	0.00	0.42	0.00	0.40	0.00	0.42	0.00	0.36	0.00	0.43	0.00	0.43	0.00
Compound	0.21	0.00	0.14	0.02					0.15	0.02				
Power	0.49	0.00	0.48	0.00					0.55	0.00				
S	0.47	0.00	0.56	0.00					0.66	0.00				
Growth	0.21	0.00	0.14	0.02					0.15	0.02				
Exponential	0.21	0.00	0.14	0.02					0.15	0.02				
Logistic	0.21	0.00	0.14	0.02					0.15	0.02				

表7 渭干河-库车河绿洲全样本下指数与 10—20cm 处土壤盐度之间的拟合关系

Table 7 Relationship between soil salinity at depth of 10—20cm and vegetation indices with all samples in WKRO

模型 Model	指数 Index											
	EEVI		ENDVI		NDSI		SAVI		SIT		TGDVI	
	R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.
Linear	0.30	0.00	0.26	0.00	0.24	0.00	0.25	0.00	0.23	0.00	0.25	0.00
Logarithmic	0.60	0.00	0.66	0.00	0.62	0.00	0.63	0.00	0.55	0.00	0.64	0.00
Inverse	0.59	0.00	0.68	0.00	0.64	0.00	0.65	0.00	0.55	0.00	0.64	0.00
Quadratic	0.46	0.00	0.50	0.00	0.49	0.00	0.50	0.00	0.45	0.00	0.50	0.00
Cubic	0.56	0.00	0.61	0.00	0.58	0.00	0.60	0.00	0.52	0.00	0.61	0.00
Compound	0.31	0.00	0.27	0.00					0.24	0.00		
Power	0.53	0.00	0.61	0.00					0.66	0.00		
S	0.49	0.00	0.60	0.00					0.72	0.00		
Growth	0.31	0.00	0.27	0.00					0.24	0.00		
Exponential	0.31	0.00	0.27	0.00					0.24	0.00		
Logistic	0.31	0.00	0.27	0.00					0.24	0.00		

表 8 渭干河-库车河绿洲全样本下指数与深度 20—40cm 处土壤盐度之间的拟合关系

Table 8 Relationship between soil salinity at depth of 20—40cm and vegetation indices with all samples in WKRO

模型 Model	指数 Index													
	EEVI		ENDVI		NDSI		SAVI		SIT		TGDVI		EVI	
	R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.
Linear	0.13	0.03	0.41	0.00	0.13	0.04	0.13	0.03	0.13	0.03	0.13	0.03	0.13	0.03
Logarithmic	0.43	0.00	0.48	0.00	0.39	0.00	0.41	0.00	0.36	0.00	0.42	0.00	0.41	0.00
Inverse	0.45	0.00	0.26	0.01	0.46	0.00	0.48	0.00	0.41	0.00	0.50	0.00	0.48	0.00
Quadratic	0.32	0.00	0.34	0.00	0.25	0.01	0.26	0.01	0.24	0.01	0.27	0.01	0.26	0.01
Cubic	0.37	0.00	0.12	0.05	0.32	0.01	0.33	0.01	0.29	0.01	0.35	0.00	0.33	0.01
Compound	0.13	0.03	0.38	0.00					0.12	0.04				
Power	0.39	0.00	0.44	0.00					0.41	0.00				
S	0.39	0.00	0.12	0.05					0.48	0.00				
Growth	0.13	0.03	0.12	0.05					0.12	0.04				
Exponential	0.13	0.03	0.12	0.05					0.12	0.04				
Logistic	0.13	0.03							0.12	0.04				

整体而言,土壤盐分指数和植被指数与 10—20cm 深度的土壤盐度,较其他深度更为敏感。0—10cm 深度,植被指数多以非线性 Invers 模型最为敏感,Logarithmic 模型次之,而盐分指数以 S 模型相关性最高,其次为 Inverse 模型。线性模型结果不够理想。其中,SI-T 指数的 S 模型与该层土壤盐度相关性最好, $R^2=0.66$,其次为 TGDVI 指数的 Inverse 模型($R^2=0.65$)。而 EVI 指数、SAVI 指数、NDSI 指数、ENDVI 指数和 EEVI 指数的 Inverse 模型 R^2 拟合平均值为 0.61。10—20cm 深度,拟合度最高的为盐分指数 SI-T, S 模型下 $R^2=0.72$,其次为植被指数 ENDVI, Inverse 模型下 $R^2=0.68$,其他指数如 TGDVI、SAVI、NDSI 和 EEVI 的 Logarithmic 模型和 Invsr 模型拟合结果相当, R^2 值域范围 0.60—0.65。各个指数的线性模型表现一般, R^2 值为 0.25—0.30。20—40cm 处,各个植被指数以 Logarithmic 模型和 Inverse 模型拟合度相对较高,盐分指数 SI-T 以 S 模型相关性最高,NDSI 指数则以模型 Inverse 拟合度最高。TGDVI 的 Inverse 模型为此深度土壤盐度最为敏感的指数($R^2=0.50$),其他指数则拟合程度最好的模型表现相当, R^2 值为 0.48 左右。

3.3 研究区土壤盐度与指数之间的相关性分析(部分样本)

按照土壤盐渍化等级划分,阜北地区非盐渍化样点只有 9 个,而盐渍化样点(盐渍化样土壤盐度 $>0.3\%$)为 28 个,所以这里只对后者进行拟合计算。统计分析结果显示(表 9),所有参与计算的指数和波段中,只有 EEVI 和 ENDVI 与该等级土壤盐度呈现显著关系。EEVI 的拟合精度整体高于 ENDVI,前者相关性最高者为 Cubic 模型($R^2=0.64$),次之为 Quadratic 模型($R^2=0.53$),Compound 模型、Growth 模型、Exponential 模型和 Logistic 模型拟合结果一致($R^2=0.47$),线性模型拟合精度为 $R^2=0.43$ 。

表 9 阜康地区部分样本下指数与 0—10cm 深处土壤盐度之间的拟合关系

Table 9 Relationship between soil salinity at depth of 0—10cm and vegetation indices with part samples in FG

模型 Model	指数 Index			
	EEVI		ENDVI	
	$R^2(n=28)$	Sig.	$R^2(n=28)$	Sig.
Linear	0.43	0.00	0.17	0.03
Logarithmic	0.30	0.00	0.10	0.10
Inverse	0.18	0.02	0.06	0.23
Quadratic	0.53	0.00	0.24	0.03
Cubic	0.64	0.00	0.27	0.05
Compound	0.47	0.00	0.24	0.01
Power	0.29	0.00	0.14	0.05
S	0.16	0.03	0.08	0.15
Growth	0.47	0.00	0.24	0.01
Exponential	0.47	0.00	0.24	0.01
Logistic	0.47	0.00	0.24	0.01

表 10 玛纳斯绿洲部分样本下波段与土壤盐度之间的拟合关系

Table 10 Relationships between bands with part samples in MRB

指数 Index 模型 Model	深度 Depth					
	0—10cm (n=55) Band2		10—20cm (n=50) Band2		20—30cm (n=48) Band2	
	R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.
Linear	0.19	0.00	0.16	0.00	0.14	0.01
Logarithmic	0.18	0.00	0.14	0.01	0.11	0.02
Inverse	0.13	0.01	0.10	0.02	0.06	0.09
Quadratic	0.19	0.00	0.16	0.01	0.14	0.03
Cubic	0.21	0.01	0.16	0.04	0.15	0.07
Compound	0.19	0.00	0.17	0.00	0.14	0.01
Power	0.18	0.00	0.14	0.01	0.11	0.02
S	0.13	0.01	0.10	0.02	0.06	0.08
Growth	0.19	0.00	0.17	0.00	0.14	0.01
Exponential	0.19	0.00	0.17	0.00	0.14	0.01
Logistic	0.19	0.00	0.17	0.00	0.14	0.01

玛纳斯研究区采样点土壤盐度以非盐渍化为主,因此,按照等级划分标准,这里仅对土壤盐度小于 2ds/m 的样点进行拟合计算和统计分析(表 10)。结果显示,0—10cm 深度仅 Band2 与该层土壤盐度呈显著相关 ($n=55$),拟合精度最高者为 Cubic 模型($R^2=0.21$),最低者为 Inverse 模型和 S 模型($R^2=0.13$),其他模型结果相近,其中线性模型为 $R^2=0.19$ 。与 10—20cm 深度土壤盐度拟合精度最高者为 Compound 模型, Growth 模型, Exponential 模型和 Logistic 模型($R^2=0.17$) ($n=50$),与线性模型拟合结果相近($R^2=0.16$)。20—30cm 深度的土壤盐度与 band2 的 Cubic 模型的拟合结果最好($R^2=0.15$) ($n=48$),线性模型为 $R^2=0.14$ 。

表 11 渭干河-库车河绿洲部分样本下波段和植被指数与土壤盐度之间的拟合关系

Table 11 Relationships between bands with part samples in WKRDO

指数 Index 模型 Model	深度 Depth									
	0—10cm (n=33)				10—20cm (n=29)				20—40cm (n=28)	
	EEVI		Band5		EEVI		TGDVI		EEVI	
	R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.	R^2	Sig.
Linear	0.16	0.02	0.18	0.01	0.23	0.01	0.13	0.05	0.09	0.13
Logarithmic	0.31	0.00	0.32	0.00	0.35	0.00	0.29	0.00	0.18	0.02
Inverse	0.31	0.00	0.33	0.00	0.40	0.00	0.42	0.00	0.17	0.03
Quadratic	0.24	0.02	0.23	0.02	0.31	0.01	0.29	0.01	0.24	0.03
Cubic	0.32	0.01	0.32	0.01	0.40	0.00	0.37	0.01	0.24	0.08
Compound	0.17	0.02	0.19	0.01	0.27	0.00	0.13	0.05	0.09	0.12
Power	0.30	0.00	0.30	0.00	0.37	0.00	0.29	0.00	0.21	0.01
S	0.30	0.00	0.29	0.00	0.39	0.00	0.42	0.00	0.20	0.02
Growth	0.17	0.02	0.19	0.01	0.27	0.00	0.29	0.01	0.09	0.12
Exponential	0.17	0.02	0.19	0.01	0.27	0.00	0.37	0.01	0.09	0.12
Logistic	0.17	0.02	0.19	0.01	0.27	0.00	0.13	0.05	0.09	0.12

渭干河-库车河绿洲采样点土壤盐度等级偏向于盐渍化,按照盐度等级划分标准,仅对盐度大于 2ds/m 的样点进行拟合计算和统计分析(表 11)。结果显示,0—10cm 深度盐度与植被指数 EEVI 和 band5 呈显著性,且后者整体略好于前者。其中后者拟合精度最高者为 Inverse 模型($R^2=0.33$, sig.=0.00) ($n=33$),线性模型为($R^2=0.18$, sig.=0.01)。植被指数 EEVI 和 TGDVI 与 10—20cm 处土壤盐度呈显著相关,其中后者略好于前者。TGDVI 的 Inverse 模型和 S 模型拟合精度最高($R^2=0.42$, sig.=0.00) ($n=29$),线性模型拟合精度为($R^2=0.13$, sig.=0.05) ($n=29$)。20—40cm 深度土壤盐度仅与植被指数 EEVI 呈显著相关,拟合精度最高者

为 Cubic 模型和 Quadratic 模型 ($R^2=0.24$, sig. = 0.00) ($n=28$), 其次为 Power 模型 ($R^2=0.21$, sig. = 0.01), 线性模型则无显著性。

3 讨论

3.1 土壤盐度分析

在阜北地区, 由于农业开发需要更多的灌溉用水, 导致地下水位不断攀升, 加之本地气候特征呈高蒸发特性, 土壤盐渍化现象普遍^[21]。此现象与野外数据分析结果基本符合。

现代滴灌技术的广泛应用, 使得玛纳斯河绿洲农业种植区的盐渍化处于可控状态^[27]。由于定期灌溉淋溶的作用, 整体处于非盐渍化水平。相对而言, 底层盐分较表层因此更易聚集盐分。但局部地区也有轻度盐渍化现象出现。虽然滴灌技术的实施, 但管理制度和具体措施实施的协同性, 地理位置, 地貌特征, 土壤类型, 种植结构, 灌溉水质等同样也是导致土壤次生盐渍化发生的重要因素^[28]。

渭干河-库车河绿洲盐渍化水平较其他研究地区而言, 情况较为严重, 这主要与本地土壤质地和气候状况相关^[29]。绿洲内部的土壤盐分经灌溉系统和地下水到达绿洲下游(绿洲-荒漠交错带), 并在低洼处聚集。同时, 本地土壤纹理以沙质土和壤土为主, 空隙度较小, 在高蒸发力的作用下, 盐分随毛细上移至表层。加之该区无盐分排泄通道, 盐渍化土壤只能集中于绿洲外围地区。

3.2 指数与土壤盐度之间的敏感性分析

3.2.1 阜北的地区

该区敏感性测试结果中(全样本和部分样本), 植被指数 EEVI 表现最优。全样本($n=37$)敏感度检验中, 参与计算的 14 个指数和 6 个波段中, 只有植被指数 EEVI, ENDVI 和 TGDVI 呈现显著性, 三者中 EEVI 的不同模型中最高者(立方函数)可以解释其中样本($n=37$)量 59% 的土壤盐度变异性(解析力), 二次非线性模型为 47%, 线性模型则为 43%。部分样本测试中(盐渍化)($n=28$)与全样本测试结果整体相近, 解析力并未明显变化。

EEVI/ENDVI 较其它指数和波段而言具备更多的解释能力, 其原因可能在于, 除了 NIR 和 RED 波段之外, 第三方波段信息的加入, 增加了其感知土壤盐度变异的效能。首先, 短波红外的引入增加了植被的信息维度; 其次, 可见光波段之间和短波红外波段之间呈高度相关性; 最后, NIR 与可见光和短波红外之间相关性较低^[25]。另外, 2100—2300nm 区具有丰富的植被信息, 可以更好的反映植被覆盖度和生长状况^[30—31]。因此, 基于上述研究结果, 在可见光组, 近红外组和短波红外组各调选一个波段组合建立新的植被指数, 也许提升了 EEVI/ENDVI 对土壤盐度的敏感度, 尤其是植被指数 EEVI。

3.2.2 玛纳斯流域

该流域土壤盐度检测中, 全样本($n=58$)统计分析显示, 且不同深度下, 土壤盐分指数 SI3, band2 和 band3 均与土壤盐度呈现显著性。指数对土壤盐度的解析力, 整体随深度增加呈降低趋势, 最高土壤盐度解析力为 41% (非线性, 10—20cm) 和 39% (线性, 30—50cm), 最小解析力出现在底层, 23% (非线性) 和 19% (线性)。

部分样本(盐渍化)显著性检验中, 只有 band2 留存, 且 30cm 深度以下无显著性。土壤盐度变异性解析力由表层的 21% (非线性) 和 19% (线性), 10—20cm 深处的 17% (非线性) 和 16% (线性), 降至 20—30cm 深处的 14% 左右(非线性和线性相似)。

此外, 基于上述指数能够探测该区深层土壤盐度变异性, 原因在于该区土壤层之间盐度高度相关有关(表 12)。

在灌溉种植区, 适于作物生长的土壤和局部地区的盐渍化土壤之间存在一定的光谱差异性^[5]。后者的光谱反射率要高于前者, 这也是基于遥感进行识别盐渍化土壤的理论依据之一。在 Csillag 等^[32]研究中提出, 可以用于识别盐度的光谱波段为可见光(550—770 nm), 近红外(900—1030 nm, 1270—1520 nm) 和短波红外区(1940—2150 nm, 2150—2310 nm, 2330—2400 nm)。Melendez-Pastor 等^[33]研究中发现光谱区间为

433—627nm 的反射率与土壤电导率有较大的相关性。而在本区,结果显示盐分指数 SI3 和 band2(绿波段:520—600nm),与上述研究形成互补。然而需要指出的是,不同地区,因土壤中盐分类型,土壤类型,采样时间,植被类型等的差异,使得诊断波段区间多有不同,本地化特征明显,在具体应用时,应考虑上述因素,谨慎甄别。

表 12 玛纳斯河绿洲采样点不同深度之间的相关关系

Table 12 Correlation matrix among different soil depth in MRB

	土壤深度 Soil depth				
	0—10cm	10—20cm	20—30cm	30—50cm	50—70cm
土壤深度 Soil depth					
0—10cm	1	0.956 **	0.922 **	0.869 **	0.720 **
10—20cm		1	0.972 **	0.895 **	0.747 **
20—30cm			1	0.951 **	0.799 **
30—50cm				1	0.845 **
50—70cm					1

** 显著性为 0.01 水平 (2-tailed); * 显著性为 0.05 水平 (2-tailed)

3.3.3 渭干河-库车河绿洲

全样本测试中($n=38$),显著性检验最大下探深度为 40cm,0—10cm 和 10—20cm 表现最优者为土壤指数 SI-T,而 20—40cm 深度则为植被指数 TGDVI,前者土壤盐度变异性(SI-T)解析力为 66%(Inverse 模型)和 72%(S 模型),后者(TGDVI)为 50%(Inverse 模型)。

部分样本(盐渍化)敏感性测试中,显著性检验最大探测深度同样为 40cm,整体表现最优者为植被指数 EEVI。表层土壤盐度变异性最大解释力为总样本的 33%(band5, Inverse 模型, $n=33$),植被指数 TGDVI 能够解释 10—20cm 深度 42%的土壤盐度变异性(Inverse 模型, $n=29$),20—40cm 深度的解析力降至 24%。线性模型(植被指数 EEVI)在此样本测试中最大解释力出现在 10—20cm 处(23%),20—40cm 处则无显著性。

植被指数 TGDVI 首次应用于土壤盐度变异性测试,总体而言,TGDVI 具备一定探测土壤盐度的潜力。Zhang 等^[18]在其研究中指出,利用 TGDVI 获取中亚温带荒漠区的植被覆盖度,与 NDVI 和 EVI 相比,TGDVI 与生物量具有更好的相关性。此外,Zhang 等^[19]在其研究中指出,在所有的物候参数中,植被物候积分曲线(EVI-SI)即类生物量参数(与季节光合作用活性、生物量和净第一性生产力(net primary production)相关),与土壤盐度最具相关性。其研究显示,在黄河三角洲地区 EVI-SI 与混合植被区(不同盐生植被群落)的土壤电导率相关性为 0.565,而在本研究中,TGDVI 与土壤电导率的相关性最大值为 0.504,低于前者。究其原因可能是因为(1) EVI-SI 是多期数据计算而得,而本研究只计算了单期数据;(2)上述研究都是基于 Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) 500m 尺度为数据源,与本研究 30m 尺度,尺度的差别是否是造成敏感度变化的原因,有待考证;(3)滨海盐渍化与内地干旱区地理环境的差异性(土壤,植被类型,气候等)也可能是敏感度差异的原因之一。基于以上分析,TGDVI 的应用潜力有待进一步挖掘。

此外,需要注意的是,植被覆盖的增加可能会使植被指数探测土壤盐度的效能提升,表 13 为 3 个研究区 NDVI 的统计表,结合上述 3 个研究区的分析和讨论得知,事前探测研究区有无植被,有助于提高指数的应用效率。

4 结论

因样区土壤类型,植被盖度和类型,地貌特征,气候等因素的影响,不同研究区指数对于土壤盐度敏感性的表现具有一定的差异性。针对本文 3 个研究区,初步得出以下结论:

(1) 阜北地区,全样本($n=37$)和部分样本(盐渍化,土壤盐度 $>0.3\%$, $n=28$)下,对土壤盐度变异性最为敏感的皆为植被指数 EEVI,前者(全样本)解析力为 59%,线性模型为 43%,后者(部分样本)解析力为 64%,线性模型为 43%。

表 13 研究区 NDVI 数值统计描述

Table 13 Descriptive statistics of NDVI in FG, MRB and WKRDO

统计参数 Descriptive statistics	渭干河绿洲 WKRDO	阜北地区 FG	玛纳斯河绿洲 MRB
采样数 (Number of samples)	38	37	58
平均值 (Mean)	0.205	0.196	0.123
中值 (Median)	0.088	0.132	0.106
标准差 (SD)	0.261	0.141	0.080
变异性 (Variance)	0.068	0.020	0.001
最大值 (Maximum)	0.853	0.541	0.508
百分比处的值 (Percentiles)			
	25%	0.047	0.091
	50%	0.088	0.132
	75%	0.234	0.265

(2) 玛纳斯流域,全样本 ($n=68$)下,相对敏感的指数为 SI3, band2 和 band3,其中 band 2 最为显著,土壤盐度变异性显著最大探测深度为 40cm,0—10cm, 10—20cm 深度解析力 30%—41%,而 20—40cm 处解析力降至 19%—23%。部分样本 ($n=48—55$),土壤盐度变异性显著最大探测深度同样为 40cm, band 2 表现最显著,各层平均解析力为 15%左右。

(3) 渭干河-库车河绿洲,全样本下 ($n=38$),土壤盐度最大探测深度为 40cm,表现最优者为 SI-T(0—10cm 最大解析力为 66%,10—20cm 最大解析力为 72%),20—40cm 处则为植被指数 TGDVI(最大解析力为 50%),部分样本 ($n=28—33$),0—10cm 深度为 band 5(线性解析力为 18%,非线性最大解析力为 33%),10—20cm 处为植被指数 TGDVI(Invers 模型,最大解析力为 42%,线性为 13%),20—40cm 处为植被指数 EEVI(最大解析力为 24%)。

由于上述研究区地理环境的差异,研究并没有针对三个研究区进行综合评价,而是就每个研究给予初步的结论。本文所选取的指数如果作为区域尺度土壤盐度定量评价的因子之一时,应结合具体的下垫面特性,选取适合的指数,以准确推理研究区的土壤盐度。为了更为准确的评估指数在本区的适用性,未来需要进一步考虑以下几点:首先,下一阶段的工作中可以添加作物区植被成熟期的样点,以测试干旱区不同作物冠层反射率对于土壤盐度的敏感性。其次,由于研究区面积较大,而实际应用的样点数据虽然典型,但若能够达到一定密集程度,可以进行细分,分析不同盐度等级下或者不用植被类型下,指数与土壤盐度之间的相关性。再次,相对于传统获取土壤盐度的方式,建议后续研究可以采用 EM38(大地电导率仪)获取实测数据,此方式不仅操作简单,且效率较高,不用破坏土壤,直接读取数值,能够获取更多的样点,尤其适用于大尺度地区。

参考文献 (References):

- [1] 王芳芳, 吴世新, 乔木, 李和平, 杨涵, 李义玲. 基于 3S 技术的新疆耕地盐渍化状况调查与分析. 干旱区研究, 2009, 26(3): 365-371.
- [2] Wang F, Chen X, Luo G P, Han Q F. Mapping of regional soil salinities in Xinjiang and strategies for amelioration and management. Chinese Geographical Science, 2015, 25(3): 321-336.
- [3] Grunwald S, Thompson J A, Boettinger J L. Digital soil mapping and modeling at continental scales: finding solutions for global issues. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75(4): 1201-1213.
- [4] Allbed L, Kumar, L, Aldakheel. Assessing soil salinity using soil salinity and vegetation indices derived from IKONOS high-spatial resolution imageries: Applications in a date palm dominated region. Geoderma, 2014, 230-231(17): 1-8.
- [5] Khan N M, Rastokuev V V, Sato Y, Shiozawa S. Assessment of hydrosaline land degradation by using a simple approach of remote sensing indicators. Agricultural Water Management, 2005, 77(1/3): 96-109.
- [6] Douaoui A E K, Nicolas H, Walter C. Detecting salinity hazards within a semiarid context by means of combining soil and remote-sensing data. Geoderma, 2006, 134(1/2): 217-230.
- [7] Abbas A, Khan S. Using remote sensing techniques for appraisal of irrigated soil salinity//Paper presented at the Advances and Applications for Management and Decision Making Land, Water and Environmental Management: Integrated Systems for Sustainability MODSIM07. Brighton: MODSIM, 2007.

- [8] Tilley D R, Ahmed M, Son J H, Badrinarayanan H. Hyperspectral reflectance response of freshwater macrophytes to salinity in a brackish subtropical marsh. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36(3) : 780-789.
- [9] Wang D, Poss J A, Donovan T J, Shannon M C, Lesch S M. Biophysical properties and biomass production of elephant grass under saline conditions. *Journal of arid Environment*, 2002, 52(4) : 447-456.
- [10] Brunner P, Li H T, Kinzelbach W, Li W P. Generating soil electrical conductivity maps at regional level by integrating measurements on the ground and remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(15) : 3341-3361.
- [11] Lobell D B, Lesch S M, Corwin D L, Ulmer M G, Anderson K A, Potts D J, Doolittle J A, Matos M R, Baltes M J. Regional-scale Assessment of Soil Salinity in the Red River Valley Using Multi-year MODIS EVI and NDVI. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 39(1) : 35-41.
- [12] Allbed A, Kumar L, Aldakheel Y Y. Assessing soil salinity using soil salinity and vegetation indices derived from IKONOS high-spatial resolution imageries: Applications in a date palm dominated region. *Geoderma*, 2014, 230-231 : 1-8.
- [13] Wu W. The Generalized Difference Vegetation Index (GDVI) for Dryland Characterization. *Remote Sensing*, 2014, 6(2) : 1211-1233.
- [14] Scudiero E, Skaggs T H, Corwin D L. Regional-scale soil salinity assessment using Landsat ETM+ canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 169 : 335-343.
- [15] Scudiero E, Skaggs T H, Corwin D L. Regional scale soil salinity evaluation using Landsat 7, western San Joaquin Valley, California, USA. *Geoderma Regional*, 2014, 2-3 : 82-90.
- [16] Fernández-Buces N, Siebe C, Cram S, Palacio J L. Mapping soil salinity using a combined spectral response index for bare soil and vegetation: A case study in the former lake Texcoco, Mexico. *Journal of Arid Environments*, 2006, 65(4) : 644-667.
- [17] 陈红艳, 赵庚星, 陈敬春, 王瑞燕, 高明秀. 基于改进植被指数的黄河口区盐渍土盐分遥感反演. *农业工程学报*, 2015, 31(5) : 107-114.
- [18] Zhang C, Lu D S, Chen X, Zhang Y M, Maisupova B, Tao Y. The spatiotemporal patterns of vegetation coverage and biomass of the temperate deserts in Central Asia and their relationships with climate controls. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 175 : 271-281.
- [19] Zhang T T, Qi J G, Gao Y, Ouyang Z T, Zeng S L, Zhao B. Detecting soil salinity with MODIS time series VI data. *Ecological Indicators*, 2015, 52 : 480-489.
- [20] Jiapaer G, Chen X, Bao A M. A comparison of methods for estimating fractional vegetation cover in arid regions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(12) : 1698-1710.
- [21] Wang Y G, Li Y. Land exploitation resulting in soil salinization in a desert-oasis ecotone. *Catena*, 2013, 100 : 50-56.
- [22] Sheng J D, Ma L C, Jiang P A, Li B G, Huang F, Wu H Q. Digital soil mapping to enable classification of the salt-affected soils in desert agro-ecological zones. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(12) : 1944-1951.
- [23] 江红南, 丁建丽, 塔西甫拉提·特依拜, 赵睿, 张飞. 基于 ETM+数据的干旱区盐渍化土壤信息提取研究. *土壤学报*, 2008, 45(2) : 222-228.
- [24] Li X M, Yang J S, Liu M X, Liu G M, Yu M. Spatio-temporal changes of soil salinity in arid areas of south Xinjiang using electromagnetic induction. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(8) : 1365-1376.
- [25] 徐涵秋, 唐菲. 新一代 Landsat 系列卫星: Landsat 8 遥感影像新增特征及其生态环境意义. *生态学报*, 2013, 33(11) : 3249-3257.
- [26] 蒲智, 于瑞德, 尹昌应, 陆亦农. 干旱区典型盐碱土壤含盐量估算的最佳高光谱指数研究. *水土保持通报*, 2012, 32(6) : 129-133.
- [27] Wang R S, Wan S Q, Kang Y H, Dou C Y. Assessment of secondary soil salinity prevention and economic benefit under different drip line placement and irrigation regime in northwest China. *Agricultural Water Management*, 2014, 131 : 41-49.
- [28] 樊自立, 乔木, 徐海量, 张青青, 李和平, 张鹏, 周生斌, 卢磊. 合理开发利用地下水是新疆盐渍化耕地改良的重要途径. *干旱区研究*, 2011, 28(5) : 737-743.
- [29] Ding J L, Yu D L. Monitoring and evaluating spatial variability of soil salinity in dry and wet seasons in the Werigan-Kuqa Oasis, China, using remote sensing and electromagnetic induction instruments. *Geoderma*, 2014, 235-236 : 316-322.
- [30] Dehni A, Lounis M. Remote sensing techniques for salt affected soil mapping: Application to the Oran region of Algeria. *Procedia Engineering*, 2012, 33 : 188-198.
- [31] Darvishzadeh R, Atzberger C, Skidmore A K, Abkar A A. Leaf Area Index derivation from hyperspectral vegetation indices and the red edge position. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(23) : 6199-6218.
- [32] Csillag F, Pásztor L, Biehl L L. Spectral band selection for the characterization of salinity status of soils. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 43(3) : 231-242.
- [33] Melendez-Pastor I, Navarro-Pedreño J, Gómez I, Koch M. Identifying optimal spectral bands to assess soil properties with VNIR radiometry in semi-arid soils. *Geoderma*, 2008, 147(3/4) : 126-132.