

土壤盐分遥感反演研究进展

陶金梅¹, 徐贵阳¹, 翁永玲², 范兴旺³

¹江苏省测绘工程院, 江苏 南京

²东南大学交通学院, 江苏 南京

³中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京

Email: phoebe_tao@sina.com

收稿日期: 2020年9月22日; 录用日期: 2020年10月7日; 发布日期: 2020年10月14日

摘要

在气候变化和人类活动的双重影响下, 土壤盐渍化已经成为土壤退化的主要形式, 在人口增长的未来情势下, 其严重威胁全球粮食安全。追溯土壤盐渍化发展历史、监测土壤盐渍化现状, 对于研究土壤盐渍化驱动机制、提出土壤质量改善措施、预测土壤盐渍化发展趋势具有重要意义。自上世纪70年代以来, 在地面采样数据的支持下, 卫星遥感技术为长时间序列土壤盐分分级制图、定量反演和动态监测提供了全新的手段。本文以可见光近红外遥感为主, 兼顾热红外和微波遥感, 重点介绍我国典型土壤盐渍化区域遥感土壤盐分的主要方法, 提出遥感土壤盐分的发展方向。

关键词

土壤盐渍化, 遥感, 高光谱遥感, 多光谱遥感, 黄河三角洲

Progresses in Remote Sensing of Soil Salinization

Jinmei Tao¹, Guiyang Xu¹, Yongling Weng², Xingwang Fan³

¹Jiangsu Province Surveying & Mapping Engineering Institute, Nanjing Jiangsu

²School of Transportation, Southeast University, Nanjing Jiangsu

³Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing Jiangsu

Email: phoebe_tao@sina.com

Received: Sep. 22nd, 2020; accepted: Oct. 7th, 2020; published: Oct. 14th, 2020

Abstract

Under the dual influences from climate change and anthropogenic activities, soil salinization has been the major form of soil degradation, which might threaten food security in the projected future

scenario of rapid population growth. There is an urgent need to track soil salinity dynamics and determine current soil salinity status, which are significant for investigating driving forces, designing soil improvement measures, and predicting future soil salinity distributions. Since the 1970 s, satellite remote sensing has provided a special opportunity for a long-term soil salinity classification, retrieval, and dynamic monitoring. From the perspective of visible and near-infrared, thermal infrared and microwave remote sensing, this study summarizes the main methods for mapping soil salinity in China, and shows the directions in remote sensing of soil salinity.

Keywords

Soil Salinization, Remote Sensing, Hyperspectral Remote Sensing, Multi-Spectral Remote Sensing, Yellow River Delta

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤盐渍化是盐分(以溶解性盐分为主)在土壤中不断累积的过程, 常见于我国干旱半干旱区[1]和海涂区[2]。盐分累积通常伴随水分运移同步发生, 与土壤盐渍化相关的水盐运移过程包括海水洪泛、海水渗漏和地下水补给等。在干旱半干旱区, 不合理的灌溉措施导致地下水水位抬升, 进一步导致土壤次生盐渍化[3]。当土壤中的盐分达到较高的浓度时, 则对农业生产造成负面影响。据估计, 2050 年全球人口总量可达 91 亿, 在人类活动和气候变化的双重影响下, 土壤盐渍化和次生盐渍化势必会对全球粮食安全构成严重威胁。因此, 追溯土壤盐渍化发展历史, 监测土壤盐渍化现状, 对于及时采取有效应对措施, 预测土壤盐渍化发展趋势具有重要意义。

实地采样是获取土壤盐分最准确的方法, 但大面积高频次的采样活动耗时费力; 考虑土壤盐分测量的复杂性, 难以实现类似于土壤水分观测的定点连续观测。上世纪 70 年代以来, 卫星遥感技术获取了近 40 年的对地观测资料, 为土壤盐分分级制图、定量反演和动态监测奠定了基础。这些观测数据记录了陆地表面的太阳反射信号(可见光近红外波段)、热红外发射信号(热红外波段)和微波发射和雷达散射信号(微波波段)。这些信号同时包含了土壤水分、植被覆盖和地表粗糙度等复杂信息, 从这些信息中分离出土壤盐分信号是遥感反演的主要任务。在地面采样数据的支持下, 已经发展了诸多土壤盐分反演方法。本文以国内土壤盐分反演研究为主, 综述可见光近红外波段土壤盐分反演的主要方法, 并展望土壤盐分遥感发展的主要方向。

2. 土壤盐分反演基本原理

遥感反演的基础是电磁波与介质之间的相互作用。用于土壤盐分遥感反演的电磁波谱以可见光近红外波段为主, 近年来, 热红外和微波波段也被用于土壤盐分反演。在可见光近红外波段, 土壤盐分存在若干特征吸收区域, 在连续光谱上表现为显著的吸收峰。Weng 等[4]研究发现, 黄河三角洲地区的土壤盐分在 416 nm、487 nm、671 nm、905 nm、1144 nm、1416 nm、1447 nm、1800 nm、1911 nm、1945 nm、2203 nm 和 2345 nm 等波段处存在吸收峰。这些吸收峰的强度与土壤盐分含量存在显著的正相关或负相关关系, 构成高光谱遥感土壤盐分的基础。多光谱遥感具有更宽的波谱宽度和更少的波段数量(一般 < 10), 无法反映土壤盐分的精细吸收特征, 盐渍化土壤的反射率(“颜色”)变化是可见光遥感土壤盐分的基础[5]。

Fan 等[5]研究发现,黄河三角洲地区的土壤盐分与蓝色波段反射率成正比关系,与其它波段反射率成反比关系。

研究发现,盐渍化土壤的发射率随含盐量的变化而变化,当土壤盐分增加时,发射率随之增大[6]。发射率增加意味着反射率降低,在可见光近红外和热红外波段,土壤盐分均与反射率成反比关系。土壤盐分与发射率的对应关系是热红外遥感土壤盐分的基础。与反射率和发射率类似,介电常数也是物质的固有属性。介电常数包括实部和虚部,实部主要受土壤水分影响,虚部则主要受土壤含盐量的影响,受土壤水分的影响较小。研究表明,介电常数虚部随含盐量的增加,变化非常剧烈,在同一含水量情况下,土壤电导率随土壤盐分的增加而增大[7]。不同盐分的介电常数差异构成微波遥感土壤盐分的基础。

可见光近红外遥感是土壤盐分反演的主要方法。可见光近红外遥感的优势在于高空间分辨率和长时间序列的卫星遥感数据。可见光近红外遥感土壤盐分的主要方法包括指标法、特征空间法、统计回归和机器学习等。

3. 多光谱遥感土壤盐分

图1为国内遥感土壤盐分研究的关键词共现网络图。黄河三角洲、渭干河-库车河和绿洲土壤是较为关注的研究区域,这些区域的次生盐渍化是研究的热点问题。研究数据主要包括光谱反射率和光谱数据,光谱特征是常见的分析目标,定量反演则是土壤盐渍化量化的主要手段。从图中可以看出,可见光近红外遥感是土壤盐分反演的主要手段。

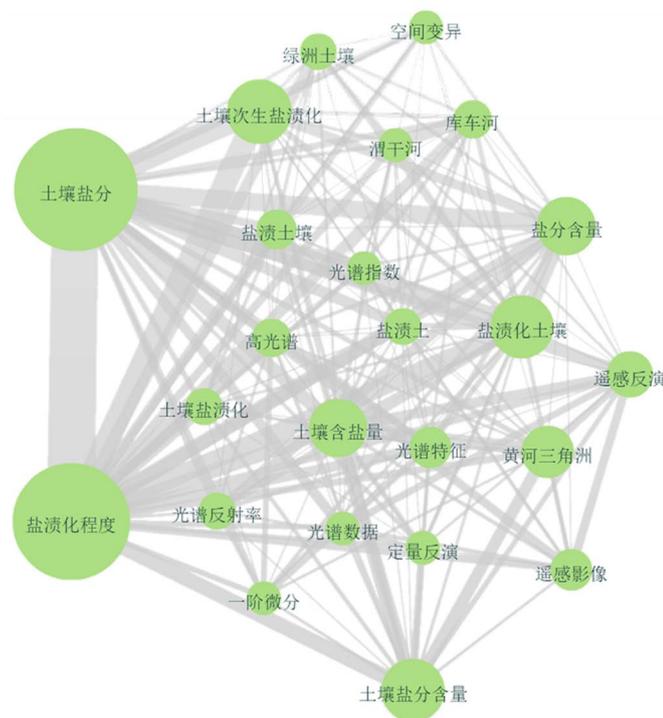


Figure 1. Keyword co-occurrence network graph (Key words in CNKI: Remote sensing of soil salinity, June 30, 2020)

图1. 关键词共现网络图(CNKI 检索关键词: 遥感土壤盐分, 2020年6月30日)

可见光近红外遥感影像具有“所见即所得”的特点。最初的土壤盐渍化研究以目视解译为主,通过图像变换、三波段彩色合成等方案突出盐渍化土壤,结合野外经验区分盐渍化和非盐渍化土壤[8]。随后,最大似然分类、光谱角制图、支持向量机、决策树分类等监督分类算法广泛应用于区分非盐渍土、轻度、

中度和重度盐渍化土壤。针对高分影像或无人机数据,可采用面向对象的分类方法提高分类精度[9]。定量遥感的发展使得土壤盐分估算成为可能,光谱指数是估算土壤盐分的主要方法(图 1)。针对无植被覆盖区,可采用各种盐分指数(SI)估算土壤盐分[10]。植被分布及其健康状况可用于指示土壤含盐量,研究表明可采用各种植被指数(VI)间接表征土壤盐分[11]。李晓明等[12]发现土壤盐分与绿波段反射率、差植被指数和比值植被指数之间具有显著相关性。张同瑞等[13]则发现土壤盐分与土壤调节植被指数(SAVI)存在显著相关关系($R^2 = 0.747$),精度达 81.44%。鉴于土壤盐分与盐分指数和植被指数的相关性,吴亚坤[14]等结合盐分指数和植被指数,实现了黄河三角洲地区的土壤盐分估算。

土壤盐分的发生和发展,直接影响当地的植被分布和土壤湿度状况。水稻田、小麦、菜地和果园主要分布在盐分含量较低的区域[15],以棉花种植为主的旱地则分布在盐分含量较高的区域[16]。由盐分指数—植被指数构造的二维特征空间可用于土壤盐分估算[17],选择合适的植被指数和盐分指数构造特征空间,可提高土壤盐分的估算精度[18]。非盐渍化和轻度盐渍化土壤通常具有较高的湿度,考虑土壤水分的三维特征空间引入了额外的水分约束条件,具有更完备的物理意义。丁建丽等[19]基于最小噪声分离处理的前三波段构建三维特征空间,将盐渍化距离指数定义为直接表征盐渍化的土壤盐分指数、间接表征盐渍化的植被指数和表征土壤水分的湿度指数。

相对于指标法和特征空间法(通常 < 3 指标),基于多特征参数(波段/指数等)的统计分析能够引入更多有关土壤盐分的解释变量。考虑多个参数之间的复共线性,偏最小二乘法(PLSR)是最常用的土壤盐分建模方法。阿也提古丽·斯迪克等[7]基于高分 QuickBird 影像和 PLSR 模型建立土壤盐分反演模型。Fan 等[15]基于 EO-1 先进型陆地成像仪(ALI)数据,估算了黄河三角洲地区的土壤盐分($R^2 = 0.748$)。罗冲等[20]基于 Landsat-8 数据,估算了玛纳斯河流域绿洲土壤盐分($R^2 = 0.89$)。陶金梅等[21]基于 ALI 影像和广义神经网络(GRNN)方法估算了黄河三角洲地区的土壤盐分($R^2 = 0.858$)。

4. 高光谱遥感土壤盐分

与多光谱遥感相比,高光谱遥感具有更高的光谱分辨率,更窄的光谱波段,对应海量的数据和更精细的地物光谱特征。指标法和统计回归是高光谱遥感土壤盐分的主要方法。高光谱数据能够揭示众多与土壤盐分成份相关的吸收峰[4]。唐明星等[22]认为单波段 747 nm 处的棉花叶片光谱反射率与土壤盐分具有最好的相关性。Weng 等[4]基于 2052 nm 和 2203 nm 波段的连续统去除反射率数据,构建了土壤盐分指数,该指数与土壤盐分的相关系数高达 0.91,可基于 EO-1Hyperion 数据开展土壤盐分制图。连续统去除、光谱一阶微分、二阶微分、对数变换、倒数变换、主成分分析和最小噪声分离等是常用的高光谱数据预处理方法,这些数据处理方法通常能够削弱背景信息影响,提高土壤盐分与特征参数的相关性。

尽管高光谱数据存在信噪比低等缺点,综合多波段(通常 > 100)反射率数据,可大大提高了土壤盐分反演的精度。多元线性回归是高光谱遥感土壤盐分的常用方法,该方法通常筛选与土壤盐分相关的若干敏感波段,未利用高光谱遥感的全波段数据。考虑到高光谱遥感数据的复共线性问题,偏最小二乘模型是土壤盐分建模的常用模型。安德玉等[23]基于国际空间站搭载的近岸水体高光谱成像仪(HICO)反演滨海土壤盐分。

机器学习在筛选土壤盐分敏感变量,挖掘海量数据中的隐藏信息具有突出的优势,近年来在遥感参数反演领域取得了广泛的应用。当前,土壤盐分反演使用的机器学习方法主要包括 BP 神经网络和随机森林等。刘亚秋等[24]研究发现,随机森林模型对土壤盐分中的 Na^+ 和 Cl^- 离子都具有较高的估算精度和稳定性。值得注意的是,机器学习依赖大量的训练样本,模型及结构参数的选择需要考虑过拟合问题,即训练样本拟合优度显著优于验证样本的拟合优度。鉴于机器学习在数据拟合方面的优势,相关模型可用于拟合土壤盐分与多源遥感和 GIS 数据之间的定量关系,以提高土壤盐分的估算精度。

5. 土壤盐分遥感展望

自上世纪 80 年代以来, 卫星遥感(以可见光近红外遥感为主)在土壤盐分反演中扮演了重要的角色, 区域土壤盐分制图取得了丰硕的成果。与此同时, 实时高精度、历史长时间序列的土壤盐分数据获取仍存在一系列亟待解决的问题。随着遥感技术和计算机建模技术的发展, 未来土壤盐分遥感存在如下发展方向:

(1) 无人机技术的应用。无人机遥感具有高机动性和高空间分辨率等优势, 能够针对重点区域开展即时观测。得益于多光谱遥感土壤盐分技术的日益成熟, 无人机遥感可获得高精度的土壤盐分制图结果。高空间分辨率的无人机影像可解决卫星遥感中普遍存在的混合像元等问题。

(2) 微波遥感土壤盐分。微波遥感具有全天候全时观测能力, 可针对晴天和雨天分别开展观测, 反映盐分“表聚”和淋洗情况下的土壤盐分含量。与可见光近红外遥感相似, 土壤水分是影响微波遥感土壤盐分精度的关键因素。微波遥感土壤盐分需同时考虑土壤水分和粗糙度两大关键参数。

(3) 土壤剖面盐分估算。可见光和微波遥感穿透深度有限, 仅能反映地表 5 cm 以内的土壤属性信息。当前主要通过大地电导率仪和表层遥感观测数据建模的方式估算深层土壤盐分[25]。遥感估算的表层土壤盐分可作为上边界条件, 根据土壤水动力模型, 准确预测剖面土壤盐分。

(4) 长时间序列土壤盐分反演。长时间序列土壤盐分数据可用于揭示土壤盐分变化的驱动机制。Fan 等[26]基于遥感数据一致性理论, 实现 Landsat-5/7/8 数据的归一化处理, 获得了黄河三角洲地区数十年的土壤盐分数据。长时间序列数据为研究土壤盐分的季节性和年际变化、探讨土壤盐分变化成因具有重要意义。

6. 结语

在气候变化和人类活动的影响下, 土壤盐渍化和次生盐渍化已经成为全球土壤退化的主要形式。基于遥感技术追踪土壤盐渍化的历史变化、提前预警土壤盐渍化的发展趋势, 对于土壤盐渍化防治具有重要的现实意义。自上世纪 70 年代以来, 以 Landsat 和 Hyperion 为代表的卫星遥感数据在土壤盐渍化分级分类、定量反演和动态监测方面发挥了重要作用。在定量反演方面, 发展了指数法、特征空间法、统计分析和机器学习等方法, 大大提高了土壤盐渍化制图的精度。未来可借助无人机遥感、微波遥感等手段提高土壤盐分反演的精度和频率, 借助土壤水动力模型提高土壤剖面盐分的估算精度, 基于历史遥感数据开展长时间序列土壤盐分的反演和土壤盐分变化的驱动机制研究。

参考文献

- [1] 戚浩平, 翁永玲, 赵福岳, 等. 茶卡 - 共和盆地土壤盐分与光谱特征研究[J]. 国土资源遥感, 2010, 22(S1): 4-8.
- [2] 李艳. 基于空间变异特性的滨海盐土采样及管理分区研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [3] 刘丽娟, 李小玉. 干旱区土壤盐分积累过程研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, 38(3): 891-898.
- [4] Weng, Y.L., Gong, P. and Zhu, Z.L. (2010) A Spectral Index for Estimating Soil Salinity in the Yellow River Delta Region of China Using EO-1 Hyperion Data. *Pedosphere*, **20**, 378-388. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(10\)60027-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(10)60027-6)
- [5] Fan, X.W., Liu, Y.B., Tao, J.M., et al. (2015) Soil Salinity Retrieval from Advanced Multi-Spectral Sensor with Partial Least Square Regression. *Remote Sensing*, **7**, 488-511. <https://doi.org/10.3390/rs70100488>
- [6] 买买提·沙吾提, 吐尔逊·艾山, 塔西甫拉提·特依拜, 等. 基于热红外光谱的干旱区土壤盐分监测研究[J]. 干旱区地理, 2017, 40(1): 181-187.
- [7] 贾殿纪. 环青海湖流域土壤盐分含量极化 SAR 反演研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2019.
- [8] 李和平, 田长彦, 乔木, 等. 新疆耕地盐渍土遥感信息解译标志及指标探讨[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(2):

- 218-222.
- [9] 袁泽, 丁建丽, 牛增懿, 等. 基于 GF-1 遥感影像的艾比湖区域田间尺度土壤盐渍化监测方法[J]. 中国沙漠, 2016, 36(4): 1070-1078.
- [10] 张丽. 玛纳斯河流域绿洲荒漠区盐渍化土地利用变化与利用潜力研究[D]: [博士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2013.
- [11] 王雪梅, 周晓红. 渭干河-库车河三角洲绿洲棉田土壤盐分估算及遥感反演[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(6): 250-262.
- [12] 李晓明, 杨劲松, 余美, 等. 基于电磁感应的干旱区土壤盐渍化定量遥感研究[J]. 国土资源遥感, 2012, 92(1): 53-58.
- [13] 张同瑞, 赵庚星, 高明秀, 等. 基于近地多光谱和 OLI 影像的黄河三角洲冬小麦种植区盐分估算及遥感反演——以山东省垦利县和无棣县为例[J]. 自然资源学报, 2016, 31(6): 1051-1060.
- [14] 吴亚坤, 杨劲松, 李晓明. 基于光谱指数与 EM38 的土壤盐分空间变异性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(4): 1023-1027.
- [15] 贾吉超, 赵庚星, 高明秀, 等. 黄河三角洲典型区域冬小麦播种面积变化与土壤盐分关系研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1200-1208.
- [16] 贾吉超. 黄河三角洲典型区域麦棉遥感监测及土壤盐分效应[D]: [硕士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2015.
- [17] 哈学萍. 干旱区土壤盐渍化遥感监测模型构建研究[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2009.
- [18] 刘亚男, 白欣, 侯君英. 基于特征空间的土壤含盐量的遥感反演[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(1): 110-111.
- [19] 丁建丽, 姚远, 王飞. 干旱区土壤盐渍化特征空间建模[J]. 生态学报, 2014, 34(16): 4620-4631.
- [20] 罗冲, 王玲, 彭丽, 等. 基于遥感指数和 PLSR 的玛纳斯河流域绿洲盐分的定量分析[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2016, 34(6): 779-784.
- [21] 陶金梅, 范兴旺, 翁永玲. 基于 GRNN 的 ALI 多光谱遥感数据土壤盐分反演研究[J]. 现代测绘, 2012, 35(6): 10-12.
- [22] 唐明星. 基于高光谱遥感的盐土棉田棉花叶片含水量和土壤电导率监测研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [23] 安德玉, 邢前国, 赵庚星. 基于 HICO 波段的滨海土壤盐分遥感反演研究[J]. 海洋学报, 2018, 40(6): 51-59.
- [24] 刘亚秋, 陈红艳, 王瑞燕, 等. 基于可见/近红外光谱的黄河口区土壤盐分及其主要离子的定量分析[J]. 中国农业科学, 2016, 49(10): 1925-1935.
- [25] 刘海霞, 丁建丽. 基于 EM38 和遥感影像的土壤表观电导率建模研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(11): 122-126.
- [26] 陈文娇. 基于多源数据光谱转换的土壤盐分反演与动态分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2018.