

土壤盐渍化诊断预测与调控治理

水利研究所 陈皓锐 徐楠楠 王少丽 管孝艳

根据第二次全国土壤普查资料统计,我国盐碱土面积 5.2 亿亩(不含滨海滩涂),科学开发 2 亿亩宜垦盐碱土地、有效治理 1 亿亩盐碱化耕地,显著提升盐碱地开发治理与管控的科技水平,对保障区域资源安全、粮食安全、生态安全具有重大战略意义。在广泛查阅和调研在主要国际权威学术刊物发表的关于盐碱地开发治理方面文献的基础上,提炼近年来土壤盐渍化诊断预测和调控治理相关的主要科研进展,指出当前国际上具有创新性、前沿性及前瞻性的成果和值得关注的新动向,提出加强盐碱地治理过程中相关研究方向的建议。

在土壤盐渍化的监测诊断方面,为了弥补原位取样监测方法的不足,利用地物高光谱仪、无人机和卫星遥感等多源数据进行更大区域的快速无损诊断技术已逐步发展起来,目前主要研究热点包括:基于多光谱、高光谱、雷达数据获取的盐渍土光谱数据,采用信息量比较法、相关系数法、最佳指数法等等开展盐渍化土壤光谱变化特征和敏感波段提取及其对水盐含量的响应分析,研究光谱曲线一阶微分、二阶微分、连续统去除、倒数、倒数的对数,对数的倒数、归一化处理等不同变换形式对反演精度的影响,采用多元线性回归、偏最小二乘回归,人工神经网络、支持向量机模型、随机森林方法、地理加权回归等线性、非线性、人工智能和机器学习等方法构建基于敏感波段、特征光谱指数的土壤盐分、盐基离子等土壤盐分反演模型,比较各类植被指数、盐分指数、干旱指数、亮度指数、湿度指数、组成物指数等特征光谱指数对于土壤盐分反演的精度及其在作物不同生育期和裸土期的适应性。探索决策树分析、主成分分析法、“缨帽变换”、HIS 变换等图像增强方法、多源数据融合、线性和非线性混合像元分解方法对于提高遥感反演精度、解决遥感影像时空分辨率矛盾的应用效果。通过将遥感与地统计学、土壤水盐运动和作物生长模型、地理信息系统等结合,进行区域和不同深度的土壤水盐信息监测、评价和预测预报也逐渐受到大家的关注。但盐碱土的光谱吸收机理目前尚未达成统一认识,需要进一步揭示土壤光谱表征对土壤盐分组成差异和离子微观运动的响应机理。而排除植被、土壤水分、土壤有机质等干扰因素的影响,并利用数字图像处理和计算机自动分类方法,不断提高盐渍土信息自动提取的精度,以及改进遥感的性能,增加波段数量,开发新的软硬件以提高

遥感信息存储和处理速度则是需要持续关注的问题。

在土壤水盐模拟预测方面，对于土柱和田间尺度，较为常用的模型包括未考虑冻融条件的 SaltMod、考虑冻融条件的 HYDRUS 系列、DRAINMOD-S、Coupmodel 和 SHAW 等，以及同时模拟水盐和作物的 SWAP 和 HYDRUS-EPIC 等，这些模型相对成熟，但需要注意各种模型的适应条件和边界选择。区域尺度水盐模拟，目前普遍采用如下三种模式，一是不考虑地下水的侧向交换和地表水流运动过程（如沟渠水分流动），将整个区域划分为若干土柱单元，直接利用 GIS 技术将田间/土柱尺度的水盐模型扩展到区域尺度，实现区域尺度土壤水盐的一/二维模拟，如 Drainmod-GIS、GSWAP、Hydyrus-GIS 等；二是考虑地下水的侧向交换，将土壤在垂向上分为饱和及非饱和带，然后耦合田间/土柱尺度的水盐模型与分布式地下水-溶质运移模型，实现区域饱和-非饱和水盐运动的准三维模拟，如 SahysMod、SWAP-Modflow、Hydyrus-Modflow 等，但这类模型仍然无法考虑地表水流运动过程；三是综合考虑灌区各种人工调控措施，构建地表—土壤—地下全过程的区域水盐运动综合性模型，并根据需要融合作物、温度、肥等要素的影响。这种综合性模型，若是基于原有自然流域的水文模型发展得到，则需要根据灌排措施的影响进行相应模块的改造，或者联合土壤水/地下水模型才能适应人工深度干扰条件下的灌区水盐运动模拟。若是基于田间尺度模型扩展而来，则需要耦合相应沟渠和地下水分及溶质运动模型才能实现灌区全介质的模拟，但势必会带来计算成本的提高，需要考虑如何融合 GPU 并行计算、人工智能、深度学习等技术手段，提高模型计算速度。此外，由于灌区地貌的复杂性，传统的基于 DEM 进行流向判别方式不完全适应灌区复杂地貌条件，进行灌区人工深度干扰下的区域空间单元离散和水流方向精准自动判别技术是需要关注的问题。总的来说，土壤水盐模拟在小尺度上趋向于开展不同介质的水分运动过程和各种离子动力学反应的水/肥/热/盐耦合模型构建，在区域尺度上则趋向于开展灌区复杂地貌条件下，考虑灌、引、耗、排、提、水利工程等多种因素影响下的地表水—土壤水—地下水—盐—肥—作物分布式模拟系统研发，其特点主要体现在考虑要素更为全面、人工调控更为复杂、空间分辨率更为细致、计算速度更为快捷等特点。

在变化环境下水盐运动规律分析及水利调控治理方面，目前的研究主要集中在

在基于各类水盐模型和田间试验,开展喷滴灌、沟道规模和密度、地下水位调控、灌溉淋洗制度、井渠结合、暗管排水、微咸水灌溉等灌排措施对蒸发、入渗、排水、地下水补给、土壤环境(土壤结构和理化性质、PH、盐分、各类离子、有机质、肥料等)、作物生长、下游湿地等的影响,并提出明沟、暗排、明暗组合、井排、干排水等排水除盐模式的技术参数和盐分淋洗制度,井渠结合、膜下滴灌、微咸水灌溉等灌水方式的技术参数。探索荒地、林地、低洼地等景观格局改变对区域水盐重分布的影响,揭示典型作物对水盐胁迫的响应机制和受迫特征,量化区域盐碱化宏观演变趋势/盐分归趋及其驱动关系。在化学、生态和生物治理方面,则开展了石膏、过磷酸钙等含钙物质及其与钙活化剂联合施用,以及腐殖酸肥料、炉渣、工矿副产品等单一和组合化学调理制剂的盐碱治理效果分析,针对不同气候类型区域、盐渍化程度、盐碱化类型、作物类型等特点,筛选了与之相适应的耐盐植物种类和微生物菌群或其组合对盐碱化的改善效果,并开展不同类型盐碱地的生态林草植被构建“梯次推进”修复方式研究。总体说来,土壤水盐调控已逐步由传统的控盐目标发展成节水、控盐、减排、绿色等多目标的水利、农业、化学、生物、生态综合治理措施,并由此带动水与作物、水与环境、水与生态、水与土壤、水与社会、水与土地等多种学科的交叉研究工作。