DOI:10.26974/j.cnki.XBGC.2026.03.006

多源遥感与输水约束下灌区缺水识别及成因诊断

杨丰铷[1,2]
(1.国电南京自动化股份有限公司,江苏 南京 210003;
2.南京河海南自水电自动化有限公司,江苏 南京 210031)

摘 要:针对干旱半干旱区灌区缺水成因难以区分、多源信息协同分析不足的问题,构建了融合多源遥感响应、渠系输水潜力评价和水源成本距离分析的灌区缺水识别与成因诊断方法。以甘肃省白银市某大型高扬程引黄灌区为例,利用Sentinel-2、Landsat 8、DEM(digital elevation model)、土地利用/覆盖、降水及渠系矢量等数据,反演归一化植被指数、地表温度和作物水分胁迫指数,计算渠系输水潜力评价参数与水源成本距离,并通过GIS空间叠加及逻辑判别识别工程性、结构性和管理性缺水。结果表明,研究区水分胁迫格局与渠系供水条件及水源可达性呈明显空间耦合关系;工程性缺水地块占待灌农田面积的4.81%,主要分布于低输水潜力渠段下游和支渠中下游;结构性缺水地块占6.20%,集中在灌区边缘及高水源成本距离区;管理性缺水地块占6.75%,以零散斑块形式分布于渠系邻近地块和局部农田。该方法实现了由缺水识别向成因诊断的拓展,可为灌区工程改造、末端供水优化与田间灌溉管理提供空间决策依据。

关键词:灌溉缺水诊断;干旱半干旱区;多源遥感;作物水分胁迫指数;输水潜力;空间叠加分析
中图分类号:S274;TP753 **文献标志码**:A

在干旱半干旱区,灌溉是维系农业生产与保障粮食安全的重要基础。受降水稀少、蒸发强烈、水资源时空分布不均,以及渠系输水、配水条件差异等因素的共同影响,灌区内部常出现程度不一、成因各异的农田缺水现象[1-2]。传统灌溉管理主要依赖人工巡查、经验判断和局部墒情监测,既难以及时掌握大范围农田水分胁迫格局,也难以判明缺水究竟是源于渠系工程条件、灌区末端区位劣势,还是田间管理差异[3]。因此,构建面向灌区尺度的缺水快速识别与成因诊断方法,对提升灌溉调度精准度和水资源利用效率具有重要意义。

遥感技术可借助植被指数、地表温度和水分胁迫指数等指标,开展大范围作物水分状况监测。其中,归一化植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI)能够反映植被覆盖度和生长状况,地表温度(land surface temperature,LST)可表征地表及冠层热状态,作物水分胁迫指数(crop water stress index,CWSI)则依据作物受水分胁迫后冠层温度升高的特征量化缺水程度[4-8]。而基于热红外与多光谱遥感的水分胁迫监测已成为精准灌溉决策的重要技术途径。近年来,无人机热红外等技术的应用进一步提升了作物水分胁迫监测的时空精细度[9]。此外,将遥感信息与GIS空间分析相结合,可实现区域农田灌溉量预测及其空间化表达,为灌溉管理和水资源配置提供技术支持[10]。

尽管如此,现有研究仍存在以下不足:一是遥感指标多用于判别是否缺水及缺水程度,难以直接解释缺水成因;二是渠系输水条件、水源可达性、降雨过程与作物水分胁迫之间尚缺乏统一的空间诊断框架;三是固定经验阈值易受作物类型、生育阶段、区域背景和影像日期影响,在灌区尺度应用中的适应性有限。因此,单一遥感指标难以同时满足缺水成因解释与差异化治理需求。

基于此,本文以甘肃省白银市某灌区为研究对象,构建了融合多源遥感响应、渠系输水潜力评价和水源成本距离分析的灌区缺水识别与成因诊断方法。主要创新体现在:一是采用NDVI分组温度基准计算CWSI,增强水分胁迫识别对不同植被覆盖

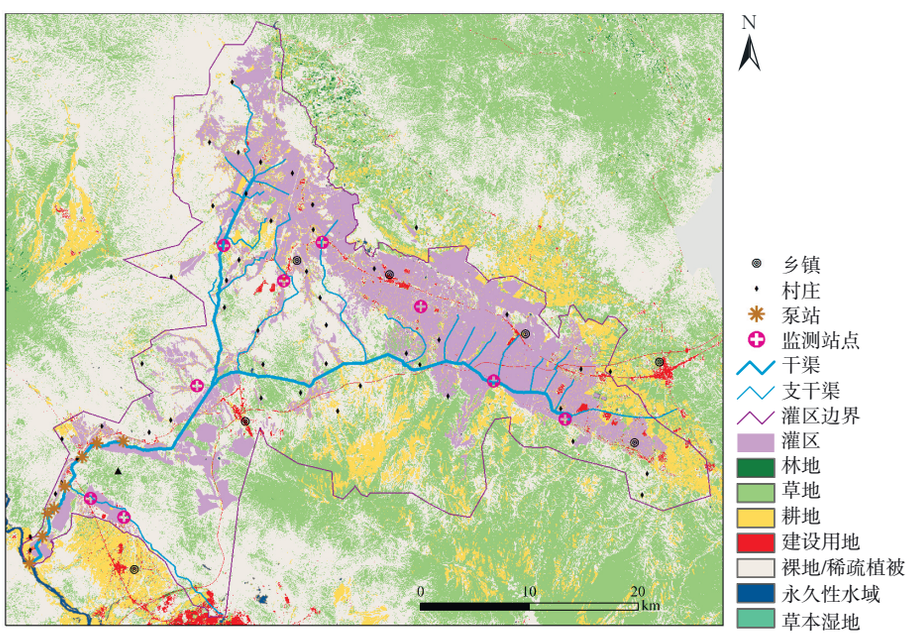
收稿日期:2026-03-09
基金项目:国电南京自动化股份有限公司项目(SD25试灌智)
作者简介:杨丰铷(1999—),女,工程师,硕士,主要从事水利水资源信息化研究(yangfengru0114@126.com)。
引用格式:杨丰铷.多源遥感与输水约束下灌区缺水识别及成因诊断[J].西北工程技术学报(中英文),2026,25(3):234-242.

度的适应性;二是引入渠系输水潜力评价参数和水源成本距离,分别表征渠段输水约束与地块水源可达性;三是结合统计分位数阈值与 GIS 空间叠加规则,将水分胁迫地块划分为工程性、结构性和管理性缺水,实现由遥感监测向成因诊断的拓展。

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

研究区位于甘肃省与宁夏回族自治区交界处,涉及白银市靖远县、平川区,以及宁夏中卫市中宁县、沙坡头区部分区域(图 1)。灌区北缘毗邻腾格里沙漠,是甘肃省大型高扬程引黄灌区之一,设计灌溉面积超过 2×10^4 hm^2。研究区属干旱半干旱气候,降水稀少、蒸发强烈,灌溉水源主要依赖黄河提水补给,年设计提水量为 1.2×10^8 m^3。区内土壤以沙质土为主,保水能力较弱且易受风蚀。灌区工程建设改善了局部农业生产条件,支撑甘肃省内约 4.27×10^4 hm^2 耕地及宁夏部分区域农业用水,并承担区域人口生活、牲畜饮水和农业生产用水保障,是干旱区农业生产的重要基础。



注:底图来源于中华人民共和国自然资源部标准地图服务网站,审图号为GS(2020)4619号。

图1　研究区位置及渠系分布图

Fig. 1　Location of the study area and distribution of the canal network

1.2　数据来源

Sentinel-2 多光谱影像来源于欧洲航天局哥白尼数据空间生态系统(https://dataspace.copernicus.eu/),空间分辨率为 10 m。数字高程模型(digital elevation model,DEM)来源于美国航空航天局(NASA)阿拉斯加卫星设施分布式活动档案中心(ASF DAAC,https://search.asf.alaska.edu/#/),空间分辨率为 12.5 m。地表温度(LST)基于美国地质调查局(USGS)提供的 Landsat 8 影像(https://earthexplorer.usgs.gov/)反演获得,Landsat 8 搭载了陆地成像仪(OLI)和热红外传感器(TIRS),本文所用 LST 数据空间分辨率为 30 m。2024 年土地利用/覆盖(land use/ land cover,LULC)数据来源于美国环境系统研究所(ESRI)全球年度土地覆盖数据集(https://ic.imagery1.arcgis.com/arcgis/rest/services/Sentinel2_10m_LandCover/ImageServer),空间分辨率为 10 m。基础地理信息数据来源于全球行政区边界数据集(http://www.gadm.org/)、中国国家基础地理信息中心(https://www.ngcc.cn/)、中国标准地图服务系统(http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/),以及灌区内部矢量资料。为保证空间分析尺度一致,所有数据统一重采样至 30 m。

选取 2024 年 7 月 30 日作为遥感影像分析日期。该时间研究区正处于夏季主要作物旺盛生长期和灌溉供水关键期,农田蒸散耗水较强,作物水分胁迫的光谱与热红外响应较为明显。同时,当日可获得云量较低、质量较好的 Sentinel-2 和 Landsat 8 影像,能够满足 NDVI、LST 和 CWSI 的协同反演要求。综合作物需水阶段、灌区供水过程与影像质量,选取该日期具有较好的代表性。

2 研究方法

本研究中的灌溉缺水区识别与成因诊断技术流程见图 2,主要包括数据预处理、指标构建与缺水类型诊断 3 个环节。首先,对 Sentinel-2、Landsat 8、DEM、土地利用/覆盖、渠系矢量及降雨数据进行波段合成、裁剪、投影统一和空间分辨率匹配,并提取待灌农田范围。其次,利用 NDVI、LST 计算 CWSI,代表农田水分胁迫程度;基于渠道宽度、纵坡和曼宁糙率计算输水潜力评价参数(score),评价渠段输水潜力;结合水源位置与坡度成本栅格计算水源成本距离(cost distance),表征地块水源可达性。最后,将各指标统一至农田地块尺度,依据分位数阈值和降雨条件开展 GIS 空间叠加与逻辑判别,识别工程性、结构性和管理性缺水,并生成灌区缺水类型诊断图。

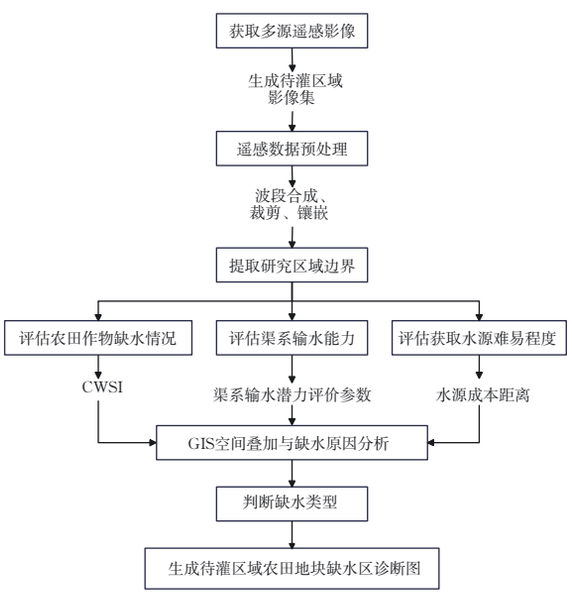


图2 灌溉缺水区识别与成因诊断技术流程

Fig. 2 Technical workflow for identifying irrigation water shortages and diagnosing their causes

2.1 归一化植被指数

归一化植被指数(NDVI)是衡量植被生长状况、健康程度和覆盖密度的常用指标。其值为正时,通常表明地表存在植被覆盖,且数值越大,植被覆盖度和生长活力越高;其值为负或接近 0 时,多对应水体、积雪、云层或裸土等非植被地表[11-12]。计算公式为

$$\mathrm{NDVI}=\frac{\mathrm{NIR}-R}{\mathrm{NIR}+R}。\tag{1}$$

式中:NIR 为近红外波段地表反射率;R 为红光波段地表反射率。健康植被在近红外波段具有较高的反射率,而在红光波段具有较强的吸收作用,因此,NDVI 能够增强植被信号并削弱土壤、水体等背景影响,可用于表征植被覆盖度、生物量及作物生长状态[4,12]。

2.2 作物水分胁迫指数

作物水分胁迫指数(CWSI)是表征作物缺水程度的重要指标[6-8]。其作用机理在于:水分供应充足时,作物蒸腾旺盛,冠层温度较低;发生水分胁迫时,气孔关闭、蒸腾减弱,冠层温度随之升高[6-7]。本文采用 NDVI 分组温度基准计算 CWSI,其公式为

$$\mathrm{CWSI}_i=\frac{T_{c,i}-T_{n,k}}{T_{x,k}-T_{n,k}}。\tag{2}$$

式中:CWSI_i 为第 i 个农田地块的作物水分胁迫指数;$T_{c,i}$ 为第 i 个农田地块的平均冠层温度,K;$T_{n,k}$ 和 $T_{x,k}$ 分别为第 k 个 NDVI 分组内农田地块温度的最低值和最高值,对应相同植被覆盖条件下的相对湿边温度和干边温度,K[13]。本文将 Landsat 8 反演得到的 LST 经农田掩膜处理后,采用地块尺度分区统计获取各农田地块的平均值($T_{c,i}$)。

为降低不同植被覆盖度对温度基准的影响,按 NDVI 值以 0.05 为组距对农田地块进行分组,并分别确定各 NDVI 分组内的最低温度 $T_{n,k}$ 和最高温度 $T_{x,k}$。该处理可减弱裸土背景、作物覆盖度及冠层结构差异对温度诊断的干扰,从而提高 CWSI 计算的区域适应性,使 CWSI 更适用于灌区尺度农田水分胁迫快速识别[7-8,14]。

基于研究区同期农田地块 CWSI 值的统计分布,本文选取第三四分位数 Q3(CWSI)作为重度水分胁迫的识别阈值。该阈值对应 CWSI 最高的 25% 地块,能够依据不同作物长势、气象背景和影像日期的总体分布自适应识别相对异常区域。相较于固定经验阈值,分位数阈值更适用于灌区尺度的快速筛查与相对诊断[8]。

2.3 渠系输水潜力评价参数

为刻画渠系对农田供水的相对约束,依据明渠输水能力与渠道断面尺度、纵坡及糙率之间的关系,构建渠系输水潜力评价参数(score),用于灌区尺度的相对评价,重点识别渠网内部输水潜力较低的渠段,为工程性缺水判别提供空间依据[15-16]。其计算公式为

$$\mathrm{score}=\frac{1}{n}\times W\times\sqrt{S}。\tag{3}$$

式中:n 为曼宁糙率系数,研究区渠道以防渗衬砌渠道为主,参照国标《灌溉与排水工程设计标准》

(GB 50288—2018)附录 B 中防渗衬砌渠槽糙率推荐范围,并结合灌区工程资料,取 n=0.015 s/m$^{1/3}$[16];W 为渠道平均宽度,m,主要取自灌区渠系矢量属性表和工程资料,对属性缺失的渠段,基于高分辨率遥感影像量测多个断面并取平均值;S 为渠道纵坡,由数字高程模型(DEM)提取渠段首、末高程,以渠段首末高程差与渠段长度之比计算。

Score 值越大,表明渠段相对输水潜力越高;score 值越小,则表明渠段可能受到断面偏小、纵坡偏缓或糙率偏大等因素的约束。本文以全部渠段 score 值统计分布的第一四分位数 Q1(score)作为低输水潜力的识别阈值,将 score 值低于 Q1(score)的渠段识别为渠网薄弱渠段。将该阈值用于相对排序筛查,可在缺乏连续流量监测资料的条件下快速定位需优先复核和治理的渠段。

为评估曼宁糙率系数 n 的赋值变化对 score 值的影响,在保持渠道平均宽度 W 和坡度 S 不变的条件下,设置 n=0.013、0.015、0.018 s/m$^{1/3}$,在 3 种情景下开展敏感性分析。由公式(3)可知,score 值与 n 值呈反比。以 n=0.015 s/m$^{1/3}$ 为基准,当 n 取值为 0.013 s/m$^{1/3}$ 时,score 值整体提高约 15.4%;当 n 取值为 0.018 s/m$^{1/3}$ 时,score 值整体降低约 16.7%。在所有渠段采用统一糙率扰动的条件下,渠段间 score 值相对排序保持不变。因此,基于分位数阈值 Q1(score)识别低输水潜力渠段的结果不受统一糙率扰动影响,表明 score 适用于灌区尺度输水潜力相对评价与薄弱渠段筛查。

2.4　水源成本距离

为表征农田地块从水源获得灌溉水的空间难易程度,本文利用 ArcGIS Cost Distance 工具计算水源成本距离(cost distance)。相较于欧氏距离(Euclidean distance),水源成本距离不仅考虑了地块与水源点之间的平面距离,还叠加了由地形坡度造成的路径阻力,因而更适合表征灌区末端及地形起伏区的供水可达性差异[17]。

首先,将由数字高程模型(DEM)提取的坡度标准化,构建成本栅格,即

$$C_j = 1 + \frac{\mathrm{slope}_j - \mathrm{slope}_{\min}}{\mathrm{slope}_{\max} - \mathrm{slope}_{\min}}。\tag{4}$$

式中:C_j 为第 j 个栅格像元的坡度成本系数;slope_j 为第 j 个像元的坡度,(°);$\mathrm{slope}_{\max}$ 和 $\mathrm{slope}_{\min}$ 分别为研究区坡度最大值与最小值,(°)。为避免出现零成本像元,在标准化结果上整体加 1。

随后,以灌区水源点、泵站和主干渠起点为源点,基于成本栅格计算最小累积成本距离,即

$$\mathrm{CD}_p = \min_{\Gamma(s,p)} \sum_{(i,k)\in\Gamma(s,p)} \frac{C_i + C_k}{2} \cdot d_{ik}。\tag{5}$$

式中:CD_p 为目标像元 p 至最近水源点的最小累积成本距离,m;$\Gamma(s,p)$ 为水源点 s 至目标像元 p 的候选路径集合;(i,k) 为路径中相邻的两个栅格像元 i 和 k;C_i 和 C_k 分别为相邻像元 i 和 k 的坡度成本系数;d_{ik} 为相邻像元 i与k 中心之间的实际空间距离,m。

最后,采用分区统计将像元尺度成本距离的平均值提取至农田地块,即

$$\mathrm{cost}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{p=1}^{N_i} \mathrm{CD}_p。\tag{6}$$

式中:cost_i 为第 i 个农田地块的平均水源成本距离,m;N_i 为该地块所含栅格像元数量。cost_i 值越大,表示地块获取灌溉水需克服的空间距离与地形阻力越大,因而更可能位于灌区供水末端或供水不利区。以第三四分位数 Q3(cost)作为灌区末端地块的识别阈值,用于结构性缺水判别。

2.5　缺水类型诊断规则

获得 CWSI、score、cost distance 及日降雨量后,采用 GIS 空间叠加构建缺水类型诊断规则。依据《降水量等级》(GB/T 28592—2012)对小雨的划分,将日降雨量低于 9.9 mm 作为无有效降水条件[18]。设 Q3(CWSI)为 CWSI 第三四分位数,Q1(score)为 score 第一四分位数,Q3(cost)为 cost distance 第三四分位数,P 为影像日期对应的日降雨量,则诊断规则如下。

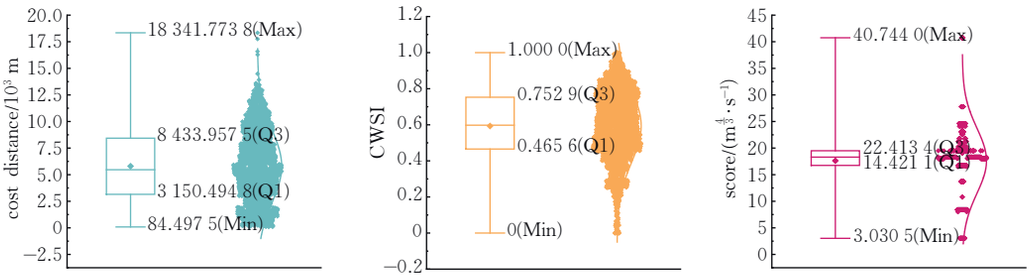
(1)工程性缺水:CWSI > Q3(CWSI),且 score < Q1(score)。此类地块已出现较强水分胁迫,且对应渠段的 score 值低于第一四分位数,即处于研究区全部评价渠段的低值区间,表明缺水主要与上游或邻近渠段输水能力不足有关。

(2)结构性缺水:CWSI > Q3(CWSI),score ≥ Q1(score),且 cost distance ≥ Q3(cost)。此类地块对应渠段输水潜力未处于低值区,但水源成本距离较高,表明缺水主要受灌区末端区位、输水路径较长、地形阻力较大或轮灌末端供水保障不足等因素的影响。

(3)管理性缺水:CWSI > Q3(CWSI),score ≥ Q1(score),cost distance < Q3(cost),且 P<9.9 mm。此类地块水分胁迫明显,但渠系输水潜力和水源可达性均无明显不利特征,且影像获取当日无有效降水,因此缺水更可能与灌溉时机、灌溉定额、种植结

构或农户用水管理差异有关。

将 CWSI、score 和 cost distance 的统计阈值以箱线图形式展示(图 3),作为后续缺水成因诊断的判别依据。



a cost distance b CWSI c score

图3 Cost distance、CWSI 和 score 的统计阈值箱线图

Fig. 3 Boxplots and statistical thresholds of cost distance, CWSI and score

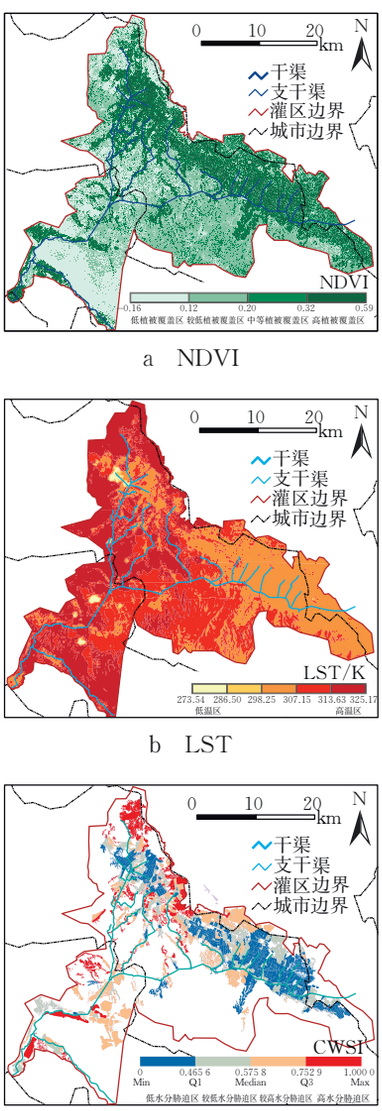
3 结果与分析

3.1 农作物水分胁迫空间格局

NDVI 整体呈现出以干渠系统为核心、向灌区边缘递减的空间格局(图 4a)。中、高植被覆盖区(NDVI > 0.20)主要分布于灌区北部、东部农田集中连片区域及干渠、主要支渠两侧,部分区域沿渠系呈连续或带状分布,表明渠系邻近地块总体具有较好的植被覆盖状况。较低、低植被覆盖区则主要分布于灌区中南部、外围边缘以及部分城市邻近区域,空间上表现为连续片状与零散斑块并存。

LST 空间格局与 NDVI 表现出较强的负相关关系(图 4b)。较高温度区域(LST> 307.15 K)主要分布于灌区北部、西部、西南部及部分内部裸露地表,呈大范围连续分布;相对低温区域则主要集中在灌区中北部渠系密集区及部分植被覆盖较高的农田斑块,空间上多呈不规则斑块状。对比 NDVI 与 LST 空间分布可以看出,部分中、高植被覆盖地块对应相对较低的地表温度,说明较好的植被覆盖和蒸腾作用能够在一定程度上降低地表热状态。然而,这种对应关系并非在全区范围内完全一致,表明 LST 除受植被生长和作物水分状况影响外,还受到裸土比例、土壤含水量以及不同地表覆盖类型热物理性质差异的共同影响。

CWSI 空间分布进一步量化了作物水分胁迫程度(图 4c)。低水分和较低水分胁迫区主要集中于灌区东部和中部连片农田,并在干渠及部分支渠两侧呈相对连续分布,说明这些区域作物冠层热状态相对稳定,水分供应条件总体较好。较高水分胁迫区主要分布于低胁迫区外围以及部分支渠中下游地块,空间上呈片状和条带状交错分布。高水分胁迫区主要集中于灌区北部末端、西部和西南部边缘区域,同时在部分渠系下游及孤立农田中呈零散斑块



a NDVI

b LST

c CWSI

注:底图来源于中华人民共和国自然资源部标准地图服务网站,审图号为GS(2020)4619号。

图4 NDVI、LST、CWSI 空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of NDVI, LST, CWSI

状分布,说明研究区作物水分胁迫不仅受水源距离影响,也与渠系输水条件密切相关[19]。

3.2　渠系输水潜力空间特征

渠系输水潜力评价参数(score)在研究区内呈现明显的空间分异特征(图 5a)。较高和高输水潜力渠段主要分布于灌区西南部引水渠段、贯穿中部的骨干输水通道以及部分主要支干渠。这些渠段整体连续性较好,在渠道宽度、纵坡和糙率共同作用下表现出相对较强的输水潜力,是维持灌区水量输配的主要通道。较低输水潜力渠段则主要分布于北部渠系、中部部分分支渠及东部支渠,空间上多呈树枝状向农田内部延伸。低输水潜力渠段数量相对较少,主要出现在部分支渠连接段和末端渠段,分布较为离散。

从渠系层级看,主干渠和部分骨干支渠的 score 值总体较高,而随着渠系由骨干渠道向支渠及末级渠段延伸,输水潜力表现出一定程度的下降和分化。这一格局表明,研究区渠系输水约束并非均匀分布,局部支渠及末端渠段可能因渠道断面尺度较小、纵坡条件不足等因素形成相对薄弱环节[15-16]。

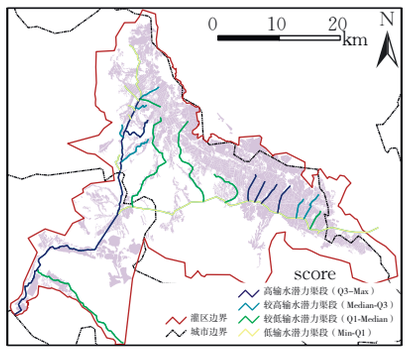
3.3　水源可达性空间特征

Cost distance 在研究区内呈现明显的空间分异特征(图 5b)。低水源成本距离区主要集中于灌区东部和中东部农田连片区域,并沿部分骨干渠系及其邻近地块分布。较低和较高水源成本距离区主要分布于低值区外围,在研究区北部、中部和东部形成由低值向高值逐步过渡的空间带。该类区域在空间上处于骨干渠系邻近区与灌区外围之间,其水源可达性受到输水距离和地形条件的共同影响。高水源成本距离区主要集中于灌区北部末端、中部部分外围地块、西南部及东部局部边缘区域,空间上呈连续片状与零散斑块状并存的状态。对比 cost distance 与 CWSI 可见,部分高水分胁迫斑块与高成本距离区具有较高空间重合度,说明较长输水路径和较大地形阻力是结构性缺水的重要诱因[17]。

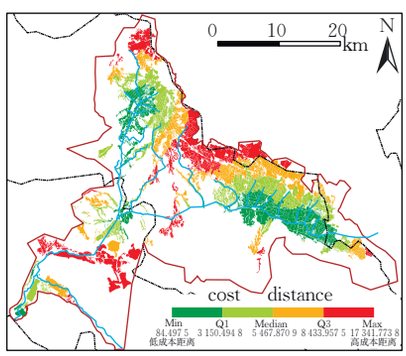
3.4　缺水类型诊断结果

基于 CWSI、score、cost distance 和日降雨量的空间叠加,生成研究区灌溉缺水类型诊断图(图 6)。结果显示,研究区缺水并非仅由作物水分胁迫程度决定,而是呈现与渠系输水潜力及水源可达性相耦合的空间分异。3 类缺水地块的面积占比与空间特征见表 1。

3 类缺水地块合计占待灌农田面积的 17.76%。其中,管理性缺水地块占比最高(6.75%),表明在渠系输水条件和水源可达性相对有利的区域,仍可能因田间灌溉管理差异产生局部水分胁迫;结构性缺水地块占待灌农田面积的 6.20%,主要分布于灌区边缘及高水源成本距离区,反映末端地块因空间区位不利而面临供水保障不足;工程性缺水地块占待灌农田面积的 4.81%,主要位于低输水潜力渠段下游,表明部分支渠或末级渠段可能构成灌溉水有效



a　score

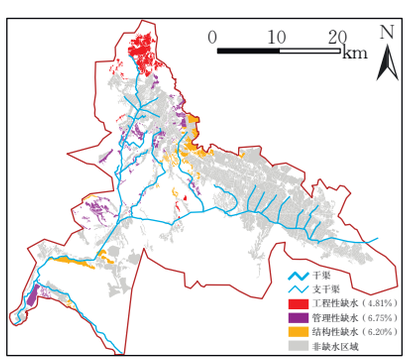


b　cost distance

注:底图来源于中华人民共和国自然资源部标准地图服务网站,审图号为GS(2020)4619号。

图5　Score与cost distance空间分布图

Fig. 5　Spatial distributions of the canal water-conveyance potential score and water-source cost distance



注:底图来源于中华人民共和国自然资源部标准地图服务网站,审图号为GS(2020)4619号。

图6　缺水类型诊断图

Fig. 6　Spatial distribution of the diagnosed types of irrigation water shortage

表 1 不同类型灌溉缺水地块诊断结果

Tab. 1 Diagnostic results for farmland parcels affected by different types of irrigation water shortage

缺水类型	判别条件	面积/km^2	占比/%	主要空间分布	治理指向
工程性缺水	CWSI>Q3(CWSI) score<Q1(score)	18.47	4.81	低输水潜力渠段下游、支渠中下游	渠道清淤、衬砌修复、断面复核与末级渠系改造
结构性缺水	CWSI>Q3(CWSI) score≥Q1(score) cost distance≥Q3(cost)	23.79	6.20	灌区边缘、末端和高水源成本距离区	优化轮灌次序、提高末端供水保障率和调蓄能力
管理性缺水	CWSI>Q3(CWSI) score≥Q1(score) cost distance<Q3(cost) P<9.9 mm	25.89	6.75	渠系附近零散斑块、局部农田和城市周边地块	调整灌溉时机、灌溉定额和田间管理方式

注:占比为不同缺水类型待灌土地占全部待灌土地总面积的比值。

输送的关键限制环节。

从空间形态上看,工程性缺水区多呈不连续点状或短带状沿特定支渠、斗渠及其下游分布,与低 score 值渠段具有较强空间对应关系;结构性缺水区集聚性最强,主要分布在灌区中部、西南部边缘和末端,与高 cost distance 区空间分布高度一致;管理性缺水区最为零散,与低输水潜力渠段或高水源成本距离区均无稳定对应关系,更多反映田间灌溉操作和用水管理差异。

4 结论

本文以甘肃省白银市某灌区为例,构建了融合多源遥感响应、渠系输水潜力评价和水源成本距离分析的灌区缺水识别与成因诊断方法,主要结论如下:

(1)NDVI、LST 与 CWSI 可协同表征研究区农田水分胁迫的空间格局。高 CWSI 区既分布于灌区边缘和末端,也出现在部分支渠下游,说明作物水分胁迫同时受渠系输水条件与水源可达性的影响。

(2)Score 和 cost distance 分别从渠段输水潜力与地块水源可达性 2 个方面刻画供水约束。主干渠整体输水潜力较高,支渠和末级渠段分异明显;高 cost distance 区主要位于灌区边缘与末端,为结构性缺水识别提供了空间依据。

(3)基于 CWSI、score、cost distance 及降雨量阈值的空间叠加规则,可将重度水分胁迫地块划分为工程性、结构性和管理性缺水。3 类缺水地块分别占待灌农田面积的 4.81%、6.20% 和 6.75%,其在空间分布上依次表现为低输水潜力渠段下游、灌区边缘及高水源成本距离区,以及渠系附近或局部农田的零散斑块。

该方法实现了从遥感缺水识别向缺水成因诊断的拓展,可为渠道改造、末端供水优化和田间灌溉管理提供空间决策依据。结合多时相遥感、渠段流量监测和田间实测数据,可进一步提升诊断精度与动态应用能力。

5 讨论

5.1 方法合理性与应用价值

本文方法的合理性在于各指标与缺水成因之间具有明确的对应关系。CWSI 直接反映作物冠层热状态及水分胁迫响应,用于识别缺水地块[6-8];score 由影响明渠输水能力的关键因素构建,用于表征渠段相对输水潜力并判断渠系输水短板[15-16];cost distance 反映地块获取水源所需克服的空间距离与地形阻力,用于识别供水末端或可达性不利地块[17]。3 类指标分别对应作物响应、工程输水约束和空间区位约束,通过 GIS 叠加可进一步将缺水现象诊断为工程性、结构性和管理性成因。

相较于仅依据遥感指数判别干旱程度的方法,本文方法可进一步形成差异化治理指向:工程性缺水区应优先开展渠道清淤、衬砌修复与断面复核;结构性缺水区应重点优化轮灌制度,提高末端供水保障率和调蓄配置能力;管理性缺水区则应加强灌溉时机、灌溉定额及农户用水行为管理。由此,该方法兼具灌区管理解释性和工程应用导向。

5.2 参数敏感性与误差控制

在 CWSI 的计算中,将经农田掩膜与地块尺度分区统计后的 LST 作为冠层温度表征值,并依据 NDVI 分组构建相对干边和湿边温度基准。该处理

能够减弱植被覆盖度、裸土背景及混合像元对温度诊断的影响,适用于灌区尺度农田水分胁迫快速识别。此外,面向田块尺度精细管理,可进一步结合无人机热红外、地面红外测温和土壤墒情观测进行校核,以提高冠层温度表征精度[9]。

在 score 的计算中,糙率是影响渠系输水潜力评价的重要参数。敏感性分析表明,当 n 在 0.013～0.018 $s/m^{1/3}$ 范围内变化时,score 绝对值随着糙率整体升降,但统一扰动条件下渠段相对排序保持不变,说明基于分位数阈值识别低输水潜力渠段具有较好的稳定性。在工程应用中,可结合重点渠段的实测流量、断面尺寸、淤积程度和衬砌完整性资料进一步复核。

5.3　尺度适应性与验证方向

本文方法面向灌区尺度快速诊断,适用于缺乏连续实测流量和大范围田间墒情资料的情形,可用于缺水区识别与成因初判。其数据来源较稳定、处理流程清晰且空间判别规则可解释,可为灌区管理部门快速定位重点治理区域提供依据。

为进一步提升诊断精度与结果可验证性,后续可选取 3 类缺水的典型斑块开展实地核查,结合无人机热红外影像、土壤含水量、渠道流量和灌溉记录进行样本验证[20]。同时,可引入多时相遥感影像,检验不同灌溉轮次与作物生育阶段下缺水类型的时空稳定性,构建面向精细灌溉管理的动态诊断框架[8-9]。

参考文献:

[1] Food, Agriculture Organization of the United Nations. The state of the world's land and water resources for food and agriculture: managing systems at risk[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2011.

[2] 康绍忠. 水安全与粮食安全[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 880-885.

[3] 成诚, 王金霞. 灌溉管理改革的进展、特征及决定因素: 黄河流域灌区的实证研究[J]. 自然资源学报, 2010, 25(7): 1079-1087.

[4] 王鹏新, Wan Zhengming, 龚健雅, 等. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 527-533.

[5] 黄友昕, 刘修国, 沈永林, 等. 农业干旱遥感监测指标及其适应性评价方法研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 186-195.

[6] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J, et al. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. Water Resources Research, 1981, 17(4): 1133-1138.

[7] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, et al. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 49(3): 246-263.

[8] Ahmad U, Alvino A, Marino S. A review of crop water stress assessment using remote sensing[J]. Remote Sensing, 2021, 13(20): 4155.

[9] Liu Q, Qu Z Y, Hu X L, et al. Combining UAV remote sensing data to estimate daily-scale crop water stress index: Enhancing diagnostic temporal representativeness[J]. Agricultural Water Management, 2024, 305: 109130.

[10] 刘勇洪, 叶彩华, 李文华. 基于RS和GIS技术的区域农田灌溉量预报研究及应用[J]. 自然资源学报, 2012, 27(9): 1601-1609.

[11] Rouse J , Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS[C]//Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Greenbelt: NASA, 1974: 309-317.

[12] Tucker C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation[J]. Remote Sensing of Environment, 1979, 8(2): 127-150.

[13] Qin Z, Karnieli A, Berliner P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(18): 3719-3746.

[14] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.

[15] French R H. Open-channel hydraulics[M]. New York: McGraw-Hill, 1985.

[16] GB 50288—2018 灌溉与排水工程设计标准[S].

[17] Hutchinson M F, Gallant J C. Digital elevation models and representation of terrain shape[M]//Wilson J, Gallant J. Terrain analysis: principles and applications. New York: John Wiley & Sons, 2000: 29-50.

[18] GB/T 28592—2012 降水量等级[S].

[19] Sun H, Xu Z H, Liu H. An evaluation of the response of vegetation greenness, moisture, fluorescence, and temperature-based remote sensing indicators to drought stress[J]. Journal of Hydrology, 2023, 625: 130125.

[20] Shi H Z, Li Z J, Xiang Y Z, et al. Integrating multi-source remote sensing and machine learning for root-zone soil moisture and yield prediction of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): A new perspective from the temperature-vegetation index feature space[J]. Agricultural Water Management, 2024, 305: 109129.

Identification and Causal Diagnosis of Water Shortage in Irrigation Districts Using Multi-Source Remote Sensing and Water-Conveyance Constraints

YANG Fengru[1,2]

(1.Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 210003, China;
2. Nanjing Hehai Nanzi Hydropower Automation Co., Ltd., Nanjing 210031, China)

Abstract: To address the difficulty in distinguishing the causes of water shortages and to remedy the insufficient integration of multi-source information in irrigation districts of arid and semi-arid regions, this study developed a method for identifying water shortages and diagnosing their causes by integrating multi-source remote-sensing responses, canal water-conveyance potential assessment, and water-source cost-distance analysis. A large-scale, high-lift Yellow River diversion irrigation district in Baiyin, Gansu Province, China, was selected as the study area. Sentinel-2, Landsat 8, digital elevation model (DEM), land-use/land-cover, precipitation, and canal-network vector data were used to derive the normalized difference vegetation index (NDVI), land surface temperature (LST), and crop water stress index (CWSI), and to calculate a canal water-conveyance potential score and water-source cost distance. Engineering, structural, and management water shortages were then identified through GIS-based spatial overlay analysis and rule-based logical classification. The results showed that the spatial pattern of water stress was closely coupled with canal water-supply conditions and water-source accessibility. Farmland parcels affected by engineering water shortages accounted for 4.81% of the irrigation-requiring farmland and were mainly located in downstream canal sections with low water-conveyance potential and in the middle and lower reaches of branch canals. Parcels affected by structural water shortages accounted for 6.20% and were concentrated along the margins of the irrigation district and in areas with high water-source cost distances. Parcels affected by management water shortages accounted for 6.75% and occurred as scattered patches adjacent to the canal network and in localized farmland areas. The proposed method extends water-shortage assessment from identification to causal diagnosis and can provide spatial decision support for irrigation infrastructure upgrading, tail-end water-supply optimization, and field irrigation management.

Keywords: irrigation water-shortage diagnosis; arid and semi-arid regions; multi-source remote sensing; crop water stress index; water-conveyance potential; spatial overlay analysis

(责任编辑 李 琼)