

干旱荒漠区人工绿洲土壤盐碱化风险综合评估与演变分析

刘子金^{1,2,3}, 徐存东^{1,2,3*}, 朱兴林⁴, 周冬蒙⁴, 田俊姣^{1,2}, 谷丰佑^{1,2}, 黄 嵩^{1,2}, 李智睿^{1,2}, 赵志宏^{1,2}, 王 鑫^{1,2} (1.华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450046; 2.浙江省农村水利水电资源配置与调控关键技术重点实验室, 浙江 杭州 310018; 3.河南省水工结构安全工程技术研究中心, 河南 郑州 450046; 4.中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为明晰干旱荒漠区人工绿洲水盐时空分异特征与盐碱化风险空间格局演变过程, 以甘肃省景电灌区为研究区, 以 2002、2010 及 2018 年为研究代表年, 基于多级模糊理论从地质气候驱动、水土环境驱动和自然-人类驱动 3 个驱动过程构建土壤盐碱化风险评估体系, 集成云发生器原理、黄金分割率法、组合赋权法以及排队理论构建土壤盐碱化空间风险综合评价模型。将长序列监测数据、多时相空间数据以及经济社会数据依据各驱动要素权重以 ArcGIS10.2 为技术平台进行多源融合, 对各空间风险状态进行了空间可视化表达与流向追踪。结果表明: 1) 研究区 2002、2010 及 2018 年土地盐碱化整体风险分别为“临界状态”、“临界状态—轻度风险”、“轻度风险”; 2) 地下水埋深及地下水矿化度是驱动土壤盐碱化进程加剧的主导因素; 3) 灌区盐碱化空间风险演变模式剧烈程度排序为持续变化型>前期变化型>后期变化型>持续稳定型>反复变化型。研究区盐碱化整体风险状态呈现出由“无风险—临界状态”以及“临界状态—轻度风险”过渡的趋势; 4) 2002~2018 年间研究区盐碱化空间风险整体呈升级态势, 表征出明显的地区差异性且总体呈现由西北向东南以弧射状增高的空间格局。

关键词: 干旱荒漠区; 人工绿洲; 盐碱化风险; 空间格局; 演变分析

中图分类号: X171.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2022)01-0367-13

Comprehensive assessment and evolution analysis of soil salinization in artificial oasis in arid desert area. LIU Zi-jin^{1,2,3}, XU Cun-dong^{1,2,3*}, ZHU Xing-lin⁴, ZHOU Dong-meng⁴, TIAN Jun-jiao^{1,2}, GU Feng-you^{1,2}, HUANG Song^{1,2}, LI Zhi-rui^{1,2}, ZHAO Zhi-hong^{1,2}, WANG Xin^{1,2} (1.School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2.Key Laboratory for Technology in Rural Water Management of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, China; 3.Henan Provincial Hydraulic Structure Safety Engineering Research Center, Zhengzhou 450046, China; 4.Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China). *China Environmental Science*, 2022,42(1): 367~379

Abstract: To clarify the spatiotemporal variation characteristics of water and salt and the spatial evolution of salinization in artificial oasis in arid desert area, Jingtaichuan electric power irrigation area in Gansu Province was taken as the research area, 2002, 2010 and 2018 were selected as representative years. The soil salinization risk assessment system was constructed based on multi-level fuzzy theory from three driving processes: geological-climatic driven, soil-water environmental driven and natural-human driven. The cloud generator principle, golden ratio method, combined assignment method and queuing theory were integrated to construct a comprehensive spatial risk evaluation model of soil salinization. The long-sequence monitoring data, multi-temporal spatial data, and economic and social data were fused based on the element weights using ArcGIS10.2. The spatial risk state of salinization in each period was visually expressed and flow traced. The results of the study showed that: 1) The overall risks of land salinization in 2002, 2010 and 2018 were "critical", "critical-mild risk" and "mild risk"; 2) The dominant factors in the soil salinization were the depth of groundwater and the mineralization of groundwater; 3) In the irrigation area, the intensity of spatial evolution pattern of salinization risk: continuous change type>early change type>late change type>continuous stable type>repeated change type. The overall salinization risk in the study area showed a transition trend from "risk-free to critical state" and "from critical state to mild risk"; 4) From 2002 to 2018, the salinization in the study area was aggravating with obvious regional differences and generally presented an arcing increase from northwest to southeast.

Key words: arid desert areas; artificial oasis; salinization risk; spatial pattern; evolution analysis

我国西北干旱荒漠区土地资源丰富、光热条件充足,但水资源空间配置不均^[1]。通过提水灌溉的方式,极大缓解了区域内水土资源不协调的问题。但干旱荒漠区生态环境本地极端脆弱,对于外调水资源驱动背景下的水土资源开发响应十分剧烈^[2]。灌溉

收稿日期: 2021-05-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51579102);河南省高校科技创新团队支持计划(19IRTSTHN030);中原科技创新领军人才支持计划(204200510048);浙江省重点研发计划项目(2021C03019);浙江省联合基金项目(LZJWD22E090001)

* 责任作者, 教授, xcudong@126.com

农业对于土地资源的掠夺性开发致使区域内水盐平衡演变模式及原生驱动过程受到了潜在破坏,进一步推进了区域内土壤盐碱化及次生盐碱化的演变进程,使得盐碱化空间风险逐渐升级^[3-4]。因此揭示干旱荒漠区水盐驱动要素时空分异特征及盐碱化空间风险演变模式,对于丰富和推进盐碱化监测、防治的针对性与精准性研究具有重要的科学意义。

干旱荒漠区人工绿洲的土壤水盐空间分异存在较为复杂的生态水文过程与水力联系^[5]。准确揭示其驱动过程的动力学机制,探明其时空演变规律与参与介质、驱动过程之间的耦合关系是水土环境领域当前研究的热点与难点^[6]。近年来对土地盐碱化驱动机理、介质联系、空间风险以及演变过程的认识已经取得一些进展,如针对灌溉背景下土地盐碱化的演变趋势、发生概率以及监测分区进行的分析与评价^[7-9];运用 SaltMod 模型、多元地质统计原理及模糊隶属函数就土地盐碱化的演变态势预测、空间变异过程及总盐度风险评价进行分析^[10-12];基于灰色系统理论分别就河西地区绿洲、苏北海涂典型围垦区以及于田绿洲的土壤盐碱化风险进行的定量评价^[13-16]。但仍存在以下不足之处,其一就研究对象及研究目标而言,目前的研究主要针对于田间尺度下灌溉条件、方式、土质结构对于典型单元土壤盐碱化的驱动机理及驱动过程研究,对于区域尺度背景下土壤盐碱化整体空间风险状态的评估研究相对较少;其二就研究方法而言,仍存在相对单一或偏主观等问题,在一定程度上影响了盐碱化风险状态评价结果的客观性和准确性;其三,对于盐碱化不同风险状态的空间变化以及风险地类特征演变流向考虑的仍不够充分。云理论在刻画模糊评价系统的随机性及不确定性问题上更具优势,使得评价结果更贴近实际情况^[17-20]。

鉴于此,以甘肃省景电灌区为例,基于多级模糊理论、云发生器原理、黄金分割率法、组合赋权法以及排队理论构建了一套土壤盐碱化空间风险评价的多级模糊评价模型,同时引入土地盐碱化空间风险转移矩阵与盐碱化风险地类特征变化模式图谱,通过多时相数据融合的方式,将2002~2018年间研究区土壤盐碱化空间风险状态

进行了定量评价与可视化表达,对于不同风险地类特征变化模式与演变流向进行了靶向追踪分析,揭示了灌区土壤盐碱化风险在多时空尺度上的发展态势与演变规律,以期为干旱荒漠区人工绿洲水土资源可持续发展提供理论依据与科学指导。

1 研究区及数据源

1.1 研究区概况

如图1所示,景电灌区地处甘肃省中部(37°26'~38°41'N,103°20'~104°04'E),地理位置处于甘、宁、蒙3省的交界地带,是为缓解我国西北干旱荒漠区土地沙化及生态环境恶化的生态建设工程。灌区总面积约1496km²,灌区内土地类型以耕地、盐碱地、草地、旱地、沙地及戈壁为主,气候条件为典型的温带大陆性气候。灌区分为一期与二期,其中一期灌区于1974年基本建成,二期灌区于1994年基本建成,该地区干旱少雨,多年平均降雨量为185.6mm,多年平均蒸发量为2433.8mm,土壤类型以荒漠灰钙土为主,植被结构单一,主要表现为旱生草本混合群落与超旱生小灌木特征,年日照时数长达2714h,无霜期约190d^[5,21]。

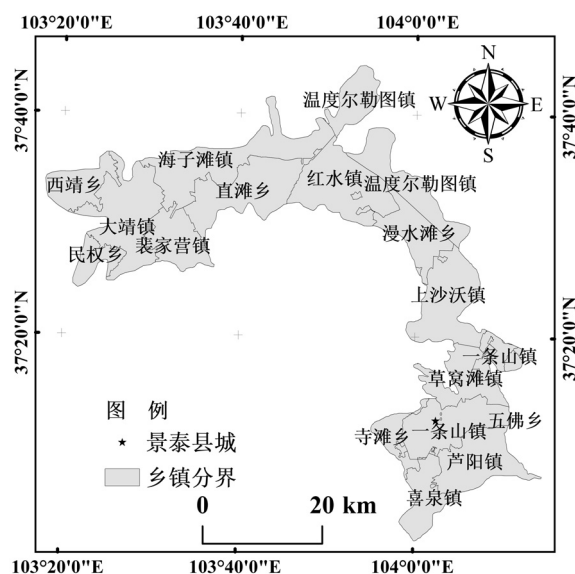


图1 研究区地理位置

Fig.1 Geographical location of the study area

1.2 多级模糊评价指标体系建立

引入多级模糊理论实现对评价目标多层次驱动过程的客观揭示^[22]。结合已有针对水盐分异驱动

机理、过程以及土地盐碱化时空演化格局的相关研究成果^[2,8,16],参照研究区实际情况与历史资料^[5,20],将区域尺度土地盐碱化空间风险状态用“高度风险 A_1 ”、“中度风险 A_2 ”、“轻度风险 A_3 ”、“临界状态 A_4 ”、“无风险 A_5 ”来描述.参与驱动的过程可以概述为地质气候驱动、水土环境驱动和自然-人类驱动.将驱动因子列定为:地形 C 、气候 D 、土壤 E 、水资源 F 、

自然干扰 G 及人类干扰 H 8 个因子.依据驱动状态可进一步将驱动因子进行分解并表征为:海拔 C_1 、坡度 C_2 、年蒸发量 D_1 、年降水量 D_2 、土壤含盐量 E_1 、土壤电导率 E_2 、地下水埋深 F_1 、地下水矿化度 F_2 、地表灌水量 F_3 、植被覆盖度 G_1 、地表温度 G_2 、人口密度 H_1 以及土地利用类型 H_2 .多级模糊评价指标体系见图 2.

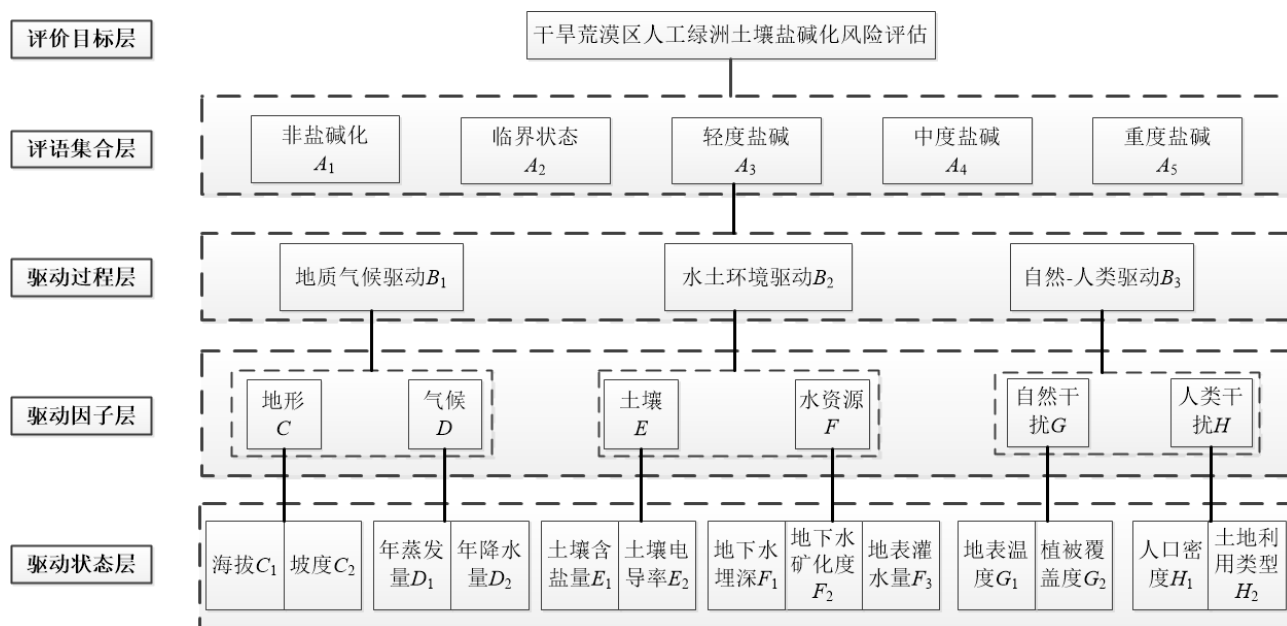


图2 多级模糊评价指标体系

Fig.2 Multi-level fuzzy evaluation index system diagram

1.3 数据来源

结合灌区建设运行过程中本底数据以及为满足研究条件的充分性与代表性,选定研究代表年份分别为:2002 年一期灌区续建配套全面完成,总灌溉面积为 3.85 万 hm^2 ,年提水量为 3.22 亿 m^3 ;2010 年二期灌区续建配套建设 2a,总灌溉面积为 4.92 万 hm^2 ,年提水量为 3.86 亿 m^3 ;2018 年代表灌区运行现状,总灌溉面积 6.05 万 hm^2 ,年提水量为 4.60 亿 m^3 .研究数据主要包含长序列监测数据、无人机航拍数据、遥感反演数据以及经济社会数据.各数据获取方式如下:(1)长序列监测对象包括年蒸发量、年降水量、土壤含盐量、地下水埋深、地下水矿化度以及地表灌水量等盐碱化驱动状态因子,其主要由布设的空间监测设备以及现场样本提取分析进行数据收集;(2)无人机航拍扫描数据来源于 2017 年 4 月

25~26 日在灌区采用 Trimble UX5 型固定机翼无人机(飞行高度 500m,控制精度为 15cm,采用“蛇型移动式”航线)搭载的 SONY ILCE-5100 相机(2400 万像素)配备影像传感器对研究区东部的封闭型水文地质单元进行连续航拍所得;(3)遥感反演数据及气象数据包括:由地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)获取的 Landsat8 及 Landsat5 系列卫星搭载数据;由 Weather Underground(<https://www.wunderground.com>)所提供的历史气象数据;由通量监测设备所获取的水热通量数据;(4)经济社会数据主要来源于景电灌区内各县、镇、村的统计年鉴、经济社会历史调查报告以及由中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>)提供的资料.各项评价指标获取来源见表 1,各指标监测点位空间分布见图 3.

表 1 评价因子数据来源
Table 1 Data sources of evaluation indicators

评价因子	单位	数据性质	数据类型	数据获取方式
海拔	m	遥感反演	栅格数据	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)+ArcGIS10.2 分析提取
坡度	°	遥感反演	栅格数据	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)+ArcGIS10.2 分析提取
年蒸发量	mm	长序列监测数据	矢量数据	空间监测点位布设
年降水量	mm	长序列监测数据	矢量数据	雨量监测设备
土壤含盐量	%	长序列监测数据	矢量数据	空间采样点布设监测+实验室样本分析+1971~2018 年景泰川灌区历年土地调查报告
土壤电导率	S/m	长序列监测数据	矢量数据	空间采样点布设监测+实验室样本分析+1971~2018 年景泰川灌区历年土地调查报告
地下水埋深	m	长序列监测数据	矢量数据	空间监测点位布设+地下水水质理化性质分析提取
地下水矿化度	g/L	长序列监测数据	矢量数据	空间监测点位布设+地下水水质理化分析提取
地表灌水量	万 m³	长序列监测数据	矢量数据	地表灌水量监测
植被覆盖	%	遥感反演	栅格数据	地理空间数据云+遥感反演
地表温度	℃	遥感反演	栅格数据	地理空间数据云+遥感反演
人口密度	人/hm²	经济社会数据	栅格数据	1971~2018 年景泰县统计年鉴+灌区各乡镇统计资料
土地利用类型	-	经济社会数据+航拍扫描数据	栅格数据	1971~2018 年景泰川灌区历年土地调查报告+航拍扫描+遥感反演

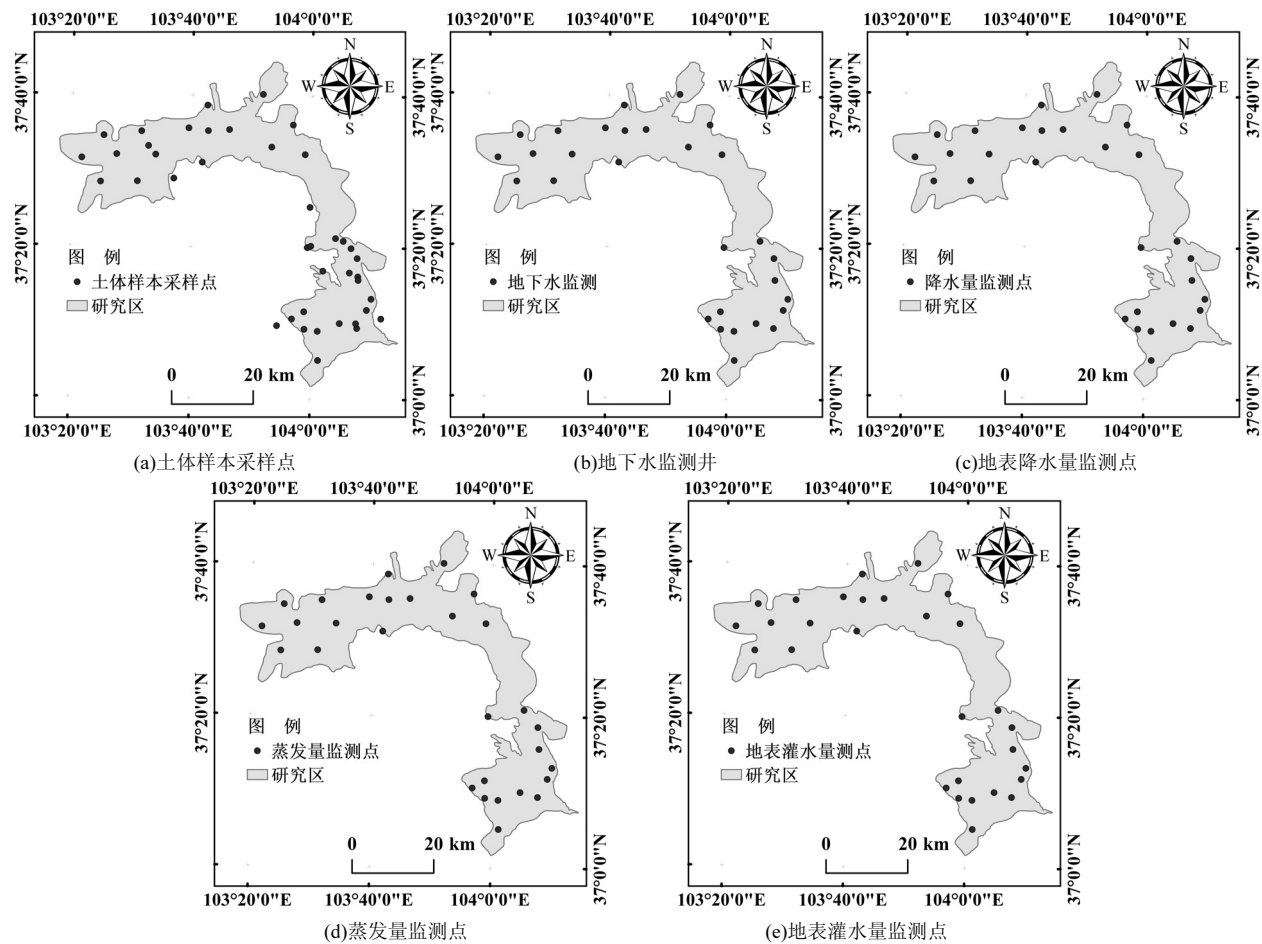


图 3 长序列监测点位空间分布
Fig.3 Spatial distribution of long sequence monitoring points

2 研究方法

2.1 数据处理

为实现数据的空间面状化,将源数据进行以下预处理:(1)长序列监测数据:通过 Origin9.1 正态 QQ 图分析对数据先进行样本源检验,结果表明,上述指

标数据分布满足正态性分布.基于 ArcGIS-Spatial Analys-插值对年蒸发量 D_1 、年降水量 D_2 、土壤含盐量 E_1 、土壤电导率 E_2 、地下水埋深 F_1 、地下水矿化度 F_2 、地表灌水量 F_3 进行空间插值.引入交叉

验证法^[23]及误差矩阵^[24]进行插值精度验证,最终优选插值方法及相应精度见表 2.研究区年降水量及年蒸发量各研究节点无显著变异性,故本文只列出 2018 年的相关结果.

表 2 各评价指标因子所选插值方法及精度

Table 2 Interpolation method and precision table selected for evaluation index factor

特征因子	插值模型	MAE	MRE	RMSE	总精度(%)	kappa 系数
土壤含盐量(%)	反距离权重插值(幂 2)	0.127	0.018	0.052	71.63	0.7176
土壤电导率(S/m)	普通克里金(球面函数)	0.081	0.007	0.038	63.17	0.6522
地表灌水量(万 m ³)	反距离权重插值(幂 2)	0.475	0.053	0.301	72.35	0.7165
地下水埋深(m)	反距离权重插值(幂 3)	0.363	0.037	0.225	71.56	0.7083
地下水矿化度(g/L)	反距离权重插值(幂 3)	0.141	0.014	0.037	69.12	0.6931
年均降水量(mm)	反距离权重插值(幂 2)	8.66	0.823	4.781	70.18	0.7001
年蒸发量(mm)	反距离权重插值(幂 3)	18.42	1.782	10.03	73.07	0.7208

注:MAE、MRE、RMSE分别表示平均绝对误差、平均相对误差以及均方根误差.

遥感反演及航拍数据:对 Landsat 光学数据分别进行辐射定标、大气校正^[25]等预处理,基于 ArcGIS10.2 提取了研究区数字高程信息,地表温度、植被覆盖度分别采用单窗算法^[26]、像元二分模型^[27]进行解译处理.土地利用在解译过程中,为提高解译精度,将航拍影像数据基于 UASMaster 进行影像集成,并利用 POS 数据完成数据定向及点云提取,最后通过配准、建模获取整体航拍扫描数据.通过目视解译及现场调查,确定感兴趣区提取遥感影像解译标志.并以此作为土地利用解译的前置条件.通过反复对比建立训练样本,最终基于 ENVI5.3 采用人机交互型解译方式进行解译.经济社会数据:将统计年鉴、经济社会历史调查报告以及中国科学院资源环境科学与数据中心提供的栅格数据进行比对验证,确保满足精度要求,对研究区不同时间节点的人口密度及分布进行空间表征.

2.2 云模型

2.2.1 云模型概念及云发生器原理 云模型能够较好地刻画模糊系统随机性与波动性,可以通过不确定性语言将研究系统的随机性与模糊性进行有机结合,能够更为准确揭示土地盐碱化受多因素耦合影响发生演化这一复杂过程,弥补了以往研究的不足.云模型基于 Ex (期望)、 En (熵)、 He (超熵)3 个云数字特征将多变量耦合关联的模糊性进行表征,其转换关联系统 CG 包含正向与逆向两个过程,可实现定量数值与定性概念的相互转换. Ex 、 En 、 He 3 个云数字特征分别代表云滴重心、云滴离散度以及云滴厚度^[20].其概念

特征及云发生器原理见图 4.

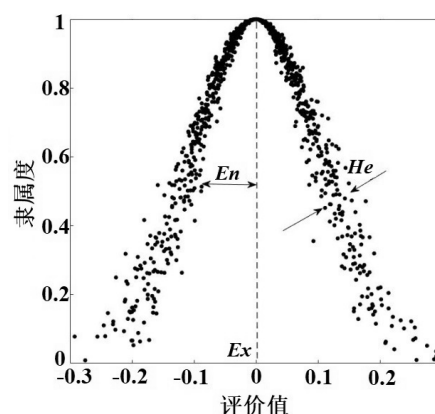


图 4 正态云模型数字特征

Fig.4 Normal cloud model digital features

2.2.2 评价标准云 水盐时空分异过程所表征出的具体状态具有较强的模糊性,黄金分割率云生成法可以在一定程度上消除指标之间的模糊性,具有较好的理论价值与应用价值^[28].以土地盐碱化风险评语集 $A = \{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5\} = \{\text{高度风险, 中度风险, 轻度风险, 临界状态, 无风险}\}$ 为基础,引入黄金分割率,定义相邻等级之间 $En_{\min} = 0.618En_{\max}$ 、 $He_{\min} = 0.618He_{\max}$, 设定“轻度风险”状态云模型参数为 $Ex_3 = 0.5$, $He_3 = 0.005$, 由此确立各评价等级的数字分布特征分别为 $A_1(0, 0.103, 0.1031)$ 、 $A_2(0.309, 0.064, 0.0081)$ 、 $A_3(0.50, 0.031, 0.005)$ 、 $A_4(0.691, 0.064, 0.0081)$ 、 $A_5(1, 0.103, 0.0131)$, 评语集系统通过 MATLAB 仿真得图 5.

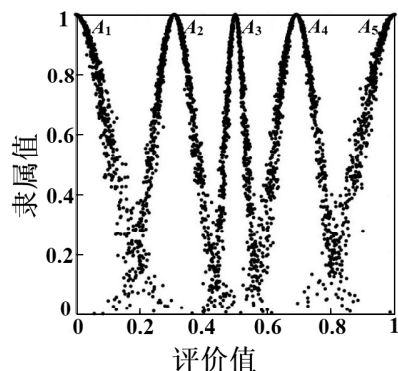


图5 土地盐碱化风险状态评估标准云

Fig.5 Evaluation standard cloud for land salinization risk status

2.2.3 组合赋权法 为充分满足指标赋权的客观性与精度要求,避免与实际状态不符以及个人经验性对赋权结果的精度扰动.本文引入基于多目标加权的组合赋权法进行指标权重确定,该方法能够避免传统赋权方法的主、客观性过强以及偏好性,能够更加精准的评判各影响要素在复合系统中实际重要性程度,具有特有优势^[29].计算过程如式 1 所示.

$$\omega_i = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{-2\ln(\frac{2(i-1)}{n})}}{6}, & 1 < i \leq \frac{n+1}{2} \\ \frac{1}{2} - \frac{\sqrt{-2\ln(2 - \frac{2(i-1)}{n})}}{6}, & \frac{n+1}{2} < i \leq n \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω_i 为第 i 个指标的权重; n 为指标个数; i 为指标重要性排序等级.

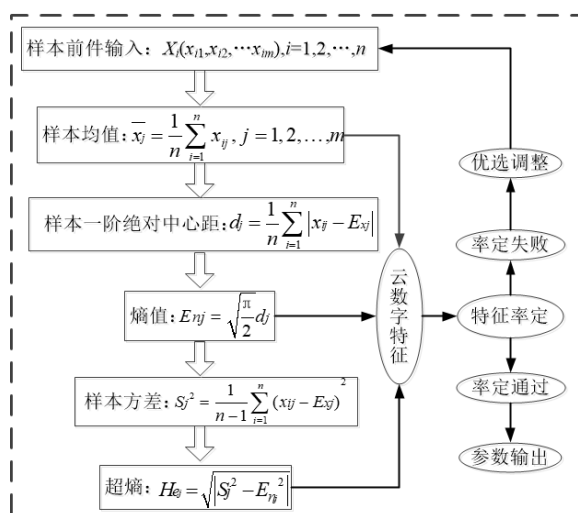


图6 隶属度云模型计算过程

Fig.6 Computing process of membership cloud model

2.2.4 隶属度云模型与综合评价云模型

逆向云发生器原理,界定评价阈值为[0~1],聘请专家学者、灌区综合管理人员以及灌区内运行工作人员依据评语层对状态层评价指标打分,对评判数据基底进行有效性筛选、剔除及调整,确保后期计算所得的云数字特征满足超熵 $He < 1/3En$ 及 3δ 原则^[30],计算流程如图 6 所示.

基于各指标权重及与隶属度云模型依据式 2 计算综合评价云.

$$\begin{cases} Ex = \sum_{i=1}^m E_{xi} \omega_i \\ En = \sqrt{\sum_{i=1}^m (En_i^2 \omega_i)} \\ He = \sum_{i=1}^m He_i \omega_i \end{cases} \quad (2)$$

式中: m 为指标个数; ω_i 为各指标权重.

2.3 土地盐碱化空间风险转移矩阵

为揭示区域尺度土地盐碱化风险在不同时期的空间分异过程与转换关系,基于土地利用转移矩阵^[31],构建土地盐碱化风险空间转移矩阵对研究区水盐分异态势在数量上的分布特征以及不同风险等级地类流向进行靶向监督,其表达过程为:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{m1} & \cdots & A_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: A 为研究区总面积, n 为土地盐碱化风险等级类别, i 为研究期初土地盐碱化风险等级地类特征, j 为研究期末土地盐碱化风险等级地类特征.

2.4 土地盐碱化风险地类特征变化模式图谱

土地盐碱化风险变化模式图谱主要用于表征各研究节点对应的不同土地盐碱化风险地域特征的空间-属性-过程一体化数据,是探究时空动态变化下水盐空间分异演变模式以及演变格局的基本信息单元.参考文献[32-33],结合景电灌区水土资源的实际状态,分别用 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 A_5 对高度风险区、中度风险区、轻度风险区、临界状态区以及无风险区进行编码.将研究区土地盐碱化风险演化模式定义为 5 种图谱类型,分别为:1)持续变化型(1-2-3 型),即研究区各阶段盐碱化风险地类特征均持续发生演化;2)反复变化型(1-2-1 型),即不同阶段盐碱化风险地类特征在前期与后期演化模式相反,

属于正向与逆向交替演化型;3)前期变化型(1-2-2型),盐碱化风险地类特征仅在前期演化,后期保持静止稳定态;4)后期变化型(1-1-2型),盐碱化风险地类特征仅在后期演化,前期保持静止稳定态;5)持续稳定型(1-1-1型),各研究时间节点对应的盐碱化风险地类特征均未发生演化.在图谱特征定义基础上,对已编码的图斑单元进行融合,将融合后的盐碱化风险地类变化模式与图谱模式比对分析从而得出区域尺度不同土地盐碱化风险状态的地类变化模式图谱.计算公式为:

$$M=100a+10b+c$$

(4)

式中: a 、 b 、 c 分别表示研究期初、期中与期末土地盐碱化风险空间地类图谱栅格属性; M 表示研究期内不同风险地类变化图谱栅格属性.

3 结果与分析

3.1 权重的求解

咨询本领域专家 3 名,依据指标重要度确定其排队等级.依据式 1 分别计算“驱动状态层”、“驱动因子层”以及“驱动过程层”的权重值.结果见表 3~5.

表 3 “驱动状态层”分层指标权重

Table 3 Hierarchical index weight of “driving state layer”

项目	C_1	C_2	D_1	D_2	E_1	E_2	F_1	F_2	F_3	G_1	G_2	H_1	H_2
序列等级	2	2	2	1	1	2	1	1	2	1	2	2	1
权重	0.50	0.50	0.50	1	1	0.50	1	1	0.65	1	0.50	0.50	1
归一化	0.50	0.50	0.33	0.67	0.67	0.33	0.38	0.38	0.24	0.67	0.33	0.33	0.67

表 4 “驱动因子层”指标权重

Table 4 “Factor layer” index weight

项目	C	D	E	F	G	H
序列等级	3	2	1	1	1	2
权重	0.65	0.75	1	1	1	0.75
归一化	0.13	0.15	0.19	0.19	0.19	0.15

表 5 “驱动过程层”指标权重

Table 5 “Process layer” index weight

项目	B_1	B_2	B_3
序列等级	3	1	2
权重	0.35	1	0.65
归一化	0.18	0.50	0.32

3.2 隶属度云模型计算与土地盐碱化风险状态综合评估

聘请本领域专家学者 3 人,研究区管理人员 3 人,

日常运行及维护工作人员 4 人,界定评语区间为[0,1],就驱动状态要素对研究区各时间节点对应的土壤盐碱化风险进行客观评定.将所得评定分值基于云发生器原理进行数字表征,依据隶属度云模型计算流程进行数据优选与正逆向反馈调整,确保结果客观性及有效性,并依次计算得出各研究年“状态层”“因子层”与“过程层”的云模型特征参数,最终依据式 2 计算得出综合评语云数字特征,各研究节点过程层与综合评语云数字特征见表 6.2002、2010 及 2018 年综合评价云数字特征分别为 $Z_1(0.7067, 0.0392,0.0107)$ 、 $Z_2(0.6162,0.0406,0.0111)$ 、 $Z_3(0.4768, 0.0491,0.0128)$.各时期云数字特征中,熵(En)与超熵(He)分别仅为 0.0392, 0.0406, 0.0491, 0.0107, 0.0111, 0.0128. He/En 小于 1/3,表明云滴离散度低,评价结果雾化度较低,更偏向实际状态,可信性高.

表 6 过程层与综合评价云数字特征参数

Table 6 Cloud digital characteristic parameters of process layer and comprehensive evaluation

代表年	过程层 B_1	过程层 B_2	过程层 B_3	综合评价云 Z
2002 年	(0.7135,0.0383,0.0094)	(0.7085,0.0389,0.0108)	(0.7003,0.0402,0.0112)	(0.7067,0.0392,0.0107)
2010 年	(0.6211,0.0373,0.0101)	(0.6124,0.0418,0.0117)	(0.6194,0.0405,0.0108)	(0.6162,0.0406,0.0111)
2018 年	(0.4824,0.0541,0.0123)	(0.4738,0.0477,0.0139)	(0.4784,0.0482,0.0115)	(0.4768,0.0491,0.0128)

基于 MatLab 将 2002、2010 及 2018 年土地盐碱化风险云数字特征进行可视化表达,结果见图 7.

由图 7 可知,研究区 2002、2010 及 2018 年土地盐碱化整体风险分别为“ A_4 -临界状态”、“ A_4 -临界状态

~ A_3 -轻度风险”、“ A_3 -轻度风险”.各时期盐碱化风险整体表征出加剧态势,表明灌区内土地盐碱化风险等级不断升级.究其原因,灌区内土地盐碱化风险持续升级主要受控于地表水资源调控背景下大水漫

灌式等传统型、粗放式田间灌溉模式以及干旱荒漠型气候条件的影响,水-热-盐输移过程被不断驱动,灌区内土地资源平衡演变模式受到了剧烈扰动,导致地表盐分呈积聚型响应态势.

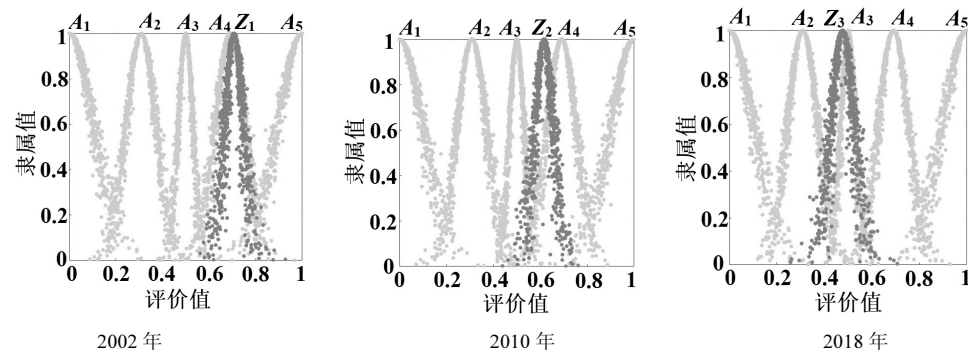


图 7 隶属度云模型计算过程
Fig.7 Computing process of membership cloud model

3.3 研究区土地盐碱化空间风险分析

3.3.1 2002~2018 年土地盐碱化风险空间变化分析
参照上文中指标权重确定方式,通过专家咨询,确定

各指标因子的总体排队等级,从驱动状态层整体层面确定各指标因子权重,各驱动状态指标因子权重见表 7.

表 7 “驱动状态层”指标权重
Table 7 "State level" overall index weight

项目	C_1	C_2	D_1	D_2	E_1	E_2	F_1	F_2	F_3	G_1	G_2	H_1	H_2
序列等级	12	13	7	8	3	5	1	2	4	6	9	11	10
权重	0.24	0.17	0.57	0.43	0.76	0.66	1	0.82	0.71	0.62	0.38	0.29	0.34
归一化	0.035	0.025	0.081	0.062	0.108	0.095	0.143	0.117	0.101	0.089	0.054	0.042	0.048

由表 7 可知,研究区区域尺度水盐分异进程驱动影响因素排序为地下水埋深>地下水矿化度>土壤含盐量>地表灌水量>土壤电导率>地表温度>年蒸发量>年降水量>植被覆盖度>土地利用类型>人口密度>海拔>坡度.可见地下水埋深、地下水矿化度、土壤含盐量以及地表灌水量是驱动灌区土壤水盐运移的控导性要素.主要由于地下水作为干旱区人工绿洲水盐运移的主要载体,也是地表盐分积聚的主要来源;土壤含盐量作为灌区土壤盐碱化的终点因素,表征土壤盐碱化进程中的属性及具体状态;地表灌水量主要通过微观尺度对土壤、地下水中的盐分及矿化物质进行输移,以此实现对土壤盐分的再分布作用.除上述主要控导因素外,水文气候要素、植被覆盖、土地利用、人口密度、地形要素等主要通过潜在影响水盐输移过程从而对水盐分异态势起到微观驱动作用,这种作用的表征

较为缓慢且呈隐性,故对土地盐碱化演化过程影响相对较弱.

根据研究区土壤盐碱化风险因子插值、反演及解译结果,将各盐碱化驱动因子进行时空叠加,考虑到各驱动要素的量纲不一致,故在进行多因素耦合叠加分析时,先基于 ArcGIS10.2 对各驱动要素的空间数据图件进行重分类处理,重分类过程基于“正向累加原则”,即各指标最终累加数值结果与土壤盐碱化风险呈正相关性.结合所构建的多级模糊评价系统评语集和层,将分类标准划定为 5 类,即“高度风险 A_1 ”、“中度风险 A_2 ”、“轻度风险 A_3 ”、“临界状态 A_4 ”及“无风险 A_5 ”.结合各驱动要素权重,通过栅格叠合计算,分别得出 2002、2010 及 2018 年的土壤盐碱化空间风险格局见图 8.基于 ArcGIS10.2 对灌区 3 个时期的土地盐碱化空间风险面积进行统计.

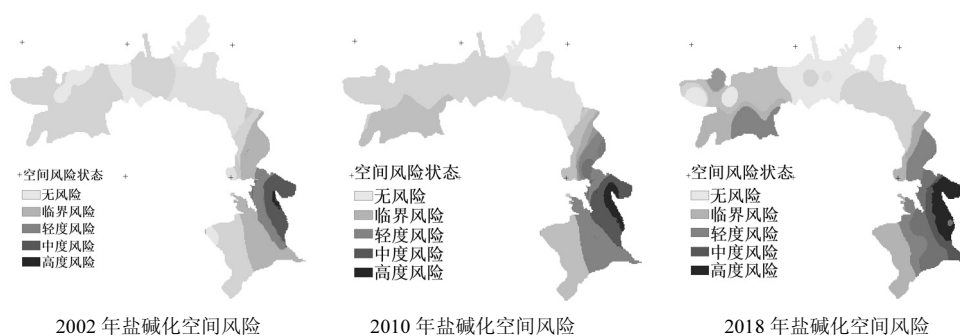


图8 研究区土壤盐碱化风险空间分布示意

Fig.8 Spatial distribution of soil salinization risk in the study area

由图8及表8可知,2002~2018年灌区土地盐碱化空间风险总体表征出无风险区、临界状态区面积减少,轻度风险、中度风险以及高度风险区域面积增加的演变态势.究其原因,结合研究区地表灌水量及土地利用方式的空间演变过程可知,随着灌水量的不断增高,灌区内土地利用方式发生了很大变迁,耕地面积呈持续增长状态,沙地、未耕地以及草地面积均明显下降,表明随着时间推进,研究区水土资源开发度不断升高,这也进一步加剧了灌区内人类活动对区域内水土资源的掠夺性开发过程,催动了土地盐渍化的地表生态演变过程.从土壤盐碱化空间风险面积转移过程来看,2002、2010和2018年灌区内土壤盐碱化无风险区域面积占比分别为37.04%、21.81%和19.39%,临界状态由2002年的41.44%下降至31.18%,面积减少了16057.2hm²,无风险及临界状态区面积呈缩减态势,主要归因于随着灌区内水利设施以及生产方式的不断转变,增大了土地资源的利用度,使得灌区运行过程中农业生产活动对原生水土资源的破坏度不断提升.轻度盐碱化风险空间占比从2002年的9.62%提升至2018年的21.64%,中度盐碱化风险空间占比从2002年的10.14%提升至2018年的16.14%,重度盐碱化风险空间占比从2002年的1.76%提升至2018年的11.65%,灌区内盐碱化整体呈现出持续演化态势.结合研究区土壤盐碱化风险空间分布可知,灌区内盐碱化风险呈现出明显的“地区差异性”,并呈现出以弧射状由西北向东南增加的态势,低风险区则主要集中分布在海子滩镇、大靖镇、裴家营镇、红水镇等区域.中高风险区主要集中于研究区东部的芦阳镇、草窝滩镇以及五佛乡等区域.结合研究区的水文地质条件可知,低风险区所对应水文地质结构为开敞型水文地质单

元,其水文地质单元由灌溉入渗带(入渗主导、盐随水移)、溶质活跃迁移带(水量多变,运移迟滞)以及水盐耗散带(盐随水移、深层耗散)3部分组成,地下水盐运移的流向与地势变化相吻合,这为高矿化度地下水的排泄提供了良好的地质基础,水盐易耗散、难积聚.而高风险区对应的封闭型水文地质单元,该地质结构单元从外围向盆地中心逐渐分别形成了潜水交替相对流畅的灌溉入渗带、溶质活跃迁移带,并逐渐转化为水盐交替迟缓的汇水聚盐带(蒸发主导,水散盐聚),受该地质层结构所影响,高风险区地下水储水层上通下阻,加上多年开放式漫灌等不合理灌溉方式,地下水水文及矿化度被不断抬升,随着水—热—盐驱动转换过程的不断进行,导致该地质区土壤盐碱化风险不断升级.在这种水盐驱动模式下,灌区水盐分异态势呈激变式,最终导致研究区土壤盐渍化及次生盐渍化空间风险不断升高.结合上述分析内容,研究区在后续应进一步对灌溉背景下水资源对土壤盐碱化的驱动过程进行调控,可通过大力推广滴灌、喷灌等节水灌溉方式,一方面可以有效减少灌溉用水量,节约水资源;另一方面灌溉水量的减少对于地下水埋深等水盐驱动要素也可以进行反向调控.此外,在高风险区可通过开挖排碱沟等方式,加快土壤中集聚盐分的耗散过程.

3.3.2 2002~2018年土地盐碱化风险变化图谱分析 为研究景电灌区土地盐碱化风险在2002~2010~2018年的流向,依据式4,基于ArcGIS10.2对2002~2018年的土地盐碱化风险变化图谱进行计算分析,结果见表9所示.

由表9可知,景电灌区在2002~2018年间土地盐碱化空间风险演变类型中,持续变化型所占比重最大,像元数为872978个,演变面积为73924.64hm²;其

次为前期变化型,像元数为 422096 个,演变面积为 35743.57hm²;后期变化型像元数为 377623 个,演变面积为 31977.49hm²;持续稳定型像元数为 110165 个,演变面积为 9328.95hm²;反复变化型像元数为 65284 个,演变面积为 5528.35hm²;结合各风险变化模式及其演变面积可知,灌区盐碱化空间风险演变模式剧烈程度排序为持续变化型>前期变化型>后期变化型>持续稳定型>反复变化型。

表 8 研究区土地盐碱化风险空间变化
Table 8 Spatial change of land salinization risk in the study area

盐碱化空间风险等级	2002 年		2010 年		2018	
	面积 (hm ²)	占比 (%)	面积 (hm ²)	占比 (%)	面积 (hm ²)	占比(%)
无风险	57968.71	37.04	34133.30	21.81	30345.93	19.39
临界状态	64854.84	41.44	67797.09	43.32	48797.64	31.18
轻度风险	15055.58	9.62	23647.60	15.11	33867.25	21.64
中度风险	15869.40	10.14	22395.57	14.31	25259.58	16.14
高度风险	2754.45	1.76	8529.41	5.45	18232.60	11.65

在持续变化型土地盐碱化演变模式中,无风险—临界状态—轻度风险的面积占比最高,为

43937.59hm²,59.43%。这一驱动模式表征研究区土壤盐碱化的主要演变态势,即表明研究区内盐渍化风险正处于一个不断加剧的演变状态,反映人类活动与土地资源空间适应性不断降低,同时也对反复变化型模式占比最小进行了反向验证;前期变化型与后期变化型演变模式对应的最大演变像元分别是临界状态—轻度风险—轻度风险,无风险—无风险—临界状态,两者变化面积分别为 10128.19, 9039.73hm²,占各对应变化模式比重分别为 28.34%与 28.27%。结合 3 个研究时期所对应的盐碱化风险空间分布状态及各水盐分异驱动因子的空间分布状态,这两种变化模式主要集中分布在研究区的中部及西北部区域,该区域受地质单元及人类活动影响,水盐驱动过程相对滞缓,此外,受地下水矿化度、地下水埋深的动态扰动较东部地区较弱,故该地区盐碱化空间风险对水盐驱动要素的耦合响应程度相对较弱,致使这两种模式对应区域盐碱化进程相对缓慢,并在局部地区表征出驱动停滞的状态。

表 9 研究区 2002~2018 年土地盐碱化空间风险演变图谱分析
Table 9 Map analysis of spatial risk change of land salinization in the study area from 2002 to 2018

变化模式	像元数	演变面积(hm ²)	演变面积最大像元		
			变化类型	面积(hm ²)	占比(%)
持续变化型	872978	73924.64	无风险—临界状态—轻度风险	43937.59	59.43
反复变化型	65284	5528.35	无风险—临界状态—无风险	1362.44	24.64
前期变化型	422096	35743.57	临界状态—轻度风险—轻度风险	10128.19	28.34
后期变化型	377623	31977.49	无风险—无风险—临界状态	9039.73	28.27
持续稳定型	110165	9328.95	无风险—无风险—无风险	2723.43	29.19

表 10 灌区 2002~2010 年土地盐碱化空间风险转移面积矩阵(hm²)
Table 10 Spatial risk transfer area matrix of land salinization in irrigation areas from 2002 to 2010 (hm²)

盐碱化风险状态		2010 年					
		无风险	临界状态	轻度风险	中度风险	高度风险	合计
2002 年	无风险	31623.85	25477.48	863.53	3.73	0.12	57968.71
	临界状态	2464.28	38318.71	17289.2	5788.39	994.26	64854.84
	轻度风险	45.17	3984.71	4265.14	5895.06	865.50	15055.58
	中度风险	0	15.86	1060.54	10033.55	4759.45	15869.40
	高度风险	0	0.33	169.20	674.84	1910.08	2754.45
	合计	34133.30	67797.09	23647.60	22395.57	8529.41	156503

3.3.3 2002~2018 年土地盐碱化空间风险演变流向分析 由上述研究内容可知,景电灌区在 2002~2018 年间土地盐碱化不同空间风险面积发生了较大演

变,基于 ArcGIS10.2 的空间分析工具对研究区内各类盐碱化风险之间的转移过程用盐碱化风险转移矩阵的方式进行定量计算。盐碱化空间风险转移矩

阵中,行代表灌区期初的盐碱化风险状态,列表示期末的盐碱化风险状态,灌区内 2002~2010 年及 2010~2018 年的盐碱化空间风险转移面积矩阵如表 10,表 11 所示.

表 11 灌区 2010~2018 年土地盐碱化空间风险转移面积矩阵(hm²)

Table 11 Spatial risk transfer area matrix of land salinization in irrigation areas from 2010 to 2018(hm²)

盐碱化风险状态		2018 年					
		无风险	临界状态	轻度风险	中度风险	高度风险	合计
2010 年	无风险	25213.50	8286.14	618.03	13.77	1.86	34133.30
	临界状态	5064.41	30947.96	24695.8	6815.25	273.67	67797.09
	轻度风险	68.02	9395.59	7766.19	5204.33	1213.47	23647.60
	中度风险	0	151.45	703.08	12612.12	8928.92	22395.57
	高度风险	0	16.50	84.15	614.08	7814.68	8529.41
	合计	30345.93	48797.64	33867.25	25259.58	18232.60	156503

由表 10 可知,在 2002~2010 年景电灌区土壤盐碱化空间风险转移矩阵中,转移面积最大的是无风险状态向临界状态的转移,演变转移面积为 25477.48hm²,占无风险转出面积的 43.9%,占临界状态转入面积的 37.5%.其次是临界状态向轻度风险的转移,转移面积为 17289.2hm²,占临界状态转出面积的 26.7%,占轻度风险转入面积的 73.1%.究其原因,主要是由于二期灌区在 2002~2010 年间,随着灌溉提水及配水设备的不断完善,灌区内提水量及灌溉用水量不断增加,这一过程使得灌区内水土资源演化态势由原生态向次生态演绎,土地资源对水资源的敏感性不断增强所致.同理由表 11 可知,在 2010~2018 年土壤盐碱化空间风险转移矩阵中,转移面积最大的是临界状态向轻度风险的转移,演变转移面积为 24695.8hm²,占临界状态转出面积的 36.4%,占轻度风险转入面积的 72.9%.其次是轻度风险向临界状态的逆向演变过程,面积为 9395.59hm²,占轻度风险转出面积的 39.7%,占临界状态转入面积的 19.3%.究其原因,上述正向环境恶化驱动过程的演变以及局部地区出现逆向健康化恢复过程的原因主要有以下两点:一是灌区内水盐运移受“灌水—蒸发—耗散”过程以及地下水矿化度、地下水埋深等盐碱化驱动要素的循环式驱动所影响,盐碱化风险整体格局仍处于增长态势.同时,随着土地盐碱化过程的不断演进,灌区内环境状态对灌溉背景下水土资源的适配性有改善的趋势,但受正向驱动过程剧烈性所制约,这种逆向健康化演变过程演绎较为缓慢,且演绎速度远小于正向恶化驱动速度.

4 讨论

本文从“地质气候”、“水土环境”以及“自然—人类”3 个主要驱动过程介入,基于多级模糊理论、云发生器原理、黄金分割率法、组合赋权法以及排队理论构建了一套适用于干旱荒漠区人工绿洲土壤盐碱化空间风险评价的多级模糊评价模型,并以云数字特征的形式对研究区 3 个时期的土壤盐碱化空间整体风险进行了定量评价.在此基础上,基于长序列监测数据、空间数据以及经济社会数据的空间信息提取处理与多源信息融合,对景电灌区 2002, 2010 年及 2018 年的土壤盐碱化空间风险格局进行了可视化表达,同时建立了土地盐碱化空间风险转移矩阵与风险地类特征变化模式对 2002~2018 年间的土壤盐碱化风险特征以及演变流向进行了分析.可为本研究区及相似研究区水土环境状态评估与演变流向靶向追踪提供一种新思路.

虽然在一定程度上克服了传统土地盐碱化风险评价的单一性、局限性、模糊性以及可视化效果不突出等弊端.但仍存在一定的不足之处,在构建多层模糊评价系统时,对水盐运移的驱动力,即热力条件驱动的系统性考虑不够充分,仅引入了地表温度以及蒸发量两个主导要素,对于地表辐射等潜在热力要素的微观驱动作用考虑不足.其二在进行多源数据融合时,由于研究区面积相对较大,对于盐碱化空间风险的尺度效应考虑不足,使得多源数据融合结果与实际土壤盐碱化空间风险状态存在一定差距.针对上述不足,在后续研究中,可进一步丰富与完善盐碱化驱动要素体系,并将栅格单元做更进一步

的划分,以期提高盐碱化空间风险的评价精度.

5 结论

5.1 研究区 2002、2010 及 2018 年综合评价云数字特征分别为 $Z_1(0.7067,0.0392,0.0107)$ 、 $Z_2(0.6162,0.0406,0.0111)$ 、 $Z_3(0.4768,0.0491,0.0128)$.各时期土地盐碱化整体风险分别为“ A_4 -临界状态”、“ A_4 -临界状态~ A_3 -轻度风险”、“ A_3 -轻度风险”.

5.2 各驱动要素对土壤盐碱化演进的驱动影响排序为地下水埋深>地下水矿化度>土壤含盐量>地表灌水量>土壤电导率>地表温度>年蒸发量>年降水量>植被覆盖度>土地利用类型>人口密度>海拔>坡度,表明地下水埋深及地下水矿化度是研究区内土壤盐碱化进程加剧的主导因素.

5.3 2002~2018 年间,研究区土地盐碱化空间风险变化趋势呈现无风险区域和临界状态区域急剧减少,轻度风险面积显著增加,中度风险与高度风险面积增长速度相对缓慢等特点.灌区盐碱化空间风险演变模式剧烈程度排序为持续变化型>前期变化型>后期变化型>持续稳定型>反复变化型.土地盐碱化空间风险主体演变流向为“无风险—临界状态”以及“临界状态—轻度风险”.

5.4 研究区 2002~2018 年土壤盐碱化空间风险格局整体呈增高趋势,且呈现出明显的空间差异性,整体空间风险表征出从西北部向东南部弧射状升高的演化态势.高风险区主要集中分布在研究区东南部的封闭型水文地质单元,而西北部的开敞型水文地质单元以及中部地区盐碱化风险等级相对较低.

参考文献:

- [1] 邓铭江.中国西北“水三线”空间格局与水资源配置方略 [J]. 地理学报, 2018,73(7):1189-1203.
Deng M J. "Three Water Lines" strategy: Its spatial patterns and effect on water resources allocation in northwest China [J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(7):1189-1203.
- [2] 郭 勇,尹鑫卫,李 彦,等.农田-防护林-荒漠复合系统土壤水盐运移规律及耦合模型建立 [J]. 农业工程学报, 2019,35(17):87-101.
Guo Y, Yin X W, Li Y, et al. Soil water and salt dynamics and its coupling model at cropland-treebelt-desert compound system [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(17):87-101
- [3] 杨劲松.中国盐渍土研究的发展历程与展望 [J]. 土壤学报, 2008, 45(5):837-845.
Yang J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008,45(5):837-845.
- [4] 张 帅,董会忠,曾文霞.土地生态系统脆弱性时空演化特征及影响因素—以黄河三角洲高效生态经济区为例 [J]. 中国环境科学, 2019,39(4):1696-1704.
Zhang S, Dong H Z, Zeng W X. The time-space evolution characteristics of the vulnerability of land ecosystems and influencing factors: A case study of the Yellow River Delta Efficiency Eco-economic Zone [J]. China Environmental Science, 2019,39(4):1696-1704.
- [5] 徐存东.景电灌区水盐运移对局域水土资源影响研究 [D]. 兰州:兰州大学, 2010.
Xu C D. Research on the effect of local water and soil environment caused by water-salt transportation in Jing-Dian Irrigation district [D]. Lanzhou University, 2010.
- [6] 王全九,邓铭江,宁松瑞,等.农田水盐调控现实与面临问题 [J]. 水科学进展, 2021,32(1):139-147.
Wang Q J, Deng M J, Ning S R, et al. Reality and problems of controlling soil water and salt in farmland [J]. Advances In Water Science, 2021,32(1):139-147.
- [7] 胡宏昌,田富强,张 治,等.干旱区膜下滴灌农田土壤盐分非生育期淋洗和多年动态 [J]. 水利学报, 2015,46(9):1037-1046.
Hu H C, Tian F Q, Zhang Z, et al. Soil salt leaching in non-growth period and salinity dynamics under mulched drip irrigation in arid area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015,46(9):1037-1046.
- [8] 毛海涛,黄庆豪,吴恒滨.干旱区农田不同类型土壤盐碱化发生规律 [J]. 农业工程学报, 2016,32(S1):112-117.
Mao H T, Huang Q H, Wu H B. Soil salinization features in arid areas farmland [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016,32(S1):112-117.
- [9] 杨厚翔,雷国平,徐 秋,等.基于危险度与风险格局的土地盐碱化监测区优先级评价 [J]. 农业工程学报, 2019,35(7):238-246.
Yang H X, Lei G P, Xu Q, et al. Priority evaluation of land salinization monitoring area based on danger degree and risk pattern [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(7):238-246.
- [10] Chang X, Gao Z, Wang S, et al. Modelling long-term soil salinity dynamics using SaltMod in Hetao Irrigation District, China [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019,156:447-458.
- [11] Castrignanò A, Buttafuoco G, Puddu R. Multi-scale assessment of the risk of soil salinization in an area of south-eastern Sardinia (Italy) [J]. Precision Agriculture, 2008,9(1/2):17-31.
- [12] Buchanan S, Huang J, Triantafyllis J. Salinity risk assessment using fuzzy multiple criteria evaluation [J]. Soil Use and Management, 2017,33(2):216-232.
- [13] 李自珍,李维德,石洪华,等.生态风险灰色评价模型及其在绿洲盐渍化农田生态系统中的应用 [J]. 中国沙漠, 2002,22(6):617-622.
Li Z Z, Li W D, Shi H H, et al. Gray model for ecological risk assessment and its application in salinization oasis agroecosystem [J]. Journal of Desert Research, 2002,22(6):617-622.
- [14] 姚荣江,杨劲松,陈小兵,等.苏北海涂典型围垦区土壤盐渍化风险评估研究 [J]. 中国生态农业学报, 2010,18(5):1000-1006.
Yao R J, Yang J S, Chen X B, et al. Evaluating soil salinization risk in

- typical coastal reclaimed regions in North Jiangsu Province [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010,18(5):1000-1006.
- [15] 李冬顺,杨劲松,姚荣江.生态风险分析用于苏北滩涂土壤盐渍化风险评估研究 [J]. 土壤学报, 2010,47(5):857-864.
- Li D S, Yang J S, Yao R J, et al. Application of ecological risk analysis to soil salinization risk assessment of coastal tidal flat in north Jiangsu province [J]. Acta Pedologica Sinica, 2010,47(5):857-864.
- [16] 依力亚斯江·努尔麦麦提,师庆东,阿不都拉·阿不力孜,等.灰色评估模型定量评价于田绿洲土壤盐渍化风险 [J]. 农业工程学报, 2019,35(8):176-184.
- Ilyas Nurmemet, Shi Q D, Abdulla Abliz, et al. Quantitative evaluation of soil salinization risk in Keriya Oasis based on grey evaluation model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(8):176-184
- [17] 刘华新,苑一鸣,周 沛,等.基于融合理论的风电机组状态评价正态云模型 [J]. 太阳能学报, 2018,39(10):2891-2900.
- Liu H X, Yuan Y M, Zhou P, et al. Normal cloud model for condition evaluation of wind turbines based on fusion theory [J]. Acta Energiæ Solaris Sinice, 2018,39(10):2891-2900.
- [18] 冶运涛,梁犁丽,曹 引,等.基于可变集和云模型的河湖水系连通方案优选决策方法 [J]. 农业机械学报, 2018,49(12):211-225,313.
- Ye Y T, Liang L L, Cao Y, et al. Optimal decision method for interconnected river system network schemes based on variable sets and cloud model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(12):211-225,313.
- [19] Wang F, Zhong D H, Yan Y L, et al. Rockfill dam compaction quality evaluation based on cloud-fuzzy model [J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2018,19(4):289-303.
- [20] 徐存东,程 慧,王 燕,等.灌区土壤盐渍化程度云理论改进多级模糊评价模型 [J]. 农业工程学报, 2017,33(24):88-95.
- Xu C D, Cheng H, Wang Y, et al. Improved multi-level fuzzy evaluation model based on cloud theory for evaluation of soil salinization degree [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(24):88-95.
- [21] 王荣荣.景电灌区土壤盐渍化特征及水盐运移规律研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2017.
- Wang R R. Characteristics of soil salinization and law of water and salt transport in Jingdian Irrigation Area [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2017.
- [22] 汪培庄,李洪兴.模糊系统理论与模糊计算机 [M]. 北京:科学出版社, 1996.
- Wang P Z, Li H X. Fuzzy system theory and fuzzy computer [M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [23] 李 佳,段 平,吕海洋,等.基于改进的逐点交叉验证的 RBF 形态参数优化方法及其空间插值实验 [J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32(3):39-42,48.
- Li J, Duan P, Lv H Y, et al. YRBF shape parameter optimization approach based on ilooceve and its spatial interpolation experiments [J]. Geography and Geo-Information Science, 2016,32(3):39-42,48.
- [24] 马宏宏,余 涛,杨忠芳,等.典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价 [J]. 环境科学, 2018,39(10):4684-4693.
- Ma H H, Yu T, Yang Z F, et al. Spatial interpolation methods and pollution assessment of heavy metals of soil in typical areas [J]. Environmental Science, 2018,39(10):4684-4693.
- [25] 彭继达,张春桂.基于高分一号遥感影像的植被覆盖遥感监测——以厦门市为例 [J]. 国土资源遥感, 2019,31(4):137-142.
- Peng J D, Zhang C G. Remote sensing monitoring of vegetation coverage by GF-1 Satellite: A case study of Xiamen City [J]. Remote Sensing for Land & Resource, 2019,31(4):137-142.
- [26] 胡德勇,乔 琨,王兴玲,等.单窗算法结合 Landsat8 热红外数据反演地表温度 [J]. 遥感学报, 2015,19(6):964-976.
- Hu D Y, Qiao K, Wang X L, et al. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared data using mono-window algorithm [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2015,19(6):964-976.
- [27] 江 淼,张显峰,孙 权,等.不同分辨率影像反演植被覆盖度的参数确定与尺度效应分析 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011,36(3): 311-315.
- Jiang M, Zhang X F, et al. Vegetation coverage retrieval scale effect analysis using multi sensor data [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011,36(3):311-315.
- [28] 傅鹤林,黄 震,黄宏伟,等.基于云理论的隧道结构健康诊断方法 [J]. 工程科学学报, 2017,39(5):794-801.
- Fu H L, Huang Z, Huang H W, et al. Health diagnosis method of shield tunnel structure based on theory [J]. Chinese Journal of Engineering, 2017,39(5):794-801.
- [29] 魏巍贤,冯 佳.多目标权系数的组合赋值方法研究 [J]. 系统工程与电子技术, 1998,(2):14-16.
- Wei W X, Feng J. Study on multiobjective weights Combination Assigning Method [J]. Systems Engineering and Electronics, 1998,(2): 14-16.
- [30] Wang J Q, Peng L, Zhang H Y, et al. Method of multi-criteria group decision-making based on cloud aggregation operators with linguistic information [J]. Information ences, 2014,274:177-191.
- [31] 张晓娟,周启刚,王兆林,等.基于 MCE-CA-Markov 的三峡库区土地利用演变模拟及预测 [J]. 农业工程学报, 2017,33(19):268-277.
- Zhang X J, Zhou Q G, Wang Z L, et al. Simulation and prediction of land use change in Three Gorges Reservoir Area based on MCE-CA-Markov [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(19):268-277.
- [32] 龚文峰,袁 力,范文义.基于 CA-Markov 的哈尔滨市土地利用变化及预测 [J]. 农业工程学报, 2012,28(14):216-222.
- Gong W F, Yuan L, Fan W Y. Dynamic change and prediction of land use in Harbin city based on CA-Markov model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012,28(14):216-222.
- [33] 王友生,余新晓,贺康宁,等.基于 CA-Markov 模型的渭河流域土地利用变化动态模拟 [J]. 农业工程学报, 2011,27(12):330-336,442.
- Wang Y S, Yu X X, He K N, et al. Dynamic simulation of land use change in Jihe watershed based on CA-Markov model [J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(12):330-336,442.

作者简介: 刘子金(1996-),男,甘肃白银人,华北水利水电大学硕士研究生,主要从事水利工程环境效应评估与灌区水盐调控方面的研究.发表论文 8 篇.