

基于遥感与可拓层次分析的水盐时空分异特征研究

王环波^{1,2} 杨鹏年^{1,3} 刘全明⁴ 杜明亮^{1,3} 彭亮^{1,3}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利水电学校, 乌鲁木齐 800013;

3. 新疆水利工程安全与灾害防治重点实验室, 乌鲁木齐 830052; 4. 巴音郭楞蒙古自治州水利综合服务中心, 库尔勒 841000)

摘要: 为深入了解干旱绿洲规模化节水治盐后区域尺度水盐时空分异特征, 有效控制盐渍化, 以焉耆盆地 of 研究区, 选取 2000、2005、2015、2020 年长时序 LandSat 遥感影像和地表含盐量、土壤含盐量、地表灌水量、地下水埋深及矿化度等指标, 借助 ENVI 和 ArcGIS 软件, 获取各指标的时空分布栅格图件, 将各栅格图件进行标准化处理, 按照可拓层次分析法权重进行空间嵌套并叠加, 定量化揭示区域尺度水盐时空分异进程。结果表明: 研究区盐渍化经历了 2000—2005 年扩张、2005—2015 年显著减少、2015—2020 年趋于稳定 3 个阶段, 从发展趋势看, 研究区盐渍化处于减轻并趋于稳定态势; 盐渍化严重的区域主要是博斯腾湖滨; 由可拓层次分析法得出各指标因子权重由大到小依次为: 地下水埋深(0.325)、地下水矿化度(0.282)、土壤含盐量(0.198)、地表含盐量(0.184)、地表灌水量(0.031), 可见, 地下水埋深和矿化度是影响区域水盐时空分异的主要驱动因素。研究为焉耆盆地控制盐渍化提供理论依据, 同时为定量化揭示区域尺度水盐时空分异进程提供一种新的方法。

关键词: 水盐时空分异; 盐渍化; 遥感; 可拓层次分析法; 焉耆盆地

中图分类号: S156.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)06-0370-10 **OSID:** 

Spatial-temporal Distribution of Water and Salt Based on Remote Sensing and Extension Analytic Hierarchy Process

WANG Huanbo^{1,2} YANG Pengnian^{1,3} LIU Quanming⁴ DU Mingliang^{1,3} PENG Liang^{1,3}

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

2. Xinjiang Water Conservancy and Hydropower School, Urumqi 800013, China

3. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, China

4. Water Conservancy Comprehensive Service Center of Bayingol Mongolian Autonomous Prefecture, Korla 841000, China)

Abstract: The key to effectively control salinization is to deeply understand the spatial-temporal distribution of water and salt at the regional scale after large-scale water-saving and salt control in arid oasis. Yanqi Basin in northwest Xinjiang of China was selected as the research area. LandSat remote sensing and field sampling water and salt data were used to analyze the water and salt migration and accumulation process after large-scale water-saving under changing environment. A total of five indicators, including surface salinity, soil salinity, groundwater salinity, surface irrigation, and groundwater depth were selected in 2000, 2005, 2015 and 2020. The weights of each indicator factor were determined by extension analytic hierarchy process. With the help of ENVI and ArcGIS software, spatial distribution raster maps of each indicator factor were obtained, and each raster map was standardized, the space was nested and superimposed according to the weight of each index factor, so as to get the spatial-temporal distribution of water and salt in the regional scale. The results showed that the salinization in the study area experienced three stages: expansion in 2000—2005, shrinkage in 2005—2015 and stabilization in 2015—2020. The areas with serious salinization were mainly along Bostan Lake, especially Bohu County in the west and Heshuo County in the north of Bostan Lake. Overall, the area of mild saline land was the largest, accounting for 6.17% ~ 11.39%, followed by moderate saline land, accounting for 3.08% ~ 10.65%, the area of heavy saline land was the smallest, accounting for

收稿日期: 2022-03-14 修回日期: 2022-04-10
基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2020D01A54)和国家自然科学基金项目(51369030)
作者简介: 王环波(1982—),男,博士生,新疆水利水电学校高级讲师,主要从事农业水土资源利用与保护研究,E-mail: wanghuanbo2021@163.com
通信作者: 彭亮(1978—),男,副教授,主要从事干旱区水文过程与水资源利用研究,E-mail: pliang_xjau@qq.com

0.56% ~ 1.10% during 2000—2020; the weight of each factor affecting the spatial-temporal differentiation process of water and salt on a regional scale was ranked as follows: groundwater depth (0.325), groundwater salinity (0.282), soil salinity (0.198), surface salinity (0.184), and surface irrigation (0.031). Groundwater depth and groundwater salinity were the main driving factors affecting the spatial-temporal differentiation of water and salt at regional scales. From the interpreted salinization development trend, the salinization in the study area was alleviated and tended to be stable.

Key words: spatial-temporal distribution of water and salt; salinization; remote sensing; extension analytic hierarchy process; Yanqi Basin

0 引言

土壤盐渍化是世界范围内最紧迫的环境问题之一,已成为世界性的生态问题,受到世界各国的广泛关注^[1-2]。根据中国第二次土壤普查数据,中国盐渍土面积约 $3.6 \times 10^7 \text{ hm}^2$,其中西北干旱和半干旱区盐渍土面积约占 70%^[3],盐碱化对环境健康和农业的可持续性产生不利影响。因此,深入了解这些地区土壤盐渍化及其相关因子的时空特征,是有效控制这些地区盐渍化的必要条件^[4],可为灌区的水盐调控与盐渍化治理提供决策依据。

水盐运移研究始于 19 世纪中期,水盐平衡理论和 Darcy 定律^[5]构成了现代土壤水盐运移的基本理论和框架。土壤盐分空间变异的理论基础是地质统计学^[6],其最初都是基于水盐运移的微观机理研究^[7-10],直到 20 世纪 70 年代,CAMPBELL^[11]提出地统计学可以很好地解决土壤盐分的空间变异性问题以来,水盐运移由理论研究转为较复杂的田间尺度,并建立了土壤水盐运移的两域模型^[12-13]。随着土壤水盐运移机理的深入研究,水盐运移平衡理论与数值模拟应用到水盐动态预测使土壤水盐运移研究进入到一个新阶段^[14-20]。区域水盐运移模型^[21-22]和地理信息系统的发展,使得水盐运移的认识更加深入,由定性、预测转向量化^[23-26]。遥感和电磁感应技术应用使得大区域土壤水盐空间变异性监测和评价更便捷,在全球和区域土壤水盐监测与制图中发挥着基础性作用^[27],高光谱水盐监测^[28]和机器学习^[29]等是目前发展主流,并逐渐由监测、反演^[30]倾向量化研究。上述的研究基本是基于机理、田间尺度以及区域定性监测、评价和反演,且大多基于单一的水盐指标进行时空变化研究,然而区域尺度的次生盐渍化多是人类活动等诸多因素综合作用导致,涉及地表水、地下水、土壤等多因素相互作用,因此在探讨水盐分异时,不能只采用单一方法,必须采用多种方法综合研究。可拓学是用于解决矛盾问题的新学科,提供了一种处理问题的新方法。其通过建立物元、事元和关系元,并将事物、特征及数据作为 3 要素,来描述客观事物^[31],因

为层次分析法的判断矩阵标度值确定存在模糊性,研究人员引入了区间数判断矩阵,并将可拓学理论用来处理区间数判断矩阵,从而产生了可拓层次分析法^[32-33]。其成为广泛应用于研究描述事物性质变换过程的定量化工具。将可拓层次分析法与遥感和地理信息系统相结合,实现量化描述水盐时空变化特征的研究鲜有报道。

本文以焉耆盆地研究对象,将影响次生盐渍化的地表含盐量、土壤含盐量、地表灌水量、地下水埋深、地下水矿化度等多个指标结合可拓层次分析法与遥感解译,运用 ENVI 和 ArcGIS 软件,将影响盐渍化的诸多因素标准化处理,量化揭示区域尺度水盐时空分异进程,为焉耆盆地控制盐渍化提供重要理论依据,并为量化揭示区域尺度水盐时空分异进程提供一种新的方法。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

本文研究区域是中国西北干旱区典型的荒漠盆地绿洲——焉耆盆地,位于东经 $85^{\circ}30' \sim 87^{\circ}50'$,北纬 $41^{\circ}40' \sim 42^{\circ}30'$,是一个近乎封闭的山间盆地,东西长约 170 km,南北宽约 85 km,总面积约 $1.26 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中绿洲面积达 $8.79 \times 10^3 \text{ km}^2$,包括焉耆县、博湖县、和静县、和硕县 4 个县(图 1)。我国西部最大的淡水水体之一——博斯腾湖位于盆地东南部,海拔 1 049 m,是盆地内较低区域,开放水面约 $1\,000 \text{ km}^2$ 。研究区具有典型的干旱大陆性气候特征,4—9 月蒸发皿蒸发量占全年蒸发量的 81%。1990—2020 年的年平均降水量和蒸发量分别为 90.9 mm 和 1 969 mm(来自焉耆气象站)。焉耆盆地灌溉面积由 20 世纪 50 年代的 $6.7 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 迅速扩大到 20 世纪末的 $1.292 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ^[34],高强度的人类活动,导致了区域大面积的水盐重组、运移,次生盐渍化加剧,严重影响了农业生产和当地经济发展。21 世纪以来,焉耆盆地灌区实施大规模覆膜滴灌改造工程^[35]和地下水开发利用等治盐措施。目前,节水治盐项目已实施了 20 多年,长期人为干预下的焉耆盆地水盐时空分异特征还没有进行深入研究。

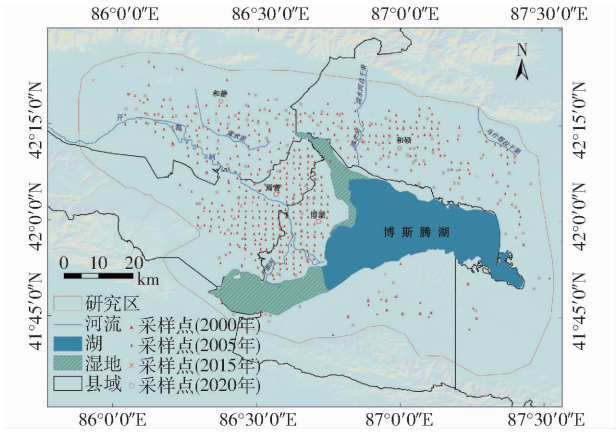


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location map of study area

1.2 研究数据

1.2.1 典型年选择

为了更好地反映焉耆盆地灌区水盐时空分异特征,结合研究区水土开发实际,以 2005 年灌区实施规模化节水为时间节点,前后共 20 年为研究时段,选取初步开始治理盐渍化的 2000 年、实施规模化覆膜滴灌节水的 2005 年、最严格的水资源管理制度落实 5 年的 2015 年、现状 2020 年 4 个典型年,以上述 4 个典型年收集地表含盐量、土壤含盐量、地下水矿化度、地表灌水量、地下水埋深、遥感影像数据等相关的基础数据。

1.2.2 数据采集与处理

2000 年 4 月 18—28 日进行了野外调查,共采集浅层地下埋深与水样 189 个,土壤样品 476 点位;2005 年 4 月 20—28 日,共采集浅层地下水埋深与水样 90 个,土壤样品 578 点位;2015 年 4 月 20—29 日,共采集浅层地下水埋深与水样 145 个,土壤样品 142 点位;2020 年 4 月 14—29 日,共采集浅层地下水埋深与水样 92 个,土壤样品 148 点位。

采样过程遵循以下原则:①尽可能多地选择历史采样点,便于比较。②水样、土壤样和地下水埋深在同一采样点采集。③根据车辆可达性设计采样过程的调查路线。④用螺旋钻取土壤,用水位计测量潜水埋深。⑤同时使用便携式 GPS(精度 5 m)记录地理位置。历史采样点布局如图 1 所示。

土壤盐分含量通过在实验室中测量饱和土壤提取物的电导率(EC, dS/m) 来表征^[36]。样品完全风干,通过 2 mm 筛去除非土物质。在土壤、水质量比为 1:5 的充足土壤渗滤液的基础上,使用数字多参数测量仪(DDS-307A 型) 在室温(25℃) 下测定土壤电导率,取平均数据作为最终值^[37]。采用便携式水质检测仪(DDBJ-350F 型,测定温度、溶解性总固体(TDS) 含量、pH 值) 进行 TDS 现场检测,选取

部分样品送有检测资质实验室进行检测用于结果比对。

水资源开发利用数据来源于巴音郭楞蒙古自治州水资源公报。

1.2.3 遥感影像数据

遥感影像是通过地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>) 获取,按照对应采样时段分别选取 2000、2005 年的 LandSat5 TM 遥感影像和 2015、2020 年的 LandSat8 OLI 遥感影像,将所获取的 4 期影像进行辐射定标、大气校正、几何校正、图像配准、影像融合(解决分辨率不同的问题)、裁剪和影像分类等预处理。预处理目的是利于后期盐碱地斑块信息的解译与提取。依据土壤农化分析^[38]将典型年实地采样表层土壤化验数据按照盐渍化土壤(EC 为 2~4 dS/m)、中度盐土(EC 为 4~8 dS/m)、重盐土(EC 为 8~16 dS/m)、极重盐土(EC 大于 16 dS/m) 4 个等级分类,并按照 GPS 定位坐标将采样点坐标导入 ENVI 5.3 中,确定各个等级所对应的像元位置,结合目视解译将相似像元运用 ROI 工具选中训练样本,进行样本可分离度检验后,基于训练样本,运用支持向量机法对研究区盐渍化进行监督分类,通过总精度和 Kappa 系数进行精度验证,采用地表盐度插值分布图进行趋势验证,最终划分为水域、湿地、植被(包含耕地、林草)、盐渍化土壤、中度盐土、重盐土、极重盐土和其他(未利用地、城居工矿等) 共 8 类。

1.2.4 指标权重确定

为了更好地揭示灌区水盐时空分异进程,考虑到数据的科学、完备、可获取性的原则,结合前人研究成果与研究区实际,以灌区水盐时空分异特征为目标,构建焉耆盆地水盐时空分异特征可拓层次结构图(图 2),将研究区的水盐时空分异(目标层) 分解为盐分运动和水分运动两个元素构成水盐分异的准则层,准则层对下一层(指标层) 起支配作用,从上至下的支配关系形成了一个递阶层次。聘请该领域的学者、灌区管理人员、技术员等,依据已构建的层次结构图,分别对目标层、指标层进行两两重要性判断,共计 7 位学者进行打分,结果以少数服从多数的原则进行集值统计^[39],使权重计算更加符合实际。

1.3 研究方法

在收集研究数据的基础上,运用可拓层次分析法首先确定各指标权重,运用正态 QQ 图分析工具对各时期地表含盐量、土壤含盐量、地下水埋深、地下水矿化度、地表灌水量等数据进行正态检验,并选定最优插值方法。用 ENVI 5.3 进行遥感解译、监督分类,将采样点坐标导入 ENVI 5.3 中,确定各个等

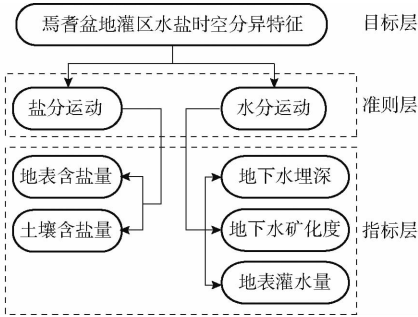


图 2 可拓层次结构图

Fig. 2 Chart of extension hierarchy structure

级所对应的像元位置,结合目视解译将相似像元运用 ROI 工具选中训练样本,进行样本可分离度检验后,基于训练样本,运用支持向量机(SVM)对研究区进行监督分类。在 ArcGIS 10.6 软件中用空间插值法,获取各指标的空间分布栅格图件,运用重分类将各栅格图件进行标准化处理。再用 ArcGIS 10.6 软件中的 Spatial Analyst 工具进行空间插值分析获得典型年的水盐分异时空分布特征图,最后将各指标分别按照一定的分类标准划分为 1~10 共 10 类标准化处理,再分别乘以影响盐渍化的各指标权重进行空间嵌套叠加分析,以获取灌区区域尺度的水盐当量^[40]时空分异进程。

2 结果与分析

2.1 主要指标权重

根据调查问卷和专家打分结果,运用可拓层次分析法计算得出影响土壤盐渍化主要指标权重,地下水埋深为 0.325、地下水矿化度为 0.282、土壤含盐量为 0.198、地表含盐量为 0.184、地表灌水量为

0.031,由此可见地下水埋深是驱动区域尺度土壤盐渍化的主要指标,其次是地下水矿化度、土壤含盐量、地表含盐量和地表灌水量,主要指标中地表灌水量影响最小。这主要是由于西北干旱区降雨稀少蒸发强烈,地下水是盐分运移的主要载体,地下水埋深直接影响盐分的空间分布。另外除土壤母质本身外,地下水埋深和矿化度是土壤盐分的主要来源,对土壤盐渍化的影响进程贡献最大。土壤含盐量和地表含盐量是衡量土壤盐渍化的主要表征指标,直接反映了区域土壤盐渍化程度,属于盐渍化进程的时空特征响应,对土壤盐渍化进程的影响相对减弱,地表灌水量主要影响着耕作层深度,即微观尺度盐分再分布过程,因此对区域尺度水盐运移的影响最弱。该研究结果与邓宝山等^[25]、董新光等^[34]、徐存东等^[40]研究得出的结论一致,能够准确反映出研究区土壤盐渍化实际情况。

2.2 主要指标时空分布特征

2.2.1 地表含盐量

依据实地采样数据,对典型年遥感数据进行监督分类,总精度与 Kappa 系数见表 1,精度均在 90% 以上,分类结果的准确性较高^[41-42],研究区各时期盐渍化分类面积见表 2,各时期地表盐分遥感影像分类结果见图 3。

表 1 支持向量机分类精度

Tab. 1 Support vector machine classification accuracy

参数	2000 年	2005 年	2015 年	2020 年
总精度/%	97.78	99.84	99.42	99.63
Kappa 系数	0.96	0.98	0.97	0.98

表 2 研究区内各时期土地盐渍化分类面积

Tab. 2 Classified area of land salinization in each period in study area

土地分类	2000 年		2005 年		2015 年		2020 年	
	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%
盐渍化土壤	542.81	6.17	536.50	6.10	659.79	7.50	518.72	5.89
中度盐土	270.71	3.08	157.34	1.79	342.65	3.89	383.39	4.36
重盐土	666.17	7.57	711.87	8.09	158.83	1.80	309.11	3.51
极重盐土	48.92	0.56	96.95	1.10	54.86	0.62	96.94	1.10
植被	3 176.56	36.10	3 273.34	37.20	3 461.41	39.34	3 457.27	39.29
水体	1 057.93	12.02	1 219.31	13.86	986.24	11.21	1 061.29	12.06
湿地	244.32	2.78	234.86	2.67	585.20	6.65	516.10	5.86
其他	2 792.30	31.73	2 569.56	29.20	2 550.74	28.99	2 456.90	27.92

由图 3 和表 2 可知,2000 年盆地盐渍化的分布较为稀疏,主要分布在盆地西北部 and 东部,大部分以轻度盐渍化为主,2000—2005 年间,盐渍化现象有所增加,其中中度盐渍化面积斑块有所增加,盆地周边尤其是博斯腾湖的东侧和北侧极重盐土面积很明显;2005—2015 年间盆地盐渍化面积大幅萎缩,重

盐土和极重盐土面积明显减少,只有少部分围绕在博斯腾湖的北侧和东侧;2015—2020 年间中度盐土和重盐土面积略有所增加,区域内盐渍化整体趋于稳定态势。

2.2.2 土壤含盐量

本研究土壤盐分通过在实验室中测量饱和土

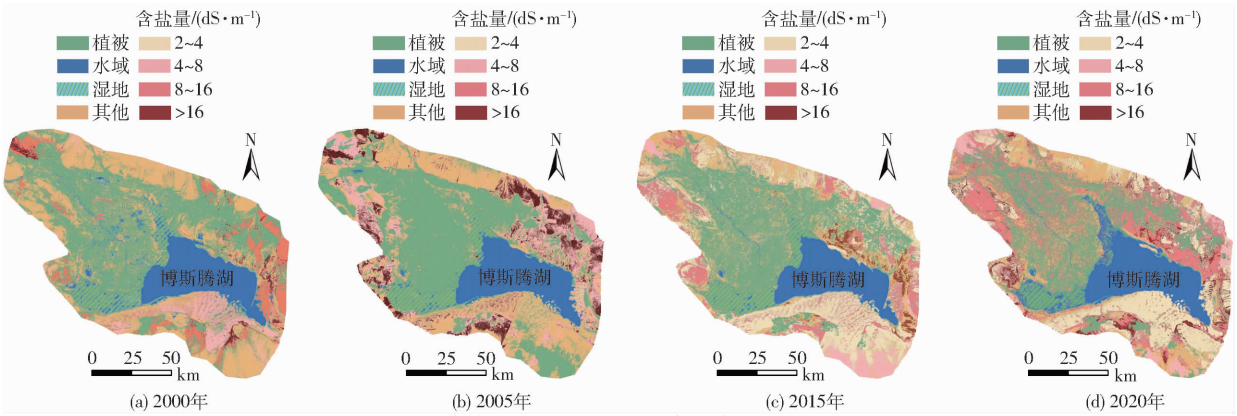


图 3 各时期地表盐分遥感影像分类结果

Fig. 3 Classification results of remote sensing images of surface salt in each period

壤提取物的电导率 (EC, dS/m) 来表征,图 4 为各时期土壤含盐量分布图。2000—2005 年间,整个盆地的盐渍化呈略微增加的趋势,从图 4 可以明显看出,2005 年博斯腾湖西北侧湿地上方的土壤含盐量 4 ~ 8 dS/m 的区域明显萎缩,然而博斯腾湖南侧和北侧环湖土壤含盐量 8 ~ 16 dS/m 和大于 16 dS/m 的区域有所扩张。这主要是由于 2003 年是丰水年,博斯腾湖水位达到历史高水位 (近 1 049 m),之后开始持续下降到 2014 年的 1 045. 18 m 后开始回升,湖滨周围的地下水位先上升后下降,而土壤盐分变化与地下水埋深动态变化呈显著负相关,却非同步升降,当地下水位开始

回落,土壤因蒸发开始积盐,即土壤因蒸发而积盐的过程发生在地下水位回落的过程中,直到水位降至临界深度以下^[34];2005—2015 年间盆地内盐渍化区域呈大幅减少趋势,除了和静县内部队农场区域盐渍化略有增加,主要是因耕地弃荒,没有进行耕种洗盐,加之这一区域地势较低,又属于潜水溢出带,强烈的蒸发作用使得这一区域土壤积盐有所增加,盆地内其他区域都呈明显萎缩状态。2015—2020 年间盆地内盐渍化变化不明显,处于相对稳定状态,主要是这一时期政府部门严格控制开荒和开采地下水,并严格实施最严格水资源管理制度“三条红线”,人类活动达到相对稳定状态。

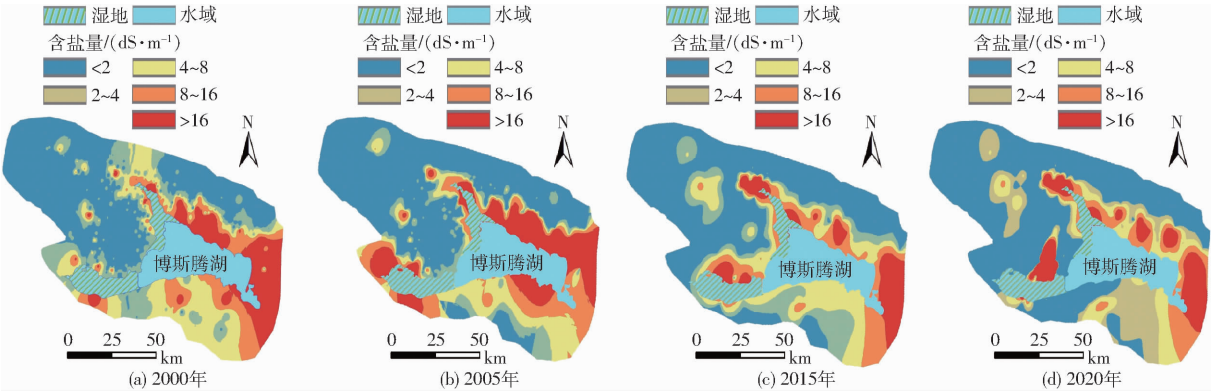


图 4 各时期土壤含盐量分布图

Fig. 4 Spatial interpolation results of soil salinity in each period

总体看,研究区盐渍化经历了 2000—2005 年扩张、2005—2015 年显著减少、2015—2020 年趋于稳定 3 个阶段,研究区的土壤含盐量表现为环湖滨高的分布特征,这主要是由于研究区博斯腾湖地势较低,整个研究区是相对封闭型水文地质单元,加之湖区又是灌区的地下水排泄区,从而导致了环湖地下水位相对较高,土壤盐渍化现象明显。

2. 2. 3 地下水埋深

由图 5 可知,2000 年盆地内大部分区域地下水埋深在 1 ~ 3 m 和 5 ~ 10 m;2005 年地下水埋深逐渐

减小,以博斯腾湖为中心向外,湖滨 < 1 m、1 ~ 2 m、2 ~ 3 m、3 ~ 5 m、5 ~ 10 m 的区域均有所增加,并且埋深 10 ~ 20 m 的区域大幅减少,大于 50 m 区域消失,这主要是由于 2000—2005 年间人类活动大量开垦荒地并进行地面大水漫灌,使得盆地内地下水位不断升高;2005—2020 年间地下水埋深逐年增大,这主要是由于 2005 年大规模实施覆膜滴灌节水措施,原有的灌溉水量可以灌溉更多的土地,这期间盆地内耕地面积不断扩大,加之大量开采地下水灌溉,使得地下水逐年下降,到 2020 年盆地内大部分区域埋深

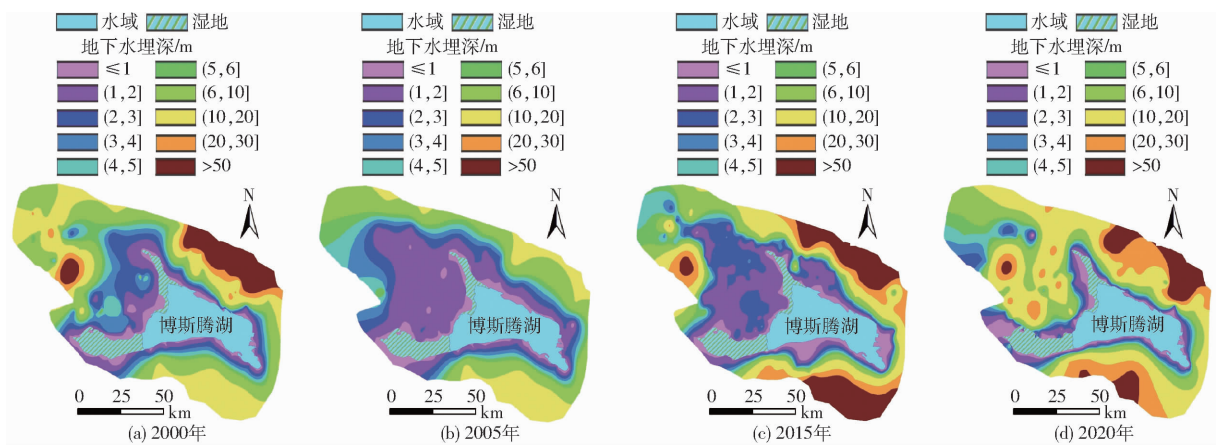


图 5 各时期地下水埋深分布图

Fig. 5 Spatial interpolation results of groundwater depth in each period

在 5 ~ 10 m、10 ~ 20 m, 博斯腾湖北部的和硕县和南部的博湖县博湖乡地下水埋深主要以大于 20 m 的区域为主; 另外盆地西部因供水开采, 出现大于 50 m 埋深的区域。

2.2.4 地下水矿化度

图 6 为各时期地下水矿化度分布图, 2000—2020 年间地下水矿化度总体呈减小趋势。2000—2005 年期间盆地内以博斯腾湖为中心向外呈梯度递减, 环湖滨区域基本是矿化度大于 5 000 mg/L 和

3 000 ~ 5 000 mg/L 区域, 2005 年之后大于 5 000 mg/L 的区域逐渐缩减至基本消失, 2015 年后盆地内以博斯腾湖为界西部和北部大部分区域为矿化度小于 1 000 mg/L 和 1 000 ~ 2 000 mg/L 的区域, 东部和南部基本为 1 000 ~ 2 000 mg/L 和 2 000 ~ 3 000 mg/L 区域。总体上地下水矿化度呈现不断降低且趋于稳定, 并且是西北低东南高的趋势, 主要原因是盆地地势西北高东南低, 湖区是盆地内低点, 呈现汇水聚盐的特点。

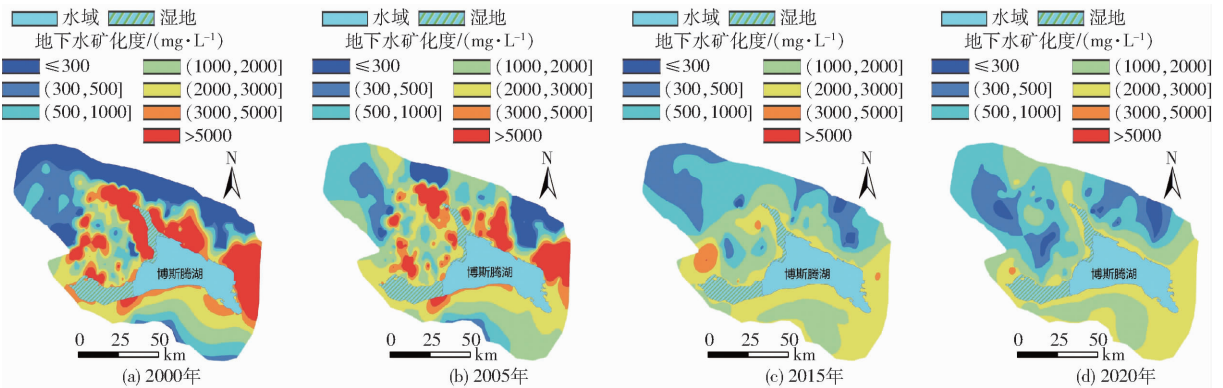


图 6 各时期地下水矿化度分布图

Fig. 6 Spatial interpolation results of groundwater salinity in each period

2.2.5 地表灌水量

由图 7 可知, 2000—2005 年期间整个灌区灌水量有所减少并呈逐渐均匀态势, 这主要是由于陆续实施了覆膜滴灌节水; 2005—2015 年间, 单位面积灌水量分布呈大幅减少趋势, 主要原因是规模化高效节水实施后, 节约出的水量可以用于灌溉更多的耕地, 这一时期耕地面积不断扩大; 2015—2020 年间, 最严格水资源管理制度“三条红线”落实, 盆地内进行了退地减水和轮耕制度, 并实施了县域间的水权置换等措施调控地表水和地下水的利用措施, 既满足灌溉均匀度又合理地解决地区水资源不均的状况。总体看盆地内, 以博斯腾湖为界, 西部和北部灌水量多, 这主要是受地形和土地类型影响, 盆地内

的大部分耕地在湖西部和北部区域地表灌水量多, 湖南部和东部只有少部分耕地并且土地类型主要以沙滩、戈壁为主, 所以地表灌水量相对少。

2.3 研究区水盐时空叠加

由于影响焉耆盆地灌区水盐时空分异的指标量纲不同, 在进行叠加分析前, 将前期各指标的插值时空分布图在 ArcGIS 中按照 1 ~ 10 分类标准进行重分类, 以消除量纲影响。其中, 将地下水埋深由深到浅划分 (由浅到深分类后对新值取反), 其余地表含盐量、土壤含盐量、地下水矿化度、地表灌水量等各指标分别按照由小到大和由高到低划分; 然后根据各指标权重, 将各时期的插值分布图在栅格计算器中分别乘以各指标权重进行叠加计算, 结果如图 8 所示。

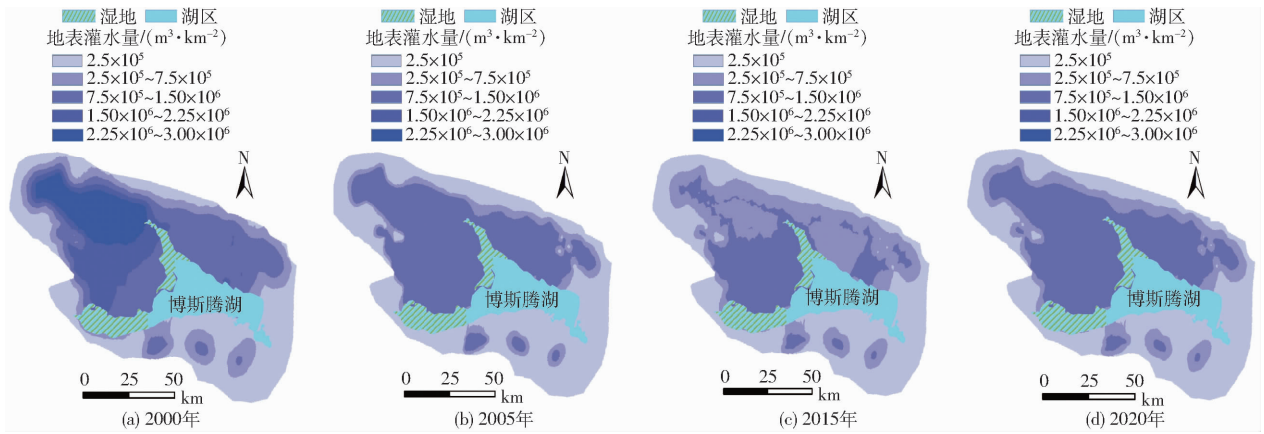


图7 各时期地表灌水量分布图

Fig. 7 Spatial interpolation results of irrigation water in each period

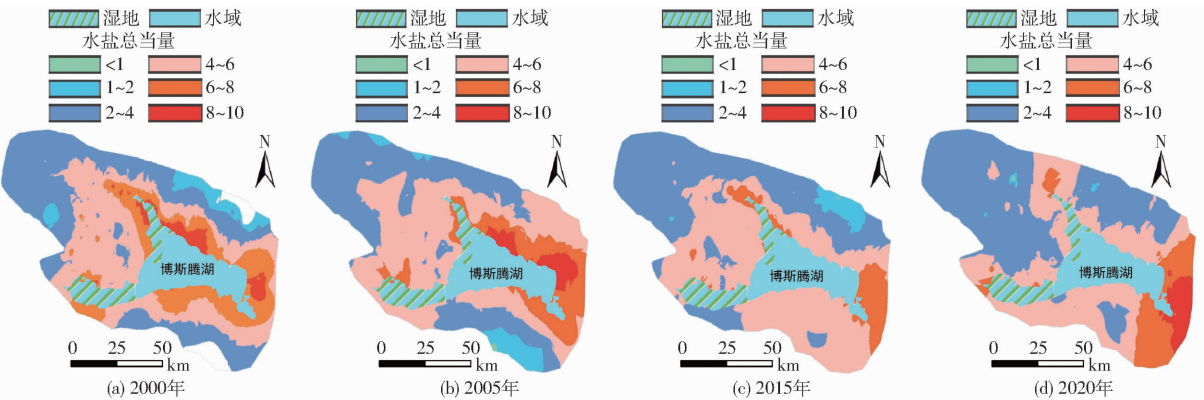


图8 各时期水盐总当量空间分布图

Fig. 8 Spatial distribution of total water-salt equivalent values in each period

由图8可知,2000—2020年间,盆地内水盐当量较高的区域主要是环博斯腾湖,其当量始终在4以上。其中,2000—2005年间,环湖区水盐当量4~6和6~8的区域随着时间的推移有所增加;2005—2015年间,水盐当量8~10的区域消失,水盐当量6~8的区域大幅缩减,水盐当量4~6的区域也呈现出萎缩态势,可见这一时间段内水盐当量明显减小;2015—2020年间,水盐当量2~4的区域明显增加,水盐当量4~6的区域也明显减小,但是在盆地东部又出现了水盐当量8~10的区域,水盐当量6~8的区域有所增加,这与这一时期的湖水水位抬升以及实施“三条红线”、地下水保护利用、退地减水等一系列的政策紧密相关,另外与盆地的地势密切相关,该区域是盆地内的低点且是博斯腾湖大湖的末端,水流循环不畅容易集盐,湖区东侧又是戈壁荒滩,蒸发强烈容易滋生盐渍化。总体上分析,研究区水盐当量呈西低东高,环博斯腾湖区高并且向外递减的格局。从时间发展的角度看呈现逐渐减小并趋于稳定的态势,东部呈略有增加的趋势。

3 讨论

本研究借助 ENVI、ArcGIS 软件,结合可托层次

分析法,利用遥感和实地采样等多元数据,量化揭示长期人为干预下的焉耆盆地水盐时空分异特征,焉耆盆地的盐渍化经历了规模化节水前的扩张、规模化节水治盐后的大幅萎缩和现状趋于稳定3个阶段。该研究填补了大区域尺度上,长期人为影响下的水盐时空分异进程。

本文研究表明地下水埋深是影响区域盐渍化的主要因素,人类活动是次生盐渍化直接驱动力。根据年鉴统计数据^[43-44],2000—2005年焉耆盆地人口增加了近3万人,为了发展经济和满足生产生活,农业扩张耕地面积增加了约1 000 hm²,大量引水灌溉,这一时期膜下滴灌还没有规模化推广,前期修建的水平排水工程没有充分发挥作用,原始的漫灌造成地下水位抬升,是造成盐渍化面积增加的主要原因。灌溉水经过土体渗滤作用后回流补充造成的短期内地下水位上升稀释了浅层地下水的矿化度。2005—2015年盐渍化面积大幅减少的主要原因:①2000年前后规模化修建的水平排水工程发挥了排盐作用。②灌区内大规模实施的覆膜滴灌节水工程,覆膜减少了地表蒸发量,节水灌溉由原来的浇地改为浇作物,灌溉定额减小的同时减少了灌溉回流入渗量。③鼓励开采地下水灌溉,控制地下水位防

止次生盐渍化,再加上冬灌或春灌洗盐措施使得盆地内的土壤处于持续脱盐状态。另外,长期大量开采地下水灌溉,地下水位呈现灌溉季节下降非灌溉时期回升,打破了地下水原有的平衡,扰动并加速了地下水流动与更新,因此地下水位总体上呈下降趋势,地下水矿化度总体上呈现减小并趋于稳定。2015—2020 年间,研究区内节水灌溉面积达 90% 以上,输水渠系防渗、水平排水等相关水利配套工程较为完善,同时这一时期实施最严格的水资源管理,地下水指标管控、退地减水等措施的实施,造成了地下水位有所回升,矿化度呈现相对稳定状态,中度盐土和重盐土面积略有所增加,盐渍化面积基本趋于稳定状态。本文大区域尺度研究的结果与杨强军等^[45]在焉耆盆地耕地土壤盐分时空变化特征研究结果一致,并与文献[30,46–49]在田间尺度上的研究结果一致,说明随膜下滴灌应用时间增长,盐分整体降低到一个新的平衡状态,仅在表层受灌水蒸发影响出现波动,田间剖面土壤盐分下降趋势明显并趋于稳定^[48]。总体来看,规模化覆膜滴灌节水加上有效的冬春灌洗盐,以及合理开发利用地下水等措施,可有效控制地下水位,还有助于加速地下水循环,降低矿化度,同时有效减少了潜水蒸发造成的土壤盐渍化。

本文仅选取了 2000、2005、2015、2020 年 4 个典型年的数据进行研究,数据存在不连续性,并且历史采样数量差异较大,不能全面表达水盐时空分异情

况。因此,未来的水盐分异特征研究需构建水盐实时监测系统和数据库,同时探讨基于深度学习的实时测报系统。

4 结论

(1)通过多指标叠加分析焉耆盆地绿洲灌区盐渍化可知,该地区盐渍化经历了 2000—2005 年扩张、2005—2015 年显著减少、2015—2020 年趋于稳定 3 个阶段,盐渍化严重的区域主要是博斯腾湖滨,尤其是博斯腾湖北侧的和硕县和西侧的博湖县,但盆地内盐渍化发展总体趋于减轻并处于相对稳定状态。

(2)可拓层次分析法确定的影响区域尺度水盐时空分异进程的各主要指标权重由大到小依次为:地下水埋深(0.325)、地下水矿化度(0.282)、土壤含盐量(0.198)、地表含盐量(0.184)、地表灌水量(0.031),表明地下水埋深和矿化度是影响干旱绿洲灌区区域盐渍化发展进程的主要因素。

(3)基于遥感数据并借助 ENVI、ArcGIS 平台,结合可拓层次分析法,实现了长序列水盐监测数据、遥感数据的整合处理与分析,提出了一种适合区域尺度水盐分异驱动指标进行耦合叠加的方法,实现了全方位展现区域水盐时空分异进程可视化,可为研究区域水盐时空分异发展态势提供有益借鉴,为焉耆盆地的水盐调控、预防土壤盐渍化提供理论依据。

参 考 文 献

[1] SAIFULLA H, DAHLAWI S, NAEEM A, et al. Biochar application for the remediation of salt affected soils: challenges and opportunities[J]. Science of the Total Environment, 2018, 625(1):320–335.

[2] SCUDIERO E, SKAGGS T H, CORWIN D L. Comparative regional-scale soil salinity assessment with near-ground apparent electrical conductivity and remote sensing canopy reflectance[J]. Ecological Indicators, 2016, 70:276–284.

[3] 刘广明,吴亚坤,杨劲松,等. 基于电磁感应技术的区域三维土壤盐分空间变异研究[J]. 农业机械学报,2013,44(7):78–82,66.

LIU Guangming, WU Yakun, YANG Jinsong, et al. Regional 3-D soil salt spatial variability based on electromagnetic induction technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering, 2013, 44(7):78–82,66. (in Chinese)

[4] LI Suyan, ZAI Penghui, SUN Xiangyang. Study on salinization characteristics and soil improvement of coastal soil[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(5):1069–1078.

[5] NARASIMHAN T N. Hydraulic characterization of aquifers, reservoir rocks, and soils: a history of ideas[J]. Water Resources Research, 1998, 34(1):33–46.

[6] KRIGE D G. A statistical approaches to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand[J]. Journal of the Chemical, 1951,52:119–139.

[7] IDOWU O A, LORENTZ S A, ANNANDALE J G, et al. Assessment of the impact of irrigation with low-quality mine water on virgin and rehabilitated soils in the upper Olifants Basin[J]. Mine Water and the Environment, 2008, 27(1):2–11.

[8] LAPIDUS L, AMUNDSON N R. Mathematics of adsorption in beds: Ⅲ. Radial flow[J]. The Journal of Physical and Colloid Chemistry, 1950, 54(6):821–829.

[9] NIELSEN D R, BIGGAR J W. Miscible displacement in soils: I. Experimental information[J]. Soil Science Society of America Journal, 1961, 25(1):1–5.

[10] NIELSEN D R, BIGGAR J W. Miscible displacement: Ⅲ. Theoretical considerations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1962, 26(3):216–221.

- [11] CAMPBELL J B. Spatial variation of sand content and pH within single contiguous delineations of two soil mapping units[J]. Soil Science Society of America Journal, 1978, 42(3):460–464.
- [12] BRUSSEAU M L, RAO P S C. Modeling solute transport in structured soils: a review[J]. Geoderma, 1990, 46(1):169–192.
- [13] CHEN C, THOMAS D M, GREEN R E, et al. Two-domain estimation of hydraulic properties in Macropore soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(3):680–686.
- [14] MIYAMOTO S, CHACON A, HOSSAIN M, et al. Soil salinity of urban turf areas irrigated with saline water[J]. Landscape and Urban Planning, 2005, 71(2–4):233–241.
- [15] JORDN M M, NAVARRO-PEDREO J, GARCA-SNCHEZ E, et al. Spatial dynamics of soil salinity under arid and semi-arid conditions: geological and environmental implications[J]. Environmental Geology, 2004, 45(4):448–456.
- [16] DERCON G, DECKERS J, GOVERS G, et al. Spatial variability in soil properties on slow-forming terraces in the Andes region of Ecuador[J]. Soil and Tillage Research, 2003, 72(1):31–41.
- [17] 王全九, 王文焰, 吕殿青. 膜下滴灌盐碱地水盐运移特征研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4):54–57.
WANG Quanjie, WANG Wenyan, LÜ Dianqing. Water and salt transport features for salt effected soil through drip irrigation under film[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(4):54–57. (in Chinese)
- [18] 姚荣江, 杨劲松. 黄河三角洲地区浅层地下水与耕层土壤积盐空间分异规律定量分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8):45–51.
YAO Rongjiang, YANG Jingsong. Quantitative analysis of spatial distribution pattern of soil salt accumulation in ploughlayer and shallow groundwater in the Yellow River Delta[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(8):45–51. (in Chinese)
- [19] 陈亚新, 史海滨. 干旱区稳定蒸发条件下土壤盐溶质迁移的动态预测[J]. 干旱区资源与环境, 1993, 7(3–4):225–230.
CHEN Yaxin, SHI Haibin. A dynamic calculation of soil solute transport under steady evaporation in the arid area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1993, 7(3–4):225–230. (in Chinese)
- [20] 史海滨, 陈亚新. 饱和-非饱和流溶质传输的数学模型与数值方法评价[J]. 水利学报, 1993(8):49–55, 58.
SHI Haibin, CHEN Yaxin. Evaluation of mathematical model and numerical method for solute transport in saturated-unsaturated flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993(8):49–55, 58. (in Chinese)
- [21] KADDAH M T, RHOADES J D. Salt and water balance in Imperial Valley, California[J]. Soil Science Society of America Journal, 1976, 40(1):93–100.
- [22] 石元春, 李保国, 李韵珠, 等. 区域水盐运动监测预报[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 1991.
- [23] PANAGOPOULOS T, JESUS J, ANTUNES M D C, et al. Analysis of spatial interpolation for optimising management of a salinized field cultivated with lettuce[J]. European Journal of Agronomy, 2006, 24(1):1–10.
- [24] KESHAVERZI A, SARMADIAN F. Mapping of spatial distribution of soil salinity and alkalinity in a semi-arid region[J]. Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Land Reclamation, 2012, 44(1):3–14.
- [25] 邓宝山, 瓦哈甫·哈力克, 党建华, 等. 克里雅绿洲地下水埋深与土壤盐分时空分异及耦合分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(3):599–607.
DENG Baoshan, WAHAP Halik, DANG Jianhua, et al. Coupled analysis of spatio-temporal variability of groundwater depth and soil salinity in Keriya Oasis[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(3):599–607. (in Chinese)
- [26] GOLOVANOV A I, SOTNEVA N I. Mathematical simulation of water and salt transfer in geosystems of solonchic soils in the Northern Caspian region[J]. Eurasian Soil Science, 2009, 42(3):251–266.
- [27] DING J, YU D. 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[J]. Geoderma, 2014, 235–236:316–322.
- [28] 张智韬, 王海峰, KARNIELI Arnon, 等. 基于岭回归的土壤含水率高光谱反演研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5):240–248.
ZHANG Zhitao, WANG Haifeng, KARNIELI Arnon, et al. Inversion of soil moisture content from hyperspectra based on ridge regression[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5):240–248. (in Chinese)
- [29] WANG Jingzhe, DING Jianli, YU Danlin, et al. Machine learning-based detection of soil salinity in an arid desert region, Northwest China: a comparison between LandSat–8 OLI and Sentinel–2 MSI[J]. Science of the Total Environment, 2020, 707:136092.
- [30] 田富强, 温洁, 胡宏昌, 等. 滴灌条件下干旱区农田水盐运移及调控研究进展与展望[J]. 水利学报, 2018, 49(1):126–135.
TIAN Fuqiang, WEN Jie, HU Hongchang, et al. Review on water and salt transport and regulation in drip irrigated fields in arid regions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1):126–135. (in Chinese)
- [31] 董伟智, 张爽, 朱福. 基于可拓层次分析法的沥青混合料路面性能评价[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(6):2137–2143.
DONG Weizhi, ZHANG Shuang, ZHU Fu. Evaluation of pavement performance of asphalt mixture based on extension analytic hierarchy process[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(6):2137–2143. (in Chinese)
- [32] 魏翠萍, 张玉忠, 冯向前. 区间数判断矩阵的一致性检验及排序方法[J]. 系统工程理论与实践, 2007(10):132–139.
WEI Cuiping, ZHANG Yuzhong, FENG Xiangqian. Deriving weights from interval comparison matrices based on consistency

test[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2007(10):132 – 139. (in Chinese)

[33] ZHOU Hong'an, LIU Sanyang, FANG Xiangrong. Method for uncertain multi-attribute decision making with preference information in the form of interval numbers complementary judgment matrix [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2007, 18(2):265 – 269.

[34] 董新光,周金龙,陈跃滨. 干旱内陆区水盐监测与模型研究及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2007.

[35] WANG Z, FAN B, GUO L. Soil salinization after long-term mulched drip irrigation poses a potential risk to agricultural sustainability[J]. European Journal of Soil Science, 2019, 70(1):20 – 24.

[36] ZARE E, HUANG J, SANTOS F M, et al. Mapping salinity in three dimensions using a DUALEM – 421 and electromagnetic inversion software[J]. Soil Science Society of America Journal, 2015, 79(6):1729 – 1740.

[37] PENG Jie, JI Wenjun, MA Ziqiang, et al. Predicting total dissolved salts and soluble ion concentrations in agricultural soils using portable visible near-infrared and mid-infrared spectrometers[J]. Biosystems Engineering, 2016, 152:94 – 103.

[38] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.

[39] 李莉,匡昭敏,莫建飞,等. 基于 AHP 和 GIS 的广西秋旱灾害风险等级评估[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19):193 – 201,293. LI Li, KUANG Zhaomin, MO Jianfei, et al. Assessment of risk ranking for autumn drought in Guangxi Province based on AHP and GIS[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(19): 193 – 201,293. (in Chinese)

[40] 徐存东,王荣荣,程慧,等. 基于遥感数据分析干旱区人工绿洲灌区的水盐时空分异特征[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2):80 – 89. XU Cundong, WANG Rongrong, CHENG Hui, et al. Spatio-temporal distribution of water and salt in artificial oasis irrigation area in arid area based on remote sensing analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(2):80 – 89. (in Chinese)

[41] 刘庆杰,荆林海,王梦飞,等. 基于克隆选择支持向量机高光谱遥感影像分类技术[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(3):746 – 751. LIU Qingjie, JING Linhai, WANG Mengfei, et al. Hyperspectral remote sensing image classification based on SVM optimized by clonal selection[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2013, 33(3): 746 – 751. (in Chinese)

[42] 杨凯歌,冯学智,肖鹏峰,等. 优化子空间 SVM 集成的高光谱图像分类[J]. 遥感学报, 2016, 20(3):409 – 419. YANG Kaige, FENG Xuezhi, XIAO Pengfeng, et al. Optimal subspace ensemble with SVM for hyperspectral image classification[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(3):409 – 419. (in Chinese)

[43] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2001.

[44] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2006.

[45] 杨强军,范燕敏,耿庆龙,等. 焉耆盆地耕地土壤盐分时空变化特征研究[J]. 新疆农业大学学报, 2020, 43(5):385 – 390. YANG Qiangjun, FAN Yanmin, GENG Qinglong, et al. Temporal and spatial variation characteristics of soil salinity in cultivated land of Yanqi Basin[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University,2020, 43(5):385 – 390. (in Chinese)

[46] 杨鹏年,董新光,刘磊,等. 干旱区大田膜下滴灌土壤盐分运移与调控[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12):90 – 95. YANG Pengnian, DONG Xinguang, LIU Lei, et al. Soil salt movement and regulation of drip irrigation under plastic film in arid area[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 90 – 95. (in Chinese)

[47] 罗毅. 干旱区绿洲滴灌对土壤盐碱化的长期影响[J]. 中国科学:地球科学, 2014, 44(8):1679 – 1688. LUO Yi. The long term impacts of drip irrigation on soil salinity in agricultural land of oasis in arid region of Northwest China [J]. Scientia Sinica Terrae, 2014,44(8): 1679 – 1688. (in Chinese)

[48] 王振华,杨培岭,郑旭荣,等. 新疆现行灌溉制度下膜下滴灌棉田土壤盐分分布变化[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 149 – 158. WANG Zhenhua, YANG Peiling, ZHENG Xurong, et al. Soil salt dynamics in cotton fields with mulched drip irrigation under the existing irrigation system in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 149 – 158. (in Chinese)

[49] 明广辉,田富强,胡宏昌. 地下水埋深对膜下滴灌棉田水盐动态影响及土壤盐分累积特征[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5):90 – 97. MING Guanghui, TIAN Fuqiang, HU Hongchang. Effect of water table depth on soil water and salt dynamics and soil salt accumulation characteristics under mulched drip irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(5):90 – 97. (in Chinese)