

徐存东, 朱兴林, 王铭岩, 等. 区域尺度地下水埋深与矿化度对土地盐碱化转变概率研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(1): 100-108.

XU Cundong, ZHU Xinglin, WANG Mingyan, et al. Study on the probability of salinization transition of regional scale groundwater depth and salinity [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(1): 100-108.

区域尺度地下水埋深与矿化度对 土地盐碱化转变概率研究

徐存东^{1,2}, 朱兴林¹, 王铭岩¹, 李振¹, 姚志鹏¹, 谷丰佑¹

(1. 华北水利水电大学 水利学院, 河南 郑州 450046;

2. 水资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心, 河南 郑州 450046)

摘要: 为探明受地下水埋深与矿化度影响的极度干旱荒漠区土地盐碱化转变概率, 选定甘肃省景泰川电力提灌灌区(简称“景电灌区”)为研究区, 分别利用 ArcGIS 空间插值中的反距离权重法、样条函数法、趋势面法及普通克里金法对 2017 年的地下水埋深和矿化度监测数据进行插值, 结合误差矩阵选取最优插值方法, 并对研究区 1994、2008 和 2017 年三期监测数据进行插值分析, 再通过重分类消除量纲进行叠加, 将土地盐碱化难易程度划分为 5 级, 分析了研究区土地盐碱化转变概率。结果表明, 地下水埋深和矿化度平均值在 1994 年至 2017 年间呈不断上升趋势, 灌区土地盐碱化转变概率西南低东北高, 地下水埋深较深区域不易形成盐碱地, 地下水埋深较浅区域, 矿化度越大越易形成盐碱地, 研究可为干旱荒漠区区域地下水利用提供理论依据。

关键词: 土地盐碱化; 地下水埋深; 地下水矿化度; 盐碱化转变概率

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.01.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TV93

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2020)11-0100-09



听语音
聊科研
与作者互动

Study on the probability of salinization transition of regional scale groundwater depth and salinity

XU Cundong^{1,2}, ZHU Xinglin¹, WANG Mingyan¹, LI Zhen¹, YAO Zhipeng¹, GU Fengyou¹

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, Henan, China;

2. Collaborative Innovation Center of Water Resources Efficient Utilization and Protection Engineering, Henan Province, Zhengzhou 450046, Henan, China)

Abstract: To explore the probability of land salinization transformation in extremely arid desert areas affected by groundwater depth and salinity, Jingtaichuan electric power irrigation area in Gansu Province is selected as the research area, respectively using ArcGIS spatial interpolation of the inverse distance weighting method, spline function method, trend surface method and ordinary kriging method for monitoring data of groundwater depth and mineralization in 2017 for interpolation, combined with the error matrix to select the optimal interpolation method, and the study area, 1994, 2008 and 2017 the third phase of monitoring data analysis of interpolation, and then eliminated by heavy classification dimension of superposition, the land salinization ease is divided into 5 levels, the land salinization in the study area transition probability is analyzed. The results indicate that the average

收稿日期: 2019-05-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51579102, 51809094); 河南省高校创新团队项目(19IRTSTHN030)

作者简介: 徐存东(1972—), 男, 教授, 博士, 主要从事灌区水盐调控方面的研究。E-mail: xcundong@126.com

通讯作者: 朱兴林(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事水利工程方面的研究。E-mail: zxinglin@yeah.com

groundwater depth and mineralization are in the rising trend from 1994 to 2017, salinization transition probability of irrigated land is low in southwest and high in northeast. Saline-alkali land is not easy to form in deep groundwater area, while in shallow groundwater area, the more salinity, the easier to form saline-alkali land. The research can provide theoretical basis for arid desert area groundwater utilization.

Keywords: land salinization; groundwater depth; groundwater salinity; salinization transition probability

0 引言

在我国西北干旱地区,通过建设提水灌溉工程可实现对区域内的宜耕土地资源进行大力开发利用,以满足人口增长和社会经济发展的需要。然而,随着外调水资源不断注入灌区,持续的农田灌溉入渗导致区域内出现大面积地下水埋深剧烈抬升的现象,加之受灌区低降雨高蒸发的气象条件影响,随着大量浅埋地下水分的蒸发耗散,地下水带动着土壤中的可溶性盐离子向地表迁移,最终导致大面积土地次生盐碱化发生与发展^[1-3]。当前,在很多高扬程灌区,土地盐碱化发展状况已经严重制约了当地的农业发展,而导致土地盐碱化的重要原因就是灌区内的水盐运移引起的局部地下水埋深和矿化度明显升高^[4-5],因此探明灌区区域内地下水埋深和矿化度的变化状况对土地盐碱化转变概率的影响,对于指导灌区的可持续发展和水盐调控就变得尤为重要。

目前国内外学者针对土地盐碱化方面开展了大量研究,取得了丰富的研究成果。麦麦提吐尔逊·艾则孜^[6]等以伊犁河流域为研究区,采用正态分布模型,研究了地下水埋深和矿化度对土地盐碱化的影响,计算了影响土地盐碱化的地下水临界深度;史志广^[7]等以伊利河谷西部平原区为研究区,结合地统计学和经典统计学方法,对地下水化学特征及空间变异性进行了研究;刘槐亮^[8]等以宁夏沙坡头灌区为对象,分析了地下水埋深、矿化度与土地盐碱化的关系,地下水埋深较浅时,地下水矿化度的大小直接影响土壤盐渍化的程度;张霞^[9]等在实地调查的基础上,结合洛慧渠多年观测数据,采用灰色关联法对灌区地下水埋深、矿化度与土壤盐分之间的动态关系进行研究,建立了灌区土壤水盐动态耦合模型;吴亚坤^[10]等以河南省封丘县为研究区,在对土壤盐分、地形、地下水埋深及矿化度、植被情况综合分析的基

础上,建立了区域土壤盐分综合评估模型,并对研究区土壤盐分空间异质性进行评估;陈永宝^[11]等以新疆喀什为研究区,定量分析了自然条件下荒地地下水埋深变化与土壤表层盐分的关系,建立了地下水埋深与土壤表层盐分之间的经验模型。以上研究虽然丰富了土地盐碱化与地下水特征之间的关系,但将地下水埋深和矿化度进行权重叠加来分析土地盐碱化转变概率的研究相对较少,本次选取景电灌区一期灌区为研究区,将地下水埋深与矿化度空间插值的栅格数据进行叠加计算,得出受地下水特征影响的土地盐碱化转变概率等级,为区域土地盐碱地概率等级划分提供了新的方法,同时对土地盐碱化的防治提供了一定的指导意义。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

景电灌区地处甘肃省中部(37°26′—38°41′N, 103°20′—104°04′E),其地理位置处于甘、宁、蒙三省的交界地带,气候条件属于典型的温带大陆性气候^[12]。景电一期灌区地理位置如图1所示。该地区干旱少雨,昼夜温差大,春季多风,夏季炎热;年日照时数长达2 714 h,无霜期约190 d,年平均气温约8.77℃,多年平均降雨量185.6 mm,降水多集中在6—9月,多年平均蒸发量2 433.8 mm。监测数据显示,随着灌溉年限的增长和灌区面积的发展,灌区内

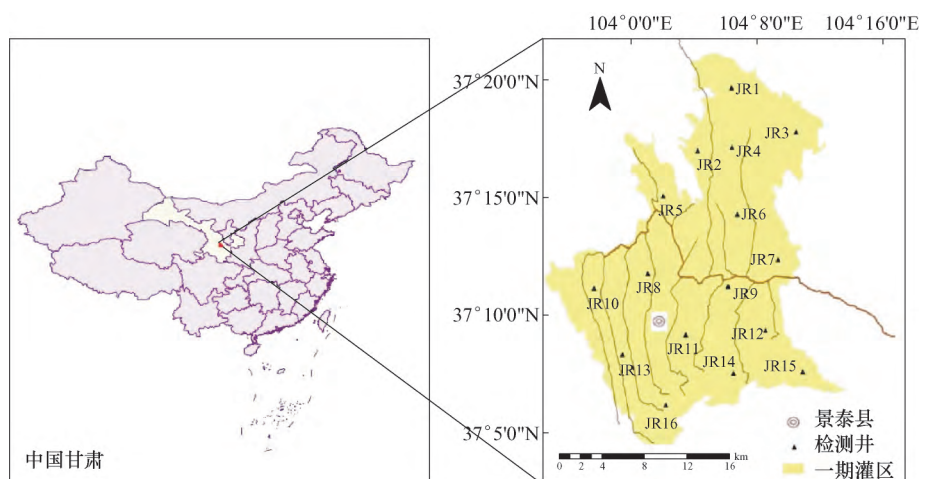


图1 研究区地理位置及监测井示意

封闭型水文地质单元的地下水位普遍逐年增高,且矿化度偏高,多介于 1.3~12.0 g/L。受到干旱气候条件、低洼封闭的地势条件以及人为灌溉因素等的影响,灌区内耕地次生土壤盐渍化的特征十分明显,且呈扩大发展的态势^[13-15]。2015 年的监测数据显示,灌区现有盐碱耕地面积 0.45 万 hm²,约占灌区总耕地面积的 21.7%,且呈逐年增加的趋势。当前,土壤盐渍化已成为制约灌区土地资源高效利用的主要因素,不断扩大的土地次生盐碱化的发展态势,严重制约了当地农业生产的可持续发展。

1.2 数据来源及处理

本研究的代表性年份分别选定为:1994 年,景电灌区全面建成,景电二期灌区开始建成全面开始灌溉,灌区总灌溉面积达到 3.47 万 hm²,年提水量 2.66 亿 m³;2008 年,二期灌区开始续建配套,灌溉面积 4.80 万 hm²,年均提水量 4.51 亿 m³;2017 年,代表灌区现状,灌区总灌溉面积为 6.05 万 hm²,年提水量为 4.60 亿 m³。基础数据和资料主要包括:灌区内 16 个固定采样点的 1994 年、2008 年、2017 年三期地下水矿化度数据;灌区内 16 个采样点的 1994、2008、2017 年三期地下水埋深数据;2017 年地下水矿化度和地下水埋深各 50 个非插值点数据。所有数据均由甘肃省景泰川电力提灌管理局以及甘肃省地质资料馆提供,获得的这些数据的资料来源包括:《景泰川电力提灌工程一期工程技术设计报告》(1971)、灌区一期工程 1972—2015 年调水用水量统计表、景泰川地下水资源概况和《河西走廊水文地质勘查/普查报告》(2015)。

在进行空间变异性分析前,利用 ArcGIS 中正态 QQ 图分析工具对数据进行必要的正态性检验,检验结果如图 2 所示,其符合正态分布可对其进行克里金插值。

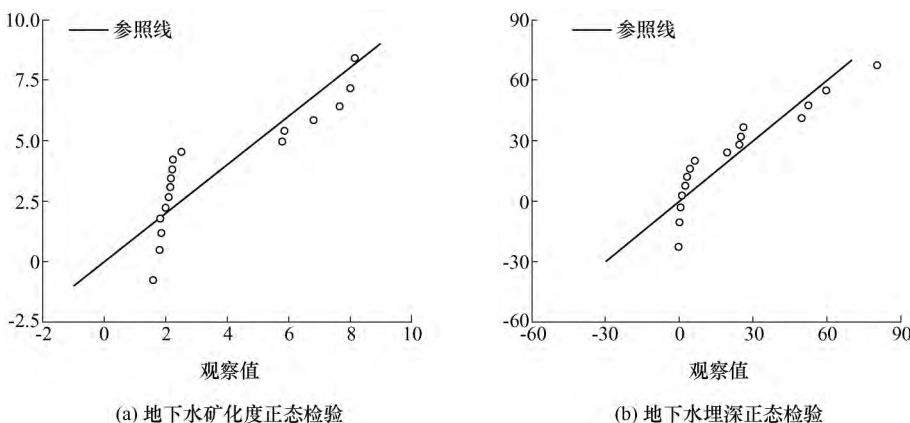


图 2 2017 年各指标因子正态 QQ 检验

1.3 研究方法

1.3.1 地下水特征空间插值方法

由于研究区范围较大,地下水监测点数目相对较少且分布不均,有限的监测数据并不能准确反映整个研究区域地下水埋深和矿化度空间分布状况和时空变化规律。ArcGIS 软件中空间插值正是利用已知的有限样本数据来估算区域内未知空间特征信息,以实现某一变量在整个区域内变化规律的研究^[16]。根据不同的分类标准^[17],在 ArcGIS 中将空间插值方法分为确定性插值方法和地统计学方法^[18]两类。确定性方法是以区域内部不同点位之间相似的信息来建立一个拟合曲面,包括反距离权重法(IDW)、样条插值法(TS)、趋势面法(TL)等;地统计学方法是根据插值点之间的统计规律,定量化其数据的空间自相关性,从而建立区域插值点的空间结构模型,包括多种类型的普通克里金法(OK)。

1.3.2 土地盐碱化转变概率等级划分方法

本研究在收集各时期基础数据的基础上,首先运用可拓层次分析法确定各指标因子权重,然后结合地统计学和经典统计学方法对地下水埋深和矿化度进行空间插值,对插值结果利用 ArcGIS 中 Spatial Analyst 模块的重分类工具进行数据集重分类,消除数据集的量纲影响,将区域同时期同位置地下水埋深像元值和矿化度像元值按照各指标因子进行嵌套叠加,产生新的像元值代表土地盐碱化转变概率等级。将地下水埋深按从浅到深等间距分为 1 到 10 级,将地下水矿化度从高到低等间距划分为 1 到 10 级,将消除量纲后的重分类结果按其权重进行栅格计算,即土地盐碱化转变概率等级 = 地下水埋深 × 0.5 + 地下水矿化度 × 0.5;将计算结果依据土地盐碱化难易程度划分为 5 级,1 级表示土地极易形成盐碱地,5 级表示土地最难形成盐碱地。

2 结果与分析

为精准、直观地分析研究区地下水埋深和矿化度随时空变异规律,选择二者的最优插值方法为必要前提,为此以 2017 年实测的地下水埋深和矿化度数据为基础,结合空间插值理论,对实测值进行插值,得到不同插值方法下的地下水埋深和矿化度的空间分布图。

2.1 地下水埋深不同插值方法比较

利用 ArcGIS 中的 Spatial Analyst 模块对 2017 年地下水埋深数据进行空间插值分析, 绘制出各插值方法所得的地下水埋深空间分布如图 3 所示。

由图 3 中图例可知, 运用反距离权重法进行插值时, 由于采样点分布不均和以距离作为定权的唯一因子, 违背了区域地下水埋深连续分布的特点, 使得地下水埋深偏离真实的分布状况; 样条函数法插值的结果正负向均有外延, 对于局部范围内变化较大的点数据, 样条函数法处理较差; 趋势面法插值结果明显负向外延较大, 偏离了真实的地下水埋

深区间, 由于过分照顾局部点, 忽略了总体的变化趋势, 造成插值误差较大; 普通克里金插值结果相比其他三种方法在赋权时, 综合考虑距离、方位的影响, 对极值点的处理较好, 能更好地反映出地下水埋深随年份的变化趋势。对以上四种插值方法采用误差矩阵(Error Matrix) 进行精度评价, 并选取地下水埋深最优插值法。误差矩阵将地下水埋深每 5m 分为一个区域, 利用实地测量所得的 50 个非插值点的数据进行检验。利用误差矩阵对地下水埋深插值结果与 50 个非插值点的数据进行评价, 评价结果如表 1 所列。

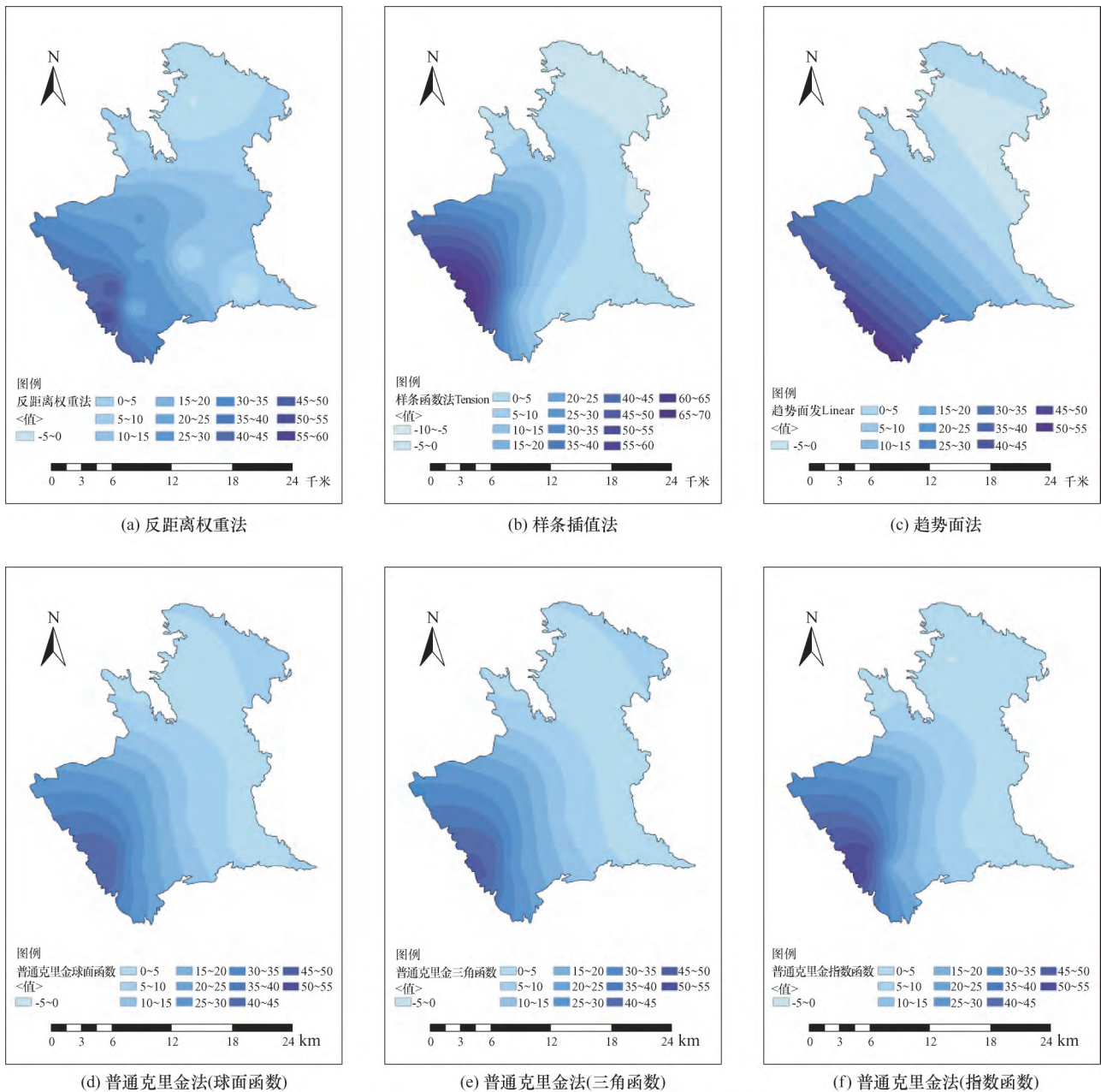


图 3 地下水埋深空间插值结果

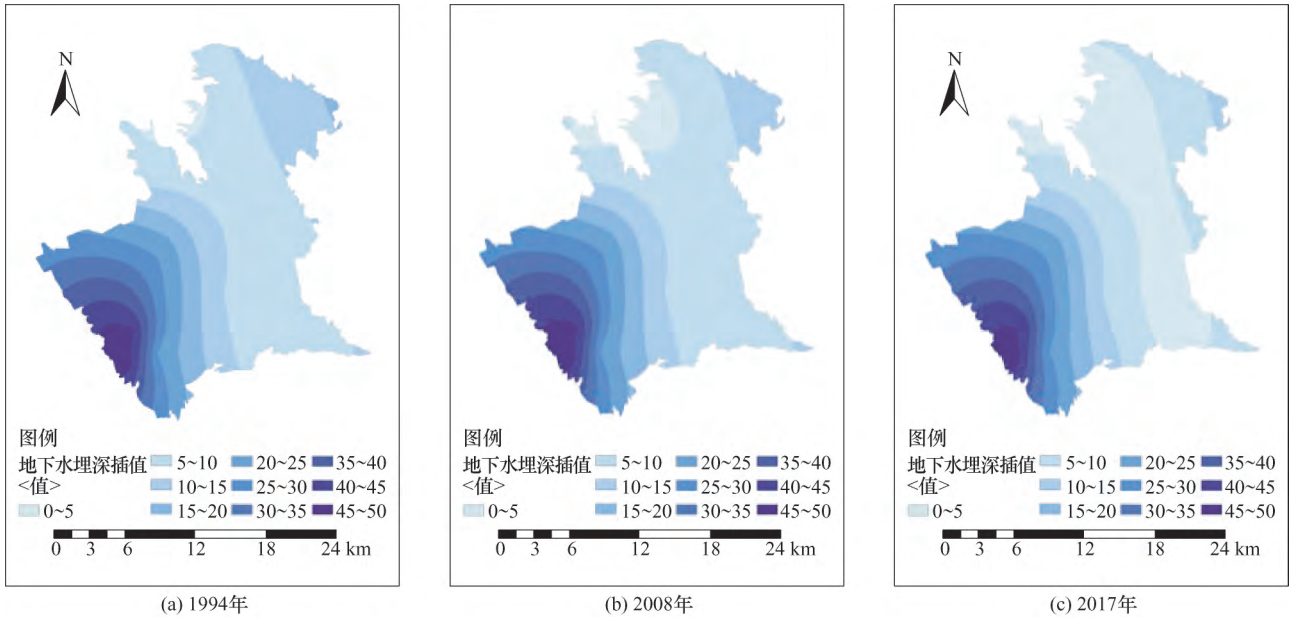


图4 地下水埋深(OK)球面函数插值结果

表1 地下水埋深插值精度评价

插值方法	插值总精度/%	Kappa 系数
IDW	67.00	0.623 3
Tspine	69.00	0.645 8
Trend Linear	68.00	0.632 1
OK(球面函数)	72.00	0.648 3
OK(三角函数)	70.00	0.628 5
OK(指数函数)	68.00	0.636 7

由表1可知,插值总精度球面函数最高(为71.00%),其次是三角函数和线性函数(为69.00%),IDW最低(为67.00%),以上插值结果Kappa系数均在0.60~0.80之间,属于高度一致性,故OK(球面函数)对地下水埋深插值精度最高。

2.2 区域地下水埋深时空进程分析

通过以上选取的最优插值方法OK(球面函数)对1994年、2008年和2017年的地下水埋深进行插值,如图4所示。

由图4可知,研究区地下水埋深总体呈现出西南低、东北高的分布特征,在长期的漫灌模式下,地下水埋深呈现出由西南到东北逐渐升高的趋势;在1994年地下水埋深在0~5m的区域只分布在监测井2周围,到2017年已经由监测井2呈条带状扩张到监测井7;受0~5m地下水埋深区域向西南扩张的影响,5~10m的地下水埋深区域逐渐缩小,由1994年的中部大片区域缩小为2017年的北方一角;由于大面积的地下水埋深持续抬升,使得北部

10~15m区域收缩剧烈,埋深15m以上的区域收缩范围极小。

将图4中各年份的地下水埋深插值结果进行提取,提取结果如表2所列。

表2 研究区1994—2017年地下水埋深特征值统计 m

地下水埋深	年份		
	1994	2008	2017
最小值	3.79	3.16	1.23
最大值	51.12	51.68	50.83
平均值	23.05	22.06	18.20

由表2知,研究区地下水埋深最小值每年都在减小,由1994年的3.79m减小至2017年的1.23m,减小了2.56m。地下水埋深最大值基本在51m左右波动,变化不明显。地下水埋深平均值受最小值变化的影响,由1994年的23.05m升高至2017年的18.20m,上升了4.85m。分析最大值和最小值的变化可以发现浅埋深区域在研究区占主导地位。

2.3 地下水矿化度不同插值方法比较

利用ArcGIS中的Spatial Analyst模块对2017年地下水矿化度数据进行空间插值,绘制出各插值方法所得的地下水矿化度空间分布如图5所示。

由图5中图例可知,样条函数法和趋势面法进行插值的结果会出现负数,而地下水矿化度不可能小于零,故这两种方法不适用。根据研究区地下水矿化度

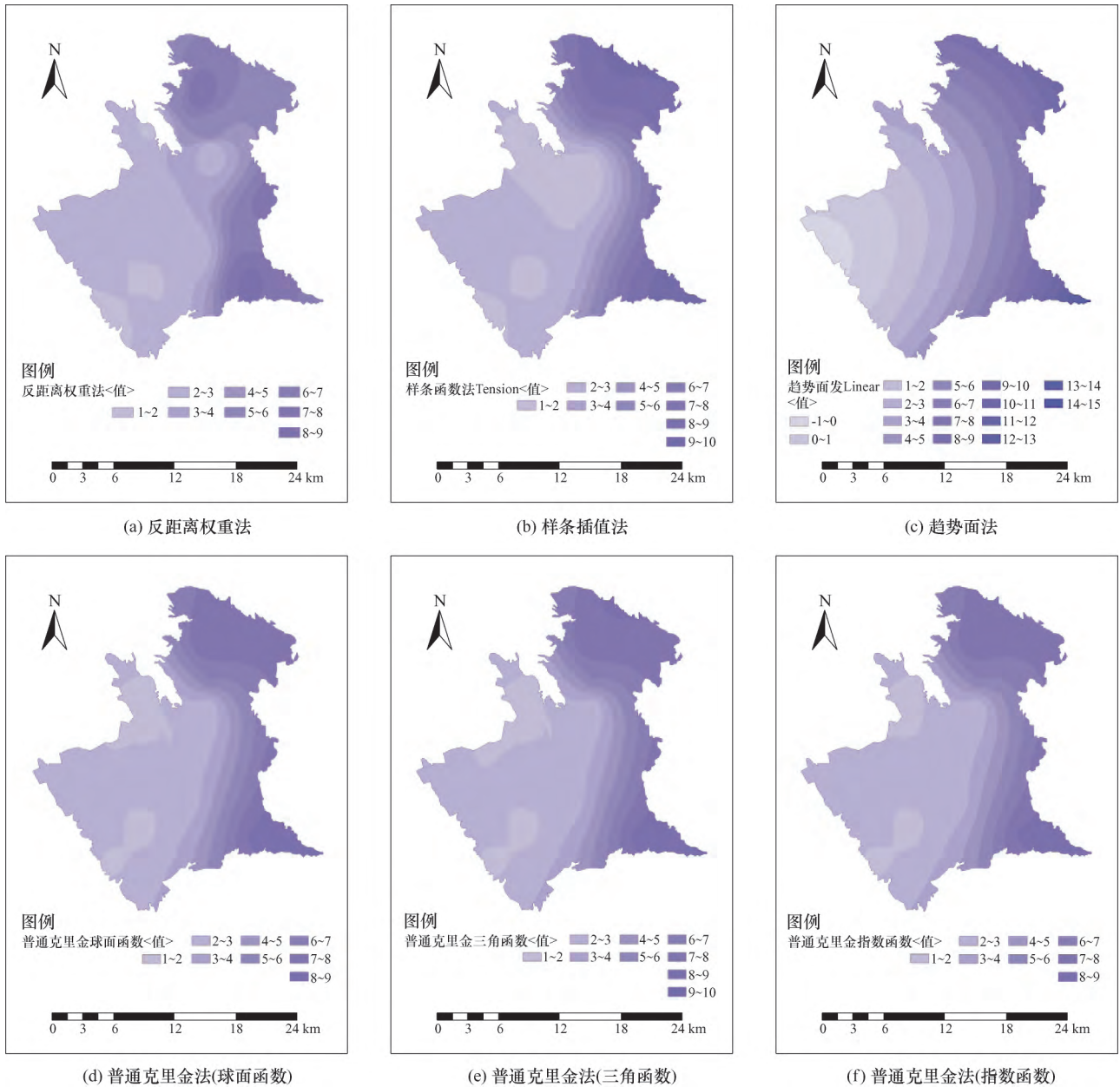


图5 地下水矿化度空间插值结果

实测值可得，空间插值结果应在 1 ~ 9 g/L 范围内，因此除反距离权重法与普通克里金法(插值函数为球面函数、指数函数)的其余方法插值结果均可排除。对以上三种方法采用误差矩阵(Error Matrix) 进行精度评价，并选取地下水矿化度最优法。误差矩阵将地下水矿化度 1.0 g/L 分为一个区域，共计 8 个区域。利用实地测量所得的 50 个非插值点的数据进行检验。利用误差矩阵对地下水矿化度插值结果与 50 个非插值点的数据进行评价评价结果如表 3 所列。

表3 地下水矿化度插值精度评价表

插值方法	插值总精度/%	Kappa 系数
OK(球面函数)	65.00	0.622 7
OK(指数函数)	71.00	0.658 5
IDW	70.00	0.639 8

由表 3 可知，插值总精度指数函数最高(为 71.00%)，其次是 OK(球面函数) 和 IDW，以上三种插值结果 Kappa 系数均在 0.60 ~ 0.80 之间，属于高度一致性，故普通克里金指数函数对地下水矿化度插值精度最高。

2.4 区域地下水矿化度时空进程分析

通过以上选取的最优插值方法普通克里金(指数函数)对1994年、2008年和2017年的地下水矿化度进行插值,如图6所示。

将图6中各年份的地下水矿化度插值结果进行提取,提取结果如表4所列。

表4 研究区1994—2017年地下水矿化度特征值统计 g/L

地下水埋深插值	年份		
	1994	2008	2017
最小值	1.516 9	1.585 2	1.641 3
最大值	6.820 5	7.010 4	8.313 5
平均值	3.285 0	3.365 4	4.075 2

由表4可知,研究区地下水矿化度最小值在1994年至2017年保持增大趋势,2017年较1994年升高了0.124 4 g/L。地下水矿化度最大值在1994年到2017年始终保持升高趋势,到2017年升高至8.313 5 g/L,较1994年升高了1.493 0 g/L。地下水矿化度平均值在1994至2017年始终保持升高趋势,到2017年升高至4.075 2 g/L,较1994年升高了0.790 2 g/L。

2.5 区域土地盐碱化转变概率等级划分

地下水埋深和矿化度的升高是土地盐碱化的重要成因,土壤盐分与地下水矿化度有较强的线性正相关性,与地下水埋深呈负相关^[19]。因此研究区盐碱地

的形成与地下水的埋深和矿化度关系密切,当地下水埋深升高达到“临界深度”时,在强蒸发作用下,盐碱地变异性的强弱程度和地下水埋深及矿化度相关。故将地下水埋深和矿化度空间分布图进行数据集重分类,消除数据集的量纲影响,将重分类结果运用栅格计算器进行数据集等权重合并计算,结果如图7所示。

由图7可知,1994年5级土地呈零散状分布在西南一侧,4级土地灌区东北侧呈大片分布,在其他区域零散分布,3级土地在灌区内侧分布最广,1、2级土地在东南侧分布居多,在北部零散分布,各临近等级土地基本相邻分布;2008年5级土地相比1994年向内蔓延形成了密集的半椭圆状,4级土地相比1994年收缩最为明显,主要收缩在西南侧,3级土地相比之前扩张明显,在区域中心呈片状分布,在灌区东北侧已由4级土地转变为3级土地,东南侧的1级土地相比1994年分布更加明显;2017年东北侧的3级土地相比2008年逐渐向1级土地转变,东北侧的1、2级土地迅速蔓延,由北向南形成带状分布,占据区域内大片面积。受地下水埋深和矿化度持续升高的影响,研究区易形成土地盐碱化面积迅速蔓延,难形成盐碱土面积主要分布在西南部,图7结合图4和图6可以发现,地下水埋深和矿化度相对较高区域,也是极易形成盐碱土的区域,表明二者对土地盐碱化转变有较大影响。

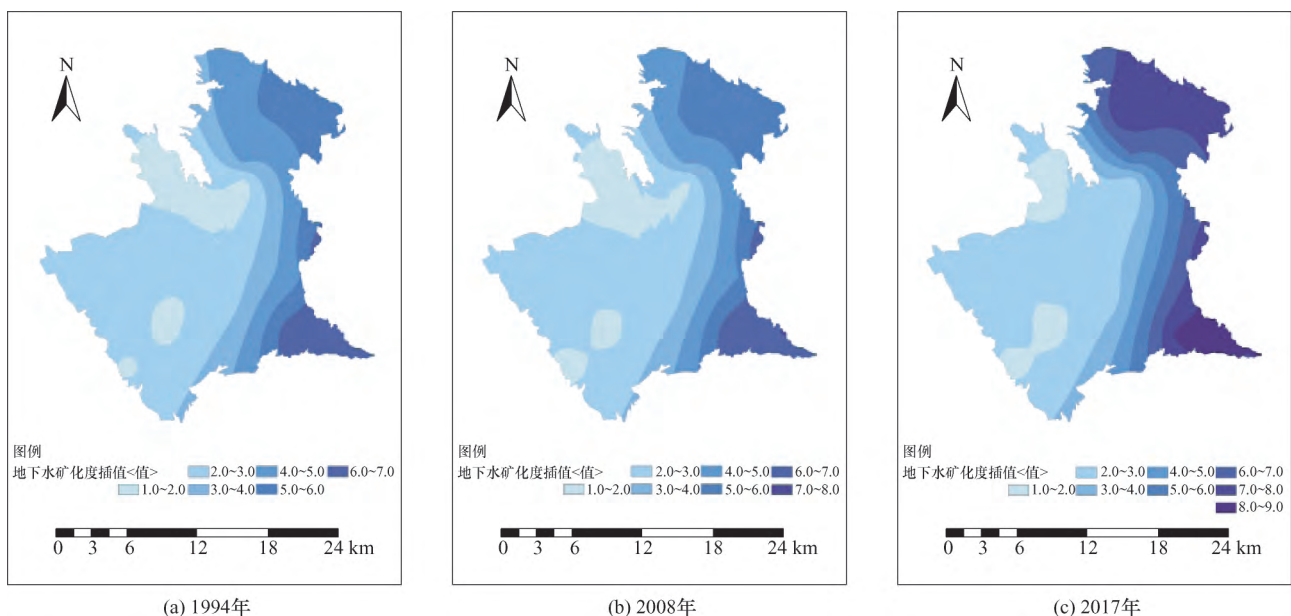


图6 地下水矿化度(OK)指数函数插值结果

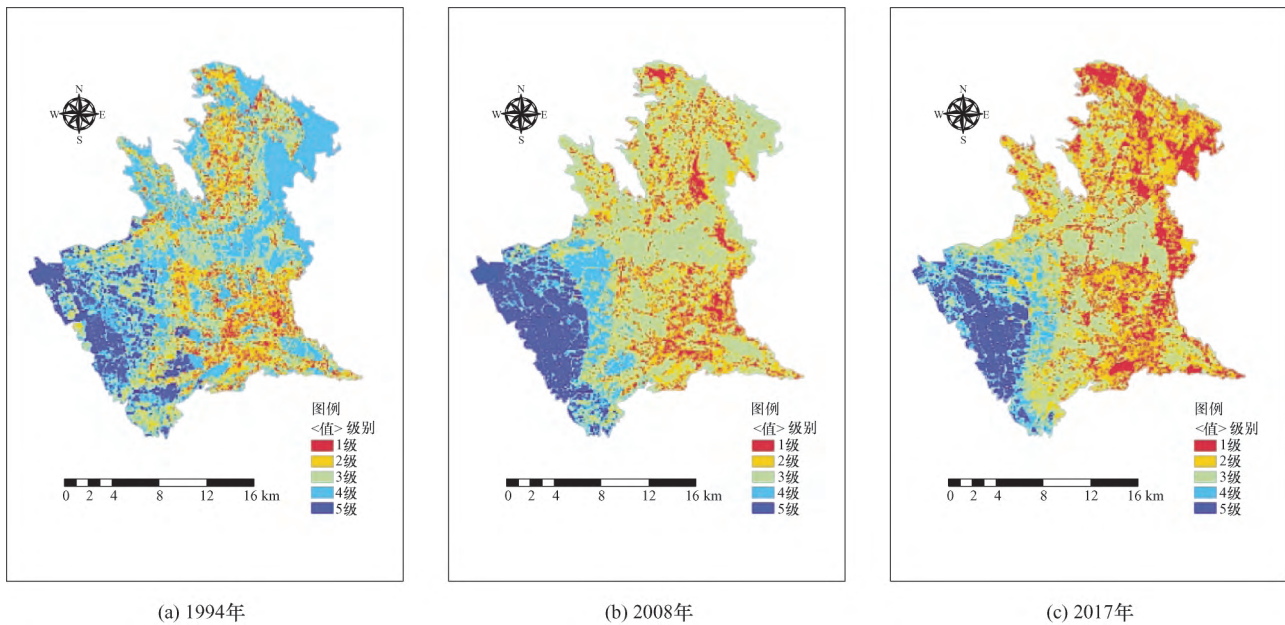


图7 土地盐碱化转变概率等级划分

3 结论

(1) 通过 ArcGIS 空间插值模块优选出地下水埋深和矿化度最优插值方法分别是克里金球面函数和指数函数; 研究区地下水埋深平均值由 1994 年的 23.05 m 升高至 2017 年的 18.20 m, 较 1994 年升高了 4.85 m; 地下水矿化度平均值由 1994 年的 3.285 0 g/L 增大至 2017 年的 4.075 2 g/L, 较 1994 年升高了 0.790 2 g/L。

(2) 将同期同位置的地下水埋深和矿化度进行嵌套叠加分析, 根据该区域土地盐碱化转变概率等级结果, 土地盐碱化转变概率由西南向东北逐渐增加, 地下水埋深较高区域, 矿化度越高, 则该区域越易形成盐碱地。

(3) 通过 ArcGIS 将地下水埋深与矿化度实测数据进行空间插值并对其等进行权重计算, 对土地的盐碱化转变概率等级进行划分, 是一种研究区域土地盐碱化的新思路; 地下水埋深和矿化度变化对盐碱化概率的影响只是一部分, 多因素共同作用下土地盐碱化概率还有待后续研究。

参考文献:

[1] 王少丽, 高占义, 郭庭天. 灌区土壤盐渍化发展模拟预测与对策研究[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(1): 71-76.
 [2] 张琳, 刘彩虹, 卞建民. 大安灌区地下水动态特征及灌区实施后的生态环境响应[J]. 节水灌溉, 2012(4): 43-45.

[3] 闫侃. 干旱条件下灌区地下水水盐动态分析及预测[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2010.
 [4] 李亮, 史海滨, 贾锦凤, 等. 内蒙古河套灌区荒地水盐运移规律模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 31-35.
 [5] ABLIZ A, TIYIP T, GHULAM A, et al. Effects of shallow groundwater table and salinity on soil salt dynamics in the Keriya Oasis, Northwestern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(3): 260.
 [6] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 海米提·依米提, 祖皮艳木·买买提, 等. 伊犁河流域土壤盐渍化对地下水特征的响应[J]. 水文, 2012, 32(6): 14-20.
 [7] 史志广, 姜纪沂, 赵振宏, 等. 基于地统计学的伊犁河谷西部霍城县平原区地下水特征空间变异性分析[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(10): 71-76.
 [8] 张霞, 沈炳岗, 王亚萍, 等. 基于灰色关联分析的土壤水盐动态变化研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(4): 267-270.
 [9] 刘槐亮, 徐利岗, 鲍子云. 宁夏沙坡头灌区土壤盐渍化影响因素分析[J]. 人民黄河, 2014, 36(12): 140-142.
 [10] 吴亚坤, 刘广明, 杨劲松, 等. 基于多源数据的中原黄泛区土壤盐分空间变异分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 115-120.
 [11] 陈永宝, 胡顺军, 罗毅, 等. 新疆喀什地下水浅埋区弃荒地表层土壤积盐与地下水的关系[J]. 土壤学报, 2014(1): 75-81.
 [12] 王辉. 景电灌区开发建设对区域生态环境的影响[J]. 生态学报, 1999, 19(3): 371-375.
 [13] 徐存东, 王小振, 王燕. 扬水灌区封闭型水文地质单元的地下水盐动态研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(2): 105-108.
 [14] 张志杰, 杨树青, 史海滨, 等. 内蒙古河套灌区灌溉入渗对地下水的补给规律及补给系数[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3):

- 61-66.
- [15] 张志杰, 杨树青, 史海滨, 等. 内蒙古河套灌区灌溉入渗对地下水的补给规律及补给系数[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 61-66.
- [16] WU T, LI Y. Spatial interpolation of temperature in the United States using residual kriging[J]. Applied Geography, 2013, 44(4): 112-120.
- [17] KOLYAIE S, YAGHOOTI M, MAJIDI G. Analysis and simulation of wireless signal propagation applying geostatistical interpolation techniques[J]. International Symposium on Mobile Mapping Technology, 2011, 22: 261-270.
- [18] XU Z, ZHOU T. On sparse interpolation and the design of deterministic interpolation points[J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 2014, 36(4): A1752-A1769.
- [19] 陆阳, 王乐, 张红玲. 宁夏平罗县井渠结合灌区地下水盐运移规律研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(3): 165-170.

(责任编辑 康健)