

克里雅绿洲浅层地下水与土壤特征的局部空间关系

黄玲^{1,2}, 瓦哈甫·哈力克^{2,3}, 卢龙辉^{1,2}

(1.新疆大学资源与环境科学学院; 2.新疆大学绿洲生态教育部重点实验室; 3.新疆大学旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要:通过优选的空间插值方法、网格单元法、地理加权回归(GWR)与最小二乘法(OLS)等方法的综合运用,系统研究典型干旱区绿洲的浅层地下水特征(埋深、电导率)与表层土壤特征(含水率、电导率)的空间分异与局部空间关系。结果表明:空间拟合方法上,表层土壤电导率与含水率的空间关系回归适用OLS模型,其余指标间空间关系采用GWR模型更优;空间关系上,土壤电导率与含水率的全局相关系数为极显著的0.85,局部相关性上绿洲西部明显高于东部;土壤电导率与地下水电导率的全局相关系数极显著($R=0.602$),但局部相关性上同时具有正相关与负相关特征;土壤含水率与埋深、地下水电导率与埋深均呈全局负相关,但在局部出现正相关;地下水埋深由绿洲西北至东南逐渐增加,地下水电导率由西南至东北依次呈现低—高—低的特征,表层土壤电导率与含水率由西至东均呈现低—高—低—次高的特征;GWR较OLS方法能够反映更多的空间异质特征,通常在总体相关水平下,局部可能出现相关性相反或大小不同的相关性。

关键词:浅层地下水;表层土壤;土壤含水率;土壤电导率;空间关系;空间插值;地理加权回归

中图分类号:S152.7 **文献标志码:**A

The localized spatial relation between shallow groundwater and soil properties in Keriya Oasis

HUANG Ling^{1,2}, WAHAP Halik^{2,3}, LU Long-hui^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Sciences; 2. The Key Lab of Oasis Ecosystem of MOE

3. College of Tourism, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China)

Abstract: It is of great significance to reveal the spatial distribution of shallow groundwater and surface soil properties, especially, the spatial relationship in local scale between them. Through the integrated methods of the interpolation methods, the grid cells method, the geographical weighted regression (GWR), and ordinary least squares (OLS), we studied the spatial distribution and relation of shallow groundwater characteristics (level and conductivity) and surface soil properties (water content and conductivity) in a typical arid oasis (Keriya Oasis). The results showed that interpolation prediction method using RBF on groundwater level and soil conductivity had the best fit compared to other methods. Meanwhile, using IDW on groundwater conductivity and using Ordinary Kriging method on surface soil moisture were more suitable. The OLS model was used to find the spatial relationship between conductivity and water content of surface soil, and GWR model was used for finding the spatial relationship between other indexes. Compared with the overall correlation (0.85) between soil conductivity and water content, the spatial relationship in the local scale showed that the correlations were higher in western than eastern regions. With the overall correlation (0.602) between soil conductivity and groundwater conductivity, the spatial relationship in the local scale appeared inconsistent results both positive and negative correlations. Compared with the overall negative correlation between water content of soil and groundwater level, and between groundwater conductivity and level, the spatial relationship in the local scale appeared positive correlation in some areas. The

收稿日期:2017-08-01

修回日期:2018-10-04

基金项目:国家自然科学基金委-新疆维吾尔自治区联合重点项目(U1138303);国家自然科学基金-地区基金(41661106)

作者简介:黄玲(1993-),女,硕士,研究方向为干旱区资源与环境。E-mail:Uangling@126.com

通信作者:瓦哈甫·哈力克(1967-),男,教授。E-mail:hwahap@xju.edu.cn

groundwater level increased from the northwestern to the southeastern, and groundwater conductivity showed low-high-low from the southwestern to the northeastern. Meanwhile, the soil conductivity and water content illustrated low-high-low-high trend in the area. GWR model could reflect more spatial heterogeneity than the OLS model, especially, might be opposite local relations or different level of relationship compared with the overall relationship.

Keywords: shallow groundwater; surface soil; soil moisture content; soil electrical conductivity; spatial relationship; interpolation method; geographically weighted regression

水是干旱区最关键的生态环境因子^[1],并且,干旱区直接影响植被生长的土壤水分和盐分与地下水密切相关^[2]。水土关系的不平衡可能导致盐渍化等类型的土地退化。盐渍化作为影响生态环境的重要因素^[3],将直接决定生态系统的生产力、水分与能量的平衡交替^[4]。深入研究干旱区水土空间关系,对维持绿洲系统的稳定性与安全具有重要意义。

在水土研究的初期,水土相互影响的研究主要以定性的总体分析为主(1994–2002年)^[5–6]。随着定量方法的发展,以及空间数据处理技术的进步,插值方法与经典统计方法被引入水土关系的研究(2007–2012年)^[7–10]。近年来,对水土关系的研究开始综合不同的分析方法,如经典统计分析、插值法、地统计方法(Moran's I)、耦合模型等(2014–2016年)^[11–14]。在水土关系研究方法不断改进的过程中,空间插值法被广泛应用,IDW(Inverse Distance Weighted,反距离权重法)^[15]、RBF(Radial Basis Function,径向基函数法)^[16]、普通克里格法(Ordinary Kriging)^[17]方法已被众多地理学者认可。统计分析方面,主要运用全局尺度相关分析,如经典统计方法(回归等)、Pearson's 相关分析及地统计方法。但目前对于局部尺度相关分析的研究还不多见。遥感技术、空间统计方法、地理信息技术的发展为水土关系分析提供了有力工具,尤其是GWR(Geographically Weighted Regression,地理加权回归)在探索变量间相互关系的异质性和空间自相关方面有明显优势^[18–20]。如果能够同时运用全局尺度与局部尺度统计分析,且综合地理信息技术在空间上区分相关性的异质特征,将对浅层地下水特征与表层土壤特征间相互关系的研究有很大助益。

克里雅绿洲作为典型的干旱区绿洲区域,进行干旱化与盐渍化的研究非常迫切,尤其在探讨区域水土特征关系方面。本研究通过遴选最优插值方法,借助网格单元法,尝试在结合传统统计方法与空间统计方法的基础上,重点研究全局尺度统计与局部尺度统计在水土空间数据分析上的应用,为进一步研究浅层地下水特征与表层土壤特征的相互影响奠定基础。

1 研究区概况

克里雅绿洲位于中国新疆南部,隶属于和田地区于田县,地理位置为 $81^{\circ}09' \sim 82^{\circ}51' E$ 、 $35^{\circ}14' \sim 39^{\circ}29' N$,地处克里雅河流域山前平原区域,位于塔克拉玛干沙漠与喀拉昆仑山之间。克里雅河自南向北贯穿绿洲,多年平均径流量为 $6.99 \times 10^8 m^3$ ^[15],占绿洲水资源利用总量的82.1%。克里雅绿洲属于暖温带大陆干旱荒漠气候,多年平均降水量为47.7 mm^[16],多年平均蒸发量为2 432.1 mm,降水稀少而蒸发量大。

2 数据与研究方法

通过在绿洲区域内均匀分布的24个观测井(见图1)内安装水位深度记录仪/监测仪(HOBO U20-001-02)与电导率测量记录仪(HOBO U24-002-C)进行地下水数据采集,间隔为1次/h。通过在观测井附近1 m范围内安装土壤水分传感器(ECH2O 5TE)与五通道土壤数据采集器(EM50)进行表层(0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm共五层)土壤数据采集,间隔为1次·h⁻¹。

本研究获取到2015年全年地下水与表层土壤实测数据。考虑到表层土壤0~20 cm处为土壤盐分的主要影响层^[19],本研究主要分析表层(0~20 cm)土壤特征数据。排除突变数据及无效数据后,计算地下水埋深、地下水电导率、表层土壤含水率、

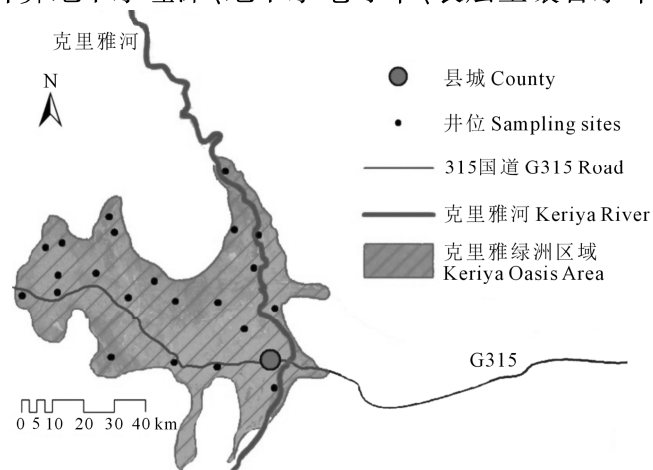


图1 研究区位置、井位分布图

Fig.1 Location of the study area and distribution of sampling wells

表层土壤电导率 4 个指标的年平均值。通过 SPSS 19.0 进行对数转换,运用 ArcGIS 10.0 中三种较为常用的空间插值方法(普通克里格法、IDW、RBF)分析最优的地下水与表层土壤特征插值方法,并进行交叉验证及精度检验(ME 平均误差、RMSE 均方根误差)。本研究运用网格单元法(Grid Cell Method)对空间插值预测结果进行网格化处理(1 km×1 km),通过 Pearson's 相关系数分析 4 个指标间在总体上的统计相关。通过 GWR(地理加权回归)与 OLS(最小二乘法)模型精度对比分析最优的局部空间相关模型,研究地下水与表层土壤 4 个指标间在局部上的空间统计相关。

3 结果与分析

3.1 最优空间插值方法与预测结果分析

对地下水埋深、地下水电导率、土壤含水率、土壤电导率数据均进行 3 次不同方法(普通克里格法、IDW、RBF)的空间插值(对比结果见表 1)。RBF 插值法拟合地下水埋深、表层土壤电导率精度最高,IDW 法拟合地下水电导率的精度优于其它两种方法,表层土壤含水率更适于采用普通克里格法。

三种插值方法采用对数转换后数据的精度普遍优于采用原始数据的精度(ME 与 RMSE 更小^[17]),但普通克里格法采用原始数据的精度更高,因此本研究将采用对数转换后数据进行地下水埋深、地下水电导率、表层土壤电导率的空间分布预测,采用原始数据进行表层土壤含水量的空间分布预测。为获得最优(精度最高)空间分布预测,本研究运用 RBF 法对地下水埋深、表层土壤电导率进行空间插值,IDW 法对地下水电导率进行插值,普通克里格法对表层土壤含水率进行空间插值预测。

分析地下水埋深、地下水电导率、土壤含水率、土壤电导率的空间分布预测结果(见图 2),结果显示:不同指标表现出不同的空间分布特征。在绿洲区域内,地下水埋深跨度较大,变化范围为 0.65 ~ 13.69 m,平均埋深约 2.33 m,由于海拔的影响,总体呈现由西北至东南逐渐增加的趋势。由于河道与绿洲湿地的交替分布引起的地下水补给差异,地下水水位最高值位于绿洲西部湿地(龙湖湿地)区域以及东部稻田区域。地下水电导率总体由西南至东北依次呈现低-高-低的变化特征,平均电导率约为 3.1 mS·cm⁻¹。表层土壤电导率与表层土壤含水

表 1 浅层地下水与表层土壤特征的最优空间插值方法
Table 1 Optimal spatial interpolation methods for characteristics of shallow groundwater and surface soil

空间插值方法 Optimal interpolation method	属性数据 Characteristics	原始数据 Primary data		对数转换数据 Data of logarithmic transformation	
		平均误差 ME	均方根误差 RMSE	平均误差 ME	均方根误差 RMSE
反距离权重 IDW	地下水埋深 Groundwater level	-0.12	1.29	-0.02	0.31
	地下水电导率 Groundwater EC	-0.31	4.01	-0.004	0.05
	表层土壤电导率 Surface soil EC	-0.18	4.25	0.01	0.76
	表层土壤含水率 Surface soil water content	-0.009	0.41	0.004	0.41
径向基函数 RBF	地下水埋深 Groundwater level	-0.07	1.28	-0.02	0.30
	地下水电导率 Groundwater EC	-0.16	3.94	-0.05	0.40
	表层土壤电导率 Surface soil EC	-0.08	4.24	-0.002	0.75
	表层土壤含水率 Surface soil water content	-0.006	0.40	-0.003	0.40
普通克里格 Ordinary Kriging	地下水埋深 Groundwater level	-0.07	1.31	-0.02	0.31
	地下水电导率 Groundwater EC	-0.16	3.99	-0.01	0.43
	表层土壤电导率 Surface soil EC	-0.009	3.67	0.006	0.67
	表层土壤含水率 Surface soil water content	0.0006	0.35	0.003	0.37

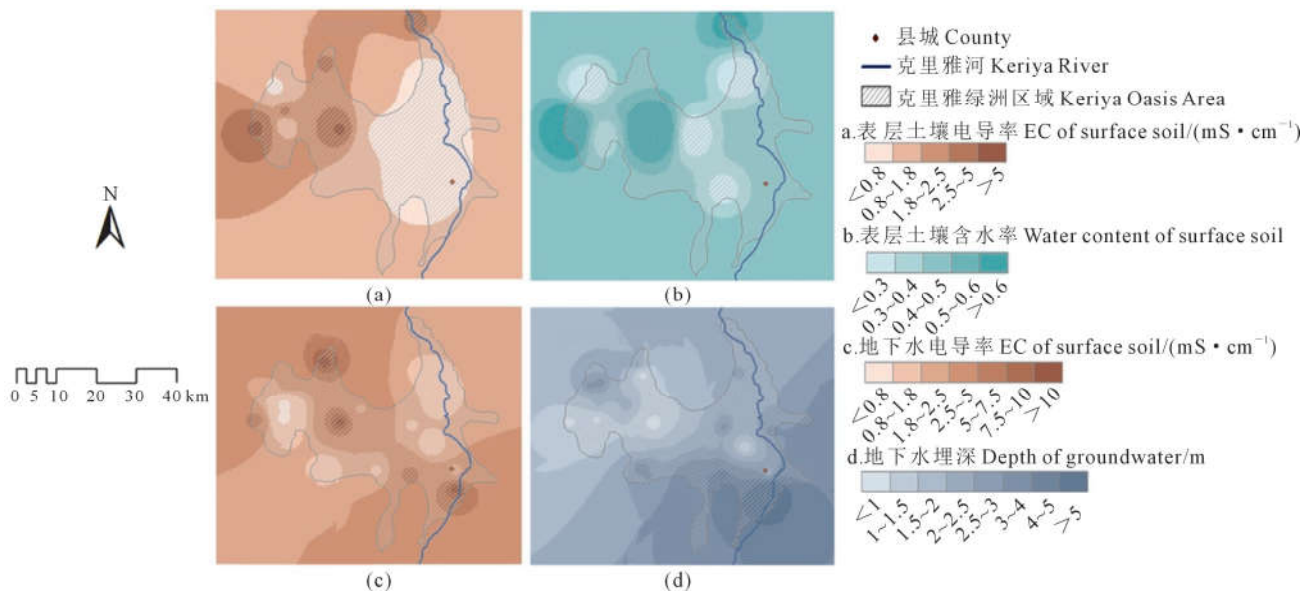


图 2 浅层地下水与表层土壤特征的空间分布预测

Fig.2 Predicted spatial distribution for characteristics of shallow groundwater and surface soil

率呈现较为一致的分布特征,由绿洲西部至东部依次呈现低-高-低-次高的特征。表层土壤电导率与表层土壤含水率的两个最高值基本出现在相同的区域,很可能与湿地的盐分聚积效应有关。另外值得注意的是,受河流-地下水的动态相互补给过程的影响,沿河道一定范围内的土壤含水率均较高而土壤电导率均较低。

本研究运用 ArcGIS 10.0 的数据管理-要素类创建渔网工具,对土壤电导率、土壤含水率、地下水埋深、地下水电导率 4 个指标的插值结果(栅格数据)进行分级,将转换的矢量面状文件进行网格单元化,网格大小 1 km×1 km,结果见图 3(以表层土壤电导率网格单元化为例)。

Pearson 相关系数矩阵显示了土壤电导率、土壤含水率、地下水埋深、地下水电导率网格单元数据之间的总体相关性大小(见表 2)。土壤电导率与土

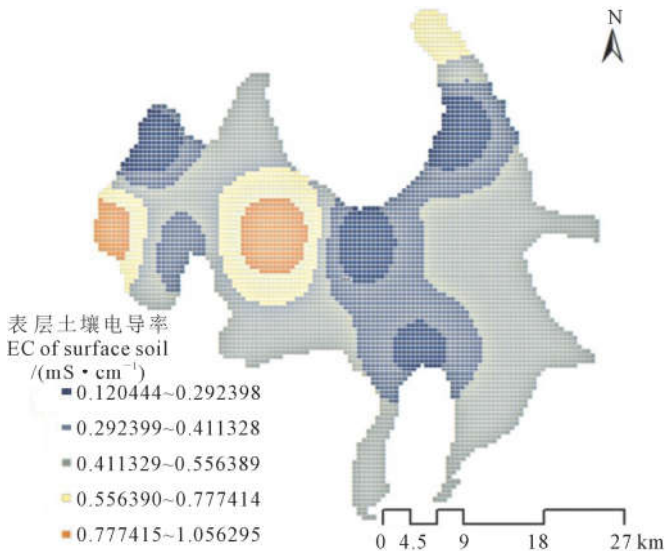


图 3 网格单元化

Fig.3 Results of grid cell method for predicted EC value of surface soil

表 2 地下水与表层土壤特征的 Pearson 相关性分析

Table 2 Pearson's correlation analysis for characteristics of shallow groundwater and surface soil

Pearson's 系数 Pearson's correlation	地下水埋深 Groundwater level	地下水电导率 Groundwater EC	表层土壤含水率 Surface soil water content	表层土壤电导率 Surface soil EC
地下水埋深 Groundwater level	1			
地下水电导率 Groundwater EC	-0.474 **	1		
表层土壤含水率 Surface soil water content	-0.475 **	0.311 **	1	
表层土壤电导率 Surface soil EC	-0.459 **	0.602 **	0.850 **	1

注: ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。
Note: ** denotes the significance level of $P \leq 0.01$.

壤含水率的线性相关程度达到 0.850,表明土壤含水率对土壤盐分的影响非常高,这与已有的研究结论相反^[18],可能由于克里雅绿洲典型的灌溉农业与干旱区蒸发量较大综合作用导致土壤含水率越高洗盐量也越高。土壤电导率与地下水埋深的线性相关系数为-0.459,与地下水电导率的相关系数为 0.602,表明土壤电导率受地下水的影响较为明显,地下水电导率与土壤电导率的相关程度更高。地下水电导率与埋深的相关系数为-0.474,基本与土壤电导率、埋深两者的相关系数(-0.459)持平,表明地下水埋深对地下水电导率与土壤电导率的影响基本相同。所有相关系数均通过了显著性检验,为极显著水平。

3.3 GWR 与 OLS 模型对比与局部尺度空间回归分析

3.3.1 GWR 与 OLS 模型对比及相关分析 对比 GWR 与 OLS 两种空间回归建模方法(见表 3),由于表层土壤电导率与表层土壤含水率存在很强的多重共线性,即存在较明显的相同变化趋势,采用 OLS 模型即可。其余指标间构建的模型对比结果显示:采用 GWR 模型的校正 R^2 均有较大提高,模型的解释程度平均提升幅度为 552% (R^2 越高变量解释的程度越高^[19]);除地下水埋深与地下水电导率所构建模型外,均为 GWR 模型的 AIC_c 值更低(AIC_c 越低表明模型预测结果与实际结果越接近^[20])。为更精确地研究局部空间相关,本研究对表层土壤电导率与表层土壤含水率构建 OLS 模型,对土壤电导率与地下水电导率、土壤电导率与地下水埋深、地下水电导率与地下水埋深构建 GWR 模型。在空间上,对于表层土壤电导率,表层土壤含水率可以解释 63.1% 的变化,地下水电导率可以解释 78.9% 的变化,地下水埋深可以解释 49.5% 的变化;对于地下水电导率,地下水埋深可以解释 61.4% 的变化。

3.3.2 局部尺度空间回归结果在空间的异质性 OLS 模型结果的估计、残差参数与 GWR 模型结果

的局部回归系数、Local R^2 见图 4~图 7。相比土壤电导率与土壤含水率的 Pearson's 相关系数为极显著的 0.85(见表 2),OLS 模型结果(图 4)显示绿洲内部在空间上存在高低不同的相关性,绿洲西部相关性明显高于东部。残差显示 OLS 模型在大部分区域拟合效果较好(残差绝对值小)。

土壤电导率与地下水电导率的 GWR 模型(图 5)结果,与 Pearson's 相关分析结果(极显著正相关 0.602,见表 2)不同,同时出现了正相关与负相关特征。负相关存在于绿洲中部灌溉频繁的耕地区域很可能的原因是灌溉对土壤的脱盐作用,尤其在稻田区域出现了最大的负相关(图 5 左,中部深蓝色环形区域)。

同样的空间异质特征也出现在土壤含水率与地下水埋深的局部回归结果中(图 6)。总体 Pearson's 相关系数为显著的负相关-0.459(见表 2),但局部空间回归的结果表明在绿洲东部区域存在正相关。不过结合绿洲西部呈现负相关的区域模型拟合效果较好,这种正相关的解释程度并不高。在湿地区域,由于地下水位较低,土壤电导率与埋深的相关也较好,呈现显著负相关。

地下水电导率与地下水埋深的 GWR 模型拟合结果同样呈现出空间相关的异质性(图 7)。在总体呈负相关(见表 2)的情况下,局部地区呈现出正相关的特征。

以上研究表明,将 GWR 方法运用在空间数据的统计分析方面能够反映更多的异质特征,而 OLS 模型只在近似线性的数据的处理分析上效果更好。

4 讨论

在众多空间插值方法的选择上,不同的区域应当选取适用于研究区的插值方法,通过交叉验证与精度检验可以对插值方法进行优选。虽然本研究所选取的插值方法只适用于克里雅绿洲,但是选取插值方法依据的原则可以为其它区域的研究提供借鉴。

表 3 GWR 与 OLS 模型精度对比结果
Table 3 Comparison of GWR and OLS models accuracy

属性数据 Characteristics	模型 Model	表层土壤含水率 Surface soil water content		地下水电导率 Groundwater EC		地下水埋深 Groundwater level		属性数据 Characteristics	地下水埋深 Groundwater depth	
		校正 R^2	AIC_c	校正 R^2	AIC_c	校正 R^2	AIC_c		校正 R^2	AIC_c
		Adjust R^2		Adjust R^2		Adjust R^2			Adjust R^2	
表层土壤电导率 Surface soil EC	GWR			0.789	-12189.7	0.495	-7723.5	地下水电导率 Groundwater EC	0.614	15224.5
	OLS	0.631	-9346	0.101	-4781.1	0.094	-4737		0.094	-4737

注:空白表示未能成功建立模型(存在严重多重共线性),模型在 0.05 水平上均具有显著性。
Note: Blank spaces mean there were no successful models due to severe multiple linearity; all models showed here are significantly at $P \leq 0.05$ level.

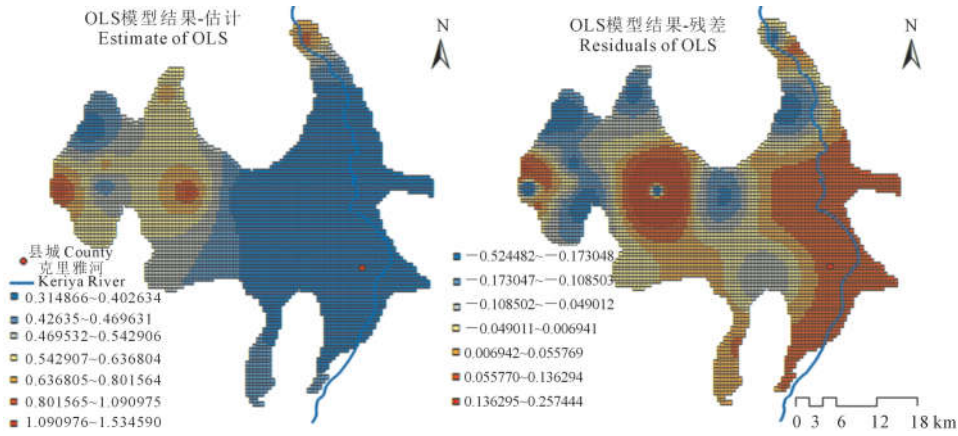


图 4 土壤电导率与土壤含水率局部相关的空间变异(OLS 模型)

Fig.4 Spatial variation of regression outputs from OLS model of soil EC and soil moisture content

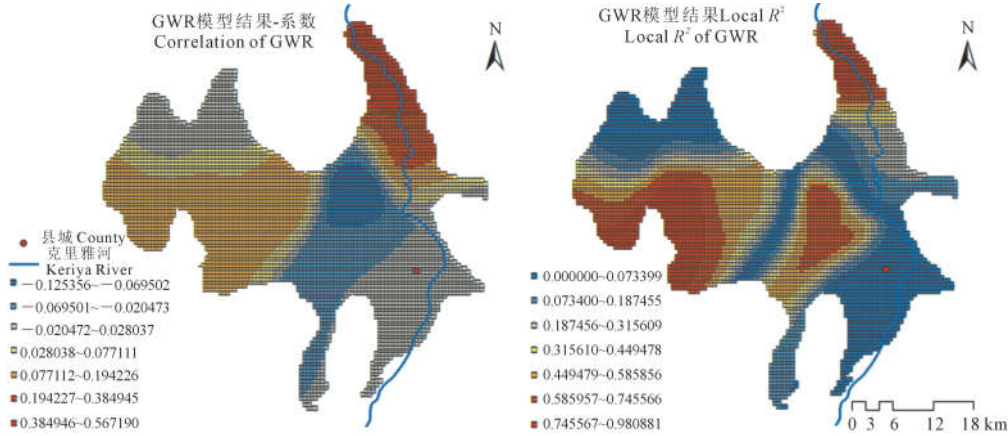


图 5 土壤电导率与地下水电导率局部相关的空间变异(GWR 模型)

Fig.5 Spatial variation of regression outputs from GWR model of soil EC and groundwater EC

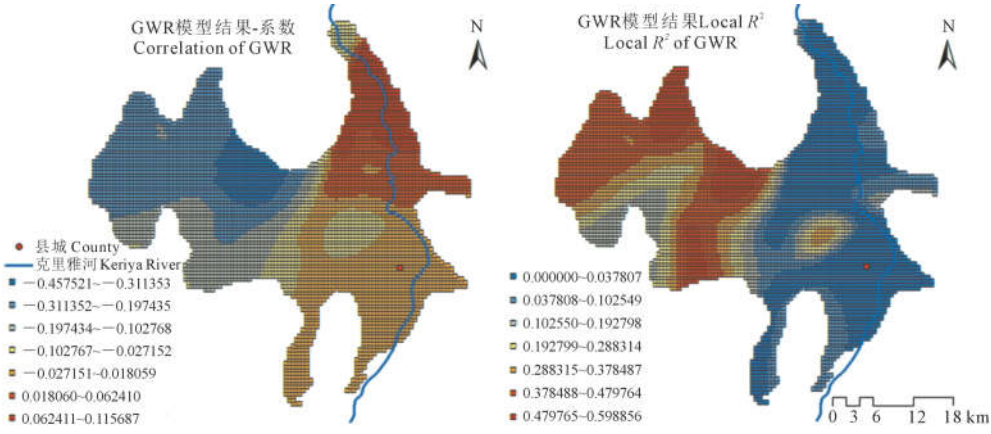


图 6 土壤电导率与地下水埋深局部相关的空间变异(GWR 模型)

Fig.6 Spatial variation of regression outputs from GWR model of soil EC and groundwater level

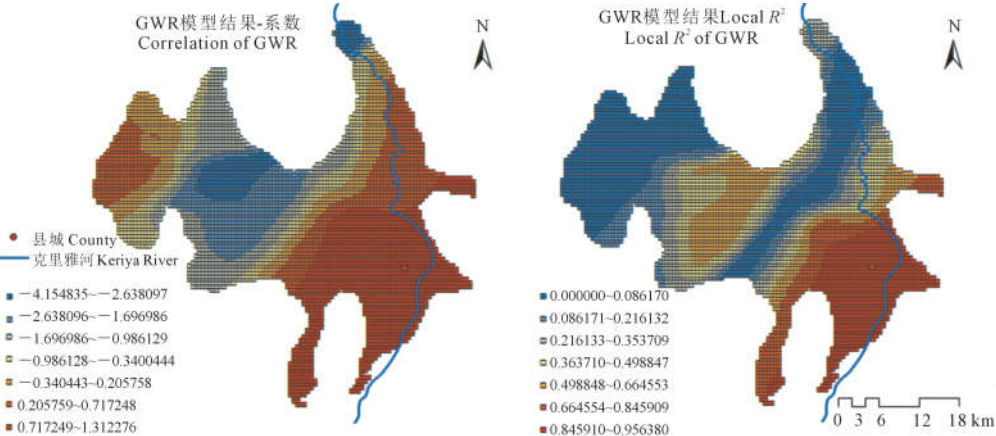


图 7 地下水电导率与地下水埋深局部相关的空间变异(GWR 模型)

Fig.7 Spatial variation of regression outputs from GWR model of groundwater EC and groundwater level

另外,本研究表明地统计空间插值方法适用于地下水特征与土壤特征的研究,但值得探讨的是,在其它研究领域的数据是否同样适用。

网格单元法在处理大尺度的地理空间数据上具有明显的优势。本研究借鉴常运用于大尺度空间数据处理的网格单元法,并且尝试将其运用于县域尺度的空间数据上,研究结果显示网格单元法既便于进行数据空间分析,也能够保证数据质量,且效果较好。但是,本文未对 MAUP(可变面积单元)问题进行探讨,网格单元大小的不同对研究结果会造成多大的影响,将是下一步研究的问题。另外,网格单元法在点面数据转换方面具有一定优势,未来可以扩展应用至其它研究领域,尤其在社会、经济数据处理方面,能够为社会学科与自然学科的交叉研究提供有效的帮助。

统计方法已经普遍运用于各个研究领域的数据分析方面,而地统计技术及地理空间分析技术为相关科学研究提供了更多的分析维度。本研究结合了传统统计方法与空间统计方法,运用全局尺度统计与局部尺度统计对地下水与表层土壤空间数据进行了分析。在关注全局尺度统计结果的同时,更关注局部尺度统计的结果。另外需要注意空间统计模型的精度问题,探讨空间统计模型在不同研究领域、不同数据源的适用性,这将为不同学科的研究提供依据。

5 结 论

1)地下水埋深总体呈现由西北至东南逐渐增加的趋势,地下水电导率总体由西南至东北依次呈现低-高-低的变化特征。表层土壤电导率与表层土壤含水率呈现较为一致的分布特征,由绿洲西部至东部依次呈现低-高低-次高的特征。RBF 插值法拟合地下水埋深、表层土壤电导率精度最高,IDW 法拟合地下水电导率的精度优于其它两种方法,表层土壤含水率更适于采用普通克里格法。

2)空间关系模拟方法上,表层土壤电导率与表层土壤含水率存在很强的多重共线性,采用 OLS 模型,其余指标间构建的模型对比结果显示 GWR 模型更优。

3)空间相关性上,土壤含水率对土壤盐分的影响较高,土壤电导率受地下水的影响较为明显,地下水埋深对地下水电导率与土壤电导率的影响基本相同。土壤电导率与土壤含水率的全局相关性为极显著正相关(0.85),局部相关性上绿洲西部明显高于东部;土壤电导率与地下水电导率的全局相

关性为极显著正相关(0.602),但局部相关性上同时具有正相关与负相关特征,负相关主要出现在绿洲中部灌溉频繁的耕地区域;土壤含水率与地下水埋深的全局相关性为显著负相关(-0.459),但绿洲东部存在局部的正相关;地下水电导率与地下水埋深全局呈负相关,局部出现正相关。

4)GWR 方法较 OLS 方法反映更多的异质特征,在总体相关水平下局部区域可能出现方向相反或大小不等的相关性。本研究表明在全局尺度统计分析显示的特征之外,局部尺度统计分析更能反映复杂的特征,更接近实际情况,提供的分析维度与深度更优、信息更丰富。本研究能为当地的水土资源管理实践提供实际的参考依据,帮助当地有关部门加深对水土相互影响的认识。本文在丰富水土关系研究方法的同时,建议未来的相关研究能够综合遥感、GIS、多种统计方法,希望能为进一步的干旱区地下水与土壤相互关系研究提供科学的依据。

参 考 文 献:

- [1] 陈亚宁,李卫红,徐海量,等. 塔里木河下游地下水位对植被的影响[J]. 地理学报,2003,58(4):542-549.
- [2] 樊自立,马英杰,张宏,等. 塔里木河流域生态地下水位及其合理深度确定[J]. 干旱区地理,2004,27(1):8-13.
- [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.
- [4] 赵其国. 土地退化及其防治[J]. 中国土地科学,1991,(2):22-25+21.
- [5] 张为政,高琼. 松嫩平原羊草草地土壤水盐运动规律的研究[J]. 植物生态学报,1994,18(2):132-139.
- [6] 王让会,樊自立,马英杰. 干旱区水域生态系统的水盐耦合关系——以新疆塔里木河流域为例[J]. 应用生态学报,2002,13(2):204-208.
- [7] 张勃,孟宝,郝建秀,等. 干旱区绿洲荒漠带土壤水盐异质性及生态环境效应研究——以黑河中游张掖绿洲为例[J]. 中国沙漠,2006,26(1):81-84.
- [8] 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.
- [9] 杨劲松,姚荣江. 黄河三角洲地区土壤水盐空间变异特征研究[J]. 地理科学,2007,27(3):348-353.
- [10] 王玉刚,肖笃宁,李彦,等. 新疆三工河流域尾间绿洲地下水变化与土壤积盐的响应[J]. 生态学报,2007,27(10):4036-4044.
- [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,2014,51(1):75-81.
- [12] 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.
- [13] 沈浩,吉力力·阿不都外力. 玛纳斯河流域农田土壤水盐空间分布特征及影响因素[J]. 应用生态学报,2015,26(3):769-776.
- [14] 赵明亮,李艳红,李发东. 新疆艾比湖湿地土壤水盐空间变异性分析[J]. 湖泊科学,2016,28(6):1328-1337.

- [15] 付传城,王文勇,潘剑君,等.南京市溧水区土壤重金属污染不同插值方法的对比研究[J].土壤通报,2014,45(6):1325-1333.
- [16] 张红,卢茸,石伟,等.基于RBF神经网络的土壤重金属空间变异研究[J].中国生态农业学报,2012,20(4):474-479.
- [17] 韩桂红,塔西甫拉提·特依拜,买买提·沙吾提,等.渭-库绿洲地下水对土壤盐渍化和其逆向演替过程的影响[J].地理科学,2012,(3):362-367.
- [18] Su S, Xiao R, Zhang Y. Multi-scale analysis of spatially varying relationships between agricultural landscape patterns and urbanization using geographically weighted regression [J]. Applied Geography, 2012, 32(2):360-375.
- [19] Zhang L, Gove J H. Spatial assessment of model errors from four regression techniques.[J]. Forest Science, 2005, 51(51):334-346.
- [20] Abliz A, Tiyyip 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):1-15.
- [21] 凌红波,徐海量,刘新华,等.新疆克里雅河流域绿洲适宜规模[J].水科学进展,2012,23(4):563-568.
- [22] 管孝艳,王少丽,高占义,等.盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J].生态学报,2012,32(4):198-206.
- [23] 陈强,朱慧敏,何溶,等.基于地理加权回归模型评估土地利用对地表水质的影响[J].环境科学学报,2015,36(5):1571-1580.
- [24] 李铸,文勇立,张云,等.若尔盖盆地不同退化阶段草甸土壤含水率、pH及电导率的变化[J].生态环境学报,2016,25(5):752-759.
- [25] Maimaitijiang M, Ghulam A, Sandoval J S O, et al. Drivers of land cover and land use changes in St. Louis metropolitan area over the past 40 years characterized by remote sensing and census population data[J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2015, 35:161-174.
- [26] Fotheringham A S, Brunsdon C, Charlton M. Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships [M]. New York: John Wiley&Sons, 2003.

(上接第 254 页)

(2)研究区棉田土壤盐分的实测值介于 7.42~22.34 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,预测的研究区土壤盐分含量介于 9.33~26.99 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,实测值与预测值达到较好的吻合,从土壤盐分的空间反演图来看,土壤含盐量从绿洲内部向外围逐渐增加,与实测点土壤盐分分布及棉田的生长状况较为一致,因此说明该研究方法对估算土壤盐分较为有效。

(3)研究表明,基于研究区棉田土壤野外采样数据构建的增强型归一化植被指数(ENDVI)线性回归模型,采用地统计空间插值得到的土壤盐分空间分布图,可以较为准确地预测出渭干河—库车河三角洲绿洲棉田土壤盐分的空间分布状况和分布特征。

参考文献:

- [1] 贡璐,韩丽,任曼丽,等.塔里木河上游典型绿洲土壤水盐空间分异特征[J].水土保持学报,2012,26(4):251-255,278.
- [2] 沈浩,吉力力·阿不都外力.玛纳斯河流域农田土壤水盐空间分布特征及影响因素[J].应用生态学报,2015,26(3):769-776.
- [3] 李建国,濮励杰,朱明,等.土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J].地理学报,2012,67(9):1233-1245.
- [4] 王佳丽,黄贤金,钟太洋,等.盐碱地可持续利用研究综述[J].地理学报,2011,66(5):673-684.
- [5] 石玉林.西北地区土地荒漠化与水土资源利用研究[M].北京:科学出版社,2004.
- [6] Dehaan R L, Taylor G R. Image-derived spectral endmembers as indicators of salinisation [J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(4):775-794.
- [7] 王飞,丁建丽,伍漫春.基于NDVI-SI特征空间的土壤盐渍化遥感模型[J].农业工程学报,2010,26(8):168-174.
- [8] 翁永玲,宫鹏.土壤盐渍化遥感应用研究进展[J].地理科学,2006,26(3):369-375.
- [9] 扶卿华,倪绍祥,王世新,等.土壤盐分含量的遥感反演研究[J].农业工程学报,2007,23(1):48-54.
- [10] 姚远,丁建丽,雷磊,等.干湿季节下基于遥感和电磁感应技术的塔里木盆地北缘绿洲土壤盐分的空间变异性[J].生态学报,2013,33(17):5308-5319.
- [11] Bouaziz M, Matschullat J, Gloaguen R. Improved remote sensing detection of soil salinity from a semi-arid climate in Northeast Brazil [J]. C R Geoscience, 2011, 343(11):795-803.
- [12] Mulder V L, Bruin S D, Schaepman M E, et al. The use of remote sensing in soil and terrain mapping: A review[J]. Geoderma, 2011, 162(1/2):1-19.
- [13] 王正兴,刘闯,Huete A.植被指数研究进展:从AVHRR-NDVI到MODIS-EVI[J].生态学报,2003,(5):979-987.
- [14] 王飞,丁建丽,魏阳,等.基于Landsat系列数据的盐分指数和植被指数对土壤盐度变异性的响应分析——以新疆天山南北典型绿洲为例[J].生态学报,2017,(15):1-16.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化性质分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978:62-135.
- [16] 陈红艳,赵庚星,陈敬春,等.基于改进植被指数的黄河口盐渍土盐分遥感反演[J].农业工程学报,2015,31(5):107-113.
- [17] 魏阳,丁建丽,王飞.基于Landsat OLI的绿洲灌区土壤盐度最优预测尺度分析[J].中国农业科学,2017,50(15):2969-2982.
- [18] 王飞,丁建丽.基于土壤植被光谱协同分析的土壤盐度推理模型构建研究[J].光谱学与光谱分析,2016,36(6):1848-1853.
- [19] 丁建丽,王飞.干旱区大尺度土壤盐度信息环境建模——以新疆天山南北中低海拔冲积平原为例[J].地理学报,2017,72(1):64-78.