

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.021

基于距离反比法的土壤盐分三维空间插值研究^{*}

云安萍¹ 鞠正山² 胡克林¹ 梁浩¹

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 国土资源部土地整治中心, 北京 100035)

摘要: 以新疆兵团一块面积约 70 hm² 的盐碱地为研究对象, 采用 EM38 与土钻取样相结合的方法得到了 126 个点不同土层(0 ~ 200 cm) 的 1 386 个土壤盐分数据, 应用三维距离反比法(3D-IDW) 对土壤盐分进行了空间插值, 探讨了垂向坐标扩大倍数和搜索点数对插值结果精度的影响。结果表明, 研究区 0 ~ 140 cm 土层盐分平均含量较高, 为 1.84 ~ 2.11 g/kg, 盐分变异较大, 而 140 ~ 200 cm 土层盐分平均含量较低, 为 1.74 ~ 1.79 g/kg。所有土层盐分含量的统计特征值(平均值、标准差和变异系数等) 均随土层加深而呈现递减的趋势。土壤盐分实测值和估计值的均方根误差随垂向坐标扩大倍数的增大而减小, 随搜索点数的增加而增大, 其值在 0.1 ~ 0.4 g/kg 范围内变化, 当垂向坐标扩大 300 倍、搜索点数为 6 个时, 插值效果较优。采用确定的参数对研究区的土壤盐分进行了三维空间插值, 结果表明土壤盐分空间分布特征与实测值比较吻合, 大部分区域土壤盐分含量小于 2.5 g/kg, 靠近北部和南部边界区土壤含盐量较低, 属于非盐化土区, 而大于 4 g/kg 盐化土主要分布在中间和南部局部区域。研究区 80% 土壤为非盐化土和轻度盐化土, 20% 为中度和重度盐化土。影响该区盐化土分布的主要因素有灌溉、局部地形、粘土层位置、地下水埋深和矿化度。当不同方向的取样间距相差很大时, 选取合适的垂向坐标扩大倍数和搜索点数对保障 3D-IDW 法的插值结果精度至关重要。

关键词: 土壤盐分 三维 空间插值 距离反比法 垂向扩大倍数 搜索点数

中图分类号: S156.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)12-0148-09

Three-dimensional Spatial Interpolation of Soil Salinity Based on Inverse Distance Weighting Method

Yun Anping¹ Ju Zhengshan² Hu Kelin¹ Liang Hao¹

(1. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

2. Centre of Land Consolidation, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China)

Abstract: Accurate prediction of three-dimensional (3D) spatial distribution of soil salinity can provide a scientific basis for land use planning and improvement of salt-affected soil. An area of about 70 hm² of saline and alkaline land in Xinjiang was taken as the study area, and a total of 1 386 data of soil salt content was obtained from different soil layers (0 ~ 200 cm) at 126 sampling sites by the method combining the electromagnetic induction technique with soil sampler. The spatial interpolation of soil salinity was made with 3D-inverse distance weighting (3D-IDW) method and the effects of vertical expanding multiples and searching points amount on the interpolation results were explored. The results indicated that it had higher average salt content and larger variations in soil layer of 0 ~ 140 cm depth than those in 140 ~ 200 cm soil depth. The average soil salt content in 0 ~ 140 cm soil layer was in the range of 1.84 ~ 2.11 g/kg, while it was 1.74 ~ 1.79 g/kg in 140 ~ 200 cm soil layer. The statistical characteristics (mean, standard deviation and coefficient of variation, etc.) of soil salinity decreased as soil depths increased. The root mean square error (RMSE) decreased with the increase of vertical

收稿日期: 2015-03-26 修回日期: 2015-06-07

^{*} 国家自然科学基金资助项目(41130526)和国土资源部土地整治重点实验室资助项目(20140135)

作者简介: 云安萍, 博士生, 主要从事土壤空间变异研究, E-mail: yunanping2008@aliyun.com

通讯作者: 胡克林, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤空间变异和溶质运移研究, E-mail: hukel@cau.edu.cn

expanding multiples, but it increased with the increasing amount of searching points, and the RMSE varied from 0.1 g/kg to 0.4 g/kg. When the vertical size was expanded by 300 folds and searching point was six, the optimal 3D spatial distribution map of soil salinity was obtained by the 3D-IDW method, and the results showed that the spatial distribution of soil salinity agreed well with the observed values. The soil salt content in most of the study area was less than 2.5 g/kg, and the areas close to the north and south boundaries belonged to non-salinized soil with relatively low soil salt content, while the heavy-salinized soil was mainly distributed in the central and south of the study area with soil salt content over 4 g/kg. About 80% of the study area belonged to non- and light-salinized soils, and only 20% of the study area belonged to moderate and heavy salinity soils. The main factors influencing the distribution of soil salinity were irrigation, local terrain, clay layers depths, groundwater depth and its degree of mineralization. When the difference of sampling interval in different directions was very large, it would be crucial to choose suitable expanding multiples and amount of searching points to improve the prediction accuracy of the 3D-IDW method.

Key words: Soil salinity Three-dimensional Spatial interpolation Inverse distance weighting method Vertical expanding multiples Searching points amount

引言

土壤是一个连续的三维实体,土壤属性在各个方向上即使在很短的距离内变异也非常大^[1]。当前有关土壤属性空间分布的研究,主要集中在二维空间^[2-4]。不同土层的土壤属性在垂直方向上是不连续的,如果忽略了垂直方向的影响,这对于研究不同土层营养元素的作物有效性是有缺陷的^[5-6]。同样对于土壤盐分空间变化的研究也存在类似的问题。有研究表明,当地下水临界埋深较浅时,其溶解盐可以通过毛管作用上升到地表进行积累^[7]。盐碱地普遍存在盐碱重、返盐强烈、盐分垂直变化明显等问题,造成土壤生产力低下,农业经济效益不高^[8]。因此,研究盐碱地土壤盐分的空间变异,特别是三维土体盐分的空间变异不仅具有理论意义,而且具有实际应用价值。

当三维土壤属性数据在水平和垂直方向上都有很好的空间变异性且能用变异函数模型描述时,克里格法或基于空间结构模型的各种估值方法就成为三维空间制图的首选。van Meirvenne 等首次用三维普通克里格和二维分层普通克里格预测三维土体硝态氮含量,发现三维普通克里格精度更高^[1]。姚荣江等研究表明克里格法的平滑效应减小了数据间的差异并改变了数据的空间结构,而序贯高斯模拟结果突出了原始数据分布的波动性^[9]。李洪义等发现将各深度土壤电导率大于一定阈值的条件概率分布切片结果叠加,可直观地反映土壤电导率的三维空间变异规律及种植作物的风险^[8]。

由于冲积平原区土壤属性在垂直方向上的变化非常复杂^[10],采用传统的克里格法很难准确描述土

壤属性的空间分布特征。因此,简单易行的距离反比法(Inverse distance weighting, IDW)就成为研究该类问题的好工具。吴亚坤等分别采用三维距离反比法和二维分层距离反比法对南疆巴州典型绿洲区土壤全盐量进行了空间插值,结果表明三维插值结果精度较高^[11],但是上述研究没有考虑垂向坐标扩大倍数和搜索点数对插值结果的影响,导致土壤盐分在垂直方向上出现一定程度的均一化现象,这与土壤盐分在垂直方向上有较为显著的空间变异事实相悖,说明采用三维距离反比插值方法时需要考虑不同方向取样间距的影响。

通常采用土钻取土法来测定土壤盐分,不仅费时、费力、成本高,而且对土壤的破坏性大。为了有效地掌握土壤的盐分情况并适时地指导农业生产,高效、快速、低廉而破坏性低的土壤盐分监测技术——电磁感应仪 EM38 正好符合该要求,并且在土壤盐分监测和管理中已有很多实际应用^[12-15]。因此,本文以新疆兵团一块盐渍化农田作为研究对象,采用 EM38 与土钻取土相结合的方法来探讨 3D-IDW 方法在土壤盐分空间插值中需要注意的问题,旨在为正确使用三维距离反比插值方法提供建议和参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆巴音郭楞蒙古自治州农二师 27 团南部,处于西部霍拉山和西部开都河冲积影响形成的冲积-洪积平原的扇缘边缘,东经 86°31',北纬 41°58',研究区总面积约 70 hm²,海拔高度 1 049 ~ 1 056 m。地势由西北向东南倾斜,自然坡降

在 1:2 000 ~ 1:1 500 之间,地形相对平缓,距离博斯腾湖约 3 km。研究区属中温带干旱性气候,年均气温 8.3℃,无霜期 158 d,年日照时长 3 183 h。年均蒸发量和降水量分别为 1 957 mm 和 65 mm,70%降水集中在 5—9 月份。土壤类型以潮土为主。因研究区紧邻博斯腾湖,地下水位较高,埋深在 1.2 ~ 2.2 m,矿化度 1.4 ~ 8.3 g/L,土壤 pH 值 8.9 ~ 9.7,受土壤盐渍化及次生盐渍化危害的影响,土壤含盐量高,且缺磷少氮,有机质不足,仅钾丰富,土质多以粉质壤土为主,主要种植单季作物,如春小麦、辣椒、番茄等。灌溉水主要来自开都河。

1.2 布点采样

选取一块面积约 70 hm² 的研究区(图 1),该区由 7 块条田组成,从北向南依次编号为 1~7,条田间距从 67 m 到 120 m 不等。该研究区靠近北边的 1~2 号条田主要种植春小麦,其他条田种植辣椒和番茄,小麦采用传统漫灌,辣椒和番茄采用膜下滴灌。由于受到排水渠的影响,在每块条田内均匀布点,东西向和南北向采样间距分别约 100 m 和 30 m,7 块条田共布设 126 个点,2014 年 4 月份在每个点均用 EM38-MK2 贴地在水平模式和垂向模式测定表观电导率,分别记为 E_{MH} 和 E_{MV} 。分别在每块条田图 1 所示取样点采用土钻分层取土,取样深度 2 m,每个剖面采集 11 层土样(0~20 cm 间隔为 10 cm,20 cm 以下间隔为 20 cm),共获得 735 个土样。另外,在每个条田均匀钻取 3 个地下水位观测孔,记录埋深,同时取地下水样。

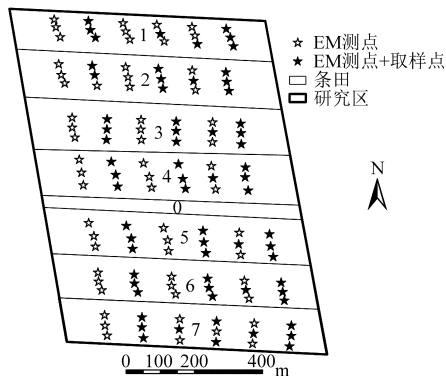


图 1 研究区采样点分布图

Fig. 1 Sampling sites in study area

1.3 测定项目和和方法

取一部分土样测定干燥含水率,剩余土样在室内风干,过 2 mm 筛,采用电导率仪测定电导率 E_c (dS/m),土水质量比 1:5。土壤盐分和电导率的换算采用相邻研究区的转换公式^[16],即

$$S_t = 3E_c + 0.966 \quad (R^2 = 0.965, n = 110)$$

式中 S_t ——土壤全盐量, g/kg

地下水样的 pH 值和矿化度分别用便携式 pH

计和电导率仪测定。

1.4 空间插值方法和结果验证

采用三维距离反比法进行区域土壤盐分三维空间分布的估值。插值中常用 Shepard's 方法来计算已知点的权重系数,计算公式为

$$V(x, y, z) = \sum_{i=1}^n w_i v_i(x_i, y_i, z_i) \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad w_i = \left(\frac{D - h_i}{D h_i} \right)^2 / \sum_{i=1}^n \left(\frac{D - h_i}{D h_i} \right)^2 \quad (2)$$

$$h_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (3)$$

式中 V ——待估点的属性值

v_i ——已知观测点的属性值,对应坐标为 (x, y, z) 和 (x_i, y_i, z_i)

w_i ——对应已知点的权重系数^[17]

h_i ——未知点到已知点的距离

D ——参与计算的 n 个已知点到未知点距离的最大值

插值结果精度验证以不同土层为基础,计算 67 个剖面点实测值与估计值间的均方根误差(RMSE)。

1.5 数据处理

数据的常规统计、正态性检验及相关分析等均采用 SPSS 13.0 软件完成。数据插值在 GMS 6.0 软件中进行,3D 空间分布图的绘制采用 SGeMS 2.0 软件。

2 结果与分析

2.1 土壤表观电导率的解释

对用 EM38 2 种模式测定的表观电导率(E_{MV} 和 E_{MH})进行了相关性分析,结果见图 2。从图中可知:垂向模式(E_{MV})和水平模式(E_{MH})的表观电导率具有很好的相关性,决定系数为 0.934 5,达到 $P < 0.01$ 的极显著水平。垂向模式表观电导率大于水平模式,因此土体属于正向剖面^[18]。以 2 种模式的

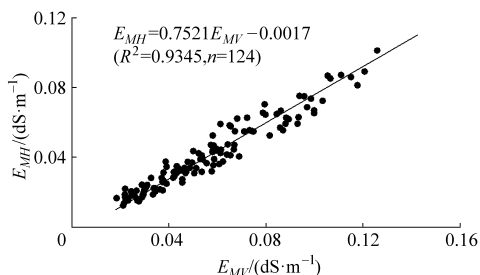


图 2 土壤表观电导率水平测定模式(E_{MH})和垂向测定模式(E_{MV})之间的相关性

Fig. 2 Relationship between apparent conductivities of E_{MV} and E_{MH}

表观电导率 E_{MH} 或 E_{MV} 为自变量,不同土壤层次的盐分含量为因变量,可建立两者之间的回归模型(表 1)。从表 1 可知,0~100 cm 土层盐分用水平模式表观电导率解译精度要高于用垂向模式,而 100~200 cm 土层则用垂向模式表观电导率解译效果更好。

表 1 不同土层土壤盐分含量与表观电导率 E_{MH} 和 E_{MV} 的回归方程

Tab. 1 Regression equation of soil total salt content of each soil layer and apparent conductivities of E_{MV} and E_{MH}

土层 深度/cm	$S_i = aE_{MH} + b$			$S_i = aE_{MV} + b$		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i>
0~10	26.44	0.88	0.483	16.65	0.88	0.396
10~20	33.97	0.56	0.600	23.06	0.56	0.533
20~40	33.92	0.52	0.675	25.13	0.52	0.624
40~60	33.89	0.49	0.688	25.84	0.49	0.674
60~80	32.50	0.52	0.691	24.77	0.52	0.677
80~100	32.09	0.47	0.715	24.33	0.47	0.699
100~120	30.66	0.51	0.719	24.28	0.51	0.724
120~140	30.48	0.55	0.693	24.85	0.55	0.718
140~160	28.20	0.57	0.667	25.44	0.57	0.715
160~180	29.97	0.44	0.739	25.32	0.44	0.755
180~200	27.81	0.56	0.694	22.20	0.56	0.690

表 2 不同土层土壤盐分含量的描述性统计特征值

Tab. 2 Descriptive statistics of soil salt content at different soil layers

土层 深度/cm	分布 类型	最小值 /(g·kg ⁻¹)	最大值 /(g·kg ⁻¹)	平均值 /(g·kg ⁻¹)	标准差 /(g·kg ⁻¹)	偏度 系数	峰度 系数	K-S(P)	变异 系数
0~10	对数正态	0.67	10.90	2.11	1.77	-0.12	0.85	0.47	0.80
10~20	对数正态	0.66	9.48	2.06	1.63	-0.07	-0.12	0.74	0.73
20~40	对数正态	0.63	7.99	2.04	1.61	-0.08	-0.12	0.42	0.73
40~60	对数正态	0.57	10.60	1.98	1.61	-0.28	0.30	0.51	0.76
60~80	对数正态	0.58	9.08	1.93	1.49	-0.32	0.16	0.45	0.71
80~100	对数正态	0.58	6.03	1.84	1.31	-0.36	-0.08	0.64	0.63
100~120	对数正态	0.62	7.85	1.84	1.34	-0.37	0.07	0.39	0.65
120~140	对数正态	0.64	7.82	1.88	1.40	-0.21	-0.08	0.62	0.67
140~160	正态	0.62	3.98	1.79	1.17	0.68	-0.05	0.40	0.55
160~180	正态	0.61	4.35	1.74	1.23	0.97	0.74	0.30	0.60
180~200	正态	0.65	3.86	1.74	1.13	0.76	0.20	0.41	0.54

注:服从对数正态分布的数据对应偏度系数、峰度系数和 K-S 检验的 P 值都是数据对数转换后重新统计的结果。

2.3 土壤盐分的三维距离反比法插值结果

三维插值计算时,给定东西向长 940 m,南北向长 1 020 m,垂直方向深为 200 cm,插值网格单元尺寸为 10 m × 10 m × 0.05 m,共计 94 × 102 × 41 = 393 108 个网格。以上数据也整理成 $X-Y-Z$ 的三维格式。因实际研究范围边界不是标准网格型,故插值后先将边界外的值去掉,再将结果导入三维绘图软件 SGeMS 中显示。由于垂直方向研究距离过小,可视化时将 Z 轴放大 100 倍。

2.3.1 搜索点数对原始数据进行三维插值的影响

在 GMS 软件中用距离反比法计算时,本研究给

2.2 不同土层盐分含量的常规统计特征

对研究区不同土层盐分进行常规统计和 Kolmogorov-Smirnov 正态性检验(K-S 检验, $P < 0.05$, 双截尾),结果见表 2。可看出,0~200 cm 土体按盐分分布可分成 0~140 cm 和 140~200 cm 两部分,0~140 cm 各土层盐分含量变化幅度较大,平均含盐量在 1.84~2.11 g/kg 范围内,标准差在 1.31~1.77 g/kg 之间,最小值只有 0.57 g/kg,最大值达到 10.9 g/kg,整体变异比较大,各层盐分含量均服从对数正态分布。除 80~100 cm 土层外,其他土层盐分最大值均大于 7.8 g/kg。140~200 cm 各土层土壤盐分均服从正态分布,盐分平均含量在 1.74~1.79 g/kg 之间,变化较为平稳。0~200 cm 土壤剖面各层盐分的变异系数范围为 0.54~0.80,呈现垂直递减的规律,所有土层盐分均属于中等变异。土壤盐分的统计量(最大值、最小值、平均值和标准差)都随着土层加深而递减,反映了在春季强烈蒸发作用下盐分随土壤毛管水上升形成表层积聚现象。该结果与阿布都热合曼·哈力克在新疆岳普湖县的研究结果相似^[19]。

定的搜索点数 n 分别为 2~15、20、25、30,然后分别进行插值,并用交叉验证法分析实测值和估计值间的均方根误差(RMSE),结果如图 3 所示。结果表明,随着搜索点数 n 的增加,预测值与实测值之间的 RMSE 先急剧增加,在 $n=11~15$ 时达到稳定,然后随 n 的增大变化幅度很小。因此,搜索点数越多,预测误差越大,搜索点数是影响插值精度的主要因素之一。

图 4a~4f 分别是搜索点数 $n=5、10、15、20、25、30$ 时对应的三维空间插值结果(显示时 Z 轴扩大了 100 倍)。从图中可以看出,随着搜索点数增加,盐

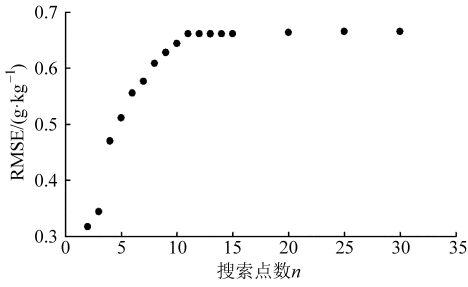


图3 盐分三维插值结果与原始数值的均方根误差随搜索点数的变化关系

Fig.3 RMSE variation between 3D-IDW method estimated and observed soil salt contents with increasing of searching points

分在水平和垂直方向的插值结果斑块化现象减弱, 逐渐变得均一。当 n 为 5 和 10 时, 盐分在水平向上几乎没有进行插值, 垂直方向上土壤盐分整体呈现上高下低的趋势, 与点数据的盐分常规统计结果一致; 当 $n > 10$ 时剖面不同土层的盐分含量基本相等, 呈现均一化的现象, 但盐分在水平向上逐渐平滑化。图 4c~4f 外围边界三维插值结果相较于图 4a、4b 有垂向斑块相互融合的效果。因此, 采用土壤盐分原始数据直接进行三维距离反比法插值时, 垂向各位置盐分插值结果逐渐趋于均一化, 主要原因是垂直方向采样间距远小于水平间距, 插值结果主要依赖于距离预测点最近剖面的盐分值, 而水平方向插值

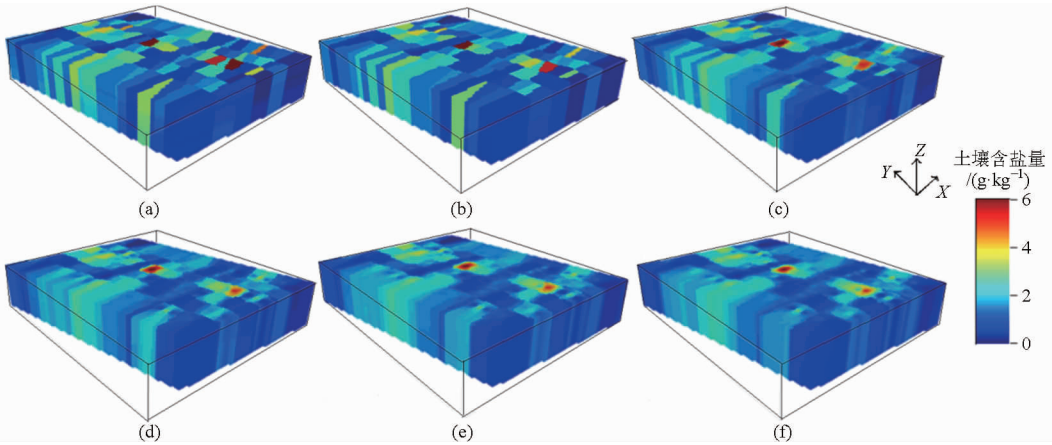


图4 土壤盐分三维距离反比法插值空间分布

Fig.4 3D distribution of soil salinity estimated by 3D-IDW method in study area

(a) $n=5$ (b) $n=10$ (c) $n=15$ (d) $n=20$ (e) $n=25$ (f) $n=30$

效果不明显。

通过对土壤剖面盐分变化情况的分析, 发现研究区主要涉及 2 种类型土壤剖面: ① 盐分随土层厚度单调递增 (15 个) 或递减 (55 个) 的剖面, 即单一变化剖面。② 剖面盐分分布随深度有递增也有递减, 即混合剖面 (56 个)。以下以这 2 种剖面盐分变化类型为例, 分析搜索点数对土壤盐分三维空间插值的影响。

从图 5 可以看出, 搜索点数越少, 垂直方向插值的结果越接近其真实情况, 随着搜索点数的增加, 参与计算某层盐分的垂向相邻点数增加, 不同土层盐分含量插值后趋于一致。图 5a 是选取的土壤盐分垂向递减的剖面, 从搜索点数 $n > 10$ 开始, 出现剖面盐分插值后各层均等的情况。从而推知搜索点数越多, 在土壤盐分单一变化的剖面应用三维距离反比法可以使土壤盐分在垂直方向上越趋向均一, 变

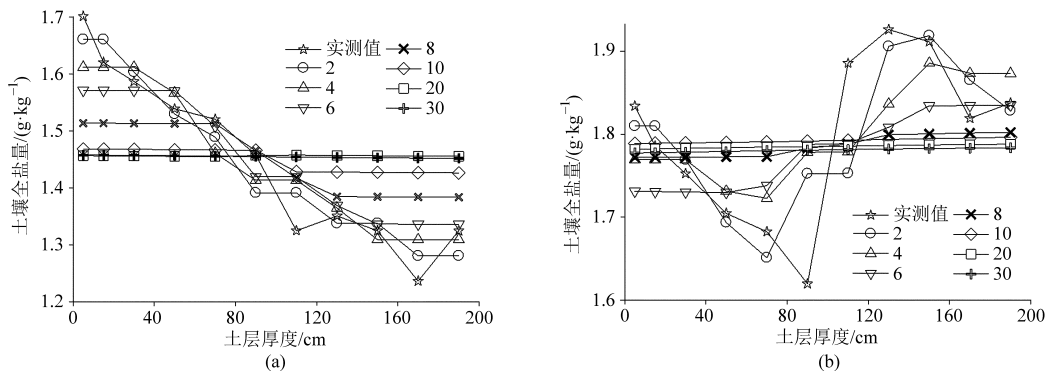


图5 2种土壤盐分剖面的插值结果(图例2~30为搜索点数)

Fig.5 Interpolation results for salt content of two soil profile types

(a) 垂向递减剖面 (b) 混合剖面

异越来越小。

图 5b 为选取的土壤盐分变化复杂的混合剖面, 当搜索点数 $n \leq 10$ 时, $0 \sim 40$ cm 土层盐分插值结果随搜索点数增加而出现先减小 ($n = 2 \sim 6$) 后增加 ($n = 6 \sim 10$) 的情况; $40 \sim 120$ cm 土层盐分插值结果随 n 增加而增加; $120 \sim 200$ cm 土层盐分插值结果随 n 增加而减小, 这与参与计算的点到待测点的距离相关, 而 $80 \sim 100$ cm 和 $100 \sim 120$ cm 土层盐分的含量决定了下层土壤盐分的插值效果。当 $n = 10$ 时, 盐分插值结果基本达到均一化; 当 $n > 10$ 时, 土壤剖面盐分含量随土层加深而增加, 盐分总体随搜索点数增加而递减, 但对于确定的搜索点数, 剖面盐分变化幅度很小。主要是由于距未知点最近的剖面在盐分插值结果中起着决定性的作用。

从以上分析可知, 搜索点数 n 小于垂向取样点 (此处为 11 个) 时, 待插值点各层盐分由水平方向上距离最近点的各层盐分依照距离大小随着 n 的增加依次加入计算, 所以每个实测点附近都有该点独有的影响区域, 表现在插值结果图中就是水平方向盐分几乎不进行插值, 但点数据由相应的盐分斑块代替; 当搜索点数 $n \geq 11$ 时, 搜索水平方向上最近的第 2 个点, 随着搜索点数的增加将该点对应剖面上的取样点依次加入计算, 所以当水平采样间距远大于垂向间距时会出现以下结果: 搜索点数 n 的增加只是将待插值点水平面内邻近点剖面各层次盐分含量按照距离大小依次加以计算, 插值结果主要是将邻近剖面盐分含量平均化, 水平方向上插值效果并不显著。因此, 利用原始数据直接进行三维插值并不能真实反映出土壤盐分在三维空间的变异性。而

本研究中土壤剖面厚度为 200 cm, 主要采样间距为 10 cm 或 20 cm, 水平方向上, 南北向每个条田内部采样点间距为 21 ~ 40 m, 条田间采样点间距从 67 m 到 120 m 不等, 东西向采样间距约 100 m, 垂直方向采样间距是水平方向上间距的 $1/1\ 000 \sim 1/200$, 对应本研究中的权重系数, 在式 (2) 中对应固定的搜索点数, 分母是一定的, 待插值点到实测点的最大距离 D 是常数, 分析分子部分为

$$\left(\frac{D-h_i}{Dh_i}\right)^2 = \frac{D^2 - 2Dh_i + h_i^2}{D^2h_i^2} = \frac{1}{h_i^2} - \frac{2}{Dh_i} + \frac{1}{D^2} \quad (4)$$

以任意一个未测点某一土层深度为例, 用式 (3) 计算 h_i 时, 水平方向点与点的距离越近, h_i 越小, 式 (4) 的结果越大, 实测点对应的权重系数越大, 对于实测点剖面未测深度的土层盐分, 第 1 项中垂直方向点的权重是水平方向邻近点权重的 $4 \times 10^4 \sim 10^6$ 倍, 第 2 项中垂直方向点的权重是水平方向点权重的 200 ~ 1 000 倍, 最后一项为常数不考虑, 整体权重还是以第 1 项为主, 因此 3D-IDW 计算结果偏向水平方向距离最近实测点在垂直方向盐分含量的算数平均值。因此, 用点数搜索来进行土壤剖面盐分的三维距离反比法插值结果是不可靠的。

同理, 如果 XY 平面上的采样间距远小于 Z 轴时, 如本研究将 Z 轴扩大 10 000 倍, 此时对应垂向最小间距为 1 000 m, 远大于水平方向采样间距。随着搜索点数 n 增加, 待插值点附近水平面内的点按照距离大小依次参与插值计算, 当搜索点数 $n = 25$ 时, 得到土壤盐分的三维插值结果 (Z 轴扩大 100 倍) 如图 6 所示。

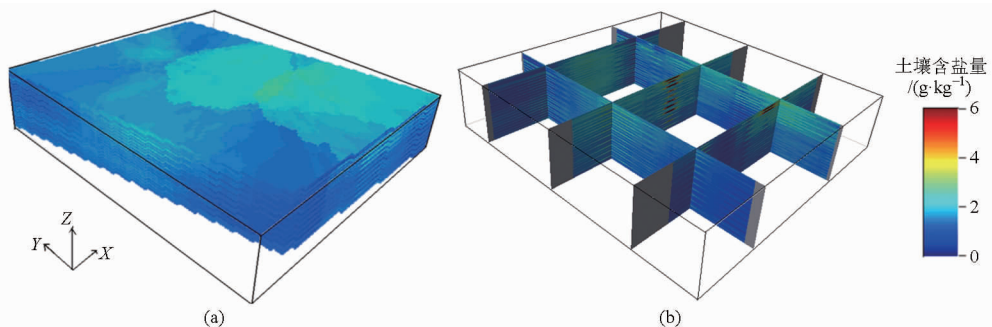


图 6 土壤盐分三维距离反比法插值空间分布全局图和截面图

Fig. 6 3D distribution of soil salinity estimated by 3D-IDW method in study area and its cross section map

(a) 全局图 (b) 截面图

从图 6 可知, 当垂直方向采样间距远大于水平采样间距时, 三维插值剖面盐分在水平方向上是平滑化的, 图 4 中盐分含量较大的区域盐分从 6 g/kg 左右变为不到 3 g/kg, 且周边盐分与该区无显著性差异, 垂直方向上表现出盐分是以水平层面垂向堆叠而成的并不十分连续的结果, 符合上述推理。因

此 Z 轴间距远小于 XY 平面点间距会使盐分含量在垂直方向上均一化, 反之则在水平方向上均一化, 搜索点数 n 的增加会加剧插值结果均一化的效果; 而且距离大的方向插值后可以保持未插值前实测点盐分的整体变化趋势, 如图 4 中研究区在中部和南部部分区域土壤盐分含量最高, 中部偏西盐分含量也

比较高,南北两边界盐分含量最低,图6的水平面上插值效果严重失真;而图6在垂直方向上保持了盐分含量随土层加深而递减的趋势,图4中垂直方向盐分含量趋于均等。从而推知在土壤属性的三维建模中如果各方向采样间距存在数量级上的差别,不能直接使用距离反比法。

2.3.2 搜索点数和垂向扩大倍数对插值结果的影响

因为土壤盐分在水平和垂直方向上都存在空间连续性,所以任意点的任一土层盐分与相同层次的其他点和同一剖面不同深度的点都相关,是否可以找出一个合适的垂向扩大倍数来满足以上要求。从上面的分析可知,水平方向上采样间距是垂向间距的100~500倍,要使三维插值在空间上搜索到不同

方向的观测点,那么各方向采样间距的数量级应该基本一致。故垂向扩大倍数(k)应在100~500之间取值,设置 k 为100、150、200、250、300、400和500 7个等级,由于搜索点数对盐分空间插值影响也比较大,因此设定采样点数 n 为2~6、10、15、20、25、30 10个等级,然后绘制不同土层插值结果评价图。

图7为不同土层盐分的插值结果与实测值的RMSE随搜索点数和垂向坐标扩大倍数的变化情况。从图可知,几乎所有土层估计值与实测值的RMSE随垂向坐标扩大倍数增大而减小,随搜索点数增加而增大,变化范围在0.1~0.4 g/kg内。对任一固定搜索点数, $k=300$ 时RMSE小于0.3 g/kg且基本达到稳定,对于0~10 cm和180~200 cm土

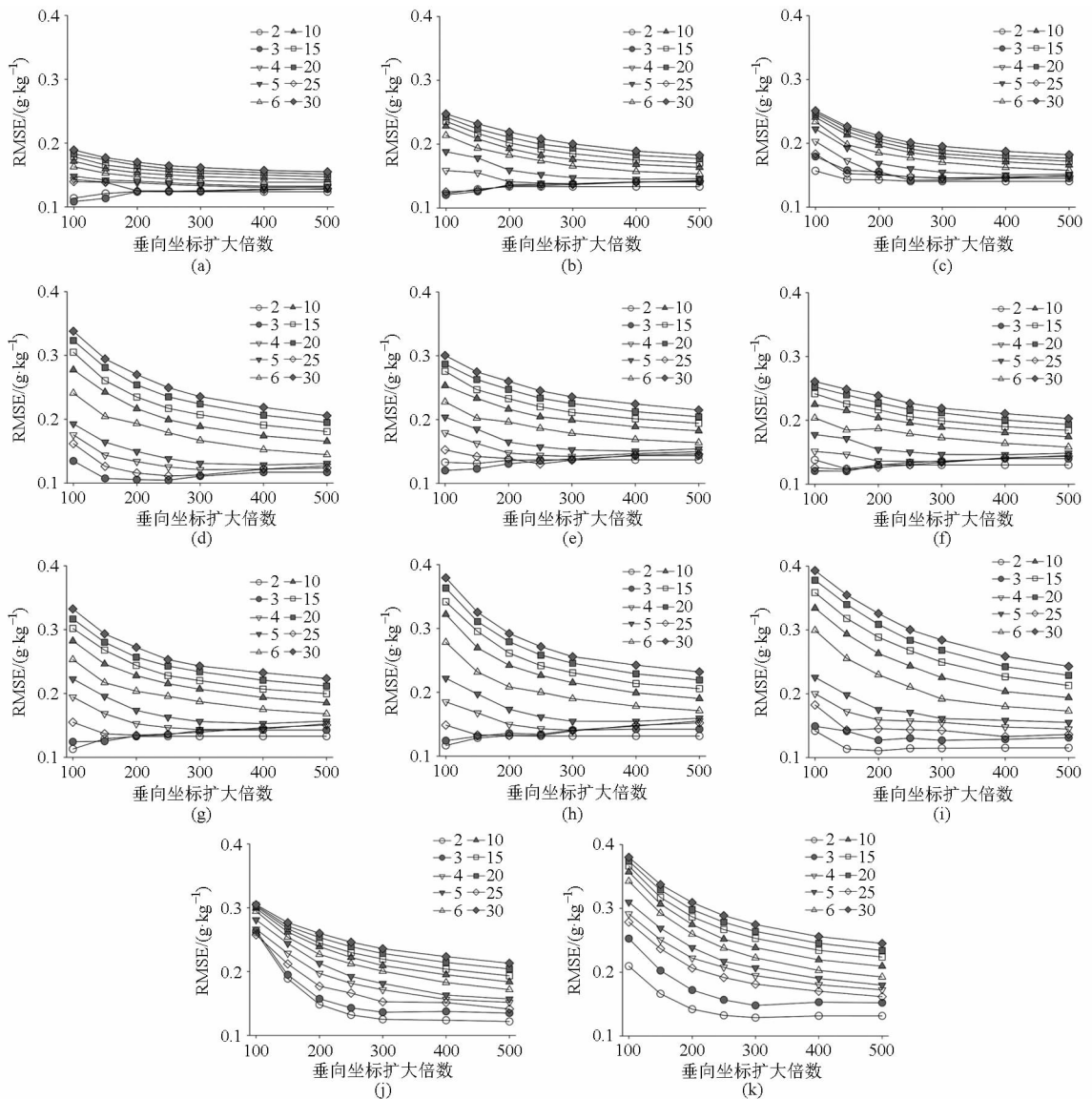


图7 不同土层盐分3D-IDW插值结果与实测值的RMSE随搜索点数和垂向扩大倍数的变化

Fig.7 RMSE variation of 3D-IDW interpolated and observed soil salinities at different soil layers with increasing of searching points and vertical expanding multiples

(a) 0~10 cm (b) 10~20 cm (c) 20~40 cm (d) 40~60 cm (e) 60~80 cm (f) 80~100 cm
(g) 100~120 cm (h) 120~140 cm (i) 140~160 cm (j) 160~180 cm (k) 180~200 cm

层,当搜索点数 $n > 4$ 时, RMSE 随垂向坐标扩大倍数增加而减小的程度趋于稳定,当搜索点数为 5 时, 10 ~ 20 cm 土层的 RMSE 趋于稳定,当搜索点数为 8 时, 20 ~ 40 cm 土层的 RMSE 趋于稳定,其他土层在搜索点数为 6 时, RMSE 随垂向坐标扩大倍数增加而减小的幅度也趋于稳定,对应 RMSE 都小于 0.2 g/kg。表层所对应的搜索点数最少,可能是由盐分表聚形成的上下土层盐分含量有较大差异引起的。因此,本研究在进行三维距离反比法插值时,可以将垂向坐标扩大 300 倍,同时将搜索点数设为 6,可以满足各层土壤的 RMSE 小于 0.2 g/kg 的精度。

2.3.3 土壤盐分三维空间插值结果及影响因素

将垂向坐标扩大 300 倍,搜索点数设为 6,应用三维距离反比法对土壤盐分进行空间插值,该研究区土壤盐分属于苏打-氯化物类型,按照《新疆土壤》对地方土壤盐化程度的分级标准^[20]:盐土、重度、中度、轻度盐化和非盐化土,其 0 ~ 60 cm 土层所对应的含盐量分别为大于 6 g/kg、4 ~ 6 g/kg、2.5 ~ 4 g/kg、1.5 ~ 2.5 g/kg 和小于 1.5 g/kg,最后分级结果见图 8。从图中可以看出:研究区 4 个角的盐分含量都比较低,小于 2.5 g/kg;中部和南部部分区域盐分含量最高,超过了 6 g/kg;而在这 2 个区域外围、中部以西、北部和东南角部分区域盐分含量比其他区域要高。土壤盐分含量在垂直方向上随土层加深而减小,在土壤剖面上呈现表聚现象,这与常规统计分析结果相同。三维截面图中可以看出盐分在垂直方向上不仅垂向有变异,在水平方向上也有一定空间异质性。该结果与图 4 的等盐分剖面图和图 6 的水平层面堆叠结果不同,消除了因垂向采样间距远小于水平间距带来的垂向盐分含量平均化的现象,使得盐分含量在 3 个方向上均有明显的变异性。

位于研究区北部的 1 号和 2 号条田种植有小麦,在采样前一段时间进行了灌溉,土壤盐分经过灌溉水的淋洗作用使得整个剖面盐分含量普遍较低,东北角和西北角的部分区域盐分含量甚至低于 1.5 g/kg;而 1 号和 2 号条田中部部分区域由于地形较高,盐分淋洗不充分,导致该区域土壤盐分含量明显较高。3 ~ 7 号条田取样时没有种植作物和进行灌溉,土壤剖面盐分含量整体上较 1 号和 2 号条田高。3 号条田的地下水埋深较深,约 2.1 m,矿化度为 1.4 ~ 5.5 g/L,所以 3 号条田的土壤盐分含量普遍较低。5 号条田与 3 号条田类似,该条田地下水埋深约 1.7 ~ 1.9 m,矿化度为 1.4 ~ 3.7 g/L,且该条田中部地下水埋深更深,对应土壤盐分在东西两侧要高于中间区域。研究区中部和南部土壤盐分含量最高的部分区域分别位于 4 号和 6 号条田,这与

局部的水土环境条件有关。4 号条田地下水埋深约 1.8 m,矿化度为 8 g/L,相比周围区域而言地下水位较浅,地下水中盐分容易随水分向上移动累积在土壤上层^[7]。6 号条田的中部地下水埋深也较浅,约 1.7 m,矿化度在 6.7 ~ 8.3 g/L 范围内,导致了局部土壤盐分累积严重,这与其他研究者报道的土壤盐分含量与地下水埋深成负相关与矿化度成正相关的研究结果一致^[7]。另外,该条田局部区域 0 ~ 40 cm 土层是粘土层,地形也比周围略低,这加剧了土壤盐分的累积。随着粘土层从 4 号条田向 7 号条田逐渐从 0 ~ 40 cm 土层下移到 80 ~ 160 cm 土层,土壤盐分积累的层次与剖面粘土层的分布层次基本一致,这与 Heil 等研究所得的粘土层的空间位置与土壤盐分空间相关的结果一致^[21]。7 号条田地下水埋深最浅,约 1.2 ~ 1.6 m,矿化度为 3.6 ~ 8 g/L,但是该条田的粘土层位置较深且厚达 80 cm,阻止了盐分的向上累积,所以地下水埋深和矿化度对土壤中盐分累积的作用不是很大。研究区东南角盐分含量在 2.5 ~ 4 g/kg 的区域对应 6 号条田和 7 号条田东侧交界处粘土层较薄的区域。因此,本研究区土壤盐分空间分布的主要影响因素是灌溉、局部地形、粘土层位置、地下水埋深和矿化度。统计发现研究区 0 ~ 60 cm 土层属于非盐化、轻度盐化、中度盐化、重度盐化和盐化土区的面积和比例分别为 18.1%、41.4%、13.3%、1.6%、0.06% 和 24.3%、55.6%、17.8%、2.2%、0.1%。非盐化土区占将近研究区面积的 1/4,大部分区域属于轻度盐渍化,而中度和重度盐渍化区占研究区面积的 20%。因此,可以根据盐分空间分布的结果划分不同治理区域,根据盐分含量制定不同的灌排措施。

由上述分析可知,当水平方向的取样间距远大于垂直方向的取样间距时,采用距离反比法对土壤盐分原始数据直接进行三维空间插值所得到的结果是不可靠的,主要原因是用来插值的邻近点主要来自该剖面不同土层的盐分观测数据,其次是相邻土壤剖面的盐分观测数据;采样间距大的方向保留了盐分变化的总趋势,采样间距小的方向插值结果严重失真。需要扩大垂向坐标和增加搜索点数以保证用来插值的邻近点分别来自不同的方向。本研究发现当垂向坐标扩大倍数等于 300,搜索点数为 6 时,所得到的土壤盐分空间插值精度相对最高。由于不同的土壤属性空间分布不同,另外,研究区形状和采样间距也不一样,因此,垂向坐标扩大倍数和搜索点数需要根据具体情况来确定。

3 结论

(1) 研究区 0 ~ 140 cm 各土层盐分平均含量较

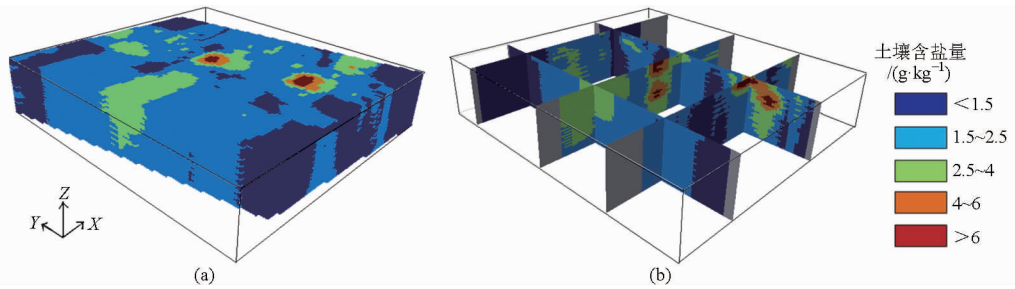


图8 土壤盐分三维空间分布最终结果等级图

Fig. 8 Classification maps of three-dimensional spatial distribution of soil salinity

(a) 全局图 (b) 截面图

高,在 1.84 ~ 2.11 g/kg 范围内,最小值和最大值对应为 0.57 g/kg 和 10.9 g/kg,各层盐分变化相对较大,服从对数正态分布。140 ~ 200 cm 土体平均含盐量较低,平均含盐量为 1.74 ~ 1.79 g/kg,各层盐分变化较平稳。土壤剖面盐分含量的统计特征值(最大值、最小值、平均值、标准差、变异系数)均随土层加深而呈递减的趋势,各层土壤盐分变异系数在 0.54 ~ 0.80 之间,表层盐分变异最大,最底层变异最小。

(2) 当水平方向的取样间距远大于垂直方向的取样间距时,采用距离反比法对土壤盐分原始数据直接进行三维空间插值所得到的结果严重失真。需考虑扩大垂向坐标和增加搜索点数来保证插值结果

的准确性。不同土层盐分的实测值和估计值之间的均方根误差随垂向坐标扩大倍数增大而减小,随搜索点数增加而增大,变化范围在 0.1 ~ 0.4 g/kg 内。当垂向坐标扩大倍数等于 300,搜索点数为 6 时,所得到的空间插值精度相对最高,可以满足本研究的需要。

(3) 研究区土壤盐化程度较重的区域主要集中在中部和南部的局部,绝大部分区域土壤盐分含量低于 2 g/kg。研究区 80% 土壤为非盐化土和轻度盐化土,20% 为中度和重度盐化土。影响该区土壤盐分含量的主要因素是灌溉、局部地形、粘土层的位置、地下水埋深和矿化度。

参 考 文 献

- van Meirvenne M, Maes K, Hofman G. Three-dimensional variability of soil nitrate-nitrogen in an agricultural field[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2003, 37(3): 147 - 153.
- Oliver M, Webster R. The elucidation of soil pattern in the Wyre Forest of the West Midlands England. II. Spatial distribution[J]. *Soil Science*, 1987, 38(2): 293 - 307.
- 白由路,李保国,石元春. 基于 GIS 的黄淮海平原土壤盐分分布与管理研究[J]. *资源科学*, 1999, 21(4): 66 - 70. Bai Youlu, Li Baoguo, Shi Yuanchun. Research of the soil salt content distribution and management in Huang - Huai - Hai Plain based on GIS[J]. *Resources Science*, 1999, 21(4): 66 - 70. (in Chinese)
- 张源沛,胡克林,李保国,等. 银川平原土壤盐分及盐渍土的空间分布格局[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 19 - 24. Zhang Yuanpei, Hu Kelin, Li Baoguo, et al. Spatial distribution pattern of soil salinity and saline soil in Yinchuan plain of China [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(7): 19 - 24. (in Chinese)
- Biondini M. A three-dimensional spatial model for plant competition in an heterogeneous soil environment[J]. *Ecological Modelling*, 2001, 142(3): 189 - 225.
- Dunbabin V M, Diggle A J, Rengel Z. Simulation of field data by a basic three-dimensional model of interactive root growth[J]. *Plant Soil*, 2002, 239(1): 39 - 54.
- 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.
- 李洪义. 滨海盐土三维土体电导率空间变异及可视化研究[D]. 杭州:浙江大学, 2008. Li Hongyi. Three dimensional variability and visualization of soil electrical conductivity in coastal saline land [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)
- 姚荣江,杨劲松,赵秀芳,等. 沿海滩涂土壤盐分空间分布的三维随机模拟与不确定性评价[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(11): 91 - 97. Yao Rongjiang, Yang Jingsong, Zhao Xiufang, et al. Three-dimensional stochastic simulation and uncertainty assessment on spatial distribution of soil salinity in coastal region [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(11): 91 - 97. (in Chinese)
- He Y, Hu K L, Chen D L, et al. Three dimensional spatial distribution modeling of soil texture under agricultural systems using a sequence indicator simulation algorithm[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010, 71(Supp. 1): S24 - S31.

(下转第 172 页)

- 20 周罕觅,张富仓,Kjelgren R,等. 苹果幼树生理特性和水分生产率对水肥的响应研究[J]. 农业机械学报,2015,46(4):77-87.
Zhou Hanmi, Zhang Fucang, Kjelgren R, et al. Response of physiological properties and crop water productivity of young apple tree to water and fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 77-87. (in Chinese)
- 21 周罕觅,张富仓,李志军,等. 桃树需水信号及产量和果实品质对水分的响应研究[J]. 农业机械学报,2014,45(12):171-180.
Zhou Hanmi, Zhang Fucang, Li Zhijun, et al. Response of water demand signal, yield and fruit quality of peach tree to soil moisture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 171-180. (in Chinese)
- 22 Pandey R K, Maranville J W, Chetima M M. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment: II. shoot growth, nitrogen uptake and water extraction[J]. Agricultural Water Management, 2000, 46(1): 15-27.
- 23 刘小刚,张岩,程金焕,等. 水氮耦合下小粒咖啡幼树生理特性与水氮利用效率[J]. 农业机械学报,2014,45(8):160-166.
Liu Xiaogang, Zhang Yan, Cheng Jinhuan, et al. Biochemical property and water and nitrogen use efficiency of young arabica coffee tree under water and nitrogen coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 160-166. (in Chinese)
- 24 赵锴,李瑾,徐宁,等. 氮磷钾配施对洋葱产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(3):558-563.
Zhao Kai, Li Jin, Xu Ning, et al. The effects of combined application of N, P and K on the yield and quality of onion[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(3):558-563. (in Chinese)
- 25 李培岭. 不同灌溉方式下民勤荒漠绿洲区棉花水氮耦合效应研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2009.
- 26 邢英英,张富仓,吴立峰,等. 基于番茄产量品质水肥利用效率确定适宜滴灌灌水施肥量[J]. 农业工程学报,2015,31(增刊):110-121.
Xing Yingying, Zhang Fucang, Wu Lifeng, et al. Determination of optimal amount of irrigation and fertilizer under drip fertigated system based on tomato yield, quality, water and fertilizer use efficiency [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp.): 110-121. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 156 页)

- 11 吴亚坤,刘广明,杨劲松,等. 基于反距离权重插值的土壤盐分三维分布解析方法[J]. 农业工程学报,2013,29(3):100-106.  
Wu Yakun, Liu Guangming, Yang Jingsong, et al. Interpreting method of regional soil salinity 3D distribution based on inverse distance weighting[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(3):100-106. (in Chinese)
- 12 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.  
Liu Guangming, Wu Yakun, Yang Jingsong, et al. Regional 3D soil salt spatial variability based on electromagnetic induction technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(7):78-82. (in Chinese)
- 13 Corwin D L, Lesch S M. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity. II. Case study [J]. Computers and Electronics in Agriculture,2005,46(1-3):135-152.
- 14 姚荣江,杨劲松,邹平,等. 基于电磁感应仪的田间土壤盐渍度及其空间分布定量评估[J]. 中国农业科学,2008,41(2):460-469.  
Yao Rongjiang, Yang Jingsong, Zou Ping, et al. Quantitative evaluation of the field soil salinity and its spatial distribution based on electromagnetic induction instruments[J]. Scientia Agricultura Sinica,2008,41(2):460-469. (in Chinese)
- 15 Doolittle J A, Brevik E C. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies[J]. Geoderma,2014, 223-225(7):33-45.
- 16 辛明亮,何新林,吕廷波,等. 土壤可溶性盐含量与电导率的关系实验研究[J]. 节水灌溉,2014(5):59-61.  
Xin Mingliang, He Xinlin, Lü Tingbo, et al. Experimental research on relationship between content soluble salt in soil and electric conductivity[J]. Water Saving Irrigation,2014(5):59-61. (in Chinese)
- 17 Franke R, Nielson G. Smooth interpolation of large sets of scattered data [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering,1980,15(11):1691-1704.
- 18 Slavich P G. Determining ECa-depth profiles from electromagnetic induction measurements [J]. Australian Journal of Soil Research,1990,28(3):443-452.
- 19 阿布都热合曼·哈力克. 新疆岳普湖县土壤盐分空间变异及其分布特征研究[J]. 水土保持研究,2011,18(1):97-100.  
Abdirahman Halik. Spatial variability and distribution characteristics research of the soil salinity Yuepuhu County in Xinjiang[J]. Research of Soil and Water Conservation,2011,18(1):97-100. (in Chinese)
- 20 新疆维吾尔自治区农业厅,新疆维吾尔自治区土壤普查办公室. 新疆土壤[M]. 北京:科学出版社,1996:52.
- 21 Heil K, Schmidhalter U. Characterization of soil texture variability using the apparent soil electrical conductivity at a highly variable site[J]. Computers & Geosciences,2012,39(2):98-110.