

保护地不同灌溉方法表层土壤pH小尺度的空间变异^①

虞娜, 张玉龙*, 黄毅, 邹洪涛, 姬景红, 白玉, 孟庆龙

(沈阳农业大学土地与环境学院, 农业部东北土壤与环境重点开放实验室, 辽宁省农业资源与环境重点实验室, 沈阳 110161)

摘要: 基于保护地定位灌溉试验, 采用经典统计学和地统计学的方法, 以网格取样方式采集不同灌溉方法(沟灌、滴灌、渗灌)表层土壤, 研究微尺度下土壤pH值的空间变异特征及空间分布。结果表明: 经6年灌溉, 沟灌处理pH显著降低, 沟灌和滴灌0~5 cm土层土壤pH表现为中等空间自相关, 而其5~10 cm和渗灌0~5 cm和5~10 cm的土壤pH表现为弱空间相关, 水分的供给方式和数量影响土壤pH的空间变异。

关键词: 保护地; 不同灌溉方法; 土壤pH; 空间变异

中图分类号: S274.1

近几年, 土壤性质的空间变异性问题已成为土壤学研究的热点之一^[1-2], 小尺度下的土壤理化性质空间变异问题也日益受到重视^[3-8]。长期定位试验能够提供长期、系统的观测数据, 一直受到学者的关注, 国外长期定位肥料试验最长的已经进行120多年, 国内有一批肥料长期定位试验已经超过20年^[9-10], 但有关保护地长期定位灌溉试验的研究国外还少见报道^[11-13]。本文用经典统计学和地统计学方法研究连续6年保护地灌溉定位试验后表层土壤pH的空间变异特点, 比较不同灌溉方法对表层土壤pH空间变异规律的影响, 以期为深入开展保护地灌溉技术以及土壤采样方法方面的研究提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

定位灌溉试验自1998年开始在沈阳农业大学试验基地塑料大棚内进行, 供试土壤为草甸土。试验实施前, 多点取样观测表明试验区域内土壤性质均一, 空间同质。保护地内0~20 cm土层土壤基本理化性质为pH 6.80, 有机质含量22.70 g/kg, 全N、全P、全K含量分别为1.30、1.86和17.60 g/kg, 碱解N含量96.91 mg/kg, 速效P、速效K含量分别为103.10和164.00 mg/kg。每年春季栽培番茄一茬, 番茄收获后, 塑料大棚一直保持覆盖状态; 番茄品种为L 402。每年的试验方案、试验方法完全相同。

试验设渗灌、滴灌、沟灌3种灌溉方法, 每种灌

水方法为一处理, 每一处理设两次重复。小区面积16.5 m²; 小区随机排列, 为防止水分相互渗透, 各小区之间用埋深60 cm塑料薄膜隔开。渗灌管理深30 cm, 管下铺设塑料槽以防止水分下渗, 管上铺放1 cm厚锯末做过滤层, 以防泥土进入而堵塞管壁上的渗水孔。渗灌管使用河南省济源塑料厂生产的黑色多孔渗灌管, 外径20 mm, 内径16 mm, 渗灌管理深30 cm。滴灌管铺放在地表, 出水孔间距30 cm, 各出水孔与番茄植株相对应。

在试验过程中使用张力计逐日观测土壤水分吸力的变化。当每一灌水处理区20 cm深处土壤水分吸力达到40 kPa时开始灌水; 沟灌处理按灌水后10~50 cm土层土壤水分含量恢复到田间持水量要求设计灌水量, 而渗灌和滴灌处理一次灌水量以沟灌灌水量为基准、但取值为沟灌灌水量的1/2。各处理灌水用水表计量。

各处理均以10⁵ kg/hm²有机肥为底肥, 番茄移栽前沟施磷酸二铵525 kg/hm²、硫酸钾375 kg/hm²为基肥, 于番茄第一穗果膨大期和第二穗果膨大期2次追肥, 每次追施尿素150 kg/hm²。

1.2 土壤样品的采集

由于每年番茄收获后, 土壤一直处于覆盖状态, 不受外界干扰, 因此, 春季取样可以代表作物收获后土壤的状态。为此于2003年4月番茄种植前采集土壤样品, 取样层次分别为0~5 cm和5~10 cm两个层次, 以60 cm×60 cm网格结点取样, 沟灌、滴灌、

①基金项目: 辽宁省教育厅重点项目(05L386)、辽宁省博士启动项目(20061043)和辽宁省教育厅创新团队项目(2007T156)资助。

* 通讯作者(yzsau@163.com)

作者简介: 虞娜(1975—), 女, 辽宁沈阳人, 博士, 副教授, 主要从事节水灌溉研究。E-mail: sausoilyn@163.com

渗灌处理的取样方法相同；每一小区采集土壤样本 45 个（依据小区面积及减少边际效应的原则拟定样本数；实际观测值有缺失）。土样采回后立即风干、过筛，充分混匀，备用。

1.3 分析方法

土壤 pH 使用 Sartorius 生产的精度为 0.01 的 PB-10 酸度计（水土比 2.5:1）进行测定^[14]。

1.4 数据处理方法

按 1% 显著水平用 Grubbs 法首先剔除土壤 pH 测定结果的异常值，再用经典统计方法计算统计参数。采用 Kolmogorov-Smirnov 检验数据的正态性，对各处理土壤 pH 不符合正态分布的数据采用 box-cox 转换实现数据正态化^[15]。采用地统计方法进行半方差

分析，再使用半方差函数进行点 Kriging 插值，绘制等值线图。

2 结果分析与讨论

2.1 土壤 pH 的统计特征分析

从表 1 所列不同灌溉方法土壤 pH 的统计特征值可见，经 6 年灌溉后灌溉方法之间表层土壤 pH 统计特征发生了明显变化。不同灌水处理之间各土层土壤 pH 差异均达到 $p < 0.01$ 显著水平 ($F_{0-5\text{cm}}(2, 125) = 16.62^{**}$, $F_{5-10\text{cm}}(2, 123) = 13.80^{**}$)；且经 Duncan 检验，渗灌和滴灌处理间，0 ~ 5 cm 和 5 ~ 10 cm 层次土壤 pH 差异均未达到 $p < 0.05$ 显著水平，而渗灌、滴灌与沟灌处理间这 2 个层次土壤 pH 差异均达 $p < 0.01$ 极显著水平。

表 1 不同灌溉方法土壤 pH 的统计描述

Table 1 Descriptive statistic features of soil pH under different irrigation methods

灌溉方法	土层 (cm)	数目 (n)	平均值	中位数	最大值	最小值	标准差	变异系数	正态性
渗灌	0 ~ 5 [*]	40	6.855	6.830	7.320	6.490	0.179	0.026	Y
	5 ~ 10 [*]	38	6.839	6.915	7.260	6.170	0.257	0.038	NY
滴灌	0 ~ 5	45	6.782	6.750	7.530	6.180	0.278	0.041	Y
	5 ~ 10	43	6.812	6.870	7.270	6.200	0.255	0.037	Y
沟灌	0 ~ 5	43	6.526	6.570	7.380	5.630	0.338	0.052	Y
	5 ~ 10	45	6.509	6.530	7.140	5.560	0.419	0.064	NY

注：* 剔除异常值后 ($n_{\text{异常值}} = 1$)；Y：正态分布；NY：经 Box-Cox 转换后服从正态分布。

计算各灌溉方法表层 0 ~ 10 cm 土壤 pH 平均值与试验前土壤 pH 的差值，结果如图 1。从图中可见，沟灌处理土壤 pH 降低了 0.28 个单位，而渗灌和滴灌处理土壤 pH 则略有升高；进一步做单样本 t 检验，结果表明沟灌处理土壤 pH 与试验前土壤 pH 差异达到了极显著水平 ($p < 0.01$)，而渗灌和滴灌处理土壤 pH 与试验前土壤相比差异不显著 ($p > 0.05$)。这可能与多年采用沟灌方法灌溉，土壤盐基离子淋洗

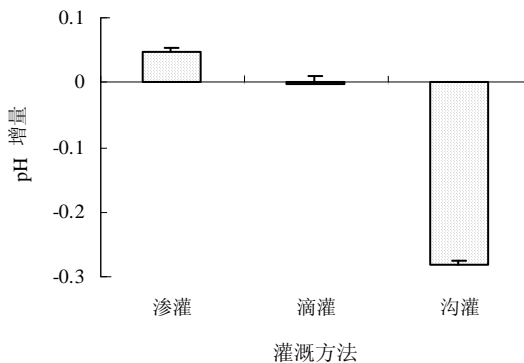


图 1 不同灌溉方法土壤 pH (0 ~ 10 cm) 的变化
Fig.1 Variety of soil pH under different irrigation methods

强度明显大于渗灌和滴灌处理所致。

从土壤 pH 的变异系数均 < 0.1 可见，各灌溉处理土壤的 pH 值属于弱变异强度；但不同灌溉方法间又表现出一定的差异，其土壤 pH 变异从小到大依次为：渗灌 $<$ 滴灌 $<$ 沟灌处理。

2.2 土壤 pH 的半方差函数

对不同灌溉方法表层土壤 pH 进行半方差模型拟合，其模型参数如表 2。从表 2 可见，对于不同处理不同土层，模型类型和参数的差异使得各处理土壤 pH 的空间变异程度不同，滴灌和沟灌处理 0 ~ 5 cm 土层变异函数的理论模型分别为线性和指数型模型，说明研究尺度下土壤 pH 空间结构持续而稳定的变化，空间依赖的距离较长，这 2 个模型的变程超出了研究区范围，这与沟灌和滴灌处理 0 ~ 5 cm 土层直接受灌溉影响有关。

从块金值/基台值 (C_0/C_0+C) 可见，仅滴灌和沟灌处理的 0 ~ 5 cm 土层表现为中等的空间相关性，其余均表现为弱的空间相关性，这表明滴灌和沟灌处理 0 ~ 5 cm 土壤 pH 受空间结构性影响更大，这可能与 3 种灌溉方法的灌溉部位、水量、方式和水流运移方

表 2 不同灌溉方法土壤 pH 的半方差函数模型参数与分形维数

Table 2 Semivariogram parameters and fractal dimensions of soil pH under different irrigation methods

灌溉方法	土层	模型	C_0	$C_0 + C$	$C_0/(C_0 + C)$	变程 (cm)	R^2	RSS	D
滴灌	0 ~ 5 cm	线性无基台	0.647	1.217	0.468	375.24	0.849	0.00015	1.880
	5 ~ 10 cm	球状	0.154	1.021	0.849	110.00	0.200	0.0667	1.991
沟灌	0 ~ 5 cm	指数型	0.364	1.087	0.665	544.5	0.932	0.00792	1.847
	5 ~ 10 cm	球状	0.135	0.982	0.863	168.40	0.634	0.0484	1.915
渗灌	0 ~ 5 cm	球状	0.124	1.041	0.881	106.30	0.169	0.0717	1.956
	5 ~ 10 cm	球状	0.004	0.987	0.996	136.40	0.116	0.506	1.919

式关系密切。渗灌 5 ~ 10 cm 土层块金值与基台值的比值接近 1, 说明在整个取样尺度土壤 pH 具有较为恒定的变异, 土壤 pH 的变异表现为随机性因素作用更大。从块金值 (C_0) 也可以看出, 滴灌 0 ~ 5 cm 土层具有较大的块金值, 沟灌 0 ~ 5 cm 土层次之, 说明它们在小尺度的变异不容忽视。

分形维数 D 作为空间异质性程度的表征参数之一, 是利用半方差函数的双对数曲线的斜率求得的。一般分形维数值越小, 则空间异质性程度越强, 反之则空间分布趋于同质, 当 D 值等于 2, 则说明整个区域化变量是空间不相关的, 整个样本是空间独立的, 在半方差分析中表现为纯块金效应^[3]。从分形维数 D 可见, 以沟灌和滴灌处理 0 ~ 5 cm 土层 D 值较小, 表明空间异质性较强, 其余 D 值均 >1.9, 空间分布趋于同质, 空间相关性小。

2.3 土壤 pH 的空间分布格局

全面地分析不同灌溉方法土壤 pH 的空间变异规律和空间分布格局, 可以有效地评价和分析灌溉方法对于土壤酸化的差异, 以及土壤质量退化的过程。基于实测数据, 在半方差模型基础上结合普通 Kriging 插值方法, 不考虑各项异性, 获得的不同灌溉方法 0 ~ 5 cm 和 5 ~ 10 cm 土壤 pH 的等值线图, 图 2 各子图具有相同的等值线间距和分隔等级, 更易比较不同灌溉方法对土壤表层 pH 的空间变异情况。由图 2 可见, 长期不同灌溉处理对土壤 pH 空间变异差异较大, 土壤 pH 的等值线均表现出明显的斑块状分布特

点。对于 0 ~ 5 cm 土层, 渗灌处理变程最小, 图斑分布零碎; 沟灌处理变程最大, 图斑大且斑块状分布特点明显。5 ~ 10 cm 土层, 沟灌处理等值线密集, 空间格局较强, 斑块边界过渡明显; 滴灌和渗灌处理格局强度较弱。同时, 滴灌和沟灌处理地面直接供水, 引起 0 ~ 5 cm 土壤 pH 空间异质性强, 其 5 ~ 10 cm 土层及渗灌处理 0 ~ 5 cm 和 5 ~ 10 cm 土层均依靠土壤水分运动间接供水, 水分供给形式和数量均有差异, 土壤 pH 表现为受随机因素影响更大, 流出部位 (水分来源、形式和数量) 对土壤 pH 空间异质性的影响不容忽视。

3 结论

(1) 长期采用不同灌溉方法的保护地内, 表层 0 ~ 5 cm 和 5 ~ 10 cm 土壤 pH 产生明显的差异, 滴灌和渗灌处理经多年灌溉与原始土壤 pH 差异不显著, 而沟灌处理土壤 pH 极显著得低于原始土壤, 并低于滴灌和渗灌处理, 且变异更大。

(2) 在亚米采样尺度上, 3 种灌溉方法的表层土壤 pH 值的空间异质性程度不同。滴灌和沟灌处理的 0 ~ 5 cm 土壤 pH 具有中等强度的空间自相关性, 独立间距较大。其余各土层土壤 pH 的空间变异受随机因素的影响较大, 空间自相关性较弱。

(3) 由于不同灌溉方法土壤 pH 的空间分布格局差异较明显, 使得不同处理、不同土层土壤 pH 的空间变异情况各不相同。

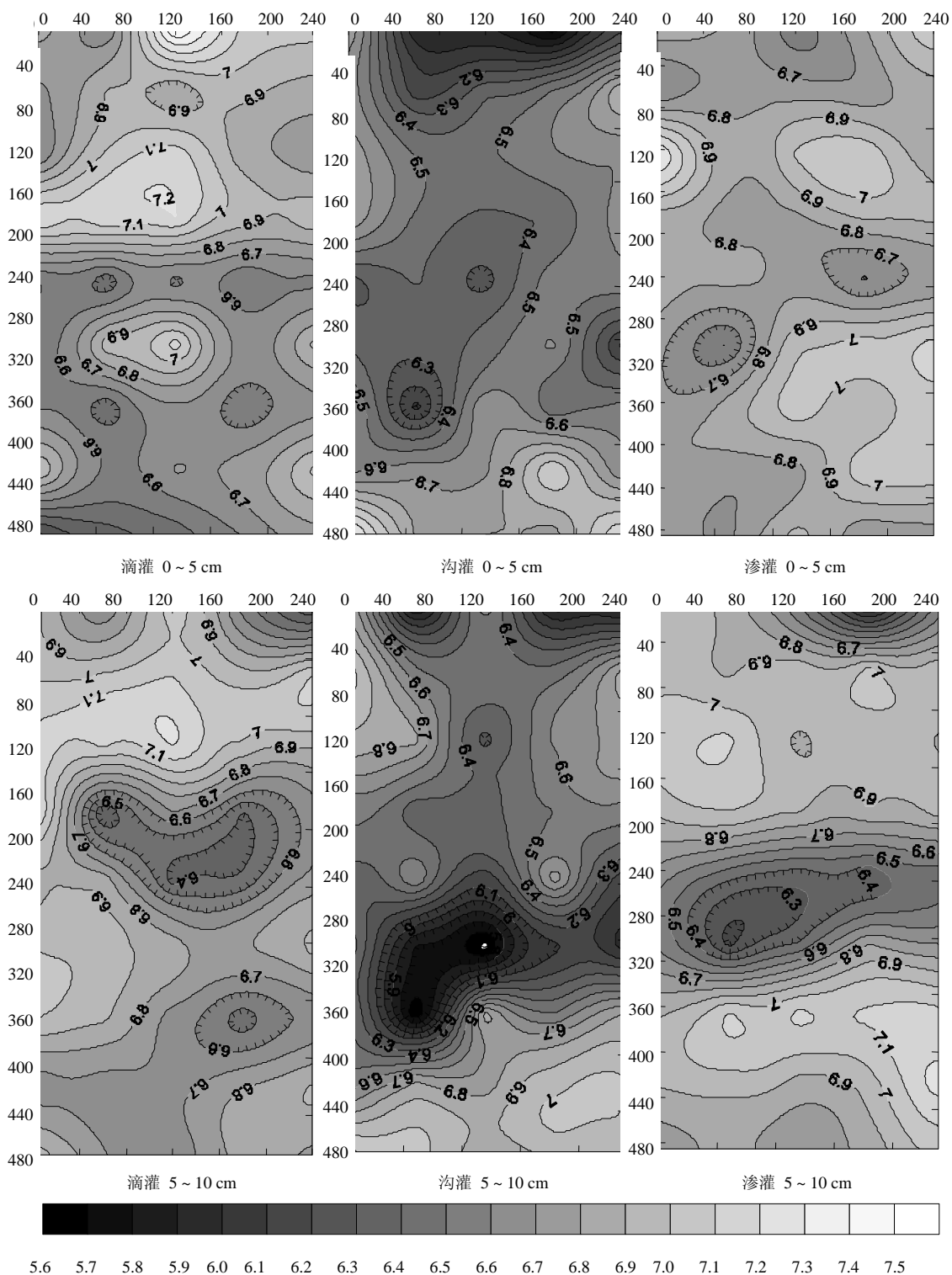


图 2 不同灌溉处理土壤 pH 等值线图 (横轴与作物垄沟方向平行)

Fig. 2 Isogram of soil pH under different irrigation methods

参考文献:

- [1] Zhang XY, Sui YY, Zhang XD, Meng K, Herbert SJ. Spatial variability of nutrient properties in black soil of northeast china. *Pedosphere*, 2007, 17 (1): 19-29
- [2] 史舟, 李艳, 金辉明. 基于方差四叉树法的滨海盐土电导率采样布局研究. *土壤学报*, 2007, 44(2): 294-299
- [3] 吕贻忠, 李保国, 崔燕. 不同植被群落下土壤有机质和速效磷的小尺度空间变异. *中国农业科学*, 2006, 39(8): 1581-1588
- [4] 赵军, 刘焕军, 隋跃宇, 张兴义, 孟凯. 农田黑土有机质和速效氮磷不同尺度空间异质性分析. *水土保持学报*, 2006, 20(1): 41-45
- [5] 李红伟, 李立平, 邢维芹. 不同小尺度下潮土重金属有效性空间变异研究. *土壤*, 2006, 38(6): 782-789
- [6] Chen FS, Zeng DS, He XY. Small-scale spatial variability of soil nutrients and vegetation properties in semi-arid northern China. *Pedosphere*, 2006, 16 (6): 778-787
- [7] Edwards I, Gillespie A, Chen J, Johnsen K, Turco R. Spatial distribution of ammonium and calcium in optimally fertilized pine plantation soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(6): 1813-1821
- [8] Panagopoulos T, Jesus J, Antunes MDC, Beltrão J. Analysis of spatial interpolation for optimizing management of a salinized field cultivated with lettuce. *Europ. J. Agronomy*, 2006, 24: 1-10
- [9] Hao MD, Fan J, Wang QJ, Dang TH, Guo SL, Wang JJ. Wheat rain yield and yield stability in a long-term fertilization experiment on the loess plateau. *Pedosphere*, 2007, 17(2): 257-264
- [10] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 胡锋, 潘根兴. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响. *土壤学报*, 2006, 43(3): 72-79
- [11] Popova Z, Eneva S, Pereira LS. Model validation, crop coefficients and yield response factors for maize irrigation scheduling based on Long-term experiments. *Biosystems Engineering*, 2006, 95 (1): 139-149
- [12] de Clercq WP, Van Meirvenne M. Effect of long-term irrigation application on the variation of soil electrical conductivity in vineyards. *Geoderma*, 2005, 128: 221-233
- [13] De Pascale S, Barbieri G. Effects of soil salinity from long-term irrigation with saline-sodic water on yield and quality of winter vegetable crops. *Scientia Horticulture*, 1995, 64(3): 145-157
- [14] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [15] 王学军, 李本纲, 陶澍. *土壤微量金属含量的空间分析*. 北京: 科学出版社, 2005

Micro-Scale Spatial Variability of Surface Soil pH Under Different Irrigation Methods in Greenhouse

YU Na, ZHANG Yu-long, HUANG Yi, ZOU Hong-tao, JI Jing-hong, BAI Yu, MENG Qing-long

(College of Land and Environmental Sciences, Shenyang Agricultural University, Key Open Laboratory of Northeastern Soil and Environment of Ministry of Agriculture, Liaoning key laboratory of Agricultural resources and Environment, Shenyang 110161, China)

Abstract: Based on 6-years irrigation experiment in greenhouse, micro-scale spatial variability and the distribution of surface soil pH were analyzed by combining classical statistic method with geostatistic method with a small grid-sampling technique under three irrigation methods (furrow irrigation, drip irrigation and subsurface irrigation). The results indicated that, after 6-years irrigation, soil pH under furrow irrigation decreased significantly, soil pH (0 ~ 5 cm) under furrow irrigation and drip irrigation were medium heterogeneity, and soil pH (5 ~ 10 cm) of furrow irrigation and drip irrigation, soil pH (0 ~ 5, 5 ~ 10 cm) of subsurface irrigation which were weak heterogeneity. The supplying way and quantity of water by irrigation can affect the spatial variability of soil pH.

Key words: Greenhouse, Different irrigation method, Soil pH, Spatial variability