

黑河中游绿洲麦田土壤导气率空间变异尺度性研究*

王卫华¹ 王全九^{2,3}

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500; 2. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048;

3. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了明确黑河中游绿洲麦田土壤导气率空间变异研究中的尺度性问题,在张掖地区面积为 21 m × 21 m 的小麦田用 3 m × 3 m 的网格布设来测定土壤导气率,运用改变采样间距和幅度的分析方法,得到选取相关距离、变异系数及 Moran's I 指数这 3 个参数作为判断表征土壤导气率空间变异的依据,进一步研究不同采样幅度与采样间距对土壤导气率空间变异产生的影响。研究表明,在一定范围内,表征土壤导气率变异特征的相关距离、变异系数及 Moran's I 指数会随着采样幅度尺度的增大而增大;当采样间距增大时,会出现相关距离减小,而 Moran's I 指数与变异系数两者却没有变化的两种截然相反的情况。

关键词: 土壤导气率 空间变异 尺度 采样幅度 采样间距

中图分类号: S152.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)04-0179-05

引言

尺度性问题早在 1995 年由 Blöchl 和 Sivapalan 提出^[1],是景观生态学研究涵盖了采样幅度、采样间距、采样体积 3 个概念的热点问题。在土壤导气率空间变异性研究中,尺度性问题亦是一个不容忽视的概念。本文试图通过改变采样幅度和采样间距,分析其对土壤导气率空间变异研究结果的影响,初步探讨土壤导气率空间变异研究中的尺度性问题。

作者曾对黑河中游绿洲麦田土壤水气热参数田间尺度空间分布特征做过研究^[2],然而针对该地区土壤导气特征空间变异的尺度性问题尚未深入研究,国际上关于土壤导气率尺度性问题的研究也鲜为报道。但在土壤科学研究中,已开展了大量关于气液两相的研究,这方面的报道也很多,故而从土壤水分的变异研究导入,借鉴土壤水分变异的分析研究方法,揭示土壤导气率空间变异研究中的尺度性问题^[3]。对土壤水分空间变异性的研究自 20 世纪 70 年代以来有了较大的发展,研究对象包括田间试验小区、小流域及大流域等不同尺度。综合前人研究成果分析发现,土壤水分空间变异的变异系数和相关距离在不同研究区域和不同尺度情况下均呈现出不同的结果^[4-6]。Western 等在 1998 年、1999 年

的研究中先后指出,相关距离在大小不同的尺度研究中存在显著区别,而这种区别可能是由于采样效应和不同采样尺度下的不确定性造成的^[7-8]。Blöchl(1998)在整理试验得出的数据后发现,表观变异与其真实变异之间也存在一定差异,且测量尺度与试验中的差异存在一定联系^[1]。同样的,以上问题在土壤导气特征的空间变异研究中也不能回避。

另外,土壤导气率真实的空间变异尺度一般与模拟、预测的尺度不相一致,在这种情况下,就需要针对在真实的变异尺度与模拟的尺度之间进行尺度推绎。由于在实际测量时,数据本身具有一定程度的尺度偏差,从而导致将其代入所得出的空间变异尺度和方差与其真实值存在差异^[1]。由于研究对象本身具有多尺度特征,加之由于测量误差造成的空间变异尺度估算的不准确,导致了尺度的预测和模拟具有一定程度的困难^[9-10]。因此,尺度性问题的土壤导气特征空间变异的研究中显得不可或缺。对于土壤导气特征的空间变异研究,目前研究热点主要集中在合理地设计采样点的位置,以便试验所得出的数据更接近于真实变异。如需了解土壤导气率的真实变异,首先要弄清楚采样幅度与采样间距对土壤导气特征空间变异的影响,从而为获取田间真实信息制定有效的采样方案提供依据。本研究仅

收稿日期: 2013-12-06 修回日期: 2013-12-31

* 国家自然科学基金资助项目(51179150)和国家自然科学基金重点资助项目(91025018)

作者简介: 王卫华,博士,主要从事土壤物理研究,E-mail: wangweihua1220@163.com

通讯作者: 王全九,教授,博士生导师,主要从事农业水土工程研究,E-mail: wquanjiu@163.com

通过改变采样幅度、采用间距对常用表征空间变异的变异系数、相关距离和自相关的 Moran's I 指数这 3 个指标的影响来判断研究尺度对土壤导气特征空间变异的影响程度,旨在客观地反映田间土壤导气率空间变异状况,从而为科学布设采样点提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于甘肃省张掖市临泽县中科院寒旱所临泽试验站,测点布设在刚收割完的麦田之上。该试验区土壤含有少量细砂土,土质结构疏松、孔隙率大,土壤肥力属于中等水平^[11]。由于笔者曾在该区域开展大量研究,研究区详细情况见文献[2],在此不在赘述。

1.2 取样与测量方法

在研究区内分别以间距 3 m × 3 m 布置测点网格,布置了 7 × 13 共 91 个测点,图 1 为布置点示意图^[2]。本文利用靠近采样区西侧面积为 21 m × 21 m 的 7 × 7 共 49 个测点的实测数据进行分析。利用 PL-300 型土壤导气率测定仪测定土壤导气率^[12-13]。

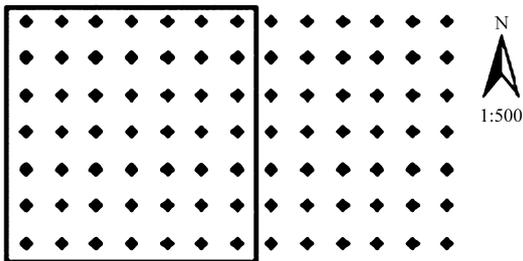


图 1 取样布点示意图(方框内为本文数据分析点)

Fig. 1 Sketch map of sampling sites (box for analysis data points in this paper)

1.3 数据分析与处理

1.3.1 采样幅度

首先以 18 m × 18 m 采样幅度对所有导气率实测数据进行分析,之后分别以 3 m × 3 m、6 m × 6 m、9 m × 9 m、12 m × 12 m 和 15 m × 15 m 为单位的滑动窗(基于多重分形理论 Multifractal Theory 的数据处理方法^[14-17])从测定区域西北角移至东南角,求出每个滑动窗内的变异系数、相关距离以及自相关的 Moran's I 指数;将相同采样幅度下的计算结果取平均值,即为此采样幅度下的变异结果。

1.3.2 采样间距

首先以 3 m 的采样间距对所有导气率实测数据进行分析,之后分别对 6、9、12、15、18m 的采样间距的实测数据进行分析,计算每个采样间距下的变异系数、相关距离以及自相关的 Moran's I 指数;对相同采样间距下变异结果取平均值即为该尺度下的变

异结果。用地统计学分析时,数据越多,变异结果越接近随机变量的真实情况,由于采样间距太大可导致滑动窗内的数据太少,从而使得研究结果的可信度降低,所以本研究并未分析采样间距为 12m、15m 和 18m 时的变异情况。

1.3.3 数据处理

利用经典统计学 SPSS 软件(19.0 版本)、地统计学 ARCGIS 软件(geostatistical analyst 模块)对上述改变采样幅度和采样间距的数据进行分析,从而获得土壤导气率数据变异系数、相关距离以及自相关的 Moran's I 指数,详细方法如下所述。

(1) 经典统计学

描述空间变异最常用的方法就是经典统计学方法。本文用经典统计学方法描述土壤导气率的统计特征值(平均值、标准差、变异系数),用变异系数(CV)判断变异程度,当 CV 小于等于 0.1 时为弱变异性,当 CV 介于 0.1 ~ 1 时为中等变异性,当 CV 大于等于 1 时为强变异性^[18-19]。

(2) 构建半方差函数模型

半方差函数参见文献[2],根据土壤导气率变异函数,绘制半方差函数曲线,拟合其相关理论模型。根据模型中的拱高与基台值之比($C/(C + C_0)$)及相关距离(a)来定量分析土壤导气率空间变化的规律^[20],其中 C_0 为块金值, C 为基台值。

(3) Moran's I 指数

Moran's I 指数是空间自相关分析中描述空间变异性的方法之一,相当于经典统计学里的相关系数,但是它又涉及到了随机变量之间的空间位置关系,比经典统计学更为先进。Moran's I 指数的计算公式为^[21]

$$I = \frac{N \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_{ij} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})} \quad (i \neq j)$$

式中 x_i, x_j ——随机变量 x 在空间单元 i 和 j 中的实际观测值

\bar{x} —— x 的平均值

w_{ij} ——相邻权重

N ——空间单元的个数

$-1 < I < 1$, 当 $I = 0$ 时代表变量之间不相关,当 $I > 0$ 时为正相关,而 $I < 0$ 时为负相关。将 Moran's I 指数与滞后距离尺度相结合分析后可得不同尺度下的空间相关关系,通过绘制尺度-自相关系数的图像便可看到空间相关性与尺度的联系。

2 结果与分析

2.1 土壤导气率的变化幅度

在研究区域内,分 4 个实时含水率水平测得土

壤导气率,野外试验难以掌控含水率的精确程度,将大致在一个含水率水平下的导气率整合在一起,在各个含水率水平下土壤导气率的变化幅度见图 2。从图中可以看出土壤含水率越低,导气率变化幅度越大。

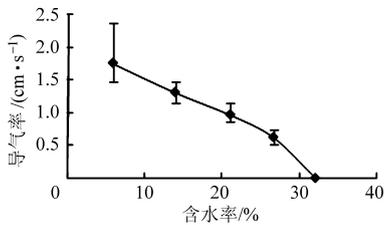


图 2 土壤导气率随含水率变化的关系

Fig. 2 Air permeability values as a function of water content

2.2 采样幅度对土壤导气率空间变异结果的影响

2.2.1 对变异系数的影响

当试验中的采样幅度分别为 3 m × 3 m、6 m × 6 m、9 m × 9 m、12 m × 12 m、15 m × 15 m 以及 18 m × 18 m 时,土壤导气率变异系数变化范围是 0.086 ~ 0.103,详见图 3。从图 3 可以看出,采样幅度较小时,变异系数的增速缓慢;但采样幅度的不断增大导致土壤导气率变异系数呈升高趋势。显而易见,此现象归因于随着研究区域不断增大,引入了其他变异因素,从而使得其变异系数增大,即小尺度情况下某些对土壤导气率分布具有影响作用的因素存在一致性,但随着采样尺度的增大,它对土壤导气率分布

的不同作用逐渐表现出来,导致变异系数增大。同时,从图 3 中亦能看出,随着采样幅度的增大,变异系数的变化趋于平缓,接近于 0.103,不会无限制增大。这是由于在特定有限区域内,影响土壤导气率变异的总因素是有限的,所以变异系数不会随区域大小无限制增加,而是趋近于某一定值,这与胡伟等^[3]的研究结果一致。

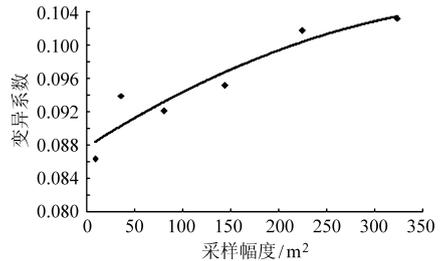


图 3 采样幅度对土壤导气率变异系数的影响

Fig. 3 Impacts of sampling extent on variation coefficient of soil air permeability

2.2.2 对相关距离的影响

利用 ARCGIS 软件对不同采样幅度下的导气率进行地统计分析,结果见表 1。从表中可以看出,随着采样幅度的不断增大,相关距离显著增大;决定系数 R^2 随采样幅度的增加而减小,说明采样幅度增大后,测量误差增大,从而研究区域内土壤导气率的变异与采样网格布置的大小相关。所以,采样幅度增大的同时,研究对象在大尺度上极有可能将小尺度上变异的相关性掩盖。

表 1 采样幅度对土壤导气率空间变异相关距离的影响

Tab. 1 Impacts of sampling extent on correlation distance inspatial variation of air permeability

项目	采样幅度/m × m					
	3 × 3	6 × 6	9 × 9	12 × 12	15 × 15	18 × 18
理论模型	指数	指数	指数	指数	指数	指数
相关距离/m	2.67	3.78	4.91	10.53	14.47	28.74
R^2	0.92 **	0.89 **	0.85 *	0.82 *	0.78 *	0.71 *

注: * 和 ** 分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 的水平下显著。

2.2.3 对 Moran's I 指数的影响

由图 4 可见,随着采样幅度的增大,Moran's I 指数显著增大,这种现象在各个采样幅度都非常明显。在研究区域内,滞后距离以内的正相关范围内,Moran's I 指数随采样幅度的增大而增大,这与相关距离随采样幅度增大而增大的变化趋势是一致的。进一步可以推断,在研究分析时,如果采样幅度过小就有可能掩盖研究区域内采样幅度大一些时的土壤导气率正相关的关系。

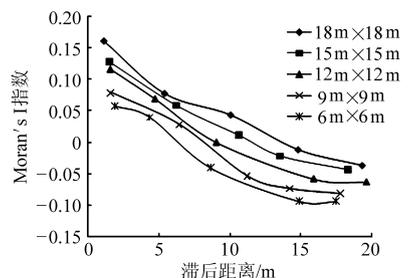


图 4 采样幅度对 Moran's I 指数的影响

Fig. 4 Impacts of sampling extent on Moran's I index

2.3 采样间距对导气率空间变异结果的影响

2.3.1 对变异系数的影响

由表 2 可见,采样间距从 3 m 以 3 m 为等差增

加至 12 m 时,土壤导气率的变异系数变化无任何规律可言。相对误差较小,可忽略不计。从而说明采样间距对土壤导气率变异系数的影响几乎不存在,

即采样幅度一定的情况下,采样间距的增大对土壤导气率变异影响不大。

表2 采样间距对土壤导气率空间变异相关距离的影响

Tab.2 Impacts of sample spacing on correlation distance in spatial variation of air permeability

采样间距/m	3	6	9	12
变异系数	0.103	0.118	0.044	0.077

2.3.2 对相关距离的影响

从图5可以看出,采样间距在3、6和9 m时的半方差函数的图相相似程度很大,在相同的滞后距离设置下计算得到的半方差函数值与采样间距呈负相关,从而相应的相关距离也随之减小。图5所示采样间距越大,相同滞后距离下的半方差值越小,这与 Nielsen 的研究结果相一致^[22]。

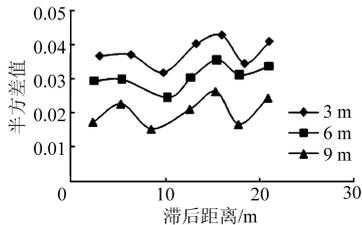


图5 不同采样间距下的土壤导气率半方差图

Fig.5 Semi-variograms of soil air permeability under different sampling spacings

2.3.3 对 Moran's I 指数的影响

从图6可以看出, Moran's I 指数的变化随采样间距的增加略有波动,但整体上具有一致的变化趋势,只是在滞后距离较大的时候有点分散,由此可以推断,采样间距的改变对 Moran's I 指数几乎没有影响。当采样幅度一定的时候,增加采样间距没有改变土壤导气率的变异特征,对其相关性没有影响,不会掩盖主要影响因子对土壤导气率变异特征的影响;

也就是说在研究区域内,选定了采样幅度后,可以尽可能的增大采样间距,在减少工作量的同时获得较为真实的研究结果。

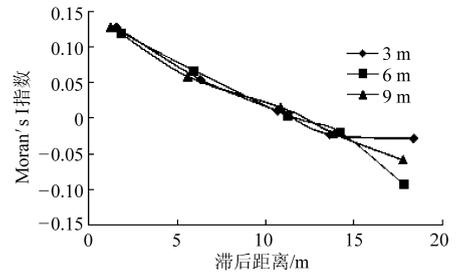


图6 采样间距对 Moran's I 指数的影响

Fig.6 Impacts of sampling spacing effects on Moran's I index

3 结束语

土壤导气率的空间变异结果在不同研究区域和尺度条件下存在较大差别。以田间尺度 21 m × 21 m 采样区域的土壤导气率实测数据为依据,分析研究采样间距和幅度对表征土壤导气率空间变异的变异系数、相关距离及 Moran's I 指数这 3 个指标的影响,结果表明:在一定范围内,表征土壤导气率变异特征的相关距离、变异系数及 Moran's I 指数会随采样幅度尺度的增大而增大。说明土壤导气率的变异与采样网格布置的大小相关,采样幅度增大的同时,研究对象在大尺度上极有可能将小尺度上变异的相关性掩盖,采样幅度过小可能掩盖研究区域内采样幅度大一些时与土壤导气率正相关的关系。相关距离随采样间距增大而减小,但 Moran's I 指数与变异系数却没有变化,说明采样幅度一定的情况下,采样间距的增大不会掩盖主要影响因子对土壤导气率变异特征的影响,可以尽可能增大采样间距,在减少工作量的同时获得较为真实的研究结果。

参 考 文 献

- Blöschl G, Sivapalan M. Scale issues in hydrological modelling; a review[J]. Hydrological Processes, 1995, 9(3-4): 251-290.
- 王卫华, 王全九, 武向博, 等. 黑河中游绿洲麦田土壤水气热参数田间尺度空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2013, 29(9): 94-102.
Wang Weihua, Wang Quanjiu, Wu Xiangbo, et al. Characteristics of spatial distribution of soil water-air-heat parameters in typical oasis croplands at middle reaches of Heihe River[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(9): 94-102. (in Chinese)
- 胡伟, 邵明安, 王全九. 黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异的尺度性研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 11-16.
Hu Wei, Shao Ming'an, Wang Quanjiu. Scale-dependency of spatial variability of soil moisture on a degraded slope-land on the Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(8): 11-16. (in Chinese)
- 薛绪掌, 张仁铎, 桂胜祥. 测定尺度对所测土壤水参数及其空间变异性的影响[J]. 水土保持通报, 2001, 21(3): 47-51.
Xue Xuzhang, Zhang Renduo, Gui Shengxiang. Effect of measurement scales on measured soil hydraulic properties and their spatial variability. [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(3): 47-51. (in Chinese)
- Sisson J B, Wierenga P J. Spatial variability of steady-state infiltration rates as a stochastic process[J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45(4): 699-704.
- 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 2007, 26(1): 100-107.
Qiu Yang, Fu Bojie, Wang Jun, et al. Spatiotemporal variation of soil moisture and its relation to environmental factors[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(1): 100-107. (in Chinese)

- 7 Western A W, Grayson R B, Blöschl G, et al. Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices[J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(3): 797–810.
- 8 Western A W, Blöschl G, Grayson R B. Geostatistical characterisation of soil moisture patterns in the Tarrawarra catchment[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 205(1): 20–37.
- 9 郭德亮, 樊军, 米美霞. 黑河中游绿洲区不同土地利用类型表层土壤水分空间变异的尺度效应[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(5): 1199–1208.
- Guo Deliang, Fan Jun, Mi Meixia. Scale-dependency of spatial variability of surface soil moisture under different land use types in Heihe Oasis, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(5): 1199–1208. (in Chinese)
- 10 王圣伟, 冯娟, 刘刚, 等. 多嵌套空间尺度农田土壤重金属空间变异研究[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(6): 128–135.
- Wang Shengwei, Feng Juan, Liu Gang, et al. Multi-nesting spatial scales of soil heavy metals in farmland[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(6): 128–135. (in Chinese)
- 11 刘文杰, 苏永中, 杨荣. 黑河中游临泽绿洲农田土壤有机质时空变化特征[J]. *干旱区地理*, 2010(2): 170–176.
- Liu Wenjie, Su Yongzhong, Yang Rong. Characteristics of spatio-temporal changes of soil organic matter in typical oasis croplands of Linze County at middle reaches of Heihe River[J]. *Arid Land Geography*, 2012(2): 170–176. (in Chinese)
- 12 王卫华, 王全九, 樊军. 原状土与扰动土导气率、导水率与含水率的关系[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(8): 25–29.
- 13 王卫华, 王全九, 李淑芹. 长武地区土壤导气率及其与导水率的关系[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(11): 120–127.
- 14 郭丽俊, 李毅, 李敏, 等. 壤土土壤水力特性空间变异的多重分形分析[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(9): 50–58.
- Guo Lijun, Li Yi, Li Min, et al. Multifractal study on spatial variability of soil hydraulic properties of loess soil[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(9): 50–58. (in Chinese)
- 15 刘继龙, 马孝义, 张振华. 土壤水盐空间异质性及尺度效应的多重分形[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 81–86.
- Liu Jilong, Ma Xiaoyi, Zhang Zhenhua. Multifractal study on spatial variability of soil water and salt and its scale effect [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1): 81–86. (in Chinese)
- 16 Zeleke T B, Si B C. Scaling relationships between saturated hydraulic conductivity and soil physical properties[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(6): 1691–1702.
- 17 Zeleke T B, Si B C. Characterizing scale-dependent spatial relationships between soil properties using multifractal techniques[J]. *Geoderma*, 2006, 134(3): 440–452.
- 18 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- 19 王政权. 地统计学及在生态学中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- 20 Zu Y G, Ma K M, Zhang X J. A fractal method for analyzing spatial heterogeneity of vegetation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(3): 333–337.
- 21 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- 22 Nielsen D R, Bouma J. Soil spatial variability [M]. Wageningen: Pudoc, 1995: 209–234.

Scale-dependency of Spatial Variability of Soil Air Permeability on Typical Oasis Croplands at Middle Reaches of Heihe River

Wang Weihua¹ Wang Quanjiu^{2,3}

(1. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China

2. The Institute of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: This article attempts to analyze the impacts of sampling extent and sampling spacing on soil air permeability's spatial variability, and preliminary discuss the scale-dependency. The spatial variation of parameters in Linze County, an agricultural area in the middle reaches of Heihe River Basin, was examined. A study in a 21 m × 21 m of wheat zone was carried out, and the spatial variation of soil air permeability was analyzed with all the data measured under 3 m × 3 m sampling grid. Then, re-sampling technique was employed with including coefficient of variation, correlation length and Moran's I index were applied to each scenario to characterize the degree of spatial variability of soil air permeability. The results showed that all measured indices increased with various degrees with increasing extent. However, the spacing did not affect coefficient of variation and Moran's I index, while correlation length decreased with the increase of the spacing.

Key words: Soil air permeability Spatial variability Scale Sampling extent Sampling spacing