

沂蒙山区桃园棕壤斥水性对理化性质的空间响应*

孙棋棋¹ 刘前进¹ 于兴修^{2†} 李建华¹ 曾昭鹏¹

(1 山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂大学, 山东临沂 276005)

(2 湖北大学资源环境学院, 武汉 430062)

摘要 以沂蒙山区典型土地利用桃园棕壤为例, 在分析降雨前后桃园棕壤斥水性与理化性质空间变异的基础上, 探讨了棕壤斥水性对土壤含水量、有机质含量和土壤质地的空间响应特征。按照 1 m × 1 m 网格等间距测定降雨前后土壤实际斥水性与含水量, 同时采集表层 0~3 cm 土壤样品, 分析其有机质含量与砂粒、粉粒、黏粒含量, 并借助经典统计学、地统计学与空间自相关理论对土壤斥水性及理化性质进行空间格局与空间相关性分析。结果表明: 沂蒙山区桃园棕壤的斥水程度强烈, 雨后斥水性显著降低; 降雨前后棕壤斥水性均具有中等变异水平和较强的空间自相关性, 且呈指数模型分布, 各向异性显著。受结构变异和随机变异作用, 斥水性空间格局沿耕作方向呈条带状分布, 在其垂直方向上最小变程为 1.4 m。土壤质地是影响棕壤斥水性空间变异的主要因素, 斥水性与粉粒含量呈空间正相关, 与砂粒和黏粒含量呈空间负相关, 相关程度粉粒 > 砂粒 > 黏粒; 棕壤斥水性与含水量呈空间负相关, 相关度雨前较弱, 雨后显著。

关键词 斥水性; 棕壤; 土壤质地; 土壤含水量; 空间响应; 沂蒙山区

中图分类号 X506; X522 **文献标识码** A

土壤斥水性(soil water repellency, SWR)是指水分不能或很难湿润土壤颗粒表面的物理现象, 其广泛存在于各种气候类型、土地利用/覆被和质地的土壤中^[1]。土壤斥水性能延缓土壤水的入渗速率, 促进坡面流产生, 增加降雨溅蚀与土壤侵蚀^[2], 造成水土流失和土地退化等问题^[3], 并能导致优先流产生、加速土壤农业化学物质流失, 加剧水体污染^[4], 不利于农业生产和环境的可持续发展。受植被类型^[5]、耕作方式^[6]以及土壤理化性质, 如含水量^[7]、土壤质地^[8]、有机质含量及组分^[9]、pH^[10]等因素的影响, 土壤斥水性具有较强的空间变异性。

研究土壤斥水性的空间特征及其机理, 对进一步认识土壤斥水性的侵蚀效应有重要意义, 这一点早已引起国外学者的关注, 且成果显著。Ritsema等^[11]认为降雨可通过淋溶作用、溅蚀及沟蚀降低土壤斥水性的空间变异性。Biemelt等^[12]发现微地貌结构中土壤的水力特性和易蚀性与斥水性的空间分布密切相关, Lemnitz等^[13]研究表明土壤斥水性的空间分布会影响坡面产流量, 且土壤斥水性

对产流的影响具有尺度效应。总体而言, 由土壤斥水性的空间异质性引起的径流量随着研究尺度的增大(自点尺度到面尺度)而减少, 这与 Witter等^[14]和 Doerr等^[15]的结论相一致。而国内有关土壤斥水性空间分布及其影响因素的研究相对薄弱, 已有学者探讨了土壤斥水性与理化性质的空间变异特征^[2, 16], 但斥水性对理化性质空间响应方面较少涉及。

沂蒙山区是北方土石山区的典型代表, 棕壤广泛分布^[17]。该区降雨分配不均, 容易发生季节性干旱, 土壤斥水现象普遍。本文以沂蒙山区典型土地利用桃园土壤为研究对象, 分析棕壤斥水性的空间变异特征, 定量分析其与土壤质地、含水量、有机质含量的空间相关关系, 阐明棕壤斥水性空间变异的影响因素, 为斥水土壤的改良与治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

孟良崮小流域位于沂河上游(108°6'E, 35°20'

* 国家自然科学基金项目(41101263)、临沂市科技发展计划引导项目(201112026)、山东省自然科学基金项目(ZR2010DM017)资助

† 通讯作者, 于兴修(1967—), 男, 山东莒县人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事资源利用与环境效应研究。E-mail: xxy2000@126.com

作者简介: 孙棋棋(1989—), 女, 山东惠民人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与环境保育研究。E-mail: sunshine19890707@163.com

收稿日期: 2013-05-09; 收到修改稿日期: 2013-12-09

N), 总面积 102.86 hm²。年平均气温 13.7 °C, 多年平均降水量 803.4 mm, 多集中在夏季。地势东北高西南低, 海拔 174 ~ 485 m, 山地丘陵面积占 80% 以上。土地利用以林地 (占 55.75%)、耕地 (占 20.52%)、果园 (占 10.66%) 为主 (图 1)。试验地

块坡度为 8°, 坡向正北, 面积为 20 m × 15 m。土壤质地为砂质壤土, 容重为 1.30 g cm⁻³, 砂粒、粉粒和黏粒平均含量分别为 81.00%、18.64%、0.37%, 有机质平均含量为 28.71 g kg⁻¹。桃树阶地行列种植, 树龄 11 年, 田间管理及人为干扰较少。

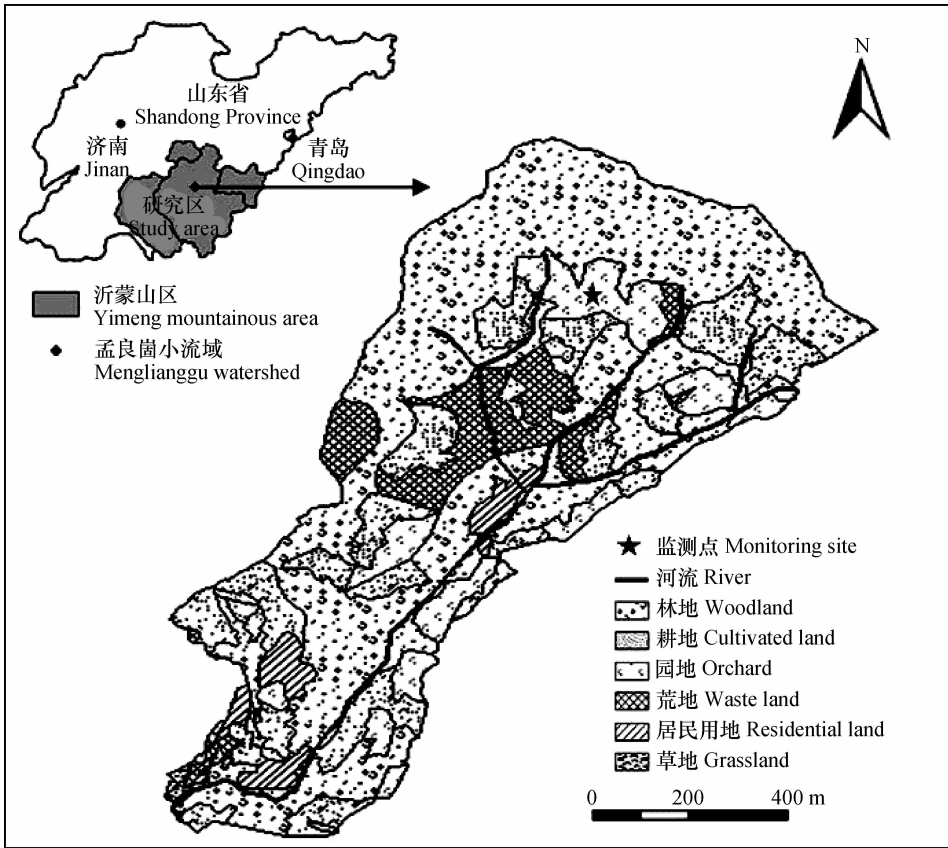


图 1 孟良崮小流域土地利用图

Fig. 1 Land use map in Menglianggu watershed

1.2 样品采集与分析

根据桃园内台地分布及耕作方向, 在水平和垂直方向按 1 m × 1 m 的网格等间距布设 100 个样点。2012 年 9 月以滴水穿透时间法原位测定土壤斥水性, 并利用土壤水分仪测定土壤含水量。野外测定分别在持续干旱 (23 d) 和降雨 (降雨量为 27.4 mm) 之后进行。本研究的前期试验结果表明, 土壤的斥水性主要存在于表层 0 ~ 3 cm 处。因此, 本研究采集布设样点表层 0 ~ 3 cm 的土壤, 每点取相邻不同的三个土样, 经混合均匀后组成待测样品, 放入黑色避光聚乙烯塑料袋中。将取回的样品置于阴凉处风干, 研磨, 一部分过 2 mm 筛, 用于粒度分析, 另一部分过 0.25 mm 筛, 用于有机质含量测定。

土壤斥水性测定: 用标准滴定管将 8 滴蒸馏水 (每滴约 0.05 ml) 滴至土壤表面, 用秒表测定每滴水滴完全渗入土壤中需要的时间, 取 8 滴蒸馏水入

渗时间的算术平均值作为每个样品的土壤斥水持续时间 (WDPT)^[18]。采用环刀法测定土壤容重。土壤颗粒组成采用英国 Mastersizer2000 激光粒度仪测定^[19], 并按美国制进行分级: 砂粒 (2 ~ 0.05 mm)、粉粒 (0.05 ~ 0.002 mm) 和黏粒 (< 0.002 mm)。采用重铬酸钾氧化—比色法^[20]测定土壤有机质含量。

1.3 数据处理与分析

土壤属性的半方差函数按式 (1) 进行计算:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (1)$$

式中, h 为位差 (Lag); $N(h)$ 为间距为 h 的样本对数; $Z(x_i + h)$ 、 $Z(x_i)$ 分别为空间位置 $x_i + h$ 、 x_i 的观测值^[21]。用 ArcGIS9.3 软件地统计分析模块拟合半方差函数模型, 通过分析模型中的块金值 (Nugget, C_0), 基台值 (Sill, $C_0 + C$), 变程 (a), 块金值与

基台值之比($C_0/(C_0 + C)$)阐明土壤斥水性与理化性质的空间变异规律,并通过普通克里格插值法,利用 Surfer8.0 软件绘制等值线图。

空间相关性分析是检验具有空间位置的某要素观测值是否显著地与其相邻空间点观测值的关联性^[22]。本文采用 GeoDA 软件计算 Moran's I 系数作为描述空间自相关的指标,其取值范围为 $[-1, 1]$,大于 0 表示空间正相关,小于 0 表示空间负相关,等于 0 表示不相关。具体公式如下:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n [X_i - \bar{X}] \sum_{j=1}^n w_{ij} [X_j - X]}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (2)$$

式中, $S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [X_i - \bar{X}]^2$; n 为空间单元数目; i, j 为

空间单元的行列值; X 为测定值; \bar{X} 为平均值; w_{ij} 为空间权重,表示各空间单元邻近关系。

2 结果

2.1 棕壤斥水性与理化性质的统计特征

利用经典统计学原理分析桃园棕壤雨前及雨后的斥水持续时间(WDPT)和含水量(Water)、砂粒(Sand)、粉粒(Silt)和黏粒(Clay)含量及有机质含量(OM),结果见表 1。其中分布类型采用偏度-峰度检验法检验,由于土壤质地及有机质较为稳定,降雨前后其含量和组分无明显变化,因此仅分析其雨前数据。

表 1 棕壤斥水性与理化性质的统计特征值

Table 1 Statistical eigenvalues of soil water repellency (SWR) and physicochemical properties of the brown soil

土壤性质 Soil Properties	最大值 Maximum	最小值 Minimum	极差 Range	平均值 Mean	标准差 Standard error	变异系数 Coefficient of variation (%)	偏态值 Skewness	峰度值 Kurtosis	K-S _p
斥水持续时间 WDPT (s)	264.5	3.2	261.3	52.50	43.56	83	2.011	8.848	0.620**
斥水持续时间* WDPT* (s)	47.7	1.1	46.6	7.15	7.06	99	3.348	16.62	0.274**
含水量 Water (%)	12.7	2.0	10.7	4.43	1.93	44	2.066	9.092	0.060
含水量* Water* (%)	17.5	3.1	14.4	8.69	2.94	33	0.787	3.602	0.767
有机质 OM (g kg ⁻¹)	51.8	3.8	48.0	28.71	13.41	47	-0.195	2.126	0.124
砂粒 Sand (%)	88.8	57.6	31.2	81.00	3.45	4	-3.066	22.60	0.084
粉粒 Silt (%)	40.9	11.0	29.9	18.64	3.35	18	2.902	21.26	0.099
黏粒 Clay (%)	1.44	0.2	1.26	0.37	0.16	43	3.232	21.99	0.127

注: * 表示土壤性质的监测条件为降雨之后; ** 表示对数转换之后的 p 值 Note: The symbol " * " indicates that the monitoring was done after rainfall and " * * " stands for significant level p after logarithmic transformation

据野外实地测定,降雨之前桃园土壤斥水持续时间为 3.2 ~ 264.5 s,其中 $5 \text{ s} \leq \text{WDPT} < 60 \text{ s}$ 的样本数量占 71%, $60 \text{ s} \leq \text{WDPT} < 600 \text{ s}$ 的样本数量占 28%, $\text{WDPT} < 5 \text{ s}$ 的样本数量很少,根据 Dekker 和 Jungerius^[23] 提出的斥水强度分类标准,其斥水程度强烈;降雨之后土壤斥水持续时间最大为 47.7 s, $> 5 \text{ s}$ 的样本数量占 44%,斥水程度轻微。统计分析(表 1)表明研究区不同土壤性质的变异程度相差较大,在 4% ~ 99% 之间,多数属于中等变异强度。降雨前后棕壤斥水性变异系数最大,分别为 83% 和 99%,变异程度均属中等偏强;有机质含量、雨前与

雨含水量均属中等变异程度;土壤质地三个指标表现为不同的变异水平,其中砂粒含量变异系数最小,属弱变异程度,而粉粒、黏粒含量则属中等变异程度。单样本 K-S 检验结果显示,雨前及雨含水量、有机质含量、砂粒、粉粒及黏粒含量均服从正态分布($p > 0.05$),雨前及雨后的棕壤斥水持续时间经对数转换后呈正态分布,满足地统计学分析的要求。

2.2 棕壤斥水性与理化性质的空间变异性

利用 ArcGIS9.3 软件拟合桃园棕壤斥水性及理化性质的半方差函数模型,发现耕作方向及其垂直

方向上的方向性差异明显。因此,本文主要分析耕作方向及其垂直方向上的半方差函数,具体结果见表 2。为了更加直观地反映土壤斥水持续时间在整

个区域上的空间分布,通过普通克里格插值法,利用 Surfer8.0 软件绘制其等值线图,如图 2。

表 2 棕壤斥水性与理化性质的半方差函数理论模型

Table 2 Semivariogram models of SWR and physicochemical properties of the brown soil

土壤性质 Soil properties	理论模型 Theoretical model	方向 Direction (°)		块金值 Nugget C_0	基台值 Sill $C_0 + C$	块金系数 Nugget/Sill $C_0 / (C_0 + C)$	变程 Range(m)		k
		长轴 Major range	短轴 Minor range				长轴 Major range	短轴 Minor range	
斥水持续时间 WDPT (s)	指数模型 Exponential	358.9	88.9	0.2298	0.7492	30.7%	6.3	1.4	4.5
斥水持续时间* WDPT* (s)	指数模型 Exponential	9.9	99.9	0.1591	0.556	28.6%	8.9	5.4	1.7
含水量 Water (%)	高斯模型 Gaussian	0.1	90.1	0.7060	3.913	18.0%	7.5	1.2	6.1
含水量* Water* (%)	高斯模型 Gaussian	359.9	89.9	1.281	6.264	20.5%	8.9	4.2	2.1
有机质 OM (g kg^{-1})	纯块金效应 Nugget effect	—	—	180.4	180.40	100.0%	—	—	1.0
砂粒 Sand (%)	高斯模型 Gaussian	273.4	3.4	5.849	6.443	90.8%	8.9	3.6	2.5
粉粒 Silt (%)	高斯模型 Gaussian	286.0	16.0	5.621	6.298	89.3%	8.9	4.7	1.9
黏粒 Clay (%)	高斯模型 Gaussian	356.1	86.1	0.0033	0.0155	21.3%	5.3	1.5	3.3

注: * 表示土壤性质的监测条件为降雨之后 Note: The symbol " * " indicates that monitoring was done after rainfall

2.2.1 空间结构特征 棕壤斥水性与理化性质的空间结构分析结果(表 2)表明:降雨前后棕壤斥水持续时间均符合指数模型,含水量、砂粒、粉粒及黏粒含量均能用高斯模型拟合,有机质含量呈现纯块金效应。块金值一方面反映随机因素的影响大小,另一方面也表明基本数据在分析、计算时误差的大小以及方法的合理程度,半方差函数的块金值总体上顺序为有机质含量 > 砂粒、粉粒含量 > 含水量 > 斥水性 > 黏粒含量,其中棕壤斥水性的半方差函数块金值和基台值均较小,表明数据处理过程合理,所得结果能够反映棕壤斥水性的空间结构。变程表示变量空间自相关范围的大小,与取样尺度以及影响变量的各种人为因素、自然条件等作用有关。除有机质含量外,各棕壤性质变程在 1.2 ~ 8.9 m 之间,均大于本研究所采用的采样间距,表明 1 m × 1 m 的取样尺度可以满足研究的要求。

块金系数($C_0 / (C_0 + C)$)可表示空间变异性程度,如果该比值较高,说明由随机部分引起的空间变异性程度较大;相反,则由空间自相关部分引起的空间变异性程度较大^[24]。降雨前后棕壤斥水持续时间的块金系数为 30.7% 和 28.6%,表明其存在中等偏强的空间自相关性,空间变异受到结构性因素(土壤母质、地形、土壤类型、气候条件等)和随机性因素(耕作方式、管理措施、种植制度等)共同作用,尤其是结构性因素的作用^[25]。降雨前后含水量及黏粒含量的块金系数 < 25%,具有强空间自相关性,其空间变异主要由结构性因素引起。而砂粒、粉粒含量的块金系数 > 75%,说明其空间变异主要由随机性因素引起,削弱了结构性因素产生的强空间自相关性;原因可能在于该地块黏粒平均含量较少、土质松散,受耕作方式及其他田间管理过程中的随机性因素影响,土壤粗颗粒的变异较大。有

机质含量块金系数为 100%，表现为纯块金效应，说明其在整个尺度上空间自相关很弱，随机性因子影响较大，结构性因子对其变异基本无影响。

2.2.2 空间方向效应 由表 2 可知，研究区降雨前棕壤斥水持续时间的空间变异存在各向异性，长、短轴变程分别为 6.3 m 和 1.4 m，方向分别为 358.9°（耕作方向）和 88.9°（垂直耕作方向）。各向异性比 k 值为 4.5，说明若在长轴和短轴方向上达到相同的变异程度，长轴方向上达到的距离应为短轴方向的 4.5 倍。棕壤斥水性在垂直耕作方向上的变异比耕作方向上的变异复杂：耕作带上的棕壤斥水持续时间值明显高于其他位置，棕壤斥水性沿耕作方向呈现明显的条带状分布趋势；在垂直方向上，随地形变化斥水持续时间变化较为剧烈，起伏明显，表明斥水性较强的空间变异性。图 2 较好地反映了其空间方向效应，尤其是耕作方向上的条带状分布趋势以及垂直方向上复杂的空间变异，其中 X、Y 轴分别表示南北向和东西向的采样距离，Z 轴表示棕壤斥水持续时间。这一现象对于指导采样具有重要意义，在该区域进行斥水性空间变异后续研究时，样点布设要考虑方向性和密度，在耕作方向上采样点可以较为稀疏，垂直方向上的采样点应较为密集。

土壤理化性质中除有机质含量表现出各向同性 ($k=1$) 的分布趋势，含水量与土壤质地均表现出一定的方向效应：长轴方向变程明显大于短轴方向，各向异性比 k 值均 >1 ，且含水量与黏粒含量表现为与斥水性相似的分布格局；相反，砂粒及粉粒含量在耕作方向上变异强烈、变程较小，垂直方向上则变异较小（表 2）。由于取样尺度不大，大尺度因素对棕壤性质的影响各方向上基本一致，因此取

样区棕壤性质空间分布的方向效应主要是由微地形及耕作方向上的生态过程引起。一方面棕壤斥水性、含水量及黏粒含量的空间变异受地形等结构性因素的影响较为显著：农田耕作方向为顺台地地方向，该平行带内棕壤性质受相同的耕作管理措施影响变异较小，相关范围较大；而垂直方向上微地形的变化以及作物布局和施肥灌溉等的差异性造成棕壤性质也产生相应变异，从而导致棕壤斥水性、含水量及黏粒含量变异程度的增加。另一方面，由半方差函数分析可知，砂粒及粉粒含量空间自相关性较弱，随机性因子如耕作方式的影响占主要作用，受耕作方向上生态过程的影响，二者在该方向上变异较为强烈，变程较小。

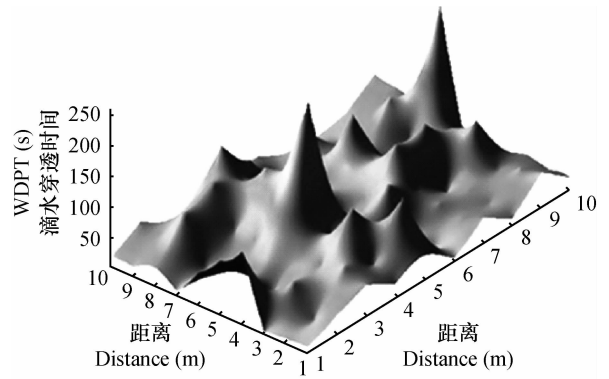


图 2 棕壤斥水性的等值线图

Fig. 2 A three-dimensional contour map of SWR of the brown soil

2.3 棕壤斥水性对理化性质的空间响应

为定量分析棕壤斥水性对理化性质的空间响应关系，在 GeoDA 空间分析软件中计算棕壤斥水性分别与含水量、有机质含量及砂粒、粉粒、黏粒含量的空间相关性系数 Moran's I ，并运用蒙特卡罗模拟方法来检验 Moran's I 系数的显著水平，结果见表 3。

表 3 棕壤斥水性与理化性质的 Moran's I 相关系数及显著水平

Table 3 Spatial correlation coefficients and significant level of SWR and physicochemical properties of the brown soil

项目 Items	含水量 Water	有机质 OM	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay
Moran's I	-0.072	0.039	-0.227	0.231	-0.071
p	0.062	0.185	0.002	0.001	0.092
Moran's I^*	-0.173	0.065	-0.156	0.164	-0.057
p^*	0.001	0.084	0.002	0.001	0.098

注：* 表示土壤性质的监测条件为降雨之后 Note: The symbol " * " indicates that the monitoring was done after rainfall

2.3.1 棕壤斥水性与有机质含量的空间相关性 包裹在土壤颗粒（或土壤团聚体）表面的斥水性化

合物是产生土壤斥水性的物质基础，包括有机质和各种脂类物质^[26]。有机质对斥水性的影响具有两

面性:一方面有机质通过土壤有机碳与矿物基质的比例来描述土壤有机碳分子的可能方向,当有机碳比例较低时亲水功能团朝向矿物质表面,疏水基朝外,导致斥水性^[27];另一方面,有机质是影响土壤团聚体的重要因素^[28],土壤有机质含量增加,可促进土壤团粒结构的形成,提高土壤的蓄水容量,减小斥水性的发生,从而降低有机质对斥水性空间变异的正相关作用。空间相关分析表明,棕壤斥水性与有机质含量的 Morian's I 系数仅为 0.039,二者无明显的空间相关关系,其原因可能与土壤质地及有机组分有关。已有研究报道,壤土条件下土壤斥水性与有机质含量没有明显的相关关系^[29];Doerr 等^[30]认为,在有机质含量偏高、有机成分输入丰富的情况下,土壤有机质含量与田间斥水性无明显空间相关作用,说明并非所有的有机质成分均是斥水性的,土壤中诱发斥水性的物质含量与实际有机质含量不一定成比例关系,有机质的组分及分子结构对斥水性的影响更为重要。

2.3.2 棕壤斥水性与含水量的空间相关性 土壤含水量的变化对斥水性的影响比较明显,多数研究表明斥水持续时间与土壤含水量成反比关系^[4,31]。本研究也得出了相似的结论:雨前斥水性强,雨后斥水性显著降低(表 1)。然而空间相关性分析结果表明(表 3):持续干旱条件下,土壤斥水性与含水量成一定的空间负相关性,与斥水土壤依赖于低含水量的情况相符,但相关系数小,置信度较低,说明二者在空间上的相互作用不明显。由此可见,土壤斥水性受多种因素的综合影响,且斥水性与含水量均具有瞬时可变性,导致斥水性对含水量的空间响应较为复杂,二者之间的空间相关性并不总是显著的。进一步分析(表 3)表明,在降雨(降雨量为 27.4 mm)之后棕壤斥水性与土壤质地、有机质含量的空间相关性均不显著的情况下,斥水性与含水量在 $p = 0.001$ 的显著性水平下呈空间负相关,且 Morian's I 系数为 -0.173 ,说明雨后棕壤斥水性与含水量空间分布的空间差异程度较强,二者分布趋势和取值相反的区域在空间上分布较为一致。同时也说明棕壤斥水性与理化性质的空间相关性并非一成不变,斥水性对理化性质的空间响应可能存在与含水量的耦合机制。这一现象对于揭示土壤斥水性与其影响因素的空间响应机制具有重要意义。

2.3.3 棕壤斥水性与土壤质地的空间相关性 空间相关分析(表 3)表明,降雨前后棕壤斥水性对

土壤质地的响应基本一致,斥水性与粉粒含量呈空间正相关,与砂粒、黏粒含量呈空间负相关,其相关度及显著水平顺序为:粉粒 > 砂粒 > 黏粒。说明棕壤斥水性与粉粒含量空间变异相近,与砂粒、黏粒含量空间差异明显。

土壤颗粒组成是影响土壤理化性状的重要因素,其可通过对斥水性物质的吸附,以及自身的亲水/疏水特性影响土壤斥水性^[32]。供试土壤为发育于花岗岩风化残积物上的棕壤,质地较粗,砂粒含量达 81%,黏粒含量极低为 0.37%(表 1)。类似于有机质在土壤颗粒中的分布,黏粒可能与土壤中的斥水性化合物结合形成有机-无机复合体,吸附稳定的斥水物质,降低其分散速度,有利于其积累^[33]。黏粒含量较低,其吸附斥水物质的总量较少,且黏土矿物以吸水作用较强的高岭石为主^[34],因此,不利于斥水性的发生,从而在空间上表现出与斥水性呈负相关,且影响程度较小。砂粒粒径较大,矿物组分以石英和云母等原生矿物为主,吸附斥水性物质的作用及机制较小或者缺失。再者,粗粒级所吸附的斥水物质可能对耕作方式的响应更为敏感,在耕作中与砂粒结合的斥水物质首先矿化分解,并从砂粒组分转移集中到粉粒组分中^[35]。因此,虽然砂粒含量占绝对优势,但其吸附的斥水物质总量有限,从而表现为与斥水性呈负相关。因黏粒与砂粒吸附的斥水物质总量较少,因而,绝大部分的斥水物质存在于粉粒中,且粉粒对吸附的斥水物质具有保护作用,因此,粉粒含量对土壤斥水性的空间作用为正向,且相对于砂粒、黏粒,其作用更为显著。

3 结 论

研究区的桃园棕壤在持续干旱条件下斥水程度强烈,降雨之后斥水性显著降低。降雨前后棕壤斥水性均表现为中等的变异强度和较强的空间自相关性,且呈指数模型分布,各向异性显著。受结构变异和随机变异作用,斥水性空间格局沿耕作方向呈条带状分布趋势,变程较大,在垂直于耕作方向上变异最为强烈。含水量及黏粒含量具有较强的空间自相关性,空间格局与斥水性相似;而粉粒、砂粒含量受随机性因素影响较大,空间自相关性较弱,分布格局与斥水性相反;有机质含量无空间自相关,为随机分布。降雨前后棕壤斥水性与有机质含量空间相关性均不显著;棕壤斥水性与含水量存在空间负相关关系,但相关性在降雨前后差别明

显,雨前较弱,雨后显著;而斥水性与粉粒含量呈空间正相关,与砂粒、黏粒含量呈空间负相关,降雨前后其相关度顺序皆为粉粒 > 砂粒 > 黏粒,土壤质地为棕壤斥水性空间变异的主要影响因素。

参考文献

- [1] Doerr S H, Ritsema C J, Dekker L W, et al. Water repellency of soils: New insights and emerging research needs. *Hydrological Processes*, 2007, 21 (17): 2223—2228
- [2] Shakesby R A, Doerr S H, Walsh R P D. The erosion impact of soil hydrophobicity: Current problems and future research directions. *Journal of Hydrology*, 2000, 231—232: 178—191
- [3] 任鑫, 李毅, 李敏, 等. 次生盐渍土垂向剖面斥水性及其与理化性质关系. *农业机械学报*, 2011, 42 (3): 58—64, 79. Ren X, Li Y, Li M, et al. Relationship between soil water repellency and soil physical-chemical properties for vertical profiles in secondary saline field (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42 (3): 58—64, 79
- [4] Jordán A, Zavala L M, Nava A L, et al. Occurrence and hydrological effects of water repellency in different soil and land use types in Mexican volcanic highlands. *Catena*, 2009, 79 (1): 60—71
- [5] 保玉录. 黄土丘陵区不同植被下土壤的斥水特性研究. 西安: 西安建筑科技大学, 2011. Bao Y L. The research of soil water repellency under different vegetation on loess hilly-gully regions (In Chinese). Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011
- [6] Keizer JJ, Doerr S H, Malvar M C, et al. Temporal and spatial variations in topsoil water repellency throughout a crop-rotation cycle on sandy soil in north-central Portugal. *Hydrological Processes*, 2007, 21 (17): 2317—2324
- [7] Atanassova I, Doerr S. Organic compounds of different extractability in total solvent extracts from soils of contrasting water repellency. *European Journal of Soil Science*, 2010, 61 (2): 298—313
- [8] Dekker L W, Ritsema C J. Wetting patterns and moisture variability in water repellent Dutch soils. *Journal of Hydrology*, 2000, 231—232: 148—164
- [9] Mataix-Solera J, Arcenegui V, Tessler N, et al. Soil properties as key factors controlling water repellency in fine-affected areas: Evidence from burned sites in Spain and Israel. *Catena*, 2012, DOI: 10.1016/j.catena.2011.12.006
- [10] Lebron I, Robinson D A, Oatham M, et al. Soil water repellency and pH soil change under tropical pine plantations compared with native tropical forest. *Journal of Hydrology*, 2012, 414—415: 194—200
- [11] Ritsema C J, Dekker L W, Nieber J L, et al. Modeling and field evidence of finger formation and finger recurrence in a water repellent sandy soil. *Water Resources Research*, 1998, 34: 555—567, DOI: 10.1029/97WR02407
- [12] Biemelt D, Schapp A, Kleeberg A, et al. Overland flow, erosion, and related phosphorus and iron fluxes at plot scale: A case study from a non-vegetated lignite mining dump in Lusatia. *Geoderma*, 2005, 129: 4—18
- [13] Lemmnitz C, Kuhnert M, Bens O, et al. Spatial and temporal variations of actual soil water repellency and their influence on surface runoff. *Hydrological Processes*, 2008, 22 (12): 1976—1984
- [14] Witter J V, Jungerius P D, Ten-Harkel M J. Modelling water erosion and the impact of water repellency. *Catena*, 1991, 18 (2): 115—124
- [15] Doerr S H, Ferreira A, Walsh P D, et al. Soil water repellency as a potential parameter in rainfall-runoff modelling: Experimental evidence at point to catchment scales from Portugal. *Hydrological Processes*, 2003, 17: 363—377
- [16] 郭丽俊, 李毅, 李敏, 等. 盐渍化农田土壤斥水性与理化性质的空间变异性. *土壤学报*, 2011, 48 (2): 275—285. Guo L J, Li Y, Li M, et al. Spatial variability of soil water repellency and soil physical-chemical properties in saline-alkaline field (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (2): 275—285
- [17] Yu X X, Qi S Z, Xu Y T. Soil erosion hazard in the Yimeng mountainous region, North China. *Natural Hazards*, 2012, 64 (2): 1963—1967
- [18] Doerr S H. Short communication on standardizing the 'Water Drop Penetration Time' and the 'Molarity of An Ethanol Droplet' techniques to classify soil hydrophobicity: A case study using medium textured soils. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1998, 23 (7): 663—668
- [19] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用. *土壤学报*, 2005, 42 (4): 545—550. Wang G L, Zhou S L, Zhao Q G. Volume fractal dimension of soil particles and its applications to land use (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42 (4): 545—550
- [20] 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. Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [21] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999: 35—63. Wang Z Q. Geostatistics and its application in ecology (In Chinese). Beijing: Science Press, 1999: 35—63
- [22] Zhang C S, McGrath D. Geostatistical and GIS analysis on soil organic carbon concentration in grassland of southeastern Ireland from two different period. *Geoderma*, 2004, 119: 261—275
- [23] Dekker L W, Jungerius P D. Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands. *Catena*, 1990 supplement: 173—183
- [24] 杨帆, 章光新, 尹雄锐, 等. 松嫩平原西部土壤盐碱化空间变异与微地形关系研究. *地理科学*, 2009, 29 (6): 869—873. Yang F, Zhang G X, Yin X R, et al. Spatial variability of soil salinity and alkalization and its correlation with mic-topography in the west of Songnen Plain (In Chinese). *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29 (6): 869—873
- [25] 胡志明, 周冀衡, 王勇, 等. 湖南烤烟 (*Nicotiana tabacum*) 铅含量的空间变异特性研究. *环境科学学报*, 2007, 27 (10): 1688—1693. Hu Z M, Zhou J H, Wang Y, et al. Study on spatial variability of lead content under flue-cure tobacco (*Nicotiana*

- tabacum*) leaf in Hunan Province, China (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(10):1688—1693
- [26] Ma'shum M, Tate M E, Jones G P, et al. Extraction and characterization of water-repellent materials from Austrilian soil. *Journal of Soil Science*, 1988, 39(1):99—110
- [27] ZhangMingkui, He Zhenli, Chen Guochao, et al. Formation and water stability of aggregates in red soil as affected by organic matter. *Pedosphere*, 1996, 6(1):39—45
- [28] Piccolo A, Mbagwu J S C. Role of hydrophobic components of soil organic matter in soil aggregate stability. *Journal of Soil Science Society of America*, 1999, 63:1801—1810
- [29] 陈俊英, 吴普特, 张智韬, 等. 土壤斥水性与有机质质量分数的变化关系研究. *灌溉排水学报*, 2012, 31(3):96—98, 118. Chen J Y, Wu P T, Zhang Z T, et al. The relation between WDPT and soil organic matter (In Chinese). *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(3):96—98, 118
- [30] Doerr S H, Shakesby R A, Walsh R P D. Soil water repellence: Its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews*, 2000, 51(14):33—65
- [31] Dekker L W, Ritsema C J, Oostindie K, et al. Effect of drying temperature on the severity of soil water repellency. *Soil Science*, 1998, 163(10):780—796
- [32] 赵明松, 张甘霖, 李德成, 等. 苏中平原南部土壤有机质空间变异特征研究. *地理科学*, 2013(1):86—92. Zhao M S Zhang G L, Li D C et al. Spatial variability of soil organic matter and factor analysis in the south of middle Jiangsu Plain (In Chinese). *Scientia Geographica Sinica*, 2013(1):86—92
- [33] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, 等. 土壤细颗粒对有机质的保护能力研究. *土壤通报*, 2005, 36(5):748—752. Liang A Z, Zhang X P, Yang X M, et al. A review on protection capacity of soil organic matter by fine particles (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(5):748—752
- [34] 孙治军, 马丽, 张民, 等. 山东主要果园土壤的粘土矿物组成及其吸附特性. *水土保持学报*, 2007, 21(3):57—60. Sun Z J, Ma L, Zhang M, et al. Composition of clay minerals and adsorption characteristics of main orchard soils in Shandong (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(3):57—60
- [35] Guggenberger G, Christensen B T, Zech W. Land-use effects on the composition of organic matter in particle size separates of soil. 1. Lignin and carbohydrate signature. *European Journal of Soil Science*, 1994, 45(4):449—458

SPATIAL RESPONSE OF WATER REPELLENCY TO PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES IN PEACH (*PRUNUSPERSICA*) ORCHARD BROWN SOIL IN YIMENG MOUNTAINS

Sun Qiqi¹ Liu Qianjin¹ Yu Xingxiu^{2†} Li Jianhua¹ Zeng Zhaopeng¹

(¹ Shandong Provincial Key laboratory of Water and Soil Conservation and Environmental Protection, Linyi University, Linyi, Shandong 276005, China)

(² Institute of Resources and Environment, Hubei University, Wuhan 430062, China)

Abstract Peach (*Prunuspersica*) orchard is a type of land use typical of brown soil in the Yimeng mountains. Soil water repellency (SWR) and soil physicochemical properties, such as soil moisture, soil organic content and soil texture, in the peach orchard brown soil before and after rainfall were analyzed to explore spatial response of SWR of the soil to variation of its physicochemical properties. Soil moisture content and SWR was measured in-situ and a total of 100 topsoil samples were collected, too, in a 1 m × 1 m grid pattern for analysis of contents of soil organic matter, sand, silt and clay. on such a basis, classic statistics, geostatistics and spatial correlation analysis were conducted. Results show that the SWR in studied brown soil was strong under the condition of lasting drought and decreased significantly after rainfall, and the SWRs before and after rainfall were both moderate in variability and strong in spatial autocorrelation, showing an exponential pattern in distribution with significant anisotropy. Under the joint function of structural and random variations, especially the structural variation, spatially the SWR was distributed in band following the direction of ploughing and its minimum codomain in vertical direction was 1.4 m. Soil texture was the main factor influencing spatial variability of SWR. SWR was positively related with silt content, but negatively with sand and clay contents in spatial distribution, showing an order of silt > sand > clay in degree of spatial correlation with SWR. SWR was also negatively related with soil moisture in spatial distribution. The negative relationship was quite weak before rainfall and became significant after rainfall.

Key words Soil water repellency; Brown soil; Soil texture; Soil moisture; Spatial correlation; Yimeng mountains

(责任编辑:檀满枝)