

黑土区农田尺度田间持水率的空间变异性研究

刘继龙¹, 徐清¹, 李林^{2*}, 付强¹, 王小慧¹, 马博思¹, 闫佳铭¹, 刘海岳¹

(1.东北农业大学 水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;

2.塔里木大学 水利与建筑工程学院, 新疆 阿拉尔 843300)

摘要:【目的】探究黑土区农田田间持水率的空间变异性机制。【方法】利用传统统计学和多重分形方法量化了田间持水率的空间变异强度, 分析了造成田间持水率空间变异性的局部信息; 利用联合多重分形方法确定了田间持水率与土壤基本物理特性在多尺度上的相关性。【结果】研究区域田间持水率具有多重分形特征, 随土层深度增加, 田间持水率的空间变异程度先降后增; 田间持水率的大值数据对 0~5 cm 和 10~15 cm 土层田间持水率空间变异性的贡献较大, 小值数据对 5~10 cm 和 15~20 cm 土层田间持水率空间变异性的贡献较大; 单一尺度上, 与田间持水率相关程度最高的土壤基本物理特性在 0~5 cm 土层是黏粒量和土壤体积质量, 在 5~10 cm 和 10~15 cm 土层是粉粒量和黏粒量, 在 15~20 cm 土层是土壤体积质量和粉粒量; 多尺度上, 与田间持水率相关程度最高的土壤基本物理特性在 0~5、5~10 和 10~15 cm 土层是黏粒量和粉粒量, 在 15~20 cm 土层是土壤体积质量和粉粒量。【结论】黑土区农田田间持水率的空间变异程度为弱变异, 田间持水率与土壤基本物理特性的相关程度在单一尺度和多尺度上有所差异。

关键词: 黑土区; 田间持水率; 空间变异性; 多重分形; 农田

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020248

OSID:



刘继龙, 徐清, 李林, 等. 黑土区农田尺度田间持水率的空间变异性研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(2): 55-61, 124.

LIU Jilong, XU Qing, LI Lin, et al. Spatial Heterogeneity of Field Capacity of Chernozem Soil in Northeast of China[J].

Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(2): 55-61, 124.

0 引言

【研究意义】土壤水分是土壤的一个重要性质, 制约土壤养分迁移以及微生物活动, 是四水转化的重要纽带, 是农学和地学等领域研究的一个重点。由于气候、地形、灌溉和作物等因素影响, 土壤特性具有明显空间变异性^[1-4]。土壤水分特性同样具有明显的空间变异性, 揭示土壤水分特性空间变异机制是实现土壤水分精准管理的理论基础。【研究进展】土壤水分特性空间变异性研究^[5-8]受到国内外学者广泛关注, 如吴向东等^[5]研究发现灌水前后不同土层土壤水分的变异性强弱有所差异, 均表现为强空间自相关性。然而, 目前关于土壤水分参数(田间持水率、凋萎系数和土壤有效含水率等)空间变异性的研究相对较少。研究空间变异性的方法众多, 其中多重分形具有识别研究变量的空间变异程度以及确定造成研究变量空

间变异性的局部信息等优点, 在实际中得到了广泛应用^[9-11]。此外, 不同尺度上造成研究对象空间变异性的主要因素并不完全相同, 多尺度相关性研究更能深入揭示研究对象之间的相互关系。目前国内外学者针对多尺度相关性^[12]已经进行了较多研究, 关于土壤水分参数与影响因素多尺度相关性研究的报道相对较少。【切入点】东北黑土区是世界仅存的“三大黑土区”之一, 具有独特的自然属性, 同时是中国重要商品粮生产基地, 由于土壤退化严重, 如何高效利用该区水土资源是一个重要课题, 获取土壤特性的空间变异特征可为水土资源的分布式管理与高效利用提供基础依据与信息^[13], 因此, 东北黑土区农田土壤水分参数的空间变异性机制是一个值得探索的科学问题。

【拟解决的关键问题】结合东北黑土区土壤退化严重, 土壤蓄水保墒能力不断降低的实际问题, 以黑土区农田田间持水率为对象, 利用多重分形和联合多重分形等方法, 研究农田田间持水率的空间变异特征及其与影响因素的多尺度相关性, 以期揭示黑土区农田田间持水率的空间变异机制, 为黑土区农田土壤水分的空间变异性研究及其管理与调控等提供参考。

收稿日期: 2020-05-06

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51439006); 国家自然科学基金项目(51409046); 黑龙江省自然科学基金项目(E2018005)

作者简介: 刘继龙(1981-), 男, 副教授, 主要从事农业水土工程方面研究。E-mail: liujilong1981@163.com

通信作者: 李林(1977-), 男, 副教授, 主要从事水土资源系统分析及高效利用等方面研究。E-mail: 55014370@qq.com

1 材料与方 法

1.1 采样点布置

试验在东北农业大学向阳试验基地进行, 该试验基地位于黑龙江省哈尔滨市, 属中温带大陆性季风气候, 年平均气温 4.25 °C, 年平均降水量 591 mm 左右, 土壤类型为黑土。试验地长和宽均为 96 m, 2016 年种植玉米, 利用机器收获玉米后, 粉碎的秸秆留在地表。2017 年翻地起垄, 种植玉米, 翻地深度为 20~30 cm, 翻地时将表面覆盖的粉碎秸秆埋入地下, 试验地没有进行灌溉, 播种时施用倍丰复混肥料(N₂、P₂O₅、K₂O 量分别为 24%、12%、10%) 300 kg/km², 玉米生长期追施昆仑尿素(总氮≥46.4%) 360 kg/km²。2017 年玉米收获后取土样, 用 12 m×12 m 网格划分试验地, 得到 64 个 12 m×12 m 网格, 在每个网格中心分别采集 0~5、5~10、10~15 和 15~20 cm 土层原状土样和散土样。挖好土壤剖面后, 各个土层的原状土利用体积为 100 cm³ 的环刀采集, 用来测定各个取样点的土壤水分特征曲线和土壤体积质量; 散土样用土铲采集, 装入土样袋, 带回实验室测定土壤颗粒组成。

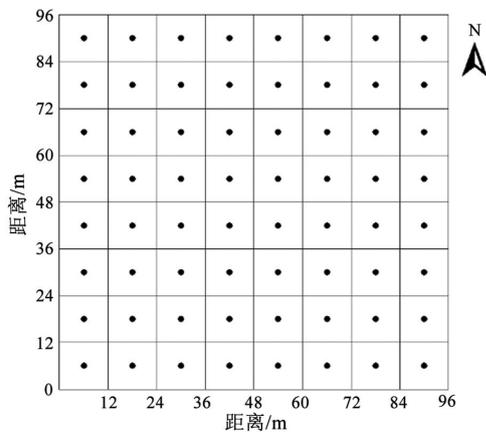


图 1 取样点的空间分布图

Fig.1 Spatial distribution of sampling site

1.2 测定指标

将装原状土样的环刀置于平底容器中, 缓慢加入清水, 保持水面低于环刀顶端 1~2 mm, 浸泡 24 h, 使土样饱和, 饱和后用离心机法测定土壤水吸力为 0、0.005、0.01、0.04、0.07、0.1、0.3、0.5 MPa 时对应的土壤含水率, 得到各测点土壤水分特征曲线; 土壤体积质量用烘干法测定, 试验地土壤体积质量平均值为 1.29 g/cm³, 变异程度为弱变异(变异系数为 0.042 8); 土壤颗粒组成用 Mastersizer 2000 激光粒度仪测定, 将土壤颗粒组成分为砂粒量(0.05~1 mm)、粉粒量(0.001~0.05 mm)和黏粒量(<0.001 mm), 黏粒量、粉粒量和砂粒量平均值分别为 13.74%、75.00%和 11.25%, 黏粒量和粉粒量为弱变异(变异系数分别为 0.065 1 和 0.012 6), 砂粒量为中等变异(变异系数为

0.110 1); 田间持水率取土壤水吸力等于 0.033 MPa 时对应的土壤含水率^[14]。

1.3 研究方法

1) Gardner模型。利用Gardner模型拟合土壤水分特征曲线, 计算式为:

$$\theta = ah^{-b}, \quad (1)$$

式中: θ 为土壤体积含水率 (cm³/cm³); h 为土壤水吸力 (kPa); a 、 b 为参数。

2) 变异系数 (CV), 其计算式为:

$$CV = \sigma / \mu, \quad (2)$$

式中: σ 为标准差; μ 为均值。

3) 多重分形。多重分形通过分析 $D(q) \sim q$ 曲线和 $\alpha(q) \sim f(q)$ 曲线 (多重分形谱), 研究空间变异程度以及造成空间变异性的局部信息等, 计算式^[15-17]为:

$$D(q) = \frac{1}{q-1} \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log \sum_{i=1}^n P_i^q(\delta)}{\log(\delta)} \quad q \neq 1, \quad (3)$$

$$D_1 = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^n P_i(\delta) \log P_i(\delta)}{\log(\delta)} \quad q=1, \quad (4)$$

$$\alpha(q) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i(q, \delta) \log P_i(\delta)}{\log \delta}, \quad (5)$$

$$f(q) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i(q, \delta) \log \mu_i(q, \delta)}{\log \delta}, \quad (6)$$

式中: $D(q)$ 为广义维数; q 为质量概率 $P_i(\delta)$ 的统计矩; δ 为尺度; $P_i(\delta) = \mu_i / \sum_{i=1}^n \mu_i$, μ_i 为第 i 处变量的值; n 为尺度取 δ 时的网格数; $\alpha(q)$ 为奇异指数; $f(q)$ 为奇异指数维数分布函数; $\mu_i(q, \delta) = P_i^q(\delta) / \sum_{i=1}^n P_i^q(\delta)$ 。

4) 联合多重分形。多重分形拓展为联合多重分形后, 可判定不同研究对象的多尺度相关性, 确定 2 个变量的多尺度相关特征时, 联合多重分形参数 $\alpha(q_1, q_2)$ 、 $\beta(q_1, q_2)$ 和 $f(\alpha, \beta)$ 、 $f(\alpha, \beta)$ 的计算式^[17]为:

$$\alpha(q_1, q_2) = -(\lg(N(\delta)))^{-1} \sum_{i=1}^{N(\delta)} (\mu_i(q_1, q_2, \delta) \lg(p_{i,1}(\delta))), \quad (7)$$

$$\beta(q_1, q_2) = -(\lg(N(\delta)))^{-1} \sum_{i=1}^{N(\delta)} (\mu_i(q_1, q_2, \delta) \lg(p_{i,2}(\delta))), \quad (8)$$

$$f(\alpha, \beta) = -(\lg(N(\delta)))^{-1} \sum_{i=1}^{N(\delta)} (\mu_i(q_1, q_2, \delta) \lg(\mu_i(q_1, q_2, \delta))), \quad (9)$$

$$\mu_i(q_1, q_2, \delta) = \frac{P_{i,1}(\delta)^{q_1} P_{i,2}(\delta)^{q_2}}{\sum_{i=1}^{N(\delta)} P_{i,1}(\delta)^{q_1} P_{i,2}(\delta)^{q_2}}. \quad (10)$$

2 结果与分析

2.1 田间持水率的传统统计学分析

利用 Gardner 模型拟合土壤水分特征曲线时, 0~5、5~10、10~15 cm 和 15~20 cm 土层拟合方程的决定系数分别在 0.942 4、0.969 7、0.961 5 和 0.927 6 以上(表 1), 均达到极显著水平, 表明可利用 Gardner 模型拟合土壤水分特征曲线。表 2 中数据显示, 0~5、5~10、10~15 cm 和 15~20 cm 土层田间持水率平均值依次为 29.92%、30.16%、31.38%、30.64%, 变异系数分别为 0.10、0.06、0.08、0.09。根据变异系数的含义^[18], 研究区域田间持水率的变异程度为弱变异。随土层深度增加, 田间持水率的平均值呈先增加后降低的变化趋势, 变异程度呈先降低后增加的变化趋势, 说明非常有必要分不同土层研究田间持水率的平均状况和变异程度。

表 1 拟合方程的决定系数

土层深度/cm	最小值	最大值	平均值	显著水平
0~5	0.942 4	0.998 2	0.989 0	0.01
5~10	0.969 7	0.996 5	0.990 1	0.01
10~15	0.961 5	0.996 9	0.985 9	0.01
15~20	0.927 6	0.997 6	0.986 1	0.01

表 2 田间持水率的传统统计特征值

土层深度/cm	最小值/%	最大值/%	平均值/%	标准差	变异系数
0~5	25.68	43.69	29.92	2.95	0.10
5~10	25.81	33.97	30.16	1.80	0.06
10~15	27.04	44.17	31.38	2.37	0.08
15~20	19.47	35.13	30.64	2.77	0.09

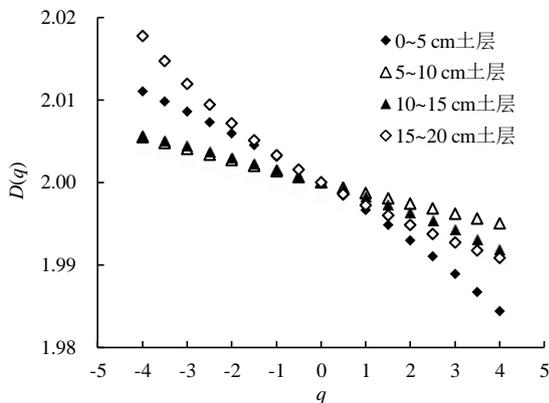


图 2 田间持水率的 $D(q) \sim q$ 曲线

Fig.2 The $D(q) \sim q$ curves of field capacity

2.2 田间持水率的多重分形分析

图 2 为田间持水率的 $D(q) \sim q$ 曲线。由图 2 可知, 不同土层田间持水率的 $D(q)$ 值随 q 增加逐渐降低, 根据多重分形原理^[16]可知, 田间持水率具有多重分形特征。从图 3 和表 3 可以看出, 不同土层田间持水率的

多重分形谱宽度($\alpha_{\max} - \alpha_{\min}$)分别为 0.053 0、0.021 3、0.028 0 和 0.064 3, 0~5 cm 和 10~15 cm 土层田间持水率的多重分形谱呈现不同程度的左偏, 5~10 cm 和 15~20 cm 土层多重分形谱呈现不同程度的右偏。根据多重分形原理^[16-17], 上述分析说明, 随土层深度变化, 空间变异强度先降低后增加, 与变异系数分析结果一致; 土层不同时, 田间持水率空间变异强度及其造成空间变异性的局部信息有所差异; 造成 0~5 cm 和 10~15 cm 土层田间持水率空间变异性的局部信息主要是其高值信息, 而造成 5~10 cm 和 15~20 cm 土层空间变异性的局部信息主要是其低值信息。

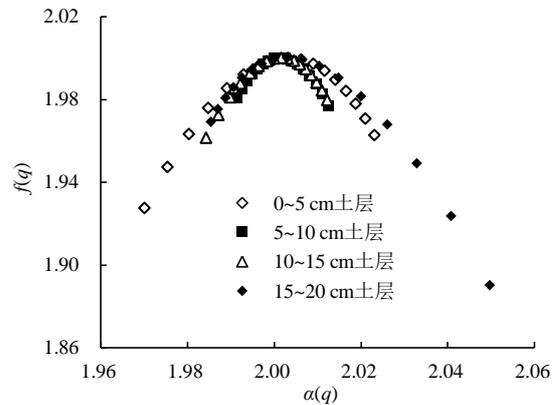


图 3 田间持水率的多重分形谱

Fig.3 Multifractal spectrums of field capacity

表 3 田间持水率的多重分形参数

土层深度/cm	α_{\min}	α_{\max}	$\alpha_{\max} - \alpha_{\min}$	$f(\alpha_{\min})$	$f(\alpha_{\max})$	$f(\alpha_{\max}) - f(\alpha_{\min})$
0~5	1.970 1	2.023 1	0.053 0	1.927 3	1.962 8	0.035 5
5~10	1.991 4	2.012 7	0.021 3	1.980 7	1.976 8	-0.003 9
10~15	1.984 3	2.012 3	0.028 0	1.961 5	1.979 7	0.018 2
15~20	1.985 4	2.049 7	0.064 3	1.969 1	1.890 1	-0.079 0

表 4 田间持水率与影响因素在单一尺度上的相关系数

土层深度/cm	砂粒量	粉粒量	黏粒量	土壤体积质量
0~5	-0.062	-0.167	0.225	0.199
5~10	-0.022	-0.134	0.152	0.108
10~15	-0.047	0.149	-0.088	0.057
15~20	-0.113	0.209	-0.112	0.381**

注 *表示在 $p < 0.05$ 水平上显著, **表示在 $p < 0.01$ 水平上显著, 下同。

2.3 田间持水率与影响因素单一尺度相关分析

表 4 为田间持水率与影响因素在单一尺度上的相关系数。由表 4 可知, 单一尺度上, 0~5 cm 土层田间持水率与黏粒量、土壤体积质量的相关性最明显, 5~10 cm 和 10~15 cm 土层与粉粒量、黏粒量的相关性最明显, 15~20 cm 土层与土壤体积质量、粉粒量的相关性

最明显;0~5 cm 和 5~10 cm 土层田间持水率与砂粒量、粉粒量负相关,与黏粒量、土壤体积质量正相关,10~15 cm 和 15~20 cm 土层田间持水率与砂粒量、黏粒量负相关,与粉粒量、土壤体积质量正相关,这可能是由于秸秆还田和土层深度不同等原因导致的。

2.4 田间持水率与影响因素多尺度相关分析

图4—图7给出了田间持水率与影响因素的联合多重分形谱,田间持水率与影响因素联合奇异指数的相关系数如表5所示,其中 α_{FC} 、 β_{SD} 、 β_{ST} 、 β_{CY} 、 β_{BD} 分别表示田间持水率、砂粒量、粉粒量、黏粒量、土壤体积质量的联合奇异指数。由图4可知,田间持水

率与影响因素的联合多重分形谱具有不同的结构特征,分析表5可知,在多尺度上,0~5、5~10 cm 和 10~15 cm 土层田间持水率与黏粒量、粉粒量的相关性最明显,15~20 cm 土层与土壤体积质量、粉粒量的相关性最明显。随土层深度变化,田间持水率与影响因素的多尺度相关特征也有所差异。田间持水率与影响因素在多尺度上的相关程度整体上高于在单一尺度上的相关程度;0~5 cm 土层田间持水率单一尺度和多尺度上的主要影响因素不同,其他土层田间持水率单一尺度和多尺度上的主要影响因素相同。

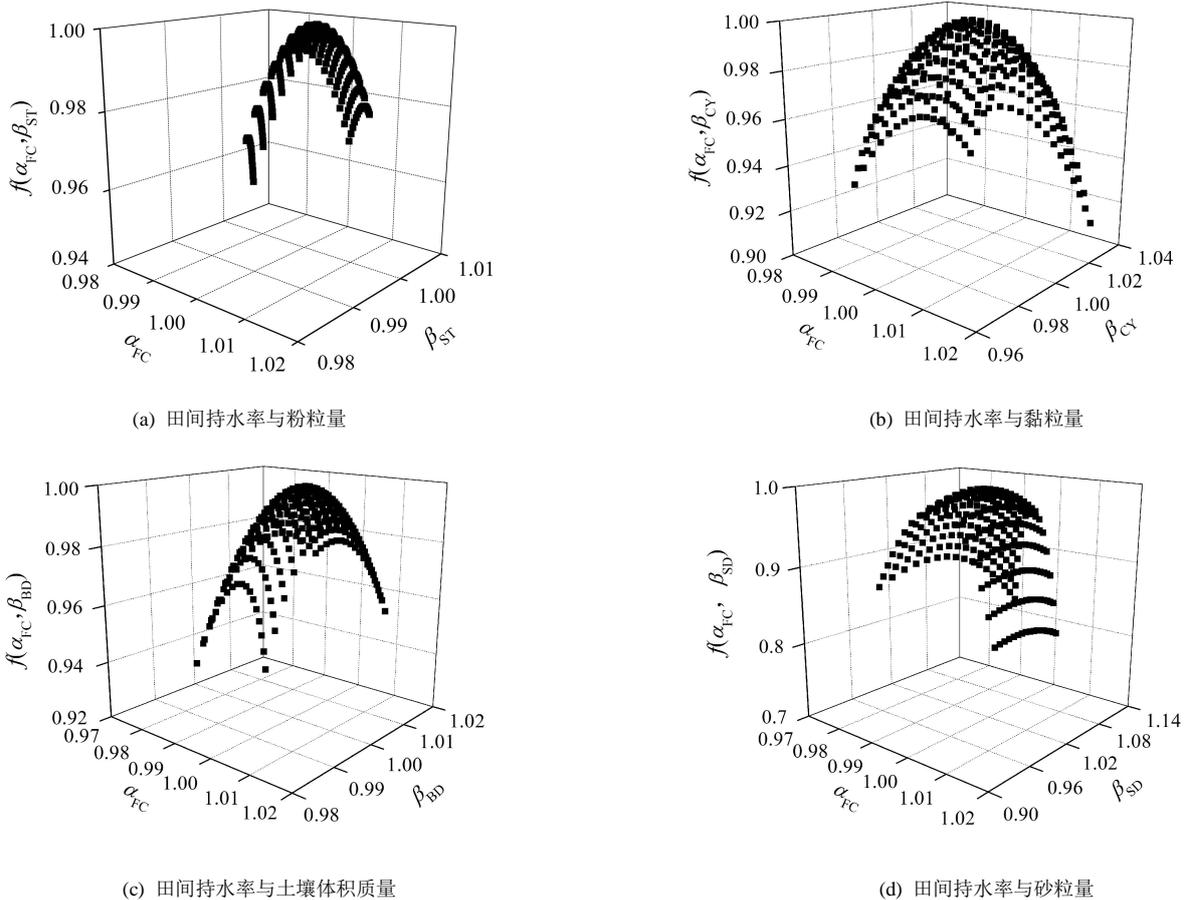
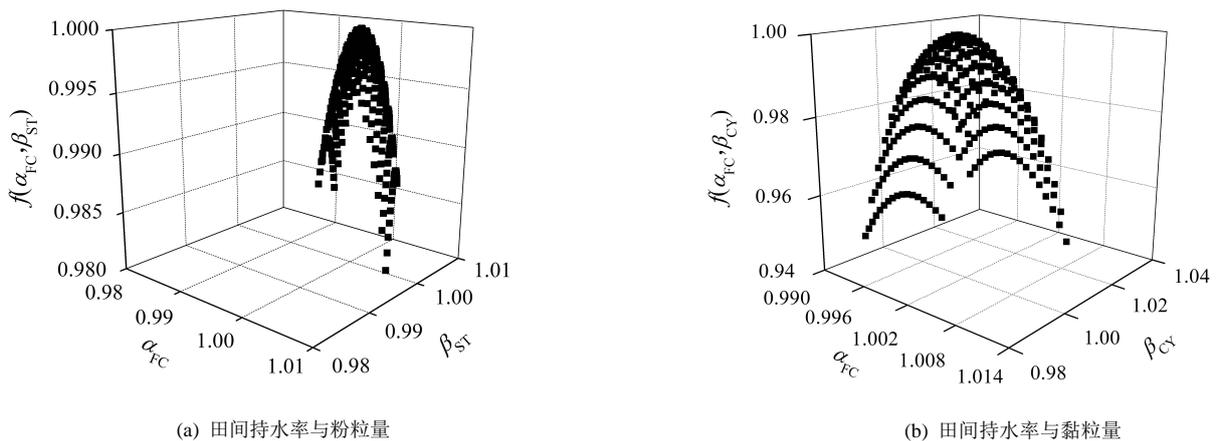


图4 0~5 cm 土层田间持水率与影响因素的联合多重分形谱

Fig.4 Joint multifractal spectra between field capacity and its influencing factors at 0~5 cm soil layer



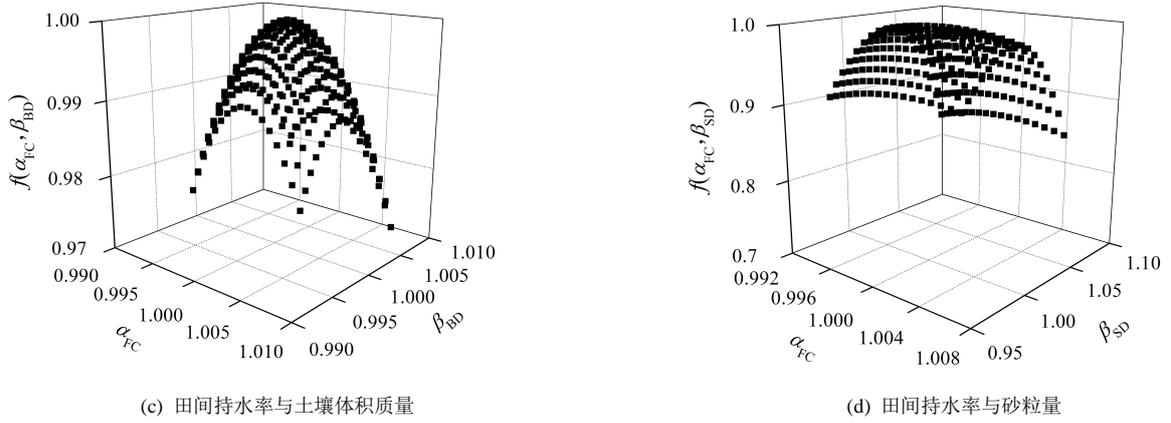


图 5 5~10 cm 土层田间持水率与影响因素的联合多重分形谱

Fig.5 Joint multifractal spectra between field capacity and its influencing factors at 5~10 cm soil layer

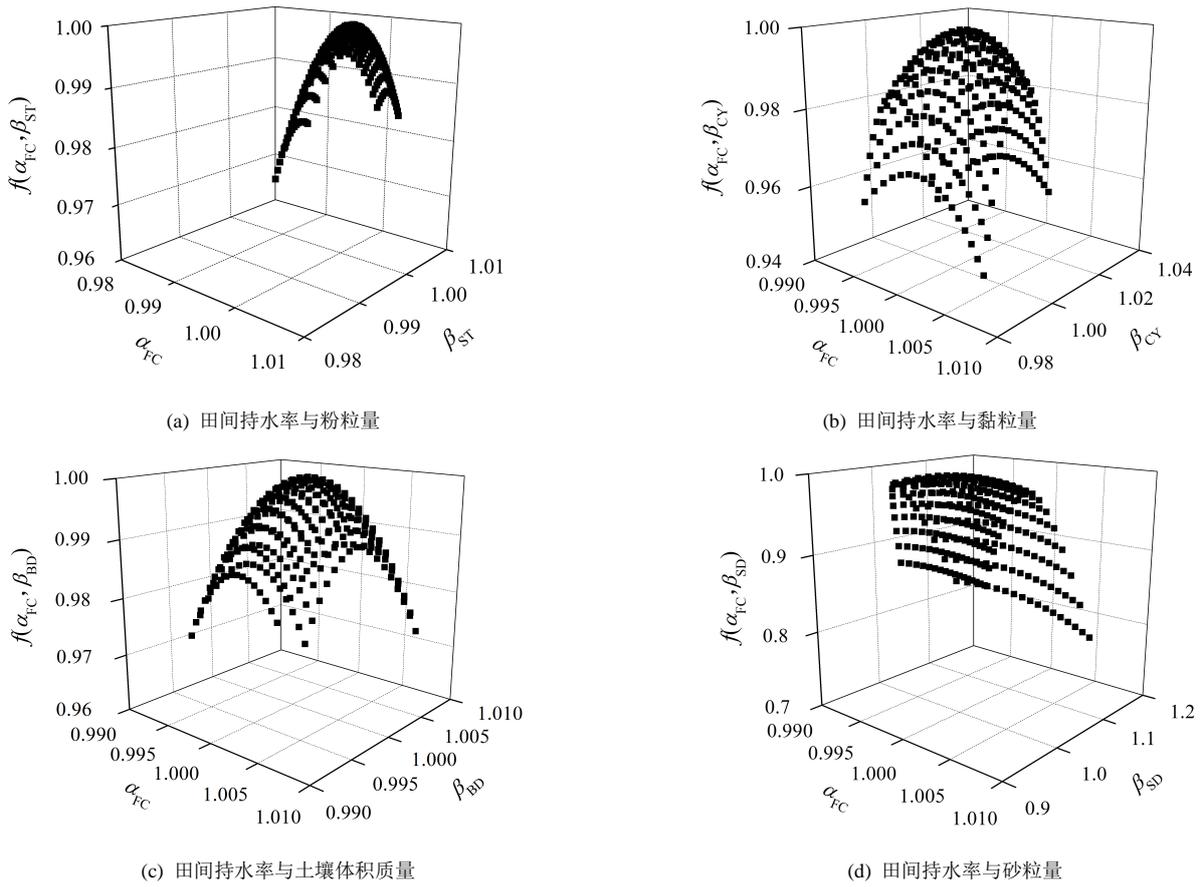
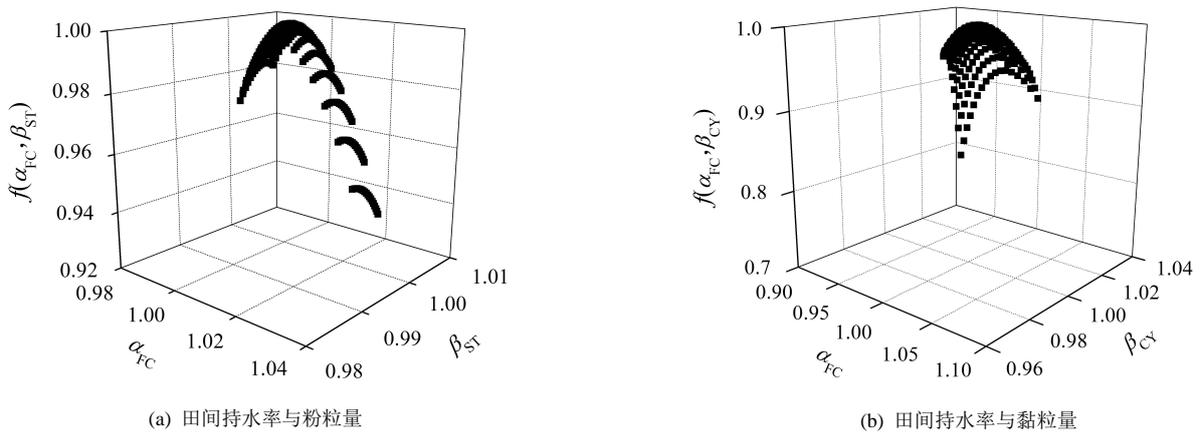
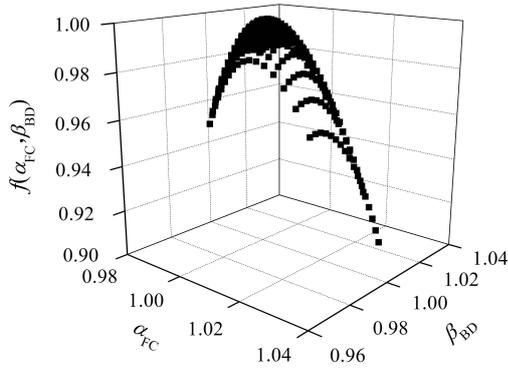


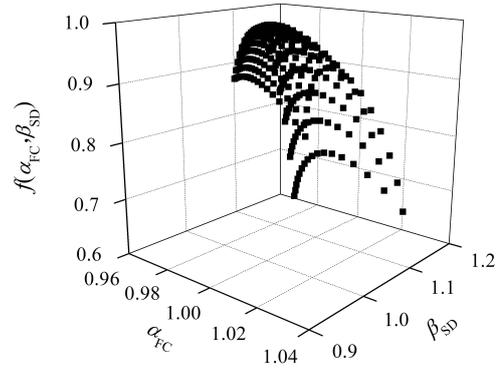
图 6 10~15 cm 土层田间持水率与影响因素的联合多重分形谱

Fig.6 Joint multifractal spectra between field capacity and its influencing factors at 10~15 cm soil layer





(c) 田间持水率与土壤体积质量



(d) 田间持水率与砂粒量

图7 15~20 cm 土层田间持水率与影响因素的联合多重分形谱

Fig.7 Joint multifractal spectra between field capacity and its influencing factors at 15~20 cm soil layer

表5 田间持水率与影响因素联合奇异指数的相关系数

Table 5 Correlation between joint singularity exponent of field capacity and its influencing factors

土层深度/cm	变量	β_{SD}	β_{ST}	β_{CY}	β_{BD}
0~5	α_{FC}	-0.193**	-0.457**	0.467**	0.295**
5~10	α_{FC}	-0.035	-0.322**	0.314**	0.261**
10~15	α_{FC}	-0.024	0.403**	-0.213**	0.116*
15~20	α_{FC}	-0.221**	0.512**	-0.247**	0.692**

3 讨论

造成不同土层田间持水率空间变异性的局部信息有所差异,说明不同土层田间持水率的空间变异特征有显著差异,这是因为不同土层田间持水率的主要影响因素不同,目前已发现土地利用方式、土层深度和地貌类型等外界条件不同时,田间持水率与影响因素(如土壤颗粒组成和土壤体积质量等)的相关特征不一定完全相同,甚至得出相反结论,如易湘生等^[19]发现田间持水率与黏粒量、砂粒量和土壤体积质量负相关,与粉粒量正相关,韩勇鸿等^[20]发现田间持水率随土壤体积质量增大先增后减,宁婷等^[14]发现田间持水率与土壤体积质量负相关,与黏粒量、砂粒量正相关。田间持水率与土壤颗粒组成、土壤体积质量在单一尺度上的相关系数在整体上都较低,可能是由于田间持水率与影响因素并不一定是线性关系^[20];本文中秸秆还田的土层深度为0~30 cm,秸秆的存在影响了田间持水率与影响因素的相关特征;不同尺度上研究对象的主要影响因素或某一影响因素的影响程度并不完全相同^[12],单一尺度上的相关程度并不一定能完全反映出田间持水率与其影响因素之间的相关程度。土壤颗粒组成、土壤结构和有机质等因素对田间持水率都具有显著影响,本文只是分析了秸秆还田农田土壤颗粒组成与土壤体积质量对田间持水率的影响,未分析秸秆还田引起的其他土壤性质变化(如土壤结构

和有机质等)对田间持水率的影响;耕作层深度内不同土层田间持水率的空间变异特征及其与影响因素的相关特征具有显著差异,非耕作层或更深土层对田间持水率的影响如何?田间持水率空间变异性具有尺度效应,取样面积较大时田间持水率的空间变异性及其与影响因素的相关性如何?上述3个方面是后续拟开展的研究内容。

4 结论

1)不同土层平均田间持水率介于29.92%~31.38%之间,随土层深度变化,平均田间持水率先增后降。田间持水率具有多重分形特征,空间变异程度为弱变异,随土层深度增加,变异程度先降后增;0~5 cm和10~15 cm土层田间持水率的空间变异性主要由田间持水率的高值造成,5~10 cm和15~20 cm土层主要由田间持水率的低值造成。

2)田间持水率与影响因素的相关特征具有尺度依赖性,单一尺度上,与田间持水率相关程度最明显的因素在0~5 cm土层是黏粒量和土壤体积质量,在5~10 cm和10~15 cm土层都是粉粒量和黏粒量,在15~20 cm土层是土壤体积质量和粉粒量;在多尺度上,与田间持水率相关程度最明显的因素在0~5、5~10 cm和10~15 cm土层是黏粒量和粉粒量,在15~20 cm土层是土壤体积质量和粉粒量。田间持水率与影响因素的多尺度相关程度整体上高于单一尺度相关程度,多尺度分析能更好地定量判定田间持水率与影响因素的相关特征。

参考文献:

- [1] 刘继龙, 马孝义, 张振华, 等. 土壤饱和和导水率的多尺度预测模型与转换关系[J]. 水科学进展, 2013, 24(4):568-573.

LIU Jilong, MA Xiaoyi, ZHANG Zhenhua, et al. Multi-scale prediction model and transformation relation of soil saturated hydraulic

- conductivity[J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(4):568-573.
- [2] 陈星星, 张江辉, 才仁加甫, 等. 新疆干旱地区土壤盐分空间变异特征研究: 以库尔勒三十一团为例[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(9): 108-114.
CHEN Xingxing, ZHANG Jianghui, CAI Ren-jiafu, et al. Study on spatial variability of soil salinity in arid area of southern Xinjiang: a case study on 31th regiment of Korla[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(9): 108-114.
- [3] 化骞寂, 冯绍元, 葛洲, 等. 河套灌区典型区周年内耕层土壤盐分时空变异研究[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(8): 26-34.
HUA Qianji, FENG Shaoyuan, GE Zhou, et al. Intra-annual spatiotemporal variation in salt content in the plough layer in Hetao irrigation district[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(8): 26-34.
- [4] 刘继龙, 刘璐, 付强, 等. 黑土区玉米地土壤温度的时空变异性研究[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(1):31-35.
LIU Jilong, LIU Lu, FU Qiang, et al. Spatiotemporal variation of soil temperature within a corn field in black soil[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(1): 31-35.
- [5] 吴向东, 陈小兵, 郭建青, 等. 黄河三角洲农田土壤含水率空间变异特征研究[J]. *灌溉排水学报*, 2013, 32(2): 48-51.
WU Xiangdong, CHEN Xiaobing, GUO Jianqing, et al. Spatial variability of soil water in Yellow river delta[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2013, 32(2): 48-51.
- [6] ROBINET J, HEBEL C V, GOVERS G, et al. Spatial variability of soil water content and soil electrical conductivity across scales derived from electromagnetic induction and time domain reflectometry[J]. *Geoderma*, 2018, 314:160-174.
- [7] SHEN Qin, GAO Guangyao, HU Wei, et al. Spatial-temporal variability of soil water content in a cropland-shelterbelt-desert site in an arid inland river basin of Northwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 540: 873-885.
- [8] 刘继龙, 任高奇, 付强, 等. 黑土区玉米地土壤水分的时空变异性研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2016, 24(6): 1 087-1 099.
LIU Jilong, REN Gaoqi, FU Qiang, et al. Spatial and temporal variability of soil moisture of corn field in black soil region[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2016, 24(6):1087-1099.
- [9] KRAVCHENKO A N, BOAST C W, BULLOCK D G. Multifractal analysis of soil spatial variability[J]. *Agronomy Journal*, 1999, 91: 1 033-1 041.
- [10] CANIEGO F J, ESPEJO R, MARTÍN M A, et al. Multifractal scaling of soil spatial variability[J]. *Ecological Modelling*, 2005, 182: 291-303.
- [11] 管孝艳, 杨培岭, 吕焯. 基于多重分形理论的农田土壤特性空间变异性分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2011, 19(5): 712-720.
GUAN Xiaoyan, YANG Peiling, LYU Ye. Analysis on spatial variability of soil properties based on multifractal theory[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2011, 19(5): 712-720.
- [12] 刘继龙, 任高奇, 付强, 等. 秸秆还田下土壤水分时间稳定性与玉米穗质量的相关性[J]. *农业机械学报*, 2019, 59(5): 320-326.
LIU Jilong, REN Gaoqi, FU Qiang, et al. Relationship between temporal stability of soil water and corn ear weight under straw Returning[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 59(5): 320-326.
- [13] 蔡守华, 徐英, 王俊生, 等. 土壤水分和养分时空变异性与作物产量的关系[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(12): 26-31.
CAI Shouhua, XU Ying, WANG Junsheng, et al. Relationship between spatio-temporal variability of soil moisture and nutrients and crop yield[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(12): 26-31.
- [14] 宁婷, 郭忠升, 李耀林. 黄土丘陵区撂荒地土壤水分特征曲线及水分常数的垂直变异[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 166-170.
NING Ting, GUO Zhongsheng, LI Yaolin. Soil water characteristic curves and soil water constants at different depths in the abandoned sloping field of loess hilly region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3): 166-170.
- [15] CHHABRA A, JENSEN R V. Direct determination of the $f(\alpha)$ singularity spectrum[J]. *Physical Review Letters*, 1989, 62: 1 327-1 330.
- [16] EGHBALLI B, SCHEPERS J S, NEGAHBAN M, et al. Spatial and temporal variability of soil nitrate and corn yield: multifractal analysis[J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95(2): 339-346.
- [17] 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): 1 691-1 702.
- [18] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
LEI Zhidong, YANG Shixiu, XIE Senzhan. *Soil water dynamics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988.
- [19] 易湘生, 李国胜, 尹衍雨. 青海三江源地区土壤水分常数转换函数的建立与比较[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(8): 1 096-1 104.
YI Xiangsheng, LI Guosheng, YIN Yanyu. Establishment and comparison of pedotransfer functions of soil moisture constant in the three-river headwaters region of Qinghai province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(8): 1 096-1 104.
- [20] 韩勇鸿, 樊贵盛, 孔令超. 土壤结构与田间持水率间的定量关系研究[J]. *太原理工大学学报*, 2012, 43(5): 615-619.
HAN Yonghong, FAN Guisheng, KONG Lingchao. The quantitative relationship between soil structure and field moisture capacity[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2012, 43(5): 615-619.