文章编号:1672-3317(2019)01-0031-05

# 黑土区玉米地土壤温度的时空变异性研究

刘继龙1,2,刘璐1,付强1,2\*,张玲玲3,李佳文1,谭思源1

 (1. 东北农业大学水利与土木工程学院,哈尔滨 150030; 2. 农业部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030; 3. 东北农业大学理学院,哈尔滨 150030)

摘 要:【目的】研究农田土壤温度的时空变异机理。【方法】以哈尔滨市向阳试验基地一块面积为96 m×96 m的农田 为研究对象(共设置32个测点),利用传统统计学与地统计学方法,分析了黑土区玉米地不同生育时期土壤温度的 空间变异性。【结果】随生育时期变化,不同深度的土壤温度平均值先增后减;不同深度土壤温度的空间变异性均为 弱变异,不同深度土壤温度变异程度的变化趋势有所差异,5 cm 深度变异程度的变化趋势不明显,10 cm和25 cm 深度先增后降,15 cm和20 cm 深度逐渐降低;土壤温度的空间相关范围在10、15、20 cm和25 cm 深度先增后减,土 壤温度在玉米灌浆期5 cm 深度与拔节期10 cm 深度具有中等空间相关性,其他生育时期及不同深度具有强烈的空 间相关性,5 cm和15 cm 深度空间相关性变化趋势不明显,10 cm和20 cm 深度先增后减,25 cm 深度先减后增。【结 论】上层深度和时间对研究区域土壤温度的空间变异性具有明显影响。

关键词:黑土区;农田;土壤温度;时空变异性;玉米

中图分类号:S152.8 文献标志码:A doi:10.13522/j.cnki.ggps.20180074

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.

0引言

土壤温度是反映土壤热能状态的变量,对作物生长发育以及土壤中的各种物理、化学、生物性状及过程 有重要影响<sup>[1]</sup>。土壤温度日变化和季节变化主要受气象因素影响,而不同空间位置土壤温度的变化主要受 地形、土壤物理因素和地表植物以及覆盖物等因素影响,故土壤温度具有明显的时空变异性<sup>[2]</sup>。目前许多学 者已对土壤温度的时空变异性进行研究,在时间尺度上包括日、月和季节<sup>[23]</sup>,在空间尺度上分为单一尺度和 多尺度<sup>[45]</sup>,研究方法包括方差分析、传统统计学、地统计学和GIS技术等,土地利用方式涉及林地<sup>[67]</sup>、农田<sup>[89]</sup> 和草地<sup>[10]</sup>等,地形包括山地和洼地等<sup>[2,11]</sup>。东北黑土区是中国重要商品粮生产基地,是中国著名玉米带和大 豆主产区,在国家粮食安全体系中起着举足轻重的作用<sup>[12]</sup>。由于自然因素和不合理的生产经营活动,造成黑 土区土壤退化严重,影响黑土生产力发挥和该区农业高效可持续发展<sup>[13]</sup>。许多研究表明,作物种子的萌发、 根系对水分和养分的吸收利用均需适宜的土壤温度,温度过高或过低均会对植物生理和生长发育造成不利 影响<sup>[14-15]</sup>。此外,土壤温度对土壤肥力有显著影响,影响土壤肥力的因子有土壤微生物活性<sup>[16-17]</sup>、有机物的分 解和转化<sup>[18]</sup>、养分的形态和有效性<sup>[19]</sup>,都与土壤温度状况有关。因此,研究作物不同生育时期土壤温度的空 间变异性,可为农田土壤温度的调控及其他农田精细管理提供理论依据与指导。目前国内外学者针对黑土 区农田土壤温度的时空变异性研究较少,针对土壤温度在玉米整个生育时期内的空间变异性研究更少。为 此,以我国东北黑土区农田为例,研究玉米不同生育时期不同深度土壤温度的空间变异特征,以期揭示该区 农田土壤温度的时空变异机理,为农田土壤温度的调控等提供一定理论依据和指导。

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

收稿日期:2018-01-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51409046);黑龙江省自然科学基金项目(E2018005);东北农业大学学术骨干项目(16XG12);黑龙江省博士 后科研启动金项目(LBH-Q16023);东北农业大学青年才俊项目(17QC25);黑龙江省博士后资助经费项目(LBH-Z17009);东北农业 大学2017年大学生SIPT计划项目(201710224247)

通信作者:付强(1973-),男。教授,博士生导师,主要从事农业水土工程研究。E-mail: fuqiang\_neau@163.com

## 1 材料与方法

## 1.1 试验观测点布置与测定

试验在东北农业大学向阳试验示范基地进行。该基地位 于哈尔滨市香坊区向阳乡,属中温带大陆性季风季候,年平均 降水量500~600 mm,年平均气温4.25 ℃,地下水类型为潜水, 地下水埋深一般14.15~46.50 m。供试土壤为黑土,碱解氮质 量分数为119.10 mg/kg,有效磷质量分数为13.61 mg/kg,速效 钾质量分数为124.66 mg/kg,有机质量为5.05%,耕层土壤体积 质量为1.29 g/cm<sup>3</sup>,土壤饱和含水率为45.35%,试验地全年无 灌溉,试验地前茬为玉米。试验地规格为96 m×96 m,供试玉 米品种为九单48,于2017年4月26日播种,10月7日收获。土 壤温度观测点位置的空间分布如图1所示,总共布置32 个观



测点。在各个观测点安装1套直角式地温计(精度0.5 ℃),地温计的埋设深度分别为5、10、15、20和25 cm。 试验期间分别观测玉米苗期(5月16日—6月25日)、拔节期(6月26日—7月18日)、抽雄期(7月19日—8月 4日)、灌浆期(8月5—24日)和成熟期(8月25日—10月7日)的土壤温度,测定土壤温度时选择无降雨日,分 别测定08:00、12:00、16:00各个观测点5、10、15、20和25 cm深度处的土壤温度,取3次土壤温度测定值的平 均值作为不同深度处日平均土壤温度。

#### 1.2 研究方法

1)传统统计学。变异系数*CV*的大小反映了变量的离散程度,*CV*≤0.1,变量具有弱变异;0.1<*CV*<1,变量 具有中等变异;*CV*≥1,变量具有强变异<sup>[20]</sup>。

2)地统计学。主要采用半方差函数 γ(h)定量研究和分析变量的空间相关结构, γ(h)计算式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \left[ Z(x_i) - Z(x_i + h) \right]^2 , \qquad (1)$$

式中:  $Z(x_i)$ 和  $Z(x_i+h)$ 分别为 $x_i$ 和 $x_i+h$ 处的土壤温度; h为样本间距; N(h)是滞后距离为h时的样本对数。

半方差函数参数包括块金值、基台值和变程,其中块金值表示由试验误差和小于取样尺度引起的变异; 块金值与基台值之比表示系统变量的空间相关性程度,比值小于25%具有强烈的空间相关性,比值大于 75%具有弱空间相关性,介于二者之间具有中等空间相关性;变程表示研究变量的空间相关范围,变程以外, 空间相关性消失<sup>[21]</sup>。

## 2 结果与分析

#### 2.1 土壤温度的传统统计特征值分析

不同生育时期土壤温度的传统统计特征值如表1所示。

表1 不同生育时期土壤温度的传统统计特征值

土层深 度/cm	生育期	最小值/℃	最大值/℃	平均值/℃	标准差	方差	CV	土层深 度/cm	生育期	最小值/℃	最大值/℃	平均值/℃	标准差	方差	CV
	苗期	29.40	34.60	31.87	1.2586	1.5842	0.0395		苗期	19.70	23.70	20.90	1.0597	1.1229	0.0507
	拔节期	28.00	35.00	32.22	1.7053	2.9079	0.0529		拔节期	23.67	29.00	25.47	1.0844	1.1758	0.0426
5	抽雄期	23.50	27.50	25.50	0.9400	0.8835	0.0369	20	抽雄期	20.00	23.83	21.51	0.7666	0.5877	0.0356
	灌浆期	23.00	25.50	24.66	0.5279	0.2786	0.0214		灌浆期	21.50	23.83	22.91	0.6891	0.4749	0.0301
	成熟期	15.00	18.17	16.08	0.5987	0.3584	0.0372		成熟期	12.67	14.17	13.60	0.3353	0.1125	0.0247
	苗期	25.50	28.80	26.89	0.8366	0.7000	0.0311		苗期	18.10	20.80	19.30	0.5744	0.3300	0.0298
	拔节期	26.83	31.50	29.20	1.2302	1.5133	0.0421		拔节期	23.00	26.33	24.48	0.7980	0.6368	0.0326
10	抽雄期	22.17	25.17	23.74	0.8121	0.6595	0.0342	25	抽雄期	20.17	22.33	21.24	0.5757	0.3314	0.0271
	灌浆期	22.50	24.67	23.95	0.5140	0.2642	0.0215		灌浆期	21.67	23.33	22.53	0.4388	0.1925	0.0195
	成熟期	13.83	15.33	14.76	0.3567	0.1272	0.0242		成熟期	13.00	14.17	13.48	0.2723	0.0741	0.0202
	苗期	22.80	27.10	24.73	1.0366	1.0745	0.0419		-	-	-	-	-	-	-
15	拔节期	25.67	30.50	27.67	1.1140	1.2410	0.0403	-	-	-	-	-	-	-	-
	抽雄期	21.67	24.67	22.92	0.7221	0.5215	0.0315		-	-	-	-	-	-	-
	灌浆期	22.33	24.33	23.52	0.5450	0.2970	0.0232		-	-	-	-	-	-	-
	成熟期	13.33	14.67	14.05	0.3419	0.1169	0.0243		-	-	-	-	-	-	-

由表1可知,在5、10、15、20和25 cm深度处,玉米不同生育时期土壤温度平均值分别为16.08~32.22、14.76~29.20、14.05~27.67、13.60~25.47和13.48~24.48℃;不同生育时期不同土层土壤温度的变异系数均介于0~0.1之间,表明土壤温度的空间变异性为弱变异,这与已有研究结果<sup>[3-4]</sup>相吻合。土层深度相同时,随生育时期的变化,土壤温度平均值均呈现出先增加后降低的变化趋势。各生育时期土壤温度观测日对应的气温平均值分别为21.1、25.6、21.6、23.1和14.1℃,不同深度土壤温度与大气温度的相关系数介于0.837~0.999之间(表2),表明土壤温度变化受大气温度影响显著,与已有研究结果<sup>[22]</sup>一致。

表2	不同生	育时	- 期不	同深	度土	壤温	度与	大	气温	度的	相う	も系	数
----	-----	----	------	----	----	----	----	---	----	----	----	----	---

土壤深度/cm	5	10	15	20	25
相关系数	0.837	0.934	0.967	0.999	0.991

随生育时期变化,5 cm深度处土壤温度的变异程度没有表现出明显的变化趋势,这可能是由于表层土 壤受自然因素及人类活动影响较大;10 cm和25 cm深度处土壤温度呈先增加后降低的变化趋势,15 cm和 20 cm深度处土壤温度则表现为逐渐降低的趋势。这与己有研究结论"土层深度不同时,随时间的变化,土 壤温度变异程度的变化趋势不同"<sup>13</sup>吻合,导致这种现象的原因可能是不同土层深度土壤含水率、土壤颗粒 组成、根系密度以及微生物活动等因素随生育时期变化不同,具体原因有待于进一步研究。

#### 2.2 土壤温度的变异函数分析

不同生育时期土壤温度的变异函数参数值如表3所示。由于不同深度随生育时期变化的土壤温度半方差拟合图较多(共25个),兹只给出5 cm深度处土壤温度在玉米整个生育时期的半方差拟合图(图2)。

土层深度/cm	生育期	理论模型	块金值	基台值	变程/m	块金值与基台值之比/%	离差平方和 RSS
	苗期	Spherical	0.154	0.963	12.0	15.99	0.089
	拔节期	Spherical	0.139	1.036	12.0	13.42	0.134
5	抽雄期	Spherical	0.128	1.042	22.5	12.28	0.116
	灌浆期	Gaussian	0.274	1.055	63.6	25.97	0.105
	成熟期	Linear to sill	0.246	1.062	61.2	23.16	0.063
	苗期	Spherical	0.157	0.887	12.0	17.70	0.110
	拔节期	Gaussian	0.506	1.167	63.4	43.36	0.085
10	抽雄期	Exponential	0.216	1.184	69.0	18.24	0.028
	灌浆期	Linear to sill	0.143	1.107	63.5	12.92	0.097
	成熟期	Spherical	0.071	0.946	14.9	7.51	0.246
	苗期	Spherical	0.125	1.032	22.7	12.11	0.161
	拔节期	Spherical	0.200	1.044	22.8	19.16	0.022
15	抽雄期	Linear to sill	0.043	1.085	39.5	3.96	0.078
	灌浆期	Linear to sill	0.026	1.046	52.4	2.49	0.099
	成熟期	Exponential	0.176	1.001	22.8	17.58	0.118
	苗期	Spherical	0.056	0.826	16.1	6.78	0.188
	拔节期	Exponential	0.084	0.846	22.2	9.93	0.117
20	抽雄期	Linear to sill	0.245	1.062	61.2	23.07	0.063
	灌浆期	Linear to sill	0.115	0.952	50.7	12.08	0.243
	成熟期	Spherical	0.120	1.008	17.0	11.90	0.116
	苗期	Spherical	0.110	0.930	21.0	11.83	0.056
	拔节期	Linear to sill	0.135	1.019	27.4	13.25	0.057
25	抽雄期	Spherical	0.051	1.024	25.7	4.98	0.109
	灌浆期	Gaussian	0.001	0.992	20.1	0.10	0.296
	成熟期	Spherical	0.103	1.022	12.0	10.08	0.227







由表3可知,不同生育时期土壤温度的块金值均大于0,说明存在试验误差和由于试验观测尺度引起的 变异。5 cm深度玉米灌浆期和10 cm深度拔节期土壤温度的块金值与基台值之比为25%~75%,其他生育时 期均小于25%,表明5 cm深度玉米灌浆期和10 cm深度拔节期土壤温度具有中等空间相关性,其他生育时 期土壤温度具有强烈的空间相关性,说明由自相关部分(土壤母质、微地形等)引起的空间变异占总空间变 异的程度大,空间变异主要是由结构因子(土壤类型和地形等)和随机因子(施肥和耕作等)共同作用导 致<sup>[23]</sup>。随作物生育时期变化,5 cm和15 cm深度处土壤温度空间相关程度没有明显的变化趋势,而10 cm和 20 cm深度呈先增大后减小的变化趋势,25 cm深度则表现为先减小后增大的变化趋势。

研究区内土壤温度的变程是12~69 m。其中5 cm和10 cm深度玉米苗期、5 cm深度拔节期以及25 cm 深度成熟期土壤温度变程为12 m,与本试验取样间距(12 m)相同,已有研究<sup>[3]</sup>发现存在变程小于取样间距的情况,说明研究对象各测点之间没有相关性,但取样间距对变程的影响,还需要在后续试验中通过改变取样间距进行进一步研究探讨。随生育时期变化,5 cm深度土壤温度变程变化趋势不明显,在其余4个深度土壤温度变程则呈现出先增大后减小的变化趋势,相关研究<sup>[3]</sup>也发现土壤温度的变程随时间变化而变化。由传统统计学方法可知,5 cm深度土壤温度的变异系数没有明显的变化趋势,10 cm和25 cm深度土壤温度的变异系数先增后减,表明5 cm深度土壤温度空间分布的均匀性变化趋势不明显,10 cm和25 cm深度 呈先增大后减小的变化趋势,这可能是导致5 cm深度土壤温度空间相关范围没有明显的变化趋势而10 cm 和25 cm深度表现为先增后减的原因,但15 cm和20 cm深度土壤温度空间相关范围随生育时期变化的原因仍有待于进一步研究。

## 3 结 论

1)随生育时期变化,不同深度土壤温度平均值均呈现先增加后降低的变化趋势;不同深度土壤温度均为弱变异,不同土层土壤温度变异程度的变化趋势有差异,5 cm深度土壤温度的变异程度变化趋势不明显, 10 cm和25 cm深度土壤温度的变异程度先增后降,15 cm和20 cm深度土壤温度的变异程度逐渐降低。

2)5 cm深度玉米灌浆期和10 cm深度拔节期的土壤温度具有中等空间相关性,其余生育期内土壤温度 表现为强烈的空间相关性,5 cm和15 cm深度土壤温度的空间相关性变化趋势不明显,10 cm和20 cm深度 土壤温度的空间相关性表现为先增后减,25 cm深度土壤温度的空间相关性先减后增;土壤温度的空间相关 范围是12~69 m,随作物生育时期变化,10、15、20和25 cm深度土壤温度的空间相关范围呈先增后减的变化 趋势。

#### 参考文献:

- [1] 王全九. 土壤物理与作物生长模型[M]. 北京:中国水利水电出版社,2016.
- [2] 谷加存,王政权,韩有志,等. 采伐干扰对帽儿山地区天然次生林土壤表层温度空间异质性的影响[J]. 应用生态学报,2006,17(12):2 248-2 254.
- [3] WOOD T E, DETTO M, SILVER W L. Sensitivity of soil respiration to variability in soil moisture and temperature in a humid tropical forest[J]. Plos One, 2013,8(12):e80965.
- [4] 王红梅,王堃,米佳,等. 北方农牧交错带沽源农田-草地界面土壤水热空间特征[J]. 生态学报,2009,29(12):6 589-6 599.
- [5] WUNDRAM D, PAPE R, LOFFLER J. Alpine soil temperature variability at multiple scales[J]. Arctic Antarctic & Alpine Research, 2010, 42(1):117-128.
- [6] 李春平,苏繁星,谢静,等. 基于地统计学方法的农田防护林网环境场特征分析[J]. 北京林业大学学报,2010,32(1):13-23.
- [7] 刘晓敏,车克钧,车宗玺,等. 祁连山青海云杉分布带土壤的空间变异性研究[J]. 甘肃农大学报,2011,46(6):86-92.
- [8] 吕雄杰,陆文龙,宋治文,等.农田土壤温度和水分空间变异研究[J].灌溉排水学报,2006,25(6):79-81.
- [9] 安晓飞,孟志军,王培,等.东北地区土壤温度和湿度空间变异特性研究[J].农业机械学报,2015,46(s1):304-308.

34

- [10] LEHNERT M, VYSOUDIL M, KLADIVO P. Semi-stationary measurement as a tool to refine understanding of the soil temperature spatial variability[J]. International Agrophysics, 2015, 29(4):449-457.
- [11] 尹辉,李晖,蒋忠诚,等. 典型岩溶峰丛洼地土壤温度的空间异质性[J]. 湖北农业科学,2015(8):1825-1828.
- [12] 蔡壮,黄金峰. 东北黑土区水土流失防治工程建后管护模式研究[J]. 吉林大学社会科学学报,2013(3):16-22.
- [13] 贾洪雷,马成林,李慧珍,等. 基于美国保护性耕作分析的东北黑土区耕地保护[J]. 农业机械学报,2010,41(10): 28-34.
- [14] 王会肖. 土壤温度、水分胁迫和播种深度对玉米种子萌发出苗的影响[J]. 中国生态农业学报,1995,3(4):70-74.
- [15] 程建峰,陈素珍,潘晓云,等. 土壤温度对陆稻根系生长发育的影响[J]. 江西农业大学学报,2000,22(1):6-10.
- [16] 刁一伟,郑循华,王跃思,等. 土壤温度和湿度对冬小麦田土壤空气CO<sub>2</sub>浓度的影响[J]. 气候与环境研究,2004,9(4):584-590.
- [17] 葛晓改,曾立雄,黄志霖,等. 土壤温度和水分含量对三峡库区马尾松林凋落物叶分解的影响[J]. 林业科学,2013,49(9):153-157.
- [18] 肖辉林,郑习健. 土壤温度上升对某些土壤化学性质的影响[J]. 土壤与环境,2000,9(4):316-318.
- [19] 程冬冬,赵贵哲,刘亚青,等. 土壤温度、土壤含水量对高分子缓释肥养分释放及土壤酶活性的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(6):216-220.
- [20] 雷志栋. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1988.
- [21] CAMBARDELLA C A, MOORMAN T B, PARKIN T B, et al. Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(5):1 501-1 511.
- [22] 秦红灵,高旺盛,李春阳.北方农牧交错带免耕对农田耕层土壤温度的影响[J].农业工程学报,2007,23(1):40-47.
- [23] 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.

# Spatiotemporal Variation of Soil Temperature within a Corn Field in Black Soil

LIU Jilong<sup>1,2</sup>, LIU Lu<sup>1</sup>, FU Qiang<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Lingling<sup>3</sup>, LI Jiawen<sup>1</sup>, TAN Siyuan<sup>1</sup>

- (1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;
- 2. Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China;

3. College of Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** [Objective] The aim of this work is to unravel the mechanisms underlying the spatiotemporal variation of soil temperature within a corn field grown in the black soil in north China in attempts to provide guidance to agronomical management. [Method] The experiment was conducted in a 96 m×96 m plot of corn field in Xiangyang experimental site in Harbin, Heilongjiang province. There were 32 observation points in the plot, from which we measured the change in soil temperature at different growth stages and then analyzed the data statistically. [Result] During the growth season, the mean soil temperature at different depths increased firstly followed by an decrease. Temporal variation in the temperature depends on soil depth, with the temperature at 5 cm remaining almost unchanged while those at 10 cm and 25 cm depth increasing first followed by a decrease; the spatial correlation of soil temperature existed medium spatial correlation on the other stages, the tendency to change the spatial variability of soil temperature was no obvious on 5 cm and 15 cm soil depth, increased firstly then decreased on 10 cm and 20 cm soil depth, and decreased firstly then increased on 25 cm soil depth. [Conclusion] The soil depth and time have significant influence on the spatial variability of soil temperature in the research area. **Key words:** black soil region; farmland; soil temperature; spatial and temporal variability

责任编辑:刘春成