

黑土坡耕地土壤湿度时空演变及其 与大豆产量空间相关性分析

张兴义, 王其存, 隋跃宇, 于同艳

(中国科学院东北地理与农业生态研究所, 哈尔滨 150040)

摘要: 利用经典统计学和地统计学方法对典型黑土坡耕地土壤湿度时空演变特征以及大豆产量与海拔高度和不同时期土壤湿度的空间关系进行了分析。结果表明: 黑土坡耕地土壤含水量具有较强的空间异质性, 有效空间相关距离为 159.3 ~ 506.6 m, 而且它们随着降雨和农田管理措施作用而改变。干旱加剧, 土壤水分空间异质性加强, 农田管理可降低土壤含水量的空间异质性。大豆产量同播种前后的土壤含水量存在显著的空间相关关系。

关键词: 黑土; 坡耕地; 土壤湿度; 大豆产量

中图分类号: S153.6

坡耕地由于其独特的地貌特征造成了土壤理化性状空间异质性, 人类耕作导致土壤水土流失加剧, 进而使该空间异质性改变, 降低坡耕地的生产力^[1-4]。近些年来, 人们对坡耕地水土流失特征研究较多, 但对水土流失导致的土地生产力和土壤理化性状的空间异质性研究较少^[5-6]。地统计学已经被证明是分析土壤性状空间分布和空间异质性的最有效方法之一^[7-8]。利用地统计学方法分析土壤水分的空间异质性, 如空间结构和空间变异尺度, 弥补了以概率论为基础的經典统计分析方法在结构和过程分析方面的不足, 能够有效地解释水分的空间分布格局对生态过程和功能的影响^[9-10]。中国东北黑土区是我国重要的商品粮生产基地, 其地貌特征是漫川漫岗, 有 1/3 以上的耕地为坡耕地, 为我国六大水土流失区之一。本文利用经典统计学和地统计学方法, 通过对典型黑土坡耕地土壤湿度时空演变特征以及大豆产量与海拔高度和不同时期土壤湿度的空间关系进行分析, 揭示黑土坡耕地大豆产量与土壤水分的空间关系, 旨在为黑土坡耕地水土流失的治理和科学管理提供理论参考。

1 试验材料和方法

1.1 试验区基本情况

试验区位于大豆主产区黑土中部区的黑龙江省海伦市前进乡光荣村, 试验坡耕地东西长 75.5 m, 南北长 310 m, 总面积 1.42 hm², 北纬 47°20.493' ~ 47°20.630', 东经 126°50.354' ~ 126°50.405'。西侧为分水岭, 东侧为侵蚀沟。地势西北略高, 向东南倾斜。海拔高度在 186.7 ~ 205 m, 1942 年由榛柴林开垦为农田。年平均气温 1.5 °C, 1 月平均气温 -23.5 °C, 7 月平均气温 21 °C, 年平均降水量 550 mm, 作物有效生长季为 120 ~ 130 天。

2003 年 10 月秋翻后起南北向垄, 2004 年种植大豆, 施种肥 N 107.2 kg/hm², P 18.6 kg/hm²。土壤为侵蚀黑土。

1.2 研究方法

2004 年春季播种前, 采用系统布点法, 设置 102 个观测点(采样点), 样点东西间距 10.5 m, 南北间距 20 m (图 1)。利用 TDR, 于 2004 年 4 月 21 日、5 月 7 日、5 月 22 日、6 月 22 日、8 月 30 日分别测定垄台和垄沟 0 ~ 15 cm 土层的平均容积含水量。于 2004 年 9 月 28 日在各样点旁采集两垄(垄距 0.7 m)长 3 m 小区大豆, 测定籽实产量, 转换为 (14%) 含水量的籽实产量。

样品的描述性分析采用 SPSS10.0 软件包, 用美国 GAMMA DESIGN SOFTWARE 公司的地统计学

①基金项目: 黑龙江省科技攻关项目 (GC03B301) 和自然科学基金项目 (C2004-25) 资助。

作者简介: 张兴义 (1966—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事黑土农业生态方面研究工作。E-mail: xyzhang1966@yahoo.com.cn

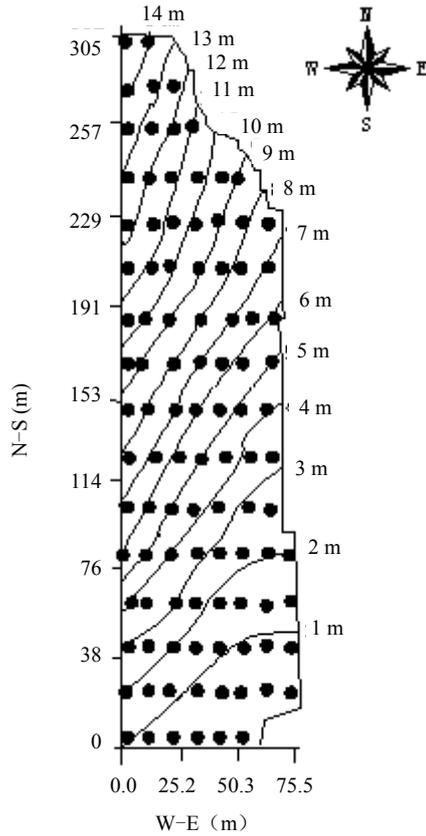


图 1 试验黑土坡耕地示意图 (示样点及等高线)
 Fig. 1 A sketch map of the slope land tested
 (Observation sites and contour was shown)

软件 GS+5.3b 进行地统计学分析, 绘制空间 Kriging 插值分布图。

2 结果与讨论

2.1 土壤水分和大豆产量经典统计学变异性分析

样本的标准差、变异系数、最大值、最小值表示数据的异质性程度, 但只能反映群体的变异性, 不能反映空间的异质性。表 1 给出了该坡耕地不同时期垄台和垄沟土壤含水量以及最终大豆产量的变异性, 结果表明: 5 月 22 日以前土壤含水量表现为中等强度变异 ($0.1 < CV < 0.75$), 尔后随着降雨的补给, 土壤含水量表现为弱变异 ($CV < 0.1$), 大豆产量表现为中等强度变异。5 月 7 日的土壤含水量较 4 月略有提高, 主要是由于 5 月 3 日连续 4 天降雨约 20 mm 和下层部分反浆水所致, 尔后一直到 6 月末, 连续 20 多天未降雨 (图 2), 土壤水逐渐减少, 处于较为严重的干旱期。进入 7 月, 雨季到来, 土壤墒情逐渐好转, 变异性降低。

2.2 大豆产量与土壤水分和相对高程的空间相关性分析

由于坡耕地不同位置的海拔高度不同, 流失的水分不同, 导致土壤含水量不同, 必将影响最终的大豆产量, 造成产量空间分布的异质性。通过观测点产量与对应点的海拔高度和不同时期土壤水分的空间相关分析, 可确定影响坡耕地对产量的影响程度, 还可确定影响产量的敏感水分时期。从表 2 可见, 大豆产量与相对高度存在负相关, 但不显著, 说明坡度本身并未对大豆产量造成直接影响, 而是因坡度的存在改变了土壤理化性状所致; 与播种前后无论是垄沟还是垄台的土壤含水量均存在显著的正相关, 该阶段的土壤含水量主要影响大豆出苗; 出苗后雨季到来前只与垄沟土壤含水量存在极显著

表 1 土壤水分含量 (%) 和大豆产量 (kg/m^2) 经典统计学分析结果

Table 1 Classical statistic analysis of soil moistures and soybean yields

日期 (月/日)	位置	样本数	均值	最小值	最大值	标准差	变异系数
4/21	垄台	102	23.3	16.7	31.9	3.586	0.118
	垄沟	102	30.2	18.2	37.9	3.572	0.142
5/07	垄台	102	28.3	21.2	35.9	3.340	0.140
	垄沟	102	33.6	25.9	48.5	4.031	0.264
5/22	垄台	102	19.3	11.5	32.8	5.087	0.224
	垄沟	102	24.4	13.4	37.8	5.471	0.249
6/22	垄台	102	17.1	10.3	28.8	4.124	0.171
	垄沟	102	26.1	14.4	36.5	4.643	0.089
8/30	垄台	102	29.5	23.6	41.6	2.623	0.084
	垄沟	102	35.3	29.8	44.0	2.866	0.081
9/28*		90	1.1	0.05	0.26	9.421	0.262

*: 大豆产量数据, 其余均为土壤含水量。

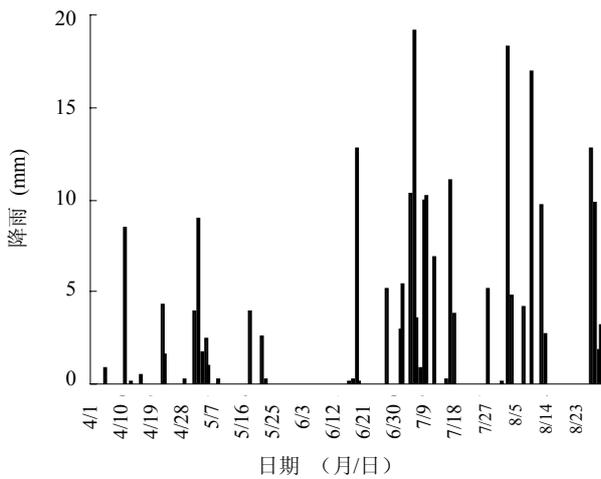


图 2 2004 年 4 月 8 月降雨

Fig. 2 Rainfalls from April to August of 2004

正相关,而与垄台的土壤含水量不存在显著相关关系,该阶段为大豆出苗-开花期,主要以生态耗水为主,生理耗水仅占一小部分^[10];雨季到来后只与垄台土壤含水量存在显著相关关系,该期大豆生理耗水占 50%^[10],因此与垄台供水存在显著相关。

2.3 坡耕地土壤水分时空演变规律分析

在性状空间变异性的经典统计分析中,是将性状看作随机的、彼此相互独立的。然而实际中,在一定的空间范围内,性状存在一定的空间依赖性。尤其是坡耕地,由于地表和地下均存在水沿地势的流失,加剧了土壤水分的空间异质性。地统计学方法被成功地引入土壤空间性状分析,弥补了经典统计学的不足,对空间异质性和相关性进行了很好分析和描述,在近 20 年来被国内外土壤研究者广泛采用^[7,9]。

表 2 大豆产量与土壤水分和相对高程的空间相关性分析

Table 2 Soybean yield in relation to relative altitude and soil moisture

高度	含水量										
	4 月 21 日		5 月 7 日		5 月 22 日		6 月 22 日		8 月 30 日		
	垄台	垄沟	垄台	垄沟	垄台	垄沟	垄台	垄沟	垄台	垄沟	
产量	-0.09	0.28**	0.23*	0.40**	0.27**	0.11	0.30**	0.16	0.49**	0.24*	0.10

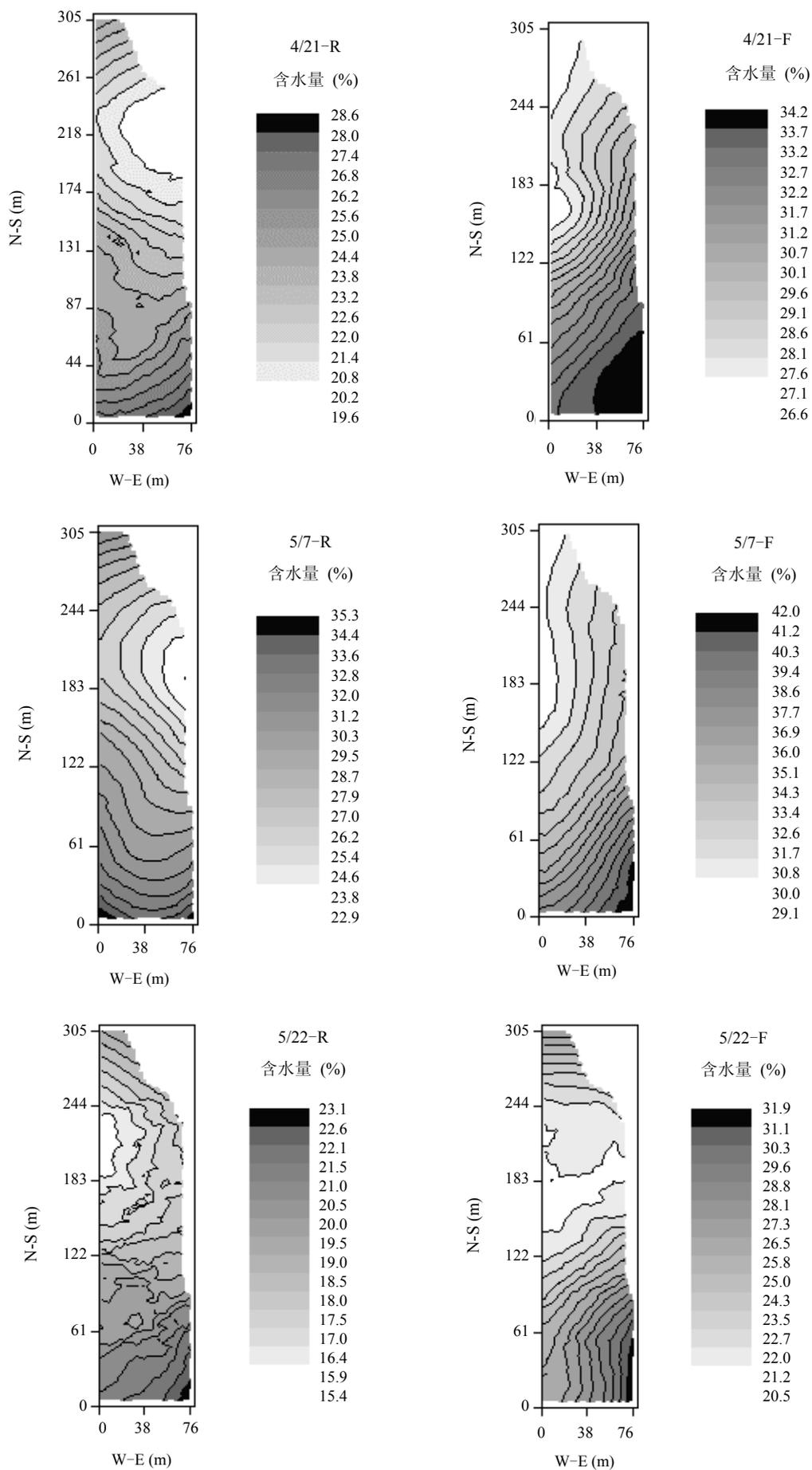
** 极显著相关 ($P < 0.01$), * 显著相关 ($P < 0.05$)。

图 3 和表 3 给出了土壤水分的时空演变特征及其空间相关性。尽管从总体而言土壤水分无论是垄台还是垄沟地势高的北部区域低于地势最低的东南部区域,均存在较大的空间异质性,但其空间异质性随着时间的演变,垄沟不同于垄台,主要是由于心土层土壤水和降雨形成的瞬间地表水沿地势迁移所致。而垄台中的土壤水很少有横向移动,主要由于土壤结构和土壤温度等差异,导致垂直方向的蒸散差异所致。

4 月 21 日、5 月 7 日、6 月 22 日土壤含水量的块金值与基台值的比值均 $< 25\%$, 表明变量有强烈的空间相关性; 5 月 22 日、8 月 30 日的块金值与基台值的比值在 $25\% \sim 75\%$ 之间, 表明变量具有中等的空间相关性^[6]。变程反映性状的有效空间相关距离, 垄台的空间相关距离在 $215 \sim 409.6 \text{ m}$ 之间, 垄沟的空间相关距离在 $159 \sim 506.6 \text{ m}$ 之间, 说明坡耕地土壤水分具有很好的空间相关性, 且随时间的变

化而变化。垄台的空间相关的有效距离随干旱的加重而加大, 随降雨的增加而变短。因此, 在对黑土坡耕地土壤水分的空间取样调查的距离应 $< 160 \text{ m}$ 。

土壤性状的空间异质性是由结构性因子和随机因子共同作用的结果。通常, 结构性因子促使土壤含水量的空间相关性加强, 而随机性因子促使土壤养分含量的空间相关性减弱。在未被人工扰动时, 无论是垄沟还是垄台, 土壤含水量主要受结构性因子的影响, 占 80% 左右; 人工扰动后, 块金值与基台值的比值增加, 空间异质性降低。例如, 大豆播种日期为 5 月 10 日、5 月 22 日的块金值与基台值的比值由 5 月 7 日的 20% 左右上升为 50% ; 7 月份进行中耕除草后, 块金值与基台值的比值又由 6 月 22 日的 20% 左右上升为 50% 左右, 空间异质性降低。因此, 加强农田管理, 可显著降低坡耕地土壤水分的空间异质性, 可部分消除地形对大豆产量的影响。



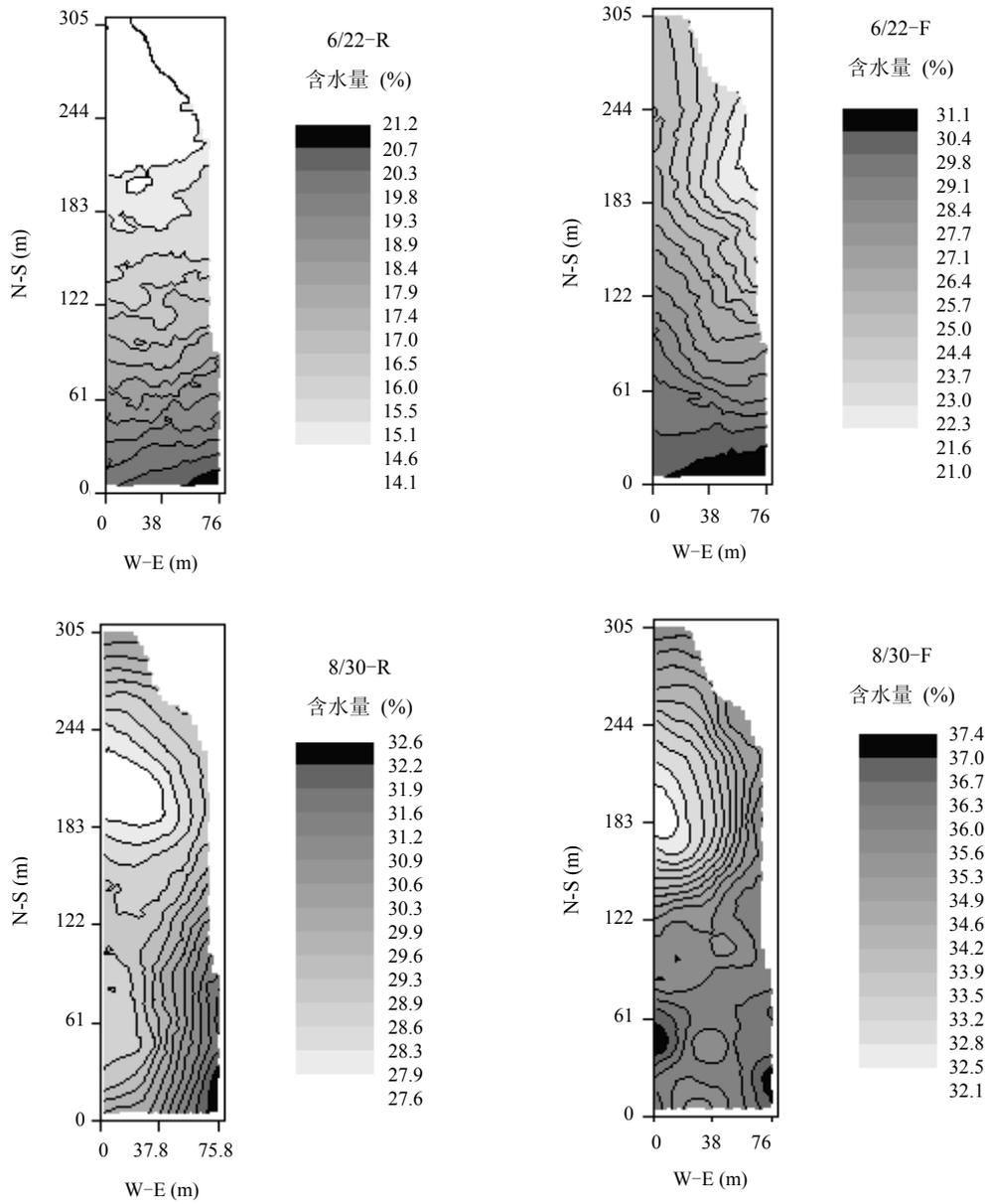


图 3 土壤水分时空演变 (R—垄台, F—垄沟)

Fig. 3 Spatial-temporal variation of soil moisture

表 3 半方差函数理论模型及相应参数

Table 3 Theoretical models of semivariogram and their parameters

日期 (月/日)	位置	最佳模型	块金值/基台值	变程 (m)
4/21	垄台	球状模型	0.200	215.4
	垄沟	球状模型	0.224	265.3
5/07	垄台	高斯模型	0.216	217.0
	垄沟	高斯模型	0.102	506.6
5/22	垄台	球状模型	0.489	293.2
	垄沟	球状模型	0.413	210.4
6/22	垄台	高斯模型	0.223	408.6
	垄沟	高斯模型	0.120	216.7
8/30	垄台	指数模型	0.487	226.2
	垄沟	指数模型	0.499	159.3

2.4 坡耕地大豆产量空间异质性分析

坡耕地由于地势的差异, 造成土壤理化生物性状的空间异质性, 进而导致大豆产量的空间异质性。测定结果表明, 大豆产量的整个空间变化范围为 $0.05 \sim 0.26 \text{ kg/m}^2$, 大豆产量的变异系数为 0.262, 为中等强度变异(表 1)。产量最低的区域分布在坡降最大的中部, 方向与坡向相反, 为西南至东北方向, 并不是水分最低区域, 因此可以推断, 尽管大豆产量受播种前后土壤含水量的显著影响, 但同时还可能受养分等性状的影响^[11](图 4)。

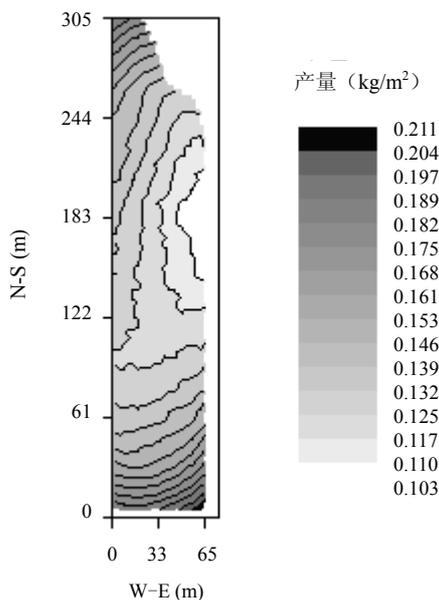


图 4 大豆产量的空间异质性

Fig. 4 Spatial heterogeneity analysis of soybean yields

3 结论

经典统计学分析结果显示在 5 月 22 日前土壤含水量具有中等强度的变异, 进入雨季后, 变异强度降低, 但不能对该异质性进行空间分析。利用地统计学对黑土坡耕地土壤含水量的时空演变及其空间异质性分析表明, 黑土坡耕地土壤含水量具有较大有效空间相关距离, 较强的空间异质性, 而且它们随着降雨和农田管理措施作用而改变。大豆产量同播种前后的土壤含水量存在显著的空间相关关系。随着春季干旱的加剧, 垄台的空间相关距离加大,

空间异质性加强, 对不同时期土壤墒情的观测, 应注意样点的空间距离, 土壤墒情好时, 采样间距应适当缩短, 在较干旱时, 样点距离可适当加大。人类活动对土壤的扰动可降低土壤含水量的空间异质性。因此, 加强坡耕地的管理, 可对水分具有一定的调控作用, 增加大豆产量。

参考文献:

- [1] 陈奇伯, 齐实, 孙立达, 张宇清, 柳长顺. 宁南黄土丘陵区坡耕地土壤侵蚀对土地生产力影响研究. 北京林业大学学报, 2001, 23 (1): 34-37
- [2] 何丙辉, 缪驰远, 吴咏, 陈晓燕. 遂宁组紫色土坡耕地土壤侵蚀规律研究. 水土保持学报, 2004, 18 (3):9-13
- [3] Zhang Y, Peng BZ, Gao X, Yang H. Degradation of soil properties due to erosion on sloping land in southern Jiangsu Province, China. *Pedosphere*, 2004, 14 (1):17-26
- [4] 李仁英, 杨浩, 赵晓光, 唐翔宇. ^{137}Cs 在黄土高原地区土壤侵蚀示踪中的应用研究. *土壤*, 2004, 36 (1): 96-98
- [5] 马混. 不同雨强条件下红壤坡地养分流失特征研究. 水土保持学报, 2002, 16 (3): 16-19
- [6] Miller MP, Sunger MJ, Nielsen DR. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills. *Soil Society of America Journal*, 1988, 52: 1133-1134
- [7] 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999: 102-149
- [8] 姜勇. 沈阳市郊耕地土壤交换性铁含量的空间异质性. 水土保持学报, 2003, 17 (1): 119-121
- [9] 郭旭东, 杨福林. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异研究. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 557-563
- [10] Snepvangers JC, Heuvelink GBM, Huisman JA. Soil water content interpolation using spatio-temporal kriging with external drift. *Geoderma*, 2003, 112 (3/4): 253-271
- [11] Goovaerts P. Geostatistics in soil science: State of the art and perspectives. *Geoderma*. 1999: 1-45
- [12] 孟凯, 张兴义. 东北北部黑土区大豆耗水特征的研究. *大豆科学*, 1997, 16 (3): 274-276
- [13] 方华军, 杨学明, 张晓平, 梁爱珍. 利用燃煤飞灰作为时间标记物评价坡耕地黑土侵蚀物质和有机碳的再分配. *土壤学报*, 2005, 42 (1): 16-23

Spatial-Temporal Variation of Soil Moisture and Its Spatial Correlations with Soybean Yield in Black Soil Sloping Farmland

ZHANG Xing-yi, WANG Qi-cun, SUI Yue-yu, YU Tong-yan

(Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150040, China)

Abstract: Spatial-temporal variation of soil moisture and its spatial correlations with soybean yield were analyzed with the classical statistics and geostatistics in a black soil sloping farmland. Results showed soil moisture displayed a strong spatial heterogeneity in the sloping farmland, with an effective range varying from 159.3 m to 506.6 m and with rainfall and farming practices. Spatial heterogeneity of soil moisture was enhanced by drought, but could be reduced by farming practices. A significant relationship was found between soybean yield and soil moisture at the seeding stage.

Keywords: Black soil, Sloping farmland, Soil moisture, Soybean yield