

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.11.037

大田尺度下车载式土壤多参数测量方法研究*

盛文溢¹ 曾庆猛¹ 林剑辉² Schulze Lammers P³ 孙宇瑞¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学工学院, 北京 100083;

3. 波恩大学农业工程研究所, 波恩 53115, 德国)

【摘要】 应用自行研制的土壤含水量、电导率与耕作阻力车载测试系统以及 EM38 电导率测试仪, 在特定的耕作和施肥管理制度试验田中进行大田尺度下的土壤多参数车载测量研究。在土壤参数空间分布信息基础上进行相关分析, 结果表明复合传感器具备农田土壤含水量和电导率变异响应能力, 进一步建立了农田土壤电导率与含水量、耕作阻力以及施肥信息之间的统计预测模型。

关键词: 土壤参数 车载式测量 大田尺度 相关分析

中图分类号: S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)11-0188-05

On-the-go Measuring Method of Soil Parameters in Field-scale

Sheng Wenyi¹ Zeng Qingmeng¹ Lin Jianhui² Schulze Lammers P³ Sun Yurui¹

(1. College of Information and Electronic Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3. Institute of Agricultural Engineering, University of Bonn, Bonn 53115, Germany)

Abstract

On-the-go measurement of soil parameters in field-scale, which managed in a determinate farming and fertilizing mode, was carried out using soil moisture content (MC), electrical conductivity (EC) and mechanical resistance (MR) measuring system and EM38. The correlativity among the soil parameters was investigated based on the soil parameter spatial distribution. The results showed that the combined sensor could response the field MC and EC variation. Soil EC in field scale could be predicted by soil MC, MR and fertilizing information.

Key words Soil parameters, On-the-go measurement, Field-scale, Correlation analysis

引言

在精细农业技术体系中, 土壤信息获取是实践变异管理(site specific management, 简称 SSM) 的重要基础环节^[1]。SSM 应用的最大潜力在于借助 GPS、GIS、信息和电子技术的进一步发展及融合, 为不同土壤、作物属性空间分布提供可靠的信息来源以及进一步解译的技术保障。基于现代农业“提高产量、减少投入、节约资源、保护环境”的特点, 车载式(on-the-go)土壤信息测量逐渐成为顺应精细农业

发展要求的国际研究热点之一。与传统土壤信息定点采样技术相比, 车载技术具备快速、高效、节能等特点, 可为不同生长时期的基于传感器(sensor-based)的作物管理提供潜在的实践方案。

当前, 车载式土壤参数研究主要集中在单一参数上, 如 Inoue 等研制了 3 种基于 TDR(time domain reflectometer)方法的车载式土壤含水量传感器探头, 在实验室环境下取得较高的测量精度, 但未能进行农田试验^[2]; Ruth 等设计了栅型 FD(frequency domain)土壤含水量传感器并尝试用于田间车载试

收稿日期: 2009-11-06 修回日期: 2010-01-18

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA10A301)和中德“精细农业中的先进传感科学与技术”合作小组专项资助(GZ494)

作者简介: 盛文溢, 博士生, 主要从事精细农业信息采集与系统集成研究, E-mail: shengwenyi@sohu.com

通讯作者: 孙宇瑞, 教授, 博士生导师, 主要从事智能检测与信号处理研究, E-mail: pal@cau.edu.cn

验^[3]; Adamchuk 等将近红外光谱方法应用于车载式土壤含水量测量研究^[4]。土壤电导率测量技术实施的主要方法分别为基于电流-电压四端法和电磁感应法,前者为接触式测量而后者为非接触式,并分别研制了相应的商品化土壤电导率测试仪 Veris3100 和 EM38,针对 Veris3100 和 EM38 的特点, Sudduth 等在美国中北部 6 个州 12 个大豆试验田进行对比试验结果表明, EM38 垂直放置测量结果 ECa-em 与 Veris3100 深层测量结果 ECa-dp 高度相关^[5]。由于力学测量技术发展的相对成熟,基于应变-电阻效应的传感技术被广泛用于车载土壤耕作阻力测量, Sirjaobs 等设计了一种曲面测力传感器,能够实时测量水平和垂直方向的受力以及转矩 3 个力学参数^[6]; Andrade 等采用 5 个棱形测力单元组成土壤剖面阻力传感系统,最大测量剖面深度为 46 cm^[7]; 赵新等采用八角环测力传感器研制了土壤阻力连续测试系统,通过液压控制装置可获取 10 ~ 50 cm 土壤深度耕作阻力^[8]。在土壤多参数测量方面,主要集中在土壤含水量与耕作阻力两参数复合测量研究上, Mouazen 等在具备了深度自动调节功能的车载式土壤耕作阻力测量系统基础上,将近红外传感器嵌入到深耕铲后端,实现了土壤含水量与耕作阻力的实时测量^[9]; Sun 等采用 FD 和圆锥一体化设计的技术方案,实现土壤含水量与耕作阻力的复合测量^[10],农田试验结果表明,该方案结构紧凑合理、测量精度高、研制成本低,更加适合农田环境车载式测量。Zeng 等对土壤含水量与电导率复合测量方法进行了传感器设计和田间初步试验研究^[11]。

本文基于四环复合传感器,设计农田土壤含水量、电导率与耕作阻力车载测试系统,在特定的耕作和施肥管理农田上进行田间试验,深入分析农田土壤多参数空间分布信息及潜在规律。

1 材料与方 法

1.1 车载式土壤多参数测量系统

土壤多参数测量系统如图 1 所示,主要包括复合传感器、测力传感器、开沟刀、传动力臂、铰链等^[10]。测量系统由三点悬装置连接到拖拉机后端,复合传感器通过开沟刀底部过孔垂直固定到传动力臂上,调节限深轮(图中未标出)使之位于地下一定深度。测量过程中,传感器锥头受到的耕作阻力由传动力臂传递到处于地面的测力传感器,开沟刀的宽度比传动力臂略大,其作用一方面负责推开复合传感器周围土壤,同时确保其他位置土壤阻力无法传递到测力传感器上。

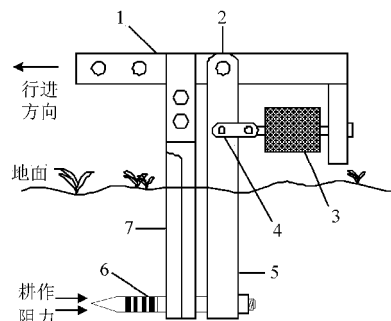


图 1 土壤含水量、电导率与耕作阻力测量系统
Fig. 1 Measurement system for soil moisture content, electrical conductivity and mechanical resistance

1. 机架 2. 铰链 3. 测力传感器 4. 支点 5. 传动力臂 6. 复合传感器 7. 开沟刀

土壤耕作阻力传感器标定结果如图 2 所示,传感器输出和轴向加载压力之间呈高度线性,决定系数 R^2 为 0.9997,表明传感器在 0 ~ 3 000 N 范围内具有良好的静态响应特点。

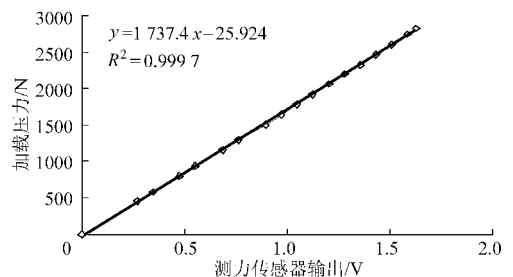


图 2 土壤耕作阻力传感器标定结果

Fig. 2 Calibration result of soil mechanical resistance sensor

1.2 车载式土壤多参数田间试验

田间试验于 2008 年夏天在德国波恩大学 Dikopshof 农场的施肥变异田进行,该试验田自 1904 年以来根据既定的种植制度分别种植冬黑麦、冬小麦、甜菜、土豆及三叶草 5 种作物,并按一定顺序进行年度轮作,一个周期为 5 年。2008 年种植作物分别为冬黑麦、冬小麦、甜菜、土豆和三叶草。

试验田的施肥管理如图 3 所示,每个种植区在宽度(30 m)方向划分为 A、B 两部分,B 部分的施肥量比 A 部分高;在长度(240 m)方向划分为 C、D 两部分,C 部分在 D 的基础上增施了有机肥(冬小麦种植区除外)。此外,C、D 部分根据化肥成分差异划分成 12 个小区,即 C1 ~ C6、D7 ~ D12。在 C1 和 D7 小区,主要化肥成分为氮(N)、磷(P)、钾(K)和钙(Ca)4 种,其他以此类推,形成 A1 ~ B12 共 24 个施肥变异小区。其中 N、P 和 K 在一个轮作周期的累积施肥量(N_5 、 P_5 、 K_5)如表 1 所示。

车载式农田土壤多参数试验在冬黑麦和冬小麦两个种植区进行,土壤质地与标定土样一致(砂粒、粉粒和粘粒质量分数分别为 17%、67% 和 16%)。

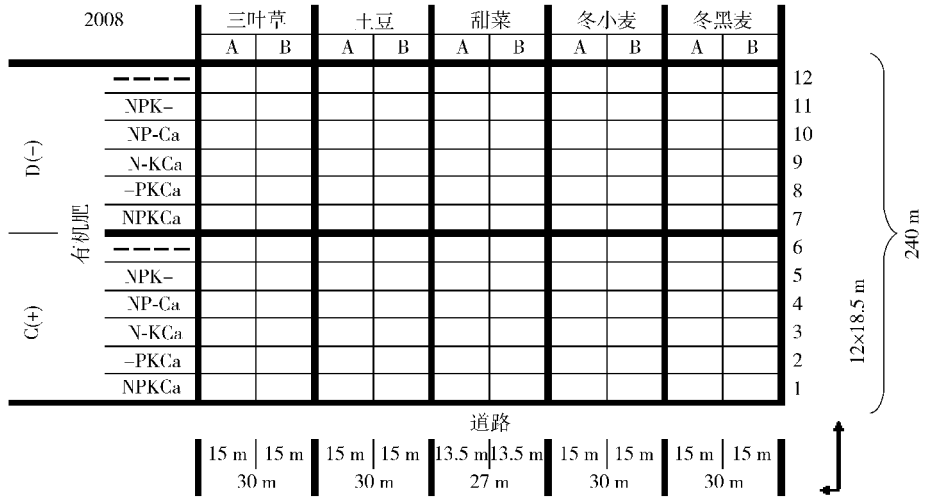


图3 试验田施肥情况

Fig. 3 Field experimental plots with varies fertilizers

表1 试验田累积施肥量

Tab.1 Cumulate fertilizing of sub-plots kg/hm²

编号	累积 N ₅		累积 P ₅		累积 K ₅	
	A	B	A	B	A	B
1	350	500	219	335	830	1 245
2	120	270	219	335	830	1 245
3	350	500	66	176	830	1 245
4	350	500	219	335	249	664
5	350	500	219	335	830	1 245
6	120	270	66	176	249	664
7	230	380	153	263	581	996
8	0	150	153	263	581	996
9	230	380	0	110	581	996
10	230	380	153	263	0	415
11	230	380	153	263	581	996
12	0	150	0	110	0	415

测量行进行距为 3 m,共 20 行,速度为 5 km/h,测量深度为 25 cm。同时运用 EM38 电导率测试仪获取农田土壤剖面电导率信息。

2 结果与讨论

2.1 农田土壤参数信息空间分布

在对田间试验数据进行剔除异常值、零点补偿等预处理基础上进行克立格插值,采用 GIS 软件生成土壤含水量、电导率与耕作阻力空间分布图,如图 4~7 所示,其中图 7 为由 EM38 获取的土壤电导率结果。

从土壤参数总体分布情况看,含水量与电导率分布均呈东北位置较低,西南位置较高趋势,呈一定正相关关系;由复合传感器和 EM38 获得的土壤电导率变化趋势基本一致,同样呈一定正相关关系;而耕作阻力分布与含水量和电导率分布趋势相反,呈

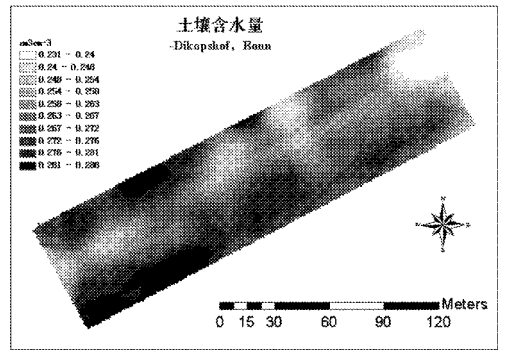


图4 土壤含水量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of soil moisture content

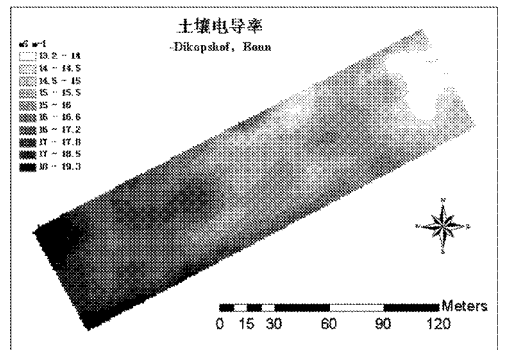


图5 土壤电导率空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of soil apparent electrical conductivity

一定负相关关系。

2.2 农田土壤参数相关分析

为定量分析不同土壤参数以及化肥施用量之间的潜在规律,在试验田 48 个不同施肥小区中央位置 25 cm 深度处,采用环刀取样-烘干方法获取土壤含水量,同时求出施肥小区中央半径为 2 m 区域内传感器测量结果的平均值,分析不同土壤参数之间的相关性。对土壤含水量而言,两种方法获取的结果相对均匀的分布在平分线(1:1)两侧,如图 8 所示。

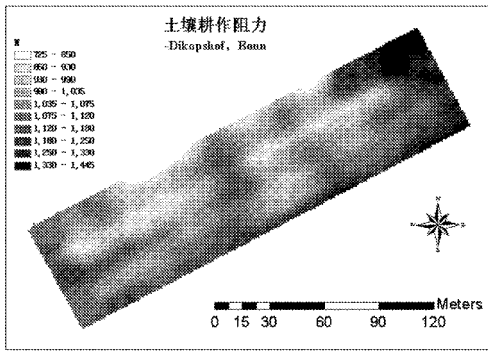


图 6 土壤耕作阻力空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of soil mechanical resistance

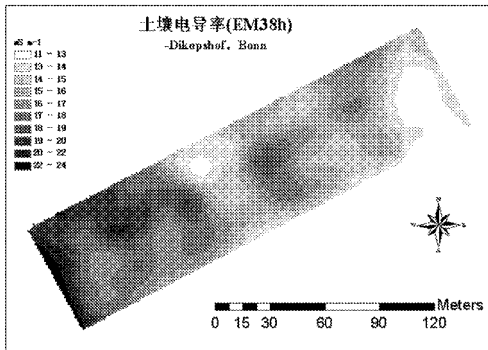


图 7 土壤电导率空间分布 (EM38h)

Fig. 7 Spatial distribution of soil apparent electrical conductivity (EM38 h)

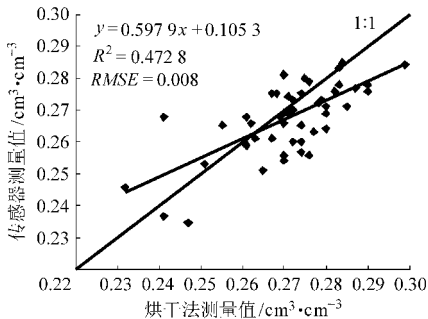


图 8 烘干法与传感器测量含水量结果统计关系

Fig. 8 Statistical relationship between core-and sensing-method for moisture content

定量分析可知,两者之间呈线性关系, R^2 和 $RMSE$ 分别为 0.472 8 和 0.008 cm^3/cm^3 。 R^2 较低的原因一方面是各种不确定因素导致了测量误差,另一方面是土壤含水量变异范围(0.07 cm^3/cm^3)较小,与传感器测量方差(0.02 cm^3/cm^3)在没有显著差别,影响了拟合模型回归效果。总体而言,复合传感器能够较好地响应土壤含水量的变异。

对于土壤电导率信息,由 EM38 和复合传感器两种方法测量的结果如图 9 所示。从数值范围看,由 EM38 和复合传感器测量的电导率分别在 12 ~ 20 mS/m 以及 13.5 ~ 18.1 mS/m 之间,造成这种测量差异的原因主要在于,EM38 在垂直放置情况下的量深可达 1.5 m,而复合传感器的空间区域很小

(传感器轴向半径小于 10 mm);从测量位置看,EM38 响应了耕作层和犁底层的土壤电导率信息,而复合传感器只响应耕作层的土壤电导率变异。进一步分析可知,两种电导率方法测量结果之间呈线性关系, R^2 和 $RMSE$ 分别为 0.524 9 和 0.79 mS/m,表明复合传感器具备响应土壤电导率变异能力。

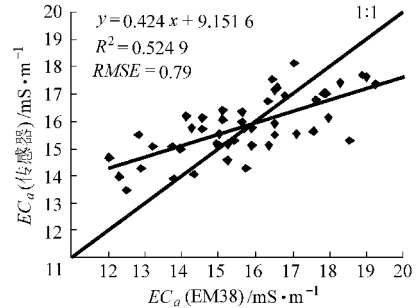


图 9 EM38 与传感器测量结果统计关系

Fig. 9 Statistical assessment between EM38-and sensing-method

表 2 所示为土壤含水量 (MC)、电导率 (EC_a)、耕作阻力 (MR) 与累积施肥量 (N_5 、 P_5 、 K_5) 之间的相关性。根据相关系数 R 密切程度的划分标准, MC 与 EC_a 之间呈显著正相关 ($R = 0.605$), MR 与 MC 、 EC_a 之间呈微弱或低度负相关 ($R = -0.181$ 、 -0.429),与上述定性分析一致。此外, EC_a 与 N_5 、 P_5 和 K_5 之间均呈显著正相关 ($R = 0.513 \sim 0.599$, $\bar{R} = 0.561$)。

表 2 土壤参数之间的相关系数

Tab. 2 Correlation coefficients among soil parameters

	MC	EC_a	MR	N_5	P_5	K_5
MC	1					
EC_a	0.605	1				
MR	-0.181	-0.429	1			
N_5	0.361	0.599	-0.338	1		
P_5	0.160	0.513	-0.224	0.579	1	
K_5	0.185	0.571	-0.322	0.575	0.582	1

研究表明,影响电导率的土壤因素主要有含水量、容积密度(耕作阻力)、离子成分、阳离子交换能力、粘粒含量、温度等^[12]。对于本研究,土壤质地、结构等信息可视为一致,可建立 EC_a 与 MC 、 MR 、 N_5 、 P_5 和 K_5 之间的多元统计预测模型为

$$EC_a = a_1 + b_1 MC + c_1 MR + d_1 N_5 + e_1 P_5 + f_1 K_5$$

求得待定系数分别为: $a_1 = 4.58$ 、 $b_1 = 45.618$ 、 $c_1 = -0.002$ 、 $d_1 = 0.00096$ 、 $e_1 = 0.00209$ 、 $f_1 = 0.00078$, $R^2 = 0.6636$, $RMSE = 0.543$ mS/m;模型显著性检验(F 检验)的 F 值为 16.6, P 值为 5.13×10^{-9} ,变量显著性检验(t 检验)的 t 值分别为 4.69、

-1.9、0.983、1.53 和 2.1, P 值分别为 2.89×10^{-5} 、0.06、0.33、0.13 和 0.04, 可见 MC 的线性显著水平大于 99%, 其他 4 个变量分别为 94%、67%、87% 和 96%。预测结果如图 10 所示, 预测值和测量值基本

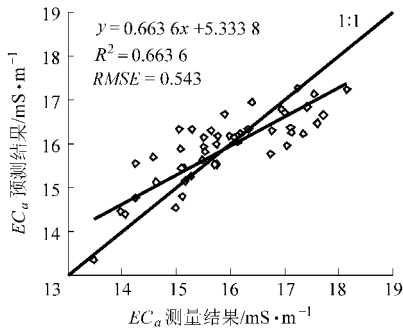


图 10 农田土壤电导率预测结果

Fig. 10 Prediction results of soil EC_a in field-scale

分布在平分线两侧。

3 结束语

在四环电极结构土壤含水量与电导率复合传感器基础上, 设计了农田土壤多参数车载测试系统, 其中耕作阻力传感器具有良好的静态响应性能, 标定结果线性拟合 R^2 为 0.9997。同时应用车载式土壤多参数测试系统和 EM38 在特定的耕作、施肥管理农田上进行田间试验, 对获取的农田土壤空间分布信息进行相关分析, 结果表明复合传感器具备农田土壤含水量和电导率变异相应能力。基于农田土壤含水量、耕作阻力、施肥信息建立土壤电导率统计预测模型, 线性拟合决定系数 R^2 为 0.6636, 预测 $RMSE$ 为 0.543 mS/m。

参 考 文 献

- 1 罗锡文, 张泰岭, 洪添胜. “精细农业”技术体系及其应用[J]. 农业机械学报, 2001, 32(2): 103~106.
Luo Xiwen, Zhang Tailing, Hong Tiansheng. Technical system and application of precision agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(2): 103~106. (in Chinese)
- 2 Inoue Y, Watanabe T, Kitamura K. Prototype time-domain reflectometry probes for measurement of moisture content near the soil surface for applications to ‘on-the-move’ measurements[J]. Agric. Water Manage., 2001, 50(1): 41~52.
- 3 Ruth B, Munch J C. Field measurements of the water content in the top soil using a new capacitance sensor with a flat sensitive volume[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2005, 168(2): 169~175.
- 4 Adamchuk V I, Hummel J W, Morgan M T, et al. On-the-go soil sensors for precision agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 44(1): 71~91.
- 5 Sudduth K A, Kitchen N R, Bollero G A, et al. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity[J]. Agron. J., 2003, 95(3): 472~482.
- 6 Sirjacobs D, Hanquet B, Lebeau F, et al. On-line soil mechanical resistance mapping and correlation with soil physical properties for precision agriculture[J]. Soil Till. Res., 2002, 64(3~4): 231~242.
- 7 Andrade P, Upadhyaya S K, Jenkins B M, et al. Field evaluation of the improved version of the UC Davis compaction profile sensor (UCD-CPS)[C]. ASAE Paper 041037, 2004.
- 8 赵新, 罗锡文, Wells L G. 土壤阻力连续测试设备研制[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 67~71.
Zhao Xin, Luo Xiwen, Wells L G. Development of continuous measurement system for soil resistance[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 67~71. (in Chinese)
- 9 Mouazen A M, Anthonis J, Saeys W, et al. An automatic depth control system for online measurement of spatial variation in soil compaction, part 1: sensor design for measurement of frame height variation from soil surface [J]. Biosystems Engineering, 2004, 89(2): 139~150.
- 10 Sun Y, Ma D, Schulze Lammers P, et al. On-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance by a combined horizontal penetrometer[J]. Soil & Tillage Research, 2006, 86(2): 209~217.
- 11 Zeng Q, Sun Y, Schulze Lammers P, et al. Improvement of a dual-sensor horizontal penetrometer by incorporating an EC sensor[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 64(2): 333~337.
- 12 Sudduth K A, Kitchen N R, Wiebold W J, et al. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 46(1~3): 263~283.