

一种多点土壤电导率实时监测系统的研制

徐艳玲 马道坤 曾庆猛 林剑辉 孙宇瑞

(中国农业大学 信息与电气工程学院,北京 100083)

摘要 为获取建立溶质运移模型所需的土壤溶质浓度参数,根据土壤溶液电导率与溶液浓度 c 的线性关系,应用电流-电压四端法,研制出一种多点土壤电导率实时监测系统。该系统硬件部分自行设计的四针微型探头可减小对溶质运移的扰动,且可高密度分布在土壤中;连接 8 路电导率探头和 1 路温度探头的高精度数据采集器 DAB 能够实现 8 通道土壤电导率测量及温度辅助测量,并可通过 485 总线接口实现系统规模的扩展。采用 VC 开发的监测显示平台能够完成采集器参数设置,数据采集、显示与存储功能。通过对采集器通道和探头的标定,有效解决了多点土壤电导率实时监测的一致性问题。标定试验结果表明,数据采集器 8 通道电导测量值与标准电导的相关系数为 0.999 5,表明通道标定后有效提高了其测量准确度,减小了各通道测量差异;通道标定后采集器各通道测量的标准溶液电导 G 与其电导率具有良好的线性关系,但不同电导率条件下探头的测量结果存在较为明显的偏差,说明探头制作过程引起的结构差异不可忽略,进而采用分段标定方法对每一个探头的结构常数进行标定。

关键词 多点测量;土壤电导率;四端法;监测系统

中图分类号 S 24; TH 7

文章编号 1007-4333(2006)05-0075-06

文献标识码 A

Development of a multipoint real-time monitoring system for soil electrical conductivity

Xu Yanling, Ma Daokun, Zeng Qingmeng, Lin Jianhui, Sun Yurui

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract In order to obtain the concentration of soil solution that has a linear relationship with the soil electrical conductivity (EC) for solute transport modeling a multipoint EC measurement system using the principle of four-electrode measurement method to determine EC was developed. The system hardware, including special designed small 4-pin probes, data acquisition boards (DAB), and temperature sensors, was integrated to compensate the temperature effect on EC. The monitoring software developed by VC programming language was adopted for collecting, displaying and storing functions of EC with the system hardware together. The consistency of multipoint measurements was resolved by calibrating to channels and probes. A series of experiments was carried out to reduce the effects from channels of DAB and sensors. The correlative coefficient between the measured and standard conductance is 0.999 5, which shows that the experiments for calibration are necessary. While, the measuring errors from probes shouldn't be ignored and the structural constants of each probe should be calibrated section by section.

Key words multipoint measurement; soil electrical conductivity; four-electrode; monitoring system

工业污水、废液中的可溶性物质对土壤和地下水资源的污染日益严重,有效预测和控制这种污染,可为土壤和地下水污染防治及固体废物的地质处置提供理论依据,对于防止环境污染和促进农业持续

发展有着重要意义^[1]。建立溶质传输函数模型,需要在入渗条件下获取土壤各剖面的离子分布状态,因此对土壤溶液浓度的实时监测成为建立模型的关键^[2-4]。

收稿日期:2006-03-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30270775,30370823);高校博士学科点专项科研基金资助项目(20030019012)

作者简介:徐艳玲,硕士研究生;孙宇瑞,教授,博士生导师,通讯作者,主要从事精细农业信息采集技术和农业工程系统集成方面的研究;E-mail:yurui828@yahoo.com

多数溶质运移参数通过取样化验和同位素示踪法等方法获取。取样化验方法获得的数据很难得出连续的动态变化过程和定性的结论,获得的测量数据计算值与实际运移结果往往相差1~2个数量级,且研究周期长,工作效率低,耗资大^[5]。同位素示踪法使用放射性同位素和稳定性同位素作为示踪剂,但是,稳定性同位素作为示踪剂灵敏度较低,可获得的种类少,价格昂贵,故应用范围受到限制;而使用放射性同位素则需要具备相应的安全防护措施和条件^[6]。

通过土壤电导率测量溶质浓度的方法是一种具有较高精度的非扰动方法^[7-10],如非接触式电磁感应法,接触式的电流-电压四端法,水分与电导率复合测量的时域反射法和定频率分解法等。用电导率测量方法取代传统的取样法和同位素示踪法已被认为是一种可行的技术路线^[11],但目前多数土壤电导率测量方法及其设备研究多针对便携式单点测量方式^[12-15],研制满足溶质运移研究要求的多点土壤电导率实时监测系统成为亟待解决的新课题。电流-电压四端法测量精度较高,被广泛认为是土壤电导率测量的标准方法^[16-19],本研究拟基于电流-电压四端法原理,研制一种多点土壤电导率实时监测系统,用以动态获取溶质运移模拟试验中与土壤溶液浓度扩散相关参数的变化情况。

1 系统设计

1.1 系统总体结构

实时监测系统总体结构(图1)主要包括3部分:

1)电导率(EC)探头。一种特殊设计的微型结构四针探头,不仅减小了对溶质运移的扰动,而且可以高密度分布在土壤中。

2)数据采集器(DAB)。与8路电导率探头、1路温度探头相连,实现8通道土壤电导率测量和1通道温度测量,并通过485总线接口实现多采集器的互联。

3)数据采集监测软件。通过485总线设置系统的试验参数,接收各采集器各路测量的电导值,运用相应的标定系数转化成电导率后屏幕显示,同时将电导率数据存于Access数据库。

该系统设计采用485总线结构,不同采集器通过各自的地址编码与监测软件通信,采集器数可根据应用要求的监测点数增减,具有良好的可扩展性。

理论上一条总线最多可连接128个DAB,实现1024点的实时监测。DAB之间并行工作,实时监测系统的最小记录间隔不因测量点数增加而变长,始终等于单一采集器的最小记录间隔,每个DAB的8通道更新1次时间10s,因而系统具有良好的实时性。

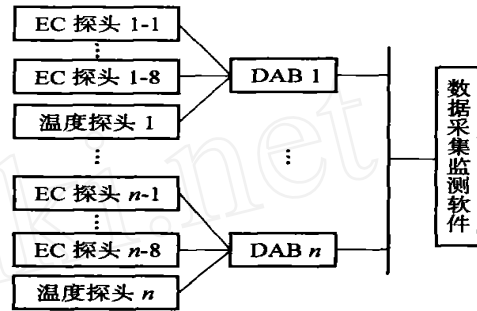


图1 系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the system

1.2 测量原理与微型电导率探头

根据四端法的基本原理,只要能够准确获取输入外侧探针的激励电流和内侧探针上的电压,即可计算出土壤电导率。探头结构设计成Wenner分布,即两侧探针作为激励电流 I 输入端,中间2探针为电压 V 测量端,探针间的距离 d 相等,该组态对应的电导率

$$= \frac{1}{2} \frac{I}{d V} \quad (1)$$

式(1)的物理意义为:当土壤被看作分布均匀且各向一致的电导材料时,电流 I 与电位差 V 之比定为土壤电导,所以式(1)可理解为单位长度 $1/2 d$ 上的电导即为该导体的电导率。

笔者设计的微型电导率探头结构见图2。探针采用不锈钢材料,直径1mm、长度15mm,4针间距均为6mm,用CYD-电子封装树脂封装。该探头明显小于一般土壤电导率探头,具有对溶质运移扰动和影响范围较小的特点,但该结构不满足式(1)要求

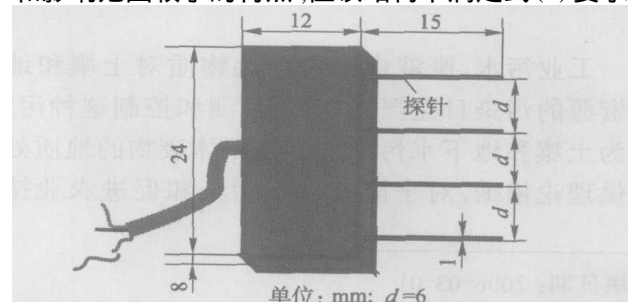


图2 微型电导率探头结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of mini-type sensor

的探针与土壤之间为点接触,即探针间距远大于探针长度的基本条件,为此本文中提出通过标定确定探头结构常数的方法。标定公式:

$$= mG + n \quad (2)$$

式中: G 为经过通道标定后探头测量的电导值, m 和 n 为探头结构常数。本研究设计的土壤电导率测量范围 $0 \sim 12 \text{ mS/cm}$, 为了使监测系统在上述电导率范围内获得一致的测量精度, 采取分 3 段的标定方法, 每一段均有对应的 m 和 n 。

1.3 数据采集器

数据采集器内嵌 CPU, 自动完成 8 路土壤电导率与 1 路土壤温度的测量、数据转换和串口通信等任务, 由 $6 \sim 12 \text{ V}$ 直流供电。

1.3.1 数据采集模块 该模块由 CPU 控制多路模拟开关, 实现测量电路与微型探头的分时连接, 完成 8 路土壤电导率的测量。本系统测量电路与王琦等^[14]设计的相比, 具有 2 个明显的特点: 1) 恒流激励源采用交流形式, 频率 140 Hz , 有效避免了直流激励条件下的接触电势与探针极化问题。2) 为解决负载、温度变化等导致的恒流源幅值波动问题, 在激励回路中串接精密电阻, 测其两端电压差, 进而获取激励电流 I , 有效解决了上述问题, 提高了采集器测量精度; 同时为了补偿土壤温度对测量精度的影响, 数据采集部分集成了 1 路二极管温度测量通道。

1.3.2 数据处理模块 该模块选用具有高性能的系统级模数转换芯片 MSC1210。该芯片内置 8 路 24 位的积分型 A/D 转换器, 保证了激励电流 I 与中间探针电势差 V 的转换精度; 同时为了校正测量电路的系统偏差, 消除不同采集器及同一采集器不同通道间的差异性, CPU 内置了各通道校正算法, 即

$$G = aG + b = a \frac{I}{V} + b \quad (3)$$

式中: a 和 b 为各通道标定后的回归系数, 固化于 CPU 内非易失存储区; G 和 G 分别为初始测量和通道校正后的电导, 8 路校正电导 G 与 1 路温度值存于片上数据存储单元 SRAM 中, 并实时更新, 最大更新速率为 8 Hz 。

1.3.3 通信接口模块 该模块包括 RS485 和 RS232 两种串行通信形式, 其中 RS485 总线接口用于不同数据采集器的并联, 并将缓存中的 8 路土壤电导和 1 路土壤温度数据传送给 PC 机的数据采集监测软件。RS232 串行接口的用途为: 1) 芯片

MSC1210 可以通过串口在线编程, 既不需要任何专用开发与下载设备, 又方便了数据采集器程序的现场修改, 这也是选用该芯片的主要原因之一; 2) 用于单采集器的参数设置、程序调试与数据采集等, 可利用 RS232 接口不判断采集器地址的特点, 查询确认采集器地址信息。

1.4 数据采集监测软件

数据采集监测软件采用 Microsoft VC++ 6.0 开发, 是实时监测系统的主要组成部分。该平台充分利用 VC 的串口通信、数据处理和图形化显示等功能, 完成土壤电导率与温度数据的采集、存储、显示和处理, 并可根据应用需求设置数据采集器运行参数。该软件采用多层次功能模块化设计, 从下至上可分为 3 个层次:

1) 参数输入层。作为程序的基层, 由 4 个对话框完成对串口号和波特率的设置, 对系统采集器属性、通道及探头标定参数的设置, 对系统采样周期和显示参数的设置。

2) 数据存储层。利用基于 Microsoft Jet 数据库引擎的数据库类 DAO 进行本地数据库的操作, 完成电导率数据和温度数据的存储和数据库的清空等操作。

3) 数据显示层。程序主界面可根据测量区域各测量点电导率大小显示不同颜色, 同时给出某测量点位置、电导率和温度测量值等, 还可以利用当前值按钮查询当前各点电导率测量值, 利用历史数据按钮查看任意测量点的历史测量曲线, 既可得到土壤中任意一点的测量情况, 也可及时发现异常情况。

该软件采用多线程编程, 主线程用来完成数据的显示和存储, 辅助线程用来完成数据的采集和转换。在开始按钮作用下, 主线程内的 CreateThread 函数创建并启动辅助线程; 在定时器的作用下, OnTimer 函数负责向消息队列添加消息。辅助线程内的全局函数 CollectDataLogData 是该数据采集检测软件的重要模块, 它在消息的作用下完成数据的采集、转换和处理等工作, 其设计流程见图 3。

2 标定试验

标定试验是多点土壤电导率实时监测系统消除通道与探头结构差异, 实现准确测量的重要环节。采用笔者设计的试验方案, 分别获得与式 (3) 对应的数据采集器通道标定系数 a 、 b 和与式 (2) 对应的微型电导率探头结构常数 m 、 n 。本文中仅以 2 号采

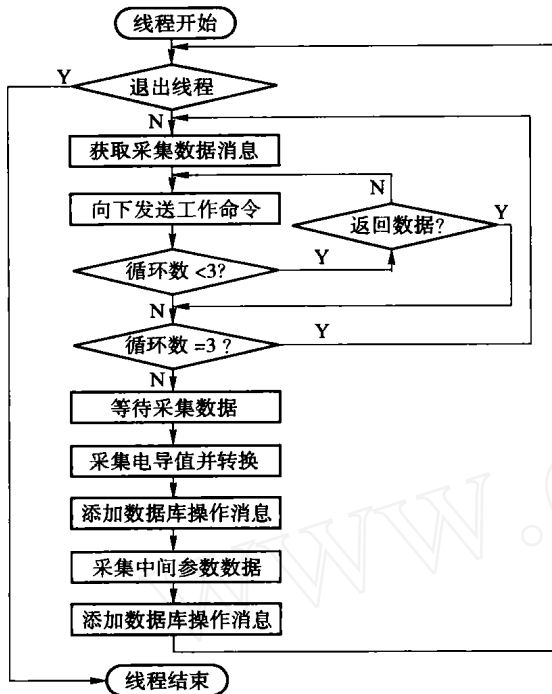


图3 数据采集函数流程图

Fig. 3 Flow chart of process function

集器为例。

2.1 数据采集器通道标定

从测量电路角度分析,微型土壤 EC 传感器的端口特性可用电阻网络等效^[16,19],土壤电导率的变化可通过改变端口所连接的电阻值进行模拟。基于这一原理,设计了一个电阻排,模拟微型传感器的端口特性,作为通道的标准电导输入。

采集器连接 EC 探头,测量电导率在 0~12 mS/cm 设计范围内的若干标准电导率溶液,测量电导的变化范围在 3~100 mS 之间,为确定等效电阻的选取范围和模拟点数提供依据。为此电阻排设计所选择的电阻精度均为 0.1%,温度系数为 0.0025%,电阻值分别为 100~270 的 7 个阻值,电导值为 3.7~10.0 mS。另加一 50 外延电阻,用于检验标定系数是否适合低电阻高电导的测量。

表 1 示出 2 号采集器 8 个通道在不同电导条件下的测量值及其与式(3)相对应的回归系数 a 和 b ,其中测量值为固定输入条件下 10 次测量的平均值。高达 0.9995 的相关系数表明标定后通道测量准确

表 1 2 号采集器 8 个通道标定试验电导测量结果与回归系数

Table 1 Results of measurement and coefficients between standard conductance and G of channel

通道 标号	模拟标准输入电导 G /mS								a	b	R^2
	20.00	10.00	9.09	7.69	6.67	5.56	4.55	3.70			
CH1	22.03	10.48	9.482	7.997	6.890	5.703	4.635	3.753	0.889 8	0.514 1	0.999 5
CH2	22.01	10.48	9.481	7.991	6.890	5.700	4.638	3.753	0.890 6	0.509 3	0.999 5
CH3	22.03	10.48	9.475	7.995	6.894	5.697	4.636	3.756	0.889 8	0.515 5	1.000 0
CH4	22.01	10.48	9.475	7.989	6.894	5.695	4.637	3.751	0.890 7	0.510 6	0.999 5
CH5	22.00	10.48	9.478	7.992	6.892	5.698	4.634	3.753	0.891 2	0.506 6	1.000 0
CH6	22.00	10.47	9.474	7.984	6.894	5.700	4.631	3.754	0.891 0	0.510 1	0.999 5
CH7	22.02	10.48	9.481	7.991	6.892	5.700	4.634	3.753	0.890 0	0.513 9	0.999 5
CH8	22.00	10.47	9.478	7.991	6.886	5.699	4.631	3.756	0.890 9	0.509 9	0.999 5

度明显提高,同时也可以看出电导 3.7~10 mS 间所确定的标定系数可适合 3~100 mS 之间甚至电导更大的场合。

2.2 微型电导率探头标定

与土壤电导率相比,溶液电导率与溶液浓度有良好的线性关系。标准溶液样品制备过程简单,且电导率空间分布均匀,与探头接触好,故微型电导率探头标定试验在不同浓度 NaCl 溶液中进行。在 0~12 mS/cm 电导率范围内配置 12 个浓度不等的 NaCl 溶液样品,试验过程室内与溶液温度保持在

25℃,以新加坡 EUTECH 手持式电导率仪 EC-CON5 的测量值作为溶液标准电导率,8 路微型电导率探头轮流放置在不同溶液样品中,用已内置通道标定系数的 2 号采集器连续记录 10 次测量结果,取平均值作为电导测量值 G 。从图 4 可以看出,得到的电导测量值 G 与标准溶液电导率具有良好的线性关系,可以用式(2)中的 m 和 n 来表征探头的结构常数;另外,不同电导率条件下探头的测量结果存在较为明显的偏差,说明探头制作过程引起的结构差异不可忽略,需要对每一个探头的结构常数

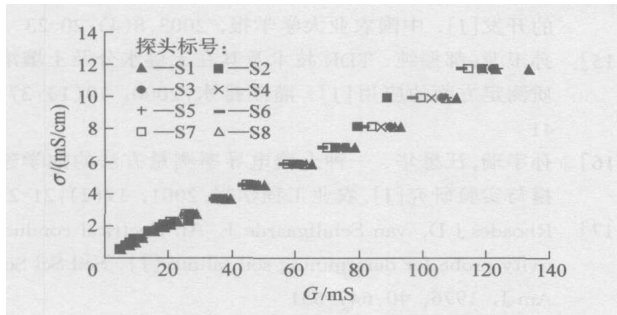


图 4 电导测量值 G 与标准溶液电导率 σ 的关系

Fig. 4 Relationships between EC and G

m 和 n 进行标定。

表 2 给出了 2 号采集器 8 个 EC 传感器分段范围及其对应的传感器结构常数。为了使各段之间有良好的过渡,计算标定系数时,兼顾前后相邻段位的 2 个测量值。数据监测显示平台根据内嵌不同 EC 传感器对应的分段结构常数,实时自动将数据采集器的电导测量值 G 转化为电导率。最低相关系数为 0.944 5,这表明经过传感器标定后,基本上消除了 EC 传感器间的测量差异。在实时监测系统应用于含水土壤电导率测量时,该值即为土壤电导率值,

表 2 2 号采集器的分段标定系数及相关系数

Table 2 Correlative coefficients between EC and G

探头标号	标准溶液电导 G/ mS								
	2 ~ 20			20 ~ 50			50 ~ 120		
	m_1	n_1	R_1^2	m_2	n_2	R_2^2	m_3	n_3	R_3^2
S1	0.103	- 0.041	0.999 5	0.084	0.309	0.999 8	0.089	- 0.092	0.998 2
S2	0.109	0.070	0.979 7	0.096	0.100	0.983 1	0.104	- 0.277	0.944 5
S3	0.109	- 0.048	0.999 5	0.089	0.297	0.999 7	0.099	- 0.580	0.994 5
S4	0.111	- 0.050	0.999 6	0.092	0.264	0.999 6	0.101	- 0.476	0.995 6
S5	0.106	- 0.048	0.999 7	0.087	0.291	0.999 6	0.099	- 0.682	0.994 2
S6	0.118	- 0.073	0.999 7	0.099	0.238	0.999 6	0.108	- 0.442	0.997 1
S7	0.115	- 0.051	0.999 8	0.095	0.272	0.999 7	0.105	- 0.497	0.994 5
S8	0.107	- 0.056	0.999 4	0.087	0.315	0.999 7	0.100	- 0.726	0.994 8

如果室内温度有所变化,需要时可以运用温度测量值进行补偿,进一步换算至 25 下的电导率。

3 结 论

研制的多点土壤电导率实时监测系统,其 458 总线结构设计具有良好的可扩展性,测量点可根据应用需求增减,最多可达 1 024 点。微型电导率探头结构设计不仅减小了探头对溶质运移的扰动,而且能够满足空间高测量密度要求,最小 10 s 的采样记录间隔不随测量点数的增加而增大,基本满足实时获取溶质运移瞬态变化过程的要求。数据采集器通道和电导率探头的标定不仅是土壤电导率的准确测量依据,而且有效减小了数据采集器通道与电导率探头的差异性,提高了多点土壤电导率的测量精度与一致性。

参 考 文 献

[1] 周爱国,周建伟,冯翠娥. 当前世界环境地学发展的特

点和趋向及我国的主要环境地学问题分析 [EB/ OL]. [2004-03-10]. <http://www.cigem.gov.cn/qingbao/No4/zhuantibaogao/2.htm>

[2] 杨金忠,蔡树英,黄冠华,等. 多孔介质中水分及溶质运移的随机理论[M]. 北京:科学出版社,2000:220~232, 280~292

[3] Danquigny C, Ackerer P, Carlier J P. Laboratory tracer tests on three-dimensional reconstructed heterogeneous porous media [J]. Journal of Hydrology, 2004, 294:196~212

[4] 杜恩昊,张佳宝,唐立松. 一种溶质运移数学模型的应用研究[J]. 干旱区研究, 2001, 18(1):29~34

[5] 杜国平,董巧云. 非饱和地下水溶质运移的测量仪器与测量方法[J]. 江苏农业学报, 2003, 19(2):127~128

[6] 姜志义,左丽丽. 同位素示踪法及其在中学生物学中的应用[J]. 生物学教学, 2005, 30(10):68~69

[7] Rhoades J D, Manteghi N A, Shouse P J, et al. Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations [J]. Soil Sci Soc Am J, 1989, 53: 433~439

- [8] 孙玉龙,郝振纯,陈启慧,等.土壤电导率及土壤溶液电导率与土壤水分之间关系[J].河海大学学报,1997,25(6):69-73
- [9] 林义成,丁能飞,傅庆林,等.土壤溶液电导率的测定及其相关因素的分析[J].浙江农业学报,2005,17(2):83-86
- [10] 刘广明,杨劲松.土壤含盐量与土壤电导率及水分含量关系的试验研究[J].土壤通报,2001,32(90):85-87
- [11] 柴世伟,刘文兆,张聚庭.TDR研制与应用方面的若干进展[J].中国生态农业学报,2001,9(2):97-99
- [12] 马文敏,康金虎.TDR在土壤盐分测试中的试验研究[J].中国农村水利水电,2004,12:10-12
- [13] 李民赞,王琦,汪懋华.一种土壤电导率实时分析仪的试验研究[J].农业工程学报,2004,20(1):51-55
- [14] 王琦,李民赞,汪懋华.便携式土壤电导率测试系统的开发[J].中国农业大学学报,2003,8(4):20-23
- [15] 孙玉龙,郝振纯.TDR技术及其在土壤水分及土壤溶质测定方面的应用[J].灌溉排水,2000,19(1):37-41
- [16] 孙宇瑞,汪懋华.一种土壤电导率测量方法的数学建模与实验研究[J].农业工程学报,2001,17(2):21-23
- [17] Rhoades J D, van Schilfgaarde J. An electrical conductivity probe for determining soil salinity[J]. Soil Sci Soc Am J, 1976, 40:647-651
- [18] Rhoades J D, Shouse P J, Alves W J, et al. Determining soil salinity from soil electrical conductivity using different models and estimates [J]. Soil Sci Soc Am J, 1990, 54:46-54
- [19] 孙宇瑞.非饱和土壤介电特性测量理论与方法的研究[D].北京:中国农业大学,2000

科研简讯

我校2个“973”计划项目批准立项

根据国家科技部公布的2006年度“973”计划立项清单,我校又有2个项目被批准立项,分别是:“农作物重大病害成灾的机理与控制的基础研究”(项目首席科学家为彭友良教授),项目依托部门为教育部和农业部;和“猪、鸡重要经济性状遗传的分子机制”(项目首席科学家为李宁教授),项目依托部门为教育部。国家科技部设立“973”计划以来,我校共计9个“973”计划项目获得批准。上述2个项目的主要研究内容是:

针对我国农作物病害控制中存在的品种抗病性丧失、抗病资源匮乏、缺少高效无公害农药等生产问题,以水稻、小麦和玉米等重要作物的重要病害为对象,深入开展病原物致病性的分子基础、病原物致病型变异的分子遗传基础与病害突发机制、抗病基因的克隆及其作用的分子机理、抗病反应的调控机理、新型抗病资源创建策略、病原菌抗药性的机理及其分子流行病学等研究工作。

利用功能基因组学、比较基因组学、生物信息学和表观遗传学等研究方法,针对猪、鸡品质、遗传抗性、生长、繁殖等典型的复杂性状,定位、分离和克隆影响这些复杂经济性状的基因和基因网络,阐明其形成和调控这些复杂经济性状表型的分子遗传机理。研制高通量基因型诊断技术平台,发展优质基因的平衡集成方法,建立创新性的系统平衡育种理论。

(科学技术处供稿)