

土壤水分测量方法研究综述

邓英春¹, 许永辉²

(1. 安徽省水文局, 安徽 合肥 230022; 2. 湖北省水文水资源局, 湖北 武汉 430071)

摘要:本文简述了土壤水分的形态、分类和表示方法,以及土壤含水量的测定方法。重点对介电法测量土壤水分的方法进行了介绍,提出了我国当前介电法土壤水分传感器参数率定中存在并和值得注意的问题。对几类土壤水分测量方法进行了比较与讨论。

关键词:土壤水分;测量方法;传感器;介电法

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2007)04-0020-05

1 问题的提出

水分是天然土壤的一个重要组成部分。它不仅影响土壤的物理性质,制约着土壤中养分的溶解、转移和微生物的活动,是构成土壤肥力的一个重要的因素;而且本身更是一切作(植)物赖以生存的基本条件。因此,研究和了解土壤水分,无论在理论上和生产上都有着重要意义。

到目前为止,土壤水分测定方法多达几十种。近几年比较常用的介电法不但技术先进,而且可以进行连续监测土壤水分,是实现土壤墒情自动监测经济、实用的方法。但是介电法也与其他定位监测一样,涉及到土壤水分传感器参数率定问题。目前我国的土壤水分传感器供应商或土壤墒情自动监测系统承建商,因其各自对方法原理理解的差异,而对传感器参数率定的方法也各有同异,还存在一些需要解决的问题。笔者曾对土壤水分测定方法进行了较系统研究,本文简要介绍有关方法,并着重介绍介电法测量土壤水分原理和方法,以起抛砖引玉的作用。

2 土壤水分形态的分类和表示

土壤中的水分或者被吸附在土粒表面,或者处在

孔隙中,并且和外界的水一样,也以固态、液态、气(汽)态三种形态存在。由于土壤的颗粒大小、形状和孔隙度等不一样,以及水分含量的多少不同,土壤水分便表现出不同的性质。

2.1 土壤水分形态的分类

土壤水分在不同状态下表现出的性质是大不相同的。进行土壤水分分类,弄清水分在土壤中的形态、作用,从而对其进行调节控制,对土壤改良和农业生产有着重要意义。但是,由于土壤是非均一的多孔介质,对土壤水分的吸附、保持或转移等现象,还有很多方面尚未弄清楚;再者,由于研究土壤水分和用水的目的不同,所涉及的面也很广,故对土壤水分进行分类比较困难。学者们曾提出过不少方案,这里,仅介绍一种通用的土壤水分分类法。

土壤水分在不同状态下表现出的性质是大不相同的。土壤水分从形态上,大致分为化学结合水、吸湿水和自由水三类:

(1)化学结合水。要在 600~700℃温度下才能脱离土粒。

(2)吸湿水。是土粒表面分子力所吸附的极薄水层,须在 105~110℃的温度下转变为气态,才能脱离土粒表面分子力的吸附而失去。

收稿日期:2006-10-20

基金项目:国家社会科学基金资助(05CJY018)

作者简介:邓春英(1952-),男,安徽庐江人,高级工程师,从事水文水资源、水环境、墒情监测评价和研究工作。

(3)自由水:可以在土壤颗粒的孔隙中移动。自由水又可分为:①膜状水:吸湿水的外层所吸附的极薄一层水膜的水分称为膜状水。它呈液态状,受土粒表面分子力的束缚,仅能作极缓慢的移动。②毛管悬着水:由毛管力所保持在土壤层中的水分称为毛管悬着水。它与地下水和土层与土层之间的悬着水无水压上的联系,但能作足够快的移动,以供植物生长吸收。③毛管支持水:地下水随毛管上升而被毛管力所保持在土壤中的水分称为毛管支持水。毛管支持水之间以及地下水有水压上的联系。④重力水:受重力作用而下渗的土壤水称为重力水。重力水只能短时间存在于土壤中,随着时间的延长,它将会逐渐下降,补充到地下水。

2.2 土壤含水量的表示方法

一般所说的土壤水分,实际上是指用烘干法在105~110℃温度下能从土壤中被驱逐出来的水。土壤水分含量即土壤含水量,它是指土壤中所含有的水分的数量。土壤含水量可以用不同的方法表示,最常用的表示方法有以下几种:

(1)以占干土重量的百分数表示的质量含水量 $w(\%)$ 。即土壤中实际所含的水量($W_{\text{水}}$)占干土重量($W_{\text{土}}$)的百分数:

$$w=\frac{W_{\text{水}}}{W_{\text{土}}}\times100\%$$

(1)

(2)以占土壤体积的百分数表示的容积含水量 $\theta(\%)$ 。也有的叫体积含水量,是指土壤中水的容积($V_{\text{水}}$)占土壤容积($V_{\text{土}}$)的百分数:

$$\theta=\frac{V_{\text{水}}}{V_{\text{土}}}\times100\%$$

(2)

(3)以占田间持水量的百分数表示的土壤相对湿度 $\beta(\%)$ 。即土壤的质量含水量 $w(\%)$ 占该土壤田间持水量 $w_{\text{田}}(\%)$ 的百分数:

$$\beta=\frac{W}{W_{\text{田}}}\times100\%$$

(3)

另外,还有以土壤中水的体积占土壤空隙体积的百分数表示的,等等。

土壤含水量应用的目的不同,选择的表示方法也不一样。如,质量含水量表示方法简单易行,并且有足够的精度,是使用最广泛、最主要和最基本的方法,也是其他土壤含水量表示方法或与其之对比的基础。容积含水量常用于一些土壤水分的理论和土壤结构关系的研究。土壤相对湿度常用作于农业旱情评价和指导灌溉的水分指标等。

土壤含水量的表示方式,也可根据需要进行互换。

如:

$$\theta=w\times\rho$$

(4)

式中: ρ 为土壤密度(g/cm^3)。

3 土壤水分测定方法的分类

长期以来,对土壤水分含量测定方法的研究一直被人们所重视,到目前为止,国内外的科学家和工程技术人员,从不同的途径提出的土壤水分测定方法多达几十种。

土壤水分含量的测定方法尽管有很多,但大致可分为取样测定法和定位测定法两大类。取样测定法包括物理法和化学法,而每种方法中又有一些不同的方法。定位测定法中包括非放射性法和放射性法,每种方法中也包括一些不同的方法。各种土壤水分测定方法的分类归纳见图1所示的土壤水分测定方法分类图。

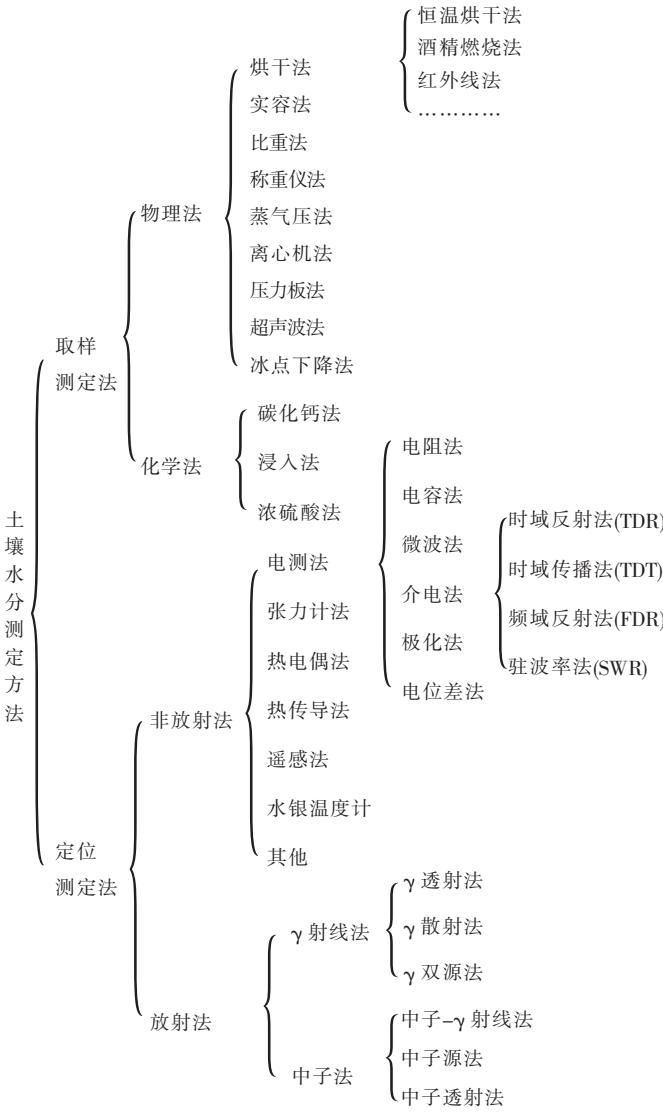


图1 土壤水分测定方法分类图

人们也可以根据各种测定方法的基本原理不同,将土壤水分测定方法大体归纳为以下几类:

(1)质量法,也称重量法。通过测定土样的质量(重量)变化来确定含水量,包括烘(烧)干称重法和密度(比重)法等。

(2)电测法。通过测定土壤(体)中的电学反应特性,如电阻、电容、电位差、微波、极化现象等的变化确定土壤含水量,以及时域反射法(TDR)、时域传播法(TDT)、频域反射法(FDR)、驻波率法(SWR)等应用被测介质中表观介电常数随土壤含水量变化确定土壤含水量的方法。

(3)热学法。通过测定土壤导热性能大小确定土壤含水量。

(4)吸力(能量)法。通过测定土壤中负压或土壤水分子吸附力的大小确定含水量等方法。

(5)射线法。通过测量 γ 射线或中子射线在土壤中的变化确定土壤含水量。

(6)遥感法。通过遥感技术测定发射或反射电磁波的能量不同确定土壤含水量等方法。

(7)化学法。通过测定土壤水分与其他物质的化学反应确定土壤的含水量等方法。

4 介电法

早在1939年,地质学家和土壤方面的科学家就发现,土壤的含水量与土壤的电介常数之间存在一种对应关系。但在当时,由于缺乏必要的设备无法利用这一重要的原理。直到第二次世界大战雷达研究的迅猛发展,科学家把当时的雷达技术引入到对时域反射技术的研究领域。随着在20世纪60年代初商业的TDR示波器的研究成功,利用此项技术测试土壤体积含水量成为可能。今天,TDR技术广泛的被各国科学家采用。

利用土壤的介电特性测量土壤水分是一种行之有效、快速、简便、可靠的方法。最先对土壤的介电特性做出系统研究的是前苏联学者Chemyak,他在1964年出版了引起世界关注的学术名著《湿土介电特性研究方法》。以此为基础,土壤的介电特性迅速应用于土壤含水量的测量技术中,而且具体实现方法千差万别。其中,高频电容探头测量土壤含水量、甚高频晶体管传输线振荡器测量土壤含水量、微波吸收法、时域反射法(包括时域传播法)、频域反射法(包括频域分解法)、驻波率法(也有学者将其归入频域反射法)等测量方法都

属于基于土壤介电特性的土壤含水量测量方法。

4.1 介电法基本原理

时域反射法和频域反射法以及某些电容法等土壤水分测量方法,都应用了被测介质中表观介电常数随土壤含水量变化而变化这一原理测定土壤含水量。土壤表观介电常数 Ka 与土壤水分含量的对应关系是通过大量的测试得到的,只要知道土壤的介电常数 Ka 值我们就很容易的得到水分含量。

一般认为,介电法土壤水分传感器测量的是土壤的容积含水量 θ_v ,输出的是电压信号 V 。理论上介电法土壤水分传感器的静态数学模型是一个三次多项式。对传感器进行率定时,将传感器在土壤含水量系列中进行测试,测量其输出电压,可得到一组测量数据 (V_i, θ_{vi}) ,再通过回归分析拟合成一元三次多项式 $\theta_v = a_0 + a_1V + a_2V^2 + a_3V^3$,确定出回归系数,即可得到传感器的特性方程。

事实上,土壤容积含水量与土壤质量含水量之间也就是一个系数(土壤密度)关系。因此,用土壤质量含水量与输出电压建立介电法土壤水分传感器的静态数学模型,也可以拟合成一个一元三次多项式,不一定要将烘干法测定得出的土壤质量含水量换算成容积含水量再拟合成一元三次多项式,而是直接用土壤质量含水量就可以拟合,并且消除了因将土壤质量含水量换算成容积含水量(需要测量土壤密度)而带来的误差。

4.2 时域反射法(Time Domain Reflectometry)

时域反射法是一种介电测量中的高速测量技术,1969年,它是以Feidegg等人关于许多液体介电特性的研究为基础发展起来的。到了1975年,Topp和Davis将其引入土壤水分测量的研究。根据电磁波在不同介电常数的介质中传播时行进速度会有所改变的物理现象提出了时域反射法(Time-Domain Reflectometry),简称TDR法。Topp首先依此方法测得了土壤中“气——固——液”混合物的介电常数,进而利用统计学中数值逼近的理论分类法找出了不同种类土壤含水量与介电常数间的多项式关系。

通过大量的理论和实验研究证明了基于TDR方法的土壤水分测试仪能够满足快速测量的实时性要求,可是对土壤这种复杂的多孔介质对象,虽然土壤含水量 θ 的变化能够显著地导致介电常数 ϵ 的改变,但在传感器探针几何长度受到限制的条件下,由土壤的介电常数 ϵ 引起的入射——反射时间差 Δt 仅有纳

秒数量级(10^{-9} s)。若要对如此短的滞后时间进行准确测量,从无线电测量技术的角度来看难度极大(目前世界上掌握超高速延迟线测量技术的只有美、加、德等极少数国家),基于 TDR 原理的土壤水分测量仪器成本相应较高。例如,美国进口的“Trase”TDR 土壤水分测量系统,其售价高达 1 万美金以上。TDR 土壤水分测试仪器昂贵的身份使得它只能装备于我国极少数高等院校和科研单位,无法大量应用于农田土壤墒情实时监测与节水灌溉自动控制系统中。

电子脉冲在一对并行的传输线路中(波导杆)的传输速度与环绕线路的周围环境或接触线路的材料介电常数有关。电介常数越大,速度越低。当电磁脉冲在一条并行线路里传输时,传输线路和周围介质的不连续性使某些微波能量沿线路反射回去,当脉冲到达传输线路的终点时,实际上所有剩余的脉冲能量全部沿线路反射回去,这非常类似于一束光在一个管子里传输而在该管子终点被一个镜子反射回去。这些特点使得人们有可能采用灵敏的电子元件来测量一个微波脉冲沿一条埋在土壤中的已知长度的传输线路(即波导杆)传输所需要的时间。土壤的介电常数可以使用下面的公式来确定:

$$Ka=(tc/L)2 \tag{5}$$

式中: L 为波导杆的长度 (cm); t 为电磁波传输时间 (ns); c 是以厘米每纳秒计的光速 (cm/ns)。传输时间定义为:脉冲单方向从波导线的始端传到波导线的终端所需要的时间。

知道了土壤的介电常数 Ka 值,我们就可以通过土壤水分含量与土壤介电常数之间的关系而得到土壤含水量数值。

时域反射法是通过测量土壤中的水和其它电介质介电常数之间的差异的原理并采用时域反射测试技术测量土壤含水量的方法。仪器工作频率一般为 1GHz。对传输电缆没有严格的要求。

时域反射法传感器的探头多为探针式、圆柱式等,可以埋设在土壤剖面连续测量,也可以与专用测量仪表配合做移动巡回测量。

4.3 频域反射法(Frequency Domain Reflectometry)

频域反射法 (Frequency Domain Reflectometry),简称 FDR 法,是通过测量传感器在土壤中因土壤介电常数的变化而引起频率的变化来测量土壤的水分含量,这些变化转变为与土壤含水量对应成为三次多项式关系的电压信号。

荷兰 Wageningen 农业大学学者 Hilhorst 通过大量的研究,在 1992 年提出了频域分解方法(Frequency Domain Decomposition)。该法利用矢量电压测量技术,在某一理想测试频率下将土壤的介电常数 Ka 进行实部和虚部的分解,通过分解出的介电常数虚部可得到土壤的电导率,由分解出的介电常数实部换算出土壤含水量。

频域反射法仪器工作频率一般为 20~150 MHz,由多种电路将介电常数的变化转换为直流电压或其它输出形式,输出的直流电压在广泛的工作范围内与土壤含水量直接相关。该方法对传输电缆没有严格的要求。

4.4 驻波率法 (Standing-Wave Ratio)

有的学者认为驻波率法是介电法中的另一种方法,也有学者将驻波率法归为频域反射法,笔者在此仍将其作为单独的一种方法加以简介。

基于驻波率原理的土壤水分测量方法与 TDR 和 FDR 两种土壤水分速测方法一样,同属于介电法。驻波率法是基于无线电射频技术中的驻波率 (Standing-Wave Ratio) 原理的土壤水分测量方法,不再利用高速延迟线测量入射-反射时间差 Δt 和拍频 (频差),而是测量它的驻波比,试验表明三态混合物介电常数 Ka 的改变能够引起传输线上驻波比的显著变化。由驻波比原理研制出的仪器在成本上有很大幅度的降低。

频域反射法和驻波率法传感器的探头多为探针式,使用方法与针式 TDR 类似。可以埋设在土壤剖面连续测量,也可以与专用测量仪表配合做移动巡回测量。

4.5 值得注意的问题

介电法也与其他定位监测方法一样,牵涉到土壤水分传感器参数率定的问题。目前我国的土壤水分传感器供应商或土壤墒情自动监测系统承建商,各自对其方法原理的理解尚有差异,对传感器参数率定的方法也各有同异,还存在不少需要解决的问题。

我国目前进口的土壤水分测量仪器和传感器种类较多,因此在购买进口仪器设备时,应尽可能多的了解仪器设备的使用情况和精度,避免造成损失。

5 几类方法的比较

在测定土壤含水量的诸多方法中,烘干法简单直观,但是采样会干扰田间土壤水分的连续性,在田间

留下的取样孔，会切断作物的某些根并影响土壤水分运动。中子仪法可以在原地的不同深度上周期性的反复测定而不破坏土壤，但是仪器的垂直分辨率较差，表层测量困难，且辐射危害健康。 γ 射线透射法与中子仪法具有许多相同的优点，而且比中子仪的垂直分辨率高，但是 γ 射线也危害人体健康。传感器法测定土壤水分的精度受传感器的设计、工艺制造等方面的影响，现在还处在进一步研制阶段。现在比较常用的是经济型的频域反射法、驻波率法和技术更先进的时域反射法。他们都具有技术成熟，精度高，便于携带可连续原位测定及无辐射等优点，在水分测定方法方面表现出良好的发展势头。目前使用较多的频域反射法、驻波率法的土壤水分测定仪器以及土壤水分自动测报系统中的传感器，国内已有生产，但主要还是进口元器件组装。目前使用的时域反射法仪器及传感器的主要有美国 SEC 公司生产的 TRASE 系统，加拿大生产的 MP-917MOISTURE.POINT 型 TDR 和波兰 EASY TEST 公司生产的 FOM/mts 型 TDR，德国 IMKO 公司生产的 FM 系统等。国产 TDR 也在积极研制之中。

(上接第 87 页)

4.4.3 节水措施

改进高耗水工艺，更换高耗水设备，加快节水技术和节水设备、器具及污水处理设备的研究开发。大力推广工业节水新技术、新工艺、新设备。下大力气改造落后的生产工艺和设备，增加节水技术改造资金的投入；循环水浓缩倍数偏低，建议采取有效措施提高循环水浓缩倍数，进一步提高水的重复利用率。

5 结语

通过对一个企业的水平衡测试，可以基本摸清工厂企业用水现状、工业用水基本参数之间的定量关系，找出泄漏水量，解

6 结 语

土壤水分测量方法很多，每一种方法都有其适用范围，因此在选用测量方法时，一定要有针对性，既要考虑其实用性，又要考虑其经济性。就目前经理论分析和实验研究认为，介电法土壤水分传感器的输出特性对土壤类型和质地的影响并不是很敏感。但是对于某些特定土壤，传感器的输出特性则还是有所不同的，因此，为了获得更满意的测量精度，应对传感器进行重新率定。

参考文献：

[1] GB50123-1999, 土工试验方法标准[S].
[2] SL237-1999, 土工试验规范[S].
[3] SL13-2004, 灌溉试验规范[S].
[4] LY/T 1210~1275-1999, 森林土壤分析方法[S].
[5] 土壤水分测定方法编写组. 土壤水分测定方法[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986.
[6] 中国标准出版社第一编辑室编. 中国农业标准汇编 土壤肥料卷 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
[7] 刘光菴, 等. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
[8] 谢贤群, 王立军. 水环境要素观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1998.

决长年漏水问题；为企业制定合理用水规划提供可靠的依据；为工厂治理废水，提供基础水量情况；为城市水资源的系统分析、供需平衡研究、城市用水规划、未来经济发展的需水量预测以及城市水污染防治、制定不断提高工业用水水平的科技发展规划等，提供较可靠的基础数据。

参考文献：

[1] GB/T7119-93, 评价企业合理用水技术通则[S].
[2] GB/T12452-90, 企业水平衡与测试通则[S].
[3] GB/ 50179-93, 河流流量测验规范[S].
[4] 吉林省水文水资源局. 吉林化学工业股份有限公司有机合成厂水平衡测试报告[R]. 长春: 吉林省水文水资源局, 2005.

Discussion on Water Balance Test in Jilin Province

FU Hai-bo, ZOU Wen-an, XIN Yu-chen

(Hydrology and Water Resources Bureau of Jilin Province, Changchun 130022, China)

Abstract: This paper introduced the balance relation between various water resources utilizations by the enterprises, analyzed their technology of using water, level and efficiency, potential of water saving with water balance test. It also analysed an enterprise in Jilin as an example and gave the enterprises some suggestions on water saving.

Key words: water balance test; level of water-use; measures of water saving

作者: 邓英春, 许永辉, DENG Ying-chun, XU Yong-hui
作者单位: 邓英春, DENG Ying-chun(安徽省水文局, 安徽, 合肥, 230022), 许永辉, XU Yong-hui(湖北省水文水资源局, 湖北, 武汉, 430071)
刊名: 水文 
英文刊名: JOURNAL OF CHINA HYDROLOGY
年, 卷(期): 2007, 27(4)
被引用次数: 3次

参考文献(8条)

1. 谢贤群;王立军 [水环境要素观测与分析](#) 1998
2. 刘光菘 [土壤理化分析与剖面描述](#) 1996
3. 中国标准出版社第一编辑室 [中国农业标准汇编土壤肥料卷](#) 2002
4. 《土壤水分测定方法》编写组 [土壤水分测定方法](#) 1986
5. LY/T 1210~1275-1999. [森林土壤分析方法](#)
6. SL 13-2004. [灌溉试验规范](#)
7. SL 237-1999. [土工试验规范](#)[期刊论文]-
8. GB 50123-1999. [土工试验方法标准](#)

本文读者也读过(9条)

1. 李炎, 王丹 [不同土壤水分测定方法的比较研究](#)[期刊论文]-[安徽农业科学](#)2010, 38(17)
2. 刘永岗, 王曰鑫, 李学哲 [气量法快速测定土壤含水量技术](#)[期刊论文]-[水土保持科技情报](#)2005(6)
3. 马英, MA Ying [农田土壤水分的研究](#)[期刊论文]-[华北水利水电学院学报](#)2009, 30(5)
4. 吴涛, 张荣标, 冯友兵, WU Tao, ZHANG Rong-biao, FENG You-bing [土壤水分含量测定方法研究](#)[期刊论文]-[农机化研究](#)2007(12)
5. 余杨, 王穗, 余艳玲 [土壤表层水分含量测定方法](#)[期刊论文]-[云南农业大学学报](#)2004, 19(2)
6. 王晓东, 魏远强, 杨召琼 [土壤水分常数的测定方法和问题探讨](#)[期刊论文]-[内江科技](#)2010, 31(4)
7. 张晓虎, 李新平 [几种常用土壤含水量测定方法的研究进展](#)[期刊论文]-[陕西农业科学](#)2008, 54(6)
8. 王赛宵, 李清河, 徐军, 赵英铭, WANG Sai-xiao, LI Qing-he, XU Jun, ZHAO Ying-ming [干旱半干旱地区土壤水分测定研究概述](#)[期刊论文]-[山西农业科学](#)2010, 38(9)
9. 张灿龙, 倪绍祥, 刘振波, 陈健, ZHANG Can-long, NI Shao-xiang, LIU Zhen-bo, CHEN Jian [遥感监测土壤含水量方法综述](#)[期刊论文]-[农机化研究](#)2006(6)

引证文献(3条)

1. 冯健昭, 肖德琴, 可欣荣, 陈剑虹 [稻田水分传感器网络节点设计与实现](#)[期刊论文]-[计算机研究与发展](#) 2010(z2)
2. 李坤岑, 张明, 谢作政, 王颖 [基于时域反射法的磷石膏渣场监测的试验研究](#)[期刊论文]-[中国西部科技](#) 2009(24)
3. 段争虎 [土壤水研究在流域生态-水文过程中的作用、现状与方向](#)[期刊论文]-[地球科学进展](#) 2008(7)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_sw200704005.aspx