

宁夏土壤电阻率时空分布观测试验

刘春泉 厚军学 张伟

(宁夏雷电防护技术中心, 银川 750002)

摘要 通过在宁夏地区选择 3 种典型的土质结构, 分别设置了 3 种不同结构的防雷接地体, 经过 1 年的对比观测, 用回归方法来分析平均气温和土壤湿度变化对不同土壤电阻率和不同结构接地电阻的影响, 说明不同土质结构在不同时间(或季节)内、不同的温湿度条件下, 对土壤电阻率的影响和不同结构防雷接地体的变化特点和规律, 从而提出了防雷接地体的敷设和结构性能最优要求。

关键词 土壤电阻率 时空分布 防雷接地体

引言

接地装置的作用是把雷电流尽快地散逸到大地, 在条件允许时, 接地装置要有较低的接地电阻值。接地装置的电阻与土壤电阻率、接地装置的结构和布置有关。土壤电阻率的数值与土壤的结构(如黑土、粘土、沙土、沙砾和岩石等)、土质的紧密程度、湿度、温度以及土壤中含有可溶性的电解质(如酸、碱、盐等)有关。在宁夏地区, 从南到北, 随着海拔高度的逐步降低, 不同地区土质结构、成分也存在着较大差异, 从而导致土壤电阻率差异很大。宁夏土壤电阻率的时间及空间上分布的试验研究, 通过在银川(永宁)、固原(固原)和吴忠(盐池)3 个地区选择 3 种典型土壤(灌淤土、黄棉土和风沙土), 在一年时间内设置统一结构的防雷接地体, 对比分析在不同温、湿度条件下其土壤电阻率的变化规律, 探讨不同土质条件下降低接地体电阻的最佳方法。

1 材料与试验方法

1.1 试验材料

在本试验中, 按照《建筑物防雷设计规范》(GB50057)中有关防雷接地体的要求, 垂直接地体采用长 2.5 m、直径 50 mm 镀锌钢管制作, 水平接地体采用 4 mm×40 mm 镀锌扁钢制作^[1]; 测试仪器采用日本 4105 型接地电阻测试仪。气象资料全部采用永宁、固原和盐池 3 个气象站观测资料; 土壤

湿度测试由 3 站按照农业气象观测规范中关于固定地段取土的相关设备和要求进行测定。

1.2 试验方法

分别选择宁夏地区永宁站(代表宁夏黄河流域灌淤土土质条件)、固原站(代表宁夏南部山区黄土高原的黄棉土土质条件)和盐池站(代表宁夏中部毛乌素沙漠边缘风沙土土质条件)^[2]作为 3 个试验观测点。在每个观测点, 分别埋设同样结构的接地装置, 其中单根接地极分为地表下 50 cm 处水平敷设和地表下 50 cm 垂直埋设; 3 根组合接地装置采用每根长 2.5 m、直径 50 mm 镀锌钢管制作, 间隔 3 m, 并用 4 mm×40 mm 镀锌扁钢焊接连通, 在地表下 50 cm 处垂直埋入土壤中。自 2004 年 9 月至 2005 年 9 月每月 8、18、28 日分别测试接地电阻, 记录当日的平均气温、0~100 cm 土壤湿度。考虑到 3 个试验点处于常年不灌溉的干旱状态, 0~30 cm 土壤湿度受降水影响较大, 敷设的防雷接地体均处于地表 50 cm 下, 因此, 统一采用地表 50 cm 处的土壤湿度代表试验土壤湿度。另外, 因冬季土壤冻结无法取土, 2004 年 11 月 18 日至 2005 年 3 月 8 日期间没有土壤湿度数据。

1.3 研究方法

本试验选择 3 种不同土壤, 通过设置 3 种结构的防雷接地体进行对比观测, 对影响接地体的土壤电阻率的外界相关因子, 主要是气温、土壤湿度进行相关性研究和回归分析, 了解每一种土质结构在不

同的温湿度条件下其土壤电阻率的变化特点。人工接地体接地电阻值的计算方法分为下面两种。

垂直接地体的接地电阻值^[3]:当 $L \gg d$ 时:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{8l}{d} - 1 \right) \quad (1)$$

水平接地体的接地电阻值^[3]:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{l^2}{hd} + A \right) \quad (2)$$

式中: R 为实测接地体的接地电阻值(Ω), ρ 为土壤电阻率($\Omega \cdot m$), l 为接地体的长度(m), d 为接地体的直径或等效直径(m), h 为水平接地体埋设深度(m), A 为水平接地体的形状系数。

从式(1)、(2)中可以看出,不同形状接地体的接地电阻与土壤电阻率成正比关系。

2 结果与分析

2.1 宁夏黄河流域灌淤土土质条件

2.1.1 土壤电阻率随气温变化特征

从图 1 中可以看出:在黄河流域灌淤土土质条件

(永宁站)下,地表下 50~300 cm 土壤温度保持相对稳定,因而深层土壤电阻率保持稳定;而地表 0~50 cm 土壤电阻率则随着气温的变化而呈如下变化:春季,随着气温的逐渐升高,土壤电阻率也逐渐降低,当日平均气温达到 18 °C 左右时,土壤电阻率基本保持稳定的常数;随着平均气温逐渐降低,土壤电阻率呈现出逐步增高的趋势;当日平均气温降低至土壤由于水分冻结而使得土壤电阻率达到最高值。

对地表下 50 cm 水平敷设接地体接地电阻和平均气温进行回归分析^[4],其土壤电阻率(y ,下同)与平均气温(t ,下同)的最优回归方程为:

$$y = 22.8493 + 0.3403t + 0.0042t^2 - 0.0015t^3 \quad (3)$$

$R = 0.526, F = 4.10$,通过信度为 0.05 的 F 检验。式(3)说明:地表下 50 cm 水平敷设接地体接地电阻值的变化和平均气温成三次曲线关系,即随着平均气温的逐渐升高,土壤电阻率呈逐渐降低趋势;当平均气温达到 18 °C 以上时,土壤电阻率(接地体接地电阻值)基本保持稳定的常数。

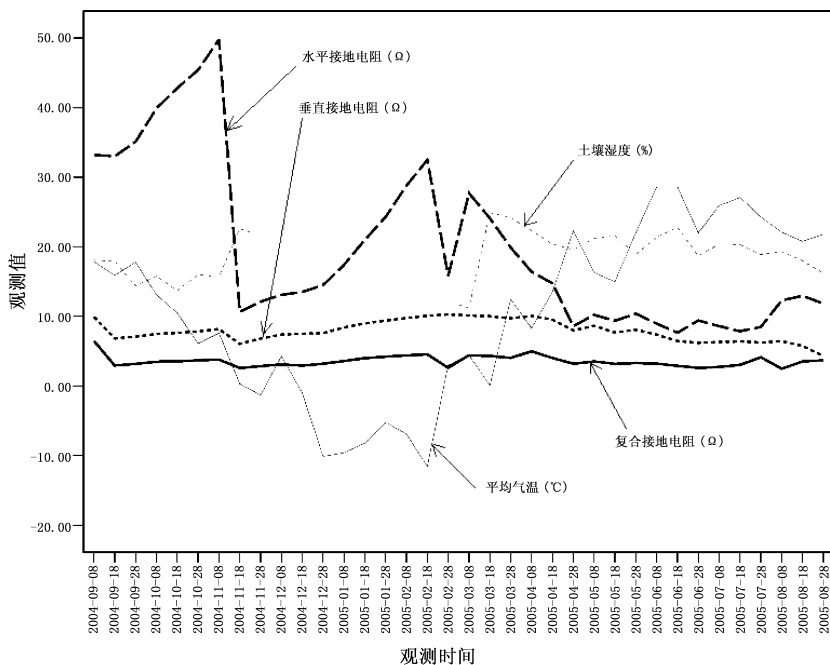


图 1 试验期间永宁 3 种结构接地体电阻、气温和土壤湿度的变化曲线^[4]

2.1.2 土壤电阻率随土壤湿度变化特性

从图 1 可以看出:在黄河流域灌淤土土质条件下,地表下 50~300 cm 土壤湿度基本没有变化,因而土壤电阻率基本保持稳定;而地表 0~50 cm 土壤电阻率则随着土壤湿度的变化而变化:当土壤含水

量低于 20% 左右时,随着土壤含水量降低,土壤电阻率呈现显著增高趋势;当土壤含水量高于 20% 时,随着土壤含水量增大,土壤电阻率呈现逐渐增大趋势;当土壤含水量达到 20%~25% 时,土壤电阻率基本保持稳定的数值。

对地表下 50 cm 敷设水平接地体接地电阻和土壤湿度变化进行回归分析^[4],其土壤电阻率与土壤湿度(u ,下同)的最优回归方程为:

$$y=121.654-7.0878 u+0.0044 u^3 \quad (4)$$

$R=0.643, F=8.13$,通过信度为 0.005 的 F 检验。从式(4)可以看出,地表下 50 cm 敷设水平接地体接地电阻值随着土壤湿度的增大而呈现明显减小的趋势;但当土壤含水量高于 20% 以上时,随着土壤含水量的增大,土壤电阻率呈现出逐渐增大的趋势。

2.1.3 土壤电阻率随气温和土壤湿度变化特性

从图 1 可以看出:在黄河流域灌淤土土质条件下,地表下 50~300 cm 土壤温度和土壤湿度基本不变化,使得土壤电阻率基本保持稳定;而地表 0~50 cm 土壤电阻率则随着气温和土壤湿度的变化而呈现三次曲线的规律性变化。

对地表下 50 cm 水平敷设接地体接地电阻和平均气温、土壤湿度进行回归分析^[4],其土壤电阻率与平均气温、土壤湿度的回归方程为:

$$y=76.106-2.256t-0.809u \quad (5)$$

$R=0.774, F=17.181$,通过信度为 0.001 的 F 检验。说明在宁夏黄河流域灌淤土土质条件下,地表下 50 cm 水平敷设接地体接地电阻的大小与平均气温和土壤湿度具有非常好($R=0.774$)的相关性,即

土壤电阻率主要受到气温和土壤湿度两因素的影响而变化。

2.1.4 不同气温和土壤湿度 3 种结构接地体性能

图 1 反映 3 种接地体性能存在差异。在同样的气温和土壤湿度条件下,复合式接地体接地电阻值最小,垂直单根接地体接地电阻值居中,而水平单根敷设接地体接地电阻值最高。复合式接地体和垂直单根接地体接地电阻值基本不受温度和土壤湿度变化的影响而保持稳定,但水平单根敷设接地体接地电阻受温度和土壤湿度的影响有很大的变化。

2.2 宁夏中部毛乌素沙漠边缘风沙土土质条件

2.2.1 土壤电阻率随气温变化特征

从图 2 中可以看出:在宁夏中部毛乌素沙漠边缘(盐池站)风沙土土质条件下,地表下 50~300 cm 土壤温度保持相对稳定,因而深层土壤电阻率保持稳定;而地表 0~50 cm 土壤电阻率则随着气温的变化而呈如下变化:春季,随着气温的逐渐升高,土壤电阻率也逐渐降低,当日平均气温达到 15 °C 左右时,土壤电阻率基本保持稳定的常数;随着平均气温逐渐降低,土壤电阻率呈现出逐步增高的趋势;当日平均气温降低至土壤由于水分冻结而使得土壤电阻率达到最高值。

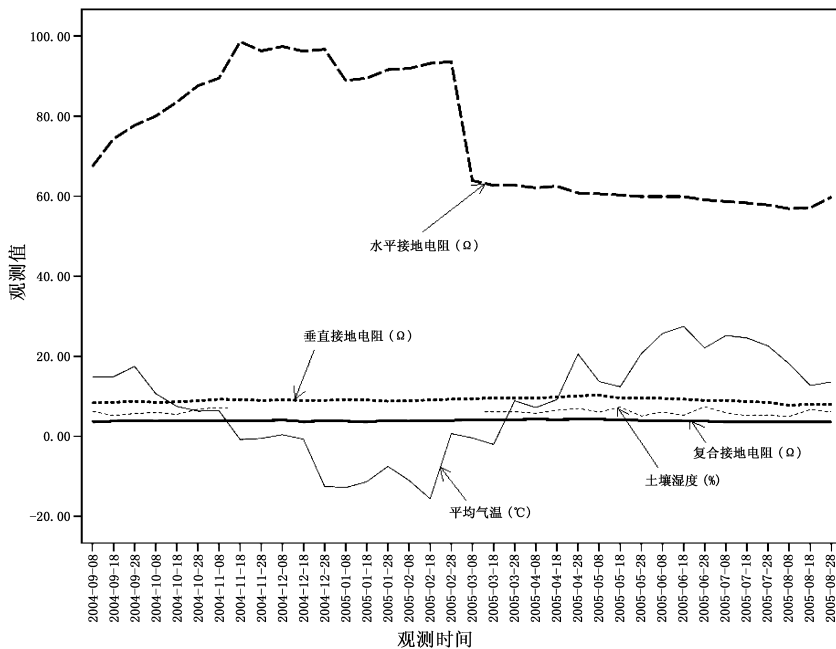


图 2 试验期间盐池 3 种接地体电阻、气温和土壤湿度的变化曲线^[4]

对地表下 50 cm 水平敷设接地体接地电阻和平均气温进行回归分析^[4],其土壤电阻率与平均气温的最优回归方程为:

$$y = 85.8056 - 1.2461t - 0.0356t^2 + 0.0017t^3 \quad (6)$$

$R = 0.794, F = 18.14$,通过信度为 0.001 的 F 检验。在宁夏中部毛乌素沙漠边缘风沙土土质条件下,从地表下 50 cm 水平敷设接地体接地电阻和平均气温的关系式(6)可以看出,水平敷设接地体接地电阻数值随着平均气温的升高,土壤电阻率(即接地体接地电阻)呈现显著降低的趋势;当日平均气温达到 20 °C 左右时,土壤电阻率基本保持稳定的常数;当日平均气温降低至 0 °C,土壤由于水分冻结而使得土壤电阻率达到最大值。

2.2.2 土壤电阻率随土壤湿度变化特性

从图 2 可以看出:在风沙土土质条件下,由于土壤含水量基本保持稳定在 5%~8% 之间,地表下 50~300 cm 深层土壤电阻率基本保持稳定。

2.2.3 土壤电阻率随气温和土壤湿度变化特性

从图 2 可以看出:在风沙土土质条件下,地表下 50~300 cm 深层,由于气温和土壤湿度基本保持稳定而使得土壤电阻率保持稳定;而地表 0~50 cm 土壤电阻率则主要随着平均气温变化而呈现三次指数规律性变化。

对地表下 50 cm 敷设水平接地体接地电阻和平均气温、土壤湿度进行回归分析^[4],其土壤电阻率与

平均气温、土壤湿度的回归方程为:

$$y = 75.743 - 0.660t - 0.00288u \quad (7)$$

$R = 0.488, F = 3.285$,通过信度为 0.05 的 F 检验。说明在宁夏中部毛乌素沙漠边缘风沙土土质条件下,地表下 50 cm 敷设水平接地体接地电阻和平均气温、土壤湿度具有 $R = 0.488$ 的相关性,土壤电阻率更主要是受到平均气温(系数 0.66)的影响而变化。

2.2.4 不同气温和土壤湿度 3 种结构接地体性能

图 2 反映 3 种接地体性能存在差异。在同样的气温和土壤湿度条件下,复合式接地体接地电阻值最低,垂直单根接地体接地电阻值居中,而水平单根敷设接地体接地电阻值最高。复合式接地体和垂直单根接地体接地电阻基本不受平均气温和土壤湿度变化的影响,水平单根敷设接地体接地电阻主要受到平均气温因素的影响而有较大的变化。

2.3 宁夏南部山区黄土高原的黄棉土土质条件

2.3.1 土壤电阻率随气温变化特征

从图 3 可以看出:在宁夏南部山区黄土高原的黄棉土土质条件(固原站)下,地表 0~50 cm 土壤电阻率和 50~300 cm 深层土壤电阻率均随着气温的变化而呈现同样规律性的变化:春季,随着气温的逐渐升高,土壤电阻率都逐渐下降,0~50 cm 土壤电阻率下降幅度大于 50~300 cm 深层土壤电阻率下降幅度;当日平均气温达到 15~20 °C 左右时,土壤

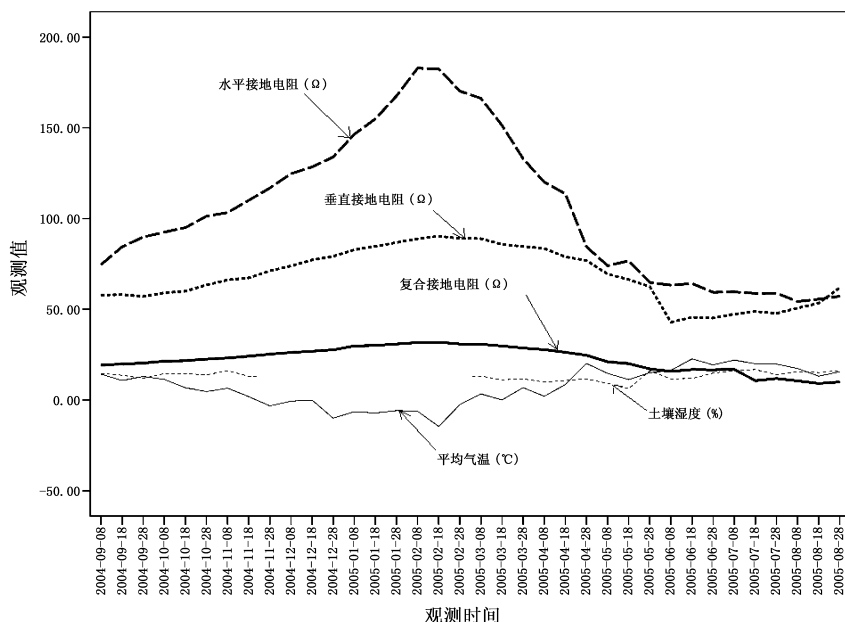


图 3 试验期间固原 3 种接地体电阻、气温和土壤湿度的变化曲线^[4]

电阻率均基本保持稳定的常数;随着冬季平均气温逐渐降低,土壤电阻率均呈现出逐步增高的趋势,0~50 cm 土壤电阻率增大幅度大于 50~300 cm 深层土壤电阻率增长幅度。当气温降低至土壤由于水分冻结而使得 0~300 cm 土壤电阻率达到最高值。

对水平敷设接地体接地电阻和平均气温进行回归分析^[4],其土壤电阻率与平均气温的最优回归方程分别为:

$$y=131.287-3.6295t \quad (8)$$

$R=0.902, F=148.51$,通过信度为 0.001 的 F 检验。式(8)直观地反映了在宁夏南部山区黄土高原的黄棉土土质条件下,水平敷设接地体接地电阻值和平均气温因子的线性关系,即随着气温的逐渐升高,土壤电阻率呈现出显著下降趋势,二者具有非常好($R=0.902$)的相关性。

对垂直单根敷设接地体接地电阻和平均气温进行回归分析^[4],其土壤电阻率与平均气温的最优回归方程分别为:

$$y=76.9903-1.2133t \quad (9)$$

$R=0.819, F=69.22$,通过信度为 0.001 的 F 检验。式(9)反映了在宁夏南部山区黄土高原的黄棉土土质条件下,垂直敷设接地体接地电阻值和平均气温呈线性关系,即随着气温的逐渐升高,土壤电阻率呈现出明显下降的趋势,具有 $R=0.819$ 的相关性。

对复合(垂直3根)敷设接地体接地电阻和平均气温进行回归分析^[4],其土壤电阻率与平均气温的最优回归方程为:

$$y=26.5338-0.5567t \quad (10)$$

$R=0.825, F=72.55$,通过信度为 0.001 的 F 检验。式(10)体现了在宁夏南部山区黄土高原的黄棉土土质条件下,复合敷设接地体接地电阻值和平均气温因子的线性关系,即随着气温的逐渐升高,土壤电阻率呈现出明显下降的趋势,二者具有 $R=0.825$ 的相关性。

2.3.2 土壤电阻率随土壤湿度变化特性

从图3看出:在宁夏南部山区黄土高原的黄棉土土质条件下,由于2004年9月至2005年8月间土壤含水量基本保持稳定在6%~16%之间,地表下50~300 cm 深层土壤电阻率基本保持稳定。

2.3.3 土壤电阻率随气温和土壤湿度变化特性

从图3可以看出:在黄棉土土质条件下,地表至地下300 cm 土壤湿度基本没有变化,因而土壤电阻

率基本保持稳定;而土壤电阻率则主要随着平均气温变化而呈现线性的规律性变化。

对水平敷设接地体接地电阻和平均气温、土壤湿度进行回归分析^[4],其土壤电阻率与平均气温、土壤湿度的回归方程为:

$$y=151.781-3.718t-1.436u \quad (11)$$

$R=0.850, F=29.998$,通过信度为 0.001 的 F 检验。式(11)说明了在黄棉土土质条件下,水平敷设接地体接地电阻主要受到平均气温和土壤湿度的影响(相关系数 $R=0.850$),其中平均气温(系数 3.718)影响更大。

对垂直单根敷设接地体接地电阻和平均气温、土壤湿度进行回归分析^[4],其土壤电阻率与平均气温、土壤湿度的回归方程为:

$$y=98.441-1.344t-1.453u \quad (12)$$

$R=0.778, F=17.584$,通过信度为 0.001 的 F 检验。式(12)说明了在黄棉土土质条件下,垂直单根敷设接地体接地电阻受到平均气温和土壤湿度的很大影响(相关系数 $R=0.778$),两种影响因子的作用几乎是等同的。

对复合(垂直3根)敷设接地体接地电阻和平均气温、土壤湿度进行回归分析^[4],其土壤电阻率与平均气温、土壤湿度的回归方程为:

$$y=37.651-0.594t-0.787u \quad (13)$$

$R=0.791, F=19.273$,通过信度为 0.001 的 F 检验。说明在宁夏南部山区黄土高原的黄棉土土质条件下,土壤电阻率因接地体的布置结构和敷设深度的不同而受到平均气温和土壤湿度的影响也呈现出显著的差异。在地表下50 cm 水平敷设接地体所反映的土壤电阻率受到平均气温和土壤湿度影响最大,与平均气温和土壤湿度的相关性最好,变化最显著;而地表下50~300 cm 深层土壤电阻率受到平均气温和土壤湿度因素影响相对较小。

2.3.4 不同气温和土壤湿度3种结构接地体性能

根据图3所示:在黄棉土土质条件下,3种接地体性能存在差异。在同样的气温和土壤湿度条件下,复合式接地体接地电阻值最小,垂直单根接地体接地电阻值居中,水平单根敷设接地体接地电阻值最高,复合式接地体和垂直单根接地体接地电阻基本不受平均气温变化的影响,水平单根敷设接地体接地电阻主要受平均气温影响有较大的变化。

2.4 宁夏土壤电阻率随时间(季节)和空间的变化

2.4.1 土壤电阻率随时间的变化

从以上分析总体来讲,在宁夏区内,土壤电阻率随时间(季节)的规律性变化是随平均气温而变化。春季随着气温的升高,土壤电阻率逐渐下降,其中0~50 cm土壤电阻率下降幅度大于50~300 cm深层土壤电阻率下降幅度;夏季当日平均气温达到15~20℃左右时,土壤电阻率均基本保持稳定的常数;随着秋冬季来临,日平均气温逐渐降低,土壤电阻率均呈现出逐步增高的趋势,0~50 cm土壤电阻率增高幅度大于50~300 cm土壤电阻率增高幅度;冬季日平均气温降低至土壤冻结而时,0~300 cm土壤电阻率增大到最高值。

2.4.2 土壤电阻率随空间的变化

土壤电阻率随空间的变化,是指土壤电阻率随着宁夏北部(永宁)到中部(盐池)、再到南部(固原)的空间变化,究其实质就是宁夏不同土质结构、不同灌溉条件的变化特征。即:同样处在地表下50 cm,在黄河流域灌淤土土质条件下,由于平均气温和土壤湿度(灌溉因素)的变化,使得土壤电阻率随平均气温和土壤湿度的变化幅度较大;而中部毛乌素沙漠边缘风沙土土质和南部山区黄土高原的黄棉土土质,其土壤电阻率随平均气温和土壤湿度的变化幅度相对较小。

3 结论

(1)在接地装置的结构和布置一致的条件下,土壤电阻率的大小是影响接地装置接地阻抗值的主要

因子。而气温和土壤湿度是影响土壤电阻率的两个最主要的因素。特别是在西部干旱地区,主要是平均气温影响土壤电阻率。一般来说,随着气温的升高,土壤电阻率逐渐下降;当日平均气温达到15~20℃左右时,土壤电阻率基本保持稳定;随着平均气温降低,土壤电阻率逐渐增大;当日平均气温降低至土壤水分冻结时,土壤电阻率达到最大值。

(2)在不同土质条件下,平均气温和土壤湿度对土壤电阻率的影响也不同。当土壤含水量低于20%左右时,随着土壤含水量降低,土壤电阻率逐渐增大;当土壤含水量高于20%时,随着土壤含水量增大,土壤电阻率逐渐降低;当土壤含水量达到20%~25%时,土壤电阻率基本保持稳定。

(3)在同一土质和自然条件下,接地装置的结构和布置同样决定防雷接地体的接地性能。人工接地体的敷设宜在地表下50 cm以下,最好埋于冻土层深度以下。人工接地装置的敷设建议采用垂直接地方式,并以多根垂直接地体连接的复合接地方式为佳。

参考文献

- [1] 杨维林,关象石. 防雷规范标准汇编(2005年版)[M]. 北京:气象出版社,2005:275-285.
- [2] 王吉智. 宁夏土壤[M]. 银川:宁夏人民出版社,1990:211-230.
- [3] 苏邦礼,崔秉球,吴望平,等. 雷电与避雷工程[M]. 广州:中山大学出版社,1999:199-213.
- [4] 李志辉. SPSS FOR WINDOWS 统计分析教程[M]. 第2版. 北京:电子工业出版社,2004:150-210.

Observational Experiment on Spatial-Temporal Distribution of Soil Resistivity in Ningxia

Liu Chunquan Hou Junxue Zhang Wei

(Ningxia Lightning Protection Technology Center, Yinchun 750002)

Abstract: An observational experiment was conducted on the impact of air temperature and humidity variation on soil resistivity and earthing resistance with different structures by selecting three typical soil conditions to set three vari-structure lightning protecting earthing bodies in Ningxia for one year. By means of comparative and regression analysis, the impacts of different soil conditions on soil resistivity at different temperatures and humidity in different seasons, and the variation characteristics and regularities of the lightning protecting earthing bodies with different structures are studied, and accordingly the optimal requirements for the layout and structure of lightning protecting earthing bodies are presented.

Key words: soil resistivity, spatial and temporal distribution, lightning protecting earthing body