

张源源, 庞华基, 徐晓亮, 等. 2017. 土壤湿度对不规则起伏地表雷电垂直电场传播影响的研究 [J]. 气候与环境研究, 22 (1): 89–96. Zhang Yuanyuan, Pang Huaji, Xu Xiaoliang, et al. 2017. The propagation effect of soil moisture on lightning vertical electric field over irregular terrain [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (1): 89–96, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16025.

土壤湿度对不规则起伏地表雷电垂直电场传播影响的研究

张源源¹ 庞华基¹ 徐晓亮¹ 王欣眉¹ 张其林² 张伟¹

¹ 青岛市气象局气象防雷中心, 青岛 266003

² 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

摘 要 本文采用二维 fractional Brown motion (fBm) 随机分形界面模拟不规则起伏地表, 基于 Longmire-Scott 提出的土壤电参数等效模型 (L-S 模型), 分析研究不规则起伏地表的土壤湿度对地闪回击垂直电场传播的影响。结果表明: (1) 地表的不规则起伏程度主要会引起垂直电场峰值的衰减和上升沿时间的滞后。随着地表不规则起伏程度的增大, 垂直电场峰值衰减越明显, 且波形上升沿时间增长。(2) 无论地表不规则程度如何, 随着土壤湿度的增大, 垂直电场的衰减反而减小。(3) 总的来说, 地表的不规则程度越大, 土壤湿度越小, 垂直电场的峰值衰减越大, 波头上升沿时间越长。

关键词 分形不规则起伏地表 土壤湿度 雷电回击 垂直电场

文章编号 1006-9585 (2017) 01-0089-08

中图分类号 P427

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16025

The Propagation Effect of Soil Moisture on Lightning Vertical Electric Field over Irregular Terrain

ZHANG Yuanyuan¹, PANG Huaji¹, XU Xiaoliang¹, WANG Xinmei¹, ZHANG Qilin²,
and ZHANG Wei¹

¹ Lightning Protection Center, Qingdao Meteorological Bureau, Qingdao 266003

² Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract A two-dimensional fractional Brown motion (fBm) model was used to describe the irregular terrain, and the Longmire-Scott soil-parameter frequency dependent model was applied to investigate the propagation effect of soil moisture on the lightning vertical electric field over irregular terrains. Main results are as follows: (1) The surface irregularity can lead to the attenuation of the magnitude of the vertical electric field and lags of the rise time of the field waveform. With the increase in the surface irregularity, the attenuation of the vertical electric field intensifies and the rise time of the field waveform increases. (2) Regardless of the degree of surface irregularity, increases in the soil moisture will reduce the attenuation of the vertical electric field. (3) Generally, increases in the surface irregularity and decreases in the soil moisture can result in stronger attenuation of the vertical electric field and longer rise time of the field waveform.

Keywords Fractal irregular terrain, Soil moisture, Lightning return stroke, Vertical electric field

收稿日期 2016-01-25; 网络预出版日期 2016-08-03

作者简介 张源源, 女, 1987 年出生, 硕士研究生、助理工程师, 主要从事雷电电磁传播、雷电监测预警方面的研究。Email: zhangyy820@sina.com

资助项目 青岛市气象局业务短平快项目 2015qdqxd06

Funded by Qingdao Meteorological Bureau Fast Business Project (Grant 2015qdqxd06)

1 引言

雷电活动所产生的电磁辐射场,尤其是地闪能量集中的低频/甚低频段的电磁场,可沿地表传播数百公里甚至更远。地闪回击电磁辐射与传播是雷电物理、雷电探测、雷电电磁兼容等方面研究的重点 (Master and Uman, 1984; Cooray and De la Rosa, 1986; 鄧秀书等, 1988, 1998; 张其林等, 2003; Zhang et al., 2009, 2011a, 2011b; 黎勋等, 2016)。不过,由于地面电导率是有限的,当雷电电磁场沿地表传播时,高频分量快速衰减,引起时域电磁场脉冲峰值减小、波形上升时间增大,这也是基于闪电电磁辐射场到达时间法的闪电定位技术 (TOA)、雷电流强度反演产生误差的其中一个原因 (Rubinstein, 1996; Cooray et al., 2000; Cooray, 2008, 2009; Delfino et al., 2008a, 2008b; Shoory et al., 2010)。因此,许多人对雷电电磁场沿地表的传播进行了研究 (Rubinstein, 1996; Cooray et al., 2000; Cooray, 2008, 2009; Yang et al., 2008; Qie et al., 2009; Zhang et al., 2009, 2011a, 2011b; Shoory et al., 2010; Yang et al., 2010)。然而,这些研究一般都是将大地视为理想情况,或者地表光滑平坦无起伏的有限电导率。实际上,雷电发生时通常伴随着降水,且不同地区的土壤湿度 (土壤体积百分含水量) 有着较明显的差异,同一地区的不同季节土壤湿度差异也很明显。早在 1970 年,Fuller and Ward (1970) 就这方面做过相关研究,得出了大地电导率、相对电容率和频率之间有着不可忽视的相关性,随后 Scott (1966) 和 Longmire and Smith (1975) 提出了大地电导率和相对电容率在不同土壤湿度下是随频率变化的,且在一定的范围内,土壤湿度对雷电电磁场传播产生较大的影响。

因此,本文拟采用二维 fractional Brown motion (fBm) 随机分形函数来模拟不规则地表,利用 Longmire-Scott (1975) 提出的土壤电参数与土壤湿度的等效模型 (L-S 模型),综合考虑土壤湿度和地形地表的起伏,分析研究土壤湿度对不规则起伏地表的地闪回击电磁场传播的影响。研究结果进一步证明了不同地区、不同季节的雷电定位系统探测效率和探测精度等存在很大差异的原因,包括土壤湿度的差异和雷电电磁场沿地表传播的复杂路径。为今后如何有效地提高地基雷电探测技术具有积极

的科学意义和实际参考价值。

2 复杂地表的雷电垂直电场近似算法

2.1 不规则起伏地表的雷电垂直电场的计算

假定地面电导率无限大,闪电通道垂直于地面,地表任意一点处的垂直电场的时域表达式 (Thottappillil et al., 1997; Thottappillil and Rakov, 2001) 为

$$E_{v,\infty}(0,r,t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_0^{L'(t)} \frac{2-3\sin^2\theta(z')}{R^3(z')} \int_{t_b(z')}^t i(z',t-R(z')/c) dt dz' + \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_0^{L'(t)} \frac{2-3\sin^2\theta(z')}{cR^2(z')} i(z',t-R(z')/c) dz' - \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_0^{L'(t)} \frac{\sin^2\theta(z')}{c^2 R(z')} \frac{\partial i(z',t-R(z')/c)}{\partial t} dz', \quad (1)$$

其中, ϵ_0 为自由空间的介电常数, z' 是地面观测点观测到回击电流脉冲波头的位置, $t_b(z')$ 是地面观测点观测到回击电流脉冲波头的时间, $t_b(z') = (z'^2 + r^2)^{1/2} / c$, r 是观测点距雷电回击通道的水平距离, c 是光速。 $L'(t)$ 是 t 时刻观测到的回击通道长度, $t = L'(t)/v + [L'(t)^2 + r^2]^{1/2} / c$, v 是回击速度, $i(z',t-R(z')/c)$ 是回击电流沿通道的分布, $\theta(z')$ 是 z' 与观测点之间的角度, $R(z')$ 是 z' 与观测点之间的距离。雷电回击过程如图 1 所示。

当地面电导率有限时,距雷电回击通道水平距离 r 处垂直电场 (Shoory et al., 2011) 为

$$E_{v,\sigma}(0,r,t) = \int_0^t E_{v,\infty}(0,r,t-\tau) w(0,r,\tau) d\tau, \quad (2)$$

其中, $E_{v,\sigma}(0,r,t)$ 为有限电导率地表的垂直电场,

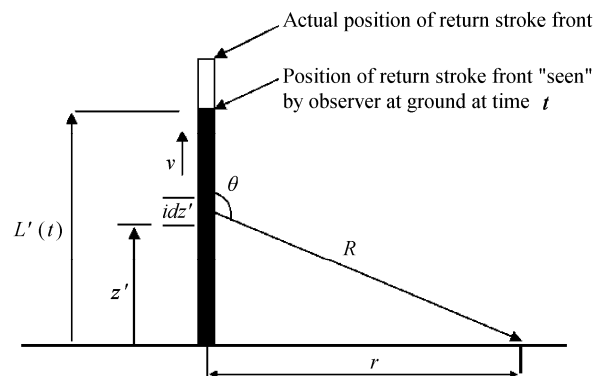


图 1 雷电回击过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram used in deriving the expressions for the lightning electromagnetic fields on the ground level generated by lightning return stroke

$E_{v,\infty}(0, r, t - \tau)$ 为理想地表的垂直电场。 $w(0, r, \tau)$ 为场的衰减函数 $W(0, r, j\omega)$ 的时域表达式。

因此, 对于不同的地表形态, 垂直电场计算的关键就在于求解不同地表的衰减函数。由 Wait (1956, 1974, 1998) 提出的衰减函数的表达式为

$$W(0, r, j\omega) = 1 - j\sqrt{\pi q} \exp(-q) \operatorname{erfc}(j\sqrt{q}), \quad (3)$$

$$q = -\frac{j\omega r}{2c} \Delta_{\text{eff}}^2, \quad (4)$$

其中, $j = \sqrt{-1}$, ω 为角频率, Δ_{eff} 是地表的归一化表面阻抗, “erfc” 是误差函数, ε_0 和 μ_0 分别为自由空间的介电常数和磁导率。

按照 Barrick (1971a, 1971b) 等效表面阻抗理论, 不规则起伏地表等效表面阻抗 Δ_{eff} 可表示为 (Cooray and Ming, 1994)

$$\Delta_{\text{eff}} = \Delta + \Delta', \quad (5)$$

$$\Delta = \frac{k_0}{k} \left(1 - \frac{k_0^2}{k^2} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

$$k = k_0 (\varepsilon_r - j60\sigma\lambda_0)^{1/2}, \quad (7)$$

$$k_0 = \omega(\mu_0\varepsilon_0)^{1/2}, \quad (8)$$

$$\lambda_0 = c / (\omega / 2\pi), \quad (9)$$

其中, Δ 为光滑地表的等效表面阻抗, Δ' 为不规则起伏地表引起的表面阻抗的增量, σ 为土壤的电导率, ε_r 为土壤的相对电容率。

$$\Delta' = \frac{1}{4} \int_{-\infty}^{+\infty} d\gamma \int_{-\infty}^{+\infty} G(\gamma, \eta) V(\gamma, \eta) d\eta, \quad (10)$$

$$G(\gamma, \eta) = \frac{\gamma^2 + b \cdot \Delta \cdot (\gamma^2 + \eta^2 - \omega\gamma/c)}{b + \Delta \cdot (b^2 + 1)} + \frac{\Delta \cdot (\gamma^2 - \eta^2)}{2} + \Delta \cdot \omega \cdot \gamma / c, \quad (11)$$

$$b = \frac{c}{\omega} \left[\left(\frac{\omega}{c} \right)^2 - \left(\gamma^2 + \frac{\omega^2}{c^2} \right) - \gamma^2 \right]^{1/2}, \quad (12)$$

其中, γ 和 η 分别为 x 和 y 方向的波数 (或空间频数)。 $V(\gamma, \eta)$ 是不规则起伏地表的高度谱密度函数。如果已知 $V(\gamma, \eta)$, 根据公式 (6) ~ (12) 可以计算不规则地表的归一化等效表面阻抗 Δ_{eff} 。从上面公式可以看出, 为了分析不同地表土壤湿度下电参

数对电磁场的影响, 就要建立土壤湿度引起的土壤电参数 (土壤电导率 σ 和相对电容率 ε_r) 变化模型。

2.2 L-S 模型介绍

对于土壤的电参数 (σ 和 ε_r), 和土壤湿度有非常密切的关系 (Longmire and Smith, 1975; Delfino et al., 2009), 如下面的公式所示:

$$\varepsilon_r(f) = \varepsilon_\infty + \sum_{n=1}^N \frac{a_n}{1 + (f/f_n)^2}, \quad (13)$$

$$\sigma(f) = \sigma_\infty + \sum_{n=1}^N \frac{a_n f_n (f/f_n)^2}{1 + (f/f_n)^2}, \quad (14)$$

其中, $\varepsilon_\infty = 5$, $\sigma_\infty = 8 \times 10^{-3} (p/10)^{1.54}$ (单位: S m^{-1}), $f_n = (p/10)^{1.28} \cdot 10^{n-1}$ (单位: Hz), p 是体积百分含水量, 典型的取值范围在 2% 到 30% 之间, 低于 2% 的一般称之为岩石地质情况, 我国土壤体积百分含水量主要集中在 10% 到 25% 之间 (周文佐, 2003)。系数 a_n 的部分数据见表 1。

2.3 不规则起伏地表的模型介绍

对于实际的不规则地表既非完全周期的也非完全随机的, 在一定的标度之间, 一般的地形地貌都存在自相仿性或仿射性, 并具有分形的特点 (郭立新和吴振森, 2001), 因此本文采用随机分形函数——fractional Brown motion (fBm) 来模拟不规则地表。fBm 是一类具有分形特征的高斯随机函数, 其模拟是基于高度起伏相关函数所对应的功率谱采用 Monte Carlo 方法进行的。Monte Carlo 方法, 也称统计模拟方法, 是一种使用随机数 (或更常见的伪随机数) 来解决很多计算问题的方法。对于一个二维 fBm 分形粗糙面, 其高度谱密度 Falconer (1990) 为

$$V(\gamma, \eta) = V_0 (\gamma^2 + \eta^2)^{-a/2}, \quad (15)$$

其中, $V_0 = H^2 / 2\pi L$, $a = 8 - 2D$, D 是分形维数, L 是相关长度, H 是不规则高度平方根。对于 fBm 粗糙面, 其分维 $D = 3 - \alpha$ ($0 < \alpha < 1$), 它与粗糙面的粗糙程度有关, 粗糙度越大, 分形维数 D 也越大。岩土表面的分形维数 $2 < D < 2.5$ (Oh et al., 1992), 本文选取 $D = 2.3$ 。图 2 给出了利用 Monte Carlo 方法模拟的二维不规则地表, $D = 2.3$, $L =$

表 1 a_n 的取值表 (Gomes and Cooray, 2000)

Table 1 The value of coefficient a_n (Gomes and Cooray, 2000)

n	1	2	3	4	5	6	7
a_n	3.4×10^6	2.74×10^5	2.58×10^4	3.38×10^3	5.26×10^2	1.33×10^2	2.72×10^1
n	8	9	10	11	12	13	
a_n	1.25×10^1	4.8	2.17	0.98	0.392	0.173	

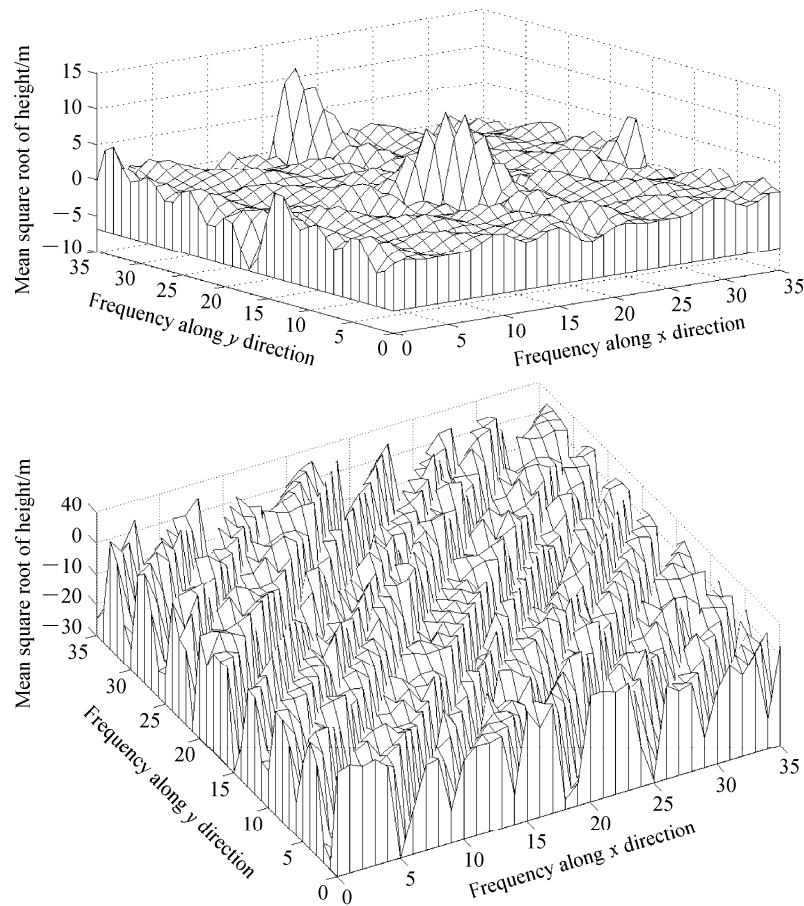


图2 利用 Monte Carlo 方法模拟的二维不规则地表: (a) $H=10$ m; (b) $H=40$ m

Fig. 2 Two-dimensional irregular terrains simulated using the method of Monte Carlo for mean square root of height (a) $H=10$ m and (b) $H=40$ m

150 m, $H=10$ m 和 40 m。

3 数值计算结果

3.1 雷电回击电流选取

本文假设回击通道为 $H=7.5$ km, 回击速度 $v=1.5 \times 10^8$ m s⁻¹, 回击击穿电流和电晕电流都采用双 Heilder (1985) 指数表达式计算:

$$i(0, t) = \frac{I_{01}}{\eta_1} \frac{(t/\tau_{11})^{\eta_1}}{[(t/\tau_{11})^{\eta_1} + 1]} e^{-t/\tau_{12}} + \frac{I_{02}}{\eta_2} \frac{(t/\tau_{21})^{\eta_2}}{[(t/\tau_{21})^{\eta_2} + 1]} e^{-t/\tau_{22}}, \quad (16)$$

$$\eta_1 = \exp \left[-\frac{\tau_{11}}{\tau_{12}} \cdot \left(n_1 \frac{\tau_{12}}{\tau_{11}} \right)^{1/\eta_1} \right], \quad (17)$$

$$\eta_2 = \exp \left[-\frac{\tau_{21}}{\tau_{22}} \cdot \left(n_2 \frac{\tau_{22}}{\tau_{21}} \right)^{1/\eta_2} \right], \quad (18)$$

其中, $i(0, t)$ 为回击通道底部电流, I_{01} 、 I_{02} 表示电流最大值, η_1 、 η_2 为修正因子, τ_{11} 、 τ_{12} 、 τ_{21} 、 τ_{22} 表示用来确定电流上升时间、衰减时间以及峰值的时间常量, n_1 、 n_2 为电流陡度因子。参数具体取值如表 2 所示, 电流波形如图 3 所示。

表 2 继后回击各参数的取值 (Caligaris et al., 2008)

Table 2 Parameters of the subsequent return strokes (Caligaris et al., 2008)

继后回击参数	I_{01}/kA	$\tau_{11}/\mu\text{s}$	$\tau_{21}/\mu\text{s}$	I_{02}/kA	$\tau_{12}/\mu\text{s}$	$\tau_{22}/\mu\text{s}$
继后回击参数取值	10.7	0.25	2.5	6.5	2	230

回击模型选取 MTLL (the modified transmission-line model with linear current decay with height) 模型, 即回击电流波形随高度线性衰减 (Rakov and Dulzon, 1991), 其表达式为

$$i(z', t - z'/v) = i(0, t)(1 - z'/H), \quad (19)$$

其中, $i(z', t - z'/v)$ 为回击电流沿回击通道的分布。

3.2 土壤湿度对不规则起伏地表雷电垂直电场的影响

图 4 给出了当土壤湿度不变(土壤体积百分含水量 $p=10\%$), 不同地表起伏程度以及不同水平观测距离对垂直电场的影响情况。可以看出, 地表不规

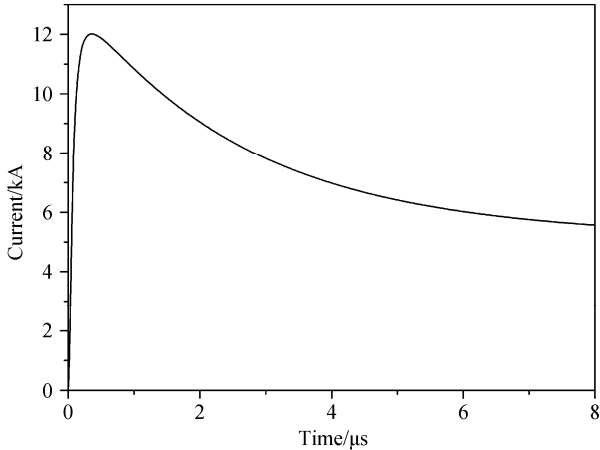


图 3 闪电通道底部采用的基电流波形

Fig. 3 The basic current waveform at the bottom of the lightning channel

则起伏对雷电回击产生的垂直电场的衰减作用主要表现在两个方面: 电场峰值的衰减和上升沿时间变慢。地表的不规则起伏越大, 垂直电场峰值的衰减越强烈, 上升沿时间越慢。这主要是因为随着地表不规则起伏的增大, 地表表面阻抗的增量也随之增大, 对垂直电场的衰减作用也就越强。当水平观测距离较近时, 地表的不规则起伏主要引起电场上升沿时间变慢, 对峰值的衰减不明显。随着观测距离的增加, 地表的不规则起伏对峰值的衰减逐渐增大, 且地表起伏程度越大, 峰值衰减越强烈。

为了进一步分析土壤湿度的变化对雷电垂直电场传输的影响, 这里分为两种情况: 一是假定地表光滑无起伏(也就是平坦地表), 二是假定地表不规则起伏。图 5 给出了当地表面光滑无起伏时, 水平观测距离 $r=1\text{ km}$ 和 $r=10\text{ km}$ 时, 土壤湿度的对雷电垂直电场的影响。可以看出, 当水平观测距离较近时, 土壤湿度对垂直电场的影响较小, 随着水平观测距离的增大, 影响越大。另外土壤湿度越大, 垂直电场的衰减反而逐渐减小。且土壤湿度对垂直

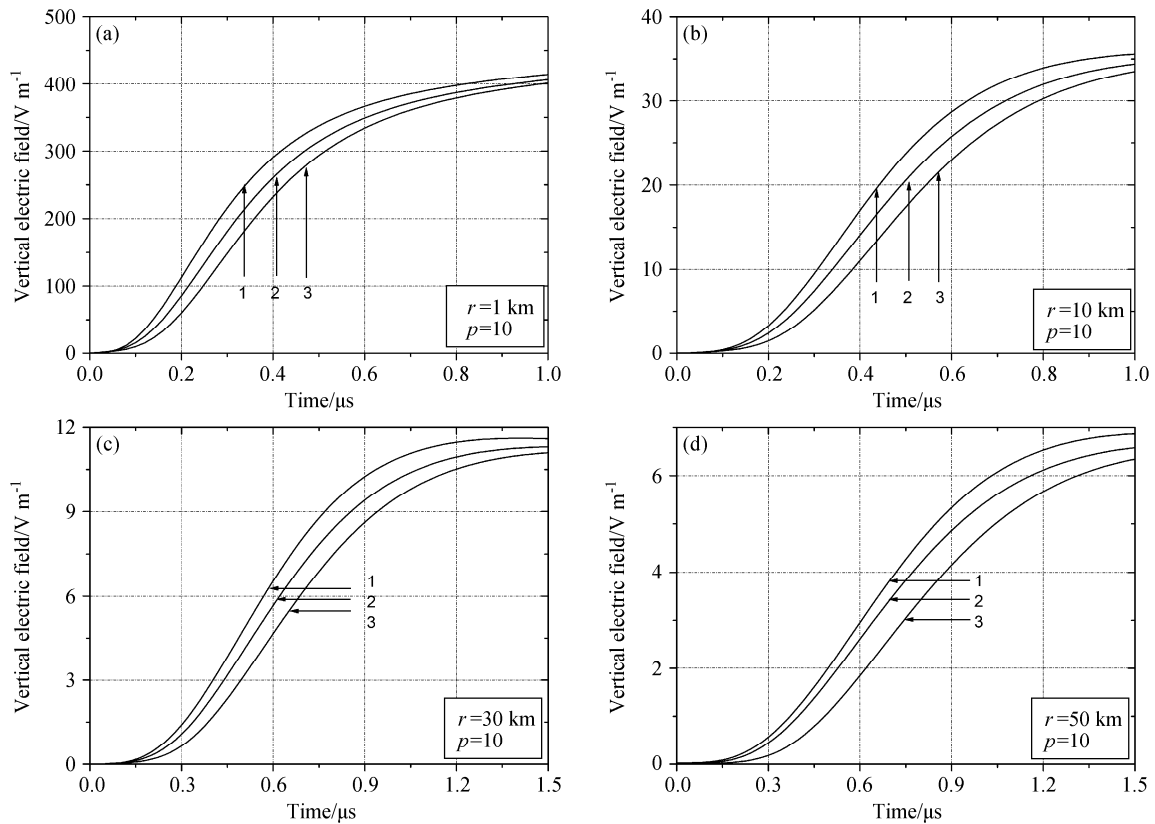


图 4 不规则地表对垂直电场的影响。曲线 1 对应于有限电导率的光滑地表, 曲线 2 和 3 对应于不同程度的不规则起伏地表(相关长度 $L=150\text{ m}$, 不规则均方高分别为 $H=10\text{ m}$ 和 $H=40\text{ m}$)

Fig. 4 The propagation effects of irregular terrain on the lightning vertical electric field. Curve 1 depicts the smooth and finitely conducting ground, curves 2 and 3 depict the rough ground with a mean square height of 10 m and 40 m, respectively (the correlation length $L=150\text{ m}$). r is the distance between the observation point and the bottom of return stroke channel. p is the percent of water content in soil

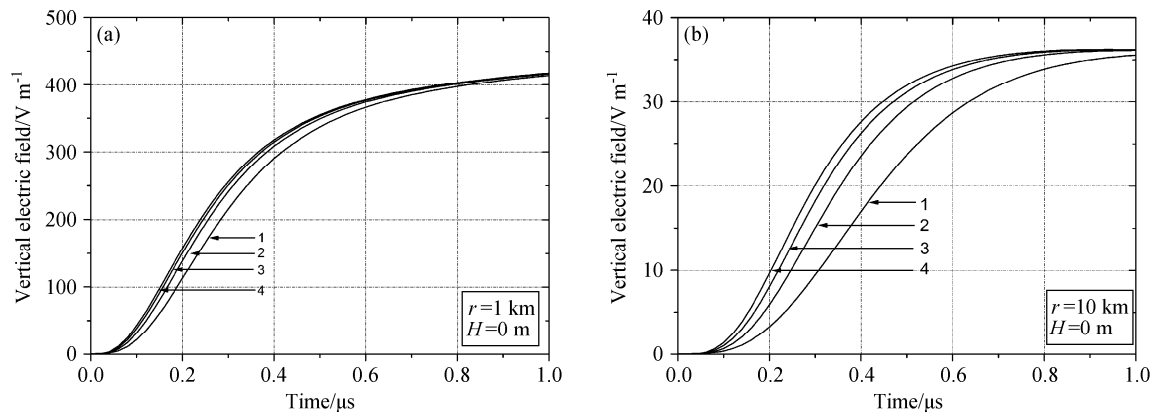


图5 光滑地表的土壤湿度对垂直电场的影响。曲线1、2、3、4分别对应于土壤体积百分含水量 $p=10\%$ 、 $p=20\%$ 、 $p=30\%$ 、 $p=40\%$ 的光滑地表

Fig. 5 The propagation effects of soil moisture on the lightning vertical electric field when the surface is smooth. Curves 1, 2, 3, and 4 depict the ground with $p=10\%$, $p=20\%$, $p=30\%$, and $p=40\%$ of water content

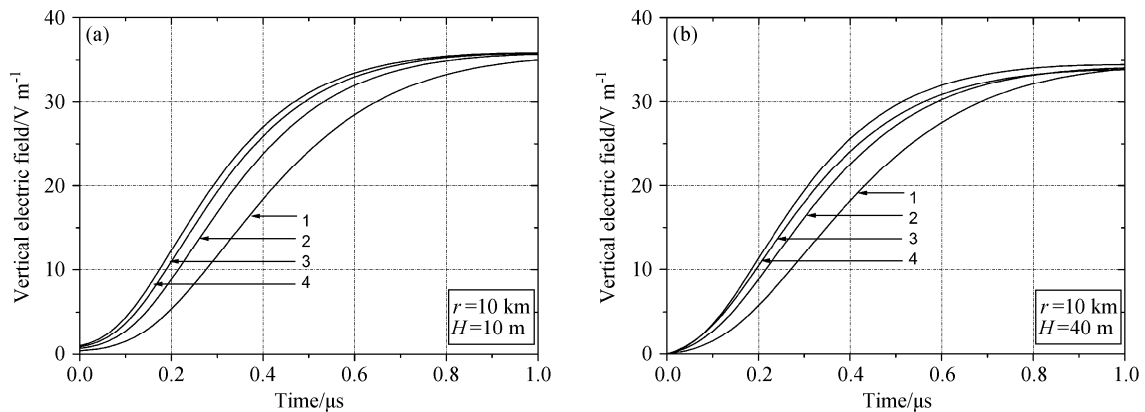


图6 同图5, 但为不规则地表的土壤湿度对垂直电场的影响

Fig. 6 As in Fig. 5, but for irregular surface

电场峰值的衰减不明显, 主要是对波头上升沿时间的影响。这是由于随着土壤湿度的增大, 大地电导率增大, 相对电容率减小, 地表的表面阻抗也就越小, 对垂直电场的衰减作用减弱。

雷电回击电磁场主要分为静电场、感应场、辐射场三个分量。对于本文来说, 当观测距离为 $r=1$ km 时雷电回击电磁场主要为静电场和感应场作用, 随着水平观测距离的增加, 当 $r=10$ km、 $r=30$ km、 $r=50$ km 时, 雷电回击电磁场主要转变为辐射场的作用。因此, 根据以上的分析结果可以得出, 地表的不规则起伏和土壤湿度对雷电回击电磁场的影响主要是对雷电回击辐射场的衰减作用。

图6给出了当地表面不规则起伏时, 水平观测距离 $r=10$ km 时 (雷电回击电磁场主要为辐射场), 土壤湿度对雷电垂直电场的影响。曲线1、2、3、4分别对应于土壤体积百分含水量 $p=10\%$ 、 $p=20\%$ 、

$p=30\%$ 、 $p=40\%$ 的起伏地表。可以看出, 当水平观测距离一定时, 无论地表面不规则起伏程度如何, 随着土壤湿度的增大, 垂直电场的衰减减小。总的来说, 地表的不规则起伏程度和土壤湿度都会对雷电垂直电场产生影响, 地表的不规则起伏会同时引起垂直电场峰值的衰减和上升沿时间变慢, 而土壤湿度主要是对垂直电场波头上升沿时间产生影响。当地表的不规则起伏程度增大以及土壤湿度减小时, 垂直电场的峰值衰减越强烈, 波头上升沿时间变慢。

4 结论

本文分析了不规则起伏地表的土壤湿度对地闪回击垂直电场传输的影响。结果表明: 地表的不规则起伏和土壤湿度都会对雷电垂直电场产生影响, 地表的不规则起伏程度主要会引起垂直电场峰值的衰减和上升沿时间变慢, 而土壤湿度主要是对垂直

电场波头上升沿时间产生影响。随着地表不规则起伏程度的增大, 垂直电场峰值衰减越明显, 且波形上升沿时间越慢。另外无论地表面不规则起伏程度如何, 随着土壤湿度的增大, 垂直电场的衰减减小。总的来说, 当地表的不规则程度增大以及土壤湿度减小时, 垂直电场的峰值衰减越强烈, 波头上升沿时间变慢。

我国地域广阔, 不同地区的地形千差万别, 土壤湿度差异性也很大。并且雷电的发生常伴有复杂的天气状况, 这对同一地区的土壤湿度又有很大的影响。目前, 闪电定位系统就是利用探测到的地闪电磁场波形参量来进行地闪定位和放电参数的反演, 回击垂直电场波形上升沿时间变慢引起到达时间法(TOA)闪电定位技术的误差, 因此在利用 TOA 进行闪电定位计算时, 每两个测站间测量到的雷电回击电磁场的到达时间差, 应考虑剔除因土壤湿度和地表起伏引起的上升沿时间的误差。另外在对雷电流强度进行反演时, 应考虑电场峰值衰减引起的误差。

参考文献 (References)

- Barrick D E. 1971a. Theory of HF and VHF propagation across the rough sea, 1, the effective surface impedance for a slightly rough highly conducting medium at grazing incidence [J]. *Radio Sci.*, 6 (5): 517–526, doi:10.1029/RS006i005p00517.
- Barrick D E. 1971b. Theory of HF and VHF propagation across the rough sea, 2, application to HF and VHF propagation above the sea [J]. *Radio Sci.*, 6 (5): 527–533, doi:10.1029/RS006i005p00527.
- Caligaris C, Delfino F, Procopio R. 2008. Cooray–Rubinstein formula for the evaluation of lightning radial electric fields: Derivation and implementation in the time domain [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 50 (1): 194–197, doi:10.1109/TEM.2007.913226.
- Cooray V. 2008. On the accuracy of several approximate theories used in quantifying the propagation effects on lightning generated electromagnetic fields [J]. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 56 (7): 1960–1967, doi:10.1109/TAP.2008.924680.
- Cooray V. 2009. Propagation effects due to finitely conducting ground on lightning-generated magnetic fields evaluated using Sommerfeld's integrals [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 51 (3): 526–531, doi:10.1109/TEM.2009.2019759.
- Cooray V, De la Rosa F. 1986. Shapes and amplitudes of the initial peaks of lightning-induced voltage in power lines over finitely conducting earth: Theory and comparison with experiment [J]. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 34 (1): 88–92, doi:10.1109/TAP.1986.1143721.
- Cooray V, Ming Y. 1994. Propagation effects on the lightning-generated electromagnetic fields for homogeneous and mixed sea–land paths [J]. *J. Geophys. Res.*, 99 (D5): 10641–10652, doi:10.1029/93JD03277.
- Cooray V, Fernando M, Sørensen T, et al. 2000. Propagation of lightning generated transient electromagnetic fields over finitely conducting ground [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62 (7): 583–600, doi:10.1016/S1364-6826(00)00008-0.
- Delfino F, Procopio R, Rossi M. 2008a. Lightning return stroke current radiation in presence of a conducting ground. I: Theory and numerical evaluation of the electromagnetic fields [J]. *J. Geophys. Res.*, 113 (D5): D05110, doi:10.1029/2007JD008553.
- Delfino F, Procopio R, Rossi M, et al. 2008b. Lightning return stroke current radiation in presence of a conducting ground. II: Validity assessment of simplified approaches [J]. *J. Geophys. Res.*, 113 (D5): D05111, doi:10.1029/2007JD008567.
- Delfino F, Procopio R, Rossi M, et al. 2009. Influence of frequency-dependent soil electrical parameters on the evaluation of lightning electromagnetic fields in air and underground [J]. *J. Geophys. Res.*, 114 (D11): D11113, doi:10.1029/2008JD011127.
- Falconer K J. 1990. *Fractal Geometry: Mathematical Foundation and Application* [M]. New York: Wiley, 231–246.
- Fuller B D, Ward S H. 1970. Linear system description of the electrical parameters of rocks [J]. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 8 (1): 7–18, doi:10.1109/TGE.1970.271447.
- Gomes C, Cooray V. 2000. Concepts of lightning return stroke models [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 42 (1): 82–96, doi:10.1109/15.831708.
- 郭立新, 吴振森. 2001. fBm 随机粗糙面电磁散射的微扰法近似 [J]. *微波学报*, 17 (2): 60–66. Guo Lixin, Wu Zhensen. 2001. Electromagnetic scattering from fBm rough surface using perturbation method [J]. *Journal of Microwaves (in Chinese)*, 17 (2): 60–66, doi:10.3969/j.issn.1005-6122.2001.02.010.
- Heilder F. 1985. Traveling current source model for LEMP calculation [C]// *Proceedings of the 6th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Switzerland: Zurich, 157–162.
- 黎勋, 鄒秀书, 王宇, 等. 2016. 基于高时间分辨率快电场变化资料的北京地区地闪回击统计特征 [J]. *气候与环境研究*. Li Xun, Qie Xiushu, Wang Yu, et al. 2016. Characteristics of cloud-to-ground lightning return strokes in Beijing based on high time resolution data of fast electric field change [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, in press, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16007.
- Longmire C L, Smith K S. 1975. *A Universal Impedance for Soils* [M]. Washington D C: Defense Nuclear Agency, 24.
- Master M J, Uman M A. 1984. Lightning induced voltages on power lines: Theory [J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-103 (9): 2502–2518, doi:10.1109/TPAS.1984.318405.
- Oh Y, Sarabandi K, Ulaby F T. 1992. An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 30 (2): 370–381, doi:10.1109/36.134086.
- 鄒秀书, 郭昌明, 张广庶. 1988. 闪电辐射场的宽带频谱测量及地闪首次回击放电参数的估算 [J]. *高原气象*, 7 (4): 312–320. Qie Xiushu, Guo Changming, Zhang Guangshu. 1988. The measurements of amplitude spectral distribution of lightning radiation field and the estimation of first return stroke parameters [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 7 (4): 312–320.

- Chinese), 7 (4): 312–320.
- 鄢秀书, 郭昌明, 张翠华, 等. 1998. 地闪回击的微秒级辐射场特征及近地面连接过程分析 [J]. 高原气象, 17 (1): 44–54. Qie Xiushu, Guo Changming, Zhang Cuihua, et al. 1998. Radiation electric field of return stroke and attachment process near the ground [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 17 (1): 44–54.
- Qie X S, Zhao Y, Zhang Q L, et al. 2009. Characteristics of triggered lightning during Shandong artificial triggering lightning experiment (SHATLE) [J]. Atmospheric Research, 91 (2–4): 310–315, doi:10.1016/j.atmosres.2008.08.007.
- Rakov V A, Dulzon A A. 1991. A modified transmission line model for lightning return stroke field calculations [C]// Proceedings of the 9th international symposium on Electromagnetic Compatibility. Switzerland: Zurich, 229–235.
- Rubinstein M. 1996. An approximate formula for the calculation of the horizontal electric field from lightning at close, intermediate, and long range [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 38 (3): 531–535, doi:10.1109/15.536087.
- Scott J H. 1966. Electrical and Magnetic Properties of Rock and Soil [M]. Washington D C: US Geological Survey, 36.
- Shoory A, Mimouni A, Rachidi F, et al. 2010. Validity of simplified approaches for the evaluation of lightning electromagnetic fields above a horizontally stratified ground [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 52 (3): 657–663, doi:10.1109/TEM.2010.2045229.
- Shoory A, Fachidi F, Delfino F, et al. 2011. Lightning electromagnetic radiation over a stratified conducting ground. II: Validity of simplified approaches [J]. J. Geophys. Res., 116 (D11115), doi:10.1029/2010JD015078.
- Thottappillil R, Rakov V A, Uman M A. 1997. Distribution of charge along the lightning channel: Relation to remote electric and magnetic fields and to return-stroke models [J]. J. Geophys. Res., 102 (D6): 6987–7006, doi:10.1029/96JD03344.
- Thottappillil R, Rakov V A. 2001. On different approaches to calculating lightning electric fields [J]. J. Geophys. Res., 106 (D13): 14191–14205, doi:10.1029/2001JD900150.
- Wait J R. 1956. Transient fields of a vertical dipole over a homogeneous curved ground [J]. Canadian Journal of Physics, 34 (1): 27–35, doi:10.1139/p56-004.
- Wait J R. 1974. Recent analytical investigations of electromagnetic ground wave propagation over inhomogeneous earth models [J]. Proceedings of the IEEE, 62 (8): 1061–1072, doi:10.1109/PROC.1974.9570.
- Wait J R. 1998. The ancient and modern history of EM ground-wave propagation [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 40 (5): 7–24, doi:10.1109/74.735961.
- Yang J, Qie X S, Zhang G S, et al. 2008. Magnetic field measuring system and current retrieval in artificially triggering lightning experiment [J]. Radio Sci., 43 (2), doi:10.1029/2007RS003753.
- Yang J, Qie X S, Zhang G S, et al. 2010. Characteristics of channel base currents and close magnetic fields in triggered flashes in SHATLE [J]. J. Geophys. Res., 115 (D23), doi:10.1029/2010JD014420.
- 张其林, 鄢秀书, 王怀斌. 2003. 高原雷暴地闪回击辐射场特征分析 [J]. 中国电机工程学报, 23 (9): 94–98. Zhang Qilin, Qie Xiushu, Wang Huaibin. 2003. Characteristics of the radiation fields from return strokes in plateau thunderstorms [J]. Proceedings of the CSEE (in Chinese), 23 (9): 94–98, doi:10.3321/j.issn:0258-8013.2003.09.019.
- Zhang Q L, Qie X S, Wang Z H, et al. 2009. Simultaneous observation on electric field changes at 60 m and 550 m from altitude-triggered lightning flashes [J]. Radio Sci., 44 (1): RS1011, doi:10.1029/2008RS003866.
- Zhang Q L, Liu X D, Yang J, et al. 2011a. The characteristics and simulation of close leader/return stroke field change waveforms [J]. Radio Sci., 46 (1): RS1017, doi:10.1029/2010RS004469.
- Zhang Q L, Yang J, Liu M Y, et al. 2011b. Measurements and simulation of the M-component current and simultaneous electromagnetic fields at 60 m and 550 m [J]. Atmospheric Research, 99 (3–4): 537–545, doi:10.1016/j.atmosres.2010.12.011.
- 周文佐. 2003. 基于 GIS 的我国主要土壤类型土壤有效含水量研究 [D]. 南京农业大学硕士学位论文, 43–49. Zhou Wenzuo. 2003. A study on available water capacity of main soil types in China based on geographic information system [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing Agricultural University, 43–49, doi:10.7666/d.Y605126.