

云雾山和叠叠沟草坡土壤电阻率和含水率空间差异*

段旭¹ 李根前¹ 李莲芳¹ 李贤忠¹ 王彦辉²

(1. 西南林业大学林学院, 昆明 650224; 2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091)

摘要: 为了解不同土质坡面土壤含水率的空间分布差异, 选择固原黄土区云雾山和石质山区叠叠沟为研究区域, 采用多电极电阻仪法, 在长约 400 m 的坡面上设置纵向样线, 多点同步连续测定了土壤含水率和电阻率。结果表明: 黄土区云雾山土壤电阻率和含水率的相关性较好 ($R^2 = 0.78$), 说明通过测定坡面电阻率推求土壤含水率的坡面变化是可行的。云雾山土壤电阻率沿坡面表现为由坡上至坡中逐渐增大, 到坡下部又逐渐减小; 而固原石质山区叠叠沟坡面从坡上到坡下电阻率逐渐减小。土壤干层特征方面, 云雾山草坡在 1~3 m 土层出现轻度干层, 3~4 m 出现中度干层, 6~17 m 出现重度干层; 叠叠沟坡面在 3 m 土层才出现轻度干层, 在 6 m 以及更深层处出现重度干层。

关键词: 黄土高原 坡面 电阻率 含水率 空间差异

中图分类号: S271; P641.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)03-0097-07

Spatial Differences of Soil Resistivity and Water Moisture on Grass Slopes between Diedie and Yunwu Mountains

Duan Xu¹ Li Genqian¹ Li Lianfang¹ Li Xianzhong¹ Wang Yanhui²

(1. College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

2. Research Institute of Forestry Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: With the aim to understand the spatial distribution of soil moisture along slopes, the method of multi-electrode electrical resistivity tomography was used on two 400 m length grass slopes of Diedie and Yunwu Mountains as study area. Both the two longitudinal transect lines were set up to detect the soil resistivity and water moisture by more points simultaneously and continuously. Results showed that there was a good statistical correlation between soil resistivity and moisture content on Yunwu Mountain ($R^2 = 0.78$), and this suggested that it was feasible to determine the spatial variation of soil moisture through measuring spatial distribution of soil resistivity on slope. On Yunwu Mountain, the soil electrical resistivity gradually increased from the top slope to the mid slope, and then decreased to the bottom. While, on Diedie Mountain, it decreased from the top slope to bottom gradually; the light, mild and severe dry layers occurred in 1~3 m, 3~4 m and 6~17 m soil layers on Yunwu Mountain respectively; While, on Diedie Mountain, the light and severe dry layers occurred in 3 m, 6 m and below 6 m soil layers respectively.

Key words: Loess Plateau Slope Resistivity Moisture content Spatial variation

引言

在黄土高原等干旱地区, 土壤含水率是影响植被结构与功能的关键, 对整个生态系统的稳定起着决定性作用^[1]。坡面是水分运动的基本空间单元,

具有独特的土壤含水率分布规律, 其不均匀分布导致了坡面植被的种类、生长速度、径流产生等生态水文过程与特性的空间差异。因此, 深入了解不同土质区坡面土壤含水率空间变异规律, 有助于更好地理解坡面生态水文等过程^[2-3]。

国内外已有很多坡面土壤含水率空间变异及影响因素的研究^[4-7],尤其在黄土高原。但这些研究的取样都是点状离散测定,如采用探针式TDR^[8]测定微地形影响下的坡面土壤含水率变化,用多点长序列观测小流域内的土壤含水率时空变化^[9-10]。这些研究仅在一定程度上探明土壤含水率的空间变异。土壤干层是黄土高原造林种草后过度消耗土壤水分而形成的一种特殊现象,目前对土壤干层的厚度和程度随植被类型、气候特征、坡向等变化规律已有一些研究^[11-16];现有的黄土高原土壤干层调查深度一般限于10 m以内,更深的土层水分取样则存在技术障碍。如何连续测定土壤水分的坡面分布,及不同土壤特性下土壤含水率空间变化差异一直受到相关研究的技术限制。

多电极电阻仪(ERT)可在一定程度上实现土壤水分空间连续变化的监测^[17-21],其工作原理是在地面测量地下电阻率的空间分布,而地下电阻率与地质、土壤、水分等参数相关,因此在其他条件一致时可反映土壤含水率的变化或地下组成物质(土壤、岩石)的不同。

黄土高原的坡面地形多样,土壤水分变化非常复杂,本文在固原云雾山和石质区草坡叠叠沟地区,沿坡面设置纵向样线,按一定间距用多电极电阻仪测定土壤电阻率的空间变化,在换算土壤含水率与电阻率的关系之后,探究坡面土壤水分的空间分布差异。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区域位于宁夏固原市黄土区的云雾山自然保护区和石质山区的叠叠沟小流域,云雾山保护对象为长芒草原及其生态系统,具体位置在固原市区东北部,介于东经106°24'~106°28',北纬36°13'~36°19',海拔高度1 800~2 100 m,坡度集中在10°~20°;土壤类型主要是黑垆土和山地灰褐土;年均气温6~7℃,年均降水量400~450 mm,7~9月份降水量占全年的65%~75%,10℃以上积温为2 100~3 200℃,干燥度1.5~2.0 g/cm³,属半干旱气候区。植被属于典型草原,建群种为本氏针茅(*Stipabungeana*)和大针茅(*Stipa grandis*),主要伴生种为铁杆蒿(*Artemisia sacrocum*)、百里香(*Thymus mongolicus*)等^[22-24]。

叠叠沟小流域介于东经106°09'~106°30',北纬35°15'~35°41',海拔高度2 000~2 500 m,坡度主要集中在10°~20°;土壤类型主要是亚高山草甸土、灰褐土、新积土、红土(第三纪红土)、潮土和粗

骨土等,其中灰褐土分布最广,为典型的土石山区,年均气温5.8℃,年均降水量380~650 mm,属半干旱类型,年干旱频率38%,多年平均潜在蒸发量为1 420 mm。全年总辐射为534.2 kJ/(cm²·a),年日照时数2 518.1 h,太阳能资源较丰富。植被生长有本氏针茅(*Stipa bungeana* Trin)和白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)群落、细叶苔草(*Carex stenophylla*)和铁杆蒿(*Artemisa vestia*)群落等。

1.2 典型坡面特征

为了避开偶然降水事件的影响,突出黄土区和石质山区草坡的土壤含水率空间分布差异,本文选择2010年5月初在云雾山和叠叠沟草坡开展测定。分别选择了东南和东北坡向的草坡,斜坡全长400 m左右,云雾山东南坡面整体坡度为20°,坡顶和坡底的海拔高度分别为2 100 m和1 900 m,划分为坡上、坡中、坡下3段,坡上和坡下部均较为平缓(坡度为15°),坡中部较陡(坡度为25°);在叠叠沟实验区选择东北坡向,坡面坡度为30°,坡顶处海拔高度2 100 m,坡底海拔高度1 990 m,设置了从坡顶到坡下的一条纵向样线,划分为坡上、坡中、坡下3段,进行土壤电阻率和含水率的测定和标定实验。

1.3 实验方法

本研究测定土壤电阻率所用多电极电阻仪为SYSCAL Kid Switch-24型(IRIS instruments公司),采用初级转换电阻率成像系统(Syscal junior switch system),包括24个电极和2条多接口的缆线。电极设置沿横截面排列,通过滚动前进可调查几百米的横截面。两电极的间隔距离可在0.5~5 m之间选择,这将导致不同的空间分辨率和绘图的不同透深。在实际应用中,二维成像测量最常用的阵列有Wenner、Pole-Pole、Dipole-Dipole、Wenner-Schlumberger、Pole-Dipole等阵列方式。本实验中,采用比较稳定的Wenner-Schlumberger阵列,其优点是能很好地反映电阻率的垂直变化,对横向结构和纵向结构均有较适中的灵敏度,有较好的横向数据覆盖范围,从而可以连续测定土壤电阻率的空间变化。

在2010年5月3~6日调查期间的测定内容:①长坡面测定:土壤电阻率和含水率关系的加密测定,分别设置了从坡顶到坡下的一条纵向样线,从坡顶开始,在纵向线路上每隔5 m间距插入一个电极,测定土壤电阻率,每次测定布设24个电极测点,则每次测定长度为120 m。②分别在纵向坡面中部利用土钻多点取土测定土壤含水率,同时对应测定电阻率,以标定二者的关系。具体测定时,在坡面上按0.25 m间隔用土钻取土,取样深度分别为0.15、

0.35、0.65、0.95、1.30 m;与之对应,按0.25 m的间距布设了24根电极,进行电阻率测定。

1.4 数据处理方法

实验数据处理采用EXCEL, 2D Electrical Resistivity Tomography (ERT) 分析软件进行描述性统计、多元回归、方差分析以及 t 检验。

2 结果与分析

2.1 云雾山东南坡面纵向样线上土壤电阻率

土壤电阻率(单位: $\Omega \cdot m$)具有坡位变化(表1),虽然在不同土层深度坡位差别趋势基本相同,但可能因受很多因素影响而存在深度差别,在1.25 m土深处,从大到小依次为坡中、坡下、坡上;在3.88 m土深处,从大到小依次为坡中、坡上、坡下;在6.76 m土深处,从大到小依次为坡下、坡中、坡上;在9.94 m土深处,从大到小依次为坡中、坡上、坡下;在13.4 m土深处,从大到小依次为坡中、坡上、坡下;在17.3 m土深处,从大到小依次为坡中、坡下、坡上。然而,在对整个东南坡面各坡段测定的土壤电阻率(表1)取平均值后,各坡位的土壤电阻率差异就很明显,表现为在较平坦的坡上部,因水分流失较少和土壤含水率较高,土壤电阻率较低,整个1.25~17.3 m土层的电阻率平均为308.5 $\Omega \cdot m$;在较陡的坡中部,因土壤水分易流失和土壤含水率较低,整个土层的土壤电阻率平

均值升到360.4 $\Omega \cdot m$;在坡度变缓的坡下部,因水分流失较少并能汇集上坡径流导致了土壤含水率有所增加,整个土层的电阻率平均值又降到318.8 $\Omega \cdot m$,与坡上部相差不大,说明坡位差异对于土壤电阻率影响很大。

土壤电阻率表现出明显的随土壤深度变化。在坡上部,土壤深度为1.25、3.88、6.76、9.94、13.40、17.30 m时的电阻率平均值依次是136.9、257.3、275.1、370.9、464.8、345.7 $\Omega \cdot m$;在坡中部,对应电阻率分别是226.4、265.8、276.1、410.7、466.1、557.4 $\Omega \cdot m$;在坡下部,对应电阻率分别是168.3、235.1、316.8、363.8、393.5、434.9 $\Omega \cdot m$ 。由此看出,在测定时间的土壤电阻率基本上是随土壤加深而增大的。但不同坡位的深度增加速率有差别,如在深度1.25~3.88 m的范围内,坡上部增幅较大,为121.66 $\Omega \cdot m$,坡中部最小;在3.88~6.76 m深度范围内,坡下部增幅较大(81.73 $\Omega \cdot m$),坡上中部最小;在6.76~9.94 m深度范围内,坡中部增幅较大(121.66 $\Omega \cdot m$),坡下处最小;在9.94~13.40 m深度范围内,坡上部增幅较大(93.88 $\Omega \cdot m$),坡中部最小;在13.40~17.30 m深度范围内,坡中部增幅较大(91.29 $\Omega \cdot m$),坡下处最小。第1层电阻率稍低些,这与其土壤含水率高有关;深层的电阻率随土壤深度增大的增幅较大,中间各层电阻率随深度的变化速率都较稳定。

表1 云雾山东南坡面样线上土壤电阻率随坡位和深度的变化

Tab.1 Variation of soil resistivity with depth at different positions for the longitudinal transects on the SE grass-slope of Yunwu Mountain

深度/m	坡上				坡中				坡下				平均			
	平均值	最大值	最小值	标准差	平均值	最大值	最小值	标准差	平均值	最大值	最小值	标准差	平均值	最大值	最小值	标准差
1.25	136.9	279.5	92.98	47.24	226.4	989.7	126.8	179.1	168.3	302.9	99.59	52.41	177.2	989.7	92.98	74.68
3.88	257.3	909.9	70.62	186.9	265.8	398.6	133.7	58.05	235.1	417.3	69.63	77.49	239.4	909.9	69.63	69.50
6.76	275.1	593.9	29.27	153.4	276.1	375.3	123.5	64.90	316.8	611.1	109.6	119.6	289.3	611.1	29.27	44.68
9.94	370.9	586.6	134.6	120.3	410.7	595.3	272.3	92.71	363.8	550.9	159.2	114.3	381.8	595.3	134.6	14.53
13.4	464.8	739.9	259.6	152.6	466.1	682.1	263.3	112.2	393.5	714.5	14.33	208.2	441.5	739.9	14.33	48.19
17.3	345.7	648.8	24.17	224.5	557.4	879.0	242.0	247.7	434.9	571.9	147.5	150.3	446.0	879.0	24.17	50.88
整层	308.5	909.9	24.17	145.0	360.4	989.7	123.5	94.09	318.8	714.5	14.33	93.62	273.4	909.9	14.33	29.54

2.2 云雾山土壤电阻率与含水率的关系

基于在典型坡面上同步多点观测的土壤体积含水率和土壤电阻率数据,标定得到二者的统计关系为

$$Y = 39.596e^{-0.0075x} \quad (R^2 = 0.78) \quad (1)$$

如图1所示,二者呈紧密的负相关,即土壤体积含水率随土壤电阻率增大而减小,在观测范围内基本呈线性关系,说明通过测定坡面电阻率推算土壤含水率的坡面变化是可行的。在周启友^[17]、Brunet P^[19]等的研究中,通过土壤电阻率推算土壤含水率

都得到了较好结果。

此外,考虑到土壤电阻率的变化同时受到土壤深度、含水率、总孔隙度、土壤容重的影响,从而继续建立了它们之间的统计关系(F 值为50.202, $P < 0.01$,标准偏差为13.37,标准误差为8.06)为

$$Y = 170.576 + 0.111X_1 - 0.6023X_2 + 0.275X_3 + 38.385X_4 \quad (R^2 = 0.86) \quad (2)$$

式中 X_1 ——土壤深度 X_2 ——含水率
 X_3 ——总孔隙度 X_4 ——土壤容重

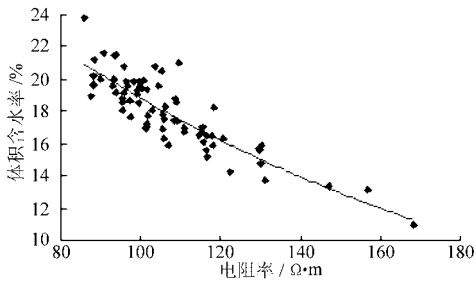


图1 云雾山坡面电阻率与体积含水率的关系

Fig.1 Relationship between volumetric soil water content and soil resistivity on the slope of Yunwu Mountain

2.3 云雾山东南坡面纵向样线上土壤含水率变化

利用式(1)将土壤电阻率换算成土壤含水率之后,比较土壤含水率的空间差异,呈现出坡中部较低(9.65%)、坡上和坡下较高(12.91%和11.62%),此外,坡面土壤含水率随土层深度加深而逐渐减小:在1.25 m深度处,含水率变化范围为7.29%~14.2%;在3.88 m深度处,对应为5.78%~7.32%;在6.76 m深度处,对应为3.68%~5.06%;在9.94 m深度处,对应为1.84%~2.59%;在13.4 m深度处,对应为1.21%~2.07%;在17.3 m深度处,对应为1.61%~2.52%。

基于加密测定的土壤电阻率深度分布数据,得到了土壤体积含水率与土层深度的统计关系为

$$X_2 = 12.014e^{-0.1523X_1} \quad (R^2 = 0.92) \quad (3)$$

图2是东南草坡上不同测段的土壤电阻率随土层加深而增大的情况。以坡下部为例,在1.25、3.88、6.76、9.94、13.40、17.30 m的深度,电阻率平均值依次是168.33、235.10、316.83、363.81、393.55、434.9 $\Omega \cdot m$,换算成各深度的体积含水率依次为11.20%、6.79%、5.67%、4.60%、3.10%、2.52%;第1层土壤含水率最高,以下各层迅速降低

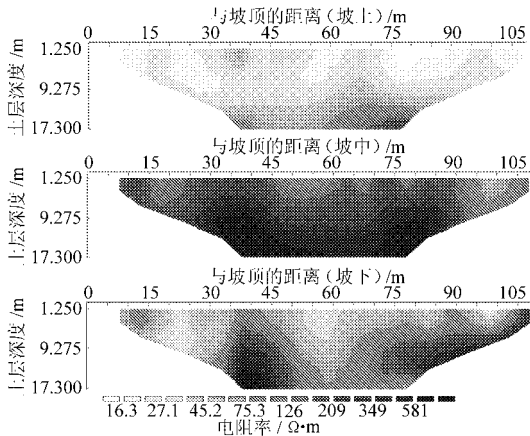


图2 云雾山东南草坡纵向样线上土壤电阻率空间分布

Fig.2 Spatial distribution of soil resistivity along the southeast longitudinal transects grass-slope of

Yunwu Mountain

到很低的程度;这个土壤含水率的深度分布与黄土高原(南部半湿润高原沟壑区的长武、中部半干旱丘陵沟壑区的固原、北部半干旱偏旱丘陵区的海原)的干土层研究结果较为一致^[13-14],按黄土高原子午岭林区的土壤干层划分标准^[15](土壤含水率8%~10%为轻度干化,6%~8%为中度,0~6%为严重干化),则本研究坡面在1~3 m深度出现轻度干层,3~4 m深度出现中度干层,6~17 m出现重度干层。

2.4 固原叠叠沟草坡纵向样线上土壤电阻率变化

对整个坡面各坡段电阻率(表2)求平均值可知,坡上含水率较小,电阻率较大,为412.26 $\Omega \cdot m$;到坡中处电阻率减小为377.94 $\Omega \cdot m$ (表2),到坡底处含水率又有所增加,电阻率为331.52 $\Omega \cdot m$;这可能是随坡位下移土壤含水率增高所致,一方面坡面径流使得坡底部汇聚了更多水分,在坡上到坡下植被较为一致的情况下,坡上部地形也有利于接受太阳辐射而植被耗水,使此坡段土壤含水率较低;然后到坡中处坡度渐陡,使得坡中部电阻率减小,到坡下水分汇聚导致土壤含水率较高;此外,坡面坡度较大,使坡面保水作用变弱。

土壤电阻率随坡面(坡位)的变化,从坡顶到坡底的土壤电阻率连续变化在1.25 m土层处,从大到小依次为坡下、坡中、坡上;在3.88 m土层处,从大到小依次为坡中、坡上、坡下;在6.76 m处,从大到小依次为坡中、坡上、坡下;在9.94 m处,从大到小依次为坡上、坡中、坡下;在13.4 m处,从大到小依次为坡上、坡中、坡下;在17.3 m处,从大到小依次为坡中、坡上、坡下。

在坡上部,土壤深度为1.25、3.88、6.76、9.94、13.40、17.30 m时的电阻率平均值依次是172.5、264.1、335.2、537.5、594.9、569.3 $\Omega \cdot m$;在坡中部,对应电阻率分别是182.1、279.9、339.9、412.7、482.9、569.9 $\Omega \cdot m$;在坡下部,对应电阻率分别是187.1、247.3、291.2、357.2、396.5、509.7 $\Omega \cdot m$ 。由此看出,在测定时间内,土壤电阻率基本上是随土壤深度加大而增加。但不同坡位的深度增加速度有差别,例如在深度1.25~3.88 m范围内,坡中部增幅较大,为97.8 $\Omega \cdot m$,坡下处最小;在3.88~6.76 m深度范围内,坡上部增幅较大(71.1 $\Omega \cdot m$),坡下处最小;在6.76~9.94 m深度范围内,坡上部增幅较大(202.3 $\Omega \cdot m$),坡下处最小;在9.94~13.40 m深度范围内,坡中部增幅较大(70.2 $\Omega \cdot m$),坡下处最小;在13.40~17.30 m深度范围内,坡下部增幅较大(113.2 $\Omega \cdot m$),坡上处最小。

表2 叠叠沟东北坡面样线上土壤电阻率随坡位和深度的变化

Tab.2 Variation of soil resistivity with depth at different positions for the longitudinal transects on the NE grass-slope of Diedie Mountain $\Omega \cdot m$

深度/m	坡上				坡中				坡下				平均			
	平均值	最大值	最小值	标准差	平均值	最大值	最小值	标准差	平均值	最大值	最小值	标准差	平均值	最大值	最小值	标准差
1.25	172.5	347.7	115.5	53.77	182.1	663.8	88.64	117.1	187.1	357.8	92.27	68.08	180.6	663.8	88.64	33.23
3.88	264.1	657.5	8.49	174.3	279.9	654.5	183.8	110.9	247.3	488.3	56.78	109.7	263.8	657.5	8.49	36.95
6.76	335.2	591.3	107.1	141.9	339.9	796.4	145.6	142.5	291.2	386.8	15.5	103.0	322.1	796.4	15.5	22.63
9.94	537.5	871.7	342.5	167.3	412.7	525.1	310.3	73.57	357.2	604.7	167.8	105.8	435.8	871.7	167.8	47.63
13.4	594.9	907.8	402.7	153.2	482.9	664.9	326.7	107.8	396.5	796.9	114.6	209.4	491.5	907.8	114.6	50.93
17.3	569.3	778.9	323.6	185.1	569.9	775.8	380.6	141.8	509.7	683.2	149.4	190.4	549.6	778.9	149.4	26.67
整层	412.3	907.8	8.49	158.1	377.9	796.4	88.64	119.6	331.5	796.9	15.5	93.56	373.9	907.8	8.49	32.47

2.5 叠叠沟土壤含水率与电阻率关系标定

基于典型坡面上多点对应加密测定的土壤电阻率和体积含水率,在土层深度0.15、0.35、0.65、0.95、1.30 m进行标定校正,得到土壤体积含水率与土壤电阻率二者的统计关系为

$$X_2 = -9.1987 \ln r + 61.021 \quad (R^2 = 0.52) \quad (4)$$

如式(4)所示,土壤电阻率与体积含水率呈一定的反比关系,随着体积含水率的增大,电阻率逐渐减小,且检验达极显著水平。把随土壤深度而增大的容重(孔隙度)变化的影响考虑进去,从而建立含水率(X_2)、总孔隙度(X_3)、容重(X_4)、石砾含量(X_5)共同影响电阻率的统计关系为

$$Y = -357.97 + 0.20X_1 - 2.75X_2 + 2.60X_3 + 284.01X_4 + 7.84X_5 \quad (R^2 = 0.69) \quad (5)$$

F值为10.64,样本数为75, $P < 0.01$,标准偏差为16.65,标准误差为18.26。

2.6 叠叠沟坡面纵向样线上土壤含水率变化

利用式(4)将测定的土壤电阻率换算成土壤含水率之后,比较土壤含水率的空间差异,呈现为坡上部到坡下逐渐增大,土壤含水率随深度加深而逐渐减小:在1.25 m深度处,含水率范围为9.77%~10.89%;在3.88 m深度处,对应为4.88%~6.23%;在6.76 m深度处,对应为3.12%~4.49%;在9.94 m深度处,对应为1.71%~2.74%;在13.4 m深度处,对应为1.46%~2.04%;在17.3 m深度处,对应为1.56%~2.88%。将土壤电阻率换算成土壤含水率以后,得到土壤含水率随深度加深逐渐减小的结果,其变化范围为1.46%~10.89%。

从整个坡面各坡位电阻率的变化来看,电阻率从坡上到坡中减小,到坡下处为最小;土壤含水率则是从坡上到坡中逐渐增大,到坡下增至最大,这可能是从坡上到坡下顺着坡面水分汇集作用(导致含水量升高)的结果。将土壤电阻率换算成土壤含水率以后,得到土壤含水率随深度加深逐渐减小的结果,

随着坡位差异含水率变化范围为1.56%~10.15%。

从图3看出电阻率具有随深度加深而增大的趋势;以坡中为例,在1.25、3.88、6.76、9.94、13.40、17.30 m的深度,电阻率平均值依次是182.1、279.9、339.9、412.7、482.9、569.9 $\Omega \cdot m$,依据式(4)换算为各深度的土壤体积含水率分别为10.15%、4.88%、3.12%、3.81%、2.07%、1.56%;第1层电阻率稍低些,可能与其土壤含水率高有关;其中以最深层的电阻率增幅最大,中间各层电阻率随深度的变化速率都较稳定。这与黄土高原的干土层研究结果较为一致^[13-14],即3 m土层出现轻度干层(9%~11%),但当土层深度到6 m以及再深层处即开始出现重度干层(0~7%)。叠叠沟土层的含水率是较低的,小于云雾山地区。

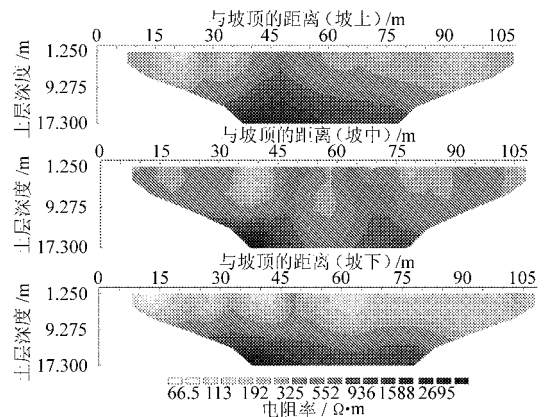


图3 叠叠沟东北草坡纵向样线上土壤电阻率空间分布
Fig.3 Spatial distribution of soil resistivity along the northeast longitudinal transects grass-slope of Diedie Mountain

3 讨论

通过对固原云雾山土壤体积含水率和土壤电阻率进行标定校正,得到统计结果,表明土壤电阻率与体积含水率呈现一定的反比关系;其中以云雾山实

验结果较好,相关系数较高。说明多电极电阻仪法是开展土壤含水率空间连续分布非破坏性研究的一个较适合的技术手段。

对黄土区云雾山典型坡面连续测定坡面土壤水分和电阻率得到,土壤含水率坡上部较高,是由于坡度较缓而利于水分滞留;到坡中部减小,主要由于坡中部坡度较大,致使水分流失;在坡下部又有所回升,主要是因为坡面汇流使得坡下部得到的水分输入较高;而叠叠沟土壤含水率则从坡上到坡下逐步增大;在云雾山草坡样线上,土壤含水率和孔隙度随着深度增加而逐渐减小,指数函数拟合分别为 $X_2 = 12.014e^{-0.1523X_1}$, $R^2 = 0.92$,最深层变化幅度较大,中间各层变化较为稳定。

电阻率受很多土壤特征影响,如总孔隙度、体积含水率、石砾体积、容重等土壤物理特性和温度及根系含量等,综合利用野外实际测定的电阻率和土壤特征数据,通过对坡面电阻率与多项相关土壤特征进行逐步回归分析,得到土壤电阻率与土壤总孔隙度和土壤体积含水率相关最紧密,尤其与体积含水率相关较好^[25];而不同土质类型坡面,其中,固原叠叠沟坡面更多受到土壤石砾的影响,云雾山草坡相对较为均匀;且不同土质类型坡面电阻率大小为云雾山相应值小于叠叠沟,含水率大小为云雾山相应值大于叠叠沟。

在黄土干层上,云雾山草坡土壤含水率的深度分布与黄土高原的干土层研究结果较为一致^[13-15],即在1~3 m土层出现轻度干层,3~4 m深度出现

中度干层,6~17 m出现重度干层,且深层的电阻率随土壤深度的增幅较大,在叠叠沟坡面,则在3 m土层才出现轻度干层,在6 m以及更深层处出现重度干层;叠叠沟山地土层较薄,属于草地石质坡面,土壤含水率与石砾等有较大关系,通过对不同土质坡面土壤电阻率和含水率的分析可以加深对六盘山地区土壤干化程度的了解。

4 结束语

通过对固原云雾山土壤体积含水率和电阻率测定结果,说明利用多电极电阻仪法是开展土壤含水率空间连续分布非破坏性研究的一个较适合的技术手段。

沿坡面对土壤电阻率连续测定得到,云雾山从坡上至坡下呈现先增大后减小的趋势;而叠叠沟从坡上到坡下则呈现逐渐减小的趋势,且坡面电阻率大小为云雾山相应值小于叠叠沟;在土壤干层特征方面,云雾山草坡分别在1~3 m、3~4 m、6~17 m土层深度出现轻度、中度、重度干层;而叠叠沟坡面在3 m土层才出现轻度干层,在6 m以及更深层处出现重度干层。

通过对坡面电阻率与多项土壤特征影响因素进行逐步回归分析,得到土壤电阻率与土壤总孔隙度和土壤体积含水率相关最紧密,尤其与体积含水率相关较好;而不同土质类型坡面中,固原叠叠沟坡面更多受到土壤石砾的影响,云雾山草坡则相对较为均匀。

参 考 文 献

- 傅伯杰,王军,马克明. 黄土丘陵区土地利用对土壤水分的影响[J]. 中国科学基金,1999(4):225~227.
- 熊亚兰,魏朝富. 坡面土壤水分特性的空间变异及其水库贮量[J]. 水土保持学报,2005,19(1):136~139.
Xiong Yalan, Wei Chaofu. Spatial variability of soil water properties and its volumetric capacity in hill slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(1):136~139. (in Chinese)
- 周慧珍,龚子同. 土壤空间变异性研究[J]. 土壤学报,1996,33(3):232~241.
Zhou Huizhen, Gong Zitong. Study on soil spatial variability[J]. Acta Pedologica Sinica, 1996, 33(3):232~241. (in Chinese)
- 黄奕龙,陈利顶,傅伯杰,等. 黄土丘陵小流域地形和土地利用对土壤水分时空格局的影响[J]. 第四纪研究,2003,23(3):334~342.
Huang Yilong, Chen Liding, Fu Bojie, et al. The influence of topography land use on soil moisture spatial-temporal pattern in the hilly area of Loess plateau[J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(3):334~342. (in Chinese)
- 何福红,黄明斌,党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域土壤水分空间分布特征[J]. 水土保持通报,2002,22(4):6~9.
He Fuhong, Huang Mingbin, Dang Tinghui. Gully region of loess plateau watershed characteristics of the spatial distribution of soil moisture[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002, 22(4):6~9. (in Chinese)
- 潘成忠,上官周平. 黄土半干旱丘陵区陡坡地土壤水分空间变异性研究[J]. 农业工程学报,2003,11(19):5~9.
Pan Chengzhong, Shanguan Zhouping. Spatial variability of soil moisture on steep slopeland in loess hill region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 11(19):5~9. (in Chinese)
- 邱扬,傅伯杰,王军,等. 黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性及其影响因子[J]. 应用生态学报,2001,12(5):715~720.
Qiu Yang, Fu Bojie, Wang Jun, et al. Spatial heterogeneity of soil moisture content on the Loess Plateau, China and its relation to influencing factors[J]. Journal of Applied Ecology, 2001, 12(5):715~720. (in Chinese)

- 8 赵荟, 朱清科, 秦伟, 等. 黄土高原干旱阳坡微地形土壤水分特征研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(3):64~68.
Zhao Hui, Zhu Qingke, Qin Wei, et al. Soil moisture characteristics on microrelief of dry south-slope on the Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(3):64~68. (in Chinese)
- 9 赵传燕, 冯兆东, 南忠仁. 黄土高原西部土壤水分时空变化模拟研究——以安家坡流域为例[J]. 冰川冻土, 2007, 29(5):785~794.
Zhao Chuanyan, Feng Zhaodong, Nan Zhongren. GIS-assisted modeling spatial and temporal variations of soil water content in Anjiapo catchment of the Western Loess Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(5):785~794. (in Chinese)
- 10 Bi H X, Li X Y, Liu X, et al. A case study of spatial heterogeneity of soil moisture in the Loess Plateau, Western China: a geostatistical approach[J]. International Journal of Sediment Research, 2009, 24(1):63~73.
- 11 方新宇, 李军, 王学春, 等. 黄土高原半湿润区苜蓿草地土壤干燥化与草粮轮作水分恢复效应[J]. 中国农业科学, 2010, 16(11):3348~3356.
Fang Xinyu, Li Jun, Wang Xuechun, et al. Soil Desiccation of *Alfalfa* fields and effects of *Alfalfa*-grain crop rotation on soil water restoration of desiccated *Alfalfa* fields in semi-humid areas of the Loess Plateau[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 16(11):3348~3356. (in Chinese)
- 12 李巍, 郝明德, 王学春. 黄土高原沟壑区不同种植系统土壤水分消耗和恢复[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3):99~105.
Li Wei, Hao Mingde, Wang Xuechun. Depletion and restoration of soil water in different cultivating systems in gully region of Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(3):99~105. (in Chinese)
- 13 万素梅, 贾志宽, 韩清芳, 等. 黄土高原半湿润区苜蓿草地土壤干层形成及水分恢复[J]. 生态学报, 2008, 28(3):1045~1051.
Wan Sumei, Jia Zhikuan, Han Qingfang, et al. Dry soil layer forming and soil moisture restoration of *alfalfa* grassland in the semi-humid region of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3):1045~1051. (in Chinese)
- 14 李军, 陈兵, 李小芳, 等. 黄土高原不同干旱类型区苜蓿草地深层土壤干燥化效应[J]. 生态学报, 2007, 27(1):75~89.
Li Jun, Chen Bing, Li Xiaofang, et al. Effects of deep soil desiccations on *alfalfa* grasslands in different rainfall areas of the Loess Plateau of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(1):75~89. (in Chinese)
- 15 何福红, 黄明斌, 党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域土壤干层的分布特征[J]. 自然资源学报, 2003, 18(1):30~36.
He Fuhong, Huang Mingbin, Dang Tinghui. Distribution characteristic of dried soil layer in Wangdonggou watershed in gully region of the Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(1):30~36. (in Chinese)
- 16 王力, 邵明安, 王全九, 等. 黄土高原子午岭天然林与刺槐人工林地土壤干化状况对比[J]. 西北植物学报, 2005, 25(7):1279~1286.
Wang Li, Shao Ming'an, Wang Quanjiu, et al. Comparison of soil desiccations in natural and *Acacia* forests in the Ziuling Mountain of the Loess Plateau[J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2005, 25(7):1279~1286. (in Chinese)
- 17 周启友, 岛田纯. 土壤水空间分布结构的时间稳定性[J]. 土壤学报, 2003, 40(5):683~690.
Zhou Qiyu, Jun Shimada. Spatial distribution of soil water stability of the structure of the time[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(5):683~690. (in Chinese)
- 18 Stefan U, Kristof K, Jochen W, et al. Joint interpretation of hydrological and geophysical data: electrical resistivity tomography results from a process hydrological research site in the Black Forest Mountains, Germany[J]. Hydrological Processes, 2009, 23:1501~1513.
- 19 Brunet P, Clement R, Bouvier C. Monitoring soil water content and deficit using electrical resistivity tomography (ERT): a case study in the Cevennes area, France[J]. Journal of Hydrology, 2010, 380:146~153.
- 20 刘松玉, 查普生, 余小军. 土的电阻率室内测试技术研究[J]. 工程地质学报, 2006, 14(2):216~222.
Liu Songyu, Zha Pusheng, Yu Xiaojun. Laboratory measurement techniques of the electrical resistivity of soils [J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(2):216~222. (in Chinese)
- 21 Archie G E. The electric resistivity log as aid in determining some reservoir characteristics[J]. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 1942, 146:54~61.
- 22 胡相明, 赵艳云, 程积民, 等. 云雾山自然保护区环境因素对土壤水分空间分布的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(7):2964~2971.
Hu Xiangming, Zhao Yanyun, Cheng Jimin, et al. Impacts of environmental factors on spatial distribution of soil moisture of grassland in Yunwu Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7):2964~2971. (in Chinese)
- 23 胡相明, 赵艳云, 程积民, 等. 云雾山天然草地物种分布与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2008, 28(7):3102~3107.
Hu Xiangming, Zhao Yanyun, Cheng Jimin, et al. The relationship between species distribution pattern and environment factors in grassland of the Yunwu Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7):3102~3107. (in Chinese)
- 24 王丽学. 云雾山天然草地群落结构特征研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2008.
Wang Lixue. Study on community structure characteristics of Yunwu Mountain[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008. (in Chinese)
- 25 段旭, 王彦辉, 徐丽宏, 等. 六盘山香水河小流域典型坡面的土壤电阻率空间变异[J]. 土壤学报, 2011, 48(5):912~921.
Duan Xu, Wang Yanhui, Xu Lihong, et al. Spatial variation of soil electric resistivity of a typical slope in the Xiangshuihe watershed of Liupan Mountains, Northwest China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(5):912~921. (in Chinese)