

# 六盘山香水河小流域典型坡面的土壤电阻率空间变异\*

段旭<sup>1</sup> 王彦辉<sup>1†</sup> 徐丽宏<sup>1</sup> 丁德友<sup>2</sup> 熊伟<sup>1</sup> 于澎涛<sup>1</sup>

(1 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091)

(2 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054)

**摘要** 为了解坡面土壤水文特征的空间分布, 采用多电极电阻仪法(ERT), 于2009年5月初在宁夏六盘山香水河小流域一个长约600 m的华北落叶松人工林典型坡面上, 设置了从坡顶至坡底的1条纵向样线及处于不同坡位的水平分布的3条横向样线, 多点测定了多层土壤的电阻率值并分析其空间变异特征。结果表明, 土壤电阻率在纵向样线上总体有较好的空间连续性及一定的空间变异性, 随着坡位下降, 电阻率呈现出由坡上至坡中上逐渐减小和然后又恢复性增大的过程。由于局部特殊的土壤特征、地貌及植被分布差异, 使土壤电阻率沿坡面纵向变异程度大于不同坡位的横向变异程度。在土层垂直方向上, 由于石砾含量和岩石比例随深度逐渐增多, 电阻率表现为随深度增加逐渐增大。电阻率与土壤总孔隙度和体积含水率相关最紧密, 尤其与体积含水率相关较好, 说明通过测定坡面电阻率推求土壤水分等土壤特性的坡面变化是可行的。

**关键词** 坡面; 电阻率; 空间变异; 华北落叶松林; 六盘山

中图分类号 S156 文献标识码 A

土壤水分作为影响干旱地区森林生态系统结构与功能的关键因子, 对整个生态系统的水热平衡及其稳定性起着决定作用<sup>[1-3]</sup>。坡面是水分运动的基本空间单元, 土壤水分在坡面上具有独特的分布规律, 其不均匀分布导致了坡面上植被种类、生长速度、产流数量等生态水文过程与特性的空间差异性<sup>[4-6]</sup>。因此, 深入了解土壤水分的坡面变异将有助于更好地理解坡面生态水文过程和生物地球化学过程等<sup>[7]</sup>。

坡面土壤水分空间变异及影响因素的研究已有很多<sup>[8-11]</sup>。例如, 傅伯杰等<sup>[12]</sup>在黄土区研究发现, 单一土地利用结构下土壤水分具有从坡顶至坡脚增大的趋势; 而在土地利用结构复杂时, 土壤水分坡面分布也变得复杂。何福红等<sup>[13]</sup>研究认为, 各土层含水量均有随坡度增加而减少的趋势, 土壤水分入渗补给深度随坡度加大而变浅。张建辉等<sup>[14]</sup>在四川丘陵区的坡面上测定了土壤湿度空间变异, 表现为纵坡方向上没有明显变异, 但横坡方向上空间变异明显; 地形和土壤特性联合控制着表层土壤水分变异。土地利用方式和地形(坡度、坡位和坡向等)是土壤水分空间变异的重要影响因子, 微地貌也有显著控制作用<sup>[15-17]</sup>。

坡面土壤水分变化具有空间连续性, 但限于技术手段, 现有研究多是离散取样测定, 不能反映坡面土壤水分的真实变化。如何连续测定坡面土壤水分分布, 一直是坡面土壤水分研究的技术难题。某些测定方法仅能保障“点”土壤水分的时间连续, 而对于反映空间变异的“面”上土壤水分连续测定则无能为力。多电极电阻仪法(ERT, Electrical resistivity tomography)<sup>[18-20]</sup>可在一定程度上解决这个难题, 其主要工作原理是在地面测量地下电阻率的空间分布, 已在水文、探矿、地质研究中应用了几十年。地下物质的电阻率与地质、土壤、水分等参数相关, 如岩石类型、土壤粒度、土壤孔隙度、水分含量、土壤溶液浓度等, 因此在其他条件一致时可反映土壤含水量变化或地下组成物质(土壤、岩石)的不同, 近来更多地用于环境水文学研究。但是, 坡面

\* 国家自然科学基金项目(40730631、40801017、41071023)、林业公益性行业科研专项(200904056、200904005)、中国林科院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目课题(CAFYBB2010001-02)、德国DFG项目(SCHW 1448/3-1)、国家林业局六盘山森林定位站和森林生态环境重点实验室联合资助

† 通讯作者: 王彦辉(1957-), 男, 河北安平人, 研究员, 从事森林生态水文等研究。E-mail: wangyh@caf.ac.cn  
作者简介: 段旭(1983-), 女, 河南洛阳人, 博士研究生, 从事森林水文研究。E-mail: feixue20012360@163.com  
收稿日期: 2010-04-29; 收到修改稿日期: 2010-07-15

电阻率变化除受土壤水分影响以外，还受到土壤厚度、根系、石砾含量等诸多因素的共同影响，所以电阻率只能在一定程度上反映土壤水分的空间变化。Koch等<sup>[18]</sup>曾将此方法应用于德国黑森林地区的山坡水文过程研究；Brunet等<sup>[19]</sup>用电阻仪监测了法国南部地中海地区砂土的土壤水分亏缺并分析了相关影响因子；周启友等<sup>[20]</sup>曾用多电极电阻仪测定日本筑波大学陆域环境研究中心试验场内不同时间土壤水的空间分布特征及时间稳定性；这些研究为通过测定坡面电阻率推求土壤水分等土壤特性的坡面变化提供了可能。

本文在因干旱缺水而使林水关系矛盾突出的宁夏六盘山区，选择生长华北落叶松人工林的典型坡面，设置沿坡面的纵向样线和水平分布的横向样线，按照一定间距用多电极电阻仪测定土壤电阻率的空间变化，为进一步探究坡面土壤水分的空间变化规律奠定基础，促进该地区的坡面生态水文研究和小流域林水综合管理。

## 1 材料与方方法

### 1.1 研究区概况

研究区域为宁夏六盘山自然保护区南段的香水河小流域，位于泾源县城西北部，介于东经106°12′10.6″~106°16′30.5″，北纬35°27′22.5″~35°33′29.7″，全流域面积43.74 km<sup>2</sup>，海拔2 140~2 598 m，坡度主要集中在20°~50°；土壤类型主要是森林灰褐土，石砾含量较高，为典型的石质山地，母岩为石灰页岩和红色沙岩；该地年均气温5℃，月均气温7月份为16.4℃，1月份为-7.5℃；年均降水量770.7 mm，全年蒸发量1 214~1 426 mm。该小流域位于六盘山重要水源涵养林区，森林覆盖率较高（约72.9%），主要是天然次生林和华北落叶松等人工林。

### 1.2 典型坡面及其植被特征

在小流域上游的分水岭沟内，选择了一个东南坡向的典型坡面，其上生长着24~25年生的华北落叶松林人工林，平均树高12.4 m，平均胸径15 cm，林下灌丛盖度平均约30%，草本盖度平均27.5%。该坡面坡度为35°；坡顶处海拔高度2 596 m，坡底海拔高度2 296 m，坡面斜坡全长600 m左右，划分为坡上、中上、坡中、中下、坡下5段；坡面剖面如图1所示。

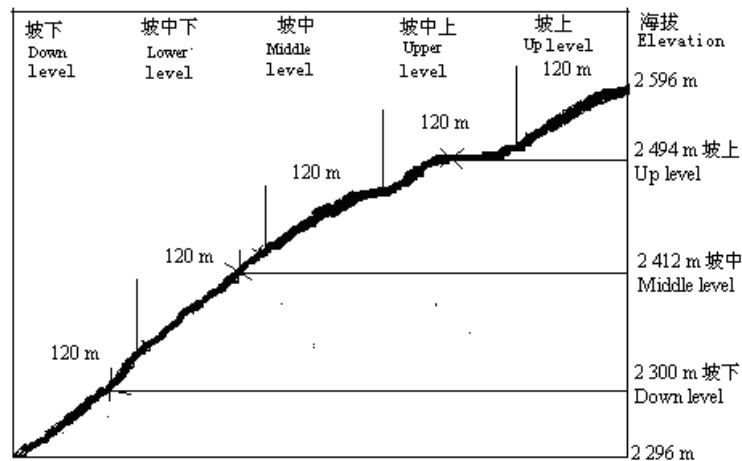


图1 六盘山香水河华北落叶松林典型坡面剖面图

Fig.1 Profile of a typical slope covered by larch plantation in the Xiangshuihe watershed of Liupan Mountains

该坡面坡顶处、坡上部、坡中上部的坡度均较为平缓，至坡中处以后坡度开始渐陡。坡顶树木稀疏，但灌丛生长茂密；在其以下的坡位皆生长着华北落叶松人工林，从坡上部至坡中部林分较为密闭，坡中部林分变稀导致灌木较多，坡中部至坡下部的林分郁闭度又开始较高。不同坡位的立地环境和林分郁闭度及林木生长等情况见表1。

表1 香水河小流域典型坡面不同坡位的立地和植被特征

Table 1 Vegetations and sites condition at different slope positions of the studied slope in Xiangshuihe watershed

坡位		坡上	坡中上	坡中	坡中下	坡下
Slope position		Up	Upper	Middle	Lower	Down
		level	level	level	level	level
立地条件 Site condition	海拔Elevation(m)	2 494	2 453	2 412	2 357	2 300
	坡度Slope gradient(°)	32	33	35	35	32
	坡向Slope aspect	SE	SE	SE	SE	SE
林木生长特 征 Forest growth characteristics	土壤厚度Thickness of soil (m)	120	130	100	120	130
	优势树种Dominant tree species	华北落叶松 <i>Larix principis-rupprechtii</i>				
	郁闭度 Canopy density	0.55	0.7	0.6	0.65	0.75
	密度Forest density(plants hm <sup>-2</sup> )	1 025	1 250	1 125	825	1 100
	平均胸径Average DBH (cm)	17.5	20.1	19.3	17.3	17.8
	平均树高Average height (m)	13.1	16.3	18.3	14.8	14.1
灌木层盖度 Shrub coverage (%)		31	30	35	26	30
草本层盖度 Herbage coverage (%)		35	30	40	20	35

### 1.3 试验方法

测定土壤电阻率所用的多电极电阻仪型号为SYSCAL KID SWITCH-24 (IRIS instruments公司, Avenue Buffon, B.P.6007-45060 Orleans Cedex2, France), 采用初级转换电阻率成像系统(Syscal Junior Switch System), 包括24个电极和两条多接口的缆线, 此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率和绘图的不同透深, 四个电极温纳(Wenner)与偶极—偶极(dipole-dipole)排列方法被用于二维的数据。在实际应用中, 二维成像测量最常用的阵列有温纳、电极—电极(pole-pole)、偶极—偶极、Wenner-Schlumberger、电极—偶极(pole-dipole)等阵列方式。本试验中, 采用比较稳定的温纳-Schlumberger阵列, 其优点是能很好反映电阻值的垂直变化, 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的空间变化。

在2009年5月份, 于典型坡面上设置了从坡顶到坡下的1条纵向样线, 同时在坡面的坡上、坡中、坡下3个不同坡位处布设了水平分布的3条横向样线。按照沿坡面纵线和等高横线的取样路线, 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。横向样线的测定长度为120 m, 纵向样线则为5个连续的120 m。为排除降水因素对坡面土壤水分及电阻率测定的影响, 选择降水稀少的5月初(1~6日)进行了纵向和横向样线的电阻率测定。同时, 为了减小乔木对电阻率测定的影响, 样线测点位置应尽量避免。

### 1.4 数据分析

实验数据处理采用EXCEL、SPSS、2D Electrical Resistivity Tomography(ERT) 分析软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤电阻率沿坡位的空间变异

表2是在整个坡面上依次在坡顶、坡中上、坡中、坡中下、坡下等不同坡位测段的各土层电阻率平均值与变化情况。为尽量减少深层石砾和岩石对土壤电阻率变化的影响, 首先分析50 cm深度内土壤电阻率的坡位变化(表2), 从坡上的70.09Ω m至坡中上增大为82.57Ω m, 至坡中处略微减小为54.48Ω m, 至坡中下增大为60.07Ω m, 坡下处为55.28Ω m; 然后分析上层土壤(2.70 m深度), 电阻率从坡上部和坡中上至坡中部变小, 从坡中部起随坡位下降又开始呈现增大的趋势, 各坡段测定的平均电阻率依次为150.6、166.3、114.7、142.6、130.4 Ω m; 在中层(3.98 m深度), 各坡位的电阻率从坡上至坡中呈逐渐减小趋势, 然后至坡中下和坡下呈增大趋势; 在下层(5.37 m深度), 电阻率平均值从坡上的194.0Ω m减小至坡中上的164.9Ω m, 然后至坡中处增大为208.2Ω m, 至坡中下处为221.1Ω m, 至坡下处为213.9Ω m; 在深层(6.91 m深度), 各坡位电阻率变化明显, 从坡上的244.2Ω m至坡中上减小为197.5Ω m, 至坡中增大为269.6Ω m, 中下处减小为249.7Ω m, 至坡下又增为357.4Ω m。

表 2 坡面纵向样线上土壤电阻率随坡位和深度的空间变化

Table 2 Spatial variation of soil electric resistivity with slope position and soil depth along the longitudinal transect line of the typical slope studied ( $\Omega$  m)

坡位 Slope position	描述统计 Statistics description	测点深度 Measure depth						整个剖面 Whole profile
		0.5 m	1.55 m	2.7 m	3.98 m	5.37 m	6.91 m	
坡上 Up level	平均值 Mean	70.09	110.5	150.6	185.1	193.9	244.1	178.6
	最大值 Max.	166.7	154.9	267.5	273.0	258.3	359.3	359.3
	最小值 Min.	41.07	46.33	97.44	141.6	113.0	183.4	41.07
	标准差 Sd.	24.23	25.89	46.03	35.89	42.57	65.80	65.02
坡中上 Upper level	平均值 Mean	82.57	104.1	166.3	161.6	164.9	197.4	151.7
	最大值 Max.	567.7	165.7	377.0	276.9	339.5	446.4	567.7
	最小值 Min.	4.19	22.05	57.51	83.78	10.65	106.3	4.19
	标准差 Sd.	124.6	35.61	79.69	58.29	115.1	127.5	97.78
坡中 Middle level	平均值 Mean	54.48	94.39	114.7	146.1	208.2	269.6	155.8
	最大值 Max.	158.7	131.5	214.0	210.4	397.3	493.7	493.7
	最小值 Min.	7.28	53.33	24.95	107.5	150.3	119.0	7.28
	标准差 Sd.	28.23	19.79	47.82	27.58	76.19	137.0	77.69
坡中下 Lower level	平均值 Mean	60.07	105.1	142.6	203.1	221.1	249.7	167.6
	最大值 Max.	78.65	125.7	174.6	236.7	252.5	345.4	345.4
	最小值 Min.	31.69	51.88	64.31	166.2	152.8	171.8	31.69
	标准差 Sd.	10.11	16.50	28.75	20.29	29.78	59.34	69.15
坡下 Down level	平均值 Mean	55.28	94.81	130.4	191.5	213.9	357.4	176.4
	最大值 Max.	84.47	164.5	216.2	281.8	296.6	770.6	770.6
	最小值 Min.	5.54	30.42	13.96	88.09	149.4	187.3	5.54
	标准差 Sd.	17.11	31.33	53.28	49.45	48.35	215.2	105.6
整个土层 Whole level	平均值 Mean	64.50	101.8	140.9	177.5	200.4	263.7	166.0
	最大值 Max.	567.7	165.7	377.0	281.8	397.3	770.6	770.6
	最小值 Min.	4.19	22.05	13.96	83.78	10.65	106.3	4.19
	标准差 Sd.	56.55	26.79	55.14	44.54	69.16	135.0	83.06

从整个坡面各坡位电阻率的变化来看；坡上为  $178.6\Omega$  m，至坡中上减小为  $151.7\Omega$  m，这可能是随坡位下移土壤含水量增高所致，一方面坡面径流使得坡中上和坡中部汇聚了更多水分，坡中上部的下凹地形也有利于水分积聚，使此坡段土壤含水量较高；至坡中处变大为  $155.8\Omega$  m，然后从坡中处开始向下，至坡中下增大为  $167.6\Omega$  m，至坡下增为  $176.4\Omega$  m；这可能与坡中下处和坡下的林木密度高、个体大从而耗水较多有关，可能是树木耗水作用超过坡面汇水作用，导致土壤含水量变低；此外，坡中部以下坡度较大，使坡面保水作用变弱。

## 2.2 土壤电阻率沿深度的空间变异

利用表 2 中各土层的电阻率平均值来描述坡面电阻率的深度变化（图 2），可以看出，电阻率具有随深度增加而增大的趋势；在 0.5、1.55、2.70、3.98、5.37、6.91 m 的深度，电阻率平均值依次为 64.50、101.8、140.9、177.5、200.4、263.7  $\Omega$  m。第一层电阻率稍低些，可能与其土壤含水量高有关；最深层的电阻率增幅最大，可能与石砾含量快速增大有关；中间各层电阻率随深度的变化速率均较稳定。

电阻率变化受到很多因素影响，诸如土壤水分、孔隙度、石砾含量、根系含量、微地形等；上层（0.5、1.55 m）可能主要受土壤水分、孔隙度、微地形、坡度以及根系含量等因素的影响；中层（2.70、3.98 m）和深层（5.37、6.91 m）则可能更多受到石砾含量的影响，因为土壤中层和深层的土壤水分和孔隙度变化较小，但岩石和石砾不断增多。由于测定时间为春季少雨期，土壤水分受植被蒸腾耗水的影响格外强烈，所以图 2 坡面电阻率的空间差异表现明显。个别测点的电阻值出现异常，可能与测点附近分布着树木或有较大石砾有关。

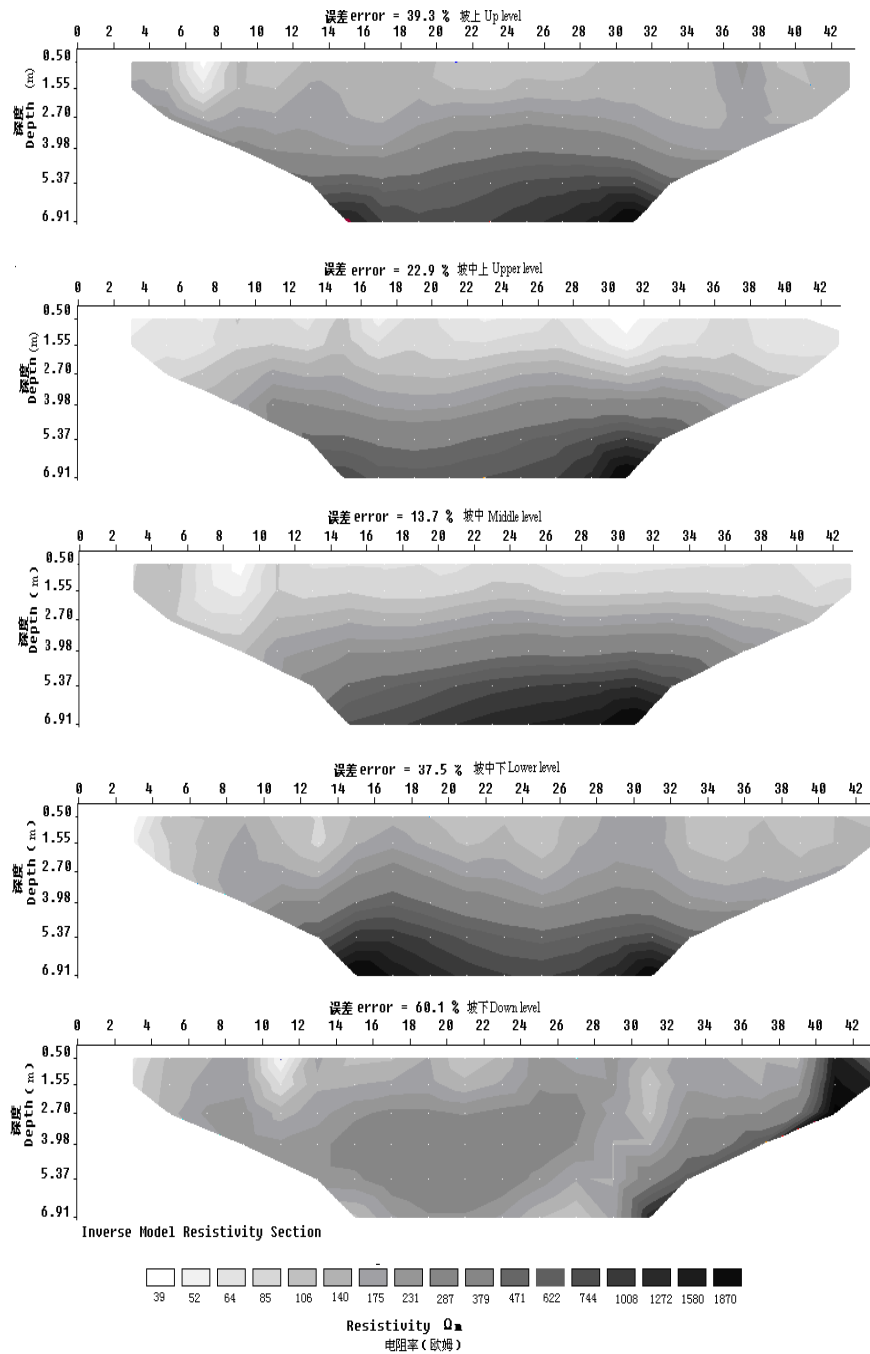


图2 坡面纵向样线上从坡顶至坡下的连续5段120 m测线的土壤电阻率深度分布

Fig.2 Distribution of soil resistivity with soil depth in a row of 5 sections, 120 m each, along the longitudinal transect line from slope top to slope foot

### 2.3 不同坡位横向样线的土壤电阻率差异

在典型坡面的坡上、坡中、坡下3个坡位处沿等高线水平设置的3条横向样线的电阻率差异见图3, 从其不同深度的电阻率均值变化(表3)可看出: 整个测定深度的平均电阻率从坡上(150.9 $\Omega \cdot m$ )至坡中(148.1 $\Omega \cdot m$ )基本没有变化, 但从坡中至坡下(166.6 $\Omega \cdot m$ )呈增大趋势。从表3中的标准差上可以看出, 不同坡位的电阻率空间分布很不均匀。

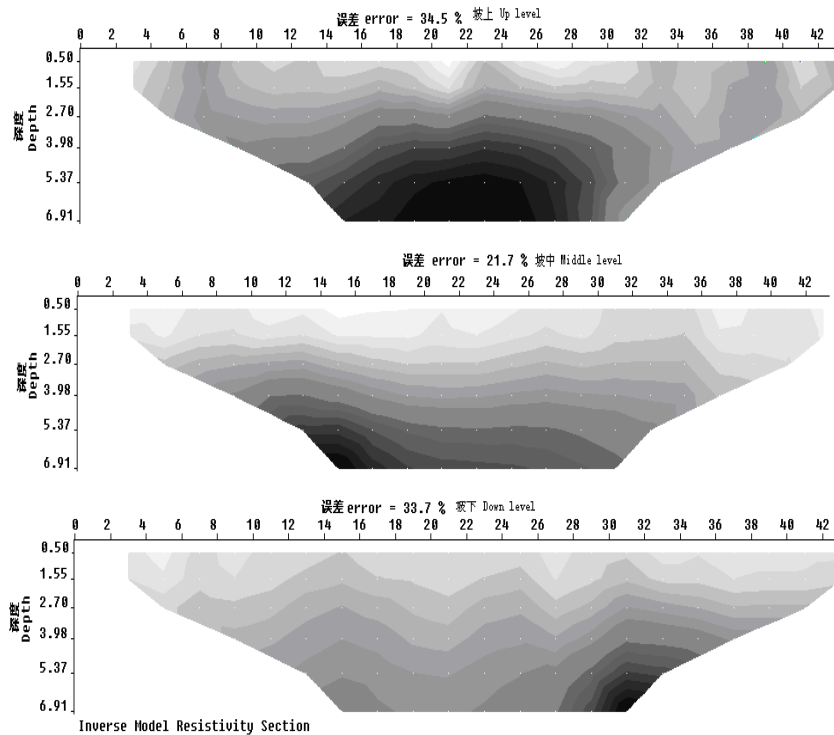
不同坡位样线处的电阻率表现出随深度增加而增大的趋势(图3), 以坡上为例, 从上层的66.18 $\Omega \cdot m$ 增大至深层的204.7 $\Omega \cdot m$ ; 在坡中和坡下样线, 对应数值分别为57.36、207.4 $\Omega \cdot m$ 和61.94、267.0 $\Omega \cdot m$ 。其中以从0.5 m至1.5 m深度的增幅较大, 说明坡面物质组成和土壤水分具有较大变

化，这与纵向坡面明显不同。依据电阻率的深度变化，可将坡面的物质组成划分为 0.5 m 以上、0.5~2.7 m、2.7~5.37 m 和 6.91 m 以下 4 个深度层次。

表 3 不同坡位横向样线上土壤电阻率的深度变化

Table 3 Variation of soil resistivity with soil depth along latitudinal transect lines at different slope positions ( $\Omega\text{m}$ )

坡位 Slope position	描述统计 Statistics description	测点深度 Measure depth						整个剖面 Whole profile
		0.5 m	1.55 m	2.7 m	3.98 m	5.37 m	6.91 m	
坡上 Up level	平均值 Mean	66.18	133.3	144.0	169.3	188.1	204.7	150.9
	最大值 Max.	133.9	455.0	207.4	251.3	332.2	290.5	455.0
	最小值 Min.	20.20	73.53	105.5	115.1	35.79	54.68	20.20
	标准差 Sd.	26.66	86.50	32.85	39.77	88.96	88.98	30.45
坡中 Middle level	平均值 Mean	57.36	98.50	144.0	198.8	191.8	207.4	148.1
	最大值 Max.	96.30	175.2	254.5	267.4	267.0	289.2	289.2
	最小值 Min.	41.22	50.94	93.68	129.2	136.1	103.6	41.22
	标准差 Sd.	12.60	26.55	36.84	39.93	55.94	63.30	18.63
坡下 Down level	平均值 Mean	61.94	114.0	144.9	178.7	233.5	267.0	166.7
	最大值 Max.	88.95	145.1	221.3	275.8	306.5	377.0	377.0
	最小值 Min.	38.11	77.79	81.18	19.81	94.98	146.8	19.81
	标准差 Sd.	11.96	18.15	37.10	74.98	74.18	73.86	29.63
整个土层 Whole level	平均值 Mean	61.83	115.3	144.3	182.3	204.5	226.3	155.8
	最大值 Max.	133.9	455.0	254.6	275.8	332.2	377.0	455.0
	最小值 Min.	20.20	50.94	81.18	19.81	35.79	54.68	19.81
	标准差 Sd.	17.07	43.73	35.60	51.56	73.02	75.38	26.24



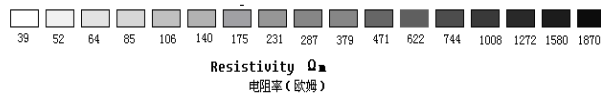


图3 在坡上、坡中、坡下的沿等高线分布的3个横向样线的土壤电阻率分布

Fig.3 Soil resistivity distribution along the 3 latitudinal contour transect lines at different slope positions (Up level, Middle level, Down level)

### 3 讨论

受地形、坡面物质组成、土壤物理特性和植被等的影响，坡面电阻率的坡位变异很大。在测定坡面的纵向样线上，电阻率的坡位变化表现为随着坡位下降先减少又恢复性增加的趋势，坡上为  $178.6\Omega\text{m}$ ；坡中上和坡中为  $151.7$  和  $155.8\Omega\text{m}$ ，这可能因随坡位下移使得坡中上和坡中部汇聚了更多水分，土壤含水量增高，尤其是坡中上部的下凹地形更有利于水分积聚；坡中下和坡下处为  $167.6$  和  $176.3\Omega\text{m}$ ，这可能与坡中下和坡下处的林木个体较大和生长旺盛从而耗水较多有关，因树木耗水作用可能超过坡面汇水作用或者因土层变厚从而导致土壤含水量变低；此外，坡中部以下坡度较大，使坡面保水作用变弱。坡面电阻率的坡位变异在纵向样线上大于横向样线，如纵向样线上5个测段（坡上、坡中上、坡中、坡中下、坡下）的电阻率标准差从上往下依次为  $65.02$ 、 $97.78$ 、 $77.69$ 、 $69.15$ 、 $105.6\Omega\text{m}$ ，整个纵向样线的电阻率标准差为  $83.06\Omega\text{m}$ ；而坡上、坡中、坡下3个横向样线的电阻率标准差依次为  $30.45$ 、 $18.63$ 、 $29.63\Omega\text{m}$ ，平均为  $26.24\Omega\text{m}$ 。

坡面电阻率的深度差异也很大，在纵向样线上，除个别测点（坡中上  $0.5\text{m}$  处）外，坡面电阻率的标准差表现为随深度增加而增大的趋势，5个测段的  $0.5$ 、 $1.55$ 、 $2.7$ 、 $3.98$ 、 $5.37$ 、 $6.91\text{m}$  深度的电阻率标准差分别为  $56.55$ 、 $26.79$ 、 $55.14$ 、 $44.54$ 、 $69.16$ 、 $135.0\Omega\text{m}$ ，说明依坡面物质组成（土壤、岩石风化母质、石砾、岩石）可划分为  $1.55\text{m}$  以上、 $1.55\sim 5.37\text{m}$ 、 $6.91\text{m}$  以下3个深度层次。在坡上、坡中、坡下3个横向样线上， $0.5$ 、 $1.55$ 、 $2.7$ 、 $3.98$ 、 $5.37$ 、 $6.91\text{m}$  深度的电阻率标准差依次为  $11.96\sim 26.66$ 、 $18.15\sim 86.50$ 、 $32.85\sim 37.10$ 、 $39.77\sim 74.98$ 、 $55.94\sim 88.96$ 、 $63.30\sim 88.98\Omega\text{m}$ ，平均依次为  $17.07$ 、 $43.73$ 、 $35.60$ 、 $51.56$ 、 $73.02$ 、 $75.38\Omega\text{m}$ ，说明坡面电阻率深度变化在横向样线上一一般大于纵向样线，可能是微地形和植被分布的不均匀有很大作用。

电阻率 ( $Y$ ,  $\Omega\text{m}$ ) 受很多土壤特征影响，如总孔隙度 ( $X_1$ )、体积含水率 ( $X_2$ )、石砾体积含量 ( $X_3$ )、容重 ( $X_4$ )、饱和度 ( $X_5$ )、温度、根系含量等，在土壤特性中，土壤孔隙度、石砾含量、体积含水量和饱和度是坡面电阻率的重要影响因素。综合利用不同月份(5~9月)在纵向和横向样线上测定的电阻率和土壤特征数据，参考 Archie 研究土壤电阻率与土壤特征关系时所采用的关系类型<sup>[20-22]</sup>，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  $Y=60.04 X_1^{0.964} X_2^{(-0.816)}$ ，( $r=0.609$ ,  $F=24.737$ ,  $n=87$ )，且检验呈极显著性相关；结果表明，电阻率与总孔隙度和体积含水率相关最紧密(图4)，尤其与体积含水率相关较好，说明通过测定坡面电阻率推求土壤水分的坡面变化是可行的；这与 Brunet<sup>[19]</sup>、周启友等<sup>[20]</sup>对土壤电阻率的研究基本一致。

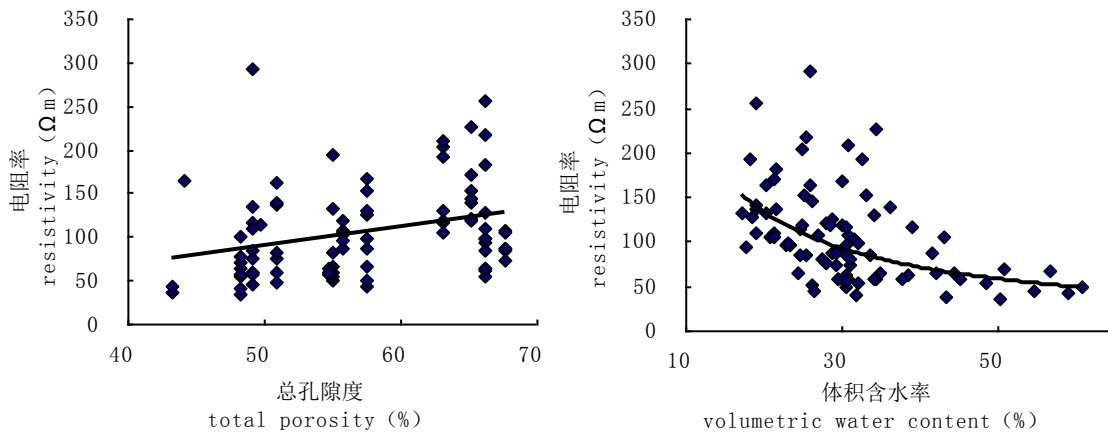


图4 坡面电阻率与土壤总孔隙度、体积含水率的关系

Fig.4 Relationships of soil resistivity with total soil porosity and volumetric water content

目前 ERT 方法在地质领域应用的十分广泛,但用来了解坡面土壤水文特征还仍处于初步尝试阶段,以后仍需在很多方面继续加强和鼓励开展研究,不断使此方法成熟起来。电阻率测定方法只是推求土壤水分特性的间接方法,所得结果受到土壤介质中很多其他因素的影响,如土温、石砾含量、根系含量等,研究结果精度也依赖于一些参数的精确测定,如未来通过加强对不同土层的土壤溶液的电阻率的室内测定和校正<sup>[22]</sup>,将有利于取得更接近实际的关系式参数,从而提高结果精度。

#### 4 结论

电阻率随着坡位变化的总体趋势为坡上至坡中上减小,坡中部较为稳定,至坡中下及坡下处逐渐增大,这可能和坡上至坡中的坡面水分汇集作用明显(导致含水量升高)以及坡中至坡下林木长势好耗水多(导致含水量降低)有关,是所在坡面的坡位、坡度、微地形、植被等综合作用的结果。

坡面电阻率具有很大的空间差异,首先表现在坡位差异上,随着坡位下降,纵向样线上的电阻率呈现出从坡上至坡中上逐渐减小、以后又恢复性增大的过程。纵向样线的电阻率坡位差异大于3条横向样线体现的电阻率坡位差异。其次,坡面电阻率具有很大的深度差异,表现为随深度增加而增大的趋势。

坡面电阻率的空间变化受到很多土壤特征的影响,包括总孔隙度、体积含水率、石砾体含量、容重、饱和度、温度、根系含量、坡位、微地形等。根系层土壤电阻率的变化可能更多受到微地形、坡位、植被特征的影响;深层电阻率变化更多地受到石砾含量和坡面物质组成的影响。

#### 参考文献

- [1] 陈洪松,王克林.岩溶干旱特征及其治理对策.农业现代化研究,2004,25(专刊):70-73. Chen H S, Wang K L. Karst features and management of drought response (In Chinese). Research of Agricultural Modernization, 2004, 25 (Special issue): 70-73
- [2] 崔灵周,丁文峰,李占斌,等.紫色土丘陵区农用地土壤水分动态变化规律研究.土壤与环境,2000,9(3):207-209. Cui L Z, Ding W F, Li Z B, et al. Purple soil hilly region of farmland study on dynamic change of soil moisture (In Chinese). Soil and Environment, 2000, 9 (3): 207-209
- [3] 刘苑秋,郭圣茂,王红盛,等.退化石灰岩红壤区四种人工林旱季土壤水分的空间变异.土壤学报,2010,47(2):229-237. Liu Y Q, Guo S M, Wang H S, et al. Spatial variability of soil moisture in four plantations in degraded limestone red soil region (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(2): 229-237
- [4] 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.水土保持学报,2005,19(1):136-139. Xiong Y L, Wei C F. Characteristics of soil moisture spatial variability and reservoir storage (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(1):136-139
- [5] 周慧珍,龚子同.土壤空间变异性研究.土壤学报,1996,33(3):232-241. Zhou H Z, Gong Z T. Spatial variability of soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1996, 33(3): 232-241
- [6] 赵世伟,周印东,吴金水,等.子午岭北部不同植被类型土壤水分特征研究.水土保持学报,2002,16(4):119-122. Zhao S W, Zhou Y D, Wu J S, et al. Northern Ziwuling soil moisture characteristics of different types of vegetation (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(4): 119-122
- [7] 袁道先.岩溶地区的地质环境和水文生态问题.南方国土资源,2003(1):22-25. Yuan D X. Karst geological and hydrological environment, ecological issues (In Chinese). Land and Resources of Southern China, 2003(1): 22-25
- [8] 王玉宽,朱波,高美容,等.小流域土壤水分空间分异特征及时稳性分析.山地学报,2004,22(1):116-120. Wang



- Y K, Zhu B, Gao M R, et al. Soil moisture content spatial difference in time of stability of watershed (In Chinese). *Journal of Mountain Science*, 2004, 22 (1): 116-120
- [9] 李玉山, 史竹叶, 张孝中, 等. 长武王东沟小流域土壤墒情影响因素与分布特征. *水土保持通报*, 1990, 10 (6): 1-6.  
Li Y S, Shi Z Y, Zhang X Z, et al. The influencing factors and distribution characteristics of soil moisture in Wang Donggou small watershed of Changwu (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1990, 10(6): 1-6
- [10] 王兵, 崔向慧, 白秀兰, 等. 荒漠化地区土壤水分时空格局及其动态规律研究. *林业科学研究*, 2002, 15 (2): 143-149. Wang B, Cui X H, Bai X L, et al. Desertification, soil moisture patterns and dynamics of space-time (In Chinese). *Forest Research*, 2002, 15 (2): 143-149
- [11] 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. *应用生态学报*, 2002, 12(5): 715-720. Qiu Y, Fu B J, Wang J, et al. Loess Plateau, Spatial heterogeneity of soil moisture and its influencing factors (In Chinese). *Journal of Applied Ecology*, 2002, 12(5): 715-720
- [12] 傅伯杰, 王军. 黄土丘陵区土地利用对土壤水分的影响. *中国科学基金*, 1998(4): 225-227. Fu B J, Wang J. Loess hilly area of land use on soil moisture (In Chinese). *Science Foundation in China*, 1998(4): 225-227
- [13] 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. *水土保持通报*, 2002, 22(4): 6-9. He F H, Huang M B, Dang T H. Gully region of Loess Plateau watershed characteristics of the spatial distribution of soil moisture (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2002, 22(4): 6-9
- [14] 张建辉, 何蓉, 唐时嘉, 等. 四川丘陵区土壤湿度的空间变异分析. *土壤通报*, 1996, 27 (2): 61-62. Zhang J H, He R, Tang S J, et al. Hilly area of spatial variability of soil moisture (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 1996, 27 (2): 61-62
- [15] 吕盼忠, 李保国, 胡克林, 等. 鄂尔多斯夏初不同地形土壤水分的空间变异. *中国农业大学学报*, 2002, 7 (5): 38-43. Lv Y Z, Li B G, Hu K L, et al. Ordos summer in different terrain spatial variability of soil moisture (In Chinese). *Journal of China Agricultural University*, 2002, 7 (5): 38-43
- [16] 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. *第四纪研究*, 2003, 23(3): 334-342. Huang Y L, Chen L D, Fu B J, et al. Loess Plateau watershed topography and land use on temporal and spatial patterns of soil moisture (In Chinese). *Quaternary Research*, 2003, 23(3): 334-342
- [17] 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. *农业工程学报*, 2003, 11(19): 5-9. Pan C Z, Shangguan Z P. Steep loess hill areas of soil moisture variability (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 11(19): 5-9
- [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. *Hydrological Processes*, 2009, 23:1 501-1 513
- [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. *Hydrological Processes*, 2009, 10: 1 016-1 024
- [20] 周启友, 岛田纯. 土壤水空间分布结构的时间稳定性. *土壤学报*, 2003, 40(5): 683-690. Zhou Q Y, Shimada J. Spatial distribution of soil water stability of the structure of the time (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(5): 683-690
- [21] Archie G E. The electric resistivity log as aid in determining some reservoir characteristics. *American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers*, 1942, 146: 54-61
- [22] 刘松玉, 查普生, 余小军. 土的电阻率室内测试技术研究. *工程地质学报*, 2006, 14(2): 216-222. Liu S Y, Zha F S, Yu X J. Laboratory measurement techniques of the electrical resistivity of soils (In Chinese). *Journal of Engineering Geology*, 2006, 14(2): 216-222

Spatial variation of soil electric resistivity of a typical slope in the Xiangshuihe watershed

## of Liupan Mountains, Northwest China

Duan Xu<sup>1</sup> Wang Yanhui<sup>1†</sup> Xu Lihong<sup>1</sup> Ding Deyou<sup>2</sup> Xiong Wei<sup>1</sup> Yu Pengtao<sup>1</sup>

(1 *Research Institute of Forestry Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China*)

(2 *Institute of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Wulumuqi 830054, China*)

**Abstract** To understand the spatial distribution of soil hydrological characteristics along slopes, the method of multi-electrode electrical resistivity tomography (ERT) was used in a study started in early May 2009 on a typical mountain slope in the Xiangshuihe watershed of the Liupan Mountains in Northwest China. The slope is 600 m long and covered with an artificial larch (*Larix principis-rupprechtii*) plantation. A longitudinal transect line was set up from the top to the foot of the slope and three transect lines at different slope positions to detect horizontal variation of the soil electrical resistivity. Results showed that along the longitudinal line, soil electric resistivity, on the whole, though remaining spatially continuous, varied to some extent. It decreased from the slope top to the mid slope and then restoratively increased on the slope downward. As a result of the uneven distribution of soil characteristics, surface topography and vegetation along slope, the longitudinal variation of soil electrical resistivity was greater than its horizontal variation. The electrical resistivity increased with soil depth as gravel and rock content increased with depth. A close relationship was observed between the soil electrical resistivity and soil porosity as well as the volumetric soil water content. The more close relation with the soil water content suggested that it is feasible to determine the spatial variation of soil characters such as the soil moisture through measuring spatial distribution of soil electric resistivity on slope.

**Key words** Slope; Resistivity; Spatial variation; Larch plantation; Liupan Mountains