

文章编号: 1008-2786-(2013)3-294-06

# 环境因子对土壤水分空间异质性的影响 ——以北京市怀柔区为例

蔡庆空<sup>1</sup> 蒋金豹<sup>1\*</sup> 崔希民<sup>1,2</sup> 郭 徵<sup>3</sup> 马开锋<sup>1,4</sup> 洪雪倩<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 10083; 2. 中国矿业大学(北京) 煤炭资源与安全开采  
国家重点实验室, 北京 10083; 3. 北京师范大学资源学院, 北京 100875;  
4. 华北水利水电学院 资源与环境学院, 河南 郑州 450011)

**摘 要:** 为了探讨山区表层土壤水分的空间分布格局及其影响因素, 以北京市怀柔区为研究区域, 联合使用 ALOS/PA-LSAR 微波数据和 Landsat-5 遥感影像反演得到研究区的土壤水分数据, 运用旋转主成分分析法分析了高程、坡度、坡向和植被盖度 4 个环境因子对土壤水分的影响情况及分布规律, 并确定相应的主控因子。结果表明: 高程和坡度是影响山区表层土壤水分空间变异的主控因子, 植被盖度次之, 坡向的影响最弱。对主控因子(高程和坡度)的单因素分析表明, 土壤含水量随着高程的增加而逐渐减少, 随着坡度的增加, 土壤含水量总体上呈现先增加(坡度 < 3°)后减小(坡度 > 3°)的趋势, 对深入研究山区土壤水分分布特性和水土保持具有指导意义。

**关键词:** ALOS/PALSAR; 土壤水分; 环境因子; 旋转主成分分析

**中图分类号:** S152.7

**文献标志码:** A

土壤水分是连接大气圈与生物圈的重要纽带, 是气候系统中不可或缺的一个关键参数, 其在空间上的分布受到植被或土地利用、剖面曲率、高程、气象因素、地形、土壤、人为活动等多因子综合作用<sup>[1-2]</sup>。目前国内外对土壤水分的研究主要集中在以下 3 个方面<sup>[3-4]</sup>: 1. 采用统计学方法进行水平方向和垂直方向上土壤水分的时空变异性研究<sup>[5-6]</sup>; 2. 土壤水分分布的影响因素研究<sup>[7]</sup>; 3. 从分布式水文模型的角度出发定量研究土壤水分时空分布的情况<sup>[8-11]</sup>。相比较而言, 以往研究中土壤水分数据的获取方法多是通过在研究区布设少量监测点, 用土壤水分速测仪 TDR 测定监测点的土壤水分, 经过克吕格插值法计算得到土壤水分分布图, 由于克吕格插值法单纯依据样点数据进行空间插值, 仅能反映空间平面位置与土壤水分的线性关系, 不能反映

环境因子对土壤水分的空间异质性<sup>[12]</sup>。由于微波遥感具有穿云透雾的能力和光学遥感信息丰富的特性, 在植被覆盖区域中联合使用 ALOS/PALSAR(相控阵型 L 波段合成孔径雷达)微波数据和同时相的 Landsat-5 遥感数据, 充分发挥两者自身的优势, 首先从光学遥感影像中提取归一化植被水分指数, 利用“水-云模型”去除植被层在土壤水分后向散射中的贡献, 之后构建后向散射系数与土壤水分反演模型得到研究区的土壤水分数据。周鹏等人的研究结果表明, 采用 HH 极化方式的土壤后向散射系数与土壤含水量的相关系数可以达到 0.522 7<sup>[13]</sup>; 张友静等人的研究结果表明, 反演的土壤含水量和准同步实测数据的均方根误差为 3.83%<sup>[14]</sup>。在反演得到研究区土壤水分数据的基础上, 运用旋转主成分分析法和地统计学方法为分析工具, 对环境因子

收稿日期(Received date): 2012-12-31; 改回日期(Accepted): 2013-02-17。

基金项目(Foundation item): 国际科技合作项目(2010DFA3290) 和国家自然科学基金项目(41101397) 联合资助。[Jointly supported by International Science and Technology Cooperation Project( NO. 2010DFA3290) and National Natural Science Foundation Project( NO. 41101397).]

作者简介(Biography): 蔡庆空(1986-), 男, 河南南阳人, 博士, 研究方向: 遥感与 GIS 应用研究。[Cai Qingkong(1986-), male, born in Nanyang of Henan, Doctor, research direction: application of RS and GIS.] Tel: 18911120375, E-mail: caiqingkong65@163.com

\* 通信作者(Communication author): 蒋金豹(1978-), 男, 博士, 副教授。[Jiang Jinbao(1978-), male, Doctor, associate professor.] E-mail: ahdsjjb@126.com

与土壤水分的时空变异特征之间的关系进行了研究,并确定了相应的主控因子。对于深入研究山区土壤水分的变化特性和水土保持具有重要意义。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

怀柔区地处北京市北部(图1),地理坐标为 $116^{\circ}17' \sim 116^{\circ}53'E$ 、 $40^{\circ}14' \sim 40^{\circ}04'N$ ,地形南北狭长,呈哑铃状,南北长128 km,东西最窄处11 km。境内地势北高南低,其中山区面积占88.7%。气候属典型的暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,年平均气温 $9^{\circ} \sim 13^{\circ}$ ,年平均降水在600~700 mm,主要集中在6—8月。植被类型多样,以常绿阔叶林和落叶阔叶林为主。全区地处华北褐土带,主要土壤类型有棕壤、褐土、潮土、水稻土四大土类,土壤质地平原区为轻壤和沙壤质,山区多为壤质和沙壤质,pH值5.9~8。研究区海拔在14~1660 m,坡度范围在 $0.34^{\circ} \sim 76.28^{\circ}$ ,主要的土地利用类型是林地、草地、建设用地、农用地,人类活动对研究区的影响相对较小。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 数据源

数据源包括ALOS/PALSAR微波数据、Landsat-5卫星遥感数据、研究区的数字高程模型(DEM)、坡度和坡向数据。ALOS/PALSAR微波数据获取时间是2010-06-04,数据级别是Level1.5级,有HH和HV两种极化方式,影像分辨率为12.5 m,入射角

为 $34.3^{\circ}$ ;Landsat-5卫星遥感数据的获取时间是2010-06-05,影像分辨率是30 m,通过查阅相关气象资料,在此期间没有出现下雨和自然灾害天气,因此可以认为两者准同步,联合使用ALOS/PALSAR微波数据与Landsat-5遥感数据,通过反演最终得到研究区的土壤水分数据;研究区域的DEM和坡度数据是利用ASTER GDEM第一版本(V1)的数据进行加工得来;坡向数据是利用研究区域的数字高程数据基于ARCGIS 9.3中的函数模型加工得来;植被盖度数据是利用Landsat-5遥感影像数据,经大气校正、辐射定标后,采用上世纪末张仁华等提出了植被盖度与植被指数的模型计算得来<sup>[15]</sup>。数据源如图2所示。

#### 1.2.2 分析方法

主成分分析法是一种将原始数据中包含的多个变量压缩为几个不相关的分量,由于特征向量的空间正交性是一种过强而非希望的约束条件,造成其结果依赖于数据覆盖的空间范围。旋转主成分分析法可以有效的改进这些缺陷,并且能够突出主成分,得到一些简明而易于理解的空间模态<sup>[3,16-17]</sup>。本次研究采用旋转主成分分析法对土壤水分与环境因子之间的相关关系进行分析,将研究区的高程、坡向、坡度分布图和植被盖度图与土壤水分分布图进行叠加,得到环境因子(高程、坡向、坡度和植被盖度)与土壤水分叠加后的数据库,基于此数据库,使用SPSS统计学软件进行旋转主成分分析,得出主成分因子和各因子的贡献率,在得出主成分因子的基础上基于主成分因子与土壤水分叠加的数据库,

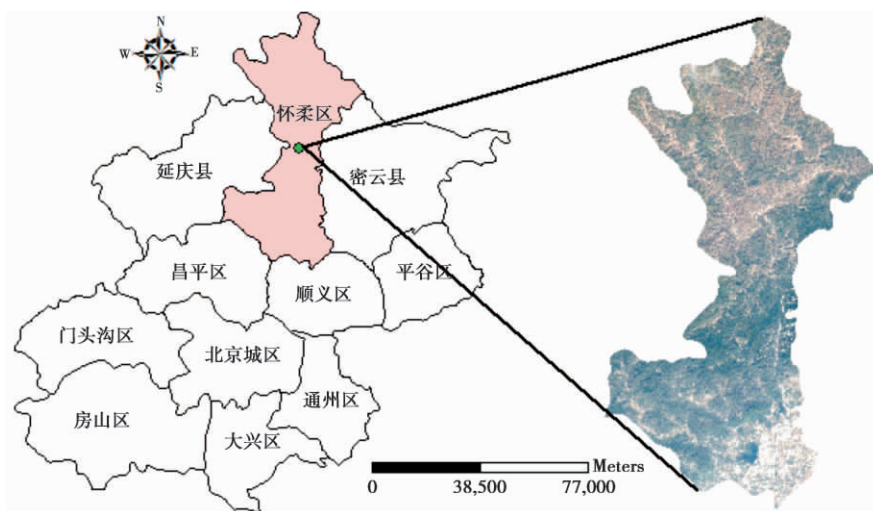


图1 研究区地理位置

Fig. 1 The location of study area

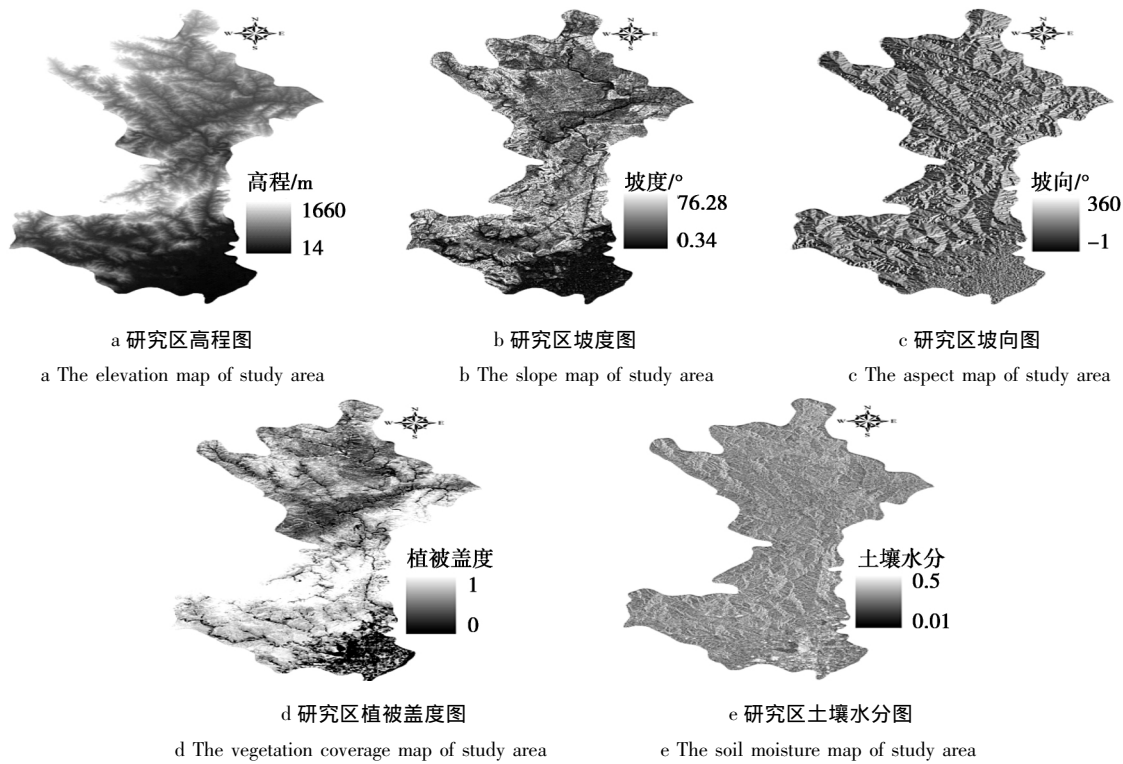


图 2 研究区环境因子图( a、b、c、d) 和土壤水分图( e)

Fig. 2 The environment factors and soil moisture map of study area

进行单因子与土壤水分作用规律的分析。

2 结果与分析

2.1 环境因子对土壤水分影响的旋转主成分分析

土壤水分的空间分布是由多种因素综合作用的结果,以研究区的地形和土地利用信息,在研究区采用均匀网格法选取测定样点,共选取 115 个测点进行旋转主成分分析。在进行旋转主成分分析之前,对 4 个环境因子进行 KMO( Kaiser – Meyer – Olkin) 检验,以判断是否适于用旋转主成分分析。结果表明 4 个环境因子的 KMO 均值为 0.636, > 0.5, 可以进行旋转主成分分析。提取特征根 > 1 主成分因

子,最终得出 2 个主成分因子。采用 SPSS 软件进行旋转主成分分析,得出各主成分因子的贡献率和主成分因子与环境因子的负荷矩阵,如表 1 和表 2 所示。

由土壤水分与环境因子的旋转主成分分析结果(表 1 和表 2) 可以看出,对于使用微波数据反演的土壤水分来说,影响土壤水分的环境因子被归类为 2 个主成分,其中第一主成分主要有高程、坡度、植被盖度因子组成,占第一主成分的负荷分别是 0.858、0.811、0.660,与土壤水分都表现为正相关,并且第一主成分对土壤水分影响的贡献率为 49.914%;第二主成分主要由坡向因子组成,对土壤水分影响的贡献率为 26.527%,坡向因子在第二主

表 1 变量共同度分析表

Table 1 The analysis table of common variable degree

主成分	原始变量的特征值			提取的主成分		
	特征根	贡献率/%	累计贡献率/%	特征根	贡献率/%	累计贡献率/%
F1	1.997	49.914	49.914	1.997	49.914	49.914
F2	1.061	26.527	76.442	1.061	26.527	76.442
F3	0.514	12.843	89.285			
F4	0.429	10.715	100			

表2 旋转主成分负荷矩阵  
Table 2 The rotate principal components matrix

主成分	高程	坡度	植被盖度	坡向
F1	0.858	0.811	0.660	0.215
F2	0.023	0.029	-0.390	0.869

成分中所占负荷最大,达到0.889,除植被盖度与第二主成分呈负相关以外,其余环境因子与土壤水分都表现为正相关。植被盖度、坡度和高程在第二主成分中所占比例逐渐较少。2个主成分的累计贡献率达到76.442%,以4个环境因子在主成分中所占的比例大小来确定环境因子对土壤水分的影响大小依次为:高程>坡度>植被盖度>坡向。高程、坡度是影响山区土壤水分空间变异的主控因子、植被盖度次之、坡向的影响最弱。这与Hawley<sup>[18]</sup>和Henninger<sup>[19]</sup>等人研究的结论一致,但与刘鑫<sup>[20]</sup>等人在晋西黄土区的研究结论不同,究其原因作者认为黄土区由于植被较少,表层土壤水分受太阳辐射的影响较大,而坡向可以最大程度的反映太阳辐射的差异,最终使得坡向成为影响黄土区土壤水分变异的主控因子。而本文中的研究区域是有植被覆盖的山区,由于植被的影响,导致太阳辐射对表层土壤水分影响能力明显削弱,坡向对表层土壤水分的影响程度降低,而海拔和坡度可以最大程度的影响山区土壤水分的流动和保蓄,使得其成为影响表层土壤水分变异的主控因子,其次植被盖度和高程也是影响土壤水分分布的因素,因此对土壤水分差异的形成有一定的作用<sup>[21]</sup>。

## 2.2 主控因子(高程和坡度)与土壤水分状况的关系

根据旋转主成分分析结果,基于主控因子(高程和坡度)与土壤水分的叠加数据库,用Excel进行

高程和坡度对土壤含水量作用规律的分析,结果如图3所示。

从图3可以看出,土壤含水量随着高程的增加而逐渐减少,总体上呈现出高的地方土壤含水量低,低的地方土壤含水量高的态势;随着坡度的增加,土壤含水量总体上呈现先增加后减小的趋势,坡度在0°~3°时,土壤含水量随着坡度的增加而不断增大,坡度在3°附近时土壤含水量最大,当坡度>3°以后,随着坡度的增加,土壤含水量逐渐减少。究其原因,作者认为研究区的低海拔区域由于地形平坦,有利于土壤水分的入渗和保蓄,使得土壤含水量较高,随着海拔的升高,山区地形由于不利于土壤水分的入渗,使得高海拔地区土壤含水量减少;再者研究区低坡度区域大多位于城区,由于城区混凝土地面不利于土壤水分的下渗,而且混凝土地面蒸发较大,致使城区土壤含水量较低,随着坡度的增加,城区减少,低坡度区域由于有利于土壤水分的入渗,土壤含水量逐渐增加,坡度在3°左右土壤含水量达到最大,此后随着坡度的增加由于地形陡峭,地表径流增大,不利于山区土壤水分的入渗和保蓄,导致土壤含水量较低,这也是最终导致了土壤含水量随着高程和坡度的增加而不断减少的原因所在。

## 3 结论

通过对北京市山区土壤水分与高程、坡度、植被盖度、坡向等环境因子的分析可知:

1. 对影响土壤水分的环境因子经旋转主成分分析得出,影响北京市山区土壤水分分布的因素可以分为两大主要因子:依次是高程、坡度和植被盖度因子、坡向因子,其中高程和坡度对山区土壤水分的影

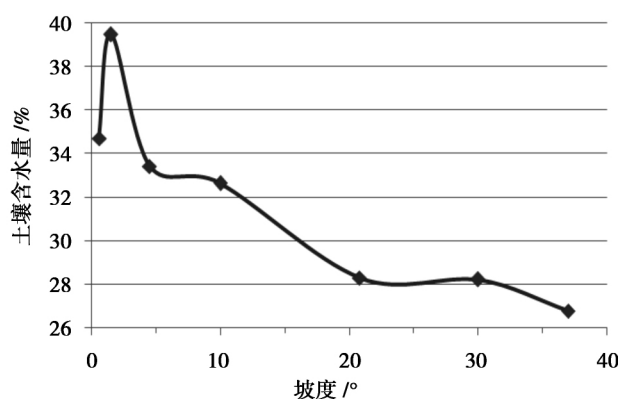
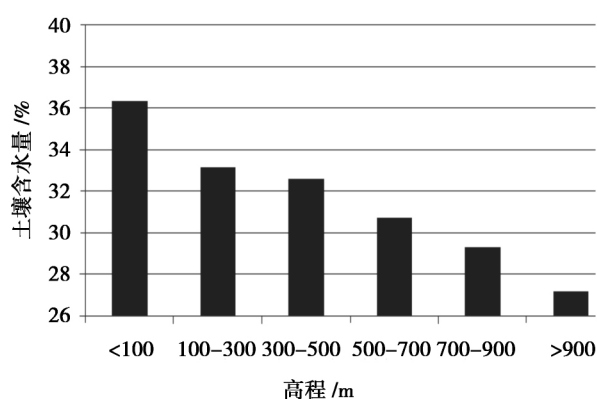


图3 高程、坡度与土壤水分的关系曲线

Fig.3 The relation between elevation, slope and soil moisture

响最为突出,植被盖度次之,坡向的影响最弱。因此,在山区进行植树造林工作应充分考虑这些因子对土壤水分分布特征的影响。

2. 高程和坡度作为影响研究区土壤水分分布的主控因子,对土壤水分的影响可表述为:土壤含水量随着高程的增加而逐渐减少,总体上呈现出高的地方土壤含水量低,低的地方土壤含水量高的态势;随着坡度的增加,土壤含水量总体上呈现先增加(坡度 $<3^{\circ}$ )后减小(坡度 $>3^{\circ}$ )的趋势,坡度在 $0^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 时,土壤含水量随着坡度的增加而不断增大,坡度在 $3^{\circ}$ 附近时土壤含水量最大,当坡度 $>3^{\circ}$ 以后,随着坡度的增加,土壤含水量逐渐减少。

3. 对于各环境因子对山区土壤水分的具体影响机制亟待进一步研究,这将有利于掌握山区土壤水分的变化特性,对于解决山区水源涵养和生态环境保护有重要意义。

## 参考文献(References)

- [1] Qiu Yang, Fu Bojie, Wang Jun, et al. Spatio temporal variation of soil moisture and its relation to environmental factors [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(1): 100–107 [邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系 [J]. 生态学杂志, 2007, 26(1): 100–107]
- [2] Qiu Yang, Fu Bojie. Spatial heterogeneity of soil moisture content on the Loess Plateau, China and its relation to influencing factors [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(5): 715–720 [邱扬, 傅伯杰. 黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性及其影响因素 [J]. 应用生态学报, 2001, 12(5): 715–720]
- [3] Wang Junde, Wang Genxu. Impact factors to soil moisture of alpine meadow and their spatial heterogeneity [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 28(3): 428–433 [王军德, 王根绪. 高寒草甸土壤水分的影响因子及其空间变异研究 [J]. 冰川冻土, 2001, 28(3): 428–433]
- [4] Zhang Xiuying, Feng Xuezhong, Zhao Chuanyan. GIS-assisted modeling of temporal and spatial distribution of soil water content in Loess Plateau—a case study in Anjiagou catchment [J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(1): 132–138 [张秀英, 冯学智, 赵传燕. 基于GIS的黄土高原小流域水分时空分布模拟——以定西安家沟为例 [J]. 自然资源学报, 2005, 20(1): 132–138]
- [5] Li Haibin, Lin Zhonghui, Liu Suxia. Application of Kriging technique in estimating soil moisture in China [J]. Geographical Research, 2001, 20(4): 446–452 [李海滨, 林忠辉, 刘苏峡. Kriging方法在区域土壤水分插值中的应用 [J]. 地理研究, 2001, 20(4): 446–452]
- [6] Western A W, Blöschl G, Grayson R B. Geostatistical characterization of soil moisture patterns in the Tarawarra catchment [J]. Journal of Hydrology, 1998, 205(1): 20–37
- [7] Qiu Yang, Fu Bojie, Wang Jun, et al. Quantitative analysis of relationships between spatial and temporal variation of soil moisture content and environmental factors at a gully catchment of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(5): 741–747 [邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分时空分异与环境关系的数量分析 [J]. 生态学报, 2000, 20(5): 741–747]
- [8] Gomez-Plaza A, Martinez-Meca M, Albaladejo J, et al. Factors regulating spatial distribution of soil water content in small semiarid catchments [J]. Journal of Hydrology, 2001, 253: 211–226
- [9] Li Baoguo, Gong Yuanshi. Soil water dynamic model and its application [M]. Beijing: Science Press, 2000. [李保国, 龚元石. 农田土壤水的动态模型及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [10] Rodriguez-Iturbe I, Odorico P D, Porporato A, et al. On the spatial and temporal links between vegetation, climate and soil moisture [J]. Water Resources Research, 1999, 35(12): 3709–3722
- [11] Strasser U I, Mauser W. Modelling the spatial and temporal variations of the water balance for the Water catchment 1965–1994 [J]. Journal of Hydrology, 2001, 254(1): 199–214
- [12] He Xiaohui, Wen Zhongming. Spatial variability of soil water controlled by the topographical factors [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(2): 80–83 [赫晓慧, 温仲明. 小流域地形因子影响下的土壤水分空间变异性研究 [J]. 水土保持研究, 2008, 15(2): 80–83]
- [13] Zhou Peng, Ding Jianli, Wang Fei, et al. Retrieval methods of soil water content in vegetation covering areas based on multi-source remote sensing data [J]. Journal of Remote Sensing, 2010, 14(5): 966–973 [周鹏, 丁建丽, 王飞, 等. 植被覆盖地表土壤水分遥感反演 [J]. 遥感学报, 2010, 14(5): 966–973]
- [14] Zhang Youjing, Wang Junzhan, Bao Yansong. Soil moisture retrieval from multi-resource remotely sensed images over a wheat area [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(2): 222–228 [张友静, 王军战, 鲍艳松. 多源遥感数据反演土壤水分方法 [J]. 水科学进展, 2010, 21(2): 222–228]
- [15] Zhang Renhua. Experimental models of remote sensing and ground foundation [M]. Beijing: Science Press, 1996 [张仁华. 实验遥感模型及地面基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1996]
- [16] John D H. A rotated principal component analysis of the interannual variability of the northern hemisphere 500 mb high-field [J]. Mon. Wea. Rev., 1981, 109: 2080–2092
- [17] Xue Wei. Statistical analysis and application of SPSS [M]. Beijing: Renmin University of China Press, 2001. [薛薇. 统计分析与SPSS的应用 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2001.]
- [18] Hawley M E, Jackson T J, McCuen R H. Surface soil moisture on a small agricultural watershed [J]. Journal of Hydrology, 1983, 62: 179–200
- [19] Henninger D L, Petersen G W, Engman E T. Surface soil moisture within a watershed: Variations, factors influencing, and relationship to surface runoff [J]. Soil Science Society of America Journal, 1976, 40: 773–776
- [20] Liu Xin, Bi Xuaxing, Li Xiaoyin, et al. Variation of soil moisture in relation to topographic factors in Loess region of west Shanxi [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(3): 411–417 [刘鑫, 毕华兴, 李笑吟, 等. 晋西黄土区基于地形因子的土壤水分分异规律研

究[J]. 土壤学报 2007 44(3):411-417]  
[21] Ge Cuicui, Zhao Jun, Wang Xiufeng et al. Influence of topographic factors on soil water and bulk density in a typical slope land in the black soil area of northeast China [J]. Bulletin of Soil and Water

Conservation 2008 28(6):16-19 [葛翠萍, 赵军, 王秀峰, 等. 东北黑土区坡耕地地形因子对土壤水分和容重的影响[J]. 水土保持通报 2008 28(6):16-19]

## Influences of Environmental Factors on Spatial Heterogeneity of Soil Moisture ——A Case Study in Huairou District of Beijing

CAI Qingkong<sup>1</sup>, JIANG Jinbao<sup>1</sup>, CUI Ximin<sup>1,2</sup>, GUO Zheng<sup>3</sup>, MA Kaifeng<sup>1,3</sup>, HONG Xueqian<sup>1</sup>

(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

3. College of Resources Science Technology, Beijing Normal University, Beijing 100857, China;

4. College of Resources and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

**Abstract:** In order to discuss spatial distribution pattern and influence factors of surface soil moisture in mountainous area, this paper take Huairou district of Beijing as the research area, the soil moisture of study area was inversely by the combined use of ALOS/PALSAR microwave data and Landsat-5 remote sensing data, we analyse the impact which bring about by four environment factors on soil moisture and the law of distribution, such as elevation, slope, aspect and vegetation coverage, and also determine the corresponding main control factor. Result indicate that the main control factors which influence mountain surface soil moisture spatial variability is elevation and slope, followed by is vegetation coverage, the last is aspect. Single factor analysis result on main control factor (elevation and slope) show that Soil moisture decreases gradually as height increase, with increase of slope, soil water content appears to increase first (slope less than 3°) and then decreases (slope greater than 3°) on the whole, it has guide significance for further study of the distribution characteristics of soil moisture and water and soil conservation.

**Key words:** ALOS/PALSAR; soil moisture; environmental factor; rotated principal component analysis