

土壤水空间分布结构的时间稳定性*

周 启友 岛田 纯
(筑波大学地球科学系, 筑波 3058571, 日本)

摘 要 通过在野外 $3.5\text{ m} \times 3.5\text{ m}$ 的正方形试验区域高密度布置多个电极和定时扫描测定土壤电阻的方法, 利用反演计算和土壤电阻率与含水量之间的关系, 计算出了不同时间的土壤含水量在三维空间上的分布。通过对由此获得的含水量资料的分析, 探讨了土壤水在三维空间上的分布特征及其在时间上的稳定性。结果表明, 试验区的土壤含水量在三维空间上的分布是非均质的和各向异性的, 这种非均质性不是随机的而是具有一定的结构或模式, 这一结构或模式在时间上是相对稳定的。

关键词 空间分布结构, 时间稳定性, 电阻率成像法, 土壤水分成像法
中图分类号 S156

土壤水是联系大气水分和地下水之间的重要通道, 是自然界水循环的重要组成部分。由于受土壤特性、饱和带地下水、各种地表过程以及生产活动的影响, 土壤水在空间上的分布常常很不均匀。探讨土壤水在空间分布上的这一不均匀性以及这种不均匀性在时间上的稳定性问题, 对分析模拟土壤介质中的流体流动和物质迁移过程、进行流域水文过程模拟和优化农业生产活动具有重要的意义, 是土壤水研究的一个重要课题。

Vachaud 等指出由于土壤水在空间上的变化特性在很大程度上可以用土壤结构的变化特性来解释, 因此如果空间上的某个点在某一时间的含水量很高, 那么它就有很大的可能在另一时间也保持着很高的含水量^[1]。在所研究的变量与土壤结构、地形等确定的因素之间具有比较紧密的联系时, 这种时间上的稳定性就可能出现。Kachanoski 和 de Jong 对这一时间稳定性的概念进行了进一步的扩充^[2]。他们认为时间稳定性是与空间尺度有关的空间分布结构或模式在时间上的持续性, 并指出空间某一点的土壤含水量是各种水文过程在不同的空间尺度上共同作用的结果。Zhang 和 Berndtsson 在分析了观测十年的土壤含水量资料后发现, 由于对降雨输入有着相似的响应, 上部土层的蒸发和农业活动在时间上都具有稳定的空间分布结构^[3]。Gomez-Plaza 等探讨了地形、植被等因素对这一结构稳定性的影响^[4]。结果发现, 当影响土壤水的因素仅限于地理位置和地形时, 土壤水就呈现出时间上较为稳定的空间分布结构, 而当像植被这样的因素也对土壤水产生影响时, 土壤水在空间上的分布结构就变得不稳定。Van Pelt 和 Wierenga 应用中子水分仪和张力计在 1 hm^2 的实验场内对土壤含水量和毛细压力水头进行了监测, 结果发现不仅土壤含水量具有时间上稳定的空间分布结构, 甚至土壤毛细压力水头也在时间上具有稳定的空间分布结构^[5]。这些研究加深了我们对土壤水空间分布结构在时间上的稳定性的认识。然而, 由于这些研究仅仅是一维的或二维的监测, 三维空间上的土壤水分布特征及其在时间上的稳定性问题仍然十分不清楚。

近年来, 高密度电阻率成像法已被广泛地应用于确定湖区地下水排泄位置^[6]、圈定污染分布范围^[7, 8]、监测地下水和水蒸气流动^[9, 10]等各种活动中。该方法简单方便, 可在不同的空间尺度上进行三维的和非破坏性的野外监测。基于这一高密度电阻率成像法, Zhou 等提出了计算三维空间上的土壤含

* 本研究是应用电阻率成像法监测土壤含水量变化研究课题的部分工作, 受到日本筑波大学地球环境变化特别研究课题、日产科学基金和日本文部科学省基金(08408003)的资助

水量的方法^[10]。通过应用这一方法,本文的目的在于探讨土壤水在三维空间上的分布特征以及这一分布特征在时间上的稳定性。

1 试验场地与方法

1.1 试验场地和测定方法

本研究的试验场地位于日本筑波市筑波大学陆域环境研究中心的试验场内,为一块位于试验场中心附近的 $3.5\text{ m} \times 3.5\text{ m}$ 的正方形区域。该正方形区域内的土壤总体上为壤土,在 $0.0\sim 0.9\text{ m}$ 深度范围内为含粘土块的粘质壤土,在 $0.9\sim 1.5\text{ m}$ 深度范围内为富含腐殖质的黑色壤土,在 $1.5\sim 1.7\text{ m}$ 深度范围内为上述黑色壤土和粘质壤土的混合物,在 $1.7\sim 2.0\text{ m}$ 深度范围内为粘质壤土。根据 Shimada 等和 Hamada 等的坑探结果,该区地下水位大约距地表 1.9 m 深^[11, 12]。由于在陆域环境研究中心的基建过程中,对试验场内的土壤有过扰动,试验区域内的土质分布普遍不均匀。区内年降雨量在 $1200\sim 1600\text{ mm}$ 之间。

在 $3.5\text{ m} \times 3.5\text{ m}$ 的正方形区域内,地表 0.05 m 深处,埋设了 64 个高 4.0 cm 、直径 3.0 cm 的圆筒状的铅制电极。这些电极形成了一个 8×8 、电极间水平间距为 0.5 m 的网格。此外,还在正方形区域四角处的四个钻孔内,以 0.25 m 的垂直间距埋设了 24 个同样的电极。这些电极通过电缆和一个 216 频道的高密度电法勘探系统 (Next 400, 日本兴和株式会社制) 相连接。通过向两个电极供应 10 mA 、 2 Hz 、电压初始值设置在 300 V 的交替直流电流,测定另外两个电极间的电位差。每四个电极为一组,可获得一个电位差数据。测定采用四极法和二极法的电极配置,并在 x 、 y 、 xy 和 $-xy$ 四个方向上进行。本勘探系统可按事先给定的电极组合进行逐个扫描测定,自动记录测定结果。每次扫描测定大约需要 40 min ,可获得 836 个数据。试验从 1996 年 6 月 22 日开始,每 24 h 扫描测定三到四次,于 1997 年 12 月 22 日结束。测定期间的降雨资料来源于筑波大学陆域环境研究中心的观测资料数据库。

1.2 土壤水分成像法

土壤水分成像法 (Soil moisture tomography) 是指对土壤含水量在空间上的分布实现成像的方法。本研究应用 Zhou 等所提出的方法^[10],通过三维空间上的土壤电阻率成像,实现对土壤含水量在三维空间上的分布特征的分析。首先,根据上述测定的高密度的电位差资料建立起土壤电阻率的初始模型。然后,应用有限单元法计算出各测定点的理论电位差值,并与实际测定的电位差值进行比较。根据实际测定值和理论计算值之间的误差,对土壤电阻率模型进行修正,直至理论值和测定值之间的误差达到稳定而较小的程度。此时的土壤电阻率模型即看作为土壤真实的电阻率,从而实现三维空间上的电阻率成像。在这一反演计算过程中,我们应用了 Zhou 等提出的补修算法^[13],对土壤电阻率模型进行修正。该算法将所有的测定划分为多个测定事件,根据各个测定事件的测定值和理论值之间的误差对模型进行分片修正。由于每个测定事件对测定事件附近的模型修正影响最大,就像在初始的土壤电阻率模型上进行修补一样,因而称为补修算法。

在实现了三维空间上的土壤电阻率成像之后,我们在试验区域内采取了多个有代表性的土样,并在室内测定土壤的电阻率随土壤含水量的变化关系。然后,应用描述多孔介质含水量和电阻率之间关系的 Archie 方程^[14],对所测得的数据进行拟合,确定相关的参数。再利用距离权重法,以室内确定的参数为基点在空间上进行插值,获得三维空间上的相关参数的分布。最后,再将三维空间上的土壤电阻率值和相关的参数值代入 Archie 方程,从而获得三维空间上的土壤含水量分布,即实现土壤水分成像法。

根据 Zhou 等所作的与实测土壤含水量之间的比较^[10],由此获得的土壤含水量的误差为 $\pm 0.10\text{ cm}^3\text{ cm}^{-3}$ 。由于这一相对较大的误差,应用这些资料分析土壤含水量在空间上的详细分布特征十分困难。然而,考虑到影响土壤水分成像法中含水量的因素多是内在的和确定的因素,而且在计算的含水量和实测的含水量之间存在普遍的线型关系,因此,通过分析成像法中的含水量在时间上的变化特征,仍然可以探讨土壤含水量在三维空间上的总体分布特征在时间上的变化规律。

应用上述土壤水分成像法,每一次扫描测定就可获得土壤含水量在三维空间上的一组资料。每组资料由 $15 \times 15 \times 6$ 个数据组成,相当于 $3.75\text{ m} \times 3.75\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ (X : $-0.125\sim 3.625\text{ m}$; Y : $-0.125\sim 3.625\text{ m}$; Z : $0.00\sim 1.50\text{ m}$) 的区域。基于这些资料,我们分析土壤水在空间上的总体分布特征并探讨这

一特征在时间上的稳定性。

2 结果与讨论

2.1 土壤水三维空间分布的非均质性

图 1 所示为应用 1997 年 4 月 9 日 11:00 测得的资料计算出的三维空间上的土壤含水量分布。右侧三列为不同 y 座标上的剖面图, 左侧二列为不同深度上的平面图。该图清晰地显示了土壤含水量在空间分布上的非均质性不仅出现在深度方向上, 而且也出现在水平方向上。在 0.0~0.75 m 深度的两个平面图上, 可以看到在西北方向(10# 点附近) 上有一个含水量相对较高的区域, 并在东北方向(11# 点附近) 和西南方向(9# 点附近) 上各有一个含水量相对较低的区域。然而, 随着深度的增加, 这些区域在空间上的分布发生了明显的变化。在 0.75~1.50 m 深度的三个平面图上, 含水量相对较高的区域转移到了北部和西南方向, 而含水量相对较低的区域则由两个变为一个并分布于图面的中心位置。在剖面图上, 如果观察含水量等值线(例如 $0.66 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 的等值线) 的深度变化, 就可以发现等值线的深度不仅在剖面内发生变化, 而且也在剖面之间不同, 完全不同于理想均质介质的情况。这一土壤含水量在空间分布上的非均质性也得到了四个钻孔(8#、9#、10# 和 11#) 的土样分析结果的证实。

为进一步探讨试验区内土壤含水量在空间上的变化特征, 我们计算了含水量的实验半变差图(Experimental semi-variogram)。图 2 为在 x 、 y 、 xy 和 $-xy$ 四个主要方向上计算出的含水量的实验半变差值随间距的变化曲线, 其中 x 轴为步长或间距, y 轴为实验半变差值, 测定时间为 1997 年 4 月 2 日 19:00。可以看出, 实验半变差值随间距的变化具有以下特征:

(1) 所有的实验半变差值曲线都在原点附近显示出下凹的特征。这是因为每个计算的含水量值都相当于 $0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$ 立方体上的含水量的平均值, 实验半变差值曲线在原点附近的下凹特征反映了这一样本体积对实验半变差值的影响。

(2) 没有实验半变差值曲线和纵轴相交于零点以上。这意味着在这些计算的土壤含水量中很少有随机的或不可预测的成分, 对于距离相近的两个土样而言其含水量之间的变化将不会很大。也就是说, 在土壤含水量的空间分布中存在着某种空间分布结构或者模式。

(3) 浅部(0.0~0.5 m) 的实验半变差值曲线具有明显的线型特征, 而深部(0.5~1.50 m) 的实验半变差值曲线则呈现出影响距离在 1.5 m 到 2.0 m 之间的球锥曲线的特征。这一区别的主要原因在于, 浅部的土壤与深部的土壤相比更接近于地表, 因而更易受到植被和其它地表过程的影响。这种影响使浅部的土壤比深部的土壤向着更为均质化的方向演化。

(4) 在相同的深度上, 实验半变差值随方向的变化而变化。如果土壤含水量在空间上的分布是各向同性的, 那么实验半变差值在四个方向上应有相同的变化趋势和顶点值(Sill)。因此, 可以得出结论认为实验区域的土壤含水量在空间上的分布是各向异性的。

2.2 土壤水空间分布结构的时间稳定性

为了探讨土壤含水量空间分布结构的时间稳定性, 我们选择了一个 7 h 内共 42 mm 的降雨事件, 观察降雨前后土壤水空间分布结构的变化。图 3 显示了这一降雨前后土壤水在三维空间上的分布。该图由 6 组图形组成, 每组对应一个深度范围, 并由 12 幅小图构成, 每幅小图代表一个测定时间。作为一个例子, 我们分析在第二深度层(0.25~0.50 m) 上的土壤含水量在降雨前后的变化。降雨之前(7 月 15 日 14:00), 我们看到在西北方向上有一个高含水量的区域, 并且在东北和西南方向上分别有一个低含水量的区域。在经过 42 mm 的降雨之后, 位于西北方向上的高含水量区域的面积扩大了, 而两个低含水量的区域的面积也缩小了(7 月 16 日 6:00)。虽然土壤含水量有了增加, 然而我们看到土壤含水量空间分布的结构或模式并没有发生根本的变化。随着降雨停止, 土壤渐渐干燥, 扩大了的高含水量区域开始渐渐缩小, 而两个缩小的低含水量区域又开始逐渐扩大。在 7 月 21 日 8:00, 含水量的空间分布结构几乎已完全返回到了降雨前的模式。虽然土壤的进一步干燥促使了土壤含水量的进一步降低, 但却并没有改变土壤含水量在空间上分布的基本结构(7 月 26 日 16:00)。对其它深度上的土壤含水量空间分布结构的分析也可得到同样的结论。从而说明土壤水在空间上的分布结构在时间上具有相对的稳定性。

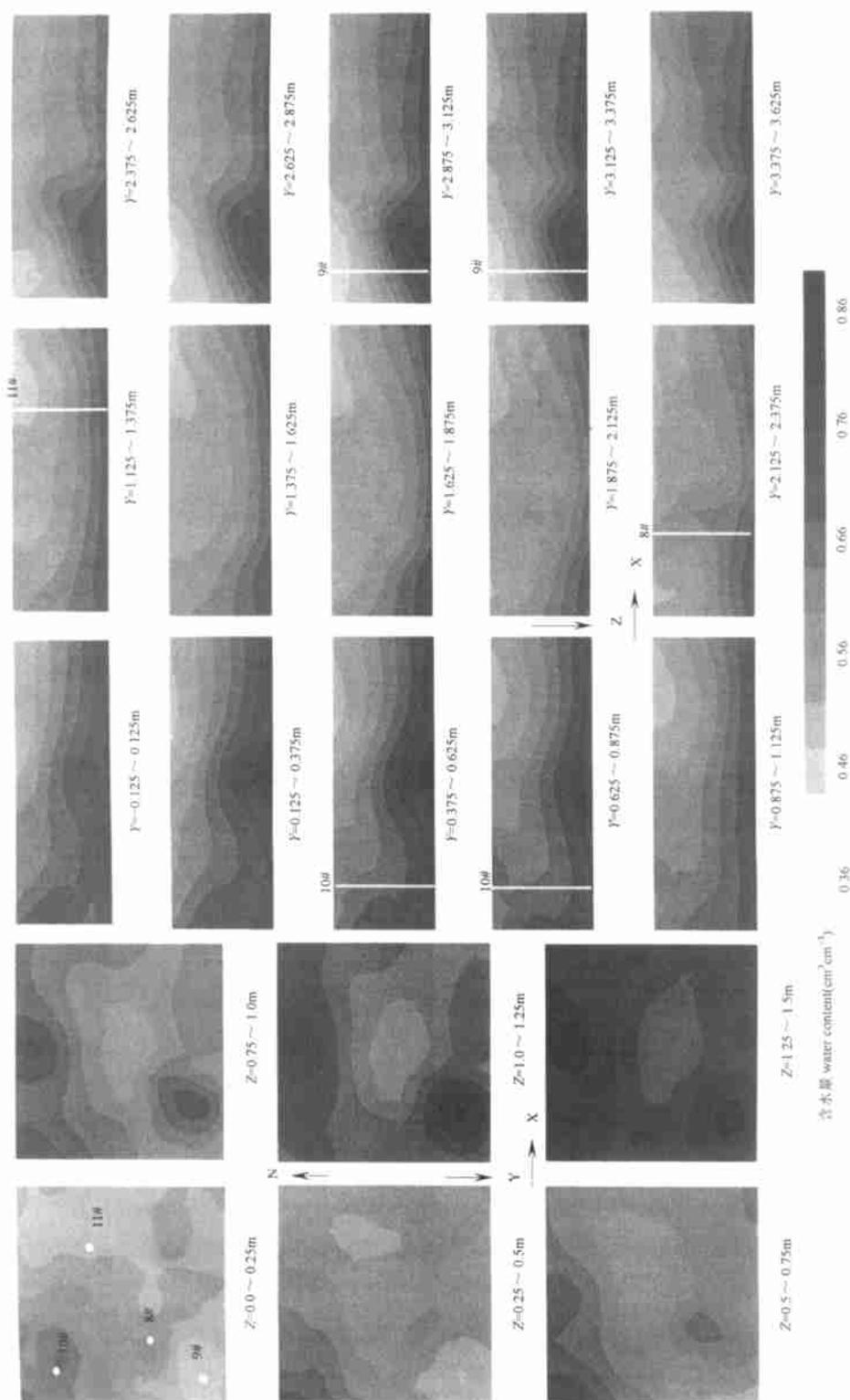


图1 基于土壤水分成像法应用1997年4月9日11:00测得的数据计算出的三维空间上的土壤含水量分布

Fig. 1 The three-dimensional soil water content distribution obtained at 11:00 April 9, 1997, by using soil moisture tomography

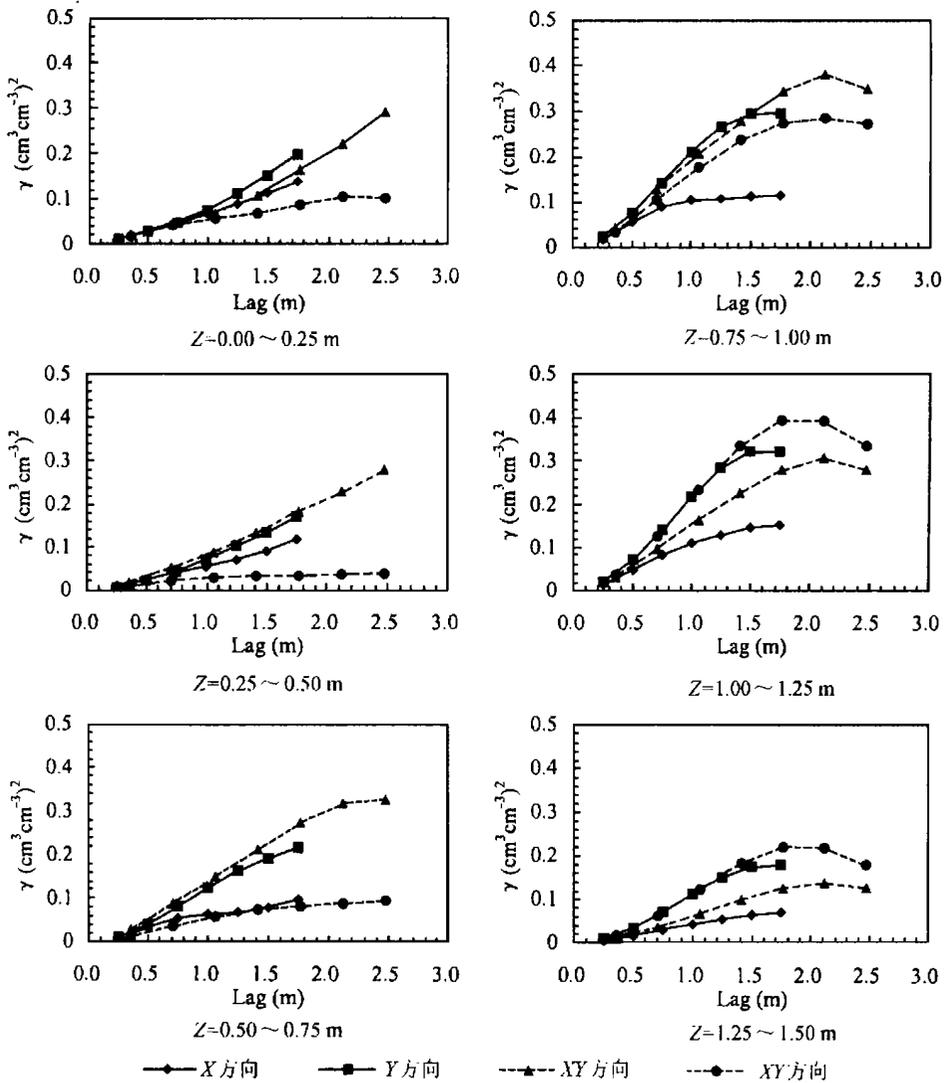


图2 三维空间上的土壤含水量分布在四个方向上的实验半变差图(测量时间为1997年4月2日19:00)

Fig. 2 The experimental semi-variograms for four directions in the three dimensional soil water content distribution (at 19:00 April 2, 1997)

3 结论

本文通过应用基于电阻率成像法的土壤水分成像法所获得的三维空间上的土壤含水量资料,对土壤水的空间分布特征和这一分布特征在时间上的稳定性进行了分析。结果表明,试验区的土壤含水量在三维空间上的分布是非均质的和各向异性的,这种非均质性在本试验的空间尺度上不是随机的而是具有一定的结构或模式,并且这一结构或模式在时间上具有相对的稳定性。这一结果对分析模拟土壤介质中的流体流动和物质迁移过程、流域水文过程以及优化农业生产活动都具有重要的意义。

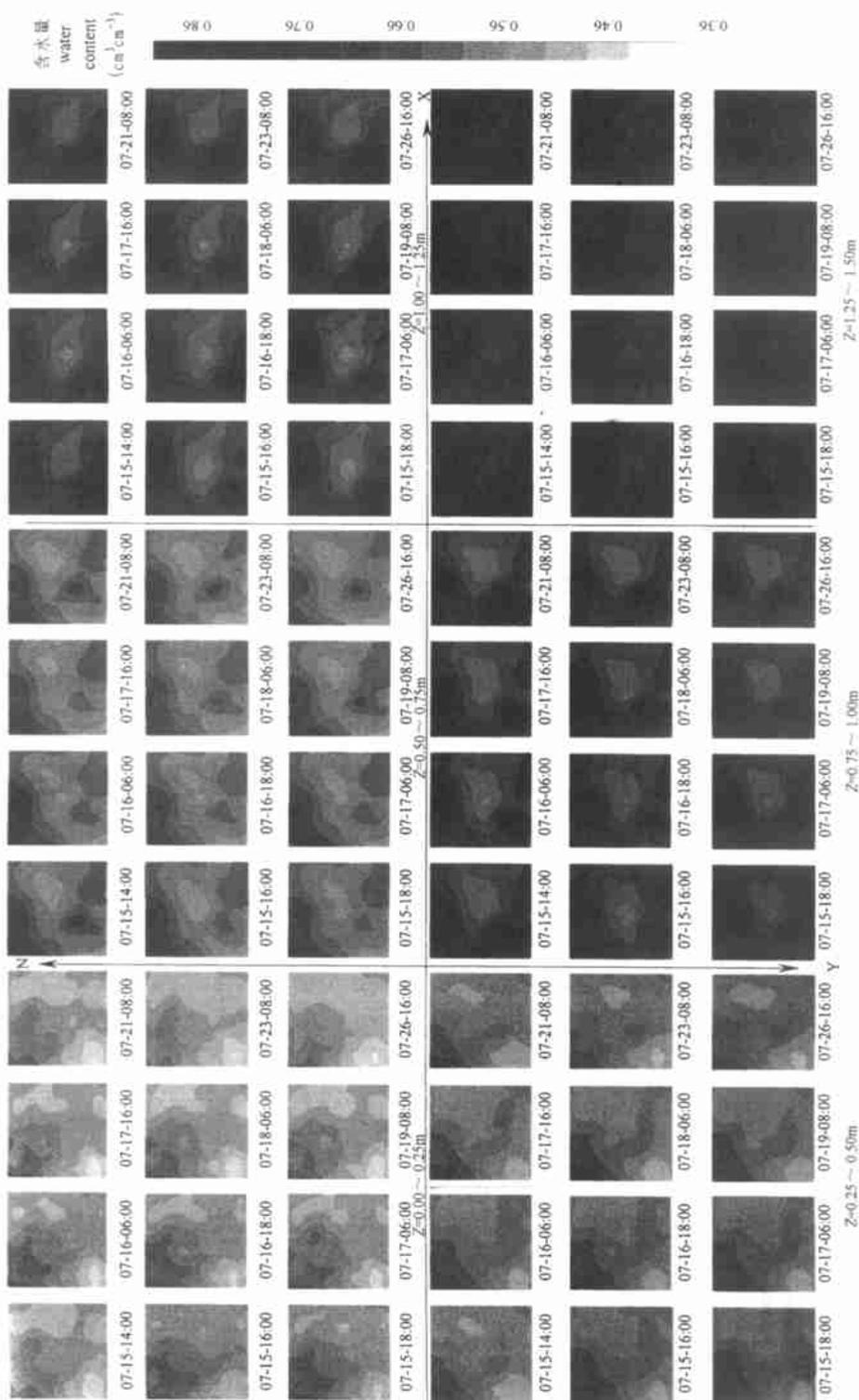


图 3 三维空间上的土壤含水量在降雨前后的变化
Fig. 3 The temporal variations of three-dimensional soil water content before and after rain fall

参考文献

1. Vachaud G, Silans A P D, Balabanis P, *et al.* Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1985, 49: 822~ 828
2. Kachanoski R G, de Jong E. Scale dependence and the temporal persistence of spatial patterns of soil water storage. *Water Resour. Res.*, 1988, 24: 85~ 91
3. Zhang T, Berndtsson R. Temporal patterns and spatial scale of soil water variability in a small humid catchment. *J. Hydrol.*, 1988, 104: 111~ 128
4. Gomez-Plaza A, Alvarez-Rogel J, Albaladejo J, *et al.* Spatial patterns and temporal stability of soil moisture across a range of scales in a semi-arid environment. *Hydrological Processes*, 2000, 14: 1261~ 1277
5. Van Pelt R S, Wierenga P J. Temporal stability of spatially measured soil matric potential probability density function. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2001, 65: 668~ 677
6. Harvey F E, Lee D R, Rudolph D L, *et al.* Locating groundwater discharge in large lakes using bottom sediment electrical conductivity mapping. *Water Resour. Res.*, 1997, 33: 2 609~ 2 615
7. Greenhouse J P, Harris R D. Migration of contaminants in groundwater at a landfill: A case study. 7. DC, VLF, and inductive resistivity surveys. *Journal of Hydrology*, 1983, 63: 177~ 197
8. Gheith H M, Schwartz F W. Electrical and visual monitoring of small scale three-dimensional experiments. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1998, 34: 191~ 205
9. Ramirez A, Daily W, LaBrecque D, *et al.* Monitoring an underground steam injection process using electrical resistivity tomography. *Water Resour. Res.*, 1993, 29: 73~ 87
10. Zhou Q Y, Shimada J, Sato A. Three dimensional spatial and temporal monitoring of soil water content using electrical resistivity tomography. *Water Resour. Res.*, 2001, 37: 273~ 285
11. Shimada J, Kawamura R, Taniguchi M, *et al.* Continuous soil moisture content measurement at the experimental field of ERC by using the heat-probe type soil moisture sensor (In Japanese). *Bulletin of Environmental Research Center, University of Tsukuba*, 1992, 16: 45~ 53
12. Hamada Y, Indra A R F, Tanaka T. Physical properties of soils of red pine forest and heat balance and water balance experiment field in Environmental Research Center, University of Tsukuba (In Japanese). *Bulletin of Environmental Research Center, University of Tsukuba*, 1998, 23: 1~ 10
13. Zhou Q Y, Shimada J, Sato A. Three-dimensional soil resistivity inversion using patching method. *Journal of the Japan Society of Engineering Geology*, 1999, 39: 524~ 532
14. Archie G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng.*, 1942, 146: 54~ 62

TEMPORAL STABILITY OF THE SPATIAL DISTRIBUTION PATTERN OF SOIL WATER

Qi You Zhou Jun Shimada

(*Institute of Geoscience, University of Tsukuba, Ibaraki 3058571, Japan*)

Summary

To analyze and simulate water flow and solute transport in the soil media, conduct catchment hydrological process simulation and optimize related agricultural activities, it is important to understand three-dimensional distribution characteristics of soil water and its temporal variability. In this study, by densely installed electrodes at a $3.5\text{m} \times 3.5\text{m}$ square in the field, first, soil resistances were measured at a given time interval. Then, based on an inversion algorithm for soil real resistivity and a relationship between soil resistivity and water content, three-dimensional spatial distributions of soil water content were obtained. Finally, on the basis of an analysis about the soil water content, three-dimensional spatial distribution characteristic of soil water and its temporal stability were investigated. The results show that the spatial distribution of soil water content at the experimental site is heterogeneous and anisotropic. However, this heterogeneity is not a random process; it has a spatial distribution pattern. This distribution pattern remains the same before and after the rainfall, indicating temporal stability of the spatial distribution characteristics of soil water.

Key words Spatial distribution pattern, Temporal stability, Electrical resistivity tomography, Soil moisture tomography