

# 太湖流域平原区土壤水分动态分析

徐飞<sup>1,2</sup>, 朱青<sup>1</sup>, 史伯强<sup>3</sup>, 廖凯华<sup>1</sup>, 郑锦森<sup>1</sup>

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室, 江苏南京 210008;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 南京市地产发展中心, 江苏南京 210005)

**摘要:**以太湖流域平原区两种土地利用方式(林地和菜地)为例,在长期定位观测土壤水分数据的基础上,采用时间序列法定量分析了土壤水分与降水之间的相关关系。结果表明:(1)降水量在时间上不相关,而各层土壤水分均为自相关序列;(2)降水与土壤水分之间存在一定的相关性,相关时长受季节、土壤深度、土地利用方式等的影响较为明显(1~8 d不等);(3)林地相关时长的季节变化表现为:夏秋季>春季>冬季。随着土壤深度的增加,菜地土壤含水量与降水相关关系在夏秋季呈减小趋势,而在冬春季节则相反。整体上林地降水对土壤含水量的有效影响时间长于菜地,且林地降水量与土壤含水量相关关系的规律性优于菜地。

**关键词:**相关性;土壤水分动态;太湖流域

文献标识码:A

文章编号:1000-288X(2014)06-0054-05

中图分类号:S152.7

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.06.017

## Dynamic Analysis of Soil Water in Plain Area of Taihu Lake Basin

XU Fei<sup>1,2</sup>, ZHU Qing<sup>1</sup>, SHI Bo-qiang<sup>3</sup>, LIAO Kai-hua<sup>1</sup>, ZHENG Jin-sen<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Nanjing Real Estate Development Center, Nanjing, Jiangsu 210005, China)

**Abstract:** Based on the long time monitoring data, taking the two typical land-use types (vegetable land and forest) in the plain of Taihu Lake basin as an example, the correlation between soil moisture and precipitation was analyzed with the time series method. The results showed that: (1) Precipitation time series was temporally uncorrelated, soil moisture contents in different depths, however, were self-correlation series. (2) There was a relationship existed between soil moisture and precipitation, the related time was in the range of 1~8 days due to the influence of seasons, soil depths and land-use types. (3) The seasonal change of the related time in forest can be described as: summer and autumn>spring>winter. With the increase of soil depth, the relationship between soil moisture and precipitation showed a trend of decrease in summer and autumn. The correlation in winter and spring, however, were the opposite. In conclusion, the effective time of precipitation on soil moisture was longer in forest than in vegetable land, and the regularity of the relationship between soil moisture and precipitation in forest was much better than that in the vegetable land.

**Keywords:** relationship; soil moisture dynamic; Taihu Lake basin

土壤水是一种重要的水资源,它是四水(地表水、地下水、大汽水、土壤水)转化的纽带,为水循环、能量循环和生物地球化学循环中的基本组成部分,在降水、径流、下渗和蒸散发等水文过程中起着至关重要的作用<sup>[1-3]</sup>。此外,太湖流域地区生态环境问题十分严重,其中水环境问题(如面源污染)尤其突出,而氮、磷等营养元素流失与降水、土地利用方式以及土壤水分运动的关系十分密切<sup>[4-5]</sup>,因此定量研究太湖流域

不同土地利用方式下土壤水分与降水之间的关系,对于该地区水资源规划管理、节水农业技术开发以及调控营养元素的迁移等均具有重要意义。

目前,国内有关土壤水分与降雨时序分析的研究已比较多,如石辉等<sup>[6]</sup>进行了黄土丘陵区人工油松林地土壤水分动态的时间序列分析,宋献方等<sup>[7]</sup>进行了华北平原地下水浅埋区土壤水分动态的时间序列分析,王晓燕<sup>[8]</sup>等进行了红壤坡地土壤水分时间序列分

收稿日期:2013-11-05

修回日期:2013-12-17

资助项目:江苏省自然科学基金项目“太湖流域丘陵区不同土地利用类型下土壤水分运动及营养盐流失研究”(BK2012502);国家自然科学基金重点基金项目(41030745);中国科学院南京地理与湖泊研究所“一三五”重点项目(NIGLAS2012135005)

作者简介:徐飞(1989—),男(汉族),安徽省安庆市人,硕士研究生,研究方向为土壤水分。E-mail:1021449273@qq.com。

析,王贺年<sup>[9]</sup>等开展了北京山区林地土壤水分时间序列分析。可见,现有研究区主要分布在西北、华北和西南地区,地貌类型主要有坡地、丘陵、山区、平原以及喀斯特地貌<sup>[10]</sup>等,已覆盖我国典型气候及地貌类型的地区。然而,对于处在东部季风气候条件下的太湖流域平原地区,有关研究则相对比较缺乏,尤其是较高时间分辨率(如日步长)的土壤水分时间序列分析更不多见。基于以上现状,本研究以日为时间步长,利用时间序列分析法研究太湖流域平原地区两种土地利用方式(林地、菜地)下土壤水分与降水的定量关系。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区地处江苏省南京市高淳区青山—游子山土地整治区,位于太湖流域平原地区西部(31°37'N, 119°05'E)。属于典型的水网平原区,河湖密布,高程在 5~10 m 之间<sup>[11]</sup>。气候类型为亚热带季风海洋性气候,年均降雨量超过 1 000 mm,降雨充沛,但年内分配不均,多集中在夏季。年平均气温 15.5 °C,全年无霜期约 230 d,年平均日照时数达到 2 000 h。研究区土地利用类型主要有林地、菜地以及水稻田,土壤水分主要受降雨补给,同时农业灌溉也是一个主要补给源。试验区林地混交阔叶林,植被覆盖季节差异明显。由于太湖流域地貌类型主要由丘陵和平原组成,其中平原区占流域总面积的 80%,因此,选取林地、菜地两种典型土地利用类型,对于揭示太湖流域土壤水分与降水之间相关关系具有较好的代表性。

### 1.2 土壤水分动态分析方法

选取林地和菜地作为试验对象,选择点系统监测降雨量和土壤体积含水量动态变化。在各试验点分别布设美国 Decagon Devices 公司生产的 EC-5 土壤水分探头,用于测定土壤剖面不同深度(10, 20, 40, 60 cm)的土壤含水量,并同步布设 ECRN-50 雨量计,记录降水量。监测频率均为 5 min,且数据自动存储在数据收集仪中,监测时段为 2012 年 7 月 1 日至 2013 年 11 月 29 日,期间定期(约 1 个月)采集下载数据。

根据原始降水量和各层土壤含水量数据,计算逐日降水量,得到降雨序列  $X$ ,然后选取每日同一时刻土壤含水量数据,得到土壤含水量时间序列  $Y$ 。对于两个时间序列,只要时间上同步,均可用协方差相关系数描述其相关性。若原始降雨序列为对于两个时间间隔相同的平稳时间序列  $X$  和  $Y$ ,它们之间的协相关系数可以用公式(1)计算<sup>[12]</sup>:

$$\rho_{xy} = \frac{S_{xy}(h)}{\sqrt{S_{xx}(0)S_{yy}(0)}} = \frac{S_{xy}(h)}{\delta_x \delta_y} \quad (1)$$

式中: $\rho_{xy}$ ——滞后时间为  $h$  时, $x$  和  $y$  两个时间序列的协相关系数; $S_{xy}(h)$ ——滞后时间为  $h$  时, $x, y$  两个序列的协方差; $S_{xx}(0), S_{yy}(0)$ —— $x, y$  序列的方差; $\delta_x, \delta_y$ ——序列  $x, y$  的标准差; $h$ ——滞后时间。

对于具有  $n$  对观测数据的两个时间序列 $(x_1, y_1)$  $(x_2, y_2)$  $(x_3, y_3)$ …… $(x_n, y_n)$ ,时间差为  $h$  的协方差可由公式(2)计算:

$$S_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-h} (x_i - \bar{x})(y_{i+h} - \bar{y}) \quad h=0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

式中: $\bar{x}$  和  $\bar{y}$ ——时间序列  $x, y$  的平均值。结合公式(1)–(2),即可计算出协相关系数为  $h$  时的协相关系数。根据协相关系数的大小,可估计两个序列的协相关程度。假设该值为 0,则表明显著不相关,如果不为 0,则应用 Bartlett 公式计算的 2 倍标准差来衡量两序列是否相关。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤水分和降水的时间动态变化特征

研究时段的年降雨量为 1 148 mm,结合研究区的多年平均降水特征可知,属于典型的平水年。其次,降水表现出明显的季节差异。夏季降水充沛,月均降水量达到 162 mm,单季降水量达到年降水总量的将近 1/2,其显著性特点是单次降雨量大,多为中到大雨,甚至暴雨,但降雨连续性差。与此不同的是,降水在秋、冬、春等季节时偏小,月均分别为 82, 79, 63 mm。

表 1 为研究时段内林地菜地在不同季节土壤水分统计特征。由表 1 可以看出,土壤含水量存在较为显著的季节变化和剖面变化,且这种变化在林地、菜地两种不同类型的土地利用方式下又有所不同。首先,各季节土壤含水量的平均值在林地和菜地均是夏季最高,而变异系数则是秋季最大,其他季节因在不同深度差异明显而整体关系较复杂。其次,在研究时段内,土壤含水量自表层 10 cm 向下至 60 cm 总体呈增加趋势,变异系数则呈减小趋势。土壤水分含量及变异在垂向上的差异可能是与不同土层土壤的渗透、持水特性以及蒸发能力的差异有关,而这又是由土壤结构剖面和孔隙度决定的<sup>[13]</sup>。土壤含水量的这种剖面变化同样因土地利用方式的不同而存在差异,菜地土壤含水量在垂直方向之差在各个季节都超过了 1 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,与菜地相比,林地土壤含水量在剖面上的差异较小,表层(10 cm)与深层(60 cm)土壤含水量之差除冬季外均小于 0.05 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。

表 1 林地、菜地各层土壤水分的统计特征

季节	土层深度/ cm	菜地土壤		林地土壤	
		含水量/( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	变异系数/%	含水量/( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	变异系数/%
夏季 (6—8月)	10	0.332±0.054	16.50	0.322±0.062	19.20
	20	0.341±0.090	26.45	0.352±0.051	14.34
	40	0.441±0.025	5.73	0.321±0.050	15.67
	60	0.382±0.008	2.16	0.371±0.038	10.33
秋季 (9—11月)	10	0.281±0.062	21.92	0.248±0.044	17.55
	20	0.293±0.099	33.85	0.281±0.053	18.84
	40	0.376±0.087	23.18	0.273±0.051	16.85
冬季 (12—2月)	60	0.372±0.012	3.24	0.256±0.063	24.56
	10	0.251±0.009	2.20	0.342±0.017	4.98
	20	0.303±0.027	9.02	0.377±0.014	3.83
春季 (3—5月)	40	0.404±0.035	8.69	0.275±0.051	18.56
	60	0.386±0.006	1.67	0.235±0.053	22.66
	10	0.274±0.027	9.91	0.287±0.037	13.15
	20	0.292±0.039	13.52	0.316±0.043	13.83
	40	0.396±0.026	6.72	0.306±0.037	12.34
	60	0.397±0.007	1.77	0.312±0.053	16.95

注:含水量数据为平均值±标准差。

## 2.2 降雨与土壤含水量自相关分析

分别对降水序列和林地、菜地各层土壤水分序列作自相关分析(图 1)。可以看出,2012 年 7 月至 2013 年 11 月研究区内降水序列不具有相关性( $p > 0.1$ ),而两种土地利用方式下各层土壤含水量序列均存在极为显著的相关性( $p < 0.05$ )。这充分说明降水的随机性很强,相邻两次降雨之间并无统计意义上的联系,同时土壤含水量受前期含水量的影响较为明显,但这种影响随时间推移逐渐减弱。

土壤含水量序列相关性主要受土壤深度的影响,表层土壤水分的相关性和相关时间长度均小于较深层次,这说明越接近于表层,土壤含水量稳定性越差。这是由于表层土壤水分受土面蒸发、植物蒸腾等作用的直接影响<sup>[6]</sup>,同时又容易通过下渗而流失,导致波动较大。而深层土壤水分受这些因素影响相对较小,因此相关性高于表层。但由于各深度土层间土壤含水量相关性同样很高,且含水量为连续变化<sup>[14]</sup>,故相关性大小在垂向上差异并不大。

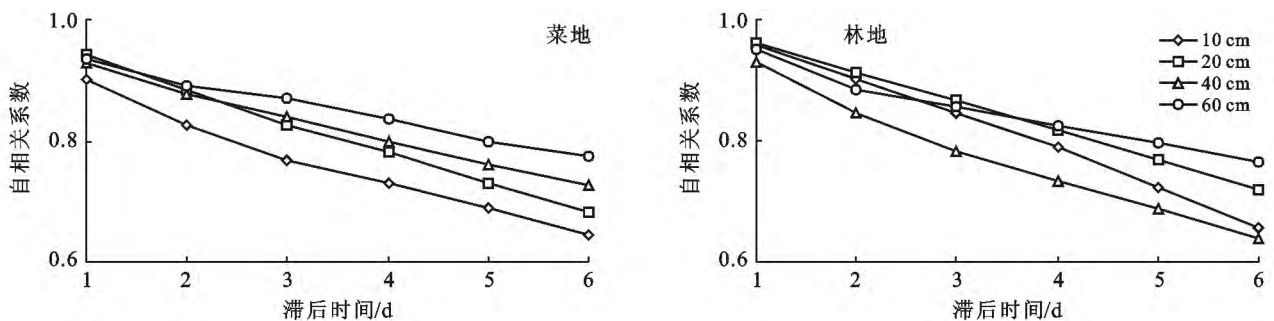


图 1 研究区菜地、林地土壤水分含量的自相关系数

## 2.3 降雨量与土壤含水量的协相关分析

对降雨量和两种土地利用方式下各层土壤含水量进行协相关分析(图 2—3)。由图 2—3 可以看出,土壤水分与降雨量之间在一定相关性,相关时长在 1~8 d 内会因土地利用方式和季节等的不同而存在差异,且相关性大小及相关时长由表层向下逐渐减

小。与王晓燕<sup>[8]</sup>在南方红壤坡地进行的研究相比,本研究中降水与土壤含水量之间的相关性较小,且随着滞后时间的增加,协相关系数的变化规律存在较大差异,这说明影响本研究区土壤水分的因素较复杂,比如季节、土地利用方式、农业活动等均可能对土壤含水量产生重要影响。

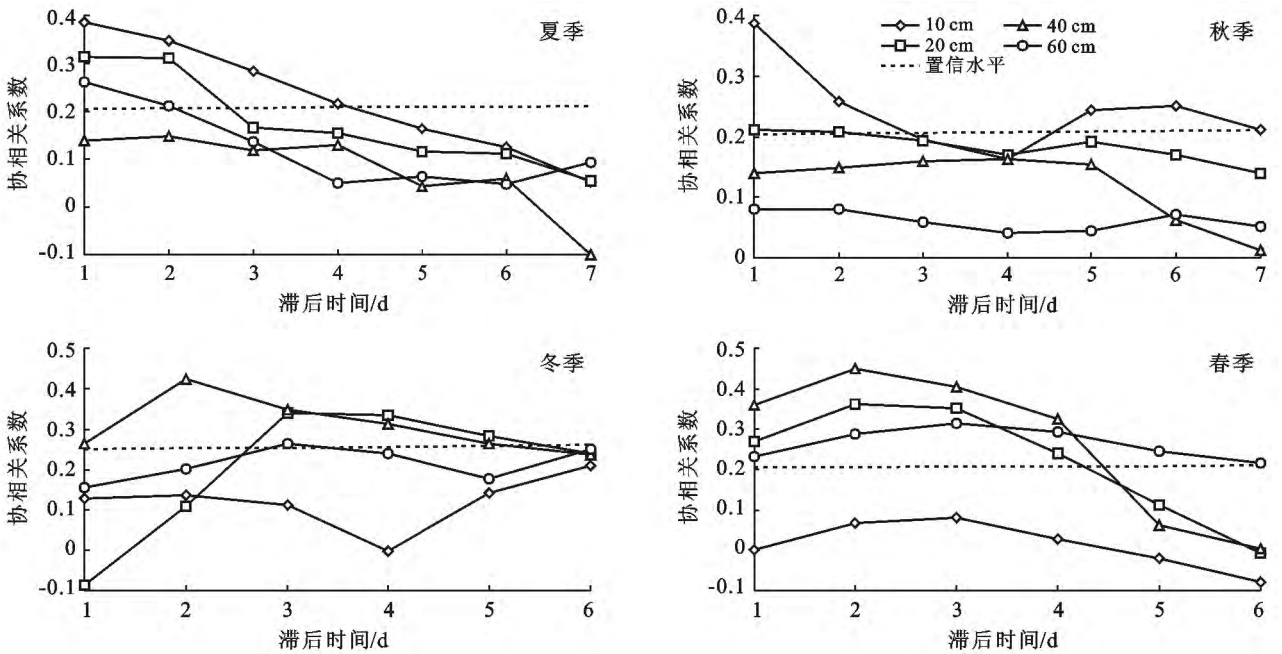


图 2 菜地不同季节不同深度土壤水分与降水的协相关系数

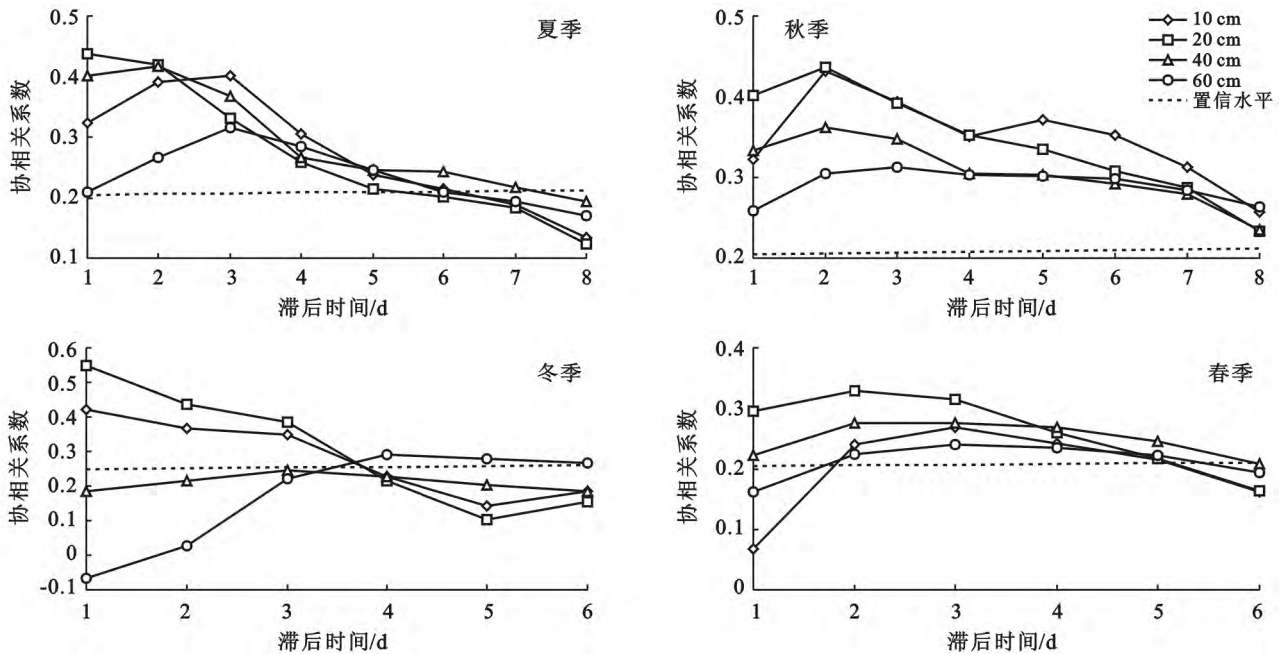


图 3 林地不同季节不同深度土壤水分与降水的协相关系数

2.3.1 不同季节和土壤深度下降水与土壤含水量协相关分析 土壤水分与降雨量之间的相关关系受到季节和土壤深度的影响。以林地为例,相关时长的季节差异较为明显,但在除冬季以外的各季无论是相关时长还是相关系数,受土壤深度的影响均较小。在夏、秋季降雨对各层土壤水分的有效影响时间分别达到 7 和 8 d,在春季为 5 d,而冬季仅表层(10 和 20 cm)有 3~4 d。林地相关系数随滞后时间增加其变化规律相似,多成先增加再下降的峰型甚至双峰型。尤其需要注意的是,相关系数在冬季深受土壤深度的

影响,表层(10 和 20 cm)土壤含水量与降水的相关系数明显大于其他季节,且最大相关时间出现在雨后第 1 d,而较深层次则不具有统计意义上的相关性。这可能是由于该研究区降雨季节性变化,以及不同季节植被的生长状况可能存在差异。冬季林地针阔叶混交林茂密度不及其他季节,对降雨的截留能力减小,初始和稳定入渗率偏低,入渗补给系数减小,导致降雨对表层(10, 20 cm)土壤含水量的影响大,对深层(40, 60 cm)影响极小,且有效影响时间短。

菜地降水和土壤含水量之间的关系随季节、深度

的变化同样表现出较大差异,这主要体现在相关时长和最大相关性时间两方面。降水与自表层向下各层土壤含水量之间的相关时间域在夏季分别为 1~4 d, 1~3 d, 1~2 d, 0 d, 在冬季分别为 0 d, 3~5 d, 1~5 d, 3~4 d, 在春季分别为 0 d, 1~4 d, 1~4 d, 1~6 d, 而在秋季除表层 10 cm 以外各层土壤含水量与降水均无统计意义上的相关性。由此可见,相关时长总体上在春季最长,秋季最短,夏季和冬季居中。且夏、秋季节相关时长自表层向下呈递减趋势,但在冬春季节却呈截然相反的“倒挂”现象。这是因为菜地 40 cm 深度由于土壤分层明显,且不易透水,致使其土壤含水量一直偏高,在夏秋季节与降水无明显相关性,而在冬春季节却使得该层与 20 和 60 cm 深度的土壤含水量均与降水存在较好的相关性。加之冬春季使用了塑料大棚,阻隔了降水对表层土壤水分的影响,因而相关时长随土壤深度的增加而增加。对于菜地降水与土壤含水量最大相关性时间,在夏季为雨后第 1 d,但在冬季和春季,多出现在雨后第 2 d 甚至第 3 d。

2.3.2 不同土地利用方式下降水与土壤含水量协相关分析 两种土地利用方式下土壤含水量与降雨的相关时长及相关系数随滞后时间的变化规律存在比较明显的差异。首先,就相关时长而言,整体上林地要长于菜地,林地除冬季外降水对土壤水分的有效影响时间均达到或超过 5 d,而菜地则普遍小于 5 d。其次,菜地土壤含水量对降雨的响应速度总体上要快于林地,表现为最大相关时间早于林地,这在夏秋季节尤为明显。林地最大相关时间多出现在雨后第 2 天,且林地相关系数的变化幅度除冬季外较菜地更为平缓。这是因为林地和菜地的植被类型不同,植被不但通过冠层截留影响入渗,而且对降水进行再分配,此外不同植被的根系吸水能力也有较大差异。

受农业活动的影响程度不同,林地土壤含水量对降雨响应的规律性要强于菜地。与较少受外界干扰的林地不同,为保证作物的正常生长,菜地受到的人为活动较为频繁,如作物种植时的翻耕,干旱时灌溉补给,和冬、春季节的塑料大棚保温等,从而改变了土壤的入渗量、保水能力,致使菜地与降水的相关关系变得复杂,其在垂向剖面上以及季节上的变化规律远不及林地显著。

### 3 结论

(1) 降水是土壤水分含量的一个重要影响因素,但影响程度因季节、土壤深度、土地利用方式的不同而存在差异。

(2) 不同的季节和土壤深度降水对土壤水分的

影响不同,对林地而言,可归纳为夏、球季最大(7~8 d),冬季最小(3~4 d),此外林地除冬季外深度对相关关系的影响较小。菜地秋季除表层外土壤含水量与降水无统计意义上的相关性,在夏季与冬春季节随土层深度的增加,土壤含水量与降水的相关时长呈截然相反的变化趋势,同时夏季的最大相关时间早于冬、春季节。

(3) 土地利用方式是影响降雨和土壤水分之间关系的一个重要因素,总体而言,林地降水对土壤含水量的影响要大于菜地,且由于人为活动影响程度不同以及植被类型的差异,林地土壤含水量与降水间相关关系变化要优于菜地。

#### [参 考 文 献]

- [1] 张超,王会肖. 土壤水分研究进展及简要评述[J]. 干旱地区农业研究,2003,21(4):117-125.
- [2] Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, et al. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate [J]. *Earth-Science Reviews*, 2010,99(3):125-161.
- [3] 邵晓梅,严昌荣,徐振剑. 土壤水分监测与模拟研究进展 [J]. 地理科学进展,2004,23(3):58-66.
- [4] 秦伯强. 太湖生态与环境若干问题的研究进展及其展望 [J]. 湖泊科学,2009,21(4):445-455.
- [5] 李恒鹏,刘晓玫,黄文钰. 太湖流域浙西区不同土地类型的面源污染产出 [J]. 地理学报,2004,59(3):401-408.
- [6] 石辉,刘世荣,孙鹏森,等. 黄土丘陵区人工油松林地土壤水分动态的时间序列分析 [J]. 山地学报,2004,22(4):411-414.
- [7] 宋献方,王仕琴,肖国强,等. 华北平原地下水浅埋区土壤水分动态的时间序列分析 [J]. 自然资源学报,2011,26(1):145-155.
- [8] 王晓燕,陈洪松,王克林,等. 红壤坡地土壤水分时间序列分析 [J]. 应用生态学报,2007,18(2):297-302.
- [9] 王贺年,余新晓. 北京山区林地土壤水分时间序列分析 [J]. 山地学报,2012,30(5):550-554.
- [10] 傅伟,王克林,陈洪松,等. 典型峰丛洼地坡面土壤水分动态变化的时序分析 [J]. 水土保持学报,2005,19(4):111-114.
- [11] 高俊峰,闻余华. 太湖流域土地利用变化对流域产水量的影响 [J]. 地理学报,2002,57(2):194-200.
- [12] 周刘宗,陈志雄,雷志栋,等. 土壤水分的时序分析研究 [J]. 土壤,1998(4):188-193.
- [13] 蒋太明,刘海隆,刘洪斌. 黄土坡地土壤水分入渗垂直变异特征分析 [J]. 水土保持学报,2004,18(3):49-52.
- [14] 张丽丽,陈家宙,吕国安,等. 利用土壤表层含水量序列预测深层含水量的研究 [J]. 水土保持学报,2007,21(3):162-169.