

DOI: 10.5846/stxb201405181019

徐飞, 赖晓明, 朱青, 廖凯华. 太湖流域丘陵区两种土地利用类型土壤水分分布控制因素. 生态学报, 2016, 36(3): - .

Xu F, Lai X M, Zhu Q, Liao K H. Study on the controlling factors of soil moisture distribution under two typical land-use hillslopes in a hilly region of Taihu Lake basin. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(3): - .

太湖流域丘陵区两种土地利用类型土壤水分分布控制因素

徐 飞^{1,2}, 赖晓明^{1,2}, 朱 青^{1,*}, 廖凯华¹

1 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 流域地理学重点实验室, 南京 210008

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:为探究太湖流域丘陵区典型土地类型(如竹林地和茶园)土壤水分的控制因素,在不同深度土壤水分定期观测的基础上,根据前七天降雨量将研究时段划分为干旱状态和湿润状态,利用分类与回归树(classification and regression tree, CART)方法得出不同干湿状态下土壤水分分布的主控因子,并借助典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)定量分析不同土地类型、不同土壤深度土壤水分格局与环境因子关系。结果表明:(1)高程、土地利用类型和土层厚度对土壤水分分布的相对贡献率最大,但在不同干湿状态下其影响程度存在差异;(2)干旱状态时土壤水分主要受高程、坡度、地形湿度指数(topographic wetness index, TWI)和剖面曲率等地形因素的作用,而土层厚度和粘粒也分别为 0—20 cm 和 20—40 cm 深度土壤水分的主控因子;(3)在湿润状态下,茶园 0—20 cm 土壤水分的主控因素为地形因子,在 20—40 cm 则以土壤性质为主,竹林地两个深度的土壤水分受地形和土壤性质的作用都很强,其中 20—40 cm 深度土壤水分与环境因子的关系较 0—20 cm 深度更为复杂。

关键词:太湖流域; 土壤水分; 环境因子; 主控因子

Study on the controlling factors of soil moisture distribution under two typical land-use hillslopes in a hilly region of Taihu Lake basin

XU Fei^{1,2}, LAI Xiaoming^{1,2}, ZHU Qing^{1,*}, LIAO Kaihua¹

1 Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Soil moisture is one of the most important factors in terrestrial ecosystems. Adequate knowledge of its spatio-temporal variability is critical to many scientific and practical applications. We explored the factors controlling moisture distribution in soils under typical land-use types (i.e., bamboo forest and tea garden) in a hilly region of Taihu Lake basin. In situ soil moisture measurements were made at different depths, and these were classified as dry or wet conditions, based on the precipitation during the previous 7 d. The main controlling factors were identified by using the classification and regression tree (CART) method. Canonical correspondence analysis (CCA) was then applied to quantitatively analyze the relationships between soil moisture and environmental factors under different land-uses at different soil depths. The results show that: (1) the relative influences of elevation, land use, and soil thickness on soil moisture distribution were larger than those of other environmental factors in most cases. Together these accounted for more than 50% of the total variation in soil moisture. However, their relative contributions differed between dry and wet conditions. (2) In dry conditions soil moisture was mainly affected by topographic indices such as elevation, slope, topographic wetness index (TWI) and profile

基金项目:国家自然科学基金(41271109, 41301234); 中国科学院南京地理与湖泊研究所“一三五”重点项目(NIGLAS2012135005)

收稿日期:2014-05-18; **网络出版日期:**2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qzhu@niglas.ac.cn

curvature. Soil thickness and clay content also significantly affected soil moisture at 0—20 and 20—40 cm depths, respectively. The main factors controlling soil moisture in dry conditions varied with soil depth, but not with land-use type. This finding was different from that of a previous study, in which the study area had similar landforms and climatic conditions. This may be due to the effects of spatial scale. (3) In wet conditions, topographic indices and soil properties were the main factors controlling soil moisture in tea gardens at 0—20 and 20—40 cm depths, respectively. Both topographic indices and soil properties were the main controlling factors of soil moisture in a bamboo forest at these two depths. It is noted that the relationship between soil moisture and environmental factors at 20—40 cm depth is more complicated than that at 0—20 cm depth in bamboo forest. In contrast to dry conditions, both soil depth and land-use type had a significant impact on the environmental factors that control soil moisture distribution. This study is of great relevance to the sustainable utilization of water and soil resources and to the management of water and fertilizer in agriculture in this region.

Key Words: Taihu Lake basin; soil moisture; environmental factors; main controlling factors

土壤水分是陆地生态系统最重要的因素之一,其时空变化研究在多个学科和应用领域有着重要的意义^[1]。首先,土壤水分对土壤的形成和发育、土壤中物质和能量的运移以及植物的生存与生长,都有着重要的影响;其次,作为一种重要的水资源,土壤水分通过控制地球表层水分和能量迁移和建立土壤—植物—大气连续体(SPAC)之间的物理关系,进而在全球水循环中起到了关键作用^[2-3]。因此,土壤水分的时空格局在土壤学、水文学和生物化学领域引起了极大的重视并得到广泛的研究。

土壤水分受地形、土壤性质和土地利用方式等多种因素的复杂影响。传统观点认为,在干旱季节,土壤水分的空间分布主要受到土壤理化性质的影响;而在湿润季节,则主要受到地形因素的影响^[4-5]。然而,随着研究区域气候、地形条件和土地利用类型的变化,土壤水分含量的时空分布规律及其控制因素往往大不相同^[6-7]。此外,当前已有的相关研究大多侧重于研究表层土壤水分的时空变化规律,而对下层土壤水分的研究尚不多见^[8-9]。因此,深入探讨不同气候、地形、土地类型和土层深度条件下土壤水分时空分布的影响因子,是当前需要解决的重点问题。

目前,国内有关土壤水分与环境因子关系的研究主要集中在西北干旱地区,尤其是黄土丘陵区。如刘鑫等^[10]以晋西黄土区典型梁坡面为例,基于地形因子对土壤水分分异进行了深入研究;姚雪玲等^[7]分析了黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及其与影响因子之间的关系。然而,有关太湖流域丘陵区土壤水分与环境因子的关系研究仍比较缺乏。太湖流域水体富营养化问题日益严重,土壤水分分布和壤中流被认为是营养盐输移的主要控制因素之一^[11]。尤其是近年来随着经济发展的需要,太湖流域丘陵区林地被大量开发为园地和旱地^[12],由此带来的农业水肥投入及土壤水文过程变化给该区水环境也造成了很大影响。因此,研究太湖流域丘陵区典型土地类型土壤水分时空格局的控制因素,对于该区域水土资源可持续利用和农业水肥管理具有较强的现实意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于太湖流域西部南京高淳区的青山茶厂(31°22' N, 119°03' E)。该地区属于亚热带季风气候,四季分明,年均降雨量超过 1100 mm,但年内分配不均,近 60 %集中在 4—9 月,光照充足,年均气温 15.9 °C。研究区海拔在 80—90 m 范围内,整体上呈西北高东南低的变化趋势,土壤类型以薄层粗骨土为主,土壤粒径分布中粉粒含量最高(超过 70 %),砂粒含量和粘粒含量相当(约 13 %),土层厚度自 18 cm 到 86 cm 不等,空间差异很大。地貌类型为典型的丘陵山区,坡度变化范围在 0.02—19.5 °。该地区农业发达,主要土地利用类型有毛竹林地和茶园。

1.2 样点布置与数据采集

在青山茶厂选取茶园(10年生)和毛竹林(30年生)两种典型土地类型,根据地形布设77个土壤水分监测点,其中茶园39个,竹林地38个(图1)。在每个监测样点安装PVC接入管,采用剖面土壤水分传感器(TRIME-PICO-IPH)测定不同深度(0—20 cm和20—40 cm)土壤水分,测定日期自2013年1月9日至11月13日,共12次,其中5月中旬有典型降雨,因而连续测定了3次。采用土钻法采集各样点不同深度处土壤样品,同时记录下土层厚度,将土壤样品带回实验室风干、过2 mm筛,利用Malvern Mastersizer 2000激光粒度仪测量土壤粒径分布,得到砂粒(0.05—2 mm)、粉粒(0.002—0.05 mm)和黏粒(0—0.002 mm)含量。此外,根据1:5000地形图生成1 m分辨率的研究区数字高程模型(DEM),进而利用ArcGIS的空间分析模块提取各监测样点位置上的地形因子,包括地形湿度指数(topographic wetness index, TWI)、高程、坡度和剖面曲率。

1.3 研究方法

利用决策树中的分类回归树(CART)模型研究不

同干湿条件下土壤水分分布的影响因素,相关分析在Clementine12.0软件中完成。CART最早于1984年提出,是一种广泛应用的基于树结构产生分类和回归模型的统计过程^[13],其内部是个分层的二叉树结构,在每个节点处利用最优的变量将数据划分为两个相互独立的子集,最终可以得出各变量在数据分类中的贡献率。CART中输入变量和输出变量可以是分类型也可以是数值型。利用CART模型,分别将不同时期各样点的平均土壤含水量作为因变量输出,其对应的环境因子作为自变量输入,从而获取各环境因子对土壤水分分类的相对贡献率。

利用典范对应分析(CCA)方法对土壤水分监测样点进行排序分析,并得到其分布格局与环境因子关系的双序图,相关分析在Canoco4.5软件中完成。CCA又名多元直接梯度分析,是基于对于分析发展而来的一种排序方法,将对应分析与多元回归分析相结合,每一步计算均与环境因子进行回归。CCA主要用于分析植物群落时空变异及其与环境因子的关系,近年来在土壤水分时空格局与环境因子关系方面多有应用^[14-15]。运用时首先要对定性数据进行编码,将茶园定义为1,竹林地定义为2。此外该方法需要两个数据矩阵,在本研究中为土壤水分含量矩阵和样点对应的环境因子矩阵。土壤水分含量矩阵为 $P \times N$ 维,其中 P 为采样次数(共12次), N 为监测样点数目。环境因子矩阵为 $Q \times N$ 维,其中 Q 为环境因子数量。

2 结果与分析

2.1 干湿变化条件下土壤水分主控因子识别

根据前7天降雨量大小,将12次土壤水分测量数据分为两类,分别代表土壤的干旱状况和湿润状况(表1)。其中湿润状态包括2013年3月27日、5月10日、5月13日、5月15日和7月7日共5次,余下7次属于干旱状态。值得注意的是,土壤平均含水量不仅受降水影响,还受到土地利用类型和土壤深度的作用。竹林地对应深度处的土壤平均含水量均显著高于茶园(约2倍),这可能是因为竹林地地表的枯枝落叶等能有效降低地表的蒸散发,从而更好地涵养水源,且竹林地的砾石含量为0.42(重量比),要低于茶园的0.51,导致两

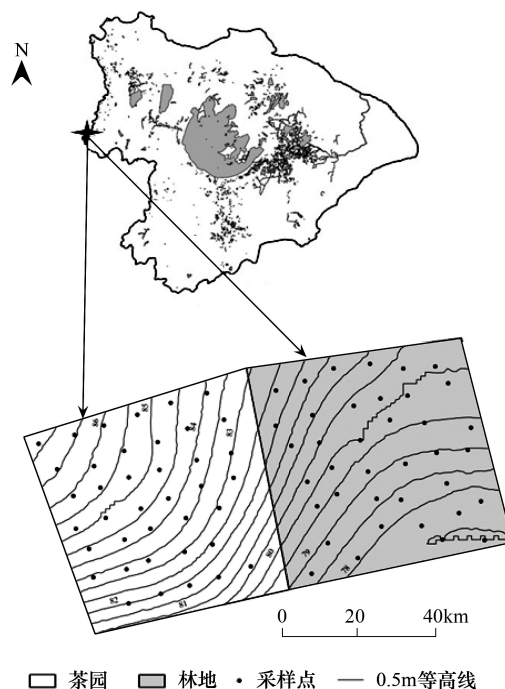


图1 研究区位置及监测样点分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area and sample point distribution

种土地利用类型的土壤饱和含水量存在差异。同时,在干旱状态下表层 0—20 cm 深度土壤平均含水量整体上低于 20—40 cm 深度,湿润状态下情况则不同,0—20 cm 深度的平均土壤含水量与 20—40 cm 基本持平或略高。

表 1 不同降雨条件下两种土地利用的土壤含水量

Table 1 Soil water contents of two land uses under different precipitation conditions

日期 Date	前 7 天降雨量/(mm) antecedent precipitation index during the previous 7 days	土壤平均含水量 Mean soil moisture (cm ³ /cm ³)			
		茶园 0—20 cm	茶园 20—40 cm	竹林地 0—20 cm	竹林地 20—40 cm
		Tea garden 0—20cm	Tea garden 20—40cm	Bamboo forest 0—20cm	Bamboo forest 20—40cm
2013-01-09	2.3	0.11	0.12	0.23	0.23
2013-03-11	1.6	0.10	0.12	0.21	0.23
2013-03-27	18.1	0.12	0.11	0.25	0.25
2013-05-10	61.4	0.13	0.13	0.27	0.29
2013-05-13	44.0	0.12	0.11	0.25	0.24
2013-05-15	36.7	0.12	0.12	0.23	0.22
2013-07-07	63.9	0.15	0.14	0.29	0.27
2013-07-31	0	0.09	0.10	0.18	0.21
2013-09-17	0	0.07	0.08	0.13	0.15
2013-09-26	9.8	0.07	0.08	0.13	0.15
2013-10-18	1.2	0.09	0.10	0.17	0.19
2013-11-13	8.6	0.08	0.08	0.13	0.15

CART 分析结果如表 2 所示,可见太湖流域丘陵区土壤水分分布主要受高程、地形湿度指数和土地类型的影响,但不同时期的主控因子存在一定差异。在整个研究时段内,高程、土地类型和土层厚度对土壤水分的影响起着主导作用,共解释了 77.7 % 的累积贡献率;在干旱状态,高程对土壤水分影响的贡献率最大(38.2 %),其次为坡度(18.8 %)和土层厚度(12.6 %);而在湿润状态,土壤水分空间格局的主控因子则为土地类型、TWI 和粘粒,它们的累积贡献率达到 64.1 %,此外高程和土层厚度对土壤水分也有一定影响。

与以往的研究不同^[10,14],本研究区各时段内土壤水分的主控因子呈现数量较多,单一因子相对贡献率偏小的特点,且与分阶段相比,在整个时段部分环境因子对土壤水分的影响出现波动变化。这可能是因为太湖流域丘陵区地形和土壤性质等空间异质性很大,且植被覆盖率高、土地利用类型多样,加上降雨的年内分布不均,导致土壤水分与环境因子之间的关系随时间变化差异较大。

表 2 环境因子对不同时段土壤水分影响的相对贡献率

Table 2 The relative contribution rate by environment attributes to soil moisture in different periods

环境因子 Environmental factors	相对贡献率 Relative contribution rate(%)		
	整个时段 Whole period	干旱状态 Dry condition	湿润状态 Wet condition
土地利用类型 Land-use type	27.2	6.8	32.3
坡度 Slope	5.0	18.8	2.3
高程 Elevation	35.3	38.2	8.6
地形湿度指数 Topographic wetness index, TWI	3.9	6.8	9.6
剖面曲率 Profile curvature	8.1	7.3	5.5
砂粒 Sand	0	0	2.3
粉粒 Silt	0	2.7	8.6
粘粒 Clay	5.2	6.8	20.2
土层厚度 Soil thickness	15.3	12.6	10.6
总计 Total	100	100	100

2.2 干旱状态时土壤水分与环境因子的定量关系

图 2 为干旱状态时茶园和竹林地不同深度土壤水分与环境因子的 CCA 排序情况,可见前两轴累积解释的土壤水分与环境因子相关系数与总方差的比值均超过 80 %,排序达到了较理想的效果。在茶园 0—20 cm 深度,第一轴与土层厚度和高程显著相关,相关系数分别为 0.278 和 -0.262,第二排序轴与坡度(0.238)和剖面曲率(-0.222)相关性较好,与其他环境因素的关系并不显著。由此可知,茶园 0—20 cm 土壤水分分布的主控因子为土层厚度、高程、坡度和剖面曲率。在 20—40 cm 深度,与第一轴关系紧密的有粘粒(-0.370)、高程(0.355)、坡度(-0.291)和 TWI(0.261),第二轴方向投影较长的是土层厚度(0.347)和剖面曲率(-0.274),这些因素是茶园 20—40 cm 土壤水分变异的主控因子。

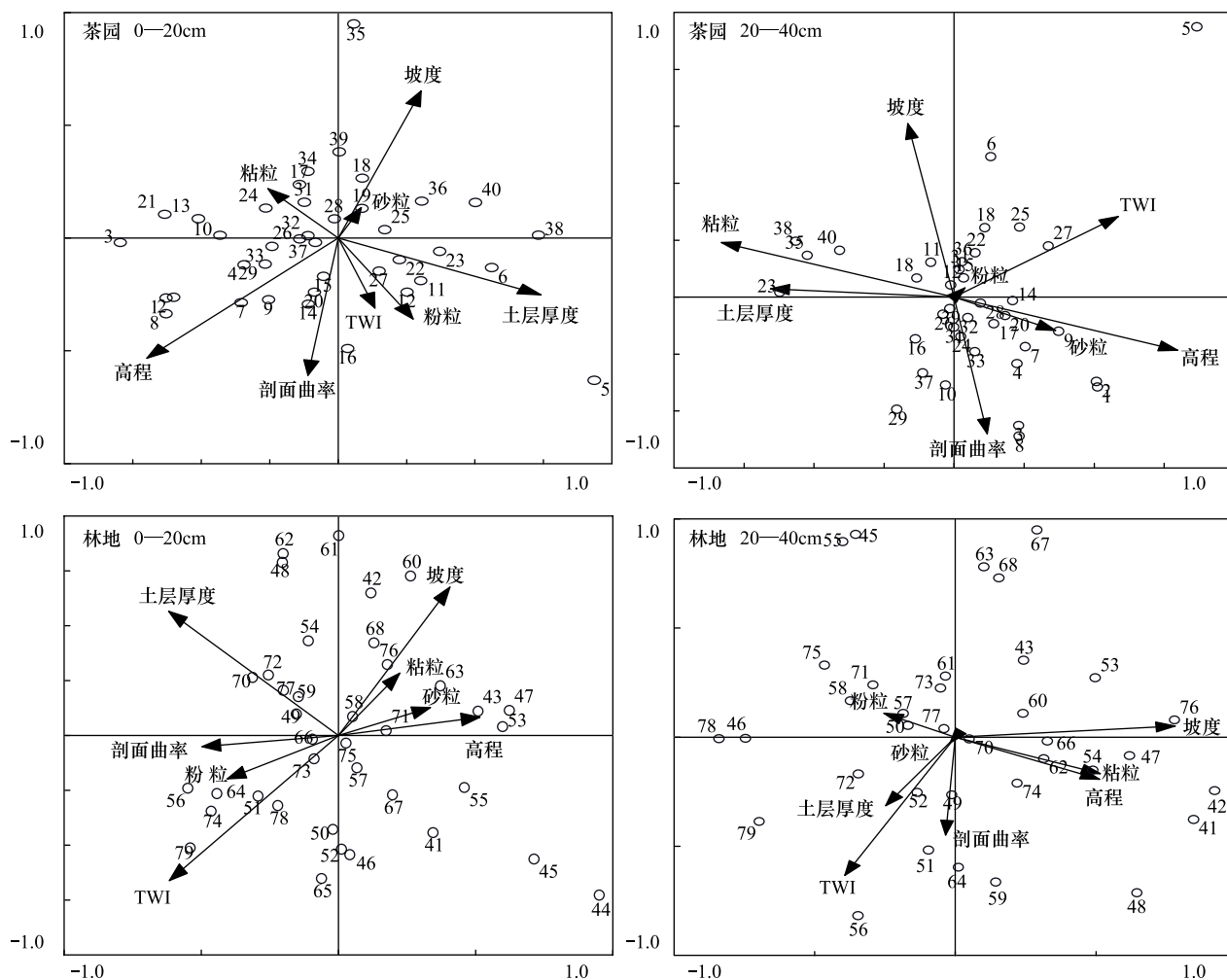


图 2 干旱状况时竹林地、茶园不同深度的土壤水分与环境因子的 CCA 排序图

Fig. 2 Ordination diagram resulting from CCA on soil moisture with environment attributes at different depths in the bamboo forest and the tea garden during the dry condition

(箭头连线代表环境因子,箭头连线的长度代表环境因子与土壤水分分布格局的相关性大小,连线越长,相关性越大,反之越小,箭头连线投影在排序轴上的长度代表该环境因子与排序轴的相关性大小。TWI:地形湿度指数 Topographic Wetness Index;下同)

对于竹林地 0—20 cm 深度而言,第一排序轴包含了大部分的环境信息,主要反映了土层厚度(-0.4017)、TWI(-0.400)、高程(0.339)和剖面曲率(-0.323)等的梯度变化,第二排序轴则与坡度显著相关(0.248)。而在 20—40 cm 深度,粘粒含量(0.272)的影响明显增大,坡度(0.412)、高程(0.271)和 TWI(-0.21)也具有一定影响,说明该深度土壤水分主要受坡度、粘粒含量、高程和 TWI 的共同作用。

干旱状态时太湖流域丘陵区坡面土壤水分主控因子主要受土壤深度影响,土地利用类型的作用较弱。在

0—20 cm 深度,地形因子(如高程、坡度和剖面曲率等)和土层厚度是竹林地和茶园土壤水分空间格局的主控因子。在 20—40 cm 深度,粘粒含量的影响明显增大,这首先与土壤质地在不同深度的空间分布有关,表层(0—20 cm)土壤质地较为均一,其砂粒、粉粒、粘粒的变异系数分别为 0.27、0.03、0.11,而下层(20—40 cm)空间异质性高于表层,对应的砂粒、粉粒、粘粒变异系数则分别为 0.33、0.05、0.13。另一方面可能是由于该深度土壤水分受外界环境(如降雨和蒸散发)的影响要小于 0—20 cm 深度。此外,干旱状态下茶园和竹林地对应深度土壤水分主控因子类似,表明在此时段土地利用类型对土壤水分影响较小,这不同于史志华等^[16]的研究结论,鉴于两个研究区相近的气候和地形地貌,最大的可能是研究尺度的差别,类似的结论在王信增等^[15]的研究中得到验证。

2.3 湿润状态时土壤水分与环境因子的定量关系

图 3 为茶园和竹林地不同深度(0—20 cm 和 20—40 cm)环境因子对土壤水分分布的影响结果,可见对于茶园 0—20 cm 深度,第一轴与坡度(-0.416)和高程(0.392)显著相关,与砂粒含量(-0.237)也有一定的相关性,而第二轴仅与剖面曲率(-0.296)相关性较好,上述表明湿季茶园 0—20 cm 深度土壤水分主控因子仍为地形因子(高程、坡度和剖面曲率)。在 20—40 cm 深度,第一排序轴主要反映的是粘粒含量(-0.409)和土层深度(-0.350)的梯度变化,第二轴则主要反映的是砂粒(0.265)和粘粒(-0.230)的梯度变化,说明土壤性质(土壤质地和土层厚度)是该深度土壤水分分布的主控因子。

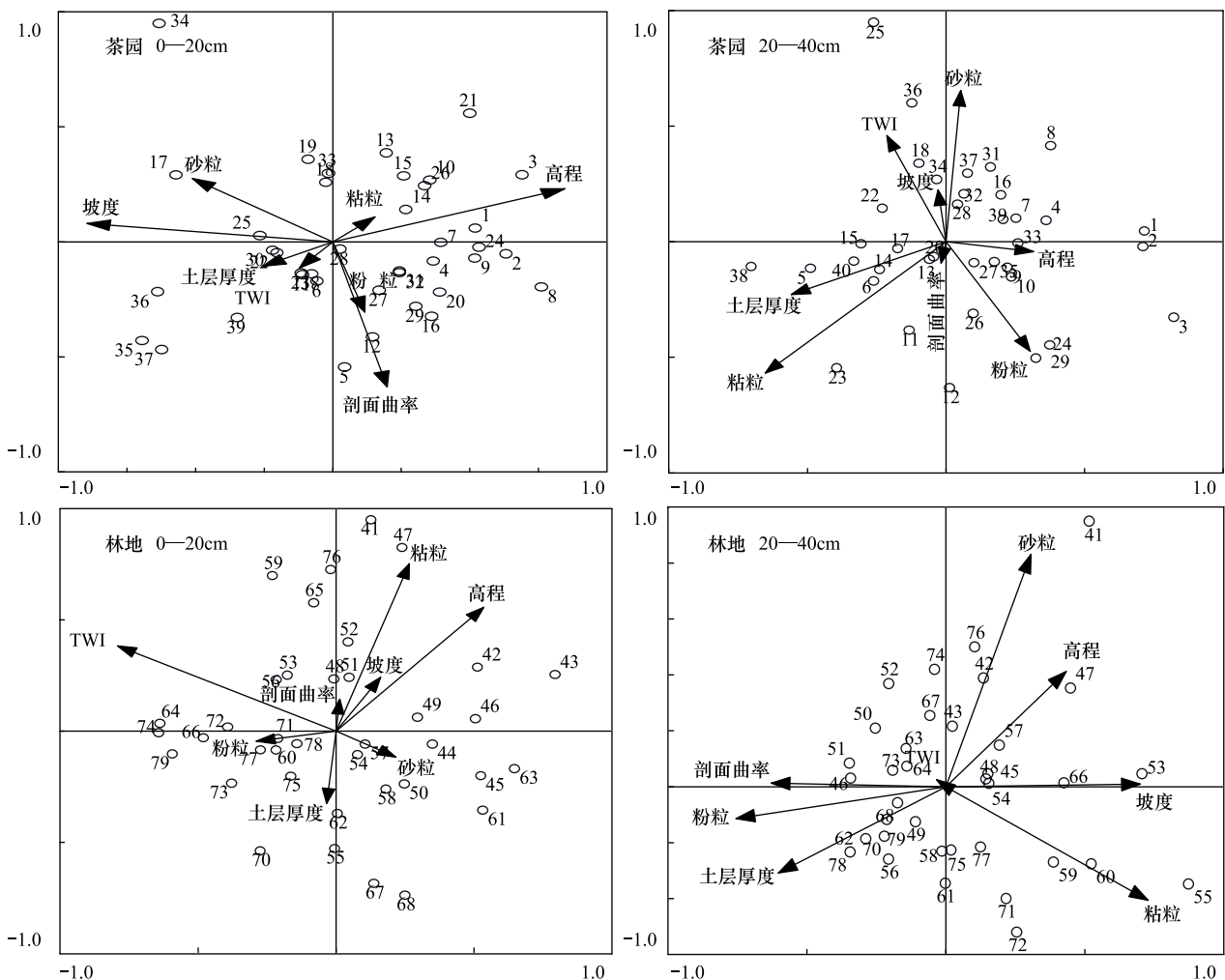


图 3 湿润状态时竹林地、茶园不同深度的土壤水分与环境因子的 CCA 排序图

Fig. 3 Ordination diagram resulting from CCA on soil moisture with environment attributes at different depths in the bamboo forest and the tea garden in the wet condition

在竹林地 0—20 cm 深度,第一、二轴方向箭头连线较长的仅有 TWI (−0.259)、粘粒 (0.215) 和高程 (0.202),因此 TWI、粘粒和高程为湿季林地 0—20 cm 深度土壤水分主控因子。而在 20—40 cm 深度处,土壤水分空间格局的主控因子较多,包括粉粒 (−0.419)、粘粒 (0.404)、坡度 (0.388)、土层厚度 (−0.334)、剖面曲率 (−0.348) 和砂粒 (0.305) 等。

与干旱状态时不同,湿润状态下太湖流域丘陵区土壤水分格局的主控因子受土壤深度、土地利用类型的作用都很大。茶园 0—20 cm、20—40 cm 深度土壤水分的主控因子分别为地形因子和土壤性质,而竹林地地形因子和土壤性质对 0—20 cm 和 20—40 cm 两个深度的土壤水分影响都很大。此外,就土壤水分的具体影响因素而言,两种土地类型也存在差异,相对于茶园 0—20 cm 深度影响土壤水分的地形因子主要为坡度、高程,林地 0—20 cm 深度则变为 TWI。20—40 cm 深度竹林地土壤水分与环境因子的关系远比茶园复杂,其主控因子的数量、影响大小均高于茶园。

湿润状态下土壤深度和土地利用类型对土壤水分主控因子的作用偏大很可能与植被有关。王军德等^[17]的研究表明,植被根系对不同深度处的土壤水分影响不同,在 30 cm 处达到最大,由此导致 20—40 cm 土壤水分的主控因子较表层复杂。与此同时,湿润时段几乎对应着植被生长茂盛期(表 1),在此时段不同土地利用方式下其植被生长状况大不相同。与竹林地的近似自由生长不同,茶园受人类活动如除草、修剪、施肥等干扰明显增强。不同植被类型无论是通过冠层对降雨的截留再分配作用,进而影响水分入渗,还是根系吸水能力都有较大差异^[18-20],因而湿润状态时土壤水分主控因子在竹林地和茶园显示出很大不同。

3 小结

本文结合 CART 和 CCA 方法研究太湖流域丘陵区茶园和竹林地不同深度(0—20 cm 和 20—40 cm)土壤水分与环境因子的关系,得出以下主要结论:

(1) 土壤平均含水量受降雨影响很大,湿润状态时要高于干旱状态,同时土壤水分分布的主控因子在不同季节表现形式有很大差异,干旱状态时土壤水分的主控因子以地形因子为主,到了湿润状态则受到地形和土壤性质的显著作用。

(2) 土地利用类型对土壤水分的作用同样表现在平均含水量大小及土壤水分主控因子两方面。首先,竹林地平均土壤含水量两倍于对应深度的茶园,其次,在干旱状态下,土地利用类型对土壤水分与环境因子的关系影响较小,两种土地利用类型对应深度土壤水分的主控因子相似,但在湿润状态,主控因子无论是数量还是类型都存在显著差异。

(3) 土壤水分分布主控因子受土壤深度的影响同样显著,在两种土地类型的干旱、湿润状态,20—40 cm 深度土壤水分主控因子数量均多于 0—20 cm 深度,表明环境因子与下层土壤水分(20—40 cm)的关系比表层土壤(0—20 cm)复杂。

参考文献(References):

- [1] Brocca L, Tullo T, Melone F, Moramarco T, Morbidelli R. Catchment scale soil moisture spatial-temporal variability. *Journal of Hydrology*, 2012, 422-423: 63-75.
- [2] Albertson J, Montaldo N. Temporal dynamics of soil moisture variability: 1. theoretical basis. *Water Resources Research*, 2003, 39(10): 1274, doi: 10.1029/2002WR001616.
- [3] Pan F, Peters-Lidard C D, Sale, M J. An analytical method for predicting surface soil moisture from rainfall observations. *Water Resources Research*, 2003, 39(11): 1314, doi: 10.1029/2003WR002142.
- [4] Grayson R B, Western A W, Chiew F H S, Blöschl G. Preferred states in spatial soil moisture patterns: local and nonlocal controls. *Water Resources Research*, 1997, 33(12): 2897-2908.
- [5] Famiglietti J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas. *Journal of Hydrology*, 1998, 210(1/4): 259-281.
- [6] Hupet F, Vanclooster M. Intraseasonal dynamics of soil moisture variability within a small agricultural maize cropped field. *Journal of Hydrology*,

- 2002, 261(1/4): 86-101.
- [7] 姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子. 生态学报, 2012, 32(16): 4961-4968.
- [8] 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 梁洪波, 孔祥丽, 张伟. 喀斯特山区坡面土壤水分变异特征及其与环境因子的关系. 农业工程学报, 2010, 26(9): 87-93.
- [9] 尤文忠, 曾德慧, 刘明国, 宋西德, 叶彦辉, 张永. 黄土丘陵区林草景观界面雨后土壤水分空间变异规律. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1591-1596.
- [10] 刘鑫, 毕华兴, 李笑吟, 李俊, 郭孟霞, 林靓靓, 郭超颖. 晋西黄土区基于地形因子的土壤水分分异规律研究. 土壤学报, 2007, 44(3): 411-417.
- [11] 李恒鹏, 金洋, 李燕. 模拟降雨条件下农田地表径流与壤中流氮素流失比较. 水土保持学报, 2008, 22(2): 6-9, 46-46.
- [12] 万荣荣, 杨桂山. 太湖流域土地利用与景观格局演变研究. 应用生态学报, 2005, 16(3): 475-480.
- [13] 张秀英, 孙棋, 王珂, 蒋玉根, 林芬芳, 韩凝. 基于决策树的土壤 Zn 含量预测. 环境科学, 2008, 29(12): 3508-3512.
- [14] 田风霞, 赵传燕, 王瑶. 祁连山东段土壤水分时空分布特征及其与环境因子的关系. 干旱地区农业研究, 2010, 28(6): 23-29.
- [15] 王信增, 焦峰, 刘源鑫, 朱乐天, 林坤. 不同空间尺度土壤水分与环境因素的关系. 生态学杂志, 2012, 31(2): 319-323.
- [16] 史志华, 朱华德, 陈佳, 方怒放, 艾蕾. 小流域土壤水分空间异质性及其与环境因子的关系. 应用生态学报, 2012, 23(4): 889-895.
- [17] 王军德, 王根绪, 陈玲. 高寒草甸土壤水分的影响因子及其空间变异研究. 冰川冻土, 2006, 28(3): 428-433.
- [18] 王晓燕, 陈洪松, 王克林, 傅伟, 谢小立. 红壤坡地土壤水分时间序列分析. 应用生态学报, 2007, 18(2): 297-302.
- [19] 李毅, 邵明安. 人工草地覆盖条件下降雨入渗影响因素的实验研究. 农业工程学报, 2007, 23(3): 18-23.
- [20] 刘鹄, 赵文智, 何志斌, 张立杰. 祁连山浅山区不同植被类型土壤水分时间异质性. 生态学报, 2008, 28(5): 2389-2394.