

不同水文年气候和施肥对红壤剖面水分变化的相对影响^①

钱海燕^{1,2,3}, 陈玲¹, 孙波^{1*}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008;

2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 江西省山江湖开发治理委员会办公室, 南昌 330046)

摘要:改善红壤剖面的水分库容及其稳定供应能力是提升红壤地力的一个重要方面。本文通过 10 年施用有机肥的淋溶池试验,研究了玉米连作红壤旱地剖面不同深度(30~100 cm)体积含水量的长期变化规律,利用集成推进树算法(ABT)定量评估了气象因素(降水和气温)和人为因素(施用有机肥)对红壤不同土层水分含量及其变异性的相对影响。研究表明:不同水文年份土壤剖面平均含水量变化顺序是丰水年($0.389\text{ cm}^3/\text{cm}^3$)>平水年($0.380\text{ cm}^3/\text{cm}^3$)>枯水年($0.377\text{ cm}^3/\text{cm}^3$);除 2005 年和 2009 年外,其余年份月均降水均与土层(30~100 cm)平均含水量呈显著对数曲线关系($r>0.582$, $P<0.05$);相同施肥处理下,在平水年和丰水年的不同季节(生长季和休闲季),不同土层中的土壤平均含水量存在极显著差异,而枯水年仅生长季表现出显著差异。不同土层土壤含水量与有机肥用量呈极显著负相关,说明长期施用有机肥提高了土壤水分的利用率。ABT 分析显示,降水和气温是影响 30~70 cm 土层土壤水分变化的主控因子,其累计相对贡献率超过了 80%。随着土层深度的增加,降水的影响逐渐减弱,施用有机肥的影响逐渐增强;在平水年和丰水年,施用有机肥是深层(100 cm)土壤水分变化的主要控制因子。

关键词:红壤旱地;土壤剖面;体积含水量;有机肥;主控因子;水文年

中图分类号:S152.7

土壤水分是作物产量形成的基础,提升土壤水分有效库容是培育地力的一个重要方面。土壤水分变化具有显著的时空变异特征^[1],受到多种环境(气候、地形、植被、土壤)和人为(土地利用、耕作、施肥)因素的综合作用^[2-3]。在林草地系统中,海拔、坡向、土壤孔隙度和土地利用类型是影响土壤水分季节性变化的主要因子,土壤孔隙度是土壤坡面水分垂直变化的主控因子^[4]。在红壤坡地系统中,降水和植被类型是影响土壤水分时空变化的主要因子,土壤水分变异程度随降水量和土壤深度的增加而减弱,随植被根系分布深度的加深而增强^[5]。在黄土高原半干旱区,降水和地形是主要影响因子,在丰水年土壤水分空间变异受到土地利用和地形的综合影响^[6]。在农田生态系统中,施肥可以在短期内提高土壤保水性,从而增加产量^[7-8]。但在长期尺度上,施肥耕作等人为措施持续影响土壤孔隙结构和土壤剖面结构的形成和变化,同时气候长期变化趋势和短期波动也影响了土壤剖面中水分库容的变化,了解气候和人为因素对土壤

水分库容的交互作用可以为控制季节性干旱提出调控措施。由于在不同时空尺度上影响土壤水分变化的主控因子不同^[2],在长期尺度上影响土壤水分时空变化的因素及其作用机制仍不清楚,需要基于长期观测揭示气候-作物-施肥对土壤水分库容及其稳定性的交互作用机制^[1]。

红壤丘陵区水热资源丰富,但降水年际变异大,雨量分配不均,干湿季节明显,伏旱、秋旱频繁^[9-10]。红壤有机碳含量低、黏粒含量高,土壤无效孔隙比例高,导致红壤持水供水能力低下^[11-12]。施用有机肥有利于增加红壤有效水库容^[13],而采用覆盖以及间作或轮种等技术提高土壤深层贮水利用率是充分利用红壤水资源的有效途径^[14-15]。在半干旱区的研究表明,长期施肥会加大作物对土壤水库的耗竭,在土壤剖面中形成一个“干土层”^[16]。红壤区存在不同类型的水文年份(包括枯水年、平水年、丰水年),因此需要针对红壤剖面,研究有机肥对红壤有效水库容的增加作用如何响应气候的波动,为提出红壤水分库容

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2011CB100506)、江西省对外科技合作项目(20142BDH80006)和江西省科技支撑计划项目(20132BBF60078)资助。

* 通讯作者(bsun@issas.ac.cn)

作者简介:钱海燕(1977—),女,江苏如东人,副研究员,博士研究生,主要从事农田生态系统养分循环研究。E-mail:hyqian@issas.ac.cn

培育、充分利用红壤区水资源提供理论依据。本文基于田间大型淋溶池试验,研究连续 10 年(2002—2011 年)施用有机肥(猪粪)条件下,红壤旱地剖面中水分的季节性变化规律;然后利用集成推进树算法(ABT)分析降水、气温以及施肥对不同深度土层中水分含量长期变化的相对影响,揭示影响土壤剖面水分库容及其稳定性的主控因子。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验在中国科学院红壤生态实验站(116°55'E, 28°13'N, 海拔 38 m)进行。实验站属中亚热带季风气候,年均气温 16.1~18.9℃,年均降水量 1 789 mm,50%左右的降水分布在 4—6 月,夏秋之间旱情突出。

1.2 试验处理和观测方法

试验用的淋溶池(lysimeter)为长 2 m × 宽 2 m × 深 1.5 m 的水泥池,土壤为第四纪红黏土发育的红壤(黏化湿润富铁土),按发生层分层填装^[17]。长期有机肥试验始于 2002 年,设置 3 个处理:不施肥(CK);

低量有机肥(LM), N 150 kg/hm²; 高量有机肥(HM), N 600 kg/hm²。3 次重复,随机排列。有机肥为试验站附近养殖场猪粪,全氮 32.9 g/kg(干基,下同),全碳 306.5 g/kg,全钾 14.0 g/kg,全磷 20.2 g/kg,平均 pH 7.72。在播种前一次性以基肥形式施入土壤表面,耕翻、耙匀。种植作物为玉米,品种为山东登海系列,每年 4 月中旬开始种植,7 月下旬收获,玉米收获后至次年 3 月土地休闲。

在小区中央埋设铝管,利用中子仪定位观测 4 个深度(30、50、70、100 cm)的土壤体积含水量,每隔 10 天观测一次。每年 3 月份标定一次中子仪,在红壤生态实验站长期观测场测定土壤剖面水分含量和土壤体积质量(容重)进行标定。

根据当地多年平均降水量,划分为 3 种水文类型:枯水年、平水年和丰水年^[18]。试验观测期内,2003、2004、2007、2009 和 2011 年为枯水年,2002、2005、2006 和 2008 年为平水年,2010 年为丰水年。2002—2011 年试验区月均降水量和月均气温见图 1,数据来源于中国科学院红壤生态站的气象观测站。

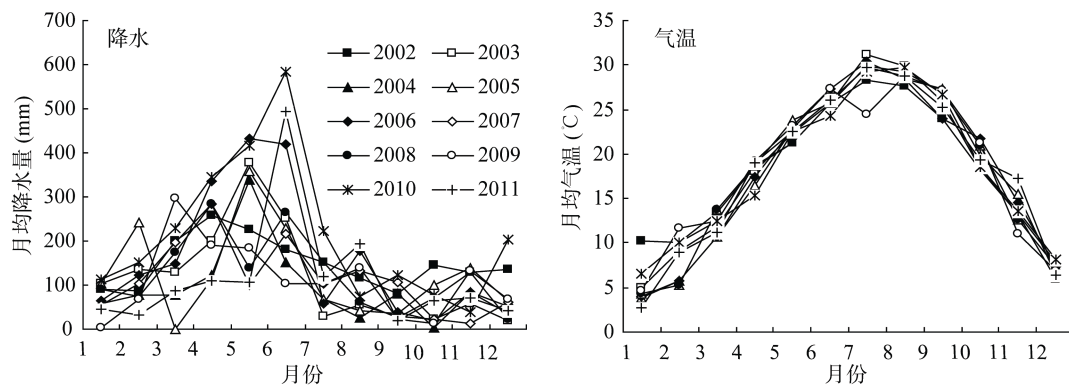


图 1 红壤生态实验站 2002—2011 年逐月降水量和月均气温

Fig. 1 Monthly precipitation and average temperature from 2002 to 2011 in Red Soil Ecological Experimental Station

1.3 数据分析方法

集成推进树算法(Aggregated Boosted Trees, ABT)基于 PAC 模型(Probably Boosting Stacking, PAC),通过偏相关图和相对重要性图来评价和描述自变量和因变量之间的相对影响大小^[19]。本文采用 ABT 定量评价气象因素(降水、气温)和人为因素(施肥)对土壤剖面水分含量变化的相对影响。采用 SPSS 软件进行双变量 Pearson 相关性分析和曲线估计,采用邓肯多重检验(Duncan's multiple range test, DMRT)进行差异显著性比较。

2 结果与分析

2.1 土壤水分的季节性变化

图 2 为连续 10 年不同层次土壤水分的变化特征,

其中,土壤含水量为每次观测样点的月平均值。在观测期内,土壤水分呈现以年为周期的季节性波动,土壤月均含水量在 4 月之前较高,保持相对平稳,随后逐渐下降,进入水分消耗阶段,至 7—10 月左右下降到最低值,从 11 月开始缓慢上升,进入水分补给阶段。枯水年除 2009 年土壤水分含量最高值出现在 12 月外,其余最高值均出现在 4 月左右,最低值出现在 9—11 月,出现明显的干、湿季。平水年土壤水分含量变化与枯水年类似,但整体波动较小。丰水年土壤水分含量较高,最高值出现在 6 月,最低值出现在 11 月,变化较为平稳,土壤基本处于湿润状态。在玉米生长季(4—7 月),枯水年土壤水分含量呈逐渐下降趋势,丰水年和平水年土壤水分含量变化幅度不

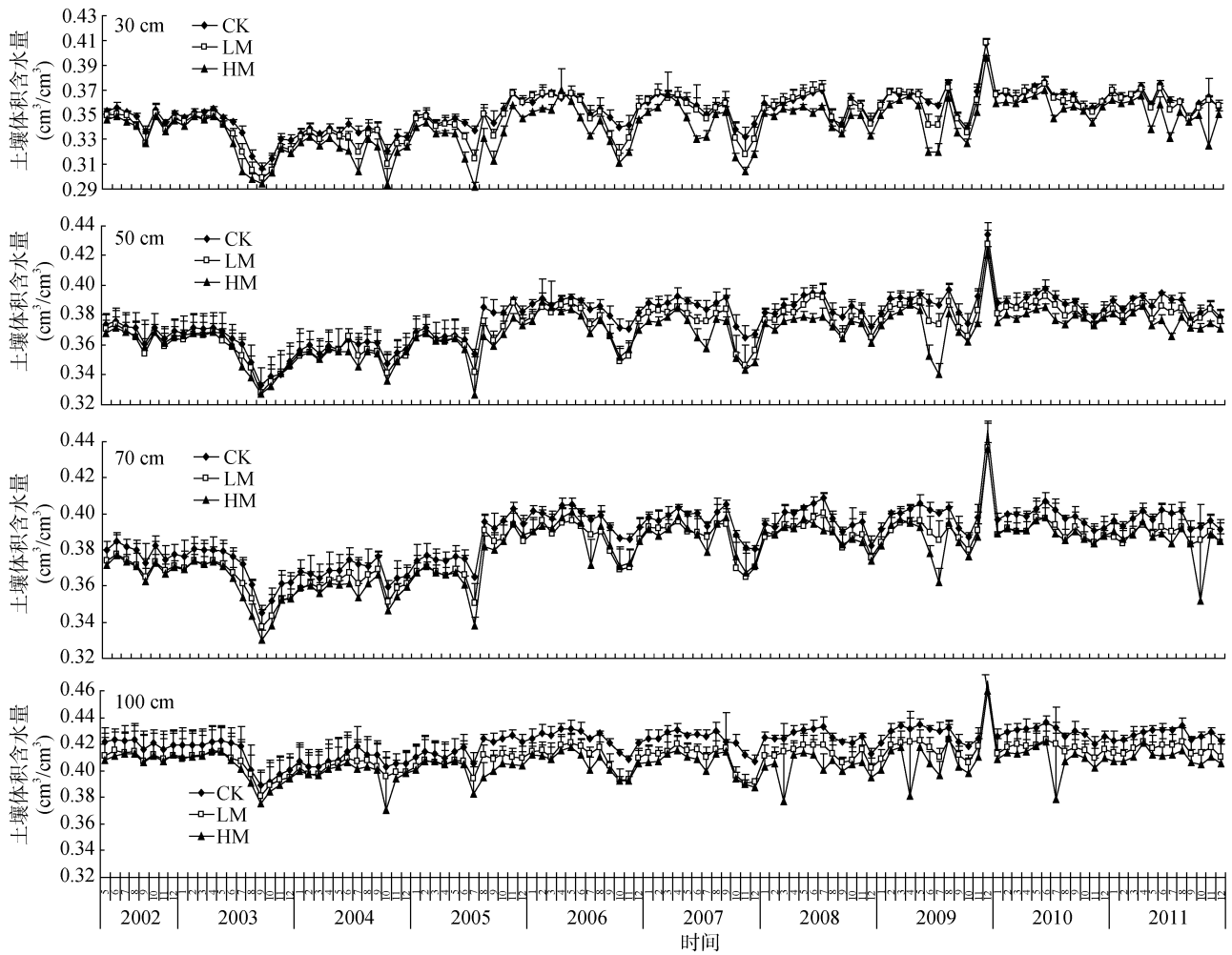


图 2 2002—2011 年不同施肥处理下红壤剖面中土壤水分的变化

Fig. 2 Changes of soil water contents in red soil profiles under different manuring treatments from 2002 to 2011

大；在玉米休闲季(8 月—次年 3 月)，土壤水分含量在不同水文年均经历了先减小随后缓慢上升，至次年 3 月达到相对平稳状态。

表 1 为 2002—2011 年不施肥(CK)处理月均降水与红壤剖面(30 ~ 100 cm)土壤含水量的拟合方程。研究发现，除 2005 年和 2009 年外，对数曲线模型($y = b_0 + b_1 \ln x$)均能很好地描述两者之间的变化趋势，相关性较好($r > 0.582$, $P < 0.05$)。此外，从 CK 处理月均降水量占 30 ~ 100 cm 土层土壤储水量比例来看(图 3)，发现除 2009 年 3 月比例(74.8%)最高外，其余年份最高比例均出现在 4—6 月份，范围为 40.2% ~ 144.0%。其中，2002—2006 年和 2010 年以 5 月和 6 月所占比例最高，2007—2008 年以 3 月和 6 月最高，2011 年以 6 月比例最高。除每年的 4—8 月份外，其余月份均有最低比例出现，枯水年最低比例多出现在 9—12 月，丰水年最低比例出现在 11 月。在不同的水文年，不同施肥处理土壤(30 ~ 100 cm)枯水年、平水年和丰水年平均含水量分别为 0.377 、 0.380 和 $0.389 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ，

差异显著($P < 0.05$)。

表 1 2002—2011 年不施肥处理月均降水量与红壤剖面(30 ~ 100 cm)月平均含水量的拟合方程

Table 1 Fitting equations between monthly precipitation and mean soil water contents in red soil profiles(30–100cm)under no manuring treatment from 2002 to 2011

年份	拟合方程	相关系数(r)	显著性(P)
2002	$y = 0.323 + 0.012 \ln x$	0.791	0.020
2003	$y = 0.322 + 0.011 \ln x$	0.782	0.003
2004	$y = 0.359 + 0.002 \ln x$	0.582	0.047
2005	—	—	—
2006	$y = 0.365 + 0.006 \ln x$	0.769	0.003
2007	$y = 0.354 + 0.008 \ln x$	0.820	0.001
2008	$y = 0.359 + 0.007 \ln x$	0.874	0.000
2009	—	—	—
2010	$y = 0.369 + 0.005 \ln x$	0.846	0.001
2011	$y = 0.373 + 0.005 \ln x$	0.851	0.001

注： x 代表月均降水量， y 代表 30 ~ 100 cm 月均含水量；其余 2 种施肥处理两者关系与不施肥处理类似，数据没有显示。

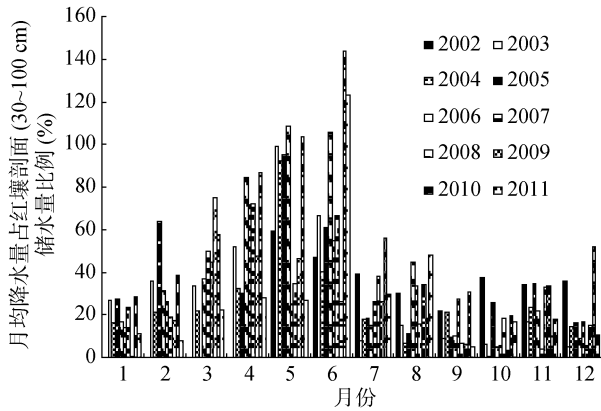


图 3 不施肥处理各年份月均降水量占红壤剖面 (30 ~ 100 cm) 储水量的比例

Fig. 3 The ratio of monthly precipitation and soil water storage in red soil profiles (30-100 cm) under no manuring treatment from 2002 to 2011

2.2 土壤水分的垂直变化

同一施肥处理不同土层之间的平均含水量在枯水年、平水年和丰水年表现出一致的垂直变化规律，随着土层深度的增加而增加，差异极显著 ($P < 0.01$)，图 4)。相同施肥处理下，在平水年和丰水年的不同季节(生长季和休闲季)，不同土层土壤含水量存在极显著差异 ($P < 0.01$)，且生长季土壤水分变化较大；在枯水年，不同土层土壤含水量在生长季表现出显著差异 ($P < 0.05$)，在休闲季差异不显著且土壤水分变化较生长季活跃(表 2)。相同土层中，与 CK 处理相比，在平水年和丰水年，除 LM 处理在 30 cm 土层土壤水分含量无显著性差异外，其余施肥处理土壤水分含量在不同季节均有显著变化 ($P < 0.05$)；在枯水年，施用有机肥在生长季显著降低了不同土层(30 ~ 100 cm)

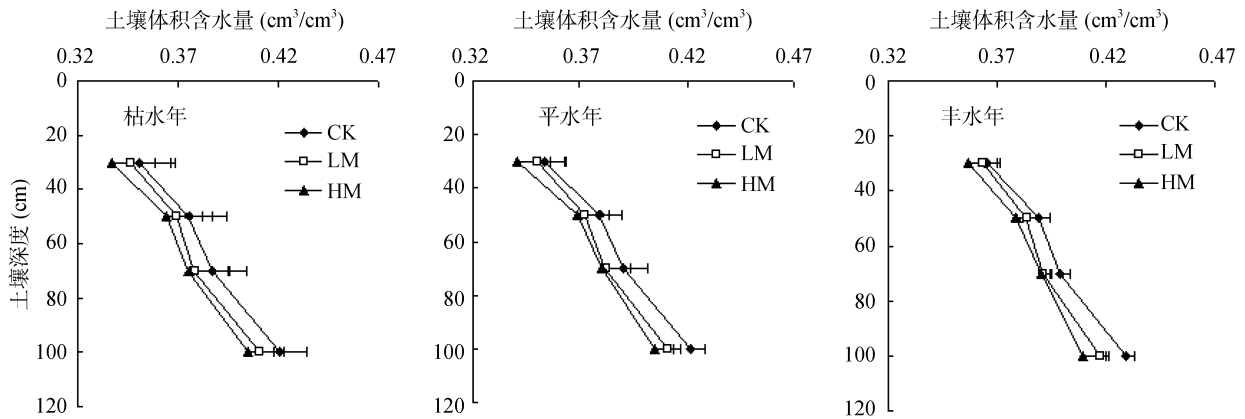


图 4 不同有机肥处理下红壤剖面中土壤水分在不同水文年的变化

Fig. 4 Vertical variations of soil water contents in red soil profiles under different manuring treatments from 2002 to 2011

表 2 不同有机肥处理下红壤剖面中土壤水分平均含量 (cm^3/cm^3) 和变异系数 ($CV, \%$) 在不同水文年(生长季和休闲季)中的变化
Table 2 Changes of mean soil water contents (cm^3/cm^3) and their coefficients of variation ($CV, \%$) in red soil profiles under different manuring treatments from 2002 to 2011

水文年	土壤深度 (cm)	生长季						休闲季					
		CK		LM		HM		CK		LM		HM	
		均值	CV	均值	CV	均值	CV	均值	CV	均值	CV	均值	CV
枯水年	30	0.354 dA	3.5	0.348 dB	4.6	0.336 dB	5.6	0.349 aA	5.6	0.345 aA	6.5	0.338 aA	6.7
	50	0.379 cA	3.7	0.373 cB	3.3	0.365 cC	3.9	0.374 aA	5.3	0.368 aA	5.3	0.364 aA	4.9
	70	0.390 bA	3.6	0.381 bB	3.4	0.377 bC	4.0	0.385 aA	4.9	0.377 aA	5.0	0.375 aA	5.5
	100	0.425 aA	1.9	0.414 aB	1.4	0.407 aC	2.2	0.418 aA	3.7	0.408 aB	3.5	0.404 aB	3.6
平水年	30	0.356 dA	2.8	0.353 dA	4.5	0.343 dB	5.7	0.352 dA	2.5	0.349 dB	3.6	0.340 dC	3.6
	50	0.380 cA	3.5	0.375 cB	3.8	0.370 cC	3.9	0.378 cA	2.2	0.371 cB	2.7	0.369 cB	2.2
	70	0.391 bA	3.7	0.382 bB	3.9	0.380 bB	4.7	0.390 bA	2.4	0.381 bB	2.5	0.381 bB	2.6
	100	0.424 aA	2.0	0.413 aB	1.8	0.408 aB	2.1	0.421 aA	1.3	0.409 aB	1.4	0.404 aC	1.9
丰水年	30	0.371 dA	1.3	0.369 dA	1.2	0.361 cB	2.7	0.363 dA	1.4	0.361 dA	1.4	0.355 dB	1.5
	50	0.394 cA	0.7	0.389 cB	0.7	0.382 bC	1.0	0.386 cA	1.0	0.381 cB	1.1	0.377 cC	0.7
	70	0.403 bA	0.9	0.395 bB	0.9	0.393 bB	1.1	0.396 bA	0.9	0.389 bB	0.7	0.388 bB	0.7
	100	0.433 aA	0.5	0.420 aAB	0.6	0.408 aB	4.9	0.427 aA	0.8	0.416 aB	0.8	0.409 aC	0.9

注：不同小写字母表示同一施肥处理不同土层的土壤含水量在 $P < 0.05$ 水平差异显著，不同大写字母表示同一土层不同施肥处理的土壤含水量在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

土壤含水量，而在休闲季仅 100 cm 土层土壤含水量下降显著(表 2)。

2.3 降水、温度和施肥对土壤水分的相对影响

ABT 分析显示(图 5)，降水对连续 10 年不同深度土壤含水量产生了最大影响，其对 30、50、70 和 100 cm 土层土壤含水量的相对贡献率分别为 53.3%、53.5%、49.9% 和 44.0%；其次是气温，对土壤水分含量施加了一个中等程度的影响。降水和气温对不同土层含水量的累积影响超过了 80%。施用有机肥对 30~70 cm 土层土壤含水量的相对影响较弱，但在 100 cm 土层深

度产生了和气温相似的影响。偏相关分析显示，土壤水分含量伴随着降水量的增加而增加，随着气温(8~30)的升高和有机肥施用量的增加而下降。

不同水文年状态下，降水、气温、施用有机肥对不同深度土壤水分含量相对影响的 ABT 分析见图 5。分析显示，降水、气温和施肥对枯水年和平水年不同深度土壤含水量的影响与连续 10 年的影响类似，其相对影响顺序表现为：降水>气温>施肥。稍微不同的是，在平水年，施肥对 100 cm 土层土壤含水量产生了最为重要的影响，其相对影响为 40.6%。在丰

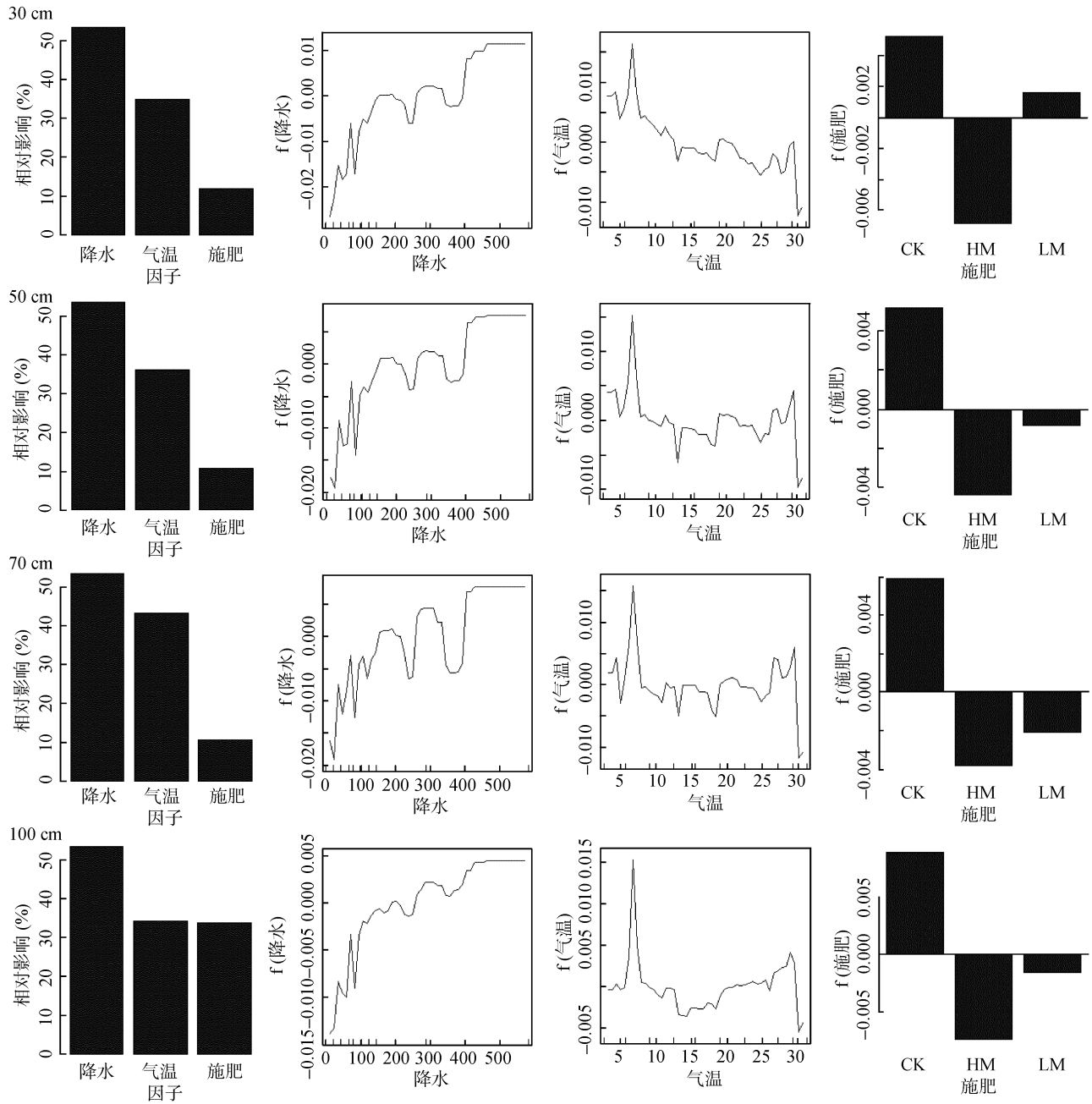


图 5 ABT 法分析降水、气温和施肥对红壤剖面不同深度土壤水分含量连续 10 年变化的相对影响及其偏相关
Fig. 5 Relative importance plots and partial dependency plots for the impact of precipitation, temperature and manuring on changes of soil water content during 10 years by aggregated boosted trees (ABT) analysis

水年,降水、气温和有机肥对土壤水分含量的相对影响与平水年和枯水年有所区别(图 6):70 cm 土层以上,降水的相对影响最大,其次是施肥和气温;随着土层的

增加,降水和气温的影响减弱,而施用有机肥的影响增加,至 100 cm 土层深度其相对影响达到了 50.9%,成为影响深层土壤含水量变化的主控因素。

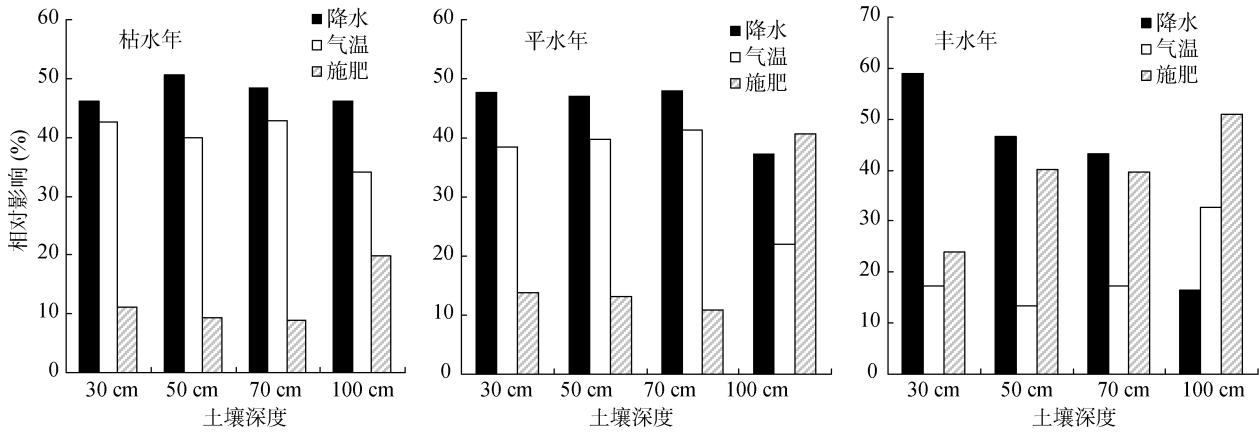


图 6 不同水文年降水、气温和施肥对红壤剖面土壤水分含量变化的相对贡献率

Fig. 6 Relative contributions of precipitation, temperature and manure to the variations of soil water contents in red soil profiles from 2002 to 2011

2.4 施肥及气象因子与连续 10 年各层次土壤水分含量及水分变异系数的相关性

将连续 10 年有机肥施用量、降水、气温及逐月对应的红壤剖面不同施肥处理土壤水分含量和水分变异系数全部输入 SPSS 软件中,进行双变量 Pearson 相关性分析(表 5),发现有机肥施用量与红壤剖面平

均含水量呈极显著负相关,在 50 cm 与 100 cm 土层与土壤水分的变异系数极显著正相关,说明长期施用有机肥提高了对土壤剖面水分的利用,但也增加了深层水分含量的波动性。降水与不同土层的土壤水分含量呈现极显著正相关,气温与 30 cm 土层土壤水分含量之间呈极显著负相关。

表 3 施肥、降水和气温与红壤剖面中土壤水分平均含量及其变异系数的相关性

Table 3 Pearson correlation coefficients between impact factors (manure, precipitation, air temperature) and mean soil water contents and their coefficient of variation in red soil profiles

影响因子	平均含水量				水分变异系数			
	30 cm	50 cm	70 cm	100 cm	30 cm	50 cm	70 cm	100 cm
有机肥施用量	-0.293**	-0.253**	-0.225**	-0.484**	0.090	0.242**	0.065	0.450**
降水	0.392**	0.352**	0.301**	0.316**	-0.103	-0.164**	-0.093	0.015
气温	-0.190**	-0.066	-0.022	0.030	0.106*	0.029	0.026	0.054

注: ** 表示在 $P < 0.01$ 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 $P < 0.05$ 水平(双侧)上显著相关。

3 讨论

对 2002—2011 年红壤剖面中水分含量变化的研究表明,降水是控制红壤水分时空变化的主要因素(图 5)。对数曲线模型及月均降水量占 30~100 cm 土层土壤储水量的比例表明土壤水分的季节变化与降水的季节变化基本一致(表 1,图 3)。本研究中,连续 10 年降水集中在 4—6 月,占全年降水量的 37%~61%,而 7—9 月降水量只占全年降水量的 8%~24%(图 1)。以枯水年 2003 年为例,4—6 月降水占全年降水量的 59%,7—9 月降水量仅占 8%,降水明显分配不均,干、湿季节明显。受降水及其分配影响水分补给程度和强度,土壤水分呈现平稳期—消耗期—补给

期的季节性变化规律,不同水文年土壤水分的时空变化差异显著,丰水年大于平水年和枯水年,这是导致红壤水分季节性变化的主要原因^[9-11]。

受降水入渗再分布以及作物和土壤向上的蒸散量过程的共同影响^[20],本研究中,土壤水分含量随着土层深度的增加呈现出显著的增长型垂直分布格局(图 4)。但在枯水年的休闲季,同一施肥处理 70 cm 土层以上土壤水分含量无显著性差异,这可能是由于在枯水年的玉米休闲季降水较少,而蒸发、入渗使得表层含水量减小,深层土壤含水量不断增加且受外界干扰较小、保水性较好的缘故所致。

气温主要是通过土面蒸发和作物蒸腾作用影响土壤水分含量的变化。本研究发现,气温对土壤水分

时空变化的影响仅次于降水(图 5)。相关性分析显示气温主要影响了土壤表层 30 cm 含水量的变化(表 3)。其他研究也表明,在低丘红壤区,气温是未降水阶段土壤水分变化的主控因子^[3,11]。

Pearson 相关系数显示,随有机肥施用量增加,各土层水分含量下降,而 50 cm 和 100 cm 土层土壤含水量的变异系数也增加(表 3)。ABT 及其偏相关分析结果也表明,土壤水分含量伴随着有机肥施用量的增加而下降,在平水年和丰水年,施用有机肥显著影响了深层土壤水分的变化(图 5,图 6)。本研究中,试验初期(2002 年 5 月)100 cm 土层深度,施用高量有机肥处理土壤水分含量较不施肥处理低 3.7%,无显著性差异;但长期施用高量有机肥导致 100 cm 土层深度的土壤水分含量显著下降,在 2008 年 12 月、2010 年 12 月以及 2011 年 12 月分别下降了 4.2%、4.1% 和 5.6%(表 4)。从不同水文年看,施用高量有机肥也显著降低了 100 cm 土层土壤含水量,在枯水年、平水年和丰水年分别下降了 3.7%、4.0% 和 4.6%(图 4)。这些结果说明随着种植年限的增加,100 cm 土层土壤含水量在不同施肥处理间差异逐渐增加。本

研究中,长期施用高量有机肥的处理丰水年(2010 年)平均玉米产量(5 362 kg/hm²)明显低于枯水年(6 603 ~ 8 113 kg/hm²)和平水年(7 531 ~ 9 807 kg/hm²),这可能是由于丰水年降水过多,抑制了玉米根系生长,降低了水分利用率,加之施用高量有机肥造成肥料向下淋洗影响了深层土壤性质,从而影响了深层土壤水分的变化;平水年产量较高,说明在降水适中的情况下,有机肥的肥效得到充分发挥,促进了作物根系生长,增加了根系在深层土壤吸水空间和吸水能力。一些长期试验结果也表明,施肥改善了土壤结构和透气性,影响了土壤蒸发量和土壤的排水和保水作用,从而对深层土壤水分吸收利用产生了显著的影响^[20-21]。在红壤坡地中,长期施用有机肥能够促进>0.25 mm 水稳性团聚体的形成,改善土壤结构,增强土壤低吸力段持水能力,从而提高水分利用效率^[11-12]。但由于降水对土壤水分的变化起主导作用,且在枯水年,施肥对深层土壤水分的影响较小(图 6)。因此,在红壤地区还需进一步研究施肥对深层土壤水分利用的作用,提出合理施肥措施,有效调控深层土壤的保水和供水能力。

表 4 4 个不同试验时期红壤剖面中土壤水分平均含量的变化(cm³/cm³)

Table 4 Change of soil water contents (cm³/cm³) in red soil profiles under different manuring treatments in four different times

土壤深度 (cm)	2002 年 5 月(平水年)			2008 年 12 月(平水年)			2010 年 12 月(丰水年)			2011 年 12 月(枯水年)		
	CK	LM	HM	CK	LM	HM	CK	LM	HM	CK	LM	HM
30	0.353 a	0.349 b	0.346 b	0.357 a	0.347 ab	0.337 b	0.362 a	0.359 a	0.357 a	0.355 a	0.356 a	0.347 a
50	0.374 a	0.371 a	0.368 a	0.373 a	0.362 a	0.363 a	0.388 a	0.389 a	0.385 a	0.378 a	0.375 a	0.365 b
70	0.380 a	0.374 a	0.371 a	0.378 a	0.375 a	0.371 a	0.396 a	0.392 ab	0.386 b	0.392 a	0.378 b	0.381 ab
100	0.422 a	0.411 a	0.408 a	0.412 a	0.398 ab	0.395 b	0.427 a	0.417 ab	0.410 b	0.417 a	0.406 ab	0.402 b

注:不同小写字母表示同一土层不同施肥处理土壤含水量在 $P<0.05$ 水平差异显著。

4 结论

连续 10 年的长期施肥表明,红壤剖面中土壤水分呈现明显的季节变化,土壤水分含量在 4 月之前保持相对较高且平稳状态,玉米生长季开始进入水分消耗期,至 7—10 月左右达到低谷,11 月开始缓慢上升进入水分补给期。枯水年、平水年土壤水分波动较大,干、湿季节较为明显,丰水年变化较为平稳,土壤水分含量表现为丰水年>平水年>枯水年。除 2005 年和 2009 年外,其余年份中对数曲线模型($y=b_0+b_1\ln x$)均能很好地描述月均降水量与土壤(30 ~ 100 cm)含水量两者的变化趋势,相关性较好($r>0.582$, $P<0.05$)。

在不同水文年,相同施肥处理不同土层之间的土壤水分变化表现出一致的垂直变化规律,从土壤表层到深层土壤,土壤含水量显著增加。其中,不同土层

中的土壤含水量在平水年和丰水年的不同季节(生长季和休闲季)存在极显著差异,生长季水分变化较休闲季活跃,而枯水年仅在生长季差异显著。相同土层,与不施肥处理相比,长期施用高量有机肥处理除在枯水年的休闲季土层 70 cm 以上无显著性差异外,其余均显著降低了土壤水分含量。

降水和气温是影响 30 ~ 70 cm 土层土壤水分时空变化的主控因子,其累计相对贡献率超过了 80%,相对影响随着土层的增加而有所减弱。土壤水分含量伴随着降水量的增加而增加,随着气温的升高和有机肥施用量的增加而下降。施用有机肥显著影响了深层土壤水分的变化,有机肥施用量与深层土壤含水量呈极显著负相关,与 50 cm 和 100 cm 土层土壤水分变异系数呈极显著正相关。ABT 分析显示,在枯水年,30 ~ 100 cm 土层土壤水分主要受降水和气温控制;

在平水年和丰水年，施用有机肥是深层(100 cm)土壤水分变化的主要控制因子。

参考文献：

- [1] 高建华, 胡振华. 土壤水分基础理论及其应用研究进展[J]. 亚热带水土保持, 2011, 23(3): 29-35
- [2] 邱阳, 傅伯杰, 王军, 张希来, 孟庆华. 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
- [3] 韩湘云, 景元书, 李根. 低丘红壤坡面土壤水分变化的气象因素冗余分析[J]. 生态学杂志, 2013, 32(9): 2 368-2 374
- [4] 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[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(6): 23-29
- [5] 王晓燕, 陈洪松, 王克林, 谢小立. 不同利用方式下红壤坡地土壤水分时空动态变化规律研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 110-113, 173
- [6] Qiu Y, Fu B, Wang J, Chen L. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2001, 240: 243-263
- [7] 宋春雨, 张兴义. 不同施肥措施对黑土土壤水分及保水性的影响[J]. 农业系统科学与综合研究, 2007, 23(2): 161-165, 171
- [8] 王晓峰, 田霄鸿, 陈自惠, 陈辉林, 王朝辉. 不同覆盖施肥措施对黄土旱塬冬小麦土壤水分的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(5): 1105-1111
- [9] 黄道友, 彭廷柏, 陈桂秋, 王克林. 亚热带红壤丘陵区季节性干旱成因及其发生规律研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(1): 124-126
- [10] 王明珠, 程训强, 张斌, 周睿. 江南丘陵红壤区的农业水资源特征与调控利用——以江西省余江县为例[J]. 生态环境, 2007, 16(2): 549-553
- [11] 方堃, 陈效民, 张佳宝, 黄晶, 王伯仁, 杜臻杰. 红壤地区典型农田土壤水力学特性及土壤水库容研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(1): 23-27
- [12] D'Angelo B, Bruand A, Qin JT, Peng XH, Hartmann C, Sun B, Hao HT, Rozenbaum O, Muller F. Origin of the high sensitivity of Chinese red clay soils to drought: Significance of the clay characteristics[J]. Geoderma, 2014, 223-225: 46-53
- [13] 王兴祥, 张桃林, 鲁如坤. 施肥措施对红壤结构的影响[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(3): 70-72
- [14] 姚贤良. 红壤水问题及其管理[J]. 土壤学报, 1996, 33(1): 13-20
- [15] 黄道友, 王克林, 黄新, 汪立刚, 彭佩钦, 刘守龙, 宋变兰. 丘陵红壤开发的水土资源保护及农业产业化经营模式[J]. 生态环境, 2005, 14(1): 139-144
- [16] 樊军, 郝明德, 邵明安. 黄土旱塬农业生态系统土壤深层水分消耗与水分生态环境效应[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 61-64
- [17] 王秀丽, 孙波. 红壤旱地施用有机肥的氮素淋失过程[J]. 土壤学报, 2008, 45(4): 745-749
- [18] 唐彬, 谢小立, 彭英湘, 王凯荣. 红壤丘岗坡地土地利用与土壤水分的时空变化关系[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(4): 8-13
- [19] De'Ath G. Boosted trees for ecological modelling and prediction[J]. Ecology, 2007, 88: 243-251
- [20] 王兵, 刘文兆, 党廷辉, 高长青, 李志, 甘卓亭. 长期施肥条件下旱作农田土壤水分剖面分布特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(3): 411-416
- [21] Liu CA, Li FR, Zhou LM, Zhang RH, Yu J, Lin SL, Wang LJ, Siddique KHM, Li FM. Effect of organic manure and fertilizer on soil water and crop yields in newly-built terraces with loess soils in a semi-arid environment[J]. Agricultural Water Management, 2013, 117: 123-132

Relative Impact of Climate and Long-term Manuring in Shaping Water Variation in Red Soil Profile During Different Hydrological Years

QIAN Hai-yan^{1,2,3}, CHEN Ling¹, SUN Bo^{1*}

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3 *Office of the Mountain-River-Lake Development Committee of Jiangxi Province, Nanchang 330046, China*)

Abstract: It is important to improve soil water effective storage for enhancing soil basic fertility. The long-term changes of water contents in soil profiles were studied by using a 10-year lysimeter experiment in an upland red soil under continuous maize cropping with manure application. The field experiment involved three treatments: no manure (CK), low-rate manure with N 150 kg/hm² (LM), and high-rate manure with N 600 kg/hm² (HM). The changes of volumetric water contents in soil profiles from 30cm to 100cm depth were observed from 2002 to 2011, and the relative impact of environmental and human factors (precipitation, air temperature and organic manure) on soil water variation was evaluated by aggregated boosted trees (ABT) analysis. The mean soil water contents in different depth of soil profiles were decreased in the sequence of wet years (0.389 cm³/cm³) > average years (0.380 cm³/cm³) > dry years (0.377 cm³/cm³). There was a significant logarithm regression relationship ($r > 0.582$, $P < 0.05$) between monthly precipitations and mean soil water contents in whole soil profiles (30–100cm) except for 2005 and 2009. Under the same manuring treatment, the mean soil water contents showed a significant difference among different soil depths in both cropping and fallow seasons of wet and average years, but not in the fallow season of dry years. The mean soil water contents in different soil depths were significantly but negatively correlated with the manure application rate, showing an increased soil water utilization with long-term manuring. Precipitation and air temperature were the dominant factors controlling the changes of soil water contents in the upper soil layers (30–70cm), which showed a relative impact of more than 80% by ABT analysis. However, the relative influence of precipitation on the soil water variation decreased with soil depth, while that of manure application increased. Manure application became the dominant factor controlling the soil water dynamics in the deep soil layer (100cm) during average and wet years.

Key words: Upland red soil; Soil profile; Volumetric water content; Organic manure; Dominant factor; Hydrological year