

南京城郊不同植被类型土壤含水量变异规律

汪春林, 张金池, 庄义琳, 周 姣, 韩 诚, 刘 鑫, 庄家尧

(南京林业大学 水土保持与生态修复实验室, 江苏 南京 210037)

摘要: 选择南京市城郊毛竹 *Phyllostachys edulis* 林和千金子 *Leptochloa chinensis* 草地, 分别在地下土壤 5, 15, 30 cm 深度埋设土壤水分探头, 在 2.0 m 高度处测定空气温度和湿度, 所有数据按照 15 min 间隔连续记录。研究了降雨间隔期不同植被土壤水分变异规律。结果表明: ①不同土地利用类型受植物根系和凋落物影响, 相应层次间土壤体积含水量差异很大。草地相应层次土壤年平均体积含水量显著 ($P=0.05$) 低于毛竹林相应层次, 有凋落物覆盖的毛竹林 0~40 cm 土壤年平均含水量比草地多 9.12%, 提高 43.41%。②土壤含水量年平均变异系数在各土地利用类型内均和年平均土壤含水量呈显著 (毛竹林: $R^2=0.77$; 草地: $R^2=0.9864$) 负相关, 草地土壤年平均含水量变异系数变动为 8.70%~16.80%, 毛竹林土壤年平均含水量变异系数变动为 13.9%~16.4%, 下限显著高于草地, 波动幅度小, 表明毛竹林地土壤具有显著高于草地的水分涵养能力, 适合作为水源涵养林建设林种。③不同层次土壤含水量降雨间隔期呈指数显著 ($R^2>0.9$) 相关关系消退。利用不同季节不同层次间土壤含水率指数模型, 可以预测森林抗旱能力并依次作出经营管理预案。图 5 表 3 参 23

关键词: 生态学; 土壤学; 毛竹林; 草地; 土壤含水量; 土地利用类型

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2014)06-0911-08

Surface volume soil water content in grasslands versus bamboo stands in a Nanjing suburb

WANG Chunlin, ZHANG Jinchi, ZHUANG Yilin, ZHOU Jiao, HAN Cheng, LIU Xin, ZHUANG Jiayao

(Laboratory of Water and Soil Conservation, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: In order to evaluate the water conservation function under forest soil, a *Phyllostachys edulis* bamboo stand and a *Leptochloa chinensis* grassland in the Tongshan Forestry Farm of Nanjing were selected with four sets (2 replications) of Decagon Em50 Data Loggers used to measure daily average soil Volumetric Water Content (VWC) at depths of 5, 15, and 30 cm with air humidity measured at a 2.0 m height for a year. All data were recorded continuously every 15 minutes. Results in the bamboo stand and grass land showed that (1) daily average soil VWC at 5 cm was 33.02%, at 15 cm was 26.16%, and at 30 cm was 30.60% with the lowest (at 15 cm) having the greatest root weight, root length, and soil compaction. In the grassland daily average soil VWC at corresponding depths was lower than the bamboo stand. For the 0–40 cm soil layer, the average annual VWC in the bamboo stand with thick litter on the ground was 9.12% higher than the grassland, improving by 43.41%. (2) For each land use type the average annual CV for daily average soil VWC was negatively and significantly correlated ($R^2>0.9$, $P<0.001$) to average annual soil VWC, varying between 8.70%–16.80% in the grassland and 13.9%–16.4% in the bamboo stand. Thus, due to plant roots and litter, daily average soil

收稿日期: 2013-12-17; 修回日期: 2014-03-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31170663); 国家林业公益性行业重大专项(201104005); 江苏省高等学校林学优势学科建设项目(164010641)

作者简介: 汪春林, 博士, 从事森林水文与土壤侵蚀模型研究。E-mail: nlzjiayao@njfu.edu.cn。通信作者: 张金池, 教授, 博士, 博士生导师。从事林业生态工程、水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: zhang8811@njfu.edu.cn

VWC in corresponding soil layers of the bamboo stand had better water conservation capabilities than the grassland. It is believed to be useful in water conservation forest construction with bamboo. (3) Simulated with exponential function model, seasonal daily average soil VWC correlated significantly ($R^2 > 0.9$, $P < 0.001$) with rain day interval for different soil layers, which could be used to help predict drought and to assist in drought control management. [Ch, 5 fig. 3 tab. 23 ref.]

Key words: ecology; soil science; bamboo forest; grassland; daily average soil VWC; land use

土壤水对植物的生长是至关重要的, 森林凋落物和森林土壤是森林生态系统特有的组成成分, 是森林拦蓄地表径流、实现水源涵养功能的主要功能体。由于干旱和水分匮乏, 在植被与土壤含水量变化关系方面, 张晶晶等^[1]、黄琳琳等^[2]、梁超等^[3]通过对北方黄土高原区植被与土壤含水量变化研究, 认为不同植被覆盖下土壤平均含水量的垂直变化特征是覆盖度越高, 其表层土壤(0~20 cm)的含水量越高。杨永东^[4]通过对黄土丘陵区不同土地利用类型的研究, 发现不同植被类型覆盖下的土壤水有显著的差异。张友静等^[4]开展了区域多源遥感数据反演预测土壤水分, 王云强等^[5]开展了黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性研究。目前, 在长江中下游地区部分开展了森林水源涵养功能研究^[6]、森林林冠截留研究^[7], 但是, 缺乏对于植被耗水与土壤水分变化规律及其影响因子的研究。到目前为止, 国内关于土壤水分研究报道大多以坡面垂直变异为主, 以个别事件作为一般规律归纳, 缺少对表层土壤长期连续定位监测与季节变异规律分析。在覆盖对土壤水分影响方面, Zhang 等^[8]研究了岩石覆盖对四川盆地紫色土蒸发和下渗的影响, Schwartz 等^[9]研究了耕作对土壤水分再分配的影响以及对裸露土壤蒸发的影响。在森林地表凋落物覆盖对土壤表层水分变异研究方面, 侧重于 0~30 cm 土壤水分变化规律研究, 例如 Juan 等^[10]研究了半干旱地区表层 5 cm 土壤不同林冠结构和凋落物覆盖下的土壤蒸发特征, 表明具有凋落物覆盖的林下土壤对土壤蒸发具有控制功能, 不受季节和物候的影响, 而没有凋落物覆盖的林下土壤斑块, 土壤蒸发受季节和物候影响很大。土壤水指的是由地面向下至地下水面(潜水面)以上土壤层中的水分, 亦称土壤中非饱和带水分。它是联系地表水与地下水的纽带。随着科学技术发展, 土壤水的研究发展迅速, 在相同降雨情况下, 地表植被不同, 土壤补水大不一样。土壤水不是静止不变的, 在时间尺度上有土体与环境之间不断输出与输入, 在土体内也有水平的扩散、壤中流和垂直方向上的水分上下传输等小范围运动。土壤水分的季节性变化动态, 在降雨量大或分布不均的年份中差异变化较为明显, 而在降雨量分布均匀的年份中, 土壤水的收支基本能够达到平衡。开展不同类型土地利用类型的土壤水分变异规律研究, 对于水源涵养林基地建设与水源涵养功能科学评估具有重要意义。笔者选择南京城郊毛竹 *Phyllostachys edulis* 林和千金子 *Leptochloa chinensis* 草地等 2 种土地利用类型, 进行表层土壤体积含水量的长期定位连续监测, 开展土壤水分的变异规律研究, 可以为城郊水源涵养林基地表层土壤水分预测预报以及土壤水分管理提供依据。

1 试验区概况

南京市东善桥林场铜山分场(31°35'~31°39'N, 118°50'~118°52'E), 属北亚热带季风气候区, 试验区基本情况见相关研究^[11]。试验地选取毛竹林和千金子草地, 千金子草地少量小白酒草 *Conyza canadensis* 入侵, 土壤类型为黄棕壤。土壤水分测量试验地点选择考虑毛竹林点不受林缘和林窗影响, 郁闭度 0.8 以上。2 种土地利用类型坡向一致, 东北向, 立地条件一致, 土壤厚度均为 60 cm 左右, 60 cm 以下为砂岩风化母质层, 坡度略有差异, 海拔 26.0 m, 地下水位位于 10.0 m 以下。2 种土地利用类型基本特征如表 1。表 1 反映毛竹林与草地表层土壤与其他层次比较, 初表层容重略低, 10~40 cm 层由于毛竹根系密度大, 土壤紧实, 容重基本一致。毛竹林各土壤层次非毛管孔隙度与有机质含量与草地相比明显较高, 其中 10~20 cm 土壤层次有机质达到 14.8 g·kg⁻¹, 是草地相应层次的 2 倍。

2 研究方法

2.1 土壤含水量、土壤温度、空气温度、空气湿度测定

由于林地和草地地表千差万别, 考虑样地中土壤水分在水平方向有变异, 选择土壤与光照条件相同

水平方向 3 m 距离各设置重复观测点 1 个，毛竹林点设置考虑位于数株毛竹组成的多边形的中心，土壤水分探头附近 10 cm 内无直径 0.5 cm 以上树根分布。每个土地利用类型、每个土壤深度共设置 2 个观测点。毛竹林点地表覆盖 2 cm 厚度毛竹凋落物。2 种土地利用类型 3 个土壤深度总计 12 个土壤体积含水量观测探头。土壤温度、空气温度、空气湿度测定与土壤物理属性与有机质测定见文献^[11]。

2.2 数据分析方法

土壤日平均含水量的计算采用 Excel 软件，方差分析与多重比较、多元线性回归以及相关性分析使用 DPS 软件。

3 结果分析

3.1 2 种土地类利用型土壤含水量水平空间变异程度分析

选择 2010 年 6 月 1 日到 2011 年 5 月 31 日期间的毛竹林与草地 5, 15, 30 cm 深度土壤体积含水量数据与相应重复层次结果进行差异显著性检验。以毛竹林与草地 5 cm 土壤水分方差分析为例表明，2 种土壤类型各土壤层次与相应重复层次间有微小差异，但是不显著(毛竹林 P 值为 0.36，草地为 0.24)。其他层次土壤含水量水平空间变异方差分析具有相似性，变异均不显著。

表 1 毛竹林分与草地土壤属性表

Table 1 Characteristics of soil in layers of 0–40 cm in bamboo forest and grass land

土地利用类型	土层/cm	容重/(t·m ⁻³)	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	总孔隙度/%	有机质/(g·kg ⁻¹)
毛竹林	0~10	1.20	38.8	15.1	53.9	29.2
	10~20	1.45	35.2	6.0	41.2	14.8
	20~30	1.49	35.2	5.4	40.6	6.7
	30~40	1.54	34.3	4.6	38.9	2.4
草地	0~10	1.30	39.9	11.4	51.3	25.8
	10~20	1.46	30.8	5.0	35.8	7.4
	20~30	1.48	26.4	4.9	31.3	4.8
	30~40	1.54	24.3	4.1	28.4	2.1

3.2 2 种土地类利用型不同深度土壤含水量在 1 a 内的变化规律

将毛竹林和草地观测期间各层次土壤体积含水量按照日平均统计，得到 2 种土地利用类型 1 a 内的土壤体积含水量变化过程(图 1 与图 2)。

图 1 与图 2 表明：具有凋落物覆盖的毛竹林各土壤层次土壤含水量为 18%~50%，显著($P=0.05$)高于草地(9.1%~30%)。2 种土地利用类型 1 a 内土壤体积含水量变化均可以分为 2 个阶段：5–9 月，土壤对强降水、蒸发响应的剧烈波动阶段；1–3 月，10–12 月，土壤对弱降水响应上升缓慢、对蒸发响应下降缓慢的波动阶段。毛竹林 5 cm 与 30 cm 土壤体积含水量在 6–10 月基本重合且显著($P=0.05$)高于 15 cm 土壤体积含水量。草地 15 cm 与 30 cm 土壤体积含水量显著($P=0.05$)高于 5 cm 土壤体积含水量。

方差分析与多重比较表明(表 2)，毛竹林与草地土壤日平均含水量于 1 a 内在 3 个层次间均具有极显著差异($P<0.01$)。毛竹林 5 cm 层土壤年平均含水量最高，30 cm 层次之，15 cm 层最低。毛竹林根系主要集中于 0~30 cm 土壤深度，0.5~5.0 mm 根系可以达到 3.5 t·hm⁻²，长度达到 669.88 km，占根系

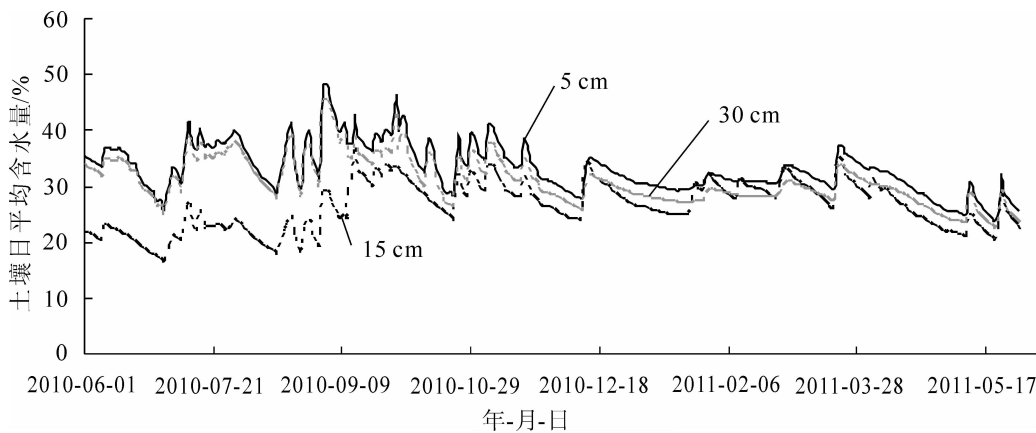


图 1 毛竹林 1 a 内 5~30 cm 层次土壤日平均含水量

Figure 1 DASVWC of 5–30 cm depth in bamboo forest during one year

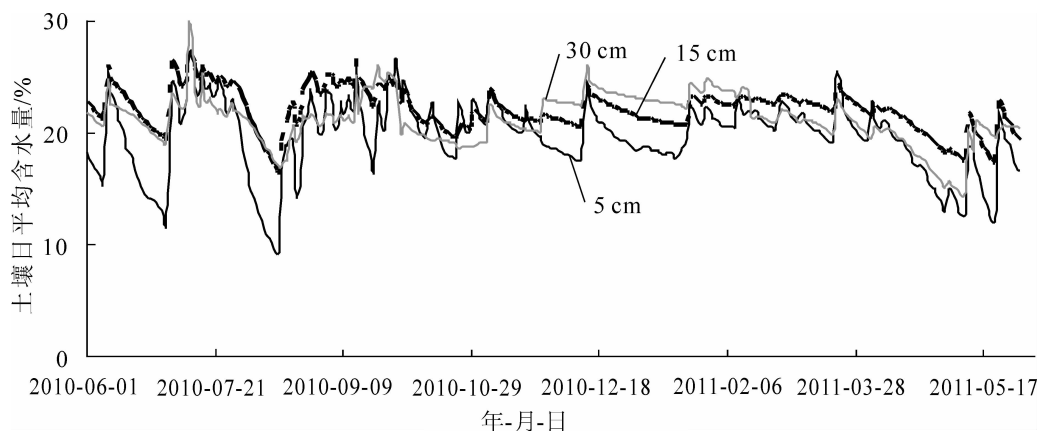


图 2 草地 1 a 内 5~30 cm 层次土壤日平均含水量

Figure 2 DASVWC of 5~30 cm depth in grassland during one year

总质量和长度的 95% 以上^[12], 0~30 cm 抗冲指数是同地区马尾松 *Pinus massoniana*-杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林的 1.5~2.0 倍, 草地的 3.0 倍^[13]。抗侵蚀指数与水稳性团聚度是同类区域马尾松林-杉木林的土壤的 2.0 倍以上, 草地的 3.0 倍以上^[14], 土壤紧实, 吸水率低与渗透速率极低。10 cm 以下土壤毛竹细根系盘根错节、土壤紧实, 下渗速率与蓄水能力均比较低。30 cm 土壤含水量低于 5 cm 层而显著高于 15 cm。草地土壤 5 cm 层年平均含水量显著低于毛竹林土壤水分, 草地土壤表层最低为 19.58%, 毛竹林 5 cm 层最高为 33.02%, 前者为后者的 59.25%。草地 15 cm 土壤年平均含水量为毛竹林 15 cm 的 84.22%, 草地 30 cm 土壤年平均含水量为毛竹 30 cm 层次土壤的 69.17%。以 5 cm 土壤年平均含水量代表 0~10 m, 15 cm 土壤年平均含水量代表 10~20 cm, 30 cm 土壤年平均含水量代表 20~40 mm, 有凋落物覆盖的毛竹林 0~40 cm 土壤年平均含水量比草地多 9.12%, 提高 43.41%。表明毛竹林 5 cm 与 30 cm 层土壤吸持水分的能力优于草地, 凋落物覆盖的毛竹林地土壤具有显著高于草地的水分储备和供应能力。

表 2 土壤日平均含水量多重方差分析与平均数检验(样本数均为 365)

Table 2 Statistical parameter of DASVWC of different depth in oak forest and grassland during December, 2010 to March, 2011($n=365$)

方差检验土壤日平均含水量所属 土地类型与土壤层次	土壤日平均含水量均值/%	两处理方差齐性, 均值差异检验	<i>P</i>
毛竹林 5 cm, 草地 5 cm	33.026 4, 19.586 8	$F=1.734\ 8, t=47.014\ 0$	0.000 1
毛竹林 15 cm, 草地 15 cm	26.117 3, 21.995 8	$F=4.981\ 9, t=16.770\ 7$	0.000 1
毛竹 30 cm, 草地 30 cm	30.655 5, 21.205 0	$F=3.792\ 5, t=46.188\ 1$	0.000 1
毛竹林 5 cm, 毛竹林 15 cm	33.026 4, 26.117 3	$F=1.030\ 6, t=21.618\ 9$	0.000 1
毛竹林 5 cm, 毛竹林 30 cm	33.026 4, 30.655 5	$F=2.186\ 2, t=7.754\ 0$	0.000 1
毛竹林 15 cm, 毛竹林 30 cm	26.117 3, 30.655 5	$F=1.075\ 3, t=14.565\ 7$	0.000 1
草地 5 cm, 草地 15 cm	19.586 8, 21.995 8	$F=2.959\ 6, t=12.048\ 3$	0.000 1
草地 15 cm, 草地 30 cm	21.995 8, 21.205 0	$F=1.353\ 8, t=5.129\ 4$	0.000 1
草地 5 cm, 草地 30 cm	19.586 8, 21.205 0	$F=1.108\ 2, t=7.550\ 0$	0.000 1

3.3 2 种土地利用类型土壤含水量变异程度的时空动态特征

通过对 2 种土地利用类型 1 a 内的土壤不同层次含水量统计, 得到反映毛竹林与草地不同层次土壤季节平均含水量变异系数(图 3)。图 3 表明: 草地表层 5 cm 土壤水分变异系数在春、夏季节显著($P=0.05$)高于其他层次(包括毛竹林), 其中夏季达到 24.70%, 而其他层次变动于 9.60%~10.90%, 区别较小, 秋季变动于 7.50%~12.12%。夏自强^[16]研究指出, 土壤不同深度的平面空间上, 土壤含水量变异性同土壤的含水量大小有关, 含水量大时其变异系数小, 含水量小时其变异系数大。本研究表明, 同一土地利用类型土壤含水量变异性同土壤含水量显著相关。土壤含水量年平均变异系数在草地和毛竹林内均和年平均土壤含水量呈显著负相关(图 4), 回归关系式分别为草地: $y=-3.494\ 9x+85.03, R^2=0.99$; 毛竹林: $y=32.527e^{-0.026\ 9x}, R^2=0.77$ 。草地 0~30 cm 土壤年平均含水量变动于 19.6%~21.9%, 土壤年平均含水量变异系数变动于 8.70%~16.80%, 表现为土壤含水量变动幅度区间窄, 年平均含水量变异系数波动幅

度大。毛竹林 0~30 cm 土壤年平均含水量变动于 26.16%~30.60%，土壤年平均含水量变异系数变动于 13.90%~16.40%，表现为土壤含水量变动幅度区间较草地大，年平均含水量变异系数波动幅度较草地小的特点。

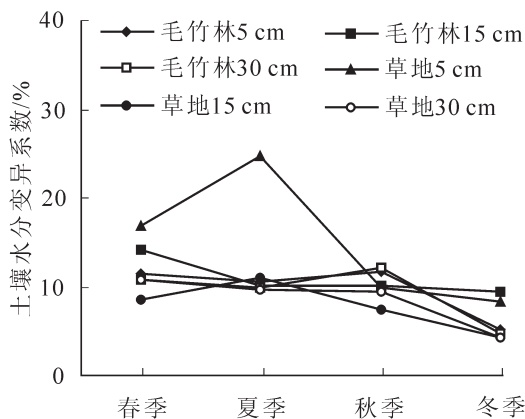


图 3 毛竹林与草地 1 a 内 5~30 cm 层次土壤季节平均含水量变异系数特征

Figure 3 Seasonal CV variation of DASVWC at 5–30 cm soil depth in grassland and bamboo forest

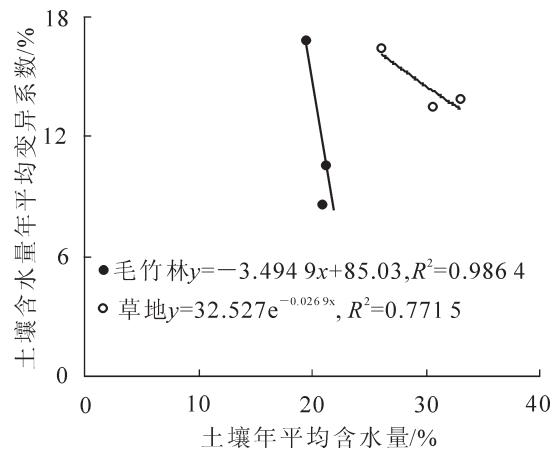


图 4 毛竹林与草地 1 a 内 5~30 cm 层次土壤年平均含水量与变异系数

Figure 4 Annual CV variation of DASVWC at 5–30 cm soil depth in grassland and bamboo forest

3.4 降雨间隔期土壤含水量日变化量的时空动态特征

谢志清等^[15]研究指出，不同类型的下垫面条件下，夏季土壤水分在湿润研究区呈明显的单峰偏态分布，且以 β 分布拟合效果为最好，且湿润的研究区域夏季土壤水分在时间上呈显著的 10~25 d 的周期变化。降水间隔期间，土壤含水量随时间呈指数式衰减^[16-17]，可用 $\theta = \alpha e^{-kt}$ 来表示， α 与土壤含水量正相关， k 为消退指数。 k 值越大，说明土壤失水速率越大。选择 10 日以上连续无降水期间，以时间(d)为横坐标，以日平均土壤体积含水量为纵坐标，得到草地与毛竹林不同季节日土壤含水量退水曲线(图5)。对 2 种土地利用类型 5~30 cm 层日平均含水量随时间消减(图 5)进行模拟，得到了 2 种土地利用类型土壤含水量与时间的极显著指数关系(表 3)。图 5 表明：夏季毛竹林 5 cm 与 30 cm 层土壤体积含水量显著($P=0.05$)高于其他层次，是同期毛竹林 15 cm 层、草地 15 cm 与 30 cm 层土壤体积分含水量的 1.5 倍左右，是草地 5 cm 层土壤体积分含水量的 2.0~3.0 倍(图 5a 和图 5b)，秋冬季毛竹林 5, 30 与 15 cm 层土壤体积分含水量呈 2.5% 左右间距平行排列(图 5c)，均高于草地各层次，消退指数 k 在 0.01 以上，高于草地 5 cm 表层土壤的 0.008 3。草地 15 cm 与 30 cm 层秋冬季土壤 k 值极低，分别为 0.003 2 和 0.001 9，土壤蒸腾以 5 cm 表土层为主。春季毛竹林 5 cm 与 30 cm 层土壤体积分含水量在降水间隔期呈 2.50% 左右间距排列，15 cm 与 30 cm 层土壤体积分含水量近似重合(图 5d)，显著区别于夏、秋冬季节。草地春季 5 cm 和 15 cm 层土壤 k 值与秋冬季近似，分别是夏季 k 值的 27.0% 和 10.0%；30 cm 层土壤消退指数 k 值为 0.004 5，是夏季 k 值的 15.0%，较秋冬季增加了 136.9%。

4 结论

本研究采用野外长期定位监测，与传统人工采样监测土壤含水量相比，对土壤坡面破坏性小，确保了数据准确、连续、系统性，避免了采样点变换导致的样本间差异。通过对 1 a 间毛竹林与草地表层不同层次土壤体积分含水量、空气温度、湿度监测数据，采用方差分析以及非线性回归分析，得出结论：南京城郊毛竹林与草地表层不同层次土壤体积分含水量年变化可以划分为 2 个阶段：5–9 月，土壤对强降水、蒸发响应的剧烈波动阶段，1–3 月，10–12 月，土壤对弱降水响应上升缓慢、对蒸发响应下降缓慢的波动阶段。

不同土地利用类型由于不同层次土壤受植物根系和凋落物影响差异，土壤体积分含水量差异很大。毛竹林 5, 15, 30 cm 土壤年平均体积分含水量分别为 33.02%，26.16% 和 30.60%，表现为和土壤物理属性对应的土壤紧实区低，表层和土壤紧实区以下高的特点。草地 5, 15, 30 cm 土壤年平均体积分含水量分

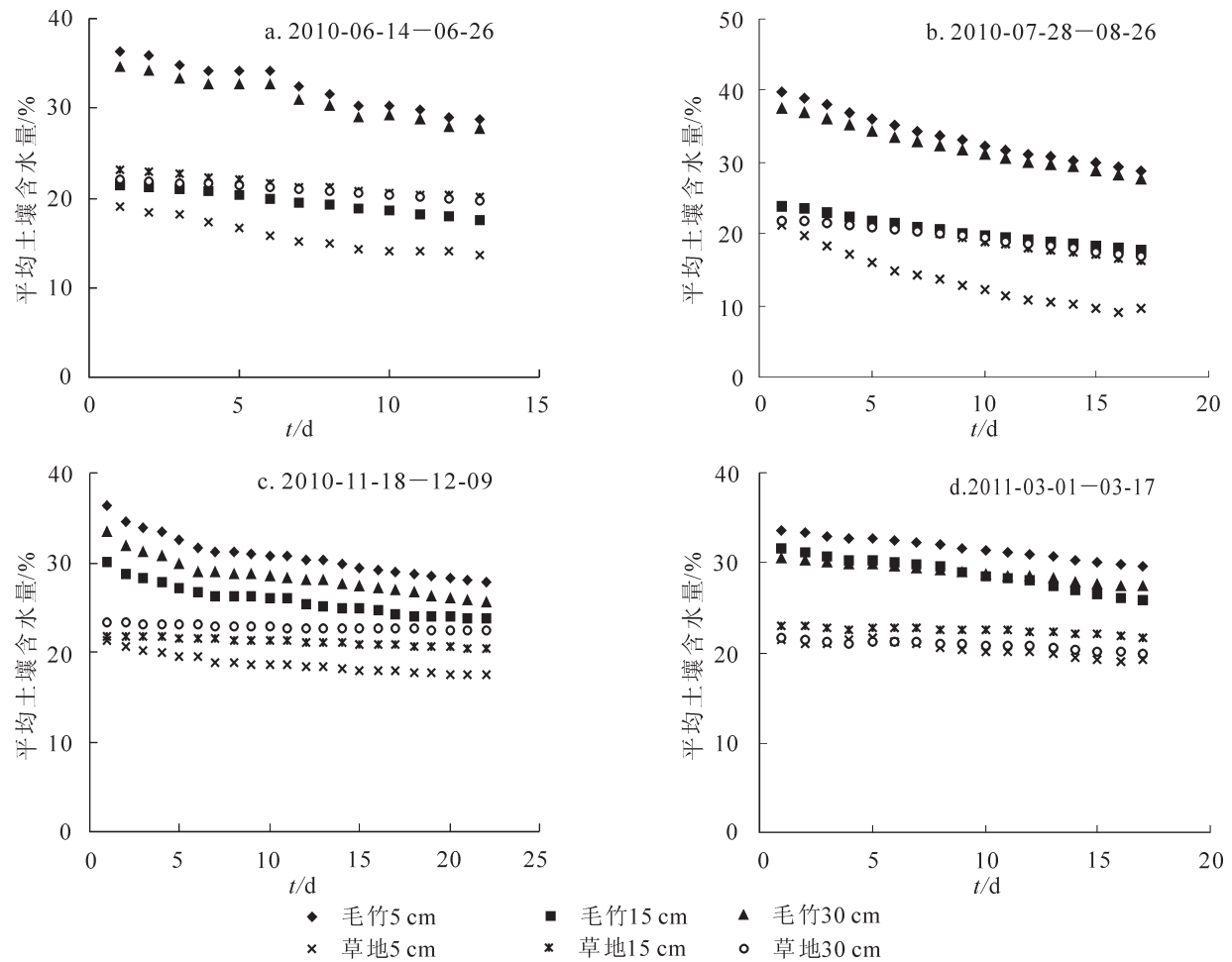


图 5 草地与毛竹林不同季节日土壤含水量退水曲线
Figure 5 Deterioration of DASVWC at 5–30 cm soil depth in grassland and bamboo forest

表 3 2 种土地类型在不同降雨间隔期的土壤含水量与天数模拟

Table 3 Simulation of DASVWC in different period of two types of land use

时间	土壤层次/ cm	草地		毛竹林	
		模拟公式	R^2	模拟公式	R^2
2012-06-14	5	$y=19.221e^{-0.029\ 2x}$	0.950 0	$y=37.334e^{-0.029\ 2x}$	0.971 5
	15	$y=23.419e^{-0.029\ 2x}$	0.990 2	$y=22.054e^{-0.017\ 3x}$	0.996 1
	30	$y=22.297e^{-0.029\ 2x}$	0.993 5	$y=35.545e^{-0.017\ 3x}$	0.966 0
2010-07-28–08-13	5	$y=21.117e^{-0.052\ 9x}$	0.981 0	$y=39.966e^{-0.020\ 1x}$	0.988 6
	15	$y=24.507e^{-0.024\ 5x}$	0.997 4	$y=24.153e^{-0.018\ 9x}$	0.990 6
	30	$y=22.688e^{-0.016\ 7x}$	0.984 7	$y=37.931e^{-0.01\ 9x}$	0.990 7
2010-11-18–12-09	5	$y=20.590e^{-0.008\ 3x}$	0.913 0	$y=34.776e^{-0.010\ 8x}$	0.933 0
	15	$y=21.983e^{-0.003\ 2x}$	0.993 3	$y=28.963e^{-0.010\ 0x}$	0.939 2
	30	$y=23.325e^{-0.001\ 9x}$	0.965 4	$y=31.955e^{-0.010\ 4x}$	0.934 1
2011-03-01–03-17	5	$y=21.880e^{-0.007\ 9x}$	0.923 3	$y=33.929e^{-0.007\ 8x}$	0.993 4
	15	$y=23.115e^{-0.003\ 2x}$	0.907 8	$y=32.157e^{-0.012\ 4x}$	0.981 4
	30	$y=21.669e^{-0.004\ 5x}$	0.906 8	$y=30.838e^{-0.007\ 0x}$	0.995 6

别为 19.59%，22.00%和 21.21%，显著低于毛竹林相应层次。有凋落物覆盖的毛竹林 0~40 cm 土壤年平均含水量比草地多 9.12%，提高 43.41%，凋落物覆盖的毛竹林地土壤具有显著高于草地的水分储备和供应能力。

土壤含水量年平均变异系数在草地和毛竹林内均和年平均土壤含水量呈显著负相关，草地土壤年平

均含水量变异系数变动于 8.70%~16.80%，毛竹林土壤年平均含水量变异系数变动于 13.90%~16.40%，下限显著低于草地，表明毛竹林地土壤具有显著高于草地的水分涵养能力。

2 种土地类型在不同降雨间隔期的各层次土壤体积含水量与天数呈随时间呈指数式消减函数关系，用 $\theta = \alpha e^{-kt}$ 模拟效果显著， R^2 均大于 0.900。与土壤体积含水量相对应，毛竹林 α 值为 22.05~39.96，远远大于草地的 19.22~24.51。毛竹林土壤体积含水量随时间消退指数 k 值为 0.007 0~0.029 2，草地为 0.001 9~0.029 2。不同层次土壤含水量降雨间隔期与时间呈指数显著相关指数关系消退，利用不同季节不同层次间土壤含水率指数模型，可以预测森林抗旱能力并依次作出经营管理预案。

5 讨论

土壤水分分布与土地利用方式密切相关，不同土地利用方式会引起土壤水分垂直分层差异，同时也会影响土壤水分垂直方向上的季节变化。不同土地利用类型各层土壤水分变异系数不同，而变异系数的垂直变化也因利用类型的不同存在差异。

与干旱区相比，长江中下游由于降水充足，植被根系和凋落物层对土壤具有极大的改造作用，在表层土壤含水量变异规律上表现出很大不同：①同一土地利用类型土壤含水量变异性同土壤含水量显著负相关适用于同一土地利用类型不同土壤层次(0~30 cm)，在不同土地利用类型之间比较时并不适合。②毛竹林 5, 15, 30 cm 土壤年平均体积含水量表现出和土壤物理属性对应的土壤紧实区低，表层和土壤紧实区以下高的特点，尚需要在以后研究中增加观测土壤不同层次根系生长过程特征，进一步研究解析其影响土壤含水量的物理学意义。

随着全球气候变暖正成为现实，森林的碳汇功能在世界范围内得到广泛认可，但是在森林水文功能方面，仍然存在森林增加和减少径流争议^[18-19]。一些区域为经济目的砍伐森林而导致去森林化或者建立无枯枝落叶以及灌木覆盖的地表裸露的人工原料林，忽略森林土壤水分经营管理在森林生态服务功能中的重要性，难以估量由于森林减少或者森林质量降低导致水源涵养功能丧失而加剧的持续干旱给与区域带来的巨大灾难和损失^[20]，而干旱能够使得森林巨大碳汇功能转化为碳源。土壤水分是连接地表水与地下水的纽带，在水资源的形成、转化及消化过程中有重要作用。近年来，由全球变暖引起的土壤含水量减少，预计将影响全球的植物群落^[21]。森林对于损伤干旱压力的水力安全边际十分狭窄，在全球范围内具有一致性，由于干旱减少森林不只发生在干旱地区，在湿润区域也时常发生^[22]。遥感监测表明，非洲和澳大利亚土壤湿度从 1998–2008 年一直下降，从而使得这些区域日益增加的土壤湿度限制因素成为全球蒸散降低趋势的原因^[23]。因此，有效的区域森林土壤水分经营管理以及碳汇林业、区域干旱控制以及水资源林业建设均迫切需要开展植被演替与径流组分变异机制研究。本研究表明：凋落物覆盖的毛竹林地土壤具有显著高于草地的水分储备和供应能力。毛竹林作为重要林种，在碳汇林业、区域干旱控制以及水资源林业建设具有重要的地位和推广价值。

参考文献：

- [1] 张晶晶, 王力. 黄土高原高塬沟壑区坡面表层土壤水分研究[J]. 水土保持通报, 2011, **31**(1): 93 – 97.
ZHANG Jingjing, WANG Li. Surface soil moisture conditions in gully region of the Loess Plateau [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2011, **31**(1): 93 – 97.
- [2] 黄琳琳, 陈云明, 王丽霞, 等. 黄土丘陵区不同密度人工油松林土壤水分状况研究[J]. 西北林学院学报, 2011, **26**(5): 1 – 5.
HUANG Linlin, CHEN Yunming, WANG Yaofeng, et al. Lixia soil moisture of artificial *Pinus tabulaeformis* stands with different densities in Loess Hilly Region [J]. *J Northwest For Univ*, 2011, **26**(5): 1 – 5.
- [3] 梁超, 郝文芳, 袁丁, 等. 黄土丘陵区不同植被群落土壤水分研究[J]. 水土保持研究, 2011, **18**(2): 103 – 111.
LIANG Chao, HAO Wenfang, YUAN Ding, et al. Study on the soil water of different vegetation communities in the Loess Hilly-Gully Region [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2011, **18**(2): 103 – 111.
- [4] 杨永东. 黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分动态及水土保持效应研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2008.
YANG Yongdong. *Study on Dynamic Soil Moisture and Water and Soil Conservation of Different Land Use in Hilly Region of Loess Plateau* [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2008.

- [5] 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.
ZHANG Youjing, WANG Junzhan, BAO Yansong. Soil moisture retrieval from multi-resource remotely sensed images over a wheat area [J]. *Adv Water Sci*, 2010, **21**(2): 222 – 228.
- [6] 王云强, 邵明安, 刘志鹏. 黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性[J]. 水科学进展, 2012, **23**(3): 310 – 316.
WANG Yunqiang, SHAO Mingan, LIU Zhipeng. Spatial variability of soil moisture at a regional scale in the Loess Plateau [J]. *Adv Water Sci*, 2012, **23**(3): 310 – 316.
- [7] 贺淑霞, 李叙勇, 莫菲, 等. 中国东部森林样带典型森林水源涵养功能[J]. 生态学报, 2011, **31**(12): 3285 – 3295.
HE Shuxia, LI Xuyong, MO Fei, *et al.* The water conservation study of typical forest ecosystems in the transect of eastern China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(12): 3285 – 3295.
- [8] 贾永正, 胡海波, 张家洋, 等. 苏南丘陵区毛竹林冠截留降雨分布格局[J]. 生态学报, 2011, **31**(12): 3537 – 3542.
JIA Yongzheng, HU Haibo, ZHANG Jiayang. Canopy interception of rainfall by bamboo plantations growing in the Hill Areas of Southern Jiansu Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(12): 3537 – 3542.
- [9] ZHANG Weihua, WEI Chaofu, LI Yan, *et al.* Effects of rock fragments on infiltration and evaporation in hilly purple soils of Sichuan Basin, China [J]. *Environ Earth Sci*, 2011, **62**(8): 1655 – 1665.
- [10] SCHWARTZ R C, BAUMHARDT R L, EVETT S R. Tillage effects on soil water redistribution and bare soil evaporation throughout a season [J]. *Soil Tillage Res*, 2010, **110**(2): 221 – 229.
- [11] VILLEGAS J C, BRESHEARS D D, ZOU C B, *et al.* Ecohydrological controls of soil evaporation in deciduous drylands: How the hierarchical effects of litter, patch and vegetation mosaic cover interact with phenology and season [J]. *J Arid Environ*, 2010, **74**(5): 595 – 602.
- [12] 庄家尧, 李珪, 张金池. 南京城郊栎林与草地不同层次土壤含水量变化规律研究[J]. 林业科学, 2012, **48**(12): 101 – 108.
ZHUANG Jiayao, LI Yao, ZHANG Jingchi. Variation of soil volumetric water content in grassland and an oak forest at different depths in a forest farm in Nanjing [J]. *Sci Silv Sin*, 2012, **48**(12): 101 – 108.
- [13] 庄家尧, 张金池, 林杰, 等. 安徽省大别山区上舍小流域植物根系与土壤抗冲性的研究[J]. 中国水土保持科学, 2007, **5**(6): 15 – 20.
ZHUANG Jiayao, ZHANG Jinchi, LIN Jie, *et al.* Relationship between plant system root and anti-socourability in the Shangshe catchment, Dabie Mountains of Anhui Province [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2007, **5**(6): 15 – 20.
- [14] 丛日亮, 黄进, 张金池, 等. 苏南丘陵区主要林分类型土壤抗蚀性分析[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(8): 1862 – 1867.
CONG Riliang, HUANG Jin, ZHANG Jinchi, *et al.* Analysis of soil anti-erodibility of main forest types in the south hilly region of Jiangsu Province [J]. *Ecol Environ Sci*, 2010, **19**(8): 1862 – 1867.
- [15] 谢志清, 丁裕国, 刘晶森. 不同下垫面条件下土壤含水量时空变化特征的对比分析[J]. 南京气象学院学报, 2002, **25**(5): 626 – 633.
XIE Zhiqing, DING Yuguo, LIU Jingmiao. Contrast analysis of spatial-temporal distribution of soil moisture of heterogeneous surface [J]. *J Nanjing Ins Meteorol*, 2002, **25**(5): 626 – 633.
- [16] 夏自强. 土壤水资源特性分析[J]. 河海大学学报, 2001, **29**(4): 23 – 26.
XIA Ziqiang. Analysis of soil water resource characteristics [J]. *J Hohai Univ*, 2001, **29**(4): 23 – 26.
- [17] 尚松浩, 毛晓敏, 雷志栋. 土壤水分动态模拟模型及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 12 – 13.
- [18] XU jiangchu. China's new forests aren't as green as they seem [J]. *Nature*, 2011, **477**(7365): 371.
- [19] JACKSON R B, JOBBÁGY E G, AVISSAR R, *et al.* Trading water for carbon with biological carbon sequestration [J]. *Science*, 2005, **310**(5756): 1944 – 1948.
- [20] QIU Jane. China Drought highlights future climate threats [J]. *Nature*, 2010, **465**: 142 – 143.
- [21] WU Gaolin, REN Guohua, WANG Dong, *et al.* Above-and below-ground response to soil water change in an alpine wetland ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *J Hydrol*, 2013, **476**: 120 – 127.
- [22] JUNG M, REICHSTEIN M, CIAIS P, *et al.* Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply [J]. *Nature*, 2010, **467**(7318): 951 – 954.
- [23] CHOAT B, JANSEN S, BRODRIBB T J, *et al.* Global convergence in the vulnerability of forests to drought [J]. *Nature*, **491**(7462): 752 – 755.