

干旱半干旱区山地土壤水分动态变化

何其华, 何永华, 包维楷

(中国科学院成都生物研究所, 四川 成都 610041)

摘 要: 水分是干旱半干旱区山地植物生长的主要限制因子, 在这些地区开展土壤水分动态变化研究对农业生产 and 生态恢复的重要性是不言而喻的。近年来土壤水分测定技术有了很大进步, 中子水分仪和时域反射仪已成为常规测量仪器, 新型仪器不断出现, 总的趋势是仪器的精度和自动化水平不断提高。土壤水分有其时空变化规律, 一方面土壤水分随季节变化而变化, 另一方面土壤水分随土壤深度和水平位置的变化发生相应变化。降水是影响干旱半干旱区山地土壤水分的最重要因素, 气温、太阳辐射等其它气象因子对土壤含水量也用一定影响。此外, 坡向、坡度、坡位等地形因子以及土壤特性、地表植被、土地利用情况等对土壤含水量空间分布也有重要影响。总之土壤含水量的时空变化是各种环境因子综合作用的结果。目前土壤水分动态变化的研究重点是对影响因子的研究。就我国而言, 宜加强干旱河谷区土壤水分动态变化的研究, 促进土壤水分动态变化研究工作全面深入地开展。

关键词: 干旱半干旱区; 山地; 土壤水分; 动态变化

中图分类号: S152. 7

文献标识码: A

土壤水分是土壤的重要性质之一, 是土壤物理学的重要内容。土壤水分是土壤- 植物- 大气连续体的一个关键因子, 是土壤系统养分循环和流动的载体, 它不但直接影响土壤的特性和植物的生长, 而且间接影响植物分布和在一定程度上影响小气候的变化。长期以来, 土壤水分都是森林、草原和农田等生态系统研究的重要内容, 尤其是在占世界约 1/3 的干旱区(包括我国的华北、西北和青藏高原的绝大部分)和半干旱区。干旱河谷区是一类特殊的干旱半干旱地区, 这类地区地形特殊, 干旱少雨、蒸发强烈、干湿季分明、光照充足, 与其它干旱半干旱区一样土壤水分匮乏。在这些地区, 土壤水分是限制植物生长和分布的主要因子, 研究土壤水分变化规律更有其重要性和迫切性。本文目的在于综述近 20 a 来土壤水分动态变化研究的进展, 为今后土壤水分动态研究提一些建议。以下就近年来土壤水分测定技术、土壤水分的时空变化及影响土壤水分含量的

环境因素的研究情况作一简单评述。

1 土壤水分测定方法

快捷有效地测定土壤水分是研究土壤水分动态变化规律的基础, 目前, 已有多种土壤水分测量方法。从测定的空间尺度上, 大致可以分为定点测定和面积测定两种方式。定点测定的常规方法有烘干法、中子水分仪测定法、时域反射仪(TDR)测定法、伽玛射线法、张力计测定法、露点仪测定法和电阻法等, 前四种方法测定土壤含水量, 后三种方法测定土壤水势。面积测定包括中等尺度范围的测定(如使用地表穿透雷达(GPR)进行的测定)^[1]和大范围的遥感测定。现将各方法的基本原理、优缺点列于表 1。

此外, 新的测定手段不断出现, 如 Joseph 等介绍的一种价格远比时域反射仪便宜但同样有效的土

收稿日期(Received date): 2002- 11- 20; 改回日期(Accepted): 2002- 12- 30。

基金项目(Foundation item): 国家十五科技攻关项目(2001BA606A- 05- 03), 中国科学院知识创新工程项目(KSCX1- 07- 01- 01)及西南创新基地项目共同资助。[Supported by the National Key Project of Science and Technology of 15th "Five Years"(2001BA606A- 05- 03), the Knowledge Innovation Project of the Chinese Academy of Sciences (KSCX1- 07- 01- 01) and the Knowledge Innovation Project of Southwestern Base.]

作者简介(Biography): 何其华(1971-), 男(汉), 四川眉山人, 中国科学院成都生物研究所植物生态学专业研究生。[HE Q+hua (1971-), Male (the Han Nationality), Graduate Student of Plant Ecology of the Chengdu Institute of Biology, the Academy of Sciences.]

表 1 土壤水分测定方法比较
Table 1 comparison of soil moisture measurements

测定方法	基本原理	优 点	缺 点
遥感法	不同含水量的土壤反射的电磁波强度不同	测量的空间范围大	只能测量地面以下几厘米的土壤,且须以定点测定数据为基础,测定的数据精度不高
GPR 法	电磁波在土壤中的传播速度与土壤的介电常数呈对应关系	测量的空间范围较大	只能测量地面以下几厘米的土壤,且必须以定点测定数据为基础,测定的数据精度较差
烘干法	在摄氏 105 度左右烘干土壤,计算水分占干土重的比率	直接测定土壤含水量,成本低、简单可行,准确性高	费时费力,且破坏测定点的土壤,不利于原位测定,取样过程会造成蒸发误差
中子水分仪法	通过记录快中子遇到与之质量相近的氢原子变为慢中子的数量来计算土壤含水量	仪器探头在一个相当大的土壤样本中测定,测量值更具代表性。可对原位土壤进行连续测定。不受土壤水状态影响,测定数据准确性较高。仪器价格适中	测定的慢中子数有赖于标准曲线转换成含水量,标定过程会带来误差,此外仪器有一定放射危害
时域反射仪法	电磁波在土壤介质中的传播速度与土壤的介电常数呈对应关系	快速、准确,可对原位土壤进行连续自动监测	测量值需要校正,且价格昂贵
γ 射线法	γ 射线在穿透土壤时,能量衰减程度与土壤含水量呈对应关系	快速、准确,可对土壤进行连续自动监测	测量值受土壤干容重影响大,仅适于实验室测定
张力计法	负压管的负压与土壤吸力呈对应关系	价格较便宜,操作简单可对原位土壤长期监测	受温度影响大,在土壤含水量低时即失效。此外,负压管中的水进入土壤会带来误差
露点微伏计法	通过电的方法测量热电偶探头温度,探头的特定温度是被测定区间水势的直线函数	能测定较低土壤水势,可对原位土壤长期监测	测量值受温度变化影响很大,土壤含水很高时测量误差很大
电阻法	电阻材料电阻的变化与周围土壤水势有对应关系	价格便宜	对土壤类型、盐分浓度和土壤温度敏感,测量范围随电阻块不同而各异

壤水分测定仪器—CS615 反射仪^[2], Gaylon 等提供的振动仪(oscillator) 也是一种价廉物美的土壤水分测定仪等^[3]。

土壤水势能更好反应土壤水分的有效性(对植物根系吸水而言), 在研究植物根系水分吸收情况时更多的使用土壤水势, 鉴于目前土壤水势测定的局限(仪器测量范围窄和仪器本身对温度等环境变化敏感等), 往往是利用土壤水分特征曲线将土壤含水量换算成土壤水势, 但是由于土壤的失水曲线和吸水曲线不一致, 造成土壤特征曲线存在一定误差。

总的来说, 近年来土壤水分测量仪器有了很大改善, 但测量精度和自动化水平有待进一步提高。快捷、准确地测量土壤水势是大家期望已久的事, 这有待于现有仪器的改良和新型仪器的发明。

2 土壤水分动态变化规律

土壤水分动态变化受到许多环境因子的影响, 呈现出非常复杂的动态变化。世界各地的研究表明, 不同地区的研究结果有一致的, 有不一致甚至相反的, 同一地区年际间的变化情况也不尽相同。从总体上来看, 某一地区的土壤水分动态的时空变化是有其内在规律的。

2.1 土壤水分的时间变化

2.1.1 土壤水分的季节性变化

降水、气温、光照强度和蒸发量等气候因子的季节性变化, 会引起土壤水分发生相应变化。植物的生长具有季节性, 随着季节的变化植物对土壤水分

的利用和植被覆盖地表的情况随之变化,对土壤水分含量也有一定影响。

据降水情况,可粗略地将一年分为雨季和旱季。雨季前土壤含水量较低,随着降雨增加进入雨季,土壤含水量逐步增加并在一段时期内相对稳定在一个较高的水平,接着降雨量减少而进入旱季,土壤水分也随之减少并在一段时期内相对稳定在一个较低的水平^[4]。由于不同地区的降雨量和降雨季节性分布情况各异,导致不同干旱半干旱区山地土壤水分季节性变化不尽相同。国内近 20 a 对干旱、半干旱区山地土壤水分季节性变化进行了大量研究,由于我国幅员辽阔,地形复杂,各地降水差异大,因此不同地区的研究结果有一定差别。卢宗凡等对黄土高原人工草地土壤水分的研究表明,该地区土壤水分季节性变化可分为三个时期:春季失墒期(4月初~6月上旬),夏季增墒期(9月中旬~9月下旬),秋末冬季缓慢失墒期(9月下旬~翌年3月下旬)^[5]。在其它黄土丘陵区的研究也有相似结论^[6~8]。孙辉等 2000 年度在四川金沙江干旱河谷区的研究将等高植物篱下的土壤水分季节动态分为水分消耗期、水分补给期和水分平稳期三个阶段^[9]。

总之,土壤水分季节性变化受该地区降雨的强烈影响,从总趋势上看,土壤水分季节性变化与当地气候的季节性变化,尤其是降雨的季节性变化基本是一致的。

2.1.2 土壤水分的年际变化

同一地区不同年份降水及降水期的长短都有差别,从而造成年际间土壤水分动态变化的差异。李洪建等研究了晋西北黄土丘陵区人工林七个年分的土壤水分变化规律,根据年降水量多少(丰水年,贫水年,近正常年份)将土壤水分年内变化分为三种类型:积累型,消耗型和平衡型^[10]。邱扬等在黄土高原的研究表明,总体上土壤平均含水量年际变化与年降水量年际变化一致^[11]。

从上述讨论可见,作为干旱半干旱区山地土壤水分唯一来源的降水,其变化是影响土壤水分的最重要的因子。

2.2 土壤水分的空间变化

2.2.1 垂直变化

在土壤垂直剖面上,上层土壤受外界环境影响大,随着深度的增加土壤所受的环境影响减弱。一般来讲,随着深度的增加,土层平均含水量的变化幅度减少。王孟本等根据标准差判别法将河北杨林、

刺槐林、柠条灌木林等 3 种林地土壤剖面按含水量变化幅度大小分为活跃层、次活跃层和相对稳定层^[12]。杨开宝等在黄土丘陵区的研究采用了类似的土壤水分含量分层方法^[13]。土壤水分变化幅度除在土壤垂直剖面上随土壤深度增加有规律变化外,处于生长期的植物根系也有重要影响,所以有的学者在研究处于生长期植被的土壤水分垂直分布时,按照植物根系对土壤水分利用的情况来分层。如阮成江等根据沙棘林地土壤水分特征的研究,将林地 5 m 土壤水分的垂直分布自上而下分为根系微弱利用层、根系利用层、补充调节层、微弱调节层^[6];邹桂霞等将杨沙混交林及杨树纯林土壤水分的垂直分布划分为 2 层:林木根系土壤水分微弱利用层(0~20 cm)和林木根系利用层(21~120 cm)。林木根系土壤水分微弱利用层土壤含水量变化剧烈,而林木根系利用层土壤含水量变化较小^[14]。虽然目前土壤水分变化垂直分层方法不一致,但对于上层土壤水分变化幅度大于下层的研究结论是一致的。

土壤含水量从上到下的变化趋势一般有两种情况,一种是增长型,一种是降低型。邱扬等在研究我国黄土高原土壤水分动态时,分析了土层平均含水量的变化,认为不同深度土层平均含水量存在明显差异,沿 5 个土层(0~5 cm, 10~15 cm, 20~25 cm, 40~45 cm 和 70~75 cm)随着土壤深度的增加,平均含水量显著增加,为增长型^[11]。这与多数在我国黄土高原的研究结论是一致的。杨新民研究了我国黄土丘陵区 0~200 cm 土壤水分动态,得出了土壤水分含量为降低型的结论,即随着土壤深度的加深,土壤含水量呈减少趋势,土壤含水量最大值出现在 20~40 cm 土层内^[15]。Singh 等在美国西部科罗拉多州对 30 cm、45 cm、60 cm、75 cm 和 90 cm 土层的研究也有相似结论^[16]。土壤平均含水量沿土壤垂直剖面的变化趋势是由当地的时空条件决定的。在雨季连续降雨的情况下,土壤平均含水量变化有可能出现降低型,旱季则一般表现为增长型。在植物的生长季节,根系对深层土壤水分的强烈吸收也会形成土壤水分含量上高下低的情况。此外,特殊的地形条件也可能造成特殊的土壤水分分布格局。这都有赖于对影响土壤水分的气候和地形等条件的深入研究。

2.2.2 水平变化

土壤水分受到各种环境因子的影响,在水平方

向上不同的位点土壤水分也有差异。近年来, 国内外的科研工作者为此作了大量工作, 建立了不少土壤水分空间模型, 有力地推进了土壤水分区域性研究, 但是由于土壤水分变异的复杂性, 迄今还没有一个较完善较普遍适用的模型。

3 影响土壤水分变化的环境因子

土壤水分变化受土壤特性、气象因子(降水、蒸散、气温和太阳辐射等)、地形(坡向、坡度和坡位等)、植被(盖度、植物种类等)、土地利用方式等因素的影响。各种影响因素对土壤水分变化的影响程度的是随研究地点和季节的变化而变化的, 如坡向在干旱和半干旱地区就是影响土壤水分变化的重要因素。要确定当地影响土壤水分变化的主要因素, 必须对各种环境因子进行客观、全面的分析。

3.1 土壤特性

降水基本上是山地土壤水分的唯一来源, 土壤的持水能力是土壤水分动态变化的基础, Saxton 等 1986 年的研究表明土壤的持水能力直接决定于土壤的结构。Herbel 等在检测了半荒漠草原土壤干旱效果后证实: 密度越大的土壤保水效果越好。适宜的土壤密度对于土壤保水是很重要的, 密度小的土壤, 上层土壤的水分容易蒸发, 下层土壤的水分容易渗漏; 密度太大的土壤则不利于降水渗入土壤, 易造成径流损失。此外, 土壤的质地在很大程度上影响土壤持水能力和水分渗透速度。Singh 等在美国西部科罗拉多州半干旱草原的研究表明, 粘质壤土的有效水含量(现有含水量减去历史最低含水量)最高, 沙质壤土有效水含量最低^[16]。Cable 研究了半荒漠区土壤, 发现粘质的下层土壤有效水含量很高, 沙质下层土壤有效水含量很低, 半粘质下层土壤有效水含量居于前二者之间。据反结构理论, 干旱区土壤水分散失主要是发生在裸地, 沙壤土持水能力低而有利于水分向土壤深层渗透, 从而减少了蒸发损失。反之, 结构较好的粘质土壤因不易向下渗透而较易蒸发损失。所以在干旱和半干旱区土壤的结构组成对土壤水分的运动有着非常重要的作用。

3.2 气象因子

气象因子对山地土壤水分变化经常起着决定性作用, 降水几乎是山地丘陵区土壤水分的唯一来源, 气温和太阳辐射对土壤水分消耗的主要方式—蒸散有着非常重要的影响。此外, 空气湿度、风速、等因

素也有一定作用。

3.2.1 降水

在干旱半干旱区降水对土壤水分动态有着强烈影响^[10, 17]。土壤的干湿季与气候的干湿季基本一致, 土壤水分的变化趋势一般情况下与降水的变化趋势也基本一致^[12], 由于降水发生时间与水分入渗到相应土层有一定时间差, 土壤含水量的峰值出现时间要滞后于降雨量峰值出现时间^[18]。一次降雨的降雨量的大小对土壤水分的影响效果是不一样的。在黄土高原灌木林地, 降雨量小于 10 mm 会从地表迅速蒸发而不能补充土壤水分, 故对于土壤水分补充来讲是无效降水^[15]。Sala 等及 Coronato 等的研究也表明, 土壤水分的丰水年和欠水年的形成与该年度降水量大于 10 mm 的降水次数直接相关^[17]。就降雨量相同的降水过程而言, 不同的降水强度对土壤水分补充效果也不同。赵晓光等对黄土高原 8 度坡耕地土壤水分的研究表明, 当降雨量相同时, 土壤含水量受中等强度降雨的影响最大, 他们认为原因在于强度较大的降雨雨滴击溅易引起土壤空隙阻塞, 造成下渗水量减少, 而小强度历时长的降雨, 对气温影响小, 降雨期间蒸发量大, 降雨对土壤水分的补充作用减弱。降雨对土壤水分的影响是一个复杂的过程, 既与降雨量有关, 还与降雨强度和降雨历时长短等诸多因素有关。

3.2.2 气温和太阳辐射

蒸散损失是土壤水分损失的主要形式, 它主要受气温、太阳辐射和风速的影响。干旱和半干旱地区土壤平均含水量低, 上层土壤温度在一天中的波动很大, 土壤水分蒸散随土壤温度的波动变化很大。干旱和半干旱地区光照充足, 太阳辐射强烈, 光照强度高和日照时数长, 这样导致年蒸发量往往是年降雨量的数倍至数十倍, 这些地区山地的坡向就成为影响太阳辐射强度和日照长度的关键性因子, 也就是影响土壤水分的蒸散的关键性因子。一般北坡(阴坡)的太阳辐射强度远低于南坡(阳坡), 土壤含水量则明显高于南坡。这也是干旱和半干旱地区山地南坡造林难度大的主要原因。

3.3 地形因子对土壤含水量的影响

地形(坡向、坡度、坡位和相对高度等)对土壤水分有着重要影响, 它对土壤水分的作用是通过改变其他影响因子来实现的。从宏观上讲, 特殊的地形可能形成独特的小气候, 从而间接影响土壤水分的含量和分布。地形因子也可通过改变太阳辐射强

度、降水在土壤中的再分配来影响土壤水分含量。

3.3.1 坡向对土壤含水量的影响

坡向影响坡面的光照、气温、降水、土壤性质和植被格局,使不同坡向的土壤水分含量存在很大差异。李昆等 1992 年在云南元谋干热河谷的研究表明,西北坡的土壤含水量明显高于南坡^[19]。一般情况,北坡(西坡)较南坡(东坡)的土壤具有更好的结构、通透性和持水性能^[20],其余坡向土壤处于二者间。邱扬等在黄土高原中部的研究结果表明,1998 年浅层土壤(0~5cm、10~15cm 和 20~25cm)的水分情况与坡向的关系为:北坡的土壤含水量比南坡高,西坡的土壤含水量比东坡高,北坡(西坡)的土壤特性和植被状况比南坡(东坡)好。土壤水分的这种分布特点也被其它研究所证实^[23]。邱扬等 1999 年的研究出现了南坡土壤水分高于北坡的反常情况,其原因可能是该年份南坡降雨量大于北坡造成的^[11]。

3.3.2 坡度

坡度影响土壤的水分渗透、排放、地表径流的形成以及地表径流速度,一般与土壤含水量呈负相关,即坡度越大,土壤含水量越低^[22]。此外,坡度与土壤含水量的负相关性在一次降雨发生后加强,随后逐渐减弱^[11]。良好的地表植被能减弱坡度对土壤水分含量的影响,在西班牙东南部半干旱区,火烧迹地土壤含水量与坡度的负相关性显著,而林地土壤含水量与坡度的相关性不明显^[23]。由此可见,山地土壤含水量是坡度、降水和地表植被等各种影响因子综合作用的结果。

3.3.3 坡位和相对高度

降水沿坡面再分配而形成不同相对高度处和同一坡面不同位置含水量不同。坡位与土壤水分的关系和相对高度与土壤水分的关系基本一致,二者有着很相似的变化规律^[24]。邱扬等研究了黄土高原中部相对高度上及不同坡位土壤水分的变化,结果表明:相对高度与土壤含水量呈负相关,即随着相对高度的增加,土壤含水量呈降低趋势,从同一坡面自坡底到坡顶土壤水分也有类似的变化趋势^[11]。相对高度与土壤含水量的负相关关系和坡位与土壤含水量的负相关关系很大程度上受到降水的影响,在较大降水发生时,这种负相关关系减弱,降水完成后又逐渐增强,其原因可能是较大量的降水使不同高度处的土壤含水量及同一坡面上不同位置的土壤含水量趋于一致引起的。

3.4 地表植被情况及土地利用方式

地表植被的类型、盖度及生长情况都会在一定程度上影响土壤含水量,土地的不同利用方式(包括耕作以外的自然和人为干扰)会改变土壤的性质和植被对地表的覆盖,从而影响土壤水分含量。较荒坡地而言,植被能改善土壤结构,增强土壤的持水能力和水分调节能力。金雁海等在大青山南坡人工林的研究表明,林地土壤饱和导水率明显高于荒坡,降雨后林地土壤含水率较荒坡高,而荒坡的土壤含水率较林地下降快^[25]。李洪建等在晋西北黄土高原的研究结论却与以上结果相反,他们分析了 7 年的土壤水分观察资料注意到研究地区 7 年荒地 0~3m 土层含水量都明显大于林地土壤含水量^[10],这可能是植被蒸腾较强烈造成的。就林地来说,地表植被的密度对土壤水分也有影响。一般情况下,在干旱半干旱区,地表植被密度越大,生长季节林地土壤蒸腾失水越多,土壤水分消耗量越大。侯喜禄等对黄土丘林区不同密度刺槐林和沙棘林土壤水分的研究表明,处于生长季节的林地密度越大,其土壤含水量越低^[26]。此外,植物根系主要分布层的根系对该层土壤水分含量有明显影响,在生长旺盛季节,植物蒸腾作用加强,根系吸水强烈,往往导致根系集中分布层土壤含水量大幅度降低^[27]。根系从土壤中吸取水分是众所周知的现象,但 Mooney 等于 1980 年通过对某种豆科灌木根部土壤水势的监测发现了一个有趣的现象,即所谓的水分提升现象(hydraulic lift),也就是植物根系白天从土壤中吸收水分,晚上根系向其周围土壤释放水分,进而向上层干土层输送水分的现象^[28,29],到目前为止,所发现具有这种现象的植物已有几十种。以上现象说明,植物与土壤环境是相互作用的,要分析某一环境因子的变化,应该从各因子间的相互作用中去分析。

土地利用方式会改变土壤结构和地表植被,明显影响土壤水分含量^[11]。李晓光等在黄土高原坡耕地的研究表明,高茬地的土壤含水量>顺坡犁耕地的土壤含水量^[22]。显然,地表覆盖(植被或其他覆盖物)能有效提高土壤含水量,合理耕作也能改善土壤结构,增强土壤保水能力。包维楷等对岷江上游干旱河谷的研究表明,不同地表覆盖方式的保水效果为:石块覆盖和作物覆盖>灌丛覆盖>枯枝叶覆盖^[30]。

4 展望

由于受到多种因素的影响,土壤水分往往呈现出复杂的变化特征,其变化可能是定向的,也可能是随机的,或者是两种变化都有^[31,32]。这里的随机变化不能详细预测其变化趋势,但是有可预测的统计特征^[11]。土壤水分动态有其时间变化规律和空间变异性,目前,国内外已在不同气候、不同地形的许多干旱半干旱地区进行了大量土壤水分动态变化研究,无论是在土壤含水量的测定技术,还是研究方法上都有重大进展:

1. 中子水分仪和时域反射仪是目前最快捷,准确性和稳定性都较好的土壤水分含量测定仪器。鉴于当前土壤水势测定仪器受环境因素影响大,利用土壤水分特征曲线将土壤含水量转换成土壤水势仍不失为简便可行的方法;

2. 土壤水分季节动态与降水季节变化基本一致。土壤含水量垂直变化一般具有季节性,雨季为降低型,旱季是增长型或各土层趋于一致,但有例外情况;

3. 降水是影响山地土壤水分动态变化的决定性因素。此外,气温、蒸散和太阳辐射、土壤特性、地形特征及土地利用情况都对土壤水分动态变化有着重要影响,使土壤水分动态变化呈现出复杂的变化特征。

深入研究影响土壤水分变化的各种环境因子,研究各种环境因子对土壤水分动态变化的作用规律应该是目前及今后一段时期土壤水分动态研究的重点。只有在充分了解各主要环境因子对土壤水分动态变化的共同作用规律后,才可能真正清楚土壤水分动态变化规律。土壤水分动态变化的研究还应该具有全球观念,在世界各地干旱半干旱区定点研究的基础上,进行区域性研究,进而开展全球性分析研究。目前,就我国的情况而言,北方干旱区和一些半干旱区的土壤水分动态变化研究比较多,而干旱河谷区域的研究还不够深入,这种情况对于全面开展干旱半干旱区土壤水分动态变化研究是不利的。

干旱河谷区是一类特殊的干旱半干旱地区,本身生态系统的脆弱性和严重的人为干扰是其形成及退化的关键原因^[33]。以川西干旱河谷为例,这些地区地形闭塞,谷地狭窄,山高坡陡,岩层破碎;土层瘠薄,土壤粗骨性明显,养分匮乏;气候干燥,降水少且

季节性分布不均,年蒸发量是降雨量的 2~6 倍,旱季可达数十倍,土壤含水量很低;植被稀疏,多为中生性耐旱灌丛,在岷江上游干旱河谷茂县段,荒漠化标志植物一刺旋花已发展成为优势种^[34];开荒垦殖和放牧等人为干扰严重。由于山高坡陡、植被稀疏,造成雨季坡面径流量大,降水入渗量少,水土流失严重,山体滑坡频繁。在地形和气候均很特殊的干旱河谷区开展土壤水分动态变化研究,是该类地区生态恢复重建研究的重点和难点。深入研究土壤水分动态变化规律,是解决干旱河谷区困难地段造林苗木成活率低、生长缓慢等问题的基础。目前国家正在实施退耕还林工程,干旱河谷区的土壤水分动态研究就显得更为迫切。

致谢:衷心感谢中国科学院成都生物研究所唐亚研究员,孙辉博士和曹亚玲研究员在本文撰写过程中给予的帮助。

参考文献(References):

- [1] J. A. Huisman, C. Sperl, W. Bouten, J. M. Verstraten. Soil water content measurements at different scales: accuracy of time domain reflectometry and ground penetrating radar. *Journal of Hydrology*. 2001, 245: 48~58.
- [2] J. J. O'Brien, F. S. Oberbauer. An inexpensive, portable meter for measuring soil moisture. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2001, 65: 1081~1083.
- [3] S. G. Campbell, Y. R. Anderson. Evaluation of simple transmission line oscillators for soil moisture measurement. *Computers and Electronics in Agriculture*, 1998, 20: 31~44.
- [4] Sheng Caiyu, Liu Lunhui, Liu Wenyao. Biomass and dynamics of soil environment during the early stage of vegetation restoration in a degraded dry-hot mountain area of Nanjian Yunnan. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(5): 575~580. [盛才余, 刘伦辉, 刘文耀. 云南山涧干热退化山地人工植被恢复初期生物量及土壤环境动态[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 575~580.]
- [5] Lu Zong-fan, Zhang Xing-chang, Su Min, Lin He-pin. Studies on the dynamic changes of soil moisture and the benefits of soil and water conservation from growing grasses on the Loess Plateau. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1995, 9(1): 40~49. [卢宗凡, 张兴昌, 苏敏, 林和平. 黄土高原人工草地的土壤水分动态及水土保持效益研究[J]. 干旱区资源与环境, 1995, 9(1): 40~49.]
- [6] Ruan Cheng-jiang, Li Dai-qiong. Soil moisture and its influence on seabuckthorn Growth in semi-arid Loess hilly region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1999, 19(5): 27~30. [阮成江, 李代琼. 半干旱黄土丘陵区沙棘林地土壤水分及其对沙棘生长影响研究[J]. 水土保持通报, 1999, 19(5): 27~30.]
- [7] Li Hong-jian, Wang Meng-ben, Chen Liang-fu, Chai Bao-feng. Comparative study on the soil water cycle under different vegetation conditions. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1996, 16(2): 24

- ~ 28. [李洪建, 王孟本, 陈良富, 柴宝峰. 不同利用方式下土壤水分循环规律的比较研究[J]. 水土保持通报, 1996, 16(2): 24~ 28.]
- [8] Zhang Xing-chang, Lu Zong-fan. Effect of soil water about different tillage methods in arid plain land in Shaanbei hilly gully region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1994, 14(1): 38~ 42. [张兴昌, 卢宗凡. 陕北黄土丘陵沟壑区川旱地不同耕作法的土壤水分效应[J]. 水土保持通报, 1994, 14(1): 38~ 42.]
- [9] Sun Hui, Tang Ya, Zhao Qi-guo, Zhang Yan-zhou. Study on dynamics of soil moisture under contour hedgerow system in dry vally area of Jinsha River. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(1): 84~ 87. [孙辉, 唐亚, 赵其国, 张炎周. 干旱河谷区坡耕地等高植物篱种植系统土壤水分动态研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 84~ 87.]
- [10] Li Hong-jian, Wang Meng-ben, Chai Bao-feng. Study on characteristic of soil water of planted forest and its relation to precipitation in Northwestern Shanxi. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, 4(4): 60~ 65. [李洪建, 王孟本, 柴宝峰. 晋西北人工林土壤水分特点与降水关系研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(4): 60~ 65.]
- [11] Yang Qiu, Bojie Fu, Jun Wang & Liding Chen. Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments*, 2001, 49: 723~ 750.
- [12] Wang Mengben, Li Hongjian. Quantitative study on the soil water dynamics of various forest plantations in the Loess Plateau region in Northwestern Shanxi. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(2): 178~ 184. [王孟本, 李洪建. 晋西北黄土区人工林土壤水分动态的定量研究[J]. 生态学报, 1995, 15(2): 178~ 184.]
- [13] Yang Kaibao, Li Jinglin, Guo Peicai, Zhang Guoyong. Law of soil moisture change in terrance land section in Loess hilly region. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, 5(2): 64~ 69. [扬开宝, 李景林, 郭培才, 张国云. 黄土丘陵区第一副区梯田断面水分变化规律[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(2): 64~ 69.]
- [14] Zou Guixia, Li Tiejun, Li Xiaohua, Guo Lianzhen. Study on regularity of soil moisture of poplar mixture seabuckthorn in gentle slope of north - west liaoning. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(5): 55~ 57. [邹桂霞, 李铁军, 李晓华, 等. 辽西北缓坡地杨树沙棘混交林地土壤水分变化规律研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(5): 55~ 57.]
- [15] Yang Ximin. Study on the characteristics of water environmental in shrubbery land of Loess Plateau. *Arid Zone Research*, 2001, 18(1): 8~ 13. [杨新民. 黄土高原灌木林地水分环境特性研究[J]. 干旱区研究, 2001, 18(1): 8~ 13.]
- [16] J. S. Singh I, D. G. Milchunas, W. K. Lauenroth. Soil water dynamics and vegetation patterns in a semiarid grassland. *Plant Ecology*, 1998, 134: 77~ 89.
- [17] F. R. Coronato, M. B. Bertiller. Precipitation and landscape related effects on soil moisture in semi-aridrange lands of Patagonia. *Journal of Arid Environments*, 1996, 34: 1~ 9.
- [18] Su Min, Lu Zongfan, Li Gouxia. Water use and equilibrium of main crops in Loess hilly and gully region of North Shaanxi. *Research of Soil and Water Conservation*, 1996, 3(2): 36~ 45. [苏敏, 卢宗凡, 李够霞. 陕北丘陵沟壑区主要农作物水分利用与平衡[J]. 水土保持研究, 1996, 3(2): 36~ 45.]
- [19] Li Kun, Chen Yude. Study on input of water regime and soil water content in the Yuanmou dry and hot river vally. *Forest Research*, 1995, 8(6): 651~ 657. [李昆, 陈玉德. 元谋干热河谷人工林地的水分输入与土壤水分研究[J]. 林业科学研究, 1995, 8(6): 651~ 657.]
- [20] Wang Lixiang. Soil and Water Conservation. Beijing: Forestry Publishing Company of China, 1995. [王礼先等. 水土保持学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1995.]
- [21] Wei Tianxing, Zhu Jinchao. Feature of water supply and consumption and productivity of stand in Loess region. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, 5(4): 45~ 51. [魏天兴, 朱金兆. 黄土区人工林地水分供耗特点与林分生产力研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(4): 45~ 51.]
- [22] Zhao Xiaoguang, Wu Faqi, Liu Bingzheng, Liu Shihai. Effects of primary factors on soil moisture in cultivated slopeland. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1999, 19(1): 10~ 14. [赵晓光, 吴发启, 刘秉正, 刘世海. 黄土高原坡耕地土壤水分主要受控因子研究[J]. 水土保持通报, 1999, 19(1): 10~ 14.]
- [23] A. Gómez-Plaza, M. Martínez-Mena, J. Albaladejo, V. M. Castillo. Factors regulating spatial distribution of soil water content in small semiarid catchments. *Journal of Hydrology*, 2001, 253: 211~ 226.
- [24] Yang Qiu, Bojie Fu, Jun Wang & Liding Chen. Soil moisture variation in relation to topography and use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2001, 240: 243~ 263.
- [25] Jin Yanhai, Yi Mi, Zheng Mingjun, Zhu Zhihong. Soil and water conservational effects of artificial Pinus tabulaeformis forest on south slope of Daqing Mountain. *Research of Soil and Water Conservation*, 1998, 5(3): 129~ 134. [金雁海, 伊敏, 郑明军, 等. 大青山南坡人工油松林水土保持效益研究[J]. 水土保持研究, 1998, 5(3): 129~ 134.]
- [26] Hou Xilu, Bai Gangshuan, Cao Qingyu. Dynamic observation of soil moisture on arbor and shrubbery in sinking lands in Loess hilly region. *Research of Soil and Water Conservation*, 1996, 3(2): 57~ 65. [侯喜禄, 白岗栓, 曹清玉. 黄土丘陵区湾塌地乔灌木土壤水分监测[J]. 水土保持研究, 1996, 3(2): 57~ 65.]
- [27] C. S. M ilikin, C. S. Bledsoe. Biomass and distribution of fine and coarse roots from blue oak (*Quercus douglasii*) trees in the northern Sierra Nevada foothills of California. *Plant Soil*, 1999, 214: 27~ 38.
- [28] M. M. Caldwell, T. E. Dawson, J. H. Richards. Hydraulic lift: consequences of water efflux from the roots of plants. *Oecologia*, 1998, 113: 151~ 161.
- [29] Burgess SSO, Adams MA, Turner NC, Ong CK. The redistribution of soil water by tree root systems. *Oecologia*, 1998, 115: 306~ 311.
- [30] Bao Weikai, Chen Qingheng, Chen Keming. Environment control

- techniques for vegetation restoration in dry valley of upper reaches of Minjiang River. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, **10** (5): 542~ 544. [包维楷, 陈庆恒, 陈克明. 岷江上游干旱河谷植被恢复环境优化调控技术研究[J]. 应用生态学报, 1999, **10** (5): 542~ 544.]
- [31] M. S. Seyfried, B. P. Wilcox. Scale and nature of spatial variability: field examples having implications for hydrologic modeling. *Water Resource Research*, 1995, **31**: 173~ 184.
- [32] A. W. Western, R. B. Grayson, G. Bloschl, G. R. Willgoose, McMahon T. A. Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices. *Water Resources Research*, 1999, **35**: 797~ 810.
- [33] Bao Wei-kai, Wang Chun-ming. Degradation mechanism of mountain ecosystem at the dry valley in the upper reaches of the Minjiang River. *Journal of Mountain Science*, 2000, **18**(1): 57~ 62. [包维楷, 王春明. 岷江上游山地生态系统的退化机制[J]. 山地学报, 2000, **18**(1): 57~ 62.]
- [34] Liu Qing, Bao Wei-kai, Qiao Yong-kang and Qian Nengbin. Studies on the interspecific relationship among dominant species of the semi-arid valley scrubs in Maoxian on the upper reaches of the Minjiang River. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 1996, **2**(1): 36~ 42. [刘庆, 包维楷, 乔永康, 等. 岷江上游茂县半干旱河谷灌丛优势种间关系的研究[J]. 应用与环境生物学报, 1996, **2**(1): 36~ 42.]

Research on Dynamics of Soil Moisture in Arid and Semiarid Mountainous Areas

HE Qian-hua, HE Yong-hua, and BAO Wei-kai

(Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041 China)

Abstract In arid and semiarid areas soil moisture is the most important factor which restricts vegetation growth. It is very important to research dynamics of soil moisture in these areas. The technology of measuring soil moisture content has made great progress in these years. Neutron Probe and Time Domain Reflectometry have been normal meters of measuring soil moisture content. There are some new instruments to be invented recent years and it is trend that new instruments become more and more accurate and automatic. Temporal and spatial variability of Soil moisture content is obvious. Change of season influences the dynamical behavior of soil moisture, and as soil depth and spot different, soil moisture varies. Precipitation is the most important factor which influences soil moisture. Other meteorological factors such as air temperature, solar irradiation have some influence to soil moisture, too. Furthermore, Environmental attributes such as vegetation, land use and topography such as aspect, slope gradient, hillslope position play controlling roles in the distribution of soil moisture content. So the phenomenon of the temporal and spatial variability of Soil moisture content is the result of influence of all factors. Now the emphasis of soil moisture dynamical study should be factors of influencing soil moisture content. Dry valley is a special arid region in our country, but research of soil moisture dynamics needs lucubrate in these areas.

Key words: arid and semiarid areas; mountainous area; soil moisture; dynamic