

# 典型喀斯特灌丛草坡类型区土壤水变化规律研究

杨胜天<sup>1</sup>, 王玉娟<sup>2</sup>, 温志群<sup>1</sup>, 吕涛<sup>3</sup>

(1. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院 国家遥感科学重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学 环境学院 国家水环境模拟重点实验室, 北京 100875; 3. 贵州省水利厅, 贵州 贵阳 550002)

**摘要:** 以贵州省红枫湖、龙里灌丛草坡类型区为定位研究区域, 选取灌丛、草地和玉米地 3 种植被类型, 利用长时间序列的观测资料, 研究了喀斯特地区石漠化过程中重要过渡类型——灌丛草坡的土壤水分变化规律。(1) 不同的植被覆盖类型, 土壤水分变化规律也不同。从降雨过后初始含水量大小来看, 玉米地 > 灌丛 > 草地; 从递减率来看, 玉米地 > 灌丛 > 草地; (2) 草地土壤水分递减速率小于灌丛, 其保水性强, 因此, 典型喀斯特地区草地植被生态与其它地区不同, 呈现出一种“自适应性”现象。

**关键词:** 喀斯特; 贵州省; 灌丛草坡; 土壤水分

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)04-0100-03

中图分类号: S152.7, X833

## Research on Soil Moisture in the Typical Shrub-grass Zone in Karst Regions

YANG Sheng-tian<sup>1</sup>, WANG Yu-juan<sup>2</sup>, WEN Zhi-qun<sup>1</sup>, LU Tao<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography,

Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Water

Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University,

Beijing 100875, China; 3. Water Conservancy Department of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550002, China)

**Abstract:** The study area is located in the shrub-grass zone, Longli County, Guizhou Province. Based on long-term data and hydrological methods, soil moisture capacity is studied in views of its temporal and spatial patterns and dynamic characteristics. Different types of vegetation cover have different forms of soil moisture movement. Shrub land, grass land and corn field are selected for comparison. Land types rank in the descendant order of corn field, grass land and shrub land in terms of the initial content, whereas they rank in the descendant order of corn field, shrub land and grass land in terms of the descending rate. The analyses of soil moisture indicate the descending rate of the soil moisture on grass land is slower than that on shrub land, and their water retention property is stronger. Vegetation on grass land is different from other regions, and appears to be adaptable.

**Keywords:** karst; Guizhou Province; shrub-grass; soil moisture

喀斯特是一种非常脆弱的生态环境, 其土壤贫瘠, 水文过程变化迅速, 植被生长过度依赖于生境条件<sup>[1-3]</sup>。喀斯特地貌在贵州省分布广泛, 随着滥伐森林, 陡坡垦殖和顺坡耕种等现象的出现, 导致水土流失严重, 石漠化加剧。贵州省生态环境的特殊性使其生态恢复问题成为研究的焦点。土壤水分是生态环境中水分存在的主要形式之一, 是土壤—植被—大气连续体 (SPAC) 水物质循环中的重要环节, 在“四水”循环中, 起着重要的循环和调蓄功能, 被称之为

“土壤水库”。很多学者对此已进行了大量的研究, 特别是随着野外观测实验的发展, 研究内容亦空前广泛, 从农田、人工林和草地的土壤水分动态到土壤质地、坡度、坡向和利用方式对土壤水分的影响<sup>[4-7]</sup>, 但针对喀斯特地区土壤水分的研究相对较少。

土壤水分是喀斯特地区侵蚀过程、植物生长和植被恢复的主要影响因子, 了解其土壤水分运动规律对喀斯特地区的生态恢复有着重要的指导作用。长期以来, 对于喀斯特地区地质水文循环、生态环境效应

收稿日期: 2007-05-20

资助项目: 国家重点基础研究发展计划 (2005CB422207); “高等学校学科创新引智计划资助” (B06004); 长江学者与创新团队发展计划项目。

作者简介: 杨胜天 (1965—), 男 (汉族), 博士, 教授, 主要从事自然地理、遥感和环境科学研究。E-mail: yangshengtian@bnu.edu.cn。

通讯作者: 王玉娟 (1981—), 女 (汉族), 江苏省南通市人, 硕士, 主要从事水文水资源遥感和环境科学研究。E-mail: wyjuan\_002@163.com。

的研究较多<sup>[8-11]</sup>,但是针对某一土地利用类型的土壤水分规律研究还很缺乏;很多学者也尝试通过建立适合喀斯特地区的土壤水平衡模型<sup>[12-16]</sup>对土壤水分变化规律进行研究和预测,但是由于缺乏长时间序列实地监测资料,无法开展更详细的研究。

在本研究中,利用长序列的观测资料,对喀斯特地区石漠化过程中重要过渡类型——灌丛草坡的土壤水分变化规律进行了探讨,目的在于了解典型喀斯特地区灌丛草坡土壤水分的特点,揭示喀斯特地区土壤水分变化的特殊规律,为该地区植被建设和生态恢复提供科学依据。

## 1 研究区概况及样点选择

为了积累基础数据,选择研究典型喀斯特地区灌丛草坡土壤水分变化规律,分别在贵州省红枫湖小区和龙里生态园进行了2次实地观测实验。

(1) 2004年7月22-29日,在贵州省典型的喀斯特地区——红枫湖小区进行了土壤水分变化规律的野外实验研究。研究区位于 $26^{\circ}32'N$ , $106^{\circ}24'E$ ,海拔1259 m左右。

(2) 2005年8月在贵州省典型喀斯特地区——龙里生态园布设实验点。监测时间从2005年8月

26号开始,一直持续进行,实验仪器为HOBO便携式小型自动气象站,监测参数主要包括:空气温湿度、降雨量、大气压、辐射、风速风向、地温、双层土壤水体积含量等。龙里生态园以龙里羊鸡冲小流域为单元,总面积 $12\text{ km}^2$ ,地貌类型为中低山丘陵地貌,土壤主要为黄壤、石灰土和水稻土,植被属阔叶林和针叶林混交地带,但以阔叶林居多,现有的天然植被较少,多为人工种植。其主要树种有马尾松、杉树、梨、刺槐、栎树、毛栗等。年平均降雨量为 $1\ 158.5\text{ mm}$ ,最少年为 $859.3\text{ mm}$ ,4-9月是该区暴雨、洪水易发期,降雨量达 $810\text{ mm}$ ,占全年降雨量70%。年均气温 $14.7^{\circ}\text{C}$ ,极端最高气温 $35^{\circ}\text{C}$ ,极端最低气温 $-3^{\circ}\text{C}$ ,积温在 $4\ 274^{\circ}\text{C}\sim 4\ 574.6^{\circ}\text{C}$ 之间。

龙里生态园观测是在红枫湖小区实验基础上,对典型喀斯特地区灌丛草坡土壤水分变化规律进行进一步研究,因此,根据植被覆盖和人为干扰程度的不同,将实验点定位在2处具有代表性的灌丛草坡类型区,实验点1(荒山草坡)位于 $26^{\circ}27'8.1''N$ , $107^{\circ}01'09''E$ ,海拔1205 m,植被为低矮草地;实验点2(封山育林)位于 $26^{\circ}27'3.8''N$ , $107^{\circ}01'17.7''E$ ,海拔1184 m,植被为灌丛,覆盖情况较实验1点好(见图1-2)。



图1 龙里生态园灌丛生态观测点



图2 龙里生态园草地生态观测点

## 2 监测方法

### 2.1 监测设备及其布设

红枫湖小区实验设备主要有高精度土壤水分测量仪AZS-2(5个探头),HOBO H8 Pro(测量温

度、湿度,共有2个测头),Temperature sensors for HOBO H8(2个探头,1个方盒)。本实验重点在于对土壤水分进行监测。首先在不同实验样点挖好土壤剖面,将土壤水分测量仪分别置于灌丛、草地和玉米田土壤剖面中,并对传感器采取了必要的保护措施

施,对灌丛、草地和玉米田 3 种不同土地利用类型下不同深度的土壤水分状况进行了观测。

龙里生态园实验数据采集系统由 3 个监测子系统组成,共包括 10 多个专项监测项目,涵盖了土壤、植被、气象等诸多方面(如图 3),实验选择多通道的数据采集器,将多个传感器及相应总线模块与数据采集器相结合,以实现多通道数据的自动获取。

为了实现数据的自动记录和对生态园土壤水分的全面监测,购置并安装了 2 套 HOBO 便携式小型自动气象站详(见图 1—2)。该气象站由数据采集器、传感器以及相应总线模块及数据处理软件组成,一次可以接 15 个传感器,预先设定观测密度为 0.5 h,即每 0.5 h 记录 1 次观测数据。

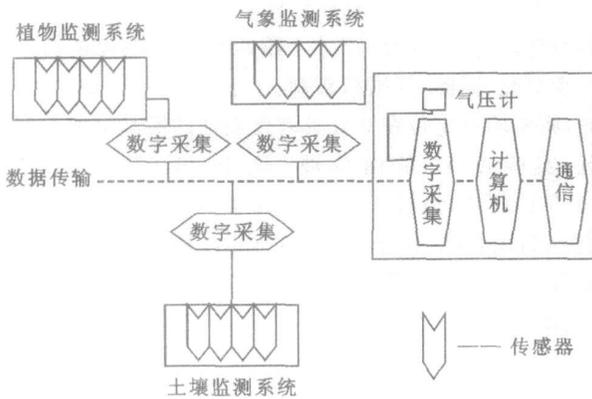


图 3 地面数据采集系统示意图

在 2 个实验样点,分别将土壤观测系统的各个传感器置于土壤中,并注意保持土壤原有的形态结构,避免人为干扰和破坏,确保数据能够反映出土壤的自然状态。特别是土壤水分传感器,根据土壤剖面,将 2 个传感器分别安装在不同的土层深度处,用于观测不同深度土壤水分的变化特征。土壤监测系统的观测要素主要包括:双层土壤水分体积含量、土壤温湿度等。利用 HOBO 便携式小型自动气象站的土壤水分传感器对 0- 5 和 15- 20 cm 层进行长时期的连续观测,其它土壤因子采用采样测定的方式来进行。

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同土地覆盖类型土壤水分变化分析

##### 3.1.1 灌丛与草地、玉米地的土壤含水量变化规律

图 4 显示了红枫湖小区实验中灌丛、草地与玉米地 3 种不同植被覆盖类型土壤水分的变化情况。可以看出,土壤水分含量及变化特征随植被覆盖类型的不同而不同。

(1) 观测起始含水量。玉米地、灌丛和草地含量都在 30% 以上,其中玉米地处最高,达到 64.8%,是由降雨过后土壤中的积水所造成。

(2) 递减速率。随着时间的推移,各样点的土壤含水量呈现递减趋势,递减速率大小依次为玉米地、草地和灌丛。其中,玉米地递减率最大。

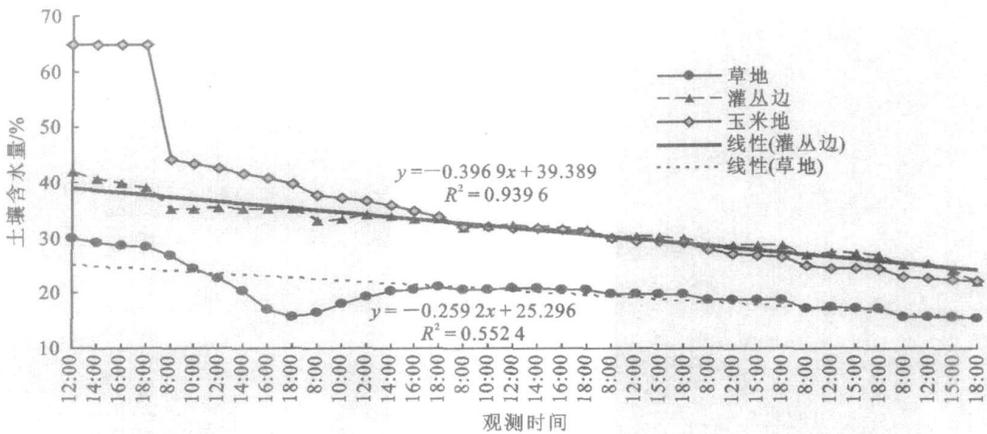


图 4 各土地利用类型土壤水分变化曲线

(3) 观测期末,各样点的土壤含水量基本稳定,变动幅度明显减小,玉米地、灌丛和草地处的土壤含水量依次为 22.1%, 22% 和 15.4%。

通过上面的分析可以看出,在典型喀斯特地区,灌丛与其它土地覆盖类型在土壤水分保水率上存在很大的差异,即不同土地覆盖类型土壤水分变化特征

也不同。

##### 3.1.2 灌丛与草坡类型区土壤水分变化特征分析

为了进一步揭示灌丛与草地土壤水分变化规律的差异,选取龙里实验期间 9 月 22 日一次降水前后,同一时段内两实验点 0- 5 cm 层和 15- 20 cm 层土壤含水量平均值进行对比分析,结果如图 5 所示。

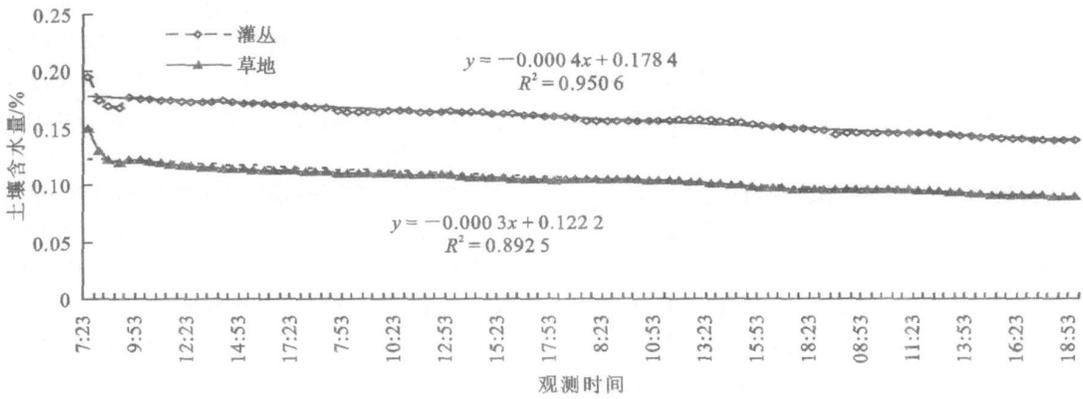


图 5 灌丛、草地土壤水分变化曲线

(1) 从这 2 个实验点土壤含水量来看。灌丛实验点土壤含水量在降水前低于 1%，降水后增加到 19%，但是随之下降到 17% 以下；而草坡实验点土壤含水量降水前在 6% 左右，降水后增加到 15% 以上，但是随之下降到 13% 以下。从以上分析可以看到，灌丛土壤水分含量整体高于草坡。分析其原因，两实验点气象条件基本一致，因此下垫面条件成为主要影响因素。灌丛土壤含水量相对较大主要是由于其表层土壤疏松，并且有枯枝落叶和草被，有利于截留降雨。

(2) 从递减率来看，灌丛的土壤含水量递减率为 0.0004，而草地的土壤含水量递减率相对较小，为 0.0003，主要是由于该实验点草本植被具有较浅的根系和较小的冠层，并且分布致密，呈平铺状，故其蒸腾和耗水较小，土壤的保水性比较强。

从 2 个实验灌丛和草地类型区土壤水分变化规

律的比较分析中，可以看出，灌丛类型土壤水分变化规律与其它土地覆盖类型有很大差异。结合王志强等人对黄土高原的研究成果<sup>[16]</sup>，就灌丛和草地两种土地覆盖类型土壤水分规律来看，灌丛的保水性大于草地，而实验数据表明，在研究区灌丛的保水性是小于草地的，即喀斯特地区灌丛和草坡土壤水分变化有其自身特征。

### 3.2 灌丛土壤水分垂直变化特征分析

理论上，土壤水分梯度可能有 3 种不同情况，上下土层土壤水分含量相等，梯度为零；下层水分含量高于上层，梯度为正；下层水分含量低于上层，梯度为负。喀斯特地区土层比较薄，实验样点分为 2 层，分别为 0-5 cm 层(上层)和 15-20 cm(下层)。为分析实验点土壤水分垂直变化规律，研究时段定在具有代表性的 9 月 22 日单次降水后，观测密度为白天 0.5 h。经过统计分析，得到其变化曲线如图 6 所示。

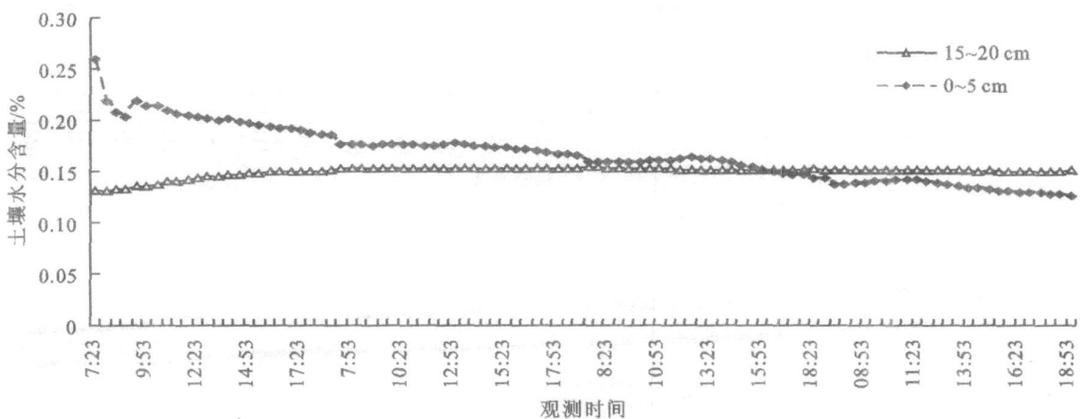


图 6 土壤水分变化曲线

(1) 从一次降水对 0-5 cm 和 15-20 cm 土层含水量的影响来看，随着降水的发生，0-5 cm 土层含水量出现明显的上升，而 15-20 cm 土层含水量则变化相对滞后，而且变化幅度明显小于 0-5 cm 土层，随着时间的推移，由于蒸散等原因，上层含水量明显下降，而下层含水量在降水后 4 d 内基本没有下降

趋势，这说明下层土壤水分释放是一个缓慢的过程，对其保水性有重要影响。

(2) 从一次降水后 0-5 cm 和 15-20 cm 土层含水量来看，降水后，上层土壤初始含水量明显大于下层，但是随着时间的推移，由于地表蒸发等因素，上层土壤含水量逐渐小于下层。

从上面灌丛草坡土壤水分垂直变化规律的分析可以看出, 喀斯特灌丛类型区土壤水分含量整体上随着深度的增加而增大; 从上下土层变化幅度来看, 下层水分含量递减速率小, 一次降水对下层影响可以持续 4 d 以上, 水分释放过程缓慢。

### 3.3 喀斯特地区植被的“自适应现象”

红枫湖和龙里 2 次实验中, 通过对灌丛与草地类型区土壤水分变化规律的比较发现, 在同样的气象条件下, 灌丛土壤水分递减速率大于草地, 即其土壤保水率要小于草地, 耗水强度大。而根据在黄土高原等地进行的研究中发现<sup>[18]</sup>, 灌丛土壤湿度在 1~4 m 的土层中持续高于草地, 灌丛的耗水强度比草地小, 土

壤保水率大于草地, 这是喀斯特地区有别于其它地区重要的一点, 将这种特殊现象理解为喀斯特地区植被的一种“自适应性”, 即草地植被通过改变自身性质去适应特殊的喀斯特环境, 减少土壤水分损耗, 增强土壤的保水能力。

为了进一步研究典型喀斯特地区灌丛草坡类型区土壤水分变化规律, 进一步验证这种特殊的“自适应性现象”的存在, 选取龙里实验中有代表性的几个时段对其进行进一步分析和验证。

3.3.1 “自适应现象”实验分析 时段选取在 9 月 22 号, 10 月 6 号, 10 月 28 号 3 次有代表性的一次降水后, 时间间隔为 0.5 h, 变化曲线见图 7-9。

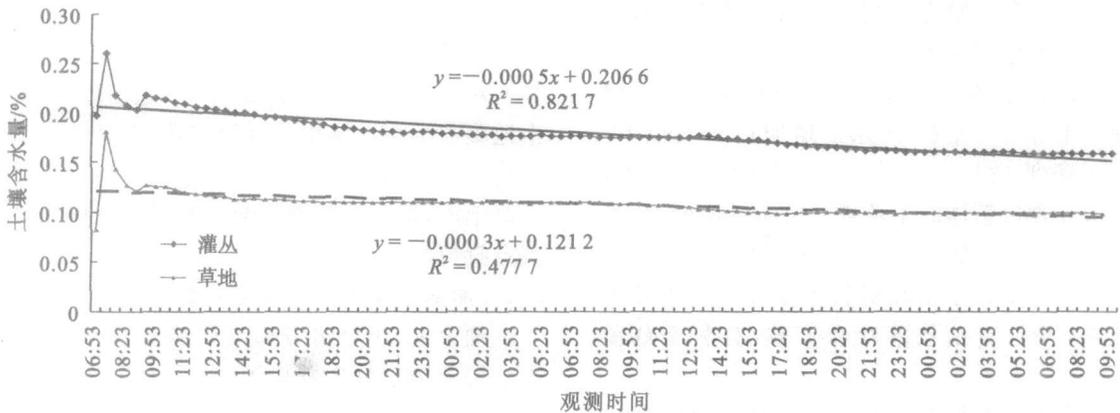


图 7 9 月 22 号灌丛草坡土壤水分变化曲线

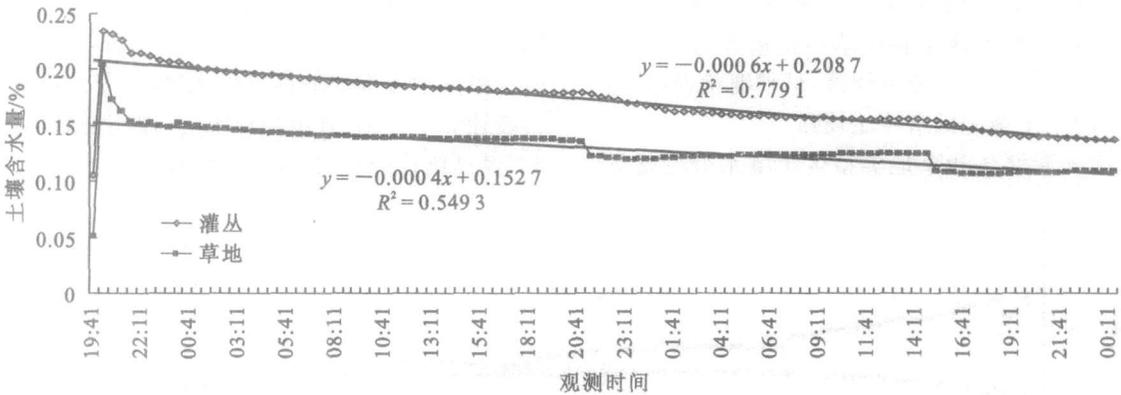


图 8 10 月 6 号灌丛草坡土壤水分变化曲线

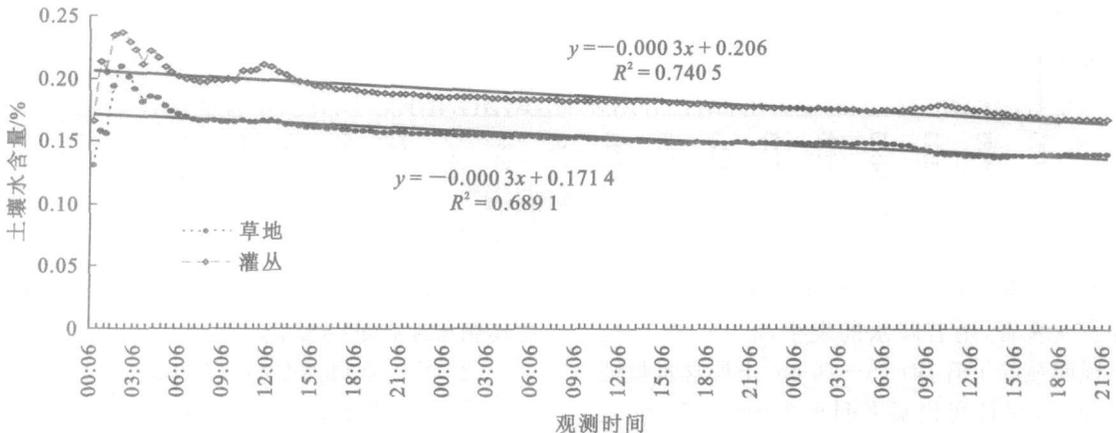


图 9 10 月 28 号灌丛草坡土壤水分变化曲线

为了揭示灌丛草坡的土壤水分变化规律,验证喀斯特地区草地“自适应现象”的存在,将3次降水过后两实验样点的初始含水量、递减速率、稳定含水量等参数进行统计,见表1。

表1 两实验点土壤水分变化参数比较

日期	初始含水量/%		递减速率		稳定含水量/%	
	灌丛	草地	灌丛	草地	灌丛	草地
--922	0.27	0.18	0.000 5	0.000 3	0.15	0.125
--1006	0.24	0.21	0.000 6	0.000 4	0.13	0.110
--1028	0.24	0.21	0.000 3	0.000 3	0.17	0.140

通过对3次降水后灌丛和草地2个实验点的主要土壤水分变化参数的比较,可以看出,灌丛类型区,初始含水量要高于草地,但是随着时间推移,含水量下降,灌丛递减速率整体上要高于草地的,即草地的保水性大于灌丛,从这里进一步验证了典型喀斯特地区草地“自适应”这种特殊现象的存在。

3.3.2 “自适应现象”理论分析 土壤水分的损耗主要与地表蒸散发有关,地表实际蒸散发可以表示为:

$$E_{T_a} = K_s \cdot E_{T_p} \quad (1)$$

式中:  $E_{T_a}$  ——实际蒸散发;  $K_s$  ——土壤水分胁迫系数;  $E_{T_p}$  ——潜在蒸散发。

Jensen 等(1971)的研究结果表明,土壤水分胁迫系数  $K_s$  用下式表示:

$$K_s = \ln(A_v + 1) / \ln(101) \quad (2)$$

$$A_v = [(W - W_m) / (W_f - W_m)] * 100\% \quad (3)$$

式中:  $W$  ——根区实际贮水量;  $W_m$  ——凋萎含水量;  $W_f$  ——田间持水量。潜在蒸散发分为两部分来考虑,一部分为作物蒸腾,另一部分为裸土蒸发,公式如下:

$$E_{T_p} = E_p + T_p \quad (4)$$

$$E_p = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * R_n * e^{-0.398L_{AI}} \quad (5)$$

$$T_p = E_p * \frac{R_{ad}}{(1-a) * R_g} \quad (6)$$

式中:  $E_p$  ——土表潜在裸间蒸发量;  $\Delta$  ——饱和水汽压与温度关系曲线斜率( $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ );  $\gamma$  ——干湿表常数( $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ );  $L_{AI}$  ——作物叶面积指数;  $T_p$  ——作物潜在蒸腾量;  $R_{ad}$  ——叶片吸收的太阳辐射量;  $R_g$  ——太阳总辐射;  $a$  ——反照率。

由上面蒸散发模型(1)可以看出,实际蒸散量受到土壤水分胁迫系数  $K_s$  和潜在蒸散  $E_{T_p}$  影响。从公式(2), (3)可以看出  $K_s$  受到土壤水分含量( $W$ ), 土壤性质( $W_m, W_f$ ) 等因素影响; 由公式(5)显示,土表潜在裸间蒸发量  $E_p$  与叶面积指数  $L_{AI}$  呈负相关关系,即植被覆盖状况越好,其裸间蒸发量越小,土壤水

分主要损耗于作物蒸腾,从(6)式<sup>[19]</sup>可以看出,作物潜在蒸腾量受到  $R_{ad}$  (叶片吸收的太阳辐射量)的影响,而  $R_{ad}$  受到植物分布密度、叶面积大小、植物形状等生理因素限制。因此,可以通过改变植物的生理生态特征来控制植被蒸腾,从而来控制区域蒸散。

研究区草地植被覆盖度较高,且呈毛毯状分布,限制了土表裸间蒸发,土壤水分主要损耗于植被蒸腾,由上面对蒸散发的理论分析,通过改变影响植被蒸腾的因素(植物分布密度、叶面积大小、植物形状等生理因素)来控制水分损耗是可行的,喀斯特地区草地植被经过长期的演替,通过不断改变自身性质,如叶面积大小、植株高度、覆盖度大小和分布,控制蒸腾,减少土壤水分散失,增强保水性,逐渐形成了一种“自适应性”。

随着喀斯特地区石漠化问题的加剧,该地区植被建设和生态恢复成为目前亟待解决的关键问题,而且通过控制蒸散发来进行生态恢复已经是一个重要的发展方向,喀斯特地区植被“自适应性”现象为喀斯特地区的生态恢复提供了理论支持,因此如何根据当地的水热状况,选择合适的植被类型和植被盖度,协调好与土壤水分的关系,成为目前研究的重要方向。

## 4 结论与讨论

喀斯特地区不同的土地覆盖类型,土壤水分变化规律不同。从土壤水分含量来看,在次降水过程后,初始含水量玉米地>灌丛>草地,但土壤水分递减速率是玉米地>灌丛>草地,草地的保水性高于其它类型。

喀斯特地区草地土壤水分的递减速率小于灌丛、农用地等,即草地的保水性高于其它类型,我们将这种现象理解为喀斯特地区生态的“自适应性”。天然植被经过长期演替,具有自组织能力,能够适应一定的土壤水分状况<sup>[20]</sup>,喀斯特地区特殊的土壤水分状况影响了其植被生长。草地植被为了适应喀斯特地区特殊的生态环境,通过改变其自身性质如叶片大小、植株密度等控制植被蒸腾,减少其土壤水分的损耗,增强土壤保水性,从而适应该地区生态环境的变化。

土壤水分条件的好坏和植被的演替是互相制约、互相依赖的。从目前喀斯特地区的生态系统演替来看,水分条件的变化,导致了植被的演替,反过来植被的生长和变化也会影响土壤水分的变化,植被状况与土壤水分之间有着重要的相关关系<sup>[20-23]</sup>。

研究既能保护水土,又不恶化土壤水分生态环境的覆被,是喀斯特地区生态恢复和环境建设的一个重大科学问题。而覆被问题,不仅指合适的植被类型,还包括植被覆盖度,在研究中,仅选择了单一的植被

类型和植被覆盖度高的实验区进行了研究,对于不同植被类型和不同植被覆盖度情况的分析还不够,还需要从各种植被类型和植被覆盖影响的角度来全面揭示喀斯特地区生态的“自适应现象”,从而根据其自身的土壤、水分状况,选择合适的植被类型,确定合适的植被覆盖度,控制蒸散,使其与当地水土资源达到一个相对友好的比例,从而恢复和改善喀斯特地区生态环境。

**致谢:**感谢贵州省水利厅水保站刘瑞禄、黄勇等对监测实验的支持和帮助。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 刘再华,袁道先. 中国典型表层岩溶系统的地球化学动态特征及其环境意义[J]. 地质论评, 2000, 46(3): 324—327.
- [ 2 ] 姚长宏,蒋忠诚,袁道先. 西南岩溶地区植被喀斯特效应[J]. 地球学报, 2001, 22(2): 159—164.
- [ 3 ] 万军,蔡运龙. 喀斯特生态脆弱区的土地退化及生态重建——以贵州省关岭县为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2003, 13(2): 52—56.
- [ 4 ] 赵世伟,周印东,吴金水. 子午岭北部不同植被类型土壤水分特征研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 119—122.
- [ 5 ] 黄奕龙,陈利顶,傅伯杰,等. 黄土丘陵小流域地形和土地利用对土壤水分时空格局的影响[J]. 第四纪研究, 2003, 23(3): 334—342.
- [ 6 ] 杨秀春,徐斌,严平. 农牧交错带不同农田耕作模式土壤水分特征对比研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 125—129.
- [ 7 ] 王军,傅伯杰,邱扬,等. 用空间内插法研究黄土丘陵小流域土壤水分时空分布特征[J]. 自然科学进展, 2002, 12(4): 430—433.
- [ 8 ] 李阳兵,王世杰,熊康宁. 浅议西南岩溶山地的水文生态效应研究[J]. 中国岩溶, 2003, 22(1): 24—27.
- [ 9 ] 苏维词,朱文孝,滕建珍. 喀斯特峡谷石漠化地区生态重建模式及其效应[J]. 生态环境, 2004, 13(1): 57—60.
- [ 10 ] Aquilina L, Ladouche B, Doerfliger N, et al. Deep water circulation, residence time, and chemistry in a karst complex[J]. Ground Water, 2003, 41(6): 790—805.
- [ 11 ] Robert E. Determination of transmissivity from specific capacity tests in a karst aquifer[J]. Ground Water, 1997, 35(5): 738—742.
- [ 12 ] 张建伟,申双和. 旱地农田土壤水分的动态模拟[J]. 新疆气象, 1997, 20(3): 33—37.
- [ 13 ] 杨胜天,刘昌明,王鹏新. 黄河流域土壤水分遥感估算[J]. 地理科学进展, 2003, 22(5): 454—462.
- [ 14 ] Olejnik J, Eulenstein F, Kedziora A. Evaluation of a water balance model using data for bare soil and crop surfaces in Middle Europe[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 2(106): 105—116.
- [ 15 ] Panigrahi B, Panda Sudhindra N. Field test of a soil water balance simulation model[J]. Agricultural Water Management, 2003, 3(58): 223—240.
- [ 16 ] 杨胜天,田雷. 喀斯特地区土壤水分层均衡模型应用研究[J]. 中国岩溶, 2005, 24(3): 186—191.
- [ 17 ] 康尔泗,程国栋,宋克超,等. 河西走廊黑河山区土壤—植被—大气系统能水平衡模拟研究[J]. 地球科学, 2004, 34(6): 544—551.
- [ 18 ] 詹志明. 区域遥感蒸散发模型方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2002, 17(6): 364—369.
- [ 19 ] Trambouze W, Voltz M. Measurement and modelling of the transpiration of a Mediterranean vineyard[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107: 153—166.
- [ 20 ] 王志强,刘宝元,王晓兰. 黄土高原半干旱区天然锦鸡儿灌丛对土壤水分的影响[J]. 地理研究, 2005, 24(1): 113—120.
- [ 21 ] 马祥华,白文娟,焦菊英,等. 黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复中的土壤水分变化研究[J]. 水土保持通报, 2004, 24(5): 19—23.
- [ 22 ] 潘占兵,李生宝,郭永忠. 不同种植密度人工柠条林对土壤水分的影响[J]. 水土保持研究, 2004, 11(3): 265—267.
- [ 23 ] 杜睿,周宇光,王庚辰,等. 土壤水分对温带典型草地 N<sub>2</sub>O 排放过程的影响[J]. 自然科学进展, 2003, 13(8): 939—945.