

# 南方丘陵区不同坡地利用方式土壤水分动态

黄志刚<sup>1,2</sup>, 欧阳志云<sup>1,\*</sup>, 李锋瑞<sup>2</sup>, 郑 华<sup>1</sup>, 王效科<sup>1</sup>, 王中建<sup>3</sup>

(1. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 生态与农业研究室, 兰州 730000; 3. 湖南省慈利县林业局, 张家界 415300)

**摘要:** 土壤水分异质性的存在对各种水文过程和土壤形成过程均有显著的影响, 了解土壤水分的异质性对理解和预测土壤水分过程具有重要意义。应用时域反射仪(TDR)土壤水分定位监测方法, 研究了南方丘陵区不同坡地利用方式土壤水分动态及其影响因子。结果表明: 3种坡地利用方式土壤水分变化具有明显的季节特征, 杜仲人工林土壤蓄水量最高, 荒山草坡次之, 坡耕地最低。植物非生长季节土壤含水量均值高于生长季节, 生长季节土壤水分消耗大于补给, 非生长季节土壤水分补给大于消耗; 干季和湿季两个时段3种坡地利用方式土壤含水量垂直变化趋势具有相似性, 其土壤含水量差异不显著。3种坡地利用方式土壤蓄水量与太阳辐射量和大气温度表现为负相关性, 与降雨量、大气相对湿度和饱和水气压差表现为正相关性, 降雨量是其最直接的影响因子, 其次是温度。雨季单次降雨后土壤蓄水量与雨后干旱天数存在显著的线性负相关性( $P < 0.05$ ), 土壤水分损失率与干旱天数存在双曲函数关系( $P < 0.05$ ), 随着干旱天数的增加, 土壤水分损失率趋于平缓。雨季单次降雨后持续干旱条件下3种坡地利用方式土壤剖面含水量呈递减的变化趋势, 杜仲人工林土壤水分损失率系数最高, 荒山草坡次之, 坡耕地最低。

**关键词:** 南方丘陵区; 坡地利用方式; 垂直变化; 土壤含水量; 时空异质性

文章编号: 1000-0933(2009)06-3136-11 中图分类号: Q149, S152.7, S181 文献标识码: A

## Spatial and temporal dynamics in soil water storage under different use types of sloping fields: a case study in a highland region of southern China

HUANG Zhi-Gang<sup>1,2</sup>, OUYANG Zhi-Yun<sup>1,\*</sup>, LI Feng-Rui<sup>2</sup>, ZHENG Hua<sup>1</sup>, WANG Xiao-Ke<sup>1</sup>, WANG Zhong-Jian<sup>3</sup>

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Department of Ecology & Agriculture, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

3 Forestry Bureau of Cili County, Zhangjiajie 415300, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 3136 ~ 3146.

**Abstract:** Soil water heterogeneity has significant effects on many hydrological processes and soil development processes, and research on spatial and temporal heterogeneity in soil water content is important for understanding and forecasting soil water processes. *In situ* monitoring of soil water content changes in sloping fields under different use types were carried out in a highland region of southern China using time domain reflectometry (TDR).

There was a significant variation in soil water storage among sloping fields under different use types, and soil water storage under *Eucommia ulmoides* plantation was found to be the highest, followed by non-cultivated sloping field and the lowest by cultivated sloping field. There was also a significant seasonal variation in soil water storage, with the average soil water content being higher during the non-growing season than during the growing season. In addition, there was a similar pattern of change in soil water profiles under different types of sloping field use in either wet or dry seasons. A negative

基金项目: 国家自然科学基金委创新群体资助项目(40621061); 国家自然科学基金资助项目(30428028)

收稿日期: 2008-03-31; 修订日期: 2008-12-12

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyouyang@rcees.ac.cn

relationship was observed between soil water storage and solar radiation and air temperature, but there was a positive relationship of soil water storage with rainfall, relative humidity and vapor pressure deficit. Thus, we can predict that soil moisture was strongly influenced by a combination of several meteorological factors, among which the most important factor was precipitation and the next important factor was temperature.

After rain, soil water loss rate of the three sloping field types had a significant hyperbolic relationship with drought durating days ( $P < 0.05$ ), but soil water storage had a significant negative linear relationship with drought durating days ( $P < 0.05$ ). Furthermore, soil water loss was found to vary with the period of drought duration as well as with soil depth.

**Key Words:** highland region; sloping field use types; soil moisture dynamics; spatial-temporal heterogeneity

土地利用变化可以引起一系列自然现象和生态过程的变化,如土壤性质、地表径流、水土流失、生物多样性分布、生物地球化学循环等,探讨土地利用变化对土壤水分的影响是自然地理过程研究的热点问题之一<sup>[1~3]</sup>。土壤水分具有明显的时空尺度特征<sup>[4]</sup>,土地利用与土壤水分的时空关系,是进行土壤水分与水文模型耦合及其尺度外推的重要环节,是生态水文学研究的热点之一<sup>[5,6]</sup>。近年来我国坡地坡地利用方式发生了较大变化,并对区域环境造成深刻影响,主要是对土壤水分及水土流失方面的影响<sup>[6~8]</sup>。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以及生态系统小气候的变化<sup>[9]</sup>。降雨、地形和土地利用等环境因子影响到降雨的入渗、再分配以及蒸发蒸腾等水文过程,从而形成了土壤水分的时空异质性,研究的尺度不同,其影响因子和变化规律也随之变化,其异质性的存在对各种水文过程和土壤形成过程均有显著的影响<sup>[10~12]</sup>,因而一直是水文学和土壤学研究的一个热点<sup>[13,14]</sup>。因此,了解土壤水分的异质性对理解和预测土壤水分过程就显得重要<sup>[15~18]</sup>。近年来,景观、生态系统尺度上土壤水分的时空异质性及其与环境因子的关系研究已成为国际上的研究热点之一<sup>[19~22]</sup>。本研究以南方丘陵区3种常见的坡地利用方式为研究对象,通过连续定位监测土壤含水量,综合分析气象因子对土壤水分的影响,揭示不同坡地利用方式土壤水分时间及空间尺度上的分布规律,为土壤水分管理及土地利用提供科学的理论依据。

## 1 试验区自然概况

研究地点位于湖南省张家界市慈利县两溪村国家长江防护林生态效益监测站( $29^{\circ}26' N, 111^{\circ}13' E$ ),流域面积为 $2.81 km^2$ ,最低海拔210.0 m,最高海拔917.4 m。母岩主要为板岩、砂岩和页岩,土壤为山地红黄壤<sup>[23]</sup>。研究区属于亚热带湿润季风气候,年平均降雨量为1 347.0 mm,4~7月份雨量占全年降雨量的57.5%,年均自由水面蒸发量1 061.7 mm,年均气温 $16.7^{\circ}C$ ,7月份最热,平均气温 $28.5^{\circ}C$ ;1月份最冷,平均 $4.8^{\circ}C$ ,无霜期269 d<sup>[24]</sup>。

本研究以当地3种主要的坡地利用方式为研究对象,样地设置在同一东南坡向的 $24^{\circ}$ 坡度的下坡,面积 $30 m \times 40 m$ ,土壤为板岩发育而成的山地黄壤,土层厚度60~80 cm。这3块地1994年以前都是种植杜仲,1998年建立“国家长江防护林生态效益监测站”时毁了其中1块地的杜仲成为坡耕地(种玉米和番薯),另1块地毁了杜仲,让其自然演替成为荒山草坡。坡耕地(cultivated slope field,CSF)于2004年7~9月种植绿豆(*Vigna Radiata*),2004年10月至2005年5月种植油菜(*Oeifera Makino*),以后休耕,田间丛生狗尾草(*Setaria viridis Beauv*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)、千里光(*Senecio scandens*)等杂草,总盖度95%;荒山草坡(deserted sloping field,DSF)具有灌-草的层次结构,主要植被有油茶(*Camellia oleifera*)、淡竹叶(*Lophatherum gracile*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)和金银花(*Flos lonicerae*),总盖度90%,其中灌木层盖度20%,草本层盖度80%;杜仲人工林(*Eucommia ulmoides* plantation,EUP)具有乔-草的层次结构,林龄13~15 a,杜仲林平均树高6.0 m,平均胸径4.5 cm,密度为6470株/ $hm^2$ ;杜仲林总盖度95%,其中乔木层盖度82%;林下草本层盖度35%,主要包括铁芒萁(*Dicranopteris Pedata*)、青蒿(*Artemisia annua*)、金银花(*Flos lonicerae*)和忍冬(*Lonicera japonica*)等。3种坡地利用方式0~60 cm土层土壤理化性质见表1。

表1 不同坡地利用方式0~60 cm土层土壤理化性质

Table 1 Soil chemical and physical properties under different sloping field use types

样地 Stand	杜仲人工林 EUP	荒山草坡 DSF	坡耕地 CSF
有机质含量 Organic matter(%)	1.24 ± 0.55	1.11 ± 0.43	0.94 ± 0.63
土壤容重 Soil bulk density(g/cm <sup>3</sup> )	1.64 ± 0.13	1.40 ± 0.14	1.60 ± 0.08
总孔隙度 Total soil porosity(%)	35.7 ± 3.0	30.5 ± 4.2	35.4 ± 6.3
非毛管孔隙 Non soil capillary porosity(%)	9.6 ± 1.4a	6.2 ± 0.6b	10.4 ± 4.3
渗透速率 Infiltration rate(mm/min)	3.16 ± 0.35	1.84 ± 0.29	2.44 ± 0.11

表中数值为年平均值 ± 标准误差 The data of the table is annual average value ± stand deviation

## 2 研究方法

### 2.1 土壤理化性质的测定

土壤容重和孔隙度的测定方法详见《森林土壤定位研究方法》<sup>[25]</sup>。渗透速率采用自动采集土壤水分入渗仪(Hood IL-2700, 德国产)。土壤有机质含量测定采用重铬酸钾法。

### 2.2 土壤含水量(Soil water content)的测定

使用时域反射仪 TDR-T<sub>3</sub> (Time Domain Reflectometry) 测定降雨前后不同深度土壤体积含水量(%)。在样地沿坡面纵向每隔 10 m 埋设导波管, 共 4 根, 埋深 140 cm。埋导波管 3 个月后开始测定土壤含水量, 土壤含水量的测定时间分为 3 种:(1)定期测定, 每个月逢 2 和 8 日进行测定;(2)次降雨后补测 2 次, 时间间隔 2 d;(3)次降雨后持续晴天条件下测定 5 次, 时间间隔为 0、1、2、7、14 d, 测定土壤水分变化过程。监测时间为 2004 年 7 月至 2005 年 7 月, 测定深度为 0~120 cm, 每 20 cm 为 1 层。

### 2.3 降雨量及其他气象因子的测定

自动气象站(WatchDog Model 900ET Weather Stations, Spectrum, U. S. A) 放置在离样地 50 m 处的空旷地, 用来测定样地外的降雨量 R (rainfall)、太阳辐射量 SRC (solar radiation capacity)、大气相对湿度 RH (relative humidity)、大气温度 t (temperature) 和饱和水汽压差 VPD (vapor pressure deficit)。

### 2.4 土壤蓄水量

土壤蓄水量(soil water storage)的计算采用分层计算法<sup>[26]</sup>, 计算公式为:

$$SWS_i = 10 V_i \cdot h \quad SWS = \sum SWS_i \quad (1)$$

式中,  $SWS_i$  为第  $i$  土层土壤蓄水量 (mm);  $SWS$  为土壤总蓄水量 (mm);  $V_i$  为第  $i$  土层土壤体积含水量 (%) ;  $h$  为分层厚度 (20 cm)。

$$\text{土壤水分损失率}(\%) = 100 \times (SWS_1 - SWS_{n+1}) / SWS_1 \quad (2)$$

式中,  $SWS_1$  表示降雨后第 1 天的土壤蓄水量,  $SWS_{n+1}$  表示第  $n+1$  天后的土壤蓄水量。

### 2.5 数据处理

利用 SPSS 11.5 进行统计分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 2002~2005 年研究区域微气象特征

研究区域 2002~2005 年降雨量及降雨次数存在明显的季节性分配(图 1), 且不同年份间差异显著(表 2), 主要以降雨量 < 25 mm、雨强 < 5 mm/h 的降雨为主, 其次数分别占总次数的 83.7% 和 92.7%, 其雨量分别占总降雨量的 62.1% 和 72.2%<sup>[27]</sup>。低雨量、小强度的降雨有利于雨水的渗透, 减少地表径流, 增加土壤水分的蓄积。由图 1 可知, 研究区域 2002~2005 年微气象特征值如大气温度、地面温度、蒸发量及降雨量具有相似的变化趋势, 大气相对湿度变化幅度较小。由表 2 可知, 尽管研究区域降雨量年间差异显著, 但是大气温度、地面温度、大气相对湿度年间差异并不显著, 且变化趋势具有相似性, 其说明微气象因子间的相互作用减弱了不同年份间降雨量差异对微气象环境的影响, 使林地土壤水分的年变化具有相似性。

表 2 2002~2005 年研究区域小气候特征年变化(月平均值,  $n=12$ )Table 2 Variation of micro-meteorology characteristics in study area from 2002 to 2005 (monthly mean values, + SE,  $n=12$ )

项目 Items	年份 Year			
	2002	2003	2004	2005
大气温度 Atmospheric temperature(℃)	17.3 ± 7.3a	17.8 ± 8.2 a	17.7 ± 7.6 a	17.0 ± 9.2 a
地面温度 Ground temperature(℃)	20.4 ± 9.7a	20.7 ± 9.5 a	20.7 ± 8.7a	20.1 ± 10.3 a
相对湿度 relative humidity(%)	61.0 ± 4.7 a	70.8 ± 13.9 a	60.0 ± 5.1 a	61.8 ± 6.4 a
*降雨量 Rainfall(mm)	1960.1 ± 100.0 A	1580.8 ± 150.2 B	1496.7 ± 111.6 C	1404.2 ± 93.7D
*降雨次数 Rain times	118 a	87 b	83 b	83 b

a 表中数值为年平均值 ± 标准误, 其中 A、B 表示差异达到极显著水平  $P < 0.01$ , a、b 表示差异达到显著水平  $P < 0.05$ 。The data of the table is annual average value ± stand deviation; Date in the same column by different letters are significant difference at  $P = 0.01$  level (A or B) and  $P = 0.05$  level (a or b)

### 3.2 不同坡地利用方式土壤水分月变化动态

2004~2005 年月单次降雨的统计分析结果表明(图 2), 研究区域降雨量季节分配不均, 有明显的干湿季节之分, 降雨主要集中在 5~8 月份, 该时段为雨季, 降雨次数占总降雨次数的 45.2%, 其降雨量占年降雨量的 68.7%。在植物生长季节(4~10 月份), 不同坡地利用方式土壤蓄水量明显受到降雨量和降雨次数的影响, 基本随着降雨量的减少, 土壤蓄水量降低, 降雨量和降雨次数对土壤蓄水量的影响在非生长季节不大。单位时间内的降雨次数影响土壤蓄水量, 这一方面受测定时间的影响, 另一方面与植被截留蒸发和地表蒸发有关。

在不同月份间, 3 种坡地利用方式土壤水分变化具有明显的季节特征, 土壤蓄水量变化具有相似性, 其差异达到极显著水平( $P < 0.01$ ), 这是植物生长规律和当地物候特点共同作用的结果。在研究期内, 3 种坡地利用方式土壤蓄水量最大值均出现在 2004 年 7 月, 之后随着降雨次数和降雨量的减少, 土壤蓄水量急剧下降, 在 2004 年 10 月均达到最低值; 10 月份以后随着气温的降低、植物或枯死或休眠, 植被蒸腾和土壤蒸发降低, 再加上降雨的补给, 土壤蓄水量逐步增加并处于比较稳定的状态(11 月至翌年 3 月份); 进入植物生长季节之后, 气温逐步升高, 植被蒸腾和土壤蒸发强度也随之增加, 尽管有充沛的降雨补给土壤水分, 土壤水分仍处于消耗状态。

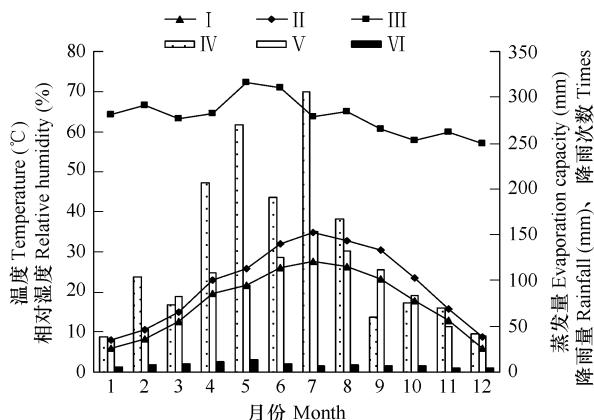


图 1 研究区域 2002~2005 年小气候特征值变化趋势(月均值)

Fig. 1 Monthly variation of micro-meteorology characteristics in study area from 2002 to 2005 (monthly mean value)

I : 大气温度(℃); II : 地面温度(℃); III : 大气相对湿度(%); IV : 降雨量(mm); V : 潜在蒸发量(mm); VI : 降雨次数  
I : Atmospheric temperature(℃); II : Ground temperature(℃); III : Atmospheric relative humidity(%); IV : Rainfall capacity(mm); V : Potential evaporation capacity(mm); VI : Rainfall times(T)

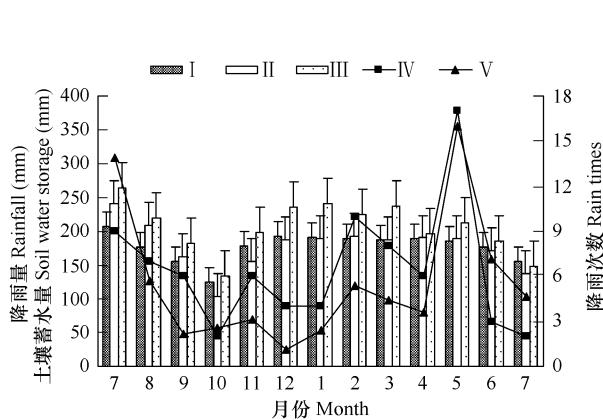


图 2 不同坡地利用类型土壤蓄水量随降雨量变化(2004-07~2005-07)

Fig. 2 Monthly variation of soil water storage with rainfall under different sloping field use patterns from Jul. 2004 to Jul. 2005

I : 坡耕地土壤蓄水量(mm); II : 荒山草坡土壤蓄水量(mm); III : 杜仲人工林土壤蓄水量(mm); IV : 降雨次数(mm); V : 降雨量(mm). I : SWS of CSF(mm); II : SWS of DSF(mm); III : SWS of EUP(mm); IV : Rain times; V : Rainfall(mm)

从2004年7月至10月土壤水分一直处于下降阶段,主要是由于该时段内降雨量的减少降低了对土壤水分的补给作用。该时段植物处于生理耗水阶段,由于蒸腾作用损失了大量的水分;另外,由于空气温度和地面温度高,加剧了土壤表面水分的蒸发。杜仲人工林土壤蓄水量最高,荒山草坡次之,坡耕地最低。尽管杜仲人工林的蒸腾耗水高于其他两种坡地利用方式,但是,其林地覆盖度高且具有乔-草的层次结构,使得林地比较郁闭,降低了土壤蒸发耗水;另外,杜仲人工林具有较大的根系,可以蓄积较多的降水补充土壤水分。荒山草坡虽然也具有较高的覆盖度和灌-草的层次结构,但是其没有如杜仲人工林那样形成郁闭的结构,其土壤蒸发强度比杜仲人工林大;另外,灌木和草本的根系比乔木小且浅,对降水的蓄积作用不如乔木,也是其土壤蓄水量低于杜仲人工林的原因。坡耕地土壤水分损失主要是由土壤蒸发引起的,低的覆盖度和单一的层次结构以及草本植物浅的根系是其土壤蓄水量低的主要影响因素。

2004年11月至2005年3月土壤水分的损耗主要也是由土壤蒸发引起的,该时段土壤水分处于上升阶段。其原因可能在于两个方面:一是该时段内林地土壤还有一定量的雨水补给土壤水分,二是随着季节的变化,气温和地温的降低,大气相对湿度较高,抑制了土壤蒸发。杜仲人工林土壤蓄水量最高,坡耕地次之,荒山草坡最低。杜仲人工林由于枯枝落叶增加了林地的覆盖度,既增加了对降雨的截留,又减弱了土壤的蒸发作用,其土壤蓄水量高于其他两种坡地利用方式。坡耕地种植的油菜处于营养生长阶段,覆盖度随生育进程的推进而增加,减少了裸露面积,因而减小土壤的蒸发作用;与之相反,荒山草坡的草本植物在这一时段死亡,增加了裸露面积,因而也加强了土壤的蒸发作用。

2005年4月至7月虽然有较多的降雨补给土壤水分,但是其降雨量和降雨次数远低于2004年同期降雨量和降雨次数,因而土壤水分低于2004年的相应时段。该时段是植物器官建成阶段,生理耗水量大;另外,随着季节的推移,气温逐渐升高,大气相对湿度下降(降雨时段除外),有利于林地土壤蒸发,因而降低了土壤水分含量。3种坡地利用方式土壤蓄水量均随着降雨量的减少而减少,杜仲人工林土壤水分减少的幅度最大,坡耕地土壤水分减小的幅度最小,7月份时坡耕地土壤蓄水量最大,已经高于杜仲人工林土壤蓄水量。5月中旬坡耕地在油菜收割后处于休耕状态,由于土壤肥力高(耕作施肥的结果),草本植物在短时间内迅速覆盖样地,减小了土壤蒸发强度;荒山草坡草本植物器官建成稍缓于坡耕地,覆盖度也低于坡耕地,因而土壤蒸发强度较高;杜仲枝叶器官建成较快,蒸腾作用高于其他两种坡地利用方式,土壤蒸发作用则相反。在植物生长季节,植被蒸腾耗水高于土壤蒸发耗水,杜仲人工林由于杜仲高强度的蒸腾作用消耗了土壤中大量的水分,又不能及时得到降雨的补给,因而其土壤蓄水量最低;荒山草坡和坡耕地草本植物的蒸腾作用强度低于杜仲,因而其土壤水分消耗也较低。

### 3.3 不同坡地利用方式土壤水分垂直变化动态

研究期内各土壤层之间土壤含水量变化差异显著( $P < 0.05$ ),根据植物生长的季节变化,分两个时段来研究土壤水分的垂直变化(图3):(1)植物非生长季节(2004年11月至翌年3月),该时段植物处于休眠期,样地植被覆盖度低,土壤水分损失以土壤蒸发为主,土壤水分补给大于土壤水分消耗,土壤蓄水量处于增加或维持状态;(2)植物生长季节(2005年4月至10月),该时段植物处于生长季节,土壤水分损失以植物蒸腾为主,土壤水分消耗大于补给。3种坡地利用方式土壤水分垂直变化趋势在两个时段具有相似性,杜仲人工林和荒山草坡土壤含水量随土层深度表现出先较快增加后缓慢增加的趋势,坡耕地土壤含水量随土层深度呈先增加后减少的趋势。

3种坡地利用方式0~120 cm土层植物非生长季节土壤含水量均值均高于生长季节,其中杜仲人工林含水量最高,坡耕地次之,荒山草坡最低。在植物非生长季节,坡耕地60~120 cm土层土壤含水量变异系数高于0~60 cm土层土壤含水量变异系数,荒山草坡和杜仲人工林则相反,这是由于不同的土地管理模式及植被根系分布影响土壤水分运输方式和途径引起的。说明在植物非生长季节,土壤水分消耗以土壤蒸发为主,降雨对土壤水分的补给主要发生在0~60 cm,这可能受该时段小雨量、低强度的降雨的影响。在植物生长季节,坡耕地和杜仲人工林60~120 cm土层土壤含水量变异系数高于0~60 cm土层土壤含水量变异系数,荒

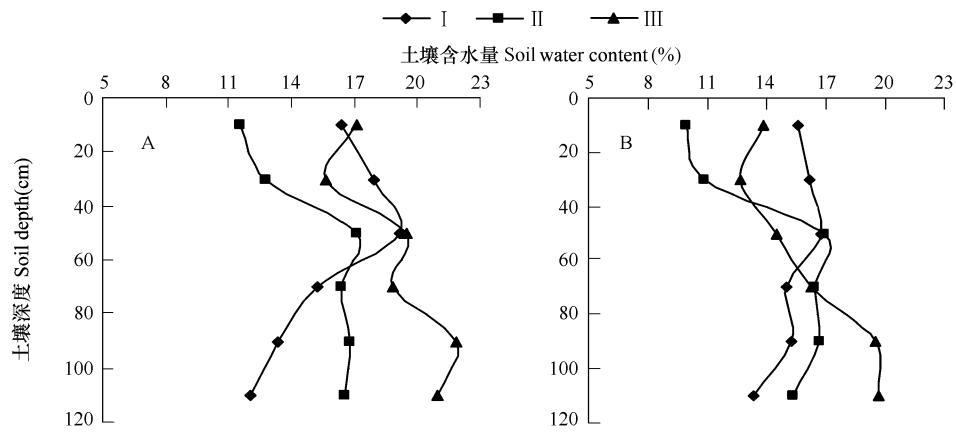


图3 不同坡地利用方式土壤含水量垂直分布:植物非生长季节(A)/生长季节(B)动态变化(2004-07~2005-07)

Fig. 3 Profile changes of soil water content under different sloping field use types; vegetation non-growth season (A) and growth season (B) from Jul. 2004 to Jul. 2005

I:坡耕地 CSF; II:荒山草坡 DSF; III:杜仲人工林 EUP

山草坡则相反。植物生长季节3种坡地利用方式0~60 cm土层土壤含水量变异系数(13.41%)与非生长季节土壤含水量变异系数(13.15%)差异不显著,生长季节60~120 cm土层土壤含水量变异系数(20.78%)显著大于非生长季节土壤含水量变异系数(12.03%)。说明在大气-植被-土壤系统中,在植物生长季节,植被对土壤水分的影响较大,这种影响尤其表现在其对深层土壤含水量的影响。

根据降雨量的季节分配,分两个时段研究土壤水分的垂直变化(图4):1)干季(1~4月份,9~12月份),该时段降雨量少,降雨量占全年降雨量的31.3%;2)湿季(5~8月份),该时段降雨量占全年降雨量的68.7%。在干季,杜仲人工林和荒山草坡土壤含水量随土层深度表现出先较快增加后缓慢增加的趋势,而坡耕地土壤含水量则随土层深度呈先增加后减少的趋势。一般来说,土壤水分含量是由土壤水分的损失和降雨补给共同决定的。在湿润季节,表层土壤比深层土壤可以接受更多水分净补给<sup>[28,29]</sup>,但是表层土壤水分在蒸散作用下容易损失。由图4可知,3种坡地利用方式两个时段土壤含水量垂直变化趋势具有相似性,并且其土壤含水量差别不大,说明在雨季,土壤蓄积水分大部分由于林冠截留蒸发和植被蒸腾以及林地土壤蒸发而损失了;干季虽然降雨量少,但是该时段相应的林冠截留蒸发量蒸腾蒸发量也少,因而土壤水分能够得以维持。

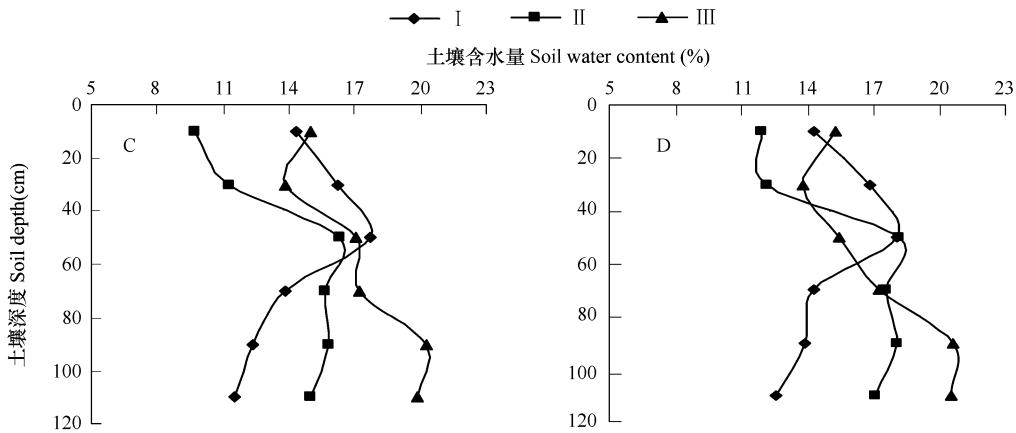


图4 不同坡地利用方式土壤含水量垂直分布:土壤水分干季(C)/雨季(D)动态变化(2004-07~2005-07)

Fig. 4 Profile changes of soil water content under different sloping field use types: dry seasons (C) and humid seasons (D) from Jul. 2004 to Jul. 2005

I:坡耕地 CSF; II:荒山草坡 DSF; III:杜仲人工林 EUP

### 3.4 土壤水分与微环境气象因子的相关性

植被蒸腾和地表蒸发受到饱和水汽压差、风、大气温度、地表温度、太阳辐射等因素的影响,是影响土壤蓄水量的主要因子之一,与降雨共同影响土壤水分过程。大量研究认为气象因子(太阳辐射  $SCD$ 、大气相对湿度  $RH$ 、大气温度  $t$ 、饱和水汽压差  $VPD$ )与土壤水分<sup>[30,31]</sup>具有显著或极显著的相关性。

在土壤水分循环的微环境中,大气相对湿度高可以增加水分的扩散阻力,间接起到抑制蒸腾蒸发的作用。另外,大气相对湿度和饱和水汽压差又是太阳辐射量、大气温度和降雨量综合影响的结果,太阳辐射量增加使环境温度升高,土壤温度和大气温度的升高影响土壤水分能态及土壤水分有效性<sup>[32]</sup>,而且影响土壤水分保持<sup>[33]</sup>,提高水分扩散能力,加剧土壤水分的损失,而降雨则逆反这个过程,增加大气相对湿度和饱和水汽压差的同时直接补充土壤水分。因此,土壤水分受微环境因子的综合调控,影响土壤蓄水量最直接的因子是降雨量,其次是温度。由表3可知,3种坡地利用方式土壤蓄水量与大气相对湿度、饱和水汽压差及降雨量均表现为正相关性,其中土壤蓄水量与大气相对湿度和饱和水汽压差的相关性达到极显著水平( $P < 0.01$ );荒山草坡土壤蓄水量与降雨量之间的相关性达到显著水平( $P < 0.05$ ),坡耕地和杜仲人工林土壤蓄水量与降雨量之间的相关性不显著。3种坡地利用方式土壤蓄水量与太阳辐射量和大气温度表现为负相关性,其中坡耕地和杜仲人工林土壤蓄水量与大气温度之间的相关性达到显著水平( $P < 0.05$ ),与太阳辐射量之间相关性不显著;荒山草坡土壤蓄水量与太阳辐射量和大气温度之间的相关性不显著。

太阳辐射量对杜仲人工林土壤水分的负效应最大,坡耕地次之,荒山草坡最小。其原因主要在于太阳辐射能显著提高杜仲树的光合速率和蒸腾速率,加剧土壤水分的消耗,而对坡耕地种植的油菜及其收割后丛生的杂草和荒山草坡灌草的光合速率和蒸腾速率的影响次之。杜仲人工林具有乔-草的层次结构,林内比较郁闭,空气湿度变化不如坡耕地和荒山草坡剧烈,因而空气湿度对杜仲人工林土壤水分的影响较坡耕地和荒山草坡低。大气温度主要受太阳辐射量的影响,因而其对3种坡地利用方式土壤含水量的影响相似。饱和水汽压差主要受空气相对湿度的影响,其次是空气温度,因而导致其对3种坡地利用方式土壤含水量的影响与空气相对湿度的影响相似。

总的来说,在植物生长季节,坡耕地和杜仲人工林土壤水分消耗主要以植物蒸腾作用为主,温度升高有助于蒸腾作用的加强,从而增加土壤水分的损失;另外,由于油菜和杜仲截留蒸发损失了部分降雨,减少了降雨对土壤水分的直接补给作用,减弱了坡耕地和杜仲人工林土壤蓄水量与降雨的相关性。

表3 不同坡地利用方式土壤蓄水量(月平均值)与微环境气象因子(月平均值)的相关系数

Table 3 Correlation coefficient of SWS and micro-climate factors (monthly average) under different sloping field use types

相关系数 Correlations ( $N = 13$ )	坡耕地土壤蓄水量 SWS of CSF (mm)	荒山草坡土壤蓄水量 SWS of DSF (mm)	杜仲人工林土壤蓄水量 SWS of EUP (mm)
太阳辐射量 Solar radiation capacity ( $W/m^2$ )	-0.420	-0.158	-0.478
饱和水汽压差 Vapor pressure deficit (kPa)	0.718 **	0.768 **	0.571 **
相对湿度 Relative humidity (%)	0.724 **	0.762 **	0.636 **
大气温度 Temperature (°C)	-0.438 *	-0.171	-0.499 *
降雨量 Rainfall (mm)	0.391	0.503 *	0.307

\* \* 表示相关性达到极显著水平  $P < 0.01$ , \* 表示相关性达到显著水平  $P < 0.05$     \* \* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed); \* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

### 3.5 雨季单次降雨后不同时段土壤水分变化

选取一次降雨研究降雨后土壤蓄水量时间和空间尺度变化。降雨时间为2005年6月26日下午,降雨历时1 h,降雨量13.8 mm,没有产生地表径流,雨停后1 h测定本次降雨对土壤含水量的贡献。雨前15 d(6月11~25日)和雨后16 d(6月27日至7月12日)天气晴朗,其中土壤含水量测定期间(6月27日至7月12日)大气平均相对湿度68.6%,平均温度28.1°C。

#### 3.5.1 雨季单次降雨对土壤水分时间变化的影响

此次降雨对土壤蓄水量的贡献率(降雨前后土壤蓄水量的差值与降雨前的土壤蓄水量的比值)差异不显

著,其中坡耕地最低(12.2%),杜仲人工林次之(13.1%),荒山草坡最高(14.2%)。由图5可知,降雨后土壤蓄水量与雨后干旱天数存在显著的线性负相关性( $P < 0.05$ ),杜仲人工林土壤蓄水量随雨后时间递减的斜率绝对值最大(9.38),荒山草坡次之(4.69),坡耕地最小(3.13)。杜仲人工林雨后2 d的土壤蓄水量(165.4 mm)就已经低于雨前值(166.4 mm),说明此时土壤水分开始损失;荒山草坡和坡耕地土壤水分损失日期则相对推迟。土壤水分损失率与雨后干旱天数存在显著的双曲函数关系( $P < 0.05$ ),随着干旱天数的增加,土壤水分损失率趋于平缓(图6),其中杜仲人工林土壤水分损失率系数最高,荒山草坡次之,坡耕地最低。

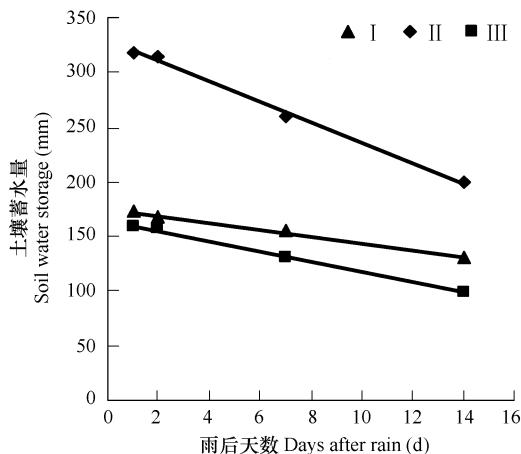


图5 降雨后不同坡地利用方式土壤水分变化(2005-06~07)

Fig. 5 Variation of soil water storage under different sloping field use types after rain from Jun. to Jul. 2005

I :坡耕地 CSF; II :杜仲人工林 EUP; III :荒山草坡 DSF

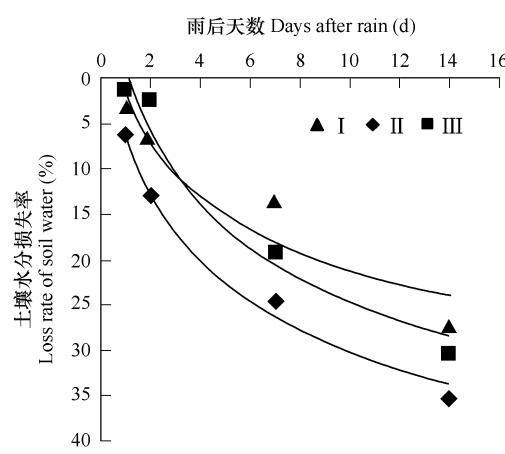


图6 降雨后不同坡地利用方式土壤水分损失率(2005-06~07)

Fig. 6 Loss rate of soil water storage under different sloping field use types after rain from Jun. to Jul. 2005

I :坡耕地 CSF; II :杜仲人工林 EUP; III :荒山草坡 DSF

### 3.5.2 雨季单次降雨对土壤水分空间变化的影响

次降雨后持续干旱条件下3种坡地利用方式土壤剖面含水量呈递减的变化趋势(图7),其变异系数亦随土层深度呈递减的变化趋势。说明持续干旱主要影响土壤表层的水分,对深层土壤水分影响较小。荒山草坡土壤水分随土层深度呈降低-增加-降低的变化趋势,其垂直变异系数为26.5%;杜仲人工林土壤水分随土层深度呈先降低后增加的变化趋势,其垂直变异系数为22.8%;坡耕地土壤水分随土层深度呈先增加后降低的变化趋势,其垂直变异系数为12.1%。降雨后2 d内杜仲人工林土壤水分垂直变化剧烈,坡耕地次之,荒山草坡缓慢,其0~120 cm土层土壤水分损失率分别为11.0%、6.6%和2.5%;随着干旱时间的延长,荒山草坡和坡耕地土壤水分垂直变化加剧,而杜仲人工林则趋于缓和。降雨后荒山草坡0~40 cm土层土壤蓄水量增加量占总增加量的比例最高(67.0%),杜仲人工林次之(58.1%),坡耕地最低(32.9),表明此次降雨对前二者土壤蓄水量的补充也主要在该层,坡耕地除补充表层突然水分外,还对深层土壤水分有较多补充。持续干旱14 d后,荒山草坡0~40 cm土层土壤蓄水量损失量占总损失量的比例最高(85.9%),坡耕地次之(44.7%),杜仲人工林最低(35.7%),表明荒山草坡和坡耕地0~40 cm土层土壤水分容易因植被蒸腾和土壤蒸发作用损失,深层土壤水分由于没有深根植物的蒸腾作用而消耗少;杜仲人工林由于具有凋落物层的覆盖和郁闭的林冠,土壤蒸发作用相对较弱,其土壤水分的损失主要是蒸腾作用的结果。

## 4 讨论与结论

大量研究认为,坡向、坡位和土地利用类型是影响土壤水分分布格局最为重要的3个因子,降雨量在很大程度上控制了土壤水分的大小<sup>[34~36]</sup>,受植被生长期耗水和降雨特征的影响,所有土地利用类型都有一个共同的特点,即土壤水分在整个生长期表现为降低型<sup>[35]</sup>。本研究中4~10月份3种坡地利用方式土壤水分处于消耗期,该时段为植被器官建成和旺盛生长期,土壤水分损失以植物蒸腾和土壤蒸发为主,土壤水分消耗大于补给。但这与邱扬等<sup>[23]</sup>关于黄土高原土壤水分状况的研究结果并不相同,这可能与两地的气候条件、植被状况

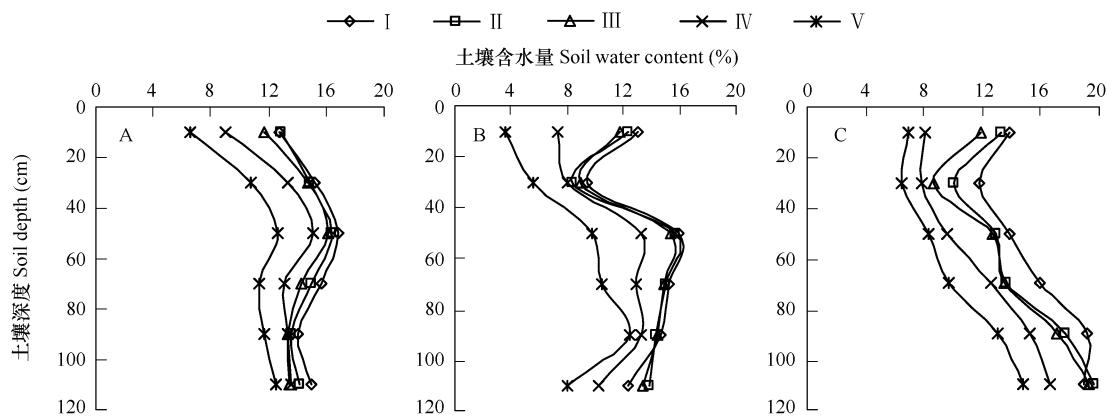


图7 次降雨后不同坡地利用方式土壤含水量垂直变化(2005.6~7)

Fig. 7 Profile changes of soil water content under different sloping field use types after rain (Jun. - Jul. 2005)

A: 坡耕地 CSF; B: 荒山草坡 DSF; C: 杜仲人工林 EUP; I : 雨后 after rain; II : 雨后 1 天 1 day after rain; III : 雨后 2 天 2 days after rain; IV : 雨后 7d 7 days after rain; V : 雨后 14d 14 days after rain

及取样时段的土壤水分状况有关。

土壤水分是土壤、土地利用(植被)、地形及汇水区面积等的函数,研究区域的不同土壤类型、土地利用的分布及景观特点可用于部分解释土壤水分的时空变异特征<sup>[37]</sup>,但是土壤水分真实变异特征与样本数据所呈现出的变异特征是有区别的<sup>[30]</sup>。表层土壤水分的空间格局由不同尺度上的自然作用和过程控制,包括降水、径流、蒸发蒸腾等,其变化尺度从几厘米到上百米<sup>[37]</sup>,通过对以上过程的调节,地形、微地貌、植被、土壤性质、地质基础等环境因子间接控制着土壤水分的空间分布<sup>[13]</sup>,同时土壤水分的空间分布格局也反映了这些自然过程和作用的空间差异。Grayson 等<sup>[38]</sup>将土壤水分的空间分布格局分两种情况进行讨论:一种是降水量持续大于蒸发蒸腾总量的情况下,地形、坡位决定了水分的分布,称之为非内部因素控制;另一种是蒸发蒸腾总量持续大于降水量情况下,土壤的含水状况由土壤的物理性质和植被控制,地形因素仅仅在降雨时对地势差异显著区域的土壤水分格局起主要控制作用。然而,土壤水分的空间格局远较理论上的复杂,除了上述系统因素控制外,还受许多随机因素和地域因素影响。在干旱情况下,土壤的含水量状况主要取决于土壤本身的性质<sup>[39]</sup>.本研究中3种坡地利用方式所处坡度、坡位、坡向以及地质基础大致相同,坡地利用方式的差异影响了土壤属性特征,导致了土壤水分时空异质性。

本研究的具体结论如下:

(1) 3种坡地利用方式土壤水分变化具有明显的季节特征,土壤蓄水量明显受到降雨量和降雨次数的影响,基本随着降雨量和降雨次数的减少而降低。土壤蓄水量变化具有相似性,其差异达到极显著水平( $P < 0.01$ ),其中杜仲人工林土壤蓄水量最高,荒山草坡次之,坡耕地最低,这是植物蒸腾、土壤蒸发和当地物候特点共同作用的结果。

(2) 研究期内各土壤层之间土壤含水量变化差异显著( $P < 0.05$ ),根据植物生长的季节变化,分植物非生长季节和生长季节两个时段来研究土壤水分的垂直变化,前阶段植物处于休眠期,样地植被覆盖度低,土壤水分损失以土壤蒸发为主,土壤水分补给大于土壤水分消耗,土壤蓄水量处于增加或维持状态;后阶段植物处于生长季节,土壤水分损失以植物蒸腾和土壤蒸发为主,土壤水分消耗大于补给。3种坡地利用方式土壤水分垂直变化趋势在两个时段具有相似性,非生长季节土壤含水量均值高于生长季节,杜仲人工林含水量最高,坡耕地次之,荒山草坡最低。根据降雨量的季节分配,分干季和湿季两个时段研究土壤水分的垂直变化,杜仲人工林和荒山草坡土壤含水量随土层深度表现出先较快增加后缓慢增加的趋势,而坡耕地土壤含水量则随土层深度呈先增加后减少的趋势。

(3) 3种坡地利用方式土壤蓄水量与太阳辐射量和大气温度表现为负相关性,与降雨量、大气相对湿度

和饱和水气压差表现为正相关性,土壤水分受气象因子的综合调控,降雨量是最直接的影响因子,其次是温度。

(4) 雨季单次降雨后3种坡地利用方式土壤蓄水量与雨后干旱天数存在显著的线性负相关性( $P < 0.05$ ),土壤水分损失率与干旱天数存在双曲函数关系( $P < 0.05$ ),随着干旱天数的增加,土壤水分损失率趋于平缓。雨季单次降雨后持续干旱条件下3种坡地利用方式土壤剖面含水量呈递减的变化趋势,其变异系数亦随土层深度呈递减的变化趋势。

#### References:

- [1] Fu B J, Chen L D, Ma K M. The effect of land use change on the regional environment in the Yangtze River catchment in the Loess Plateau of China. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(3): 241—246.
- [2] Chen L D, Wang J, Fu B J, et al. Land-use change in a small catchment of northern Loess Plateau, China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2001, 86: 163—172.
- [3] Gabris G, Kertesz A, Zambo L. Land use change and gully formation over the last 200 years in a hilly catchment. *Catena*, 2003, 50: 151—164.
- [4] Davidson D A, Watson A L. Spatial variability in soil moisture as predicted from airborne thematic mapper(ATM) data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1995, 20: 219—230.
- [5] Kalma J D. Predicting catchment scale moisture status with limited field measurements. *Hydrological Processes*, 1995, 9: 445—468.
- [6] Cerdà A. The influence of geomorphological position and vegetation cover on the erosional and hydrological processes on a mediterranean hilllope. *Hydrological Processes*, 1998, 12: 661—671.
- [7] Ding S Y, Gu Y F, Miao C, et al. Comparing research of weeds communities of different land using types in typical area of the middle-lower reach of the Yellow River. *Journal of Henan University(Natural Science)*, 2006, 36(1): 75—78.
- [8] Yue D P, Liu Y B, Zang R G, et al. Study on the regularities of wind-erosion of different land-Use types in Yongding River sand land, Beijing. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(4): 62—66.
- [9] He Q H, He S H, Bao W K. Research on dynamics of soil moisture in arid and semiarid mountainous areas. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21(2): 149—156.
- [10] Ladson A R, Moore I D. Soil water prediction on the Konza Prairie by microwave remote sensing and topographic attributes. *Journal of Hydrology*, 1992, 138: 385—407.
- [11] 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: 259—281.
- [12] Andrew W, Western, Sen-Lin Zhou, et al. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. *Journal of Hydrology*, 2004, 286: 113—134.
- [13] Western A W, Ganter B, Rodger B G. Geostatistical characterization of soil moisture patterns in the Tarrawarra catchment. *Journal of Hydrology*, 1998, 205: 20—37.
- [14] Western A W, Rodger B G. The Tarrawarra data set: soil moisture patterns, soil characteristics, and hydrological flux measurements. *Water Resources Research*, 1998, 34(10): 2765—2768.
- [15] Huang Y L, Chen L D, Fu B J, et al. The influence of topography land use on soil moisture spatial-temporal pattern in the hilly area of Loess Plateau. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(3): 334—342.
- [16] Liu S C, Lv J L, Zhang Y P, et al. Study on relationship of water movement and thermodynamic function in unsaturated soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(3): 388—395.
- [17] Qiu Y, Fu B J, Wang J. Quantitative analysis of relationships between spatial and temporal variation of soil moisture content and environmental factors at a gully catchment of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 741—747.
- [18] Wang J, Fu B J. Spatiotemporal variability of soil moisture in small catchment on Loess Plateau semi-variograms. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(4): 428—438.
- [19] Nyberg L. Spatial variability of soil water content in the covered catchment of Gardsjön, Sweden. *Hydrological Processes*, 1996, 10: 89—103.
- [20] Qiu Y, Fu B J, Wang J, et al. Spatial-temporal distribution of land use in relation to topography in a gully catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(1): 20—29.
- [21] Qiu Y, Fu B J, Wang J, et al. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2001, 240(3, 4): 243—246.
- [22] Wendroth O, Pohl W, Koszinski S, et al. Spatial-temporal patterns and covariance structures of soil water status in two Northeast-German field sites. *Journal of Hydrology*, 1999, 215: 38—58.
- [23] Zhang W T, Shao R X, Zhang W, et al. The Influence of climatic and geographical factors on the growth of Eucommia ulmoides in Cili County. *Journal of Northwest Forestry College*, 1994, 9(4): 41—45.
- [24] Li X Q, Tian Y X, Yuan Z K, et al. Effects of different vegetative types on soil and water conservation at erosion areas. *Research of Soil and Water*

- Conservation, 2003, 10(2): 153—157.
- [25] Zhang W R, Xu B T. The Method of Long-term Research on Forest Soil. Beijing: Chinese Forestry Press, 1986. 30—36.
- [26] Duan Z H, Xiao H L, Song Y X, et al. Soil water variation in different terrains and influence on plant in Lanzhou suburb on western Loess Plateau. Journal of Desert Research, 2006, 26(4): 522—526.
- [27] Huang Z G, Li F R, Cao Y, et al. Study on Ecological Benefit of Soil and Water Conservation of Eucommia ulmoides and Vernica fordii Plantation in Hilly Red Soil Region, Southern China. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(8): 8—14.
- [28] Wang J, Fu B J. Spatiotemporal variability of soil moisture in small catchment on Loess plateau-semivariograms. Acta Pedographica Sinica, 2000, 55(1): 84—91.
- [29] Wang M B, Li H J. Water ecology of the Populus simonii plantation in northwestern Shanxi. Acta Ecologica Sinica, 1996, 16(3): 232—237.
- [30] Western A W, Blöschl G. On the spatial scaling of soil moisture. Journal of Hydrology, 1999, 217: 203—224.
- [31] Huang Z H, Zhou G Y, MORRIS J, et al. Effects of canopy meteorological factors on soil moisture content during rainy seasons in an Eucalypt plantation. Journal of Tropical and Sub-tropical Botany, 2003, 11(3): 197—204.
- [32] Ming A C, Zhang Y P, Zhu M E, et al. Effect of temperature on water potential in field soil. Acta Pedologica Sinica, 1995, 32(2): 235—240.
- [33] Pan P, Li R W, Qin Z G, et al. A study on biomass and productivity of Eucommia ulmoides plantation. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2002, 9(1): 71—77.
- [34] Le-Roux X, Bariac T, Mariotti A. Spatial partitioning of the soil water resource between grass and shrub components in a West African humid savanna. Oecologia, 1995, 104: 147—155.
- [35] Whitaker M P. Small-scale spatial variability of soil moisture and hydraulic conductivity in a semi-arid rangeland soil in Arizona. Tucson: The University of Arizona, 1993.
- [36] Gomez P A, Alvarez R J, Albaladejo J, et al. Spatial patterns and temporal stability of soil moisture across a range of scales in a semi arid environment. Hydrological Processes, 2000, 14: 1 261—1 277.
- [37] Wang J, Fu B J, Jiang X P. Review on Research of Soil Moisture Heterogeneity. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(1): 1—5.
- [38] Grayson R B, Western A W, Chiew F H S, et al. Preferred states in spatial soil moisture patterns: local and non-local controls. Water Resource Research, 1997, 33: 2 897—2 908.
- [39] Herbst M, Diekkrilger B. Modelling the spatial variability of soil moisture in a micro-scale catchment and comparison with field data using geostatistics. Physics and Chemistry of the Earth, 2003, 28: 239—245.

#### 参考文献:

- [1] 傅伯杰, 陈利顶. 黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响——以延安市羊圈沟流域为例. 地理学报, 1999, 54(3): 241~246.
- [7] 丁圣彦, 谷艳芳, 苗琛, 等. 黄河中下游典型地区不同坡地利用方式杂草群落比较研究. 河南大学学报(自然科学版), 2006, 36(1): 75~78.
- [8] 岳德鹏, 刘永兵, 贤润国, 等. 北京市永定河沙地不同坡地利用方式风蚀规律研究. 林业科学, 2005, 41(4): 62~66.
- [9] 何其华, 何水华, 包维楷. 干旱半干旱区山地土壤水分动态变化. 山地学报, 2003, 21(2): 149~156.
- [15] 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. 第四纪研究, 2003, 23(3): 334~342.
- [16] 刘思春, 吕家珑, 张一平, 等. 非饱和土壤水分运动与热力学函数关系初探. 土壤学报, 2000, 37(3): 388~395.
- [17] 邱扬, 傅伯杰, 王军. 黄土丘陵小流域土壤水分时空分异与环境关系的数量分析. 生态学报, 2000, 20(5): 741~747.
- [18] 王军, 傅伯杰. 黄土丘陵小流域土壤水分的时空变异特征: 半变异函数. 地理学报, 2000, 55(4): 428~438.
- [23] 张维涛, 邵如喜, 张伟, 等. 慈利县气候生态因子对杜仲生长的影响. 西北林学院学报, 1994, 9(4): 41~45.
- [24] 李锡泉, 田育新, 袁正科, 等. 湘西山地不同植被方式的水土保持效益研究. 水土保持研究, 2003, 10(2): 153~157.
- [25] 张万儒, 许本彤. 森林土壤定位研究方法. 北京: 中国林业出版社, 1986. 30~36.
- [26] 段争虎, 肖洪浪, 宋耀选, 等. 黄土高原西部兰州市郊地貌驱动的土壤水分变化及对植物的影响分析. 中国沙漠, 2006, 26(4): 522~526.
- [27] 黄志刚, 李锋瑞, 曹云, 等. 南方红壤丘陵区杜仲和油桐人工林水土保持效应比较研究. 林业科学, 2007, 43(8): 8~14.
- [28] 王军, 傅伯杰. 黄土丘陵小流域土地利用结构对土壤水分时空分布的影响. 地理学报, 2000, 55(1): 84~91.
- [29] 王孟本, 李洪建. 晋西北小叶杨林水分生态的研究. 生态学报, 1996, 16(3): 232~237.
- [31] 黄志宏, 周国逸, MORRIS J, 等. 桉树人工林冠层气象因子对雨季土壤水分的影响. 热带亚热带植物学报, 2003, 11(3): 197~204.
- [32] 闵安成, 张一平, 朱铭羲, 等. 田间土壤的水势温度效应. 土壤学报, 1995, 32(2): 235~240.
- [33] 潘攀, 李荣伟, 覃志刚, 等. 杜仲人工林生物量和生产力研究. 长江流域资源与环境, 2002, 9(1): 71~77.
- [37] 王军, 傅伯杰, 蒋小平. 土壤水分异质性的研究综述. 水土保持研究, 2002, 9(1): 1~5.