

不同土地利用方式对岩溶山区旱坡地土壤水分时空分异的影响*

刘海隆¹ 蒋太明² 刘洪斌^{1,3} 肖厚军² 夏锦慧²

(1 西南农业大学资源环境学院, 重庆北碚 400716)

(2 贵州省农业科学院, 贵阳 550006; 3 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550005)

摘要 通过对岩溶山区贵州修文县 2 年的土壤水分定点观测, 系统分析了研究区不同坡度下土地利用方式对土壤水分的影响。分析结果表明, 在不同坡度之间, 土壤水分的变化差异极为显著; 在不同的土地利用方式条件下, 蔬菜地的土壤水分变化与其他两种用地的差异极为显著, 而裸地与小麦—玉米轮作地之间却没有显著差异。同一时间径流深虽然 16° 坡地 > 9.5° 坡地 > 6.5° 坡地, 但土壤水分却存在 9.5° 坡地 > 16° 坡地 > 6.5° 坡地的关系, 初步分析这是由土壤剖面质地差异所致, 从剖面分布来看, 土壤水分含量都随着深度的增加而增大。坡度和土地利用方式对土壤水分的影响主要集中在 BC 层以上, 而在 C 层这种影响较弱, 坡度因素的影响深度比土地利用方式小。

关键词 岩溶山区; 土壤水分; 时空分异

中图分类号 S152.7 文献标识码 A

岩溶环境是一种非常脆弱的生态环境, 其土壤贫薄, 水文过程变化迅速, 植被生长过度依赖于生境条件^[1,2]。贵州省岩溶(碳酸盐类岩石)出露面积为 12.96 万 km², 垂直分布总厚度约 8 500 m, 岩溶面积占省域面积的 73.6%。水土流失面积, 占省域面积的 43.5%, 全省大于 25° 的旱坡耕地占总耕地面积的 17.1%, 滥伐森林、陡坡垦植、顺坡耕种导致贵州水土流失日趋严重, 农业生态环境日益恶化, 石漠化进一步加剧^[3,4]。土壤水分是侵蚀过程、植物生长和植被恢复的主要影响因子, 因此, 研究土壤水分的时空分异特征对岩溶山区农业生产、植被恢复和土地的合理利用及配置具有重要的指导意义^[5]。

土壤水分具有高度的异质性, 研究的尺度不同, 其影响因子和变化规律也随之变化^[5,6]。长期以来, 在岩溶地区地质水文循环、生态环境效应的研究较多^[7~14], 而从土地利用方式的角度来研究岩溶区旱坡地土壤水分变化的还少有报道。

1 研究区概况

研究区位于贵阳市中部修文县久长镇, 东经 106°38′、北纬 26°56′。研究区所在地属于亚热带季

风气候区, 年平均气温 13.5℃; 日平均气温 ≥10℃ 的年积温为 4 090℃; 年日照时数为 1 281.5 h; 年均降雨量为 1 211 mm; 无霜期 265 d; 地势起伏大, 山地占 53.4%, 丘陵 34.5%, 碳酸盐类岩层占 74.9%, 海拔 1 280~1 420 m, 岩溶地貌发育。土壤类型为泥页岩母质上发育而成的黄壤土。根据国际制分类标准划分土壤质地为壤质粘土, 有机质含量 20~30 g kg⁻¹, 普遍缺磷、少钾; pH 值 5.0~5.5, 土壤容重为 0.971~1.131 g cm⁻³。试区土层深厚, 剖面特征如表 1 所示。

表 1 试验区土壤剖面特性

Table 1 Characteristics of soil profile in experiment area

土壤剖面 Soil profile	深度 Depth (cm)	性状描述 Description of properties
A	0~18	灰棕色, 少量侵入体, 少量根系, 小块状, 稍紧实
B1	18~30	棕灰色, 少量侵入体, 小块状, 较紧实
B2	30~39	灰黄色, 无侵入体, 无根系, 块状, 较紧实
	39~43	棕黄色
BC	43~67	灰黄色, 有胶膜, 棱状结构, 较紧实
C	67~105	黄色, 有胶膜, 棱柱状, 较紧实

试验区土壤水分特征曲线如图 1 所示。

* 国家重点科技攻关计划(99-021-03-06)资助

作者简介: 刘海隆(1974~), 男, 四川德阳人, 硕士, 主要从事农业生态研究。E-mail: liu_hai_tiger@sina.com

收稿日期: 2004-03-16; 收到修改稿日期: 2004-08-20

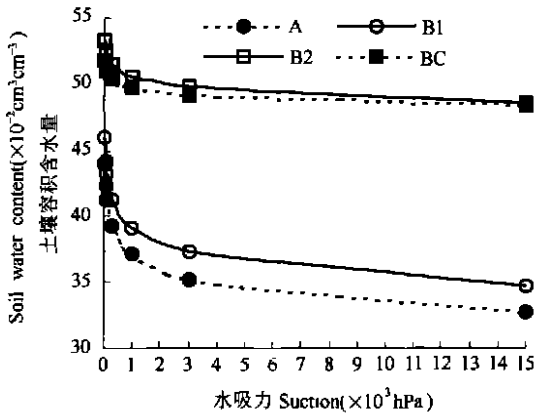


图 1 黄壤旱地土壤水分特征曲线

Fig. 1 Characteristic curve of the moisture regime in yellow soil dry land

试验根据农耕坡地习惯性不同利用方式共设置 6.5° 、 9.5° 、 16° 三个坡度, 坡长 400 m, 试验区坡向为南坡, 处于坡中部, 每个坡度分别设蔬菜地、麦玉(小麦—玉米轮作)地、裸地等三种土地利用方式。

2 研究方法

2.1 取样方法

土壤水分用传统的烘干法测定。用铝盒分土层(0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm)取样, 每周取样一次, 降雨后增加取样, 土样在 $105\sim 110^\circ\text{C}$ 烘干 6 h, 冷却至 $30\sim 40^\circ\text{C}$ 时称干土重。采用自记雨量计记录每次降雨量、降雨持续时间。观测时间为 2001 年 6 月 13 日~2003 年 7 月 23 日。

2.2 分析方法

在土壤水分的时间和空间分异分析中, 根据研究需要消除土壤深度、时间或土地利用方式的影响。

$$\theta_0(i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \theta_0(i, j) \quad (1)$$

式中, $\theta_0(i)$: 单因素下的体积含水量; $\theta_0(i, j)$: 双因素下的体积含水量; n : j 因素下的样本数。

为了评估土壤利用方式及坡度在土壤水分时空格局分异中的作用, 方差分析是一种有效的方法。方差分析是对几个总体同时进行比较, 检验其平均数之间是否有显著区别。单、双因素方差分析是通过分别检验拒绝域(2)式和(3)式来进行比较判断。

$$F_A = \frac{S_A/(r-1)}{S_E/(rs(t-1))} \geq F_{\alpha}(r-1, rs(t-1)) \quad (2)$$

$$F_{A \times B} = \frac{S_{A \times B}/(r-1)(s-1)}{S_E/(rs(t-1))} \geq F((r-1)(s-1), rs(t-1)) \quad (3)$$

其中:

$$S_A = \sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^n (\bar{x}_{\cdot j} - \bar{x})^2$$

$$S_E = \sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^n (\bar{x}_{ij} - \bar{x}_{\cdot j})^2$$

$$S_{A \times B} = t \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s (\bar{x}_{ij} - \bar{x}_{i\cdot} - \bar{x}_{\cdot j} + \bar{x})^2$$

式中, F_A 为因素 A 中各效应全为 0 时的拒绝域, $F_{A \times B}$ 为因素 A、B 中各交互效应全为 0 时的拒绝域, S_A 、 S_B 分别称为因素 A、B 的效应平方和, $S_{A \times B}$ 称为因素 A、B 交互效应平方和, r 、 s 分别为因素 A、B 的水平数, t 为重复处理数, \cdot 表示某因素下的序列值之和。

为了更准确地了解每个因素中的各层次间的土壤水分是否均有显著差异, 需进一步对方差做多重比较。

3 结果与分析

3.1 土壤水分的时间分异特征

在研究土壤水分的时间分异特征中, 根据式(1)对观测数据进行处理以消除土壤深度的影响。

3.1.1 不同坡度下土地利用方式与土壤水分分异关系 分析试验区不同坡度下各土地利用方式土壤水分的时间序列, 发现其变化不仅与坡度有密切的关系, 而且与土地利用方式紧密相关。

在不同坡度下土地利用方式对土壤水分影响的双因素方差分析中发现, 坡度因素和土地利用方式因素及二者交互作用的 F 概率值均小于 0.01 且接近于 0, 达到极显著水平, 表明坡度和土地利用方式对土壤水分的影响都是极显著的, 同时二者的交互作用对土壤水分的影响也是极显著的。但这种差异还不能说明每一个坡度或每一种土地利用方式对土壤水分的影响均是极显著的。因此作者做了进一步的方差多重比较。分析结果表明, 在不同坡度之间, 土壤水分的变化差异极为显著, 即坡度不同, 土壤水分变化不同; 在不同的土地利用方式条件下, 蔬菜地的土壤水分变化与其他两种用地的差异极为显著, 而裸地与麦玉地之间却没有显著差异。这是由于三者不同的需水量(植物吸收和蒸发)造成的, 因为从三者试验期间的径流深总量来看, 蔬菜地为

678.8 mm, 麦玉地为 683.7 mm, 裸地为 437.5 mm, 与麦玉地相比, 蔬菜地的径流量与之相差不大。

3.1.2 土壤水分的时间变化特征 由图 2 可见, 在不考虑土地利用类型以及土层深度情况下, 不同坡度下土壤水分含量有一定的差异, 且变化并不同步。在同一时刻, θ_v 的大小表现为 9.5° 坡地 $>$ 16° 坡地 $>$ 6.5° 坡地, 土壤水分的这种格局主要是由土壤剖面结构引起的, 土体中孔隙度的不同形成了这种差异, 在 $0\sim 100$ cm 土层内, 6.5° 坡地、 9.5° 坡地和 16° 坡地的土壤总孔隙度分别为 55.5%、61.6%、59.8%, 9.5° 坡地明显高于另外两类。试验期间 3 种坡度的径流深分别为: 16° 坡地 (826.1 mm) $>$ 9.5° 坡地 (784.0 mm) $>$ 6.5° 坡地 (662.3 mm), 但其平均水深 ($D_{w, 100}$) 却仍然为 16° 坡地 (7 045.3 cm) $>$ 9.5° 坡地 (6 616.2 cm) $>$ 6.5° 坡地 (6 175.2 cm), 这种关系

主要表现在 $0\sim 10$ cm、 $10\sim 20$ cm、 $20\sim 40$ cm 和 $40\sim 60$ cm 4 个土层, 这些土层的水深在 16° 、 9.5° 、 6.5° 3 个坡度总水深中分别占 72.4%、70.3% 和 71.1%。这表明土壤持水能力的强弱是造成土壤水分不同的原因。3 个坡度的土壤水分都随时间的变化而不断波动, 具有明显的季节变化特征, 全年夏季土壤含水量最高, 秋季和冬季最低。在实验观测期间, 3 个坡度的土壤含水量最低值均出现在 2003 年 1 月 10 日, 其中 6.5° 坡地的 θ_v 为 26.66%, 9.5° 坡地为 29.42%, 16° 坡地为 25.95%; 但三者最大值出现的日期并不一致, 6.5° 坡地出现在 2003 年 3 月 25 日, θ_v 为 53.37%, 9.5° 坡地出现在 2002 年 8 月 10 日, θ_v 为 59.42%, 16° 坡地出现在 2003 年 3 月 25 日, θ_v 为 54.87%。

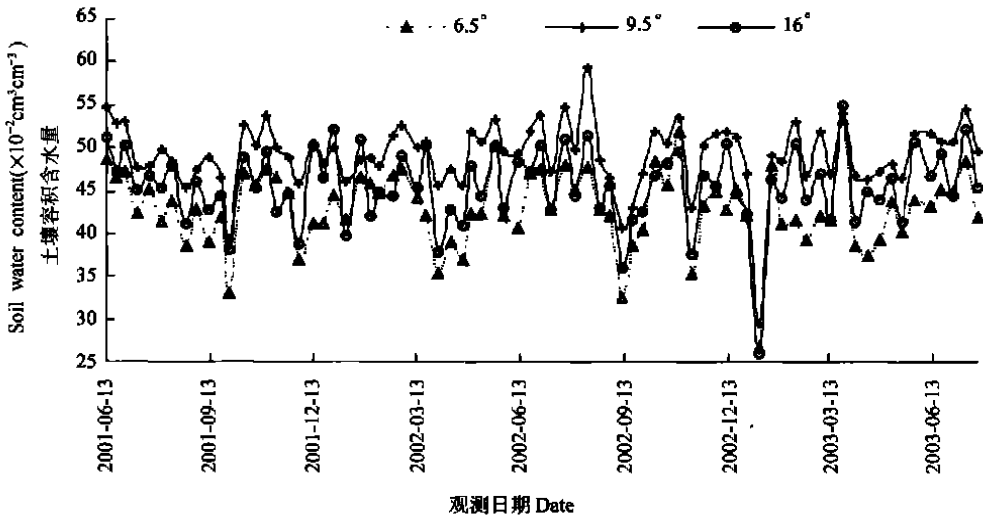


图 2 不同坡度下的土壤水分变化

Fig. 2 Variation of soil moisture in soils on different slope

在不考虑坡度以及土层深度情况下, 由图 3 可见, 各种土地利用方式的土壤含水量变化趋势基本一致, 但起伏波动的幅度不尽相同, 随时间而异。总体而言, 麦玉地的降幅最大, 最小负距平 (θ_v 与 $\bar{\theta}_v$ 之差) 为 -19.7% , 裸地为 -18.1% , 蔬菜地为 -8.4% , 前两者都出现在 2003 年 1 月 10 日, 后者出现在 2002 年 9 月 10 日; 而裸地的增幅最大, 最大正距平为 9.0% , 麦玉地为 7.4% , 蔬菜地为 5.6% 。这表明在冬季地表较为裸露, 且降水稀少, 土壤较为干旱时, 土壤水分下降较多, 而蔬菜地在收获季节土壤水分变化较大。在同一时刻, 蔬菜地的土壤含水量基本上小于裸地和麦玉地, 麦玉地的土壤水分又略

高于裸地, 如前文分析, 这是需水差异所致。

3.2 土壤水分的剖面分异特征

3.2.1 不同坡度下土地利用方式与土壤水分分异关系 根据式 (1) 进行数据处理消除时间的影响, 分别考虑消除坡度因素影响时不同土地利用方式下的土壤水分剖面分异以及消除土地利用方式因素影响时不同坡度下的分异, 对两组关系进行双因素方差分析。

结果表明, 坡度、土地利用方式和土层深度对土壤水分含量都有极显著的影响, 同时坡度与土层、土地利用方式之间的相互耦合作用对土壤水分含量也有重要影响。

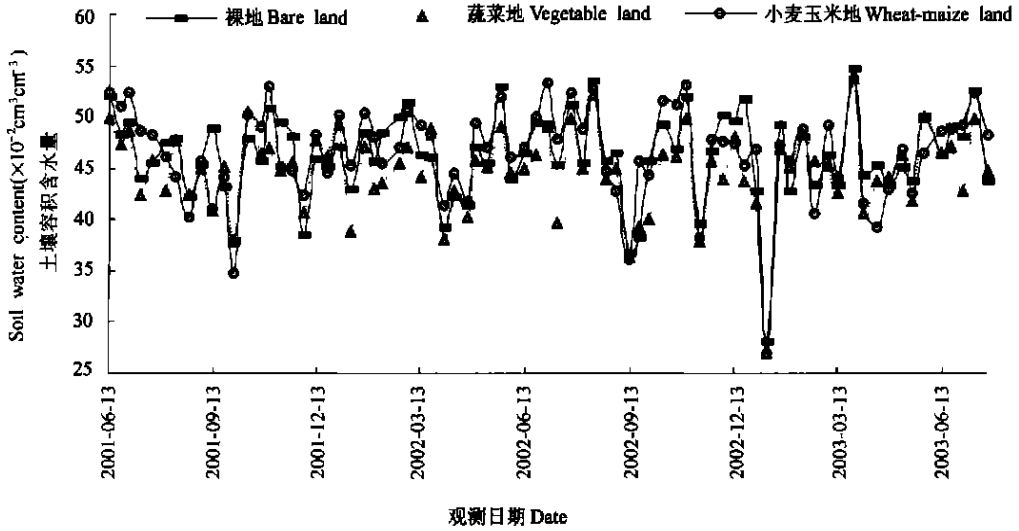


图 3 不同土地利用方式下的土壤水分变化

Fig. 3 Variation of soil moisture in soils under different land uses

但在进一步的方差多重比较中发现, 在相同的坡度下, 如果土地利用方式不同, 60~ 80 cm 土层与 80~ 100 cm 土层之间的土壤水分变化差异不显著, 而其他各层差异显著; 在相同的土地利用方式下, 如果坡度不同, 80~ 100 cm 土层分别与 40~ 60 cm 土层和 60~ 80 cm 土层之间的土壤水分变化差异不显著, 而其他各层差异显著。这表明坡度和土地利用方式对土壤水分的影响主要集中在 BC 层以上, 而在 C 层这种影响较弱, 从前面分析可知, 坡度因素的影响深度比土地利用方式更浅。

3.2.2 土壤水分的剖面分异特征 图 4 显示了各坡度中不同土地利用方式土壤水分含量平均值 (2001年6月13日~ 2003年7月21日) 随深度的变

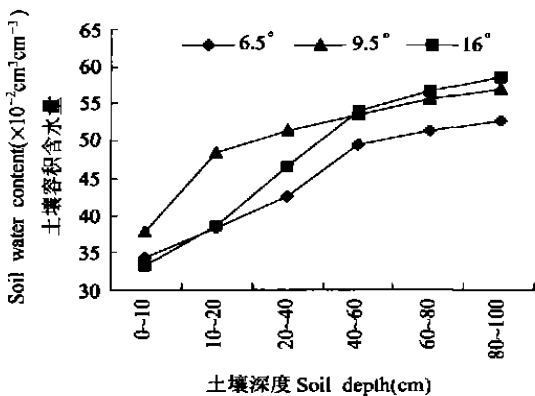


图 4 不同坡度下土壤水分的垂直分异比较

Fig. 4 Vertical diversity of soil moisture in soils on different gradients

化。显而易见, 土壤水分含量都随着深度的增加而增大。但比较三者之间的差异发现, 在 0~ 20 cm 土层内, 9.5°坡地的土壤水分含量高于 6.5°坡地和 16°坡地, 而 6.5°坡地和 16°坡地的变化差异不大, 前者略高于后者; 在 20~ 60 cm 土层内, 9.5°坡地的土壤水分含量仍然明显高于另外两者, 16°坡地大于 6.5°坡地; 在 60~ 100 cm 土层内, 16°坡地的土壤含水量最大, 9.5°坡地高于 6.5°坡地。分析发现, 在 0~ 20 cm 土层内, 6.5°坡地、9.5°坡地和 16°坡地的土壤总孔度分别为 56.0%、64.7%、59.7%, 9.5°坡地明显高于另外两类。而 60~ 100 cm 土层内, 上述三者的土壤总孔度分别为 54.1%、58.4%、59.9%, 16°坡地的最大。土壤孔隙度的剖面分布与土壤水分剖面分布相一致。

图 5 显示了每一土地利用方式中不同坡度不同土层土壤水分含量的平均值 (2001年6月13日~ 2003年7月21日) 分布特征。在不同的土地利用方式中, 0~ 60 cm 土层内土壤水分含量之间的差异较大, 比较而言, 在 0~ 60 cm 土层内, 蔬菜地的土壤含水量最低, 裸地与麦玉地差异不大, 而在 60~ 100 cm 土层内, 三者没有明显差异。各层平均状况和波动幅度的结果表明, 蔬菜地的土壤含水量最低, 波动幅度也最小, 麦玉地的两者变化最大。这是因为蔬菜地有机肥施用量更大, 耕作层的耕作更为频繁, 使土壤结构得到了改善, 孔度变小, 在 0~ 60 cm 土层内, 它比裸地和麦玉地的土壤孔隙度分别小 2.1%、

3.0%。而小麦、玉米的根系较为发达,一方面植株需水量大,另一方面又利于土壤蓄水。

土壤水分的这种剖面分异特征对时间分异特征具有重要影响。

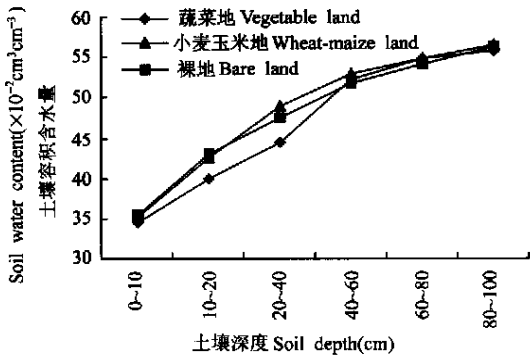


图5 不同土地利用方式下土壤水分的垂直分异比较

Fig. 5 Vertical diversity of soil moisture in soils under different land uses

4 结论

1) 通过贵州岩溶山区修文县试验区的土壤水分时空分异研究发现,不同坡度和土地利用方式对土壤水分变化均有重要影响。

2) 从土壤水分随时间的变化规律分析中发现,在不同坡度之间,土壤水分的变化差异极为显著;在不同的土地利用方式条件下,蔬菜地的土壤水分变化与其他两种用地的差异极为显著,而裸地与麦玉地之间却没有显著差异。同一时刻, θ_v 的大小表现为 9.5° 坡地 > 16° 坡地 > 6.5° 坡地。初步分析这是由土壤剖面结构差异所致,需要进一步的研究。

3) 从土壤剖面角度来看,各种坡度下的土壤水分含量都随着深度的增加而增大。坡度和土地利用方式对土壤水分的影响主要集中在 BC 层以上,而在 C 层这种影响较弱,坡度因素的影响深度比土地利用方式小。

参考文献

[1] 何师意, 冉景丞, 袁道先, 等. 不同岩溶环境系统的水文和生态效应研究. 地球学报, 2001, 22(3): 265~270. He S Y, Ran J C, Yuan D X, *et al.* A comparative study on hydrological and ecological effects in different karst ecosystems (In Chinese). Acta Geoscientia Sinica, 2001, 22(3): 265~270

[2] 姚长宏, 蒋忠诚, 袁道先. 西南岩溶地区植被喀斯特效应. 地球学报, 2001, 22(2): 159~164. Yao C H, Jiang Z C, Yuan D X. Karst effects on vegetation in the karst area Southwest China (In Chinese). Acta Geoscientia Sinica, 2001, 22(2): 159~164

[3] 龙健, 李娟, 腾应, 等. 贵州高原喀斯特环境退化过程土壤

质量的生物学特性研究. 水土保持学报, 2003, 17(2): 47~50. Long J, Li J, Teng Y, *et al.* Biological Characteristics of soil quality in the degradation process of the Karst environment in Guizhou Plateau (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(2): 47~50

- [4] 范厚明, 龙国, 聂伟. 贵州省岩溶山区旱坡耕地梯化的环境效应研究. 农业工程学报, 2000, 16(5): 56~59. Fan H M, Long G, Nie W. Environmental effect of terraced field construction on the hillside upland in karst mountain areas in Guizhou Province (In Chinese). Transactions of the CASE, 2000, 16(5): 56~59
- [5] 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. Wang J, Fu B J. Impact of land use on spatial and temporal distribution of soil moisture on the Loess Plateau (In Chinese). Acta Geographica Sinica, 2000, 55(1): 84~91
- [6] 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. Huang Y L, Chen L D, Fu B J, *et al.* Influence of topography and land use on spatial-temporal pattern of soil moisture in the hilly area of the Loess Plateau (In Chinese). Quaternary Sciences, 2003, 23(3): 334~342
- [7] 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. 中国岩溶, 2003, 22(1): 24~27. Li Y B, Wang S J, Xiong K N. Eco-hydrological effects in the karst mountain area, Southwest China (In Chinese). Carsologica Sinica, 2003, 22(1): 24~27
- [8] 王腊春, 汪文富. 贵州普定后寨地下河流域岩溶水特征研究. 地理科学, 2000, 20(6): 557~562. Wang L C, Wang W F. Characteristic of karst water at Houzhai underground basin in Puding County, Guizhou Province (In Chinese). Scientia Geographica Sinica, 2000, 20(6): 557~562
- [9] 李国芬. 广西岩溶水文地质特征及其资源. 中国岩溶, 1996, 15(3): 253~258. Li G F. Karst hydrogeologic characteristics and water resources in Guangxi (In Chinese). Carsologica Sinica, 1996, 15(3): 253~258
- [10] Aquilina L, Ladouche B, Doerfliger N, *et al.* Deep water circulation, residence time, and chemistry in a karst complex. Ground Water, 2003, 41(6): 790~805
- [11] Robert E. Determination of transmissivity from specific capacity tests in a karst aquifer. Ground Water, 1997, 35(5): 738~742
- [12] Han X F, Lu J, Liu Y L, *et al.* Coupled transfer of water and heat in red soil: Experiment and numerical modelling. Pedosphere, 2001, 11(2): 123~130
- [13] 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. Liu S C, Lu J L, Zhang Y P, *et al.* Relationship of water movement with thermodynamic function in unsaturated soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(3): 388~395
- [14] 周刘宗, 陈志雄, 周凌云, 等. 土壤水分的时序分析研究. 土壤, 1998, (4): 188~193. Zhou L Z, Chen Z X, Zhou L Y, *et al.* A temporal distribution of soil moisture (In Chinese). Soils, 1998, (4): 188~193

IMPACT OF LAND USE ON SPATIO-TEMPORAL VARIATION OF SOIL MOISTURE OF SLOPING UPLAND IN KARST MOUNTAINOUS AREA

Liu Hailong¹ Jiang Taiming² Liu Hongbin^{1,3} Xiao Houjun² Xia Jinhui²

(1 Southwest Agriculture University, Beibei, Chongqing 400716, China)

(2 Guizhou Academy of Agricultural Science, Guiyang 550006, China)

(3 Research Institute of Geochemistry of Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550005, China)

Abstract Stationary soil moisture observation was carried out in Xiuwen County, Guizhou Province, which lies in the karst mountainous area of Southwest China. Based on the two-year observation from June 13, 2001 to July 23, 2003, impacts of gradient and land use on soil moisture are analyzed systemically. The result shows that gradient and land use have a marked effect on soil moisture. Comparison of change in soil moisture between soils under three different kinds of land uses shows that it is the most remarkable in soil under vegetable, and there is no significant difference between bared soil and soil under wheat or corn. But in terms of effect of slope on soil moisture, surface runoff shows a decreasing order of $16^{\circ} > 9.5^{\circ} > 6.5^{\circ}$ in gradient field while soil moisture has a decreasing order of $9.5^{\circ} > 16^{\circ} > 6.5^{\circ}$ in gradient field. According to a preliminary analysis, the difference in soil profile structure is the potential cause. Soil profile soil moisture increases with the depth in the soil profile. In conclusion, the impact of gradient and land use on soil moisture is mostly effective in the soil layers above the BC layer, and is quite weak in the C layer. And the impact of gradient on moisture distribution in depth is lower than that of land use.

Key words Karst mountainous area; Soil moisture; Spatio-temporal variation