

元阳梯田水源区林地土壤水分时空变异性研究

张 娟¹, 宋维峰^{1*}, 彭永刚², 朱兴耀²

(1. 西南林业大学, 云南 昆明 650224; 2. 云南红河州水利局, 云南 红河 661100)

摘要: 使用高精度土壤水分测量仪 ML2X 测定元阳梯田水源区林地不同深度(10、20、30、40、60、100 cm)的土壤容积含水率, 分析其土壤水分时空变异规律。结果表明: 林地土壤水分垂直分布规律显著, 土壤含水率随土层深度的增加而递增, 且雨季大于旱季, 变异系数随土层深度的增加而递减。土壤含水率在同一坡面存在差异, 坡中位置均大于坡上和坡下位置; 其中, 变异系数表现为坡下>坡上>坡中, 雨季>旱季。季节、土层深度及坡位等因素均对土壤含水率有较大影响。土壤水分的平均值具有明显的时间变异规律, 不同层次土壤含水率变化不同, 表层土壤水分与降水变化基本一致, 深层土壤受降雨和蒸腾作用的影响较小, 土壤水分时序变幅不大。各土层土壤蓄水量均表现为雨季大于旱季, 且随着土层深度的增加呈递增的趋势。研究揭示了林地土壤水分的分布特征, 为今后梯田灌区土壤水分的有效利用提供一定参考依据。

关键词: 土壤水分; 林地; 时空变异; 元阳梯田水源区

中图分类号: S714.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-7461(2014)-02-0049-05

Studies on Spatial and Temporal Variations of Soil Moisture in Forest in Water Source Area of Yuanyang Terrace

ZHANG Juan¹, SONG Wei-feng^{1*}, PENG Yong-gang², ZHU Xing-yao²

(1. Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China;

2. Water Conservancy Bureau of the River State, Honghe, Yunnan 661100, China)

Abstract: The volumetric water contents (VWC) in different depths (10, 20, 30, 40, 60, and 100 cm, respectively) of the forest soil which serves as the water source for the agricultural terrace fields nearby in Yuanyang, Yunnan Province, China were measured by high-precision soil moisture measurement instrument ML2x. Rules of temporal and spatial variations of VWC were analyzed. Significantly regular distribution patterns of VWC in soil profile were observed. The VWC increased with the soil depth, and it was higher in rainy season than in dry season. The variation coefficients increased with the soil depth. In the same slope, it was higher the middle part than those in lower and upper parts, in which the values of variation coefficients in different positions of a slope were in the order of low > up > middle, and similarly, rain season > dry season. Factors such as season, soil depth and slope positions all had significant influences on VWC. The average value of VWC presented obvious variations with time. Different variation patterns were found in different soil layers: the changes of VWC in surface soil were the same as precipitation, it almost was not affected by rainfall and transpiration in deep soil, and the variation range of the time series was small. The water demands in the soils with different depths in wet season were more than in dry season, and with the increase of soil depth, VWC presented the trend of increase.

Key words: soil moisture; forest; spatial and temporal variation; water source area of Yuanyang terrace

收稿日期: 2013-08-28 修回日期: 2013-11-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(31070631、41371066)。

作者简介: 张娟, 女, 硕士研究生, 研究方向: 森林水文。E-mail: zj20111225@126.com

* 通信作者: 宋维峰, 男, 博士, 教授, 研究方向: 生态环境工程和森林水文。E-mail: songwf85@126.com

随着人类社会的发展,水资源的需求日益增大,与土壤水有关的生态环境问题不断出现,化肥、农药、重金属等的迁移转化对土壤以及地下水的污染等问题,使得人们越来越关注对土壤水的研究。土壤水指的是由地面向下至地下水水面(潜水面)以上土壤层中的水分,亦称土壤中非饱和带水分^[1],是组成土壤的主要物质之一^[2],也是植物生长需水的主要来源,更是土壤内生物活动和养分转化过程的必须条件^[3],决定着土壤生产力的高低。林地土壤水分对植物-大气、大气-土壤和土壤-植物3个界面间的物质和能量的交换过程都有重要的控制作用,土壤水分转化直接影响到土壤的水分入渗、林地的蒸散和流域的产流以及入渗后的再分布过程^[4-5]。另外,土壤层含水率是联系气候与植被水分动态的关键^[6]。2013年6月22日,已有1700多年历史的哈尼梯田被成功列入联合国科教文组织世界遗产名录,其中核心分布区元阳县境内就有近3万hm²^[7],分布于海拔700~1800 m、坡度为15°~75°的沟壑山岭间^[8],水是贯穿梯田区整个灌溉渠系的最主要因素。近几年云南省大部分地区为旱情所困扰,元阳梯田却依旧丰产,这是森林涵养水源及降水再分配在土壤中水分运移的结果,其中土壤层是森林水源涵养层的主体^[9]。而目前,关于哈尼梯田土壤水分方面没有学者进行研究。因此,研究元阳梯田水源区林地土壤水分时空变异性,掌握土壤水分动态,提高土壤水分利用效率,对于探索元阳梯田水源区森林涵养水源机理以及“森林-村寨-梯田-江河”四素同构体系^[10]具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选在云南省红河哈尼彝族自治州元阳县(102°27'~103°13'E, 22°49'~23°19'N之间),新街镇全福庄小寨流域,位于元阳县城41 km处。经纬度:102°44'E, 23°07'N, 海拔1820 m^[11]。全村国土面积7.07 km²,其中研究区流域面积0.77 km²,属深切割中山地貌类型,平均海拔1840 m。气候属亚热带山地季风气候,年平均气温为20.5℃,最高气温37.5℃,最低气温0.6℃,年无霜日363.5 d;多年平均降水量1397.6 mm。年日照时数1820.8 h,相对湿度85%^[12]。土壤以黄棕壤为主,土壤剖面完整,土层厚度约为100 cm^[13]。森林覆盖率达50%^[14],林地植被类型为常绿阔叶林,主要乔木树种有灰木(*Symplocos pilosa*)、石砾(*Lithocarpus*

megalophyllus)、元江栲(*Castanopsis orthacantha*)、绿樟(*Meliosma squamata*)、香桂(*Cinnamomum subavenium*)、云南臀果木(*pygeum henryi*)、云南山桃花(*Gordouia chrysandra*)、尖叶桂樱(*Laurocarasus undulate*)、长果大头茶(*Gordonia longicarpa*)、板栗(*Castanea mollissima*)、油葫芦(*Pyrularia edulis*)、泡花树(*Meliosma cuneifolia*)等,主要分布在海拔1970~2020 m之间。从Google earth上截取研究区流域影像图,使用Arcview GIS软件绘制流域地理位置(图1)。

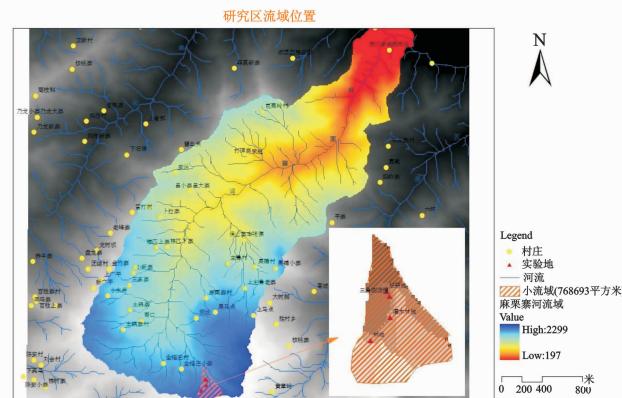


图1 流域地理位置

Fig. 1 The geographical position of Quanfu Village Basin

1.2 研究方法

1.2.1 林地标准径流小区的布设 采用“水土保持标准径流小区监测法”,在全福庄流域出口布设控制断面1处,控制小流域面积为0.77 km²,建设一座卡口站,在小流域内102°46'11.5"E, 23°05'37.4"N, 东坡,坡度21°,海拔2020 m处布设1个5 m×20 m的林地标准径流小区。在标准径流小区内选取上、中、下(同一直线上)3个部位并埋设长度为1 m的高精度土壤水分测量仪ML2X型延长套管。标准径流小区内植被类型属常绿阔叶林,主要乔木有:灰木、石砾、元江栲;灌木有:野牡丹(*Melastoma candidum*)、菝葜(*Smilax china*);草本有:金粉蕨(*Onychium cenuifrons*)、里白(*Hicriopteris yunnanensis*)等。

1.2.2 土壤水分测定 参照国家标准《水土保持试验规程》(SL 419-2007)^[15],每隔1 d,早晚各1次(8:00、18:00),使用高精度土壤水分测量仪的ML2X型探头伸入已埋设好的延长套管内,测量不同深度(10、20、30、40、60、100 cm)土壤容积含水量,并使用HH2型手持读表读数,记录测量数据。监测期从2012年5月到2013年2月。土壤的容积含

水量是土壤中水分容积与土壤容积的比例,容积含水量定义为:

$$\theta_v = (V_w/V_s) \times 100\% \quad (1)$$

式中: θ_v 为容积含水率; V_w 为土样中水的体积; V_s 为土样的总体积。

根据观测,2012年5—9月降雨集中,且雨量均在100 mm以上;2012年10月—2013年2月降雨很少,雨量均在100 mm以下。因此,以100 mm降雨量为标准将全年划分为雨季(5—9月)和旱季(10月—次年2月)。

1.3 数据处理与分析

通过野外测定和室内分析相结合,在Excel和SPSS软件中进行数据的统计分析。

2 结果与分析

2.1 干湿两季林地不同土层土壤水分变异

土壤水分的垂直分布指的是土壤水分随土层深度的变化。受降水和根系吸收的影响,林地土壤剖

面水分垂直分布不均^[16]。同一坡面上,坡位、植被类型及生长情况、土壤物理性质等的不同也会使得土壤水分分布产生差异。变异系数反映了不同深度土壤含水量的变化程度,变异系数越大,土壤含水量变化越剧烈,反之亦然^[17]。

使用描述性统计方法对干湿两季不同土层土壤水分进行分析(表1)。结果表明,旱季土壤含水率随土层深度的增加呈递增趋势,其中10 cm土层土壤含水率为8.78%,100 cm土层土壤含水率为23.94%;雨季土壤含水率除40 cm土层<30 cm土层外,其他各层均随土层深度的增加而递增,10 cm土层土壤含水率为10.79%,30 cm土层土壤含水率为19.11%,40 cm土层土壤含水率为17.59%,100 cm土层土壤含水率为25.21%。说明不同土层土壤含水率均表现出雨季大于旱季;两季变异系数均随土层深度的增加而呈现出递减的趋势,深度越深,变异系数越小,且在同一土层表现为雨季大于旱季;表层土壤水分变化较深层剧烈。

表1 不同土层干湿两季土壤水分变化情况

Table 1 Changes of soil moisture of different soil layers between wet and dry seasons

| 土层深度/cm | 季节 | 样本数 | 均值/% | 标准差 | 变异系数/% | 极小值 | 极大值 | 95%置信区间/% | 偏度 | 峰度 |
|---------|----|-----|-------|------|--------|-------|-------|-------------|-------|-------|
| 10 | W | 85 | 10.79 | 7.01 | 64.97 | 1.20 | 25.2 | 9.28~12.30 | 0.76 | -0.54 |
| | D | 85 | 8.78 | 2.60 | 29.62 | 4.10 | 14.9 | 8.22~9.34 | 0.30 | -0.63 |
| 20 | W | 85 | 15.01 | 6.34 | 42.24 | 5.83 | 33.17 | 13.64~16.37 | 0.86 | 0.00 |
| | D | 85 | 11.52 | 2.40 | 20.83 | 6.37 | 17.33 | 11.01~12.04 | 0.14 | -0.61 |
| 30 | W | 85 | 19.11 | 3.89 | 20.36 | 9.00 | 27.70 | 18.27~19.95 | -0.74 | 0.38 |
| | D | 85 | 16.99 | 1.99 | 11.71 | 13.77 | 26.43 | 16.56~17.42 | 2.10 | 7.49 |
| 40 | W | 85 | 17.59 | 2.57 | 14.61 | 9.57 | 24.90 | 17.03~18.14 | -0.76 | 1.77 |
| | D | 85 | 17.23 | 1.92 | 11.14 | 14.63 | 28.17 | 16.82~17.65 | 3.04 | 13.47 |
| 60 | W | 85 | 20.07 | 2.72 | 13.55 | 16.60 | 28.70 | 19.49~20.67 | 1.02 | 0.40 |
| | D | 85 | 19.89 | 1.89 | 9.50 | 15.47 | 25.50 | 19.49~20.30 | 0.37 | 0.07 |
| 100 | W | 85 | 25.21 | 2.87 | 11.38 | 18.63 | 31.93 | 24.59~25.83 | 0.29 | -0.10 |
| | D | 85 | 23.94 | 1.63 | 6.81 | 20.03 | 31.23 | 23.59~24.30 | 1.74 | 6.01 |

注:W:雨季,D:旱季。表2、表4同。

2.2 干湿两季林地不同坡位土壤水分变异

在SPSS软件里对林地标准径流小区上、中、下3个坡位的土壤含水率进行描述性统计分析(表2)。坡中位置干湿两季土壤含水率明显大于坡上和坡下位置,主要是由于雨季降雨量较多,坡中位置乔木分布密集、枯落物层较厚,有效的保水截留使得坡中含水率较高。此外,由于微地形、土壤质地、土壤含水率、植被及降雨强度的影响,坡面各处径流量差异较大,从而土壤含水率在同一坡面也存在差异^[18]。从表2看出,变异系数由大到小依次是雨季坡下>旱季坡下>雨季坡上>雨季坡中>旱季坡上>旱季坡中,坡下位置乔木和灌木分布较为稀疏,植被覆盖主要为草本,雨季降雨强度大,该位置不能有效地截留和分配降雨,土壤保水性较低。因此,土壤含水率变

异系数较大,而坡中位置植被覆盖度大,降雨和光照造成的影响较小,土壤含水率变化较小。

2.3 干湿两季土层深度和坡位对土壤含水率的影响

利用SPSS17.0进行双因素方差分析得出:1)不同土层深度干湿两季土壤含水率对应的F统计量为145.614,显著性概率Sig=0.000<0.05,这表明季节与土层深度的交互作用对土壤含水率的影响较大。季节因素对应的F统计量为18.680,土层深度对应的F统计量为300.030,二者对应的显著性概率均为Sig=0.000<0.05,表明季节和土层深度对土壤含水率均有较大的影响。2)不同坡位干湿两季土壤含水率对应的F统计量为167.922,显著性概率Sig=0.000<0.05,这表明季节与坡位的交互作用对土壤含水率的影响较大。季节因素对应的F

统计量为36.804,坡位对应的F统计量为343.360,二者对应的显著性概率均为Sig=0.000<0.05,表明季节和坡位对土壤含水率都有较大的影响。综上

得出,不同土层干湿两季的土壤含水率以及不同坡位干湿两季的土壤含水率均有显著的差异。

表2 不同坡位干湿两季土壤水分变化情况

Table 2 Changes of soil moisture of different slope positions between wet and dry seasons

| 坡位 | 季节 | 样本数 | 均值/% | 标准差 | 变异系数/% | 极小值 | 极大值 | 95%置信区间/% | 偏度 | 峰度 |
|----|----|-----|-------|------|--------|-------|-------|-------------|-------|-------|
| 坡上 | W | 85 | 17.94 | 2.83 | 15.77 | 10.48 | 22.77 | 17.32~18.55 | -0.56 | -0.17 |
| | D | 85 | 19.23 | 1.37 | 7.12 | 14.67 | 22.03 | 18.93~19.53 | -0.66 | 0.88 |
| 坡中 | W | 85 | 21.42 | 1.88 | 8.78 | 16.58 | 26.10 | 21.01~21.82 | 0.01 | 0.05 |
| | D | 85 | 20.65 | 1.42 | 6.88 | 17.44 | 24.76 | 20.34~20.96 | 0.37 | -0.05 |
| 坡下 | W | 85 | 16.02 | 4.49 | 28.02 | 10.42 | 27.58 | 15.05~16.99 | 0.99 | -0.13 |
| | D | 85 | 11.21 | 2.61 | 23.28 | 8.02 | 26.82 | 10.64~11.77 | 3.24 | 16.34 |

2.4 土壤水分时间变异

土壤水分的时间分布包括年际分布和季节分布。受降水、植被生长、上一年土壤水分存储等环境因子的影响,土壤水分年内变化规律相对比较复杂。降雨是土壤水分的主要来源,前期降雨量多少与土壤水分蒸腾作用共同影响着土壤含水率的变化^[19]。

由表3可以看出,不同层次土壤含水率的变化并不相同,20~60 cm土层土壤含水率周期性变幅不大;表层(0~20 cm)土壤水分与降水变化基本一

致,土壤含水率在雨季小于降雨量,而在旱季则大于降雨量;深层(60~100 cm)土壤水分时序变幅不大,这是由于深层土壤受降雨和蒸腾作用的影响较小,其中在10月份出现1个峰值,由于降水格局直接影响降水向土壤水分的有效转换,10月份雨季刚结束,旱季伊始,前期降雨量的积累使得该月土壤水分偏高,由此得出,土壤含水量在季节上的高度变异与植被类型、降水格局和前期土壤水分的交互作用密切相关^[20]。

表3 土壤水分时间序列变化

Table 3 Changes of the time sequence of soil moisture

| 土层/cm | 月份 | | | | | | | | | |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 |
| 0~20 | 6.17 | 9.61 | 15.29 | 11.36 | 17.85 | 11.05 | 10.73 | 8.78 | 11.60 | 9.27 |
| 20~60 | 15.33 | 18.68 | 20.07 | 18.33 | 17.97 | 18.28 | 17.87 | 17.09 | 17.45 | 17.48 |
| 60~100 | 26.34 | 25.91 | 25.63 | 24.85 | 27.10 | 31.00 | 23.49 | 22.64 | 23.06 | 23.21 |
| CV | 63.34 | 45.21 | 25.45 | 37.11 | 25.27 | 50.24 | 36.84 | 43.13 | 33.00 | 42.10 |
| 降雨量/mm | 256 | 318 | 364 | 164 | 181 | 94 | 74 | 41 | 37 | 53 |

2.5 干湿两季不同土层土壤蓄水量

土壤蓄水量指在自然状态下土壤中储蓄的水量,由土壤持水能力决定,其大小由土层厚度和土壤体积含水量确定,可按下式计算:

$$W = hg\theta_v \times 100\% \quad (2)$$

式中:W—土壤储水量(mm);h—土层深度(cm); θ_v —土壤体积含水量(%).

土壤的持水孔隙对土壤蓄水量影响最大。通常

林地土壤孔隙度较大,持水能力强,土壤的持水潜力亦较大。林地土壤蓄水量(表4)均表现为雨季大于旱季,且随着土层深度的增加呈递增的趋势,差值也逐级递增。0~10 cm土层土壤蓄水量雨季为9.32 mm、旱季为9.24 mm;0~100 cm土层土壤蓄水量雨季为249.30 mm、旱季为232.60 mm,这说明雨季林冠截留和枯枝落叶层的保水作用使得雨季林地土壤蓄水量略多于旱季。

表4 干湿两季不同土层土壤蓄水量

Table 4 Soil water storage capacity of different soil layers between wet and dry season

| 季节 | 土层深度/cm | | | | | | |
|----|---------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| | 0~10 | 10~20 | 20~30 | 30~40 | 40~60 | 60~100 | 0~100 |
| W | 9.32 | 14.26 | 18.78 | 17.57 | 41.33 | 99.72 | 249.30 |
| D | 9.24 | 11.14 | 16.91 | 16.72 | 38.21 | 93.04 | 232.60 |
| 差值 | 0.08 | 3.12 | 1.87 | 0.85 | 3.12 | 6.68 | 16.7 |

3 结论

1) 林地土壤水分垂直分布规律显著,随着土层深度的增加土壤含水率干湿两季均呈现出递增的趋势;雨季各土层土壤含水率均大于旱季;两季节变异系数均随土层深度的增加而递减,且在同一土层雨季大于旱季;表层土壤水分变化最为剧烈。

2) 土壤含水率在同一坡面存在差异,坡中位置干湿两季土壤含水率明显大于坡上和坡下位置;变异系数由大到小依次为雨季坡下>旱季坡下>雨季坡上>雨季坡中>旱季坡上>旱季坡中。坡中位置植被分布密集,降雨和光照造成的影响较小,土壤含水率变化最小。

3) 季节、土层深度、坡位等因素均对土壤含水率有较大的影响。不同土层、不同坡位干湿两季对应的土壤含水率存在显著性差异。

4) 林地土壤水分的平均值呈现出明显的时间变异规律。不同层次土壤含水率变化不同,表层土壤水分与降水变化基本一致;深层土壤受降雨和蒸腾作用的影响较小,土壤水分时序变幅不大。

5) 林地各土层土壤蓄水量均表现为雨季大于旱季,且随着土层深度的增加呈递增的趋势。

4 讨论

元阳梯田水源区森林对于维持区域小气候、涵养水源和水土保持等具有十分重要的意义。关于元阳梯田水源区森林生态系统水文过程的研究才刚刚起步,主要在森林水文功能、枯落物水文效应、土壤抗冲性、抗蚀性、梯田空间分布等方面进行了初步研究。对梯田水源区林地土壤水分时空分布的研究,为进一步揭示土壤水垂直运移的内在机制奠定了基础。今后可采用先进的氢氧同位素技术在土壤水补给量和滞留时间、土壤水垂直运移特征、森林优势树种的水分利用特征等方面进行相关研究,为哈尼梯田的可持续发展提供更多的理论支撑。

参考文献:

- [1] 雷志栋,胡和平,杨诗秀. 土壤水研究进展与评述[J]. 水科学进展,1999, 10(3): 311-318.
- [2] 高峰,李建平,王黎黎,等. 土壤水运动理论研究综述[J]. 湖北农业科学,2009, 48(4): 982-986.
GAO F, LI J P, WANG L L, et al. Review on theoretic research of soil water movement[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2009, 48(4): 982-986. (in Chinese)
- [3] 吴钦孝. 森林保持水土机理及功能调控技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 125.
- [4] 陈洪松,邵明安. 黄土区坡地土壤水分运动与转化机理研究进展[J]. 水科学研究,2003, 14(4): 513-520.
- [5] 邵明安,黄明斌. 土-根系统水动力学[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2000.
- [6] 王金叶,于彭涛,王彦辉,等. 森林生态水文过程研究[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 90.
- [7] 角媛梅,程国栋,肖笃宁. 哈尼梯田文化景观及其保护研究[J]. 地理研究, 2002, 2(16): 733-740.
JIAO Y M, CHENG G D, XIAO D N. A study on the cultural landscape of Han's terrace and its protection[J]. Geographical Research, 2002, 2(16): 733-740. (in Chinese)
- [8] 李阳芳,宋维峰,何俊,等. 元阳梯田核心区不同土地利用类型土壤水文效应研究[J]. 水土保持研究, 2012, 12(6): 54-57.
LI Y F, SONG W F, HE J, et al. A study on the hydrological effect on different land use types of terraced core area in YuanYang[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 12(6): 54-57. (in Chinese)
- [9] 李海防,王金叶,刘兴伟,等. 广西猫儿山主要林型水源涵养功能研究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(1): 50-53.
LI H F, WANG J Y, LIU X W, et al. Evaluation on water conservation function of typical forest ecosystems in Maoer Mountain[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(1): 50-53. (in Chinese)
- [10] 陈文文. 森林—哈尼梯田的水塔[J]. 科学与文化, 2010, (10): 7.
- [11] 罗德胤,孙娜,霍晓卫. 一个哈尼族村寨的建成史:以云南省元阳县全福庄中寨的形成和发展为例[J]. 住区, 2011, 43(3): 70-77.
- [12] 和弦,宋维峰,彭永刚,等. 元阳梯田全福庄流域水源涵养林的植物多样性分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(5): 1-6.
HE X, SONG W F, PENG Y G, et al. Analysis on plant diversity of water-holding forest in quanfu village basin of Yuanyang terrace[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(5): 1-6. (in Chinese)
- [13] 段兴凤,宋维峰,李健,等. 云南省元阳梯田水源区森林土壤入渗特性研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(4): 47-52.
DUAN X F, SONG W F, LI J, et al. Soil infiltration characteristics in water conservation forest of terrace in Yuanyang County of Yunnan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(4): 47-52. (in Chinese)
- [14] 李阳芳,宋维峰,彭永刚,等. 元阳梯田不同土地利用类型表层土壤的抗冲性[J]. 中国水土保持, 2012, 10(5): 31-35.
LI Y F, SONG W F, PENG Y G, et al. Anti-scorrability of surface soil of different land use types in area of Yuanyang terrace[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(5): 31-35. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国水利部. 水土保持试验规程(SL 419-2007)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.

(下转第 60 页)