

喀斯特断陷盆地不同植被恢复模式 土壤水分动态变化

孙永磊^{1,2}, 周金星^{1,2}, 庞丹波^{1,2}, 刘玉国^{3*}, 肖桂英⁴, 张清⁴

(1. 北京林业大学水土保持学院, 云南建水荒漠生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083;
2. 北京林业大学水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083; 3. 中国林业科学研究院
荒漠化研究所, 北京 100091; 4. 云南省建水县林业技术推广所, 云南建水 654300)

摘要: [目的]以喀斯特断陷盆地小流域中典型植被恢复模式,即桉树(*Eucalyptus maideni*)林、冲天柏(*Cupressus duclouxiana*)林、马尾松(*Pinus massoniana*)林以及天然次生灌丛、高盖度车桑子(*Dodonaea viscosa*)灌丛和低盖度车桑子灌丛为研究对象,探究断陷盆地不同植被恢复模式土壤水分时空变异规律,为该地区植被生态恢复工作提供参考。[方法]利用自动气象观测系统和土壤水分传感器同步监测2016年5月—2017年4月期间小流域降雨量与各林地土壤水分,采用变异系数与克里金插值分析方法,对6种植被恢复模式林地的土壤水分时空异质性以及持续干旱条件下土壤水分衰减特征进行研究。[结果]表明:(1)同一植被类型不同土层雨季和旱季土壤体含水量垂直变化趋势相同,且雨季土壤水分含量显著高于旱季($P < 0.05$),均为中等变异(C_v :12.88%~28.66%)。(2)同一乔木林雨季和旱季的土壤活跃层与次活跃层垂直分布不同,但同一灌丛雨季和旱季分布相同。(3)6种植被恢复模式土壤体含水量均在降雨量较充足的8—9月达到最大值,其变化范围介于26.25%~44.08%之间,在降雨量明显不足的3—4月达到最小值,土壤体含水量介于9.48%~17.47%之间。(4)3种乔木林0~30 cm土层、3种灌丛0~10 cm土层充分降雨后约10 d土壤水分恢复为降雨前1 d水平,低盖度和高盖度车桑子灌丛10~30 cm土层土壤水分降雨后15 d恢复为降雨前1 d水平,并且接近植物萎蔫系数。[结论]不同植被恢复模式间雨季、旱季和月均土壤体含水量均表现为桉树林>天然次生灌丛>冲天柏林>马尾松林>高盖度车桑子灌丛>低盖度车桑子灌丛。喀斯特断陷盆地季节性干旱和临时性干旱问题严峻,乔木林和灌丛经充足降雨,达到田间持水量后,在连续放晴天气下林地土壤水分可供植物10~15 d的消耗。

关键词: 断陷盆地; 土壤水分; 时空变异; 变异系数; 水分衰减特征

中图分类号: S714.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2018)04-0104-09

Soil Moisture Dynamic Change of Different Vegetation Restoration Patterns in Karst Faulted Basins

SUN Yong-lei^{1,2}, ZHOU Jin-xing^{1,2}, PANG Dan-bo^{1,2}, LIU Yu-guo³, XIAO Gui-ying⁴, ZHANG Qing⁴

(1. Jianshui Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

3. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

4. Forest Technology Extension Institute of Jianshui County, Jianshui 654300, Yunnan, China)

Abstract: [Objective] This study selected the *Eucalyptus maideni* woodland, *Cupressus duclouxiana* woodland, *Pinus massoniana* woodland and the natural secondary shrubs, low coverage *Dodonaea viscosa* and high coverage *D.*

收稿日期: 2018-01-25

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0502500, 2016YFC0502504); 国家自然科学基金(31500583); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金(CAFYBB2014ZD006, CAFYBB2016QB020)。

作者简介: 孙永磊(1992—),男,硕士研究生,主要从事石漠化区植被恢复研究。E-mail: 1024217602@qq.com

* 通讯作者: 刘玉国(1986—),男,助理研究员,主要从事石漠化治理方面研究。E-mail: liuyuguo@caf.ac.cn

viscosa shrubs to investigate the spatiotemporal variability of soil moisture at different vegetation restoration patterns in karst faulted basins small watershed and to provide reference for vegetation restoration in this area. [Method] The rainfall and soil moisture were measured from May 2016 to April 2017 by using automatic weather observation system and soil moisture sensor. The temporal and spatial heterogeneity of soil moisture and the characteristics of soil water attenuation under drought conditions were studied by using the coefficient of variation and Kriging interpolation analysis method. [Result] (1) In different soil layers of the same vegetation type, the vertical variations of soil volume water content during the rainy and dry seasons were similar, and the soil moisture content in the rainy season was significantly higher than that in the dry season ($P < 0.05$). Each forest was moderately variant (C_v : 12.88%~28.66%). (2) In rainy and dry seasons, the distribution of active layer and sub-active layer in the same woodland was different, but the distribution was same in different soil depth of the same shrub. (3) The soil volume water content of the six kinds of woodland reached the maximum value in August to September with a sufficient rainfall, ranging from 26.25%~44.08%. In the case of obviously insufficient rainfall, March to April reached the minimum value, ranging between 9.48%~17.47%. (4) The soil volume water content of 0~30 cm soil layer of three kind woodlands and 0~10 cm soil layer of three shrub species decreased to 1 day before rainfall for about 10 days. The 10~30 cm soil layer of low coverage and high coverage *D. viscosa* samples returned to the level of 1 day before rainfall for about 15 days and close to the plant wilting coefficient. [Conclusion] The soil volume water content of different vegetation restoration patterns in rainy season, dry season and average monthly shows that the *E. maideni* woodland > natural secondary shrubs > *C. duclouxiana* woodland > *P. massoniana* woodland > high coverage *D. viscosa* shrubs > low coverage *D. viscosa* shrubs. The seasonal drought and temporary drought in karst faulted basins are serious, after sufficient rainfall and reached the field capacity, the soil moisture of forest land and shrub in karst faulted basins is available to plants for 10~15 days.

Keywords: faulted basins; soil moisture; temporal and spatial variation; coefficient of variation; water attenuation characteristics

喀斯特地区长时间强烈的岩溶作用造成了水土资源不协调的地表、地下双层空间结构,导致地表水易流失、地下水深埋,土层浅薄、土壤持水性能差,致使该区域生态系统十分脆弱,石漠化问题突出,植被恢复困难^[1-2]。断陷盆地作为喀斯特石漠化综合治理的重要类型区,主要分布在滇东-攀西,受西南印度洋季风影响,该区季节性干旱严重,有明显的雨季和旱季,即使在降水较多的雨季,由于土层浅薄、土壤持水性能差等原因,也只能在每次降雨后维持短时间的充足水分状态,水资源矛盾极为突出^[3]。目前,关于喀斯特区土壤水分动态变化的研究主要集中在岩溶高原、峰丛洼地等区域。如李菲^[4]研究了贵州普定生态示范区不同植被类型土壤水分的变化特征,发现原生林与灌丛地的土壤含水量高于次生林地与荒草地,而土壤密度变化与之相反。张川等^[5]通过比较桂西北喀斯特地区典型灌丛与草灌坡地旱季表层土壤水分含量空间变异特征,发现灌丛坡地的土壤水分含量与变异系数明显高于草灌坡地,两种坡地土壤水分与降雨量波动变化趋势相同。

颜蒙蒙等^[6]分析了贵阳市花溪区2013年和2015年土壤水分的动态变化规律,认为土壤水分呈季节性动态变化,土壤剖面水分的垂直变化具有明显层次性。

特殊的地质结构和水文地质条件,导致喀斯特断陷盆地降雨、蒸发、水分分配等均与岩溶高原、峰丛洼地等其它喀斯特类型区存在显著差异^[7-8]。目前,对该区不同植被恢复模式土壤水分时空变化规律的研究鲜有报道。本研究通过对喀斯特断陷盆地6种植被恢复模式不同土层深度土壤体积含水量进行全年连续监测,研究林地土壤水分时空变异规律,分析降雨前后各林地土壤水分变化及持续干旱条件下土壤水分衰减特征,以期为该地区植被恢复与石漠化治理工作提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 研究区概况

研究区位于西南喀斯特断陷盆地区云南省建水县九标小流域范围内(地理坐标 102°54'00"~102°

54'55" E, 23°36'50"~23°37'30" N), 该流域为东西走向, 主沟道长约 1.32 km, 流域面积约为 1.12 km² (图 1), 小流域内地貌为典型的岩溶断陷盆地地貌。海拔高度 1 350~1 700 m, 处于低纬度地区, 属南亚热带季风气候。受西南印度洋季风影响, 形成明显干湿季节, 季节性干旱严重, 旱季(11 月—次年 4 月)空气干燥, 降雨稀少。雨季(5—10 月)湿度大, 降雨较多。该地区年均气温 19.8℃, 年均地温 20.8℃, 年均相对湿度 72%, 年均日照时数 2 322 h, 年均降水量 805 mm, 全年无霜期 307 d。

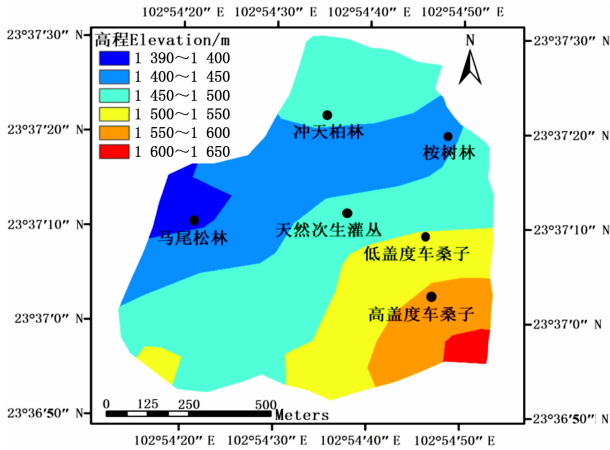


图 1 九标小流域 6 种植被恢复模式空间分布

Fig. 1 Spatial distribution map of six vegetation restoration patterns in Jiubiao small watershed

选取小流域中 6 种植被恢复模式作为研究对象, 除天然次生灌丛为 1970 年开始自然恢复植被外, 其余 5 种皆为 1985 年人工造林恢复植被, 恢复时间均已 30 年以上, 土壤结构稳定且受干扰较少。

其中 3 种为乔木林, 即桉树林(直杆蓝桉(*Eucalyptus*

maideni F. V. Muell.)), 冲天柏(*Cupressus duclouxiana* Hickel) 林和马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.) 林, 林地土层深厚, 分别设置 40 m×40 m 的标准样地。桉树林具有乔-灌-草层次结构, 乔木均高 14.20 m, 灌木均高 1.22 m, 草本均高 0.30 m, 主要植被有直杆蓝桉、车桑子(*Dodonaea viscosa* L.) 和紫茎泽兰(*Eupatorium adenophora* Spreng.) 等。冲天柏林地岩石裸露率 25%, 具有乔-灌-草层次结构, 乔木均高 11.78 m, 灌木均高 0.84 m, 草本均高 0.21 m, 主要植被有冲天柏、小石积(*Osteomeles anthyllidifolia* Lindl.) 和铁仔(*Myrsine africana* Linn.) 等。马尾松林具有乔-灌-草层次结构, 乔木均高 13.42 m, 灌木均高 0.45 m, 草本均高 0.18 m, 主要植被有马尾松和刺芒野古草(*Arundinella setosa* Trin.) 等。另外 3 种为灌丛(天然次生灌丛、低盖度车桑子灌丛和高盖度车桑子灌丛), 土层较薄, 仅 30 cm 左右, 分别设置 20 m×20 m 的标准样地。天然次生灌丛具有灌-草层次结构, 灌木均高 2.71 m, 草本均高 0.22 m, 主要植物有假虎刺(*Carissa spinarum* L.)、薄叶鼠李(*Rhamnus leptophylla* Schneid.)、铁仔(*Myrsine africana* Linn.) 和石山羊蹄甲(*Bauhinia comosa* Craib) 等。低盖度车桑子灌丛岩石裸露率 70%, 具有灌-草层次结构, 灌木均高 2.20 m, 草本均高 0.20 m, 主要植被有车桑子(*Dodonaea viscosa* L.) 和硬秆子草(*Sclerochloa dura* Steud.) 等。高盖度车桑子灌丛岩石裸露率 60%, 具有灌-草层次结构, 灌木均高 2.34 m, 草本均高 0.27 m, 主要植被有车桑子(*Dodonaea viscosa* L.) 和荇草(*Arthraxon hispidus* Thunb.) 等。样地其他信息如表 1 所示。

表 1 6 种植被恢复模式基本概况

Table 1 Basic profiles of six vegetation restoration patterns

样地 Plot	地理坐标 Geographical coordinates	坡度 Slope/ (°)	坡向 Aspect	海拔 Elevation/ m	造林时间 Afforestation time	树高 Height /m	植被盖度 Vegetation cover/%	植株密度 Plant density/ (tree·hm ⁻²)	冠幅 Crown diameter/ (m×m)
桉树林 <i>Eucalyptus maideni</i>	102°54'47" E 23°37'19" N	2	北偏东 North east	1 424	1985	14.20	50	1 388	2.06×1.96
冲天柏林 <i>Cupressus duclouxiana</i>	102°54'34" E 23°37'23" N	5	北 North	1 466	1985	11.78	35	2 731	1.60×1.54
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i>	102°54'23" E 23°37'11" N	5	西 West	1 398	1985	13.42	65	2 128	2.63×2.66
天然次生灌丛 Secondary shrubs	102°54'38" E 23°37'12" N	22	北偏东 North east	1 475	1970	2.71	90	4 550	1.86×1.81
低盖度车桑子灌丛 low-coverage <i>Dodonaea viscosa</i>	102°54'46" E 23°37'08" N	15	西 West	1 509	1985	2.20	45	1 575	1.48×1.44
高盖度车桑子灌丛 high-coverage <i>Dodonaea viscosa</i>	102°54'47" E 23°37'03" N	12	西偏南 South west	1 573	1985	2.34	60	1 850	1.53×1.55

1.2 研究方法

1.2.1 土壤含水量的测定 采用土壤水分传感器 CS616(Campbell Scientific Inc., USA) 记录土壤水分数据。3种乔木林地分4层剖面(0~10, 10~30, 30~50, 50~70 cm)对土壤体积含水量进行实时监测。3种灌丛林地分3层剖面(0~10, 10~20, 20~30 cm)对土壤体积含水量进行实时监测。测定前对CS616测定的数据进行了相应校准,仪器测定结果可代表研究区土壤水分变化情况。采用CR800(Campbell Scientific Inc., USA)进行数据采

集,采集频率设置为10 min,日记录数据的平均值作为本研究的分析数据,数据记录为期1年(2016年5月—2017年4月)。

1.2.2 降雨量及蒸散发测定 采用自动气象观测系统(WatchDog 2900ET, Spectrum Technologies Inc., USA)同步测定降雨量与蒸散发(ET_0),2016年5月—2017年4月期间降雨总量为876.3 mm,蒸散发全年为1 397.88 mm,降雨量及蒸散发分布情况见图2。

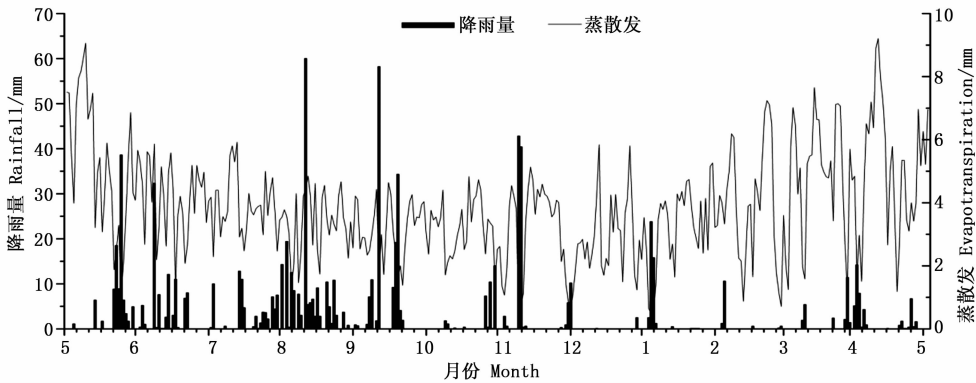


图2 九标小流域降雨及蒸散发分布情况(2016年5月—2017年4月)

Fig.2 Distribution of precipitation and evapotranspiration in Jiubiao small watershed (May 2016 -April 2017)

1.3 数据处理

变异系数 c_v 表征随机变量的离散程度,其定义为:

$$c_v = \frac{s}{\bar{x}} \times 100\%$$

式中: s 为标准差, \bar{x} 为土层样本均值。 $c_v \leq 10\%$ 属于弱变异, $10\% \leq c_v \leq 100\%$ 属于中等变异, $c_v \geq 100\%$ 属于强变异^[9]。本文中的变异系数为土壤水分在统计周期内的波动情况。

所有数据统计在Excel 2016中进行,采用普通克里金插值方法生成土壤水分随时间消退过程的空间分布图,数据分析与作图在R 3.3.3 for Windows和Golden Software Surfer 8.0软件中进行。

2 结果与分析

2.1 不同植被恢复模式土壤水分季节变化

根据研究区的气候特点,分两个时间段来研究不同植被恢复模式土壤水分垂直变化特征:雨季(2016年5月—2016年10月),该时段降雨量为729.7 mm,占全年降雨量的83.27%,旱季(2016年11月—2017年4月),该时段降雨量为146.6 mm,

占全年降雨量的16.73%。综合分析不同植被恢复模式在雨季和旱季各土层间土壤水分含量(表2和表3),结果表明:同一植被类型不同土层深度雨季和旱季土壤体积含水量垂直变化趋势相同,且雨季土壤水分含量显著高于旱季($P < 0.05$)。随土层深度的增加,雨季和旱季土壤体积分含水量的差值有减小的趋势,以桉树林和高盖度车桑子灌丛为例,桉树林0~10、10~30、30~50和50~70 cm土层深度对应的差值分别为:7.09%、6.90%、3.39%和1.31%。高盖度车桑子灌丛0~10、10~20和20~30 cm土层深度对应的差值分别为:9.09%、4.64%和2.15%。不同植被恢复模式土壤体积含水量变化趋势各异,其中3种乔木林地雨季和旱季在0~70 cm剖面范围内的垂直分布规律为:桉树林土壤体积含水量随土层深度的增加而减小,冲天柏林和马尾松林则表现出波动变化,冲天柏林土壤水分先增大后减小,马尾松林则先减小后增大再减小。3种灌丛雨季和旱季在0~30 cm剖面范围内的垂直分布规律为:天然次生灌丛土壤体积含水量先增大后减小,低盖度和高盖度车桑子灌丛土壤体积含水量随土层深度的增加而减小。3种乔木林(0~70

cm 土层)和3种灌丛(0~30 cm 土层)在雨季和旱季的平均土壤体积含水量均表现为桉树林>天然次生灌丛>冲天柏林>马尾松林>高盖度车桑子灌丛

>低盖度车桑子灌丛。另外,从表2和表3得出,无论雨季还是旱季,6种植被恢复模式各土层土壤水分均为中等变异(C_v :12.88%~28.66%)。

表2 3种林地土壤水分含量及变异系数

Table 2 Soil moisture content and variation coefficient of three forest land

土层深度 Soil depth/cm		0~10		10~30		30~50		50~70	
		土壤水分	变异系数	土壤水分	变异系数	土壤水分	变异系数	土壤水分	变异系数
		Soil moisture/%	Variation coefficient/%	Soil moisture/%	Variation coefficient/%	Soil moisture/%	Variation coefficient/%	Soil moisture/%	Variation coefficient/%
桉树林 <i>Eucalyptus maideni</i>	雨季 Rainy season	37.26 ± 7.91	21.23	34.71 ± 7.92	22.82	26.30 ± 4.65	17.68	20.20 ± 3.70	18.32
	旱季 Dry season	30.17 ± 6.54	21.67	27.81 ± 5.81	20.89	22.91 ± 5.19	22.65	18.89 ± 3.90	20.65
冲天柏林 <i>Cupressus duclouxiana</i>	雨季 Rainy season	28.99 ± 6.27	21.63	32.55 ± 6.30	19.35	24.98 ± 4.08	16.33	21.16 ± 4.25	20.09
	旱季 Dry season	21.50 ± 4.83	22.47	24.28 ± 5.72	23.56	20.40 ± 5.37	26.32	19.75 ± 5.28	26.73
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i>	雨季 Rainy season	25.86 ± 4.55	17.59	21.75 ± 3.26	14.99	22.98 ± 3.91	17.01	19.50 ± 4.87	24.97
	旱季 Dry season	20.02 ± 4.28	21.38	18.22 ± 2.44	13.39	18.93 ± 3.33	17.59	16.33 ± 2.57	15.74

注:表中数据形式为均值±标准差,下同。

Note: The data form in the table is the mean ± standard deviation. The same below.

一般采用变异系数(C_v)和标准差(S)将剖面土壤水分垂直变化划分为4层:速变层($C_v \geq 30\%$ 且 $S \geq 4\%$)、活跃层($C_v:20\% \sim 30\%$ 且 $S:3\% \sim 4\%$)、次活跃层($C_v:10\% \sim 20\%$ 且 $S:2\% \sim 3\%$)和相对稳定层($C_v \leq 10\%$ 且 $S \leq 2\%$)^[10]。但在实际应用过程中,标准差和变异系数很难同时满足以上要求,此时可依据变异系数来划分土壤水分的垂直变化层次^[11]。综合分析表2、表3得出:雨季桉树林0~30 cm 土层为活跃层,30~70 cm 土层为次活跃层,冲

天柏林0~10 cm、50~70 cm 土层为活跃层,10~50 cm 土层为次活跃层,马尾松林0~50 cm 土层为次活跃层,50~70 cm 土层为活跃层。旱季表现为:桉树林和冲天柏林0~70 cm 土层均为活跃层,马尾松林0~10 cm 土层为活跃层,10~70 cm 土层为次活跃层。在雨季和旱季时段内,天然次生灌丛和高盖度车桑子灌丛0~10 cm 土层均为活跃层,10~30 cm 土层均为次活跃层。低盖度车桑子灌丛0~30 cm 土层均为活跃层。

表3 3种灌丛土壤水分含量及变异系数

Table 3 Soil moisture content and variation coefficient of three shrubs

土层深度 Soil depth/cm		0~10		10~20		20~30	
		土壤水分	变异系数	土壤水分	变异系数	土壤水分	变异系数
		Soil moisture /%	Variation coefficient/%	Soil moisture /%	Variation coefficient/%	Soil moisture /%	Variation coefficient/%
天然次生灌丛 Secondary shrubs	雨季 Rainy season	25.05 ± 5.22	20.84	30.70 ± 4.63	15.08	25.87 ± 4.39	16.97
	旱季 Dry season	22.63 ± 5.67	25.06	27.64 ± 4.39	15.88	23.91 ± 5.25	19.96
低盖度车桑子 Low coverage <i>Dodonaea viscosa</i>	雨季 Rainy season	21.68 ± 5.09	23.48	21.21 ± 4.26	20.08	17.51 ± 3.63	20.73
	旱季 Dry season	18.77 ± 5.38	28.66	18.10 ± 5.32	27.85	14.58 ± 3.74	25.65
高盖度车桑子 High coverage <i>Dodonaea viscosa</i>	雨季 Rainy season	29.72 ± 7.02	23.62	23.57 ± 3.60	15.27	13.12 ± 1.69	12.88
	旱季 Dry season	20.63 ± 5.72	27.73	18.93 ± 3.23	17.06	10.97 ± 1.82	16.59

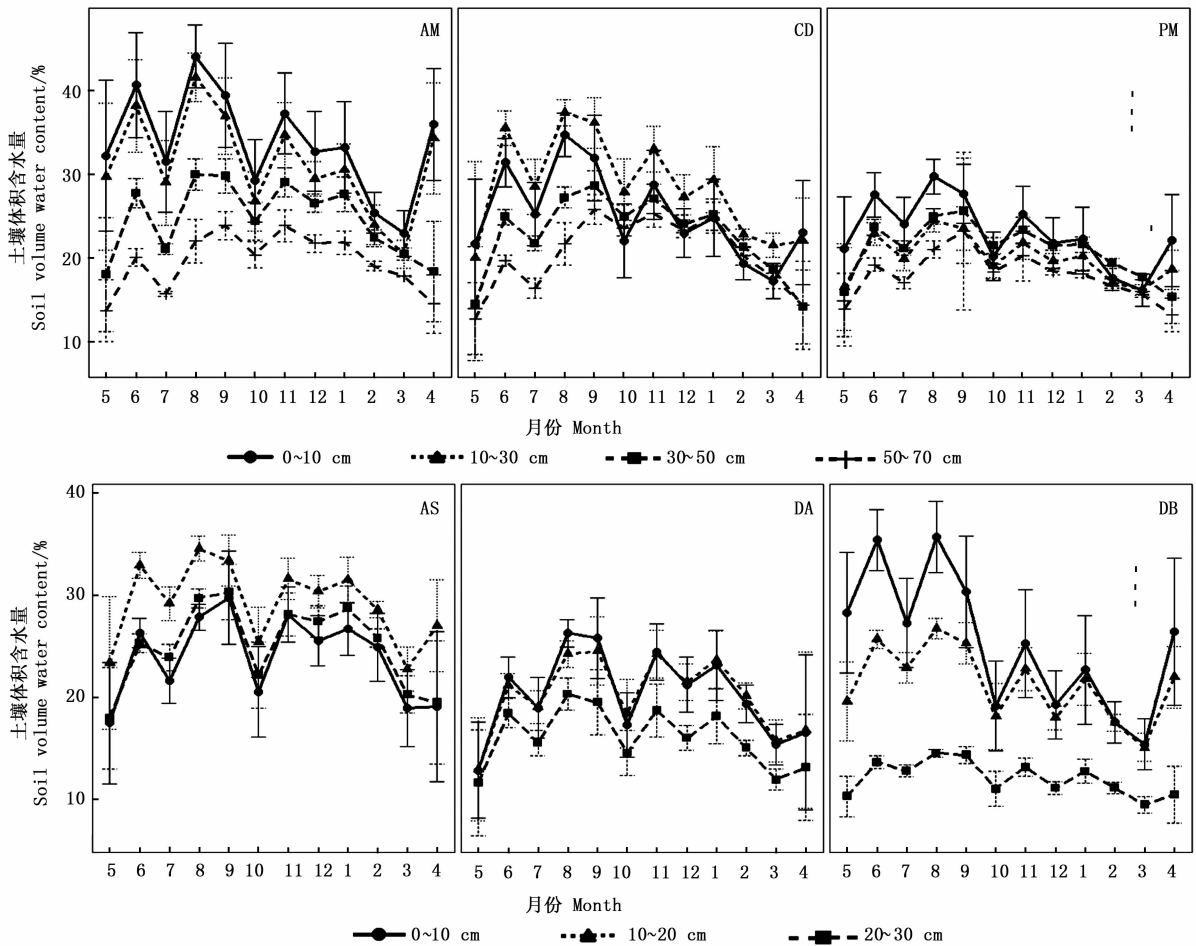
2.2 不同植被恢复模式土壤水分月份动态变化

不同植被恢复模式各土层月均土壤体积含水量如图3所示。结果表明:由于降雨的季节性分布,土壤水分波动范围较大,但这种波动随土层深度的增

加而减小,高盖度车桑子灌丛20~30 cm 土层砾石含量较多,故其全年土壤体积含水量波动范围较小。林地各土层间土壤体积含水量差异显著($P < 0.05$)。以2016年10月为分界线,6种植被类型土

壤水分含量在5—10月呈上升趋势,10月至次年4月呈下降趋势,各土层土壤体积含水量均在8—9月达到最大值,其变化范围为26.25%~44.08%,3—4月达到最小值,土壤体积含水量变化范围在9.48%~17.47%之间。3—4月各植被类型表层土壤体积含水量较高,但3种乔木林地30~70 cm土层和3种灌丛20~30 cm土层深度土壤水分含量接

近于植物萎蔫系数(13%~16.6%)^[3,12],当雨季刚来临时,少量的降雨主要补充表层土壤,这对于浅根性草本植物种子萌发尤为重要。另外,不同植被类型间月均土壤体积含水量差异显著($P < 0.05$),表现为桉树林(27.30%) > 天然次生灌丛(26%) > 冲天柏林(24.23%) > 马尾松林(20.47%) > 高盖度车桑子灌丛(19.52%) > 低盖度车桑子灌丛(18.84%)。



AM:桉树林 *Eucalyptus maideni* CD:冲天柏林 *Cupressus duclouxiana* PM:马尾松林 *Pinus massoniana*.

AS:天然次生灌丛 Secondary shrubs DA:低盖度车桑子灌丛 Low coverage *Dodonaea viscosa* DB:高盖度车桑子灌丛 High coverage *Dodonaea viscosa*

图3 6种植被恢复模式不同土层土壤水分时间动态变化

Fig.3 Soil moisture dynamic change in different soil layers of six vegetation restoration patterns

2.3 持续干旱条件下土壤水分衰减特征

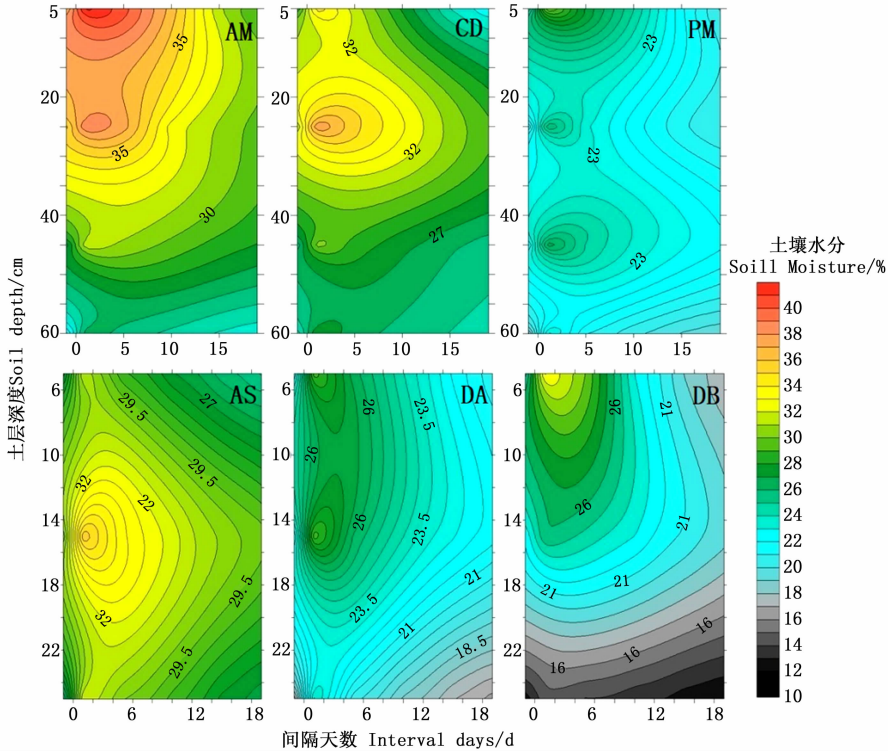
喀斯特断陷盆地具有土层浅薄、石灰岩的高渗透性以及较高的蒸散速率等特点,研究充足降雨后持续干旱条件下土壤水分的衰减规律,对于该地区植被恢复工作意义重大。此次降雨时间为2016年11月8日—9日,总降雨量83.2 mm,此次降雨前9天(10月30日—11月7日)和降雨后19天(11月

10日—11月28日)均无有效降雨。

分析图4可知,3种乔木林0~30 cm土层,3种灌丛0~10 cm土层降雨后约10天土壤体积含水量均恢复为降雨前1天水平,主要原因可能是旱季来临,部分草本植物叶片萎蔫,地表植被覆盖度有所降低,土壤表层水分蒸发强烈。3种乔木林30~70 cm土层土壤水分波动较小,土壤水分降雨后19天

均高于植物萎蔫系数,主要原因可能是此次降雨充足,另外植物在旱季耗水量较低,且土层较深,受蒸发影响较小。天然次生灌丛 10~30 cm 土层土壤水分表现为降雨后约 15 天土壤体积含水量恢复为降雨前 1 天水平,降雨后 19 天土壤体积含水量仍高于植物萎蔫系数,主要原因可能是该林地高达 90% 的植被覆盖度,生物多样性丰富,样地植株冠幅较大

(表 1),起到遮阴、保水的作用,从而使 10~30 cm 土层的内部环境较稳定,土壤保水性较强。低盖度和高盖度车桑子灌丛 10~30 cm 土层土壤体积含水量均表现为降雨后约 15 天恢复为降雨前 1 天水平,并且接近植物萎蔫系数,主要原因可能是样地植被少,覆盖度低,土层薄,受植被盖度与土壤蒸发等因素共同影响。



AM:桉树林 *Eucalyptus maideni* CD:冲天柏林 *Cupressus duclouxiana* PM:马尾松林 *Pinus massoniana*.

AS:天然次生灌丛 Secondary shrubs DA:低盖度车桑子灌丛 Low coverage *Dodonaea viscosa* DB:高盖度车桑子灌丛 High coverage *Dodonaea viscosa*

图4 次降雨后不同植被恢复模式土壤水分随时间的消退过程

Fig. 4 After secondary rainfall different vegetation restoration patterns soil moisture decreased with time

3 讨论

降雨作为研究区土壤水分的直接来源,其入渗后的再分布过程影响不同植被恢复模式土壤水分的时空动态变化。本研究发现,同一植被类型不同土层深度雨季和旱季土壤体积含水量垂直变化趋势相同,不同植被类型土壤水分的分布格局则不同,这与韩姣姣等^[13]在干热河谷区探究不同土地利用类型坡面土壤水分的时空变化规律得出的结论一致。主要原因可能是植物通过根系进行水分的吸收与利用,不同植被类型根系的分布特征决定着不同土层深度土壤水分的动态变化,导致不同植被恢复模式

土壤水分的垂直分布格局不同。本研究中无论雨季还是旱季,土壤水分均为中等变异(C_v :12.88%~28.66%)。Chen^[14]等在广西环江以天然灌丛、闲置农田和经济林地研究对象,得出土壤水分均为中等变异(C_v :17.5%~30.3%)的规律。张继光等^[15]对峰丛洼地区坡面土壤水分空间变异研究中表明,坡面表层土壤水分沿上坡向下具有减小的趋势,坡面纵向和横向土壤水分均呈现中等变异。这说明由于喀斯特区降雨时空分布不均,土层浅薄,土壤持水性差,再加上岩溶作用,导致土壤水分含量波动变化较大。另外,土壤活跃层是土壤与大气水分转化的通道,水分含量变化较为剧烈。次活跃层是降雨、植

被和土壤水分进行水分交换的缓冲区,也是植被根系主要的分布区,对植被生长所需水分提供保障^[16]。本研究表明,不同植被类型间土壤水分的垂直变化层次分布各异,同一乔木林在雨季与旱季的土壤活跃层与次活跃层垂直分布也不同,但同一灌丛的分布相同。这说明土壤水分的垂直变化层次分布与降雨量、植物根系分布和土层深度有关。桉树林0~40 cm土层的细根占总细根量的74.9%,0~60 cm土层的细根占总细根量的92.2%^[17],柏树根系的90%以上集中分布在0~50 cm土层中^[18],马尾松47.53%~71.73%的活细根集中分布在0~20 cm土层,粗根(2~10 mm)则主要分布在20~60 cm土层范围内^[19]。3种灌木林样地由于土层浅薄,土壤体积含水量极易受到降雨、蒸发及植被等因素影响,故土壤水分波动较大。本研究发现,6种植物恢复模式各土层土壤体积含水量均在8—9月达到最大值,3—4月达到最小值。结合图1降雨情况可知,2016年8月、9月有效降雨量充足(328.2 mm),入渗的水量远大于植物根系耗水,土壤水分得到有效补充;2017年3月、4月有效降雨量严重不足(69.4 mm),而植物一般3—4月份开始进入生长期,耗水量增加,前期土壤中储存的水分被大量消耗,此时又尚未完全进入到雨季,土壤水分难以得到补充,同时随着气温逐渐升高,地表蒸发量大幅增加,从而造成了该区各植被类型土壤干燥化、季节性干旱严重。

西南喀斯特区小流域土壤水分空间分布呈斑块状,含量差异明显。王家文等^[20]通过对比喀斯特区不同土地利用类型土壤水分含量,得出森林>灌丛>草地,阔叶林>针叶林,天然林>人工林的规律。张继光等^[21]对喀斯特山区典型坡面表层(0~15 cm)土壤水分与环境因子的关系研究也表明土壤平均含水率以自然植被最高,撂荒地和坡耕地次之,人工林最低。本研究中不同植被恢复模式间雨季、旱季和月均土壤体积含水量均表现为桉树林>天然次生灌丛>冲天柏林>马尾松林>高盖度车桑子灌丛>低盖度车桑子灌丛,与上述规律相符。这可能是由于植被类型不同,冠层截留、树干径流和植被蒸腾耗水等关键水文过程各异,说明植被自身的属性也是影响土壤水分变化的重要因素。

喀斯特生境中普遍存在着不同程度的水分亏缺现象,这种现象不是由于降雨量的不足,而是因为土层浅薄且不连续,碳酸盐裂隙的高度发育和岩石的

高渗透性,土壤保水性差,林地经充足降雨后只能维持短时间的水分适宜状态^[22]。李安定等^[23]对花江流域喀斯特石质山地人工林地不同小生境(土面、石槽、石沟)的土壤水分动态变化规律进行了研究,结果表明不同小生境一般经过7天就可能出现水分胁迫。朱守谦等^[24]对乌江流域岩溶石质山地土壤水分状况的监测,在连续晴天条件下未郁闭新造林地土壤能保持的田间持水量仅可供植物7~14天的蒸腾损失。而本研究发现,断陷盆地乔木林和灌丛经充足降雨,土壤达到田间持水量后,在连续晴朗天气下林地土壤水分可供植物10~15天的消耗。土壤水分作为喀斯特地区植物生长的主要限制因子^[25],是决定区域林草植被布局与配置的关键因素^[26],喀斯特断陷盆地的频繁干旱已严重加剧了土地石漠化的趋势,并对植被生态恢复重建形成了严峻挑战^[27-28]。今后在该地区植被恢复建设过程中,对季节性干旱和临时性干旱生境有较强适应性的耐旱植物筛选是值得进一步深入研究的方向。

4 结论

(1)喀斯特断陷盆地小流域内6种植物恢复模式土壤水分含量呈现出明显的季节性和月际间波动规律,这种波动随土层深度的增加而减小,均为中等变异(C_v :12.88%~28.66%)。同一植被类型不同土层雨季和旱季土壤体积含水量垂直变化趋势相同,且雨季土壤水分含量显著高于旱季($P<0.05$)。

(2)同一乔木林雨季与旱季的土壤活跃层与次活跃层垂直分布不同,但同一灌丛雨季与旱季的分布相同。各植被恢复模式土壤体积含水量在降雨量较充足的8—9月达到最大值,变化范围为26.25%~44.08%,在降雨量明显不足的3—4月达到最小值,土壤体积含水量介于9.48%~17.47%之间。不同植被恢复模式间雨季、旱季和月均土壤体积含水量均表现为桉树林>天然次生灌丛>冲天柏林>马尾松林>高盖度车桑子灌丛>低盖度车桑子灌丛。

(3)3种乔木林0~30 cm土层、3种灌丛0~10 cm土层充分降雨后约10天土壤水分恢复为降雨前1天水平,降雨19天后仍高于植物萎蔫系数。3种乔木林30~70 cm土层、天然次生灌丛10~30 cm土层土壤水分降雨后19天均高于植物萎蔫系数,低盖度和高盖度车桑子灌丛10~30 cm土层土壤水分降雨后15天恢复为降雨前1天水平,并且接

近植物萎蔫系数。断陷盆地乔木林和灌丛经充足降雨,土壤达到田间持水量后,在连续晴朗天气下林地土壤水分可供植物 10~15 天的消耗。

参考文献:

- [1] 陈洪松, 王克林. 西南喀斯特山区土壤水分研究[J]. 农业现代化研究, 2008, 29(6): 734-738.
- [2] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环—西南喀斯特土壤—植被系统生源要素循环[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [3] 刘长成. 植物对喀斯特生境干旱胁迫的生态适应性研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- [4] 李 菲. 典型喀斯特山区不同植被类型土壤水分动态变化及其对植物光合作用的响应[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2016.
- [5] 张 川, 张 伟, 陈洪松, 等. 喀斯特典型坡地旱季表层土壤水分时空变异性[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6326-6334.
- [6] 颜蒙蒙, 周 洲, 王 济, 等. 喀斯特地区土壤水分随降雨的动态变化研究——以贵阳市花溪区为例[J]. 中国岩溶, 2016, 35(4): 446-452.
- [7] 曹建华, 袁道先, 童立强. 中国西南岩溶生态系统特征与石漠化综合治理对策[J]. 草业科学, 2008, 25(9): 40-50.
- [8] 陈 喜. 西南喀斯特地区水循环过程及其水文生态效应[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [9] 张晨成, 邵明安, 王云强, 等. 黄土区切沟对不同植被下土壤水分时空变异的影响[J]. 水科学进展, 2016, 27(5): 679-686.
- [10] 张 川, 陈洪松, 聂云鹏, 等. 喀斯特地区洼地剖面土壤含水率的动态变化规律[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(10): 1225-1232.
- [11] 陈洪松, 邵明安, 王克林. 黄土区荒草地和裸地土壤水分的循环特征[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1853-1857.
- [12] 耿增超, 戴 伟. 土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [13] 韩姣姣, 段 旭, 赵洋毅, 等. 干热河谷不同土地利用类型坡面土壤水分时空变异[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 129-136.
- [14] Chen H S, Zhang W, Wang K L, *et al.* Soil moisture dynamics under different land uses on karst hillslope in northwest Guangxi, China[J]. *Environ Earth Sci*, 2010, 61(6): 1105-1111.
- [15] 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 等. 喀斯特峰丛洼地坡面土壤水分空间变异研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 54-58.
- [16] 于 洋, 卫 伟, 陈利顶, 等. 黄土丘陵区坡面整地和植被耦合下的土壤水分特征[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3441-3449.
- [17] 王恩群, 余雪标, 林培群, 等. 超大宽行桉农间作模式下桉树人工林根系的研究[J]. 广东农业科学, 2010, (3): 72-79.
- [18] 季永华, 张纪林, 卢义山, 等. 河堤防护林带树木根系形态特征的研究[J]. 南京林业大学学报, 1998, 22(3): 31-34.
- [19] 程瑞梅, 王瑞丽, 肖文发, 等. 三峡库区马尾松根系生物量的空间分布[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 823-832.
- [20] 王家文, 周 跃, 肖本秀, 等. 中国西南喀斯特土壤水分特征研究进展[J]. 中国水土保持, 2013, (2): 37-42.
- [21] 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 等. 喀斯特山区坡面土壤水分变异特征及其与环境因子的关系[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 87-93.
- [22] 郭 柯, 刘长成, 董 鸣. 我国西南喀斯特植物生态适应性及石漠化治理[J]. 植物生态学报, 2011, 35(10): 991-999.
- [23] 李安定, 卢永飞, 韦小丽, 等. 花江喀斯特峡谷地区不同小生境土壤水分的动态研究[J]. 中国岩溶, 2008, 27(1): 56-62.
- [24] 朱守谦, 韦小丽, 祝小科, 等. 乌江流域喀斯特石质山地土壤水分特征研究. [M]. 森林生态学论坛. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [25] 容 丽, 王世杰, 俞国松, 等. 荔波喀斯特森林 4 种木本植物水分来源的稳定同位素分析[J]. 林业科学, 2012, 48(7): 14-22.
- [26] 程积民, 万惠娥, 王 静, 等. 半干旱区柠条生长与土壤水分消耗过程研究[J]. 林业科学, 2005, 41(2): 37-41.
- [27] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132(3): 1-12.
- [28] Wan L, Zhou J X, Guo H Y, *et al.* Trend of water resource amount, drought frequency, and agricultural exposure to water stresses in the karst regions of South China[J]. *Nat Hazards*, 2016, 80(1): 23-42.

(责任编辑: 彭南轩)