

## 喀斯特洼地不同森林类型的坡面径流和土壤流失动态

张喜<sup>1,2</sup>, 连宾<sup>2</sup>, 尹洁<sup>1,3</sup>, 吴永波<sup>4</sup>, 崔迎春<sup>1</sup> (1. 贵州省林业科学研究院, 贵州贵阳 550011; 2. 中国科学院地球化学研究所, 贵州贵阳 550001; 3. 成都理工大学, 四川成都 610000; 4. 南京林业大学, 江苏南京 237400)

**摘要** [目的] 定位研究喀斯特洼地不同森林类型的坡面径流和侵蚀量变化。[方法] 在喀斯特洼地底部建立雨量观测点, 分别在不同森林类型建立径流场, 定时定位观测主要指标变化。[结果] 不同森林类型地表径流呈单峰型, 为 2~11 月, 其中 6~7 月间有低谷; 径流系数呈双峰型, 分别为 2~5 月、7~9 月; 径流变动系数呈三峰型, 分别为 3~4 月、7~8 月、9~11 月; 泥沙浓度呈单峰型, 为 3~5 月; 侵蚀模数呈双峰型, 为 3~5 月、6~8 月。随着林木生长和植被层结构的发育, 径流量呈逐年降低的趋势。不同森林类型径流量同相应的泥沙浓度呈正相关, 径流量同相应降雨量和蒸发量的正相关达显著水平, 泥沙浓度同相应降雨量和蒸发量的相关性不显著, 趋势性明显。通过地表径流量和侵蚀模数拟合分析发现石漠化加剧了地表径流的不均匀性, 增加了地表径流量和侵蚀模数。幼林地表土的渗透性小于森林地, 不同森林类型表土的渗透性大于底土层。[结论] 该研究可为喀斯特地区水土保持、石漠化治理的生物管理技术提供理论依据。

**关键词** 喀斯特洼地; 森林类型; 地表径流; 侵蚀模数; 影响因素

中图分类号 S718.5 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2010)07-03843-05

## Dynamics of Slope Runoff and Soil Erosion of Different Forest Types in Karst Depression

ZHANG Xi et al (Guizhou Provincial Academy of Forestry, Guiyang, Guizhou 550011)

**Abstract** [Objective] The research was aimed to study the dynamics of slope runoff and soil erosion in different forest types in karst depression. [Method] Precipitation observation sites at the bottom of karst depression and runoff observation sites in different forest types were established to monitor the changes of main indices at fixed position timely. [Result] The surface runoff of different forest types appeared singer peak from February to November, with lowest valley from June to July. The runoff coefficient appeared double peaks from February to May, from July to September. The changing coefficient of runoff appeared three peaks from March to April, from July to August, from September to November. The silt concentration appeared one peak from March to May. The erosion modulus appeared double peaks from March to May, from June to August. Runoff showed annually reduced trend with the growth of forests and the development of vegetation layer's structure. There was a positive correlation between the runoff and its silt concentration in different forest types. Rainfall and evaporation had notable positive correlation with the runoff and similar correlation with silt concentration, but not marked. The fitting analysis results of surface runoff and erosion modulus showed that rocky desertification intensified the unevenness of surface runoff and increased the surface runoff and erosion modulus. The penetrability of surface soil in new planted forest was lower than that in young forest, and that in surface soil of different forest types was higher than in bottom soil. [Conclusion] The research provided theoretical basis for the biological management technologies of water and soil conservation and the control of karst rocky desertification in karst regions.

**Key words** Karst depression; Forest types; Runoff; Erosion modulus; Affected factors

以贵州为中心的中国南方喀斯特区是世界三大喀斯特地貌集中分布区之一<sup>[1]</sup>, 其岩石组成、地质地貌特性有别于其他岩组<sup>[2-3]</sup>。这些地区气候炎热、雨水充沛, 岩溶作用发育, 风化成土缓慢, 土层浅薄, 一旦流失很难恢复, 具有突出的地球化学敏感性与生态环境脆弱性。它同中国东部的平原、西北黄土高原、荒漠和沙漠, 东南红土丘陵和青藏高原一起构成支持与维系中华民族生存发展的重大生态环境类型之一。有关地表径流产生同植被和地貌类型的关系<sup>[4-7]</sup>, 喀斯特地区的水土保持<sup>[8-13]</sup>、喀斯特森林对降水分配的影响<sup>[14-15]</sup>已有部分研究报道, 但喀斯特典型地貌内不同植被类型对水土保持的影响与动态变化还未见报道。笔者以喀斯特洼地为研究对象, 定位观测不同植被类型对地表径流和泥沙流失的影响, 为喀斯特地区水土保持、石漠化治理的生物管理技术提供理论依据。

## 1 试验区概况及研究方法

**1.1 试验区概况** 试验区所在织金县<sup>[16]</sup>地处贵州中西部, 属黔中山原区, 26°21'~26°58' N, 105°20'~106°11' E, 海拔

变幅 861.5~2 262.0 m, 南北宽约 66.0 km, 东西长约 82.5 km, 总面积 2.868 × 10<sup>3</sup> km<sup>2</sup>。境内岩溶发育, 喀斯特地貌占总面积的 82.00%, 地质构造由 20 余条大致呈北东-南西向、相互平行的褶曲与断层组成。其中台地占 0.40%、丘陵占 49.90%、山地占 43.40%、山原占 1.50%、丘原占 1.30%、盆地占 3.50%。大部分地区年平均气温 13~15 °C, 最高气温 30.1~35.5 °C、最低气温 -9.2~-12.3 °C, Σ ≥ 10 °C 积温 3 107~4 673 °C/a, 日照时数 1 050~1 118 h/a, 太阳辐射量 3 516 MJ/(m<sup>2</sup>·a), 无霜期 240~290 d/a, 降雨量 1 200~1 500 mm/a。地带性植被为亚热带常绿阔叶林, 喀斯特植被为常绿落叶阔叶混交林。

喀斯特洼地位于县城关镇, 呈椭圆形, 北东-南西向, 南北长 1 392 m, 东西宽 1 680 m, 海拔变幅 1 437.5~1 821.5 m, 石面率 5%~30%, 总面积 134.945 hm<sup>2</sup>, 集水区汇流于洼地底部, 由溶洞进入地下暗河。以灰岩(T1Yn、T1f、T1d)为主、夹泥灰岩(T1Yn), 土壤为黑色石灰土和黄色石灰土。其中耕地 22.364 hm<sup>2</sup>, 石山灌丛 54.310 hm<sup>2</sup>, 人工林中杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林 1.429 hm<sup>2</sup>、柳杉(*Cryptomeria fortunei*)林 0.221 hm<sup>2</sup>、华山松(*Pinus armandi*)林 0.732 hm<sup>2</sup>, 坡耕地 55.889 hm<sup>2</sup> 已全部退耕还林, 主要树种为香樟(*Cinnamomum camphora*)、板栗(*Castanea mollissima*)、檫木(*Sassafras tzumu*)、柳杉、女贞(*Lonicera ligustrina*)、柏木(*Cupressus funebris*)和核桃(*Carya kweichowensis*), 林内偶有天然桦木(*Betula*

**基金项目** 国家重点基础研究发展计划 973 项目(2006CB403200); 贵州省科技计划(黔科 S2007-1021, 黔省专合 2008-73, TZJF2008-17); 国家科技支撑计划项目(2006BAD03A0303)。

**作者简介** 张喜(1964-), 男, 四川苍溪人, 博士, 研究员, 从事林业生态工程和喀斯特生态系统研究。

**鸣谢** 参加部分野外调查工作的还有贵州省林业科学研究院的金明、丁访军同志。

**收稿日期** 2010-01-04

alnoides)零星分布。

1.2 观测设施布置 在喀斯特洼地内相近海拔高度范围建立不同森林类型径流场5个,底部建立雨量点1个。

不同径流场林分特征差异明显(表1)。No.1是柞木杉

木林,株数比为1:15;No.2是柞木板栗林,株数比为1:2;No.3~5是退耕幼林,其中No.3是板栗林,No.4是核桃林,No.5是柳杉檫木林,株数比为1:8。径流场间坡向变化明显,场内石面率,乔、灌和草本层盖度在层次间分异较大。

表1 径流场不同森林类型的林分特征变化

Table 1 Characteristics changes of forest stands in different forest types of runoff observation sites

序号 No.	目标层 Object layer				灌木层 Shrub layer				草本层 Herb layer	
	种多样性 种数/100m <sup>2</sup>	平均胸(地) 径//cm	平均高度 cm	密度 株/hm <sup>2</sup>	种多样性 种数/100m <sup>2</sup>	平均地径 cm	平均高度 cm	密度 株/hm <sup>2</sup>	种多样性 种数/100m <sup>2</sup>	平均高度 cm
No.1	2	7.89	6.10	2 450	7	1.07	0.85	4 782	3	0.12
No.2	2	4.06	4.58	2 187	5	0.48	0.30	2 316	4	0.20
No.3	1	1.23	1.11	2 311	5	0.96	0.90	596	6	0.13
No.4	1	0.99	0.63	2 191	3	0.81	0.72	700	5	0.21
No.5	2	0.76	0.58	2 497	5	0.81	0.58	4 889	6	0.14

序号 No.	其他特征 Other characteristics							
	起源	年龄	坡向	坡度//°	石面率//%	乔木层盖度 %	灌木层盖度 %	草本层盖度 %
No.1	人工	10	东北	31	5	55	21	90
No.2	天然+人工		西北	39	20	45	35	63
No.3	人工	3	西北	33	30	0	7	89
No.4	人工	3	西北	23	25	0	5	91
No.5	人工	3	东南	16	10	0	9	90

径流场规格为20 m×5 m,短边平行于等高线。在径流场的上、左、右边界向外开挖宽10~15 cm、深30 cm的沟,沟内用混凝土筑基,挡水墙用砖石修建,露出地表高度15~20 cm,水泥砂浆涂面、斜面向外。下边挡水墙内侧设集水槽,槽长500 cm,宽15~20 cm,中部深20 cm,集水槽垂直断面为等腰三角形,集水向中部聚流,中部设有直径8~10 cm的出水孔与盛水池相连。盛水池尺寸为80 cm×80 cm×60 cm,盛水池旁有同体积备用池相连,防特大降雨时外溢。盛水池用砖砌,水泥砂浆涂面,内置水位尺。为防止暴雨时径流场上方和两侧的地表流漫入径流场内,在径流场两侧和上方开挖排水沟进行保护,上方排水沟距挡水墙100 cm、两侧排水沟距挡水墙50 cm,宽20 cm、深15 cm左右。

雨量点<sup>[17]</sup>规格为5 m×5 m,四周用稀疏木栏保护观测仪器。雨量点仪器包括普通雨量筒,蒸发皿,地表和地下曲管温度计,百叶箱内置干、湿球温度计和最高、最低温度计。

1.3 观测与研究方法

1.3.1 径流场和雨量点观测。地表径流量于降雨期间的每日8:00、20:00观测。雨量点观测参见地面气象观测规范<sup>[17]</sup>。

1.3.2 泥沙量测定。在测量蓄水池水位后,将池水搅拌均匀,用量筒取1 000 ml,过滤、烘干、称重,并换算成1次降雨产生的径流悬移质量。

1.3.3 土壤取样与相关指标测定。参照森林土壤分析方法进行<sup>[18]</sup>。

2 结果与分析

2.1 不同森林类型对地表径流的影响 观测结果表明(表2、图1),2种森林类型的年径流量变幅为26.713~29.062 mm、平均值为27.89 mm,3种退耕幼林地径流量变幅为11.002~37.838 mm、平均值为20.502 mm。不同森林类型的地表径流主要产生于2~11月,其中在6~7月间有一低谷,11~2月间的产流量较低。

表2 不同森林类型径流量的月动态变化

Table 2 The monthly dynamic changes of runoff in different types of forest

月份 Month	平均径流量 Average runoff//mm					径流系数 <sup>(9)</sup> Runoff coefficient //%				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
1	0.112	0.165	0.114	0.069	0.067	0.37	0.55	0.38	0.23	0.22
2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.373	0.384	0.254	0.254	0.399	1.29	1.33	0.88	0.88	1.38
4	1.568	3.019	0.738	1.016	2.952	3.95	7.61	1.86	2.56	7.44
5	5.947	5.736	1.882	2.170	6.280	3.53	3.40	1.12	1.29	3.73
6	3.359	4.775	2.213	1.870	5.548	1.57	2.23	1.03	0.87	2.59
7	4.703	5.132	2.111	1.963	5.481	1.39	1.52	0.63	0.58	1.63
8	7.266	4.034	1.857	1.559	8.344	3.78	2.10	0.97	0.81	4.34
9	2.663	3.129	2.543	1.201	4.727	1.90	2.23	1.81	0.86	3.37
10	0.299	1.756	0.572	0.623	3.351	0.31	1.85	0.60	0.66	3.53
11	0.174	0.549	0.127	0.069	0.555	0.62	1.95	0.45	0.25	1.97
12	0.249	0.384	0.254	0.208	0.133	0.74	1.15	0.76	0.62	0.40
总和/均值 Total/Average	26.713	29.062	12.665	11.002	37.838	2.00	2.18	0.95	0.82	2.83

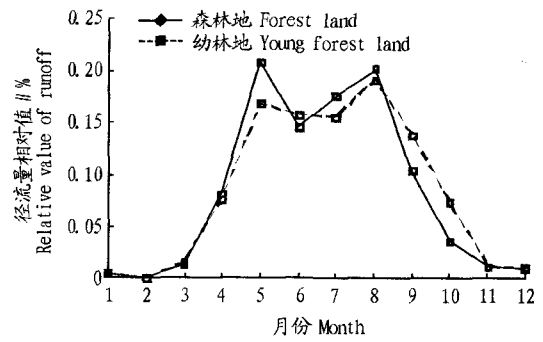
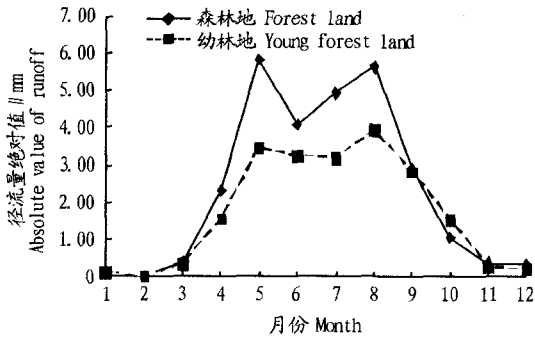


图1 森林和幼林地的径流量绝对值(左)和相对值(右)年动态

Fig.1 The annual dynamics of absolute(left)and relative(right) values of runoff in forest and young forest lands

喀斯特洼地森林和幼林地的年均径流系数分别为 2.09%、1.53%。年动态呈双峰型(图2),分别出现在2~5月、7~9月间。径流变动系数的年均值在森林地为5.96%,在幼林地为73.34%,峰值出现在3~4月、7~8月、9~11

月,反映了一年南、北气流在喀斯特洼地上空的交汇状态,这种交汇的持续时间、气流大小影响到不同森林类型的地表径流和分布。

不同森林类型径流量年动态变化还表现在年度间(图

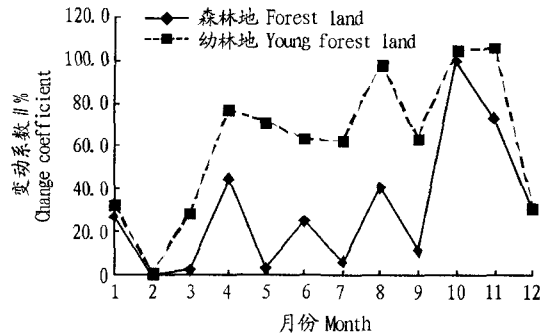
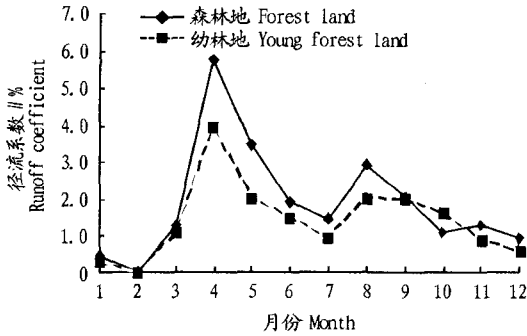


图2 森林和幼林地径流系数(左)和变动系数(右)年动态

Fig.2 Annual dynamics of runoff coefficient(left)and runoff change coefficient(right) in forest lands and young forest lands

3)。由图3可见,随着林木生长和植被层结构的发育,年径流量的变化趋势为逐年降低,即No.1 > No.2 > No.3 > No.4。

0.676\*\*\*,  $\alpha = 1%$ ):

$$Y_1 = 17.156 + 0.118X_1 + 0.363X_2 - 19.314X_3 + 5.442X_4$$

将试验区所在乌江流域其他试验点<sup>[9]</sup>观测数据综合分析,可建立坡度( $X_1$ )、乔木层盖度( $X_2$ )、灌木层盖度( $X_3$ )和草本层盖度( $X_4$ )与地表径流量( $Y_1$ )关系的相关模型( $R =$

模式抽样检测的预测误差为5.56%,对喀斯特洼地5个径流场的预测误差为2.79%,其预测值为95.99 mm,实测值为117.28 mm。由此可见,地表石漠化可增加地表径流量。

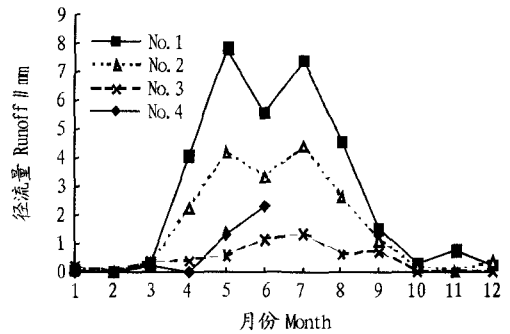
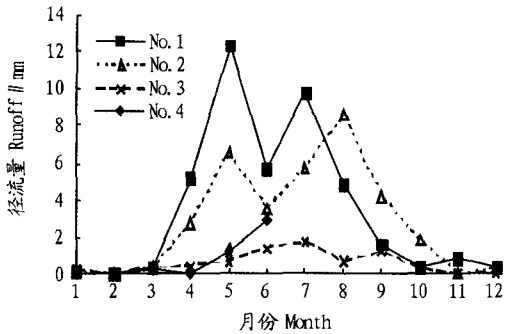


图3 森林地(左)和幼林地(右)径流量的年度动态变化

Fig.3 The annual dynamic changes of runoff in forest lands(left)and young forest lands

**2.2 不同森林类型对土壤流失的影响** 喀斯特洼地森林和幼林地径流中的泥沙浓度(表3、图4)分别为1.78~1.99 g/L、平均值1.89 g/L,1.41~1.77 g/L、平均值1.62 g/L;侵蚀模数分别为457.98~697.46 T/(km<sup>2</sup>·a)、平均值577.72 T/(km<sup>2</sup>·a),178.08~689.95 T/(km<sup>2</sup>·a)、平均值359.96 T/(km<sup>2</sup>·a)。径流泥沙浓度变化呈单峰型,森林地1~5月的泥沙浓度高于幼林地,6~12月间2种植被类型的泥沙浓度

差异不大。侵蚀模数在森林地和幼林地呈双峰型,分别为3~5月、6~8月。

将试验区所在乌江流域其他试验点<sup>[7]</sup>的观测数据综合分析,其侵蚀模数( $Y_2$ )同坡度( $X_1$ )、乔木层盖度( $X_2$ )、灌木层盖度( $X_3$ )和草本层盖度( $X_4$ )模型的相关性达极显著水平( $R = 0.6918^{***}$ ,  $\alpha = 0.1%$ )。

$$Y_2 = 603.004 + 19.992X_1 - 423.013X_2 - 208.229X_3 -$$

758.740X<sub>4</sub>

模式抽样检测误差为 8.68%，喀斯特洼地 5 个径流场的预测误差为 15.40%，其预测值为 1 825.22 T/(km<sup>2</sup>·a)，实

测值为 2 235.32 T/(km<sup>2</sup>·a)，石漠化加剧了地表径流的不均匀性，增加了侵蚀模数。

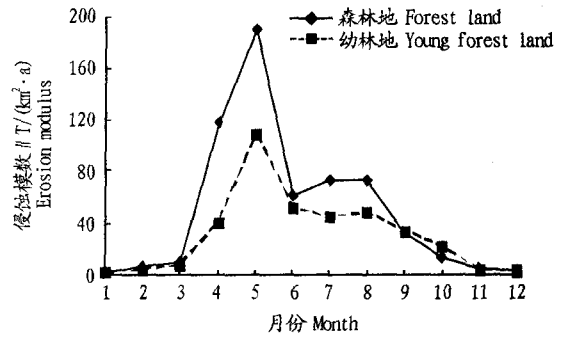
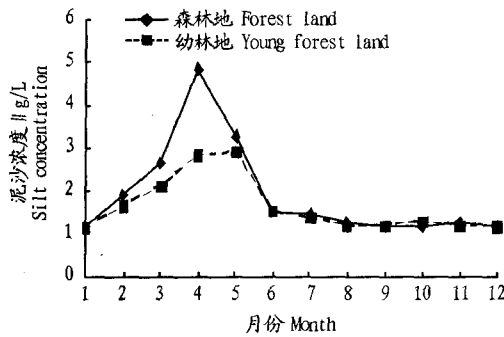


图4 森林和幼林地径流的泥沙浓度(左)和侵蚀模数(右)年动态

Fig. 4 Annual dynamics of runoff silt concentration (left) and erosion modulus (right) in forest land and young forest lands

表3 不同森林类型地表径流泥沙浓度和侵蚀模数的月动态变化

Table 3 Monthly dynamic changes of silt concentration and erosion modulus of surface runoff in different forest types

月份 Month	泥沙浓度 Silt concentration //g/L					侵蚀模数 Erosion modulus //T/(km <sup>2</sup> ·a)				
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
1	1.10	1.17	1.10	1.16	1.19	1.23	1.93	1.26	0.80	0.79
2	2.12	1.65	1.39	1.86	1.66	6.46	5.06	2.75	3.65	4.65
3	3.13	2.13	1.67	2.56	2.13	11.68	8.18	4.25	6.50	8.51
4	3.85	5.80	2.53	3.80	2.11	60.30	175.19	18.66	38.64	62.18
5	2.14	4.38	1.88	3.20	3.52	127.03	251.45	35.34	69.45	221.07
6	1.50	1.52	1.22	1.53	1.79	50.50	72.42	27.07	28.55	99.31
7	1.53	1.41	1.48	1.28	1.41	71.78	72.42	31.24	25.07	77.15
8	1.35	1.16	1.14	1.13	1.27	97.95	46.96	21.22	17.61	106.22
9	1.09	1.17	1.11	1.16	1.24	29.04	36.60	28.27	13.87	58.54
10	1.11	1.23	1.14	1.31	1.41	3.31	21.60	6.54	8.18	47.33
11	1.38	1.13	1.13	1.10	1.31	2.40	6.20	1.44	0.76	7.27
12	1.10	1.17	1.10	1.16	1.19	2.74	4.50	2.80	2.40	1.58
均值/总和 Average/Total	1.78	1.99	1.41	1.77	1.69	457.98	697.46	178.08	211.84	689.95

2.3 水土保持的影响因素

2.3.1 气象因素。喀斯特洼地年平均降雨量(图5)为 1 336.1 mm,蒸发量为 866.5 mm,每年 11~4 月间蒸发量大于降雨量,占全年蒸发量的 38.44%,蒸发量为同期降雨量的 176.74%;而邻近的织金县级气象站<sup>[16]</sup>11~4 月间的蒸发和降雨量关系也表现出相似规律。这反映了喀斯特洼地秋未一春初间严重干旱的事实,提高了春季地表径流中的泥沙浓度。

森林地月径流量同相应降雨量( $R_1 = 0.4029^*$ )、蒸发量( $R_2 = 0.3743^*$ )的相关性达显著水平,幼林地月径流量同相应降雨量( $R_1 = 0.3513^*$ )、蒸发量( $R_2 = 0.3801^*$ )的相关性也达显著水平。森林地较幼林地地表径流减少,是因为较为发育的森林结构增加了近地表降雨循环的复杂性<sup>[15]</sup>;相同的地表径流量在森林地需要更多的降雨量,这主要是复杂的森林结构在改变降雨分配、减少地表径流的同时,也增加了植被层片的蒸发、蒸腾面积。

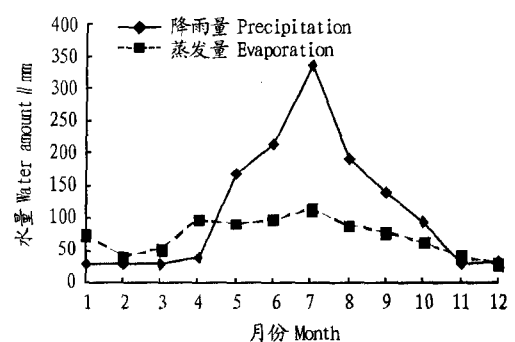
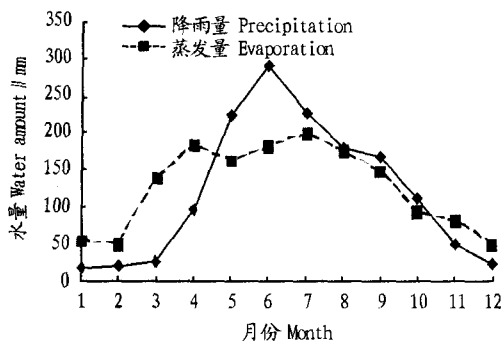


图5 织金县城(左)和喀斯特洼地(右)降雨和蒸发量的年动态

Fig. 5 Annual dynamics of precipitation and evaporation in Zhijin county(left) and the karst depression(right)

森林地月泥沙浓度同相应降雨量( $R_1 = 0.0089$ )、蒸发量( $R_2 = 0.4199$ )和径流量( $R_3 = 0.5232^*$ )的关系相似于幼

林地月泥沙浓度同相应降雨量( $R_1 = 0.0045$ )、蒸发量( $R_2 = 0.2851$ )和径流量( $R_3 = 0.4015$ )的关系,相关性不显著,趋

势性明显。相同雨量时,幼林地径流泥沙浓度高于森林地;相同蒸发量时,幼林地径流泥沙浓度低于森林地;相同径流量时,幼林地径流泥沙浓度高于森林地。

**2.3.2 土壤因素。**森林地和幼林地地表产流与产沙大小还受林地土结构的影响(表4)。由表4可见,森林地土平均容重为1.185 6 g/kg,总孔隙度为162.46%,非毛管孔隙度为4.08%;幼林地土平均容重为1.209 2 g/kg,总孔隙度为

155.66%,非毛管孔隙度为4.86%。由此可见,幼林地地表土容重大、总孔隙度小、非毛管孔隙度大,地表径流的渗透性差。森林地B层平均容重为1.266 5 g/kg,总孔隙度为158.51%,非毛管孔隙度为2.14%,幼林地B层平均容重为1.268 5 g/kg,总孔隙度为153.14%,非毛管孔隙度为4.11%,A层的下渗性能优于B层。同一森林类型不同样地间土壤性质的差异也是造成其地表径流和产沙量差异的因素之一。

表4 不同森林类型的土壤物理性质变化

Table 4 The changes of soil physical characteristics in different forest types

序号 No.	层次 Stratum	容重//g/cm <sup>3</sup> Volume weight	孔隙度(体积比)Porosity//%		颗粒组成 Granule composition//g/kg		
			总孔隙 Total porosity	非毛管孔隙 Non-capillary porosity	砂粒 Sand	粉砂粒 Silt	黏粒 Clay
No. 1	A 层	1.230 9	163.077 2	6.929 9	302.70	457.22	241.08
	B 层	1.143 0	168.201 6	0.917 2	280.10	436.93	282.97
No. 2	A 层	1.140 3	161.843 8	1.222 9	517.62	367.91	114.46
	B 层	1.389 9	148.804 2	3.363 1	372.37	533.28	94.35
No. 3	A 层	1.145 8	154.257 8	3.668 8	151.60	407.06	441.34
	B 层	1.402 9	146.491 2	5.299 4	591.25	250.26	158.50
No. 4	A 层	1.163 7	156.343 5	9.579 6	273.16	378.12	348.71
	B 层	1.207 2	157.804 8	6.216 6	233.54	591.16	175.31
No. 5	A 层	1.318 3	156.374 6	1.324 8	407.36	476.60	116.04
	B 层	1.195 4	155.112 2	0.815 3	340.17	459.38	200.46

注:A指表土(耕作)层,B指沉淀(底土)层;砂粒指粒径为0.05~2.00 mm,粉砂粒0.002~0.05 mm,黏粒<0.002 mm。

Note:A stratum is surface(cultivated)horizon;B stratum is illuvium(substratum horizon). Diameter of sand is 0.05-2.00 mm,that of silt is 0.002-0.05 mm and that of clay is lower than 0.002 mm.

### 3 讨论

喀斯特洼地年径流量变幅的变化趋势为幼林地>森林地,年径流量、泥沙浓度和侵蚀模数的变化趋势为幼林地<森林地,有别于现有研究的一般结论<sup>[5-6,9-13]</sup>。进一步分析幼林地样地间的分异,No.5幼林地年径流量>不同森林地是对现有结论的肯定;No.3和No.4幼林地的年径流量<森林地,与样地内石面率高、分布零碎存在一定的非常下渗作用有关,导致地表径流量减小,泥沙浓度下降,侵蚀模数降低。同为森林类型的No.1和No.2间的径流量变幅不大,泥沙浓度却是No.2>No.1,主要与No.2的石面率高、林相稀疏、植被层结构较差有关;喀斯特洼地11~4月间的蒸发量是降雨量的176.74%,森林地还要承受林分的蒸发、蒸腾耗水,土壤干燥、疏松,春季降雨的平均泥沙浓度为幼林地的137.38%,夏-秋季的泥沙浓度相近,年平均泥沙浓度和侵蚀模数为森林地>幼林地。这是喀斯特洼地地表径流和侵蚀模数影响的特有性,而不是径流量变化规律在喀斯特地貌上的否定。与同生态区的森林地<sup>[9,15]</sup>相比,喀斯特洼地森林地年径流量偏高,径流系数偏大,主要受喀斯特洼地近地表“滞流、驻雾”的影响,这种现象在春-夏、秋-冬交替期更为明显。年径流变动系数为森林地<幼林地,表明森林地能减小径流量变幅。径流系数、径流变动系数、泥沙浓度、侵蚀模数在不同森林类型间的年动态变化规律具有一致性。

在石漠化的喀斯特洼地研究不同森林类型的地表径流和侵蚀模数,观测样地的母岩-土壤结构至关重要。喀斯特岩组多具石缝、石隙和石坑等,土被连续性往往掩盖了母岩缝隙,影响地表径流量和泥沙浓度观测的准确性,从而影响侵蚀模数,土层浅薄时这种影响更为明显。有必要进一步完善石漠化喀斯特山地森林地表径流和侵蚀模数的研究方法。

### 参考文献

- [1] 欧阳自远. 中国西南喀斯特生态脆弱区的综合治理与开发脱贫[J]. 世界科技研究与发展, 1998, 20(2): 53-56.
- [2] PETAR J, MILANOVIC. Karst Hydrogeology[M]. Colorado (USA): Water Resources Publications, 1981.
- [3] WOLFGANG DREYBRODT. Processes in karst systems physics, chemistry and geology[M]. New York: Springer-Verlag Incorporated, 1988.
- [4] DUNNE T. Effects of rainfall, vegetation and micro-topography on infiltration and runoff[J]. Water resources research, 1991, 27(9): 2271-2285.
- [5] BONELL M. Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forest[J]. Journal of Hydrology, 1993, 150: 217-275.
- [6] PETERS D L. Runoff production in a forested, shallow soil, Canadian shield basin[J]. Water Resources Research, 1995, 31(5): 1291-1304.
- [7] 覃绍德. 贵州省主要林业科学技术研究成果汇编[M]. 贵阳: 贵州教育出版社, 1993: 273-294.
- [8] CHANDLER D G. Reversibility of forest conversion impacts on water budgets in tropical karst terrain[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 224(1/2): 95-103.
- [9] 张喜, 薛建辉, 许效天, 等. 黔中喀斯特山地不同森林类型的地表径流及影响因素[J]. 热带亚热带植物学报, 2007, 15(6): 527-537.
- [10] 梅再美, 熊康宁. 喀斯特地区水土流失动态特征及生态效益评价——以贵州清镇退耕还林(草)试验区为例[J]. 中国岩溶, 2003, 22(2): 136-143.
- [11] 罗海波, 钱晓刚, 刘方, 等. 喀斯特山区退耕还林(草)保持水土生态效益研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 31-35.
- [12] 陈强, 常恩福, 毕波, 等. 滇东南岩溶地区三种退耕还林模式的水土保持效应研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 1-5.
- [13] 李德生, 刘文彬, 许慕龙. 石灰岩山地植被水土保持效益的研究[J]. 水土保持学报, 1993, 7(2): 57-62.
- [14] 冉景丞, 何师意, 曹建华, 等. 茂兰喀斯特森林水文学效应初步研究[C]//朱守谦. 喀斯特森林生态研究(III). 贵阳: 贵州科技出版社, 2003: 135-140.
- [15] 张喜, 薛建辉, 生原喜久雄, 等. 黔中喀斯特森林的水文学过程和养分动态[J]. 植物生态学报, 2007, 31(5): 757-768.
- [16] 《织金县综合农业区划》编写组. 织金县综合农业区划[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1989.
- [17] 中央气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 1979.
- [18] 国家林业局. 森林土壤分析方法(LY/T1210-1275)[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999: 21-24, 57-67.