

南方红壤区植被结构类型与降雨模式对林下水土流失的影响

陈 洋^{1,3}, 张海东², 于东升^{1,3*}, 马利霞¹, 陆晓松^{1,3}, 王 鑫^{1,3}

(1. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2. 苏州市农业科学院(江苏太湖地区农业科学研究所), 苏州 215155; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 植被和降雨是水土流失的关键因素, 探究二者对水土流失的影响对开展水土保持具有重要意义。该研究基于鹰潭红壤生态试验站 5 种植被结构类型的径流小区 2016—2018 年 93 次降雨、径流、泥沙观测资料以及各小区植被结构参数, 利用自组织映射(self-organizing maps, SOM)方法, 根据雨量、历时、60 min 最大雨强、平均雨强、降雨集中性等特征指标划分降雨模式, 研究了不同降雨模式和植被结构类型的水土流失特征, 并采用冗余分析(RDA)定量研究降雨与植被对林下水土流失的影响。结果表明, SOM 方法能客观识别红壤区 4 种典型侵蚀降雨模式, R_{III} 模式(短历时、大雨强、雨量集中)是造成水土流失的主要降雨模式, R_{IV} 模式(多雨量、大雨强、长历时)最具侵蚀性破坏力; 植被结构类型显著影响水土流失, 水土保持功能从大到小依次为: 灌草混交林、草地、低灌林、乔木林、高灌林。RDA 分析表明, 降雨模式与植被结构类型能够改变降雨、植被对水土流失的影响, 随着降雨模式由弱到强转变, 植被的水土保持功能逐渐减小, 降雨影响增强, 水土流失由植被主控演变为平衡控制、降雨主控; 随着植被结构类型由近地表植被向灌木、乔木的变化, 植被的调节能力减小, 降雨影响增强。

关键词: 侵蚀; 径流; 土壤; 植被结构; 降雨模式; 南方红壤区

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.017

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-05-0150-08

陈 洋, 张海东, 于东升, 马利霞, 陆晓松, 王 鑫. 南方红壤区植被结构类型与降雨模式对林下水土流失的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 150—157. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.017 http://www.tcsae.org

Chen Yang, Zhang Haidong, Yu Dongsheng, Ma Lixia, Lu Xiaosong, Wang Xin. Effects of vegetation structure types and rainfall patterns on soil and water loss of understory vegetation in red soil areas of South China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(5): 150—157. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.017 http://www.tcsae.org

0 引 言

南方红壤区由于丰富降水、山地丘陵地貌、高强度土地利用、单一林分结构, 易于造成严重水土流失^[1]。据 2013 年第一次全国水利普查水土保持情况公报显示, 红壤区水土流失面积达 16 万 km², 平均侵蚀速率为 3 419.8 t/(km²·a), 部分流域可达 237.6 t/(km²·a)以上^[2-4], 远超区域容许土壤流失量的上限(500 t/(km²·a)), 严重威胁区域土壤资源利用与可持续发展。自 20 世纪 80 年代以来, 红壤区采取了桑基鱼塘、护坡、飞播造林、退耕还林还草等一系列水土保持生态治理措施^[1,4], 区域水土流失得到有效遏制, 但“空中绿化”“林下流”的特征依然明显^[1]。探究植被结构类型与降雨模式对区域水土流失的综合影响, 对提高土壤侵蚀治理效率、促进水源涵养具有重要意义。

水土流失景观差异与地表水文-植被过程响应密切相关, 降雨是这一过程中的动力来源^[5-6]。降雨模式特征如

雨量、强度、历时、雨强变异性、集中度等, 决定了地表的水文过程^[7]; 在水力侵蚀过程中, 影响着渗流潜力、土壤剥离速率以及产流过程等^[8]。Parsons 等^[9]模拟了 5 种降雨模式下的土壤侵蚀过程, 表明雨强上升型的降雨模式对土壤剥离速率更高、能力更强。Nciizah 等^[10]研究指出, 湿润区短历时的强降雨模式容易快速产流并引起地表侵蚀。Duan 等^[11]运用 K-means 法对自然降雨事件聚类分析, 指出低强度和长历时的降雨模式能充分产生地下径流, 从而使表层土壤免受侵蚀。Chen 等^[12]基于降雨量集中性差异, 分析得出黄土高原地区雨量集中性高的降雨模式是造成土壤侵蚀的主要降雨模式。这些研究综合分析了多维降雨因子特征与水土流失之间的关系, 揭示了区域水土流失的主导降雨模式。

植被对控制水土流失发挥重要作用, 不同结构形态植被的水土保持功能不一。Peng 等^[13]在西南地区的自然降雨观测表明, 覆盖度较高的草本比乔木林地能更有效减少水土流失; 于东升等^[14]通过模拟降雨试验表明, 林下有草或灌草的混交植被结构具有最佳的雨水调节与防洪减沙效能; 孙佳佳等^[15]在闽西北红壤径流小区试验分析指出, 林草结构比纯林结构能减少 20%的径流和 90%的土壤侵蚀。显然, 近地表植被对降雨侵蚀的控制作用最为明显, 多层次植被结构比单一层次植被的水土保持作用更具优势^[16]。

收稿日期: 2019-11-11 修订日期: 2019-12-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571206, 41501296); 土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放研究基金项目(Y812000002)

作者简介: 陈 洋, 博士生, 主要从事资源环境遥感应用与水土流失研究。

Email: chenyang@issas.ac.cn

*通信作者: 于东升, 研究员, 主要从事水土保持与资源环境遥感应用研究。

Email: dshyu@issas.ac.cn

然而，已有研究对降雨模式划分相对混杂、主观性强，对不同降雨模式的侵蚀破坏力认识不足；并且多侧重于独立探究降雨、植被对坡面水土流失的影响，忽视了自然环境下植被、降雨对水土流失的交互竞争性影响。因此，本文针对红壤区复杂降雨模式、典型植被结构^[11]，通过径流小区试验，运用自组织映射（self-organizing maps, SOM）和多元统计方法，研究揭示水土流失对不同降雨模式、植被结构的响应特征，定量分析它们对水土流失的综合影响，并明确植被在不同降雨条件下的截留减蚀作用差异，为区域有针对性开展水土流失治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

试验区位于江西省鹰潭市中国科学院红壤生态实验站（116°55'16"~116°56'18"E，28°12'01"~28°12'37"N），属东亚季风气候，年平均气温 17.6℃，降水量达 1 795 mm，>10℃的积温达 7 500℃，无霜期 236 d^[17]。试验区为第四纪红黏土发育的红壤丘岗地形，坡度小于 15°，海拔 30~47 m。土壤母质以红砂岩为主，风化壳深厚，土层为 A-C 结构型，粉粒含量为 30.3%~40.8%，质地黏重、易侵蚀^[17]。历史上形成的亚热带常绿阔叶林、针阔混交林等自然植被景观，由于近现代以来森林砍伐、土地开垦，导致原生植被严重破坏。当前试验区周边植被为人工次生林，成林时间小于 30a，代表性物种为马尾松（*Pinus massoniana*）、芒萁（*Dicranopteris dichotoma*）、

白茅（*Imperata cylindrica*）等^[17-18]。

1.2 试验小区观测

在试验站东区坡度为 8°的缓坡上建有 8 个长×宽水平投影为 10 m×2.6 m 的径流试验小区（图 1）^[18]。基于红壤区典型次数植被配置特征、形态结构与植被参数，设计 5 种植被结构类型：纯草（G）、灌草（GS）、低灌（LS）、高灌（HS）、乔木（F），物种为马尾松、芒萁、白茅。除了 G 小区外，其他小区均布植马尾松 21 棵。

在试验区空旷地带安装自动雨量计记录自然降雨过程。每次降雨后，利用水尺测定各小区径流桶中水深，并采集径流样品和所有泥沙，待泥沙风干后测定质量；再用烘干法测定径流中的泥沙含量和风干泥沙样中泥沙含水量，利用式（1）~（3）计算各次降雨后的径流深度与土壤流失量^[19]。本文采用 2016 年 1 月至 2018 年 12 月的试验观测数据，同期测定的各试验小区平均的土壤理化性质及植被结构参数（表 1）。

$$V_i = \pi \cdot r^2 \cdot h_i (1 - C_{si} / d) \tag{1}$$

$$R_i = V_i / A \tag{2}$$

$$S_i = [V_i \cdot C_s + G_i / (1 + C_{wi})] / A \tag{3}$$

式中 R_i 为第 i 次降雨产生的径流深，mm； S_i 为土壤侵蚀量，g/m²； A 为径流小区面积，m²； V_i 为径流体积，m³； h_i 为测定的水深， G_i 为泥沙风干质量，g； C_{si} 为径流中的泥沙含量，g/m³； C_{wi} 为泥沙含水率，%； r 为圆柱体径流桶的半径，m； d 为土壤密度，g/m³。

表 1 试验小区植被结构参数及土壤性质
Table 1 Vegetation structure parameters and soil properties of experimental plots

植被类型 Vegetation types	植被组成 Vegetation composition	树龄 Tree age/a	树高 Tree height/m	胸径 Diameter at breast height/cm	LAI	覆盖度 Coverage/%	冠层厚度 Canopy thickness/m	pH 值 pH value	有机质 Soil organic matter/(g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/(g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus/(g·kg ⁻¹)	全钾 Total potassium/(g·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus/(g·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/(g·kg ⁻¹)	CEC/ (Cmol·kg ⁻¹)	颗粒组成 Grain composition/%		
																2~0.05 mm	0.05~0.002 mm	<0.002 mm
纯草	D、I	1	0.50	0.10	2.29	0.94	0.50	4.62	21.49	1.13	0.31	9.71	2.07	60.83	14.94	22.68	38.55	38.77
灌草	P、D、I	4	1.60	3.00	2.46	0.93	0.80	4.63	19.50	1.07	0.33	9.64	5.30	53.33	15.78	22.65	37.84	39.51
灌草	P、D、I	4	2.00	5.50	1.78	0.85	0.90	4.68	19.55	1.08	0.36	9.58	6.08	55.83	15.67	23.00	37.28	39.72
低灌	P	5	2.50	6.20	2.85	0.82	1.00	4.66	16.97	0.92	0.37	9.71	6.27	57.50	15.18	22.08	37.20	40.72
低灌	P	5	3.10	6.80	1.94	0.71	1.30	4.73	15.59	0.90	0.38	9.73	6.07	60.83	14.11	20.80	36.56	42.64
高灌	P	5	4.40	10.89	3.90	0.58	1.40	4.71	14.87	0.88	0.28	9.71	1.02	60.83	13.79	20.55	37.96	41.49
乔木	P	14	7.80	20.80	2.91	0.73	3.70	4.43	18.09	0.97	0.26	9.75	1.55	63.33	15.37	22.09	37.12	40.79
乔木	P	14	8.20	23.20	3.48	0.78	3.20	4.47	18.52	0.97	0.25	9.80	1.53	62.50	15.09	21.95	36.83	41.23

注：P 为马尾松；D 为芒萁；I 为白茅。
Note: P, D, I represent *Pinus massoniana*, *Dicranopteris dichotoma*, *Imperata cylindrica*, respectively.

1.3 基于 SOM 的降雨模式聚类

定义产生径流的降雨为侵蚀降雨^[11-13]。针对各场次侵蚀降雨，采用降雨量（ Dp ）、历时（ Dt ）、最大 60 min 雨强（ I_{\max} ）、平均雨强（ I_{mean} ）、降雨量集中性指数（ CI ）等指标描述降雨模式特征^[11-13]，利 SOM 方法对降雨特征因子集进行聚类，从而识别降雨模式。

SOM 是 Kohonen^[20]教授发明的一种基于神经网络的数据降维技术，其网络结构为一个输入层和一个竞争层，前者由接收高维数据的输入单元组成，后者由位于规则二维网格上的输出单元组成，网络层之间通过权向量连

接。在聚类分析过程中，先采用 z-score 函数对降雨特征因子进行预处理，以消除数据噪声影响；再将处理后的变量集导入输入层，运用高斯邻域函数构建 8×10 的 SOM 网络拓扑结构，设置初始学习效率为 0.1，迭代次数 1 000 次，计算输入变量与所有神经元权重之间的距离；最后，基于最近距离原则从竞争层中获得最佳匹配单元，从而得到降雨模式聚类结果。

聚类数是一平衡选择。本着聚类数小且尽可能反映组间差异原则选择最优聚类结果，并利用组内总方差（within groups sum of squared error, WSS）与聚类数总体

变化关系曲线的拐点对聚类数进行客观判断。

1.4 数据分析

采用单因素方差分析法研究不同降雨模式、植被结构类型下的径流量、土壤侵蚀量之间差异,当检验值 $P < 0.05$ 时具有统计学意义;冗余分析 RDA (redundancy analysis) 用以揭示植被与降雨对水土流失的影响。

2 结果与分析

2.1 不同模式降雨统计特征

研究区 2016—2018 年记录到 93 次侵蚀降雨事件,降雨量合计 4 226.5 mm,占总降雨量 83.7%。规定单次降雨后小区总产沙量小于 0.15 kg 为无侵蚀,观测到有 52 次降雨产生了明显土壤侵蚀,占侵蚀降雨次数的 55.9%。SOM 聚类分析表明, WSS 随聚类数的变化由陡变缓,聚类数 4 是其总体变化拐点 (图 1)。因此,研究区主要存在 4 种侵蚀降雨模式,分别记作 R_I 、 R_{II} 、 R_{III} 和 R_{IV} (表 2)。

R_I 在研究区发生频率较高 (31.2%),但引起土壤侵蚀频率较低 (13.8%),其特点是雨量和强度小、历时长、雨量不集中,多发生在 9 月至次年 4 月。 R_{II} 模式在 4—10 月均有发生,特点为雨量较多、中雨强、历时长,该模式降雨频率少 (14.0%),但易于造成土壤侵蚀 (76.9%)。

R_{III} 为短历时、高强度、雨量集中的暴雨,主要发生在 5—9 月,是造成水土流失的首要降雨模式 (43.0%),产生土壤侵蚀频率较高 (75.0%)。 R_{IV} 为多雨量、长历时、大强度的连续强降雨,集中发生在 6—7 月,发生频率较低 (11.8%),但具有较高的土壤侵蚀频率 (72.7%)。4 种降雨模式中以 R_{III} 、 R_{IV} 的降雨量最丰富,分别占降雨总量的 31.5%、27.0%, R_I 、 R_{II} 模式降雨量分别占 20.9%、20.7% (表 2)。

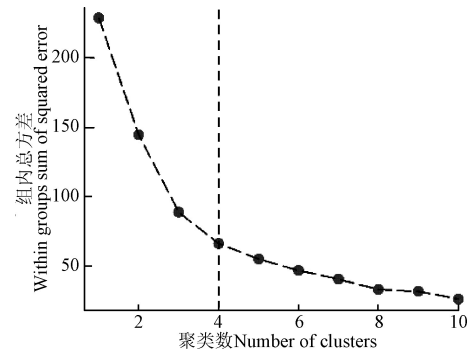


图 1 组内总方差随聚类数目的变化

Fig. 1. Variation of within groups sum of squared error with number of clusters

表 2 4 种模式降雨的统计特征

Table 2 Eigenvalue statistical features of the four rainfall patterns

降雨模式 Rainfall patterns	降雨量 Rainfall amount D_p /mm	最大 60min 雨强 Maximum 30 min rainfall intensity $I_{max}/(mm \cdot h^{-1})$	平均雨强 Average rain intensity $I_{mean}/(mm \cdot h^{-1})$	持续时间 Rainfall duration D_t /h	降雨量集中性指数 Rainfall concentration index CI	径流次数 Runoff events	土壤侵蚀次数 Erosion events	总雨量 Total amount of rainfall/mm
R_I	最小值	13.50	1.80	0.34	7.00	0.05		
	最大值	59.60	15.40	4.77	45.00	0.48		
	平均值	30.41	5.36	1.56	21.90	0.19	29	882.0
	标准差	12.11	3.05	0.97	8.62	0.11		
R_{II}	最小值	51.60	3.27	1.99	16.00	0.05		
	最大值	83.00	17.60	5.16	40.00	0.27		
	平均值	67.17	10.57	2.99	26.77	0.16	13	873.2
	标准差	10.16	4.50	0.88	7.20	0.07	10	
R_{III}	最小值	12.10	4.80	1.23	2.00	0.19		
	最大值	60.10	31.90	7.88	18.00	0.92		
	平均值	33.23	14.50	4.56	7.60	0.47	40	1329.4
	标准差	13.95	6.47	1.57	3.61	0.18	30	
R_{IV}	最小值	70.76	12.56	1.54	13.00	0.11		
	最大值	195.30	53.10	9.77	30.00	0.40		
	平均值	103.81	22.58	5.43	17.82	0.22	11	1141.9
	标准差	35.14	12.62	1.94	4.98	0.10	8	

注: R_I 模式指雨量和强度小、历时长、雨量不集中; R_{II} 模式指雨量较多、中雨强、历时长; R_{III} 模式指短历时、大雨强、雨量集中; R_{IV} 模式指多雨量、大雨强、长历时。下同。

Note: R_I pattern refers to rainfall events with low intensity, long duration, minor amount of rainfall and low rainfall concentration; R_{II} pattern refers to the rainfall events with medium amount of rainfall, moderate rainfall intensity and long duration; R_{III} pattern refers to the rainfall events with characteristics of short duration, strong rainfall intensity and high rainfall concentration; R_{IV} pattern refers to great amount of rainfall, strong rainfall intensity and long duration. The same as follows.

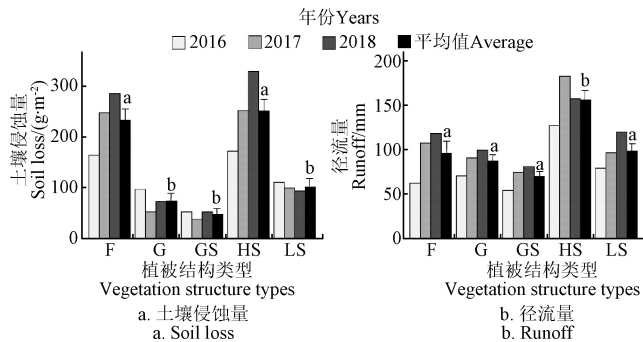
研究区存在 4 种典型侵蚀降雨模式,与 Duan 等^[11,21]基于 D_p 、 D_t 、 I_{max} 等降雨特征因子的组间差异分析得到的湘北、赣北红壤区降雨模式特征一致,表明本结果在中亚热带红壤区具有典型性。秦伟等^[22]基于 D_p 、 D_t 、 I_{mean} 等降雨因子分析认为,赣北红壤地区侵蚀降雨存在 3 种模式,并不存在 R_{IV} 模式;Liu 等^[23]基于快速聚类法在同样地区分析得出 5 种降雨模式,其中部分模式之间具有

相似特征。显然,已有研究对降雨模式划分并不一致,这不仅与区域气候条件密切相关,也受聚类分析方法影响。这些研究^[11,21-23]均基于 K-means 聚类方法,以特征因子与聚类中心的距离来识别降雨模式,但需要事先设定聚类数目。通常未知降雨模式组间方差情况下自主设定聚类数,易导致对降雨模式的划分不充分或冗余。本研究根据 WSS 的变化特征客观给出聚类数,获得的 4 种降

雨模式, 准确反映了中亚热带红壤区的侵蚀降雨特征。

2.2 不同植被结构类型下水土流失特征

单因素方差分析显示, 不同植被结构类型下年均径流量与土壤侵蚀量存在一定差异 ($P<0.05$) (图2)。HS、F小区的土壤侵蚀量最高, 分别为G、GS、LS小区2.1~3.2倍; HS小区的径流量最高, 达155.6 mm, 显著高出T、LS、GS、G小区的0.6、0.6、1.2、0.8倍 ($P<0.05$)。5种植被结构类型下产生的水土流失量从大到小排序为GS、G、LS、T、HS。由于近地表幼龄植被的活跃生长改变了土壤侵蚀敏感性^[24], 导致各植被结构类型下土壤侵蚀量的年际变化并不同步, 而径流量波动在各小区具有一致性。



注: 植被结构 F、G、GS、LS、HS 分别指乔木、纯草、灌草、低灌、高灌。不同小写字母表示处理间差异显著。下同。

Note: Vegetation structure F, G, GS, LS, HS refers to trees, pure grass, shrubby and grasses, low shrubby, high shrubby, respectively. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments. The same as below.

图2 不同植被结构类型下年均径流量和土壤侵蚀量

Fig.2 Average annual surface runoff and soil loss in different vegetation structure types

植被结构改变降雨到达地表的过程和土壤对降雨的响应, 进而影响水土流失^[25-26]。冠层与枝干通过截留雨滴、增加蒸散以减少到达地表的净降雨量, 并根据植株高度、冠层开度分配降雨动能^[26], 因而高植被覆盖的G、GS小区(表1)产生的径流和土壤侵蚀小于低植被覆盖的HS小区。针簇状结构的马尾松冠层能将小雨滴合并成大雨滴, 从而增加雨滴动能^[27-28], 当截留饱和后雨滴从冠层高处降落产生较大的侵蚀力, 这也是HS、T小区中侵蚀模数较大的原因。低灌、草本等植被结构不仅具有发达的浅层根系, 还能通过改善地表水热条件支持地表生物生长, 丰富的土壤生物和根系活动改善土壤孔隙度和团聚体, 增加土壤入渗潜力和抗侵蚀能力^[29]。相较而言, HS、T小区表层土壤孔隙度较少、下渗渠道不足, 因而产生较多地表径流。

2.3 不同降雨模式下的水土流失特征

4种降雨模式中, R_{III} 和 R_{IV} 产生的地表径流量较多, 分别占总径流量的35.6%~44.4%和26.9%~32.9%, 是 R_I 、 R_{II} 模式的3倍和1倍以上(图3)。 R_{III} 模式对土壤侵蚀量贡献率最大, 其次为 R_{IV} 模式, 分别占侵蚀总量的48.2%~56.7%以及25.2%~35.6%; R_I 和 R_{II} 模式产生土壤侵蚀量较少, 平均分别占3.4%、13.4%。4种降雨模式对试验区水土流失的贡献大小依次为 $R_{III}>R_{IV}>R_{II}>R_I$ 。

各降雨模式下历次降雨产生的平均径流与土壤侵蚀量存在显著差异(图4)。 R_{IV} 模式下产生的平均土壤侵蚀量最多, 显著高出其他模式1.5~8.7倍($P<0.05$), 其次是 R_{II} 、 R_{III} 和 R_I 模式(图4a)。 R_{IV} 模式产生的平均径流也最多, 显著高出 R_{III} 模式的1.3~8.7倍($P<0.05$); R_{III} 模式产生的平均径流次之, 高出 R_I 、 R_{II} 模式的0.8~2.5倍。各降雨模式下历次降雨产生的平均径流量从大到小依次为 R_{IV} 、 R_{III} 、 R_{II} 、 R_I , 平均土壤流失量从大到小则为 R_{IV} 、 R_{II} 、 R_{III} 、 R_I , 且在各植被结构类型下表现具有一致性。

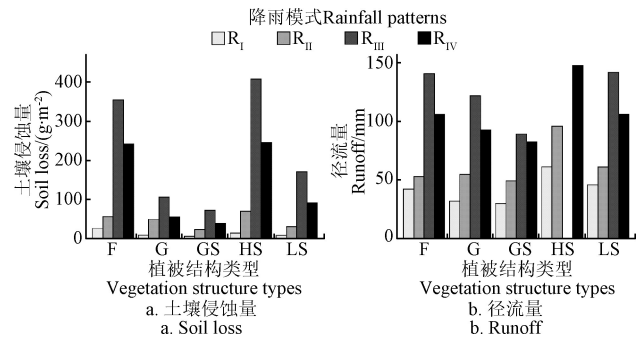


图3 不同降雨模式下水土流失总量

Fig.3 Total of surface runoff and soil loss in different rainfall patterns

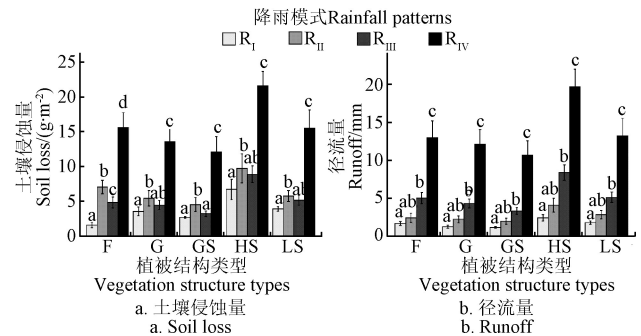


图4 不同降雨模式下次降雨产生的平均径流和土壤侵蚀量

Fig.4 Average surface runoff and soil loss in different rainfall patterns

R_{III} 是引起红壤区水土流失的最主要降雨模式。研究区红壤饱和入渗速率为122.3~489.0 mm/h^[17], 远高于大部分降雨事件的雨强, 红壤对该类降雨响应时间短, 导致降雨未充分下渗及土壤饱和情况下形成地表径流。同时, 此类高强度降雨能迅速破坏地表介壳、剥离土壤颗粒, 进而造成土壤侵蚀。 R_{III} 模式特征与其他地区相比具有共同性, 如喀斯特岩溶区^[13]、北方土石山区^[30]、黄土高原^[12]、中南地区^[11,21]。

R_{IV} 是区域气候环境水平上最具破坏力的降雨模式。该模式具有长历时、大雨强、多雨量特征, 前期降雨补充土壤水分后使土壤入渗能力持续保持在较低水平^[11,22]; 植被对该模式降雨也会在短时间内形成饱和截留, 无法继续有效拦截降雨^[21,31], 因而具有较高的产流能力(图4b)。该降雨模式下, 土壤侵蚀类型随着降雨历时延长逐步由降雨侵蚀变化为径流与降雨综合侵蚀, 进而引发更强烈的土壤流失^[32]。由于该极端降雨具有较大的土壤剥离与径流输送能力, 容易引起泥石流、洪涝等灾害, 是区域应积极防范的灾害性天气。

2.4 不同降雨模式下水土流失随植被结构类型的分异特征

降雨和植被对水土流失过程发挥着互相竞争性影响,不同的植被结构与降雨模式叠加将产生复杂的产流、产沙情景^[21]。在 R_I 模式下,各小区水土流失量较小且不存在组间差异; R_{II} 模式下其差异显著($P<0.05$),但绝对相差依然较小。在 R_{III} 模式下,HS 和 F 小区的径流量比 GS、G 小区高出 0.62~1.71 倍,土壤侵蚀量高出 2.30~4.63 倍;在 R_{IV} 模式下,HS、F 小区的径流量比 GS、G 小区高出 0.32~0.78 倍,土壤侵蚀量则高出 3.37~7.42 倍(图 5)。显然,不同植被结构类型下的水土流失对降雨模式的响应存在差异。

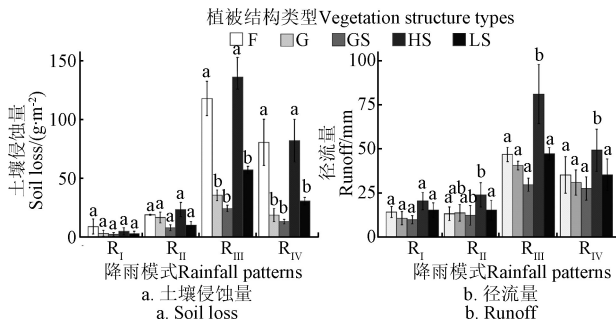


图 5 不同降雨模式下水土流失随植被结构类型的分异特征
Fig.5 Difference of water and soil erosion with vegetation structure type under different rainfall pattern

3 讨论

3.1 不同降雨模式下植被对水土流失的影响

RDA 分析显示,不同降雨模式下降雨与植被对水土流失的解释方差并不一致(图 6),表明降雨和植被共同影响,改变了地表产流、产沙的响应。 R_I 模式下,植被、降雨对侵蚀量的解释方差占比为 0.37、0.56,植被是侵蚀发生的首要控制因素; R_{II} 模式下,二者的解释力相接近,分别为 0.57、0.42,表明降雨和植被平衡控制土壤侵蚀; R_{III} 、 R_{IV} 模式下,植被、降雨的解释能力依次为 0.22、0.63 和 0.14、0.74,降雨是侵蚀发生的首要控制因素(图 6a)。就径流而言,无论在何种降雨模式下,降雨的影响力均高于植被,并且二者作用力大小也随降雨模式变化(图 6b)。

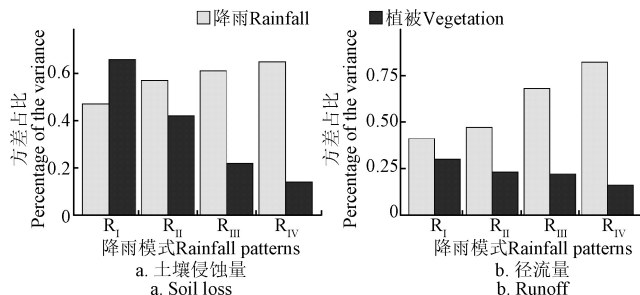


图 6 不同降雨模式下降雨和植被分别对土壤侵蚀与径流的影响
Fig.6 Effects of rainfall and vegetation on soil erosion and runoff under different rainfall patterns

降雨、植被对水土流失产生过程有着复杂竞争性关系。Fang 等^[33]在北亚热带红壤区研究表明,不同降雨模式下降雨对水土流失的影响高于植被因素;Wei 等^[34]在黄土高原地区研究显示,降雨与植被随着降雨模式变化

交替主控水土流失;Huang 等^[21]定性分析了红壤区降雨与植被对水土流失竞争性作用,认为分 3 种情形:降雨主控、植被主控与综合控制。本研究 RDA 分析表明,植被与降雨对水土流失的影响力并不固定,随降雨模式的变化而改变,这与上述研究结果相近,但略有差异。这是由于 Fang 等^[33]基于主观聚类法划分的 3 种降雨模式中,忽视了弱降雨模式存在;而黄土高原地区降雨模式较为简单,对降雨、植被与水土流失的关系较为单一。相较而言,本文与 Huang 等^[21]研究结果能够较好地反映出红壤区降雨、植被对水土流失影响力的可变性。

已有研究关于植被的水土保持能效忽略了降雨模式的影响。本研究基于降雨模式的考虑,能更准确评价植被抑制侵蚀的作用,并认识植被与降雨之间的竞争性。随着降雨模式由 R_I 变化为 R_{II} 乃至 R_{III} 、 R_{IV} ,植被抑制水土流失的作用逐渐减小,这取决于植被结构对不同的降雨的响应。在小雨强、长历时的降雨条件下,植被的截留与削弱雨滴动能能力最好,而在大雨强、短历时的降雨条件下较差。Li 等^[35]在闽西北红壤林地研究表明,马尾松灌木对小雨强(7 mm/h)降雨的截留率最高,一定雨强下(30 mm/h)截留趋近饱和;且降雨动能与雨强呈指数关系,当雨强达到一定阈值(14 mm/h)后,植被对降雨动能的削减达到饱和。这些研究更加证实了植被水土保持功能对降雨模式的依赖性。

3.2 不同植被结构类型下降雨对水土流失的影响

不同植被结构类型下降雨和植被对水土流失影响存在差异(图 7)。从土壤侵蚀方面来看(图 7a),GS 植被结构下降雨的解释方差为 0.57,植被为 0.21,降雨的影响是植被的 2.71 倍;G 植被结构下降雨影响是植被的 3.57 倍。在单一灌、乔(LS、HS、F)植被结构下,降雨影响更大,分别是植被的 5.69、19.33、10.50 倍。试验区所涉及的植被结构类型中,降雨对侵蚀的影响大于植被,这与 Mishra 等^[36]、Yu 等^[37]分别基于全球、径流小区尺度的研究结果类似。另从径流方面来看(图 7b),除了 G、GS 植被条件下植被的解释方差高于降雨外,其他条件下则相反;G、GS、LS、F、HS 植被结构类型下,降雨的解释方差分别是植被的 0.64、0.60、1.64、7.33、7.00 倍。表明区域降雨条件下,植被的调节作用在近地表(G、GS)结构下比单一乔、灌木(LS、HS、F)结构更强;相应地,降雨作用在乔、灌木植被结构下比近地表植被结构下更强。

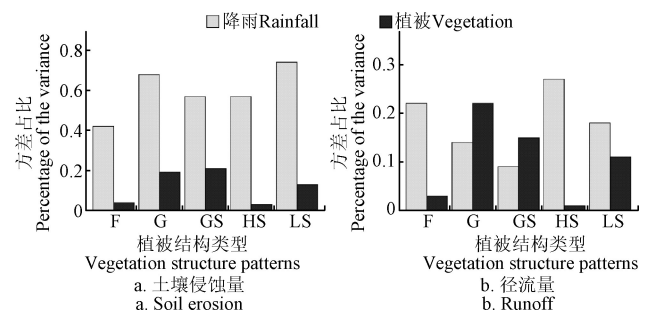


图 7 不同植被结构类型下降雨和植被对水土流失的影响
Fig.7 Effects of rainfall and vegetation on runoff and soil erosion under different vegetation structure types

同一气候降雨水平上, 植被类型及其结构形态是引起土壤侵蚀空间异质性的主要来源。已有研究证实了不同植被类型抗侵蚀功能性差异, 但很少关注其调节能力大小^[13]。Zhou 等^[38]在运用结构方程模型揭示了恢复期长的植被对水土流失调节作用比恢复期短的植被更大。Yu 等^[37]利用网络分析和 RDA 分析量化了降雨、植被等要素对水土流失影响, 指出高覆盖、球形冠层植被对水土流失的调节能力比伞形冠层植被更强。本研究针对红壤区典型植被特征, 量化了不同植被结构类型的水土保持功能差异, 进一步证实了近地表植被具有更佳的抑制侵蚀、减少径流作用。同时表明, 植被结构差异诱导了降雨-水土流失过程, 从而影响降雨、植被对水土流失的竞争性影响。

4 结 论

1) 运用自组织映射方法确立了红壤区存在 4 种典型侵蚀降雨模式, 即: R_I 模式(少雨量、弱雨强、长历时); R_{II} 模式(中雨量、中雨强、长历时); R_{III} 模式(短历时、大雨强、雨量集中); R_{IV} 模式(多雨量、大雨强、长历时)。其中 R_{III} 是引起区域水土流失的最主要降雨模式; R_{IV} 模式最具侵蚀破坏力。

2) 不同植被结构类型的水土保持功效从大到小依次为: 灌草混交林(GS)、草地(G)、低灌林(LS)、乔木林(F)、高灌林(HS), 这种差异主要由植被覆盖、结构形态的调控作用实现。

3) 红壤区林下水土流失过程受降雨与植被综合影响, 二者对水土流失的竞争性影响依赖于降雨模式、植被结构类型而呈现一定规律性。在降雨模式水平上, 随着降雨模式由弱至强($R_I \rightarrow R_{II} \rightarrow R_{III} \rightarrow R_{IV}$)变化, 降雨的影响增加, 植被抑制水土流失的能力逐渐减小, 相应地水土流失由植被主控演变为平衡控制、降雨主控。在植被结构类型水平上, 降雨影响总体高于植被, 随着植被结构类型由近地表向单一乔木、灌木结构变化($GS \rightarrow G \rightarrow F \rightarrow LS \rightarrow HS$), 植被调节功能减小, 降雨影响则增加。通过冗余分析定量研究了降雨与植被在不同降雨模式及植被结构下对水土流失的影响, 对红壤区水土流失治理具有积极指导意义。

[参 考 文 献]

[1] 何圣嘉, 谢锦升, 杨智杰, 等. 南方红壤丘陵区马尾松林下水土流失现状、成因及防治[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(6): 65—70.
He Shengjia, Xie Jinsheng, Yang Zhijie, et al. Status, causes and prevention of soil and water loss in Pinus massoniana woodland in hilly red soil region of southern China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(6): 65—70. (in Chinese with English abstract)

[2] 梁音, 张斌, 潘贤章, 等. 南方红壤丘陵区水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 22—27.

Liang Yin, Zhang Bin, Pan Xianzhang, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for hilly region in the Southern China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(1): 22—27. (in Chinese with English abstract)

[3] 水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报[R]. 北京: 水利部, 2013.

[4] 景可, 焦菊英, 李林育, 等. 中国南方红壤丘陵区土壤侵蚀量与泥沙输移比研究[J]. 水利学报, 2010, 41(12): 1476—1482.

Jing Ke, Jiao Juying, Li Linyu, et al. Research on soil erosion amount and sediment delivery ratio in the hilly red soil region of southern China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(12): 1476—1482. (in Chinese with English abstract)

[5] Zhang K, Wen Z. Review and challenges of policies of environmental protection and sustainable development in China[J]. Journal of environmental management, 2008, 88(4): 1249—1261.

[6] Ravi S, Breshears D D, Huxman T E, et al. Land degradation in drylands: Interactions among hydrologic-aeolian erosion and vegetation dynamics[J]. Geomorphology, 2010, 116(3/4): 236—245.

[7] Ludwig J A, Wilcox B P, Breshears D D, et al. Vegetation patches and runoff-erosion as interacting ecohydrological processes in semiarid landscapes[J]. Ecology, 2005, 86(2): 288—297.

[8] Foley J L, Silburn D M. Hydraulic properties of rain impact surface seals on three clay soils-influence of raindrop impact frequency and rainfall intensity during steady state[J]. Soil Research, 2002, 40(7): 1069—1083.

[9] Parsons A J, Stone P M. Effects of intra-storm variations in rainfall intensity on interrill runoff and erosion[J]. Catena, 2006, 67(1): 68—78.

[10] Nciizah A D, Wakindiki I I C. Soil sealing and crusting effects on infiltration rate: A critical review of shortfalls in prediction models and solutions[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2015, 61(9): 1211—1230.

[11] Duan J, Yang J, Tang C, et al. Effects of rainfall patterns and land cover on the subsurface flow generation of sloping Ferralsols in southern China[J]. PloS one, 2017, 12(8): e0182706.

[12] Chen H, Zhang X, Abila M, et al. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2018, 170: 141—149.

[13] Peng T, Wang S. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China[J]. Catena, 2012, 90: 53—62.

[14] 于东升, 史学正. 红壤区不同生态模式的“土壤水库”特征及其防洪减灾效能[J]. 土壤学报, 2003, 40(5): 656—664.
Yu Dongsheng, Shi Xuezheng. Characteristics of soil-water reservoir and their efficiency in flooding control under different ecological patterns of red soils in the south of

- China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(5): 656—664. (in Chinese with English abstract)
- [15] 孙佳佳, 于东升, 史学正, 等. 植被叶面积指数与覆盖度定量表征红壤区土壤侵蚀关系的对比研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(6): 1060—1066.
- Sun Jiajia, Yu Dongsheng, Shi Xuezheng, et al. Comparison of between LAI and VFC in relationship with soil erosion in the red soil hilly region of south China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(6): 1060—1066. (in Chinese with English abstract)
- [16] Wen Z M, Lees B G, Feng J, et al. Stratified vegetation cover index: A new way to assess vegetation impact on soil erosion[J]. *Catena*, 2010, 83(1): 87—93.
- [17] Yu Dong Sheng, Shi Xue Zheng, Weindorf D C. Relationships between permeability and erodibility of cultivated Acrisols and Cambisols in subtropical China[J]. *Pedosphere*, 2006, 16(3): 304—311.
- [18] Zhang W T, Yu Dong Sheng, Shi Xue Zheng, et al. Variation of sediment concentration and its drivers under different soil management systems[J]. *Pedosphere*, 2010, 20(5): 578—585.
- [19] 张黎明, 于东升, 史学正, 等. 不同降雨类型下的南方典型土壤侵蚀量差异研究[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(4): 1—6.
- Zhang Liming, Yu Dongsheng, Shi Xuezheng, et al. Soil loss of different typical soils in south china under different rainfall types[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(4): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [20] Kohonen T. The self-organizing map[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1990, 78(9): 1464—1480.
- [21] Huang Z, Ouyang Z, Li F, et al. Response of runoff and soil loss to reforestation and rainfall type in red soil region of southern China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(11): 1765—1773.
- [22] 秦伟, 左长清, 晏清洪, 等. 红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(2): 124—132.
- Qin Wei, Zuo Changqing, Yan Qinghong, et al. Regularity of individual rainfall soil erosion in bare slope land of red soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(2): 124—132. (in Chinese with English abstract)
- [23] Liu Y J, Yang J, Hu J M, et al. Characteristics of the surface-subsurface flow generation and sediment yield to the rainfall regime and land-cover by long-term in-situ observation in the red soil region, Southern China[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 539: 457—467.
- [24] Zheng F L. Effect of vegetation changes on soil erosion on the Loess Plateau[J]. *Pedosphere*, 2006, 16(4): 420—427.
- [25] 张海东, 于东升, 史学正, 等. 地面三维激光扫描方法研究红壤侵蚀恢复区植被垂直结构[J]. *土壤*, 2014, 46(5): 948—953.
- Zhang Haidong, Yu Dongsheng, Shi xuezheng, et al. Retrieval of forest vertical structure in eroded area of southern china using terrestrial LiDAR systems[J]. *Soil*, 2014, 46(5): 948—953. (in Chinese with English abstract)
- [26] Xu C, Yang Z, Qian W, et al. Runoff and soil erosion responses to rainfall and vegetation cover under various afforestation management regimes in subtropical montane forest[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(14): 1711—1724.
- [27] Llorens P, Poch R, Latron J, et al. Rainfall interception by a *Pinus sylvestris* forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area I. Monitoring design and results down to the event scale[J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 199(3/4): 331—345.
- [28] Geißler C, Lang A C, Von Oheimb G, et al. Impact of tree saplings on the kinetic energy of rainfall: The importance of stand density, species identity and tree architecture in subtropical forests in China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 156: 31—40.
- [29] Nagase A, Dunnett N. Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 104(3/4): 356—363.
- [30] 郭铃莉, 王云琦, 王晨沣, 等. 降雨类型对北方土石山区坡面土壤侵蚀的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(24): 157—164.
- Wu Lingli, Wang Yunqi, Wang Chenfeng, et al. Effect of rainfall patterns on hillslope soil erosion in rocky mountain area of north China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(24): 157—164. (in Chinese with English abstract)
- [31] Brasil J B, de Andrade E M, de Queiroz Palácio H A, et al. Characteristics of precipitation and the process of interception in a seasonally dry tropical forest[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2018, 19: 307—317.
- [32] Bagio B, Bertol I, Wolschick N H, et al. Water erosion in different slope lengths on bare soil[J]. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2017, 41:e0160132.
- [33] Fang N F, Shi Z H, Li L, et al. The effects of rainfall regimes and land use changes on runoff and soil loss in a small mountainous watershed[J]. *Catena*, 2012, 99: 1—8.
- [34] Wei W, Chen L, Fu B, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 335(3/4): 247—258.
- [35] Li G, Wan L, Cui M, et al. Influence of canopy interception and rainfall kinetic energy on soil erosion under forests[J]. *Forests*, 2019, 10(6): 509—523.
- [36] Mishra A K, Placzek C, Jones R. Coupled influence of precipitation and vegetation on millennial-scale erosion rates derived from ^{10}Be [J]. *PloS one*, 2019, 14(1): e0211325.
- [37] Yu Y, Wei W, Chen L, et al. Quantifying the effects of precipitation, vegetation, and land preparation techniques on runoff and soil erosion in a Loess watershed of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 755—764.
- [38] Zhou J, Fu B, Gao G, et al. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2016, 137: 1—11.

Effects of vegetation structure types and rainfall patterns on soil and water loss of understory vegetation in red soil areas of South China

Chen Yang^{1,3}, Zhang Haidong², Yu Dongsheng^{1,3*}, Ma Lixia¹, Lu Xiaosong^{1,3}, Wang Xin^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Soil and Agricultural Sustainable Development, Nanjing Soil Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Suzhou Academy of Agricultural Sciences (Taihu Region Research Institute of Agricultural Science), Suzhou 215155, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Vegetation and rainfall are the key factors that affect the soil and soil erosion. Exploring the surface runoff and soil loss process associated with different rainfall patterns and vegetation structure types is of great significance to the development of soil and water conservation. In this study, we carried out a series of experiments on surface runoffs and sediments monitoring at different runoff plots with five structures types of vegetation (i.e., shrub-grass mixed forest, grassland, low shrub, arbor forest, high shrub). There are 8 runoff test plots with length \times width (10 m \times 2.6 m) on the gentle slope of 8° in Red soil Ecological Experimental Station, Yingtan city. The experiment lasted three years from 2016 to 2018. During the study period, 93 individual natural erosive rainfall events, surface runoffs and sediments data were collected, as well as the vegetation structure parameters were obtained. The self-organizing mapping (SOM) method was applied to classify rainfall patterns according to rainfall characteristic indicators such as rainfall amounts, rainfall durations, 60min maximum rainfall intensity, average rainfall intensity and rainfall amount concentration index. Then the characteristics of soil and water loss under different rainfall patterns and vegetation structure types were studied, and the effect of rainfall and vegetation on soil and water loss were quantitative analysis by redundancy analysis (RDA). The results showed that SOM method could identify the four typical erosion rainfall patterns in red soil region, the rainfall patterns were as follows: R_I (low intensity, long duration, minor amount of rainfall and low rainfall concentration index), R_{II} (medium amount of rainfall, moderate intensity and long duration), R_{III} (short duration, strong rainfall intensity and high rainfall concentration index), R_{IV} (a great amount of rainfall, strong rainfall intensity and long duration). Among all of the erosion rainfall events, the least rainfall was pattern R_{IV}, which was the most erosive and destructive, so it was easy to cause serious soil erosion. R_{III} was the main pattern that made the highest cumulative contribution rate to soil and water loss. The erosion ability of pattern R_{II} was moderate, but it was also easy to cause soil and water loss due to its moderate intensity and long duration. The pattern R_I could hardly cause soil erosion. Vegetation structure types significantly affected the soil erosion and runoff generation, and the soil and water conservation function of different vegetation in turn was as followed the order of shrub-grass mixed forest, grassland, low shrub, arbor forest, and high shrub. RDA results shown that comprehensive interaction effects on soil erosion exist between rainfall patterns and vegetation structure types. The ability of soil and water conservation of vegetation decreased gradually and the effects of rainfall became greater in the later stage of erosion process, when rainfall patterns changed from weak to strong (R_I→R_{II}→R_{III}→R_{IV}), meanwhile the dominant factors of soil and water loss changed from vegetation to the interaction of vegetation and precipitation, and then to rainfalls. The influences of canopy structure on soil and water loss reduced, while the ones of rainfall increased when vegetation structure types changed from near surface vegetation to shrub and tree.

Keywords: erosion; runoff; soils; vegetation structure; rainfall pattern; red soil region in South China