DOI：10.11766/trxb201808270236

不同雨强下喀斯特坡耕地养分流失特征研究*

高儒学[1] 戴全厚[1†] 甘艺贤[1, 2] 彭旭东[1] 严友进[1]

（1 贵州大学林学院，贵阳 550025）

（2 水城县森林公安局现场勘验中心，贵州六盘水 553000）

摘 要 为揭示西南喀斯特坡耕地的养分流失特征，通过人工模拟降雨试验，研究不同雨强下喀斯特坡耕地养分流失的过程机制及特征。结果表明：（1）喀斯特坡耕地产流产沙从地下过渡到地表的临界雨强在30 mm·h^{-1} ~ 50 mm·h^{-1}之间，产流量和产沙量均随降雨强度的增大而增大，且产流产沙主要以地表为主。（2）小雨强（15 mm·h^{-1}和30 mm·h^{-1}）下，喀斯特坡耕地TN、TP、TK主要通过地下径流进行流失，大雨强（≥50 mm·h^{-1}）下，喀斯特坡耕地TN、TP、TK地表流失比例为地下漏失的3倍左右；TP径流流失量及流失浓度均随雨强的增大而增大，TN和TK径流流失量及流失浓度却随雨强的增大变化不明显。（3）喀斯特坡耕地泥沙养分流失也主要是以地表流失为主，地表流失量较地下高出约5.03倍，且泥沙中流失的养分浓度均大于径流中流失的养分浓度；地表泥沙养分富集率整体高于地下漏失部分；地表、地下泥沙养分流失总量与养分流失模数均随降雨强度的增大而增大。（4）喀斯特坡耕地径流总量与径流养分（TP、TK）、泥沙养分（TN、TP、TK）均呈极显著正相关关系（P<0.05），径流总量与径流TN呈现极显著正相关关系（P<0.01）。研究结果可为喀斯特区坡耕地养分流失防治及面源污染治理等提供理论参考依据。

关键词 喀斯特坡耕地；降雨强度；径流；泥沙；养分流失；富集率

中图分类号 S157.1; S158.2 **文献标识码** A

农田土壤养分流失不仅造成土壤肥力降低、土地生产力下降[1]，流失的营养元素进入到水体还会引起水体富营养化[2]，从而破坏生态环境。当前，学术界对农田营养元素流失研究主要通过人工模拟[3]、示踪剂示踪[4]、定位监测[5]等方法进行，研究结果表明影响农田土壤养分流失的因素较多，其中农田土壤类型[6]、坡度[7]、降雨[8]、耕作方式[9]、肥料施用量[10]等均是影响农田氮素流失的主要因素。

坡耕地土壤养分随径流和土壤颗粒的迁移而流失，尤其在径流系数较高的地区更加突出[11]。因此，坡耕地养分流失引起了学术界的的高度重视，部分学者开展了一定的研究，例如王帅兵等[12]对自然降雨条件下反坡台阶对坡耕地氮、磷流失的影响进行了研究，马美景等[13]利用室内放水冲刷试验研究了上方来水流量对红壤坡面径流侵蚀过程中泥沙的迁移规律及土壤溶质运移特征的影响，王玉军等[14]测定分析了农田土壤的养分含量

* 国家重点研发计划课题项目（2016YFC0502604）、贵州省一流学科建设项目（GNYL［2017］007）、国家自然科学基金项目（41671275，41461057）资助 Supported by the National Key Research and Development Plan of China（No. 2016YFC0502604），the First-class Subject Construction Project of Guizhou Province（No. GNYL［2017］007），the National Narural Science Foundation of China（Nos. 41671278，41461057）

† 通讯作者 Corresponding author，E-mail：qhdairiver@163.com

作者简介：高儒学(1991—)，男，贵州织金人，博士研究生，主要从事水土保持与生态恢复重建研究。E-mail：2235274067@qq.com

收稿日期：2018-08-27；收到修改稿日期：2018-10-27；优先数字出版日期（www.cnki.net）：2018-11-19

及分布特征，Wu等[8]通过人工降雨的方法研究了降雨强度及坡度对黄土坡面氮素流失的影响，郑海金等[15]研究指出控制红壤坡地农业氮素流失关键在于控制各层次壤中流的形成和减少硝态氮淋溶损失下移。坡耕地是西南喀斯特地区最主要的耕地类型，也是水土流失的主要发生地之一，然而由于受喀斯特区特殊的地表、地下立体双层结构特征的影响[16-17]，降雨会形成地表和地下径流，地下径流主要通过地下孔裂隙、竖井、落水洞等地下岩溶管道以地下漏失形式流失[4]，因此，喀斯特区坡耕地养分流失过程存在一定的特殊性和复杂性。

近年来，学术界逐步关注到喀斯特区域土壤养分流失，并开展了一系列研究。有学者对典型喀斯特流域浅层地下水化学特征及水质状况进行了研究，为喀斯特山区水资源的保护提供了科学参考依据[18]；俞月凤等[19]研究表明在区域大尺度下，影响桂西北喀斯特石灰土养分空间变异特征的重要因素是地形因子和植被类型；胡芳等[20]对桂西北典型喀斯特峰丛洼地不同植被恢复阶段根际土壤养分的富集效应进行研究发现大多数养分表现出明显的富集效应；同时也有学者对喀斯特区不同土壤类型[21]、不同土地利用方式下[22]坡耕地土壤养分特征进行了研究；此外，还有学者通过野外观测对喀斯特灌丛坡地雨季典型降雨产流和氮素流失特征进行了研究[23]。然而，由于喀斯特区野外实验开展难度较大且实验不可控因素较多，部分学者试图采用人工模拟实验对喀斯特坡耕地养分流失特征进行研究，主要集中在探讨地下裂隙、降雨强度等对土壤养分流失的影响，研究结果显示喀斯特地区的裂隙结构加剧了地下径流中氮素的渗漏[24]，降雨强度对地表径流养分输出负荷影响显著[25]。

整体来看，目前对于喀斯特坡耕地养分流失研究相对薄弱，仅处于初步探索阶段，缺乏系统的研究，且由于岩溶地区多重介质环境特点使得其研究方法有限，研究难度较大，研究结果存在一定的异同，已有研究尚未能全面揭示喀斯特坡耕地养分流失规律，尤其是其地下养分流失机制。因此，本研究在采用实验钢槽模拟喀斯特坡地二元结构的基础上，通过人工模拟降雨实验研究不同降雨强度下喀斯特坡耕地养分流失的过程机制及特征，以期为喀斯特区坡耕地养分流失防治及面源污染治理等提供理论参考依据，为喀斯特区生态防护体系的构建及区域经济可持续发展奠定理论基础。

1　材料与方法

1.1　试验土样

石灰土是西南喀斯特地区重要的土壤类型之一，本研究的试验土样为贵州省贵阳市花溪区喀斯特坡耕地（26°19′17″N、106°39′18″E）的石灰性土壤，具有一定的典型性。试验土样的全氮（TN）含量为1.72 $g\cdot kg^{-1}$，全磷（TP）含量为1.69 $g\cdot kg^{-1}$，全钾（TK）含量为8.47 $g\cdot kg^{-1}$，砂粒、粉粒和黏粒分别占37.34%、47.53%和15.13%。降雨开始前，将供试土样在室内风干后，剔除大的石块、植物根系等杂质，并对较大的土壤团块进行分散处理；试验用于模拟基岩裸露率的岩石均为直径≥35 cm的碳酸盐岩石，测量并标记出30 cm以上的部分，随机分布于实验钢槽中，使30 cm以上的裸露率达到实验设计水平，并利用坡面垂直影像进行基岩裸露率的校核。

1.2　试验仪器

试验仪器包括试验钢槽和降雨设备。试验钢槽采用戴全厚等[26]设计的变坡钢槽，钢槽长宽高为4.0 m×1.5 m×0.35 m。钢槽底部有两块可活动的钢板，上面均匀分布有192个直径5 cm的孔，孔（裂）隙度在0～8%之间可调，钢槽的坡度在0～45° 之间可调，钢槽设有地表、地下径流集流槽，用于收集地表、地下径流。降雨设备采用QYJY～501型便携式全自动下喷式人工降雨设备，降雨设备的有效面积为6.5 m×6.5 m，降雨高度为6 m，降雨设备的调节精度为7 $mm\cdot h^{-1}$，调节变化时间<30 s，可手动控制雨强范围为10～200 $mm\cdot h^{-1}$，雨滴大小调控范围为0.37～6 mm，降雨均匀度>85%，试验前在钢槽两侧放置雨量筒，用以率定雨强。

1.3　试验设计

基于课题组对贵州省喀斯特主要分布区域贵阳市、安顺市、遵义市、黔南州、毕节市等地区160个样地调查结果，贵州省喀斯特坡耕地的基岩裸露率在10%～20%居多，坡度在10°～25°分布较多，地下孔（裂）隙度分布最大为5.98%[27]，因此，本研究以坡耕地基岩裸露率20%，坡度20° ，

地下孔（裂）隙度3%为研究对象，同时根据贵州省降雨资料设计降雨强度为15、30、50、70、90 mm·h^{-1}。将碳酸盐岩石随机排列于变坡钢槽中，使30 cm以上的裸露率达到实验设计水平，并利用坡面垂直影像进行基岩裸露率的校核。通过调节变坡钢槽底部的孔洞，可使地下孔（裂）隙达到设置水平[28]。钢槽的填土为3层，每层10 cm，土壤紧实度自下而上依次为1 070、760、410 kPa。填充好土壤后，用特制木板耙平填土表面，压实土壤边界处以减小边界效应影响，调节坡度与地下裂隙度至设计水平。在每场降雨前先小雨沉降，使土壤水分饱和并产流后，开始计时收集水样，产流为30 min，每3 min用500 ml的聚乙烯瓶取一次地表径流与地下孔（裂）隙流的水样，用于测定径流水样中全氮、全磷、全钾含量，其余径流全部收集在径流大桶内，测定径流及泥沙量。待降雨30 min一场结束后，更换土壤且达到设计要求后开始下一场降雨，重复三次。

1.4 样品分析

水样采集后现场加酸保存，并于24 h内进行室内分析。水样中全氮采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法测定，全磷采用过硫酸钾氧化—钼锑抗比色法测定，全钾采用原子吸收光谱仪法测定；泥沙中的全氮采用重铬酸钾硫酸消化法测定，全磷采用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法测定，全钾采用酸溶—火焰光度法测定；具体操作步骤参考国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》[29]。测定试验用水养分含量作为空白样，径流养分的结果扣除该空白即为径流流失的养分含量。

1.5 数据处理

试验数据采用SPSS18.0统计分析和Excel2010软件进行处理。

2 结 果

2.1 雨强对产流产沙的影响

径流与泥沙是养分流失的载体，喀斯特坡耕地发生水土流失时，养分会随着径流泥沙一起流失。试验表明降雨强度较小（15、30 mm·h^{-1}）时，喀斯特坡耕地地表不产流，径流以地下孔（裂）隙流为主（图1）；而降雨强度较大（50、70、90 mm·h^{-1}）时，喀斯特坡耕地地表地下均产流，产流量和产沙量随降雨强度的增大而增大，且产流产沙主要以地表为主；地表与地下产流量随降雨历时的增大先增大后趋与平缓，产沙量随降雨历时的增大先增大后缓慢减小（图2）。

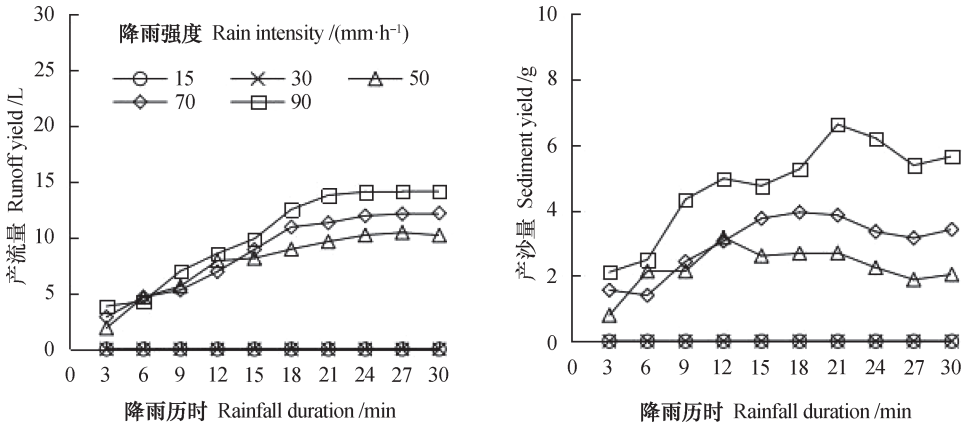

图1 地表产流产沙变化特征图

Fig. 1 Characteristics of runoff and sediment yield on the surface

2.2 雨强对径流养分输出的影响

土壤养分的输出方式主要是泥沙携带及径流溶解。表1～表3是根据各降雨强度下喀斯特坡耕地径流TN、TP、TK流失情况统计而成。由表可知，雨强对养分输出浓度影响不明显，但对养分流失量影响较为明显，尤其是对地下径流养分输出量。此外，表1、表2、表3显示，对于地表径流养分流失量及流失浓度而言，总体上TP的流失量及流失浓度均随雨强的增大而增大，TN和TK流失量及流失浓度却随雨强的增大出现波动性变化；TN的养

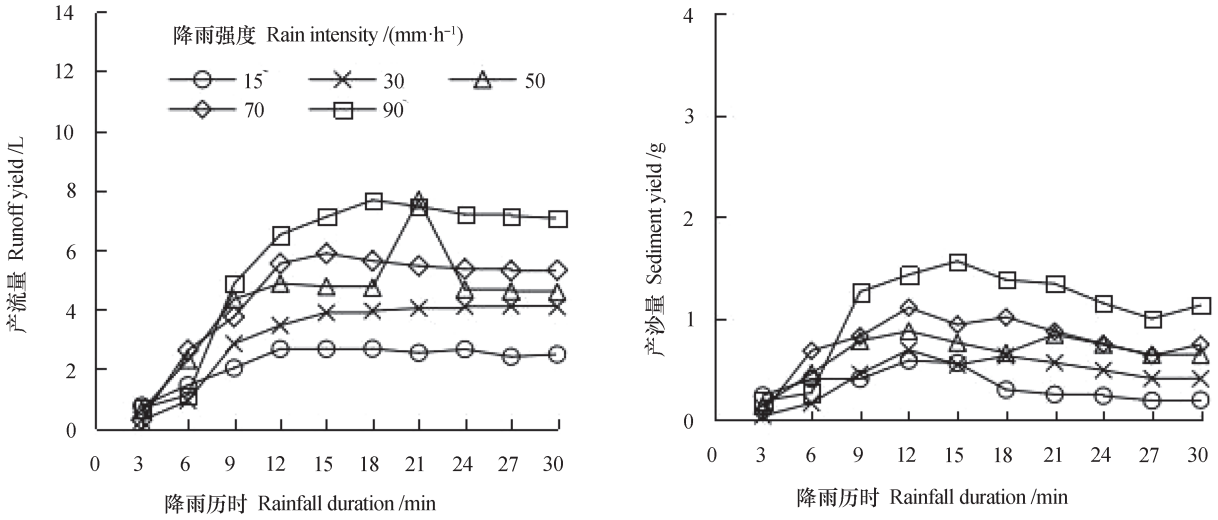

图2　地下产流产沙变化特征图

Fig. 2　Characteristics of runoff and sediment yield under ground

分流失模数在72.82 ~ 95.54 mg·h^{-1}·m^{-2}之间，TP的养分流失模数在6.36 ~ 11.06 mg·h^{-1}·m^{-2}之间，TK的养分流失模数在16.99 ~ 23.86 mg·h^{-1}·m^{-2}之间，TN、TP、TK地表流失比例在68.13% ~ 82.78%之间，这说明坡耕地土壤养分大部分随地表径流而流失。对于地下孔（裂）隙流养分流失而言，整体上TN、TP、TK的漏失量均随雨强的增大而增大；TN的养分流失模数在15.15 ~ 48.47 mg·h^{-1}·m^{-2}之间，TP的养分流失模数在1.37 ~ 3.16 mg·h^{-1}·m^{-2}之间，TK的养分流失模数在2.16 ~ 6.12 mg·h^{-1}·m^{-2}之间，降雨强度为15 mm·h^{-1}和30 mm·h^{-1}时，地下漏失的养分占100%；当降雨强度大于等于50 mm·h^{-1}时，TN、TP、TK地下流失比例在19.19% ~ 33.66%之间。由此可知，小雨强下，喀斯特坡耕地径流养分流失以地下孔（裂）隙流养分流失为主，而大雨强下，养分流失主要以地表径流流失为主，且地表流失的养分比例是地下漏失的3倍左右。

表1　径流TN输出变化情况

Table 1　Variation of TN output with runoff

类型 Type	降雨强度 Rainfall intensity /（mm·h^{-1}）	平均流失浓度 Average loss concentration /（mg·L^{-1}）	流失量 Total loss /mg	养分流失模数 Nutrient loss modulus /（mg·h^{-1}·m^{-2}）	流失比例 Loss ratio /%	平均流失量 Average loss /（mg·min^{-1}）
地表 Surface	15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	50	2.88 ± 0.15	224.45 ± 11.64	74.82 ± 3.88	72.84	7.48
	70	2.49 ± 0.07	218.47 ± 5.75	72.82 ± 1.92	68.13	7.28
	90	2.78 ± 0.05	286.61 ± 5.46	95.54 ± 1.82	66.34	9.55
地下 Underground	15	2.06 ± 0.06	45.46 ± 1.38	15.15 ± 0.46	100	1.52
	30	2.10 ± 0.10	65.51 ± 3.24	21.84 ± 1.08	100	2.18
	50	2.11 ± 0.09	83.69 ± 3.46	27.90 ± 1.15	27.16	2.79
	70	2.27 ± 0.12	102.20 ± 5.37	34.07 ± 1.79	31.87	3.41
	90	2.52 ± 0.10	145.42 ± 5.50	48.47 ± 1.83	33.66	4.85

表2 径流TP输出变化情况

Table 2 Variation of TP output with runoff

类型 Type	降雨强度 Rainfall intensity /（mm·h^{-1}）	平均流失浓度 Average loss concentration /（mg·L^{-1}）	流失量 Total loss /mg	养分流失模数 Nutrient loss modulus /（mg·h^{-1}·m^{-2}）	流失比例 Loss ratio /%	平均流失量 Average loss /（mg·min^{-1}）
地表 Surface	15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	50	0.24 ± 0.04	19.08 ± 3.18	6.36 ± 1.06	75.33	0.64
	70	0.27 ± 0.05	22.21 ± 4.11	7.40 ± 1.37	75.54	0.74
	90	0.33 ± 0.03	33.19 ± 4.02	11.06 ± 1.34	77.76	1.11
地下 Underground	15	0.19 ± 0.06	4.11 ± 1.30	1.37 ± 0.43	100	0.14
	30	0.18 ± 0.07	5.64 ± 2.19	1.88 ± 0.73	100	0.19
	50	0.16 ± 0.04	6.25 ± 1.56	2.08 ± 0.52	24.67	0.33
	70	0.16 ± 0.03	7.19 ± 1.35	2.40 ± 0.50	24.46	0.24
	90	0.17 ± 0.03	9.49 ± 1.67	3.16 ± 0.56	22.24	0.32

表3 径流TK输出变化情况

Table 3 Variation of TK output with runoff

类型 Type	降雨强度 Rainfall intensity /（mm·h^{-1}）	平均流失浓度 Average loss concentration /（mg·L^{-1}）	流失量 Total loss /mg	养分流失模数 Nutrient loss modulus /（mg·h^{-1}·m^{-2}）	流失比例 Loss ratio /%	平均流失量 Average loss /（mg·min^{-1}）
地表 Surface	15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	50	0.65 ± 0.11	50.97 ± 8.64	16.99 ± 2.88	80.81	1.70
	70	0.82 ± 0.13	71.57 ± 11.32	23.86 ± 3.77	82.78	2.39
	90	0.65 ± 0.09	69.53 ± 5.59	23.18 ± 3.20	78.86	2.32
地下 Underground	15	0.29 ± 0.02	6.49 ± 0.44	2.16 ± 0.15	100	0.22
	30	0.27 ± 0.03	8.22 ± 0.92	2.74 ± 0.30	100	0.27
	50	0.29 ± 0.05	12.10 ± 2.06	4.03 ± 0.69	19.19	0.40
	70	0.31 ± 0.04	14.89 ± 1.89	4.96 ± 0.63	17.22	0.50
	90	0.47 ± 0.07	18.64 ± 2.77	6.12 ± 0.92	21.14	0.62

将不同雨强下TN、TP、TK输出量随降雨时间的变化情况点绘成图，如图3～图5所示。整体来看，喀斯特坡耕地地表养分流失量随降雨历时的增加表现为先增大而后趋于平缓，且不同降雨强度下地表养分流失规律亦表现为雨强越大，变化趋势越明显；地下养分漏失量随降雨历时增加也表现出相同的变化规律。另一方面，喀斯特坡耕地地表养分流失量随降雨历时变化的时间转折点集中在第27 min左右，而地下养分流失量随降雨历时变化的时间转折点提前至第15～18 min，因此，喀斯特区坡耕地养分流失防治地表和地下不同时间段有所区别，本研究结果可提供一定的参考。

2.3 雨强对泥沙养分输出的影响

表4～表5是根据各降雨强度下喀斯特坡耕地泥沙TN、TP、TK流失情况统计而成。整体来看，泥沙中流失的养分浓度均大于径流中流失的养分浓度。就地表泥沙养分流失情况而言，除TN以外，TP与TK的富集率基本均大于1；地表泥沙养分流失总量与养分流失模数均随降雨强度的增大而增大，TN输出量在25.3～

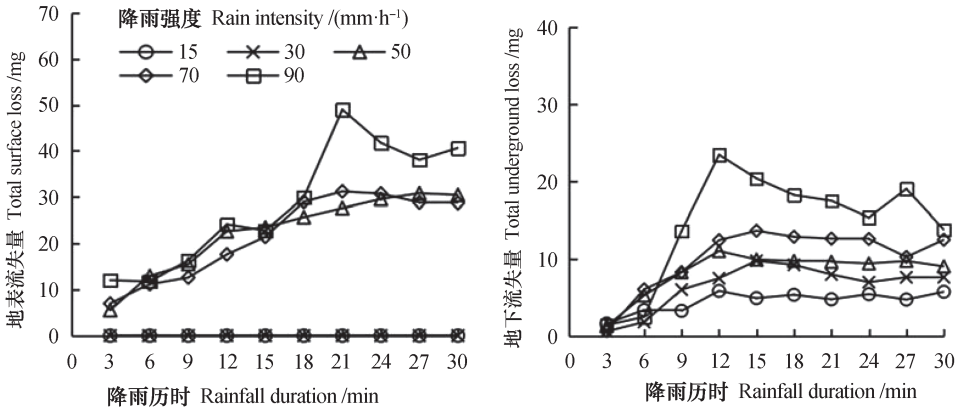

图3　径流TN输出变化情况

Fig. 3　TN output with runoff

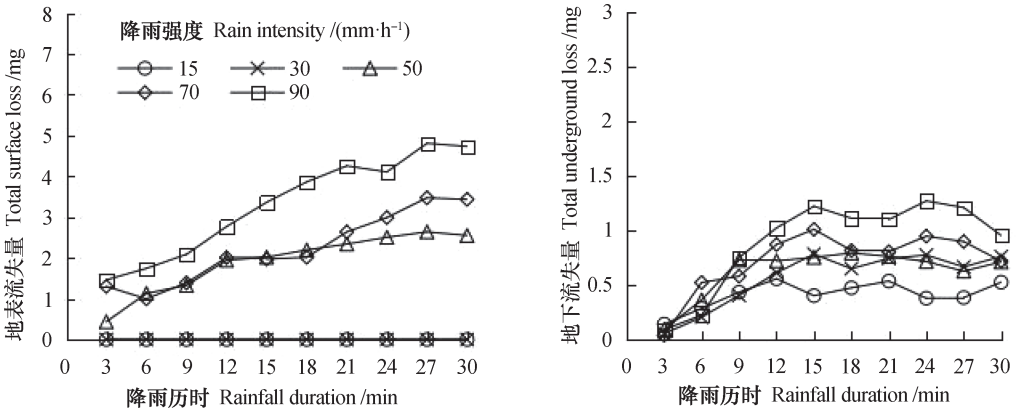

图4　径流TP输出变化情况

Fig. 4　TP output with runoff

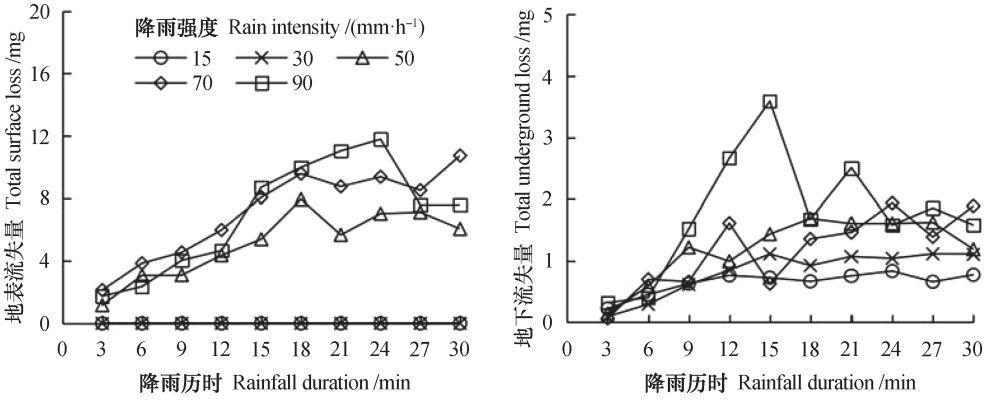

图5　径流TK输出变化情况

Fig. 5　TK output with runoff

67.45 mg之间，TP输出量在39.13～93.98 mg之间，TK输出量在183.47～444.61 mg之间；TN养分流失模数在8.44～22.48 mg·h^{-1}·m^{-2}之间，TP养分流失模数在13.04～31.33 mg·h^{-1}·m^{-2}之间，TK养分流失模数在61.16～148.30 mg·h^{-1}·m^{-2}之间。

表4 不同雨强下地表泥沙养分流失情况

Table 4 Loss of nutrients with surface sediment relative to rainfall intensity

类型 Type	降雨强度 Rainfall intensity /（mm·h^{-1}）	平均流失浓度 Average loss concentration /（mg·L^{-1}）	流失量 Total loss /mg	养分流失模数 Nutrient loss modulus /（mg·h^{-1}·m^{-2}）	平均流失量 Average loss /（mg·min^{-1}）	富集率 Enrichment rate
TN	15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	50	1.13 ± 0.14	25.33 ± 3.14	8.44 ± 1.05	0.84	0.66
	70	1.41 ± 0.21	42.25 ± 6.29	14.08 ± 2.10	1.41	0.82
	90	1.41 ± 0.17	67.45 ± 8.13	22.48 ± 2.71	2.25	0.82
TP	15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	50	1.75 ± 0.22	39.13 ± 4.92	13.04 ± 1.64	1.30	1.04
	70	1.87 ± 0.19	55.91 ± 5.17	18.64 ± 1.89	1.86	1.11
	90	1.97 ± 0.15	93.98 ± 7.16	31.33 ± 2.39	3.13	1.17
TK	15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	50	8.19 ± 0.31	183.47 ± 6.94	61.16 ± 2.31	6.12	0.96
	70	9.47 ± 0.28	282.93 ± 8.37	94.31 ± 2.79	9.43	1.12
	90	9.33 ± 0.17	444.91 ± 8.11	148.30 ± 2.70	14.83	1.10

表5 不同雨强下地下泥沙养分流失情况

Table 5 Loss of nutrient with underground sediment relative to rainfall intensity

类型 Type	降雨强度 Rainfall intensity /（mm·h^{-1}）	平均流失浓度 Average loss concentration /（mg·L^{-1}）	流失量 Total loss /mg	养分流失模数 Nutrient loss modulus /（mg·h^{-1}·m^{-2}）	平均流失量 Average loss /（mg·min^{-1}）	富集率 Enrichment rate
TN	15	1.70 ± 0.11	8.92 ± 0.58	2.97 ± 0.19	0.30	0.99
	30	1.13 ± 0.08	7.55 ± 0.53	2.52 ± 0.18	0.25	0.66
	50	1.56 ± 0.13	11.47 ± 0.96	3.82 ± 0.32	0.38	0.91
	70	1.41 ± 0.07	13.08 ± 0.65	4.36 ± 0.22	0.44	0.82
	90	1.13 ± 0.12	13.45 ± 1.43	4.48 ± 0.48	0.45	0.66
TP	15	1.51 ± 0.23	7.93 ± 1.21	2.64 ± 0.40	0.26	0.89
	30	1.86 ± 0.11	12.40 ± 0.73	4.13 ± 0.24	0.41	1.10
	50	1.71 ± 0.15	12.58 ± 1.10	4.19 ± 0.37	0.42	1.01
	70	1.62 ± 0.09	14.98 ± 0.83	4.99 ± 0.28	0.50	0.96
	90	1.57 ± 0.13	18.67 ± 1.55	6.22 ± 0.52	0.62	0.93
TK	15	9.68 ± 0.22	50.92 ± 1.16	16.97 ± 0.39	1.70	1.14
	30	8.97 ± 0.17	59.88 ± 1.13	19.96 ± 0.38	2.00	1.06
	50	8.34 ± 0.19	61.45 ± 1.40	20.48 ± 0.47	2.05	0.98
	70	8.48 ± 0.21	78.39 ± 1.94	26.13 ± 0.65	2.61	1.00
	90	9.40 ± 0.16	111.74 ± 1.90	37.25 ± 0.63	3.72	1.11

对于地下漏失的泥沙养分而言，TP与TK的富集率在1左右，TN的富集率地下和地表一样均小于1。整体来看，地下泥沙养分流失总量与养分流失模数亦均随降雨强度的增大而增大，TN漏失量在8.92 ~ 13.45 mg之间，TP漏失量在7.93 ~ 18.67 mg之间，TK漏失量在50.92 ~ 111.7 mg之间；TN养分流失模数在2.97 ~ 4.48 $mg \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$之间，TP养分流失模数在2.64 ~ 6.22 $mg \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$之间，TK养分流失模数在16.97 ~ 37.25 $mg \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$之间。

总体而言，这是由于随着雨强的增大，坡耕地产沙量亦增大，相应带走了更多的养分。同时，地表流失养分的富集率整体高于地下漏失部分，地表养分的输出量较地下漏失量约高出5.03倍，即喀斯特坡耕地泥沙养分流失亦主要是以地表流失为主。

2.4　径流总量与养分流失的相关性

径流与降雨密切相关，降雨产生的径流携带泥沙及养分进行迁移，导致土壤养分的流失，径流为泥沙的流失提供了基础动力。因此，为了进一步探究径流与各流失养分之间的关系，对径流量与各养分流失量进行相关性分析。结果表明，径流总量与径流养分（TP、TK）、泥沙养分（TN、TP、TK）均呈现极显著正相关关系（$P<0.05$），径流总量与径流TN呈现显著正相关关系（$P<0.01$）（表6）。

表6　径流总量与各养分指标之间的相关性

Table 6　Correlation coefficient of volume of runoff with nutrient loss relative to type of nutrient

指标 Index	径流总量① Runoff volume	径流全氮② TN in runoff	径流全磷③ TP in runoff	径流全钾④ TK in runoff	泥沙全氮⑤ TN in sediment	泥沙全磷⑥ TP in sediment	泥沙全钾⑦ TK in sediment
径流总量①	1						
径流全氮②	0.939*	1					
径流全磷③	0.959**	0.992**	1				
径流全钾④	0.966**	0.973**	0.962**	1			
泥沙全氮⑤	0.979**	0.962**	0.987**	0.943*	1		
泥沙全磷⑥	0.965**	0.967**	0.991**	0.932*	0.997**	1	
泥沙全钾⑦	0.972**	0.960**	0.987**	0.932*	0.991**	0.992**	1

注：**表示在0.01 水平（双侧）上显著相关；*表示在 0.05 水平（双侧）上显著相关 Note: ** means significant correlation at 0.01 level (bilateral); * means significant correlation at 0.05 level (bilateral) ①Runoff volume，②TN in runoff，③TP in runoff，④TK in runoff，⑤TN in sediment，⑥TP in sediment，⑦TK in sediment

3　讨　论

降雨是水土流失和面源污染的主要动力[12]，降雨形成径流对坡面进行冲刷带走泥沙从而出现侵蚀现象，而喀斯特区由于其特殊的地质构造，地下岩溶裂隙发育，因此雨水携带泥沙沿坡面流失的同时还会通过地下岩溶裂隙流失[27]。本研究表明当降雨强度为15、30 $mm \cdot h^{-1}$时，产流主要是以地下孔（裂）隙流为主，喀斯特坡耕地坡面不产流，其原因主要是喀斯特坡面主要为超渗产流，小雨强下喀斯特坡面入渗率大于降雨强度，因此坡面不产流，而当降雨强度超过了一定的临界值，坡面便开始出现产流，因此，喀斯特坡耕地坡面产流临界雨强在30 $mm \cdot h^{-1}$ ~ 50 $mm \cdot h^{-1}$之间；同时，本研究还显示喀斯特坡耕地地表地下产流产沙受降雨强度影响显著，这与其他学者的研究结论一致[28]。

氮磷钾为土壤中主要的三大主要营养元素，也是植物生长发育所必需的元素，氮磷钾的流失直接影响到坡耕地生产力，因此了解掌握坡耕地氮磷钾流失规律是做好养分流失防护的前提和基础。通常情况下，土壤中氮磷钾元素活性有一定的差异，全氮和钾素极易随着径流进行流失，磷素由于吸附性较强主要随土壤流失。降雨强度、降雨量及降雨时空分布等主要降雨特征是影响坡面土壤养分流失的关键因素[39]，坡面土壤养分受降雨的影响可以总结为受雨滴作用而流失和随雨水入渗[31]，降雨初期土壤养分会随着土壤溅蚀而流失，随着降雨的进行，径流开始对土壤中的养分浸提，土壤养分随雨

水和雨水携带的泥沙流失。本研究结果显示小雨强下，喀斯特坡耕地径流养分流失以地下孔（裂）隙流流失为主，而大雨强下，养分流失主要以地表径流流失为主，且地表流失的养分比例是地下漏失的3倍左右，这与产流产沙量变化规律一致。

有研究指出坡面土壤养分中TN流失量随着降雨强度的增大而增大[8]，TN、TP径流养分浓度与雨强关系不明显[32]，而本研究结果显示喀斯特坡耕地径流中TP的输出量及TP流失浓度均随雨强的增大而增大，TN和TK径流输出量及流失浓度却随雨强的增大出现波动性变化，这与其他地区研究得出的径流养分流失浓度存在降雨初期冲刷效应结论不同[33]，也有学者研究发现TP流失量随降雨强度的增大而增加[34]。总体来看，土壤养分流失是一个复杂的变化过程，其受到多种因素的影响，加上喀斯特区特殊的地下二元结构，径流分为地表和地下，因此，喀斯特区坡耕地径流养分流失规律有别于其他地区，今后应加强地下构造对其影响的研究，且土壤养分在地下孔裂隙中是如何运移的当前尚无研究涉及。

除随溶解于径流中流失外，泥沙携带也是土壤养分流失的重要途径，有研究指出泥沙中TN流失主要受产沙率的控制，降雨强度的增加一般会增加TN流失率[35]。本研究结果表明地表泥沙养分流失浓度随雨强增大而增大，地下泥沙养分流失浓度随雨强增大呈波动性变化，且雨强对地表地下泥沙养分总体流失量的影响呈正相关关系，而陈晓燕等[36]对三峡库区紫色土陡坡地养分流失规律研究指出侵蚀泥沙全氮、有效磷、速效钾浓度随雨强增大的变化规律不明显，但均有富集现象，且富集程度与雨强无明显相关关系。本研究显示喀斯特坡耕地泥沙TN、TP、TK亦均有富集现象，且富集程度与雨强关系不明显。因此，喀斯特区坡耕地泥沙养分流失规律与其他地区存在一定的差异，究其原因是否与其特殊的地质构造有关当前尚不可知，且该区错综复杂的水文过程更进一步使其养分流失规律呈现多样性；此外该区泥沙养分富集程度是否与地下孔裂隙度与坡度等相关有待进一步的研究证实。

本研究还显示，喀斯特坡耕地TN的输出方式主要是以径流为主，TK的输出方式主要是通过泥沙，TK泥沙流失量较径流中的约高出6倍，TP随径流和泥沙流失量相当。整体来看，喀斯特坡耕地TN、TP、TK流失主要以地表流失为主，但是地下流失部分亦不容忽视，因其能直接通过地下裂隙管道进入地下水系统造成水体污染，因此，控制喀斯特地下孔（裂）隙流是防治喀斯特区面源污染的重要手段。

4 结 论

喀斯特坡耕地地表产流产沙从地下过渡到地表的临界雨强在30 $mm \cdot h^{-1}$ ~ 50 $mm \cdot h^{-1}$之间。小雨强（15 $mm \cdot h^{-1}$和30 $mm \cdot h^{-1}$）下，喀斯特坡耕地TN、TP、TK主要通过地下径流进行流失，应注重地下流失防治。大雨强（≥50 $mm \cdot h^{-1}$）下，喀斯特坡耕地TN、TP、TK出现地表及地下流失，且地表流失的养分比例是地下漏失的3倍左右，因此应该以地表防治为主，地下防治为辅。TP径流流失量及流失浓度均随雨强的增大而增大，TN和TK径流流失量及流失浓度却随雨强的增大变现为波动性变化。喀斯特坡耕地泥沙养分流失主要是以地表流失为主，且泥沙中流失的养分浓度均大于径流中流失的养分浓度；地表泥沙养分富集率整体高于地下漏失部分；地表、地下泥沙养分流失总量与养分流失模数均随降雨强度的增大而增大。喀斯特坡耕地径流总量与径流养分（TP、TK）、泥沙养分（TN、TP、TK）均呈现极显著正相关关系（$P<0.05$），径流总量与径流TN呈现极显著正相关关系（$P<0.01$）。

参 考 文 献

[1] 彭旭东，戴全厚，李昌兰. 中国西南喀斯特坡地水土流失/漏失过程与机理研究进展. 水土保持学报，2017，31（5）：1—8
Peng X D，Dai Q H，Li C L. Research progress on the process and mechanism of soil water loss or leakage loss on slope in the Karst Rocky desertification areas（In Chinese）. Journal of Soil and Water Conservation，2017，31（5）：1—8

[2] Ryther J H，Dunstan W M. Nitrogen，phosphorus，and eutrophication in the coastal marine environment. Science，1971，171（3975）：1008—1013

[3] Wang G，Wu B，Zhang L，et al. Role of soil erodibility in affecting available nitrogen and phosphorus losses under simulated rainfall. Journal of Hydrology，2014，514：180—191

[4] Kogovsek J，Petric M. Solute transport processes in a karst vadose zone characterized by long-term tracer tests（the cave system of Postojnska Jama，Slovenia）. Journal of Hydrology，2014，519：1205—1213

[5] Jost G，Dirnböck T，Grabner M T，et al. Nitrogen leaching of two forest ecosystems in a Karst Watershed. Water Air & Soil Pollution，2011，218（1/4）：633—649

[6] Baechle B，Davis A S，Pittelkow C M. Potential nitrogen losses in relation to spatially distinct soil management history and biochar addition. Journal of Environmental Quality，2018，47（1）：62—69

[7] 陈诚，郝治邦. 模拟降雨下不同坡度土壤坡面产流产沙特征及磷和钾素流失研究. 水土保持研究，2017，24（2）：70—76，83
Chen C，Hao Z B. Research on slope runoff，sediment and P and K loss characteristics on slopes with different gradients under artificial simulation of rainfall（In Chinese）. Research of Soil and Water Conservation，2017，24（2）：70—76，83

[8] Wu L，Peng M，Qiao S，et al. Assessing impacts of rainfall intensity and slope on dissolved and adsorbed nitrogen loss under bare loessial soil by simulated rainfalls. Catena，2018，170：51—63

[9] 王帅兵，王克勤，宋娅丽，等. 高反坡阶对昆明市松华坝水源区坡耕地氮、磷流失的影响. 水土保持学报，2017，31（6）：39—45
Wang S B，Wang K Q，Song Y L，et al. Effects of contour reverse-slope terrace on nitrogen and phosphorus loss in sloping farmland in the water resource area of Songhua Dam in Kunming City（In Chinese）. Journal of Soil and Water Conservation，2017，31（6）：39—45

[10] Karimi R，Akinremi W，Flaten D. Nitrogen- or phosphorus-based pig manure application rates affect soil test phosphorus and phosphorus loss risk. Nutrient Cycling in Agroecosystems，2018，111（2/3）：217—230

[11] Shen H，Zheng F，Wen L，et al. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope. Soil & Tillage Research，2016，155：429—436

[12] 王帅兵，宋娅丽，王克勤，等. 不同雨型下反坡台阶减少红壤坡耕地氮磷流失的效果. 农业工程学报，2018，34（13）：160—169
Wang S B，Song Y L，Wang K Q，et al. Effects of reverse-slope terrace on nitrogen and phosphorus loss in sloping farmland of red loam under different rainfall patterns（In Chinese）. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2018，34（13）：160—169

[13] 马美景，王军光，郭忠录，等. 放水冲刷对红壤坡面侵蚀过程及溶质迁移特征的影响. 土壤学报，2016，53（2）：365—374
Ma M J，Wang J G，Guo Z L，et al. Research on sediment and solute transport on red soil slope under simultaneous influence of scouring flow（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2016，53（2）：365—374

[14] 王玉军，欧名豪. 徐州农田土壤养分和重金属含量与分布研究. 土壤学报，2017，54（6）：1438—1450
Wang Y J，Ou M H. Contents and distribution of soil nutrients and heavy metal elements in farmlands of Xuzhou（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2017，54（6）：1438—1450

[15] 郑海金，左继超，奚同行，等. 红壤坡地氮的径流输出通量及形态组成. 土壤学报，2018，55（5）：1168—1178
Zheng H J，Zuo J C，Xi T X，et al. Nitrogen output through runoff on red soil slope and its composition（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2018，55（5）：1168—1178

[16] 龙健，江新荣，邓启琼，等. 贵州喀斯特地区土壤石漠化的本质特征研究. 土壤学报，2005，42（3）：419—427
Long J，Jiang X R，Deng Q Q，et al. Characteristics of soil rocky desertification in the Karst Region of Guizhou Province（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2005，42（3）：419—427

[17] Fu Z Y，Chen H S，Zhang W，et al. Subsurface flow in a soil-mantled subtropical dolomite karst slope：A field rainfall simulation study. Geomorphology，2015，250：1—14

[18] 郭琴，龙健，廖洪凯，等. 贵州高原喀斯特流域浅层地下水化学特征及质量评价——以普定后寨河为例. 环境化学，2017，36（4）：858—866
Guo Q，Long J，Liao H K，et al. Chemical characteristics and quality evaluation of shallow groundwater in a typical Karst Plateau Basin of Guizhou Province：A case study of Houzhai River in Puding County（In Chinese）. Environmental Chemistry，2017，36（4）：858—866

[19] 俞月凤，何铁光，宋同清，等. 桂西北喀斯特地区石灰土养分空间变异特征. 生态学报，2018，38（8）：2906—2914
Yu Y F，He T G，Song T Q，et al. Spatial variability of limestone soil nutrients in a Karst Area of Northwest

Guangxi（In Chinese）. Acta Ecologica Sinica，2018，38（8）：2906—2914

［20］ 胡芳，杜虎，曾馥平，等. 典型喀斯特峰丛洼地不同植被恢复对土壤养分含量和微生物多样性的影响. 生态学报，2018，38（6）：2170—2179
Hu F，Du H，Zeng F P，et al. Dynamics of soil nutrients content and microbial diversity following vegetation restoration in a typical karst peak-cluster depression landscape（In Chinese）. Acta Ecologica Sinica，2018，38（6）：2170—2179

［21］ 符裕红，彭琴，李安定，等. 喀斯特石灰岩产状地下生境的土壤质量. 森林与环境学报，2017，37（3）：353—359
Fu Y H，Peng Q，Li A D，et al. Soil quality of the limestone underground habitat types in karst areas（In Chinese）. Journal of Forest and Environment，2017，37（3）：353—359

［22］ 张亚杰，钱慧慧，李伏生，等. 不同土地管理和利用方式喀斯特坡地养分和碳库管理指数的差异. 中国岩溶，2016，35（1）：27—35
Zhang Y J，Qian H H，Li F S，et al. Differences in soil nutrient and carbon pool management index under different land management and utilization modes in karst slope region（In Chinese）. Carsologica Sinica，2016，35（1）：27—35

［23］ 朱晓锋，陈洪松，付智勇，等. 喀斯特灌丛坡地土壤-表层岩溶带产流及氮素流失特征. 应用生态学报，2017，28（7）：2197—2206
Zhu X F，Chen H S，Fu Z Y，et al. Runoff and nitrogen loss characteristics in soil-epikarst system on a karst shrub hillslope（In Chinese）. Chinese Journal of Applied Ecology，2017，28（7）：2197—2206

［24］ 吴丽萍，陈洪松，付智勇，等. 喀斯特岩溶裂隙对地下径流和氮素垂直渗漏的影响. 水土保持学报，2017，31（5）：64—71
Wu L P，Chen H S，Fu Z Y，et al. Effects of karst fissures on subsurface runoff and nitrogen vertical leaching（In Chinese）. Journal of Soil and Water Conservation，2017，31（5）：64—71

［25］ 彭旭东，戴全厚，李昌兰，等. 模拟雨强和地下裂隙对喀斯特地区坡耕地养分流失的影响. 农业工程学报，2017，33（2）：131—140
Peng X D，Dai Q H，Li C L，et al. Effect of simulated rainfall intensities and underground pore fissure degrees on soil nutrient loss from slope farmlands in Karst Region（In Chinese）. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2017，33（2）：131—140

［26］ 戴全厚，喻理飞，杨智，等. 一种用于研究坡面径流和地下孔裂隙流的模拟试验装置. 101988886A，2011-03-23
Dai Q H，Yu L F，Yang Z，et al. One used to study the slope surface runoff and underground hole fissure flow simulation test device（In Chinese）. CN101988886A，2011-03-23

［27］ 伏文兵，戴全厚，严友进. 喀斯特坡耕地及其浅层孔（裂）隙土壤侵蚀响应试验研究. 水土保持学报，2015，29（2）：11—16，22
Fu W B，Dai Q H，Yan Y J. The karst slope and shallow hole（crack）gap response experiment of soil erosion research（In Chinese）. Journal of Soil and Water Conservation，2015，29（2）：11—16，22

［28］ Yan Y，Dai Q，Yuan Y，et al. Effects of rainfall intensity on runoff and sediment yields on bare slopes in a karst area，SW China. Geoderma，2018，330：30—40

［29］ 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法. 北京：中国环境科学出版社，2002
State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring and analysis methods（In Chinese）. Beijing：China Environmental Science Press，2002

［30］ 吴电明，夏立忠，俞元春，等. 坡耕地氮磷流失及其控制技术研究进展. 土壤，2009，41（6）：857—861
Wu D M，Xia L Z，Yu Y C，et al. Reviews on mechanisms of nitrogen，phosphorus losses from sloping farmland and control techniques（In Chinese）. Siols，2009，41（6）：857—861

［31］ 邵明安，张兴昌. 坡面土壤养分与降雨、径流的相互作用机理及模型. 世界科技研究与发展，2001，23（2）：7—12
Shao M A，Zhang X C. The interacting models and mechanisms of soil nutrient with rainfall and runoff（In Chinese）. World Sci-tech R & D，2001，23（2）：7—12

［32］ 李波，李晔，韩惟怡，等. 人工降雨条件下不同粒径泥沙中氮磷流失特征分析. 水土保持学报，2016，30（3）：39—43
Li B，Li Y，Han W Y，et al. Loss characteristics of nitrogen and phosphorus in the sediment of different sizes under artificial rainfall（In Chinese）. Journal of Soil and Water Conservation，2016，30（3）：39—43

［33］ Ramos M C，Martínez-Casasnovas J A. Nutrient losses by runoff in vineyards of the Mediterranean Alt Penedès region（NE Spain）. Agriculture Ecosystems & Environment，2006，113（1）：356—363

［34］ 罗春燕，涂仕华，庞良玉，等. 降雨强度对紫色土

坡耕地养分流失的影响. 水土保持学报，2009，23（4）：24—27
Luo C Y，Tu S H，Pang L Y，et al. Loss characteristics of nitrogen and phosphorus in the sediment of different sizes under artificial rainfall（In Chinese）. Journal of Soil and Water Conservation，2009，23（4）：24—27
［35］ Xing W，Yang P，Ren S，et al. Slope length effects on processes of total nitrogen loss under simulated rainfall. Catena，2016，139：73—81
［36］ 陈晓燕，王茹，卓素娟，等. 不同降雨强度下紫色土陡坡地侵蚀泥沙养分特征. 水土保持学报，2012，26（6）：1—5
Chen X Y，Wang R，Zhuo S J，et al. Characteristics of sediment nutrients from steep land of purple soil under different rainfall intensities（In Chinese）. Journal of Soil and Water Conservation，2012，26（6）：1—5

Characteristics of Nutrient Loss from Sloping Farmland in Karst Region as A Function of Rainfall Intensity

GAO Ruxue[1]　DAI Quanhou[1†]　GAN Yixian[1, 2]　PENG Xudong[1]　YAN Youjin[1]
（1 *College of Forestry*，*Guizhou University*，*Guiyang* 550025，*China*）
（2 *Site Survey Center*，*Forest Public Security Bureau of Shuicheng County*，*LiuPanshui*，*Guizhou* 553000，*China*）

Abstract　【Objective】As the multi-media environment in the karst region is so peculiar, few case-specific research methods are available, making it hard to carry out researches in this region of how soil nutrients are lost from slope farmlands. Although some have been done, outcomes vary sharply and are far from complete, adequate or systematic to exposit rules of nutrient loss from slope farmlands in the karst region, let alone mechanisms of underground soil nutrient lost. Therefore, this study was unfolded to explore characteristics and mechanisms of soil nutrient loss from slope farmlands in the karst region as a function of rainfall intensity, in an attempt to provide certain theoretical reference for control of nutrient loss and non-point source pollution from slope farmlands in the karst region. 【Method】An in-lab experiment was carried out with soil packed in a steel trough to s imulate bare slope farmland in morphological structure, 20% in bedrock outcropping rate, 20° in slope gradient, and 3% in porosity. Besides, the experiment was designed to have five levels of rainfall intensity, i.e., 15 $mm·h^{-1}$, 30 $mm·h^{-1}$, 50 $mm·h^{-1}$, 70 $mm·h^{-1}$and 90 $mm·h^{-1}$, to scour the aritificial slope farmland. Before the experiment began, the soil was made saturated in moisture with a light rainfall event, and effluent was collected for 30 minutes after the slope began to yield runoff. 【Result】(1) The rainfall intensity critical for runoff and sediment yield to transit from underground to surface varied in the range of 30 $mm·h^{-1}$ ~ 50 $mm·h^{-1}$, and runoff and sediment yield increased with rising rainfall intensity, and occurred mainly on the surface. (2) Under light rainfalls, 15 $mm·h^{-1}$ or 30 $mm·h^{-1}$ in intensity, loss of TN, TP and TK occurred mainly with underground runoff, while under heavy rainfalls, ⩾ 50 $mm·h^{-1}$ in intensity, the loss of nutrients with surface runoff gained in proportion to the total loss and reached three times as much as that with underground runoff. The runoff loss of TP increased in both volume and concentration with rising rainfall intensity, but the loss of TK and TN did not change so significantly. (3) The nutrient loss with sediment occurred mainly on the surface, reaching about 5.03 times higher than that underground, and nutrients in the sediment were higher in concentration than those in the runoff. Nutrient enrichment rate of the surface sediment was on the whole higher than that of underground leaching. The totals of nutrient losses with surface and underground sediments and their moduli all increased with rising rainfall intensity. And (4) Significantly positive relationships were found of the total volume of runoff with

nutrients (TP & TK) in runoff and nutrients (TN, TP & TK) in sediment ($P<0.05$), and with TN in runoff, too ($P<0.01$). 【Conclusion】The losses of TN, TP and TK occur mainly with runoff in slope farmlands in the karst region, and partly with sediment. Under rainfalls light in intensity (15 $mm \cdot h^{-1}$ ~ 30 $mm \cdot h^{-1}$), attention should be paid mainly to control of nutrient loss with underground runoff. The impact of rainfall intensity is significant on TP loss with runoff in volume and concentration, as well as on totals of nutrients lost with surface and underground sediments and their nutrient loss moduli. The total volume of runoff is significantly related to the losses of nutrients with runoff and sediment.

Key words Sloping farmland in karst region; Rainfall intensity; Runoff; Sediment; Nutrient loss; Enrichment rate

（责任编辑：檀满枝）