

任惠敏, 付智勇, 王发, 等. 喀斯特坡地不同土地利用方式碳氮流失的水文驱动特征[J]. 中国岩溶, 2023, 42(1): 84-93.

DOI: 10.11932/karst20230107

喀斯特坡地不同土地利用方式碳氮流失的水文驱动特征

任惠敏^{1,2,3}, 付智勇^{1,2}, 王发^{1,2,3}, 陈洪松^{1,2}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 湖南 长沙 410125;

2. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 河池 547100;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:喀斯特坡地壤中流与地表径流并存, 共同驱动了土壤关键生源物质的迁移, 造成该区土壤生产力下降、地下水污染。为揭示喀斯特坡地土壤碳氮流失途径及其水文驱动机制, 本研究以喀斯特坡地径流微区(2 m×1.2 m)为研究对象, 分析了火烧、轻度砍伐、重度砍伐、人工林、耕地、牧草6种不同土地利用方式对土壤碳氮流失途径、形态及通量的影响。结果表明: 降雨是土壤碳氮流失的主要驱动因子, 降雨产流阈值为16 mm, 55 mm时达到产流峰值。各土地利用方式仅在暴雨下有显著差异, 其中, 人工林的土壤碳氮流失量较大, 而重度砍伐的流失量较小。土地利用方式不改变土壤碳氮的流失途径, 各土地利用方式均以地表流失为主(51.29%~75.15%), 壤中流为辅, 其中壤中流主要通过A层流失(65.20%~89.12%)。氮素流失形态以NO₃-N为主(45.84%~56.49%)。研究结果可为揭示喀斯特坡地生源物质流失过程及其水文驱动机制、研发水土流失与面源污染阻控技术提供参考。

关键词:喀斯特生态系统; 人为干扰; 面源污染; 碳氮流失; 壤中流

中图分类号: X143 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2023)01-0084-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

不合理的土地利用引起的水土流失问题备受关注^[1]。坡地水土及其养分流失不仅造成土壤质量退化, 还会导致地下水环境污染^[2-3], 更是造成喀斯特区域石漠化和制约当地社会、经济可持续发展的根源^[4]。因此, 研究不同土地利用方式下土壤养分的流失特征对喀斯特地区的水土保持工作至关重要。土壤养分流失途径以水文驱动的径流迁移和土壤侵蚀搬运为主^[5]。近年来诸多学者针对不同土壤类型区, 通过室内模拟降雨或野外长期定位监测等方法, 对坡地

水土及养分流失基本特征进行了研究^[6]。对我国黄土高原的研究表明, 土壤养分主要通过泥沙流失^[7], 蔡崇法等^[8]在三峡库区低覆盖度紫色土的研究也得出类似的结论。然而, 对覆盖度较大的紫色土研究结果表明, 土壤养分主要通过壤中流流失^[9-10]。与非喀斯特地区以土壤层为核心相比, 喀斯特地区特殊的地表地下二元三维水土流失环境结构的存在, 致使其养分流失类型、形式和水文驱动机制等明显不同于非喀斯特区。目前, 国内外有关喀斯特区水土流失研究较多, 主要是针对坡面产流产沙、地表流失或地下漏失的过程及机理, 而针对其土壤养分流失

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U21A20189); 广西重点研发项目(桂科 AB22035058); 国家自然科学基金面上项目(42077077)

第一作者简介: 任惠敏(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持与土壤侵蚀研究。E-mail: renhm98@163.com。

通信作者: 付智勇(1982—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事坡面水文与土壤侵蚀研究。E-mail: zyfu@isa.ac.cn。

收稿日期: 2021-03-16

的研究较少^[11-14]。国外的相关研究主要从岩溶作用和污染物迁移两方面开展^[15-16],而国内主要涉及土壤养分空间异质性及土壤侵蚀等的研究^[17-18],缺乏特殊二元结构下土壤养分流失的系统研究。前期的研究发现,喀斯特坡地土壤有机质流失率高达 40%,表现出急剧流失的特点^[19]。然而,基于喀斯特坡地径流场的研究表明,地表径流系数很小,坡面地表径流并不发育^[20]。进一步通过野外模拟降雨,证实了喀斯特坡地以地下水文过程为主,地表径流为辅^[21-22],其中除了垂直迁移过程外,土壤发生层间和土岩界面,因导水、持水性能的差异极易产生横向壤中流。在这种背景下,快速丢失的养分是选择何种水文路径、通过何种水文驱动机制流失等科学问题急需深入研究。因此,需要将喀斯特坡地近地表水文系统作为一个整体,探索地表—地下水文过程与养分迁移过程的耦合关系,弄清养分流失的水文驱动机制,才能为喀斯特地区养分流失预测及土地资源的可持续利用提供科学对策。

喀斯特地区多重因素影响导致降雨径流引起的养分流失存在着明显的空间异质性和不确定性,但对其内在机理和流失途径的研究不够,尤其缺少基于观测的直接证据,水文过程和养分流失过程的耦合研究不足。同时,西南喀斯特地区生态脆弱,人地矛盾突出,土地利用类型更为复杂,因而改变土地利用方式对坡面养分流失的水文路径的影响程度远大于其他区域。因此,本文结合喀斯特坡地土岩剖面不同发生层界面及近地表的水流、养分信息,分析土壤碳氮的流失形态、途径,评估不同雨量下碳氮流失通量,探讨土壤碳氮流失差异的主控因素,为喀斯特区水土资源永续利用和环境效应的合理评价提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于广西壮族自治区环江毛南族自治县中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站(24°54'42.6"~24°55'17.8"N, 107°56'48.1"~107°57'28.5"E)。站区是典型的喀斯特峰丛洼地生态系统,总面积达 146.1 hm²。属于亚热带季风气候,温暖湿润,雨热同期,平均气温 19.9 ℃,多年平均降雨量 1 389.1 mm,降水集中在每年的 4 月底至 9 月。地形起伏较大,最高海拔 816 m,最低海拔 376 m。研究区在 1985 年之前主要受到砍伐、樵采、垦殖、放牧、火烧等 6 种方式干扰,植被遭到大面积破坏。1985 年之后居民迁出,自然生态恢复。2004 年开始,部分洼地开垦为农田示范基地。至今为止,该流域植被恢复长达三十多年,研究区域处理前荒草地和稀疏灌丛为研究区主要的植被类型,仅坡脚和洼地有斑块状和条带状分布的灌木林。常见的植物种为黄荆、盐肤木、红贝山麻秆、构树、白茅、鬼针草等。2004 年底在中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站选取典型坡地建立径流场,设置火烧、轻度砍伐、重度砍伐、人工林、耕地、牧草 6 种干扰方式,干扰年限约为 16 年,具体设计及处理见表 1^[20]。

1.2 试验设计

径流场投影面积为 1 400 m²(20 m×70 m),坡度为 23°~34°,在每个径流场地下坡位建立投影面积为 2 m×1.2 m 的径流监测微区,并设置 3 个重复区,共计 18 个微区。小区四周开挖深达风化基岩的隔水沟,除下坡断面外,上、左、右三面均插入 3 mm 厚的

表 1 坡地径流小区处理方式
Table 1 Processing modes of the runoff micro-area

土地利用方式	坡形	坡度/°	处理方式
火烧	直形坡	34	每年一月份火烧一次
轻度砍伐	直形坡	23	每年一月份砍伐、搬移,不去除植物根系
重度砍伐	直形坡	24	每年一月份砍伐、搬移,去除植物根系
人工林	凹形坡	23	2006 年挖坑种植构骨木
耕地	凹形坡	25	顺坡种植玉米(每年三月份和六月份共施氮肥 160 kg·hm ⁻²)
牧草	凹形坡	24	种植牧草(桂牧 1 号;返青后施氮肥 45 kg·hm ⁻² ,每次刈割后施氮肥 50 kg·hm ⁻²)

镀锌薄铁皮钢板至风化基岩,以隔绝外围水对微区的影响。在下坡断面由下至上依次在土壤—风化基岩界面以下 2 cm 处(地表以下 60~150 cm 深处)、土壤发生层 A 层(地表以下 15~30 cm 深处)、土壤表层(地表以下 3 cm 深处)横向插入 L 形集流钢槽(横向插入深度为 10 cm),通过导水管将各层次的产流水分别引入到自动翻斗流量计中,依次实现 A 层以下壤中流、A 层壤中流、地表径流的同时监测与样品采集,详见图 1(b)^[23]。试验微区的土壤理化性质见表 2。

1.3 样品收集及数据处理

土壤样品分为原状土和扰动土采集。原状土主要是用环刀采集土壤测定容重;扰动土一般为采样点附近 3~5 个重复的混合土样。通过称重法测定土壤砾石覆盖度,吸管法测定土壤机械组成,使用重铬酸钾容量法测定土壤有机质和全氮。

降雨收集采用 RG3-M 型自动记录雨量计(美国

Onset,分辨率为 0.2 mm),试验期间降雨分布如图 2。翻斗流量计下方排水口连接软管,将径流水导入高密度聚乙烯塑料桶(50 L),每次降雨结束后,在桶内采集水样,用磷酸将 pH 调为 2~3,放于-4 ℃ 冰箱冷冻。样品解冻后, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 、TN 使用 A33 流动注射仪测定,DON 用 TN 与无机氮的差减法计算。TOC 使用 1030 W 总有机碳分析仪测定。

本研究将间隔 12 h 的相邻降雨事件划分为两场不同降雨事件,基于此,统计每次降雨产流事件各处理微区的产流量、碳氮流失浓度等水文水化学指标。用最小显著性差异法(Least Significant Difference)检验不同土地利用方式之间的差异显著性,显著性水平设置为 0.05;用回归分析探讨土壤碳氮单位面积流失量与流失浓度、产流量、降雨量之间的关系。单位面积流失量计算公式如下:

$$\text{土壤碳氮单位面积流失量}(\text{mg}\cdot\text{m}^{-2})=\text{流失浓度}(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})\times\text{径流量}(\text{L})/\text{微区投影面积}(\text{m}^2)$$

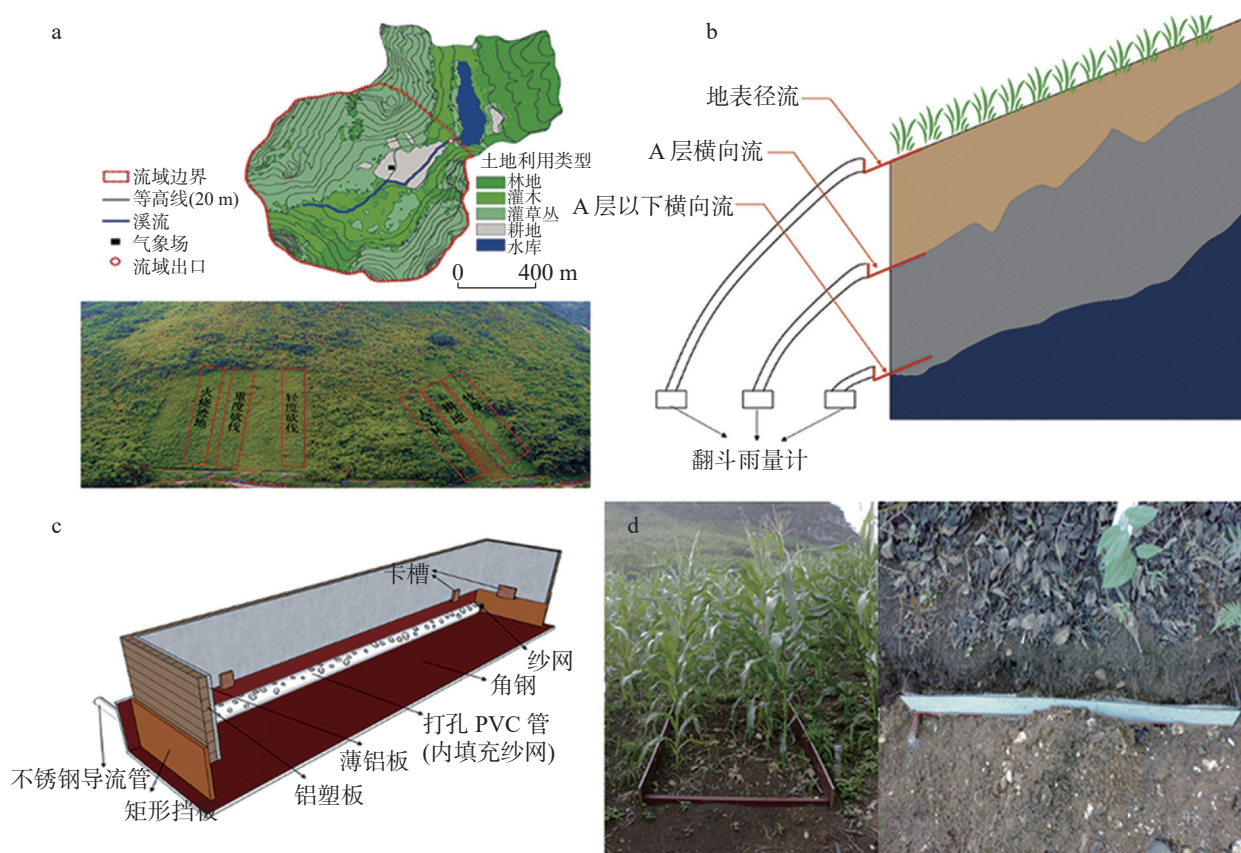


图 1 (a) 环江流域以及径流场地形图; (b) 土壤剖面图,通过集流槽收集地表、A 层、A 层以下水流;
(c) 径流收集装置示意图; (d) 微区布设图

Fig. 1 (a) Topographic map of the surrounding Huanjiang basin and runoff field; (b) Soil profile map, collecting water from the surface, Layer A, and below Layer A through collecting trough; (c) Schematic diagram of runoff collection device; (d) Micro area layout

表 2 不同土地利用方式径流微区土壤基本理化性质

Table 2 Soil physical and chemical properties in runoff micro-area under different land use modes

土地利用 方式	砾石覆 盖度/%	全氮TN/ g·kg ⁻¹	有机质/ g·kg ⁻¹	容重/ g·cm ⁻³	土壤机械组成/%		
					0.02~2 mm	0.002~0.02 mm	<0.002 mm
火烧	50	3.12	30.59	1.32	61.28	18.43	20.29
轻度砍伐	34	1.70	28.43	1.32	65.16	14.16	20.68
重度砍伐	49	1.77	27.26	1.34	62.93	15.82	21.25
人工林	28	2.23	30.00	1.26	48.90	15.81	35.29
耕地	44	2.18	22.27	1.40	64.48	14.47	21.05
牧草	40	1.69	25.37	1.29	70.58	11.07	18.35

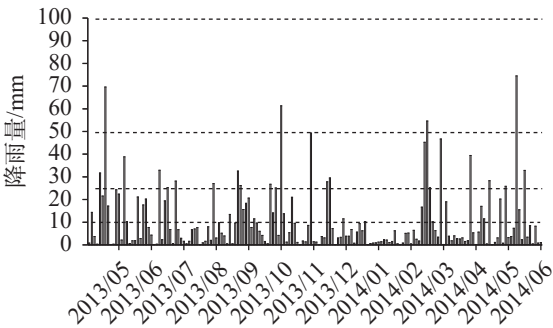


图 2 试验期间降雨分布

注: 图中虚线为小雨 (<10 mm)、中雨 (10~24.9 mm)、大雨 (25~49.9 mm)、暴雨 (50~99.9 mm) 的分界线。

Fig. 2 Precipitation distribution during the experiment

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下土壤碳氮的主要流失途径

各土地利用方式土壤 TOC 均以地表流失为主, 人工林地表流失比例为 75.15%, 显著高于耕地、重度砍伐、牧草、火烧、轻度砍伐区。各土地利用方式壤中流流失均以 A 层流失为主, 表现为人工林 (80.43%)>耕地 (79.13%)>轻度砍伐 (72.50%)>牧草 (72.21%)>重度砍伐 (69.07%)>火烧迹地 (68.70%) (图 3)。

各土地利用方式土壤 TN 均以地表流失为主, 壤中流为辅。耕地地表单位面积流失量为 2.75 mg·m⁻², 显著高于牧草 (1.77 mg·m⁻²)、人工林 (1.46 mg·m⁻²)、火烧迹地 (1.24 mg·m⁻²)、轻度砍伐 (1.20 mg·m⁻²)、重度砍伐 (1.02 mg·m⁻²)。各土地利用方式壤中流流失均以 A 层为主, 耕地 A 层流失比例最高, 占壤中流流失量的 89.12%; 火烧迹地 A 层流失比例最低, 为 65.20%, 各土地利用方式之间的变异程度较小。

2.2 不同土地利用方式土壤可溶性氮的主要流失形态

不同土地利用方式下, 氮素的流失形态均以 NO₃⁻-N 为主, 这与 NO₃⁻-N 带负电而吸附性较弱, 易随土壤水分迁移有关。各土地利用方式 NO₃⁻-N 的单位面积流失量表现为耕地最高, 其显著高于牧草区、人工林、轻度砍伐区、火烧迹地和重度砍伐区, 分别占 TN 单位面积流失量的 51.57%、45.84%、56.49%、46.74%、48.28% 和 44.71%。其次, 以 DON 流失为主, DON 单位面积流失量表现为牧草 (1.56 mg·m⁻²)>耕地 (1.29 mg·m⁻²)>人工林 (0.82 mg·m⁻²)>轻度砍伐 (0.79 mg·m⁻²)>火烧 (0.73 mg·m⁻²)>重度砍伐 (0.72 mg·m⁻²); NH₄⁺-N 的单位面积流失量最小, 且各土地利用方式可溶性氮流失量之间的差异不显著 (图 4)。

2.3 不同降雨量下各土地利用方式土壤碳氮单位面积流失量

各土地利用方式不同降雨量下土壤 TOC 单位面积流失量的差异较大。中雨下土壤 TOC 单位面积流失量表现为人工林 (9.41 mg·m⁻²)>耕地 (6.42 mg·m⁻²)>轻度砍伐 (6.00 mg·m⁻²)>牧草 (5.56 mg·m⁻²)>火烧迹地 (5.47 mg·m⁻²)>重度砍伐 (4.62 mg·m⁻²)。大雨下轻度砍伐区的土壤 TOC 单位面积流失量最大, 为 16.92 mg·m⁻², 高于火烧迹地、牧草区、耕地、人工林和重度砍伐区, 且差异不显著。暴雨下人工林的土壤 TOC 单位面积流失量最大, 为 55.23 mg·m⁻², 显著高于牧草 (27.51 mg·m⁻²)、轻度砍伐 (25.53 mg·m⁻²)、火烧迹地 (24.79 mg·m⁻²)、耕地 (23.23 mg·m⁻²) 和重度砍伐区 (22.93 mg·m⁻²) (图 5)。

各土地利用方式不同降雨量下土壤 TN 单位面积流失量小于 TOC 单位面积流失量, 且不同土地利用方式下土壤 TOC 单位面积流失量的变异程度比 TN 更高。土壤 TN 单位面积流失量在中雨和大雨

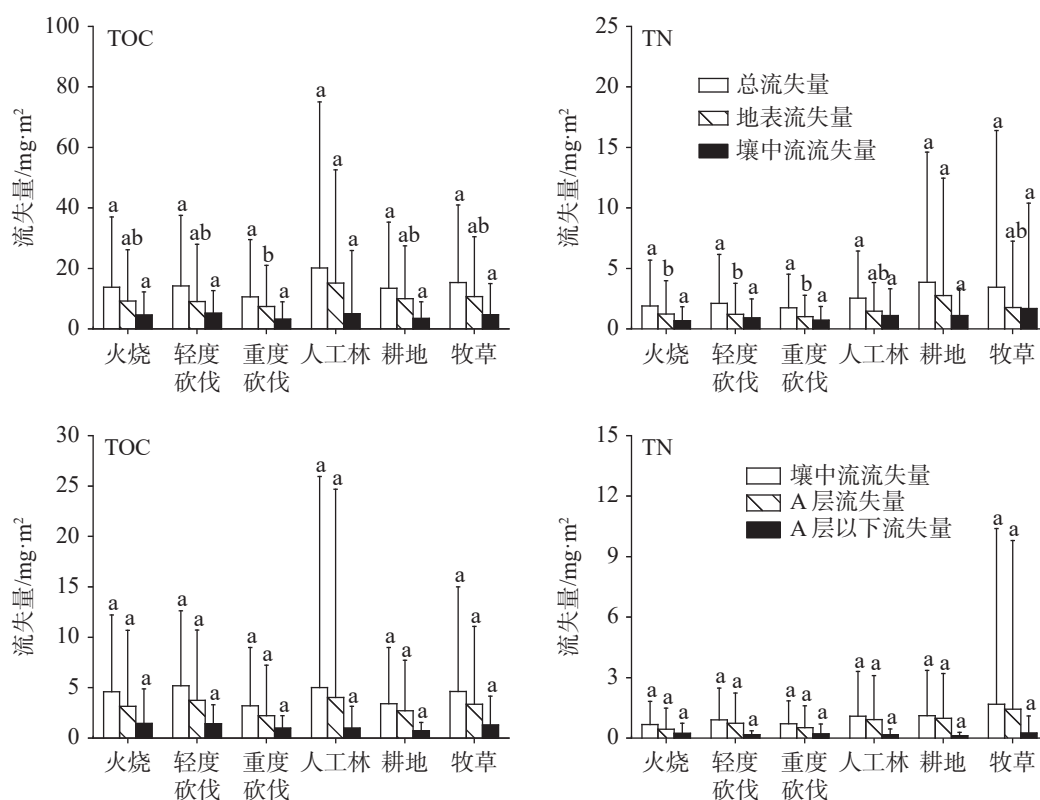


图3 不同土地利用方式土壤碳氮流失途径

注: 图中字母标注为方差分析结果($P=0.05$), 下同。

Fig. 3 Soil TN and TOC loss pathways under different land use modes

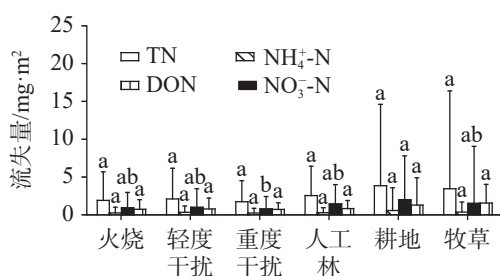


图4 不同土地利用方式土壤氮素流失形态

Fig. 4 Soil TN loss forms under different land use modes

下均表现为耕地流失较多, 分别为 $1.59 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $5.29 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。大雨和暴雨下重度砍伐区单位面积流失量最小, 分别为 $2.20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $2.51 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 各土地利用方式不同降雨量下土壤 TN 单位面积流失量的差异不显著。

2.4 不同土地利用方式土壤碳氮流失的影响因子

降雨和径流是土壤养分流失的主要驱动力之一, 降雨径流驱动土壤养分迁移, 也是养分流失的载体, 对土壤碳氮养分流失特征有重要的影响^[24]。轻度砍伐区土壤 TN 单位面积流失量与产流量呈 $Y=0.857+$

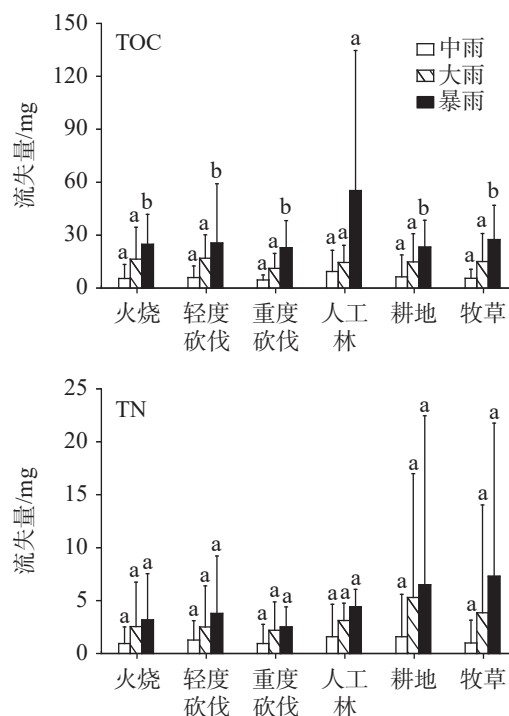


图5 各土地利用方式不同降雨量下土壤碳流失量

Fig. 5 Soil TN and TOC loss amount of each land use mode under different rainfall amounts

0.001x 线性增加趋势,其他土地利用方式土壤 TN 单位面积流失量均与降雨量和产流量呈指数增加趋势;除耕地 TOC 单位面积流失量与降雨量之间的拟合方程不显著外,其他各土地利用方式土壤 TOC 单位面积流失量与降雨量和产流量呈指数、线性和多项式变化趋势,且拟合效果较好(表 3,表 4)。从图 6 可知,降雨量较小时各土地利用方式几乎不产流,且均在降雨量为 16 mm 时开始产生明显径流;之后随降雨量的增加各土地利用方式的产流量呈先减少后逐渐增加的趋势,且均在降雨量为 55 mm 时达到产流峰值。

3 讨 论

本研究基于土壤剖面尺度对土壤水分—养分进行连续监测,发现喀斯特白云岩坡地土壤养分主要通过地表流失(51.29%~75.15%),与以地下流失为主

的石灰岩地区的研究结果不一致^[25],这是由碳酸盐岩岩性不同造成的:一方面,白云岩地区在物理风化和构造力的双重影响下,孔隙、节理分布均匀,且容易产生隔水层,渗透性好,而石灰岩地区岩石裂隙、管道开度更大,降水从裂隙快速汇入地下,不利于地表产流^[26]。另一方面,二者的溶蚀残余物在地表的堆积不同。白云岩地区溶蚀残余物相对分布于地表,其形成的土壤层也厚于石灰岩地区,进而对降水入渗过程产生影响^[27]。同时,对壤中流的监测结果表明,A 层壤中流流失远高于 A 层以下流失,一方面与 A 层养分富集有关;另一方面,喀斯特地区产流遵循界面产流理论,A 层的渗透性远高于 A 层以下^[28-29]。本研究基于微区对土壤发生层养分流失进行观测,有尺度小、变异性大且局部产流的特点,而径流及其养分在土壤—包气带界面中的入渗过程或机理还需进一步研究。

土壤碳氮单位面积流失量与降雨量、产流量呈

表 3 不同土地利用方式土壤 TN 流失量与流失浓度、产流量、降雨量的关系
Table 3 Relationship between the TN loss concentration and flux, runoff amount, and rainfall amount under different land use modes

土地利用方式	流失浓度			产流量			降雨量		
	拟合方程	R ²	P	拟合方程	R ²	P	拟合方程	R ²	P
火烧	$Y=0.701+0.875x-0.057x^2+0.003x^3$	0.273	0.000	$Y=0.011x^{0.770}$	0.830	0.000	$Y=0.192x^{0.785}$	0.426	0.000
轻度砍伐	$Y=0.923x^{0.684}$	0.125	0.017	$Y=0.857+0.001x$	0.812	0.000	$Y=0.144x^{0.923}$	0.476	0.000
重度砍伐	$Y=2.935-0.107x$	0.200	0.004	$Y=0.039x^{0.604}$	0.696	0.000	$Y=0.247x^{0.707}$	0.314	0.000
人工林	$Y=0.820x^{0.850}$	0.271	0.000	$Y=0.006x^{0.846}$	0.724	0.000	$Y=0.200x^{0.882}$	0.407	0.000
耕地	$Y=3.920+0.489x+0.001x^2$	0.553	0.000	$Y=0.008x^{0.868}$	0.624	0.000	$Y=0.154x^{0.950}$	0.201	0.000
牧草	$Y=-1.932+2.368x-0.202x^2+0.007x^3$	0.393	0.000	$Y=0.014x^{0.762}$	0.680	0.000	$Y=0.285x^{0.711}$	0.219	0.000

表 4 不同土地利用方式土壤 TOC 流失量与流失浓度、产流量、降雨量的关系
Table 4 Relationship between the TOC loss concentration and flux, runoff amount, and rainfall amount under different land use modes

土地利用方式	流失浓度			产流量			降雨量		
	拟合方程	R ²	P	拟合方程	R ²	P	拟合方程	R ²	P
火烧	$Y=76.329+8.766x+0.372x^2+0.004x^3$	0.125	0.122	$Y=0.151x^{0.668}$	0.672	0.000	$Y=30.937-3.556x+0.162x^2-0.002x^3$	0.552	0.000
轻度砍伐	$Y=1.465x^{0.789}$	0.334	0.000	$Y=8.448+0.007x$	0.649	0.000	$Y=22.743-2.594x+0.138x^2+0.001x^3$	0.578	0.000
重度砍伐	$Y=5.099x^{0.319}$	0.067	0.069	$Y=12.073+0.003x+4.220E-7x^2$	0.912	0.000	$Y=1.196x^{0.789}$	0.281	0.000
人工林	$Y=2.633+0.897x$	0.147	0.027	$Y=-3.280+0.029x-7.722E-6x^2+7.233E-10x^3$	0.918	0.000	$Y=-42.504+8.174x-0.311x^2+0.004x^3$	0.603	0.000
耕地	$Y=17.615+0.270x$	0.218	0.001	$Y=0.472x^{0.523}$	0.485	0.000	$Y=6.332x^{0.370}$	0.074	0.061
牧草	$Y=7.690x^{0.291}$	0.081	0.019	$Y=0.428x^{0.539}$	0.514	0.000	$Y=13.877-1.219x+0.083x^2-0.001x$	0.606	0.000

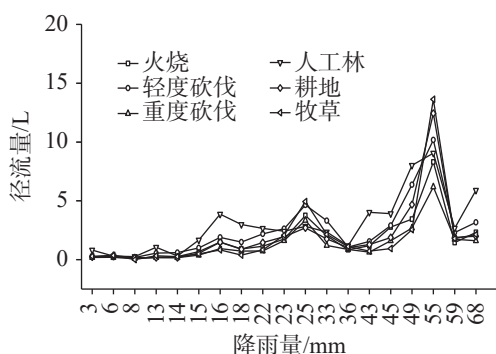


图6 不同土地利用方式土壤产流量对降雨量的响应

Fig. 6 Response of soil flux to rainfall under different land use modes

显著正相关,表明降雨和径流是养分流失的直接驱动因素。降雨产流表现出明显的阈值效应,即次降雨量为 16 mm 时明显产流,55 mm 时达到产流峰值。基于此,对喀斯特白云岩峰丛洼地坡面产流机制进行判别,发现白云岩峰丛洼地坡面典型土体构型存在以蓄满产流为主要产流机制的地表产流^[21,28]。这与魏兴萍、Dai 等^[30-31]的研究结果一致,喀斯特坡地地表土壤养分流失集中发生在超过 60 mm 的降雨,这主要与径流微区基岩裸露率低、中下部土层较厚、高砾石土壤入渗率高等密切相关^[20]。各土地利用方式坡地降雨产流响应规律基本一致,表明土地利用方式的转变对产流机制的影响较小,这与喀斯特地区小生境类型的多样性和水文地质结构的复杂性有关。

虽然土地利用方式对坡地养分流失的水文驱动机制影响有限,但各土地利用方式土壤养分流失量存在显著差异。首先,从植被覆盖的角度,土地利用方式的变化会改变水文循环各要素的水量分配。相比其他土地利用方式,人工林能够提高冠层截留,增加蒸腾量和入渗量,进而削弱地表产流过程^[32],但研究结果发现,人工林的土壤碳氮流失量均较大,这一方面与其植被类型单一,地表裸露度高,土壤表层可较快饱和有关;另一方面,植物根系穿插形成的通道具有天然的连续性,与土壤中其他的通道相互连接形成巨大的水分输送网络,促进径流的发生^[33]。由此说明植被类型单一的人工林需要加强底部灌草植物的配置,从而削弱土壤养分流失。其次,土地利用方式对土壤孔隙结构有重要影响,从而能显著改变近地表水文过程^[34]。本研究发现重度砍伐的养分流失量较小,重度砍伐挖根剔除根系的过程中,破坏了土壤中原有的孔隙,对优先流和壤中流的发生产生了消极的影响,同时增加了地表填洼,因而减少了

近地表流失量,增加了岩石裂隙入渗^[35]。本结果中牧草和耕地养分流失较高,这与其耕作期施肥有关,但二者差异不显著,说明保护性耕作有利于土壤微生物活动,提高了土壤肥力,加上施肥的影响,可能掩盖了水文过程驱动下养分流失量的差异^[36]。本研究结果发现土壤养分流失量并未随着干扰强度的增加而增加,反而有减小趋势,这可能与养分流失的界面分配有关,人为干扰强度加剧,土岩裂隙度增大、地表粗糙度改变,从而进一步增加水分入渗,减少地表养分流失。因此应培育适合喀斯特地区的物种,加强冠层底部灌草物种的配置,并进行适度的人为干扰,优化植物群落结构,进而减少养分流失。

4 结 论

以典型喀斯特坡地径流微区为研究对象,基于连续水分—养分监测,分析了不同土地利用方式对土壤碳氮流失的影响。结果表明:各土地利用方式土壤碳氮均以地表流失为主(51.29%~75.15%),壤中流流失为辅,其中壤中流流失以 A 层流失为主(65.20%~89.12%)。受氮素形态稳定性以及土壤生物化学作用影响,不同土地利用方式下土壤氮素的流失形态均以 NO_3^- -N 为主(45.84%~56.49%)。受施肥的影响,耕地和牧草的 TN 流失量显著高于其他干扰区。土壤碳氮流失量与降雨量显著正相关,各土地利用方式在降雨量为 55 mm 时,达到产流峰值,其中暴雨下不同土地利用方式土壤碳氮流失量差异显著,且均呈现人工林>轻度砍伐>火烧迹地>重度砍伐的趋势,保护性措施的流失量显著高于其他恢复性措施。因此,未来在喀斯特坡地水土及养分流失控制过程中,既要植被自然恢复,也要适当人为干扰。

参考文献

- [1] 覃星铭,何丙辉,沈利娜,王魁,喻崎雯,张路遥. 漓江流域水土流失特征及其侵蚀影响因子典型分析[J]. 中国岩溶, 2018, 37(3): 351-360.
QIN Xingming, HE Binghui, SHEN Lina, WANG Kui, YU Qiwen, ZHANG Luyao. Characteristics of soil and water loss in the Lijiang River Basin and soil erosion factors in typical karst small watersheds[J]. *Carologica Sinica*, 2018, 37(3): 351-360.
- [2] 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.
- [3] 彭遥,周蓓蓓,陈晓鹏,唐湘伟,陶汪海,王全九. 间歇性降雨对黄土坡地水土养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2018,

- 32(3): 54-60.
- PENG Yao, ZHOU Peipei, CHEN Xiaopeng, TANG Xiangwei, TAO Wanghai, WANG Quanjiu. Study on the mechanism of soil, water and nutrient loss on loess slope under interval rain events[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3): 54-60.
- [4] Peng Xudong, Dai Quanhui, Ding Guijie, Li Changlan. Role of underground leakage in soil, water and nutrient loss from a rock-mantled slope in the karst rocky desertification area[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 578: 124086.
- [5] 王全九, 杨婷, 刘艳丽, 赵光旭, 张鹏宇. 土壤养分随地表径流流失机理与控制措施研究进展[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(6): 67-82.
- WANG Quanjiu, YANG Ting, LIU Yanli, ZHAO Guangxu, ZHANG Pengyu. Review of soil nutrient transport in runoff and its controlling measures[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(6): 67-82.
- [6] 陈洪松, 冯腾, 李成志, 付智勇, 连晋蛟, 王克林. 西南喀斯特地区土壤侵蚀特征研究现状与展望[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 10-16.
- CHEN Hongsong, FENG Teng, LI Chengzhi, FU Zhiyong, LIAN Jinjiao, WANG Kelin. Characteristics of soil erosion in the karst regions of Southwest China: Research advance and prospective[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1): 10-16.
- [7] 陈磊, 李占斌, 李鹏, 穆军, 贾莲莲. 黄土高原人为加速侵蚀下水土与养分流失耦合研究[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(3): 7-11.
- CHEN Lei, LI Zhanbin, LI Peng, MU Jun, JIA Lianlian. Study on the coupling effect of erosion and nutrient lost under man-made accelerated erosion on Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3): 7-11.
- [8] 蔡崇法, 丁树文, 张光远, 黄丽, 王道合. 三峡库区紫色土坡地养分状况及养分流失[J]. *地理研究*, 1996, 15(3): 77-84.
- CAI Chongfa, DING Shuwen, ZHANG Guangyuan, HUANG Li, WANG Daohe. A preliminary study on the conditions and losses nutrients of purple soils in Three Gorge Reservoir Area(TGRA)[J]. *Geographical Research*, 1996, 15(3): 77-84.
- [9] 王洪杰, 李宪文, 史学正, 杨金玲. 四川紫色土区小流域土壤养分流失初步研究[J]. *土壤通报*, 2002, 33(6): 441-444.
- WANG Hongjie, LI Xianwen, SHI Xuezheng, YANG Jinling. Study on soil erosion of the small watershed in the purple area of Sichuan[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(6): 441-444.
- [10] 林超文, 庞良玉, 陈一兵, 黄晶晶, 涂仕华. 四川盆地紫色土N、P损失载体及其影响因子[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(2): 20-23, 46.
- LIN Chaowen, PANG Liangyu, CHEN Yibing, HUANG Jingjing, TU Shihua. Carrier of losing N, P of purple soil in Sichuan Basin and its affecting factors[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(2): 20-23, 46.
- [11] 张信宝, 王世杰, 曹建华, 王克林, 孟天友, 白晓东. 西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题[J]. *中国岩溶*, 2016, 29(3): 274-279.
- ZHANG Xinbao, WANG Shijie, CAO Jianhua, WANG Kelin, MENG Tianyou, BAI Xiaoyong. Characteristics of water loss and soil erosion and some scientific problems on karst rocky desertification in Southwest China karst area[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 29(3): 274-279.
- [12] Wang Jianxiu, Zou Baoping, Liu Yan, Tang Yiqun, Zhang Xinbao, Yang Ping. Erosion-creep-collapse mechanism of underground soil loss for the karst rocky desertification in Chenqi village, Puding county, Guizhou, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(8): 2751-2764.
- [13] Williams P W. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: A review[J]. *International Journal of Speleology (Edizione Italiana)*, 2008, 37(1): 1-10.
- [14] 严友进, 戴全厚, 伏文兵, 彭旭东, 靳丽. 喀斯特裸坡产流产沙过程试验研究[J]. *生态学报*, 2017, 37(6): 2069-2079.
- YAN Youjin, DAI Quanhui, FU Wenbing, PENG Xudong, JIN Li. Runoff and sediment production processes on a karst bare slope[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(6): 2069-2079.
- [15] 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)[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 1205-1213.
- [16] Flynn R M, Sinreich M. Characterisation of virus transport and attenuation in epikarst using short pulse and prolonged injection multi-tracer testing[J]. *Water Research*, 2010, 44(4): 1138-1149.
- [17] 闫钊全, 刘琦, 邓大鹏, 王涵. 表层岩溶裂隙带土壤地表流失/地下漏失室内模拟实验[J]. *中国岩溶*, 2017, 31(5): 1-8.
- YAN Yiquan, LIU Qi, DENG Dapeng, WANG Han. Qi, DENG Dapeng, WANG Han. Laboratory simulation study on soil surface loss and underground leakage in the epikarst fissure zone[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(5): 1-8.
- [18] 吴士章, 朱文孝, 苏维词, 李坡, 贺卫, 周庆珍. 喀斯特地区土壤侵蚀及养分流失定位试验研究: 以贵阳市修文县久长镇为例[J]. *中国岩溶*, 2005(3): 36-39.
- WU Shizhang, ZHU Wenxiao, SU Weici, LI Po, HE Wei, ZHOU Qingzhen. Experiment on soil erosion and nutrient loss in karst area: A case in Jiuchang town, Xiuwen, Guiyang[J]. *Carsologica Sinica*, 2005(3): 36-39.
- [19] 张伟, 陈洪松, 王克林, 张继光, 侯娅. 典型喀斯特峰丛洼地坡面土壤养分空间变异性研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(1): 68-73.
- ZHANG Wei, CHEN Hongsong, WANG Kelin, ZHANG Jiguang, HOU Ya. Spatial variability of soil nutrients on hillslope in typical karst peak-cluster depression areas[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(1): 68-73.
- [20] 陈洪松, 杨静, 傅伟, 何菲, 王克林. 桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(16): 121-126.

- CHEN Hongsong, YANG Jing, FU Wei, HE Fei, WANG Kelin. Characteristics of slope runoff and sediment yield on karst hill-slope with different land-use types in northwest Guangxi[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(16): 121-126.
- [21] Wang Sheng, Fu Zhiyong, Chen Hongsong, Nie Yunpeng, Xu Qinxue. Mechanisms of surface and subsurface runoff generation in subtropical soil-epikarst systems: Implications of rainfall simulation experiments on karst slope[J]. Journal of Hydrology, 2020, 580: 124370.
- [22] Fu Zhiyong, Chen Hongsong, Xu Qinxue, Jia Jintian, Wang Sheng, Wang Kelin. Role of epikarst in near-surface hydrological processes in a soil mantled subtropical dolomite karst slope: implications of field rainfall simulation experiments[J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(5): 795-811.
- [23] 付智勇, 陈洪松, 王克林, 张伟. 一种适宜高异质性喀斯特坡地的微型土壤水文监测系统[P]. 中国, ZL201310424726.3. 2015. FU Zhiyong, CHEN Hongsong, WANG Kelin, ZHANG Wei. Hydrological monitoring system suitable for micro-soil on high heterogeneous karst slope land[P]. China, ZL201310424726.3. 2015.
- [24] Zheng F L, Huang C H, Norton L D. Effects of near-surface hydraulic gradients on nitrate and phosphorus losses in surface runoff[J]. *Environmental Quality*, 2004, 33(6): 2174-2152.
- [25] 彭旭东, 戴全厚, 李昌兰. 模拟降雨下喀斯特坡耕地土壤养分输出机制[J]. 生态学报, 2018, 32(2): 624-634. PENG Xudong, DAI Quanhong, LI Changlan. Output mechanism of soil nutrients from karst slope farmland under simulated rainfall[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 32(2): 624-634.
- [26] 颜萍, 熊康宁, 王恒松, 李晋, 刘洋. 喀斯特地区水土流失与水土保持研究进展[J]. 中国水土保持, 2016(406): 58-63+77. YAN Ping, XIONG Kangning, WANG Hongsong, LI Jin, LIU Yang. Progress of study on soil and water loss and soil and water conservation of karst region[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2016(406): 58-63+77.
- [27] 杨振华, 宋小庆, 苏维词. 西南喀斯特地区坡地产流过程及其利用技术[J]. 地球科学, 2019, 44(9): 2931-2943. YANG Zhenhua, SONG Xiaoping, SU Weici. Slope runoff process and its utilization technology in southwest karst area[J]. *Earth Science*, 2019, 44(9): 2931-2943.
- [28] 张兴, 王克林, 付智勇, 陈洪松, 张伟, 史志华. 桂西北白云岩坡地典型土体构型石灰土水文特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2186-2196. ZHANG Xing, WANG Kelin, FU Zhiyong, CHEN Hongsong, ZHANG Wei, SHI Zhihua. Hydrological characteristics of calcareous soil with contrasting architecture on dolomite slope of northwest Guangxi[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(7): 2186-2196.
- [29] 姜光辉, 陈坤琨, 于爽, 彭稳. 峰丛洼地的坡地径流成分划分[J]. 水文, 2009, 29(6): 14-19. JIANG Guanghui, CHEN Kunkun, YU Shi, PENG Wen. Separating karst slope runoff in peak cluster area[J]. *Journal of China Hydrology*, 2009, 29(6): 14-19.
- [30] 魏兴萍, 谢德体, 倪九派, 苏程烜. 重庆岩溶槽谷区山坡土壤的漏失研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(3): 462-473. WEI Xingping, XIE Deti, NI Jiupai, SU Chengxuan. Soil erosion and loss on slope in karst valley area, Chongqing with ¹³⁷Cs[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2015, 23(3): 462-473.
- [31] Dai Q H, Liu Z, Shao H, Yang Z. Karst bare slope soil erosion and soil quality: A simulation case study[J]. *Solid Earth*, 2015, 6(3): 985-995.
- [32] 杨成英, 吴虹. 桂林毛村岩溶地下河流域水土流失遥感动态监测研究[J]. 中国岩溶, 2009, 28(2): 206-211. YANG Chengying, WU Hong. RS monitoring soil erosion regime in the Maocun underground river basin, Guilin[J]. *Carologica Sinica*, 2009, 28(2): 206-211.
- [33] Li Xiaoyan, Yang Zhipeng, Li Yuetan, Lin Henry, Li Dongsheng, Li Xiaoyan. Connecting ecohydrology and hydropedology in desert shrubs: Stemflow as a source of preferential flow in soils[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13: 1133-1144.
- [34] 李昌兰, 戴全厚, 彭旭东, 袁应飞. 喀斯特坡耕地浅层地下孔(裂隙)发育过程中径流产污特征[J]. 环境科学学报, 2016, 36(12): 4437-4445. LI Changlan, DAI Quanhong, PENG Xudong, YUAN Yingfei. Characteristics of nitrogen, phosphorus and potassium losses in underground runoff of karst slope farmlands during the developing process of shallow karst fissure[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(12): 4437-4445.
- [35] Sander T, Gerke H H. Preferential flow patterns in paddy fields using a dye tracer[J]. *Vadose Zone Journal*, 2007, 6: 105-115.
- [36] Richards P L, MD Norris, Lin B B. The hydrologic implications of old field succession: Depression storage and leaf litter[J]. *Ecohydrology*, 2013, 6(5): 863-877.

Hydrological driving characteristics of soil carbon and nitrogen losses under different land use modes on karst slopes

REN Huimin^{1,2,3}, FU Zhiyong^{1,2}, WANG Fa^{1,2,3}, CHEN Hongsong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410125, China; 2. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract There is no direct contact between shallow soil and underlying carbonate rock in karst slope. Due to the unique karst processes in the karst hillslopes, in the process of secondary rainfall, overland flow and subsurface flow jointly drive the migration of key biogenic materials in the soil rock profile, resulting in the decrease of soil productivity and groundwater pollution in this area. However, the main migration pathways and driving mechanisms of soil carbon and nitrogen loss under different land use modes remain unclear. Based on a complete hydrological annual rainfall runoff-nutrient monitoring from 6 different land use experimental hillslopes (burned land, light felling land, heavy felling land, planted forest, farmland and grassland), we took the slope runoff micro-area (2 m×1.2 m) of Huanjiang Karst Ecosystem Observation and Research Station of Chinese Academy of Sciences as the research object. This study analyzed the loss path, loss form and average loss of soil TN and Toc driven by the near-surface multi-interface lateral hydrological processes (surface runoff, lateral flow from Layer A and lateral flow below the layer). Results show that the karst slope has a high soil infiltration coefficient, and the soil carbon and nitrogen loss per unit area is positively correlated with rainfall. Rainfall is the main driving factor of soil carbon and nitrogen loss. The threshold rainfall of nutrient loss driven by runoff is 16 mm, and the peak rainfall is 55 mm, indicating that the karst slope shows the characteristics of nutrient loss driven by full runoff. There are significant differences of soil carbon and nitrogen loss among different land use modes, but only under heavy rainfall. Compared with other land use mods, planted forest can improve canopy interception, increase transpiration and infiltration, and thus weaken the surface flow production. However, research results also show that the soil carbon and nitrogen loss of planted forest is relatively large, which on the one hand is related to the single vegetation type, high surface exposure, and fast soil surface saturation; on the other hand, the channels formed by the interpenetration of plant roots have natural continuity and are interconnected with other channels in the soil to form a huge water transport network and promote the occurrence of runoff. Therefore, species suitable for karst areas should be cultivated; the allocation of shrub and grass species at the bottom of canopy should be strengthened; and moderate human interference should be carried out to optimize plant community structure and reduce the risk of soil carbon and nitrogen loss.

In this study, it is found that the soil carbon and nitrogen loss of heavy felling land is relatively small. During the process of heavy felling and root removal, the original pores of soil were destroyed, which had a negative impact on the occurrence of preferential flow and near-surface flow. The higher soil carbon and nitrogen loss in farmland and grassland is related to fertilization in tillage period, but the difference between them is not significant, indicating that conservation tillage is beneficial to soil microbial activities and thus improve soil fertility. Combined with the effect of fertilization, the difference in nutrient loss driven by hydrological processes may be concealed. Meanwhile, surface filling increase, thus reducing the near-surface loss. Land use modes do not change the path of soil carbon and nitrogen loss. The soil carbon and nitrogen in the slope of karst dolomite mainly loss through the surface (51.29%-75.15%), because the pores and joints in the dolomite area are evenly distributed and the water-barrier layer is easy to be generated and the permeability is good under the dual influence of physical weathering and tectonic forces. At the same time, the monitoring results of soil flow show that the flow loss in Layer A is much higher than that below Layer A, which is related to nutrient enrichment in Layer A on the one hand. On the other hand, the flow generation in karst areas follows the theory of interfacial flow generation, and the permeability of Layer A is much higher than that below Layer A. NO_3^- -N is the main form of soil carbon and nitrogen loss under different land use experimental hillslopes (45.84%-56.49%). The results of this study can provide reference for revealing the process of biogenic material loss and its hydrologic driving mechanism in karst slope, and developing the prevention and control technology of soil loss and non-point source pollution.

Key words karst ecosystem, human disturbance, non-point source pollution, carbon and nitrogen loss, soil flow.

(编辑 张玲 杨杨)