

元谋干热河谷冲沟发育区植被恢复对土壤碳氮的影响

文孝丽, 董一帆, 杨 己, 段兴武

(云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650091)

摘要: 冲沟侵蚀是一种剧烈的土壤侵蚀过程, 导致冲沟发育区地表形态处于显著变化的非稳定状态。通过封禁使植被自然恢复是元谋干热河谷冲沟治理的主要模式之一, 但在沟道植被持续恢复与冲沟显著发育的综合作用下, 沟道土壤碳氮含量的变化趋势仍有待明晰。选择元谋干热河谷 1 条典型冲沟, 在沟内随机布设 81 个 1 m×1 m 的样方, 分别在 2012 年和 2017 年的旱季初期, 监测 81 个样方的植被指数、侵蚀/沉积过程引起的地表高程变化, 以及冲沟土壤理化性质。结果表明: (1) 2017 年沟道内植被状况明显好于 2012 年, 且沟床表面径流冲刷范围内的植被变化最为明显, 其盖度、株数、株高分别增加 313.61%, 94.29%, 33.33%。(2) 5 年间冲沟发育区以沉积为主, 侵蚀样方和沉积样方的比例分别为 22.22% 和 77.78%。随着植被盖度的增加, 土壤砂粒含量呈下降趋势, 粉粒含量呈增加趋势。(3) 封禁期间虽然植被恢复显著, 但土壤碳氮并没有明显改善。土壤碳氮不仅与植被盖度和粉粒百分比呈显著正相关, 还与样方点高程变化呈显著负相关。冲沟内地形起伏的剧烈程度显著高于坡面侵蚀, 并对冲沟表层土壤碳氮产生显著影响。研究有助于查明植被恢复及冲沟发育对土壤碳氮的综合影响, 并为干热河谷冲沟退化生态系统的修复提供理论支持。

关键词: 植被恢复; 冲沟侵蚀; 土壤碳氮; 高程变化; 干热河谷

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)04-0282-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.04.039

Effects of Vegetation Restoration on Soil Carbon and Nitrogen in Gully Development Area of Yuanmou Dry-hot Valley

WEN Xiaoli, DONG Yifan, YANG Ji, DUAN Xingwu

(Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming 650091)

Abstract: Gully erosion is a kind of intense soil erosion process, which leads to the surface morphology of gully development area in an unstable state of significant change. Natural restoration of vegetation through prohibition is one of the main modes of gully management in Yuanmou Dry-hot valley. However, under the comprehensive effect of continuous restoration of gully vegetation and significant development of gully, the changing trend of soil carbon and nitrogen content in gully remains to be clearly defined. In this study, a typical gully in Yuanmou Dry-hot valley was selected, and 81 samples of 1 m×1 m were randomly arranged. The vegetation index, elevation changes caused by the erosion/sedimentation process, and soil physical and chemical properties of the 81 samples were measured at the beginning of the dry season in 2012 and 2017, the results showed that: (1) The vegetation conditions in the gully in 2017 were significantly better than that in 2012, and the vegetation changes within the range of runoff erosion on the surface of the gully bed were the most obvious, and the vegetation cover, number, and height increased by 313.61%, 94.29%, and 33.33%, respectively. (2) During the five years, the gully development area was dominated by sedimentation, and the proportions of erosion and sedimentation were 22.22% and 77.78%, respectively. With the increase of vegetation cover, the sand content of the soil showed a decreasing trend, and the silt content showed an increasing trend. (3) Although the vegetation recovered significantly during the period of prohibition, the soil carbon and nitrogen did not improve significantly. Soil carbon and nitrogen were not only significantly positively correlated with vegetation cover and soil particle-size, but also significantly negatively correlated

收稿日期: 2021-01-09

资助项目: 国家自然科学基金项目(U2002209, 41671288); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0307)

第一作者: 文孝丽(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 15239913067@163.com

通信作者: 董一帆(1983—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事沟蚀分布、发育过程及机理研究。E-mail: yifan@ynu.edu.cn

with elevation changes of quadrat points. The severity of topographical changes in the gully was significantly higher than that of surface erosion, and it had a significant impact on the carbon and nitrogen of the surface soil of the gully. This study will help to identify the comprehensive effects of vegetation restoration and gully development on soil carbon and nitrogen, and provide support for the restoration of the degraded gully ecosystem in Dry-hot valley.

Keywords: vegetation restoration; gully erosion; soil carbon and nitrogen; elevation change; Dry-hot valley

土壤碳、氮元素不仅为植物生长提供养分,也是构成生物地球化学循环的重要组成部分^[1]。土壤碳库是陆地生态系统碳库的重要组成部分,其碳储量约为 25 000 亿 t^[2]。土壤也是 N₂O 最大的排放源,自然状态下每年 N₂O 排放量为 6 Tg(1 Tg=10¹² g)^[3]。因此,土壤碳、氮储量的微小波动均会显著影响全球气候变化^[4]。在生态系统脆弱的地区,土壤侵蚀是影响土壤碳、氮储量的主要因素之一^[5]。前期,部分学者^[6-8]研究在细沟及细沟间侵蚀(rill and interrill erosion)驱动下土壤碳、氮的储量变化及再分布过程发现,土壤养分随土壤侵蚀强度的增大而减小,而植被恢复可以有效控制土壤侵蚀,减少土壤养分流失。

细沟及细沟间侵蚀引发的土层厚度年际变化主要在毫米—厘米级^[9],引起地表的变化幅度相对有限。与之相对,冲沟侵蚀(gully erosion)是一种更为剧烈的土壤侵蚀过程,通过沟头溯源、沟道下切、沟壁崩塌、沟口泥沙沉积等过程,冲沟发育区地表的年际变化往往达到几十厘米,甚至数米^[10],冲沟沟道生境长期处于剧烈变化的非稳定状态。而这种强烈的侵蚀/沉积过程引起的地表形态显著变化对冲沟发育区内土壤碳氮含量产生怎样的影响,尚有待进一步明晰。

干热河谷是我国西南特殊的脆弱生态类型区,冲沟侵蚀极为剧烈,是造成该区水土流失及土地退化的主要驱动因素之一。以元谋为代表的金沙江干热河谷区,平均沟壑密度在 3~5 km/km²,土壤侵蚀模数高达 1.64×10⁴ t/(km²·a)^[11],自然植被覆盖率仅 15%~20%^[12]。当前,元谋干热河谷冲沟治理的措施主要有 2 种,以人工改造为主的平沟建园^[13]和对冲沟发育区采取封禁措施的植被自然恢复。目前,针对土壤侵蚀与植被恢复对土壤碳氮的影响开展了大量研究^[14-16]显示,植被生长可以有效提升土壤碳氮含量及稳定性。冲沟发育区植被可以有效降低区域侵蚀强度,增益泥沙沉积^[17-18],但植被的空间分布也受冲沟发育活跃程度的显著影响^[19]。在冲沟发育与植被恢复的交互作用背景下,干热河谷冲沟的土壤碳氮呈怎样的变化趋势,控制碳氮含量的主要因素是什么,仍有待进一步研究。

本文以元谋干热河谷典型冲沟发育区为研究区。该研究区在 2012 年开始封禁,经过 5 年的植被自然

恢复后,通过监测冲沟区植被恢复、地表起伏及相应的土壤碳氮变化,探讨植被恢复对冲沟侵蚀及沟道土壤碳氮变化的综合影响,对冲沟发育区的水土保持及生态修复对策的制定具有重要的实践意义。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

元谋干热河谷地处滇中高原北部的金沙江一级支流—龙川江下游(101°35′—102°05′E, 25°25′—26°07′N)(图 1)。该区属南亚热带季风气候,具有“炎热干燥、降水集中、干湿季分明”的特征^[20],多年平均气温 21.8℃,年降水量 634 mm,主要集中在 6—10 月(雨季),占年总降水量的 85%以上;年蒸发量 3 848 mm,几乎是降水量的 6 倍,导致该区极端干旱。区内土壤类型主要为燥红土和变性土,植被类型为稀树灌木草丛,草本主要有扭黄茅(*Heteropogon*)和孔颖草(*Bothriochloa pertusa*)等;灌木以车桑子(*Dodonaea viscosa*)为主,以上均为乡土种。新银合欢(*Leucaena leucocephala*)是前期干热河谷生态恢复的引进物种(小乔木),生长迅速,具有较强的抗旱能力。研究区在 2011 年时沿沟缘线布设围栏,以防止当地居民进入冲沟区域进行放牧、砍伐、割草等活动。

1.2 野外调查

研究地点选择在云南省元谋县苴林乡 1 条天然冲沟中,2012 年使用 RTK-GPS(Trimble R8,水平和垂直定位精度分别达到 1,2 cm)对沟道进行形态监测,并将测得的地形点导入 ArcGIS 软件中,使用 3D Analyst 工具创建不规则三角网,然后将其转换为单元大小为 1 m×1 m 的 DEM 网格生成地形因子,获得沟道各部位的高程、深度、坡度、坡向等信息。基于获取的冲沟地形 DEM,该冲沟在 2012 年时面积为 16 332.37 m²,体积为 124 514.50 m³,平均沟深为 7.60 m,最大深度为 15.92 m。

分别在 2012 年和 2017 年对冲沟内 81 个 1 m×1 m 的样方进行植被调查及土壤样品采集(图 1)。采样时间在当年的 11—12 月,即最后 1 场产流降雨结束后的 46,49 天。在 2012 年利用差分 GPS 记录样方中心点位置,2017 年基于差分 GPS 的放样法导航至样方所在位置进行采样,两期样方中心点位置的水平位置差异控制在厘米级。调查内容包括样方内

的灌木和草本植物的物种、盖度、株数、株高,因草本植物根系主要分布深度在 5—30 cm,故土壤样品的采集深度为 0—30 cm。2017 年调查时,由于新银合欢(小乔木)在沟道大量生长,样方调查时记录样方内是否有株高 > 2 m 的新银合欢。2012 年调查时,基于不同的地貌部位及沟床径流的冲刷痕迹,将冲沟沟道分为沟壁、沟床_{out}(径流冲刷范围外)和沟床_{in}(径流冲刷范围内)3 大区域。沟床表面径流路径内经常受到水流冲刷,植被生长状况较差,故以径流路径为界,沟床表面植被分布有明显差异^[19]。

1.3 试验方法

土壤理化性质指标在成都山地所综合测试与模拟中心进行测试,测试前土壤样品经过自然风干及研磨过筛处理,全碳和全氮采用元素分析仪自动分析法;碱解氮采用碱解—扩散法;土壤机械组成采用激光粒度仪测

定。本文测定土壤机械组成包括土壤砂粒(2~0.05 mm)、粉粒(0.05~0.002 mm)及黏粒(<0.002 mm)。

1.4 数据处理

元谋干热河谷侵蚀强烈,土壤退化严重,大量深层沉积物因沟蚀及泥沙沉积而暴露至地表,尚处于成土初期,导致检测出的土壤全碳含量非常低,2017 年全碳含量变化范围为 0~15.23 g/kg,平均含量仅为 2.44 g/kg,有 3 个样点检测不到全碳含量,元谋干热河谷区土壤 pH 为 5.5,为酸性土壤^[21]。故本研究在分析土壤质量变化时,直接采用全碳含量来进行分析,且使用全碳:全氮来计算 C/N 值。

采用 Excel 2010 和 SPSS 24.0 软件对试验数据进行统计分析,所有数据均通过正态分析。其中包括多元回归分析和 Pearson 相关性分析,并用 Origin 9.0 和 ArcGIS 10.2 软件进行绘图。

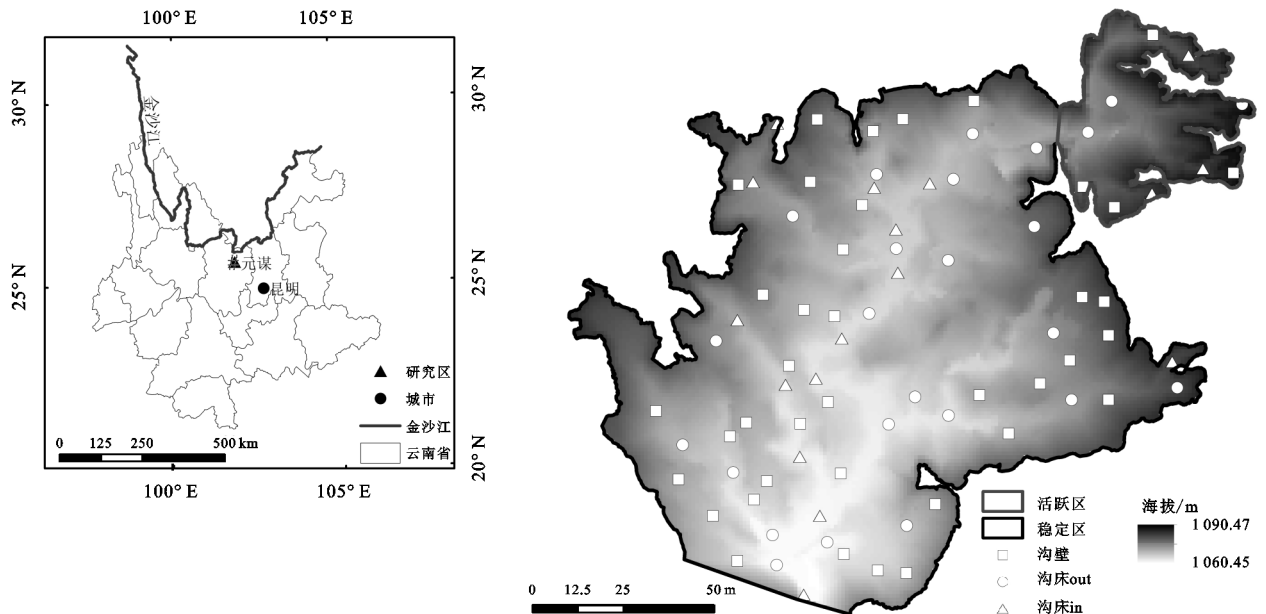


图 1 研究区概况地理位置及冲沟发育区样方分布

2 结果与分析

2.1 冲沟发育区植被恢复状况

通过封禁 5 年的植被自然恢复,2017 年冲沟区植被状况明显优于 2012 年(表 1),植被盖度、株数、株高分别增加 28.27%,23.46%,19.69%,且相互间呈极显著正相关。2012 年冲沟区植被主要由以车条子为主的灌木和以扭黄茅、孔颖草为主的草本组成,调查的 81 个样方均无乔木生长。然而,2017 年共有 26 个样方发现高度 > 2 m 的新银合欢植株;同时,低矮植物的种类也明显增多,出现了白背黄花稔、假杜鹃等灌木物种以及三茅草、白羊草等草本物种。

在植被状况总体改善的情况下,不同地貌部位的植被生长也有明显差异,沟床_{out}部位的植被状况最好,沟壁其次,沟床_{in}相对最差。但是封禁期间各地貌部位的植被改善状况则呈相反状况,表现为沟床_{in}

的植被增长幅度最大,其盖度、株数、株高分别增加 313.61%,94.29%,33.33%。其中,沟壁、沟床_{out}和沟床_{in} 3 个地貌部位新增小乔木的样方数量分别为 6,14,6,其比例分别为 15.38%,56.00%,35.29%,沟床区域的新银合欢长势明显。

2.2 沟蚀区地形变化

侵蚀沉积过程不仅导致地表的高程变化,也会引起土壤颗粒级配的粗化。通过对比 2012 年和 2017 年 81 个样方中心点的高程变化,有 18 个样方地形变化为负值,表现为侵蚀,有 63 个样方地形变化为正值,表现为沉积(表 2)。侵蚀样方和沉积样方的数量分别占总样方数量的 22.22%和 77.78%,说明该研究流域主要以沉积为主,且主要在侵蚀沟的中下游发生沉积。从不同地貌部位的情况看,沟壁、沟床_{out}和沟床_{in}均以沉积为主。其中沟壁的侵蚀单元占比为

30.78%,显著高于沟床部位,平均沉积厚度为 0.07 m,显著低于沟床部位。沟壁的沉积主要发生在沟壁边坡的中下部。沟床_{in}的沉积样方占比及平均沉积厚度均显著高于沟床_{out}。

此外,在邻近冲沟沟头的活跃区,与沟道中下游的稳定区(图 1),5 年间均表现为沉积为主的趋势,但

表 1 冲沟发育区 2012 年和 2017 年 81 个样方的植被状况

位置	采样年份	样方数量	盖度/%			株数/株			株高/cm		
			最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
沟壁	2017	39	0	99	61.38	0	20	8.69	0	96	53.46
	2012		0	96	50.56	0	16	6.95	0	81	41.92
沟床 _{out}	2017	25	17	99	65.64	1	16	9.04	13	93	57.20
	2012		11	98	56.88	4	14	8.32	22	89	54.16
沟床 _{in}	2017	17	0	88	26.94	0	10	4.00	0	76	31.29
	2012		0	38	6.53	0	7	2.06	0	51	23.47

表 2 冲沟发育区 81 个样方的高程变化

位置	侵蚀样方	沉积样方	侵蚀比例/%	高程变化/m	平均数	中位数	标准差	变异系数
沟壁	12	27	30.78	-0.56~0.56	0.07	0.02	0.30	4.24
沟床 _{out}	5	20	20.00	-0.02~0.79	0.18	0.12	0.30	1.62
沟床 _{in}	1	16	5.88	-0.16~0.96	0.46	0.36	0.32	0.70
共计	18	63	22.22	-0.56~0.96	0.19	0.06	0.34	1.82

同时,3 个地貌部位的土壤均呈现明显的粗骨化特征,砂粒含量表现为增加,而粉粒和黏粒含量均表现为减少(图 2)。沟床_{out}部位的土壤粗骨化现象最严重,其砂粒含量平均增加 12.83%;沟床_{in}部位的粒径变化幅度最小,其粉粒和黏粒平均含量分别下降 0.80% 和 2.91%。

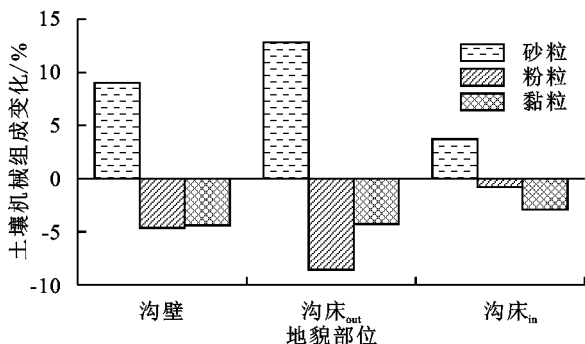


图 2 冲沟发育区各地貌部位土壤机械组成变化量

植被盖度的增加可以显著控制土壤侵蚀强度^[23]。通过 5 年的封禁,81 个样方的灌草植被盖度显著增长,同时大量小乔木(新银合欢)在沟道内生长,导致冲沟出现显著的泥沙沉积。同时,样方植被盖度的高低与土壤机械组成之间存在显著的线性相关关系,即随着植被盖度的增加,样方土壤砂粒含量的增幅与粉粒的流失比例均呈下降趋势,3 个地貌部位的粒径变化表现出相似规律(图 3)。

2.3 沟道土壤碳氮变化

封禁期间,沟道内土壤全碳含量略有增加,但全氮含量整体呈下降趋势(图 4)。2017 年沟壁和沟床_{out}的全碳含量均高于 2012 年,分别高出 14.00% 和

2 个区域沉积机理存在显著差异。活跃区主要由于沟头及沟壁的崩塌物沉积在沟床^[22],由于当前沟头已接近流域边界,有限的上游来水无法将崩塌堆积物完全搬运出活跃区,导致沉积发生;相反,稳定区则由于植被的显著恢复,导致上游搬运泥沙在稳定区沟床及坡脚大量沉积。

5.21%。但是沟床_{in}的全碳含量则相反,相比 2012 年降低 22.83%。2017 年沟壁、沟床_{out}和沟床_{in}的全氮含量均低于 2012 年,分别降低 11.00%,16.64%,43.20%。碱解氮含量和 C/N 则表现为 2017 年高于 2012 年。沟壁、沟床_{out}和沟床_{in}的碱解氮含量分别增加 16.42%,43.72%,41.15%。3 个部位 2017 年的 C/N 值分别为 11.03,10.70,8.97,相比 2012 年分别上升 33.00%,25.00%,28.62%。沟床_{in}土壤的碳氮平均含量最低,但 5 年间的变化也最明显,即全碳和全氮含量减少的幅度最大。2017 年干热河谷冲沟侵蚀区平均 C/N 值为 10.50,2012 年该值为 8.10,C/N 值的增长主要是由于表层土壤 N 含量的下降幅度高于 C。

3 讨论

土壤侵蚀与植被变化可显著影响土壤碳氮含量。土壤侵蚀不仅导致地表起伏变化,还使土壤发生粗骨化。本研究表明,土壤全碳、全氮含量与高程变化呈显著负相关,与植被盖度及粉粒百分比则呈显著正相关(图 5)。这是因为植被主要通过物理和化学作用(如植被覆盖、截流入渗、根系穿插、枯落物分解、根系分泌物)直接或间接影响土壤理化性质^[24-25],且以碳、氮元素为主的有机质主要富集在细颗粒土壤中^[26]。有关土壤侵蚀对土壤碳氮的研究主要集中在坡面侵蚀与细沟侵蚀,其机理主要是剥蚀表层土壤而导致土层厚度的流失,且侵蚀土层厚度的变化较小,故而前人的研究中并未涉及高程变化这一指标。冯志珍等^[8]和赵文启等^[23]在东北黑土区和黄土高原

区测得的年平均土壤侵蚀深度分别为 0.14, 0.27 cm, 而在本研究的冲沟内, 5 年间最大侵蚀厚度为 0.56 m, 侵蚀样方年平均下切厚度为 1.6 cm; 沉积超过 0.50 m 的样方有 14 个, 年平均沉积厚度为 5 cm。相较于细沟及细沟间侵蚀, 冲沟区的地形起伏更为剧烈。而随着地表高程变化幅度的增加, 土壤碳、氮含量呈显著下降趋势。在侵蚀区, 地表比重相对较

轻的植被残体和土壤细颗粒首先被股流冲刷流失, 土壤碳氮等养分随径流迁移, 致使土壤贫瘠化^[27]。在沉积区, 粗粒级土壤较难被搬运而最先沉积, 导致土壤结构变差, 土壤保水保肥能力降低^[28], 抗侵蚀能力变差, 加剧侵蚀的发展和土壤肥力的衰竭, 形成恶性循环^[29]。总体表现为高程变化越剧烈, 则土壤碳氮含量越低。

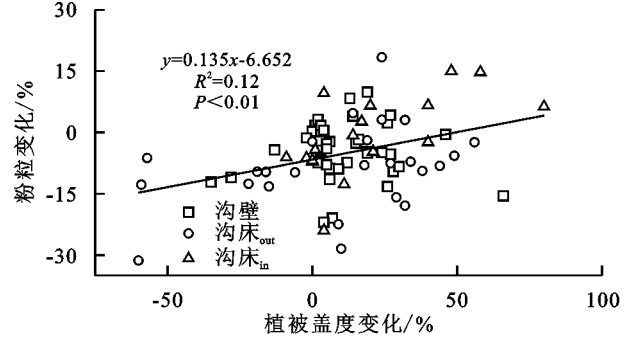
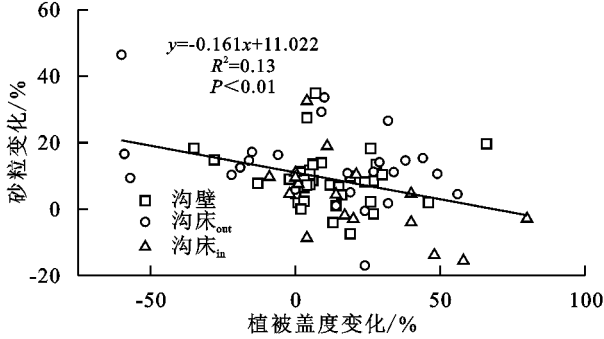
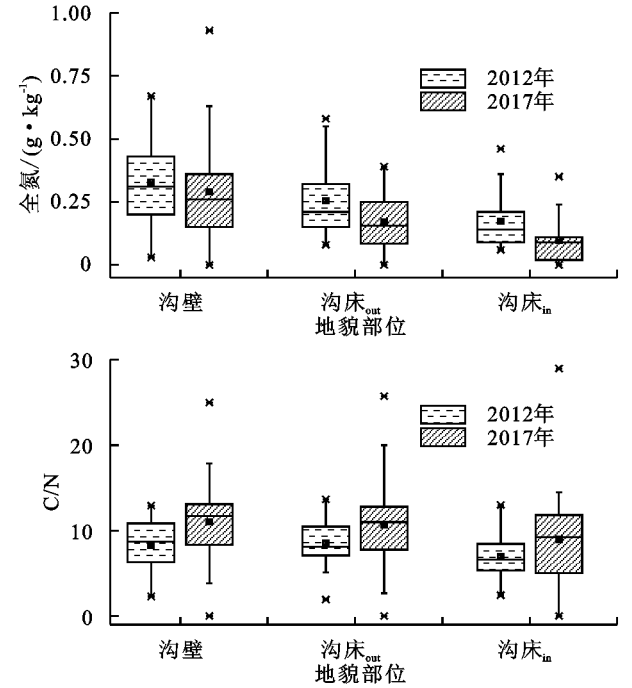
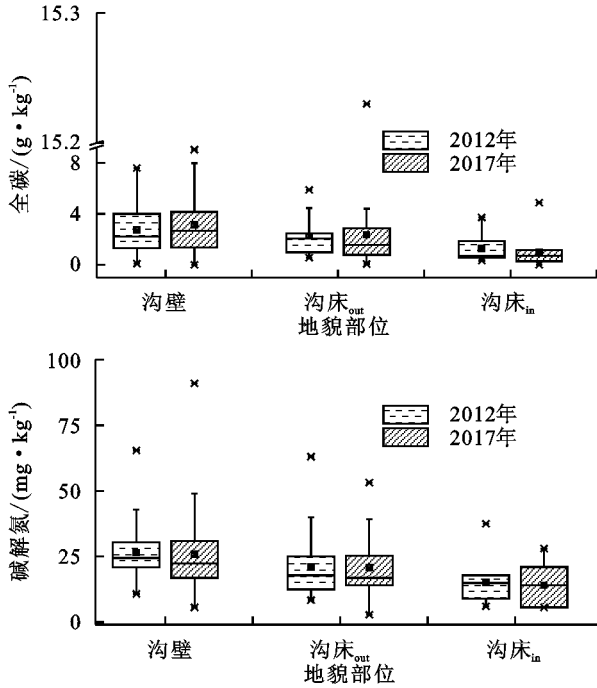


图 3 封禁期间冲沟植被盖度与砂粒和粉粒变化量的关系



注: 箱体的顶部和底部分别表示数据的上四分位数(75%)和下四分位数(25%), 即包含 50% 的数据; 箱体中间的一条线表示数据的中位数; 箱体中间点表示数据的平均数; 箱型图的上下边缘分别表示数据的最大值和最小值; 超出上下边缘的点表示数据的异常值。

图 4 冲沟发育区各地貌部位土壤碳氮含量变化

将影响土壤碳、氮的几个因素拟合成一个多元回归方程, 结果显示其相关性比单独拟合的线性回归方程更高, 变化趋势仍与单独拟合相同, 且不同地貌部位的拟合结果较为一致(表 3), 说明冲沟沟道土壤碳氮是多个因素综合作用的结果。除了植被与土壤细颗粒含量等前人较多关注的影响因素之外, 沟道地形起伏的剧烈程度也显著影响沟床表层土壤的碳氮含量。

虽然封禁期植被恢复有明显的成效, 但土壤全碳含量无显著变化, 全氮和碱解氮含量则显著减少, 这与前人^[7, 20]的研究结果相反。有研究^[30]表明, 土壤碳氮等养分主要集中在土壤表层(0—10 cm), 且随

着土层深度的增加而减少。元谋干热河谷冲沟沟道平均沟深为 7.60 m, 最大下切深度高达 15.92 m, 导致大量原本碳氮含量极低的深层土体被侵蚀、搬运后, 由于植被的生长而沉积在坡脚及沟床等部位, 导致 2017 年监测的冲沟表层土壤碳氮含量相对于 2012 年有所降低; 再加上封禁初期, 植被快速生长需要消耗土壤碳氮, 故而沟道内土壤碳氮并没有得到改善。但是, 由于本研究的观测时期仅有 5 年, 而后续随着植被持续恢复到相对稳定的状态, 冲沟内的地形起伏变化趋于稳定后, 沟道土壤的碳氮含量变化趋势仍有待进一步研究。

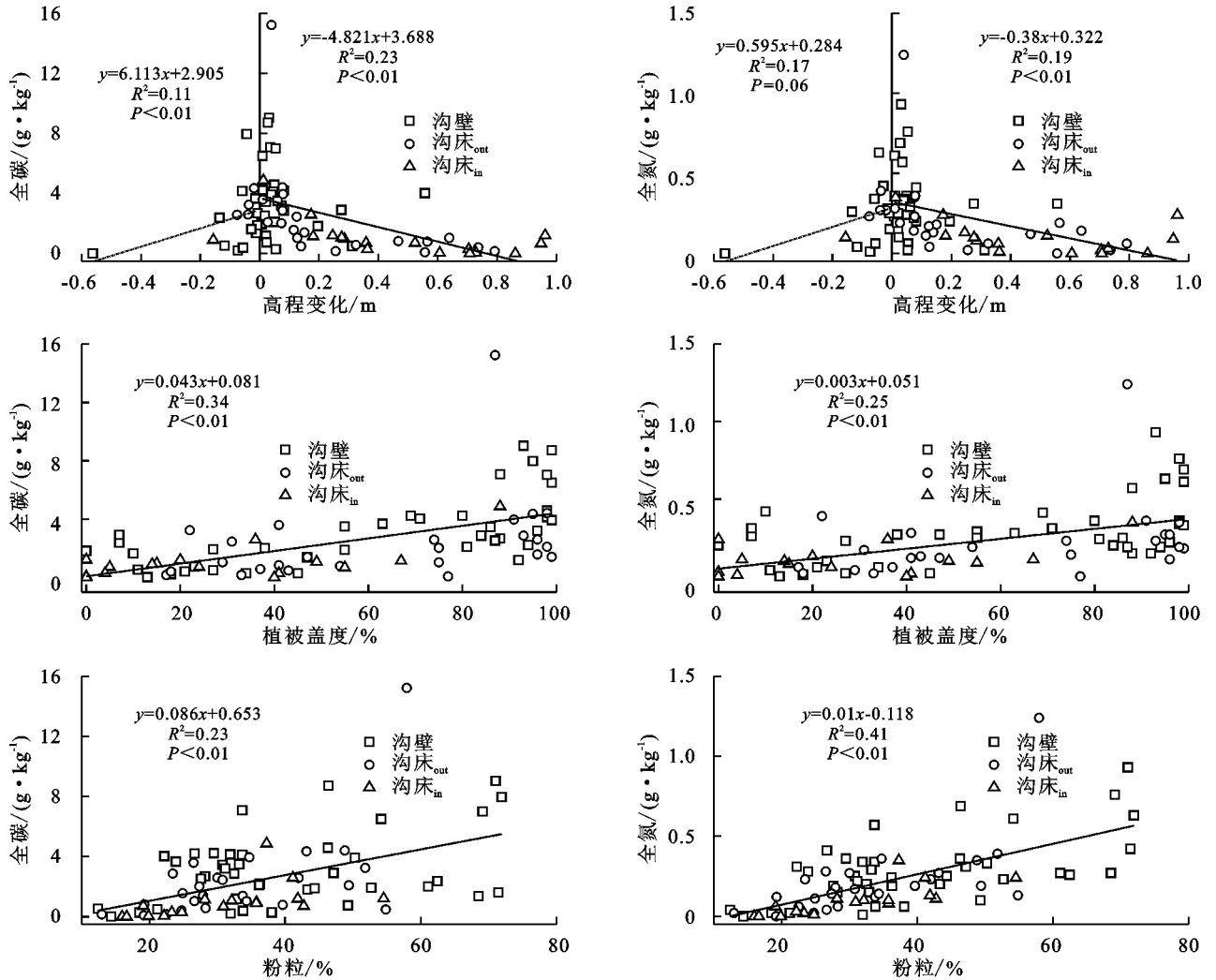


图 5 冲沟各地貌部位土壤碳、氮与各影响因素间的回归分析

表 3 冲沟各地貌部位土壤碳氮影响因子的多元回归方程

地貌部位	多元回归方程	R ²
沟壁	$Y_{全碳} = -1.819 - 0.548X_1 + 0.046X_2 + 0.054X_3$	0.61
	$Y_{全氮} = -0.208 - 0.043X_1 + 0.003X_2 + 0.008X_3$	0.65
沟床 _{out}	$Y_{全碳} = -1.636 - 1.696X_1 + 0.030X_2 + 0.069X_3$	0.32
	$Y_{全氮} = -0.067 - 0.238X_1 - 9.823 \times 10^{-5}X_2 + 0.011X_3$	0.58
沟床 _{in}	$Y_{全碳} = -0.489 - 1.223X_1 + 0.022X_2 + 0.047X_3$	0.72
	$Y_{全氮} = -0.130 - 0.032X_1 + 0.002X_2 + 0.007X_3$	0.79

注: X₁为高程变化的绝对值,即不分侵蚀与沉积,只是用来表示高程的变化量; X₂为植被盖度; X₃为粉粒含量。

本研究的目标冲沟可以分为活跃区和稳定区,其中活跃区由 5 个发展迅速的活跃沟头组成(图 1),包含 10 个样方,2012 年时平均植被盖度为 31.63%,甚至有 2 个样点完全无植被生长。沟道的其他部分则相对稳定,没有出现明显的变化,2017 年平均植被盖度为 58%,其中植被盖度超过 50%的样方比例为 54.93%。沟床_{in}部位在雨季遭受强烈的径流冲刷,因此不能被描述为稳定区域。剔除这个部位的样方后,2017 年稳定区的平均植被盖度提高到 64.53%。稳定区的土壤全碳、全氮含量分别为 3.91, 0.34 g/kg,比活跃区

分别提高 74.65%, 29.88%,但仍低于袁勇等^[21]在元谋干热河谷冲沟集水区测得的土壤有机碳含量,其值为 3.82 g/kg。这是因为稳定区的表层土壤主要是径流携带的泥沙沉积所致,而土壤碳氮随径流流失,故其碳氮含量低于集水区。

4 结论

(1)封禁后,沟道内植被状况有明显的改善,盖度、株数、株高分别增加 28.27%, 23.46%, 19.69%,植被种类也明显增加,且不同地貌部位的植被生长也有明显的差异,即沟床_{out}部位的植被状况较好,沟壁其次,沟床_{in}相对最差,但沟床_{in}部位植被状况改善幅度最大。

(2)在植被的拦截作用下,沟道内侵蚀样方和沉积样方的比例分别为 22.22%和 77.78%,以沉积为主,但仍发生土壤颗粒级配的粗化,样方内砂粒含量总体呈增加趋势,而粉粒和黏粒含量均为减少。但随着植被盖度的增加,土壤砂粒含量呈下降趋势,粉粒含量呈增加趋势。

(3)虽然冲沟植被显著恢复,但受沟道内剧烈的侵蚀/沉积过程影响,沟道内土壤碳氮含量并没有增

加,反而整体呈下降趋势。土壤全碳、全氮含量分别与植被盖度及粉粒百分比呈正相关,与高程变化呈负相关。在地形起伏剧烈的冲沟侵蚀区,高程变化对土壤碳氮的影响不可忽略。

参考文献:

- [1] Wang T, Kang F F, Cheng X Q, et al. Soil organic carbon and total nitrogen stocks under different land uses in a hilly ecological restoration area of North China[J].*Soil and Tillage Research*,2016,163:176-184.
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J].*Science*,2004,304(5677):1623-1627.
- [3] Saikawa E, Prinn R G, Dlugokencky E, et al. Global and regional emissions estimates for N₂O[J].*Atmospheric Chemistry and Physics*,2014,14(9):4617-4641.
- [4] Wang D, Wu G L, Zhu Y J, et al. Grazing exclusion effects on above- and below-ground C and N pools of typical grassland on the Loess Plateau (China)[J].*Catena*,2014,123:113-120.
- [5] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget[J].*Environment International*,2003,29(4):437-450.
- [6] Zhang B, Yang Y S, Zepp H. Effect of vegetation restoration on soil and water erosion and nutrient losses of a severely eroded clayey Plinthudult in southeastern China[J].*Catena*,2004,57:77-90.
- [7] 巩杰,陈利顶,傅伯杰,等.黄土丘陵区小流域土地利用和植被恢复对土壤质量的影响[J].*应用生态学报*,2004,15(12):2292-2296.
- [8] 冯志珍,郑粉莉,易祎.薄层黑土微生物生物量碳氮对土壤侵蚀—沉积的响应[J].*土壤学报*,2017,54(6):1332-1344.
- [9] 阎百兴.中国水土流失防治与生态安全[M].东北黑土卷.北京:科学出版社,2010.
- [10] Castillo C, Gomez J A. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches[J].*Earth-Science Reviews*,2016,160:300-319.
- [11] 校亮,熊东红,张宝军,等.干热河谷冲沟侵蚀劣地坡积区土体性质与裂缝形态发育特征[J].*灌溉排水学报*,2017,36(6):81-86.
- [12] 南岭,郭芬芬,王小丹,等.云南元谋干热河谷区典型植被恢复模式的水土保持效应[J].*安徽农业科学*,2011,39(9):5168-5171.
- [13] 刘琳,熊东红,张闻多,等.元谋干热河谷平沟建国土地治理工程效益及生态风险[J].*农业工程学报*,2020,36(4):251-258.
- [14] 聂小军,张建辉,刘刚才,等.金沙江干热河谷侵蚀陡坡植被恢复对土壤质量的影响[J].*生态环境*,2008,17(4):1636-1640.
- [15] 翁伯琦,郑祥洲,丁洪,等.植被恢复对土壤碳氮循环的影响研究进展[J].*应用生态学报*,2013,24(12):3610-3616.
- [16] Wu G L, Liu Y, Tian F P, et al. Legumes functional group promotes soil organic carbon and nitrogen storage by increasing plant diversity[J].*Land Degradation and Development*,2017,28(4):1336-1344.
- [17] Dong Y F, Xiong D H, Su Z A, et al. Effects of vegetation buffer strips on concentrated flow hydraulics and gully bed erosion based on in situ scouring experiments[J].*Land Degradation and Development*,2018,29(6):1672-1682.
- [18] Vannoppen W, Vanmaercke M, De Baets S, et al. A review of the mechanical effects of plant roots on concentrated flow erosion rates[J].*Earth-Science Reviews*,2015,150:666-678.
- [19] Dong Y F, Xiong D H, Su Z, et al. The distribution of and factors influencing the vegetation in a gully in the Dry-hot Valley of southwest China[J].*Catena*,2014,116:60-67.
- [20] 唐国勇,高成杰,李昆.植被恢复对干热河谷退化土壤改良的影响[J].*生态学报*,2015,35(15):5157-5167.
- [21] 袁勇,熊东红,校亮,等.元谋干热河谷冲沟不同部位土壤质量评价[J].*西南农业学报*,2018,31(10):2165-2172.
- [22] 张素,熊东红,杨丹,等.干热河谷不同活跃度冲沟土体抗剪强度分异及理化性质[J].*水土保持学报*,2014,28(6):124-129.
- [23] 赵文启,刘宇,罗明良,等.黄土高原小流域植被恢复的土壤侵蚀效应评估[J].*水土保持学报*,2016,30(5):89-94.
- [24] Li S X, Wang Z H, Li S Q, et al. Effect of plastic sheet mulch, wheat straw mulch, and maize growth on water loss by evaporation in dryland areas of China[J].*Agricultural Water Management*,2013,116:39-49.
- [25] 校亮,熊东红,张宝军,等.干热河谷冲沟沟岸葛藤不同覆被状况及土壤性质差异分析[J].*生态学报*,2018,38(14):5047-5055.
- [26] 杜兰兰,王志齐,王蕊,等.模拟条件下侵蚀—沉积部位土壤 CO₂ 通量变化及其影响因素[J].*环境科学*,2016,37(9):3616-3624.
- [27] Al-Kaisi M M, Grote J B. Cropping systems effects on improving soil carbon stocks of exposed subsoil[J].*Soil Science Society of America Journal*,2007,71(4):1381-1388.
- [28] 姜敏.衡南县土壤肥力空间变异及对土壤侵蚀的响应[D].武汉:华中农业大学,2016.
- [29] 陈利顶,王军,傅伯杰.我国西南干热河谷脆弱生态区可持续发展战略[J].*中国软科学*,2001,1(6):95-99.
- [30] Li Z W, Liu C, Dong Y T, et al. Response of soil organic carbon and nitrogen stocks to soil erosion and land use types in the Loess hilly-gully region of China[J].*Soil and Tillage Research*,2017,166:1-9.