

侵蚀影响下土壤碳和养分空间变化及其过程模拟

朱远达¹, 张光远², 蔡强国¹, 丁树文²

(1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2 华中农业大学资源环境系, 武汉 430070)

摘要: 通过小区采样并进行了机械组成和化学分析, 认为侵蚀过程导致的土壤颗粒坡面分布变化点在 0.2 mm 左右, 同时认为侵蚀是坡面土壤碳和养分再分布过程及分布差异的主要因素, 当其它条件一致时, 侵蚀和堆积决定了特定点或区域的土壤碳和养分含量的高低。通过建立土壤碳和养分变化模型及侵蚀模型, 在 DRISW 的支持下对侵蚀条件下流域各地块土壤碳和养分含量变化过程进行了模拟和长期预测, 并得到了引起土壤碳和养分含量降低的最低侵蚀模数阈值。

关键词: 侵蚀; 土壤碳; 土壤养分; 变化过程; 模拟

中图分类号: S158.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2001)04-0126-07

Soil Carbon and Nutrient Change and Model Under Soil Erosion

ZHU Yuan-da¹, ZHANG Guang-yuan², CAI Qiang-guo¹, DING Shu-wen²

(1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2 Department of Resources and Environment, Huazhong Agriculture University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The results of physical and chemical analysis of soil samples showed that the diameter changing point of soil particles caused by soil erosion is about 0.2 mm in slope land, and soil erosion is one of the main causes of spatial distribution and redistribution of soil carbon and nutrient in slope land. As other conditions are fixed, the intensity of soil erosion and deposition determines the concentration of soil carbon and nutrient in slope land. After models of soil carbon, nutrient changing and soil erosion have been constructed, soil carbon and nutrient changes under soil erosion in each land unit of Wangjiaqiao watershed have been simulated and forecasted, which are based on DRISW GIS. The results of simulation showed that different element of soil nutrient (C, N, P, K) has different soil acceptable erosive modulus in different land use types, which means that one kind of soil element will decrease when soil acceptable erosive modulus is higher than the limited value.

Key words: soil erosion; soil carbon; soil nutrient; change; simulation

自 80 年代以来, 土壤侵蚀对土壤生产力的影响开始为全世界土壤学界关心, 重点在于土壤侵蚀发展趋势的预测及对现有土壤资源生产力的影响。然而土壤侵蚀使土壤生产力降低是一个缓慢的过程(李忠魁, 1986), 其过程的难以检测导致了土壤侵蚀对土壤生产力影响的研究进展缓慢。土壤侵蚀主要通过影响土壤养分含量来影响土壤生产力。目前大

多数土壤养分流失研究只针对泥沙、地下和地表径流带走的养分总量, 其估算值实际包含了成土母质所包含的养分, 不能真正反映土壤侵蚀对单个地块土壤养分含量的影响及过程, 从不同程度上扭曲了土壤侵蚀与土壤退化的关系。因此, 探明土壤侵蚀对土壤碳和养分含量变化的影响及过程对明确土壤侵蚀影响土壤生产力的机制具有重要意义。

* 收稿日期: 2001-08-25

中科院地理科学与资源研究所知识创新工程项目(CXDG-A00-05-02)、国家自然科学基金资助项目(49871053)资助。

作者简介: 朱远达, (1976-), 中国科学院地理科学与资源研究所博士研究生, 主要从事养分流失、面源污染及土壤侵蚀等方面的研究。

1 材料与方法

试验区距离长江干流约 4 km, 为长江支流吒溪河的二级支流王家桥小流域, 总面积为 16.7 km²。母岩为侏罗系上部的蓬莱镇组, 以紫色砂岩和页岩为主, 夹少量泥岩。土壤为中性、石灰性紫色土。气候属中亚热带, 气温年平均 18℃, 降水集中在 5~9 月, 占全年的 67.16%。1996 年对全流域进行了土壤利用、侵蚀现状详查, 并将图件数字化建立了流域数据库, 同时在全流域范围内采样进行了化学和颗粒分析。

在试验区设立 6 个径流小区, 每个径流小区坡度均为 25°; 水平投影长度 10 m, 宽 2 m, 除对照坡耕地 1-1 小区外, 1996 年 3 月均等高定植了三带香根草 (*Vetiveria zizanioides*) 植物篱, 夏季植物篱定高剪裁并横置篱前, 植物篱带间距 3 m; 每带两行, 行距 20 cm, 株距 20 cm, 篱带间种植黄豆和冬小麦。各小区处理见表 1。表中覆盖是用收获作物的稿秆覆盖植物篱带间坡面(覆盖度均为 70%); 有机肥指面施猪粪(1-5 小区施 88 kg, 1-6 小区施 44 kg); 无机肥指每小区(1-3, 1-4, 1-6 三个小区)面施尿素 0.75 kg、过磷酸钙 1.5 kg; 施肥均在上年 6 月播种时施作基肥; 施肥量以当地平均施肥量折算。

2000 年 6 月经流小区土壤采样数共 54 个。各小区顺坡自坡上到坡下采 9 个土样, 样点间距为 1 m, 每个样点为小区内水平 3 点的混合样, 以保证样品的代表性。样点 1、9 均距小区上下边缘 50 cm, 以消除边缘效应。植物篱小区各篱带间采样 3 个, 样点均距篱带 50 cm 以消除植物篱对养分的强吸收作用以及植物篱修剪枝叶、枯落物分解对土壤碳和养分的影响。所有土壤样品的制备、分析均采用常规方法。

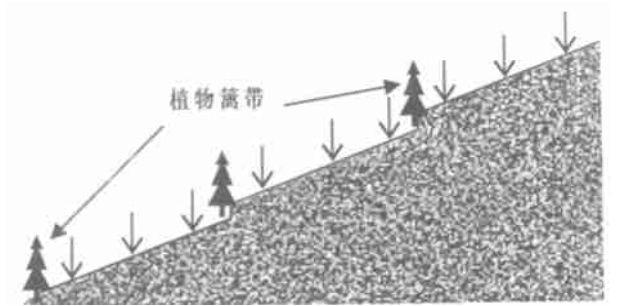


图 1 采样点位示意图

2 径流试验小区结果与分析

2.1 侵蚀对土壤颗粒空间分布的影响

大量研究认为土壤养分坡面流失的主要途径是土壤较细颗粒的流失(陈皓, 1991; Hamilton, 1992; Wan, 1998; 黄丽, 1998; 康玲玲, 1999; 王兴祥, 1999)。而唐以剑(1999)研究表明, 未施肥时, 农田氮的流失主要是呈颗粒结合态随泥沙一起迁移的, 但在施肥后遇上暴雨时, 则以溶解态形式随水流迁移到较远的地方去。

表 1 各径流小区处理情况

| 小区 | 1-1 | 1-2 | 1-3 | 1-4 | 1-5 | 1-6 |
|----|-------|-----|----------|----------|----------|----------|
| 处理 | 对照坡耕地 | 香根草 | 香根草覆盖无机肥 | 香根草覆盖无机肥 | 香根草覆盖有机肥 | 香根草覆盖有机肥 |

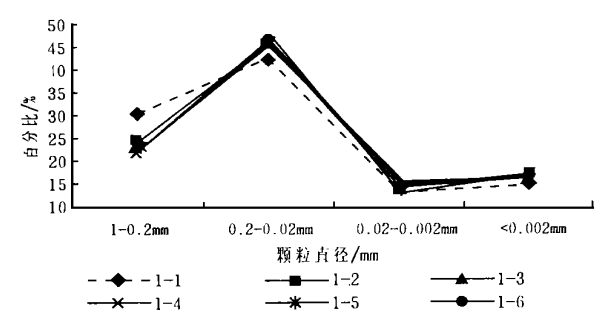


图 2 各径流小区土壤颗粒粒径分布

由图 2 可以看出, 对照小区 1-1 的粒级分布明显不同于其余小区, 其中 1~0.2 mm 粒级含量要高于其他小区, 而 0.2~0.02 mm、0.02~0.002 mm、<0.002 mm 粒级含量则低于其余小区, 其临界点可能在 0.2 mm 左右, 与前人研究结果(黄丽, 1999)略有差异。蔡强国(1998)研究表明, 当细沟侵蚀发生时, 坡耕地侵蚀泥沙的粒径及其分布与表土接近, 而不只是侵蚀土壤中粒径较小的颗粒的流失。植物篱的种植可防止细沟侵蚀的发生, 从而控制了大部分侵蚀; 同时由于植物篱增加了地表糙率, 减缓地表径流流速, 径流中携带的细颗粒中粒径相对较大的颗粒发生沉积。而相同小区人工降雨试验表明, 1-1 小区侵蚀量大大超过其余各小区, 因此, 长时间影响下, 对照小区较细颗粒大量流失, 发生粗化, 而种植植物篱小区粒径较小的颗粒则相对增加, 为保持土壤养分防止土壤侵蚀提供了良好的物质基础。

2.2 侵蚀对土壤碳和养分空间分布的影响

侵蚀泥沙中养分含量几乎总是高于土壤中养分

的含量。Hudson 认为这种情况的出现一方面是因为流失泥沙主要来源于表土,而表土中养分含量相对较高,另一方面是因为细小的土壤颗粒最容易流失,而植物所需养分往往在土壤细颗粒中含量较高(Walling, 1987; 黄丽, 1998; 龙怀玉, 2000; 徐阳春, 2000)。因此,侵蚀和侵蚀控制措施影响了土壤颗粒在坡面中再分配,而土壤颗粒是土壤养分的携带者,从理论上讲侵蚀和侵蚀控制措施必然导致土壤养分在空间上的分布不同,本次实验研究结果也证明了这一点。

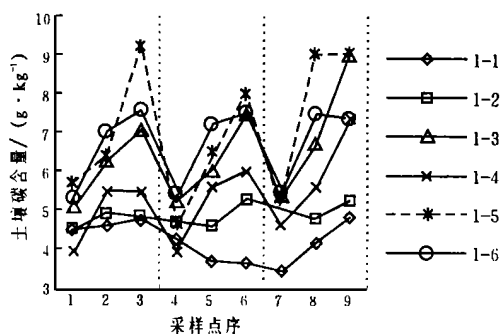


图3 各小区土壤有机碳空间分布差异

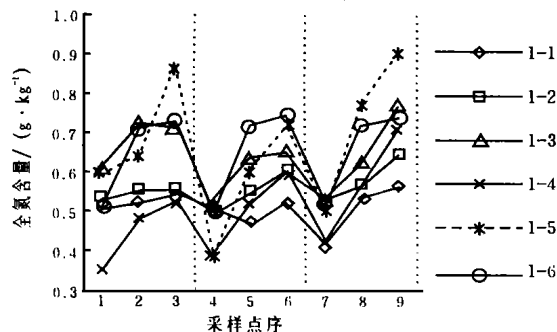


图4 各小区土壤全氮空间分布差异

就有机碳而言,1-1 小区作为对照小区,在样点1至3间有一个逐步增加的趋势,说明在该地段有侵蚀到堆积的过程,而在样点3至7间有机碳含量逐渐降低,说明了一个侵蚀增强的趋势,在样点7至9间又逐步增加,即有一种堆积的趋势,这与小区内微域地形变化相吻合,充分的说明了侵蚀条件下土壤中碳受侵蚀的影响而导致空间分布发生变化。这种变化为进一步研究不同坡度坡耕地与植物篱布设间距提供了依据。1-2 小区为单纯种植香根草植物篱小区,土壤碳及养分在坡面上分布较为平稳,在篱带间略有差异,但与对照小区比较,有机碳含量在坡面下部显著增高,说明植物篱阻挡了大部分泥沙,从而减少了有机碳的流失;但与1-3、1-4、1-5、1-6 小区比较,其有机碳含量显著要少,说明在不施

肥条件下,植物篱提高土壤中碳的含量的作用有限。这一点提示我们,在侵蚀坡耕地上要想快速提高土壤肥力,除采用植物篱措施外,必须配合施用肥料,才能达到理想的效果。1-4 小区为单施无机肥小区,在篱带间土壤碳从坡面向下有一个显著的增加趋势,但单个篱带间最上一点(样点1、4、7)有机碳含量极低(上两个篱带甚至低于对照),其原因可能是在施肥影响下,作物生长旺盛,收获后留茬使土壤碳含量整体水平较1-1和1-2 小区要高,但在样点1、4、7处,由于侵蚀原因碳含量本身就低,在无机氮肥施入后,改变土壤的碳氮比,促进了土壤碳的矿化作用,从而使单个篱带间最上点有机碳含量很低。而1-3、1-5、1-6 小区,单个篱带间由上到下土壤碳含量增加趋势更为明显,特别是样点(2,3)、(5,6)、(8,9)碳含量猛增,其原因是覆盖和施有机肥处理人为的增加了土壤碳的来源,而坡面层流更容易搬运土壤中比重较轻的植物残体,因而使大量的残体在篱带上方滞留,增加土壤碳的含量。1-5 与1-

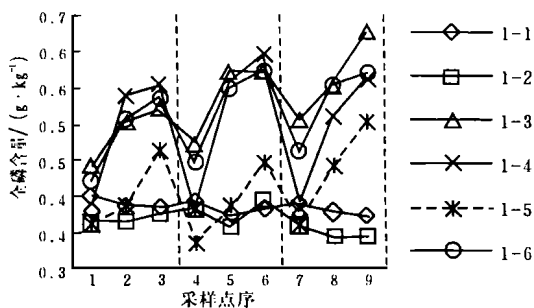


图5 各小区土壤全磷空间分布差异

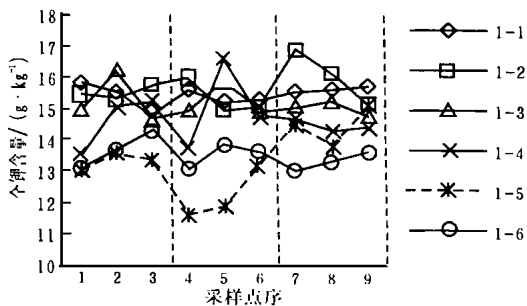


图6 各小区土壤全钾空间分布差异

6 小区相比,1-6 小区同时进行了覆盖和施有机肥处理,土壤碳含量水平反较1-5 小区为低,其原因同样可能是无机肥施入加速了碳的矿化作用。

由于全氮是用开氏法测定,土壤中有有机氮占全氮的80%~98%,因而与有机质相关性较好,本研究中相关系数达到0.84($n=54$),规律也相似,总体上看全氮在坡面上的空间分布除1-1 小区外,其余各小区均可明显看出植物篱的挡土保肥、提高土壤

肥力的效果,在植物篱上坡位置,土壤全氮含量都较高,下坡位置由于侵蚀使全氮含量下降,但整个坡面全氮量仍然是呈提高的趋势。然而各小区之间比较,1-4 小区全氮(平均为 0.503 g/kg)反而比 1-1 小区全氮(平均为 0.509 g/kg)、1-2 小区全氮(平均为 0.558 g/kg)偏低,与有机碳规律略有不同(1-1、1-2、1-4 小区有机碳含量分别为 7.20 、 8.36 、 9.15 g/kg),说明在施用无机肥的条件下,土壤活性有机质大量矿化,土壤中全氮的主要部分有机氮被强烈消耗,甚至低于不施肥对照处理。这与徐阳春(2000)研究结果不同。其原因可能与土壤中有机无机复合体的稳定性有关(王岩,2000),也可能是因为土壤中碳的活性(沈宏,2000)以及腐植酸的组成(郑粉莉,1999)的不同而造成的,其具体原因还需进一步研究。

从 T 检验看来,1-1、1-2、1-5 小区,1-3、1-4、1-6 小区之间全磷含量无显著差异,这说明了土壤中全磷的提高主要依赖于施用化肥,有机肥对

土壤中全磷的增加没有显著效应,这与徐阳春(2000)等人的研究一致,其原因可能是有机酸对土壤中固定态磷的转化以及有机肥的类型不同,使有机肥中磷更易被作物吸收。而在 1-3、1-4、1-5、1-6 小区磷在篱带间的空间分异极为显著说明全磷在该系统中的移动速率较高,主要是因为在该系统中依靠泥沙的移动而移动,据研究土壤中全磷一般以黏粒组分含量最高,而在侵蚀过程中,黏粒是最容易流失的。磷在篱带中的空间分异实际上说明了两个问题:一是在植物篱带间由于坡度的存在,土壤侵蚀移动依然存在;二是植物篱对黏粒的流失具有显著的阻拦作用,导致泥沙在篱带前沉积,从而引起了磷含量的变化。但 1-2 小区全磷分布状况与其他植物篱小区有明显差异,其原因可能是由于紫色土本身磷含量偏低,在不施肥的条件下,养分富集表现不明显,同时植物篱对土壤中磷的消耗较大,从而导致了阻拦效果不显著。

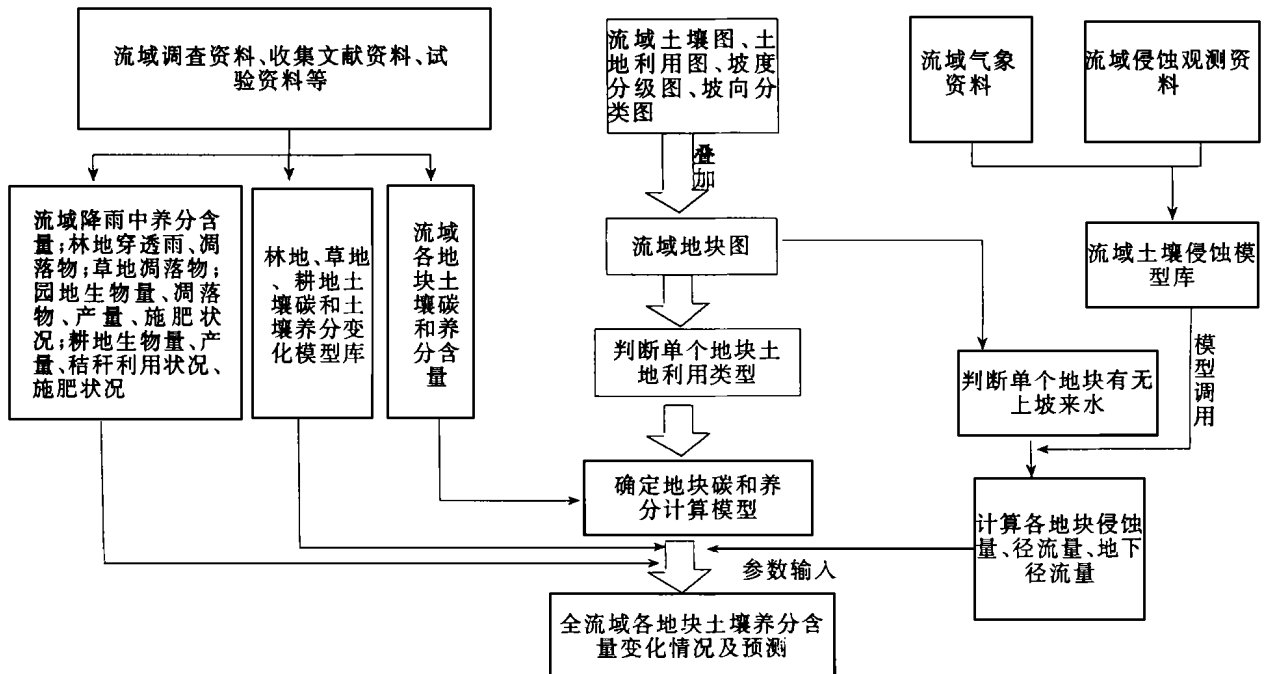


图7 模拟流程图

本试区土壤属于低钾紫色土,全钾含量低于紫色土全钾平均值(23 g/kg)。从分析资料结果说明植物篱防止侵蚀,对提高全钾量有一定的作用(小区 1-1 低于 1-2 平均值),但不很明显,植物篱上坡位置与下坡位置全钾含量差别不大。钾素养分的流失,很可能是随径流流失或淋失而带走,且多呈有效态(许峰等,2000)。本试验结果也可看出:小区间以 1-4、1-5、1-6 全钾含量为低,说明全钾的吸收消

耗高,而 1-5 小区最低,可能是有机肥分解产生的有机酸使土壤中矿质钾风化速度加快,作物吸收量大于有机肥携入量,从而使土壤中全钾含量降低。

总之,土壤中碳和养分含量在空间上发生分布差异,受施肥、作物吸收、侵蚀等因素的综合影响,其中侵蚀、堆积作用是造成土壤碳和养分空间分布差异的主导因素。

3 土壤碳和养分变化过程的 GIS 模拟

3.1 模拟过程分析

本研究主要是通过模拟土壤侵蚀在全流域空间和时间上的差异,同时考虑不同土壤利用类型中养分循环和平衡的差异,最后综合侵蚀对碳和养分的影响及碳和养分自身循环的差异,来模拟土壤碳和养分在流域空间和时间上的变化过程。

3.2 GIS 支持下侵蚀对土壤碳和养分影响过程模拟

所谓过程,是指侵蚀对土壤碳和养分的影响的动态变化,具有空间和时间的差异。空间差异体现在流域不同点,由于侵蚀与其他影响因素不同而使土壤碳和养分变化不同;时间差异则体现在不同时间段中由于降雨、植被等侵蚀因素不同而使侵蚀状况不同。

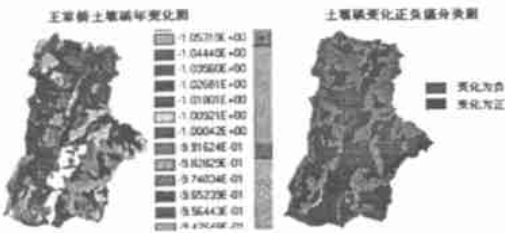


图 8 王家桥流域土壤碳年变化

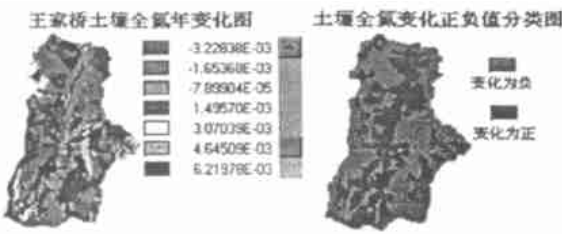


图 9 王家桥流域土壤全氮年变化

在地理信息系统软件 DRISW 的支持下,通过建立小流域地图数据库、属性数据库以及模型库,并对土地利用图、坡度分级图、坡向分类图、土壤类型图等相关图件操作运算得到流域地块图,同时采用汇流网络运算模型 DEM 得到不同地块间汇流关系,从而通过侵蚀模型计算得到不同地块次降雨土壤侵蚀模数和径流模数;同时,由地表径流模数则可以计算得到不同地块的地下径流模数;而根据径流泥沙中养分含量及地块初始养分含量即可以得到次降雨侵蚀引起的各个地块土壤碳和养分含量变化,

次降雨累积即可得到年降雨变化,将年降雨侵蚀引起的土壤碳和养分含量变化作为参数输入土壤碳和侵蚀变化模型后,运算则可得到侵蚀条件下土壤碳和养分年变化;同理,如果将多年降雨条件和下垫面条件作为输入参数则可得到侵蚀条件下土壤碳和养分多年变化;此外,由于本研究中侵蚀模型是多年观测结果得到的经验模型,具有相应的预测功能,因此可以预测侵蚀条件下土壤碳和养分年变化和多年变化。

通过对全流域土壤全氮、全磷、全钾在 1993 年降雨条件下假设变化的计算,我们发现流域土壤碳、全氮、全磷、全钾含量下降面积分别占全流域面积的 44.14%、55.8%、39.2%、75.7%,年变化幅度分别为 -0.175~0.136、-0.021~0.019、-0.006~0.011、-0.20~0.19 g/kg。其中全磷含量下降的面积比例和变幅均最小。

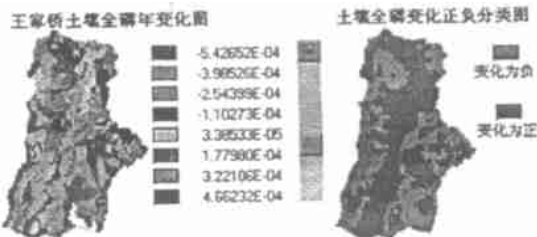


图 10 王家桥流域土壤全磷年变化

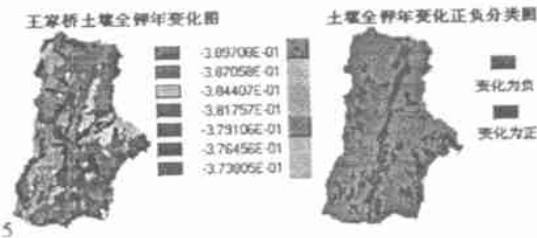


图 11 王家桥流域土壤全钾年变化

表 5 不同利用类型土壤碳和养分 10 年变化状况 g/kg

| 项目 | 碳变化 | 全氮变化 | 全磷变化 | 全钾变化 |
|------|---------|---------|---------|--------|
| 坡耕地 | - 1.252 | - 0.064 | 0.038 | - 1.83 |
| 梯田 | - 0.477 | 0.088 | 0.052 | - 0.96 |
| 坡式果园 | - 0.136 | 0.012 | 0.033 | - 0.61 |
| 梯式果园 | 0.113 | 0.166 | 0.051 | - 0.32 |
| 林地 | 0.135 | 0.124 | 0.010 | 0.36 |
| 疏林地 | 0.064 | 0.071 | - 0.006 | - 0.28 |
| 荒草地 | 0.059 | - 0.034 | - 0.024 | - 0.87 |
| 全流域 | - 0.201 | 0.058 | 0.011 | - 0.50 |

表 6 可能引起土壤碳和养分降低的最低侵蚀模数

| 项目 | t/km ² | | | |
|-----|-------------------|------------|------------|-----------|
| | 碳 | 全氮 | 全磷 | 全钾 |
| 耕地 | 2000~ 2500 | 2000~ 2500 | 5000~ 6000 | - |
| 橘园 | 2500~ 3000 | 3000~ 3500 | 6000~ 7000 | - |
| 林地 | 1000~ 1500 | 1000~ 1500 | 2000~ 2500 | 500~ 1000 |
| 荒草地 | 2000~ 2500 | 1000~ 1500 | 2000~ 2500 | - |

通过预测小流域 10 年间的侵蚀状况, 假设流域耕作管理情况没有变化, 按各年侵蚀状况预测土壤碳和养分的变化, 最终可以得到流域各地块碳和养分的 10 年变化值, 经过汇总得到如表 5 的结果。预测结果表明, 在现有侵蚀状况和耕作管理状况条件下, 全流域土壤碳和全钾平均含量有所下降, 全氮和全磷含量则有所提高。而从不同土地利用类型来看, 坡耕地中碳、全氮、全钾下降幅度为最高, 这主要与其具有最高的土壤侵蚀模数有关。

对全流域而言, 土壤碳和养分含量变化在不同利用方式下表现出明显差别, 如坡耕地和荒地土壤碳和养分含量普遍下降; 而在同种利用条件下, 各地块土壤碳和养分变化状况并不是一致的, 在一些侵蚀强烈的坡耕地如碳和养分含量趋于下降, 而侵蚀较弱的地块养分含量则可能增加; 同时, 碳和养分含量出现下降的土壤侵蚀模数临界并不是一个固定值, 相同的侵蚀模数在不同地块中对土壤碳和养分含量的影响可能表现不一致; 在碳、氮、磷、钾四种物质中, 侵蚀的影响表现有所不同, 如土壤全氮对侵蚀的响应较为敏感, 而全磷对侵蚀的响应则较为迟钝, 而单个地块土壤碳和养分含量变化计算表明, 不同土地利用中导致碳、氮、磷、钾含量降低的最低侵蚀模数是不一致的。

4 结 论

本研究通过坡面密集采样颗粒分析及养分含量分析, 研究了土壤侵蚀对土壤碳和养分的影响途径和表现, 侵蚀作用影响下土壤碳和养分在微地形空

间的分布规律; 同时在地理信息系统的支持下, 建立了侵蚀条件下的土壤碳和养分变化模型, 模拟了侵蚀对土壤碳和养分影响的空间过程, 预测了侵蚀影响下土壤碳和养分的年变化及多年变化; 主要得出了如下结论:

(1) 颗粒分析结果表明, 侵蚀作用在坡面上的临界搬运粒径在 $0.2 \sim 0.02 \text{ mm}$ 之间, 侵蚀剧烈的点大于 0.2 mm 的颗粒含量相对富集, 而小于 0.02 mm 的颗粒含量则相对减少; 养分分析结果表明, 受侵蚀及堆积作用强弱的影响, 土壤碳和养分在空间上可能出现较大的分布差异, 当侵蚀作用占主导地位时, 土壤碳和养分含量较坡面养分平均含量出现下降, 当堆积作用占主导地位时, 碳和养分含量趋于升高。

(2) 在地理信息系统的支持下, 模拟了流域各地块的侵蚀过程。现状, 充分描述了各个地块在侵蚀影响下土壤碳和养分的年变化现状、过程及多年变化过程, 得到在现有侵蚀及耕作管理条件下, 全流域中土壤碳、全氮、全磷、全钾下降的地块面积分别占流域总面积的 44.1%、55.8%、39.2%、75.7%, 以及各个地块的碳和养分含量变化趋势。

(3) 通过对地块土壤侵蚀模数、碳和养分含量变化的计算, 得到了不同利用类型中不同元素含量出现下降的最低侵蚀模数阈值, 如耕地全氮为 $2000 \sim 2500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 果园全氮为 $3000 \sim 3500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 林地全氮为 $1000 \sim 1500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 草地全氮为 $1000 \sim 1500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 从而为流域侵蚀治理规划提供了科学依据。

参考文献

- [1] 李忠魁. 国外评价土壤侵蚀与土壤生产力关系的模式[J]. 水土保持通报, 1986, 6(5): 53~59.
- [2] 陈皓, 章申. 黄土地区氮磷流失的模拟研究[J]. 地理科学, 1991, 11(2): 142~147.
- [3] Hamilton, H., 陆兆熊, 卫中平. 小流域氮的流失及输移机理研究[A]. 见: 晋西黄土高原土壤侵蚀管理与地理信息系统应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 140~149.
- [4] Wan Y., El-Swaify S. A. Sediment enrichment mechanism of organic carbon and phosphorus in a well-aggregated oxisol[J]. J. of Environmental Quality, 1998, 27(1): 132~138.
- [5] 黄丽, 丁树文, 董舟, 等. 三峡库区紫色土养分流失的试验研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(1): 8~13, 21.
- [6] 康玲玲, 朱小勇, 王云璋. 不同雨强下黄土性土壤养分流失规律研究[J]. 土壤学报, 1999, 36(4): 536~543.
- [7] 王兴祥, 张桃林, 张斌. 红壤旱坡地农田生态系统养分循环和平衡[J]. 生态学报, 1999, 1(30): 336~341.
- [8] 唐以剑, 陈喜保, 罗金发, 等. 人工降雨模拟农田径流中氮的流失过程[A]. 见: 挖掘生物高效利用土壤养分潜力保持土壤环境良性循环论文集[C]. 北京: 1999, 244~249.
- [9] 黄丽, 张光远, 丁树文, 等. 侵蚀紫色土颗粒流失的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(1): 35~39, 85.
- [10] 蔡强国. 黄土高原侵蚀产沙过程与模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1~150.
- [11] Walling D. E. Nutrient and sediment removal by vegetated strips[J]. Trans. of the ASAE, 1987, 32(2): 663~667.
- [12] 龙怀玉, 蒋以超, 李韵珠. 褐土与潮土吸附动力学研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 563~568.
- [13] 徐阳春, 沈其荣. 长期施用不同有机肥对土壤各粒级复合体中 C、N、P 含量与分配的影响[J]. 中国农业科学, 2000, 33

(5): 65~ 71.

- [14] 王岩, 杨振明, 沈其荣 土壤不同粒级中 C、N、P、K 的分配及 N 的有效性研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(1): 86~ 94
- [15] 郑粉莉, 张成娥 加速侵蚀对土壤腐植酸动态变化的影响[J]. 生态学报, 1999, 19(2): 194~ 199
- [16] 沈宏, 曹志洪, 徐志红 施肥对土壤不同碳形态及碳库管理指数的影响[J]. 土壤学报, 2000, 37(2): 166~ 173
- [17] Marrs, R. H. Soil fertility and nature conservation in Europe: Theoretical considerations and practical management solutions[A]. In: Advances in ecological research[C]. London Academic Press, 1993
- [18] 庄恒扬, 黄丽芬, 王小兵 等 不同管理模式对生土有机质动态模拟[J]. 江苏农业研究, 2000, 21(1): 52~ 55
- [19] 钟华平, 杜占池 川东中高山地区红三叶、鸭茅凋落物分解速率与气候因子之间的定量关系[J]. 中国草地, 1997(6), 29~ 32
- [20] 王青春, 邓红兵, 王庆礼, 等 三峡库区柏木林降雨的再分配及养分循环研究[J]. 长江流域资源与环境, 2000, 9(4): 452~ 457
- [21] 朱波, 李同阳, 张先婉 耕作制度对紫色土养分循环的影响[J]. 山地研究, 1996, 14(增刊): 51~ 54
- [22] 许峰, 蔡强国, 吴淑安, 等 三峡库区坡地生态工程控制土壤养分流失研究 地理研究[J]. 2000, 19(3): 303~ 310

(上接第 85 页)

量、含沙量都很小, 但吸水达到一定量后, 在其自重和流水冲力下, 局部出现滑动, 并且速度越来越快, 即刻到达堰口, 使含沙量骤增, 这样连续冲刷几次后, 便产生固定流路, 侵蚀轻微, 含沙量变小。

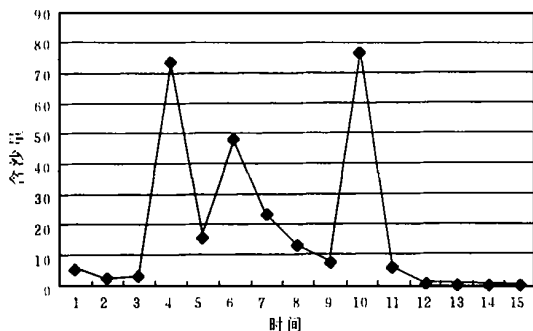


图3 煤矸石在 3.2 L/min 流量冲刷下含沙量随时间变化图

2.2.2 侵蚀过程分析 覆土煤矸石的侵蚀过程基本类似于黄土坡面的径流侵蚀。冲刷初期以层状面蚀为主, 随着径流的汇集, 坡面出现股流, 产生细沟侵蚀。细沟侵蚀的发展使细沟中出现微型陡坎, 借助于微型陡坎下射流所产生的“水枪”效应, 细沟在长度和深度上急剧发展, 但流路很稳定。随着冲刷流量的加大, 这种侵蚀形式更明显, 细沟深可达 7 cm, 而宽仅有 2~ 4 cm, 因此, 在冲刷后期必然出现沟壁崩塌, 使产沙模数变大。自燃煤矸石坡面侵蚀过程与覆土矸石根本不同。冲刷时, 流水对自燃煤矸石有浸润饱和作用, 当它过度充水后, 堆置体充水部分的平衡条件遭破坏, 形成涌动性泥石流小批量向前蠕动。蠕动一定距离, 当水流挟沙力不能再搬运时, 便停留在

某一部位, 形成冲积堆, 冲积堆使上部水流或另外小批量泥石流受阻, 能量在此重新聚集, 为下一次涌动准备了条件。因此, 自燃煤矸石坡面侵蚀是在重力和流水冲力作用下产生的脉动性泥石流侵蚀。冲刷形成的泥石流极不稳定, 出现袭夺现象。只有当设计流量很难再产生新的涌流时, 细沟便向深和宽发展, 直到形成稳定的流路。煤矸石在 1.6 L/min 和 2.4 L/min 流量冲刷下, 基本没有产生侵蚀。径流通过时, 表层矸石对水的吸力很大, 使矸石表面产生一层膜状水, 这样, 径流只能从矸石浅层漫漫流动, 因此, 很难产生侵蚀。当流量加大到 3.2 L/min 时, 煤矸石坡面才能发生侵蚀。侵蚀过程类似与自燃煤矸石, 但其侵蚀的突发性更为明显, 侵蚀沟的形态较自燃煤矸石的更宽、更浅。

3 结论

在小流量冲刷下, 煤矸石抗冲刷性能最大, 坡面侵蚀轻微, 几乎没有产沙, 但是自燃后的煤矸石侵蚀却较严重。因此, 矸石的堆放应以防止自燃和大的径流冲刷为原则, 选择适宜的沟道修建拦矸石坝, 矸石排满后在其上覆土, 之后立即建造先锋植物, 使地表迅速覆盖。另外, 要注意修建排水工程, 地表径流以排为主, 排蓄结合。如取土不便利, 煤矸石山可不覆土, 等表层风化后, 直接采取一些技术措施进行复垦。煤矸石局部自燃后要立即采取治理措施, 以免大范围自燃后给复垦工作带来不便。