

三峡库区退耕还林土壤侵蚀及养分流失控制 ——以兰陵溪小流域为例

王甜¹, 黄志霖¹, 曾立雄¹, 肖文发¹, 宋文梅²

(1. 中国林业科学研究院 森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 2. 秭归县林业局, 湖北 宜昌 443699)

摘要:以秭归县兰陵溪小流域为研究对象, 基于2016年5—9月自然降雨条件下, 对三峡库区内典型退耕还林模式(茶园、板栗林、柑橘园)及原有农耕地(对照)径流小区的土壤侵蚀及养分流失情况进行了监测和分析, 评估退耕还林工程实施后对小流域土壤侵蚀及氮磷养分流失的影响。结果表明: (1) 退耕还林后土壤侵蚀量和总氮、总磷流失量明显减少, 与农耕地相比, 板栗林、柑橘园和茶园地表径流流失减少幅度分别为41.95%、22.78%、6.11%, 土壤侵蚀减少幅度分别为87.91%、75.26%、58.94%, 总氮流失量减少幅度分别为52.42%、44.08%、31.26%, 总磷流失量减少幅度分别为72.87%、70.45%、43.24%。(2) 相较农耕地, 退耕还林模式速效氮流失量明显减少, 硝态氮流失量顺序为农耕地 332.09 g/hm² > 茶园 243.42 g/hm² > 板栗林 124.76 g/hm² > 柑橘园 123.18 g/hm², 铵态氮流失量顺序为农耕地 184.22 g/hm² > 茶园 132.18 g/hm² > 柑橘园 117.62 g/hm² > 板栗林 91.42 g/hm², 且硝态氮流失量占总氮流失量比率高于铵态氮。(3) 总氮、总磷主要通过侵蚀泥沙途径流失, 速效氮流失的主要途径是地表径流。流域内主要污染物为随侵蚀泥沙流失的总氮。

关键词:退耕还林; 土壤侵蚀; 养分流失

中图分类号: S153

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)05-0083-06

Assessment on the Comprehensive Control of Soil Erosion and Soil Nutrient Losses in the Reforestation Patterns along the Three Gorges Reservoir Area —A Case Study of Lanlingxi Watershed

WANG Tian¹, HUANG Zhilin¹, ZENG Lixiong¹, XIAO Wenfa¹, SONG Wenmei²

(1. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Zigui County Forestry Administration, Yichang, Hubei 443699, China)

Abstract: The soil erosion and nitrogen and phosphorus loss characteristics on typical reforestation patterns in Lanlingxi watershed along the Three Gorges Reservoir Area was studied by runoff plot experiment. Soil erosion and nutrient loss from May to September 2016 of typical reforestation patterns including garden plot (tea garden and citrus garden), forest land (Chinese chestnut) and the Original farmland were monitored and analyzed. The results showed that: (1) after the Returning Farmland to Forest Project, the quantity of soil erosion and nutrient losses (nitrogen and phosphorus, the sum of them in sediment and runoff) decreased obviously. Compared with the original farmland, the surface runoff losses in the Chinese chestnut forest, citrus garden and tea garden decreased by 41.95%, 22.78%, and 6.11%, respectively, the soil erosion decreased by 87.91%, 75.26% and 58.94%, respectively, the decrease of total nitrogen loss was 52.42%, 44.08% and 31.26%, respectively, and the decrease of total phosphorus loss was 72.87%, 70.45% and 43.24%, respectively; (2) compared with farmland, available nitrogen loss decreased in reforestation patterns, total nitrate nitrogen (NO₃⁻-N) loss ranked in the order: farmland 332.09 g/hm² > tea garden 243.42 g/hm² > Chinese chestnut forest 124.76 g/hm² > citrus garden 123.18 g/hm², and for ammonium nitrogen

收稿日期: 2017-08-08

修回日期: 2017-11-25

资助项目: 国家科技支撑计划“长江防护林质量调控与高效经营技术研究与示范”(2015BAD07B04)

第一作者: 王甜(1987—), 女, 吉林辽源人, 硕士研究生, 研究方向土地利用及其生态环境效应。E-mail: 1494951212@qq.com

通信作者: 黄志霖(1966—), 男, 河南信阳人, 博士, 研究员, 主要从事生态水文研究。E-mail: hzlin66@163.com

(NH₄⁺-N) loss order was farmland 184.22 g/hm²>tea graden 132.18 g/hm²>citrus graden 117.62 g/hm²>Chinese chestnut forest91.42 g/hm²; the proportion of nitrate nitrogen loss to total nitrogen loss is higher than that of ammonium nitrogen; (3) the main route of total nitrogen and total phosphorus losses were through sediment. The losses of NO₃⁻-N and NH₄⁺-N were mainly through runoff. The main pollutant in the watershed was total nitrogen of sediment.

Keywords: returning farmland to forest; soil erosion; nutrient loss

三峡库区的主要范围是因修建三峡工程而涉及到的重庆、湖北 2 省 21 个县(市、区)。三峡库区地处四川盆地与长江中下游平原的结合部,地形为山地丘陵。该地带降雨集中,雨热同期,垦殖历史久,植被覆盖率低,一直都属于土壤强侵蚀地区。据长江流域水土保持公报记载,至 2009 年,三峡库区水土流失面积为 2.74 万 km²,占土地总面积 47.17%^[1]。严重的水土流失不仅导致库区周边土壤资源受到破坏、土壤肥力下降、植物产量降低等^[2],而且因水土流失而带走的侵蚀泥沙、溶解于径流水的可溶性养分和结合泥沙颗粒表面的养分进入三峡水库导致了泥沙淤积和水体水质恶化^[3-4],对三峡水库的使用寿命和综合效益的发挥造成了直接威胁。

为了改善区域生态环境,提高水源涵养能力,三峡库区退耕还林工程自 2000 年开始启动。通过退耕还林工程的实施,使得以农耕地为主体的小流域转变为耕地、茶园、果园和林地等多种模式类型的镶嵌格局^[5]。在改变土地利用/覆被植物类型和人为管理措施(耕作、施肥等)后,流域内的水土及养分流失情况较之前有了一定改善。退耕还林工程对于水土及养分流失的影响,目前已有大量学者对此进行研究,但多是对地表径流及径流中的氮磷养分流失进行监测研究^[6-7],对与侵蚀泥沙结合而流失的养分研究相对较少。因此,本文以秭归县茅坪镇兰陵溪小流域野外径流小区观测数据为基础,对自然降雨条件下退耕还林模式对水土及养分流失的影响进行观测并分析,并评估其控制效应,以期能为三峡库区退耕还林工程的继续推行和三峡库区水土与养分流失的防控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

秭归县水土及养分流失监测定位站位于秭归县茅坪镇中坝子村兰陵溪小流域(东经 110°53′27″—110°54′50″,北纬 30°51′21″—30°51′34″),流域面积为 1.44 km²。小流域地形西高东低,大部分面积为低山丘陵地带,受亚热带大陆季风气候影响,全年日照时数 1 200~1 600 h,年平均气温 7.8~18℃,年平均

降水量在 950~1 900 mm。降雨年内分配不均,主要集中在 5—9 月,占全年降雨量的 70%左右,且多以暴雨形式出现。

小流域中土壤类型复杂,根据垂直分布分为两类。海拔 500 m 以下低山河谷区土壤多为黄壤粗骨性沙土,固土保肥性差,主要分布植物类型以茶(*Canmelia sinesis* L)、板栗(*Castanea mollissima*)、柑橘(*Citrus*)为主;中部低山区海拔 500 m 以上多为山地黄壤为主,植物类型以柏木(*Cupressus funelris* Endl)、马尾松(*Pinus massoniana* Lamb)和栎类(*Quercus* L.)为主^[8]。小流域退耕还林工程自 2002 年开始全面实施,主要改造对象为 25°以上农耕地。退耕还林后台地主要以茶园为主,占小流域总面积的 12.17%、板栗林占 4.39%、柑橘园占 1.90%^[9],部分地块间作玉米、花生等农作物,形成林农复合模式。试验监测期间农耕地主要种植玉米和花生,各地类由当地农户按照原有的种植习惯进行管理。

1.2 研究方法

根据小流域退耕还林模式(茶园、柑橘园、板栗林)和农耕地(对照),建立 8 个径流监测小区,以具有代表性及地形条件基本一致为原则。径流小区坡下设置集沙槽和集水池,以便产流产沙后取样。在径流小区四周,用 40 cm 高水泥板做成围栏,埋深 20 cm,防止小区内地表径流流出或小区外地表径流流入,保证集水区相对独立。径流场详细资料见表 1。

表 1 径流小区基本特征

编号	土地利用 方式	海拔/ m	坡度/ (°)	坡长/ m	坡宽/ m	土壤 类型
1	茶园	270	30	11	4.5	黄壤沙土
2		270	30	11	4.5	黄壤沙土
3		255	23	12	4	黄壤沙土
4	板栗林	252	23	12	4	黄壤沙土
5		275	20	10	5	黄壤沙土
6	柑橘园	275	20	10	5	黄壤沙土
7		295	25	10	5	黄壤沙土
8	农耕地(对照)	290	25	10	5	黄壤沙土

试验监测起止时间为 2016 年 6—9 月,每次降雨事件结束后,对径流小区产流产沙进行样品收集,保存于 4℃恒温冰箱。样品收集完后清扫集水池和集

水槽,以免对下次样品进行污染。样品送入实验室进行化学分析,监测指标包括:总氮(TN)、总磷(TP)、铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)。径流水样中 TN 测定选用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,TP 测定选用钼酸铵分光光度法。侵蚀泥沙样 TN 选用半微量凯氏测定法进行测定,TP 选用碱熔—钼锑抗比色法进行测定。过滤后的水样通过意大利产 Smartchem140 型化学间断分析仪测定 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 质量浓度,所有测定方法均参照标准方法进行。流域内设有自制雨量计收集降雨数据。本研究应用 Excel 2010 软件统计与分析试验数据,使用 Origin 9.0 软件进行作图。

1.3 退耕还林模式养分流失公式

各退耕还林模式氮磷养分流失总量,采用下式计算

$$W=W_w+W_s=\sum_{i=1}^n W_{wi} \times C_{wi} / S \times 10^6 + \sum_{i=1}^n W_{si} \times C_{si} / S \times 10^3$$

式中: W_w 为单位面积的地表径流养分流失量; W_s 为单位面积的侵蚀泥沙养分流失量(mg/m²); W_{wi} 为第 i 次采样的径流量(m³); W_{si} 为第 i 次采样的侵蚀泥沙量(kg); C_{wi} 为第 i 次采样的径流水养分浓度(kg/m³); C_{si} 为第 i 次采样的侵蚀泥沙养分含量(g/kg); S 为不同退耕还林模式的径流小区面积(m²)。

表 2 降雨量、地表径流量与土壤侵蚀回归方程

退耕还林 类型	地表径流量与降雨量的相关性			土壤侵蚀与降雨量的相关性			地表径流量与土壤侵蚀的相关性		
	公式	R^2	p	公式	R^2	p	公式	R^2	p
茶园	$y=0.1059x+7.785$	0.8089	<0.01	$y=0.2791x+19.513$	0.8406	<0.01	$y=2.5179x+2.3922$	0.9489	<0.01
板栗林	$y=0.09x+4.1728$	0.8324	<0.01	$y=0.0934x+5.039$	0.7806	<0.01	$y=1.1015x+0.8836$	0.8969	<0.01
柑橘园	$y=0.1372x+4.4175$	0.7831	<0.01	$y=0.1438x+12.314$	0.7078	<0.01	$y=1.0063x+8.0908$	0.8332	<0.01
坡耕地(对照)	$y=0.11323x+8.847$	0.8212	<0.01	$y=0.3854x+54.351$	0.7608	<0.01	$y=3.4354x+23.817$	0.9215	<0.01

从图 1 可以看出,土壤侵蚀模数也呈现出明显的降低趋势,与地表径流变化趋势基本一致。相对农耕地,退耕还林模式减少的幅度为茶园 58.94%、板栗林 87.91%、柑橘园 75.26%。结合表 2,退耕还林后土壤侵蚀量有大幅度的降低,可见退耕还林模式固定土壤的功能较强。根据监测期间所采集到的降雨事件,对退耕还林模式下地表径流量与降雨量之间、土壤侵蚀量与降雨量之间、地表径流量与土壤侵蚀量之间进行回归分析,以回归方程式进行拟合,结果如表 2 所示。通过回归方程可知,3 个指标彼此之间的相关性均达到显著水平。可见,降雨量是影响地表径流和土壤侵蚀的主要因子。根据方程式可以推算出,在同样降雨条件下,不同退耕还林模式地表径流量和土壤侵蚀量值的顺序与之前监测的结果相一致。

2.2 土壤中氮磷养分流失

土壤中氮磷养分流失主要通过两种途径,地表径

2 结果与分析

2.1 退耕还林土壤侵蚀变化

2016 年监测期间共采集到地表径流 9 次,对其降雨、产流、产沙情况进行分析,数据见表 2,图 1。地表径流作为土壤侵蚀和氮磷养分流失的主要动力和载体,其径流量和径流系数是衡量退耕还林工程水土保持特征的重要指标。土壤侵蚀模数是表征土壤侵蚀强度的指标。在相同立地条件下,同一场降雨事件中,土地利用/覆被植物类型不同,产生的地表径流量和土壤侵蚀模数差异较大^[10-11]。

从图 1 得知,与农耕地相比,退耕还林模式的地表径流存在明显的减少趋势。从地表径流量来看,各退耕还林模式相对农耕地的平均减少幅度分别为茶园 6.11%、板栗林 41.95%、柑橘园 22.78%。从径流系数来看,各退耕还林模式的径流系数范围主要分布在 0.012 1~0.05,与农耕地相比,降低幅度分别为茶园 6.01%、板栗林 40.56%,柑橘园 22.77%。结合表 2 的公式,3 种退耕还林模式从起始的地表径流量值比农耕地小,茶园和板栗林随降雨量增长的地表径流量的比率也小于农耕地,可见退耕还林后,地表径流有所减弱。

流和侵蚀泥沙携带流失。其中侵蚀泥沙的流失量主要受雨水和径流对土壤的冲刷作用影响。根据这两种途径,将退耕还林模式在 9 次降雨事件中的氮磷养分流失情况通过箱型图加以分析,结果如图 2 所示。

从图 2A 中得知退耕还林模式总氮流失的情况。结果表明,农耕地退耕还林后,无论是在径流中还是在泥沙中,总氮流失量都显著减少。具体表现如下,总氮流失总量(包括地表径流和侵蚀泥沙两部分)的顺序为:农耕地流失量最大,为 4 168.63 g/hm²;茶园其次,为 2 865.34 g/hm²,较农耕地减少了 31.26%;柑橘园流失量为 2 331.07 g/hm²,减少了 44.08%;板栗林地最少,为 1 983.31 g/hm²,减少了 52.42%。从图中可以直观看出,由泥沙携带流失的总氮量高于径流中流失的总氮量,其中农耕地、茶园、柑橘园和板栗林由径流携带的总氮量占总量比例分别为 34.84%,38.79%,43.22%和 54.14%。进行统计时,只有柑橘园随侵

蚀泥沙而流失的总氮存在异常值。径流中退耕还林模式之间总氮相差较小,而泥沙中各模式之间总氮差

异较大。总体来看,可以通过控制土壤侵蚀来减少小流域的氮素流失。

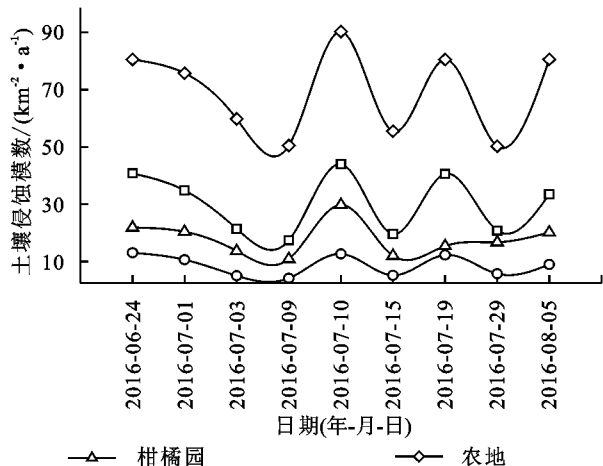
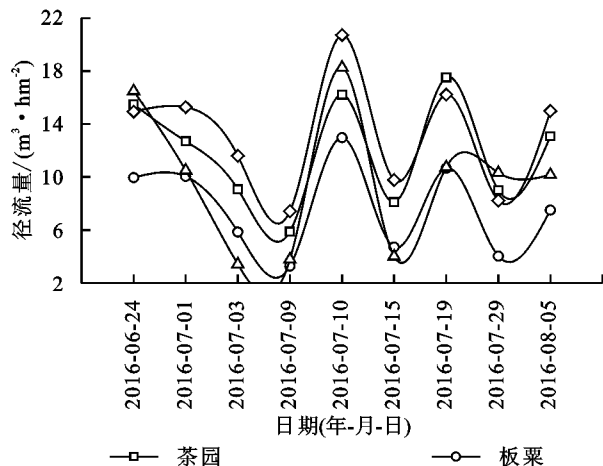


图1 不同退耕还林模式地表径流和土壤侵蚀流失

从图2B中可以看出退耕还林模式总磷(包括地表径流和侵蚀泥沙两部分)的流失特征。从流失总量上看,其顺序与总氮流失顺序基本一致,为农耕地 $297.77 \text{ g/hm}^2 > \text{茶园 } 169.00 \text{ g/hm}^2 > \text{柑橘园 } 87.98 \text{ g/hm}^2 > \text{板栗林 } 80.80 \text{ g/hm}^2$ 。相较于农耕地,茶园、柑橘园和板栗林总磷流失量的减少幅度分别为43.24%、70.45%和72.87%。由图2B可以直接看出总磷随泥沙流失的量大于随径流流失的量,农耕地、茶园、柑橘园和板栗林泥沙中总磷输出量分别为径流中的2.82、2.45、1.83、1.57倍。总体来看,总磷输出主要依靠侵蚀泥沙携带进入下游水体形成污染。在统计时,柑橘园总磷流失与总氮相仿,都是在泥沙侵蚀途径中存在异常值,而板栗林两个途径都存在异常值。表明板栗林中流失的总磷紊乱程度较大,稳定性差。

将图2A、2B并行比较,尽管退耕还林模式间氮磷流失顺序相同,但从数值上看,单次氮素流失总值的范围主要分布在 $194.85 \sim 350.11 \text{ g/hm}^2$,而单次磷素流失值的范围主要分布在 $4.55 \sim 19.58 \text{ g/hm}^2$,可见小流域内水体主要面源污染物为氮素。

2.3 土壤中速效氮流失

土壤中氮素养分主要以有机态氮和无机态氮两种形式存在,二者的总和称为总氮。根据植物吸收利用的难易程度,可以将氮素分为速效性氮和迟效性氮。其中有机态氮素属于迟效性氮。以硝酸盐和铵盐的形式存在的无机态氮素为速效性氮素。本文主要测量硝态氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$)和铵态氮($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)两个指标。

从图2C可以得知,退耕还林后,硝态氮的流失量有明显的减少趋势。监测期间,退耕还林模式下硝态氮流失总量顺序为农耕地 $332.09 \text{ g/hm}^2 > \text{茶园 } 243.42 \text{ g/hm}^2 > \text{板栗林 } 124.76 \text{ g/hm}^2 > \text{柑橘园 } 123.18 \text{ g/hm}^2$ 。其中,径流中硝态氮流失量占总量的比例为农耕地97.59%、茶园97.30%、柑橘园94.88%和板

栗林99.23%。结合图2C,可知硝态氮的主要流失途径是径流携带。与农耕地相比,茶园、柑橘园和板栗林中硝态氮流失减少幅度分别为26.70%、62.91%和62.43%,减少幅度明显。此外,柑橘园径流中流失的硝态氮存在异常值。

铵态氮输出情况如图2D所示,监测期间流失总量为农耕地 184.22 g/hm^2 ,茶园 132.18 g/hm^2 ,柑橘园 117.62 g/hm^2 和板栗林 91.42 g/hm^2 ,这与硝态氮的流失情况有所不同。从图2D中可以看出,铵态氮流失主要受地表径流影响,其径流中的流失量与泥沙中的流失量相比较,农耕地、茶园、柑橘园和板栗林地表径流中铵态氮流失量分别为泥沙中的10.15倍、15.66倍、21.03倍和28.00倍。板栗林随径流流失的铵态氮存在异常值。

对退耕还林模式下速效性氮素养分硝态氮和铵态氮在监测期间的流失总量与总氮的流失总量进行对比分析,其中硝态氮占总氮的比例为农耕地7.97%、茶园8.50%、柑橘园5.28%和板栗林6.29%;铵态氮占总氮的比例为农耕地4.42%、茶园4.61%、柑橘园4.61%和板栗林5.05%。从分析得知,硝态氮是速效性氮素流失的主要类型。

3 讨论

三峡库区的土壤侵蚀问题是多种自然因素和人为因素相互作用而造成的结果。目前对土壤侵蚀及养分流失情况的评价指标主要为土壤侵蚀模数及养分流失量。由监测分析结果看出,退耕还林工程实施后,土壤侵蚀减少的范围在45.29%~93.04%,总氮流失减少的范围在20.41%~71.63%,总磷流失减少的范围在21.11%~83.28%,且总氮、总磷流失的主要途径是侵蚀泥沙。这一研究结果与兰木羚等^[12]在三峡库区重庆市涪陵区王家沟小流域旱坡地上所作试验的结果一致,都

是侵蚀泥沙氮磷流失量高于地表径流氮磷流失量和地表径流量及侵蚀泥沙流失量与降雨量存在显著的线性正相关。但刘俏等^[13]在浙江省永康市所作的试

验结果却显示降雨径流才是导致土壤氮磷流失的主要途径。出现差异的原因主要来自于不同的土地利用/覆盖植物类型和人为管理状况。

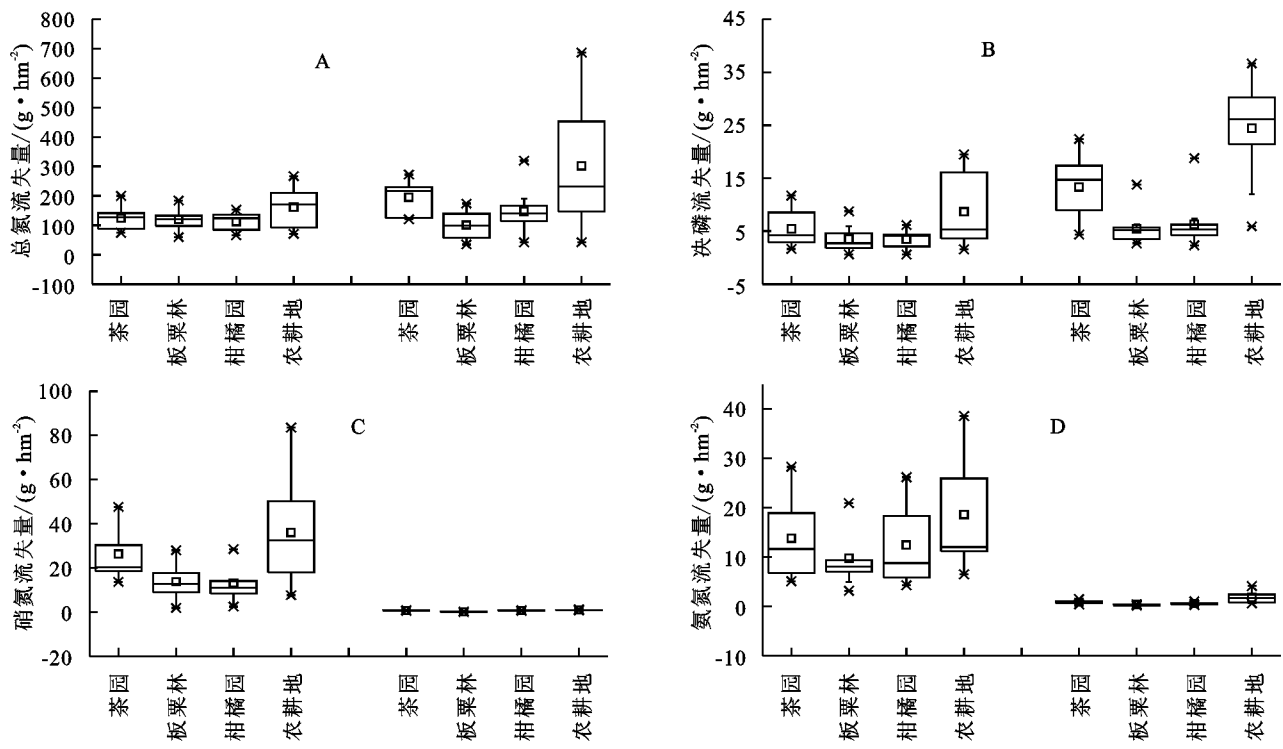


图 2 退耕还林模式下不同形态养分流失

本研究选择的 3 种退耕还林类型为茶园、柑橘园和板栗林,其中茶园和柑橘园氮磷流失的主要途径都是侵蚀泥沙携带流失,而板栗林氮磷流失的主要途径是地表径流携带流失。这 3 种类型相对于农耕地,植被覆盖程度都有所增加,较农作物更大的植被冠层可以在降雨时更易于拦截降水,减少落在地面上的雨水量及雨水对地面冲击的动能,减轻土壤表面结构被破坏的程度,增大临界流量,减少地表径流量。同时,植物根系增加了土壤结构的稳定性,利于降雨下渗,推迟地表径流发生的时间。影响土壤侵蚀的两个主要因素是地表径流量和土壤抗蚀性^[14],因此退耕还林模式通过对这两个因素的影响,达到了削弱土壤侵蚀的作用,从而降低了氮磷养分流失。但由于植被类型不同,相对应的人为管理模式有了巨大的区别,导致土壤侵蚀和养分流失也有了差异。农耕地土壤侵蚀严重,主要由于人为干扰严重,耕作、播种、除草和收割等活动对于土壤结构是破坏性的影响,再加上地表覆盖度低,尤其是在作物收获后(8 月)地表呈现出裸地状态,极易产生地表径流和土壤侵蚀^[15]。而过量施肥问题增加了流失养分的浓度和流失量。作为兰陵溪小流域退耕还林后的主要经济来源—茶园,同样存在人为干扰严重的问题。茶叶采摘后,冠层受到破坏,拦截降水能力下降。采摘茶叶时对地表土壤的踩

踏破坏了土壤的结构和蓄水性,使得土壤板结,土壤抗蚀性差。连续降雨后,土壤侵蚀问题严重。加上茶树对化肥利用率较低,所以在对茶树进行施肥时,会为了增加茶叶产量而不断进行追肥。过多的施肥,因无法被植物吸收而富集在土壤中,从而导致随侵蚀泥沙流失的养分急剧增加。柑橘园虽然存在与茶园相同的问题,但在兰陵溪小流域,柑橘园每年只在年初进行一次堆肥,当地柑橘成熟期在 10—12 月份,所以在雨季不存在过多的人为影响,因此较农耕地和茶园的土壤侵蚀和氮磷养分流失程度低。板栗林与茶园、柑橘园相反,人为干扰极少,没有施肥过程。植被盖度远高于另两种退耕还林模式,凋落物层受破坏小,对地表径流有削弱作用;土壤结构疏松,有利于降雨下渗;板栗根系发达,对土壤有较好的固定作用,土壤侵蚀量极少。没有施肥过程,土壤中氮磷养分含量低,随侵蚀泥沙而流失的养分含量也急剧减少。板栗林氮磷养分流失主要途径为地表径流。

因此,在研究退耕还林工程对兰陵溪小流域土壤侵蚀和氮磷养分流失情况的控制过程中,要注意的几个问题如下。第一、增强植被覆盖度。从原有的单一植物模式改为复合模式,在茶园和柑橘园中增加板栗、杉木等作物,营造乔灌结合的复层林分,可以在不影响经济效益的同时增强水土保持能力^[16]。第二、

试验监测期间处于小流域雨季,雨热同期,且土壤侵蚀和氮磷流失都与降雨量显著正相关。因此可以通过调整施肥时间和施肥方式、改变施肥种类和施肥量的方式,来达到在保证土壤内有效氮磷含量的同时减少氮磷流失量的目的。

4 结论

(1) 在退耕还林工程实施后,通过改变土地利用/覆被植物类型的方式,使得地表径流流失和土壤侵蚀都受到了一定的控制。各退耕还林模式的地表径流量和土壤侵蚀模数相对于农耕地的减少幅度顺序皆为板栗林>柑橘园>茶园。

(2) 各退耕还林模式总氮、总磷养分流失量(地表径流和侵蚀泥沙)顺序为农耕地>茶园>柑橘园>板栗林。退耕后单次土壤养分总氮流失量在 194.85~350.11 g/hm²,较农耕地减小的范围在 20.41%~71.63%;总磷流失量在 4.55~19.58 g/hm²,减少的范围在 21.11%~83.28%。可见小流域内水体主要面源污染物为氮素。

(3) 各退耕还林模式速效氮中,硝态氮流失顺序为农耕地>茶园>板栗林>柑橘园,铵态氮流失顺序为农耕地>茶园>柑橘园>板栗林,通过硝态氮、铵态氮和总氮的流失量比率可知,硝态氮是速效性氮素流失的主要类型。

(4) 流失养分中,总氮和总磷以土壤侵蚀泥沙携带为主要途径。随侵蚀泥沙流失的氮磷量是随地表径流流失的 1.00~3.59 倍;速效氮中硝态氮和铵态氮的主要流失途径为地表径流携带,由径流输出的硝态氮和氨态氮占总流失量的比率为 91.03%~99.24%。

参考文献:

- [1] 水利部长江水利委员会. 长江流域水土保持公报[N]. 中国水利报,2007-11-16(4).
- [2] 王珠娜. 三峡库区秭归县退耕还林工程生态效益计量评价研究[D]. 海口:华南热带农业大学,2007.
- [3] 王晓荣,万伏红,崔鸿侠,等. 三峡库区不同退耕还林模式水土保持效益定位监测[J]. 湖北林业科技,2014,43(4):1-4.
- [4] 霍洪江,汪涛,魏世强,等. 三峡库区紫色土坡耕地氮素流失特征及其坡度的影响[J]. 西南大学学报:自然科学版,2013,35(11):112-117.
- [5] 潘磊,唐万鹏,肖文发,等. 三峡库区不同退耕还林模式林地水文效应[J]. 水土保持通报,2012,32(5):103-106.
- [6] 曾立雄,黄志霖,肖文发,等. 三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应[J]. 环境科学,2012,33(10):3390-3396.
- [7] 马东,杜志勇,吴娟,等. 崂山水库流域不同土地利用类型地表径流的氮磷流失特征[J]. 水土保持学报,2011,25(6):31-33.
- [8] 姜焱,周祖钦,梅大英. 秭归县林业志:1949—2004[M]. 秭归县林业志编纂委员会,2007.
- [9] 黄志霖,田耀武,肖文发,等. 三峡库区黑沟流域 An-nAGNPS 参数空间聚合效应[J]. 生态学报,2009,29(12):6681-6690.
- [10] 郭效丁,刘晓君,黄萍萍,等. 不同土地利用方式水土及养分流失响应机制研究:以鹦鹉沟小流域为例[J]. 水土保持研究,2014,21(5):18-23.
- [11] 魏兴萍,谢世友,张志伟,等. 重庆南平镇岩溶槽谷区不同土地利用类型地表水土流失[J]. 农业工程学报,2011,27(6):42-46.
- [12] 兰木羚,高瑗,高明,等. 三峡库区王家沟小流域不同坡度土壤氮素流失特征研究[J]. 中国水土保持,2014(3):39-42.
- [13] 刘俏,张丽萍,聂国辉,等. 浙江红壤区经济林坡地氮素径流流失特征研究[J]. 农业环境科学学报,2014,33(7):1388-1393.
- [14] 傅涛,倪九派,魏朝富,等. 坡耕地土壤侵蚀研究进展[J]. 水土保持学报,2001,15(3):123-128.
- [15] 高超,朱继业,朱建国,等. 不同土地利用方式下的地表径流磷输出及其季节性分布特征[J]. 环境科学学报,2005,25(11):1543-1549.
- [16] 肖文发. 长江三峡库区退耕还林工程生态效益监测与评价[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [16] Fang J Y, Chen A P, Peng C H. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. Science, 2001,292(5525):2320-2323.
- [17] 张颖,周雪,覃庆锋,等. 中国森林碳汇价值核算研究[J]. 北京林业大学学报,2013,35(6):124-131.
- [18] 李海奎,雷渊才,曾伟生. 基于森林清查资料的中国森林植被碳储量[J]. 林业科学,2011,47(7):7-12.
- [19] 马琪,刘康,张慧. 陕西省森林植被碳储量及其空间分布[J]. 资源科学,2012,34(9):1781-1789.
- [20] 周玉荣,于振良,赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. 植物生态学报,2000,24(5):518-522.
- [21] 崔高阳,陈云明,曹扬,等. 陕西省森林生态系统碳储量分布格局分析[J]. 植物生态学报,2015,39(4):333-342.
- [22] 曹扬,陈云明,晋蓓,等. 陕西省森林植被碳储量、碳密度及其空间分布格局[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(9):69-73.
- [23] 高阳,金晶炜,程积民,等. 宁夏回族自治区森林生态系统固碳现状[J]. 应用生态学报,2014,25(3):639-646.
- [24] 杨传强,李士美. 2012 年山东省乔木林碳储量研究[J]. 资源科学,2015,37(8):1661-1667.

(上接第 82 页)