

孙孝龙, 蒋文举, 王克勤, 等. 2009 抚仙湖尖山河小流域山地典型地类非点源污染特征与分析 [J]. 环境科学学报, 29(7): 1534– 1541
Sun X L, Jiang W J, Wang K Q, *et al*. 2009. The characteristics and analysis of non-point pollution in different land categories in small watersheds in the Jianshan River of Fuxian Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(7): 1534– 1541

抚仙湖尖山河小流域山地典型地类非点源污染特征与分析

孙孝龙^{1, 2}, 蒋文举², 王克勤^{2*}, 宋泽芬¹, 陈尧²

1 西南林学院环境科学与工程系, 昆明 650223
2 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065

收稿日期: 2008-08-11 修回日期: 2008-12-15 录用日期: 2009-04-07

摘要: 通过在尖山河小流域建立径流场, 在自然降雨条件下采集水样, 检测分析地表径流中各污染物的浓度, 研究自然状态下和人为干扰下山地不同地类污染物的输出量, 探讨高原湖泊山地非点源污染的特征与规律. 研究结果表明: 研究区内各地类产流量的关系是坡耕地 > 人工林 > 灌草丛 > 次生林, 各地类产沙量大小关系是坡耕地 > 人工林 > 次生林 > 灌草丛, 产流量与降雨量相关性更为显著; 次生林、坡耕地、灌草丛、人工林 4 种土地类型产流的总无机氮输出量平均值分别为 0.94 mg m⁻²、19.70 mg m⁻²、1.74 mg m⁻²、17.22 mg m⁻², 总磷平均值分别为 0.32 mg m⁻²、3.58 mg m⁻²、1.12 mg m⁻²、2.85 mg m⁻²; 产沙过程中单位面积水解氮输出量平均值为 0.41 mg m⁻²、7.17 mg m⁻²、0.89 mg m⁻²、0.23 mg m⁻², 速效磷平均值为 0.04 mg m⁻²、1.14 mg m⁻²、0.03 mg m⁻²、0.02 mg m⁻²; 产流过程中输出的污染物大于产沙过程中的输出量, 尖山河小流域农业非点源污染控制应以控制产流污染物为主.
关键词: 非点源污染; 土地利用类型; 山地; 流失特征

文章编号: 0253-2468(2009)07-1534-08 中图分类号: X171 文献标识码: A

The characteristics and analysis of non-point pollution in different land categories in small watersheds in the Jianshan River of Fuxian Lake

SUN Xiaolong^{1, 2}, JIANG Wenju², WANG Keqin^{1*}, SONG Zefen¹, CHEN Yaoyao²

1 Environmental Science and Engineering Department in Southwest Forestry College, Kunming 650223
2 College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065

Received 11 August 2008; received in revised form 15 December 2008; accepted 7 April 2009

Abstract In order to discover the characteristics and rules that govern non-point source pollution in a plateau lake in Yunnan, rainfall samples from different land use types were collected and analyzed under natural and man-made interference conditions. The results showed that the runoff yield in different regions sequentially decreased from sloped farmland to planted forest, shrub-grassland and secondary forest. The sediment yield also showed a significant reduction from sloped farmland to planted forest, secondary forest and shrub-grassland areas. The runoff yield showed significant correlations with the rainfall. For secondary forest, sloped farmland, shrub-grassland and planted forest, the average outputs of total inorganic nitrogen in the runoff yield were 0.94 mg m⁻², 19.70 mg m⁻², 1.74 mg m⁻², 17.22 mg m⁻², respectively. The average values of total phosphorus were 0.32 mg m⁻², 3.58 mg m⁻², 1.12 mg m⁻², 2.85 mg m⁻², and the average outputs of hydrolyzed nitrogen in sediment were 0.41 mg m⁻², 7.17 mg m⁻², 0.89 mg m⁻², 0.23 mg m⁻², while the available phosphorus values were 0.04 mg m⁻², 1.14 mg m⁻², 0.03 mg m⁻², 0.02 mg m⁻², respectively. The pollutant output in runoff was larger than in sediment. Thus reducing the contaminants in runoff of the Jianshan river is critical to non-point pollution control.
Keywords non-point pollution; land use type; mountainous region; loss characteristics

1 引言 (Introduction)

非点源污染的危害性随点源污染控制能力的提高而逐渐表现出来, 成为影响地表水体 (尤其是湖泊) 富营养化的主要污染源或是首要污染源 (Lal 1990 McGath, 2001). 国外学者对农田地表径流氮磷元素的流失量及对水体影响的研究始于 20 世纪 70~80 年代 (Flanagan 1989), 先后对土壤中氮磷等元素的流失规律进行了研究, 并建立了相应的模型 (Nair 1995 Eghball 2000 Arhonditsis et al 2000 Francos A, 2001). 我国非点源污染研究始于 20 世纪 80 年代初的湖泊、水库富营养化调查和河流水质规划研究, 有研究者在官厅水库 (王雪蕾, 2007; 梁涛, 2005)、滇池 (王震洪, 2006)、太湖 (郭红岩, 2004)、三峡库区 (龙天渝, 2008) 等湖泊进行了探索性的研究, 较好地掌握了非点源污染负荷发生状况, 为湖泊、河流的水质规划与流域规划提供了可靠的依据, 也为非点源污染研究积累了有益的经验. 随着非点源污染模型模拟地表径流迁移转化机理研究的广泛开展, 次降雨事件下地表径流氮、磷流失的监测分析被广泛用于校检模型及非点源污染负荷的计算与评价 (岳勇, 2007; 郝芳华, 2006; 程红光, 2006a 于涛, 2008). 而河流和高原湖泊的汇水区基本为山地, 地表径流是输送非点源的主要途径, 因此径流系数高的农业山区非点源污染尤为突出, 山地农业的非点源污染在山地非点源污染中占据绝对的份额, 并且将持续相当长的时期, 是山地非点源污染控制的关键区域 (王震洪, 2006). 以往的研究多是选择人为干扰比较严重或是污染比较厉害的区域, 因而无法获得有代表性的本底值, 本研究中选择受人为干扰较小的抚仙湖尖山河小流域作为研究对象, 在同一地区不同的地类 (自然的、人为干扰) 建立具有相同坡度的径流场, 测定地表径流产流和泥沙中的有机质、N、P 等污染物的形态及含量, 观测自然降雨条件下山地不同地类地表径流污染物的输出及特征; 并将坡耕地、人工林地和受人类干扰较小的次生林、灌草丛作对比, 探明非点源污染物通过地表径流途径输出的种类、形态、成分和输出量. 旨在为有效控制农业山区非点源污染提供成熟技术及其应用的理论依据, 同时也对抚仙湖从贫营养型湖泊向富营养转化过程的研究提供基础性的数据.

2 实验设计与研究方法 (Materials and methods)

2.1 实验区概况

试验地选在澄江县抚仙湖尖山河小流域, 位于

北纬 $24^{\circ}32'00''\sim 24^{\circ}37'38''$ 、东经 $102^{\circ}47'21''\sim 102^{\circ}52'02''$ 之间 (流域), 北接龙街镇广龙村委会, 南接禄充管委会, 东临抚仙湖. 抚仙湖是我国最大的深水型淡水湖泊, 也是我国目前尚存的为数不多的 I 类水质湖泊, 属于贫营养型湖泊的典型代表 (刘阳, 2008). 尖山河是抚仙湖的一条天然入湖河道, 尖山河小流域主要有天然次生林、人工林、灌草丛、坡耕地和梯田几种土地类型, 森林覆盖率为 21.4%, 林草覆盖率为 47.9%. 该区域的面积为 18.83km^2 , 其中坡耕地面积为 44.29hm^2 , 次生林为 1269.98hm^2 , 人工林为 28.20hm^2 , 灌草丛为 56.76hm^2 .

小流域内主要河道为尖山河, 河道长 8.5km, 河床平均比降为 0.036. 河流泥沙为雨后冲刷形成, 年输沙量 $4.86\times 10^4\text{t}$, 平均含沙量 $0.3\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 年均输沙模数 $1372\text{t}\cdot\text{km}^{-2}$. 年际分布情况为: 雨季径流量占全年总雨量的 75%, 旱季降雨量占全年径流量的 25%, 年平均径流深 300mm.

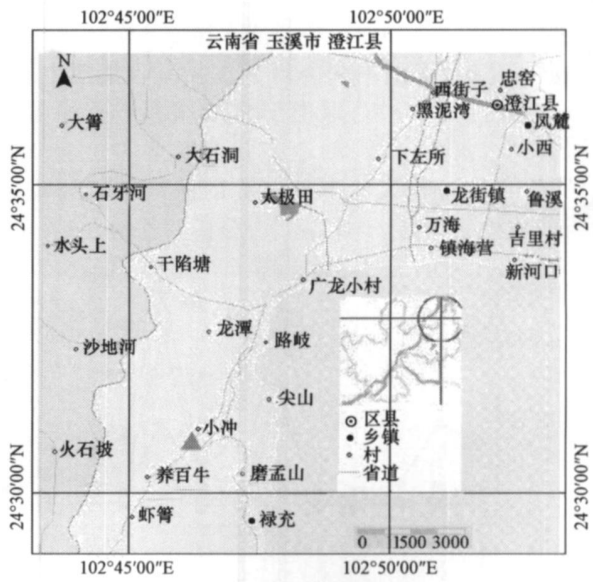


图 1 项目区地理位置

Fig. 1 The location of the research field

2.2 径流场概况

根据不同的土地利用方式共布设 4 个水平投影面积为 $5\text{m}\times 20\text{m}$ 的径流场, 分别建在坡耕地、灌草丛、人工桉树林和云南松天然次生林 4 种土地类型上, 各径流场四周采用水泥衬砌, 各径流场下有集水池, 集水池修建在室内, 径流场内的径流汇入到集水池中, 通过流量计监测径流总量. 径流场的基本概况见表 1, 4 种土地类型中各土层土壤理化性状见表 2.

表 1 各径流场基本概况

Table 1 The general situation of different land use pattems

小区名称	坡 位	坡度	坡向	土壤类型	主要植物种	海拔 /m	盖度
次生林	坡中下部	24. 62°	东西向	赤红壤	云南松、紫茎泽兰、扭黄茅等	1787	90%
坡耕地	坡中下部	18. 58°	南北向	赤红壤	种植烟草	1773	-
人工林	坡中下部	18. 58°	南北向	赤红壤	云南松、桉树、紫茎泽兰等	1788	65%
灌草丛	坡中下部	20. 84°	南北向	赤红壤	紫茎泽兰、扭黄茅、鬼针草等	1790	95%

表 2 不同土地类型各土层土壤理化性状

Table 2 Chemical and physical characteristics of different land areas

土地类型	容重 $/(g\ cm^{-3})$	pH 值	有机质	全氮	水解氮 $/(10^{-2}mg\ g^{-1})$	速效磷 $/(10^{-2}mg\ g^{-1})$
次生林	1. 43	5. 51	2. 08%	0. 042%	7. 86	0. 90
坡耕地	1. 39	4. 93	1. 08%	0. 037%	6. 82	35. 10
人工林	1. 78	5. 01	1. 43%	0. 042%	5. 77	0. 73
灌草丛	1. 46	8. 16	1. 80%	0. 044%	5. 89	0. 57

2.3 采样分析方法

2.3.1 采样 实验区设有雨量计,采集大气降雨数据,并观测各径流场在降雨之后所产生的数据,选择雨量 > 15mm、能够形成地表径流的降雨,采集地表径流。地表径流样品分为 2 类,一是产流,主要是不包含大颗粒物水样,二是产沙,主要是沉淀在集水池底部的泥沙。每种地类径流水样取 3 个样,分别在降雨发生时、降雨中和降雨后在径流收集池中取水样,经过沉淀、分离,取上层溶液作为产流样品,并对其进行水质分析,测定各营养元素的含量,结果取平均值。对收集池下部沉淀的泥沙进行收集、作为产沙样品,然后干燥,称重,分析营养物含量。

2.3.2 分析方法 项目各项指标均在室内进行分析检测,氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定;化学需氧量 (COD)采用美国 HACH 水质 COD 分析仪测定;总磷采用钼酸铵分光光度法测定;硝态氮、亚硝态氮采用离子色谱法测定。土壤速效磷采用碳酸氢钠法和氟化氢-草酸钠法测定;全氮采用高氯酸-硫酸消化法测定;水解性氮采用碱解蒸馏法测定。

3 实验结果 (Results)

2006 年 6 月 ~ 2006 年 11 月共有 27d 降雨,采集降雨数据以及不同土地类型的径流量,以 d 为统计单位,结果如图 2 所示。

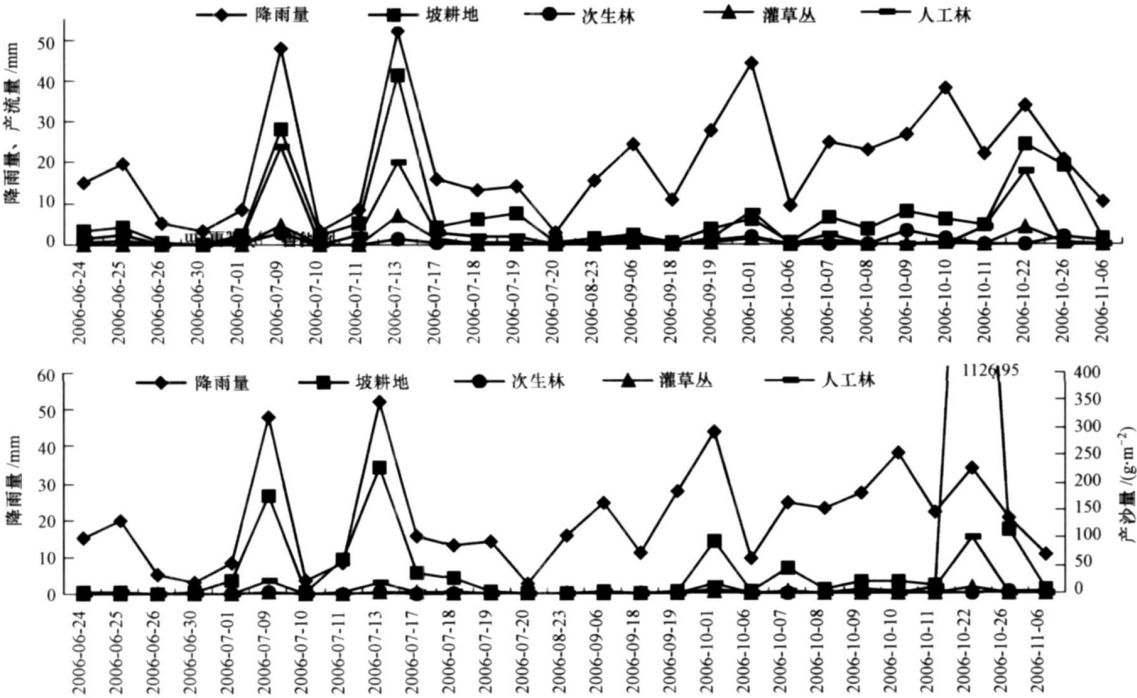


图 2 不同降雨强度下各地类产流量及产沙量

Fig. 2 Runoff from different land types

分别在 7 月 9 日、7 月 13 日、7 月 17 日、9 月 6 日、9 月 19 日降雨后采集水样, 对采集的水样进行分析, 检测水样中 COD_{Cr} 、 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 、总磷等各营养盐含量, 并按时间分别作图, 如图 3~

图 4 所示. 其中总无机氮的值为易溶于水、对水体富营养化有较大影响的 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 3 种营养盐浓度相加, 单位面积污染物产生量为污染物浓度和产流量的乘积.

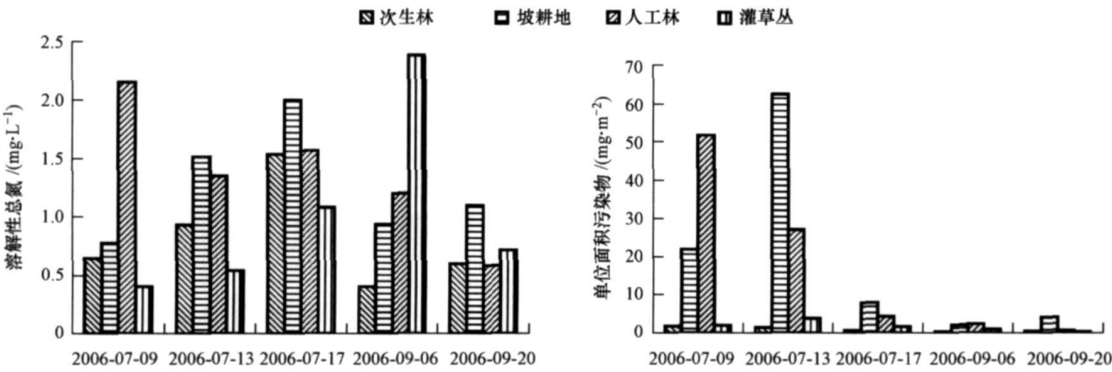


图 3 总无机氮浓度和单位面积产生量
Fig. 3 Concentration and output of total inorganic nitrogen in runoff

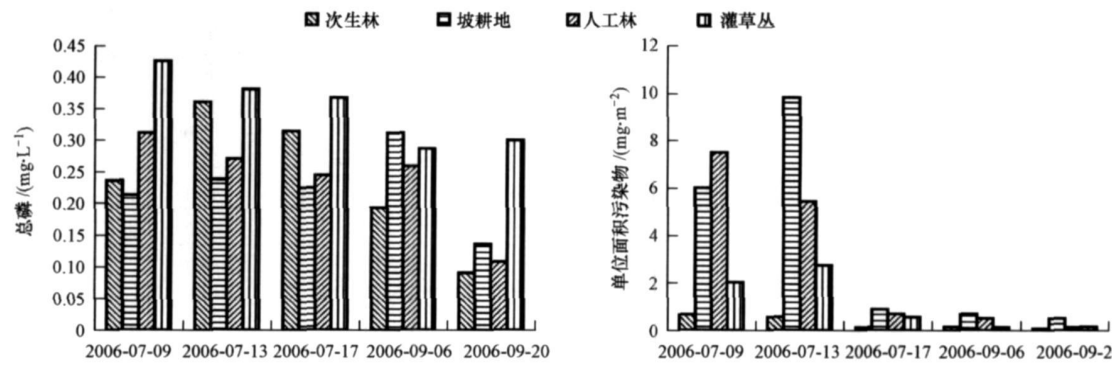


图 4 总磷浓度和单位面积产生量
Fig. 4 Concentration and output of total phosphorous in runoff

对收集池中的泥沙进行收集, 干燥, 混合, 检测其泥沙中污染物平均含量, 如表 3 所示. 对水体影响较大的水解氮和速效磷的单位面积污染物的输出

量见图 5. 单位面积污染物输出量为泥沙中污染物含量和单位面积产沙量的乘积.

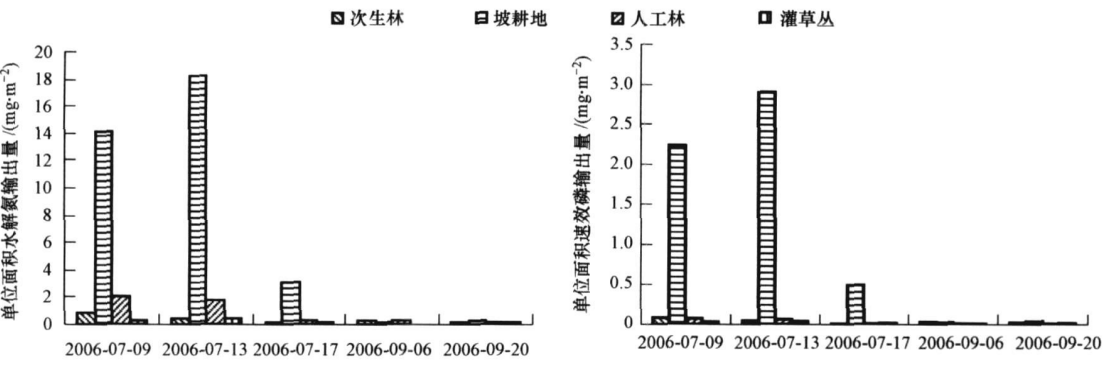


图 5 产沙中单位面积污染物的输出量
Fig. 5 The output of pollutants in the sediment

表 3 泥沙样的污染物质浓度
Table 3 Pollutant concentrations in the sediment on different runoff plots

地点	有机质	全氮	全磷	水解氮 /(mg 100g ⁻¹)	速效磷 /(mg 100g ⁻¹)
次生林	4.538%	0.046%	0.162%	24.031	2.339
坡耕地	0.623%	0.043%	0.102%	7.930	1.257
人工林	1.164%	0.020%	0.081%	8.275	0.282
灌草丛	0.740%	0.054%	0.143%	10.507	1.043

4 讨论 (Discussion)

4.1 不同地类的产流量及产沙量

图 2 是不同降雨强度下,灌草丛、人工林、次生林、坡耕地不同地类的产流量及产沙量,从图中可以看出不同地类在相同降雨强度下产流量和产沙量不同。其中,产流量的关系是坡耕地 > 人工林 > 灌草丛 > 次生林,在 $p < 0.05$ 时,灌草丛和次生林两者的产流量无显著性差异。坡耕地在降雨量大于 10mm 时会产生明显产流,而人工林在降雨量大于 20mm 时,灌草丛在降雨量大于 30mm 时,次生林在降雨量大于 40mm 时会产生明显产流。对于不同地

类产沙量,坡耕地 > 人工林 > 次生林 > 灌草丛,在 $p < 0.05$ 灌草丛和次生林两者无显著性差异。

影响降雨入渗和产流过程的一个重要因素是土壤的含水率以及降雨的强度和持续时间。在降雨强度大、时间长,尤其是在暴雨情况下,产流量会相对较多一些 (Sharpley, 1985)。降雨量和不同地类产流量和产沙量之间的相关关系如表 4 所示。由表可知,产流量与降雨量相关关系更显著,产沙量和降雨量的相关性较差,尤其是降雨量和坡耕地产沙量的相关性;对于坡耕地而言,其产沙量并不取决于降雨量的大小,而是与坡耕地其它的因素有关,如坡度、耕作方式等。

表 4 降雨量和不同地类产流量、产沙量的 Pearson 相关分析
Table 4 Correlation analysis of runoff and sediment amounts with rainfall

不同地类	产流量			产沙量		
	相关系数	显著概率	样本数	相关系数	显著概率	样本数
坡耕地	0.740	0	27	0.378	0.05	27
灌草丛	0.742	0	27	0.627	0	27
人工林	0.739	0	27	0.444	0.02	27
次生林	0.666	0	27	0.560	0	27

4.2 污染物浓度

4.2.1 各地类产流污染物浓度 1) 总无机氮:总无机氮浓度变化较大,浓度范围 0.4~2.378 mg·L⁻¹。次生林、坡耕地、灌草丛、人工林这 4 种土地类型的产流中总无机氮平均浓度依次为 0.823 mg·L⁻¹、1.267 mg·L⁻¹、1.371 mg·L⁻¹、1.022 mg·L⁻¹,按平均浓度排序为灌草丛 > 坡耕地 > 人工林 > 次生林。

产流中的污染物主要由地表土壤中的溶解态污染物溶解于雨水中形成。在降雨之后,雨水浸渍土壤,一部分雨水下渗;当降雨强度大于下渗速度,且土壤含水饱和后,便形成地表径流。因此,降雨后产流中的污染物浓度和地表土壤特性密切相关。本研究中观测的总无机氮(氨氮、亚硝态氮、硝态氮)主要是土壤中的水解氮(硝态氮、氨氮)溶解于地表

径流中形成的(谢红梅, 2003)。而 4 种土地类型的土壤中水解氮的含量差别不是很大,每 100g 土壤中水解氮的含量分别是 7.86mg、6.82mg、5.77mg、5.89mg。不同土地类型产流的污染物浓度与土壤类型、雨水浸泡时间以及地面植物的生命代谢过程有关(仓恒瑾, 2005)。地表径流中的总无机氮浓度是一个复杂因素影响的过程。雨水快速降落到地表时,坡耕地、人工林 2 种覆盖度较低的地类对雨水的阻滞能力很小,雨水溅落到地表,土粒和雨水充分混合,土壤中的氮作为易移动的非矿质元素快速进入到径流中(程红光, 2006b)。次生林和灌草丛 2 种植被覆盖度高的径流场,当降雨强度较大时,覆盖度对产流中总无机氮的影响较小,雨水毫无阻挡的降落到地表,产流量均较大,土壤中的水解氮溶入地表径流中,此时影响产流中总无机氮浓度的主要

影响因素是土壤中的水解氮含量。7月9日和7月13日降雨强度较大时,地表径流中总无机氮浓度较大的是人工林和坡耕地。而当降雨量较小时,覆盖度较高的地类降雨直接落到地表的较少,土壤中的水解氮和径流有较长的接触时间,而氮在水中有较大的溶解力,因此,造成径流中氮浓度较高,尤其是9月6日灌草丛地表径流的浓度高达 $2\ 378\ \text{mg}\ \text{L}^{-1}$ 。

2)总P:产流中磷浓度大小与土壤含磷水平、流失发生的地理位置、农业耕作方式和管理方式、水位条件和降水等因素有关。而本研究中,4种地类产流中总磷平均浓度分别为 $0\ 2392\ \text{mg}\ \text{L}^{-1}$ 、 $0\ 225\ \text{mg}\ \text{L}^{-1}$ 、 $0\ 239\ \text{mg}\ \text{L}^{-1}$ 、 $0\ 3524\ \text{mg}\ \text{L}^{-1}$,按平均浓度排序为灌草丛>次生林>人工林>坡耕地。灌草丛产流中总磷浓度明显高于其它地类,甚至高于坡耕地;其它几种地类,产流中总磷浓度相差不大。一般来说,草地和林地产流中的磷以溶解态为主,农业用地中磷以颗粒态为主,约占75%~95%(陈欣,2000)。同时基于土壤吸附理论(晏维金,2000),磷酸盐被土壤吸附,降雨形成的地表径流会将其解吸出来,但磷酸盐的解吸存在一个平衡时间。由于坡耕地农作物根系不发达,使得降雨后雨水无法渗透到深层土壤中,而是直接从土壤表面下泄,雨水和土壤的接触时间较短,导致磷素无法溶解到地表径流中,因此,虽然对于区域内表层土壤内的速效磷,坡耕地明显大于其它地类,但其产流总磷浓度小于灌草丛,和其它几种地类无明显区别。而灌草丛由于下部土壤中根系发达,雨水能和土壤充分接触,并有足够长的停留时间,导致产流中的总磷浓度相对较高。因此,产流的大小对总磷浓度有影响,即产流量大,则总磷浓度较低;而产流量小,则总磷浓度高。郭红岩等(郭红岩,2004)也得到了类似的结论。

4.2.2 各地类产沙污染物含量 从表3中可以看出,各地类产沙水解氮含量大小关系为次生林>灌草丛>人工林>坡耕地,速效磷含量大小关系依次为次生林>坡耕地>灌草丛>人工林。其中,对于水解氮,灌草丛、人工林、坡耕地3种土地类型产沙中含量差别不大,而对于速效磷,坡耕地和灌草丛产沙中含量基本相同。次生地类产沙过程中水解氮和速效磷含量均高于其它地类,主要原因是次生林上层土壤比较疏松,营养元素含量较高的泥土容易被输送到水体中,同时土壤中腐殖质浓度较高,土

壤呈酸性,磷元素容易被上层土壤吸附,并随着降雨输出系统外。在本实验中,坡耕地产沙的速效磷在背景值(土壤中速效磷)较高的情况下,其含量较低,与灌草丛类似,其机理和流失模型有待于进一步的研究。

4.3 污染物输出量

4.3.1 不同地类产流污染物输出量 影响土壤中养分元素淋失的因素很多,包括施肥、土地利用、气象条件、土壤水分含量、扩散速率、孔隙度、离子交换能力,以及其他一些土壤化学反应(Karwar,1980)。结合本实验中的相关数据,在污染物浓度差距不大的情况下,产流量越大,则单位面积污染物输出量越多,土壤背景值对单位面积污染物产生量影响越小。

次生林、坡耕地、灌草丛、人工林这4种土地类型的总无机氮输出量平均值分别为 $0\ 94\ \text{mg}\ \text{m}^{-2}$ 、 $19\ 70\ \text{mg}\ \text{m}^{-2}$ 、 $1\ 74\ \text{mg}\ \text{m}^{-2}$ 、 $17\ 22\ \text{mg}\ \text{m}^{-2}$,大小关系依次为坡耕地>人工林>灌草丛>次生林;总磷平均值分别为 $0\ 32\ \text{mg}\ \text{m}^{-2}$ 、 $3\ 58\ \text{mg}\ \text{m}^{-2}$ 、 $1\ 12\ \text{mg}\ \text{m}^{-2}$ 、 $2\ 85\ \text{mg}\ \text{m}^{-2}$,大小关系依次为坡耕地>人工林>灌草丛>次生林。

从不同地类单位面积污染物输出量的大小规律可知,在植树造林过程中,不能忽视草地在环境保护方面的重要作用。灌草会对雨水进行截留,防止地表溅蚀,对土壤发育和改良有重要意义,同时,灌草对非点源污染物的截留作用及水土保持作用也需要进一步研究。在非点源污染治理和荒山绿化过程中,可以采取灌草和树木混合种植的策略,灌草生长速度快,很快就能达到一定的盖度,并同时减少营养元素的流失,减少对水体的污染。

单位面积污染物输出量是污染物浓度和各地类产流量的乘积,污染物浓度和产流量的大小对污染物输出量都会产生影响。对产流中的污染物输出量和污染物浓度及产流量作Pearson相关分析,结果见表5。由表可知, $p < 0\ 01$ 时,单位面积总无机氮、总磷输出量与产流量的相关系数为0.938和0.983。单位面积污染物输出量受产流量的影响更大,减少地表产流量,能够显著减少污染物的输出量。因此,控制山区农业非点源污染,坡耕地非点源污染治理应重点将目标放在减少产流量上,即减少坡耕地产流,减少其地表水土流失量。

表 5 单位面积污染物输出量与污染物浓度和产流量 Pearson 关系

Table 5 Correlation analysis of the output of pollutants to runoff amount and pollutant concentration

项目	总无机氮 (总磷) 浓度	产流量
单位面积总无机氮输出量	0.411	0.938
单位面积总磷输出量	0.099	0.983

4.3.2 不同地类产沙中污染物输出量 计算 5 次降雨各地类产沙中单位面积污染输出量, 次生林、坡耕地、灌草丛、人工林这 4 种土地类型单位面积水解氮输出量的平均值为 $0.41\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $7.17\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $0.89\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $0.23\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$, 其大小关系依次关系为坡耕地 > 灌草丛 > 次生林 > 人工林; 速效磷平均值为 $0.04\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $1.14\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $0.03\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $0.02\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$, 其大小关系依次为坡耕地 > 次生林 > 灌草丛 > 人工林。

将产沙中的污染物输出量与产流中的污染物输出量对比, 产流中的污染物输出量大于产沙中的污染物输出量, 尖山河流域农业非点源控制主要以控制水体污染物为主, 增加土地吸水能力, 减少地表径流产生量。

5 结论 (Conclusions)

1) 研究区域各土地类型产流量的关系是坡耕地 > 人工林 > 灌草丛 > 次生林, 在 $p < 0.05$ 灌草丛和次生林两者相差不大; 各地类产沙量, 坡耕地 > 人工林 > 次生林 > 灌草丛, 灌草丛和次生林产沙量相近; 产流量与降雨量显著相关。

2) 研究区域各地类产流总无机氮浓度变化较大, 按平均浓度排序为人工林 > 坡耕地 > 灌草丛 > 次生林, 而总磷浓度以灌草丛的产流中浓度最高, 大小关系为灌草丛 > 次生林 > 人工林 > 坡耕地。

3) 次生林、坡耕地、灌草丛、人工林这 4 种地类产流总无机氮输出量平均值分别为 $0.94\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $19.70\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $1.74\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $17.22\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$; 总磷平均值分别为 $0.32\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $3.58\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $1.12\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $2.85\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。产沙中单位面积水解氮输出量平均值为 $0.41\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $7.17\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $0.89\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $0.23\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$; 速效磷平均值为 $0.04\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $1.14\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $0.03\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $0.02\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。污染物单位面积输出量受各地类产流量影响较大, 产流中污染物总无机氮输出量和总磷输出量与产流的 Pearson 相关系数分别为 0.938、0.983。

4) 产流中输出的污染物大于产沙污染物的输

出量, 尖山河小流域农业非点源污染控制应以控制水体污染物为主, 各地类单位面积污染物输出量受产流量影响较大, 山地农业非点源污染控制应重点减少坡耕地产流量。

责任作者简介: 王克勤 (1964—), 男, 教授, 主要从事水土保持与防治和非点源污染控制的工作和研究. E-mail: kqwang@swfc.edu.cn

参考文献 (References):

Athonditis G, Tsirtsis G, Angelidis M O, *et al*. 2000 Quantification of the effects of nonpoint nutrient sources to coastal marine eutrophication: application to a semi-enclosed gulf in the Mediterranean Sea [J]. *Ecological Modelling* 129 (2): 209—227

仓恒瑾, 许炼峰, 李志安, 等. 2005 雷州半岛旱地红壤非点源氮、磷淋溶损失模拟研究 [J]. *生态环境*, 14 (5): 715—718

Cang H J, Xu L F, Li Z A, *et al*. 2005. The leaching of non-point source N and P from latosol in dry land of Leizhou peninsula [J]. *Ecology and Environment* 14 (5): 715—718 (in Chinese)

陈欣, 王兆骞, 杨武德, 等. 2000. 红壤小流域坡地不同利用方式对土壤磷素流失的影响 [J]. *生态学报*, 20 (3): 374—377

Chen X, Wang Z Q, Yang W D, *et al*. Effects of sloping land use patterns on phosphorus loss in a micro-watershed of red soil area Southern China [J]. *Acta Ecologica Sinica* 20 (3): 374—377 (in Chinese)

程红光, 岳勇, 杨胜天, 等. 2006a 黄河流域非点源污染负荷估算与分析 [J]. *环境科学学报*, 26 (3): 384—391

Cheng H G, Yue Y, Yang T S, *et al*. 2006a An estimation and evaluation of non-point source (NPS) pollution in the Yellow River Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 26 (3): 384—391 (in Chinese)

程红光, 郝芳华, 任希岩, 等. 2006b 不同降雨条件下非点源污染氮负荷入河系数研究 [J]. *环境科学学报*, 26 (3): 392—397

Cheng H G, Hao F H, Ren X Y, *et al*. 2006b The study of the rate loss of nitrogenous non-point source pollution loads in different precipitation levels [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 26 (3): 392—397 (in Chinese)

Eghball B, Gilley J E, Kramer L A, *et al*. 2000. Narrow grass hedge effects on phosphorus and nitrogen in runoff following manure and fertilizer application [J]. *Journal of Soil and Water Conservation* 55 (2): 172—176

Flanagan D C, Foster G R. 1989 Storm parent effect on nitrogen and phosphorus losses in surface runoff [J]. *Trans ASAE*, 32: 535—544

Francos A, Bilogio G, Galbati L, *et al*. 2001 Hydrological and water quality modeling in a medium sized coastal basin [J]. *Phys Chem Earth* 26 (1): 47—52

郭红岩, 王晓蓉, 朱建国. 2004. 太湖一级保护区非点源磷污染的定量化研究 [J]. *应用生态学报*, 15 (1): 136—140

Guo H Y, Wang X R, Zhu J G. 2004 Quantification of non-point

- sources phosphorus pollution in key protection area of Taihu Lake [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 15(1): 136—140 (in Chinese)
- 郝芳华, 杨胜天, 程红光, 等. 2006 大尺度区域非点源污染负荷计算方法 [J]. 环境科学学报, 26(3): 375—383
- Hao FH, Yang ST, Cheng HG, *et al*. 2006 A method for estimation of non-point source pollution load in the large-scale basins of China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 26(3): 375—383 (in Chinese)
- Karwar RS, Baker JL, Johnson HP, *et al*. 1980. Nitrate movement with zero-order denitrification in a soil profile [J]. Soil Science Society of America Journal, 44: 898—902
- Lal R. 1990. Research and development priorities in soil degradation [J]. Advance in Soil Science, 3(2): 331—336
- 梁涛, 王红萍, 张秀梅, 等. 2005 官厅水库周边不同土地利用方式下氮、磷非点源污染模拟研究 [J]. 环境科学学报, 25(4): 483—490
- Liang T, Wang HP, Zhang XM. 2005 Simulation study of non-point source pollution under different land use in Guanting Reservoir watershed [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 25(4): 483—490 (in Chinese)
- 刘阳, 吴钢, 高正文. 2008 云南省抚仙湖和杞麓湖流域土地利用 [J]. 生态学杂志, 27(3): 447—453
- Liu Y, Wu G, Gao ZW. 2008 Impacts of land-use change in Fuxian and Qilu basins of Yunnan Province on lake water quality [J]. Chinese Journal of Ecology, 27(3): 447—453 (in Chinese)
- 龙天渝, 梁常德, 李继承, 等. 2008 基于 SIURP 模型和输出系数法的三峡库区非点源氮磷负荷预测 [J]. 环境科学学报, 28(3): 574—581
- Long TY, Liang CD, Li JC, *et al*. 2008 Forecasting the pollution load of non-point sources imported to the Three Gorges Reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 28(3): 574—581 (in Chinese)
- McGrath A, Kemsith C, Henry L, *et al*. 2001. Effects of land-use change on soil nutrient dynamics in Amazonia [J]. Ecosystems, 4: 625—645
- Nair VD, Gaetz DA, Portier KM. 1995. Forms of phosphorus in soil profiles from dairies of south Florida [J]. Soil Sci Soc Am J, 59: 1244—1249
- Shapley AN. 1985 Depth of surface soil runoff interaction as affected by rain-fall [J]. Soil Sci Soc Am J, 49: 1010—1015
- 王雪蕾, 杨胜天, 智泓, 等. 2007 官厅水库库滨带非点源污染控制效应的遥感分析 [J]. 环境科学学报, 27(2): 304—312
- Wang XL, Yang ST, Zhi H, *et al*. 2007 Employing remote sensing to analyze non-point source pollution problems in riparian buffer strips of guanting reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 27(2): 304—312 (in Chinese)
- 王震洪, 吴学灿, 李英南. 2006 滇池流域荒地植被恢复工程控制面源污染生态机理 [J]. 环境科学, 27(1): 37—42
- Wang ZH, Wu XC, Li YN. 2006 Ecological mechanisms of the effects of vegetation restoration on the controls of non-point source pollution on Barren Tableland in Dianchi watershed of China [J]. Environmental Science, 27(1): 37—42 (in Chinese)
- 谢红梅, 朱波. 2003 农田非点源氮污染研究进展 [J]. 生态环境, 12(3): 349—352
- Xie HM, Zhu B. 2003 Research progress on non-point source pollution of nitrogen in agro-ecosystem [J]. Ecology and Environment, 12(3): 349—352 (in Chinese)
- 晏维金, 亢宇, 章申, 等. 2000 磷在土壤中的解吸动力学 [J]. 中国环境科学, 20(2): 97—101
- Yan WJ, Kang Y, Zhang S, *et al*. 2000 The desorption kinetics of phosphorus from calcareous soil in China [J]. China Environmental Science, 20(2): 97—101 (in Chinese)
- 于涛, 孟伟, Edwin Ongley, 等. 2008 我国非点源负荷研究中的问题探讨 [J]. 环境科学学报, 28(3): 401—407
- Yu T, Meng W, Edwin Ongley, *et al*. 2008 Problems and recommendations for non-point source pollution identification in China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 28(3): 401—407 (in Chinese)
- 岳勇, 程红光, 杨胜天, 等. 2007 松花江流域非点源污染负荷估算与评价 [J]. 地理科学, 27(2): 231—236
- Yue Y, Cheng HG, Yang ST, *et al*. 2007 Integrated Assessment of Non-point Source Pollution in Songhuajiang River Basin [J]. Scientia Geographica Sinica, 27(2): 231—236 (in Chinese)