

摘要：通过在天然次生林、人工林、农地和灌草丛四种不同土地利用类型径流场设置径流小区，在自然降雨下测定径流及泥沙中非点源污染物地表输出量，得出不同土地利用类型径流小区非点源污染物地表输出规律差异。结合径流量和泥沙量及降雨量数据的观测值，找出此流域的最佳土地利用方式，为此流域的生态恢复工作提供基础资料。研究结果表明：

(1) 2006年农地径流总产流量最大，是人工林的1.60倍，分别是次生林和灌草丛的12.45和5.52倍；而从产沙量来看，农地的产沙量也远大于其余几种土地利用类型，农地总产沙量是人工林的8.41倍，是次生林的53.06倍，灌草丛的41.90倍。2007年农地径流场产生径流318.16mm，农地产流量分别是人工林、灌草丛、次生林的5.32倍、24.76倍和19.66倍；农地的土壤侵蚀量为5156.45 t/km²，天然次生林和灌草丛分别比农地减少土壤侵蚀量99.08%和99.28%，比人工林减少土壤侵蚀量52.46%和62.50%。

(2) 总体来看，6月初期径流中全磷输出浓度表现为农地较大，其次为次生林和灌草丛，人工林较小，6月末期、7月径流样则表现为灌草丛最大，其次是次生林和农地，人工林最小。8、9月采集的径流样中则是农地和灌草丛全磷的输出浓度较大，次生林和人工林的输出浓度较小。

6月农地径流全氮浓度最大，其次是灌草丛和次生林，人工林的输出浓度最低。7月、8月和9月径流全氮的浓度为次生林和灌草丛较高，而在人工林和农地中的浓度较低。

氨氮输出浓度为农地和人工林较高，次生林和灌草丛较小。氨氮浓度和植被的关系基本正相关，植被的覆盖度越大，氨氮随径流流失浓度越小。

径流中COD（化学需氧量）输出浓度大体上表现为次生林和人工林较大，灌草丛和农地的COD的输出浓度较小。

(3) 径流中全氮、全磷和氨氮输出量为农地最大，其变化幅度也是最大的，其次是人工林，灌草丛和次生林输出量和变化幅度都较小。2006年COD输出量的大致规律为农地>人工林>灌草丛>次生林。2007年COD输出量的大致规律为农地>人工林>次生林>灌草丛。

(4) 2006年不同土地利用类型侵蚀泥沙中全氮和全磷的输出量依次为：农地>人

工林>灌草丛>次生林,农地径流小区全氮输出量是次生林的 32.4 倍,农地全磷输出量是次生林的 34 倍;速效氮和速效磷则为:农地>人工林>次生林>灌草丛,农地速效氮输出量是灌草丛的 40 倍,农地速效磷输出量是灌草丛的 50.5 倍。2007 年泥沙中全氮、全磷、速效氮和速效磷输出量都依次为农地>人工林>次生林>灌草丛,农地泥沙全氮输出量是灌草丛的 71.4 倍,农地速效氮输出量是灌草丛的 76.9 倍,农地全磷输出量是灌草丛的 66.7 倍,农地速效磷输出量是灌草丛的 5337.5 倍;而灌草丛和次生林全磷的输出量相差不大,次生林输出量为灌草丛的 1.33 倍。

(5) 径流泥沙对养分有富集特性,全氮的富集率为灌草丛>农地>人工林>次生林,速效氮为次生林>灌草丛>人工林>农地;全磷富集率为次生林>农地>灌草丛>人工林,速效磷为次生林>人工林>灌草丛>农地;速效钾的富集率为灌草丛>次生林>人工林>农地。

(6) 表层土壤中全氮含量与径流及泥沙中氮的输出量呈负相关关系,全氮含量与径流中氨氮输出量的相关系数为 0.66,而与泥沙中全氮、速效氮输出的相关系数都大于 0.95。表层土壤中速效氮含量与径流中氨氮输出量的相关系数为 0.37,因此表层土壤中的氮随径流流失的量大于泥沙中的量。表层土壤中的磷与径流及泥沙中的磷输出量正相关,表土中全磷与径流中全磷的相关系数为 0.7,而与泥沙中磷的相关系数皆大于 0.99,表层土壤养分与侵蚀泥沙中非点源污染物输出的相关性大于与径流水中的,说明侵蚀泥沙引起的非点源污染更大。相对于氮而言,表层土壤中的磷更易于随径流流失,磷的输出以泥沙结合态为主,特别是速效磷。

(7) 通过产流量、产沙量与径流及泥沙中全氮全磷输出量相关分析得到:产流量和产沙量显著正相关,径流中全氮输出量与产流量的相关系数大于全磷的,说明径流中带走的全氮量更大;泥沙中全氮全磷的输出量与产沙量的相关系数远大于与径流中的全氮全磷的相关系数,而与全磷的相关系数达到 1.000。

关键词: 非点源污染; 输出; 土地利用类型; 尖山河流域

Abstract: Through observation of non-point sources pollution output regularities in small watershed in jianshan river, Chengjiang, Yuxi city. This study goal to obtained non-point source pollutants on different land use patterns through the runoff plots observation, thus discovers the best land utilization way in this watershed, provide basic data for ecology restoration in this watershed. The result showed that:

(1) Total amount of runoff in 2006 was 1.60 times of planted forest, 12.45 times of secondary forest, and 5.52 times of shrub-grassland. Sediment production at farmland was bigger than other lands use pattern, it was respectively 8.41, 53.06, times of planted forests, natural secondary forests, and 41.90 times of shrub-grassland.

In 2007, total amount of runoff at farmland was 318.16mm, was respectively 5.32 times, 24.76 times and 19.66 times of planted forest, shrub-grassed and secondary forest; The soil erosion quantity at farmland was 5156.45 t/km², compared to the farmland, the secondary forest and shrub-grassland separately reduced soil erosion quantity 99.08% and 99.28%; Compared to the planted forest, the secondary forest and shrub-grassland reduced soil erosion quantity 52.46% and 62.50%.

(2) On the whole view, the density of total phosphorus in shrub-grassland in the beginning of june was higher than secondary forest and shrub-grassland, planted forest was the smallest. At the end of june and in july, total nitrogen density output were followed as shrub-grassland, farmland and the secondary, planted forest was the smallest one. Total nitrogen density output were bigger at farmland and shrub-grassland, and smaller at the secondary and planted forest in august and september.

Total nitrogen density output in runoff in june at the farmland was the biggest one, followed as shrub-grassland and the secondary forest, and planted forest was the smallest one. In july, august and september, total nitrogen density output were bigger at the secondary and shrub-grassland, and smaller at farmland and planted forest.

The ammonia nitrogen density at farmland and planted forest were bigger than at shrub-grassland and the secondary forest, the higher the vegetation coverage, the smaller

density of ammonia nitrogen loss in runoff. COD output at the secondary forest and planted forest were bigger than at farmland and shrub-grassland.

(3) The total nitrogen, total phosphorus and ammonia nitrogen output in the runoff in 2006 and 2007 in the farmland was the biggest, and followed the planted forest, shrub-grassland and secondary forest was the smaller. In 2006 COD output was followed as farmland, planted forest, shrub-grassland and the secondary forest, in 2007 COD output was followed as farmland, planted forest, shrub-grassland and the secondary forest.

(4) The total nitrogen and total phosphorus output in the eroded sediment in 2006 in different lands use pattern were orderly followed as farmland, planted forest, shrub-grassland and secondary forest. Phosphorus output in farmland was 32.4 times of shrub-grassland, total nitrogen output in farmland was 34 times of shrub-grassland; The available nitrogen and phosphorus were followed as farmland, planted forest, secondary forest, shrub-grassland. Available phosphorus output in farmland was 50.5 times of shrub-grassland and available nitrogen output in farmland was 40 times of shrub-grassland.

Total nitrogen, total phosphorus, available nitrogen and available phosphorus output in the eroded sediment in 2007 in the different lands use pattern were orderly followed as farmland, planted forest, secondary forest, shrub-grassland. Total nitrogen output in farmland was 71.4 times of shrub-grassland, available nitrogen in farmland was 76.9 times of shrub-grassland; phosphorus output in farmland was 66.7 times of shrub-grassland, available phosphorus output in farmland was 5337.5 times of shrub-grassland; But the difference of total phosphorus output between shrub-grassland and secondary forest was not very big, output in secondary forest was 1.33 times of shrub-grassland.

(5) The eroded sediment was capable to enrich nutrient, total nitrogen enrichment ratios in different lands use pattern orderly followed as shrub-grassland, farmland, planted forest and secondary forest, available nitrogen enrichment ratios followed as

secondary forest, shrub-grassland, planted forest and farmland; Total phosphorus enrichment ratios followed as secondary forest, farmland, shrub-grassland and planted forest, available phosphorus followed as secondary forest, planted forest, shrub-grassland and farmland; Available potassium enrichment ratios followed as shrub-grassland, the secondary forest, planted forest, farmland.

(6) Total nitrogen in surface soil has the inverse correlation relations with the nitrogen output in the runoff and the sediment. Correlation coefficient of total nitrogen content in soil with ammonia nitrogen in runoff was 0.66, but both correlation coefficient of total nitrogen and available nitrogen output in the sediment with runoff were bigger than 0.95. Correlation coefficient between available nitrogen in surface soil with the ammonia nitrogen was 0.37, so nitrogen loss with runoff was bigger than sediment. Phosphorus in the surface soil with phosphorus output in the runoff and the sediment was being related, total phosphorus correlation coefficient between the surface soil and the runoff was 0.7, but the phosphorus correlation coefficient is bigger than 0.99 with the sediment, Compared with nitrogen, the surface soil phosphorus was more easily to be lost with the runoff activity, and the phosphorous output was mainly connected with sediment, particularly for the available phosphorus. The relevance of surface soil nutrient with non-point source pollution output in sediment were bigger than in the runoff, therefore erosion sediment caused bigger non-point source pollution.

(7) Through correlation of the amount of runoff and sediment with total nitrogen and phosphors output in runoff and in sediment obtains: The relevance was extremely remarkable between runoff amount and sediment amount. Correlation coefficient of total nitrogen output in the runoff with runoff amount was bigger than phosphorus output in the runoff, so total nitrogen loss with the runoff was bigger than sediment; Correlation coefficient of total nitrogen and total phosphorus output with the sediment was bigger than with the runoff, total phosphorus's correlation coefficient achieves 1.000 with the sediment.

Keywords: Non-point Source Pollution, Output, Lands Use Pattern, Jianshan watershed

声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得西南林学院或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料，与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签名： 宋泽芳 日期： 2008.5.12

关于论文使用授权的说明

本人同意：西南林学院有权保留论文的复印件，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文；提交论文一年后，允许论文被查阅和借阅，学校可以公布论文的全部或部分内容。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

签名： 宋泽芳 导师签名： 王泽平 日期： 2008.5.12

1 前言

1.1 研究的目的、意义及内容

珠江上游地处我国西南部，土地总面积 24.5 万 km²，总人口 3822 万人，涉及云南、贵州和广西三省（区）的 19 个地（市、州），106 个县（市、区）。据 2002 年全国第二次土壤侵蚀遥感调查，该地区现有水土流失面积 5.0 万 km²，年土壤侵蚀量 13061 万 t，年土壤侵蚀模数 2604t/km²。珠江上游地区的水土流失主要发生在坡耕地，其次是荒山荒坡和疏、残、幼林地。该地区河谷深切、地形起伏大、土质疏松、土层浅薄、植被稀少、暴雨集中、自然条件差，同时又是苗、布依、彝、回等少数民族聚居的贫困落后地区，交通不便，经济不发达，群众的温饱问题还没有得到彻底解决，是珠江流域乃至全国水土流失最为严重、治理难度最大、群众生活最贫困、需要治理最迫切的地区之一^[1, 2]。

土地利用/覆被变化 (Land Use/Cover Change, LUCC) 对区域生态环境的影响是目前土地利用变化研究的热点之一。研究 LUCC 对流域尺度上的元素输移过程及其通量的影响并定量评估其生态环境效应，提出与国家可持续发展目标相协调的土地利用调控策略具有重要意义^[3]，而其影响最主要表现在不同土地利用方式下营养盐随地表径流的迁移^[4]。LUCC 对元素（尤其是营养元素）输移影响的最主要途径是非点源污染^[5]。

澄江县位于抚仙湖径流区内，农业和磷化工业比较发达。据监测统计结果显示，抚仙湖的主要污染来自地表径流和生活污水构成的面源污染^[6]。山地开垦和磷矿开采引起森林植被的严重破坏和大量水土流失，径流区内林地覆盖率仅为 27.1%，荒山、荒地和坡耕地面积占 55%，水土流失中度侵蚀面积达 64.9km²，每年流失入湖的泥沙约 346000t。加上滨湖平坝区高强度的农作和大量使用化肥农药，以及居民生活污水和垃圾污染，径流区每年输入抚仙湖的氮、磷污染负荷分别达到 338.3t 和 43.7t，这是引起抚仙湖富营养化加速发展的根本原因^[7]。水是人类生存的根本条件，但是目前我国的水资源正面临着严重缺乏的危机，因此保护水资源显得越来越重要，当前有许多研究都是针对部分区域的面源污染的治理工作开展研究^[8,9,10,11]。但对于此流域不同土地利用方式与非点源污染的关系以及养分在径流中的迁移研

究较少。

尖山河是抚仙湖的一条入湖河流，入湖河流的外源污染对受纳湖泊的水质有直接影响^[12]。研究表明抚仙湖的主要污染来自地表径流和生活污水构成的面源污染，其总氮、总磷分别占全流域陆源总氮、总磷污染负荷的 99%和 98%，而且主要经北岸和南岸河流输入湖泊^[13]。

小流域往往是一些河流的源头，小流域的水土流失不仅会产生河道淤塞，而且径流和泥沙携带的养分元素往往造成河流、湖泊富营养化、水质退化等^[14]，因此控制小流域面源污染输出具有重要意义。目前对于小流域坡地非点源污染物和矿质元素的流失规律^[15, 16, 17, 18]、流失形态及不同的农作水保措施^[19, 20]对控制小流域面源污染等方面做了一些研究。但以小流域为整体单元，从合理利用坡地资源出发研究不同土地利用类型面源污染输出特征的研究报道较少。从流域尺度研究氮、磷随地表径流的流失是国内外研究的热点。目前用人工模拟方法研究较多，而在自然条件下，通过长期的观测得出小流域不同土地利用类型面源污染输出规律的研究较少^[21, 22]。本研究通过观测不同土地类型自然降雨条件下，地表径流、泥沙非点源污染物的输出规律，找出此流域的最佳土地利用方式，为此流域的生态恢复工作提供基础资料。

1.2 国内外研究现状与发展趋势

1.2.1 国内外研究现状

非点源污染也称面源污染，是指溶解和固体的污染物从非特定地点，在降水或融雪的冲刷作用下，通过径流过程而汇入受纳水体（包括河流、湖泊、水库和海湾等）并引起有机污染、水体富营养化或有毒有害等其它形式的污染^[23]。非点源是影响地表水体水质的主要污染源，而水土流失是其中的主要形式之一^[24,25]。降雨对地表的击溅及冲刷产生的水力侵蚀，造成了结合在土壤颗粒和土壤团聚体中的氮磷的流失。在暴雨径流条件下，氮磷等养分随地表径流流出汇入各种水体，引起水体的富营养化和污染，成为水体富营养化的限制因子^[26]。随地表径流流失的氮磷包括径流水中的溶解态和侵蚀泥沙携带的颗粒态两部分。

1.2.1.1 植被覆盖与产流产沙及非点源污染输出

有关植被与径流泥沙水文响应的研究起步较早。早在 1877 年至 1895 年德国土壤学家 Wollny 设置第一个土壤侵蚀小区试验观测植被和地面覆盖物对防止降雨侵蚀和土壤结构恶化的影响^[27]；1909 年美国设置第一个对比实验流域探讨森林覆被变化对流域产水量的影响^[28,29]。Imeson^[30]曾对植被与径流泥沙的相关研究进行系统分类，认为第 1 类研究主要揭示微尺度生物过程对可蚀性等土壤特性的影响，如土壤团聚性、土壤入渗性等^[31]；第 2 类研究主要集中探讨植被及枯落物对地表的保护作用，探讨植被如何减缓径流流速、减少雨滴击溅等^[32]；第 3 类研究主要探讨干旱半干旱地区空间非连续的植被分布格局与径流、泥沙源汇区的相关关系^[33,34]。

Lang 和 Mccaffrey 在澳大利亚的实验资料表明要使土壤流失与土壤侵蚀相平衡，植被覆盖应在 50%—75%。植被分布格局变化多源于放牧、弃耕等人为干扰，植被空间分布格局影响径流过程的连续性，而径流、泥沙、污染物等汇集受植被空间分布格局影响，因此，理解植被空间分布格局对于生态系统健康及山坡水文学的研究具有重要意义^[35-37]。

国内的径流小区主要用于农耕地径流及土壤侵蚀研究，用于林地的研究较少^[38]。蔡崇法^[39]在对紫色土研究时就指出养分流失有随植被覆盖度增加而减少的趋势。张兴昌^[40, 41]利用模拟降雨对小流域氮素流失进行研究时得出，植被覆盖度增加时，有机质、全氮流失量减少，而土壤铵态氮和硝态氮均增加，说明植被覆盖在有效地减少土壤全氮流失的同时却增加了矿质氮的流失。彭琳等研究得出地面植被覆盖度大的牧草地土壤养分流失量较少，覆盖度小的作物地土壤养分流失量较牧草地增加 1 倍，裸地增加到 11 倍^[42]。通过监测分析降雨后的径流样得出植被覆盖可以明显减少径流量和泥沙量，从而有效地控制农田氮磷污染物的流失^[43]。

1.2.1.2 降雨对非点源污染物输出的影响

降雨是响径流和侵蚀的主要动力因素之一^[44,45]，降雨量是影响非点源污染输出的一个重要因素，随着降雨量的增大，雨水和径流对坡地的冲刷作用明显加强，氮等营养元素的流失量也相应显著增加^[46]。程红光等的研究得出在降水小于 400 情况下，基本不产生污染物负荷；在降水大于 400 情况下，吸附态氮和溶解态氮入河系数随着降水的增加而增加，这是由于地表径流的增加，对颗粒物的输移能力增强，从而造成吸附态氮的入河系数增加比溶解态氮的入河系数明显^[47]。

地面坡度、降雨时间、土壤性质、地表状况、土地利用方式等直接影响到坡面径流,构成影响坡面养分流失的主要因素。降雨是土壤侵蚀的动力,雨水是可溶性养分的溶剂,当雨水汇集成径流后,它又是携带其它形态养分的介质^[48],所以降雨强度是坡地养分流失的主要影响因素之一。一些研究得出降雨强度较降雨历时对径流中 TN 含量上升影响更为明显,即中、大雨径流中 TN 含量远高于小雨^[49]。窦培谦等以北京密云县高岭乡石匣实验小区为研究对象,通过监测分析降雨后的径流样研究实验小区氮磷流失特征也得出了这个结论^[50]。

1.2.1.3 土地利用方式对非点源污染物输出的影响

土地利用方式是影响面源污染的关键因素,综合反映人类活动对自然环境作用的土地利用方式对土壤、植被、径流、及化学物质输入、输出等因素具有影响,因而导致不同土地利用类型所产生的面源污染差异巨大^[51]。

土地利用结构对营养盐的输出具有重要影响,合理的土地利用可以改善土壤对外界环境变化的抵抗力,不合理的土地利用会导致土壤质量下降,增加土壤侵蚀。Sanchez 等人在委内瑞拉安第斯山地区用径流小区法选择 4 种植被类型对土壤侵蚀进行了定量研究,结果表明不同植被类型及管理措施对土壤侵蚀程度不同^[52]。

我国学者也进行了不少径流小区的试验小区的试验工作,研究自然降雨条件下不同土地利用方式的养分输出^[53]。在其他条件相似时,随着研究单元内林地和基水地的增加,非点源污染减轻,而随着耕地或城镇、农村居民点比例的升高,非点源污染有逐渐增大的趋势^[54]。农地地表径流是原森林小区的 5-30 倍,实施水土保持措施小区比未实施的大大减小了地表径流速率^[55]。

不同土地利用类型氮磷的输出不同^[56,57],随着林地面积的减少和耕地面积的增加,流域营养盐的输出强度增大^[58]。流域径流水中销态氮含量是主要的,约占氮素总量的 75%^[59],由此可见,氮的输出以 NO_3^- -N 为主,在单一土地利用结构中,不同地表径流中的溶解态氮浓度的差别较大。村庄最高,其次是坡耕地、林地、荒草坡^[60]。国外已有研究表明径流水中氮的含量 94%与农地、林地的面积有关,径流水中氮素含量与林地面积比例呈显著的线性相关。由此表明,林地草地对氮污染物有一定的截留作用。

不同利用方式下农田土壤水土界面磷的迁移能力有较大的差别^[61,62],土地利用对磷的形态也有一定的影响,一般来说草地和林地径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%。南方红壤小流域的研究表明: 磷素的流失量以竹园为最高, 其次是旱地和新建果园, 再次是幼龄茶园, 林地和荒草地磷素的流失较小^[63]。因此, 土地利用对磷素流失的影响除了与土壤侵蚀量密切相关外, 磷肥的施用量和土壤磷的含量是主要的影响因素。

1.2.1.4 肥料使用与非点源污染物输出

土壤对氮肥有一个最佳吸收量, 当使用量超过最大吸收量时就会在土壤中富集形成污染。研究发现, 土壤中氮素的利用效率与使用的深度和方式具有密切关系^[64,65]。

Withers 等^[66]对三重过磷酸盐, 液态牛粪, 液态还原消化污泥或脱水污泥处理下的土壤磷的释放研究表明, 施加液态还原消化污泥和脱水污泥的土壤磷的释放最低, 三重过磷酸盐的释放最高。Siddique 等^[67]的研究也表明, 施加肥料的土壤磷的释放比施加消化污泥的土壤低。不但肥料的种类会对磷的流失产生影响, 施肥方式也会对磷的流失产生影响, 李裕元通过实验证明, P 肥在土壤中的混匀程度越高, 则越容易导致生物有效 P(BAP)的流失^[68]。

1.2.1.5 侵蚀泥沙与非点源污染物输出关系

侵蚀泥沙是养分流失的主要载体, 氮磷流失的60%以上是通过泥沙带走的, 对我国黄土高原的研究表明, 98%的养分流失来自于泥沙^[69, 70]。部分学者在对红壤进行研究时同样指出了坡面养分以泥沙结合态流失为主, 磷、钾的水溶态是养分流失的重要途径^[71], 氮、磷、钾在流失泥沙中有明显的养分富集现象^[72]。不同农作方式的农田地表径流泥沙中污染物含量则表现为坡耕地最低, 这可能与坡耕地地表径流冲刷剧烈、泥沙流失量大, 大量粗颗粒混入有关^[73]。

王晓龙等研究得出泥沙养分含量普遍高于原表土养分含量, 而且不同的土地利用方式对养分的富集率也不同。总体来看, 橘园和板栗园养分富集率较高, 花生地和水稻田养分富集率则较低^[74]。泥沙N、P的富集系数与泥沙浓度有一定的关联, 泥沙浓度高, N富集系数低, P富集系数高, 但其原因还有待于进一步探讨^[75]。

1.2.2 非点源污染研究趋势

数十年来, 世界各国对非点源污染的产生和输出机理方面取得了一定的收获, 在探讨其各种危害的同时, 提出了不少切实可行的控制方法。但从总体看, 由于非

点源污染本身的复杂特性,使非点源污染的研究和控制充满了各种困难,需进一步深入的努力。

1.2.2.1 多学科联合,完善农业非点源污染的研究理论

农业非点源污染是一个复杂的综合过程,涉及水文、土壤、环境、气象、地学等多学科和专业。所以对其研究必须多学科联合攻关,才能富有成效。

1.2.2.2 加强模型化研究,促进农业非点源污染的量化

随着非点源污染研究理论的发展,今后的非点源污染模型,应建立以污染物的产生迁移转化机理为基础,兼顾不同的时空尺度,便于推广应用的非点源污染模型,促进非点源污染的量化工作。

1.2.2.3 各种新技术新方法的运用,加强对农业非点源污染的监测

非点源污染的发生具有间歇性,随机性,不确定性等特征,且空间差异性大,所以对其监测非常困难。GIS、GPS 和 RS 具有对空间地理数据进行采集处理和分析的高强度综合能力,它们与非点源污染的常规监测的结合,将会大大提高对非点源污染的监测和控制能力。

1.2.2.4 非点源污染物的迁移转化研究更趋深入

受目前非点源污染物迁移转化研究深度的影响,国内外考虑污染物迁移转化的非点源污染模型的预测能力普遍偏低,在传输途径上进行的非点源污染控制效果也不是很理想。为给建模、控制提供更加坚实的理论基础,非点源污染物的迁移转化机理研究将更加深入。

1.2.2.5 生物技术、总量控制将在流域非点源污染控制和治理中发挥重要的作用

地表径流的输移以流域进行,从流域角度探讨流域开发和水环境质量的关系,追踪污染物来源,实施管理措施,建立流域土地、水域最优开发和管理模式具有重要的意义。利用生物杂交、生物遗传技术培养高产、抗病、固氮作物,减少化肥、农药的施用;培养具有特殊降解、吸收能力的植物、细菌,吸收大气沉降污染物质、过滤地表径流、净化污水;利用生物操纵技术进行水体富营养化、酸化生态修复等。生物技术将在流域非点源污染的控制和治理中发挥重要的作用。有机物的总量控制并未有效地控制营养物和泥沙对水环境的威胁。特别是泥沙,作为非点源污染物的主要载体,更应该加以严格控制。从流域尺度出发,开展 BOD、营养物、泥沙总量控制将成为非点源污染控制研究的一个重要突破点^[76]。

1.3 该研究的创新点

该研究项目地属珠江上游南北盘江石灰岩地区水土保持综合治理试点工程的第一批实施项目。在天然降雨条件下,对流域四种不同土地利用类型坡面径流及泥沙中非点源污染物地表输出量进行定量研究,通过非点源污染物输出量与各不同土地类型之间的关系,探索出该区域水土保持综合治理的优势措施。

2 研究区概况

澄江县属低纬度高原气候,多年平均降雨量 1050mm,降雨主要集中在雨季(5月下旬~10月下旬),占年平均降雨量的 75%;5年一遇 24 小时最大降雨量为 100mm,10 年一遇 24 小时最大降雨量为 115mm;年平均蒸发量为 1100mm。全年日照总时数 2172.30h,大于或等于 10℃的活动积温 3400℃,年均温 14.20℃,全年最高气温出现在七月为 30℃,最低气温在一月为 0℃,年无霜期为 265d。

尖山河小流域地处澄江县西南部,距离县城 16km,北接龙街镇广龙村委会,南接禄充管委会,东临抚仙湖,西接晋宁县,流域总面积 18.83km²,位于北纬 24°32'00"~24°37'38",东经 102°47'21"~102°52'02"之间;海拔在 1722~2347.40m 之间,最高海拔在流域北部为 2347.40m,最低海拔在抚仙湖湖边为 1722m,相对高差 625.40m。

小流域内主要河道为尖山河,河道长 8.50km,河床平均比降 $J=0.036$ 。河流泥沙为雨后冲刷形成,径流的产生主要集中在雨季,雨季径流量占全年总径流量的 75%,旱季径流量占全年总径流量的 25%。

尖山河小流域内地层主要为中侏罗系地层,地层岩石有粉砂岩、泥岩夹泥灰岩、含砾砂岩、砂岩、粉砂岩、泥岩、砂质泥岩、砂岩组成;其次是二迭系玄武岩组,地层岩石主要由玄武岩组成。流域整个西部、北部、南部为中侏罗系地层,占流域总面积的 85%。东部尖山村委会附近为二迭系地层,占流域面积的 15%。其大部分地区属澄江中山和低山高原地带。据实地调查,流域内山高坡陡,河床落差大,岩石风化严重,坡积层厚,且人为开垦的大于 25°的坡耕地较多,水土流失严重。

流域内的土壤主要是紫色土和红壤,紫色土主要分布在尖山大河上游河道顺流左岸方向,占流域面积的 60%以上;红壤分布在尖山大河顺流右岸,其中石灰岩红壤分布在带头村附近、五尺埂至岔河,占流域总面积的 30%;玄武岩红壤分布在流域东部李头村附近,占流域面积的 8%;尖山大河河床两岸均为紫泥田,占流域总面积的 2%。

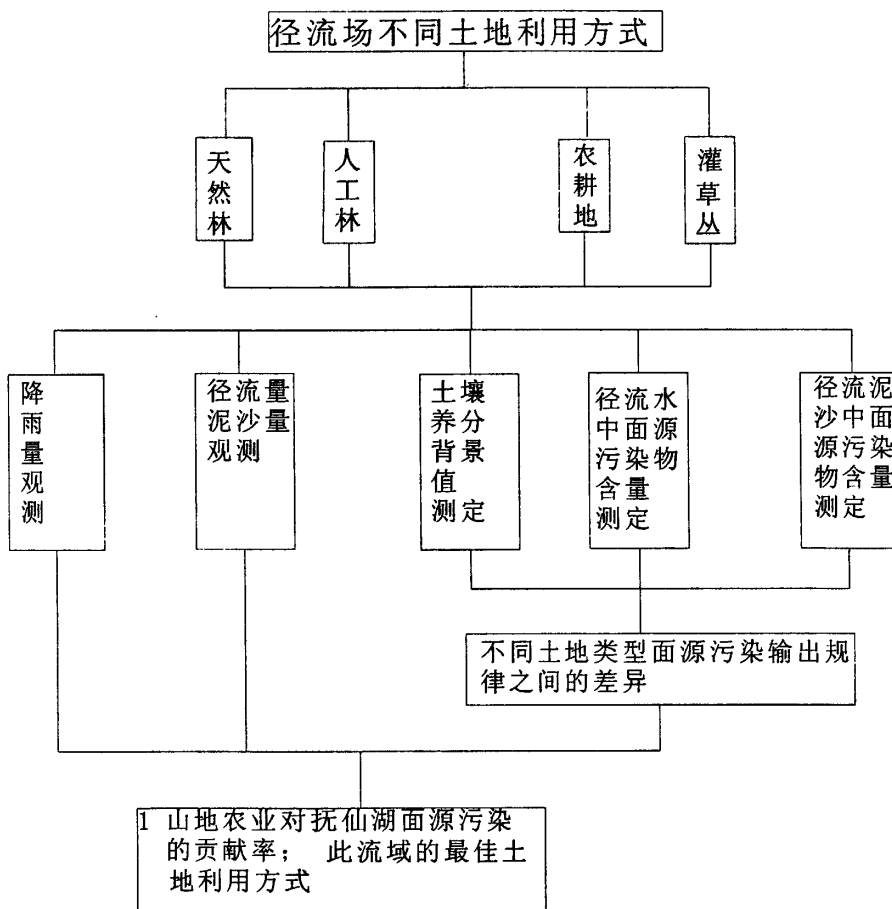
流域内森林覆盖率为 21.4%,林草覆盖率为 47.9%。主要乔木树种有云南松(*Pinus yunnanensis* Franch)、华山松(*Pinus armandii* Franch)、桉树(*Eucalyptus* Labill)、杉树(*Cunninghamia lanceolata* Lamb.)等,灌木树种有水马桑(*Weigela japonica*

Thunb.var.sinica(Rehd)Bailey)、杜鹃(*Rhododendron simsii* Planch), 竹(*Bambusoideae*)等, 草有紫茎泽兰 (*Eupatorium edenophorum* Spreng) 等, 果树主要有板栗(*Castanea mollissima* Bl)、桃树(*Amygdalus persica* L.)、柿子(*Diospydrs kaki* L.f)、李子(*Prunus salicina* Lindl)等。

3 研究技术路线与方法

3.1 研究技术路线

通过在天然次生林、人工林、农地和灌草丛四种不同土地利用类型径流场设置径流小区，在自然降雨下测定径流及泥沙中非点源污染物地表输出量，得出不同土地利用类型径流小区非点源污染物地表输出规律差异。结合径流量和泥沙量及降雨量数据的观测值，找出此流域的最佳土地利用方式，为此流域的生态恢复工作提供基础资料。下图为技术路线图。



3.2 试验地布置

3.2.1 试验地的选取

试验地选在澄江县尖山河小流域，位于北纬 24°32'00"—24°37'38"，东经 102°47'21"—102°52'02"之间，东临抚仙湖，流域总面积 35.42km²。最高海拔为 2347.4m，最低海拔为 1722m。多年平均降雨量为 1050mm，降雨量集中在 5~10 月，占全年的 75%。暴雨基本出现在雨季，常以单点暴雨出现，年平均蒸发量为 900mm。该区属珠江上游南北盘江石灰岩地区水土保持综合治理试点工程的第一批实施项目之一。尖山河小流域主要有天然次生林，人工林，灌草丛，坡耕地和梯田几类地类。森林覆盖率为 21.4%，林草覆盖率为 47.9%。

3.2.2 径流小区的布设

径流小区的选定和设置遵守①在试验区的植被、土壤、坡度及水土流失等应有代表性，使其试验所得的结论具有一定的推广意义；②在天然条件下，布置各种观测设备；③其面积一般满足研究单项水文因素和对比需要这几条原则。

经过踏查，根据不同的土地利用方式共布设四个水平投影面积为 5×20 m²的径流小区，分别建在农地、灌草丛、人工桉树林和云南松天然次生林四种地类上。

在小区四周用水泥砖块围埂，埋入地表下 15cm，地表外露 10cm，径流小区上方挖截水沟，以防客水侵入。在小区的下端分别建了量水建筑物，其中有径流积水池容积 1m³，并配置安装了自记水位计。

在径流小区的汇流槽处采用混凝土和铁板，防止下渗，并采用 1/4 分流法。在小区的围埂外分别留了 0.5m 宽的保护带，并用铁丝圈着，以防人畜进去破坏。（农地除外，农地依然进行日常的耕作）。

径流小区内的主要植物有紫茎泽兰 *Eupatorium adenophorum* Spreng、扭黄茅 *Heteropogon contortus* (L.) Beauv. ex Roem. & Schult、鬼针草 *Bidens pilosa* Linn.、云南松 *Pinus Yunnanensis* Franch、桉树 *Eucalyptus globulus* Labill、旱冬瓜 *Alnus nepalensis* D.Don.等。（径流小区区域特征见表 1）

表 1 径流小区区域特征

Table1 The Area Characteristics of runoff plots

小区名称	坡位	坡度 (°)	坡向	土壤类型	主要植物种	海拔 (m)	盖度 (%)
灌草丛	坡中下部	20.84	南北向	红紫壤	紫茎泽兰、扭黄茅、鬼针草等	1790	95
人工林	坡中下部	18.58	南北向	红紫壤	云南松、桉树、紫茎泽兰等	1788	65
次生林	坡中下部	24.62	东西向	红紫壤	云南松、早冬瓜、紫茎泽兰等	1787	90
农地	坡中下部	18.58	南北向	红紫壤	种植烟草	1773	

3.3 试验数据观测

3.3.1 降雨量测定

在径流小区的附近安置自记雨量计（型号：JDZ-1, 重庆水文仪器厂）一个，采用自记雨量计和雨量筒对 2006、2007 年项目区的降雨量进行观测。

3.3.2 坡面径流、泥沙的观测

每次降雨后立即测出沉沙池的泥水总量，搅匀水池中的泥沙，并取一定体积水样，重复取样 3 次，取样完后放出沉沙池的泥水。所取水样带回称重，经澄清后收集泥沙在固定的烧杯内，测泥沙的比重。根据沉沙池内的泥水总量，泥沙样品比重，得出小区的径流量和泥沙量。

3.4 污染物分析

每次降雨过后取径流样 500ml，4℃保存并于 24h 内测定其中的全氮、全磷、氨氮、COD 等值。

在径流小区周围挖掘土壤剖面取表层 20 cm 土样，带回实验室进行土壤污染物背景值的测定。

取径流小区内沉沙池中的泥沙，自然风干后测定其中的污染物含量。

3.4.1 泥沙和土壤养分的测定

PH: 用电位法测定 (型号: PHS-4C⁺ 酸度计, 成都方舟科技开发公司)

有机质: 重铬酸钾容量法

土壤含水量: 烘箱法测定 (型号: 101 A-1 型恒温干燥箱, 上海市崇明实验仪器厂)

全氮: 凯氏蒸馏法测定

水解氮: 凯氏蒸馏法测定

全磷: 浓硫酸-高氯酸消化, 抗坏血酸还原比色法测定 (分光光度计型号: 721, 上海精密科学仪器有限公司)

速效磷: 根据土壤的 PH, 酸性用盐酸-氟化铵提取剂提取土壤中的速效磷, 然后用氯化亚锡还原比色测定; 中性及石灰性土壤用碳酸氢钠浸提, 钼锑抗混合显色剂还原比色测定 (分光光度计型号: 721, 上海精密科学仪器有限公司)

速效钾: 中性醋酸铵浸提, 火焰光度计测定 (型号: 6400A 型火焰光度计, 山东高密彩虹分析仪器有限公司)

3.4.2 径流养分测定

COD: 水样与 HACH 试剂在 HACH-COD 加热器中加热, HACH2010 测定

全氮: 碱性过硫酸钾消解, 紫外分光光度法测定 (分光光度计型号: 721, 上海精密科学仪器有限公司) GB 11894-89

全磷: 过硫酸钾消解, 抗坏血酸和钼酸铵发色后用分光光度计测定 (分光光度计型号: 721, 上海精密科学仪器有限公司) GB 11893-89

氨氮: 纳氏试剂比色法测定 (分光光度计型号: 721, 上海精密科学仪器有限公司) GB 7479-87

4 结果与分析

4.1 不同地类表土非点源污染物背景值

土壤养分是植物生长发育所必须的物质基础，在自然土壤中，土壤养分主要来源于土壤矿物质和土壤有机质；在耕作土壤中还来源于灌溉水、施肥等。不同利用方式和不同地形的土壤养分状况有不同变化^[77]。

表 2 径流小区表层土壤理化性质

Table2 Physical and chemical properties of surface soil in runoff plots

小区名称	含水率 (%)	PH	有机质 (%)	速效钾 (ppm)	全氮 (g/kg)	速效氮 (mg/kg)	全磷 (g/kg)	速效磷 (mg/kg)
次生林	2.68	5.51	2.08	182.03	0.42	78.55	0.46	9.03
农地	2.93	4.93	1.08	222.04	0.37	68.17	0.94	350.97
人工林	3.13	5.01	1.43	180.52	0.42	57.72	0.77	7.34
灌草丛	3.13	8.16	1.80	120.89	0.44	58.93	13.5	5.66

从表 2 中可以看到，土壤含水率为人工林和灌草丛最大，其次是农地，而次生林最小。农地坡度最小，人工耕种对土壤的翻耕等都增加了土壤的入渗，而次生林由于植被覆盖度最大，在炎热的夏季，林木的蒸腾作用旺盛，所以农地的土壤含水率高于次生林。灌草丛的植被覆盖度最大，草丛根系增加了水分的入渗，所以其含水率大于农地和次生林。人工林植被结构复杂，林木的根系等使土壤结构松散，地表枯枝落叶覆盖也增加了水分入渗，另外，人工林虽然植被覆盖度小于灌草丛和次生林，但是由于其坡度较小，因此其含水量大于次生林和人工林。

土壤有机质含量多随着利用方式和植被覆盖的不同而有差异，侵蚀严重，植被覆盖稀少的自然土壤含量为最低。结果显示灌草丛 PH 最大 (8.16)，大于次生林 (5.51) 和人工林 (5.01)，农地的最小 (4.93)。这是因为次生林和人工林的林木根系所分泌的有机酸对土壤的 PH 值的降低起到了一定的作用，植物落叶及残体的腐殖化过程中释放的腐殖酸、有机酸及酸性阴离子等都使得林地的 PH 低于灌草丛。农地种植烟草，由于烟草中释放的酸性物质较多，因此农地的 PH 值是最小的。

土壤有机质是指土壤中来源于生命的物质。包括土壤微生物和土壤动物及其分

分泌物以及土体中植物残体和植物分泌物和来源于高等植物、土壤中的动物、土壤中的微生物及施用的有机肥。土壤有机质对土壤肥力的作用是土壤养分的主要来源；促进土壤结构形成，改善土壤物理性质；提高土壤的保肥能力和缓冲性能；腐殖质具有生理活性，能促进作物生长发育；腐殖质具有络合作用有助于消除土壤的污染。从表2中可以看到，次生林的有机质含量最高，其次是灌草丛，再次是人工林，农地的有机质含量是最小的。这是因为次生林的植被覆盖度较大，大量的地表覆盖物增加了有机质的含量；灌草丛的植被覆盖度虽然大于次生林，但是由于草本植物的有机残体主要来自植物根系，因此灌草丛的有机质含量小于次生林；人工林由于植被结构简单，地上部分凋落物少，因此其含量相对较小；农地的有机质主要来源于是施肥和植物根茬，由于此地区施肥较少，加上农地种植烟草，烟草本身根系不发达，地上覆盖稀少，因此农地的有机质含量是最小的。

土壤中的全氮含量，表示氮素的供应容量，是土壤中无机态氮和有机态氮的总和，它与有机质含量及氮肥施用量相关。由表中可以看出，几种土地利用类型的土壤全氮含量相差不是很大，次生林、人工林、灌草丛由于植被覆盖度较大，植物改善了土壤结构，使营养物质富集地表，因此全氮含量高于农地。而对于速效氮来说，次生林也是最大的，其次是农地，这是因为农地人工施氮态氮肥所导致的。灌草丛和人工林的速效氮含量低于次生林和农地。

不同土地利用类型全磷含量为灌草丛最大，其次是农地和人工林，次生林的含量最小。而速效磷则是农地最大，其次是次生林和人工林，灌草丛最小。对于速效钾来说，农地的含量最大，其次是次生林和灌草丛，人工林最小。由此可见，次生林和灌草丛的全量养分含量较大，而农地的速效养分较大。

4.2 不同地类产流产沙量

4.2.1 不同地类产流量

土壤表层溶质随地表径流的迁移是一个十分复杂的过程，受到众多因素的影响，但是直接决定因素是化学元素、土体和水三者。其中水是土壤溶质的溶剂和载体，也是溶质随地表迁移的驱动者。它不仅使土壤溶质随径流水迁移，而且使溶质随侵蚀而迁移。因此，水的迁移过程制约和决定着土壤溶质的迁移过程，坡面降雨

一入渗一径流过程，就是土壤溶质溶解、随入渗水和径流水迁移的过程，在降雨过程中，降雨初期的雨滴打击作用使土壤表层溶质与雨水混合，当土壤入渗能力大于雨强时，雨水全部入渗，土壤表层部分溶质随入渗水向下层迁移，而迁移量多少取决于溶质本身的化学性质，如土壤吸附性、水溶解性和流动性等。这样表层土壤溶质含量逐渐减少。随着降雨量增加，土壤表层含水率逐渐增大，土壤入渗能力逐步下降，入渗率等于或小于雨强，地表开始积水，并随之产生地表径流，同时也可能产生土壤侵蚀。

植被的介入改变了降雨的地表水文过程，大大减少了径流量和泥沙量，并且不同植被类型的保水保土效益各不相同。

表 3 不同地类产流量

Table3 Amount of runoff in different lands use pattern

日期 (年/月/日)	降雨量 (mm)	产流量 (cm)			
		农地	人工林	次生林	灌草丛
06/07/09	48.0	28.00	24.00	2.80	4.76
06/07/13	52.4	41.20	20.00	1.56	7.20
06/07/17	15.8	4.00	2.76	0.40	1.52
06/09/06	24.5	2.20	2.00	0.80	0.40
06/09/20	27.6	3.80	1.20	0.80	0.48
07/05/30	11.9	7.2	0.4	0.32	0.24
07/06/10	19.6	17.2	0.8	0.6	0.4
07/06/11	32.4	19.6	3.2	1.2	0.4
07/06/12	25.2	12	1.2	0	0.32
07/06/26	3.5	0.8	0.04	0	0
07/06/27	16.4	9.2	0.8	0.8	0.32
07/06/28	20.0	29	2.8	0.8	0.4
07/07/02	9.0	4.8	0.2	0.04	0.08
07/07/06	14.9	13.2	0.8	0.36	0.32
07/07/13	15.8	8.4	0.4	0.12	0.2
07/07/16	2.4	1.2	0	0	0
07/07/19	50.5	15.2	4	1.68	1.6
07/07/23	4.2	0.8	0	0	0
07/07/26	11.9	2.8	0.8	0.4	0
07/07/28	6.8	0.2	0	0	0
07/07/31	13.8	0.6	1.8	1.2	0.4
07/08/01	3.0	0.4	0	0.8	0.6
07/08/03	47.3	32.6	7.2	1.6	1.8
07/08/04	5.2	1.2	0.4	0	0
07/08/05	0.9	0.2	0	0	0
07/08/12	55.8	54	11.2	2	2.6
07/08/13	16.9	10.4	1.8	0.6	0.72
07/08/19	3.5	0.16	0	0	0
07/08/21	8.1	2	0.8	0.06	0.08
07/08/25	10.9	24	6	1.2	0.8
07/08/26	20.0	10	3.6	0.6	0.32
07/08/27	10.1	17.2	6.8	0.6	0.4
07/08/28	3.5	2.8	0.6	0.2	0.02
07/08/29	8.4	3.2	0.8	0.04	0.008
07/09/03	3.3	1.8	0.2	0.04	0.02
07/09/04	19.0	14	1.6	0.6	0.4
07/09/25	20.0	2	1.6	0.32	0.4

从表 3 中可以看到, 在相同的降雨量下, 灌草丛和次生林地都有较好的调节径

流作用。2006年农地总的产流量是人工林的1.60倍,分别是次生林和灌草丛的12.45和5.52倍;项目区4个坡面径流小区2007年5月至2007年10月共32场产流降雨的特征值统计结果如下:农地产生32场,人工林26场,灌草丛24场,次生林24场。观测结果显示,2007年5-10月份32场共计494.2mm产流降雨,各径流场产流量分别为:农地318.16mm、人工林59.84mm、灌草丛12.85mm、天然次生林16.18mm,农地的产流量最多,灌草丛产流量最少。灌草丛和次生林比农地多涵养水分305.31mm和301.98mm,比人工林多涵养水分46.99mm和43.66mm。

说明植被的覆盖有保护土壤侵蚀的良好作用,植被对地表径流的影响是由枯枝落叶层冠层和土壤层的综合效能决定的。天然次生林和灌草丛的覆盖度分别达到90%和95%,远大于农地和人工林。次生林小区的林冠对降雨起到了良好的阻隔作用,森林截留降水,地面覆盖一层枯枝落叶,防止了雨滴击溅,避免了土壤分散和表面结皮,促进入渗。灌草丛也可以有效的降低雨滴对地面的击溅,灌草丛较多的根系也对土壤有较好的固定作用,因此这两个小区的径流量和泥沙量是四种土地利用类型中较小的。农地的土层深厚,地表覆盖少,烟草的根系不发达,再加上人为活动的影响,其产流量最大。可见,天然次生林和灌草丛拦蓄径流的效果要比人工林好,农地的开垦和种植加大了坡面的水土流失。

4.2.2 不同地类产沙量

土壤侵蚀是指在水、风、冰或重力等营力作用下对陆地表面的磨损或者造成土壤、岩屑的分散与移动(美国土壤保持学会),坡地土壤侵蚀过程在土粒运移、降低土地生产力、物理性淤积水库渠道、抬高河床的同时,还伴随着土壤养分的流失。

表 4 不同地类产沙量

Table4 Amount of sediment in different lands use pattern

日期 (年/月/日)	降雨量 (mm)	产沙量 (t/km ²)			
		农地	人工林	次生林	灌草丛
06/07/09	48.0	177.15	24.53	3.82	2.78
06/07/13	52.4	230.59	21.41	2.13	4.21
06/07/17	15.8	39.32	3.49	0.47	1.85
06/09/06	24.5	2.03	2.73	1.21	0.62
06/09/20	27.6	2.96	1.58	0.89	1.33
07/05/30	11.9	194.3	0.34	0.50	0.48
07/06/10	19.6	345.3	1.07	1.16	0.69
07/06/11	32.4	219.3	6.34	2.76	0.88
07/06/12	25.2	109.9	0.9	0	0.21
07/06/26	3.5	23.34	0	0	0
07/06/27	16.4	173.4	0.9	2.10	0.67
07/06/28	20.0	982.7	4.2	1.84	1.03
07/07/02	9.0	84.8	0.25	0.13	0.17
07/07/06	14.9	389.4	0.86	0.83	0.6
07/07/13	15.8	133.6	0.39	0.39	0.56
07/07/16	2.4	21.84	0	0	0
07/07/19	50.5	129.4	5.57	4.86	4.03
07/07/23	4.2	7.581	0	0	0
07/07/26	11.9	25.63	1.58	1.03	0
07/07/28	6.8	1.863	0	0	0
07/07/31	13.8	5.396	3.18	3.28	1.63
07/08/01	3.0	3.79		2.18	1.83
07/08/03	47.3	298.4	9.25	4.88	6.55
07/08/04	5.2	10.99	1.03	0	0
07/08/05	0.9	1.702	0	0	0
07/08/12	55.8	954	27	5.46	7.52
07/08/13	16.9	96.88	3.47	1.73	2.35
07/08/19	3.5	1.49	0	0	0
07/08/21	8.1	30.94	2.23	0.28	0.33
07/08/25	10.9	206.9	14.8	5.78	3.08
07/08/26	20.0	153.1	9.25	2.38	1.52
07/08/27	10.1	208.1	20.4	2.73	1.31
07/08/28	3.5	27.28	1.48	0.88	0.08
07/08/29	8.4	31.69	1.84	0.07	0.02
07/09/03	3.3	13.01	0.48	0.06	0.03
07/09/04	19.0	251.8	4.63	1.35	0.96
07/09/25	20.0	18.63	3.6	0.62	0.77

从表 4 中可以看到, 在相同的降雨量下, 灌草丛和次生林地都有较好的减少土

壤流失的作用。2006年农地总的产沙量远大于其余几种土地利用类型，农地总产沙量是人工林的8.41倍，是次生林的53.06倍，灌草丛的41.90倍。

2007年土壤侵蚀量分别为农地5156.45 t/km²，人工林99.46 t/km²，灌草丛37.3 t/km²，次生林47.28 t/km²。农地土壤侵蚀量最大，灌草丛保持土壤效果最好。天然次生林和灌草丛分别比农地减少土壤侵蚀量99.08%和99.28%，比人工林减少土壤侵蚀量52.46%和62.50%。

植被对地表径流的影响是由植被的树冠和植物群体、枯枝落叶层和土壤层的综合效能决定的。灌草丛小区植被覆盖率高，几乎高达100%，草的根系发达，延长径流下渗时间，也减少了土壤免遭暴雨和地表径流打击和冲刷，因此灌草丛小区的泥沙侵蚀量小于人工林。因此建立生态系统相对稳定、群落结构合理、生物量大的乔灌混交林明显好于单一的人工林和农地。

4.3 不同地类径流中非点源污染物浓度输出

降雨条件下表层土壤中的农业化合物(氮、磷、钾)等养分和农药，因雨滴击溅和径流冲刷作用，向地表径流迁移并随之流出田块汇入河流、湖泊、水库等水体，引起水体的富营养化或污染，这一问题既是养分流失以及土壤质量退化，又属于水环境非点源污染。土壤流失过程实际上是表层土壤养分与降雨、径流相互作用的过程，土壤养分流失的多少主要受相互作用的限制^[1]。因此，研究降雨条件下农田化合物随径流迁移的机制，对制定农业生产管理措施，改善水体环境具有指导意义^[78]。

4.3.1 不同地类径流全磷的输出浓度

表 5 为不同地类径流小区全磷输出浓度表, 2006 年与 2007 年各次采样中全磷的输出浓度并未表现出明显的规律, 但从表 5 中 2006 年数据可以看出: 全磷在灌草丛中的浓度普遍高于其它土地利用类型, 7 月份三次所采集的样品全磷浓度均为灌草丛>次生林>人工林>农地, 而 9 月份两次所采的径流样中农地中全磷的含量均比较高, 这可能是由于种植豆类时施肥所引起的肥料中的磷随地表径流流失所致。

表 5 不同地类径流小区全磷输出浓度

Table5 Density of phosphorus in runoff in different lands use pattern

采样日期 (年/月/日)	降雨量 (mm)	全磷输出浓度 (mg/l)			
		次生林	农地	人工林	灌草丛
06/07/09	48.0	0.24	0.21	0.23	0.43
06/07/13	52.4	0.36	0.24	0.27	0.38
06/07/17	15.8	0.54	0.49	0.50	0.58
06/09/06	24.5	0.19	0.31	0.26	0.29
06/09/20	27.6	0.09	0.14	0.11	0.30
07/06/11	32.4	0.24	0.39	0.11	0.22
07/06/27	16.4	0.21	0.06	0.14	0.25
07/06/28	20.0	0.17	0.15	0.12	0.18
07/07/06	14.9	0.15	0.24	0.31	0.52
07/07/19	50.5	0.15	0.10	0.06	0.18
07/07/31	13.8	0.11	0.12	0.06	0.19
07/08/12	55.8	0.16	0.24	0.17	0.22
07/08/25	10.9	0.15	0.18	0.13	0.25
07/09/04	19.0	0.11	0.39	0.11	0.21
07/09/25	20.0	0.18	0.30	0.24	0.29

2007 年采样数据分析得出, 6 月 11 日采集的径流中全磷表现为农地>次生林>灌草丛>人工林, 6 月 27 日为灌草丛最大, 其次是次生林和人工林, 农地最小。6 月 28 日则表现为灌草丛最大, 其次是次生林和农地, 人工林最小。7 月采样也表现出灌草丛和次生林较大, 人工林和农地较小。8、9 月径流样则是农地和灌草丛全磷的输出浓度较大, 次生林和人工林的输出浓度较小。因此, 总的来说, 次生林和灌草丛径流小区全磷的输出浓度较大, 其次为次生林, 农地中全磷输出浓度变化规律不明显。

4.3.2 不同地类径流全氮的输出浓度

表 6 为不同地类径流小区全氮输出浓度表, 由表可以得到 2006 年全氮输出浓度规律为: 7 月 9 号, 全氮的输出浓度次生林 > 灌草丛 > 农地 > 人工林, 7 月 13 号为次生林 > 灌草丛 > 农地 > 人工林, 7 月 17 号为灌草丛 > 次生林 > 农地 > 人工林, 9 月 6 号为灌草丛 > 次生林 > 农地 > 人工林, 9 月 20 号为灌草丛 > 次生林 > 农地 > 人工林。总体上来看, 灌草丛和次生林较大, 农地和人工林较小。

表 6 不同地类径流小区全氮输出浓度

Table6 Density of total nitrogen in runoff in different lands use pattern

采样日期 (年/月/日)	降雨量 (mm)	全氮输出浓度 (mg/l)			
		次生林	农地	人工林	灌草丛
06/07/09	48.0	8.13	5.13	3.15	7.24
06/07/13	52.4	9.28	8.84	8.02	9.12
06/07/17	15.8	6.89	4.06	4.00	7.32
06/09/06	24.5	4.96	4.00	3.80	9.35
06/09/20	27.6	3.86	3.57	1.07	5.38
07/06/11	32.4	7.15	8.17	4.10	5.34
07/06/27	16.4	11.20	18.75	5.57	7.82
07/06/28	20.0	1.31	1.97	0.41	1.58
07/07/06	14.9	1.8	1.67	1.81	1.47
07/07/19	50.5	1.66	0.77	0.64	0.82
07/07/31	13.8	8.6	1.59	6.36	7.33
07/08/12	55.8	3.54	1.10	1.34	2.70
07/08/25	10.9	3.20	0.42	1.53	2.06
07/09/04	19.0	2.50	1.86	1.89	1.92
07/09/25	20.0	6.51	5.13	6.02	6.45

2007 年 6 月三次所采集的样品中农地的全氮的输出浓度是最大的, 其次是灌草丛和次生林, 而人工林的输出浓度最低。这是因为六月刚种植烤烟不久, 此地烤烟种植时都会施氮肥, 并用薄膜覆盖, 六月是雨季, 所施的氮肥随雨水径流流失, 所以农地全氮的输出浓度是最大。7 月 16 日所采集的样品中全氮的输出浓度与 7 月 19 日、7 月 31 日规律不同, 但是全氮的输出浓度在四种土地利用类型中相差不大, 因此, 总体上来看, 7 月三次所采集的径流中全氮的浓度在次生林和灌草丛中的浓度较高, 而人工林和农地输出浓度较低。8 月和 9 月四次取样全氮都为次生林 > 灌草丛 > 人工林 > 农地。

4.3.3 不同地类径流氨氮的输出浓度

表 7 为不同地类径流小区氨氮输出浓度表, 2006 年各不同地类径流中氨氮浓度均显示出人工林 > 农地 > 次生林 > 灌草丛, 这说明氨氮浓度和植被的关系基本是正相关的, 植被的覆盖度越大, 氨氮随径流流失浓度越小。

表 7 不同地类径流小区氨氮输出浓度

Table 7 Density of ammonia nitrogen in runoff in different lands use pattern

采样日期 (年/月/日)	降雨量 (mm)	氨氮输出浓度 (mg/l)			
		次生林	农地	人工林	灌草丛
06/07/09	48.0	0.93	3.05	4.85	0.77
06/07/13	52.4	1.17	2.52	4.89	0.81
06/07/17	15.8	1.93	7.03	5.97	1.73
06/09/06	24.5	0.61	2.23	4.49	0.37
06/09/20	27.6	1.73	4.17	4.57	0.97
07/06/11	32.4	2.03	1.90	4.75	1.91
07/06/27	16.4	6.67	5.96	8.66	3.25
07/06/28	20.0	5.56	11.60	14.70	5.33
07/07/06	14.9	3.74	2.69	4.79	2.41
07/07/19	50.5	2.06	2.18	2.34	1.40
07/07/31	13.8	1.55	1.46	1.51	0.96
07/08/12	55.8	1.80	4.05	2.37	1.64
07/08/25	10.9	4.03	10.20	5.82	2.19
07/09/04	19.0	3.42	12.70	4.03	2.37
07/09/25	20.0	1.71	4.58	2.11	0.80

2007 年 6 月三次所采集的样品中, 氨氮表现为人工林最大, 其次是次生林和灌草丛, 农地中氨氮输出浓度较小。这是由于六月是烤烟的生长期, 烤烟以氨态氮形式吸收氮素, 因此虽然六月份取样中农地全氮输出浓度最大, 但是氨氮输出浓度较低。总体上来看, 7 月三次所采集的径流中氨氮浓度为人工林较高, 其次为次生林和农地, 灌草丛中的输出浓度是最低的。8 月和 9 月四次取样氨氮输出浓度则表现为农地 > 人工林 > 次生林 > 灌草丛。这可能是由于此时烤烟收获, 大量的氨氮返还给地表和种植豆类时施加氮肥所致。

4.3.4 不同地类径流 COD 输出浓度

2006 年径流样中 COD（化学需氧量）大体上表现为农地和人工林较大，其次为次生林，灌草丛 COD 的输出浓度较小。

2007 年径流样中，次生林的 COD 输出浓度是最大的，其次是人工林，农地和灌草丛的输出浓度较小。

表 8 不同地类径流小区 COD 输出浓度

Table8 Density of COD in runoff in different lands use pattern

采样日期 (年/月/日)	降雨量 (mm)	COD 输出浓度 (mg/l)			
		次生林	农地	人工林	灌草丛
06/07/09	48.0	22	30	24	23
06/07/13	52.4	14	17	31	18
06/07/17	15.8	29	22	24	15
06/09/06	24.5	49	40	53	25
06/09/20	27.6	20	19	36	5
07/06/11	32.4	96	24	65	28
07/06/27	16.4	82	34	51	38
07/06/28	20.0	44	20	35	35
07/07/06	14.9	41	14	20	8
07/07/19	50.5	129	81	103	104
07/07/31	13.8	38	2	16	2
07/08/12	55.8	40	30	26	16
07/08/25	10.9	42	31	17	36
07/09/04	19.0	39	28	38	25
07/09/25	20.0	49	37	55	19

总体上来看，农地和灌草丛的 COD 输出浓度是较小，而次生林和人工林的输出浓度较大。这可能是由于在相同的降雨量下，农地的径流量远大于其余几种土地利用类型，较多的径流稀释了 COD 的浓度，因此农地的 COD 输出浓度较小，次生林的径流量较少，因此次生林的 COD 输出浓度较高。次生林径流量大于灌草丛，但是次生林的 COD 输出浓度较高，由此可见，灌草丛抵御污染的能力大于次生林。

4.4 不同地类径流中非点源污染物输出量

降雨—入渗—径流与土壤相互作用过程是坡面养分流失的重要过程水土流失在带走大量径流和泥沙的同时，大量的土壤氮素和磷素养分也随之流失。土壤中的氮素和磷素不但是作物生长所必须的营养物质，同时也是重要的非点源污染来源，

它的流失不但是肥料资源的浪费，而且会对下游地表水和地下水造成污染^[79]。

土壤侵蚀受植被覆盖度、坡度、土地利用、土壤结构、水文气象、土地空间利用、人为活动等各种因素的影响^[80,81]。由于所选径流小区坡度、坡位、坡向、海拔、土壤类型等相似，因此土地利用类型和盖度成为影响地表径流的主要因素。

4.4.1 不同地类径流全磷的输出量

下图是 2006 年不同地类径流中产流量和全磷输出量关系图，不同地类面源污染物输出量有明显差异，植被类型不同，产生的径流量和非点源污染物浓度也不同，因此非点源污染物输出量就有明显变化。

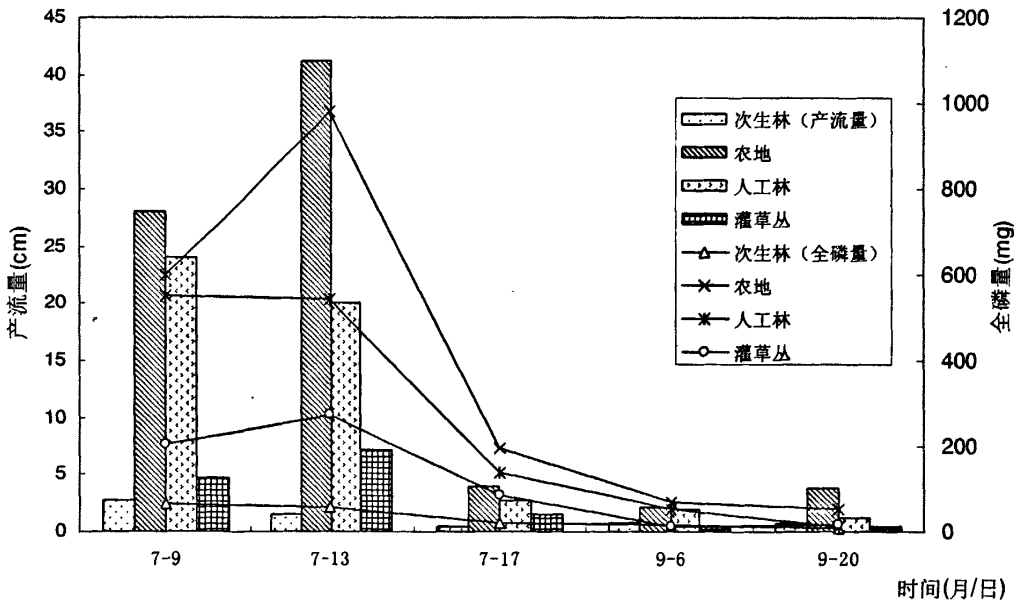


图 1 2006 年不同地类径流中产流量和全磷输出量关系

Fig.1 Relationship of total phosphorus output in the runoff with runoff amount in different runoff plots in 2006

2006 年 7 月到 9 月共采集了五次产流较大的径流样，表 5 中磷浓度无明显的输出规律，但是由图 1 可以看到，全磷的输出量为农地 > 人工林 > 灌草丛 > 次生林，与径流量关系较密切，即径流量大时全磷的输出量大。农地磷输出量是次生林的 4.4-17.4 倍之间。

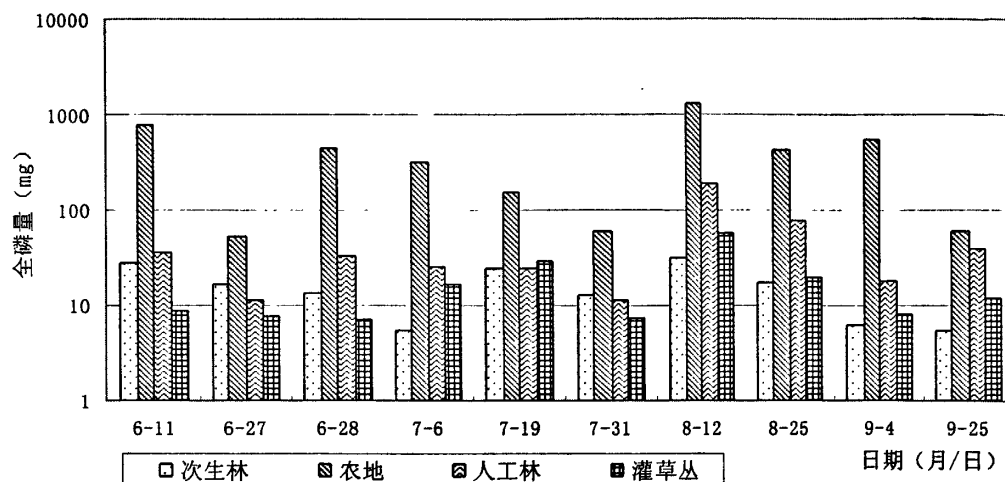


图 2 2007 年不同地类径流全磷输出量

Fig.2 Total phosphorus output in the runoff in different runoff plots in 2007

图 2 所示是四种土地利用类型 2007 年全磷的输出关系图，从图中可以看出农地的全磷的输出量是最大的，其变化幅度也是最大的，其次是人工林，再次是灌草丛和次生林。由图中可以看到，全磷的输出量与降雨量的大小关系更为密切，降雨量越大，产生的径流量就越多。全氮的输出量在雨季开始时输出量较大，而到了后期即使降雨量大于初期，其全氮的输出量也较小。而全磷的输出规律则不同，与降雨量的关系更为密切。

虽然灌草丛和次生林磷的输出浓度大，但由于其产流量小，因而磷输出的总量就较农地少。人工林由于植被结构简单，覆盖度小，因此磷的输出量和产流量都较次生林和灌草丛大。农地由于受到人为影响较大，且植被覆盖度小，因此产流量和磷的输出量是四种土地利用类型中最大的。

4.4.2 不同地类径流全氮的输出量

图 3 为不同土地利用类型径流小区径流中 2006 年全氮输出量关系, 从图中可以看到, 不同土地利用类型中总氮的输出量差异显著, 全氮的输出量表现为农地 > 人工林 > 灌草丛 > 次生林。农地全氮的输出量受径流的影响较大, 其次是人工林, 而次生林和灌草丛受径流量的影响波动较小。

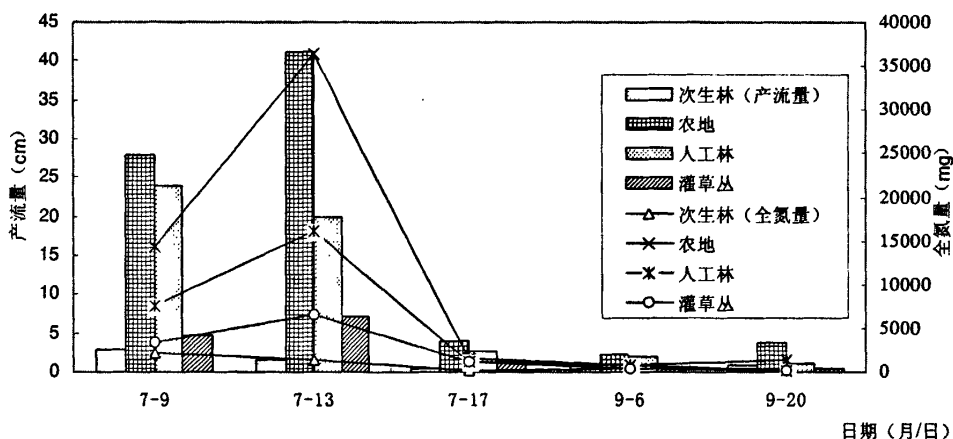


图 3 2006 年不同地类径流中产流量和全氮输出量关系

Fig.3 Relationship of total nitrogen output in the runoff with runoff amount in different runoff plots in 2006

不同地类非点源污染物输出量有明显差异, 植被类型不同, 产生的径流量和非点源污染物浓度也不同, 因此非点源污染物输出量就有明显变化。2007 年 6 月到 9 月共采集了十次产流较大的径流样, 图 4 为 2007 年不同地类径流全氮输出量图, 由图中可以看到, 全氮的输出量为农地 > 人工林 > 次生林 > 灌草丛, 农地的变化幅度远大于其余几种土地利用类型。

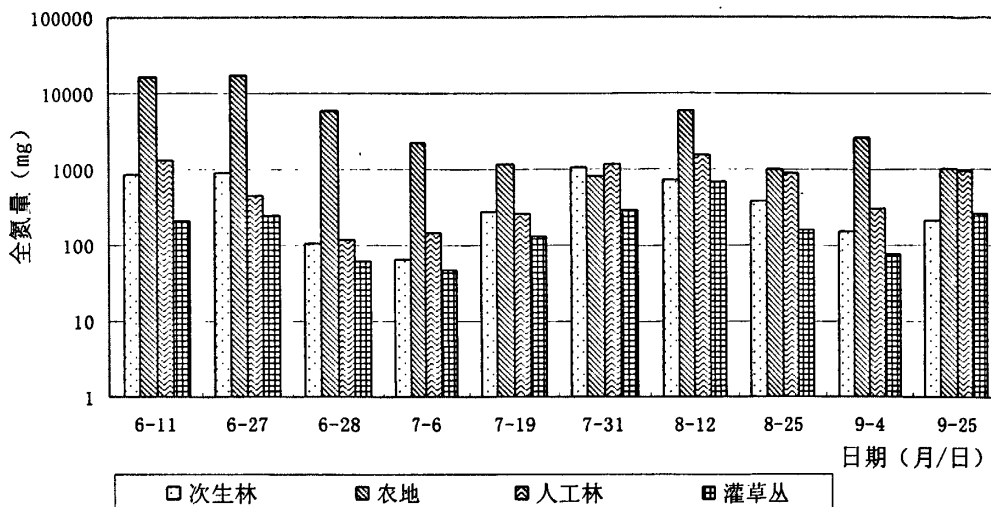


图 4 2007 年不同地类径流全氮输出量

Fig.4 Total nitrogen output in the runoff in different runoff plots in 2007

从图中可以看到，6月11日、6月27日、与8月12日几次降雨过程中农地全氮的输出量远大于其它几种地类。6月11日降雨量为32.4mm，农地产流19.6mm；6月27日降雨量为16.4mm，农地产流9.2mm；由此可以看见产流量和降雨量是成正比关系的。8月12日降雨55.8mm，农地产流达到54mm，但其全氮的输出量却远小于6月份两次降雨过程中农地的全氮输出量，这可能是由于8月降雨频繁，而农地由于地表植被覆盖较少，没有植物对营养元素的选择作用，因此，土壤中全氮的含量较小导致。

总体上看，次生林、灌草丛、人工林等植被覆盖较好的小区全氮输出量较小，农地小区地表缺少覆被，雨滴的打击和冲刷作用使得径流量和全氮的输出量大于其它几种地类。

4.4.3 不同地类径流中氮氮的输出量

不同土地利用类型2006年氮氮输出量没有显著趋势（如图5所示）。从总体上来看，氮氮的输出量和产流量有一定相关性，即产流量大时氮氮输出量大，反之则小。次生林的氮氮的输出量是四种土地利用型中最小的，其次是灌草丛，农地和人工林地的输出量都高于次生林和灌草丛，这是由于次生林的植被覆盖度和植物种类起主要作用。

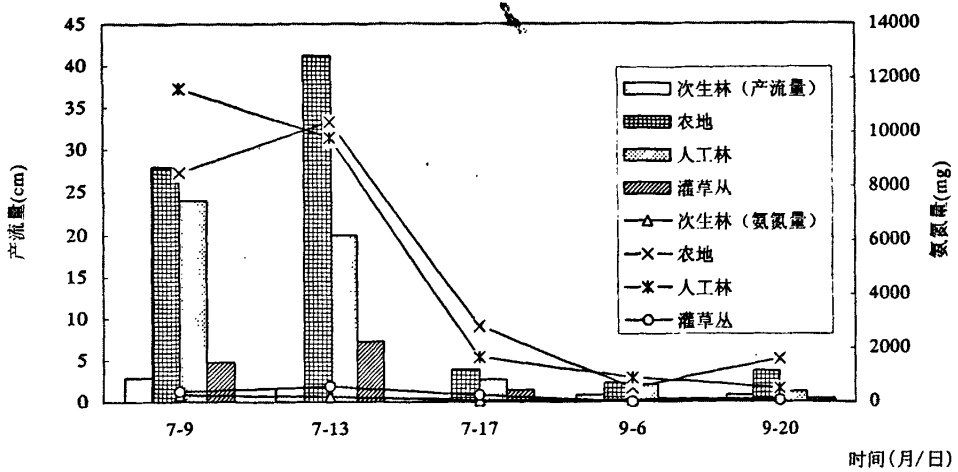


图 5 2006 年不同地类径流中产流量和氨氮输出量关系

Fig.5 Relationship of ammonia nitrogen output in the runoff with runoff amount in different runoff plots in 2006

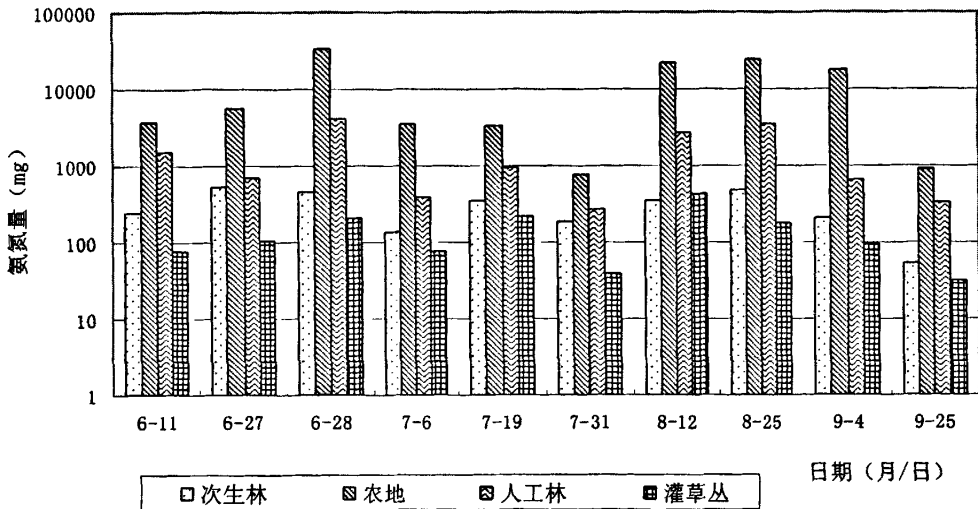


图 6 2007 年不同地类径流氨氮输出量

Fig.6 Ammonia nitrogen output in the runoff in different runoff plots in 2007

不同土地利用类型 2007 年氨氮输出量有显著趋势 (如图 6 所示)。灌草丛的氨氮的输出量是四种土地利用型中最小的, 其次是次生林, 再次是人工林地, 农地的输出量是四种土地利用类型中最大的。

氨氮多随径流迁移, 同等雨量下, 农地产流大于其它几种地类, 因此农地的氨

氮的输出量是最大的。6月28日降雨量小于6月11日，但是由于降雨强度大，致使其产流量大于6月11日，因此，氮氮的输出与径流量关系较为密切。降雨冲刷地表，使地表土壤大量侵蚀入径流池，氮素在雨水的溶解下进入水体，再加上6月施用氨态氮肥，因此农地的氨氮量输出最大。

4.4.4 不同地类径流 COD 输出量

COD 是水体中能被氧化的物质在规定条件下进行化学氧化过程中所消耗的氧化物的量，用于表征水体受有机污染的一个指标。从图7中可以看出，2006年COD输出量的大致规律为农地>人工林>灌草丛>次生林。

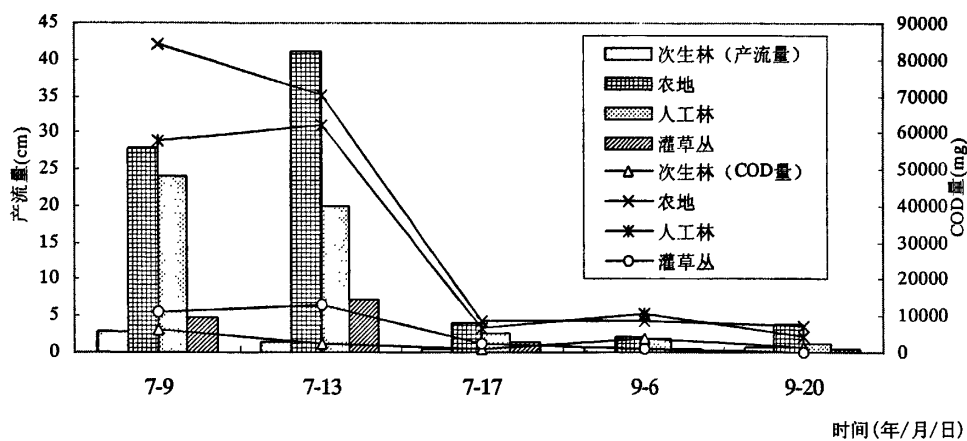


图7 2006年不同地类径流中产流量和COD输出量关系

Fig.7 Relationship of COD output in the runoff with runoff amount in different runoff plots in 2006

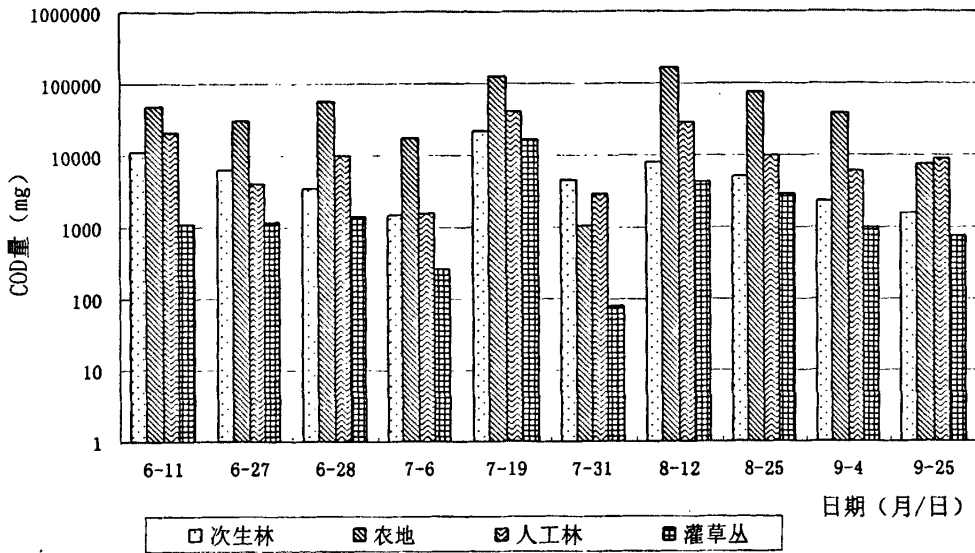


图 8 2007 年不同地类径流 COD 输出量

Fig.8 COD output in the runoff in different runoff plots in 2007

从 2007 年不同地类径流 COD 输出量 (图 8) 可以得到, COD 在不同土地利用类型地类中输出规律差异明显, COD 输出量的规律为农地 > 人工林 > 次生林 > 灌草丛。

COD 的输出量是由地类、降雨量、降雨强度、持续时间等因素综合作用的结果。从总体上来看, 在相同的降雨量下, 农地 COD 输出量是四种土地利用类型中变化幅度最大的, 其次是人工林, 而次生林和灌草丛受降雨的影响较小, 这说明次生林和灌草丛抵御污染的能力大于农地和人工林。

4.5 不同地类泥沙中非点源污染物输出量

磷的输出主要是以泥沙结合态为主, 泥沙是磷的主要载体, 梁涛等的研究也证明: 在坡地农田利用方式中, 侵蚀泥沙是养分流失的主要载体, 氮磷流失的 60% 以上是通过泥沙带走的^[5]。这是因为磷主要是由悬浮固体运输, 它以不溶于水的磷酸氢钙等化合物存在于自然界, 在降雨的冲刷下, 被悬浮颗粒携带进入径流。而总氮的主要成分是可溶性氮, 因此氮在径流中的输出量更大^[82]。

4.5.1 不同地类泥沙中非点源污染物输出特征

不同地类 2006 年泥沙中非点源污染物输出特征（表 9）得到，总氮量依次为农地>人工林>灌草丛>次生林，农地径流小区输出的总氮量是最大的，而且远大于次生林地，是次生林的 32.4 倍；而速效氮为农地>人工林>次生林>灌草丛，农地输出量是灌草丛的 40 倍；总磷输出规律为农地>人工林>灌草丛>次生林，农地磷输出量是次生林的 34 倍；不同土地利用类型速效磷输出量依次为农地>人工林>次生林>灌草丛，农地的输出量是灌草丛的 50.5 倍。

表 9 2006 年不同土地利用类型泥沙中面源污染输出量均值比较

Table9 Mean comparison of non-point source pollution in runoff in different lands use pattern in 2006

采样点	总氮 (g)	速效氮 (ug)	总磷 (g)	速效磷 (ug)
农地	3.89	716.95	9.22	113.65
人工林	0.51	88.94	0.87	15.84
次生林	0.08	40.95	0.27	3.99
灌草丛	0.12	17.90	0.31	2.25

尽管地表水质的影响因子很复杂，但当排除点源污染后，不适当的土地利用方式和管理模式会导致过量的、随地表径流流失，从而形成对河流、湖泊的大面积非点源污染。

表 10 不同土地利用类型 2007 年泥沙中面源污染输出量均值比较

Table10 Mean comparison of non-point source pollution in runoff in different lands use pattern in 2007

采样点	总氮 (g)	总磷 (g)	速效氮 (mg)	速效磷 (mg)
农地	6.999	47.836	1189.696	80.062
人工林	0.260	1.102	27.205	0.018
次生林	0.130	0.963	19.889	0.020
灌草丛	0.098	0.717	15.461	0.015

由表 10 可以看出, 2007 年泥沙中总氮输出量依次为农地>人工林>次生林>灌草丛, 农地径流小区输出的总氮量是最大的, 而且远大于灌草丛地, 是灌草丛的 71.4 倍; 而速效氮为农地>人工林>次生林>灌草丛, 农地输出量是灌草丛的 76.9 倍; 全磷输出规律为农地>人工林>次生林>灌草丛, 农地磷输出量是灌草丛的 66.7 倍; 不同土地利用类型速效磷输出量依次为农地>人工林>次生林>灌草丛, 农地的输出量是灌草丛的 5337.5 倍; 而灌草丛和次生林全磷的输出量相差不大, 次生林输出量为灌草丛的 1.33 倍。

4.5.2 不同地类泥沙中全氮输出量

图 9 为不同地类径流小区 2006 年泥沙携带的全氮关系图, 由图中可以看到, 农地的全氮输出量是四种土地利用类型中最大的, 其变化幅度也远大于次生林和灌草丛。人工林的输出量大于次生林和灌草丛, 变化幅度不及农地。次生林和灌草丛的全氮输出量是四种地类中最小的, 而且随降雨量变化的趋势也不明显。

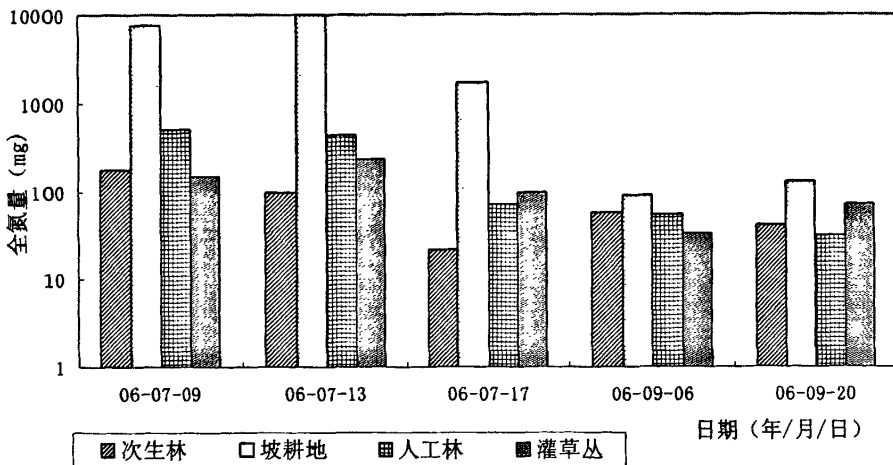


图 9 不同地类径流小区 2006 年泥沙中全氮输出量

Fig.9 Total nitrogen output in the sediment in different runoff plots in 2006

澄江县尖山河小流域的降雨主要集中在 6-9 月, 由图中可以看到, 全氮的输出量也集中在雨季前期 (6、7 月), 而到了 8 月和 9 月, 全氮的输出量变化不及 6、7 月明显。因此, 雨季初期是非点源污染物输出量较严重的, 应采取一定的措施加以防治。

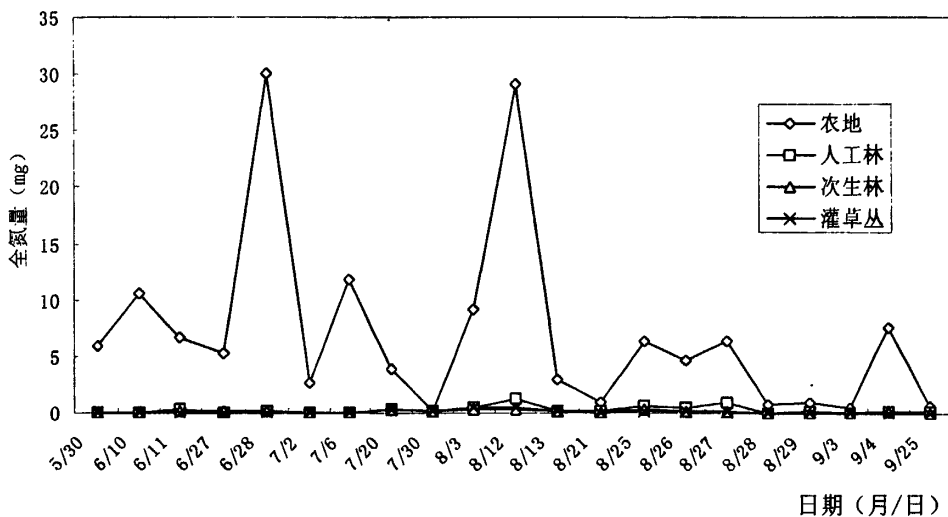


图 10 不同地类径流小区 2007 年泥沙全氮输出量

Fig.10 Total nitrogen output in the sediment in different runoff plots in 2007

图 10 为 2007 年不同地类径流小区泥沙中全磷的输出量关系图, 从图中可以看到, 全磷的输出量在农地小区和其它几个小区中的输出差异很大。农地小区泥沙中全氮的输出量远大于其它几个类型小区, 其次是人工林小区。而次生林和灌草丛小区差别不是很明显, 为四种土地利用类型中非点源输出较小的小区。

由图中可以看到, 6 月 28 日与 8 月 12 日是农地全氮输出量最大的两次, 6 月 28 日降雨量 20mm, 产沙量 $982.7\text{t}/\text{km}^2$, 8 月 12 日降雨量 55.8mm, 产沙量为 $954\text{t}/\text{km}^2$, 而虽然 7 月 19 日降雨 50.5mm, 但产沙量仅为 $129.4\text{t}/\text{km}^2$ 。由此可见, 产沙量和泥沙中全氮的输出量关系更为密切。

而 8 月 26 日与 9 月 4 日虽然产沙量大于 7 月 19 日, 其全氮输出量却小于 7 月 19 日, 这可能是由于农地地表缺少覆盖, 土壤的结构性较差。因此在雨季初期, 富含养分的细颗粒随径流流失而得不到补充, 致使后期泥沙养分含量较低, 因此, 即使产沙量很大, 但是全氮的输出量也不大。

4.5.3 不同地类泥沙中全磷输出量

图 11 为 2006 年不同土地利用类型径流小区中泥沙所携带的全磷输出量关系图, 如图所示, 农地全磷输出量最大, 其次为人工林, 而次生林和灌草丛泥沙中输

出的全磷量远小于农地，变化幅度也不及农地明显。

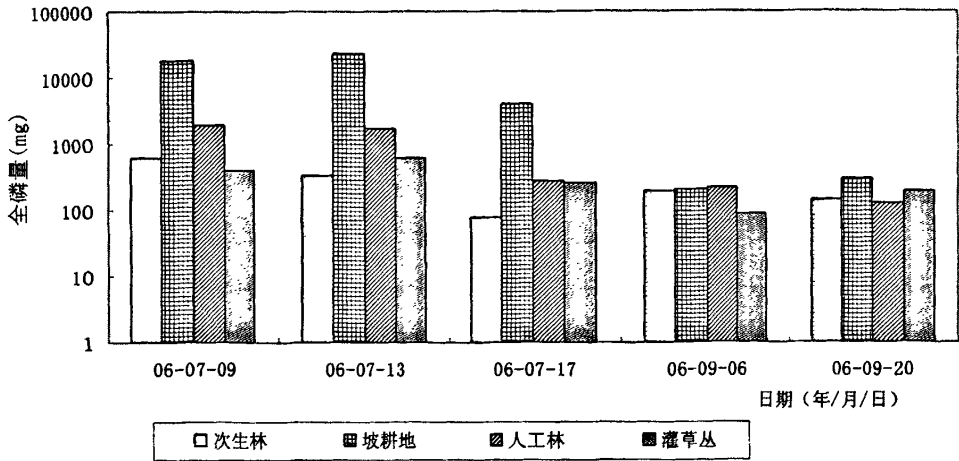


图 11 不同地类径流小区 2006 年泥沙中全磷输出量

Fig.11 Total phosphorus output in the sediment in different runoff plots in 2006

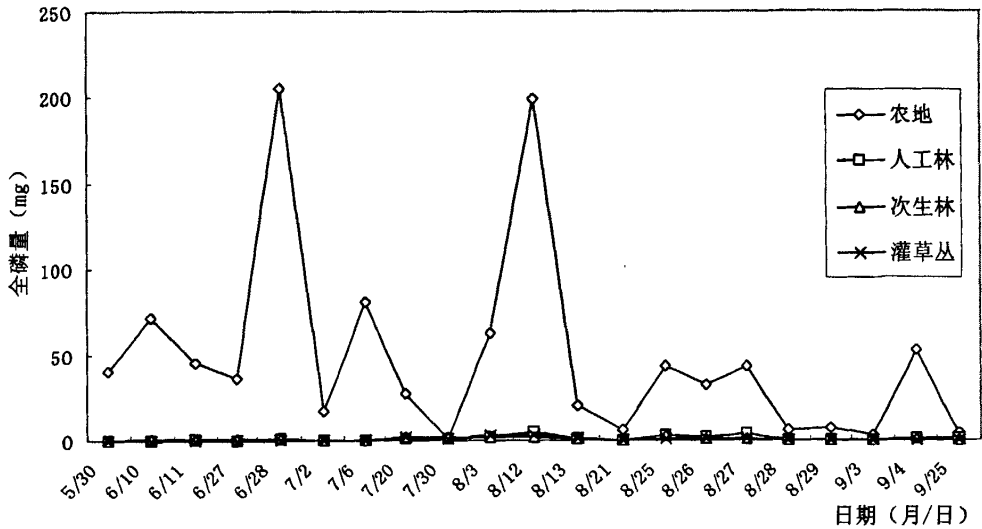


图 12 不同地类径流小区 2007 年泥沙中全磷输出量

Fig.12 Total phosphorus output in the sediment in different runoff plots in 2007

图 12 为 2007 年不同地类径流小区泥沙中全磷的输出量，从图中可以得到，农地径流小区全磷的输出量是四种土地利用类型中最大的，并且随径流的变化很明显。而次生林、人工林和灌草丛小区随径流的变化较小，其产沙量和全磷输出量都较小。

与图 11 相同, 各不同土地利用类型径流小区中全磷的输出量也是雨季初期的变化幅度大于后期, 全磷的输出量也同泥沙量的输出有密切关系, 并且全磷的输出量比泥沙中全氮的输出量变化幅度更明显。因此, 泥沙是磷流失的主要载体。

全磷的输出量变化大于全氮的输出变化, 泥沙中磷的输出量大于氮的输出。表 2 中农地表层土壤中总氮含量是最小的, 全磷含量也不大。但是, 农地全氮、全磷的输出量远大于其余几种地类, 这是因为次生林和灌草丛的植被覆盖度最大, 由于植被的介入, 改变了土壤的理化性质, 增加了土壤的渗透性, 植物的根系对土壤的固结作用, 加上地表枯枝落叶层的保护作用, 泥沙不易随地表径流流失。人工林种植桉树, 植被覆盖度较小、树种结构单一、林内灌草层植物较少, 因而降雨后泥沙随地表径流迁移的量大于灌草丛和次生林。农地上种植烟草, 植被覆盖度低, 再加上顺坡耕种, 人为影响频繁是造成土壤流失的主要原因。烟地上覆盖薄膜有一定的防止泥沙侵蚀作用。

4.6 不同土地利用类型侵蚀泥沙养分富集特征

泥沙中的养分富集现象主要是由于表层土壤的侵蚀引起的, 一般受植被覆盖和施肥的影响, 表层土壤养分含量往往高于底层, 其次植被覆盖度的增加使得细颗粒土壤聚集地表, 因而和原土壤相比, 侵蚀泥沙往往会富集养分^[83, 84]。

土壤有机质的不同形态通常总是与土壤不同粒级颗粒组成相结合, 与不同颗粒结合的有机质形态也因侵蚀特性在泥沙中产生再分配。在泥沙传递过程中, 泥沙在径流中的搬运特性决定了首先搬运土壤表层细颗粒, 其原因在于土壤细颗粒容易在径流液中运移, 使侵蚀泥沙中出现粘粒和所吸附的化学元素富集现象^[85]。

由表 11 可以看到, 径流泥沙对养分有富集特性, 全氮的富集率为灌草丛>农地>人工林>次生林, 速效氮为次生林>灌草丛>人工林>农地; 全磷富集率为次生林>农地>灌草丛>人工林, 速效磷为次生林>人工林>灌草丛>农地; 速效钾的富集率为灌草丛>次生林>人工林>农地。从总体上来看, 次生林和灌草丛的养分富集率较高, 农地的富集率较低。

表 11 不同土地利用类型 2006 年侵蚀泥沙养分富集率 (ER)

Table 11 Nutrient concentration ratio in sediment in different lands use pattern in 2006

		次生林	农地	人工林	灌草丛
全氮 (g/kg)	原表土	0.42	0.37	0.42	0.44
	泥沙	0.46	0.43	0.47	0.54
	ER	1.10	1.16	1.12	1.23
速效氮 (mg/kg)	原表土	78.55	68.17	57.72	58.93
	泥沙	240.31	79.3	82.75	105.07
	ER	3.06	1.16	1.43	1.78
全磷 (g/kg)	原表土	0.46	0.94	0.77	13.5
	泥沙	16.2	10.2	0.81	14.3
	ER	35.22	10.85	1.05	1.06
速效磷 (mg/kg)	原表土	9.03	350.97	7.34	5.66
	泥沙	23.39	12.57	14.74	10.43
	ER	2.59	0.04	2.01	1.84
速效钾 (ppm)	原表土	185.97	227.74	191.31	126.55
	泥沙	232.45	229.94	216.54	175.54
	ER	1.25	1.01	1.13	1.39

次生林和灌草丛由于植被覆盖度大,地表径流量小,土壤结构不易被破坏,泥沙以养分含量较高的细颗粒为主,因此泥沙的养分含量大。农地由于植被覆盖度小,经常受到人为活动的影响,土壤颗粒的选择性作用小,因此泥沙的养分含量小。张兴昌^[86]采用 17 种植被对土壤侵蚀和氮素流失的影响进行研究,发现有植被覆盖地的全氮富集率比裸地增加 13.8%—114%,植被地表对水土流失起到了良好的抑制作用。本研究也得出了次生林和灌草丛的养分富集率较高,农地的富集率较低的结论。

4.7 不同土地利用类型表层土壤养分与径流及泥沙中面源污染物输出的相关关系

表层土壤中全氮含量与径流及泥沙中氮的输出量呈负相关关系(表 12),全氮含量与径流中氨氮输出量的相关系数为 0.66,而与泥沙中全氮、速效氮输出的相关系数都大于 0.95。表层土壤中速效氮含量与径流中氨氮输出量的相关系数为 0.37,因此表层土壤中的氮随径流流失的量大于泥沙中的量。表层土壤中的磷与径流及泥沙中的磷输出量正相关,表土中全磷与径流中全磷的相关系数为 0.7,而与泥沙中

磷的相关系数皆大于 0.99, 相对于氮而言, 表层土壤中的磷更易于随径流流失, 磷的输出以泥沙结合态为主, 特别是速效磷。

表 12 表土养分与径流中非点源污染物输出量的相关关系

Table12 Correlation of non-point source pollution in runoff with surface nutrient

	水全磷	水氨氮	水 COD	泥沙全氮	泥沙速 效氮	泥沙全磷	泥沙速 效磷
表土全氮	-0.736	-0.661	-0.782	-0.958 *	-0.966 *	-0.956 *	-0.964 *
表土速效氮	-0.410	-0.367	-0.300	0.096	0.138	0.124	0.110
表土全磷	0.628	0.377	0.506	0.606	0.577	0.602	0.588
表土速效磷	0.727	0.564	0.728	0.994 **	0.996 **	0.998 **	0.994 **

* : 显著水平 $p < 0.05$ ** : 极显著水平 $p < 0.01$

4.8 不同地类径流小区产流、产沙量与氮磷输出相关分析

表 13 2006 年产流量与径流及泥沙中全氮全磷输出量相关分析

Table13 Correlation analysis of runoff amount with total phosphorous and nitrogen output in sediment and runoff in 2006

		产流量	产沙量	泥沙全氮	泥沙全磷	径流全磷	径流全氮
产流量	相关系数	1	.875*	.847**	.864*	.979*	.937**
	显著概率	.	.000	.000	.000	.000	.000
	样本数	20	20	20	20	20	20
产沙量	相关系数	.875*	1	.998**	1.000**	.792**	.878*
	显著概率	.000	.	.000	.000	.000	.000
	样本数	20	20	20	20	20	20

** 显著性水平在 0.01 下, 认为标记的相关系数是显著的。

通过 2006 年产流量、产沙量与径流及泥沙中全氮全磷输出量相关分析(表 13)可以得到, 产流量和产沙量之间正相关, 即产流量越大, 产沙量也就越大。从总体上来看, 泥沙中全氮全磷输出量与产沙量的相关系数大于径流中全氮全磷输出量与产流量的相关系数。因此, 泥沙是氮磷流失的主要载体。产流量与径流中全氮的输

出量在 0.01 显著水平时相关系数为 0.937, 说明径流中带走的全氮量更大。泥沙中全氮全磷的输出量与产沙量在显著水平 0.01 时相关系数分别为 0.998 和 1.000, 远大于与径流中的全氮全磷的相关系数, 因此磷的输出主要是以泥沙结合态为主。

前面分析得出在相同的降雨量下, 次生林和灌草丛的产流量都远小于农地, 人工林的输出量仅次于农地。因此农地的总氮输出量是四种地类中最大的, 而次生林和灌草丛的输出量较少。磷流失的主要载体是泥沙, 而农地的产沙量是次生林的 1.68—108.26 倍, 因此农地磷的输出量也是最大的。

表 14 2007 年产流量与径流及泥沙中全氮全磷输出量相关分析

Table 14 Correlation analysis of runoff amount with total phosphorous and nitrogen output in sediment and runoff in 2007

		产流量	产沙量	泥沙全氮	泥沙全磷	径流全磷	径流全氮
产流量	相关系数	1	.900**	.901**	.897**	.940**	.472*
	显著概率	.	.000	.000	.000	.000	.000
	样本数	40	40	40	40	40	40
产沙量	相关系数	.900**	1	1.000**	1.000**	.434**	.816**
	显著概率	.000	.	.000	.000	.000	.000
	样本数	40	40	40	40	40	40

** 显著性水平在 0.01 下, 认为标记的相关系数是显著的。

通过 2007 年产流量、产沙量与径流及泥沙中全氮全磷输出量相关分析(表 14)可以得到, 产流量和产沙量之间相关性极其显著(显著水平为 0.01 时相关系数达到 0.900), 径流是泥沙侵蚀的主要载体, 径流流失的量决定了泥沙量的多少。

从总体上来看, 泥沙中全氮全磷输出量与产沙量的相关系数大于径流中总氮总磷输出量与产流量的相关系数。因此, 泥沙是氮磷流失的主要载体。产流量与径流中全磷的输出量在 0.01 显著水平时相关系数为 0.940。泥沙中全氮全磷的输出量与产沙量在显著水平 0.01 时相关系数都为 1.000, 大于与径流中的全氮全磷的相关系数, 因此磷的输出主要是以泥沙结合态为主。

5 结论与讨论

5.1 结论

(1) 在相同的降雨量下, 灌草丛和次生林地都有较好的调节径流和拦蓄泥沙的作用。2006 年农地总的产流量最大, 是人工林的 1.60 倍, 分别是次生林和灌草丛的 12.45 和 5.52 倍; 农地的产沙量也远大于其余几种土地利用类型, 农地总产沙量是人工林的 8.41 倍, 是次生林的 53.06 倍, 灌草丛的 41.90 倍。2007 年农地径流场共产生径流 318.16mm, 农地产流量分别是人工林、灌草丛、次生林的 5.32 倍、24.76 倍和 19.66 倍; 农地的土壤侵蚀量为 $5156.45\text{t}/\text{km}^2$, 天然次生林和灌草丛分别比农地减少土壤侵蚀量 99.08% 和 99.28%, 比人工林减少土壤侵蚀量 52.46% 和 62.50%。

(2) 径流样中全磷的输出浓度未表现出明显规律, 2006 年 7 月份三次所采集的样品全磷浓度均为灌草丛 > 次生林 > 人工林 > 农地, 而 9 月份两次所采的径流样中农地中全磷的含量均比较高。2007 年采样数据分析得出, 6 月 11 日径流样全磷输出浓度表现为农地 > 次生林 > 灌草丛 > 人工林, 6 月 27 日则为灌草丛最大, 其次是次生林和人工林, 农地最小。6 月 28 日则表现为灌草丛最大, 其次是次生林和农地, 人工林最小。7 月径流样也表现出灌草丛较大, 人工林较小。8、9 月采集的径流样中则是农地和灌草丛全磷的输出浓度较大, 次生林和人工林的输出浓度较小。因此, 总的来说, 农地和灌草丛径流小区全磷的输出浓度较大, 次生林与灌草丛输出浓度较小。

2006 年全氮输出浓度规律为: 7 月 9 号与 7 月 13 号, 全氮的输出浓度为次生林 > 灌草丛 > 农地 > 人工林, 7 月 17 号、9 月 6 号、9 月 20 号都表现为灌草丛 > 次生林 > 农地 > 人工林。总体上来看, 灌草丛和次生林较大, 农地和人工林较小。2007 年 6 月三次所采集的样品中, 农地的全氮浓度最大, 其次是灌草丛和次生林, 而人工林的输出浓度最低。7 月三次所采集的径流中全氮的浓度在次生林和灌草丛中的浓度较高, 而在人工林和农地中的浓度较低。8 月和 9 月四次取样全氮输出浓度都为次生林 > 灌草丛 > 人工林 > 农地。

2006 年各不同地类径流中氨氮浓度均显示出人工林 > 农地 > 次生林 > 灌草丛, 这说明氨氮浓度和植被的关系基本是正相关的, 植被的覆盖度越大, 氨氮随径流

失浓度越小。2007年6月氨氮则表现为人工林最大,其次是次生林和灌草丛,农地中氨氮输出浓度较小。7月氨氮浓度为人工林较高,其次为次生林和农地,灌草丛中的输出浓度是最低的。8月和9月四次径流样中氨氮输出浓度为农地>人工林>次生林>灌草丛。

径流样中COD(化学需氧量)大体上表现为次生林和人工林较大,灌草丛和农地的COD的输出浓度较小。

(3) 径流样中全氮、全磷输出量为农地最大,其变化幅度也是最大的,其次是人工林,再次是灌草丛和次生林。不同土地利用类型中氨氮输出量有显著趋势。次生林和灌草丛的氨氮的输出量是四种土地利用型中最小的,其次是人工林地,农地的输出量是四种土地利用类型中最大的,2006年COD输出量的大致规律为农地>人工林>灌草丛>次生林。2007年COD输出量的大致规律为农地>人工林>次生林>灌草丛。

(4) 2006年不同土地利用类型侵蚀泥沙中全氮和全磷的输出量依次为:农地>人工林>灌草丛>次生林;速效氮和速效磷则为:农地>人工林>次生林>灌草丛。速效氮和速效磷在次生林中的输出量大于灌草丛,与全氮和全磷输出量相反。农地侵蚀泥沙中面源污染物输出量远大于次生林和灌草丛。

2007年不同土地利用类型小区侵蚀泥沙中,全氮输出量依次为农地>人工林>次生林>灌草丛,农地径流小区输出的全氮量是最大的,而且远大于灌草丛地,是灌草丛的71.4倍;而速效氮为农地>人工林>次生林>灌草丛,农地输出量是灌草丛的76.9倍;全磷输出规律为农地>人工林>次生林>灌草丛,农地磷输出量是灌草丛的66.7倍;不同土地利用类型速效磷输出量依次为农地>人工林>次生林>灌草丛,农地的输出量是灌草丛的5337.5倍;而灌草丛和次生林全磷的输出量相差不大,次生林输出量为灌草丛的1.33倍。

(5) 径流泥沙对养分有富集特性,全氮的富集率为灌草丛>农地>人工林>次生林,速效氮为次生林>灌草丛>人工林>农地;全磷富集率为次生林>农地>灌草丛>人工林,速效磷为次生林>人工林>灌草丛>农地;速效钾的富集率为灌草丛>次生林>人工林>农地。从总体上来看,次生林和灌草丛的养分富集率较高,农地的富集率较低。次生林和灌草丛由于植被覆盖度大,地表径流量小,土壤结构不易被破坏,泥沙以养分含量较高的细颗粒为主,农地由于植被覆盖度小,经常受到

人为活动的影响，土壤颗粒的选择性作用小，因此泥沙的养分含量小。

(6) 表层土壤中全氮含量与径流及泥沙中氮的输出量呈负相关关系，全氮含量与径流中氨氮输出量的相关系数为 0.66，而与泥沙中全氮、速效氮输出的相关系数都大于 0.95。表层土壤中速效氮含量与径流中氨氮输出量的相关系数为 0.37，因此表层土壤中的氮随径流流失的量大于泥沙中的量。表层土壤中的磷与径流及泥沙中的磷输出量正相关，表土中全磷与径流中全磷的相关系数为 0.7，而与泥沙中磷的相关系数皆大于 0.99，表层土壤养分与侵蚀泥沙中面源污染物输出的相关性大于与径流水中的，说明侵蚀泥沙引起的面源污染更大。相对于氮而言，表层土壤中的磷更易于随径流流失，磷的输出以泥沙结合态为主，特别是速效磷。

(7) 产流量、产沙量与径流及泥沙中全氮全磷输出量相关分析得到，产流量和产沙量之间相关性极其显著，径流是泥沙侵蚀的主要载体，径流流失的量决定了泥沙量的多少。从总体上来看，径流中全氮输出量与产流量的相关系数大于全磷的，说明径流中带走的全氮量更大；泥沙中全氮全磷输出量与产沙量的相关系数大于径流中全氮全磷输出量与产流量的相关系数。因此，泥沙是氮磷流失的主要载体。泥沙中全氮全磷的输出量与产沙量在显著水平 0.01 时相关系数达到 1.000，远大于与径流中的全氮全磷的相关系数，因此磷的输出主要是以泥沙结合态为主。

5.2 讨论

(1) 在相同的降雨量下，灌草丛和次生林地都有较好的调节径流和减少土壤流失的作用。农地是其中产流产沙量最大的，其次是人工林，而次生林与灌草丛是几种土地利用类型中产流产沙量较小的。农地剖面总的土壤物理性质最差，覆盖率也较差，过快的坡面径流流速，使径流入渗土壤的机会大大减小，因此其产流量和产沙量远大于其它几种土地利用类型。一些研究也证实了农地是坡面侵蚀的主要土地利用类型，天然次生林与灌丛的防蚀效应大于人工林^[87,88]。由于植被变化引起流域产流变化，流域产沙也随之变化。裸地土壤往往由于土壤结皮的存在而降低入渗率，产生地表径流；而植被覆盖的土壤则因改善的土壤特性，入渗率增大，成为降水吸收区，从而导致径流泥沙源汇区的产生。

(2) 六月农地中刚种植烤烟不久，而在澄江县尖山河流域种植烤烟时都会施氮肥，并薄膜覆盖，六月是雨季，所施的氮肥随雨水径流流失，因此六月份取样中农地全氮输出浓度最大，而六月是烤烟的生长期，烤烟以氨态氮形式吸收氮素，因此氨氮

输出量较低。到了雨季后期，灌草丛与次生林径流中全氮、全磷输出浓度较高，农地和人工林输出浓度较低。这是由于灌草丛的植被覆盖度高，植被的介入，改变了土壤的物理结构，使富含养分的细颗粒团聚体集聚地表，从而随地表径流流失所致。

(3) 农地非点源污染物的输出量最大，其次是林人工林，次生林和灌草丛的输出量较小。由于农地植被覆盖度较低，加上耕作等人为影响，因此降雨产生的径流较大，因此即使当径流样中农地的氮磷浓度不高，但是其全氮、全磷的输出量却是最大的，次生林和灌草丛氮磷的浓度较高，但是由于植被覆盖度的不同改变了降雨与地表的水文过程林冠层或枯枝落叶层减小到达地面的降水量和降雨强度，减小了降雨对地表的击溅作用从而减小径流深，减少了径流量，因此全氮全磷的输出总量较低。simth 等的研究表明地表水体中氮磷质量浓度的来源主要是农业生产^[78]。对于人工林而言，整地不仅增加了入渗，而且增加了填洼量，也起到了减小径流深从而使总氮、总磷的输出量减少。

COD 的输出量是由地类、降雨量、降雨强度、持续时间等因素综合作用的结果。从总体上来看，在相同的降雨量下，农地受到的有机污染最严重，而次生林灌草丛受到的有机污染最小。农地是四种土地利用类型中变化幅度最大的，其次是人工林，而次生林和灌草丛受降雨的影响较小，这说明次生林和灌草丛抵御污染的能力大于农地和人工林。

在澄江尖山河小流域，次生林和灌草丛较人工林和农地更有利于减少水土流失，降低非点源污染。在农地上采取一定的水土保持措施有利于水土保持。

(4) 表层土壤中氮含量与径流及泥沙中氮的输出量呈负相关关系，而表层土壤中的磷与径流及泥沙中的磷输出量正相关。即表层土壤中的氮含量越高，其越不容易随径流和泥沙流失，表土中的磷含量越高，其磷越容易随径流及泥沙流失。具体原因还不是很清楚，期待以后的进一步研究解决。

参考文献

- [1]陈泽健. 明确目标同心协力搞好珠江上游石灰岩地区综合治理试点工程[J]. 中国水土保持, 2004(2):4-5
- [2]陈文贵. 珠江上游石灰岩地区综合治理试点工程建设与管理[J]. 中国水土保持, 2005(7):20-21
- [3]郭旭东,陈利顶,傅伯杰. 土地利用/土地覆被变化对区域生态环境的影响[J]. 环境科学进展, 1999, 7(6):66-75
- [4]李俊然,陈利顶,郭旭东等. 土地利用结构对非点源污染的影响[J]. 中国环境科学, 2000, 20(6):506-510
- [5]梁涛,张秀梅,章申等. 西苕河流域不同土地类型下氮元素输移过程[J]. 地理学报, 2002, 54(4):389-396
- [6]陈源高,李文朝,李荫玺等. 云南抚仙湖窑泥沟复合湿地的除氮效果[J]. 湖泊科学, 2004, 16(4):331-337
- [7]李荫玺,刘红,陆娅等. 抚仙湖富营养化初探[J]. 湖泊科学, 2003, 15(3):285-289
- [8]侯长定,莫绍周,陈怀芬等. 抚仙湖富营养化与入湖河水处理研究[J]. 云南环境科学, 2004, 23(s2 期):98-100
- [9]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——以等高植物篱为例[J]. 地理研究, 2000, 19(3):303-340
- [10]叶许春,张世涛,李荫玺等. 抚仙湖东岸海镜—居乐段污染控制与湖滨带生态修复工程[J]. 生态经济, 2005, (2):106-110
- [11]徐进,张奇,王世和等. 云南抚仙湖湖滨带复合湿地的脱氮效果分析[J]. 给水排水, 2006, 22(3):13-16
- [12]金相灿,辛玮光,卢少勇等. 入湖污染河流对受纳湖湾水质的影响[J]. 环境科学研究, 2007, 20(4):52-56
- [13]侯长定,莫绍周,陈怀芬等. 抚仙湖富营养化与入湖河水处理研究[J]. 云南环境科学, 2004, 23(s2 期):98-100
- [14]袁东海,王兆骞,陈欣等. 红壤小流域不同利用方式氮磷流失特征研究[J]. 生态学报, 2003, 23(1):189-199.

- [15] 王晓龙,李辉信,胡锋等. 红壤小流域不同土地利用方式下土壤N、P 流失特征研究[J]. 水土保持学报,2005,19(5):31-34.
- [16] 吕唤春,薛生国,方至发等. 千岛湖流域不同土地利用方式对氮磷流失的影响[J]. 中国地质,2004,31(增刊):113-117.
- [17] 黄云凤,张珞平,洪华生等. 不同土地利用对流域土壤侵蚀和氮、磷流失的影响[J]. 农业环境科学学报,2004,23(4):735-739.
- [18] 黄进勇,严力蛟,王兆骞. 红壤小流域不同土地利用方式下的水土流失特征[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2002,28(1):78-82.
- [19] S D Merrill, J M Krupinsky, D L Anderson. Soil coverage by residue as affected by ten crop species under no-till in the northern Great Plains[J]. Soil and Water Conservation,2006,61(1):7-13.
- [20] R N Lerch, N R Kitchen, R J Kremer et al. Development of a conservation-oriented precision agriculture system: Water and Soil quality assessment[J]. Soil and Water Conservation, 2005,60(6):411-420.
- [21] 梁淘,王红萍,张秀梅等. 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,2005,25(4):483-490.
- [22] 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季节性分布特征[J]. 环境科学学报,2005,25(11):1543-1549.
- [23] 陈吉宁,李广贺,王洪涛. 滇池流域面源污染控制技术研究[J]. 中国水利,2004(9):47-50
- [24] Lal R. Research and development priorities in soil degradation[J]. Advance in Soil Science. 1990,3(2):331-336
- [25] A. McGrath, C. Kemsith, Henry L, et al. Effects of land-use change on soil nutrient dynamics in american dcborah[J]. Ecosystems,2001,(4):625-645
- [26] 王全九,王文焰,沈冰,等. 降雨—地表径流—土壤溶质作用深度[J]. 水土保持学报,1998,4(2):41-46
- [27] Hudson N W. Soil Conservation[M]. 1975,Beijing: China Scientific Press
- [28] Hibbert A R. Water yield changes after converting a forested catchment to grass[J]. Water Resour. Res. , 1969 ,5:634-640.

- [29]Swank W T, Swift J L W, Douglass J E. Stream flow changes associated with forest cutting, species conversions, and natural disturbances[A]. In Swank W T and Crossley D A (editors), *Forest Hydrology and Ecology at Coweeta*[C]. *Ecol. Stud.*, 1988, 66:297-312.
- [30]Imeson A C and Prinsen H A M. Vegetation patterns as biological indicators for identifying runoff and sediment source and sink areas for semi-arid landscapes in Spain[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, 104: 333-342.
- [31]Cammeraat L H and Imeson A C. Deriving indicators of soil degradation from soil aggregation studies in southeastern Spain and southern France[J]. *Geomorphology*, 1998, 23: 307-321.
- [32]Tongway D and Hindley N. Assessing and monitoring desertification with soil indicators[A]. In: Arnalds O and Archer S editors. *Advances in Vegetation Science 19: Rangeland Desertification*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht[C], 1999.89-98.
- [33]Sánchez Gand Puigdefábregas J. Interactions of plant growth and sediment movement on slopes in a semi-arid environment. *Geomorphology*, 1994, 9:243-260.
- [34]Cammeraat L H, Imeson A C. The evolution and significance of soil vegetation patterns following land abandonment and fire in Spain. *Catena*, 1999, 37:107-127
- [35]Cammeraa L H. Scale dependent thresholds in hydrological and erosion response of a semi-arid catchment in southeast Spain[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, 104:317-332.
- [36]Puigdefabregas J, Sanchez G. Geomorphological implications of vegetation patchiness on semi-arid slopes[A]. In: Anderson M G and Brooks S M eds. *Advances in Hillslope Processes*[C]. Wiley, London, 1996. 1027-1060.
- [37]Mulligan M. Modelling the complexity of land surface response to climatic variability in Mediterranean environments[A]. In: Anderson M Gand Brooks S M eds. *Advances in Hillslope Processes*[C]. Wiley, London, 1996. 1099-1150.
- [38]石健,郭小平,孙艳红等. 森林植被对径流形成机制的影响[J]. *水土保持应用技术*,2006,(2):5-8

- [39]蔡崇法,丁树文,张光远等. 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
- [40]张兴昌,邵明安. 黄土丘陵区小流域土壤氮素流失规律[J]. 地理学报,2000,55(5):617-626
- [41]张兴昌,刘国彬,付会芳. 不同植被覆盖度对流域氮素径流流失的影响. 环境科学,2000,6:16-19
- [42]彭琳,王继增,卢宗藩. 黄土高原旱作土壤养分剖面运行与坡面流失的研究[J]. 西北农业学报,1994,3(1):62-66
- [43]窦培谦,王晓燕,秦福来等. 农业非点源氮磷流失规律研究[J]. 安徽农学通报,2005,11(4):151-153
- [44]陈浩. 降雨特征和上坡来水对产沙的综合影响[J]. 水土保持学报,1992,6(2):17-23
- [45]吕甚悟,李君莲. 降雨及土壤湿度对水土流失的影响[J]. 土壤学报,1992,29(1):94-103
- [46]陈欣,姜曙千,张克中等. 红壤坡地磷素流失规律及其影响因素[J]. 水土保持学报,1999,5(3):38-41
- [47]程红光,郝芳华,任希岩等. 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,2006,26(3):392-397
- [48]李韵珠等著. 土壤水和养分的有效利用[M]. 北京:农业大学出版社,1994
- [49]赵敏慧,杨树华,王宝荣. 不同植被类型对土壤全氮随降雨径流流失的控制研究—以抚仙湖流域磷矿开采区为例[J]. 云南地理研究,2006,18(4):20-26
- [50]窦培谦,王晓燕,秦福来等. 农业非点源氮磷流失规律研究[J]. 安徽农学通报,2005,11(4):151-153
- [51]李俊然,陈利顶,郭东旭等. 土地利用结构对非点源污染的影响[J]. 中国环境科学,2000,20(6):506-510.
- [52]Sanchez LA, Ataroff M, Lopez R. Soil erosion under different vegetation covers in the Venezuelan Andes[J]. The Environmenta list, 2002,22:161-172
- [53]陈永宗. 黄河粗泥沙来源及侵蚀产沙机理研究文集[M]. 北京:气象出版社,1989
- [54]帅红,夏北成. 广佛区域土地利用结构对非点源污染的影响[J]. 热带地

- 理,2006,26(3):229-233
- [55]Hans H, Kebede T, Gete Z. The Implication of Changes in Population, land use, and land management for surface runoff in the upper Nile basin area of Ethiopia[J]. Mountain research and development,2005,25(2):147-154
- [56]Tao Liang, Hao Wang, Hsiang-te Kung, et al. Agriculture land-use effects on nutrient losses in west TiaoXi watershed, china[J]. Agriculture Journals,2004,40(6):1499-1510
- [57]Li Qi, Cheng li-ding, QiXin, et al. Assessing field vulnerability to phosphorus in Beijing agricultural area using revised field phosphorus ranking scheme. Journal of Enviroment Sciences(china)[J],2007,19(8):977-985
- [58]李兆富,杨桂山,李恒鹏. 西苕河流域不同土地利用类型营养盐输出系数估算[J]. 水土保持学报,2007,27(1):1-4
- [59]杨金玲,张甘霖,周瑞荣. 皖南丘陵地区小流域氮素径流输出的动态变化[J]. 农村生态环境,2001,17(3):1-4
- [60]王晓燕,王一响. 密云水库小流域土地利用方式与氮磷流失规律[J]. 环境科学研究,2003,16(1):30-33
- [61]高超,张桃林. 不同利用方式下农田土壤对磷的吸持与解吸特征[J]. 环境科学,2001,22(4):67-72
- [62]高超,张桃林. 太湖地区丘陵旱地土壤磷的吸持解吸特征[J]. 湖泊科学,2001,13(3):255-260.
- [63]陈欣,王兆骞. 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,2000,20(3):374-377
- [64]陈国军,曹林奎. 稻田氮素流失规律测坑研究[J]. 上海交通大学学报,农业科学版.2003,21(4):320-324
- [65]张志剑,董亮. 水稻田面水氮素的动态特征、模式表征及排水流失研究[J]. 环境科学学报.2001,21(4):476-480
- [66]Withersp J A, Stepher D C, Victor G. Phosphorus transfer in runoff following application of fertilizer, manure, and sewage sludge[J]. Environ Qual., 2001, (30) :180-188

- [67] Siddique M T, Robinson J S, Alloway B J. Phosphorus reactions and leaching potential in soil amended with sewage sludge[J]. Environ. Qual., 2000, 29: 1931-1938
- [68] 李裕元, 邵明安. 土壤翻耕影响坡地磷流失试验研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 443-448
- [69] 王福堂. 晋西黄土高原土壤侵蚀管理与地理信息系统研究[M]. 北京: 科学出版社, 1988
- [70] 全国土壤普查办公室. 中国土壤分类系统[M]. 北京: 农业出版社, 1993
- [71] 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, 19(3): 335-341
- [72] 马琨, 王兆骞, 陈欣等. 不同雨强条件下红壤坡地养分流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 16-19
- [73] 王晓燕, 王一岫, 蔡新广等. 北京密云水库流域非点源污染现状研究[J]. 环境科学与技术, 2002, 25(4): 1-3
- [74] 王晓龙, 李辉信, 胡锋等. 红壤小流域不同土地利用方式下土壤 N, P 流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 31-35
- [75] 李宪文, 史学正, Coen Ritsema. 四川紫色土区土壤养分径流和泥沙流失特征研究[J]. 资源科学, 2002, 24(6): 22-28
- [76] 杨爱玲, 朱颜明. 地表水环境非点源污染研究[J]. 环境科学进展, 1998, 7(5): 60-67
- [77] 骆伯胜, 钟继洪, 卓慕宁等. 博罗县下村农场土壤养分概况[J]. 热带亚热带土壤科学, 1994, 3(2): 90-96
- [78] Smith R A, Alexander R B, Wolman M G. Water quality trends in the nation's river[J]. Science, 1995, 235: 1607-1615
- [79] USDA. Water Erosion Prediction Project[J]. Erosion Prediction Model Version 94, 3 User Summary NSERL Report. No. 8, d.c. Flanagan(ed.) National Soil Erosion Research Laboratory, USDA-ARS West Lafayette, Indiana, 1994.
- [80] 江忠善, 王志强, 刘志. 应用地理信息系统评价黄土丘陵区小流域土壤侵蚀的研究[J]. 水土保持研究, 1996, 3(2): 84-97.
- [81] 李玉山, 刘国彬, 刘宝元等. 中美小流域治理和农业的对比研究[J]. 水土保持通报, 1993, 13(1): 11-15

- [82]张宇. 滇池沿岸台地水土流失特征与控制对策分析[J]. 云南环境科学,2006,25(1):31-34
- [83]张水铭,马杏法,汪祖强. 农田排水中磷素对苏南太湖水系的污染[J]. 环境科学,1993,14(6):24-29.
- [84]周祖澄,金振玉,王洪玉等. 固体氮肥施入旱田土壤中去向的研究[J]. 环境科学,1985,6(6):2-7.
- [85]郑剑英,吴瑞俊,翟连宁. 氮磷配施对坡地谷子吸 N,P 量及土壤养分流失的影响[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(5):94-98
- [86]张兴昌,邵明安,黄占斌等. 不同植被对土壤侵蚀和氮素流失的影响[J]. 生态学报,2000,20(6):1038 - 1044
- [87]刘卉芳,朱清科,孙中峰等. 黄土坡面不同土地利用与覆盖方式的产流产沙效应[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(2):137-141
- [88]陈奇伯,寸玉康,刘芝芹等. 滇西高原不同地类坡面产流产沙规律研究[J]. 水土保持研究,2005,12(2):71-73

致谢

2008年夏季已然来临，我的研究生生涯已接近尾声。回想漫漫求学路，充满了艰辛与苦涩，可是此时此刻，在即将挥手告别母校、老师和朋友的时候，心中却充满了无限的眷念和感慨。

该论文是在导师王克勤教授的悉心指导下完成的，在论文的选题、研究思路以及论文的修改上王老师付出了大量的心血。王老师治学严谨、一丝不苟，对学生严格要求，十分注重启发学生的思维。在研究过程中，他不仅为我创造了较好的研究条件和良好的环境，还在生活上给予我无微不至的关怀和照顾。在王老师的教导下，攻读硕士研究生期间，我不仅巩固了专业知识，开阔了视野，还扩展了思维，为我今后的研究工作打下了坚实的基础。在论文完成之际，谨向导师表示衷心的感谢！

学习和论文完成过程中，在实验方法上得到了孙孝龙老师、刘云根老师的大量指导，还得到了杨芳、龙午、李开书等师兄、师姐的帮助，在此致以真诚的谢意。在实验中得到了李洪波、依倭传、和甲秋、李乃娟、李立军、沙照海同学的协助以及澄江县水电局水保办的工作人员的大力支持和帮助，在此向他们表示感谢！还有许多不能一一列举的同学及朋友的帮助，在此一并给予我最真诚的谢意。

还有我的家人，在我求学期间，给予了我经济及精神上的大力支持，在此向他们致以我最真挚的谢意。特别是我的妈妈，可以说，没有她的理解和支持，没有她的坚强和宽容的爱，就不会有今天的我，妈妈所给予的一切不是一个谢字可以表达完的。

由于作者的实践经验和理论水平有限，因此疏漏和错误之处在所难免，敬请各位专家批评指正。

最后，感谢在百忙之中评阅论文和参加答辩的各位专家、教授！

附录：发表论文情况

- 1 《澄江尖山河小流域不同土地利用类型面源污染输出特征》，水土保持学报，2008年第二期，第一作者；
- 2 《澄江尖山河小流域不同地类地表径流氮磷流失特征研究》，环境科学研究，2008年第四期，第一作者；
- 3 《金沙江峡谷退耕经济林地昆虫多样性分析》，西南林学院学报，2006年第五期，第四作者。