

不同施肥管理模式对集雨区苗木地径流氮素流失的影响

叶照金^{1,2}, 廖敏^{1,2}, 黄宇^{1,2}, 吕婷^{1,2}, 沈杰³, 张云³

(1. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 2. 浙江省亚热带土壤与植物营养重点研究实验室, 杭州 310058; 3. 浙江省长兴县环境监测站, 浙江长兴 313100)

摘要: 采用田间径流小区定位研究方法, 以合溪水库集雨区苗木种植地为研究对象, 设置了撒施(对照)、地膜覆盖、秸秆覆盖、区外设置植草缓冲带、条施、穴施 6 种施肥管理处理小区, 探究不同施肥管理模式对合溪水库集雨区苗木地径流氮素流失的影响, 筛选最佳施肥管理模式。结果表明: 不同施肥管理模式下, 苗木地地表径流年总氮素径流流失通量大小顺序为: 撒施(对照) > 覆膜 > 条施 > 穴施 > 区外植草缓冲带 > 秸秆覆盖, 撒施(对照)、地膜覆盖、条施、穴施、区外设置植草缓冲带和秸秆覆盖 6 种施肥管理模式下的年总氮素径流流失通量分别为 35.61, 18.30, 15.86, 12.94, 8.18, 3.44 kg/(hm² · a), 说明穴施、区外设置植草缓冲带和秸秆覆盖是较佳的施肥管理模式, 将其优化组合后会显著消减水库集雨区苗木地径流氮素流失及其对水库水质的潜在影响。此外, 不同施肥管理模式下, 苗木地径流水样氮素流失的主要形态为颗粒态氮, 其次为硝态氮, 其中, 撒施(对照)、地膜覆盖、秸秆覆盖、区外植草缓冲带、条施和穴施年均流失的颗粒态氮占流失总氮的比例分别为 69.11%, 68.87%, 68.04%, 61.89%, 61.17% 和 65.09%; 年均流失的硝态氮占流失总氮的比例分别为 23.18%, 23.36%, 20.21%, 27.20%, 32.02% 和 28.71%。

关键词: 合溪水库; 苗木地; 地表径流; 氮素流失

中图分类号: S157.4; X131 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2016)06-0030-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.06.006

Influence of Different Management Mode of Fertilization on Nitrogen Losses in Runoff from Nursery Land in a Catchment Area

YE Zhaojin^{1,2}, LIAO Min^{1,2}, HUANG Yu^{1,2}, LÜ Ting^{1,2}, SHEN Jie³, ZHANG Yun³

(1. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058;
2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Subtropical Soil and Plant Nutrition, Hangzhou 310058;
3. Changxing Station of Environmental Monitoring, Changxing, Zhejiang 313100)

Abstract: The aims of the present study were to maximize the reduction of nitrogen loss from farmland and protect the main source of drinking water and stream water quality for Hexi reservoir. Site-specific observation was carried out in the present study, plots for nursery land with six fertilization management modes were selected, including broadcast placement (contrast), plastic mulching, straw mulching, setting buffer for planting grass around nursery land, band placement and hole placement, to explore the influence of different fertilization management mode on nitrogen losses in surface runoff and screen the best fertilization management mode in the catchment area of Hexi reservoir. The results showed that under different fertilization management modes, the order of the concentration of annual nitrogen loss in the runoff was: broadcast placement (contrast) > plastic mulching > band placement > hole placement > setting buffer for planting grass around nursery land > straw mulching. The mean annual runoff load of total nitrogen from broadcast placement (contrast), plastic mulching, band placement, hole placement, setting buffer for planting grass around nursery land and straw mulching was 35.61, 18.30, 15.86, 12.94, 8.18, 3.44 kg/(hm² · a), respectively. The results indicated that hole placement, setting buffer for planting grass and straw mulching were better fertilization management modes, which would significantly reduce nitrogen runoff from non-point source output of nursery land and weaken the potential impact on water quality of Hexi reservoir by optimum combination of the above-mentioned better fertilization management mode in nursery land in the catchment area of Hexi reservoir in Changxing

收稿日期: 2016-07-10

资助项目: 国家公益性行业(农业)专项(201003059); 国家重点研发计划项目(2016YFD0200800)

第一作者: 叶照金(1990—), 男, 重庆荣昌人, 硕士研究生, 主要从事土壤环境化学、水污染治理及农业面源污染研究。E-mail: 1066711803@qq.com

通信作者: 廖敏(1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤碳氮循环与土壤微生物及其对环境变化响应之间的关系研究。E-mail: liaomin@zju.edu.cn

county. In addition, particulate nitrogen was the dominant form of nitrogen loss in the runoff, followed by nitrate nitrogen under all fertilization management modes. Furthermore, for the management mode of broadcast placement(contrast), plastic mulching, straw mulching, setting buffer for planting grass around nursery land, band placement and hole placement, annual loss of particulate nitrogen in the runoff accounted for about 69.11%, 68.87%, 68.04%, 61.89%, 61.17% and 65.09% of the total nitrogen losses, respectively; annual loss of nitrate nitrogen in the runoff accounted for about 23.18%, 23.36%, 20.21%, 27.20%, 32.02% and 28.71% of the total nitrogen losses, respectively.

Keywords: Hexi reservoir; nursery land; runoff; nitrogen losses

地表水体富营养化的重要原因之一是农田养分流失带来的面源污染物^[1]。农田养分流失主要通过地表径流、农田排水和地下淋溶 3 种途径将污染物排入各水域^[2],并直接污染周边湖泊、河流和地下水。污染物是以氮磷为主的化合物,而地表径流又是农田 N、P 养分流失的主要途径之一,在美国被列为导致全美河流和湖泊污染的第三大污染源^[3]。我国耕地利用强度大,化肥消耗量已远超其他国家^[4],农田养分流失情况更加严重。研究表明,农田养分 N、P 流失影响因素复杂,主要受降雨^[5]、土地类型^[6]、管理模式^[7]等的影响。其中来自不同利用类型土地来源方式的降雨径流携带的污染物质对地表水体氮、磷污染负荷具有重要的贡献,可能成为地表水体富营养化的主要来源^[8],但不同土地利用类型 N、P 径流流失输出具有较大差异。章明奎等^[9]进一步研究表明苗木种植地 N 素径流流失量少于水田及早地,说明苗木种植是减少农田 N 素面源输出的较佳土地利用方式。

合溪水库位于浙江省长兴县,是该县近 40 万人的主要饮用水源,其水质质量直接影响着当地居民的身体健。合溪水库上游集雨区存在 2 333 hm² 耕地,因此耕地的 N、P 面源输出是威胁合溪水库水质的重要污染源之一,为了削减耕地的 N、P 面源输出,基于已有研究成果证明苗木种植相对具有氮磷径流流失少、施肥频率低、经济效益高等特征,长兴县政府对合溪水库上游集雨区耕地种植结构进行调整,大力发展苗木产业,目前已有近 1/3 约 800 hm² 调整为苗木种植地。目前,结构调整后的苗木地种植过程中,肥料的施用管理方式仍以撒施为主,如何优化合溪水库集雨区苗木种植地的肥料施用管理方式,是进一步优化减少集雨区耕地的 N 素面源输出的关键,但相关研究缺乏。鉴此,本研究采用田间径流小区定位研究方法,以合溪水库集雨区苗木种植为研究对象,设置撒施(对照)、地膜覆盖、秸秆覆盖、区外植草缓冲带、条施、穴施 6 种施肥管理处理小区,探明不同施肥管理模式对合溪水库集雨区苗木地径流氮素流失的影响,以期为合溪水库集雨区苗木地种植提供优化的施肥管理方式,进一步实现集雨区耕地农业面源输出减量化和有效保护合溪水库水质提供科学依据和技术指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于浙江省湖州市长兴县合溪水库集雨区煤山镇(31°5'30"N,119°42'22"E),距离合溪水库集雨区雨水入库口 10 km。该地区属亚热带海洋性季风气候,年均降雨 1 309 mm,年平均雨日 144 d,历年平均气温 15.6 °C,年均日照时数 1 810.3 h。研究区地形主要为平原和低山,主要土壤类型为水稻土,中等肥力水平^[10]。合溪水库集雨区苗木地土壤(0—10 cm)基本性质:pH 6.56,有机质含量 17.23 g/kg,硝态氮含量 21.83 mg/kg,铵态氮含量 256.62 mg/kg,全氮含量 6.25g/kg,全磷含量 0.15g/kg。

1.2 试验设计与处理

为了探究不同施肥及地表管理模式对合溪水库集雨区苗木地径流氮素流失的影响,本研究采用径流小区定位试验,在集雨区苗木地试验设置 6 个定位小区,分别为:撒施(对照)(编号 M-s)、地膜覆盖(编号 M-m)、秸秆覆盖(编号 M-j)、区外植草缓冲带(编号 M-c,是在撒施区外设置同等面积植草缓冲带)、条施(编号 M-t)、穴施(编号 M-x)6 种处理。每个小区尺寸均为 4 m×4 m。各小区间起垄并用塑料薄膜隔开,以防小区间水的相互流动,膜埋深 80 cm。每小区留一排水口,在排水口安装一根长 1~3 m,内径 10 cm 的 PVC 管,出水口接一个容量约 1 m³ 的径流池,池上加盖。当地表径流发生时,计量地表径流量,并同时采集地表径流样品。监测期全年施肥以当地苗木地常年施肥习惯为主,采样复合肥(总养分≥48%,N:P₂O₅:K₂O=16:16:16),于每年 6、9 月各施 1 次,每次约 2.25 t/hm²,全年共施肥 4.5 t/hm²。径流小区定位试验持续 1 年。

1.3 采样及测定方法

(1)径流量记载。每次降水并产生径流后,记载不同处理小区径流池水面高度(mm),计算径流量。遇连续多日降雨季节,在多天下雨径流池水量达到 80%以上,计算径流量,但最大间隔在 7 天以内。

(2)径流水采样。记录径流量后即采集径流水样。每次降雨开始后,记录降雨开始时间,降雨结束

后,记录降雨持续时间,同时记录降雨量大小,并记录不同处理小区径流池水深,得到总径流量。采样前用竹片搅拌径流池,混匀径流水,采集 500 ml 水样在实验室分析相关理化指标,测定的理化指标包括总氮、溶解性氮、硝态氮、铵态氮、颗粒态氮等。

(3)样品分析测定。总氮(TN)直接采用水样进行测定,可溶性氮(DN)、硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)用经 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤后的水样进行测定。各指标测定方法见《水和废水监测分析方法》^[11],其中,TN、DN 含量用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法测定, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量用纳氏试剂光度法测定, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量用紫外分光光度法测定。

1.4 数据分析

各时段径流不同形态氮流失量为各时段径流体积乘以各时段相应形态氮的浓度,总负荷量为各时段各形态氮素流失量之和:

$$L_i = \sum_i^n C_{ti} \times Q_{ti}$$

式中: L_i 为一场降雨中 i 项污染物的流失量(mg); C_{ti}

为第 t 时段内 i 项污染物浓度(mg/L); Q_{ti} 为第 t 时段内 i 项污染物的径流量(L)。

数据处理采用 SPSS 11.5 软件对数据进行统计分析,差异显著性分析采用 LSD 法,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 合溪水库集雨区降雨特征

表 1 是径流小区定位试验期间(2015 年 4 月至 2016 年 3 月)降雨特征。由表 1 可知,试验期间合溪水库集雨区年降雨量为 1 606.7 mm,与常年相比降雨量多 297.7 mm(图 1)。试验期间降雨次数为 136 次,略低于常年的 144 次(图 1)。4—11 月是试验期间全年降雨集中期,占全年降雨的 86.1%。7 月降雨量最大,为 259.9 mm,2 月份降雨量最小,仅为 28.5 mm,最大月降雨量为最小月降雨量的 9 倍。由图 1 可知,集雨区常年降雨与试验期间降雨特征略有差异,常年降雨相对集中在 3—9 月,期间降雨量占年雨量的 75%以上。

表 1 合溪水库集雨区试验期间年降雨特征

日期(年—月)	降雨量/		降雨		小雨		中雨		大雨		暴雨	
	mm	场数	降雨量/mm	场数	降雨量/mm	场数	降雨量/mm	场数	降雨量/mm	场数	降雨量/mm	场数
2015	4 月	156.4	13	42.3	8	67.7	4	46.4	1			
	5 月	159.8	11	28.5	6	23.7	2	53.9	2	53.7	1	
	6 月	243.3	16	19.0	4	129.7	10	26.3	1	68.3	1	
	7 月	259.9	14	23.4	8	78.1	4	27.5	1	130.9	2	
	8 月	118.4	12	33.8	9	11.4	1	73.2	2			
	9 月	193.0	8	25.7	4	31.9	2	42.2	1	93.2	1	
	10 月	93.7	9	25.3	5	68.4	4					
	11 月	158.1	20	62.3	15	65.4	4	30.4	1			
	12 月	51.1	7	14.3	4	36.8						
	1 月	90.8	17	36.3	13	54.5	4					
	2 月	28.5	3	11.1	2	17.4	1					
	3 月	53.7	6	9.5	5			44.2	1			
总计	1606.7	136	331.5	83	585.0	36	299.9	9	346.1	5		

注:降雨类型的划分标准按 1986 年 10 月农业出版社的《中国农业百科全书》农业气象卷的划分标准:小雨<10 mm/24 h,中雨 10.0~24.9 mm/24 h,大雨 25.0~49.9 mm/24 h,暴雨 50~99.9 mm/24 h,大暴雨 100~199.9 mm/24 h,特大暴雨≥200 mm/24 h。

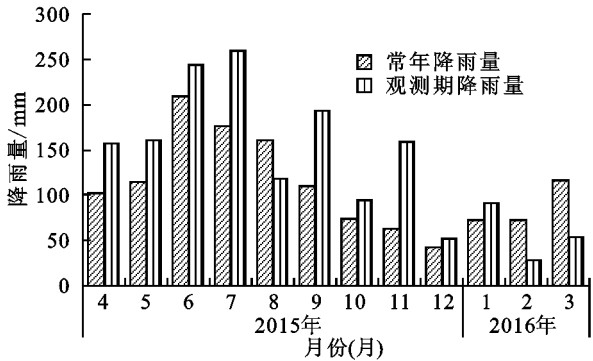


图 1 合溪水库集雨区常年降雨量与试验期间降雨量对比

2.2 不同施肥管理模式 下合溪水库集雨区苗木地径流特征

降雨量的大小直接影响苗木地不同施肥管理小

区的地表径流,由图 2 可知,虽然不同施肥管理模式对相应试验小区径流量的影响不同,但所有试验小区径流量均与降雨量呈显著正相关关系(图 2),相关关系分别为:撒施(对照) $R^2=0.6717$;地膜覆盖 $R^2=0.7879$;秸秆覆盖 $R^2=0.5497$;区外植草缓冲带 $R^2=0.5919$;条施 $R^2=0.6610$;穴施 $R^2=0.7183$ 。但不同施肥管理模式小区的径流量存在显著差异,与撒施(对照)区相比,秸秆覆盖和区外植草缓冲带试验小区径流量减少了 42.25%和 36.97%;条施和穴施试验小区径流量增大了 9.20%和 4.94%;但地膜覆盖试验小区径流量增加了 342.05%,达到撒施(对照)区的 4.42 倍。

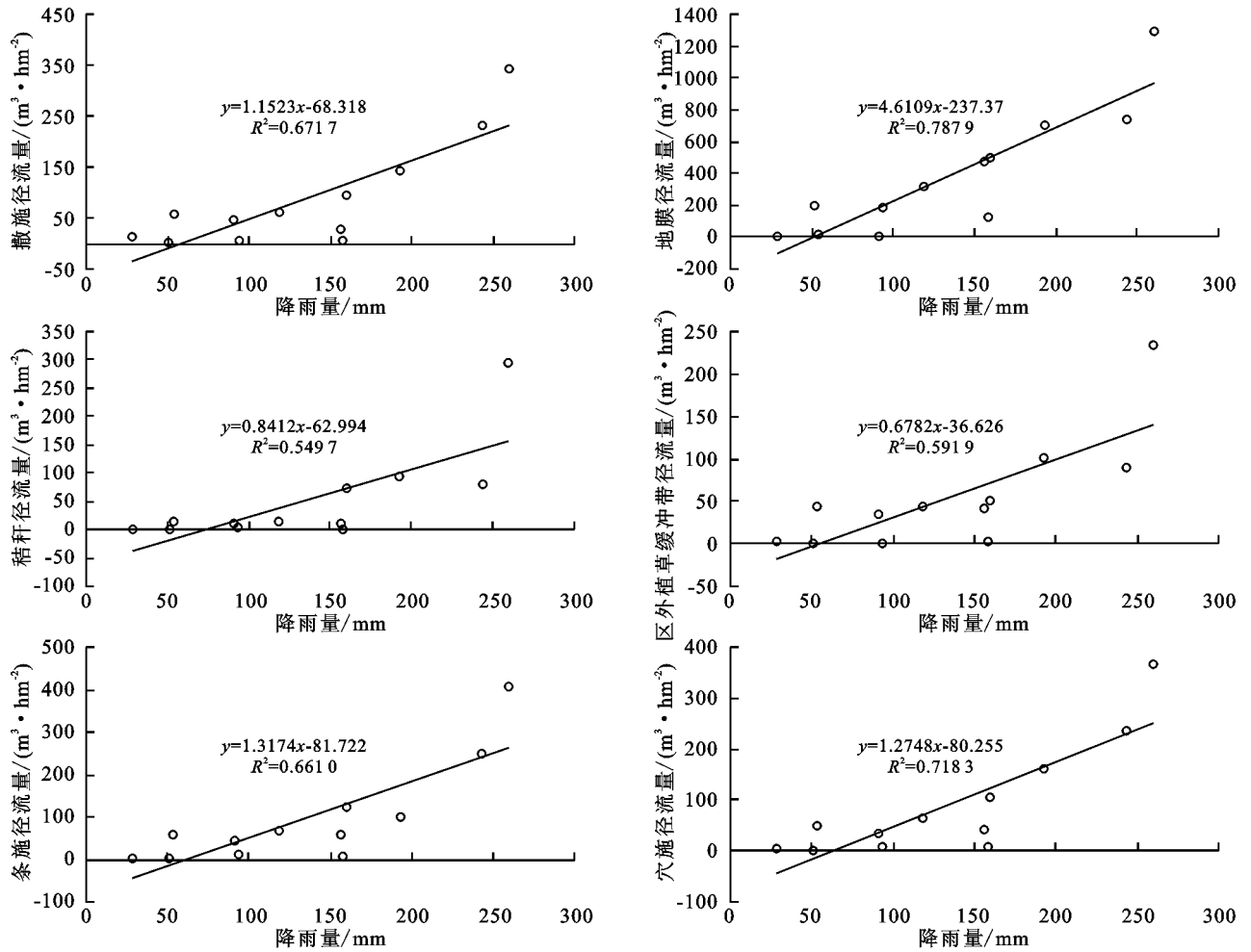


图 2 合溪水库集雨区苗木地不同施肥管理模式下的径流量特征

综合图 2 分析可知,合溪水库集雨区不同施肥管理模式苗木地降雨量与径流量均有密切的正相关关系,且拟合度较高,这与赵欣^[12]、熊亚兰等^[13]的研究一致。造成不同施肥管理模式试验小区径流量差异较大的原因是秸秆覆盖和区外植草可减少降雨对土壤的直接冲刷,增加雨水的入渗时间,提高土壤入渗能力,进而减少径流;而条施、穴施对地表土壤的松动面积相对较少,雨水入渗土壤时间较短,导致了径流量较大;地膜覆盖直接阻隔了雨水对土壤直接冲刷作用,致大部分降雨直接随径流排出,使得地膜覆盖试验小区径流量达到撒施(对照)区的 4.42 倍。

2.3 不同施肥管理模式下合溪水库集雨区苗木地径流氮素流失特征

2.3.1 总氮流失浓度动态特征 由图 3 可知,在持续 1 年的径流小区试验期间,不同施肥管理模式小区的径流水样中总氮浓度呈现波动变化特征,其中撒施(对照)、区外植草缓冲带、条施、穴施处理小区的径流总氮最大浓度值出现在 7 月份,分别为 4.14, 1.27, 1.27, 1.11 mg/L;而地膜覆盖与秸秆覆盖处理小区的径流总氮浓度最大值分别出现在 1 月和 9 月,分别

为 0.39, 0.53 mg/L。6 类施肥管理模式苗木地径流水样中,撒施(对照)小区径流总氮浓度波动随时间的变化最为剧烈,全年在 1.98~4.14 mg/L 间波动。平均值为 $(2.44 \pm 0.94) \text{mg/L}$,其他 5 个处理小区的径流总氮浓度波动随时间的变化表现相对平缓,地膜覆盖、秸秆覆盖、区外植草缓冲带、条施和穴施 5 种处理小区径流总氮浓度波动区间和平均值分别是 0.10~0.56, $(0.28 \pm 0.08) \text{mg/L}$; 0.22~0.81, $(0.37 \pm 0.14) \text{mg/L}$; 0.60~1.27, $(0.95 \pm 0.27) \text{mg/L}$; 0.40~1.90, $(0.96 \pm 0.28) \text{mg/L}$; 0.40~2.01, $(0.86 \pm 0.26) \text{mg/L}$ 。撒施(对照)小区径流氮浓度波动随时间的变化表现为先升高,7 月份达到相对峰值,8 月份降低,至 9 月份又达到另一相对峰值,之后逐渐降低,形成这一变化特征的原因可能是 6,9 月的应季施肥并遭遇强降雨造成的。6—7 月处于梅雨季节,9 月遭遇台风等天气,降雨相对集中,降雨持续时间长,降雨量、降雨强度大,土壤表面直接受雨水冲刷,导致撒施的总氮大量淋失。而其他 5 个处理小区径流总氮浓度波动随时间的变化相对平缓,且浓度显著低于撒施处理,其的原因是:地膜覆盖和秸秆覆盖阻隔了雨水与土壤的

直接冲刷作用;条施、穴施降低了雨水直接对所施肥料的直接淋洗作用;区外植草则形成了拦截缓冲带,使得直接径流带出的氮素得到一定的拦截。

整个径流小区试验期间,相对于撒施(对照)管理,地表覆膜、秸秆覆盖、区外植草缓冲带、条施、穴施处理小区径流总氮浓度显著下降,分别下降了 88.38%,83.27%,63.55%,59.57%,65.46%,地表覆膜、秸秆覆盖处理小区,下降最多,说明合理的施肥管理方式可进一步有效削减苗木地氮素的流失,施肥管理方式是影响径流氮素流失浓度的重要因素之一,这一结果与刘宗岸等^[14]和李广等^[15]的研究一致。

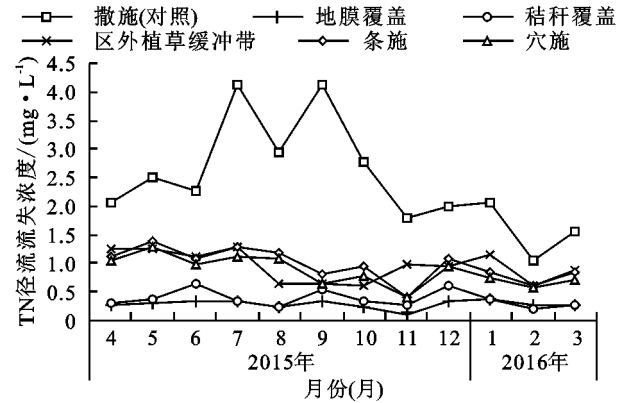


图 3 不同施肥管理模式苗木地径流总氮浓度动态变化

2.3.2 颗粒态氮流失浓度动态特征 由图 4 可知,试验期内不同施肥管理模式小区的径流水样中颗粒态氮浓度随时间呈不同程度的波动变化特征。其中,撒施(对照)、区外植草缓冲带、条施、穴施等处理颗粒态氮径流流失浓度最大值出现在 7 月,分别为 3.35, 1.42, 1.92, 1.75 mg/L。地膜、秸秆颗粒态氮径流流失浓度最大值出现在 4 月,分别为 0.37, 0.55 mg/L。6 类施肥管理模式苗木地径流水样中,撒施(对照)小区径流颗粒态氮浓度波动随时间的变化最为剧烈,全年在 0.20~3.35 mg/L 间波动,平均值为(1.86±0.88)mg/L。其他 5 个处理小区中,区外植草缓冲带、条施和穴施处理小区径流颗粒态氮浓度波动随时间变化表现较为剧烈,其波动区间和平均值分别是:0.11~1.42, (0.67±0.40)mg/L; 0.13~1.65, (0.79±0.48)mg/L; 0.28~1.14, (0.65±0.43)mg/L; 而地膜覆盖、秸秆覆盖处理小区径流颗粒态氮浓度波动随时间的变化相对平缓,且都处于较低水平,2 种处理小区径流颗粒态氮浓度波动区间和平均值分别为:0.05~0.47, (0.21±0.08)mg/L; 0.14~0.55, (0.27±0.12)mg/L。说明降雨量和施肥管理方式对雨水与土壤的冲刷作用控制以及径流过滤作用是影响苗木地小区径流颗粒态氮浓度变化的重要因素,这与不同施肥后的地表管理方式苗木地径流总氮浓度变化形成的原因一致。

同时,从图 4 还可看出,不同处理小区中径流颗粒态氮浓度均与径流总氮浓度接近,撒施(对照)、地膜覆盖、秸秆覆盖、区外设置植草缓冲带、条施、穴施分别占总氮浓度的 76.32%, 72.19%, 72.80%, 70.10%, 81.95%, 75.94%。意味着颗粒态氮是径流氮素流失的主要形式,原因是降雨径流产生过程中,雨水侵蚀土壤,相当一部分氮富集到泥沙中随径流流失之故^[16-17]。

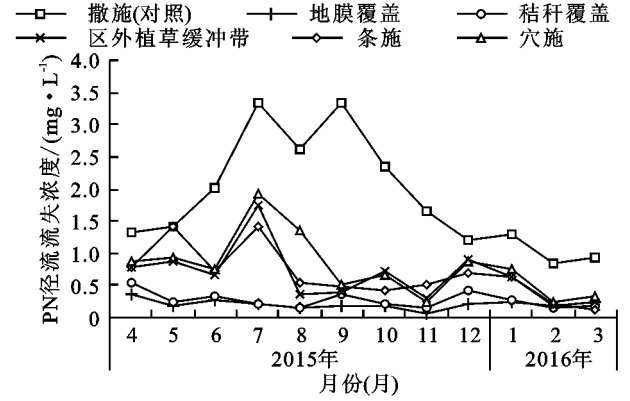


图 4 不同施肥管理模式苗木地径流颗粒态氮浓度动态变化

2.3.3 硝态氮流失浓度动态特征 由图 5 可知,不同施肥管理模式小区的径流水样中硝态氮浓度动态特征波动明显。其中,撒施(对照)、区外植草缓冲带和条施、穴施处理小区径流硝态氮浓度 7 月份达到最大,分别为 0.41, 0.19, 0.29, 0.19 mg/L; 而地膜覆盖和秸秆覆盖小区硝态氮径流流失浓度在 9 月份达到最大,分别为 0.13 mg/L 和 0.16 mg/L。6 类施肥管理模式苗木地径流水样径流硝态氮浓度波动随时间的变化都较为剧烈,撒施(对照)、地膜覆盖、秸秆覆盖、区外植草缓冲带、条施和穴施 6 处理小区径流硝态氮浓度波动区间和平均值分别是 0.17~1.98, (0.25±0.11) mg/L; 0.04~0.94, (0.08±0.03)mg/L; 0.03~0.17, (0.09±0.04) mg/L; 0.10~0.92, (0.15±0.06) mg/L; 0.04~1.54, (0.17±0.07) mg/L; 0.07~1.06, (0.14±0.07)mg/L。6 类施肥管理径流浓度波动随时间的基本变化趋势均为先升高,于 5—7 月达到相对峰值,之后降低,至 8 月后开始回升,9 月又达到另一相对峰值,之后逐渐降低至相对平稳状态。形成这一变化特征的可能原因是 4 月设置试验小区时频繁的人为活动,6 月和 9 月的应季施肥以及 5—7 月气候有助于微生物活性的释放,导致上述阶段有相对多的氮素硝化形成硝态氮,以至雨水淋洗出较多的硝态氮随径流流失^[18-19]。同时从图 5 可知,地膜覆盖和秸秆覆盖管理模式相对于其他 4 种管理模式,径流中硝态氮浓度显著降低,其径流中硝态氮分别是撒施处理的 32.91%, 36.71%, 进一步说明合理的施肥管理模式可有效削减苗木地氮素流失。

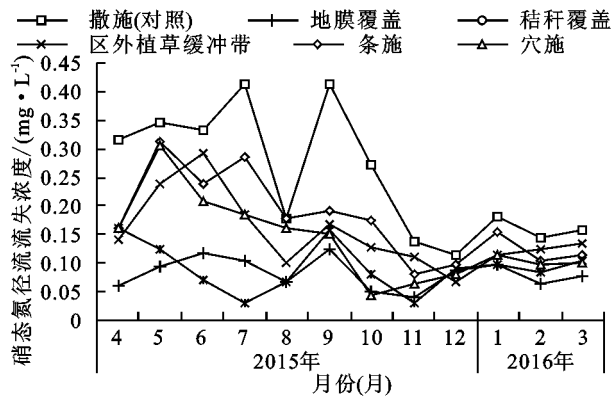


图 5 不同施肥管理模式苗木地径流硝态氮浓度动态变化

2.3.4 铵态氮流失浓度动态特征 由图 6 可知,在持续 1 年的径流小区试验期间,6 种施肥管理模式小区的径流水样中铵态氮浓度波动变化特征明显,但相对平缓,撒施(对照)、地膜覆盖、秸秆覆盖、区外植草缓冲带、条施和穴施 6 种处理小区径流铵态氮浓度波动区间和平均值分别是 0.06~0.23,(0.11±0.06) mg/L;0.01~0.06,(0.03±0.02) mg/L;0.01~0.10,(0.05±0.03) mg/L;0.01~0.16,(0.05±0.03) mg/L;0.02~0.12,(0.07±0.03) mg/L;0.02~0.08,(0.05±0.03) mg/L,且 6 处理小区径流铵态氮浓度均在 7 月份达到最大,分别为 0.24,0.05,0.11,0.11,0.13,0.11 mg/L,8 月份降低,至 9 月份又达到另一相对峰值,之后逐渐降低。

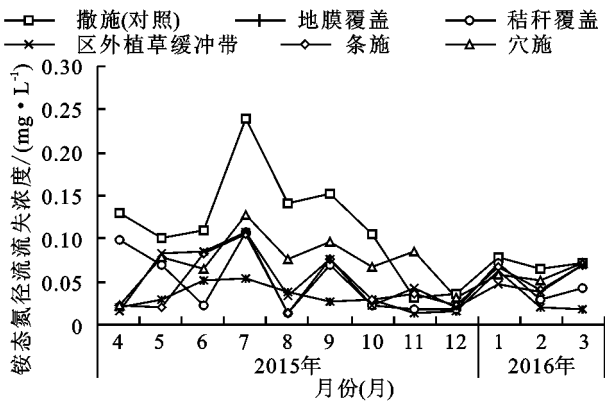


图 6 不同施肥管理模式苗木地径流铵态氮浓度动态变化

形成上述变化特征的原因除跟降雨量、以及施肥管理模式对雨水与土壤的冲刷作用控制以及径流过滤作用有关外,还与铵态氮特性有关。研究表明, NH_4^+-N 容易被土壤胶体所吸附,移动性小^[20],但是当土壤对其吸附达到饱和时,同样会在雨水中释放随径流而流失^[18,21],农田氮素淋溶流失以可溶性 NO_3^--N 为主, NO_2^--N 次之, NH_4^+-N 只占很小比例^[19]。本研究结果也反映了这一特征,即不同施肥管理模式苗木地铵态氮径流流失浓度都处于较低水平。与撒施处理相比,地膜覆盖、秸秆覆盖、区外植草缓冲带、条施、穴施 5 类管理模式能显著降低径

流铵态氮浓度,分别减少 70.19%,53.61%,53.55%,34.05%,48.99%。进一步说明合理的施肥管理模式是有效削减径流氮素流失的重要措施。

2.4 不同施肥管理模式苗木地径流年均不同形态 N 流失通量及其组成特征

2.4.1 年均不同形态 N 流失通量 单位面积苗木地径流年均 N 流失通量与地表径流氮素浓度和径流量成正比,不同施肥管理模式苗木地径流不同形态氮的单位面积年均径流流失通量结果见表 2。由表 2 可知,撒施(对照)、覆膜、秸秆、条施、穴施、区外设置植草缓冲带和秸秆覆盖 6 种施肥管理模式下的年 TN 径流流失通量分别为 35.62,18.30,15.86,12.94,8.18,3.44 kg/(hm²·a)。所有形态的氮素中,TN、PN、 NO_3^--N 年均流失通量由大到小均符合撒施(对照)>地膜覆盖>条施>穴施>区外植草缓冲带>秸秆覆盖;年均 DN 流失通量由大到小是撒施(对照)>条施>地膜覆盖>穴施>区外植草缓冲带>秸秆覆盖;年均 NH_4^+-N 流失通量由大到小是地膜覆盖>撒施(对照)>条施>穴施>区外植草缓冲带>秸秆覆盖。不同施肥管理模式苗木地不同形态氮年均径流流失通量之间存在显著差异,与撒施(对照)相比,地膜覆盖、秸秆覆盖、区外植草缓冲带、条施和穴施处理小区单位面积年均径流 TN 流失通量分别是撒施(对照)的 51.38%,9.66%,22.98%,44.53%,36.34%和 17.76%;年均径流 DN 流失通量分别是撒施(对照)的 53.01%,10.24%,29.13%,57.43%,41.99%和 17.05%;年均径流 PN 流失通量分别是撒施(对照)的 51.21%,9.51%,20.58%,39.41%,34.23%和 18.26%;年均径流 NO_3^--N 流失通量分别是撒施(对照)的 51.79%,8.42%,26.97%,61.50%,45.00%和 15.11%;年均径流 NH_4^+-N 流失通量分别是撒施(对照)的 102.94%,25.10%,35.85%,56.59%,44.43%和 32.39%。可以看出秸秆覆盖、区外植草缓冲带和穴施对径流氮素流失通量减少得最多,说明合理的施肥管理方式能显著减少径流氮素流失。其中,地表覆膜径流流失浓度小,但径流量大,其径流量是撒施(对照)、秸秆覆盖、区外植草缓冲带、条施、穴施处理小区的 4.4,7.7,7.0,4.0,4.2 倍,从而导致年均径流部分形态氮素流失通量相应较大,甚至出现年均径流铵态氮流失通量大于撒施(对照)的情况。表明地膜虽然能减少各形态氮素径流流失浓度,但巨大的径流量依然能带来不小的年氮素流失总量。

进一步分析可知,撒施(对照)处理小区年均总氮流失通量与秸秆、区外植草缓冲带、条施、穴施处理小区存在显著差异($P<0.05$)(表 2),分别是秸秆覆盖、区外植草缓冲带、条施、穴施总氮流失通量的 10.4,4.4,2.2,2.8

倍。表明 6 类施肥管理模式种中,撒施(对照)导致苗木地氮素径流流失量最大,浓度变化范围也最广;而地膜覆盖、秸秆覆盖、区外植草缓冲带、条施、穴施等施肥管理模式能显著减少氮径流流失,使小区年均总氮流失通量分别减少了 48.62%,90.34%,77.02%,63.66%,55.47%。说明合理的施肥管理方式可进一步有效削

减苗木地氮素的流失,意味着合溪水库集雨区种植结构转向苗木种植后,可选用相应优化施肥管理模式,即穴施搭配秸秆覆盖并增加外围植草缓冲带是进一步消减苗木地径流氮素流失的优化组合,将削减合溪水库集雨区苗木地氮素的面源输出,减轻合溪水库集雨区农业面源对合溪水库水质的潜在威胁。

表 2 不同施肥管理模式苗木地年均径流氮流失情况							kg/(hm ² ·a)
土地类型	编号	TN	DN	PN	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	
撒施(对照)	M-s	35.61a	10.74a	24.87a	8.26a	1.72a	
地膜覆盖	M-m	18.30b	5.69b	12.60b	4.28b	1.77a	
秸秆覆盖	M-j	3.44c	1.10c	2.34c	0.70c	0.43c	
区外植草缓冲带	M-c	8.18c	3.13bc	5.06c	2.23bc	0.62c	
条施	M-t	15.86bc	6.17b	9.70bc	5.08ab	0.97b	
穴施	M-x	12.94bc	4.51b	8.42bc	3.71b	0.76b	

注:表中数字后不同小写字母表示同列数据间差异显著(P<0.05)。

2.4.2 年均径流流失氮素形态组成特征 表 3 为 6 个处理小区不同形态氮素年均流失通量占年均总氮径流流失通量比例的特征。由表 3 可知,撒施(对照)、地膜覆盖、秸秆覆盖、区外植草缓冲带、条施和穴施小区年均溶解态氮径流流失比例分别是 30.89%,31.12%,31.96%,38.24%,38.91%和 34.86%;年均颗粒态氮径流流失比例分别是 69.11%,68.87%,68.04%,61.89%,61.17%和 65.09%。说明颗粒态氮是径流水样氮素流失的主要形式,意味着采用合理的拦截颗粒态氮流失手段可以削减氮素进入水体的量,如区外植草缓冲带处理和秸秆覆盖等。在年均可溶性态氮素径流流失通量中,撒施(对照)、地膜覆盖、秸秆覆盖、区外植草缓冲带、条施和穴施处理小区年均径流流失硝态氮分别占可溶性态氮的 75.04%,75.07%,63.24%,71.13%,82.29%和 82.35%,占总氮的 23.18%,23.36%,20.21%,27.20%,32.02%和 28.71%;年均径流流失铵态氮分别占可溶性态氮的 15.60%,31.03%,39.18%,19.67%,15.75%和 16.91%,占总氮的 7.71%,7.77%,11.75%,10.91%,6.81%和 6.20%。说明可溶性氮中硝态氮是其径流主要流失形式,原因是苗木地是旱地,土壤主要处于氧化环境,进入土壤的溶解性氮素易于硝化转化为硝态氮之故^[18-19]。

表 3 不同施肥管理模式苗木地氮素径流流失特征 %

试验设置	编号	DN/TN	PN/TN	NO ₃ ⁻ -N/ NH ₄ ⁺ /	
				DN	DN
撒施(对照)	M-s	30.89	69.11	75.04	15.60
地膜覆盖	M-m	31.12	68.87	75.07	31.03
秸秆覆盖	M-j	31.96	68.04	63.24	39.18
区外植草缓冲带	M-c	38.24	61.89	71.13	19.67
条施	M-t	38.91	61.17	82.29	15.75
穴施	M-x	34.86	65.09	82.35	16.91

3 结论

(1)合溪水库集雨区,不同施肥管理处理小区苗

木地降雨量与径流量均呈正相关,相关关系分别为:撒施(对照) $R^2=0.6717$;地膜覆盖 $R^2=0.7879$;秸秆覆盖 $R^2=0.5497$;区外植草缓冲带 $R^2=0.5919$;条施 $R^2=0.6610$;穴施 $R^2=0.7183$ 。但不同施肥管理模式小区的径流量存在显著差异,与撒施(对照)区相比,秸秆覆盖和区外植草缓冲带试验小区径流量减少了 42.25%和 36.97%;条施和穴施试验小区径流量增大了 9.20%和 4.94%,地膜覆盖试验小区径流量则增加了 342.05%。

(2)不同施肥管理模式下,合溪水库集雨区苗木地地表径流年总氮素径流流失通量大小顺序为:撒施(对照)>覆膜>条施>穴施>区外植草缓冲带>秸秆覆盖,撒施(对照)、地膜覆盖、条施、穴施、区外设置植草缓冲带和秸秆覆盖 6 种施肥管理模式下的年总氮素径流流失通量分别为:35.61,18.30,15.86,12.94,8.18,3.44 kg/(hm²·a),地膜覆盖、条施、穴施、区外植草缓冲带、秸秆覆盖等施肥管理模式小区年均总氮流失通量与撒施(对照)小区相比,分别减少了 48.62%,55.47%,63.66%,77.02%,90.34%,说明恰当的施肥管理模式能显著降低苗木地径流氮素的进一步流失。

(3)合溪水库集雨区,不同施肥管理处理小区苗木地径流水样氮素流失的主要形态为颗粒态氮和硝态氮。其中,撒施(对照)、地膜覆盖、秸秆覆盖、区外植草缓冲带、条施和穴施小区径流年均流失的颗粒态氮占 TN 的比例分别是 69.11%,68.87%,68.04%,61.89%,61.17%和 65.09%;年均流失的硝态氮占 TN 的比例分别是23.18%,23.36%,20.21%,27.20%,32.02%和 28.71%。

参考文献:

[1] Drewry J J, Newham L T H, Croke B F W. Suspended sediment, nitrogen and phosphorus concentrations and exports during storm events to the Tuross estuary, Australia[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(2):879-887.

[2] 牟新利,任江林,刘瑞民. 农业面源污染最佳管理措施评

- 价研究[J]. 湖北农业科学, 2013(17):4073-4076.
- [3] Oenema O, Roest C W J. Nitrogen and phosphorus losses from agriculture into surface waters, the effects of policies and measures in the Netherlands[J]. Water Science and Technology, 1998, 37(3):19-30.
- [4] 李冠杰, 郑雅莉, 胡明, 等. 基于环境需求视角的农业面源污染防治对策[J]. 农村经济与科技, 2014(11):6-9.
- [5] 丁晓东. 农田养分流失风险评价及养分平衡管理研究[D]. 杭州:浙江大学, 2010.
- [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] Giri S, Mukhtar S, Wittie R. Vegetative covers for sediment control and phosphorus sequestration from dairy waste application fields[J]. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2010, 53(3):803-811.
- [8] Liang T, Wang H, Kung H T, et al. Agriculture land-use effects on nutrient losses in west Tiaoxi watershed, China[J]. Journals of the American Resources Association, 2004, 40(6):1499-1510.
- [9] 章明奎, 王阳, 黄超. 水网平原地区不同种植类型农田氮磷流失特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12):3211-3220.
- [10] 杨丽萍. 浙江省两个典型流域水体污染特征及污染源解析研究[D]. 杭州:浙江大学, 2015.
- [11] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学版, 2002.
- [12] 赵欣. 新疆地区年径流量与降雨量相关关系分析[J]. 水资源开发与管理, 2016(1):73-75.
- [13] 熊亚兰, 王昌全, 张科利, 等. 北盘江流域降雨量和径流量年际变化研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5):30-34.
- [14] 刘宗岸, 杨京平, 杨正超, 等. 茗溪流域茶园不同种植模式下地表径流氮磷流失特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2):29-32.
- [15] 李广, 黄高宝. 雨强和土地利用对黄土丘陵区径流系数及蓄积系数的影响[J]. 生态学杂志, 2009, 28(10):2014-2019.
- [16] 张瑞国, 王克勤, 陈奇伯, 等. 昆明市水源区不同利用类型坡地径流氮和磷的输出特征[J]. 环境科学研究, 2009, 22(5):607-611.
- [17] 袁兴程, 钱新, 庞宗强, 等. 不同土地利用方式土壤表层氮、磷流失特征研究[J]. 环境化学, 2011, 30(9):1657-1662.
- [18] 司友斌, 王慎强, 陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化[J]. 土壤, 2000, 32(4):188-193.
- [19] 张福珠, 熊先哲, 戴同顺, 等. 应用 N(15)研究土壤-植物系统中氮素淋失动态[J]. 环境科学, 1984, 5(1):21-24.
- [20] 曹志洪, 林先贵. 太湖流域土-水间的物质交换与水环境质量[M]. 北京:科学出版社, 2006.
- [21] 张兴昌, 邵明安. 坡地土壤氮素与降雨、径流的相互作用机理及模型[J]. 地理科学进展, 2000, 19(2):128-135.

(上接第 29 页)

参考文献:

- [1] 谢俊奇, 唐程杰, 李宪文, 等. 中国坡耕地[M]. 北京:中国大地出版社, 2005:29-31.
- [2] 刘京, 常庆瑞, 李岗, 等. 连续不同施肥对土壤团聚体影响的研究[J]. 水土保持通报, 2000, 20(4):24-26.
- [3] Engel F L, Bertol I, Ritter S R, et al. Soil erosion under simulated rainfall in relation to phenological stages of soybeans and tillage methods in Lages, SC, Brazil[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 103(2):216-221.
- [4] Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in Ulti-sols from subtropical China[J]. Geoderma, 2001, 99(1/2):123-145.
- [5] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. Geoderma, 2005, 124(1/2):3-22.
- [6] 史奕, 陈欣, 沈善敏. 有机胶结形成土壤团聚体的机理及理论模型[J]. 应用生态学报, 2002, 13(11):1495-1498.
- [7] 潘剑君. 利用土壤入渗速率和土壤抗剪强度确定土壤侵蚀等级[J]. 水土保持学报, 1995, 9(2):93-96.
- [8] 孟秦倩, 王健, 吴发启. 延安庄陵沟壑区坡肉果园土壤水库特征[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(1):93-95.
- [9] 王云琦, 王玉杰, 张洪江, 等. 重庆缙云山不同土地利用类型土壤结构对土壤抗剪性能的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3):40-45.
- [10] 朱波, 况福虹, 高美荣, 等. 土层厚度对紫色土坡地生产力的影响[J]. 山地学报, 2009, 27(6):735-739.
- [11] 何晓玲, 郑子成, 李廷轩, 等. 不同耕作方式对紫色土侵蚀及磷素流失的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(12):2492-2500.
- [12] 陈印军, 肖碧林, 方琳娜, 等. 中国耕地质量状况分析[J]. 中国农业科学, 2011, 44(17):3557-3564.
- [13] 刘丽芳, 许新宜, 王会肖, 等. 土壤水资源评价研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2009, 45(5):621-625.
- [14] 孙仕军, 丁跃元, 曹波, 等. 平原井灌区土壤水库调蓄能力分析[J]. 自然资源学报, 2002, 17(1):42-47.
- [15] 余海铭, 樊贵盛. 影响土壤入渗能力的剖面因素研究[J]. 大连理工大学学报, 2009, 40(3):307-309.
- [16] 刘洁, 李贤伟, 纪中华, 等. 元谋干热河谷三种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性[J]. 生态学报, 2011, 31(8):2331-2340.
- [17] Kavdir Y, Smucker A J M. Soil aggregate sequestration of cover crop root and shoot-derived nitrogen[J]. Plant and Soil, 2005, 272(1):263-276.