

太子河源头水源涵养林不同植被类型矿质态氮流失特征及其对环境因子的响应

王琼^{1,2}, 荣湘民¹, 李法云^{1,2}, 范志平²

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2. 辽宁石油化工大学生态环境研究院, 辽宁 抚顺 113001)

摘要:以太子河源头水源涵养林为研究对象,分析不同植被类型地表径流和壤中流的氮流失特征,运用冗余分析和偏冗余分析对氮流失特征与环境因子之间的关系进行分析,并对其主要影响因子进行定量分解,探寻太子河源头水源涵养林氮流失特征的关键影响因子。结果表明:不同植被类型地表径流和壤中流硝态氮是氮流失的主要形态,地表径流硝态氮的浓度是铵态氮浓度的1.5倍,壤中流硝态氮的浓度是铵态氮浓度的20.5倍。无论是地表径流还是壤中流铵态氮和硝态氮流失浓度的大小顺序均为人工林>杂木林>次生林。受径流量和壤中流量的影响,铵态氮流失量表现为次生林最大,硝态氮流失量表现为人工林最大。土壤物理性质和土壤化学性质是影响氮流失浓度的关键因子,分别能解释氮流失浓度总变异的46.36%和16.42%。地形水文因子和植被特征是影响氮流失量的关键因子,分别能解释氮流失量总变异的22.85%和15.09%。而地形水文因子、植被特征、土壤物理性质、土壤理化性质4者混合作用在对氮流失特征中也起到了重要影响,分别能解释氮流失浓度和流失量总变异的36.03%和51.36%。

关键词: 氮素流失; 地表径流; 壤中流; 环境因子

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)03-0216-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.03.037

Mineral Nitrogen Loss in Different Types of Vegetation and Its Response to Environmental Factors in the Water Conservation Forest in the Headstream of Taizi River

WANG Qiong^{1,2}, RONG Xiangmin¹, LI Fayun^{1,2}, FAN Zhiping²

(1. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128;

2. Institute of Eco-environmental Sciences, Liaoning Shihua University, Fushun, Liaoning 113001)

Abstract: The characteristics of mineral nitrogen loss through surface flow and interflow in different types of vegetation in a water conservation forest were analyzed in the headstream of Taizi river. To explore the limiting factors which affect nitrogen loss, redundancy analysis and partial redundancy analysis were applied to study the relationship between nitrogen loss and environmental factors, and quantitative analysis was applied among the main influential factors. The results showed that nitrate nitrogen was the main form of nitrogen loss in both the surface flow and interflow. The concentration of nitrate nitrogen was 1.5 times more than the ammonium nitrogen in the surface flow and 20.5 times in the interflow. Whether in the surface flow or interflow, ammonium and nitrate concentrations were in the order of plantation forest > hardwood forest > secondary forest. Owing to the effects of surface flow and interflow, the amount of ammonium loss was the largest in secondary forest; the amount of nitrate loss was the largest in plantation forest. Soil physical and chemical properties were the main influential factors of the concentration of nitrogen loss, with their effects accounting for 46.36% and 16.42% of the total explanation, respectively. Geomorphology-hydrology factors and vegetation types were the main influential factors of the amount of nitrogen loss, with their effects accounting for 22.85% and 15.09% of the total explanation, respectively. The mixed effects of hydrological factors, vegetation characteristics, soil physical properties, soil chemical properties on nitrogen loss charac-

收稿日期: 2016-11-22

资助项目: 国家水体污染与治理科技重大专项(2012ZX07505-001-01); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2015BAD07B030102); 辽宁石油化工大学环境科学与工程学科创新团队([2014]11号)

第一作者: 王琼(1983—), 女, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事生态工程、水土保持等方面研究。E-mail: wangqiong0407@163.com

通信作者: 荣湘民(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事植物营养生态、施肥原理与技术研究。E-mail: rongxm2005@126.com

teristics also played an important role, accounting for 36.03% and 51.36% of the total explanation for the concentration and the amount of nitrogen loss, respectively.

Keywords: nitrogen loss; surface flow; interflow; environmental factors

氮是生物体重要的组成部分,也是造成水质退化,河流、湖泊富营养化的重要元素之一^[1]。降雨和径流冲刷引起的氮素流失不仅会导致氮素利用率降低,且进入水体后造成水环境污染,由此带来的环境、经济问题不容忽视^[2-3]。氮流失过程十分复杂,受降雨过程、地形、地貌、植被特征、土壤理化性质等综合影响^[4-7]。降雨是氮素随径流流失的主要驱动因素,降雨径流是氮素流失的主要载体^[8-9],土壤的质地、入渗能力、土壤含水率是影响产流过程的重要因素^[10-12],植被覆盖通过乔木层、灌木层、草本层及凋落物的覆盖,有效减小雨滴的冲刷作用^[13],进而会影响氮素的迁移流失过程。近年来,国内外学者针对地表径流和壤中流氮输出开展了大量研究,包括不同雨强、不同植被条件下土壤氮流失过程的研究^[14-16]。Yahdjian 等^[17]研究发现,总降雨量相同时,多次少量的降雨氮流失量明显少于单次强降雨。Srivastava 等^[18]研究发现,植被能有效减少地表径流的氮流失,主要由于林冠覆盖、凋落物、土壤水分和生物量的影响。曾立雄等^[5]研究结果也表明,植被的总盖度、乔木层盖度以及凋落物层盖度对氮流失的影响程度较大,并且矿质态氮的流失受土壤表层氮含量影响程度较高。虽然目前对氮素流失特征及其影响因子的研究较多,但多数只对地表径流进行研究,很少涉及到壤中流。降雨径流过程中,地表径流和壤中流迁移特征差异显著,地表径流是氮迁移的一种途径,同时随壤中流流失的氮造成的水环境污染也不容忽视^[7]。氮素流失是一个多种过程相互联系,相互作用的多途径统一体,受多种因素的影响,各种因素又相互作用,错综复杂。在众多影响因素中探求影响氮素流失的

关键因素具有重要意义。

本研究选取太子河源头人工林、次生林和杂木林 3 种不同植被类型,研究地表径流和壤中流氮流失特征,探讨地形水文、植被特征、土壤物理性质、土壤化学性质对氮流失的影响,运用冗余分析和偏冗余分析的方法,探寻氮流失的关键影响因子,为环境保护以及有效治理非点源污染提供参考和依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于太子河源头,老秃顶子国家级自然保护区(124°41′13″—125°05′15″ E, 41°11′11″—41°21′34″ N),地处辽宁省桓仁县和新宾县交界处,是一个以北温带中山山地森林系统及珍稀动植物为主要保护对象的自然保护区,总面积 15 217.3 hm²。区域内水资源丰富,植物群落组成复杂,森林覆盖率达到 97%,是重要的水源涵养林区。气候属北温带大陆性季风气候,降水多集中在 6—8 月份,年降水量 900~1 200 mm,年平均气温 5.2℃,最高气温 37.2℃,最低气温-37.5℃,无霜期 133 d。土壤以棕壤和暗棕壤为主。

1.2 研究方法

1.2.1 试验布设与样品分析 根据不同植被类型(人工林、次生林和杂木林)共布设 9 个水平投影面积为 100 m²(20 m×5 m)的径流小区,径流小区基本特征见表 1、表 2。径流小区护埂采用不透水的 PVC 板插入到土壤不透水层,土壤上方留 40 cm PVC 板作为挡水板;径流小区下端用引水管连接 2 个径流收集桶,分别收集地表径流和壤中流。

表 1 径流小区基本特征

植被类型	林龄/ a	坡度/ (°)	海拔/ m	胸径/ cm	树高/ m	盖度/ %	草本植被 类型	草本生 物量/g	地下生 物量/g	凋落 物量/g
人工林	43	18	684	24.817	20.22	75	落叶松、羊草、老鹳草和野大豆等	32.40	116.99	337.69
次生林	43	16	672	24.526	19.00	90	花曲柳、核桃楸、大砧草、狭叶荨麻、紫花地丁等	41.24	341.71	611.45
杂木林	25	10	614	12.178	9.22	95	蒙古栎、花楷、胡桃楸、千金榆、堇菜、野大豆等	31.05	146.53	562.45

表 2 径流小区土壤理化性质

植被类型	含水率/ %	容重/ (kg·m ⁻³)	孔隙度/ %	pH	有机质/ (g·kg ⁻¹)	TN/ (g·kg ⁻¹)	TP/ (g·kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg·kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N/ (mg·kg ⁻¹)
人工林	54.4	0.800	71.53	6.448	71.839	4.321	0.154	2.747	10.926
次生林	59.5	0.841	68.88	6.687	63.760	4.664	0.084	2.433	21.231
杂木林	31.5	0.941	67.81	5.882	57.265	3.237	0.097	1.043	4.007

降雨结束后,立即收集地表径流和壤中流样品,测量地表径流和壤中流量。同时收集 500 mL 样品,冷藏保存带回实验室,24 h 内紫外分光光度计法测定其铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)含

量^[19]。气象数据来源于人工林样地布设的自动气象站,年降水量和气温见图 1。本试验从 2014 年 5 月 25 日—9 月 25 日共监测到 7 场产流明显的降雨事件,累计降雨量约 100 mm。

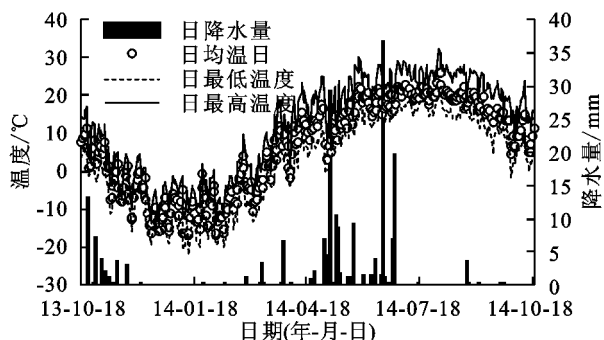


图 1 试验区降水量与气温

1.2.2 统计分析 为探讨环境因子对地表径流和壤中流铵态氮和硝态氮流失特征的影响,选取了 22 个环境因子,并将其划分为 4 类:地形水文因子,包括坡度、坡向、海拔、地表径流量、壤中流量;植被特征,包括林龄、树高、盖度、草本生物量、地下生物量、凋落物量;土壤物理性质,包括含水率、容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度;土壤化学性质,包括土壤 pH、有机质、TN、TP、铵态氮和硝态氮。利用 Canoco 4.5 统计软件,在对地表径流和壤中流铵态氮和硝态氮数据进行去趋势对应分析,计算排序轴梯度长度的基础上,采用冗余分析和偏冗余分析分别对其与地形水文因子、植被特征、土壤物理性质和土壤化学性质数据矩阵进行排序分析。

为了更好地反映环境因子对铵态氮和硝态氮流失特征影响的解释效果,充分考虑地形水文因子、植被特征性质、土壤物理性质和土壤化学性质的综合作用,将解释变量分解为以下几个部分:总解释变异、纯

地形水文、纯植被特征、纯土壤物理性质、纯土壤化学性质和混合因子。其中总解释变异是 22 个因子全部参加分析;纯地形水文因子的计算方法为地形水文因子为解释变量,其他因子为协变量。纯植被特征、纯土壤物理性质、纯土壤化学性质的计算方法以此类推。混合因子解释变异计算方法为总解释变异减去纯地形水文、纯植被特征、纯土壤物理性质、纯土壤化学性质的解释变异。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型地表径流和壤中流氮浓度特征

由图 2 可知,人工林地表径流铵态氮平均浓度为 0.34 mg/L,显著高于次生林(0.29 mg/L)和杂木林(0.30 mg/L)。地表径流中硝态氮浓度表现为人工林(0.52 mg/L) > 杂木林(0.46 mg/L) > 次生林(0.41 mg/L)。各植被类型地表径流氮浓度年内差异均较大,且不同用地类型表现出的规律不完全一致。各植被类型均表现为前期无降雨时间较长时,地表径流铵态氮和硝态氮浓度相对较高,连续降雨过程中,浓度呈降低的趋势。人工林还表现出 5 月、9 月地表径流铵态氮和硝态氮浓度明显高于 6 月的特征,而次生林和杂木林各月地表径流浓度无明显差异。壤中流铵态氮平均浓度表现为人工林(0.28 mg/L) > 杂木林(0.17 mg/L) > 次生林(0.11 mg/L)。硝态氮浓度与铵态氮浓度趋势相同也表现为人工林(5.12 mg/L) > 杂木林(4.05 mg/L) > 次生林(2.29 mg/L)。壤中流中矿质氮的流失形态以硝态氮为主,硝态氮的浓度是铵态氮浓度的 20.5 倍。不同植被类型间硝态氮浓度月份动态表现出相近的规律。前期浓度相对较低,进入 6 月浓度升高,连续降雨过程中浓度有所下降。

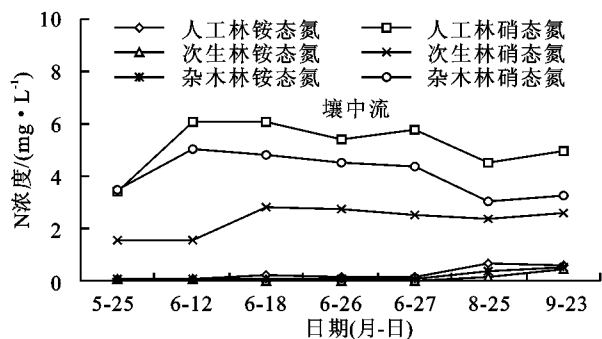
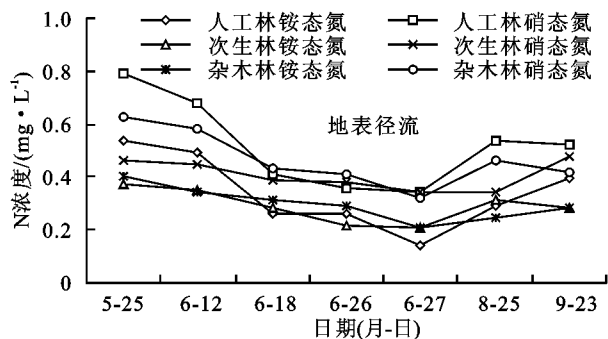


图 2 不同植被类型地表径流和壤中流氮浓度

2.2 不同植被类型氮流失量特征

由图 3 可知,太子河源头水源涵养林不同植被类型在试验监测的 7 次重要降水过程中,地表径流铵态氮流失量的大小顺序为次生林(156.72 g/km²) > 人工林(67.58 g/km²) > 杂木林(64.23 g/km²)。壤中流铵态氮流失量大小顺序为次生林(438.61 g/km²)

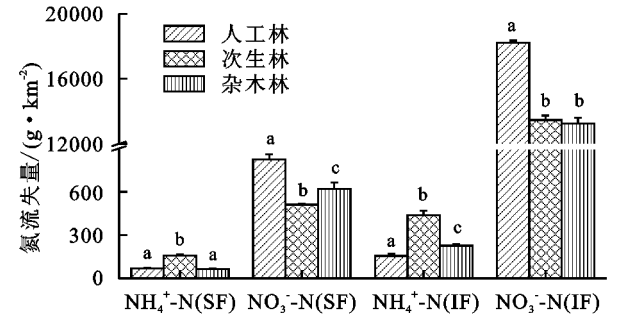
> 杂木林(225.84 g/km²) > 人工林(156.47 g/km²)。无论在地表径流还是壤中流,次生林的铵态氮流失量都显著高于其他植被类型。地表径流中硝态氮流失量大小顺序为人工林(825.27 g/km²) > 杂木林(620.40 g/km²) > 次生林(509.82 g/km²)。壤中流硝态氮流失量大小顺序为人工林(18 220.29 g/

km²)>次生林(13 461.44 g/km²)>杂木林(13 244.02 g/km²)。人工林地表径流和壤中流中硝态氮流失量均显著高于其他植被类型。壤中流铵态氮和硝态氮的流失量显著高于地表径流的流失量,壤中流铵态氮流失量是地表径流的 2.9 倍,硝态氮流失量是地表径流的 23.3 倍。无论在地表径流还是壤中流硝态氮的流失量显著高于铵态氮的流失量。地表径流中硝态氮的流失量是铵态氮的 8.4 倍,壤中流中硝态氮的流失量是铵态氮的 68.6 倍。

2.3 环境因子对铵态氮、硝态氮流失浓度的影响

分别做地形水文、植被特征、土壤物理性质和土壤化学性质对地表径流和壤中流中铵态氮、硝态氮影响的冗余分析,结果表明,地形水文、植被特征、土壤物理性质和土壤化学性质分别能解释地表径流和壤中流中铵态氮、硝态氮浓度特征的 18%,25%,30.9%和 40.3%。排序轴 1,2 的贡献率为 90%以上,可以较好地反映氮流失浓度特征与环境因子的关系(表 3)。RDA 排序图表明(图 4),地形水文因子地表径流和壤中流硝态氮浓度与地表径流量、壤中流量和坡向呈正比,与坡度和海拔呈反比,而无论是地表径流还是壤中流中铵态氮浓度与地形水文各因子相关性均不显著。植被特征对地表径流和壤中流中铵态氮、硝态氮均有显著影响,地表径流硝态氮浓度、

壤中流铵态氮和硝态氮浓度均与盖度、地下生物量和凋落物量呈反比,地表径流铵态氮浓度与树高、林龄和草本生物量呈正比。土壤物理性质对地表径流和壤中流铵态氮、硝态氮影响表现为地表径流硝态氮浓度、壤中流铵态氮和硝态氮浓度与总孔隙度、非毛管孔隙度呈正比,与容重和含水率呈反比,地表径流铵态氮浓度与土壤物理性质相关性不显著。土壤化学性质对地表径流和壤中流铵态氮、硝态氮影响表现为地表径流硝态氮浓度、壤中流中铵态氮和硝态氮浓度与土壤总氮、总磷和硝态氮浓度呈正比,地表径流铵态氮浓度与土壤 pH 呈正比。



注: NH₄⁺-N(SF) 表示地表径流中铵态氮; NH₄⁺-N(IF) 表示壤中流中铵态氮; NO₃⁻-N(SF) 表示地表径流中硝态氮; NO₃⁻-N(IF) 表示壤中流中硝态氮; 不同字母代表氮流失量间差异显著(*p*<0.05)。

图 3 不同植被类型氮流失量

表 3 氮流失浓度和氮流失量与环境因子 RDA 结果

环境因子	排序轴	氮流失浓度				氮流失量			
		特征值	累积贡献率	特征值总和	典范特征值总和	特征值	累积贡献率	特征值总和	典范特征值总和
地形水文	1	0.171	95.0	1.000	0.180	0.484	99.9	1.000	0.485
	2	0.008	99.6			0.001	100.0		
植被特征	1	0.238	95.1	1.000	0.250	0.402	99.9	1.000	0.403
	2	0.012	99.7			0.000	100.0		
土壤物理	1	0.298	92.1	1.000	0.309	0.064	99.7	1.000	0.064
	2	0.011	100.0			0.000	100.0		
土壤化学	1	0.382	94.7	1.000	0.403	0.136	99.5	1.000	0.136
	2	0.021	100.0			0.001	99.5		

2.4 环境因子对铵态氮、硝态氮流失量的影响

地形水文因子、植被特征、土壤物理性质和土壤化学性质分别能解释地表径流和壤中流中铵态氮、硝态氮流失量特征的 48.5%,40.3%,6.4%和 13.6%。排序轴 1,2 的贡献率为 90%以上,可以较好的反映氮流失量特征与环境因子的关系(表 3)。从 RDA 排序图可以看出,环境因子对地表径流和壤中流铵态氮、硝态氮流失量的影响与浓度的影响有明显差异(图 5)。地形水文因子中地表径流铵态氮和硝态氮流失量与地表径流量成正比,壤中流硝态氮流失量与壤中流量、海拔、坡度成正比,壤中流铵态氮流失量与地形水文因子相关性不显著。植被特征中地表径流铵态氮、硝态氮流失量与盖度、草本生物量和地下生物量呈正相关,壤

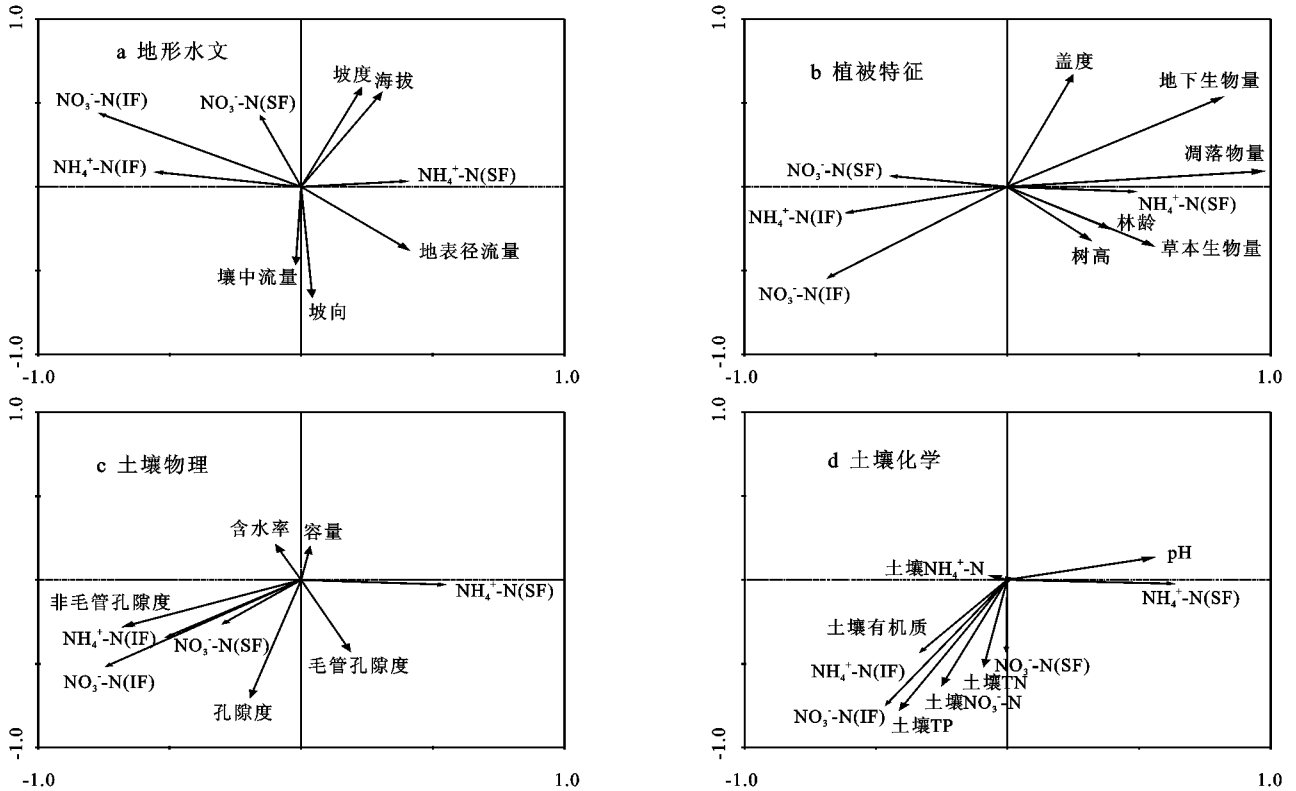
中流铵态氮流失量与树高、林龄和凋落物量呈负相关,壤中流硝态氮与盖度、草本生物量和地下生物量呈负相关。土壤物理性质对地表径流和壤中流铵态氮、硝态氮影响均不显著。土壤化学性质对地表径流和壤中流中铵态氮、硝态氮流失量影响表现为地表径流铵态氮和硝态氮流失量与土壤有机质呈正相关,壤中流硝态氮流失量与土壤总氮呈正相关。

2.5 影响因子分解

为了更好地分析环境因子中,哪种因子是影响铵态氮和硝态氮流失的关键因素,充分考虑地形水文因子、植被特征、土壤物理性质和土壤化学性质的综合及交互作用,利用冗余分析和偏冗余分析计算各个因子对地表径流和壤中流铵态氮、硝态氮浓度及流失量

的贡献率。结果表明(表 4),环境因子对地表径流和壤中流铵态氮、硝态氮浓度的总解释变异为0.816,即 4 个类别的环境因子共同解释铵态氮、硝态氮浓度变异的 81.6%,不可解释部分为 18.4%。4 种因子中土壤化学性质对铵态氮、硝态氮浓度影响最大,达到

了 46.36%。土壤物理和地形水文因子对铵态氮、硝态氮浓度变异的解释率分别为 16.42%和 15.20%。植被特征对铵态氮、硝态氮浓度变化影响较小,仅占总变异的 2.45%。混合作用对铵态氮、硝态氮浓度影响较大,达到 36.03%。



注:SF为地表径流;IF为壤中流。下同。

图 4 氮流失浓度与环境因子的冗余分析

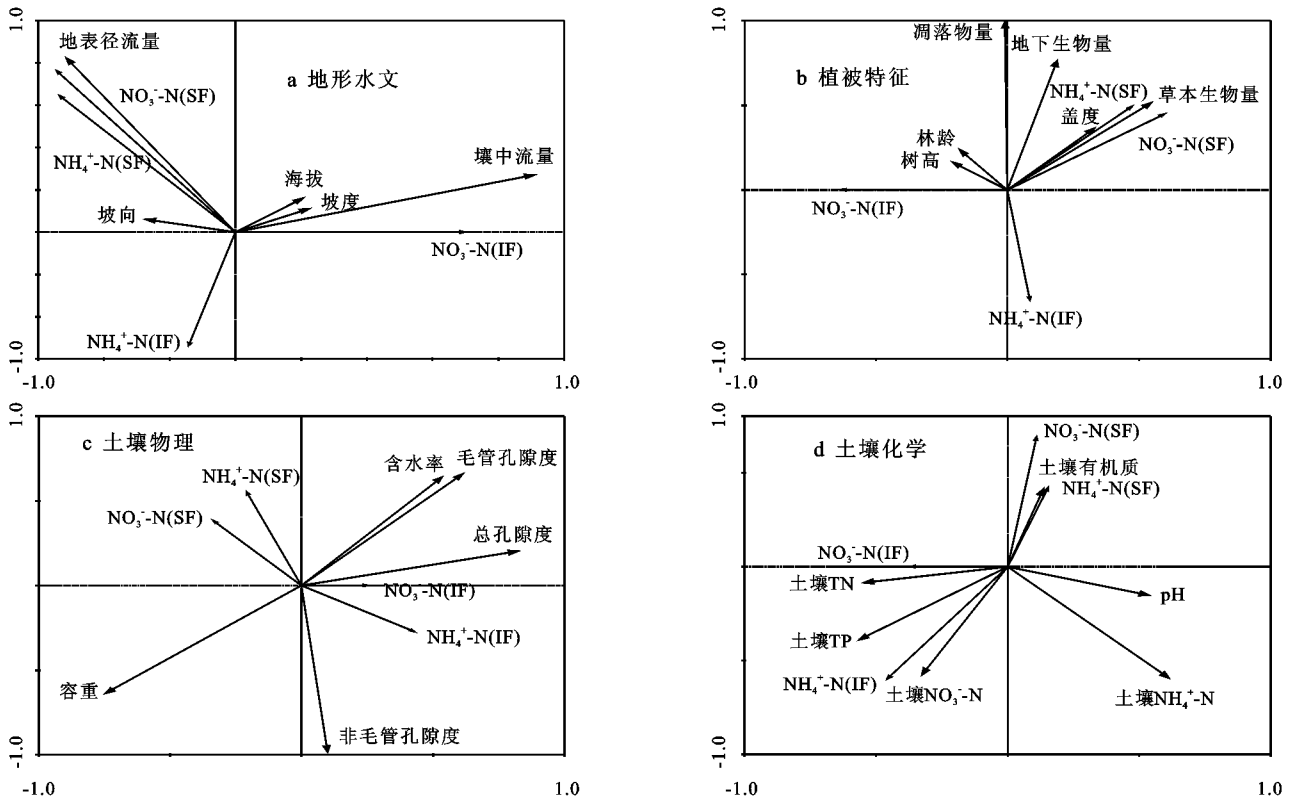


图 5 氮流失量与环境因子的冗余分析

环境因子对地表径流和壤中流铵态氮、硝态氮流失量的总解释变异达到 0.954,即 4 个类别的环境因子共同解释铵态氮、硝态氮流失量变异的 95.4%,不可解释部分仅为 4.6%。4 种因子中地形水文和植被特征对铵态氮、硝态氮流失量影响较大,分别能解释总变异的 22.85%和 15.09%。土壤物理和土壤化学性质对流失量影响较小,仅能解释总变异的 4.19%和 6.50%。混合作用对铵态氮、硝态氮流失量的影响也较大,达到 51.36%。

表 4 利用冗余度分析进行因子分解结果

变异解释 构成	流失浓度		流失量	
	总变异	总变异解释部分/%	总变异	总变异解释部分/%
所有因子	0.816		0.954	
单纯地形水文	0.124	15.20	0.218	22.85
单纯植被特征	0.020	2.45	0.144	15.09
单纯土壤物理	0.134	16.42	0.040	4.19
单纯土壤化学	0.378	46.36	0.062	6.50
混合因素	0.294	36.03	0.490	51.36
残差	0.184		0.046	

3 讨论

3.1 铵态氮和硝态氮流失特征分析

不同的植被类型对土壤氮素流失影响显著。无论是地表径流还是壤中流,铵态氮和硝态氮流失浓度都表现为人工林>杂木林>次生林。这主要归结于植被茎叶对降雨的截留作用、植被根系对土壤的固结作用和植被对径流传递的阻碍作用^[20]。不同植被类型壤中流氮流失浓度还与土壤养分的循环机制有关,植被类型不同,植物对土壤养分的吸收及微生物对养分的分解和转化,都会直接或间接的影响土壤氮素的流失^[21]。近年来,对不同植被类型氮流失特征的研究较多,并得到相似结论,宋泽芬等^[6]研究表明,人工林氮流失显著大于次生林和灌草丛。黄云凤等^[22]研究表明,氮流失顺序为水稻田>人工果林>天然次生林。不同植被类型流失量与流失浓度的规律明显不同,地表径流和壤中流铵态氮流失量表现为次生林最大,硝态氮流失量表现为人工林最大。流失浓度和流失量规律不同主要是由径流量和壤中流量的不同引起的。土壤氮素流失过程实质是表层土壤与降雨、径流的相互作用过程^[23-24]。不同植被类型土壤的结构有所不同,导致土壤截留、入渗能力不同,进而造成了地表径流和壤中流流量不同^[10]。

无论是地表径流还是壤中流,硝态氮的流失浓度和流失量都大于铵态氮。这是因为铵态氮可以有效地吸附于土壤颗粒上,流动性差,径流对其携带能力较弱。而硝态氮主要溶解在土壤溶液中,促使其迁移进入径流的能力更强^[25]。本研究中地表径流中硝态氮的流失量

是铵态氮的 8.4 倍,壤中流中硝态氮的流失量是铵态氮的 68.6 倍。赵亮等^[8]的研究也得到相似的结论,铵态氮在整个径流过程变化较平稳且流失浓度较低,硝态氮在整个径流过程变化较多且流失浓度较大。

壤中流的铵态氮和硝态氮流失量分别大于地表径流的铵态氮和硝态氮流失量。壤中流铵态氮流失量是地表径流的 2.9 倍,硝态氮流失量是地表径流的 23.3 倍。聂小飞等^[26]研究指出,壤中流硝态氮贡献了流失总量的 86.7%~99.7%,但壤中流铵态氮的流失量要低于地表径流,主要由于铵根离子易于被土壤胶体吸附,铵态氮主要靠地表径流的冲刷进入水体。本研究得出不同的结果主要是由于水源涵养林植被覆盖率较高,减少了降雨对土壤表层的冲刷,研究区域降水强度较小,地表径流量较少,从而地表径流对土壤表层的冲刷较小,二者共同作用,致使地表径流中铵态氮的流失量也较小。

3.2 环境因子对铵态氮和硝态氮流失影响分析

受自然因素和人为因素的影响,不同植被类型氮流失特征有所差异。氮素流失是一个多种因素相互联系,相互作用的多途径统一体。主要受地形地貌、降雨强度、植被覆盖、土壤理化性质等因素的综合影响^[27-28]。降雨是诱发养分流失的原始动力,土壤理化性质是养分流失的本质因素,地形地貌和植被覆盖是养分流失的驱动因子。这些因素的共同作用使不同植被类型氮流失浓度及流失量产生较大差异。在众多影响因子中,哪个因子是影响氮素流失的关键因子,氮流失浓度和流失量影响因子是否相同?我们通过冗余分析发现:影响氮流失浓度和流失量的关键性因子不同,土壤物理性质和土壤化学性质是影响氮流失浓度的关键因子,地形水文因素和植被特征是影响氮流失量的关键因子。而地形水文、植被特征、土壤物理性质、土壤理化性质混合作用在对氮流失特征中也起到了重要的作用。

土壤化学性质是氮流失浓度的主要影响因子,本研究中土壤化学性质能解释氮流失浓度总变异的 46.36%,主要表现为地表径流硝态氮浓度、壤中流铵态氮和硝态氮浓度与土壤硝态氮、总氮、总磷浓度呈正比,地表径流中铵态氮浓度与土壤 pH 呈正比。地表径流和壤中流氮素主要来源于土壤表层氮素的冲刷、溶出和土壤剖面氮素的淋溶,土壤中氮素的浓度直接影响径流中氮浓度。张燕等^[29]研究表明,0—20 cm 的土壤硝态氮含量与地表径流和壤中流中硝态氮的流失呈极显著正相关关系,是影响氮素流失的最重要因子。袁兴程等^[30]研究指出,土壤表层中氮的含

量、组成与径流中不同形态的氮浓度密切相关。

土壤物理性质是氮流失浓度的另一个主要影响因素,本研究中土壤物理性质能解释氮流失浓度总变异的 16.42%,主要表现为地表径流硝态氮浓度、壤中流铵态氮和硝态氮浓度与土壤总孔隙度、非毛管孔隙度呈正比,与容重和含水率呈反比。土壤孔隙大,土壤的渗透能力增强,增大壤中流量。土壤含水量高则会导致地表径流较早达到饱和状态,引起较大的土壤养分流失。贾海燕等^[11]研究指出,孔隙度大容易形成壤中流,而且使得壤中流具有较大的流量。陈玲等^[31]研究也指出,土壤前期含水量较高,地表产流较早,从而加大了降雨对地表的冲刷能力。

地形水文因子是氮流失量主要影响因素,本研究中地形水文因子能解释氮流失量总变异的 22.85%,主要表现为地表径流铵态氮和硝态氮流失量与地表径流量成正比,壤中流硝态氮流失量与壤中流量、坡度呈正比。降雨量和产流量直接影响氮素流失量,坡度主要影响降雨入渗的时间,进而对坡面产流量产生明显的影响。刘秉正等^[32]研究指出,养分流失总量随坡面坡度的增加呈幂指数增加,坡度越大,坡面出现径流越快,在产流以后,坡度与径流的速度有关,从而影响营养物质的流失。

植被特征是氮流失量的另一个主要影响因素,本研究中植被特征能解释氮流失量总变异的 15.09%,主要表现为地表径流铵态氮、硝态氮流失量与盖度、草本生物量和地下生物量呈正相关,壤中流铵态氮流失量与树高、林龄和凋落物量呈负相关,壤中流硝态氮与盖度、草本生物量和地下生物量呈负相关。地表径流铵态氮、硝态氮流失量与盖度、草本生物量和地下生物量呈正相关,这与很多研究得到了相反的结论,主要由于本研究中 3 种植被类型覆盖度达到了 75%~95%,地上凋落物较厚,基本没有裸露土壤,而植被覆盖对氮流失的减缓主要是通过减少降雨对土壤的冲刷,减缓地表径流的速度,当植被覆盖率高、地上凋落物较厚时,减缓地表径流速度,使地表径流与土壤表层接触,溶出较多营养物质^[33]。

混合因素对氮流失浓度和氮流失量总变异的解释率分别为 36.03%和 51.36%,在总变异的解释率中占很大比例。氮流失特征受到多种因素的综合影响,各种因素间也存在着相互作用和反作用,如地表径流量受到降雨量的影响,同时也受到植被特征的影响,植被特征又通过植物的吸收作用影响到土壤的理化性质,这种错综复杂的过程,也使本文中地形水文、植被特征、土壤化学性质和土壤物理性质混合在一起

对氮流失特征的解釋率较高。

4 结论

(1)不同植被类型地表径流和壤中流硝态氮是氮流失的主要形态,地表径流硝态氮的浓度是铵态氮浓度的 1.5 倍,硝态氮的流失量是铵态氮的 8.4 倍。壤中流硝态氮的浓度是铵态氮浓度的 20.5 倍,硝态氮的流失量是铵态氮的 68.6 倍。

(2)土壤物理性质和土壤化学性质是影响氮流失浓度的关键因子,分别能解释氮流失浓度总变异的 46.36%和 16.42%。不同植被类型铵态氮和硝态氮流失浓度受土壤孔隙度、容重、含水率和土壤总氮、总磷等的影响显著,大小顺序均表现为人工林>杂木林>次生林。

(3)地形水文因子和植被特征是影响氮流失量的关键因子,分别能解释氮流失量总变异的 22.85%和 15.09%。不同植被类型径流量和壤中流量不同,同时受到植被盖度、生物量、凋落物的影响,铵态氮流失量表现为次生林最大,硝态氮流失量表现为人工林最大。

(4)氮素流失是一个受到多种因素相互作用和影响的复杂过程,地形水文因子、植被特征、土壤物理性质、土壤化学性质混合作用在对氮流失特征中起到了重要作用,分别能解释氮流失浓度和流失量总变异的 36.03%,51.36%。

参考文献:

- [1] 王芮,唐家良,章熙锋,等. 亚热带农业小流域暴雨过程硝态氮迁移特征及水文示踪研究[J]. 水利学报, 2016, 47(8):996-1004.
- [2] 沈连峰,苗蕾,韩敏,等. 河南省淮河流域不同土地利用类型氮磷流失的特征分析[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4):77-80.
- [3] Butler D M, Ranells N N, Franklin D H, et al. Ground cover impacts on nitrogen export from manured riparian pasture[J]. Journal of Environmental Quality, 2007, 36(1): 155-162.
- [4] 王华玲,赵建伟,程东升,等. 不同植被缓冲带对坡耕地地表径流中氮磷的拦截效果[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9):1730-1736.
- [5] 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.
- [6] 宋泽芬,王克勤,孙孝龙,等. 澄江尖山河小流域不同土地利用类型地表径流氮、磷的流失特征[J]. 环境科学研究, 2008, 21(4):109-113.
- [7] 周林飞,郝利朋,孙中华. 辽宁浑河流域不同土地类型地表径流和壤中流氮、磷流失特征[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4):737-742.

- [8] 贾海燕,雷阿林,雷俊山,等.紫色土地区水文特征对硝态氮流失的影响研究[J].环境科学学报,2006,26(10):1658-1664.
- [9] Girmay G, Singh B R, Nyssen J, et al. Runoff and sediment associated nutrient losses under different land uses in Tigray, Northern Ethiopia[J]. Journal of Hydrology, 2009, 376(1/2): 70-80.
- [10] Zhao P, Tang X, Tang J, et al. The nitrogen loss flushing mechanism in sloping farmlands of shallow Entisol in south-western China; a study of the water source effect[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(12): 1-13.
- [11] 陈成龙,高明,倪九派华,等.三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响[J].环境科学,2016,37(5):1707-1716.
- [12] Zhang G H, Liu G B, Wang G L, et al. Effects of vegetation cover and rainfall intensity on sediment-associated nitrogen and phosphorus losses and particle size composition on the Loess Plateau[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2011, 66(3): 192-200.
- [13] Marques M J, Ramón B, Luis J, et al. Effect of vegetal cover on runoff and soil erosion under light intensity events. Rainfall simulation over USLE plots[J]. Science of The Total Environment, 2007, 378(1/2): 161-165.
- [14] 赵亮,张自军,唐泽军,等.旱作农业土壤矿质态氮随地表径流迁移特征研究[J].环境科学学报,2010,30(10):1977-1984.
- [15] Tu L H, Hu T X, Zhang J, et al. Nitrogen distribution and cycling through water flows in a subtropical bamboo forest under high level of atmospheric deposition. [J]. PLoS one, 2013, 8(10): 65-65.
- [16] 钱婧,张丽萍,王小云,等.人工降雨条件下不同坡长和覆盖度对氮素流失的影响[J].水土保持学报,2012,26(5):6-10.
- [17] Yahdjian L, Sala O E. Size of precipitation pulses controls nitrogen transformation and losses in an arid patagonian ecosystem[J]. Ecosystems, 2010, 13(4): 575-585.
- [18] Srivastava N K, Ram L C, Mastro R E. Role of selected riparian herbs in reducing soil erosion and nutrient loss under simulated rainfall[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 61(2): 405-417.
- [19] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].第1版.北京:中国农业科技出版社,1999:129-133.
- [20] 杨丽霞,杨桂山,苑韶峰,等.影响土壤氮素径流流失的因素探析[J].中国生态农业学报,2007,15(6):190-194.
- [21] 汤家喜,孙丽娜,孙铁珩,等.河岸缓冲带对氮磷的截留转化及其生态恢复研究进展[J].生态环境学报,2012,21(8):1514-1520.
- [22] 黄云凤,张路平,洪华生,等.小流域氮流失特征及其影响因素[J].水利学报,2006,37(7):801-806.
- [23] He Z, Weng H, Ho H C. et al. Soil erosion and pollutant transport during rainfall-runoff processes [J]. Water Resources, 2014, 41(5): 604-611.
- [24] Liu R, Wang J, Shi J. Runoff characteristics and nutrient loss mechanism from plain farmland under simulated rainfall conditions[J]. Science of the Total Environment, 2014, S468/469(1): 1069-1077.
- [25] 李瑞玲,张永春,曾远,等.太湖流域丘陵地区暴雨条件下农田氮素随表径流迁移特征[J].农业环境科学学报,2009,28(6):1185-1190.
- [26] 聂小飞,李恒鹏,黄群彬,等.天目湖流域丘陵山区典型土地利用类型氮流失特征[J].湖泊科学,2013,25(6):827-835.
- [27] 刘俏,张丽萍,聂国辉,等.浙江红壤区经济林坡地氮素径流流失特征研究[J].农业环境科学学报,2014,33(7):1388-1393.
- [28] 沈连峰,苗蕾,韩敏,等.河南省淮河流域不同土地利用类型氮磷流失的特征分析[J].水土保持学报,2012,26(4):77-80.
- [29] 张燕,王自林,李永梅,等.滇池流域农田土壤氮素流失影响因子研究[J].土壤通报,2012,43(4):916-922.
- [30] 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.
- [31] 陈玲,刘德富,宋林旭,等.不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究[J].环境科学,2013,34(6):2151-2158.
- [32] 刘秉正,吴发启.土壤侵蚀[M].西安:陕西人民出版社,1996:1-40.
- [33] 吕锡芝,余新晓,王贺年.林地枯落物层对地表径流水化学性质及其变化趋势[J].生态环境学报,2012,21(11):1800-1803.