

沂蒙山区不同强降雨下土壤的氮素流失特征分析

井光花^{1,2}, 于兴修^{1*}, 刘前进¹, 李振炜^{1,2}

(1. 山东省水土保持与环境保育重点实验室/临沂大学水土保持与环境保育研究所, 临沂 276005;
2. 山东师范大学人口资源与环境学院, 济南 250014)

摘要:为探讨不同自然强降雨氮素流失特征,实地观测沂蒙山区孟良崮小流域 2010 年汛期的降雨与径流过程,选取暴雨(汛期首场强降雨)、大雨(土壤水分相对饱和强降雨)和大暴雨(年最大雨强降雨)3 场不同典型强降雨,分析降雨径流及氮素流失特征。结果表明,在首场暴雨条件下,除颗粒态氮外,其他形态氮含量在整个降雨过程中均呈现增加趋势;在大雨过程中,总氮含量在径流峰值前达到峰值,溶解态氮和硝态氮含量在径流峰值后达到峰值,并趋于稳定;在大暴雨条件下,总氮和颗粒态氮含量在径流峰值前浓度陡增到最大后迅速降低。总氮与颗粒态氮的流量加权质量浓度表现为大雨<暴雨<大暴雨,溶解态氮流失浓度百分比介于 49.9265%~85.292%,且硝态氮在溶解态氮中占主导地位。不同形态氮和泥沙的平均流失率随着降雨强度的增强而增加,均表现为大暴雨>暴雨>大雨。该研究为沂蒙山区小流域水环境保护和非点源污染治理提供依据。

关键词:氮,降雨,径流,流失,沂蒙山区

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.06.020

中图分类号: S162.5⁺9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-06-0120-06

井光花, 于兴修, 刘前进, 等. 沂蒙山区不同强降雨下土壤的氮素流失特征分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 120-125.
Jing Guanghua, Yu Xingxiu, Liu Qianjin, et al. Characteristics of soil nitrogen loss under different intense rainfalls in Yimeng mountainous area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(6): 120-125. (in Chinese with English abstract)

0 引言

地表径流与土壤侵蚀引起氮素流失是非点源污染的主要原因和水体富营养化的重要限制因子^[1],是流域非点源污染的重点控制目标,深入研究氮素流失及其影响因素具有重要意义。已有研究分析了人工模拟降雨或自然降雨条件降雨、土地利用结构、植被覆盖度、耕作方式及地形特征等因素对氮素流失特征的影响^[2-5],发现降雨是影响地表径流养分流失的最重要的气象因子和主要驱动力^[6]。目前,国内外学者主要通过人工模拟降雨手段分析不同降雨强度径流量对不同形态氮素的影响,并结合土壤性质、管理措施等其他因素探讨降雨强度对不同形态氮素流失特征的影响^[7-10],但缺乏针对不同强降雨条件下的氮素流失研究。由于人工模拟降雨条件与自然降雨状态在降雨属性方面存在差异^[1,11],且人工模拟降雨受自身设备等因素的限制研究多集中在坡面尺度或者农田地块^[12-13],难以精确反映小流域尺度不同强降雨对氮素流失的机理与规律。

沂蒙山区的沂河上游是临沂市重要的水源地。该区

地形复杂,降雨分配不均,农业活动剧烈,极易引起水土流失、非点源污染等水环境问题。关于沂蒙山区氮素流失的研究已有报道,多集中在人工模拟条件下坡面尺度^[14],但缺乏小流域尺度上基于自然降雨过程的主要非点源污染物流失的探析。本研究以沂河上游孟良崮小流域为依托,根据径流量峰值对应时刻将降雨过程划分两个阶段,探讨 3 种典型自然强降雨下氮流失的特征;以流量加权浓度和平均流失率为标准,分析不同强降雨地表径流氮素流失特征,以期减少氮素流失和控制农业非点源污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

孟良崮小流域位于沂河上游蒙阴县垛庄镇(108°6 E, 35°20 N),见图 1。地势东北高西南低,最高海拔 485 m,最低海拔 174 m,山地丘陵面积占总面积的 80%以上。该流域年平均气温 13.7℃,降雨量较丰富,多年平均降水量 803.4 mm,降水年际变化大,年内分配极不均匀,多集中在夏季,容易出现暴涨暴落的现象。根据 RTK(real time kinematic,实时动态差分法)野外实地调查,该流域总面积约为 102.86 hm²,土地利用类型以林地、果园及耕地为主,所占百分比见表 1,土壤类型为棕壤,其理化性质见表 2,种植作物主要有花生、地瓜、玉米等。

1.2 水样采集与分析方法

孟良崮小流域内无任何工业污染源,地表径流汇集后从一个出口流出。在流域出口布设三角堰与宽口堰、

收稿日期: 2011-06-19 修订日期: 2012-02-16

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-08-0877);水利部淮委科技项目(SBJ2010003)和临沂市重大科技项目(201011019)

作者简介: 井光花(1987-),山东邹城市人,主要从事资源利用与环境效应的研究。临沂 山东省水土保持与环境保育重点实验室,276005。

Email: jingguanghuajgh@126.com

*通信作者: 于兴修(1967-),山东莒县人,教授,博士生导师,主要研究方向为资源利用与环境效应。临沂 山东省水土保持与环境保育重点实验室/临沂大学资源环境学院,276005。Email: yuxingxiu@lyu.edu.cn

虹吸式雨量记录仪，其三角堰和宽口堰表面平整光滑，分别用于小雨强与大雨强水位的记录，取样间隔为 5 min，对采集的水样进行酸化（按每升样品中加 2 mL 浓硫酸的比例）后立即封存于 2~4℃ 的便携式冰柜中，送往实验室进行分析；然后根据记录的水位和堰流量公式计算径流量。

测定指标包括硝态氮、可溶态氮、颗粒态氮及总氮。硝态氮的测定先经 0.45 μm 滤膜过滤后直接测定双波长吸光度；可溶态全氮的测定经 0.45 μm 滤膜过滤后过硫酸钾在 120℃ 高温下氧化消煮 30 min，在 UV1206 紫外分光光度计 220、275 nm 2 个波长下测定吸光度；总氮的测定水样混合均匀后经过硫酸钾消煮，双波长系数法测定；颗粒态氮由总氮与可溶态全氮之差获得；泥沙的测量，

在上层清液抽走后，在 120℃ 烘干后，称质量。

表 1 孟良崮小流域土地利用类型百分比
Table 1 Percentage of land use types in Menglianggu basin %

土地类型	面积百分比
林地	55.75
耕地	20.52
果园	10.66
荒山荒地	9.23
居民点	3.35
草地	0.20
其他	0.29

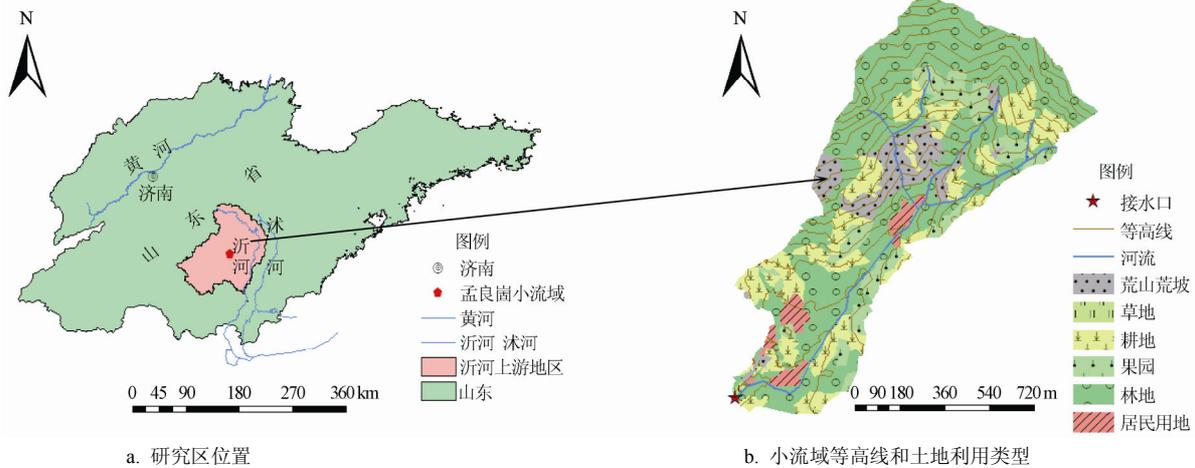


图 1 研究区位置、小流域等高线和土地利用类型

Fig.1 Location of experimental area and contour lines and land use type of small watershed

表 2 孟良崮小流域土壤的理化性状

Table 2 Basic soil properties of Menglianggu basin

土壤颗粒组成			砾石质量分数 /%	有机质质量分数/(g·kg ⁻¹)	碱解氮质量分数/(mg·kg ⁻¹)	全氮质量分数/(g·kg ⁻¹)	速效磷质量分数/(mg·kg ⁻¹)	全磷质量分数/(g·kg ⁻¹)
黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%						
0.39	31.92	67.69	22.8	104.87	59.03	1.27	7.27	0.95

1.3 评价指标计算方法

1) 次降雨流量加权质量浓度

次降雨流量加权质量浓度 (discharge-weighted event concentration, DWEC) 用来评价降雨径流污染状况，公式为^[15]

$$DWEC = \frac{\sum_{i=1}^n C_i Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (1)$$

式中，DWEC 为次降雨流量加权质量浓度，mg/L；C_i 为瞬时污染物质量浓度，mg/L；Q_i 为瞬时流量，m³/s；n 为降雨收集水样数。

2) 次降雨平均污染物流失率

次降雨平均污染物流失率 (Lv) 用来衡量次降雨事件不同雨强下污染物的流失强度，本研究根据已有公式^[16]和监测数据，将公式修正为

$$Lv = \sum_{i=1}^n [(C_i + C_{i+1}) / 2 \times (Q_i + Q_{i+1}) / 2 \times \Delta t] / (T \cdot S) \quad (2)$$

式中，Lv 为次降雨平均污染物流失率，g·h⁻¹·hm⁻²；C_i 和

C_{i+1} 为第 i 次和第 i+1 次监测污染物浓度，mg·L⁻¹；Q_i 和 Q_{i+1} 为第 i 次和第 i+1 次监测流量，m³·s⁻¹；Δt 为监测时间间隔，s；T 为降雨历时，h；S 为面积，hm²。

为详细反映氮素随地表径流的变化趋势，本研究以径流量峰值时刻 (T_p) 为标准，将污染物在整个径流过程分成 2 个阶段对比分析，探讨不同形态氮素在径流量峰值前后的变化特征。

2 结果与分析

2.1 不同强降雨过程与径流过程

根据气象部门采用的标准^[17]，从 2010 年 7~10 月间实地观测的 13 场降雨中，选取 7 月 17 日、8 月 7 日和 8 月 12 日的 3 场降雨，雨型为暴雨（编号为 2010-07-17）、大雨（编号为 2010-08-07）及大暴雨（编号为 2010-08-12），其中 2010-07-17 为该流域汛期首场有效强降雨，2010-08-07 为土壤水分相对饱和后的强降雨，2010-08-12 为该流域汛期最大强度降雨，

降雨过程与径流过程见图 2。

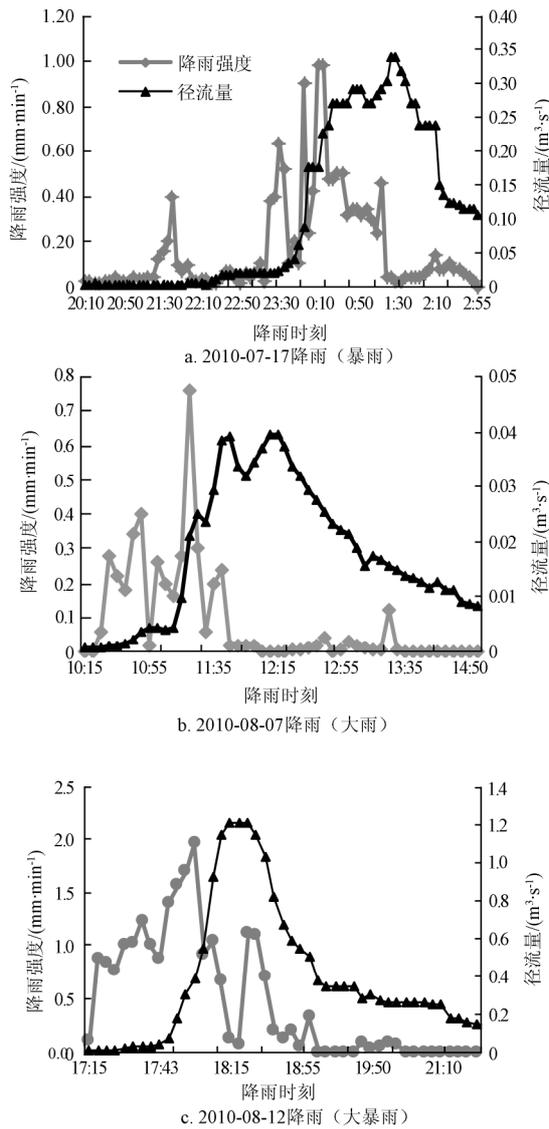


图 2 降雨强度与径流量变化曲线

Fig.2 Variation curves of rainfall intensity and flux

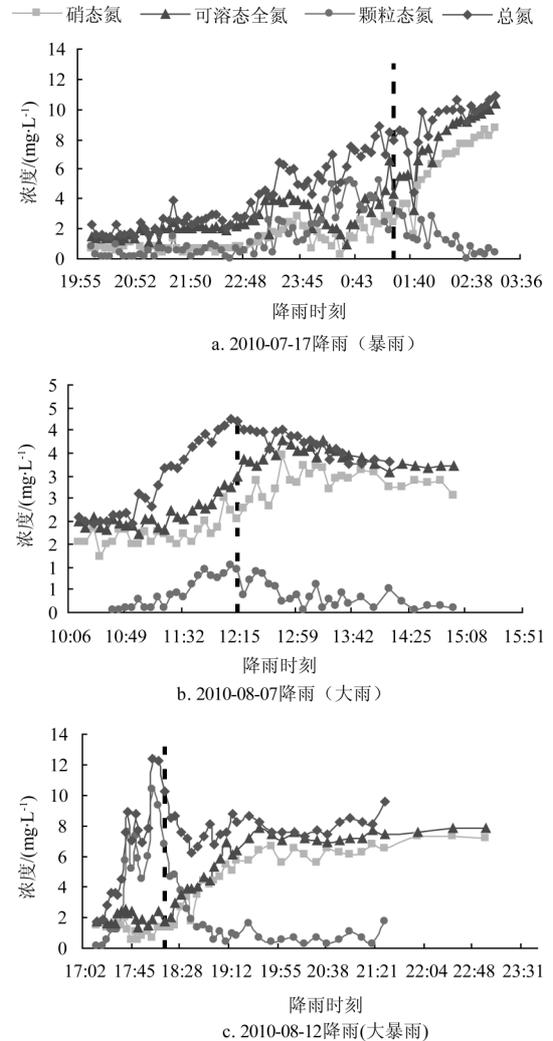
3 次降雨过程径流量曲线趋势不相同。由图 2a 和 b 可知，暴雨和大雨的降雨强度变化不稳定，有多处峰值，而径流在降雨的驱动下呈现双峰现象，与蒋锐等研究一致^[18]；而图 2c 表明，在大暴雨条件下，降雨强度整体呈先增强后减弱的趋势，且减弱过程中有一较小峰值。由于小波峰持续时间较短，降雨强度的增强并未对径流量产生明显的影响，故径流曲线在大暴雨条件呈单峰趋势，且出现峰值时间较其他降雨事件提前，与李瑞玲在太湖流域研究相近^[19]。

3 次降雨过程流量峰值均滞后于最大降雨强度。根据监测记录分析，暴雨、大雨和大暴雨的最大降雨强度时刻分别为 0:10、11:20 和 17:55，而径流峰值时刻分别为 1:25、12:10 和 18:25，径流滞后时间分别为 70、50 和 20 min，据前人研究得知除降雨强度影响外，前期土壤含水量、雨前晴天数及植被覆盖度等是影响滞后时间长短

的重要因素^[17,19]。

2.2 不同强降雨径流过程的氮素变化特征

为探讨不同降雨强度条件氮素随降雨径流的变化特征，本研究利用 3 场自然强降雨下径流样品数据，以径流量峰值对应时刻将降雨过程划分两个阶段，对比分析峰值前后氮素的变化特征（见图 3）。



注：虚线代表径流峰值对应时刻。

图 3 不同形态氮变化趋势图

Fig.3 Change trend chart of nitrogen

由图 3a 可知，在汛期首场暴雨过程中，不同形态氮变化趋势不一致，总氮持续增加，颗粒态氮在径流峰值前增加随后降低，硝态氮和可溶态氮在径流峰值前呈短暂降低后逐渐增加。径流量达到峰值前以颗粒态氮为主，峰值后可溶态氮为主，这是因为降雨强度大，持续时间长，先后发生了超渗产流和蓄满产流，超渗产流以颗粒态为主，蓄满产流以可溶态为主^[20]。

图 3b 表明，在大雨过程中，不同形态氮的变化特征均表现为在富集作用下逐步增加，然后径流量的稀释作用导致氮素含量逐渐减少，最后趋于稳定。由于前期出现不同强度的降雨，土壤水分相对饱和，径流以蓄满产流为主，在整个降雨过程中可溶态氮为氮流失的主要形态。此降雨事件氮流失的变化趋势同时反映了径流量对

先后产生了富集和稀释的作用^[21]。

从图 3c 可以看出, 在大暴雨过程中, 降雨历时短, 强度较大, 总氮和颗粒态氮在径流量峰值前浓度陡增达到最大, 随后总氮减少, 趋于稳定, 而颗粒态氮达到峰值后迅速降低; 硝态氮与可溶态氮逐渐上升, 在流量峰值后达到峰值并趋于稳定。由于降雨强度大, 历时短, 降雨径流携带大量泥沙, 初期冲刷效应明显, 峰值前氮流失以颗粒态氮形态为主; 而径流峰值后可溶态氮是氮流失的主要形态, 并发生了富集效应。

2.3 不同强降雨对氮素流失质量浓度的影响

由表 3 知, 不同雨强下氮 DWEC 值存在较大差异, 反映了降雨强度不同程度上影响氮的流失。在大雨、暴雨及大暴雨 3 种雨型下, 总氮的 DWEC 值分别为 3.469、7.803 及 8.291 mg/L, 表现为大雨 < 暴雨 < 大暴雨。颗粒态氮变化与总氮类似, 与雨强表现为正相关, 雨强越大, 颗粒态氮的 DWEC 值越大, 这是因为强降雨过程含有巨大能量的雨滴, 雨滴对富集大量化肥的表土进行反复冲击, 使得土壤侵蚀造成的颗粒态养分大量流失。硝态氮和可溶解态全氮的 DWEC 值均表现为暴雨 > 大暴雨 > 大雨, 这是因为暴雨事件为汛期首场较大有效降雨、持续

时间较长, 表土富集的氮素被淋洗后随着径流大量流失。

表 3 还表明, 颗粒态氮占总氮的质量浓度百分比最大为 50.074%, 可溶态氮占总氮的质量浓度百分比介于 49.9265~85.292%, 表现为大雨 > 暴雨 > 大暴雨, 说明氮主要以溶解态流失, 且随着雨强的增大所占比例相对减少, 在大雨强度较暴雨强度降雨条件, 溶解态更容易成为氮素流失的主要类型; 硝态氮在可溶态氮含量中占重要比例, 介于 67.822~80.026%。

2.4 不同强降雨对氮和泥沙平均流失率的影响

降雨是径流污染物形成的重要水文条件, 为定量分析不同强降雨对不同形态氮素的影响以及泥沙流失与氮素流失的关系, 本研究以次降雨污染物平均流失率为指标, 讨论不同强降雨对氮素平均流失率的影响。由表 4 可知, 与次降雨流量加权浓度随雨强变化过程有差异, 不同形态氮素的平均流失率随着降雨强度的增强而增加, 均表现为大暴雨 > 暴雨 > 大雨, 在大暴雨条件下, 总氮的平均流失率高达 78.239 g/(h·hm²); 其中可溶态氮流失率所占总氮的比例表现为大雨 > 暴雨 > 大暴雨, 与流量加权质量浓度变化表现一致, 说明氮流失率主要以溶解态形态。

表 3 不同形态氮 DWEC 值与所占比例

Table 3 DWECs and proportion of diferent nitrogen

编号	雨型	次降雨平均加权质量浓度/(mg·L ⁻¹)				百分比/%		
		硝态氮	可溶态全氮	颗粒态氮	总氮	硝态氮/可溶态氮	可溶态氮/总氮	颗粒态氮/总氮
2010-07-17	暴雨	3.302	4.869	2.934	7.803	67.822	62.400	37.600
2010-08-07	大雨	2.368	2.959	0.510	3.469	80.026	85.292	14.708
2010-08-12	大暴雨	3.215	4.139	4.152	8.291	77.666	49.926	50.074

表 4 不同形态氮素平均流失率和泥沙流失率

Table 4 Average loss rate of nitrogen and sediments

编号	雨型	次降雨平均氮素流失率/(g·h ⁻¹ ·hm ⁻²)				硝态氮/可溶态氮 /%	可溶态氮/总氮 /%	颗粒态氮/总氮 /%	泥沙流失率 /(g·h ⁻¹ ·hm ⁻²)
		硝态氮	可溶态氮	颗粒态氮	总氮				
2010-07-17	暴雨	5.761	8.697	4.786	13.483	66.241	64.504	35.496	2.385
2010-08-07	大雨	1.715	2.142	0.371	2.512	80.059	85.237	14.763	0.36
2010-08-12	大暴雨	29.499	38.02	40.219	78.239	77.586	48.595	51.405	22.022

表 4 还表明, 不同降雨强度泥沙的平均流失率差异较大, 表现为大暴雨 > 暴雨 > 大雨; 该流域总氮、颗粒态氮和硝态氮的平均流失率与降雨冲刷的泥沙流失率呈显著线性正相关 ($R^2 > 0.99$), 可溶态氮所占总氮的比例和颗粒态氮所占总氮的比例与泥沙流失率呈负相关和正相关 ($R^2 > 0.9$), 说明强降雨冲刷携带的泥沙是溶解态氮流失的重要因子和颗粒态氮流失的主要途径。

3 讨论

降雨是产生径流的必要条件, 其特征 (降雨强度、降雨历时、最大雨强等) 在一定程度上影响产生径流的时间、深度以及径流量。当降雨强度小于或等于土壤入渗率时不产流, 并以降雨强度向下入渗; 当降雨强度大于入渗强度时, 则形成超渗产流; 当土壤包气带和饱和水带基本饱和 (或者土壤最大蓄水量小雨累积入渗量) 时, 则形成蓄满产流^[22]; 故径流产生方式可分为超渗产流与

蓄满产流, 相对应氮素流失也可分为超渗流失与蓄满流失。据研究, 在超渗产流状态下, 颗粒态氮素流失比例超过蓄满产流, 而蓄满产流状态下, 氮素流失以可溶态为主^[20]。沂河上游孟良崮小流域的研究结果表明, 在土壤水分相对较饱和大雨过程中, 降雨引起的径流主要以蓄满产流为主, 整个降雨过程可溶态氮占主导地位; 而在汛期大暴雨降雨条件下, 降雨历时短, 强度较大, 径流量达到峰值前, 以超渗产流为主, 颗粒态氮是氮流失的主要形态。

也有研究表明, 氮素在降雨条件下主要通过可溶性态在径流中淋洗溶解、颗粒吸附在径流中解吸以及颗粒态随产流在坡面传递与被水体携带 3 种方式随地表径流流失进入水体^[23], 在径流量的富集和稀释的正、反两项作用转化与变化下, 不同形态氮素在径流中流失形态变化较大。在径流过程中, 径流初期由于冲刷效应, 颗粒态氮含量较高, 后期以可溶态氮为主, 并随着径流量富

集和稀释的作用趋于稳定；而硝态氮由于带负电，不易被土壤吸附而随地表和地下径流直接进入水体，在可溶态氮中占重要比例^[18,24-25]；通常情况下，可溶态氮是氮素流失的主要形态，随着雨强的增大所占比例相对减少。本研究对 DWEC 和平均污染物流失率的计算分析得知，不同强降雨下，氮素流失特征也存在差异，在大暴雨条件下，土壤侵蚀作用占据了主导地位，颗粒态氮含量相对较高；在大雨状态下，径流量的稀释作用则超过了富集作用，导致在氮素浓度在后期有降低趋势。这一结论与上述前人研究结果与本研究基本一致。

4 结 论

1) 在大雨径流曲线有明显的双峰现象，暴雨降雨径流达到峰值前有一较小峰值，而大暴雨的径流曲线呈单峰现象；径流峰值滞后时间不等，大约为 20~70 min。

2) 在首场暴雨降雨条件下，除颗粒态氮外，其余形态氮在降雨过程中均呈现增加趋势；在土壤水分相对饱和后的大雨过程中，总氮在径流峰值前达到峰值，可溶态氮与硝态氮在径流峰值后达到峰值，并趋于稳定；在大暴雨条件下，总氮与颗粒态氮在径流峰值前浓度陡增到最大，以颗粒态氮流失为主，径流峰值后可溶态氮与硝态氮逐渐增加，并趋于稳定。

3) 总氮和颗粒态氮的 DWEC 值表现为大雨 < 暴雨 < 大暴雨，可溶态全氮流失百分比介于 49.9265%~85.292%，而在溶解态氮中硝态氮占主导地位。

4) 不同形态氮素的平均流失率和泥沙流失率均表现为大暴雨 > 暴雨 > 大雨。不同形态氮流失率均与泥沙流失率呈正相关，而可溶态氮所占总氮比例与泥沙流失率分别呈负相关。

[参 考 文 献]

- [1] Wu Xiyuan, Zhang Liping, Fu Xingtiao, et al. Nitrogen loss in surface runoff from Chinese cabbage fields[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2011, 36(9/11): 401-406.
- [2] Franciska T de Vries, Jan Willem van Groenigen, Ellis Hoffland, et al. Nitrogen losses from two grassland soils with different fungal biomass[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(5): 997-1005.
- [3] Girmay G, Singha B R, Nyssenc 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.
- [4] 赵伟, 杨培岭, 李海山, 等. 呼伦湖流域 3 种利用方式草场水土及氮磷流失特征[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(9): 220-225. Zhao Wei, Yang Peiling, Li Haishan, et al. Characteristics of soil erosion, nitrogen and phosphorous losses under three grassland use patterns in Hulun Lake watershed[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(9): 220-225. (in Chinese with English abstract)
- [5] 马骞, 于兴修, 刘前进, 等. 沂蒙山区不同覆被棕壤理化特征对径流溶解态氮磷输出的影响[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(7): 1526-1536. Ma Qian, Yu Xingxiu, Liu Qianjin, et al. Effect of physicochemical properties of brown earth under different land cover in the Yimeng mountainous area on the output of dissolved nitrogen and phosphorus in runoff[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(7): 1526-1536. (in Chinese with English abstract)
- [6] 孙正宝, 陈治谏, 廖晓勇, 等. 三峡库区典型小流域农业非点源氮磷流失特征[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(8): 1720-1725. Sun Zhengbao, Chen Zhijian, Liao Xiaoyong, et al. Characteristics of agricultural non-point source nitrogen and phosphorus losses in a typical small watershed in Three Georges Reservoir area[J]. *Chinese Journal of Ecology* 2011, 30(8): 1720-1725. (in Chinese with English abstract)
- [7] 田坤, Huang Chihua, 王光谦, 等. 降雨-径流条件下土壤溶质迁移过程模拟[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(4): 81-87. Tian Kun, Huang Chihua, Wang Guangqian, et al. Movement of soil solute under simulated rainfall runoff[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(4): 81-87. (in Chinese with English abstract)
- [8] 曾文治, 黄介生, 谢华, 等. 不同暗管布置下棉田排水的硝态氮流失量分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(4): 89-93. Zeng Wenzhi, Huang Jiesheng, Xie Hua, et al. Analysis of nitrate-nitrogen loss under different underground pipe layout[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(4): 89-93. (in Chinese with English abstract)
- [9] Yang Jinling, Zhang Ganlin, Shi Xuezheng, et al. Dynamic changes of nitrogen and phosphorus losses in ephemeral runoff processes by typical storm events in Sichuan Basin, Southwest China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 105(2): 292-299.
- [10] Bechmann M, Deelstra J, Stålnacke P, et al. Monitoring catchment scale agricultural pollution in Norway: Policy instruments, implementation of mitigation methods and trends in nutrient and sediment losses[J]. *Environmental Science and Policy*, 2008, 11(2): 102-114.
- [11] Kleinman P J A, Sharpley A N, Veith T L, et al. Evaluation of phosphorus transport in surface runoff from packed soil boxes[J]. *J Environ Qual*, 2004, 33: 1413-1423.
- [12] 张展羽, 袁自璞, 孔莉莉, 等. 不同毛沟布置方式下农田次降雨氮素流失特性分析[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(10): 51-55. Zhang Zhanyu, Yuan Ziyong, Kong Lili, et al. Characteristics of nitrogen loss from field ditches with different densities under single rainfall event[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(10): 51-55. (in Chinese with English abstract)
- [13] Gabriele Bonaiti, Maurizio Borin. Efficiency of controlled drainage and subirrigation in reducing nitrogen losses from agricultural fields[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 98(2): 343-352.
- [14] 于兴修, 马骞, 刘前进, 等. 横坡与顺坡垄作径流氮磷输出及其富营养化风险对比研究[J]. *环境科学*, 2011, 32(2): 428-436. Yu Xingxiu, Ma Qian, Liu Qianjin, et al. Comparative study of N,P output and eutrophication risk in runoff water in cross ridge and longitudinal ridge[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(2): 428-436. (in Chinese with English abstract)
- [15] Zhao Zhang, Takehiko Fukushima, Yuichi Onda, et al. Characterization of diffuse pollutions from forested watersheds in Japan during storm events -Its association with rainfall and watershed features[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 390(1), 215-226.

- [16] 张千千, 王效科, 郝丽岭, 等. 重庆市路面降雨径流特征及污染源解析[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 76—82.
Zhang Qianqian, Wang Xiaoke, Hao Liling, et al. Characterization and source apportionment of pollutants in urban roadway runoff in Chongqing[J]. Environmental Science, 2012, 33(1): 76—82. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李瑞玲, 张永春, 刘庄, 等. 太湖缓坡丘陵地区雨强对农业非点源污染物随地表径流迁移的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(5): 1220—1224.
Li Ruiling, Zhang Yongchun, Liu Zhuang, et al. Rainfall intensity effects on nutrients transport in surface runoff from farmlands in gentle slope hilly area of Taihu lake basin[J]. Environmental Science, 2010, 31(5): 1220—1224. (in Chinese with English abstract)
- [18] 蒋锐, 朱波, 唐家良, 等. 紫色丘陵区典型小流域暴雨径流氮磷迁移过程与通量[J]. 水利学报, 2009, 40(6): 659—666.
Jiang Rui, Zhu Bo, Tang Jialiang, et al. Transportation processes and loss fluxes of nitrogen and phosphorous through storm runoff in a typical small watershed in the hilly area of purple soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(6): 659—666. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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地表径流迁移特征[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6): 1185—1190.
Li Ruiling, Zhang Yongchun, Zeng Yuan, et al. Effects of rainstorm on the export of farmland nitrogen with surface runoff in hilly area of Tai lake basin[J]. Journal of Agro-environmental Science, 2009, 28(6): 1185—1190. (in Chinese with English abstract)
- [20] 宋娅丽, 王克勤, 董莉, 等. 滇中烤烟坡耕地地表径流氮素的动态变化特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 7—11.
Song Yali, Wang Keqin, Dong Li, et al. Dynamic changes feature of nitrogen exports via overland runoff in sloping filed in the middle regions of Yunnan province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(4): 7—11. (in Chinese with English abstract)
- [21] 张汪寿, 李晓秀, 王晓燕, 等. 北运河下游灌区不同土地利用方式非点源氮素输出规律[J]. 环境科学学报, 2011, 31(12): 2698—2706.
Zhang Wangshou, Li Xiaoxiu, Wang Xiaoyan, et al. Dissolved nitrogen runoff from different land use types in the downstream irrigation area of the Beiyunhe River Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(12): 2698—2706. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张丽萍, 张妙仙. 土壤侵蚀正态模型试验中产流畸变系数[J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 449—455.
Zhang Liping, Zhang Miaoxian. Research on runoff formation distortion coefficient in soil erosion experiment of a normal model of small drainage[J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(4): 449—455. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张兴昌, 邵明安. 植被覆盖度和综合治理对纸坊沟流域土壤氮素流失的影响: 英文版[J]. 植物学报, 2003, 45(10): 1195—1203.
Zhang Xingchang, Shao Mingan. Effects of vegetation coverage and management practice on soil nitrogen loss by erosion in a hilly region of the loess plateau in China[J]. Acta Botanica Sinica, 2003, 45(10): 1195—1203.
- [24] Han Jiangang, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Nitrogen and phosphorous concentrations in runoff from a purple soil in an agricultural watershed[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(5): 757—762.
- [25] 曹杰君, 高扬, 黄海波, 等. 长三角典型村域次降雨条件下氮素非点源输出特征[J]. 环境科学, 2010, 31(11): 2587—2593.
Cao Junjie, Gao Yang, Huang Haibo, et al. Output characteristics of non-point nitrogen from a typical village region in Yangtze delta under an individual rainfall event[J]. Environmental Science, 2010, 31(11): 2587—2593. (in Chinese with English abstract)

Characteristics of soil nitrogen loss under different intense rainfalls in Yimeng mountainous area

Jing Guanghua^{1,2}, Yu Xingxiu^{1*}, Liu Qianjin¹, Li Zhenwei^{1,2}

(1. Shandong Key Laboratory of Soil Conservation and Environmental Protection, Institute of Soil and Water Conservation and Environmental Protection, Linyi University, Linyi 276005, China; 2. Institute of Population Resource and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

Abstract: In order to analyze the loss characteristics of different forms of nitrogen under different natural rainfall intensities, a fixed-point experiment was conducted in Meng Lianggu basin, a typical watershed in the area of YiHe upstream located in Yimeng Mountainous area. The processes of rainfall and runoff in 2010 were observed and three typical rainfall events including the first rainstorm, a heavy rain and a heavy rainstorm were selected. Results showed that different forms of nitrogen contents presented the same increasing trend except for particulate nitrogen during the first rainstorm event of the flood season. In the heavy rain process, total nitrogen content reached the maximum before the runoff peak and dissolved nitrogen and then dissolved nitrate nitrogen contents reached the maximum. During the heavy rainstorm, total nitrogen and particulate nitrogen contents reached rapidly the maximum before the runoff peak and then declined quickly. The discharge weighted concentration of total nitrogen and particulate nitrogen increased with the rainfall intensity in the order of heavy rain < rainstorm < heavy rainstorm. Dissolved nitrogen accounted for 49.9265%—85.292% of total nitrogen loss concentration and dissolved nitrate nitrogen played a dominated role in dissolved nitrogen. Furthermore, the average loss rates of nitrogen and sediment were both declined with the rainfall intensity decreasing in the order of heavy rainstorm > rainstorm > heavy rain. The research could provide a basis for the protection of water environment and the control of non-point pollution of typical watersheds in Yimeng Mountainous area.

Key words: nitrogen, rain, runoff, losses, Yimeng mountainous area