影响土壤氮素径流流失的因素探析*

杨丽霞[1,3] 杨桂山[1] 苑韶峰[2] 李恒鹏[1]
(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 南京 210008; 2. 浙江工商大学公共管理学院土地研究所 杭州 310035; 3. 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要 从自然因素和人为因素出发探讨了地形、降雨、土壤理化性质、植被以及施肥、耕作制度等因素对土壤N素流失的影响,并综述了国内外有关研究的最新进展。并认为,基于这些因素相互作用的复杂性,有必要开展以下3方面的内容:一是大量开展多因子交叉实验,定量评价它们之间的关系,这为深入理解土壤N素流失机理和确定流域非点源污染模拟模型参数提供科学依据;二是加强有关土壤N素流失机理的多学科之间的联系,协同攻关建立较完善的理论认识;三是利用微观径流小区开展田间试验,结合遥感和GIS分析等方法,建立宏观大尺度土壤N素流失模型,为环境问题的宏观决策提供支持。

关键词 土壤N素 径流流失 土壤侵蚀 非点源污染 径流小区

Analysis of the factors affecting soil nitrogen loss through runoff. YANG Li-Xia[1,3], YANG Gui-Shan[1], YUAN Shao-Feng[2], LI Heng-Peng[1] (1. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Institute of Land & College of Public Management, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310035, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China), *CJEA*, 2007, 15(6): 190～194

Abstract This paper systematically analyzed the impacts of landform, rainfall, soil, vegetation, fertilizer and cropping system on soil nitrogen loss and introduced the latest achievements of research in this field. Based on complex interactions of the above factors, suggestions on future research on soil nitrogen loss are advanced. Firstly, experiments on multi-factor interactions and quantitative evaluation of their relationships should be done to provide scientific understanding of the basic mechanisms of soil nitrogen loss and non-point source pollution model parameters. Secondly, cooperation among various research disciplines should be enacted to establish profound theoretical basis. Thirdly, large-scale models on soil nitrogen loss should be established by conduction on field experiments and micro-runoff plots in combination with remote sensing and GIS to provide support for environmental macroscopical decision on spatial-temporal scales.

Key words Soil nitrogen, Runoff loss, Soil erosion, Non-point source pollution, Micro-runoff plot
(Received April 12, 2006; revised June 5, 2006)

土壤N素是农作物生长不可缺少的营养元素之一,随着N肥施用量的增加,大量的N素累积在土壤中,明显地增加了向水体释放的风险,这使得土壤N素由增产的农学意义向非点源污染的环境意义方向转变。N素作为非点源污染的重要营养物质之一[1],其流失既可造成土壤生产力衰退,又可引起水体富营养化,为此关于N非点源污染特征及其影响因素的研究十分活跃[2]。近年来国内外的研究主要集中在从影响因素和减少污染输出的角度来研究土壤N素流失规律和特征[3],并建立了不同影响因素与N素流失之间的关系。本文围绕土壤N素流失问题,从自然因素和人为因素出发阐述了地形、降雨、土壤理化性质、植被以及施肥、耕作制度等因素对土壤N素流失的影响,这有助于理解营养盐流失机理和确定流域非点源污染模拟模型参数,为有效控制N素径流流失,防止地表水体富营养化提供科学依据。

1 土壤N素流失影响因素

土壤N素流失过程实质是表层土壤与降雨、径流的相互作用过程,表现为两种形式:其一,在降雨条件下,当土壤入渗能力小于雨强时,产生地表径流,可溶性物质随地表径流迁移;其二,土壤内部的可溶性物质随入渗的水分沿垂直方向迁移[4]。由于以入渗方式迁移的量一般较小,且迁移造成的危害也相对不大,故

* 国家自然科学基金项目(40371111)资助
收稿日期:2006-04-12 改回日期:2006-06-05

认为 N 素流失以随地表径流迁移为主。

2　土壤 N 素流失的影响因素

影响土壤 N 素径流流失的因素包括自然因素和人为因素。自然因素是影响 N 素径流流失发生的先决条件和主要因素,包括地形、地貌、气候、土壤和植被,深入了解这些因素的作用,是认识土壤 N 素流失机理的基础;而人为因素是间接因素,主要通过人类活动干预或者改变自然因素,加剧 N 素径流流失,主要包括土地利用方式和耕作管理两个方面。

2.1　自然因素

2.1.1　地形

地形因素是影响土壤 N 素流失的重要因素,主要包括坡度和坡长。坡度是影响土壤 N 素径流流失的最突出的地形因素。由于重力的作用,水在坡面上既有流动性又有渗透性,在其他条件相近的情况下,这二种性质随坡度大小而相互转化。当坡度较大时,水的流动性占主导地位,易发生土壤 N 素随径流流失;当坡度较小时,水向下渗透占主导地位,不易发生径流流失,探讨坡度与土壤 N 素流失之间的关系,对土壤侵蚀和水体富营养化的削弱都具有重要意义。

有研究表明,土壤侵蚀与坡度成正比。如 Zingg1940 年通过实测建立了土壤侵蚀量与坡度之间的经验关系式:$y=ax^b$(a、b 分别为正系数和指数,取值为 0.065 和 1.48;x 为坡度;y 为土壤侵蚀量),表明土壤侵蚀量随坡度的增大而增大[23]。汤立群和陈国祥[5]在小流域产流产沙模型中建立的坡面土壤侵蚀量关系式也表明,土壤侵蚀量与坡面坡度成正比。但更多人工降雨试验和野外观测资料表明[6,7],在一定范围和条件下,土壤侵蚀量与坡面坡度成正比关系,但坡度超过一定限度后,土壤侵蚀量与坡度成反比关系,说明土壤侵蚀存在坡度界限。国内外很多学者通过室内外观测实验以及理论研究也都证实了临界坡度的存在,但土壤侵蚀的临界坡度存在很大的差异。Horton 的研究结果认为临界坡度为 57°[24];Renner[25]认为约为 40.5°;陈法扬[8]在红黏土上的研究结果为 25°;阮伏水[9]认为 20°～30°的坡度区间土壤侵蚀最严重,坡度极限为 27.6°;曹文洪[10]同时考虑坡度变化对受雨面积的影响及土粒沿顺坡方向的重力分量,认为临界坡度为 41.4°或 45°;石生新[11]认为临界坡度在 23.4°～27.3°之间。由于不同学者研究方法和边界条件不同,结论差异比较大,故今后有待于从土壤侵蚀机理和过程入手,结合室内外试验资料综合分析坡度和土壤侵蚀的关系,制定出相应的保护水土、削减水体富营养化的措施。

坡面长度是影响坡面径流与水流侵蚀产沙过程的重要地貌因素,国内外相关研究已较深入,但是结论各异。一些学者认为单位面积土壤流失量随着坡长增加而增加[26,27];另一些学者指出[28],由于侵蚀产沙,随着坡长增加,水流挟沙量增加,很快坡面径流的侵蚀量达到最大值,超过这个峰值点后,随着坡长增加,径流的侵蚀强度逐渐减弱;还有一种观点认为随着坡长增加,坡面径流深逐渐增加,同时径流中含沙量也逐渐递增,二者相互消长,侵蚀强度随坡长变化不大[29]。由于影响坡面径流与侵蚀的因素错综复杂,上述结论都是在特定降雨和下垫面条件下得到的,因此地貌因素尤其是坡长因素对侵蚀的影响往往因地因时而异。但有一点是比较确定的,就是在降雨初期,坡面的侵蚀强度是随着坡长的增加而增加的。

2.1.2　降雨

降雨(包括降雨量、降雨强度等)是土壤 N 素流失发生的动力,主要是通过直接打击土壤,分散土壤颗粒结构,当降雨强度大于土壤下渗速度时,就产生地表径流,从而引起土壤 N 素径流流失。降雨量直接影响径流量的大小,一般在其他各类因素相同的前提下,N、P 的径流输出量与降雨量成较好的线性关系。Kumar 等[30]、吕唤春[12]、陈欣等[13]认为,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,N、P 等营养元素的流失量也相应显著的增加。土壤 N 素径流流失量不仅与降雨量有关,还与降雨强度有密切关系。Pruski 与 Nearing[31]研究表明,降雨强度不增加,即使降雨总量增加 1%,土壤侵蚀仅会增加 0.85%;但当降雨强度发生变化,降雨总量增加 1%,土壤侵蚀就会增加 1.7%。可见,降雨强度也是影响土壤养分损失的重要气象因子。

在同一雨强条件下,水土流失量与养分流失量呈显著的正相关关系;不同雨强下,径流累积量、流失养分累积量和泥沙累积量与雨强呈幂函数增长;Fierer 等[32]通过人工降雨模拟研究草地和山艾树中 C、N 随地表径流流失规律,研究表明,硝态氮和有机氮的流失量与雨强呈幂函数增长,而铵态氮受雨强的影响变化不大。黄满湘等[14]认为,在强降雨条件下土壤侵蚀量和 N 素流失量都明显大于弱降雨条件,造成这一现象的主要原因是随着雨强增加,雨滴对大的土壤颗粒打击和分散力增加,引起土壤流失量和养分流失量增大。

康玲玲[15]、马琨等[16]对不同雨强条件下养分流失特征的试验研究表明,不同雨强条件下径流中水溶性的N素表现为初始流失浓度较高,随降雨历时延长略有下降,最终趋于稳定。但不同雨强下水溶性N素流失浓度没有很大差别,主要是N素流失形态变化。在雨强较大情况下,土壤养分以泥沙形式随径流迁移;当雨强较小时,随径流迁移的可溶态养分流失量占流失泥沙养分量的比例较高。雨强与养分流失量、流失泥沙量有正相关关系,但对流失泥沙养分含量影响不明显。尽管国内外学者研究了不同雨强或不同降雨量条件下土壤N素流失特征,并得出了一些基本规律,但都是单一因子的影响,并没有综合考虑雨强与其他因素的相互作用,所以对不同雨强、坡度和植被覆盖度等综合因素对土壤N素流失规律的影响有待进一步研究。

2.1.3 土壤

土壤N素径流流失与土壤理化性质密切相关。许多研究表明,土壤内部水分、有机质含量、N含量、细颗粒物分布等理化因子与土壤N素流失密切相关。一般来说,土壤有机质含量越高,土壤结构就越佳,抗蚀性就越强,土壤N素越不容易流失;土壤黏粒含量降低促进土壤N素流失的发生。Chow与Rees[33]通过模拟降雨试验研究了不同粗粒含量和粒径对径流、入渗和土壤流失量的影响,发现径流量和土壤流失量随粗粒含量增加和粒径增大而减少。Caravaca[34]对14个耕地土壤以及6个林地表层土壤样品的比较研究表明,细颗粒物质含量较大的土壤区域,N素流失形态中存在一部分有机氮随水流携带进入水体的威胁。黄满湘[14]指出,径流中不同形态N浓度同侵蚀土壤表层中N的含量、组成以及土壤质地密切相关。

2.1.4 植被

多数研究[35,36]认为植被覆盖可有效地减少土壤侵蚀,并将植被减蚀作用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。但由于土壤全N多为有机氮,主要和土壤颗粒结合,因此,植被在防止土壤颗粒流失的同时,相应地减少了土壤全N的流失,其减少作用随覆盖度的增大而增加。

Castillo[37]和Meyer等[38]认为,植被覆盖度愈高,水土流失愈少;Morgan等[39]通过人工降雨模拟发现土壤侵蚀随植被覆盖度的增加呈指数衰减;Pierson等[40]发现,90%植被覆盖度的土壤侵蚀仅仅是裸土侵蚀的8%,主要是由于植被的保护增强了土壤抗侵蚀作用。张兴昌等[17]研究表明,随植被覆盖度增加,全N流失减少,但矿质N流失并未减少。黄满湘等[14]认为,植被覆盖是影响农田地表径流养分损失的重要因素,作物覆盖能有效地减少地表水土和颗粒态N流失。石生新[11]的研究表明,坡面累积产沙量与植被覆盖度呈负相关,即植被覆盖度越大,坡面累积产沙量越小;当植被覆盖度大于60%时,减沙效益均在90%以上(与休闲地相比),并得出了定量的关系式:$Sq=8.622e^{-3.24V}$[式中,Sq为累积产沙量(kg),V为植被覆盖度]。植被覆盖度能影响产流形成时间和径流量,在一定范围内,植被覆盖度愈高,水土流失愈少,超过这个范围,其作用并不很明显。所以有必要研究植被覆盖度能发挥最大效益的临界值,尽可能保护水土侵蚀和水体富营养化,减少环境污染。

2.2 人为因素

人类活动对土地资源的粗放式、掠夺式利用诱发和加剧了潜在的水土流失,其影响因素主要包括土地利用方式和耕作管理两个方面。Mander等研究发现在小的农业子流域中,化肥使用率是N流失的最主要影响因子,而在较大的流域中,土地利用模式则起主要作用,且土地利用模式的优化与强度降低也对小流域($300km^2$)的N、P和有机物流失有明显的缩减效应[41]。

2.2.1 土地利用类型

不同土地利用类型的养分循环机制不同,对水体N素负荷的贡献率也不同。有研究表明[42],不同坡地结构及土地利用类型,如森林、草地、农田、河边植被,明显地影响着径流量及其中的养分含量。农用地与林地面积比例明显地影响着径流中N素含量。Schilling具体地研究了地表水中N素含量与中耕地的面积比例呈线性关系[43]。杨金玲等[18]研究了典型小流域地表径流水中N素和土地利用系统之间的定量关系,发现林地、水塘面积比例增加会使径流水中的N素含量成比例地减少,而水田则具有成比例增加效应;村庄对NH_4-N的增加效应显著;并且指出N素的输出量与土地利用类型具有指数相关性,并得出了$y=a\times e^{ax}$的函数;梁涛等[19]通过人工模拟降雨对浙江省西苕溪流域水田、林地、园地、草地和菜地5种土地利用类型的土壤N素径流流失进行了研究,发现在相同的降雨条件下,地表径流水相总N的流失量桑林最大,水田最小;悬浮颗粒态N占地表径流水相总N的70%~90%,水相溶解态N的流失量以松林最高,竹林、桑林和水田接近而且较低。目前,不管是人工降雨模拟还是自然降雨,大多数研究都表明不同土地利用类型下土壤N

素流失是不同的,但很少有研究说明土地利用类型的差异能解释土壤 N 素流失变异的程度。

2.2.2 耕作管理

目前,很多地区化肥的施用量均超出作物生长实际所需的水平,超出的化肥用量极易使土壤 N 素含量出现"盈余",增加 N 素流失的潜能。Schuman 和 Burwell[44] 研究表明,如果给所研究的流域补施 N 168 kg/hm^2,通过流域径流水流失的无机氮素含量占到降水输入 N 量的 69%。Smith[45] 研究发现径流中硝态氮浓度偏高与施肥方式和时期有关,在产流前表施 N 肥,径流中无机氮浓度高。杨金玲等[20] 研究表明,施用化学 N 肥会显著增加农田径流水中 N 素的含量和输出量。马立珊等[21] 采用^{15}N 同位素示踪技术研究水、旱田网络试验区农田 N 素流失,发现 N 素流失与化肥施用量之间存在明显的正相关关系。因此,合理施肥是减少土壤养分流失的基础,同时要注意肥料品种的选择、施肥方式和施肥时间等。

不同农作方式也明显的影响土壤 N 素径流流失。袁东海等[22] 采用径流小区法研究了 6 种不同农作方式土壤 N 素的流失特征,发现同顺坡农作方式相比,其他农作方式均有明显控制土壤 N 素流失的作用,等高耕种、等高土埂、休闲等农作方式控制土壤 N 素流失优于水平沟和水平槽带农作方式。Myers 等[46] 认为免耕和少耕农田产生了较少地表径流,且农药和养分的地表流失较少,而传统耕作农田中,养分随地下径流流失较多。

3 问题与展望

土壤 N 素径流流失导致水体富营养化,产生一系列环境问题。目前,关于土壤 N 素流失主要是通过室内或室外人工模拟降雨和自然降雨的方法来研究的,但大多数研究集中在探讨土壤 N 素流失总量对水环境的贡献,虽对土壤 N 素流失与影响因素之间的关系有些研究,但多限于定性的描述,定量研究较少。鉴于 N 素径流流失受诸多因素综合作用的复杂性,有必要开展多因子交叉试验,定量评价其关系,为深入理解土壤 N 素流失机理和确定流域非点源污染模拟模型参数提供科学依据。同时,土壤 N 素径流流失的过程实质是水土侵蚀和养分迁移等过程的综合体现,对这些过程的研究涉及多学科知识,故需加强多学科联系,协同攻关建立较完善的理论认识。目前已经建立了多种不同尺度范围的 N 素流失模型,但是模型之间很难有机统一起来,有待于利用微观径流小区的田间试验,结合遥感和 GIS 分析等方法,建立宏观的、大尺度的土壤 N 素流失模型,为环境问题的宏观决策提供支持。

参 考 文 献

1 苑韶峰,吕　军,俞劲炎.氮、磷的农业非点源污染防治方法.水土保持学报,2004,18(1):122～125

2 马立珊.苏南太湖水系农业非点源氮污染及其控制对策研究.应用生态学报,1992,3(4):346～354

3 单保庆.小流域磷污染非点源输出的人工降雨模拟研究.环境科学学报,2000,20(1):33～37

4 王全九,沉　晋,王文焰,等.降雨条件下黄土坡面溶质随地表径流迁移实验研究.水土保持学报,1993,7(1):11～17,52

5 汤立群,陈国祥.小流域产流产沙动力学模型.水动力学研究与进展:A 辑,1997,12(2):164～174

6 李佩武,姚玉君.于桥水库以上流域地形、坡度与 N、P 输出的关系初探.天津师大学报(自然科学版),1994,14(4):50～54

7 胡世雄,靳长兴.坡面土壤侵蚀临界坡度问题的理论与实验研究.地理学报,1999,54(4):347～356

8 陈法扬.不同坡度对土坡冲刷量试验.中国水土保持,1985 (2):24～30

9 阮伏水.福建花岗岩地区坡度和坡长对土壤侵蚀的影响.福建师范大学学报(自然科学版),1995,11(1):100～106

10 曹文洪.土壤侵蚀的坡度界限研究.水土保持通报,1993,13(4):1～5

11 石生新.高强度人工降雨条件下地面坡度、植被对坡面产沙过程的影响.山西水利科技,1996 (3):77～80

12 吕唤春,陈英旭,方志发,等.千岛湖流域坡地利用结构对径流氮、磷流失量的影响.水土保持学报,2002,16(2):91～92

13 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.水土保持学报,1999,5(3):38～41

14 黄满湘,章　申,张国梁,等.北京地区农田氮素养分随地表径流流失机理.地理学报,2003,58(1):147～154

15 康玲玲,朱小勇,王云璋,等.不同雨强条件下黄土性土壤养分流失规律研究.土壤学报,1999,36(4):536～543

16 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.水土保持学报,2002,16(3):16～19

17 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,2000,21(6):16～19

18 杨金玲,张甘霖,张　华,等.丘陵地区流域土地利用对氮素径流输出的影响.环境科学,2003,24(1):16～23

19 梁　涛,张秀梅,章　申,等.西苕溪流域不同土地类型氮元素输移过程.地理学报,2002,57(4):389～396

20 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.农村生态环境,2001,17(3):1～4

21 马立珊,王祖强,张水铭,等.苏南太湖水系农业面源污染及控制对策研究.环境科学学报,1997,17(1):39～47

22 袁东海,王兆赛,陈　欣,等.不同农作方式红壤坡耕地土壤氮素流失特征.应用生态学报,2002,13(7):863～866

23 Zingg A.W.Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff.Agric.Eng.,1940,21:59～64

24 Horton R.E. Erosional development of streams and their drainage basins, hydrophysical approach to quantitative morphology. Bull. Amer. Geol. Soc., 1945, 56(3): 275～370

25 Renner F.G. Conditions influencing erosion of the Boise River watershed. U.S. Dept. Agric Tech. Bull., 1936, 28(5): 479～493

26 Smith D.D., Wischmeier W.H. Factor affecting sheet and rill erosion. Trans. AGU, 1957, 38: 889～896

27 Morgan R.P.C. Soil Erosion and Conservation. New York: Longman Scientific and Technical, 1986

28 Zachar D. Soil Erosion (Development in Soil Science 10). Amsterdam: Elservier Scientific Publishing Company, 1982

29 King L.C. The uniformitarian nature of hillslopes. Trans. Edin. Geol. Soc., 1957, 17(1): 81～102

30 Kumar R., Ambasht R.S., Srivastava A., *et al*. Reduction of nitrogen losses through erosion by *Leonotis nepetaefolia* and *Sida acuta* in simulated rain intensities. Ecological Engineering, 1997, 8(3): 233～239

31 Pruski F.F., Nearing M.A. Climate-induced changes in erosion during the 21st century for eight U.S. locations. Water Resources Research, 2002, 38(12): 1298

32 Fierer N.G., Gabet E.J. Carbon and nitrogen losses by surface runoff following changes in vegetation. Journal of Environmental Quality, 2002, 31(4): 1207～1213

33 Chow T.L., Rees H.W. Effects of coarse-fragment content and size on soil erosion under simulated rainfall. Canadian Journal of Soil Science, 1995, 75(2): 227～232

34 Caravaca F., Lax A. Organic matter, nutrient contents and cation exchange capacity in fine fractions from semiarid calcareous soils. Geoderma, 1999, 93(3/4): 161～176

35 Schuman G.E., Bunvell R.E., Pest R.F., *et al*. Nitrogen losses in surface runoff from agricultural watersheds on Missouri Valley Loess. J. Environ. Qual., 1973, 2(2): 299～302

36 Weier K.L. Nitrogen use and losses in agriculture in subtropical Australia. Fertilizer Res., 1994, 39(3): 245～257

37 Castillo V.M., Martinez-Mena M., Albaladejo J. Runoff and soil loss response to vegetation removal in a semiarid environment. Soil Sci. Soc. Am. J., 1997, 61(4): 1116～1121

38 Meyer L.D., Foster G.R., Nikolov S. Effect of flow rate and canopy on rill erosion. Trans. ASAE, 1975, 8(5): 905～911

39 Morgan R.P.C., McIntyre K., Vickers A.W., *et al*. A rainfall simulation study of soil erosion on rangeland in Swaziland. Soil Technology, 1997, 11(3): 291～299

40 Pierson F.B. Incorporating small scale spatial variability into predictions of hydrologic response on sagebrush rangelands. Variability in Rangeland, Water Erosion Processes. Madison: Soil Science Society of America, 1994. 23～34

41 Mander U. Nutrient runoff dynamics in a rural watershed: influence of land-use change, climatic fluctuations and ecotechnological measures. Ecol. Eng., 2000, 14(4): 405～417

42 Kuenzler B.J., Craig N.J. Land use and nutrient yields of the Chowan River Watershed. Watershed Research Perspectives. Washington, DC: Smithsonian Press, 1986. 77～107

43 Schlling K.E., Libra R.D. The relationship of nitrate concentrations in streams to row crop land use in Iowa. J. Environ. Qual., 2000, 29(6): 1846～1951

44 Schuman G.E., Barwell R.E. Precipitation nitrogen contribution to surface runoff discharges. J. Environ. Qual., 1974, 3(4): 366～368

45 Smith S.J. Nutrient losses from agricultural land runoff in Oklahoma. Proc. 22th Okal. Agric. Chem. Conf. Stillwater, OK: Oklahoma State Univ. Pub., 1988. 23～26

46 Myers J.L., Wagger W.G., Leidy R.b., *et al*. Chemical movement in relation to tillage system and simulated rainfall intensity. J. Environ. Qual., 1995, 24(6): 1183～1192