



地理学报 2003年第58卷第1期

北京地区农田氮素养分随地表径流流失机理

作者: 黄满湘 章 申

田间模拟降雨径流试验研究了北京地区农田暴雨径流氮素流失与雨强、作物覆盖、施肥因子的关系,以及侵蚀泥沙的粒径分布特征和对氮的富集作用。结果表明:(1)降雨强度越大,地表径流模数和侵蚀模数增大,氮素流失越多;作物覆盖有效地减少地表水土和颗粒态氮流失;(2)颗粒态氮浓度占径流全氮浓度的88.9%(施尿素)和98%以上(未施氮肥),是农田径流氮损失的主要形态;(3)施用化学氮肥增大了农田径流溶解态氮浓度,化学氮肥容易通过地表径流流失;(4)侵蚀泥沙的团聚体组成和原来土壤有很大差异,粒径<0.25 mm的团聚体,尤其是含氮量较高的<0.045 mm团聚体的富集是侵蚀泥沙富集氮的主要原因。减少地表径流和土壤侵蚀,降低表土速效氮含量是减少农田地表径流氮养分流失的关键。

北京地区农田氮素养分随地表径流流失机理 黄满湘,章申,张国梁,张秀梅(中国科学院地理科学与资源研究所,北京100101) 1 引言土壤氮随地表径流向水体迁移是农田氮养分损失的主要途径之一,也是氮素溜出农田生物地球化学小循环进入地质大循环的过程。国外对于农田暴雨径流氮磷流失研究始于20世纪70年代,早期的研究集中在农田径流氮磷的流失量及其对水体的影响,80年代以来则主要是从减少污染输出的角度研究氮磷元素从农田径流流失的机理和规律[1-8]。近20年来,我国在农田氮磷向水体迁移对主要河、湖水体富营养化的影响方面也积累了一些数据[9,10];对田间条件下土壤-作物系统中氮肥的损失途径进行了许多定量的评价和研究[11-13],特别是对氨挥发、硝化—反硝化及其影响因素有了更多的了解[14],但是,整体而言,对于包括氮素在内的农用化合物随地表径流流失的研究还刚刚起步[15];已有的关于农田氮素的地表径流流失研究多集中在南方水田[16,17],北方农田径流氮流失的研究是从黄土高原结合水土流失开始的[18,19],其后在白洋淀地区也进行过一些尝试[20],但都只限于总量的分析,对旱田氮素随季节性暴雨径流流失的特征和机制了解甚少。为了有效控制农田氮径流流失,为防止地表水体富营养化提供科学的依据,有必要对农田径流氮的形态和浓度,以及降雨强度、地面覆盖、施肥等因子的影响作深入的探讨。随地表径流流失的氮从形态上分为溶解态和颗粒态两部分。已经发现,与土壤相比,侵蚀泥沙有较高的养分含量,表现出对氮磷等养分的富集[21],这种富集作用可用富集系数(Enrichment Ratio, ER)表示。大多文献把侵蚀泥沙对养分的富集归因于径流对土表富含养分的有机质和粘粒的选择性搬运[22-24]。由于被选择搬运的农田表层土壤有机质在侵蚀泥沙中只占很小的一部分,因而对侵蚀泥沙的养分富集贡献也一定有限;同时,土壤表层和侵蚀泥沙氮磷养分主要是存在于不同粒径的土壤团聚体中,即颗粒态氮的流失主要是通过结合有机氮磷的泥沙迁移作用完成的,侵蚀泥沙的养分富集作用也不是简单的粘粒的选择性搬运。因此,暴雨径流中颗粒态氮流失过程的本质,有待进一步解释。北京地区农业种植以春小麦、春玉米或冬小麦—夏玉米轮作制为主,6月中旬到8月,作物收割,地表裸露,翻耕整地,施肥,玉米播种出苗,地表覆盖率低,常遭暴雨[25]袭击,形成地表径流。但是,关于该地区气候和农业生产条件下农田径流氮流失的研究资料极少。一个重要的原因是利用自然降雨研究径流养分损失,实验周期长,困难很多,不容易控制。利用模拟降雨—径流实验则可以控制降雨强度和降雨时间,为解决这一问题提供了有效的途径[26]。本研究通过模拟降雨,在研究农田地表径流水土流失特征基础上,(1)比较降雨强度、作物覆盖和施用氮肥对农田地表径流氮浓度及其损失的影响;(2)评估颗粒态氮和溶解态氮对农田暴雨径流氮养分损失的贡献;(3)分析径流泥沙的团聚体组成及其氮含量特征,以研究农田暴雨径流侵蚀泥沙对氮的富集机理。 2 材料与模拟降雨系统主要包括供水系统、模拟降雨机、土壤侵蚀试验小区和采样器四个部分。土壤侵蚀试验小区坡度5度,水平受水面积2 m × 5 m,小区两长边及顶端加50 cm塑料挡板,塑料挡板插入土中20 cm,防止降雨泥沙溅出和小区外围水分侵入;在小区下端安装V型量水堰,由塑料管连接到带有刻度的塑料桶收集径流。试验地点位于北京西郊马连洼,土壤为草地褐土,质地为粉沙质粘壤土,其基本理化性状见表1。侵蚀小区A、B处理为休闲地,表土松散。C区处理为春小麦地,覆盖率35%,降雨前一周施入尿素(水平为360 kgN/hm²),均匀混入表层15 cm土壤。每试验处理小区设三重复;降雨强度分别为1.40 mm/min(A区)、0.77mm/min(B区)、1.34 mm/min(C区)。每场降雨持续约40分钟(表3)。从产流开始,以每3分钟为一个时段,用干净的塑料桶收集径流水沙;搅动均匀,用1000 ml塑料瓶分取径流水样,每次降雨取雨水为空白对照。空白雨水样和用塑料瓶收集的水样,经0.45滤膜过滤,用美国Dohrmann公司生产的DN-1900测氮仪测定过滤水溶解态氮(DN)浓度和硝态氮(NO₃-N)浓度,用水杨酸-次氯酸盐光度法测定铵态氮(NH₄-N)浓度[27]。泥沙经风干、称重,用凯氏法测定其氮含量[28]。计算径流侵蚀泥沙、溶解态氮、颗粒态氮(Particulate N, PN)、全氮(Total N, TN)浓度和负荷。降雨开始前,取A小区上层土壤,依次用孔径为1, 0.5, 0.25, 0.1, 0.045 mm一组金属筛进行干筛[29],得到6组不同粒径团聚

体: >1, 1-0.5, 0.5-0.25, 0.25-0.1, 0.1-0.045, <0.045 mm, 风干、称重, 计算其重量含量 (表2); 同样, 以6或9分钟为一时间段, 用上述孔径的金属筛组对A区径流水沙进行湿筛, 风干、称重, 计算其重量含量; 测定原土壤和侵蚀泥沙团聚体全氮含量。3 结果与讨论

3.1 产流排水与侵蚀产沙降雨强度和作物覆盖对产流排水与侵蚀产沙的影响结果如表3。在地面条件相同时, 与A区比较, B区降雨强度小, 有利于入渗, 开始产流时间远迟于A区, 开始产流时入渗量大于A区; A区与C区的降雨强度接近, 但C区的作物覆盖, 有利于水分入渗, 推迟了地表开始产流时间。与裸地B区比较, 作物覆盖C区的开始产流时间较早, 说明降雨强度可能比作物覆盖更大地影响开始产流时间。雨强和作物覆盖对坡面产流排水过程和径流模数的影响同它们对产流时间的影响是一致的, A、B、C区平均径流模数分别为A区 (70.8%) > C区 (37.4%) > B区 (15.6%)。试验小区表土结构松散, 大暴雨 (A、C) 造成的侵蚀泥沙浓度明显大于一般暴雨 (B区)。降雨过程结束后, A、B、C区侵蚀产沙量分别6.1、0.3、3.1kg, A区侵蚀量是B区侵蚀量的20.3倍, 为C区侵蚀量的1.9倍, C区侵蚀量是B区侵蚀量的10倍 (表4)。由于降雨强度最小, B区的径流模数及侵蚀强度都最小; A、C区降雨强度接近, 但C区入渗强, 减弱了土壤侵蚀, 故两区的径流模数、侵蚀强度相差很大。

3.2 径流氮养分浓度表5列出了不同试验条件下, 农田地表径流平均溶解态氮、颗粒态氮浓度。A、B区径流DN、NO₃-N、NH₄-N浓度没有显著差异; A、B区径流溶解态氮浓度低, 各占其全氮浓度的1%和1.7%, 颗粒态氮浓度相对较高, 各占其全氮浓度的99%和98.3%。径流溶解态氮浓度与表土中可溶性氮含量有很好的正相关性, 未施氮肥农田表土的可溶性氮含量一般只占全氮的6%左右 (表1), 进入地表径流水中的溶解态氮有限, 径流溶解态氮浓度低; 由于降雨径流试验是在松散裸地上进行的, 径流泥沙浓度大, 颗粒态氮浓度远远超过溶解态氮浓度。C区径流DN、NO₃-N、NH₄-N浓度显著大于A区和B区; 溶解态氮浓度占全氮浓度的11.1%。尿素施入土壤后水解转化为NH₃或NH₄⁺; NH₄⁺在微生物的作用下转化为硝态氮。硝化作用受许多因素的影响, 施肥量越大, 持续的时间越长。C区高量尿素的施用增加了表土NO₃⁻、NH₄⁺含量, 由于硝化作用不完全, NH₄⁺含量超过NO₃⁻, 导致径流NO₃-N、NH₄-N、DN浓度显著增大, NH₄-N浓度高于NO₃-N浓度。A、C区径流颗粒态氮浓度显著大于B区径流。雨强增大, 入渗减少, 地面开始产流时间提前, 地面产流排水速率大, 水流侵蚀力加强, 侵蚀泥沙浓度增加, 颗粒态氮浓度相应增加。C区与A区径流颗粒态氮浓度没有显著差异。作物覆盖显著减少水土侵蚀, 但作物覆盖同时减少地表径流排水和土壤侵蚀量, 故对地表径流泥沙浓度和颗粒态氮浓度的影响不显著。C区径流溶解态氮浓度的增加降低了颗粒态氮占全氮浓度的百分比。

3.3 径流氮养分负荷径流泥沙与养分负荷是化学因素 (径流养分浓度) 和水文因素 (径流) 对侵蚀泥沙与养分转移共同影响的结果。大暴雨A、C区径流泥沙负荷、颗粒态氮、溶解态氮、铵态氮和硝态氮负荷都显著大于一般暴雨B区径流相应负荷。大暴雨条件下, 地表径流增大, 径流与表土的混合更加充分, 养分交换过程较充分, 随径流水流失的溶解性氮 (DN、NO₃-N、NH₄-N) 也随之增多; 同时, 强烈的土壤侵蚀导致了更多的泥沙和颗粒态氮损失。除了雨强因子的作用, C区施用氮肥导致溶解态氮的流失大于B区。C区径流量少于A区, 但铵态氮、硝态氮和溶解态氮浓度显著大于A区, C区径流DN、NO₃-N、NH₄-N流失量显著大于A区, 说明了化学氮肥容易随暴雨径流水流失。相反, A、C两区泥沙和颗粒态氮浓度没有显著差异, 但C区径流量小于A区, PN、泥沙流失量显著小于A区, 反映了作物覆盖在减少水土侵蚀和颗粒态氮养分流失方面的保护功能。图1表示径流颗粒态氮和全氮的累积流失变化过程。不同时段, A、B、C三区径流颗粒态氮占全氮的比例分别在94%、96%、81%以上, 表明颗粒态是土壤氮随地表径流迁移的主要方式。这同土壤氮素主要是与有机无机体紧密结合而存在于土壤团聚体中的方式, 以及侵蚀泥沙对氮的富集作用有关。下文以A区径流为例分析富集现象的本质。

3.4 侵蚀泥沙的团聚体组成特征比较侵蚀泥沙和原土壤的团聚体组成发现, 侵蚀泥沙的 >1 mm和1-0.5 mm团聚体含量明显低于原土壤; 0.25-0.5 mm团聚体含量没有净变化 (坐标 = 2); 0.25-0.1 mm、0.1-0.045 mm、<0.045 mm 团聚体含量都高于原土壤 (图2)。土壤粒径大的团聚体是不稳定的, 在雨滴打击下, 大粒径团聚体被剥离形成较细的团聚体; 同时, 侵蚀小区表面只形成很薄的水层, 地表径流没有足够的能量搬运大粒径团聚体, 所以, 侵蚀泥沙中细粒径团聚体所占的比重大; 0.1-0.25 mm、0.045-0.1 mm、<0.045 mm三个粒径组的团聚体含量达到81%以上, 大大高于原土壤中的16%; >1 mm、1-0.5 mm、0.5-0.25 mm三个粗粒径组团聚体含量只占19%, 大大低于原土壤中的84% (图3, 表2)。因此, 侵蚀泥沙与土壤的团聚体组成存在明显的差异, 径流泥沙的流失主要以粒径为0.25 mm以下的团聚体为主。侵蚀泥沙的团聚体组成随时间而变化 (图3)。随着降雨径流的延续, >0.25 mm的粗团聚体含量下降; <0.25 mm团聚体含量呈增加的趋势, 其中0.1-0.045mm团聚体含量不断增加; 0.1-0.25 mm团聚体和 <0.045 mm团聚体含量变化表现为相反的过程, 从产流开始至33分钟, 0.1-0.25 mm团聚体含量也不断增加, 而<0.045 mm团聚体含量不断下降; 随后, 0.1-0.25 mm团聚体含量下降, <0.045 mm团聚体含量增加。这反映了暴雨径流选择搬运细颗粒的过程是随时间变化的。Rose和Palis等[30]认为, 在雨滴剥离分散大团聚体和径流选择搬运细颗粒的同时, 较粗的颗粒沉积甚至覆盖在侵蚀小区表面, 使被选择搬运的侵蚀泥沙变粗。因此, 降雨剥离和沉积作用以及径流的选择搬运作用共同决定了侵蚀泥沙的团聚体组成。

3.5 团聚体氮含量及其对侵蚀泥沙富集氮作用不同粒径团聚体的氮含量列于表6 (>1 mm团聚体较少, 测定时归入1-0.5 mm团聚体组中)。同一时段的各粒径团聚体氮含量有显著区别, 团聚体含氮量与其粒径的关系遵循下列规律: (<0.045 mm) > (>0.5 mm) > (0.25-0.5 mm) > (0.25-0.1 mm) > (0.1-0.045 mm); 这一现象与一般结论不完全一致。通常情况下, 粒径越小, 团聚体氮含量越高[13, 14]。可能原因是, 本实验土壤因常施家禽粪, 径流中富含粗颗粒有机质, 通过湿筛时留在粗团聚体中, 使大于0.25 mm粒径的团聚体有较高的氮含量。利用不同粒径团聚体含氮量和对应的重量含量百分数, 加权计算得到不同时段侵蚀泥沙的氮含量 (表6), 高于原土壤含氮量, 表现出对氮素的富集。不同粒径团聚体对侵蚀泥沙富集氮的作用是不一样的。平均而言, 粒径小于0.045 mm团聚体贡献最大, 占44%; >0.5 mm、0.5-0.25 mm的团聚体虽然有较高的氮含量, 但其团聚体重量含量低, 所以其贡献最低, 说明径流选择搬运有机质对侵蚀泥沙富集氮的作用有限; 0.25-0.1 mm、0.1-0.045 mm 团聚体有较高的重量含量, 但其团聚体氮含量较低, 所以其贡献也较低, 但两者之和达到了34%。因此, 粒径0.25 mm以下的团聚体的对侵蚀泥沙富集氮素起着主要的作用。由于土壤颗粒内外层氮养分含量存在梯度 [31]和选择搬运的泥沙逐渐变粗, 不同时段团聚体氮含量不同, 产流初始阶段收集的侵蚀泥沙的团聚体氮含量最高, 随后不断下降, 这是侵蚀泥沙含氮量随时间而降低的原因。

3.6 侵蚀泥沙氮富集系数及变化规律根据富集系数定义计算A区不同时段侵蚀泥沙的氮的富集系数ER_n值。图4表示氮富集系数与收集侵蚀泥沙时间的关系。ER_n在早期

收集的泥沙中比较大, 随侵蚀过程的延续而下降。B、C区径流泥沙富集系数也遵循同样的趋势。根据前面的分析, 在降雨径流早期, 侵蚀地表的少量有机质对侵蚀泥沙的富集系数存在有限的影响; 侵蚀过程中大颗粒团聚体的剥离分散和选择搬运细颗粒团聚体才是侵蚀泥沙富集氮养分和富集系数随时间下降的主要的机制。

4 结论 (1)降雨强度是影响农田地表径流养分损失的最重要的气象因子。坡地表面径流及侵蚀产沙在很大程度上取决于降雨强度。(2)植被覆盖是影响农田地表径流养分损失的重要因素。在大暴雨条件下, 较低的作物覆盖就能明显减低径流与侵蚀强度 [32]。侵蚀泥沙量减少, 也就是减少了颗粒态氮源。(3)影响径流中DN流失量的因素有径流量和径流DN浓度。径流DN损失量与径流量呈正相关, 而与DN浓度不存在这种关系。(4)在一般矿质土壤中, 表层土壤溶解性氮数量不多, 所以径流溶解态氮浓度很低, 不足径流全氮浓度的2%。在满足作物生长需要的同时, 避免土壤中速效氮的过量存在, 应是化学氮肥经济施用的重要原则之一。(5)土壤氮主要以有机态存在, 占全氮的95%以上, 多是和无机胶体, 甚至和非胶体的矿质土粒密切结合而成为复合形态的氮, 稳定性大大增加, 不易溶于水, 所以土壤侵蚀强度决定了颗粒态氮在农田暴雨径流氮损失中的比重。暴雨条件下, 未施肥坡地径流颗粒态损失占径流全氮损失的98%以上, 施用尿素后仍占88%以上。(6)粒径 <0.25 mm团聚体, 尤其是氮含量最高的 <0.045 mm 团聚体的富集是侵蚀泥沙富集氮的原因。暴雨径流条件下, 侵蚀泥沙中有81%是小于0.25 mm团聚体, 大大高于原土壤的16%; 而 >0.25 mm团聚体只有19%, 远低于原土壤中的84%。78%的颗粒态氮是由粒径0.25 mm以下的团聚体贡献的, 44%的颗粒态氮是通过粒径 <0.045 mm以下的团聚体贡献的。

Losses of Nitrogen Nutrient in Overland Flow from Farmland in Beijing under Simulated Rainfall Conditions HUANG Manxiang, ZHANG Shen, ZHANG Guoliang, ZHANG Xiumei (Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China) Abstract: Rainfall simulation experiments were performed to evaluate the contribution of both particulate N and dissolved N to losses of nitrogen by comparing the difference of the N concentrations and the yields in runoff from three tilled plots A, B and C, and the effect of fertilizer applications on them. The catchment area of the plot is 2 m × 5 m each with a slope of 5 degrees. A and B were bare and unfertilized, and C was fertilized with granular urea (360 N kg/ha) idle 35%. These results indicate that: (1) higher rainfall intensity results in higher discharge, sediment yield and losses of N, even lower cover rate significantly reduces discharge, and sediment yield and loss of N; (2) particulate N was the dominative form of N loss in surface runoff, added fertilizer N may suffer loss by runoff dissolved N form. Mechanism of soil aggregates detachment by rainfall and loss by runoff was investigated to seek explanation for the enrichment of PN in eroded sediment to original soil. The results showed that the aggregate size distribution of the eroded sediment was drastically different to that of the original soil. Aggregates smaller than 0.25 mm constituted more than 81% of the sediment as compared with only 16% in the original soil. More than 99% of total N transported by runoff was in the particulate form, whereas 78% of particulate N lost with finer aggregates smaller than 0.25 mm. About 44% of particulate N lost with finer aggregates smaller than 0.045 mm. ERN decreased as the erosion process continued. A higher percentage of aggregates smaller than 0.25 mm, especially the enrichment of aggregates smaller than 0.045 mm which has a high concentration of nitrogen is responsible for the enrichment of N in eroded sediment. Key words: simulation rainfall; overland flow; sediment; aggregate; dissolved nitrogen; particulate nitrogen; enrichment ratio (ER)

关键词: 模拟降雨; 地表径流; 侵蚀泥沙; 溶解态氮; 颗粒态氮; 团聚体; 富集系数