第 25 卷第 12 期
2005 年 12 月

环 境 科 学 学 报
Acta Scientiae Circumstantiae

Vol. 25, No. 12
Dec., 2005

付伟章, 史衍玺. 施用不同氮肥对坡耕地径流中 N 输出的影响 [J]. 环境科学学报, 2005, 25(12): 1676- 1681
FU Weizhang, SHI Yanxi. Effect on nitrogen output in farmland with different nitrogen fertilization[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(12): 1676- 1681

施用不同氮肥对坡耕地径流中 N 输出的影响

付伟章, 史衍玺*

山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018

收稿日期: 2005-01-20 修回日期: 2005-09-21 录用日期: 2005-09-22

摘要: 以山东省泰安东北部刘家庄村坡耕地为研究区域, 通过实地监测多次天然降雨中农田养分的流失, 研究施肥处理对氮素流失的影响. 结果表明, 施肥显著地增大了农田径流中氮素浓度及流失量; 在相同施肥量的实验条件下, 与碳酸氢铵和普通尿素相比, 控释尿素可有效地降低氮素流失 15%~25%; 70% 左右的氮素流失发生在监测的前期. 合理施肥、降低表土中速效氮养分含量是减少农田氮流失的关键途径之一.

关键词: 坡耕地; 农田径流; 氮素流失; 控释尿素; 降雨量; 非点源污染

文章编号: 0253-2468(2005)12-1676-06 中图分类号: X522 文献标识码: A

Effect on nitrogen output in farmland with different nitrogen fertilization

FU Weizhang, SHI Yanxi*

College of Resource and Environment, Shandong Agriculture University, Taian 271018

Received 20 January 2005; **received** in revised form 21 September 2005; **accepted** 22 September 2005

Abstract: It was conducted to determine the effect of fertilizing to nitrogen loss by testing the nutrient loss from the farmland in natural rainfall events. The sloping field was selected to conduct the research in the northeast of Taian, Shandong Province. The results showed that the concentrations of N in the surface runoff were increased sharply, and the mass of N loss during precipitation runoff were also high. Under the same fertilizer level, CR-urea could reduce nitrogen 15%-25% loss availably, comparing with NH_4HCO_3 and usual urea. In the same time, 70% nitrogen loss was occurred in the early stage of rainfall events. Reducing the amount of nitrogen by rational fertilization in the surface of the soil was a key method to decrease the nitrogen loss.

Keywords: farmland; surface runoff; nitrogen loss; CR-urea; precipitation; nonpoint sources pollution

“七五”期间, 对巢湖污染的研究结果表明, 在现阶段我国水体污染的非点源污染问题越来越突出, 而农业生产中氮素的流失是造成非点源污染的一个关键因素(鲍全盛等, 1996; Yan W, 1998).

由于 N 污染物随地表径流流失机理的复杂性以及作物生长发育与土壤条件的区域性, 虽然对农田径流 N 流失影响因素研究已有报道, 但施肥品种与施肥措施对农田径流 N 污染负荷的控制研究还处于探索阶段(潘根兴等, 2003; 黄满湘等, 2003; 张兴昌等, 2000). 尤其是从流域尺度研究不同施肥方法、不同肥料品种的定量研究鲜见报道.

近年来控释肥在农业上的应用研究日趋活跃. 控释肥是一种可以对养分释放速度进行调节的新型肥料, 其养分释放速度可以通过物理、化学以及生物技术手段来调控, 实现促释或缓释的双向调节, 使肥料中营养元素的供应与作物对养分的需求基本达到同步、实现动态平衡. 控释氮肥可根据作物的生长需要提供养分, 延迟氮肥释放, 从而减少氨挥发损失, 与施用常规氮肥碳酸氢铵、尿素相比, 可以降低氮素径流损失. 因此, 控释肥的研究应用将会提高农田氮肥利用率, 是减少氮素环境污染新的有效途径.

位于泰安市境内的东平湖是南水北调东线输水工程在通过黄河之前的一个水质调节湖泊, 本研究选择入东平湖的主干河流——大汶河流域为检测研究对象, 通过监测流域内典型种植模式下大田玉米整个生长期间的降雨、径流发生情况, 研究施用碳酸氢铵、尿素、控释尿素情况下农田氮素的流失. 这对于了解施肥对氮素输出的影响、降低农业非点源污染、保护东平湖水质具有应用意义.

基金项目: 国家农业跨越计划项目(No. [2001]8)

作者简介: 付伟章(1972—), 男, 硕士研究生, E-mail: sdaufwz@sdau.edu.cn; * 通讯作者(责任作者), E-mail: yxshi@sdau.edu.cn

Foundation item: the National Agriculture Span Planning Adjustment(No. [2001]8)

Biography: FU Weizhang(1972—), male, master candidate, E-mail: sdaufwz@sdau.edu.cn; * **Corresponding author** E-mail: yxshi@sdau.edu.cn

1　试验部分(Experiment)

坡耕地养分输出试验区设在山东省泰安市刘家庄村, 该地区位于山东省泰安市东北部, 北纬 36°5′, 东经 117°10′. 流域年均气温 15.1℃, 最低气温 - 12.3℃, 平均无霜期191 d. 年日照2654.9 h, 年均降雨量700.0 mm, 多集中在 6~ 9 月份, 汛期平均降水量480.0 mm, 占年降水量的 68.6%. 该试验小区土壤类型为棕壤. 土壤相对密度为 2.66, 容重 1.28 $g\cdot cm^{-3}$, 孔隙率为 52.1%, 饱和含水量 23.6%, 土质瘠薄, 胶体性、抗蚀性差, 水利侵蚀严重. 土壤呈微酸性, pH 值为 5.7. 该地区主要是采用冬小麦/夏玉米轮作种植体系.

该地区化肥施用历史较久. 目前, 主要施用的氮肥有碳酸氢铵、尿素和复合肥, 施用量大约为 420 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$(以N 计). 夏玉米施肥形式主要是小喇叭口期追施碳酸氢铵、尿素, 施肥量大约为 180 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$(以N 计), 基本不施农家肥.

径流小区布设于刘家庄水库以东的坡耕地上, 小区平均坡度为 4.5°, 坡向西, 小区水平投影面积为 2.5 m × 10 m. 小区上部设排水沟, 以引排上部坡面径流; 小区上部及左右边界均设 5 cm 厚的水泥板, 埋深 25 cm, 以分隔小区内外径流; 小区下接承水槽和沉沙蓄水池, 池底留有放水孔.

试区中间设标准雨量桶, 用以进行降雨观测. 径流泥沙采用体积法计算, 于每次产流降雨结束后, 观测池内泥沙水位并计算径流泥沙总量: 搅匀池内浑水取样, 用烘干法测定悬移质含沙量, 放出浑水后测量池内推移质泥沙量; 用分别计算的悬移质泥沙量和推移质泥沙量之和作为本次产流的冲刷量, 然后根据径流泥沙总量和冲刷总量计算清水径流量(张永轩等, 1994).

监测时间为 2003-07-17~ 2003-10-05. 每次降雨结束后立即收集径流样品, 加浓硫酸调到 pH < 2, 并在 24 h 内分析完毕. 收集到的泥沙样品自然风干后检测速效氮含量.

径流水中氮素含量的测定方法: 测定样品加入 1 $mol\cdot L^{-1}$盐酸酸化, 用紫外分光光度法(220 nm)测定 NO_3^--N, NH_4^+-N 用纳氏试剂比色法(过 0.45 μm 滤膜的上清液)(鲁四光等, 1989). 泥沙样品速效氮含量用凯氏定氮法测定(李合生等, 1999).

试验设计中地形、地貌在整个检测期间不变, 为避免耕作方式对土壤的扰动, 在玉米小喇叭口期施肥后不再中耕除草. 肥料选用碳酸氢铵、尿素、控释尿素. 控释尿素是采用硫磺包膜, 控释期为 60d. 施肥时间是玉米的小喇叭口期(2003-07-12), 施肥方法是穴施. 试验小区施肥设计见表 1. 由于试验用地的面积限制, 每个施肥水平只设置了 2 个重复. 低施肥量(222.5 $kg\cdot hm^{-2}$, 以N 计) 基本与当地农民的习惯施肥量一致, 高施肥量(337.5 $kg\cdot hm^{-2}$, 以 N 计) 是低施肥量的 1.5 倍, 这是为了利于试验结果的差异更明显, 而且也符合当地农民对某些经济作物的习惯施肥量.

表 1　试验小区及施肥设计

Table 1　Fertilizing design for the experimental area

小区编号	施肥设计 /($kg\cdot hm^{-2}$)	处理编号	施肥设计 /($kg\cdot hm^{-2}$)
E-1	0	W-1	0
E-2	碳酸氢铵 222.5	W-2	碳酸氢铵 337.5
E-3	尿素 222.5	W-3	尿素 337.5
E-4	控释尿素 222.5	W-4	控释尿素 337.5
E-5	碳酸氢铵 222.5	W-5	碳酸氢铵 337.5
E-6	尿素 222.5	W-6	尿素 337.5
E-7	控释尿素 225.0	W-7	控释尿素 337.5

2　结果(Results)

2.1　各处理小区的产流产沙情况

表 2 中数据均为各个实验小区径流监测数据的平均值. 从 2003-07-17 第一次收集径流到 2003-10-05 收获玉米 80 d 的降雨监测资料来看, 取得降雨资料的 10 次降雨总量为 481.3 mm, 由于降雨间隔时间过短和其它偶然因素, 有几次降雨未做统计. 另外, 2003-10-09 的降雨量为 173.5 mm(试验田玉米在 2003-10-02 收获, 故 2003-10-09 号数据未列入表 2),

表 2　各个监测小区的径流泥沙输出

Table 2　Sediments of transported in process of rainfall-runoff

采样时间	降雨量 /mm	25 m^2 径流量 /m^3	径流模数 /($m^3\cdot km^{-2}$)	25 m^2 实际泥沙收集量/g	冲刷量 /($t\cdot km^{-2}$)
2003-07-17	19.0	0.018(0.007)	705.0	281.0(11.2)	11.2
2003-07-21	26.4	0.104(0.003)	4 148.0	1 787.0(54.6)	71.5
2003-07-25	37.0	0.180(0.046)	7 215.0	2 682.5(77.9)	107.3
2003-08-01	57.0	0.263(0.097)	10 530.0	4 080.0(28.6)	163.2
2003-08-06	54.0	0.289(0.008)	11 550.0		174.3
2003-08-16	7.0	0.000	0	0	0
2003-08-23	36.6	0.144(0.012)	5 746.0	1 782.5(47.3)	71.3
2003-08-25	73.3	0.407(0.056)	16 293.5		172.5
2003-09-02	37.5	0.188(0.006)	7 512.5	1 718.8(21.7)	68.8
2003-09-04	133.5	0.751(0.117)	30 032.5		287.1
合计	481.3	2.343	93 732.5	28 179.3	1 127.2

注: 括号内为标准差

2003-07-17~ 2003-10-09 总降雨量大约为 680~ 710 mm, 比该地区往年该时段平均年降雨量 390 mm 高出 72%~ 82%. 据资料统计, 该年是近 10 年来少有的丰水年份. 在监测到的 10 次降雨中, 除 2003-08-16 因为降雨量太小(7 mm) 未形成径流外, 其余 10 次均形成径流.

2.2 侵蚀泥沙中的氮素流失

图 1 数据是每次降雨前取得的表土样的速效氮含量; 图 2 数据是降雨后收集泥沙的速效氮含量. 监测结果比较明显地反映出, 施肥量与施肥品种对土壤和径流泥沙中的速效氮含量有明显影响.

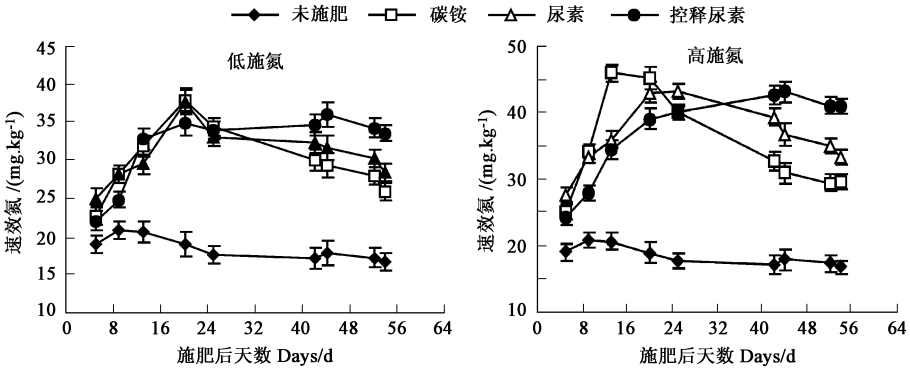


图 1 农田土壤中的氮素变化

Fig. 1 The variation of Nitrogen in landscape of field

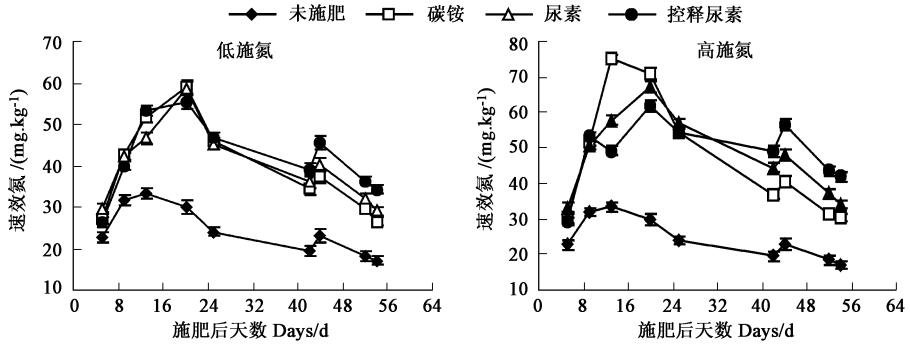


图 2 侵蚀泥沙中的氮素变化

Fig. 2 The variation of nitrogen in eroded sediment

2.3 径流氮的流失及其变化趋势

图 3 是施用不同氮肥情况下, 各试验小区径流水中的 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的浓度随时间的变化. 不同施肥水平, 特别是高的碳酸氢铵的施用, 会明显增加监测前期径流水中 NH_4^+-N 浓度.

2.4 氮素流失总量

图 4 是整个作物生长期间, 监测到的 10 次降雨条件下不同施肥设计小区径流水中的 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 与侵蚀土壤中速效氮的总量. 高施肥量明显增加了氮素的流失总量; 控释肥与碳酸氢铵、尿素相比, 可以减少氮素的流失. 施用碳酸氢铵最容易导致氮素的流失.

3 讨论(Discussion)

3.1 各处理小区的水沙效应

表 2 数据为各个试验小区每次降雨监测的平均值, 方差值在 0.096~ 0.114 之间. 在监测过程中发现, 同一次降雨过程中, 由于各个小区在监测过程中是处于基本相同降雨的强度、历时、土壤含水量和土壤覆盖度的条件下, 因而各试验小区的产沙排水、侵蚀产沙的结果没有显著差别.

从表 2 历次降雨监测数据中可以发现, 不同次降雨的降雨强度、历时、土壤覆盖度不同, 所收集到的径流量、泥沙量亦有很大差别. 这可能是由于监测期间降雨频繁, 每次降雨的土壤前期含水率相差不

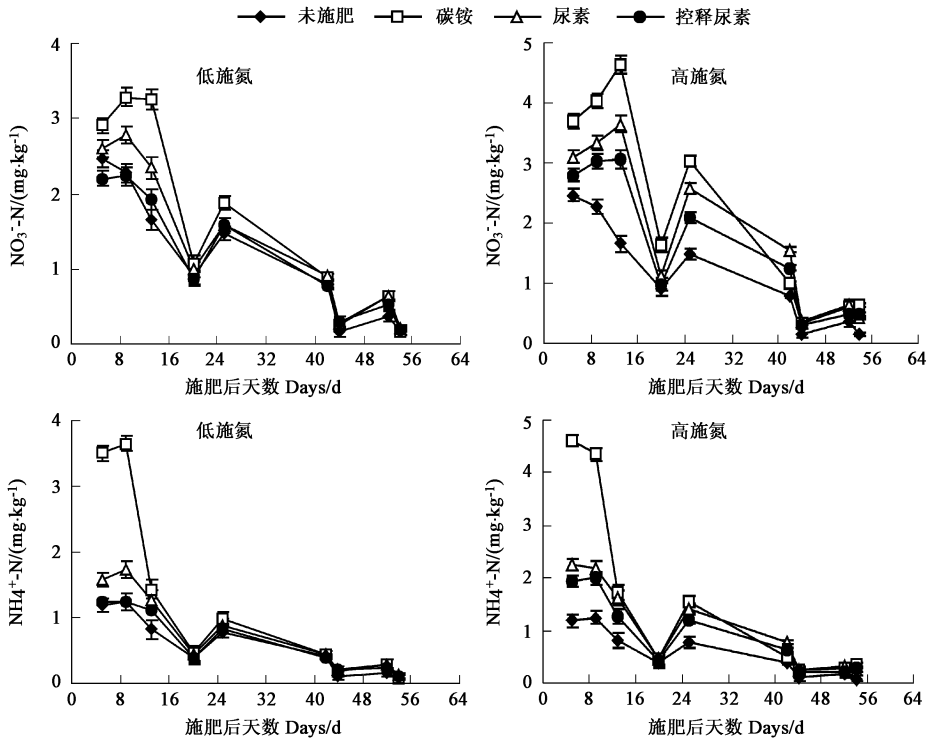


图 **3**　径流中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的流失变化

Fig. 3　The variation of NH_4^+-N and NO_3^--N of running off

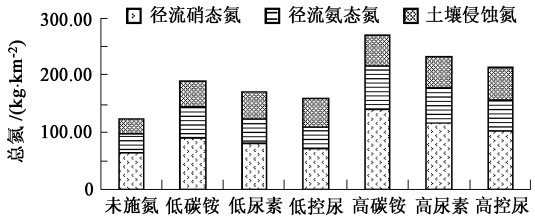


图 **4**　不同施肥措施下的氮素总流失量

Fig. 4　The total loss of nitrogen in different fertilizing ways

大的缘故. 所以我们认为, 在地形和植被条件相似、降雨强度不是特别大的条件下, 影响降雨入渗和产流过程的主要因素是土壤前期含水率, 其次是降雨强度和降雨时间. 这与冯绍元等(1998) 的研究结论相似.

从表 2 还可以得知, 相似降雨量条件下, 在监测前期(2003-08-21 之前) 明显比监测后期(2003-08-21 之后) 的侵蚀泥沙量大. 这可能与多次的雨水冲刷, 以及追肥后不再中耕除草, 到监测后半期地表杂草丛生、土壤板结、土壤紧实度、覆盖度的增大有关. 试验小区的地表覆盖度 2003-07-17 的监测结果为 12%, 到了 2003-08-21, 由于作物的生长与杂草的蔓延, 地表覆盖度基本达到 90% 以上. 这也进一步印证了增加地表覆盖度可以降低土壤冲刷量.

综合以前的研究与本实验的实地监测可以看出, 少耕免耕措施, 可以有效地保持水土, 减少土壤的冲刷量.

3.2　侵蚀泥沙中的氮素流失

图 1 显示, 施肥小区表土中速效氮的含量过程线均明显高于对照小区. 而且, 在施肥后的前 20 d, 施肥小区表土中速效氮含量逐渐升高, 而且比对照小区的速效氮要高得多. 这说明使用氮肥会在短时间内增加土壤的速效氮浓度. 但随着 N 在土壤中的形态转化、作物吸收利用、挥发、以及降雨侵蚀等作用, 表土中速效氮含量会逐渐降低.

由图 2 可知, 施肥小区侵蚀泥沙中的速效氮与表土中氮素变化规律相似, 且速效氮含量明显高于对照小区. 从图中还可以看出, 在监测的前期(施肥后 15~ 20 d) , 相同施肥天数后, 高施肥量比低施肥量小区侵蚀泥沙中的速效氮含量明显要高, 到监测后期二者差别减小. 所以说, 施肥量的变化可以显著地影响侵蚀泥沙中速效氮的含量.

德国科学家克雷默的试验也说明了这一问题. 克雷默的试验显示, 耕作土壤中氮的冲刷量与施肥量密切相关(r = 0.91~ 0.99) , 每增施 1 kg·hm^{-2} 氮素, 氮的冲刷流失即增加 0.56~ 0.72 kg·hm^{-2}. 其中

肥料氮流失所占比重也随施氮量而增加, 即每增施 100 kg• hm^{-2} 氮素, 肥料氮的流失增加 0.086% ~ 0.091%(孙彭力等, 1995) .

表 3 表明, 侵蚀泥沙对氮素养分有富集作用. 一般用某养分在侵蚀泥沙中的含量与其在被侵蚀土壤中的含量之比表示富集系数(enrichment ration, ER) . 在作物生长前期, 降雨径流首先搬运表土中含氮丰富的细颗粒, 随着作物的生长, 土壤覆盖度、紧实度的逐渐增大, 细颗粒减少, 侵蚀小区被较大粒径颗粒覆盖, 降雨径流继续选择搬运由这些较大颗粒崩裂而成的较细颗粒.

表 **3** 小区侵蚀泥沙与表土速效氮富集系数

Table 3 The enrichment coefficient of nitrogen in sediment transports and surface soils

监测时间	富集系数						
	未施氮	低碳铵	低尿素	低控尿	高碳铵	高尿素	高控尿
2003-07-17	1.20	1.19	1.14	1.19	1.21	1.16	1.23
2003-07-21	1.52	1.50	1.49	1.61	1.50	1.52	1.91
2003-07-25	1.62	1.62	1.58	1.62	1.64	1.61	1.43
2003-08-01	1.47	1.56	1.55	1.58	1.57	1.56	1.61
2003-08-06	1.36	1.33	1.36	1.37	1.42	1.32	1.36
2003-08-23	1.13	1.15	1.11	1.13	1.21	1.13	1.15
2003-08-25	1.29	1.27	1.18	1.27	1.31	1.24	1.31
2003-09-02	1.06	1.04	1.06	1.16	1.11	1.06	1.15
2003-09-04	1.02	1.01	1.02	1.12	1.02	1.00	1.02

由较大颗粒崩裂而成的较细颗粒含氮量一般低于原来表土细颗粒含氮量. 监测时间越长, 由较大颗粒崩裂而成的较细颗粒含氮量越低, 降雨径流选择搬运的侵蚀土粒的含氮量也越低, 侵蚀泥沙对氮素养分的富集系数越小(黄满湘等, 2001) .

所以, 综合图 1、图 2 与表 3 的分析结果可以看出, 作物生长前期施肥, 是影响氮素径流输出的关键因素. 因此, 作物生长前期施肥要格外慎重, 既要考虑施用肥料的品种, 又要选择最佳时机, 减少暴雨季节施肥, 避免施肥后不久即遭遇大的降雨侵蚀.

3.3 径流氮的流失及其变化趋势

由图 3 可以看出, 各个试验小区径流中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的流失均有以下特点. ①在监测的前期, 同一次降雨条件下, 各试验小区径流中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的浓度有以下关系: 施用碳酸氢氨> 施用尿素> 施用控释尿素> 对照. 随着作物的生长, 施肥小区径流中的 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的浓度随历次降雨表现出更迅速的下降趋势. 在相似降雨量条件下, 监测后期与监测前期相比, 各径流中的 NH_4^+-N、NO_3^--N 的浓度降低, 差别减小, 趋于相似. 这是由于作物的吸收利用以及径流的侵蚀作用, 使土壤中的氮素浓度降低, 而且到监测后期, 土壤的覆盖度、紧实度均增大, 也使氮素的流失减弱. ②同一次降雨径流中, NO_3^--N 的浓度是 NH_4^+-N 浓度的 1.7~ 2.4 倍. 只有施用碳酸氢氨的小区, 在 2003-07-17 和 2003-07-21 的降雨径流中, NH_4^+-N 的浓度较高. 可见, 氮素的地表径流输出以 NO_3^--N 为主. 这与张福珠等(1984) 在农田氮素淋失研究中的结论相似, 段水旺等(2004) 长江下游地表水体氮素的浓度和输出量进行的研究也证实了该结论. 这是由于在好氧条件下, 土壤中 N 矿化释放的 NH_4^+-N 以及肥料铵, 很快氧化为 NO_3^--N, 土壤中矿质态氮以 NO_3^--N 为主, 可占 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 总量的 80% 以上. 另外, 土壤胶体一般带负电荷, NH_4^+-N 带正电荷, 易于被土壤胶体吸附, 所以 NO_3^--N 易于淋溶和流失(黄满湘等, 2001) . 2003-07-17 和 2003-07-21 的特殊情况, 是由于在施肥后不久, 土壤中的 NH_4^+ 未被固定或稳定吸附, 且仍有一部分 NH_4^+-N 未被氧化为 NO_3^--N, 土壤中的 NH_4^+-N 浓度较高. ③施肥量对 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 流失都有影响. 特别是监测前期, 高施肥量更容易增加径流中 NH_4^+-N 的流失.

所以, 施用碳酸氢铵尿素等速效氮肥, 更容易造成氮素的大量流失, 是造成水体非点源污染的主要农业污染源. 控制 NO_3^--N 的流失是减少农田氮素流失的关键措施.

3.4 氮素流失总量对比

由图 4 可以看出, 在该实验的测定指标下, 整个监测期间径流氮素的流失, 以径流水中的 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 为主, 占流失总氮的 75% ~ 80% , 侵蚀土中的速效氮占 20% 左右. 施肥量和肥料品种对氮素的流失影响明显. 高施肥量会导致氮素的流失加剧; 控释尿素与碳酸氢铵、尿素相比, 可以有效地降低氮素流失 15% ~ 25%.

表 4 为不同试验小区监测前期(施肥后 25d 左右) 氮素流失量与整个监测期氮素流失量的统计数据.

表 **4** 前期流失氮素与总流失量

Table 4 The relation of nitrogen loss between prophase and whole period

施肥方案	前期流失氮 /(kg• km^{-2})	总流失氮 /(kg• km^{-2})	前期流失氮 / 总流失氮
未施氮	89.7	123.9	72.4%
低碳铵	142.6	190.0	75.1%
低尿素	116.8	169.3	69.0%
低控尿	105.7	157.6	67.1%
高碳铵	194.8	269.6	72.2%
高尿素	158.4	232.6	68.1%
高控尿	137.3	212.4	64.6%

表 4 显示, 监测前期(施肥后 25 d 左右) 是氮素流失的主要时期, 占总径流氮素流失的 64.6% ~ 75.1%. 主要是因为前期的地表覆盖度比较低, 土壤易于发生侵蚀, 而且施肥前期土壤中的 NH_4^+ 未被固定或稳定吸附, 且仍有一部分 NH_4^+-N 未被氧化为 NO_3^--N, 土壤中的 NH_4^+-N 含量较高, 很容易流失. 氮素流失总量差异的主要原因是高施肥量会明显增加监测前期的各种形态的氮素流失.

4　结论(Conclusions)

1) 施用速效氮肥会显著影响农田氮素流失. 施肥会明显增加农田径流水中 NO_3^--N、NH_4^+-N、侵蚀泥沙中速效氮的含量, 并增大了其随径流流失的总量.

2) 玉米小喇叭口期穴施氮肥、连续降雨条件下, 施肥后 20 d 左右是氮素径流输出的关键时期. 氮素流失总量差异的主要原因是高施肥量会明显增加监测前期的各种形态的氮素流失.

3) 控释尿素与其它速效氮肥相比, 可以减少农田氮素流失 15% ~ 25%. 应用控释氮肥降低农业氮素源头输出是今后控制农业非点源污染发生的研究重点.

通讯作者简介: 史衍玺(1955—), 男, 山东郓城人. 山东农业大学资源与环境学院院长、教授, 博士生导师, 主要从事环境生态学、植物营养机理与调控的教学和研究工作. 地址: 271018, . 山东农业大学资源与环境学院; Email: yxshi@sdau.edu.cn . Tel: 0538-8241767

参考文献(**References**):

Bao Q S , Wang H D. 1996. The research and prospect on norr-point source pollution of water environment in China [J]. Scientia geographical sinica, 16(1): 66—71(in Chinaese)

Duan S W, Zhang S, Chen X B, *et al*. 2000. Concentrations of nitrogen and phosphorus and nutrient transport to estuary of the Yangtze River. Environmental science. 21(1): 46—53(in Chinaese)

Feng S Y, Ding Y Y , Yao B. 1998. Study on soil infiltration law with artificial rainfall and numerical simulation [J]. Journal of Hydranlic Engineering, 11: 17—25(in Chinaese)

Huang M X, Zhang S, Tang Y J, *et al*. 2001. Nitrogen losses from farm runoff under simulated rainfall conditions [J]. Soil and Environmental Sciences, 10(1): 6—10(in Chinese)

Huang M X, Zhang S, Zhang G L, *et al*. 2003. Losses of nitrogen nutrient in overland flow from farmland in Beijing under simulated rainfall conditions [J]. Scientia Geographical sinica, 58(1): 147—153(in Chinese)

Lu S G, Zhou H D, Li Y T. 1989. Method of analysis water quality[M]. Beijing: Publishing Company Science, 114—148(in Chinese)

Li H S, Li G S. 1999. The theory and technology about plant physiology [M]. Beijing: Higher Education press. 121—123, 186—191(in Chinese)

Pan G X, Zhu Q H, Zhang Y , *et al*. 2003. Minimum application rates for high-yielding rice production system in the Taihu lake region as a field measure for controlling N and P agriculture loading [J]. Environmental Science, 24(3): 96—100(in Chinese)

Sun P L, Wang H J. 1995. Environmental pollution of nitrogen [J]. Environmental Pollution and Control, 1: 38—41(in Chinese)

Yan W. 1998. Nutrient retention by multipoint systems: mechanisms for the control of nonpoint source pollution [J]. J Environ Qual, 27: 1009—1017

Zhang F Z, Xiong X Z, Dai T S. 1984. Study on the trends of nitrogen loose in the system of soil-plant by ^{15}N[J]. Environmental Science, 5(1): 21—24(in Chinese)

Zhang Y X, Zhang Y M, Wan J C, *et al*. 1994. She H G. The study on relation of rainstorm and eroded sediment from farmland in Taian[J]. Soil and Water Conservation in China, 7: 14—17(in Chinese)

Zhang X C, Shao M A. 2000. The interacting models and mechanisms of soil nitrogen with rainfall and runfall[J]. Progress in Geography, 19(2): 128—134(in Chinese)

中文参考文献:

鲍全盛, 王华东. 1996. 我国水环境非点源污染研究与展望[J]. 地理科学, 16(1): 66—71

段水旺, 章　申, 陈喜保, 等. 2000. 长江下游氮磷含量变化及其输送量的估计[J]. 环境科学, 21(1): 46—53

冯绍元, 丁跃元, 姚　彬. 1998. 用人工降雨和数值模拟方法研究降雨入渗规律[J]. 水利学报, 11: 17—25

黄满湘, 章　申, 唐以剑, 等. 2001. 模拟降雨条件下农田径流中氮的流失过程[J]. 土壤与环境, 10(1): 6—10

黄满湘, 章　申, 张国梁, 等. 2003. 北京地区农田氮素养分随地表径流流失机理[J]. 地理学报, 58(1): 147—153

鲁四光, 周怀东, 李怡庭. 1989. 水质分析方法[M]. 北京: 学术书刊出版社, 114—148

李合生, 李贵生. 1999. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 121—123, 186—191

潘根兴, 褚清河, 张　英, 等. 2003. 太湖地区高产水稻土经济极点施肥: 一种农田 N、P 养分负荷的田间控制技术[J]. 环境科学, 24(3): 96—100

孙彭力, 王慧君. 1995. 氮素化肥的环境污染[J]. 环境污染与防治, 1: 38—41

张福珠, 熊先哲, 戴同顺. 1984. 应用 ^{15}N 研究土壤-植物系统中氮素淋失动态[J]. 环境科学, 5(1): 21—24

张永轩, 张玉梅, 万继臣, 等. 1994. 泰安市风化花岗片麻岩坡耕地暴雨与径流泥沙关系研究 [J]. 中国水土保持, 7: 14—17

张兴昌, 邵明安. 2000. 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, 19(2): 128—134