

# 施肥对紫色土坡耕地氮素淋失的影响

汪涛<sup>1,2</sup>, 罗贵生<sup>1</sup>, 朱波<sup>1</sup>, 罗专溪<sup>1</sup>, 张剑<sup>1</sup>

(1.中国科学院山地灾害与地表过程重点试验室, 四川 成都 610041; 2.中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

**摘要:**通过径流小区试验,研究了4种施肥条件下紫色土坡耕地氮素淋失特征。结果表明,单施氮肥、氮磷配施和氮磷钾配施等施肥处理渗漏液中硝态氮含量在 $10.17\sim 21.88\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,渗漏液硝态氮占总氮含量的比例在85.5%~90.8%之间。各施肥处理渗漏液硝态氮含量呈前期较低,迅速上升,而后逐渐降低的季节变化趋势。玉米生长季各处理硝态氮淋失总量顺序为:单施氮肥>氮磷配施>氮磷钾配施>无肥处理,单施氮肥处理硝态氮淋失总量最高( $44.31\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ),氮磷配施和氮磷钾配施处理硝态氮淋失量分别较单施氮肥降低47.6%和54.2%。氮磷钾合理配施方式有助于显著减少紫色土坡耕地硝态氮淋失。

**关键词:**施肥;紫色土;氮素;淋失;坡耕地

**中图分类号:**X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)04-0716-07

## Effects of Fertilization on Nitrogen Leaching from Hillslope Cropland of Purple Soil

WANG Tao<sup>1,2</sup>, LUO Gui-sheng<sup>1</sup>, ZHU Bo<sup>1</sup>, LUO Zhuan-xi<sup>1</sup>, ZHANG Jian<sup>1</sup>

(1.Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, CAS, Chengdu 610041, China; 2.Institute of Mountain Hazards and Environment of CAS, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Nitrogen leaching is an important route of nitrogen loss, whose mechanism in flat cropland has been documented. However, it is unclear how nitrogen leaching takes place in sloping cropland. Field runoff plot experiments were performed to monitor nitrogen leaching in sloping cropland of purple soil. Results showed that  $\text{NO}_3^-$ -N contents of the leakage in three fertilization treatments, i.e. N(N), N with P(NP), N with P and K(NPK), ranged from  $10.17$  to  $21.88\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , which accounted for 85.8%~90.8% of total nitrogen in the leakage.  $\text{NO}_3^-$ -N leaching exhibited obvious seasonal patterns with a rapid increase in the beginning and a gentle decrease in the end of the maize growth stage. The estimated total amount of  $\text{NO}_3^-$ -N leaching in the maize growth season in difference treatments followed an order of:  $\text{N}>\text{NP}>\text{NPK}>\text{CK}$ . The total leaching of  $\text{NO}_3^-$ -N for the treatment N was  $44.31\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , whereas that for the treatment NP and NPK decreased by 47.62% and 54.23%, respectively. Therefore, nitrogen losses by leaching could be reduced through rational fertilizations in cropland of the hillslope. The estimated total amount of  $\text{NO}_3^-$ -N absorbed by crops in different treatments followed an order of:  $\text{NPK}>\text{NP}>\text{N}>\text{CK}$ . The total N absorbed by crop for the treatment NPK was  $93.02\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , while that for the treatment N and NP decreased by 23.8% and 10.6%, respectively. The difference of crops absorbing N ability could be the main reason of the effect of fertilization on nitrogen leaching in sloping cropland of purple soil.

**Keywords:** fertilization; purple soil; nitrogen; leaching; sloping cropland

氮素淋失是农田土壤中氮素损失的重要途径之一<sup>[1]</sup>,也是导致地下水硝酸盐污染的主要原因<sup>[2]</sup>。施入农田中的氮肥大约有5%~41.9%通过淋溶进入地下水<sup>[3]</sup>,导致地下水硝酸盐含量上升,危及人类健康<sup>[4]</sup>。因

此,探讨农田氮素淋失的过程及其机理一直以来都是国内外学者关注的焦点<sup>[5]</sup>。目前,平地条件下降雨与径流相互作用驱动氮素垂直运移的机制已较为清楚,并建立了相应的土壤氮素淋溶模型<sup>[6-7]</sup>。但坡地氮素淋失研究不多<sup>[8]</sup>,且大部分主要通过瓦罐渗漏法和土壤剖面硝酸盐累积测定研究单点微观一维(垂直)渗漏特征,得到的结论与平地相似<sup>[9-10]</sup>,很少有人对坡地土壤氮素淋溶进行深入研究,所建立的模型也仅适合平原地区<sup>[10-11]</sup>。

国内对农田土壤氮素淋失的研究主要集中在水稻土、红壤和北方旱地土壤<sup>[9,12-13]</sup>,探讨了气候、土壤性

收稿日期:2008-07-08

基金项目:国家自然科学基金(40571093);中国科学院西部行动计划(KZCX2-XB2-07-02);国家基础研究发展计划(973)(2005CB121108);中国科学院成都山地灾害与环境研究所人才引进基金

作者简介:汪涛(1978—),男,助理研究员,主要研究方向:非点源污染与环境土壤学。E-mail: wangt@imde.ac.cn

责任作者:朱波 E-mail: bzhu@imde.ac.cn

质、耕作、施肥方式、施肥量等对农田土壤氮素淋失的影响<sup>[14]</sup>。但研究结果大都是平地条件的氮素淋溶特征,坡地氮素淋失的研究报道很少。紫色土耕地以坡耕地为主,紫色土是由紫色页岩发育而成的土壤,孔隙度大,入渗能力强。紫色土坡耕地氮素流失不仅加剧该区地表水富营养化程度<sup>[15]</sup>,而且可能造成该区浅层地下水硝酸盐污染<sup>[16]</sup>。目前,紫色土坡耕地氮素淋失机制已较为清楚,随壤中流迁移是紫色土坡耕地氮素淋失的重要机制<sup>[17]</sup>。关于紫色土坡耕地氮素淋失影响因素的研究已有报道,但侧重于水文特征的影响<sup>[18]</sup>,而且主要通过人工降雨模拟进行研究,对自然降雨条件下紫色土坡耕地氮素淋失的影响因素(特别是施肥的影响)缺乏系统研究。为此,本文通过野外径流小区试验,研究施肥方式对紫色土坡耕地氮素淋失的影响,以期为紫色土区坡耕地农田养分管理,地下水硝酸盐污染综合防治提供科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

野外观测与试验依托中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站(105°27'E, 31°16'N)。该站位于四川盆地中北部的盐亭县林山乡,地处涪江支流弥江、湍江的分水岭上。属中亚热带湿润季风气候,年均气温 17.3℃,极端最高气温 40℃,极端最低气温-5.1℃;多年平均降雨量 826 mm,分布不均,春季占 5.9%,夏季 65.5%,秋季 19.7%,冬季 8.9%,无霜期 294 d。土壤为紫色土,田间持水量为 28.1%~37.8%,凋萎湿度为 5.4%~7.7%。

### 1.2 试验设计

自行设计建造坡度为 7°(紫色土丘陵区缓坡地常见坡度)的可测渗漏量的径流观测小区<sup>[17]</sup>。径流小区面积 32 m<sup>2</sup>。小区内土层厚度 60 cm。为保障小区水系独立,防止附近水流侧渗影响,同时模拟土壤-岩石不透水界面,小区四周及底部浇筑混凝土。坡底设置反滤层和汇流沟,并将整个小区的渗漏水导入到渗漏收集桶。供试土壤为蓬萊镇组钙质紫色土,质地中壤, pH 值为 8.83,有机质含量为 8.75 g·kg<sup>-1</sup>,全 N 含量为 0.62 g·kg<sup>-1</sup>,全 P 含量为 0.64 g·kg<sup>-1</sup>,全 K 含量为 18.42 g·kg<sup>-1</sup>,碱解 N 含量为 42.29 mg·kg<sup>-1</sup>,有效 P 含量为 4.16 mg·kg<sup>-1</sup>,速效 K 含量为 71.39 mg·kg<sup>-1</sup>。

紫色土丘陵区农田氮肥施用量较大,其中农户旱地氮肥年施用量一般为 363.5 kgN·hm<sup>-2</sup>,其中玉米季施氮高达 200 kg·hm<sup>-2</sup>,本文在此基础上,减量施用氮

肥,施肥处理的氮量控制在相同水平,为 150 kgN·hm<sup>-2</sup>,设置 3 种施肥方式,分别为单施氮肥(N)、氮磷配施(NP)和氮磷钾配施(NPK),每处理 3 次重复。另外设置一无肥处理(CK)。氮肥品种为紫色土丘陵区广泛施用的碳酸氢铵。磷肥为过磷酸钙,单季施用量为 90 kgP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>;钾肥为氯化钾,单季施用量为 36 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup>。施肥方式为穴施,底肥一次施用,施后覆土。选取夏季作物玉米作为研究对象,试验从 2003 年开始进行,2005 年开始观测,播种时间为 2005 年 5 月 25 日,顺坡播种,同时施肥,单株约占面积 0.5 m×0.5 m。作物种植期间不再灌溉与追肥,大田管理与当地农民习惯一致。

### 1.3 坡耕地硝酸盐累积试验设计

为避免扰动径流小区的土壤结构,影响入渗性能,选取 NPK 处理中的一个小区作为研究对象,用土钻分别于玉米施肥前、施肥后 1 周、拔节初期、拔节中期、抽雄吐丝期、腊熟期(2005 年 5 月 20 日、6 月 1 日、6 月 14 日、6 月 19 日、7 月 27 日、8 月 23 日)等主要生育期采集土壤剖面(0~15、15~30、30~50、50~60 cm)样品,降雨结束后采用多点混合法立即采集土壤样品,测定剖面土壤硝态氮、铵态氮含量,以初步了解坡耕地硝态氮和铵态氮累积与迁移趋势。采样完成后,回填土壤,减少对小区土壤结构的破坏。

### 1.4 采样与分析方法

利用自记雨量计记录降雨情况。每次降雨产流结束后,测定径流收集桶水位,计算渗漏量。用以蒸馏水洗净的塑料瓶采集渗漏液 500 mL,立即分析总氮、硝态氮和铵态氮含量。空白雨水样和经 0.45 滤膜过滤后的径流水样,采用碱性过硫酸钾高温(120℃)消解-紫外分光比色法测定总氮含量(GB11894—1989),紫外分光光度法测定硝态氮含量(GB8538—1995),靛酚蓝法测定铵态氮含量(GB8538—1995)<sup>[19]</sup>。氮素淋失量由渗漏量和氮素浓度相乘而得。所有数据统计分析均利用 SPSS 软件包完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 坡耕地氮素分配与累积特征

2005 年在玉米生长季采集坡地土壤剖面样,分析土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量的动态变化,结果见图 1。玉米季不同层次土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量均呈单峰变化,但各层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量达到极大值的时间不同。施肥后 1 周表层(0~15 cm)NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量立即达到最高,约 20.63 mg·kg<sup>-1</sup>,而中下层(15~30、30~50 cm)土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N

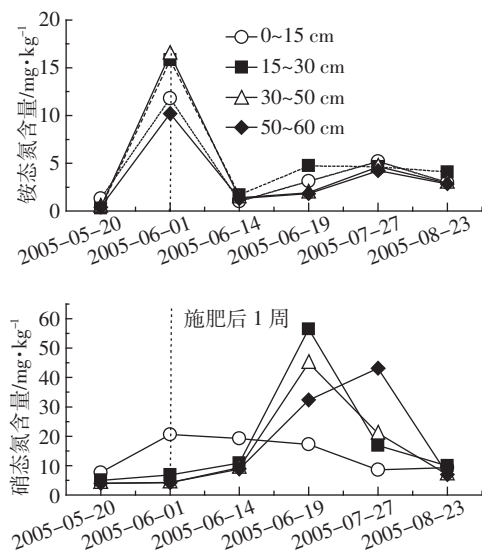


图 1 紫色土坡耕地土壤剖面氮素含量的季节变化

Figure 1 Seasonal patterns of  $\text{NO}_3\text{-N}$  and  $\text{NH}_4\text{-N}$  at soil profile of slope land of purple soil

含量 6 月 19 日才达到最大值, 分别为  $56.50$ 、 $44.93 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 底层 ( $50\sim 60 \text{ cm}$ ) 7 月 27 日才达到最大, 约  $43.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由此可见, 土壤剖面累积的  $\text{NO}_3\text{-N}$  玉米生长季有明显下移趋势, 紫色土土壤剖面  $\text{NO}_3\text{-N}$  分配特征可能与坡地降雨入渗过程有关。因硝酸盐易溶于水, 其移动主要受水分驱动<sup>[20]</sup>。不同层次土壤剖面  $\text{NH}_4\text{-N}$  含量变化也呈单峰变化, 各层土壤  $\text{NH}_4\text{-N}$  含量均在播种后 1 周 (6 月 1 日) 达到最大值, 而后迅速下降到播种前 (5 月 20 日) 的水平, 表明紫色土坡耕地土壤硝化作用明显, 施入土壤中的铵态氮迅速被转化为硝态氮。

进一步分析土壤剖面  $\text{NO}_3\text{-N}$  累积特征, 发现在玉米的拔节中期、抽雄吐丝期  $\text{NO}_3\text{-N}$  累积量较高, 而

到腊熟期后, 土壤  $\text{NO}_3\text{-N}$  累积量明显降低, 拔节末期—腊熟期降雨产流频繁, 推测可能是作物吸收与硝酸盐淋溶损失共同作用的结果 (表 1)。施肥后 1 周土壤铵态氮累积量最大, 达到  $106.06 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 其后迅速下降, 至拔节中期又明显上升, 可能是由于干湿交替引起的土壤固定态铵的释放<sup>[21]</sup>。

## 2.2 坡耕地渗漏水产流特征

2005 年降雨入渗产流频繁, 共有 9 次产流, 测得历次降雨产流事件中各处理渗漏水流量 (表 2)。无肥处理 (CK) 渗漏量明显高于其他处理。原因可能是由于无肥处理作物长势差, 覆盖度相对低, 从而降低作物截留降雨能力, 增加了到达地表的降雨量。另外, 覆盖度差将导致土壤蒸发量增大, 表土水分的大量蒸发造成表土裂隙, 增大了表土入渗能力, 以致入渗量增大。4 种处理渗漏水总量顺序为:  $\text{CK} > \text{N} > \text{NP} > \text{NPK}$  (表 2)。可见, 氮磷钾配合施肥能明显降低紫色土坡耕地入渗量。不施肥处理与其他处理渗漏量差异显著, 而 3 种施肥处理之间差异显著 (表 2), 覆盖度可能是影响 3 种施肥条件下坡耕地渗漏量差异不明显的主要原因。据测定, 3 种施肥条件下坡耕地玉米覆盖度差异不明显<sup>[22]</sup>。

## 2.3 渗漏水氮素形态与含量

### 2.3.1 形态分配

各处理渗漏水氮素形态、平均含量及其组成比例见表 3。单施氮肥 (N) 处理总氮含量最高, 达到  $(24.09 \pm 2.18) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 其次为氮磷配施处理 (NP), 达到  $(15.67 \pm 3.21) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 再次为氮磷钾配施处理 (NPK), 达到  $(11.91 \pm 2.13) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。无肥处理 (CK) 总氮含量最低, 仅为  $(1.19 \pm 0.07) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。渗漏水氮素的存在形态主要包括硝态氮和铵态氮。其中, 各处理硝态氮含量

表 1 紫色土土壤剖面硝态氮、铵态氮累积量 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )Table 1 Accumulated  $\text{NO}_3\text{-N}$  and  $\text{NH}_4\text{-N}$  at soil profile of purple soil ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

| 氮素形态                   | 土壤层次/cm | 土壤容重/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | 播种前   | 施肥后 1 周 | 拔节初期  | 拔节中期   | 抽雄吐丝期 | 腊熟期   |
|------------------------|---------|---------------------------------------|-------|---------|-------|--------|-------|-------|
| $\text{NO}_3\text{-N}$ | 0~15    | 1.32                                  | 15.16 | 40.85   | 38.13 | 34.17  | 16.98 | 18.58 |
|                        | 15~30   | 1.39                                  | 10.56 | 14.34   | 22.84 | 117.80 | 35.07 | 20.75 |
|                        | 30~50   | 1.42                                  | 8.68  | 9.19    | 19.78 | 95.69  | 44.56 | 14.97 |
|                        | 50~60   | 1.44                                  | 5.77  | 6.11    | 12.84 | 46.67  | 62.09 | 10.11 |
|                        | 全土      |                                       | 40.17 | 70.49   | 93.59 | 294.33 | 158.7 | 64.41 |
| $\text{NH}_4\text{-N}$ | 0~15    | 1.32                                  | 2.58  | 23.34   | 2.00  | 6.20   | 10.25 | 5.94  |
|                        | 15~30   | 1.39                                  | 0.63  | 33.00   | 3.52  | 9.88   | 9.68  | 8.53  |
|                        | 30~50   | 1.42                                  | 0.91  | 35.02   | 2.96  | 4.11   | 9.89  | 6.26  |
|                        | 50~60   | 1.44                                  | 0.59  | 14.70   | 1.86  | 2.64   | 6.09  | 4.09  |
|                        | 全土      |                                       | 4.71  | 106.06  | 10.34 | 22.83  | 35.91 | 24.82 |



表 2 不同施肥处理下紫色土坡耕地渗漏水流量

Table 2 Leakage fluxes from slope cropland of purple soil under different fertilizations

| 时间         | 降雨量/mm | 平均雨强/mm·h <sup>-1</sup> | 降雨历时/h | 渗漏水/mm        |              |               |               |
|------------|--------|-------------------------|--------|---------------|--------------|---------------|---------------|
|            |        |                         |        | CK            | N            | NP            | NPK           |
| 2005-06-24 | 42.30  | 3.97                    | 10.7   | 15.78±1.36    | 2.73±0.67    | 1.38±1.11     | 2.41±1.89     |
| 2005-07-06 | 38.90  | 4.98                    | 7.8    | 14.88±3.42    | 8.27±1.11    | 4.68±0.61     | 3.20±0.99     |
| 2005-07-19 | 53.60  | 10.04                   | 5.3    | 25.27±5.97    | 10.44±3.48   | 9.02±3.48     | 8.23±4.78     |
| 2005-07-20 | 29.50  | 22.90                   | 1.3    | 13.32±3.35    | 12.82±1.50   | 14.68±1.50    | 13.53±3.07    |
| 2005-07-24 | 56.30  | 18.10                   | 3.1    | 8.76±1.40     | 5.09±1.01    | 5.14±1.01     | 4.96±3.16     |
| 2005-07-30 | 39.10  | 3.79                    | 10.3   | 31.11±2.86    | 23.20±4.03   | 22.27±4.03    | 22.08±1.44    |
| 2005-08-03 | 21.00  | 3.00                    | 7      | 12.44±1.39    | 8.99±1.39    | 9.89±1.39     | 9.48±0.53     |
| 2005-08-11 | 76.70  | 2.39                    | 32.1   | 59.36±4.09    | 57.86±4.58   | 58.28±4.58    | 57.62±1.10    |
| 2005-08-29 | 29.60  | 1.90                    | 15.6   | 13.81±1.61    | 4.99±2.34    | 4.53±2.34     | 4.41±2.91     |
| 合计         | 387.00 | —                       | —      | 194.73±23.86a | 134.39±4.97b | 129.87±19.24b | 125.92±17.61b |

注:Significance level(0.05),多重比较结果如表所示,字母不同表示差异明显,字母相同表示差异不明显。

占总氮的比例在 74.8%~90.8%之间,铵态氮含量极低,仅占 0.8%~9.8%。硝态氮为紫色土坡耕地氮素淋失的主要形态。紫色土旱地硝化作用剧烈,特别在 pH 较高的条件下,硝化作用迅速完成<sup>[23]</sup>,导致紫色土坡耕地土壤氮素以硝态氮为主,而铵态氮含量极低,随渗漏水迁出的铵态氮可能为土壤本底铵态氮含量。

表 3 各处理渗漏水氮素主要形态、平均含量(mg·L<sup>-1</sup>)及其占总氮的比例(%)

Table 3 Nitrogen forms, contents and ratios in total nitrogen of leakage under different fertilizations

| 处理  | 总氮          | 硝态氮         |      | 铵态氮        |     |
|-----|-------------|-------------|------|------------|-----|
|     |             | 含量          | 比例   | 含量         | 比例  |
| CK  | 1.19±0.07c  | 0.89±0.15c  | 74.8 | 0.12±0.01a | 9.8 |
| N   | 24.09±2.18a | 21.88±2.39a | 90.8 | 0.19±0.04a | 0.8 |
| NP  | 15.67±3.21b | 13.92±1.76b | 88.8 | 0.18±0.02a | 1.1 |
| NPK | 11.91±2.13b | 10.17±2.33b | 85.5 | 0.16±0.03a | 1.3 |

注:Significance level(0.05),多重比较结果如表所示,字母不同表示差异明显,字母相同表示差异不明显。

### 2.3.2 渗漏水硝态氮含量季节变化

图 2 为 2005 年各处理渗漏水硝态氮含量的季节变化。整个季节中,无肥处理渗漏水硝态氮含量均很低,动态变化不明显。但是,3 个施肥处理硝态氮含量动态变化十分明显。单施氮肥处理硝态氮含量范围在 1.87~42.12 mg·L<sup>-1</sup> 之间,氮磷配施处理硝态氮含量范围在 2.13~28.27 mg·L<sup>-1</sup> 之间,氮磷钾配施处理含量范围在 1.92~16.81 mg·L<sup>-1</sup> (图 2)。紫色土土层浅薄,入渗水分是该区浅层地下水补给的主要来源。历次产流中 N、NP、NPK 3 种处理硝态氮含量高于世界卫生组织

饮用水准则规定的 10 mg·L<sup>-1</sup> 标准的产流次数占总发生次数的比例分别为 77.8%、55.6% 和 44.4% (由图 2 计算而得)。可见,紫色土坡耕地氮素淋失导致该区地下水硝酸盐污染的风险极大,而氮磷钾合理配合施用则能明显降低此种风险。

当年的第一次降雨入渗产流事件(24-Jun)中,各施肥处理(N、NP、NPK)渗漏水硝态氮含量并不高,均低于 10 mg·L<sup>-1</sup> (图 2)。这可能是由于第 1 次降雨入渗量小,大量的硝态氮仅仅被淋溶到土壤深层,而迁出土壤的硝态氮反而偏少。至第 2 次降雨入渗产流时,渗漏水硝态氮含量迅速上升,其中,单施氮肥处理硝态氮含量甚至达到 42.12 mg·L<sup>-1</sup>,此阶段土壤硝态氮累积较高(表 1),加之入渗产流丰富可能是导致此次降雨各处理硝态氮含量最高的主要原因。其后,随着硝态氮的不断淋失,各施肥处理渗漏水硝态氮含量逐渐降低。至最后一次降雨入渗产流时,各施肥处理渗漏水硝态氮含量均降至 2 mg·L<sup>-1</sup> 左右,这可能与后期土壤剖面硝态氮含量较低有关(图 1)。总的来说,3 种处理渗漏水硝态氮含量季节变化表现为前期低,迅速上升,而后下降的趋势。

### 2.3.3 典型次降雨径流过程中硝态氮淋失特征

图 3 所示为 2005 年 8 月 3 日一次长历时、小雨强降雨中紫色土坡耕地硝态氮淋失过程。该次降雨历时 7 h,降雨量 21.0 mm,平均雨强 3.0 mm·h<sup>-1</sup>,初始土壤含水量 27.1%。降雨 134 min 时入渗产流开始,产流初期径流速率较小,而后逐渐上升,至降雨 510 min 时达到最大径流峰。峰值出现后,径流速率逐渐降低直至产流结束。整个过程持续 24 h。入渗产流初期硝

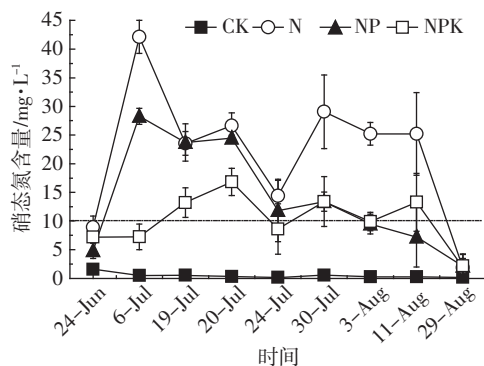


图2 各处理渗漏水硝态氮含量季节变化

Figure 2 Seasonal patterns of nitrate content in different treatments

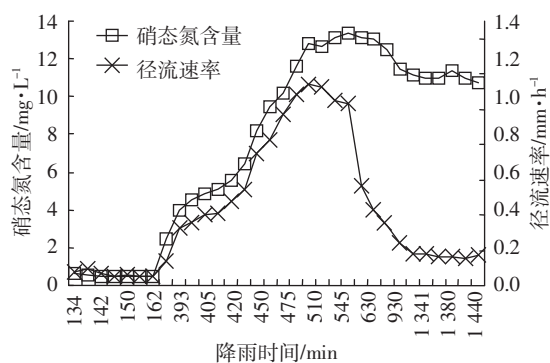


图3 典型次降雨过程中硝态氮含量与径流速率的变化过程

Figure 3 Nitrate content and runoff velocity changing in typical rainfall

态氮浓度很低,仅为  $0.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。第 352 min 时,硝态氮浓度上升到  $2.47 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,而后继续上升,至 555 min 时达到最大浓度  $13.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。达到最大值后略有降

低,而后趋于稳定,直至产流停止。水分在土壤中的运动可以分为大孔隙流和基质流两部分<sup>[24]</sup>,大孔隙流形成速度快于基质流。在降雨初期,水分运动以大孔隙流为主,但大孔隙流形成时入渗水和土壤硝态氮之间的交互作用非常弱,因而此时渗漏水硝态氮浓度较低。随着降雨的持续,基质流形成,入渗水带来了大量的土壤硝态氮,导致硝态氮浓度急剧增加。而当硝态氮浓度达到最大后出现短暂的降低,则可能是由于渗漏水流量增大而引起的稀释作用。峰值流量过后,硝态氮浓度也逐渐趋于稳定。

## 2.4 氮素淋失量

### 2.4.1 硝态氮淋失量季节变化

单次降雨硝态氮淋失量由渗漏水量与硝态氮浓度相乘而得。通过计算,获得历次降雨产流中各处理硝态氮淋失量,结果见图 4。无肥处理硝态氮淋失量在  $(0.02 \pm 0.01) \sim (0.29 \pm 0.02) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  之间,平均为  $0.14 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;单施氮肥处理硝态氮淋失量在  $(0.12 \pm 0.09) \sim (10.66 \pm 0.76) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  之间,平均为  $4.92 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;氮磷配施处理硝态氮淋失量在  $(0.10 \pm 0.10) \sim (8.51 \pm 0.86) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  之间,平均为  $2.58 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;氮磷钾配施处理硝态氮淋失量在  $(0.13 \pm 0.15) \sim (4.58 \pm 0.21) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  之间,平均为  $2.25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;相关分析表明,历次降雨产流中各处理(CK、N、NP、NPK)硝态氮淋失量与降雨量的相关系数分别为 0.693、0.785、0.793、0.604 ( $P < 0.05$ ),表明紫色土坡耕地硝态氮淋失量与降雨量之间具有明显的正相关关系。历次降雨产流中各处理硝态氮淋失量与平均雨强的相关系数分别为 -0.392、-0.206、-0.150、0.232 ( $P > 0.05$ ),说明紫色土坡耕地硝态氮淋

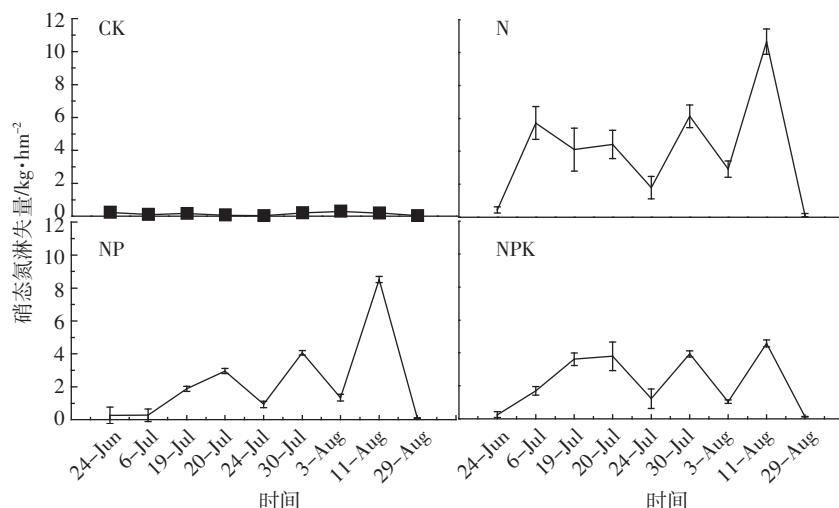


图4 各处理渗漏水硝态氮淋失量季节变化

Figure 4 Seasonal patterns of nitrate leaching flux in different treatments

失量与平均雨强相关不显著。可见,降雨量是影响紫色土坡耕地硝态氮淋失量的主要因素。

#### 2.4.2 淋失总量

表 4 列出了 2005 年夏玉米生长季节各处理氮素淋失总量。3 种施肥处理(N、NP、NPK)硝态氮淋失总量在 $(20.28 \pm 12.35) \sim (44.31 \pm 5.77) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间,占当季施氮量的 13.5%~29.5%。其中,氮磷钾配施处理硝态氮淋失总量最低,为 $(20.28 \pm 12.35) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。而单施氮肥处理硝态氮淋失总量最高,达到 $(44.31 \pm 5.77) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,占当季施氮量的 29.5%。与单施氮肥相比,氮磷配施和氮磷钾配施处理硝态氮淋失总量分别降低 47.6%和 54.2%。这说明氮磷钾合理配施有助于减少坡耕地硝态氮淋失量。多重比较结果显示,单施氮肥处理硝态氮淋失总量与氮磷配施、氮磷钾配施处理之间差异显著,而氮磷配施处理与氮磷钾配施处理硝态氮淋失量差异不是很明显,这可能与紫色土富含钾素有关<sup>[25]</sup>。

表 4 各处理氮素淋失总量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )及其占施肥量的比例(%)  
Table 4 Annual cumulative nitrogen leaching fluxes and loss ratios of fertilization N under different treatments

| 处理  | 硝态氮                          |                   | 铵态氮                        |      | 总氮                          |      |
|-----|------------------------------|-------------------|----------------------------|------|-----------------------------|------|
|     | 淋失量                          | 比例                | 淋失量                        | 比例   | 淋失量                         | 比例   |
| CK  | $1.03 \pm 0.09^{\text{B}}$   |                   | $0.17 \pm 0.04^{\text{a}}$ |      | $2.73 \pm 0.54^{\text{c}}$  |      |
| N   | $44.31 \pm 5.77^{\text{a}}$  | 29.5 <sup>A</sup> | $0.19 \pm 0.03^{\text{a}}$ | 0.13 | $48.48 \pm 6.61^{\text{a}}$ | 32.3 |
| NP  | $23.21 \pm 9.50^{\text{b}}$  | 15.5              | $0.16 \pm 0.05^{\text{a}}$ | 0.11 | $24.54 \pm 9.98^{\text{b}}$ | 16.4 |
| NPK | $20.28 \pm 12.35^{\text{b}}$ | 13.5              | $0.17 \pm 0.06^{\text{a}}$ | 0.12 | $23.04 \pm 9.25^{\text{b}}$ | 15.4 |

注:A 为氮素淋失总量占当季施肥量的百分比。B, Significance level(0.05), 多重比较结果如表所示, 字母不同表示差异明显, 字母相同表示差异不明显。

#### 2.5 作物生长对氮素淋失的影响

不同的施肥条件显著影响作物的生物量和籽粒产量(表 5)。不同处理地上部分生物量的大小顺序为: NPK>NP>N>CK。相关分析表明, N、NP、NPK 处理地

表 5 各处理生物量、产量( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )及作物吸氮量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

Table 5 Crop yield, biomass, and nitrogen uptake of maize under different treatments

| 处理  | 籽粒产量                       | 地上部分生物量                     | 作物吸氮量                       |
|-----|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| CK  | $1.01 \pm 0.12^{\text{c}}$ | $4.72 \pm 0.35^{\text{c}}$  | $8.17 \pm 0.36^{\text{c}}$  |
| N   | $3.40 \pm 0.36^{\text{b}}$ | $10.16 \pm 0.72^{\text{b}}$ | $70.87 \pm 0.69^{\text{b}}$ |
| NP  | $5.27 \pm 0.89^{\text{a}}$ | $12.77 \pm 2.35^{\text{a}}$ | $83.14 \pm 2.21^{\text{b}}$ |
| NPK | $6.00 \pm 0.74^{\text{a}}$ | $14.49 \pm 1.19^{\text{a}}$ | $93.02 \pm 0.98^{\text{a}}$ |

注: Significance level(0.05), 多重比较结果如表所示, 字母不同表示差异明显, 字母相同表示差异不明显。

上部分生物量与渗漏量的相关系数为 $-0.948 (P < 0.01)$ , 与总氮、硝态氮淋失量的相关系数分别为 $-0.938$ 和 $-0.940 (P < 0.01)$ , 说明氮磷钾合理配施方式增大了作物地上部分的生物量, 减少了水分渗漏, 也在一定程度上保持了土壤氮素。不同处理作物吸氮量的大小顺序为: NPK>NP>N>CK(表 5)。与氮磷钾配施处理相比, 单施氮肥处理作物吸氮量降低了 23.8%, 氮磷配施处理作物吸氮量降低了 10.6%。相关分析结果表明, N、NP、NPK 处理作物吸氮量与总氮、硝态氮淋失量的相关系数分别为 $-0.918$ 和 $-0.940 (P < 0.01)$ , 说明作物对土壤氮素的吸收利用程度越高, 氮素淋失越少。这可能是氮磷钾合理配施方式能明显降低紫色土坡耕地氮素淋失量的主要原因。

### 3 结论

(1) 紫色土坡耕地氮素淋失导致该区地下水硝酸盐污染的风险极大, 历次产流中 N、NP、NPK 处理渗漏液硝态氮含量高于世界卫生组织饮用水准则规定的  $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  标准的产流次数占总发生次数的比例分别为 77.8%、55.6%和 44.4%。

(2) 不同施肥处理作物吸氮量的大小顺序为: NPK>NP>N>CK。与氮磷钾配施处理相比, 单施氮肥处理作物吸氮量降低了 23.8%, 氮磷配施处理降低了 10.6%。作物吸氮量的差异可能是施肥影响紫色土坡耕地氮素淋失量的主要原因。

(3) 不同施肥处理玉米季硝态氮淋失量大小顺序为: N>NP>NPK>CK。与单施氮肥相比, 氮磷配施和氮磷钾配施处理硝态氮淋失量分别降低了 47.6%和 54.2%。可见, 氮磷钾合理配施方式能显著减少紫色土坡耕地氮素淋失量。

(4) 紫色土区冬小麦—夏玉米轮作制度下, 不合理施肥现象较为普遍。在当前有机肥难以推广的情况下, 控氮增磷、钾, 推广氮磷钾合理施肥方式, 将成为控制紫色土坡耕地氮素淋失的一条有效途径。

#### 参考文献:

- [1] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6. ZHU Zhao-liang. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(1): 1-6.
- [2] Strebel O, Duynisveld W H M, Bottcher J. Nitrate pollution of groundwater in Western Europe[J]. *Agric Ecosyst Environ*, 1989, 26: 189-214.
- [3] Ceccon P, et al. N in drainage water as influenced by soil depth and N fertilizer: a study in lysimeters[J]. *European Journal of Agronomy*, 1995,

- 4(3):289-298
- [4] Johnson C J, Bonrud P A, Dosch T L, et al. Fatal outcome of methemoglobinemia in an infant[J]. *J Am Med Assoc*, 1987, 257:2796-2797.
- [5] OECD. Environmental indicators for agriculture, methods and results [M]. Paris: OECD Publication Service, 2001.
- [6] Kyllmar K, Martensson K, Johnsson H. Model-based coefficient method for calculation of N leaching from agricultural fields applied to small catchments and the effects of leaching reducing measures[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 304:343-354.
- [7] Changsheng Li, Neda Farahbakhshazad, Dan B Jaynes, et al. Modeling nitrate leaching with a biogeochemical model modified based on observations in a row-crop field in Iowa[J]. *Ecological Modeling*, 2006, 196: 116-130.
- [8] Christian Baresel, Georgia Destouni. Estimating subsurface nitrogen accumulation depletion in catchments by input-output flow analysis[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2006, 31:1030-1037.
- [9] 孙 波, 等. 红壤养分淋失的影响因子[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3):257-262.
- SUN Bo, et al. Influencing factors of leaching nutrients in red soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(3):257-262.
- [10] 张兴昌, 等. 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, 2000, 19(2):128-135.
- ZHANG Xing-chang, et al. The interacting models and mechanisms of soil nitrogen with rainfall and runoff[J]. *Progress in Geography*, 2000, 19(2):128-135.
- [11] Sun B, Chen D, Li Y, Wang X. Nitrogen leaching in an upland cropping system on an acid soil in subtropical China: lysimeter measurements and simulation[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, 81(3): 291-303.
- [12] 余贵芬, 等. 氮在紫色土中的移动和水稻氮素利用率的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(4):316-320.
- YU Gui-fen, et al. Study on nitrogen migration in purple soil and nitrogen uptake by rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1999, 5(4):316-320.
- [13] 张玉铭, 等. 华北太行山前平原农田土壤水分动态与氮素的淋溶损失[J]. 土壤学报, 2006, 43(1):17-25.
- ZHANG Yu-ming, et al. Nitrate leaching in wheat-maize rotation field in the North China Plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1):17-25.
- [14] 张国梁, 等. 农田氮素淋失研究进展[J]. 土壤, 1998(6):291-297.
- ZHANG Guo-liang, et al. Advance of nitrogen leaching from farmland [J]. *Soil*, 1998(6):291-297.
- [15] 朱 波, 等. 紫色丘陵区典型小流域氮素迁移及其环境效应[J]. 山地学报, 2006, 24(5):601-606.
- ZHU Bo, et al. Non-point-source nitrogen movement and its environmental effects in a small watershed in hilly area of purple soil[J]. *Journal of Mountain Science*, 2006, 24(5):601-606.
- [16] 汪 涛, 等. 川中丘陵区典型小流域地下水硝酸盐污染分析[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(3):84-87.
- WANG Tao, et al. Nitrate pollution of groundwater in the hilly area of the Central Sichuan Basin[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(3):84-87.
- [17] 朱 波, 等. 紫色土坡耕地硝态氮淋失研究[J]. 环境科学学报, 2008, 22(3):84-87.
- ZHU Bo, et al. Characteristics of nitrate leaching from hilly cropland of purple soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(3):525-533.
- [18] 贾海燕, 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.
- JIA Hai-yan, et al. Nitrate-N loss effected by the runoff process in purple soil—a simulation study[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(10):1658-1664.
- [19] 谢贤群, 等. 中国生态系统研究网络观测与分析标准方法-水环境要素观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1998, 104-279.
- XIE Xian-qun, et al. Observation and analysis of water environment factors[M]. Beijing: Standards Press of China, 1998: 49-57.
- [20] Young E O, Briggs R D. Shallow ground water nitrate-N and ammonium-N in cropland and riparian buffers[J]. *Agr Ecosyst Envir*, 2005, 109(3-4):297-309.
- [21] 李世清, 等. 土壤氮素矿化过程中非交换铵态氮的变化[J]. 中国农业科学, 2003, 36(6):663-670.
- LI Shi-qing, et al. Change of non-exchangeable ammonium nitrogen during procession of soil organic nitrogen mineralization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(6):663-670.
- [22] 徐泰平. 紫色土坡耕地磷素迁移及其影响因素研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院硕士论文, 2006.
- XU Tai-ping. Phosphorus transport and its impact factors in slope cropland of purple soil[D]. Beijing: Master Thesis of Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [23] 同延安, 等. 不同氮肥种类在壤土及黄绵土中的转化[J]. 土壤通报, 1994, 25(3):107-108.
- TONG Yan-an, et al. Translation of different nitrogen fertilizer in yellow soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1994, 25(3):107-108.
- [24] Petry J, Soulsby C, Malcolm I A, et al. Hydrological controls on nutrient concentrations and fluxes in agricultural catchments[J]. *Sci Total Environ*, 2002, 294:95-110.
- [25] Zhu Bo, Wang Tao, et al. Nutrient release from weathering of purple rock in the Sichuan Basin[J]. *China, Pedosphere*, 2008, 18(2):257-264.