

黄绵土坡面土壤矿质氮素径流流失与入渗特征研究

李艳梅^{1,2}, 袁霞^{1,2}, 张亚丽², 张兴昌^{1,2}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要 采用人工模拟降雨的研究方法, 研究了黄绵土坡面土壤矿质氮素径流损失与入渗规律。结果表明, 径流损失是土壤矿质氮素流失的主要形式, 土壤硝态氮是氮素径流损失的主要形态, 土壤矿质氮素在地表流失过程中, 随着时间的延长累积流失量均不断增大, 可用幂函数和对数函数方程进行模拟。降雨 16 h 后, 硝态氮发生深层渗漏现象比较明显, 坡中部硝态氮发生向下迁移的现象相对严重, 而铵态氮径流或泥沙损失主要集中在坡上和坡中部。

关键词 黄绵土; 矿质氮; 径流流失; 入渗

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2007)01-0246-06

Mineral Nitrogen Loss by Runoff and Infiltration in the Loess Soil Slope

LI Yan-mei^{1,2}, YUAN Xia^{1,2}, ZHANG Ya-li², ZHANG Xing-chang^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, North West Sci-Tec University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China; 2. Key Lab of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy Sciences, Yanglin 712100, China)

Abstract: Serious soil erosion on slope land of the Loess Plateau results in a great deal of nitrogen loss and restricts local agriculture greatly. In this study, simulated precipitation experiment was conducted to investigate the relationship between runoff and nitrogen loss on slope land. Runoff and sediment were sampled during rainfall and soil profile samples were collected 16 hours after precipitation. For all the samples, nitrate and ammonium were determined. The results showed that both nitrate and ammonium concentrations in runoff decreased with time until reaching a quasi-steady condition at about 20 min, nitrate and ammonium concentrations in sediment decreased with time for the first 12 min and then increased steadily. Cumulative nitrate and ammonium loss in runoff increased steadily during rainfall, which fitted well with exponential function, cumulative nitrate loss was 50 times of cumulative ammonium loss in runoff. Cumulative nitrate and ammonium loss in sediment fitted well with logarithmic function, cumulative nitrate loss was 1.36 times of ammonium loss in sediment, and the cumulative nitrate and ammonium loss in runoff were 100 times and 3 times larger than that in sediment, respectively. Compared with other positions on the slope, nitrate leached deepest up to 28 cm at the position 230 cm from the summit of the slope, but the ammonium concentration was comparatively lower at this point. Soil mineral nitrogen was mainly carried off by runoff, and nitrate was the main form of lost nitrogen during rainfall. Nitrate leaching loss was obvious and mainly occurred on the middle position of the slope, while ammonium loss by runoff and sediment occurred mainly at up and middle positions.

Keywords: Yellow Cultivated loessal soil; mineral nitrogen; runoff; infiltration

黄土高原地区分布大面积的黄绵土, 是世界范围内严重的水土流失区, 水土流失伴随着养分流失, 施

入农田中的氮肥有相当一部分以淋洗途径损失于环境中^[2,3]。培育土壤氮素肥力, 充分发挥其增产效用成为发展该区域农业生产的重要途径^[1]。目前, 人们普遍关注硝态氮的损失, 而忽视了铵态氮。本文利用人工模拟降雨, 研究径流和泥沙中矿质氮的流失过程, 揭示降雨过程中黄绵土坡面矿质氮素随径流的流失规律, 并对坡面土壤剖面矿质氮的分布进行分析, 以期

收稿日期 2006-03-31

基金项目 西北农林科技大学科研创新团队、青年学术骨干和研究生教育创新支持计划项目、国家自然科学基金(40371076)

作者简介 李艳梅(1983—), 女, 陕西志丹人, 硕士研究生, 研究方向为土壤环境化学。

通讯作者 张兴昌 E-mail: zhangxc@ms.iswc.ac.cn

揭示降雨入渗条件下矿质氮在土壤剖面中的分布规律,为黄土区域水土流失治理提供理论依据。

1 研究方法

1.1 供试材料

供试土壤为黄绵土,质地为粉质壤土,采自陕西省安塞县。供试土壤过 5 mm 筛孔,土壤含水量控制在 10% 左右,分层装土,土壤容重维持在 $1.25 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 左右。

1.2 人工模拟降雨

模拟降雨试验于 2004 年 5 月在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室模拟降雨大厅进行,采用侧喷式自动模拟降雨系统,喷头高度 16 m,雨滴降落速度可达到自然雨滴降落速度的 98% 以上。装土槽子为一套长 \times 宽 \times 高 = $3.8 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.55 \text{ m}$ 的坡度可调式钢槽。本试验土槽表面裸露,坡度设置为 10° ,土槽下端设有集流装置,可以定时采集径流样。在降雨 3 h 前,表层 10 cm 施入硝酸铵 50 g。降雨前测定原始土壤和雨水养分含量。降雨强度为 $1.2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,降雨时间为 90 min。产流过程中同步采集径流与泥沙样品,前 3 min 每分钟采集 1 个样品,从第 4 min 开始每 3 min 采集 1 个样品。采样结束后测定各泥水样的总体积。降雨结束 16 h 后,在槽内沿坡面方位 6 个等分点处(距坡顶 28、105、168、230、304、370 cm)用土钻每 5 cm 取土,直至槽底。

1.3 样品分析

取部分泥水样将上层清液过滤后测定径流中矿质氮(主要为铵态氮和硝态氮)含量,剩余泥水样经过澄清、倾水后将泥沙风干称重,测泥沙中矿质氮含量。土壤和泥沙中矿质氮用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 溶液浸提(水土比为 5:1)^[4]。土样和水样中的硝态氮用紫外分光光度计测定,铵态氮用连续流动分析仪测定。

2 结果与讨论

2.1 坡面土壤矿质氮的流失

2.1.1 径流和泥沙中矿质氮的流失过程

产流过程中坡地土壤矿质氮素的流失过程实际上是表层土壤矿质氮素与降雨、径流相互作用的过程^[5]。降雨过程中,当土壤入渗能力小于雨强时,地表径流携带走土壤液相中的可溶性氮素,携带数量为径流量与氮素浓度的乘积^[6,7]。随着产流的继续,径流与土壤表层氮素进一步作用,吸附在土壤颗粒表面的吸附态的氮素逐渐被解吸,并随产流在坡面传递,被携带出

产流口。在这个过程中,径流是土壤养分流失的动力,又是载体^[8]。图 1 和图 2 分别是径流中硝态氮和铵态氮的浓度随时间的动态变化曲线,由图 1 和图 2 可见,产流初期径流中矿质氮浓度相对较高,但硝态氮浓度高于铵态氮(硝态氮浓度为 $10.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,铵态氮浓度为 $0.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),两者之间的浓度比大于 10,随着产流时间的延长,矿质氮浓度逐渐降低最后趋于稳定,其中硝态氮浓度的稳定时间比铵态氮略早一点,其稳定时间分别为产流 18 min 左右和 23 min 左右。在产流初期,土壤粘粒含量高,吸附于表层颗粒和存在于土壤液相中的养分含量相应高,径流携带走大量可溶性养分,因此产流初期矿质氮浓度较高,随着养分物质的减少以及表土混合层厚度的增加,径流中养分浓度逐渐降低,当土壤吸持养分的能量与降雨径流的溶解或解吸的能量处于动态平衡中时,径流中养分浓度保持稳定^[9]。比较径流中硝态氮浓度和铵态氮浓度变化曲线可以看出,整个产流过程中都是硝态氮浓度大于铵态氮浓度,这主要与黄绵土的性质以及这两种矿质氮与土壤的作用力及其迁移能力有关,同时也说明了在径流所导致的养分流失过程中,硝态氮流失是矿质氮流失的主要形式之一。

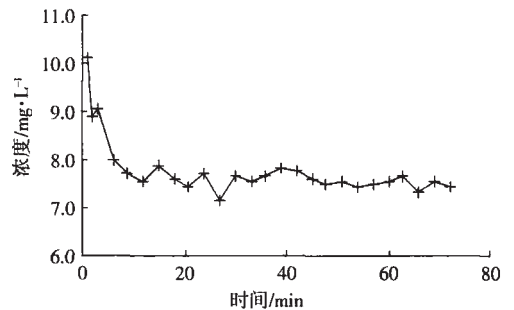


图 1 径流中硝态氮浓度随时间变化

Figure 1 Changes of the nitrate concentration in runoff during rainfall

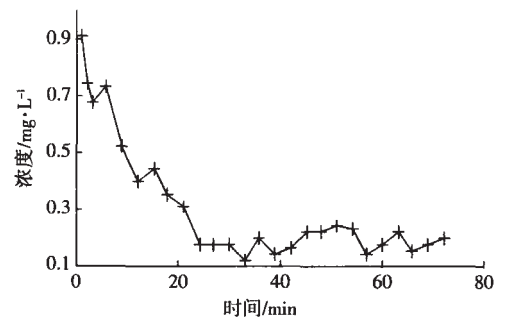


图 2 径流中铵态氮浓度随时间变化

Figure 2 Changes of the ammonium concentration in runoff during rainfall

土壤矿质氮不仅随径流发生流失,还有一部分随着泥沙的迁移而损失。为了全面分析土壤矿质氮的流失情况,对泥沙中矿质氮的浓度随时间变化分析情况进行分析,结果见图3。由图3可见,就一次产流而言,泥沙中不同形态矿质氮浓度随产流时间总体上呈先降低后呈波动增加的趋势。产流初期矿质氮浓度高(硝态氮浓度为 $2.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,铵态氮浓度为 $1.67\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。随产流时间的延长,浓度逐渐降低至最小值(硝态氮 $1.21\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,铵态氮 $1.12\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)并呈现暂时的稳定状态,硝态氮与铵态氮的稳定时间大致相同,约是12 min。而后矿质氮浓度呈稳定增加趋势。该变化过程可认为产流初期,吸附态与溶解态矿质氮养分含量相对高一些,被泥沙携带走的养分含量相对高一些,随产流时间的延长,更多的表层养分被冲刷,浓度逐渐降低,当土壤吸持与解吸的能量处于动态平衡中时,泥沙中养分浓度呈现出暂时的稳定状态。产流过程中径流除一部分流出试验槽出口外,另一部分滞留在坡面,并与土表混合,形成水土混合体,水土相互作用时间的延长与作用强度的增加,破坏了原有的能量平衡状态,径流的解吸作用增强,存在于土壤颗粒上的吸附态氮逐渐被解吸^[9],因此泥沙矿质氮浓度在产流15 min后出现稳定的增加趋势。可认为产流时间的延长增加了径流与土壤吸附态氮的作用时间,更多的养分被解吸、溶解,因此矿质氮的浓度不断增大。

比较径流和泥沙所带走的矿质氮浓度随时间的变化可以看出,硝态氮在径流中的浓度远大于在泥沙中的浓度,而对于铵态氮来说,它在泥沙中的浓度却始终大于在径流中的浓度。

2.1.2 坡面土壤矿质氮的流失规律

径流矿质氮累计流失变化曲线绘于图4和图5,由图易见,随着产流时间的延长,径流中矿质氮的累

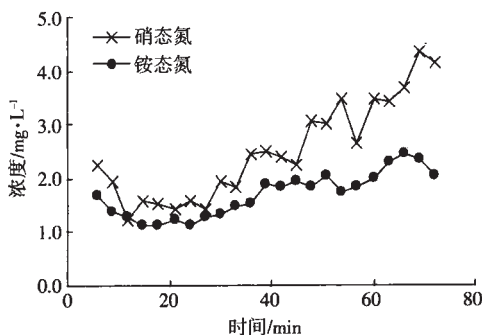


图3 泥沙中矿质氮浓度随时间变化

Figure 3 Changes of the mineral nitrogen concentration in sediment during rainfall

积量呈稳定增加趋势,为了定量寻求矿质氮的累积流失量和时间的关系,对两者之间进行拟合,用幂函数进行拟合。幂函数可表示为:

$$y=ax^b \tag{1}$$

式中 y 为径流矿质氮累积量 x 为时间。

其中硝态氮累积流失量和时间的关系为:

$$y=0.2205x^{1.6201} (r^2=0.9965) \tag{2}$$

而铵态氮累积流失量和时间的关系为:

$$y=0.0199x^{1.2626} (r^2=0.9918) \tag{3}$$

由(2)式和(3)式的 r 决定系数可以看出,用幂函数能较好地模拟矿质氮流失量和时间的变化关系。比较(2)和(3)式可以看出,不管是系数 a 还是系数 b 都表现为硝态氮大于铵态氮,从而可以说明硝态氮在整个产流过程中的累积流失量大于铵态氮在整个产流过程中的累积流失量,这从图4和图5的纵坐标的明显差异可以看出。同时计算发现,在整个降雨试验过程中,径流中累积流失的硝态氮量大约是铵态氮量的50倍。

泥沙矿质氮累计流失变化曲线显示,由于泥沙携带走的矿质氮累积量也随着产流时间的延长而增大,为了定量描述由于泥沙携带走的矿质氮累积量随时间的关系,用对数函数进行拟合。可以表示为:

$$y=a\ln(x) + b \tag{4}$$

式中 y 为泥沙携带走的矿质氮累积量 x 为时间。

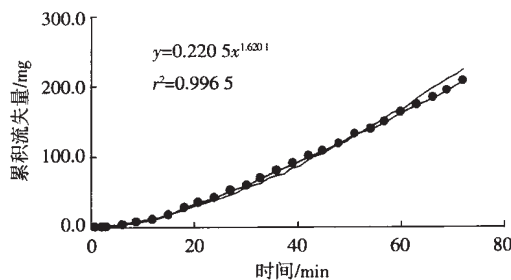


图4 径流硝态氮累计流失量

Figure 4 Cumulative nitrate losses in runoff during rainfall

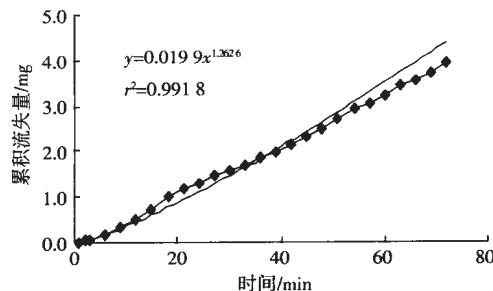


图5 径流铵态氮累计流失量

Figure 5 Cumulative ammonium losses in runoff during rainfall

其中硝态氮累积流失量和时间的关系为：

$$y=0.8485\ln(x)-1.4125 \quad (5)$$

而氨态氮累积流失量和时间的关系为：

$$y=0.6328\ln(x)-1.1559 \quad (6)$$

根据式 (5) 和 (6) 的决定系数, 说明用对数函数能较好地描述泥沙携带走的矿质氮累积量随时间的关系, 然而根据式 (5) 和 (6) 较难比较泥沙中硝态氮和氨态氮在整个有效时间内累积损失量的相对大小。然而, 至少在本文研究的时间范围内, 可明显地看出泥沙中硝态氮累积流失量大于氨态氮累积流失量。同时计算发现, 在整个降雨试验过程中, 泥沙中累积流失的硝态氮量大约为氨态氮量的 1.36 倍, 见图 6。

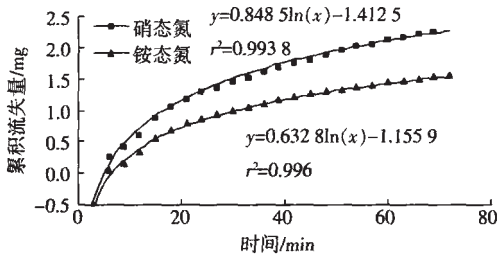


图 6 泥沙中矿质氮累积流失变化

Figure 6 Cumulative mineral nitrogen losses in sediment during rainfall

比较径流矿质氮累积流失和泥沙矿质氮累积流失发现, 随着产流时间的延长, 两种累积流失规律大致相同, 即呈增大的趋势, 但是存在的差异是, 对于径流累积流失规律来说, 先缓慢增加后急剧增加, 关系图表现为向里凹, 因而符合幂函数规律。从而说明了以径流形式流失的矿质氮在前期相对较少, 而随着时间的延长, 以径流形式流失的矿质氮相对较多些。结合图 1 和图 2, 虽然前期流失的矿质氮浓度较高, 但流失量相对较小, 这主要是由于产流前期, 其产流量相对较少的缘故。而对于泥沙中矿质氮的累积流失规律表现为向上凸的对数函数关系, 即刚开始累积流失量迅速增加, 随着时间的延长慢慢趋于平稳, 这说明以泥沙形式带走的矿质氮流失主要发生在产沙前期, 而在后期流失量较少。通过前面对图 3 的分析, 泥沙中携带的矿质氮浓度随时间的变化是先降低后增加, 而这与泥沙中矿质氮的累积流失规律相反, 这是由于随着时间的延长, 泥沙流失速率不断降低的缘故。另外, 通过比较径流矿质氮累积流失和泥沙矿质氮累积流失图的纵坐标可以看出径流累积流失的矿质氮大于泥沙累积流失的矿质氮的量, 同时通过计算发现, 在整个降雨试验过程中, 径流累积流失的氨态氮量大

约是泥沙累积流失氨态氮量的 3 倍, 而径流累计流失的硝态氮量大约是泥沙累积流失硝态氮量的 100 倍以上。

因此, 在降雨-产沙产流过程中, 矿质氮流失的氮素形态主要是硝态氮, 另外径流是导致养分流失的主要载体。

2.2 降雨结束 16 h 后坡面土壤矿质氮在土壤剖面中的再分布

在降雨-产沙产流过程中, 表层的矿质氮可能存在着表层迁移和深层入渗迁移的过程。当降雨-产沙产流过程结束后, 上层矿质氮只随土壤水分向深层再分布而发生向下的迁移。充分认识上层矿质氮在降雨结束后的再分布规律有利于揭示矿质氮素的深层损失机理, 并和矿质氮的径流损失一并考虑, 可更好地揭示矿质氮的径流损失机理。

图 7 是降雨结束 16 h 后硝态氮在不同坡位土壤剖面中的分布。由图 7 可见, 硝态氮在剖面中的分布存在 3 个明显的拐点(即硝态氮浓度急剧变化之处)。在第 1 个拐点以内, 硝态氮含量一直保持恒定且非常低, 坡面土壤在径流的冲刷下失去上层表土, 并与雨水形成了水土混合体, 土壤溶质在雨滴的击溅作用和径流的冲刷解吸下随地表径流流失。可见, 该区域大部分硝态氮都参与了坡面养分流失, 分析测得的浓度仅为降雨前土壤的 27%。第 1 个拐点的深度在一定程度上反映了表土硝态氮的流失程度, 由图 7 可知, 不同坡位第 1 个拐点所在深度表现为 28、105、370 cm(三者大约为 18 cm 左右)、168 cm、304 cm(两者大约为 23 cm 左右)、>230 cm(约为 28 cm 左右), 因此, 可以推断土表硝态氮流失程度最严重的既不是处于坡上位置也不是处于坡下位置, 而是处于坡中位置。另外, 在第 1 个拐点之内, 各土层深度的硝态氮浓度基本一致, 说明在第 1 个拐点内, 不同深度土壤硝态氮的损失程度是一致的。第 1 个拐点到第 2 个拐点之间, 硝态氮浓度急剧升高并在第 2 个拐点处达到峰值, 而且不同坡位出现峰值的深度变化规律同第 1 拐点出现深度规律基本一致, 即表现为 28、105、370 cm(三者大约为 27 cm 左右)、>168 cm、304 cm(两者大约为 31 cm 左右)、>230 cm(约为 33 cm 左右), 而峰值大小表现为 370 cm 和 105 cm > 304 cm > 230 cm > 168 cm > 28 cm; 从第 2 个拐点开始, 浓度逐渐降低至第 3 拐点后基本稳定, 第 3 拐点所在深度可认为是硝态氮损失所作用的深度^④, 在该深度以下, 硝态氮基本不发生损失, 由图 7 可以看出, 不同坡位硝态氮的损失深度基

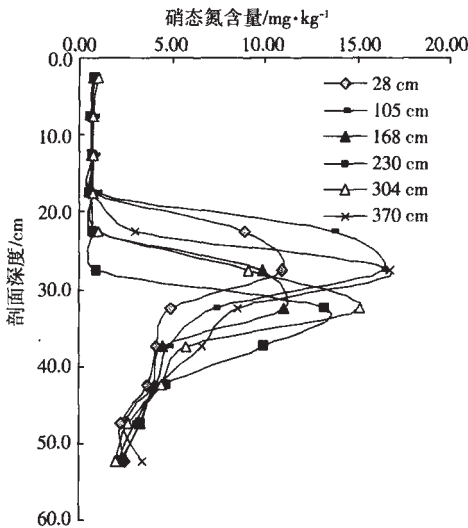


图7 硝态氮剖面分布

Figure 7 Distribution of nitrate in the soil profile in different positions along the slope

本上一致,大约在 50 cm 深度处。

图 8 显示了不同坡位土壤剖面铵态氮含量分布趋势,由图可见,与硝态氮明显不同的是铵态氮在土壤剖面中的分布曲线只有 1 个拐点,在该拐点以内,6 个不同坡位的铵态氮含量剖面分布曲线形状基本相同,有着共同的趋势,铵态氮含量从上至下逐渐降低,分布相对均匀,在拐点以下的深度层,土壤铵态氮浓度与原始土壤几乎无任何差异,只有在坡位 105 cm 处铵态氮含量相对较高,这可能是由试验误差造成的。在拐点 10 cm 以下相对稳定的低铵态氮含量说明了此深度以下的铵态氮既没有来自上层土壤的淋溶累积,也不参与向下的淋溶损失。从而可认为铵态氮

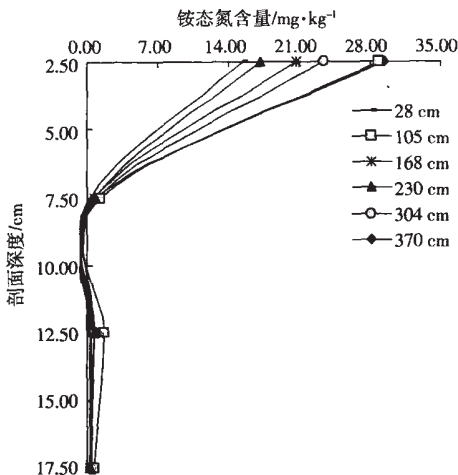


图8 铵态氮剖面分布

Figure 8 Distribution of ammonium in the soil profile in different positions along the slope

的损失途径主要是靠径流和泥沙携带。在不考虑氮素在土壤中的转化时,10 cm 土层以上的铵态氮含量在一定程度上反映随径流和泥沙流失的程度。而土层中铵态氮的含量可以用铵态氮浓度和土层深度的关系所围成的面积近似表示,比较不同坡位铵态氮浓度和土层深度关系曲线,可以看出,土层中铵态氮的含量在 28 cm 和 230 cm 处的含量最低,因此可认为,铵态氮随径流和泥沙发生损失在坡顶和坡中最严重。

通过对土体剖面硝态氮和铵态氮不同分布的分析比较发现,坡面土壤硝态氮和铵态氮的损失机理不同。硝态氮养分除一部分随径流和泥沙流失外,有很大一部分在土体中通过入渗产生淋溶流失到深层土壤,铵态氮则是绝大部分都是以径流和泥沙的形式流失。这主要是与供试土壤的理化性质和两种不同形态氮素的电荷特征以及迁移能力有关。不同坡位同一剖面硝态氮第 1 个拐点出现的深度不一样,大致为坡中部最深,坡顶和坡脚较浅;对于铵态氮,虽然出现第 1 个拐点的深度相差不大,但是拐点以内铵态氮的含量不同。径流与土壤硝态氮的作用深度明显大于铵态氮的作用深度,两者之差为 9~19 cm,这与张兴昌等(2005)的研究结果基本一致^[10]。可见,径流与坡面土壤的相互作用对不同形态的矿质氮在土体剖面的再分布的影响不同,硝态氮淋溶损失较为严重,且在坡中部区域表现得最为明显;铵态氮基本无淋溶损失,主要随径流及泥沙流失,其随径流和泥沙流失的强弱在不同坡位存在着空间变化,坡顶和坡中最严重。比较发现,在坡顶区域,坡面土壤矿质氮流失呈现明显的形态差异性,硝态氮与其他坡位同一剖面相比流失较少,但是铵态氮与其他坡位同一剖面相比养分流失最严重。这主要是由于硝态氮主要溶解于土壤液相中,流动性较强,很容易被坡面径流携带走,因此水土混合体区域极大部分的硝态氮都参与了坡面养分流失,硝态氮养分流失在不同坡位的相对多少只受硝态氮浓度和水势梯度的控制^[10],铵态氮吸附于土壤颗粒表面,移动性弱,被土壤吸持的能力较强,解吸需要较长的时间,在整个产流期,只有 0~8 cm 土层区域部分的参与了土壤矿质氮养分的流失,其养分流失在不同坡位的多少除受浓度和水势梯度的影响外,还受径流作用的控制,从坡面土壤矿质氮的流失关于矿质氮的分析比较也可以很好地印证这一点。同时发现不同坡位硝态氮与铵态氮的流失亦有相似的地方,即均是坡中部流失严重,坡脚流失最少。这可认为地表径流沿坡面向下流量和流速逐渐增大,与土壤溶质的相互作

用强度较大,对中部坡位土壤搬运冲刷较强。因此养分亏缺较为严重,而在坡脚区域,由于坡面上部随径流迁移的矿质氮在入渗的同时也沿坡面向下运移,养分在坡脚汇聚后才逐渐流出坡面。因此,土层和雨水中矿质氮养分对坡脚的侧渗补给量相对较多,及时填补了矿质氮的流失可能引起的养分亏缺,土壤坡面矿质氮养分流失的研究中,泥沙养分浓度在暂时的稳定状态之后又呈稳定增加趋势可能与之有关。

3 结论

土壤矿质氮的流失通过随径流和泥沙发生的地表流失以及通过入渗发生向下的淋溶流失而损失。在降雨-产沙产流过程中,径流矿质氮浓度随着时间的延长而降低,泥沙矿质氮浓度随着时间的延长先降低后又呈波动增加。土壤矿质氮素流失的主要形式是径流损失,矿质氮流失的氮素形态主要是硝态氮。降雨 16 h 后,硝态氮发生深层渗漏现象比较明显,不同坡位硝态氮的损失深度基本上一致,大约在 50 cm 深度处,硝态氮在坡中部发生向下迁移相对较严重,铵态氮很少发生向下的迁移,随径流或泥沙损失主要集中在坡上和坡中部。

参考文献:

- [1] 沈善敏.中国土壤肥力[M].北京:中国农业出版社,1998.189,250,307-320.
- [2] 张道勇.氮肥的利用及其损失问题(三)[J].土壤通报,1981,67(5):32-35.
- [3] 冯绍元,郑耀泉.农田氮素的转化与损失及其对水环境的影响[J].农业环境保护,1996,15(6):277-279.
- [4] 中国土壤学会.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,1999.106-226.
- [5] 张兴昌,邵明安.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.
- [6] 王全九,沈晋.降雨条件下黄土坡面溶质随地表径流迁移试验研究[J].水土保持学报,1993,7(1):11-17.
- [7] 张兴昌.水蚀条件下硝酸铵施用对黄绵土氮素流失的影响[J].农业工程学报,2000,16(2):58-63.
- [8] 李光录,赵晓光.水土流失对土壤养分流失的影响研究[J].西北林学院学报,1995,10(增):28-33.
- [9] 傅涛,倪九派,魏朝富,等.不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究[J].植物营养与肥料学报,2003,9(1):71-75.
- [10] 张兴昌,张亚丽,李怀恩,等.径流与坡面土壤矿质氮素的作用深度研究[J].科学技术与工程,2005,5(17):1256-1259.