

DOI: 10.11766/trxb201712220550

# 红壤坡地氮的径流输出通量及形态组成\*

郑海金 左继超 奚同行 聂小飞 王凌云 刘 昭

(江西省水土保持科学研究院, 江西省土壤侵蚀与防治重点实验室, 南昌 330029)

**摘要** 为研究自然降雨条件下红壤坡地氮素输出特征, 于2015年5月—2016年5月采用野外大型土壤水分渗漏试验装置, 对赣北第四纪红壤坡地植草覆盖、干草覆盖和裸露对照3种处理的地表径流和壤中流中不同形态氮素的输出开展了试验观测。结果表明: (1) 在侵蚀不明显的第四纪红壤坡地, TN (总氮)、DIN (溶解态无机氮)、DON (溶解态有机氮) 和PN (悬涂泥沙颗粒态氮) 主要随105 cm壤中流输出, 占径流输出总通量的71%, 而随地表径流和30 cm、60 cm壤中流输出通量分别为23%和6%; (2) 氮素随壤中流输出主要以溶解态 (DTN (溶解态总氮) 占TN比例为54.8%~86.9%) 为主, DTN又以无机态 (DIN占DTN比例为57.8%~97.1%) 尤其是NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N (硝态氮) 为主。氮素随地表径流输出的主要形态则随处理措施的不同而不同; (3) 保留草被覆盖可以较好地削减氮素径流流失, 而采取干草覆盖有增大氮素径流流失尤其是深层损失的风险。

**关键词** 红壤; 植草覆盖; 干草覆盖; 氮损失; 径流; 壤中流

**中图分类号** S157.1 **文献标识码** A

径流是坡地土壤养分迁移传输的重要途径与载体, 在降雨和径流冲刷作用下, 坡地土壤养分主要通过地表径流和壤中流等途径汇入受纳水体<sup>[1]</sup>, 从而引起土壤中养分的流失和水体的污染<sup>[2]</sup>。随着地表径流对土壤养分流失影响研究的日趋成熟, 壤中流影响土壤养分流失的研究已成为热点<sup>[1]</sup>。近年来, 国外在壤中流的观测方法<sup>[3]</sup>、产流特征<sup>[4]</sup>、发生机制<sup>[5-6]</sup>、预测模拟<sup>[7-8]</sup>、溶质运移<sup>[9]</sup>及其与地表径流关系<sup>[10]</sup>方面进行了广泛的研究, 并取得了较大的进展; 国内则侧重于紫色土和喀斯特地区壤中流的形成、产流特征、影响因素、养分输出特征及其与地表径流的差异分析<sup>[11-14]</sup>; 越来越多的研究证实, 虽然地表径流是氮素等养分迁移的主要途径, 随壤中流流失的氮素等养分对湖

泊和河流富营养化的作用也不容忽视<sup>[15-19]</sup>。如Jia等<sup>[16]</sup>研究了不同水文机制下紫色土地区的氮损失, 发现壤中流中硝态氮 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N) 的浓度为地表径流的20多倍; 林超文等<sup>[11,17]</sup>多次证明紫色土农田氮损失的主要途径是壤中流。尽管如此, 已有研究主要采用模拟降雨试验或单场自然降雨试验, 长期的野外原位观测研究相对薄弱, 对坡地氮素随径流入渗至地下的再分配过程、氮素随壤中流的迁移途径和机理等有待深入研究; 大部分研究关注于硝态氮损失, 对其他形态氮素 (如有机氮) 损失关注较少。

我国东南部红壤丘陵区遍及10省 (区), 面积为113万km<sup>2</sup>, 占红壤区土地总面积的51.8%, 占全国土地总面积的11.8%<sup>[20]</sup>。该区域降水充沛, 加

\* 国家自然科学基金项目 (41401311和41761060)、江西省自然科学基金项目 (20171ACB21072) 和江西省杰出人才资助计划 (20171BCB23080) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41401311 and 41761060), the Natural Science Foundation of Jiangxi Province in China (No. 20171ACB21072) and the Program for Excellent Talents of Jiangxi Province in China (No. 20171BCB23080)

作者简介: 郑海金 (1978—), 女, 江西临川人, 博士, 教授级高工, 主要研究方向为水土保持与坡地养分循环。

E-mail: haijinzhen@163.com

收稿日期: 2017-12-22; 收到修改稿日期: 2018-02-12; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2018-03-12

上红壤自身性质的影响，壤中流普遍发生<sup>[15,21]</sup>。国内学者对红壤坡地壤中流养分运移特征已进行了初步研究，如褚利平等<sup>[22]</sup>研究了烤烟红壤坡耕地壤中流氮素等养分浓度垂向变化特征；莫明浩等<sup>[23]</sup>基于单场自然降雨产流的观测分析了红壤坡地地表径流和壤中流及其氮素等养分流失特征。但受试验观测手段等的限制，前人对自然降雨条件下壤中流长时期持续产流及其运移养分过程的观测与研究尚不充分；而且，由于红壤区的降水分配特征和土壤垂向结构区别于紫色土和喀斯特地区，红壤坡地土壤水文状况也与上述两地区明显不同。为此，本文利用野外大型土壤水分渗漏试验装置，长期观测自然降雨条件下红壤坡地不同径流的产流过程及其氮素含量，研究红壤坡地不同形态氮随径流垂向分层输出浓度与输出通量变化特征，以期深入了解红壤坡地不同径流对不同形态氮流失的贡献和差异，探索氮素径流流失量、形态与机制，为该地区水土流失和农业面源污染防治提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验布设在江西省北部德安县的江西水土保持科研创新基地（115° 42' 38" E ~ 115° 43' 06" E，29° 16' 37" N ~ 29° 17' 40" N）内。该基地属鄱阳湖流域博阳河水系，属于亚热带季风气候区，多年平均降水量1 399 mm，主要集中在

在4—9月，占全年降水量的70%以上；多年平均气温16.7℃，多年平均无霜期249 d，年日照时数1 650 ~ 2 100 h；地貌为浅丘岗地，海拔30 ~ 100 m，坡度5° ~ 25°，地带性植被为亚热带常绿阔叶林。土壤主要为第四纪红黏土发育的红壤，呈酸性至微酸性，土层厚度约105 cm，土壤剖面从上至下典型土体构型为Ah-Bs-Bsv-Csv<sup>[21]</sup>。其中：Ah层厚度约为0 ~ 30 cm，土壤容重为1.05 ~ 1.32 g·cm<sup>-3</sup>；Bs层厚度约为30 ~ 60 cm，土壤容重为1.48 g·cm<sup>-3</sup>；Bsv层厚度约大于60 cm，土壤容重为1.53 g·cm<sup>-3</sup><sup>[24]</sup>，土壤入渗率大小表现为：Ah > Bs > Bsv，故在各分层土壤中存在壤中流现象。该土壤在我国东南部红壤丘陵区具有代表性。

### 1.2 试验设计

试验采用大型土壤水分渗漏装置，可观测地表径流以及30 cm、60 cm和105 cm壤中流。试验装置详细布置参见文献[21, 24]。设置3个处理，即植草覆盖（种植百喜草，覆盖度100%，定期刈割使草丛高度保持在30 cm）、干草覆盖（将刈割的百喜草横向覆盖于地表，覆盖度100%，厚度约5 cm）和裸露对照（地表不扰动，及时清除杂草保持地表完全裸露）。各处理小区彼此相邻且坡度均为14°，每个小区宽5 m、长15 m（水平投影）。小区于2000年建成，经过15 a的沉降稳定，已接近自然土体。小区内各项处理措施保存良好，目前土壤基本化学性质见表1（土壤采样时间为2015年5月22日施肥前）。

表1 试验小区土壤养分背景

Table 1 Chemical properties of the soils in the three treatment plots

处理 Treatment	土层深度 Soil depth /cm	有机质 Organic matter /(g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen /(g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Alkaline nitrogen /(mg·kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total phosphorus /(g·kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available phosphorus /(mg·kg <sup>-1</sup> )
植草覆盖 Grass cover	0~30	19.87	0.98	114.80	0.22	12.55
	30~60	6.84	0.53	65.10	0.24	10.27
干草覆盖 Straw mulch	60~90	4.93	0.45	42.21	0.17	3.69
	0~30	14.81	0.83	87.71	0.34	19.73
	30~60	5.57	0.53	59.01	0.20	16.28
裸露对照 Bare land	60~90	4.27	0.45	29.61	0.25	5.62
	0~30	11.38	0.53	60.41	0.24	19.86
	30~60	8.63	0.38	61.11	0.19	17.80
	60~90	5.24	0.38	52.50	0.18	5.61

### 1.3 观测指标与方法

鉴于3个试验小区土壤氮素背景值含量较低(表1),于2015年5月22日参照当地花生旱坡地氮肥施用标准施以尿素 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (约合总氮 $140\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ),施肥后开展逐场次自然降雨条件下的氮素随分层径流输出浓度和输出通量的试验观测,观测周期为2015年5月22日—2016年5月21日。降雨量采用试验区旁设置的虹吸式自计雨量计进行监测;径流量通过径流池池壁的搪瓷水尺读数,由预先率定的公式计算得到;每次产流结束后,将各径流池中的水充分搅拌均匀后迅速采集500 mL水样于塑料瓶中,现场加酸稳定立即带回实验室置于 $4^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存,在48 h内分析完毕,主要测定总氮含量 $\rho(\text{TN})$ 、溶解态总氮含量 $\rho(\text{DTN})$ 、溶解态无机氮含量 $\rho(\text{DIN})$ 、铵态氮含量 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 和硝态氮含量 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 等指标。分析检测时,首先将水样充分摇匀取适量检测 $\rho(\text{TN})$ (含颗粒态和溶解态),然后将剩余水样经 $0.45\ \mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤后测定溶解态总氮、铵态氮和硝态氮质量浓度。 $\rho(\text{TN})$ 和 $\rho(\text{DTN})$ 采用碱性过硫酸钾氧化—紫外分光光度法测定; $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 采用水杨酸分光光度法测定; $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 采用硫酸肼还原法测定<sup>[11, 17, 25]</sup>。

### 1.4 数据整理与计算

由于各试验小区侵蚀泥沙量低,文中 $\rho(\text{TN})$ 是指径流中溶解态和悬浮颗粒态氮量,未涉及推移质泥沙所吸附的氮量;因 $\rho(\text{NO}_2^--\text{N})$ 较低,故忽略不计。 $\rho(\text{DON})$ (溶解态有机氮质量浓度,  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )、 $\rho(\text{PN})$ (悬浮泥沙颗粒态氮质量浓度,  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )、 $\rho(\text{DIN})$ (溶解态无机氮质量浓度,  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )通过计算得到:

$$\rho(\text{DON})=\rho(\text{DTN})-\rho(\text{DIN}) \quad (1)$$

$$\rho(\text{PN})=\rho(\text{TN})-\rho(\text{DTN}) \quad (2)$$

$$\rho(\text{DIN})=\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})+\rho(\text{NO}_3^--\text{N}) \quad (3)$$

各分层径流不同形态氮输出通量计算公式如下:

$$W_{kj}=\sum_{i=1}^{N_p} 10 \frac{C_{ikj} \times Q_{ik}}{A} \quad (4)$$

式中,  $i=1, 2, \dots, N_p$ , 表示第 $i$ 次降雨;  $N_p$ 为总降

雨次数;  $W_{kj}$ 为第 $k$ 类径流第 $j$ 种形态氮的输出通量,  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;  $C_{ikj}$ 表示第 $i$ 次降雨、第 $k$ 类径流、第 $j$ 种形态氮输出的质量浓度,  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $Q_{ik}$ 为第 $i$ 次降雨、第 $k$ 类径流所对应的径流量,  $\text{m}^3$ ;  $A$ 为试验小区的面积, 本文为 $75\ \text{m}^2$ 。

## 2 结果

### 2.1 径流液中不同形态氮浓度

本文采用的数据是2015年5月22日—2016年5月21日28次自然降雨产流事件下采集水样的监测结果。试验观测期总降雨量为 $1\ 246\ \text{mm}$ , 植草覆盖小区地表径流、30和60 cm壤中流以及105 cm壤中流产流量分别为 $28.94$ 、 $21.06$ 、 $13.82$ 、 $393.0\ \text{mm}$ ; 干草覆盖小区地表径流、30和60 cm壤中流以及105 cm壤中流产流量分别为 $27.48$ 、 $39.36$ 、 $20.51$ 、 $647.1\ \text{mm}$ ; 裸露对照小区分别为 $89.97$ 、 $17.89$ 、 $10.18$ 、 $473.9\ \text{mm}$ (图1)。

试验观测期不同处理各分层径流中氮素输出质量浓度的平均值如表2所示。由表2可知, 植草覆盖坡地径流中不同形态氮输出浓度总体呈现出随土层深度的增加而减小的趋势, 除 $\rho(\text{PN})$ 外, 其壤中流输出的 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{DIN})$ 和 $\rho(\text{DON})$ 分别为地表径流氮素输出值的 $36.5\% \sim 56.4\%$ 、 $23.8\% \sim 47.0\%$ 和 $10.5\% \sim 46.5\%$ ; 干草覆盖坡地径流中不同形态氮输出浓度呈现出随土层深度的增加而增大的趋势, 其壤中流输出的 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{DIN})$ 、 $\rho(\text{DON})$ 和 $\rho(\text{PN})$ 分别为地表径流氮素输出值的 $2.72$ 倍 $\sim 8.16$ 倍、 $5.07$ 倍 $\sim 14.55$ 倍、 $1.83$ 倍 $\sim 8.62$ 倍和 $1.09$ 倍 $\sim 2.94$ 倍; 裸露坡地径流中输出的 $\rho(\text{TN})$ 和 $\rho(\text{DIN})$ 也呈现出随土层深度的增加而增大的趋势, 其壤中流输出的 $\rho(\text{TN})$ 和 $\rho(\text{DIN})$ 分别为地表径流氮素输出值的 $1.59$ 倍 $\sim 4.38$ 倍和 $5.01$ 倍 $\sim 15.04$ 倍, 但裸露坡地各分层径流中 $\rho(\text{DON})$ 和 $\rho(\text{PN})$ 随土层深度变化无明显规律。

从处理类型来看(表2), 总体上植草覆盖小区的氮素浓度低于裸露对照小区, 而干草覆盖小区的氮素浓度高于裸露对照小区。可见, 保留草被覆盖对于坡地径流氮素浓度有着明显的削减效应, 而采取干草覆盖的坡地有增大氮素径流损失尤其是深层损失的风险。

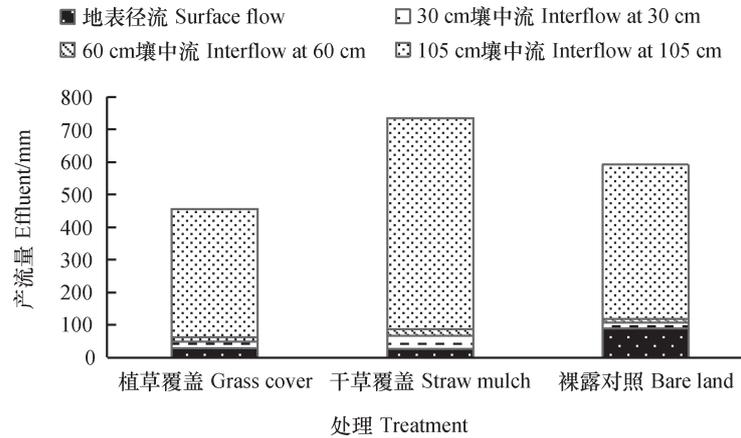


图1 试验小区分层径流输出量

Fig. 1 Runoff from the plot relative to treatment and soil depth

表2 分层径流不同形态氮素输出质量浓度平均值

Table 2 Mean mass concentration of different fractions of nitrogen in runoff relative to soil depth/(mg·L<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	分层径流 Surface/Surface runoff Inerflow	$\rho$ (TN)	$\rho$ (DIN)	$\rho$ (DON)	$\rho$ (PN)
植草覆盖 Grass cover	地表径流Surface runoff	2.237de	1.039e	0.674b	0.523c
	30 cm壤中流 Interflow at 30 cm	1.144e	0.377e	0.313b	0.454c
	60 cm壤中流 Interflow at 60 cm	1.261e	0.488e	0.071b	0.702c
	105 cm壤中流 Interflow at 105 cm	0.816e	0.248e	0.178b	0.390c
干草覆盖 Straw mulch	地表径流Surface runoff	2.643de	1.011e	0.362b	1.269c
	30 cm壤中流 Interflow at 30 cm	7.177c	5.128d	0.663b	1.387bc
	60 cm壤中流 Interflow at 60 cm	10.39b	7.790c	0.875b	1.722ab
	105 cm壤中流 Interflow at 105 cm	21.56a	14.70a	3.125a	3.735a
裸露对照 Bare land	地表径流Surface runoff	2.757e	0.640e	0.421b	1.695c
	30 cm壤中流 Interflow at 30 cm	4.374d	3.476d	0.052b	0.846c
	60 cm壤中流 Interflow at 60 cm	4.659cd	3.204d	0.184b	1.272c
	105 cm壤中流 Interflow at 105 cm	12.09b	9.626b	0.941b	1.518bc

注：不同小写字母表示同一列中不同分层径流处理间在5%水平差异显著， $\rho$  (TN)、 $\rho$  (DIN)、 $\rho$  (DON)、 $\rho$  (PN) 分别表示总氮、溶解态无机氮、溶解态有机氮和悬浮泥沙颗粒态氮质量浓度 Note: Different letters in the same column indicate significant difference between treatments at 5% level, and  $\rho$  (TN),  $\rho$  (DIN),  $\rho$  (DON) and  $\rho$  (PN) stands for mass concentrations of total nitrogen, dissolved inorganic nitrogen, dissolved organic nitrogen, and particulate nitrogen, respectively

## 2.2 氮随径流垂向分层输出通量

试验观测期不同处理各分层径流的氮素输出通量如图2所示。可以看出，无论何种覆盖措施，红壤坡地105 cm壤中流中TN、DIN、DON和PN输出通量分别占径流输出总通量的76.6%~95.9%、78.0%~97.3%、72.9%~96.6%和71.8%~94.4%；30和60 cm壤中流中TN、DIN、DON和PN输出通量分别占径流输出总通量的1.3%~5.0%、0.4%~4.1%、

1.0%~6.0%和2.1%~4.8%；地表径流中TN、DIN、DON和PN输出通量分别占0.5%~15%、0.4%~21.1%、0.2%~16.8%和1.3%~23.2%。这表明不同形态氮径流输出均以105 cm壤中流为主，占径流输出总通量的71%以上，而地表径流和其他层次壤中流输出分别不足23%和6%。

从处理类型来看（图2），试验观测期3种处理的TN、DIN、DON和PN输出总通量由大到小排序

为干草覆盖、裸露对照、植草覆盖。由于径流中氮输出通量与产流量及其氮质量浓度相关，不同处理

间径流中的氮输出通量差异与不同处理间产流差异和氮质量浓度差异类似。

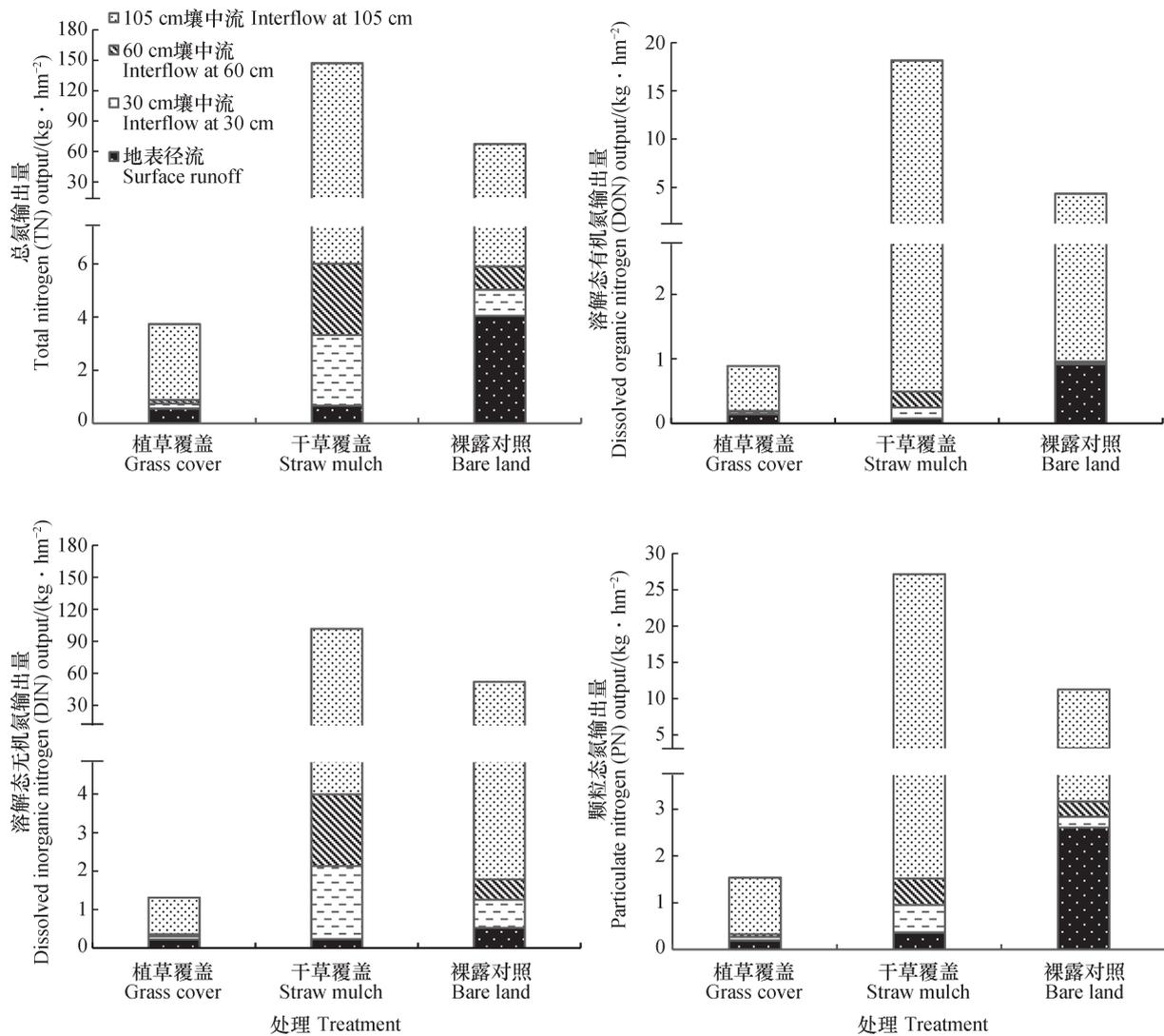


图2 分层径流不同形态氮素输出通量

Fig. 2 Output flux of different nitrogen fractions in runoff relative to soil depth

### 2.3 氮随径流垂向分层输出形态及其贡献

坡地径流中的氮素通常以溶解态和颗粒态的形式迁移输出。从总氮输出形式来看 (表3), 裸露红壤坡地地表径流输出的氮以泥沙颗粒吸附为主, 占地表径流TN输出通量的64.4%; 采取死地被物覆盖处理后, 泥沙颗粒吸附氮PN的输出比例下降至54.2%, 与径流溶解态总氮DTN的输出比例 (45.9%) 相差不明显; 而采取活地被物覆盖处理后, DTN为地表径流氮输出的主要形式, 占TN输出通量的64.9%。对于壤中流, 3种处理下径流中54.8%~86.9%的氮以DTN输出, 表明壤中流氮的

输出均以径流溶解态为主, 且干草覆盖和裸露处理下壤中流的DTN输出通量高于植草覆盖处理, 这与干草覆盖和裸露处理下壤中流中DTN输出质量浓度明显高于植草覆盖处理有关。

上述分析表明, 径流溶解态携带是红壤坡地径流尤其是壤中流氮素输出的主要形式, 故进一步分析溶解态总氮DTN的输出形态。根据表4可知, 对于地表径流, 裸露处理地表径流中DTN输出以有机态为主, 约占64%; 采取死地被物覆盖和活地被物覆盖措施后, DTN随地表径流输出则以无机态为主, 占60%~76%左右。对于各层次

表3 总氮随各分层径流输出形态

Table 3 Composition of TN in runoff relative to soil depth

处理 Treatment	分层径流 Surface runoff/Inerflow	溶解态总氮 输出量 DTN output	颗粒态氮 输出量 PN output	占总氮的比例 Percentage of TN	
		/( kg·hm <sup>-2</sup> )	/( kg·hm <sup>-2</sup> )	DTN	PN
植草覆盖 Grass cover	地表径流Surface runoff	0.36	0.20	64.9	35.1
	30 cm壤中流 Interflow at 30 cm	0.12	0.07	63.1	36.9
	60 cm壤中流 Interflow at 60 cm	0.07	0.06	54.8	45.2
	105 cm壤中流 Interflow at 105 cm	1.65	1.21	57.8	42.2
	总径流 Total runoff	2.20	1.53	59.0	41.0
干草覆盖 Straw mulch	地表径流Surface runoff	0.31	0.36	45.9	54.2
	30 cm壤中流 Interflow at 30 cm	2.07	0.59	77.8	22.2
	60 cm壤中流 Interflow at 60 cm	2.12	0.57	78.8	21.2
	105 cm壤中流 Interflow at 105 cm	115.5	25.64	81.8	18.2
	总径流 Total runoff	112.0	27.16	81.5	18.5
裸露对照 Bare land	地表径流Surface runoff	1.44	2.61	35.6	64.4
	30 cm壤中流 Interflow at 30 cm	0.75	0.23	76.5	23.6
	60 cm壤中流 Interflow at 36 cm	0.55	0.33	62.7	37.4
	105 cm壤中流 Interflow at 105 cm	53.56	8.08	86.9	13.1
	总径流 Total runoff	56.30	11.24	83.4	16.6

壤中流, 3种处理下DTN随径流均以无机态输出为主, DIN占57.8%~97.1%, 且干草覆盖和裸露处理下各层次壤中流中DIN输出量均高于植草覆盖处理, 这与干草覆盖和裸露处理下各层壤中流中输出的 $\rho$ (DIN)尤其是 $\rho$ (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)的浓度明显高于植草覆盖处理有关。在DIN中, 由于NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N更易迁移, 各分层径流输出的 $\rho$ (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)均要显著高于 $\rho$ (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N), 植草覆盖、干草覆盖和裸露处理下NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N输出量分别为NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N输出量的2.89倍、72.79倍、15.37倍。

此外, 从不同组分总氮TN的输出形态来看(表3和表4), 对于干草覆盖和裸露处理小区, 监测期内NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N是壤中流氮素流失的主要形态(占TN流失的56.2%~76.7%), 除去占有很少比例的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N外(不足5%), 其余为PN(占TN流失的13.1%~37.4%)和DON(占TN流失的1.8%~12.5%)。但对于植草覆盖处理小区, 监测期内壤中流中PN占TN流失的39.2%~45.2%, 其次为NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和DON, 分别占TN流失的24.1%~31.6%和10.6%~24.4%; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N比例较少, 为

9.3%~15.6%。这表明3种处理下壤中流TN输出除DIN外还有DON和PN。

### 3 讨论

#### 3.1 氮随径流垂向分层输出形态特征

国内外有关坡地氮素流失途径和形态的研究较多<sup>[26-31]</sup>, 但这些研究主要集中在地表径流, 将氮素在地表和地下各层综合分析其流失途径和形态的研究还较少。本研究利用土壤径流收集系统详细分析了自然降雨条件下红壤坡地氮素随地表径流和壤中流的输出特征, 有助于深化对氮素地表及深层流失规律的理解。本研究结果表明, 在侵蚀不明显的第四纪红壤坡地, 氮素主要随径流尤其是壤中流流失, 这与前人<sup>[23,26-27]</sup>已有研究结论相似, 他们发现: 在覆盖度较大、少量或无侵蚀发生的土地利用类型下, 由于其侵蚀泥沙量少, 径流成为氮素等养分流失的主要途径; 氮素流失不仅体现在地表径流, 更多地还体现在壤中流。百喜草根系较发达, 深达80 cm左右, 受根系吸收土壤养分的影响, 植

表4 溶解态总氮 (DTN) 随各分层径流输出形态

Table 4 Composition of DTN in runoff relative to soil depth

处理 Treatment	分层径流 Surface runoff/Inerflow	不同组分的DTN输出量 Fractions of DTN output / ( kg·hm <sup>-2</sup> )				占DTN比例 Percentage of DTN /%		占TN比例 Percentage of TN /%		
		DIN				DIN	DON	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	DON
		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	小计 Sub-total	DON					
植草覆盖 Grass cover	地表径流 Surface runoff	0.03	0.19	0.22	0.14	60.7	39.3	5.9	33.5	25.5
	30 cm壤中流 Interflow at 30 cm	0.02	0.06	0.08	0.04	68.0	32.0	9.8	31.6	19.5
	60 cm壤中流 Interflow at 60 cm	0.02	0.04	0.06	0.01	80.7	19.3	15.6	28.6	10.6
	105 cm壤中流 Interflow at 105 cm	0.27	0.69	0.95	0.70	57.8	42.2	9.3	24.1	24.4
	总径流 Total runoff	0.34	0.97	1.31	0.89	59.5	40.5	9.0	26.0	23.8
干草覆盖 Straw mulch	地表径流 Surface runoff	0.07	0.16	0.23	0.07	75.7	24.3	10.1	24.7	11.1
	30 cm壤中流 Interflow at 30 cm	0.11	1.79	1.90	0.17	91.8	8.2	4.3	67.1	6.4
	60 cm壤中流 Interflow at 60 cm	0.02	1.85	1.87	0.25	88.3	11.7	0.7	68.9	9.2
	105 cm壤中流 Interflow at 105 cm	1.18	96.65	97.83	17.66	84.7	15.3	0.8	68.5	12.5
	总径流 Total runoff	1.38	100.5	101.8	18.15	84.9	15.1	0.9	68.3	12.3
裸露对照 Bare land	地表径流 Surface runoff	0.20	0.33	0.52	0.92	36.3	63.7	4.9	8.0	22.7
	30 cm壤中流 Interflow at 30 cm	0.02	0.71	0.73	0.02	96.9	3.1	1.8	72.3	2.4
	60 cm壤中流 Interflow at 60 cm	0.04	0.49	0.53	0.02	97.1	2.9	4.7	56.2	1.8
	105 cm壤中流 Interflow at 105 cm	2.92	47.25	50.17	3.39	93.7	6.3	4.7	76.7	5.5
	总径流 Total runoff	3.17	48.78	51.95	4.35	92.3	7.7	4.7	72.2	6.4

百喜草覆盖坡地径流中不同形态氮输出浓度总体表现为随土层深度的增加而减小；通常土壤中不同形态氮素的淋溶损失强度由大至小依次为硝态氮、铵态氮、有机氮，本研究中干草覆盖和裸露坡地移动性氮素输出浓度表现为随土层深度的增加而增大，这主要与氮素发生淋溶损失下移有关。

至于氮素流失形态，已有研究表明，氮素随地表径流迁移输出既有以泥沙颗粒吸附携带为主的也有以径流溶解携带为主的，而溶解态氮随地表径流迁移输出既有以有机氮为主的也有以无机氮为主的，在不同的土地利用方式等条件下，坡地氮素随地表径流迁移输出的主要形式各不相同<sup>[28-31]</sup>。本研究也发现红壤坡地氮素随地表径流迁移输出的上述特征，但还发现总氮深层流失（随壤中流输出）除无机氮外还有溶解态有机氮和泥沙颗粒态氮，这与高忠霞等<sup>[32]</sup>利用大型回填土渗漏池研究得出淋溶水样中除无机氮外基本以溶解态有机氮为主的试验结果不完全一致，主要是因为高忠霞等<sup>[32]</sup>仅考

虑无植被覆盖的裸地且未考虑悬移泥沙颗粒态氮。

### 3.2 覆盖方式对各分层径流不同形态氮输出的影响

干草覆盖和植草覆盖是拦截坡面径流、增加水分入渗、减少地表养分流失的常见水土保持措施，已被广泛应用<sup>[21,33]</sup>。近年来，有学者<sup>[34-35]</sup>研究发现，覆盖措施、植物篱等水土保持措施在减少养分地表流失的同时，也同样增加了养分渗漏损失。但本研究仅在干草覆盖小区中发现氮素渗漏损失增加的现象，在覆盖度大的植草覆盖小区则不然。本研究表明：与裸露对照相比，植草覆盖所产生的地表径流及其不同形态氮流失的拦截能力与干草覆盖相当，但干草覆盖和植草覆盖对壤中流及其氮流失的作用不同，即保留草被覆盖对于坡地壤中流量及其氮流失有着明显的削减效应，而采取干草覆盖的坡地有增大氮深层损失的风险（表5）。草被对于坡地的氮素保持具有十分重要的价值：一方面，草被覆盖可以有效减少降雨对于坡面土壤打击，拦

蓄径流, 减少径流的氮素质量浓度, 降低氮素流失通量; 另一方面, 草被可以有效吸收坡地土壤中多余的溶解态氮素, 减少流失。可见, 单纯采用干草

覆盖措施虽能有效控制地表养分流失, 但又引起了渗漏损失增加等问题。因此, 应该综合多种措施, 形成一种或几种综合性的覆盖模式是十分必要的。

表5 不同覆盖措施对各分层径流不同形态氮的拦截效应

Table 5 Interception effect of different nitrogen fractions in runoff on grass cover/straw mulch plot /%

处理 Treatment	对地表径流及其氮素流失的拦截效应 Interception effects on surface runoff and nitrogen loss					对壤中流及其氮素流失的拦截效应 Interception effects on interflow and nitrogen loss				
	地表径流 Surface runoff	TN	DIN	DON	PN	壤中流 Interflow	TN	DIN	DON	PN
	植草覆盖 <sup>①</sup>	67.9	86.2	58.1	84.5	92.5	14.7	95.0	97.9	78.2
干草覆盖 <sup>②</sup>	69.5	83.5	55.7	91.9	86.1	-40.9	-130.7	-97.5	-426.9	-210.5

注: 以裸露处理为对照 Note: with the bare land as control. ①Grass cover, ②Straw mulch

## 4 结 论

不同形态氮径流输出浓度在红壤干草覆盖坡地呈现出随土层深度的增加而增大的趋势, 而在植草覆盖坡地总体呈现出随土层深度的增加而减小的趋势。控制红壤坡地各层次壤中流的形成和减少硝态氮淋溶损失下移是减少农业氮素流失的关键所在。与裸露对照相比, 保留草被覆盖对于红壤坡地的氮素保持具有重要意义, 主要是通过草被覆盖削减径流氮素浓度和拦蓄径流产生的; 而采取干草覆盖的坡地有增大氮素径流损失尤其是深层损失的风险。因此, 在红壤坡地农林开发中, 活地被物覆盖措施和死地被物覆盖措施相结合, 才能达到保持土壤肥力、减少侵蚀和预防农业面源污染的效果。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Wang T, Zhu B, Kuang F H. Reducing interflow nitrogen loss from hillslope cropland in a purple soil hilly region in southwestern China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 93 ( 3 ) : 285—295
- [ 2 ] Ftd V, van Groenigen J W, Hoffland E, et al. Nitrogen losses from two grassland soils with different fungal biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43 ( 5 ) : 997—1005
- [ 3 ] Everts C, Kanwar R S. Estimating preferential flow to a subsurface drain with tracers. *Transactions of the ASAE*, 1990, 33 ( 2 ) : 451—457
- [ 4 ] Meerveld H J T V, McDonnell J J. Temporal variability of subsurface storm flow: 1. A 147-storm analysis of the Panola hillslope. *Water Resources Research*, 2006, 42 ( 2 ) : 1—11
- [ 5 ] Uchida T, Tromp V M I, McDonnell J J. The role of lateral pipe flow in hillslope runoff response: An intercomparison of non-linear hillslope response. *Journal of Hydrology*, 2005, 311 ( 1 ) : 117—133
- [ 6 ] Du E H, Jackson C R, Klaus J, et al. Subsurface flow dynamics on a low relief forested hillslope: Lots of fill, little spill. *Journal of Hydrology*, 2016, 534: 648—658
- [ 7 ] Samper J, Pisani B, Marques J E. Hydrological models of subsurface flow in three Iberian mountain basins. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73 ( 6 ) : 2645—2656
- [ 8 ] 郭新送, 丁方军, 宋付朋, 等. 质量指数表征模拟降雨下土壤坡面养分的流失特性. *土壤*, 2016, 48 ( 5 ) : 1000—1006
- Guo X S, Ding F J, Song F P, et al. Quality indices on nutrient loss characteristics of soil slope under simulated rainfall ( In Chinese ). *Soils*, 2016, 48 ( 5 ) : 1000—1006
- [ 9 ] Chandna P, Khurana M L, Ladha J K, et al. Spatial and seasonal distribution of nitrate-N in groundwater beneath the rice-wheat cropping system of India: A geospatial analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 178 ( 1/4 ) : 545—562
- [ 10 ] 马美景, 王军光, 郭忠录, 等. 放水冲刷对红壤坡面侵蚀过程及溶质迁移特征的影响. *土壤学报*, 2016, 53 ( 2 ) : 365—374
- Ma M J, Wang J G, Guo Z L, et al. Research on sediment and solute transport on red soil slope under simultaneous influence of scouring flow ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 ( 2 ) :

- 365—374
- [ 11 ] 林超文, 罗春燕, 庞良玉, 等. 不同雨强和施肥方式对紫色土养分损失的影响. 中国农业科学, 2011, 44 ( 9 ) : 1847—1854  
Lin C W, Luo C Y, Pang L Y, et al. Effect of different fertilization methods and rain intensities on soil nutrient loss from a purple soil ( In Chinese ). *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44 ( 9 ) : 1847—1854
- [ 12 ] 吴希媛, 张丽萍, 张妙仙, 等. 不同雨强下坡地氮流失特征. 生态学报, 2007, 27 ( 11 ) : 4576—4582  
Wu X Y, Zhang L P, Zhang M X, et al. Research on characteristics of nitrogen loss in stoping land under different rainfall intensities ( In Chinese ). *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 ( 11 ) : 4576—4582
- [ 13 ] 周林飞, 郝利朋, 孙中华. 辽宁浑河流域不同土地类型地表径流和壤中流氮、磷流失特征. 生态环境学报, 2011, 20 ( 4 ) : 737—742  
Zhou L F, Hao L P, Sun Z H. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses through surface flow and interflow on different types of land in Liaoning Hunhe basin ( In Chinese ). *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20 ( 4 ) : 737—742
- [ 14 ] Li X Y, Contreras S, Sole B A, et al. Controls of infiltration—runoff processes in Mediterranean karst rangelands in SE Spain. *Catena*, 2011, 86 ( 2 ) : 98—109
- [ 15 ] 郑海金, 胡建民, 黄鹏飞, 等. 红壤坡耕地地表径流与壤中流氮磷流失比较. 水土保持学报, 2014, 28 ( 6 ) : 41—45, 70  
Zheng H J, Hu J M, Huang P F, et al. Comparative study of nitrogen and phosphorus through surface-flow and interflow on red soil farmland ( In Chinese ). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28 ( 6 ) : 41—45, 70
- [ 16 ] Jia H Y, Lei A L, Lei J S, et al. Effects of hydrological processes on nitrogen loss in purple soil. *Agricultural Water Management*, 2007, 89 ( 1 ) : 89—97
- [ 17 ] 林超文, 庞良玉, 罗春艳, 等. 平衡施肥及雨强对紫色土养分流失的影响. 生态学报, 2009, 29 ( 10 ) : 5552—5560  
Lin C W, Pang L Y, Luo C Y, et al. Effect of balanced fertilization and rain intensity on nutrient losses from a purple soil in Sichuan ( In Chinese ). *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29 ( 10 ) : 5552—5560
- [ 18 ] 徐勤学, 王天巍, 李朝霞, 等. 紫色土坡地壤中流特征. 水科学进展, 2010, 21 ( 2 ) : 229—234  
Xu Q X, Wang T W, Li Z X, et al. Characteristics of interflow in purple soil of hillslope ( In Chinese ). *Advances in Water Science*, 2010, 21 ( 2 ) : 229—234
- [ 19 ] 江叶枫, 叶英聪, 郭熙, 等. 江西省耕地土壤氮磷生态化学计量空间变异特征及其影响因素. 土壤学报, 2017, 54 ( 6 ) : 1527—1539  
Jiang Y F, Ye Y C, Guo X, et al. Spatial variability of ecological stoichiometry of soil nitrogen and phosphorus in farmlands of Jiangxi Province and its influencing factors ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 ( 6 ) : 1527—1539
- [ 20 ] 赵其国. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控. 北京: 科学出版社, 2002  
Zhao Q G. Temporal and spatial variability, mechanism and regulation of soil degradation in red soil region of eastern China ( In Chinese ). Beijing: Science Press, 2002
- [ 21 ] 谢颂华, 涂安国, 莫明浩, 等. 自然降雨事件下红壤坡地壤中流产流过程特征分析. 水科学进展, 2015, 26 ( 4 ) : 526—534  
Xie S H, Tu A G, Mo M H, et al. Analysis on the characteristic of interflow production processes on red soil slopes in the case of natural rainfall events ( In Chinese ). *Advances in Water Science*, 2015, 26 ( 4 ) : 526—534
- [ 22 ] 褚利平, 王克勤, 宋泽芬, 等. 烤烟坡耕地壤中流氮、磷浓度的动态特征. 农业环境科学学报, 2010, 29 ( 7 ) : 1346—1354  
Chu L P, Wang K Q, Song Z F, et al. Dynamics of nitrogen and phosphorus in tobacco slope cropland interflow ( In Chinese ). *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29 ( 7 ) : 1346—1354
- [ 23 ] 莫明浩, 谢颂华, 张杰, 等. 红壤坡地氮溶质分层输出特征试验研究. 水利学报, 2016, 47 ( 7 ) : 924—933  
Mo M H, Xie S H, Zhang J, et al. Environmental research on characteristics of nitrogen output from different layers in red soil slopes ( In Chinese ). *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47 ( 7 ) : 924—933
- [ 24 ] Liu Y J, Yang J, Hu J M, et al. Characteristics of the surface-subsurface flow generation and sediment yield to the rainfall regime and land-cover by long-term in-situ observation in the red soil region, Southern China. *Journal of Hydrology*, 2016, 539: 457—467
- [ 25 ] 王其宝. 硫酸脲还原NEDD光度法测定地表水中硝酸盐. 理化检验 ( 化学分册 ), 1994, 30 ( 2 ) : 98, 101

- Wang Q B. Spectrophotometric determination of nitrate in surface water by hydrazine sulfate reduction NEDD (In Chinese). *Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis)*, 1994, 30 (2): 98, 101
- [26] 王兴祥, 张桃林. 红壤旱坡地农田生态系统养分循环和平衡. *生态学报*, 1999, 19 (3): 335—341  
Wang X X, Zhang T L. Nutrient cycling and balance of sloping upland ecosystems on red soil (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19 (3): 335—341
- [27] 王洪杰, 李宪文, 史学正, 等. 四川紫色土区小流域土壤养分流失初步研究. *土壤通报*, 2002, 33 (6): 441—444  
Wang H J, Li X W, Shi X Z, et al. Study on soil erosion of the small watershed in the purple area of Sichuan (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33 (6): 441—444
- [28] 袁东海, 王兆骞, 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  
Yuan D H, Wang Z Q, Chen X, et al. Characteristics of nitrogen loss from sloping field in red soil area under different cultivation practices (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13 (7): 863—866
- [29] 张展羽, 左长清, 刘玉含, 等. 水土保持综合措施对红壤坡地养分流失作用过程研究. *农业工程学报*, 2008, 24 (11): 41—45  
Zhang Z Y, Zuo C Q, Liu Y H, et al. Process of nutrient loss of red-soil slope land under comprehensive soil and water conservation measures (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24 (11): 41—45
- [30] 王全九, 穆天亮, 王辉, 等. 土壤溶质随径流迁移基本特征分析. *水土保持研究*, 2008, 15 (6): 38—41  
Wang Q J, Mu T L, Wang H, et al. Features analysis of solute in soils transfer with surface runoff (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15 (6): 38—41
- [31] 陈晓安, 杨洁, 郑大辉, 等. 赣北第四纪红壤坡耕地水土及氮磷流失特征. *农业工程学报*, 2015, 31 (17): 162—167  
Chen X A, Yang J, Zheng T H, et al. Sediment, runoff, nitrogen and phosphorus losses of sloping cropland of quaternary red soil in northern Jiangxi (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (17): 162—167
- [32] 高忠霞, 杨学云, 周建斌, 等. 小麦-玉米轮作期间不同施肥处理氮素的淋溶形态及数量. *农业环境科学学报*, 2010, 29 (8): 1624—1632  
Gao Z X, Yang X Y, Zhou J B, et al. Forms and amounts of nitrogen in leachates affected by different fertilizations after one wheat-maize rotation (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29 (8): 1624—1632
- [33] Bosch D D, Truman C C, Potter T L, et al. Tillage and slope position impact on field-scale hydrologic processes in the South Atlantic Coastal Plain. *Agricultural Water Management*, 2012, 111: 40—52
- [34] Owino J O, Owido S F O, Chemelil M C. Nutrients in runoff from a clay loam soil protected by narrow grass strips. *Soil and Tillage Research*, 2006, 88 (1/2): 116—122
- [35] Wanwisa P, Thanuchai K, Thomas H H, et al. Nitrogen losses by erosion and leaching in hillside cropping systems of northeast Thailand as affected by soil conservation measures: A case study. *Conference on International Agricultural Research for Development, Stuttgart-Hohenheim, October 11—13, 2005. Berlin: Tropentag*

## Nitrogen Output through Runoff on Red Soil Slope and Its Composition

ZHENG Haijin ZUO Jichao XI Tonghang NIE Xiaofei WANG Lingyun LIU Zhao

(*Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Jiangxi Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention, Nanchang 330029, China*)

**Abstract** 【Objective】The development of agriculture in the sloping uplands of red soil has been restricted by low water use efficiency, high temperatures and low fertilizer use efficiency. Interflow in the soil has been playing a important role in runoff generation, nutrient loss and soil erosion. Carrying

soil nutrients along, it merges into rainfall-induced runoff, which flows into water bodies, thus causing environmental problems, like waterbody eutrophication. Nitrogen (N) as one of the common soil nutrients causing eutrophication is highly mobile in the soil because it is hardly absorbed and fixed by soil particles, so it moves easily with surface runoff and interflow as its main pathway of migration. Consequently, to study soil nitrogen loss related to the joint effect of surface runoff and interflow on slope lands is of great significance. In some regions, plentiful and concentrated rainfall results in surface runoff and interflow that enhances nutrient migration. Recently, researchers have studied patterns of nitrogen migration in red soil through surface flow and its impacting factors, as well as generation of interflows and its influence on nitrogen output. However, so far little has been reported on investigations that have taken into full account the joint effect of surface flow and interflow on nitrogen migration in red soil. 【Method】 In order to explore characteristics of nitrogen output in sloping uplands of red soil under natural rainfall, large-scale lysimeters were used in a field experiment carried out during the year from May 2015 to May 2016, on a sloping upland of quaternary red soil in Jiangxi, China. The experiment had three treatments, i.e. planted with grass, mulched with straw, and bare land laid out for observation of forms of nitrogen lost with surface flow and interflow (30, 60 and 105 cm) relative to treatment under natural rainfall. 【Result】 Results show: (1) Interflow at 105 cm depth was an important channel of N loss on the slope of red soil where erosion wasn't serious. The interflow in the soil layer 105 cm in depth contributed more than 71% of the total N loss while surface runoff and interflows in the soil layers 30 and 60 cm in depth did less than 23% and 6%, respectively; (2) N in the interflow was mainly in the form of dissolved N, composed principally of dissolved inorganic nitrogen (DIN), especially nitrate nitrogen. The proportion of DTN (dissolved total nitrogen) in TN was 54.8%~86.9% and that of DIN in DTN was 57.8%~97.1% in the interflow. The proportions of various forms of N in the surface runoff varied with the treatment; and (3) Grass coverage effectively reduced N runoff loss, while straw mulch increased the risk of N leaching loss. 【Conclusion】 All these findings in the experiment provide certain scientific support to control of N runoff loss from red soil slopelands by establishing a suitable vegetation cover. The key to reduction of nitrogen loss from agricultural fields is to control the formation of interflow or subsurface runoff in sloping uplands of red soil slope and to reduce content of nitrate nitrogen in interflow.

**Key words** Red soil; Grass cover; Straw mulch; Nitrogen loss; Runoff; Interflow

(责任编辑: 陈荣府)