

紫色土坡耕地硝态氮随壤中流迁移的时空分布模拟

龙天渝^{1,2}, 刘祥章¹, 刘佳^{1,2}

(1.重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2.重庆大学低碳绿色建筑国际联合研究中心, 重庆 400045)

摘要:通过建立紫色土坡耕地耕作层和非耕作层土壤养分淋失的二维对流-弥散模型, 针对全层施肥和基穴施肥两种方式, 数值模拟坡耕地硝态氮淋失的时空分布。模拟结果表明: 紫色土的壤中流发生在土壤饱和后的降雨中后期; 硝态氮淋失在降雨初期全层施肥表现为垂直下渗, 基穴施肥表现为由基穴向周围扩散, 在降雨后期两者的养分淋失情况相似, 壤中流成为硝态氮淋失的主要方式, 并且二者耕作层硝态氮淋失速度均大于非耕作层; 在相同施肥量 ($150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 条件下, 降雨结束后, 全层施肥耕作层土壤硝态氮浓度处于 $0.110 \sim 0.160 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 基穴施肥的硝态氮浓度处于 $0.040 \sim 0.120 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 因而基穴施肥的养分淋失多于全层施肥。

关键词: 紫色土; 施肥方式; 硝态氮淋失; 数值模拟

中图分类号: X501 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)10-1973-06 doi:10.11654/jaes.2015.10.019

Modeling Spatial and Temporal Variation of Nitrate Loss via Interflow in a Sloping Field of Purple Soil

LONG Tian-yu^{1,2}, LIU Xiang-zhang¹, LIU Jia^{1,2}

(1. Key Laboratory of Eco-Environment of Three Gorges Region of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. National Centre for International Research of Low-carbon and Green Buildings, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: A two-dimension convection-dispersion model was established to simulate the transport of nitrate in cultivated and non-cultivated layers in a sloping cropland of purple soil under broadcast incorporated and hole fertilization. Water transport in purple soil could be divided into saturation stage and interflow stage, and the interflow occurred during the middle and later period of rainfall when the soil was saturated. During the early period of rainfall, the loss of nitrate nitrogen was via downward infiltration under broadcast incorporated fertilization, while it was through diffusion from the holes under hole fertilization. During the later period of rainfall, however, losses of nitrate nitrogen were mainly via subsurface flow under both fertilization methods, with faster nitrate leaching in cultivated layer than in non-cultivated layer. At the same amount of fertilizer ($150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), soil nitrate nitrogen concentrations were $0.110 \sim 0.160 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ under broadcast incorporated fertilization, but were $0.040 \sim 0.120 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ under hole fertilization, at the end of raining. The present results indicate that cumulative nitrate nitrogen losses are greater under hole fertilization than under broadcast incorporated fertilization.

Keywords: purple soil; fertilization method; nitrate leaching; numerical simulation

紫色土是三峡库区以及西南地区重要的耕地资源, 且以坡耕地为主。紫色土由紫色页岩发育而成, 孔隙度大、入渗能力强、土层浅, 下伏透水性极弱的泥页岩, 岩土二维结构明显。紫色土坡耕地由于独特的地形和土壤结构, 致使降雨时沿坡向的壤中流在总径流中占有相当的比例^[1]。三峡库区属亚热带湿润季风性气候, 多年平均降雨量约 1130 mm, 年降雨量分配不均, 主要集中在夏季, 多以暴雨或大暴雨的形式出现。

已有研究表明, 氮素随壤中流淋失是紫色土坡耕地氮素流失的主要方式^[2-5], 并已成为长江上游三峡库区水体养分物质的重要来源。目前关于紫色土坡耕地氮素淋失的研究以试验研究为主: 林超文等^[2]和贾海燕等^[6]采用人工降雨试验发现壤中流是紫色土硝态氮的主要水文传输途径; 陈正维等^[7]采用野外径流观测法, 研究自然降雨条件下紫色土坡地氮素随径流流失的特征, 表明壤中流淋溶损失的氮素含量是地表径流氮流失量的 2.74~50.93 倍; 汪涛等^[8-9]通过径流小区试验, 得出有机-无机、氮磷钾肥合理配施有助于显著减少紫色土坡耕地硝态氮淋失; Chambers 等^[10]研究认为施用动物肥料能减少氮素的淋失。至今为止, 关于不同

收稿日期: 2015-04-23

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划重点项目(2011BAD31B03)

作者简介: 龙天渝(1960—), 女, 重庆人, 教授, 博士生导师, 主要从事水污染控制与水环境模拟研究。E-mail: longty128@cqu.edu.cn

施肥情况下氮素淋失过程中氮素随壤中流迁移的时空分布特性,以及耕作层和非耕作层氮素淋失的空间差异等相关研究鲜见报道。

为此,本研究采用数值模拟的方法,通过建立土壤养分淋失的二维对流-弥散模型,采用 Galerkin 有限元法,针对全层施肥和基穴施肥这两种较为常见的施肥方式,对降雨时硝态氮随壤中流迁移的时空分布进行模拟,对耕作层和非耕作层中硝态氮垂向和侧向淋失特性进行探讨,并对坡耕地硝态氮淋失空间分布特性与降雨历时的关系进行分析。以期紫色土区坡耕地合理的施肥方式,减少土壤氮素淋失,防治农业非点源污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数学模型

1.1.1 土壤养分淋失控制方程

假定土壤质地均匀,各向同性,不考虑温度和空气等对土壤水分运移的影响,根据 Darcy 定律和质量守恒定律,可以得出二维渗流的土壤水分运移 Richards 方程^[11-12]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial H}{\partial y}) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

式中: H 为总水头,m; k_x 为 x 方向的渗透系数, $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$; k_y 为 y 方向的渗透系数, $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$; Q 为边界流量, $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$; θ 为体积含水量, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; t 为时间,min。

土壤溶质运移控制方程采用常用的对流-弥散(Convection-Dispersion Equation, CDE)方程。该方程假定土壤质地均匀,不存在离子吸附和反应等过程。

溶质在非饱和土壤中迁移时,二维条件下的对流-弥散方程为^[11-13]:

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} + u_x \frac{\partial C}{\partial x} + u_y \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(\theta D_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\theta D_y \frac{\partial C}{\partial y})$$

式中: C 为溶质浓度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; D_x 、 D_y 分别为 x 、 y 方向水动力弥散系数, $\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$; u_x 、 u_y 分别为 x 、 y 方向水流速度, $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

1.1.2 参数确定

对于溶质硝态氮,上述控制方程中的参数是根据室内试验的结果,采用反演优化法并参考部分文献确定的^[14]。硝态氮的耕作层单宽流量下的纵向弥散度为0.32 cm,横向弥散度为0.003 cm;非耕作层纵向弥散度为0.22 cm,横向弥散度为0.002 cm。选定的耕作层与非耕作层水力参数见表1。

表1 紫色土各土层水力学参数

Table 1 Hydraulic parameters for each layer of purple soil

土层	饱和导水率/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	饱和含水量/ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	残余含水量/ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$
耕作层	1.2×10^{-3}	0.40	0.08
非耕作层	9.8×10^{-4}	0.30	0.06

1.1.3 网格划分与离散

模型的求解采用 Galerkin 有限元法。采用三角形网格对土层区域进行网格划分,网格的等效直径为0.1 m,经网格无关性验证,确定网格数。模型采用 GeoStudio 软件进行数值计算。

1.1.4 模型验证

选取室内试验中没有参与参数率定的试验结果,对所建立模型进行验证。室内试验装置如图1所示,

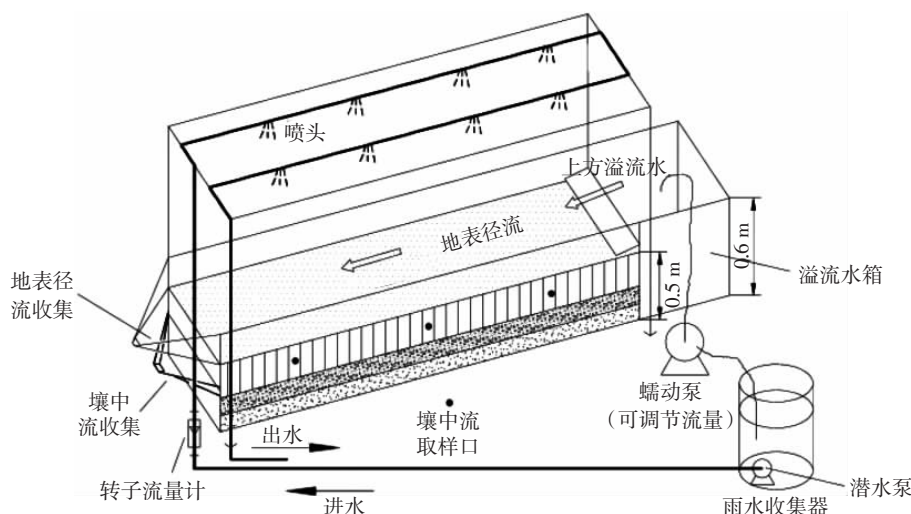


图1 室内试验装置图

Figure 1 Experimental device of artificial rainfall

土槽尺寸为 $1\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),坡度可在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 内任意调节。在装置内填装紫色土,土层分为两层,其中耕作层厚度 20 cm ,非耕作层厚度 30 cm 。试验坡长 1 m ,坡度 15° ,降雨强度为 $80\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,降雨历时 1 h ,模拟施肥选用 KNO_3 ,不考虑根系影响条件下模拟值与实测值的对比如图 2 所示。可以看到,模拟值与实测值变化趋势相同、吻合良好,这为该模型应用于实际坡耕地硝态氮淋失的模拟奠定了基础。

1.2 模拟的坡耕地几何尺寸与条件

三峡库区坡耕地坡度 $10^\circ \sim 25^\circ$ 占大部分^[15],根据实际坡耕地长度以及坡耕地地形地势,本研究建立了

坡长为 9 m 、坡度为 15° 的坡耕地模型进行数值模拟,按距坡顶位置分为坡上($0 \sim 3\text{ m}$)、坡中($3 \sim 6\text{ m}$)、坡下($6 \sim 9\text{ m}$)三部分。模型的初始条件与边界条件为:上表面为大气降雨,底部和左侧表面为零通量,右侧为自由排水。大气降雨边界条件选取三峡库区典型降雨^[16],降雨时间为 2007-05-30,总降雨量为 43.4 mm ,降雨历时 7 h ,最大雨强为 $23.4\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,平均雨强为 $6.2\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,其降雨随时间变化过程如图 3 所示。

施肥方式选取全层施肥及基穴施肥两种,参考当地农田施肥量,确定施肥总量为 $150\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,肥料采用 KNO_3 。全层施肥,初始施肥量为 $0.135\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$;基穴施肥,在土壤表层下 10 cm 处选取 17 个点作为基穴(基穴间距 0.52 m),每个基穴初始肥量为 0.0079 kg 。分别在坡上坡中坡下距表层土壤 20 cm 处选取三个观测点,以研究土壤中壤中流的特性及硝态氮淋失情况。

2 结果与讨论

2.1 紫色土坡耕地土壤水分运移特性分析

不同时刻坡耕地压强水头(m)随降雨历时变化的空间分布如图 4,图中箭头表示水流速度矢量,表征土壤水分运动。可以看出,降雨初期(11.4 min),速度矢量垂直向下,水分以向下渗透为主,水压等值线彼此基本上为平行的水平线。随着降雨的持续进行(1.26 h),坡耕地坡下部分土壤逐渐饱和,水压不断增加,水分不仅沿垂直下渗,而且也呈现顺坡向下流动,在已饱和土壤的前方水分呈现沿坡逆向非饱和土壤运动,直至坡耕地土壤水分达到饱和。由于土壤下部基质岩的存在,在降雨中后期,水分向下渗透趋势已经很弱,土壤水分主要表现为沿坡向下运移,这是紫色土壤中流的表现形式。

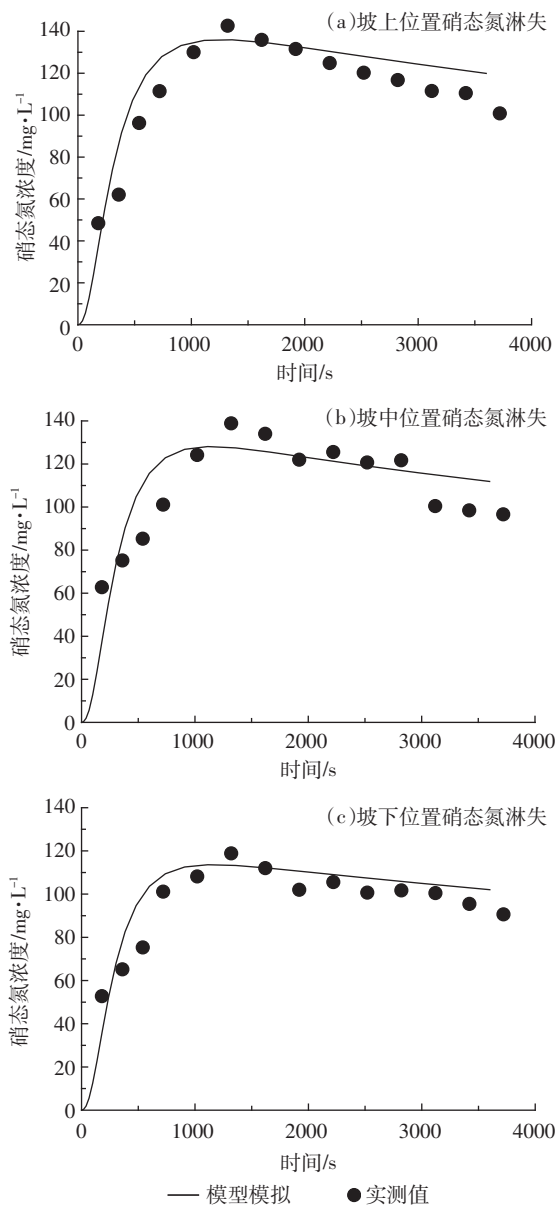


图 2 不同坡位硝态氮淋失模拟值与实测值对比

Figure 2 Comparison of simulated and measured values of nitrate leaching at different slope positions

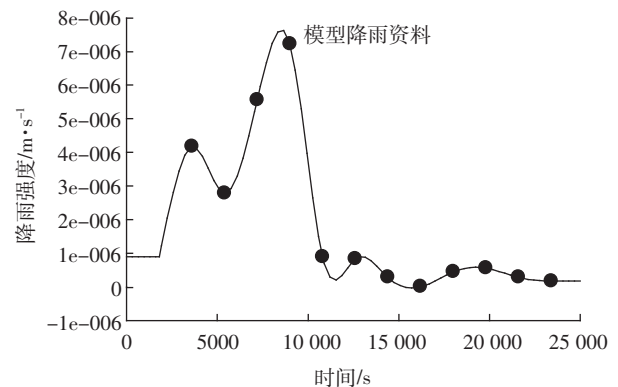


图 3 降雨随时间变化

Figure 3 Temporal variation of rainfall

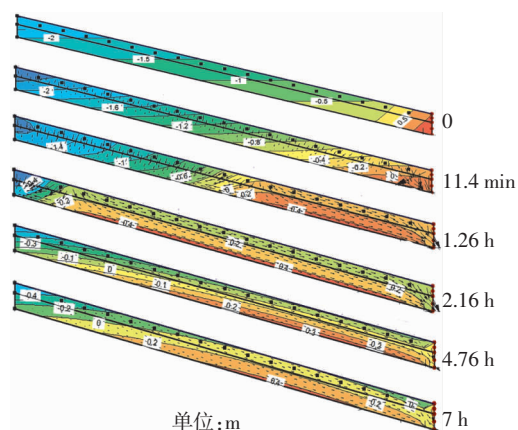


图4 不同时刻压强水头的空间变化

Figure 4 Spatial variation of pressure head at different moments

本次模拟所选降雨雨型为典型的双峰型,降雨初期雨强较大,之后雨强逐渐减弱。结合雨强和土壤水压变化可以看出,前期土壤水压等值线分布较为稀疏,随着降雨强度增大,土壤水压等值线也逐渐密集,而后降雨强度降低,土壤水压等值线也随之稀疏,土壤水压等值线密集程度表现为和降雨强度明显的正相关。

不同坡位中点处的体积含水量随降雨时间的空间分布如图5所示。可以看出,坡下位置初期含水量高于坡中高于坡上,各坡位土壤体积含水量均在降雨初期迅速增加直至饱和,其中各坡位土壤含水量达到饱和时间点分别为坡下45 min,坡中1.43 h,坡上2.16 h。

2.2 两种施肥方式下硝态氮随壤中流迁移特性分析

选取典型时间分析硝态氮迁移情况。不同时刻全层施肥方式下硝态氮浓度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)的空间变化如图6所示。可以看出,在降雨初期(11.4 min),全层施肥方式的硝态氮浓度等值线基本与坡面平行,说明在降雨初期硝态氮主要表现为下渗状态,并未随坡向下运

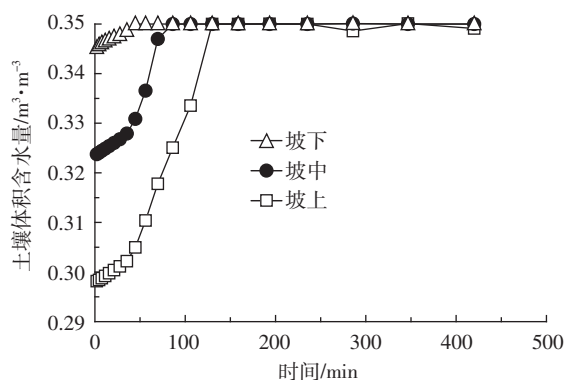


图5 不同坡位的土壤含水量变化

Figure 5 Changes in soil water content at different slope positions

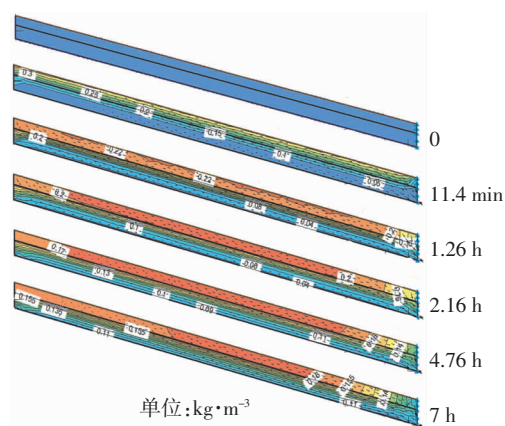


图6 全层施肥硝态氮浓度等值线变化

Figure 6 Variation in leached nitrate concentration isopleth under broadcast incorporated fertilization

移。土壤坡面最高浓度值为 $0.35 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,但此时坡顶和坡脚部分的硝态氮流失分别有延缓和加快的趋势。在降雨1.26 h之后,坡耕地硝态氮淋失浓度开始发生变化,耕作层坡中部的浓度明显高于坡上和坡下,表明耕作层的硝态氮在向土壤深处入渗的同时,开始沿坡向下运移,而非耕作层硝态氮浓度等值线仍沿坡向较为平行,表明此时非耕作层硝态氮沿坡运移不明显,速度远小于耕作层。其原因是耕作层土壤渗透系数相对较大,耕作层土壤先达到饱和,达到饱和后水分开始侧向运移,导致进入非耕作层的水分较少,因此在非耕作层中水分沿侧向运移不明显。汪涛等^[17]的研究也表明入渗能力强的坡地土壤水分侧向运移更大。随着降雨的进行,土壤耕作层硝态氮浓度峰值逐渐沿坡向下移动。在降雨历时7 h后,全层施肥土壤硝态氮浓度基本维持在 $0.110\sim 0.160 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

图7为不同时刻基穴施肥方式下硝态氮浓度

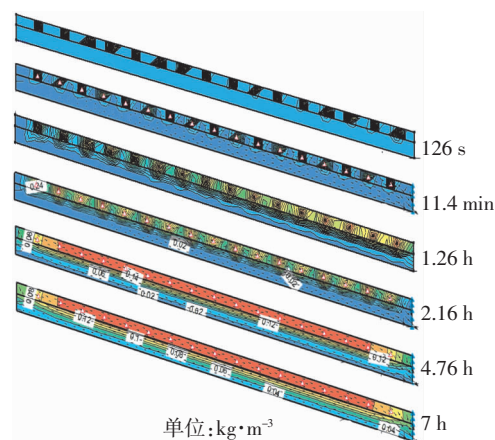


图7 基穴施肥硝态氮淋失浓度等值线变化

Figure 7 Variation in leached nitrate concentration isopleth under hole fertilization

($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)的空间变化。可以看出,在降雨初期(126 s),硝态氮基本集中在基穴附近,扩散还不明显。在 11.4 min 时,各基穴的养分开始由基穴向四周运移,基穴硝态氮浓度水平运移趋势小于垂直运移趋势,并有沿剖面向土壤表层运移的趋势。这是由于硝态氮纵向弥散大于横向弥散,此时水分基本处于垂直运动的状态。随着降雨历时延长,土壤中水分逐渐增多,硝态氮浓度等值线也逐渐向两边扩散,在基穴边缘地带开始出现汇合,非耕作层硝态氮浓度等值线已呈波浪线平行于坡向,并且坡下部分的迁移强度明显大于坡中大于坡上。这可能是因为坡下土壤要比坡中、坡上先达到饱和^[18],而硝态氮的运移依托于水分的运移,而且随着降雨的进行浓度峰值也同样有向坡下移动的趋势。在降雨 7 h 后,基穴施肥下,坡耕地耕作层硝态氮浓度基本保持在 $0.040\sim 0.120\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

通过对不同施肥条件下的浓度空间分布图对比,可以看到,虽然全层施肥和基穴施肥方式硝态氮的淋失过程有较大差异,但总体变化趋势是一样的:两种施肥方式下,紫色土坡耕地耕作层的硝态氮迁移都较非耕作层快;在降雨中后期硝态氮都是以沿坡向下运移为主,其浓度峰值也均沿坡向下迁移,耕作层内硝态氮浓度峰值基本维持在坡中位置。降雨结束后,全层施肥下硝态氮最高浓度为 $0.160\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,基穴施肥下硝态氮最高浓度为 $0.120\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。造成此结果的原因可能是:基穴施肥方式肥料比较集中,浓度梯度较大,水动力弥散系数相对全层施肥大,硝态氮淋失更为迅速,使基穴施肥淋失到非耕作层的硝态氮要大于全层施肥,基穴施肥下硝态氮养分淋失量相对较大。

2.3 硝态氮淋失浓度沿程变化特征分析

图 8 为两种施肥方式下耕作层和非耕作层交界

面各坡位(坡上、坡中、坡下)观察点的硝态氮淋失浓度变化。从图 8a(全层施肥)和图 8b(基穴施肥)的比较发现,尽管施肥方式不同,但各坡位典型点硝态氮浓度变化趋势却相似,均在降雨前中期迅速增加而后衰退,且彼此各坡位典型点间的差异较小。汪涛等^[8]、任秀文等^[19]分别通过小区和室内试验研究也得出类似的硝态氮浓度变化趋势。全层施肥各坡位淋失浓度在 35 min 左右达到最大,为 $0.222\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,此后缓慢下降;而基穴施肥淋失浓度在 27 min 左右达到最大,为 $0.188\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,比全层施肥有所提前,但此后迅速下降继而趋于平稳。造成这一结果的原因一方面可能是由于基穴施肥是在土层内部,硝态氮淋失到交界面路程较短,另一方面可能是基穴施肥硝态氮的浓度梯度相对于全层施肥大。

3 结论

(1)在本次典型降雨条件下,紫色土水分运移分为土壤饱和阶段和壤中流阶段,壤中流发生在土壤饱和后的降雨中后期。

(2)降雨初期全层施肥硝态氮表现为垂直下渗,基穴施肥表现为由基穴向周围扩散,其中纵向弥散强于横向弥散。在降雨后期两者养分淋失情况相似,壤中流成为硝态氮淋失的主要方式,并且耕作层硝态氮淋失速率大于非耕作层。

(3)降雨结束后,全层施肥耕作层硝态氮浓度维持在 $0.110\sim 0.160\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,而基穴施肥维持在 $0.040\sim 0.120\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,基穴施肥的养分淋失多于全层施肥,表明全层施肥相对有助于土壤肥料的保持。

(4)全层施肥和基穴施肥硝态氮淋失浓度都在降雨初期达到最大,全层施肥各坡位硝态氮淋失浓度在

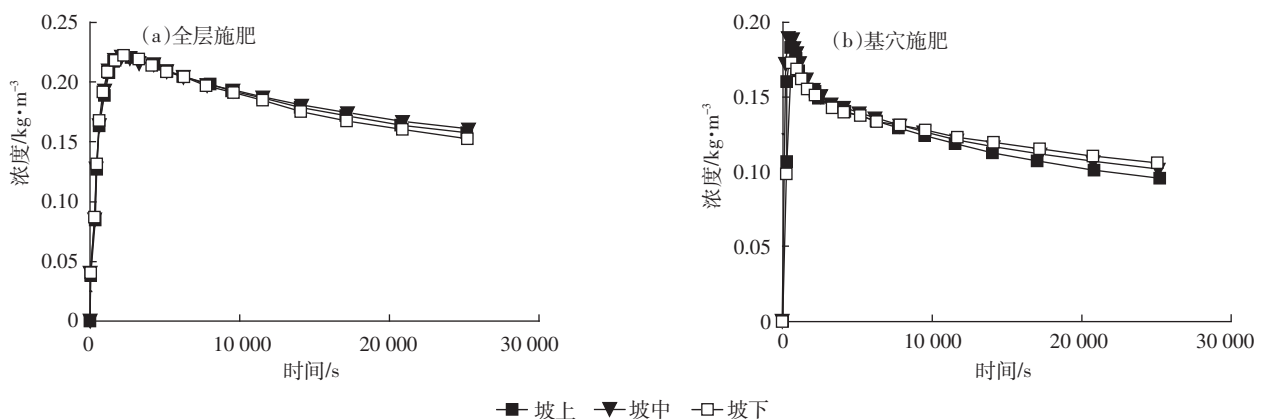


图 8 全层和基穴施肥方式各坡位硝态氮淋失浓度变化

Figure 8 Changes in nitrate concentration in leachate at different slope positions under broadcast incorporated and hole fertilization

35 min 左右达到最大,为 $0.222 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,而基穴施肥在 27 min 左右达到最大,为 $0.188 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

参考文献:

- [1] 徐勤学,王天巍,李朝霞,等. 紫色土坡地壤中流特征[J]. 水科学进展, 2010, 21(2):229-234.
XU Qin-xue, WANG Tian-wei, LI Zhao-xia, et al. Characteristics of interflow in purple soil of hillslope[J]. *Advance in Water Science*, 2010, 21(2):229-234.
- [2] 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[J]. 中国农业科学, 2011, 44(9):1847-1854.
LIN Chao-wen, LUO Chun-yan, PANG Liang-yu, et al. Effect of different fertilization methods and rain intensities on soil nutrient loss from a purple soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(9):1847-1854.
- [3] Wang T, Zhu B, Kuang F H. Reducing interflow nitrogen loss from hillslope cropland in a purple soil hilly region in Southwestern China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 93(3):285-295.
- [4] Yang X L, Zhu B, Li Y L. Spatial and temporal patterns of soil nitrogen distribution under different land uses in a watershed in the hilly area of purple soil, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, 10(3):410-417.
- [5] Zhou M H, Zhu B, Butterbach-Bahl K, et al. Nitrate leaching, direct and indirect nitrous oxide fluxes from sloping cropland in the purple soil area, Southwestern China[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 162:361-368.
- [6] 贾海燕,雷阿林,雷俊山,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, LEI A-lin, LEI Jun-shan, 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.
- [7] 陈正维,朱波,刘兴年. 自然降雨条件下紫色土坡地氮素随径流迁移特征[J]. 人民长江, 2014, 45(13):82-85.
CHEN Zheng-wei, ZHU Bo, LIU Xing-nian. Characteristics of nitrogen transfer with runoff on sloping cropland of purple soil under natural rainfall[J]. *Yangtze River*, 2014, 45(13):82-85.
- [8] 汪涛,罗贵生,朱波,等. 施肥对紫色土坡耕地氮素淋失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4):716-722.
WANG Tao, LUO Gui-sheng, ZHU Bo, et al. Effects of fertilization on nitrogen leaching from hillslope cropland of purple soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(4):716-722.
- [9] 汪涛,朱波,况福虹,等. 有机-无机肥配施对紫色土坡耕地氮素淋失的影响[J]. 环境科学学报, 2010, 30(4):781-788.
WANG Tao, ZHU Bo, KUANG Fu-hong, et al. Effects of a combination of organic and inorganic fertilization on nitrogen leaching from purple soil with sloping cropland[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(4):781-788.
- [10] Chambers B J, Smith K A, Pain B F, et al. Strategies to encourage better use of nitrogen in animal manures[J]. *Soil Use Manage*, 2000, 16(Suppl):157-161.
- [11] Simunek J, Sejna M, van Genuchten M T. HYDRUS-2D Simulating water flow, heat, and solute transport in two-dimensional variably saturated media[M]. Calif. International Ground Water Modeling Center, Riverside, 1999.
- [12] 王康. 非饱和土壤水流运动及溶质迁移[M]. 北京:科学出版社, 2010.
WANG Kang. Flow and solute transport of unsaturated soil[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [13] Ge Y, Cao F. Multigrid method based on the transformation-free HOC scheme on nonuniform grids for 2D convection diffusion problems[J]. *Journal of Computational Physics*, 2011, 230(10):4051-4070.
- [14] 李久生,张建君,饶敏杰. 滴灌施肥灌溉的水氮运移数学模拟及试验验证[J]. 水利学报, 2005, 36(8):932-938.
LI Jiu-sheng, ZHANG Jian-jun, RAO min-jie. Model verification of water and nitrate transport from a surface point source[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(8):932-938.
- [15] 王永艳,李阳兵,邵景安,等. 基于斑块评价的三峡库区腹地坡耕地优化调控方法与案例研究[J]. 生态学报, 2014, 34(12):3245-3256.
WANG Yong-yan, LI Yang-bing, SHAO Jing-an, et al. Optimizing theory and case studies of cultivated slope land in the center of Three-Gorges reservoir area based on patch-scale land evaluation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12):3245-3256.
- [16] 蒋锐,朱波,唐家良,等. 紫色丘陵区小流域典型降雨径流氮磷流失特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4):1353-1358.
JIANG Rui, ZHU Bo, TANG Jia-liang, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses in typical rainfall-runoff events in a small watershed in hilly area of purple soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4):1353-1358.
- [17] 汪涛,朱波,罗专溪,等. 紫色土坡耕地硝酸盐流失过程与特征研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(5):962-970.
WANG Tao, ZHU Bo, LUO Zhuan-xi, et al. Nitrate loss from sloping cropland of purple soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(5):962-970.
- [18] 谭新,陈善雄,杨明. 降雨条件下土坡饱和-非饱和渗流分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(3):381-384.
TAN Xin, CHEN Shan-xiong, YANG Ming. Saturated-unsaturated seepage analysis of slope under rainfall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(3):381-384.
- [19] 任秀文,李开明,刘爱萍,等. 模拟降雨条件下红壤坡面硝态氮流失特征研究[J]. 中国环境科学, 2013, 33(Suppl1):119-124.
REN Xiu-wen, LI Kai-ming, LIU Ai-ping, et al. Characteristics of nitrate nitrogen loss on red soil slope under simulated rainfall conditions[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(Suppl1):119-124.