

# 地表覆盖对紫色土坡耕地壤中流流动和 硝态氮运移过程的影响

龙天渝<sup>1,2</sup>, 刘金辉<sup>1</sup>, 刘祥章<sup>1</sup>, 曹怀亮<sup>1</sup>, 田大浪<sup>3</sup>

(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; 3. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:**针对不同坡度下的表土结皮和稻草覆盖两种地表状况下的紫色土坡耕地,构建养分淋失的三维对流—弥散模型,数值模拟坡耕地中水分和硝态氮浓度的时空分布,研究不同地表覆盖对紫色土坡耕地壤中流流动和硝态氮运移过程的影响。结果表明:表土结皮通过减少水分入渗使壤中流流量与稳定强度降低,硝态氮随壤中流流失量减少,而稻草覆盖下的情况正好相反;在降雨强度为 30 mm/h、降雨历时为 3 h,坡度分别为 5°,10°,15°,20°和 25°的情况下,结皮使壤中流流量降低 34.8%~43.0%,硝态氮随壤中流流失量减少 8.6%~34.4%,而稻草覆盖下壤中流出流量增加 8.6%~12.6%,硝态氮随壤中流流失量增加 8.6%~15.4%。对于紫色土坡耕地,在采用稻草覆盖增加入渗的情况下,应采取相应的措施保水保肥。

**关键词:**坡耕地; 硝态氮淋失; 表土结皮; 稻草覆盖; 数值模拟

中图分类号: X501

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)06-0068-06

## Effects of Surface Mulching on Interflow and Nitrate Migration Process in a Sloping Farmland of Purple Soil

LONG Tianyu<sup>1,2</sup>, LIU Jinhui<sup>1</sup>, LIU Xiangzhang<sup>1</sup>, CAO Huailiang<sup>1</sup>, TIAN Dalang<sup>3</sup>

(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; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** For two kinds of surface conditions of sloping farmland of purple soil with topsoil crust and straw mulching under different slope gradients, the three-dimensional convective-dispersion model of nutrient leaching was established, the temporal and spatial distributions of interflow and nitrate concentration had been simulated numerically, and influences of surface mulching on interflow and nitrate migration process were studied. The results showed that, for topsoil crust, the rate and steady strength of interflow as well as the nitrate loss in the soil decreased due to reduction of water infiltration, while the situation for the straw mulch was opposite. For three hours rainfall with intensity of 30 mm/h, when slope gradients are 5°, 10°, 15°, 20° and 25°, respectively, for topsoil crust, the rate at outlet decreased by 34.8%~43.0%, and the nitrate loss in the soil decreased by 8.6%~34.4%. However, for the straw mulch, the rate increased by 8.6%~12.6%, and the nitrate loss increased by 8.6%~15.4%. For the purple soil slope farmland, the appropriate measures should be taken to keep the water and fertilizer under the conditions of using straw mulch to increase infiltration.

**Keywords:** sloping farmland; nitrate leaching; topsoil crust; straw cover; numerical simulation

地表覆盖主要影响降雨过程中水分的下渗,从而  
影响地表径流与壤中流的分布。地表覆盖的影响因  
素有很多,包括表土结皮、稻草覆盖、植被覆盖和砾石  
覆盖等。三峡库区的土壤类型以紫色土为主,占库区

总面积的近 40%,总耕地面积高达 75%以上,且以坡  
耕地为主<sup>[1]</sup>。紫色土坡耕地土层浅薄,土壤田间持水  
力低、土壤疏松,土壤水分极易蓄满,持续降雨时,水  
分下渗至土壤—基岩界面,因紫色泥页岩渗透性弱,

水分难以垂直入渗而沿坡向汇集形成壤中流,壤中流充分发育。在紫色土坡耕地中,氮素主要随壤中流流失。与平地中氮素随壤中流垂向一维运移不同,紫色土坡耕地氮素随壤中流的运移是二维、甚至是三维的,因此,针对三峡库区紫色土坡耕地壤中流流动和养分流失机理的特点开展相关研究具有重要的理论和实际意义。

通常土壤在降雨或灌溉的作用下或频繁的耕作状况下都会结皮,土壤表层形成一层致密层<sup>[2-5]</sup>。而紫色土即使无降雨作用,仍能形成稳定的结皮层并影响水分入渗<sup>[6-7]</sup>。地表稻草覆盖具有能减少土壤侵蚀、抑制降雨时土壤结皮等优点,逐渐在紫色土坡耕地中采用。迄今为止,对表土结皮和稻草覆盖对紫色土坡耕地壤中流流动和养分运移影响研究的学者和发表的论文为数不多<sup>[8-10]</sup>,并且所采用的方法均是把坡耕地作为“黑箱”的试验研究,有关土壤中水分流动和养分运移过程的数值模拟研究未见报道。为此,本研究采用数值模拟的方法,通过建立土壤水分和养分运移的三维数学模型,借助 HYDRUS 软件,针对表土结皮和稻草覆盖这两种较为常见的地表覆盖状况,对降雨情况下紫色土坡耕地水分和硝态氮随壤中流的运移过程进行模拟,分析紫色土坡耕地水分和硝态氮的流失特性。

## 1 材料与方法

### 1.1 数学模型与模拟区域

1.1.1 土壤水分和养分运移控制方程组 不计空气、温度等对水分运移的作用,忽略水分运移对土壤结构和性质的影响,采用 Richards 方程描述土壤中的水分运移过程,即

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ K \left( K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz}^A \right) \right] - \omega \quad (1)$$

式中: $\theta$  为体积含水率 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $h$  为压力水头 (cm);  $\omega$  为沉降系数 ( $\text{cm}^{-1}$ );  $x_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 为空间坐标,  $x_1=x$ ,  $x_2=y$ ,  $x_3=z$ ;  $z$  为垂直坐标,向上为正;  $t$  为时间 (min);  $K_{ij}^A$  为修正土壤导水率各向异性的张量 (无量纲),对于各向同性土壤  $K_{ij}^A$  在对角线为 1,非对角线为 0;  $K$  为非饱和土壤导水率 ( $\text{cm}/\text{min}$ )。

采用对流—弥散方程对硝态氮运移过程进行模拟,即

$$\theta \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \theta D_{x_i} \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) - u_i \left( \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) + s \quad (2)$$

式中: $c$  为硝态氮浓度 ( $\text{mg}/\text{cm}^3$ );  $D_{x_i}$  为  $x_i$  方向硝态氮的弥散系数 ( $\text{cm}^2/\text{min}$ );  $u_i$  为  $x_i$  方向上的水流速度 ( $\text{cm}/\text{min}$ );  $s$  为源项,包括根系吸收、土壤吸附与解

析等,本文中忽略不计。

1.1.2 模拟区域 模拟的坡耕地的几何尺寸如图 1 所示。坡耕地长 600 cm、宽 300 cm、高 50 cm,坡度分别为  $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$  和  $25^\circ$ 。土壤耕作不可避免使土壤分层,因此,为了使模型更符合实际土层情况,把坡耕地分为耕作层和非耕作层。地表结皮和稻草覆盖层分别作为在耕作层上的单独一层。耕作层高度为 20 cm,非耕作层高度为 30 cm,地表结皮层或稻草覆盖层的高度均为 1 cm<sup>[8]</sup>。

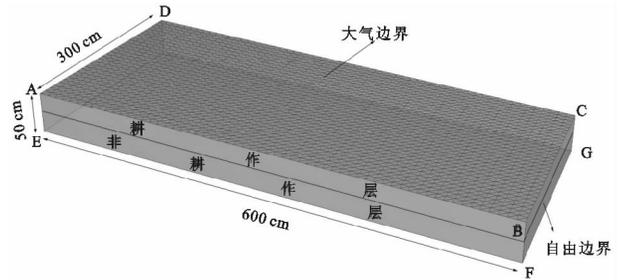


图 1 模拟区域和边界条件示意

1.1.3 模型参数 土壤水分特征曲线和非饱和土壤水力传导率采用 van Genuchten 模型来表示。对结皮土壤的水力特性参数采用 Chahinian N 的确定方法和相关研究结果<sup>[11-12]</sup>;稻草覆盖层的水力特性参数的确定采用虎胆·吐马尔白等的研究结果<sup>[13]</sup>;耕作层和非耕作层的水力特性参数采用 HYDRUS 自带的神经网络反演法,由已有的试验数据反演优化得出<sup>[14-15]</sup>(表 1)。

表 1 土壤水力特性参数

土层	$\theta_r/$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$\theta_s/$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$\alpha/$ $\text{cm}^{-1}$	$n$	$k_s/$ ( $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	$l$
结皮层	0.070	0.460	0.005	1.090	0.0043	0.5
稻草层	0.000	0.506	0.05	2.000	0.693	0.5
耕作层	0.062	0.447	0.011	1.516	0.043	0.5
非耕作层	0.100	0.390	0.059	1.480	0.022	0.5

溶质运移参数同样采用优化反演法确定。耕作层和非耕作层土壤体积密度为  $1.5 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,纵向弥散度为 0.5 cm,横向弥散度为 0.01 cm,硝态氮在水中的分子扩散系数为  $0.0015 \text{ cm}^2/\text{min}$ ,在土壤空气中的分子扩散系数为 0。

1.1.4 区域离散与网格划分 借助 HYDRUS 软件对数学模型进行数值计算。采用等间距三角形网格,经网格无关性检验,表土结皮情况下 X 方向设置 61 个节点, Y 方向 31 个, Z 方向 22 个,共生成 41 620 个节点。第一层的高度为 1 cm,第二层为 1.5 cm,其他均为 2.5 cm。稻草覆盖情况下, X 方向设置 61 个节点, Y 方向 31 个, Z 方向 21 个,共生成 39 711 个节点。第一层的高度为 1 cm,其他均为 2.5 cm。模拟



入渗能力减弱。稻草覆盖入渗率下降的时间更晚,约在降雨 70 min 后。在整个降雨期内,表土结皮时土壤表层平均入渗率为 0.027 cm/min,无结皮无覆盖时为 0.040 cm/min,稻草覆盖时为 0.042 cm/min。表土结皮在很大程度上降低了土壤的入渗率,而稻草覆盖略增加了入渗率。

图 6 为坡度 15°时不同地表覆盖下土壤湿润锋随时间的变化。从图 6 中可以看到,在降雨初期,3 种表土情况下湿润锋运移率(湿润锋/时间)均比较快,稻草覆盖下湿润锋运移率略低于对照情况,这是由于土壤表层有稻草层对降雨进行截留和缓冲。经过缓冲以后,稻草覆盖下湿润锋运移率基本与对照情况相当。结皮下湿润锋运移率明显低于其他两种情况,说明结皮阻碍了水分下渗;降雨约 15 min 后,3 种表土状况下的湿润锋均到达耕作层底部(20 cm 处),因非耕作层渗透系数较小,此后湿润锋运移率均明显减慢。在降雨结束后,稻草覆盖和对照土壤湿润锋均运移到 45 cm 处,而结皮湿润锋仅运移到 30 cm 处,表土结皮导致入渗量减少。

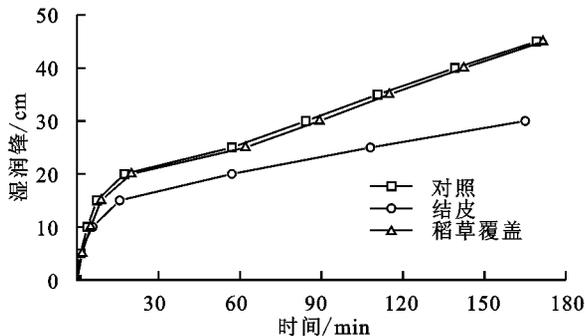


图 6 不同地表覆盖下湿润锋随时间变化

2.1.2 不同地表覆盖下壤中流的产生和发展 壤中流是指降雨、灌溉过程中及其随后一段时间内,水分在土壤内部的运动,包括水分在土壤内的下渗和侧流。侧流是坡地径流的重要组成部分,对土壤水分和养分流失等具有重要影响<sup>[18]</sup>。图 7 为坡度 15°时 3 种不同地表状况下土壤中水分随时间的运移过程。由图可以看出,降雨初期,耕作层中水分的运移基本上为垂直入渗。随着降雨的持续,耕作层逐渐从上到下在水分饱和区产生侧流。在约 90 min 后,稻草覆盖下侧流基本上扩展到整个耕作层。而在表土结皮和对照条件下在降雨进行到 190 min 时,侧流才出现在整个耕作层。从图中 3 种不同表土性质下的速度矢量的方向可以看出,当水分进入非耕作层后,在耕作层和非耕作层流速方向明显不同,在耕作层的水分为侧流,在非耕作层的水分主要为垂直入渗,这种情况持续到降雨结束。模拟结果表明,与对照情况相比,稻草覆盖增加了水分入渗,使较多水分入渗到非耕作层,而表土结皮的情况正好相反。说明坡耕地中水分的流失过程主要发生在耕作层。

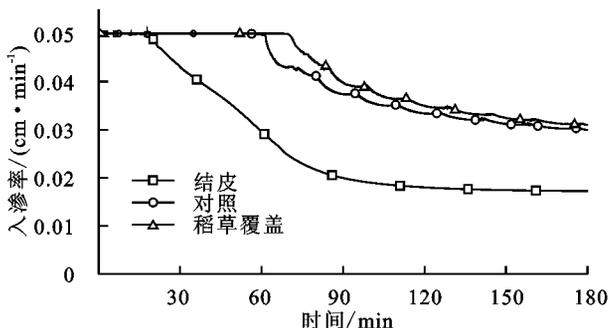


图 5 不同地表覆盖下表土水分入渗速率变化

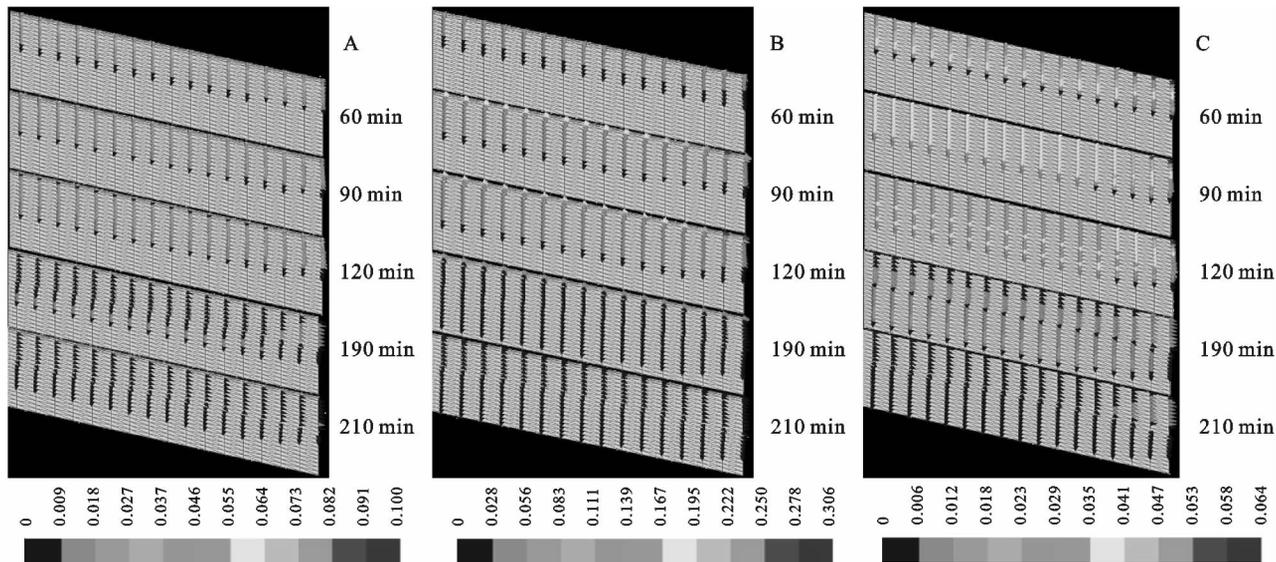


图 7 表土结皮、稻草覆盖、对照条件下各典型时刻水分运移速度矢量

2.1.3 表土性质对壤中流出流量的影响 图 8 为 3 种不同地表覆盖下不同坡度在降雨过程中形成的累

积的壤中流出流量。不同坡度下,结皮组的壤中流累积出流量为 12 997~14 141 cm<sup>3</sup>,稻草覆盖组的壤中

流累积出流量为 24 100~25 200 cm<sup>3</sup>,对照组的壤中流累积出流量为 21 400~23 200 cm<sup>3</sup>。稻草覆盖的壤中流出流量>对照>表土结皮,稻草覆盖会增加壤中流出流量,而表土结皮会明显降低壤中流出流量。稻草覆盖时,稻草层的孔隙率大,渗透能力强,降雨能够更多地渗入土壤,导致更多的水分以壤中流的方式流出。与此相反,表土结皮时,土壤渗透性差,更多的降雨随地表径流流失,减少了入渗,从而减少壤中流流量。在 5 种坡度下,坡度由小到大,结皮情况下壤中流出流量分别比未结皮降低 41.6%,43.0%,36.9%,40.5%和 34.8%。坡度不同,表土结皮对壤中流的影响也不相同,在 25°时土壤结皮对壤中流影响最小,10°时土壤结皮对壤中流影响最大。5 种坡度下,稻草覆盖比对照情况下的壤中流出流量分别增加了 8.6%,10.1%,10.7%,11.9%和 12.6%。说明坡度越大,稻草覆盖对壤中流的影响越明显,由于稻草覆盖削弱了坡度对地表径流的增加效果,使得坡度增加更有利于壤中流的产生和出流。

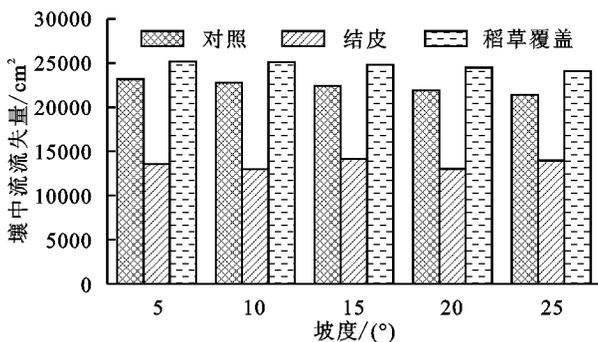


图 8 不同地表覆盖下壤中流累积出流量

为了进一步地研究不同表土性质下壤中流出流的动态变化,图 9 列出了坡度 15°下,3 种不同表土性质下出流边界壤中流速率变化对比。从图中看出,表土结皮和稻草覆盖下壤中流变化趋势仍都遵循紫色土壤中流流失规律:分为降雨开始时的出流强度增加阶段,稳定或平稳增加阶段和降雨结束后的衰减阶段。稻草覆盖下,壤中流稳定强度约为 200 cm<sup>3</sup>/min,对比无稻草覆盖下增加了约 11.1%;而表土结皮下壤中流稳定强度为 95 cm<sup>3</sup>/min,对比无结皮情况下紫色土饱和和稳定强度约降低 47.2%。在整个模拟期内,稻草覆盖明显增加壤中流强度而表土结皮均明显降低壤中流强度,可能原因是稻草覆盖和表土结皮后,土壤表层入渗能力变化,导致土壤内部水压力发生改变。

## 2.2 表土性质对紫色土硝态氮随壤中流流失的影响

图 10 为 3 种表土性质下硝态氮随壤中流的流失

量。在 5 个坡度下,表土结皮时硝态氮流失量分别减少了 14.2%,15.9%,8.6%,34.4%和 18.9%,稻草覆盖时硝态氮流失量分别增加了 8.6%,15.1%,15.4%,13.5%和 11.1%。与表土结皮和稻草覆盖对壤中流影响对比分析可以发现,表土结皮下硝态氮随壤中流流失的减小幅度明显小于表土结皮对水分的影响,而稻草覆盖下硝态氮随壤中流流失的增加幅度却略大于稻草覆盖对水分的影响。与壤中流水分流失类似,不同坡度下,表土结皮对硝态氮流失量的影响程度也不相同,在坡度为 15°时,表土结皮对硝态氮流失影响小,坡度为 20°时影响最大,这与表土结皮对壤中流影响不同步。稻草覆盖对硝态氮在 15°时影响最大。

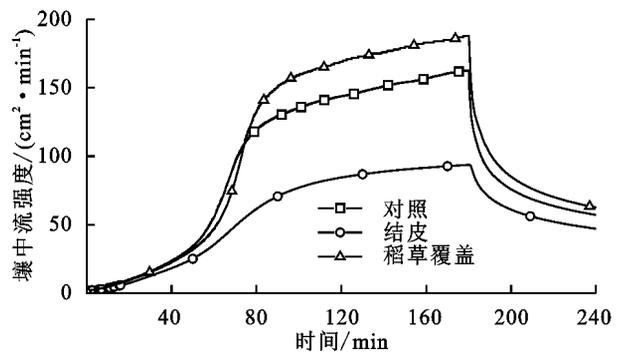


图 9 不同地表覆盖下边界壤中流强度变化

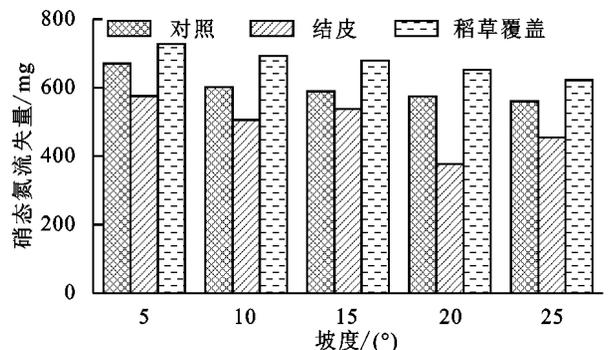


图 10 不同地表覆盖下硝态氮随壤中流流失量

为了进一步研究表土结皮下出流硝态氮浓度变化,选取典型坡度 15°时不同表土性质下出流硝态氮浓度随时间变化进行分析。如图 11 所示,在降雨刚开始时,表土结皮下硝态氮浓度比未结皮时增长速率慢,到达浓度峰值的时间约推迟 6 min,但表土结皮下硝态氮浓度峰值却较未结皮时高,且几乎整个模拟期内表土结皮时硝态氮浓度均高于土壤未结皮时;对比稻草覆盖和对照情况的硝态氮浓度也可以发现,稻草覆盖下硝态氮浓度高于对照情况。这种现象的原因可能是土壤结皮和稻草覆盖时,土壤内部的水分入渗速率比对照情况时较慢,水分在土壤内部停留时间较长,土壤中硝态氮溶解更为充分,单位水分溶解的硝态氮更多,这也解释了土壤结皮对硝态氮随壤中流

流失的影响小于对水分流失的影响,而稻草覆盖下硝态氮随壤中流流失的增加幅度大于稻草覆盖对水分的影响。

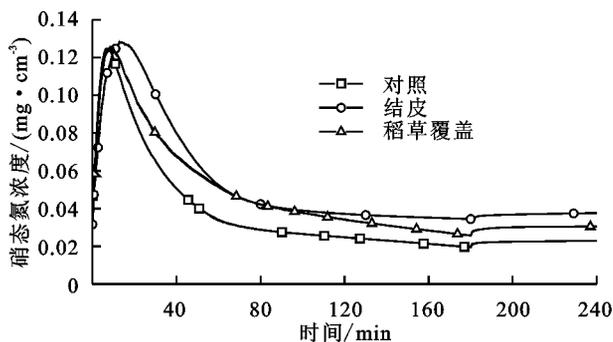


图 11 不同地表覆盖下出流硝态氮浓度随时间变化

### 3 结论

(1) 紫色土表土结皮会减少土壤表面水分的入渗,壤中流出流量降低 34.8%~43.0%,壤中流稳定出流强度约降低 42.7%,硝态氮随壤中流流失量减少 8.6%~34.4%,但是流失的硝态氮浓度有所增加。稻草覆盖下,壤中流出流量增加 8.6%~12.6%,壤中流出流强度约增加 11.1%,硝态氮随壤中流流失量增加 8.6%~15.4%,硝态氮流失浓度也有所增加。

(2) 坡度对表土结皮下水分和硝态氮运移的影响比较复杂,坡度不同,表土结皮对紫色土壤中流以及硝态氮流失的影响程度也不相同。坡度越大,稻草覆盖对壤中流的影响越大,而对硝态氮的影响在 15°时最大。

(3) 对于紫色土坡耕地,在采用稻草覆盖增加入渗的情况下,应采取相应的措施保水保肥。

#### 参考文献:

- [1] 廖晓勇,陈治谏,刘邵权,等. 三峡库区紫色土坡耕地不同利用方式的水土流失特征[J]. 水土保持研究, 2005, 12(1):159-161.
- [2] Skujins J. Semiarid lands and deserts: soil resource and reclamation [J]. Semiarid Lands & Deserts Soil Resource & Reclamation, 1991.
- [3] Lehrs, Gary A, Kincaid, et al. Sprinkler droplet energy effects on soil penetration resistance and aggregate stability and size distribution[J]. Soil Science, 2006, 273(1/2):1-13.
- [4] Cai Q, Luk S H. Experimental Study of Surface Crusts Process and Microfabric Analysis on Loess Soil [J]. Journal of Basicence & Engineering, 1996, 4:363-370.
- [5] Bu C, Cai Q C Q, Wu S F. Development of soil crust on the surface of purplish soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(3):385-391.
- [6] 程琴娟,蔡强国,马文军. 我国水土流失典型区土壤土结皮敏感性[J]. 地理研究, 2008, 27(6):1290-1298.
- [7] 卜崇峰,蔡强国,程琴娟,等. 紫色土表土结皮发育特征的试验研究[J]. 土壤学报, 2007, 44(3):385-391.
- [8] 付智勇,李朝霞,蔡崇法,等. 不同起始条件下坡面薄层紫色土水分和壤中流响应[J]. 水利学报, 2011, 42(8):899-907.
- [9] 蔡崇法,丁树文,张光远,等. 三峡库区色土地地养分状况及养分流失[J]. 地理研究. 1996, 15(3):77-84.
- [10] 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.
- [11] Chahinian N, Voltz M, Trotoux G, et al. Assessing the impact of a soil surface crust on simulated overland flow at the field scale. EGS-AGU-EUG Joint Assembly, 2003.
- [12] Chahinian Nanée, Voltz Marc, Moussa Roger, et al. Assessing the impact of the hydraulic properties of a crusted soil on overland flow modelling at the field scale[J]. Hydrological Processes, 2006, 20(8):1701-1722.
- [13] 虎胆·吐马尔白,苏里坦. 反演分析土壤—秸秆水分运动参数[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(1):68-70.
- [14] 吴元芝,黄明斌. 基于 Hydrus-1D 模型的玉米根系吸水影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(S2):66-73.
- [15] 李玮,何江涛,刘丽雅,等. Hydrus-1D 软件在地下水污染风险评价中的应用[J]. 中国环境科学, 2013, 33(4):639-647.
- [16] 张虹. 红壤地表结皮特征及其对导水性能的影响[D]. 武汉:华中农业大学, 2012.
- [17] 龙天渝,刘祥章,刘佳. 紫色土坡耕地硝态氮随壤中流迁移的时空分布模拟[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(10):1973-1978.
- [18] 郑海金,王辉文,杨洁,等. 地表径流和壤中流对坡耕地氮磷流失影响研究概述[J]. 中国水土保持, 2015(2):36-39.