

黑土区坡耕地壤中流水平迁移动力学模型研究

曹程鹏¹, 张 飞², 段建明²

(1. 绥化学院 农业与水利工程学院, 黑龙江 绥化 152061; 2. 东北农业大学 水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030)

摘 要:为了解决我国黑土区坡耕地犁底层影响下壤中流水平迁移动力学模型的建立问题,基于能够连续模拟犁底层上部土壤及犁底层内部土壤水分垂直迁移的 Richard 模型,借鉴模拟犁底层以上土壤水分水平迁移的壤中流动力波模型及“双超”模型原理,提出了适合黑土区坡耕地壤中流水平迁移的模拟机理模型,并利用人工模拟降雨试验获取实测值,分析了壤中流产生及迁移影响因素影响机理。通过试验得出:土壤质地一定条件下,坡面坡度是决定壤中流强度的关键影响因素,随着坡度的增加,壤中流强度增加显著。土壤初始含水量及降雨强度仅对产流时间影响较大,对壤中流流量大小影响较小。壤中流流量显著小于土壤表面径流,但其对土壤养分水平迁移的贡献可能高于土表径流。模型模拟值与实测值基本一致,两种坡度条件下 RMSE 分别为 0.136 ml/min 和 0.138 ml/min, R^2 分别为 0.89, 0.92, 模型能够反映出存在犁底层条件下的壤中流产生情况,说明壤中流水力坡度可以近似为地面坡度,同时将犁底层入渗能力作为壤中流计算依据的假设具有一定的合理性,进一步解决了犁底层中存在土壤水分垂直入渗条件下如何利用 Richard 模型进行壤中流侧向出流计算问题。

关键词:黑土区; 坡耕地; 犁底层; 壤中流; 模拟模型

中图分类号:S152.7; P481

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)04-0259-06

Study on the Dynamics Model of Horizontal Migration of Interflow in Cropland in Black Soil Area

CAO Chengpeng¹, ZHANG Fei², DUAN Jianming²

(1. College of Agriculture and Hydraulic Engineering, Suihua University, Suihua, Heilongjiang 152061, China;

2. College of Water Conservancy and Architecture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to solve the problem of interflow model establishment in sloping farmland under the influence of plough pan in black soil region of China, we used the Richard model to simulate soil water vertical migration in and above plough pan, and then setup mechanism interflow model based on Richard model, dynamic wave model and double super model. The measured data were obtained by the artificial rainfall experiments to reveal the function of the main factors on interflow. When the soil texture is fixed, slope gradient is the key factor to determine the interflow intensity. With the increase of slope gradient, the interflow rate increased significantly. The initial soil moisture content and rainfall intensity had greater impact on interflow occurrence time, but had little effect on the runoff volume. The interflow rate was much lower than that of soil surface runoff, the contribution of the interflow to soil nutrient transfer was higher than that of soil surface runoff. The simulated data agreed with the measured data, the RMSEs were 0.136 ml/min and 0.138 ml/min, R^2 was 0.89 and 0.92, respectively. The model can reflect the interflow process. It is reasonable to assume the interflow infiltration capacity as the basis of interflow calculation in soil, which can solve the problem of how to use Richard model to calculate the lateral flow under the soil moisture vertical infiltration in the plough pan.

Keywords: black soil region; sloping farmland; plough pan; interflow; simulation model

我国东北黑土区犁底层普遍存在,导致降雨过程中土壤内部壤中流的产生,壤中流作为径流不可或缺的重要组成部分,对农业生产及生态环境治理有着重要意义。基于不同的假设,国内外学者提出了许多壤中流产生的机理模型,但每种模型都有其应用局限性,不能将已有模型直接应用于实际田间生产活动。Richard 模型作为经典非饱和土壤水分运动模拟模型在壤中流的模拟中有所应用^[1-3],但其不能直接求出渗流区的侧向出流量。贮水泄流模型从宏观的水量平衡角度出发,虽然可以直接获得坡面出口断面处侧向出流量^[4-5],但其应用局限性较大。动力波模型假设不透水层或准不透水层边界上饱和区域内流线平行于底板,且水力梯度等于基岩坡度^[6-7],该模型早期应用较多。近年来,“双超”模型及其改进模型逐渐应用于土壤壤中流过程的模拟中,由于其模拟参数变动较大,实际模拟效果并不十分理想^[8-9]。

黑土区坡耕地犁底层对土壤水分入渗虽然存在阻滞作用,但犁底层中的垂向入渗仍然是土壤内部水分迁移的主要形式,这就造成了前人提出的贮水泄流模型及动力波等模型应用受到限制,能够同时反映犁底层中土壤水分垂直迁移与犁底层上部壤中流水平迁移相互作用的模型更具合理性。为此,本文基于能够连续模拟犁底层上部土壤及犁底层内部土壤水分垂直迁移的 Richard 模型,借鉴动力波模型及“双超”模型原理,提出适合黑土区坡耕地壤中流水平迁移的机理模拟模型,并利用人工模拟降雨试验对模型进行验证,以期黑土区坡耕地农田土壤水肥管理提供科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 模型原理

土壤水分入渗采用一维垂直土壤水分运动的 Richard 方程计算^[10]:

$$\frac{\partial \theta(z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta(z, t)}{\partial z} - k(\theta) \right] \quad (1)$$

式中: t 表示时间(min); θ 表示含水量(%); $D(\theta)$ 表示土壤水分扩散率(cm^2/min); $k(\theta)$ 表示非饱和导水率(cm/min); $\theta(z, t)$ 表示在深度为 z 处的土壤含水量(%)。方程(1)的初始和边界条件为:

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_i & t &= 0 & z &\geq 0 \\ D(\theta) \frac{\partial \theta(z, t)}{\partial z} - k(\theta) &= -R & t &> 0 & z &= 0 \\ D(\theta) \frac{\partial \theta(z, t)}{\partial z} - k(\theta) &= -i & 0 < t < t_p & & z &= 0 \\ \theta &= \theta_i & t &> 0 & z &\neq \infty \end{aligned} \quad (2)$$

式中: R 为入渗(cm/min); θ_i 为土壤初始含水量(%); t_p 表示产流时间(min); i 表示入渗率(cm/min)。

根据试验条件,得到方程(1)的上边界条件 Parlange 模型^[11-12]:

$$\theta_0'(t) = -\frac{R}{\theta_0(t) - \theta_i} \cdot \frac{k[\theta_0(t)] - R}{D[\theta_0(t)]} \quad (3)$$

采用 Brooks-Corey^[13] 的水分特征曲线模型:

$$k(\theta) = k_s \theta^M \quad (4)$$

$$D(\theta) = \frac{k_s h_d \theta^{l+1/N}}{N(\theta_s - \theta_r)} \quad (5)$$

$$\theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (6)$$

式中: $K(\theta)$ 为非饱和导水率; $D(\theta)$ 为土壤水分扩散率; θ 为有效饱和度; N, M 为形状系数; $M = 3N + 2$; h_d 为土壤进气吸力; l 为弯曲度; $\theta_0(t)$ 为土壤表层含水量; K_s 为土壤饱和导水率(cm/min); θ_s 为土壤饱和含水量; θ_r 为土壤滞留含水量。通过数值方法求解方程(3)得到土壤饱和前的上边界条件,通过垂直和水平土柱(扰动土)入渗试验得到土壤参数见表1。

由于土壤容重在犁底层处发生显著变化,犁底层以上土壤与犁底层内部土壤进行土壤水分垂直迁移模拟时需要采用与土壤特性相对应的参数。2组参数需要分别测量获得(表1),结合公式(1)将犁底层及其以上土壤作为一个整体,不同位置采用不同参数,利用数值法连续模拟湿润峰下移过程。计算犁底层上边界入渗通量时,采用公式(2)中入渗率 i 作为犁底层上边界入渗通量计算公式,得到犁底层上边界入渗能力。假设犁底层以上入渗水未触及犁底层时段,土壤饱和层与集水槽挡板相接触的饱和土壤中土壤水分无水平运移,结合动力波模型中假设犁底层区域内流线平行于底板(犁底层),水力梯度等于犁底层坡度,利用双超模型原理,当犁底层上表面处土壤含水量超过土壤田间含水量,来水量大于犁底层下渗能力,在水力梯度作用下产生横向流动,得到侧向出流模型:

$$q = iA \tan \alpha \quad (7)$$

式中: q 为侧向出流量(ml); i 为犁底层上表面入渗率; A 为出流断面面积(cm^2); α 为坡面坡度。公式(7)反映出壤中流侧向出流流量变化过程与降雨强度及土壤初始含水量无关,与犁底层上表面入渗率有关。以上侧向出流模型虽然忽略了侧向出流土壤导水率与犁底层土壤导水率之间的差异,但在重力作用下的垂向迁移能力与相对疏松的犁底层以上土壤水平迁移能力相近,由此认为公式(7)是成立的。

利用 RMSE^[14-15] 评价模型模拟值和试验实测值

之间的差异。公式 RMSE 表示为:

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(p_i-o_i)^2}{n}}$$
 (8)

式中: n 为总数据点数; p_i 为模拟值; o_i 为实测值。

表 1 土壤基本参数

土壤类型	$\theta_s/\%$	$\theta_r/\%$	N	l	h_d
犁底层以上耕层	46.1	5.7	0.12	2	33.67
犁底层	42.3	7.1	0.12	2	28.02

注:表中含水量为重量含水量。

1.2 试验设计

利用自制坡度可调节的集雨槽(长 100 cm,宽 40 cm,高 50 cm)装土,坡度调节范围 0°~30°。土槽设计上下 2 个径流收集口,上侧收集口下边缘低于土面 0.5 cm,收集土表径流,下侧收集口位于上侧收集口以下 11.5 cm 处,收集位于 12 cm 处犁底层以上壤中流。采用侧喷式人工模拟降雨器(NLJY-09-2 型,降雨均匀度系数>0.86,降雨高度 4 m)模拟降雨。试验装置见图 1。设计坡面坡度 7°和 10°两个水平,降雨强度 0.12 cm/min,土壤初始含水量 18.8%,根据取土样地实测犁底层深度及土壤容重,设计犁底层位于土表以下 12 cm 深处,犁底层以上控制土壤容重 1.23 g/cm³,犁底层土壤容重 1.38 g/cm³,降雨历时 40 min。试验 2 次重复。供试土壤理化性质见表 2。将供试土壤过 4 mm 孔筛网除去碎石块、植物根茬等杂质,经风干、均匀混合处理备用。利用烘干法测量土壤含水量,计算出达到设计含水量需加水量。将试验用土、水按照重量(利用电子秤称重)平均

分成数份,将第一份土壤均匀摊铺在塑料上,土层厚约 2 cm,将水按每份重量均匀喷洒在土层上,按重量覆盖上第二层土壤,再喷洒上设计水量的水,如此往复,最后用塑料将土包好,防止水分蒸发。24 h 以后打开塑料,将土混合均匀。通过上述方法,可以获得水分与土壤混合均匀的供试土壤,土壤含水量误差可控制在土 1%(重量含水量)范围内。将混合好的土壤按设计容重分层装入土槽中,每 5 cm 为一层,用秤称量土重,装土时用土锤轻轻地将土面砸平,为了得到平整的土面,用锋利的刀将多余土量刮到土少的地方。填装下一层土前抓毛下层土壤表面,以防土层之间出现分层现象。土壤填装完成后用塑料将土槽盖好。装土深 40 cm,预留 10 cm 土槽侧壁防止雨水击溅造成水量减少出现试验误差。约 24 h 以后开始降雨试验。用容量为 2 000 ml 的塑料桶在土槽接水口接取地表径流及壤中流,产流后每 1 min 收集 1 个水样,停止降雨后在土槽中部沿坡面垂直方向取土壤剖面,收集土样,每 10 mm 取 1 个土样。饱和导水率的测定采用环刀法获取土槽试验后原状土,环刀高 70 mm,直径 50 mm,设 3 个重复,采用马氏瓶定水头供水测定饱和导水率,取平均值。



图 1 试验装置

表 2 土壤基本农化状况

深度/ cm	各级颗粒含量/%			有机质/ %	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	pH 值
	<0.002 mm	0.002~0.05 mm	>0.05 mm							
0—20				1.52	1.34	0.68	83	29.2	123	7.65
20—40	14.56	65.15	20.29	1.48	0.99	0.62	54	25.0	112	7.67
40—60				1.39	0.78	0.57	53	18.9	118	7.62

2 结果与分析

东北黑土区犁底层普遍存在,犁底层界面以上当土壤含水量超过土壤田间持水量后,在水力梯度影响下产生横向流动,本研究进行的 2 种坡面坡度试验是模拟野外大田实际犁底层分布情况进行的,壤中流的产生与野外大田实际产流情况较为接近。

通过试验获取壤中流随时间变化过程见图 2。随着降雨时间的延续,前期(0~23 min 左右)没有壤中流出现,在这一阶段,入渗水仅在重力及毛管吸力等作用下做垂向运动,壤中流产生以后流量随时间推

移首先呈增加趋势,然后趋于平缓(图 2),与地面径流变化规律相似。对比坡面坡度 7°与 10°条件下的壤中流流量变化图,坡面坡度为 7°时,壤中流稳定在 1.5 ml/min 附近,而坡面坡度为 10°时,壤中流流量稳定在了 2.4 ml/min,坡面坡度是壤中流的重要影响因素。2 种处理条件下壤中流产流时间实测值分别为 23.3,22.9 min,可见坡面坡度对壤中流产流时刻影响较小,对稳定流量影响显著,2 种坡度下壤中流流量均在 37 min 左右趋于稳定。从壤中流流量过程线可知,关于犁底层以上入渗水未触及犁底层时段,土壤饱和层与集水槽挡板相接触的饱和土壤中土

壤水分无水平运移的假设接近实际情况。

对比壤中流模型模拟值与实测值,模型模拟值与实测值基本一致,2 种坡度条件下 RMSE 分别为 0.136 ml/min 和 0.138 ml/min, R^2 分别为 0.89,0.92,模型能够反映出存在犁底层条件下的壤中流产生情况,说明了壤中流水力坡度可以近似认为是地面坡度,同时将犁底

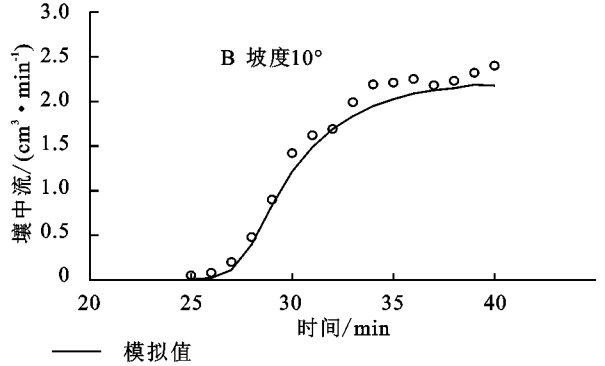
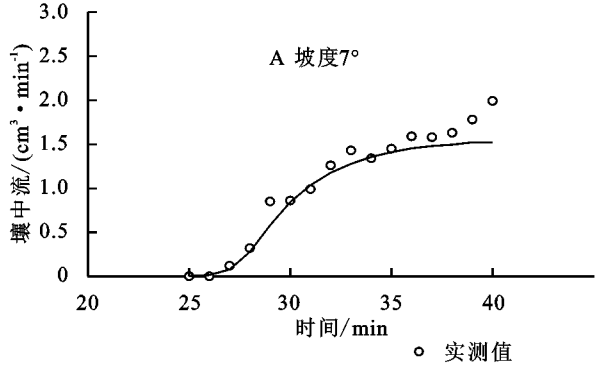


图 2 2 种坡度处理条件下壤中流流量实测值与模拟值

图 3 为降雨结束后土壤沿垂向含水量实测值与模拟值及犁底层分布位置。2 种坡度处理条件下湿润峰下移深度基本相同,可见坡度对土壤垂向入渗影响不显著,2 种处理湿润峰均触及犁底层并下移。壤中流的产生是土壤含水量超过田间持水量且入渗受到犁底层明显阻碍后在犁底层表面产生的侧向流动,其对土壤水分的垂直入渗影响很小,土壤水分的迁移仍然以垂直入渗为主,本研究试验采用的土壤容重犁底层以上与农田耕层相同,饱和导水率为 0.025 4

cm/min,而犁底层饱和导水率为 0.012 0 cm/min,入渗能力减小显著,壤中流流量与垂直入渗量相比较取决于犁底层坡面坡度,我国东北黑土区坡耕地大部分较为平坦,取土样地平均坡度 7° ,壤中流相对于垂直入渗量较小。虽然图 3 显示出边界效应的存在,但是模型模拟值与实测值仍然较为接近,2 种坡度条件下 RMSE 分别为 1.31%,1.24%(重量含水量), R^2 分别为 0.94,0.97,说明 Richard 模型可以反映出东北黑土区坡耕地存在犁底层条件下的土壤水分入渗过程。

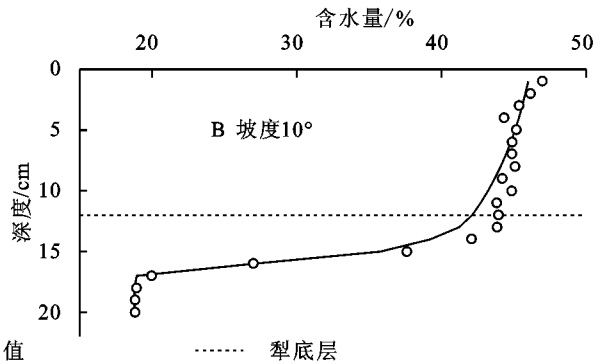
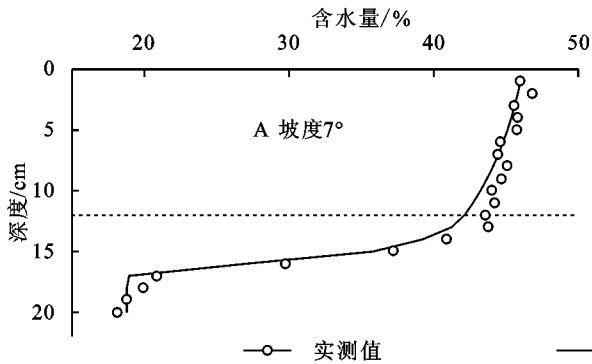


图 3 降雨结束后土壤剖面含水量实测值与模型模拟值

图 4 为 2 种处理条件下降雨过程中坡面径流过程,两种处理条件下产流时刻较为接近,实测值分别为 18.21,17.43 min,可见缓坡对于径流产生时刻影响较小,这一研究成果与 Dong 等^[10]研究成果较为接近。坡度对于随着降雨时间的延续,流量显著增加,2 种处理条件下均接近 250 ml/min 趋于稳定,壤中流流量约为地表径流量 1/100,这一比例与降雨强度关系较大,降雨强度越大,比值越小。降雨强度也决定着土壤剖面含水量的变化,降雨强度越大,湿润峰向

下迁移越早,壤中流产生时刻越早,使得壤中流流量过程整体前移,形状并未改变。虽然壤中流占径流总量比例较小,但壤中流养分浓度可近似认为是相应深度的土壤水养分浓度,据相关研究显示坡面径流养分浓度较土壤水养分浓度小几个数量级^[10],所以土壤养分的径流流失主要是通过壤中流这一途径。同时,由于壤中流携带养分的水平迁移,也影响了植物根系对土壤养分的利用。

对模型的敏感性分析结果见图 5。利用模型分

别模拟了不同坡面坡度、土壤初始含水量及降雨强度条件下的壤中流径流过程。各条件下从降雨开始至产流时刻历时见表 3。坡面坡度对壤中流产流时刻影响较小($p>0.05$),土壤初始含水量和降雨强度的变化引起壤中流出现时刻的变化,且变化规律与地表径流相似。不同条件下壤中流产流时刻模拟结果较为合理,说明该模型对壤中流产生机理反映接近实际情况。图 5A 为改变坡面坡度后壤中流过程,坡面坡

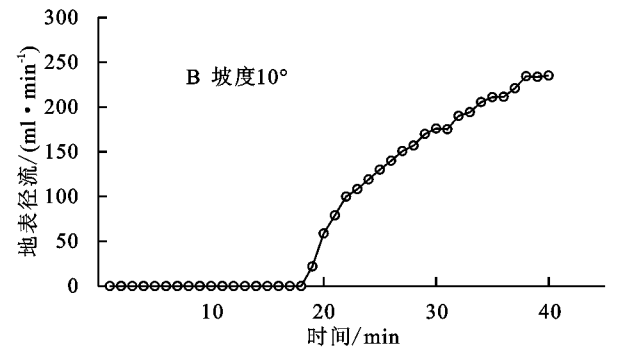
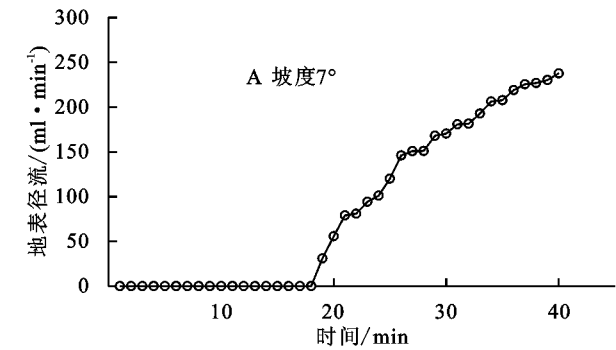


图 4 2 种坡度处理条件下降雨过程中坡面径流过程

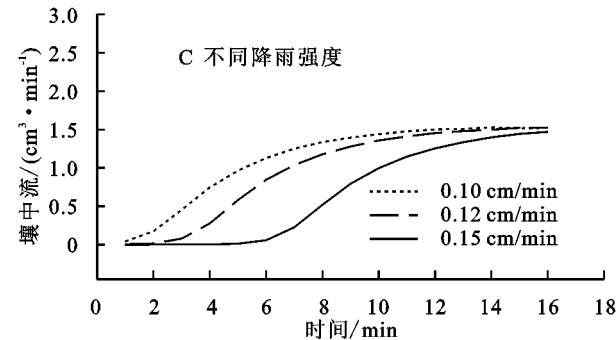
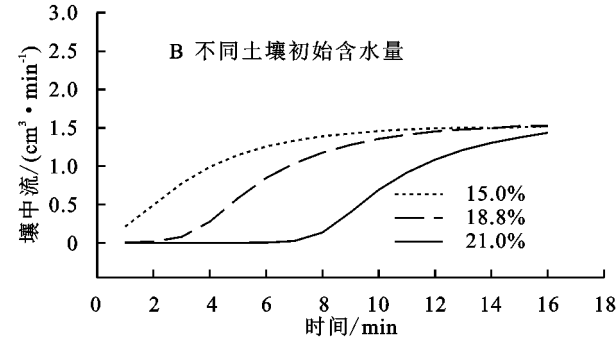
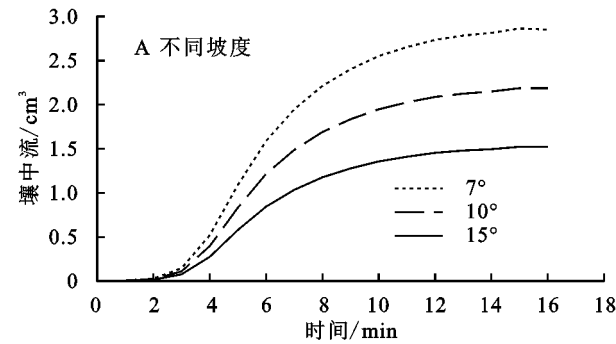


图 5 模型模拟不同坡度、初始含水量及降雨强度条件下的壤中流过程

度对产流时刻影响较小,但对稳定出流流量影响较大,随着坡度增加显著增加($p<0.05$)。图 5B—5C 显示不同土壤初始含水量和降雨强度对壤中流过程稳定出流之前影响较大($p<0.05$),土壤初始含水量越高,降雨强度越大壤中流出流越早趋于稳定,这与不同条件下壤中流出流过程理论分析基本一致,说明模型对不同影响因素较为敏感,同时说明模型能够较为合理的反映壤中流出流过程。

表 3 不同条件下壤中流模型模拟产流时间

处理	模拟产流时间	
不同坡面坡度/(°)	7	24
	10	24
	13	24
	15	29
不同初始含水量/%	18	24
	21	22
不同降雨强度/ (cm·min ⁻¹)	0.10	28
	0.12	24
	0.15	23

3 结论

犁底层的存在导致壤中流的产生,土壤质地一定条件下,坡面坡度是决定壤中流强度的关键影响因素。随着坡度的增加,壤中流强度增加显著,坡度对于壤中流及坡面地表径流产生时刻影响较小。初始含水量及降雨强度仅对产流时间影响较大,对壤中流流量大小影响较小。降雨强度增加、土壤初始含水量增高均能使壤中流产流时间缩短。壤中流流量显著小于土壤表面径流,但其对土壤养分水平迁移的贡献可能高于土表径流。基于连续模拟犁底层上部土壤及犁底层内部土壤水分垂直迁移的 Richard 模型,结合动力波模型及“双超”模型原理构建的壤中流水平迁移机理模型能够准确反映黑土区坡耕地壤中流径流过程。这一模型的建立是基于黑土区坡耕地这一特定条件,其他下垫面条件下的壤中流水平迁移模拟适用性有待进

一步验证,同时,该模型适用于壤中流流量上升及稳定阶段的模拟计算,对于下降段不适用。

参考文献:

- [1] 杨金忠. 二维饱和与非饱和水分运动的理论及实验研究[J]. 水利学报, 1989(4): 55-61.
- [2] 薛凤海. 关于用有限单元法计算一类边界流量及水力坡度问题的探讨[J]. 水利学报, 1992(7): 57-551.
- [3] Kubota J, Sivapalan M. Towards a catchment-scale model of subsurface runoff generation based on synthesis of small-scale process-based modelling and field studies [J]. Hydrological Processes, 2010, 9(5/6): 541-554.
- [4] Sloan P G, Moore I D. Modeling subsurface storm flow on steeply sloping forested watersheds [J]. Water Resources Research, 1984, 20(12): 1815-1822.
- [5] Stagnitti F, Jean-Yves Parlange, Steenhuis T S, et al. A mathematical model of hillslope and watershed discharge[J]. Water Resources Research, 1992, 28(8): 2111-2122.
- [6] Smith R E, Hebbert R H B. Mathematical simulation of interdependent surface and subsurface hydrologic processes[J]. Water Resources Research, 1983, 19(4): 987-1001.
- [7] Koussis A D. A linear conceptual subsurface storm flow model[J]. Water Resources Research, 1992, 28(4): 1047-1052.
- [8] 李力, 延耀兴, 张海瑞. 水文模拟中壤中流计算方法的研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(1): 65-68.
- [9] 王玉珉, 王印杰. 非饱和土壤 Richards 方程入渗求解探讨[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(1): 9-13.
- [10] Dong W C, Wang Q J. Modeling soil solute release into runoff and transport with runoff on a loess slope[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18(5): 527-535.
- [11] Parlange J Y. Theory of water-movement in soils: I. Onedimensional absorption[J]. Soil Science, 1971, 111(2): 134-137.
- [12] Parlange J Y. Theory of water movement in soils: 8. one-dimensional infiltration with constant flux at the surface[J]. Soil Science, 1972, 114(1): 1-4.
- [13] Brooks R H, Cory A J. Hydraulic properties of porous media[M]. Tallahassee Fort Collins, USA: Colorado State University, 1964.
- [14] 刘继龙, 马孝义, 张振华. 不同条件下 Green-Ampt 模型累积入渗量显函数的适用性[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(1): 11-19.
- [15] Willmott C J. Some comments on the evaluation of model performance[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1982, 63(11): 1309-1369.

(上接第 258 页)

- [12] 陈鹤影. 城市扩张与生态环境效应: 益阳等中小城市土地扩张的特征及其影响因素的研究[J]. 管理观察, 2008(11): 16-22.
- [13] 陈华伟, 黄继文, 张欣, 等. 基于 DPSIR 概念框架的水生态安全动态评价[J]. 人民黄河, 2013, 35(9): 34-37.
- [14] 穆江霞. 西安市建设用地扩展变化研究[J]. 现代城市研究, 2007, 22(4): 38-42.
- [15] 田柳, 陈江龙, 高金龙. 城市空间结构紧凑与土地利用效率耦合分析: 以南京市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(1): 26-34.
- [16] 蔺雪芹, 王岱, 刘旭. 北京城市空间扩展的生态环境响应及驱动力[J]. 生态环境学报, 2015, 24(7): 1159-1165.
- [17] 谭文彬, 刘斌, 张增祥, 等. 近三十年来昆明市城市建设用地扩展遥感监测与分析[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(1): 117-119.
- [18] 李稣获, 任学慧, 曹奇刚, 等. 城市化进程中基于 DPSIR 模型的大连市与锦州市土地集约利用对比分析[J]. 云南地理环境研究, 2012, 24(5): 6-11.
- [19] 陈广. 基于 DPSIR 模型的三峡库区水生态安全评价[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [20] 张凤太, 王腊春, 苏维词. 基于 DPSIRM 概念框架模型的岩溶区水资源安全评价[J]. 中国环境科学, 2015, 35(11): 3511-3520.
- [21] 程振杰. 基于熵值法的辽宁省城市人居环境研究[D]. 辽宁大连: 辽宁师范大学, 2017.
- [22] 孙仪阳. 基于熵值法和数学预测模型的土地生态安全动态评价[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2016.