

坡面泥石流起动模型研究

张万顺¹, 乔 飞¹, 崔 鹏², 彭 虹³, 陈晓清²

(1. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079;

2. 中国科学院成都分院, 成都 610041; 3. 武汉大学水利水电学院, 武汉 430072)

摘 要:针对单一坡面泥石流起动模型进行研究。基于土壤动力学理论、土壤下渗理论和土壤水动力学理论,以及土体含水率变化引起土体抗剪切应力变化的物理机理,提出了坡面泥石流起动模式。在此基础上,结合传统分布式水文模型理论,建立了分布式坡面泥石流起动模型。模型应用于云南蒋家沟典型坡面泥石流研究,能够预测坡面泥石流起动的的时间、部位和起动力,进行多时段模拟坡面泥石流流入沟流量过程线,模拟结果体现了泥石流发生阵发性、不连续性、滞后性的特征,这与实际观测情况吻合,表明应用该模型研究坡面泥石流的起动是可行的,能够为进一步的泥石流数值模拟提供依据。

关键词:坡面泥石流起动;土体含水率;土体应力;分布式模型;云南东川蒋家沟

中图分类号: P642. 23

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)04-0146-04

The Study on the Numerical Model of Debris Flow on the Slope

ZHANG Wan - shun¹, QIAO Fei¹, CUI Peng², PENG Hong³, CHEN Xiao - qing²

(1. College of Resource and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Institute of Mountain Hazards & Environmental Disaster of CAS, Chengdu 610041, China;

3. School of Hydrology and Water Power Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The model of the initiation of debris flow on the single slope is studied. Based on the theory of dynamic of soil, soil infiltration, and the physical mechanism of soil movement caused by percent moisture content, the mode of the initiation of debris flow on the slope is proposed. Then, combining this with the theory of distributed hydrological model, the numerical model of debris flow on the slope is developed and applied to Jiangjia ravine in Yunnan Province. The model is used to predict the time and position of the initiation of debris flow, and to model the continuous flow rate of debris flow. The results agree well with the measured characteristic of debris flow, which shows that it is feasible to model the debris flow initiation with this model, and the model can give facts for the future study of the numerical simulation of debris flow in the whole watershed.

Key words: the initiation of debris flow on the slope; percent moisture content of soil; resistance to shear of soil; distributed model of debris flow; Jiangjia ravine

泥石流是一种常见的山地自然灾害,它是降雨、地形地貌、地质构造、固体堆积物、植被覆盖度及人类活动等共同作用的结果^[1]。当除降雨以外的其它因素达到某种程度时,一旦有足够大的降雨量,就可能发生灾害性的泥石流^[2]。关于泥石流起动的研究对于防治泥石流灾害有着十分重要的作用。

泥石流是由水和固体物质(如泥沙、石块)组成的混相流体,其发生过程非常复杂^[3]。国内外学者主要从泥石流发生的外部条件和泥石流起动物理机理进行研究。泥石流发生的外部条件主要包括三个,陡峭的地形(地貌条件)、大量的松散固体物质(土源条件)和水(水源条件),泥石流的发生是三个条件共同作用的结果^[4]。泥石流形成物理机理分为水力类泥石流和土力类泥石流:水力类泥石流主要由地表径流冲刷坡面补给物质形成,泥石流流量与降雨有密切关系^[5~8];土力类泥石流主要由降雨下渗引起坡面土体的滑

坡、崩塌而形成,土力类泥石流可能发生在降雨过程中,也可能发生在降雨结束以后,破坏性最大。土力类泥石流起动和形成,目前的研究基本都是从坡面土体稳定性入手,通过坡面滑坡体转化研究泥石流的形成。王裕宜等(2001)通过实验分析了土体抗剪切力和土体含水率的关系^[9]。胡明鉴等(2001)通过人工实验对斜坡土体含水率与土体稳定性关系进行分析^[10]。鲁晓兵(2001)对土体振动和冲刷进行受力分析,研究了滑坡泥石流起动的条件^[11]。这些研究对土力类泥石流的起动的提供了基础,但都是仅限于静态地、单一地研究泥石流起动的形成的条件,没有能够与实际降雨过程相结合形成动态地、系统地定量计算坡面泥石流的起动理论。

本文基于 GIS 技术对流域进行数字离散,形成坡面带单元,在坡面带单元上应用土壤下渗理论和土壤动力学理论,建立分布式泥石流模型^[12,13],对云南蒋家沟单一坡面的泥石流起动过程采用数值模型进行定量研究,主要进行了如下几方

* 收稿日期:2005-07-11

基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(40025103);国家“973”计划资助项目(2002CB412300)

作者简介:张万顺(1965-),教授,博导,武汉大学资源与环境科学学院,从事环境管理与规划教学和研究。

面的工作:(1)将泥石流易发坡面划分成带状单元,动态识别单元参数(面积、坡度、空隙度、下渗率、含水率等);(2)根据土壤下渗理论分析降雨过程中坡面带单元土体下渗率,土体含水率、土体空隙度的动态变化;(3)结合土体动力学理论对坡面土体进行稳定性分析和泥石流起动定量计算;(4)采用一维动力模型进行坡面泥石流演算。数值结果表明,该模型能够描述泥石流的起动过程,比较准确地反映了泥石流阵性、滞后性的特征,为进一步的泥石流预报提供了可靠的依据。

1 分布式泥石流起动模型

分布式泥石流起动模型将泥石流起动理论与分布式模型相结合,研究坡面单元在重力和表层流体作用下的泥石流起动和演算,解决了泥石流发生时空分布不均的问题^[14]。模型主要包含三个主要部分:土体下渗和土体含水率计算;土体动力分析和泥石流起动定量计算;坡面泥石流演算。

1.1 土壤下渗模型

降雨下渗是指降雨经过地表进入到土体的过程。降雨泥石流起动和形成过程时间较短,是一个短期效应,也是一个复杂过程,与土体结构和土水势有着密切的关系,本文主要考虑降雨过程中垂直方向的水运动过程,坡面带单元土壤中垂向非饱和水运动可用下面的数学描述:

$$C(h) \frac{\partial b}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial b}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(h)}{\partial z} \quad (1)$$

初始条件: $h|_{t=0} = h_0(z)$ (2)

Dirichlet 边界条件, $h|_{z=1} = h_1(z), Z=1$ (3)

式中: $C(h)$ ——比水容重, $C(h) = \frac{d}{dh} \cdot \frac{\partial}{\partial t} = C(h) \frac{\partial b}{\partial t}$,——土体含水量; $K(h)$ ——垂向水力传导系数; h ——基质势; h_0 ——初始值; h_1 为基质势边界条件。对于坡面带单元土壤中垂向非饱和水运动方程来讲, $K(h)$ 是 h 的函数,模型属于非线性模型,不能直接求出 h 、,必须使用迭代算法来推求。

1.2 泥石流起动模型

泥石流源地土体的抗剪切力随着土体含水率产生变化,当土体含水率达到一定程度,土体的稳定性就遭到了破坏,土体产生滑动或者崩塌,进一步就形成泥石流。因此,土壤抗剪切力直接决定着泥石流的起动。

1.2.1 土体应力计算

坡面单元土体主要在抗剪切和剪切力的相互作用下保持稳定或者产生滑动,降雨过程中抗剪切力主要由内凝力和内摩擦力决定,抗剪切力主要受重力和地表泥石流的冲刷力影响^[4,16]:

$$\begin{cases} = c + \sigma_n \tan \varphi \\ F = \sigma_n + k_1 \times \sigma_0 \times V_0^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中:——土体抗剪切应力(pa); F ——土体切向应力(pa); C ——土体内聚力(pa),——土体内摩擦角($^\circ$),两者均为土体含水率 的函数^[9,10], $C = f_1()$, $\varphi = f_2()$; σ_n ——土体法向应力(pa), $\sigma_n = (G + G) \cos \alpha / A$; σ_0 ——土体切向应力(pa), $\sigma_0 = GV \sin \alpha / A$;——表层土体坡度($^\circ$); G ——土体重力(n); G ——表层泥石流重力(n); V_0 ——表层泥石流流速(m/s); A ——土体单元表层面积(m^2); σ_0 为表层泥石流密度(kg/m^3); k_1 ——经验参数。

1.2.2 土体起动厚度估算

坡面土体起动并形成泥石流与土体剪切应力(F)和抗剪切应力(τ)有着密切的关系。坡面泥石流起动中表层土体起动厚度的估算比较重要,坡面土体在剪切力和抗剪切力的

作用下起动,形成具有一定速度的流体,满足下面条件:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F - \tau}{H_s \cdot s} \quad (5)$$

对公式积分得到:

$$v_1 = \frac{F - \tau}{H_s \cdot s} \times t \quad (6)$$

泥石流的流速公式^[4]:

$$v_2 = K_1 H_c I \quad (7)$$

如果形成泥石流,则有: $v_1 = v_2$

$$\frac{F - \tau}{H_s \cdot s} \times t = K_1 H_c I \quad (8)$$

$$H_c = H_s + H_w \quad (9)$$

令 $H_w = H_s$,由式(8)、式(9)得到,表层土体起动厚度估算公式:

$$H_s = \left[\frac{(F - \tau) \cdot t}{K_1 \cdot s \cdot I \cdot (1 +)} \right]^{1/(1+)} \quad (10)$$

式中: v_1 、 v_2 ——土体起动后的速度(m/s); H_s 、 H_w 、 H_c ——起动土体的厚度(m),地表泥石流深度(m),土体起动后形成的泥石流深(m); s ——起动土体的密度(kg/m^3); I 坡面比降; K_1 、、——经验参数,根据流域实测资料选定。公式(10)中,剪切应力 F 和抗剪切应力 τ 在土体含水率和坡度确定的情况下是土层厚度 H_s 的函数,因此,该式不能直接求出 H_s ,需要经过迭代计算来确定。

1.3 坡面泥石流演算

坡面单元泥石流的产流和汇流并不是两个完全独立的过程,起动产流过程中实际已经包括了坡面汇流,两者相互结合,其本身是一个很复杂的过程,为降低计算的复杂程度,模型对其进行简化,将不规则的坡面单元概化成一系列连续点单元(图1),采用一维动力坡面演算模型,即坡面流的 St. Venent 方程(式11),进行坡面泥石流演算:

水流连续性方程:

$$\frac{\partial b}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial t} = r \quad (11)$$

输沙连续性方程:

$$\frac{\partial (h S_c)}{\partial t} + \frac{\partial (q S_c)}{\partial t} = H_s S_s \quad (12)$$

式中: h ——径流深(m); q ——单宽流量(m^2/s); r ——单元产流深(m/s); S_c ——泥石流中沙与水比例系数, $S_c = \frac{S_w}{1 - S_v}$, S_v ——泥石流中泥沙的体积百分比含量; H_s ——单元土体起动厚度; S_s ——土体中泥沙的体积百分比含量; l ——坡面长度(m), t ——时间(s)。泥石流具有极限运动浓度 S^* ,如果浓度达到 S^* ,泥石流将会停止运动,在坡面淤积下来,其淤积厚度为 $h S_c$,则停止输沙演算。本文用一维有限差分法离散方程(11)(12),进行坡面泥石流演算,根据泥石流流速公式(7)计算泥石流流速 v (m/s),则 $q = v \times H_c$ (m^2/s)。

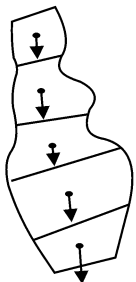


图1 坡面单元划分示意图

2 分布式泥石流起动模型在云南蒋家沟的应用

蒋家沟地处云南东川,是小江流域内最具代表性的一条泥石流沟,流域面积 48.6 km²,主沟长 13.9 km,海拔 1 042 ~ 3 269 m,植被稀少,崩塌、滑坡发育,降雨充沛,是著名的泥石流多发地带^[1]。蒋家沟泥石流观测项目较多、资料较多、系列较长、幅度较宽,这为泥石流基础理论研究奠定了良好的基础。

2.1 蒋家沟坡面土体特性

蒋家沟泥石流源区广泛分布着砾石土,其显著特征是级配较宽,分布不均匀,随着坡面坡度的变化,源区砾石土的颗粒级配与空隙率有一定的分布规律^[1]。坡地的垂直组合分布形态取决流域地貌的演化,流域沟道侵蚀速度不断增加,垂直坡地组合形态具有凸形坡形态,即以分水岭和沟道最为平缓,主流两岸谷坡最陡。坡地的土体状况与坡地的成因类型有关,在流域分水岭及其毗邻的山地剥蚀面上,一般发育有地带性风化壳和土壤(山地红壤)。而在极陡的谷坡上却缺乏地带性风化壳和土壤,风化壳底层的岩屑碎石土体直接露出地表。主流山坡上部或分水岭及其临近地带,地面坡形和缓,一般 10 ~ 20°,根据基岩岩性的不同,分为两类,红壤和红色石灰土(红色土)。红壤质地属亚黏土,土体厚度变化于数十厘米至数十米,土体颗粒由地表向地下深处变粗,底部为砂岩、板岩风化碎石土体。红色土土体厚度可达 10 多 m,与下覆基岩间无碎石土体,红色土黏重、板结、空隙度小、天然含水率高、透水性弱。

这一特殊的土壤分布规律为泥石流的形成提供了土源条件,流域分水岭处分布的红壤黏粒含量大,透水性弱,土体易积聚水分,天然含水率高,在一定的降雨条件下容易产生滑坡、崩塌,形成泥石流。

2.2 坡面泥石流起动计算

根据蒋家沟 DEM(10 m × 10 m)进行流域划分^[17,18],并进行坡面单元化,提取单元属性,包括面积、坡度等。选取泥石流易发生的典型凸形坡面进行研究(图 3),该坡面由上到下分为 5 个单元。5 号单元位于坡面最上游,坡度最小,土壤粒径小,4、3、2 三个单元坡度变化率较小,处于凸形坡面的分水岭附近,1 号单元坡度最大,处于坡面最下游,属于河谷沟道两侧的陡坡,地表缺乏风化壳和土壤。5 个单元的坡度、初始体积含水率和初始空隙率见表 1。

表 1 蒋家沟坡带单元特征

坡带	比降	初始体积含水率	初始孔隙率
5	0.1737	0.2178	0.3594
4	0.3386	0.1801	0.3790
3	0.3580	0.1667	0.3815
2	0.4433	0.1056	0.3932
1	0.5557	0.0579	0.4103

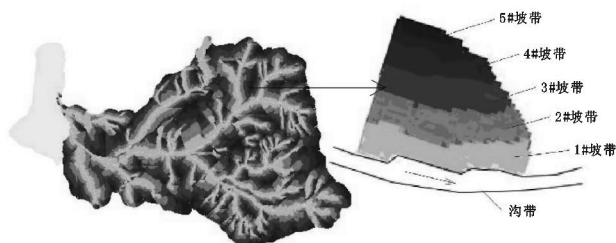


图 2 坡带单元划分示意图

本文选用蒋家沟 2001 年 7 月 7 ~ 8 日的降雨过程,结合蒋家沟坡面地形、地貌和土体特征条件,应用分布式泥石流模型进行坡面泥石流起动模拟,土体起动厚度按照式(10)估算,坡面泥石流汇流采用一维有限差分方法,模拟结果见图 3 和图 4。

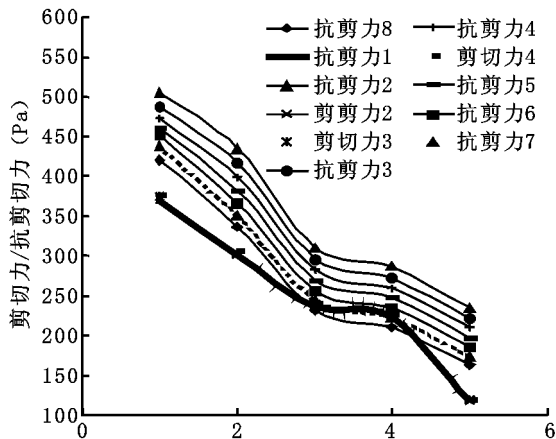


图 3 连续时段剪切力和抗剪力变化示意图

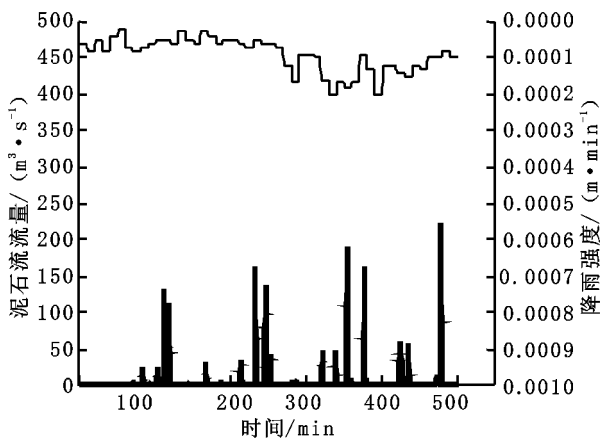


图 4 泥石流/降雨过程线

对坡面泥石流模拟结果进行分析,可以得到如下结论:

(1) 从图 3 来看,连续时段剪切力变化不大,抗剪力变化比较明显,说明泥石流起动主要由抗剪力减小而引起;从剪切力和抗剪力的变化过程来看,3 号坡带抗剪力减小最快,最早小于剪切力,产生泥石流;随着土体含水率的增大,2 号坡带和 4 号坡带,也产生泥石流;1 号坡带和 5 号坡带的抗剪力总大于剪切力,因此不会发生泥石流,说明坡面泥石流发生的部位就在凸形坡面的分水岭附近,这一结果与实际观测的现象比较吻合,符合泥石流客观规律,定性描述坡面泥石流的起动部位。

(2) 图 4 是连续时段的泥石流流量过程线,时段全长为 500 min,最大降雨强度为 2.0 mm/10 min,最小降雨强度为 0.2 mm/10 min。从模拟结果可以看出,泥石流发生全过程周期性和阵性明显,泥石流流量变化范围比较大,连续性不强。从泥石流发生的时间来看,降雨开始 73 min 左右有少量泥石流产生,112 ~ 118 min 发生两场比较大的泥石流,第一个周期结束;233 ~ 246 min 有两次较大泥石流发生,第二个周期结束;355 ~ 376 min 有两次较大泥石流发生,第三个周期结束;最后一次较大泥石流发生在 479 min,整个泥石流过程结束。模拟计算的泥石流暴发周期间隔约为 100 ~ 120 min,与降雨强度和土层的起动厚度有关。雨强最大的时间

为 340 min 和 400 min,泥石流流量最大时间为 480 min,说明了泥石流形成过程存在滞后性。

3 结 论

本文从土体抗剪切应力与剪切应力之间的关系提出了坡面泥石流起动模式,并与分布式水文模型理论相结合,建

立了坡面泥石流起动模型。应用该模型,模拟云南东川蒋家沟典型坡面的降雨泥石流过程,数值结果很好的描述了天然降雨形成泥石流的所有特征——阵发性、不连续性、滞后性等,这说明该模型建立机理是正确的,模拟结果是合理的,能够解决复杂的坡面泥石流起动问题,从而为全流域泥石流预报提供有力的支持。

参考文献:

- [1] 吴积善,康志成,田连全,等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京:科学出版社,1990.
- [2] 谭万沛. 中国暴雨泥石流预报基本理论与现状[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(1):89-95.
- [3] 费祥俊,舒安军. 泥石流运动机理与灾害防治[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [4] 唐邦兴,周必凡,吴积善,等. 中国泥石流[M]. 北京:商务印书馆,2000.
- [5] 余斌,洪勇,何淑芬. 降雨泥石流预报的研究[J]. 水土保持学报,2002,16(6):96-99.
- [6] 魏永明,谢又予. 降雨型泥石流(水石流)预报模型研究[J]. 自然灾害学报,1997,6(4):48-54.
- [7] 崔鹏,等. 中国泥石流监测预测研究现状与展望[J]. 自然灾害学报,2000,9(2):10-15.
- [8] 高速,周平根,董颖,等. 泥石流预测、预报技术方法的研究现状浅析[J]. 工程地质学报,2002,10(3):279-283.
- [9] 王裕宜,詹钱登,严璧玉,等. 泥石流流体结构和流变特性[M]. 长沙:湖南科学技术出版社,2001.
- [10] 胡明鉴,汪稔,张平仑. 斜坡稳定性及降雨条件下激发滑坡的试验研究——以蒋家沟流域滑坡堆积角砾土坡地为例[J]. 岩土工程学报,2001,23(4):454-457.
- [11] 鲁晓兵,崔鹏. 泥石流启动分析[J]. 力学与实践,2001,23(6):21-23.
- [12] 王中根,刘昌明,吴险峰. 基于 DEM 的分布式水文模型研究综述[J]. 自然资源学报,2003,18(2):168-173.
- [13] 唐莉华,张思聪. 小流域产汇流及产输沙分布式模型的初步研究[J]. 水力发电学报,2002,第1期(专刊):119-127.
- [14] 夏军,王纲盛,吕爱峰,等. 分布式时变增益流域水循环模拟[J]. 地理学报,2003,58(5):789-796.
- [15] 陈宁生,张军. 泥石流源区弱固结砾石土的渗透规律[J]. 山地学报,2001,19(1):169-171.
- [16] C M 弗莱施曼. 泥石流[M]. 北京:科学出版社,1986.
- [17] Tribe A. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models:a review and a new method[J]. Journal of Hydrology,1992,139(1/4):263-293.
- [18] Turcotte, Fortin J P, Rousseau A N, et al. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network[J]. Journal of Hydrology,2001,240(3~4):225-242.
- [19] 吴积善,等. 泥石流及其综合治理[M]. 北京:科学出版社,1993.
- [20] 白永峰. 成昆线暴雨泥石流预报量化方法的探讨[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(3):67-72.
- [21] Thomas C. Pierson. Flow characteristics of large eruption-triggered debris flows at snow-clad volcanoes:constraints for debris-flow models[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research,1995,66:283-294.
- [22] L Franzi, GBianco. A Statistical Method to Predict Debris Flow Deposited Volumes on a Debris Fan[J]. Phys. Chem. Earth,2001,26(9):683-688.
- [23] A H Schumanna, R Funkeb, G A. Schultz. Application of a geographic information system for conceptual rainfall-runoff modeling[J]. Journal of Hydrology,2000,240:45-61.
- [24] 中国科学院成都山地灾害与环境研究所. 泥石流研究与防治[M]. 成都:四川科学技术出版社,1989.

(上接第 145 页)

方面效果相对明显。

(3) 退耕还林还草所带来的植物物种多样性变化与土壤

性状变化存在正相关关系,说明土壤性状的改良与物种多样性的增加可能存在相互促进作用。

参考文献:

- [1] Zhao WZ, Xiao HL, Liu ZM, et al. Soil degradation and restoration as affected by land use change in the semiarid Bashang area, northern China[J]. Catena,2005,59(2):173-186.
- [2] Dregne H E. Land degradation in the drylands[J]. Arid Land Research and Management, 2002,16(2):99-132.
- [3] Rodriguez A R, Mora J L, Arbelo C, et al. Plant succession and soil degradation in desertified areas (Fuerteventura, Canary Islands, Spain)[J]. Catena,2005,59(2):117-131.
- [4] Pando-Moreno M, Jurado E, Manzano M, et al. The influence of land use on desertification processes[J]. Journal of Range Management, 2005,57(3):320-324.
- [5] 韩永伟,韩建国,王堃,等. 农牧交错带退耕还草对耕作层土壤磷、钾含量的影响[J]. 草地学报,2003,11(3):228-233.
- [6] 姜凤岐,曹成有,曾德慧. 科尔沁沙地生态系统退化与恢复[M]. 北京:中国林业出版社,2002.
- [7] 盛学斌,刘云霞,孙建中. 农牧交错带土壤及某些表生植被特性变异与荒漠化的相关性——以冀北康保县为例[J]. 应用生态学报,2002,13(7):909-910.
- [8] 史培军,严平,袁艺. 中国北方风沙活动的驱动力分析[J]. 第四纪研究,2001,21(1):41-47.