

紫色土区土壤初始含水量对坡面径流溶质流失的影响

秦川¹, 何丙辉¹, 王亮¹, 刘永鑫²

(1. 西南大学 资源环境学院 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 四川省成都市龙泉驿区第十中学, 成都 610108)

摘 要:土壤初始含水量在一定程度上影响着紫色土区的水土流失。通过人工降雨试验,研究了紫色土在 5%, 10%, 15% 和 20% 共 4 种初始含水量条件下的入渗、产流和径流溶质迁移变化过程。结果表明:径流强度随降雨时间呈对数函数变化;降雨 25 min 后,径流强度趋于稳定值;在单位时间内,紫色土坡面平均径流深度和累积径流量随初始含水量的增大而增大,而坡面平均入渗率则呈相反的变化趋势。径流中 PO_4^{3-} , K^+ , Br^- 浓度均呈现相同的变化规律,在开始产流时,径流溶质浓度很高,随后迅速衰减并逐渐趋于稳定。径流溶质的流失量随初始含水量的增加而增加,径流溶质从土壤迁移到径流的过程是从很小值迅速增大到某一峰值,然后逐渐衰减至稳定。指数函数比幂函数更适合描述紫色土丘陵区坡地径流溶质迁移变化过程。

关键词:紫色土;土壤初始含水量;土壤侵蚀;养分流失

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)01-0019-06

Effect of the Soil Antecedent Water Content on Soil Solutes Loss on Slope of Purple Soil Region

QIN Chuan¹, HE Bing-hui¹, WANG Liang¹, LIU Yong-xin²

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-environment
of Ministry of Education, Institute of Resources and Environment, Southwest University,

Chongqing 400715, China, 2. The 10th middle school of Longquanyi District, Chengdu 610108, China)

Abstract: Soil antecedent water content affects soil and water loss in purple soil area to some extent. According to the results of lab simulation rainfall experiments, the process and mechanism of rainfall infiltration, runoff process, release-transport and change of runoff and solutes less than four soil antecedent water content 5%, 10%, 15% and 20% were studied on purple soil region. The results showed that runoff intensity presents a logarithmic function with rainfall time changing, runoff intensity trended to be steady about 25 minutes later when rain occurred. The change of accumulated output runoff presented a linearity relationship with soil antecedent water content in unit time. The soil surface runoff and an average depth increase with the rise of initial the moisture contents, and the average infiltration rates on slope changes in the reverse trend. The concentrations of PO_4^{3-} , K^+ , Br^- of runoff presented the same law, at the beginning of runoff yields, the runoff concentration was very high, and then it got down quickly, finally, it trended to be steady. The soil solute losses was gaining with the increase of soil antecedent water contents, the process that the solutes transport from soil to runoff increased quickly to a peak value from a very small concentration, then gradually decayed to a stable content. Exponential function model was more suitable to describe the process of runoff solutes release, transport and change on purple soil hilly region compared with power function model.

Key words: purple soil; soil antecedent water content; soil erosion; nutrient loss

紫色土坡耕地是西南丘陵地区主要的耕地资源,也是长江上游主要泥沙来源之一^[1]。影响土壤侵蚀

的因素很多,其中气候因素中的降雨是引起土壤流失的最主要因子^[2]。以水力侵蚀为主的紫色土丘陵区,

收稿日期:2012-06-15

修回日期:2012-09-10

资助项目:农业部行业公益性科研项目“南方山地丘陵区面源污染监测与氮磷投入阈值研究”(201003014-6-3);国家科技支撑计划(2011BAD31B03);国家自然科学基金(40671115);西南大学生态学重点学科“211 工程”三期建设项目

作者简介:秦川(1986—),男,甘肃敦煌人,硕士,主要从事城市水土保持研究。E-mail:qinchuan523@126.com

通信作者:何丙辉(1966—),男,博士,教授,主要从事土壤侵蚀与小流域综合治理研究。E-mail:hebinghui@yahoo.com.cn

雨量充沛,土壤侵蚀严重,坡耕地坡面径流及其携带的泥沙是土壤养分流失的载体,随地表径流和泥沙的流失,土壤养分也随之发生流失,进而导致地表水体的富营养化和农业面源污染,这些问题严重阻碍了丘陵区农业的可持续发展。因此研究降雨入渗产流并合理利用土壤水资源是该区域生态环境建设和农业可持续发展的关键问题^[3-4]。土壤前期含水量影响紫色土丘陵区降雨—入渗—径流过程和径流溶质流失过程的一个重要因素。孔刚等^[5]在黄土高原区粉质砂土的研究认为:在前期含水量不同时,次降雨过程中养分的流失量与初始含水量具有较强的相关性。不同研究者所关注的对象不同,得出的结论缺少全面性,甚至认为前期含水量对坡地溶质迁移可以不考虑。此外,很多学者都对黄壤、红壤和棕壤做了相关研究,但对于紫色土的研究却很少,现有研究还有待深入。

坡耕地水土流失与径流溶质迁移的研究是农业

生产与水土保持领域的主要研究课题,本文以紫色土为研究对象,探讨在人工模拟降雨条件下,不同初始含水量对坡面的入渗和土壤溶质迁移过程的影响及其机理,以期对西南丘陵区坡耕地减少土壤养分流失和降低农业面污染源提供参考和依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

室内人工降雨模拟试验主要利用 NSERL 美国土壤侵蚀研究实验室提供的人工模拟降雨装置^[6],供试土壤采自重庆市渝北区木耳镇后河小流域,土壤为侏罗纪沙溪庙组泥岩和砂岩母质发育而成的灰棕紫泥土,该土壤土层厚度在 50 cm 以上,试验用弃耕地表层 0—20 cm 的耕层土,质地为轻壤。供试土壤风干后过 5.0 mm 筛,除去沙砾、石块和植物根等杂质后风干、混合均匀,以备试验用。土壤的基本理化性质如表 1 所示。

表 1 试验土壤的基本理化性质

土壤	容重/ (g·cm ⁻³)	pH 值	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	土壤的机械组成/%		
							<0.001 mm	0.001~0.05 mm	>0.05 mm
紫色土	1.30	6.5	1.04	0.62	23.52	19.75	18.16	48.80	33.04

1.2 试验设计

土壤前期准备:试验中紫色土的前期土壤质量含水量设定 4 个水平:5%,10%,15%,20%。由于田间土壤氮磷钾含量差异较大,首先测定供试土壤初始含水量,根据所要求土壤的初始含水量和含溴、磷、钾水平,计算所需补水量和肥料量,然后将土样均匀摊开,用喷壶将蒸馏水、132 g/m² 溴化钾和 20 g/m² 磷酸二氢钾均匀喷洒在土壤上,充分搅拌均匀,最后装入塑料大桶中,密封存放,静置 24 h。通过上述方法,可获得肥料含量分布均匀、含水量平均误差控制在 2% 以内的土壤。

试验用土槽尺寸为长 2.0 m,宽 1.0 m,高 0.5 m,在土槽的径流出口处安装了“V”形钢槽收集径流;槽内底层铺鹅卵石一层,在其上覆一层细沙,最后填土 30 cm。为了控制试验坡面物理状况的一致性,采用每 5 cm 厚分层装填土壤,层间接触面进行粗糙化处理,以减少土壤分层现象,先填装 20 cm 厚、含水量 10% 的土壤,来模拟犁底层,随后填装备制好的不同含水量的土壤,逐层填装至 10 cm 厚度,土层表面与收集径流的 V 形槽保持在同一水平上,模拟降雨前初始含水量;并控制紫色土容重为 1.30 g/cm³。最后,用塑料薄膜覆盖土壤表面,以防模拟降雨前期表层土壤含水量因蒸散而改变。

模拟降雨过程及样品采集。许多研究表明,暴雨是造成紫色土丘陵区水土流失的主要降雨类型,所以

试验降雨强度设为 1.392 mm/min,模拟坡地将坡度设置为 15°,降雨历时 60 min,当开始产流时,前 10 min 每隔 2 min 收集一次径流样,10~30 min 内先每间隔 5 min 收集一次径流水样,然后每间隔 10 min 收集一次径流水样,其余水样均收集在大塑料桶内,用于径流量的分析,提取的水样用于测定径流中水溶性磷、水溶性钾和水溶性溴离子含量。

1.3 测定内容和方法

坡面土壤样品采集和分析:每次降雨后迅速在土槽中部分层取样,表层按 0—0.5 cm,0.5—1.0 cm 取样,此后每 1 cm 取样 1 个土样直至取至湿润峰处。土壤理化性质测定:土样一部分用于测定土壤含水量,另外一部分经风干后用于测定土壤养分指标,土壤容重采用环刀法测定,土壤的机械组成采用吸管法测定。用称重法测定不同降雨时刻的径流量。径流中 PO₄³⁻ 采用钼蓝比色法—紫外分光光度计测定;K⁺ 用原子吸收分光光度计测定;Br⁻ 采用蒸馏水浸提(土水比 1:5),震荡 30 min 后过滤,用精密离子计测定。试验数据运用 Excel 2010 软件进行分析与处理。

2 结果与分析

2.1 不同前期含水量对降雨—入渗—径流过程的影响

前期土壤含水量对坡地降雨—入渗—产流过程有着重要的影响,裸地土壤产流时刻随前期土壤含水

量的变化反应最为明显^[7]。降雨开始后,雨水首先落在地表入渗成为土壤水,经过一段时间土壤水分达到饱和后,当土壤的入渗能力小于降雨强度时,雨水沿坡面运动成为地表径流。入渗率能反映土壤水源涵养能力和抗侵蚀能力,其对侵蚀产沙也有一定的影响^[8]。土壤入渗率的变化影响径流的形成过程,是描述降雨条件下坡地水文过程的一个重要指标。根据降雨过程中实测径流量大小,利用公式(1)—(2)^[9]可得出单位时间单位面积径流深度和坡面平均入渗率。

$$H=10R/tS \tag{1}$$

$$i=[ptcosa-(10R/S)]/t \tag{2}$$

式中: H ——径流深度(mm); i ——坡面平均入渗率(mm/min); R ——在 t 时间内产生的径流量(ml); p ——降雨强度(mm/min); S ——坡面实际承雨面积(cm^2); a ——地表坡度($^\circ$); t ——降雨时间(min)。

图 1 为不同前期含水量条件下径流强度和累计径流量变化过程。由图 1 可知,紫色土坡面径流强度随降雨时间整体呈增大趋势,当前期土壤含水量达到 20% 时,表现出明显的对数函数关系,降雨 25 min 后,径流强度逐渐趋于稳定,且随着前期含水量的增大,径流强度稳定值的增大也很明显。这与 Philip^[10]研究得出的随着降雨历时的延续,前期土壤含水量对入渗的影响变小,最终可忽略的结论是一致的。根据入渗规律,在雨强和坡度均较大的情况下,土壤表面径流表现出不同的特征,单位时间内,初始含水量与累计输出径流量呈正相关关系,土壤累积径流量输出顺序为:初始含水量 20% > 15% > 10% > 5%,这与

传统降雨产流过程表现出基本相同的趋势。产生这种现象是因为土壤前期含水量影响着土壤的入渗和产流,土壤前期含水量大,使得土壤较快达到饱和而产生径流;相反,土壤前期含水量小,前期降雨主要满足土壤水分下渗,只有降雨强度较大,土壤达到饱和后,才会产生地表径流。

图 2 为不同前期含水量条件下平均径流深和平均入渗率变化过程。通过对结果进行分析发现,在产流 25 min 后流量基本达到稳定,相应入渗量也达到稳定,因而将该时刻的入渗率作为稳定入渗率。由图 2 可知,初始含水量越大,产流越快,平均入渗率越小,趋于稳定入渗阶段的时间也越短,在初始含水量达 20% 时,平均径流深在各个时间段均比其它处理大,而平均入渗却比其它处理小。在雨滴对土壤颗粒产生击溅作用和表土夯实作用下,表层土壤的物理性状发生了不同程度的改变,因而坡面土壤入渗能力、产流和产沙与前期土壤含水量的关系变得更为复杂,土壤入渗能力随着土壤初始含水量的增加而减小^[11-12]。

在降雨强度和坡度都较大的情况下,当土壤含水量较低时,土壤颗粒在雨滴打击作用下容易分散,细颗粒随着雨水流动、入渗、堵塞土壤孔隙,迅速形成土壤结皮,导致入渗率迅速降低,径流量迅速增大。紫色土坡面平均径流深度随初始含水量的增大而增大,而坡面平均入渗率呈则相反的变化趋势,土壤初始含水量越大,产流时刻越早,产流速度越快,径流对地表的冲刷力越大,土壤侵蚀越严重。

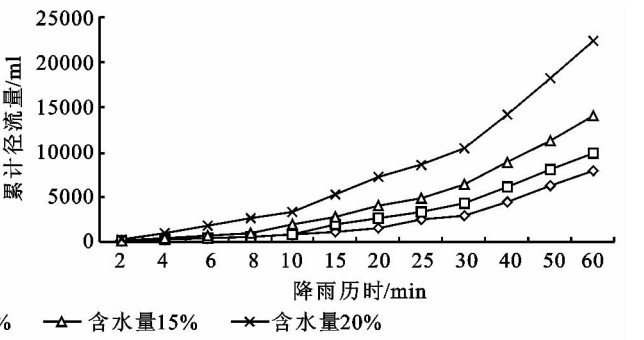
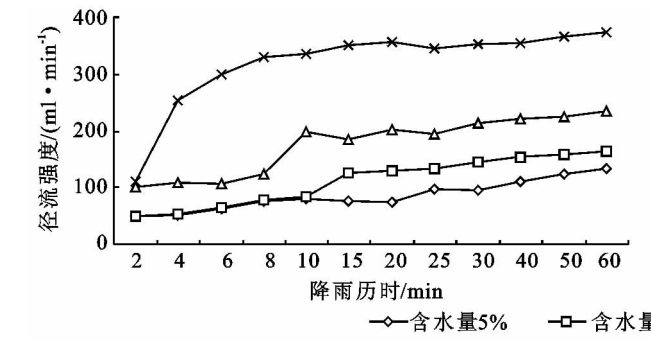


图 1 不同前期含水量条件下径流强度和累计径流量变化过程

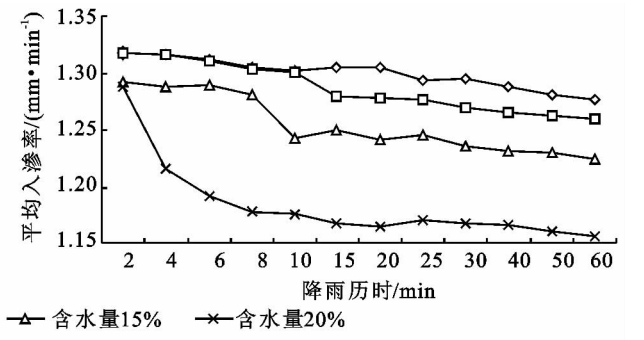
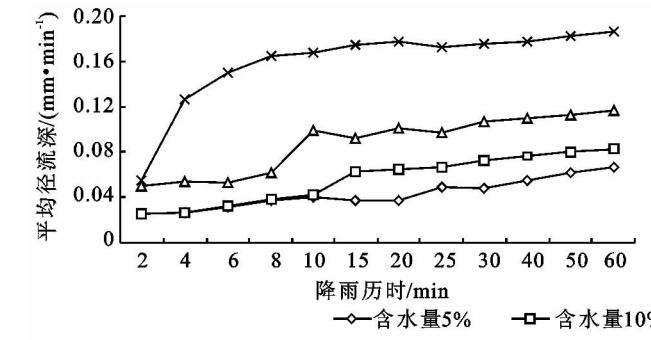


图 2 不同前期含水量条件下平均径流深和平均入渗率变化过程

2.2 不同前期含水量对坡面径流溶质浓度的影响

土壤表层一定深度内的溶质可随地表径流迁移,而此深度以下的溶质不随地表径流迁移。土壤前期含水量决定了土壤初渗量及初期吸水能力,因而不同前期含水量对坡面径流溶质浓度也有较大影响。由于硝态氮本底值很高,径流硝态氮流失量变化趋势和径流量变化过程一致,但不能反映土壤硝态氮随径流迁移情况;而 Br^- 在自然界的含量很低,在降雨过程中不发生物理和化学变化,在径流运移过程中与硝态氮相似,因此用溴离子来示踪硝态氮是比较合理的^[13]。降雨和径流是土壤养分流失的动力,土壤是降雨和径流作用的界面,土壤养分与径流、泥沙相互作用过程是土壤养分流失之所以产生的关键所在^[14]。

图3为在不同前期含水量条件下径流溶质浓度随降雨历时的变化过程。由图3可知,径流中 PO_4^{3-} , K^+ , Br^- 的浓度变化均呈衰减过程,前期含水量为20%的土壤,径流中 PO_4^{3-} , K^+ , Br^- 的浓度在整个产

流阶段都明显高于其它处理。 PO_4^{3-} 和 K^+ 浓度在产流初期衰减较快,之后基本趋于稳定,而 Br^- 出现较大波动。土壤前期含水量决定了土壤中磷素的溶解态和吸附态所占比例,在整个产流过程中,磷素在土壤中吸附能力较强,且主要富集在表层土壤中,土壤的侵蚀量明显影响了磷素的流失。在产流初期,径流中 K^+ 浓度较高,然后逐渐降低并在20 min后趋于稳定,这是由于坡面径流的稀释溶解作用较强,加之产流初期吸附于表层颗粒中和存在于土壤液相中的含量相对较高,因此产流初期 K^+ 浓度高,随着降雨的持续,土壤表层的 K^+ 不断被雨水淋洗和冲刷,致使径流中 K^+ 的浓度逐渐降低并趋于稳定。由于 Br^- 移动性强,土壤前期含水量高的土壤,产流时表层土壤 Br^- 含量较高,因此产流初期 Br^- 浓度很高,随着降雨的持续,紫色土地表径流的稀释作用、持续入渗作用和下层土壤溶质的供给相对迟缓,使得径流中的 Br^- 浓度出现波动变化。

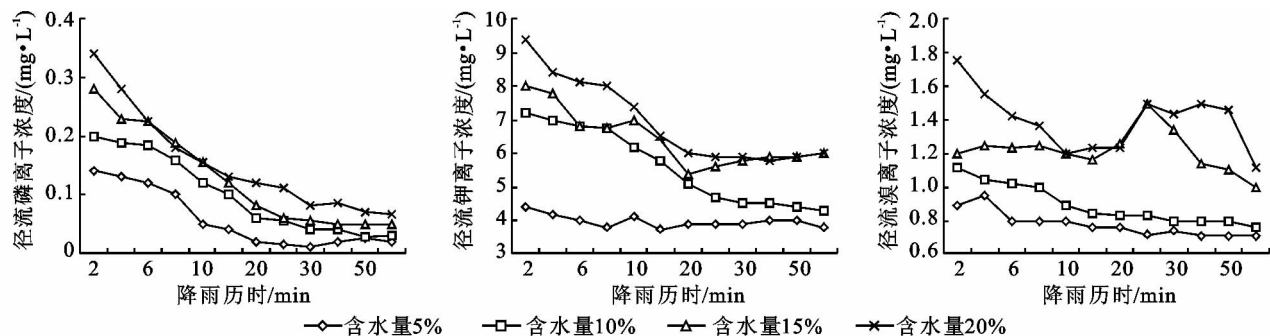


图3 不同初始含水量条件下径流溶质浓度变化过程

2.3 不同前期含水量对径流溶质流失率的影响

影响坡面土壤养分流失的因素很多,除地形因素通过影响径流泥沙量来影响养分流失外,气候、降雨、土壤初始含水量、土壤初始养分浓度、土壤容重等因素也会对土壤养分流失造成影响。利用公式(3)可获得3种化学物质在不同土壤初始含水量条件下的径

流溶质流失率动态变化过程,结果如图4所示。

$$m(t) = c(t) \times r(t) \quad (3)$$

式中: $m(t)$ ——表示 t 时刻坡面出口处的径流溶质流失量(mg/min); $c(t)$ ——表示 t 时刻坡面出口处的径流浓度(mg/L); $r(t)$ ——表示 t 时刻坡面出口处的径流量(L/min)。

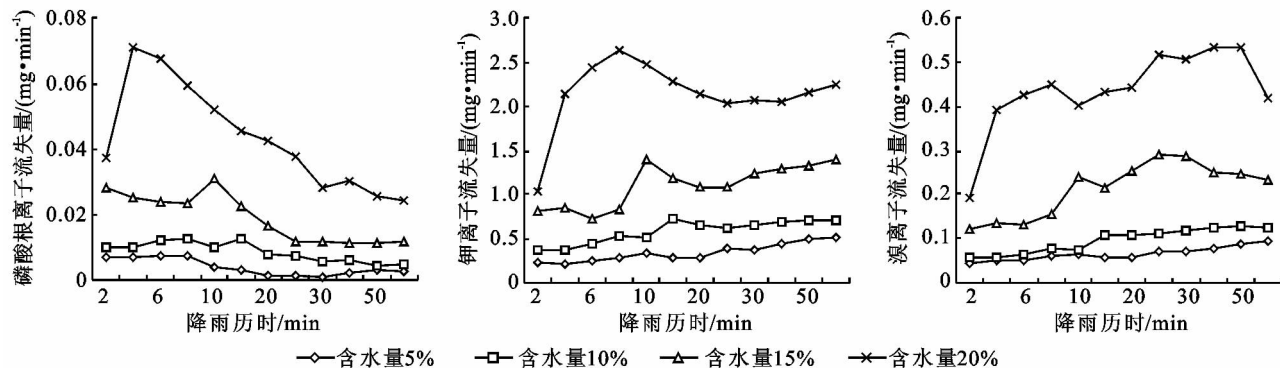


图4 不同初始含水量条件下径流养分流失变化过程

图4显示了 PO_4^{3-} , K^+ , Br^- 随地表径流迁移过程的流失量变化。由图4可以看出,随着初始含水量

的增大,径流溶质随地表径流迁移出的量也在增加,初始含水量为20%的土壤明显比5%的流失量高

出很多,在降雨历时 4 min、20% 初始含水量时,径流 PO_4^{3-} , K^+ , Br^- 流失率分别为 5% 初始含水量的 10.52,9.78,7.97 倍。径流溶质迁移的过程均是从很小值迅速增大到某一峰值,然后逐渐衰减至稳定,这是由于前期含水量很高,土壤水分接近饱和,降雨后迅速产流,降水稀释了土壤水溶质含量,加之溶质的溶解和扩散具有滞后作用造成的,达到峰值所需时间和大小因初始含水量和化合物特性的不同而不同,土壤初始含水量越大,所需时间越短,峰值就越大;土壤化合物吸附越弱,达到峰值越快。张亚丽等^[15]认为,对于吸附性强的 PO_4^{3-} , K^+ , 影响径流溶质浓度的因素除了降雨和地表径流的溶解作用外,土壤对其的吸附性以及表层土壤中的固液相比也是很重要的因素。土壤的初始含水量越大,吸附性 PO_4^{3-} , K^+ 和表层溶解态 PO_4^{3-} , K^+ 的含量较高,导致地表径流浓度很高,径流溶质流失率也越大,土壤侵蚀就越严重。

2.4 地表径流养分流失模型模拟对比分析

采用合理的数学模型模拟径流溶质迁移过程是一种有效模拟径流溶质流失的方法,因此国内外很多专家学者建立了许多模型。王全九等^[16]认为对于黄土地区存在严重的水土流失,幂函数能较好地描述径流溶质浓度变化过程,因此建立了幂函数形式的模拟模型,见公式(4);而 Ahuja 等^[17-19]通过系列室内降雨试验,提出了有效混合深度概念(EDI),认为应该建立以指数函数形式为特征的模拟模型来描述径流溶

质迁移过程,见公式(5)。为了进一步检验这两种模型在紫色土丘陵区适用性,本文采用两种函数拟合径流浓度变化过程进行对比分析。

$$C_s(t) = \frac{K_m C_{s0} \rho_b H_0}{r(t)(it_p + \rho_b \theta_0 H_0)} t^b \tag{4}$$

式中: $C_s(t)$ ——时刻 t 等效混合深度内溶质浓度(mg/L); C_{s0} ——初始土壤溶质含量(mg/L); $r(t)$ ——径流流量(ml); i ——降雨强度(cm/min); t_p ——产流时刻(min); ρ_b ——土壤容重(g/cm^3); H_0 ——初始土壤含水量(g/g); θ_0 ——等效混合深度(cm); K_m ——质量传递系数; b ——参数。

$$C(t) = C_0 \exp[-it / (\text{EDI} \times \theta_s)] \tag{5}$$

式中: $C(t)$ ——径流溶质在 t 时刻的浓度(g/L); C_0 ——土壤降雨开始浓度(g/L); i ——降雨强度(cm/min); EDI——有效混合深度(cm/cm); θ_s ——土壤饱和含水量(cm^3/cm^3)。

如表 2 所示,指数函数的拟合系数整体比幂函数的拟合系数高,说明幂函数拟合效果较差。溶解态磷在前期含水量为 20%,15%,10% 的条件下,用指数函数模拟的相关系数比用幂函数拟合的相关系数高,溶解态钾离子在前期含水量为 5%,10% 的条件下,用指数函数模拟的相关系数比用幂函数拟合的相关系数高。综合分析认为,指数函数拟合紫色土丘陵区非饱和条件下坡地径流溶质浓度变化过程较幂函数效果好,这与在黄土区用幂函数模拟径流溶质浓度变化过程相反。

表 2 两种模型拟合不同前期含水量下径流溶质浓度和降雨历时变化对比

径流溶质 类型	初始含 水量/%	幂函数拟合 方程	相关系数	指数函数拟合 方程	相关系数
溶解态磷	5	$C(t) = 0.2385t^{-1.084}$	0.7702	$C(t) = 0.1701e^{-0.226t}$	0.7604
	10	$C(t) = 0.3551t^{-0.903}$	0.8142	$C(t) = 0.3013e^{-0.206t}$	0.9655
	15	$C(t) = 0.4228t^{-0.839}$	0.8620	$C(t) = 0.3458e^{-0.184t}$	0.9442
	20	$C(t) = 0.4282t^{-0.700}$	0.9462	$C(t) = 0.3517e^{-0.149t}$	0.9766
钾离子	5	$C(t) = 4.2724t^{-0.044}$	0.4914	$C(t) = 4.1573e^{-0.007t}$	0.9079
	10	$C(t) = 8.2845t^{-0.246}$	0.8343	$C(t) = 7.8609e^{-0.055t}$	0.9478
	15	$C(t) = 8.2028t^{-0.149}$	0.7896	$C(t) = 7.7201e^{-0.029t}$	0.6743
	20	$C(t) = 9.8579t^{-0.219}$	0.9079	$C(t) = 9.1414e^{-0.045t}$	0.8536

3 结论

(1) 在紫色土丘陵区,初始含水量对坡面降雨入渗、产流过程有着重要的影响。土壤初始含水量越大,产流时刻越早,坡面径流强度随降雨时间呈对数函数变化,累积径流量和坡面平均径流深度随初始含水量的增大而增大,而坡面平均入渗率则呈相反的变化趋势。

(2) 不同初始含水量对坡面径流溶质浓度的也

有较大影响。由于磷、钾离子的吸附性强和溴离子的移动性强,径流中水溶性磷、钾离子在开始产流时,径流溶质浓度增高,随着降雨的持续,逐渐衰减趋于稳定,径流中溴离子浓度出现波动变化。

(3) 当初始含水量在 5%~20% 变化时,土壤径流溶质的流失量随初始含水量的增加而增加。因此在紫色土区的雨季来临时,应少施磷钾肥,而采取保护性耕作措施来减少径流养分的流失。

(4) 通过合理的数学模型来模拟径流养分溶质

过程,建立以指数函数为特征的模型模拟此过程,更适合描述紫色土丘陵区非饱和条件下坡地径流溶质迁移变化过程。

参考文献:

- [1] 傅斌,王玉宽,朱波,等. 紫色土坡耕地降雨入渗试验研究[J]. 农业工程学报,2008,24(7):39-41.
- [2] 李瑞,李勇,刘云芳,等. 贵州喀斯特地区降雨与坡面土壤侵蚀关系研究[J]. 水土保持研究,2012,19(9):7-9.
- [3] 杨文志,邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京:北京科学出版社,2000.
- [4] 陈洪松,邵明安. 黄土区坡地土壤水分运动与转化机理研究进展[J]. 水科学进展,2003,14(4):513-520.
- [5] 孔刚,王全九,樊军,等. 前期含水量对坡面降雨产流和土壤化学物质流失影响研究[J]. 土壤通报,2008,12(6):1395-1397.
- [6] 周佩华,张学栋,唐克丽. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀模拟实验大厅降雨装置[J]. 水土保持通报,2000,20(4):27-30.
- [7] 袁建平,将定生,甘淑,等. 影响坡地降雨产流历时的因子分析[J]. 山地学报,1999,17(3):259-264.
- [8] 贾莲莲,李占斌,李鹏,等. 黄土区野外模拟降雨条件下坡面径流—产沙试验研究[J]. 水土保持研究,2010,17(1):1-4.
- [9] 满秀玲,范金凤,谭晓京,等. 森林和沼泽对溪流水化学特征的影响[J]. 应用生态学报,2006,17(6):992-996.

(上接第18页)

参考文献:

- [1] Santhi C, Srinivasan R, Arnold J G, et al. A modeling approach to evaluate the impacts of water quality management plans implemented in a watershed in Texas[J]. Environmental Modelling & Software, Corrected Proof, 2006,21(8):1141-1157.
- [2] Behera S, Panda R K. Evaluation of management alternatives for an agricultural watershed in a sub-humid sub-tropical region using a physical process based model[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment,2006,113(1/4):62-72.
- [3] Srinivasan R, Arnold J G, Jones C A. Hydrologic modeling of the United States with the Soil and Water Assessment Tool[J]. Water Resources Development,1998,14(3):315-325.
- [4] 庞靖鹏,刘昌明,徐宗学. 基于 SWAT 模型的径流与土壤侵蚀过程模拟[J]. 水土保持研究,2007,14(6):89-94.
- [5] 郝芳华,陈利群,刘昌明,等. 土地利用变化对产流和产沙的影响分析[J]. 水土保持学报,2004,18(3):5-8.
- [6] 卢爱刚,索安宁,张镭. 基于 SWAT 模型的黄土高原典型区水土流失格局模拟评价[J]. 水土保持研究,2011,18

- [10] Philip J R. Hillslope infiltration: planar slopes[J]. Water Resources,1991,27(1):109-117.
- [11] 安晓奇,郭成久,苏芳莉,等. 土壤前期含水量对弃渣坡面侵蚀特性影响的模拟试验[J]. 水土保持研究,2009,16(6):117-118.
- [12] 王全九,穆天亮,王辉,等. 土壤溶质随径流迁移基本特征分析[J]. 水土保持研究,2008,15(6):38-41.
- [13] 孔刚,王全九,樊军,等. 坡度对黄土坡面养分流失的影响实验研究[J]. 水土保持学报,2007,21(3):14-18.
- [14] 傅涛. 三峡库区坡面水土流失机理及预测评价建模[D]. 重庆:西南大学,2002.
- [15] 张亚丽,李怀恩,张兴昌,等. 水蚀条件下土壤初始含水量对黄土坡地溶质迁移的影响[J]. 水土保持学报,2007,21(4):1-6.
- [16] 王全九,王文焰,沈冰,等. 降雨—地表径流—土壤溶质相互作用深度[J]. 水土保持学报,1998,12(2):41-46.
- [17] Ahuja L R, Sharpley A N, Yamamoto M, et al. The depth of rainfall-runoff-soil interaction a determining by ^{32}P [J]. Water Resources Research,1981,17(4):969-974.
- [18] Abuja L R, Lehman O R. The extent and nature of rainfall-soil interaction in the release of soluble chemicals to runoff[J]. J. Environ. Qual.,1983,12(1):34-40.
- [19] Ahuja L R. Release of soluble chemical from soil to runoff[J]. Trans. Am. Soc. Agricu. Eng.,1982,25(4):948-953,960.

(2):57-65.

- [7] 杨巍,汤洁,李昭阳,等. 基于 SWAT 模型的大伙房水库汇水区径流与泥沙模拟[J]. 水土保持研究,2012,19(2):77-81.
- [8] 江西省土壤普查办公室. 江西土壤[M]. 北京:中国农业科技出版社,1991.
- [9] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009[R]. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service,2011.
- [10] Arnold J G, Williams J R, Nicks A D, et al. SWRRB: A Basin Scale Simulation Model For Soil and Water Resources Management [M]. College Station: Texas A&M Press, 1990.
- [11] USDA-SCS, National Engineering Handbook, Hydrology Section 4, chap. 4-10, (US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, DC, USA,1972.
- [12] Williams J R, Berndt H D. Sediment yield prediction based on watershed hydrology [J]. Trans. ASAE, 1977,20(6):1100-1104.
- [13] 抚州市水文局. 抚州市水资源公报[R]. 抚州:抚州市水文局,2005.