

岩石边坡植被重建系统中微量元素径流损失模型研究

陈璋¹, 缪福俊¹, 罗双¹, 胡兴¹, 李成俊¹, 庞亮¹, 李绍才¹, 孙海龙²

(1. 四川大学 生命科学学院, 四川 成都 610064;

2. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610064)

摘要:以岩石边坡植被重建系统为研究对象,开展人工模拟降雨试验与野外验证试验,应用幂函数模型拟合岩石边坡植被重建系统中 4 种微量元素铁、锰、铜和锌的径流损失与降雨量间的关系。人工模拟降雨试验中,铁、锰、铜 3 种元素产流初始阶段径流损失量较大,但随着降雨时间的延长,其损失量逐渐减小,最后均趋于稳定,而锌元素径流损失量较稳定;幂函数模型相关指数均达 0.90 以上,能较好地拟合产流时刻以后的微量元素损失量随降雨量的变化过程。试验表明,幂函数模型的模拟结果与实测结果拟合度较好,其相对误差小于 15%,确定性系数达到 0.85 以上。因此,利用该模型可初步描述微量元素径流损失与降雨量间耦合关系,为岩石边坡植被重建与恢复工程养分设计提供理论基础。

关键词:岩石边坡; 植被重建; 微量元素; 径流损失; 幂函数模型

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2013)01-0255-06

中图分类号: TU45

Model of Trace Element Loss in Runoff for Rocky Slope Revegetation System

CHEN Zhang¹, MIAO Fu-jun¹, LUO Shuang¹, HU Xing¹,

LI Cheng-jun¹, PANG Liang¹, LI Shao-cai¹, SUN Hai-long²

(1. College of Life Science, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China; 2. State Key

Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract: Simulated artificial rainfall experiment and field verification experiment were carried out and power function model was used to study the relationship between trace element loss and rainfall in rocky slope revegetation system. Results from simulated artificial rainfall experiment indicated that the growing rates of Fe, Mn and Cu losses in runoff were high at the very beginning and however, they tended to decrease and be stable with artificial rainfall continuing. The growing rate of Zn loss in runoff was stable throughout the experiment. Power function model could be used to fit the changing process of trace element loss in runoff and the correlation coefficients were more than 0.90. Results from field verification experiment indicated that the results of the model fitting agreed well with the experimental results, the relative errors were less than 15%, and the deterministic coefficients were more than 0.85. Therefore, these models could predict the relationship between the trace element loss in runoff and rainfall, providing a theoretical basis of nutrients design for the rocky slope revegetation and restoration project.

Keywords: rocky slope; revegetation; trace element; power function model

随着我国经济建设的快速发展,大规模的铁路、公路等建设形成的岩石边坡在逐年递增,由此引起的水土流失、地质灾害与生态破坏十分严重,生态环境进一步恶化,急需生态恢复和重建。岩石边坡发育是一个动力学过程^[1],其稳定性分析、控制与岩石边坡工程关键技术是岩石边坡植被恢复与重建的热点研究领域^[2]。以植被为主体构件的植被恢复与重建技术是国内外边坡防护的重要技术途径和发展趋势^[3],其中植物生长基质的养分循环研究对于岩石植被重

建与恢复工程尤为重要^[4-5]。微量元素对植物生长及稳定群落构建,尤其是破碎生境恢复有着重要作用^[6-8],在一些生态系统中,微量元素的缺失可能成为植被系统退化的关键因子^[9],而微量元素过量时往往会造成环境污染和生态系统平衡破坏^[10-11]。由于岩石边坡质地特殊,系统基质中微量元素相对容易流失,而微量元素转移及损失与降雨量、降雨时间等又有很大关联^[12]。因此,探明岩石边坡条件下植被系统微量元素在径流中的损失规律对于岩石边坡植被

收稿日期:2012-03-14

修回日期:2012-04-12

资助项目:国家科技支撑计划项目“龙门山地震带震损坡体生态修复技术与示范”(2011BAK12B04)

作者简介:陈璋(1984—),男(汉族),山西省夏县人,博士研究生,研究方向为边坡生态修复。E-mail:8551277@163.com。

通信作者:孙海龙(1976—),男(汉族),黑龙江省海林市人,博士,讲师,从事生态工程方面研究。E-mail:cz2002311002@hotmail.com。

恢复与重建具有重要意义。

目前有关岩石边坡植被系统养分流失方面的研究鲜见报道。本研究开展室内人工降雨土槽模拟和野外验证试验,研究新型岩石边坡植被重建系统微量元素在降雨条件下的迁移规律,建立适合岩石边坡微量元素径流损失的数学模型,为岩石边坡植被系统的基质养分设计和生态系统稳定机制研究,以及其他极端环境条件下的植被重建及恢复建立理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

岩石边坡植被重建系统是将植物与工程措施结合对岩石坡面进行保护,通过在岩石坡面构建基质一

植被系统来防护岩石坡面,主要包括植物生长基质、水分阻控层、温度调节层、辐照反射层和种子萌发堆。植物生长基质主要由高原泥炭、植壤土、保水剂、植物纤维、PAM、速效肥、缓释肥、生物肥等按一定的比例混合而成,其理化指标如表 1 所示。本试验以植物生长基质为试验样品,开展室内试验和野外试验,研究植物生长基质微量元素径流损失特征。

1.2 试验方法

(1) 人工模拟降雨试验。采用自动模拟降雨系统,由中国科学院水利部水土保持研究所设计制造的。降雨强度变化在 20~200 mm/h,降雨均匀度大于 90%,试验所用土槽为 3 个相同尺寸钢槽(140 cm×70 cm×15 cm),坡度 60°,在土槽的径流出口处安装 V 形径流导流钢槽收集径流。

表 1 基质基本理化指标

容重/ (g·cm ⁻³)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	pH 值	全 N/ (g·kg ⁻¹)	全 P/ (g·kg ⁻¹)	全 K/ (g·kg ⁻¹)	全 Fe/ (g·kg ⁻¹)	全 Mn/ (g·kg ⁻¹)	全 Cu/ (g·kg ⁻¹)	全 Zn/ (g·kg ⁻¹)
1.15	50.08	6.5	2.89	2.61	7.91	1.98	1.62	1.96	1.25

试验于 2011 年 4 月进行,土槽内铺设相同规格的试验样品,设置 3 组平行重复试验,降雨强度为 20 mm/h。产流开始时收集径流,每隔 15 min 取径流样品并摇匀取累积径流样品,记录径流量。用火焰原子吸收法测定样品的铁、锰、铜、锌含量。

(2) 野外验证试验。试验地位于四川省彭州市升平镇。在人工模拟岩石边坡上铺设试验样品,开展野外验证试验。人工模拟边坡坡高为 5 m,坡向为南,坡度 60°,面积 100 m²,岩石面采用 100 cm×50 cm×10 cm 的砂岩石板砌成。

设置 3 组平行试验小区,试验区规格 4.35 m×1.10 m,铺设相同规格的试验样品。每个试验小区四周均用水泥板隔开以防止互相渗漏,下端布设径流桶用于收集径流。试验时间为 2011 年 5—8 月,记录降雨量、降雨强度、降雨时间等并收集坡面累积径流量。用火焰原子吸收法测定微量元素含量。

(3) 幂函数模型。岩石边坡植被重建系统径流微量元素浓度变化过程用幂函数方程描述^[13]:

$$C(t) = \frac{K_m C_{s0} \rho_b H_0}{r(t)(it_p + \rho_b \theta_0 H_0)} t^b \quad (1)$$

式中: $C(t)$ ——时刻 t 等效混合深度内溶质浓度(mg/L); K_m ——质量传递系数; C_{s0} ——初始土壤溶质含量(mg/L); $r(t)$ ——径流量(ml); i ——降雨强度(mm/min); t_p ——产流时刻(min); ρ_b ——土壤容重(g/cm³); θ_0 ——初始土壤含水量(g/g); H_0 ——

等效混合深度(cm); b ——参数。模型中基本参数,例如 b , K_m 等,都是利用试验资料反推或由率定确定。

(4) 模型评价指标。采用相对误差和确定性系数评定模型拟合精度。确定性系数又称模型效率系数,是模型模拟精度的一个重要评价指标^[13]。

1.3 数据处理

利用 Microsoft Excel, Matlab 6.0 分析软件进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 人工模拟降雨试验

2.1.1 径流微量元素浓度变化过程 微量元素运移始于坡面降雨侵蚀,径流是坡面微量元素流失的动力和载体,单位时间单位面积的微量元素流失量与径流量趋势一致^[13]。人工降雨过程中,坡面在第 30 min 开始产流。图 1 表示径流微量元素浓度与降雨时间的关系,随着降雨时间的延长,径流中微量元素浓度均表现出一致的变化趋势,产流初始阶段径流微量元素浓度均很高,但迅速降低,最后趋于稳定值。不同微量元素浓度变化幅度因其化学性质不同而表现不同,径流中铁、锰和铜 3 种元素浓度降低较快,降低幅度较大,而锌元素浓度降低较慢而且降低幅度最小,可能是由于基质对锌元素有较强吸附作用。

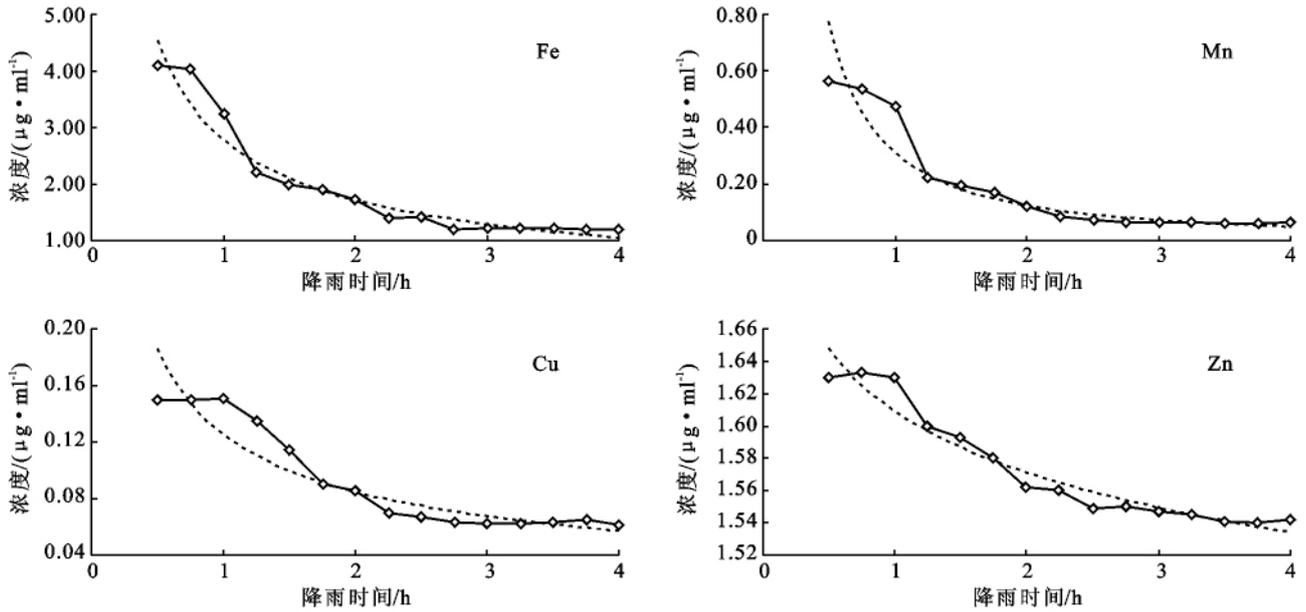


图 1 径流微量元素浓度与降雨时间关系

2.1.2 径流微量元素浓度变化过程模拟 用幂函数模型拟合径流微量元素浓度与降雨时间的变化过程。具体参数如表 2 所示,相关指数均达 0.90 以上,说明该模型能较好地拟合产流以后微量元素随径流的变化过程。利用幂函数能够较好地模拟在人工降雨条件下新型岩石边坡植被重建系统径流作用下微量元素损失过程。

产流初始阶段微量元素径流损失量较大,但随着降雨时间的延长,其损失量逐渐减小,最后均趋于稳定。其中锌元素的变化趋势与其他元素不同,其损失量较稳定,主要是由于径流中锌元素浓度随降雨时间衰减较慢而且衰减幅度较小,而径流中铁锰铜元素浓度随降雨时间降低较快而且降低幅度较大。

2.1.3 微量元素径流损失量与降雨量模拟模型 本试验通过研究特定坡度条件下降雨特征与微量元素径流损失量之间的关系,最终获得了不同降雨量下的微量元素径流损失量动态变化过程模拟,如图 2 所示。

表 2 微量元素径流损失幂函数模型

元素	幂函数方程式	R ²
Fe	$C(t) = 2.7963t^{-0.698}$	0.9514
Mn	$C(t) = 0.3100t^{-1.324}$	0.9415
Cu	$C(t) = 0.1256t^{-0.565}$	0.9362
Zn	$C(t) = 1.6091t^{-0.034}$	0.9336

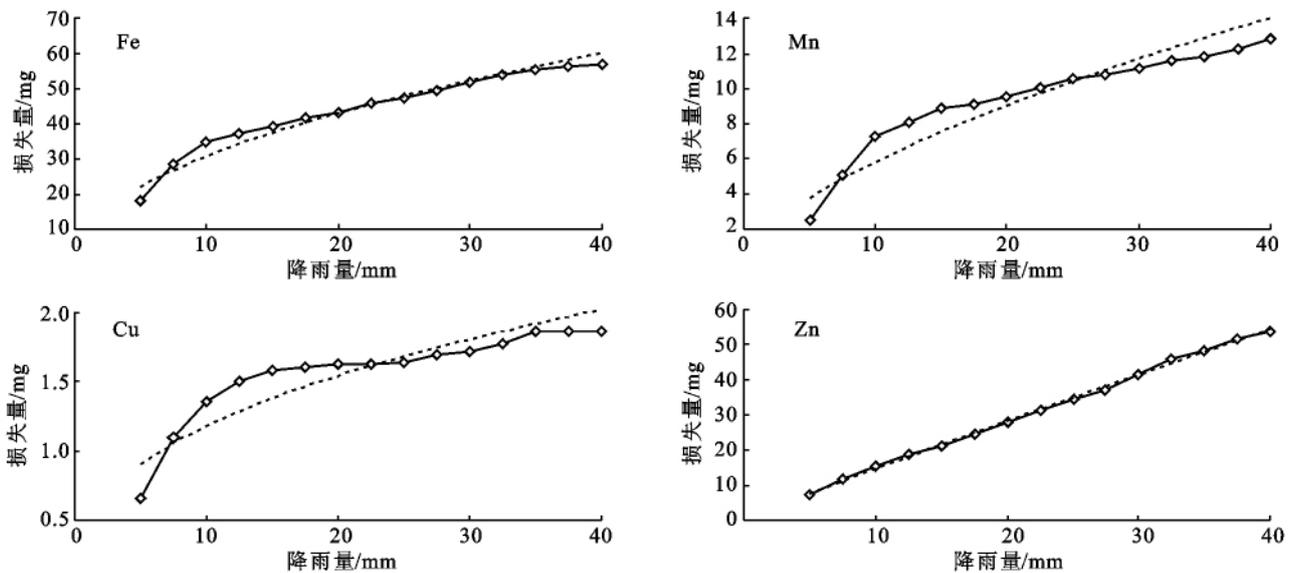


图 2 累积微量元素径流损失量与降雨量关系

根据质量平衡原理^[13]和径流微量元素浓度变化幂函数模型,建立了描述单位面积坡面微量元素径流损失量与降雨量变化过程数学模型:

$$C = a(R\cos\alpha)^b = a(Pt\cos\alpha)^b \quad (2)$$

式中: R ——日降雨量(mm); P ——降雨强度(mm/min); t ——降雨时间(min); α ——地表坡度($^\circ$); a, b ——基本参数,是利用实验资料反推或由率定所确定的。

用幂函数模型拟合微量元素径流损失量与降雨量的变化过程,具体参数如表 3 所示。

结果表明上述模型较好描述了微量元素径流损失量与降雨量变化过程,幂函数相关指数均达 0.90 以上,其中锌元素拟合度最好, R^2 达到 0.997 7, 锰和铜元素的拟合度较低, R^2 为 0.90。

表 3 微量元素径流损失量与降雨量幂函数模型

元素	幂函数方程式	R^2
Fe	$C(R) = 7.3458(R\cos\alpha)^{0.4794}$	0.933 2
Mn	$C(R) = 0.8647(R\cos\alpha)^{0.6362}$	0.902 3
Cu	$C(R) = 0.3682(R\cos\alpha)^{0.3888}$	0.905 6
Zn	$C(R) = 0.8663(R\cos\alpha)^{0.9448}$	0.997 7

2.2 野外验证试验

野外验证数据取自 5—8 月的 12 场降雨,日降雨量数据如图 3 所示,对微量元素径流损失量与降雨量关系数学模型进行验证。从图 4 和表 4 可知,各微量元素的模拟特征为:当降雨量小于 25 mm,铁元素

实测值小于模拟值;降雨量 25 mm 以上,实测值大于模拟值,相对误差维持在 14% 左右,平均确定性系数为 0.87,拟合度较好;当降雨量小于 25 mm,锰元素实测值大于模拟值,当降雨量大于 25 mm,实测值小于模拟值,相对误差维持在 12% 左右,平均确定性系数为 0.88,拟合度较好;铜元素实测值均大于模拟值,相对误差维持在 14% 左右,平均确定性系数为 0.85,拟合度较好;锌元素的模拟值在实测值上下浮动,相对误差维持在 10% 左右,平均确定性系数 0.90 以上,拟合度较好。其中 5 月 15 日,6 月 4 日,6 月 16 日 3 d 降雨量小于 10 mm,没有产生径流,验证了人工降雨试验结果,即当降雨量大于 10 mm 以上时产生径流,数学模型适应范围为降雨量大于 10 mm。

野外验证试验进一步检验了用幂函数模型描述微量元素径流损失量与降雨量变化过程的效果,相对误差均小于 15%,确定性系数达到 0.85 以上。

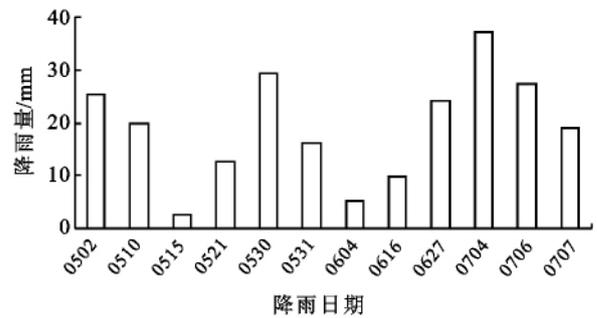


图 3 研究区日降雨量

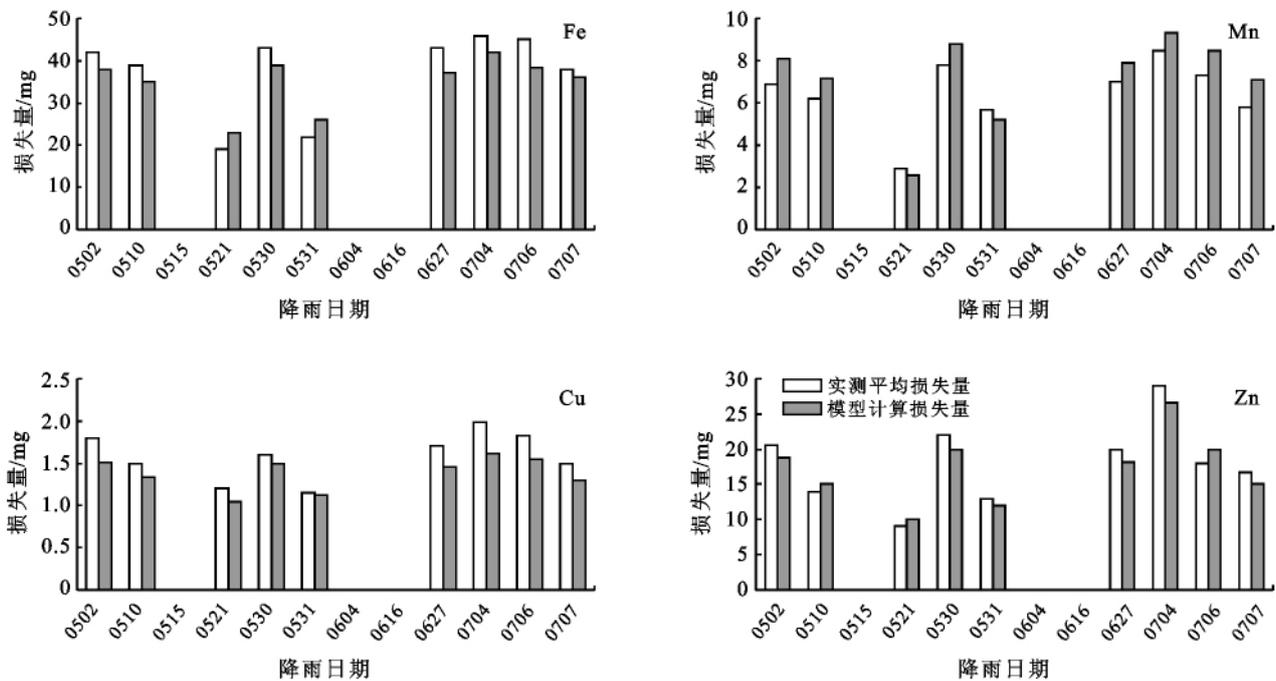


图 4 实测微量元素径流损失量与模型计算损失量结果

表 4 模型拟合度

项目	Fe	Mn	Cu	Zn
相对误差范围/%	-5.6~17.4	-9.6~18.6	-23~-2.7	-11.3~10
平均相对误差/%	13.6	12.6	14.3	9.5
确定性系数范围	0.83~0.92	0.85~0.92	0.80~0.91	0.88~0.93
平均确定性系数	0.87	0.88	0.85	0.90

2.3 讨论

岩石边坡不同于土质边坡,它具有较强的异质性^[1-3,13],在进行生态防护过程中具有较多的不利条件。它不具备植被生长所必需的土壤环境,没有有机质,N,P,Fe,Cu,Zn等元素的积累,水热容量小,造成生态因子变化激烈与频繁的特殊生境,这些特征都不利于植物的定居^[4-5,13]。

同时,由于现在工程建设形成的岩石边坡坡度都较大,坡比一般都在1:0.75以上,受外力侵蚀更加明显,复杂的岩石类型与地质类型更增加了对其进行生态重建的难度^[13-14]。因此,以岩石边坡为研究对象具有重要的研究价值^[15-18]。

微量元素径流损失数学模型是通过分析、比较技术和应用数学理论方法^[15-16],建立反映实际的且具有意义的数学模型,综合考虑影响微量元素流失的各种主要生态因子,定量描述生态过程,阐明微量元素流失的机制和规律,能够动态地模拟微量元素降雨运移过程,预测微量元素径流损失量^[17-18]。Gao等^[19],Gao等^[20],Natha等^[21]通过建立数学模型,研究降雨动能等对土壤溶质随径流迁移的影响;王全九^[22-25],王辉^[13]等研究了黄土坡面养分随地表径流迁移过程,针对黄土坡地特定研究对象获得了经典养分流失模型。微量元素运移过程是径流与坡面土壤颗粒相互作用的过程,土壤类型不同则有不同的流失规律^[22-25,13]。

本研究基于经典养分流失模型,以岩石边坡植被重建系统的植物生长基质为研究对象,针对植被重建系统生长基质养分结构特性以及岩石边坡特征,修正和优化了经典养分流失模型,建立了微量元素径流损失的幂函数模型,该模型模拟结果与实测结果拟合度较好,利用该模型可初步预测出岩石边坡植被重建系统微量元素径流损失。对岩石坡面有关参数和气象数据测定,模拟整个坡面微量元素径流损失过程,这有待进一步的深入研究。

3 结论

(1)室内试验结果表明,微量元素铁、锰、铜和锌的径流损失量与降雨量呈现不同的变化趋势。铁、锰、铜元素在产流初始阶段其径流损失量较大,随着

降雨时间的延长,其损失量逐渐降低,最后均趋于稳定,而锌元素变化较稳定。幂函数模型能较好地拟合产流时刻以后的微量元素损失量与降雨量间的关系,相关指数均达0.90以上。

(2)野外验证试验检验了幂函数模型,模拟结果与实测结果拟合度较好,其相对误差小于15%,确定性系数达到0.85以上,利用该模型可初步预测出微量元素径流损失情况。

(3)利用确定性系数方法分析了模型的不确定性,确定了模型的敏感参数,提高了模型预测结果的科学性。模型的应用还需要更多的工程检验,模型需要进一步完善。由于试验条件的限制,该次研究未能够将建立的模型应用于更多的试验场地,需要对不同条件坡面进行验证,以使模型更加可靠、有效以及实用。

[参 考 文 献]

- [1] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1525-1544.
- [2] 周德培, 钟卫, 杨涛. 基于坡体结构的岩石边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 687-695.
- [3] 宋胜武, 向柏宇, 杨静熙, 等. 锦屏一级水电站复杂地质条件下坝肩高陡边坡稳定性分析及其加固设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 442-458.
- [4] 张俊云, 周德培, 李绍才. 岩石边坡生态护坡研究简介[J]. 水土保持通报, 2000, 20(4): 36-38.
- [5] 李绍才, 孙海龙, 杨志荣. 岩石边坡基质—植被系统的养分循环[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(2): 85-90.
- [6] Yang Handong, Rose N. Trace element pollution records in some UK lake sediments, their history, influence factors and regional differences[J]. Environment International, 2005, 31(1): 63-75.
- [7] Yang Lixia, Li Shaocai, Sun Hailong, et al. Polyacrylamide molecular formulation effects on erosion control of disturbed soil on steep rocky slopes[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2011, 91(6): 917-924.
- [8] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, et al. Ecological linkages between aboveground and belowground biota [J]. Science, 2004, 304(5677): 1629-1633.
- [9] 姜勇. 森林生态系统微量元素循环及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2009, 20(1): 197-204.

- [10] 漆良华,张旭东,彭镇华,等.不同植被恢复模式下中亚热带黄壤坡地土壤微量元素效应[J].应用生态学报,2008,19(4):735-740.
- [11] 张俊云,周德培,李绍才.厚层基材喷射护坡试验研究[J].水土保持通报,2001,21(4):45-48.
- [12] Kleinman P J A, Srinivasan M S, Dell C J, et al. Role of rainfall intensity and hydrology in nutrient transport via surface runoff [J]. Journal of Environmental Quality, 2006,35(4):1248-1259.
- [13] 王辉.降雨条件下黄土坡地养分迁移机理及模拟模型[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2006.
- [14] 李绍才,孙海龙.我国岩石边坡植被护坡技术现状及发展趋势[J].资源科学,2004,26(8):61-66.
- [15] Tong Juxiu, Yang Jinzhong, Bill X H. Experimental study and mathematical modeling of soluble chemical transfer from unsaturated/saturated soil to surface runoff [J]. Hydrological Processes, 2010,24(21):3065-3073.
- [16] White M J, Storm D E, Philip R B, et al. A quantitative phosphorus loss assessment tool for agricultural fields [J]. Environmental Modelling & Software, 2010,25(10):1121-1129.
- [17] Wang Lingqing, Liang Tao, Kleinman P J A, et al. An experimental study on using rare earth elements to trace phosphorous losses from nonpoint sources[J]. Chemosphere, 2011,85(6):1075-1079.
- [18] Wang Lingqing, Liang Tao, Chong Zhongyi, et al. Effects of soil type on leaching and runoff transport of rare earth elements and phosphorous in laboratory experiments[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2010,18(1):38-45.
- [19] Gao Bin, Walter M T, Steenhuis T S, et al. Investigating raindrop effects on transport of sediment and non-sorbed chemicals from soil to surface runoff[J]. Journal of Hydrology, 2005,308(1/4):313-320.
- [20] Gao Bin, Todd Walter W, Steenhuis T S, et al. Rainfall induced chemical transport from soil to runoff theory and experiments [J]. Journal of Hydrology, 2004, 295(1/4):291-304.
- [21] Bosch N S, Allan J D, Dolan D M, et al. Application of the Soil and Water Assessment Tool for six watersheds of Lake Erie: Model parameterization and calibration[J]. Journal of Great Lakes Research, 2011, 37 (2): 263-271.
- [22] 牛明芬,温林钦.可溶性磷损失与径流时间关系模拟研究[J].环境科学,2008,29(9):2580-2085.
- [23] 石德坤.模拟降雨条件下坡地氮流失特征研究[J].水土保持通报,2009,29(5):98-101.
- [24] 吴希媛,张丽萍,张妙仙,等.不同雨强下坡地氮流失特征[J].生态学报,2007,27(11):4576-4582.
- [25] 王全久,穆天亮,王辉.坡度对黄土坡面径流溶质迁移特征的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(40):176-179.

(上接第 245 页)

[参 考 文 献]

- [1] 李金玉.冻融环境下混凝土结构的耐久性设计与施工[J].水力发电,2004,30(A02):244-252.
- [2] 童彬,李真.土壤固化剂研究进展[J].合肥师范学院学报,2009,27(3):91-93.
- [3] Medina J, Guida H N. Stabilization of lateritic soils with phosphoric acid[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1995, 13(4): 199-216.
- [4] Tomohisa S, Sawa K, Naitoh N. Hedoro hardening treatment by industrial wastes[J]. Zairyo/Journal of the Society of Materials Science Japan, 1995, 44 (503): 1023-1026.
- [5] Zalihe N, Emin G. Improvement of calcareous expansive soils insemi-arid environments[J]. Journal of Arid Environments, 2001,47(4):453-463.
- [6] 梁文泉.土壤固化剂的性能及机理研究[J].武汉水利电力大学学报,1995,10(6):71-75.
- [7] 崔德山.离子土壤固化剂对武汉红色黏土结合水作用机理研究[D].武汉:中国地质大学,2009.
- [8] 贺立军,唐雪云. HEC 固化剂加固膨胀土试验研究[J].人民黄河,2010,32(9):148-149.
- [9] 刘清秉,项伟,张伟锋,等.离子土壤固化剂改性膨胀土的试验研究[J].岩土力学,2009,30(8):2286-2290.
- [10] 彭波,李文瑛,陈忠达.固化剂加固土性能的研究[J].内蒙古公路与运输,2001,67(1):27-29.
- [11] 季节,张志新.加固土路用性能的评价[J].北京建筑工程学院学报,2001,17(2):44-46.
- [12] 樊恒辉,高建恩,吴普特.土壤固化剂研究现状与展望[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2006,34(2):141-143.