

岩石边坡基质-植被系统中氮磷钾损失模型^{*}

邱利平¹ 李绍才¹ 孙海龙^{2**}

(¹四川大学生命科学学院, 成都 610064; ²四川大学水利水电国家重点实验室, 成都 610064)

摘要 以岩石边坡基质-植被系统为研究对象, 结合人工模拟降雨试验和养分损失模型, 对基质径流养分损失量与降雨场次、降雨时间之间的关系进行了定量分析及预测。降雨试验中, N、P、K 营养元素损失量与降雨场次呈负向关系, 但随着降雨场次的增加, 损失量减少幅度变小; 营养元素累积损失量随降雨时间呈幂函数增长; 营养元素损失量在降雨场次和降雨时间变化上均表现出极显著差异 ($P=0.00$)。养分损失模型能较准确地对径流养分损失量进行预测, 确定系数均在 0.86 以上, 实测结果与拟合预测结果接近, 其相对误差 <27%。其中, K 在第一场降雨时, 模型预测结果最好; N、P 则在最后一场降雨时, 预测效果最为显著。该模型的建立, 可描述营养元素径流损失量随降雨时间的变化过程, 从而为岩石边坡基质-植被系统制定合理的养分配比提供理论依据。

关键词 岩石边坡; 基质; 营养元素; 损失量; 模型

中图分类号 TU45 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2014)11-3164-05

Models of nitrogen, phosphorus and potassium losses in rock slope matrix-vegetation system. QIU Li-ping¹, LI Shao-cai¹, SUN Hai-long^{2**} (¹College of Life Science, Sichuan University, Chengdu, 610064, China; ²State Key Laboratory of Water Resource and Hydropower, Chengdu, 610064, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(11): 3164-3168.

Abstract: Combining a manually simulated rainfall experiment with nutrient loss model, we quantified and forecasted the relationship between nutrient loss of matrix runoff and rainfall frequency and time in a rock slope matrix-vegetation system. Results from the rainfall experiment indicated that the losses of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) showed a negative relationship with rainfall frequency. The relationship between the accumulated nutrient loss and rainfall time followed the power function, and the nutrient loss showed significant differences with rainfall frequency and with rainfall time ($P=0.00$). These models could be used to forecast the nutrient loss accurately, with the coefficients of determination more than 0.86. The results of the model fitting agreed well with the experimental results, with the relative errors less than 27%. Loss of element K was best predicted in the first rainfall, while Losses of elements N and P were in the last rainfall. Therefore, our mathematical models could be used to describe the changing process of nutrient loss in runoff along with rainfall frequency and time, and provided a theoretical basis for nutrient management in the rock slope matrix-vegetation system.

Key words: rock slope; matrix; nutrient element; loss; model.

岩石边坡植被护坡技术是指用活的植物与工程措施结合, 以防止岩石坡面风化剥落的技术手段(张俊云和李绍才, 2000), 是一类以生物措施为主来实现岩石坡面生态系统良性循环的坡面生态工程。它必须结合岩石边坡不具备植被生长所必需的

土壤环境, 无有机质、氮、磷、钾等营养元素的积累, 水热容量小等特点, 形成有效的解决办法, 才能保证技术的应用(Chen *et al.*, 2013)。岩石边坡基质-植被系统就是针对岩石边坡特殊质地生产的一种高强度、低成本植被重建与恢复系统, 在这一系统中, 作为非生物部分的工程措施起到稳定基质与加固坡面基岩的作用, “基质”则提供植被生长所需的合理物理结构, 同时为植被的生长提供水分、养分转化利用

* 国家科技支撑项目(2011BAK12B04)和国家科技支撑计划项目(2013BAJ02B03)资助。

** 通讯作者 E-mail: cz2002311002@hotmail.com

收稿日期: 2014-04-14 接受日期: 2014-07-26

的平台和载体(李绍才和孙海龙, 2004)。由于岩石边坡具有较强的异质性(黄润秋, 2008; 周德培等, 2008; 宋胜武等, 2010), 系统基质中养分相对容易流失, 而养分迁移及损失与降雨量、降雨时间等又有很大关联(Yang & Rose, 2005)。因此, 探明岩石边坡条件下植物卷材营养元素在径流中的损失情况, 揭示其养分变化规律, 对于岩石边坡恢复与重建具有重要意义, 为岩石边坡植被护坡技术的应用提供必要的理论支持。

目前, 养分迁移方面的研究大多是现有坡地, 有关人工模拟岩石边坡的养分径流损失情况鲜见报道。岩石边坡不同于土质边坡, 它具有较强的异质性, 在进行生态护坡过程中具有较多的不利因素, 并且坡比一般都在 1 : 0.5 以上, 以岩石边坡作为研究对象更具研究价值。因此, 本文利用系统降雨观测试验和模型预测模拟, 结合人工降雨的方式, 探究岩石边坡基质-植被系统的养分径流迁移规律, 建立适合岩石边坡养分径流损失的数学模型, 为植物卷材的基质养分设计和生态系统稳定机制研究建立理论基础, 实现工程措施的优化配置。

1 材料与方法

1.1 岩石边坡基质-植被系统构造及原理

岩石边坡基质-植被系统是将植物与工程措施结合起来, 在岩石坡面构建植被系统来防护边坡, 包括植物卷材和模拟边坡两部分。植物卷材主要包括植物生长基质层、水分阻控层、温度调节层、辐射反射层和种子萌发层。其中, 植物生长基质层是最主要的组成构件, 主要由泥炭、紫色土、高分子材料等混合加工而成, 是提供植被生长所需的合理物理结构, 又是植被水分、养分转化利用的平台和载体, 是植被稳定生长的物质基础。模拟边坡采用中空塑钢板搭建, 形成 100 cm×70 cm 的框槽, 坡度 63°, 框槽下部预留径流收集孔, 接软管于径流收集桶。径流收集桶采用 $\Phi=200$ mm 的 PVC 管加工, 底部封闭, 上部用活盖, 并预先钻孔接径流软管。将加工好的植物生长基质平铺至试件槽内, 并固定, 形成岩石边坡基质-植被系统。

1.2 试验地概况

试验地在四川沃尔宜环保科技有限公司基地, 地处四川省彭州市升平镇, 气候属亚热带季风气候, 年平均降雨量 1146.5 mm, 年最大月降雨量 150 mm。

1.3 试验设计

采用人工模拟降雨的试验方法, 设计单因子试验测定 3 组平行岩石边坡基质-植被系统中的基质径流养分随降雨场次、降雨时间的损失变化规律。试验时间为 2013 年 12 月—2014 年 3 月, 每月降雨一次。通过模拟试验地一年中最大月降雨量, 降雨强度采用 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 降雨时间为 3 h。试验时在供水管处安装流量表, 控制供水量。试验前将各处理的基质混合物含水量调整至相同(30%), 以便工艺制作。试验过程用秒表记录坡面产流时间, 每隔 10 min 对径流桶读数一次并摇匀取样进行水样养分分析。岩石边坡基质-植被系统基本理化参数见表 1。

径流养分分析方法: 全氮采用凯氏半微量法(LY/T 1228-1999), 全磷采用钼酸铵分光光度法(GB 11893-89), 全钾采用火焰光度法。

1.4 养分损失模型

1.4.1 模型介绍 养分损失数学模拟模型是预报养分流失、配置和优化水土资源的有效工具。根据质量传递原理和质量平衡原理, 王全九(1993)、吴希媛等(2007)、牛明芬和温林钦(2008)、石德坤(2009)和王全九(2009)等建立了幂函数形式为特征的模拟模型, 描述在非饱和条件下径流养分浓度变化过程:

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

式中, $C_s(t)$ 为 t 时间等效混合深度内溶质浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); C_{s0} 为初始土壤溶质含量 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); $r(t)$ 为径流流量 (mL); i 为降雨强度 ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$); t_p 为产流时刻 (min); ρ_b 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); θ_0 为初始土壤含水量 ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$); H_0 为等效混合深度 (cm); K_m 为质量传递系数; b 为基本参数。

根据质量平衡原理(王辉, 2006)和径流养分浓度变化幂函数模型, 建立了描述单位面积岩石边坡基质-植被系统径流量与降雨量变化过程的数学模型(陈璋等, 2013):

$$Q = a(R \cos \alpha)^c = a(P t \cos \alpha)^c \quad (2)$$

表 1 基质基本理化参数

Table 1 Matrix basic physical and chemical parameters

容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	pH 值	基质厚度 (cm)	全氮 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	全磷 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	全钾 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)
1.2	6.5	5	10.36	7.51	22.80

式中, Q 为总径流量,包括表面径流和壤中流; R 为降雨量(mm); P 为降雨强度($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$); t 为降雨时间(min); α 为地表坡度($^{\circ}$); a 、 c 为基本参数,是利用试验数据资料反推所确定的。

在不考虑基质颗粒迁移的情况下,岩石边坡基质-植被系统总的养分损失量只与径流携带养分损失量有关,因此可通过上述公式(1)和(2)计算出单位面积岩石边坡基质-植被系统的养分径流损失量 E 与降雨时间变化过程数学模拟模型:

$$E = Cs(t) \times Q \quad (3)$$

1.4.2 模拟与预测检验 采用相对误差最小原理和确定性系数检验模型的有效性。为了分析岩石边坡基质-植被系统养分损失量模型的精度,利用式(1)、(2)和(3)获得基本参数 a 、 b 、 c ,计算出累积损失量预测值。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(王辉,2006)。

1.5 数据处理

收集数据和指标采用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 软件,采用 ANOVA 进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 降雨场次对岩石边坡基质-植被系统径流养分损失量的影响

岩石边坡基质-植被系统在第2分钟开始产流,在降雨至土壤饱和过程中,养分一部分随着降雨入渗水流向下转移,一部分在土壤表层溶解,径流产生时会带走大部分溶解养分。由图1可知,随着降雨场次的增多,基质养分损失量逐渐减少并在后期趋于稳定。径流中营养元素损失变化趋势一致,降雨场次与N、P、K元素的养分损失量存在明显的负相关。前几场降雨养分流失较多,降雨场次间养分损失量变化幅度较大。不同的营养元素损失量变化幅

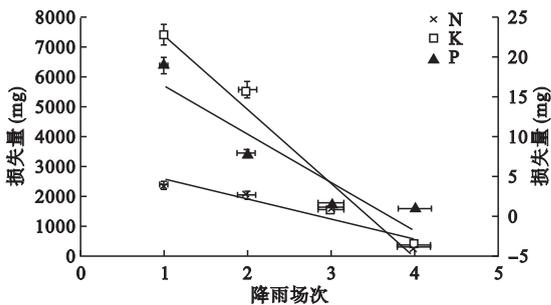


图1 径流养分损失量与降雨场次的关系

Fig.1 Relationship between nutrient loss in runoff and rainfall frequency

N、K为左纵坐标值,P为右纵坐标值。

度因其理化性质不同而表现不同,径流中N、K元素损失量下降较快,幅度较大,而P元素降低缓慢而且幅度最小。

2.2 降雨时间对岩石边坡基质-植被系统径流养分损失量的影响

在雨强不变的情况下,径流量和径流养分含量是养分径流损失的2个重要构成因素。径流量又与降雨时间有着紧密联系。因此,本文把降雨过程中实测得到的平均径流养分损失数据与降雨时间进行了分析(图2)。由图2可知,各营养元素与降雨时间有明显的幂函数关系,确定性系数在0.935~0.998,说明岩石边坡基质-植被系统径流养分损失量与降雨时间之间的相关关系显著。随着降雨时间的延长,出现径流养分累积损失量增加的现象,N、P、K元素还随着降雨场次的增加,径流养分损失量

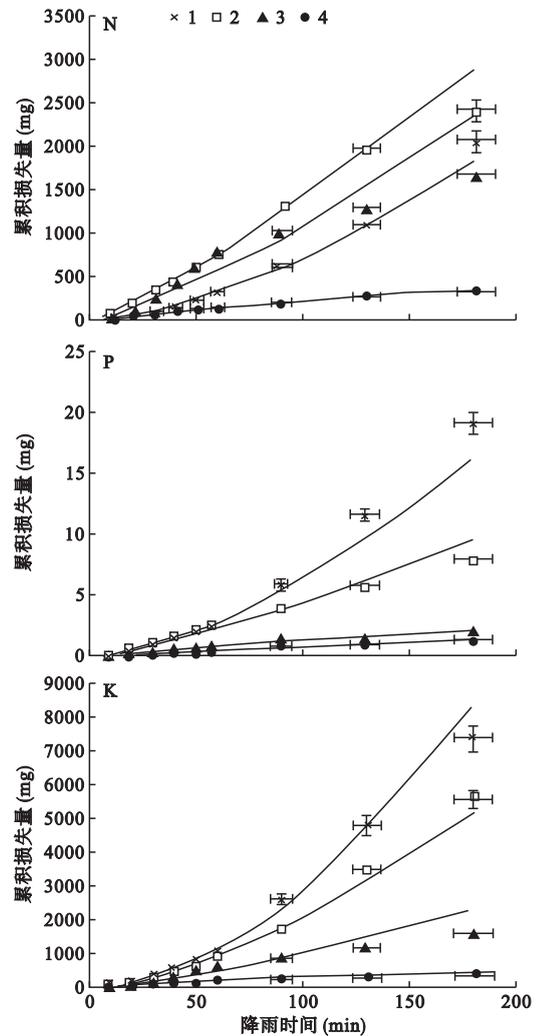


图2 径流养分累积损失量与降雨时间的关系

Fig.2 Relationship between cumulative nutrient loss in runoff and rainfall time

表 2 径流养分损失量与降雨场次关系预测模型
Table 2 Predicted model of relationship between nutrient loss in runoff and rainfall frequency

元素	预测模型方程式	确定性系数 (R^2)
N	$E = -657.6T + 3249.8$	0.882
P	$E = -5.950T + 22.31$	0.866
K	$E = -2488.3T + 9960.49$	0.958

E. 径流养分损失量, T. 降雨场次。

动态变化过程增加幅度变得缓慢。

2.3 模拟预测及模型有效性评价

2.3.1 岩石边坡基质-植被系统径流养分损失量模拟预测 表 2,3 为根据式(3)拟建立的关于径流养分损失量 E 与降雨场次 T 及降雨时间 t 的岩石边坡基质-植被系统的二元回归统计预测模型。具体参数如下表所示,确定性系数均达 0.85 以上,且降雨场次和降雨时间与 N、P、K 径流养分损失量差异极显著 ($P=0.00$),符合数学模型的精度要求,说明该模型对于岩石边坡基质-植被系统径流养分损失动态变化过程的模拟是适用的。

2.3.2 岩石边坡基质-植被系统径流养分损失量实

表 3 径流养分损失量与降雨时间关系预测模型
Table 3 Predicted model of relationship between nutrient loss in runoff and rainfall time

元素	预测模型方程式				确定性系数 (R^2)			
	1	2	3	4	1	2	3	4
N	$E = 6.025t^{1.181}$	$E = 2.486t^{1.32}$	$E = 0.458t^{1.595}$	$E = 2.2t^{0.987}$	0.987	0.958	0.995	0.990
P	$E = 0.003t^{1.615}$	$E = 0.008t^{1.356}$	$E = 0.012t^{0.977}$	$E = 0.008t^{0.986}$	0.971	0.978	0.962	0.978
K	$E = 0.545t^{1.856}$	$E = 1.601t^{1.556}$	$E = 1.105t^{1.472}$	$E = 1.21t^{1.135}$	0.998	0.988	0.949	0.935

E. 径流养分损失量, t. 降雨时间。

表 4 径流养分损失量实测结果和预测结果比较
Table 4 Comparison between measured results and predicted results of nutrient loss in runoff

元素	降雨场次	相对误差 (%)								平均相对误差 (%)	
		10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	90 min	130 min		180 min
N	1	11.35	7.76	9.52	15.65	8.10	1.59	2.90	2.56	11.38	7.87
	2	22.97	8.75	12.91	6.32	0.89	0.17	7.81	1.88	19.65	9.04
	3	25.25	24.09	4.19	18.04	25.46	30.01	7.64	17.77	41.73	21.58
	4	11.33	1.90	0.22	7.65	11.15	8.76	3.16	3.77	14.17	6.90
P	1	46.97	13.88	9.16	13.54	1.81	10.21	26.65	32.24	30.41	20.54
	2	34.02	15.94	22.84	20.03	14.59	11.53	5.60	2.51	14.77	15.76
	3	22.31	5.02	11.91	18.18	22.65	24.71	7.06	13.54	12.56	15.33
	4	5.33	2.12	1.37	7.98	17.32	24.94	11.24	3.85	14.30	9.83
K	1	2.19	2.96	5.24	3.86	0.27	6.96	11.45	4.98	13.08	5.67
	2	24.82	9.21	25.24	16.03	4.85	3.60	2.19	11.20	7.67	11.64
	3	20.32	37.15	9.22	24.82	32.79	35.18	6.71	23.91	45.87	26.22
	4	56.61	16.17	20.38	18.73	11.42	10.79	3.40	13.50	23.95	19.44

3 讨论与结论

岩石边坡不同于土质边坡,它具有较强的异质

性,在进行生态护坡过程中具有较多的不利因素,并且坡比一般都在 1 : 0.5 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生态修复的

测结果与预测结果比较 二元回归的方法是统计学中用来进行数值预测的重要手段,通过回归分析方法可以研究确定径流养分损失量 E 对降雨场次 T 和降雨时间 t 的依赖关系,进而通过已知的降雨场次 T 和降雨时间 t 对径流养分损失量 E 进行预测。由表 4 可知, K 在第一场降雨时,预测精度最高; N、P 则在最后一场降雨时,预测精度最高。各营养元素养分损失量模型预测值与实测值很接近,最大平均相对误差分别为: N 为 21.58%, P 为 20.54%, K 为 26.22%, 已具备较高的预测精度。

根据相对误差、确定性系数和差异显著性分析综合检验模型的有效性,总结得出:该岩石边坡基质-植被系统预测模型是可行的,其相对误差 < 27%, 确定性系数均在 0.86 以上。同时,由二元回归方程建立过程中的确定性系数分别为 0.882、0.866 和 0.958,二元非线性回归方程系数均在 0.935 以上,说明模型的拟合优良度都较好。其中, N、K 的平均相对误差随着降雨场次的增多,百分数先增加后降低, P 则一直处于递减状态。

难度。因此,该次研究利用坡度为 63° 的岩石边坡基质-植被系统开展人工降雨试验和验证试验,探究了N、P、K径流损失与降雨场次及降雨时间的关系。结果表明,N、P、K 3种元素的径流损失量与降雨场次呈现相同的变化趋势且在前几场降雨中养分损失量较大,随着降雨场次的增加,其损失量逐渐降低,径流营养元素损失量表现出差异极显著($P=0.00$),而磷元素变化缓慢,可能与基质对磷元素有较强吸附作用有关。随着降雨时间的延长,出现N、P、K径流累积损失量增加的现象,且3种营养元素累积损失量在降雨时间动态变化过程中表现出差异极显著($P=0.00$)。N、P、K还随着降雨场次的增加,径流养分损失量动态变化过程增加幅度变得缓慢,可能跟降雨过程中基质养分含量和基质含水量变化有关。

养分径流损失模型是通过分析、比较技术和应用数学理论方法(Tong *et al.*, 2010; White *et al.*, 2010),建立反映实际情况且具有意义的数学预测模型。本研究基于经典养分损失模型,以岩石边坡基质-植被系统中的基质为研究对象,建立了径流养分损失量与降雨场次及降雨时间之间的二元函数关系,修正和优化了经典养分损失模型,以此实现了对植物生长基质养分损失量的预测。根据实测径流养分损失量数据结合相对误差、确定性系数对模型预测进行检验评价,结果分析得出实测值与理论值的相对误差 $<27\%$,模型确定性系数均在0.86以上,说明该数学预测模型适用于岩石边坡基质-植被系统的径流养分损失量预测。径流是基质养分流失的载体(邵明安和张兴昌,2001;张兴昌和邵明安,2001),降雨-入渗-径流是土壤养分溶解并随径流迁移的过程(张学权等,2006)。在此过程中,影响岩石边坡基质-植被系统养分损失的因素颇多,由于试验条件的限制,本次研究未能将更多的影响因子应用于模型及野外验证。同时,养分径流损失模型的应用还需要更多的工程检验,模型还需要进一步的完善,还需加深对不同条件的坡面和降雨进行实测验证,使模型更加可靠、有效,具有实用性。

参考文献

陈 璋, 繆福俊, 罗 双, 等. 2013. 岩石边坡植被重建系

- 统中微量元素径流损失模型研究. 水土保持通报, **33**(1): 256-260.
- 黄润秋. 2008. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制. 岩石力学与工程学报, **27**(8): 1525-1544.
- 李绍才, 孙海龙. 2004. 中国岩石边坡植被防护技术现状及发展趋势. 资源环境, **26**(8): 61-66.
- 牛明芬, 温林钦. 2008. 可溶性磷损失与径流时间关系模拟研究. 环境科学, **9**(9): 2580-2585.
- 邵明安, 张兴昌. 2001. 坡面土壤养分与降雨、径流的相互作用机理及模型. 世界科技研究与发展, **23**(2): 7-13.
- 石德坤. 2009. 模拟降雨条件下坡地氮流失特征研究. 水土保持通报, **29**(5): 98-101.
- 宋胜武, 向柏宇, 杨静熙, 等. 2010. 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. 岩石力学与工程学报, **29**(3): 442-458.
- 王 辉. 2006. 降雨条件下黄土坡地养分迁移机理及模拟模型(博士学位论文). 陕西杨凌: 西北农林科技大学.
- 王全九, 穆天亮, 王 辉. 2009. 坡地对黄土坡面径流溶质迁移特征的影响. 干旱地区农业研究, **27**(40): 176-179.
- 王全九. 1993. 降雨条件下黄土坡面土壤溶质随地表径流迁移试验研究. 水土保持学报, **7**(1): 11-17.
- 吴希媛, 张丽萍, 张妙仙, 等. 2007. 不同雨强下坡地氮流失特征. 生态学报, **27**(11): 4576-4582.
- 张俊云, 李绍才. 2000. 岩石边坡生态护坡研究简介. 水土保持通报, **20**(4): 36-38.
- 张兴昌, 邵明安. 2001. 侵蚀泥沙、有机质和全N富集规律研究. 应用生态学报, **12**(4): 541-544.
- 张学权, 胡庭兴, 李 伟, 等. 2006. 林(竹)+草植被恢复初期地表径流及其养分流失特征. 中国水土保持, **12**(10): 25-27.
- 周德培, 钟 卫, 杨 涛. 2008. 基于坡体结构的岩石边坡稳定性分析. 岩石力学与工程学报, **27**(4): 687-695.
- Chen Z, Yang L, Jiang Z, *et al.* 2013. Runoff-driven nitrogen and phosphorus dynamics of substrate material for rocky slope eco-engineering. *Ecological Engineering*, **51**: 123-132.
- Tong JX, Yang JZ, Hu BX. 2010. Experimental study and mathematical modeling of soluble chemical transfer from unsaturated/saturated soil to surface runoff. *Hydrological Processes*, **24**: 3065-3073.
- Yang HD, Rose N. 2005. Trace element pollution records in some UK lake sediments, their history, influence factors and regional differences. *Environment International*, **31**: 63-75.
- White MJ, Storm DE, Philip RB, *et al.* 2010. A quantitative phosphorus loss assessment tool for agricultural fields. *Environmental Modelling & Software*, **25**: 1121-1129.

作者简介 邱利平,女,1989年生,硕士研究生,主要从事生态恢复研究。E-mail: 308174675@qq.com

责任编辑 张 敏