

# 谷竹高速公路某滑坡形成机制数值模拟分析

王红明<sup>1</sup>, 代先尧<sup>1</sup>, 罗红明<sup>2</sup>, 程江涛<sup>1</sup>

(1.湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430051;

2.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室)

**摘要:** 在山区修建高速公路时,边坡开挖使其原始应力状态发生改变,有可能导致滑坡体复活和诱发新的滑坡。以谷竹高速公路某滑坡为研究背景,在现场调研的基础上,建立滑坡的工程地质模型,并通过二维数值模拟,再现滑坡体变形破坏过程。研究结果表明:该滑坡体的地形及物质组成是滑坡发生的地质基础,切脚开挖成为滑坡失稳触发因素;滑坡中后部位移量大,而前缘区位移量小,表现为滑坡中前部处于挤压变形状态,为推移式滑坡。

**关键词:** 高速公路; 滑坡; 数值模拟; 形成机制

## 1 引言

随着中国高速公路建设在山区及丘陵区不断推进,致使挖方边坡和填方边坡大量存在。因此,开展高速公路边坡稳定性的研究是高速公路建设的一个热点。滑坡在形成过程中,由于其物质组成、地质环境等都不尽相同,所以它们的变形破坏方式、成因机制等也会不同。对于一个滑坡,它的稳定性计算以及针对稳定状况采取的处理措施是以正确地分析它的成因机制为基础,只有了解滑坡的成因机制才能对它的稳定性进行准确的计算,所以必须对滑坡的成因机制问题有一个透彻的了解。

滑坡形成的机制分析一般采用工程地质分析方法、数值模拟方法及物理模拟方法。大多数工程地质工作者从滑坡所处的地质条件出发,采用“地质分析方法”,对滑坡的成因过程及变形机制进行分析,该方法偏重于地质条件对滑坡形成的定性描述分析,忽视了滑坡变形全过程,不能够反映出滑坡形成的主导因素;而数值模拟和物理模拟方法可以定量或半定量地再现滑坡变形破坏过程和内部机制作用过程,从整体上、理性上认识滑坡的变形破坏机制,认识滑坡稳定性的发展变形,成为当前滑坡形成机制研究应用较多的方法。目前对滑坡形成机制的分析多采用地质分析法或数值

模拟法,鲜见考虑边坡的地质环境条件影响的研究。

该文首先采用地质分析方法对鄂西山区谷竹高速公路 K81+100~K81+500 段滑坡的地质环境条件进行分析,阐明滑坡形成的工程地质条件,结合变形破坏迹象,揭示滑坡的变形破坏模式;然后采用 FLAC<sup>3D</sup> 对滑坡的形成机制进行数值模拟,再现滑坡变形破坏全过程,综合分析滑坡的变形破坏机制,揭示滑坡机理,为滑坡灾害评价和防治提供依据,确保高速公路正常建设和安全运营。

## 2 滑坡的地质环境条件

该研究滑坡起始桩号为湖北谷(城)竹(溪)高速公路的 K81+100,边坡全长约 400 m,行政区划隶属于湖北十堰市房县青峰镇陡口村一带。

经过现场地质调查发现,研究区为构造剥蚀侵蚀低山区,滑坡高度约 145 m,地形坡度为 20°~40°,坡体表面多覆盖有残坡积物和冲洪积物。地表出露基岩属于片岩类,为浅灰色、灰白色绢云钠长石英片岩及绢云石英片岩。

该滑坡位于山梁以下的斜坡地带,区内的纵坡降较大,是地下水的补给区及径流区,地下水主要是基岩裂隙水,分布较不均匀。

收稿日期:2018-11-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:41402318);中南工程咨询设计集团有限公司科研项目(编号:中南设计办【2018】14号);2013年度湖北省地方标准制修订项目(编号:鄂质监标【2013】50号)

作者简介:王红明,男,大学本科,高级工程师,E-mail:89674797@qq.com

3 滑坡工程地质特征

3.1 滑坡形态特征

滑坡整体呈南高北低,滑坡前缘和后缘的高程分别为 399、492 m,高差 93 m,滑坡总面积约  $7.5 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。现场调查发现滑坡区均有贯通的裂缝发育,滑坡前缘发育有剪切裂缝、后缘发育有张拉裂缝且错落明显,滑坡两侧以剪切裂缝为主,滑坡范围示意图如图 1 所示。

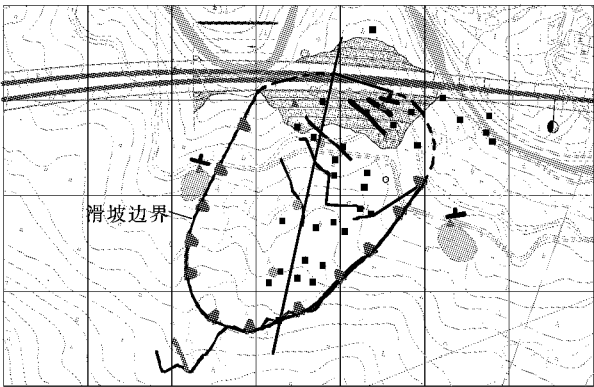


图 1 滑坡范围示意图

滑坡后缘位于高程 492 m 的缓坡段,以地面拉裂及其错落现象为主,后缘断壁清晰。错落高度 0.3~1.5 m,拉裂面产状为  $\text{NE}35^\circ \angle 55^\circ$ ,裂缝宽度 0.05~0.5 m、深 0.1~0.6 m。在该拉裂面后部缓坡区土体中发育一些因牵引导致的拉裂缝。前缘位于现开挖的路基中线附近,高程为 399 m。

据野外调查,该滑坡右侧边界较明显,可见连续的地面裂缝,以剪切裂缝为主、少量为拉裂缝。

滑坡左侧地表变形不明显,局部(即在左侧中后部)见有少量裂缝。根据野外调查,结合滑坡区地形地貌条件,确定以滑坡左侧山体冲沟为滑坡左侧边界。

3.2 滑坡物质组成特征

滑坡区主要地层岩性为残坡积土和片岩,滑坡区地质剖面图如图 2 所示,主要物质组成为:① 褐黄色、土黄色粉质黏土,分布于滑坡中后部,厚度 0.4~7.1 m;② 灰黄色、灰绿色碎石土,分布于滑坡中后部,厚度为 1.8~11.2 m;③ 灰黄色、灰绿色滑带土,为粉质黏土夹碎石,层厚为 0.1~0.6 m;④ 青灰色、灰黄色片岩,岩层面倾向指向边坡临空面。

3.3 滑坡变形破坏迹象

该边坡于 2010 年 10 月 25 日施工开挖,施工期间

曾多次发生小型滑坡,2011 年 6 月持续性降雨造成滑坡产生了新的变形,已经填埋的滑坡后部裂缝重新开裂,在开挖区路基中心发现滑坡的前缘剪出口,滑面擦痕明显,同样在一级坡顶平台以上的二级边坡坡面上发现 3 段滑面,擦痕明显。

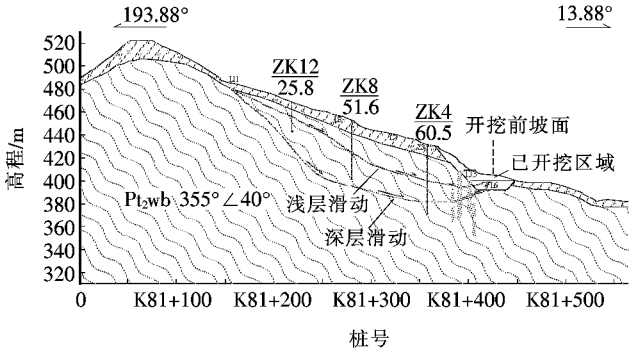


图 2 谷竹高速公路 K81+100~K81+500 段滑坡 II-II' 横断面图

根据上述变形迹象,可以初步判断路基中心处的剪出口为滑坡深层滑动的剪出口,一级坡顶平台以上二级边坡坡脚的剪出口为浅层滑动的前缘剪出口。因此,该滑坡是一个多级滑面的复杂滑坡。

4 滑坡形成机制数值模拟分析

采用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 对边坡开挖过程中的变形特征进行模拟分析,进而揭示出滑坡的变形破坏机制,为路堑边坡的稳定性评价奠定基础。

4.1 计算模型和边界条件

在滑坡勘察资料的基础上,建立计算模型。模型长 500 m(X 轴方向),底部高程为 200 m,表面为地表实际高程。位移边界条件为左、右两侧采用水平约束,底面采用双向约束,顶面为自由边界。

4.2 力学模型与计算参数

斜坡岩土体变形破坏满足莫尔-库仑弹塑性强度准则。计算模型中采用的各岩土层物理力学参数见表 1。

表 1 岩土层计算参数

岩性	重度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )		饱和抗剪强度	
	天然状态	饱和状态	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\circ)$
覆盖层(粉质黏土夹碎石)	21.5	22.0	0.0	17.0
层面	24.0	25.5	5.0	17.0
片岩(强风化)	24.0	25.5	56.0	22.0

根据高速公路施工方案,该剖面处按 4 级台阶开挖(自下而上分别为一级、二级、三级和四级),在模拟计算中按 4 级台阶开挖施工方案进行模拟。

#### 4.3 模拟结果分析

(1) 滑坡在开挖过程中不平衡力演化过程曲线见图 3。随着开挖过程的进行,斜坡系统的不平衡力收敛时间逐渐加长,表明了开挖引起滑坡的变形在逐步发展,滑坡的应力也在逐步调整中;当第四级台阶开挖时,系统的不平衡力变化很大,主要是由于开挖对系统的扰动较大。而在第一级台阶开挖时,斜坡系统的不平衡力收敛时间最长,说明在该阶段,系统基本处于相对极限状态,也说明该阶段发生变形也是最大,变形的历时也是较长的。

(2) 开挖过程中 X 方向的位移图见图 4。开挖之

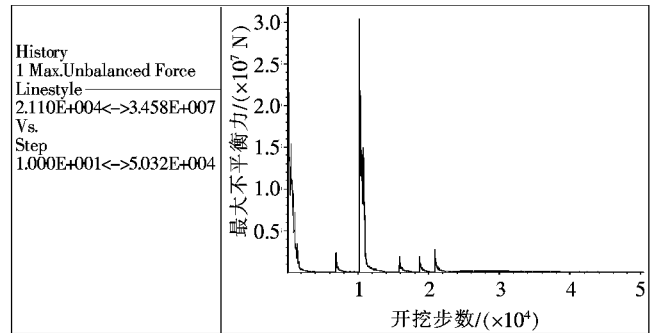
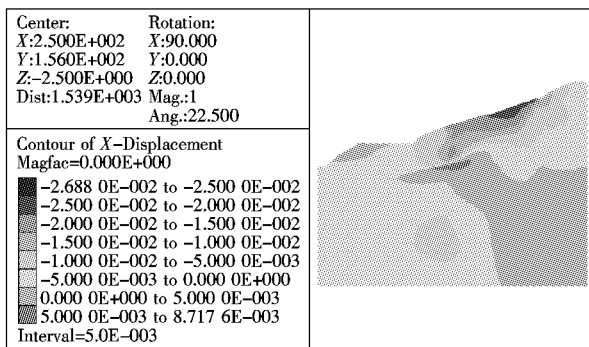
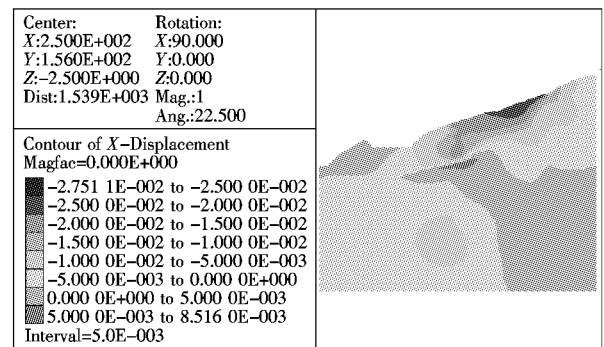


图 3 开挖过程中系统不平衡力演化过程曲线图

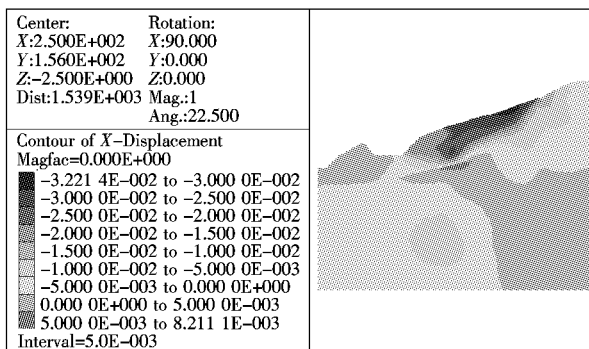
初边坡就产生了位移,这是坡体开挖引起的“卸荷回弹”导致。当开挖至四级、三级平台时,主要是边坡的后部发生变形,因而在滑坡的中后部尤其是后部会出现较多拉裂缝。



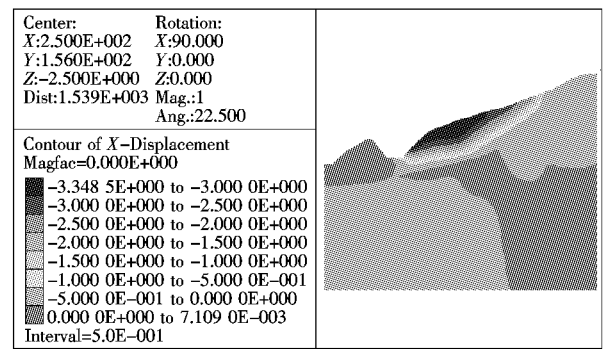
(a) 开挖至四级平台



(b) 开挖至三级平台



(c) 开挖至二级平台



(d) 开挖至一级平台

图 4 开挖后 X 方向位移图(单位:m)

当开挖至二级平台时,边坡体变形开始逐渐增大,边坡变形的范围也开始向坡脚发展。当开挖到道路设计标高时,滑坡的变形将更加明显,最大变形区前移,滑坡整体变形较大而发生明显的破坏。

(3) 滑坡开挖过程中塑性区分布图见图 5。

由图 5 可知:在边坡开挖过程中,边坡塑性区不断扩大,在开挖到第三级平台后,边坡体局部已经有塑性

区开始贯通,此时三级边坡的坡脚塑性区集中分布,从而引发边坡浅层发生滑动,此现象与现场情况基本一致。开挖到二级平台后,边坡内部塑性区出现贯通,边坡后部表现为拉破坏,边坡前部表现为剪切破坏。此现象也与现场的剪出口特性基本一致。若在该工况下继续开挖边坡,挖至设计道路标高,滑体塑性区贯通,前缘破坏范围将继续扩大,从而引起滑坡发生滑动破坏。

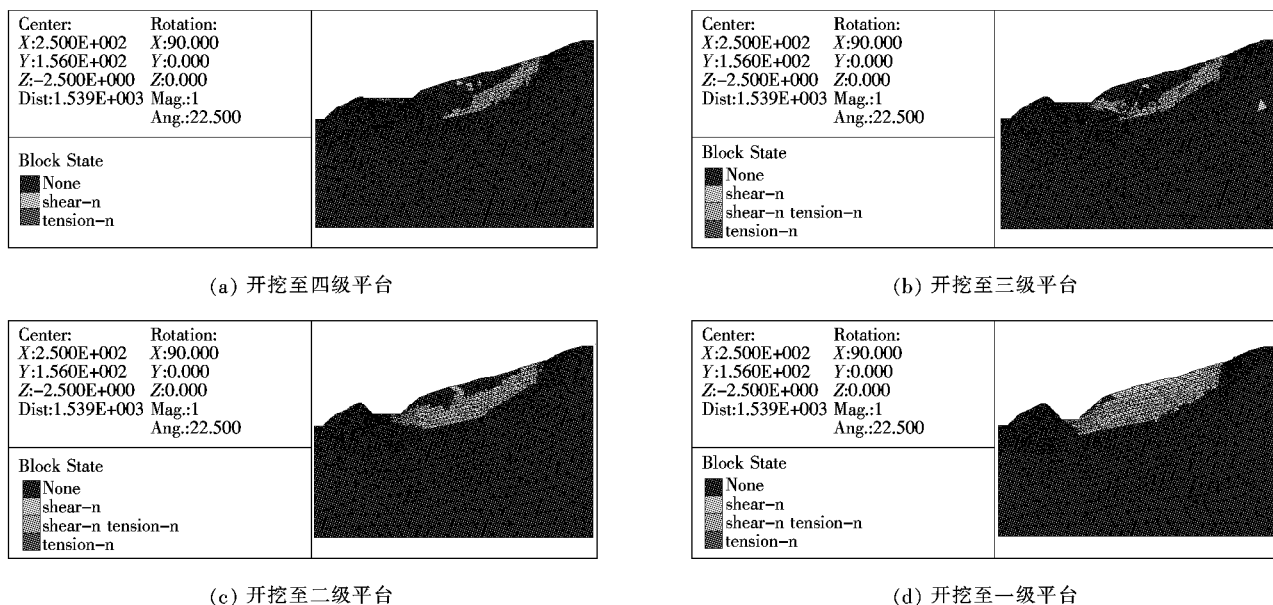


图5 开挖后塑性区分布图

#### 4.4 滑坡形成机制分析

通过现场地质调查发现,影响该滑坡形成的主要因素有:地层岩性、地形、地貌、水文地质、地质构造等。自然斜坡总体坡度 $30^{\circ}$ 左右,斜坡坡顶高程525.3 m,坡脚峪家湾沟高程约381.8 m,相对高差约143.5 m。高速公路经过该斜坡时,路基开挖形成的坡度为 $45^{\circ}$ ,该陡峭的临空面是滑坡形成的前提条件。

滑坡区为第四系残坡积物,松散~稍密状,含有较多碎石,滑床为元古界武当山群浅灰~灰白色绢云钠长石英片岩、绢云石英片岩,产状为 $310^{\circ}\sim 15^{\circ}\angle 34^{\circ}\sim 40^{\circ}$ ,为顺层边坡,节理裂隙发育,易风化,遇水易软化,为滑坡的形成提供了物质基础。

滑坡区内地形纵坡较大,为地下水补给、径流提供了有利条件,路堑开挖改变了边坡原有的应力,破坏了原有的力学平衡条件,特别是切脚开挖成为导致滑坡失稳的触发因素。

通过数值模拟分析,路堑开挖打破了原滑坡应力,对滑坡发生变形起到了诱发和加速的作用。该滑坡的坡脚部分位移较小,而坡顶部分的位移较大,此现象表明该滑坡尚处于蠕滑阶段,同时数值模拟发现该滑坡的中前部为挤压状态,故该滑坡为推移式滑坡,此与工程地质分析一致。

现场调查和数值模拟结果表明:开挖到二级平台时,该滑坡尚处在蠕动变形阶段,为极限平衡稳定状态。如果按照原方案继续开挖到路基的高程,则边坡体的变形会进一步加剧,甚至会导致大规模滑坡的发

生,其后果将十分严重。因此,根据数值模拟结果,对该边坡采取了抗滑桩加卸载等紧急措施保证边坡稳定后,继续开挖至设计路基高程,现谷竹高速公路已通车运营,该处边坡处于稳定状态。

## 5 结论

(1) 通过现场地质调查发现,影响该滑坡形成的物质条件主要有:地层岩性、地形、地貌、水文地质、地质构造等,边坡开挖是导致滑坡形成的触发因素,同时雨水入渗也是触发滑坡发生的重要因素。

(2) 采用数值模拟手段分析了滑坡的形成机制,路堑开挖打破了原滑坡应力,对滑坡发生变形起了诱发和加速作用。滑坡中后部位移量大、前缘区位移量小,表现为滑坡中前部滑体处于挤压变形状态,为推移式滑坡。

(3) 从边坡开挖到二级平台时的变形迹象和数值模拟结果来看,此状态下滑坡尚处在蠕动变形阶段,为极限平衡稳定状态。根据数值模拟的结果对该边坡采取了抗滑桩加卸载等紧急措施保证边坡稳定后,继续开挖至设计路基高程,现边坡运行稳定。

#### 参考文献:

- [1] 张倬元,王士天,王兰生.工程地质分析原理[M].北京:地质出版社,1994.
- [2] 晏鄂川,唐辉明.工程岩体稳定性评价与利用[M].武汉:中国地质大学出版社,2002.

# 基于模拟退火的果蝇优化算法的边坡临界滑面搜索

余秀玲, 申翊\*, 郑万栋

(武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 传统的边坡稳定性分析多采用极限平衡法,需要研究者依据经验试算一系列滑面,再确定最危险滑面。该文将果蝇优化算法(FOA)与模拟退火算法(SA)融合,提出基于模拟退火的果蝇优化算法(SA-FOA),避免了陷入局部极值的缺点,确保获得全局最优解,并结合极限平衡法用于边坡临界滑面的搜索。在 Matlab 中编程实现该算法,通过两个土坡算例的验证及与其他方法的对比分析,结果表明:基于模拟退火的果蝇优化算法能够高效、快捷地搜索出边坡的临界滑面,且具有更高的收敛精度和可靠性,为边坡临界滑面的搜索提供了一条高效的新途径。

**关键词:** 边坡稳定性分析; 极限平衡法; 果蝇优化算法; 模拟退火

边坡稳定性分析是岩土工程中的重要研究课题之一,其研究方法包括:工程地质类比法、极限平衡法、极限分析法、数值分析法等。其中极限平衡法的应用最为广泛,但是其必须依赖研究者的经验,试算一系列滑面寻找最小安全系数及其对应的临界滑面位置。

近年来,很多学者致力于临界滑面自动搜索技术的研究,提出了各种适用于圆弧滑面或非圆弧滑面的搜索方法,如蒙特卡罗法与有限元结合、临界化方法、遗传进化算法、模式搜索法、相遇蚁群算法、神经网络与多元回归等。与早期使用的穷举法、二分法相比,上述方法的精度和收敛性提高了很多,对边坡稳定研究和实际工程应用起到了积极的作用,但有时也会发生计算成果并非整体安全系数极值的情况。该文将果蝇优化算法和模拟退火算法相融合,在 Matlab 中编程实现基于模拟退火机制的果蝇优化算法,通过两个土坡算例验证,并与其他方法进行对比分析。以期对边坡

临界滑面搜索提供新途径。

## 1 边坡临界滑面搜索理论模型

简化 Bishop 法是目前常用的一种滑坡稳定性分析方法,被认为是圆弧滑面计算分析的最佳极限平衡法。其力学模型如图 1 所示。假定条间力的方向水平,切向剪力为零,根据滑面上土体的静力平衡和整体的力矩平衡可以得到滑面的安全系数:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \left[ \left( \cos\theta_i + \frac{\sin\theta_i \tan\varphi_i}{F_s} \right) (W_i \tan\varphi_i + c_i b_i) \right]}{\sum_{i=1}^n W_i \sin\theta_i} \quad (1)$$

式中:  $F_s$  为对应滑面的安全系数;  $n$  为条分数;  $c_i$ 、 $\varphi_i$  分别为滑动体第  $i$  条块土层的黏聚力和内摩擦角;  $W_i$  为第  $i$  条块自重;  $b_i$  为第  $i$  条块的宽度;  $\theta_i$  为第  $i$  条块

- \*\*\*\*\*
- [3] 陈永波,乔建平,王成华,等.张家界唐家坡滑坡形成机制及成因分析[J].山地学报,2002(S1).
  - [4] 陈侃福,周建锋,俞伯汀.某公路滑坡的变形机理与稳定性分析[J].地球与环境,2005(S1).
  - [5] 张亮,何宏民,张少挺,等.铜黄一级公路滑坡发育规律与成灾机理分析[J].公路交通科技,2005(6).
  - [6] 黄润秋.20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J].岩石力学与工程学报,2007(3).

- [7] 向强,陈彰贵.某滑坡的成因机制数值模拟分析[J].地质灾害与环境保护,2007(1).
- [8] 黄达,裴向军,张志刚,等.某公路滑坡成因机制及稳定性[J].山地学报,2008(7).
- [9] 杨为民,吴树仁,张春山,等.陕南岚皋县柳家坡滑坡形成机制研究[J].工程地质学报,2007(2).
- [10] 贺为民,杨杰.豫西高速公路滑坡成因分析[J].自然灾害学报,2013(3).

收稿日期:2018-11-06

作者简介:余秀玲,女,硕士研究生.E-mail:463401364@qq.com

\* 通信作者:申翊,女,博士,副教授.E-mail:563615001@qq.com