

# 鄂西南路基边坡影响土壤侵蚀量因素分析

何凡<sup>1</sup>, 陈宗伟<sup>2</sup>, 王金娟<sup>3</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 2. 交通部科学研究院, 北京 100029; 3. 湖北沪蓉西高速公路指挥部, 湖北 恩施 445000)

**摘要:** 为深入了解路基边坡土壤侵蚀过程及其影响因素, 以位于鄂西南的湖北沪蓉西高速公路恩施至利川段公路路基边坡作为研究对象, 在天然降雨条件下进行土壤侵蚀观测, 对路基边坡土壤侵蚀的主导因子进行分析判断。结果表明, 影响土壤侵蚀量的最主要因素是降雨过程, 总体上升雨量、降雨历时和降雨强度对土壤侵蚀量产生的影响较为接近; 在坡度较缓的坡面, 降雨量的影响大于降雨强度, 而在坡度较陡的坡面, 降雨强度的影响大于降雨量; 在以时间为变化序列的因素中, 对土壤侵蚀的影响大小顺序依次为: 降雨 > 土壤含水量 > 植被覆盖度; 土壤侵蚀量与坡长、坡度均不存在显著相关关系, 与坡长相比, 土壤侵蚀量对坡度的变化更为敏感。

**关键词:** 路基; 土壤侵蚀; 鄂西南

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)06-0168-04

中图分类号: S157.1, U416

## Factors Influencing Soil Erosion on Roadbed Side Slope in Southwest Hubei Province

HE Fan<sup>1</sup>, CHEN Zong-wei<sup>2</sup>, WANG Jin-juan<sup>3</sup>

(1. China Research Institute of Water Resources and Hydropower, Beijing 100048

China; 2. Chinese Academy of Transportation Science, MOC, Beijing 100029, China;

3. Hubei Management Company of Construction of Hurongxi Expressway, Enshi, Hubei 445000, China)

**Abstract:** In order to study soil erosion processes and their influence factors on roadbed side slope, the roadbed side slope of Hurongxi expressway from Enshi to Lichuan located in Southwest Hubei Province was taken as a study object. The analysis of main factors of soil erosion on the roadbed side slope was carried based on soil erosion observation under the natural rainfall condition. The analysis indicates that rainfall process was the most important factor influencing soil erosion and as a whole the effects of rainfall amount, rainfall duration, and rainfall intensity on soil erosion were relatively similar. On a relatively gentle slope, the influence of rainfall amount was greater than that of rainfall intensity, but on a relatively steep slope, the influence of rainfall intensity was greater than that of rainfall amount. Taking the time as change sequence, the factors influencing soil erosion were in such an order of rainfall > soil moisture content > vegetation degree of coverage. Soil erosion did not have a remarkable correlation with slope length and gradient, but was more sensitive to the change in gradient.

**Keywords:** roadbed; soil erosion; the Southwest Hubei Province

水土流失是我国存在的主要环境问题之一。随着各类开发建设项目规模的扩大, 开发建设活动造成的水土流失面积不断扩大, 危害日益严重。其中公路建设所导致的水土流失占了很大比例<sup>[1-3]</sup>。路基边坡是公路工程在建设期和运营期均存在土壤侵蚀的部

分之一, 同时也是公路主体的重要组成部分, 路基边坡土壤侵蚀不仅关系到公路沿线土壤侵蚀状况, 还会对公路的安全运营造成重大影响。因此, 路基边坡土壤侵蚀尤其需要引起重视。但目前土壤侵蚀研究的重点主要集中在农地、林地、牧区和工矿区等领

收稿日期: 2008-07-17

修回日期: 2009-06-19

资助项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目“南方山区公路水土保持监测指标体系与方法研究”; 国家科技支撑计划“长江上游坡耕地整治与高效生态农业关键技术试验示范”(2008BAD98B08); 中国水利科院科研专项课题“秦巴山区湿润黄土坡耕地整治技术水土保持效益研究”(泥集 0910)

作者简介: 何凡(1980—), 男(汉族), 陕西省汉中市人, 博士, 工程师, 主要研究方向为水土保持。E-mail: hef an\_98@sina.com.

通信作者: 陈宗伟(1972—), 男(汉族), 河南省禹州市人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为公路水土保持。E-mail: czw72@126.com.

域<sup>[47]</sup>。我国公路土壤侵蚀研究是近几年才开始的,对路基边坡土壤侵蚀规律研究较少,尤其是野外自然降雨条件下的研究还非常缺乏。

本研究以位于鄂西南的湖北沪蓉西高速公路恩施至利川段公路路基边坡作为研究对象,在自然降雨条件下进行土壤侵蚀观测,选取降雨量、降雨强度、降雨历时、土壤含水量、坡长、坡度等因素,应用灰关联方法对路基边坡土壤侵蚀的影响因素进行分析判断。研究结果可对进一步深入认识路基边坡土壤侵蚀过程,指导公路水土保持工作具有重要意义。

## 1 研究区概况

湖北沪蓉西高速公路地处湖北省西南部,位于长江三峡腹地,是国家公路主骨架沪蓉国道主干线的重要组成部分。研究区位于湖北省恩施土家族苗族自治州恩施市境内(东经 $108^{\circ}23'12''$ — $110^{\circ}38'08''$ ,北纬 $29^{\circ}07'10''$ — $31^{\circ}24'13''$ )。属亚热带山地季风性湿润气候,年平均气温 $14^{\circ}\text{C}$ ~ $16^{\circ}\text{C}$ ,无霜期260 d以上,最冷月平均气温在 $2.8^{\circ}\text{C}$ ~ $4.4^{\circ}\text{C}$ ,最热月平均气温在 $24.8^{\circ}\text{C}$ ~ $26.6^{\circ}\text{C}$ ,大于 $10^{\circ}\text{C}$ 的活动积温为 $4\ 300^{\circ}\text{C}$ ~ $5\ 000^{\circ}\text{C}$ ,年降水量1 400 mm左右,相对湿度平均为80%左右,干燥度0.55~0.65。该区成土母质复杂,加上生物气候的变化,发育而成的土壤种类繁多,主要的地带性土壤有红壤、黄壤、黄棕壤等。主要森林类型为针阔混交林,主要树种为马尾松 [*Pinus massoniana* Lamb.],杉木 [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.],栓皮栎 (*Quercus variabilis* BL.),柏木 (*Cupressus funebris* Endl.),刺槐 (*Robinia pseudoacacia* Linn.)。

## 2 研究方法

### 2.1 观测方法

2.1.1 观测小区建立 针对路基边坡常见坡度建立试验观测小区,观测小区以拱形防护为基本单位,每个拱为一个试验小区。观测小区均位于恩施州恩施市龙凤坝。各观测小区概况如表1所示。各小区均为拱形框架梁防护,框架梁内为回填红砂壤,土壤密度 $1.21\text{ g/cm}^3$ ,填土厚度50 cm,进行机械压实,恢复植被系采用人工撒播方式建植。野外观测时段为2007年6月中旬至2007年10月底。

2.1.2 土壤侵蚀量观测 因路基回填土厚度较小,无明显沉降,故采用插签标注法和体积量测法进行土壤侵蚀量观测。插签标注法用于测量土壤面蚀量,该法是在土壤侵蚀观测小区内按一定规则于坡面布设若干竹签,在竹签上划下刻痕,将竹签打入地下至刻痕与

地面齐平为止,每次降雨后测定地面与竹签刻痕之间的高差,计算各个竹签裸露高度的算术平均值,求出坡面在此次降雨条件下产生的土壤侵蚀深度,侵蚀深度与观测小区面积、土壤密度的乘积即为该观测小区在该次降雨条件下的土壤侵蚀量。以此类推就可得出各观测小区每次降雨产生的土壤侵蚀量。

表1 观测小区概况

小区类型	小区编号	长度/m	宽度/m	植被状况	盖度/%
缓坡小区 (边坡比1:3)	h-1	5.4	1.88	裸露	<1
	h-2	5.4	1.88	裸露	<1
	h-3	5.4	1.88	裸露	<1
中坡小区 (边坡比1:1.5)	z-1	4.0	3.90	裸露	<1
	z-2	4.0	3.90	裸露	<1
	z-3	4.0	3.90	裸露	<1
	z-4	4.0	3.90	裸露	<1
	z-5	5.2	3.95	裸露	<1
	z-6	5.2	3.95	裸露	<1
	z-7	5.2	3.95	裸露	<1
	z-8	5.2	3.95	裸露	<1
	z-9	5.2	3.95	人工恢复 10(初始值)	
	z-10	5.2	3.95	人工恢复 10(初始值)	
	z-11	5.2	3.95	人工恢复 10(初始值)	
	z-12	5.2	3.95	人工恢复 10(初始值)	
	z-13	6.8	4.00	裸露	<1
	z-14	6.8	4.00	裸露	<1
	z-15	6.8	4.00	裸露	<1
	z-16	6.8	4.00	裸露	<1
陡坡小区 (边坡比1:1)	d-1	4.5	3.15	裸露	<1
	d-2	4.5	3.15	裸露	<1
	d-3	4.5	3.15	裸露	<1
对照小区 (边坡比9:100)	dz-1	5.2	2.50	裸露	<1
	dz-2	5.2	2.50	裸露	<1
	dz-3	5.2	2.50	裸露	<1

注:人工恢复植被采用的主要植物种包括高羊茅 (*Festuca elata* Keng)、紫羊茅 (*Festuca rubra* L.)、木豆 (*Cajanus cajan* Millsp.)、山毛豆 (*Tephrosia candida* DC.)、猪屎豆 (*Crotalaria pallida* AIT.)、混播种植。对照小区位于路基边坡旁边。

对侵蚀细沟采用体积量测法进行测量。在各观测点坡面,用皮尺由上部到下部等距离沿等高线设置量测断面,量测每一断面全部侵蚀沟的断面尺寸(根据当地情况,将沟宽>20 cm的侵蚀沟断面概化为梯

形,量测断面上宽、下宽和深,将沟宽 $\leq 20$  cm 的侵蚀沟断面概化为三角形,量测其上宽和深),计算出每一断面侵蚀沟断面面积之和,然后计算出侵蚀沟总体积  $V_{\text{沟}}$  和沟蚀量  $M$ ,公式为:

$$V_{\text{沟}} = \frac{\sum S_1 + \sum S_2 + \dots + \sum S_n}{N}$$

$$M = \frac{V_{\text{沟}} R}{BL}$$

式中:  $\sum S_1, \sum S_2, \sum S_n$ ——1, 2, ...,  $n$  断面侵蚀沟断面面积求和;  $B$ ——观测点坡面宽;  $L$ ——观测点坡面长;  $N$ ——量测断面数;  $R$ ——土壤密度。

2.1.3 降雨观测 在距研究路段观测小区 100 m 处安置 CR2 型翻斗式电脑数字雨量仪(成都产),观测记录降雨过程,降雨记录间隔为 1 min,降雨量最大观测值为 33.6 mm/min,降雨资料按地面气象要素观测规范整理。

2.1.4 土壤含水量观测 采用 ML2x 针式土壤水分速测仪进行土壤含水量测定。测定在野外小区实时进行,采用竖埋的方式测定小区土壤含水量,每天测 3 次,每个小区测上中下 3 个部位,取平均值。

2.1.5 植被覆盖度观测 植被覆盖度是一个植被因子的综合度量指标,主要指林草地(包括乔木林、灌木林和草地)上林草植株冠层或叶面在地面上的垂直投影面积占该林草标准地面积的比例。本试验采用样线调查法和样方调查法测定径流小区的植被覆盖度。

## 2.2 灰关联分析方法

灰关联是指事物之间不确定性关联,或系统因子与主行为因子之间的不确定性关联。灰关联分析是基于行为因子序列的微观或宏观几何接近,以分析和确定因子间的影响程度或因子对主行为的贡献测度,而进行的一种分析方法<sup>[8-9]</sup>。

## 3 结果分析

土壤侵蚀影响因素分为两类:一类以时间为变化序列,包括降雨量、降雨历时、降雨强度、土壤含水量和植被覆盖度,这些因素随着时间变化,不同的时间段有不同的值;一类以空间为变化序列,例如坡长、坡度,这些因素随着空间变化,不同的坡面有不同的值。因此,本研究对这两类因素分别进行分析。

### 3.1 以时间为变化序列的土壤侵蚀影响因素分析

3.1.1 灰关联分析 通过对 32 场降雨过程中相关数据的野外观测,得到各类型小区土壤侵蚀量及其影响因素(降雨量、降雨历时、降雨强度、土壤含水量和植被覆盖度)共 6 项参数特征值,再将这 6 项原始值分别标准化处理后,得到各因子的无量纲标准化值。

标准化的目的是消除各因子间由于量纲不同对分析造成的影响。采用最大化处理方法,即在各组数值中选取其中的最大值作为标准参照值,然后把每组的所有数值与其对应的最大值相除,所得的比值组成新的数列。

将土壤侵蚀量标准化数值作为参考数列,其影响因素标准化数值作为比较数列,计算的灰关联度如表 2 所示。

表 2 土壤侵蚀量与其影响因素的灰关联度

小区类型	降雨量	降雨 历时	降雨 强度	土壤 含水量	植被 覆盖度
对照小区	0.76	0.70	0.73	0.54	—
缓坡小区	0.73	0.68	0.70	0.46	—
中坡裸露小区	0.71	0.72	0.75	0.64	—
中坡有植被小区	0.70	0.71	0.73	0.63	0.57
陡坡小区	0.67	0.71	0.74	0.62	—

灰关联度值越大,说明比较数列与参考数列的发展趋势越接近,即比较数列对参考数列影响就越大。上表反映出影响土壤侵蚀量的最主要因素是降雨,总体上降雨量、降雨历时和降雨强度对土壤侵蚀量产生的影响较为接近。这与当地降雨特性较为相符,与其它地区相比,当地降雨历时与降雨强度均处于中等水平。

从表 2 可以看出,在坡度较缓的小区(缓坡小区、对照小区),降雨量的影响大于降雨强度,而在坡度较陡的坡面(中坡小区、陡坡小区),降雨强度的影响则大于降雨量。这种差异看起来很微小,但却反映了路基边坡不同坡度坡面的产流特点。在坡度较缓的小区,水分下渗量较大,地表径流产生相对较慢,产流模式更接近蓄满产流,因此降雨量对地表径流和土壤侵蚀的影响更大。在坡度较陡的小区,情况则有所不同,水分下渗量较小,地表径流产生相对较快,产流模式更接近超渗产流,在这种情况下,降雨强度对地表径流和土壤侵蚀的影响就更大。

从表 2 还可看出,在以时间为变化序列的因素中,对土壤侵蚀的影响大小顺序依次为:降雨>土壤含水量>植被覆盖度。

3.1.2 相关分析 灰关联分析反映出各因素对土壤侵蚀量影响大小,为了进一步分析土壤侵蚀量与各因素的相关性,同时也为了对灰关联分析结果进行验证。本研究对土壤侵蚀和影响因素的标准化数据进行皮尔逊(Pearson)相关分析,结果见表 3。

通过分析表 3 两因子间的相关系数及显著性检验值,可以得出:(1)影响对照小区土壤侵蚀的主要

因素是降雨量, 两者呈现出极显著的正相关关系; (2) 缓坡小区土壤侵蚀量与各因素间均不存在显著相关关系, 这可能是由于各因素的影响较为均衡, 没有一个因素起明显的主导作用; (3) 在中坡小区, 降雨量、

降雨历时和降雨强度与土壤侵蚀量呈现出极显著的正相关关系, 这表明这 3 个因素对中坡小区土壤侵蚀都起到决定作用; (4) 影响陡坡小区土壤侵蚀的主要因素是降雨强度, 两者呈现出极显著的正相关关系。

表 3 土壤侵蚀量与其影响因素相关分析

小区类型	降雨量		降雨历时		降雨强度		土壤含水量		植被覆盖度	
	相关系数	显著性系数	相关系数	显著性系数	相关系数	显著性系数	相关系数	显著性系数	相关系数	显著性系数
对照小区	0.561 <sup>*</sup>	0.049	-0.200	0.914	0.324	0.102	0.168	0.359	—	—
缓坡小区	0.224	0.217	0.101	0.583	0.235	0.196	0.052	0.777	—	—
中坡裸露小区	0.732 <sup>**</sup>	0.000	0.429 <sup>**</sup>	0.014	0.654 <sup>**</sup>	0.000	0.133	0.468	—	—
中坡有植被小区	0.660 <sup>**</sup>	0.000	0.446 <sup>**</sup>	0.526	0.520 <sup>**</sup>	0.002	0.141	0.441	0.176	0.335
陡坡小区	0.677	0.000	0.300	0.095	0.706 <sup>**</sup>	0.000	0.116	0.527	—	—

注: \*\*表示相关系数具有极显著性意义; \*表示相关系数具有显著性意义。

从表 3 可以看出, 在各类型小区中, 只有降雨的某个因素或某几个因素与土壤侵蚀量呈显著或极显著关系, 土壤含水量、植被覆盖度与土壤侵蚀量不存在显著相关关系。这表明, 决定路基边坡土壤侵蚀量的主要是降雨。土壤含水量与土壤侵蚀量不存在显著相关关系的原因应该仍然是和路基边坡坡面的产流特点有关, 如前所述, 路基边坡坡度相对较陡, 产流模式更接近超渗产流, 在这种情况下, 土壤含水量的作用相对有限。而植被覆盖度与土壤侵蚀量不存在显著相关关系的原因应该是和植被覆盖度大小有关, 由于试验小区观测从植被初始建植时就开始进行, 初期植被覆盖度较小, 所起到的防护作用有限, 这就导致了植被覆盖度对土壤侵蚀的影响较小。

此外, 从表 3 还可看出, 随着坡度的增大, 对土壤侵蚀起较大作用的因素从降雨量变为降雨强度。这与灰关联分析的结果是一致的。

### 3.2 以空间为变化序列的土壤侵蚀影响因素分析

3.2.1 灰关联分析 根据小区布设情况, 得到小区土壤侵蚀量以及各影响因素(坡长、坡度)的参数特征值, 采用最大化处理方法, 分别进行标准化处理后, 得到各因子的标准化值。

将土壤侵蚀量标准化数值作为参考数列, 其影响因素标准化数值作为比较数列, 计算的灰关联度坡长为 0.56, 坡度为 0.69。可以看出, 坡长、坡度均会对土壤侵蚀产生一定影响, 其中坡度产生的影响比坡长更大。也就是说, 土壤侵蚀量对坡度的变化更为敏感。从实测值来看, 小区坡度从 9%变化到 100%, 变化量为 10 倍左右。与此同时, 土壤侵蚀量变化量也为 10 倍左右, 即土壤侵蚀量随坡度的变化率接近 1。

而土壤侵蚀量随坡长的变化率约为 0.224, 远小于土壤侵蚀量随坡度的变化率。这也表明, 土壤侵蚀量对坡度的变化更为敏感。

3.2.2 相关分析 对土壤侵蚀和影响因素的标准化数据进行皮尔逊(Pearson)相关分析, 结果见表 4。

表 4 土壤侵蚀量与其影响因素相关分析

坡长		坡度	
相关系数	显著性系数	相关系数	显著性系数
0.082	0.878	0.122	0.818

从表 4 可以看出, 土壤侵蚀量与坡长、坡度均不存在显著相关关系, 这与两者灰关联度值较小是一致的。从上表还可以看出, 虽然土壤侵蚀量与坡长、坡度的相关关系均不显著, 但坡度相关系数的绝对值还是大于坡长的, 即与坡长相比, 坡度对土壤侵蚀量的影响更大, 这与灰关联分析结果也是一致的。

坡长与土壤侵蚀量相关关系不显著在一定程度上正反映了路基边坡土壤侵蚀的特点。处于主体工程安全的考虑, 路基边坡通常会采取一定的水土保持措施, 其中最常见的就是本研究试验小区所采取的拱形骨架+植草防护方式。在这种水土保持措施作用下, 一个小区的壤中流被拱形骨架隔断, 地表径流则被挡水沿分流到排水槽中, 各个小区坡面径流互不影响。因此, 拱形骨架实质上是将面积较大的坡面分割为数个小面积坡面, 每一个坡面的坡长就很短, 一般不超过 10 m。从土壤侵蚀的角度来说, 各坡面坡长的差异十分微小, 所以坡长与土壤侵蚀量相关关系并不显著。

(下转第 181 页)

的基础上合理利用,才能巩固治理成果,同时,需要结合现代信息技术,利用3S等数字化、智能化手段和仿真技术,对盐碱化土壤的分布、演变规律以及土壤质量进行长期的跟踪观测和模拟研究。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 周和平,张立新,禹锋,等.我国盐碱地改良技术综述及展望[J].现代农业科技,2007(11):159-164.
- [ 2 ] 张克强,白成云,马宏斌,等.大同盆地金沙滩盐碱地综合治理技术开发研究[J].农业工程学报,2005(S1):136-137.
- [ 3 ] 韩霖昌,解建仓,罗林涛,等.陕西卤泊滩盐碱地综合治理的“改排为蓄 水地共处 和谐生态”模式研究[J].水利学报,2009,40(3):119-121.
- [ 4 ] 王水献,杨鹏年,董新光,等.内陆河流域绿洲灌区盐碱地改良分区及治理模式探究:以新疆焉耆县平原灌区为

例[J].节水灌溉,2008(3):5-8.

- [ 5 ] 杨自辉,王继和,纪永福,等.河西走廊盐碱地治理模式研究[J].土壤通报,2005,36(4):479-482.
- [ 6 ] 张建锋.盐碱地生态修复原理与技术[M].北京:中国林业出版社,2007:26-27.
- [ 7 ] Skaggs R W, Chescheir G M. Effects of subsurface drain depth on nitrogen losses from drained lands[C]//Proc Annu. Int. Meet. of ASAE/CSAE-SCGR. Toronto, Canada, 1999.
- [ 8 ] Guitjens J C, Ayars J E, Grismer M E, et al. Drainage design for water quality management: overview[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1997, 123(3):148-153.
- [ 9 ] 刘建刚,罗纨,贾忠华,等.从水盐平衡的角度分析控制排水在银南灌区实施的可行性[J].农业工程学报,2005,21(4):36-38.

(上接第171页)

## 4 结论与讨论

(1) 影响土壤侵蚀量的最主要因素是降雨过程,总体上降雨量、降雨历时和降雨强度对土壤侵蚀量产生的影响较为接近,土壤含水量和植被覆盖度与土壤侵蚀量不存在显著相关关系。

(2) 在坡度较缓(边坡比9:100和1:3)的路基坡面,降雨量的影响大于降雨强度,产流模式更接近蓄满产流。而在坡度较陡(边坡比1:1.5和1:1)的路基坡面,降雨强度的影响大于降雨量,产流模式更接近超渗产流。

(3) 在以时间为变化序列的因素中,对土壤侵蚀的影响大小顺序依次为:降雨>土壤含水量>植被覆盖度。

(4) 土壤侵蚀量与坡长、坡度均不存在显著相关关系。但与坡长相比,土壤侵蚀量对坡度的变化更为敏感。

(5) 本研究分析了影响土壤侵蚀量的降雨量、降雨历时、降雨强度、土壤含水量、植被覆盖度和坡长、坡度等7种因素,但土壤侵蚀是一个有机的复杂过

程,其影响因素还有很多,例如土壤理化性质等,需要在今后的研究中继续完善。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 沈波,郑南翔,田伟平.路基压实黄土坡面降雨冲蚀试验研究[J].重庆交通学院学报,2003,22(4):64-67.
- [ 2 ] 杨国栋,贾成前.高速公路用地复垦技术及其效果评价[J].交通环保,2001,22(2):28-31.
- [ 3 ] 张洪江,李猛,江玉林,等.高速公路边坡侵蚀沟特性初步研究:以银武高速公路同心至固原段为例[J].北京林业大学学报,2007,29(6):143-147.
- [ 4 ] 李文银,王治国,蔡继清.工矿区水土保持[M].北京:科学出版社,1996.
- [ 5 ] 郑粉莉,唐克丽,周佩华.坡耕地细沟侵蚀的发生、发展和防止途径的探讨[J].水土保持学报,1987,1(1):36-48.
- [ 6 ] 张侠,赵德义.水土保持研究综述[J].地质技术经济管理,2004,26(3):26-30.
- [ 7 ] 周正朝,上官周平.土壤侵蚀模型研究综述[J].中国水土保持科学,2004,2(1):52-55.
- [ 8 ] 刘思峰,郭天榜.灰色系统理论及其应用[M].开封:河南大学出版社,1991.
- [ 9 ] 邓聚龙.灰理论基础[M].武汉:华中科技大学出版社,2002.