

# 低丘黄壤区不同植被恢复模式水土保持功能分析

刘 艳<sup>1,2,3</sup>, 刘学全<sup>2</sup>, 崔鸿侠<sup>2</sup>, 周金星<sup>3</sup>, 何丙辉<sup>1</sup>

(1. 湖北省林业科学研究院, 武汉 430075; 2. 中国林业科学研究院, 北京 100091; 3. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400716)

**摘 要:**在湖北省象鼻嘴小流域内, 选取马尾松天然林及 4 种 5 年生的人工经济林+ 同等配置地埂植物篱模式, 设置退耕 5 a 的撂荒地作为对照, 进行典型样地植被、土壤调查, 结合各植被恢复模式的野外径流场地表水土流失观测数据进行分析。结果显示: 植被群落特征、土壤理化性质等方面的明显优势决定了马尾松天然林模式的蓄水、保土功能最强, 与撂荒地(对照)模式相比, 它的地表径流削减率约为 40%, 土壤侵蚀削减率高达 80% 以上; 人工植被恢复模式的蓄水、保土能力大小为: 板栗+ 黄花菜> 桃+ 黄花菜> 竹+ 黄花菜> 李+ 黄花菜, 均超过撂荒地(对照)模式; 板栗+ 黄花菜模式的地表径流削减率为 30% 左右, 土壤侵蚀削减率约为 67%, 以其为代表的经济林+ 植物篱模式的水土保持功能比起天然林模式还有一定差距。

**关键词:**低丘黄壤区; 植被恢复模式; 水土保持功能; 野外径流场观测

中图分类号: S157; X171.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)06-0048-05

## Analysis on Function of Water and Soil Conservation of Different Vegetation Restoration Patterns in Yellow Soil Area of Low Hill

LIU Yan<sup>1,2,3</sup>, LIU Xue-quan<sup>2</sup>, CUI Hong-xia<sup>2</sup>, ZHOU Jin-xing<sup>3</sup>, HE Bing-hui<sup>1</sup>

(1. Hubei Academy of Forestry, Wuhan 430075, China; 2. Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. Institute of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

**Abstract:** The masson pine natural forest and four 5-year artificial patterns that economic forest + equally configured ridge hedgerows were selected in Xiangbizui small watershed of Hubei province and the abandoned land that de-farming in five years was set as a control to carry through the vegetation and soil survey, and analyze the field plot observation data on surface soil erosion of each vegetation restoration pattern. The soil and water conservation function of masson pine pattern is significant due to the obvious advantages on community characteristics of vegetation, soil physical and chemical properties and other aspects. Compared with the abandoned land (control) mode, reduction rate of surface runoff is about 40% and reduction rate of soil erosion is high to 80% in plantation of masson pine. The capacity that water storage and soil conservation of the artificial vegetation restoration patterns followed the order of chestnut + daylily > peach + daylily > bamboo + daylily > plum + daylily. They all exceeded the abandoned land (control) mode. The reduction rate of surface runoff of chestnut + daylily mode is about 30% and reduction rate of soil erosion is about 67%. The soil and water conservation function of economic forest + ridge hedgerows modes such as chestnut + daylily representative had a gap compared with that of natural forest modes.

**Key words:** yellow soil area of low hill; vegetation restoration pattern; soil and water conservation function; observation of the field plot

我国长江中下游地区低山丘陵分布广, 面积大, 占该区域国土面积的 60% 左右。低山丘陵区基本处于农林业结合的边缘地带, 立地条件复杂多样, 土地垦殖率较高, 大多粗放经营, 经济实力弱, 产业开发缓

慢, 山绿民不富的矛盾突出。该区人口密度大, 且易发生水力侵蚀, 土壤侵蚀不可避免地导致了土壤退化和面源污染, 是长江水泥泥沙淤积、江河污染的重要来源及长江中下游水土流失的主要源地, 历来是我国

收稿日期: 2010-05-21

资助项目: “十一五” 国家科技支撑计划项目(2006BAD-03A16-03)

作者简介: 刘艳(1984-), 女, 云南楚雄人, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持生态修复。E-mail: liuyan1984213@163.com

通信作者: 刘学全(1966-), 男, 湖北黄梅人, 研究员, 主要从事森林生态研究。E-mail: liuxq027@126.com

林业建设和生态工程建设的主战场。通过详细的野外调查、科学试验掌握该区森林结构及植被恢复模式的基本特征,对该区域高效植被恢复模式建立、农林产业合理布局、小流域综合治理的关键优化配置具有重要参考价值。探索出高效的生态经济型栽培利用模式,不仅能有效地减轻水土流失,保证小流域生态安全,而且有利于促进农业经济结构调整、生态产业发展和农民增收致富。

土壤侵蚀规律研究、水土保持措施效益分析与评价、土壤侵蚀预报模型的建立等都依赖于大量观测数据的积累和分析,开展室内外模拟和径流小区及遥感技术进行综合考察等可为上述科学数据的获取提供技术平台<sup>[1]</sup>。本研究结合野外典型样地的植被、土壤调查及野外小区径流场降雨产流产沙观测数据,综合分析、比较各植被恢复模式的水土保持功能,为提出适宜长江中游低丘黄壤区推广的植被恢复措施及综合治理模式奠定基础。

## 1 试验区概况

试验区位于湖北省东部的浠水县清泉镇象鼻嘴小流域,在地理位置上属于浠水、蕲春两县交界的低山与丘陵过渡地带。气候属亚热带湿润区之东部夏热冬暖亚区,阳光充足,四季分明,雨量充沛。年均气温 16.9℃, > 10℃活动积温为 5 059~ 5 398℃。年均日照时数 1 919 h, 年均无霜期 250 d。年降雨量为 1 200~ 1 300 mm, 主要集中在 4—8 月, 雨热同季。土壤类型主要是黄壤, 具有易侵蚀性, 若遇强度大且时段集中的降雨会导致大量水土流失。植被属于中亚热带常绿阔叶林带, 优势树种主要是马尾松、杉木、毛竹、樟、白栎、青冈栎等。主要经济树种为板栗、桃、李、梨、桔、毛竹。流域内大部分人工林地及坡地均已实行坡改梯, 这种情况在长江中游低丘黄壤区也具有普遍代表性。

## 2 试验方法

### 2.1 样地选择及径流场布设

根据实地踏查情况及试验需要,在小流域已有各植被恢复模式中选择马尾松林模式、桃树+黄花菜植物篱、板栗+黄花菜植物篱、竹+黄花菜植物篱、李+黄花菜植物篱模式作为野外径流场观测典型样地,并设撂荒地作对照。选择典型样地尽量保证各模式间的可比性,相对高差、水热状况、坡向、坡位、坡度等都是影响植被发育的主要因素,各样地间应相差不大。

在所选各模式样地中就梯地之势修建水平投影面积为 5 m×20 m 的水土保持小区径流场,每种模

式设一个重复,重复小区紧邻。径流场 4 个边界均用 0.5 m 高的砖混墙体围筑而成。每个径流场下方建有一个体积为 1 m×1 m×1 m 砖混水泥墙体且有防雨遮盖的径流池,池底用混凝土现浇而成。在径流场与径流池相连一端,沿径流场宽度方向用砖砌砂浆抹面做成矩形断面的集流槽,将径流泥沙导入径流池,其表面铺设石棉水泥盖板。用混凝土现浇时,在每一个径流池底沿池壁做一个 10 cm×10 cm 的凹型槽,砌砖时在池壁相应的位置埋入直径为 5 cm 的带盖的 PVC 管,连通到径流池外的排水沟。排径流水时打开连通管上的盖子,收集径流水时则盖上盖子再收集<sup>[2-5]</sup>。

### 2.2 植被特征调查

在先前确定的各植被恢复模式中选择具有地带性特征的植被群落,进行植被样方调查。每个样方的水平投影面积为 20 m×20 m,样方内乔木层树种进行每木调查,灌草群落调查的样方设置在对角线上。调查灌木群落时,直接设置 5 个 5 m×5 m 的小样方;调查草本群落时,直接设置 9 个 1 m×1 m 的小样方。

植被调查的主要项目有:乔木的名称、高度、胸径、冠幅等;灌草的名称、平均高度、盖度、株(丛)数、地径等。密度和盖度调查均用估测法,调查密度时,丛生植物按丛数计算其个体数量,盖度用估测法测定其投影盖度。以下是植被群落特征各指标值的计算方法:

#### (1) 重要值

乔木的重要值

$$I_{tr} = \frac{1}{300}(\text{相对密度} + \text{相对优势度} + \text{相对频度})$$

灌木和草本植物重要值

$$I_{sh} = \frac{1}{300}(\text{相对密度} + \text{相对盖度} + \text{相对频度})$$

式中:相对密度=每个种的密度/所有种的密度之和×100;相对优势度=每个种所有个体的胸径断面积和/所有种个体的胸径断面积和×100;相对频度=每个种的个体数量/所有种个体数量之和×100;相对盖度=每个种的盖度/所有种的盖度之和×100。

(2) 丰富度指数。群落的丰富度指数采用 Margalef 丰富度指数计算<sup>[6]</sup>,如式(1)。

$$R = (S - 1) / \ln(n) \quad (1)$$

式中:R——Margalef 丰富度指数;S——群落中物种总数;n——群落中所有物种的个体数之和。

(3) 多样性指数。群落的多样性采用辛普森(Simpson)和香农-威纳(Shannon-Wiener)多样性指数计算<sup>[6-7]</sup>,如式(2)、(3)。

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (2)$$

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln(P_i) \quad (3)$$

式中:  $D$  ——Simpson 多样性指数;  $H$  ——Shannon-Wiener 多样性指数;  $P_i$  ——物种  $i$  的重要值。

(4) 均匀度指数。均匀度指数  $J$  反映群落中个体的数目分布状况, 即均匀程度, 计算式如式(4)。

$$J = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i / \ln S \tag{4}$$

式中:  $J$  ——均匀度指数, 其余各项代表含义同上。

2.3 土壤取样及理化性质分析

在各典型样地中(径流场外)按“S”形随机挖取土壤剖面, 分 0– 20, 20– 40 cm 两个土层深度进行环刀取样, 每个样地重复 3 次, 用于测定和计算土壤物理性质, 包括含水量、土壤容重、总孔隙度、渗透系数等指标。同时每个样地每个重复取 1.0 kg 左右土壤带回实验室风干制样, 进行化学性质分析, 包括有机质、全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾等指标。

2.4 径流水采样及测试

降雨结束或期间发现产生径流时量测并记录水量, 径流量大于 500 ml 时需采集径流水样。采集方法: 每次采样时, 先用清洁竹竿充分搅匀径流水, 然后

进行不同部位、不同深度多点采样, 转入清洁矿泉水瓶中, 贴上标签, 供分析测试用。取完水样后, 拧开每个径流池底排水凹槽处连通管的盖子, 抽排径流水, 排空后将径流池清洗干净, 以备下一次采样和计量。

3 结果与分析

3.1 植被群落特征及土壤理化性质分析

各植被恢复模式的盖度、丰富度指数、多样性指数、均匀度指数等见表 1 所示。其中马尾松天然林灌木层的盖度值和  $J$  值最高, 分别为 99.7%、0.890; 草本层  $R$  值最高, 为 3.950。在人工植被恢复模式中, 板栗+ 黄花菜模式盖度值最高, 为 98.6%, 其余各指标优势却不明显; 李+ 黄花菜模式的  $R, H$  值最高, 分别为 3.960, 2.342,  $D, J$  值也处于较高水平; 撂荒地(对照)模式的  $D, J$  值最高, 分别为 0.861, 0.804, 盖度值及  $R$  值最低。

3.2 土壤理化性质分析

通过典型样地取样分析, 各植被恢复模式的土壤理化性质见表 2。

表 1 各恢复模式植被群落特征指标

植被恢复模式		盖度/ %	丰富度指数 $R$	多样性指数		均匀度指数 $J$
				$D$	$H$	
马尾松天然林	乔木层	98.3	0.588	0.345	0.874	0.357
	灌木层	99.7	1.780	0.817	1.852	0.890
	草本层	80.0	3.950	0.675	1.823	0.631
	桃+ 黄花菜	90.2	2.972	0.816	2.073	0.704
	板栗+ 黄花菜	98.6	2.455	0.798	1.841	0.680
	竹+ 黄花菜	75.6	2.840	0.829	2.067	0.730
	李+ 黄花菜	82.3	3.960	0.854	2.342	0.737
	撂荒地(对照)	67.8	2.262	0.861	2.177	0.804

表 2 各植被恢复模式土壤理化性质

植被恢复模式	土层/ cm	物理指标				化学指标					
		容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	含水 量	总孔 隙度	渗透 系数	速效钾/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	有机质/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全氮/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全磷/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全钾/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	速效磷/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
马尾松	0– 20	1.486	0.239	0.439	4.000	27.880	2.083	0.084	1.679	4.380	135.000
天然林	20– 40	1.693	0.217	0.361	5.240	22.340	2.456	0.080	1.788	4.230	124.000
桃+	0– 20	1.574	0.211	0.406	0.910	10.710	0.762	0.056	2.454	2.020	100.000
黄花菜	20– 40	1.623	0.196	0.388	1.710	8.770	0.550	0.033	2.100	2.130	89.500
板栗+	0– 20	1.478	0.275	0.442	2.470	17.280	1.015	0.061	0.428	0.440	127.500
黄花菜	20– 40	1.400	0.308	0.472	4.400	11.690	0.896	0.049	0.420	0.670	100.000
竹+	0– 20	1.478	0.305	0.442	3.030	12.160	0.715	0.071	0.507	2.000	110.000
黄花菜	20– 40	1.392	0.298	0.475	2.650	5.780	0.670	0.048	0.367	2.220	113.500
李+	0– 20	1.491	0.304	0.437	0.640	12.580	0.951	0.045	0.731	0.300	52.500
黄花菜	20– 40	1.485	0.295	0.440	0.570	10.290	0.780	0.031	0.578	0.570	67.500
撂荒地	0– 20	1.507	0.235	0.431	2.740	13.560	0.813	0.136	1.366	3.960	102.500
(对照)	20– 40	1.549	0.219	0.417	2.600	11.900	0.794	0.107	1.247	3.680	89.500

3.2.1 土壤物理性质分析 从表 2 中试验数据分析可知, 各植被恢复模式土壤的主要物理性质差异不大。马尾松天然林模式的土壤渗透系数明显大于其

他模式, 在土壤容重方面也稍占优势, 0– 20, 20– 40 cm 层间的土壤容重、总孔隙度相差较大; 桃+ 黄花菜模式的土壤容重最大, 但含水量及土壤总孔隙度指标

却小于其他模式; 板栗+ 黄花菜模式的土壤总孔隙度、渗透系数较大, 含水量表现为 0– 20 cm < 20– 40 cm 层; 竹+ 黄花菜模式的土壤含水量及总孔隙度、渗透系数均较大; 李+ 黄花菜模式的土壤含水量较大, 但渗透系数最小; 撂荒地(对照)模式的土壤容重、含水量、总孔隙度、渗透系数各物理指标均处于中下水平。

3.2.2 土壤化学性质分析 各植被恢复模式土壤的主要化学性质则表现比较复杂, 差异也比较明显。马尾松天然林模式在土壤有机质、全氮、全磷、速效磷、速效钾含量方面均具有明显优势, 其中有机质、全磷、速效磷、速效钾含量具有表聚性; 桃+ 黄花菜模式的全钾含量较高, 但有机质、全氮含量较低, 其余指标也不具比较优势, 除速效磷外的指标均具有表聚性; 板栗+ 黄花菜模式的土壤有机质、全氮、速效钾含量较高, 但速效磷、全钾含量较低, 除速效磷外的指标均具有表聚性; 竹+ 黄花菜模式的土壤全磷、速效钾含量稍高, 但有机质、全氮、全钾含量均较低, 除速效磷、速

效钾外的指标均具有表聚性; 李+ 黄花菜模式的土壤全氮量稍高, 速效磷、速效钾含量均最低, 其余指标不占比较优势, 除速效磷、速效钾外的指标均具有表聚性; 撂荒地(对照)模式的土壤全磷、速效磷含量较高, 其余化学指标均处于比较系列的中间位置, 除速效磷外的指标均具有表聚性。综合以上各理化指标的分析, 各植被恢复模式中马尾松天然林的土壤状况最好, 板栗+ 黄花菜次之, 桃+ 黄花菜、李+ 黄花菜、竹+ 黄花菜与撂荒地(对照)模式相差不大。

3.3 不同模式地表径流、土壤侵蚀削减率比较分析 因条件限制, 野外径流场水土流失观测难以控制, 各种植被恢复模式在同一降雨条件下的产流、产沙特征差异较大, 尤其是在雨强较小的情况下, 产流开始时间差异明显。故将一定观测期内各次观测的径流、泥沙进行累加作为一个观测数据。选取 2008 年 7– 8 月、2009 年 4– 5 月、2009 年 6– 7 月三个时期观测的地表径流、泥沙流失数据进行分析比较(以撂荒地作对照), 详见表 3。

表 3 各恢复模式地表径流和土壤侵蚀比较

植被恢复模式	地表径流/( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )			地表径流削减率/%			土壤侵蚀量/( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )			土壤侵蚀削减率/%		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
马尾松天然林	25.34	29.56	57.24	34	41	50	3.01	4.23	7.18	84	82	86
桃+ 黄花菜	31.34	38.50	88.40	18	23	22	9.23	10.48	25.74	50	54	49
板栗+ 黄花菜	30.50	36.60	65.78	20	27	42	5.23	7.74	18.54	71	66	63
竹+ 黄花菜	35.58	41.72	98.46	7	16	13	9.47	10.90	26.78	48	53	47
李+ 黄花菜	36.45	45.78	106.80	5	8	6	12.05	15.56	35.45	34	32	30
撂荒地(对照)	38.26	49.80	113.45	0	0	0	18.34	23.00	50.67	0	0	0

注: 1, 2, 3 分别表示 2008 年 7– 8 月、2009 年 4– 5 月、2009 年 6– 7 月三个观测期。

从以上 3 个观测期的数据可以看出, 与撂荒地(对照)模式进行比较的所有模式中, 马尾松天然林模式的地表径流与土壤侵蚀削减率均最大, 蓄水、保土能力最为明显, 人工植被恢复模式的蓄水、保土能力大小为: 板栗+ 黄花菜> 桃+ 黄花菜> 竹+ 黄花菜> 李+ 黄花菜, 均超过撂荒地(对照)模式。

3.4 各种植被恢复模式水土保持功能分析

3.4.1 撂荒地(对照)模式的水土保持功能分析 从植被群落特征来看, 撂荒地(对照)模式的  $D$ 、 $J$  值最高, 盖度值及  $R$  值较低; 从土壤理化性质来看, 撂荒地(对照)模式的土壤容重、含水量、总孔隙度、渗透系数各物理指标均处于 7 种植被恢复模式中的中下水平, 土壤全磷、速效磷含量较高, 其余化学指标均处于中等水平, 土壤有机质、全氮、全磷、全钾、速效钾均具有表聚性。结合野外小区径流场观测数据, 由于植被盖度、土壤肥力等方面的不利影响, 撂荒地(对照)模式的蓄水、保土功能较差, 不同程度地低于其他 6 种植被恢复模式。

3.4.2 天然林模式水土保持功能分析 从植被群落

特征来看, 马尾松天然林分乔、灌、草三层植被结构, 其灌木层的盖度、多样性指数、均匀度指数等指标均高于乔木层和草本层。各植被恢复模式中马尾松天然林灌木层的盖度值和  $J$  值最高, 草本层的  $R$  值最高; 从土壤理化性质来看, 马尾松天然林模式的土壤渗透系数明显大于其他模式, 在土壤容重方面也稍占优势, 0– 20、20– 40 cm 层间的土壤容重、总孔隙度相差较大, 在土壤有机质、全氮、全磷、速效磷、速效钾含量方面均具有明显优势, 其中有机质、全磷、速效磷、速效钾含量具有表聚性。结合野外小区径流场观测数据, 多方面分析指标的明显优势决定了马尾松天然林模式的水土保持功能居于各植被恢复模式之首。与撂荒地(对照)模式相比, 它的地表径流削减率约为 40%, 土壤侵蚀削减率更是高达 80% 以上, 以其为代表的天然林模式水土保持功能非常显著。

3.4.3 经济林+ 植物篱模式水土保持功能分析 从植被群落特征来看, 板栗+ 黄花菜模式的盖度值在人工植被恢复模式中最高, 丰富度指数、多样性指数、均匀度指数不显优势; 从土壤理化性质来看, 板栗+ 黄

花菜模式的土壤有机质、全氮、速效钾含量较高,但速效磷、全钾含量较低,除速效磷外的指标均具有表聚性。结合野外小区径流场观测数据,板栗+黄花菜模式的水土保持功能在人工植被恢复模式中稍显优势。与撂荒地(对照)模式相比,它的地表径流削减率为30%左右,土壤侵蚀削减率约为67%,以其为代表的经济林+植物篱模式的水土保持功能比起天然林模式还有一定差距。

## 4 讨论

(1) 由于自然降雨复杂多变,难以进行全过程观测,通过野外径流场试验收集的相关数据具有很大的局限性,本试验中由于人力、时间等条件的限制,将一定观测期内各植被恢复模式各次观测的径流、泥沙进行累加作为一个观测数据,以撂荒地作对照进行地表径流、土壤侵蚀削减率分析比较,偏颇之处在所难免。

(2) 具体来讲水土流失应包含土壤侵蚀、径流流失和养分流失3部分,但由于野外试验条件的限制,本试验中并未涉及养分流失方面的特征分析,希望在以后不断改进试验条件的同时更多地涉足其中,使试验数据更具说服力与实用性。

(3) 以板栗+黄花菜模式为代表的经济林+植物篱模式的水土保持功能比起天然林模式还有一定差距,考虑到研究区域天然林面积日益减少及当地经济

社会发展等因素,此种植被恢复模式在研究区域有一定的发展前景。但是本研究主要从各植被恢复模式的水土保持功能,即水土保持基础效益入手,若要涉及经济、生态、社会各方面的效益,还要具体考察其市场行情,才能确定适宜当地的最佳模式,走优质高效之路,实现效益最大化,才能确保选定模式的区域推广性。

参考文献:

- [1] 袁爱萍. 美国人工降雨模拟设备的引进与应用[J]. 北京水利, 2004(6): 36-37.
- [2] 郑粉莉, 唐克丽, 白红英. 标准小区和大型坡面径流场径流泥沙监测方法分析[J]. 人民黄河, 1994(7): 19-22.
- [3] 路炳军, 袁爱萍, 张超. 坡地径流场监测数据质量控制[J]. 北京水务, 2009, 2(增刊): 55-57.
- [4] 张玉洪, 张克映, 马友金, 等. 西双版纳热带森林地表径流场设计的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(6): 56-60.
- [5] 中华人民共和国水利部. 水土保持监测设施通用技术条件(SL342-2006) [S]. 2006.
- [6] 何丙辉, 赵晓苕, 齐代华. 生态恢复过程中水土保持林乔木层多样性研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2008, 28(4): 113-117.
- [7] 高贤明, 马克平, 陈灵芝. 暖温带若干落叶阔叶林群落物种多样性及其与群落动态的关系[J]. 植物生态学报, 2001, 25(3): 283-290.

(上接第47页)

## 5 结语

长久以来,路堑边坡锚间距的确定一直是探讨的热点和重点,本文采用断裂力学理论,通过引入一些简化假设后对此进行了探讨,并通过算例分析获得了一等厚层状碎裂结构岩体路堑边坡的锚固合理间距,为工程实际提供了有益参考。文中简化假设的合理性,以及所得结果的可靠性和普遍性,尚需更广泛的论证。

参考文献:

- [1] 汪树玉, 刘国华, 江辉, 等. 高边坡工程中预应力锚索间距与开挖顺序的优化[J]. 水利学报, 1997, 28(5): 54-59.
- [2] 亢景付, 胡玉明. 圆筒形预应力结构锚索间距的确定方法[J]. 工程力学, 2003, 20(5): 124-123, 133.
- [3] WU Shunchuan, ZHANG Youpa, GAO Yongtao. Study on range interval distance of prestressed anchor bars using update backpropagation neural network [J]. Journal of Coal Science & Engineering, 2003, 9(2): 35-39.
- [4] 吕庆, 孙红月, 尚岳全, 等. 预应力锚索框格梁体系加固

破碎岩质边坡合理间距研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 136-140.

- [5] 韩雪. 露天矿边坡稳态监控锚索应力场及设置间距分析[J]. 中国矿业, 2009, 18(5): 77-80.
- [6] 袁培进, 吴铭江, 陆遐龄, 等. 长江三峡永久船闸高边坡预应力锚索监测[J]. 岩土力学, 2003, 24(增1): 198-201.
- [7] 张发明, 刘宁, 赵维炳. 岩质边坡预应力锚固的力学行为及群锚效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增刊): 1077-1080.
- [8] 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.
- [9] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [10] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [11] 王成, 张录坤. 有限宽板裂纹在裂纹面受两对反平面集中力时裂纹线场的弹塑性分析[J]. 应用数学和力学, 1998, 19(6): 513-520.
- [12] 唐树名. 碎裂结构岩体路堑边坡锚固机理及其应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.
- [13] 高家美, 顿志林. 楔形体应力理论及其在工程中的应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000.