

# 高速公路边坡不同恢复年限土壤性质 及生态防护模式研究

刘子壮<sup>1</sup> 赵晶<sup>1,2</sup> 高照良<sup>1,2\*</sup>

1(西北农林科技大学资源环境学院<sup>1</sup> 水土保持研究所<sup>2</sup> 杨凌 712100)

**摘要** 以陕南土石山区不同植被恢复年限高速公路为研究对象,综合分析了不同护坡模式的防护效果及不同坡向间土壤理化性质的差异性。结果表明:①土石山区高速公路边坡土壤养分条件受恢复年限的影响显著。土壤有机质、全N含量处于缺乏和显著缺乏水平;随着边坡植被恢复年限延长及植被的演替进程推移,植被长势渐好,豆科植物的固氮作用使得土壤有机质和全N含量增加,但仍处于较低水平;②有机质、全N、速效K、含水率排序均为骨架护坡>挂网喷播>拱形+植生袋,且养分表现出向表层富集的趋势,骨架护坡保水保肥效果较好,该护坡模式为最优选择;③土壤有机质、全N、速效P、速效K、含水率、孔隙度等均表现为阴坡>阳坡;④土壤的养分(有机质、全N、速效P)已成为边坡植被恢复和演替的限制因子,应适当采取土壤改良措施,为植被恢复创造良好的环境,促进植物生长,使其尽快发挥其水土保持效果。

**关键词** 边坡防护类型 生态防护模式 土壤性质 阴阳坡面 高速公路  
**中图分类号** U4181.9; **文献标志码** A

高速公路的快速发展,加快了技术、信息的交流,促进了资源有效配置,对促进国民经济发展和社会进步都起到了重要的作用。但是,与此同时,高速公路建设也造成了沿线植被群落破坏,物种多样性降低、土壤养分流失、水土流失加剧等生态退化现象<sup>[1-4]</sup>。高速公路边坡是对原有地面进行填挖产生的新的裸露坡面,尤其是穿越山区时大量的高边坡开挖,造成大量的裸露边坡,严重破坏了自然的生态环境和自然景观,同时引起土壤的组成结构和理化性质发生变化,引发严重的水土流失问题。

土壤是植物最为重要的生长物质基础,土壤的理化性质直接影响着植物的生长发育、生理活力和物种多样性<sup>[5,6]</sup>。高速公路边坡的防护和植被恢复是近几年的研究热点问题之一。目前,对高速公路边坡多采用工程防护和植物防护相结合的防护措施,在边坡上建立人工植被,坡面残留物质得以固定,生物作用促使坡面残留物质不断向着土壤的方向形成和发育,改良土壤的性状;同时,植被起到了

保水和固土作用,减轻降雨的冲刷,有利于维持坡面土壤的稳定。植被生长过程,是植物与土壤相互影响和相互作用的过程。在这个过程中作为土壤本质特征的土壤肥力处于不断地发展变化中<sup>[7]</sup>,植被的生长状况也得以改善。土壤质量水平直接影响到边坡植被恢复的后期效果<sup>[8]</sup>。前人研究主要内容为护坡防护模式、优良植物种的选择与配置和绿化效果分析等方面。而对于边坡土壤的研究却不多<sup>[9-11]</sup>。由于山区高速公路复杂的生态条件(覆土较薄、地形地貌多变),加之公路边坡立地条件较差,土壤一般是客土,且多数情况下是生土,有机质含量低,结构性差,不利于植物特别是幼苗的生长,增加了植被恢复过程中植物中的配置及恢复技术的难度。因此,改良边坡土壤的质量是边坡植被恢复亟需解决的问题。所选陕南5条高速均地貌类型均属于为土石山区或石质山区,对研究土石山区高速公路边坡植被恢复具有较好的典型性。

本文对陕南高速公路边坡的不同恢复年限及不同的边坡防护模式下的土壤特性进行了探讨分析,旨在为高速公路边坡的防护类型的选择和土壤的改良提供依据,为类似立地条件下受损生态系统的恢复与重建提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

所选取的高速公路为陕南地区的西汉高速的汉

2013年11月14日收到 “十二五”国家科技支撑计划课题(2011BAD31B01)资助  
第一作者简介:刘子壮(1987—),男,汉族,山东曲阜人,硕士。研究方向:土壤侵蚀、开发建设项目及高速公路边坡防护。E-mail: liuz-izhuang@163.com。

\* 通信作者简介:高照良(1969—),男,汉族,河南灵宝人,博士,副研究员。研究方向:土壤侵蚀、水土保持及荒漠化。E-mail: gzl@ms.iswc.ac.cn。

中东—勉县和勉县—宁强段、十天高速的安康—汉中段和西合线的蓝田—商州段、丹凤—陕豫界段。分属两个地貌单元—土石山区、石质山区。选定高速公路情况见表 1。

表 1 研究的高速公路及基本情况

高速公路	建成时间	建设里程 /km	地形地貌		恢复年限/年
勉县—宁强	2003.11	54.86	低山丘陵	土石山区	7
汉中东—勉县	2005.09	46.70	低山丘陵	土石山区	5
丹凤—陕豫界	2008.01	91.44	山岭重丘区	土石山区	2
安康—汉中	2010.12	189.65	低山丘陵	土石山区	0
蓝田—商州	2008.01	92.79	中低山	石质山区	2

研究区域位于陕西南部,展布于秦巴山地之内,地形地貌复杂多变。研究区分别属于暖温带南缘半湿润季风型山地气候和北亚热带向暖温带过渡的半湿润山地季风型气候,多年平均气温 12.8~14℃,≥10℃的积温 3 931~4 456℃,无霜期 216~217 d,多年平均降水量 710.7~830.4 mm,土壤主要为黄褐土、黄棕壤、水稻土等。植被属暖温带落叶阔叶林带向亚热带常绿阔叶林带的过渡带,植被覆盖率为 60%左右。目前,应用于研究区域高速公路边坡防护的植物种类主要有紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、苜蓿(*Medicago sativa*)、小冠花(*Coronilla varia*)、黑麦草(*Lolium perenne*)、大叶女贞(*Ligustrum lucidum*)等。

### 1.2 采样方法

研究选取陕南五段高速公路作为研究对象,五段高速公路植被恢复年限分别为 0、2、5、7 年(以建成时间为准)。采样点设立于生境大致相同,护坡模式和恢复年限不同的位置,共 28 个样地。勉县—宁强、汉中东—勉县段建成较早,且经山区,多为挖方边坡,护坡模式也比较单一,根据高速公路的主要护坡类型,选取挂网喷播、骨架+植生袋、骨架护坡三种护坡作为研究,挂网喷播和骨架护坡植被生长分布较为均匀,骨架+植生袋护坡植被生长在植生袋上,植生袋间少有,采样时避开了植生袋间隔。采样方法为对角线多点环刀采样,每个样地设置三个取样点,其中一个为边坡上方未扰动的土壤取样点,样点规格为 1 m×1 m,每个样点重复 3 次,分层取样(0~10 cm、10~20 cm),部分边坡由于土层较薄,只采 0~10 cm 的表层土,共采集 495 个土样。由于陕南地处山区,形成大量的挖方边坡,所以本文以挖方边坡作为研究重点。采样情况见表 2。

### 1.3 测定方法

土样带回实验室,经前期处理风干、过筛,测定

土壤有机质、全 N、无机 N、速效 P、速效 K 等理化性质。土壤水分含量采用烘干法测定,理化性质测定方法参考《土壤农化分析》<sup>[12]</sup>。另外,在每个样方内,用环刀采取原状土带回实验室测定土壤容重,计算含水率及孔隙度。数据处理与绘图采用 SPSS 和 Excel。

表 2 采样点设置及基本情况

编号	恢复年限/年	地形	高速公路	护坡类型	坡向	是否覆土	路堤/堑	植被
1	0	土石山区	汉中安康		阴	覆土	路堑	紫花苜蓿+紫穗槐
2					阳	覆土	路堑	紫花苜蓿+黑麦草
3	2	土石山区	丹凤-陕豫界	挂网喷播	阴	覆土	路堑	黑麦草
4					阳	覆土	路堑	紫花苜蓿
5	2	石质山区	蓝田-商州		阴	覆土	路堑	黑麦草+紫花苜蓿
6					阳	覆土	路堑	黑麦草+紫花苜蓿
7	0	土石山区	汉中安康	拱形+植生袋	阴	覆土	路堑	紫穗槐+黑麦草
8					阳	覆土	路堑	紫穗槐+紫花苜蓿
9	2	土石山区	丹凤-陕豫界		阴	覆土	路堑	紫穗槐
10					阳	覆土	路堑	紫穗槐
11	2	石质山区	蓝田-商州		阴	覆土	路堑	黑麦草+紫花苜蓿
12					阳	覆土	路堑	紫穗槐+紫花苜蓿
13	0	土石山区	汉中安康		阳	覆土	路堤	紫穗槐+紫花苜蓿
14					阴	覆土	路堤	紫穗槐+紫花苜蓿
15		土石山区	丹凤-陕豫界		阴	覆土	路堑	绣球小冠花+紫穗槐
16	2				阳	覆土	路堤	绣球小冠花+紫穗槐
17		土石山区	丹凤-陕豫界		阳	覆土	路堑	绣球小冠花+紫穗槐
18					阴	覆土	路堤	紫穗槐
19		土石山区			阴	覆土	路堑	绣球小冠花
20	5		汉中东-勉县	骨架护坡	阳	覆土	路堤	绣球小冠花
21		土石山区			阳	覆土	路堑	绣球小冠花
22					阴	覆土	路堤	绣球小冠花
23		土石山区			阴	覆土	路堑	紫花苜蓿+艾蒿
24	7		勉县-宁强		阳	覆土	路堤	绣球小冠花
25		土石山区			阳	覆土	路堑	紫花苜蓿
26					阴	覆土	路堤	黑麦草+紫花苜蓿
27	2	石质山区	蓝田-商州		阳	覆土	路堤	绣球小冠花+紫花苜蓿
28					阴	覆土	路堤	绣球小冠花+紫花苜蓿

## 2 结果与分析

### 2.1 高速公路边坡土壤扰动前后不同防护模式下土壤养分含量的变化

不同防护模式对高速公路边坡土壤扰动程度不同,分析不同防护模式下土壤扰动前后养分含量的变化(表 3)可知,与对照相比,挂网喷播、拱形+植生袋以及骨架等 3 种防护模式下 0~10 cm 土层土壤有机质、全 N、速效磷和速效钾含量均有极显著的降低,不仅如此,拱形+植生袋和骨架防护模式下土壤无机氮含量也显著降低,但挂网喷播防护模式下扰动的土壤则表现不明显。而 10~20 cm 土层也表现出同样的规律,挂网喷播、拱形+植生袋以及骨架等 3 种防护模式下土壤有机质、全 N、速效磷和速效

钾含量均有显著的降低,但是无机氮含量与对照相比则均差异不明显。这说明挂网喷播、拱形+植生袋以及骨架等3种防护模式对边坡0~20 cm土层土壤有机质、全N、速效磷和速效钾含量均有显著性的负面影响,而这3种扰动对土壤无机氮含量影响则相对较小。

表3 不同护坡模式下0~20 cm土层土壤扰动前后养分含量的变化

土层	防护模式	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全N (g·kg <sup>-1</sup> )	无机N/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速P/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速K/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
0~10 cm	非扰动土	50.73 <sup>a</sup>	2.64 <sup>a</sup>	19.25 <sup>a</sup>	76.84 <sup>a</sup>	310.10 <sup>a</sup>
	挂网喷播	7.80 <sup>b</sup>	0.42 <sup>b</sup>	17.34 <sup>a</sup>	3.71 <sup>b</sup>	106.87 <sup>b</sup>
	拱形+植生袋	4.09 <sup>c</sup>	0.32 <sup>b</sup>	8.96 <sup>b</sup>	5.03 <sup>b</sup>	104.62 <sup>b</sup>
	骨架	4.70 <sup>bc</sup>	0.32 <sup>b</sup>	8.65 <sup>b</sup>	2.42 <sup>b</sup>	75.48 <sup>b</sup>
10~20 cm	非扰动土	29.55 <sup>a</sup>	1.38 <sup>a</sup>	11.58 <sup>a</sup>	69.17 <sup>a</sup>	199.21 <sup>a</sup>
	挂网喷播	2.37 <sup>b</sup>	0.18 <sup>b</sup>	63.78 <sup>ab</sup>	2.71 <sup>b</sup>	54.77 <sup>b</sup>
	拱形+植生袋	2.84 <sup>b</sup>	0.25 <sup>b</sup>	9.72 <sup>ab</sup>	11.51 <sup>b</sup>	108.03 <sup>b</sup>
	骨架	3.97 <sup>b</sup>	0.27 <sup>b</sup>	7.64 <sup>b</sup>	3.29 <sup>b</sup>	72.54 <sup>b</sup>

## 2.2 不同恢复年限及不同护坡模式边坡土壤理化性质分析

土壤养分是植被生长、演替的营养基础,与植被的生长状况息息相关,有机质含量作为土壤的养分重要指标之一,是N、P的重要营养库,有机质可以提供植物生长所需养分,具有提高土壤的保水保肥能力、改良土壤性状等作用<sup>[13]</sup>。土壤全N主要由有机态氮构成,土壤有机态氮相对比较稳定,而且也是不断矿化供给作物利用的氮素主要来源,其含量占全氮的92%~98%,故采用全氮含量作为土壤氮素的丰缺指标<sup>[13,14-17]</sup>。土壤的容重、孔隙度等物理性状直接影响植物根系的呼吸、生长及其对养分的吸收。

分析各护坡模式下土壤的养分状况,同时以国家第二次土壤普查养分分级标准<sup>[12]</sup>为依据对研究区土壤营养成分进行评价。不同恢复年限各防护模式下边坡土壤0~10 cm和10~20 cm理化性质见表3、表4。挂网喷播模式下0~10 cm、10~20 cm土壤有机质、全N处于缺乏和显著缺乏水平,速效P处于中等及缺乏水平,速效K处于丰富及中等水平。由此可见,土壤的养分状况偏低,仅有速K含量达到要求,养分状况已成为植被生长、演替进程的限制性因素。土壤有机质、全N、速效P、速效K、含水率表现为恢复2年(石质山区)的显著高于恢复0年(土石山区),但与土石山区恢复2年没有显著差异,恢复年限对有机质和全N含量的影响分别为显

著和极显著,植被恢复在一定程度上起到了改良土壤的作用。土壤的含水率和孔隙度表现为10~20 cm高于0~10 cm。容重和孔隙度在不同恢复年限间没有显著差异。

拱形+植生袋护坡模式下0~10 cm、10~20 cm土壤有机质、全N含量均处于缺乏或显著缺乏水平,且含量表现为(0~10 cm) > (10~20 cm),速效P、速效K含量达到丰富水平,在各年限间差异显著。总体而言,各养分指标均以土石山区植被恢复2年的边坡为最高,并且与土石山区恢复0年、石质山区恢复2年均具有显著差异,恢复年限对有机质、全N等五项养分指标影响均显著。含水率和容重集中在1.20~1.60 g/cm<sup>3</sup>之间,两者表现为(10~20 cm) > (0~10 cm)。可见,土石山区在植被恢复中的效果已初步显现,可能是植被的枯枝落叶及根系的分泌物等使得表层土壤的养分积累较明显,土壤的养分条件得以改善。

骨架护坡模式下路堑边坡的土壤有机质和全N含量呈现恢复7年>5年>2年,且均处于中等及丰富水平。汉中东一勉县、勉县—宁强高速由于其恢复时间相对较长,而且植被(绣球小冠花、苜蓿)长势很好,豆科植物的固氮作用使得有机质和全N含量增加。各恢复年限下土壤速效P含量为缺乏水平,而速效K含量为丰富,恢复年限对速效K和含水率影响显著,各养分含量均为(0~10 cm) > (10~20 cm)。含水率为20%左右,容重为1.4 g/cm<sup>3</sup>左右。路堤边坡的土壤养分表现为随着恢复时间延长而增加,且表现为极显著影响,有机质和全N处于中等水平,速效K为丰富,速效P为缺乏。

通过三种护坡模式下土壤养分分析,有机质、全N、速效K均为骨架护坡>挂网喷播>拱形+植生袋,速效P为拱形+植生袋>挂网喷播>骨架,速效K含量适宜,可以提供植物所需。由此可见,骨架护坡土壤的养分状况优于其他两种形式下的土壤养分,并且随着恢复年限的增长土壤的养分条件日渐改善,恢复年限对有机质等养分含量影响显著。拱形+植生袋模式下的土壤含水率偏低,为11.5%,含水率表现为骨架>挂网喷播>拱形+植生袋,由于骨架护坡具有框架可以截留一部分水分,防止水分流失,起到了保水作用;土壤容重为拱形+植生袋>骨架>挂网喷播,由于施工中为防止植生袋下陷,将框架内植生袋挤压紧实,从而造成土壤的密度增大。

表 4 不同恢复年限及护坡模式下 0~10 cm 土壤理化性质

边坡形式	恢复年限	高速公路	防护模式	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全 N/ (g·kg <sup>-1</sup> )	无机 N/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速 P/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速 K/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	含水率/ %	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙度/ %
路堑	0	汉中—安康		7.62 <sup>b</sup>	0.42 <sup>b</sup>	17.50 <sup>a</sup>	5.50 <sup>a</sup>	130.33 <sup>b</sup>	11.23 <sup>ab</sup>	1.08 <sup>a</sup>	34.40 <sup>a</sup>
	2	丹凤—陕豫界	挂网喷播	11.20 <sup>ab</sup>	0.54 <sup>b</sup>	25.55 <sup>a</sup>	11.19 <sup>a</sup>	191.56 <sup>ab</sup>	7.71 <sup>b</sup>	1.03 <sup>a</sup>	36.23 <sup>a</sup>
	2	蓝田—商州		17.07 <sup>a</sup>	0.92 <sup>a</sup>	18.66 <sup>a</sup>	8.04 <sup>a</sup>	209.21 <sup>a</sup>	18.25 <sup>a</sup>	1.40 <sup>a</sup>	47.19 <sup>a</sup>
		F		5.287 <sup>*</sup>	10.193 <sup>**</sup>	1.54	0.885	2.902	3.151	0.657	0.629
	0	汉中—安康	拱形+	4.55 <sup>b</sup>	0.31 <sup>b</sup>	8.65 <sup>a</sup>	2.49 <sup>b</sup>	108.21 <sup>b</sup>	13.35 <sup>a</sup>	1.37 <sup>a</sup>	48.18 <sup>a</sup>
	2	丹凤—陕豫界	植生袋	11.32 <sup>a</sup>	0.59 <sup>a</sup>	42.31 <sup>b</sup>	29.96 <sup>a</sup>	208.48 <sup>a</sup>	9.36 <sup>a</sup>	1.40 <sup>a</sup>	47.31 <sup>a</sup>
	2	蓝田—商州		6.65 <sup>b</sup>	0.37 <sup>b</sup>	14.04 <sup>a</sup>	14.41 <sup>ab</sup>	142.77 <sup>b</sup>	11.71 <sup>a</sup>	1.43 <sup>a</sup>	45.85 <sup>a</sup>
		F		6.279 <sup>*</sup>	5.517 <sup>*</sup>	8.138 <sup>*</sup>	4.331 <sup>*</sup>	7.977 <sup>*</sup>	0.59	0.214	0.194
	2	丹凤—陕豫界		11.23 <sup>b</sup>	0.60 <sup>b</sup>	17.79 <sup>a</sup>	7.13 <sup>a</sup>	200.18 <sup>b</sup>	7.90 <sup>b</sup>	1.41 <sup>a</sup>	46.88 <sup>a</sup>
	5	汉中东—勉县	骨架	25.98 <sup>ab</sup>	1.44 <sup>a</sup>	43.52 <sup>a</sup>	3.24 <sup>a</sup>	312.25 <sup>a</sup>	17.41 <sup>a</sup>	1.42 <sup>a</sup>	46.46 <sup>a</sup>
	7	勉县—宁强		30.68 <sup>a</sup>	1.52 <sup>a</sup>	12.04 <sup>a</sup>	5.83 <sup>a</sup>	197.22 <sup>b</sup>	19.50 <sup>a</sup>	1.30 <sup>a</sup>	51.11 <sup>a</sup>
		F		4.153	5.629 <sup>*</sup>	0.893	1.47	6.085 <sup>*</sup>	12.681 <sup>**</sup>	2.78	2.693
路堤	0	汉中—安康		5.98 <sup>b</sup>	0.34 <sup>b</sup>	8.15 <sup>a</sup>	2.97 <sup>b</sup>	71.58 <sup>c</sup>	9.12 <sup>b</sup>	1.46 <sup>a</sup>	44.81 <sup>a</sup>
	2	丹凤—陕豫界		11.57 <sup>b</sup>	0.48 <sup>b</sup>	33.93 <sup>a</sup>	6.62 <sup>b</sup>	200.25 <sup>b</sup>	13.13 <sup>ab</sup>	1.45 <sup>a</sup>	45.25 <sup>a</sup>
	5	汉中东—勉县	骨架	23.94 <sup>a</sup>	1.24 <sup>a</sup>	25.57 <sup>a</sup>	4.39 <sup>b</sup>	203.57 <sup>b</sup>	15.84 <sup>a</sup>	1.41 <sup>a</sup>	46.64 <sup>a</sup>
	7	勉县—宁强		30.75 <sup>a</sup>	1.45 <sup>a</sup>	34.14 <sup>a</sup>	3.24 <sup>b</sup>	168.22 <sup>b</sup>	13.90 <sup>ab</sup>	1.41 <sup>a</sup>	46.68 <sup>a</sup>
	2	蓝田—商州		25.24 <sup>a</sup>	1.25 <sup>a</sup>	21.01 <sup>a</sup>	16.17 <sup>a</sup>	264.63 <sup>a</sup>	10.06 <sup>b</sup>	1.38 <sup>a</sup>	48.06 <sup>a</sup>
		F		9.115 <sup>**</sup>	9.849 <sup>**</sup>	0.76	3.582 <sup>*</sup>	15.141 <sup>**</sup>	2.924	0.258	0.157

注: 每种模式同一列中的不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。运用 LSD 检验恢复年限对各指标的影响进行分析, \*\* 表示年限对其影响极显著 ( $P < 0.01$ ), \* 表示年限对其影响显著 ( $P < 0.05$ )。

表 5 不同恢复年限及护坡模式下 10~20 cm 土壤理化性质

边坡形式	恢复年限	高速公路	防护模式	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全 N/ (g·kg <sup>-1</sup> )	无机 N/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速 P/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速 K/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	含水率/ %	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙度/ %
路堑	0	汉中—安康		2.37 <sup>b</sup>	0.18 <sup>b</sup>	63.78 <sup>a</sup>	2.71 <sup>b</sup>	54.77 <sup>b</sup>	8.43 <sup>b</sup>	1.15 <sup>a</sup>	31.76 <sup>a</sup>
	2	丹凤—陕豫界	挂网	-	-	-	-	-	9.16 <sup>ab</sup>	0.67 <sup>a</sup>	24.53 <sup>a</sup>
	2	蓝田—商州		8.18 <sup>a</sup>	0.51 <sup>a</sup>	16.33 <sup>a</sup>	5.66 <sup>a</sup>	138.24 <sup>a</sup>	18.96 <sup>a</sup>	1.49 <sup>a</sup>	43.90 <sup>a</sup>
		F		18.814 <sup>**</sup>	19.575 <sup>**</sup>	0.726	6.676 <sup>*</sup>	15.077 <sup>**</sup>	4.601	1.814	1.707
	0	汉中—安康	拱形+	2.96 <sup>b</sup>	0.24 <sup>b</sup>	9.94 <sup>a</sup>	7.54 <sup>a</sup>	103.54 <sup>b</sup>	15.13 <sup>a</sup>	1.51 <sup>a</sup>	43.19 <sup>a</sup>
	2	丹凤—陕豫界	植生袋	7.17 <sup>a</sup>	0.45 <sup>a</sup>	49.24 <sup>a</sup>	31.12 <sup>a</sup>	187.08 <sup>a</sup>	9.88 <sup>a</sup>	1.13 <sup>a</sup>	32.54 <sup>a</sup>
	2	蓝田—商州		4.58 <sup>ab</sup>	0.24 <sup>b</sup>	10.12 <sup>a</sup>	13.83 <sup>a</sup>	111.68 <sup>b</sup>	14.83 <sup>a</sup>	1.55 <sup>a</sup>	41.67 <sup>a</sup>
		F		9.377 <sup>**</sup>	12.783 <sup>**</sup>	2.03	1.855	13.588 <sup>**</sup>	0.103	0.187	0.172
	2	丹凤—陕豫界		7.72 <sup>a</sup>	0.45 <sup>a</sup>	13.99 <sup>a</sup>	6.75 <sup>a</sup>	154.52 <sup>ab</sup>	12.10 <sup>b</sup>	1.49 <sup>a</sup>	43.87 <sup>a</sup>
	5	汉中东—勉县	骨架	13.76 <sup>a</sup>	0.78 <sup>a</sup>	22.66 <sup>a</sup>	2.13 <sup>a</sup>	199.75 <sup>a</sup>	18.69 <sup>a</sup>	1.37 <sup>a</sup>	48.25 <sup>a</sup>
	7	勉县—宁强		12.98 <sup>a</sup>	0.76 <sup>a</sup>	8.30 <sup>a</sup>	2.54 <sup>a</sup>	120.96 <sup>b</sup>	21.57 <sup>a</sup>	1.39 <sup>a</sup>	47.62 <sup>a</sup>
		F		1.002	1.576	1.821	2.858	6.845 <sup>*</sup>	5.595 <sup>*</sup>	1.268	1.243
路堤	0	汉中—安康		4.57 <sup>b</sup>	0.25 <sup>b</sup>	8.56 <sup>c</sup>	2.57 <sup>b</sup>	54.08 <sup>b</sup>	13.84 <sup>a</sup>	1.53 <sup>a</sup>	42.29 <sup>b</sup>
	2	丹凤—陕豫界		3.00 <sup>ab</sup>	0.15 <sup>ab</sup>	68.55 <sup>bc</sup>	2.79 <sup>ab</sup>	68.18 <sup>a</sup>	9.22 <sup>a</sup>	1.26 <sup>b</sup>	52.50 <sup>a</sup>
	5	汉中东—勉县	骨架	12.15 <sup>a</sup>	0.69 <sup>a</sup>	18.84 <sup>ab</sup>	3.49 <sup>ab</sup>	161.24 <sup>a</sup>	15.68 <sup>a</sup>	1.30 <sup>b</sup>	50.87 <sup>a</sup>
	7	勉县—宁强		14.00 <sup>a</sup>	0.82 <sup>a</sup>	39.50 <sup>a</sup>	2.30 <sup>b</sup>	122.42 <sup>a</sup>	11.18 <sup>a</sup>	1.46 <sup>ab</sup>	44.80 <sup>ab</sup>
	2	蓝田—商州		14.93 <sup>a</sup>	0.72 <sup>a</sup>	10.14 <sup>ab</sup>	12.11 <sup>a</sup>	148.11 <sup>a</sup>	12.46 <sup>a</sup>	1.40 <sup>ab</sup>	47.12 <sup>ab</sup>
		F		5.431 <sup>**</sup>	5.941 <sup>**</sup>	0.744	2.272	4.065 <sup>*</sup>	0.866	1.824	1.841

注: - 表示该取样点土层较薄,未取样。

### 2.3 不同坡向边坡土壤理化性质分析

高速公路边坡坡向的不同会造成不同受光坡面的光、热、水等气候生态因子存在差异,构成两种不同的生态环境—阴阳坡生境,这两种环境的差异直接影响坡面植被的生长情况及土壤的养分积累和水分条件<sup>[18]</sup>。根据对不同受光面边坡土壤养分和物理性状(图 1)分析可知,各恢复年限下有机质、全 N、速效 P、速效 K 等养分的含量均表现为阴坡 > 阳

坡,且呈现向表层富集的趋势。有机质和全 N 的变化趋势一致,随着恢复年限延长其含量呈递增趋势;速效 P 和无机 N 含量在土石山区恢复 2 年时出现最高值,植被的改良作用使其增加。土壤孔隙度表现为阴坡 > 阳坡,低于植物生长适宜水平,影响植物的根系呼吸及其对养分的吸收;土壤含水率为阴坡 > 阳坡,主要是因为阴坡接受的太阳辐射相对较少,且植被覆盖度相对较高,减少了土壤水分蒸发;

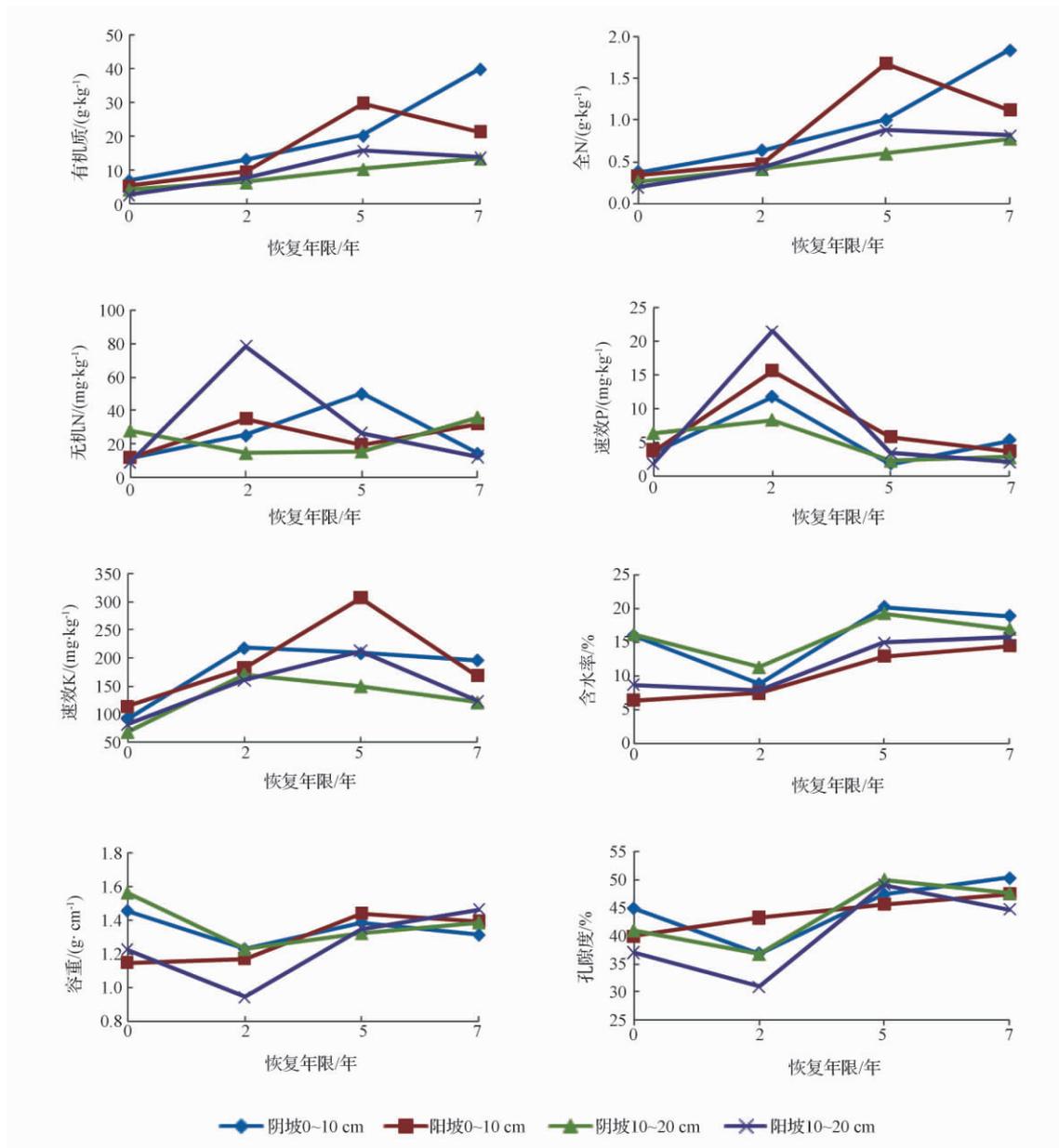


图1 不同恢复年限、不同坡向、不同土层深度高速公路边坡土壤理化性质状况

恢复0年和2年的边坡土壤容重表现为阴坡>阳坡,恢复5年和7年的土壤容重表现为阳坡>阴坡,主要是由于随着恢复时间增长,阴坡水热及养分条件更适宜植物生长,加快植被凋落物的分解及地下根系的穿插、死亡和分解<sup>[19]</sup>,增加了土壤有机质,致使土壤容重减小、孔隙度增大,植被的改良土壤作用渐显。

### 3 讨论

本文对高速公路边坡建造人工植被后不同时间序列上土壤理化性状分析表明,边坡养分贫瘠,有机质和全N处于缺乏水平,而且各养分比例失调,分析结果是对以往研究成果<sup>[20-22]</sup>进一步补充和深入。植物生长适宜的C/N在(15~25):1左右,本研究经分析各边坡土壤C/N偏低,在9:1左右,微生物的作

用加快了土壤有机C分解,导致有机质含量下降,应根据有机质的成分适当调节客土层土壤C/N比到(15~20):1。对于边坡土壤而言,因多为新开挖的新生土,自身有机质含量很少,而所建植的边坡植被恢复前期土壤本身的有机质来源又非常有限,因此只能通过人工补充才能保证绿化边坡植物的正常生长<sup>[23]</sup>。恢复初期植被生长需要吸收大量的养分,另外,由于降水的冲刷、淋溶作用,使得养分含量不同程度的降低,但随着时间延长降幅逐渐减缓<sup>[24]</sup>。包括有机质含量在内的客土养分含量的全面恢复需要一定的时间,应该注意到随着客土养分衰减的持续进行,土壤肥力下降,故要维持植物正常生长,人工追肥是必要的。郭曼<sup>[25]</sup>研究表明,由于一年生草本植被周期性的腐烂分解增加了土壤养分含量,土

壤有机碳、全氮、碱解氮、速效磷含量呈上升趋势; 随着植被演替的推进, 地面植物数量和物种多样性增加, 植被的快速生长繁殖消耗了过多的土壤养分, 使土壤养分积累速度减缓, 但仍高于恢复初期的土壤养分含量。土壤养分含量随着年限的增加呈波动性增加趋势, 养分含量的增加也促进了植被的演替, 提高酶活性, 三者相互作用、相互促进。但就目前陕南高速公路边坡采用的植被类型多为多年生草本或多年生灌木, 其改良土壤的效果相对缓慢。

土壤肥力随人工植被建植时间的延长而逐渐恢复, 表现为土壤有机质和全 N 含量的增加<sup>[22]</sup>, 年限对两者的影响显著, 且表现出养分向表层积累的趋势, 植被枯枝落叶的积累, 加之人工种植的豆科植物的固 N 作用可显著提高土壤 N 的水平, 进而可以促进其他种的发育和生长<sup>[23]</sup>。

经对比分析各边坡防护模式的防护效果, 得出三种护坡模式中骨架护坡模式的效果最好, 保水保肥效果突出。骨架 + 植生袋效果最差, 在边坡防护施工过程中, 要求对植生袋内土壤按一定的配比添加营养物质, 但是多数施工未能按要求实施, 这也是造成植生袋内土壤养分含量低的一方面, 此外, 由于过度的挤压使得密度增大, 理化性状均不利于植物生长。建议在日后的边坡防护施工中加以改善。有研究表明<sup>[21]</sup>, 对陕北三种护坡模式分析得出, 骨架植草模式涵养水分能力最强, 其次是穴状整地植草模式, 最后是挂网喷播植草模式。由此可见, 骨架护坡模式在这两种地形区的效果均较好。

舒安平<sup>[26]</sup>研究表明, 土壤密实度阳坡 > 阴坡, 水分阴坡 > 阳坡, 已影响边坡植被的生长和根系的延伸, 成为阳坡植被恢复的限制因子, 阴坡植被的长势和盖度均优于阳坡。研究表明, 阴坡容重小于阳坡, 阴坡对土壤孔隙的改善优于阳坡, 土壤通气透水性好, 有利于植被生长。土壤养分的变化均表现出表层养分含量相对高于下层, 土壤养分有向表层富集的趋势, 有机质与全 N 变化一致<sup>[27]</sup>。所以, 应根据阳坡特点, 采取适当措施加以改良, 诸如, 增施有机肥以改善土壤的性状, 适时灌溉保证植被所需水分。另外, 在物种的选择上要根据当地的特点, 选择耐性较强的物种。

## 4 结论

本研究结果表明, 在公路边坡建植人工植被以后, 土壤理化性状随建植时间的延长而得到明显改善。植被人工重建对土壤肥力的改善效应是生物和非生物因素共同作用的一个复杂的生态学过程<sup>[28]</sup>。

1) 土石山区高速公路边坡土壤长期处于缺水

状况, 养分匮乏。0~20 cm 土层边坡扰动前后土壤有机质、全 N、速效磷和速效 K 含量均显著降低; 然而随着边坡植被恢复时间延长及植被的演替进程, 植被长势渐好, 豆科植物的固氮作用使得有机质和全 N 含量增加, 但仍处于较低水平。

2) 三种护坡模式(保水保肥效果)比较: 有机质、全 N、速效 K、含水率均为骨架护坡 > 挂网喷播 > 拱形 + 植生袋, 骨架护坡模式保水保肥效果较好, 该护坡模式为最优选择。

3) 各恢复年限下土壤有机质、全 N、速效 P、速效 K 等养分的含量均表现为阴坡 > 阳坡, 土壤含水率、孔隙度等为阴坡优于阳坡, 可见, 阴坡的水肥条件优于阳坡, 应根据这种规律, 因地制宜, 采取适当措施对阳坡的土壤加以改良, 促进植被生长, 加快植被的生长演替。

4) 陕南土石山区高速公路路堑挂网喷播护坡模式下植被恢复宜采用黑麦草 + 紫花苜蓿混播或单播其一种, 路堑拱形 + 植生袋护坡模式下宜采用穴植紫穗槐或紫穗槐 + 紫花苜蓿护坡, 骨架护坡模式下宜采用紫穗槐 + 紫花苜蓿或者单播小冠花护坡。

5) 土壤的养分(有机质、全 N、速效 P)是边坡植被恢复和演替的限制因子, 另外, 土石山区特殊的地理环境, 土壤资源相对贫乏, 利用当地养分含量适宜的表层土已存在困难, 所以, 应适当采取土壤改良措施, 增施有机肥和氮磷肥, 改善土壤的养分条件及物理性质, 为植被恢复提供良好的环境, 促进植物生长, 使其尽快发挥其水土保持效果。

## 参 考 文 献

- Olander L P, Scatena F N, Silver W L. Impacts of disturbance initiated by road construction in a subtropical cloud forest in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. *Forest Ecology and Management*, 1998; 109(1/3): 33—49
- 王太平, 杨晓明. 高速公路边坡植物群落物种多样性与土壤因子的关系. *福建林业科技* 2010; 37(2): 37—45
- 陈爱侠, 冀德学, 邓顺熙. 公路建设中生态环境保护的设计原则与要求. *西安公路交通大学学报*, 1999; 19: 15—17
- Alisa W C. From road kill to road ecology: A review of the ecological effects of roads. *Journal of Transport Geography*, 2007; 15(5): 396—406
- 李西, 罗承德, 陈其兵. 岩石边坡植被护坡植物选择初探. *中国园林* 2004; 20(9): 52—53
- 童望军, 王小德, 吴兵, 等. 02 省道西延工程路堑边坡绿化工程技术探讨. *浙江林业科技* 2005; 25(2): 51—54
- 张华, 张甘霖. 土壤质量指标和评价方法. *土壤* 2001; 33(6): 326—333
- 许文年, 夏振尧, 戴方喜, 等. 恢复生态学理论在岩质边坡绿化工程中的应用. *中国水土保持* 2005; (4): 31—33
- 祝遵凌, 胡海波, 芦建国. 不同植物配置模式在边坡防护中的应

- 用比较. 公路交通科技: 应用技术版 2007; (12): 17—20
- 10 王云, 龙春林, 刘怡涛. 植物在高速公路边坡防护中的应用. 水土保持研究 2005; 12(6): 199—202
- 11 肖玉德. 铜陵至黄山高速公路边坡绿化设计探讨. 工程与设计 2007; 21(2): 148—150
- 12 鲍士旦. 土壤农化分析. 第三版. 北京: 中国农业出版社 2000
- 13 林大仪, 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国林业出版社 2002: 90—92
- 14 殷秀琴, 宋博, 邱丽丽. 红松阔叶混交林凋落物-土壤动物-土壤系统中 N、P、K 的动态特征. 生态学报, 2007; 27(1): 128—134
- 15 王华静, 吴良欢, 陶勤南. 氮形态对植物生长和品质的影响及其机理. 科技通报 2005; 21(1): 50—55
- 16 孙瑞琴, 门光耀. 环境因素对植物硝态氮代谢的影响. 阴山学刊 2007; 21(1): 65—67
- 17 张磊, 程温莹, 罗丽. 黄塔高速公路边坡土壤营养元素分布特征. 四川理工学院学报(自然科学版) 2008; 21(6): 117—120
- 18 张俊云, 周德培, 李绍才. 高速公路岩石边坡绿化方法探讨. 岩石力学与工程学报 2002; 21(9): 1400—1403
- 19 安韶山, 常庆瑞, 李壁成, 等. 不同林龄植被培肥改良土壤效益研究. 水土保持通报 2001; 21(3): 75—77
- 20 陈友光, 陈振雄, 柯玉诗, 等. 广东地区高速公路边坡生态防护的土壤肥力调查与改良对策. 公路 2008; (6): 200—204
- 21 肖蓉, 高照良, 张兴昌, 等. 陕北黄土丘陵沟壑区高速公路边坡不同生物防护模式的土壤特性——以铜(川)黄(陵)延(安)高速公路为例. 中国水土保持科学 2009; 7(3): 79—85
- 22 余海龙, 顾卫, 江源, 等. 半干旱区高速公路边坡不同年代人工植被群落特征及其土壤特性研究. 中国生态农业学报 2007; 15(6): 22—25
- 23 Shumway S W. Filitative effects of a sand dune shrub on species growing beneath the shrub canopy. *Oecologia*, 2000; 124(1): 138—143
- 24 舒安平, 苏建明, 冷剑, 等. 半干旱区生态护坡工程客土养分衰减特征与恢复趋势. 水土保持学报 2008; 22(5): 82—90
- 25 郭曼, 郑粉莉, 和文祥, 等. 黄土丘陵区不同退耕年限植被多样性变化及其与土壤养分和酶活性的关系. 土壤学报 2010; 47(5): 979—986
- 26 舒安平, 成瑶, 李芮, 等. 高速公路石质边坡不同受光面土壤与植被恢复的差异性. 公路交通科技 2010; 27(6): 143—147
- 26 Shu Anping, Cheng Yao, Li Rui *et al.* Differences of soil and vegetation restoration on expressway rocky slope under diverse solar radiations. *Journal of Highway and Transportation Research and Development* 2010; 27(6): 143—147
- 27 周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区侵蚀环境不同坡面及坡位土壤理化特征研究. 水土保持学报 2008; 22(1): 7—12
- 28 Mun H T, Whitford W G. Changes in mass and chemistry of plant roots during long-term decomposition on a Chihuahuan Desert watershed. *Biology and Fertility Soils*, 1998; 26(1): 16—22

## Research on Ecological Protection Modes and Soil Properties of Different Years of Recovery along Highway Slopes

LIU Zi-zhuang<sup>1</sup>, ZHAO Jing<sup>1, 2</sup>, GAO Zhao-liang<sup>1, 2\*</sup>

( College of Resources and Environment, Northwest A & F University<sup>1</sup>,  
Institute of Soil and Water Conservation<sup>2</sup>, Yangling 712100, P. R. China)

**[Abstract]** Based on rocky mountainous areas in southern Shaanxi, taking the highways of different vegetation restoration years as examples, the protective effect of different slope protection mode and the differences of soil characteristics between the different slope aspects are analyzed. The results showed: ①Restoration years had a significant impact on the soil nutrient conditions of highway slopes in rocky mountainous region. Organic matter and total nitrogen were at the deficient and extremely deficient rank; Along with the slope vegetation restoration time and vegetation succession process, vegetation growing gradually better, the contents of organic matter and total N increased by the role of legume plants' nitrogen fixation, but still at low level; ②Organic matter, total N, available K and water content were framework seeding protection model > net-suspended spray seeding protection model > framework + vegetation bags protection model, and nutrients showed a trend of surface enrichment. The effect of fertilizer and water retention in framework seeding protection model is better, and it was the best choice in three models; ③The contents of organic matter, total N, available P and available K in the shady slope were higher than that of the sunny slope, the soil moisture content and porosity in the shady slope were better than that of the sunny slope; ④The soil nutrients (organic matter, total N, available P) had become a limited factor to slope vegetation restoration and succession. So it was necessary to take appropriate soil improvement measures to improve soil nutrient conditions and physical properties, and to provide better environment for vegetation restoration, promote plant growth, and make it play the effect of soil and water conservation as soon as possible.

**[Key words]** slope protection models ecological protection mode soil features sunny and shady slope highway