

内蒙古中东部高速公路路堑阳坡植被恢复效果研究

陶 岩¹, 段问宇², 卜庆国^{3,4}, 王新民^{3,4}, 江 源^{2*} (1. 东北师范大学地理科学学院, 吉林长春 130024; 2. 北京师范大学资源学院, 北京 100875; 3. 国家环境保护创面生态修复工程技术中心, 北京 100082; 4. 路域生态工程有限公司, 北京 100082)

摘要 针对路堑阳坡立地条件差, 植被恢复困难的问题, 以内蒙古中东部地区高速公路为例, 研究了路堑阳坡的生态恢复效果和群落演替规律。研究表明: ①在内蒙古干旱半干旱条件下, 阳坡与自然环境的生态条件更加接近, 乡土植物在坡面群落建植初期更容易侵入; ②在群落演替过程中, 阳坡物种数目和生活型构成比例逐渐与天然群落接近, 体现出了人工群落向自然群落过渡的趋势; ③对研究区而言, 生态恢复物种应以豆科和禾本科草本植物为主, 少量搭配灌木, 不建议使用乔木; ④沙打旺、紫花苜蓿、老芒麦、白草、白花草木樨 5 种草本植物更适应于阳坡生长, 而赖草则更适应于阴坡生长。
关键词 高速公路; 路堑阳坡; 植被恢复; 效果评价
中图分类号 S731.8 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2015)23-198-04

Vegetation Restoration on Cutting Sunny Slope of Highways in Central and Eastern Inner Mongolia
TAO Yan¹, DUAN Wen-yu², BU Qing-guo^{3,4}, JIANG Yuan^{2*} et al (1. School of Geographical Science, Northeast Normal University, Changchun, Jilin 130024; 2. College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875; 3. State Environmental Protection Engineering Center for Ecological Restoration of Surfaces Destroyed, Beijing 100082; 4. Louis Ecological Engineering Co. Ltd., Beijing 100082)

Abstract Vegetation restoration is hard to achieve at the cutting sunny slope where held the worse habitat condition. This study investigated the effects of ecological restoration and community succession law at the cutting sunny slope on the highway in eastern Inner Mongolia. The main conclusions are ① the ecological conditions of cutting sunny slope and natural environment are similar under the background of arid and semi-arid climatic conditions in Inner Mongolia. Therefore, the native plant communities are easy to be invaded at the early stage of establishment on the slope; ② the species number and the proportion of life forms at the sunny slope caught up with those at the natural plant communities on the process of succession, which showed a transition trend from artificial community to natural community; ③ for the study area, the selection of plant species for ecological restoration should be legume and grass herbaceous plants, followed by shrubs. Woody plants are not suggested; ④ *Astragalus adsurgens*, *Medicago sativa*, *Elymus sibiricus*, *Pennisetum centrasaticum*, and *Melilotus alba* are adapted to grow in the sunny slope, whereas *Leymus secalinus* is adapted to grow in the shade slope.
Key words Expressway; Cutting sunny slope; Vegetation restoration; Effect evaluation

随着国民经济的快速发展, 高速公路已经成为我国现代化公路运输不可缺少的基础设施之一。以内蒙古自治区为例, 到“十二五”末, 全区公路总里程将达到 1.7×10^5 km, 其中高速公路和一级公路里程将达到 1.3×10^4 km。高等级公路的快速发展有效地改善了我国现有的公路网结构, 极大地促进了区域间的经济联系。但是随着公路建设里程和等级的不断提高, 各种生态与环境问题在路域范围内日渐凸显, 例如, 公路建设造成大量坡体的岩石和表土裸露, 导致植被、动物栖息地和自然景观遭到破坏, 土壤结构的扰动, 进而引起水土流失、边坡塌方、土壤质量下降、环境污染加剧等一系列问题^[1]。尤其是在我国的内蒙古地区, 生态环境十分脆弱, 植被和土壤一旦遭到破坏, 自然恢复难度大, 时间长, 其影响范围不仅是内蒙古自治区本身, 还将对我国中东部地区生态环境造成极大威胁^[2]。

因此, 在公路建设的同时, 如何有效地恢复和重建公路边坡植被, 改善路域生态条件 and 环境质量, 做到公路建设与生态环境保护的协调发展, 已经成为当今公路生态建设必不可少的任务之一^[3-4]。然而, 与近些年高速公路的快速发展

相比, 公路边坡生态恢复与重建的相关研究却严重滞后, 特别是针对生态条件最为恶劣的路堑阳坡的植被恢复效果研究更加匮乏^[5-6]。笔者以内蒙古中东部地区高速公路路堑阳坡为研究对象, 选择典型的试验路段, 以生态系统理论为指导, 系统地观测了护坡植被的群落组成变化特征, 并对植被护坡群落的生态恢复效果和演替过程进行了深入的探讨和研究。

1 研究区概况

研究依托“京新高速公路(G7)韩家营(晋蒙界)至集宁段道路生态景观建设”在建工程进行, 标段为 K0+105—K72+050, 位于乌兰察布市察哈尔右翼前旗巴音塔拉乡刘家村东部。地貌类型以盆地为主, 属浅山丘陵区; 气候属于北温带大陆性干旱气候, 风多雨少, 降水量在 350~400 mm, 昼夜温差大。土壤属于温带干草原栗钙土地带, 地带性植被为典型草原, 优势种为大针茅(*Stipa grandis*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)等。干旱区阳坡严酷的自然条件使得试验路段的地表植被极易遭受破坏, 一旦破坏之后, 夏季暴雨的冲刷和冬春季节强烈的风蚀作用使得土壤养分很快流失, 植被难以恢复。此外, 由于此地区绝大部分年降水发生在夏季, 因此春旱也是制约当地植物生长的重要因素。

2 材料与方法

2.1 试验地条件与建植技术 试验路段路堑边坡地理位置为 113°51'50.51"E, 40°42'12.14"N, 海拔高度 1 423 m, 距离兴

基金项目 国家自然科学基金青年基金(41101523); 内蒙古自治区交通科技项目(NJ-2013-26)。
作者简介 陶岩(1979—), 男, 吉林长春人, 讲师, 博士, 从事恢复生态学、生物地理学研究。* 通讯作者, 教授, 博士生导师, 从事植被生态学、生物多样性保护、恢复生态学研究。
收稿日期 2015-06-03

和县城 20 km。路堑边坡坡面为岩石土坡,基岩为砂页岩,坡面倾斜角度为 45°~60°。植被护坡工程于 2013 年 7 月完成施工。试验阳坡的物种设计采用乔木+灌木+草本的立体

组合模式,具体选用的物种种类及播种量见表 1,播种后的覆土厚度为 2 cm。

表 1 试验路段高速公路边坡生态恢复物种设计方案

序号	名称	播种量//g/m ²	序号	名称	播种量//g/m ²
1	榆树(<i>Ulmus pumila</i>)	5	7	紫穗槐(<i>Amorpha fruticosa</i>)	3.5
2	刺槐(<i>Robinia pseudoacaci</i>)	3	8	柠条(<i>Caragana korshinskii</i>)	5.5
3	臭椿(<i>Ailanthus altissima</i>)	0.65	9	沙打旺(<i>Astragalus adsurgens</i>)	0.5
4	火炬树(<i>Rhus Typhina</i>)	4.3	10	紫花苜蓿(<i>Medicago sativa</i>)	0.25
5	胡枝子(<i>Lespedeza bicolor</i>)	0.5	11	波斯菊(<i>Cosmos bipinnatus</i>)	0.03
6	沙棘(<i>Hippophae rhamnoides</i>)	0.5	12	野菊花(<i>Dendranthema indicum</i>)	0.015

2.2 恢复效果调查方法 2013 年 8 月~2014 年 8 月期间,在植物生长季定期监测试验边坡植被的生长和恢复效果。调查主要通过样带和坡面固定样方跟踪调查的方式进行,调查方法是:选择典型路堑阳坡坡面作为样地,从坡顶向坡麓,在上、中、下部位各布设 4 个 1 m×1 m 的样方,测定样方内的植物种类、高度、密度、群落覆盖度、地上生物量、叶绿素含量等生物学指标,并对每个样方周边 5 m×5 m 范围内出现的新植物种类进行登记。其中覆盖度的调查采用样方点测法,即将 1 m×1 m 的样方等分成为 100 个 10 cm×10 cm 的小网格,对每个网格节点登记是否在点向地面的垂线方向被植物体分布,最后统计有植物体分布的总点数与所有网格点数的比值,并以此作为覆盖度指标,用百分数表示。为减少对护坡植被的破坏,生物量的测定为选取 1 m×1 m 样方中的 1/4,即剪取样方内 50 cm×50 cm 的植株地上部分,带回室内烘干后称重。叶绿素荧光比率(CFR)和相对叶绿素含量采用美国 OPTI-sciences CCM-300 叶绿素含量测量仪测定。根据对坡面植被调查数据,还计算了群落各物种的相对比例和 Shannon-Weiner 多样性指数。

此外,为了更好地对比和说明坡面植被的恢复效果,研究还对试验阳坡对面的阴坡和试验阳坡附近的草原群落进行了植物样方调查,记录了各群落的植物种类组成及相关生长指标。

3 结果与分析

3.1 物种数目变化 试验阳坡的初始设计物种为 12 种(表 2),在坡面植被建植后 1 个月(2013 年 8 月)左右,有 7 种植物顺利出苗生长,并在建植 1 年后(2014 年)仍然存活,表明这 7 种植物基本能够适应当地气候和土壤等条件。此外,在坡面植被建植当年,有 8 种样地外乡土植物进入护坡植被群落,在建植后第 1 年,有 14 种乡土植物进入护坡植被群落,坡面总物种数目分别达到了 15 种和 21 种,乡土植物种在群落中所占的比例呈现稳定增加趋势,而附近草原群落的常见物种数目介于二者之间,表明坡面群落在初始设计物种的基础之上,正在向适应当地环境条件的群落演替。

阳坡的这个特征与阴坡形成了鲜明对比。调查数据显示,阴坡仅在建植当年有 8 种乡土植物进入边坡(与阳坡相同),而此后一年无更多乡土植物侵入。这表明本地区高速公路阴坡坡面的护坡植物群落在建植后的一段时间内,不利

于本地植物的进入。究其原因,可能在于阴坡坡面播种的植物能够形成较大盖度,对当地侵入植物形成较大竞争压力。而相对干旱的阳坡生境,因水分等条件较差,人工播种的植物盖度不高,为本地植物成功侵入提供了较多生态位。

表 2 路堑阳坡生态恢复群落物种数目变化及对比

调查地点	物种来源	建植初期	2013 年 8 月	2014 年 8 月
阳坡	初始设计物种	12	7	7
	样地外侵入物种	0	8	14
	总物种数	12	15	21
	天然草原物种数	19	19	19

3.2 种类组成变化

3.2.1 优势物种变化。根据阳坡初始设计的播种种类及其数量,对照建植后坡面植被群落中各物种的密度及盖度,计算出了阳坡生态恢复群落的物种相对比例变化(图 1)。根据统计结果,初始设计物种在建植当年和建植后第 1 年分别表现出相对比例增加、减少和先增加后减少 3 种趋势。其中,沙打旺、紫花苜蓿、波斯菊的相对比例表现为逐年增加,相对比例分别由初始设计比例的 13.25%、5.3%、0.21%,增加到建植后第 1 年的 68%、10%、2.9%。榆树、紫穗槐、柠条、刺槐、臭椿、沙棘、火炬树、野菊花的相对比例表现为逐年下降,其中刺槐、臭椿、沙棘、火炬树、野菊花在坡面植被建植 1 年后在群落物种组成中消失。胡枝子初始设计时的相对比例仅为 2.36%,然而其在建植当年的出苗率非常高,再加上受到其他物种出苗率低的影响,相对比例达到 20.71%,但是在建植 1 年后又大量减少,相对比例降低到 1.4%。

按照相对比例大于 10% 的标准确定坡面优势物种,可以得出,在阳坡植被建植当年,群落优势植物由榆树、胡枝子、沙打旺 3 个物种构成;建植 1 年后,坡面优势物种变为沙打旺和紫花苜蓿,其中沙打旺在阳坡占据绝对优势地位。

3.2.2 生活型比例变化。在阳坡初始设计物种中,乔木、灌木、草本 3 种生活型的种类比例为 1:1:1,根据建植当年出苗调查结果(此次调查在播种后 1 个月左右,因此某些木本植物可能尚未出苗),刺槐、臭椿、火炬树 3 种乔木种子出苗率较低或未出苗,灌木沙棘出苗率较低或未出苗,草本植物野菊花未出苗,乔木和灌木在群落中所占比例下降。建植后第 1 年,边坡上的乔木和灌木物种与建植当年 8 月相同,但草本

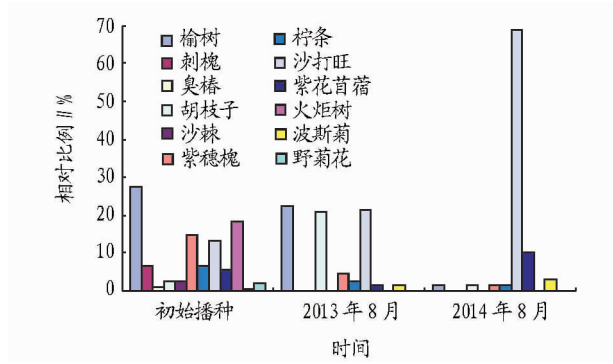


图1 路堑阳坡生态恢复群落优势物种变化

植物由建植当年的11种增加到了17种,当地乡土草本植物大量进入护坡群落,因此乔木和灌木所占的比例进一步降低,乔灌木物种比例达到1:3:17(表3)。对比试验边坡周边的天然草原后发现,天然草原中几乎没有乔木生长,仅有少量灌木存在,主要还是因为该区域降雨量偏少,而且地下有深厚且不利于植物根系生长的钙土层,所以大多数木本植物很难生长。另外,根据样方调查结果,天然草原中的乔木、灌木、草本物种数目的比例约为0:2:19,而此比例恰好与阳坡乔灌木比例相接近,这说明护坡植物群落中各物种的生活型比例也正在向当地自然群落进行过渡。

0:2:19 这个比例对于内蒙古中东部地区路域边坡植被恢复过程中,关于乔、灌、草的物种选配比例具有明显的指导意义:在此区域内进行路域护坡实践时,应充分考虑气候及土壤因素对植物生长的制约,尽量限制乔木的使用,主要使用多年生旱生草本植物,适量搭配耐旱、耐寒型灌木。如果选择乔木物种,则应采取浇水、除草等相应的特殊管护措施。

表3 路堑阳坡生态恢复群落不同生活型种类数目变化及对比

调查地点	调查时间	生活型		
		乔木	灌木	草本
阳坡	初始设计物种	4	4	4
	2013 年 8 月	1	3	11
	2014 年 8 月	1	3	17
天然草原	2013 年 8 月	0	2	19

3.2.3 各科植物比例变化。在阳坡植被恢复群落中,禾本科植物没有设计在初始播种物种中,边坡中出现的禾本科植物均为样地外侵入,并在群落建植当年占到了一定比例(13%),但1年之后比例开始下降(5%)。豆科植物的初始播种数量比例(49%)与自然环境(42%)最为接近,在播种当年8月份比例略有上升,到第2年8月份比例急剧上升,占到坡面总数量的83%,结合样方数据分析,主要是由于沙打旺和紫花苜蓿两种豆科植物数量上升所致,尤其是沙打旺已经成为了阳坡群落的最优势物种。菊科植物初始播种数量比例为2%,而在天然草原中的数量比例为3%,二者比较接近,建植当年野菊花未出苗,但有一定数量的鬼针草侵入护坡群落,使菊科所占比例略有上升,建植1年后所占比例下降(1%),主要组成物种是波斯菊和菊科蒿属中的一些植物。初始设计中的其他科植物主要集中在乔灌木种类,如榆树

(榆科)、臭椿(苦木科)、沙棘(胡颓子科)、火炬树(漆树科),由于除了榆树外的其他乔灌木在建植后均出现了大量减少,因此其他科数量相对比例下降较为明显,但在建植后的1年时间里,样地外的藜科,如藜(*Chenopodium album*)、猪毛菜(*Salsola collina*);十字花科,如油菜(*Brassica campestris*);车前科,如车前(*Plantago asiatica*)等植物开始侵入,因此也在一定程度上减缓了其他科植物的数量下降比例。

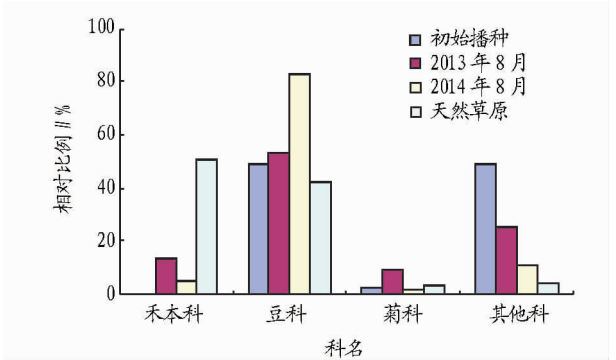


图2 路堑阳坡生态恢复群落各种植物比例变化及对比

3.3 物种多样性变化 群落的物种多样性既体现了生物之间及生物与环境之间的复杂关系,又体现了生物资源的丰富性^[7-10]。从图3可以看出,路堑阳坡在植被恢复当年表现出了较高的物种多样性,而到了建植1年后开始下降,物种多样性低于天然草原群落。这是因为有两个因素影响着 Shannon-Wiener 物种多样性指数,一是物种丰富程度,二是各种间个体分配的均匀性,即群落物种丰富程度越高,物种个体分配越均匀,Shannon-Wiener 多样性指数越大。结合样方调查数据分析,阳坡物种的丰富程度在建植后第1年有所升高,由建植当年的15种增加到了21种,但是从各物种所占的数量比例来看,沙打旺和紫花苜蓿两个物种占到了78%,导致群落各种间个体分配极不均匀,因此物种多样性处于较低水平,这与已有研究结果一致^[11]。

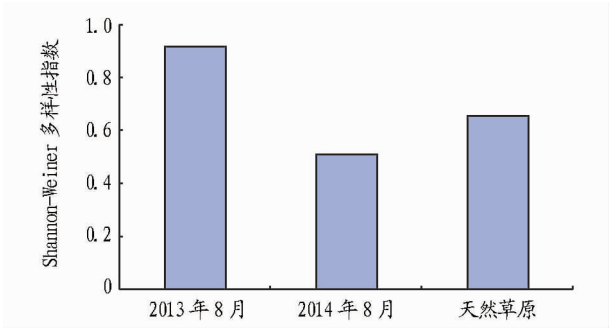


图3 路堑阳坡生态恢复群落物种多样性变化及对比

3.4 植物叶绿素含量变化 叶绿素是存在于植物细胞中的一类极为重要的绿色色素,是绿色植物进行光合作用时吸收、转化和传递光能的主要物质。植物中的叶绿素含量直接影响植物的光合作用、营养吸收等过程,因此被广泛用作植物生长的常规监测指标^[12-13]。另外,影响植物体叶绿素含量的因素主要有光照、温度、土壤营养元素等,所以叶绿素含量除了可以反映植物的生长情况外,也可以作为反映生境条件的综合指标^[14-15]。

表 4 中列出了试验路段阳坡和阴坡主要优势物种的叶绿素荧光比率(CFR)和相对叶绿素含量,从表中可以看出,绝大多数测定物种在阳坡上的 CFR 值和相对叶绿素含量均高于阴坡,即从理论上来说,这些物种更适于阳坡生长。其中沙打旺、紫花苜蓿、老芒麦(*Elymus sibiricus*)、白草(*Pennisetum centrasiatricum*)4 种植物的 CFR 值和相对叶绿素含量增加比较明显,表明这 4 种植物相对于白花草木樨(*Melilotus alba*)更适合于阳坡生长。另外,测试物种中只有赖草(*Leymus secalinus*)的 CFR 值是阴坡大于阳坡,表明该物种更适于阴坡环境生长。

表 4 不同坡向路堑护坡群落优势物种叶绿素含量比较

植物种类	叶绿素荧光比率(CFR)		相对叶绿素含量//mg/m ²	
	阴坡	阳坡	阴坡	阳坡
沙打旺	1.158	1.333	1 126	1 243
紫花苜蓿	1.208	1.488	1 158	1 337
白花草木樨	1.221	1.248	1 165	1 185
老芒麦	1.146	1.276	1 119	1 202
赖草	1.324	0.815	1 232	910
白草	1.098	1.190	1 089	1 149

此外,阳坡中同一种植物生长在不同坡位时,其 CFR 值和相对叶绿素含量也表现出了一定的差异,沙打旺、紫花苜蓿、草木樨、老芒麦在坡下部的 CFR 值和相对叶绿素含量高于坡顶部(表 5)。这说明对于阳坡而言,坡上部立地条件更为恶劣,土质更为干旱,植物生长受到地形、光照、土壤水分、养分等多重因素的影响,长势较弱;而坡下部由于水分较好,长时间累积后土层加厚,坡度变缓,土壤营养元素富集,因此植被长势良好^[9,16]。

表 5 路堑阳坡不同坡位优势物种叶绿素含量比较

植物种类	叶绿素荧光比率(CFR)		相对叶绿素含量//mg/m ²	
	坡顶部	坡下部	坡顶部	坡下部
沙打旺	1.32	1.35	1 236	1 251
紫花苜蓿	1.24	1.74	1 178	1 496
白花草木樨	1.10	1.39	1 092	1 279
老芒麦	1.08	1.47	1 080	1 325

4 结论与讨论

植被护坡的物种组成及在未来的变化发展趋势对高速公路路域景观和边坡结构的稳定具有重要影响。坡面初始设计物种的变化及当地乡土物种的侵入反映了边坡植物群落的演替过程,这个过程将直接决定坡面最终植物群落的建成情况和对坡面表层及深层土壤的保护程度。在内蒙古干旱半干旱的区域条件下,路堑阳坡与天然草原的生态条件更加接近,乡土植物在护坡群落建植初期更易侵入。

在路堑阳坡植被建植后的演替过程中,群落物种数目和植物生活型构成比例两个指标逐渐与天然草原相接近,体现出了人工群落对生境条件的逐步适应和向自然植被进行过渡的趋势。而群落中优势种和优势科两个指标与天然草原

差异较大,在植被护坡建植 1 年后,坡面植被主要被豆科植物占据优势,其他科植物受豆科植物竞争影响较大。这种现象导致的结果是,护坡群落物种多样性较低,地上生物量短期内快速增加。较低的物种多样性降低了群落的抗扰动力,而较高的地上生物量又预示着植被对坡面地表和地下部分起到了很好的保护和稳固作用^[17],这是一个相对矛盾的结果。如何协调二者在群落演替过程中的利弊作用,是笔者接下来的重要工作之一。

根据对研究结果的分析可知,针对内蒙古中东部地区的生态恢复物种种类筛选,应该主要以草本植物为主,而且应首选豆科和禾本科植物,其次考虑少量搭配耐寒、耐旱型灌木,而对于乔木物种则建议不使用。另外,通过试验路段主要优势物种的 CFR 值和相对叶绿素含量可知,沙打旺、紫花苜蓿、老芒麦、白草、草木樨 5 种草本植物更适应于阳坡生境生长,而赖草则更适应于阴坡生境生长。并且位于边坡下部的植物生长情况要好于边坡上部。这些特征一方面反映出了植物的生态适应能力,另一方面也反映了坡面不同部位生态条件的差异,因此这些因素在路域边坡生态恢复实践中应予以充分考虑。

参考文献

[1] BRADSHAW A. The use of natural processes in reclamation: Advantages and difficulties[J]. Landscape and Urban Planning, 2000, 51: 89–100.

[2] 陶岩,江源,顾卫,等. 内蒙古中部高速公路边坡植被恢复研究[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(S1): 61–66.

[3] WANG Z Q, WU L H, LIU T T. Revegetation of steep rocky slopes: Planting climbing vegetation species in artificially drilled holes[J]. Ecological Engineering, 2009, 35: 1079–1084.

[4] 江源,陶岩,顾卫,等. 高速公路边坡植被恢复效果研究[J]. 公路交通科技, 2007, 24(7): 147–152.

[5] 刘春霞,韩烈保. 高速公路边坡植被恢复研究进展[J]. 生态学报, 2007, 27(5): 2090–2098.

[6] ADOLFO C, RAUL N, IBONE A, et al. Local topoclimate effect on short-term cutslope reclamation success[J]. Ecological Engineering, 2002, 18: 489–498.

[7] 邹蜜,罗庆华,辜彬,等. 生境因子对岩质边坡生态恢复过程中植被多样性的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(1): 7–14.

[8] 潘树林,辜彬,李家祥. 岩质公路边坡生态恢复土壤特性与植物多样性[J]. 生态学报, 2012, 32(20): 6404–6411.

[9] 马旭东,张苏峻,苏志尧,等. 车八岭山地常绿阔叶林群落结构特征与微地形条件的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(19): 5151–5160.

[10] 孙儒泳,李博,诸葛阳,等. 普通生态学[M]. 北京:高等教育出版社, 1997: 104–112.

[11] ALDAY J G, MARRS R H, RUIZ C M. The importance of topography and climate on short-term revegetation of coal wastes in Spain[J]. Ecological Engineering, 2010, 36: 579–585.

[12] 王平荣,张帆涛,高家旭,等. 高等植物叶绿素生物合成的研究进展[J]. 西北植物学报, 2009, 29(3): 629–636.

[13] 胡颂平,梅捍卫,邹桂花,等. 正常与水分胁迫下水稻叶片叶绿素含量的 QTL 分析[J]. 植物生态学报, 2006, 30(3): 479–486.

[14] 赵娟,宋媛,毛子军. 蒙古栎幼苗光合作用以及叶绿素荧光对温度和降水交互作用的响应[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(1): 64–71.

[15] 王文杰,李文馨,祖元刚,等. 紫萁泽兰茎和叶片色素及叶绿素荧光相关参数对不同温度处理的响应差异[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5424–5433.

[16] 秦松,樊燕,刘洪斌,等. 地形因子与土壤养分空间分布的相关性研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 47–52.

[17] 梁彦涛,徐太海,金连丰,等. 豆科植物在生态恢复方面的应用研究进展[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(20): 6637–6638, 6655.