

# 纵向岭谷区高速公路干扰下群落组分 及其水平分布格局变化研究

刘 杰 崔保山\* 董世魁 王 娟 赵淑青

(北京师范大学环境学院水环境模拟国家级重点实验室, 北京 100875. \* 联系人, E-mail: cuiubs@163.com)

**摘要** 选定纵向岭谷区大保(大理-保山)和思小(思茅-小勐养)两段高速公路, 采用对比分析、差异性分析等方法研究了高速公路干扰下沿线群落主要组分及其水平格局的变化. 结果表明: (1) 高速公路建设干扰下沿线乔木和灌木优势和亚优势物种的数量有所减少, 草本优势和亚优势种群数量有所增加, 并出现了入侵物种; (2) 高速公路建设干扰下沿线群落中各优势和亚优势植物种群的分布格局将发生由均匀型或者随机型向集群型的转化, 其聚集程度加剧, 扩散能力增强; (3) 高速公路沿线紫茎泽兰和飞机草种群的平均盖度和高度等指标均高于远离公路处, 其频度在公路沿线 200 m 范围内没有明显变化; (4) 大保高速公路对沿线群落构成及种群分布的影响强度高于思小公路, 两条公路在山腰路段的影响强度高于山顶路段.

**关键词** 高速公路 干扰作用 群落组分 水平格局变化

高速公路的出现是现代公路发展的一个重要里程碑, 其分布范围之广和发展速度之快, 都是其他人类建设工程所不能比拟的<sup>[1]</sup>. 高速公路建设促进了经济增长和社会发展, 同时也对自然生态系统产生了显著影响, 有研究表明, 这种影响至少涉及到了全球陆地的 15%~20%<sup>[2]</sup>. 目前, 高速公路建设的生态影响已经得到了广泛重视, 相关研究也得以深入开展, 其引起的景观破碎、水土流失、植被破坏、重金属污染和生物多样性变化等都已经得到了较为深入地研究<sup>[2~9]</sup>, 但有关高速公路干扰下沿线植物群落结构变化, 特别是群落水平结构变化研究尚属少见. 群落水平结构是指群落水平配置状况或水平格局, 是群落生物在二维平面中的不均匀配置在外形上表现出的斑块相间的镶嵌性. 当前, 某些生物种群的格局特征及动态趋势已经得到了初步论证<sup>[10~12]</sup>, 不同尺度和密度条件下的种群格局特点得到了系统比较<sup>[12~14]</sup>, 人为干扰下群落格局的变化也得到了初步分析<sup>[15,16]</sup>, 但就高速公路引起的群落主要组分及其水平格局的变化研究尚不多见. 事实上, 高速公路建设的干扰作用及其造成的群落内环境因子的变化(如地形地貌特征、土壤结构与肥力、空气温度与湿度等), 必然导致群落组分及其水平分布格局发生变化<sup>[17~21]</sup>. 研究高速公路建设对沿线群落组分及其水平格局的影响,

也必将在中观尺度上深入揭示公路建设的生态效应, 为道路和相关工程生态效应理论的建立和完善提供基础.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究路段

以纵向岭谷区的大保和思小两段高速公路为案例工程(位置见图 1). 纵向岭谷区(Longitudinal range-gorge region)是指位于中国西南、与青藏高原隆升直接相关联的横断山及毗邻的南北走向的山系河谷区(具体位置见图 1), 以其沿南北向发育、东西向展布的巨大山系和深切河谷构成了全球独特的高山峡谷景观<sup>[22,23]</sup>. 大保高速公路(大理-保山)东西走向, 横穿纵向岭谷并位于山脉核心区与河流的上游, 全线地形峰峦重叠, 坡陡谷深, 海拔高差 1445 m, 已经通车多年; 思小高速公路南北走向, 顺延纵向岭谷并位于山脉边缘区和河流下游, 全线为河流切割的山原地形, 地势由北向南倾斜, 相对平缓, 海拔高差 595 m, 至今建成通车不足两年. 可见, 两条案例公路沿线区域地形、地貌等条件具有典型性, 其建设基本能反应研究区高速公路建设的整体特征.

### 1.2 研究方法

(i) 样地与样方. 在大保和思小高速公路山



图1 研究区与案例路段位置示意图

坡、山顶和坝区路段沿线各选择1条样线(表1),样线垂直公路走向.参照样地远离公路(1500 m以外),其坡度、坡向以及群落类型与测定样线相近.

对于样线1,2,4和5,在距离公路0~50,50~100和100~200 m范围内及其参照样地处各设置20 m×20 m的乔木样方3个,在每个乔木样方内设置5 m×5 m的灌木样方3个,每个灌木样方内设置1 m×1 m的草本样方3个.记录样地坡度、坡向等生境状况,实测乔木胸径、树高和冠幅;记录乔木、灌木和草本植物的名称,同时调查其密度、盖度、高度、频度、多度和覆盖度等指标.对于样线3和样线6,在公路

沿线各样地及其参照样地处各设置1 m×1 m草本样方10个,统计紫茎泽兰和飞机草的入侵状况,实测其密度、高度和频度等指标.

(ii) 指标选取与计算. (1) 重要值的计算.重要值是评价植物种群在群落中地位和作用的一项综合指标,是种群相对盖度、相对频度和相对密度(相对高度)的总和,本文用其确定优势种群和亚优势种群,其计算方法如下:

乔木重要值:  $IV = RDE + RCO + RFE$ ,  
灌草重要值:  $IV = RHI + RCO + RFE$ , (1)

式中,IV为种群重要值,RDE为种群相对密度,RDO为种群相对盖度,RFE为种群相对频度;RHI为种群相对高度. (2) 水平分布格局指标.测定植物种群水平分布格局的指标很多,论文采用多个指标进行测度以避免各个指标在应用中的误差,各指标计算方法如下:

方差/均值比的t检验

计算公式为:

$$t = \frac{v/m-1}{\sqrt{v/(N-1)}} \quad v = \frac{\sum x_i^2 - \sum x_i^2/n}{n-1} \quad m = \sum x_i/n, \quad (2)$$

v/m用于检验种群分布格局是否偏离随机分布,v/m=1,种群格局呈随机分布;v/m>1,种群分布呈聚集分布.t为以n-1为自由度进行显著性检验值,x<sub>i</sub>为每个样方的株数,株.

扩散指标(Moristita)

计算公式为:

$$I = n \frac{\sum x_i^2 f_i - N}{N(N-1)}, \quad (3)$$

表1 选定样地基本情况

|                  | 样 线  | 样地中心点经纬度                    | 海拔/m | 地形      | 测定植物种                           |
|------------------|------|-----------------------------|------|---------|---------------------------------|
| 大<br>保<br>高<br>速 | 样线 1 | 25°02'1″N, 99°43'05″E       | 2278 | 凹坡      | 针阔混交林, 自然植被                     |
|                  | 参线 1 | 25°02'14″N, 99°43'05″E      | 2194 | 25°~30° |                                 |
|                  | 样线 2 | 25°27'12″N, 99°23'37.3″E    | 1944 | 平坡      | 常绿阔叶林, 自然植被                     |
|                  | 参线 2 | 25°27'29″N, 99°23'37.5″E    | 1950 | 28°~33° |                                 |
|                  | 样线 3 | 25°25'57.1″N, 99°11'57.1″E  | 1656 | 坝子, 低丘  | 林缘地带, 有纯杉林、灌木丛和农田分布, 有紫茎泽兰入侵现象  |
|                  | 参线 3 | 25°25'57.2″N, 99°11'58.2″E  | 1679 | 起伏小     |                                 |
| 思<br>小<br>高<br>速 | 样线 4 | 23°06'46.8″N, 102°46'2.0″E  | 1970 | 凸坡      | 常绿阔叶林, 自然植被                     |
|                  | 参线 4 | 23°06'47.4″N, 102°46'2.2″E  | 1931 | 20°~22° |                                 |
|                  | 样线 5 | 23°04'35.9″N, 102°44'35.7″E | 1585 | 平坡      | 常绿阔叶林, 自然植被                     |
|                  | 参线 5 | 23°04'35.9″N, 102°44'35.7″E | 1498 | 27°~30° |                                 |
|                  | 样线 6 | 22°37'49.5″N, 100°26'14.7″E | 610  | 坝子      | 林缘地带, 有人工橡胶林、农田和灌木丛分布, 有飞机草入侵现象 |
|                  | 参线 6 | 22°37'48.9″N, 100°26'15.4″E | 622  | 平坦      |                                 |

式中,  $I$  为植物扩散指数,  $n$  为样方个数(个),  $N$  为总株数(株),  $x_i$  为各样方株数(株),  $f_i$  为物种频数. 当  $I=1$  时, 种群为随机型; 当  $I>1$  时, 为聚集型分布; 当  $I<1$  时, 为均匀分布

聚块性指数

计算公式为:

$$M = 1 + \frac{1}{k} = 1 + \frac{s^2 - \bar{x}}{\bar{x}^2}, \quad (4)$$

式中,  $s^2$  为取样单位的方差,  $\bar{x}$  为每个取样单位个体的平均数目(个). 当  $M=1$  时, 为随机分布; 当  $M<1$

时为均匀分布; 当  $M>1$  时, 为聚集分布.

## 2 群落组分变化

### 2.1 群落组分变化特征

栖息于同一地域中相互联系的所有种群构成的复合体是群落, 优势种和亚优势种是对群落结构和群落环境具有明显控制作用的物种, 是群落主要组分和结构形成的基础. 论文对样线 1, 2, 4 和 5 以及其相应参照样地处群落中的优势种(重要值:  $>50\%$ )和亚优势种(重要值:  $30\% \sim 50\%$ )的构成情况进行了统计和对比, 结果见表 2 和表 3.

表 2 大保高速公路沿线与参照样地处群落构成对比<sup>a)</sup>

| 样地     | 群落构成 | 共有种(路边样地与参照样地)                                  |     |    |                                      | 非共有种(路边样地与参照样地) |   |    |  |
|--------|------|-------------------------------------------------|-----|----|--------------------------------------|-----------------|---|----|--|
|        |      | 种类                                              | 重要值 |    | 种类                                   | 重要值             |   |    |  |
|        |      |                                                 | 参   | 路  |                                      | 参               | 路 |    |  |
| 样线 1   | 优势种  | 滇青冈 <i>Cyclobalanopsis glaucoides</i>           | 67  | 72 | 多变柯 <i>Lithocarpus variolosus</i>    | 63              |   |    |  |
|        |      | 白皮柯 <i>Lithocarpus dealbatus</i>                | 64  | 71 |                                      |                 |   |    |  |
|        |      | 龙陵栲 <i>Castanopsis rockii</i>                   | 54  | 59 |                                      |                 |   |    |  |
|        |      | 曼青冈 <i>Cyclobalanopsis oxyodon</i>              | 51  | 53 |                                      |                 |   |    |  |
|        | 灌    | 马棘 <i>Indigofera pseudotinctoria</i>            | 55  | 66 | 展毛野牡丹 <i>Melastoma normale</i>       | 56              |   |    |  |
|        |      | 斑鸠菊 <i>Vernonia esculenta</i>                   | 54  | 57 |                                      |                 |   |    |  |
|        |      | 地肤 <i>Kochia scoparia</i>                       | 44  | 59 |                                      |                 |   |    |  |
|        | 草    | 紫茎泽兰 <i>Ageratina adenophora</i>                | 77  | 85 | 半夏 <i>Pinellia ternata</i>           | 52              |   |    |  |
|        |      | 长穗兔儿风 <i>Ainsliaea henryi</i>                   | 65  | 58 |                                      |                 |   |    |  |
|        |      | 白茅 <i>Imperata cylindrica</i> var. <i>major</i> | 63  | 57 |                                      |                 |   |    |  |
| 大保山顶路段 | 亚优势种 | 云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>                    | 46  | 49 | 黄毛青冈 <i>Cyclobalanopsis delavayi</i> | 42              |   | 90 |  |
|        |      | 西南桦木 <i>Betula alnoides</i>                     | 42  | 49 |                                      |                 |   |    |  |
|        |      | 蒙自桤木 <i>Alnus nepalensis</i>                    | 39  | 47 |                                      |                 |   |    |  |
|        |      | 水同木 <i>Ficus harlandii</i>                      | 34  | 36 |                                      |                 |   |    |  |
|        | 灌    | 香薷 <i>Elsholtzia</i> sp.                        | 47  | 48 | 虎刺 <i>Damnacanthus indicus</i>       | 44              |   |    |  |
|        |      | 南烛 <i>Lyonia ovalifolia</i>                     | 41  | 45 |                                      |                 |   |    |  |
|        | 草    | 半夏 <i>Pinellia ternata</i>                      | 39  | 34 | 毛茛 <i>Pellaea trichophylla</i>       | 30              |   |    |  |
|        |      | 茜草 <i>Rubia leiocaulis</i>                      | 32  | 31 |                                      |                 |   |    |  |
| 样线 2   | 优势种  | 滇青冈 <i>Cyclobalanopsis glaucoides</i>           | 64  | 76 | 肉色杜鹃 <i>Rhododendron carneum</i>     | 64              |   |    |  |
|        |      | 多变柯 <i>Lithocarpus variolosus</i>               | 59  | 69 |                                      |                 |   |    |  |
|        |      | 云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>                    | 56  | 63 |                                      |                 |   |    |  |
|        |      | 川西栎 <i>Quercus gilliana</i>                     | 55  | 67 |                                      |                 |   |    |  |
|        | 灌    | 曼青冈 <i>Cyclobalanopsis oxyodon</i>              | 53  | 66 | 乌饭 <i>Vaccinium bracteatum</i>       | 50              |   |    |  |
|        |      | 马棘 <i>Indigofera pseudotinctoria</i>            | 62  | 77 |                                      |                 |   |    |  |
|        |      | 斑鸠菊 <i>Vernonia esculenta</i>                   | 59  | 64 |                                      |                 |   |    |  |
|        | 草    | 紫茎泽兰 <i>Ageratina adenophora</i>                | 60  | 79 | 苔草 <i>Carex</i> sp.                  | 55              |   |    |  |
|        |      | 白茅 <i>Imperata cylindrica</i> var. <i>major</i> | 58  | 54 |                                      |                 |   |    |  |
|        |      | 长穗兔儿风 <i>Ainsliaea henryi</i>                   | 57  | 55 |                                      |                 |   |    |  |
| 大保山腰路段 | 亚优势种 | 羊胡子草 <i>Eriophorum comosum</i>                  | 51  | 50 | 多变柯 <i>Lithocarpus variolosus</i>    | 42              |   |    |  |
|        |      | 黄毛青冈 <i>Cyclobalanopsis delavayi</i>            | 47  | 48 |                                      |                 |   |    |  |
|        |      | 胡桃 <i>Juglans regia</i>                         | 36  | 41 |                                      |                 |   |    |  |
|        |      | 水红木 <i>Viburnum cylindricum</i>                 | 42  | 44 |                                      |                 |   |    |  |
|        | 灌    | 山蚂蝗 <i>Desmodium concinnum</i>                  | 36  | 40 | 买麻藤 <i>Gnetum montanum</i>           | 45              |   |    |  |
|        |      | 山蓼 <i>Oxyria digyna</i>                         | 44  | 42 |                                      |                 |   |    |  |
|        |      | 牛尾蒿 <i>Artemisia subdigitata</i>                | 41  | 37 |                                      |                 |   |    |  |
|        | 草    | 金发草 <i>Pogonatherum paniceum</i>                | 32  | 30 | 荩草 <i>Arthraxon hispidus</i>         | 49              |   |    |  |
|        |      |                                                 |     |    |                                      |                 |   |    |  |

a) “路”为公路沿线样地区; “参”为公路沿线参照样地区, 下同

表 3 思小高速公路沿线与参照样地处各个群落构成对比

| 样地     | 群落构成 | 共有种(路边样地与参照养地)                                  |     |    |                                     | 非共有种(路边样地与参照养地) |   |    |    |
|--------|------|-------------------------------------------------|-----|----|-------------------------------------|-----------------|---|----|----|
|        |      | 种类                                              | 重要值 |    | 种类                                  | 重要值             |   |    |    |
|        |      |                                                 | 参   | 路  |                                     | 参               | 路 |    |    |
| 样线 4   | 乔    | 铁刀木 <i>Cassia siamea</i>                        | 69  | 78 | 小果柯 <i>Lithocarpus microspermus</i> | 65              |   |    |    |
|        |      | 火绳树 <i>Helicteres isora</i>                     | 60  | 82 |                                     | 52              |   |    |    |
|        |      | 斜叶榕 <i>Ficus gibbosa</i>                        | 53  | 74 |                                     |                 |   |    |    |
|        |      | 对叶榕 <i>Ficus hispida</i>                        | 53  | 59 |                                     |                 |   |    |    |
|        |      | 牡竹 <i>Dendrocalamus strictus</i>                | 50  | 60 |                                     |                 |   |    |    |
|        | 灌    | 山蚂蝗 <i>Desmodium concinnum</i>                  | 65  | 67 | 鹅掌柴 <i>Schefflera octophylla</i>    |                 |   | 56 | 61 |
|        |      | 思茅葛 <i>Pueraria wallichii</i>                   | 64  | 68 |                                     |                 |   |    |    |
|        |      | 大野牡丹 <i>Melastoma imbricatum</i>                | 51  | 57 |                                     |                 |   |    |    |
|        |      | 美丽胡枝子 <i>Lespedeza formosa</i>                  | 50  | 63 |                                     |                 |   |    |    |
|        | 草    | 飞机草 <i>Chromolaena odorata</i> (入侵)             | 67  | 88 | 三角叶风毛菊 <i>Saussurea deltoidea</i>   |                 |   | 67 |    |
|        |      | 苔草 <i>Carex</i> sp.                             | 64  | 55 |                                     |                 |   |    |    |
|        |      | 云南莲座蕨 <i>Angiopteris yunnanensis</i>            | 61  | 55 |                                     |                 |   |    |    |
|        |      | 海金沙 <i>Lygodium japonicum</i>                   | 61  | 53 |                                     |                 |   |    |    |
| 思小山顶路段 | 乔    | 高山榕 <i>Ficus altissima</i>                      | 48  | 49 | 粗丝木 <i>Gomphandra tetrandra</i>     | 38              |   | 47 |    |
|        |      | 滇银柴 <i>Aporosa yunnanensis</i>                  | 43  | 49 |                                     |                 |   |    |    |
|        |      | 鸡骨香 <i>Croton crassifolius</i>                  | 41  | 45 |                                     |                 |   |    |    |
|        |      | 厚皮树 <i>Lannea coromandelica</i>                 | 39  | 43 |                                     |                 |   |    |    |
|        |      | 华冬青 <i>Ilex sinica</i>                          | 34  | 40 |                                     |                 |   |    |    |
|        |      | 厚果美登木 <i>Maytenus pachycarpa</i>                | 30  | 39 |                                     |                 |   |    |    |
|        |      | 葛藤 <i>Pueraria lobata</i>                       | 47  | 49 |                                     |                 |   |    |    |
|        | 灌    | 买麻藤 <i>Gnetum montanum</i>                      | 42  | 45 | 滇南木姜子 <i>Litsea greenmaniana</i>    | 33              |   | 32 |    |
|        |      | 棕叶芦 <i>Thysanolaena maxima</i>                  | 35  | 39 |                                     |                 |   |    |    |
|        |      | 裂叶崖角藤 <i>Rhaphidophora decursiva</i>            | 31  | 39 |                                     |                 |   |    |    |
|        | 草    | 隐穗苔草 <i>Carex cryptostachys</i>                 | 44  | 41 | 蜂斗草 <i>Sonerila cantonensis</i>     |                 |   | 47 |    |
|        |      | 皱叶狗尾草 <i>Setaria plicata</i>                    | 41  | 38 |                                     |                 |   |    |    |
| 样线 5   | 乔    | 榕树 <i>Ficus microcarpa</i>                      | 60  | 71 | 火烧花 <i>Mayodendron igneum</i>       |                 |   | 57 | 62 |
|        |      | 铁刀木 <i>Cassia siamea</i>                        | 58  | 67 |                                     |                 |   |    |    |
|        |      | 火绳树 <i>Helicteres isora</i>                     | 57  | 64 |                                     |                 |   |    |    |
|        |      | 老白花 <i>Bauhinia variegata</i>                   | 57  | 61 |                                     |                 |   |    |    |
|        |      | 林生芒果 <i>Mangifera sylvatica</i>                 | 52  | 56 |                                     |                 |   |    |    |
|        | 灌    | 山蚂蝗 <i>Desmodium concinnum</i>                  | 69  | 79 | 海南草珊瑚 <i>Sarcandra hainanensis</i>  |                 |   | 55 |    |
|        |      | 思茅葛 <i>Pueraria wallichii</i>                   | 64  | 78 |                                     |                 |   |    |    |
|        |      | 鸡骨香 <i>Croton crassifolius</i>                  | 59  | 60 |                                     |                 |   |    |    |
|        |      | 紫花黄檀 <i>Dalbergia assamica</i>                  | 53  | 67 |                                     |                 |   |    |    |
|        | 草    | 飞机草 <i>Chromolaena odorata</i> (入侵)             | 67  | 82 | 铁扫帚 <i>Indigofera bungeana</i>      |                 |   | 66 |    |
|        |      | 苔草 <i>Carex</i> sp.                             | 67  | 60 |                                     |                 |   |    |    |
|        |      | 皱叶狗尾草 <i>Setaria plicata</i>                    | 61  | 56 |                                     |                 |   |    |    |
| 思小山坡路段 | 乔    | 大鱼藤树 <i>Derris robusta</i>                      | 48  | 49 | 马鞍羊蹄甲 <i>Bauhinia brachycarpa</i>   | 41              |   | 49 |    |
|        |      | 云树 <i>Garcinia cowa</i>                         | 39  | 41 |                                     |                 |   |    |    |
|        |      | 八角枫 <i>Alangium chinense</i>                    | 36  | 40 |                                     |                 |   |    |    |
|        |      |                                                 | 31  | 45 |                                     |                 |   |    |    |
|        |      |                                                 |     |    |                                     |                 |   |    |    |
|        | 灌    | 蛇藤 <i>Acacia pennata</i>                        | 39  | 41 | 线柱苣苔 <i>Rhynchoetichum obovatum</i> | 42              |   |    |    |
|        |      | 美丽相思子 <i>Abrus pulchellus</i>                   | 40  | 43 |                                     |                 |   |    |    |
|        |      | 蛇藤等 <i>Acacia pennata</i>                       | 35  | 43 |                                     |                 |   |    |    |
|        | 草    | 地胆草 <i>Elephantopus scaber</i>                  | 49  | 43 | 断线蕨 <i>Colysis hemionitidea</i>     |                 |   | 47 |    |
|        |      | 裂叶崖角藤 <i>Rhaphidophora decursiva</i>            | 43  | 39 |                                     |                 |   |    |    |
|        |      | 星毛蕨 <i>Ampelopteris prolifera</i>               | 43  | 38 |                                     |                 |   |    |    |
|        |      | 芭茅 <i>Miscanthus sinensis</i>                   | 38  | 35 |                                     |                 |   |    |    |
|        |      | 白茅 <i>Imperata cylindrica</i> var. <i>major</i> | 31  | 30 |                                     |                 |   |    |    |

表 2 和表 3 表明, 高速公路沿线各样地(200 m 内) 与其相应参照样地处(1500 m 外)植物群落的构成具有很大相似性, 但在种群数量、类型和重要值等方面存在着一定的差异.

就种群构成而言, 参照样地受人为干扰程度小, 保存了适应样地水热条件的大部分物种, 而公路沿线样地中由于水热条件等大的环境要素与参照样地基本相同, 因此也具有参照样地 60%~100%的优势和亚优势植物物种, 群落类型没有发生根本的变化. 同时, 正是由于高速公路建设的干扰作用及其导致的人为活动的增加, 一方面公路沿线样地较参照样地缺失了很多本土物种, 另一方面却出现了一些与参照样地不同的、与公路干扰作用和人类活动密切相关的其他植物种, 主要为人工栽培种(芒果、柚木和兰桉等)和外来侵入物种(紫茎泽兰和飞机草), 在特定条件下成为了其所在区域的优势种或者亚优势种. 野外考察结果表明, 大保公路沿线已经为紫茎泽兰成功入侵, 而思小公路沿线有飞机草的大量分布.

就种群数量而言, 高速公路沿线 62.5%的样地中构成乔木层和灌木层的优势、亚优势种群的数量明显少于其相应参照样地, 其他 37.5%的样地中乔木层和灌木层的优势、亚优势种群数量与其参照样地相同; 草本植物则恰恰相反, 其在公路沿线各样地(100%)中的优势、亚优势种群的数量均多于其相应参照样地. 种群重要值在公路沿线样地和参照样地的对比情况, 正好与种群数量对比情况相反, 即: 乔木和灌木种群的重要值对比情况满足: 公路沿线 $\geq$ 参照样地, 而草本植物种群满足: 公路沿线 $\leq$ 参照样地. 当然, 这一

规律不适用于紫茎泽兰和飞机草等外来物种, 实测结果表明沿线紫茎泽兰和飞机草等种群的密度、盖度和重要值等指标都远远高于自然生境中, 说明高速公路建设可能是造成生物入侵的重要因素之一.

## 2.2 群落组分变化程度

采用差异性指数定量表示高速公路建设导致的群落组分的变化程度, 差异性指数是与相似性指数相关的一个概念, 定义为 1 与相似性指数的差值, 其计算公式如下:

$$D = \sum_{I=1}^3 D_I \times X_I, \quad D_I = \sum_{i=1}^2 W_i \times S_i, \quad W_i = 1 - \frac{|I_s|}{\sum I_s + L_t + Y_t}, \quad (5)$$

式中,  $D$  为各样地与其参照样地种群构成的差异性指数;  $D_I$  ( $I = 1, 2, 3$ ) 为乔、灌、草各层植物种群构成的差异性指数,  $X_I$  ( $I = 1, 2, 3$ ) 为其影响权重;  $W_i$  ( $i = 1, 2$ ) 为优势种和亚优势种植物构成的差异性指数,  $S_i$  ( $i = 1, 2$ ) 为其影响权重,  $I_s$  表示样地与参照样地相同物种数量,  $L_t$  为公路沿线独有的植物种数,  $Y_t$  为参照样地独有的植物种数.

依据优势种和亚优势种群地位的主次关系, 确定优势种权重为 0.7, 亚优势种权重为 0.3; 采用乔、灌和草各层生物量<sup>[6]</sup>占总生物量的比重作为其影响权重, 对样线 1, 2, 4 和 5 处植物群落的种群构成差异指数进行了计算, 结果见表 4.

表 4 表明, 公路沿线样线 1, 2, 4 和 5 处与其相应参照样地处的植物群落中优势植物种群的差异性指数范围为 0.2~0.42, 亚优势种群的差异性指数范围为 0.11~0.5, 大多情况下(83.3%)优势种群的差异性指数

表 4 高速公路沿线与其参照样地处植物种群构成的差异性指数

| 样地号  | 植被类型 | 权重   | 优势种差异性指数<br>(权重 0.7) | 亚优势种差异性指数<br>(权重 0.3) | 本层综合差异性指数 | 样地综合差异性指数 |
|------|------|------|----------------------|-----------------------|-----------|-----------|
| 样地 1 | 乔木   | 0.94 | 0.20                 | 0.33                  | 0.239     | 0.2411    |
|      | 灌木   | 0.04 | 0.25                 | 0.33                  | 0.274     |           |
|      | 草本   | 0.02 | 0.25                 | 0.33                  | 0.274     |           |
| 样地 2 | 乔木   | 0.95 | 0.29                 | 0.33                  | 0.302     | 0.3011    |
|      | 灌木   | 0.03 | 0.33                 | 0.33                  | 0.33      |           |
|      | 草本   | 0.02 | 0.20                 | 0.33                  | 0.215     |           |
| 样地 4 | 乔木   | 0.97 | 0.29                 | 0.11                  | 0.236     | 0.23882   |
|      | 灌木   | 0.02 | 0.33                 | 0.33                  | 0.33      |           |
|      | 草本   | 0.01 | 0.20                 | 0.33                  | 0.33      |           |
| 样地 5 | 乔木   | 0.98 | 0.42                 | 0.5                   | 0.353     | 0.35115   |
|      | 灌木   | 0.01 | 0.33                 | 0.25                  | 0.306     |           |
|      | 草本   | 0.01 | 0.25                 | 0.25                  | 0.215     |           |

不大于亚优势种群;公路沿线各样地与其参照样地处乔木、灌木和草本等各层植物的差异性指数范围为0.218~0.353,不同植物类型之间的对比规律不明显;公路沿线各样线与其参照样地处群落构成的整体差异性指数范围为0.2411~0.35115,结合地貌条件对不同样地进行比较可知,山腰路段(样地1,4)的差异性指数大于山顶路段(样地2,4),说明公路建设在山腰地貌条件下对植物群落的影响强度更大;两条公路比较,在山顶路段群落的差异性指数基本相等,在山腰路段思小公路大于大保公路。

### 3 群落组分水平格局变化

#### 3.1 优势种群水平格局变化

不同种群相互作用形成群落,其中优势种群是群落识别的标志,对群落结构与格局的形成起着关键作用,因此对公路建设干扰下优势物种水平分布格局的变化进行研究,能够在很大程度上说明高速公路建设对沿线群落水平结构影响的主要特征。

表5和表6是样线1,2,4和5及其参照样地处两

个主要优势种群(表2和表3的共有种中,除入侵物种外重要值最高的)的方差/均值、 $T$ 值、扩散指数和聚块型指数等指标的计算结果,并据此确定了其分布格局的类型,见表5和表6。

表5和表6表明,两条高速公路沿线各选定优势种群的分布格局与其参照样地处明显不同,由高速公路沿线到参照样地处各种群的分布格局均呈现了集群分布→随机分布→均匀分布的变化趋势。从数量统计上分析,两条高速公路沿线选定的4条样地上的24个优势植物种群中,符合集群分布格局的有14个(58.3%),符合随机分布的种群有9个(37.5%),符合均匀分布的种群1个(4.2%);选定的4个参照样地24个优势植物种群的分布格局中,符合集群分布的有5个(20.8%),比高速公路沿线区域减少了9个(37.5%);符合随机分布的有9个(37.5%),与高速公路沿线区域持平;符合均匀分布的植物种群10个(42.7%),比高速公路沿线区域增加了9个(37.5%)。由此可见,参照样地处比高速公路沿线区域有更多的种群呈均匀分布,有更少的种群呈现集群分布,这

表5 大保高速公路沿线优势种群的空间分布格局

| 样地  | 优势种群  | 方差/均值  | $T$ 值 | 扩散指数  | 聚块型指数 | 分布格局 <sup>a)</sup> |
|-----|-------|--------|-------|-------|-------|--------------------|
| 样地1 | 滇青冈   | 7.412  | 61.24 | 2.122 | 2.171 | C                  |
|     | 白皮柯   | 4.987  | 17.13 | 4.137 | 4.212 | C                  |
|     | 马刺    | 10.103 | 18.29 | 1.996 | 2.004 | C                  |
|     | 斑鸠菊   | 1.034  | 18.22 | 1.072 | 1.083 | P                  |
|     | 长穗兔儿风 | 5.794  | 31.24 | 2.532 | 2.466 | C                  |
|     | 白茅    | 3.125  | 27.12 | 3.141 | 3.200 | C                  |
| 参照1 | 滇青冈   | 4.217  | 70.11 | 1.975 | 1.893 | C                  |
|     | 白皮柯   | 3.142  | 54.25 | 2.764 | 2.709 | C                  |
|     | 马刺    | 1.012  | 21.02 | 1.003 | 1.021 | P                  |
|     | 斑鸠菊   | 1.003  | 19.97 | 1.035 | 1.044 | P                  |
|     | 长穗兔儿风 | 4.156  | 33.13 | 2.019 | 2.003 | C                  |
|     | 白茅    | 0.477  | 17.16 | 0.886 | 0.902 | U                  |
| 样地2 | 滇青冈   | 9.997  | 55.51 | 3.814 | 3.912 | C                  |
|     | 多变柯   | 3.771  | 27.14 | 2.573 | 2.602 | C                  |
|     | 马刺    | 6.547  | 18.14 | 1.762 | 1.782 | C                  |
|     | 斑鸠菊   | 7.344  | 26.77 | 2.454 | 2.433 | C                  |
|     | 长穗兔儿风 | 0.866  | 20.86 | 0.711 | 0.698 | U                  |
|     | 白茅    | 1.017  | 1.24  | 1.042 | 1.078 | P                  |
| 参照2 | 滇青冈   | 5.554  | 45.33 | 3.577 | 3.499 | C                  |
|     | 多变柯   | 0.791  | 30.02 | 0.762 | 0.943 | U                  |
|     | 马刺    | 0.995  | 24.88 | 1.037 | 1.062 | P                  |
|     | 斑鸠菊   | 5.124  | 44.51 | 1.489 | 1.511 | C                  |
|     | 长穗兔儿风 | 1.097  | 16.44 | 1.012 | 1.031 | P                  |
|     | 白茅    | 1.008  | 18.99 | 1.007 | 1.002 | P                  |

a) C为集群分布, P为随机分布, U为均匀分布, 下同

表 6 思小高速公路沿线优势种群的空间分布格局

| 样地   | 优势种群  | 方差/均值 | T 值   | 扩散指数  | 聚块型指数 | 分布格局 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 样地 4 | 铁刀木   | 6.664 | 42.42 | 2.331 | 2.347 | C    |
|      | 火绳树   | 4.714 | 24.23 | 1.562 | 1.534 | C    |
|      | 山蚂蝗   | 1.072 | 3.29  | 1.019 | 1.044 | P    |
|      | 思茅葛   | 1.069 | 1.56  | 1.046 | 1.050 | P    |
|      | 云南莲座蕨 | 1.099 | 3.74  | 1.092 | 1.100 | P    |
|      | 苔草    | 0.994 | 2.45  | 0.985 | 1.063 | P    |
| 参照 4 | 铁刀木   | 1.015 | 20.13 | 0.912 | 0.932 | U    |
|      | 火绳树   | 0.842 | 10.25 | 0.824 | 0.851 | U    |
|      | 山蚂蝗   | 1.054 | 2.21  | 1.012 | 0.993 | P    |
|      | 思茅葛   | 0.884 | 23.27 | 0.927 | 0.879 | U    |
|      | 云南莲座蕨 | 1.074 | 2.13  | 1.021 | 1.007 | P    |
|      | 苔草    | 0.911 | 31.12 | 0.843 | 0.772 | U    |
| 样地 5 | 榕树    | 1.577 | 9.09  | 3.192 | 3.213 | C    |
|      | 铁刀木   | 6.788 | 7.41  | 4.117 | 4.121 | C    |
|      | 山蚂蝗   | 1.122 | 8.15  | 1.053 | 1.059 | P    |
|      | 思茅葛   | 1.109 | 12.73 | 1.041 | 1.042 | P    |
|      | 皱叶狗尾草 | 6.342 | 9.86  | 2.704 | 2.732 | C    |
|      | 苔草    | 1.056 | 11.24 | 1.099 | 1.014 | P    |
| 参照 5 | 榕树    | 0.679 | 17.11 | 0.821 | 0.793 | U    |
|      | 铁刀木   | 1.289 | 30.12 | 0.813 | 0.854 | U    |
|      | 山蚂蝗   | 0.981 | 23.06 | 0.714 | 0.802 | U    |
|      | 思茅葛   | 1.034 | 22.15 | 1.023 | 1.039 | P    |
|      | 皱叶狗尾草 | 1.081 | 21.54 | 1.012 | 1.007 | P    |
|      | 苔草    | 0.548 | 20.12 | 0.913 | 0.936 | U    |

在一定程度上说明了高速公路建设加剧了沿线环境因子的不均匀性,有导致植物种群由均匀型或者随机型分布向集群型转化的作用。

比较各选定植物种群的分布格局随距离公路渐远(由公路沿线到参照样地)而变化的趋势可知,选定的 24 个优势植物种群中,由集群型分布格局变为均匀型分布格局的有 6 个(25%);由随机型分布格局转变为均匀型分布格局的有 4 个(16.7%);由集群型分布格局转变为随机型分布格局的有 4 个(16.7%);保持集群型不变的有 4 个(16.7%);保持随机型分布格局不变的有 5 个(20.8%);由均匀型分布格局转变为随机型分布格局的 1 个(4.2%)。比较高速公路沿线与其参照样地处各种群的扩散指数与聚块型指数可知,有 23 个种群(95.8%)的对比结果满足公路沿线样地高于其相应参照样地。可见,高速公路建设在多数情况下有促使沿线植物种群聚集程度加剧,扩散能力增强的趋势。

### 3.2 入侵物种水平格局的变化

根据“生态位空缺假说”<sup>[24]</sup>,干扰生境能为外来

入侵种提供更好的竞争条件。高速公路沿线是重度干扰地区,也是生物入侵的危险区域<sup>[24,25]</sup>。入侵物种在公路沿线的分布状况能够在很大程度上反映公路建设对沿线生态系统的干扰强度与影响特征。

(i) 公路沿线的水平变化。(1) 高度与盖度变化。根据样线 3、6 及其参照样地处入侵种群特征的调查结果,对紫茎泽兰和飞机草在自然样地与人工样地中的分布状况进行了对比(表 7 和表 8)。结果表明,紫茎泽兰和飞机草主要分布在公路沿线的边缘地带(200 m 范围),随着远离公路的影响,自然样地中植被密度逐渐增大,紫茎泽兰和飞机草的平均高度与平均盖度均会下降。在人工样地中,紫茎泽兰和飞机草的分布情况,没有表现出随公路距离增大而减少的趋势。(2) 频度变化。图 2 和图 3 是大保公路沿线紫茎泽兰和思小公路沿线飞机草的分布频度随远离公路而变化的趋势及其与参照样地的对比情况。结果表明,公路沿线紫茎泽兰和飞机草的分布频度远高于其相应参照样地,但在 200 m 范围内没有规律性变化,这说明公路建设可能是造成紫茎泽兰蔓延和飞

表 7 紫茎泽兰平均高度与盖度统计(单位: 平均高度(m)/平均盖度)

| 与公路距离/m | 自然样地   |         | 人工样地    |          |
|---------|--------|---------|---------|----------|
|         | 林地     | 灌丛      | 纯杉林     | 农田       |
| 5       | 0.5/90 | 0.3/40  | 0.8/17  | 0.12/2   |
| 20      | 0.4/25 | 0.25/27 | 0.08/2  | 0.14/2   |
| 50      | 0.3/20 | 0.25/26 | 0.04/5  | 0.7/2    |
| 100     | 0.3/15 | 0.15/14 | 0.25/78 | 0.01/0.5 |
| 200     | 0.2/15 | 0.05/12 | 0.4/69  |          |

表 8 飞机草的平均高度与盖度统计(单位: 平均高度(m)/平均盖度)

| 与公路距离/m | 自然样地    |         | 人工样地   |          |
|---------|---------|---------|--------|----------|
|         | 林地      | 灌丛      | 橡胶林    | 农田       |
| 5       | 0.6/95  | 0.5/50  | 0.4/35 | 0.1/1.5  |
| 20      | 0.45/30 | 0.35/37 | 0.5/20 | 0.15/1.5 |
| 50      | 0.35/25 | 0.25/22 | 0.4/25 | 0.14/0.5 |
| 100     | 0.3/15  | 0.25/18 | 0.7/50 | 0.2/1    |
| 200     | 0.25/15 | 0.15/10 | 0.4/25 |          |

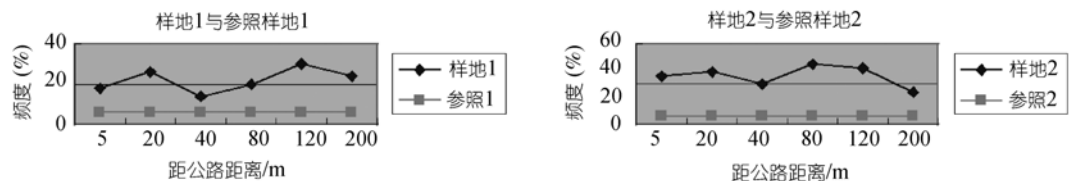


图 2 高速公路沿线紫茎泽兰分布频度及与参照样地的对比情况

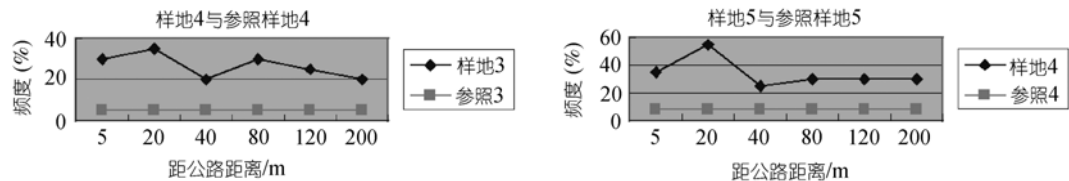


图 3 高速公路沿线飞机草的分布频度及与参照样地的对比情况

机草蔓延的重要原因之一,其沿线 200 m 范围内可能都是其生长适宜范围和易入侵区.不同道路比较,大保公路沿线紫茎泽兰的入侵比思小公路沿线飞机草更为严重,而不同样线也有所差异,普遍而言,山腰路段沿线多于山顶路段.

(ii) 不同用地类型的影响.图 4 和图 5 是各种用地类型条件下紫茎泽兰和飞机草的分布状况,结果表明紫茎泽兰在大保公路沿线区域的总体侵害面积已经达到了土地总面积的 21.38%,危害最重的为草地,侵占比例达 35.89%.其次为荒地(人工撂荒地),侵占比例 29.78%,农田最小,为 0.81%;飞机草在思小公路沿线各用地类型条件下的入侵程度与大保沿线紫茎泽兰的入侵程度相似,但程度略低,其总体侵害面积为土地总面积的 17.6%;草地侵占比例最高,

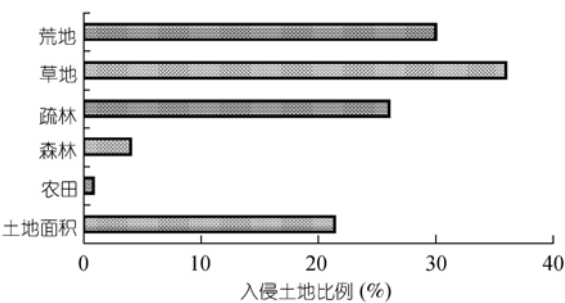


图 4 紫茎泽兰的分布状况

达 30.71%;其次为荒地(人工撂荒地),侵占比例 25.62%;农田入侵比例最小,为 0.71%,这说明公路沿线紫茎泽兰和飞机草等外来物种的入侵受用地类型影响.草地、荒地(人工撂荒地)属于紫茎泽兰和飞机草的易侵入区,而林地<sup>1)</sup>具有较强的荫蔽作用,紫

1) 文中林地分为森林与疏林地,二者以乔木密度进行区分,300 株/hm<sup>2</sup> 以上为森林,以下为疏林



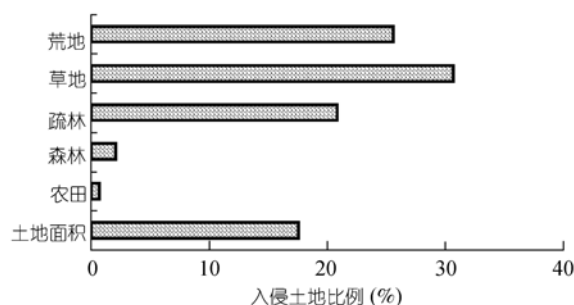


图 5 飞机草的分布状况

茎泽兰和飞机草难以侵入,农田则是由于人为管护的作用,使外来物种入侵机率下降。

#### 4 讨论

高速公路建设干扰下,群落优势种和亚优势种的数量、组成和水平格局等方面的变化能够反映公路建设对沿线群落组分及其水平结构的影响。公路建设过程中乔灌木植物破坏严重<sup>[6,19]</sup>,这必将有效地改善草本植物的光照条件<sup>[26]</sup>,使得其得到发展。有研究表明:高速公路开发后沿线乔、灌两层的物种多样性将下降,而草本物种多样性有上升的迹象<sup>[1,7]</sup>。论文对公路沿线及其参照样地处群落优势和亚优势种群构成情况的对比结果也得到了相似的结论。种群重要值是与种群数量有关的表征物种相对重要程度的指标,其变化情况正好与种群数量相反。

群落水平结构主要指其组分的配置状况或水平格局,环境因子的不均匀是主要成因。公路建设前若环境状况单一,植物种群的每一个体在种群领域内出现的机会相等,此时种群分布为均匀型;公路从中穿过造成了生境破坏和种群分割<sup>[18,19]</sup>,由于公路附近生境的破坏和植物个体的消亡,植物将主要集中在路网中心区域,种群向集群型发展。公路建设改变了沿线气候、地形和土壤等因子的分布,造成了多个微地生境的形成并支持了多个局地种群的存在,群落水平镶嵌性加剧,植物种群将由均匀型或者随机型向集群型转化,其聚集程度加剧,扩散能力增强。需要说明的是,在样线 2 及参照样地 2 处的长穗兔儿风的种群布局模式分别均匀型和随机型,其聚块指数与扩散指数在样线 2 处也小于参照样地 2 处,其原因可能是由于长穗兔儿风生态适应能力强所致,另外也不能剔除测定及计算误差等原因。

紫茎泽兰和飞机草是研究区入侵严重的外来物种<sup>[25,27]</sup>,是伴随人类活动而出现和延伸的。高速公路

等人类活动的生态影响使得沿线出现了较多的生态位空缺,从而增大了紫茎泽兰和飞机草入侵的概率和速度<sup>[24,25,28]</sup>,其在公路沿线分布格局的变化在很大程度上说明了公路建设与种群入侵的相关关系。紫茎泽兰和飞机草的入侵与公路建设及其导致的人为活动强度有关,其平均盖度和平均高度在人工样地较自然样地高,在自然样地中随着距离公路渐远呈现出了下降趋势,可见公路建设是造成沿线紫茎泽兰蔓延的重要原因。紫茎泽兰和飞机草的分布与公路建设造成的生态位空缺正相关,在公路沿线其盖度和高度等指标均高于远离公路地点;其频度在公路沿线 200 m 范围内没有明显变化,原因是紫茎泽兰和飞机草对各种环境因子具有较宽的生态幅和较强的忍耐力<sup>[24,27]</sup>,公路沿线 200 m 范围内都是其适生范围,此时其频度主要取决于公路沿线能够满足其生存的生境(要求条件宽泛)数量。

高速公路沿线各样点生境特征不同,距离公路远近各异,受到的干扰程度也必然不同。一般而言,距离公路近、起伏较大的样地受到的干扰程度大。因此在自然条件下,公路沿线各种群的盖度、高度和频度等指标随着距离公路渐远而增加。两条公路比较,大保公路沿线地形更复杂,地势起伏大,其干扰作用强烈,造成的生态位空缺较大,外来物种也入侵严重;两条公路在山顶路段群落的差异性指数基本相等,在山腰路段思小公路大于大保公路,其原因是群落构成的差异性指数除了受公路干扰作用的强度影响外,还与其所处大环境的水热条件有关,思小公路沿线水热条件好,物种(特别是乔木树种)绝对数量大,受到公路建设干扰前后不同物种的数量也会相对较多。不同地貌类型比较,山腰坡度一般较陡,公路在山腰建设时会造成强烈的山体切割和植被破坏,加之显著的海拔梯度变化,对群落构成和种群的分布格局影响较大,群落组分的变异程度也比较显著,紫茎泽兰和飞机草的分布频度也高于山顶路段。

虽然当前公路建设对群落组分及其水平格局的影响研究还属少见,但其他人类活动引起群落格局变化已经有所涉及,其研究成果可概括为:人类活动将打破沿线种群的均匀分布,使之趋于随机和集群分布<sup>[15,16,29]</sup>,且不同种群的分布格局呈不同的变化趋势<sup>[16,29]</sup>。本研究在整体上符合上述规律,即:多数种群随公路干扰加强聚集度加剧,例外的入侵物种恰证明了不同物种特征的影响;但相比他人研究成

果,其规律性更为明显,主要原因是公路沿线是典型的人类干扰区,其干扰强度有随公路渐远而逐渐减弱的明显趋势和规律。

### 参 考 文 献

- 1 Forman R T T, Sperling D, Bissonette J A, et al. Road ecology: Science and solutions. Washington DC: Inland Press, 2002. 3—397
- 2 Forman R T T. Horizontal processes, roads, suburbs, societal objectives and landscape ecology. In: Landscape ecological analysis: Issues and Applications, 1999. 35—53
- 3 Lydia P, Lander F N, Scatena W L. Impacts of disturbance initiated by road construction in a subtropical cloud forest in the Luquillo experimental forest, Puerto Rico. Silver Forest Ecology and Management, 1998. 33—49
- 4 Canters K, Piepers A, Hendriks H A, et al. Proceedings of the international conference on habitat fragmentation and infrastructure in Maastricht & DenHague Delft. Ministry of Transport, 1995. 15: 61—69
- 5 Thierry L. Effect of a motorway on mortality and isolation of wildlife species. AMBIO, 2000, 29(3): 163—166
- 6 刘杰, 崔保山, 董世魁, 等. 纵向岭谷区高速公路建设对沿线植物生物量的影响. 生态学报, 2006, 26(1): 83—90
- 7 Malin J, Hansen A, Clevenger P. The influence of disturbance and habitat on the presence of non-native plant species along transport corridors. Biological Conservation, 2005, 125(2): 249—259
- 8 朱建军, 杨志峰, 崔保山, 等. 纵向岭谷区公路沿线土壤表层重金属空间分异特征. 生态学报, 2006, 26(1): 146—153
- 9 舒建英, 张世熔, 孙波, 等. 江西兴国水土流失区土壤有机质动态变化. 生态学报, 2005, 25(6): 1240—1246
- 10 赖江山, 张谡, 谢宗强. 三峡库区常绿阔叶林优势种群的结构和格局动态. 生态学报, 2006, 26(4): 1073—1079
- 11 Eccles N S, Esler K J, Cowling R M. Spatial pattern analysis in Namaqualand desert plant communities: evidence for general positive interactions. Plant Ecology, 1999, 142: 71—85
- 12 尉秋实, 王继和, 李昌龙, 等. 不同生境条件下沙冬青种群分布格局与特征的初步研究. 植物生态学报, 2005, 29(4): 591—598
- 13 李昌龙, 赵明, 王玉魁. 不同密度四翅滨藜人工种群的分枝格局可塑性分析. 西北林学院学报, 2007, 22(2): 5—8
- 14 韩照祥, 朱惠娟, 张文辉, 等. 不同地区不同尺度下栓皮栎种群的空间分布格局. 西北植物学报, 2005, 25(6): 1216—1221
- 15 杨梅, 林思祖, 曹光球, 等. 人为干扰对常绿阔叶林主要种群分布格局的影响. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 9—11
- 16 王峥嵘, 高三红, Mary J W, 等. 人为干扰下南亚热带厚壳桂种群分布格局. 生态学报, 2005, 25(12): 3289—3293
- 17 陈辉, 李双成, 郑度. 青藏公路铁路沿线生态系统特征及道路修建对其影响. 山地学报, 2003, 21(5): 559—567
- 18 刘杰, 崔保山, 董世魁, 等. 公路建设干扰下的生态系统变化及其机理. 水土保持通报, 2006, 26(2): 31—36
- 19 孙青, 卓慕宁, 朱利安. 论高速公路建设中的生态破坏及其恢复土壤与环境, 2002, 11(2): 210—212
- 20 Van H D, Bohemen H W, Jansen H, et al. The influence of road infrastructure and traffic on soil, water and air quality. Environmental Management, 2003, 3(1): 50—68
- 21 Davide G B. Biodiversity impact assessment of roads and approach based on ecosystem rarity. Environmental Impact Assessment Review, 2003, 23: 343—365
- 22 何大明, 吴绍洪, 彭华, 等. 纵向岭谷区生态系统变化及西南跨境生态安全研究. 地球科学进展, 2005, 20(3): 338—344
- 23 吴绍洪, 戴尔阜, 何大明. 中国西南纵向岭谷区环境与发展问题初步研究. 地理科学进展, 2005, 24(1): 31—40
- 24 于兴军, 于丹, 马克平. 不同生境条件下紫茎泽兰化感作用的变化与入侵力关系的研究. 植物生态学报, 2004, 28(6): 773—780
- 25 陈艳. 凉山在西部大开发中的生物入侵风险-紫茎泽兰的启示. 西南民族大学学报(自然科学版), 2003, 29(3): 352—355
- 26 谢会成, 宋金斗, 姜志林. 栓皮栎林内的光照分布及植物的光台特性研究. 福建林学院学报, 2004, 24(1): 21—24
- 27 郑元超, 冯玉龙. 西双版纳两种生态特性不同的外来草本植物对生长环境光强的适应策略. 生态学报, 2005, 25(4): 727—733
- 28 王银朝, 赵宝玉, 樊泽锋, 等. 紫茎泽兰及其危害研究进展. 动物医学研究进展, 2005, 26(5): 45—48
- 29 Perkins T E, Matlack G R. Human-generated pattern in commercial forests of southern Mississippi and consequences for the spread of pests and pathogens. Forest Eco1 Manag, 2002, 157: 143—154