

云南省南部山地7种主要入侵植物沿公路两侧的扩散格局

赵金丽^{1,2} 马友鑫^{1*} 朱 华¹ 李红梅¹ 刘文俊¹ 李增加^{1,2}

1 (中国科学院西双版纳热带植物园, 云南昆明 650223)

2 (中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 公路被认为是促进入侵植物扩散的主要通道之一。为了揭示公路与植物入侵的关系, 我们在云南省北热带和南亚热带地区选择13条公路, 按照公路性质、修建年代以及干扰历史将公路分为高、中、低3个干扰水平, 研究了7种主要入侵植物在公路两侧的扩散格局, 以及环境因素(干扰、光照、坡向、气候带)对扩散格局的影响。结果表明: 紫茎泽兰(*Eupatorium adenophorum*)、飞机草(*E. odoratum*)、胜红蓼(*Ageratum conyzoides*)和肿柄菊(*Tithonia diversifolia*)的密度以及紫茎泽兰的频度沿公路扩散格局呈明显的单峰变化, 峰值一般都出现在4 m以内。高干扰公路两侧, 紫茎泽兰、飞机草、胜红蓼、肿柄菊与金腰箭(*Synedrella nodiflora*)的密度以及紫茎泽兰、飞机草、胜红蓼、肿柄菊的频度均明显高于中、低干扰公路, 说明高干扰公路比中、低干扰公路更有利于促进植物入侵。高光水平下紫茎泽兰、飞机草、胜红蓼的密度以及紫茎泽兰、胜红蓼和金腰箭的频度明显大于中、低光水平, 说明高光水平显著促进公路两侧的这4种入侵植物向远距离扩散。紫茎泽兰、胜红蓼与金腰箭的密度在阳坡显著高于阴坡。紫茎泽兰与肿柄菊主要出现在南亚热带, 而飞机草与金腰箭主要出现在北热带, 胜红蓼与赛葵(*Malvastrum coromandelianum*)在两种气候带中均有出现。羽芒菊(*Tridax procumbens*)在公路两侧出现的频率与密度均很低, 无统计学意义。因此, 公路两侧的生境应作为防治外来植物入侵的重点, 提高公路两侧本地植被郁闭度将有利于控制紫茎泽兰等外来植物的进一步扩散。

关键词: 公路效应, 外来入侵植物, 廊道, 环境因素, 入侵格局

Invasion patterns of seven alien plant species along roadsides in southern mountainous areas of Yunnan Province

Jinli Zhao^{1,2}, Youxin Ma^{1*}, Hua Zhu¹, Hongmei Li¹, Wenjun Liu¹, Zengjia Li^{1,2}

1 Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223

2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: Roads serve multiple functions that enhance exotic species invasion. In this paper, we examined the roles of disturbance, light availability, slope aspect, and climate in explaining density and frequency of exotic invasive plants. We analyzed the effect of main environmental factors along 13 roads with different levels of anthropological disturbances (heavy, moderate, and light) in the north tropical and south subtropical mountainous zones in Yunnan Province. The results demonstrated that density of four species, *Eupatorium adenophorum*, *E. odoratum*, *Ageratum conyzoides* and *Tithonia diversifolia*, and frequency of *E. adenophorum* were significantly associated with distance from roads. The curves of these four alien plants all presented a single-peak pattern, and their maximum abundance occurred within 4 m of roads. These four alien plants invaded native plant communities from primary colonization points along road margins. Density of *E. adenophorum*, *E. odoratum*, *A. conyzoides*, *T. diversifolia* and *Synedrella nodiflora* and frequency of *E. adenophorum*, *E. odoratum*, *A. conyzoides* and *T. diversifolia* tended to be significantly higher along highly disturbed

roads than moderately and lightly disturbed roads, indicating that plant communities adjacent to highly disturbed roads might be more prone to invasion. Density of *E. adenophorum*, *E. odoratum* and *A. conyzoides* and frequency of *E. adenophorum*, *A. conyzoides* and *S. nodiflora* were significantly higher in areas with high light level than those that had medium or low light levels. *E. adenophorum*, *E. odoratum* and *A. conyzoides* might obviously invade farther in habitats along roads that had high light level. Density of *E. adenophorum*, *A. conyzoides* and *S. nodiflora* were significantly higher on warm aspects than on cool aspects. *E. adenophorum* and *T. diversifolia* were mainly distributed in the south subtropical mountainous zones, while *E. odoratum* and *S. nodiflora* were mainly in the north tropical mountainous zones. *A. conyzoides* and *Malvastrum coromandelianum* were distributed in both zones. *Tridax procumbens* were very few along roadsides, which had no statistical significance. Management of roadside habitats should be considered a key to preventing and controlling alien plant invasion, and the maintenance of a dense canopy of native vegetation would benefit control of alien invasive plants.

Key words: road effect, alien invasive plant, corridor, environmental factor, invasion pattern

生物入侵已经引起全球生态学家的广泛关注,被认为是仅次于栖息地破坏导致全球生物多样性减少的第二大原因(Everett, 2000),并且已被认为是一个世界范围的重大环境问题(Everett, 2000; 陈兵和康乐, 2003)与经济问题(Pimentel *et al.*, 2001)。近年来,随着道路生态学的不断发展,越来越多的研究关注道路对植物物种组成的影响(Angold, 1997; Trombulak & Frissell, 2000; Gelbard & Belnap, 2003; Godefroid & Koedam, 2004),尤其关注公路两侧外来入侵种的扩散与定居格局(Tyser & Worley, 1992; Greenberg *et al.*, 1997; Parendes & Jones, 2000; Williamson & Harrison, 2002; Flory & Clay, 2006)。这些格局一方面反映公路两侧本身环境条件的差异,另一方面说明道路作为外来植物繁殖体的扩散通道(Amor & Stevens, 1976; Lonsdale & Lane, 1994)以及人类干扰活动的渠道(Greenberg *et al.*, 1997),促进了外来植物入侵。国内除少数研究关注公路两侧紫茎泽兰的扩散格局(Lu & Ma, 2006; 张黎等, 2007)外,有关公路两侧外来植物入侵的专门研究还比较少。

外来入侵植物已经严重危害云南的热带和亚热带生态系统,对生物多样性造成了极大的影响(徐成东和陆树刚, 2006)。本文选择在云南北热带、南亚热带分布较广的紫茎泽兰(*Eupatorium adenophorum*)、飞机草(*E. odoratum*)、胜红蓼(*Ageratum conyzoides*)、肿柄菊(*Tithonia diversifolia*)、金腰箭(*Synedrella nodiflora*)、羽芒菊(*Tridax procumbens*)和赛葵(*Malvastrum coromandelianum*) 7种入侵植物(李振宇和解焱, 2002; 王四海等, 2004; 徐海根和强胜, 2004; 郝建华和强胜, 2005; 徐成东和陆树刚,

2006; 徐成东等, 2006)为研究对象,探讨它们在公路两侧的扩散格局,以及环境因素(人类干扰、光照、坡向和气候带)对它们沿公路扩散格局的影响,揭示植物入侵与公路的关系,为外来入侵植物防治和生态恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

选择云南省典型北热带和南亚热带地区的3条主要路线:(1)滇南地区的宁洱—普洱—景洪—勐海;(2)滇西南地区的梁河—盈江—潞西;(3)滇东南地区的开远—蒙自—屏边—河口。这3条路线是云南省3个主要的国家级口岸通道,每年过往车流量大,公路受干扰严重(图1)。其中具有北热带特征的地区有景洪市、河口县、屏边县和盈江县,平均公路密度分别是0.24、0.60、1.0与0.42 km/km²;具有南亚热带特征的地区有宁洱县、勐海县、普洱市、开远市、蒙自县、梁河县和潞西市,平均公路密度分别是0.30、0.49、0.89、0.47、0.35、0.80和0.83 km/km²(中共云南省委政策研究室, 2001)。

1.2 研究方法

从上述3条主要路线中选取自然植被分布较集中的公路路段作为取样地段,于2007年1—4月进行调查。取样地段要求至少沿线连续20 km内无成片农业用地、橡胶地和人工建筑,并且路旁25 m内无沟渠、陡崖和堤坝。共选择取样地段13个,依据公路性质、修建年代以及历史干扰的主要事件等将其分为高、中、低3个干扰水平(表1)。

随机选择取样地段公路的一侧,每隔1 km设置

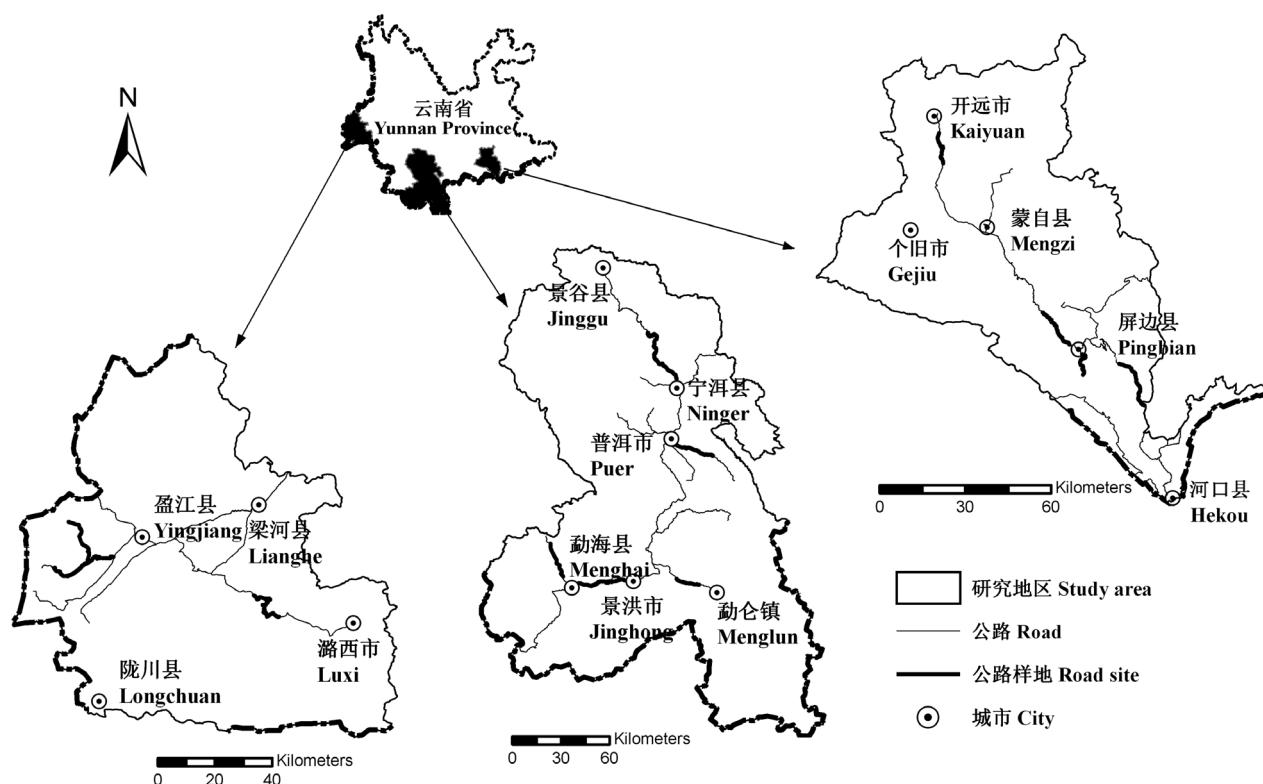


图1 研究地点示意图

Fig. 1 Map showing the studied sites

1条样带; 每条样带以公路路肩为起点, 垂直于公路向外延伸, 在距离路肩的0、2、4、9、14、24 m处取样)。分别在每个距离点的中心、左、右各设置1个1 m×1 m的样方, 各个样方之间距离至少为1 m, 记录每个样方的经纬度、海拔、坡向和郁闭度。统计每个样方内7种入侵植物的株数或地上部分分枝数(仅对无性繁殖的物种), 并以每个取样地段为单位, 统计这7种入侵植物出现的频度。样带上每个距离点的3个样方各调查指标的平均值作为1个重复进行统计分析。

气候带的划分主要依据样带所在路段的纬度气候和海拔气候, 把云南南部、东南、西南地区海拔800 m以下归入北热带, 800–1,500 m为南亚热带(中共云南省委政策研究室, 2001)。植被郁闭度分为3个等级: 0–30%, 31–70%和71–100%, 分别对应光的高、中、低3个等级。坡向分为西坡(45°–135°)、南坡(135°–225°)、东坡(225°–315°)、北坡(315°–45°)

以及平地。坡度对紫茎泽兰的入侵没有显著影响(卢志军和马克平, 2004), 因此, 本文不考虑坡度因子。

采用通用线性模型(GLM)对7个物种的密度与频度(因变量)分别进行多因素方差分析, 自变量包括到公路的距离、人为干扰、光水平、坡向、气候带等, 分析7个入侵种沿公路的扩散格局, 以及环境因素对扩散格局的影响。其中密度数据作对数转换, 百分数的数据进行反正弦变换, 以降低不同取样地段间的方差异质性, 提高模型的适合度。

数据处理和作图在Excel和SigmaPlot10.0中完成, 统计过程使用SPSS13.0 (for Windows)进行。

2 研究结果

2.1 到公路的距离对外来植物入侵的影响

到公路的距离对紫茎泽兰、飞机草、胜红蓼和肿柄菊的密度有显著影响, 但只对紫茎泽兰的频度有显著影响($P < 0.05$)(表2), 这种影响以南亚热带的

表1 取样地段的特征
Table 1 The characteristics of roads selected from the mountainous regions of south Yunnan Province

干扰等级 Disturbance level	公路段名 Road segment name	公路等级 Road grade	样方数 Number of quadrats	修建时间 Time of construction	历史干扰事件 Disturbance history
高干扰 Highly disturbed	宁洱—景谷 Ninger-Jinggu	国道323 State highway 323	54	20世纪60年代或以前 Before or in the 1960s	1996–2002年改修柏油路 Improved to blacktop between 1996 and 2002
	勐仑—景洪 Menglun-Jinghong	国道213 State highway 213	14	20世纪60年代或以前 Before or in the 1960s	1984年改修柏油路 Improved to blacktop in 1984 20世纪90年代大修 Heavy repair in the 1990s
	景洪—勐海 Jinghong-Menghai	国道214 State highway 214	28	20世纪60年代以前 Before or in the 1960s	1979–1981年改修柏油路 Improved to blacktop between 1979 and 1981 20世纪90年代大修 Heavy repair in the 1990s
	鸡街—开远 Jijie-Kaiyuan	国道326 State highway 326	13	20世纪60年代 In the 1960s	20世纪80年代大修 Heavy repair in the 1980s 1992年改修柏油路 Improved to blacktop in 1992
	蒙自—屏边 Mengzi-Pingbian	国道326 State highway 326	14	20世纪60年代 In the 1960s	20世纪80年代大修 Heavy repair in the 1980s 1992年改修柏油路 Improved to blacktop in 1992
中度干扰 Moderately disturbed	普洱—江城 Puer-Jiangcheng	省道214 Provincial Highway 214	35	1959–1967	2004年改修柏油路 Improved to blacktop in 2004
	河口—屏边 Hekou-Pingbian	省道235 Provincial highway 235	14	20世纪70年代 In the 1970s	90年代改修为柏油路 Improved to blacktop in the 1990s
	盈江—铜壁关 Yingjiang-Tongbiguan	省道318 Provincial highway 318	30	20世纪70年代 In the 1970s	2005–2006年改修柏油路 Improved to blacktop between 2005 and 2006
	梁河—潞西 Lianghe-Luxi	省道 Provincial highway	23	20世纪70年代 In the 1970s	1999–2000年改修柏油路 Improved to blacktop between 1999 and 2000
	勐海—勐阿 Menghai-Meng'a	县级路 County road	26	20世纪70年代 In the 1970s	2004年改修柏油路 Improved to blacktop in 2004
	勐海—景洪 Menghai-Jinghong	县级路 County road	10	1999–2004	2004年开始通车 Opened in 2004
	昔马—盈江 Xima-Yingjiang	乡村弹石路 Sandstone road	20	1974	N/A
低干扰 Lightly disturbed	屏边—大围山 Pingbian-Daweishan	乡村弹石路 Sandstone road	13	20世纪70年代 In the 1970s	N/A

高干扰公路表现最显著。如图2所示, 在高干扰公路两侧, 这4种入侵植物的密度以及紫茎泽兰的频度随公路距离变化均呈现明显的“单峰”扩散格局, 峰值都在4 m以内。金腰箭、赛葵的密度以及飞机草、胜红蓼、肿柄菊和赛葵的频度在高干扰公路两侧也呈“单峰”扩散格局, 但扩散趋势不显著; 羽芒菊在公路两侧出现的频率与密度均很低, 无统计学意义(图2)。

2.2 人为干扰对外来植物入侵的影响

表2结果显示, 人为干扰对紫茎泽兰、飞机草、

胜红蓼、肿柄菊和金腰箭的密度, 对紫茎泽兰、飞机草、胜红蓼和肿柄菊的频度有显著影响($P<0.05$)。其中低干扰公路主要是分布在高海拔(1,600–2,100 m)的弹石路, 因受高海拔限制入侵植物仅有紫茎泽兰出现。在高干扰公路两侧, 紫茎泽兰的密度与频度均显著大于中、低干扰公路; 飞机草、胜红蓼、肿柄菊、金腰箭的密度以及飞机草、胜红蓼和肿柄菊的频度显著大于中干扰公路; 金腰箭的频度和赛葵的密度与频度虽然也大于中干扰公路, 但这种变化趋势不显著(图3)。

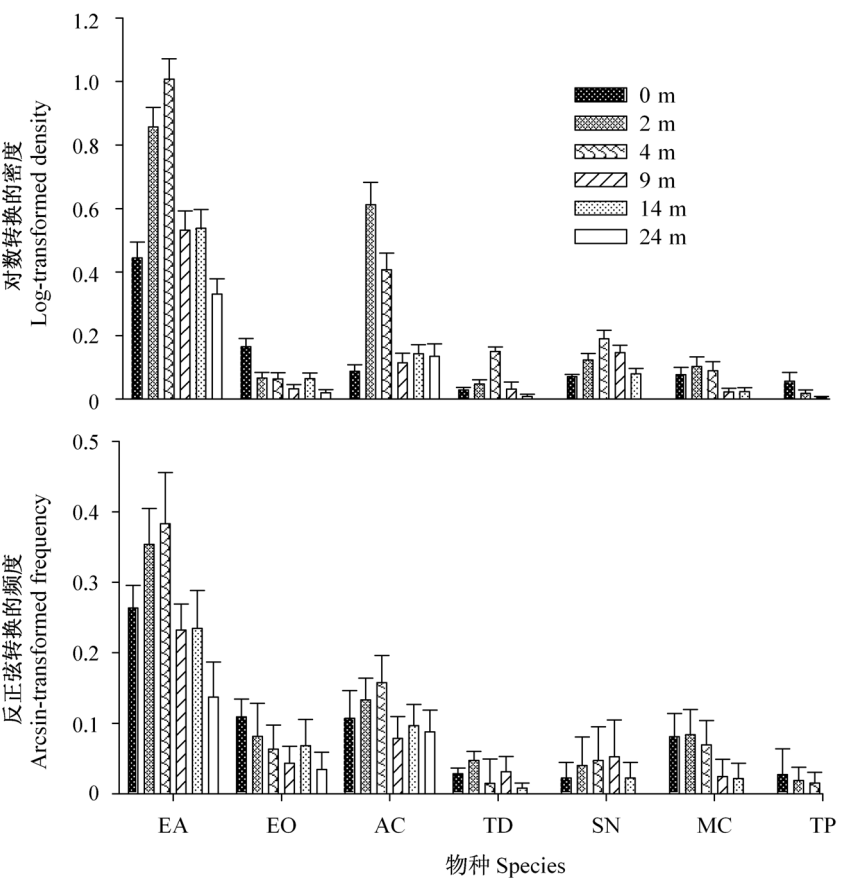


图2 在南亚热带高干扰公路两侧不同距离对7种外来植物密度和频度的影响(均值±标准误)。EA: 紫茎泽兰; EO: 飞机草; AC: 胜红蓼; TD: 肿柄菊; SN: 金腰箭; MC: 赛葵; TP: 羽芒菊。
Fig. 2 Effect of distance from roads on the density and frequency of seven alien plants along highly disturbed roads in the south subtropical zone (mean±SE). EA, *Eupatorium adenophorum*; EO, *E. odoratum*; AC, *Ageratum conyzoides*; TD, *Tithonia diversifolia*; SN, *Synedrella nodiflora*; MC, *Malvastrum coromandelianum*; TP, *Tridax procumbens*.

2.3 光水平对外来植物入侵的影响

光水平对紫茎泽兰、飞机草、胜红蓼的密度, 对紫茎泽兰、胜红蓼和金腰箭的频度影响显著 ($P<0.05$)(表2)。如图4所示, 在不同干扰水平的公路两侧, 紫茎泽兰、飞机草、胜红蓼的密度以及紫茎泽兰、胜红蓼和金腰箭的频度均随着光水平的降低而降低, 并且在高干扰公路两侧这种变化趋势更显著。肿柄菊、金腰箭与赛葵的密度以及飞机草、肿柄菊与赛葵的频度也是高光水平下大于中光水平, 但变化趋势不显著。

距离与光水平的交互作用对紫茎泽兰、飞机草、胜红蓼密度的影响显著 ($P<0.05$), 对7种外来植物的频度均无显著影响 ($P>0.05$)(表2)。如图5A所示,

在中干扰公路两侧, 紫茎泽兰的密度峰值由高光水平的4 m平移至中、低光水平的2 m, 扩散最远距离由高光水平的大于24 m缩短至低光水平的9 m。而对于飞机草与胜红蓼来说, 二者在高光水平下扩散的距离几乎都大于中、低光水平, 而且在低光水平下出现得都很少。

2.4 坡向对外来植物入侵的影响

坡向对紫茎泽兰、飞机草、胜红蓼与金腰箭的密度有显著影响 ($P<0.05$), 但对7种外来植物的频度均没有显著影响 ($P>0.05$)(表2)。如图6所示, 在南坡或西坡紫茎泽兰、胜红蓼与金腰箭的密度均显著大于其他坡向, 而飞机草的密度在东坡与北坡明显大于其他坡向; 肿柄菊、赛葵的密度以及紫茎泽兰、

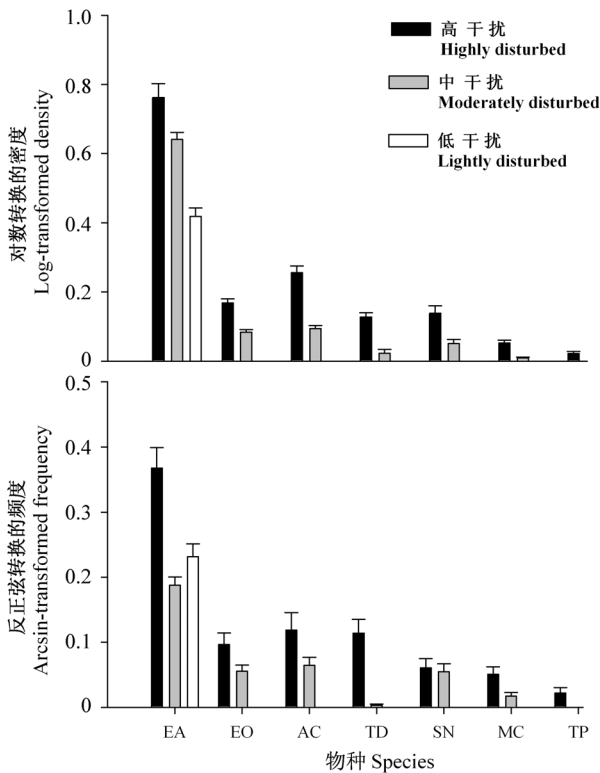


图3 人类干扰对7种外来植物沿公路两侧分布的密度和频度的影响(均值±标准误)。种名的缩写同图2。
Fig. 3 Effect of anthropological disturbances on the density and frequency of seven alien plants (mean±SE). The abbreviations of the seven alien species are the same as in Fig. 2.

胜红蓟和肿柄菊的频度也都表现为南坡或西坡大于其他坡向,但这种差异不显著;坡向对飞机草、金腰箭、赛葵的频度没有影响(表2)。

坡向与光水平的交互作用对紫茎泽兰、飞机草、胜红蓟的密度,对紫茎泽兰与胜红蓟的频度有显著影响($P<0.05$)(表2)。如图7所示,在各个坡向,高光水平下紫茎泽兰、飞机草、胜红蓟的密度以及紫茎泽兰与胜红蓟的频度几乎都明显大于中、低光水平;在不同光水平下,南坡或西坡紫茎泽兰、胜红蓟的密度均大于其他坡向。

2.5 不同气候带上外来植物的入侵

紫茎泽兰、飞机草、胜红蓟、肿柄菊与金腰箭的密度在两种气候带下的分布有显著差异,前4个种的频度在两种气候带下的分布也有显著差异($P<0.05$)(表2)。如图8所示,紫茎泽兰与肿柄菊(包括密度与频度)主要出现在南亚热带,而飞机草与金

表 2 不同生态因子对 7 种外来植物密度和频度影响的方差分析
Table 2 ANOVA analysis for the effect of ecological factors on density and frequency of seven alien plants

Independent variable	紫茎泽兰		飞机草		胜红蓟		肿柄菊		金腰箭		赛葵		羽芒菊	
	Density	Frequency	Density	Frequency	Density	Frequency	Density	Frequency	Density	Frequency	Density	Frequency	Density	Frequency
人类干扰 Anthropological disturbance	28.680***	12.448***	18.617***	2.535*	217.531***	24.763***	112.856***	21.717***	19.878***	0.734	2.604	1.599	1.211	0.260
与公路距离 Distance from road	73.663***	9.890***	10.971***	1.900	5.573***	0.668	3.653**	0.295	0.679	0.780	1.262	1.133	0.986	0.488
光水平 Light level	17.443***	6.679**	8.286***	1.522	10.802***	4.347*	2.414	0.697	0.127	5.322**	2.388	2.413	1.266	0.929
坡向 Aspect	6.456***	1.830	5.008**	0.952	4.213**	1.262	2.148	0.711	5.823***	0.504	1.348	0.593	0.581	0.141
气候带 Climatic zone	273.413***	22.829***	401.445***	98.407***	8.242**	8.389**	292.056***	71.633***	34.691***	3.016	0.210	1.393	3.300	0.445
距离×光水平 Distance × Light level	8.786***	0.722	2.701**	0.733	2.884**	0.341	1.033	0.325	1.509	0.559	1.525	0.829	1.610	0.690
光水平×坡向 Light level × Aspect	10.170***	3.762**	7.891***	1.780	11.435***	2.105*	1.304	0.710	2.093	1.561	1.393	0.805	1.351	0.849

^a表中的数字表示各自变量在GLM模型中的F值,种名缩写同图2。* $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$ 。
^a Numbers in the table indicate F values of each independent variable in GLM ANOVA model. The abbreviations of the seven alien species are the same as in Fig. 2. * $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$.

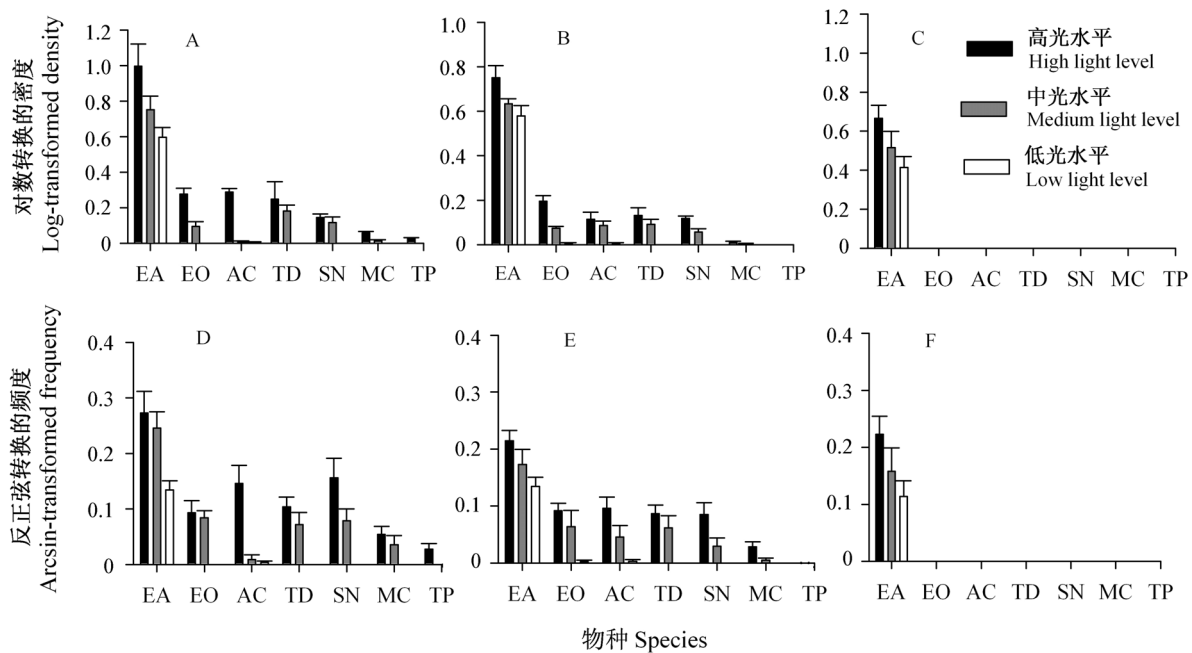


图4 光照条件对不同干扰强度公路两侧7种外来植物密度(A、B、C)和频度(D、E、F)的影响(均值±标准误)。A、D: 高干扰; B、E: 中干扰; C、F: 低干扰。种名的缩写同图2。
Fig. 4 Effect of light availability on the density and frequency of seven alien plants (mean±SE). A and D, Highly disturbed; B and E, Moderately disturbed; C and F, Lightly disturbed. The abbreviations of the seven alien species are the same as in Fig. 2.

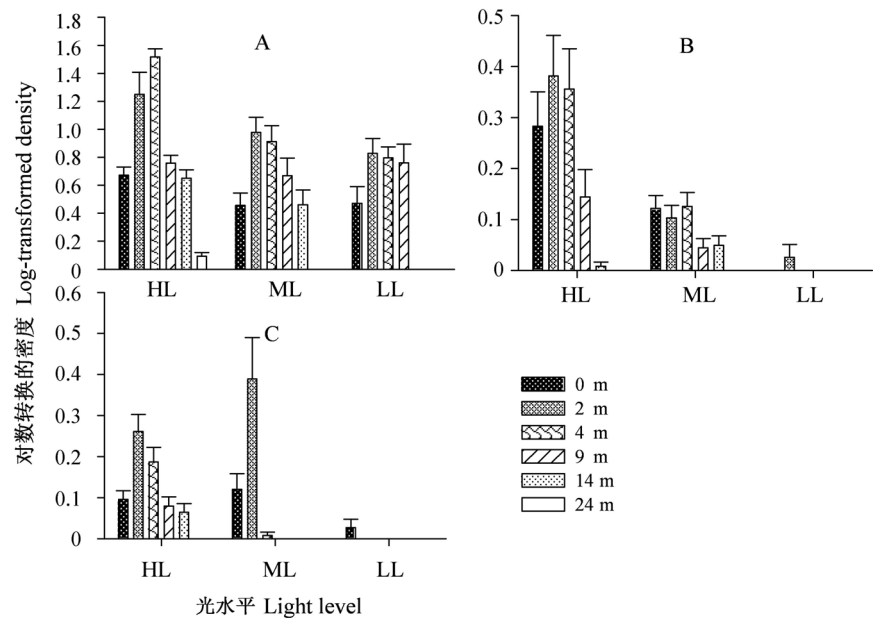


图5 到公路的距离与光水平的交互作用对紫茎泽兰(A)、飞机草(B)与胜红蓟(C)密度的影响(均值±标准误)。HL: 高光水平; ML: 中光水平; LL: 低光水平。
Fig. 5 Interaction of distance from road and light level on the density of *Eupatorium adenophorum* (A), *E. odoratum* (B) and *Ag-eratum conyzoides* (C) (mean±SE). HL, High light level; ML, Medium light level; LL, Low light level.

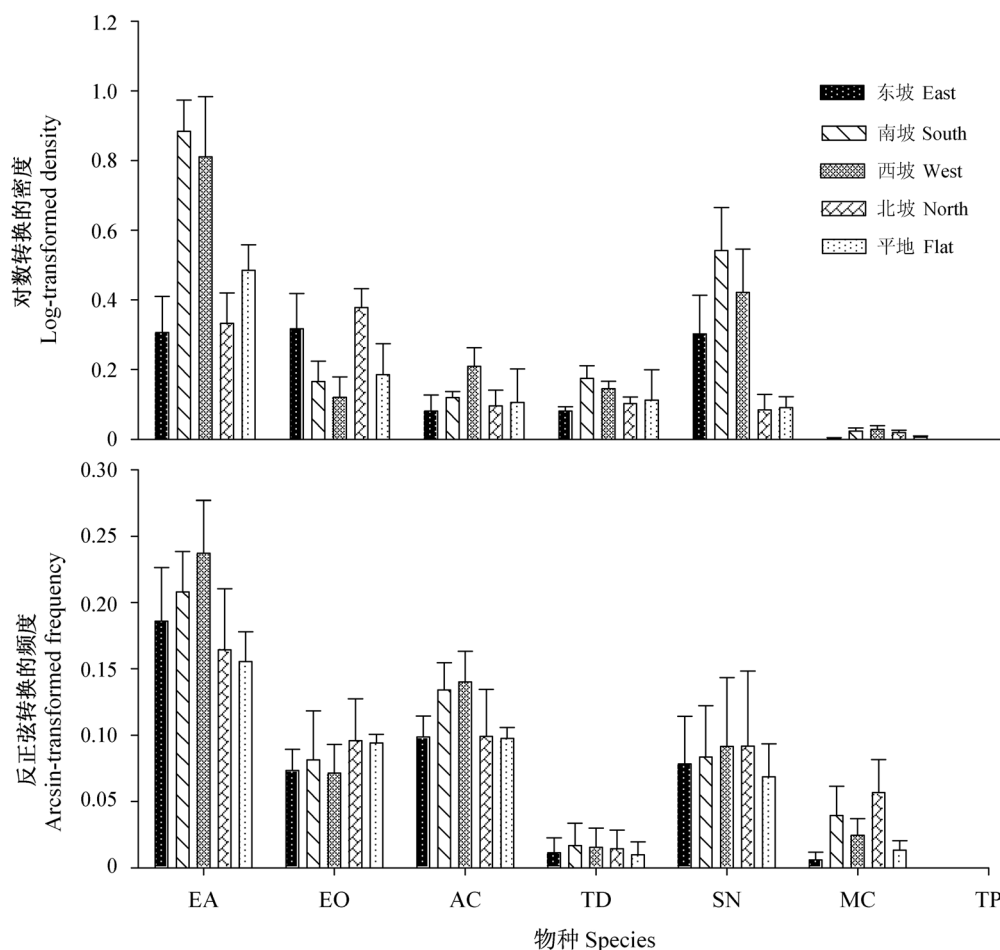


图6 高光水平下坡向对中干扰公路两侧7种外来植物密度和频度的影响(均值±标准误)。种名缩写同图2。

Fig. 6 Effect of aspect on the density and frequency of seven alien plants in habitats along moderately disturbed roads that had high light level (mean $\pm$ SE). The abbreviations of the seven alien species are the same as in Fig. 2.

腰箭(包括密度与频度)主要出现在北热带, 胜红蓼与赛葵在两种气候带下均有出现。

3 讨论

3.1 植物入侵与公路的关系

本研究所选择的7个入侵种中, 紫茎泽兰、飞机草、胜红蓼、肿柄菊等4种在高干扰公路两侧具有明显的“单峰”扩散格局, 峰值一般出现在4 m以内, 这与 Amor 和 Stevens (1976)、Milberg 和 Lamont (1995)、Tyser 和 Worley (1992) 以及 Watkins 等 (2003) 等的研究基本一致。而 Flory 和 Clay (2006) 在对印第安那州落叶林内的研究中却发现入侵种密度与到公路距离呈负相关, 0 m 处密度最高。这种负相关关系表明, 外来杂草入侵自然植物群落的初始点是公路边缘 (Banks *et al.*, 2004)。

不同等级的公路对外来植物入侵的影响程度不同, 其中高等级公路更能促进外来植物入侵。主要原因是: (1) 高等级公路由于频繁的交通运输与路面养护活动, 更易引入外来植物的种子, 从而改变路旁种子库; (2) 高等级公路由于路面填充物的增加, 其边缘的土壤深度增加, 而且纹理更细、肥性更好 (Greenberg *et al.*, 1997), 从而更有利于植物生长; (3) 高等级公路受干扰程度更高且路缘更宽, 从而降低公路下垫面的蒸发, 并向路缘集中渗透雨水, 因而比初级路更容易保持湿润的生境 (Johnson *et al.*, 1975; Holzaphel & Schmidt, 1990)。

此外, 公路的设计与养护活动可在路旁创造多样化的生境, 有利于包括外来种在内的不同物种的生存 (Bugg *et al.*, 1997)。因此, 相对于中、低干扰公路, 高干扰公路邻近植被受人类更频繁干扰以及

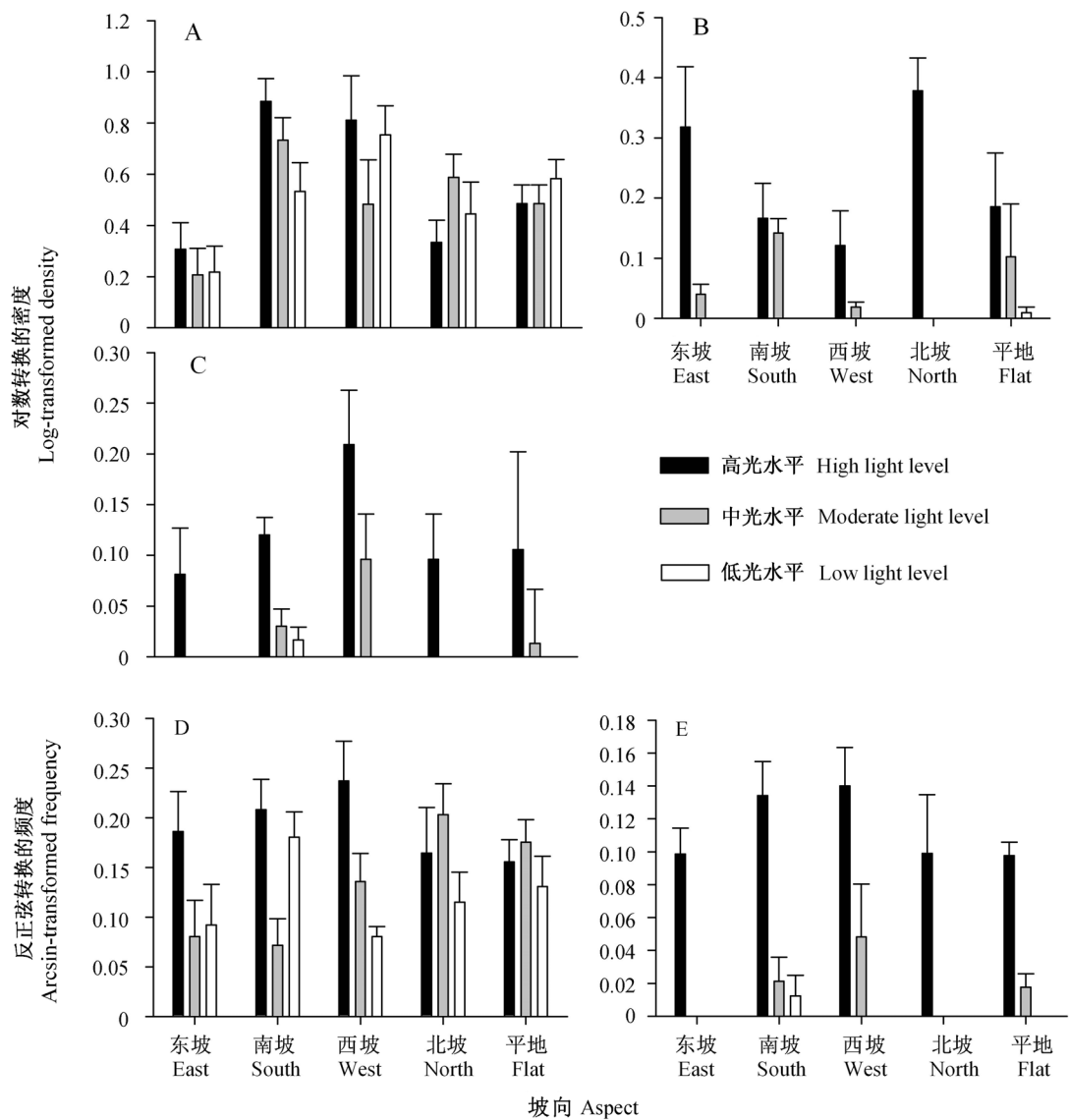


图7 坡向与光水平对中干扰公路两侧外来植物紫茎泽兰(A)、飞机草(B)、胜红蓟(C)密度与紫茎泽兰(D)和胜红蓟(E)频度的影响(均值±标准误)。

Fig. 7 Interaction of aspect and light level on the density of *Eupatorium adenophorum* (A), *E. odoratum* (B) and *Ageratum conyzoides* (C), and frequency of *Eupatorium adenophorum* (D) and *Ageratum conyzoides* (E) along moderately disturbed roads (mean ± SE).

外来植物种子的引入时间更长(Gelbard & Belnap, 2003), 路旁适宜更多外来植物的入侵与潜在扩散。

3.2 不同入侵植物的公路扩散格局

本研究所选择的7个入侵种中, 紫茎泽兰、飞机草、胜红蓟与肿柄菊等4种都具有如下特征: (1)结实率高、繁殖速度快; (2)瘦果小且具有冠毛或带锯齿的鳞片, 易随风、流水或交通工具以及人畜等传

播; (3)能分泌化感物质, 抑制邻近植物生长, 使昆虫拒食; (4) 紫茎泽兰、飞机草与肿柄菊还可以通过较强的克隆繁殖快速扩散蔓延(李振宇和解焱, 2002; 王四海等, 2004; 徐海根和强胜, 2004; 郝建华和强胜, 2005)。这些特征符合“理想”入侵植物的特征(Rejmanek & Richardson, 1996)。再加上公路沿线较大的车流量、雨水径流以及裸露场地等有利

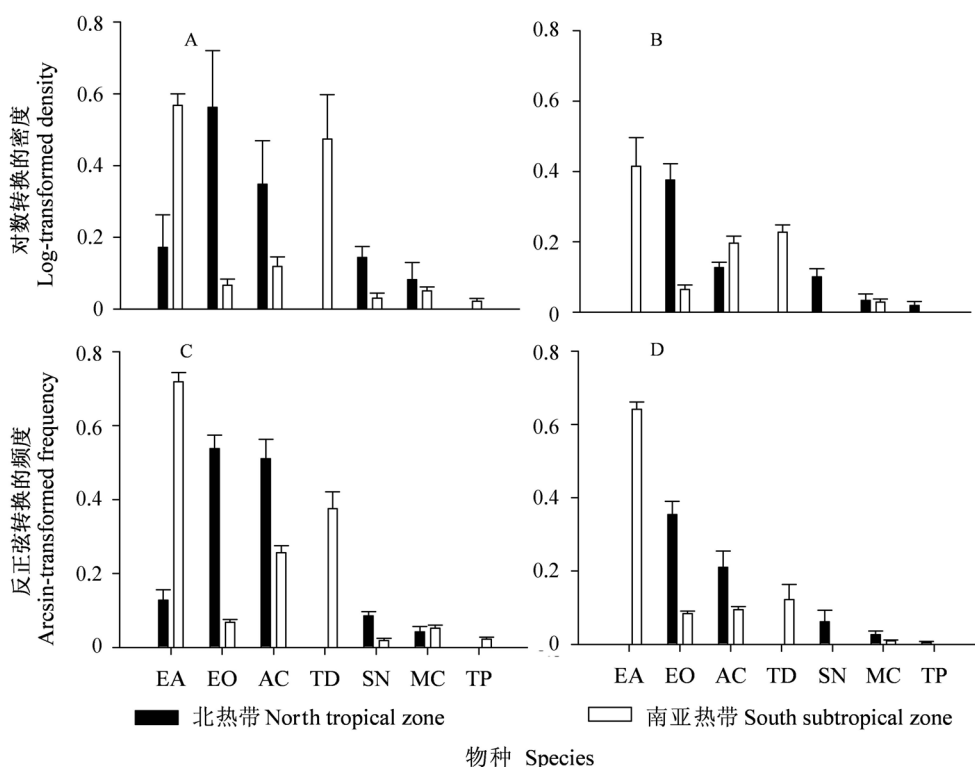


图8 7种外来植物在云南北热带和南亚热带地区沿公路两侧的密度(A, B)和频度(C, D)的对比(均值±标准误)。A、C: 高干扰; B、D: 低干扰。种名的缩写同图2。

Fig. 8 Comparison of the density (A, B) and frequency (C, D) of seven alien plants between the north tropical zone and the south subtropical zone (mean ± SE). A and C, Heavily disturbed roads; B and D, Moderately disturbed roads. The abbreviations of the seven alien species are the same as in Fig. 2.

于种子传播 (Trombulak & Frissell, 2000; Myers *et al.*, 2004), 路旁营养丰富的土壤(Trombulak & Frissell, 2000)、充足的阳光(Parendes & Jones, 2000; Watkins *et al.*, 2003)也为这些外来物种生长创造了适宜条件。它们一旦成功定居路旁生境, 将一方面通过分泌化感物质来抑制邻近植物生长, 另一方面通过快速的有性与无性繁殖不断向远距离扩散蔓延。而赛葵(吴征镒等, 2003)、金腰箭与羽芒菊(彭华, 个人通讯)的入侵植物的特征不明显, 这可能是影响它们沿公路扩散格局不明显的因素之一。

这种不同入侵种之间沿公路两侧分布格局的差异可能是由物种本身的特性和各种不同环境因子的共同作用造成的。如繁殖体的生产力与分布、萌发的成功率、生长与存活的要求等生活史特征, 历史因素(如引入时间等), 植物地理分布范围等(Flory & Clay, 2006)。

3.3 环境因素对入侵植物公路扩散格局的影响

本研究结果表明, 光水平对紫茎泽兰、飞机草、胜红蓼的密度以及紫茎泽兰、胜红蓼和金腰箭的频度大小影响显著。相关研究也表明, 与高光水平有关的生境如草地生境、具开放式林冠的林地以及森林边缘等, 外来入侵植物都比较容易入侵(Tyser & Worley, 1992; Parendes & Jones, 2000; Cadenasso & Pickett, 2001; Hansen & Cleverger, 2005)。相反, 光水平较低的林地则不易被入侵(Watkins *et al.*, 2003, Hansen & Cleverger, 2005)。因此, 光水平可能是影响这些种密度和频度沿公路分布差异的主要因素。同时, 光水平还可能是紫茎泽兰、飞机草、胜红蓼密度在公路两侧扩散距离的限制因素。因为低光水平下的生境林冠封闭, 光照少, 枯落物层厚而裸露土壤少(Myser, 1994; Parendes & Jones, 2000; Mazia *et al.*, 2001), 比如本研究的大围山国家森林公园,

从而限制紫茎泽兰等外来植物的进一步扩散;而高光水平常伴随高温、裸露土壤等条件,促使外来植物定居后向更远的距离扩散(Parendes & Jones, 2000)。

本研究结果还表明,太阳辐射、温度与土壤湿度可能是公路两侧紫茎泽兰、胜红蓟与金腰箭密度阳坡明显大于阴坡的重要因素。因为阳坡太阳辐射多、温度高、土壤湿度低,而阴坡太阳辐射少、温度低、土壤湿度高。环境温度与土壤湿度的变化会影响不同物种种子萌芽率与存活率,进而影响群落物种组成 (Brothers & Spingarn, 1992; Gehlhausen *et al.*, 2000; Witkowski & Wilson, 2001),而太阳辐射的变化通常影响温度与土壤湿度。但对于飞机草来说却出现了阳坡低于阴坡的情形,分析原因可能是人类过度的干扰造成的。飞机草适宜生长在海拔1,000 m以下的热带地区,而在云南,海拔1,000 m以下热带地区的阳坡(尤其是南坡),种植了大面积的橡胶以及其他经济作物,频繁使用除草剂并施以人工除草。

外来杂草在原产地的环境生态适应性(包括光照、温度、雨水和土壤等)是决定其分布范围的最重要因素(强胜和曹学章, 2000)。本研究中的7种外来植物的原产地是热带美洲、中美洲以及中南美洲地区(李振宇和解焱, 2002; 王四海等, 2004),而云贵高原与墨西哥高原、哥斯达黎加高原同属于低纬度高原(卢志军和马克平, 2004),与原产地的光照、温度、雨水和地形等相似,可能是决定7种外来植物在云南北热带、南亚热带公路两侧入侵格局的主要因素。

综上所述,我们认为在控制紫茎泽兰等外来杂草时应该关注公路两侧的生境,尤其对于干扰程度较高和新建设的公路,提高路旁本地植被郁闭度将有利于控制紫茎泽兰等外来植物的进一步扩散。另外,本研究中所选择的低干扰公路样地较少,再加上受云南山地地形限制,样带设计的距离较短,在以后的工作中将在这些方面做更深入的研究,更加充分地揭示植物入侵与公路的关系。

致谢: 实验设计与野外调查过程中得到了云南省宁洱县、普洱市、景洪市、勐海县、蒙自县、屏边县、河口县、梁河县、盈江县等地的公路管理、农林、植保部门,中科院昆明植物所彭华研究员,中科院西双版纳热带植物园的沈有信博士和林露湘博士

的支持与帮助,在此表示感谢。

参考文献

- Amor RL, Stevens PL (1976) Spread of weeds from a roadside into sclerophyll forests at Dartmouth, Australia. *Weed Research*, **16**, 111–118.
- Angold PG (1997) The impact of a road upon adjacent heathland vegetation: effects on plant species composition. *Journal of Applied Ecology*, **34**, 409–417.
- Banks A, Lesica P, Pokorny M, Weeden C (2004) *Roads Enhance Exotic Plant Invasions*. http://www.umn.edu/MNPS/roads_and_weeds.pdf.
- Brothers TS, Spingarn A (1992) Forest fragmentation and alien plant invasion of central Indiana old-growth forest. *Conservation Biology*, **6**, 91–100.
- Bugg RL, Brown CS, Anderson JH (1997) Restoring native perennial grasses to rural roadsides in the Sacramento Valley of California: establishment and evaluation. *Restoration Ecology*, **5**, 214–228.
- Cadenasso ML, Pickett STA (2001) Effect of edge structure on the flux of species into forest interiors. *Conservation Biology*, **15**, 91–97.
- Chen B (陈兵), Kang L (康乐) (2003) Biological invasion and its relation with global changes. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), **22** (1), 31–34. (in Chinese with English abstract)
- Everett RA (2000) Patterns and pathways of biological invasions. *Trends in Ecology & Evolution*, **15**, 177–178.
- Flory SL, Clay K (2006) Invasive shrub distribution varies with distance to roads and stand age in eastern deciduous forests in Indiana, USA. *Plant Ecology*, **184**, 131–141.
- Gehlhausen SM, Schwartz MW, Augspurger CK (2000) Vegetation and microclimatic edge effects in two mixed-mesophytic forest fragments. *Plant Ecology*, **147**, 21–35.
- Gelbard JL, Belnap J (2003) Roads as conduits for exotic plant invasions in a semiarid landscape. *Conservation Biology*, **17**, 420–432.
- Godefroid S, Koedam N (2004) The impact of forest paths upon adjacent vegetation: effect of the path surfacing material on the species composition and soil compaction. *Biological Conservation*, **119**, 405–419.
- Greenberg CH, Crownover SH, Gordon DR (1997) Roadside soil: a corridor for invasion of xeric scrub by nonindigenous plants. *Natural Areas Journal*, **17**, 99–109.
- Hansen MJ, Clevenger AP (2005) The influence of disturbance and habitat on the presence of non-native plant species along transport corridors. *Biological Conservation*, **125**, 249–259.
- Hao JH (郝建华), Qiang S (强胜) (2005) The alien invasive weed: *Ageratum conyzoides* L. *Journal of Weed Science* (杂草科学), (4), 54–58. (in Chinese)
- Holzaphel C, Schmidt W (1990) Roadside vegetation along transects in the Judean Desert. *Israel Journal of Botany*,

- 39, 263–270.
- Johnson HB, Vasek FC, Yonkers T (1975) Productivity, diversity, and stability relationships in Mojave Desert roadside vegetation. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, **102**, 106–115.
- Li ZY (李振宇), Xie Y (解焱) (2002) *Invasive Alien Species in China* (中国外来入侵种), pp. 127–173. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese)
- Lonsdale WM, Lane LA (1994) Tourist vehicles as vectors of weed seeds in Kakadu National Park, northern Australia. *Biological Conservation*, **69**, 277–283.
- Lu ZJ (卢志军), Ma KP (马克平) (2004) The influence of topographical factors on the invasion of the alien species, *Eupatorium adenophorum*. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **28**, 761–767. (in Chinese with English abstract)
- Lu ZJ, Ma KP (2006) Spread of the exotic croftonweed (*Eupatorium adenophorum*) across southwest China along roads and streams. *Weed Science*, **54**, 1068–1072.
- Mazia CN, Chaneton EJ, Ghersa CM, Leon RJ (2001) Limits to tree species invasion in pampean grassland and forest plant communities. *Oecologia*, **128**, 594–602.
- Milberg P, Lamont BB (1995) Fire enhances weed invasion of roadside vegetation in southwestern Australia. *Biological Conservation*, **73**, 45–49.
- Myster RW (1994) Contrasting litter effects on old field tree germination and emergence. *Vegetatio*, **114**, 169–174.
- Myers JA, Vellend M, Gardescu S, Marks PL (2004) Seed dispersal by white-tailed deer: implications for long-distance dispersal, invasion, and migration of plants in eastern North America. *Oecologia*, **139**, 35–44.
- Parendes LA, Jones JA (2000) Role of light availability and dispersal in exotic plant invasion along roads and streams in the H. J. Andrews Experimental Forest, Oregon. *Conservation Biology*, **14**, 64–75.
- Pimentel D, McNair S, Janecka J, Wightman J, Simmonds C, O'Connell C, Wong E, Russel L, Zern J, Aquino T, Tsomondo T (2001) Economic and environmental threats of alien plant, animal, and microbe invasions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **84**, 1–20.
- Policy Research Center of the Committee of Yunnan Province C.C.P. (中共云南省委政策研究室) (2001) *New Prefectural Conditions of Yunnan Cities* (新编云南地州市县情), pp. 276–545. Guangming Daily Publishing House, Beijing. (in Chinese)
- Qiang S (强胜), Cao XZ (曹学章) (2000) Survey and analysis of exotic weeds in China. *Journal of Plant Resources and Environment* (植物资源与环境学报), **9**, 34–38. (in Chinese with English abstract)
- Rejmanek M, Richardson DM (1996) What attributes make some plant species more invasive? *Ecology*, **77**, 1655–1661.
- Trombulak SC, Frissell CA (2000) Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. *Conservation Biology*, **14**, 18–30.
- Tyser RW, Worley CA (1992) Alien flora in grasslands adjacent to road and trail corridors in Glacier National Park, Montana (U.S.A). *Conservation Biology*, **6**, 253–262.
- Wang SH (王四海), Sun WB (孙卫邦), Cheng X (成晓) (2004) Attributes of plant proliferation, geographic spread and the natural communities invaded by the naturalized alien plant species *Tithonia diversifolia* in Yunnan, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **24**, 444–449. (in Chinese with English abstract)
- Watkins RZ, Chen J, Pickens J, Brososke KD (2003) Effects of forest roads on understory plants in a managed hardwood landscape. *Conservation Biology*, **17**, 411–419.
- Williamson J, Harrison S (2002) Biotic and abiotic limits of the spread of exotic revegetation species. *Ecological Applications*, **12**, 40–51.
- Witkowski ETF, Wilson M (2001) Changes in density, biomass, seed production and soil seed banks of the non-native invasive plant, *Chromolaena odorata*, along a 15 year chronosequence. *Plant Ecology*, **152**, 13–27.
- Wu ZY (吴征镒), Lu AM (路安民), Tang YC (汤彦承), Chen ZD (陈之端), Li DZ (李德铎) (2003) *The Families and Genera of Angiosperms in China: A Comprehensive Analysis* (中国被子植物科属综论). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Xu CD (徐成东), Dong XD (董晓东), Lu SG (陆树刚) (2006) Invasive plants in Honghe River basin of Yunnan Province, China. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), **25**, 194–200. (in Chinese with English abstract)
- Xu CD (徐成东), Lu SG (陆树刚) (2006) The invasive plants in Yunnan. *Guihaia* (广西植物), **26**, 227–234. (in Chinese with English abstract)
- Xu HG (徐海根), Qiang S (强胜) (2004) *Inventory Invasive Alien Species in China* (中国外来入侵物种编目), pp. 94–200. China Environmental Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Zhang L (张黎), Ma YX (马友鑫), Li HM (李红梅), Liu WJ (刘文俊), Cao ZW (曹智伟), Zhang Q (张强) (2007) Patterns of *Eupatorium adenophorum* along roadsides in Lincang region, Yunnan Province, China. *Ecology and Environment* (生态环境), **2**, 516–522. (in Chinese with English abstract)

(责任编辑: 高贤明 责任编辑: 周玉荣)