

腾格里沙漠东南缘公路对路域植被物种组成的影响*

冯 丽^{1*} 李新荣¹ 郭 群² 张景光¹ 张志山¹

(¹ 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙坡头沙漠试验研究站, 兰州 730000; ² 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要 沿腾格里沙漠东南缘省道 201 线沙坡头-景泰段 2 侧设置 48 条垂直于公路的样线, 调查距路缘不同距离处植被的物种分布特征, 研究干旱荒漠区公路建设和运营对植被物种组成的影响. 结果表明: 随着距路缘距离的增加, 草本植物的种数、盖度、生物量和 α 多样性均逐渐减小, 5 m 后与对照差异不显著, 高度在 0~6 m 处较大, 密度变化不显著. 0~2 m 处草本植物的物种周转速率较低, 2~5 m 处最高, 10 m 后物种组成与对照相似. 路缘处的草本植物群落以禾本科植物占优势, 抗干扰能力较强的白草、虎尾草和冰草占草本植物总个体数的 68.6%. 其中, 虎尾草在距路缘 1 m 后, 白草和冰草在距路缘 2 m 后数量和频度迅速减小, 而菊科植物茵陈蒿和冷蒿急剧增加, 距路缘 2 m 后占草本植物总个体数的 70%. 路缘处灌木植物的盖度和密度显著小于对照, 物种组成与对照没有显著差异.

关键词 干旱荒漠 道路建设 物种多样性 分布格局

文章编号 1001-9332(2011)05-1114-07 **中图分类号** Q149 **文献标识码** A

Effects of highway on the vegetation species composition along a distance gradient from road edge in southeastern margin of Tengger Desert. FENG Li¹, LI Xin-rong¹, GUO Qun², ZHANG Jing-guang¹, ZHANG Zhi-shan¹ (¹Shapotou Desert Research and Experiment Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; ²Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(5): 1114-1120.

Abstract: Aimed to examine the effects of highway on the vegetation species composition in arid desert area, forty-eight transects perpendicular to the provincial highway 201 from Shapotou to Jingtai in the southeastern margin of Tengger Desert were installed, with the vegetation species distribution along a distance gradient from the road edge investigated. The results showed that with increasing distance from the road edge, the species number, coverage, biomass, and α -diversity of herbaceous plants declined, but had no significant differences with the control beyond 5 m. Within 0-6 m to the road edge, the herbaceous plant height was greater than that of the control, but their density had less change. Within 0-2 m to the road edge, the species turnover rate of herbaceous plants was lower; at 2-5 m, this rate was the highest; while beyond 10 m, the species composition of herbaceous plants was similar to that of the control. The herbaceous plant community at the road edge was dominated by gramineous plants, with the disturbance-tolerant species *Pennisetum centrasiaticum*, *Chloris virgata*, and *Agropyron cristatum* accounting for 68.6% of the total. *C. virgata* beyond 1 m to the road edge had a rapid decrease in its individual number and presence frequency, *P. centrasiaticum* and *A. cristatum* beyond 2 m also showed a similar trend, while the composite plants *Artemisia capillaris* and *A. frigida* beyond 2 m from the road edge had a rapid increase in its individual number, accounting for 70% of the herbaceous plants. At the road edge, the coverage

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-301-1)和国家自然科学基金项目(30870425, 30870401)资助.

* * 通讯作者. E-mail: fengli_lily@126.com

2010-09-10 收稿, 2011-02-28 接受.

and density of shrubs were significantly lower than those of the control, but the species composition had no significant difference.

Key words: arid desert; highway construction; species diversity; distribution pattern.

公路作为人类活动的产物影响着各种生态过程,其中对植被特征的影响是其多重生态影响中的重要组成部分,是量化公路对景观过程与格局影响的重要基础^[1-3].大量研究表明,路域植被无论是盖度、密度,还是物种组成和丰富度均不同于相邻的天然植被^[4-9].公路的建设、运营以及维护、管理等会对沿线植被产生各种直接或间接的影响^[2,10].直接影响:如公路建设过程中对路域植被的刈割和种植;间接影响:如汽车尾气的排放、防冰盐的使用及其他管理措施引起的光照、水分、土壤理化性质的改变^[6,11-12].由于频繁的干扰,路缘常为杂草和外来物种提供有利生境^[13-16];同时,车辆可携带种子和营养繁殖体,车流可引起空气湍流,从而促进种子的传播^[17-18];此外,汽车尾气引起的氮沉降可促进路缘植物的生长,并对植被的物种组成和丰富度产生影响^[4,8].有研究表明,公路对植被的影响距离可达100 m以外,影响距离与车流量、生境特征(路边原有植被和土壤特征)、风以及路面特征等因素有关^[4,19].

目前,有关公路和车辆对路域生态系统的影响研究大多集中在美国、澳大利亚、荷兰等国,而我国很少有这方面的报道,特别是在干旱荒漠区^[2,20].位于腾格里沙漠东南缘的沙坡头-景泰地区是沙漠与草原化荒漠的过渡区,和其他荒漠地带一样具有生境脆弱、植被结构简单、对人为干扰高度敏感的特征^[21-22].因此,研究公路对该地区植被产生何种影响、主要影响因子是什么、影响范围多大等问题,对干旱区管理和生物多样性保护具有重要指导意义.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验地点位于腾格里沙漠东南缘的沙坡头-景泰地区(37°26'—37°32' N, 104°30'—105°02' E).该区属于草原化荒漠与沙漠的过渡区^[23],海拔1300~1350 m,年均温9.6℃,1月平均气温-6.9℃,7月平均气温24.3℃^[22],初霜期在9月下旬,终霜期在4月中旬;年均降水量186 mm,其中80%集中在5—9月,年均蒸发量2900 mm.地下水埋较深,不能被天然植被利用^[24].主要土壤类型为灰钙土和风沙土.地带性植被是以旱生木本植物、草

原化荒漠草本植物以及沙生植物为主的荒漠植被.优势灌木、半灌木有:珍珠猪毛菜(*Salsola passerina*)、红砂(*Reaumuria soongorica*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、柠条(*Caragana korshinskii*)等;优势草本植物有:茵陈蒿(*A. capillaris*)、冷蒿(*A. frigida*)、无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)、寸草苔(*Carex duriuscula*)等.

试验样地沿省道201线沙坡头-景泰段布设.该路段全长90 km,日车流量3000~4000辆,初始路线完成于1989年,1999年进行路面拓宽和改造,建成宽12 m的二级公路,沥青碎石路面,路肩与路面水平,除少数路边地形高出路面外基本无路堑和排水沟,部分路段种植蜀葵(*Althaea rosea*)和紫花苜蓿(*Medicago sativa*)用于路边美化.该路段管理措施相对较少,仅限于对路边较高植物的清除.

1.2 研究方法

2009年9月,垂直公路设置48条样线,路南和路北各24条.选择路面与相邻区域基本水平、无排水沟的阶段,样线设置远离居民点和其他人工设施,并排除公路建设和管理影响以外的其他影响因素,如河流、地形等.沿样线设置2个10 m×10 m灌木样方和6个1 m×1 m草本样方.其中,第1个灌木样方位于距路缘0~10 m处,前5个草本样方分别位于距路缘0~1 m,1~2 m,2~3 m,5~6 m和10~11 m处,第2个灌木样方和第6个草本样方为对照(CK),设置于距路缘>200 m未受干扰的地段(图1).调查样方中植物种类、盖度、高度,以及各植物物种的数量(禾本科植物以分蘖株计),收获草本样方内植物的地上部分,75℃烘干48 h至恒量后称生物量.

2009年4—9月中旬,随机选择6条垂直于公

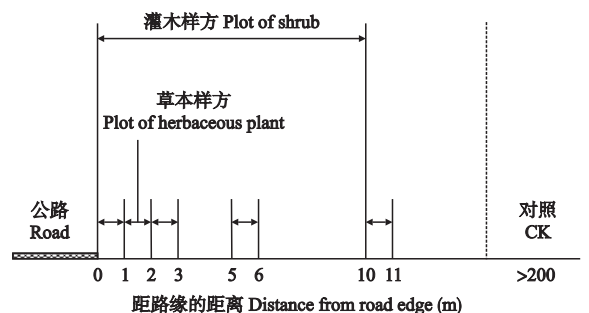


图1 样方位置示意图

Fig. 1 Location sketch of the sampling plots.

路的样线,距路缘0.5、1.5、2.5、5.5、10.5和>200 m处设定6个监测点,每月15日和30日用TDR (TDR 300 Spectrum Technologies, Inc.)测定各点土壤表层(0~7.6 cm)体积含水量。

1.3 数据处理

各样方的 α 多样性用Simpson (D)、Shannon (H')和Pielou指数(E)计算,相邻植物群落间的 β 多样性用Whittaker (β_w)、Sorenson (C_s)和改进的Morisita-Horn指数(C_{MH})计算^[25-26]。

$$D = 1 - \sum P_i^2 \quad (1)$$

$$H' = - \sum P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$E = (- \sum P_i \ln P_i) / \ln S \quad (3)$$

式中: P_i 为第*i*种的个体数占群落中总个体数的比例; S 为群落中的物种数。

$$\beta_w = S/ma - 1 \quad (4)$$

式中: ma 为样方中平均物种数。

$$C_s = 2j/(a + b) \quad (5)$$

式中: j 为2个相邻群落A和B共有物种数; a 和**b**分别为群落A和群落B的物种数。

$$C_{MH} = 2 \sum (an_i \times bn_i) / [(da + db) aN \times bN] \quad (6)$$

式中: an_i 和 bn_i 分别为群落A和B中第*i*种的个体数; aN 为群落A的物种数; bN 为群落B的物种数;

$$da = \sum an_i^2/aN^2; db = \sum bn_i^2/bN^2.$$

采用SPSS 13.0对各样方中的植物盖度、密度、高度、生物量、种数和 α 多样性进行单因素方差分析(one-way ANOVA),采用Tukey法在 $\alpha=0.05$ 水平进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 公路对草本植物盖度、密度、高度和生物量的影响

由图2可以看出,草本植物的盖度、高度和生物量在路缘处最大,随距路缘距离的增加显著减小($P<0.05$)。其中,草本植物盖度在0~5 m范围内急剧减小,>5 m处与对照差异不显著;0~1 m处的草本植物高度小于1~2 m和2~3 m处,但差异不显著,在3~10 m范围内显著降低($P<0.05$),>10 m处与对照差异不显著;草本植物生物量在0~1 m和1~2 m处差异不显著,2~5 m范围内显著减小($P<0.05$),>5 m处与对照差异不显著。草本植物密度在距路缘不同距离处差异均不显著。

2.2 公路对草本植物物种多样性的影响

2.2.1 α 多样性 由表1可以看出,共调查到草本植物60种,距路缘0~2 m处的草本植物种数最多(0~1 m处50种,1~2 m处47种),是对照的1.6~1.7倍,>2 m处的种数与对照相近。平均样方物种数也随距路缘距离的增加而减小,其中0~1 m处与其他样方的差异均达到显著水平($P<0.05$),是对照的1.9倍。

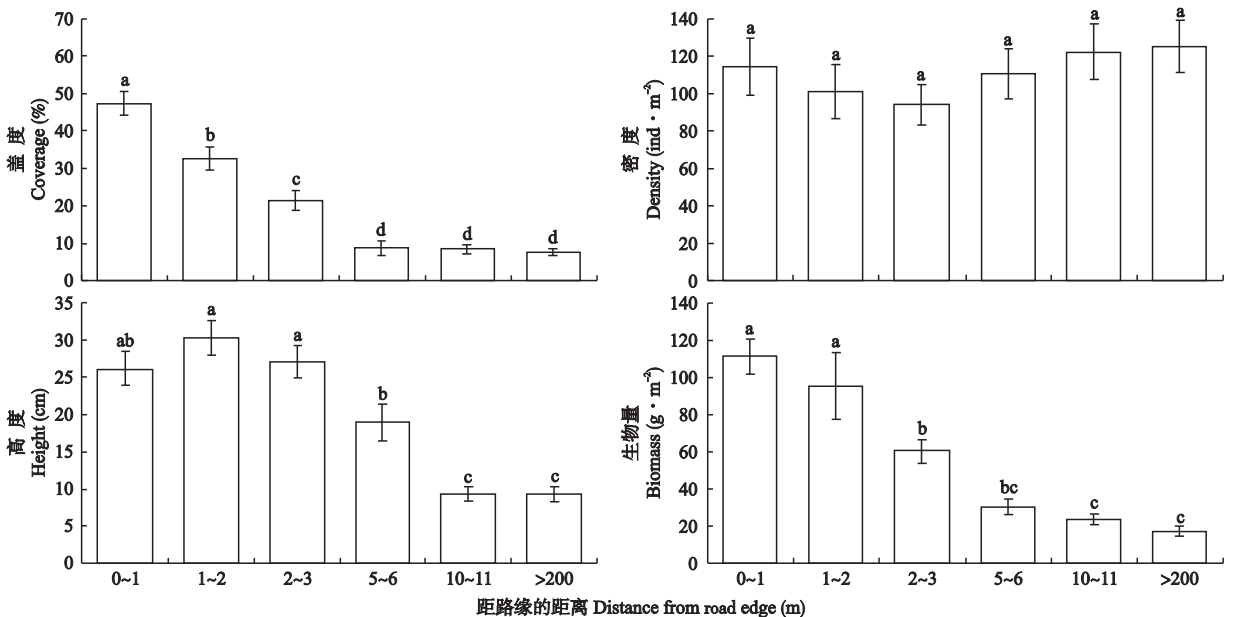


图2 距路缘不同距离处草本植物的盖度、密度、高度和生物量

Fig. 2 Coverage, density, height, and biomass of herbaceous plants at different distances from the road edge (mean±SE).

不同小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different small letters meant significant difference at 0.05 level.

表 1 距路缘不同距离处草本植物的总物种数、平均样方物种数、 α 多样性和 β 多样性Table 1 Total species number, mean species number per plot, α -diversity and β -diversity of herbaceous plants at different distances from the road edge (mean \pm SE)

指数 Index	距路缘的距离 Distance from road edge (m)					
	0~1	1~2	2~3	5~6	10~11	>200
总物种数 Total species number in all plots	50	47	31	30	29	29
平均样方物种数 Mean species number per plot	7.6 a	5.3 b	4.5 b	4.1 b	4.3 b	3.9 b
Simpson 指数 Simpson index	0.52 \pm 0.04a	0.45 \pm 0.04ab	0.43 \pm 0.03ab	0.37 \pm 0.04ab	0.38 \pm 0.04ab	0.31 \pm 0.03b
Shannon 指数 Shannon index	1.15 \pm 0.09a	0.92 \pm 0.08ab	0.83 \pm 0.07bc	0.73 \pm 0.08bc	0.75 \pm 0.08bc	0.60 \pm 0.06c
Pielou 指数 Pielou index	0.57 \pm 0.04ab	0.55 \pm 0.04ab	0.59 \pm 0.04a	0.51 \pm 0.04ab	0.48 \pm 0.04ab	0.42 \pm 0.04b
Whittaker 指数 Whittaker index	-	0.13	0.23	0.31	0.29	0.17
Sorenson 指数 Sorenson index	-	0.87	0.77	0.69	0.71	0.83
改进的 Morisita-Horn 指数 Modified Morisita-Horn index	-	0.86	0.64	0.88	0.96	0.88

不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different letters indicated significant difference at 0.05 level.

Simpson 和 Shannon 指数表明, 距路缘 0~1 m 处草本植物的物种多样性最高, 随着距离的增加呈减小趋势. Pielou 指数除 2~3 m 处出现一个最高值外, 其他各点也表现出随距离的增加逐渐减小的趋势, 这表明虽然 0~1 m 和 1~2 m 处的物种比 2~3 m 处丰富但均匀度较低.

2.2.2 β 多样性 Whittaker 指数反映群落间的差异性, Sorenson 指数和改进的 Morisita-Horn 指数反映群落间的相似性, 前两者利用二元数据能直观反映物种的周转, 后者利用数量数据能综合反映物种的改变和各物种个体数量比例的变化^[25]. 由表 1 可以看出, Whittaker 指数的最大值和 Sorenson 指数的最小值均出现在 2~3 m 与 5~6 m 处的样方间 ($\beta_w = 0.31, C_s = 0.69$), 改进的 Morisita-Horn 指数的最小值出现在 1~2 m 与 2~3 m 处的样方间 ($C_{MH} = 0.64$), 这说明距路缘 2~5 m 区域的植物组成变化最大. 0~1 m 与 1~2 m 处样方间 ($\beta_w = 0.13, C_s = 0.87, C_{MH} = 0.86$) 和 10~11 m 与对照间 ($\beta_w = 0.17, C_s = 0.83, C_{MH} = 0.88$) 的草本植物组成有较大的相似性, 而 0~1 m 与对照间的相似性较小 ($\beta_w = 0.49, C_s = 0.51, C_{MH} = 0.11$); 5~6 m 与 10~11 m 处样方

间的物种相似性较小 ($\beta_w = 0.29, C_s = 0.71$), 但群落整体相似性较大 ($C_{MH} = 0.96$). 可以看出, 与对照相比, 路缘 0~2 m 处形成了截然不同的植物群落, 2~5 m 处的植物组成发生较大变化, 5~10 m 处变化减小, 10 m 以外与对照没有显著差异.

2.2.3 生活型 将调查到的 60 个草本植物种按照禾本、非禾本, 以及一年生和多年生分为 4 种生活型 (表 2). 随着距路缘距离的增加, 草本植物生活型组成的变化为: 一年生禾本植物和一年生非禾本植物的比例均降低, 而多年生禾本植物和多年生非禾本植物的比例均增加. 不同距离处各生活型的比例均为: 多年生非禾本植物 > 一年生非禾本植物 > 多年生禾本植物 > 一年生禾本植物.

2.3 公路对路缘常见草本植物分布的影响

按物种的频率和数量比例综合评价排序 (表 3), 路缘常见草本植物依次为: 白草 (*Pennisetum centrasiticum*)、虎尾草 (*Chloris virgata*)、冰草 (*Agropyron cristatum*)、茵陈蒿、刺蓬 (*Salsola ruthenica*)、狗尾草 (*Setaria viridis*)、阿尔泰狗娃花 (*Heteropappus altaicus*)、雾冰藜 (*Bassia dasyphylla*)、冷蒿、牻牛儿苗 (*Erodium stephanianum*). 这 10 种植物的个体数

表 2 距路缘不同距离处草本植物的生活型组成

Table 2 Life form composition of herbaceous plants at different distances from the road edge

	生活型 Life form	距路缘的距离 Distance from road edge (m)					
		0~1	1~2	2~3	5~6	10~11	>200
非禾本	一年生 Annual (%)	34.0	34.0	32.3	30.0	24.1	27.6
Non-gramineous	多年生 Perennial (%)	38.0	38.3	38.7	43.3	48.3	48.3
禾本	一年生 Annual (%)	14.0	12.8	12.9	10.0	10.3	10.3
Gramineous	多年生 Perennial (%)	14.0	14.9	16.1	16.7	17.2	13.8

表3 距路缘不同距离处常见草本植物的数量比例(P)和频率(F)

Table 3 Individual proportion (P) and frequency (F) of common herbaceous species at different distances from the road edge

植物种 Plant species	距路缘的距离 Distance from road edge (m)												
	0~1		1~2		2~3		5~6		10~11		>200		
	P (%)	F (%)	P (%)	F (%)	P (%)	F (%)	P (%)	F (%)	P (%)	F (%)	P (%)	F (%)	
白草 <i>Pennisetum centrasiaticum</i>	R	42.8	32.4	40.2	35.7	10.2	25.0	7.6	20.0	0.5	8.3	1.1	9.5
虎尾草 <i>Chloris virgata</i>	R	11.9	55.2	2.8	24.1	0.3	15.3	0.1	3.3	-	-	-	-
冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	R	13.9	18.3	11.8	15.7	4.4	17.5	0.1	3.3	2.5	4.2	2.5	12.9
茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i>	R,C	4.0	45.1	25.9	68.7	52.3	80.6	63.2	78.9	62.8	58.3	45.2	59.0
刺蓬 <i>Salsola ruthenica</i>	R	3.3	45.6	0.6	24.0	0.9	40.3	1.1	27.8	1.2	22.9	1.8	14.3
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	R	2.6	30.0	0.2	12.5	0.03	2.4	-	-	0.02	2.1	0.02	2.4
阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	R	1.6	38.4	1.6	47.3	1.7	47.4	1.4	32.7	0.6	20.8	0.5	11.7
雾冰藜 <i>Bassia dasyphylla</i>	R	1.8	29.4	0.04	4.8	0.5	16.7	0.4	18.9	0.1	6.3	0.02	2.4
冷蒿 <i>Artemisia frigida</i>	R,C	1.6	32.2	3.4	47.9	19.6	57.1	12.4	45.7	4.8	31.3	24.6	46.4
牻牛儿苗 <i>Erodium stephanianum</i>	R	1.2	18.3	0.2	8.9	0.2	4.4	-	-	-	-	-	-
寸草苔 <i>Carex duriuscula</i>	C	-	-	0.4	3.3	-	-	0.5	6.7	13.7	35.4	16.5	26.7
无芒隐子草 <i>Cleistogenes songorica</i>	C	0.1	4.4	0.1	4.8	0.4	20.1	0.8	14.8	1.7	39.6	3.2	51.4

R: 路缘常见种 Common species at the road edge; C: 对照样方常见种 Common species in the control plot.

量占路缘草本植物总数的 84.7%。其中前 3 种均为禾本科植物, 占总个体数的 68.6%, 加上狗尾草, 禾本科植物比例达 71.2%。可见, 禾本科为路缘植物群落的优势科。对照样方中常见的草本植物有 4 种, 为茵陈蒿、冷蒿、寸草苔、无芒隐子草, 占总个体数的 89.5%, 其中菊科植物茵陈蒿和冷蒿占总个体数的 69.8%。

由表 3 可以看出, 上述 12 种植物中, 茵陈蒿和冷蒿同是路缘和对照样方中的常见草本植物, 在 0~1 m 处它们的个体数量比例较小, 合计 5.6%, 随后急剧增加, 在距路缘 >2 m 处的植物群落中占到 70% 左右。随着距离的增加, 路缘处其他 8 个常见种的比例均有不同程度的减小, 其中雾冰藜、刺蓬、牻牛儿苗、虎尾草、狗尾草在 1 m 以外明显减小, 特别是牻牛儿苗和虎尾草分别在 5 m 和 10 m 以外不再出现, 白草和冰草在 2 m 以外明显变少, 阿尔泰狗娃花在 10 m 以外也明显减少。对照地其他 2 种常见草本植物无芒隐子草和寸草苔在距路缘 0~6 m 范围内的出现频率和数量比例明显小于 10 m 以外区域。可见, 路缘处更适合抗干扰能力较强的根茎禾草和杂草类草生存。

2.4 公路对灌木植物群落结构和物种组成的影响

距路缘 0~10 m 范围内的样方中, 灌木的盖度和密度分别为 $(9.9 \pm 0.9)\%$ 和 (25.9 ± 4.0) ind · 100 m⁻², 分别显著低于对照样方 $(20.8 \pm 1.8)\%$ 和 (75.4 ± 6.2) ind · 100 m⁻² ($P < 0.05$)。共调查到灌木植物 10 种: 珍珠猪毛菜、白刺、油蒿、柠条、红砂、刺叶柄棘豆 (*Oxytropis aciphylla*)、驼绒藜

(*Ceratoides lateens*)、狭叶锦鸡儿 (*Caragana stenophylla*)、合头草 (*Sympegma regelii*)、灌木亚菊 (*Ajania fruticulosa*)。距路缘 0~10 m 处和 200 m 以外的样方间灌木物种周转率几乎为零, 平均每个样方 (100 m²) 灌木种数分别为 2.3 ± 0.1 和 2.2 ± 0.2 。

3 讨论

公路的建设和运营可以引起周围区域的地形, 以及土壤水分、养分、机械组成、干扰频度和力度 (轻度干扰如踩踏, 重度干扰如深翻土壤) 等改变, 使道路 2 侧形成特殊的微生境^[2,5,11-12]。路面径流引起的路缘土壤水分含量升高可能是本研究中影响草本植物分布的主要因素。有研究表明, 土壤水分是干旱区植被盖度和生物量最主要的限制因素, 也是决定植物分布空间异质性的重要因子之一^[24,27-28]。在本研究中, 样线设置在与路面水平且没有排水沟的位置, 路面径流可以直接汇入路边区域。由图 3 可以看出, 距路缘 0.5 m 处土壤表层 (0~7.6 cm) 含水量是 10 m 外区域的 1.7 倍, 并在 1.5 m 范围内急剧降低, 1.5 m 后降低幅度减小, 10 m 后变化趋于稳定。路边较高的水分使距路缘较近的植物个体更高, 盖度和生物量更大 (图 2)。由于路边较高的水分可以促进土壤种子库中需水量较大的植物生长, 而且途经的车流和人流也可能带入植物种子^[16-18], 因此靠近路缘处植物多样性较高, 如牻牛儿苗和虎尾草只在路旁 10 m 内出现, 并且大部分路缘处常见种的数量均在 1 m 后随着水分的降低明显减少 (表 3)。

在公路的修建、运营和管理过程中, 路缘处土壤

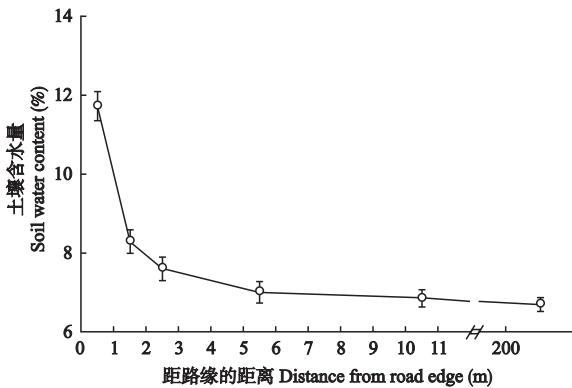


图 3 距路缘不同距离处表层土壤体积含水量

Fig. 3 Volumetric water content of top soil at different distances from the road edge (mean±SE).

理化性质的改变、植物的机械破坏以及引入新的植物种等干扰活动的发生使得路缘处抗干扰能力较强的植物占优势^[5-6,8-9]. 在本研究中,路缘处主要的优势植物有白草、虎尾草、冰草,它们具有很强的抗干扰能力. 其中,白草和冰草为根茎禾草,具有很强的营养繁殖能力,这也可能是它们与其他路缘常见种相比可以在更远距离处大量存在的原因;另外,虎尾草是典型的一年生杂草,抗干扰能力极强.

3 个 β 多样性指数能够较好地反映草本植物组成的变化特征,路缘 0~2 m 处形成了与对照样地完全不同的群落,2~5 m 处物种组成变化较大,5~10 m 处变化减小,10 m 以外与对照样地基本一致. 此外,在 5 m 以外区域,除在 5~10 m 范围内高度显著减小外,草本植物的盖度、高度和生物量均无显著差异. 因此,公路对草本植物分布特征的影响可达到 10 m,其中具有显著影响的区域为距路缘 0~5 m.

距路缘 0~10 m 的样方中,灌木的盖度和密度显著低于对照样方,但物种组成没有显著差异. 在道路修建和管护过程中路线 2 侧的植被很容易受到碾压和踩踏造成机械损伤,特别是在挖方和填方的地方,植被会被直接铲除或压埋^[29]. 植被受到破坏后,草本植物由于生活史短、繁殖能力强能够在短期内自然恢复,而灌木的自然恢复需要一个长期过程. 路缘处灌木的铲除和破坏也可能是影响草本植物分布的另一个因素.

参考文献

[1] Fu W (富伟), Liu S-L (刘世梁), Cui B-S (崔保山), et al. Ecological effect of road network in the typical area of Yunnan Province based on integration of landscape pattern and process. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20** (8):

1925-1931 (in Chinese)

[2] Li Y-H (李月辉), Hu Y-M (胡远满), Li X-Z (李秀珍), et al. A review on road ecology. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14** (3): 447-452 (in Chinese)

[3] Li Y-H (李月辉), Hu Y-M (胡远满), Chang Y (常禹), et al. Effect zone of forest road on plant species diversity in Great Hing'an Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21** (5): 1112-1119 (in Chinese)

[4] Angold PG. The impact of a road upon adjacent heathland vegetation: Effects on plant species composition. *Journal of Applied Ecology*, 1997, **34**: 409-417

[5] Trombulak SC, Frissell CA. Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. *Conservation Biology*, 2000, **14**: 18-30

[6] Hansen MJ, Clevering AP. The influence of disturbance and habitat on the presence of non-native plant species along transport corridors. *Biological Conservation*, 2005, **125**: 249-259

[7] Hovd H, Skogen A. Plant species in arable field margins and road verges of central Norway. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, **110**: 257-265

[8] Truscott AM, Palmer SCF, McGowan GM, et al. Vegetation composition of roadside verges in Scotland: The effects of nitrogen deposition, disturbance and management. *Environmental Pollution*, 2005, **136**: 109-118

[9] O'Farrell PJ, Milton SJ. Road verge and rangeland plant communities in the southern Karoo: Exploring what influences diversity, dominance and cover. *Biodiversity and Conservation*, 2006, **15**: 921-938

[10] Forman RTT. *Road Ecology: Science and Solutions*. Washington: Island Press, 2003

[11] Greenberg CH, Crownover SH, Gordon DR. Roadside soils: A corridor for invasion of xeric shrub by nonindigenous plants. *Natural Areas Journal*, 1997, **17**: 99-109

[12] Godefroid S, Koedam N. The impact of forest paths upon adjacent vegetation: Effects of the path surfacing material on the species composition and soil compaction. *Biological Conservation*, 2004, **119**: 405-419

[13] Gelbard JL, Belnap J. Roads as conduits for exotic plant invasions in a semiarid landscape. *Conservation Biology*, 2003, **17**: 420-432

[14] Flory SL, Clay K. Invasive shrub distribution varies with distance to roads and stand age in eastern deciduous forests in Indiana, USA. *Plant Ecology*, 2006, **184**: 131-141

[15] Lu ZJ, Ma KP. Spread of the exotic croftonweed (*Eupatorium adenophorum*) across southwest China along roads and streams. *Weed Science*, 2006, **54**: 1068-1072

[16] Christen DC, Matlack GR. The habitat and conduit functions of roads in the spread of three invasive plant species. *Biological Invasions*, 2009, **11**: 453-465

[17] Lonsdale WM, Lane AM. Tourist vehicles as vectors of weed seeds in Kakadu National Park, Northern Austral-

- ia. *Biological Conservation*, 1994, **69**: 277-283
- [18] Tikka PM, Högmänder H, Koski PS. Road and railway verges serve as dispersal corridors for grassland plants. *Landscape Ecology*, 2001, **16**: 659-666
- [19] Forman RTT. Estimate of the area affected ecologically by the road system in the United States. *Conservation Biology*, 2000, **14**: 31-35
- [20] Zong Y-G (宗跃光), Zhou S-Y (周尚意), Peng P (彭萍), *et al.* Perspective of road ecology development. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23** (11): 2396-2405 (in Chinese)
- [21] Brown G, Schoknecht N. Off-road vehicles and vegetation patterning in a degraded desert ecosystem in Kuwait. *Journal of Arid Environments*, 2001, **49**: 413-427
- [22] Li XR, Zhang ZS, Zhang JG, *et al.* Association between vegetation patterns and soil properties in the Southeastern Tengger Desert, China. *Arid Land Research and Management*, 2004, **18**: 369-383
- [23] Li X-R (李新荣), Shi Q-H (石庆辉), Zhang J-G (张景光), *et al.* Study of plant diversity changes during the artificial vegetation evolution processes in the Shapotou region. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 1998, **18**(suppl. 4): 23-29 (in Chinese)
- [24] Li XR, Ma FY, Xiao HL, *et al.* Long-term effects of revegetation on soil water content of sand dunes in arid region of Northern China. *Journal of Arid Environments*, 2004, **57**: 1-16
- [25] Ma K-P (马克平), Liu C-R (刘灿然), Liu Y-M (刘玉明). The measurement of community diversity. II. The measurement of β -diversity. *Chinese Biodiversity* (生物多样性), 1995, **3**(1): 38-43 (in Chinese)
- [26] Bai Y-F (白永飞), Xing X-R (邢雪荣), Xu Z-X (许志信), *et al.* β -diversity of *Stipa* communities in Inner Mongolia Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2000, **11** (3): 408-412 (in Chinese)
- [27] Olsvig-Whittaker L, Shachak M, Yair A. Vegetation patterns related to environmental factors in a Negev Desert watershed. *Vegetatio*, 1983, **54**: 153-165
- [28] Southgate RI, Masters P, Seely MK. Precipitation and biomass changes in the Namib Desert dune ecosystem. *Journal of Arid Environments*, 1996, **33**: 267-280
- [29] Bao W-H (包薇红), Fan J (范兢). Discussion on the impact of highway construction on ecological environment. *Environmental Protection in Transportation* (交通环保), 2000, **21**(3): 42-44 (in Chinese)

作者简介 冯丽,女,1982年生,博士研究生.主要从事植物生态学研究. E-mail: fengli_lily@126.com

责任编辑 孙菊
