

公路边坡人工恢复植被后土壤动物群落变化及多样性

殷秀琴¹, 顾 卫^{2,*}, 董炜华¹, 邱丽丽³, 刘永兵², 陶 岩¹

(1. 东北师范大学城市与环境科学学院, 长春 130024; 2. 北京师范大学资源学院资源技术与工程研究所, 北京 100875;
3. 绵阳师范学院资源环境系, 绵阳 621000)

摘要:对内蒙古中部呼集高速卓资段的公路边坡人工恢复植被后土壤动物群落进行研究,探讨人工恢复植被前后土壤动物的数量组成、结构,揭示人工恢复植被后土壤动物多样性变化规律及其影响因素,为路域生态恢复与生态建设提供科学依据。研究表明公路边坡人工恢复植被后土壤动物的种类和数量急剧增加。未进行人工恢复植被的裸露边坡没有大型土壤动物。不论是人工恢复植被当年还是人工恢复植被 1 年后,西北坡大型和中小型土壤动物的数量均高于东南坡。人工植被恢复的时间不同,大型土壤动物类群数量差异显著,个体数量差异不显著,中小型土壤动物类群数量和个体数量差异均显著。土壤动物的种类组成和个体数量随着人工恢复植被时间发生变化。隐翅虫及蜘蛛,线虫、节跳虫、辐螨、革螨和甲螨它们之间相关性大,经常共同出现在人工恢复植被后各边坡,并且个体数量多。无论是大型土壤动物还是中小型土壤动物个体数量和类群数量的垂直分布均具表聚性。土壤动物的多样性受土壤 pH 值和有机质、全 P、全 N 含量的影响。土壤含水量对中小型土壤动物的多样性的影响较大。通过对土壤环境因子的主成分分析结果表明,0~5cm 和 5~10cm 的土壤含水量为主导因子。

关键词:公路边坡;土壤动物;人工恢复植被;多样性

文章编号:1000-0933(2008)09-4295-11 中图分类号:Q142,Q958,S154.5 文献标识码:A

The community change and diversity of soil fauna after artificial vegetation restoration in highway slope

YIN Xiu-Qin¹, GU Wei^{2,*}, DONG Wei-Hua¹, QIU Li-Li³, LIU Yong-Bing², TAO Yan¹

1 College of Urban and Environmental Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

2 Institute of Resources Technology and Engineering, College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

3 Department of Resource and Environmental Science, Mianyang Normal University, Mianyang 621000, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9): 4295 ~ 4305.

Abstract: Soil fauna community was studied in ecosystems near highways in regions surrounding Zhuozi Mountain, Inner Mongolia. The composition, structure and the change in the diversity of soil fauna community on the slopes of artificially restored vegetation alongside roads were found. The findings provided the scientific basis for ecological restoration and construction alongside these highways. Soil fauna was obtained from different highway slopes. The sample area was 50cm × 50cm for soil macrofauna, 10cm × 10cm for soil meso-microfauna and 5cm × 5cm for soil damp fauna. Soil macrofauna was handpicked. Soil meso-microfauna was separated by Tullgren funnel and soil damp fauna was separated by Baermann funnel. Soil pH was measured with PHS-3B acidity meter, Organic C was determined by K₂Cr₂O₇ oxidation method and

基金项目:国家交通部西部交通建设科技资助项目“半干旱地区公路岩质边坡生物恢复加固技术研究”(200631800087)

收稿日期:2008-03-07; 修订日期:2008-05-23

作者简介:殷秀琴(1951~),女,吉林长春人,教授,主要从事土壤动物生态学和生物地理学研究. E-mail: yinxq773@nenu.edu.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: weigu@bnu.edu.cn.

Foundation item: The project was financially supported by bioremediation and strengthening technology on the rock road slope in semiarid region in west traffic construction project of the ministry of communication, China(No. 200631800087)

Received date: 2008-03-07; **Accepted date:** 2008-05-23

Biography: YIN Xiu-Qin, Professor, mainly engaged in soil fauna ecology and biogeography. E-mail: yingxq773@nenu.edu.cn

Total N by Kjeldahl method. Total P was analyzed using the colorimetric method with molybdenum in sulphuric acid. Total K was determined with flame photometer. A total of 37 groups, 270 individuals of soil macrofauna belonging to 1 phylum, 3 classes, 12 orders and 31 families were obtained. Furthermore, a total of 38 groups, 12 853 individuals of soil meso-microfauna belonging to 3 phyla, 5 classes, 13 orders, and 26 families were obtained. Groups and individual numbers of soil fauna increased rapidly after artificial vegetation restoration on highway slopes. Soil macrofauna were absent on bare slopes. The number of groups and individual soil faunas on bare slopes were approximately $2/5 - 1/3$ and $1/80 - 1/127$ of that on slopes with artificially restored vegetation, respectively. Individual numbers of macrofauna and meso-microfauna on the northeastern slopes were higher than those of southeastern slopes after artificial vegetation restoration. The difference in groups of soil macrofauna was significant on the slopes at different times of artificial vegetation restoration ($F = 12.067, P < 0.01, df = 14$), while one of individual numbers was not significant ($F = 3.166, P > 0.05, df = 14$). The difference in numbers of groups ($F = 4.674, P < 0.05, df = 14$) and individuals ($F = 7.160, P < 0.05, df = 14$) of soil meso-microfauna on the slopes at different times of artificial vegetation restoration was significant. Vegetation restoration, as well as time of its application had substantial influence on the number of groups and individuals of soil fauna. The individual numbers and groups of soil meso-microfauna were higher two years after vegetation restoration compared to the year of its application. There were greater correlation between Staphylinidae and Araneae. There were also greater correlation among Nematoda, Isotomidae, Actinedida, Gamasida and Oribatida. They appeared on the slopes of artificially restored vegetation at the same time, and their individual numbers were also more than others. Both groups and individuals of soil macrofauna and meso-microfauna gathered on the surface of soil in a vertically distributed fashion. Soil pH, organic content, as well as total P and total N influenced the diversity of soil fauna. Soil moisture had important influence on the diversity of soil meso-microfauna. Total K has less effect on their diversity. Soil fauna diversity was negatively correlated to the soil pH. They were also positively correlated to the soil organic contents, total N, total P and soil moisture. The results of principal component analysis indicated that soil moisture of 0–5 cm and 5–10 cm was the dominant factor affecting the soil environment.

Key Words: highway slope; soil fauna; artificial vegetation restoration; diversity

由于公路建设,路域内地表植被遭到破坏,土壤受到扰动,小气候、土壤条件和植被组成都发生了巨变^[1,2]。筑路形成的裸露边坡,依靠自然恢复至少需要几十甚至上百年的时间。人工恢复植被-植草,能够为边坡植被的自然恢复提供基础,缩短植被演替的时间,改良边坡土壤,为土壤动物的栖息创造了有利的条件。目前,关于路域生态恢复方面的研究,国内外许多学者主要侧重土壤、植被方面^[3~6],在公路边坡恢复中重视坡面植被恢复技术等^[7~9],而与植被同等重要的土壤动物群落未见报道。土壤动物是路域生态系统的重要组成部分^[10,11]。土壤动物能够敏感地反映生境的优越程度,它已成为监测环境变化的指示生物^[12~16]。本文对内蒙古中部呼集高速卓资段的公路边坡人工恢复植被后土壤动物群落进行研究,探讨人工恢复植被前后土壤动物的数量组成、结构,揭示人工恢复植被后土壤动物多样性变化规律及其影响因素,为路域生态恢复与生态建设提供科学依据。

1 研究区自然环境概况

研究区位于内蒙古自治区中部的乌兰察布盟境内的卓资县,呼集高速卓资段,公路为东西走向。该区属温带干旱半干旱大陆性季风气候,冬季漫长而寒冷,夏季短暂,年均温 2.9°C ,年降水量 545 mm 左右,年蒸发量 1877 mm。路域周边现生植被为克氏针茅草原,土壤为栗钙土。2004 年 8 月中旬,在研究区公路两侧分别取未进行人工植草的裸露边坡(A)和在铺设基质(铺设泥炭厚度为 7 cm 左右)当年进行人工植草的东南坡(B)、当年进行植草的西北坡(C)、人工植草 1 年后的东南坡(D)、人工植草 1 年后的西北坡(E)共 5 个生境进行土壤动物调查取样。各生境的自然环境概况见表 1。

表 1 各生境自然环境概况

Table 1 The general characteristics of physical environment

生境 Habitat	地理位置 Position	地貌 Relief		土壤 Soil	植被 Vegetation		植草时间 Time
		海拔 Elevation (m)	坡向 Exposure		植物组成 Composition of plant	盖度% Coverage	
A	40°52'39"N, 112°34'24.4"E	1499	北偏西 35°	风化物	无	0	无
B	40°52'34"N, 112°34'3"E	1510	南偏东 35°	底层为风化物,上层主要 为人为铺设的泥炭基质	主要为草木樨、无芒雀 麦、冰草,伴生灰菜。	100	2004-05
C	40°52'34"N, 112°34'3"E	1510	北偏西 55°	同生境 B	主要为草木樨、无芒雀 麦、冰草,长势好于生境 B,伴生莠麦	100	2004-05
D	40°53'28"N, 112°31'38"E	1460	南偏东 15°	同生境 B	主要为无芒雀麦、老芒 麦、冰草和草木樨	100	2003-07 ~ 08
E	40°53'28"N, 112°31'38"E	1460	北偏西 50°	同生境 B	主要为无芒雀麦、草木 樨、冰草,伴生蒿属植物	100	2003-07 ~ 08

草木樨 *Melilotus suaveolens*、无芒雀麦 *Bromus inermis*、冰草 *Agropyron cristatum*、老芒麦 *Elymus sibiricus*、灰菜 *Chenopodium album*、莠麦 *Avena cinensis*

2 研究方法

2.1 野外取样方法

在公路两侧上述 5 个生境中,首先对各个生境进行调查,用 GPS 测定地理位置、海拔高度、用坡度仪测定坡向;然后在每个生境设 3 个有代表性的样方(1m × 1m),测定植物盖度和统计植物种类、高度等;采集土壤动物,其中大型土壤动物的取样面积为 50cm × 50cm,中小型土壤动物的取样面积为 10cm × 10cm,湿生土壤动物的取样面积为 5cm × 5cm。分别按 0 ~ 5cm, 5 ~ 10cm, 10 ~ 15cm 和 15 ~ 20cm 各 4 层取样,共取土样 180 个。大型土壤动物在野外直接采用手捡法,中小型和湿生土壤动物样品带回室内待分离。同时在每个样方内取 0 ~ 5cm、5 ~ 10cm 土样及铝盒土样带回室内,待分析测定 pH 值和有机质、全 N、全 P、全 K 含量及自然含水量。

2.2 室内分析方法

室内采用 Tullgren 法和 Baermann 法分离提取中小型和湿生土壤动物^[17]。实体显微镜下鉴定土壤动物及统计数量,一般鉴定到科的水平。由于土壤动物的成虫和幼虫功能不同,将成虫和幼虫分开统计数量。土壤 pH 值采用 PHS-3B 精密 pH 计测定;有机质含量采用重铬酸钾(K₂Cr₂O₇)容量法测定;全 N 含量采用半微量开氏定氮法测定;全 P 含量采用酸溶—钼锑抗比色法测定;全 K 采用原子吸收法测定^[18];土壤自然含水量采用烘干法(温度为 105℃)测定。

2.3 数据统计分析

采用结合指数 $IA = \frac{c}{a+b+c}$ 分析土壤动物类群间的相关性^[19]。式中, a 表示 A 类群单独出现的样方数; b 表示 B 类群单独出现的样方数; c 表示 A、B 共同出现的样方数。采用多群落间比较指数: $DIC = \frac{g}{G} \sum_{i=1}^n \left[1 - \left(\frac{|X_{i\max} - X_i|}{X_{i\max} + X_i} \right) \right] \frac{C_i}{C}$ ^[20], 分析土壤动物多样性特征。式中, $X_{i\max}$ 为某个群落中第 i 类群的最大个体数; X_i 为该群落中第 i 类群的个体数; g 为该群落中的类群数; G 为各群落所包含的总类群数; C_i/C 为在 C 个群落中第 i 类群出现的比率。

利用 Spss 进行土壤动物组成的方差检验和土壤动物多样性与土壤环境因子相关分析及土壤环境因子的主成分分析。

3 结果与分析

3.1 人工恢复植被后土壤动物组成多样性变化

通过调查发现,未进行人工恢复植被的裸露边坡,无大型土壤动物。人工恢复植被的 4 个生境共获大型

土壤动物 37 类, 270 只, 隶属于 1 门 3 纲 12 目 31 科。其中, 象甲科幼虫 (Curculionidae) 和隐翅虫科 (Staphylinidae) 为优势类群, 其个体数占总数的 49.63%; 步甲科 (Carabidae)、拟平腹蛛科 (Zodariidae)、卷叶蛛科 (Dictynidae)、隐翅虫科幼虫 (Staphylinidae)、蚁科 (Formicidae)、虎甲科 (Cicindelidae)、蚜科 (Aphididae)、褐蛉科幼虫 (Hemerobiidae)、夜蛾科幼虫 (Noctuidae)、长奇盲蛛科 (Phalangiidae) 为常见类群, 个体数占总数的 38.15%, 其余 25 类为稀有类群, 其类群数占总数的 67.57%, 但个体数仅占总数的 12.22%。生境 B 中步甲科 (Carabidae)、拟平腹蛛科 (Zodariidae) 和卷叶蛛科 (Dictynidae) 等的个体数也较多, 为该生境的优势类群。生境 D 为人工恢复植被 1a 后的同向边坡, 步甲科 (Carabidae) 和拟平腹蛛科 (Zodariidae) 的个体数多于生境 B (表 2), 说明随着人工恢复植被时间的延长, 大型土壤动物中的某些类群逐渐增多, 多样性逐渐增加。

表 2 各生境大型土壤动物组成

Table 2 Composition of soil macro-fauna in different habitats

序号 No.	土壤动物名称 Name of soil fauna	B		C		D		E		(%)	多度 Abundance
		(%)	多度 Abundance	(%)	多度 Abundance	(%)	多度 Abundance	(%)	多度 Abundance		
1	象甲科幼虫 Curculionidae	24.00	+++	64.10	+++			15.31	+++	28.52	+++
2	隐翅虫科 Staphylinidae	10.00	+++	7.69	++	40.91	+++	28.57	+++	21.11	+++
3	步甲科 Carabidae	10.00	+++			18.18	+++	11.22	+++	8.89	++
4	拟平腹蛛科 Zodariidae	10.00	+++			18.18	+++	7.14	++	7.41	++
5	卷叶蛛科 Dictynidae	10.00	+++	1.28	++	6.82	++	7.14	++	5.93	++
6	隐翅虫科幼虫 Staphylinidae	2.00	++	5.13	++	6.82	++	4.08	++	4.44	++
7	蚁科 Formicidae			5.13	++			3.06	++	2.59	++
8	虎甲科 Cicindelidae	2.00	++	3.85	++			1.02	++	1.85	++
9	蚜科 Aphididae	2.00	++	1.28	++			3.06	++	1.85	++
10	褐蛉科幼虫 Hemerobiidae	4.00	++	1.28	++			2.04	++	1.85	++
11	夜蛾科幼虫 Noctuidae	4.00	++	2.56	++			1.02	++	1.85	++
12	长奇盲蛛科 Phalangiidae	6.00	++					1.02	++	1.48	++
13	隆头蛛科 Dictynidae							2.04	++	0.74	+
14	盲蝽科 Miridae	2.00	++	1.28	++					0.74	+
15	瓢虫科幼虫 Coccinellidae	2.00	++			2.27	++			0.74	+
16	步甲科幼虫 Carabidae	2.00	++	1.28	++					0.74	+
17	扁甲科幼虫 Cucujidae					4.55	++			0.74	+
18	实蝇科 Trypetidae							2.04	++	0.74	+
19	柄腹细蜂科 Heloridae	2.00	++					1.02	++	0.74	+
20	蚜科若虫 Aphididae	2.00	++	1.28	++					0.74	+
21	逸蛛科 Zoropsidae							1.02	++	0.37	+
22	近管蛛科 Anyphaenidae							1.02	++	0.37	+
23	长角象甲科 Anthribidae							1.02	++	0.37	+
24	叶甲科幼虫 Chrysomelidae					2.27	++			0.37	+
25	象甲科 Curculionidae							1.02	++	0.37	+
26	大蚊科幼虫 Tipulidae							1.02	++	0.37	+
27	姬螬科 Nabidae			1.28	++					0.37	+
28	叩甲科幼虫 Elateridae			1.28	++					0.37	+
29	蝗科 Acrididae							1.02	++	0.37	+
30	网蝽科 Tingidae	2.00	++							0.37	+
31	啮虫科 Psocidae							1.02	++	0.37	+
32	叶蝉科若虫 Cicadellidae							1.02	++	0.37	+
33	红蝽科 Pyrrhocoridae							1.02	++	0.37	+
34	葬甲科 Silphidae							1.02	++	0.37	+
35	姬螬科若虫 Nabidae			1.28	++					0.37	+
36	网蝽科若虫 Tingidae	2.00	++							0.37	+
37	地蜈蚣科 Geophilidae	2.00	++							0.37	+
类群数合计 Total groups		19		15		8		25		37	

+++ 优势类群, 个体数占总数的 10% 以上; ++ 常见类群, 个体数占总数的 1% ~ 10%; + 稀有类群, 个体数占总数的 1% 以下
 + Dominant group, individual number is more than 10% of total individuals; ++ Common group, individual number is between 1% and 10%; + Rare group, individual number is less than 10%

未进行人工恢复植被的裸露边坡,获中小型土壤动物 11 类,29 只。人工恢复植被的 4 个生境共获中小型土壤动物 38 类,12 824 只,隶属于 3 门 5 纲 13 目 26 科。各生境的类群数和个体数均高于未进行人工恢复植被的裸露边坡。在全部中小型土壤动物中,线虫(Nematoda)和节跳虫(Isotomidae)为优势类群,其个体数占总数的 80.53%;革螨亚目(Gamasida)、辐螨亚目(Actinedida)、甲螨亚目(Oribatida)和球角跳虫科(Hypogastruridae)为常见类群,个体数占总数的 17.79%;其余 32 类为稀有类群,其类群数占总类群数的 84.21%,而个体数仅占总数的 1.68%(表 3)。人工恢复植被后各边坡线虫(Nematoda)、蛱蝶类(革螨亚目、辐螨亚目、甲螨亚目)、弹尾类(节跳虫、球角跳虫、山跳虫)的个体数逐渐增多,中小型土壤动物的种类趋于复杂化。

表 3 各生境中小型土壤动物组成

Table 3 Composition of soil meso-microfauna in different habitats

序号 No.	动物名称 Name of soil fauna	A		B		C		D		E		(%) 多度 Abundance	
		(%)	多度 Abundance	(%)	多度 Abundance	(%)	多度 Abundance	(%)	多度 Abundance	(%)	多度 Abundance	(%)	多度 Abundance
1	线虫 Nematoda	27.59	+++	46.68	+++	59.44	+++	58.73	+++	45.98	+++	52.92	+++
2	节跳虫科 Isotomidae	13.79	+++	23.60	+++	14.25	+++	32.89	+++	38.81	+++	27.61	+++
3	革螨亚目 Gamasida	13.79	+++	11.94	+++	10.70	+++	1.48	++	6.92	++	7.59	++
4	辐螨亚目 Actinedida	10.34	+++	10.66	+++	12.23	+++	1.91	++	1.71	++	6.40	++
5	甲螨亚目 Oribatida	3.45	++	4.10	++	0.97	+	0.06	+	4.93	++	2.47	++
6	球角跳虫科 Hypogastruridae			0.92	+	0.82	+	3.52	++	0.17	+	1.32	++
7	山跳虫科 Pseudachorutidae					0.71	+	0.03	+	0.63	+	0.38	+
8	隐翅虫科幼虫 Staphylinidae	3.45	++	0.32	+	0.34	+			0.19	+	0.22	+
9	蚜科若虫 Aphididae			0.97	+	0.06	+					0.20	+
10	鳞跳虫科 Tomoceridae	10.34	+++	0.12	+	0.06	+	0.22	+			0.12	+
11	地跳虫科 Oncopoduridae							0.38	+	0.03	+	0.10	+
12	绫跳虫科 Entomobryidae					0.03	+	0.38	+			0.10	+
13	隐翅虫科 Staphylinidae	3.45	++			0.06	+	0.06	+	0.17	+	0.09	+
14	蚜科 Aphididae			0.20	+	0.03	+	0.03	+	0.06	+	0.07	+
15	象甲科幼虫 Curculionidae			0.04	+	0.14	+					0.05	+
16	叶甲科幼虫 Chrysomelidae			0.24	+							0.05	+
17	大蚊科幼虫 Tipulidae					0.11	+			0.06	+	0.05	+
18	蓟马科 Thripidae	6.90	++	0.04	+					0.06	+	0.04	+
19	蜈蚣科 Scolopendrellidae									0.11	+	0.03	+
20	大蚊科 Tipulidae					0.03	+	0.06	+			0.02	+
21	瘿蚊科 Cecidomyiidae			0.08	+					0.03	+	0.02	+
22	毛蠓科 Psychodidae							0.06	+			0.02	+
23	葬甲科 Silphidae									0.06	+	0.02	+
24	线蚓科 Enchytraeidae							0.03	+			0.01	+
25	拟平腹蛛科 Zodariidae	3.45	++									0.01	+
26	卷叶蛛科 Dictynidae			0.04	+							0.01	+
27	褐蛉科幼虫 Hemerobiidae							0.03	+			0.01	+
28	草蝇科 Pallopteridae							0.03	+			0.01	+
29	小蜂总科 Chalcidoidea									0.03	+	0.01	+
30	缘蝽科 Coreidae							0.03	+			0.01	+
31	瘿蚊科幼虫 Cecidomyiidae			0.04	+							0.01	+
32	蓟马科若虫 Thripidae							0.03	+			0.01	+
33	摇蚊科 Chironomidae									0.03	+	0.01	+
34	叶蝉科 Jassidae									0.03	+	0.01	+
35	毛蠓科幼虫 Psychodidae							0.03	+			0.01	+
36	叶蝉科若虫 Jassidae					0.03	+					0.01	+
37	金龟子科 Scarabaeidae									0.03	+	0.01	+
38	圆跳虫科 Sminthuridae	3.45										0.01	+
类群数合计 Total groups		11		16		17		20		20		38	

+++ 优势类群,个体数占总数的 10% 以上; ++ 常见类群,个体数占总数的 1% ~ 10%; + 稀有类群,个体数占总数的 1% 以下

+ Dominant group, individual number is more than 10% of total individuals; ++ Common group, individual number is between 1% and 10%; + Rare group, individual number is less than 10%

通过对未进行人工恢复植被的裸露边坡、人工恢复植被当年和一年的边坡不同生境内各 3 个样方所获大型土壤动物的类群数和个体数进行方差分析,经显著性检验,大型土壤动物类群数($F = 12.067, P < 0.01, df = 14$)差异极显著,个体数差异不显著($F = 3.166, P > 0.05, df = 14$)。对中小型土壤动物的类群数和个体数进行方差分析,经显著性检验,中小型土壤动物类群数($F = 4.674, P < 0.05, df = 14$),个体数($F = 7.160, P < 0.05, df = 14$)差异均显著。人工恢复植被活动对土壤动物的种类组成和个体数量产生重要影响。人工恢复植被后有更多的稀有类群侵入边坡,在土壤中定居并与其它土壤动物形成互利共生复杂的食物网^[21,22]。

3.2 人工恢复植被后土壤动物空间分布多样性变化

人工恢复植被后土壤动物迅速侵入公路边坡并定居,其类群和个体数量迅速增长。进行多群落 *DIC* 多样性指数计算,结果为人工恢复植被 1 年后中小型土壤动物的多样性高于人工恢复植被当年,如生境 D (3.790) > 生境 B (3.283) 和生境 E (4.333) > 生境 C (3.573); 西北坡土壤动物的多样性均高于东南坡,如生境 C (3.573) > 生境 B (3.283) 和生境 E (4.333) > 生境 D (3.790)。调查中发现,西北坡植物长势好于东南坡,同时西北坡土壤基质中有机质、全 N 含量和土壤含水率高于东南坡(表 4),这些因子的综合作用导致人工恢复植被的西北边坡土壤动物更丰富。

人工恢复植被 1 年后西北坡土壤动物的类群和个体数量高于人工恢复植被当年的同向边坡,因为人工恢复植被后边坡的土壤环境得到改善、植物种类增加,当年人工恢复植被的植物群落中,优势种为草木樨,其次是无芒雀麦。草木樨为 2 年生草本植物,当年处于生长期,虽未不开花结实,但地下部分生长很快,第二年开花结实,增加土壤的有机质和 N、P 含量^[23]。无芒雀麦为多年生草本植物,须根细密,当年主要生长地下部分,第 2 年开始,地上部分生长大大加快,生物量增加,能够为土壤动物提供更丰富的食物。因此会使更多的土壤动物侵入边坡土壤中,同时分解植物残落物,促进植物更好的生长发育^[24,25]。符合 Crisp 的结论,即增加地表植被产生更多生态位,从而使土壤动物的种类更加丰富^[26]。

表 4 各生境主要土壤环境因子指标

Table 4 Indexes of main soil ecological factors in different habitats

生境 Habitats	层次 Layers	pH 值 pH value	有机质 Soil organic matter (g/kg)	全 N Total N (g/kg)	全 P Total P (g/kg)	全 K Total K (g/kg)	自然含水量 Soil moisture (g/kg)
A	0 ~ 5cm	8.73	14.30	0.27	0.43	12.81	143.35
	5 ~ 10cm	8.45	7.46	0.36	0.41	17.49	171.39
B	0 ~ 5cm	7.39	336.66	9.18	1.09	16.26	833.20
	5 ~ 10cm	8.25	27.13	1.08	0.67	22.44	180.93
C	0 ~ 5cm	7.55	395.34	10.83	1.00	14.36	988.77
	5 ~ 10cm	7.99	91.29	2.74	1.13	9.86	363.11
D	0 ~ 5cm	6.26	433.21	10.16	1.22	13.53	1140.02
	5 ~ 10cm	7.38	66.06	2.27	0.52	6.50	110.35
E	0 ~ 5cm	6.28	476.01	14.60	1.19	14.00	1296.52
	5 ~ 10cm	7.58	62.88	2.09	0.73	19.23	164.97

隐翅虫科(Staphylinidae)、卷叶蛛科(Dictynidae)和球角跳虫科(Hypogastruridae)在人工恢复植被后各坡均有出现,这些土壤动物可视为人工恢复植被过程中土壤动物入侵的先锋类群。象甲科幼虫(Curculionidae)为人工恢复植被当年两边坡的优势类群。随着人工恢复植被时间的延长,边坡中土壤动物的优势类群发生变化。人工恢复植被一年后隐翅虫科(Staphylinidae)和步甲科(Carabidae)成为优势类群,这些捕食性土壤动物类群侵入,使食物网更加复杂,群落的稳定性增强。人工恢复植被后线虫(Nematoda)、辐螨亚目(Actinedida)、革螨亚目(Gamasida)的个体数迅速增长,如线虫在裸露公路边坡为 8 只,人工恢复植被当年的两坡平均为 1628 只;辐螨在裸露公路边坡为 3 只,人工恢复植被当年的两坡平均为 348 只;革螨在裸露公路边坡为 4 只,

人工恢复植被当年的两坡平均为 337 只。人工恢复植被后 1a, 线虫的个体数量变为 1 770 只, 辐螨为 62 只, 革螨为 149 只, 线虫的个体数量略增加, 而辐螨和革螨的个体数量趋于下降。这与人工恢复植被后生境的环境条件改善, 这些种群迅速增长, 随着种类的不断的增加, 种间的竞争激烈, 使其个体数量减少, 最后趋于稳定水平^[27,28]。

生物种间相关性通常是由于群落生境的差异影响了它们的分布而引起的。物种间相关性最普遍的研究是记录它们在一系列取样过程中的存在与否。以存在与不存在为基础的种结合指数能很好地指示两个物种间的相关性。人工恢复植被引起了边坡中土壤动物类群分布的差异。本文采用结合指数计算了大型和中小型土壤动物的优势类群和常见类群间的相关性, 结果见表 5。

表 5 主要土壤动物结合指数
Table 5 The integration index of main soil fauna

序号 No.	大型土壤动物 Soil macrofauna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	象甲科幼虫 Curculionidae	1.00										
2	隐翅虫科 Staphylinidae	0.75	1.00									
3	步甲科 Carabidae	0.50	0.75	1.00								
4	拟平腹蛛科 Zodariidae	0.50	0.75	1.00	1.00							
5	卷叶蛛科 Dictynidae	0.75	1.00	0.75	0.75	1.00						
6	隐翅虫科幼虫 Staphylinidae	0.75	1.00	0.75	0.75	1.00	1.00					
7	蚁科 Formicidae	0.67	0.50	0.25	0.25	0.50	0.50	1.00				
8	虎甲科 Cicindelidae	1.00	0.75	0.50	0.50	0.75	0.75	0.67	1.00			
9	蚜科 Aphididae	1.00	0.75	0.50	0.50	0.75	0.75	0.67	1.00	1.00		
10	褐蛉科幼虫 Hemerobiidae	1.00	0.75	0.50	0.50	0.75	0.75	0.67	1.00	1.00	1.00	
11	夜蛾科幼虫 Noctuidae	1.00	0.75	0.50	0.50	0.75	0.75	0.67	1.00	1.00	1.00	1.00
12	长奇盲蛛科 Phalangidae	0.67	0.50	0.67	0.67	0.50	0.50	0.33	0.67	0.67	0.67	0.67
序号 No.	中小型土壤动物 Soil meso-microfauna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	线虫 Nematoda	1.00										
2	节跳虫科 Isotomidae	1.00	1.00									
3	革螨亚目 Gamasida	1.00	1.00	1.00								
4	辐螨亚目 Actinedida	1.00	1.00	1.00	1.00							
5	甲螨亚目 Oribatida	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00						
6	球角跳虫科 Hypogastruridae	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00					
7	山跳虫科 Pseudoscorpionidae	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	1.00				
8	隐翅虫科幼虫 Staphylinidae	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.50	1.00			
9	蚜科若虫 Aphididae	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.25	0.67	1.00		
10	鳞跳虫科 Tomoceridae	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.50	0.50	0.67	1.00	
11	地跳虫科 Oncopoduridae	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.67	0.25	0	0.25	1.00
12	绫跳虫科 Entomobryidae	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.67	0.25	0.33	0.67	0.33

由表 5 可以看出, 指数最大为 1.00, 最小为 0。大型土壤动物中隐翅虫(成虫和幼虫)及蜘蛛(卷叶蛛和拟平腹蛛), 它们之间相关性大, 共同出现在人工恢复植被后各边坡, 并且个体数多, 处于食物链中相同或相近的营养级。象甲科幼虫(Curculionidae)与虎甲科(Cicindelidae)、蚜科(Aphididae)、褐蛉科幼虫(Hemerobiidae)和夜蛾科幼虫(Noctuidae), 两两同时出现在同一边坡, 表现出最大的相关性, 并且个体数也较多。中小型土壤动物中线虫(Nematoda)、节跳虫(Isotomidae)、辐螨亚目(Actinedida)、革螨亚目(Gamasida)和甲螨亚目(Oribatida)这几类共同出现在人工恢复植被后各边坡, 并且个体数多, 它们之间的相关性大。蚜科(Aphididae)若虫和地跳虫科(Oncopoduridae)的结合指数为 0, 说明它们相关性差, 不在相同边坡同时出现。

稀有类群间的结合指数低,它们彼此间相关性差。

无论是大型还是中小型土壤动物个体数的垂直分布特征类似,即具有表聚性(图1)。沿着土壤剖面方向向下,土壤动物的种类和数量逐渐减少,类群数和个体数均为 I > II > III > IV 层。I 层个体数占总数的 49.27%, II 层个体数占总数的 35.89%, III 层个体数占总数的 9.62% 和 IV 层个体数占总数的 5.23%。从图1可以看出, E 生境中有更多的大型土壤动物个体趋向生活于 I 层,这与人工恢复植被 1a 后土壤表层有较多的枯落物,土壤的水热条件更利于土壤动物的生存有关^[29]。由于土壤动物的分布常随微生境的改变而上下迁移,因此土壤理化性质的垂直分异,引起土壤动物分布差异。土壤动物在土体空间上的表聚现象,与土壤营养元素的表聚有关(表4)。

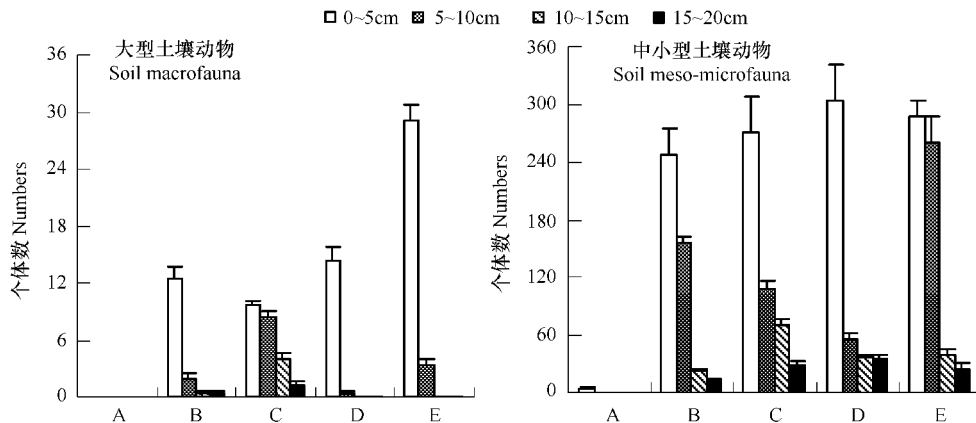


图1 各生境土壤动物个体数的垂直分布

Fig. 1 Vertical distribution of individuals of soil fauna in different habitats

3.3 主要土壤环境因子对土壤动物多样性的影响

土壤动物的多样性深受土壤环境因子的影响。各生境土壤环境因子与土壤动物的多样性指数的相关分析结果表明,土壤动物的多样性受土壤 pH 值、有机质、全 P 和全 N 含量的影响较大(表6)。土壤含水量对中小型土壤动物多样性的影响比大型土壤动物影响大。土壤全 K 含量与土壤动物的多样性相关不明显。土壤动物的多样性与 pH 值呈负相关,与土壤有机质、全 N、全 P 含量和自然含水量呈正相关。

表6 土壤动物与土壤环境因子的相关系数

Table 6 The correlation coefficient of soil fauna and soil environmental factors

项目 Item	大型土壤动物 Soil macrofauna					
	pH 值 pH value	有机质 Soil organic matter (g/kg)	全 N Total N (g/kg)	全 P Total P (g/kg)	全 K Total K (g/kg)	自然含水量 Soil moisture (g/kg)
DIC	-0.386	0.636	0.752	0.719	0.51	0.695
I	-0.665	0.880 *	0.948 *	0.892 *	0.048	0.927 *
G	-0.461	0.747	0.829	0.842	0.39	0.791
项目 Item	中小型土壤动物 Soil meso-microfauna					
	pH 值 pH value	有机质 Soil organic matter (g/kg)	全 N Total N (g/kg)	全 P Total P (g/kg)	全 K Total K (g/kg)	自然含水量 Soil moisture (g/kg)
DIC	-0.889 *	0.992 **	0.992 **	0.914 *	-0.143	0.987 **
I	-0.727	0.943 *	0.889 *	0.960 **	-0.337	0.928 *
G	-0.978 **	0.943 *	0.916 *	0.768	-0.367	0.921 *

I: 个体数, G: 类群数; * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$; I: Individual numbers, G: Group numbers

大型土壤动物的多样性指数与各土壤因子的相关系数较小。中小型土壤动物的多样性指数与各土壤因

子的相关系数较大。中小型土壤动物大部分时间在土壤中度过,个体数小,移动性较弱,获取食物的范围有限^[27]。中小型土壤动物的多样性指数均与土壤自然含水量、全 N 和有机质相关显著($P < 0.05$),其中 DIC 指数与有机质、全 N 和自然含水量的相关系数均较大,达到极显著相关($P < 0.01$, $df = 4$)。

为了解各种土壤环境因子对土壤动物的综合影响,对土壤环境因子进行主成分分析。以特征值 > 1 选取主成分,结果见表 7。第一主成分与 0~5cm 的土壤含水量、有机质、全 N 和全 P 的正相关程度高,说明第一主成分是 0~5cm 土壤含水量的主成分;第二主成分与 5~10cm 土壤含水量和全 P 的正相关程度较高,说明第二主成分是 5~10cm 土壤含水量的主成分;第三主成分与 0~5cm 的土壤全 K 的正相关程度较高,说明第三主成分是 0~5cm 全 K 的主成分。第一主成分、第二主成分和第三主成分的累计贡献率分别达到 56%、81% 和 97% 以上,它们可以代表环境中的主导因子。本区位于温带干旱半干旱区,年蒸发量大于年降水量,水分是制约该区生物生存的限制因子。土壤环境因子的主成分分析结果表明,0~5cm 和 5~10cm 的土壤含水量为环境因子的主导因子,符合当地的实际情况。

表 7 主成分载荷矩阵表

Table 7 Component score coefficient matrix

主成分 Principle component	pH 值 pH value		有机质(g/kg) Organic matter		全 N(g/kg) Total N	
	0~5cm	5~10cm	0~5cm	5~10cm	0~5cm	5~10cm
第一主成分 First principle component	-0.984	-0.886	0.967	0.669	0.931	0.744
第二主成分 Second principle component	0.147	0.131	0.251	0.643	0.280	0.565
第三主成分 Third principle component	0.091	0.443	0.041	-0.373	0.141	-0.357
主成分 Principle component	全磷(g/kg) Total P		全钾(g/kg) Total K		土壤含水量(%) Soil moisture	
	0~5cm	5~10cm	0~5cm	5~10cm	0~5cm	5~10cm
第一主成分 First principle component	0.974	0.281	0.294	-0.249	0.979	-0.179
第二主成分 Second principle component	0.091	0.953	0.250	-0.254	0.185	0.982
第三主成分 Third principle component	0.136	0.079	0.852	0.857	-0.008	0.017

4 结论与讨论

4.1 人工恢复植被对公路边坡土壤动物群落组成产生显著影响

本研究区在未进行人工恢复植被的裸露边坡没有发现大型土壤动物,土壤动物类群数大约是人工恢复植被边坡的 2/5~1/3 左右,土壤动物数量大约是人工恢复植被边坡的 1/59~1/125。人工恢复植被各生境大型和中小型土壤动物的多样性指数比较接近,与未进行人工恢复植被的裸露边坡的多样性存在明显差异。

公路边坡人工恢复植被,为土壤动物的生存创造了有利的条件。不同公路边坡的大型和中小型土壤动物的群落组成随着地表人工恢复植被而变化,土壤动物群落组成结构与植被状况(如植物盖度和凋落物厚度等)密切相关^[30]。植物群落组成和结构的变化直接影响到地表凋落物的数量和质量,进而可能对系统中的土壤动物群落结构和功能产生影响,并涉及演替的生态过程和生态恢复速度^[31]。徐国良等对鹤山丘陵退化生态系统植被恢复中土壤动物群落结构的研究认为,土壤动物的群落特征显示了退化生态系统的人工改造措施,并对其产生了积极效应^[22]。本文通过对人工恢复植被后土壤动物群落变化研究也表明,人工恢复植被对于公路边坡的生态恢复与重建产生了重要影响。

同一坡向不同恢复时间的边坡土壤动物差异与边坡植被的生长发育状况有关。人工恢复植被后公路边坡的植物种类增加,与之相应土壤环境得到改善。人工恢复植被的植物群落中,优势种为草木樨和无芒雀麦。草木樨为 2 年生草本植物,无芒雀麦为多年生草本植物。人工恢复植被当年这两种植物都处于生长期,第 2 年地上部分生长大大加快,生物量增加,能够为土壤动物提供更丰富的食物。同时,人工恢复植被 1 年后植物根系的发育,要好于当年人工恢复植被生境,而根系的发育不仅改变了土壤的营养结构,也为土壤动物提供了

食物。因此土壤动物的种类更加丰富。本研究中同向边坡人工恢复植被 1 年后中小型土壤动物的类群和个体数量均高于人工恢复植被当年。土壤动物的类群数和个体数量是否随着人工恢复植被时间的延长而增加,有待进一步深入研究。

4.2 影响公路边坡土壤动物组成的因素

本研究中不同公路边坡之间的土壤动物差异,不仅与人工干预的程度有关(是否铺设植生基质、开展人工恢复植被等),还与边坡的立地条件(如坡向)有关。由于本研究区西北向边坡的水热条件组合较好,不论是人工恢复植被当年还是人工恢复植被一年后,西北坡大型和中小型土壤动物的数量和多样性指数均高于东南坡。

土壤动物群落的组成和分布与立地和土壤条件有关。Connell 等研究表明地表植被结构通过改变微气候条件和土壤养分影响土壤动物的种群密度,生境多样性也深刻影响着土壤动物群落的多样性^[32]。Niemela 等研究发现局地小尺度的生境差异对土壤动物群落组成和多样性产生较大的影响^[33]。

公路边坡各生境无论是大型还是中小型土壤动物个体数的垂直分布特征类似,即具有表聚性。沿着土壤剖面方向向下,土壤动物的种类和数量逐渐减少。由于土壤动物的分布常随微生境的改变而上下迁移,因此土壤理化性质的垂直分异,引起土壤动物分布的差异。土壤动物在土体空间上的表聚现象,与土壤营养元素的表聚有关。土壤动物的多样性受土壤 pH 值、有机质、全 P 和全 N 含量的影响。Magura 等研究表明土壤动物对环境条件改变非常敏感,土壤的 pH、土壤密度和营养元素含量等对土壤动物的分布有明显影响^[34]。本研究发现土壤含水量对中小型土壤动物的多样性的影响较大。土壤全 K 含量与土壤动物的多样性相关不明显。土壤动物的多样性与 pH 值呈负相关,与土壤有机质、全 N、全 P 含量和自然含水量呈正相关。对土壤环境因子的主成分分析结果表明 0~5cm 和 5~10cm 的土壤含水量为主导因子。

References:

- [1] Chen A X, Ji D X, Deng S X. The Design Principles and Requirements of Protecting Ecological Environment in Highway Construction, Journal of Xi'an Highway University, 1999, 19: 15—17.
- [2] Alisa W C. From roadkill to road ecology: A review of the ecological effects of roads. Journal of Transport Geography, 2007, 15(5): 396—406.
- [3] Lin S C. The ecologically ideal road density for small islands: The case of Kinmen. Ecological Engineering, 2006, 14: 234—332.
- [4] Zhang M T, Qiu J D, Yan D. Application of External-Soil Spray Seeding Technique to Slopes Natural Eco-restoration and Protection. Science of Soil and Water Conservation, 2004, 2(3): 10—12.
- [5] Zong Y G, Zhou S Y, Peng P, *et al.* Perspective of road ecology development. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(11): 2396—2405.
- [6] Jiang Y, Tao Y, Gu W, *et al.* Assessment on Vegetation Restoration by Soil Spray Seeding Technique on Road Verge Slopes of Expressway. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(7): 147—152.
- [7] Tinsley M H, Simmons M T, Windhager S. The establishment success of native versus non-native herbaceous seed mixes on a revegetated roadside in Central Texas. Ecological Engineering, 2006, 26: 231—240.
- [8] Fang H, Lin J P. Slope Vegetation: Present Situation and Its Prospect. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(3): 283—286.
- [9] Andrés P, Zapater V, Pamplona M. Stabilization of motorway slopes with herbaceous cover, Catalonia, Spain. Restoration Ecology, 1996, 4: 51—60.
- [10] Fu B Q, Chen W, Dong X H, *et al.* The composition and structure of the four soil macrofaunas in Songshan Mountain in Beijing, Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(2): 215—223.
- [11] Yin X Q, Wang H X, Zhou D W. Characteristics of soil animals' communities in different agricultural ecosystem in the Songnen Grassland of China, Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(6): 1071—1078.
- [12] Lobry de Bruyn L A. Ants as bioindicators of soil function in rural environments. Agriculture, Ecosystem and Environment, 1999, 74: 425—441.
- [13] Paoletti M G, Sommagio D, Favretto M R, *et al.* Earthworms as useful bioindicators of agroecosystem sustainability in orchards and vineyards with different inputs. Applied Soil Ecology, 1998, 10: 137—150.
- [14] Didden W, Rmbke J. Enchytraeids as indicator organisms for chemical stress in terrestrial ecosystems. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2001, 50: 25—43.
- [15] Doring T F, Hiller A, Wehke S, *et al.* Biotic indicators of carabid species richness on organically and conventionally managed arable fields. Agriculture, Ecosystem and Environment, 2003, 98: 133—139.
- [16] Ponge J F, Gilletta S, Dubs F. Collembolan communities as bioindicators of land use intensification. Soil Biology & Biochemistry, 2003, 35: 813—

826.

- [17] Jun-ichi AOKI. Soil zoology. Japan. Tokyo: Hokuryukan, 1973. 1—22.
- [18] Institute of Soil Science of Chinese Academy of Sciences. Physical and Chemical Analysis of Soil. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Press, 1978. 96—134.
- [19] Kang B, Liu S R, Cai D X, *et al.* Species composition and correlation of understorey woody plants in chinese fir plantation in the lower subtropical area. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2173—2179.
- [20] Liao C H, Li J X, Yang X D, *et al.* Soil animal community diversity in the forest of the southern subtropical region, China. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5): 549—556.
- [21] Yi L, You W H, Song Y C. Soil animal communities in the litter of the evergreen broad-leaved forest at five succession stages in Tiantong. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 466—473.
- [22] Xu G L, Zhou G Y. The responses of soil fauna composition to forest restoration in Heshan, *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1670—1677.
- [23] Wu B G. *Melilotus suaveolens*, Breeding technology in agriculture, 2003, 17: 33.
- [24] Liu L. Influence of Foreign Plant Species on Ecology Environment in the Region of Highway. *Environmental Protection of Communication*, 2003, 24(2): 20—22.
- [25] De Deyn G B, Raaijmakers C E, Zoomer H R, *et al.* Soil invertebrate fauna enhances grassland succession and diversity. *Nature*, 2003, 69(33): 711—713.
- [26] Crisp P N, Dickinson K J M, Gibbs G W. Does native invertebrate diversity reflect native plant diversity? A case study from New Zealand and implications for conservation. *Biological Conservation*, 1998, 83(2): 209—220.
- [27] Sun R Y. Principle of zoecology. Beijing: Beijing Normal University Press, 2001. 110—224.
- [28] Scheu S. The soil food web: structure and perspectives. *European Journal of Soil Biology*, 2002, 38: 11—20.
- [29] Li B, Yang C, Lin P. Ecology. Beijing: Higher Education Press, 2000. 10—63.
- [30] Mikola J, Yeates G W, Wardle D A, *et al.* Response of soil food-web structure to defoliation of different plant species combinations in an experimental grassland community. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33: 205—214.
- [31] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, *et al.* Ecological Linkages Between Aboveground and Belowground Biota. *Science*, 2004, 304: 1629—1633.
- [32] Connell J H, Slatyer R O. Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization. *American Naturalist*, 1977. 111: 1119—1144.
- [33] Niemela J, Haila Y, Punttila P. The importance of small scale heterogeneity in boreal forests: Variation in diversity in forest-floor invertebrates across the succession gradient. *Ecography*, 1996, 19: 352—368.
- [34] Magura T, Tóthmérész B, Elek Z. Diversity and composition of carabids during a forestry cycle. *Biodiversity and Conservation*, 2003, 12: 73—85.

参考文献:

- [1] 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.
- [4] 章梦涛, 邱金淡, 颜冬. 客土喷播在边坡生态修复与防护中的应用. *中国水土保持科学*, 2004, 2(3): 10—12.
- [5] 宗跃光, 周尚意, 彭萍, 等. 道路生态学研究进展. *生态学报*, 2003, 23(11): 2396—2405.
- [6] 江源, 陶岩, 顾卫, 等. 高速公路边坡植被恢复效果研究. *公路交通科技*, 2007, 24(7): 147—152.
- [8] 方华, 林建平. 植被护坡现状与展望. *水土保持研究*, 2004, 11(3): 283—286.
- [10] 傅必谦, 陈卫, 董晓晖. 北京松山四种大型土壤动物群落组成和结构. *生态学报*, 2002, 22(2): 215—223.
- [11] 殷秀琴, 王海霞, 周道玮. 松嫩草原区不同农业生态系统土壤动物群落特征. *生态学报*, 2003, 23(6): 1071—1078.
- [17] 青木淳一. 土壤动物学. 东京: 北隆馆, 1973. 1—22.
- [18] 中国科学院南京土壤研究所, 土壤理化分析, 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 96—134.
- [19] 康冰, 刘世荣, 蔡道雄, 等. 亚热带人工杉木林灌木层物种组成及主要木本种间联结性. *生态学报*, 2005, 25(9): 2173—2179.
- [20] 廖崇惠, 李健雄, 黄海涛. 亚热带森林土壤动物群落多样性研究. *生态学报*, 1997, 17(5): 549—556.
- [21] 易兰, 由文辉, 宋永昌. 天童常绿阔叶林五个演替阶段凋落物中的土壤动物群落. *生态学报*, 2005, 25(3): 466—473.
- [22] 徐国良, 周国逸, 莫江明, 等. 鹤山丘陵退化生态系统植被恢复的土壤动物群落结构. *生态学报*, 2005, 25(7): 1670—1677.
- [23] 武保国. 白花草木樨. *农村养殖技术*, 2003, 17: 33.
- [24] 刘龙. 外来植物物种的引进对路域生态的影响. *交通环保*, 2003, 24(2): 20—22.
- [27] 孙儒泳. 动物生态学原理. 北京: 北京师范大学出版社, 1987. 124—222.
- [29] 李博, 杨特, 林鹏. 生态学. 北京: 高等教育出版社, 1999. 345—347.