

DOI: 10.11686/cyxb2025119

http://cyxb.magtech.com.cn

何佳奇, 吴林, 邱智敏, 等. 温州绕城高速公路边坡杂草物种多样性及群落特征. 草业学报, 2026, 35(2): 40—53.

HE Jia-qi, WU Lin, QIU Zhi-min, *et al.* Species diversity and community characteristics of weeds on the banks of the Wenzhou expressway. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(2): 40—53.

温州绕城高速公路边坡杂草物种多样性及群落特征

何佳奇¹, 吴林², 邱智敏¹, 高绪勇³, 高伦伦¹, 付双彬¹, 杨燕萍¹, 王培龙¹, 徐婉¹, 周庄^{1*}

(1. 浙江省亚热带作物研究所, 浙江温州 325005; 2. 温州市公路工程有限公司, 浙江温州 325804; 3. 福建农林大学风景园林与艺术学院, 福建福州 350002)

摘要: 杂草入侵导致道路边坡的植被退化, 影响边坡生态系统的恢复与稳定, 而研究边坡杂草的物种多样性和群落特征情况, 对掌握道路生境杂草群落演替规律以及制定精准的防治措施具有重要意义。本研究采用样带相邻格子法, 对浙江温州绕城高速公路7处地点的边坡植被进行了样方调查, 鉴定了杂草物种并筛选了群落的优势种, 评估了群落的多样性、稳定性和相似度。结果表明: 1) 样方中总共调查到65个杂草物种, 其中47.69%为一年生, 10.77%为一年生或二年生, 41.54%为多年生, 白花鬼针草、野老鹳草、黄鹌菜、苏门白酒草、五节芒、三裂叶薯蓣和翅果菊是优势杂草。2) 白花鬼针草占主导地位的群落丰富度指数和香农指数较高, 辛普森指数和均匀度指数较低; 五节芒占主导地位的群落丰富度指数较低, 辛普森指数和均匀度指数较高。3) 白花鬼针草和五节芒为优势种的群落较为稳定, 但由于不同地点的杂草群落类型和物种数量差异较大, 群落间相似度较低。总的来说, 温州绕城高速公路边坡杂草主要属于菊科和禾本科, 其中白花鬼针草(菊科代表杂草)入侵增加了群落多样性, 而五节芒(禾本科代表杂草)入侵降低了群落的多样性, 造成差异的原因是两个物种生长习性不同。此外, 本研究建议应结合当地实际情况, 合理搭配不同类型的护坡植物, 促进稳定可持续的群落系统形成, 增强对杂草入侵的抵抗能力。

关键词: 边坡; 杂草; 物种多样性; 优势种; 群落特征

Species diversity and community characteristics of weeds on the banks of the Wenzhou expressway

HE Jia-qi¹, WU Lin², QIU Zhi-min¹, GAO Xu-yong³, GAO Lun-lun¹, FU Shuang-bin¹, YANG Yan-ping¹, WANG Pei-long¹, XU Wan¹, ZHOU Zhuang^{1*}

1. Institute of Subtropical Crops of Zhejiang Province, Wenzhou 325005, China; 2. Wenzhou Highway Engineering Co., Ltd., Wenzhou 325804, China; 3. College of Landscape Architecture and the Arts, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

Abstract: Weed invasion leads to the degradation of vegetation on the banks of roadways, affecting the recovery and stability of the ecosystem. Studying the species diversity and community characteristics of weeds on road banks is very important for understanding the pattern of weed community succession and for designing precise control methods. In this study, a contiguous grid quadrat method was used to investigate the vegetation on the road bank at seven sites along the Wenzhou Expressway in Zhejiang Province. We identified the species of weeds and the dominant species in the weed communities, and evaluated the diversity, stability, and similarity of weed

收稿日期: 2025-04-07; 改回日期: 2025-05-21

基金项目: 农业农村部科技教育司项目—外来入侵物种危害评估与扩散风险测算(13230119)和农业农村部科技教育司项目—农业外来入侵物种发生危害及扩散风险等调查(13220138)资助。

作者简介: 何佳奇(1993—), 男, 浙江绍兴人, 博士。E-mail: hejq1993@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: zhuangchow@126.com

communities. The results show that: 1) 65 species of weeds were present at the sampling sites, of which 47.69% were annual, 10.77% were annual or biennial, and 41.54% were perennial. *Bidens alba*, *Geranium carolinianum*, *Youngia japonica*, *Erigeron sumatrensis*, *Miscanthus floridulus*, *Ipomoea triloba*, and *Lactuca indica* were identified as the dominant weeds. 2) Patrick's index and Shannon's index were higher in *B. alba*-dominated communities than in other communities, whereas Simpson's index and Pielou's index were lower in *B. alba*-dominated communities than in other communities. Patrick's index was lower in *M. floridulus*-dominated communities than in other communities, whereas Simpson's index and Pielou's index were higher. 3) The communities dominated by *B. alba* and *M. floridulus* were more stable than other communities. The similarity among different weed communities was low; i. e., the types and numbers of species differed among the communities. Overall, our results show that the weeds on the banks of the Wenzhou Expressway mainly belong to the Asteraceae and Poaceae families. Because of their different growth habits, the invasion of *B. alba* (the representative weed of the Asteraceae family) has increased the diversity of communities, while the invasion of *M. floridulus* (the representative weed of the Poaceae family) has reduced the diversity of communities. These results indicate that different types of plants should be considered according to the local situation when replanting road banks to promote the formation of a stable and sustainable community system and enhance resistance to weed invasion.

Key words: slope; weed; species diversity; dominant species; community characteristics

随着经济和科技的迅速发展,我国公路网络建设日益完善。据统计,截至 2019 年末我国公路里程已达 14.3 万 km,稳居世界首位^[1]。然而,每建设 1 km 公路形成的裸露坡面面积可达 5~7 万 m²,这不仅改变了地形地貌,扰动了土层结构,同时破坏了植物群落,降低了生物多样性,从而影响当地生态环境^[2-3]。有研究表明,道路建设降低了林地、草地、耕地、湿地等受人类干扰较低的土地覆被类型面积百分比,改变了不同土地覆被类型的植被净初级生产力^[4]。为缓解道路建设对生态带来的负面影响,国家大力推动交通运输生态文明建设,其中边坡植被的恢复与重建是路域生态恢复的重要组成部分。目前已基于不同地域的气候、地形等因素,从植物生长基材、植物种类配置等角度展开了边坡植被恢复技术研究。例如,在高寒地区推荐使用植生混凝土喷附技术^[5];在红壤区推荐使用多花木兰(*Magnolia multiflora*)和香根草(*Chrysopogon zizanioides*)作为主要边坡防护植物^[6];在温州地区,榿木(*Loropetalum chinense*)、麻叶绣线菊(*Spiraea cantoniensis*)、白花龙(*Styrax faberi*)、大叶胡枝子(*Lespedeza davidii*)、覆盆子(*Rubus idaeus*)、细梗络石(*Trachelospermum gracilipes*)和藤黄檀(*Dalbergia hancei*)适宜作为边坡生态恢复的重点植物物种^[7]。

杂草入侵是导致道路边坡植被退化的主要因素。杂草的生理代谢较为旺盛,生长速度较快,有利于其与边坡植物争夺光照、水分、肥料等营养资源;同时杂草种子的寿命长、抗性强、发芽力持久,表现出更强的繁殖能力^[8]。此外,外来杂草缺乏天敌制约,种群容易扩散,其化感作用也可通过抑制其他植物种子萌发和幼苗生长来增强自身的竞争力^[9]。研究表明杂草及其种子可附着在车辆表面并迁移至数百公里外^[10],因此道路运输网络是杂草扩散、入侵的主要途径。前人对公路沿线的本土植物和外来入侵植物进行分析发现,靠近公路的区域外来入侵植物物种出现频率明显增加,并对本地植物物种造成了负面影响^[11-12]。道路杂草不仅制约了边坡植被的恢复,同时容易遮挡视线、堵塞道路排水系统,危害行车安全。然而,目前对杂草的调查分析主要集中在农田、果园、林地和草甸^[13-17],有关高速公路边坡杂草分布、物种类型和群落特征情况的了解相对匮乏,因此有必要进行系统深入的调查,以期掌握高速公路边坡杂草群落演替规律和制定科学有效的防治措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 调查地区概况

温州市地处浙江省东南部,境内地势由西南向东北呈阶梯式倾斜,土壤成土母质主要有滨海相沉积物、河湖相沉积物、火成岩类风化物 and 沉积岩类风化物 4 大类,土壤类型主要包括水稻土、红壤、粗骨土、潮土和滨海盐土 5

大类^[18]。温州市属于中亚热带季风气候区,年日照时数为1622~1886 h,年降水量在1320~2030 mm,主要分布在3—9月(约占全年降水量的75%~83%),年平均气温在18℃左右,其中春季平均气温为14.7~17.1℃,夏季为25.8~28.2℃,秋季为17.5~20.7℃,冬季为6.0~8.2℃,气温年较差为19.7~20.2℃^[19]。

温州绕城高速公路是环绕温州都市圈的一条省级高速公路,规划总长度约154 km,连接温州乐清、永嘉、鹿城、瓯海、瑞安、平阳、龙湾、洞头等区域,沟通沈海高速公路、温丽高速公路、诸永高速公路、龙丽温高速公路、沿海高速复线等线路。由于温州市雨热资源丰沛,利于植物生长,绕城高速公路边坡广泛存在杂草滋生、入侵的情况(图1),严重影响道路安全和城市美观。



图1 温州绕城高速公路边坡杂草情况

Fig. 1 The situation of weed on the slope of Wenzhou Expressway

1.2 调查地点设置

2023年11月,沿温州市绕城高速公路选取7个地点,在每个地点的边坡设置一条长40 m的样带,对样带中出现的所有维管植物进行调查(图2和表1),统计其具体科属种和物种多度(出现次数)。随后,采用样带相邻格子法^[20]进行群落调查分析,每条样带间隔5 m设置1个样方,共设置8个样方,每个样方大小为1 m×1 m,对样方内杂草物种的盖度、密度和频度等群落特征进行调查记录,同时采集相应植物标本,在室内进行准确鉴定。

1.3 指示测定与方法

本研究根据《中国外来植物数据集》^[21]和《浙江植物志(新编)》^[22],将样方内调查到的植物物种按生活型分为一年生、一年生或二年生和多年生;按生存类别分为本土物种和外来物种,外来物种中达到入侵级别的特别注明。物种重要值综合反映了该物种在群落中的地位和作用,本研究根据物种的盖度、密度和频度等基础样方数据计算该物种的相对盖度、相对密度和相对频度,并计算其重要值:

$$\text{重要值} = (\text{相对盖度} + \text{相对密度} + \text{相对频度}) / 3 \times 100\% \quad (1)$$

群落多样性反映了调查地点物种的多样化程度,其中优势度指数(Berger-Parker index)表示优势度;丰富度指数(Patrick index)表示物种丰富度;辛普森指数(Simpson index)表示多样性出现的概率;香农指数(Shannon index)表示多样性的高低;均匀度指数(Pielou index)表示群落的均匀程度^[23-24]。群落相似性反映了不同群落构



图2 调查地点分布

Fig. 2 Distribution of investigation sites

成的相似程度,相似系数(Jaccard index)可用于评价不同调查地点的群落相似性^[25]。具体计算公式如下:

$$\text{Berger-Parker index } (d) = N/n_{\max} \tag{2}$$

$$\text{Patrick index } (d_{\text{Ma}}) = S \tag{3}$$

$$\text{Simpson index } (D) = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2, P_i^2 = \frac{n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)} \tag{4}$$

$$\text{Shannon index } (H_e) = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i, P_i = \frac{n_i}{N} \tag{5}$$

$$\text{Pielou index } (J_e) = \frac{H_e}{H_{\max}}, H_{\max} = \ln S \tag{6}$$

$$\text{Jaccard index } (C_j) = c/(a+b+c) \tag{7}$$

式中: n_{\max} 代表群落中最多物种的个体数量, N 代表物种的个体数量总和, n_i 代表第*i*个物种的个体数量, S 代表群落的总物种数量, P_i 代表第*i*个物种个体数量占所有物种个体数量总和的比例, a 、 b 分别代表调查地点A和调查地点B的总物种数, c 代表调查地点A和调查地点B共有的物种数。将群落Jaccard index划分为4个等级,分别代表不同相似程度: $0 \leq C_j \leq 0.25$ 为极不相似, $0.25 < C_j \leq 0.50$ 为中等不相似, $0.50 < C_j \leq 0.75$ 为中等相似, $0.75 < C_j \leq 1.00$ 为极为相似^[26]。

利用改良的Godron^[27]贡献定律法对杂草群落的稳定性进行评价^[28]。具体方法为:将群落中所有杂草物种根据相对盖度由大到小排列,计算群落中各个物种的种累积百分数和相对盖度累积百分数,具体计算公式如下:

$$\text{种累积百分数 } (X) = i/S \tag{8}$$

$$\text{种相对盖度累积百分数 } (Y) = \sum_{i=1}^S C_i \tag{9}$$

式中: i 代表第*i*个物种, S 代表群落的总物种数量, C_i 代表第*i*个物种的相对盖度。随后以种累积百分数为*x*轴,相对盖度累积百分数为*y*轴绘制散点图,以一元三次方程拟合曲线;将拟合曲线与直线 $y=100-x$ 相交,得到交点(x, y)即为稳定性参考点,计算交点坐标与理想稳定点坐标(20, 80)的欧氏距离(D),群落稳定值=1/D,群落稳定值越大,说明群落稳定性越高。

1.4 数据处理

运用SPSS 26.0和Excel 2010进行数据统计分析,用LSD法比较各调查地点群落多样性指数在0.05水平的差异显著性,运用Originlab 2021进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 边坡植被物种类型与组成

对7个地点的边坡进行物种调查,共发现植物153种,分属于46科119属(表2)。各科物种数及其占总植物物种数比例由大到小依次如下:菊科、禾本科各26种,各占16.99%;豆科14种,占9.15%;大戟科10种,占6.54%;唇形科5种,占3.27%;茜草科、旋花科、玄参科、蓼科、莎草科各4种,各占2.61%;金星蕨科、石竹科各3种,各占1.96%;茄科、牻牛儿苗科、紫草科、伞形科、山茶科、大麻科、金缕梅科、堇菜科、锦葵科、桑科、十字花科、荨麻科各2种,各占1.31%;海金沙科、葡萄科、酢浆草科、柳叶菜科、苋科、漆树科、鸭跖草科、百合科、报春花科、防己科、凤尾蕨科、海桐花科、黄杨科、夹竹桃科、景天科、蔷薇科、忍冬科、鼠李科、水龙骨科、五加科、榆科、樟科各1种,各占0.65%。比较7个调查地点中各科物种的多度,前5名分别为菊科(79)、禾本科(63)、大戟科(30)、豆科(21)和茜草科(15)。

表1 调查地点基本信息

Table 1 Basic situation of the investigation site

地点编号 Site number	区段 Zone	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔高度 Elevation (m)
1	马林头隧道口 Entrance of Malintou tunnel	120°45'47"	28°03'54"	63.5
2	K7-200	120°39'40"	28°05'31"	65.8
3	112-4	120°31'00"	27°50'18"	10.7
4	109-7	120°30'48"	27°48'32"	12.1
5	104-7	120°30'22"	27°46'10"	9.1
6	102-8	120°30'53"	27°45'37"	10.7
7	93-7	120°35'54"	27°44'32"	5.6

表2 边坡植被物种类型与组成

Table 2 Species types and composition of vegetation on the slope

科 Family	物种数 Species number	多度 Abundance	科 Family	物种数 Species number	多度 Abundance
菊科 Asteraceae	26	79	荨麻科 Urticaceae	2	2
禾本科 Poaceae	26	63	海金沙科 Lygodiaceae	1	5
豆科 Fabaceae	14	21	葡萄科 Vitaceae	1	4
大戟科 Euphorbiaceae	10	30	酢浆草科 Oxalidaceae	1	4
唇形科 Lamiaceae	5	8	柳叶菜科 Onagraceae	1	3
茜草科 Rubiaceae	4	15	苋科 Amaranthaceae	1	3
旋花科 Convolvulaceae	4	9	漆树科 Anacardiaceae	1	2
玄参科 Scrophulariaceae	4	7	鸭跖草科 Commelinaceae	1	2
蓼科 Polygonaceae	4	6	百合科 Liliaceae	1	1
莎草科 Cyperaceae	4	6	报春花科 Primulaceae	1	1
金星蕨科 Thelypteridaceae	3	3	防己科 Menispermaceae	1	1
石竹科 Caryophyllaceae	3	3	凤尾蕨科 Pteridaceae	1	1
茄科 Solanaceae	2	10	海桐花科 Pittosporaceae	1	1
牻牛儿苗科 Geraniaceae	2	6	黄杨科 Buxaceae	1	1
紫草科 Boraginaceae	2	6	夹竹桃科 Apocynaceae	1	1
伞形科 Apiaceae	2	4	景天科 Crassulaceae	1	1
山茶科 Theaceae	2	3	蔷薇科 Rosaceae	1	1
大麻科 Cannabaceae	2	2	忍冬科 Caprifoliaceae	1	1
金缕梅科 Hamamelidaceae	2	2	鼠李科 Rhamnaceae	1	1
堇菜科 Violaceae	2	2	水龙骨科 Polypodiaceae	1	1
锦葵科 Malvaceae	2	2	五加科 Araliaceae	1	1
桑科 Moraceae	2	2	榆科 Ulmaceae	1	1
十字花科 Brassicaceae	2	2	樟科 Lauraceae	1	1

2.2 边坡优势杂草

样方中共调查到65种杂草(表3)。从生活型来看,47.69%的杂草(31种)属于一年生,10.77%的杂草(7种)属于一年生或二年生,41.54%的杂草(27种)属于多年生。从生存类别来看,本土物种占56.92%(37种),外来物种占43.08%(28种);外来物种中入侵物种占67.86%(19种)。

将杂草划分为优势杂草(综合重要值 ≥ 5.0)、次优势杂草($3.0 \leq$ 综合重要值 < 5.0)、常见杂草($1.0 \leq$ 综合重要值 < 3.0)和一般杂草(综合重要值 < 1.0)^[29],白花鬼针草、野老鹳草、黄鹌菜、苏门白酒草、五节芒、三裂叶薯和翅果菊为优势杂草,藿香蓟和叶下珠为次优势杂草,血见愁、田菁、小叶大戟等13种杂草为常见杂草,复序飘拂草、南苦苣菜、小巢菜等43种杂草为一般杂草。不同杂草在不同调查地点的生长情况存在较大差异,以优势杂草为例,白花鬼针草和野老鹳草在5个地点中发现,且相对盖度、相对密度和相对频度均较高,因此重要值较大,应作为重点防治对象;黄鹌菜、苏门白酒草和三裂叶薯的出现频率较高(在6个地点中发现),在部分地点有较大的重要值,需保持关注,防止进一步扩散;翅果菊在5个地点中发现,在地点3、5和7的重要值较大;五节芒仅在地点2发现,但因其较高的相对盖度、相对密度和相对频度,重要值也较大。

2.3 边坡杂草群落特征分析

边坡杂草群落多样性指标如表4所示。7个地点杂草群落的优势度指数无显著差异($P > 0.05$)。地点1的丰富度指数最大,为6.375;地点3、4、5、6和7的丰富度指数相当,为4.000~6.125;地点2的丰富度指数最小且显著

续表 Continued Table

杂草物种 Weed species	生活型 Life form	生存类别 Survival classes	重要值 Importance value							综合 Totality
			地点1 Site 1	地点2 Site 2	地点3 Site 3	地点4 Site 4	地点5 Site 5	地点6 Site 6	地点7 Site 7	
狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	多年生 Perennial	外来 Exotic	0.00	0.00	0.00	0.00	1.01	5.31	0.00	0.80
丝毛雀稗 <i>Paspalum urvillei</i>	多年生 Perennial	入侵 Invasive	0.00	0.00	0.00	1.54	0.00	3.56	0.00	0.70
夜香牛 <i>Cyanthillium cinereum</i>	多年生 Perennial	本土 Native	0.00	10.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.69
雾水葛 <i>Pouzolzia zeylanica</i>	多年生 Perennial	本土 Native	3.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.69
酢浆草 <i>Oxalis corniculata</i>	多年生 Perennial	外来 Exotic	1.98	0.00	0.00	0.00	0.93	0.92	0.00	0.66
白花蛇舌草 <i>Scleromitrion diffusum</i>	一年生 Annual	本土 Native	0.95	0.00	0.00	0.00	1.78	1.29	0.00	0.66
香丝草 <i>Erigeron bonariensis</i>	一年生或二年生 Annual or biennial	入侵 Invasive	0.00	0.00	0.00	0.00	0.89	0.00	3.38	0.65
龙葵 <i>Solanum nigrum</i>	一年生 Annual	入侵 Invasive	0.81	0.00	0.00	1.13	1.87	0.00	0.00	0.62
母草 <i>Lindernia crustacea</i>	一年生 Annual	外来 Exotic	2.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.55
金毛耳草 <i>Hedyotis chrysotricha</i>	多年生 Perennial	本土 Native	2.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.54
牛筋草 <i>Eleusine indica</i>	一年生 Annual	本土 Native	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.75	0.00	0.50
空心莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	多年生 Perennial	入侵 Invasive	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00	1.06	0.50
白茅 <i>Imperata cylindrica</i>	多年生 Perennial	本土 Native	0.00	0.00	0.00	0.00	1.12	2.08	0.00	0.45
苦蕒 <i>Physalis angulata</i>	一年生 Annual	入侵 Invasive	0.00	0.00	0.00	0.00	1.84	0.00	0.98	0.45
长萼堇菜 <i>Viola inconspicua</i>	多年生 Perennial	本土 Native	0.00	0.00	0.00	0.00	2.28	0.00	0.00	0.41
马蹄金 <i>Dichondra micrantha</i>	多年生 Perennial	本土 Native	1.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38
水蜈蚣 <i>Kyllinga polyphylla</i>	多年生 Perennial	入侵 Invasive	1.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35
金色狗尾草 <i>Setaria pumila</i>	一年生 Annual	外来 Exotic	1.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32
飞扬草 <i>Euphorbia hirta</i>	一年生 Annual	入侵 Invasive	0.00	0.00	0.00	0.00	0.92	1.08	0.00	0.31
阔叶丰花草 <i>Spermacoce alata</i>	一年生 Annual	入侵 Invasive	1.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30
一点红 <i>Emilia sonchifolia</i>	一年生 Annual	本土 Native	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.98	0.29
蜜柑草 <i>Phyllanthus ussuriensis</i>	一年生 Annual	外来 Exotic	1.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29
球序卷耳 <i>Cerastium glomeratum</i>	一年生 Annual	入侵 Invasive	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.07	0.27
碎米莎草 <i>Cyperus iria</i>	一年生 Annual	本土 Native	1.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26
纤毛马唐 <i>Digitaria ciliaris</i>	一年生 Annual	本土 Native	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.79	0.00	0.22
葛麻姆 <i>Pueraria montana var. lobata</i>	多年生 Perennial	本土 Native	1.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21
华南毛蕨 <i>Cyclosorus parasiticus</i>	多年生 Perennial	本土 Native	0.00	3.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19
钻叶紫菀 <i>Symphotrichum subulatum</i>	一年生或二年生 Annual or biennial	入侵 Invasive	0.00	0.00	1.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19
柔枝莠竹 <i>Microstegium vimineum</i>	一年生 Annual	本土 Native	0.00	0.00	0.00	0.00	1.05	0.00	0.00	0.18
络石 <i>Trachelospermum jasminoides</i>	多年生 Perennial	本土 Native	0.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17
野梧桐 <i>Mallotus japonicus</i>	多年生 Perennial	本土 Native	0.00	0.00	0.00	0.00	0.97	0.00	0.00	0.16
细风轮菜 <i>Clinopodium gracile</i>	多年生 Perennial	本土 Native	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.13	0.00	0.15
丁香蓼 <i>Ludwigia prostrata</i>	一年生 Annual	本土 Native	0.00	0.00	1.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15
针毛蕨 <i>Macrothelypteris oligophlebia</i>	多年生 Perennial	本土 Native	0.00	2.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15
紫花地丁 <i>Viola philippica</i>	多年生 Perennial	本土 Native	0.00	0.00	0.00	0.00	0.86	0.00	0.00	0.15
千根草 <i>Euphorbia thymifolia</i>	一年生 Annual	本土 Native	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.14
匍匐大戟 <i>Euphorbia prostrata</i>	一年生 Annual	入侵 Invasive	0.00	0.00	0.00	0.00	0.82	0.00	0.00	0.14
草木樨 <i>Melilotus officinalis</i>	一年生或二年生 Annual or biennial	入侵 Invasive	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.92	0.14
碎米荠 <i>Cardamine occulta</i>	一年生 Annual	本土 Native	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.94	0.00	0.13
拟鼠鞠草 <i>Pseudognaphalium affine</i>	一年生或二年生 Annual or biennial	本土 Native	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.92	0.00	0.13

表 4 边坡杂草群落多样性

Table 4 Species diversity of weed communities on the slope

地点 Site	优势度指数 Berger-Parker index	丰富度指数 Patrick index	辛普森指数 Simpson index	香农指数 Shannon index	均匀度指数 Pielou index
1	2.293±0.347a	6.375±0.905a	0.601±0.095b	1.274±0.214a	0.683±0.072b
2	2.221±0.171a	3.125±0.227c	0.843±0.049a	1.050±0.076ab	0.939±0.023a
3	1.644±0.208a	4.000±0.627bc	0.456±0.112b	0.781±0.175b	0.648±0.101b
4	1.996±0.210a	5.625±0.532ab	0.591±0.065b	1.134±0.116ab	0.667±0.064b
5	1.830±0.238a	6.125±0.953ab	0.539±0.069b	1.107±0.159ab	0.626±0.053b
6	1.896±0.271a	5.500±1.150ab	0.528±0.112b	1.088±0.245ab	0.693±0.067b
7	2.233±0.219a	5.625±0.460ab	0.664±0.045ab	1.272±0.088a	0.756±0.056ab

注：同列不同小写字母表示群落多样性指数差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters in the same column indicated the significant difference in community diversity index ($P < 0.05$).

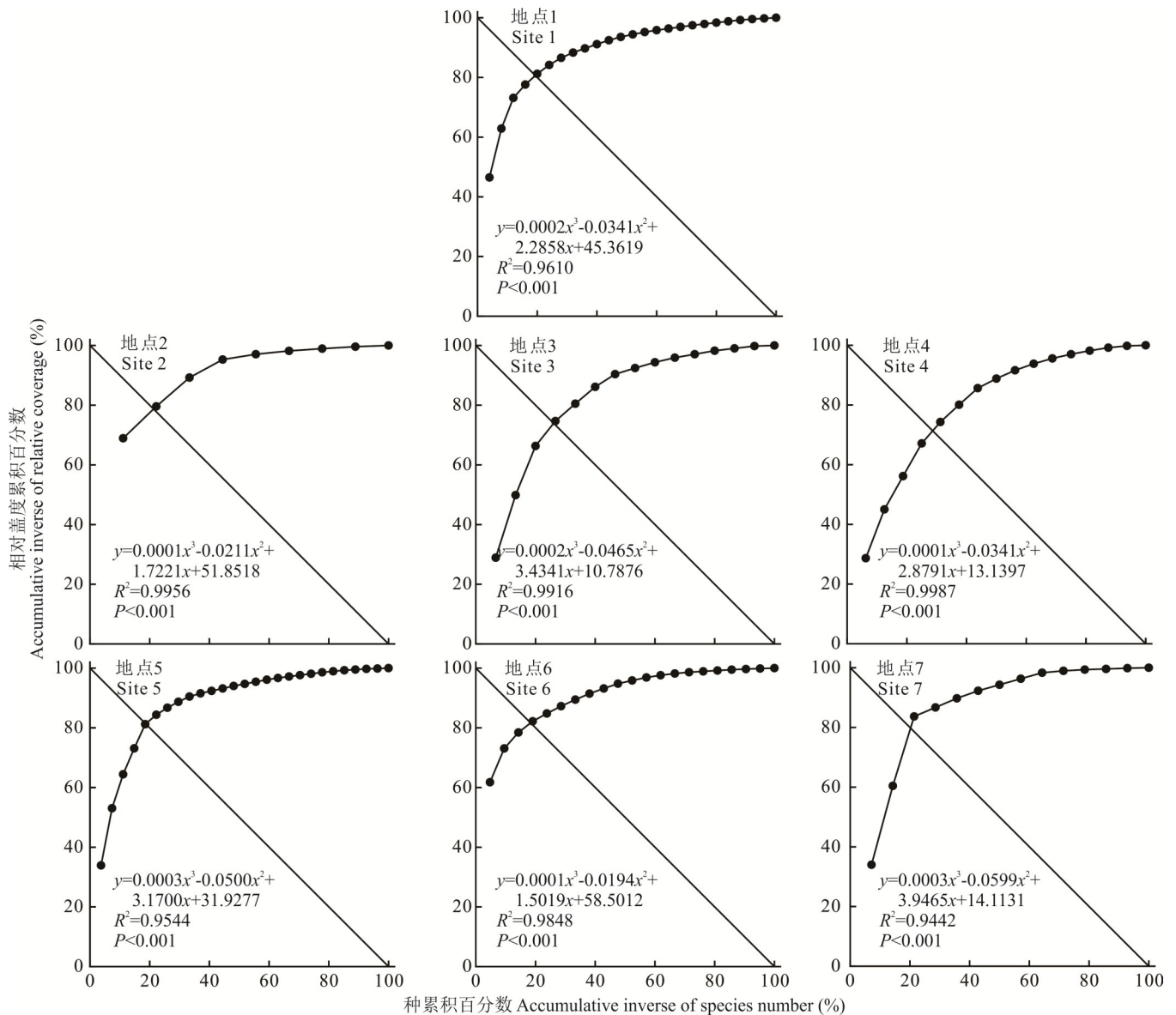


图 3 边坡杂草 Godron^[27]群落稳定性拟合曲线

Fig. 3 Godron^[27] stability simulated curves of weed community on the slope

7个调查地点间群落相似程度存在极不相似、中等不相似和中等相似3类情况(图4)。具体分析发现,地点1和2与其他地点的共有物种数均较少,群落间相似程度为极不相似。地点3与地点4共有11个物种,相似系数为0.550,群落间相似程度为中等相似;与地点5共有8个物种,相似系数为0.235,群落间相似程度为极不相似;与地点6、7分别共有8、6个物种,相似系数分别为0.286、0.261,群落间相似程度为中等不相似。地点4与地点5、6分别共有10、11个物种,相似系数分别为0.303、0.423,群落间相似程度为中等不相似;与地点7共有6个物种,相似系数为0.250,群落间相似程度为极不相似。地点5与地点6、7分别共有13、9个物种,相似系数分别为0.371、0.281,群落间相似程度为中等不相似。地点6与地点7共有4个物种,相似系数为0.129,群落间相似程度为极不相似。

表5 边坡杂草群落稳定性

Table 5 Stability of weed communities on the slope

地点 Site	拟合曲线 Fitting curve	决定系数 Determination coefficient	交点坐标 Intersection coordinate	欧氏距离 Euclidean distance	群落稳定值 Communities stability index
1	$y=0.0002x^3-0.0341x^2+2.2858x+45.3619$	0.9610	(20.57, 79.43)	0.806	1.2405
2	$y=0.0001x^3-0.0211x^2+1.7221x+51.8518$	0.9956	(20.74, 79.26)	1.047	0.9555
3	$y=0.0002x^3-0.0465x^2+3.4341x+10.7876$	0.9916	(26.67, 73.33)	9.433	0.1060
4	$y=0.0001x^3-0.0341x^2+2.8791x+13.1397$	0.9987	(28.83, 71.18)	12.480	0.0801
5	$y=0.0003x^3-0.0500x^2+3.1700x+31.9277$	0.9544	(21.08, 78.93)	1.520	0.6578
6	$y=0.0001x^3-0.0194x^2+1.5019x+58.5012$	0.9848	(19.20, 80.80)	1.131	0.8839
7	$y=0.0003x^3-0.0599x^2+3.9465x+14.1131$	0.9442	(23.09, 76.89)	4.384	0.2281

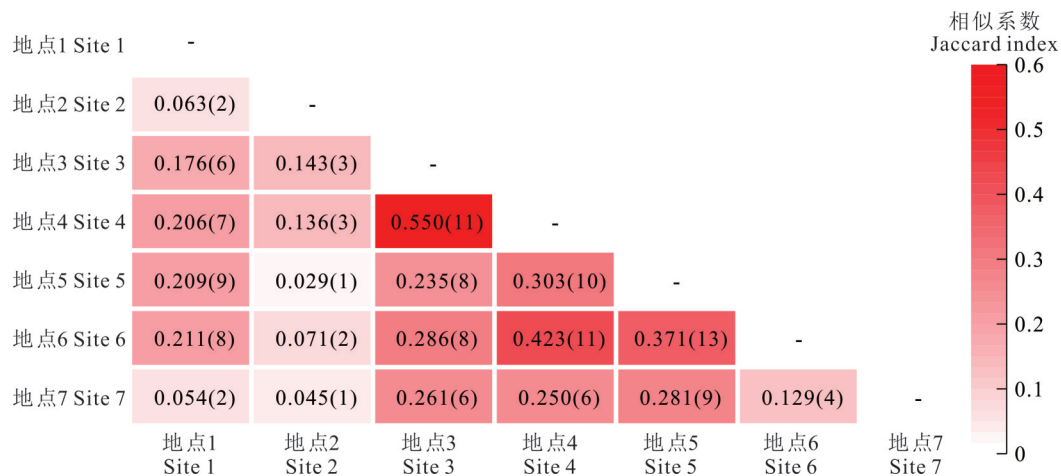


图4 边坡杂草群落相似系数

Fig. 4 Jaccard index of weed community on the slope

括号内数字表示2个样地共有的物种数。Number in bracket is the number of species shared by the two communities.

3 讨论与结论

3.1 边坡杂草的物种多样性

温州绕城高速公路边坡调查到的杂草共46科153种,其中菊科和禾本科的物种数和多度较大,这与Hayasaka等^[30]针对城乡道路杂草的研究结论相似。菊科和禾本科植物的生态适应能力较强,在平原、高山、草原、河滩等地形均有分布,又因其生长速率快、繁殖能力强,还可以通过化感作用等手段改造周围生长环境以促进

自身生长^[31-34],因此成为绕城高速公路边坡最主要的杂草。陈菁^[35]调查发现我国外来入侵植物主要属于菊科、豆科和禾本科,北美洲、南美洲和欧洲是其主要的来源地,但外来入侵植物物种数占对应科总物种数的比重并不高。本研究中,菊科杂草和禾本科杂草的生存类别存在较大差异,菊科杂草中的外来物种占比较大(61.54%),远大于禾本科杂草中的外来物种占比(15.38%)。究其原因,一方面是菊科植物具备一定的观赏、药用价值,一些物种比如加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)起初由人为引种进入我国,后逸生成为恶性杂草^[36];另一方面,包括钻叶紫菀在内的部分菊科物种主要伴随商品贸易或旅游活动无意引入^[35]。Zhu等^[37]列举了50种我国目前防治难度较大的外来入侵杂草,其中18种(36%)菊科物种对农田、果园、森林、住宅、路域、河道等区域均存在不同程度的侵扰。此外,调查中发现的部分杂草(藿香蓟、空心莲子草、苏门白酒草和小蓬草)已被列入农业农村部、自然资源部、生态环境部、住房和城乡建设部、海关总署和国家林草局于2022年联合发布的《重点管理外来入侵物种名录》^[38],需保持重点关注,防止其扩散蔓延。

关于哪一类生活型的杂草具有更强的竞争性目前结论并不一致,一年生杂草生长迅速,种子量大,因此表现出更强的繁殖能力,而多年生杂草植株相对更加高大、根系更为发达,对空间、光照和养分等资源的截获能力更强^[26,39]。在本研究中,样方内调查到的优势杂草和次优势杂草大多为一年生或二年生,这与当地气候条件、土壤条件和道路管理措施等因素有关。温州地处我国东南沿海地区,气候温暖、降水充沛,有研究发现雨热条件较好的南方地区适合杂草生长,杂草种类和数量较多且大多为一、二年生;而北方地区由于气温较低、雨水较少,杂草种类较少,大多为二年生或多年生杂草^[40]。同时,与农田、草原等其他生境相比,公路边坡土层大多是在裸露的路基两侧再覆土形成,因此土壤的深度较浅且较为贫瘠,不利于植物生长,此时根系浅短的一年生、二年生杂草因其对水分、养分的需求量更少,比根系粗壮的多年生杂草表现出更强的竞争性。此外,高速公路养护过程中会定期对边坡杂草进行防治,生活史较短的一年生、二年生杂草可以在高强度和高频率的人为干扰环境下快速完成生长、繁衍,帮助种群扩张,而多年生杂草更容易在还未进入繁殖阶段时即被灭除。

3.2 边坡杂草的群落特征

前人对不同城市生境中加拿大一枝黄花的入侵情况分析发现,其在轻度入侵情况下促进了群落的多样性和优势度,这可能与物种间的生态位互补效应有关,然而在重度入侵情况下群落的多样性、优势度和丰富度显著降低;同时研究指出加拿大一枝黄花的入侵能力与群落中植物功能特征(如株高、茎粗、光合能力等)的多样性关系密切,由于道路生境的植物群落功能特征多样性最高,导致该生境中加拿大一枝黄花的入侵程度高于其他生境^[41]。对本研究中的优势菊科杂草(白花鬼针草)和禾本科杂草(五节芒)群落展开分析发现,白花鬼针草在地点1、5和6的杂草种群中占比较高,同时群落的丰富度指数和香农指数均较高、辛普森指数和均匀度指数均较低,说明白花鬼针草的入侵增加了群落的多样性;相反,五节芒占主导优势的地点2丰富度指数最低、辛普森指数和均匀度指数最高,群落物种数量降低,物种类型出现同质化。造成两者差异的原因是白花鬼针草轻度入侵时可改善土壤环境并与其他物种形成互补,促进群落发展;而五节芒作为多年生植物容易发展出高大茂盛的冠层,对温光资源的截获能力更强,限制其他物种的生存和繁殖^[30],但也有研究表明在白花鬼针草重度入侵时由于其化感作用增强,会抑制或排斥其他物种,降低群落多样性^[42]。前人研究表明群落中优势种盖度所占的比重越高,群落的稳定值越高^[43]。本研究中,地点1、2、5和6的群落稳定值较大,而上述地点主要由白花鬼针草或五节芒占主导地位;地点3、4和7的优势杂草重要值相对较小且与其他杂草物种差异不大,种群间竞争激烈,导致群落的稳定值降低。尽管有研究表明较高的物种多样性有利于增加群落稳定性^[44],但也有报道称除了多样性外,物种的复杂性和种群间相互作用等因素也会影响群落稳定性^[45-46]。本研究中不同多样性指标的变化趋势并不一致,可能是由于不同地点的杂草种群类型和大小差异较大,难以进行衡量比较,不同调查地点间的群落相似度均较低也证明了这一观点。

3.3 杂草防治建议

边坡植被恢复技术有助于缓解道路修建对生态环境带来的负面影响,然而植被恢复过程中存在外来杂草入侵的问题,威胁本土植物的生存繁衍^[12,47]。因此,有必要采取适当的边坡管理措施,降低外来杂草的入侵风险,提

高人工栽种植物物种的存活能力。首先,需要考虑合理选择植物物种。前人发现边坡植被中较低的乡土植物比例不利于发挥生态效益,景观效果也不稳定^[48]。因此,边坡植被可趋向于使用乡土植物,这样不仅能够使护坡植物较好地适应当地环境,增加植被恢复成功率,也能减少因过度引进外来物种导致的种间竞争^[49]。此外,物种类型单一不利于生态系统的稳定,因此建议根据边坡地形地貌,从时间和空间层次综合考虑,合理搭配乔木、灌木和草本护坡植物,促进形成稳定可持续的群落系统,从而降低杂草的入侵能力。

对已滋生的杂草,目前以刈割和喷施除草剂防治为主。人工刈割的精细度较高,但效率较低,工作周期较长,且对掉落在土壤中的杂草种子清除效果较差,较适宜在对美观要求较高或特定的区域进行;而对于大面积滋生的边坡杂草,可选用机械刈割的方案。由于杂草种子大多轻而小,在外界环境扰动下易扩散,刈割应在其开花结实之前进行。同时,对割除的杂草残体需要及时妥善处理,防止其成为新的传染源。喷施除草剂对杂草防治效果好、防控时间长,但由于其毒性较强、残留时间较长,过量使用会严重破坏植被和生态环境,长时间喷施单一除草剂也存在增强杂草的抗药性、提高杂草优势种群演变速度的风险,因此尽量使用选择性除草剂,并定期更换除草剂类型。对边坡人工恢复植被的研究表明,随恢复年限的增加,植物的生活型由一年、二年生逐渐转为多年生,优势种由人工种植植物逐渐转为本土植物,物种多样性下降且群落的稳定性逐渐上升^[28]。因此,在杂草防治的过程中可以有选择地把具备观赏性的多年生本土杂草予以保留,从而提高边坡植被群落的稳定性,这样既保持了边坡景观的美观度,又增加了绿化植被的持久度,实现了道路管理的降本增效。

致谢:感谢温州大学生命与环境科学学院丁炳扬教授在杂草物种鉴定和论文撰写方面给予的指导。

参考文献 References:

- [1] Fu H Y, Zha H Y, Zeng L, *et al.* Research progress on ecological protection technology of highway slope: status and challenges. *Transportation Safety and Environment*, 2020, 2(1): 3–17.
- [2] Liu C X, Han L B. Review of researches in vegetation restoration of freeway slopes. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 2090–2098.
刘春霞, 韩烈保. 高速公路边坡植被恢复研究进展. *生态学报*, 2007, 27(5): 2090–2098.
- [3] Lázaro-Lobo A, Ervin G N. A global examination on the differential impacts of roadsides on native vs. exotic and weedy plant species. *Global Ecology and Conservation*, 2019, 17: e00555.
- [4] Jiang A P, Jin T T, Zhang L P, *et al.* Influence of road construction on vegetation net primary productivity in southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(9): 3624–3632.
蒋爱萍, 靳甜甜, 张丽萍, 等. 西南地区道路建设对植被净初级生产力的影响. *生态学报*, 2022, 42(9): 3624–3632.
- [5] Zhang X, Zhang H Y, Lu Z H, *et al.* Vegetation restoration effects of rock cutting slopes in the cold region of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(5): 1450–1457.
张霄, 张红玉, 陆兆华, 等. 高寒地区路堑边坡植被恢复效果. *生态学报*, 2017, 37(5): 1450–1457.
- [6] Luo Z F. Slope plant protection technology and quality assessment of highway engineering in red soil area. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2023.
罗智芳. 红壤区公路工程边坡植物防护技术与质量评估. 长沙: 中南林业科技大学, 2023.
- [7] Jin J H. Investigation and research on adaptability of plants for ecological recovery on side slope. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
金建红. 边坡生态恢复植物调查与适应性研究. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [8] Van Kleunen M, Weber E, Fischer M. A meta-analysis of trait differences between invasive and non-invasive plant species. *Ecology Letters*, 2010, 13(2): 235–245.
- [9] Wang C X, Zhu M X, Chen X H, *et al.* Review on allelopathy of exotic invasive plants. *Procedia Engineering*, 2011, 18: 240–246.
- [10] Taylor K, Brummer T, Taper M L, *et al.* Human-mediated long-distance dispersal: an empirical evaluation of seed dispersal by vehicles. *Diversity and Distributions*, 2012, 18(9): 942–951.
- [11] Hansen M J, Cleveger A 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.
- [12] Cui B, Zhao S Q, Zhang K J, *et al.* Disturbance of Dabao highway construction on plant species and soil nutrients in Longitudinal Range Gorge Region (LRGR) of Southwestern China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 158(1): 545–559.
- [13] Cao T, Wang T, Zhou G Z, *et al.* Weed community characteristics during upland crop season under five paddy-upland rotations in the western Sichuan Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(3): 1273–1283.
曹涛, 王涛, 周高子, 等. 川西平原五种水旱轮作模式旱季杂草群落特征. *生态学报*, 2024, 44(3): 1273–1283.
- [14] Liu D X, Liu H, Meng S, *et al.* Study on the productivity and weed community dynamics of mixed artificial grasslands in agro-pastoral area. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(7): 2086–2095.
刘东霞, 刘辉, 孟帅, 等. 农牧交错区混播人工草地生产性能及杂草群落动态研究. *草地学报*, 2023, 31(7): 2086–2095.
- [15] Yan Y Y, Wang Y K, Xu P, *et al.* Diversity and harmfulness of weed species in citrus orchards in the Three Gorges Reservoir Region. *Pratacultural Science*, 2020, 37(11): 2309–2319.
闫洋洋, 王玉宽, 徐佩, 等. 三峡库区柑橘园杂草种类、分布及危害. *草业科学*, 2020, 37(11): 2309–2319.
- [16] Li J, Zhang Y. Dynamics and ecological niche of weed communities under chestnut forest in northern Yanshan. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(3): 201–206.
李娟, 张昱. 燕山北部板栗林下杂草群落动态及生态位研究. *水土保持学报*, 2022, 36(3): 201–206.
- [17] Boyd N S, Reuss L. Survey of weed flora and weed management practices in Florida strawberry fields. *Weed Science*, 2022, 70(3): 353–360.
- [18] Wang X Y, Wang L, Wang C J, *et al.* Study on the changing trend and causes of soil pH value of main agricultural land in Wenzhou in recent 15 years. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(5): 206–214.
王学寅, 王磊, 王长江, 等. 近15年温州市主要农用地土壤酸碱度变化趋势及成因探讨. *中国土壤与肥料*, 2023(5): 206–214.
- [19] Hou Q F, Ji H B, Yang L Y, *et al.* Survey of agroclimatological resources in Wenzhou. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(S2): 260–263.
侯球锋, 季海滨, 杨林燕, 等. 温州市农业气候资源分析. *中国农业气象*, 2009, 30(S2): 260–263.
- [20] Zhang L M, Lan B, Zhang D S, *et al.* Niche and interspecific association of dominant herbaceous plants in the water-level-fluctuating zone of Fuling-Fengjie section of the Three Gorges Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(8): 3228–3240.
张乐满, 兰波, 张东升, 等. 三峡水库涪陵—奉节段消落带优势草本植物生态位与种间联结性研究. *生态学报*, 2022, 42(8): 3228–3240.
- [21] Lin Q W, Xiao C, Ma J S. A dataset on catalogue of alien plants in China. *Biodiversity Science*, 2022, 30(5): 22127.
林秦文, 肖翠, 马金双. 中国外来植物数据集. *生物多样性*, 2022, 30(5): 22127.
- [22] Editorial board of flora of Zhejiang (new edition). *Flora of Zhejiang (new edition)*. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Publishing House, 2021.
《浙江植物志(新编)》编辑委员会. *浙江植物志(新编)*. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2021.
- [23] Kong F Z, Yu R C, Xu Z J, *et al.* Application of Excel in calculation of biodiversity indices. *Marine Sciences*, 2012, 36(4): 57–62.
孔凡洲, 于仁成, 徐子钧, 等. 应用Excel软件计算生物多样性指数. *海洋科学*, 2012, 36(4): 57–62.
- [24] Xiao J H, Lai M Y, Li M, *et al.* Characteristics of *Pinus massoniana* forest community and species diversity of island in Sandu Gulf, Ningde, Fujian Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(23): 9827–9843.
肖集泓, 赖敏英, 李媚, 等. 宁德三都澳海岛马尾松林群落特征及物种多样性. *生态学报*, 2023, 43(23): 9827–9843.
- [25] Ye C, An M T, Zhang N, *et al.* Effect of afforestation of *Dodonaea viscosa* on native plant species diversity in Karst area of Beipan River of Guizhou. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, 39(2): 310–318.
叶超, 安明志, 张楠, 等. 贵州北盘江喀斯特地区车桑子造林对乡土植物物种多样性的影响. *西北植物学报*, 2019, 39(2): 310–318.
- [26] Zhou T, Su Z A, He Z Y, *et al.* Vegetation community characteristics of mine dumps under different recovery years. *Pratacultural Science*, 2019, 36(6): 1508–1517.
周涛, 苏正安, 何周窈, 等. 不同恢复年限矿山排土场植物群落特征. *草业科学*, 2019, 36(6): 1508–1517.
- [27] Godron M. Some aspects of heterogeneity in grasslands of Cantal. *Statistical Ecology*, 1972, 3(3): 397–415.
- [28] Zhang L, Lu Z H, Tang S Y, *et al.* Slope vegetation characteristics and community stability at different restoration years of

- open-pit coal mine waste dump. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14): 5764–5774.
- 张琳, 陆兆华, 唐思易, 等. 露天煤矿排土场边坡植被组成特征及其群落稳定性评价. *生态学报*, 2021, 41(14): 5764–5774.
- [29] Tian Z H, Yuan G H, Wang Y M, *et al.* Species composition and characterization of weed community in the paddy fields in Shanghai. *Plant Protection*, 2018, 44(6): 152–157.
- 田志慧, 袁国徽, 王依明, 等. 上海市水稻田杂草种类组成及群落特征. *植物保护*, 2018, 44(6): 152–157.
- [30] Hayasaka D, Akasaka M, Miyauchi D, *et al.* Qualitative variation in roadside weed vegetation along an urban-rural road gradient. *Flora*, 2012, 207(2): 126–132.
- [31] Yuan X W. The adaptability of invasion alien species of composite in response to different environmental gradients in Henan section of the Yellow River watershed. Kaifeng: Henan University, 2011.
- 苑晓雯. 黄河流域河南段菊科主要外来种对不同环境梯度的适应性研究. 开封: 河南大学, 2011.
- [32] Han Y J, Zhang Y, Zhou Z R, *et al.* Variation of weed species composition and community characteristics in wheat fields of Anhui Province. *Plant Protection*, 2020, 46(4): 210–216.
- 韩云静, 张勇, 周振荣, 等. 安徽省麦田杂草种类组成变化及群落特征分析. *植物保护*, 2020, 46(4): 210–216.
- [33] Pu Y F, Song Q X, Wang G X, *et al.* Leaf traits of nine common species of Compositae weeds in Yunnan Province. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 36(4): 816–825.
- 浦艳飞, 宋起萱, 汪国鲜, 等. 云南9种常见菊科杂草叶片性状研究. *西南农业学报*, 2023, 36(4): 816–825.
- [34] Cai X Y, Xiang B H, Pan S F, *et al.* Weed community composition in the hilly wheat area of eastern Zhejiang Province. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2024, 65(3): 661–666.
- 蔡新仪, 项秉哈, 潘苏峰, 等. 浙东山地丘陵麦区杂草群落组成. *浙江农业科学*, 2024, 65(3): 661–666.
- [35] Chen J. The distribution patterns and the major influencing factors of invasive alien species in China. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2022.
- 陈菁. 中国外来入侵物种的分布格局及主要影响因素. 南京: 南京林业大学, 2022.
- [36] Yang R Y, Zan S T, Tang J J, *et al.* Invasion mechanisms of *Solidago canadensis* L.: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(4): 1185–1194.
- 杨如意, 笄树婷, 唐建军, 等. 加拿大一枝黄花的入侵机理研究进展. *生态学报*, 2011, 31(4): 1185–1194.
- [37] Zhu J, Wang J, Ditommaso A, *et al.* Weed research status, challenges, and opportunities in China. *Crop Protection*, 2020, 134: 104449.
- [38] Li F F, Hao Q, Cui X, *et al.* Analysis and reflection of plant species in the Key Management List of Invasive Alien Species. *Plant Science Journal*, 2024, 42(2): 266–274.
- 李飞飞, 郝强, 崔夏, 等. 对《重点管理外来入侵物种名录》中植物物种的解析与思考. *植物科学学报*, 2024, 42(2): 266–274.
- [39] Lu X L, Liu J L, Tang Q, *et al.* Characteristics of non-agricultural habitat plant functional groups in agricultural landscape of Huanghuaihai Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(18): 6721–6730.
- 卢训令, 刘俊玲, 汤茜, 等. 黄淮海平原农业景观非农生境植物功能群特征分析. *生态学报*, 2019, 39(18): 6721–6730.
- [40] Wang Y X, Chen Y, Huang L J, *et al.* Research progress of urban weeds in China. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 2020, 18(6): 68–72.
- 王云霄, 陈莹, 黄柳菁, 等. 我国城市杂草研究进展. *中国城市林业*, 2020, 18(6): 68–72.
- [41] Wang C Y, Wu B D, Jiang K, *et al.* Canada goldenrod invasion affect taxonomic and functional diversity of plant communities in heterogeneous landscapes in urban ecosystems in East China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 38: 145–156.
- [42] Wang X F, Wang T, Wang Q, *et al.* Effects of *Bidens alba* invasion on structure and species diversity of plant community. *Journal of Biosafety*, 2023, 32(4): 384–392.
- 王小飞, 王涛, 王琦, 等. 白花鬼针草入侵对植物群落结构及物种多样性的影响. *生物安全学报*, 2023, 32(4): 384–392.
- [43] Liao H R, Indree T, Guo T, *et al.* Effects of grazing exclusion on the vegetation community composition and the community stability of dry steppe and mountain steppe ecosystems in Mongolia. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2020, 56(3): 471–478.
- 廖哈茹, Indree Tuvshintogtokh, 郭通, 等. 围封对蒙古荒漠草原和高山草原植物群落组成及稳定性的影响. *北京大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(3): 471–478.
- [44] Qian Z L, Xiang H, Wang Y, *et al.* Effects of *Bidens alba* on interspecific association and the stability of companion species.

Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2023, 44(2): 31–37.

钱宗亮, 向华, 王悦, 等. 白花鬼针草入侵对本土植物群落主要物种间联结和稳定性的影响. 四川林业科技, 2023, 44(2): 31–37.

[45] May R M. Will a large complex system be stable? Nature, 1972, 238(5364): 413–414.

[46] Yonatan Y, Amit G, Friedman J, *et al.* Complexity-stability trade-off in empirical microbial ecosystems. Nature Ecology & Evolution, 2022, 6(6): 693–700.

[47] Sullivan J J, Williams P A, Timmins S M, *et al.* Distribution and spread of environmental weeds along New Zealand roadsides. New Zealand Journal of Ecology, 2009, 33(2): 190–204.

[48] Zhang Y Y. Investigation and analysis of plant community species diversity and land-scape structure. Molecular Plant Breeding, 2023, 21(22): 7566–7570.

张岩岩. 植物群落物种多样性与景观结构调查与分析. 分子植物育种, 2023, 21(22): 7566–7570.

[49] Zhu Y L, Liu Y Q. Research progress of vegetation restoration on expressway side slope. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2017, 23(21): 99–101.

朱亚丽, 刘彦清. 高速公路边坡植被恢复研究进展. 安徽农学通报, 2017, 23(21): 99–101.