

方月, 魏强, 赵健, 万炳宏, 闫晓俊, 肖玖金, 陈良华, 韩美清, 朱鹏. 成兰铁路干旱河谷段边坡创面不同恢复阶段的植物多样性[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28 (5): 1137-1143

Fang Y, Wei Q, Zhao J, Wan BH, Yan XJ, Xiao JJ, Chen LH, Han MQ, Zhu P. Plant diversity in excavated slopes of different vegetation restoration stages in arid valleys of the Chendu-Lanzhou Railway [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2022, 28 (5): 1137-1143

成兰铁路干旱河谷段边坡创面不同恢复阶段的植物多样性

方月¹ 魏强² 赵健² 万炳宏³ 闫晓俊⁴ 肖玖金¹ 陈良华¹ 韩美清^{2,5} 朱鹏¹

¹长江上游林业生态工程四川省重点实验室, 长江上游森林资源保育与生态安全国家林业和草原局重点实验室, 华西雨屏区人工林生态系统研究长期科研基地, 四川农业大学生态林业研究所 成都 611130

²中国国家铁路集团有限公司工程管理中心 北京 100038

³中铁二十五局集团第一工程有限公司 广州 510405

⁴四川农业大学风景园林学院 成都 611130

⁵中国铁道科学研究院集团有限公司节能环保劳卫研究所 北京 100038

摘要 成兰铁路工程岷江上游干旱河谷地带是生态环境最为脆弱、植被恢复最为困难的特殊地域单元。以成兰铁路岷江上游干旱河谷区一个典型的边坡创面恢复样地(约2.5年)为对象, 对其不同恢复阶段植物群落的物种组成及多样性进行研究, 以期对未来干旱河谷地区工程建设的边坡创面植被恢复提供理论依据和借鉴。结果显示: (1) 各恢复阶段草本植物物种数差异不大, 但灌木植物(2—8—12)和草灌(18—22—29)总的物种数表现出明显的依次增多, 物种主要以菊科、唇形科、蔷薇科和豆科植物为主; (2) 人工播撒的豆科草本物种在恢复后期重要值和优势比大大降低(紫苜蓿)或者消失(大花野豌豆和地角儿苗); (3) 各恢复阶段草本植物的多样性指数已没有显著性的差异, 恢复后期的灌木和草灌总平均物种数还显著地低于原始植被群落阶段, 但Pielou均匀度指数显著高于原始植被群落阶段。本研究表明人工播撒一些广用性豆科草本以及胡枝子(*Lespedeza bicolor*) (豆科)、苦蒿(*Eschenbachia blinii*)、香青(*Anaphalis sinica*)等本地物种种子可促进岷江上游干旱河谷区工程建设中边坡创面植被群落的恢复进程, 但要完全恢复到原始状态, 还应对干旱河谷这类特殊地域单元植被恢复技术进行深入研究。(图2 表2 参36)

关键词 成兰铁路; 干旱河谷; 边坡创面; 植被恢复; 植物多样性

Plant diversity in excavated slopes of different vegetation restoration stages in arid valleys of the Chengdu-Lanzhou Railway

FANG Yue¹, WEI Qiang², ZHAO Jian², WAN Binghong³, YAN Xiaojun⁴, XIAO Jiujiu¹, CHEN Lianghua¹, HAN Meiqing^{2,5} & ZHU Peng¹

¹ Sichuan Provincial Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering on the Upper Reaches of the Yangtze River & National Forestry and Grassland Administration Key Laboratory of Forest Resources Conservation and Ecological Safety on the Upper Reaches of the Yangtze River & Rainy Area of West China Plantation Ecosystem Permanent Scientific Research Base, Institute of Ecology & Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

² Engineering Management Center, China State Railway Group Corporation Limited., Beijing 100038, China

³ The 1st Engineering Co., Ltd of China Railway 25th Bureau Group, Guangzhou 510405, China

⁴ College of Landscape Architecture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

⁵ Energy Saving & Environmental Protection & Occupational Safety and Health Research Institute. China Academy of Railway Sciences Corporation Limited. Beijing 100081, China

Abstract The arid valley area of the upper reaches of the Minjiang River in the Chengdu-Lanzhou railway of China is a unique geographical unit. It is the most vulnerable ecological environment and the most difficult to restore vegetation. This study took a typical restoration sample plot (ca. 2.5 a) of excavated slope in the arid valley area of Chengdu-Lanzhou Railway to study the vegetation diversity among different restoration stages, offering a theoretical and empirical basis to the vegetation restoration of this region in the future. The average number of species, Margalef index, Simpson index, Pielou index, and other indicators were calculated by investigating the type, height, coverage, and abundance of vegetation at different recovery stages of the slope. The results showed that there are limited differences in the number of species of herbs among the three

收稿日期 Received: 2021-04-12 接受日期 Accepted: 2021-06-17

四川省科技厅应用基础项目(2019YJ0422)和成兰公司重大工程试验项目(CLSY2018001)资助 Supported by the Sichuan Provincial Science and Technology Department Application Foundation Project (2019YJ0422) and the Major Engineering Project of Chenglan Company (CLSY2018001)

通信作者 Corresponding authors (E-mail: rocerzhu2008@126.com; 57153214@qq.com)

restoration stages. However, the number of shrub (2—8—12) and shrub and herb (18—22—29) species obviously increased successively along restraint stages, which were mainly from Asteraceae, Lamiaceae, Rosaceae, and Leguminosae. Moreover, three artificially sown herbaceous Leguminosae species had a greatly reduced importance value and dominance ratio (*Medicago sativa*) or disappeared (*Vicia bungei* and *Oxytropis bicolor*) in later restoration stages (HSC). In addition, the diversity index of herbs did not show significant differences among the three restoration stages, and the average number of shrub species, and the total shrub and herb species in HSC were significantly lower than those of primitive plant community stage (WPC); however, the Pielou index of HSC was significantly higher than that of WPC. The artificial introduction of some common Leguminosae and local species such as *Lespedeza bicolor* (Leguminosae), *Eschenbachia blini*, and *Anaphalis sinica* could be expected to restore the vegetation community of an excavated slope in the arid valley area of the upper reaches of Minjiang River. Arid valley vegetation restoration technology should be used to fully restore this special geographical unit to its original state in further research.

Keywords Chendu-Lanzhou railway; arid valley; excavated slope; vegetation restoration; plant diversity

干旱河谷地区是亚热带横断山脉深切河谷所形成的特殊地貌和生态类型^[1-4], 由于干燥温暖的气候和干旱贫瘠的土壤条件, 该地区形成了脆弱山地生态系统^[5-6], 加之随着我国高铁(公)路建设的高速发展和东部地区高铁(公)路的快速成网, 我国的高铁(公)路建设已经逐渐深入干旱河谷地区, 大量的工程施工不仅改变着周围的地形地貌, 也对路域原有的植物群落、土壤结构造成了严重破坏, 进一步加剧了该地区的生态退化, 导致其生态环境恶劣、植被恢复困难^[7-9]. 我国高铁(公)路建设带来了一系列生态破坏等问题已经有许多学者的关注和研究, 目前关于植被恢复基础的研究主要包括植物的选择与配置、养护与管理、恢复植被群落研究、对生态环境的影响等. 我国在植被恢复技术方面研究也较多, 例如三维植被网施工技术^[10]可以增强抵抗自然水土流失的能力, 可应用于土质、土石混合、石质边坡的植被恢复; 喷混植草防护技术^[11]和厚层基材喷播^[12]可针对岩石边坡生态治理. 我国目前建立了适合不同坡面类型的综合技术体系, 并且研制出了喷播机械. 但由于我国关于边坡植被恢复的研究处于起步阶段, 基础研究和技术研究均不全面、不完善、不系统, 且在荒漠、青藏高原、干旱河谷、高陡岩石边坡等特殊地理环境条件下的植被恢复技术还欠缺, 因此如何快速、有效地促使施工创面的生态恢复^[13-14], 科学地指导公路边坡植被恢复工程是目前迫切需要解决的重要问题.

成兰铁路工程是国家《综合交通网中长期发展规划》中“五纵五横”综合运输大通道的重要组成部分, 地处由成都平原向青藏高原东部边缘急切过渡的高山峡谷地带, 自然环境具有“原始、独特、敏感、脆弱”的特点, 已被世界自然基金会列为优先保护的生态环境区域^[15]. 铁路沿线经过了数个不同的生态区域和地貌单元, 其中什邡与茂县交界的山脊到松潘县镇江关一带的岷江上游干旱河谷地带是生态环境最为脆弱、植被恢复最为困难的特殊地域单元^[16-17]. 成兰铁路施工工程中, 施工方在边坡创面前期修复中往往仅在工程护坡后采用简单的混合播撒草本种子(如紫苜蓿*Medicago sativa*、大花野豌豆*Vicia bungei*、禾草类等)的方式进行植被恢复, 实地调查发现这种简单方式处理后的一些边坡创面在经过数年的封育后, 由于坡面的原因呈现出不同坡位梯度式的植被恢复阶段(图1), 为我们研究边坡创面的植被恢复进程提供了良好的素材. 这些不同恢复阶段的植物多样性存在着怎样的差异呢, 具体物种有什么不同呢, 是否存在一些物种在恢复早期进入或者具有明显的优势度而在后期消失或者优势度降低的现

象呢, 又有哪些物种只是在恢复后期出现呢? 这些问题的探究有助于我们对这些边坡创面植被恢复进程的深入了解, 从而为快速有效地进行边坡创面的植被恢复提供经验数据.

为此, 我们以成兰铁路岷江上游干旱河谷地段一个典型边坡创面修复样地为研究对象, 对已经呈现出不同恢复阶段的植被的优势物种及多样性开展调查研究, 期望为未来干旱河谷地区类似工程建设边坡创面的植被恢复提供理论依据与借鉴.

1 材料与方法

1.1 研究地概况

研究地所在的边坡创面位于松潘县成兰铁路工程DK200至DK220段线路段镇江关车站附近线路右侧, 边坡创面所在区域为典型的岷江上游干旱河谷气候和地貌. 岷江上游地区位于四川省西北部, 处于川西平原与青藏高原的过渡地带, 地势由西北向东南倾斜, 地跨岷江上游支流杂谷脑河两岸, 气候受西伯利亚西风气流、印度洋暖流和太平洋东南季风3个环流的影响, 属于暖温带高原季风气候^[18-19]. 该区年平均气温12.4℃左右, 年均降水量400-600 mm, 但年蒸发量1 100-1 600 mm, 降水量与蒸发量严重失调, 且在地域和季节分配上很不均匀^[20], 造成该地区气候干燥、焚风现象显著、水土流失严重、土壤瘠薄, 加之人类活动频繁, 导致植被发育十分不良^[21-22]. 水分严重亏缺, 降水不均和伏旱、春旱严重是该区造林难度高的主要原因.

边坡创面所在区域植被主要是耐旱小灌丛, 伴生有耐旱草丛^[23-25], 例如蔷薇灌丛和沙棘灌丛^[26-27]等, 主要优势种为川藏香茶菜(*Isodon pharicus*)、小叶杭子梢(*Campylotropis macrocarpa*)、蓍状亚菊(*Ajania achilleoides*)、粘叶蕈(*Caryopteris glutinosa*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)^[28-29]、西康扁桃(*Amygdalus tangutica*)、香青(*Anaphalis sinica*)等. 2015年9-10月份施工方完成了边坡创面的工程护坡修复, 并于11月份在工程护坡修复后的边坡创面上混合播撒紫苜蓿(*Medicago sativa*)、大花野豌豆和地角儿苗(*Oxytropis bicolor*)等植物种子.

1.2 野外调查方法

样地植物多样性的调查于2018年7月开展. 由于坡面和距离的原因, 研究样地在恢复约2.5年后形成了两个明显的恢复阶段(图1), 即恢复早期(草本植被群落阶段, HEC)

和恢复后期(草灌植被群落阶段, HSC), 加上原始植被群落(WPC), 可近似地被视为3个恢复阶段。依据上述的恢复阶段划分, 鉴于各恢复阶段呈现出的扇形(或弧形)形状, 在恢复早期样地中按照弧形带布设了10个1 m × 1 m的草本样方, 由于没有明显可见的灌木物种, 未布设灌木样方; 在恢复后期和原始植被群落阶段样地中沿弧形带布设了5个5 m × 5 m的灌木样方, 同时每个灌木样方中按品字形布设3个1 m × 1 m草本样方。分别调查每个样方中每个物种的多度(或株数)、盖度、高度等。

1.3 数据分析

计算样地中各物种的重要值和综合优势比, 公式如下。

重要值(IV): $IV = (\text{相对多度} + \text{相对盖度} + \text{相对频度}) / 3$

综合优势比(SDR2): $SDR2 = (\text{盖度比} + \text{高度比}) / 2 \times 100\%$

计算3个恢复阶段样地中草本、灌木和草灌综合的平均物种数, 以及草本和灌木的Margalef丰富度指数、Simpson多样性指数、Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数^[30-31]。由于计算后面4个多样性指数时草本和灌木存在着尺度差异, 因此未将草灌综合进行计算比较。具体公式如下:

平均物种数(S_A): $S_A = \sum S_i / a$

Margalef丰富度指数(D_M): $D_M = (S-1) / \ln N$

Simpson多样性指数(D_S): $D_S = 1 - \sum P_i^2$

Shannon-Wiener多样性指数(H): $H = -\sum P_i \ln P_i$

Pielou均匀度指数(J): $J = H / \ln S$

式中, S_i 表示第*i*个样方中物种数, a 为样方数, S 为样方中的物种数, N 为样方中的所有物种个体数总和, P_i 表示样方中的第*i*个物种的个体数与群落总个体数之比。

用Excel 2010完成重要值、综合优势比、平均物种数、Margalef丰富度指数、Simpson多样性指数等全部指标的计算。3个恢复阶段草本多样性指数的比较采用单因素方差分

析。由于恢复早期几乎不存在灌木, 灌木的多样性指数仅在恢复后期和原始植被群落阶段(HSC和WPC)进行了比较, 采用独立样本*T*检验。草灌综合仅比较了恢复后期和原始植被群落阶段的平均物种数, 采用独立样本*T*检验。单因素方差分析和独立样本*T*检验均使用SPSS 20.0进行。

2 结果与分析

2.1 不同演替阶段的物种组成

总的物种数(表1)显示, 3个恢复阶段的草本物种数呈现一定的波动, 而灌木物种数则呈现出不断增多的趋势。在草本物种上, 恢复早期(草本植被群落阶段, HEC)出现了16个, 分别属于9科16属, 主要集中在菊科, 其次为豆科和唇形科; 恢复后期(草灌植被群落阶段, HSC)出现了14个, 分别属于8科14属, 主要集中在菊科, 其次为唇形科; 原始植被群落阶段(WPC)出现了17个, 分别属于11科17属, 也主要集中在菊科, 其次为唇形科。在灌木物种上, 恢复早期的草本植被群落阶段也出现了2个物种, 而恢复后期和原始植被群落阶段则分别出现了8和12个物种, 都主要集中在蔷薇科, 其次为豆科。草灌综合总的物种数在3个恢复阶段依次增多, 分别出现了18、22和29个物种。

从各阶段出现的具体物种(表1)来看, 在草本植物方面, 紫苜蓿、大花野豌豆和地角儿苗等3个在恢复早期存在的豆科物种(人工播撒)在随后的恢复阶段消失或逐渐消失, 而吉祥草(*Reineckea carnea*)、景天点地梅(*Androsace bulleyana*)、棘豆(*Oxytropis*)、马先蒿(*Pedicularis*)和天门冬(*Asparagus cochinchinensis*)等5个物种则是在恢复后期或原始植被群落阶段才出现。在灌木物种方面, 除水栒子(*Cotoneaster multiflorus*)在恢复后期出现而未在原始植被群落阶段出现外, 其他物种均未出现在恢复后期或原始植被



图1 研究样地所在位置及边坡创面植被恢复图。HEC: 草本植被群落阶段(恢复早期); HSC: 草灌植被群落阶段(恢复后期); WPC: 原有植被群落阶段。

Fig. 1 Location photo of the sample plot and the plant restoration of excavated slope. HEC: Herbaceous vegetation community stage (recovery in early stage); HSC: Herb-shrub vegetation community stage (recovery in lately stage); WPC: Original vegetation community stage.

表1 各物种在3个恢复阶段的重要值和综合优势比

Table 1 IV and SDR2 of each species in three restoration stages

类型 Type	物种 Species	科 Family	属 Genus	重要值 IV			综合优势比 SDR2 (P/%)		
				HEC	HSC	WPC	HEC	HSC	WPC
草本 Herb	苦蒿 <i>Eschenbachia blinii</i> †	菊科 Compositae	白酒草属 <i>Eschenbachia</i>	0.58	0.49	0.42	100.00	100.00	96.01
	紫苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	豆科 Fabaceae	苜蓿属 <i>Medicago</i>	0.39	0.16	-	25.30	9.88	-
	香青 <i>Anaphalis sinica</i>	菊科 Compositae	香青属 <i>Anaphalis</i>	0.31	0.39	0.49	36.89	66.69	94.35
	白莲蒿 <i>Artemisia stechmanniana</i>	菊科 Compositae	蒿属 <i>Artemisia</i>	0.25	0.11	0.21	19.66	4.50	17.67
	莠 <i>Caryopteris divaricata</i>	唇形科 Lamiaceae	莠属 <i>Caryopteris</i>	0.22	0.15	0.19	23.45	32.82	26.26
	翻白草 <i>Potentilla discolor</i>	蔷薇科 Rosaceae	委陵菜属 <i>Potentilla</i>	0.18	0.34	0.27	3.42	11.47	11.60
	沿阶草 <i>Ophiopogon bodinieri</i>	天门冬科 Asparagaceae	沿阶草属 <i>Ophiopogon</i>	0.18	0.24	0.38	9.01	11.19	57.16
	狗娃花 <i>Aster hispidus</i>	菊科 Compositae	紫菀属 <i>Aster</i>	0.17	0.37	0.04	24.73	31.36	3.25
	北柴胡 <i>Bupleurum chinense</i>	伞形科 Apiaceae	柴胡属 <i>Bupleurum</i>	0.15	0.32	0.18	20.99	35.35	13.69
	野生紫苏 <i>Perilla frutescens</i> var. <i>purpurascens</i>	唇形科 Lamiaceae	紫苏属 <i>Perilla</i>	0.12	0.11	0.04	14.08	9.16	5.25
	长蕊石头花 <i>Gypsophila oldhamiana</i>	石竹科 Caryophyllaceae	石头花属 <i>Gypsophila</i>	0.11	-	0.03	6.91	-	2.52
	地角儿苗 <i>Oxytropis bicolor</i> †	豆科 Fabaceae	棘豆属 <i>Oxytropis</i>	0.07	-	-	1.52	-	-
	獐牙菜 <i>Swertia bimaculata</i>	龙胆科 Gentianaceae	獐牙菜属 <i>Swertia</i>	0.07	0.05	0.18	3.24	6.83	23.12
	甘青青兰 <i>Dracocephalum tanguticum</i>	唇形科 Lamiaceae	青兰属 <i>Dracocephalum</i>	0.04	0.05	0.15	0.73	1.45	14.73
	茜草 <i>Rubia cordifolia</i>	茜草科 Rubiaceae	茜草属 <i>Rubia</i>	0.04	0.11	0.07	0.52	11.60	3.72
	大花野豌豆 <i>Vicia bungei</i> †	豆科 Fabaceae	野豌豆属 <i>Vicia</i>	0.04	-	-	1.47	-	-
	吉祥草 <i>Reineckea carnea</i>	天门冬科 Asparagaceae	吉祥草属 <i>Reineckea</i>	-	0.06	-	-	6.08	-
	景天点地梅 <i>Androsace bulleyana</i>	报春花科 Primulaceae	点地梅属 <i>Androsace</i>	-	-	0.19	-	-	6.19
	棘豆 <i>Oxytropis</i>	豆科 Fabaceae	棘豆属 <i>Oxytropis</i>	-	-	0.15	-	-	7.18
	马先蒿 <i>Pedicularis</i>	列当科 Orobanchaceae	马先蒿属 <i>Pedicularis</i>	-	-	0.08	-	-	3.27
	天门冬 <i>Asparagus cochinchinensis</i>	天门冬科 Asparagaceae	天门冬属 <i>Asparagus</i>	-	-	0.04	-	-	5.25
灌木 Shrub	西康扁桃 <i>Amygdalus tangutica</i>	蔷薇科 Rosaceae	桃属 <i>Amygdalus</i>	-	0.56	0.51	-	100.00	100.00
	水栒子 <i>Cotoneaster multiflorus</i>	蔷薇科 Rosaceae	栒子属 <i>Cotoneaster</i>	-	0.39	-	-	71.79	-
	平枝栒子 <i>Cotoneaster horizontalis</i>	蔷薇科 Rosaceae	栒子属 <i>Cotoneaster</i>	-	0.29	0.08	-	32.12	10.90
	胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	豆科 Fabaceae	胡枝子属 <i>Lespedeza</i>	-	0.29	0.43	-	19.69	38.46
	栒子 <i>Cotoneaster hissaricus</i>	蔷薇科 Rosaceae	栒子属 <i>Cotoneaster</i>	√	0.19	0.41	√	31.26	68.84
	杜鹃 <i>Rhododendron simsii</i>	杜鹃花科 Ericaceae	杜鹃花属 <i>Rhododendron</i>	√	0.14	0.37	√	9.28	9.37
	锦鸡儿 <i>Caragana sinica</i>	豆科 Fabaceae	锦鸡儿属 <i>Caragana</i>	-	0.12	0.23	-	15.03	24.11
	刚毛忍冬 <i>Lonicera hispida</i>	忍冬科 Caprifoliaceae	忍冬属 <i>Lonicera</i>	-	0.12	0.15	-	11.88	8.58
	圆柏 <i>Juniperus chinensis</i>	柏科 Cupressaceae	刺柏属 <i>Juniperus</i>	-	-	0.15	-	-	21.49
	高山柳 <i>Salix paraqlesia</i>	杨柳科 Salicaceae	柳属 <i>Salix</i>	-	-	0.14	-	-	11.09
	鲜黄小檗 <i>Berberis diaphana</i>	小檗科 Berberidaceae	小檗属 <i>Berberis</i>	-	-	0.14	-	-	6.55
	虎榛子 <i>Ostryopsis davidiana</i>	桦木科 Betulaceae	虎榛子属 <i>Ostryopsis</i>	-	-	0.10	-	-	21.80
	铁仔 <i>Myrsine africana</i>	报春花科 Primulaceae	铁仔属 <i>Myrsine</i>	-	-	0.07	-	-	1.92
	草本物种数 No. of herb species			16	14	17	-	-	-
	灌木物种数 No. of shrub species			2	8	12	-	-	-
	草灌总物种数 No. of herb & shrub species			18	22	29	-	-	-

HEC: 草本植被群落阶段(恢复早期); HSC: 草灌植被群落阶段(恢复后期); WPC: 原有植被群落阶段; †: 为边坡剖面工程修复后人工播撒的3个物种; √表示该物种在恢复早期出现,但由于其与后面两个阶段中灌木物种重要值和综合优势比的计算尺度不一,故没有计算其重要值和综合优势比。

HEC: Herbaceous vegetation community stage (recovery in early stage); HSC: Herb-shrub vegetation community stage (recovery in lately stage); WPC: Original vegetation community stage; †: Three species artificially sown after slope restoration; √: The species appeared in the early stage of restoration, and because the calculation scale of the important value and comprehensive odds ratio of the shrub in the latter two stages is different, the important value and comprehensive odds ratio were not calculated.

群落阶段消失的现象,而圆柏(*Juniperus chinensis*)、高山柳(*Salix paraqlesia*)、鲜黄小檗(*Berberis diaphana*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)和铁仔(*Myrsine africana*)等5个物种则只在原始植被群落阶段才出现。

各物种的综合重要值和综合优势比变化方面,除开早期出现而后期消失或前期没有而后期出现的物种,在草本植物中,菊科的苦蒿(*Eschenbachia blinii*)和香青两个物种的重要值和优势比在3个演替阶段都是最高的。狗娃花(*Aster hispidus*)、野生紫苏(*Perilla frutescens* var. *Purpurascens*)和长蕊石头花(*Gypsophila oldhamiana*)3个物种表现出总体上降低的趋势,沿阶草(*Ophiopogon bodinieri*)、獐牙菜(*Swertia bimaculata*)和甘青青兰(*Dracocephalum tanguticum*)3个物种表现出总体上升高的趋势,其他物种则呈现一定的波动或变化不大。在灌木植物方面,西康扁桃除了在演恢复早期未出现外,在恢复后期和原始植被群落中都是最为重要和优势比最大的物种。胡枝子(*Lespedeza*

bicolor)、杜鹃(*Rhododendron simsii*)、栒子(*Cotoneaster hissaricus*)和锦鸡儿(*Caragana sinica*)等4个物种表现为较大程度的升高(杜鹃的优势比除外),而平枝栒子(*Cotoneaster horizontalis*)则表现为较大程度的降低,刚毛忍冬(*Lonicera hispida*)变化不大。

2.2 不同演替阶段的物种多样性变化

多样性指数比较(表2和图2)显示,草本植物的平均物种数、Margalef丰富度指数、Simpson多样性指数、Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数在3个恢复阶段均没有呈现出显著性的差异。灌木植物恢复后期和原始植被群落阶段的比较中,平均物种数、Margalef丰富度指数、Simpson多样性指数和Shannon-Wiener指数等4个多样性指数在原始植被群落阶段都表现为升高,且平均物种数表现出显著性的升高(4.3 vs 6.4个);而Pielou均匀度指数则在原始植被群落阶段表现为显著性的下降。草灌综合总的物种数来看,原始植被群落阶段的草灌总平均物种数(16.8个)极显著地高于恢复后期的草

表2 恢复阶段间草本、灌木及草灌综合多样性指数的单因素方差分析和独立样本T检验
Table 2 Independent-samples T test and single-factor variance analysis of diversity index of herb, shrub, and herb-shrub synthesis among/between restoration stages

多样性指数 Diversity index	草本 Herb			灌木 Shrub			草灌综合 Herb & shrub		
	d_f	F	P	d_f	T	P	d_f	T	P
平均物种数 No. of species (S_A)	2	0.313	0.734	6	0.481	0.029*	6	0.128	0.005**
Margalef指数 Margalef index (D_M)	2	0.713	0.500	6	0.893	0.126	-	-	-
Simpson指数 Simpson index (D_S)	2	0.008	0.992	6	0.314	0.658	-	-	-
Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index (H)	2	0.016	0.984	6	1.685	0.239	-	-	-
Pielou指数 Pielou index (J)	2	0.345	0.712	6	1.357	0.012*	-	-	-

*在 $P = 0.05$ 水平上显著, **在 $P = 0.01$ 水平上极显著。
* Significant at the 0.05 level; ** Extremely significant at the 0.01 level.

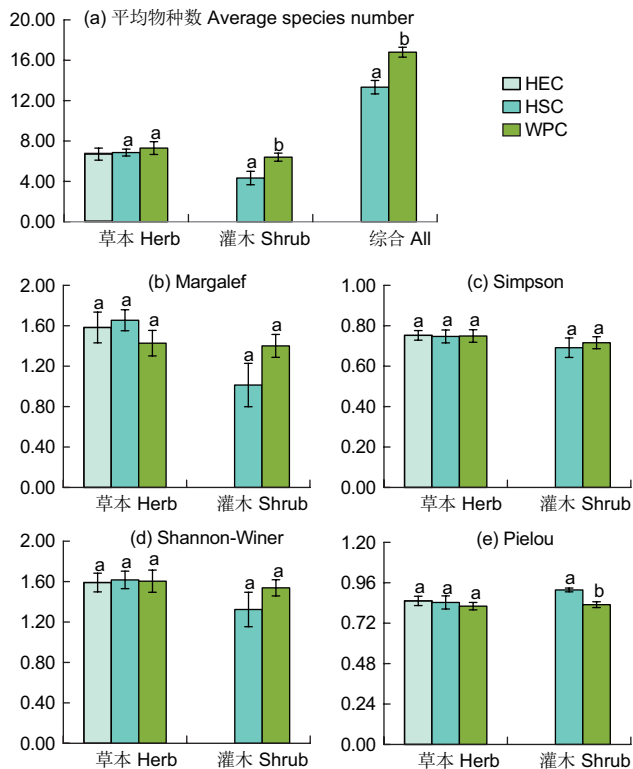


图2 3个恢复阶段的多样性指数比较. 字母不同表示不同恢复阶段差异显著. HEC: 草本植被群落阶段(恢复早期); HSC: 草灌植被群落阶段(恢复后期); WPC: 原有植被群落阶段.

Fig. 2 The comparison in diversity index among/between restoration stages. Different letters indicate significant differences in different stages of recovery. HEC: Herbaceous vegetation community stage (recovery in early stage); HSC: Herb-shrub vegetation community stage (recovery in lately stage); WPC: Original vegetation community stage.

灌总平均物种数(13.3个).

3 讨论与结论

从各恢复阶段总的物种情况来看,草本植物3个阶段物种差异不大,依次为16、14和17个物种,而灌木植物和草灌总的物种数则表现出明显的依次增多,分别为2、8、12和18、22、29个物种. 可以看到,前两个恢复阶段(HEC和HSC)的草本物种似乎已基本与原始植被群落(WPC)相近,但前两个阶段分别有3个(紫苜蓿、大花野豌豆和地角儿苗)和1个物种(紫苜蓿)是边坡创面工程修复后人工播撒的物种,其并没有出现在原始植被群落阶段中,如果剔除这些物种,前两个阶段的草本物种数则均为13个,显示前两个阶段出现草本物种数还

是在一定程度上少于原始植被群落阶段. 灌木物种方面,现场的植被群落外貌(图1)显示,演替早期基本看不到什么灌木物种,但调查到了2个物种(杜鹃和胡枝子). 演替早期出现的灌木植物不是原始群落中占绝对优势的西康扁桃而是杜鹃和胡枝子,应该与它们的种子特性有关,杜鹃和胡枝子种子千粒重分别约为0.1-0.4 g和1.0-8.0 g [32-33],而西康扁桃种子千粒重则达到了550 g [34],西康扁桃的种子迁徙到新的恢复迹地更为困难. 虽然恢复后期的植被群落外貌已经趋近于原始植被群落,但灌木物种数(8个)还是明显低于原始植被群落(12个).

从物种组成及其变化动态来看,草本植物的菊科和唇形科、灌木植物的蔷薇科和豆科在各恢复阶段都是物种存在较多的科,与黄炬斌[15]、黎燕琼等[35]对岷江干旱河谷段植物多样性的研究结果基本相同,且3个科的物种大多在某个恢复阶段甚至各恢复阶段都处于较为优势的地位,显示菊科、唇形科、蔷薇科和豆科的物种更易于在干旱河谷地区生存. 其中,草本植物菊科的苦蒿和香青和灌木植物蔷薇科的西康扁桃不仅在原始植被群落阶段占据着主导地位,在前两个恢复阶段(西康扁桃仅在恢复后期)也基本都是占据着主导地位,尤其是苦蒿和西康扁桃,说明3个物种是该区域植被群落的主要建群种,在植被恢复过程中也在一定程度上可能会优先进入新的恢复迹地. 3个人工播撒的豆科草本物种有2个物种(大花野豌豆和地角儿苗)在恢复后期消失,另外1个物种(苜蓿)虽然在恢复后期还没有消失,但其重要值和优势比也大大降低,显示它们不会影响恢复进程中本地植被群落的形成. 除此之外,其他物种基本都是原始植被群落中的物种,但除了吉祥草和水栒子,可能是抽样调查时由于随机因素没有在原始植被群落中调查到这两个物种. 一些物种表现出在演替早期具有一定的优势,如草本植物中的狗娃花、野生紫苏、长蕊石头花和灌木植物中的平枝栒子;而一些物种则在演替后期表现出一定的优势,如草本植物中的沿阶草、獐牙菜、甘青青兰和灌木植物中的胡枝子、锦鸡儿、杜鹃和栒子. 此外,原始植被群落中的草本和灌木植物分别有4和5种没有出现在前两个恢复阶段.

多样性指数方面,草本植物的平均物种数、Margalef丰富度指数、Simpson多样性指数、Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数在3个恢复阶段均没有呈现出显著性的差异,即使剔除掉人工播撒的3个豆科草本物种,还是没有表现出显著性的差异(数据未列出). 李芳兰等对岷江干旱河谷豆科植物多样性的研究[36]也发现,豆科植物具有较强的生存能力,能为生态系统中其他植物的生长与定居创造有利的微生境条件,是岷江干旱河谷植被的特殊功能群之一,也常被用于干旱河谷地区植被恢复的优先物种. 灌木植物方面,多样性指数除Pielou均匀度指数外原始植被群落均高于恢复后期,且

平均物种数表现出显著性的升高,显示灌木的生物多样性还是与原始植被群落存在一定的差距。而原始植被群落灌木的Pielou均匀度指数要显著低于演替后期,应该是由于西康扁桃占过于主导的优势地位所造成,其在原始植被群落的综合优势比达到了100%,其他物种则要远低于西康扁桃。综合草灌总的平均物种数来看,原始植物群落的草灌总平均物种数极显著地高于恢复后期的草灌总平均物种数,说明恢复后期的植被群落外貌虽然已经趋近于原始植被群落(图1),但物种多样性还并未达到原始的植被群落状态。

综上所述,成兰铁路岷江上游干旱河谷段边坡创面工程修复通过人工播撒植物种子约2.5年后,形成的两个恢复阶段的草本和灌木植物的多样性指数已基本与原始植被群落没有显著的差异,但草灌植被群落阶段的灌木和草灌总的物种数还与原始植被群落存在显著的差距。表明通过人工播撒种子能在一定程度上促进边坡植被恢复,但是还不能完全恢复到原始植被状态。人工播撒的豆科植物在演替后期呈现逐渐消

失的迹象,显示这些引进物种不但可以在前期在一定程度上丰富植被多样性,后期也不会影响本地植被群落的形成;但同时这些物种也表现出不稳定性,干旱河谷土壤贫瘠,对养分需求较低的物种更具有抗旱性^[17],而部分人工播撒的种子不能长期地适应干旱河谷的特殊地理环境和气候,不能为该地区的植被恢复长期提供助力,这也反映了工程队在边坡恢复过程中的施工粗放以及技术不成熟,没有筛选出更适宜该地区环境的物种。由于豆科、菊科植物在岷江上游干旱河谷生存更具有优势,根据物种重要值和优势比的变化,该地区在进行边坡创面植被恢复时,除了引进一些广泛使用的豆科物种外,也应当针对性地采集本地物种胡枝子(豆科)、苦蒿、香青等的种子在植被恢复初期进行人工播撒以促进植被群落的恢复进程。同时也应给工程队普及一些基本的植被恢复技术或者在施工时邀请专业人士进行分析评估和指导,从而更加科学、高效地促进边坡植被恢复进程。

参考文献 [References]

- 钟祥浩. 干热河谷区生态系统退化及恢复与重建途径[J]. 长江流域资源与环境, 2000, 9 (3): 376-383 [Zhong XH. Degradation of ecosystem and ways of its rehabilitation and reconstruction in dry and hot valley—take representative area of Jinsha river, Yunnan province as an example [J]. *Res Environ Yangtze Basin*, 2000, 9 (3): 376-383]
- 赵琳, 郎南军, 郑科, 彭明俊. 云南干热河谷生态环境特性研究[J]. 林业调查规划, 2006, 9 (3): 114-117 [Zhao L, Lang NJ, Zheng K, Peng MJ. A study on eco-environmental characteristics of dry and hot valley of Yunnan province [J]. *For Inv Plan*, 2006, 9 (3): 114-117]
- 龙汉利, 覃志刚, 刘福云, 魏宗华, 干少雄, 蒲春林, 尤继勇. 四川干旱河谷地区植被恢复研究进展[J]. 四川林业科技, 2013, 34 (6): 27-32 [Long HL, Qin ZG, Liu FY, Wei ZH, Gan SX, Pu CL, You JY. Advances in researches on vegetation restoration in dry valleys of Sichuan province [J]. *J Sichuan For Sci Technol*, 2013, 34 (6): 27-32]
- 魏宏庆, 沈永平, 魏鹏慧, 张峰. 白龙江中游干旱河谷水土流失与地理环境[J]. 干旱区地理, 2019, 42 (5): 1023-1028 [Wei HQ, Shen YP, Wei LH, Zhang F. Soil erosion and geographical environment in dry valley of the middle reaches of Bailong River [J]. *Arid Land Geogr*, 2019, 42 (5): 1023-1028]
- 詹金凤. 岷江上游干旱河谷演化研究及生态安全评价[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2015 [Zhan JF. Evolution research of dry valley and ecological security evaluation of the upper reaches in Minjiang River [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2015]
- 周义贵. 岷江上游干旱河谷区不同土地利用/植被恢复类型土壤生态效益评价[D]. 成都: 四川农业大学, 2014 [Zhou YG. Evaluation on soil ecological benefits in different land use/vegetation restoration in the key region of the upper reaches of Minjiang River-valley [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2014]
- 包维楷, 陈庆恒, 陈克明. 岷江上游干旱河谷植被恢复环境优化调控技术研究[J]. 应用生态学报, 1999, 22 (5): 542-544 [Bao WK, Chen QH, Chen KM. Environment control techniques for vegetation restoration in dry valley of upper reaches of Minjiang River [J]. *Chin J Appl Ecol*, 1999, 22 (5): 542-544]
- 邵方丽. 干热河谷典型地区植被恢复研究综述[J]. 林业建设, 2017, 31 (1): 22-27 [Shao FL. Research overview on vegetation restoration in typical area of dry-hot valley [J]. *For Constr*, 2017, 31 (1): 22-27]
- 杨育林, 鄢武先, 尤继勇, 陈安全, 吴雨峰, 张好, 李佳泳. 川西干旱河谷区植被恢复机理及模式分析[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2016, 42 (6): 604-609 [Yang YL, Yan WX, You JY, Chen AQ, Wu YF, Zhang H, Li JY. Mechanism and model analysis with vegetation restoration in arid valley area of western Sichuan [J]. *J S Minzu Univ (Nat Sci Ed)*, 2016, 42 (6): 604-609]
- 刘爱兰. 三维植被网喷播植草技术的应用[J]. 湖北林业科技, 2002, 16 (2): 35-37 [Liu AL. Application of three-dimension vegetative net for planting grasses by spraying sowing to roadside slopes of highway [J]. *Hubei For Sci Technol*, 2002, 16 (2): 35-37]
- 章恒江, 章梦涛, 付奇峰. 岩质坡面喷混快速绿化新技术[J]. 国外公路, 2000, 17 (5): 30-32 [Zhang HJ, Zhang MT, Fu QF. New technique of fast planting by spraying the mixture on stony slopes [J]. *J China Foreign For Highway*, 2000, 17 (5): 30-32]
- 张俊云, 李绍才, 周德培. 厚层基材喷射种植基的物理特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20 (A1): 1010-1014 [Zhang JY, Li SC, Zhou DP. Study on the characteristics of thick layer base material spraying [J]. *Chin J Rock Mech Eng*, 2001, 20 (A1): 1010-1014]
- 裴娟, 艾应伟, 刘浩, 张志卿, 曾丽霞. 坡面和坡向对遂渝铁路岩石边坡创面人工土壤植被恢复的影响[J]. 水土保持通报, 2009, 29 (2): 197-201 [Pei J, Ai YW, Liu H, Zhang ZQ, Zeng LX. Effects of slope position and aspect on vegetation restoration of excavated soil surface on Suiyu railway rock slope [J]. *Bull Soil Water Cons*, 2009, 29 (2): 197-201]
- 王东睿. 成都至兰州铁路(四川段)区域生态系统影响分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2016 [Wang DR. Analysis on the regional ecosystem impact of Chengdu-Lanzhou railway (Sichuan section) [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016]
- 黄炬斌. 成兰铁路沿线(岷江干旱河谷段)植物多样性及其工程扰动区植被恢复潜力研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2010. [Huang JB. Studies on the plant diversity and the vegetation restoration potential of engineering disturbance region along Chengdu-Lanzhou railway (in the arid valley of Mingjiang river) [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2010]
- 晏兆莉, 陈克明, 陈建中, 王春明. 岷江干旱河谷的生态特征与

- 植被恢复研究[J]. 世界科技研究与发展, 2000, **29** (S1): 36-38 [Yan ZL, Chen KM, Chen JZ, Wang CM. Studies on ecological characteristics and reforestation in dry valley area of Minjiang river [J]. *World Sci-Technol R&D*, 2000, **29** (S1): 36-38]
- 17 周会敏. 岷江上游干旱河谷优势灌木矿质元素与抗旱性研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2019 [Zhou HM. Study on drought resistance of dominant shrubs and mineral elements of dominant shrubs in rid valley of the Mingjiang river [D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2019]
- 18 赖元长, 陆军. 岷江上游干旱河谷区植被恢复对土壤物理性质的影响研究[J]. 四川林勘设计, 2019, **32** (4): 1-5 [Lai YC, Lu J. Study on the effect of vegetation restoration on physical properties of soil in the arid valley of the upper Minjiang River [J]. *Sichuan For Expl Des*, 2019, **32** (4): 1-5]
- 19 胡尧. 岷江上游干旱河谷气候变化对农业发展的影响及适应性对策 [J]. 福建农业, 2014, **25** (1): 116-117 [Hu Y. Impact of climate change on agricultural development in arid valley of upper reaches of Minjiang River and its adaptive countermeasures [J]. *Fujian Agric*, 2014, **25** (1): 116-117]
- 20 张春华, 孙永玉, 刘方炎, 崔永忠, 李昆. 金沙江干热河谷与岷江上游干旱河谷气候特征比较研究[C]//国家林业局、广西壮族自治区人民政府、中国林学会. 第二届中国林业学术大会——S10林业与气候变化论文集. 南宁, 中国林学会, 2009: 118-128 [Zhang CH, Sun YY, Liu FY, Cui YZ, Li K. Comparison of climate characteristics and reforestation on between hot-dry valley in Jinsha River and warm-dry valley in upper reaches of Min River [C]//National Forestry and Grassland Administration & The Guangxi Zhuang Autonomous Region, Chinese Society Forestry. The second China forestry Academic Conference-S10 Papers on forestry and climate change. Nanning, Chinese Society Forestry, 2009: 118-128]
- 21 严代碧. 岷江上游干旱河谷区退化植被特征及其恢复重建的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006 [Yan DB. Research on degraded vegetation characters, restoration and reconstruction at the arid valley in the upper reaches of the Minjiang River [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006]
- 22 李国强, 马克明, 傅伯杰. 区域植被恢复对生态安全的影响预测——以岷江上游干旱河谷为例[J]. 生态学报, 2006, **38** (12): 4127-4134 [Li GQ, Ma KM, Fu BJ. Impacts prediction of regional vegetation restoration on ecological security [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **38** (12): 4127-4134]
- 23 刘国华, 张洁瑜, 张育新, 周建云, 关文彬, 马克明, 傅伯杰. 岷江干旱河谷三种主要灌丛地上生物量的分布规律[J]. 山地学报, 2003, **21** (1): 24-32 [Liu GH, Zhang JY, Zhang YX, Zhou JY, Guan WB, Ma KM, Fu BJ. Distribution regulation of aboveground biomass of three main shrub types in the dry valley of Minjiang River [J]. *Mount Res*, 2003, **21** (1): 24-32]
- 24 冶民生, 关文彬, 吴斌, 马克明, 刘国华, 汪西林, 陈箬妍. 岷江干旱河谷植物群落的复杂性[J]. 生态学报, 2006, **38** (10): 3159-3165 [Ye MS, Guan WB, Wu B, Ma KM, Liu GH, Wang XL, Chen JY. Plant community complexity in the arid valley of Minjiang River [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **38** (10): 3159-3165]
- 25 余昱. 金沙江、澜沧江干热河谷灌草丛群落特征研究[D]. 昆明: 云南大学, 2018 [Yu Y. Study on the shrub-grass communities in dry warm valley of Jinsha and Lancang River [D]. Kunming: Yunnan University, 2018]
- 26 马吉才, 冯杰. 岷江杂谷脑河9种典型植被群落的水源涵养能力与价值评估[J]. 四川林业科技, 2017, **38** (2): 110-113 [Feng JC, Feng J. A study of water conservation capacity and value evaluation of 9 kinds of typical vegetation community in the Zagunao River of the Minjiang River [J]. *J Sichuan For Sci Technol*, 2017, **38** (2): 110-113]
- 27 刘晔, 李鹏, 许玥, 石松林, 应凌霄, 张婉君, 彭培好, 沈泽昊. 中国西南干旱河谷植物群落的数量分类和排序分析[J]. 生物多样性, 2016, **24** (4): 378-388 [Liu Y, Li P, Xu Y, Shi SL, Ying LX, Zhang WJ, Peng PH, Shen ZH. Quantitative classification and ordination for plant communities in dry valleys of Southwest China [J]. *Biol Sci*, 2016, **24** (4): 378-388]
- 28 王雷. 岷江上游干旱河谷几种优势灌木的叶水势与抗旱性研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2018 [Wang L. A study on leaf water potential and drought resistance of dominant shrubs in the arid valley of the upper Minjiang River [D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2018]
- 29 马玲. 岷江上游干旱河谷几种主要灌木光合色素比较研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2018 [Ma L. Study on photosynthetic pigments of several main shrub species in the dry valley of the upper Minjiang River [D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2018]
- 30 马克平. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法 (上) [J]. 生物多样性, 1994, **2** (3): 162-168 [Ma KP. Methods for measuring the diversity of biological communities I Methods of measuring α diversity (Part one) [J]. *Biol Sci*, 1994, **2** (3): 162-168]
- 31 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法 (下) [J]. 生物多样性, 1994, **2** (4): 231-239 [Ma KP, Liu YM. Methods for measuring the diversity of biological communities I Methods of measuring α diversity (Part two) [J]. *Biol Sci*, 1994, **2** (4): 231-239]
- 32 杨冰, 黄梅, 王灵军, 吴晓悦, 戴晓勇. 贵州杜鹃花科植物果实形态及21种杜鹃花属植物种子特性[J]. 贵州林业科技, 2020, **48** (1): 8-14 [Yang B, Huang M, Wang LJ, Wu XY, Dai XY. Fruit morphology of ericaceae and seed characteristics of 21 species of rhododendron in Guizhou [J]. *Guizhou For Sci Technol*, 2020, **48** (1): 8-14]
- 33 宋鹏, 张庭端, 刘芙蓉, 王伟, 罗建勋, 贾晨. 川西地区西康扁桃优树选择技术与综合评价[J]. 四川林业科技, 2017, **38** (2): 79-84 [Song P, Zhang TD, Liu FR, Wang W, Luo JX, Jia C. Superior variety selection and overall evaluations of amygdalus tangutica in Western Sichuan [J]. *J Sichuan For Sci Technol*, 2017, **38** (2): 79-84]
- 34 陈香波, 田旗, 崔心红. 胡枝子属种子萌发特性试验[J]. 林业科技开发, 2012, **26** (2): 83-85 [Chen XB, Tian Q, Cui XH. Germination characteristic of seeds in genus Lespedeza [J]. *J For Eng*, 2012, **26** (2): 83-85]
- 35 黎燕琼, 陈泓, 郑绍伟, 杨素香, 刘大虎, 龚良春. 岷江上游干旱河谷区植被特征与多样性研究[J]. 四川林业科技, 2009, **30** (5): 28-34, 43 [Li YQ, Chen H, Zheng SW, Yang XS, Liu DH, Gong LC. A study of the vegetation characteristics and diversity of the arid valley in the upper Minjiang River [J]. *J Sichuan For Sci Technol*, 2009, **30** (5): 28-34, 43]
- 36 李芳兰, 包维楷, 朱林海. 岷江干旱河谷豆科植物多样性及其空间格局[J]. 山地学报, 2010, **28** (1): 76-84 [Li FL, Bao WK, Zhu Lin H. Species diversity and spatial distribution of legumes in the dry valley of Minjiang River, SW China [J]. *Mount Res*, 2010, **28** (1): 76-84]