

高寒山区道路边坡植被恢复物种选择及适宜性评估*

刘鑫¹ 包维楷^{1**} 胡斌¹ 冯德枫^{1,2} 庞学勇¹ 丁建林¹ 吴展波³

¹中国科学院山地生态恢复与生物资源利用重点实验室, 生态恢复与生物多样性保育四川省重点实验室, 中国科学院成都生物研究所 成都 610041

²中国科学院大学 北京 100049

³中铁二院工程集团有限责任公司 成都 610031

摘要 筛选适应高寒山区生境的物种对于因公路、铁路修建导致原生植被退化的边坡生态恢复具有重要的现实意义。在青藏高原东部318国道折多山、高尔寺山和剪子弯山等路段设置植物样方120个, 调查其物种组成和群落结构, 据此对边坡人工恢复物种和自然恢复物种进行评价筛选。结果显示: 调查范围内共有108种植物, 分属36科96属。其中, 人工恢复物种17个, 以禾本科和豆科植物为主。其中黑麦草 (*Lolium perenne*) 和垂穗披碱草 (*Elymus nutans*) 以及紫苜蓿 (*Medicago sativa*) 和草木犀 (*Melilotus officinalis*) 能够生长于3 000-4 100 m的边坡并达到较高盖度。自然恢复物种多出现于恢复3-5年后的边坡, 其中稳定扩展型物种是导致边坡植被多样性提高、群落结构复杂化的关键。自然恢复物种中的部分灌木, 例如金露梅 (*Potentilla fruticosa*) 和黄花木 (*Piptanthus nepalensis*) 等, 以及苔藓可以通过进一步试验用于人工边坡恢复, 建立苔藓、草本、木本植物共存的群落, 有助于提高边坡植被的护坡效果。高寒山区道路边坡植被恢复是一个漫长的过程, 依据边坡环境条件利用上述适宜物种及其组合进行人工恢复, 并选择适宜时机促进稳定扩展型自然恢复物种的生长, 将促使边坡逐渐由次生裸地、人工植被走上自然演替恢复的道路。(图2 表1 参21)

关键词 高寒山区; 边坡; 植被恢复; 护坡植物筛选; 配置模式; 演替

CLC X171.4 (271)

Plant species selection and adaptivity for vegetation restoration of alpine roadside slopes*

LIU Xin¹, BAO Weikai^{1**}, HU Bin¹, FENG Defeng^{1,2}, PANG Xueyong¹, DING Jianlin¹ & WU Zhanbo³

¹CAS Key Laboratory of Mountain Ecological Restoration and Bioresource Utilization & Ecological Restoration and Biodiversity Conservation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China

Abstract Construction of expressways and railways results in bare slopes and degraded ecosystems. Vegetation restoration with proper plant species is the foremost work in the restoration of the degraded roadside slopes. The climate of alpine region is featured with low temperature, short growing period, strong radiation, and low but concentrated precipitation, which are harsh for restoring vegetation. This research aimed to select proper plant species adaptable to the environment of alpine region and suitable for roadside slope restoration. We recorded the coverage and height of each plant present in the 120 plots along the G318 road in the eastern part of Tibetan Plateau. The investigation found 108 vascular plant species in the alpine roadside slope, including 17 artificially planted species. Most planted species belonged to Poaceae and Fabaceae. *Lolium perenne*, *Elymus nutans*, *Melilotus officinalis*, and *Medicago sativa* grew well on roadside from the altitude of 3000 m to 4100 m. Naturally regenerated species were mainly distributed in older slopes formed 3-5 years ago. Two species groups could be identified by the species characteristics: invasive species and spread species. The spread species contributed most to the biodiversity and complicated community structure in older slopes in Zheduo Mountain and Jianziwan Mountain. Naturally regenerated shrubs, such as *Potentilla fruticosa*, *Piptanthus nepalensis*, and *Caragana franchetiana*, could be planted artificially to improve the protection effect of vegetation. We also found that some bryophyte species, which are drought and cold tolerant, could be used as slope protecting species. The vegetation restoration of roadside slope in alpine region is a long lasting process. Artificial restoration of the secondary bare slope with proper plant species could result in healthy ecosystem with natural succession.

Keywords alpine region; roadside slope; vegetation restoration; species selection; plant configuration; succession

收稿日期 Received: 2016-01-11 接受日期 Accepted: 2016-03-03

*中国铁路总公司科技研究开发计划课题 (2014G004-A-11) 资助 Supported by the China Railway Corporation Technology Research and Development Program (2014G004-A-11)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: baowk@cib.ac.cn)

在公路、铁路的修建过程中,大规模开山采石、填积土方,严重扰乱了原有的自然生态系统,导致边坡原生植被退化,并带来水土流失、山体滑坡的危险^[1]。为治理极度退化的道路边坡,必须进行生态系统的恢复重建^[2]。植被的重建是边坡生态系统恢复中的重要步骤,恢复良好的边坡植被能够提高边坡稳定性,降低水土流失风险^[3],能够促进边坡土壤结构和肥力的恢复,使边坡生态系统走上自然演替恢复的道路。其中所使用植物物种的生物学、生态学性状将显著影响边坡植被的恢复速度和护坡效果。因此,选择合适的物种就成为边坡植被恢复中的首要问题。

青藏高原东部高寒山区的原生植被主要为云冷杉林、针阔混交林、落叶阔叶林、高山灌、草丛等,一旦遭受破坏则难以自然恢复更新^[4]。高寒山区的自然条件与低海拔地区迥异,光照强,植物生长期短,降水集中。在这种环境条件下,多数植物难以在施工破坏后的次生裸地上顺利生长繁殖。因此,高寒山区护坡植物的选择必须充分考虑当地的实际环境条件。但迄今,植物选择仍是道路边坡植被恢复中尚未解决的问题^[5],特别是针对高海拔、高寒山区道路边坡植被恢复的物种筛选尚且缺乏研究。

目前道路边坡生态恢复的基本思路是运用地带性规律、植被演替规律及生态位原理等选择适宜的先锋植物,依照一定的物种搭配模式构建边坡植物群落和生态系统。初始种植的先锋植物将影响自然更新物种的定植,并进一步对后期边坡植被的物种组成、群落结构与多样性产生显著影响^[3]。因此边坡恢复植物的选择对于成功进行极端退化生态系统的重建具有重要的意义。本文通过调查川西高寒山区道路边坡植被的物种组成,分析和评价其中主要人为栽培物种和自然恢复物种的生长情况,重点聚焦3个方面问题:

(1)各栽培物种的生长情况及其适应的生境范围;(2)自然恢复更新的种类以及在道路边坡的生长情况;(3)边坡植被由人工栽培主导向自然恢复更新演替变化的关键时期和过程。通过对上述问题的回答,为构建稳定的边坡植被提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于四川省西部高寒山区,主要包括甘孜藏族自治州境内318国道海拔在3 000 m-4 100 m范围内的折多山、高尔寺山和剪子弯山等路段,共约167 km。研究区属高原温带季风半干旱气候区,冬春干燥寒冷,夏季温暖湿润,雨热同季。年平均气温6.3-8.7℃,6-7月份平均气温14.5-16.6℃,1月份平均气温-0.8-4.7℃。无霜期较短,约为130-140 d。年平均降水量800-950 mm^[6],主要集中在7-9月份。

1.2 野外调查

首先对研究区域内海拔3 000 m以上路段的边坡进行普查,记录这些路段边坡出现的主要植物物种及其出现的路段、海拔等信息。其次,对折多山、高尔寺山和剪子弯山等路段中近5年内形成的边坡进行调查。选择典型边坡作为调查样地,在各样地内设置数个1 m × 1 m的样方。确定样方位置时,充分考虑样方的代表性,兼顾该样地内的各种物种搭配

类型;对于较高的边坡兼顾各个坡位,同时在坡上、坡中和坡下布置样方。记录样方内植物总盖度以及出现的所有维管植物物种,并记录每个物种的盖度和高度。对于有苔藓植物出现的样方,额外记录苔藓总盖度和主要苔藓物种。详细记录样方的海拔、坡度、坡向和边坡类型,石砾含量高于60%的为石质边坡,石砾含量低于60%的为土质边坡。相对于阴坡,阳坡接受的太阳辐射量、气温日较差和土壤水分蒸发量均较大,更加能够代表高寒山区道路边坡的环境特点,因此本次调查中的大部分样方位于阳坡,不宜分析坡向的影响。共调查样方120个,其中折多山31个,高尔寺山西坡10个,高尔寺山东坡39个,剪子弯山40个。高尔寺山边坡为近2年左右形成,折多山和剪子弯山边坡约形成5年左右。样方调查中无法识别的植物采集标本带回实验室依据《中国植物志》相关卷册鉴定。

依据相关资料以及边坡植物的分布类型和栽培方式,将边坡中出现的物种划分为人工栽培种和自然恢复种,分别统计物种数目。对于出现频率较高的人工栽培物种,通过分析其盖度与其所处样方的海拔、坡度和类型的关系,并据此评价其生长状况和对环境的适应性;对于自然恢复物种,通过分析其出现的样方数目(频率)、出现样方的位置及其在样方中的盖度,评价其生长状况。

2 结果与分析

四川西部高寒山区道路边坡共记录植物108种,分属36科96属,其中多数物种为四川西部高山峡谷区最常见的物种(附表1)。这些边坡植物绝大多数是草本植物,多达92种,约占85%。木本植物共16种,其中灌木11种,乔木5种。

2.1 人为栽培种

这些边坡植物中,17种为人工种植,多数是草本植物,其中包括禾本科植物黑麦草(*L. perenne*)、羊茅(*Festuca ovina*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、长芒披碱草(*E. dolichatherus*)、短颖披碱草(*E. burchan-buddae*)、糙野青茅(*Deyeuxia scabrescens*)、野燕麦(*Avena fatua*)和白车轴草(*Trifolium repens*)、紫苜蓿(*Medicago sativa*)、草木犀(*Melilotus officinalis*)、白花草木犀(*M. albus*)、花苜蓿(*M. ruthenica*)等豆科植物。部分路段种植有青杨(*Populus cathayana*)、柳(*Salix* sp.)和云杉(*Picea* sp.)等木本植物。

黑麦草广泛用于折多山、高尔寺山和剪子弯山等路段的边坡恢复。120个样方中,89个样方有黑麦草出现,其平均高度约19 cm,平均盖度约15%,且有21个样方的黑麦草盖度在20%以上。黑麦草盖度较高的样方多集中于剪子弯山路段,能够在3 000-4 100 m海拔的边坡上生长并形成比较高的盖度,同时它们还能够适应各种坡度(图1 d和k)。披碱草也广泛出现于高寒山区道路边坡,特别是折多山和高尔寺山路段,以垂穗披碱草为主,只有少数长芒披碱草和短颖披碱草混杂其中。120个样方中41个样方有披碱草出现,平均盖度达21%,平均高度47 cm。披碱草可以在3 000-3 900 m海拔范围内生长(图1 c和j)。糙野青茅出现于28个样方中,各路段均有出现,平均盖度约13%(图1 b和i),平均高度25 cm。野燕麦出现于21个样方中,这些样方主要分布于剪子弯山路段的土质边

坡, 海拔多低于3 300 m, 能够适应40°左右的坡度(图1 a和h)。
豆科植物也常用于边坡植被恢复。120个样方中, 20个样方有以紫苜蓿为主的苜蓿属植物出现, 平均盖度达23%, 平均高度28 cm, 广泛分布于海拔3 000-4 000 m的边坡(图1 e和l)。以草木犀属植物出现于21个样方中, 集中于剪刀弯路段, 平均盖度约为13%, 平均高度16 cm, 主要分布于海

拔3 600-4 100 m的边坡(图2 f和m)。白车轴草主要出现在折多山路段, 共15个样方有白车轴草出现, 平均盖度约11%, 平均高度4 cm, 多分布于海拔3 500 m以下, 且坡度大于20°时盖度较低(图2 g和n)。

此外, 除上述较常用于边坡恢复的物种外, 另有部分物种见于部分路段边坡。例如, 青杨在部分海拔3 500 m以下坡

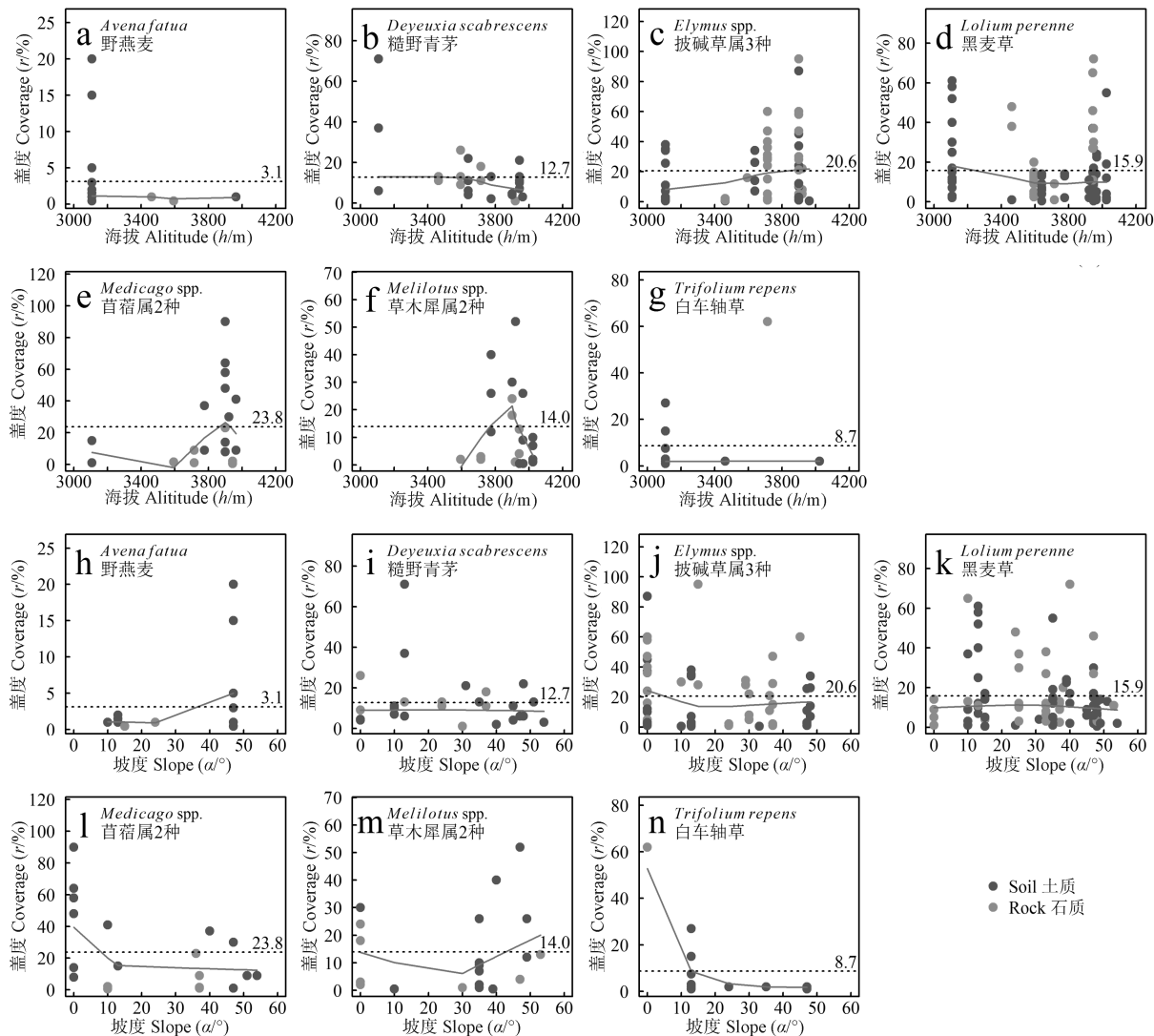


图1 高寒山区道路边坡主要栽培植物盖度与海拔(a - g)和坡度(h - n)的关系。实线表示LOWESS趋势线, 虚线和数字为物种平均盖度。
Fig. 1 Relationships between altitude (a - g) or slope (h - n) and the coverage of main planted species in the road side area of cold alpine region. The trend is indicated by LOWESS lines (solid). The mean coverage is indicated by dotted lines.

表1 高寒山区道路边坡主要自然恢复物种出现样方数、平均盖度和平均高度
Table 1 The occurrence, coverage and height of naturally regenerated species in the road side area of cold alpine region

物种 Species	出现 样方数 Occurrence	均盖度 Coverage (r%)	均高度 Height (h/cm)	物种 Species	出现 样方数 Occurrence	均盖度 Coverage (r%)	均高度 Height (h/cm)
疏花剪股颖 <i>Agrostis hookeriana</i>	15	5.57	24.00	甘肃棘豆 <i>Oxytropis kansuensis</i>	5	1.08	5.63
黄腺香青 <i>Anaphalis aureopunctata</i>	9	1.99	16.83	轮叶马先蒿 <i>Pedicularis verticillata</i>	15	1.58	9.50
茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i>	10	10.30	49.30	黄花木 <i>Piptanthus nepalensis</i>	2	38.00	63.50
甘青蒿 <i>Artemisia tangutica</i>	12	1.90	27.13	柔毛蓼 <i>Polygonum sparsipilosum</i>	15	1.97	2.23
柳兰 <i>Chamerion angustifolium</i>	9	1.19	16.88	珠芽蓼 <i>Polygonum viviparum</i>	7	1.49	7.40
光籽柳叶菜 <i>Epilobium tibetanum</i>	31	1.59	6.79	西南委陵菜 <i>Potentilla lineata</i>	14	6.14	3.12
东俄洛龙胆 <i>Gentiana tongolensis</i>	17	1.33	8.14	连翘叶黄芩 <i>Scutellaria hypericifolia</i>	6	4.50	16.50
甘青老鹳草 <i>Geranium pylzowianum</i>	8	1.03	12.00	景天 <i>Sedum</i> sp.	11	8.30	2.56

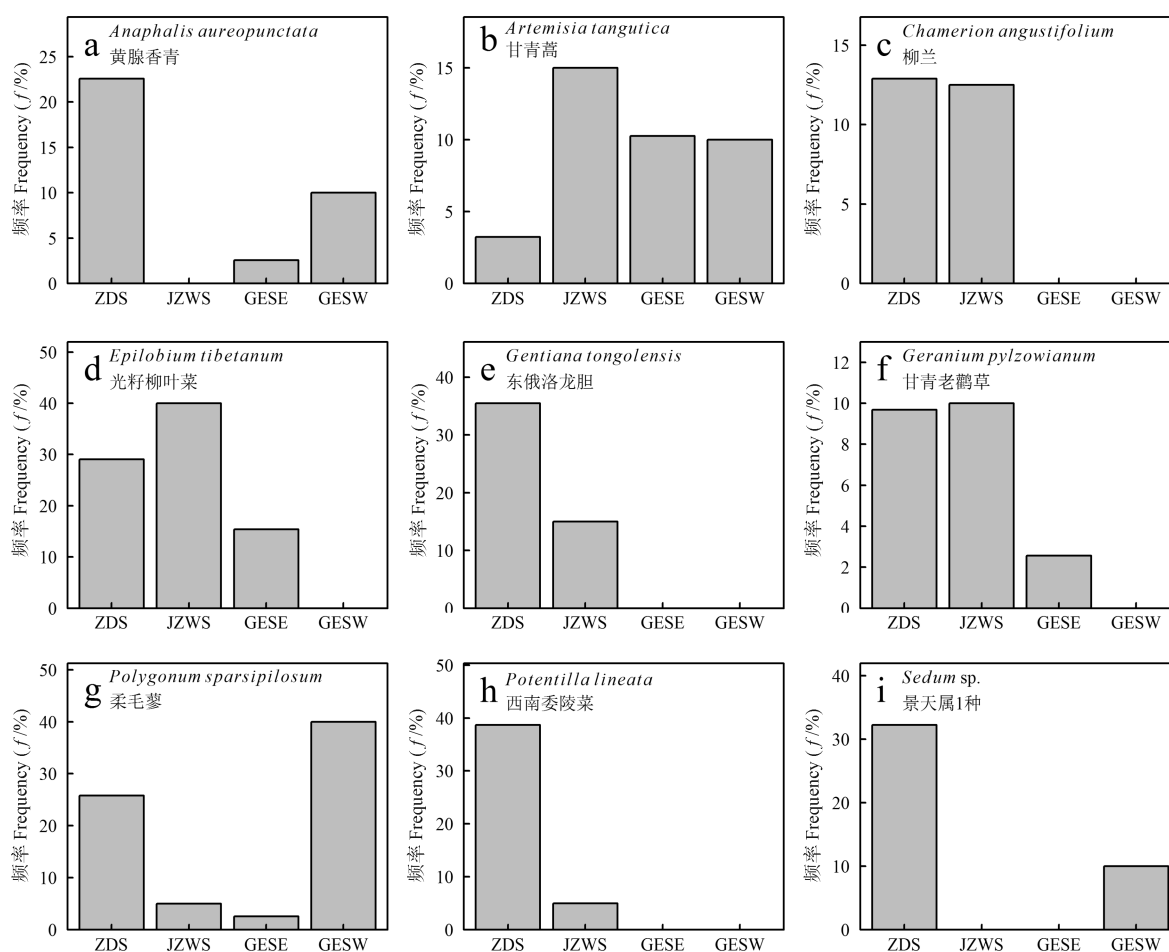


图2 高寒山区道路边坡常见自然恢复物种在各路段的出现频率。ZDS: 折多山; JZWS: 剪子弯山; GESE: 高尔寺山东; GESW: 高尔寺山西。
Fig. 2 Occurrence frequency of dominant naturally regenerated species on each road section in cold alpine region. ZDS: Zhoduo Mountain; JZWS: Jianziwan Mountain; GESE: East of Gaorsi Mountain; GESW: West of Gaorsi Mountain.

度较小的边坡生长良好, 而栽培的柳树则多长势不旺。

2.2 自然恢复种

大量的边坡上出现的物种都是自然恢复的物种(表1), 其中仍然以草本植物为主。较常见的杂类草有光籽柳叶菜(*Epilobium tibetanum*)、东俄洛龙胆(*Gentiana tongolensis*)、柔毛蓼(*Polygonum sparsipilosum*)、轮叶马先蒿(*Pedicularis verticillata*)、西南委陵菜(*Potentilla lineata*)、甘青蒿(*Artemisia tangutica*)、景天(*Sedum* sp.)、茵陈蒿(*A. capillaris*)、冷蒿(*A. frigida*)、柳兰(*Chamerion angustifolium*)、黄腺香青(*Anaphalis aureopunctata*)、甘青老鹳草(*Geranium pylzowianum*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、粘毛鼠尾草(*Salvia roborowskii*)和东方草莓(*Fragaria orientalis*)等。较常见的禾草主要有疏花剪股颖(*Agrostis hookeriana*)和早熟禾(*Poa annua*)等。

自然恢复物种更多地出现于折多山和剪子弯山路段, 而在较新建的高尔寺山路段则较少出现(图2)。部分物种也开始出现于高尔寺山路段, 例如甘青蒿(图2b)和柔毛蓼(图2g)等。此外, 部分自然恢复物种广泛分布于各个路段, 例如各种禾草, 平均盖度约为3%-6%, 以及菊科蒿属的几种, 在各个路段均有分布, 平均盖度约6%, 高度在27-50 cm之间。

自然恢复物种的平均盖度多低于10%(表1)。但仍有一些物种在部分样方达到较高盖度, 例如西南委陵菜在折多山路段的一些样方盖度可达25%左右, 景天在折多山路段部分样方的盖度在20%以上, 粘毛鼠尾草虽仅出现于折多山和剪子弯山路段的共5个样方, 但最大盖度达34%, 柔毛蓼的盖度也达13%。

自然恢复物种还包括黄花木(*Piptanthus nepalensis*)和金露梅(*Potentilla fruticosa*)等灌木。例如, 黄花木虽仅现于2个样方中, 但平均盖度达38%。此外, 120个样方中的52个有苔藓植物分布, 主要集中于剪子弯山和折多山路段, 高尔寺山部分新近修建道路的边坡也有苔藓植物出现, 而且苔藓植物能够适应各海拔、坡度水平, 在土质或石质边坡上均能生长。苔藓物种以能够适应干旱生境的物种为主, 例如银叶真藓(*Bryum argenteum*)、金发藓属(*Polytrichum* spp.)和毛口藓属(*Trichostomum* spp.)物种等。

3 讨论

本文结果表明, 目前常用于高寒山区边坡的人工恢复物种多是草本植物, 以禾本科和豆科物种为主, 它们一般能够

适应高寒山区的环境,但随着海拔或坡度增加,部分物种盖度明显下降。边坡植被恢复3-5年后,自然恢复物种逐渐开始占据边坡。自然恢复物种数量较多,同样多为草本植物,以杂类草为主;此外,自然恢复的灌木和苔藓植物也可以通过进一步试验筛选为边坡恢复植物。

3.1 人工栽培物种

禾本科植物是道路边坡恢复中常用物种^[7-8],本文结果也表明,黑麦草和披碱草等高寒山区常用禾草可以在不同路段边坡形成较高的盖度(图1)。黑麦草是多年生冷季型草种,具有建植容易、发芽迅速、生长速度快的特点,可以使用喷播的方式播种^[9]。黑麦草对土壤要求不高,根系虽入土不深但须根发达,能提供较强的加筋作用^[10-11],可护坡固土,防止土壤侵蚀,减少水土流失。它能够良好生长于海拔3 000-4 000 m的道路边坡,能够适应各种坡度。披碱草是多年生草本,适应性广,耐寒抗旱。根系发达,能吸收土壤深层水分。与黑麦草类似,同样可以生长于海拔3 000-4 000 m的道路边坡。相对于上述两类草种,野燕麦是一年生草本,多分布在海拔3 100 m左右的边坡,盖度不高。因此,黑麦草和披碱草更适合用于高寒山区边坡植被恢复。

豆科植物是另一类道路边坡恢复中常用的物种^[8]。草木犀属的草木犀和白花草木犀都是二年生植物,抗逆性强。苜蓿属紫苜蓿和花苜蓿是多年生草本植物。草木犀属和苜蓿属的植物都是较高大的草本植物,有时主茎木质化呈半灌木状,而且根系深,具有较强的锚固作用^[10-11]。与黑麦草等根系浅但须根发达的植物共同使用可以实现较强的护坡作用。它们能够生长于海拔达4 000 m的道路边坡(图1),可以作为高寒山区边坡植被恢复的理想物种。白车轴草是多年生草本植物,抗寒耐热,在酸性和碱性土壤上均能适应,常形成密集的大面积草丛,对边坡具有较强的防护作用。白车轴草植株矮小(4 cm左右),与相对高大的黑麦草、披碱草等禾草搭配形成多层次的边坡群落,有助于增强植被护坡作用。此外,上述豆科植物都具有共生固氮的能力,能够有效地改善边坡的土壤条件。黑麦草和披碱草等禾草虽然能够适应贫瘠的土壤,但土壤氮含量增加时,其生物量将明显增加^[9]。因此,豆科植物与禾草混合播种,能够在边坡形成初期为边坡提供较好的防护作用。

3.2 自然恢复更新过程及物种

人工栽培物种一般作为边坡恢复的先锋种,其顺利定植生长将起到提高边坡稳定性的作用^[11]。随着时间的发展,土壤种子库的萌发和周边植物繁殖体的传入将使群落物种组成逐渐多样化^[12]。

据物种生物学特性可将其划分为两个种组:主动入侵型种组(Invasive species)与稳定扩展型种组(Spread species)。入侵型种组通常在边坡形成早期迅速扩大种群,能够适应边坡生境。其中比较典型的包括禾草,如疏花剪股颖、早熟禾等和菊科蒿属的甘青蒿、茵陈蒿和冷蒿等物种以及光籽柳叶菜和柳兰等植物。该种组植物与人工恢复物种类似,一般具有喜光耐旱等特点,并且种子产量大、易传播。这些特点使其可以成为边坡形成初期的护坡植物。稳定型种组通常能够稳步占据适宜生境。其中既包括草本植物也包括灌木物种,比较典型的有珠芽蓼、柔毛蓼和西南委陵菜、东方草莓以及黄花木、锦鸡儿(*Caragana franchetiana*)、金露梅等物种。它们具有较强的竞争力,种子含营养物质多,或可以通过营养

繁殖占据生境。该类型还包括能适应边坡生境的苔藓植物。稳定型种组是边坡植被恢复后期多样性增加的主要物种。

自然更新物种多分布于折多山和剪子弯山路段,高尔寺山路段较少且以禾草和菊科蒿属等植物为主,表明边坡恢复约2年内,自然恢复过程以主动入侵型种组的物种逐渐占据边坡为主,约3-5年后,来自于土壤种子库或者边坡周边植物群落的植物逐渐开始占据边坡生境,使边坡植被由人为主导逐渐向自然恢复演替转化。随着演替进展,边坡植物群落物种组成逐渐改变、物种多样性增加,形成不同高度植物搭配的复杂群落结构,这些变化有助于进一步增加植被护坡作用^[13-15]。边坡植被自然演替过程中,稳定型种组的植物逐渐占据边坡生境是其中的关键步骤。如果选择适当时机,如边坡建成3年后,人工促进稳定型种组的植物在边坡定植生长,将推动边坡植被自然恢复演替。

高寒山区道路边坡人工恢复所采用的物种多是草本植物,灌木物种应用较少。随着边坡植被自然演替,部分灌木物种开始出现在边坡上。选择适宜的灌木物种栽培,形成灌草结合的群落结构,将有效增强植被的护坡效果^[11]。结果显示锦鸡儿、金露梅等物种都是较好的选择。另外一类可以有效提高边坡稳定性的植物就是木质藤本植物^[16-17],它们具有攀附能力,可以迅速覆盖边坡^[18],但本次调查中没有在边坡上发现木质藤本植物。有研究表明低海拔地区可以使用爬山虎(*Parthenocissus tricuspidata*)、地锦(*Parthenocissus quinquefolia*)、扶芳藤(*Euonymus fortunei*)等作为护坡植物,但高海拔地区鲜见研究。依据我们对高寒山区植被调查的经验,铁线莲属(*Clematis* spp.)部分乡土物种适应高寒山区环境,可以作为高寒山区护坡植物,但仍需要进一步研究。

苔藓植物适应能力强,很多物种能够在高寒、干旱和弱光的环境中生长^[19]。本文结果表明,苔藓在高寒山区道路边坡植被恢复中发挥着重要的作用,仅通过自然恢复就对边坡形成较大面积的覆盖。此外,与乡土草种联合应用时,苔藓提高了乡土草种的发芽率和生长速度^[20]。苔藓具有强大蓄水和保土能力,可以降低雨水对表土的直接冲刷;苔藓还能够有效地吸收滞留营养物质,起到养分库的作用;另外苔藓可以在石质边坡表面形成结皮,促进岩石风化,促使边坡植被自然恢复;苔藓具有多样的繁殖方式,无性繁殖能力强,甚至可以通过将植物体机械粉碎后大面积播种的方式繁殖^[19, 21]。这些特性决定了苔藓植物在边坡植被恢复中具有极大的应用潜力,苔藓、草本、木本植物联合使用才能够形成坡面岩体—基质—植被有机体的整体效果^[19]。但是目前对苔藓植物在边坡恢复中应用的研究和实例还很少,对许多苔藓的生物学、生态学特性尚且缺乏研究,对种源的采集以及繁殖体的培养也鲜有探索。有必要加强苔藓植物相关的应用基础研究和相关技术推广。

道路边坡的生态恢复是一个长期、系统的工程。人为设计的边坡植被能否成功具有很大的不确定性,通过对当地自然植被组成和结构的观察、研究和借鉴将有助于提高边坡人工恢复植被的稳定性。但人工恢复植被未经实践检验,仍存在失败的可能。因此,在实施边坡植被恢复工程前,需要经过较长时间的小面积实验阶段,以免工程的失败和浪费。

4 结论

调查范围内共有36科96属108种植物,以禾本科和菊科居多。人工恢复的17个物种中,禾本科的黑麦草和垂穗披碱草以及豆科紫苜蓿和草木犀等植物都是适宜的护坡植物。另外,青杨等乔木能够生长于海拔低于3 500 m部分边坡而且可以形成较好的景观效果,可以在适宜路段推广。自然恢复物种中,主动入侵型种组的植物可以作为人工恢复的备选物种。边坡形成3-5年后,稳定扩展型种组的物种逐渐入侵边坡,其中也保护一些灌木物种例如,锦鸡儿、金露梅和黄花木等,它们可以作为建立灌草型边坡群落的物种,增强护坡效果。铁线莲属部分物种和一些苔藓植物能够适应高山山地道路边坡的生境,可以作为良好的护坡植物,但仍有待进一步试验研究。边坡的生态恢复是一个漫长的过程,其形成后的3-5年是边坡逐渐向自然恢复转变的关键时期,选择适当的时机人为促进这一转变将有助于促使人工植被成功地自然演替恢复。

参考文献 [References]

- Bradshaw A. The use of natural processes in reclamation - advantages and difficulties [J]. *Landscape Urban Plan*, 2000, **51** (2-4): 89-100
- Wang ZQ, Wu LH, Liu TT. Revegetation of steep rocky slopes: Planting climbing vegetation species in artificially drilled holes [J]. *Ecol Eng*, 2009, **35** (7): 1079-1084
- 方文, 潘声旺, 何平, 刘杨, 马立辉, 李军, 孙益. 先锋种丰富度对边坡植被的群落特征及其护坡效益的影响[J]. 生态学报, 2015, **35** (11): 3653-3662 [Fang W, Pan SW, He P, Liu Y, Ma LH, Li J, Sun Y. Effects of pioneer plants richness on community characteristics of vegetation and their soil and water conservation benefit for highway side slope [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35** (11): 3653-3662]
- 包维楷, 张德铨, 王乾, 摆万奇, 郑度. 青藏高原东部采伐迹地早期人工重建序列梯度上植物多样性的变化[J]. 植物生态学报, 2002, **26** (3): 330-338 [Bao WK, Zhang YL, Wang Q, Bai WQ, Zheng D. Plant diversity along a time sequence (1-30 years) of artificial forest rehabilitation on subalpine cut land in the eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2002, **26** (3): 330-338]
- 刘春霞, 韩烈保. 高速公路边坡植被恢复研究进展[J]. 生态学报, 2007, **27** (5): 2090-2098 [Liu CX, Han LB. Review of researches in vegetation restoration of freeway slopes [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, **27** (5): 2090-2098]
- 朱高儒, 杨丁丁, 衷平, 徐洪磊, 颜磊. 川藏公路康定段山区风景道规划[J]. 公路, 2013, **58** (11): 164-169 [Zhu GR, Yang DD, Zhong P, Xu HL, Yan L. Scenic planning in mountainous area of Kangding section on the Sichuan-Tibet Highway [J]. *Highway*, 2013, **58** (11): 164-169]
- 董世魁, 崔保山, 刘世梁, 刘杰, 朱建军, 姚维科. 云南省公路路域绿化护坡植物的生态区划与选择[J]. 环境科学学报, 2006, **26** (6): 1038-1046 [Dong SK, Cui BS, Liu SL, Liu J, Zhu JJ, Yao WK. Study on the regionalization and selection of suitable plants for roadside deforestation and soil protection in Yunnan Province [J]. *Acta Sci Circumst*, 2006, **26** (6): 1038-1046]
- 何云, 李贤伟, 邓月平. 浅谈岩石边坡护坡植物选择[J]. 四川草原, 2006, **37** (4): 38-42 [He Y, Li XW, Deng YP. Preliminary study of selecting plant about protecting rock slope [J]. *J Sichuan Grassland*, 2006, **37** (4): 38-42]
- 肖蓉, 高照良, 宋晓强, 张兴昌, 杨永峰. 高速公路边坡植被特征分析及护坡模式优化研究[J]. 水土保持学报, 2009, **23** (2): 90-94 [Xiao R, Gao ZL, Song XQ, Zhang XC, Yang YF. Analysis of vegetation features on slopes of expressway and study of slope protection model optimization [J]. *J Soil Water Conserv*, 2009, **23** (2): 90-94]
- 王启明. 对植被护坡作用机理和技术的探讨[J]. 科技视界, 2013, **3** (11): 147-148
- 段晓明, 苗增健, 刘连新, 刘荣桂. 生态护坡应用及护坡植物群落的选择[J]. 安徽农业科学, 2009, **37** (31): 15327-15329, 15339 [Duan XM, Miao ZJ, Liu LX, Liu RG. Ecological application of ecological slope protection and vegetation community selection for slope protection [J]. *J Anhui Agri Sci*, 2009, **37** (31): 15327-15329, 15339]
- 李波, 张曼, 赵璐玲, 冉江洪, Moermond T, 尚涛. 汶川地震滑坡体自然植被恢复及影响因子——以龙溪-虹口自然保护区为例[J]. 应用与环境生物学报, 2014, **20** (3): 468-473 [Li B, Zhang M, Zhao LL, Ran JH, Moermond T, Shang T. Vegetation recovery on landslides of the Wenchuan earthquake and its influencing factors: a case study in Longxi-Hongkou Nature Reserve [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2014, **20** (3): 468-473]
- 王太平, 杨晓明. 高速公路边坡植物群落物种多样性[J]. 西北林学院学报, 2012, **27** (2): 230-234 [Wang TP, Yang XM. Species diversity of plant community on highway slope [J]. *J Northwest For Univ*, 2012, **27** (2): 230-234]
- 邹蜜, 罗庆华, 辜彬, 窦亮, 潘树林. 生境因子对岩质边坡生态恢复过程中植被多样性的影响[J]. 生态学杂志, 2013, **32** (1): 7-14 [Zou M, Luo QH, Gu B, Dou L, Pan SL. Influence of habitat factors on vegetation diversity in the process of eco-restoration on rocky slopes [J]. *Chin J Ecol*, 2013, **32** (1): 7-14]
- 任海, 彭少麟, 陆宏芳. 退化生态系统恢复与恢复生态学[J]. 生态学报, 2004, **24** (8): 1760-1768 [Ren H, Peng SL, Lu HF. The restoration of degraded ecosystems and restoration ecology [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, **24** (8): 1760-1768]
- 陈永安, 王玲, 黄滔, 李轩, 胡果生. 攀援植物在高速公路岩石边坡的应用技术研究[J]. 湖南交通科技, 2005, **31** (4): 34-36, 59
- 张显国, 王学丽. 鸡矢藤在河北高速公路绿化上的应用前景[J]. 河北林业科技, 2008, **36** (4): 123-124
- 陈忠. 寒地高等级公路护坡植物的选择研究[J]. 黑龙江生态工程职业学院学报, 2008, **21** (5): 18-19
- 左元彬, 辜彬, 艾应伟. 苔藓植物在道路边坡植被生态恢复中的应用与分析[J]. 中国水土保持科学, 2006, **4** (S1): 122-125 [Bin ZY, Gu B, Ai YW. Investigation of application of bryophyte to road side ecological restoration [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2006, **4** (S1): 122-125]
- 孙俊峰, 陈其兵, 王怡, 杨江山. 苔藓植物联合乡土草种应用于植被恢复工程的初步研究[J]. 四川草原, 2005, **26** (3): 16-18 [Sun JF, Chen QB, Wang Y, Yang JS. The utilization of the bryophytes in the revegetation engineering of Jiuzhaigou-Huanglong airdrome [J]. *J Sichuan Grassland*, 2005, **26** (3): 16-18]
- 岳焕丽, 杨建英, 赵廷宁, 赵金鹏. 苔藓植物在道路边坡植被生态恢复中的应用分析[J]. 中国水土保持, 2009, **30** (2): 34-36, 49, 60 [Qiu HL, Yang JY, Zhao TN, Zhao JP. Application of bryophyte to vegetation ecological rehabilitation of road slopes [J]. *Soil Water Conserv Chin*, 2009, **30** (2): 34-36, 49, 60]

附表1 高寒山区道路边坡物种组成

Appendix Table 1 Species composition in the road side area of cold alpine region

物种 Species	科 Family	生长型 Growth form
<i>Abies</i> sp.	松科 Pinaceae	乔木 Tree
<i>Agrimonia pilosa</i> Ledebour	蔷薇科 Rosaceae	草本 Herb
<i>Agrostis hookeriana</i> C. B. Clarke ex J. D. Hooker	禾本科 Poaceae	草本 Herb
<i>Ajuga ovalifolia</i> var. <i>calantha</i> (Diels ex Limpricht) C. Y. Wu & C. Chen	唇形科 Lamiaceae	草本 Herb
<i>Anaphalis aureopunctata</i> Lingelsheim & Borza	菊科 Asteraceae	草本 Herb
<i>Anemone tomentosa</i> (Maximowicz) C. P'ei	毛茛科 Ranunculaceae	草本 Herb
<i>Artemisia capillaris</i> Thunberg	菊科 Asteraceae	草本 Herb
<i>Artemisia frigida</i> Willdenow	菊科 Asteraceae	草本 Herb
<i>Artemisia tangutica</i> Pampanini	菊科 Asteraceae	草本 Herb
<i>Aster flaccidus</i> Bunge	菊科 Asteraceae	草本 Herb
<i>Avena fatua</i> Linnaeus	禾本科 Poaceae	草本 Herb
<i>Berberis jamesiana</i> Forrest & W. W. Smith	小檗科 Berberidaceae	灌木 Shrub
<i>Caragana franchetiana</i> Komarov	豆科 Fabaceae	灌木 Shrub
<i>Carex laeta</i> Boott	莎草科 Cyperaceae	草本 Herb
<i>Carex lehmannii</i> Drejer	莎草科 Cyperaceae	草本 Herb
<i>Carpesium divaricatum</i> Siebold & Zuccarini	菊科 Asteraceae	草本 Herb
<i>Cerastium furcatum</i> Chamisso & Schlechtendal	石竹科 Caryophyllaceae	草本 Herb
<i>Chamerion angustifolium</i> (Linnaeus) Holub	柳叶菜科 Onagraceae	草本 Herb
<i>Chenopodium glaucum</i> Linnaeus	藜科 Chenopodiaceae	草本 Herb
<i>Clematis rehderiana</i> Craib	毛茛科 Ranunculaceae	灌木 Shrub
<i>Comastoma pulmonarium</i> (Turczaninow) Toyokuni	龙胆科 Gentianaceae	草本 Herb
<i>Corydalis gracillima</i> C. Y. Wu ex Govaerts	罂粟科 Papaveraceae	草本 Herb
<i>Cosmos bipinnatus</i> Cavanilles	菊科 Asteraceae	草本 Herb
<i>Cyananthus hookeri</i> C. B. Clarke	桔梗科 Campanulaceae	草本 Herb
<i>Cynoglossum lanceolatum</i> Forsskål	紫草科 Boraginaceae	草本 Herb
<i>Cyperus cuspidatus</i> Kunth	莎草科 Cyperaceae	草本 Herb
<i>Delphinium tatsienense</i> Franchet	毛茛科 Ranunculaceae	草本 Herb
<i>Desmodium elegans</i> Candolle	豆科 Fabaceae	灌木 Shrub
<i>Deyeuxia scabrescens</i> (Grisebach) Munro ex Duthie	禾本科 Poaceae	草本 Herb
<i>Draba nemorosa</i> Linnaeus	十字花科 Brassicaceae	草本 Herb
<i>Duchesnea indica</i> var. <i>microphylla</i> T. T. Yu & T. C. Ku	蔷薇科 Rosaceae	草本 Herb
<i>Elsholtzia souliei</i> H. Léveillé	唇形科 Lamiaceae	草本 Herb
<i>Elymus burchan-buddae</i> (Nevski) Tzvelev	禾本科 Poaceae	草本 Herb
<i>Elymus dolichatherus</i> (Keng) S. L. Chen	禾本科 Poaceae	草本 Herb
<i>Elymus nutans</i> Grisebach	禾本科 Poaceae	草本 Herb
<i>Epilobium tibetanum</i> Haussknecht	柳叶菜科 Onagraceae	草本 Herb
<i>Euphrasia pectinata</i> subsp. <i>sichuanica</i> D. Y. Hong	玄参科 Scrophulariaceae	草本 Herb
<i>Festuca ovina</i> Linnaeus	禾本科 Poaceae	草本 Herb
<i>Fragaria orientalis</i> Losinskaja	蔷薇科 Rosaceae	草本 Herb
<i>Galium spurium</i> Linnaeus	茜草科 Rubiaceae	草本 Herb
<i>Gentiana squarrosa</i> Ledebour	龙胆科 Gentianaceae	草本 Herb
<i>Gentiana tongolensis</i> Franchet	龙胆科 Gentianaceae	草本 Herb
<i>Geranium pylzowianum</i> Maximowicz	牻牛儿苗科 Geraniaceae	草本 Herb
<i>Geum aleppicum</i> Jacquin	蔷薇科 Rosaceae	草本 Herb
<i>Gymnadenia conopsea</i> (Linnaeus) R. Brown	兰科 Orchidaceae	草本 Herb
<i>Halenia elliptica</i> D. Don	龙胆科 Gentianaceae	草本 Herb
<i>Hemiphragma heterophyllum</i> Wallich	玄参科 Scrophulariaceae	草本 Herb
<i>Impatiens nubigena</i> W. W. Smith	凤仙花科 Balsaminaceae	草本 Herb
<i>Incarvillea arguta</i> (Royle) Royle	紫葳科 Bignoniaceae	草本 Herb
<i>Ixeris chinensis</i> (Thunberg) Kitagawa	菊科 Asteraceae	草本 Herb
<i>Juncus amplifolius</i> A. Camus	灯心草科 Juncaceae	草本 Herb
<i>Lagopsis supina</i> (Stephan ex Willdenow) Ikonnikov Galitzky ex Knorring	唇形科 Lamiaceae	草本 Herb
<i>Leontopodium andersonii</i> C. B. Clarke	菊科 Asteraceae	草本 Herb
<i>Ligularia duciformis</i> (C. Winkler) Handel-Mazzetti	菊科 Asteraceae	草本 Herb
<i>Ligularia virgaurea</i> (Maximowicz) Mattfeld ex Rehder & Kobuski	菊科 Asteraceae	草本 Herb

(续附表1 Continued)

物种 Species	科 Family	生长型 Growth form
<i>Lobelia chinensis</i> Loureiro	半边莲 桔梗科 Campanulaceae	草本 Herb
<i>Lolium perenne</i> Linnaeus	黑麦草 禾本科 Poaceae	草本 Herb
<i>Lonicera webbia</i> Wallich ex Candolle	华西忍冬 忍冬科 Caprifoliaceae	灌木 Shrub
<i>Medicago ruthenica</i> (Linnaeus) Trautvetter	花苜蓿 豆科 Fabaceae	草本 Herb
<i>Medicago sativa</i> Linnaeus	紫苜蓿 豆科 Fabaceae	草本 Herb
<i>Melilotus albus</i> Medikus	白花草木犀 豆科 Fabaceae	草本 Herb
<i>Melilotus officinalis</i> (Linnaeus) Lamarck	草木犀 豆科 Fabaceae	草本 Herb
<i>Miscanthus paniculatus</i> (B. S. Sun) Renvoize & S. L. Chen	红山茅 禾本科 Poaceae	草本 Herb
<i>Notopterygium incisum</i> C. C. Ting ex H. T. Chang	羌活 伞形科 Apiaceae	草本 Herb
<i>Oxytropis kansuensis</i> Bunge	甘肃棘豆 豆科 Fabaceae	草本 Herb
<i>Pedicularis verticillata</i> Linnaeus	轮叶马先蒿 玄参科 Scrophulariaceae	草本 Herb
<i>Picea</i> sp.	云杉 松科 Pinaceae	乔木 Tree
<i>Piptanthus nepalensis</i> (Hooker) Sweet	黄花木 豆科 Fabaceae	灌木 Shrub
<i>Plantago asiatica</i> Linnaeus	车前 车前科 Plantaginaceae	草本 Herb
<i>Pleurospermum hookeri</i> C. B. Clarke	喜马拉雅棱子芹 伞形科 Apiaceae	草本 Herb
<i>Poa annua</i> Linnaeus	早熟禾 禾本科 Poaceae	草本 Herb
<i>Polygonum lapathifolium</i> Linnaeus	马蓼 蓼科 Polygonaceae	草本 Herb
<i>Polygonum sparsipilosum</i> A. J. Li	柔毛蓼 蓼科 Polygonaceae	草本 Herb
<i>Polygonum viviparum</i> Linnaeus	珠芽蓼 蓼科 Polygonaceae	草本 Herb
<i>Polystichum neolobatum</i> Nakai	草叶耳蕨 鳞毛蕨科 Dryopteridaceae	草本 Herb
<i>Populus cathayana</i> Rehder	青杨 杨柳科 Salicaceae	乔木 Tree
<i>Potentilla fruticosa</i> Linnaeus	金露梅 蔷薇科 Rosaceae	草本 Herb
<i>Potentilla lineata</i> Treviranus	西南委陵菜 蔷薇科 Rosaceae	草本 Herb
<i>Primula</i> sp.	报春 报春花科 Primulaceae	草本 Herb
<i>Prunella vulgaris</i> Linnaeus	夏枯草 唇形科 Lamiaceae	草本 Herb
<i>Pseudostellaria himalaica</i> (Franchet) Pax	须弥孩儿参 石竹科 Caryophyllaceae	草本 Herb
<i>Quercus semecarpifolia</i> Smith	高山栎 壳斗科 Fagaceae	灌木 Shrub
<i>Ranunculus tanguticus</i> (Maximowicz) Ovczinnikov	高原毛茛 毛茛科 Ranunculaceae	草本 Herb
<i>Rheum delavayi</i> Franchet	滇边大黄 蓼科 Polygonaceae	草本 Herb
<i>Rhododendron calophyllum</i> Franch.	美容杜鹃 杜鹃花科 Ericaceae	灌木 Shrub
<i>Rhododendron nivale</i> J. D. Hooker	雪层杜鹃 杜鹃花科 Ericaceae	灌木 Shrub
<i>Ribes glaciale</i> Wallich	冰川茶藨子 虎耳草科 Saxifragaceae	草本 Herb
<i>Rosa omeiensis</i> Rolfe	峨眉蔷薇 蔷薇科 Rosaceae	草本 Herb
<i>Rubia cordifolia</i> Linnaeus	茜草 茜草科 Rubiaceae	草本 Herb
<i>Rubus pungens</i> Cambessédès	针刺悬钩子 蔷薇科 Rosaceae	草本 Herb
<i>Rumex acetosa</i> Linnaeus	酸模 蓼科 Polygonaceae	草本 Herb
<i>Salix</i> sp.	柳 杨柳科 Salicaceae	乔木 Tree
<i>Salvia roborowskii</i> Maximowicz	粘毛鼠尾草 唇形科 Lamiaceae	草本 Herb
<i>Saxifraga egregia</i> Engler	优越虎耳草 虎耳草科 Saxifragaceae	草本 Herb
<i>Scutellaria hypericifolia</i> H. Léveillé	连翘叶黄芩 唇形科 Lamiaceae	草本 Herb
<i>Sedum</i> sp.	景天 景天科 Crassulaceae	草本 Herb
<i>Senecio argunensis</i> Turczaninow	额河千里光 菊科 Asteraceae	草本 Herb
<i>Sibbaldia procumbens</i> var. <i>aphanopetala</i> (Handel-Mazzetti) T. T. Yü & C. L. Li	隐瓣山莓草 蔷薇科 Rosaceae	草本 Herb
<i>Silene himalayensis</i> (Rohrbach) Majumdar	须弥蝇子草 石竹科 Caryophyllaceae	草本 Herb
<i>Spiraea alpina</i> Pallas	高山绣线菊 蔷薇科 Rosaceae	灌木 Shrub
<i>Swertia macrosperma</i> (C. B. Clarke) C. B. Clarke	大籽獐牙菜 龙胆科 Gentianaceae	草本 Herb
<i>Tamarix chinensis</i> Loureiro	怪柳 怪柳科 Tamaricaceae	灌木 Shrub
<i>Taraxacum mongolicum</i> Handel-Mazzetti	蒲公英 菊科 Asteraceae	草本 Herb
<i>Thlaspi arvense</i> Linnaeus	蔊菜 十字花科 Brassicaceae	草本 Herb
<i>Trifolium pratense</i> Linnaeus	红车轴草 豆科 Fabaceae	草本 Herb
<i>Trifolium repens</i> Linnaeus	白车轴草 豆科 Fabaceae	草本 Herb
<i>Tsuga chinensis</i> (Franchet) E. Pritzel	铁杉 松科 Pinaceae	乔木 Tree
<i>Veronica szechuanica</i> Batalin	四川婆婆纳 玄参科 Scrophulariaceae	草本 Herb