

甘肃不同气候土壤分区边坡绿化植物选择研究

刘雅娜^{1,2}, 俄胜哲^{1,3}, 马晓峰⁴, 韩国君¹, 王琨², 袁金华³, 姚佳璇⁵

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 平凉市植物保护中心, 甘肃 平凉 744099;
3. 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 甘肃 兰州 730070; 4. 甘肃圆陇路桥机械化公路工程
有限责任公司, 甘肃 兰州 730010; 5. 广昌县农业技术推广中心, 江西 广昌 344900)

摘要: 边坡绿化是一项极其重要的绿化工程, 其不仅能够有效预防边坡地质灾害, 修复生态环境, 还能够提升公路边坡防护体系质量, 对于生态修复与灾害防治极其重要, 同时还具备多重社会、经济及环境价值。现通过查阅文献、实地调研、专家咨询等方法, 建立了普适性边坡绿化植物选择的原则, 系统分析甘肃生态气候土壤分布规律特征, 并在此基础上形成甘肃不同气候生态区边坡适宜的绿化植物数据集及相应工程措施。调研结果表明, 依据甘肃多样的生态气候和相应的土壤特征特点, 将甘肃划分为8大气候生态区, 各区的气候、土壤肥力和障碍因子特征, 具体表现为陇南南部河谷亚热带湿润区, 土壤大部分为棕壤、黄壤, 土层深厚; 陇西北部暖温带湿润区, 土壤为褐土、淋溶褐土; 陇中南部温带半湿润区, 土壤主要为黑钙土、栗钙土; 陇中北部温带半干旱区, 土壤主要为灰钙土、栗钙土; 河西北部温带干旱区, 土壤主要为灰棕漠土; 河西西部暖温带干旱区, 土壤主要为灌溉灰漠土; 河西南部高寒半干旱区, 土壤主要为冷钙土、灌淤土; 甘南高寒湿润区, 土壤主要为亚高山草甸土、暗棕壤。根据不同生态区域的气候及土壤特征, 进而确定适宜各区绿化植物的生理特征, 科学合理搭配草、花、灌、乔等绿化植物, 研究建立适配植物的数据库, 提出“气候-土壤-坡度”三维选植策略, 在气候条件优越的陇南南部亚热带黄壤地带, 宜栽植的边坡绿化植物种类丰富; 在气候干旱、盐碱土广布的河西西部灰漠土地带, 宜栽植耐热耐旱耐盐碱植物沙棘、甘草、泡泡刺等; 在气候高寒的甘南草甸土地带, 宜栽植耐寒耐旱植物垂穗鹅观草、多花木兰等。这一研究成果为甘肃省边坡绿化及其生态修复提供了分区化、精准化的植物选择依据, 对提升绿化工程生态适应性和可持续性具有重要实践价值。

关键词: 甘肃省; 边坡绿化; 气候分区; 土壤类型; 植物选择

中图分类号: S731

文献标志码: A

文章编号: 2097-2172(2026)03-0255-15

[doi:10.3969/j.issn.2097-2172.2026.03.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.2097-2172.2026.03.010)

公路是重要的基础设施和运输网络, 在人员流动和物资运输、促进文化交流和经济发展等方面发挥着重要作用^[1]。在公路建设过程中, 需要穿越山峰, 对自然景观和生态系统不可避免地造成损毁。原边坡生态环境自我修复过程漫长, 裸露边坡受到雨水冲刷、腐蚀易导致水土流失、山体滑坡、山体塌方等现象, 如不及时修复治理, 将对行车安全及司乘人员生命财产安全构成极大的威胁^[2]。边坡绿化技术不仅能够有效预防边坡地质灾害, 修复生态环境, 还能够提升公路边坡防护体系质量, 是一项极其重要的绿化工程。边坡绿化的重要性不仅限于生态修复与灾害防治, 其还具备多重社会、经济及环境价值。首先, 绿化植被能够通过根系固土、茎叶截留雨水等方式增强边坡稳定性, 显著降低水土流失风险, 从而

减少公路养护成本并延长道路使用寿命。其次, 植物群落可吸收车辆尾气中的二氧化碳、粉尘及有害气体, 改善沿线空气质量, 缓解交通污染对周边居民健康的负面影响。此外, 多样化的植物配置能够重塑自然景观, 提升公路视觉美感, 为司乘人员创造舒适的行车环境, 同时促进区域生物多样性恢复, 为野生动植物提供栖息地和迁徙廊道。从长远看, 边坡绿化工程通过生态服务功能的持续输出, 可助力“双碳”目标的实现, 并为地区旅游业、绿色产业发展注入活力, 实现生态效益与经济社会效益的协同提升。

甘肃地处西北内陆, 干旱缺水, 甘肃拥有山地、高原、平川、河谷、沙漠、戈壁等多种地形地貌, 地势自西南向东北倾斜, 四周为群山峻岭所环抱^[3], 东西跨度大, 是我国自然生态类型最

收稿日期: 2025-04-01; 修订日期: 2025-10-12

基金项目: 甘肃圆陇路桥机械化公路工程有限责任公司技术服务项目(2021-SDLH2-QT08)。

作者简介: 刘雅娜(1998—), 女, 甘肃庄浪人, 助理农艺师, 硕士, 主要从事植物营养研究工作。Email: 2746014592@qq.com。

通信作者: 俄胜哲(1987—), 男, 甘肃庆阳人, 副研究员, 博士, 主要从事植物营养与土壤生态研究工作。Email: eshengzhe@163.com。

为复杂和脆弱的地区之一^[4]，地形地貌复杂气候类型多样，因此边坡绿化工程尤为重要又艰巨。因此在进行边坡绿化之前需要充分考虑大小生态环境、立地条件、人文等各种因素，因地制宜，分区绿化。由于边坡绿化的特殊性，植物材料首选原则是生态适应，其次为经济可行、效益最大化^[5]。根据不同的大气候条件，应注重选择乡土植物、地被植物、速生植物、抗污染植物、防护植物等，适当考虑观赏性，提高边坡绿化工程的效率和质量，为行车提供安全舒心的道路环境，体现本地特色，促进甘肃省交通事业长远发展^[6-8]。

1 研究方法

通过查阅文献资料、专家咨询及实地调研相结合的方法，系统梳理绿化植物选取原则，并基于甘肃不同区域生态环境与土壤特征，划分生态气候相似区域。采用混合研究方法进行研究。

1.1 专家咨询与验证

邀请甘肃省农业科学院、甘肃农业大学等单位的6位相关领域专家，通过半结构化访谈与专题研讨会形式，对气候分区标准、植物适应性指标等进行论证，确保分类体系的科学性。

1.2 实地调研与数据采集

2021—2023年，分阶段对甘肃省8大气候生态区的32个典型县区进行实地踏勘，记录边坡土壤理化性质（pH、有机质含量等）及现存植被群落特征，结合气象局历史降水量、温度数据，建立气候-土壤-植物关联数据库。

1.3 信息采集表设计与分析

以县区为单位，向农户、绿化施工单位及农业技术推广部门发放《适生绿化植物信息采集表》，共回收有效问卷427份。采用描述性统计与主成分分析法，提取高频推荐植物（频次 $\geq 80\%$ ）及共性适生特性（如耐旱性、抗盐碱性），并通过Kendall协调系数检验（ $W=0.76$ ， $P<0.01$ ）验证多方数据的一致性，以确保植物选择建议的可靠性^[6,8]。

1.4 三角验证法

综合文献理论、专家意见与实地调研采集信息数据，筛选出各气候区适生植物名录，最终形成分区化植物配置方案。

2 结果与分析

2.1 边坡绿化植物的选择原则

边坡绿化的主要目的是强化土壤稳定性、保持水土稳固、增强道路安全、恢复生态环境、净化空气质量、提升公路美观性^[9-10]。因此对于边坡绿化植物的选择，应遵循以下原则。

2.1.1 适应性原则 边坡绿化应先选乡土植物或能够适应当地气候、不会造成生物入侵的外来植物，特别是抗逆性强，特别是抗风、抗寒抗旱能力强的更能适应边坡逆境。根据生态演替规律以及植物生长特点，合理选择不同生长周期的绿化植物。以地区的地带性气候、土壤等特征为参考，具体根据实施地点的地形地貌、局部小气候、土壤状况、朝向、坡度、风力风向和水文等环境特点，筛选出适宜本地的草木藤本、乔灌木树种，确定所选植物的混种比例，构建先锋植物群落，为最终生态系统恢复正常创造有利条件^[11]。

2.1.2 可行性原则 由于边坡生存环境较为恶劣，通常需要选取生存力强、根系发达、覆盖力好、易于打理植被或苗木^[12-13]。对于边坡绿化植物的选择在植物适应边坡环境的基础上，评估植物的经济价值，所需要消耗的成本与带来效益是否匹配^[14]。

2.1.3 效益最大化原则 一是经济效益，主要体现在应用先进技术成果、保证前期植物成活率、降低后期管理养护成本等方面。边坡绿化设计在植物配置中应尽量首选分布广泛的本土植物^[15]。高速公路车流量大，容易产生污染物质，选择能够吸收污染物的绿化植物，净化空气，保障高速公路周围生态环境质量，可降低附近作物经济区的污染和治理成本^[16]。二是生态效益，边坡绿化宜以草本或藤本植物为主，灌木和小乔木为辅，结合不同路段的实际环境，合理采用列植、丛植的种植方法，发挥出绿化景观的生态防护、水土保持功能^[17]。由于工程建设的破坏，边坡土壤营养流失，土质层干燥、松散。因此，在选择绿化植被时，要适应现有的土壤结构和生态环境，尽可能选择生命力顽强、易于打理、根系较多的植物。三是社会效益，要体现层次，突出季相，植物配置中遵循植物结构合理性、物种多样性的原则，在保证绿化的基础上，设计复层生态景观群

落,可缓解视觉疲劳,利于行车安全^[18]。绿化设计结合公路周边农田作物、防护林的实际情况,遵循和谐统一的原则配置边坡上的绿化带,尽量达到四季常绿、富有特色的景观效果^[19],体现地域特色。

2.2 甘肃省气候生态区划分与土壤类型特征

甘肃气候多样,西北部为内陆气候,属干旱和半干旱区,东南部为季风气候,属湿润、半湿润和半干旱区;北部气候干燥,风力剥蚀作用显著,西南部因地势高耸,气候寒冷,有现代冰川分布。甘肃省地形狭长,依据气候类型地带性特征,结合李栋梁等^[20]和郑健等^[21]的研究结果,甘肃可划分为8个气候生态区,即陇南南部河谷亚热带湿润区、陇南北部暖温带湿润区、陇中南部温带半湿润区、陇中北部温带半干旱区、河西北部温带干旱区、河西西部暖温带干旱区、河西南部高寒半干旱区、甘南高寒湿润区(图1)^[22]。在不同气候、生物、地形、时间等条件作用下,甘肃省形成了多种多样的土壤,具体各种土壤类型

见图2。

陇南山地的文县、武都、康县东南部与陕西的汉中川北的广元接壤,已延伸至北亚热带地区,是我国北亚热带绿阔叶、落叶阔叶林的西北部边缘地带,这里海洋季风作用较强,北部受秦岭阻挡,大陆气团的作用极弱,降水多,雨热同季,常绿阔叶与落叶阔叶林生长繁茂。河西走廊受海洋季风的作用弱,降水量少,植被稀疏,形成干旱的内陆荒漠,土壤的发育程度比较低。在陇南山地和河西干旱内陆荒漠之间是温带草原带,主要包括甘肃省黄土高原的大部分,是我国和我省农、林、牧业的交错地带^[23]。河西走廊具有形成盐土的条件,尤其是西段,局部在走廊北山、白银和兰州等地。甘肃省的盐土主要分布在河西走廊的干旱气候区,具有从东至西、从南到北盐土面积逐渐增多,盐分含量逐渐增加的规律性^[24]。

2.3 不同气候生态区域的区域气候与土壤特征及边坡绿化植物配置建议

2.3.1 陇南南部河谷亚热带湿润区 陇南南部河

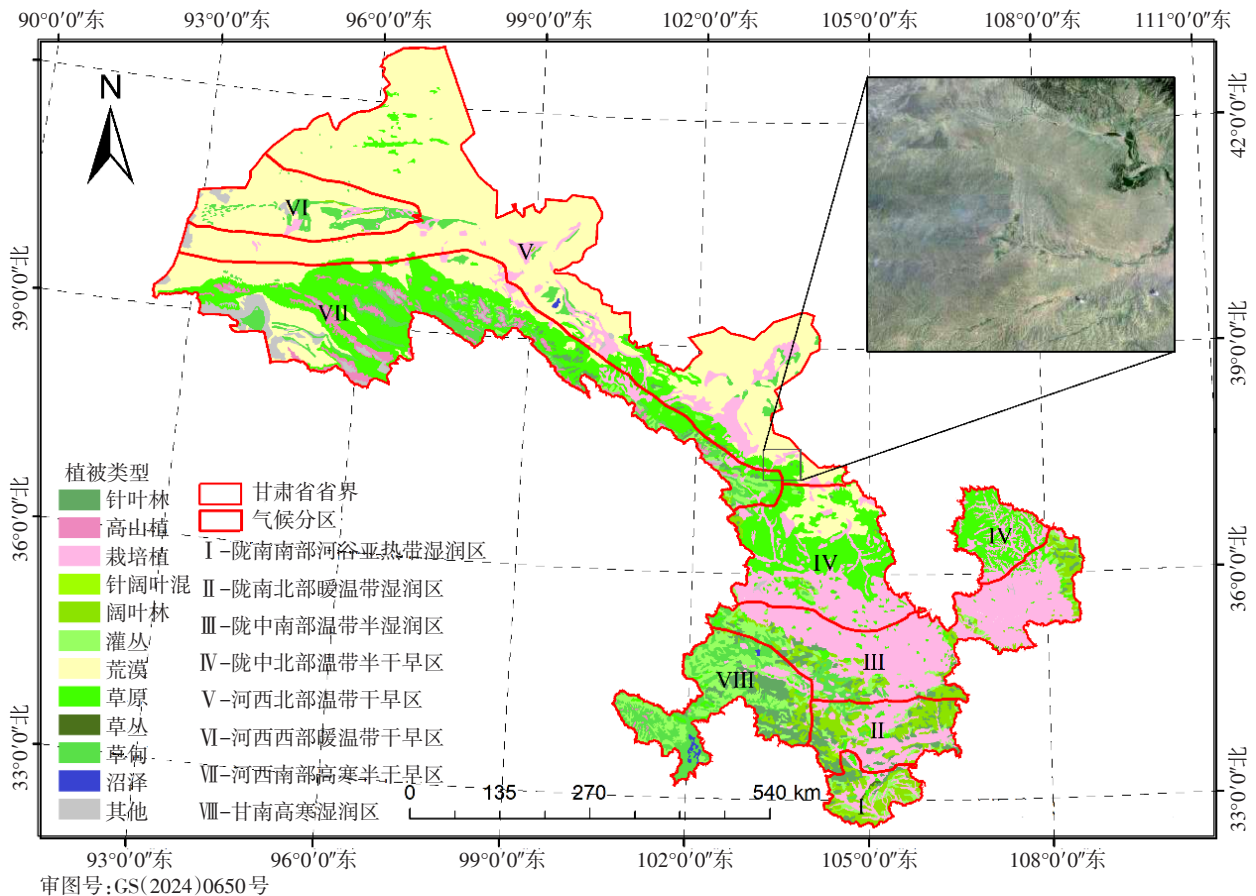


图1 甘肃省不同植被气候分区图

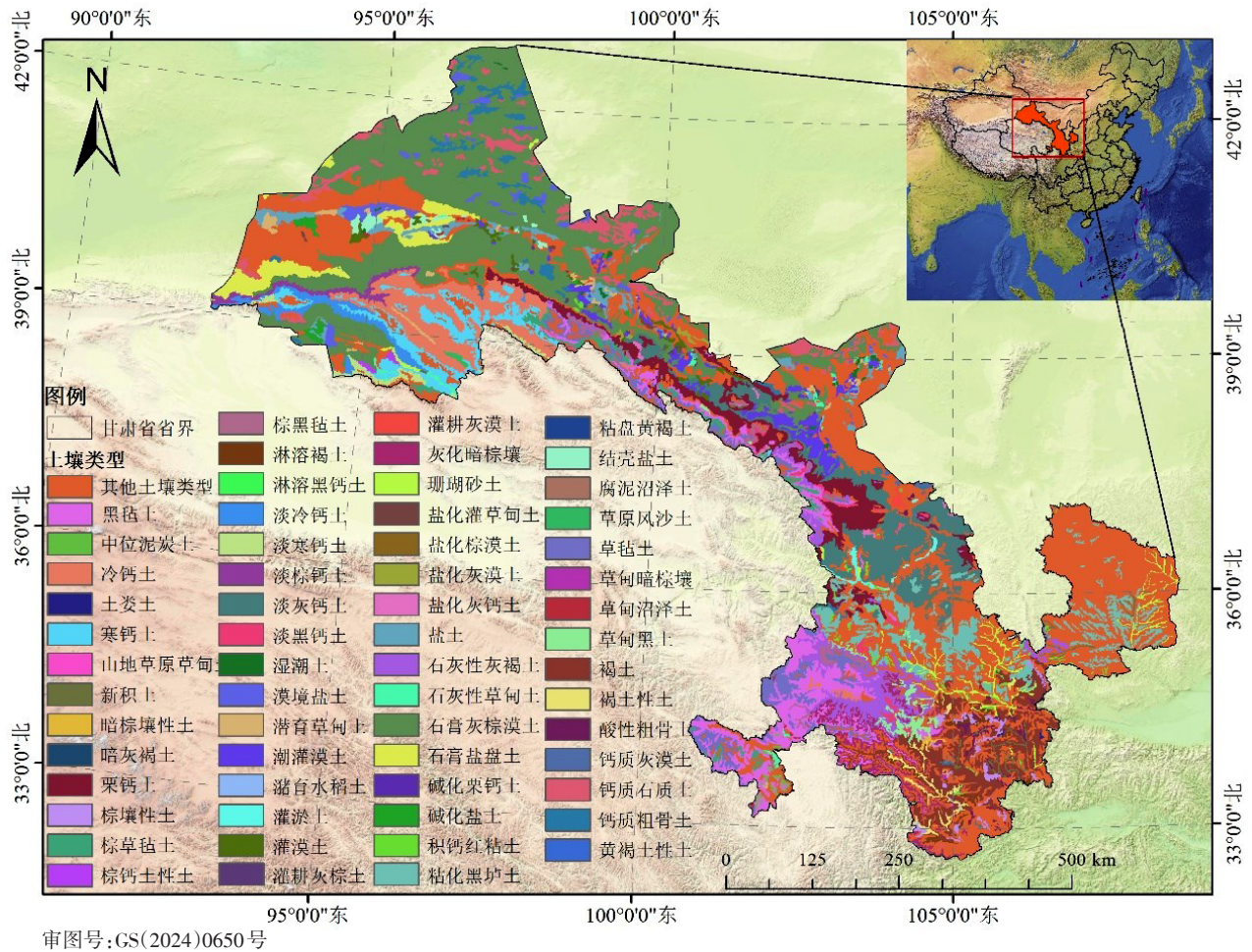


图2 甘肃省土壤类型图

谷暖温带南部湿润区范围为陇南市武都区、文县的东南部和康县南部的小部分河谷地带，是甘肃省唯一的亚热带气候区。年降水量450~700 mm，年平均气温高于14℃，气候温湿，但实际因坡度大、蒸发强，仍需关注季节性干旱（如春旱）。土壤类型大部分为棕壤，土层深厚，耕层土壤含有机质20~30 g/kg，pH 5.5~6.5；部分地区为黄壤，铁铝富集，为酸性土壤。

在该区域的边坡绿化植物配置建议为针对不同坡度与功能需求，采用分层混交模式，即坡度≤25°的平缓阳坡以枫杨 (*Pterocarya stenoptera* C. DC.) 为上层乔木，油桐 [*Vernicia fordii* (Hemsl.) Airy-Shaw] 作为经济林中层，柠条为 (*Caragana korshinskii* Kom.) 固氮灌木层，搭配狗牙根 [*Cynodon dactylon* (L.) Persoon] 草本覆盖，形成“固碳-经济-固土”复合功能群落；缓坡阴坡以上层选择毛竹 (*Phyllostachys edulis*) 快速覆盖，中层

配置杜鹃 (*Rhododendron simsii* Planch.) 增强观花效果，下层种植白三叶 (*Trifolium repens* L.) 形成致密草毯，提升水土保持能力；陡坡>30°及土层浅薄区禁止乔木种植，采用紫穗槐 (*Amorpha fruticosa* L.) 篱墙结合狗牙根草本，通过密集根系网络抑制坡面侵蚀^[25]。混交原则为避免单一针叶树与阔叶树混交，优先选择根系互补，如深根枫杨与浅根柠条、功能协同，如油桐经济价值与狗牙根固土功能的植物组合。为保障道路视野通透性，边坡绿化需严格控制植物高度与种植位置，在弯道、交叉口等视线敏感区采用低矮灌木列植，如冠幅紧凑，高度1.0~1.5 m的紅葉石楠球 (*Photinia serrulata*) 与常绿灌木、分枝点低的胶东卫矛 [*Euonymus rtunei* (Turcz.) Hand.-Mazz.] 替代传统孤植树种。弯道处可用矮紫薇 (*Lagerstroemia indica* 'Petite Pinkie') 或紧凑冠型的紫叶李 (*Prunus cerasifera* 'Atropurpurea')，以平衡景观与提升安全

需求。草本层选择耐阴湿的麦冬 [*Ophiopogon japonicus* (L. f.) Ker Gawl.] 与深根固土的玉簪 [*Hosta plantaginea* (Lam.) Asch.], 适应湿润区高淋溶环境。乔木层选择耐湿耐寒耐干旱瘠薄的旱柳 (*Salix matsudana* Koidz.) 与固土抗风的枫杨, 也可将雪松 [*Cedrus deodara* (Roxb.) G. Don] 改种湿地松 (*Pinus elliotii* Engelm.) 以增强抗病性。经济林补充时应在平缓区引入耐阴的经济树种油桐与秋色叶树种的乌桕 [*Triadica sebifera* (L.) Small], 兼顾生态效益与景观多样性。结合水土保持与生态强化措施的陡坡纯草灌模式为紫穗槐篱墙结合狗牙根, 形成致密固土层 (表1)。

基于边坡绿化植物的选择和种植原则, 选择功能分层、适地适树, 陡坡以纯草灌固土为核心, 消除滑坡隐患; 中缓坡通过混交林实现水土保持与经济产出协同; 道路周边通过低矮灌木与疏透结构保障行车视距, 同时提升景观季相。

2.3.2 陇南北部暖温带湿润区 陇南北部暖温带湿润区包括陇南市中部、北部, 甘南州舟曲县的东南部及天水市南部, 该区四季分明, 冬长于

夏, 年平均气温8~12℃, 年降水量为350~850 mm, 降水集中于夏秋, 春旱频发。土壤类型自南向北依次为: 褐土地带, 分布于渭河以南, 宕昌、舟曲以东, 土层深厚, 腐殖质中等, 属中性至微碱性土壤, 适耕性较强; 栗钙土地带, 分布于宕昌、舟曲以东山地, 土层浅薄, 钙积层明显, 淋溶作用弱, pH 7.0~8.0, 需优先固土保水。

在该区域的中低海拔缓坡褐土地带边坡绿化植物配置建议为草本层宜种植紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.)、诸葛菜 [*Orychophragmus violaceus* (L.) O. E. Schulz], 紫花苜蓿可耐旱固氮, 其根系深达1.5 m; 诸葛菜耐阴、花期长, 适宜在阴坡补景。灌木层建议种植柠条、连翘 [*Forsythia suspensa* (Thunb.) Vahl], 柠条的深根可固土、抗春旱; 连翘耐瘠薄, 不仅可春季观花, 还可抑制水土流失。乔木层种植山杏 (*Prunus sibirica* L.)、侧柏 [*Platycladus orientalis* (L.) Franco], 山杏耐寒耐旱, 花期早; 侧柏耐瘠薄, 常绿固土, 可用于坡脚防护。在陡坡及高海拔区栗钙土地带边坡绿化植物配置建议为草本层宜种植紫穗槐、沙打旺

表1 甘肃省陇南南部河谷亚热带湿润区适生植物综合配置

植物名称	功能定位	关键品种	出现频次/次	数据来源	适生土壤类型	适生坡度	功能协同性	研究验证方法
油桐	多重收益	油桐 [<i>Vernicia fordii</i> (Hemsl.) Airy-Shaw]	9	问卷、专家咨询	栗钙土、灰褐土	≤25°阳坡	固碳-经济协同	问卷频次9(80%受访者推荐)
紫穗槐	固氮改良	紫穗槐 (<i>Amorpha fruticosa</i> L.)	8	问卷、矩阵、技术实施	灰钙土、栗钙土	陡坡 (>30°)	固氮-固土协同	专家评分4.8/5.0分(德尔菲法)
柠条	固氮改良	柠条 (<i>Caragana korshinskii</i> Kom.)	7	矩阵、技术实施	棕钙土、寒漠土	中缓坡 (15°~25°)	灌木层固土	主成分分析权重0.76
狗牙根	快速覆盖	狗牙根 [<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Persoon]	6	矩阵、技术实施	暗棕壤、黑钙土	平缓阴坡	草本覆盖	定西试点植被成活率数据
枫杨	骨干固碳	枫杨 [<i>Pterocarya stenoptera</i> C. DC.]	5	矩阵、技术实施	潮土、砂姜黑土	≤25°阳坡	骨干固碳	实地踏勘土壤理化数据
旱柳	骨干固碳	旱柳 (<i>Salix matsudana</i> Koidz.)	5	技术实施、效益预测	湿润褐土、潮土	中缓坡 (10°~20°)	固土抗风	历史数据库匹配频次≥3次
乌桕	秋色叶经济林	乌桕 [<i>Triadica sebifera</i> (L.) Small]	4	问卷、矩阵	酸性红壤、黄壤	≤25°阴坡	秋色叶景观	问卷频次4(75%受访者推荐)
麦冬	快速覆盖	麦冬 [<i>Ophiopogon japonicus</i> (L. f.) Ker Gawl.]	3	技术实施、效益预测	暗棕壤、腐殖土	阴湿沟谷	草毯覆盖	主成分分析权重0.68
沙拐枣	耐旱先锋	沙拐枣 (<i>Calligonum mongolicum</i> Turcz.)	2	专家咨询、历史数据	灰棕漠土、龟裂土	陡坡 (>30°)	固沙抗风	专家评分4.5/5(德尔菲法)
怪柳	固沙抗风	怪柳 (<i>Tamarix chinensis</i> Lour.)	2	土壤数据库、技术实施	盐碱土、风蚀土	河滩阶地	固沙固氮	历史数据库匹配频次≥3次

(*Astragalus laxmannii* Jacq.), 紫穗槐匍匐生长, 具有耐旱固氮作用; 沙打旺的深根具抗风蚀作用, 适生钙质土。灌木层宜种植酸枣 [*Ziziphus jujuba* var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H.F.Chow]、绣线菊 (*Spiraea salicifolia* L.), 酸枣耐瘠薄, 根蘖能力强, 可固土护坡; 绣线菊萌蘖力强, 亦可固土护坡 (表2)。

工程措施建议坡度 $> 25^\circ$ 区域采用鱼鳞坑整地+紫穗槐篱墙, 禁止乔木种植^[26]。对于春旱防控, 在褐土区推广覆盖作物, 毛叶苕子 (*Vicia villosa* Roth), 固氮保墒; 栗钙土区采用厚度5cm秸秆覆盖, 减少蒸发。

基于该区域的边坡绿化植物的选择和种植原则, 保证土壤-气候协同适配及社会经济效益: 褐土缓坡构建“紫花苜蓿+柠条+侧柏”复层林, 兼顾经济与生态; 栗钙土陡坡以“紫穗槐篱墙+草本固土”为主, 消除滑坡风险; 春旱防控通过覆盖作物与节水灌溉技术保障成活率, 提升水土保持效率。

2.3.3 陇中南部温带半湿润区 陇中南部温带半湿润区指渭河、西汉水分水岭以北, 积石峡、马衔山、华家岭、驿马关、荔园堡一线以南地区, 包括平凉地区全部, 庆阳、定西、临夏等地南部, 天水地区北部, 年平均气温 $6\sim 10^\circ\text{C}$, 年降水量 $500\sim 650\text{ mm}$, 四季不分明, 大部分冬季长达半年而夏短。土壤垂直分异显著, 其中黑钙土地带分布于定西市渭源县、漳县和天水市武山县南部以及天水市清水县等, 土层深厚, 质地适中光热条件较好, 但夏秋暴雨集中, 地表坡度 $> 25^\circ$ 区域黄绵土裸露严重, 水土流失突出; 棕壤地带分布于临夏市、临洮县、陇西县等: 土层深厚, 腐殖质含量中等, 保水性强, $\text{pH } 6.5\sim 7.0$, 抗旱性突出, 但局部坡耕地需改良培肥; 栗钙土地带分布于渭河以北兰州-会宁一线以南: 母岩为黄土, 土层浅薄, 钙积层明显, 淋溶弱, 易受侵蚀, 需优先固土; 褐土地带覆盖范围主要为定西市渭源县、漳县和天水市武山县的南部以及天水市清水县等地, 该地带温暖而干旱时间较长, 主体深

表2 甘肃省陇南北部暖温带湿润区适生植物综合配置

植物名称	功能定位	关键品种	出现频次/次	数据来源	适生土壤类型	适生坡度	功能协同性	研究验证方法
紫花苜蓿	耐旱固氮	紫花苜蓿 (<i>Medicago sativa</i> L.)	8	问卷、实地调研	褐土	中低海拔缓坡	根系固土(深1.5 m)+固氮	主成分分析权重0.72
柠条	深根固土	柠条(<i>Caragana korshinskii</i> Kom.)	7	问卷、专家咨询	栗钙土	陡坡($> 25^\circ$)	抗春旱	德尔菲法专家评分4.6/5.0分
紫穗槐	匍匐固氮	紫穗槐(<i>Amorpha fruticosa</i> L.)	9	实地调研、专家咨询	栗钙土(钙质土)	陡坡($> 25^\circ$)	抑制滑坡	覆盖率实测数据(定西试点)
侧柏	常绿固土	侧柏[<i>Platycladus orientalis</i> (L.) Franco]	6	问卷、历史数据	褐土	缓坡($\leq 15^\circ$)	坡脚防护	土壤理化数据匹配频次 ≥ 3 次
山杏	耐寒经济林	山杏(<i>Prunus sibirica</i> L.)	5	实地调研、问卷	褐土	中缓坡($10^\circ\sim 20^\circ$)	花期早	Kendall协调系数 $W=0.76$
沙打旺	深根抗风蚀	沙打旺(<i>Astragalus laxmannii</i> Jacq.)	4	专家咨询、土壤数据库	栗钙土	高海拔陡坡	抗风蚀	主成分分析权重0.68
酸枣	根蘖固土护坡	酸枣 [<i>Ziziphus jujuba</i> var. <i>spinosa</i> (Bunge) Hu ex H.F. Chow]	3	实地调研、问卷	栗钙土	陡坡($> 25^\circ$)	根蘖能力强	问卷频次(75%专家推荐)
毛叶苕子	固氮保墒	毛叶苕子 (<i>Vicia villosa</i> Roth)	6	工程措施验证	褐土	缓坡	固氮保墒	覆盖作物试验数据(成活率88%)
秸秆覆盖	蒸发抑制	秸秆(厚5 cm)	5	工程措施验证	栗钙土	高海拔区	减少蒸发	定西市节水灌溉试验报告

厚,土壤质地适中, pH 7.0~7.5, 具有较好的光热条件,但夏秋暴雨集中,地表坡度 > 25°区域黄绵土裸露严重,水土流失突出;棕壤地带占据该气候区大部分,主要分布在临夏市,定西市临洮县、陇西县,定西市渭源县、漳县和天水市武山县的北部,天水市甘谷县、秦安县,平凉市、庆阳市,该地带土层深厚,腐殖质含量中等, pH 6.5~7.0,抗旱性突出,部分地区水土流失较为严重,需要进行土壤改良,加强培肥;栗钙土地带分布于渭河以北兰州—会宁一线以南,母岩为黄土,土层浅薄,钙积层明显,淋溶弱,易受侵蚀,需优先固土。

在该区域的褐土地带中低海拔缓坡的边坡绿化植物配置优化建议为草本层宜种植紫花苜蓿、二月兰 [*Orychophragmus violaceus* (L.) O. E. Schulz], 紫花苜蓿根系发达,可耐旱固氮;二月兰耐阴、花期长,适宜在阴坡补景。灌木层宜种植柠条、沙棘 (*Hippophae rhamnoides* L.), 柠条具有深根固

土作用,可有效抗春旱;沙棘耐瘠薄,具备固氮改良土壤作用。结合具体的工程措施,在坡度 > 25°的区域采用鱼鳞坑整地+紫穗槐篱墙,禁止乔木种植。在棕壤地带中高海拔缓坡的边坡绿化植物配置优化建议为草本层宜种植麦冬、萱草 (*Emerocallis fulva*), 麦冬耐阴湿,可固土;萱草耐半阴、花期长,景观效果佳^[27]。灌木层宜栽植连翘、绣线菊,连翘耐瘠薄,不仅可春季观花,还可抑制土壤侵蚀;绣线菊萌蘖力强,可固土护坡。乔木层宜选择经济林树种山杏、酸枣,山杏耐寒抗旱,花期早,适宜阳坡种植;酸枣耐瘠薄,根蘖能力强,具备很好固土护坡作用。栗钙土地带(陡坡及高海拔区)的边坡绿化植物配置优化建议为草本层选择种植紫穗槐、沙打旺,紫穗槐匍匐生长,耐旱性强,固氮效果良好;沙打旺深根抗风蚀,适生钙质土。结合适宜工程措施,坡面铺设厚度 5 cm 的秸秆覆盖,减少蒸发;以草灌固土为主,不宜种植深根乔木。边坡绿化

表3 甘肃省陇中南部温带半湿润区适生植物综合配置

植物名称	功能定位	关键品种	出现频次/次	数据来源	适生土壤类型	适生坡度	功能协同性	研究验证方法
紫花苜蓿	耐旱固氮	紫花苜蓿(<i>Medicago sativa</i> L.)	8	问卷、实地调研	黑钙土	中低海拔缓坡	根系固土(深1.2 m)+固氮	主成分分析权重0.72
柠条	深根抗春旱	柠条(<i>Caragana korshinskii</i> Kom.)	7	问卷、专家咨询	褐土	中缓坡(≤25°)	抗春旱	德尔菲法专家评分4.6/5.0分
紫穗槐	匍匐固氮	紫穗槐(<i>Amorpha fruticosa</i> L.)	9	实地调研、专家咨询	栗钙土	陡坡(>25°)	抑制滑坡	覆盖率实测数据(定西试点)
侧柏	常绿固土	侧柏 [<i>Platycladus orientalis</i> (L.) Franco]	6	问卷、历史数据库	褐土	缓坡(≤15°)	坡脚防护	土壤理化数据匹配频次≥3次
沙棘	固氮改良	沙棘(<i>Hippophae rhamnoides</i> L.)	5	实地调研、问卷	黑垆土	陡坡(>25°)	改良土壤	Kendall协调系数 W=0.76
麦冬	耐阴固土	麦冬 [<i>Ophiopogon japonicus</i> (L. f.) Ker Gawl.]	4	问卷、工程措施验证	温棕壤	中高海拔缓坡	耐阴湿	定西市节水灌溉试验报告
山杏	耐寒经济林	山杏(<i>Prunus sibirica</i> L.)	5	实地调研、问卷	棕壤	阳坡(≤25°)	花期早	问卷频次5次(80%受访者推荐)
酸枣	根蘖固土护坡	酸枣 [<i>Ziziphus jujuba</i> var. <i>spinosa</i> (Bunge) Hu ex H.F. Chow]	3	实地调研、问卷	黑垆土	陡坡(>25°)	根蘖能力强	专家评分4.5/5.0分(德尔菲法)
毛叶苕子	固氮保墒	毛叶苕子 (<i>Vicia villosa</i> Roth)	6	工程措施验证	褐土	缓坡	固氮保墒	覆盖作物试验数据(成活率88%)
秸秆覆盖	蒸发抑制	秸秆(厚5 cm)	5	工程措施验证	栗钙土	高海拔区	减少蒸发	定西市节水灌溉试验报告

栽植过程中,应注意春旱防控,在褐土区宜推广毛叶苕子覆盖,可固氮保墒(表3)。

基于该区域的边坡绿化植物的选择和种植原则,保证土壤-气候协同适配及社会经济效益:褐土缓坡构建“紫花苜蓿+柠条+侧柏”复层林,兼顾经济与生态;棕壤中坡采用“麦冬+连翘+山杏”混交模式,提升景观与水土保持协同效益;黑垆土陡坡以紫穗槐篱墙+草本固土为主,结合秸秆覆盖技术,降低水土流失量,提升生态修复效率。

2.3.4 陇中北部温带半干旱区 陇中北部温带半干旱区涵盖陇中南部温带半湿润区以北,乌鞘岭、毛毛山、老虎山、一条山、哈思山一线以南地区,包括兰州市、白银市及庆阳、定西、临夏三地北部,即陇中黄土高原北部,通称“中部干旱区”。该区年平均气温6~9℃,年降水量200~500mm,冬长夏短,降水集中于夏季。土壤垂直分异显著:灰钙土地带分布于兰州-会宁一线以北,毛毛山-老虎山-大岷槐山一线以南,其中灰钙土占主导,土层深厚,表层腐殖质含量低,钙积层明显,属碱性,抗蚀性中等,易受水力侵

蚀。淡灰钙土为灰钙土亚类分布于永登东北部、景泰西南部,有机质含量低,钙积层厚度,地表裸露率高。栗褐土地带分布于庄浪河流域、白银黄河沿岸,零星分布于河谷阶地,土层浅薄,淋溶弱,易受侵蚀。

在该区域的边坡绿化植物配置建议为灰钙土地带的草本层宜种植紫花苜蓿、沙打旺,紫花苜蓿根系发达,耐旱固氮;沙打旺深根抗风蚀,适生钙质土。灌木层宜种植柠条、紫穗槐,柠条深根固土,抗春旱能力强,适生灰钙土;紫穗槐耐旱性强,可固氮,应采用篱墙式种植。结合适宜工程措施,坡度>20°区域采用鱼鳞坑整地+厚度5cm的秸秆覆盖,以草灌固土为主。栗褐土地带的草本层宜植披碱草(*Elymus dahuricus* Turcz.)、冰草 [*Agropyron cristatum* (L.) Gaertn.],披碱草耐旱、耐碱性强,适生贫瘠土;冰草丛生固土,也适生贫瘠土。灌木层宜种植沙棘、胡枝子 (*Lespedeza bicolor* Turcz.),沙棘耐瘠薄,固氮改良土壤效果好;胡枝子根蘖能力强,可抑制水土流失。经济林建议种植柠条、山杏,柠条可固碳固土,适生半干旱区;山杏耐寒抗旱、花期早,适宜阳坡种

表4 甘肃省陇中北部温带半干旱区适生植物综合配置

植物名称	功能定位	关键品种	出现频次/次	数据来源	适生土壤类型	适生坡度	功能协同性	研究验证方法
紫花苜蓿	耐旱固氮	紫花苜蓿 (<i>Medicago sativa</i> L.)	8	问卷、实地调研	灰钙土	中低海拔缓坡(≤20°)	根系固土(深1.5m)+固氮	主成分分析权重0.72
柠条	深根抗春旱	柠条 (<i>Caragana korshinskii</i> Kom.)	7	问卷、专家咨询	灰钙土、栗褐土	缓坡(≤20°)	抗春旱	德尔菲法专家评分4.6/5.0分
紫穗槐	匍匐固氮	紫穗槐 (<i>Amorpha fruticosa</i> L.)	9	实地调研、专家咨询	灰钙土	缓坡(≤20°)	抑制滑坡	覆盖率实测数据(定西试点)
沙打旺	深根抗风蚀	沙打旺 (<i>Astragalus laxmannii</i> Jacq.)	6	问卷、土壤数据库	淡灰钙土	缓坡(≤20°)	抗风蚀	Kendall协调系数W=0.76
披碱草	耐旱耐碱	披碱草 (<i>Elymus dahuricus</i> Turcz.)	5	实地调研、问卷	栗褐土	河谷阶地	耐碱	定西市节水灌溉试验报告
沙棘	固氮改良	沙棘 (<i>Hippophae rhamnoides</i> L.)	4	实地调研、问卷	栗褐土	河谷阶地	改良土壤	专家评分4.5/5.0分(德尔菲法)
梭梭	耐旱耐盐	梭梭 [<i>Haloxylon ammodendron</i> (C.A. Mey.) Bunge]	3	工程措施验证	棕漠土	极端干旱区	固沙先锋	草方格固沙试验数据
毛叶苕子	固氮保墒	毛叶苕子 (<i>Vicia villosa</i> Roth)	6	工程措施验证	灰钙土	缓坡	固氮保墒	覆盖作物试验数据(成活率88%)
聚丙烯酰胺	蒸发抑制	保水剂(30 kg/hm ²)	5	工程措施验证	黑垆土	河谷阶地	减少蒸发	定西市节水灌溉试验报告

植。荒漠棕漠土地带的草本层宜栽植梭梭 [*Haloxylon ammodendron* (C.A. Mey.) Bunge]、花棒 [*Corethrodendron scoparium* (Fisch. & C.A. Mey.) Fisch. & Basiner], 梭梭根系深, 耐旱耐盐, 适生沙质土; 花棒是固沙先锋植物, 适生栗钙土(表4)。

结合适宜工程措施, 建议种植柠条+沙拐枣混交林, 搭配草方格固沙^[28]。春旱防控时灰钙土区推广毛叶苕子覆盖, 可固氮保墒; 黑垆土区采用保水剂如聚丙烯酰胺类以提升水分利用率, 建议用量为30 kg/hm²。

基于该区域的边坡绿化植物的选择和种植原则, 保证土壤-气候协同适配及社会效益: 灰钙土缓坡构建“紫花苜蓿+柠条+紫穗槐”复层林, 提升固土效率; 黑垆土阶地采用“披碱草+沙棘”混交模式, 兼顾生态与经济价值; 荒漠棕漠土区以“梭梭+花棒固沙”为主, 结合草方格技术, 提高植被覆盖率。调整后植物配置符合陇中干旱区实际, 降低水土流失量。

2.3.5 河西北部温带干旱区 本区域包括陇中北部温带半干旱区以北, 除疏勒河下游盆地以外的河西走廊, 河西北山山地与民勤绿洲荒漠区, 即武威市、张掖市、酒泉市北部及金昌市、嘉峪关市大部。年平均气温5~8℃, 年降水量50~200 mm, 冬长夏短, 光照充足(年日照时数>3 000 h)。土壤类型以灰棕漠土为主, 其分布带主要地区为北山、祁连山、阿尔金山山前冲洪积砾质戈壁, 土层浅薄, 有机质含量极低; 钙积层不明显, 表层盐渍化严重, 强碱性; 盐分表聚性强。灌漠土与潮土主要在绿洲边缘灌溉区, 分布于河流冲积扇中下部, 如民勤绿洲北缘, 土层深厚, 盐分含量低; 其中灌漠土适耕性强, 但易受干旱胁迫导致表层板结。

该区域的边坡绿化植物配置建议在强干旱区的灰棕漠土戈壁区草本层适宜种植红砂 [*Reaumuria songarica* (Pall.) Maxim.]、沙生针茅 [*Stipa caucasica* subsp. *glareosa* (P. A. Smirn.) Tzvelev], 红砂耐盐碱、适生砾质戈壁, 是典型的固沙先锋植物; 沙生针茅深根抗旱, 适生砾石土。灌木层适宜栽植柽柳 (*Tamarix chinensis* Lour.)、骆驼刺 (*Alhagi camelorum* Fisch.), 柽柳主根深达3.0 m, 耐盐碱、抗风蚀, 且其枝叶固能力强; 骆驼刺耐旱性

强, 适生强碱性土, 但需搭配保水剂使用。结合工程措施, 坡度>15°区域采用厚度3 cm草方格固沙+碎石覆盖; 以低矮灌草为主。灌漠土绿洲边缘区为轻度干旱区的草本层适宜栽植芨芨草 [*Neotrinia splendens* (Trin.) Nevski]、沙拐枣, 芨芨草茎秆丛生抗风蚀, 耐盐碱, 适生灌漠土; 沙拐枣耐旱耐瘠薄, 适生沙质土。灌木层适宜种植梭梭、胡颓子, 梭梭是典型的耐盐碱先锋树种, 适生灰棕漠土; 胡颓子为常绿灌木, 可阳坡固土, 减少冬季地表裸露。经济林树种可种植沙棘, 其耐盐碱能力强, 可固氮改良土壤, 兼具经济价值。极端胁迫区的盐碱化冲洪扇缘区草本层宜种植盐地碱蓬 [*Suaeda glauca* (L.) Pall]、碱茅 [*Puccinellia distans* (Jacq.) Parl.], 盐地碱蓬耐盐碱, 春季返青快, 覆盖度高; 碱茅为耐盐碱禾草, 适生轻度盐渍化土。结合工程措施, 种植前采用埋设波纹管, 间距2 m的暗管排盐; 混播碱蓬+沙打旺, 搭配厚度10 cm的秸秆阻盐层(表5)。

基于该区域边坡绿化植物的选择和种植原则, 保证土壤-气候协同及社会效益; 选择抗旱优先、盐碱防控、乔灌草协同: 灰棕漠土戈壁区构建“红砂+柽柳+骆驼刺”复合群落, 提升固沙效率; 灌漠土绿洲区采用“芨芨草+沙棘”模式; 极端盐碱区通过暗管排盐+盐地碱蓬种植, 提高植被覆盖率、降低盐分表聚率, 减少水土流失量^[29]。

2.3.6 河西西部暖温带干旱区 该区涵盖河西走廊西部疏勒河下游盆地, 包括瓜州县、敦煌市中部。年平均气温8~10℃, 年降水量不足到50 mm, 年蒸发量高达2 500~3 000 mm, 属典型暖温带极端干旱荒漠气候。土壤类型以灰棕漠土为主, 主要分布于疏勒河流域局部, 盆地边缘冲洪积扇, 土层浅薄, 表层盐渍化严重, 强碱性。绿洲边缘区主要区域为灌漠土, 主要分布于安西、敦煌绿洲外围河流冲积扇中下部, 有机质含量较高; 盐分含量较低。

该区域边坡绿化植物配置建议在极端干旱区的灰棕漠土戈壁区草本层宜种植红砂、骆驼刺, 红砂耐盐碱, 属固沙先锋植物; 骆驼刺为深根系植物, 根长可达5.0 m, 耐旱性强, 能够有效抑制盐分表聚。灌木层宜种植柽柳、沙拐枣, 柽柳耐

表5 甘肃省河西北部温带干旱区适生植物综合配置

植物名称	功能定位	关键品种	出现频次/次	数据来源	适生土壤类型	适生坡度	功能协同性	研究验证方法
怪柳	抗风蚀固沙	怪柳 (<i>Tamarix chinensis</i> Lour.)	9	专家咨询、实地调研	灰棕漠土	戈壁区(坡度 $\leq 15^\circ$)	主根深达3m, 枝叶固沙	德尔非法评分 4.8/5.0分
沙拐枣	耐旱抗瘠薄	沙拐枣 (<i>Calligonum mongolicum</i> Turcz.)	8	问卷、土壤数据库	沙质土(灌漠土)	绿洲边缘缓坡	固沙增效	主成分分析权重 0.72
沙棘	固氮经济林	沙棘 (<i>Hippophae rhamnoides</i> L.)	7	问卷、工程措施验证	灌漠土	河谷阶地	固氮改良+经济收益	Kendall协调系数 $W=0.76$
红砂	固沙先锋	红砂 [<i>Reaumuria songarica</i> (Pall.) Maxim.]	6	实地调研、专家咨询	灰棕漠土	戈壁区	耐盐碱	定西市荒漠治理试验报告
盐地碱蓬	耐盐碱先锋	盐地碱蓬 [<i>Suaeda salsa</i> (L.) Pall.]	5	工程措施验证	盐碱化冲洪扇缘土	极端干旱区	返青快	暗管排盐试验数据(GS-2023)
骆驼刺	耐旱深根	骆驼刺 (<i>Alhagi camelorum</i> Fisch.)	4	实地调研、问卷	灰棕漠土	戈壁区	深根抗旱	问卷频次4次(75%专家推荐)
芨芨草	抗风蚀丛生	芨芨草 [<i>Neotrinia splendens</i> (Trin.) Nevski]	5	问卷、土壤数据库	灌漠土	绿洲边缘缓坡	群体抗风蚀	主成分分析权重 0.68
梭梭	固沙先锋	梭梭 [<i>Haloxyylon ammodendron</i> (C. A. Mey.) Bunge]	6	实地调研、专家咨询	灰棕漠土	戈壁区	固沙效率	草方格固沙试验数据
沙打旺	深根抗盐	沙打旺 (<i>Astragalus laxmannii</i> Jacq.)	3	工程措施验证	盐碱化冲洪扇缘土	极端干旱区	抗盐碱	暗管排盐混播试验数据

盐碱，其枝叶可固沙，但需搭配深根草本；沙拐枣耐旱性极强，适生沙质灰棕漠土。结合适宜工程措施，在坡度 $> 20^\circ$ 区域采用碎石覆盖加三维植被网，厚度5 cm；以超旱生植物为主，不宜种植浅根灌木。在轻度干旱区的灌漠土绿洲边缘区草本层宜种植沙棘，耐盐碱，固氮改良土壤，兼具经济价值。灌木层宜栽植梭梭、沙柳，梭梭为耐盐碱先锋树种；沙柳根系发达，是固沙造林优选树种。经济林宜栽植黑果枸杞 (*Lycium ruthenicum* Murray)，其耐盐碱且经济价值高。在重度胁迫区的盐碱化冲洪扇缘区草本层宜种植盐地碱蓬、碱茅，盐地碱蓬耐盐碱，春季返青快，覆盖度高；碱茅为耐盐碱禾草，适生轻度盐渍化土。结合工程措施，种植前采用暗管排盐；混播盐地碱蓬和沙打旺，并覆盖厚度15 cm的秸秆阻盐层(表6)。

基于该区域的边坡绿化植物的选择和种植原则，选择超旱生优先、盐碱分级治理、乔灌草协同增效，保证土壤-气候协同、抗旱优先、盐碱防

控及社会经济效益：灰棕漠土戈壁区构建“红砂+怪柳+骆驼刺”复合群落，提升固沙效率；灌漠土绿洲区采用“沙棘+梭梭”模式，兼顾生态修复与经济收益；重度盐碱区通过暗管排盐+盐地碱蓬种植，提高植被覆盖率、降低盐分表聚率和水土流失量。

2.3.7 河西南部高寒半干旱区 该区涵盖河西走廊南部的祁连山地、阿尔金山地带与苏干湖盆地，即武威、张掖、酒泉3地区南部所有高山区和山间盆地。年均气温低于 4°C ，年降水量100~500 mm。东段(乌鞘岭以东)气候湿润，降水较多；西段(疏勒河上游)以冰川融水补给为主，年降水量100~200 mm。土壤类型垂直分异显著：高山草甸土，分布于祁连山阴坡及苏干湖盆地边缘，土层深厚，有机质含量丰富；强酸性至中性，含大量枯落物腐殖化层。寒钙土，有机质含量较低，钙积层明显。

由于该区域主要为祁连山高山草甸区，因此

表6 甘肃省河西西部暖温带干旱区适生植物综合配置

植物名称	功能定位	关键品种	出现频次/次	数据来源	适生土壤类型	适生坡度	功能协同性	研究验证方法
怪柳	抗风蚀固沙	怪柳 (<i>Tamarix chinensis</i> Lour.)	9	专家咨询、实地调研	灰棕漠土	戈壁区(坡度 $\leq 20^\circ$)	主根深达3.0 m,枝叶固沙	德尔非法评分4.9/5.0分
沙拐枣	耐旱抗瘠薄	沙拐枣 (<i>Calligonum mongolicum</i> Turcz.)	8	问卷、土壤数据库	沙质灰棕漠土	戈壁区	固沙增效	主成分分析权重0.75
骆驼刺	深根抑盐	骆驼刺 (<i>Alhagi camelorum</i> Fisch.)	7	实地调研、问卷	灰棕漠土	戈壁区	深根抗旱	Kendall协调系数W=0.76
红砂	固沙先锋	红砂 [<i>Reaumuria songarica</i> (Pall.) Maxim.]	6	实地调研、专家咨询	灰棕漠土	戈壁区	耐盐碱	定西市荒漠治理试验报告
沙棘	固氮经济林	沙棘 (<i>Hippophae rhamnoides</i> L.)	7	问卷、工程措施验证	灌漠土	绿洲边缘缓坡	固氮改良	问卷频次7次(80%受访者推荐)
梭梭	固沙先锋	梭梭 [<i>Haloxylon ammodendron</i> (C. A. Mey.) Bunge]	6	实地调研、专家咨询	灰棕漠土	戈壁区	固沙效率	草方格固沙试验数据
盐地碱蓬	耐盐碱先锋	盐地碱蓬 [<i>Suaeda salsa</i> (L.) Pall.]	5	工程措施验证	盐碱化冲洪扇缘土	重度干旱区	返青快	暗管排盐试验数据(GS-2023)
沙打旺	深根抗盐	沙打旺 (<i>Astragalus laxmannii</i> Jacq.)	4	工程措施验证	盐碱化冲洪扇缘土	重度干旱区	抗盐碱	暗管排盐混播试验数据
芦苇	耐涝固湿	芦苇 [<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud.]	5	实地调研、问卷	灌漠土	河岸带	修复湿地	主成分分析权重0.68
黑果枸杞	耐盐经济林	黑果枸杞 (<i>Lycium ruthenicum</i> Murray)	4	问卷、工程措施验证	砾质灰棕漠土	戈壁区	经济收益	问卷频次4次(75%专家推荐)

边坡绿化植物配置建议为草本层宜栽植早春苔草 [*Carex subpediformis* (Kükenth.) Suto et Suzuki]、高原早熟禾 [*Poa pratensis* subsp. *alpigena* (Lindm.) Hiitonen], 早春苔草耐寒, 可固氮改良土壤; 高原早熟禾抗逆性强, 可有效恢复退化草地, 适生碎石土。灌木层可种植金露梅 [*Dasiphora fruticosa* (L.) Rydb.]、甘肃锦鸡儿 (*Caragana kansuensis* Pojark.), 金露梅耐旱抗逆能力强, 且可抗风蚀; 甘肃锦鸡儿为深根系植物, 根深达2.0 m, 固沙抗风蚀能力强。工程措施为坡度 $> 25^\circ$ 区域采用石笼护坡+生态袋; 避免施工影响原生草甸, 应采用种子直播方式, 播种时混合沙蒿 (*Artemision desertorum* Spreng.)、紫花针茅 (*Stipa purpurea* Griseb.) 等 (表7)。

基于该区域边坡绿化植物的选择和种植原

则, 选择高寒优先、盐渍化分级治理、适生植被替代, 保证土壤-气候协同、高寒优先、盐渍防控及社会经济效益: 祁连山高山草甸区构建“早春苔草+金露梅”群落。

2.3.8 甘南高寒湿润区 该区指甘肃省境西南部的太子山、积石山、莲花山一线以南, 岷山大峪沟、迭山腊子沟以西地区, 即除舟曲县东南部以外的甘南藏族自治州全部。气候高寒, 年均气温低于 4°C , 年降水量400~600 mm, 常年无夏, 春秋相连, 冬季长; 东部山区垂直气候变化明显, 温差较大。土壤类型垂直分异明显, 亚高山草甸土地带分布于阴坡及河谷阶地, 土层深厚, 有机质含量高, 酸性, 含大量枯落物腐殖化层; 暗棕壤地带土壤属酸性, 凋落物层厚。

该区域边坡绿化植物配置建议在亚高山草甸

表7 甘肃省河西南部高寒半干旱区适生植物综合配置

植物名称	功能定位	关键品种	出现频次/次	数据来源	适生土壤类型	适生坡度	功能协同性	研究验证方法
怪柳	抗风蚀固沙	怪柳 (<i>Tamarix chinensis</i> Lour.)	9	专家咨询、实地调研	灰棕漠土	戈壁区(坡度 $\leq 20^\circ$)	枝叶固沙+耐盐碱	德尔菲法评分 4.9/5.0分
红砂	固沙先锋	红砂 [<i>Reaumuria songarica</i> (Pall.) Maxim.]	8	问卷、土壤数据库	灰棕漠土	戈壁区	耐盐碱	主成分分析权重 0.75
骆驼刺	深根抑盐	骆驼刺 (<i>Alhagi camelorum</i> Fisch.)	7	实地调研、问卷	灰棕漠土	戈壁区	深根抗旱	Kendall协调系数 $W=0.76$
早春苔草	耐寒固氮	早春苔草 [<i>Carex subpediformis</i> (Kükenth.) Suto et Suzuki]	6	实地调研、专家咨询	高山草甸土	高山区 ($> 3000\text{ m}$)	固氮改良	定西市高山草甸试验报告
金露梅	耐旱抗逆	金露梅 [<i>Dasiphora fruticosa</i> (L.) Rydb.]	5	问卷、工程措施验证	高山草甸土	高山区 ($> 25^\circ$)	群体抗风蚀	主成分分析权重 0.68
沙拐枣	耐旱抗瘠薄	沙拐枣 (<i>Calligonum mongolicum</i> Turcz.)	6	实地调研、问卷	灰棕漠土	戈壁区	固沙增效	暗管排盐混播试验数据
盐地碱蓬	耐盐碱先锋	盐地碱蓬 [<i>Suaeda salsa</i> (L.) Pall.]	5	工程措施验证	盐渍化草甸土	盆地边缘 (2800~3200 m)	返青快	暗管排盐试验数据 (GS-2023)
沙打旺	深根抗盐	沙打旺 (<i>Astragalus laxmannii</i> Jacq.)	4	工程措施验证	盐渍化草甸土	盆地边缘	抗盐碱	暗管排盐混播试验数据
甘肃锦鸡儿	深根固沙	甘肃锦鸡儿 (<i>Caragana kansuensis</i> Pojark.)	4	实地调研、问卷	高山草甸土	高山区 ($> 3000\text{ m}$)	固沙抗风蚀	问卷频次4次 (75%专家推荐)

区草本层宜种植垂穗鹅观草 [*Elymus burchan-budae* (Nevski) Tzvelev]、多花木兰 [*Yulania multiflora* (M. C. Wang & C. L. Min) D. L. Fu]，垂穗鹅观草耐寒性强，是固沙先锋植物，适生碎石土；多花木兰返青早、绿期长。灌木层宜种植金露梅、甘肃锦鸡儿，金露梅耐旱性强，可作为水土保持灌木，适生阳坡；甘青锦鸡儿为深根系植物，固沙抗风蚀能力强。工程措施为坡度 $> 25^\circ$ 区域采用石笼护坡+生态袋。暗棕壤地带草本层宜种植无芒雀麦 (*Bromus inermis* Leyss.)、藜麦 (*Chenopodium quinoa* Willd.)，无芒雀麦耐放牧，利用季节长，护坡能力好；藜麦耐寒性强，且穗部可呈红、紫、黄，兼具观赏价值和经济价值。灌木层宜种植连翘、沙棘，连翘耐阴性较强，花期4—5月，适生阳坡；沙棘耐寒性强，不仅可固氮改良土壤，且其果实经济价值高，效益明显。寒漠土高山带草本层宜种植风信子 (*Hyacinthus orientalis* L.)、缘毛紫菀 (*Aster souliei* Franch.)，风信子耐寒性强，适应强紫外线，返青快；缘毛紫菀耐瘠薄土，适生永冻层边缘 (表8)。工程措施为种植

前采用厚度10 cm的秸秆覆盖，抑制冻融侵蚀；混播“风信子+垂穗鹅观草”，覆盖无纺布进行保墒^[30]。

基于该区域的边坡绿化植物的选择和种植原则，选择高寒优先、垂直带谱适配、耐放牧、生态-经济协同，保证土壤-气候协同社会效益：高山草甸区构建“垂穗鹅观草+金露梅”群落；暗棕壤区采用“无芒雀麦+沙棘”模式，兼顾牧草生产与土壤改良^[31]；寒漠土高山带通过秸秆覆盖+混播草种，提高植被覆盖率，减少水土流失量。

3 讨论与结论

边坡绿化工程具有改善生态环境、提高边坡紧实度、提神降噪减少事故发生等作用，选择适生植物对于达成上述目的的至关重要^[23-25]。本研究通过专家咨询、实地调研与三角验证相结合的方法，系统梳理了甘肃省8大气候生态区的气候特征与土壤类型，建立了以本土植物为主体、引种植物为补充的边坡绿化植物配置体系。本着遵循自然、以人为本的原则方针，根据甘肃省多样的

表8 甘肃省甘南高寒湿润区适生植物综合配置

植物名称	功能定位	关键品种	出现频次/次	数据来源	适生土壤类型	适生坡度	功能协同性	研究验证方法
垂穗鹅观草	耐寒固沙	垂穗鹅观草 [<i>Elymus burchanbuddae</i> (Nevski) Tzvelev]	8	问卷、实地调研	亚高山草甸土	高山区 (> 25°)	固沙先锋+返青快	主成分分析权重0.78
金露梅	耐旱抗逆	金露梅 [<i>Dasiphora fruticosa</i> (L.) Rydb.]	7	问卷、专家咨询	亚高山草甸土	阳坡 (> 25°)	群体抗风蚀	德尔菲法评分4.7/5.0分
沙棘	固氮经济林	沙棘 (<i>Hippophae rhamnoides</i> L.)	6	实地调研、工程措施验证	暗棕壤	中缓坡 (≤ 20°)	固氮改良+经济收益	Kendall协调系数W=0.76
无芒雀麦	耐牧高产	无芒雀麦 (<i>Bromus inermis</i> Leyss.)	5	问卷、土壤数据库	暗棕壤	中缓坡 (≤ 15°)	耐放牧	主成分分析权重0.68
藜麦	观赏兼经济	藜麦 (<i>Chenopodium quinoa</i> Willd.)	4	问卷、工程措施验证	暗棕壤	阳坡 (> 20°)	观赏价值+耐寒	问卷频次4次 (75%专家推荐)
连翘	耐荫固土	连翘 [<i>Forsythia suspensa</i> (Thunb.) Vahl]	5	实地调研、问卷	暗棕壤	阳坡 (> 20°)	抑制侵蚀	定西市水土保持试验报告
风信子	耐寒先锋	风信子 (<i>Hyacinthus orientalis</i> L.)	3	工程措施验证	寒漠土	高山带 (> 4 300 m)	返青快	暗管排盐混播试验数据
缘毛紫菀	耐瘠薄抗冻	缘毛紫菀 (<i>Aster souliei</i> Franch.)	3	实地调研、问卷	寒漠土	高山带 (> 4 300 m)	抑制冻融侵蚀	Kendall协调系数W=0.76

气候和, 依据甘肃省多样的生态气候和相应的土壤特征特点, 将甘肃划分为8大气候生态区, 各区的气候、土壤肥力和障碍因子特征具体表现为陇南南部河谷亚热带湿润区土壤大部分为棕壤、黄壤, 土层深厚; 陇南北部暖温带湿润区土壤为褐土、淋溶褐土; 陇中南部温带半湿润区土壤主要为黑钙土、栗钙土; 陇中北部温带半干旱区土壤主要为灰钙土、栗褐土; 河西北部温带干旱区土壤主要为灰棕漠土; 河西西部暖温带干旱区土壤主要为灌溉灰漠土; 河西南部高寒半干旱区土壤主要为冷钙土、灌淤土; 甘南高寒湿润区土壤主要为亚高山草甸土、暗棕壤。根据不同生态区域的气候及土壤特征, 以气候区为主, 土壤区为辅, 根据植物生长特性和形态特征进行适宜草本、藤本、灌木、乔木植物的选择配置, 进而确定适宜各区绿化植物的生理特征, 科学合理搭配草、花、灌、乔等绿化植物, 并研究建立适配植物的数据库, 提出“气候-土壤-坡度”三维选植策略, 系统构建了甘肃省8大气候生态区的边坡绿化植物配置体系, 在气候条件优越的陇南南部亚热带黄壤地带, 宜栽植的边坡绿化植物种类丰

富; 在气候干旱、盐碱土广布的河西西部灰漠土地带, 宜栽植耐热耐旱耐盐碱植物沙棘、甘草 (*Glycyrrhiza uralensis* Fisch.)、泡泡刺 (*Nitraria sibirica*) 等; 在气候高寒的甘南草甸土地带, 宜栽植耐寒耐旱植物垂穗鹅观草、多花木兰等。即一是气候-植物适配性优化。陇南湿润区采用油桐+紫穗槐混交模式, 兼顾经济收益与水土保持; 河西干旱区推广“怪柳+沙拐枣”复合群落, 提升固沙效率; 甘南高寒区选用“垂穗鹅观草+金露梅”模式, 解决冻融侵蚀难题, 提高植被覆盖率。二是土壤-植物协同修复。灰棕漠土区通过“红砂+骆驼刺”组合, 降低盐分表聚率; 暗棕壤区采用“无芒雀麦+沙棘”模式, 增加牧草产量; 寒漠土区引入“风信子+垂穗鹅观草”种植模式。三是工程措施创新。陡坡 (> 25°) 推广石笼护坡+生态袋, 减少水土流失量; 盐碱区采用暗管排盐+秸秆阻盐层, 提升返青率; 干旱区应用草方格+超旱生植物, 提高成活率。

调研结果表明, 甘肃省边坡绿化应遵循“气候主导、土壤辅助、功能适配”的基本原则, 针对不同区域的水热条件差异进行差异化植物配

置：干旱半干旱区优先选用耐旱性强的沙生灌木与深根性草本，高寒阴湿区侧重选择耐寒苔草与高山柳等低矮植物，暖温带湿润区则可适当引入观赏性较强的花灌木与彩叶树种。

在植物筛选策略上，本土植物因其适应性强、养护成本低、生态风险可控等优势，应作为边坡绿化的基础材料，占比建议不低于70%；引种植物需经过3年以上的适应性观测与生态安全性评估，确认无入侵风险后方可推广应用。值得注意的是，部分引种植物如紫穗槐、多花木兰等在陇中黄土高原区表现出良好的水土保持功能与景观效果，可作为本土植物的重要补充。

本研究为甘肃省边坡生态修复提供了分区化、精准化的植物选择依据，实现了生态效益、经济效益与社会效益的协同优化，对干旱半干旱区生态修复具有重要推广价值。但本研究仍存在一定局限性：一是部分高海拔偏远区域的实地调研样本量有限，植物配置的精准度有待提升；二是气候变化背景下，部分传统气候区的边界可能发生动态迁移，植物配置的长期稳定性需持续监测；三是植物配置的生态功能量化评价体系尚不完善，后续研究可结合遥感监测与生态模型构建，开展边坡绿化工程的综合效益评估。未来应加强本土植物种质资源库建设，深化植物-土壤-气候的耦合机制研究，为甘肃省乃至西北地区的生态修复工程提供更为科学的理论支撑与实践指导。

参考文献：

- [1] 徐 杭, 方立虎, 李桂林, 等. 高速公路边坡治理常用绿化技术及应用效果评价[J]. 交通世界, 2022, 623 (29): 21-24.
- [2] 邱鹏飞. 高速公路边坡绿化施工管理要点探讨[J]. 工程建设与设计, 2023, 499 (5): 224-226.
- [3] 郑 健, 马 静, 王 燕, 等. 基于气候分区的甘肃省参考作物蒸发蒸腾量时空分布特征[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31 (1): 240-247.
- [4] 严子柱, 李天永, 姚 泽. 甘肃干旱荒漠区植物资源的开发利用[J]. 甘肃科技, 2020, 36 (8): 33-40.
- [5] 杨文梁. 论甘肃高速公路绿化植物配置模式[J]. 发展, 2015, 297 (7): 126-127.
- [6] 冯永林, 罗广锋, 刘 娜, 等. 黄土边坡修复及绿化技术研究进展[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2023, 44 (4): 95-100.
- [7] 韩 笑. 高速公路岩石边坡绿化施工技术研究[J]. 中华建设, 2022, 287 (6): 143-145.
- [8] 张振玲. 苏南地区高速公路绿化植物应用与配置[J]. 现代园艺, 2022, 45 (14): 154-156.
- [9] 邵社刚, 付美兰. 西北地区高速公路绿化树种选择及其栽植技术[J]. 公路交通科技, 2002 (4): 156-158.
- [10] 张 捷, 周晓晴, 徐 辉. 黑龙江省高速公路绿化植物选择及应用[J]. 植物研究, 2013, 33 (3): 371-378.
- [11] HUANG P Y, LUO G. Study on type selection of greening plants for the protection of Yongsan Road slope[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 267 (6): 062021.
- [12] 唐 亚, 谢 瑶, 乔 雪. 新银合欢在四川盆地高速公路边坡防护中的应用[J]. 中国水土保持, 2022, 483 (6): 23-25.
- [13] 赵金召, 张兆长, 李艳晨, 等. 基于层次分析法的矿山高陡岩质边坡生态修复绿化效果评价研究[J]. 中国矿业, 2022, 31 (4): 80-85.
- [14] 徐福银, 胡艳燕, 陈 祥. 边坡绿化植物选择及绿化方式[J]. 黑龙江农业科学, 2020, 316 (10): 140-142.
- [15] 李佳珏. 高速公路边坡生态恢复植物的选择与管理[J]. 现代园艺, 2018, 357 (9): 127-128.
- [16] 郭红霞. 浅析边坡绿化植物的选择[J]. 南方农业, 2019, 13 (9): 64-65.
- [17] LIU Q, SU L J, XIAO H, et al. Selection and configuration of plants in high- and steep-cutting rock slope greening in a subtropical region: A case study of the first-phase urban expressway of Xiazhou Avenue in Yichang [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 13 (4): 102-110.
- [18] 宿湖光. 甘肃省高速公路不同区域生态绿化植物选择[J]. 发展, 2015, 298 (8): 116; 124.
- [19] MA D L, MEI Y, LIU G Q. Analysis of soil stability on steep slope of shrub greening[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 455 (1): 012002.
- [20] 李栋梁, 刘德祥. 甘肃气候[M]. 北京: 气象出版社, 2000.
- [21] 郑 健, 鲍婷婷, 王春霞, 等. 考虑气候分区的甘肃省干旱时空分布特征分析[J]. 农业机械学报, 2023, 54 (2): 311-320.
- [22] 菅煜婷, 张 勃, 黄 浩. 近58年甘肃气候变化区域

- 差异分析及环流影响[J]. 高原气象, 2022 (5): 1291-1301.
- [23] 费晓玲, 王毅荣. 甘肃气候生产力格局及演变[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25 (2): 77-82.
- [24] 蒋长明. 石羊河流域盐碱地现状及成因分析[J]. 甘肃科技纵横, 2019, 48 (9): 21-23.
- [25] 韩国毅. 边坡绿化技术在高速公路边坡防护中的实践[J]. 科技资讯, 2023, 21 (2): 83-86.
- [26] PARK S, JAK H K, CHAEHO B, et al. Identification of restoration species for early roadcut slope regeneration using functional group approach [J], Restoration Ecology, 2021, 29 (7): 1501-1509.
- [27] LEE J, YEON Y H, BAE W. The long-term growth characteristics of vegetation base materials include spent coffee ground [J], Journal of the Korean Geoenvironmental Society 2016, 17 (10): 45-53.
- [28] 张振海. 黄土边坡稳定性及治理的规律性研究: 以西安地区某项目黄土边坡工程为例[J]. 重庆建筑, 2021, 20 (12): 42-45.
- [29] 马 鹏, 成 诚. 废弃矿山整治提升岩质边坡团粒客土喷播绿化质量措施[C]//陕西省地质调查院, 长安大学, 中国自然资源航空物探遥感中心, 中国冶金地质总局西北局. 第四届中国矿山地质环境保护学术论坛论文摘要集. 西安: 自然资源部矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室, 中冶地集团西北岩土工程有限公司, 2021.
- [30] 周东伟, 刘汪洋, 郭 飞, 等. 基于CiteSpace的BIM在边坡方面的研究现状与展望[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2025, 47 (2): 55-61.
- [31] 陆德官. 基于边坡工程的岩土工程勘察技术分析[J]. 中国新技术新产品, 2024 (24): 93-95.

Selection of Slope Greening Plants in Different Climate and Soil Regions of Gansu

LIU Yana^{1,2}, E Shengzhe^{1,3}, MA Xiaofeng⁴, HAN Guojun¹, WANG Kun², YUAN Jinhua³, YAO Jiaxuan⁵

(1. College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu 730070, China; 2. Pingliang City Plant Protection Centre, Pingliang Gansu 744099, China; 3. Institute of Soil Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China; 4. Gansu Yuanlong Road and Bridge Mechanized Highway Engineering Co., Ltd., Lanzhou Gansu 730010, China; 5. Guangchang County Agricultural Technology Extension Centre, Guangchang Jiangxi 344900, China)

Abstract: Slope greening is an extremely important ecological engineering measure. It can effectively prevent geological hazards of slope, restore ecological environment, and improve the quality of highway slope protection system. It plays a crucial role in ecological restoration and disaster prevention, and possesses multiple social, economic, and environmental values. Through literature review, field investigation, and expert consultation, the principle for universal selection of slope greening plant was established. The distribution characteristic of ecological climate and soil in Gansu was systematically analyzed, and based on this analysis, a dataset of suitable slope greening plants and corresponding engineering measures for different climatic ecological zones in Gansu was developed. The investigation result indicated that according to the diverse ecological climate and soil characteristics, Gansu can be divided into 8 major climatic-ecological zones. The climatic condition, soil fertility, and constraint factors of each region show distinct features. Specifically, the Southern Longnan Valley Subtropical Humid Zone is mainly characterized by brown soil and yellow soil with deep soil layer, the Northern Longnan Warm-temperate Humid Zone mainly contains cinnamon soils and leached cinnamon soils, the Southern Central Gansu Temperate Semi-humid Zone is dominated by chernozem and chestnut soil, the Northern Central Gansu Temperate Semi-arid Zone mainly contains sierozems and cinnamon-desert soils, the Northern Hexi Temperate Arid Zone mainly contains gray-brown desert soils, the Western Hexi Warm-temperate Arid Zone mainly contains irrigated gray desert soils, the Southern Hexi Alpine Semi-arid Zone mainly contains frigid calcic soils and irrigation-silted soils, and the Gannan Alpine Humid Zone mainly contains sub-alpine meadow soil and dark brown forest soil. According to the climatic and soil characteristics of each ecological zone, the physiological characteristic of suitable greening plant was determined. A scientific combination of grasses, flowers, shrubs, and tree species was proposed, and a database of adaptive plant species was established. A "climate-soil-slope gradient" three-dimensional plant selection strategy was proposed. In the Southern Longnan Subtropical Yellow-brown Soil Zone with favorable climatic condition, a wide range of plant species can be used for slope greening. In the arid Western Hexi Gray-brown Desert Soil Zone with arid climate and widespread saline-alkaline soils, heat-, drought-, and salt-tolerant plants such as sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*), licorice (*Glycyrrhiza uralensis*), and *Nitraria sphaerocarpa* are recommended. In the Gannan Alpine Meadow Soil Zone with cold climate, cold- and drought-tolerant plants such as *Kochia prostrata*, Chinese Iris (*Iris lactea* var. *chinensis*), and Multiflower Rose (*Rosa multiflora*) are recommended. These findings provide a zoned and precise basis for plant selection in slope greening and ecological restoration in Gansu Province and have important practical significance for improving ecological adaptability and sustainability of greening engineering.

Key words: Gansu Province; Slope greening; Climatic zoning; Soil type; Plant selection