

# 基于工程扰动的高寒草甸移植保护技术研究

## ——以拉乌山顶草甸为例

孙荣<sup>1</sup>, 庞博<sup>2</sup>, 安小兵<sup>1</sup>, 张雪驰<sup>1</sup>, 陈凡<sup>1</sup>, 吴建波<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081;

2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

**摘要:** [目的] 研究草皮掘取后的多层堆置技术以及迹地草皮回植关键技术, 为高寒草甸资源保护和工程创面修复提供科学依据和技术支撑。[方法] 以西藏自治区芒康县拉乌山顶高寒草甸为研究对象, 通过实施草皮人工剥离、开展不同草皮叠置层数(2~5层)的叠置试验以及草皮回植试验, 并对不同叠置层数下草皮叠置保存率、草皮回植存活率和不同时期植物物种种类进行比较分析, 分析草皮剥离、堆存、回植的技术要点。[结果] 草皮叠置整体保存率为96.89%, 在叠置层数超过2层时保存率显著升高。草皮回植试验的整体存活率为87.96%, 不同叠置层数之间的存活率差异并不显著。草皮堆叠导致物种种类减少, 群落结构趋于简化; 草皮回植后, 物种种类逐渐恢复到与原生植被相近水平。综合空间利用和存活率因素, 本研究推荐草皮叠置5层堆存。[结论] 高寒地区草皮剥离后回植是有效的植被恢复措施, 推荐采用叠置5层的堆存方式。

**关键词:** 高山草甸; 草皮剥离; 草皮回植; 人工干预; 拉乌山; 西藏芒康县

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2026)01-0166-06

中图分类号: S812.8

**文献参数:** 孙荣, 庞博, 安小兵, 等. 基于工程扰动的高寒草甸移植保护技术研究[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 166-171. Sun Rong, Pang Bo, An Xiaobing, et al. Engineering disturbance-based transplantation protection technology for alpine meadow [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 166-171.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.012

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.012

## Engineering disturbance-based transplantation protection technology for alpine meadow —A case study at summit meadow of La'u Mountain

Sun Rong<sup>1</sup>, Pang Bo<sup>2</sup>, An Xiaobing<sup>1</sup>, Zhang Xuechi<sup>1</sup>, Chen Fan<sup>1</sup>, Wu Jianbo<sup>2</sup>

(1. Power China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang, Guizhou 550081, China;

2. Institute of Mountain Hazard and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China)

**Abstract:** [Objective] The multi-layer turf stacking techniques after turf stripping and key techniques for turf replanting on disturbed sites were investigated, in order to provide a scientific basis and technical support for alpine meadow conservation and engineering surface restoration. [Methods] Taking the summit alpine meadow of La'u Mountain at Mangkang County, Xizang Autonomous Region as the study site, artificial turf stripping, stacking with 2—5 layers, and turf replanting experiments were conducted. Turf preservation rates during stacking, survival rates after replanting, and plant species composition across different stacking layers and periods were compared, and key technical points of turf stripping, stacking, and replanting were analyzed. [Results] The overall preservation rate of stacked turf was 96.89%, and it increased significantly when more than two layers were stacked. The overall survival rate after turf replanting was 87.96%, with no significant difference among different stacking layers. Turf stacking reduced species diversity and simplified community structure. After

收稿日期: 2025-06-10

修回日期: 2025-09-22

采用日期: 2025-09-30

资助项目: 贵州省科技计划项目“石漠化山区光伏建设生态环境影响与修复技术研究及应用”(黔科合支撑[2025]一般098); 华能澜沧江水电股份有限公司科技项目“高寒区水电站植被恢复工程成效评估及调控技术研究”(LCJKJ2025-07)

第一作者: 孙荣(1987—), 男(汉族), 贵州省贵阳市人, 本科, 高级工程师, 主要从事生态恢复、水土保持方面的研究。Email: 739168643@qq.com。

通信作者: 陈凡(1970—), 男(汉族), 贵州省贵阳市人, 本科, 正高级工程师, 主要从事环境保护、生态恢复方面的研究。Email: 329412406@qq.com。

replanting, species diversity gradually recovered to a level similar to that of the native vegetation. Considering spatial efficiency and survival rate, this study recommended stacking turf in five layers. [Conclusion] In alpine meadows, replanting after turf stripping is an effective measure for vegetation restoration. It is recommended to use a stacking method of five layers.

**Keywords: alpine meadows; turf stripping; turf replanting; artificial interventions; La' u Mountains; Mangkang County, Xizang Autonomous Region**

高寒草甸作为青藏高原广泛分布的重要植被类型,在生态系统中发挥着至关重要的作用。它在有效涵养水源,减少水土流失方面起着关键作用,对维持区域生态平衡意义重大<sup>[1]</sup>。然而,受高海拔、空气稀薄、低温、昼夜温差大以及强烈辐射等特殊环境因素影响,高寒草甸生态系统极为脆弱,自身修复能力有限。一旦遭受外界干扰,发生质量退化,其恢复过程漫长,甚至存在系统逆向演替的风险<sup>[2]</sup>。随着国家基础设施建设的不断推进,越来越多的工程在高寒区陆续展开,这些工程建设活动对地表产生了诸多负面影响,其中最突出的便是对当地植被的破坏,进而导致地表裸露,若不及时采取有效的植被恢复措施,水土流失问题将日益严重<sup>[3]</sup>。青藏高原高海拔区植被恢复困难,常采用种草法和草皮移植方式代替自然恢复,有研究表明,采用草皮移植法对于高寒草地群落盖度的修复效果优于种草法<sup>[4]</sup>。草皮移植回铺技术凭借其经济可行,见效快的特点,成为目前较为常用的植被恢复手段<sup>[5-6]</sup>。尽管青藏铁路等重大工程建设在草皮移植技术、人工草皮培植技术等方面积累了一定经验,但由于青藏高原地域辽阔,地被植物建群种差异显著,这些技术的应用存在一定局限性。此外,草皮剥离后,因工程建设进度等原因,无法立即进行回植,需要对草皮进行堆存。然而,草皮堆存大多依赖经验操作,面临堆存空间有限、剥离草皮损耗高、回植成活率低等问题<sup>[7]</sup>。因此,本研究以青藏高原拉乌山山顶草甸为研究对象,从草皮剥离与切割作业方式,剥离草皮管护,草皮铺植与管护方式等关键角度出发,深入研究草皮掘取后的多层堆置技术以及迹地草皮回植关键技术,旨在为高寒草甸资源保护和工程创面修复提供科学、可靠的依据和技术支撑,这对于保障国家重大工程顺利实施,维护区域生态安全,具有重大的战略意义和重要的科学意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究地点选择在西藏自治区芒康县拉乌山山顶(29°41'50"N,98°30'09"E)。海拔高度约4 300 m。该区域属于高原温带半湿润季风型气候区,年均降水

量约为400 mm,降水主要集中在夏季,无霜期仅有95 d,年均气温为10℃。土壤类型为高原草甸土,土壤呈酸性。在植被方面,蒿草草甸是主要的植被类型,其中高山蒿草为建群种。这种特殊的气候、土壤和植被条件,使得该区域的高寒草甸生态系统既具有典型性,又面临着工程建设带来的诸多挑战,为研究工程扰动下的高寒草甸保护技术提供了理想的样本。

### 1.2 试验设计与方法

#### 1.2.1 草皮剥离

2022年5月,研究团队租用挖掘机开展原生草皮人工剥离工作。在剥离过程中,充分考虑到草皮运输、存放的便利性以及对自然草甸的保护需求,将草皮用平口铁铲分割成0.3 m×0.3 m的规格块状。根据拉乌山土料场的植被根系垂直分布特征,因其生长下限约为13 cm,最终确定草皮块厚度为15 cm。此厚度既能完整保留草甸植被根系,又能最大程度减少对原始草甸植被的破坏。草皮揭取完成后,随即进行“切根”处理,即切除植物四周的主根和侧根。对于以高山蒿草为建群种的高寒草甸,“切根”具体操作为切除剥离草皮底部的不定根,切除厚度控制在0.5~1 cm范围内。随后,为防止草皮烂根,将草皮翻转进行晒根,在晴朗天气晒根24 h。草皮剥离后,及时收集下层腐殖土并进行集中堆放用于后续草皮叠置和回植。

#### 1.2.2 草皮堆叠

草皮堆放在山体背风且地势平坦地段,采用堆叠方式放置,目的是防止风力带走草甸水分,以保障草皮存活。在堆叠存放草皮过程中,在下部堆放腐殖土,并在每层草皮表面均匀施水,以维持草皮湿润状态。同时,对每堆草皮的最下层草皮直接接触的地面均匀施用10 g暂稳态维持混合物,该混合物由4 g保水剂,5 g草木灰及粗颗粒煤渣以及1 g粗颗粒牛羊粪便混合组成。试验分别设置2层(L<sub>1</sub>)、3层(L<sub>2</sub>)、4层(L<sub>3</sub>)和5层(L<sub>4</sub>)共4个不同叠置层数,以4个不同叠置层数(5:4:3:2)为一组进行堆放,共108组,每堆间隔0.2 m。具体的平面叠置存放方式如图1所示。在叠置3个月后,开展草皮保存率调查,并对存活草皮进行草皮回植试验。

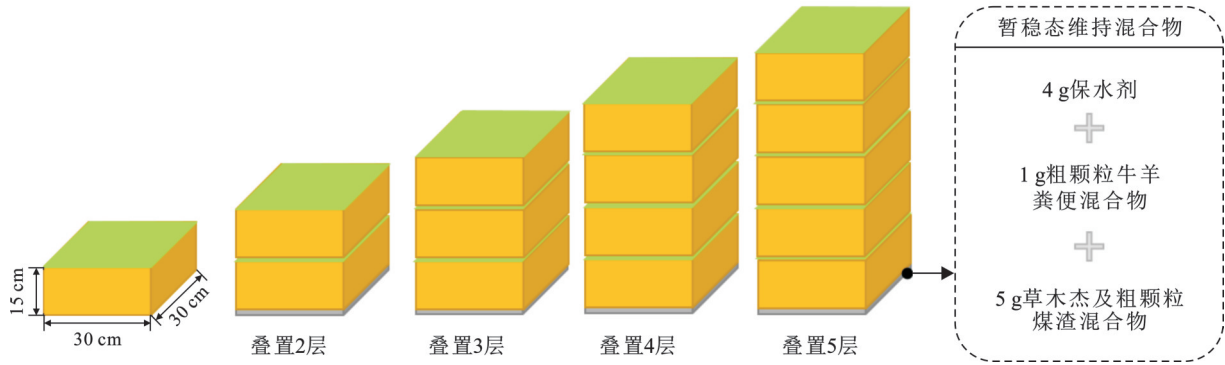


图 1 草皮叠置示意图

Fig.1 Schematic diagram of turf stacking

1.2.3 草皮回植

2022年8月,研究团队开展草皮回植试验。在草皮回植前,对回植场地的土壤进行翻耕处理,翻耕深度控制在3~5 cm。翻耕过程中,将大粒径的砾石块取出,而小砾石则保留在回植场地,小砾石能够起到加固和支撑土壤的作用,有助于草皮扎根。回植时,草皮之间预留3~5 cm的空隙带,预留空隙采用1 a生草种(黑麦草)进行补种(回填土为剥离腐殖土,草种量为2 g/kg),预留空隙的回填土高度略高于周围草皮,形成“脊”状,待后期自然沉降后,完成草皮回植工作(图2)。回植后的草皮脆弱,采取防践踏和啃食措施,并根据当地气候条件定期养护。

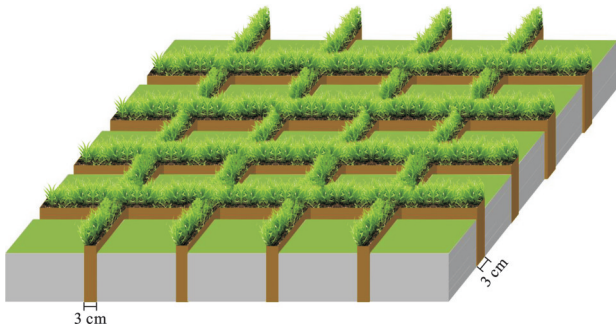


图 2 草皮回铺示意图

Fig.2 Schematic diagram of turf replanting

1.3 数据调查和分析

本次研究叠置草皮108组,共涵盖1512块草皮,草皮样方0.3 m×0.3 m,厚度0.15 m。2022年5月、2022年8月和2023年7月分别对原生草皮、叠置草皮和回植后草皮进行草皮存活数量以及存活草皮物种种类,高度,相对频度调查。草皮物种调查以一块存活草皮为样方对全部存活草皮进行调查。

$$\text{堆叠保存率} = \frac{\text{堆叠后存活草皮数}}{\text{堆叠草皮数}} \times 100\%$$

$$\text{回植存活率} = \frac{\text{回植后存活草皮数}}{\text{堆叠后存活草皮数}} \times 100\%$$

$$\text{成活率} = \frac{\text{回植存活草皮数}}{\text{堆叠草皮数}} \times 100\%$$

$$\text{频度} = \frac{\text{某植物出现的样方数}}{\text{总样方数}} \times 100\%$$

$$\text{相对频度} = \frac{\text{某物种的频度}}{\text{所有物种频度之和}} \times 100\%$$

获取的数据采用Excel 2016进行处理和绘图。利用Origin 2024软件对草皮堆叠后不同堆叠层数保存率进行正态性检验,然后进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 草皮堆叠保存率特征

草皮叠置技术在高寒草甸中呈现高存活率特点。试验数据表明(表1),草皮叠置整体保存率高达96.89%。其中,不同叠置层数(2~5层)的保存率分别为90.74%,98.15%,96.30%和99.07%,当叠置层数超过2层时,草皮保存率显著提升,叠置层数为5层时保存率最高。

表 1 草皮堆叠保存率

Table 1 Preservation rate of stacked turf

试验类型	块数	保存数量	死亡数量	保存率±标准差
L <sub>1</sub>	216	196	20	90.74%±29.12% <sup>b</sup>
L <sub>2</sub>	324	318	6	98.15%±13.55% <sup>a</sup>
L <sub>3</sub>	432	416	16	96.30%±18.97% <sup>a</sup>
L <sub>4</sub>	540	535	5	99.07%±9.62% <sup>a</sup>
合计	1512	1465	47	96.89%

注:不同小写字母代表同一指标不同处理之间差异显著(p<0.05)。

2.2 草皮回植存活率特征

草皮回植后存活率调查的具体数据详见表2。其中存活草皮数为1330块,死亡草皮数为135块,整体存活率达到90.78%,存活率高。不同叠置层数(2~5层)的存活率分别为95.92%,90.25%,93.03%和87.48%。图3为综合草皮叠置和回植死亡数量的草皮成活率图。不同叠置层数(2~5层)的最终成活

率分别为 87.04%, 88.58%, 89.58%, 86.67%。综合考虑空间利用率和草皮存活率等因素,推荐采用叠置 5 层的堆存方式。

表 2 草皮回植存活率

Table 2 Survival rate of turf replanting

试验类型	块数	存活数量	死亡数量	存活率/%
L <sub>1</sub>	196	188	8	95.92
L <sub>2</sub>	318	287	31	90.25
L <sub>3</sub>	416	387	29	93.03
L <sub>4</sub>	535	468	67	87.48
合计	1 465	1 330	135	90.78

### 2.3 草皮物种种类特征

由表 3 可知,不同时期,高山嵩草均为草皮核心优势种,但其相对频度呈:原生草皮(81.58%)>叠置草皮(70.68%)>回植草皮(69.02%)的降低趋势。原生草皮包含 9 种不同物种,伴生种以蕨麻(6.87%)、圆穗蓼(4.24%)、龙胆(4.09%)等为主,其余物种相对频度均低于 2%。叠置草皮包含 8 种不同

物种。相较于原生草皮,缺失龙胆、委陵菜、风毛菊和臭芥等植物,但新增喜泉卷耳、红景天和高山豆。其中喜泉卷耳(21.69%)为优势伴生种,其余物种相对频度均低于 3%。回植草皮包含 9 种不同物种,物种种类与原生草皮物种相似。其中圆穗蓼(14.49%)成为优势伴生种,委陵菜(4.71%)、蕨麻(4.36%)、火绒草(3.18%)次之,其余物种相对频度均低于 3%。

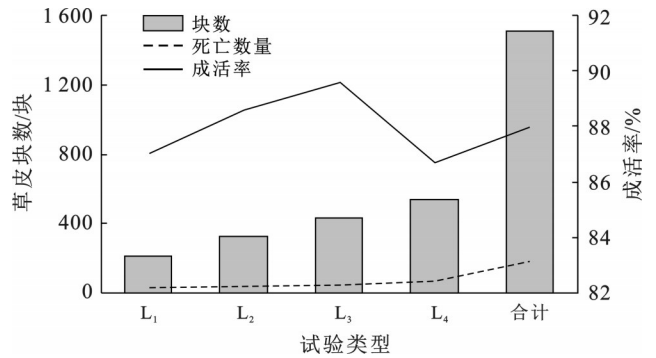


图 3 综合堆叠期与回植期死亡的最最终成活率

Fig.3 Final survival rate accounting for mortality during both stacking and replanting periods

表 3 不同时期植被调查结果

Table 3 Vegetation survey results during different periods

原生草皮			叠置草皮			回植草皮		
物种	高度/cm	相对频度/%	物种	高度/cm	相对频度/%	物种	高度/cm	相对频度/%
高山嵩草	4.30	81.58	高山嵩草	4.67	70.68	高山嵩草	5.57	69.02
蕨麻	4.30	6.87	喜泉卷耳	1.67	21.69	圆穗蓼	19.33	14.49
圆穗蓼	16.00	4.24	红景天	1.75	2.41	委陵菜	8.67	4.71
龙胆	6.00	4.09	蕨麻	5.25	2.01	蕨麻	8.50	4.36
木根香青	6.30	1.02	高山豆	9.00	0.80	火绒草	3.33	3.18
早熟禾	7.00	0.88	木根香青	3.00	0.80	青藏苔草	7.00	2.36
委陵菜	4.50	0.58	圆穗蓼	3.00	0.80	早熟禾	20.00	1.18
风毛菊	3.80	0.44	早熟禾	3.00	0.80	臭芥	4.50	0.47
臭芥	4.50	0.29				风毛菊	4.50	0.24

## 3 讨论

### 3.1 草皮堆叠和铺植对草皮存活的影响

本研究结果显示,叠置层数越高,草皮保存率越高。在高海拔地区,草皮水分蒸发量大,随着叠置数量的增加,总遮阴面积相应增加,水分挥发量降低,从而使得草皮存活数量增加。除叠置层数对草皮存活的影响外,移植时节、草皮切割方式、根系防病害、土壤环境打造等都将对草皮堆存存活产生影响<sup>[7-9]</sup>。在移植时节上,本研究选择在温暖湿润的时节进行草皮剥离,此时降雨丰富,植物处于生长旺盛阶段,为剥离草皮的存活创造了有利条件。在草皮切割方式上,对剥离草皮进行的“切根”处理,切断老根后能

够有效刺激不定芽萌发,促使植物长出更多新根,从而扩大根系的吸收面积,对回植草皮生长起到促进作用<sup>[10]</sup>。此外,剥离草皮底部呈不规则形状,在叠置时增加了草皮层与层之间的透气性,这也有助于底层草皮的存活。在根系防病害上,利用太阳的紫外线进行“晒根”,一方面,能减少根部病原菌的数量,从而减少根部病害的发生几率<sup>[11]</sup>;另一方面,可改变土壤透气性,防止后期草皮堆叠时植物烂根。但过量紫外线照射会造成植物根系细胞损伤和土壤水分流失,因此本研究照射时间为晴朗天气“晒根”24 h。在土壤环境打造上,在叠置草皮下方堆放腐殖土,为草皮提供了良好的生长下垫面环境。同时,施加暂稳态维持混合物,进一步增强了草皮的保温保湿性

能以及对环境干扰的缓冲能力。

草皮回植存活率受前期草皮堆存层数影响外,还受土壤翻耕和草皮间距空隙的影响。在草皮回植前,对土壤进行翻耕(移除大砾石,保留小砾石),有效改善了土壤物理结构,显著提高土壤透气性,为草皮扎根创造了良好条件,最终促进草皮存活<sup>[12]</sup>。草皮移植虽然能够快速促进草甸物种的建立,但草甸发育良好并向周围扩散需要一定时间<sup>[13]</sup>。在草皮铺设过程中,剥离草皮边缘往往不够整齐,因此铺设时需保持一定距离。后续通过添加腐殖土,不仅能够确保土地平整性,还能为草皮根系侧向发育提供良好环境。此外,在草坪间隙补种黑麦草草籽的做法,不仅操作简便,还能显著加快成坪速度。在回植初期,下层叠置草皮叶片容易发黄,不能过度暴晒,此时快速生长的黑麦草起到了良好的遮阴作用。此外,黑麦草凋落物缓慢释放养分,为土壤碳氮磷养分提供物质基础,逐步提升了草皮的生产力<sup>[14-15]</sup>。

### 3.2 草皮物种组成对堆叠和铺植的适应性差异

试验结果显示,草皮剥离叠置后,草皮物种种类减少,物种结构趋于简化。这一现象与草皮叠置形成的特殊微环境直接相关。草皮叠置会产生机械挤压作用并导致光照条件受限。不同物种之间开始争夺有限的水分、养分和阳光等资源。在此过程中,对微环境胁迫敏感物种逐渐死亡消失,而对微环境胁迫耐受性较强物种得以存活<sup>[16-17]</sup>。随着物候期的推移,新的植物个体萌发,且草皮叠置形成的无光环境为喜泉卷耳生长创造了有利条件。该植物植株高度较低,能在无光环境下正常生长,具备更强的耐阴能力,因此其相对频度较高。在草皮回植阶段,部分植物由于长时间处于无光环境下,紫外线耐受能力显著弱化。在植物回植后,植物暴露于太阳直射下因生理胁迫而死亡<sup>[18-19]</sup>。值得注意的是,草皮叠置和回植期间新增的部分物种相对频度较低,这可能是因为高原为多风环境,草本植物种子多以风力传播为主,这些新增物种种子在草皮堆叠和回植时期通过风力迁入群落<sup>[20]</sup>。草皮回植后,生长环境相较于叠置时期显著改善,各伴生物种相对频度和高度均显著提升,物种组成逐渐恢复到与原生植被相近水平,表明草皮剥离回植是有效的植被恢复措施。

## 4 结论

(1) 草皮堆叠层数对草皮保存率具有显著影响,当层数超过2层后,保存率显著提升。其中5层堆叠草皮保存率最高为99.07%。这表明在高寒地区,草皮叠置数量增加可提高剥离草皮保存率。草皮回植

存活率受到前期堆叠层数的影响,5层堆叠草皮回植存活率略低于其他层数,但综合考虑空间利用率,草皮堆叠和回植的最终成活率,推荐采用叠置5层的堆存方式。

(2) 草皮堆叠过程导致物种种类减少,物种结构趋于简化。草皮堆叠形成的特殊微环境对物种耐阴能力提出更高要求,部分敏感物种消失,而耐阴物种如喜泉卷耳相对频度增加。草皮回植后,物种种类逐渐恢复到与原生植被相近水平,表明草皮剥离后回植是有效的植被恢复措施。

### 参考文献(References)

- [1] 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. 地理学报, 2012, 67(1): 3-12.  
Sun Honglie, Zheng Du, Yao Tandong, et al. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(1): 3-12.
- [2] 王建兵,张德罡,曹广民,等. 青藏高原高寒草甸退化演替的分区特征[J]. 草业学报, 2013, 22(2): 1-10.  
Wang Jianbing, Zhang Degang, Cao Guangmin, et al. Regional characteristics of the alpine meadow degradation succession on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(2): 1-10.
- [3] 张歆,高晓飞,平原,等. 青藏高原寒区管道工程建设对生态环境的影响及防治对策[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(S2): 160-163.  
Zhang Xin, Gao Xiaofei, Ping Yuan, et al. Influence of pipeline construction on ecological environment in Qinghai-Tibet Alpine area and countermeasures [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2021, 60(S2): 160-163.
- [4] 赵科,汪正芸,李育庆,等. 两种修复方式对青藏高原取弃土场修复后草地盖度的影响[J]. 草业科学, 2019, 36(10): 2499-2506.  
Zhao Ke, Wang Zhengyun, Li Yuqing, et al. Effect of two restorations on the grassland coverage after remediation of take-abandon soil field on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Pratacultural Science, 2019, 36(10): 2499-2506.
- [5] 何凌坚,尹静,王天伟. 共和至玉树公路边坡植被恢复技术及效果分析[J]. 山东交通科技, 2016(1): 87-88.  
He Lingjian, Yin Jing, Wang Tianwei. The meatures of slope vegetation restoration and its benefits analysis of Gonghe-Yushu highway [J]. Shandong Transportstion Science and Technology, 2016(1): 87-88.
- [6] 祁文斌. 浅谈共玉公路草皮植被护坡防护[J]. 青海交通科技, 2013(3): 10-11.  
Qi Wenbin. A brief discussion on grass-covered slope protection for the Gongyu highway [J]. Qinghai Transportstion Science and Technology, 2013(3): 10-11.

- [7] 王宝鹤,陆建国,文卓,等.基于退化剥离草皮的土壤重构技术[J].环境工程学报,2024,18(9):2577-2587.  
Wang Baohe, Lu Jianguo, Wen Zhuo, et al. Soil reconstruction technology based on degraded stripped turfs [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2024, 18 (9):2577-2587.
- [8] 贺鹏.生态环保关键技术在山地风电项目建造中的应用研究[J].人民珠江,2023,44(S2):328-331.  
He Peng. Research on the application of key ecological and environmental technologies in mountain wind power project construction [J]. Pearl River, 2023, 44 (S2) : 328-331.
- [9] 顾立海.北京冬奥会延庆赛区亚高山草甸保护与恢复技术研究[J].北方建筑,2023(4):55-59.  
Gu Lihai. Research on the conservation and restoration techniques of subalpine meadows in the Yanqing competition area of the Beijing winter olympics [J]. Northern Architecture, 2023(4):55-59.
- [10] 高志成,田佳妮,霍艳双,等.切根和浅耕翻措施对退化草地生长季土壤性质及植物群落的影响[J].生态学报,2017,37(11):3824-3829.  
Gao Zhicheng, Tian Jiani, Huo Yanshuang, et al. Effects of root pruning and shallow plowing on soil properties and plant communities in deteriorated steppe [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(11):3824-3829.
- [11] Canale M C, Benato E A, Cia P, et al. In vitro effect of UV-C irradiation on *Guignardia citricarpa* and on postharvest control of citrus black spot [J]. Tropical Plant Pathology, 2011, 36(6):356-361.
- [12] Avila R, Schoenau J, King T, et al. Effects of subsoiling tillage on structure, permeability, and crop yields on compacted Solonchic and Chernozemic dryland soils in Western Canada [J]. Canadian Biosystems Engineer-
- ing, 2022, 62(1):1.1-1.9.
- [13] Mudrak O, Fajmon K, Jongepierova I, et al. Restoring species-rich meadow by means of turf transplantation: Long-term colonization of ex-arable land [J]. Applied Vegetation Science, 2017, 20(1):62-73.
- [14] Li Jie, Yang Hong, Zhou Feng, et al. Effects of maize residue return rate on nitrogen transformations and gaseous losses in an arable soil [J]. Agricultural Water Management, 2019, 211:132-141.
- [15] Wei Xiaoxuan, Li Yansu, Fan Xiaoguang, et al. Techno-economic feasibility of *in situ* vegetable residue return in the Chinese solar greenhouse [J]. Agronomy, 2021, 11(9):1828.
- [16] Emsens W J, Aggenbach C J S, Rydin H, et al. Competition for light as a bottleneck for endangered Fen species: An introduction experiment [J]. Biological Conservation, 2018, 220:76-83.
- [17] Holmgren M, Gomez-Aparicio L, Quero J L, et al. Non-linear effects of drought under shade: Reconciling physiological and ecological models in plant communities [J]. Oecologia, 2012, 169(2):293-305.
- [18] Petrov V, Hille J, Mueller-Roeber B, et al. ROS-mediated abiotic stress-induced programmed cell death in plants [J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6:69.
- [19] 袁珩,杨文强.光合生物光抑制现象与光保护措施[J].植物生理学报,2023,59(4):705-714.  
Yi Heng, Yang Wenqiang. Photoinhibition and photoprotection of photosynthetic organisms [J]. Plant Physiology Journal, 2023, 59(4):705-714.
- [20] Sullivan L L, Clark A T, Tilman D, et al. Mechanistically derived dispersal kernels explain species-level patterns of recruitment and succession [J]. Ecology, 2018, 99(11):2415-2420.

(上接第165页)

- [26] 王娟,刘晓林,亢庆,等.“县-小流域-图斑”多层次水土流失治理策略[J].农业工程学报,2025,41(7):136-144.  
Wang Juan, Liu Xiaolin, Kang Qing, et al. Multi-level controlling of the soil erosion for counties, small watersheds, and plots [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(7):136-144.
- [27] 林子墨,王纪杰,唐张轩,等.红壤丘陵区种植茶树和柑橘对土壤肥力和水土流失的影响[J].福建农业科技,2024,55(9):17-22.  
Lin Zimo, Wang Jijie, Tang Zhangxuan, et al. Effects of planting tea trees and citrus trees on soil fertility and soil and water loss in the red soil hilly region [J]. Fujian Agricultural Science and Technology, 2024, 55(9):17-22.
- [28] 刘忠仙,顾再柯,杜迪.新阶段贵州省水土流失动态监测工作思考[J].中国水土保持,2024(10):19-21.  
Liu Zhongxian, Gu Zaike, Du Di. Thoughts on dynamic monitoring of soil erosion in Guizhou Province in the new stage [J]. Soil and Water Conservation in China, 2024(10):19-21.
- [29] 刁品文,曹珮,赵敏,等.基于CSLE模型的广州市水土流失及动态变化分析[J].人民珠江,2024,45(S1):19-28.  
Diao Pinwen, Cao Pei, Zhao Min, et al. Analysis of soil erosion and dynamic change in Guangzhou based on CSLE model [J]. Pearl River, 2024, 45(S1):19-28.