

DOI: 10.11686/cyxb2024356

http://cyxb.magtech.com.cn

耿玉刚, 杨红梅, 王文武, 等. 青藏高原剥离草甸不同堆存方式对根系活性的影响. 草业学报, 2025, 34(8): 79-87.

GENG Yu-gang, YANG Hong-mei, WANG Wen-wu, *et al.* Effects of stockpiling methods on root activity in stripped alpine meadows of the Qinghai-Tibet Plateau. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(8): 79-87.

青藏高原剥离草甸不同堆存方式对根系活性的影响

耿玉刚¹, 杨红梅¹, 王文武^{2*}, 罗睿杰¹, 赵保国², 陈江红¹, 秦昌盛³, 陈锐银¹

(1. 华电金上昌都新能源有限公司, 西藏 昌都 854000; 2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610000; 3. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 随着青藏高原地区资源开发的加速, 特别是光伏电站建设的推进, 草甸的保护面临严峻挑战。本研究旨在系统评估不同堆存方式对青藏高原地区剥离草甸根系活性的影响, 探索最佳的草甸根系保护措施。本研究选取了平铺法、镂空法、支架法、三层重叠法、五层重叠法和水土保持方案支架法(以下简称“水保支架法”), 通过综合分析这6种方式下土壤的理化性质和草甸根系活性, 评估其对剥离草甸保护的效果。测定了不同堆存方式下的土壤pH值、有机碳、全氮、全钾、全磷、有效磷、速效钾、碱解氮含量等理化指标, 以及表征草甸根系活性的氯化三苯基四氮唑(TTC, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)还原强度, 并探讨了这些指标与根系活性之间的关系。结果表明: 不同堆存方式对于土壤理化性质的影响有限。水保支架法在维持草甸根系活性方面具有显著优势。根系TTC还原强度依次为: 水保支架法($5.52\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) > 支架法($4.52\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) > 镂空法($4.02\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) > 平铺法($3.74\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) > 五层重叠法($3.71\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) > 三层重叠法($3.54\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)。钾元素(全钾和速效钾)在促进根系生长、提高呼吸速率和增强抗逆性方面发挥重要作用, 而土壤pH值、有机碳含量和磷元素对根系活性的影响较小。总的来说, 本研究揭示了不同堆存方式对剥离草甸根系活性的影响, 为草甸生态修复及可持续发展提供了科学依据。

关键词: 草甸生态系统; 堆存方式; 根系活性; 影响因子; 生态修复

Effects of stockpiling methods on root activity in stripped alpine meadows of the Qinghai-Tibet Plateau

GENG Yu-gang¹, YANG Hong-mei¹, WANG Wen-wu^{2*}, LUO Rui-jie¹, ZHAO Bao-guo², CHEN Jiang-hong¹, QIN Chang-sheng³, CHEN Rui-yin¹

1. Huadian Jinsha River Upstream Changdu New Energy Co. Ltd., Changdu 854000, China; 2. POWERCHINA Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610000, China; 3. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 210000, China

Abstract: With the increasing rate of economic development in the Qinghai-Tibet Plateau, particularly the construction of photovoltaic power stations, meadow conservation faces significant challenges. This study systematically evaluated the impact of different stockpiling methods on the root activity of stripped alpine meadows on the Qinghai-Tibet Plateau, aiming to identify the pattern that most effectively preserved root activity. Six stockpiling methods were tested: flat-laying, hollow, scaffold, three-layer overlapping, five-layer overlapping, and a soil and water conservation scaffold (hereafter referred to as a “conservation scaffold”). Soil physicochemical properties and meadow root activity under the six stockpiling methods were comprehensively analyzed to assess their

收稿日期: 2024-09-23; 改回日期: 2024-11-20

基金项目: 成都院项目(NZK22272), 成都院博后课题(P60224), 华电集团科技项目(CHDKJ23-02-01-82; CHDKJ23-02-02-75; CHDKJ23-02-02-76)和昌都新能源项目(CDXNY23-07-07-02)资助。

作者简介: 耿玉刚(1970-), 男, 山东桓台人, 高级工程师, 硕士。E-mail: ccqy_2023@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: 695019587@qq.com

effectiveness in protecting stripped meadows. Key soil properties, including pH, organic carbon content, total nitrogen content, total potassium content, total phosphorus content, available phosphorus content, available potassium content, and alkaline hydrolyzable nitrogen content, were measured, along with triphenyltetrazolium chloride (TTC, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) reduction intensity as an indicator of root activity. The relationships between these indicators and root activity were also examined. The results show that the different stockpiling methods had limited influence on soil physicochemical properties. However, the conservation scaffold showed a significant advantage in maintaining meadow root activity, with root TTC reduction intensity as follows: Conservation scaffold ($5.52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) > scaffold ($4.52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) > hollow ($4.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) > flat-laying ($3.74 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) > five-layer overlapping ($3.71 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) > three-layer overlapping ($3.54 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$). Soil potassium level (total potassium and available potassium) was strongly associated with promotion of root growth, increased soil respiration rate, and enhanced stress resistance, while soil pH, organic carbon content, and phosphorus had weaker associations with root activity. Overall, this study reveals the effects of different photovoltaic panel installation patterns on the root activity of stripped meadows, providing scientific data to support meadow ecological restoration and sustainable development planning.

Key words: meadow ecosystem; stockpiling methods; root activity; influencing factors; ecological restoration

草甸作为青藏高原生态系统的关键组成部分,发挥着涵养水源、调节区域气候、保持生物多样性和维护生态稳定的重要作用,是高原生态安全的重要屏障^[1-2]。然而,随着近年来人类对青藏高原资源开发的不断深入,特别是光伏电站建设工程的快速推进,导致高寒草甸生态系统面临着前所未有的挑战^[3]。首先,光伏电站的建设需要大面积的土地,通常导致草甸植被的直接清除和破坏,扰动了原有的地表土壤,减少了植物覆盖^[4]。其次,施工过程中的重型机械和设备对土壤结构造成了压实和扰动,降低了土壤的渗透性和通气性,进而影响了土壤的微生物活动和养分循环。此外,地表植被的破坏使得土壤更易受到风蚀和水蚀的侵害,导致土壤退化、侵蚀和养分流失^[5]。因此,如何在保障光伏产业发展的同时,有效保护和恢复高寒草甸生态系统,已成为当前亟待解决的科学问题。在众多的生态恢复措施中,对草甸实施剥离、堆存、回铺措施因其操作简便、效果显著而受到广泛关注。其中,草甸堆存技术通过对剥离后的草甸土壤和植被进行覆盖、保水、保温等处理,旨在维持植被根系活性,以保证草甸回铺的存活率^[6]。然而,目前关于不同堆存方式对高寒草甸根系活性影响的研究基本处于空白状态,这严重制约了堆存技术在光伏电站建设工程区生态恢复中的应用和推广。

根系作为植物的重要器官,其活性直接影响着植物的生长和恢复能力^[7]。剥离后的草甸堆存方式可能从养分吸收、水分含量和呼吸作用等方面对根系活性产生较大影响。因此,研究不同堆存方式对高寒草甸根系活性的影响及其机制,对于优化堆存技术、提高生态恢复效果具有重要意义。本研究以青藏高原某光伏电站建设工程区为对象,系统探究了平铺法、镂空法、支架法、三层重叠法、五层重叠法和水土保持方案支架法(以下简称“水保支架法”)6种不同堆存方式下草甸根系活性的变化趋势及其与环境因子和植物因素的关系。试验结果不仅为深化高寒草甸生态系统恢复理论研究提供了新的思路和方法,还可为光伏电站建设工程区的生态恢复提供切实可行的技术支撑和解决方案。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

本研究区地处青藏高原东南部西藏自治区昌都市芒康县内,对于研究青藏高原高寒草甸具有代表性。研究区平均海拔4400 m,属高原温带半湿润季风型气候。根据多年气象数据记录,该区域平均年降水量为613.8 mm,多年平均气温为4.3℃。研究区土壤类型主要为亚高山草甸土、灰褐土和暗棕壤土等,植被类型以丛生蒿草和杂草草甸为主,对于维持当地生态系统的稳定性和功能具有关键作用。因此,本研究区以其独特的地理位置、气候条件、土壤类型和植被特征,成为研究青藏高原高寒草甸堆存方式对根系活性影响机制的理想区域。

1.2 试验设计

草甸于2023年5月剥离并堆存,草甸剥离尺寸为50 cm×50 cm。试验设置了6种堆存方式,分别是平铺法、镂空法、支架法、三层重叠法、五层重叠法和水保支架法(表1)。这6种堆存方式综合了农业通风堆肥技术、建筑支撑结构、环境工程中的水土保持措施以及对自然环境中草甸生长层次的模拟,通过模拟自然生长条件和提供物理支撑,结合通风、保水和土壤结构优化等措施,旨在探索和评估对剥离草甸根系活性影响最有效的管理策略。每种堆存方式均设置了6个重复和1个空白对照,以确保数据的可靠性。在遮盖措施方面,每种堆存方式中有3个采用遮阳网遮盖,3个采用密目网遮盖,而空白对照则不进行任何遮盖。根据当地月均降水量,浇水频次方面,统一设定为第1个月浇水3次,后续每月浇水1次。

表1 草甸堆存方案信息

Table 1 Information of meadow stockpiling methods

堆存方式 Stockpiling method	编号 Number	层 Layer	描述 Description	优缺点 Advantage and disadvantage
平铺法 Flat-laying method	PP1	1	将草甸单层平铺在指定位置。Lay the turf flat in a single layer at the designated location.	优点:根系活性保持较好,回铺后恢复快;缺点:占地面积较大。Advantages: The root system maintains good activity and recovers quickly after re-laying; Disadvantages: It occupies a relatively large area.
镂空法 Hollow method	LK3	3	利用自身刚度使重叠堆放的草甸保持镂空。Utilize its own rigidity to keep the overlapped turf stacked with ventilation gaps.	优点:堆存容量较大,通风好;缺点:对草甸自身刚性有要求,且保水效果一般。Advantages: The stockpiling capacity is relatively large and the ventilation is good; Disadvantages: There are requirements for the rigidity of the turf itself, and the water retention effect is average.
支架法 Scaffold method	ZJ3	3	采用铝合金支架摆放草甸,形成3层堆存结构。Arrange the turf using aluminum alloy brackets to form a 3-layer stockpiling structure.	优点:外观整洁,通风好;缺点:保水效果较差。Advantages: Neat appearance and good ventilation; Disadvantages: Poor water retention.
三层重叠法 Three-layer overlapping method	CD3	3	将草甸重叠3层堆放。Stack the turf in three overlapping layers.	优点:占地较少,保水性能好;缺点:通风效果差。Advantages: Requires less space and has good water retention; Disadvantages: Poor ventilation.
五层重叠法 Five-layer overlapping method	CD5	5	将草甸重叠5层堆放。Stack the turf in five overlapping layers.	优点:占地较少,堆存容量较大,保水性能好;缺点:通风效果差,底层承重较大。Advantages: Takes up less space, has a large stockpiling capacity, and offers good water retention; Disadvantages: Poor ventilation and high load-bearing on the bottom layer.
水保支架法 Conservation scaffold method	SZ3	3	利用钢管支架支撑草甸,形成3层堆存结构,下垫面铺设三维网。Support the turf with steel pipe brackets to form a 3-layer stockpiling structure, with a three-dimensional mesh laid underneath.	优点:堆存后景观效果较整洁,通风和保水效果好;缺点:成本较高。Advantages: The landscape effect after stockpiling is neat, with good ventilation and water retention; Disadvantages: The cost is relatively high.

注:为方便理解,堆存方式命名为“中文名缩写+堆存层数”。

Note: For ease of understanding, the naming convention for stockpiling methods is “Chinese abbreviation+number of stockpiling layers”.

1.3 样品采集与测定

在本研究中,共进行了4次野外采样工作,分别为2023年6、8、11月以及2024年1月。采样过程中,针对每种草甸堆存方式,均进行了植被样品和土壤样品的采集。采样时,首先在选定区域割出一块草甸,确保样品能够真实反映草甸的情况。随后,对割取的草甸进行仔细的人工分离,分别将植被根系和土壤进行装袋。采集的植被和土壤样品均经过严格的分类、标记和装袋,供后续的实验分析。

1.3.1 土壤基本理化性质测定 将土壤样品与水混合后静置,用pH计(PHSJ-3F,上海)测量悬浊液的pH值,以评估土壤的酸碱性。采用重铬酸钾氧化法,氧化土壤中的有机碳并用硫酸亚铁滴定剩余的重铬酸钾,计算有机碳含量。利用半微量凯氏法,将土壤中的有机氮转化为铵态氮,并通过蒸馏和滴定确定全氮含量。通过酸溶法溶

解土壤中的钾和磷,然后使用分光光度计(Lumiso Expert,英国)测定全钾和全磷含量。使用碳酸氢钠提取一钼锑抗比色法测定土壤有效磷含量。采用醋酸铵提取一火焰光度法测定土壤速效钾含量。通过碱解扩散法,将土壤中的氮素转化为氨态氮,并通过扩散和滴定计算碱解氮含量^[8]。

1.3.2 植被根系还原活性测定 采用氯化三苯基四氮唑(triphenyltetrazolium chloride, TTC)法测定植被根系活性^[9]。TTC是一种常用的氧化还原指示剂,其标准氧化电位为80 mV。在氧化还原反应中,它充当氢受体,当遇到植物根系中生活细胞产生的还原物质时,原本无色的TTC会被还原成红色的三苯基甲臍(triphenylmethane, TTF)。TTF是一种不溶于水的稳定化合物,因此,通过测定TTF的生成量,可以间接反映植物根系呼吸代谢的强度,即根系活性。该原理的基础是植物根系活细胞内的脱氢酶催化呼吸底物氧化时释放的氢能将无色的TTC还原成红色的TTF,TTF的量与根系的活力呈正比,所以根据TTC还原量可测定根系活力。

选取健康、新鲜的植物根系,确保无损伤或病害。用自来水冲洗干净,以去除根系表面的泥土和杂质。随后用滤纸轻轻吸干根系表面的水分,避免多余水分对后续测定造成影响。将洗净并吸干水分的根系切成约1 cm长的小段,称取约5 g根段放入研钵中。接着,加入适量的磷酸缓冲液,使样品在研磨过程中保持pH稳定。用研钵和研杵将根系小段研磨成匀浆,确保样品充分破碎,释放细胞内的脱氢酶。使用漏斗和滤纸将研磨好的匀浆进行过滤,以分离出细胞碎片和液体部分。收集滤液,准备用于后续的TTC反应。

取5 mL滤液,加入等量的TTC溶液,摇匀混合。然后将混合液放置在暗处,避光反应30 min,以确保TTC与根系中的还原物质充分反应。使用可见分光光度计(Lumiso Expert,英国),在波长485 nm处测定反应液的吸光度。此波长下,TTF能够吸收特定的光,因此吸光度值可以反映TTF的生成量。

根据测定的吸光度值,结合标准曲线或已知的TTF浓度与吸光度之间的关系,可以计算出根系中TTF的生成量。进而,根据TTF的生成量与根系活力的正比关系,推算出样品的根系活力。

1.4 数据处理

本研究在数据分析过程中,采用单因素分析方法和回归分析方法,以全面探究不同堆存方式对草甸生态的影响。主要借助SPSS统计软件、Excel办公软件以及R语言进行数据分析。采用单因素分析法考察每一种堆存方式对草甸生态指标(如植被生长情况、土壤理化性质等)的影响。通过SPSS软件中的单因素方差分析(One-way ANOVA)功能,对不同堆存方式下的各指标数据进行差异显著性检验,并采用Tukey法进行多重比较;采用回归分析方法深入探究堆存方式与草甸生态指标之间的定量关系。通过R语言构建回归模型,分析植被活性、土壤理化性质(因变量)之间的相关性和影响程度,揭示各因素之间的内在联系和变化趋势。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质分析

分析6种不同堆存方式对土壤多项理化指标及土壤酶活性的影响(表2),结果显示,各种堆存方式对土壤pH值和有机碳、全氮、全钾、全磷、有效磷、速效钾、碱解氮含量的影响均不显著($P>0.05$),表明这些堆存方式在改变土壤基础理化性质方面作用有限。

2.2 不同堆存方式下植被根系活性

从时间序列上来看,草甸根系活性在6种堆存方式下均呈下降的趋势(图1)。在草甸剥离前期,根系活性出现大幅下降的现象,但是当根系活性下降到一定程度时(下降幅度约为50%),其下降趋势会减缓,直至停滞。

此外,堆存方式对植被根系活性有着明显的影响(图1)。不同堆存方式下根系平均TTC还原强度排序由大到小依次为:SZ3($5.52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)>ZJ3($4.52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)>LK3($4.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)>PP1($3.74 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)>CD5($3.71 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)>CD3($3.54 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)。由此可见, SZ3处理的植被根系活性大于其他处理方式。

2.3 草甸根系活性影响因素分析

在对土壤pH值与植被根系活性的回归分析中(图2)未显示显著相关性,表明pH值对植被根系活性的直接

表 2 土壤理化性质

Table 2 Soil physicochemical properties

指标 Indicator	PP1	LK3	ZJ3	CD3	CD5	SZ3	P 值 P value
pH	4.99	4.90	5.09	5.11	4.98	4.96	>0.05
有机碳 Organic carbon (%)	5.30	4.64	5.88	4.57	4.48	5.66	>0.05
全氮 Total nitrogen (%)	0.36	0.32	0.41	0.31	0.31	0.39	>0.05
全钾 Total potassium (%)	1.33	1.29	1.25	1.27	1.21	1.22	>0.05
全磷 Total phosphorus (mg·kg ⁻¹)	836.85	761.71	872.27	724.88	681.63	864.74	>0.05
有效磷 Available phosphorus (mg·kg ⁻¹)	2.31	1.97	1.86	1.72	2.16	1.57	>0.05
速效钾 Available potassium (mg·kg ⁻¹)	179.35	123.74	216.24	163.56	161.09	193.74	>0.05
碱解氮 Alkaline hydrolyzable nitrogen (mg·kg ⁻¹)	329.27	316.13	395.31	296.79	294.37	381.45	>0.05

注：表中理化性质为 4 次采样的均值。 $P>0.05$ 表示差异不显著。

Note: The physicochemical properties in the Table are the means of four samplings. $P>0.05$ indicates that the difference is not significant.

影响可能较为有限。土壤有机碳含量与植被根系活性同样显示出微弱的正相关趋势。尽管如此,与 pH 值类似,不同堆存方式下的有机碳含量之间也未观察到显著差异($P>0.05$)。这一结果表明,虽然有机碳可能对植被根系的还原能力有一定的正面影响,但这种影响并不足以在不同堆存方式之间产生显著区别。

对于土壤中的全氮、全钾、全磷、有效磷、速效钾以及碱解氮含量等关键养分指标,结果显示,全钾、速效钾和速效磷含量与植被根系活性呈显著正相关($P<0.05$),其他养分指标与植被根系活性没有显著相关性($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 草甸根系活性在堆存过程中的时间序列变化

在本研究中,剥离草甸根系活性在 6 种堆存方式下均表现出随时间推移而逐渐下降的趋势,这一现象与剥离过程中根系与土壤环境之间相互作用的变化密切相关^[5]。根系活性的显著下降主要集中在剥离后的初期阶段,这可能是因为根系失去了土壤的物理保护和支持,同时暴露在外界环境中,导致一系列生理应激反应的发生。已有研究表明,当植物根系突然暴露在新的环境中时,会经历严重的水分和养分失衡,尤其是在水分和氧气供给不足的情况下,根系的呼吸和代谢功能会显著受抑制,从而影响根系吸收水分和养分的能力,还会引发根细胞的氧化应激反应,导致代谢活动迅速减弱^[1]。

随着时间的推移,根系活性下降趋势逐渐减缓并趋于稳定,这可能反映了根系在极端环境中的适应性调整。具体而言,当根系活性下降到一定程度(约为初期的 50%)时,根系细胞的代谢活动可能已经进入一种低耗能的“休眠”状态,以应对不利的外界条件。此种“休眠”状态是一种植物防御机制的体现,在外界条件恢复后,根系可以迅速恢复活性,以重新适应环境并恢复正常的生长功能^[10]。

另外,根系在堆存过程中还可能表现出一定的延迟效应(lag effect),即在初期经历快速下降后,下降速率逐渐减缓。这种延迟可能与根系的结构性特性有关。根系在经历剥离的剧烈胁迫后,初期活性失去较快,但随着时间推移,根细胞可能通过代谢调节进入一种抗胁迫状态,减少代谢需求,从而延缓进一步的活性下降。这种过程类似于植物的“自我保护”机制,在不利环境下将自身能量消耗降至最低,以提高生存概率^[11]。

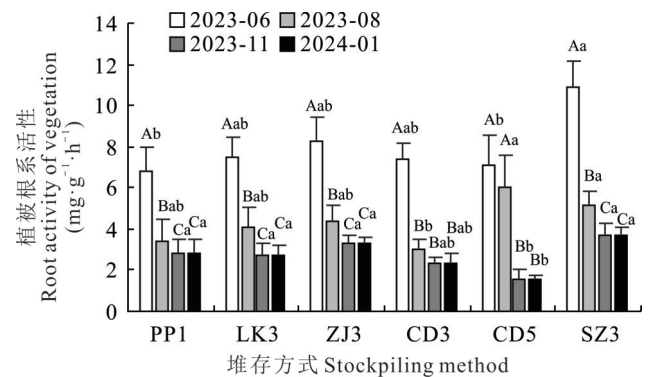


图 1 不同堆存方式下植被根系活性

Fig. 1 Root activity of vegetation under different stockpiling methods

不同大写字母表示同一堆存方式下不同时期植被根系活性间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一时期不同堆存方式间差异显著($P<0.05$)。Different uppercase letters indicate significant differences in root activity of vegetation within the same stockpiling method across different periods ($P<0.05$); different lowercase letters indicate significant differences among different stockpiling methods within the same period ($P<0.05$).

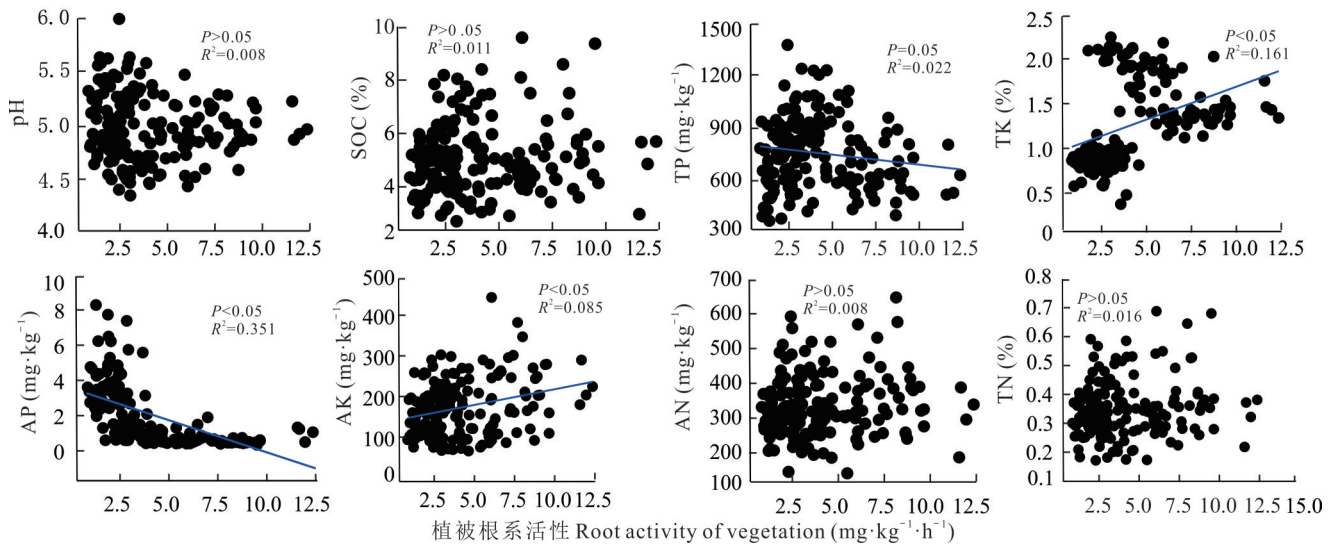


图2 植被根系活性与潜在影响因子回归分析

Fig. 2 Regression analysis of root activity and potential influencing factors

SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; TP: 全磷 Total phosphorus; TK: 全钾 Total potassium; AP: 速效磷 Available phosphorus; AK: 速效钾 Available potassium; AN: 速效氮 Available nitrogen; TN: 全氮 Total nitrogen.

3.2 堆存方式对草甸根系活性的影响

不同堆存方式下草甸根系活性的显著差异揭示了堆存策略在草甸生态系统恢复中的关键作用。结果表明, 水保支架法(SZ3)在维持根系活性方面表现出明显的优势, 这可能与该方法能有效保持土壤理化性质的稳定性密切相关。SZ3堆存方式通过提供更好的通气性和保水性, 创造了一个有利于根系持续代谢活动的微环境, 从而减缓了根系活性的下降速度^[11]。土壤的通气性和水分含量是影响根系活性的两个关键因素。SZ3堆存方式通过支架将剥离的草甸抬高, 避免了土壤的过度压实, 同时保留了较好的土壤孔隙度, 确保了根系能够持续获取足够的氧气, 这对于维持根系的呼吸作用至关重要^[12]。此外, 支架的使用可能有助于减少土壤水分的快速蒸发, 使得根系在干燥环境中仍能保持相对稳定的水分供应, 从而支持了根系的正常代谢功能^[13]。

与此相反, 平铺法(PP1)和重叠法(CD3、CD5)的根系活性较低, 可能是由于这些堆存方式导致土壤结构被压实, 通气性和水分保持能力下降。在这些方式下, 土壤中的孔隙减少, 空气流通受阻, 导致根系无法获得充足的氧气, 进而抑制了根系的呼吸作用和能量代谢^[14]。同时, 土壤水分的流失可能加剧了根系的干旱胁迫, 进一步降低了根系的活性。已有研究表明, 土壤的物理结构特别是其通气性和水分保持能力, 对植物根系的生理功能具有决定性影响^[15]。支架法在这些方面的优势, 使其成为一种更加有效的草甸堆存方式, 不仅能够延缓根系活性的衰退, 还可能在长时间内支持根系的部分功能恢复, 这对高寒草甸生态系统的长远修复具有积极意义。

这些发现与前人的研究结果基本一致。例如, 蒋希雁等^[16]研究发现植被根系对减少水的渗入量有着显著作用, 这与植被根系受环境因素影响的主题相关。植被根系的存在对土体的物理性质产生影响, 而堆存方式也会改变土壤环境, 进而影响植被根系活性。另外, Papdi等^[17]研究了不同覆盖材料对土壤水分和微生物活性的调节作用, 结果显示覆盖物能改变土壤环境的理化性质, 从而影响微生物的活性和根系的生长, 间接表明不同的处理方式对植被根系活性有影响。

3.3 草甸根系活性潜在影响因子分析

在探讨草甸根系活性的潜在影响因子时, 本研究发现土壤钾含量与植被根系活性呈正相关关系^[18]。钾元素是植物生长发育所必需的重要营养元素之一, 它在维持细胞渗透压、调节酶活性以及促进光合作用等方面发挥着关键作用^[19]。因此, 土壤中钾含量的增加可能直接促进了草甸根系的呼吸作用和代谢活动, 从而提高了植被根系活性。这一发现与前人的研究结果相一致, 表明钾元素对植物根系的活性具有重要影响。足够的钾有助于植物抵抗病害和虫害。它可以增强植物的细胞壁, 提高植物的抗病性。此外, 钾有助于根系对其他养分(如氮、磷和

镁)的吸收。它可以增加根系的活性,从而提高养分吸收效率^[20-21]。

然而,本研究中并未发现其他土壤养分指标(如全氮、全磷和碱解氮)与根系活性之间的显著相关性。这可能是由于这些养分在土壤中的存在形态和可利用性受到多种因素的综合影响,导致它们对根系活性的直接作用相对较弱^[14,22]。此外,植物对养分的吸收和利用还受到遗传特性、生长阶段以及环境条件等多重因素的调控,这进一步增加了养分与根系活性关系的复杂性^[23]。尽管如此,这些养分仍然是植物正常生长发育所必需的,它们在维持植物生理功能和代谢活动方面发挥着重要作用。因此,在未来的研究中可以进一步探讨这些养分与其他生物因素(如土壤微生物、根系分泌物等)的相互作用关系,以便更全面地了解它们对草甸根系活性的影响机制。

除了土壤养分之外,土壤pH值、有机碳含量以及土壤酶活性等也是影响草甸根系活性的重要因素^[24]。本研究发现土壤pH值与根系活性之间呈现出微弱的正相关趋势,尽管未达到显著水平,但暗示了适宜的土壤pH值可能有利于根系的生长和活性。土壤pH值能够影响土壤养分的有效性、微生物的活性以及根系的代谢过程,从而对根系的活性产生影响^[25]。有机碳作为土壤养分的重要来源之一,其含量的增加可能有助于提升根系的营养吸收能力和代谢活动水平^[26]。而土壤酶活性则能够反映土壤微生物的活性和土壤养分的转化速率,与根系的生长和活性密切相关。因此,在未来的研究中可以进一步探讨这些因素与草甸根系活性之间的关系及其作用机制。

3.4 剥离堆存后草甸回铺的成活率探讨

有研究表明,草甸在剥离和堆存过程中,由于根系与原生土壤环境的分离,根系活性会有所下降,这种变化可能会对回铺后的初期成活率带来一定影响,根系无法完全吸收水分和养分,且受到环境变化的胁迫,根系活性因此减弱^[27]。然而,研究也指出,尽管根系活性降低,但并未完全丧失,通过科学的养护管理措施,可以有效促进根系的恢复,进而提高成活率^[28]。

具体而言,适时的浇水、适量的施肥、遮阳处理以及生物菌剂的应用等措施,都能改善草甸根系的生存环境^[29]。例如,在青藏高原地区的草甸回铺实践中,通过一系列的科学养护管理措施,如遮阳防护、定期洒水保持土壤湿润,以及施用生物菌剂以增强土壤微生物活性等,回铺草甸的成活率接近100%^[30]。这不仅表明科学管理措施在提升回铺草甸存活率方面的重要性,也为高寒草甸生态恢复提供了切实可行的技术方案。

因此,尽管草甸在剥离和堆存过程中面临活性下降的挑战,但只要在回铺后实施合理的养护管理,仍能保障较高的存活率,最终达到理想的生态恢复效果。这一过程进一步强调了养护管理在草甸生态系统恢复中的重要作用,尤其是在高寒地区复杂气候条件下,更需要采用科学的方法确保回铺草甸的长期稳定性和生态功能恢复。

4 结论

本研究深入探讨了6种不同堆存方式对草甸根系活性的影响,并综合分析了根系活性的潜在影响因子。结果显示,水保支架法在保护草甸根系活性方面展现出明显优势。同时,研究还发现土壤钾含量对根系活性具有重要影响,揭示了钾元素在促进根系呼吸和代谢活动中的关键作用。这些发现不仅为优化堆存技术、提升草甸生态系统健康与可持续性提供了科学依据,也为深入理解草甸根系活性的调控机制提供了有益参考。因此,在剥离草甸进行生态恢复和养护管理时,选择合适的堆存方式至关重要。支架法,特别是水土保持支架法,为草甸的生态恢复提供了一种可行的技术手段,其优越的土壤物理条件为根系提供了更好的生存环境。未来的研究可以进一步优化这种堆存方式,结合其他生态恢复措施,如适当的水分管理和施肥策略,最大限度地促进草甸生态系统的恢复与稳定。

参考文献 References:

- [1] Yang X Y, Xia T Y, Wu T. Potassium nutrient stress in plants: A review. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(18): 101-106.
杨晓燕, 夏体渊, 吴甜. 植物钾营养胁迫研究进展. *中国农学通报*, 2023, 39(18): 101-106.
- [2] Du Q, Zhao X H, Jiang C J, *et al.* Effect of potassium deficiency on root growth and nutrient uptake in maize (*Zea mays* L.). *Agricultural Sciences*, 2017, 8(11): 1263-1277.

- [3] Liu C E, Yang Y X, Yang Y. Distribution, accumulation and dynamics of kalium of wetland plants in upper shoal of the Jiuduansha, Shanghai. *Wetland Science*, 2008, 6(2): 185–191.
刘长娥, 杨永兴, 杨杨. 九段沙上沙湿地植物钾元素的分布、积累与动态. *湿地科学*, 2008, 6(2): 185–191.
- [4] Luo T, Yin X D, Qu S M, *et al.* Effects of photovoltaic panels on quantitative characteristics of plant functional groups in meadow steppe. *Grassland and Turf*, 2023, 43(6): 32–37.
罗厅, 尹晓冬, 曲善民, 等. 光伏电板对草甸草原植物功能群数量特征的影响. *草原与草坪*, 2023, 43(6): 32–37.
- [5] Tian Z Q, Zhang Y, Liu X, *et al.* Effects of photovoltaic power station construction on terrestrial environment: Retrospect and prospect. *Environmental Science*, 2024, 45(1): 239–247.
田政卿, 张勇, 刘向, 等. 光伏电站建设对陆地生态环境的影响: 研究进展与展望. *环境科学*, 2024, 45(1): 239–247.
- [6] Liu L J. Study on spatial heterogeneity of soil water and soil total carbon of alpine area in eastern Qinghai–Tibetan Plateau. Chengdu: Sichuan Normal University, 2008.
柳领君. 青藏高原东缘高寒地区土壤水分与土壤全碳空间异质性研究. 成都: 四川师范大学, 2008.
- [7] Zhou Z Y, Cui B L, Chen K L, *et al.* Effects of simulated changes in precipitation on soil respiration in alpine lakeshore wetlands. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(5): 130–137.
周祉蕴, 崔博亮, 陈克龙, 等. 模拟降雨量变化对高寒湖滨湿地土壤呼吸的影响. *水土保持研究*, 2023, 30(5): 130–137.
- [8] Bao S D. Soil agricultural and chemical analysis (3rd edition). Beijing: China Agricultural Press, 1999.
鲍士旦. 土壤农化分析(第3版). 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [9] Ye B X, Mao D C, Liu X C. Study on the correlation of root activity and photosynthetic rate in the later growth duration of super-wheat. *Shandong Agricultural Sciences*, 2005(4): 4–16.
叶宝兴, 毛达超, 刘学春. 超级小麦生育后期根系活力与净光合速率相关性的研究. *山东农业科学*, 2005(4): 4–16.
- [10] Mareri L, Parrotta L, Cai G. Environmental stress and plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(10): 16–29.
- [11] Caboň M, Galváněk D, Etheredge A P, *et al.* Mulching has negative impact on fungal and plant diversity in Slovak oligotrophic grasslands. *Basic and Applied Ecology*, 2021, 52(2): 24–37.
- [12] Han X, Li Y H, Du X F, *et al.* Effect of grassland degradation on soil quality and soil biotic community in a semi-arid temperate steppe. *Ecological Processes*, 2020, 63(9): 1–11.
- [13] Li C X, Wu X B, Jin Y Z. Advances on plant–microbe interaction mediated by root metabolites. *Acta Microbiologica Sinica*, 2022, 62(9): 3318–3328.
李春霞, 吴兴彪, 靳亚忠. 根系代谢物介导的植物–微生物互作的研究进展. *微生物学报*, 2022, 62(9): 3318–3328.
- [14] Wu J Q, Ma W W, Li G, *et al.* Effects of four vegetation types on soil physical characteristics and permeability in Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(4): 133–138.
吴江琪, 马维伟, 李广, 等. 黄土高原4种植被类型对土壤物理特征及渗透性的影响. *水土保持学报*, 2018, 32(4): 133–138.
- [15] You Y, Jiang W, Yi L, *et al.* Seeding alpine grasses in low altitude region increases global warming potential during early seedling growth. *Journal of Environmental Management*, 2024, 356(4): 120–138.
- [16] Jiang X Y, Yang S Q, Feng F, *et al.* Experimental study on the influence of vegetation roots on soil permeability. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2022, 45(3): 370–375.
蒋希雁, 杨尚青, 冯峰, 等. 植被根系对土体渗透特性影响的试验研究. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2022, 45(3): 370–375.
- [17] Papdi E, Veres A, Kovács F, *et al.* How different mulch materials regulate soil moisture and microbiological activity? *Journal of Central European Green Innovation*, 2022, 10(9): 26–38.
- [18] Wang T. The impact of photovoltaic power construction on soil and vegetation in Jingbian County. Yangling: Northwest A&F University, 2015.
王涛. 光伏电站建设对靖边县土壤、植被的影响研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [19] Li L Z, Liu H, Shi X F, *et al.* A brief analysis of the impact of photovoltaic power stations on the environment. *Science & Technology Information*, 2012, 41(12): 91.
李丽珍, 刘辉, 史学峰, 等. 浅析光伏电站对环境的影响. *科技信息*, 2012, 41(12): 91.
- [20] Geng X D, Xu R, Liu Y W. Responses of ecosystem carbon exchange to multi-level water addition in an alpine meadow in Namtsu of Qinghai–Xizang Plateau, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(3): 397–405.

- 耿晓东, 旭日, 刘永稳. 青藏高原纳木错高寒草甸生态系统碳交换对多梯度增水的响应. 植物生态学报, 2018, 42(3): 397–405.
- [21] Zhang J, Yuan M S, Zhang J, *et al.* Responses of the NDVI of alpine grasslands on the Qinghai–Tibetan Plateau to climate change and human activities over the last 30 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(18): 6269–6281.
张江, 袁旻舒, 张婧, 等. 近30年来青藏高原高寒草地NDVI动态变化对自然及人为因子的响应. 生态学报, 2020, 40(18): 6269–6281.
- [22] Rondina A B L, Tonon B C, Lescano L E A M, *et al.* Plants of distinct successional stages have different strategies for nutrient acquisition in an Atlantic rain forest ecosystem. *International Journal of Plant Sciences*, 2019, 180(3): 186–199.
- [23] Zheng Z, Wu X, Gong L, *et al.* Studies on the correlation between $\delta^{13}\text{C}$ and nutrient elements in two desert plants. *Forests*, 2023, 14(12): 23–38.
- [24] Tang K, Zhu W W, Zhou W X, *et al.* Research progress on effects of soil pH on plant growth and development. *Crop Research*, 2013, 27(2): 207–212.
唐琨, 朱伟文, 周文新, 等. 土壤pH对植物生长发育影响的研究进展. 作物研究, 2013, 27(2): 207–212.
- [25] Lian M H, Sun L N, Hu X M, *et al.* Effect of pH on cadmium speciation in rhizosphere soil solutions of different cadmium accumulating plants. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(1): 130–137.
廉梅花, 孙丽娜, 胡筱敏, 等. pH对不同富集能力植物根际土壤溶液中镉形态的影响. 生态学杂志, 2015, 34(1): 130–137.
- [26] Ni H J, Su W H, Fan S H, *et al.* Responses of forest soil nutrient cycling to nutrient input modes: A review. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(3): 863–872.
倪惠菁, 苏文会, 范少辉, 等. 养分输入方式对森林生态系统土壤养分循环的影响研究进展. 生态学杂志, 2019, 38(3): 863–872.
- [27] Centenaro G, Hudek C, Zanella A, *et al.* Root-soil physical and biotic interactions with a focus on tree root systems: A review. *Applied Soil Ecology*, 2018, 123(2): 318–327.
- [28] Yang J X, Yin W J, Yang X R. Application of turf stripping and re-laying technology in the Sichuan-Tibet power grid interconnection project. *Technology Innovation and Application*, 2014(19): 24–25.
杨建霞, 尹武君, 杨晓瑞. 草皮剥离回铺技术在川藏联网工程中的应用. 科技创新与应用, 2014(19): 24–25.
- [29] Kong Y Y, Luo Q Y, Chen Z. Study on the characteristics of vegetation composition and community succession of alpine meadow under three management modes. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2020, 35(6): 1046–1053.
孔杨云, 罗巧玉, 陈志. 3种管理模式下高寒草甸植物群落构成及稳定性研究. 云南农业大学学报(自然科学), 2020, 35(6): 1046–1053.
- [30] Xian G. Huadian Changdu New Energy Company: Top-level design draws a green blueprint, harmonious coexistence guards the third pole. (2024-06-06)[2025-01-03]. https://k.sina.com.cn/article_7517400647_1c0126e4705905939s.html.
鲜敢. 华电昌都新能源公司: 顶层设计绘就绿蓝图, 和谐共生守护第三极. (2024-06-06)[2025-01-03]. https://k.sina.com.cn/article_7517400647_1c0126e4705905939s.html.