基于多方法评价的新疆荒漠化矿区砾幕层重构粒径配置优选

代 绅[1], 王新瑞[2], 王 阳[1], 李永成[1], 林 军[1], 刘 英[3], 毕银丽[4]

(1.国能新疆矿业红沙泉二矿有限公司, 新疆 昌吉 831800;
2.新疆能源化工有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830027; 3.西安科技大学 测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054; 4.西安科技大学 西部矿山生态环境修复研究院, 陕西 西安 710054)

摘 要: [目的]开展矿区不同粒径配置(粒径大小、砾石覆盖度)对砾幕层重构效果的试验,为矿区砾幕层重构和生态修复提供科学依据。[方法]在新疆准东煤田红沙泉矿区开展了不同粒径配置下的砾幕层重构试验,共设计不同砾石粒径大小与覆盖度组合样方44个。分析不同样方的土壤紧实度、土壤结皮厚度及风蚀量,采用砾幕层重构效果三维评价指数、熵权-TOPSIS法及等权-TOPSIS法进行综合评价并确定砾幕层重构的最佳粒径组合和砾石覆盖度。[结果]①各样方在土壤紧实度、土壤结皮厚度及风蚀量3项指标上表现出一致的变化规律,砾幕层重构效果较好的样方普遍具有紧实度高,结皮厚,风蚀量低的特征;②通过砾幕层重构效果三维评价指数、熵权-TOPSIS法及等权-TOPSIS法的综合评价结果可知,Ⅲ-JX(极小粒径,90%砾石覆盖度)样方的综合得分最高,达到0.909 2,表明该粒径配置最有利于砾幕层重构;监测期间,最佳样方(Ⅲ-JX)的砾幕层结构经历了由初期松散向后期致密稳定的演变过程,说明极小粒径在高覆盖条件下能够有效填充地表孔隙,增强砾幕层结构完整性与稳定性,从而显著促进砾幕层的形成与稳定发展。[结论]人工配置粒径处理整体优于对照样方,能够有效提高砾幕层的致密性与稳定性;在相同粒径条件下,提高砾石覆盖度可普遍增强砾幕层稳定性,极小粒径和小粒径对砾石覆盖度变化最为敏感;在相同砾石覆盖度下,极小粒径与合理的粒径配置对砾幕层的重构效果更为显著,能够形成更加稳定和紧密的砾幕层结构。

关键词: 砾幕层重构; 粒径组合; 砾石覆盖度; 新疆荒漠化矿区

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)05-0054-12 **中图分类号:** S157.2, X171.4, TD88

文献参数: 代绅, 王新瑞, 王阳, 等.基于多方法评价的新疆荒漠化矿区砾幕层重构粒径配置优选[J].水土保持通报,2026,46(5):54-65. Dai Shen, Wang Xinrui, Wang Yang, et al. Optimal selection of particle size configuration for gravel-mulch layer reconstruction in desertified mining areas of Xinjiang based on multi-method evaluation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(5):54-65.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.030 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.05.030**

Optimal selection of particle size configuration for gravel-mulch layer reconstruction in desertified mining areas of Xinjiang based on multi-method evaluation

Dai Shen[1], Wang Xinrui[2], Wang Yang[1], Li Yongcheng[1], Lin Jun[1], Liu Ying[3], Bi Yinli[4]

(1.*Guoneng Xinjiang Mining Hongshaquan No. 2 Mine Co., Ltd., Changji, Xinjiang* 831800, *China*; 2.*Xinjiang Energy and Chemical Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang* 830027, *China*; 3.*College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*; 4.*Institute of Ecological Environment Restoration in Mine Areas of West China, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*)

Abstract: [Objective] Experiments on the effects of different particle size configurations (particle size and gravel coverage level) on gravel-mulch layer reconstruction were conducted in order to provide a scientific basis for gravel-mulch layer reconstruction and ecological restoration in mining areas. [Methods] A gravel-mulch layer

收稿日期:2026-03-16 **修回日期:**2026-04-14 **采用日期:**2026-04-15

资助项目:陕西省自然科学基础研究计划项目"黄河流域煤矿区生态系统格局、质量、服务综合评估"(2023-JC-YB-440),"气候变化和城市热浪背景下城市冷岛与热岛分析"(2023-JC-YB-266)

第一作者:代绅(1988—),男(汉族),山东省聊城市人,工程师,学士,主要从事矿区生态修复方面的研究。Email:786137508@qq.com。

通信作者:刘英(1982—),女(汉族),山东省滨州市人,副教授,博士,主要从事矿区环境遥感方面的研究。Email:liuying712100@163.com。

reconstruction experiment involving different particle size configurations was conducted in the Hongshaquan mining area of the Zhundong coalfield, Xinjiang Wei Autonomous Region. A total of 44 sample plots were established using different combinations of gravel particle size and coverage level. Soil compactness, soil crust thickness, and wind erosion amount were measured and analyzed for each plot. The reconstruction performance of the gravel-mulch layer was comprehensively evaluated using a three-dimensional evaluation index, the entropy-weighted TOPSIS method, and the equal-weighted TOPSIS method, thereby determining the optimal combination of particle size and gravel coverage level for gravel-mulch layer reconstruction. [Results] ① The various sample plots exhibited consistent variation patterns across three indicators: soil compactness, soil crust thickness, and wind erosion amount. Plots demonstrating superior gravel-mulch layer reconstruction generally featured high compactness, thick crusts, and low wind erosion amounts. ② Comprehensive evaluation results, derived from the three-dimensional evaluation index for gravel-mulch layer reconstruction, the entropy-weighted TOPSIS method, and the equal-weighted TOPSIS method: indicated that the Ⅲ-JX plot (featuring the extremely small particle size and 90% gravel coverage) achieved the highest comprehensive score of 0.909 2, demonstrating that this specific particle size configuration was most conducive to gravel-mulch layer reconstruction. During the monitoring period, the gravel-mulch layer structure of the optimal plot (Ⅲ-JX) evolved from an initially loose state to a dense, stable one. This indicated that extremely small particle size under high coverage conditions effectively filled surface pores and enhanced the structural integrity and stability of the gravel-mulch layer, thereby significantly promoting its formation and stable development. [Conclusion] Artificially configured particle size treatments generally outperform the control plots and effectively enhance the compactness and stability of the gravel-mulch layer. Under the same particle size conditions, increasing gravel coverage generally improves the stability of the gravel-mulch layer, and extremely small and small particle sizes are most sensitive to variations in gravel coverage. At the same gravel coverage, extremely small particles and appropriate particle size configurations have more pronounced effects on gravel-mulch layer reconstruction, resulting in a more stable and compact gravel-mulch layer structure.

Keywords: gravel-mulch layer reconstruction; particle size combination; gravel coverage; desertified mining areas of Xinjiang Wei Autonomous Region

干旱荒漠区地表广泛分布着天然砾幕层。它其是在持续风蚀作用下,土壤表层的细土不断流失,较大粒径的砾石和碎屑残留并裸露于地表而形成特有的地表防护屏障[1-2]。近年来,随着国家能源结构不断向西部转移,新疆地区已成为中国重要的能源接替区和战略资源储备区,全区煤炭预测资源量高达2.19×10^8t,占全国总量40%以上,居全国第一[3-4]。在推动区域经济发展的同时,大规模煤炭开采活动破坏了地表植被及土地利用方式,使原有天然砾幕层遭到损毁,导致地表细颗粒暴露、风蚀加剧,破坏了原有稳定的生态系统、加剧了区域荒漠化风险[5-6]。目前,砾幕层的破坏已成为干旱区矿山生态问题之一[7]。在此背景下,通过人工重构砾幕层,在地表形成由特定粒径和覆盖度砾石组成的防护性覆盖结构,可提高地表粗糙度并产生遮蔽效应,削弱近地层风速和降雨过程中雨滴动能对地表的直接作用,从而抑制细颗粒物质的起动与迁移。同时,砾石覆盖能够减少土壤直接暴露面积,改善地表水热条件,促进细颗粒沉积与土壤结皮形成,增强表层土体的稳定性并降低风蚀强度。上述作用表明,砾幕层重构通过调控地表结构与侵蚀过程,能有效提升地表稳定性,但鉴于天然砾幕层受损后恢复难度较大,探索高效且可行的砾幕层重构方法已成为干旱矿区生态修复研究中的重要方向。

荒漠化露天矿区砾幕层重构是指在砾幕层受露天采矿扰动而破坏的情况下,采用合适的物理、化学与工程技术手段,对其进行重构与优化,以恢复并形成稳定、功能完善的砾幕层剖面[8]。目前,关于砾幕层的研究主要集中在砾幕层形成机制、调查样方确定以及生态功能作用等方面。在形成机制研究中,Mu Yue等[9]基于戈壁砾幕层地表砾石形态特征的空间变化,对砾幕层的形成过程进行了探讨;Xu Jiahong等[10]指出干旱荒漠区在持续风蚀作用下,细颗粒物质不断被搬运,地表逐渐残留粗颗粒砾石,从而形成稳定的砾石覆盖层。在方法研究方面,裴浩等[11]以荒漠区土地砾化监测为对象,系统分析了不同采样方案和样方设置方式对砾石覆盖度表征结果的影响,认为合理的样方尺度与布局是提高调查砾

幕层代表性和可靠性的关键；张岚彪等[12]通过对比不同砾石覆盖度测量方法，指出调查样方的选择及测量方式会显著影响砾石覆盖特征的判识结果。在生态功能研究方面，崔艳等[13]研究表明新疆露天煤矿开发造成的砾幕层结构破坏是导致戈壁区生态退化的重要原因，生态恢复应优先重视砾幕层的保护与重构；李道进等[14]指出矿山工程扰动破坏原生砾幕层是引发区域风蚀增强和生态退化的重要原因。然而，现有研究多侧重于砾幕层形成原因、调查方法和生态功能认知，对矿区砾幕层重构的研究较少，未明确给出砾幕层重构中最佳粒径大小、粒径组合及覆盖度等。除此之外，现有研究大多侧重于单一指标或方法，尚未将土壤紧实度、土壤结皮厚度以及风蚀量等能够综合反映砾幕层稳定性与抗蚀性能的关键指标纳入统一的综合评价体系中，因此难以确定砾幕层重构的最优方案。本研究在新疆准东煤田红沙泉矿区开展不同粒径配置（粒径大小、砾石覆盖度）对砾幕层重构效果的试验，通过定期监测不同样方的土壤紧实度、土壤结皮厚度及风蚀量三项关键指标，构建一种砾幕层重构效果三维评价指数，并结合熵权-TOPSIS法和等权-TOPSIS法综合评价不同处理组的重构效果优劣，筛选出砾幕层重构试验中最佳粒径配置方案，为干旱荒漠矿区砾幕层重构提供科学依据与技术参考，并为区域生态恢复技术体系的构建提供理论支撑。

1 研究区概况

准东煤田红沙泉矿区位于新疆维吾尔自治区昌吉回族自治州奇台县东部，地理坐标为东经90.26°—90.42°，北纬44.41°—44.52°，距奇台县城东北约78 km，总面积约93.43 km^2[15-16]。地势东南高，西北低。地貌类型包括冲积湖平原、风积沙地、剥蚀丘陵及波状平原等，海拔657～753 m，相对高差约30 m，最大可达96 m[17-18]。准东煤田红沙泉矿区属于大陆性干旱荒漠气候，年温差与昼夜温差显著，常年多西北风且风力较大[19]。依据奇台县气象局观测数据，6—8月为夏季，气候干燥炎热，日最高气温达到43.2 ℃；年均降水量仅106 mm，年蒸发量1 149～2 382 mm[20]。植被类型为温带荒漠植被，主要为旱生与超旱生灌木、小半灌木，如麻黄、猪毛菜等耐旱植物，植被覆盖率为2%。区内地表砾幕层分布广泛，其主要由土壤结皮和地表砾石共同构成，是准东煤田红沙泉矿区最重要的生态屏障之一，在矿区范围内的覆盖比例高达65%～80%。但在受到开采扰动后，砾幕层的表面结构被破坏，土壤结皮和砾石层的完整性遭到削弱，抗风蚀能力逐渐衰退。

2 材料与方法

2.1 样地布设

课题组于2025年8月7日在准东煤田红沙泉矿区内选择未受到人为破坏及相对平坦开阔的区域作为试验样地（图1），并于8月8—10日开展野外实地砾幕层重构试验样方布设与测量工作。指标监测工作自2025年8—11月连续观测，通过连续跟踪观测砾幕层结构变化，系统分析其演变特征及稳定过程。



图1 试验样地及样方布设

Fig.1 Layout of test site and sample plots

2.2 试验方法

在选定的试验样地内，布设44个规格统一为1 m×1 m的标准样方，样方间距控制在0.5 m，以减少样方间的互相干扰（图1）。试验具体过程为：①对各样方原有砾幕层进行统一的标准化破坏处理，即采用工具对样方地表砾幕层进行翻动与扰动，使原生砾幕层结构完全破坏，以消除天然砾幕层对后续重构试验的影响；②完成破坏处理后，参考已有研究[12]中关于砾石粒径划分的分类标准，并结合研究区实地砾石粒径分布特征，利用筛网对样方内砾石进行分级筛选，将砾石划分为极小粒径（5～10 mm）、小粒径（10～20 mm）、中粒径（20～30 mm）和大粒径（30～40 mm）4个粒径等级（图2）；③为系统评估不同粒径与砾石覆盖度组合对砾幕层重构过程的影响，本研究设置50%，70%和90%这3种砾石覆盖度水平，并依据试验设计在各样方中布置相应的粒径等级与砾石覆盖度处理；④将粒径及砾石覆盖度的对照样方（如Ⅰ-D对照、Ⅰ-Z对照等）与对应样方的处理保持一致，用于补充样方数量，增强数据稳定性；⑤对照1和对照2样方则将砾石全部筛除，仅保留裸土，用以提供完全无砾石条件下的参照。各样方粒径配置见表1。



a 5~10 mm粒径　b 10~20 mm粒径　c 20~30 mm粒径　d 30~40 mm粒径

图 2　不同粒径砾石的筛分结果

Fig.2　Sieving results of gravel with different particle sizes

表 1　各样方粒径配置

Table 1　Particle size configuration for each sample plot

样方名称	粒径大小	砾石覆盖度/%	样方名称	粒径大小	砾石覆盖度/%
Ⅰ-D	大	50	Ⅲ－JX	极小	90
Ⅰ-D对照	大	50	Ⅲ－JX对照	极小	90
Ⅱ-D	大	70	JX＋X＋Z＋D①	极小＋小＋中＋大	50
Ⅱ-D对照	大	70	JX＋X＋Z＋D②	极小＋小＋中＋大	70
Ⅲ-D	大	90	JX＋X＋Z＋D③	极小＋小＋中＋大	90
Ⅲ-D对照	大	90	X＋Z＋D①	小＋中＋大	50
Ⅰ-Z	中	50	X＋Z＋D②	小＋中＋大	70
Ⅰ-Z对照	中	50	X＋Z＋D③	小＋中＋大	90
Ⅱ-Z	中	70	JX＋X＋Z①	极小＋小＋中	50
Ⅱ-Z对照	中	70	JX＋X＋Z②	极小＋小＋中	70
Ⅲ-Z	中	90	JX＋X＋Z③	极小＋小＋中	90
Ⅲ-Z对照	中	90	Z＋D①	中＋大	50
Ⅰ-X	小	50	Z＋D②	中＋大	70
Ⅰ-X对照	小	50	Z＋D③	中＋大	90
Ⅱ-X	小	70	JX＋Z①	极小＋中	50
Ⅱ-X对照	小	70	JX＋Z②	极小＋中	70
Ⅲ-X	小	90	JX＋Z③	极小＋中	90
Ⅲ-X对照	小	90	JX＋X①	极小＋小	50
Ⅰ-JX	极小	50	JX＋X②	极小＋小	70
Ⅰ-JX对照	极小	50	JX＋X③	极小＋小	90
Ⅱ-JX	极小	70	对照①	无	无
Ⅱ-JX对照	极小	70	对照②	无	无

2.3　测定指标及方法

本研究以土壤紧实度、土壤结皮厚度和风蚀量作为核心评价指标,对砾幕层重构试验效果进行综合评估,并在8—11月期间对土壤紧实度和侵蚀针高度实施7次连续监测,其中风蚀量根据相邻两期侵蚀针高度变化计算得到,共获得6期风蚀量数据;对土壤结皮厚度实施6次连续监测,以便系统分析幕层重构过程中结构特征及抗风蚀功能的动态变化。土壤紧实度能够揭示砾幕层再生后土体结构的稳定性与抗压性,是衡量砾幕层形成质量的重要物理参数,在1 m×1 m的样方内,采用土壤硬度计在样方四周及中心位置布设采样点取平均值作为该样方的最终土壤紧实度指标;土壤结皮厚度直接影响地表的抗风蚀能力,是砾幕层重构效果的关键表征,利用游标卡尺测定砾幕层结皮厚度;风蚀量则是地表抗风扰动能力的直观反映,在每个1 m×1 m样方的东北、东南、西南、西北方向及样方中心位置垂直插入侵蚀针,定期测量并记录各侵蚀针露出地表的高度,通过比较同一侵蚀针在不同监测时期的高度变化,可计算相应样方的风蚀量。3项指标相互补充,从结构稳定性、表层致密性与抗风蚀效果3个方面共同构成了对砾幕层重构质量的完整评价体系。

2.4　砾幕层重构效果三维评价指数构建

利用三维空间原理,将土壤紧实度、土壤结皮厚

度及风蚀量分别作为三维空间的坐标轴，利用欧式空间距离的大小表征砾幕层重构效果，构建砾幕层重构效果三维评价指数（three-dimensional evaluation index of gravel-mulch layer reconstruction effect，TGEI）。

由于三项指标的数值范围不同，因此需要将3项指标进行归一化。

正向指标：

$$NZ^K=\frac{Z^K-Z^K_{min}}{Z^K_{max}-Z^K_{min}} \tag{1}$$

负向指标：

$$NZ^K=\frac{Z^K_{max}-Z^K}{Z^K_{max}-Z^K_{min}} \tag{2}$$

式中：NZ^K表示第k个指标的归一化Z值；Z^K（k=1，2，3）分别表示指标土壤紧实度、土壤结皮厚度和风蚀量的Z值；Z^K_{max}，Z^K_{min}分别表示第k个指标的最大值和最小值。

图3为土壤紧实度、土壤结皮厚度和风蚀量在三维空间中所构建的砾幕层重构效果三维评价指数。点O(0，0，0)是最差方案，代表最低的土壤紧实度、最薄的结皮厚度和最高的风蚀量；点W(1，1，1)是最佳方案，表示最高的土壤紧实度、最大的结皮厚度和最低的风蚀量。任意样方P在三维空间中的位置，代表其三项指标的综合水平特征。样方P与最差点O的欧氏距离|OP|越大，说明其偏离不利状态越远，综合状况越好。因此，将|OP|定义为砾幕层重构效果三维评价指数（TGEI指数），用于衡量各样方的砾幕层重构效果。

$$TGEI=\sqrt{\left(NZ^1-NZ^1_{min}\right)^2+\left(NZ^2-NZ^2_{min}\right)^2+\left(NZ^3-NZ^3_{min}\right)^2} \tag{3}$$

式中：NZ^1，NZ^2，NZ^3分别表示土壤紧实度、土壤结皮厚度和风蚀量的归一化Z值；NZ^1_{min}，NZ^2_{min}，NZ^3_{min}为土壤紧实度、土壤结皮厚度和风蚀量的归一化最小Z值。

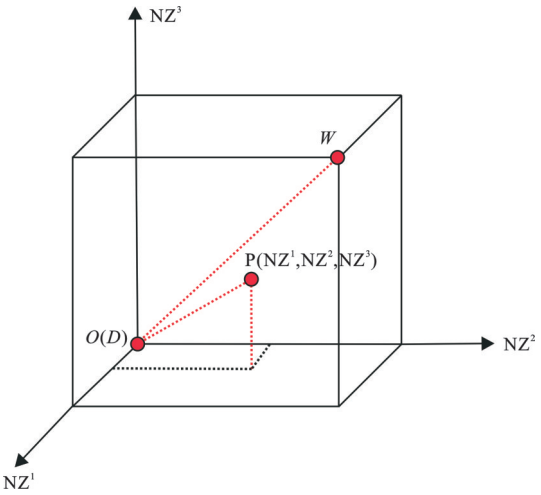


图3 三维空间中砾幕层重构效果三维评价指数（TGEI）的定义

Fig.3 Definition of three dimension evaluation index (TGEI) of gravel-much layer reconstruction in three-dimensional space

2.5 熵权-TOPSIS法与等权-TOPSIS法评价

采用熵权法及等权法确定砾幕层重构试验中各指标的权重。熵权法是一种客观赋权方法，通过指标数据确定权重，提高评价结果的客观性和准确性[21]。等权法则是对3项指标进行等权重分配，确保不同指标在评价体系中具有均等的初始影响力。在此基础上，利用TOPSIS法对各处理的综合质量进行评价[22]。TOPSIS方法通过计算正负理想解距离来衡量各样方的相对优劣，其中，正理想解距离代表各指标均达到最优水平的理想状态，负理想解距离则代表各指标处于最劣水平的状态。与正理想解的距离越近，而与负理想解的距离越远，则该方案综合质量越优。

2.6 最佳粒径配置的确定方法

为确定最佳的粒径配置方案，本研究基于砾幕层重构效果三维评价指数，结合熵权-TOPSIS法与等权-TOPSIS法的评价结果，将3种评价方法所得得分赋予相同权重后进行加权平均，得到最终的综合评价得分，以此来确定最佳粒径配置方案。

$$S=\frac{1}{3}\left(S_{TGEI}+S_{EWT}+S_{UWT}\right) \tag{4}$$

式中：S表示最终综合评价得分；S_{TGEI}表示砾幕层重构效果三维评价指数得分；S_{EWT}表示熵权-TOPSIS方法得分；S_{UWT}表示等权-TOPSIS方法得分。

2.7 数据统计分析

使用Microsoft Excel 2021软件对测定的试验数据进行整理与统计；采用Origin 2024进行数据分析与绘图。

3 结果与分析

3.1 不同粒径配置对砾幕层重构试验指标的影响

由图4可知，各样方在土壤紧实度、土壤结皮厚度及风蚀量3项指标上均表现出较为一致的变化特征。从土壤紧实度来看，大部分样方集中在10～18 Lbf，波动幅度较小，说明各样方在试验期间均形成较好的砾幕层，其中Ⅲ-JX样方土壤紧实度超过20 Lbf，明显高于其他样方，表现为较为紧实的地表；土壤结皮厚度在各样方之间的差异较小，整体稳定在8～10 mm，差异相对较小，表明多数样方在试验阶段已形成较为均匀且成熟的结皮层；风蚀量总体主要分布在2～5 kg/m^2，部分样方出现局部高值，但总体变化趋势平

稳,风蚀量较低的样方通常对应较高的土壤紧实度与较厚的土壤结皮层,表明其砾幕层结构具备更强的抗风蚀能力。总体而言,砾幕层重构效果较好的样方具有土壤紧实度高,土壤结皮厚且风蚀量低的特点。

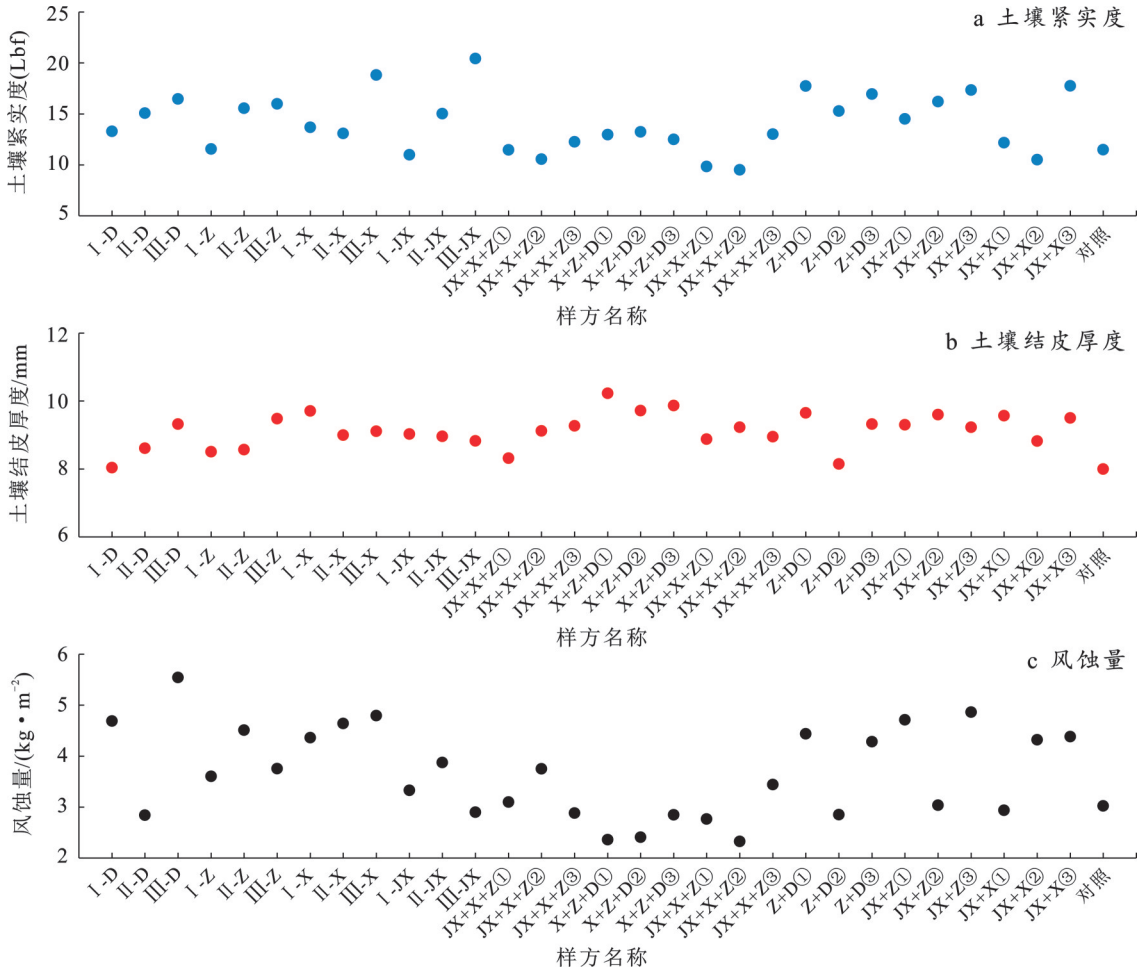


图 4　各样方土壤紧实度、土壤结皮厚度及风蚀量 3 项评价指标

Fig.4　Three evaluation indicators of soil compaction, soil crust thickness and wind erosion amount for each sample plot

3.2　最佳粒径配置样方的确定

3.2.1　不同评价方法的结果分析

(1) 砾幕层重构效果三维评价指数。由图 5 可知,X+Z+D①样方的欧氏空间距离最高,在所有样方中排名首位,表明该样方在土壤紧实度、土壤结皮厚度及风蚀量三项指标的综合状态上最接近理想砾幕层结构,三项指标之间协调性最好,整体稳定性最强。其次,Ⅲ-JX,X+Z+D② 及 JX+Z② 等样方的得分同样处于较高区间,说明这些样方在三维特征空间中的整体偏离程度较小,砾幕层结构较为完整,但在单项指标或指标协同方面仍略逊于最优样方。位于中等排序区间的样方,包括 JX+X③,Ⅲ-X 及 Ⅱ-JX 等,其欧氏空间距离值呈现逐级递减特征,反映出不同处理条件下砾幕层重构效果在稳定性水平上的连续变化,这类样方虽已形成一定程度的表层结构,但其综合稳定性仍处于过渡阶段。相比之下,排序靠后的样方,如 Ⅱ-Z,Ⅰ-Z 及 Ⅱ-X 等样方的欧氏空间距离明显偏低,表明其在至少一项关键指标上与理想状态存在较大差距,砾幕层结构较为松散,抗风蚀能力不足,重构效果相对较差。总体而言,砾幕层重构效果三维评价指数法能够在样方尺度上清晰区分不同处理条件下砾幕层重构效果的等级差异,对优势样方与劣势样方具有良好的识别能力。

(2) 熵权-TOPSIS 评价方法。由表 2 可知,土壤紧实度的差异性最大(0.060 0),对应熵值最低(0.940 0),熵权最高(0.425 6),这表明在粒径试验样方中,土壤紧实度的变异程度最高,为综合评价体系提供了最多的有效信息,成为影响砾幕层重构效果的主导因素。土壤结皮厚度的差异系数为 0.044 3,熵权为 0.313 9,说明该指标在不同粒径试验样方中也具有一定的区别度,但显著性低于土壤紧实度。风蚀量的差异性最小(0.036 7),权重仅为 0.260 4,说明该指标在本试验条件下的变异相对有限,对样方的砾幕层重构效果的解释力度较弱。熵权-TOPSIS

综合评价结果(图6)表明,各样方在正理想解距离、负理想解距离和综合评价结果的差异明显,说明不同粒径配置对砾幕层重构效果的影响差异较为显著,其中正理想解距离指方案与最优状态之间的距离,其值越小越接近理想解,负理想解距离表示方案与最差状态之间的距离,其值越大越远离负理想解。所有样方中,Ⅲ-JX排名第1,正理想解距离为0.202 5,负理想解距离为0.490 5,综合得分达到0.707 8,明显优于其他样方。整体来看,排名前10的样方,具有正理想解距离小于0.30,负理想解距离大于0.35的特征,说明其在3项指标上均保持较强综合表现;而排名靠后的样方,如Ⅰ-D,Ⅰ-Z等样方,其正理想解距离普遍较大(多在0.43以上)、负理想解距离较小(多在0.2以下),综合得分低于0.30,与理想状态差异明显,整体表现较弱。

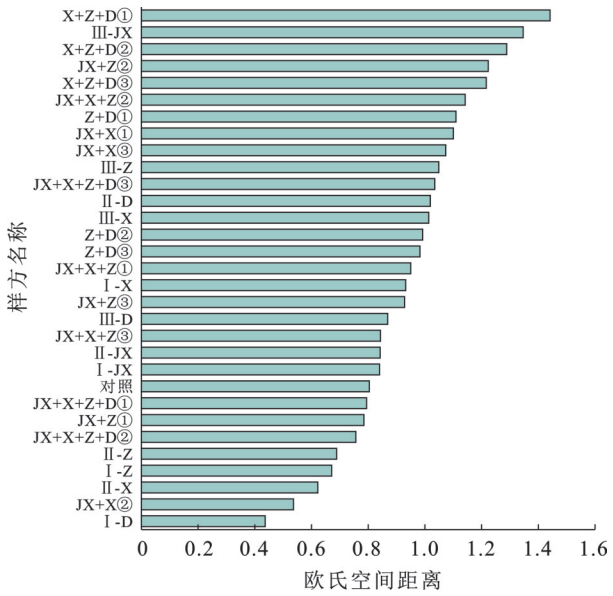


图5 砾幕层重构效果三维评价指数(TGEI)的评价结果

Fig.5 Evaluation results of three-dimensional evaluation index (TGEI) of gravel-mulch layer reconstruction effect

表2 三项评价指标的熵权

Table 2 Entropy weights of three evaluation indicators

指 标	熵值(e)	差异性系数(g)	熵权(w)
土壤紧实度	0.940 0	0.060 0	0.425 6
土壤结皮厚度	0.955 7	0.044 3	0.313 9
风蚀量	0.963 3	0.036 7	0.260 4

(3)等权-TOPSIS评价方法。由图7可知,以极小粒径(JX)和小粒径(X)为主,并与中粒径(Z)或大粒径(D)形成合理粒径配置的样方位于得分序列的前列,如JX+Z②,X+Z+D①,Ⅲ-JX等样方正理想解距离较小、负理想解距离较大,综合评价得分较高,说明小粒径在提高覆盖均匀性、增强填隙与嵌锁作用方面具有更明显的综合优势,从而在稳定性与抗风蚀性指标上表现更为突出。中等得分区域主要由其他粒径配置样方构成,反映出不同粒径之间的互补效应能改善砾幕层的重构效果,使其在多个指标上保持相对均衡的表现。相比之下,以大粒径(D)和中粒径(Z)为主的单一粒径在低覆盖度下呈现出正理想解距离大、负理想解距离小,综合评价得分普遍较低,如Ⅰ-D,Ⅰ-Z等,表明大、中粒径难以在低覆盖度下形成致密稳定的表层结构,容易导致孔隙度偏大、抗扰动能力不足等问题,从而影响砾幕层重构效果。总而言之,粒径级配越合理,较小粒径成分占比越高的样方能够提高砾幕层的重构效果,获得更优的综合表现。

3.2.2 *最佳样方的确定*

由图5—7可知,砾幕层重构效果三维评价指数(TGEI)、熵权-TOPSIS法和等权-TOPSIS法3种方法在最优样方的判定结果上存在一定差异,该差异表明,不同评价模型对指标的响应机制和敏感性存在显著区别,TGEI侧重于多指标在三维空间中的集合结构关系,熵权-TOPSIS法反映指标数据离散度所包含的客观信息量,而等权-TOPSIS法则强调各指标贡献的均衡性。三者虽基于同一指标体系,但在评价机理、权重确定方式及指标敏感性方面存在差异,对砾幕层重构效果的评价具有互补性。为避免单一评价方法难以全面反映不同粒径配置在多指标下的整体表现,本文将3种评价方法所得得分赋予相同权重后进行加权平均,得到最终的综合评价得分。

从图8可以看出,各样方的最终综合得分呈现出明显的阶梯式分布,表明不同粒径组合在砾幕层重构效果上存在显著差异。Ⅲ-JX样方综合得分为0.9092,排名第1,表明在90%砾石覆盖度下,以极小粒径为主的砾幕层重构效果最优。其他排名靠前的样方多由极小粒径(JX)与小粒径(X)占主导并形成合理级配的组合构成,如X+Z+D①,JX+Z②,X+Z+D②,其得分普遍高于0.80,说明此类配置能够在填隙作用、结构致密性、覆盖均匀性及抗风蚀性能等方面同时具备优势,从而实现更优的砾幕层重构效果;排名位于中等得分区间的样方多为不同粒径的复合配置,得分集中在0.60~0.75,反映出这些组合在多项指标上表现相对均衡,但在关键指标上的优势不够突出。相反,以大粒径(D)为主的单一配置位于得分末端,即Ⅰ-D样方,其得分低于0.40,说明粗粒径难以在低覆盖下形成致密稳固

的表层结构,孔隙度较大、嵌锁性弱,从而在综合评价中表现不佳。

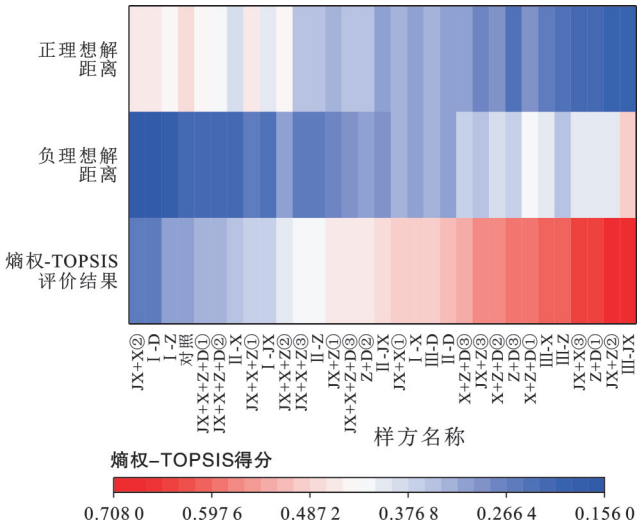


图 6　各样方的熵权-TOPSIS 综合评价结果

Fig.6　Entropy weight-TOPSIS comprehensive evaluation results for each sample plot

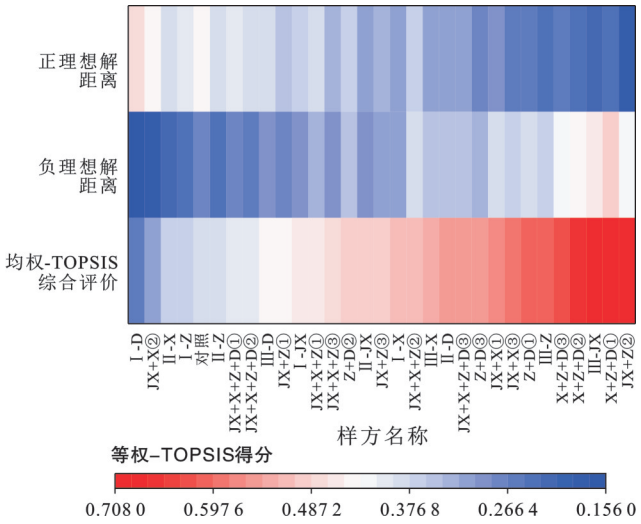


图 7　各样方的等权-TOPSIS 综合评价结果

Fig.7　Equal-weighted TOPSIS comprehensive evaluation results of each sample plot

总体而言,极小粒径或小粒径及其与其他粒径形成的合理组合在高覆盖度条件下的综合表现显著优于单一大粒径或中粒径,能够更有效地形成致密稳定的表层结构,增强填隙与嵌锁作用并提升抗风蚀能力,从而在综合评价中取得明显优势。

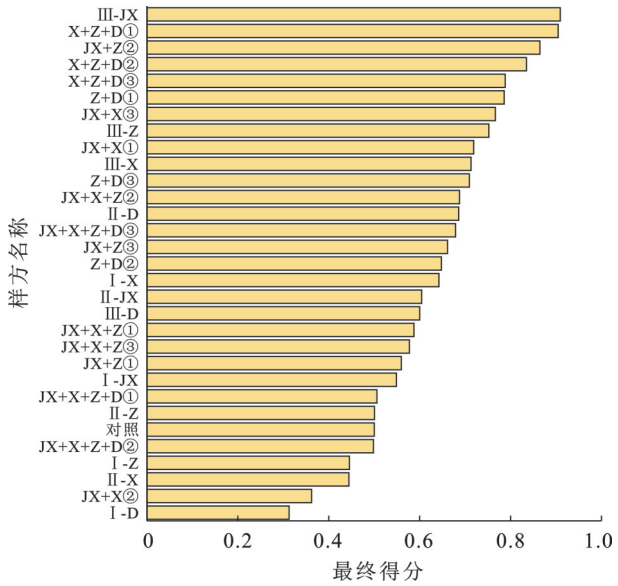
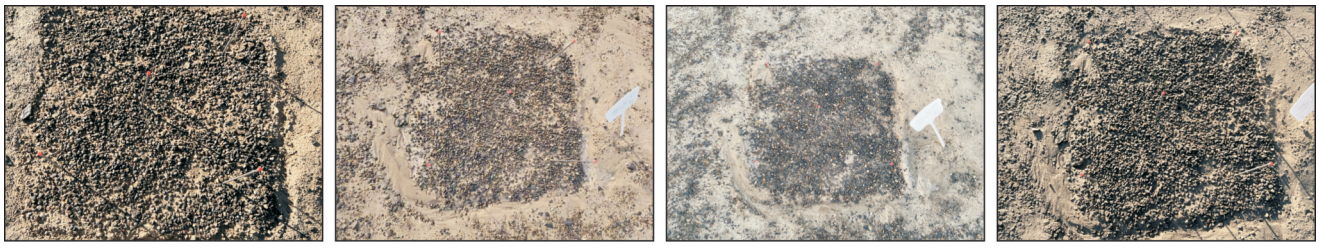


图 8　基于多种方法的样方综合得分

Fig.8　Comprehensive scores of each sample plot based on multiple methods

3.2.3　最优样方砾幕层的时序变化

由图 9 可知,Ⅲ-JX 样方(极小粒径,90% 砾石覆盖度)在整个监测周期内呈现出由初期松散向后期趋于稳定的变化过程。9 月 6 日,样方整体结构较为均匀,砾石分布紧密但呈自然散落状态,局部细沙轻微裸露,此时砾幕层处于形成初期,结构稳定性较弱。9 月 30 日,在风蚀与水蚀共同作用下,样方边缘砾石出现轻微下滑,细沙裸露范围略有扩大,样方边界变得模糊,显示出在极小粒径及高砾石覆盖度的条件下仍易发生边缘迁移。10 月 7 日,样方整体趋于致密,砾石之间的孔隙明显减少,中央区域呈现更紧凑、更压实的状态,边缘细沙开始再次被砾石覆盖,砾幕层结构逐渐稳定。11 月 4 日,样方内部砾石分布更加均匀,边界清晰度明显提高,砾石层厚度与致密度均较前期增强,几乎看不到明显裸露的细沙区域,表明极小粒径在高覆盖条件下,经过一定时间的风沙扰动与自然固结后,最终形成了稳定的砾幕层结构。



a 2025年9月6日　　b 2025年9月30日　　c 2025年10月7日　　d 2025年11月4日

图 9　最优样方Ⅲ-JX 的变化

Fig.9　Variation of optimal sample plot Ⅲ-JX

3.2.4 最优样方3项指标的耦合关系

由图10可知，在8月中旬至9月上旬阶段，土壤紧实度总体呈现较大幅度上升，而结皮厚度变化相对缓慢，表明在砾幕层重构初期，地表首先在降雨击实、颗粒重排及自然沉降作用下发生结构致密化过程，孔隙被压缩、颗粒接触关系增强，该过程为后续结皮发育提供了必要的物理基础。进入9月中旬至10月初，在土壤紧实度已处于较高水平并趋于稳定的条件下，土壤结皮厚度开始出现显著增加，说明在致密基底形成后，降雨溅蚀促使细颗粒向表层迁移并发生再沉积，物理结皮得以在稳定床面上快速发育，反映出结皮形成明显滞后于土壤紧实度提升。10月以后，随着土壤结皮厚度达到较高水平，风蚀量总体降低并维持在较低水平，表明当地表形成连续且致密的结皮层后，床面抗剪强度与抗起沙能力明显增强，风蚀过程受到有效抑制。3者在时间变化上并不同步，而是呈现出“土壤压实→结皮发育→风蚀响应减弱”的阶段性演化特征。土壤紧实度与土壤结皮厚度在变化趋势上表现为显著的正向响应关系，而二者与风蚀量则呈现出明显的负向响应关系，共同揭示了砾幕层抗风蚀效能形成的过程机制及其时间尺度上的耦合关系。

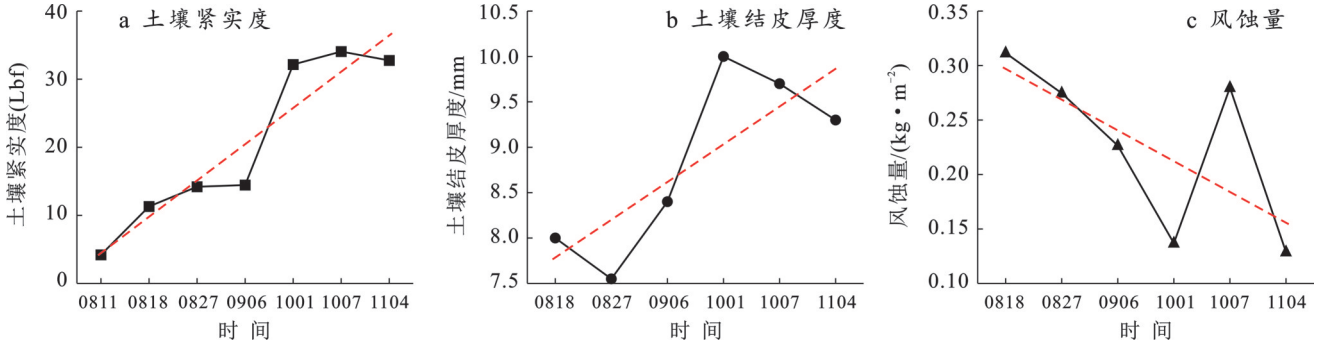


图10 砾幕层重构过程中最佳样方Ⅲ-JX三项指标的时间序列数据

Fig.10 Time-series data of three indicators of optimal plot Ⅲ-JX during gravel-mulch layer reconstruction process

3.3 不同粒径和砾石覆盖度对砾幕层形成的影响

3.3.1 采取重构措施对砾幕层形成的影响

由图8可知，大多数处理组的综合得分均高于对照样方，表明人工配置的粒径组合能够有效增强砾幕层的重构能力、表层稳定性以及抗扰动能力。其中，综合表现优秀的处理组（如Ⅲ-JX，X+Z+D①，JX+Z②，等）普遍具备小粒径、较高砾石覆盖度或多粒径科学搭配等共同特征，此类配置能形成较紧密的嵌锁结构，有利于细粒物质滞留、表层结皮发育及风蚀抑制。综合表现处于中等水平的处理组虽未达到最佳效果，但整体仍优于对照组，说明单粒径或多粒径的组合在合适砾石覆盖度下仍对砾幕层的重构具有促进作用。相比之下，Ⅰ-Z和Ⅰ-D处理组的得分低于对照组，主要因其粒径偏大且砾石覆盖度不足，使表层孔隙率较高，难以固定细粒物质，从而导致土壤紧实度与结皮厚度偏低，并加剧风蚀。对于JX+X②处理组，其表现较弱主要源于小粒径组合在约70%砾石覆盖度下易形成半致密但不连续的砾石结构，造成局部裸露、砾石堆积不均，从而降低紧实度并增加风蚀量，导致综合得分下降。总体而言，小粒径或多粒径组合在中高砾石覆盖度下更能显著提升砾幕层重构效果，而大粒径、低砾石覆盖度配置表现较差，说明粒径组成与砾石覆盖度是决定砾幕层重构与稳定性的关键因素。

3.3.2 砾石粒径与覆盖度对砾幕层重构效果的影响

由图11可知，砾石粒径和覆盖度对砾幕层的重构效果具有显著影响。在单一粒径样方中，随着砾石覆盖度从50%增加至90%，不同粒径的表现存在差异：大粒径样方（D）在低覆盖度（50%）下得分最低（0.312 7），砾石覆盖度提高至70%时显著增加（0.686 0），但在90%覆盖度下略有下降（0.600 2），说明过高覆盖度并未进一步增强重构效果；中粒径样方（Z）随砾石覆盖度提升表现出持续改善的稳定趋势，其最终综合评价得分从0.445 4上升至0.752 3，说明中粒径在高砾石覆盖度下更易形成结构稳定、抗风蚀能力较强的砾幕层；小粒径样方（X）在70%砾石覆盖度下出现下降，但在90%砾石覆盖度时显著提升至0.713 0，说明小粒径在70%砾石覆盖度下重构效果相对较弱，90%砾石覆盖度下可通过致密铺覆重新提升砾幕层稳定性；极小粒径样方（JX）随着砾石覆盖度的增加呈现出明显的递增趋势，得分由0.548 8上升至0.909 2，提升幅度最大，表明极小粒径在高砾石覆盖度下能够形成致密封闭的砾石结构，其抗风蚀能力与结构完整性均达到最优状态。

在组合粒径下，砾石覆盖度同样发挥着关键作用。4粒径组合（JX+X+Z+D）在50%，70%，90%

砾石覆盖度下得分分别为0.506 0,0.498 3和0.679 0,虽中等覆盖度处理得分略有降低,但总体呈现出砾幕层重构效果随砾石覆盖度增加而向好的趋势,说明多种粒径协同作用在高砾石覆盖度下更易发挥稳定效应;X+Z+D粒径组合随砾石覆盖度增加呈轻微下降趋势,但整体得分始终维持在较高水平,说明在缺少极小粒径参与的情况下,中低砾石覆盖度反而更有利于保持砾幕层结构优势;JX+X+Z粒径组合中,JX+X+Z①、JX+X+Z②和JX+X+Z③样方最终得分分别为0.587 5,0.687 8和0.577 5,在70%砾石覆盖度下达到最高值,表现出中等砾石覆盖度下多粒径协同效果最优的特征;在Z+D粒径组合中,Z+D①的综合得分为0.786 0,为该组合下最高值,Z+D②在70%砾石覆盖度下降至0.6479,Z+D③在90%砾石覆盖度下回升至0.7093,但仍低于Z+D①,说明中、大粒径组合在低砾石覆盖度下更利于形成相对稳定的砾幕层结构;在JX+Z粒径组合中,JX+Z①,JX+Z②,JX+Z③样方的得分分别为0.559 5,0.864 5和0.661 3,在70%砾石覆盖度下表现最佳;在JX+X粒径组合中,JX+X①的综合得分为0.7190,当砾石覆盖度提高至70%时,JX+X②的综合得分显著下降至0.362 3,而当砾石覆盖度进一步提高至90%时,JX+X③的综合得分上升至0.766 6,为该组合下的最高值,表明该粒径组合在70%砾石覆盖度下重构效果最弱,而高砾石覆盖度(90%)下重构效果显著改善。

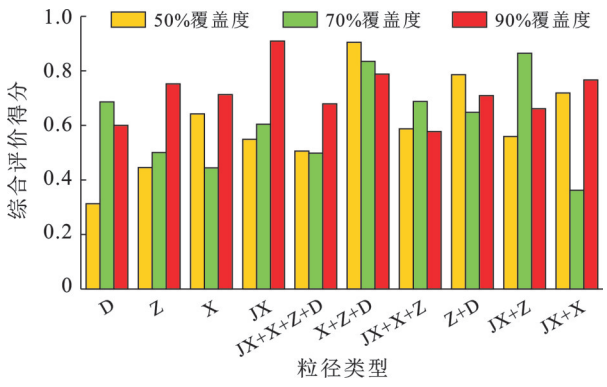


图11　相同粒径下不同砾石覆盖度对砾幕层的影响

Fig.11　Influence of different gravel coverage levels on gravel-mulch layer at same particle size

总体而言,砾石覆盖度和粒径对砾幕层重构效果具有显著交互作用,低覆盖度下,极小粒径和小粒径在初始结构形成中占优势;中覆盖度下,中粒径发挥关键支撑作用,与小粒径或极小粒径形成有效填隙结构;高覆盖度下,细粒砾石及“双粒径骨架-填隙组合”更易获得结构紧密、抗风蚀能力强的砾幕层。结果表明,在砾幕层重构过程中,应综合控制砾石覆盖度并优化粒径配置,实现覆盖度与粒径的协同优化,从而增强结构稳定性和抗风蚀能力。

4　讨　论

本研究通过构建不同粒径与砾石覆盖度配置组合条件下的砾幕层重构试验,选取土壤紧实度、土壤结皮厚度与风蚀量3项指标,采用砾幕层重构效果三维评价指数、熵权-TOPSIS法及等权-TOPSIS法对各处理样方进行综合评价。结果表明,极小粒径(JX)在90%砾石覆盖度下的砾幕层重构效果最为突出,其综合评价得分最高,显著优于其他粒径与砾石覆盖度组合,表明极小粒径在高砾石覆盖度下能够显著提升砾幕层的结构致密性、抗风蚀能力和整体稳定性。

砾石粒径和砾石覆盖度是控制砾幕层形成与稳定的关键因素。王志强等[23]通过风洞试验指出,在相同粒径下,增加砾石覆盖度对地表风蚀有更显著的防护效果;而在相同砾石覆盖度下,防护效率随砾石粒径增大而降低,说明小粒径砾石具有更高且更稳定的防风蚀效果。富宝锋等[24]通过风洞试验同样表明,当砾石覆盖度达到较高水平后防风蚀效果基本稳定,而在相同砾石覆盖度下,小粒径砾石的防风蚀效率始终高于大粒径砾石。因此,极小粒径在高砾石覆盖度下,更有利于形成连续、稳定的砾石覆盖结构,从而促进砾幕层的形成与稳定。

李增沛等[25]参考自然形成的砾幕层,表明砾石覆盖度不得低于60%。以保证砾幕层结构的稳定性与防护功能的有效发挥。这与本研究中在高砾石覆盖度(90%)条件下砾幕层形成效果最优的结果相一致。李敬文等[26]针对荒漠区砾幕层抗风蚀能力的研究表明,砾石覆盖能够显著降低砾幕层试样的累计质量损失,且砾石覆盖度越大,分布类型中大粒径砾石越少,砾幕层的累计质量损失越少,其抗风蚀能力和结构稳定性越强,砾幕层更稳定。上述研究结果与本文提出的“极小粒径砾石在90%覆盖条件下”最有利于砾幕层的形成与稳定的试验结果一致,表明本文研究结论具有较高的科学可靠性。

此外,除砾石粒径与覆盖度影响抗风蚀能力外,砾石形状同样也是影响风蚀抑制效能的重要因素。薛娴等[27]通过风洞试验与莫高窟野外观测指出,高度较大且形状规则的块状砾石相比扁平卵石能更有效增加地表粗糙度,在低风速下主要通过形状参数影响粗糙度,而在高风速及高距地面范围内,高度优势则更为关键,从而显著降低近地面风速,减弱风蚀作用。樊瑞静等[28]通过风洞试验指出,在相同覆盖

度下，不同几何形态的粗糙元会产生显著不同的抗风蚀效果，其中球形、三棱锥形、圆柱形及正方体形粗糙元的防护效率明显优于饼形和半球形。其原因在于高、细且具有明显棱角的粗糙元能更有效增强地表空气动力学粗糙度，形成更大的风影区，从而降低床面风速与剪切应力；而方向比率较小的扁平形态对气流扰动能力有限，防护作用较弱。综上所述，砾石形状通过改变地表空气动力学粗糙度及风影区范围，进而调控近地层气流结构与床面剪切应力，是影响风蚀抑制效能的重要结构因素。

5 结 论

（1）各样方在土壤紧实度、土壤结皮厚度及风蚀量3项指标上呈现出较为一致的变化规律，其中，砾幕层重构效果较好的样方普遍具有土壤紧实度高、土壤结皮厚且风蚀量低的特点，表现出更为稳定和成熟的砾幕层结构特征。

（2）基于三维评价指数法、熵权-TOPSIS法及等权-TOPSIS法的综合评价结果可知，Ⅲ-JX样方的综合得分最高，达到0.909 2，表明极小粒径在90%砾石覆盖度下的砾幕层重构效果最优。整体上，高分样方以极小或小粒径合理级配为主，结构致密、抗风蚀能力强；而以大粒径为主的配置得分最低，难以形成稳定的砾幕层结构。最优样方（Ⅲ-JX样方，极小粒径，90%砾石覆盖度）在监测期间呈现出由前期松散向后期稳定的演变过程。早期砾幕层结构松散，局部细沙裸露；中期在风蚀与水蚀作用下边缘发生轻微调整；后期整体趋于致密，砾石分布更加均匀，结构逐渐稳定，表明极小粒径在高覆盖条件下，经过风沙扰动与自然固结，可形成稳定的砾幕层结构。

（3）土壤紧实度、土壤结皮厚度及风蚀量3项指标在时间上呈阶段性演化，即初期土壤在降雨与颗粒重排作用下先发生快速致密化，随后在稳定基底上结皮逐渐发育，最终随着结皮形成风蚀显著减弱。

（4）基于综合评价结果可知，不同粒径处理样方总体上优于对照样方，仅大粒径、低砾石覆盖度的少数处理组（如Ⅰ-Z，Ⅰ-D）低于对照，说明人工配置粒径能够有效提升砾幕层的稳定性与抗扰动能力；在相同粒径下，砾石覆盖度提升能普遍增强砾幕层重构的效果，其中极小粒径和小粒径对砾石覆盖度最敏感，高砾石覆盖度能显著提升其致密性；在相同砾石覆盖度下，极小粒径对砾幕层的重构效果始终优于大、中、小粒径，且随砾石覆盖度增强而更加明显。

参考文献（References）

[1] 马于博，张爱国，王浩宇，等.基于U-ConvHDNet模型的戈壁砾幕层提取[J].测绘通报，2025(4)：68-74.
Ma Yubo, Zhang Aiguo, Wang Haoyu, et al. Extraction of Gobi desert gravel layer based on U-ConvHDNet [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2025(4):68-74.

[2] Zhang Chunlai, Wei Guoru, Zou Xueyong, et al. The varying fetch effect of aeolian sand transport above a Gobi surface and its implication for Gobi development process [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2022,10(4):623-634.

[3] 李根生，王卓，刘俊江，等.新疆四大煤田采动生态损伤特征与生态修复研究进展[J].中国矿业，2026，35(3)：237-248.
Li Gensheng, Wang Zhuo, Liu Junjiang, et al. Research progress on mining-induced ecological damage characteristics and ecological restoration in the four major coalfields of Xinjiang [J]. China Mining Magazine, 2026, 35(3):237-248.

[4] 卞正富，张益东，王猛，等.新疆煤炭资源开发潜力与开发策略[J].煤炭学报，2024，49(2)：967-977.
Bian Zhengfu, Zhang Yidong, Wang Meng, et al. Research on the potential and strategy for coal resources exploitation in Xinjiang [J]. Journal of China Coal Society, 2024,49(2):967-977.

[5] 刘英，许萍萍，毕银丽，等.新疆戈壁煤矿露天开采对生态环境扰动定量分析[J].煤炭学报，2023，48(2)：959-974.
Liu Ying, Xu Pingping, Bi Yinli, et al. Quantitative analysis of coal mining disturbance on environment in Xinjiang Gobi open-pit mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2023,48(2):959-974.

[6] 任兵兵，蒋平安，方勇，等.新疆典型大煤矿生态环境质量时空变化特征研究[J].金属矿山，2025(6)：273-283.
Ren Bingbing, Jiang Ping'an, Fang Yong, et al. Study on the spatiotemporal variation characteristics of ecological environmental quality in typical large coal mines in Xinjiang [J]. Metal Mine, 2025(6):273-283.

[7] 邢浩，石海涛，娄雪聪.新疆哈密市南湖一带砾幕层自然修复能力及保护修复对策研究[J].新疆地质，2023，41(S1)：72.
Xing Hao, Shi Haitao, Lou Xuecong. Study on natural restoration ability and protection and restoration countermeasures of gravel curtain layer in Nanhu area of Hami City, Xinjiang [J]. Xinjiang Geology, 2023,41(S1):72.

[8] 张俊杰，白中科，杨博宇.新疆荒漠露天矿区生态受损及砾幕层重构方法研究[J].地学前缘，2021，28(4)：142-152.
Zhang Junjie, Bai Zhongke, Yang Boyu. Gravel curtain layer in the desert open-pit mining area of Xinjiang: Ecological damage and reconstruction method [J]. Earth Science Frontiers, 2021,28(4):142-152.

[9] Mu Yue, Wang Feng, Zheng Bangyou, et al. McGET:

A rapid image-based method to determine the morphological characteristics of gravels on the Gobi desert surface [J]. Geomorphology, 2018,304:89-98.

[10] Xu Jiahong, Li Huiru, Zou Xueyong, et al. Comprehensive influence of gravel cover and soil particle characteristics on wind erosion rate: A wind tunnel investigation [J]. Geoderma, 2025,464:117597.

[11] 裴浩,叶虎,姜艳丰,等.内蒙古荒漠区土地砾化监测采样方案优化研究[J].地球科学进展,2025,40(8):821-830.
Pei Hao, Ye Hu, Jiang Yanfeng, et al. Optimization sampling schemes for monitoring land gravelization in desert areas of Inner Mongolia [J]. Advances in Earth Science, 2025,40(8):821-830.

[12] 张岚彪,裴浩,韩旭日,等.锡林郭勒草原土地砾石覆盖度两种测量方法的对比分析[J].内蒙古气象,2023(4):14-19.
Zhang Lanbiao, Pei Hao, Han Xuri, et al. Comparative analysis of two measurements of land gravel cover in Xilingol grassland [J]. Meteorology Journal of Inner Mongolia, 2023(4):14-19.

[13] 崔艳,李思扬.新疆露天煤矿开发对戈壁的影响及生态恢复对策[J].煤炭工程,2024,56(11):24-28.
Cui Yan, Li Siyang. Influence of open-pit coal exploitation of Gobi in Xinjiang and the reconstruction measures [J]. Coal Engineering, 2024,56(11):24-28.

[14] 李道进.西部矿山开发的生态环境修复技术研究[J].资源节约与环保,2022(4):31-34.
Li Daojin. Study on ecological environment restoration technology of mining development in western China [J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2022(4):31-34.

[15] 刘英,林家权,岳辉,等.荒漠化矿区不同土地利用类型土壤呼吸及其影响因子[J].煤炭学报,2023,48(7):2893-2905.
Liu Ying, Lin Jiaquan, Yue Hui, et al. Soil respiration and its influencing factors in different land use types in desertification mining areas [J]. Journal of China Coal Society, 2023,48(7):2893-2905.

[16] 岳辉,朱蓉,刘英,等.荒漠化露天矿土壤湿度监测模型的构建:以红沙泉矿区为例[J].煤炭科学技术,2022,50(2):300-311.
Yue Hui, Zhu Rong, Liu Ying, et al. Construction of soil moisture monitoring model in desertification open-pit mining area: Taking Hongshaquan mining area as an example [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2):300-311.

[17] 许晨,马龙,马宁,等.红沙泉露天煤矿西端帮陡帮开采方案研究[J].煤炭工程,2025,57(5):17-24.
Xu Chen, Ma Long, Ma Ning, et al. Mining plan for the western steep slope of Hongshaquan open-pit coal mine [J]. Coal Engineering, 2025,57(5):17-24.

[18] 韩勇,于翔宇,姜凯升,等.红沙泉露天煤矿土壤盐渍化遥感监测[J].煤炭学报,2023,48(增刊2):704-712.
Han Yong, Yu Xiangyu, Jiang Kaisheng, et al. Remote sensing monitoring of soil salinization in Hongshaquan open-pit mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2023,48(S2):704-712.

[19] 韩勇,韩流,李思维,等.红沙泉露天煤矿采煤工作面雾气成因与治理方法研究[J].煤炭工程,2024,56(增刊1):90-96.
Han Yong, Han Liu, Li Siwei, et al. Research on the causes and treatment methods for fog of coal mining face at Hongshaquan open-pit coal mine [J]. Coal Engineering, 2024,56(S1):90-96.

[20] 白继元,肖航,武志高,等.新疆红沙泉二号露天煤矿水文地质类型划分探讨[J].新疆有色金属,2025,48(5):8-10.
Bai Jiyuan, Xiao Hang, Wu Zhigao, et al. Discussion on hydrogeological classification of No.2 open-pit coal mine in Hongshaquan, Xinjiang [J]. Xinjiang Youse Jinshu, 2025,48(5):8-10.

[21] 王秋荣.基于熵权-TOPSIS法的中部六省数字经济发展水平综合评价[J].中国商论,2025,34(22):141-145.
Wang Qiurong. Comprehensive evaluation of the digital economy development level in the six provinces of central China based on entropy weight and TOPSIS method [J]. China Business & Trade, 2025,34(22):141-145.

[22] 李曼宁,曹红霞,赵俊城,等.基于熵权法-TOPSIS对半干旱地区覆盖模式下猕猴桃生长的影响分析[J].干旱地区农业研究,2025,43(4):111-119.
Li Manning, Cao Hongxia, Zhao Juncheng, et al. Analysis of the effect of entropy weight-based method-TOPSIS on the growth of kiwifruit under the mulching model in semi-arid areas [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2025,43(4):111-119.

[23] 王志强,富宝锋,何艺峰,等.砾石覆盖对土壤风蚀防护效率的风洞模拟研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(9):90-93.
Wang Zhiqiang, Fu Baofeng, He Yifeng, et al. Wind tunnel simulation on protective efficiency of gravel mulch on soil erosion [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014,28(9):90-93.

[24] 富宝锋,赵耀林,何艺峰,等.砾石覆盖沙床防风蚀效果风洞实验[J].水土保持学报,2014,28(2):91-94.
Fu Baofeng, Zhao Yaolin, He Yifeng, et al. Wind tunnel experiments on gravel mulch restraining wind erosion of sand-bed [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2014,28(2):91-94.

(下转第 156 页)