

黄亚浩, 李旭, 安文举, 李王成, 张一帆, 何雷. 干湿循环条件下砾石风化特征及其养分资源化潜力[J]. 土壤学报, 2026,

HUANG Yahao, LI Xu, AN Wenju, LI Wangcheng, ZHANG Yifan, HE Lei. Effect of Dry-Wet Cycles on Gravel Weathering and Topsoil Nutrient Supplement in Gravel-Mulched Farmland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

干湿循环条件下砾石风化特征及其养分资源化潜力*

黄亚浩¹, 李旭¹, 安文举¹, 李王成^{1, 2, 3†}, 张一帆¹, 何雷¹

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 银川 750021; 3. 宁夏回族自治区黄河水联网数字治水重点实验室, 银川 750021)

摘要: 针对西北砂田覆盖层砾石在水-岩作用下风化特征及其元素释放过程尚不明确的问题, 以连续种植 30 年以上且处于休耕期的退化砂田为研究对象, 选取砂田中主要粒径范围的砾石, 分析其物理与化学风化特征对干湿循环的响应, 并探讨元素释放对耕层土壤元素组成的影响。结果表明: (1) 压砂砾石以硅酸盐矿物为主, 具备一定的风化潜力和养分释放能力。干湿循环条件下弱碱性水体对砾石化学风化作用有限, 物理风化占主导地位。水-岩作用显著促进砾石质量损失并提高吸水效率 ($P<0.05$), 其中, 细粒砾石 (5~10 mm) 响应最为敏感, 质量损失率和吸水率最高, 分别为 2.09% 和 1.70%, 相较于对照组分别提高了 242.11% 和 23.10%。(2) 次生矿物之间未发生明显转化, 但细粒级砾石中绿泥石含量下降最明显 (10%), 表明其在干湿循环过程中更易发生淋溶损失。伴随孔隙填充型富镁绿泥石的流失, 耕层土壤中元素呈现不同程度富集, 元素释放能力表现为: $Mg>Ca>Fe>Mn>K>Zn$ 。(3) 相关性分析与主成分分析进一步表明, 砾石物理风化特征与土壤造岩元素含量显著相关 ($P<0.05$), 水-岩作用对砾石裂化及土壤元素组成具有显著影响。总之, 干湿循环作用促进了压砂砾石的风化进程, 砾石裂化过程中元素淋溶对耕层土壤养分有明显补充作用, 且细粒砾石养分释放能力最强, 表明退化砂田表层砾石具有一定的养分资源化利用潜力, 能够为改良砂田土壤环境、遏制砂田退化及实现复垦提供新视角。

关键词: 砂田; 砾石; 干湿循环; 元素淋溶; 耕层土壤

中图分类号: S151

文献标志码: A

Effect of Dry-Wet Cycles on Gravel Weathering and Topsoil Nutrient Supplement in Gravel-Mulched Farmland

HUANG Yahao¹, LI Xu¹, AN Wenju¹, LI Wangcheng^{1, 2, 3†}, ZHANG Yifan¹, HE Lei¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Engineering Research Center for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Regions, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China; 3. Key Laboratory of the Internet of Water and Digital Water Governance of the Yellow River in Ningxia, Yinchuan 750021, China)

*宁夏回族自治区青年拔尖人才培养项目(032503060192)、国家自然科学基金项目(U2243601)和宁夏大学水利工程“一流学科”建设项目(030900002602)共同资助 Supported by the Outstanding Young Talent Development Program of Ningxia Hui Autonomous Region, China (No. 032503060192), the National Natural Science Foundation of China (No. U2243601) and the “First-Class Discipline” Construction Project in Hydraulic Engineering of Ningxia University, China (No. 030900002602)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: liwangcheng@nux.edu.cn

作者简介: 黄亚浩 (2001—), 男, 宁夏吴忠人, 硕士研究生, 主要从事旱区节水灌溉理论与技术研究。E-mail: xu82413@163.com

收稿日期: 2026-01-09; 收到修改稿日期: 2026-07-17; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2026-07-17

Abstract: 【Objective】 The mulched sand field system in arid and semi-arid regions of Northwest China has long been used for crop cultivation, where a surface gravel layer plays a critical role in moisture conservation and soil protection. However, over continuous cultivation periods exceeding 30 years, the degradation of these sand fields has become increasingly evident, yet the weathering behavior of the gravel cover under water-rock interaction and its potential contribution to soil nutrient replenishment remain poorly understood. 【Method】 To address this knowledge gap, this study selected a degraded sand field that had been under continuous cultivation for more than 30 years and was currently in a fallow phase. Gravel samples within the major particle size ranges present in the field were collected and analyzed to investigate their physical and chemical weathering responses to repeated dry-wet cycles. Furthermore, the study sought to reveal the regulatory mechanisms by which element leaching from the weathered gravel influences the nutrient status of the underlying plough layer soil. 【Result】 The results of this investigation are summarized as follows. (1) The gravel used for mulching in the studied sand field is predominantly composed of silicate minerals, which possess a certain intrinsic weathering potential and a notable capacity for nutrient release. Under the influence of dry-wet cycling, the slightly alkaline water environment in the field imposed only a limited chemical weathering effect on the gravel, whereas physical weathering played a dominant role. The water-rock interaction significantly accelerated gravel mass loss and enhanced the gravel's water absorption efficiency, with all observed differences being statistically significant ($P < 0.05$). Among the different particle size fractions examined, the fine-grained gravel with a size range of 5 to 10 mm exhibited the most sensitive response to the imposed dry-wet cycles. This fraction achieved the highest mass loss rate, recorded at 2.09%, and the highest water absorption rate, reaching 1.70%. Compared with the control group (no dry-wet cycles or water-rock interaction), these values represent substantial increases of 242.11% and 23.10%, respectively. (2) No significant transformation or conversion among secondary minerals was detected throughout the experimental period. However, chlorite showed the most pronounced loss in the fine-grained gravel fraction, decreasing by 10% due to the combined effects of thermal stress induced by temperature fluctuations and the leaching action of infiltrating water. Accompanying the loss of pore-filling, magnesium-rich chlorite, various elements in the plough layer soil exhibited different degrees of enrichment. The sequence of element release from the gravel into the soil, ranked from highest to lowest relative release intensity, was ranked by ability as follows: $Mg > Ca > Fe > Mn > K > Zn$. (3) Correlation analyses and principal component analysis (PCA) further confirmed that the physical weathering characteristics of the gravel, including mass loss and water absorption rate, were significantly correlated with the content of rock-forming elements in the soil ($P < 0.05$). This finding demonstrates that water-rock interaction under dry-wet cycles has a pronounced influence on gravel fragmentation and also significantly modulates the elemental composition of the soil. 【Conclusion】 In conclusion, the dry-wet cycling process serves as an effective accelerator for the weathering of mulching gravel in degraded sand fields. The elemental leaching accompanying gravel fragmentation plays an important role in supplementing soil nutrients in the plough layer. Notably, the fine-grained gravel fraction exhibits the strongest nutrient release capacity among all tested particle sizes. These results suggest that the surface gravel layer in degraded sand fields possesses a certain potential for resource utilization in terms of nutrient supply. This study provides a new and valuable perspective for improving the soil environment of mulched sand fields, mitigating the ongoing degradation of such fields, and facilitating their future reclamation.

Key words: Gravel-mulched farmland; Mulching gravel; Dry-wet cycles; Element leaching; Topsoil

灰绿板岩是一种变质泥岩，可作为有效的物理屏障覆盖在砂田土壤表面，覆盖厚度通常为 6~15 cm，是西北旱区传统且独特的抗旱耕作方式^[1]。随着种植年限的延长，表层砾石在自然风化和农耕活动作用下逐渐破碎细化，砂田增温保墒等功能逐渐消退。同时，由于砾石覆盖限制了底肥施用和土壤培肥措施的实施，耕层土壤养分难以得到持续补充，导致土壤肥力下降和农业生产能力减弱^[2]。为应对砂田退化导致的作物减产、经济效益降低问题，现有研究就田间管理措施^[3]、耕作模式改进^[4]和外源调理剂施用^[5]等方面开展了长期研究。这些措施在一定程度上遏制了砂田退化撂荒，但对于长期连续利用（30 年以上）砂田的可持续生产能力提升仍存在一定局限性。当砂田退化至一定程度，通常选择休耕^[6]，然而受表层砾石覆盖影响，休耕期间土壤培肥措施实施难度较大，养分补给不足的问题依然存在。因此，如何在降低治理成本的同时提升土壤养分供给能力，实现退化砂田的可持续修复与利用，已成为当前砂田治理面临的重要科学问题。

岩石是土壤形成的主要母质来源之一,其风化过程决定了矿质养分向生态系统释放的速率和可利用性,并深刻影响岩石-土壤-植物系统中的物质循环^[7]。在砂田种植中,覆盖层砾石风化不可避免,自然和人为因素会大幅提升砾石风化进程,这是砾石结构层发生破坏的重要原因^[8]。因此,研究砾石风化的养分释放潜力对改善土壤环境和植物生长具有重要意义。由于压砂砾石主要分布在土壤表面,其风化进程主要受水分^[9]和气候条件^[10]的影响。西北地区气候条件恶劣,季节性变化会引发淋溶效应^[11],其中主要涉及冻融循环和干湿循环两个过程,而砂田覆盖砾石中含有绿泥石等层状硅酸盐矿物,在干湿交替条件下易发生膨胀收缩和淋溶流失。室内试验已基本探明温湿度及作用时长耦合作用下各粒径压砂砾石的裂化效果及其淋溶作用下的元素析出及释放能力^[12]。后续大田研究表明,压砂砾石主要成分为硅酸盐,具有一定风化及土壤养分补给能力,且其重金属迁移未超标^[13]。当前相关研究多聚焦于压砂砾石干湿循环或冻融循环作用下的损伤机理或风化程度因素筛查,然而,关于砾石风化过程中元素释放对土壤养分的调控机制尚不明确,尤其是田间条件下砾石裂化与养分释放之间的定量关系仍缺乏系统研究,亟待通过田间试验验证水-岩作用下砾石元素析出对土壤元素的调控特征,并量化砾石裂化对农业生产的影响程度。

鉴于此,本研究选取连续种植 30 年以上且处于休耕期的退化砂田,通过监测模拟干湿循环作用下不同粒径砾石的裂化特征,解析砂田耕层土壤养分对砾石风化的响应机理,并初步评价砾石中养分的资源化潜力,以期为砂田土壤环境改良及退化砂田复垦提供理论基础和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区地处宁夏中部干旱带中卫市沙坡头区香山乡(36°56'24"N, 105°13'44"E),平均海拔 1 479.20 m。该区干旱少雨,气候多变,属于典型的温带半干旱大陆性气候^[14],多年平均降水量为 180~200 mm,平均蒸发量高达 2 100~2 400 mm。

1.2 样品采集与处理

供试砾石样品于 2024 年 5 月取自研究区连续种植 30 a 以上且处于休耕期的退化砂田。样品采用“S”形取样法采集,确保所取样品具有代表性。覆盖砾石主要为奥陶纪灰绿-深灰色变质板岩,结合水质量分数为 0.3%^[15],元素组成见表 1,样本数量均为 3。覆盖物中 2~15 mm 粒径灰绿板岩占比居多^[16],针对覆盖物主要粒径范畴进行研究,试验前经美国材料与试验协会的 5、10、15、20 mm 圆孔筛将灰绿板岩划分为三种粒径 5~10、10~15、15~20 mm,筛分后样品经去离子水反复清洗,直至洗液无明显浑浊,置于室内自然风干备用。经测量其容重分别为 1 650、1 620、1 580 kg·m⁻³。

表 1 压砂砾石元素组成及含量

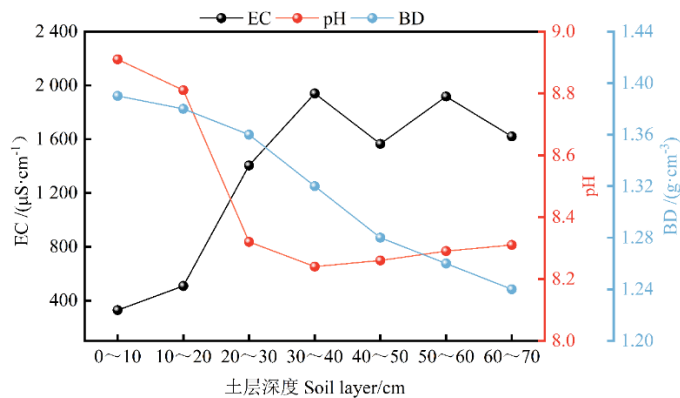
Table 1 Elemental composition and content of mulched gravels

元素 Element	含量 Content/(mg·L ⁻¹)	元素 Element	含量 Content/(mg·L ⁻¹)	元素 Element	含量 Content/(mg·L ⁻¹)
钨 W	1.29±0.08	镍 Ni	25.25±9.38	钛 Ti	1 578.10±98.04
铍 Be	1.79±0.13	锌 Zn	44.75±2.88	硅 Si	143 647.20±25.20
锡 Sn	2.60±0.17	镓 Ga	13.59±0.44	铝 Al	35 305.74±44.37
钴 Co	7.44±1.17	铅 Pb	11.93±0.16	铁 Fe	15 788.19±653.22
砷 As	1.58±1.16	锶 Sr	27.87±0.49	磷 P	609.56±125.59
硒 Se	7.12±0.33	硫 S	88.66±0.01	钙 Ca	12 201.01±3 617.44
钼 Mo	0.33±0.13	硼 B	38.18±3.19	镁 Mg	11 053.64±2 714.38
镉 Cd	0.09±0.01	锂 Li	29.62±1.79	钾 K	21 786.89±2 724.56
钒 V	36.11±1.45	锰 Mn	276.99±30.15	钠 Na	10 215.89±1 545.50

铬 Cr	28.68±2.75	铜 Cu	24.33±17.80
------	------------	------	-------------

1.3 试验设计

于 2024 年 4–9 月开展土柱试验, 试验装置为聚氯乙烯 (PVC) 圆桶, 内径 40 cm, 高 80 cm, 壁厚 0.50 cm, 底部预留透水孔以确保水分正常流通。圆桶埋设于地下, 桶口高出地面 5 cm, 以规避极端降雨产生径流对试验的不利影响。装置内壁均匀涂抹凡士林以减少边界效应, 将原状土按 10 cm 分层回填至桶内, 总回填深度为 65 cm, 层间进行打毛处理, 原状土基本理化性质见图 1。依据现有研究及实地调研确定覆盖层厚度为 10 cm。在土层装填完毕静置 24 h 后, 依据砾石容重及铺设厚度计算 5~10、10~15、15~20 mm 的砾石覆盖质量分别为 20.74、20.36 和 19.86 kg, 经电子秤 (量程 200 kg, 精度 0.01 kg, 万特) 称量后将其均匀覆盖于土表。



注: EC 为土壤电导率, BD 为土壤容重。Note: EC is soil electrical conductivity, and BD is soil bulk density.

图 1 土壤基本理化性质

Fig. 1 Basic physicochemical properties of the soil used in the study

本研究为避免产生地表径流并实现良好的干湿循环, 基于试验区 2010–2019 年 6–8 月多年平均蒸发量 (图 2a: 中国气象网, <http://data.cma.cn/site/index.html>) 及 10 cm 灰绿板岩覆盖层的保水性能^[17], 结合试验装置尺寸确定 5~10、10~15、15~20 mm 的砾石每次干湿循环淋水量分别为 660、640 和 560 mL; 淋水时机通过温度传感器 (ZL6, METER, Pullman, WA, 美国) 预试验测定 3 种粒径压砂砾石覆盖层的日温度变化趋势 (图 2b), 选定每日 14:00 (覆盖层温度最高时刻) 进行淋水, 是否进行干湿处理以每日温度传感器温度数值为准 ($\geq 50^\circ\text{C}$)。采用灌溉用水, 经雷磁 DDBJ-350 便携式电导率仪及 pH 仪测定其电导率为 $0.62\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, pH 为 8.47, 矿化度为 $0.34\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 采用喷洒壶淋水以求达到均匀淋水效果。

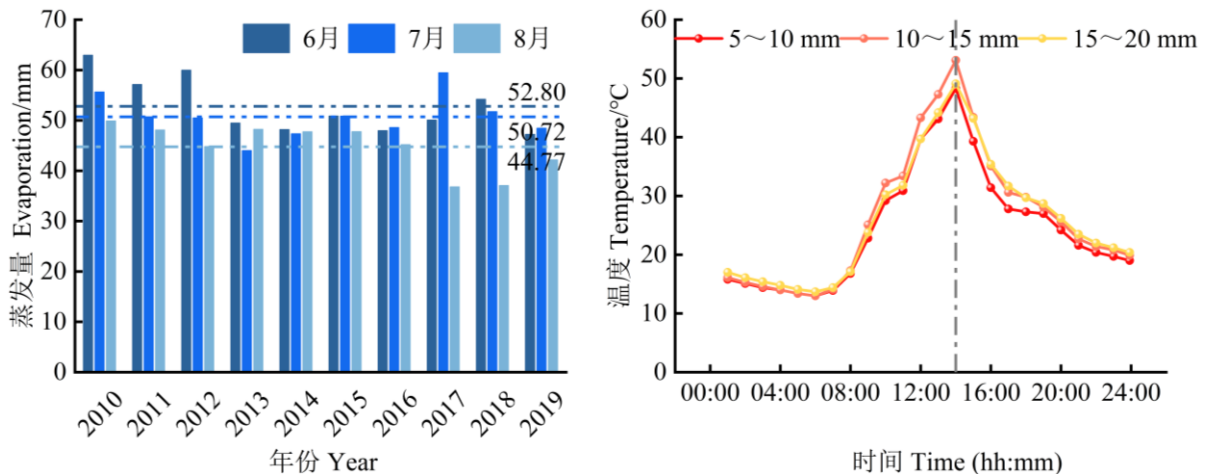


图 2 研究区 2010–2019 年 6–8 月平均蒸发量及压砂砾石层温度日变化曲线

Fig. 2 Average evaporation rate from June to August in the research area from 2010 to 2019 and diurnal temperature variation of the mulched gravel layer

采用完全随机试验,砾石粒径设置三个水平分别为 5~10 (S1)、10~15 (S2)、15~20 mm (S3),干湿循环是否参与砾石风化过程设置为干湿 (C1) 和无干湿 (C2),各处理组合 (C1S1、C1S2、C1S3、C2S1、C2S2、C2S3) 均重复三次。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 砾石自由吸水率及质量损失率 根据《天然石材试验方法 GB/T 9966.3—2020》测定压砂砾石的自由吸水率 (WA),具体操作步骤如下:首先将样品洗净,置于 105~110 °C 电热鼓风干燥箱中烘干 12~24 h 至恒重,冷却至室温 (20±2 °C) 后称得其干质量为 M_0 。随后,将烘干样品置于容器中,采用分级注水浸泡的方式使其充分吸水:依次加水至试样堆积高度 1/4、1/2、3/4 处,每级浸泡 2 h,累计浸泡 6 h;之后加水至高出试样表层约 2 cm,常压下持续自由吸水 48 h。吸水过程结束后,取出样品,沥干水分并用湿润纱布擦去表面残留水,立即称取其饱和面干状态下的质量 M_1 。自由吸水率 (WA) 按下式计算:

$$WA = [(M_1 - M_0) / M_0] \times 100\% \quad (1)$$

采用称重法,于试验处理前、后分别测定砾石质量。首先将试样洗涤后烘干至恒重,称得其初始质量 (m_0);经特定条件处理后,再次将试样洗净,烘干至恒重,称得其处理后质量 (m_1)。压砂砾石的质量损失率 (ML) 按下式计算:

$$ML = |(m_1 - m_0) / m_0| \times 100\% \quad (2)$$

1.4.2 砾石矿物组成分析 试验结束后采集表层代表性砾石样品,蒸馏水冲洗 3 次,室内自然风干后密封保存。选取代表性砾石破碎、研磨后过 200 目尼龙筛,采用 X 射线衍射仪 (XRD, 6100, SHIMADZU, 日本) 进行物相分析,使用 Cu K α 辐射,操作电压 40 kV,电流 30 mA。扫描范围设定为 3°~85° (2 θ),步宽 0.02°,每步停留时间为 3 s。获得 XRD 图谱后,利用 Jade 软件对矿物组成进行鉴定及相对含量分析。

1.4.3 耕层土壤营养元素及其富集比测定 待表层砾石样品取样完成后,采用土钻法采集 0~40 cm 耕层土壤样品,置于阴凉处自然风干。经研钵研磨并通过 200 目筛后,使用微波消解系统 (CEM, Matthews, NC, 美国),以 HCl、HNO₃ 和 HF 混合酸体系 (体积比为 2:1:1) 对土壤样品进行消解。消解完成后,利用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, NexION 350X, PerkinElmer, 美国) 对样品中化学元素含量进行分析。

元素富集率 (B_r) 用于量化砾石覆盖土壤与裸地土壤之间元素差异的指标,反映元素在砾石覆盖土壤中相对于裸地土壤的富集程度,按下式计算:

$$B_r = (E_1 - E_2) / E_2 \quad (3)$$

式中, E_1 为干湿循环作用下的耕层土壤元素含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; E_2 为无干湿循环参与下耕层土壤元素含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.5 数据处理与分析

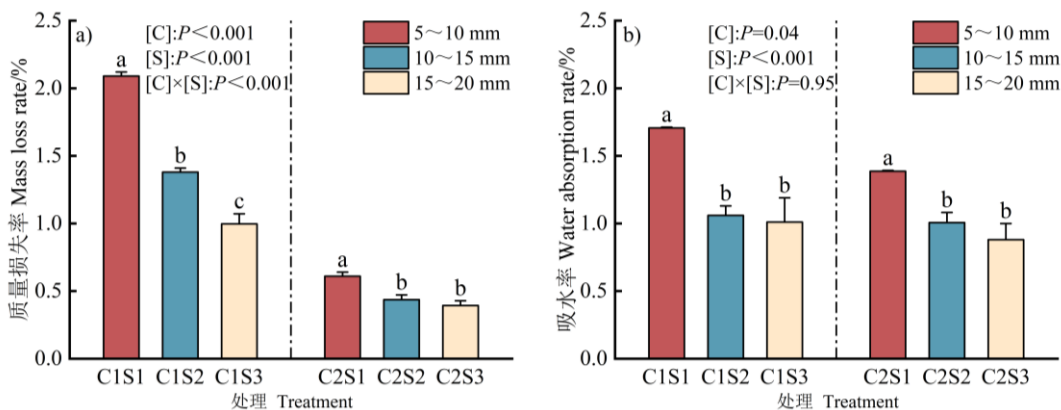
试验数据采用 Excel 2019 进行初步整理与汇总。利用 SPSS Statistics 27 软件采用双因素方差分析 (Two-way ANOVA) 检验砾石粒径、干湿循环及其交互作用对压砂砾石风化特征及砂田耕层土壤营养元素含量的影响,并使用邓肯 (Duncan) 法进行事后检验 ($P < 0.05$)。采用 Origin 2022 进行砾石风化特征与土壤元素间的皮尔逊 (Pearson) 相关性分析及主成分分析 (PCA) 及图表绘制。

2 结果

2.1 压砂砾石干湿循环作用下质量损失与吸水特性

压砂砾石质量损失率 (ML) 可有效反映干湿循环条件下不同粒径压砂砾石风化速率差异, 如图 3a 所示, 干湿循环、砾石粒径及其交互作用对 ML 具有极显著影响 ($P<0.001$)。无论是否经历干湿循环, 砾石 ML 均随粒径增大呈下降趋势, 且最小粒径 (5~10 mm) 对应的质量损失率达到峰值 (2.09%)。相同粒径范围内, 干湿循环使三种粒径砾石的 ML 提高约 2 倍, 其中 5~10 mm 砾石质量损失率增幅最大 (2.42 倍), 15~20 mm 砾石增幅最小 (1.54 倍)。

自由吸水率 (WA) 是反映材料内部孔隙结构的重要指标。由图 3b 可知, 砾石粒径对 WA 存在极显著影响 ($P<0.001$), 表现为无论有无干湿循环, 5~10 mm 粒径砾石的 WA 最高, 而 10~15 mm 与 15~20 mm 粒径间无显著差异。干湿循环作用显著影响压砂砾石吸水特性 ($P=0.04$), 同一粒径砾石自由吸水率经干湿循环后明显得到提升, 5~10 mm 粒径最明显, 相对增加了 23.1%。此外, 干湿循环和砾石粒径的交互作用对压砂砾石风化速率的影响不具备统计学意义 ($P=0.95$)。



注: C1、C2 分别表示干湿处理和无干湿处理, S1、S2、S3 分别表示砾石粒径为 5~10、10~15、15~20 mm。[C]代表干湿处理的主效应, [S]代表砾石粒径的主效应, [C]×[S]代表干湿处理与砾石粒径的交互效应。不同小写字母表示相同干湿处理下不同砾石粒径间差异显著 ($P<0.05$)。Note: C1, C2 represent with and without dry-wet cycles, respectively; S1, S2, and S3 represent gravel particle sizes of 5~10, 10~15, and 15~20 mm, respectively. [C] represents the main effect of dry-wet treatment, [S] represents the main effect of gravel particle size, and [C]×[S] represents the interaction effect between the two factors. Different lowercase letters indicate significant differences among gravel particle sizes under the same dry-wet treatment ($P<0.05$).

图3 干湿循环作用下不同粒径压砂砾石质量损失率 (a) 与自由吸水率 (b) 变化特征

Fig. 3 Effects of wet-dry cycles on mass loss rate (a) and water absorption rate (b) of mulched gravel with different particle sizes

2.2 压砂砾石矿物组成变化及其 XRD 特征

为定量分析不同粒径压砂砾石在风化过程中矿物成分及含量的变化, 采用 XRD 分析不同处理组合下压砂砾石矿物组成及含量变化^[18]。由图 4 可知, 供试压砂砾石以石英为主要优势矿物, 伴生矿物以硅酸盐类矿物为主, 仅含少量方解石, 整体属于典型硅酸盐岩岩性。干湿循环显著影响石英和绿泥石含量, 二者含量变化呈负相关关系。在 5~10 mm 粒径范围内, 干湿循环处理引起的石英与绿泥石含量波动最为显著, 石英含量相对增加 13%, 绿泥石含量相对减少 10%, 且石英增幅和绿泥石降幅远大于 10~15 mm 和 15~20 mm 两组粒径区间, 而后两者间的差异相对较小, 该变化在 XRD 图谱中亦有明确反映, 石英的衍射峰强度增强, 而绿泥石的衍射峰强度明显减弱。值得注意的是, 亲水性黏土矿物的淋失程度与其自身亲水性强弱密切相关, 压砂砾石中亲水性黏土矿物并非均因干湿循环作用而流失, 在干湿循环作用下 3 种粒径压砂砾石仅有绿泥石百分含量出现明显下降, 而伊利石和百分比含量极低的高岭石对干湿循环作用的响应程度有限, 对应的 XRD 图谱中其衍射峰未发生明显变化。此外, 干湿循环处理对原生矿物 (钠长石) 和碳酸盐矿物 (方解石) 的含量并未产生明显影响, 其衍射峰强度在处理前后未见明显差异。

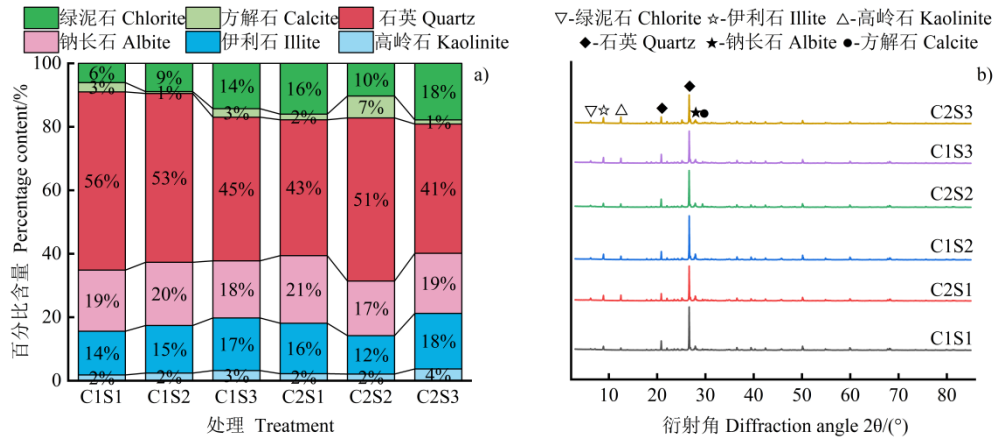


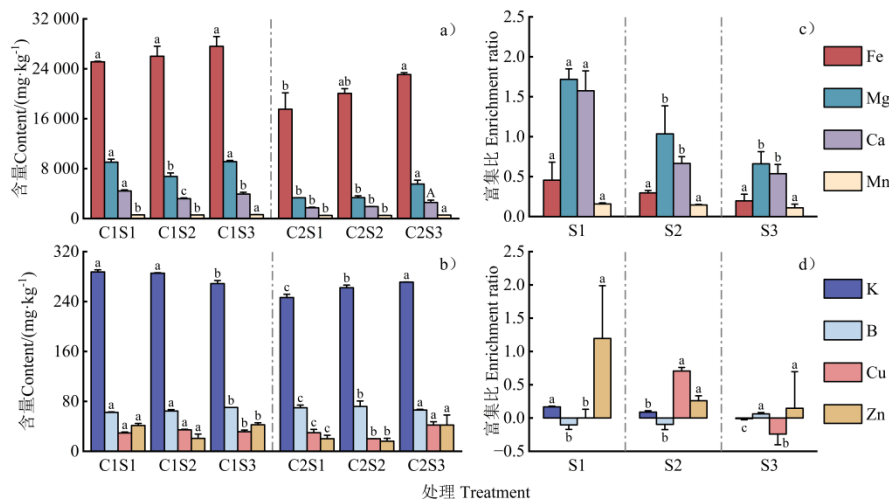
图4 干湿循环作用下不同粒径压砂砾石矿物百分比含量 (a) 与X射线衍射 (XRD) 衍射图谱 (b)

Fig. 4 Mineral content (a) and X-ray Diffraction (XRD) patterns (b) of mulched gravel with different particle sizes under wet-dry cycles

2.3 干湿循环中砾石元素释放通量及其对耕层土壤元素组成的重塑作用

耕层土壤 (0~40 cm) 的水分和养分状况是制约农业高质量发展的关键因素之一^[19], 而作物正常生长必需的 16 种营养元素中, Mg、Ca、Mn、Fe、K、B、Cu、Zn 在土壤-植物系统中具有不可替代的作用, 直接影响作物生理代谢、产量形成与品质构成^[20]。如图 5a、图 5b 所示, 退化砂田耕层土壤以 Mg、Ca、Mn、Fe、K 造岩元素为主 (含量大于 200 mg·kg⁻¹), 按照含量从高到低顺序排列为: Fe>Mg>Ca>Mn>K, 而 B、Cu、Zn 等植物必需营养元素则相对匮乏。干湿循环、砾石粒径及其交互作用对耕层土壤中造岩元素的含量均有显著影响, 但对 B、Cu、Zn 影响有限 (表 2)。无干湿循环作用时, 不同粒径下元素含量差异显著但无明显规律; 干湿循环参与后, Fe、Mg、Ca、Mn、K 和 Zn 含量较未处理的土壤明显增加, 以造岩元素增幅最突出, 其余元素在不同粒径下未表现出明显的增加或减少趋势。此外, 6 种元素增幅与粒径表现出明显的负相关性, 同一粒径下元素增量均表现为 Fe>Mg>Ca>Mn>K>Zn。在 5~10、10~15 和 15~20 mm 三种砾石覆盖下的耕层土壤中 8 种元素增加总量均值分别为 16 141、10 732、9 514 mg·kg⁻¹, 元素增量在 5~10 mm 粒径处理下最为显著, 而 10~15 mm 与 15~20 mm 粒径间差异较小, 元素积累量同砾石粒径呈负相关关系。

经干湿循环后, 上述 6 种元素在耕层土壤中均发生富集 ($B_r > 0$), 且同一元素以 5~10 mm 粒径下的富集率最高。五种元素的富集程度为: Mg>Ca>Fe>Mn>K, B、Cu 的富集和消耗与砾石粒径不存在明显规律性 (图 5c, 图 5d)。



注: 不同小写字母表示同种元素在相同干湿处理不同砾石粒径间差异显著 ($P < 0.05$)。Note: Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) among different gravel particle sizes for the same element under the same dry-wet treatment.

图5 干湿循环下压砂砾石对耕层土壤营养元素含量 (a, b) 及其富集率 (c, d) 的影响

Fig. 5 Nutrient content (a, b) and enrichment rate (c, d) of cultivated soil in response to gravel-mulching under wet-dry cycles

表 2 干湿循环、粒径及其交互作用对耕层土壤营养元素的双因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA examining the effects of wet-dry cycles, particle size, and their interaction on topsoil nutrient elements

元素 Element	有无干湿 Dry-wet cycles	粒径 Particle size	有无干湿∩粒径 Dry-wet cycles ∩ Particle size
Fe	***	**	*
Mg	***	***	**
Ca	***	***	***
Mn	***	***	*
K	***	*	***
B	ns	ns	ns
Cu	ns	**	***
Zn	*	**	ns

注：“*”表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著；“**”表示在 $P<0.01$ 水平上差异显著；“***”表示在 $P<0.001$ 水平上差异极显著；ns 则表示在 $P>0.05$ 水平上差异不显著。Note: “*” indicates a significant difference at the level of $P<0.05$; “**” indicates significant difference at the level of $P<0.01$; “***” indicates extremely significant difference at the level of $P<0.001$; “ns” indicates no significant difference at the level of $P>0.05$.

3 讨 论

3.1 水-岩作用下压砂砾石风化机理

砾石覆盖层处于土壤表层，受人为干扰与外部复合胁迫因素作用相对有限，区域气候温湿度节律是主导砾石风化进程的核心环境因子^[21]。本研究模拟干旱区存在的干湿循环现象，探讨水-岩相互作用对岩石风化过程的促进作用。结果表明，在干湿交替条件下，温差效应与溶蚀效应共同显著影响压砂砾石的质量损失和吸水率，且细粒砾石对干湿循环作用表现出更高的敏感性（图 3）。在干旱区夏季极端气候条件下，砾石表面温度较高，在风力和云层覆盖等因素影响下易发生温度波动。这种由低幅值循环热荷载引起的热胀冷缩作用会逐渐导致砾石表面裂纹扩展，最终引起毫米级碎屑从表面剥离^[22]。干湿循环过程进一步强化了砾石表层温度梯度差异，同时伴随持续的水岩溶蚀作用^[23]，在温差与溶蚀的耦合机制下，压砂砾石表面的裂纹和孔隙得以进一步扩展，从而提高了碎屑脱落效率。此外，无论干湿循环是否参与风化过程，岩石粒径始终是控制其整体风化速率的关键因素。细颗粒通常具有更大的比表面积，能够更充分和深入地与外源物质接触，因而对水分、温度等环境变化更为敏感^[24]。该结论与刘民安等^[8]基于扫描电子显微镜（SEM）图像及二值化定量分析的结果一致，即小粒径砾石在干湿循环作用下表现出最大的质量损失、最多的孔隙数量和最大的开度。

通过对压砂砾石样品的 X 射线衍射分析，发现其矿物组成以硅酸盐矿物为主，方解石含量较低（图 4）。该现象可能与退化砂田（种植年限大于等于 30 a）在长期连续耕作过程中受到自然或人为因素影响有关，导致碳酸盐发生溶解，仅少量方解石因赋存于非连通孔隙中得以保存^[25]。本研究区砾石在干湿循环下的最大质量损失率为 2.09%，低于杨凯旋^[26]室内干湿循环溶蚀试验所得质量损失率（3.84%），说明研究区淋滤作用较弱，化学风化程度低，不利于高岭石的生成，也抑制了其迁移流失^[27]。在干湿循环参与砾石风化的过程中，长石、伊利石和高岭石的含量未发生显著变化（图 4a），表明三者之间并未发生明显的矿物转化，这代表着干湿交替条件下弱碱性水体对砾石的化学风化作用较为有限^[28]。除此之外，石英与绿泥石含量变化呈现明显的负相关关系（图 4a）。绿泥石含量的持续下降可作为有限化学风化和较弱风化强度的指示标志^[29]。绿泥石通常以碎屑形式^[30]、颗粒包膜^[31]或孔隙填充物^[32]存在，研究区砾石中的绿泥石很可能以孔隙填充形式存在。因此，在化学风化作用有限的背景下，干湿循环引起的膨胀-收缩效应使得孔隙开度扩展，使得绿泥石从岩石中脱离并发生淋滤流失和孔隙扩展，在上述砾石质量损失率和吸水率的结论（图 3）中已得到论证。此外，绿泥石晶体结构中的二价铁离子在水分、氧气和温度升高的条件下易发生氧化，转变为离子

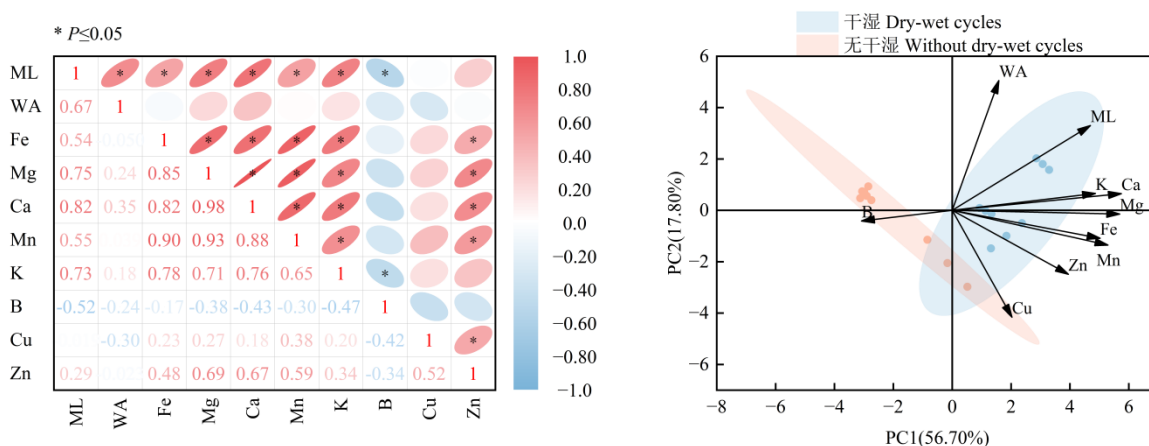
半径较小的三价铁,该过程引起绿泥石晶格收缩变形,进而破坏其晶体结构,也可能是导致绿泥石含量减少的重要原因。

3.2 砾石覆盖下耕层土壤营养元素含量及其对砾石矿物成分变化的响应

砾石覆盖对耕层土壤中造岩元素的调控作用已获证实,风化过程导致其含量与裸土形成显著差异,且不存在潜在重金属富集的风险^[33]。砂田耕层土壤五种造岩元素中 Fe 元素含量最多,但相对无干湿循环的元素富集率却表现为 Mg 元素富集程度最高(图 5)。绿泥石是一种富含铁、镁元素的黏土矿物,存在两种赋存状态,其中富镁绿泥石多出现在岩石碎屑颗粒中,富铁绿泥石通常以覆粒充填型存在于岩石孔隙中^[34]。土壤造岩元素以 Fe、Mg 元素为主的主要原因可能来自砾石矿物成分中绿泥石的淋溶作用。根据砾石风化过程中的水-岩相互作用机制,本研究猜测砾石中绿泥石可能以孔隙填充物存在,结合长期种植砂田土壤元素中 Fe 元素含量高于 Mg 的实测结果,可初步判定研究区砾石中绿泥石多以富铁孔隙填充物存在。退化砂田中 Fe 元素含量最高,反映了长期强风化作用下的累积效应,而 Mg 在无干湿循环的砾石覆盖下表现出最强的富集率和敏感性,则与元素自身溶解度密切相关,Fe 在水中溶解度极低,而 Mg 则相对易溶,导致地层水中 Mg 的迁移性和可获性较高,此外,在不考虑掺杂其他矿物的情况下,绿泥石通常不含 K,或者是钾长石含量较低^[35],矿物释钾能力有限,最终导致土壤 K 元素含量与富集度整体偏低。

3.3 耕层土壤中各元素间以及同砾石物理风化特征的相关性与主成分分析

岩石风化作用是关键的地质演化过程,在控制表生地球化学元素循环时扮演重要角色,深刻影响地球表层系统的物质循环和能量交换^[36]。岩石风化过程中元素淋溶会对土壤营养元素和综合肥力产生深远影响^[37]。压砂砾石作为土壤表层的覆盖材料,其自身粒径特性与外界温湿度条件共同影响着耕层土壤中营养元素的含量。Pearson 相关性分析(图 6)表明,耕层土壤中 Fe、Mg、Ca、Mn、K 五种造岩元素之间存在显著的同向变化趋势,且对干湿循环作用的响应程度极高。相比之下,Zn 和 Cu 与上述五种造岩元素之间的耦合关系并不明显,且未发现其与砾石存在或水-岩作用参与的风化过程具有显著统计学关系。此外,B 元素的表现则截然不同,其在耕层土壤中与其他监测元素均呈显著的负相关,同时对砾石粒径和干湿循环也表现出负向响应。砾石性质变化、黏土矿物流失与土壤元素平衡三者之间形成紧密关联。岩石风化过程中,砾石的质量损失和吸水率变化反映了内部黏土矿物的流失。这些黏土矿物进入土壤后,因其独特的吸附和交换特性,会改变土壤原有的元素含量和分布,从而打破元素平衡。主成分分析可区分覆盖层砾石在有干湿循环参与下的砂田土壤。第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)的贡献率分别为 56.70%和 17.80%,足以反映原始数据的大部分信息。此外,第一主成分以造岩元素为核心贡献因子,进一步证实水-岩作用诱导的砾石造岩元素淋溶迁移,是重塑砂田耕层土壤营养元素组成的关键驱动因子。



注: ML 为质量损失率, WA 为自由吸水率。Note: ML is the mass loss rate, and WA is the water absorption rate.

图 6 砾石物理风化特征与耕层土壤营养元素含量相关性分析和主成分分析 (PC)

Fig. 6 Correlation and principal component (PC) analysis on the relationship between gravel physical weathering and nutrient element content in plough layer soil

3.4 退化砂田表层砾石养分资源化潜力及未来发展方向

根据实际调研与相关研究^[6]不难发现,砂田耕作年限同其退化程度关联密切,种植年限达 50 a 常被视为砂田退化撂荒的阈值,而休耕管理是退化砂田向撂荒压砂地转变的关键节点。目前治理撂荒砂田的主要措施为推砂换种,但高昂的推砂成本和替代作物的种植适宜性等问题是治理措施落实的重要阻碍^[2]。我国西北砂田分布区气候干旱、温湿度季节波动剧烈,自然干湿交替作用叠加长期人为农耕扰动,显著加速表层压砂砾石裂化、风化与成壤进程,砾石风化产物的持续淋溶,也是调控砂田耕层土壤环境与元素组分的核心因素^[15]。随着 Beerling 等^[38]提出采用异地硅酸盐岩固碳技术应用于农田固碳后,引起了全球学者的广泛关注。部分地区与国家配施硅酸盐粉在农田固碳区域的适应性开展了相关研究,甚至部分地区已得到推广。随着此项研究的持续深入,硅酸盐岩粉在风化过程中对农作物生长的积极效益逐渐被揭示^[39]。西班牙的一项研究中提到,用于抑制蒸发和吸收、保持水分的土壤表层硅酸盐岩覆盖物可作为农田固碳硅酸盐岩粉的重要来源^[40]。虽然农田配施仍存在诸多不确定性,但硅酸盐砾石覆盖物作为一种增强岩石风化、固碳以及作物硅酸盐改良剂具有重大应用前景,未来发展或许可以沿着这一重要视角深化研究。

4 结 论

砂田表层砾石的主要成分为硅酸盐矿物,在干湿循环作用下以物理风化为主导。细粒砾石(5~10 mm)对干湿循环响应最敏感,其质量损失率和吸水率分别达到 2.09%和 1.70%,相较对照组分别提高了 2.42 倍和 23%。同时,绿泥石为 5~10 mm 粒径砾石风化过程中的主要流失矿物,其含量下降 10%,且元素释放能力表现为: Fe>Mg>Ca>Mn>K>Zn, B 和 Cu 元素含量无明显变化。造岩元素富集程度表现为: Mg>Ca>Fe>Mn>K>Zn。这表明退化砂田表层砾石具有较高的养分释放与资源化潜力,在砂田休耕期适当保留砾石覆盖,利用自然干湿循环,促进砾石风化、释放养分,减少对人工施肥的依赖,细粒风化砾石可考虑作为土壤改良材料,用于退化砂田的复垦,同时硅酸盐砾石风化过程具有固碳潜力,未来可探索在砂田管理中结合岩石风化技术,在改良土壤的同时协同实现农田固碳目标。

参考文献 (References)

- [1] Zhou H Y, Wang Y J, Fan H W, et al. Wind tunnel test on wind erosion resistance of gravelly farmland in the arid zone of central Ningxia[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(1): 41-49. [周海燕, 王瑛珏, 樊恒文, 等. 宁夏中部干旱带砂田抗风蚀性能研究[J]. *土壤学报*, 2013, 50(1): 41-49.]
- [2] Wang Y Q, Zhang X, Zhao Y P, et al. Interpolation of soil CEC of sandy fields using GIS and geographically weighted regression-Kriging[J]. *Soils*, 2020, 52(2): 421-426. [王幼奇, 张兴, 赵云鹏, 等. 基于 GIS 和地理加权回归的砂田土壤阳离子交换量空间预测[J]. *土壤*, 2020, 52(2): 421-426.]
- [3] Tan J L, Wang X N, Tian J C, et al. Effect of gravel-sand mulching on movements of soil water and salts under different amounts of brackish water[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(17): 100-108. [谭军利, 王西娜, 田军仓, 等. 不同微咸水灌水量条件下覆砂措施对土壤水盐运移的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(17): 100-108.]
- [4] Li K, Wu H L, Xu Q, et al. Effect of gravel-sand mulched field rotation patterns on soil enzyme activities and microbial flora[J]. *Northern Horticulture*, 2014(18): 185-189. [李凯, 吴宏亮, 许强, 等. 砂田轮作模式对土壤酶活性及微生物区系的影响[J]. *北方园艺*, 2014(18): 185-189.]
- [5] Li T F, Li W, Guo J Y, et al. Effects of soil conditioners combined with microbial agent on soil nutrient and *Citrullus lanatus* growth and yield in continuous cropping gravel mulch field[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(8): 1923-1930. [李停锋, 李雯, 郭君钰, 等. 土壤调理剂配施菌剂对连作压砂田土壤养分及西瓜生长、产量的影响[J]. *核农学报*, 2021, 35(8): 1923-1930.]
- [6] Jia Z J, Liu X Z, Li W C, et al. Evolution and regulation of soil quality and land productivity in continuous cropping gravel-sand mulched field in arid region: Progress and perspective[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(5): 2136-2148. [贾振江, 刘学智, 李王成, 等. 旱区连作砂田土壤质量和土地生产力演变与调控研究进展[J]. *生态学报*, 2024, 44(5): 2136-2148.]
- [7] Huang Y H, Jia Z J, Li W C, et al. Growth-affecting factors and adaptive strategies of lithophyte: Research progress and prospect[J]. *Journal of Soil*

- and Water Conservation, 2025, 39(2): 1-11. [黄亚浩, 贾振江, 李王成, 等. 石生植物生长影响因素及其适应策略: 研究进展与展望[J]. 水土保持学报, 2025, 39(2): 1-11.]
- [8] Liu M A, Dong Y P, Li C, et al. Damage process of gravel-sand under freeze-thaw-dry-wet cycle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(1): 176-187. [刘民安, 董亚萍, 李晨, 等. 冻融干湿循环条件下压砂砾石损伤过程[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 176-187.]
- [9] Xie C X, Antić N, Nadal-Romero E, et al. The influences of climatic and lithological factors on weathering of sediments in humid badland areas[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 900314.
- [10] Dalai T K, Singh S K, Trivedi J R, et al. Dissolved rhenium in the Yamuna river system and the *Ganga* in the Himalaya: Role of black shale weathering on the budgets of Re, Os, and U in rivers and CO₂ in the atmosphere[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2002, 66(1): 29-43.
- [11] Shang F Z, Yang P L, Li Y K, et al. Effects of different chemical nitrogenous fertilizer application rates on soil nitrogen leaching and accumulation in deep vadose zone[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(7): 103-110. [商放泽, 杨培岭, 李云开, 等. 不同施氮水平对深层包气带土壤氮素淋溶累积的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 103-110.]
- [12] Ma D X, Wang J, Li W C, et al. Study on elemental leaching pattern of mulched gravel under freeze-thaw-dry-wet cycle[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2023, 54(8): 79-87. [马东祥, 王洁, 李王成, 等. 冻融干湿条件下压砂砾石元素淋溶规律研究[J]. 东北农业大学学报, 2023, 54(8): 79-87.]
- [13] Liu Q L. Effects of magma elemental release of compacted gravel on soil environment, yield and quality of jujube fruit under dry-wet cycle[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023. [刘巧玲. 干湿循环下压砂砾石元素释放对土壤环境及枣果产量和品质的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2023.]
- [14] Sun Q, Wu H L, Chen F, et al. Fungal community diversity and structure in rhizosphere soil of different crops in the arid zone of central Ningxia[J]. Microbiology China, 2019, 46(11): 2963-2972. [孙倩, 吴宏亮, 陈阜, 等. 宁夏中部干旱带不同作物根际土壤真菌群落多样性及群落结构[J]. 微生物学通报, 2019, 46(11): 2963-2972.]
- [15] Li W C, Zhao Y, Wang S, et al. Influencing factors of element leaching of compressed gravel in Ningxia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(19): 152-159. [李王成, 赵研, 王帅, 等. 宁夏压砂地砾石元素淋溶影响因素研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 152-159.]
- [16] Wang Y Q, Ruan X H, Bai Y R, et al. Process of soil moisture infiltration and model analysis of gravel-mulched land with different planting years[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(10): 1048-1055. [王幼奇, 阮晓晗, 白一茹, 等. 不同种植年限压砂地土壤水分入渗过程及模型分析[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(10): 1048-1055.]
- [17] Li X Y, Shi P J, Liu L Y, et al. Influence of pebble size and cover on rainfall interception by gravel mulch[J]. Journal of Hydrology, 2005, 312(1/2/3/4): 70-78.
- [18] Wu P B, Liu Q, Xiao Z J, et al. Pyrolysis kinetics of multi-source biomass wastes and their fermentation products[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(13): 281-290. [吴彭冰, 刘骞, 肖子竣, 等. 多源生物质废弃物及其发酵产物的热解动力学研究[J]. 农业工程学报, 2025, 41(13): 281-290.]
- [19] Li N, Long J H, Han X Z, et al. Effects of short-term plowing and organic amendments on soil physical properties and maize yield in dark brown soil in Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(12): 99-107. [李娜, 龙静泓, 韩晓增, 等. 短期翻耕和有机物还田对东北暗棕壤物理性质和玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 99-107.]
- [20] Wang J, Li W C, Dong Y P, et al. Leaching regularity of mineral elements of mulched gravel in arid zone of central Ningxia[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2021, 52(2): 60-69. [王洁, 李王成, 董亚萍, 等. 宁夏中部干旱带压砂砾石矿质元素淋溶规律[J]. 东北农业大学学报, 2021, 52(2): 60-69.]
- [21] Ouyang K G, Jiang X W, Ma C, et al. Formation and transformation of condensate water inside rocks: Insight into source of rock moisture affecting weathering[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(2): 506-513. [欧阳恺皋, 蒋小伟, 马策, 等. 岩体表层凝结水的形成与转化规律: 对岩石风化水分来源的指示意义[J]. 地学前缘, 2023, 30(2): 506-513.]
- [22] Aldred J, Eppes M C, Aquino K, et al. The influence of solar-induced thermal stresses on the mechanical weathering of rocks in humid mid-latitudes[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2016, 41(5): 603-614.

- [23] Matsuoka N, Murton J. Frost weathering: Recent advances and future directions[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2008, 19(2): 195-210.
- [24] Wang J, Li W C, Mu M, et al. Particle size composition characteristics of weathered debris from grey - green slate under the action of freeze - thaw and dry-wet cycles[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 1421.
- [25] Zhu W X, Deng H F, Li J L, et al. Study on the deterioration law of microbial improved granite residual soil under dry-wet cycle[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2025, 44(2): 482-491. [朱文羲, 邓华锋, 李建林, 等. 干湿循环作用下微生物改良花岗岩残积土劣化规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2025, 44(2): 482-491.]
- [26] Yang K X. Experimental study on the macro-microscopic dissolution characteristics of gypsum-bearing carbonate rocks under wet-dry cycles[J]. *Railway Construction Technology*, 2026(2): 46-49, 72. [杨凯旋. 干湿循环作用下含石膏碳酸盐岩宏观溶蚀特性试验研究[J]. *铁道建筑技术*, 2026(2): 46-49, 72.]
- [27] Wang M Z, Wu C D, Wang L X, et al. Jurassic clay mineral assemblages in mudstones and geochemical characteristics in the southern part of Junggar Basin[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2014, 33(4): 421-430. [王明振, 吴朝东, 王陆新, 等. 准噶尔盆地南缘侏罗系泥岩黏土矿物组合及地球化学特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2014, 33(4): 421-430.]
- [28] Tang Y J, Jia J Y, Xie X D. Environment significance of clay minerals[J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2): 337-344. [汤艳杰, 贾建业, 谢先德. 粘土矿物的环境意义[J]. *地学前缘*, 2002, 9(2): 337-344.]
- [29] Rateev M A, Sadchikova T A, Shabrova V P. Clay minerals in recent sediments of the World Ocean and their relation to types of lithogenesis[J]. *Lithology and Mineral Resources*, 2008, 43(2): 125-135.
- [30] Griffiths J, Worden R H, Wooldridge L J, et al. Compositional variation in modern estuarine sands: Predicting major controls on sandstone reservoir quality[J]. *AAPG Bulletin*, 2019, 103(4): 797-833.
- [31] Wooldridge L J, Worden R H, Griffiths J, et al. Clay-coat diversity in marginal marine sediments[J]. *Sedimentology*, 2019, 66(3): 1118-1138.
- [32] Worden R H, Mayall M, Evans I J. The effect of ductile-lithic sand grains and quartz cement on porosity and permeability in Oligocene and lower Miocene clastics, South China Sea: Prediction of reservoir quality[J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84(3): 345-359.
- [33] Liu Q L, Li Y Y, Li W C, et al. Effect of the release of gravel elements on soil nutrients and jujube fruit yield under wet-and-dry cycles[J]. *Agronomy*, 2022, 12(11): 2881.
- [34] Worden R H, Utley J E P, Butcher A R, et al. Improved imaging and analysis of chlorite in reservoirs and modern day analogues: New insights for reservoir quality and provenance[J]. *Geological Society Special Publication*, 2020, 484(1): 189-204.
- [35] Worden R H, Griffiths J, Wooldridge L J, et al. Chlorite in sandstones[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 204: 103105.
- [36] Yang J L, Zhang G L, Huang L M. Rock weathering and soil formation rates of a forested watershed in the typical subtropical granite area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(2): 253-259. [杨金玲, 张甘霖, 黄来明. 典型亚热带花岗岩地区森林流域岩石风化和土壤形成速率研究[J]. *土壤学报*, 2013, 50(2): 253-259.]
- [37] Yang W, Peng X D, Dai Q H, et al. Leaching and input effects of exposed rock surface flow on soil nitrogen and phosphorus at rock-soil interface in rocky desertification mountainous area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(1): 86-97. [杨威, 彭旭东, 戴全厚, 等. 石漠化山区露石岩面流对岩-土界面土壤氮磷淋溶与输入作用的研究[J]. *土壤学报*, 2024, 61(1): 86-97.]
- [38] Beerling D J, Kantzas E P, Lomas M R, et al. Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands[J]. *Nature*, 2020, 583(7815): 242-248.
- [39] Guo F X, Sun H W, Yang J, et al. Improving food security and farmland carbon sequestration in China through enhanced rock weathering: Field evidence and potential assessment in different humid regions[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 903: 166118.
- [40] Bullock L A, Alcalde J, Tornos F, et al. Geochemical carbon dioxide removal potential of Spain[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 867: 161287.

(责任编辑: 陈荣府)