

文章编号: 1672 - 3317 (2024) 02 - 0041 - 06

冻融干湿循环条件下粒径及盐分对土壤粗颗粒风化速率的影响

穆 敏¹, 李王成^{1,2,3*}, 王 洁¹, 刘巧玲¹, 李阳阳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.省部共建西北土地退化与生态恢复国家重点实验室, 银川 750021)

摘要: 【目的】探究冻融干湿循环条件下, 土壤粒径及盐分对土壤粗颗粒风化速率的影响。【方法】以土壤粗颗粒(灰绿板岩)为研究对象, 设置粒径(10、20、30 mm)、盐分浓度(3、6、10 g/L 及蒸馏水作对照)两因素, 开展冻融干湿循环随机试验, 分析不同循环次数下土壤粗颗粒风化速率的变化规律。【结果】①在水盐溶液处理下土壤粗颗粒风化速率均比单纯水处理大, 10 g/L 盐分处理下的土壤粗颗粒风化速率大于其他处理。在 20~60 次冻融干湿循环之间, 10 mm 土壤粗颗粒的风化速率随盐分浓度的增加而增大。②土壤粗颗粒风化速率随粒径的增大呈减小趋势, 且 10 mm 的土壤粗颗粒风化速率大约是 30 mm 的 2 倍。③土壤粗颗粒风化速率随冻融干湿循环次数的增大而增大, A1B4(10 mm 10 g/L) 组合下的土壤粗颗粒风化速率最大。【结论】在冻融干湿循环影响下, 小粒径的土壤粗颗粒风化速率大于大粒径, 且水盐作用对土壤粗颗粒风化速率的影响大于单纯水作用。

关键词: 土壤粗颗粒; 冻融干湿循环; 风化速率; 风化成土

中图分类号: S152

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023089

OSID: 

穆敏, 李王成, 王洁, 等. 冻融干湿循环条件下粒径及盐分对土壤粗颗粒风化速率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(2): 41-46.

MU min, LI Wangcheng, WANG Jie, et al. Impact of particle size and soil salinity on weathering of mineral particles under freeze-thaw and drying-wetting cycles[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(2): 41-46.

0 引言

【研究意义】宁夏中部干旱带压砂地是一种利用砾石覆盖在土壤表面的旱作农田^[1], 有增温保墒, 抑蒸抗旱等作用^[2]。但由于长期不合理耕作, 砂地出现质地粗化^[3]、肥力下降^[4-5]等问题。本研究通过分析冻融干湿循环条件下, 不同粒径土壤粗颗粒在水盐环境中的风化速率, 以期为宁夏中部干旱带土壤粗颗粒成壤化进程提供数据支持。**【研究进展】**对于岩石风化的研究, 安文举等^[6]通过对压砂砾石进行干湿循环试验, 研究分析了砾石裂化过程中孔隙发育, 质量损失量和吸水率, 初步分析了压砂砾石的劣化过程。张继周等^[7]对不同水环境下的冻融试样进行电镜扫描, 发

现酸性溶液会导致岩石内部颗粒的胶结作用较弱, 结构变得松散, 使得酸性环境中的岩石更容易被冻融作用破坏。刘民安等^[8]通过模拟室内冻融干湿循环试验, 研究了不同粒径及不同盐分处理下的压砂砾石损伤机理。冯志刚等^[9]通过干热、湿热与干冷模拟 3 种气候条件, 对贵州中部岩溶区碳酸岩盐风化壳岩-土壤相交界面的岩粉层进行淋溶试验, 研究结果表明, 碳酸盐的溶蚀强度依次递减, 说明低温下碳酸盐的溶剂速率最大。Lin 等^[10]开展了干湿循环作用对砂岩力学特征影响的试验研究, 结果表明, 经历 60 次干湿循环作用后岩石的强度劣化至其自然状态的 80%。高文浩等^[11]对黄河粗砂区的砒砂岩进行研究, 得出降水、风力和冻融 3 种风化营力交替作用或叠加作用加速了砒砂岩的风化。赵吉霞等^[12]通过模拟酸雨淋溶对紫色母岩风化成土试验, 得出酸性越强, 母岩风化成土率越高, 淋溶覆盖土层越厚, 母岩风化成土率越低的结论。袁野^[13]通过干湿循环条件下泥岩颗粒破碎机理及渗透特性研究, 发现 2~5 mm 的颗粒破碎的程度更大, 随着循环次数的增加, 颗粒的破碎速率减缓。李王成等^[14]、王洁等^[15]通过对压砂砾石进行淋溶试验, 发现小粒径的砾石释放的有益元素量更多。目前

收稿日期: 2023-03-10 修回日期: 2023-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(52169010); 宁夏自然科学基金重点项目(2021AAC02008); 国家重点研发计划项目(2021YFD1900600); 宁夏重点研发计划项目(引才专项)(2019BEB04029); 宁夏大学研究生创新项目(CXXM2022-18)

作者简介: 穆敏(1994-), 女, 硕士研究生, 主要从事水资源高效利用研究。E-mail: 353280431@qq.com

通信作者: 李王成(1974-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事节水灌溉技术与理论、农业水资源高效利用研究。

E-mail: liwangcheng@126.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

研究主要集中在土壤粗颗粒对土壤肥力^[16]、盐分变化^[17-18]、水力传导率^[19]以及对环境的影响。【切入点】在退耕压砂地复垦过程中, 土壤粗颗粒风化速率的定量研究和风化机理研究较少。【拟解决的关键问题】本研究通过分析不同粒径土壤粗颗粒在盐分改变和冻融干湿循环作用下的风化速率, 探究土壤粗颗粒的风化机理, 为进一步研究土壤粗颗粒成壤化提供理论依据, 对退耕砂地生态恢复具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏中卫环香山地区 ($105^{\circ}13'44''E$, $36^{\circ}56'24''N$)。平均海拔高度 1 740 m。采样区属于典型的大陆性季风气候, 日照充足, 干旱少雨, 年平均降水量介于 180~200 mm, 蒸发量介于 2 100~2 400 mm, 昼夜温差大, 日照充足, 属于典型的极度干旱地区。

1.2 试验样品

于 2019 年 5 月在宁夏中卫市沙坡头区红圈子村尹东大队北部河流冲积沟壑中采集试验所需的灰绿板岩。采用钢卷尺手动挑选直径 10、20、30 mm 的土壤粗颗粒砾石带回实验室, 为避免砾石表面的杂质对试验的影响, 试验开始前对不同粒级灰绿板岩表面先用自来水清洗后再用蒸馏水清洗数遍。清洗后的样品放置室内自然风干后用烘箱烘干至恒质量, 以便后续各项试验指标的测定。

1.3 试验方法

本试验采用室内模拟试验, 设置 2 个因素(粒径、盐分浓度), 3 个粒径 10 mm(A1)、20 mm(A2)、30 mm(A3); 3 种 NaCl 质量浓度(3 g/L(B2)、6 g/L(B3)、10 g/L(B4)、蒸馏水(B1)作为对照组)。冻融干湿交替循环试验利用烘箱和冰箱完成, 试验共计 12 个处理, 每个处理重复 3 次, 共 36 次试验。试验设计详见表 1。

根据研究区 1990—2020 年累年月平均气温数据, 冬春季的冻融期和夏秋季的干湿期以及冻融循环试验规范参数设定作为参考, 设置冻融循环温度-20 ℃, 冷结时长 17 h, 融解温度为 25 ℃, 融解时长 7 h; 干燥温度为 30 ℃, 干燥时长 22 h, 浸水时长 2 h。一个完整的冻融干湿交替循环试验为 48 h, 循环次数为 80 次, 每循环 20 次测定相应指标。

表 4 土壤粗颗粒主要元素组成及含量

Tab.4 Composition and content of the main elements of soil coarse particles

元素	O	Si	Fe	Al	K	C	Na	Ca	H	Mg	TI	微量元素
百分比/%	54.16	31.56	3.42	4.19	2.30	1.19	1.22	0.42	0.37	0.35	0.31	0.51

表 1 试验设计

Tab.1 Experimental design

处理	粒径/mm	盐量/(g L ⁻¹)
A1B1	10	0
A1B2	10	3
A1B3	10	6
A1B4	10	10
A2B1	20	0
A2B2	20	3
A2B3	20	6
A2B4	20	10
A3B1	30	0
A3B2	30	3
A3B3	30	6
A3B4	30	10

1.4 风化碎屑量测定

灰绿板岩经历冻融干湿循环发生崩解破碎, 产生风化碎屑, 一般文献中以风化岩石颗粒直径小于 2 mm 即为风化成土, 每循环 20 次后称粒径≤2 mm 的颗粒质量, 每次粒径≤2 mm 颗粒质量增加量为风化崩解速率量^[20]。

1.5 数据分析

各处理下土壤粗颗粒的风化速率计算式如下:

$$V_i = M_{ni}/M_0 \times 100\%, \quad (1)$$

式中: V_i 为风化速率(%) ; M_n 为筛分出小于 2 mm 颗粒的质量(g) ; M_0 为初始灰绿板岩的质量(g) ; i 为循环次数。

2 结果与分析

2.1 土壤粗颗粒理化性质

土壤粗颗粒的主要物理性质如表 2, 土壤粗颗粒是一种灰绿板岩, 其天然含水率较低。但粗颗粒砾石风化成土后的营养组分丰富, 由表 3 和表 4 结果可知, 粗颗粒砾石为灰绿板岩, 层理结构, 从矿物成分组成来看。石英量为 44%, 云母和斜长石量均为 18%, 方解石量 4%, 黏土矿物绿泥石量 15%, 高岭石量 1%, 矿物颗粒间胶结力差, 黏土矿物易溶解, 吸水容易膨胀, 从而加快土壤粗颗粒风化速率。

表 2 土壤颗粒主要物理性质

Tab.2 Main physical properties of soil particles

粒径/mm	天然含水率/%	自由吸水率/%	饱和含水率/%	饱水系数
10	0.18	0.84	1.26	0.66
20	0.12	0.74	0.87	0.85
30	0.13	0.66	0.79	0.83

表 3 土壤颗粒主要矿物成分

Tab.3 Main mineral composition of soil particles

矿物名称	石英	绿泥石	云母	斜长石	方解石	高岭石
百分比/%	44	15	18	18	4	1

2.2 粒径对土壤粗颗粒风化速率的影响

图1是蒸馏水处理下,随冻融干湿循环进行不同粒径土壤粗颗粒风化速率的变化。如图1可知,在蒸馏水处理下,土壤粗颗粒风化速率随粒径的增大呈减小趋势,在40~60次冻融干湿循环时,土壤粗颗粒风化速率增速最快。由表5可以得出,在20、40次循环处理下,10 mm土壤粗颗粒的风化速率是30 mm土壤粗颗粒的2倍,因为10 mm粒径粗颗粒的天然含水率较高,其内部孔隙率较大,裂隙发育程度高。土壤粗颗粒在干湿循环过程中,粗颗粒内部黏土矿物大量吸水膨胀,使得板岩层理裂隙增大,造成表层碎屑剥落和内部裂隙扩展同时进行,加速了粗颗粒的风化速率。粒径在一定程度上会影响土壤粗颗粒的风化速率,小粒径的颗粒比表面积大,与水充分接触面积大,表面颗粒易脱落,从而使得小粒径土壤粗颗粒的风化速率会增大^[21]。

在蒸馏水处理中,冻融干湿循环对土壤粗颗粒的破坏是由表及里的,因为大粒径砾石含水率较低,吸

表5 不同粒径处理下砾石颗粒的风化崩解速率(蒸馏水处理)

Tab.5 Effect of weathering and disintegration rates of soil particles under different particle size treatments (distilled water treatment)

处理	粒径/mm	20次循环		40次循环		60次循环		80次循环	
		平均/%	标准差	平均值/%	标准差	平均值/%	标准差	平均值/%	标准差
A1B1	10	0.52	0.20	0.63	0.06	0.89	0.75	0.89	0.52
A2B1	20	0.39	0.54	0.44	0.20	0.73	0.75	0.85	0.74
A3B1	30	0.23	0.10	0.31	0.21	0.66	0.59	0.72	1.73

2.3 盐分对土壤粗颗粒风化速率的影响

水盐环境对土壤粗颗粒的风化速率具有重要意义,水在粗颗粒砾石风化中的作用主要为解石的溶解、钠长石的水解和黏土矿物吸水膨胀,会增加孔隙压力和毛细管张力,并降低摩擦和断裂能量^[22]。这些因素都会导致砾石在风化过程中开裂,裂纹扩展主要是砾石含水量的函数^[23]。

图2是在水盐环境下,同一粒径土壤粗颗粒风化速率随冻融干湿循环次数的变化规律,10 mm的土壤

风化能力也比小粒径小,导致裂缝发展更慢。因此,在饱和条件下,当岩石经历-20~30 ℃的温度范围时(即湿-干和加热-冷却以及冻融的联合作用),裂隙快速扩展,岩石会崩解成小块件,不断地从岩石表面剥落。小粒径的粗颗粒风化速率高,由于小粒径内部孔隙多,结构较为松散,易溶解等特征,碎屑也更容易脱落。

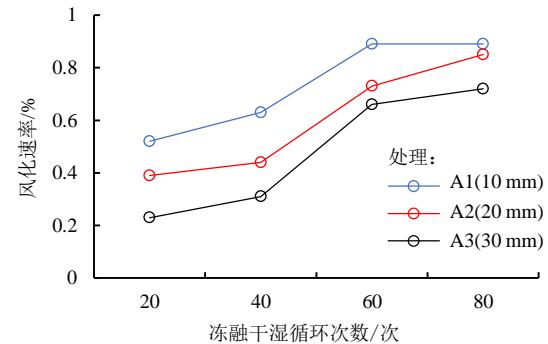


图1 不同粒径处理土壤粗颗粒的风化速率

Fig.1 Weathering rates of coarse soil particles for different particle size treatments

粗颗粒,在20~60次循环之间,土壤粗颗粒风化速率随盐分质量浓度的增加而增大。而20 mm和30 mm的土壤粗颗粒风化速率在不同盐分间的变化并不显著。总体来看,水盐溶液处理均比单纯水处理的风化速率大,10 g/L盐分处理下的粗颗粒风化速率均大于其他处理,表明在饱水条件下,盐分加速了粗颗粒的风化崩解速率。粗颗粒属于变质板岩,层理结构明显,盐溶液进入粗颗粒裂隙中蒸发析出盐结晶,会产生结晶压力,向岩石施加压力,使得岩石崩解破碎。

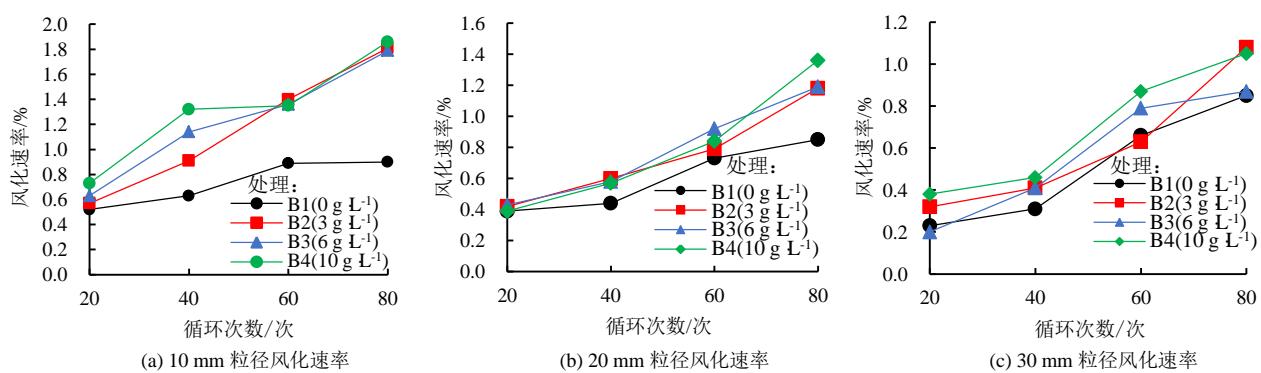


图2 不同盐分处理下粗颗粒的风化速率

Fig.2 Weathering rate of coarse soil particles under different salt treatments

2.4 冻融干湿循环对土壤粗颗粒风化速率的影响

盐分+冻融干湿循环处理显著改变了土壤粗颗粒的风化速率,加快土壤粗颗粒风化成土速率。由表6可

知,同一粒径下,盐分浓度大更利于粗颗粒风化崩解。随着冻融干湿循环次数的增加,粗颗粒的孔隙和裂隙增大,使得粗颗粒的吸水率增大,有利于加速风化崩

解速率。表 6 可以看出, 经历 80 次冻融干湿循环后, 粒径相同条件下, 水盐处理更有利于土壤粗颗粒风化崩解, 且小粒径的土壤粗颗粒风化速率比大粒径快。在 20 次、40 次冻融循环后, 风化速率最快的是 A1B4 处理, 分别是 0.73%、1.32%; 在 60 次、80 次冻融干湿循环处理后, 风化速率最快的是 A1B2、A1B4 处理, 分别是 1.40%、1.86%。而相同水盐处理下, 大

粒径的风化速率相对较慢, 在 20 次、40 次冻融干湿循环后, 10 mm 粗颗粒风化速率约是 30 mm 的 2 倍, 在 60 次、80 次冻融干湿循环后, 10 mm 粗颗粒风化速率仅是 30 mm 的 1 倍多一点。随着冻融干湿循环的增加, 土壤粗颗粒的风化速率的增速是先增大而后变缓的。因此利用当地的微咸水灌溉, 可加速土壤粗颗粒的风化速率, 促使土壤粗颗粒快速成土的目的。

表 6 盐分+冻融干湿循环对粗颗粒风化崩解速率的影响

Tab.6 Effect of salinity + freeze-thaw dry-wet cycles on the rate of weathering and disintegration of coarse soil particles

处理	粒径/mm	盐分	20 次循环		40 次循环		60 次循环		80 次循环	
			平均值/%	标准差	平均值/%	标准差	平均值/%	标准差	平均值/%	标准差
A1B1		0	0.52	0.02	0.63	0.06	0.89	0.07	0.9	0.07
A1B2	10	3	0.57	0.07	0.91	0.03	1.40	0.12	1.83	0.23
A1B3		6	0.63	0.09	1.14	0.25	1.36	0.12	1.79	0.09
A1B4		10	0.73	0.15	1.32	0.05	1.35	0.07	1.86	0.11
A2B1		0	0.39	0.05	0.44	0.02	0.73	0.07	0.85	0.07
A2B2	20	3	0.42	0.13	0.60	0.06	0.79	0.08	1.18	0.30
A2B3		6	0.43	0.07	0.58	0.05	0.92	0.09	1.19	0.16
A2B4		10	0.39	0.11	0.57	0.02	0.84	0.03	1.36	0.16
A3B1		0	0.23	0.01	0.31	0.02	0.66	0.06	0.85	0.04
A3B2	30	3	0.32	0.09	0.41	0.04	0.63	0.03	1.08	0.08
A3B3		6	0.26	0.03	0.41	0.04	0.79	0.07	0.87	0.07
A3B4		10	0.38	0.03	0.46	0.11	0.87	0.01	1.05	0.15

注 平均表示 3 组重复样品风化速率的平均值。

对粒径 (X_1 , mm)、盐分 (X_2 , g/L)、冻融干湿循环次数 (X_3) 与风化速率 (Y , %) 进行皮尔逊相关性检验, 结果见表 7。风化速率与粒径显著中度负相关 ($r=-0.408$, $P<0.01$), 与盐分无相关关系, 与冻融干湿循环次数显著正相关 ($r=0.554$, $P<0.01$)。逐步回归方程表明, 本试验条件下, 影响土壤粗颗粒风化速率因素由大到小为冻融干湿循环次数、粒径。

$$Y=0.707+0.017X_3-0.034X_1 \quad (R^2=0.62), \quad (2)$$

表 7 粒径、盐分、循环次数与风化速率相关系数

Tab.7 Correlation coefficients between grain size, salt content, number of cycles and weathering rate

因素	相关性	风化速率
粒径 (X_1)	皮尔逊相关性	-0.408
	P	0.004
盐分 (X_2)	皮尔逊相关性	0.173
	P	0.240
循环次数 (X_3)	皮尔逊相关性	0.554
	P	0.000

3 讨论

研究区昼夜温差大, 粒径小的粗颗粒, 风化程度高, 其内部存在更多空隙和裂隙, 表面的孔隙对水分子产生吸附作用, 水分子渗入岩体内部^[24], 在冻融干湿交替作用下, 对产生挤压, 使得岩体内部胶结键断裂, 产生劈裂现象。由于土壤粗颗粒中有绿泥石、高岭石等黏土矿物存在, 在水环境中, 水分子会通过层理结构、裂隙等通道进入土壤粗颗粒内部后再矿物颗

粒表层形成水膜, 黏土矿物会吸水膨胀, 在宏观上表现为软化和脱落。且岩石受到水分和冻融干湿循环的双重作用, 其内部孔隙水分发生冻结并膨胀, 导致岩石微裂隙发生变形并扩展, 应力作用改变了岩石间的层理结构^[25-26], 促使岩石风化破碎, 并进一步风化成土。

在冻融干湿循环作用下, 土壤粗颗粒中淋溶出来的元素会改变土壤元素的平衡, 促进作物的生长发育^[27]。王洁等^[21]研究冻融干湿交替下灰绿板岩矿质元素释放特征, 得出板岩淋溶液中矿质元素淋溶总量随循环次数的增加而增加。且研究区土壤中盐分的存在, 有利于粗颗粒砾石内部产生盐结晶发生应力而破碎。蒸馏水处理组的土壤粗颗粒风化速率较为缓慢, 风化行为表现出逐层剥落, 风化崩解速率慢。随着冻融干湿循环交替增加, 土壤粗颗粒的表面出现逐层脱落, 小粒径的土壤粗颗粒破裂程度更大, 其风化速率更快(图 3), 这一结果与陈福榜等^[28]的研究相似。这是由于土壤粗颗粒的黏土矿物吸水膨胀, 其次水溶液进入到砾石孔隙对其孔隙壁产生应力, 经历反复的冻融干湿循环, 微孔隙会不断扩展, 裂隙沿层理方向连通, 加速砾石风化崩解^[29], 盐溶液在温度变化过程中也会在岩石表面产生盐结晶, 会腐蚀岩石表层颗粒。

对 12 种组合处理进行了聚类分析, 结果表明, 12 种组合处理下粗颗粒风化崩解速率效果分成 2 大类, 2 类间差异显著, 盐分处理对粗颗粒风化效果要远高于水分处理的效果。

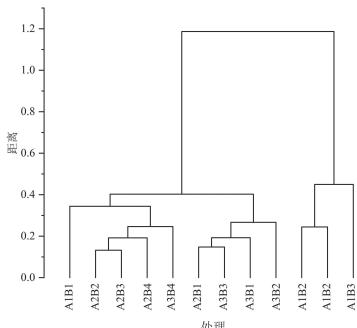


图3 不同处理下土壤粗颗粒风化速率聚类分析树形图

Fig.3 Cluster analysis tree diagram of the weathering rate of soil coarse particles under different treatments

土壤粗颗粒(灰绿板岩)的板岩层理状结构使得其不断崩解变成细小的碎屑,能够快速达到成土的效果(≤ 2 mm)。在退耕砂地恢复中,可利用其水资源和当地昼夜温差大的气候条件,加速土壤粗颗粒快速成土的目的,能补充弃耕压砂地的表土来源,加快退耕砂地复垦速率。

本试验以10、20、30 mm的单一粒径土壤粗颗粒作为研究对象,未考虑混合粒径水平,因此不同粒径间是否相互影响还需进一步研究,后续应进行野外试验补充,全面探讨土壤粗颗粒成壤化进程。

4 结论

1) 水盐溶液处理的土壤粗颗粒风化速率比单纯水处理的风化速率大,10 g/L盐分处理下的土壤粗颗粒风化速率均大于其他处理。在20~60次循环之间,10 mm的土壤粗颗粒风化速率随盐分浓度的增加而增大。

2) 土壤粗颗粒风化速率随粒径的增大呈减小趋势,且10 mm土壤粗颗粒风化速率约是30 mm的2倍。

3) 随着冻融干湿循环的增加,土壤粗颗粒风化速率的增速先增大后减小,在40~60次冻融干湿循环时,土壤粗颗粒的风化速率增速最大。在经历冻融干湿循环后,风化速率最快的组合是10 mm+10 g/L。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 李王成,董亚萍,李晨,等.不同环境条件下板岩中必需元素的释放规律[J].排灌机械工程学报,2020,38(9): 951-958.
LI Wangcheng, DONG Yaping, LI Chen, et al. Essential element leaching law of slate under different environmental conditions[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(9): 951-958.
- [2] 王春燕,李晓炜,张雯莉,等.压砂西瓜连作土壤生物学特性和理化性质变化[J].兰州大学学报(自然科学版),2021,57(5): 659-664, 674.
WANG Chunyan, LI Xiaowei, ZHANG Wenli, et al. Changes of soil biological and physicochemical properties in continuous cropping of watermelon in sandy loam soil[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2021, 57(5): 659-664, 674.
- [3] 李王成,王帅,王兴旺.砂田抑制蒸发功能随覆砂年限的演变规律[J].灌溉排水学报,2019,38(3): 83-89.
WANG Cheng, WANG Shuai, WANG Xingwang. Service life of the gravel-sand mulch in reducing soil evaporation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(3): 83-89.
- [4] 范依笑,王仁德,常春平,等.风蚀作用下农田土壤细颗粒的粒度损失特征及其对土壤性质影响[J].水土保持学报,2018,32(2): 104-109, 119.
YUAN Yixiao, WANG Rende, CHANG Chunping, et al. Loss characteristics of fine particles by wind in farmland and its effect on soil properties[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(2): 104-109, 119.
- [5] 马波,刘声峰.宁农科1号西瓜压砂地种植水肥效应研究[J].灌溉排水学报,2015,34(10): 102-104.
MA Bo, LIU Shengfeng. Water and fertilizer effect of ningnongke No.1 watermelon in gravel-mulched field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(10): 102-104.
- [6] 安文举,李王成,赵广兴,等.干湿循环对宁夏压砂砾石劣化的田间试验研究[J].灌溉排水学报,2022,41(6): 80-88.
AN Wenju, LI Wangcheng, ZHAO Guangxing, et al. The effects of wetting-drying cycles on degradation of sands and gravels used for soil mulching in Ningxia Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(6): 80-88.
- [7] 张继周,缪林昌,杨振峰.冻融条件下岩石损伤劣化机制和力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(8): 1 688-1 694.
ZHANG Jizhou, MIAO Linchang, YANG Zhenfeng. Research on rock degradation and deterioration mechanisms and mechanical characteristics under cyclic freezing-thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1 688-1 694.
- [8] 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.
LIU Min'an, DONG Yaping, LI Chen, 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.
- [9] 冯志刚,马强,李石朋,等.模拟不同气候条件下碳酸盐岩风化作用的淋溶实验研究[J].中国岩溶,2012,31(4): 361-376.
FENG Zhigang, MA Qiang, LI Shipeng, et al. Leaching experiment for the weathering of carbonate rocks by simulating different climates[J]. Carsologica Sinica, 2012, 31(4): 361-376.
- [10] LIN M L, JENG F S, TSAI L S, et al. Wetting weakening of tertiary sandstones: Microscopic mechanism[J]. Environmental Geology, 2005, 48(2): 265-275.
- [11] 高文浩,付金霞,张宝利,等.砒砂岩风化速率及其主要影响因素分析[J].人民黄河,2023,45(9): 125-128.
GAO Wenhao, FU Jinxia, ZHANG Baoli, et al. Analysis of weathering rate and main influencing factors of pisha sandstone[J]. Yellow River, 2023, 45(9): 125-128.
- [12] 赵吉霞,邓利梅,陆传豪,等.模拟酸雨淋溶对紫色母岩风化成土特征的影响研究[J].西南大学学报(自然科学版),2021,43(11): 151-161.
ZHAO Jixia, DENG Limei, LU Chuanhao, et al. Effects of simulated acid rain leaching on weathering and soil forming characteristics of purple parent rock[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2021, 43(11): 151-161.
- [13] 袁野.干湿循环条件下泥岩颗粒料破碎机理及渗透特性研究[D].重庆:重庆交通大学,2017.
YUAN Ye. Studying on crushing mechanism and permeability of mudstone granules under wet-dry cycling[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [14] 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.
LI Wangcheng, ZHAO Yan, WANG Shuai, 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.
- [15] 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.
WANG Jie, LI Wangcheng, DONG Yaping, 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.
- [16] 黄继忠, 袁道先, 万力, 等. 水岩作用对云冈石窟石雕风化破坏的化学效应研究[J]. 敦煌研究, 2010(6): 59-63.
- HUANG Jizhong, YUAN Daoxian, WAN Li, et al. A study on chemical effect on the water-rock interaction on the weathering of stone sculpture Yungang Grottoes[J]. Dunhuang Research, 2010(6): 59-63.
- [17] 马波, 田军仓. 宁夏中部压砂区表层土壤离子分布及盐分类型预测[J]. 中国土壤与肥料, 2021(5): 1-9.
- MA Bo, TIAN Juncang. Soil ions distribution and salinity types prediction of surface layer of gravel mulched region of middle of Ningxia[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(5): 1-9.
- [18] 谭军利, 王西娜, 金慧娟, 等. 微咸水灌溉下砂层级配及覆砂厚度对土壤水盐运移的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(9): 7-13.
- TAN Junli, WANG Xina, JIN Huijuan, et al. The effects of grading and thickness of gravel mulching on water and salt movement in soil under brackish water irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(9): 7-13.
- [19] 宋建树. 压砂地土壤特性及水分变异规律研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
- SONG Jianshu. Study on sandy land soil properties and moisture variation pattern[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.
- [20] 郭海桥, 程伟, 尚志, 等. 水分和冻融循环对酷寒矿区煤矸石风化崩解速率影响的定量研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3 859-3 864.
- GUO Haiqiao, CHENG Wei, SHANG Zhi, et al. Quantitative determination of the effect of moisture and freeze/thaw cycles on coal gaugue decay rate in severe cold mining areas[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3 859-3 864.
- [21] 王洁, 李王成, 穆敏, 等. 冻融干湿交替下灰绿板岩矿质元素释放特征及释放模型[J]. 干旱区地理, 2022, 45(6): 1 795-1 804.
- WANG Jie, LI Wangcheng, MU Min, et al. Mineral element release characteristics and release models for gray-green slate under alternating freeze-thaw and dry-wet conditions[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(6): 1 795-1 804.
- [22] MOL L, VILES H A. Geoelectric investigations into sandstone moisture regimes: Implications for rock weathering and the deterioration of San Rock Art in the Golden Gate Reserve, South Africa[J]. Geomorphology, 2010, 118(3/4): 280-287.
- [23] MOORES J E, PELLETIER J D, SMITH P H. Crack propagation by differential insolation on desert surface clasts[J]. Geomorphology, 2008, 102(3/4): 472-481.
- [24] 董武书. 干湿循环及化学溶蚀作用下灰岩的劣化机理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- DONG Wushu. Study on the deterioration mechanism of limestone under dry-wet cycle and chemical dissolution[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.
- [25] FANTONG W Y, KAMTCHEUNG B T, YAMAGUCHI K, et al. Characteristics of chemical weathering and water-rock interaction in Lake Nyos Dam (Cameroon): Implications for vulnerability to failure and re-enforcement[J]. Journal of African Earth Sciences, 2015, 101: 42-55.
- [26] 赵研, 李王成, 王霞, 等. 岩石风化及成壤过程中元素行为研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2019(1): 147-150.
- ZHAO Yan, LI Wangcheng, WANG Xia, et al. Research progress of element behavior in rock weathering and soil formation[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2019(1): 147-150.
- [27] 王小玲, 刘腾云, 高柱, 等. 稀土元素对作物生长及作物品质影响的研究进展[J]. 核农学报, 2016, 30(6): 1 240-1 247.
- WANG Xiaoling, LIU Tengyun, GAO Zhu, et al. A review of rare earth elements on crop growth and quality[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2016, 30(6): 1 240-1 247.
- [28] 陈福榜, 左清军, 吴友银, 等. 富水环境下板岩膨胀过程宏-细-微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 126-137.
- CHEN Fubang, ZUO Qingjun, WU Youyin, et al. Macro-meso-micro mechanisms of rich-water slate in the swelling process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 126-137.
- [29] 吴国鹏, 范文武, 崔凯, 等. 冻融和干湿作用下表生板岩的劣化行为与机制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(6): 1 392-1 402.
- WU Guopeng, CHEN Wenwu, CUI Kai, et al. Degradation behavior and mechanism of slate under alternating conditions of freeze-thaw and wet-dry[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(6): 1 392-1 402.

Impact of particle size and soil salinity on weathering of mineral particles under freeze-thaw and drying-wetting cycles

MU Min¹, LI Wangcheng^{1,2,3*}, WANG Jie¹, LIU Qiaoling¹, LI Yangyang¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Engineering Research Center of the Ministry of Education for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Dry Areas, Yinchuan 750021, China;
3. State Key Laboratory of Land of Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Yinchuan 750021, China)

Abstract: 【Objective】Freezing-thawing and drying-wetting cycles are important abiotic processes in mineral particle weathering and their effect is modulated by many other processes. In this paper, we investigate the impact of particle size and soil salinity on mineral particle weathering. 【Method】Green slate particles were used. The experiment consisted of three particle size treatments: 10, 20 and 30 mm, and three soil salinity treatments with salt concentration of the soil water being 3, 6 and 10 g/L, respectively. Each treatment was subjected to randomized freeze-thaw and drying-wetting cycles. During the experiment, we measured the weathering rate of all particles.

【Result】① Soil salinity increased particle weathering rate, but the increase depended on soil water concentration. In the treatments we compared, soil water concentration of 10 g/L gave the best results. For the 10 mm particles, their weathering rate increased with soil salinity when they were subjected to 20 and 60 freeze-thaw and drying-wetting cycles. ② The weathering rate decreased with particle size, with the weathering rate of the 10 mm particles being two times that of the 30 mm particles. ③ The weathering rate increased with the number of freeze-thaw drying-wetting cycles. 【Conclusion】Under the influence of freeze-thaw and drying-wetting cycles, the weathering rate of small particles is higher than that of large particle. Soil salinity also increased the weathering rate, albeit the increasing rate depended on soil water concentration.

Key words: soil coarse grains; freeze-thaw dry-wet cycle; weathering rate; weathering into soil

责任编辑：赵宇龙