干湿交替对侵蚀沟沟壁抗蚀特性的影响

王南超，崔湘驰，特布格日勒，乌仁图雅，王国琪，夏祥友
（东北林业大学 林学院，哈尔滨 150040）

摘　要：［目的］分析东北黑土区干湿交替作用下典型侵蚀沟壁不同土层抗蚀性差异及其对沟蚀发育的影响规律，明确干湿交替作为侵蚀沟快速发育重要驱动因子的作用机制，为黑土区侵蚀沟防治提供理论依据。［方法］以黑土区农耕地侵蚀沟为研究对象，在沟壁0—30，30—60，60—90 cm土层采集土壤样品，采用室内模拟干湿交替试验，测定并分析土壤基本物理性质、土壤机械组成、团聚体水稳性（WSA）、土壤崩解速率（SDR）、土壤抗冲系数（ANS）等抗蚀性指标，比较不同土层抗蚀性差异及变化规律。［结果］干湿交替对3个土层WSA，SDR，ANS等指标均产生明显影响。在1次交替时，3个土层团聚体的破碎率（PAD）分别下降了0.51%，8.64%，1.29%；0—30，30—60，60—90 cm土层ANS分别提升了171.03，287.84，5.59 L/g。5次交替时，对0—30 cm土层SDR影响最大，提升了72.29 g/s；对30—60 cm土层PAD影响最大，提升了7.23%；60—90 cm土层SDR达到最小，下降了6.1 g/s。8次交替时，0—30，30—60 cm土层PAD分别上升了4.315%，7.78%。由此可知，0—30 cm土层团聚体水稳性随干湿交替次数的增加而降低，崩解速率上升幅度较大，但因＞2 mm粒径占比较大以及较高的土壤孔隙度使其具有较强的抗冲性；30—60 cm土层土壤在1次交替后水稳性有所提升，结构短暂改善，5～8次交替后结构发生破坏，抗冲性下降，但整体抗崩解能力较初始状态有所增强。60—90 cm土层土壤水稳性差，崩解速率高，抗冲刷能力弱，结构受损后难以恢复。［结论］干湿交替加剧了沟壁土壤垂向分异，表层土壤相对稳定，中层抗蚀性波动较大，深层最为薄弱。这一过程促进沟壁坍塌并加速沟蚀扩展，对黑土区水土保持与沟蚀治理具有重要参考价值。建议在日后治理中针对中下层土壤采取结构改良与抗冲性增强等措施。

关键词：干湿交替；团聚体水稳性；土壤崩解速率；侵蚀沟
文献标识码：A　　**文章编号：**1000-288X（2026）04-0030-10　　**中图分类号：**S152.4

文献参数：王南超，崔湘驰，特布格日勒，等.干湿交替对侵蚀沟沟壁抗蚀特性的影响[J].水土保持通报，2026，46（4）：30-39. Wang Nanchao，Cui Xiangchi，Tebugerile，et al. Effects of dry-wet cycles on erosion resistance characteristics of gully sidewalls [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2026，46（4）：30-39.
DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.039　　**CSTR：32312.14.stbctb.2026.04.039**

Effects of dry-wet cycles on erosion resistance characteristics of gully sidewalls

Wang Nanchao，Cui Xiangchi，Tebugerile，Wurentuya，Wang Guoqi，Xia Xiangyou
（*College of Forestry*，*Northeast Forestry University*，*Harbin*，*Heilongjiang* 150040，*China*）

Abstract：［Objective］The differences in soil layer resistance to erosion under dry-wet cycles in typical erosion gullies in the black soil region of northeast China and the influence patterns of these differences on the development of gully erosion were analyzed，in order to clarify the mechanism of how dry-wet cycles act as an important driving factor for the rapid development of erosion gullies，and to provide a theoretical basis for the prevention and control of erosion gullies in the black soil region.［Methods］Soil samples were collected from gully sidewalls of cultivated land in the black soil region at depths of 0—30，30—60 cm，and 60—90 cm. A laboratory-simulated dry-wet cycle experiment was conducted to determine erosion resistance indicators including soil basic physical properties，soil mechanical composition，water-stable aggregates（WSA），soil disintegration rate（SDR），and soil anti-scour coefficient（ANS）. Differences and variation patterns in erosion resistance among the three soil layers were analyzed and compared.［Results］Dry-wet cycles had significant effects on WSA，SDR，ANS，and other

收稿日期：2025-12-24　　**修回日期：**2026-03-11　　**采用日期：**2026-03-12
资助项目：国家重点研发计划课题“黑土农田侵蚀阻控原理及水土保持措施效应”（2021YFD1500705）
第一作者：王南超（1998—），男（汉族），山东省莱阳市人，硕士研究生，研究方向为水土保持。Email：3092798125@qq.com。
通信作者：夏祥友（1977—），男（汉族），黑龙江省哈尔滨市人，副教授，主要从事水土保持方面研究。Email：xiabuyi@nefu.cn。

indicators across all three soil layers. After one cycle, percentage of aggregate destruction (PAD) in the three layers decreased by 0.51%, 8.64% and 1.29%, respectively. In contrast, ANS in the 0—30, 30—60 cm and 60—90 cm layers increased by 171.03, 287.84 L/g and 5.59 L/g, respectively. After five cycles, SDR in the 0—30 cm layer showed the largest increase of 72.29 g/s, PAD in the 30—60 cm layer increased by 7.23%, and SDR in the 60—90 cm layer reached its minimum, decreasing by 6.1 g/s. After eight cycles, PAD increased by 4.315% and 7.78% in the 0—30 cm and 30—60 cm layers, respectively. Overall, WSA in the 0—30 cm layer decreased and SDR increased markedly with increasing cycle number, although the relatively large proportion of particles > 2 mm and high soil porosity provided it with strong resistance to scouring. The 30—60 cm layer exhibited improved water stability after one cycle, indicating temporary structural enhancement. However, structural degradation and reduced anti-scour resistance occurred after 5—8 cycles, although resistance to disintegration remained higher than the initial state. The 60—90 cm layer showed poor water stability, high SDR, and weak anti-scour capacity, and its structure was difficult to recover once damaged. [Conclusion] Dry-wet cycles intensify the vertical differentiation of erosion resistance along gully sidewalls, with the surface layer remaining relatively stable, the middle layer exhibiting pronounced fluctuations, and the deep layer being the most vulnerable. This process promotes gully wall collapse and accelerates gully expansion, providing important implications for soil and water conservation and gully erosion control in black soil regions. Management strategies should therefore emphasize structural improvement and enhancement of anti-scour capacity, particularly in the middle and lower soil layers.

Keywords: dry-wet cycles; aggregate water stability; soil disintegration rate; erosion gullies

东北黑土区是中国重要的商品粮生产基地,具有典型的地貌特征和显著的气候差异。然而,在长期耕作扰动和自然因素叠加作用下,土壤侵蚀问题日益突出,成为制约区域农业可持续发展的关键因素。其中,浅沟与切沟作为该区域常见的侵蚀沟类型,其快速发育不仅破坏农田耕作层结构,也削弱了生态系统的稳定性和服务功能,亟需加以关注和治理。

在侵蚀沟的形成与演化过程中,土壤干湿交替现象扮演着重要角色。干湿交替作为一种显著的气候-土壤响应机制,是指土壤受降雨蒸发周期性变化影响而交替出现湿润、干燥变化的交替过程[1]。它对土壤结构的影响已被广泛关注。已有研究发现,该过程可通过破坏土壤团聚体结构、削弱土体黏聚力与力学强度,从而显著提高土壤的可蚀性[2]。例如,白培勋等[3]指出,干湿交替通过破坏土壤团聚体、削弱胶结力,显著提高土壤可蚀性,是沟蚀扩展的重要驱动力。纪亚林等[4]的研究也发现土壤干湿交替过程通常会发生胀缩现象,促使孔隙分布发生变化,进而引起土壤体积变化,裂隙发育,最终导致土壤水分运动规律发生改变。韩祖丽等[5]研究发现干湿循环后边坡表层土会出现大量宏观和微观收缩裂缝,破坏边坡的完整性,土体黏聚力受到破坏。王丽鑫等[6]通过对黑土区侵蚀沟沟岸研究发现,不同土层的崩解速率与可蚀性在垂向上表现出增强趋势。同时,在黑土区,土地利用方式与沟岸土壤可蚀性密切相关,但现有研究更多集中在土地利用差异,而针对沟壁不同土层在干湿交替作用下的系统对比研究仍显不足。张素等[7]通过对干热河谷冲沟不同土层研究证实,不同质地土壤在干湿交替作用下抗蚀性表现出显著差异。国外研究则表明,干湿交替会促进土壤有机质重新分布并影响团聚体稳定性[8],而黄土区试验也发现干湿交替可加快土壤崩解速率[1]。

东北黑土区侵蚀沟沟壁在垂直方向上土壤分层明显,尤其是黑土层与黄土层土壤性质差异较大。但目前尚缺乏针对黑土区侵蚀沟壁不同土层抗蚀性的系统研究,尤其是干湿交替作用对侵蚀沟沟壁土壤抗蚀性产生的影响以及侵蚀沟不同土层土壤对干湿交替气候的响应。因此,探索侵蚀沟沟壁不同土层土壤抗蚀性的变化规律对研究侵蚀沟的发育、扩展具有重要意义。加强干湿交替下沟壁不同土层抗蚀性的研究显得十分必要。本文选择侵蚀沟沟壁的土层剖面,采用室内干湿交替试验,选取团聚体水稳性(WSA),土壤抗冲系数(ANS)以及土壤崩解速率(SDR)等抗蚀性指标,研究不同土层的抗侵蚀特性,以期为进一步开展沟蚀防治提供理论依据,为黑土区水土保持及生态修复与重建提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于黑龙江省西北部(125°07′40″—125°37′30″E,48°11′15″—48°24′07″N),隶属于北大荒集团克山农场,地处讷河市与克山县境内[9]。该区

域海拔240～340 m，地处小兴安岭西麓，松嫩平原东北部，坡长且缓，坡耕地坡度多为1°～3°，坡长多为500～2 000 m，最长达4 000 m，地势以丘陵漫岗为主，土壤以黏化湿润均腐土为主，平均黑土层厚度20～40 cm，为典型厚层黑土区[10]。研究区属温带大陆性季风气候，春季少雨多风，夏季高温多雨，冬季寒冷漫长，降雪量大。近10 a年平均气温为2.1 ℃，极端高温达36.5 ℃，极端低温为－37.6 ℃，无霜期约120 d。多年平均年降水量为502.5 mm，年平均风速为3.9 m/s，主导风向为西北风。

1.2 样品采集

野外取样于2024年5月完成，取样地位于黑龙江省讷河市与克山县克山农场（125°07′40″—125°37′30″E，48°11′15″—48°24′07″N），取样地土地利用类型为耕地，侵蚀沟位于耕地边，沟深约1.5 m，沟宽2 m左右，沟壁坡度约为90°，属于流水侵蚀形成的U型沟，并且每年以约1 m的速度发育。在侵蚀沟中选择坡岸平坦、沟壁垂直的地点进行取样。首先对沟壁进行修整，人工开挖深约1 m的剖面，土壤自然分层明显，将剖面分为上层（黑土层，0—30 cm）、中层（淋溶层，30—60 cm）和下层（黄土层，60—90 cm）。在各层分别使用体积为100 cm^3的环刀取原状土样，并用铝盒采集约20 g土样测定土壤含水率，每层重复3次；使用Φ10×5 cm圆柱形冲刷槽取原状土，测定土壤抗冲性；使用长方形取样器（21 cm×13 cm×6 cm）取原状土样，用于测定土壤崩解性和团聚体水稳性。在侵蚀沟壁上用土壤刀修整出一个21 cm×13 cm×6 cm的长方形土样，将长方形取样器扣在土样上，用土壤刀切下土体并削平取样器底部，盖上取样器盖子，清理外部土壤后称重（精确至0.01 g）并记录。

1.3 样品指标测定与方法

土壤干湿交替处理，将土壤饱和田间持水量的40%～80%作为干湿循环范围。0—30，30—60，60—90 cm土层土壤饱和持水量分别为45.72%，34.51%，36.06%。加湿时，将土样放入整理箱中，使用加湿器将去离子水雾化，使土样主动均匀地吸收水分，避免直接加水时对土样结构造成破坏。含水量达到80%时，用保鲜膜将土样密封静置12 h，使水分均匀分布。然后，将土样放入40 ℃烘箱中烘干至饱和田间持水量的40%，同样静置12 h。即完成一次干湿循环。同时，土样加湿与烘干过程中水分含量的控制，均通过称重的方式完成（精确至0.01 g）。使用长方形取样器（21 cm×13 cm×6 cm）和Φ10 cm×5 cm圆柱形冲刷槽取原状土并进行干湿交替处理，用于测定土壤基本物理性质、土壤崩解速率、团聚体水稳性和土壤抗冲性。

机械稳定性团聚体粒径分布用干筛法测定[11]。水稳性团聚体采用湿筛法测定。利用恒温型土壤团粒分析仪（型号WS1020，点将科技股份有限公司，上海）进行测定，先将土样湿润10 min，然后上下频率30次/min，湿筛20 min，共用时30 min。

采用烘干法测定土壤含水率，用环刀法测定容重、孔隙度和饱和含水率[11]。土壤抗冲性采用原状土冲刷水槽法测定[12]。土壤崩解速率采用静水崩解法测定[13]。土壤机械组成用吸管法测定[14]。

1.4 指标计算

（1）土壤崩解速率（SDR）的计算公式为：

$$\mathrm{SDR}=\frac{M_0-M_E}{t_d} \tag{1}$$

式中：M_0代表土壤样品浸入水中时天平的初始测量值（g）；M_E代表土壤样品崩解完全或第30 min时的天平测量值（g）；t_d代表土壤样品完全崩解时所需的时间，或在土壤样品未完全崩解的情况下，第30 min的时间。

（2）土体抗冲系数（ANS）的计算公式为：

$$\mathrm{ANS}=\frac{ft}{W} \tag{2}$$

式中：f代表冲刷流量（L/min）；t代表冲刷时间（min）；W代表干泥沙质量（g）。

（3）土体剥蚀率（SER）的计算公式：

$$\mathrm{SER}=\frac{M_s}{A_t} \tag{3}$$

式中：M_s为时间t内径流产沙量（g）；A原状土冲刷面积（cm^2）。

（4）土壤团聚体平均质量直径（MWD，式中以M_{MWD}表示）的计算公式为：

$$M_{\mathrm{MWD}}=\sum_{i=1}^{n}W_iX_i \tag{4}$$

式中：M_{MWD}为土壤团聚体平均质量直径（mm）；i为团聚体粒径的分级数量；W_i为i粒径团聚体质量百分数（%）；X_i指i粒径团聚体的平均直径（mm）。

（5）土壤团聚体破碎率（PAD>0.053，式中以$P_{\mathrm{pad}>0.053}$表示）的计算公式为：

$$P_{\mathrm{pad}>0.053}=\frac{M_{>0.053}-m_{>0.053}}{M_{>0.053}}\times 100\% \tag{5}$$

式中：$P_{\mathrm{pad}>0.053}$为粒径>0.053 mm团聚体的破碎率（%）；$M_{>0.053}$为粒径>0.053 mm的干筛团聚体总质量（g）；$m_{>0.053}$为粒径>0.053 mm的湿筛团聚体总质量（g）。

1.5 数据处理

所有数据采用Excel 2019软件进行整理与初步计算。使用SPSS 23.0软件进行单因素方差分析

(one-way ANOVA)和沃勒-邓肯法(Waller-Duncan's test)检验不同干湿交替处理之间的差异性($\alpha=0.05$)。采用OriginPro2024进行作图处理。

2　结果与分析

2.1　干湿交替对不同土层基本物理性质的影响

如表1所示,各土层土壤质地组成随干湿交替产生明显变化。3个土层土壤黏粒占比随干湿交替次数的增加呈现明显的下降趋势,分别下降了约19.09%,21.34%和33.04%。0—30 cm土层土壤粉粒含量呈现上升趋势,提升了约16.03%;30—60 cm土层土壤粉粒含量在1次循环时达到最高,提升了约5.21%,但总体呈现出下降趋势;60—90 cm土层土壤粉粒含量总体呈现轻微上升趋势,并在5次循环时达到最高,提升了约3.02%。30—60 cm土层和60—90 cm土层土壤砂粒含量随干湿循环次数的增加呈现上升趋势,分别提升了31.47%,20.11%,0—30 cm土层基本不变。

从图1a中可以看出,随着干湿交替次数的增加,0—30 cm和60—90 cm土层机械大团聚体(>2 mm)比例逐渐减小,分别从81%和52%下降到66%和37%。其他粒径团聚体占比不同程度地增大,说明干湿交替作用主要对>2 mm的大团聚体起到破坏作用,使其破碎成其他小粒径团聚体。30—60 cm土层机械大团聚体(>2 mm)占比逐渐上升,从26%提升到43%,但是0.25~1 mm团聚体的含量出现下降趋势,从38%下降到25%,说明干湿交替主要破坏了该土层0.25~1 mm团聚体,对>2 mm大团聚体的形成起到了促进作用。从图1b可以看出,3个土层>2 mm,1~2 mm水稳性团聚体占比显著下降,尤其是5,8次干湿循环后,大团聚体(>2 mm)占比几乎为0,0.25~1 mm水稳性团聚体轻微下降,0.053~0.25 mm团聚体占比随着土层深度的加深占比越大,但是>0.053 mm团聚体占比急剧增加,占比均达到了60%左右。这说明随着干湿交替次数的增加尤其是5,8次干湿循环时,对>1 mm的团聚体破碎作用越明显,破碎后主要以<0.053 mm的小团聚体为主。

表1　不同干湿交替次数下各土层土壤物理性质变化

Table 1　Changes in physical properties of soil layers under different dry-wet cycles

土层深度/cm	交替次数	土壤质地组成占比/%		
		砂粒	粉粒	黏粒
0—30	0	29.79 ± 1.36^{Aa}	40.87 ± 4.72^{Ab}	29.34 ± 3.60^{Aa}
	1	26.82 ± 1.37^{Ab}	45.84 ± 1.37^{Aa}	27.34 ± 1.37^{Aa}
	5	29.12 ± 1.36^{Aa}	44.25 ± 1.36^{Ab}	26.62 ± 0.00^{Aa}
	8	28.85 ± 2.35^{Aa}	47.42 ± 1.35^{Aa}	23.74 ± 1.35^{Aa}
30—60	0	24.56 ± 0.00^{Ab}	52.98 ± 2.35^{Aa}	22.45 ± 2.35^{Aab}
	1	23.15 ± 1.36^{Ab}	55.74 ± 3.60^{Aa}	21.11 ± 3.60^{Aa}
	5	30.16 ± 1.36^{Aa}	51.51 ± 1.36^{Aab}	18.33 ± 0.00^{Ab}
	8	32.29 ± 4.88^{Aa}	50.06 ± 5.41^{Aa}	17.65 ± 1.35^{Aab}
60—90	0	30.03 ± 1.36^{Aa}	51.60 ± 1.36^{Aab}	18.37 ± 0.00^{Ab}
	1	36.84 ± 2.35^{Aa}	52.94 ± 2.35^{Aa}	10.22 ± 0.00^{Bb}
	5	33.96 ± 4.06^{Aa}	53.16 ± 5.41^{Aa}	12.88 ± 1.35^{Bc}
	8	36.07 ± 1.36^{Aa}	51.63 ± 1.36^{Aa}	12.30 ± 2.35^{ABb}

注:①数据为平均值(±标准误),不同字母表示差异显著($p<0.05$);②大写字母(A)代表同一土层不同处理之间差异显著($p<0.05$),小写字母(a)代表不同土层同一处理之间差异显著($p<0.05$)。下同。

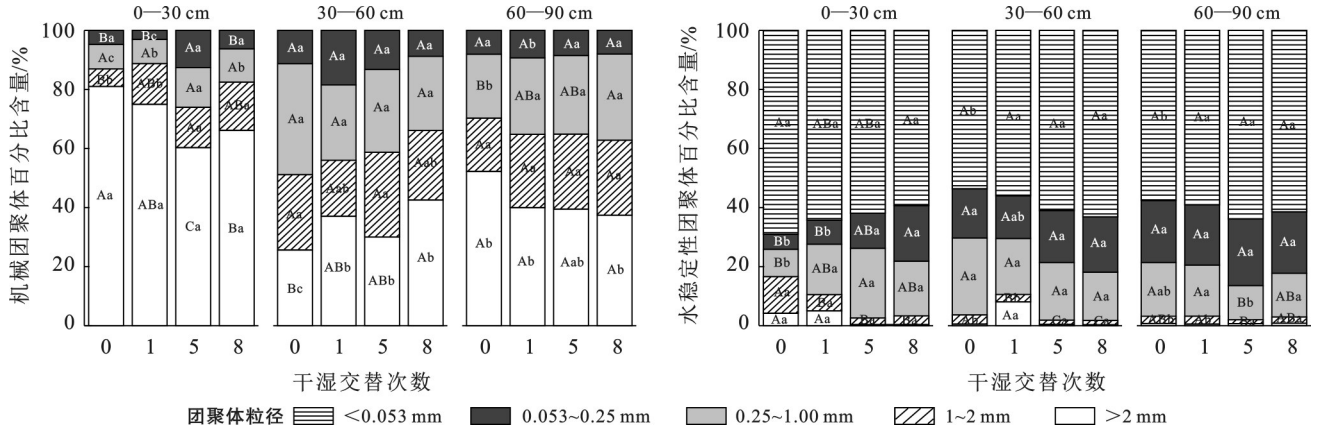


图1　干湿交替次数对不同土层土壤团聚体百分比含量的影响

Fig.1　Effects of dry-wet cycle frequency on percentage content of soil aggregates in different soil layers

由图2可以看出,0—30 cm土层土壤容重明显低于其余两层,随着干湿交替次数的增加土壤容重逐渐上升,且在1次循环后容重达到最大,较0次循环提升了约5.15%;土壤孔隙度明显高于其余两层,随着干湿交替次数的增加土壤孔隙度逐渐下降,且在8次循环后达到最低,较0次循环下降了7.89%。

30—60 cm土层土壤容重最高，随着干湿循环次数的增加容重逐渐下降，8次循环时达到最低，下降了约3.15%；土壤孔隙度随着循环次数的增减呈现出先上升后下降的趋势，在1次循环时达到最大，提升了约2.5%，在5次循环时最低，降低了约4.92%。60—90 cm土层土壤容重随循环次数的增加呈现先上升后下降的趋势，在1次循环时达到最大，提升了约2.19%，8次循环时最低，下降了约0.38%；土壤孔隙度随着循环次数的增加逐渐下降，在5次循环时达到最低，下降了约7.86%。

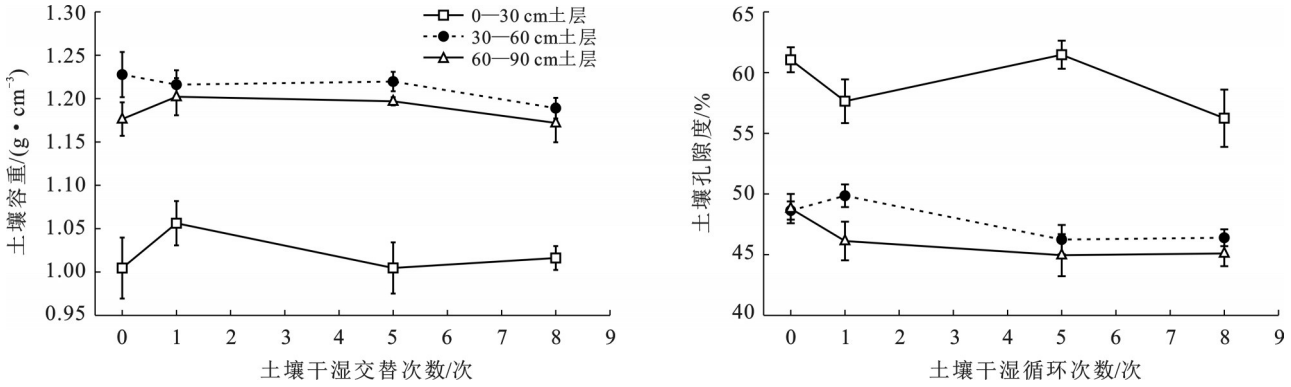


图2 干湿交替次数对不同土层土壤结构性指标的影响

Fig.2 Effects of dry-wet cycle frequency on soil structural indicators in different soil layers

2.2 干湿交替对不同土层土壤团聚体水稳性的影响

干湿交替次数的增加对不同土层的土壤团聚体水稳性指标产生了不同程度的影响。如图3所示，在0—30 cm土层，土壤D_{MWD}随着干湿交替次数的增加整体呈下降的趋势。与初始状态相比，在第1，5，8次干湿交替后D_{MWD}分别下降了3.81%，26.98%和5.57%，且在8次交替后，D_{MWD}的下降幅度最小；土壤W_{MWD}在进行1次交替后保持不变，但在5次与8次交替后有所下降，均降至0.27 mm，较0与1次交替后下降了38.64%；其PAD在1次交替后有所下降，由87.10%下降至86.59%，随后随着交替次数增加呈逐渐升高的趋势，至8次交替后PAD达最高值，为91.61%。30—60 cm土层，土壤D_{MWD}随着干湿交替次数的增加整体呈现上升的趋势，与初始状态相比，在第1，5，8次干湿交替后D_{MWD}分别上升了16.76%，9.25%和31.79%，且在8次交替后，D_{MWD}的上升幅度最大；土壤W_{MWD}在进行1次交替后上升至0.56 mm，较0次交替上升了69.70%，但在5次与8次交替后有所下降，分别降至0.25 mm和0.23 mm，较0次交替分别下降了24.24%，30.30%；其PAD在1次交替后有所下降，由80.92%下降至72.28%，随后随着交替次数增加呈逐渐升高的趋势，至8次交替后PAD达最高值，为89.91%。60—90 cm土层，土壤D_{MWD}随着干湿交替次数的增加整体呈下降的趋势。与初始状态相比，在第1，5，8次干湿交替后D_{MWD}分别下降了13.73%，14.12%和15.69%。在1次交替时，下降幅度最小；土壤W_{MWD}随着干湿交替次数的增加整体呈下降的趋势。分别降至0.27 mm，0.22 mm，0.25 mm，较0次交替分别下降了3.57%，21.43%，10.71%；其PAD在1次交替后有所下降，由89.02%下降至87.73%，5次交替后PAD达到最高，为89.95%，8次后交替下降到88.37%。

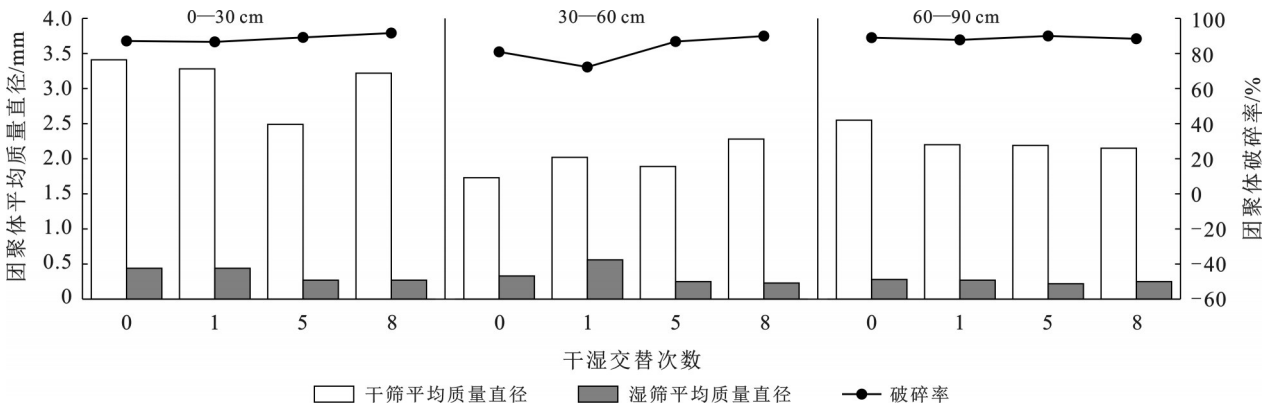


图3 干湿交替次数对不同土层团聚体水稳性的影响

Fig.3 Effects of dry-wet cycle frequency on water stability of soil aggregates in different soil layers

2.3　干湿交替对不同土层土壤崩解性的影响

随着干湿交替次数的增加,各土层土壤的平均崩解速率指标呈现出差异性变化。如图 4 所示,在 0—30 cm 土层,土壤平均崩解速率(SDR)在前一分钟内随干湿交替次数的增加整体呈上升趋势,与初始状态 9.15 g/s 相比,在第 1,5,8 次交替后分别达到了 18.19, 81.44, 43.50 g/s, 分别上升了 98.80%, 790.05% 和 375.41%。其中 5 次交替后 SDR 达到最高值,为 81.44 g/s。30—60 cm 土层,SDR 随干湿交替次数的增加整体呈下降趋势,前 1 分钟内,在第 1, 8 次交替后分别达到 52.35, 49.97 g/s,与 0 次交替 94.29 g/s 相比,分别降低了 44.48% 和 47.00%,但在第 5 次交替后有所上升,上升至 100 g/s,较 0 次交替上升了 6.05%。且在经过 0,1,5,8 次交替后,土壤分别在第 360,120,38,420 s 时完全崩解。60—90 cm 土层,SDR 随干湿交替次数的增加整体上呈现出上升的趋势,但是整体上差异变化较小,尤其是在前 1 分钟内,SDR 在第 1,8 次交替后要高于第 0,5 次交替后,与 0 次交替 43.04 g/s 相比,在第 1,8 次交替后达到 68.31,64.10 g/s,分别上升了 58.7% 和 48.9%,但是在第 5 次交替后有所下降,下降至 36.94 g/s,较 0 次交替下降了 14.2%。

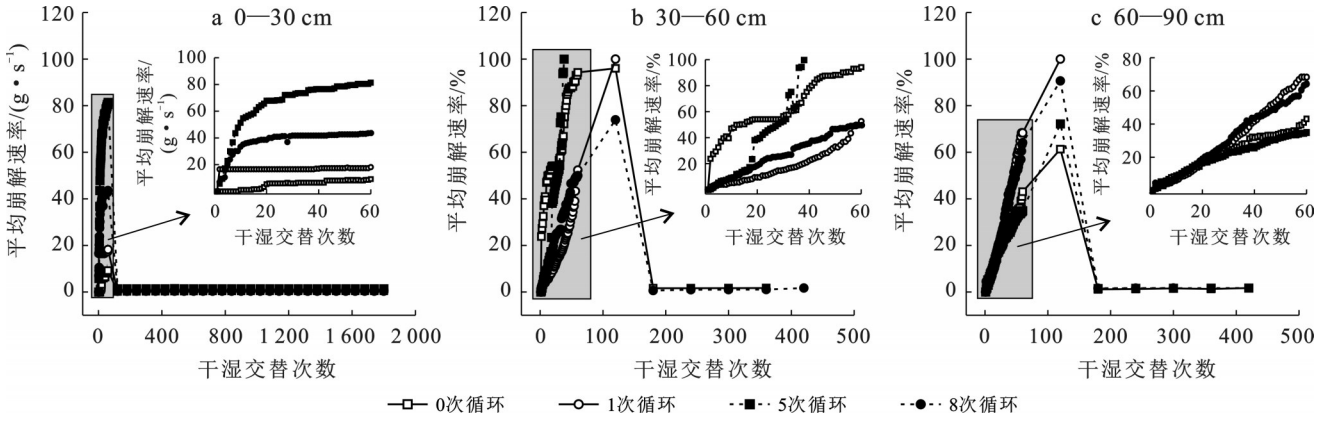


图 4　干湿交替次数对不同土层平均崩解速率的影响

Fig.4　Effects of dry-wet cycle frequency on mean disintegration rate in different soil layers

2.4　干湿交替对不同土层土壤抗冲性的影响

干湿交替次数的增加对不同土层的土壤抗冲系数产生了积极的影响,整体上提高了各土层的抗冲能力,但不同土层的变化幅度存在差异。如图 5 所示,在 0—30 cm 土层,土壤抗冲系数(ANS)随干湿交替次数的增加呈现上升趋势。与初始状态 19.23 L/g 相比,在第 1, 5, 8 次交替后分别达到 190.26 L/g, 154.55 L/g, 123.33 L/g, 分别上升了 889.5%, 703.8% 和 541.45%, 且在第 1 次交替后, ANS 上升幅度最大。30—60 cm 土层, ANS 同样随着干湿交替次数的增加呈现上升趋势。与初始状态 4.85 L/g 相比,在第 1, 5, 8 次交替后分别达到 292.69, 93.97, 25.78 L/g, 分别上升了 5 934.84%, 1 837.5% 和 431.5%, 同样是在第一次交替后, ANS 上升幅度最大。60—90 cm 土层, ANS 随着干湿交替次数的增加呈现上升趋势,但是该层不同交替次数之间变化幅度差异不大。与初始状态 6.50 L/g 相比,在第 1,5,8 次交替后分别达到 12.09, 13.88, 17.31 L/g, 分别上升了 86.00%, 113.5% 和 166.30%, 在第 8 次交替后, ANS 上升幅度最大。

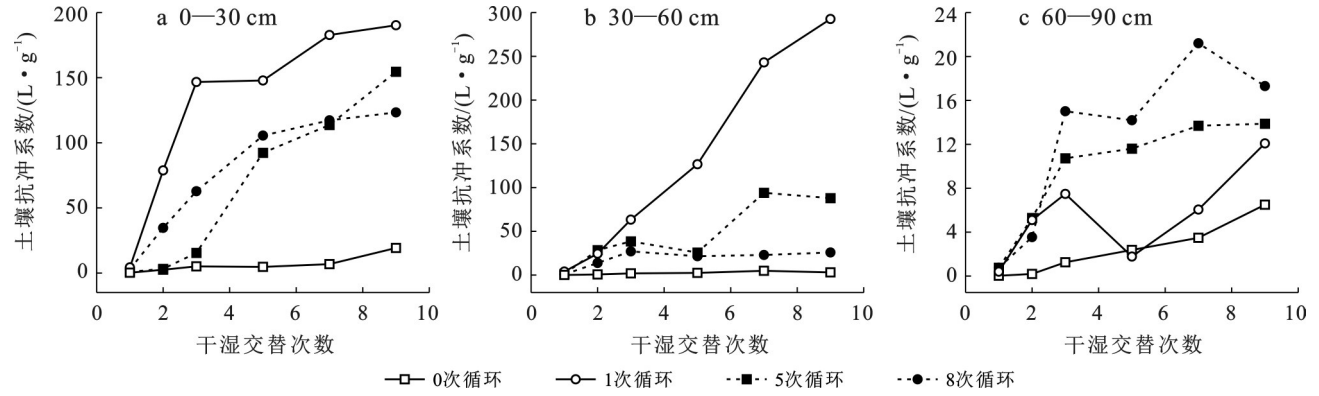


图 5　干湿交替次数对不同土层土壤抗冲系数的影响

Fig.5　Effects of dry-wet cycle frequency on soil anti-scour coefficient in different soil layers

3 讨 论

3.1 不同土层土壤团聚体稳定性对干湿交替的响应

干湿交替通过改变土壤中胶结物质的稳定性以及团聚体在膨胀-收缩过程中的结构响应,从而显著影响其水稳性[15]。受土壤类型及黏粒组成差异的影响,不同土壤在干湿交替作用下的团聚体稳定性表现存在明显差异。本研究结果显示,3个土层PAD在短期交替内都呈现出不同程度的下降,这说明短期水分波动可能在一定程度上促进团聚体结构的重组和胶结作用,从而提升其抗水解能力。Bravo-Garza等[8]在相关研究中也提出,在一定范围内,干湿交替有助于促进土壤团聚体的稳定性,但当交替次数过多时,结构稳定性会逐渐下降。值得注意的是,0—30,30—60 cm土层土壤PAD在8次循环时才达到最大,而60—90 cm在5次循环时就已经达到最大,造成这种差异的原因可能是该层土壤砂粒含量高,胶结弱、结构更加敏感,相较于其他两个土层更易先达到阈值。同时,当干湿交替次数继续增加时,3个土层的D_{MWD}均出现下降趋势,W_{MWD}整体随交替次数的增加而降低,说明长期频繁的干湿交替不利于团聚体的维持。类似的结果也见于邬铃莉等[16]对西南黄壤的研究,他们发现,随着干湿交替次数增加,土壤团聚体MWD显著下降,表明反复的干湿交替过程会破坏团聚体稳定结构。张爱国等[17]的研究也表明,干湿交替会引发土壤结构的变化从而改变土壤力学性质。上述研究结果与本研究结论基本一致,我们发现随着循环次数的增加,土壤结构逐渐变差,导致其团聚体稳定性变差,从而对其抗蚀性产生影响。但是马璠等[18]研究发现干湿交替过程会引起土壤的结构重组和沉降压实,导致土壤容重增加。这与我们的研究结果不尽相同,我们发现各土层土壤容重随干湿循环次数的增加呈现出一定下降趋势。这可能是由于在干湿循环过程中土壤黏粒逐渐减少,从而造成土壤颗粒之间胶结作用减弱,加上在复湿过程中土壤颗粒自身吸水膨胀,水和斥力导致土壤颗粒间距离增加[19],最终导致土壤体积变大,土壤容重显著减小。

3.2 不同土层土壤崩解性对干湿交替的响应

土壤崩解速率(SDR)是评价土壤抗侵蚀能力的重要指标,受土壤结构、颗粒组成和有机质含量等因素的综合影响[20]。本研究结果显示,不同土层SDR差异显著,整体表现为60—90 cm>30—60 cm>0—30 cm,说明随土层加深土壤抗侵蚀能力逐渐减弱。崩解速率的差异还与土壤颗粒组成密切相关。一般而言,黏粒含量越高,土壤颗粒间胶结作用越强,崩解速率越低,而砂粒含量增加则会加快土壤在水中的分散过程。王良等[21]通过对黄土可蚀性影响因素的探索发现土壤崩解速率受黏粒含量和砂粒含量影响显著,黏粒含量越高,崩解速率越小,抗侵蚀能力越强,砂粒含量的影响则相反。段青松等[22]的研究结果也证实,黏粒中的有机质作为一种土壤胶结物,促进微团聚体形成大团聚体,提高土壤团聚体的稳定性。与许晓鸿等[23]的研究也一致,他们通过对东北丘陵漫岗区坡耕地土壤抗蚀性研究发现,有机质含量较高可显著减缓土壤在水中的崩解速率。上述研究结论与本试验结果一致。在干湿交替作用下,0—30,30—60 cm土层SDR随循环次数增加而整体加快,这主要与反复干湿作用导致土壤中黏粒含量下降有关。其中,0—30 cm土层土壤在30 min内土样并未完全崩解,这可能也与黑土黏粒含量较高、颗粒间结合力较强以及较低容重和较高孔隙度有关[24]。这些特征赋予了黑土良好的通气性和持水性,从而提高了其对水分溶解与消散作用的抵抗能力,降低了累计崩解量。本研究在30—60 cm土层中观察到,崩解速率在0次交替时最高,而在1次和8次交替后明显降低。郝志桃等[25]通过黄土胶黏粒运移规律试验发现,在多次干湿交替作用下,黄土骨架颗粒之间的“黏桥”作用增强,同时孔隙壁矿物颗粒表面逐渐光滑,孔隙渗流黏滞力减弱,从而促进了颗粒间更有效的胶结。表明干湿交替可促进黏粒及可溶性物质在土壤中的均匀分布,增强颗粒间胶结作用,从而导致土壤容重增加、孔隙度降低,进而减缓崩解过程。与此不同,60—90 cm土层的SDR整体较高,且干湿循环对其作用不明显,变化幅度相对较小,高于0—30 cm和30—60 cm土层。这可能是由于该层土壤结构较为疏松,黏粒含量偏低,土壤以砂粒为主,颗粒间聚合能力弱,因而更容易在水中被侵蚀和分散。这与王念秦等[26]研究结果相一致,他们通过陕西关中地区黄土崩解试验指出,土壤砂粒含量越高,团聚作用就越弱,遇水越容易崩解。这一结果与王健等[1]的研究存在差异,他们通过干湿交替对黄土崩解速度的影响试验发现干湿交替可增加土壤颗粒间的内聚力,从而减缓崩解速度并提高抗蚀性。

3.3 不同土层土壤抗冲性对干湿交替的响应

土壤抗冲性是衡量其抵抗水流侵蚀能力的重要参数[27]。试验结果表明,随着干湿循环次数及沟壁深度的增加,3个土层抗冲系数(ANS)整体呈下降趋势,且土层间差异显著,表现为0—30 cm>30—60 cm>60—90 cm,说明干湿循环对土壤抗冲性的影响具

有累积效应和明显的空间分异特征。反复的湿胀-干缩过程加剧了土壤团聚体破碎、重组,造成黏粒随径流流失,削弱颗粒间胶结作用,从而降低土壤结构稳定性。已有研究表明,土壤黏粒在维持土壤结构稳定性和增强抗冲性方面具有重要作用。朱兆棋等[28]通过安宁河干旱河谷区不同类型农用地土壤抗冲性及与土壤性质关系的研究指出,土壤有机质与抗冲性呈正相关但不显著。沙小燕等[29]通过研究也认为土壤抗冲性与有机质呈极显著正相关。本研究结果与上述结论基本一致,表明黏粒及细颗粒物质的流失是抗冲性降低的重要原因之一。此外,不同土壤类型对干湿循环的响应存在差异。马璠等[18]也通过干湿交替处理对土壤抗冲性的影响试验发现,干湿交替处理对土壤抗冲性的影响程度与土壤种类有关,黑土的抗冲性要明显强于黄土。进一步证实了上述结论。本研究结果还显示,土壤容重随干湿循环次数的增加而逐渐降低,这也是导致ANS随循环次数增加而下降的重要原因之一。王健等[30]通过土壤密度对土壤抗侵蚀性的影响试验也证实,抗冲性随土壤密度的增大而增强。需要指出的是,各土层在0次干湿循环处理下ANS值相对偏低,可能与原状土采样过程中对表层结构产生一定扰动有关,导致试验初期径流含沙量偏高。但该现象属于客观因素,不影响不同土层间抗冲性差异及其变化规律的整体判断。

4　结　论

(1) 不同干湿交替次数对侵蚀沟沟壁各土层抗蚀性具有显著影响。随着交替次数增加,土壤团聚体水稳性整体下降,崩解速率呈现明显的土层差异性变化,土壤抗冲性总体表现为增强趋势,表明干湿交替是调控沟壁土壤结构稳定性和抗蚀性的关键外界因素。

(2) 干湿交替加剧了侵蚀沟沟壁抗蚀性的垂向分异。在干湿交替作用下,沟壁土壤抗蚀性表现出明显的垂向分异特征:黑土层(0—30 cm)结构相对稳定,抗蚀性最强,但干湿交替仍会加剧团聚体破碎,降低孔隙度并提高崩解速率;淋溶层(30—60 cm)综合抗蚀性低于表层,干湿交替对其崩解过程具有一定抑制作用,并在一定程度上增强了抗冲刷能力;黄土层(60—90 cm)结构疏松,抗蚀性最弱,受自身土壤质地限制,干湿交替对其改善作用有限。

研究结果对侵蚀沟治理具有启示意义,但仍需进一步深化。干湿交替加速了沟壁结构破坏和垂向差异发展,是促进沟壁坍塌与沟蚀持续扩展的重要过程。侵蚀沟发育是多种外营力长期耦合作用的结果,未来研究应在本研究基础上,进一步考虑降雨、径流以及冻融等多因子叠加效应的影响,以更全面地揭示侵蚀沟发育机制,并为中下层土壤结构改良与抗冲性增强提供科学依据。

参考文献(References)

[1] 王健,马璠,张鹏辉,等.干湿交替对黄土崩解速度的影响[J].土壤学报,2015,52(6):1273-1279.
Wang Jian, Ma Fan, Zhang Penghui, et al. Effect of wet-dry alternation on loess disintegration rate[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015,52(6):1273-1279.

[2] 杨和平,王兴正,肖杰.干湿循环效应对南宁外环膨胀土抗剪强度的影响[J].岩土工程学报,2014,36(5):949-954.
Yang Heping, Wang Xingzheng, Xiao Jie. Influence of wetting-drying cycles on strength characteristics of Nanning expansive soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014,36(5):949-954.

[3] 白培勋,余建.干湿交替对土壤结构、土壤抗蚀性的影响机理述评[J].水土保持应用技术,2022(4):45-48.
Bai Peixun, Yu Jian. Review on the influence mechanism of dry-wet alternation on soil structure and soil erosion resistance [J]. Technology of Soil and Water Conservation, 2022(4):45-48.

[4] 纪亚林,黄明斌,郭天琦.干湿交替对重构土壤物理性质的影响[J].土壤通报,2025,56(3):646-654.
Ji Yalin, Huang Mingbin, Guo Tianqi. Effect of drying-wetting alternations on the physical properties of reconstructed soils [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2025, 56(3):646-654.

[5] 韩祖丽,兰素恋,张红日,等.干湿循环作用下膨胀土强度特性及衰减机理研究[J].西部交通科技,2025(12):93-96.
Han Zuli, Lan Sulian, Zhang Hongri, et al. Study on strength characteristics and attenuation mechanism of expansive soil under dry-wet cycle [J]. Western China Communications Science & Technology, 2025(12):93-96.

[6] 王丽鑫,陈卓鑫,郭明明,等.典型黑土区不同土地利用类型侵蚀沟沟岸土壤可蚀性及其影响因素[J].水土保持研究,2025,32(3):18-27.
Wang Lixin, Chen Zhuoxin, Guo Mingming, et al. Soil erodibility and its influencing factors of erosion gully banks under different land use types in the typical black soil region of northeast China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(3):18-27.

[7] 张素,熊东红,张宝军,等.干湿交替下干热河谷冲沟不同土层的抗侵蚀性研究[J].农业机械学报,2016,47(12):152-159.

Zhang Su, Xiong Donghong, Zhang Baojun, et al. Soil erosion resistance under dry-wet alternation in different layers of dry-hot valley region [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12):152-159.

[8] Bravo-Garza M R, Voroney P, Bryan R B. Particulate organic matter in water stable aggregates formed after the addition of ^{14}C-labeled maize residues and wetting and drying cycles in vertisols [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010,42(6):953-959.

[9] 李娜,吴娟,李欣昱.克山农场年月降水量随机特征分析[J].水利科学与寒区工程,2023,6(7):57-60.
Li Na, Wu Juan, Li Xinyu. Analysis on the random characteristics of monthly precipitation in Keshan Farm [J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2023,6(7):57-60.

[10] 刘华征,贾燕锋,范昊明,等.东北松嫩典型黑土区长缓坡耕地土壤侵蚀沿坡长变化规律及其对土壤质量的影响[J].自然资源学报,2022,37(9):2292-2305.
Liu Huazheng, Jia Yanfeng, Fan Haoming, et al. Variation of soil erosion intensity along the long gentle farming slopes and its influence on soil quality in the typical mollisol region, Songnen Plain, northeast China [J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(9):2292-2305.

[11] 张琛,赫有有,薛婷婷,等.松嫩平原北部未开垦黑土土壤物理性状垂直变化特征[J].水土保持研究,2023,30(6):231-240.
Zhang Chen, He Youyou, Xue Tingting, et al. Vertical variation of physical properties of uncultivated black soil in northern Songnen Plain [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(6):231-240.

[12] 许航,秦岭,何淑勤,等.大渡河干旱河谷区不同土地利用方式下土壤抗冲性特征[J].干旱区资源与环境,2023,37(10):102-108.
Xu Hang, Qin Ling, He Shuqin, et al. Soil anti-scourability under different land use types in arid valley area of Dadu River [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023,37(10):102-108.

[13] 李强,张正,孙会,等.土壤崩解速率的一种修正方法[J].水土保持研究,2015,22(6):344-348.
Li Qiang, Zhang Zheng, Sun Hui, et al. A new modified method for calculation of soil disintegration rate [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015,22(6):344-348.

[14] Di Stefano C, Ferro V, Mirabile S. Comparison between grain-size analyses using laser diffraction and sedimentation methods [J]. Biosystems Engineering, 2010,106(2):205-215.

[15] 舒新兴.土壤团粒结构形成机制及其稳定性影响因素研究[J].景德镇学院学报,2022,37(6):46-49.
Shu Xinxing. Study on the formation mechanism of soil aggregate structure and the influencing factors on its stability [J]. Journal of Jingdezhen University, 2022, 37(6):46-49.

[16] 邬铃莉,王玉杰,王彬,等.干湿交替作用对西南地区黄壤团聚体稳定性的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):317-321.
Wu Lingli, Wang Yujie, Wang Bin, et al. Influence of dry-wet cycles on aggregate stability of yellow soil in southwest China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(3):317-321.

[17] 张爱国,李锐,杨勤科.中国水蚀土壤抗剪强度研究[J].水土保持通报,2001,21(3):5-9.
Zhang Aiguo, Li Rui, Yang Qinke. Study on soil anti shearing intensity of water erosion in China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001,21(3):5-9.

[18] 马璠,王健,张鹏辉,等.干湿交替处理对土壤抗冲性的影响试验研究[J].中国农学通报,2014,30(35):178-184.
Ma Fan, Wang Jian, Zhang Penghui, et al. Effects of dry-wet alternation treatment on anti-scourability of soil [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(35):178-184.

[19] Israelachvili J N, Adams G E. Measurement of forces between two mica surfaces in aqueous electrolyte solutions in the range 0—100 nm [J]. Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases, 1978,74:975.

[20] 邹翔,张平仓,陈杰.小江流域土壤抗崩性实验研究[J].水土保持研究,2008,15(1):244-246.
Zou Xiang, Zhang Pingcang, Chen Jie. Study on soil anti-collapse ability in Xiaojiang River basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008,15(1):244-246.

[21] 王良,王昕宇,雷磊,等.黄土可蚀性因子K值与土壤密度、崩解速率的关系[J].中国水土保持科学(中英文),2025,23(5):69-77.
Wang Liang, Wang Xinyu, Lei Lei, et al. The relationship between the erodibility factor K value of loess and bulk density and disintegration rate [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025,23(5):69-77.

[22] 段青松,保锐琴,黄广杰,等.澜沧江黄登水电站库周土壤的崩解特性[J].水土保持通报,2023,43(4):195-202.
Duan Qingsong, Bao Ruiqin, Huang Guangjie, et al. Soil disintegration characteristics around Huangdeng Hydropower Station reservoir on Lancang River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(4):195-202.

[23] 许晓鸿,隋媛媛,张瑜,等.东北丘陵漫岗区坡耕地土壤

抗蚀性研究[J].水土保持通报,2012,32(4):32-35.
Xu Xiaohong, Sui Yuanyuan, Zhang Yu, et al. Anti-erodibility of sloping land soil in upland region of northeast China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012,32(4):32-35.

[24] 王忠良,范春梅,段继琪,等.滇中亚高山草甸土理化性质和崩解特性关系[J].水土保持学报,2024,38(4):170-180.
Wang Zhongliang, Fan Chunmei, Duan Jiqi, et al. Relationship between physicochemical properties and disintegration characteristics of subalpine meadow soils in central Yunnan [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(4):170-180.

[25] 郝志桃,李喜安,安明晓,等.循环增减湿条件下黄土胶黏粒运移规律试验研究[J].西安科技大学学报,2025,45(1):138-152.
Hao Zhitao, Li Xi'an, An Mingxiao, et al. Experimental study on the migration law of loess colloidal-clay particles under cyclic humidity increase and decrease [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2025,45(1):138-152.

[26] 王念秦,魏精瑞.陕西关中地区离石黄土崩解速率实验研究[J].工程地质学报,2015,23(5):954-958.
Wang Nianqin, Wei Jingrui. Experimental study on disintegration rate of Lishi loess in Guanzhong region of Shaanxi Province [J]. Journal of Engineering Geology, 2015,23(5):954-958.

[27] 刘方严,黎建强,杨舒媛,等.林下三七种植对林地土壤抗冲抗蚀性影响[J].水土保持研究,2025,32(5):11-19.
Liu Fangyan, Li Jianqiang, Yang Shuyuan, et al. Effects of understory *Panax notoginseng* planting on soil anti-scourability and anti-erodibility in forestlands [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(5):11-19.

[28] 朱兆棋,刘守江,刘鲁光,等.安宁河干旱河谷区不同类型农用地土壤抗冲性及与土壤性质关系[J].水土保持研究,2024,31(1):27-34.
Zhu Zhaoqi, Liu Shoujiang, Liu Luguang, et al. Soil anti-scourability of different types of agricultural lands in the arid valley area of the Anning River and its relationship with soil properties [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(1):27-34.

[29] 沙小燕,李魁,王文龙,等.黄土高塬沟壑区草地沟头立壁土壤抗冲性特征[J].应用生态学报,2022,33(1):133-140.
Sha Xiaoyan, Li Kui, Wang Wenlong, et al. Characteristics of soil anti-scouribility in gully head wall of grass-covering on the gullied Loess Plateau, northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022,33(1):133-140.

[30] 王健,刘旦旦,张鹏辉.土壤密度对土壤抗侵蚀性的影响[J].灌溉排水学报,2013,32(1):65-68.
Wang Jian, Liu Dandan, Zhang Penghui. Effects of soil density on soil erosion resistance [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013,32(1):65-68.

(上接第 29 页)

[27] 何玲丽,田东方.基于混合格式Richards方程的非均质土体渗流模拟[J].水利水运工程学报,2022(3):59-65.
He Lingli, Tian Dongfang. Seepage simulation for heterogeneous soil based on the mixed form of Richards' equation [J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(3):59-65.

[28] 赵志强,戴福初,闵弘,等.原状黄土-古土壤中水分入渗过程研究[J].岩土力学,2021,42(9):2611-2621.
Zhao Zhiqiang, Dai Fuchu, Min Hong, et al. Research on infiltration process in undisturbed loess-paleosol sequence [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021,42(9):2611-2621.

[29] 路培.土壤结皮形成机制及空间分布对侵蚀的影响研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.
Lu Pei. Formation of soil crust and its effects of different spatial distributions of physical soil crusts on runoff and erosion [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2018.

[30] 徐蝶,王济,蔡雄飞,等.我国土壤物理结皮侵蚀效应研究进展[J].河南农业科学,2023,52(4):9-20.
Xu Die, Wang Ji, Cai Xiongfei, et al. Research progress of soil physical crust erosion effect in China [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023,52(4):9-20.