

# 土壤表面电场对黑土团聚体破碎和侵蚀的影响

郭威震<sup>1,2</sup> 胡斐南<sup>1,2,3</sup> 谭滔滔<sup>1,2</sup> 马任甜<sup>1,2</sup> 刘婧芳<sup>1,2</sup> 李喆<sup>1,2</sup> 赵世伟<sup>1,2,3\*</sup>

(<sup>1</sup>西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup>西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; <sup>3</sup>中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘要** 通过定量调控土粒表面电场强度,采用湿筛法和模拟降雨试验,研究了土壤表面电场对东北黑土团聚体稳定性和土壤侵蚀的影响。结果表明: 1) 随着土壤本体溶液电解质浓度的降低,土壤颗粒表面电位绝对值和电场强度均不断增加,宾县黑土和克山黑土表面电场强度均可达  $10^8 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  数量级; 2) 随着土粒表面电场增强,土壤团聚体的破碎程度增大,平均重量直径表现为先急剧减小而后保持不变; 3) 通过人工模拟降雨试验可知,随本体溶液电解质浓度降低,颗粒表面电场增强,土壤流失强度增大。当电解质浓度  $< 0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,对应宾县黑土和克山黑土的表面电位绝对值分别大于 210 和 209 mV 时,土壤累积流失量随时间的分布曲线较为接近,表明  $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  是影响土壤侵蚀强度的电解质临界浓度值; 4) 土壤累积流失量与团聚体平均重量直径之间表现出良好的线性关系。综上,当雨水进入土壤,土粒表面电场增强,引发土壤团聚体破碎并释放大量细颗粒,最后在雨水冲刷作用下发生侵蚀。该研究结果可为深入理解东北黑土区土壤水蚀机理提供新的思路。

**关键词** 土壤侵蚀; 土壤电场; 表面电位; 团聚体稳定性

**Effects of soil surface electric field on aggregates breakdown and water erosion in black soil region of Northeast China.** GUO Wei-zhen<sup>1,2</sup>, HU Fei-nan<sup>1,2,3</sup>, TAN Tao-tao<sup>1,2</sup>, MA Ren-tian<sup>1,2</sup>, LIU Jing-fang<sup>1,2</sup>, LI Zhe<sup>1,2</sup>, ZHAO Shi-wei<sup>1,2,3\*</sup> (<sup>1</sup>College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>2</sup>State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>3</sup>Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China).

**Abstract:** Through quantitatively adjust soil electric field, we investigated the effect of soil electric field on aggregate stability and soil erosion in black soil region of Northeast China with the experiments of wet sieving and rainfall simulation. Results showed that: 1) Soil surface potential absolute value and electric field strength increased with the decreases of electrolyte concentration in bulk solution. Soil electric field strength could reach to  $10^8 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ . 2) With the increase of soil electric field strength, the degree of fragmentation of soil aggregates increased and the mean weight diameter (MWD) decreased sharply first and then kept constant. 3) With decreasing electrolyte concentration and increasing surface potential, the amount of soil loss increased. As the electrolyte concentration was  $< 0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , the corresponding soil surface potential was  $> 210$  and  $209 \text{ mV}$  for Binxian and Keshan, respectively, the cumulative amounts of soil loss with rainfall time almost overlapped, suggesting that the electrolyte concentration of  $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  was the threshold for soil erosion. 4) There was a linear relationship between soil cumulative loss and MWD. Our results indicated that soil electric field strength increased as the rain enters into the soil, which could induce soil aggregate breakdown and release amounts of fine soil particles. Finally, soil erosion occurred under the driving of flowing water. Our results provided insights into the mechanism underlying soil erosion in the black soil region of Northeast China.

**Key words:** soil erosion; soil electric field; surface potential; aggregate stability.

本文由国家重点研发计划项目(2016YFE0202900)和国家自然科学基金项目(41977024)资助 This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFE0202900) and the National Natural Science Foundation of China (41977024).

2020-01-02 Received, 2020-05-15 Accepted.

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: swzhao@nwfu.edu.cn

土壤侵蚀是导致土壤退化、降低土地生产力的主要环境问题之一,其过程往往伴随着大量水土流失,造成土地瘠薄,养分流失,进而影响作物生长和产量,严重制约着人类生存和经济发展<sup>[1-2]</sup>。因此,深刻理解土壤侵蚀的发生机制,对减少水土流失、保护生态环境具有深刻意义。

土壤团聚体的破碎是土壤侵蚀发生的第一步,也是关键的一步。团聚体稳定性对土壤孔隙状况、水分入渗和压实、板结等物理过程有重要影响,同时也是土壤肥力的基础和评价土壤质量的重要指标之一<sup>[3-4]</sup>。因此,提高土壤团聚体稳定性是增加土壤肥力、减少土壤流失的重要措施。目前,关于土壤团聚体破碎主要是因为雨滴打击力、矿物不均匀膨胀、消散作用和理化分散作用<sup>[5]</sup>。理化分散作用强调土壤溶液化学性质变化对团聚体稳定性的影响。徐爽等<sup>[6]</sup>研究发现,不同离子浓度、化合价和离子种类均对土壤团聚体的破碎程度有一定影响。Holthusen 等<sup>[7]</sup>指出,土壤溶液中离子浓度降低将会导致团聚体稳定性降低。根据胶体双电层理论,溶液化学性质的变化会影响颗粒双电层厚度,从而改变土壤周围的电场强度。因此,雨水进入土壤后改变了土壤本体溶液的电解质浓度,继而改变了土粒周围电场,并最终影响团聚体稳定性。

尽管在宏观上土壤表现为电中性,但在介观尺度(1~1000 nm 量级)土壤颗粒表面带有大量电荷<sup>[8]</sup>。近年研究发现,土壤胶体间的凝聚与分散主要取决于土壤内力(静电斥力、范德华引力、水合斥力)的大小,其产生的压强可高达上百个大气压,是推动团聚体破碎的主要作用力<sup>[9-10]</sup>。当团聚体破碎后,细土粒被雨水冲刷带走,最终发生土壤侵蚀。可见,土壤电场作用不仅使土壤颗粒间产生相互作用,还会影响到土壤团聚体的稳定和破碎程度,从而导致土壤侵蚀的发生及其强度变化<sup>[11]</sup>。Quirk<sup>[12]</sup>研究发现,土壤溶液中电解质浓度升高有利于团聚体的形成与稳定,进而增加水分入渗,减少土壤流失。Kim 等<sup>[13]</sup>研究发现,随着降雨溶液浓度的增加,土壤流失量逐渐减小,并存在一个临界浓度值。Li

等<sup>[8]</sup>研究得出,紫色土壤颗粒迁移量随电场强度的增强而明显增多。可见,土壤颗粒表面电场的变化将深刻影响土壤团聚体稳定性及破碎特征,并最终影响土壤流失的发生和强度变化。

东北黑土区有机质含量丰富,土地肥沃,是我国重要的商品粮生产基地<sup>[14]</sup>。然而风蚀、水蚀和冻融作用的长期影响使黑土层从 20 世纪的 80~100 cm 减少到目前的 20~40 cm,土地退化十分严重。特别是近半个世纪以来的人为活动导致土壤结构被破坏,加速了有机质的分解,造成水土流失面积扩大、土壤抗蚀能力减弱,部分地区出现“破皮黄”的现象<sup>[15]</sup>。尽管目前关于黑土区土壤多营力侵蚀的研究较多<sup>[16-17]</sup>,但有关土壤电场对黑土团聚体稳定性和土壤侵蚀的影响研究还不清楚,这在一定程度上限制了人们对黑土区多营力复合侵蚀发生机制的认识。因此,本研究以两种典型黑土为对象,通过理论计算和试验相结合的方法,分析土壤表面电场对黑土团聚体破碎和侵蚀的影响,以期为黑土区土壤多营力复合侵蚀研究提供一定的理论参考。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 供试土样与基本性质

供试土壤分别采自哈尔滨市宾县(45°45'22" N, 127°25'36" E)和齐齐哈尔市克山县(48°08'27" N, 126°04'59" E)的农田耕作层(0~20 cm)。土样在室内自然风干去杂后,研磨过 0.25 和 2 mm 筛,采用常规分析方法测定土壤基本性质<sup>[18]</sup>。有机质采用重铬酸钾外加热法测定;土壤颗粒组成采用 MS2000 激光粒度仪(英国马尔文公司生产)测定,并按国际制标准分为砂粒(2~0.02 mm)、粉粒(0.02~0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm) 3 个粒级;采用电极法测定土壤 pH,土水比为 1:2.5;采用 X 射线衍射法测定土壤黏土矿物组成,两种黑土的矿物组成主要以水云母(30%)、绿泥石(25%)和高岭石(25%)为主;采用表面性质联合测定法测定土壤阳离子交换量(CEC)和比表面积(SSA)<sup>[19-20]</sup>。各土壤性质测定结果见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Soil basic physical and chemical properties

土壤类型 Soil type	有机质 SOM (g·kg <sup>-1</sup> )	pH	阳离子交换量 CEC (cmol·kg <sup>-1</sup> )	比表面积 SSA (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	黏粒 Clay (%)	粉粒 Silt (%)	砂粒 Sand (%)
宾县黑土 Binxian black soil	28.9	6.32	21.3	58.6	32.9	24.7	42.4
克山黑土 Keshan black soil	49.9	5.88	23.4	66.5	35.5	25.4	39.1

SOM: Soil organic matter; CEC: Cation exchange capacity; SSA: Specific surface area.

## 1.2 土壤样品的制备

为了定量表征土壤颗粒表面电场对团聚体破碎和侵蚀的影响,需要先将供试土样制成单一离子的 $K^+$ 饱和样。制备方法如下<sup>[8,19]</sup>:称取2 kg风干土样置于5 L的大烧杯中,然后加入 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的KCl溶液,将土壤悬液搅拌12 h后离心,弃去上清液,重复3次。之后再加入去离子水,重复上述操作,洗去溶液中多余的盐分离子,即得到 $K^+$ 饱和样。将两种土壤的 $K^+$ 饱和样在 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干,然后研磨过5 mm筛备用。

## 1.3 土壤颗粒表面电位和电场的计算

在自然状态下,土壤通过干湿状态来调节本体溶液中的电解质浓度,进而改变土壤表面的电场强度。据此,本试验通过设置1、0.1、0.01、0.001、0.0001  $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的KCl溶液来直接调节不同的电场条件。根据双电层理论,在1:1型电解质溶液中土壤颗粒表面电位可由下式计算<sup>[21]</sup>:

$$\phi_0 = -\frac{2RT}{ZF} \ln\left(\frac{1-a}{1+a}\right) \quad (1)$$

$$\frac{kC}{SC_0} = 1 + \frac{4}{1+a} - \frac{4}{1+e^{-1}a} \quad (2)$$

$$k = \sqrt{\frac{8\pi F^2 Z^2 C_0}{\varepsilon RT}} \quad (3)$$

式中: $\phi_0$ 表示土壤颗粒表面电位(V); $F$ 表示法拉第常数( $96485.34 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$ ); $Z$ 表示电解质阳离子的化合价; $C_0$ 表示本体溶液中阳离子的平衡浓度( $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ); $R$ 表示气体常数( $8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ); $T$ 表示绝对温度(298 K); $\varepsilon$ 表示介电常数( $8.9 \times 10^{-9} \text{ C}^2 \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ); $C$ 表示阳离子交换量( $\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ ); $S$ 表示比表面积( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ); $k$ 表示德拜-休克尔系数( $1 \cdot \text{dm}^{-1}$ ); $a$ 表示方程中间变量。

依据式(4)中的表面电位值,可通过以下公式计算出KCl溶液体系中土壤表面电位和电场随颗粒距离变化的情况:

$$\varphi_{(x)} = \frac{4RT}{F} \tanh^{-1}(be^{-kx}) \quad (4)$$

$$b = \tanh(F\phi_0/4RT) \quad (5)$$

$$E_{(x)} = -\sqrt{\frac{8\pi RT}{\varepsilon}} [C_0(e^{\frac{ZF\varphi_{(x)}}{RT}} - 1)] \quad (6)$$

式中: $\varphi_{(x)}$ 表示距离颗粒表面 $x$ 处的电位(V); $x$ 表示双电层中距离颗粒表面的距离(nm); $b$ 表示中间变量; $E_{(x)}$ 表示距离表面 $x$ 处的电场强度( $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ )。

## 1.4 试验方法

### 1.4.1 团聚体稳定性测定

本研究中,采用湿筛法

测定土壤团聚体稳定性。具体步骤如下:称取5 g左右的土壤样品,分别在1、0.1、0.01、0.001、0.0001  $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的KCl溶液中浸泡10 min后,缓慢吸取上清液,然后用酒精将土样冲刷转移到由2、1、0.5、0.25、0.15和0.053 mm筛网组成的套筛顶部,并在99%的无水乙醇中上下震荡10次,幅度保持在2 cm。最后将每个筛网中剩余的土样冲刷到铝盒中,然后在 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下烘干称重,试验重复3次。按照公式(7)计算团聚体平均重量直径:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \frac{r_{i+1} + r_i}{2} \times m_i \quad (7)$$

式中: $r_i$ 是第 $i$ 个筛子孔径, $r_0 = r_1$ , $r_n = r_{n+1}$ ;  $m_i$ 是第 $i$ 个筛子的破碎团聚体质量百分比。

**1.4.2 模拟降雨试验** 采用不同浓度的KCl溶液作为降雨水源,定量调控降雨试验中土壤颗粒表面电场强度的大小,在一定的高度下收集不同时刻的土壤流失量,计算累积流失量。具体试验方法如下:取 $<5 \text{ mm}$ 粒径的 $K^+$ 饱和团聚体65 g,并将其平铺于径流土槽内,土壤容重约 $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,将径流土槽安放在针滴式模拟降雨器下,降雨高度设置为10和20 cm,降雨强度设为 $80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (实际为 $82.5 \pm 0.80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )。模拟降雨水源为不同浓度的KCl溶液,浓度分别为1、0.1、0.01、0.001、0.0001  $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。为方便收集径流泥沙,径流土槽下端设计为等腰梯形。为避免干扰径流,尽量保证土壤表面平整。从径流产生开始计时,每4 min收集一次径流,累积降雨100 min,共计收集径流25次。然后在 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下将径流泥沙悬液烘干并称重。根据测定数据计算累积流失量,本试验重复2次<sup>[22]</sup>。

## 1.5 数据处理

采用Excel 2016进行数据处理,Origin 2018作图并对累积流失量与平均重量直径进行线性拟合。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤表面电学性质

由表2可知,随着宾县黑土和克山黑土本体溶液中电解质浓度的升高,土壤表面电位绝对值逐渐降低。例如,当电解质浓度为 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,克山黑土和宾县黑土的表面电位绝对值分别为99.9和101.3 mV;而当电解质浓度为 $0.0001 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,克山黑土和宾县黑土的表面电位绝对值分别高达326.3和328.0 mV。电解质浓度从 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 降到 $0.0001 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,两种土壤的表面电位分别增长了226.6%和223.8%。上述结果表明,土壤本体溶液中

表 2 不同电解质浓度下土壤颗粒表面电位  
Table 2 Soil surface potential at different electrolyte concentrations (mV)

电解质浓度 Electrolyte concentration (mol · L <sup>-1</sup> )	宾县黑土 Binxian black soil	克山黑土 Keshan black soil
0.0001	-328.0	-326.3
0.001	-269.2	-267.5
0.01	-210.9	-209.3
0.1	-154.4	-152.9
1	-101.3	-99.9

电解质溶液的浓度和类型均会影响土壤表面电位和颗粒周围的电场强度。

将一系列的表面电位数值代入公式(4)~(6)进行计算,可以得到不同电解质浓度下土壤颗粒周围的电场分布。由图 1 可知,在不同浓度电解质溶液作用下,宾县黑土和克山黑土颗粒表面电场强度均可高达  $10^8 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  数量级,但随着距颗粒表面处距离的增加,不同浓度电解质溶液下的电场强度发生不同程度的减小。当距离颗粒表面位置在 0~5 nm 范围内时,各浓度电解质溶液下的电场强度均可高达  $10^9 \sim 10^7 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ ,而大于 5 nm 的距离后,各电解质浓度下的电场强度迅速衰减。例如,当电解质浓度为  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,电场强度在 10 nm 之内迅

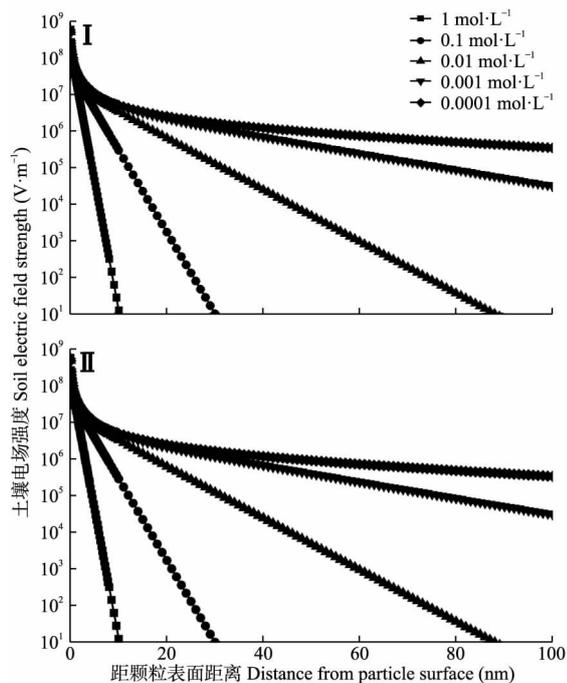


图 1 不同电解质浓度下土粒周围电场强度分布  
Fig.1 Distribution of soil electric field around soil particles at different electrolyte concentrations.

I: 宾县黑土 Binxian black soil; II: 克山黑土 Keshan black soil. 下同 The same below.

速衰减至 0; 而当本体溶液电解质浓度为  $0.0001 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,电场强度在 100 nm 处仍然可高达  $10^5 \sim 10^6 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 。同时,当本体溶液电解质浓度  $< 0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,电场强度变化曲线较为接近,表明该浓度值可能是电场变化的临界点。

## 2.2 土壤表面电场对团聚体稳定性的影响

由图 2 可知,随着本体溶液电解质浓度的升高,颗粒表面电位绝对值降低,团聚体平均重量直径增大。说明随着土壤本体溶液电解质浓度的升高团聚体稳定性不断增强<sup>[23]</sup>。当电解质浓度为  $0.0001 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,克山黑土和宾县黑土的平均重量直径分别为 0.31 和 0.14,而当电解质溶液浓度为  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,其平均重量直径分别为 0.90 和 0.48,增加幅度分别为 190.3%和 242.9%。当颗粒表面电位绝对值小于 209.3 mV 时,克山黑土的平均重量直径不断增大,当颗粒表面电位绝对值大于 209.3 mV 时,其平均重量直径趋于平缓。说明表面电位 209.3 mV 是克山黑土团聚体破碎的临界电位值。同样,当宾县黑土的颗粒表面电位绝对值小于 210.9 mV 时,其平均重量直径不断增大,而当颗粒表面电位值大于 210.9 mV 时,其平均重量直径趋于平缓。因此,当电解质浓度为  $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,对应的克山黑土和宾县黑土的电位值分别为 209.3 和 210.9 mV,是团聚体破碎的临界电位值。随着电解质浓度降低,对应的土壤颗粒表面电位绝对值增加,

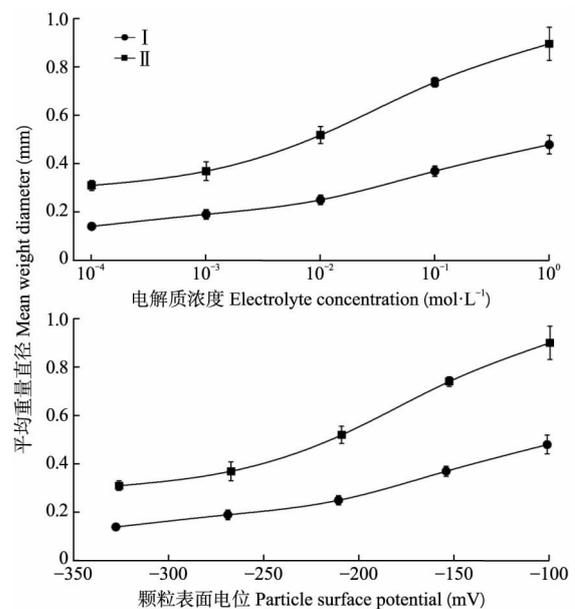


图 2 土壤团聚体平均重量直径随电解质浓度和颗粒表面电位的变化

Fig.2 Changes of soil mean weight diameter with electrolyte concentration and particle surface potential.

土壤团聚体平均重量直径递减。在不同浓度电解质条件下,克山黑土的平均重量直径均高于宾县黑土,说明克山黑土的团聚体稳定性高于宾县黑土。

由图3可知,在1和0.1 mol·L<sup>-1</sup> KCl溶液作用下,宾县黑土团聚体发生裂解,分散后的团聚体粒级主要分布在0.25~0.5 mm、0.15~0.25 mm、0.053~0.15 mm、<0.053 mm中。其中,0.25~0.5 mm微团聚体含量最高,分别为30.7%和27.3%。0.01 mol·L<sup>-1</sup>电解质溶液作用下,其团聚体破碎后粒级主要分布在0.053~0.15 mm和<0.053 mm中,其中,微团聚体含量最高的粒级分布在0.053~0.15 mm,高达33.0%。而在0.001和0.0001 mol·L<sup>-1</sup> KCl溶液作用下,团聚体的粒级越小含量越高,其中,<0.053 mm粒级含量最高,分别为36.6%和40.9%。而克山黑土除0.0001 mol·L<sup>-1</sup> KCl溶液作用下微团聚体主要分布在<0.053 mm粒级外,在其余4个浓度KCl溶液作用下,分散后的团聚体主要分布在0.25~0.5 mm。从1 mol·L<sup>-1</sup>到0.001 mol·L<sup>-1</sup>的团聚体含量依次为27.6%、30.7%、31.6%和30.9%。整体来看,对于克山黑土而言,团聚体破碎后仍能够释放大量的大团聚体(>0.25 mm),而宾县黑土团聚体破碎后主要释放大量的微团聚体,这说明相同条件下宾县黑土团聚体比克山黑土更易发生破碎。这一研究结果与之前两种土的平均重量直径随电解质

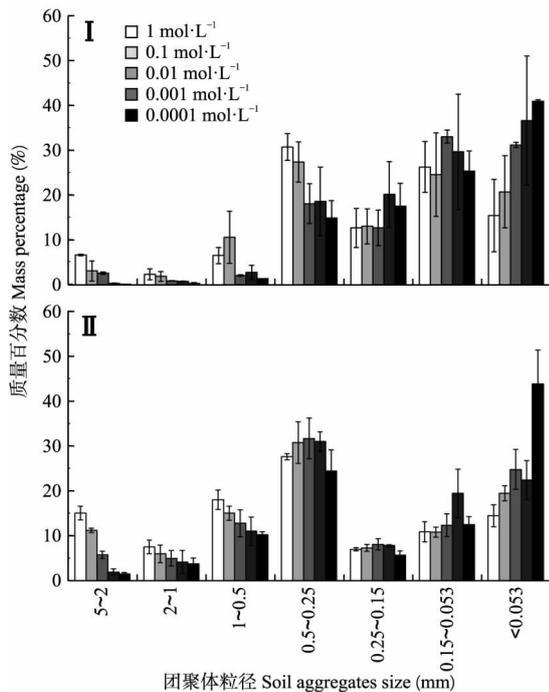


图3 不同电解质浓度下土壤团聚体分布

Fig.3 Soil aggregates distribution at different electrolyte concentrations.

浓度和颗粒表面电位的变化情况相一致,表明土壤颗粒表面电场将会对团聚体破碎程度产生重要影响。

### 2.3 土壤表面电场对土壤流失的影响

土壤流失量表征土壤侵蚀的强度,土壤累积流失量越大,则土壤侵蚀程度越高<sup>[24]</sup>。由图4可知,不同电解质浓度对土壤流失量有较大影响,随着电解质浓度的增加,土壤累积流失量逐渐减小。以宾县黑土为例,当高度为10 cm时,在电解质浓度为0.001和0.0001 mol·L<sup>-1</sup>的降雨条件下,其累积流失量分别为1803和2210 g·m<sup>-2</sup>;而高度为20 cm时,其累积流失量分别为2600和3120 g·m<sup>-2</sup>,土壤累积流失量均趋于相同。而当电解质浓度大于0.01 mol·L<sup>-1</sup>时,土壤累积流失量不断减小。克山黑土也存在相似的结果,表明电解质浓度0.01 mol·L<sup>-1</sup>是影响黑土土壤侵蚀的临界浓度值。这一结果与土壤团聚体平均重量直径随电解质浓度和颗粒表面电位变化的趋势相一致。在10、20 cm高度下,宾县黑土的累积流失量均大于克山黑土。宾县黑土土壤团聚体平均重量直径较克山黑土小,因此土壤团聚体稳定性较差(图2)。在同一浓度电解质溶液作用下,宾县黑土团聚体破坏程度较克山黑土大,其土壤流失量也较大。在降雨打击力和降雨强度均保持一致的情况下,1 mol·L<sup>-1</sup>电解质浓度下的土壤流失量远小于0.0001 mol·L<sup>-1</sup>电解质浓度下的土壤流失量。当改变外力作用,高度从10 cm升高到20 cm后,电解质浓度越低,则土壤流失量增加的幅度越大。以宾县黑土为例,在10 cm高度下,1和0.0001 mol·L<sup>-1</sup>电解质溶液作用下的累积流失量分别为255和2210 g·m<sup>-2</sup>,当降雨高度升至20 cm时,其1和0.0001 mol·L<sup>-1</sup>电解质溶液作用下的累积流失量分别为302和3120 g·m<sup>-2</sup>,增加幅度分别为18.5%和41.2%。这说明土壤流失量也同时会受到外在雨滴打击力的影响。

由图5可知,两种土壤的累积流失量随颗粒表面电位绝对值的降低逐渐降低。当颗粒表面电位绝对值分别大于209.3和210.9 mV时,土壤累积流失量趋于平缓且始终保持较高的强度。当颗粒表面电位绝对值小于209.3和210.9 mV时,土壤累积流失量随电位的降低不断减小。表明209.3和210.9 mV是影响土壤累积流失量的临界电位值,这一研究结果与平均重量直径随电解质浓度和颗粒表面电位变化的结果相一致(图2)。综上,随着电解质溶液浓度降低,土壤颗粒表面电位升高,土壤电场增强,团聚体破碎程度增加,土壤累积流失量增加。

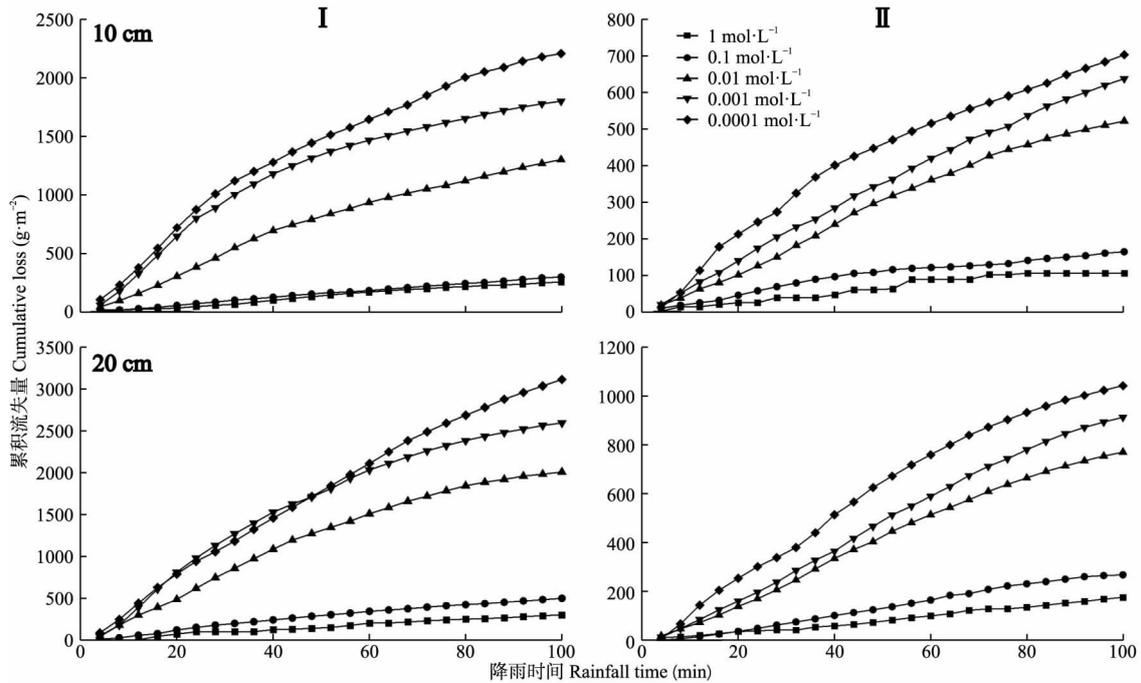


图 4 不同电解质浓度下土壤累积流失量随降雨时间的变化  
 Fig.4 Changes of soil cumulative loss with rainfall time at different electrolyte concentrations.

由图 6 可知,土壤累积流失量与团聚体平均重量直径表现出较好的线性关系。在克山黑土中,土壤累积流失量与平均重量直径拟合曲线的  $R^2$  分别为 0.971 和 0.970。在宾县黑土中,土壤累积流失量与平均重量直径拟合曲线的  $R^2$  分别为 0.948 和 0.925。这一研究结果与土壤累积流失量和团聚体

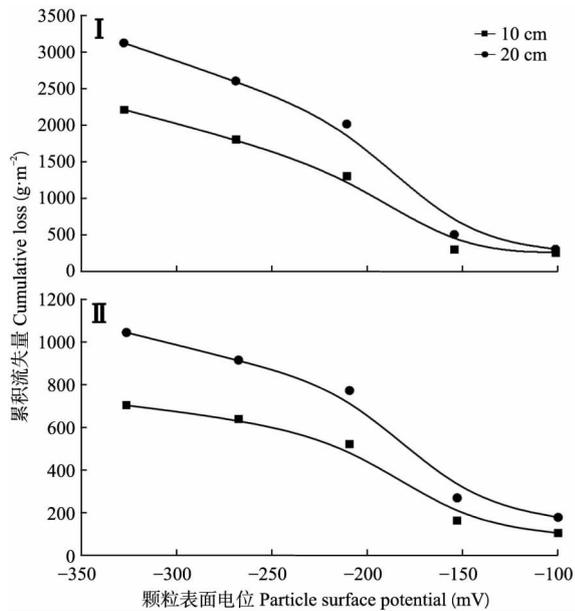


图 5 土壤累积流失量与表面电位之间的关系  
 Fig.5 Relationship between soil cumulative loss and soil surface potential.

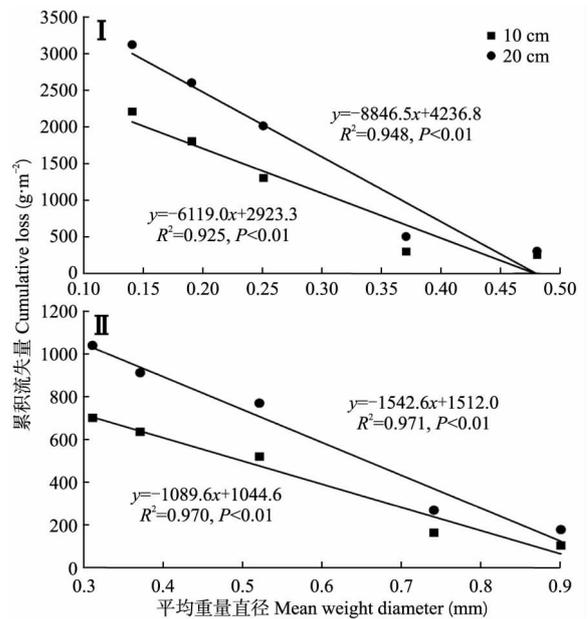


图 6 团聚体平均重量直径与土壤累积流失量之间的关系  
 Fig.6 Relationship between soil cumulative loss and mean weight diameter of soil aggregates.

平均重量直径随颗粒表面电位变化的结果一致,说明土壤电场变化引起团聚体破碎并最终导致土壤累积流失量发生变化。

### 3 讨 论

团聚体破碎是降雨侵蚀发生的第一步,也是关

键的一步。当雨水进入土壤后,团聚体破碎释放大 量细颗粒物为后续侵蚀提供了物质基础。本研究 以不同浓度电解质溶液作为降雨形成材料,模拟分 析了降雨过程中团聚体破碎和侵蚀状况。结果表 明,降雨过程中团聚体稳定性及侵蚀的发生受到土 壤电场的强烈影响。随着本体溶液电解质浓度的 降低,土壤表面电位升高,颗粒周围的电场强度急 剧增大,进而使团聚体的破碎程度增大,稳定性降 低,这与 Hu 等<sup>[25]</sup>的研究结果一致。然而徐爽等<sup>[26]</sup>研究 发现,盐溶液具有使水稳性团聚体进一步被分散、 可能抑制团聚体分散的双重性质,这主要是由于盐 离子种类和土壤类型的不同造成的。本研究通过对 电解质溶液浓度的设置来定量调节电场强度,发现 电解质浓度  $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  是影响团聚体破碎的临界 浓度值。目前人们普遍认为,降雨过程中土壤团聚 体破碎主要归因于雨滴打击、矿物不均匀膨胀、消 散作用和理化分散作用<sup>[5]</sup>。但在本研究中对于同一 土壤类型,上述破碎机制在不同溶液条件下均一致, 表明上述机制并不能解释团聚体稳定性随本体溶液 电解质浓度的变化而变化这一结果。另一方面,从 作用力大小的角度来看,雨滴打击力产生的压强最 大不超过  $3 \text{ atm}$ <sup>[27]</sup>,同时团聚体湿润过程中闭蓄空 气外逸产生的压强(消散作用)也不超过  $1 \text{ atm}$ <sup>[28]</sup>, 而土粒周围的强电场作用使土粒间能够产生高达数 百甚至上千大气压的静电排斥力和水合排斥力,该 作用力远大于雨滴打击和消散作用,是导致土壤团 聚体破碎的主要作用力<sup>[25]</sup>。因此,随本体溶液电解 质浓度的降低,宾县黑土和克山黑土的颗粒表面电 场逐渐增强,在相同的雨滴打击力作用下,团聚体稳 定性越低,释放的细小土粒也越多。

团聚体稳定性是影响土壤侵蚀最主要和最直接 的因子<sup>[29]</sup>。随着土壤团聚体破碎并释放出大量细 颗粒开始,一方面,细土粒由于雨水击溅发生跃迁而 形成土壤溅蚀;另一方面,细颗粒物通过堵塞土壤 孔隙减少土壤水分入渗,当地表径流形成后,土壤颗 粒随水迁移而发生侵蚀<sup>[30]</sup>。本研究发现,随着本体 溶液电解质浓度的降低,土壤累积流失量显著增加, 这与 Li 等<sup>[8]</sup>的研究结果一致。这主要是由于随着 本体溶液电解质浓度的降低,宾县黑土和克山黑土 的土粒表面电场将会急剧增强,导致颗粒间产生强 大的静电排斥压使团聚体破碎,最后在径流冲刷作 用下土壤颗粒发生迁移。Yu 等<sup>[31]</sup>研究了土壤有机 质和颗粒相互作用力对土壤团聚体稳定性的耦合效 应,结果表明,去除土壤有机质可降低土壤颗粒间的

范德华力,从而降低土壤团聚体的稳定性。这在 一定程度上解释了克山黑土有机质含量高于宾县黑 土,因此其抗蚀能力也强于宾县黑土这一试验现象。 随着模拟降雨高度的增加,降雨动能将会增大,而降 雨动能是影响土壤侵蚀的又一重要因素。当降雨高 度增加,降雨动能增大,其搬运能力也增强<sup>[32]</sup>。本 研究也发现,随着降雨高度的增加,相同条件下土壤 侵蚀量会增大,团聚体稳定性和累积侵蚀量之间呈现 出较好的线性关系,这与他人研究结果相一致<sup>[33]</sup>。 上述结果意味着在自然条件下,当雨水进入土壤后, 原本相对干燥的土粒本体溶液电解质浓度被迅速稀 释,引发土壤电场急剧增大,导致团聚体发生爆裂并 释放出大量细颗粒,最终在径流冲刷下细土粒随水迁 移而形成侵蚀。可见,土壤静电场作用会对黑土侵蚀 造成重要影响,因此,在后续关于黑土区多营力复合 侵蚀研究中要进一步加强这方面的探讨。

#### 4 结 论

土壤表面电场强烈地影响着两种黑土团聚体稳 定性和土壤侵蚀强度。随着本体溶液电解质浓度的 降低,土壤颗粒表面电位绝对值和电场强度均急剧 增大,导致土壤团聚体稳定性减小,破碎程度增强, 土壤流失量增加。土壤累积流失量和团聚体平均重 量直径二者之间表现出较好的线性相关性。土壤本 体溶液电解质浓度  $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  是影响团聚体稳 定性和土壤侵蚀的临界浓度。当电解质浓度小于  $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,宾县黑土和克山黑土的表面电位绝对值 大于 210 和 209 mV 时,土壤电场强度随浓度的变化 曲线较为接近,对应的土壤团聚体稳定性和累积流 失量也较为接近。这表明降雨侵蚀过程中,土壤表 面电场对黑土团聚体稳定性及土壤侵蚀具有重要影 响,在今后关于黑土区多营力复合侵蚀研究中需进 一步加强这方面的探讨。

#### 参考文献

- [1] 李占斌,朱冰冰,李鹏. 土壤侵蚀与水土保持研究进 展. 土壤学报, 2008, 45(5): 802-809 [Li Z-B, Zhu B-B, Li P. Advancement in study on soil erosion and water conservation. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (5): 802-809]
- [2] 李强,许明祥,齐治军,等. 长期施用化肥对黄土丘 陵区坡地土壤物理性质的影响. 植物营养与肥料学 报, 2011, 17(1): 103-109 [Li Q, Xu M-X, Qi Z-J, et al. Effects of long-term chemical fertilization on soil physical properties of slope lands in the loess hilly re- gion. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17

- (1): 103-109]
- [3] 葛楠楠, 石芸, 杨宪龙, 等. 黄土高原不同土壤质地农田土壤碳、氮、磷及团聚体分布特征. 应用生态学报, 2017, **28**(5): 1626-1632 [Ge N-N, Shi Y, Yang X-L, et al. Distribution of soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and water stable aggregates of cropland with different soil texture on the Loess Plateau, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(5): 1626-1632]
- [4] 李秋嘉, 薛志婧, 周正朝. 宁南山区植被恢复对土壤团聚体养分特征及微生物特性的影响. 应用生态学报, 2019, **30**(1): 137-145 [Li Q-J, Xue Z-J, Zhou Z-C. Effects of vegetation restoration on nutrient and microbial properties of soil aggregate with different particle sizes in the loess hilly regions of Ningxia, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(1): 137-145]
- [5] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility. I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 1996, **47**: 425-437
- [6] 徐爽, 王益权. 湿筛过程中分散液的质量对土壤团聚体稳定性的影响. 植物营养与肥料学报, 2014, **20**(4): 1012-1020 [Xu S, Wang Y-Q. Effects of dispersion quality on soil aggregate stability during wet screening. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, **20**(4): 1012-1020]
- [7] Holthusen D, Reeb D, Horn R. Influence of potassium fertilization, water and salt stress, and their interference on rheological soil parameters in planted containers. *Soil and Tillage Research*, 2012, **125**: 72-79
- [8] Li S, Li H, Xu CY, et al. Particle interaction forces induce soil particle transport during rainfall. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, **77**: 1563-1571
- [9] Hu FN, Liu JF, Xu CY, et al. Soil internal forces initiate aggregate breakdown and splash erosion. *Geoderma*, 2018, **320**: 43-51
- [10] Hu FN, Xu CY, Li H, et al. Particles interaction forces and their effects on soil aggregates breakdown. *Soil and Tillage Research*, 2015, **147**: 1-9
- [11] Gong Y, Tian R, Li H, et al. Coupling effects of surface charges, adsorbed counterions and particle-size distribution on soil water infiltration and transport. *European Journal of Soil Science*, 2018, **69**: 1008-1017
- [12] Quirk JP. Interparticle forces: A basis for the interpretation of soil physical behavior. *Advances in Agronomy*, 1994, **53**: 121-183
- [13] Kim KH, Miller WP. Effect of rainfall electrolyte concentration and slope on infiltration and erosion. *Soil Technology*, 1996, **9**: 173-185
- [14] 王志强, 刘宝元, 王旭艳, 等. 东北黑土区土壤侵蚀对土地生产力影响试验研究. 中国科学: 地球科学, 2009, **39**(10): 1397-1412 [Wang Z-Q, Liu B-Y, Wang X-Y, et al. Erosion effect on the productivity of black soil in Northeast China. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2009, **39**(10): 1397-1412]
- [15] 郑粉莉, 王占礼, 杨勤科. 土壤侵蚀学科发展战略. 水土保持研究, 2004, **11**(4): 1-10 [Zheng F-L, Wang Z-L, Yang Q-K. Development strategy on soil erosion science in China. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, **11**(4): 1-10]
- [16] 温磊磊, 郑粉莉, 杨青森, 等. 雨型对东北黑土区坡耕地土壤侵蚀影响的试验研究. 水利学报, 2012, **43**(9): 1084-1091 [Wen L-L, Zheng F-L, Yang Q-S, et al. Effects of rainfall patterns on hillslope farmland erosion in black soil region of Northeast China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, **43**(9): 1084-1091]
- [17] 宋玥, 张忠学. 不同耕作措施对黑土坡耕地土壤侵蚀的影响. 水土保持研究, 2011, **18**(2): 14-16 [Song Y, Zhang Z-X. The effects of different tillage measures on soil erosion in slope farmland in black soil region. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, **18**(2): 14-16]
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2007 [Bao S-D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2007]
- [19] Li H, Hou J, Liu XM, et al. Combined determination of specific surface area and surface charge properties of charged particles from a single experiment. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, **75**: 2128-2135
- [20] Liu XM, Li H, Du W, et al. Hofmeister effects on cation exchange equilibrium: Quantification of ion exchange selectivity. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2013, **117**: 6245-6251
- [21] Li H, Qing CL, Wei SQ, et al. An approach to the method for determination of surface potential on solid/liquid interface: Theory. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, **275**: 172-176
- [22] Li S, Li H, Hu FN, et al. Effects of strong ionic polarization in the soil electric field on soil particle transport during rainfall. *European Journal of Soil Science*, 2015, **66**: 921-929
- [23] 苗司晗, 刘新敏, 李航, 等. 金属离子界面对粘粒水流迁移强度的影响. 西南大学学报: 自然科学版, 2018, **40**(1): 107-114 [Miao S-H, Liu X-M, Li H, et al. Effects of interfacial reaction of metal ions on flow migration intensity of clay particles. *Journal of Southwest University: Natural Science*, 2018, **40**(1): 107-114]
- [24] 陈佩岩, 马岚, 薛孟君, 等. 华北土石山区不同粒径土壤团聚体特征及其与坡面侵蚀定量关系. 北京林业大学学报, 2018, **40**(8): 64-71 [Chen P-Y, Ma L, Xue M-J, et al. Characteristics of soil aggregates with different particle sizes and their relationship with slope erosion in north China soil-stone mountains. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, **40**(8): 64-71]
- [25] Hu FN, Liu JF, Xu CY, et al. Soil internal forces contribute more than raindrop impact force to rainfall splash erosion. *Geoderma*, 2018, **330**: 91-98
- [26] 徐爽, 王益权. 不同类型土壤团聚体化学稳定性分析. 农业机械学报, 2014, **45**(4): 173-178 [Xu S, Wang Y-Q. Chemical stability of aggregates under different types of soil. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, **45**(4): 173-178]

- [27] Nearing MA, Bradford JM, Holtz RD. Measurement of waterdrop impact pressures on soil surfaces. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, **51**: 1302-1306
- [28] Wuddivira MN, Ekwue EI, Stone RJ. Modelling slaking sensitivity to assess the degradation potential of humid tropic soils under intense rainfall. *Land Degradation and Development*, 2010, **21**: 48-57
- [29] Bryan RB. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology*, 2000, **32**: 385-415
- [30] 史志华, 宋长青. 土壤水蚀过程研究回顾. 水土保持学报, 2016, **30**(5): 1-10 [Shi Z-H, Song C-Q. Research review of soil water erosion process. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, **30**(5): 1-10]
- [31] Yu ZH, Zhang JB, Zhang CZ, et al. The coupling effects of soil organic matter and particle interaction forces on soil aggregate stability. *Soil and Tillage Research*, 2017, **174**: 251-260
- [32] 张光辉. 坡面水蚀过程水动力学研究进展. 水科学进展, 2001, **12**(3): 395-402 [Zhang G-H. Progress in hydrodynamics of slope erosion process. *Advances in Water Science*, 2001, **12**(3): 395-402]
- [33] 闫峰陵, 史志华, 蔡崇法, 等. 红壤表土团聚体稳定性对坡面侵蚀的影响. 土壤学报, 2007, **44**(4): 577-583 [Yan F-L, Shi Z-H, Cai C-F, et al. Effect of topsoil aggregate stability on soil erosion at hillslope on red soils. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, **44**(4): 577-583]

作者简介 郭威震,男,1995年生,硕士研究生。主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: nwafugwz@163.com

责任编辑 张凤丽

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



郭威震, 胡斐南, 谭滔滔, 等. 土壤表面电场对黑土团聚体破碎和侵蚀的影响. 应用生态学报, 2020, **31**(8): 2644-2652

Guo W-Z, Hu F-N, Tan T-T, et al. Effects of soil surface electric field on aggregates breakdown and water erosion in black soil region of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(8): 2644-2652