

# 黑土农田极端侵蚀对土壤质量及作物产量的影响

鄂丽丽<sup>1</sup>, 胡伟<sup>2</sup>, 谷思玉<sup>1</sup>, 陈帅<sup>2</sup>, 翟星雨<sup>1</sup>, 杨润城<sup>1</sup>, 张兴义<sup>2</sup>

(1. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030;

2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土区农业生态院重点实验室, 哈尔滨 150081)

**摘要:**在黑土层厚度为30 cm、过渡层(母质层)厚度为40,70 cm下的坡耕地上,采用人为剥离0,30,70 cm土层以及沉积30,70 cm土层,建立田间模拟试验小区,研究了黑土坡耕地极端侵蚀对土壤理化性质及玉米籽实产量的影响。结果表明:与无侵蚀处理相比,表土剥离30,70 cm、沉积30,70 cm处理均导致耕层(0—20 cm)土壤容重、质量含水量和储水量显著增加,土壤孔隙度、>0.25 mm水稳性团聚体含量、团聚体平均重量直径、几何平均直径、田间持水量、饱和含水量及养分含量均显著降低;表土剥离30,70 cm处理下玉米产量分别减产42.1%和52.6%;沉积30 cm处理下玉米产量与无侵蚀处理间没有显著性差异,而沉积70 cm处理下显著减产12.4%。极端侵蚀无论是表土剥离还是沉积均导致土壤质量的下降,致使全坡面耕层土壤供肥保肥能力降低,最终造成玉米减产。

**关键词:**黑土; 极端侵蚀; 土壤质量; 作物产量

**中图分类号:**S155.2<sup>+</sup>7; S158.3

**文献标识码:**A

**文章编号:**1009-2242(2018)02-0142-08

**DOI:**10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.02.021

## Effects of Extreme Soil Erosion on Soil Quality and Crop Yield in Mollisols Farmland

E Lili<sup>1</sup>, HU Wei<sup>2</sup>, GU Siyu<sup>1</sup>, CHEN Shuai<sup>2</sup>, ZHAI Xingyu<sup>1</sup>, YANG Runcheng<sup>1</sup>, ZHANG Xingyi<sup>2</sup>

(1. School of Resources and Environmental Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin 150030; 2. Key Laboratory of Mollisols Agroecology, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081)

**Abstract:** To investigate the effects of extreme soil erosion on physical and chemical properties of soil and crop yield, simulated experiments were conducted in topsoil (30 cm), transition layer (40 cm) and parent material layer (>70 cm) of Mollisols farmlands. Treatments including 70 cm topsoil removal, 30 cm topsoil removal, no eroded soil, 30 cm sediment deposition and 70 cm sediment deposition were set respectively. The results showed that compared with no eroded soil, soil bulk densities, soil mass water contents, soil water storages of the other four treatments were all significantly increased in tillage layer (0—20 cm), while soil porosities, contents of soil water stable aggregates were greater than 0.25 mm, mean weight diameters, geometric mean diameters, field capacities, saturated moistures and soil nutrient contents of the four treatments were all significantly decreased. Furthermore, compared with no eroded soil, corn yields of the treatments of 30 cm and 70 cm soil removal reduced by 42.1% and 52.6%, respectively. There was no significant difference in corn yield between no eroded soil and 30 cm sediment deposition. Corn yield of the treatment of 70 sediment deposition significantly decreased by 12.4%. Thus, extreme soil erosion, no matter topsoil removal or sediment deposition, will lead to the decline of soil quality, reduce soil fertilizer supply and conservation ability, then reduce corn yield.

**Keywords:** mollisols; extreme soil erosion; soil quality; crop yield

东北黑土区是我国重要的粮食产区和商品粮基地,水土流失已成为当前威胁黑土区粮食生产和生态

安全的最大问题。黑土有别于我国其他土壤的一个典型特征是分层明显,其剖面由上至下分别为黑土层

(A 层)、过渡层(AB 层和 BC 层)和母质层(C 层),已有研究表明肥沃的黑土层对维持作物高生产力起着至关重要作用<sup>[1-3]</sup>。而我国黑土层每年平均剥蚀 0.5~1 cm,黑土层厚度已经由开垦初期的 60~70 cm 下降到 20~30 cm<sup>[4]</sup>。东北黑土区的典型地貌是漫川漫岗为主,坡缓且长;受这种地形影响,土壤侵蚀强度沿坡面差异明显,发生在坡耕地中上部的侵蚀主要以剥离为主,致使黑土层变薄,极端情况下会导致黑土层消失甚至使母质层裸露呈现“破皮黄”现象<sup>[5-6]</sup>;坡上和坡中侵蚀剥离的表土绝大部分在坡下部沉积<sup>[7-8]</sup>。黑土坡面中上部富含养分的表土被剥离,在坡脚沉积使表层土壤重新分配,这势必改变耕层土壤养分和有机质含量,降低农田生产力,严重阻碍农业的可持续发展<sup>[5,9-10]</sup>。随着侵蚀的日益加剧,土壤的结构和功能也随之发生改变,使土壤的团粒结构遭受破坏,容重增加,孔隙度减小,继而使通气透水性变差,持水保水能力减弱等。现有研究多采用表土剥离的方式研究土壤侵蚀对土壤质量与作物产量的影响<sup>[4,6-12]</sup>,或在流域尺度下定量研究不同侵蚀程度土壤质量与作物产量的空间分布<sup>[5,13-17]</sup>,而关于严重侵蚀导致的黑土层消失和母质裸露的极端后果,即极端侵蚀引起的土壤在坡面的重新分布对土壤质量及生产力的影响研究鲜见报道。因此,本研究通过剥离和沉积田间模拟试验,定量研究黑土坡耕地极端侵蚀对土壤质量和生产力的影响,以期对侵蚀黑土危害评估及黑土资源保护提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区设在中国科学院海伦水土保持监测研究站,地理位置为 47°21′16.95″N,126°49′56.43″E,海拔 226 m。冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,雨热同季,属温带大陆性季风气候区,年均气温 1.5℃,年均降水量 530 mm,70%的降雨集中在 7—9 月份,年均有效积温 2 450℃,年均日照时间 2 600~2 800 h,无霜期 125 d,地下水水位埋深 20~40 m。试验地为东西向典型坡耕地,坡度为 6.2°。土壤为典型黑土,分层明显,黑土层(A)厚度 30 cm(剖面 0—30 cm)、过渡层(AB 和 BC)厚度 40 cm(剖面 30—70 cm)和母质层深度>2 m(剖面>70 cm)。

### 1.2 试验设计与处理

本试验始于 2015 年,试验共设 5 个侵蚀处理:(1)表土剥离 70 cm(E<sub>-70</sub>),即将 A、AB、BC 层全部剥离,处理后的土壤剖面由母质层 C 层组成;(2)表土剥离 30 cm(E<sub>-30</sub>),即将 A 层全部剥离,处理后的土

壤剖面由 AB、BC、C 层组成;(3)无侵蚀(E<sub>0</sub>),土壤剖面由 A、BC 和 C 层组成;(4)表土沉积 30 cm(E<sub>+30</sub>),即将 E<sub>-30</sub>处理原 A 层全部堆积在原黑土层上,处理后的土壤剖面由双 A 层和 AB、BC、C 层组成;(5)表土沉积 70 cm(E<sub>+70</sub>),即将 E<sub>-70</sub>处理原 A、AB、BC 全部反转堆积在原黑土层上,处理后的土壤剖面由 BC、AB、双 A 层和 AB、BC、C 层组成。每个处理设 3 次重复,小区长 2.2 m,宽 3 m,玉米—大豆轮作。小区间用宽 14 cm、高 40 cm(地下 20 cm,地上 20 cm)的水泥墙隔离,处理后小区水平,以剔除水分影响。2015 年 5 月末人工翻表土 20 cm 后,南北向起垄,其中垄宽 70 cm,垄高 20 cm。各处理表层 0—20 cm 土壤初始有机质含量分别为 14.9,26.6,35.6,36.3,18.2 g/kg。田间观测时间为 2016 年 6—9 月,观测期种植作物为玉米,品种为龙玉 10。每个试验小区种植 4 垄玉米,种植密度为 6 万株/hm<sup>2</sup>,株距 22 cm。5 月初人工点播,播种时施入纯氮肥 N 69 kg/hm<sup>2</sup>、纯磷肥 P 69 kg/hm<sup>2</sup>、纯钾肥 K 15 kg/hm<sup>2</sup>;6 月末,即玉米拔节期追施纯氮肥 N 69 kg/hm<sup>2</sup>。

### 1.3 测定项目与方法

土壤容重采用环刀法<sup>[18]</sup>测定。环刀高 5 cm,体积为 100 cm<sup>3</sup>,于 2016 年 6—9 月(即玉米生育期的苗期、拔节期、抽雄期和成熟期)测定垄台 0—10 cm 和 10—20 cm 的土壤容重。

土壤总孔隙度和通气孔隙度通过公式(1)和公式(2)计算得出<sup>[18]</sup>:

$$f = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}\right) \times 100\% \quad (1)$$

$$f_a = f - w_i \times \rho_b \quad (2)$$

式中: $\rho_b$  为土壤容重(g/cm<sup>3</sup>); $\rho_s$  为土壤比重(取值 2.65 g/cm<sup>3</sup>); $w_i$  为土壤质量含水量(%); $f$  和  $f_a$  分别为土壤总孔隙度(%) 和土壤通气孔隙度(%)。

土壤含水量:土壤质量含水量、饱和含水量、田间持水量均采用环刀浸泡法测定<sup>[18]</sup>。于 2016 年 6—9 月测定垄台 0—10 cm 和 10—20 cm 的土壤含水量。

土壤储水量:依据各土层土壤含水量和容重计算,公式为<sup>[19]</sup>:

$$W_i = w_i \rho_{bi} h_i \quad (3)$$

式中: $w_i$  为土壤质量含水量(%); $\rho_{bi}$  为每层干容重(g/cm<sup>3</sup>); $h_i$  为分层厚度,为 10 cm。

土壤水稳性团聚体:采用真空慢速浸提法测定 2016 年 6—9 月 0—10 cm 和 10—20 cm 的土壤水稳性团聚体<sup>[20]</sup>。于 2016 年 6—9 月(即玉米生育期的苗期、拔节期、抽雄期和成熟期)采集垄台 0—10 cm 和 10—20 cm

的土壤样品,风干后,利用测定的各粒级水稳性团聚体数据,计算 $>0.25$  mm 水稳性团聚体含量、平均重量直径和几何平均直径,公式为<sup>[20]</sup>:

$>0.25$  mm 土壤水稳性团聚体含量:

$$WR_{0.25} = \frac{M_{r>0.25}}{M_T} \quad (4)$$

式中: $M_{r>0.25}$  为粒径 $>0.25$  mm 的团聚体重量(g); $M_T$  为团聚体总重量(g)。

平均重量直径:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n W_i X_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (5)$$

式中: $X_i$  为筛分出来的任一粒径范围团聚体的平均直径(mm); $W_i$  为任一粒径范围团聚体的总量占土壤样品干重的分数。几何平均直径:

$$GMD = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n W_i \lg X_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (6)$$

式中: $W_i$  为平均直径为 $X_i$  的团聚体重量(g); $\sum_{i=1}^n W_i$  为土壤样品的总重(g)。

土壤养分:耕层土壤主要功能是协调水、肥、气和热,使其能够满足作物生长发育的需要,而耕地表层是耕地生产力的核心<sup>[21-22]</sup>。由于抽雄期是影响产量的敏感时期,因此本研究在玉米抽雄期采集 0—10 cm 和 10—20 cm 土样,风干、磨细后过 1 mm 和 0.25 mm 筛备用。采用 Vario EL I11 (Elementar, 德国) 元素分析仪测定土壤全氮和有机碳(因黑土坡耕地不含碳酸盐,土壤总碳即为有机碳),再通过公式换算出有机质<sup>[20,23]</sup>;采用连续流动分析仪(San ++, SKALAR, 荷兰)测定土壤全磷;采用碱解扩散法测定土壤碱解氮;采用 $\text{NaHCO}_3$  浸提法测定土壤有效磷;采用 $\text{NH}_4\text{OAc}$  浸提法测定土壤速效钾<sup>[24]</sup>。

作物生物量:采集玉米的地上部分和地下部分,地上部分包括秸秆、穗轴、苞叶、叶和玉米籽粒,地下部分为 0—30 cm 土层玉米根系。测定 2016 年 6—9 月即玉米生育期的苗期、拔节期、抽雄期和成熟期)的作物生物量。

籽实产量:于 2016 年 10 月玉米成熟后测定籽粒质量,计算出各侵蚀处理下玉米籽实产量。

#### 1.4 数据分析与处理

使用 SPSS 21.0 软件对试验数据进行统计分析,方差分析检验处理间的效应,用 LSD 法检验平均数之间的差异性。利用 Microsoft Excel 2010 软件完成绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 黑土极端侵蚀对土壤结构的影响

#### 2.1.1 黑土极端侵蚀对土壤容重和孔隙度的影响 黑

土极端侵蚀对土壤容重和孔隙度及其季节变化具有显著影响(图 1)。与无侵蚀( $E_0$ )相比,表土剥离 70 cm ( $E_{-70}$ )和 30 cm ( $E_{-30}$ )、沉积 30 cm ( $E_{+30}$ )和 70 cm ( $E_{+70}$ )处理下 0—20 cm 表土层的土壤容重显著增加( $p < 0.05$ ),其中  $E_{-70}$  处理土壤容重增加幅度显著高于其他处理,且 0—10 cm 表层的变化大于 10—20 cm 土层(图 1a)。在 0—20 cm 表土层,除  $E_0$  处理外,其他处理土壤容重季节间存在显著差异,且在 8 月份达到最大值;以  $E_{-30}$  处理土壤容重变幅最大,6—8 月份增加幅度为  $0.13 \text{ g/cm}^3$ ,达到显著水平。

与  $E_0$  处理相比, $E_{-70}$ 、 $E_{-30}$ 、 $E_{+30}$ 、 $E_{+70}$  处理土壤总孔隙度降低(图 1b)。在 0—20 cm 表土层,以  $E_{-70}$  处理土壤总孔隙度降幅最大,显著降低 2.1%~10.0%,且 0—10 cm 表层的土壤总孔隙度变化明显大于 10—20 cm 土层。除  $E_0$  处理无显著季节变化外,其他各处理土壤总孔隙度季节间存在显著差异,且在 8 月份达到最小值。在 0—20 cm 表土层,以  $E_{-70}$  处理土壤总孔隙度变幅最大,6—8 月份显著降低了 7.9%。

与  $E_0$  处理相比, $E_{-70}$ 、 $E_{-30}$ 、 $E_{+30}$ 、 $E_{+70}$  处理均显著降低土壤通气孔隙度(图 1c)。在 0—20 cm 表土层,以  $E_{-70}$  处理土壤通气孔隙度变化最大,达到显著差异,且 0—10 cm 表层的变化明显大于 10—20 cm 土层。在 0—20 cm 表土层,各处理土壤通气孔隙度季节间的改变在 8 月份达到最大值,以  $E_{+70}$  处理土壤通气孔隙度变幅最大,8 月土壤通气孔隙度分别是 6,7,9 月的 1.3,1.4,1.2 倍,达到显著水平。

综上所述,无论是表土剥离还是沉积,均致使土壤容重增加,土壤总孔隙度和通气孔隙度降低。

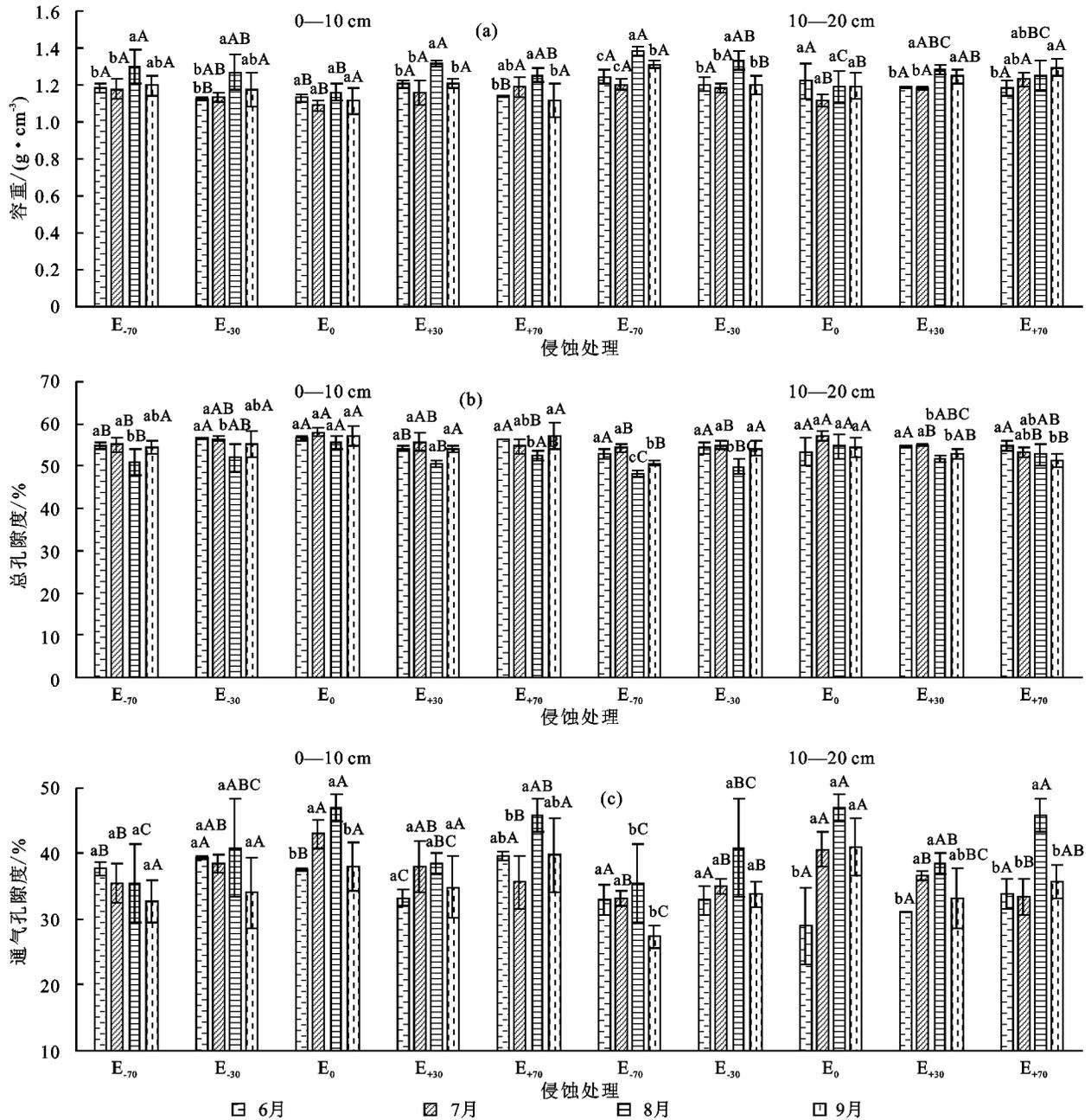
#### 2.1.2 黑土极端侵蚀对土壤水稳性团聚体的影响

黑土极端侵蚀对 $>0.25$  mm 土壤水稳性团聚体含量( $WR_{0.25}$ )及其季节变化具有显著影响(表 1)。在 0—20 cm 土层,与  $E_0$  处理相比, $E_{-70}$ 、 $E_{-30}$ 、 $E_{+30}$ 、 $E_{+70}$  处理下土壤  $WR_{0.25}$  减少,且剥离处理小于相应的沉积处理。其中以  $E_{-70}$  处理土壤  $WR_{0.25}$  变幅最大,由 78.5%降低到 72.7%,达到显著差异,且 0—10 cm 表层的土壤  $WR_{0.25}$  变化明显大于 10—20 cm 土层。在 0—20 cm 表土层,各处理土壤  $WR_{0.25}$  随季节的推移而减少,其中以  $E_{+30}$  处理  $WR_{0.25}$  变幅最大,9 月  $WR_{0.25}$  分别是 7,8 月的 1.04,1.21 倍,达到显著水平。

在 0—20 cm 表土层,与  $E_0$  处理相比, $E_{-70}$ 、 $E_{-30}$ 、 $E_{+30}$ 、 $E_{+70}$  处理均显著降低土壤团聚体的 MWD 和 GMD。其中以  $E_{-70}$  处理土壤团聚体 MWD 和 GMD 变幅最大,分别显著降低了 21.5%~47.5% 和 4.7%~21.2%,且 0—10 cm 表层的 MWD 和

GMD 变化明显大于 10—20 cm 土层(表 1)。土壤团聚体 MWD 和 GMD 季节变化无明显规律。

综上所述,无论是表土剥离还是沉积,均致使土壤 WR<sub>0.25</sub>、MWD 和 GMD 降低。



注:图中小写字母表示相同处理不同季节差异显著( $p < 0.05$ );大写字母表示同一季节不同处理差异显著( $p < 0.05$ )。

图 1 不同侵蚀处理下土壤容重和孔隙度的季节变化

表 1 不同侵蚀处理下各土层水稳性团聚体季节变化

土层 深度/cm	侵蚀 处理	>0.25 mm 水稳性团聚体含量/%				平均重量直径/mm				几何平均直径/mm			
		6月	7月	8月	9月	6月	7月	8月	9月	6月	7月	8月	9月
0—10	E <sub>-70</sub>	75.03aD	74.17aB	72.36aBC	68.91bD	0.83aD	0.83aD	0.81aD	0.81aE	0.71aD	0.71aD	0.70abD	0.67bD
	E <sub>-30</sub>	76.96aCD	77.90aA	75.05aB	74.97aC	0.93cCD	0.87cD	1.12bB	1.65aB	0.74bCD	0.73bD	0.75bBC	0.83aB
	E <sub>0</sub>	85.06aA	79.50bA	74.60cB	78.36bB	1.67aA	1.56bA	1.38cA	1.53bC	0.91aA	0.85bA	0.79dA	0.82cB
	E <sub>+30</sub>	81.34abAB	78.60bcA	78.02cA	82.66aA	1.19bB	1.29bB	1.02cC	2.07aA	0.81bB	0.81bB	0.76cB	0.96aA
	E <sub>+70</sub>	79.46aBC	78.91aA	68.39abD	76.04bC	0.97cC	1.02bcC	1.36aA	1.05bD	0.76abC	0.77aC	0.74bC	0.76abC
10—20	E <sub>-70</sub>	70.44cD	79.12aB	74.91bA	70.52cE	0.79cE	1.14aB	1.06bD	0.75cD	0.68cE	0.79aB	0.74bC	0.67cD
	E <sub>-30</sub>	76.85bB	75.79bC	70.27cB	80.51aC	1.01cD	1.07bB	0.96cE	1.22aC	0.75bC	0.75bB	0.70cD	0.82aB
	E <sub>0</sub>	84.49aA	84.17aA	73.99bA	83.94bB	1.61bB	1.70aA	1.30cB	1.60bB	0.89aB	0.90aA	0.78cB	0.81bB
	E <sub>+30</sub>	84.99aA	85.27aA	76.18bA	87.60aA	1.73bcA	1.77bA	1.63cA	2.31aA	0.93bA	0.93bA	0.83cA	1.06aA
	E <sub>+70</sub>	73.47bC	77.95aBC	74.95bA	78.24aD	1.07cC	1.06cB	1.25aC	1.19bC	0.73cD	0.77cB	0.77aB	0.79bC

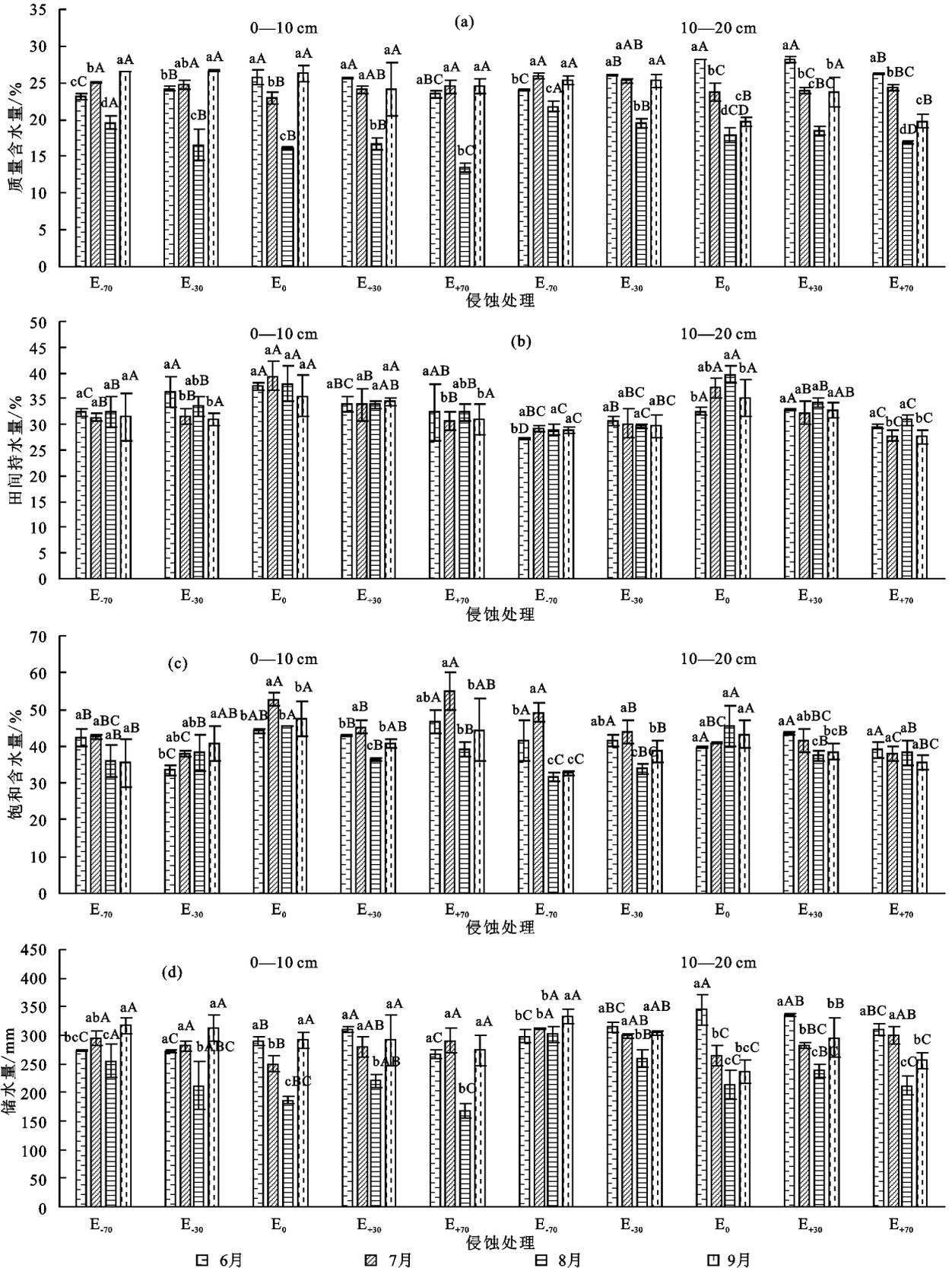
注:表中同一行同一处理,用不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ );表中同一列同一深度,用不同大写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

2.2 黑土极端侵蚀对土壤功能的影响

可以看出,黑土极端侵蚀对土壤水分及其季节变化具有

2.2.1 黑土极端侵蚀对土壤水分的影响 从图 2 可

显著影响。



注:图中小写字母表示相同处理不同季节差异显著( $p < 0.05$ );大写字母表示同一季节不同处理的差异( $p < 0.05$ )。

图 2 不同侵蚀处理下土壤水分季节变化

在 0—20 cm 表土层,与 E<sub>0</sub> 处理相比,E<sub>-70</sub>、E<sub>-30</sub>、E<sub>+30</sub>、E<sub>+70</sub> 处理下土壤质量含水量显著增加,其

中 E<sub>-70</sub> 处理下变化幅度最大,达到显著差异,且 0—10 cm 表层的土壤质量含水量变化明显大于 10—20

cm 土层(图 2a)。各处理土壤质量含水量季节间存在显著差异,在 8 月份达到最小值。在 0—20 cm 土层,以  $E_{+70}$  处理土壤质量含水量变幅最大,由 6 月份 24.8% 减少到 8 月份的 15.2% 再增加至 9 月份的 22.1%,达到显著差异。与  $E_0$  处理相比, $E_{-70}$ 、 $E_{-30}$ 、 $E_{+30}$ 、 $E_{+70}$  处理下土壤田间持水量显著降低。在 0—20 cm 表土层,以  $E_{-70}$  处理下土壤田间持水量最低,其显著降低了 14.9%~20.8%,且 0—10 cm 表层变化明显大于 10—20 cm 土层(图 2b)。各处理土壤田间持水量季节间存在显著差异,随生育期的推移而降低。在 0—20 cm 表土层,以  $E_{-30}$  处理土壤田间持水量变幅最大,6 月的土壤田间持水量分别是 7、9 月的 1.11,1.12 倍,达到显著水平。土壤侵蚀对饱和含水量的影响与田间持水量相似。在 0—20 cm 表土层,与  $E_0$  处理相比, $E_{-70}$ 、 $E_{-30}$ 、 $E_{+30}$ 、 $E_{+70}$  处理下土壤饱和持水量显著降低,其中以  $E_{-70}$  处理下土壤饱和含水量降幅最大,显著降低了 2.0%~25.6%,且 0—10 cm 表层的变化明显大于 10—20 cm 土层(图 2c)。各处理土壤饱和含水量季节间存在显著差异,均在 7 月份最大。在 0—20 cm 表土层,以  $E_{-70}$  处理土壤饱和含水量变幅最大,由 6 月的 42.0% 降低到 9 月的 34.1%,达到显著差异。

表 2 不同侵蚀处理的土壤养分含量

土层深度/cm	侵蚀处理	有机质/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g · kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	有效磷/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg · kg <sup>-1</sup> )
0—10	$E_{-70}$	15.60e	0.53d	0.66c	172.48d	22.38a	224.27ab
	$E_{-30}$	23.58c	0.71c	0.73bc	237.16c	26.59a	204.43c
	$E_0$	39.74a	1.49a	1.03a	517.44a	29.27a	228.10a
	$E_{+30}$	31.45b	1.07b	0.82b	172.48d	35.27a	231.20a
	$E_{+70}$	17.68d	0.56d	0.72d	301.84b	31.38a	212.97bc
	$E_{-70}$	15.09d	0.50d	0.58b	129.36d	22.06a	202.73a
10—20	$E_{-30}$	19.51c	0.60c	0.66b	280.28c	36.55a	201.53a
	$E_0$	38.18a	1.35a	0.97a	495.88a	41.78a	196.97ab
	$E_{+30}$	32.34b	1.05b	0.95a	409.64b	39.10a	190.07ab
	$E_{+70}$	15.91d	0.52d	0.68a	129.36d	35.98a	183.37b

注:表中小写字母表示同一土层深度不同侵蚀处理差异显著( $p < 0.05$ )。

### 2.3 黑土极端侵蚀对作物生物量和产量的影响

黑土极端侵蚀对作物生物量及其季节变化和产量具有显著影响(图 3)。与  $E_0$  处理相比, $E_{-70}$ 、 $E_{-30}$ 、 $E_{+30}$ 、 $E_{+70}$  处理下作物生物量降低,其中以  $E_{-70}$  处理降幅最大,显著降低 32.4%~73.3%;地上生物量、地下生物量变化规律与作物生物量变化规律一致。各处理作物生物量表现为随季节的推移显著增加。以  $E_{+70}$  处理作物生物量变幅最大,由 6 月份的 16.6 kg/hm<sup>2</sup> 增加到 9 月份的 16 550.4 kg/hm<sup>2</sup>,达到显著差异。

与  $E_0$  处理相比, $E_{-70}$ 、 $E_{-30}$  和  $E_{+70}$  处理均会导致玉米籽实产量降低,玉米减产率分别达 52.6%,42.1%,

在 0—20 cm 表土层,与  $E_0$  处理相比, $E_{-70}$ 、 $E_{-30}$ 、 $E_{+30}$ 、 $E_{+70}$  处理下土壤储水量显著增加(图 2d),其中以  $E_{-70}$  土壤储水量增幅最大,显著增加 17.8%~39.4%,且 0—10 cm 表层的变化明显大于 10—20 cm 土层。各处理土壤储水量季节间具有显著差异,在 8 月达到最小值。在 0—20 cm 表土层,以  $E_{+70}$  处理土壤储水量季节变幅最大,6—8 月显著降低 98.8 mm,8—9 月显著增加 74.8 mm。

综上所述,无论是表土剥离还是沉积,均致使土壤质量含水量和土壤储水量增加,土壤田间持水量和土壤饱和含水量降低。

2.2.2 黑土极端侵蚀对土壤养分的影响 黑土极端侵蚀对土壤养分具有显著影响(表 2)。在 0—20 cm 表土层,无论是表土剥离还是沉积处理,均致使土壤养分含量显著降低,且随侵蚀和沉积强度的增强降幅更明显。与  $E_0$  处理相比, $E_{-70}$ 、 $E_{-30}$ 、 $E_{+30}$ 、 $E_{+70}$  处理土壤有机质含量分别显著下降 60.6%,44.7%,18.1%,56.9%,全氮含量分别显著下降 63.4%,53.5%,25.4%,62.0%,全磷含量分别显著下降 38.0%,31.0%,12.0%,30.0%,碱解氮含量分别显著下降 70.2%,48.9%,42.6%,57.4%。各处理对土壤养分的影响表现为  $E_{-70} > E_{+70} > E_{-30} > E_{+30}$ ,且 0—10 cm 表层的土壤养分含量高于 10—20 cm 土层。

12.4%(图 4)。 $E_{+30}$  处理与  $E_0$  处理玉米产量无显著性差异。

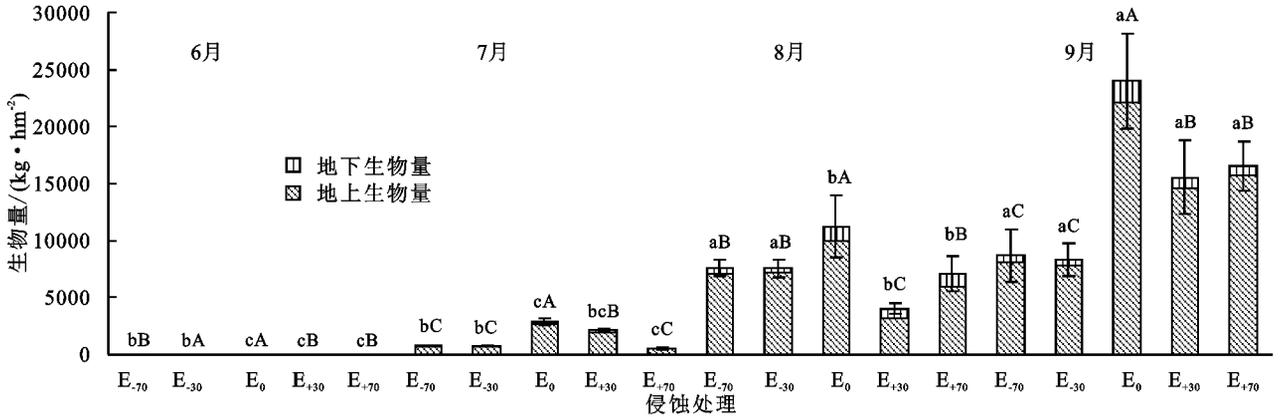
综上所述,无论是表土剥离还是沉积,均在一定程度上导致作物生物量和产量降低。

## 3 讨论

土壤侵蚀导致黑土层变薄的同时,使土壤结构发生恶化<sup>[25-27]</sup>。土壤容重是表示土壤紧实程度的重要指标,直接影响土壤的结构性状<sup>[18]</sup>。本研究中,表土剥离和沉积均增大了表土容重,这与韩晓增等<sup>[28]</sup>的研究结论相似。土壤容重增大,致使土粒间距减小,土壤发生板结,土壤孔隙度减小,孔隙分布发生恶化<sup>[9,29]</sup>。因此,极端侵

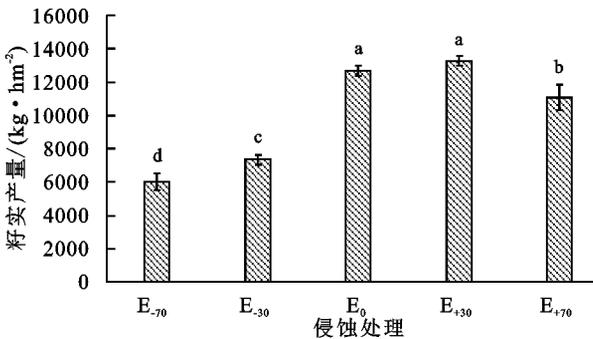
蚀条件下土壤总孔隙度和土壤通气孔隙度均呈现降低趋势。作为衡量土壤结构是否稳定的重要指标,稳定的土壤团聚体可以减少土壤黏结或结壳现象的产生<sup>[30]</sup>。土壤团聚体的 MWD 和 GMD 常被用来评价土壤团聚体的大小分布,其值越大表示团聚体的团聚度越高,稳定性越强<sup>[31-32]</sup>。本研究中,表土剥离和沉积均导致土壤团聚体稳定性显著降低,MWD 和 GMD 值减少,这主要是因为土壤侵蚀易造成  $>0.25$  mm 水稳性团粒含量减少,

使土壤的松散性减弱,抗蚀性降低<sup>[33]</sup>。此外,极端侵蚀显著影响土壤结构的季节变化,各处理土壤容重均在 8 月份达到最大值。这主要是由于前茬作物收获后旋松土壤,经冻融交替和播种处理,致使 6 月份土壤容重较低,孔隙度较大,大团聚体较多,土壤稳定性较高;而在 8 月份,经作物生长和降雨回实<sup>[30]</sup>,土壤容重逐渐增大,孔隙度减小,紧实度增加,WR<sub>0.25</sub> 含量减小,稳定性降低。



注:图中小写字母表示相同处理不同季节差异显著( $p < 0.05$ );大写字母表示同一季节不同处理的差异( $p < 0.05$ )。

图 3 不同侵蚀处理下作物生物量季节变化



注:图中小写字母表示不同侵蚀处理之间作物籽实产量差异( $p < 0.05$ )。

图 4 不同侵蚀处理下籽实产量变化

土壤含水量在一定程度上反映土壤蓄水保水能力。本研究中,表土剥离和沉积均导致土壤质量含水量和土壤储水量增加,这主要跟降雨、土壤持水保水能力以及作物耗水能力有关。土壤水分主要通过降雨或地下水进行补充。土壤水通过入渗补充地下水,或经过土面蒸发和植物蒸腾向上移动,水分在土壤中的输入和输出决定了土壤的蓄水和保水量<sup>[18]</sup>。土壤田间持水量、饱和含水量反映土壤有效水的上限和土壤的最大蓄水持水能力。本研究中,无论是表土剥离还是沉积处理均导致土壤田间持水量和土壤饱和含水量降低。这与成婧等<sup>[9]</sup>的研究结果相似,土壤蓄水能力、土壤饱和含水量及田间持水量均随土壤容重的增大而减小。这主要是因为土壤质地直接影响着土壤蓄水保水能力,土壤孔隙和土壤容重是土壤质地的重要指示因子,两者对土壤蓄水保水至关重要<sup>[18]</sup>。此外,稳定的土壤团聚体会形成可贮藏水分的空隙。农

田极端侵蚀致使土壤质地粗化,土壤水稳性团聚体含量降低,毛管含水量降低,储水空间减少,减弱了土壤的蓄水持水能力<sup>[28]</sup>。本研究中,各处理的土壤质量含水量和土壤储水量均在 8 月份达到最小值,主要是由于 8 月份为玉米的抽雄期,也是玉米生长发育最旺盛时期,耗水量大,土壤质量含水量和土壤水分储量下降明显<sup>[34]</sup>。此外,各侵蚀处理下土壤全量养分和速效养分均显著降低,这与王志强等<sup>[3]</sup>和张孝存等<sup>[8]</sup>在东北黑土区的研究结果一致,其最根本原因是侵蚀和沉积致使富含养分的表土层消失。以往的研究指出土壤侵蚀在一定程度上引起耕层土壤微生物数量、群落发生改变、酶活性降低,继而导致土壤养分转化能力变低、速效养分含量难以恢复<sup>[35-36]</sup>,土壤有机质含量、土壤氮、磷储量的减少<sup>[27,33,37]</sup>。

土壤侵蚀对作物的生物量和产量产生一定的影响。本研究中,表土剥离和沉积导致作物生物量和产量降低,且随侵蚀程度的增大,对作物生物量和产量的影响增大,这与张兴义等<sup>[1-2]</sup>的研究结果相似。坡耕地原位观测试验表明侵蚀部位作物产量显著低于坡脚<sup>[3-9]</sup>。模拟不同侵蚀程度试验也证实作物产量与表土层厚度呈显著相关<sup>[26-27]</sup>。因此,表土侵蚀和沉积是导致作物减产的最直接原因。本研究中,极端侵蚀对作物产量的影响主要表现为土壤结构和功能的恶化。极端侵蚀导致了土壤容重增大,孔隙度降低,土壤水稳性团聚体含量降低,对作物产生胁迫作用,限制其根系的生长发育;加之通气条件恶化,不利于根

系的生理活动。此外,随着表土被剥离或沉积,土壤表层有机质含量发生改变,土壤养分含量降低,导致土壤供肥能力减弱。由此可见,侵蚀和沉积影响作物产量的实质是土壤物理化学生物性状的改变,抑制了作物的生长发育,养分的有效利用率降低,最终造成作物减产。作物生物量表现为随季节的推移而增长,这主要是受作物生长发育的影响,随着季节变化,玉米的生长发育加快,干物质积累增加,从而致使作物生物量逐渐增加。

## 4 结论

(1)在0—20 cm 土层,表土剥离与沉积均导致土壤容重增大,总孔隙度和通气孔隙度降低,土壤  $WR_{0.25}$  含量、土壤团聚体的 MWD 和 GMD 显著减小。随着季节的推移,各处理的土壤容重和通气孔隙度在8月份达到最大值,总孔隙度达到最小值。土壤  $WR_{0.25}$  含量随季节推移而减少。土壤团聚体 MWD 和 GMD 季节间无明显变化规律。

(2)在0—20 cm 土层,表土剥离与沉积均会降低土壤田间持水量和饱和含水量,减少土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷和速效钾含量。随着季节的推移,各处理的土壤质量含水量和土壤储水量均在8月份达到最小值,土壤饱和含水量均在7月份达到最大值,土壤田间持水量随季节变化而降低。

(3)表土剥离与沉积均会降低作物生物量。与无侵蚀处理相比,表土剥离处理和沉积70 cm 处理造成作物减产,沉积30 cm 处理的产量无显著性差异。黑土层的减少对作物减产影响显著。因此,在我国黑土区应该采取切实可行的措施防治水土流失,改善作物的生产条件,保证国家粮食安全。

致谢:感谢国家科技基础条件平台、国家地球系统科学数据共享服务平台、东北黑土科学数据中心 (<http://northeast.geodata.cn>) 提供数据支撑。

### 参考文献:

[1] 张兴义,刘晓冰,隋跃宇,等.人为剥离黑土层对大豆干物质积累及产量的影响[J].大豆科学,2006,25(2):123-126.

[2] 张兴义,孟令钦,刘晓冰,等.黑土区水土流失对玉米干物质积累及产量的影响[J].中国水利,2007(22):47-49.

[3] 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[J].中国科学(D辑:地球科学),2009,39(10):1397-1412.

[4] 刘宝元,阎百兴,沈波,等.东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J].中国水土保持科学,2008,6(1):1-8.

[5] Fang H J, Yang X M, Zhang X P, et al. Using  $^{137}\text{Cs}$  tracer technique to evaluate erosion and deposition of black soil in Northeast China[J]. Pedosphere, 2006, 16(2):201-209.

[6] 方华军,杨学明,张晓平,等.利用 $^{137}\text{Cs}$ 技术研究黑土坡

耕地土壤再分布特征[J].应用生态学报,2005,16(3):464-468.

[7] 阎百兴,汤洁.黑土侵蚀速率及其对土壤质量的影响[J].地理研究,2005,24(4):499-506.

[8] 张孝存,郑粉莉,安娟,等.典型黑土区坡耕地土壤侵蚀对土壤有机质和氮的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(4):182-186.

[9] 成婧,吴发启,王健,等.渭北旱塬不同程度土壤侵蚀及生产力恢复试验[J].中国水土保持科学,2013,11(2):19-24.

[10] 何万云,张之一,林伯群.黑龙江土壤[M].北京:农业出版社,1992.

[11] 张明礼,杨浩,邹军,等.北方土石山区土壤侵蚀对土壤质量的影响[J].水土保持学报,2011,25(2):218-221.

[12] 沈奕彤,郭成久,金珊,等.土壤容重对黑土坡面养分流失的影响[J].水土保持学报,2016,30(1):26-30.

[13] 陈欣,郭新波.采用 AGNPS 模型预测小流域磷素流失的分析[J].农业工程学报,2000,16(5):44-47.

[14] 徐国策,李占斌,李鹏,等.丹江鸚鵡沟小流域土壤侵蚀和养分损失定量分析[J].农业工程学报,2013,29(10):160-167.

[15] 杨维鸽,郑粉莉,王占礼,等.地形对黑土区典型坡面侵蚀—沉积空间分布特征的影响[J].土壤学报,2016,53(3):572-581.

[16] 胡婵娟,刘国华,郭雷,等.土壤侵蚀对土壤理化性质及土壤微生物的影响[J].干旱区研究,2014,31(4):702-708.

[17] 王小刚,董红燕,韩光中.紫色土基本理化性质与土壤侵蚀特征研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2016,37(4):66-72.

[18] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006:37-55,196.

[19] 李华,吴发启,张青峰,等.黄土高原丘陵沟壑区土壤储水量年变异特征[J].安徽农业科学,2007,35(13):3919-3920,4008.

[20] Sun T, Chen Q, Chen Y, et al. A novel soil wetting technique for measuring wet stable aggregates[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 141:19-24.

[21] 韩晓增,邹文秀,陆欣春,等.旱作土壤耕层及其肥力培育途径[J].土壤与作物,2015(4):145-150.

[22] 梁秀雪.关于土壤耕层现存的问题及恢复肥力的思考[J].吉林农业,2011(1):48.

[23] 苑亚茹,李禄军,李娜,等.长期施肥对东北黑土不同活性有机碳库的影响[J].生态学杂志,2016,35(6):1435-1439.

[24] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,1999:56-106.

[25] Zheng F L, He X B, Gao X T, et al. Effects of erosion patterns on nutrient loss following deforestation on the Loess Plateau of China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2005, 108(1):85-97.