

# 黑土区坡耕地侵蚀沟演变对土壤粒径分布及蓄水性的影响

张瑞豪<sup>1</sup>, 肖洋<sup>1</sup>, 邵社刚<sup>2</sup>, 徐金忠<sup>3</sup>, 倪栋<sup>2</sup>, 乔雨彤<sup>1</sup>, 周琪睿<sup>1</sup>, 付兴悦<sup>1</sup>

(1.黑龙江大学 现代农业与生态环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2.交通运输部公路科学研究所, 北京 100088; 3.黑龙江省水利科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** [目的] 研究侵蚀作用对黑土区坡耕地侵蚀沟表层土壤的影响, 为该区土壤资源合理运用和区域水土流失治理工作提供理论支持。[方法] 以黑龙江省哈尔滨市延寿县不同发育程度侵蚀沟为研究对象, 对切沟沟头的沟坡和沟底土壤的粒径分布及蓄水性进行定量描述。[结果] ①不同深度处土壤容重、最大吸持贮水量、最大滞留水量、总库容、死库容、最大有效库容差异显著 ( $p < 0.05$ )。随土层加深, 土壤容重增大, 贮水量、持水性、有效水分下降。各层最大吸持贮水量占饱和贮水量均约 90%, 有效水分利用率分别为 44.79% 和 41.87%, 侵蚀沟发育对土壤有效水分影响明显。②入渗特征总体表现为: 初始入渗速率  $> 30$  min 入渗速率  $>$  稳定入渗速率, 3 者在不同编号沟道的  $A_2-A_4$  间随土层的加深, 入渗性能下降。在 20—40 cm 层  $A_1-A_4$  的入渗特征均表现为:  $CK(对照) > A_1 > A_2 > A_3$ , 呈先下降后上升趋势。随着侵蚀沟的发育, 土壤入渗性先下降后上升。③侵蚀沟的发育是黏粒含量变化的主要原因, 黏粒所占比例在 0—40 cm 层呈先增大, 后减小趋势; 砂粒所占比例在 0—20 cm 土层先减小, 后增大, 呈粗骨化趋势。④土壤退化指数在 0—20 cm 层表现为:  $A_1 > A_2 > A_3 > A_4$ 。随侵蚀沟的发育, 土壤退化程度加剧,  $A_4$  土壤退化最为严重。[结论] 不同深度的土壤剖面差异是造成黑土土壤物理性质差异的主要原因, 随着侵蚀沟的发育, 0—20 cm 层土壤蓄水性性能减弱, 土壤退化严重。

**关键词:** 黑土区; 坡耕地; 土壤侵蚀; 土壤持水; 土壤入渗

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)02-0001-08

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 张瑞豪, 肖洋, 邵社刚, 等. 黑土区坡耕地侵蚀沟演变对土壤粒径分布及蓄水性的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 1-8. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.02.001; Zhang Ruihao, Xiao Yang, Shao Shegang, et al. Effects of erosion gully evolution on particle size distribution and water storage properties in sloping cropland of a black soil area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 1-8.

## Effects of Erosion Gully Evolution on Particle Size Distribution and Water Storage Properties in Sloping Cropland of a Black Soil Area

Zhang Ruihao<sup>1</sup>, Xiao Yang<sup>1</sup>, Shao Shegang<sup>2</sup>, Xu Jinzhong<sup>3</sup>,  
Ni Dong<sup>2</sup>, Qiao Yutong<sup>1</sup>, Zhou Qirui<sup>1</sup>, Fu Xingyue<sup>1</sup>

(1. College of Advance Agriculture and Ecological Environment, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China; 2. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China; 3. Hydro-science Research Institute of Hydro-science of Heilongjiang, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of erosion on the surface soil of erosion gullies in sloping cropland soils in a black soil area were studied in order to provide theoretical support for the rational utilization of soil resources and regional soil and water conservation work in black soil areas. [Methods] The study was conducted on erosion gullies with different degrees of development in Yanshou County, Harbin City, Heilongjiang Province. Particle size distribution and water storage properties of soil on the slope, at the bottom of the gullies and at the head of the gullies were quantitatively described. [Results] ① Soil bulk density, maximum water-storage capacity, maximum water-retention capacity, total storage capacity, dead storage capacity,

收稿日期: 2022-07-20

修回日期: 2022-09-14

资助项目: 黑龙江省自然科学基金项目“黑土区切沟变化特征对融雪侵蚀的响应”(LH2020D018); 公路交通环境保护技术交通行业重点实验室开放课题“北方高寒区高速公路边坡植被快速恢复技术研究”; 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项“用于道路工程创面生态防护的植物纤维复合材料研发”(2017-9058)

第一作者: 张瑞豪(1994—), 男(汉族), 浙江省嘉兴市人, 硕士研究生, 研究方向为农业水土保持。Email: zrh1994zjx@163.com。

通讯作者: 肖洋(1978—), 男(汉族), 黑龙江省哈尔滨市人, 博士, 副教授, 主要从事农业水土保持方面的研究。Email: xiaoyang@hlju.edu.cn。

and maximum effective storage capacity at different depths were significantly different ( $p < 0.05$ ). As soil depth increased, soil bulk density also increased, and water-storage, water-retention, and effective water storage capacity decreased. Each layer had a maximum water-storage capacity of about 90% of its saturated capacity, and the effective water utilization rates were 44.79% and 41.87%, respectively. The development of erosion gullies had a clear influence on effective soil water. ② The infiltration characteristics generally showed that the initial infiltration rate > the 30-minute infiltration rate > the stable infiltration rate. As soil depth increased, the infiltration characteristics of the three indicators decreased between gully A<sub>2</sub> and A<sub>4</sub> for different erosion degree gullies. In the 20—40 cm layer, the infiltration characteristics of gully A<sub>1</sub> to A<sub>4</sub> followed the order of CK (control group) > gully A<sub>1</sub> > gully A<sub>4</sub> > gully A<sub>2</sub> > gully A<sub>3</sub>. Infiltration initially declined and then increased. With the development of the erosion gully, soil infiltration decreased and then increased. ③ The development of erosion gullies was the main reason for the change in clay content. The percentage of clay in the 0—40 cm layer tended to increase first and then decrease. The percentage of sand in the 0—20 cm layer tended to decrease first and then increase, showing a trend toward increased coarseness. ④ The soil degradation index followed the order of gully A<sub>1</sub> > gully A<sub>2</sub> > gully A<sub>3</sub> > gully A<sub>4</sub> in the 0—20 cm layer. Soil degradation increased with the development of erosion gullies. Soil degradation was most severe in gully A<sub>4</sub>. [Conclusion] The differences in soil profiles was the main reason for the differences in physical properties of black soil. Soil water-holding capacity in the 0—20 cm layer was weakened and soil degradation became severe as erosion gullies developed.

**Keywords:** black soil area; sloping arable land; soil erosion; soil water holding; soil infiltration

东北黑土区作为我国粮食主产区之一,正面临严重的土壤退化风险,尤以土壤侵蚀危害为甚。坡耕地因其不具备长期稳定的植被覆盖,物种结构单一、定期翻耕使得团聚体难以形成等特点<sup>[1]</sup>,成为土壤侵蚀的重灾区<sup>[2]</sup>。近些年黑土区坡耕地侵蚀主要表现为土层“变薄”<sup>[3]</sup>、土壤“变硬”<sup>[4]</sup>、侵蚀沟密度增大<sup>[5]</sup>,有研究表明在长年累月的垦荒耕作和不合理的土地利用模式下,黑土层厚度正从开垦初期的 70 cm 均值骤减至 40 cm 以下<sup>[6]</sup>,局部地区更是只有 20 cm<sup>[7]</sup>;土壤容重也从垦荒前的 0.8~1 g/cm<sup>3</sup> 到 1.0~1.1 g/cm<sup>3</sup> (1982 年),再到近些年来普遍的 1.25~1.3 g/cm<sup>3</sup><sup>[8]</sup>;耕作区内的侵蚀沟密度与烈度也呈上升趋势<sup>[9]</sup>。这些现象导致耕作区土壤质地趋于黏重化,土壤的存蓄降水能力下降,并反过来加剧侵蚀沟道的形成,形成恶性循环。而引发这一现象的原因除了人类活动影响之外,也与东北降雨的季节性分布有关,每年 7—8 月的雨季正是黑土区水土流失的高发期<sup>[10]</sup>。降雨初期的雨滴溅蚀迫使表层土壤颗粒松动位移,细小颗粒堵塞土壤空隙,降低土壤入渗能力,加速地表径流生成,但这一时期的水土流失量并不大<sup>[11-12]</sup>。而一旦降雨量超过植被林冠截流、填洼及土壤饱和持水量,或降雨强度超过土壤入渗速率时,地表径流随之产生,这时径流一方面对沿途的土壤施加剪切应力,不断剥离土壤使之位移,另一方面早期溅蚀、冻融等作用下的松动土壤颗粒也随之被冲蚀,周而复始,直至降雨结束,使得这一时期水土流失量大幅上升。因此

土壤蓄水性能在防控水土流失中的作用至关重要,它包括降雨入渗性能和土壤自身持水、贮水性能<sup>[13]</sup>。土壤入渗可以减小地表径流的产生<sup>[14]</sup>,不同的土壤持水性也影响坡面径流的形成<sup>[15-16]</sup>。而土壤粒径分布(PSD)作为土壤物理性质的基础特征,能直观反映土壤紧实度<sup>[17]</sup>、结构<sup>[18]</sup>和抗蚀性特征<sup>[19]</sup>,对我们定量描述土壤状态具有重要参考价值。目前,针对黑土区不同侵蚀程度土壤的蓄水性能研究还较少。因此,本文以不同发育程度侵蚀沟为研究对象,通过定量描述 0—40 cm 层的土壤持水性特征及粒径分布,系统阐述侵蚀作用对表层土壤的影响,为黑土区土壤资源合理运用提供基础数据,为区域水土流失治理工作开展提供理论支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省哈尔滨市延寿县双安村(东经 128.22'47",北纬 45.39'12"),属寒温带大陆性季风气候,年均相对湿度 73%,年均气温 2.3 ℃,年均降水量 571.7 mm,其中 70%以上集中在 7—8 月。海拔为 145~300 m,地处小兴安岭余脉与松嫩平原的过渡带,为典型的漫川漫岗和低丘的地形,坡度较小,多在 3°~8°区间内,坡面较长,多为 0.5~1 km<sup>[20]</sup>,汇水面积大,径流冲刷能力较强。表层土质为黑土,腐殖质含量高,孔隙度高,土质疏松。底层成土母质为第四纪黄土状亚土。采样区作为缓坡耕地,主要种植一

年一熟的玉米,春季翻耕深度为 20~25 cm。

### 1.2 研究区数据获取

为确保试验中各条切沟的地质变量趋近,减少外部环境的扰动,本研究参照 Randolph 等<sup>[21]</sup>人对流域空间尺度的界定,将各切沟选址范围限定在小流域级内(0.13~1.3 km<sup>2</sup>)。通过 Google Earth 地球影像初步筛选研究区域,结合历史影像推算域内沟道发育时间和年均侵蚀量后,确认符合试验需求的场地为“延寿县双安村双奎河样区”。通过现场无人机进行测绘并建立 DEM 模型(无人机为大疆精灵 4 RTK,DEM 模型精度为 0.1 m),确认模型与卫星图像无差异后(卫星为 Sentinel-1,DEM 精度为 12.5 m),利用 GIS 和 Sketch Up 软件绘制鸟瞰图。

### 1.3 野外土样采集

本次土样采集时间为 2021 年 5 月 1 日,依照《黑龙江省侵蚀沟分级与分类(DB23/T2412)》分类标准,结合侵蚀沟长度、深度、占地面积、近 3 a 的年均侵蚀量为判定标准,在研究区 1 km<sup>2</sup> 内选择 4 条具有代表性的小型侵蚀沟作为研究对象,分别设为 A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub>, A<sub>4</sub>(见图 1)。在各沟道在沟头段的布设 3 个采集部位(左右沟坡、沟底集水区),每个部位上设

0.5 m×0.5 m 的采样区,并沿单侧对角线分设 3 个采集点,其中沟坡采集点设于坡面上端,采集时垂直于坡面;沟底集水区的采集点采样前用刮刀去除 3 cm 浮土以避免样品掺杂上游冲刷下的泥沙。另在受春耕影响较小的距离 A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> 沟道右侧 5 m 的坡耕平地上设 2 处采集点,设为空白对照 CK,共计 28 个采样点。每个采集点采样前拂去表面大块有机质后,以地表为基,用机械分层法垂直向下分别采集 0—20 cm 和 20—40 cm 两个土层的土样,其基本情况详见表 1。



图 1 延寿县双安村侵蚀沟选取区位置示意图

Fig.1 Location diagram of erosion gully in Shuang'an village of Yanshou County

表 1 供试土壤基本情况

Table 1 Basic condition of the tested soil

编号	坡度/(°)	采样点数	沟长/m	均深/m	占地面积/hm <sup>2</sup>	年均侵蚀量/m <sup>2</sup>	土壤质地	发育程度
A <sub>1</sub>	5.22	6	17.4	0.18	0.001	1.8	黏壤土	小型稳定侵蚀沟
A <sub>2</sub>	4.82	6	223.4	0.72	0.05	13.9	黏壤土	小型半稳定侵蚀沟
A <sub>3</sub>	5.23	6	300.9	1.17	0.08	30.3	黏壤土	小型半稳定侵蚀沟
A <sub>4</sub>	5.57	6	319.8	2.03	0.18	57.4	黏壤土	小型发展侵蚀沟
CK <sub>1</sub>	5.10	2	—	—	—	—	壤土	坡耕地
CK <sub>2</sub>	5.48	2	—	—	—	—	壤土	坡耕地

注:由于对照组 CK<sub>1</sub> 与 CK<sub>2</sub> 毗邻,所以进行混样处理。

### 1.4 样品分析

完成试验数据收集后,利用 SPSS 25,Excel 2020 等软件对原始数据进行描述性、回归等分析,其计算方式为:

(1) 土壤蓄水量。土壤蓄水量计算公式为:

$$W_a = \int_0^H \theta(H) dH \quad (1)$$

式中:W<sub>a</sub> = 地表以下 H 深度土层的土壤蓄水量(mm); θ(H) = 地表以下 H 深度土层的土壤含水量。

(2) 土壤库容特征。土壤库容是土壤对其内外部水分蓄、运、保、调的能力的统称,通常与土壤类型、结构、机械组成构成和地下水埋深等关系密切<sup>[22]</sup>。各类库容计算公式为<sup>[23]</sup>:

$$\text{总库容} = 0.1 \sum_{i=1}^n (S_i \times r_i \times H_i) \quad (2)$$

$$\text{死库容} = 0.1 \sum_{i=1}^n (Wl_i \times r_i \times H_i) \quad (3)$$

$$\text{兴利库容} = 0.1 \sum_{i=1}^n [(C_i - Wl_i) \times r_i \times H_i] \quad (4)$$

$$\text{滞洪库容} = 0.1 \sum_{i=1}^{i=h} [(S_i - C_i) \times r_i \times H_i] \quad (5)$$

$$\text{最大有效库容} = \text{总库容} - \text{死库容} \quad (6)$$

$$\text{有效水分} = \text{田间持水量} - \text{凋萎持水量} \quad (7)$$

式中:Wl = 凋萎持水量(%); r = 容重(g/cm<sup>3</sup>); n = 土壤层次,本次取 1; C = 田间持水量(%); S = 饱和持水量(%)。

(3) 土壤贮水特征。

土壤饱和贮水量 = 最大吸持贮水量 + 最大滞留水量;

最大吸持贮水量 = 毛管孔隙度 × 土层厚度 (cm);

最大滞留水量 =

非毛管孔隙度 × 土层厚度 (cm)<sup>[24]</sup>。(8)

(4) 土壤退化特征分析。Adejuwon 等人<sup>[25]</sup>提出的土壤退化指数 (SDI) 可以定量地反映土壤退化和改善程度, 试样土壤退化程度可用土壤物理性质指标所反映。变异系数 ( $C_v$ ) 可反映土壤退化特征的空间变异性及敏感性, 系数越大, 说明评价土壤退化特征的指标差异性越敏感<sup>[26]</sup>。计算公式为:

$$SDI = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \frac{x_{ij} - x_{cj}}{x_{cj}} \times 100\% \quad (9)$$

式中: SDI = 土壤退化指数;  $n$  = 纳入计算的指标值;  $x_{ij}$  = 第  $i$  个侵蚀程度第  $j$  个土壤物理指标值;  $x_{cj}$  = 第  $j$  个物理指标的对照值。本研究中以 CK 的土壤理化指标值作为对照组,  $A_1, A_2, A_3, A_4$  为不同侵蚀程度的试样组, 若  $SDI > 0$ , 则说明土壤质量有所改善, 若  $SDI < 0$ , 则土壤质量有所退化, 数值越小, 退化越严重。

Norm 值是指标通过主成分分析, 在其成分组成的多维空间中矢量常模的长度, 长度越长, 该指标的综合载荷越大, 释义综合信息能力的的能力越强<sup>[27]</sup>。Norm 值计算公式为:

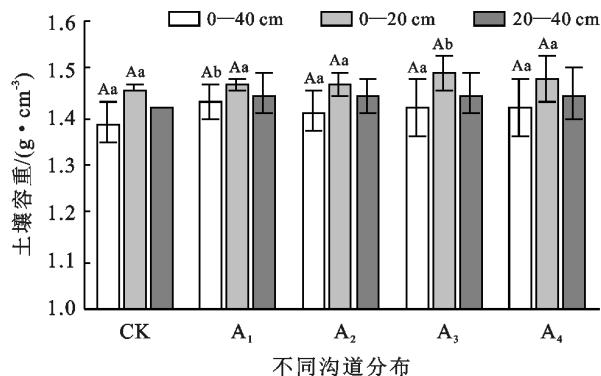
$$N_{ik} = \sqrt{\sum_{i=1}^k (u^2 \cdot \lambda_k)} \quad (10)$$

式中:  $N_{ik}$  是第  $i$  个指标在特征值  $\geq 1$  的前  $k$  个主成分上的综合载荷;  $u_{ik}$  是第  $i$  个指标在第  $k$  个主成分上的载荷;  $\lambda_k$  是第  $k$  个主成分的特征值。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同发育程度侵蚀沟的土壤容重变化特征

由图 2 可知, 容重在 0—20 cm 层的  $A_1$ — $A_4$  较 CK 分别上升了 3.49%, 1.81%, 2.53% 和 2.45%, 在 20—40 cm 层分别上升 0.46%, 0.68%, 1.75% 和 1.29%, 侵蚀沟发育对容重变化影响不显著, 各沟道土层间容重总体表现为: 0—20 cm < 20—40 cm 且差异极显著 ( $p < 0.01$ ), 土壤容重随土层加深逐渐增大, 呈上虚下实的剖面构成。据表 4 灰度关联分析结果可知, 土层加深对容重变化的关联度为 0.951, 是容重变化的最大影响因素, 表层黑土 (0—20 cm) 和下层黄土状亚黏土 (20—40 cm) 的剖面差异是造成土壤物理性质差异的主要原因。沟道发育的关联度为 0.650, 侵蚀沟发育使沟道土壤裸露出不同层的剖面及构型, 是容重变化的次要原因。



注: 同列数据不同大写字母表示同一垂直深度不同沟道差异显著 ( $p < 0.05$ ), 不同小写字母表示同一沟道不同垂直深度差异显著 ( $p < 0.05$ )。下同。

图 2 不同发育程度侵蚀沟土壤容重特征

Fig.2 Soil bulk weight characteristics in different erosion gullies

### 2.2 不同发育程度侵蚀沟的土壤持水性特征

由表 2 可见, 在 0—20 cm 层, 各沟道间总库容、死库容、兴利库容、最大有效库容差异显著 ( $p < 0.05$ ),  $A_1$  较 CK 的兴利库容降幅和  $C_v$  值均最大, 分别为 45.55% 和 57.68%, 且与总库容、最大有效库容变化趋势基本一致; 而滞洪库容、死库容降幅波动小, 均值分别为 6.87% 和 8.33%, 可见侵蚀沟发育对土壤有效水分影响显著, 对土壤削减径流能力和无效水分影响较小。不同深度间的总库容、死库容、兴利库容、最大有效库容差异显著 ( $p < 0.05$ ), 随着土层加深, 土壤持水性下降。多元回归线性分析表明 (表 3), 土层加深对总库容、死库容、最大有效库容变化的 Beta 值分别为 0.262, 0.248 和 0.259, 且差异性显著 ( $p < 0.05$ ), 是造成土壤持水性变化的主要原因。在 0—20 cm 层,  $A_1$ — $A_4$  的饱和含水量在 20.46%~30.31% 间, 田间含水量在 10.56%~22.17% 间, 凋萎含水量在 3.39%~4.79% 间, 储蓄降水可被农作物有效利用率为 44.79%, 而 20—40 cm 层为 41.87%, 随着土层加深, 土壤有效水分下降。

### 2.3 不同发育程度侵蚀沟土壤贮水性特征

由图 3 可知, 最大吸持贮水量与最大滞留水量间差距明显, 各层最大吸持贮水量占饱和贮水量均为 90% 左右。不同深度间最大吸持贮水量在 0—20 cm 层  $A_1$ — $A_4$  较 CK 分别下降 -1.17%, 0.38%, 5.06% 和 1.00%, 在 20—40 cm 层分别下降 -0.04%, 1.15%, 5.31% 和 1.87%, 各层降幅均值分别为 0.82% 和 2.07%, 侵蚀沟发育对土壤贮水性影响较小。最大滞留水量在 0—20 cm 层  $A_1$ — $A_4$  较 CK 分别下降 16.53%, 15.52%, -15.43% 和 35.23%, 在 20—40 cm 层分别上升 3.51%, 5.98%, 36.38%, 5.47%。二者在各沟道土层间总体平均值均呈 0—20 cm > 20—

40 cm 差异性显著 ( $p < 0.05$ )。灰色关联分析表明 (表 4), 侵蚀沟的发育和土层加深对最大吸持贮水量变化灰色关联度分别为 0.605 和 0.932, 最大滞留水

量关联度为 0.651 和 0.776, 土层加深是造成最大吸持贮水量和最大滞留水量变化的主要原因。土层贮水量随土层加深逐渐减小。

表 2 供试土壤水分物理特征

Table 2 Physical properties of soil moisture of the tested soil

沟道编号	土层/cm	土壤含水量特征/%				土壤水库特征库容/mm				
		饱和含水量	毛管含水量	田间含水量	凋萎含水量	总库容	死库容	兴利库容	滞洪库容	最大有效库容
CK	0—20 cm	28.24 <sup>Aa</sup>	26.6 <sup>Aa</sup>	18.29 <sup>ABa</sup>	4.67 <sup>ABa</sup>	78.14 <sup>Aa</sup>	12.91 <sup>ABa</sup>	37.71 <sup>ABa</sup>	27.52 <sup>Aa</sup>	50.62 <sup>ABa</sup>
	20—40 cm	20.97 <sup>Ab</sup>	19.16 <sup>Ab</sup>	11.32 <sup>Ab</sup>	3.72 <sup>Ab</sup>	61.27 <sup>Ab</sup>	10.87 <sup>Ab</sup>	22.22 <sup>Ab</sup>	28.18 <sup>Aa</sup>	33.09 <sup>Ab</sup>
	平均值	24.60	22.88	14.81	4.19	69.70	11.89	29.96	27.85	41.85
A <sub>1</sub>	0—20 cm	25.16 <sup>ABa</sup>	23.41 <sup>ABa</sup>	15.99 <sup>ABa</sup>	4.76 <sup>Aa</sup>	71.81 <sup>ABa</sup>	13.56 <sup>Aa</sup>	32.07 <sup>ABa</sup>	26.18 <sup>Aa</sup>	45.63 <sup>ABa</sup>
	20—40 cm	20.61 <sup>Ab</sup>	18.82 <sup>Ab</sup>	11.06 <sup>Ab</sup>	3.29 <sup>Ab</sup>	60.43 <sup>Ab</sup>	9.61 <sup>Ab</sup>	22.58 <sup>Ab</sup>	28.23 <sup>Aa</sup>	32.20 <sup>Ab</sup>
	平均值	22.89	21.11	13.52	4.02	66.12	11.59	27.33	27.20	38.91
A <sub>2</sub>	0—20 cm	24.57 <sup>ABa</sup>	22.79 <sup>ABa</sup>	15.64 <sup>ABa</sup>	3.73 <sup>BCa</sup>	69.36 <sup>ABa</sup>	10.53 <sup>BCa</sup>	33.66 <sup>ABa</sup>	25.17 <sup>Aa</sup>	44.19 <sup>ABa</sup>
	20—40 cm	21.44 <sup>Ab</sup>	19.67 <sup>Ab</sup>	12.42 <sup>Ab</sup>	3.31 <sup>Ab</sup>	63.02 <sup>Ab</sup>	9.74 <sup>Ab</sup>	26.80 <sup>Ab</sup>	26.48 <sup>Aa</sup>	36.54 <sup>Ab</sup>
	平均值	23.01	21.23	14.03	3.52	66.19	10.14	30.23	25.83	40.36
A <sub>3</sub>	0—20 cm	30.31 <sup>Aa</sup>	28.89 <sup>Aa</sup>	22.17 <sup>Aa</sup>	4.79 <sup>Aa</sup>	85.88 <sup>Aa</sup>	13.63 <sup>Aa</sup>	49.10 <sup>Aa</sup>	23.15 <sup>Aa</sup>	62.73 <sup>Aa</sup>
	20—40 cm	25.5 <sup>Ab</sup>	24 <sup>Ab</sup>	17.27 <sup>Ab</sup>	4.18 <sup>Ab</sup>	75.67 <sup>Ab</sup>	12.43 <sup>Ab</sup>	38.73 <sup>Ab</sup>	24.51 <sup>Aa</sup>	51.16 <sup>Ab</sup>
	平均值	27.90	26.44	19.72	4.48	80.78	13.03	43.92	23.83	56.95
A <sub>4</sub>	0—20 cm	20.46 <sup>Ba</sup>	18.47 <sup>Ba</sup>	10.56 <sup>Ba</sup>	3.39 <sup>Ca</sup>	58.18 <sup>Ba</sup>	9.63 <sup>Ca</sup>	20.53 <sup>Ba</sup>	28.02 <sup>Aa</sup>	30.16 <sup>Ba</sup>
	20—40 cm	21.16 <sup>Ab</sup>	19.38 <sup>Ab</sup>	11.74 <sup>Ab</sup>	3.42 <sup>Ab</sup>	62.73 <sup>Ab</sup>	10.12 <sup>Ab</sup>	24.85 <sup>Ab</sup>	27.76 <sup>Aa</sup>	34.97 <sup>Ab</sup>
	平均值	20.81	18.93	11.15	3.40	60.46	9.88	22.69	27.89	32.57

注:同列数据不同大写字母表示同一垂直深度不同部位差异显著 ( $p < 0.05$ ), 不同小写字母表示同一部位不同垂直深度差异显著 ( $p < 0.05$ )。

表 3 供试土壤机械组成回归分析

Table 3 The regression analysis of soil texture of the tested soil

指标	常量	调整后 $R^2$	DW 值	标准化系数 (Beta)	显著性	VIF 值
总库容	发育程度	0.43	0.984	-0.159	0.267	1.28
	深度差异			-0.262	0.037	1.00
死库容	发育程度	0.103	0.903	-0.258	0.048	1.28
	深度差异			-0.248	0.042	1.00
兴利库容	发育程度	0.007	0.912	-0.135	0.350	1.28
	深度差异			-0.164	0.198	1.00
滞洪库容	发育程度	0.005	0.955	0.115	0.426	1.28
	深度差异			0.125	0.326	1.00
最大有效库容	发育程度	0.350	0.988	-0.156	0.278	1.28
	深度差异			-0.259	0.039	1.00

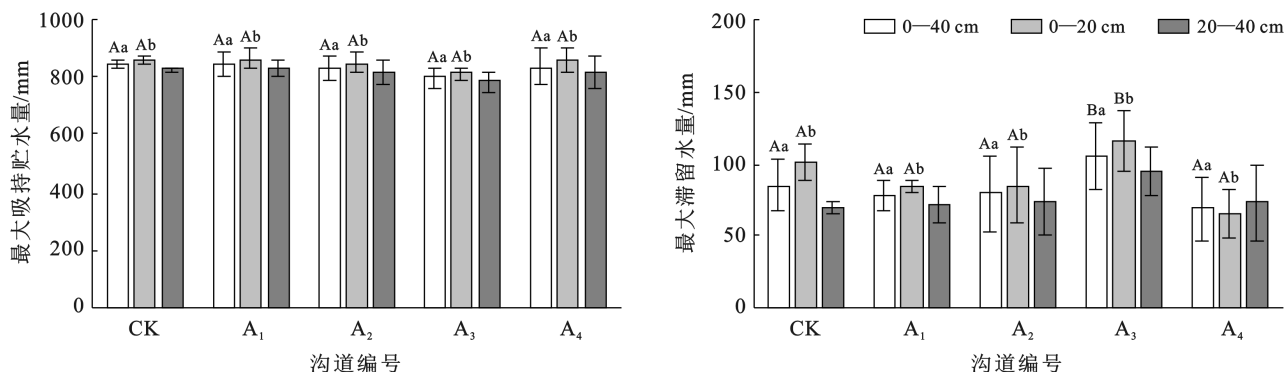


图 3 不同发育程度侵蚀沟土壤贮水性特征

Fig.3 Soil water-storage characteristics in different erosion gullies

表 4 供试土壤容重与贮水性回归分析

Table 4 The regression analysis of bulk weight and water-storage characteristics of the tested soil

项目	容重	最大吸持贮水量	最大滞留水量
深度差异	0.951	0.932	0.776
发育程度	0.650	0.605	0.651

注:无纲量处理方式均为均值化;分辨系数  $p=0.50$ 。

## 2.4 不同发育程度侵蚀沟的土壤入渗性特征

由图 4 可知,入渗试验中入渗速率特征变化总体呈:初始入渗速率( $8.48 \pm 8.05$  mm/min) > 30 min 入渗速率( $5.83 \pm 5.61$  mm/min) > 稳定入渗速率(5.24

$\pm 5.19$  mm/min),随入渗时间增加,土壤间空隙逐渐被壤中流填满,致使入渗速率下降并趋于稳定。3 者在发育程度更深的沟道  $A_2-A_4$  土层间总体平均值均呈:0—20 cm > 20—40 cm 且差异显著( $p < 0.05$ ),土壤剖面差异使得入渗性能存在差异,随着土层的加深,土壤入渗性能下降。在 20—40 cm 层,  $A_1-A_4$  的初始、30 min、稳定入渗速率分别在 14.97~3.64 mm/min, 12.48~2.22 mm/min 和 12.55~1.96 mm/min 间,三者均呈:CK >  $A_1$  >  $A_4$  >  $A_2$  >  $A_3$ ,呈先下降,后上升趋势,随着侵蚀沟的发育,土壤入渗性呈先下降,后上升趋势。

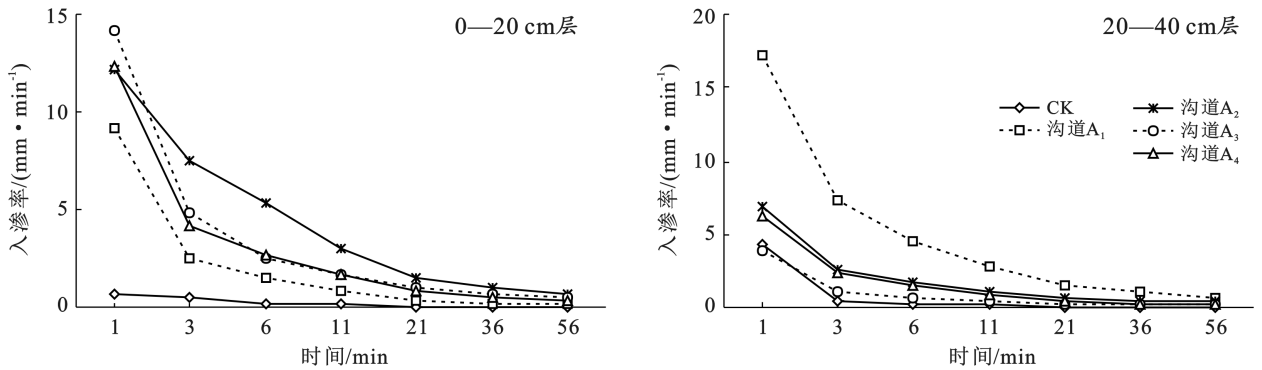


图 4 不同侵蚀沟土壤入渗特征

Fig. 4 Soil infiltration characteristics of different erosion gullies

## 2.5 不同发育程度侵蚀沟的土壤机械组成特征

由图 5 可知,在 0—20 cm 层,原本质地为壤土的 CK 受到侵蚀作用后发展成为  $A_1-A_4$  的黏壤土,其中  $A_1-A_4$  的砂粒所占比例在 35.59%~39.69% 间,各沟道间呈:CK >  $A_4$  >  $A_3$  >  $A_2$  >  $A_1$ ,呈先减小,后增大趋势;粉粒所占比例在 27.50%~30.14% 间,表现为:CK >  $A_1$  >  $A_2$  >  $A_3$  >  $A_4$ ,变化平缓且呈递减趋势;黏粒所占比例在 21.92%~24.12% 间,表现为:  $A_1$  >  $A_3$  >  $A_2$  >  $A_4$  > CK。砂粒所占比例的上升通常伴随着粉粒、黏粒所占比例的下降,这可能是沟头段受径流冲蚀影响,在侵蚀发育过程中粒径变化主要以细小颗粒的机械搬运为主,发育过程呈“粗骨化”趋势。而

砂粒和粉粒所占比例在 20—40 cm 层变化不规律,黏粒所占比例则在 24.25%~27.36% 间,表现为:  $A_2$  >  $A_1$  >  $A_3$  >  $A_4$  > CK。黏粒所占比例在不同沟道间均呈:20—40 cm > 0—20 cm,且差异显著( $p < 0.05$ ),土壤颗粒随土层加深逐渐变细;黏粒所占比例在 0—20 cm 与 20—40 cm 层时均呈先增大,后减小的趋势且差异性显著( $p < 0.05$ ),这可能是早期侵蚀中颗粒被径流冲刷崩解、风化形成更小颗粒,而后被径流搬运的结果。多元线性回归分析表明(表 5),侵蚀沟的发育对黏粒所占比例变化的 Beta 值为 0.257 且显著,土层加深为 0.163,但不显著,因此侵蚀沟的发育是黏粒含量变化的主要原因。

表 5 供试土壤机械组成回归分析

Table 5 The regression analysis of soil texture of the tested soil

指标	常量	调整后 $R^2$	DW 值	标准化系数(Beta)	显著性	VIF 值
砂粒比例	发育程度	0.184	1.792	0.257	0.051	1.28
	深度差异			-0.118	0.303	1.00
粉粒比例	发育程度	0.013	1.852	-0.209	0.149	1.28
	深度差异			0.017	0.893	1.00
黏粒比例	发育程度	0.314	1.55	-0.257	0.036	1.28
	深度差异			0.163	0.130	1.00

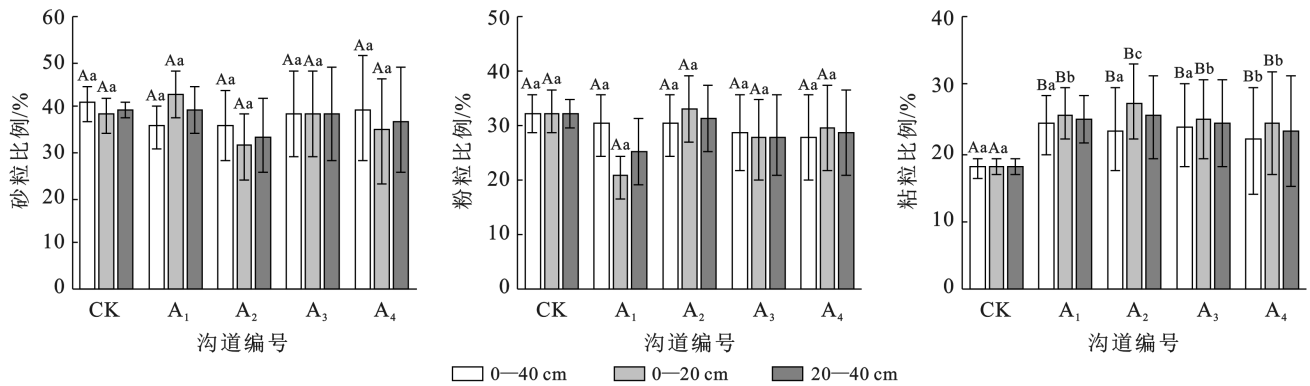


图 5 供试土壤机械组成

Fig.5 Soil texture of the tested soil

## 2.6 供试土壤退化特征

由表 6 可知,兴利库容、最大有效库容、最大滞留水量、初始入渗速率、30 min 入渗速率、稳定入渗速率为中敏感指标(40%~100%),是土壤退化发生的主要指标;总库容、死库容、滞洪库容、砂粒比例、粉粒比例、黏粒比例为低敏感指标(10%~40%),是土壤退化发生的稳定因素;此外土壤容重、最大吸持贮水量敏感度低(<10%),而在坡耕地土壤质量评价中,可定量评价土壤质量时选择中度敏感指标<sup>[28-29]</sup>。K-S 检验表明,总库容、死库容、兴利库容、滞洪库容、最大有效库容、最大滞留水量、砂粒比例、黏粒比例符合正态分布( $p>0.05$ ),其中砂粒比例 Norm 值(1.20)偏低不选用。剩余 7 项土壤物理指标可作为土壤退化指数的计算指标。由图 6 可知,在 0—40 cm 土层中,不同侵蚀程度沟道土壤退化指数变化特征呈:  $A_1(0.79\%) > A_2(-1.24\%) > A_3(-5.77\%) > A_4(-9.08\%)$  且差异显著( $p<0.05$ ),呈先上升后下降趋势。在 0—

20 cm 层中,表现为:  $A_1(-3.24\%) > A_2(-4.95\%) > A_3(-6.78\%) > A_4(-13.26\%)$  且差异显著( $p<0.05$ ),呈递减趋势,  $A_1$  退化最为严重。侵蚀作用主要影响 0—20 cm 层表土层,随侵蚀沟的发育,0—20 cm 层土壤退化程度加剧。在 20—40 cm 层土壤退化不明显。

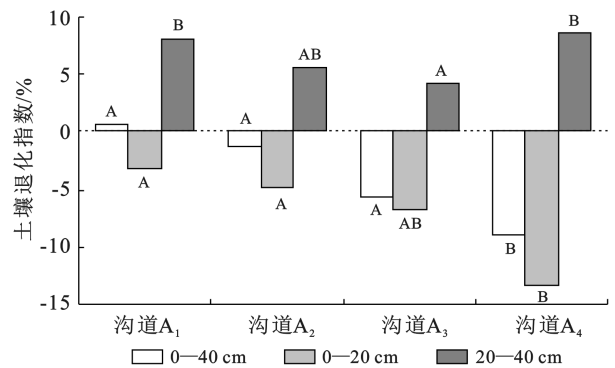


图 6 供试土壤退化指数特征

Fig.6 Characteristics of the tested soil degradation index

表 6 供试土壤退化指标统计分析特征

Table 6 Statistical analysis characteristics of soil degradation indicators for testing

指标	容重/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	总库容/ mm	死库容/ mm	兴利 库容/mm	滞洪 库容/mm	最大有效 库容/mm	最大吸持贮 水量/mm	最大滞留 水量/mm	初始入渗速率/ ( $mm \cdot min^{-1}$ )	30 min 入渗速率/ ( $mm \cdot min^{-1}$ )	稳定入渗速率/ ( $mm \cdot min^{-1}$ )	砂粒 比例/%	粉粒 比例/%	黏粒 比例/%
最大值	1.57	103.01	17.18	69.42	32.72	82.88	826.84	84.04	48.37	27.81	25.29	57.82	47.17	38.44
最小值	1.33	37.85	5.10	1.15	19.44	5.84	948.60	157.00	0.53	0.31	0.25	18.51	13.72	12.85
平均值	1.45	68.89	11.12	31.67	26.10	42.79	724.4	34.8	8.84	6.30	5.74	36.94	29.2	23.95
标准差	0.05	15.07	2.57	15.92	3.41	17.90	47.71	26.63	7.93	5.65	5.25	9.38	7.05	6.60
变异系数/%	3.54	21.87	23.08	50.28	13.07	41.84	6.59	76.52	89.71	89.67	91.47	25.40	24.14	27.56
峰度	-0.24	0.40	-0.26	-0.31	-0.73	-0.44	-0.04	-0.03	8.98	2.03	1.71	-0.56	0.28	-0.88
偏度	0.31	0.204	-0.24	-0.01	-0.06	-0.16	0.18	0.21	2.44	1.36	1.31	0.01	0.03	0.31
K-S 检验	0.02	0.20	0.05	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.04	0.03	0.04	0.20	0.02	0.20
Norm 值	0.40	2.26	1.98	2.06	2.12	2.24	1.56	2.25	0.26	0.36	0.26	1.20	0.80	1.59

## 3 结论

(1) 不同深度处土壤容重、最大吸持贮水量、最大滞留水量差异显著( $p<0.05$ ),土层加深对 3 者的灰色关联度分别为 0.951, 0.932 和 0.776,容重、贮水特征

变化主要是侵蚀沟裸露出不同土壤剖面及构型所造成。随着土壤加深,土壤容重增大,贮水量逐渐减少。各层最大吸持贮水量占饱和贮水量均约 90%。

(2) 侵蚀沟发育对土壤有效水分影响显著,对土壤削减径流能力和无效水分影响较小。不同深度间的总

库容、死库容、最大有效库容差异显著 ( $p < 0.05$ ), 土层加深对 3 者变化的 Beta 值分别为 0.262, 0.248 和 0.259 且显著, 是造成土壤持水性变化的主要原因。各层有效水分利用率分别为 44.79% 和 41.87%。随着土层加深, 土壤持水性、有效水分下降。

(3) 入渗特征总体表现为: 初始入渗速率  $> 30$  min 入渗速率  $>$  稳定入渗速率, 3 者在不同沟道  $A_2-A_4$  间随土层的加深, 入渗性能下降。在 20—40 cm 层  $A_1-A_4$  的入渗特征均呈:  $CK > A_1 > A_2 > A_3 > A_4$ , 呈下降, 后上升趋势, 随着侵蚀沟的发育, 土壤入渗性先下降后上升。

(4) 随着侵蚀沟的发育, 砂粒比例在 0—20 cm 层先减小, 后增大, 呈粗骨化趋势; 黏粒比例在 0—40 cm 层呈先增大, 后减小趋势; 侵蚀沟的发育对黏粒比例变化的 Beta 值为 0.257 且显著, 是黏粒含量变化的主要原因。

(5) 土壤退化指数在 0—20 cm 层呈:  $A_1 > A_2 > A_3 > A_4$ , 随侵蚀沟的发育, 土壤退化程度加剧,  $A_4$  土壤退化最为严重。

#### [参 考 文 献]

- [1] 吴佳. 黄土高原旱地秋作入渗蓄水与防蚀作用特征研究[D]. 陕西 西安: 西安理工大学, 2016.
- [2] 路中, 雷国平, 王居午, 等. 30 年来东北典型黑土区水土流失敏感性时空分异特征研究[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(4): 186-195.
- [3] 许文旭, 杨献坤, 崔斌, 等. 东北黑土区典型坡耕地土层厚度及退化程度分析[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2021, 19(3): 28-36.
- [4] 陈敏. 典型黑土淀积层分布及抗蚀性特征的研究[D]. 黑龙江 哈尔滨: 东北林业大学, 2010.
- [5] 李智广, 王岩松, 刘宪春, 等. 我国东北黑土区侵蚀沟道的普查方法与成果[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(5): 9-13.
- [6] 万炜, 李含微, 王佳莹, 等. 基于空间平滑法的旱作区粮食产量时空变化与影响因素研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 284-296.
- [7] 张兴义, 刘晓冰, 赵军. 黑土利用与保护[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [8] 李保国, 刘忠, 黄峰, 等. 巩固黑土地粮仓保障国家粮食安全[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1184-1193.
- [9] 温艳茹. 黑土区典型农业小流域沟蚀发育历史、速度和关键过程研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2020.
- [10] 徐金忠. 典型黑土区切沟发育关键驱动因素及特征研究[D]. 黑龙江 哈尔滨: 东北林业大学, 2020.
- [11] 李桂芳. 典型黑土区坡面土壤侵蚀影响因素与动力学机理研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2016.

- [12] Rodrigo C, Sinoga J R, Gonzalez J D S, et al. High variability of soil erosion and hydrological processes in Mediterranean hillslope vineyards (Montes de Malaga, Spain) [J]. *Catena: An Interdisciplinary Journal of Soil Science Hydrology-Geomorphology Focusing on Geocology and Landscape Evolution*, 2016, 145: 274-284.
- [13] 姚贤良, 程云生. 土壤物理学[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 122-126.
- [14] Leonard J, Andrieux P. Infiltration characteristics of soils in Mediterranean vineyards in Southern France [J]. *Catena*, 1998, 32(3/4): 209-223.
- [15] 杨光, 丁国栋, 赵廷宁, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕还林的水土保持效益研究: 以陕西省吴旗县为例[J]. 水土保持通报, 2006(02): 88-90, 99.
- [16] 薛飞. 基于超渗—蓄满产流模式的分布式水文模型在半干旱地区的构建及应用[D]. 河南 郑州: 华北水利水电大学, 2017.
- [17] 程思贤, 刘卫玲, 靳英杰, 等. 深松深度对砂姜黑土耕层特性、作物产量和水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(9): 1355-1365.
- [18] 高燕. 黑土区不同侵蚀方式对土壤团聚体和泥沙颗粒流失的影响研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [19] 张加子琦. 东北黑土区长缓复合侵蚀坡面土壤可蚀性参数研究[D]. 辽宁 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- [20] 范昊明, 蔡强国, 王红闪. 中国东北黑土区土壤侵蚀环境[J]. 水土保持学报, 2004(02): 66-70.
- [21] Randolph J. Environmental land use planning and management [J]. *Journal of Planning Education and Research*, 2005, 24(4): 452-453.
- [22] 孙仕军, 丁跃元, 曹波, 等. 平原井灌区土壤水库调蓄能力分析[J]. 自然资源学报, 2002, 17(1): 42-47.
- [23] 黄荣珍, 杨玉盛, 张金池, 等. 不同林地类型土壤水库蓄水特性研究[J]. 水土保持通报, 2005, 25(3): 1-5.
- [24] 娄义宝, 史东梅, 江娜, 等. 土壤侵蚀对坡耕地土壤水分及入渗特性影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1399-1410.
- [25] Adejuwon J O, Ekanade O. A comparison of soil properties under different landuse types in a part of the Nigerian cocoa belt [J]. *Catena*, 1988, 15(3/4): 319-331.
- [26] 金慧芳, 史东梅, 陈正发, 等. 基于聚类及 PCA 分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 155-164.
- [27] 陈正发, 史东梅, 金慧芳, 等. 基于土壤管理评估框架的云南坡耕地耕层土壤质量评价[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 256-267.
- [28] 许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区土壤质量评价指标研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1843-1848.
- [29] Xu Mingxiang, Li Qiang, Wilson G. Degradation of soil physicochemical quality by ephemeral gully erosion on sloping cropland of the hilly Loess Plateau, China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 9-18.