

DOI: 10.11766/trxb202006250332

王小康, 谷举, 刘刚, 师宏强. 横、顺坡垄作对黑土坡面侵蚀-沉积周期规律的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59 (2): 430–439.

WANG Xiaokang, GU Ju, LIU Gang, SHI Hongqiang. The Influence of Transverse and Longitudinal Ridge Tillage on Soil Erosion and Deposition Cycles for Mollisol Slope[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (2): 430–439.

## 横、顺坡垄作对黑土坡面侵蚀-沉积周期规律的影响\*

王小康<sup>1</sup>, 谷 举<sup>1, 2</sup>, 刘 刚<sup>1, 3†</sup>, 师宏强<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨陵 712100; 2. 长江生态环保集团有限公司, 武汉 430000; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨陵 712100)

**摘要:** 我国东北黑土区的水土流失和土地退化正严重制约着东北地区农业经济发展, 威胁国家粮食生产安全。掌握不同垄作方向耕作措施下的东北黑土区土壤侵蚀规律, 对合理布设水保措施、控制水土流失等具有重要意义。采用 <sup>137</sup>Cs 示踪技术并结合小波分析方法, 对不同垄作方向坡耕地土壤侵蚀-沉积速率的空间变化规律开展研究。结果表明: (1) 横、顺坡垄作坡面 <sup>137</sup>Cs 平均浓度分别为 1 802 Bq·m<sup>-2</sup> 和 1 770 Bq·m<sup>-2</sup>, 均小于当地背景值 2 417 Bq·m<sup>-2</sup>, 说明在两种垄作方向下均发生了不同程度的土壤侵蚀。(2) 横坡垄作的坡面平均侵蚀速率 (1 341 t·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>) 小于顺坡垄作 (1 477 t·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>), 表明在长期平均条件下前者的水土保持作用优于后者。尽管研究区土壤侵蚀属于轻度侵蚀, 但其侵蚀速率远大于黑土区的土壤容许流失量 (200 t·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>), 因而在本研究区进行水土流失综合治理已迫在眉睫。(3) 横、顺坡垄作在整个坡面均存在侵蚀-沉积的周期性变化规律, 顺坡垄作存在一个 45 m 的主周期和一个 75 m 的次周期, 而横坡垄作只存在一个 45 m 的主周期。准确把握土壤侵蚀-沉积在坡面的周期性变化规律, 可为坡面水土保持措施的精确布设提供科学的理论依据。

**关键词:** 土壤侵蚀; 沉积; 垄向; 垄作; <sup>137</sup>Cs; 小波分析

**中图分类号:** S157.1      **文献标志码:** A

## The Influence of Transverse and Longitudinal Ridge Tillage on Soil Erosion and Deposition Cycles for Mollisol Slope

WANG Xiaokang<sup>1</sup>, GU Ju<sup>1, 2</sup>, LIU Gang<sup>1, 3†</sup>, SHI Hongqiang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Yangtze Ecology and Environment Co. Ltd., Wuhan 430000, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] The black soil region of Northeast China is an important commodity grain production base in China. The long-term high-intensity utilization and unplanned agricultural cultivation measures led to serious soil fertility decline, grain yield reduction, and soil erosion in some areas. Soil erosion and land degradation in the black soil region seriously restricted the

\* 国家重点研发计划战略性国际科技创新合作重点专项 (2016YFE0202900) 和 中国科学院战略性科技先导 (A 类) (XDA23060502)

资助 Supported by the Strategic International Collaboration of Scientific and Technological Innovation for the National Key R&D Program of China (No. 2016YFE0202900), Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. XDA23060502)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: gliu@foxmail.com

作者简介: 王小康 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀示踪研究。E-mail: xiaokang0215@qq.com

收稿日期: 2020-06-25; 收到修改稿日期: 2021-04-07; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2021-07-30

development of the agricultural economy in Northeast China. This threatened national food production and security. Ridge tillage is the most common cultivation method in the black soil region of Northeast China. However, the long-term effects of different ridge direction on slope erosion and deposition has never been evaluated. Therefore, understanding soil erosion and deposition on slopes with different ridge directions is of great significance for the development and deployment of soil and water conservation measures and the control of soil loss in the black soil area of Northeast China. 【 Method 】  $^{137}\text{Cs}$  is an artificial radionuclide produced by atmospheric nuclear test and nuclear leakage. Its half-life is 30.2 years. The nuclide is strongly adsorbed by clay particles in soils after settling to the surface, and it is difficult to be leached by water. This implies that it only moves mechanically with soil particles. Therefore, it is regarded as a good tracer and widely used in the study of soil erosion rate. In this study,  $^{137}\text{Cs}$  tracer technology combined with wavelet analysis method was used to study the spatial variation of soil erosion and deposition rate on slopes with different ridge planting directions. 【 Result 】 (1) The average concentration of  $^{137}\text{Cs}$  on slopes with horizontal and longitudinal ridges was  $1\ 802\ \text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$  and  $1\ 770\ \text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ , respectively, which were lower than the local background value of  $2\ 417\ \text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ . (2) The slope erosion and deposition rate were between  $-700$  to  $2\ 662\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  with an average of  $1\ 341\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  on slopes with horizontal ridges, and that on slopes with longitudinal ridges was between  $-726$  to  $3\ 327\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  with an average of  $1\ 466\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ . These results showed that the average erosion rate of slopes with horizontal ridges was lower than that with longitudinal ridges. (3) Different periodic change of erosion and deposition on 140 m long slopes were observed. There was a 45 m main period and a 75 m secondary period of erosion and deposition on slopes with longitudinal ridges, while only a 45 m main period was observed on slopes with horizontal ridges. 【 Conclusion 】 The periodic change of erosion and deposition on slope surface is mainly caused by the change of transportation capacity of rainfall-runoff and snowmelt runoff along the slope. Different degrees of soil erosion occurred on slopes with different ridge directions, and the slopes with horizontal ridges showed less soil loss than those with longitudinal ridges. Although soil erosion in the study area was mild, its average soil erosion rate is far greater than the allowable soil loss ( $200\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ) in the black soil region of China. Thus, there is an urgent need for comprehensive control of soil erosion in this area. This study could provide a scientific and theoretical basis for the precise layout of soil and water conservation measures such as; (i) reinforcement of ridge platform and (ii) arrangement of contour plant belt on strong erosion positions of slopes. This could prevent the destruction of ridges by runoff and effectively reduce slope soil erosion.

**Key words:** Soil erosion; Deposition; Ridge direction; Ridge tillage;  $^{137}\text{Cs}$ ; Wavelet analysis

东北黑土区土地面积  $103\ \text{万}\ \text{km}^2$ , 占全国陆地总面积的  $10.7\%\text{[1]}$ , 是世界著名的四大黑土区之一, 也是我国重要的商品粮生产基地, 素有“中华粮仓”之美誉。由于长期的高强度利用和不合理的农业耕作措施导致黑土区土壤肥力严重下降、粮食减产和部分地区水土流失日益加重 $^{[2-3]}$ 。2013 年水土普查公报显示东北黑土区水土流失总面积为  $2.588\times 10^5\ \text{km}^2$ , 占黑土区总面积的  $25.13\%\text{[4]}$ 。第一次全国水利普查公报显示东北黑土区侵蚀沟道 29.57 万余条 $^{[5]}$ 。昔日的“生态功能区”正逐步演变为“生态脆弱区”, 黑土区的土壤流失和土地退化严重制约着东北地区农业经济发展, 威胁国家粮食生产安全, 因此加强东北黑土区水土流失综合治理已刻不容缓, 开展坡面水土流失机理研究将为合理布设水土保持措施、进行水土流失综合治理提供科学依据与理论指导。

垄作是东北黑土区最常见的耕作方式 $^{[6]}$ , 可有

效提高作物产量 $^{[7]}$ 。已有研究表明, 不同的垄作方向对于防治水土流失具有不同的效果。顺坡垄作的垄向与坡向平行, 地表径流向垄沟汇集的过程中无垄台阻挡, 垄沟内径流流速和径流侵蚀力迅速增大, 从而加大了坡面侵蚀强度; 而横坡垄作则由于垄台对地表径流的拦截作用、使径流流速减小, 增加了降水的就地入渗, 从而使其坡面侵蚀强度减小 $^{[8-11]}$ 。王磊等 $^{[12]}$ 通过不同降雨强度下的室内模拟试验发现横坡垄作与无垄作相比, 横坡垄作可推迟产流时间, 并使产流量和产沙量大幅减小; 宋玥和张忠学 $^{[13]}$ 研究对比两种垄作方式在不同降雨强度 ( $40$ 、 $60$ 、 $80\ \text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ) 下径流量和泥沙量的差异, 发现在不同降雨强度下顺坡垄作的径流量和泥沙量均大于横坡垄作; 沈昌蒲等 $^{[14]}$ 的研究也表明横坡垄作较顺坡垄作对坡面水土流失具有更好的防治效果。目前针对不同垄作方向的土壤侵蚀机理研究多在次降雨或短

历时条件下进行,而对长期条件下不同垄作方向对坡面水土流失的影响,以及坡面侵蚀-沉积强弱交替变化周期性规律的研究则较为缺乏,有待进一步深入研究。

$^{137}\text{Cs}$  是由大气核试验和核泄漏产生的一种人工放射性核素,其半衰期为 30.2 年。该核素沉降 to 地表后被土壤中的黏性颗粒强烈吸附,很难被水向下淋溶,仅随土壤颗粒发生机械位移,因而被视为一种良好的示踪剂被广泛应用于土壤多年平均侵蚀速率研究<sup>[15-18]</sup>。王禹等<sup>[19]</sup>利用  $^{137}\text{Cs}$  示踪技术研究发现东北黑土区坡耕地在长坡长(500 m)、顺坡垄作条件下存在 142 m 侵蚀强弱交替的周期性变化规律。冯志珍<sup>[20]</sup>在东北黑土区宾州河流域的研究中发现横坡垄作在整个坡面同样存在侵蚀强弱交替的周期性变化规律,大周期处于 144~150 m 之间,小周期处于 75~88 m 之间。Cui 等<sup>[21]</sup>基于野外径流小区的观测结果发现黑土区坡面侵蚀速率沿坡长呈现强弱交替变化。然而,这些研究均未考虑不同垄作方向对坡面土壤侵蚀沉积规律及空间分布特征的影响。

因此,本研究采用  $^{137}\text{Cs}$  示踪技术并结合小波分析方法,探究长期条件下东北黑土区坡耕地坡面侵蚀-沉积的周期性变化特征对两种不同垄作方向的响应规律,从而为该地区水土保持措施的合理布设以及水土流失防治规划提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

克山县(47°50'51"—48°33'47"N, 125°10'57"—126°8'18"E)位于小兴安岭南缘,松嫩平原腹地,隶属于黑龙江省齐齐哈尔市。该地区属寒温带大陆性季风气候,年均温 2.4 °C,有效积温 2 400 °C,无霜期 122 d 左右,雨热同期,降雨主要集中在 6—8 月,年平均降水量在 500 mm 左右;地貌属波状起伏台地(漫川漫岗),地势沟谷相间,丘陵地形占总面积的 80%。本研究选取克山县境内两处临近的、开垦历史近 70 年的典型漫川漫岗坡耕地为研究对象。坡长 140 m、宽 60~80 m,平均坡度为 3°,且坡度在整个坡面的整体变化微弱,垄作方向分别为横垄和顺垄,且垄作方向自耕作以来一直未发生改变。垄高 15 cm,垄台顶宽 20 cm,垄间距为 65 cm。

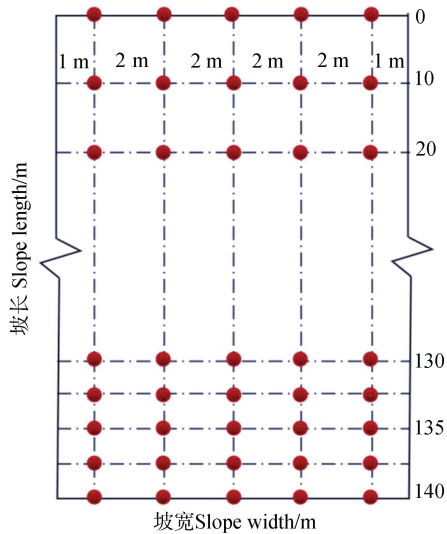
土壤质地为粉壤土,其颗粒组成(美国农业部制)砂粒、粉粒、黏粒的含量分别为 5.6%、54.8%、39.6%。耕层深度为 20 cm 左右,耕层容重介于 1.08~1.44 g·cm<sup>-3</sup>,耕层平均土壤容重为 1.13 g·cm<sup>-3</sup>,有机质含量为 25.86 g·kg<sup>-1</sup>,pH 为 6.36。

### 1.2 样品的采集与处理

理想的  $^{137}\text{Cs}$  背景值采样点应选自地势平坦、无侵蚀与沉积发生、植被覆盖较好的区域,如平坦的草地和多年无人扰动过的坟地。本研究最终选取距离研究区约 10 km 处一块 70 年未受人为扰动且地势平坦的老坟地作为背景值采样点进行独立分层采样,根据刘志强等<sup>[22]</sup>在之前的研究中得出的结论,对于未扰动地块,在 0.25 m<sup>2</sup> 的范围内至少需要采集 11 个样点才可确定当地  $^{137}\text{Cs}$  背景值,因而在本研究中共选择 17 个样点进行背景值分层样的采集。

前人研究发现该地区顺坡垄作存在侵蚀-沉积强弱交替变化的振荡周期约为 140 m<sup>[19]</sup>,本研究将进一步探究不同垄作在更小坡长尺度下侵蚀-沉积的周期性振荡规律,因而本研究选取坡面长度 140 m,坡宽沿等高线取 10 m 作为一个完整的采样断面。Zhang 等<sup>[23]</sup>通过大量试验统计分析确定当采样点间距大于 0.75 m,小于 5 m 时采集的土壤样本才具有独立性,满足此条件的样本可以组合成为一个样本代表点。故沿等高线方向设计 2 m 的采样间距,一个等高线可采集 5 个样本,然后将采集到的 5 个样本土样均匀混合,作为该等高线的代表性样本。顺坡方向自上而下设计 10 m 的采样间距,在距离坡底 10 m 的位置开始样本点加密,每 2.5 m 采集一个样本。 $^{137}\text{Cs}$  在东北黑土区的平均分布深度约为 30 cm,故坡上部与坡中部均按 30 cm 的采样深度进行打钻采样。通过分层样(按 5 cm 分层,采样深度为 45 cm)的测定发现坡下部的  $^{137}\text{Cs}$  分布已到达距离地面 35 cm 的深度,故确定坡下部的采样深度为 35 cm。采样时间为 2019 年 4 月, $^{137}\text{Cs}$  在坡面的采样点分布见图 1。

采集的土样带回实验室经风干、研磨、过筛(2 mm),称 300 g 左右装盒待测。 $^{137}\text{Cs}$  测量使用美国 AMETEK 公司生产的 ORTEC GMX-50220 型高纯锗  $\gamma$  能谱仪。 $^{137}\text{Cs}$  含量由其在 661.6 keV  $\gamma$  射线的全峰面积求得,所有样品测量均在 40 000 s 以上,仪器重复测量误差在 95% 的置信水平下  $\leq 5\%$ 。

图 1  $^{137}\text{Cs}$  的采样点分布Fig. 1  $^{137}\text{Cs}$  sampling point distribution

### 1.3 单位面积 $^{137}\text{Cs}$ 含量计算

单位面积浓度（面积比活度）反映了研究区不同位置  $^{137}\text{Cs}$  的含量差异，比较不同样点  $^{137}\text{Cs}$  含量与背景值之间的差异及其在土壤剖面中的分布深度可大致判断自  $^{137}\text{Cs}$  沉降以来该点是发生了侵蚀还是沉积，一般地当采样点  $^{137}\text{Cs}$  浓度小于或大于当地背景值时分别表示在该点发生了侵蚀和沉积。测得各层土样  $^{137}\text{Cs}$  的放射性活度后，由式（1）计算样点单位面积  $^{137}\text{Cs}$  含量  $C_s$  ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ ):

$$C_s = \sum_{i=1}^n C_i \cdot \text{BD}_i \cdot \text{DI}_i \cdot 1000 \quad (1)$$

式中， $i$  为采样层数序号； $n$  为采样层数； $C_i$  为第  $i$  采样层的  $^{137}\text{Cs}$  浓度 ( $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ )； $\text{BD}_i$  为  $i$  采样层的土壤容重 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )； $\text{DI}_i$  为  $i$  采样层的深度 (m)。

### 1.4 土壤侵蚀量计算模型

采样地自  $^{137}\text{Cs}$  沉降以来一直为农耕地，因而采用张信宝  $^{137}\text{Cs}$  农耕地侵蚀量计算模型<sup>[18]</sup>估算样点的土壤流失量：

$$C_s = A_0 \cdot \left(1 - \frac{\Delta H}{H}\right)^{N-1963} \quad (2)$$

式中， $C_s$  为土壤剖面中  $^{137}\text{Cs}$  面积浓度 ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ )； $A_0$  为  $^{137}\text{Cs}$  背景值 ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ )； $H$  为耕层深度 (cm)，这里取 20 cm； $\Delta H$  为年平均土壤流失厚度 (cm)； $N$  为采样年份。

### 1.5 小波分析方法

小波函数可实现对时间序列数据的多尺度分解，从而得到原始信号在不同尺度上的周期性变化特征。具体地，连续小波变换可以定义为<sup>[24]</sup>：

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \int x(t) \cdot \varphi^* \cdot \left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

式中， $x(t)$  为原始信号； $\varphi(t)$  为小波母函数； $a$  为尺度因子； $b$  为平移因子；\*表示共轭；积分结果  $W(a,b)$  表示小波系数，反映了尺度为  $a$ ，位移为  $b$  时的小波函数与原始信号间相关性的强弱。

在众多的小波母函数中，由于复 Morlet 小波能够有效提取特征时间尺度信号在不同时间的强弱和位相两方面的信息，可消除用实小波变换系数作为判据所产生的虚假振荡且不具有正交性<sup>[25]</sup>。所以本研究进行连续小波变换时选用复 Morlet 小波，其母小波的表达式为<sup>[26]</sup>：

$$\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} \exp\left[-\frac{t^2}{f_b} + (2\pi f_c t)i\right] \quad (4)$$

式中， $f_b$  为小波带宽； $f_c$  为小波中心频率； $i$  表示虚数。在本研究中根据小波变换的实际效果确定最优带宽  $f_b$  为 1，中心频率  $f_c$  取值为 1.5。

小波伸缩尺度  $a$  不等同于真实的周期尺度，伸缩尺度  $a$  与周期  $T$  存在如下关系：

$$T = \frac{4\pi}{\omega + \sqrt{2 + \omega^2}} \times a \quad (5)$$

式中， $\omega = 2\pi f_c$ ， $f_c$  为小波中心频率，所以实际坡长对应的真实周期尺度为：

$$T = 0.663a \quad (6)$$

小波方差反映了波动的能量随尺度的分布，可以客观而有效地确定一个待分析序列中存在的主要周期，方差的峰值处所对应的尺度即为该序列的主要周期尺度。小波方差越大，说明信号在对应尺度上的周期性特征就越显著。

$$\text{Var}(a) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |W(a, x_i)|^2 \quad (7)$$

式中,  $\text{Var}$  为小波方差;  $W$  为小波系数;  $|W|$  表示小波系数的模;  $x_t$  为时间序列;  $n$  为在  $a$  尺度下求得的小波系数总数。小波方差反映了波动的能量随尺度的分布, 小波方差图中各极值点对应的坡长尺度  $a$  即是坡长序列中存在的显著振荡周期。

由于本研究每个坡面的数据样本点只有 18 个, 因而在进行小波分析前本文采用美国 MathWorks 公司出品的数学软件 Matlab2017b 对数据进行了插值处理和对称性两端扩展, 通过计算得到小波方差并绘制小波方差图。侵蚀速率空间分布图的制作使用的是美国 Golden Software 公司编制的三维制图软件 Surfer 15。

## 2 结果与讨论

### 2.1 采样区的 $^{137}\text{Cs}$ 背景值

从图 2 中可以看出  $^{137}\text{Cs}$  主要分布在表层 0~15 cm, 且从上而下呈现出逐层递减的趋势。由式(1)计算得到  $^{137}\text{Cs}$  含量平均值为  $2\,417\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ , 变异系数为 7.2%。与其他学者测定的黑土区土壤  $^{137}\text{Cs}$  背景值进行对比, 闫百兴和汤洁<sup>[27]</sup>在吉林省德惠市确定的背景值为  $2\,464\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ , 杨维鸽等<sup>[28]</sup>在黑龙江省哈尔滨市宾县确定的背景值为  $2\,379\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ , 王禹等<sup>[19]</sup>在黑龙江省齐齐哈尔市克山县确定的背景值为  $2\,500\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ 。结果显示本研究所测定的  $^{137}\text{Cs}$  背景值与前人在东北黑土区所确定的背景值非常接近, 因而将  $2\,417\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$  确定为本研究区的  $^{137}\text{Cs}$  背景值。

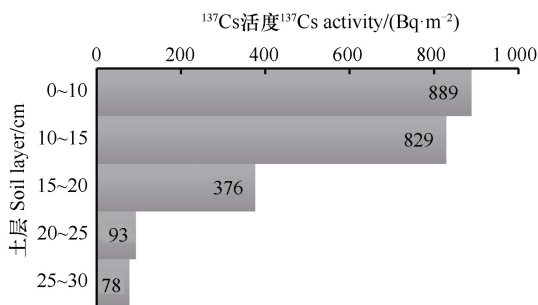


图 2  $^{137}\text{Cs}$  背景值在土壤剖面中的含量分布

Fig. 2 Distribution of  $^{137}\text{Cs}$  background content in the soil profile

### 2.2 坡面 $^{137}\text{Cs}$ 含量及侵蚀速率空间变化

横坡垄作坡面  $^{137}\text{Cs}$  浓度介于  $1\,294\sim 2\,845\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$  之间, 平均浓度为  $1\,802\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ , 变异系数为 26.6%; 顺坡垄作坡面  $^{137}\text{Cs}$  浓度介于  $1\,106\sim$

$2\,863\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$  之间, 平均浓度为  $1\,770\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ , 变异系数为 21.4%。由图 3 可知横坡、顺坡垄作坡面  $^{137}\text{Cs}$  平均浓度均远低于当地背景值, 说明当地发生了严重的土壤侵蚀。0~20 m, 由于汇水坡长较短, 水力侵蚀较小, 长期的犁耕作用使土壤沿坡长方向发生运移从而导致  $^{137}\text{Cs}$  浓度沿坡长增加; 20~40 m, 随着汇水坡长的增加, 径流动能与径流侵蚀力增大, 水力侵蚀增强并占据主导作用导致  $^{137}\text{Cs}$  浓度沿坡长减小; 当径流挟沙量逐渐趋于饱和, 径流侵蚀力减小并开始卸载泥沙,  $^{137}\text{Cs}$  浓度沿坡长又呈现增大的趋势。伴随径流侵蚀力等的强弱周期变化,  $^{137}\text{Cs}$  浓度相应地呈现出增大-减小的周期变化规律。由于  $^{137}\text{Cs}$  示踪获取的是多年平均值, 因此该侵蚀速率为多种外营力长期综合作用的结果。该地区夏季和秋季主要以水蚀为主<sup>[29]</sup>; 冬季和春季则发生风力、冻融和融雪径流等的复合侵蚀; 在晚秋和春播时节土质疏松, 地表覆盖率低, 大风频发, 此时则发生强烈的耕作侵蚀和风蚀<sup>[30]</sup>。坡面  $^{137}\text{Cs}$  随土壤颗粒在多种外营力作用下被侵蚀搬运, 从而导致其浓度在坡面呈现空间差异性。

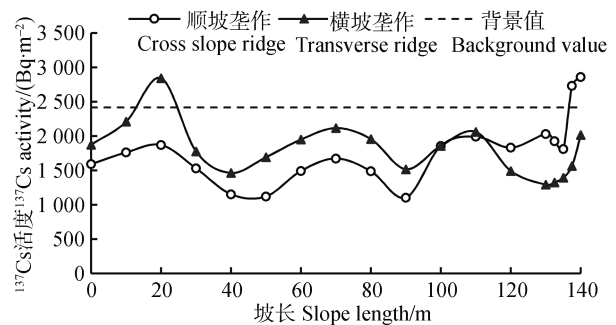


图 3 横、顺坡垄作坡面  $^{137}\text{Cs}$  活度随坡长的变化

Fig. 3  $^{137}\text{Cs}$  activity on slope with transverse and longitudinal ridges changed with the slope length

横坡、顺坡垄作的侵蚀-沉积速率分别介于  $-700\sim 2\,662\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  和  $-726\sim 3\,327\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  之间, 其平均值分别为  $1\,341\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  和  $1\,466\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。依据水利部公布的土壤侵蚀分级标准<sup>[31]</sup>, 该地区土壤侵蚀属于轻度侵蚀, 但其侵蚀强度远大于东北黑土区土壤容许流失量 ( $200\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )。顺坡垄作的平均侵蚀速率大于横坡垄作, 说明横坡垄作较顺坡垄作具有更好的水土保持效果。其原因可能有以下几点: 首先是垄作对降雨径流的影响, 横垄垄台能够有效地减缓径流流速, 减小径流侵蚀力



从而减少表层土壤的剥离和搬运，增加降雨入渗、推迟产流时间<sup>[12]</sup>；顺坡垄作则将坡面径流大量汇聚于垄沟内，在增大径流流速的同时，径流对于垄沟底部和两侧垄台的掏蚀作用也相应增强。其次是垄作对耕作侵蚀的影响，横坡垄作在机械耕作时农机沿垄向做横向移动，坡面土块在机械牵引下主要发生横向位移，顺坡方向的位移并不显著。顺坡垄作则沿坡进行上下耕作，向下坡耕作时，重力在耕作方向上的分力与机械牵引力的方向相同，在二者共同作用下土壤很容易随耕作机械向下坡发生迁移；而向上坡耕作时，重力在耕作方向上的分力与机械牵引力方向相反，削弱了机械牵引力对土壤迁移的效果，这是造成顺坡垄作坡底 <sup>137</sup>Cs 浓度大于横坡垄作并发生土壤沉积的又一重要原因<sup>[32-33]</sup>。然后是垄作对融雪径流的影响，冻融作用会破坏土壤结构，使土质疏松，在融雪径流作用下极易被侵蚀搬运。横坡垄作的垄台可有效拦截融雪径流，减小径流侵蚀；而顺坡垄作则增大垄沟内径流流速，并将松散的土壤搬运至坡面底

部。最后，还可能有风蚀作用的参与，但由于风力对坡面作用较为复杂且缺乏相关观测资料，因此本研究难以对风蚀作用的影响进行详细分析。

### 2.3 坡面土壤侵蚀-沉积的空间分布规律

从图 4 可以发现其侵蚀速率空间分布呈现明显的周期波动性。为了进一步探究不同垄向坡面侵蚀速率的分布规律，本文引入小波分析方法来研究坡面侵蚀速率具体的周期性变化规律。图 5 为顺坡垄作下坡面侵蚀速率的小波方差图，从图中可以看出顺坡垄作坡面存在 2 个较为明显的波峰，它们依次对应 68 m、113 m 的坡长尺度。由式 (6) 换算成实际坡长下的周期尺度分别为 45 m 和 75 m。其中最大峰值对应着 68 m 的坡长尺度，说明在 68 m 的坡长尺度下周期震荡性最强，因而 45 m 为该坡面侵蚀速率的第一主周期；113 m 坡长尺度对应着第二峰值，75 m 作为该坡面土壤侵蚀速率的第二主周期，上述 2 个周期的波动控制着土壤侵蚀速率在整个坡长域内的变化特征。

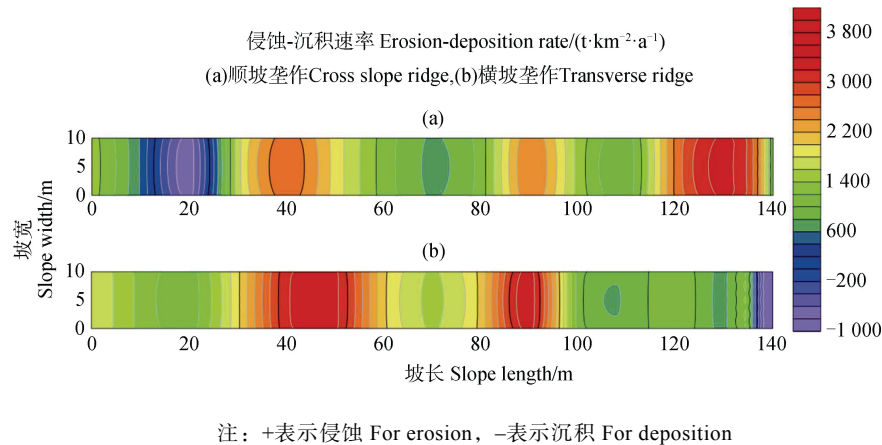


图 4 横、顺坡垄作坡面侵蚀-沉积速率空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of erosion-deposition rate on slope with horizontal and longitudinal ridges

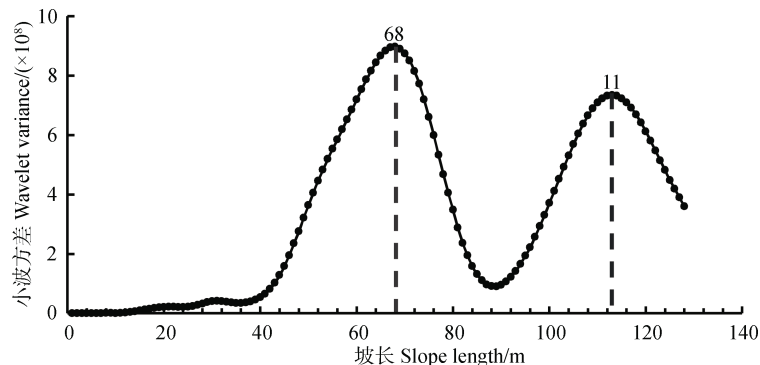


图 5 顺坡垄作坡面土壤侵蚀速率小波方差随坡长尺度的变化规律

Fig. 5 Wavelet variance of soil erosion rate on slopes with longitudinal ridges

图 6 (a) 为顺坡垄作坡面在 68 m 坡长尺度下的小波系数图, 从图中可以看出侵蚀速率大约经历了 3 个极强-极弱的交替转换期, 其平均周期与计算得到的 45 m 实际坡长周期尺度完全吻合。图 6 (b)

为顺坡垄作在 113 m 坡长尺度下的小波系数图, 从图中可以看出在 113 m 坡长尺度下, 侵蚀速率大约经历了 2 个极强-极弱的交替转换期, 这与计算得到的 75 m 的实际周期尺度也大致吻合。

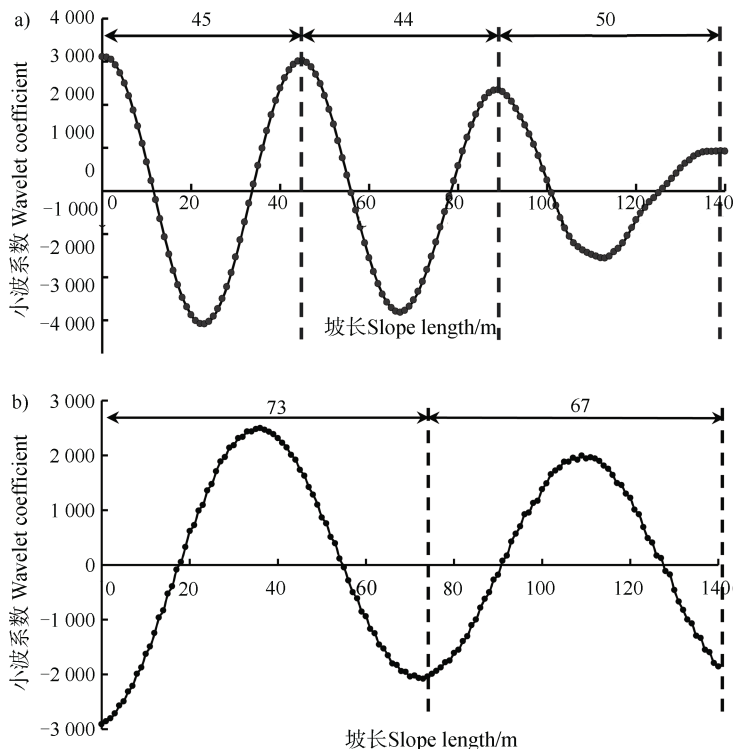


图 6 顺坡垄作坡面土壤侵蚀速率在 (a) 68 m 和 (b) 113 m 坡长尺度下的小波系数随坡长变化规律  
Fig. 6 Wavelet coefficient of soil erosion rate in (a) 68 m and (b) 113 m length scale on slopes with longitudinal ridges

图 7 为横坡垄作坡面土壤侵蚀速率的小波方差图, 从图中可以看出横坡垄作坡面土壤侵蚀速率的最大峰值对应 67 m 的坡长尺度, 由式 (6) 换算得到实际坡长下的真实周期尺度为 45 m。67 m 的坡长

尺度下周期震荡性最强, 因而该坡面侵蚀速率的主周期为 45 m, 该周期的波动控制着土壤侵蚀速率在整个坡长域内的变化特征。图 8 为横坡垄作在 67 m 坡长尺度下的小波系数图, 从图中可以看出土壤侵

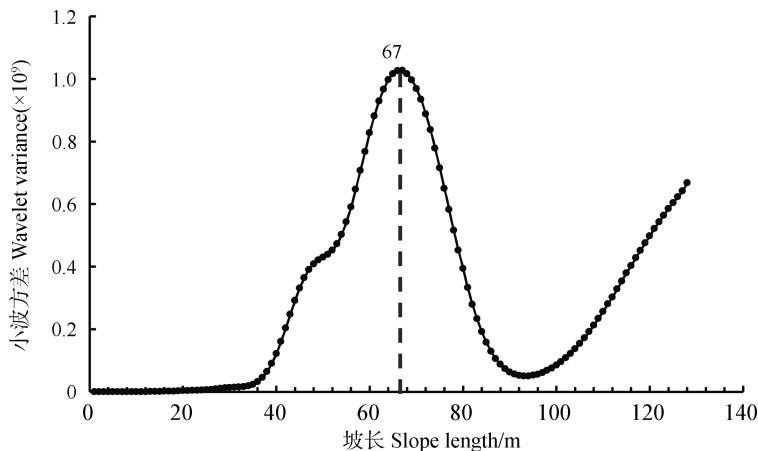


图 7 横坡垄作坡面土壤侵蚀速率小波方差随坡长尺度变化的规律  
Fig. 7 Wavelet variance of soil erosion rate on slopes with horizontal ridges

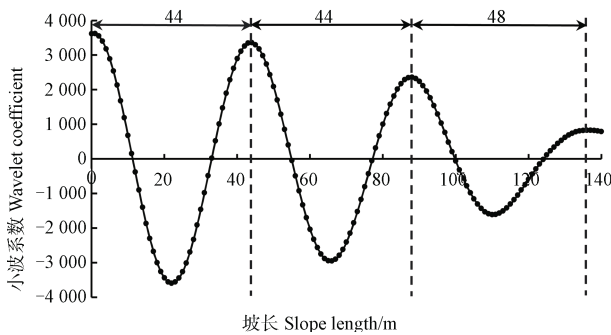


图8 横坡垄作坡面土壤侵蚀速率在67 m坡长尺度下的小波系数随坡长变化规律

Fig. 8 Wavelet coefficient of soil erosion rate in 67 m length scale on slopes with horizontal ridges

蚀速率大约经历了3个极强-极弱的交替转换期,土壤侵蚀速率的平均变化周期为45.3 m,这与计算得到的周期尺度45 m完全吻合。

由上述小波方差图与小波系数图可知,横坡垄作与顺坡垄作在140 m的坡长尺度下均存在侵蚀-沉积的周期性变化规律。二者在主周期上具有一定的共性,均存在一个45 m的第一主周期,同时二者也存在差异,顺坡垄作还存在一个75 m的第二主周期。坡面存在的侵蚀-沉积周期性变化规律主要是由降雨径流和融雪径流引起的。在降雨和融雪过程中,坡面径流沿坡面自上而下流动,径流流速不断增大,对坡面土壤的侵蚀也随之增大,不断携带沿程泥沙向坡下运移,当挟沙量逐渐趋于饱和,径流流速和径流侵蚀力均减小并开始卸载泥沙,泥沙被卸载后径流流速与侵蚀力又逐渐增大,径流沿着坡面继续向下开始新一周期的泥沙侵蚀、搬运、沉积。周而复始在整个坡面形成侵蚀-沉积的周期性变化规律。横坡垄作和顺坡垄作存在侵蚀-沉积周期变化规律差异(即顺坡垄作存在第二主周期)的主要原因是横垄垄台对径流泥沙的拦截作用和对坡面流速的消减作用,垄台能有效的将泥沙阻留在垄沟内,以及它对坡面挟沙水流的减速作用使得挟沙水流的挟沙能力减弱,在更短的坡长周期内使泥沙卸载沉积。顺坡沿坡长方向无垄台阻挡,坡面水流在垄沟里迅速汇集,流量大、流速快,导致挟沙水流侵蚀力增大,需运移更远的距离才能达到饱和,因而其存在较横坡垄作更长的侵蚀-沉积第二主周期。准确把握坡面土壤侵蚀-沉积规律,可有效指导水土保持措施的空间配置,例如在侵蚀较强的部位进行垄

台加固,布设等高植物带,防止垄台被冲垮,可有效减少坡面水土流失。

### 3 结 论

横、顺坡垄作的坡面 $^{137}\text{Cs}$ 平均浓度分别为 $1\ 802\ \text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $1\ 770\ \text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ ,均小于当地背景值 $2\ 417\ \text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ ,说明在两种耕作措施下坡面均发生了不同程度的土壤侵蚀。横坡垄作的坡面侵蚀-沉积速率介于 $-700\sim 2\ 662\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间,平均值为 $1\ 341\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ;顺坡垄作侵蚀速率介于 $-726\sim 3\ 327\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间,平均值为 $1\ 466\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。横坡垄作在整个坡面的平均侵蚀速率小于顺坡垄作,表明在长期平均条件下前者的水土保持作用优于后者。尽管研究区的土壤侵蚀属于轻度侵蚀,但其侵蚀速率远大于黑土区的土壤容许流失量( $200\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ),因而在本研究区进行水土流失综合治理已迫在眉睫。通过小波分析发现,在140 m坡长条件下,东北黑土区横坡垄作与顺坡垄作坡耕地在整个坡面均存在侵蚀-沉积的周期性变化规律。顺坡垄作存在一个45 m的主周期和一个75 m的次周期,而横坡垄作只存在一个45 m的主周期。坡面呈现的侵蚀-沉积周期性变化规律主要是由降雨径流和融雪径流对坡面土壤的侵蚀、搬运、输移和沉积过程引起的。准确把握坡面土壤侵蚀沉积规律对水土保持措施的空间配置,有效控制坡面水土流失,提高黑土区水土保持效益等具有重要的指导意义。但不同坡型条件下(即凸型和凹型),坡面侵蚀沉积规律还有待进一步研究。

### 参考文献 (References)

- [1] Liu B Y, Yan B X, Shen B, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for cultivated land in the Northeastern black soil area of China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(1): 1—8. [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.]
- [2] Yu L, Zhang B. The degradation situations of black soil in China and its prevention and counter measures[J]. Journal of Arid Land Resources & Environment, 2004, 18(1): 99—103. [于磊, 张柏. 中国黑土退化现状与防治对策[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(1): 99—103.]



- [ 3 ] Zhang J, Jia Y F, Wang J N, et al. Parameter characteristics of soil erodibility of long gentle slopes under composite erosion in the black soil region of northeast China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57( 3 ): 590—599. [张加子琦, 贾燕锋, 王佳楠, 等. 东北黑土区长缓复合侵蚀坡面土壤可蚀性参数特征[J]. *土壤学报*, 2020, 57( 3 ): 590—599.]
- [ 4 ] Ministry of water resources. Prevention and control of soil erosion and ecological security in China: Northeast black soil region volume[M]. Beijing: Science Press, 2010. [水利部. 中国水土流失防治与生态安全: 东北黑土区卷[M]. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [ 5 ] Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Bulletin on soil and water conservation of the first national water conservancy census [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2013 ( 10 ): 2—3, 11. [中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报[J]. *中国水土保持*, 2013 ( 10 ): 2—3, 11.]
- [ 6 ] Xu X M, Zheng F L, Wilson G V, et al. Comparison of runoff and soil loss in different tillage systems in the Mollisol region of Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 177: 1—11.
- [ 7 ] Zhao S D. The effect of soil and water conservation measures on soil erosion and fertility under black soil sloping farmland[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. [赵赛东. 不同水土保持措施对黑土坡耕地土壤侵蚀及肥力的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.]
- [ 8 ] Bian F, Zheng F L, Xu X M, et al. Comparison of soil erosion process between longitudinal ridge slope and non-ridge slope in mollisol region of northeast China[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36 ( 1 ): 11—16. [边锋, 郑粉莉, 徐锡蒙, 等. 东北黑土区顺坡垄作和无垄作坡面侵蚀过程对比[J]. *水土保持通报*, 2016, 36 ( 1 ): 11—16.]
- [ 9 ] Gebreegziabher T, Nyssen J, Govaerts B, et al. Contour furrows for in situ soil and water conservation, Tigray, Northern Ethiopia[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 103 ( 2 ): 257—264.
- [ 10 ] Liu Q J, Zhang H Y, An J, et al. Soil erosion processes on row sideslopes within contour ridging systems[J]. *Catena*, 2014, 115: 11—18.
- [ 11 ] Lal R. Ridge-tillage[J]. *Soil and Tillage Research*, 1990, 18 ( 2/3 ): 107—111.
- [ 12 ] Wang L, He C, Zheng F L, et al. Soil-Bin experiment on effects of contour ridge tillage for controlling hillslope soil erosion in black soil region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34 ( 15 ): 141—148. [王磊, 何超, 郑粉莉, 等. 黑土区坡耕地横坡垄作措施防治土壤侵蚀的土槽试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34 ( 15 ): 141—148.]
- [ 13 ] Song Y, Zhang Z X. The effect of different tillage measures on soil erosion in slope farmland in black soil region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18 ( 2 ): 14—16, 25. [宋玥, 张忠学. 不同耕作措施对黑土坡耕地土壤侵蚀的影响[J]. *水土保持研究*, 2011, 18 ( 2 ): 14—16, 25.]
- [ 14 ] Shen C P, Gong Z P, Wen J T. Comparison study on soil and water loss of cross ridge and longitudinal ridge[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2005, 25 ( 4 ): 48—49, 80—114. [沈昌蒲, 龚振平, 温锦涛. 横坡垄与顺坡垄的水土流失对比研究[J]. *水土保持通报*, 2005, 25 ( 4 ): 48—49, 80—114.]
- [ 15 ] Zhang M L, Yang H, Gao M, et al. Study on soil erosion in Dianchi catchment using  $^{137}\text{Cs}$  tracer[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 ( 6 ): 1017—1025. [张明礼, 杨浩, 高明, 等. 利用  $^{137}\text{Cs}$  示踪技术研究滇池流域土壤侵蚀[J]. *土壤学报*, 2008, 45 ( 6 ): 1017—1025.]
- [ 16 ] Hedvall R, Erlandsson B, Mattsson S. Cs-137 in fuels and ash products from biofuel power plants in Sweden[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 1996, 31 ( 1 ): 103—117.
- [ 17 ] Lance J C, McIntyre S C, Naney J W, et al. Measuring sediment movement at low erosion rates using cesium-137[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50 ( 5 ): 1303—1309.
- [ 18 ] Xinbao Z, Higgitt D L, Walling D E. A preliminary assessment of the potential for using Cesium-137 to estimate rates of soil-erosion in the Loess Plateau of China[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1990, 35 ( 3 ): 243—252.
- [ 19 ] Wang Y, Yang M Y, Liu P L. The wavelet analysis on the soil erosion intensity in the black soil straight cultivated slope[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2010, 24 ( 1 ): 98—103, 87. [王禹, 杨明义, 刘普灵. 典型黑土直型坡耕地土壤侵蚀强度的小波分析[J]. *核农学报*, 2010, 24 ( 1 ): 98—103, 87.]
- [ 20 ] Feng Z Z. Impacts of soil erosion and deposition on soil properties and corn yield in the thin layer black soil region[D]. Yangling, China: Northwest A & F University, 2018. [冯志珍. 东北薄层黑土区土壤侵蚀—沉积对土壤性质和玉米产量的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.]
- [ 21 ] Cui M, Cai Q G, Zhu A, et al. Soil erosion along a long slope in the gentle hilly areas of black soil region in Northeast China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2007, 17 ( 3 ): 375—383.
- [ 22 ] Liu Z Q, Yang M Y, Liu P L, et al. Progress and suggestions on the investigation of  $^{137}\text{Cs}$  reference inventory[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2008, 22 ( 6 ): 913—917, 922. [刘志强, 杨明义, 刘普灵, 等.  $^{137}\text{Cs}$  示踪技术背景值研究进展与建议[J]. *核农学报*, 2008, 22 ( 6 ): 913—917, 922.]
- [ 23 ] Zhang X C, Polyakov V O, Liu B Y, et al. Quantifying geostatistical properties of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  at small

- scales for improving sampling design and soil erosion estimation[J]. *Geoderma*, 2019, 334: 155—164.
- [ 24 ] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79 ( 1 ): 61—78.
- [ 25 ] Fei P Y, Liu S G. Performance analysis of several common wavelets[C]. *Proceedings of the seventh annual meeting of the Chinese Electronic Society*, 2001: 380—385. [费佩燕, 刘曙光. 几种常见小波的性能分析[C]. 中国电子学会第七届学术年会论文集, 2001: 380—385.]
- [ 26 ] Tabaru T, Shin S. Relation between spectrum density and wavelet transform of correlation function[J]. *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, 2003, 39 ( 5 ): 425—431.
- [ 27 ] Yan B X, Tang J. Study on reference cesium-137 inventory of black soil in northeast China[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2004, 18 ( 4 ): 33—36. [阎百兴, 汤洁. 东北黑土中  $^{137}\text{Cs}$  背景值研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18 ( 4 ): 33—36.]
- [ 28 ] Yang W G, Zheng F L, Wang Z L, et al. Effects of topography on spatial distribution of soil erosion and deposition on hillslope in the typical of black soil region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 ( 3 ): 572—581. [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.]
- [ 29 ] Zheng F L, Zhang J Q, Liu G, et al. Characteristics of soil erosion on sloping farmlands and key fields for studying compound soil erosion caused by multi-forces in mollisol region of northeast China[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39 ( 4 ): 314—319. [郑粉莉, 张加琼, 刘刚, 等. 东北黑土区坡耕地土壤侵蚀特征与多营力复合侵蚀的研究重点[J]. 水土保持通报, 2019, 39 ( 4 ): 314—319.]
- [ 30 ] Zhang X L, Zhou Q Q, Chen W W, et al. Observation and modeling of black soil wind-blown erosion from cropland in Northeastern China[J]. *Aeolian Research*, 2015, 19: 153—162.
- [ 31 ] Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Classification and classification standard of soil erosion ( sl190-96 ) [M]. Beijing: Water Conservancy and Power Press, 1997. [中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准 ( SL190-96 ) [M]. 北京: 水利电力出版社, 1997.]
- [ 32 ] Zhao P Z, Chen X W, Wang E H. Quantitative assessment of tillage erosion on typical sloping field in black soil area of northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 ( 12 ): 151—157. [赵鹏志, 陈祥伟, 王恩姮. 东北黑土区典型坡面耕作侵蚀定量分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32 ( 12 ): 151—157.]
- [ 33 ] Tiessen K H D, Mehuys G R, Lobb D A, et al. Tillage erosion within potato production systems in Atlantic Canada: I. Measurement of tillage translocation by implements used in seedbed preparation[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 95 ( 1/2 ): 308—319.

(责任编辑: 檀满枝)