

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.040; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.040.

邹惠杰, 刘刚, 舒成博, 等. 内蒙古农牧交错区典型黑土坡耕地土壤侵蚀空间分布特征[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 13-20.

Zou Huijie, Liu Gang, Shu Chengbo, et al. Spatial distribution characteristics of soil erosion on typical black soil slopes in Inner Mongolia's agricultural and pastoral intertwined areas[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 13-20.

## 内蒙古农牧交错区典型黑土坡耕地 土壤侵蚀空间分布特征

邹惠杰<sup>1,2,3</sup>, 刘刚<sup>1,2,4</sup>, 舒成博<sup>4</sup>, 孙波<sup>4</sup>, 刘亚<sup>4</sup>, 张琼<sup>1,2,4</sup>, 郭珍<sup>5</sup>

(1.中国科学院 教育部水土保持与生态环境研究中心, 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;

2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.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; 5.四川华标检测技术有限公司, 成都 610097)

**摘要:** [目的] 定量了解内蒙古典型黑土区土壤侵蚀速率, 探究该区域土壤侵蚀空间分布特征, 阐明土壤侵蚀坡面和区域空间分布规律, 以为区域水土流失治理提供参考。 [方法] 采集内蒙古农牧交错区(海拉尔区、额尔古纳市和牙克石市)典型黑土坡耕地的土壤样品, 利用<sup>137</sup>Cs 示踪技术计算各采样点土壤侵蚀速率, 结合小波分析的方法研究土壤侵蚀在坡面的分布特征。 [结果] (1) 3 个坡面所有采样点<sup>137</sup>Cs 含量均小于背景值(1 984.24 Bq/m<sup>2</sup>), 表现为所有坡面土壤流失。(2) 3 个地区的采样坡面平均侵蚀速率表现为: 海拉尔[6 533.37 t/(km<sup>2</sup> · a)] > 额尔古纳[4 174.35 t/(km<sup>2</sup> · a)] > 牙克石[2 765.87 t/(km<sup>2</sup> · a)]。相同坡面的 3 个纵向断面的平均侵蚀速率相近, 同一断面侵蚀速率的变异程度较高。(3) 土壤侵蚀速率沿坡长呈强弱交替的周期性变化, 但周期长度并不固定。大部分纵向断面存在周期长度为 80~160 m 和 160~200 m 的大小两个周期。部分纵向断面只存在一个周期长度为 100~120 m 的周期。 [结论] 该地区土壤侵蚀在坡面尺度表现为全坡面侵蚀且在纵向呈现周期性特征, 在区域尺度呈现从东到西逐渐增加趋势。

**关键词:** 土壤侵蚀; 典型黑土; 农牧交错带; 小波分析

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0013-08

## Spatial distribution characteristics of soil erosion on typical black soil slopes in Inner Mongolia's agricultural and pastoral intertwined areas

Zou Huijie<sup>1,2,3</sup>, Liu Gang<sup>1,2,4</sup>, Shu Chengbo<sup>4</sup>, Sun Bo<sup>4</sup>, Liu Ya<sup>4</sup>, Zhang Qiong<sup>1,2,4</sup>, Guo Zhen<sup>5</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture, The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5. Sichuan Huabiaoce Testing Technology Co., Ltd., Chengdu 610097, China)

**Abstract:** [Objective] To quantify the rate of soil erosion in typical black soil areas of Inner Mongolia, investigate the spatial distribution characteristics of soil erosion in the region, and elucidate the spatial distribution patterns of slopes and regions soil erosion. The aim is to provide references for regional soil erosion management. [Methods] In this study, soil samples were collected from typical black soil sloping cropland in Inner Mongolia's agricultural and pastoral intertwined areas (Hailar District, Erguna City, and Yakeshi City). The

收稿日期: 2024-03-10

修回日期: 2024-03-24

资助项目: 中国科学院战略性先导科技专项(子课题)“黑土地保护与利用科技创新工程专项”(XDA28010201)

第一作者: 邹惠杰(1996—), 女, 河南周口人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: zouhuijie21@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 刘刚(1982—), 男, 陕西西安人, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: gliu@foxmail.com

<http://stbj.paperonce.org>

$^{137}\text{Cs}$  tracer technology was utilized to calculate the soil erosion rate at each sampling point. Additionally, the method of wavelet analysis was employed to investigate the distribution characteristics of soil erosion on the slopes. [Results] (1) All sampling points on all three slopes had  $^{137}\text{Cs}$  levels lower than the background value ( $1\,984.24\text{ Bq/m}^2$ ), indicating soil erosion on all slopes. (2) The average erosion rate of the slopes in the three areas was in the order that Hailar [ $6\,533.37\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ] > Erguna [ $4\,174.35\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ] > Yakeshi [ $2\,765.87\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ]. The average erosion rates of the three longitudinal sections of the same slope were similar, but the coefficient of variation of the erosion rates within the same section was high. (3) The soil erosion rate varied periodically of strength and weakness along the slope length, but the cycle length was not constant. The most of longitudinal sections exhibited two cycles of change. The small cycle ranges from 80 to 160 m, while the large cycle ranges from 160 to 200 m. Some longitudinal sections only had one cycle of change, with a length ranging from 100 to 120 m. [Conclusion] Soil erosion in this area exhibits full-slope erosion at the slope scale and displays cyclic characteristics in the longitudinal direction. There is a gradual increase trend from east to west at the regional scale. The findings of this study can offer a scientific basis and data support for soil erosion management in the study area.

**Keywords:** soil erosion; typical black soil; farming-pastoral zone; wavelet analysis

内蒙古典型黑土区位于东北地区西部,主要分布在呼伦贝尔市,是东北黑土区的重要组成部分。该地区的草原与林地过渡地带的土壤多为黑钙土,养分含量较高,适合发展种植业。呼伦贝尔耕地开垦于 1960 年<sup>[1]</sup>,由于人类的过度利用与开垦,该地区植被覆盖率从早期的 95% 下降到目前的 60%~80%,且土地退化严重,对农牧业造成不利影响<sup>[2-3]</sup>。水土流失是该地区土地退化的一个重要原因。根据内蒙古自治区 2022 年水土保持公报<sup>[4]</sup>,呼伦贝尔市水土流失面积  $32\,808.79\text{ km}^2$ , 占该地区土地面积的 12.97%,风蚀和水蚀面积分别为  $16\,261.03\text{ km}^2$ ,  $16\,547.76\text{ km}^2$ 。另外,呼伦贝尔市是中国纬度较高的城市,存在季节性冻融。由于风蚀、水蚀和冻融侵蚀共存,导致该地区侵蚀特征异常复杂。因此,调查与研究内蒙古农牧交错区坡耕地土壤侵蚀,对了解多营力作用的黑土侵蚀和开展针对性地黑土地保护研究具有重要意义。

有研究发现近 20 年东北地区总体水土流失略有加剧趋势<sup>[5]</sup>。东北地区可划分为多个侵蚀区<sup>[6]</sup>,各侵蚀区侵蚀特征与治理模式不同。前人的研究多集中在松嫩平原,研究发现该地区从东北到西南土壤侵蚀速率逐渐增加<sup>[5,7-8]</sup>。然而,内蒙古典型黑土区土壤侵蚀的区域分布规律尚不明确。另外,内蒙古典型黑土坡耕地位于草地、林地过渡地带,土地利用为农牧交错,区域土地利用与规划具有时空波动性强的特点<sup>[9-10]</sup>。了解该区域土壤侵蚀的区域空间分布对有效利用和合理规划该区域黑土地至关重要。

东北黑土坡面侵蚀速率会随坡长出现强弱交替的波动变化<sup>[11-15]</sup>。王禹等<sup>[14]</sup>发现东北黑土区直型坡存在坡面侵蚀强弱交替变化的特征,变化周期长度为 142 m。

Shen<sup>[12]</sup> 和刘华征<sup>[15]</sup>等发现,直型、凹型和凸型坡面均存在侵蚀速率强弱交替的周期性变化。但是,以往许多研究结果对周期长度存在争议,且研究主要集中在松嫩平原典型黑土区<sup>[11-15]</sup>,对于内蒙古农牧交错区坡面侵蚀周期性变化的关注不足。内蒙古农牧交错区风蚀、水蚀和冻融侵蚀共存,且风蚀速率与水蚀速率在坡面存在不同的周期性变化规律<sup>[16]</sup>,但黑土坡耕地的复合侵蚀空间分布规律尚不清楚<sup>[4]</sup>。

本研究利用 $^{137}\text{Cs}$ 示踪技术研究内蒙古农牧交错区典型黑土坡耕地土壤侵蚀,结合小波分析法掌握坡面尺度上土壤侵蚀速率的空间分布特征,以期为该地区土壤侵蚀防治和黑土资源保护提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

呼伦贝尔市位于  $47^{\circ}05' - 53^{\circ}20'\text{N}$ ,  $115^{\circ}13' - 126^{\circ}04'\text{E}$ 。全市气候总特征呈现为冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨;年温度差、日温度差大;主风向为西南风。大兴安岭以东北—西南走向纵贯呼伦贝尔市中部,形成林区—草原—低山丘陵与河谷平原三大地形单元。研究区主要位于草原与林地的过渡地带,土壤类型为黑钙土,区域适于发展种植业。本研究选取典型坡耕地为采样坡面,采样位置分别在海拉尔区、额尔古纳市和牙克石市境内(图 1)。选择坡长 400 m 左右,坡面宽度大于 100 m,坡度为  $2^{\circ} \sim 4^{\circ}$  的直型坡。研究区平均气温  $-4.0 \sim 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年平均降水量  $200 \sim 477.9\text{ mm}$ 。3 个采样位置的土壤质地均为粉黏土(国际制土壤分级标准)。研究区耕作方式为顺坡无垄耕作,耕层深度 20—30 cm,耕层平均土壤容重  $1.20\text{ g/cm}^3$ 。

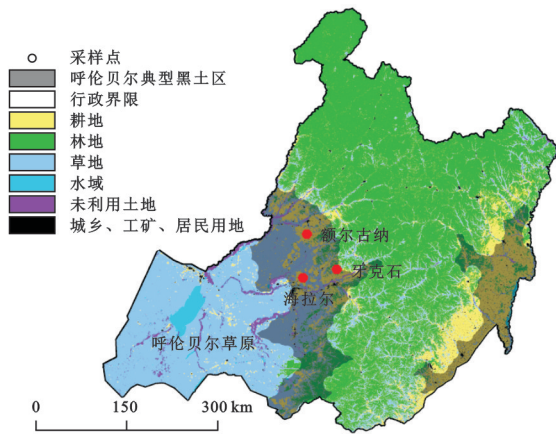


图 1 研究区土地利用及采样点分布图

(审图号 GS(2020)4624 号)

Fig. 1 Distribution of land use and sampling sites in the research area

## 1.2 样品采集

3 个研究区的背景值均选取在采样坡面附近的次生林地。林地地处开阔地带,地势平坦,无明显侵蚀或沉积,且长期无耕作、放牧和施工等人为扰动。各研究区均按逐步加密网格法<sup>[17]</sup>采集 15 个土壤样品进行混合作为背景样点。土壤背景值按 5 cm 深度间隔自上而下分 10 层采集样品,共采集 50 cm 深。

采集坡面土壤样品时,根据该地区土壤分层样品,确定<sup>137</sup>Cs 主要在土壤表层 25 cm 深度,为保证土壤全样采集深度涵盖<sup>137</sup>Cs 在土壤中的分布深度。土壤全样采集深度为 30 cm。用半径 2 cm 的土钻采集土壤全样,采用网格化采样方式(图 2)。将每个坡面设置 3 个断面,间隔 50 m。每个断面沿坡面从坡顶到坡脚布设采样点,根据坡长每个断面布设 10~11 个采样点,相邻采样点间隔 40 m。每个采样点周围以 1 m 为半径,按梅花状采集 5 个土壤样品,并将 5 个土壤样品混合作为 1 个样点的土壤样品。

## 1.3 样品处理与测定

将采集好的<sup>137</sup>Cs 样品带回实验室,将样品晾干、去除杂物、称重、研磨、过筛(2 mm)。将过筛后的土壤样品装入样品盒中,称取装盒前后的重量,装盒土壤样品重量在 300 g 左右。<sup>137</sup>Cs 样品测定是在中国科学院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进行的。使用 ORTEC 高纯锗探测器多道数字伽玛能谱分析仪(GMX-50220, AMETEK, USA),在 661.62 keV 处下测量土壤样品中<sup>137</sup>Cs 的全峰面积,测量时间为 43 200 s,在 95% 的置信度水平下,仪器重复<sup>137</sup>Cs 的测试误差±5%。研究区耕作年限与<sup>137</sup>Cs 沉降年限接近,因此采用农耕地土壤侵蚀计算模型<sup>[18]</sup>:

$$Y = 10^3 dB \left[ 1 - \left( \frac{A_t}{A_{ref}} \right)^{1/(t-1963)} \right] \quad (1)$$

式中:Y 为年平均土壤流失量(t/(km<sup>2</sup>·a));d 为犁耕层深度(m);B 为土壤容重(km/m<sup>3</sup>);A<sub>ref</sub> 为<sup>137</sup>Cs 采样地点的背景值(Bq/m<sup>2</sup>);A<sub>t</sub> 为采样点<sup>137</sup>Cs 的测量值(Bq/m<sup>2</sup>);t 为采样年份。

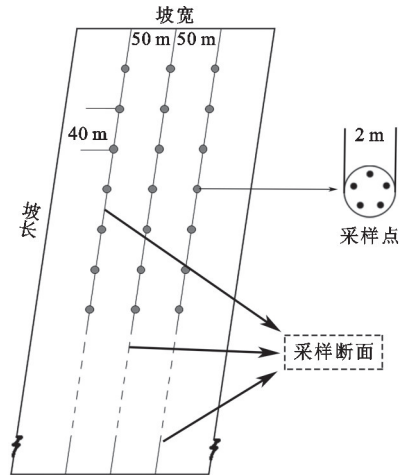


图 2 坡面采样点分布

Fig. 2 Distribution of sampling points on the slope

## 1.4 数据分析

小波函数可以用于研究时间或空间数据的周期性变化,可以利用小波函数研究土壤侵蚀沿坡长的周期性变化。小波分析是通过母小波的变化代替原有信号周期性变化的一种分析方式。根据以往的研究<sup>[11-13]</sup>,选择 Morlet 小波作为母小波进行周期性分析。其表达式为:

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

式中: $\varphi(t)$  为母小波函数; $f_b$  为母小波带宽,取值为 1; $f_c$  为母小波中心频率,取值为 1.5; $i$  代表虚数。

对母小波进行积分变化,通过母小波和原始信号获得小波系数,表达式为:

$$W_y(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int y(t) \bar{\varphi} \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (3)$$

式中: $W_y(a, b)$  表示小波系数; $y(t)$  为原始信号; $\bar{\varphi}(t)$  为小波母的共轭函数; $a$  为尺度参数,代表母小波的伸缩; $b$  为平移因子,代表母小波的平移。

小波方差是描述原始信号与母小波相关度的量。某一尺度下原始信号与母小波相关度高,小波方差会出现极大值。小波方差越大,对应尺度下的周期性特征越明显。小波方差是小波系数平方和的均值,其表达式为:

$$\text{var}(a) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |W(a, y_i)|^2 \quad (4)$$

式中: $\text{var}(a)$  表示在  $a$  尺度下的小波方差; $n$  为  $a$  尺度下小波系数的个数。



本研究数据统计分析采用的软件包括 SPSS 25, Origin 2021, Matlab R2018。小波分析主要通过 Matlab R2018 中的小波分析工具实现。

## 2 结果与分析

### 2.1 研究区 $^{137}\text{Cs}$ 含量及其分布

土壤中 $^{137}\text{Cs}$ 会随时间衰减,大气中的 $^{137}\text{Cs}$ 会随时间沉降, $^{137}\text{Cs}$ 背景值会随时间变化。近几年的研究表明,东北地区土壤中 $^{137}\text{Cs}$ 的背景值为 $1\,751\sim 2\,081\text{ Bq/m}^2$ <sup>[19-20]</sup>。本文研究区 $^{137}\text{Cs}$ 背景值计算结

果是 $1\,984.24\text{ Bq/m}^2$ ,与近几年的研究结果相似,确定研究区的 $^{137}\text{Cs}$ 背景值为 $1\,984.24\text{ Bq/m}^2$ 。

研究区坡面 $^{137}\text{Cs}$ 含量在坡面的分布如图 3 所示。研究区所有采样点的 $^{137}\text{Cs}$ 含量均小于 $^{137}\text{Cs}$ 背景值, $^{137}\text{Cs}$ 含量在各坡面总体表现为流失。目前,牙克石坡面 $^{137}\text{Cs}$ 含量最高,流失最少;海拉尔坡面 $^{137}\text{Cs}$ 含量最低,流失最多。在相同坡面的不同断面 $^{137}\text{Cs}$ 含量沿坡长变化趋势相似,海拉尔 $^{137}\text{Cs}$ 含量范围为 $159.12\sim 580.39\text{ Bq/m}^2$ ;额尔古纳 $^{137}\text{Cs}$ 含量范围为 $188.35\sim 1\,891.92\text{ Bq/m}^2$ ;牙克石 $^{137}\text{Cs}$ 含量范围为 $509.80\sim 1\,633.47\text{ Bq/m}^2$ 。

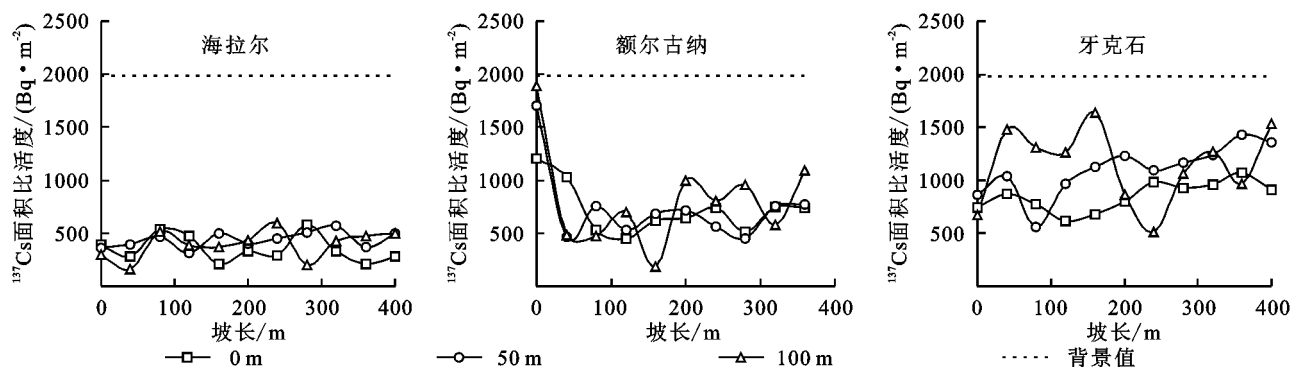


图 3 在 3 个采样坡面(海拉尔,额尔古纳,牙克石) $^{137}\text{Cs}$ 活度沿坡长的分布

Fig. 3 Distribution of  $^{137}\text{Cs}$  activity along the slope length on three sampling slopes (Hailar, Erguna, Yakeshi)

### 2.2 土壤侵蚀速率空间分布特征

3 个地区坡面侵蚀速率空间分布如图 4 所示,3 个地区均表现出全坡面侵蚀,且土壤侵蚀远高于东北黑土区土壤容许流失量 $[200\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})]$ 。海拉尔地区坡面侵蚀速率最大,平均值为 $6\,533.37\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ;额尔古纳市坡面侵蚀速率居中,平均值为 $4\,174.35\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ;牙克石坡面侵蚀速率最小,平均值为 $2\,765.87\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。总体表现为从林区到草原过渡方向,靠近林区位置土壤侵蚀速率低,靠近草原位置土壤侵蚀速率高。

研究区坡面土壤侵蚀空间分布如图 5 所示。海拉尔地区坡面侵蚀速率范围是 $4\,774.88\sim 9\,883.94\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ,坡面侵蚀变异率最小 $19.69\%$ ;额尔古纳地区坡面侵蚀速率范围是 $190.51\sim 9\,236.25\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ,坡面侵蚀变异率居中 $41.40\%$ ;牙克石地区坡面侵蚀速率范围在 $776.87\sim 5\,374.79\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ,坡面侵蚀变异率最大 $41.84\%$ 。

在同一个采样坡面,不同纵向断面的平均侵蚀速率相近(表 1)。海拉尔 3 个断面的平均侵蚀速率分别为 $6\,973.69\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ , $6\,014.21\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 和 $6\,612.22\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ,断面间变异率为 $6.06\%$ 。额尔古纳断面的平均侵蚀速率分别为 $4\,188.83\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ , $4\,204.62\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 和 $4\,129.60\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ,不同断面间平均侵蚀速率变异程度极低,为 $0.77\%$ 。相比海拉尔与额尔古纳,牙克石的不同断面间侵蚀速率的变异

程度较高,为 $16.8\%$ 。坡宽 $0\text{ m}$ 位置断面的平均侵蚀速率( $3\,422.29\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ )明显高于另外两个断面( $2\,464.01\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ , $2\,411.31\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ )。

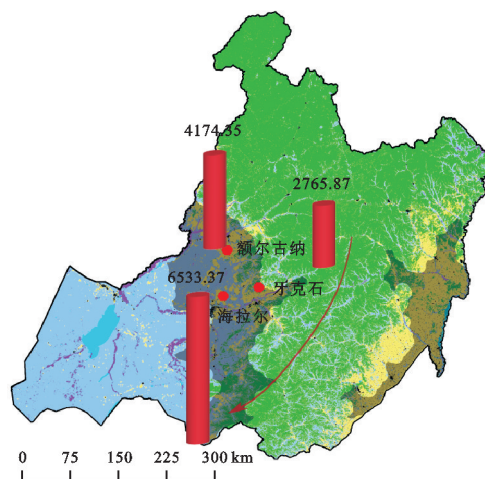


图 4 土壤侵蚀速率在 3 个采样区(海拉尔,额尔古纳,牙克石)的分布

Fig. 4 Distribution of soil erosion rates in the three sampling areas (Hailar, Ergun, Yakeshi)

不同断面的平均侵蚀速率相近,但是同一断面不同位置土壤侵蚀速率的变异程度较大(表 2)。海拉尔地区坡面上 3 个断面的土壤侵蚀变异程度均为中等变异。额尔古纳和牙克石地区坡面的 3 个纵断面中,土壤侵蚀速率变异程度为一个断面( $0\text{ m}$ 位置)中等变异( $27.36\%$ , $18.65\%$ ),两个断面( $50\text{ m}$ 和 $100\text{ m}$ )高变异。

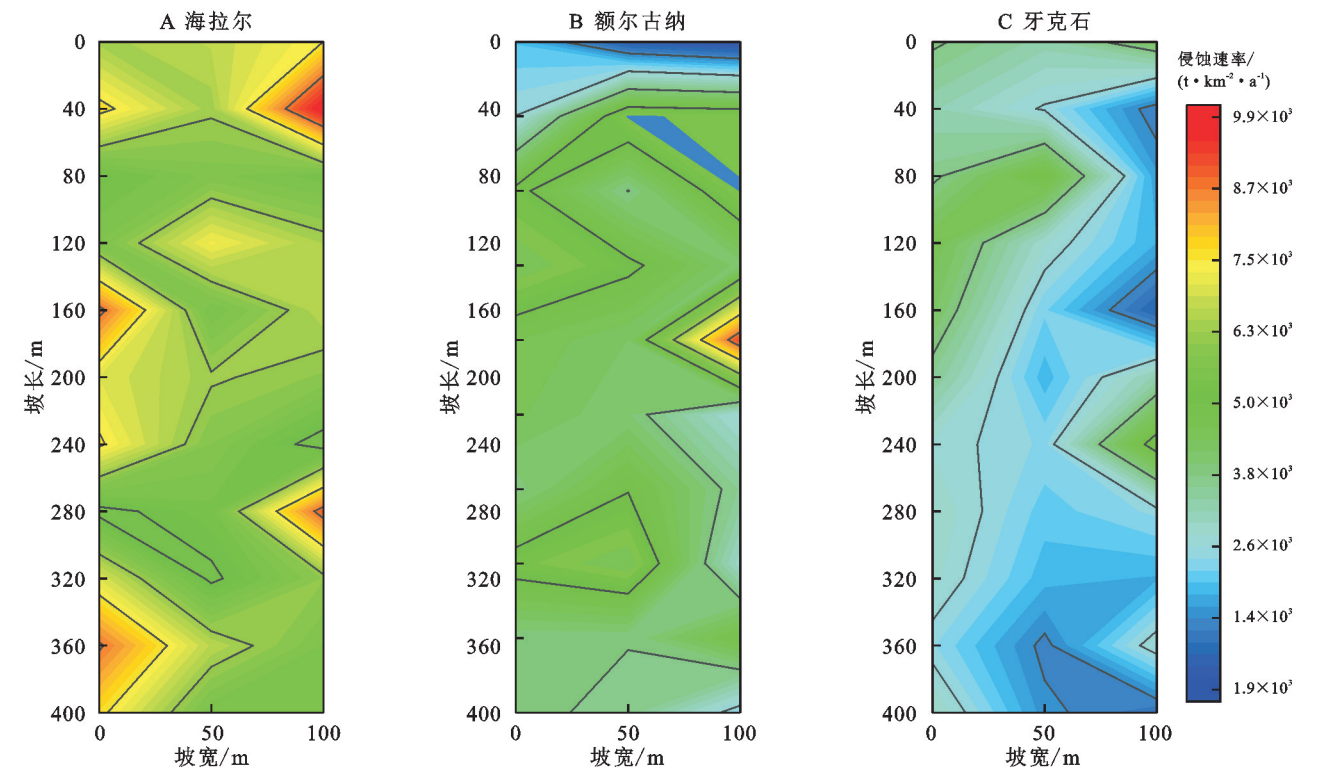


图 5 土壤侵蚀速率在 3 个采样区坡面分布

Fig. 5 Distribution of soil erosion rates on slopes in three sampling areas

表 1 3 个研究区坡面不同采样断面土壤侵蚀速率

Table 1 Soil erosion rate at different sampling sections on slopes within three study areas

侵蚀速率/ ( $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ )	海拉尔			额尔古纳			牙克石		
	0 m	50 m	100 m	0 m	50 m	100 m	0 m	50 m	100 m
最小值	4867.17	4923.09	4774.88	1984.22	611.39	190.51	2449.57	1296.50	776.87
最大值	8874.70	7312.71	9883.94	5878.65	5861.72	9236.25	4629.16	5023.49	5374.79
平均值	6973.69	6014.21	6612.22	4188.83	4204.62	4129.60	3422.29	2464.01	2411.31
变异系数/%	6.06			0.77			16.80		

表 2 3 个研究区坡面不同采样断面土壤侵蚀速率的变异系数

Table 2 Variation coefficients of soil erosion rates at different sampling section on slopes within three study areas

研究区 断面位置	海拉尔			额尔古纳			牙克石		
	0 m	50 m	100 m	0 m	50 m	100 m	0 m	50 m	100 m
变异系数/%	18.26	11.21	22.77	27.36	33.64	55.97	18.65	39.79	56.84

2.3 土壤侵蚀沿坡长的变化特征

小波分析结果表明(图 6),海拉尔地区一个纵断面(0 m 位置)在坡长尺度 4 和坡长尺度 7 存在小波方差的极大值,说明在对应坡长尺度下的周期性特征比较明显。在坡面尺度 4,发现坡面存在土壤侵蚀速率强弱变化周期,周期长度为 90~100 m。在坡面尺度 7,发现坡面存周期长度为 195 m 土壤侵蚀速率的强弱变化周期。小波方差的极大值越大,数据的周期性越明显。因此,海拉尔纵断面(0 m 位置)的周期中,坡面尺度 7 对应的周期为土壤侵蚀速率强弱变化的主周期,周期长度为 195 m;坡面尺度 4 对应的是第二周期。

其他断面的土壤侵蚀速率也存在类似的强弱周期变化(表 3)。海拉尔的 3 个断面在坡长尺度 3 或 4 存在 90~120 m 的短周期,在坡长尺度 6 或 7 存在 160~200 m 的长周期。在额尔古纳的 3 个断面中,其中两个断面在坡长尺度 3 存在 80~90 m 的周期,在坡长尺度 7 存在 172~177 m 的周期;另外一个断面只在坡长尺度 4 存在一个 100 m 的周期。在牙克石的 3 个断面的结果与额尔古纳相似,在其中两个断面(0 m 和 50 m)存在大小两个周期;另外一个断面只存在一个周期。

总体上,坡面土壤侵蚀速率存在周期性波动,通常

存在长短两个周期,短周期长度平均为 85~140 m,长周期长度为 160~200 m。两个周期中,主周期长度不确定,大小周期都可能是主周期。部分断面只存在一个周期,侵蚀速率波动的周期长度为 100~120 m。

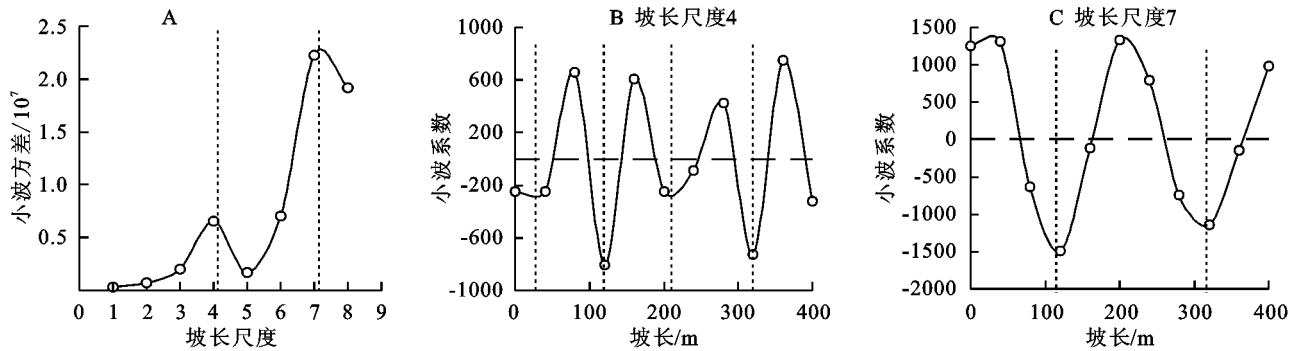


图 6 海拉尔坡宽 0 m 位置断面侵蚀速率小波分析结果

Fig. 6 Wavelet analyses of the erosion rate of the section at 0 m slope width in Hailar

表 3 3 个研究区不同采样断面的侵蚀速率强弱变化周期长度

Table 3 Cycle length at different sampling sections on slopes within three study areas

研究区	断面位置	坡长尺度	周期长度/m	平均周期长度/m	坡长尺度	周期长度/m
海拉尔	0 m	4	90;90;100	96.67	7*	195
	50 m	3*	120;120	120.00	7	200
	100 m	3*	90;120	111.00	6	160
额尔古纳	0 m	3	80;90	85.00	7*	177
	50 m	3	80;90	85.00	7*	172
	100 m	4	100;100	100.00		
牙克石	0 m	2	120;160	140.00	6*	160
	50 m	3	90;80	85.00	7*	190
	100 m	4	115;120	117.50		

注: \*代表小波系数极值的最大值所在坡长尺度,即变化周期的主周期。

### 3 讨论

#### 3.1 复合侵蚀空间分布

风蚀与水蚀对坡面土壤侵蚀—沉积的影响存在差异。杨维鸽等<sup>[21]</sup>在东北黑土区的研究发现坡脚处沉积明显。水力侵蚀在流向和边界方面比较确定,土壤颗粒随坡面水流向下,容易在地势平缓的坡脚处发生沉积。本研究中坡面侵蚀分布为全坡面侵蚀,坡脚处未出现明显沉积。原因可能是研究区侵蚀类型为复合侵蚀,风蚀会改变水蚀引起的侵蚀—沉积分布格局。近地表风速变化复杂,具有局地性、瞬变性和间歇性<sup>[22]</sup>,风蚀沉积可能发生在防风林带。Fang 等<sup>[23]</sup>发现在东北中西部地区,除了一些洼地和防护林带沿线的土壤沉积外,其他采样点几乎都表现为侵蚀。另外,Wang 等<sup>[16]</sup>在黑土区的研究也发现风蚀与水蚀速率在坡面分布具有不同的规律。因此,复合侵蚀在坡面的空间分布更复杂。

与风蚀、水蚀直接影响土壤再分配不同,冻融侵蚀通常通过影响坡面土壤结构间接影响坡面土壤再分配。有研究表明,土壤抗剪强度与冻融循环次数之间存在极

显著负相关关系<sup>[24]</sup>,土壤抗蚀能力在土壤冻融循环过程中被减弱,加剧了后期的风蚀与水蚀速率<sup>[25-26]</sup>。因此,复合侵蚀存在非线性的叠加关系<sup>[27]</sup>。内蒙古农牧交错区西部靠近草原,东部靠近林地,相比东部靠近林区的位置,西部靠近草原的地表风更强。因此,土壤侵蚀速率从东部到西部呈现逐渐增加的趋势。

#### 3.2 复合侵蚀坡面的周期性变化

以往在以水蚀为主的地区,有研究发现坡面侵蚀速率沿坡长存在强弱交替的周期性变化<sup>[11-15]</sup>。土壤侵蚀强弱交替的周期性变化特征可能与流体(气流、水流)挟沙饱和—不饱和的交替变化过程有关。在其他条件一致的情况下,水流挟沙变化过程一致。Shen<sup>[12]</sup>和王小康<sup>[13]</sup>等在克山县的研究获得一致的研究结果,分别发现坡长 140 m 直坡的波动周期为 45.1 m 和 45 m。另外,地形因素改变可能会影响土壤侵蚀的强弱交替的变化周期。坡长会影响侵蚀周期长度,如 Shen<sup>[12]</sup>、王小康<sup>[13]</sup>、王禹<sup>[14]</sup>、刘华征<sup>[15]</sup>等分别研究克山县坡长 140 m,140 m,500 m 和 1 020 m 的直型坡坡面,土壤侵蚀周期长度分别为 45.1 m, 45 m,140 m 和 380 m。另外,坡型也会影响侵蚀周

期长度,如 Shen<sup>[12]</sup> 和刘华征<sup>[15]</sup> 等发现相同坡长,不同坡型的坡面波动周期长度也不同。地形因素存在差异可能是不同研究中土壤侵蚀周期长度的结果不一致的主要原因<sup>[11-15]</sup>。

与以往研究相似,本研究在风力、水力和季节性冻融共存的复合侵蚀坡面也发现了侵蚀速率存在周期性变化特征。然而,本研究中3个地区坡面的地形(包括坡长、坡度和坡型)基本一致,其土壤侵蚀速率强弱交替周期的长度并不完全一致。复合侵蚀坡面的周期性波动变化是风蚀与水蚀共同作用的结果,风蚀与水蚀在坡面的分布规律不一致<sup>[22,28]</sup>,且风蚀在坡面的分布复杂<sup>[16]</sup>,所以复合侵蚀坡面的土壤侵蚀波动周期长度的变异更大。在未来可以分别研究复合侵蚀中风蚀和水蚀沿坡面强弱交替的周期性变化,其结果将有利于更准确了解复合侵蚀沿坡长的周期性变化规律。

## 4 结论

本研究通过<sup>137</sup>Cs核素示踪技术结合小波分析方法研究了内蒙古农牧交错区典型黑土坡耕地土壤侵蚀空间分布。

(1) 研究区的<sup>137</sup>Cs背景值为1 984.24 Bq/m<sup>2</sup>,3个地区的坡面<sup>137</sup>Cs含量均低于背景值,表现出全坡面土壤流失。

(2) 在区域尺度上从东到西,牙克石,额尔古纳,海拉尔土壤平均侵蚀速率依次增加,分别是2 765.87 t/(km<sup>2</sup>·a),4 174.35 t/(km<sup>2</sup>·a),6 533.37 t/(km<sup>2</sup>·a)。内蒙古农牧交错区典型黑土整体呈现出,从东到西土壤侵蚀逐渐增加,土地利用林地到草地过渡方向土壤侵蚀逐渐增加。在坡面尺度,同一坡面不同位置的纵断面的平均土壤侵蚀速率相近。同一断面不同坡长位置的所有样点的土壤侵蚀速率的变异程度为中高变异。

(3) 坡面土壤侵蚀速率沿坡长存在周期性变化。大部分纵断面土壤侵蚀存在大小两个周期,周期长度的范围分别是80~160 m和160~200 m。部分断面只存在一个长度100~120 m的周期。

### 参考文献(References):

- [1] 康庆禹,钟烈元.呼伦贝尔草原农垦的经验与教训[J].资源科学,1981,(3):70-81.  
Kang Q Y, Zhong L Y. Experiences and lessons learnt from the reclamation of the Hulunbeier grasslands[J]. Resources Science, 1981, (3):70-81.
- [2] 张蕾,郑利远,于贺,等.呼伦贝尔市农牧交错区典型土壤剖面理化性状特征分析[J].中国农学通报,2018,34(20):92-95.  
Zhang L, Zheng L Y, Yu H, et al. Soil physical and chemical properties of typical soil profiles in the agro-pastoral zone in Hulunbuir [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018,34(20):92-95.
- [3] 方辉,张永康,高照良.农牧交错区生态建设与草业开发研究[J].生态经济,2006,(7):56-59.  
Fang H, Zhang Y K, Gao Z L. Eco-environmental construction and the development of grass industry in the farming-pastoral ecotone [J]. Ecological Economy, 2006, (7):56-59.
- [4] 000014348/2023-06240,内蒙古自治区水土保持公报(2022年度)[S].2023,5-6.  
000014348/2023-06240, Water and soil conservation Bulletin of Inner Mongolia Autonomous region (2022) [S].2023, 5-6.
- [5] Wang S, Xu X, Huang L. Spatial and temporal variability of soil erosion in northeast China from 2000 to 2020 [J]. Remote Sensing, 2022,15(1):225.
- [6] 范昊明,王铁良,蔡强国,等.东北地区土壤侵蚀分异特征与分区治理模式研究[J].水土保持研究,2008,15(2):69-72.  
Fan H M, Wang T L, Cai G Q, et al. Study on zonation differentiation of soil erosion and the model soil and water conservation in northeast China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008,15(2):69-72.
- [7] Wang H, Yang S L, Wang Y D, et al. Rates and causes of black soil erosion in Northeast China [J]. Catena, 2022,214:106250.
- [8] 张光辉,杨扬,刘瑛娜,等.东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J].水土保持学报,2022,36(2):1-12.  
Zhang G H, Yang Y, Liu Y N, et al. Advances and prospects of soil erosion research in the black soil region of northeast China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(2):1-12.
- [9] 张天琪,杨光,刘峰,等.呼伦贝尔沙地2000—2020年土地利用变化及生态服务价值[J].水土保持通报,2021,41(4):331-338,349,369.  
Zhang T Q, Yang G, Liu F, et al. Land use change and ecological service value of Hulun Buir sandy land from 2000 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(4):331-338,349,369.
- [10] 杨仙保.呼伦贝尔沙地及其周边土地利用变化与人为活动关系研究[D].昆明:西南林业大学,2023.  
Yang X B. Relationship between human activities and land use changes in Hulunbuir sandy land and its surrounding areas [D]. Kunming: School of Geography and Ecotourism, 2023.
- [11] Liu C, Liu G, Dan C, et al. Variability in mollic epipedon thickness in response to soil erosion-deposition rates along slopes in Northeast China [J]. Soil and Till-



- age Research, 2023,227:105616.
- [12] Shen, Y L, Gu, et al. Predicting soil erosion and deposition on sloping farmland with different shapes in northeast China by using  $^{137}\text{Cs}$ [J]. Catena, 2023,229:107238.
- [13] 王小康,谷举,刘刚,等.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 X K, Gu J, Liu G, et al. 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.
- [14] 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.
- 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.
- [15] 刘华征,贾燕锋,范昊明,等.东北松嫩典型黑土区长缓坡耕地土壤侵蚀沿坡长变化规律及其对土壤质量的影响[J].自然资源学报,2022,37(9):2292-2305.
- Liu H Z, Jia Y F, Fan H M, et al. Variation of soil erosion intensity along the long gentle farming slopes and its influence on soil quality in the typical Mollisol region, Songnen Plain, Northeast China[J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(9):2292-2305.
- [16] Wang L, Zheng F, Liu G, et al. Seasonal changes of soil erosion and its spatial distribution on a long gentle hillslope in the Chinese Mollisol region[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021,9(3):394-404.
- [17] 刘志强,杨明义,刘普灵,等.确定 $^{137}\text{Cs}$ 背景值所需的采样点数与采样面积[J].核农学报,2009,23(3):482-486.
- Liu Z Q, Yang M Y, Liu P L, et al. Sampling numbers and area for the confirmation of  $^{137}\text{Cs}$  reference inventory[J]. Journal of Nuclear Agricultural, 2009,23(3):482-486.
- [18] 张信宝,李少龙,王成华,等.黄土高原小流域泥沙来源的 $^{137}\text{Cs}$ 法研究[J].科学通报,1989,34(3):210-213.
- Zhang X B, Li S L, Wang C H, et al. Study on source of mud and sand in small watershed of Loess Plateau by  $^{137}\text{Cs}$  method[J]. Chinese Science Bulletin, 1989,34(3):210-213.
- [19] 莫帅豪.典型东北黑土区农地侵蚀对土壤质量的影响评价[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2023.
- Mo S H. Assessing impacts of soil erosion on soil quality in sloping farmland of Chinese Mollisol region[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [20] 张威,潘少明,张克新,等.中国大陆 Cs-137 背景值研究[J].地理学报,2015,70(9):1477-1490.
- Zhang W, Pan S M, Zhang K X, et al. Study of the cesium-137 reference inventory in the mainland of China [J]. Acta Geographica Sinica, 2015,70(9):1477-1490.
- [21] 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.
- 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.
- [22] 张飞民. WRF-3 DVAR 对近地层风速预报改进的数值试验[D].兰州:兰州大学,2014.
- Zhang F M. The improvement experiments on near surface wind forecasting with WRF-3 DVAR [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.
- [23] Fang H Y, Sun L Y, Qi D L, et al. Using  $^{137}\text{Cs}$  technique to quantify soil erosion and deposition rates in an agricultural catchment in the black soil region, Northeast China[J]. Geomorphology, 2012,169:142-150.
- [24] 左小锋,王磊,郑粉莉,等.冻融循环和土壤性质对东北黑土抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2020,34(2):30-35,42.
- Zuo X F, Wang L, Zheng F L, et al. Effects of freeze-thaw cycles and soil properties on Mollisol shear strength in Chinese black soil region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(2):30-35,42.
- [25] 桑琦明,郑粉莉,王一菲,等.东北黑土区冻融、风力、水力交互作用对坡面侵蚀的影响[J].水土保持学报,2021,35(2):87-95.
- Sang Q M, Zheng F L, Wang Y F, et al. An experimental study on freeze-thaw, wind and water agents impacts on hillslope soil erosion in Chinese Mollisol region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(2):87-95.
- [26] 王一菲,郑粉莉,张加琼,等.冻融作用对典型黑土土壤风蚀的影响[J].水土保持学报,2020,34(5):34-41.
- Wang Y F, Zheng F L, Zhang J Q, et al. Effects of freeze-thaw on wind erosion in the typical Mollisol region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(5):34-41.
- [27] 张攀,姚文艺,肖培青,等.黄河流域砒砂岩区多动力侵蚀交互叠加效应研究[J].水利学报,2022,53(1):109-116.
- Zhang P, Yao W Y, Xiao P Q, et al. Interactive superposition effect of multi-dynamic erosion in the Pisha sandstone area of the Yellow River basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022,53(1):109-116.
- [28] Zou H J, Liu G, Zhang Q, et al. Investigating the effects of water and wind erosion on different hillslope aspects on the Loess Plateau of China by using  $^{137}\text{Cs}$  [J]. Catena, 2024,238:107879.