

# 中国全新世土壤侵蚀事件研究进展与展望

胡家乐, 侯崇俊, 刘思颖, 史晴, 李宏印, 赵刘慧, 梁晨钰, 李晓刚\*

商洛学院城乡规划与建筑工程学院, 陕西 商洛

收稿日期: 2025年2月9日; 录用日期: 2025年3月12日; 发布日期: 2025年3月27日

## 摘要

为了更好地把握全新世土壤侵蚀研究方向, 从研究区域、研究载体、定量计算方法、时间分辨率等四个方面回顾了我国全新世土壤侵蚀研究进展; 进而从学科集成土壤侵蚀原因的研究、土壤侵蚀事件精度的提高、研究手段现代化模拟预测等三个方面进行了展望。

## 关键词

土壤侵蚀, 全新世, 研究进展

# Research Progress and Prospects of Holocene Soil Erosion Events in China

Jiale Hu, Chongjun Hou, Siying Liu, Qing Shi, Hongyin Li, Liuhui Zhao, Chenyu Liang,  
Xiaogang Li\*

School of Urban, Rural Planning and Architectural Engineering, Shangluo University, Shangluo Shaanxi

Received: Feb. 9<sup>th</sup>, 2025; accepted: Mar. 12<sup>th</sup>, 2025; published: Mar. 27<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

To better grasp the direction of Holocene soil erosion research, this paper reviews the progress of Holocene soil erosion studies in China from four aspects: research regions, research carriers, quantitative calculation methods, and temporal resolution. Furthermore, it provides a research outlook focusing on three areas: interdisciplinary integration in studying the causes of soil erosion, improving the accuracy of soil erosion event dating, and the modernization of research methods for simulation and prediction.

\*通讯作者。

文章引用: 胡家乐, 侯崇俊, 刘思颖, 史晴, 李宏印, 赵刘慧, 梁晨钰, 李晓刚. 中国全新世土壤侵蚀事件研究进展与展望[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(3): 390-397. DOI: 10.12677/aep.2025.153046

## Keywords

### Soil Erosion, Holocene, Research Progress

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

土壤侵蚀是我国最重要的生态环境问题之一，尤其是黄土高原地区[1]。“山水林田湖草沙生命共同体”理念是治理土壤侵蚀、服务黄河流域生态保护和西部大开发等国家重大战略的基本遵循。土壤侵蚀是地表土壤受到水、风等自然外营力以及人类活动不合理生产作用下，导致土壤消损、水土流失、土地退化等生态环境问题[2]。全新世是最年轻的地质时期，也是与古代人类社会和现今自然环境直接联系的一个时期[3]。现今的土壤侵蚀是在全新世时期土壤侵蚀基础上形成的。深入研究全新世土壤侵蚀事件，可以为现代土壤侵蚀作用提供历史背景，对认识现代土壤侵蚀的形成、预测未来土壤侵蚀具有重要意义。本研究回顾中国近 40 年全新世土壤侵蚀研究历程并提出未来展望，服务于国家生态文明建设。

## 2. 研究进展

### 2.1. 研究区域

在中国知网(CNKI)中英文数据库中，用“全新世(Holocene)”、“土壤侵蚀(soil erosion)”和“中国(China)”作为主题并列搜索后，结果显示最早对中国全新世土壤侵蚀做研究并发表论文的是中国科学院地理研究所景可和陈永宗。论文通过黄河下游的冲积扇估算黄土高原全新世自然侵蚀率 7.9%，1983 年发表在《地理研究》上[4]。

土壤侵蚀具有一定的普遍性，只要降水量或者降水强度超过临界点都会产生面状土壤侵蚀，无论是山地还是丘陵。从表 1 可知，近 40 年中国全新世土壤侵蚀研究区域基本覆盖全国全部范围，除地处西北内陆深处的新疆、内蒙古和东南沿海的低山丘陵区。由于黄土高原是我国的生态环境脆弱区和生态保护重点区，抵抗人为和自然因素破坏的能力较差[5]，历来是土壤侵蚀研究的首选区域(表 1)。

**Table 1.** Statistics of changes in research regions of holocene soil erosion in China over the past 40 years

**表 1.** 近 40 年中国全新世土壤侵蚀研究区域变化统计表

年代	研究区域
1980s	黄土高原
1990s	黄土高原、北京地区
2000s	黄土高原、长江中上游、东北嫩江流域、青藏高原东北端
2010s	黄土高原、滇西北
2020s	黄土高原、六盘山、秦岭、云贵高原、长江中下游

### 2.2. 研究载体

#### 2.2.1. 河流下游沉积

景可等根据土壤侵蚀——河流堆积相关原理，利用黄河下游不同时期冲积扇沉积模式，估算黄土高

原全新世中期(距今 6000~3000 年)年侵蚀量约为 10.75 亿吨, 全新世晚期(公元前 1020 年至公元 1194 年)年平均侵蚀量为 11.6 亿吨[4] [6]。赵景波根据黄河下游现代泥沙量, 推测黄土高原全新世侵蚀速度远没有现代高[7]。吴祥定通过黄河下游冲积扇堆积量推算, 全新世晚期(先秦至西汉时期)黄河中游土壤侵蚀量为 6.5 亿吨, 该值也可作为黄河中游土壤侵蚀自然背景值[8]。任美镔根据黄河下游泥沙沉积估算全新世早中期(距今 10,000~4000 年)土壤侵蚀率为每年 0.5 亿吨, 全新世中晚期(距今 4000 年以来)土壤侵蚀率达到每年 6 亿吨(北宋时期)至 10 亿吨(明代) [9]。

### 2.2.2. 沟谷发育

甘枝茂等利用渭河两岸侵蚀堆积差推算出全新世晚期(距今 2300 年以来)渭河西安段土壤侵蚀量每年 24 万吨[10]。桑广书等通过全新世黄土高原沟谷密度来定量计算全新世中期(距今 6100~4200 年)土壤侵蚀模数为 743 t/km<sup>2</sup>·a<sup>-1</sup>, 全新世晚期较全新世早、中期土壤侵蚀模数分别增加了 9.73%、7.19% [11]。桑广书等认为土壤侵蚀过程就是沟谷的发育过程; 通过黄土高原沟谷发育速度计算出全新世是 33 万年来土壤侵蚀最强烈的, 洛川塬区众多冲沟主要是全新世以来形成的; 全新世黑木沟的上游段沟头前进长度 3740 m, 沟头平均前进速度 0.374 m/a [12]。

### 2.2.3. 剖面记录

从表 2 可以看出, 通过剖面记录研究中国全新世土壤侵蚀, 剖面位置都位于黄土高原。2004 年杜鹃等在关中盆地通过对六个黄土剖面全新世黄土层(L0)厚度测量, 发现该层黄土变薄, 证实冷干期土壤侵蚀是温湿期 7 倍[13] [14]。2023 年周旗等在关中盆地对四个全新世黄土剖面调查, 发现普遍缺失 L<sub>x</sub> 地层, 说明距今 6000~5000 年是全新世一个普遍的侵蚀期[23]。从 2004 年至 2023 年, 利用黄土剖面研究中国全新世土壤侵蚀从未间断过, 说明剖面记录在黄土高原是研究土壤侵蚀一个很好的研究载体。黄土既具有疏松多孔、易侵蚀的结构特征, 又能忠实记录全新世气候环境信息。所以剖面记录揭示全新世土壤侵蚀研究方式可归属为三大类: 侵蚀缺失(在原剖面中地层变薄或缺失)、沉积增厚(在缓坡低地剖面中沉积保留了坡面上侵蚀而来粗粒物质使地层增厚)、气候背景(黄土磁化率等代用指标反演全新世降水量和土壤侵蚀强弱)(表 2)。

Table 2. Holocene soil erosion recorded in profiles

表 2. 剖面记录的中国全新世土壤侵蚀

作者及文献	剖面位置	揭示土壤侵蚀的标志	揭示侵蚀的方式归类
杜鹃等[13] [14]	西安白鹿塬、少陵塬和宝鸡陵塬	土层厚度变薄	侵蚀缺失
刘昆等[15]	襄汾 PDG、夏县 DXF-S	CaCO <sub>3</sub> 、磁化率、粒度突变	沉积增厚
查小春等[16] [17]	华县 NSC、运城 DXF-N	>0.1 mm 的沙级颗粒突变	沉积增厚
匡娟等[18]	会宁硝沟	磁化率反演降水量	气候背景
贾耀锋等[19]	华县老官台	磁化率和粒度突变	沉积增厚
靳建辉等[20]	庆阳市许家掌	孢粉、磁化率和粒度突变	沉积增厚
伍铁牛等[21]	岐山蔡家坡	波状侵蚀面	侵蚀缺失
徐佳等[22]	秦安大地湾、王甫梁	磁化率反演降水量	气候背景
周旗等[23]	西安白鹿塬和少陵塬	缺失 L <sub>x</sub> 地层	侵蚀缺失

### 2.2.4. 湖泊沉积

盛恩国等通过泸沽湖沉积岩芯磁化率、TOC 和 AMS <sup>14</sup>C 等实验发现距今 100 多年来土壤侵蚀加剧

[24]。张欢等通过六盘山天池岩芯 XRF 元素、AMS  $^{14}\text{C}$  等实验发现六盘山流域中晚全新世(距今 5570 年以来)土壤侵蚀可以划分为三个阶段:整体呈现先降低后升高的趋势[25]。程颖等通过太白山跑马梁湖泊岩芯 TOC、TN、粒度、孢粉和 AMS  $^{14}\text{C}$  等实验分析发现中全新世(距今 5800 年)以来,土壤侵蚀以距今 4000 年分为土壤侵蚀严重和土壤侵蚀减缓两个阶段[26]。Feng 等通过对内蒙古黄旗海湖的湖泊沉积物粒度、磁化率、化学元素和 AMS  $^{14}\text{C}$  等实验分析发现晚全新世(距今 1600 年)以来有三个土壤侵蚀加剧期[27]。

### 2.3. 定量计算方法

乌云格日勒等采用北京地区现代土壤侵蚀模型和全新世两个典型时期(仰韶温暖期和小冰期)的降水温度推测值,借助 GIS 软件绘制北京地区仰韶期和小冰期侵蚀深度等级图,仰韶温暖期时期(距今 5000~6000 年)的侵蚀强度比任何时期都要大,大部分地区为强度侵蚀区或更严重;小冰期(16 世纪~17 世纪)的侵蚀强度比任何时期都要小,大部分地区为轻度和微度侵蚀区[28]。桑广书等采用“空腔体积”法在 1:10,000 地形图上计算黄土高原黑木沟全新世土壤侵蚀模数为  $2041.08 \text{ t/km}^2\cdot\text{a}$  [12]。景可等利用湖泊钻孔地层厚度、面积和沉积时段,计算了洞庭湖流域、鄱阳湖流域和古云梦泽流域全新世侵蚀模数,分别为  $264.2 \text{ t/km}^2\cdot\text{a}$ 、 $312.5 \text{ t/km}^2\cdot\text{a}$  和  $297.0 \text{ t/km}^2\cdot\text{a}$  [29]。靳建辉等利用降水量-径流量-粒度中值-侵蚀产沙量之间的关系式,计算了黄土高原全新世早期、中期和晚期的侵蚀产沙量分别为:  $4065.85\sim 12743.6 \text{ t/km}^2\cdot\text{a}$ 、 $9579.43\sim 16858.5 \text{ t/km}^2\cdot\text{a}$ 、 $4744.98\sim 15475.3 \text{ t/km}^2\cdot\text{a}$  [5]。高明星等利用精细的地质图数据,通过古沉积面恢复古侵蚀量,计算循化盆地、贵德盆地、共和盆地全新世以来侵蚀总量分别为:  $2.1 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 、 $4.7 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 、 $8.2 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ,侵蚀速率分别为  $17.5 \text{ m/a}$ 、 $29.5 \text{ m/a}$ 、 $10.7 \text{ m/a}$  [30]。赵宏飞等利用土壤侵蚀模型(RUSLE)和全新世晚期(距今 2000 以来)恢复的降水量和植被覆盖度计算了黄土高原秦汉、隋唐、明清和现代土壤侵蚀模数分别为 28、39、43 和  $30 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$  [31]。赵宏飞等利用 Landlab 地貌演化数值模拟平台,定量计算了西北、青藏高原、北方、南方和西南地区湖泊流域全新世土壤侵蚀模数分别为 2.1、1.2、12.9、3.1 和  $18.9 \text{ t/ha a}$  [32]。

### 2.4. 时间分辨率

从表 3 可以看出,学者们对全新世(距今 11,000 年)以来土壤侵蚀阶段的划分虽然差异较大,但是总的来看都呈现出早期和中期侵蚀较弱,晚期增强的模式。研究载体不同、研究区不同、人类影响程度强弱不同,造成全新世侵蚀分期不同。受制于测年技术和样品取样精度的双重限制,近 40 年中国全新世土壤侵蚀事件研究时间分辨率多数在千年尺度,百年尺度较少,数十年尺度缺失的状态。

**Table 3.** Statistics of soil erosion intensity in different periods of the holocene in China

**表 3.** 中国全新世不同时期土壤侵蚀强弱统计

全新世时间轴 (单位:距今...年)	11000	9000	7000	5000	3000	2000	1000	500	300	100
朱照宇等[33]			侵蚀强烈					侵蚀强烈		侵蚀强烈
张月鸿等[34]			面状侵蚀							
刘昆等[15]				面状侵蚀						
杜鹃等[35]		侵蚀弱						侵蚀强		
查小春等[36]	面状侵蚀			面状侵蚀	面状侵蚀		面状侵蚀			
郑粉莉等[37]								侵蚀急剧增加		

续表

查小春等[16]	面状侵蚀不明显		面状侵蚀加速	
崔明等[38]	轻度侵蚀			
贾耀锋等[19]	面状侵蚀	面状侵蚀		
靳建辉等[20]	面状侵蚀微弱	面状侵蚀增强	面状侵蚀较强	面状侵蚀最强
刘刚等[39]	侵蚀增大	侵蚀减弱	自然侵蚀较弱	人类加速侵蚀
赵宏飞等[31]	微度侵蚀	侵蚀增强	侵蚀急剧增加	侵蚀最强烈
张丽萍等[40]	自然侵蚀旋回		侵蚀加重	侵蚀较轻
张欢等[25]			侵蚀较强	侵蚀降低
程颖等[26]			侵蚀较高	侵蚀较低
赵宏飞等[32]	侵蚀波动变化		侵蚀快速增加	

### 3. 总结与展望

#### 3.1. 学科集成土壤侵蚀原因研究

土壤侵蚀是地球表层普遍存在的一种自然过程。自地球形成以来,土壤侵蚀从未停止[29]。在人类活动影响尚小的地质历史时期,构造运动和气候变化是影响土壤侵蚀的两个主要作用。全新世以来,中国乃至全球范围内气候、植被、人类活动都经历阶段性变化,必然导致土壤侵蚀发生变化[41]。

全新世中国大陆造山运动基本停止[42],但是也有学者认为全新世早期(距今 11,000~7000 年)土壤侵蚀的控制因素是构造活动[33]。地形地貌对全新世土壤侵蚀也有着一定影响。黄土塬边较塬面地势平坦,土壤侵蚀就弱一些,同在黄土塬面上,地形低处较地形高处侵蚀强[14]。位于临汾盆地古洪积扇前部的襄汾 DPG 剖面较位于四级阶地上襄汾 TSG 剖面记录的全新世土壤侵蚀强[15]。由于海拔较高的黄土塬面地形平坦基本没有土壤侵蚀,海拔较低处接近局部侵蚀基准面侵蚀弱,故在黄土塬边侵蚀最为严重[43]。在青藏高原大江大河上游,靠近上游的盆地地形和缓平坦,局部侵蚀基准面相对高差小,土壤侵蚀能力小[30]。

气候变化可改变侵蚀动力进而影响土壤侵蚀,但是发生土壤强烈侵蚀的气候背景观点依然不一。观点一认为土壤强烈侵蚀发生在气候温湿期。因为降水增加,冲刷作用增加,导致土壤侵蚀增强[1][33][44]。观点二认为土壤强烈侵蚀发生在气候冷干期。因为虽然降水少,但降水集中,且干旱时期植被覆盖减少、土壤凝聚力降低,导致土壤侵蚀增加[4][14][23][45]。观点三认为土壤强烈侵蚀发生在气候变化过渡阶段(交替时段)。因为东亚季风不稳定或频繁气候波动,温度与降水存在时滞性,导致土壤侵蚀加重[19][34][40][46][47]。

气候不仅是土壤侵蚀的宏观环境背景,而且可能会直接影响降水强度和短时间径流形成洪水,在较长尺度上也会影响到植被覆盖度。全新世时期区域性强降水、极端降雨事件、洪水造成土壤侵蚀增强[31][48][49]。在黄土高原区植被覆盖度高的全新世中期,土壤侵蚀减弱,植被覆盖度低的全新世早期和晚期,土壤侵蚀增强[3][5]。在云贵高原和长江中下游地区,全新世时期植被覆盖对土壤的保护作用远大于降雨对土壤的侵蚀作用[32]。

在全新世早中期的原始农业时期(距今 4000 年之前),人类活动对土壤侵蚀的影响甚微;到全新世晚期的古代农业时期(距今 4000 以来),人类活动对土壤侵蚀的影响日趋严重[9][17][25][31][32][34][42]。人类开垦坡地、砍伐树木、围湖造田、修筑堡垒、驻扎军队等活动,破坏了地质历史时期的侵蚀堆积平衡,促使土壤侵蚀率快速提升,远远超过了自然侵蚀率。

全新世土壤侵蚀受地质地貌、气候条件、植被覆盖、人类活动等多种因素影响,空间差异也必然存在。全新世气温变化具有全球性,但是全新世降水空间差异较大[23]。降水量增加导致北方土壤侵蚀增加,对南方土壤侵蚀微弱[32]。全新世晚期(距今 1600 年,即唐宋以来)植被覆盖等自然因素是北方草原土壤侵蚀的主要影响因子,而非人类活动[27]。土壤侵蚀客观存在,海南热带雨林土壤侵蚀 0.09 cm/a [4]。

全新世土壤侵蚀研究需要地理、地质、气象、历史、考古、水利及技术学科的集成研究和综合分析。地理学者注重地貌研究,第四纪地质学者侧重古环境研究,历史学者更倾向于历史时期人类如何活动。不同学科之间研究成果相互对比验证,才能使全新世土壤侵蚀研究系统化、深入化。

### 3.2. 土壤侵蚀事件精度提高

全新世土壤侵蚀事件精度的提高有赖于高分辨率古环境数据的重建。河流下游沉积、沟谷发育、剖面记录和湖泊沉积是全新世古土壤侵蚀的主要研究载体。相较而言湖泊沉积样品时间分辨率是最高的,从全新世土壤侵蚀研究历程来看,湖泊沉积也是最新的。未来将更多地运用湖泊沉积来进行全新世土壤侵蚀研究,提高事件精度。

断代测年技术的不断突破也将是制约全新世土壤侵蚀事件精度提高的因素之一。从热释光(TL)、光释光(OSL)、<sup>14</sup>C 到 AMS <sup>14</sup>C (加速质谱),测年精度不断提高,从千年、百年到十年尺度。未来将应用 AMS <sup>14</sup>C 测年技术建立研究区可信可靠的年代序列,来研究全新世土壤侵蚀事件的分辨率和侵蚀量计算的精确度。

### 3.3. 研究手段现代化模拟预测

研究手段的定量化和现代化能促使中国全新世土壤侵蚀研究处于国际水平。分子生物技术逐渐开始运用在古植被和古人类活动重建,将为全新世土壤侵蚀研究提供新的途径[50]。未来将现代土壤侵蚀观测与全新世土壤侵蚀模拟相结合,大力发展数值模拟手段,开展模型模拟和预测,达到理解过去、把握现状和预测未来目标[51]。例如开发适用于中国的 Landlad 地貌演化模型[52],将全新世气候因子、植被因子、坡面侵蚀和沟道侵蚀等设计融合,模拟全新世土壤侵蚀过程。

## 基金项目

陕西省教育厅青年创新团队项目(22JP021);商洛学院科研项目(18SKY002);国家级大学生创新创业训练计划项目(S202211396003)。

## 参考文献

- [1] 邓成龙,袁宝印.末次间冰期以来黄河中游黄土高原沟谷侵蚀-堆积过程初探[J].地理学报,2001,56(1):92-98.
- [2] 杨子生.论水土流失与土壤侵蚀及其有关概念的界定[J].山地学报,2001,19(5):436-445.
- [3] 靳建辉,康相武.全新世以来黄土高原侵蚀环境研究述评[J].亚热带资源与环境学报,2009,4(4):30-37.
- [4] 景可,陈永宗.黄土高原侵蚀环境与侵蚀速率的初步研究[J].地理研究,1983,2(2):1-11.
- [5] 石学瑾,张彪,郭家龙,等.黄土高原典型小流域土壤侵蚀时空演变[J].地理学报,2024,79(7):1787-1803.
- [6] 叶青超,景可,杨毅芬,等.黄河下游河道演变和黄土高原侵蚀的关系[J].世界科学,1984(2):57-58.
- [7] 赵景波.黄土高原现代侵蚀加剧的根本原因[J].中国水土保持,1993(2):30-33+43.
- [8] 吴祥定.历史上黄河中游土壤侵蚀自然背景值的推估[J].人民黄河,1994(2):5-8+61.
- [9] 任美镠.黄河的输沙量:过去、现在和将来——距今 15 万年以来的黄河泥沙收支表[J].地球科学进展,2006,21(6):551-563.
- [10] 甘枝茂,桑广书,甘锐,等.晚全新世渭河西安段河道变迁与土壤侵蚀[J].水土保持学报,2002,16(2):129-132.

- [11] 桑广书. 黄土高原历史时期地貌与土壤侵蚀演变研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 陕西师范大学, 2003.
- [12] 桑广书, 甘枝茂. 洛川塬区晚中更新世以来沟谷发育与土壤侵蚀量变化初探[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 109-113.
- [13] 杜娟, 赵景波. 陕西关中全新世以来黄土塬区土壤侵蚀研究[J]. 干旱区地理, 2004(4): 535-539.
- [14] 杜娟, 赵景波. 西安白鹿塬约 8500 年来土壤侵蚀研究[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(2): 136-140.
- [15] 刘昆. 汾渭盆地全新世成壤环境和人类活动影响比较研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 陕西师范大学, 2004.
- [16] 查小春, 黄春长, 庞奖励. 关中东部缓坡地面全新世土壤侵蚀与沉积发展演变规律研究[J]. 生态环境, 2005, 14(1): 52-56.
- [17] 查小春, 黄春长, 庞奖励. 运城盆地洪积平原全新世环境演变与侵蚀阶段研究[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(1): 131-135.
- [18] 匡娟. 会宁地区两万多年来气候变化与土壤侵蚀状况研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2007.
- [19] 贾耀锋, 黄春长, 庞奖励, 等. 渭河流域东部全新世黄土-古土壤剖面光释光测年及其记录的土壤侵蚀事件[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(3): 73-83.
- [20] 靳建辉. 全新世以来黄土高原坡地系统侵蚀过程与侵蚀环境演变规律研究[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2009.
- [21] 伍铁牛. 更新世黄土高原中南部土壤侵蚀研究[D]: [博士学位论文]. 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), 2010.
- [22] 徐佳. 27000 年以来秦安黄土沉积速率研究[D]: [博士学位论文]. 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), 2015.
- [23] 周旗, 赵景波, 苏敏, 等. 西安地区全新世气候变化与土壤侵蚀研究[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1404-1415.
- [24] 盛恩国. 滇西北泸沽湖沉积记录的晚全新世气候环境变化及其全球联系[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院(地球环境研究所), 2015.
- [25] 张欢, 牛丽丽, 袁子杰, 等. 中晚全新世六盘山流域土壤侵蚀的湖泊沉积记录[J]. 地球环境学报, 2021, 12(2): 146-158.
- [26] 程颖, 刘鸿雁, 王红亚, 等. 中全新世以来中国中部高山植被生产力和土壤侵蚀演变的古生态学证据[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(12): 2140-2149.
- [27] Feng, M., Wang, Q., Hao, Q., *et al.* (2016) Determinants of Soil Erosion during the Last 1600 Years in the Forest-Steppe ecotone in Northern China Reconstructed from Lacustrine Sediments. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **449**, 79-84.
- [28] 乌云格日勒, 徐海鹏, 马蔼乃, 等. 北京地区中全新世以来特征时段环境变化对土壤水力侵蚀的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 1997, 5(2): 146-154.
- [29] 景可, 张信宝. 长江中上游土壤自然侵蚀量及其估算方法[J]. 地理研究, 2007, 26(1): 67-74.
- [30] 高明星. 基于 DEM 的青藏高原东北端地表过程分析[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009.
- [31] 赵宏飞. 近 1 万年以来特征时期黄土高原土壤侵蚀及其对黄河下游沉积的影响[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2018.
- [32] 赵宏飞. 全新世中国典型湖泊沉积与流域侵蚀环境演变特征[D]: [博士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2023.
- [33] 朱照宇, 周厚云, 谢久兵, 欧阳婷萍. 黄土高原全新世以来土壤侵蚀强度的定量分析初探[J]. 水土保持学报, 2003(2): 81-83+88.
- [34] 张月鸿. 汾渭平原全新世成壤环境演变的高分辨率研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 陕西师范大学, 2004.
- [35] 杜娟, 赵景波. 长安少陵塬全新世以来的土壤侵蚀规律研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(1): 65-69.
- [36] 查小春. 汾渭盆地全新世古洪水和侵蚀沉积事件研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 陕西师范大学, 2005.
- [37] 郑粉莉, 唐克丽, 白红英. 黄土高原人类活动与生态环境演变的研究[J]. 水土保持研究, 1994, 1(5): 36-42.
- [38] 崔明, 张旭东, 蔡强国, 等. 东北典型黑土区气候、地貌演化与黑土发育关系[J]. 地理研究, 2008, 27(3): 527-535.
- [39] 刘刚. 陕北黄土高原全新世气候影响下的黄土沉积速率[D]: [博士学位论文]. 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), 2009.
- [40] 张丽萍, 朱大奎, 杨达源. 黄河中游土壤侵蚀与下游古河道三角洲演化的过程响应[J]. 地理科学, 2001, 21(1):

52-56.

- [41] Zhang, F., Li, S., Sun, C., *et al.* (2022) Human Impacts Overwhelmed Hydroclimate Control of Soil Erosion in China 5000 Years Ago. *Geophysical Research Letters*, **49**, 969-983.
- [42] 把多辉, 朱拥军, 王若生, 等. 气候变迁与黄土高原演变的研究综述[J]. 干旱气象, 2005, 23(3): 69-73+88.
- [43] 李智佩. 中国北方荒漠化形成发展的地质环境研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西北大学, 2006.
- [44] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [45] Yu, K.K., Xu, H., Lan, J.H., *et al.* (2017) Climate Change and Soil Erosion in a Small Alpine Lake Basin on the Loess Plateau, China. *Earth Surface Processes and Landforms*, **42**, 1238-1247.
- [46] 唐克丽, 张平仓, 王斌科. 土壤侵蚀与第四纪生态环境演变[J]. 第四纪研究, 1991, 11(4): 300-309.
- [47] Huang, X., Chen, C., Jia, W., *et al.* (2015) Vegetation and Climate History Reconstructed from an Alpine Lake in Central Tianshan Mountains since 8.5 ka BP. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **432**, 36-48.
- [48] Wu, L., Liu, X. and Ma, X.Y. (2016) Spatiotemporal Distribution of Rainfall Erosivity in the Yanhe River Watershed of Hilly and Gully Region, Chinese Loess Plateau. *Environmental Earth Sciences*, **75**, Article No. 315.
- [49] Wang, H.Y., Cheng, Y., Luo, Y., *et al.* (2019) Variations in Erosion Intensity and Soil Maturity as Revealed by Mineral Magnetism of Sediments from an Alpine Lake in Monsoon-Dominated Central East China and Their Implications for Environmental Changes over the Past 5500 Years. *Holocene*, **29**, 1835-1855.
- [50] Elliott, L.D., Rijal, D.P., Brown, A.G., *et al.* (2023) Sedimentary Ancient DNA Reveals Local Vegetation Changes Driven by Glacial Activity and Climate. *Quaternary*, **6**, Article 7.
- [51] 陈发虎, 傅伯杰, 夏军, 等. 近 70 年来中国自然地理与生存环境基础研究的重要进展与展望[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(11): 1659-1696.
- [52] Barnhart, K.R., Hutton, E.W.H., Tucker, G.E., *et al.* (2020) Short Communication: Landlab v2.0: A Software Package for Earth Surface Dynamics. *Earth Surface Dynamics*, **8**, 379-397.