

中国5年间隔水蚀区土壤侵蚀数据集的研发 (2000–2015)

李佳蕾^{1,2}, 孙然好^{1,2*}, 熊木齐³, 陈利顶^{1,2}

1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100190;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程院重点实验室, 北京 100101

摘要: 随着全球气候变化与人类活动加剧, 土壤侵蚀已成为限制中国乃至世界土地可持续利用的难题之一。本研究以中国水蚀区为研究对象, 基于 Köppen-Geiger 气候分区、降水量、土地利用与土地覆盖 (LULC)、植被指数 (NDVI)、DEM 等较高精度的空间数据, 对 USLE 模型的降雨侵蚀力 (R)、植被覆盖与管理因子 (C)、水土保持措施因子 (P) 进行了率定, 并估算了 2000、2005、2010、2015 年中国的土壤侵蚀量。研究结果表明: (1) 中国土壤侵蚀较强的区域分布在云贵高原、黄土高原、昆仑山山麓等, 占统计总面积的 9.65%; (2) 2000–2015 年间, 土壤侵蚀显著增大的区域分布于新疆农田区、四川盆地、云贵高原东南部、长江中下游平原、东北平原, 土壤侵蚀显著减小的区域分布于黄土高原南部、秦岭地区、东南沿海地区等。本数据集包括 2000、2005、2010、2015 年中国土壤侵蚀估算量 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), 相关的中间数据还包括 C 因子和 R 因子 (分辨率 1 km), 格式为 .tif。本数据集可为中国水土保持与土地利用规划提供数据参考。

关键词: 土壤侵蚀; USLE; 降雨侵蚀力; 水土保持

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2021.02.13>

CSTR: <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2021.02.13>

数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2021.05.03.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2021.05.03.V1>.

1 前言

土壤侵蚀可以导致土壤养分流失、水体淤积和富营养化、碳储量减少、生物多样性下降, 甚至人口贫困, 已成为中国乃至全球环境和经济最严重的威胁之一^[1–4]。对长时间序列土壤侵蚀进行定量评估与变化分析, 可以给农业、地球生物化学循环相关的研究人员与土地决策者提供一定的理论依据与参考^[5]。

收稿日期: 2021-03-25; 修订日期: 2021-05-26; 出版日期: 2021-06-25

基金项目: 中华人民共和国科学技术部 (2017YFA0604704)

*通讯作者: 孙然好 AAM-6837-2021, 中国科学院生态环境研究中心/中国科学院地理科学与资源研究所, rhsun@rcees.ac.cn

数据引用方式: [1] 李佳蕾, 孙然好, 熊木齐等. 中国5年间隔水蚀区土壤侵蚀数据集的研发 (2000–2015) [J]. 全球变化数据学报, 2021, 5(2): 203–212. <https://doi.org/10.3974/geodb.2021.02.13>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2021.02.13>.

[2] 李佳蕾, 孙然好, 熊木齐等. 中国5年间隔水蚀区土壤侵蚀公里网格数据集 (2000–2015) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2021. <https://doi.org/10.3974/geodb.2021.05.03.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2021.05.03.V1>.

USLE 模型是由美国农业部 (USDA) 开发的经验模型, 该模型预测了由薄层和细沟侵蚀过程造成的长期平均年土壤流失^[6,7], 描述了土壤流失率与降雨和径流、土壤属性、地形、植被覆盖以及土地管理等控制因素之间的关系^[8]。随着计算技术的发展、地理信息系统 (GIS) 的进步以及高分辨率图像可获取性, 使用 USLE 模型评估大尺度水蚀成为一种合理且可行的方法^[9,10]。目前, 几乎所有估算大尺度乃至全球尺度的土壤侵蚀的研究都基于 USLE 方程及相关的衍生模型^[2,11-15]。我国已有大量研究, 基于 USLE 及相关模型开展流域尺度土壤侵蚀评估^[16-18]。

当前已有一些研究提出了 USLE 模型的因子优化方法^[19-24]。例如, 基于区域尺度上的气候区和土地利用类型, 对 USLE 模型中的降雨侵蚀力因子 (R) 和植被覆盖与管理因子 (C) 进行校准^[19,20]。但是其他因子的计算方法优化相对较少, 如水土保持措施因子 (P)。此外, 全国范围内土壤侵蚀因子优化及土壤侵蚀评估相对较少。为了明确中国水蚀区土壤侵蚀的分布格局和变化规律, 本研究将利用最新发表的 USLE 模型因子量化及优化方法, 并根据中国地理和气候背景进行更新, 可提高模型计算的全国土壤侵蚀估算精度。

2 数据集元数据简介

《中国 5 年间隔水蚀区土壤侵蚀公里网格数据集 (2000–2015)》^[25]的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

3 数据研发方法

3.1 数据来源与处理

《中国 5 年间隔水蚀区土壤侵蚀公里网格数据集 (2000–2015)》研发所利用的降雨数据是在中国气象数据网¹中下载的 1981–2015 年全国逐日降水数据, 包括全国 839 个国家级站点, 经 SPSS 软件统计得出各个站点的年降水量、经纬度坐标和海拔高度, 原始格式为 .txt。气候带分区为 Köppen–Geiger 气候分区^[27], 分辨率为 1 km, 格式为 .tif。数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 数据的原始数据是美国地质调查局 ASTER GDEM 数据的中国分区 30 m 分辨率数据, 计算之前进行填注处理, 格式为 grid。中国年度植被指数 (Normalized Vegetation Index, NDVI) 空间分布数据是基于连续时间序列的 SPOT/VEGETATION NDVI 卫星遥感数据, 采用最大值合成法生成, 分辨率为 1 km, 格式为 .tif。土地覆盖类型数据为欧洲航空局 (ESA) 的 CCI LC (Climate Change Initiative Land Cover) 数据^[28], 分辨率为 300 m, 格式转化为 tif 后再进行计算。中国农作物数据 (农作物种类、播种面积等) 下载于国家统计局国家数据网, 格式为 .csv。土壤成分数据是在国际土壤参比信息中心 (International Soil Reference and Information Centre, ISRIC) 下载, 利用 2017 年全球土壤的黏粒、粉粒、砂粒和有机碳的含量数据提取中国区域的土壤数据, 分辨率为 250 m, 格式为 .tif。降水数据、NDVI、土地利用类型、农作物数据选取了 2000、2005、2010、2015 年覆盖中国区域数据。

¹ 中国气象数据网. <https://data.cma.cn>.

表 1 《中国 5 年间隔水蚀区土壤侵蚀公里网格数据集（2000–2015）》元数据简表

条 目	描 述		
数据集名称	中国 5 年间隔水蚀区土壤侵蚀公里网格数据集（2000–2015）		
数据集短名	SoilErosionChina_2000-2015		
作者信息	李佳蕾，中国科学院生态环境研究中心，lijialei97@163.com 孙然好 AAM-6837-2021，中国科学院生态环境研究中心，rhsun@rcees.ac.cn 熊木齐，中国科学院地理科学与资源研究所，xiongmq@igsnr.ac.cn 陈利顶，中国科学院生态环境研究中心，liding@rcees.ac.cn		
地理区域	中国水蚀区		
数据年代	2000、2005、2010、2015		
时间分辨率	年	空间分辨率	1 km × 1 km
数据格式	.tif	数据量	1.91 GB
数据集组成	包括 12 个文件，分别为 2000、2005、2010、2015 年中国水蚀区年土壤侵蚀率以及补充数据的文件。土壤侵蚀数据以 SEyyyy.tif 命名，如 SE2000.tif 为中国水蚀区 2000 年的年土壤侵蚀率。补充数据内包括这 4 年每年的 C 因子和 R 因子，以 Cytyy.tif 和 Rytyy.tif 命名		
基金项目	中华人民共和国科学技术部（2017YFA0604704）		
数据计算环境	ArcGIS，中国科学院大学平台；SPSS 软件		
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn		
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所		
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据（中英文）、通过《全球变化数据仓储电子杂志（中英文）》发表的实体数据集和通过《全球变化数据学报（中英文）》发表的数据论文。其共享政策如下：（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报（中英文）》编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[26]		
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS/ISC, GEOSS		

3.2 算法原理

本项研究利用 USLE（Universal Soil Loss Equation，通用土壤流失方程）模型，结合国际发表的因子计算方法，根据中国实际情况进行调整，估算中国水蚀区 2000、2005、2010、2015 年的土壤侵蚀率。模型公式如下：

$$A = R \cdot L \cdot S \cdot K \cdot C \cdot P \tag{1}$$

式中， A 是模型预测的年土壤侵蚀率（ $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ）。 R 是降雨侵蚀力因子（ $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ）^[29]。 L 、 S 为地形因子（无量纲）， L 即坡长因子， S 即坡度因子^[30]；本研究利用 DEM 数据提取信息来计算 L 、 S 因子。 K 是土壤可蚀性因子（ $\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ ）^[31,32]。 C 是植被覆盖与管理因子（无量纲）^[33]。 P 因子即水土保持措施因子（无量纲）^[34]。各个因子按照输入数据的最小分辨率计算结束后，将所有的因子利用双线性插值法重采样为 1 km 分辨率，再将各因子相乘，最终得到各年的土壤侵蚀率^[35]。

3.2.1 基于气候分区的 R 因子修正

传统的 R 因子计算方式要求降雨站点的 30 分钟雨强数据作为输入数据^[7], 在大尺度、长时间序列的研究中很难完成。本研究利用年降水量、结合多参数输入, 并根据不同气候带对 R 因子进行计算。Naipal^[20]基于美国降雨站点监测值, 拟合降雨侵蚀力因子 R 值和年降水量 (P , mm)、高程 (Z , m)、日降水强度 ($SDII$, mm·day⁻¹) 的回归方程, 得出修正的不同气候区降雨侵蚀力 R 计算方法:

$$R = (P, Z, SDII) \quad (2)$$

不同的气候区有不同的计算公式, 其气候区的划分标准为 Köppen-Geiger 气候分区法^[27,36], 其中有 6 种气候带利用此方法^[35]。对于其他气候区, 则利用 Renard and Freimund 指数^[34]。首先利用全国 800 多个站点的日降水数据计算出各个站点的年降水量, 然后计算平均降雨侵蚀力, 再选用模拟精确度较好的普通克里金插值方法来进行空间插值^[37]推测全国的 R 值。

3.2.2 基于土地覆被的 C 因子修正方法

植被覆盖因子 C 和植被种类、农作物种类紧密相关^[38,39], 所以本研究利用 Borrelli 计算 C 因子的方法^[12], 将中国的耕地和非耕地的 C 因子分别进行调整与计算。

耕地的 C 因子计算采用国家统计局发布的各省耕地主要作物种类和播种面积, 在结合中国实际农业状况进行调整后, 将已发布的作物归为 10 类, 通过以下公式计算过去全国耕地的 C 值^[35]:

$$C_{\text{crop}} = \sum_{n=1}^{10} C_{\text{cropn}} \times \% \text{Region}_{\text{Cropn}} \quad (3)$$

式中, C_{cropn} 是作物 n 的 C 值, $\% \text{Region}_{\text{Cropn}}$ 是作物 n 的播种面积占各省总面积的比例。

对于非耕地, 植被覆盖因子 C 取决于植被覆盖度和植被覆盖类型, 本研究结合已有文献中非耕地的各种植被覆盖类型的经验 C 值^[12,19], 利用土地利用数据和 NDVI 数据, 计算非耕地的 C 值^[35]:

$$C_{\text{NonArable}} = \text{Min}(C_{\text{NA}}) + \text{Range}(C_{\text{NA}}) \times (1 - F_{\text{cover}}) \quad (4)$$

$$F_{\text{cover}} = \text{VFC} = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{min}}) / (\text{NDVI}_{\text{max}} - \text{NDVI}_{\text{min}}) \quad (5)$$

式中, $\text{Min}(C_{\text{NA}})$ 是 C_{NA} 取值范围的最小值, $\text{Range}(C_{\text{NA}})$ 是 C_{NA} 的最大值与最小值的差, F_{cover} 是植被覆盖度。

3.2.3 基于地形特征的 P 因子修正方法

USLE/RUSLE 模型 P 因子在大尺度的土壤侵蚀风险建模中很少被考虑^[40]。Xiong 等依据大量文献总结^[41-43], 归纳不同坡度耕地以及不同的水土保持措施的 P 值差异。本研究将 Xiong 的 P 因子赋值方法结合历年土地利用类型, 将水平稻田区域赋值为 0.2, 其他农田区域根据坡度为 P 因子赋值。其中坡度小于等于 10° 的农田 P 值取为 0.5, 坡度大于 10° 小于等于 25° 的 P 值取为 0.6, 坡度大于 25° 小于等于 45° 的 P 值取为 0.8, 坡度大于 45° 的 P 值取值为 1。其他非农田区取值为 1。

3.2.4 其他因子的计算方法

本研究利用 30 m 分辨率的中国 DEM 数据计算 L 因子^[7,44,45]。 S 因子则利用刘宝元等提

出的 CSLE 模型中计算 S 因子的方法^[46]，对不同坡度段分别进行计算^[35]。

土壤可蚀性因子 K 利用 EPIC 模型^[47]计算。其中的输入数据包括土壤砂粒含量百分数、粉粒含量百分数、黏粒含量百分数、有机碳含量百分数^[35]。

3.3 技术路线

《中国 5 年间隔水蚀区土壤侵蚀公里网格数据集（2000–2015）》研发的技术路线如图 1 所示。

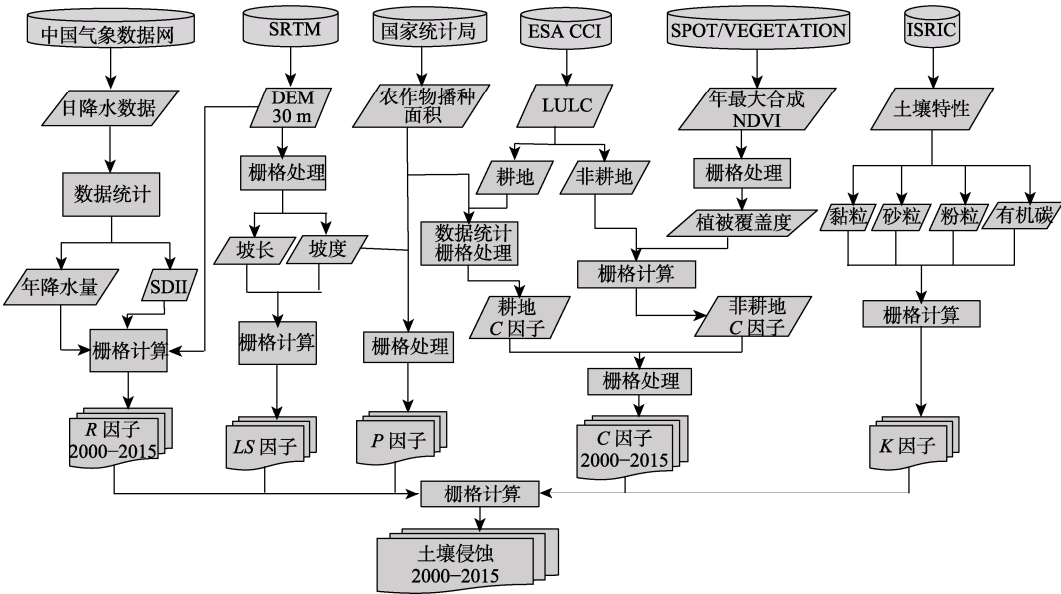


图 1 数据集研发技术路线图

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

数据集包含 12 个文件，包括 4 个土壤侵蚀数据和 8 个过程数据（ C 因子、 R 因子），格式为.tif，时间范围为 2000、2005、2010、2015 年，空间范围覆盖为在中国水蚀区，时间分辨率为年，空间分辨率为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 。土壤侵蚀数据单位为 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ，即单位面积土壤侵蚀量； C 因子数据无量纲； R 因子数据单位为 $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。文件命名方式为 SEyyyy.tif、Cyyyy.tif、Ryyyy.tif。

4.2 数据结果

2000、2005、2010、2015 年中国的年平均土壤侵蚀量分别为 38.63、37.35、49.03、47.84 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ，土壤侵蚀率数值介于 $0\text{--}2,880\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间。土壤侵蚀的空间分布见图 2。根据中华人民共和国水利部发布的《土壤侵蚀分类分级标准》^[48]，将计算后的中国土壤侵蚀度分成 6 个等级，即微度、轻度、中度、强烈、极强烈和剧烈，中国水蚀区大多（60% 以上）的空间为微度侵蚀。中国水蚀较强的区域多分布在中国南方，呈点状分布分散于南方各地，例

如云贵高原与四川盆地之间的区域水蚀剧烈，尤其分布于贵州省。中国北方水蚀较强的区域多集中于黄土高原、山东丘陵区、东北大兴安岭和西北的昆仑山与塔里木盆地的交界处。

4.3 数据结果验证

大范围的径流小区实验的站点数据较难获取，我们根据文献搜集全球小区径流实验数据^[49]。本研究基于此数据，选取中国区域的站点数据，根据气候带分类进行统计，并与本数据 4 个年份进行平均后的数据进行对比（图 3）。可以看出，热带的计算误差较大，其他气候区虽然模型模拟的数值与测量值有一定差距，但气候区之间的趋势差异大致类似。

虽然通过收集较高分辨率数据、改进因子算法等使得模拟结果有一定提升，但由于空间尺度大，土壤侵蚀具有空间尺度效应^[50]，大尺度模型估算与小尺度的土壤调查数据会一定程度的偏差。大尺度模型计算的原数据精度与计算方法的不同也会导致不同研究的结果不同（表 4）。例如利用 USLE 模型在不同尺度下计算的江西省年均土壤侵蚀差距较大。总体而言，不同研究的研究尺度不同、计算方法不同、数据来源不同，导致了模型的不确定性，使得结果差异较大。但本研究主要致力于水蚀区，一般其他大尺度研究会包含非水蚀区，如风蚀区等。本数据集可以作为土壤侵蚀时间变化分析的来源，以及未来大尺度土壤侵蚀研究的对比素材。

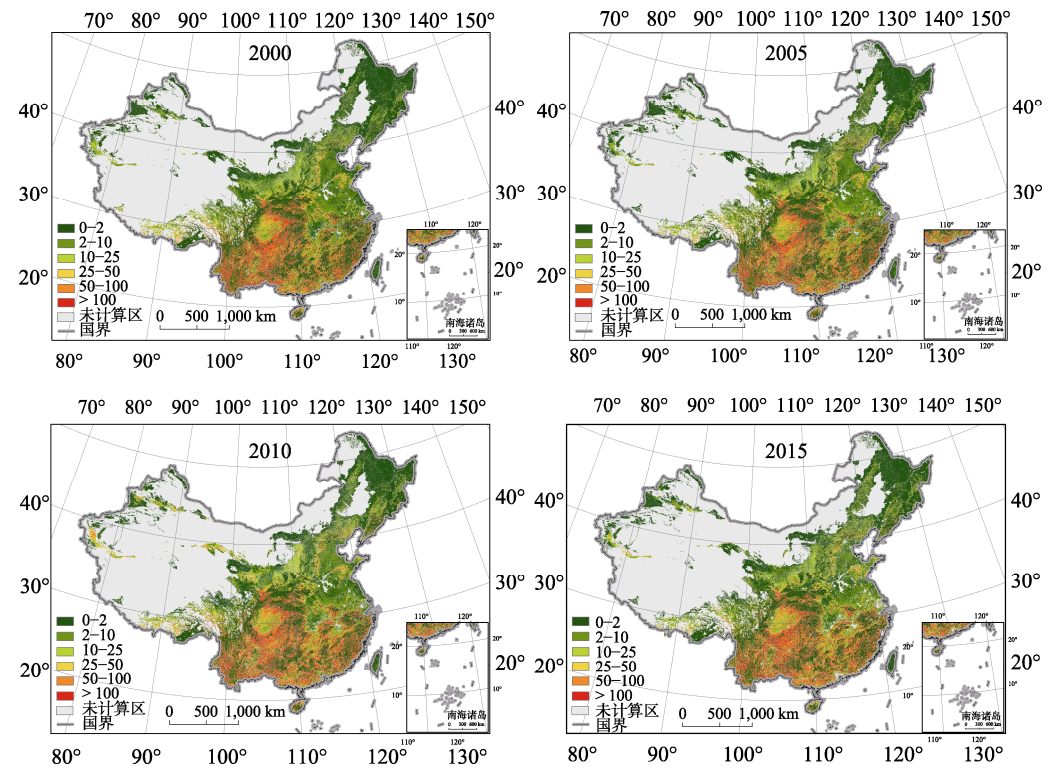


图 2 中国土壤侵蚀数据可视化图（依据审图号为 GS(2019)1831 号的标准地图制作）

5 讨论和总结

本数据集是基于经验模型 USLE 方程计算的中国土壤侵蚀分布格局。通常情况下，USLE 模型最初应用于田块尺度，较难直接在大尺度运用，本数据集通过将因子在大尺度范围进行率定，可以模拟国家范围土壤侵蚀强度和动态变化。具体地，本研究基于中国的自然、社会条件特征，对特定因子进行了精度提升，比如 *C* 因子根据不同省份的农业背景和自然植被进行了赋值，*R* 因子根据不同气候区进行了率定，*P* 因子则针对农田的管理措施进行了改进。

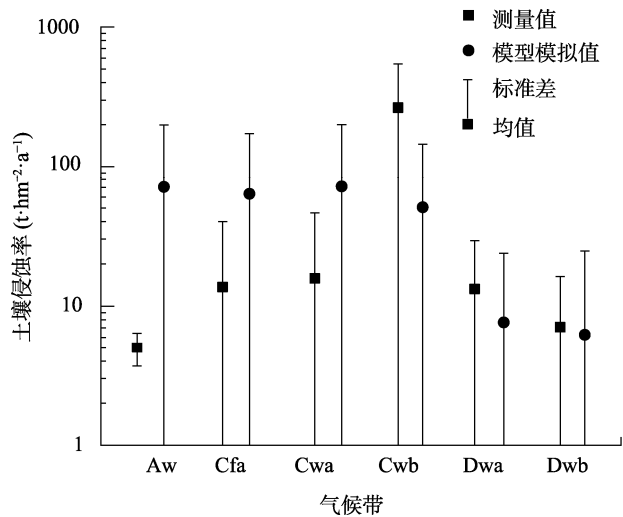


图 3 模型模拟的土壤侵蚀率与小区实验测量数据的对比图

（注：气候带命名方法采用字母缩写组合。字母缩写含义为 A：热带；B：干旱带；C：温带；D：寒带；a：炎热夏季；b：夏季温和；k：寒冷；f：无旱季；w：冬季干燥。）

表 2 不同研究不同区域的年均土壤侵蚀率对比（ $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ）

研究区域	其他研究	本研究
江西省	63.75 ^[17]	90.60
	0.92 ^[51]	
	3.54 ^[52]	
广东省	22.94 ^[53]	115.19
	1.88 ^[51]	
延河流域	144.58 ^[54]	2.20
黄土高原	24.05 ^[18]	8.27
南方丘陵山区	4.22 ^[52]	108.20
甘南川西北	13.39 ^[55]	11.53

本数据使用的原始数据中，地形数据为 30 m、NDVI 数据为 1 km，最终结果重采样为 1 km。与相关的全国尺度研究相比^[51]，地形数据的分辨率由 90 m 提升至 30 m 精度，农田的 *C* 和 *P* 因子根据各个省份的农作物种植情况进行了更细程度的优化，从而使得土壤侵蚀

模拟的精细程度有了提升；此外，计算了 2000、2005、2010 和 2015 年逐年的侵蚀数据，在时间序列上也形成了更加完整的数据集。

大尺度土壤侵蚀的定量估算存在一定难度，尤其是计算的可行性与结果的准确性的权衡，经验模型的机理忽略了土壤侵蚀的过程与动态^[56]，以及后续的模型验证中缺乏大量小区测量数据进行对比等。本数据主要目标是分析中国土壤侵蚀的年际变化，为潜在的土壤侵蚀热点识别提供依据。此外，本数据集也可以为未来其他土壤侵蚀研究提供数据对比，以及为进一步提升模型参数和机理提供参考，为土壤侵蚀变化的驱动因素辨识奠定基础。

作者分工：孙然好对数据集的开发做了总体设计；李佳蕾采集和处理了原始数据、做了数据验证、撰写了数据论文；熊木齐设计了模型和算法；陈利顶提供了修改思路和意见。

利益冲突声明：本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

- [1] Lal, R. Soil Erosion Impact on agronomic productivity and environment quality [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 1998, 17(4): 319–464.
- [2] Pham, T. N., Yang, D., Kanae, S., *et al.* Application of RUSLE model on global soil erosion estimate [J]. *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, 45: 811–816.
- [3] Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., *et al.* Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits [J]. *Science*, 1995, 267(5201): 1117–1123.
- [4] Lal, R. Soils and world food security [J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 102(1): 1–4.
- [5] 章文波, 刘宝元. 基于 GIS 的中国土壤侵蚀预报信息系统[J]. *水土保持学报*, 2003(2): 89–92.
- [6] Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., *et al.* RUSLE: revised universal soil loss equation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 46(1): 30–33.
- [7] Wischmeier, W., Smith, D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. Agricultural Handbook No. 537 [M]. Washington DC: U.S. Department of Agriculture, 1978.
- [8] Montgomery, D. R. Soil erosion and agricultural sustainability [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 2007, 104(33): 13268–13272.
- [9] de Vente, J., Poesen, J. Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: scale issues and semi-quantitative models [J]. *Earth-Science Reviews*, 2005, 71(1/2): 95–125.
- [10] Karydas, C. G., Panagos, P., Gitas, I. Z. A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2014, 7(3): 229–250.
- [11] Borrelli, P., Robinson, D. A., Panagos, P., *et al.* Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015–2070) [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(36): 21994–22001.
- [12] Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., *et al.* An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 2013.
- [13] Guerra, C. A., Rosa, I. M. D., Valentini, E., *et al.* Global vulnerability of soil ecosystems to erosion [J]. *Landscape Ecology*, 2020, 35(4): 823–842.
- [14] Ito, A. Simulated impacts of climate and land-cover change on soil erosion and implication for the carbon cycle, 1901 to 2100 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(9): L09403.

- [15] Yang, D. W., Kanae, S., Oki, T., *et al.* Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes [J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17(14): 2913–2928.
- [16] 胡先培, 曾成, 钱庆欢等. 基于RUSLE模型的铜仁地区1987–2015年土壤侵蚀时空特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2019(2): 158–166.
- [17] 周夏飞, 马国霞, 曹国志等. 基于USLE模型的2001–2015年江西省土壤侵蚀变化研究[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(1): 8–11.
- [18] Fu, B., Liu, Y., Lu, Y., *et al.* Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China [J]. *Ecological Complexity*, 2011, 8(4): 284–293.
- [19] Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., *et al.* Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale [J]. *Land Use Policy*, 2015, 48: 38–50.
- [20] Naipal, V., Reick, C., Pongratz, J., *et al.* Improving the global applicability of the RUSLE model—adjustment of the topographical and rainfall erosivity factors [J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, 8(9): 2893–2913.
- [21] Panagos, P., Ballabio, C., Borrelli, P., *et al.* Rainfall erosivity in Europe [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 511: 801–814.
- [22] Lufafa, A., Tenywa, M. M., Isabirye, M., *et al.* Prediction of soil erosion in a Lake Victoria basin catchment using a GIS-based Universal Soil Loss model [J]. *Agricultural Systems*, 2003, 76(3): 883–894.
- [23] Barao, L., Alaoui, A., Ferreira, C., *et al.* Assessment of promising agricultural management practices [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 649: 610–619.
- [24] Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K. A new European slope length and steepness factor (LS-factor) for modeling soil erosion by water [J]. *Geosciences*, 2015, 5(2): 117–126.
- [25] 李佳蕾, 孙然好, 熊木齐等. 中国5年间隔水蚀区土壤侵蚀公里网格数据集(2000–2015) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2021. <https://doi.org/10.3974/geodb.2021.05.03.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2021.05.03.V1>.
- [26] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策 [OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017年更新).
- [27] Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., *et al.* Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution [J]. *Scientific Data*, 2018, 5: 12.
- [28] ESA. Land cover CCI product user guide version 2 [Z]. Tech. Rep. (2017).
- [29] 查良松, 邓国徽, 谷家川. 1992–2013年巢湖流域土壤侵蚀动态变化[J]. *地理学报*, 2015, 70(11): 1708–1719.
- [30] 孔亚平, 张科利, 曹龙熹. 土壤侵蚀研究中的坡长因子评价问题[J]. *水土保持研究*, 2008(4): 43–47, 52.
- [31] Bouyoucos, G. J. The clay ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion [J]. *Journal of the American Society of Agronomy*, 1935(9): 738–741.
- [32] 刘宝元, 张科利, 焦菊英. 土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用[J]. *自然资源学报*, 1999(4): 345–350.
- [33] 冯强, 赵文武. USLE/RUSLE中植被覆盖与管理因子研究进展[J]. *生态学报*, 2014, 34(16): 4461–4472.
- [34] Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., *et al.* Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M]. In *Agricultural Handbook No.703*. Washington, DC: US Department of Agriculture, 1997.
- [35] 李佳蕾, 孙然好, 熊木齐等. 基于RUSLE模型的中国土壤水蚀时空规律研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(10): 3473–3485.
- [36] Rubel, F., Markus, K. Observed and projected climate shifts 1901–2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification [J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2010, 19: 135–141.
- [37] 李璐, 姜小三, 孙永远. 基于地统计学的降雨侵蚀力插值方法研究——以江苏省为例[J]. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(1): 88–92.

- [38] Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., *et al.* The new assessment of soil loss by water erosion in Europe [J]. *Environmental Science & Policy*, 2015, 54: 438–447.
- [39] Borrelli, P., Panagos, P., Maerker, M., *et al.* Assessment of the impacts of clear-cutting on soil loss by water erosion in Italian forests: first comprehensive monitoring and modelling approach [J]. *Catena*, 2017, 149: 770–781.
- [40] Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., *et al.* Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale [J]. *Environmental Science & Policy*, 2015, 51: 23–34.
- [41] Xiong, M., Sun, R., Chen, L. Effects of soil conservation techniques on water erosion control: a global analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 753–760.
- [42] Teng, H., Rossel, R. A. V., Shi, Z., *et al.* Assimilating satellite imagery and visible-near infrared spectroscopy to model and map soil loss by water erosion in Australia [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 77: 156–167.
- [43] Xiong, M., Sun, R., Chen, L. Global analysis of support practices in USLE-based soil erosion modeling [J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2019, 43(3): 391–409.
- [44] McCool, D. K., Brown, L. C., Foster, G. R., *et al.* Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation [J]. *Transactions of the ASAE*, 1987, 30(5): 1387–1396.
- [45] Desmet, P. J. J., Govers, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units [J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 1996, 51(5): 427–433.
- [46] Liu, B., Zhang, K., Yun, X. An empirical soil loss equation [A]. In: Process of soil erosion and its environment effect volume II 12th ISCO [C]. Beijing: Tsinghua press, 2002: 21–25.
- [47] Sharpley, A. N., Williams, J. R. EPIC-erosion/productivity impact calculator: 1. model determination [Z]. US Department of Agriculture, 1990.
- [48] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准: SL190—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [49] Xiong, M., Sun, R., Chen, L. A global comparison of soil erosion associated with land use and climate type [J]. *Geoderma*, 2019, 343: 31–39.
- [50] 倪九派, 魏朝富, 谢德体. 土壤侵蚀定量评价的空间尺度效应[J]. 生态学报, 2005(8): 2061–2067.
- [51] Teng, H. F., Hu, J., Zhou, Y., *et al.* Modelling and mapping soil erosion potential in China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(2): 251–264.
- [52] 陈思旭, 杨小唤, 肖林林等. 基于 RUSLE 模型的南方丘陵山区土壤侵蚀研究[J]. 资源科学, 2014, 36(6): 1288–1297.
- [53] Gao, F., Wang, Y. P., Yang, J. X., Assessing soil erosion using USLE model and MODIS data in the Guangdong, China [C]. Bristol: Iop Publishing Ltd, 2017.
- [54] Fu, B. J., Zhao, W. W., Chen, L. D., *et al.* Assessment of soil erosion at large watershed scale using RUSLE and GIS: a case study in the Loess Plateau of China [J]. *Land Degradation & Development*, 2005, 16(1): 73–85.
- [55] 魏健美, 李常斌, 武磊等. 基于 USLE 的甘南川西北土壤侵蚀研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 31–37, 46.
- [56] Quine, T. A., van Oost, K. Insights into the future of soil erosion [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(38): 23205–23207.