

DOI: 10.11766/trxb202004200185

杨苗苗, 杨勤科, 张科利, 李玉茹, 王春梅, 庞国伟. 砾石含量对土壤可蚀性因子估算的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1157–1168.
YANG Miaomiao, YANG Qinke, ZHANG Keli, LI Yuru, WANG Chunmei, PANG Guowei. Effects of Content of Soil Rock Fragments on Calculating of Soil Erodibility[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(5): 1157–1168.

砾石含量对土壤可蚀性因子估算的影响^{*}

杨苗苗¹, 杨勤科^{1†}, 张科利^{2†}, 李玉茹^{1, 3}, 王春梅¹, 庞国伟¹

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 2. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 3. 自然资源部第一地理信息制图院, 西安 710054)

摘要: 砾石 ($>2\text{ mm}$) 是土壤组成部分之一, 其含量对侵蚀产沙有重要影响。在土壤可蚀性因子 (K) 计算中充分考虑砾石含量的影响, 计算所得土壤可蚀性因子会更加准确。利用 30 弧秒分辨率土壤砾石含量和土壤质地等级等数据, 利用文献报道的砾石含量与土壤渗透性和土壤侵蚀关系估算方法, 在全球范围内分析估算砾石含量对土壤可蚀性因子的影响。结果表明, (1) 土壤剖面中砾石的存在, 通过降低土壤入渗速率 (土壤渗透性等级增加 5.68%)、增加地表径流而使土壤侵蚀增加, 进而使全球土壤可蚀性因子增加 4.43%; 砾石覆盖通过保护土壤免遭雨滴打击和径流冲刷减少侵蚀, 在山地、荒漠 (沙漠和戈壁) 地区, 这一影响会使土壤可蚀性值减小约 18.7%。考虑土壤剖面砾石含量和表面砾石覆盖综合影响时, 土壤可蚀性因子降低 5.52%。(2) 以砾石影响为主的地区, 占全球 62.7%, 土壤可蚀性因子可降低 $0.0091 (\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) \cdot (\text{hm}^{-2} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1})$; 以剖面砾石影响为主的地区, 占全球的 31.1%, 土壤可蚀性因子增加 $0.0019 (\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) \cdot (\text{hm}^{-2} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1})$ 。(3) 剖面和表面砾石共同作用使 6 个样区土壤流失速率减少约 11.8%。因此, 剖面砾石的存在会增加土壤可蚀性, 而表面砾石覆盖会减少土壤可蚀性, 综合影响使土壤侵蚀降低。在区域土壤可蚀性制图研究中, 应考虑这两个方面的影响, 进而提高土壤可蚀性因子的制图精度。

关键词: 砾石含量; 砾石覆盖; 入渗速率; 饱和导水率; 土壤可蚀性

中图分类号: S157.1 文献标志码: A

Effects of Content of Soil Rock Fragments on Calculating of Soil Erodibility

YANG Miaomiao¹, YANG Qinke^{1†}, ZHANG Keli^{2†}, LI Yuru^{1, 3}, WANG Chunmei¹, PANG Guowei¹

(1. College of Urban and Environment, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. College of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. The First Institute of Geoinformation Mapping, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Xi'an 710054, China)

Abstract: 【Objective】Rock fragments ($>2\text{ mm}$ diameter) are an important component of soil, and its presence has a significant impact on soil erosion and sediment yield. So it is essential to take into full account content of the rock fragments for accurate

* 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA20040202) Supported by the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (No. XDA20040202)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: qkyang@nwu.edu.cn; keli@bnu.edu.cn

作者简介: 杨苗苗 (1995—), 女, 甘肃省平凉市人, 硕士研究生, 主要从事区域土壤侵蚀调查与定量评价研究。E-mail: ymm_miao@163.com

收稿日期: 2020-04-20; 收到修改稿日期: 2020-10-27; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2021-01-25

calculation of soil erodibility factor (K). 【Method】In this paper, based on the data available of the content of rock fragments and classes of soil texture with a resolution of 30 arc-second, influence of the content of rock fragments, including rock fragments in the soil profile (RFP) and gravels on the surface of the soil (SC), on K was assessed at a global scale, using the equation (Brakensiek, 1986) of the relationship between saturated hydraulic conductivity and grade of soil permeability, and the equation (Poesen) of soil erodibility attenuation under a rock fragment cover. 【Result】Results show: (1) The existence of rock fragments in the soil increased K by 4.43% and soil permeability by 5.68% on average in grade and lowering soil saturated hydraulic conductivity by 11.57% by reducing water infiltration rate of the soil and increasing surface runoff. The gravels on the surface of the mountain land and desert/gobi reduced K by 18.7% by protecting the soil from splashing of rain drops and scrubbing of runoff; so once the content of rock fragments in the soil profile and gravels on the surface of the land are taken into account in calculation, soil K may be 5.52% lower; (2) In the areas dominated with the effect of rock fragments, about 62.7% of the global land area, soil K decreased by $0.0091(t \cdot hm^2 \cdot h) \cdot (hm^{-2} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1})$ on average, while in the area affected mainly by rock fragments in profile, about 31.1% of the global land area, soil K increased by $0.0019(t \cdot hm^2 \cdot h) \cdot (hm^{-2} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1})$; and (3) The joint effect of rock fragments in profile and gravels on the surface reduced the soil erosion rate by 11.8% in the 6 sample areas. 【Conclusion】The presence of RFP increases soil K while the presence of SC does reversely. The joint effect of the two leads to decrease in soil erosion. In plotting regional soil erosion maps, it is essential to take both of the two into account so as to improve accuracy of the mapping.

Key words: Rock fragment; Rock cover; Infiltration rate; Saturated hydraulic conductivity; Soil erodibility

土壤可蚀性因子 (soil erodibility factor, K) 是 USLE^[1]、RUSLE^[2]，以及 EPIC^[3]、AGNPS^[4]等模型的基本参数；可蚀性因子值又是采用 USLE/CSLE 等模型来进行区域土壤侵蚀调查与制图所必须的重要数据^[5-7]。自 Wischmeier^[1]正式提出土壤可蚀性因子 (K) 以来，国内外学者对此进行了大量研究，提出了若干种土壤可蚀性因子估算方法。比较成熟的算法有 USLE-K 算法^[1]、RUSLE2-K 算法^[8]、EPIC-K 算法^[3]和基于平均几何粒径的算法^[9]等四种。这些算法均基于土壤理化性状指标（粒径、有机质、结构和渗透性等）来计算土壤可蚀性 K 值(式(1)～式(3))^[1]。土壤可蚀性因子计算模型中的粒径包括黏粒含量、粉粒含量、砂粒含量，但均不涉及土壤剖面砾石含量和土壤表面砾石覆盖 (Rock Fragments, $\geq 2mm$ 颗粒)。

而大量研究表明，土壤剖面中的砾石含量（以下简称剖面砾石）和土壤表面砾石覆盖对土壤水文、土壤侵蚀产沙过程和土地利用等具有重要影响^[10-13]。Brakensiek 等^[14]建立了基于剖面砾石含量推算饱和导水率的方法。Poesen 等^[15]证明，土壤表层砾石覆盖可以减少土壤可蚀性，并可以用指数衰减函数来定量估算。Zhou 和 Shao^[16-17]认为，当土壤中砾石含量大于 40%时，土壤渗透速率下降，土壤饱和导水率增加。Jomaa 等^[18]室内水槽试验表明，砾石覆盖

可以减缓雨滴打击，并减少地表水流，降低径流输移能力，一定程度上可以减轻土壤侵蚀。Hlaváčiková 等^[19]发现剖面砾石可以使饱和导水率降低，进而增加地表径流和侵蚀产沙。马晨雷等^[20]也印证了砾石覆盖使坡面总侵蚀量呈负指数减少，且砾石覆盖在冲刷流量较小的情况下，对坡面侵蚀量的减少效果更明显。

尽管 Römkens 等^[9]在 RUSLE 手册中提到了砾石对土壤可蚀性因子的影响，并将其分解为土壤剖面中砾石含量影响和土壤表面砾石覆盖影响两个方面。但是在土壤可蚀性因子计算与制图研究中（如梁音等^[21]；王彬^[22]），均未考虑剖面砾石和砾石覆盖对土壤可蚀性的影响。Panagos 等^[23]在欧洲土壤可蚀性因子计算时，对剖面砾石和砾石覆盖的影响进行了分析，并认为砾石校正因子的应用使 K-因子平均降低 15%。若不考虑剖面砾石的影响，剖面含砾石较多土壤可蚀性因子将被低估；若不考虑砾石覆盖的影响，分布于山地丘陵土壤的可蚀性将被高估。迄今为止，仍然没有全球范围内砾石含量对土壤可蚀性因子计算值的订正方法和结果。

本研究在全球范围内，利用比较容易获取的表层土壤 ($0\sim15\text{ cm}$) 质地等级、土壤剖面砾石含量、土壤表面砾石覆盖等分析估算剖面砾石含量和砾石覆盖对土壤可蚀性因子的影响，以期使土壤可蚀性的计算更加完整准确，进而提高区域土壤侵蚀预报

的精度, 本研究对全球土壤碳收支的模拟研究也具有一定意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域及数据

作为全球土壤侵蚀制图研究计划的一部分, 本研究在全球范围内展开。考虑到南极大陆和北极的格陵兰地区数据资料的缺失, 同时这些地区多被冰雪覆盖, 因此本研究不包括南极大陆和格陵兰等

地。为了便于全面分析土壤剖面砾石的影响及其空间分布, 研究区包括了水蚀地区、风蚀地区和高寒地区。研究区总面积约 1.32 亿 km², 约占地球表面面积 (1.48 亿 km²) 的 89.2%, 与全球土壤属性数据产品 (SoilGrids) 覆盖的范围基本一致。

本研究所用基本数据为 ISRIC 发布的 SoilGrids^[24], 包括土壤类型图和土壤性状图 (表层 0~15 cm 和土壤表面) 等 (表 1)。该数据最新版的原始分辨率为 7.5 弧秒, 分析过程中重采样成 30 弧秒。

表 1 基础数据清单

Table 1 Basic data list

数据 Data	来源 Source	分辨率 Resolution	用途 Use
黏粒 Clay/%			计算土壤可蚀性因子
粉粒 Silt/%			计算土壤可蚀性因子
砂粒 Sand/%			计算土壤可蚀性因子
有机碳 Soil organic carbon content / (g·kg ⁻¹)	从 ISRIC 网站 下载 ⁽¹⁾	7.5 弧秒	计算土壤可蚀性因子
质地等级数据 Class of soil texture			推算土壤饱和导水率
0~15 cm 土层砾石含量 Coarse fragments volumetric in 0~15 cm soil			计算剖面砾石对土壤侵蚀的影响
表面砾石覆盖 Gravel coverage of the surface /%			计算全球土壤表面砾石覆盖度
类型图 (WRB 系统) Global soil type map (WRB system)			分析不同土壤类型对土壤侵蚀的影响
全球土壤侵蚀因子数据 Global soil erosion factors	网络下载 ⁽²⁾	12.6 弧分	评价剖面砾石和砾石覆盖对土壤侵蚀的影响

注: 土壤数据下载网址: (1) SoilGrids: <https://files.isric.org/soilgrids/fomer/2017-03-10/data/>; (2) Borrelli^[5] 数据下载地址: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/global-soil-erosion>. Note: Download site for soil data: (1) SoilGrids: <https://files.isric.org/soilgrids/fomer/2017-03-10/data/>; (2): Download site for Borrelli^[5] data: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/global-soil-erosion>

1.2 土壤可蚀性因子计算

考虑到 USLE 模型中的土壤可蚀性因子 (K) 算法较为全面地考虑了各种土壤理化性状, 也在区域土壤侵蚀调查制图中得到了比较广泛的应用 (如 Lu 等^[25]; 梁音等^[21]; Panagos 等^[23]; Borrelli 等^[5]), 本研究以此为例讨论土壤粗颗粒物质对土壤可蚀性因子的影响。USLE 的土壤可蚀性因子计算公式如下:

$$K_{\text{USLE}} = \frac{2.1 \times 10^{-4} M^{1.14} (12 - \text{OM}) + 3.25(s-2) + K_p}{100} \times 0.1317 \quad (1)$$

$$M = (M_{\text{silt}} + M_{\text{vfs}}) \times (100 - M_c) \quad (2)$$

$$K_p = 2.5 \times (p-3) \quad (3)$$

式中, M_c 为黏粒含量, M_{silt} 为粉砂粒含量, M_{vfs} 为极细砂粒含量, OM 为有机质含量 (%), s 为土壤结构等级, P_f 为渗透性等级, K_p 为土壤渗透指数对可蚀性的影响, 不考虑剖面砾石影响的计算结果为 K_{pf} , 考虑剖面砾石影响的计算结果为 K_{pc} 。

1.3 剖面砾石含量影响的计算

本研究根据土壤孔隙度和饱和导水率关系, 及 Brakensiek 等^[14]的方法, 通过分析剖面砾石对土壤渗透等级的影响来估算剖面砾石对土壤可蚀性因子的影响。具体计算过程如下: 用土壤质地等级和表

2 规则^[26-28]，推算未考虑剖面砾石条件下的渗透等级指数 P_f ；用 P_f 据表 2 反推饱和导水率 K_s ；然后推算有剖面砾石（也叫田间土壤）和没有剖面砾石的饱和导水率（分别为 K_b 和 K_s ）的比例（式（4）），并根据式（5）反推包含了剖面砾石的土壤饱和导水率 K_b （式（5））。

$$K_b K_s = \frac{2(1 - \text{CRFVOL}/100)}{(2 + \text{CRFVOL}/100)} \quad (4)$$

$$K_b = K_b K_s \times K_s \quad (5)$$

式中， K_b 为含有剖面砾石的土壤饱和导水率， K_s 为没有剖面砾石的土壤饱和导水率，CRFVOL 为土壤剖面（0~15 cm）砾石含量。

根据表 2 中 P_f 与最后一列拟合成一个简单模型

（式（6）），再将 K_b 代入，计算田间土壤（包含剖面砾石）的渗透性等级指数 P_c 。

$$P_c = -0.969 \ln(K_b) + 5.3866 \quad (6)$$

最后，将 P_f 和 P_c 代入式（7）和式（8）计算未考虑剖面砾石的土壤可蚀性因子 (K_f) 和有剖面砾石影响的土壤可蚀性因子 (K_c)。

$$K_f = \frac{2.1 \times 10^{-4} M^{1.14} (12 - \text{OM}) + 3.27(s - 2) + K_{pf}}{100} \times 0.1317 \quad (7)$$

$$K_c = \frac{2.1 \times 10^{-4} M^{1.14} (12 - \text{OM}) + 3.25(s - 2) + K_{pc}}{100} \times 0.1317 \quad (8)$$

表 2 基于土壤质地等级/饱和导水率和渗透系数 (P) 关系表

Table 2 Relationship between classes of soil texture/saturated hydraulic conductivity and permeability coefficient (P)

质地类型 Texture type	质地等级 Texture class	渗透性等级 Permeability class P_f	饱和导水率范围 saturated hydraulic conductivity range K_s	饱和导水率均值 Average saturated hydraulic conductivity K_s
砂 Sand	12	0.5	111.84~201.67	156.76
壤砂土 Loam sand	11	1.0	61.94~123.00	92.47
砂壤土 Sand loam	9	1.5	34.31~75.02	54.66
壤土 Loam	7	2.0	19.00~45.75	32.38
粉砂壤土 Silt loam	8	2.5	10.52~27.91	19.21
粉砂 Silt	10	3.0	5.83~17.02	11.42
砂质黏壤土 Sand clay loam	6	3.5	3.23~10.38	6.80
黏壤土 Clay loam	4	4.0	1.79~6.33	4.06
粉(砂)质黏壤土 Silt clay loam	5	4.5	0.99~3.86	2.43
砂质黏土 Sand clay	3	5.0	0.55~2.36	1.45
粉砂黏土 Silt clay	2	5.5	0.30~1.44	0.87
黏土 Clay	1	6.0	0.17~0.88	0.52

1.4 砾石覆盖影响的计算

野外调查和观察表明，丘陵山区的土壤也广泛存在砾石覆盖^[10, 29]，但目前尚无砾石覆盖度的数据产品。本研究将土壤表面砾石含量近似作为砾石覆盖度，采用 Poesen 的算法（式（9））^[15]计算砾石覆

盖下的可蚀性衰减系数 S_t 。

$$S_t = e^{-0.04(R_c - 10)} \quad (9)$$

式中， S_t 为土壤可蚀性衰减系数， R_c 为砾石覆盖率（%）。

1.5 剖面砾石含量和砾石覆盖的总影响计算

将 S_t 与式(7)和式(8)计算结果结合, 土壤属性数据代入式(1), 利用本项目开发的土壤可蚀性因子计算工具 (K_{tool}), 计算得到质地分量 k_t 、有机质分量 k_0 、土壤结构性分量 k_s , 通过不考虑剖面砾石和考虑剖面砾石的土壤渗透性分量 (K_{pf} 和 K_{pc}) 推算得到不考虑剖面砾石和考虑剖面砾石的土壤可蚀性因子 (K_f , K_c)。将砾石覆盖影响因子 (S_t) 与 K_c 相乘, 得到考虑剖面砾石和砾石覆盖影响的土壤可蚀性因子 K_{cs} , 将砾石覆盖影响因子 (S_t) 与 K_f 相乘, 得到未考虑剖面砾石和有砾石覆盖影响的土壤可蚀性因子 K_{fs} 。

$$K_{\text{fs}} = S_t \times K_f \quad (10)$$

$$K_{\text{cs}} = S_t \times K_c \quad (11)$$

2 结 果

2.1 剖面砾石含量对土壤可蚀性的影响

比较未考虑剖面砾石和考虑剖面砾石时土壤可蚀性因子 K_f 和 K_c 发现, 考虑剖面砾石含量 (图 1a) 使土壤可蚀性因子值增加, 全球范围内土壤可蚀性因子值增加 $0.001123 (\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) \cdot (\text{hm}^{-2} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1})$,

平均增加为 5.43%。究其原因是由于土壤剖面中砾石的增加会降低土壤孔隙度, 进而减少入渗, 增加地表径流和土壤侵蚀产沙^[9, 23]。本研究计算结果表明, 剖面砾石使土壤饱和导水率平均减少 11.57%, 使土壤渗透性等级增加 5.68% (土壤入渗速率降低)。土壤可蚀性因子增加最多的地方在剖面砾石含量较高 (土壤平均几何粒径较大) 的撒哈拉地区 (图 1b 和图 1c), 增幅大于 20%; 减小最少的地方见于北美大平原、亚马孙平原、拉普拉塔平原、东欧平原、西西伯利亚平原和华北平原, 减幅 <1% (图 1d)。一般而言, 影响较大的区域为山地和高原, 包括: 南北美洲的科迪勒拉山系 (南美安第斯山、北美落基山脉)、加拿大东部拉布拉多高原、美国东部阿巴拉契亚山脉、东非高原和北部的撒哈拉沙漠、欧洲西北部斯堪的纳维亚山脉、西亚地区的伊朗高原、阿拉伯高原、青藏高原和天水、东西伯利亚山地、澳洲大陆的大部分地区 (图 1d)。这些地方的地形起伏度多大于 200 m。与剖面砾石含量 (图 1a) 对比表明, 剖面砾石含量越高的地方影响越明显, 特别是剖面砾石含量大于 20% 的地区。影响比较小的区域多见于平原, 如美国中西部大平原、南美平原、印度平原、东欧平原、中国的东北和华北平原、及西伯利亚平原等地区, 这些地方的地形起伏度多小于 60 m。

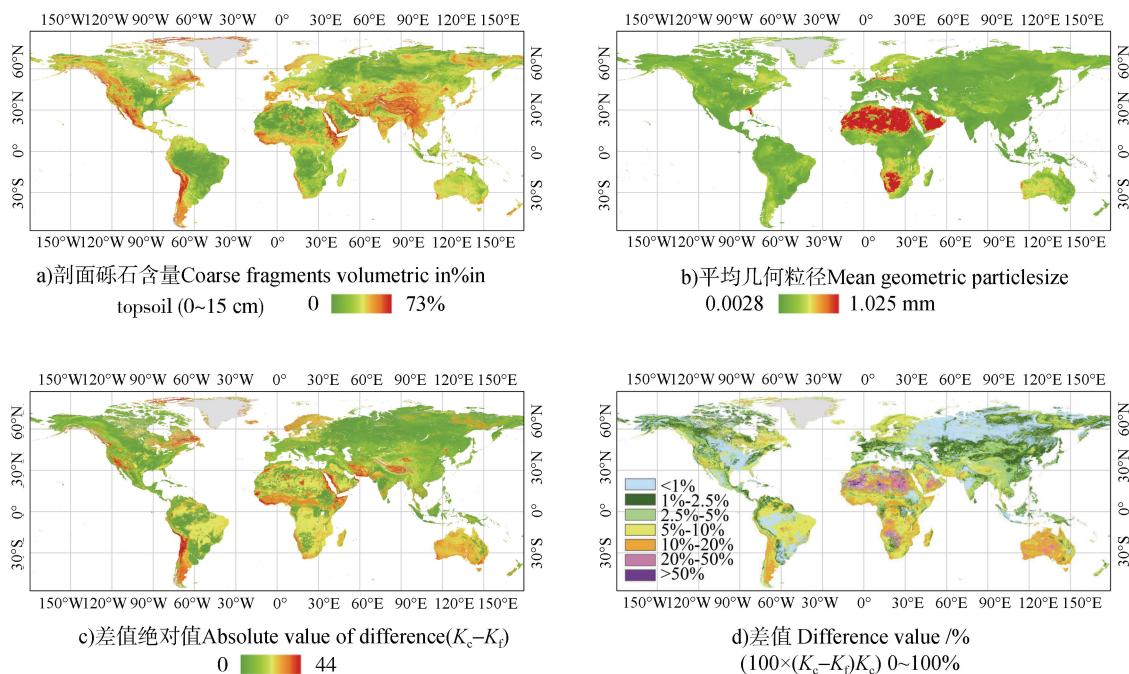


图 1 剖面砾石对土壤可蚀性因子的影响

Fig. 1 Effects of rock fragments on soil erodibility factor

将 K_c 与 K_f 的差值（图 1c）与土壤类型图对比可见，当土壤类型为砂性土（Arenosols）、低活性淋溶土（Lixisols）、灰壤（Podzols）、薄层土（Leptosols）、疏松岩性土（Regosols）和铁铝土（Ferralsols）时，对土壤可蚀性因子影响较大。因为这类土壤发育较弱，剖面砾石含量和砂粒含量较高，平均值分别为 10.511% 和 61.211%，黏粒含量和有机碳含量较低，均值分别为 19.28% 和 23.14%，且大多分布在干旱地区或呈酸性，土壤比较松散^[29]，所以较容易受到侵蚀。当土壤类型为硅胶结土（Durisols）、滞水潜育土（Stagnosols）、黏磐土（Planosols）、漂白淋溶土（Albeluvisols）和有机土（Histosols）时，对土壤可蚀性因子影响较小。这是因为这类土壤多分布在森林地带，剖面砾石含量和砂粒含量较低，平均值分别为 5.185% 和 41.72%，黏粒含量和有机碳含量较高，平均值分别为 24.44% 和 71.60%。

2.2 砾石覆盖对土壤可蚀性的影响

全球范围内而言，砾石覆盖使土壤可蚀性因子衰减系数平均为 0.911，山地高原荒漠地区可蚀性衰减系数 S_t 的均值分别为 0.641 和 0.681，使土壤可蚀性因子降低约 8.9% 和 18.7%。砾石覆盖使 K 值和土壤侵蚀减小的原理在于，砾石覆盖减缓了雨滴打击，

减少了地表水流速度，降低了径流输移能力，进而减轻土壤侵蚀^[17-18, 20]。由砾石覆盖度和砾石衰减系数图（图 2）可以看出，砾石覆盖较大的区域主要见于山地和高原，如南北美洲的太平洋沿岸山地（科迪勒拉山系）、加拿大东部拉布拉多高原、西亚地区的伊朗高原、青藏高原及澳大利亚零星地区。与前述剖面砾石影响比较，范围较小。这些地方土壤表面砾石覆盖度较大，平均值为 21.16%。而其他地区（平原、波状平原和俄罗斯远东地区的缓坡丘陵等）则影响轻微，砾石衰减系数一般为 0.9 左右。就土壤类型看，影响比较大的有暗色土（Umbrisols）、薄层土（Leptosols）、疏松岩性土（Regosols）和寒冻土（Cryosols）； S_t 平均值较低，衰减系统介于 0.57~0.63，平均为 0.60（表 3）。这组土壤发育程度较低，粗颗粒成分和地表砾石覆盖度较大^[29]，平均砾石覆盖度为 16.13%，所以对 S_t 的影响更大。而其他地区（平原、缓坡丘陵等）则影响轻微，土壤类型为聚铁网纹土（Plinthosols）、铁铝土（Ferralsols）、黏绨土（Nitisols）和黏磐土（Planosols）等土壤，衰减系统介于 0.84~0.92，平均为 0.88；这组土壤发育相对较好、砾石覆盖度较低，平均为 4.31%。

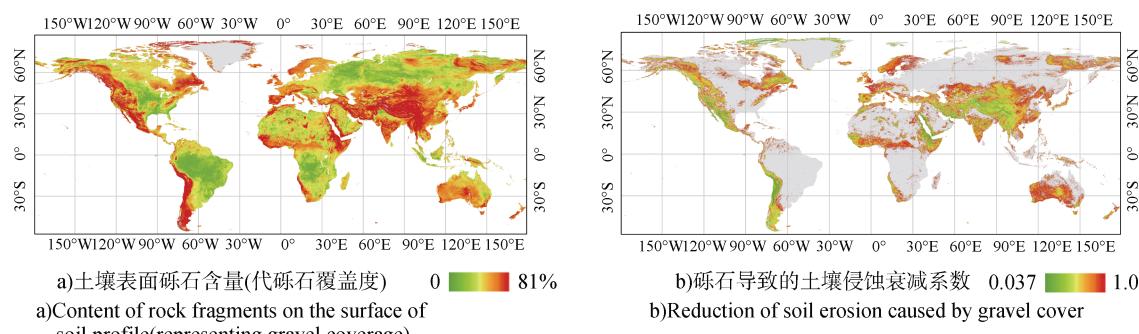


图 2 土壤表面砾石对土壤可蚀性因子的影响

Fig. 2 Effects of gravel coverage on soil erodibility factor

表 3 几种土壤类型的 S_t 均值

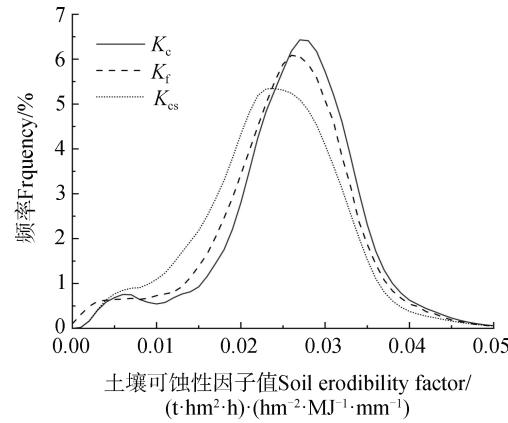
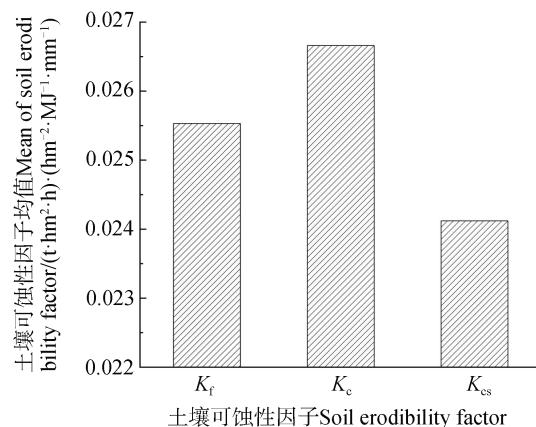
Table 3 Mean of S_t (soil erodibility reduction factor) relative to soil types

土壤类型 Soil type	寒冻土 Cryosols	松软岩性土 Regosols	薄层土 Leptosols	暗色土 Umbrisols	聚铁网纹土 Plinthosols	铁铝土 Ferralsols	黏绨土 Nitisols	黏磐土 Planosols
S_t 均值 Mean of S_t	0.625	0.625	0.590	0.574	0.923	0.856	0.845	0.838
砾石覆盖度 Gravel cover	8.185	18.304	16.019	22.001	4.630	3.345	5.827	3.426

2.3 剖面砾石含量和砾石覆盖的总影响

前述分析可见,剖面砾石和砾石覆盖对土壤可蚀性因子均具有影响,但方向相反,这与前期研究的认识一致^[15, 30]。对不考虑剖面砾石和砾石覆盖、只考虑剖面砾石、只考虑砾石覆盖、同时考虑了剖面砾石和砾石覆盖影响的土壤可蚀性因子计算(K_f 、 K_c 、 K_{fs} 、 K_{cs})的统计(图3)表明,剖面砾石使土壤可蚀性因子增加(增幅 $0.001\ 1\ (\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h})\cdot(\text{hm}^{-2}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1})$)、砾石覆盖使土壤可蚀性因子减小(减幅 $0.0024\ (\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h})\cdot(\text{hm}^{-2}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1})$)、当剖面砾石和砾石覆盖均考虑时总体上使土壤可蚀性因子减小(减幅 $0.001\ (\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h})\cdot(\text{hm}^{-2}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1})$)。土壤可蚀性因子降低区域占总面积62.7%,增加区域占总面积31.1%,减少和增加的均值分别为 $0.006\ 4\ (\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h})\cdot(\text{hm}^{-2}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1})$ 和 $0.000\ 9\ (\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h})\cdot(\text{hm}^{-2}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1})$,其中明显增减的面积分别约占20%。这说明从总体上看,砾石覆盖的作用更大,如果不考虑剖面砾石和砾石覆盖,则总体使土壤可蚀性因子被高估。不考虑剖面砾石和砾石覆盖的土壤可蚀性因子和考虑了砾石含量的土壤可蚀性因子差值图(图4)可以清晰地表达粗颗粒物质的综合影响。砾石覆盖影响为主的情形(相对于 K_f ,土壤可蚀性因子值减小,图面上的紫色区域)见于山

地、高原和戈壁,地理区域详见3.1,这些区域土壤可蚀性因子减小的平均值为 $0.009\ 1\ (\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h})\cdot(\text{hm}^{-2}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1})$;主要的土壤类型为薄层土(Leptosols)、高活性淋溶土(Luvisols)、钙积土(Calcisols)、灰壤(Podzols)等。剖面砾石影响为主的情形(相对于 K_f ,土壤可蚀性因子值增加,图面上的绿色区域)见于土壤剖面砾石含量比较高的地区,但这些地区零星分布,主要见于北美的东北部、南美的东部和西北部、非洲的东部、西欧以及澳洲大陆的北部;这些区域土壤可蚀性因子增加的平均值为 $0.001\ 9\ (\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h})\cdot(\text{hm}^{-2}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1})$ 。主要的土壤类型为砂性土(Arenosols)、铁铝土(Ferralsols)、雏形土(Cambisols)和寒冻土(Cryosols)等。基本未影响的情形(相对于 K_f ,土壤可蚀性因子值变幅绝对值小于 $0.000\ 1$,图面上的灰色区域)见于平原,如美国中西部大平原、南美平原、印度平原、东欧平原、中国的东北和华北平原、及西伯利亚平原等地区,面积占6.18%。土壤类型主要有有机土(Histosols)、低活性强酸土(Acrisols)、漂白淋溶土(Albeluvisols)等。这些地方基本上为平原,土壤剖面砾石含量(12.3%)、和砾石覆盖(12.7%)含量小,对土壤可蚀性因子没有明显的影响。



注: K_f 不考虑剖面砾石和砾石覆盖、 K_c 仅考虑剖面砾石和 K_{cs} 同时考虑剖面砾石和砾石覆盖。Note: K_f represents the mean value of soil erodibility factor without considering RFP and gravel coverage, K_c represents only considering RFP and K_{cs} represents considering both RFP and gravel coverage.

图3 各种 K 因子值均值对照
Fig. 3 Comparison of the mean values of various K

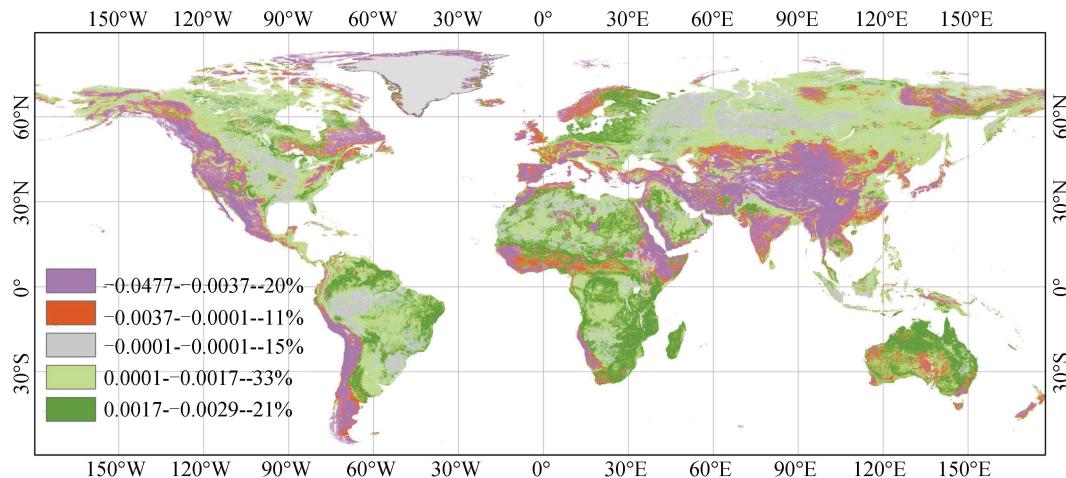


图4 有无砾石含量影响的土壤可蚀性因子差值图

Fig.4 Difference graph of soil erodibility factor as affected by the content of rock fragments

2.4 砾石含量对土壤侵蚀评价的影响

6个样区的分析表明(表4),以砾石覆盖为主的情况如下(SS1, SS3 和 SS6样区),土壤剖面砾石的作用使土壤水蚀流失速率略增加(幅度为2.3%~4.7%,平均为2.6%),土壤表面砾石覆盖和剖面砾石共同作用使流失速率减少17%~28.4%、平均为22.8%(土壤水蚀流失速率减小 $181\text{ t}\cdot(\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$);由此推算单独砾石覆盖使之减少19.5%~31.6%,平均为27.3%。以剖面砾石作用为主的样区(SS2, SS5),剖面砾石的作用使流失速率略有增加,幅度为3.7%~10.5%、平均为7.0%,砾石覆盖和剖面砾石共同作用下流失速率增加2.1%~7.6%,平均为4.85%(土壤水蚀流失速率增加 $7\text{ t}\cdot(\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$),单独砾石覆盖使之减少1.6%~2.9%,平均为2.3%。两种作用均有的一个样区(SS4)位于澳大利亚,剖面砾石的作用使流失速率增加17.1%,共同作用减小8.4%(土壤水蚀流失速率减小 $2\text{ t}\cdot(\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$),推算砾石覆盖单独减少25.5%,剖面砾石的作用略大。全球范围内,剖面砾石作用使土壤水蚀流失速率增加4.8%,砾石覆盖和剖面砾石共同作用使流失速率减少14.7%(土壤水蚀流失速率减小 $54\text{ t}\cdot(\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$),由此推算单独砾石覆盖使之减少19.5%。

3 讨论

3.1 砾石覆盖

文献报道(如Miller和Guthrie^[10]; Weil和

Brady^[28])、野外观察和1cm分辨率高分无人机影像(图5a)均表明,丘陵山区土壤广泛存在砾石覆盖。在戈壁地区地表砾石覆盖度可达到50%^[10, 31-32],黄土地区碳酸盐结核(俗名料姜石)出露地表,也属于类似情况^[33]。美国西部大约有17%的土系砾石含量大于35%,所占面积超过15%^[10]。所以,尽管土壤侵蚀模型研究者注意到了这个问题(如毕小刚^[34]; Römkens^[9]),但由于缺少覆盖大区域的砾石覆盖度数据(类似于LUCAS database, Panagos^[23]),目前最高分辨率的卫星影像也无法提取这些信息(图5b),所以长期以来的K值计算大多数未考虑砾石覆盖的影响。

作为一种初步的尝试和无奈的研究方案,本文用土壤表面砾石含量代替砾石覆盖,虽然实现了对砾石覆盖影响的分析,但因为土壤学中所用数据和砾石覆盖的概念不完全相同^[10, 27],因此本文分析的土壤表面砾石覆盖,未考虑大石块(cm级甚至更大)的覆盖,理论上讲是不严密的。与Panagos等^[23]的分析相比(图6),一方面其空间格局相似、并且总影响与欧洲地区的接近(土壤侵蚀速率减少16%左右),一方面本文的结果偏大。今后可通过改善数据(如典型地区野外调查、查阅土壤普查报告等),分析土壤普查和制图数据中对于砾石相关的土相的记载^[27],逐步改善砾石覆盖含量对土壤可蚀性影响的全面估算。

表4 典型样区砾石含量对土壤水蚀流失速率的影响

Table 4 Effects of rock fragment on soil erosion rate in the sample areas

专题层 Themes	变化		变化		变化		变化		变化		变化	
	SS1	Variation/ %	SS3	Variation/ %	SS6	Variation/ %	SS2	Variation/ %	SS5	Variation/ %	SS4	Variation/ %
R	374.4	—	1 310	—	3 506	—	366.3	—	8660.4	—	499.0	—
K	0.031	—	0.036	—	0.027	—	0.028	—	0.017	—	0.012	—
LS	2.73	—	6.3	—	0.96	—	0.35	—	0.89	—	0.38	—
C	0.063	—	0.059	—	0.154	—	0.051	—	0.012	—	0.115	—
Af	159.6	—	1156.2	—	1071.3	—	19.7	—	180.8	—	26.6	—
Ac	167.0	4.7	1185.5	2.5	1096.0	2.3	20.4	3.7	199.8	10.5	31.2	17.1
Acs	116.6	-26.9	959.4	-17	767.1	-28.4	20.1	2.1	194.4	7.6	24.4	-8.4

注: R 的单位为 $(\text{MJ} \cdot \text{mm}) \cdot (\text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$ 或 $(\text{MJ} \cdot \text{mm}) \cdot (\text{km}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$; K 的单位为 $(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) \cdot (\text{hm}^{-2} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1})$; Af 为未考虑砾石含量的土壤流失速率, Ac 为只考虑剖面砾石含量的土壤流失速率, Acs 为考虑了剖面砾石含量和砾石覆盖的土壤流失速率, 单位为 $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。Note: The unit of R is $(\text{MJ} \cdot \text{mm}) \cdot (\text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$ or $(\text{MJ} \cdot \text{mm}) \cdot (\text{km}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$; the unit of K is $(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) \cdot (\text{hm}^{-2} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1})$; Af stands for soil erosion rate without REP taken into account, Ac for soil erosion rate with REP taken into account, Acs for soil erosion rate with both REP and gravel coverage taken into account, and the unit is $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$.

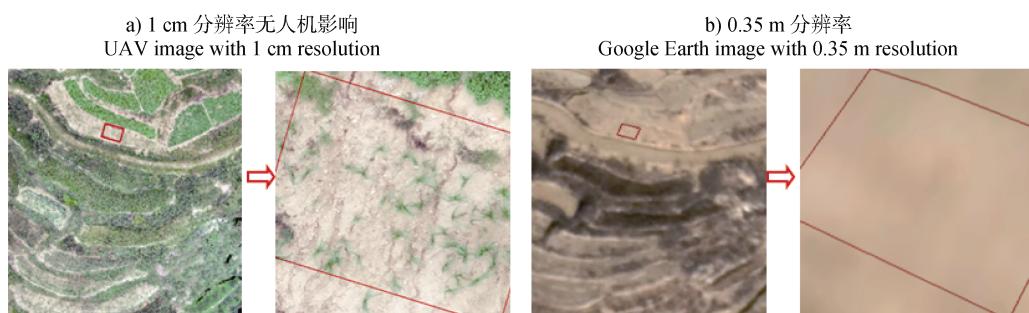


图5 山东沂蒙山区(临朐县)曾家沟局地砾石覆盖情况

Fig. 5 Gravel coverage of Zengjiagou in Yimeng mountain area (Linqu county), Shandong

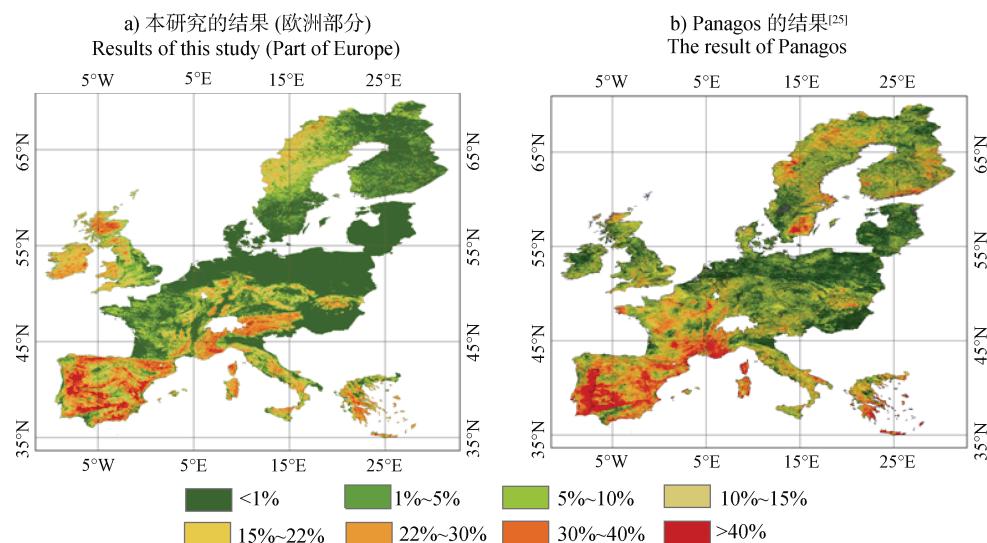


图6 本次计算与Panagos (2014)计算的砾石衰减系数对比

Fig. 6 Comparison between the calculation in this study and that with the Panagos (2014) equation in gravel attenuation coefficient

3.2 关于相关K因子算法的修正

本文引言部分提到,土壤可蚀性因子的估算有多种算法,如USLE-K算法^[1]、RUSLE2-K算法^[8]、EPIC-K算法^[3]和基于平均几何粒径的算法^[9]等。本文作为一种方法的探讨,以USLE-K算法为例进行分析,形成的计算方法对其他算法基本适用。砾石覆盖计算,只需要砾石覆盖度数据,用式(9)完成砾石覆盖下的可蚀性衰减系数St计算,然后用式(11)可完成对任一可蚀性因子计算结果的砾石覆盖的修正,这一过程与土壤可蚀性因子算法无关。但是对于剖面粗砂影响的修正,因为需要通过土壤饱和导水率—土壤渗透性(式(6)和式(8))来推算K值的增减,所以式(11)对EPIC算法、基于几何平均粒径的算法还不能直接应用,需要进一步研究。

3.3 砾石含量对K的影响机理

砾石覆盖对土壤产流、侵蚀产沙的影响比较复杂。一些研究与本文的计算结果并不一致,如Zavala等^[35]的研究表明,砾石存在会增加地表积水、阻滞产流、增加入渗、降低土壤流失速率。王蕙等^[13]的研究表明,土壤中砾石的存在将对整个水文循环产生影响,嵌套于土壤中的砾石可以增加地表入渗,阻碍坡面侵蚀。同时,还有试验研究表明,砾石(包括土壤剖面中的和土壤表面覆盖的)影响,需要考虑的因素较多,包括砾石的位置和形状、土壤孔隙类型、土壤表面坡度和侵蚀的微形态特征等^[11,30,36]。这些研究均表明,砾石覆盖对土壤侵蚀的影响比较复杂,有待从侵蚀产沙物理过程出发集成更多的试验研究数据,全面评估砾石覆盖对入渗、产流和侵蚀产沙的影响,进而准确评价其对土壤可蚀性因子的影响。

3.4 砾石含量对风蚀的可蚀性影响

研究表明砾石覆盖对风蚀速率有重要影响^[32,37-38]。一些风蚀预报模型,如风蚀方程(Wind Erosion Equation, WEQ)^[39]、修正风蚀方程(Revised Wind Erosion Equation, RWEQ)^[40]、风蚀预报系统(Wind Erosion Prediction System, WEPS)等^[41],均需要土壤可蚀性因子(soil erodibility factor)。尽管风蚀模型中的土壤可蚀性因子与USLE的K因子的估算方法有所不同,但砾石覆盖、剖面砾石含量均对其有影响^[38]。因此,如果将本研究的式(8)、

式(10)和式(11)做必要的修改,有可能用于风蚀预报方程WEP的土壤可蚀性因子计算、提高风蚀预报的精度。

4 结 论

基于全球1 km分辨率土壤属性数据SoilGrids的计算表明,土壤剖面中砾石的存在,使土壤渗透性等级增加5.68%,土壤饱和导水率降低11.57%,全球土壤可蚀性因子增加4.43%;砾石覆盖通过保护土壤免遭雨滴打击和径流冲刷减少土壤侵蚀,在山地、荒漠(沙漠和戈壁)地区,这一影响会使土壤可蚀性值减小约18.7%;土壤剖面砾石含量和土壤表面砾石覆盖的综合影响,使土壤可蚀性因子降低5.52%。以砾石覆盖影响为主的地区,土壤可蚀性因子可降低 $0.0091(t \cdot hm^2 \cdot h) \cdot (hm^{-2} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1})$;以剖面砾石影响为主的地区,土壤可蚀性因子增加 $0.0019(t \cdot hm^2 \cdot h) \cdot (hm^{-2} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1})$;初步计算砾石含量可使全球土壤流失速率减少约 $54 t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ (14.7%)。在土壤可蚀性因子(K)计算和制图中充分考虑砾石含量的影响,计算所得土壤可蚀性因子会更加准确;同时,本研究对风蚀预报也具有参考价值。

致 谢 中山大学上官微副教授对本文数据应用提供了指导意见,特此致谢!

参考文献 (References)

- [1] Wischmeier W H, Smith D D, Administration S A E, et al. Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning[EB/OL]. 1978.
- [2] Renard K G. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss equation (RUSLE) [EB/OL]. 1997.
- [3] Sharpley A N, Williams J R. Epic-erosion/productivity impact calculator[M]. 1. 1. Model determination. Technical bulletin 1768. United States Department of Agriculture, 1989.
- [4] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, et al. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 44 (2) : 168—173.
- [5] 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: 2013.

- [6] Cheng L, Yang Q K, Xie H X, et al. GIS and CSLE based quantitative assessment of soil erosion in Shaanxi, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23 (5) : 61—66. [程琳, 杨勤科, 谢红霞, 等. 基于GIS 和 CSLE 的陕西省土壤侵蚀定量评价方法研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23 (5) : 61—66.]
- [7] Liu B Y, Guo S Y, Li Z G, et al. Sampling survey of hydraulic erosion in China[J]. Soil and Water Conservation in China, 2013 (10) : 26—34. [刘宝元, 郭索彦, 李智广, 等. 中国水力侵蚀抽样调查[J]. 中国水土保持, 2013 (10) : 26—34.]
- [8] Science documentation - Revised universal soil loss equation version 2 (RUSLE2) [EB/OL]. 2008.
- [9] Römkens M J M, Young R A, Poesen J W A, et al. Soil erodibility factor(k)// Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M]. USDA agriculture handbook , 1997, 703: 65—100.
- [10] Miller F T, Guthrie R L. Classification and distribution of soils containing rock fragments in the United States[M]//Erosion and Productivity of Soils Containing Rock Fragments. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, 2015: 1—6.
- [11] Poesen J, Lavee H. Rock fragments in top soils: Significance and processes[J]. Catena, 1994, 23 (1/2) : 1—28.
- [12] Lü J R, Zhang W B, Hu J S, et al. Effects of rock fragment content on erosion characteristics of spoil heaps under multiple rainfall events[J]. Advances in Water Science, 2019, 30 (2) : 210—219. [吕皎容, 张文博, 胡锦昇, 等. 连续降雨下不同砾石含量工程堆积体土壤侵蚀[J]. 水科学进展, 2019, 30 (2) : 210—219.]
- [13] Wang H, Lu D B, Huang D J, et al. On the erosion characteristics of red soil slope with different gravel existence forms[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17 (4) : 49—58. [王蕙, 卢德宝, 黄冬菁, 等. 不同砾石存在形式红壤坡面侵蚀特征的比较[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17 (4) : 49—58.]
- [14] Brakensiek D L, Rawls W J, Stephenson G R. Determining the saturated hydraulic conductivity of a soil containing rock fragments[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50 (3) : 834—835.
- [15] Poesen J W, Torri D, Bunte K. Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: A review[J]. Catena, 1994, 23 (1/2) : 141—166.
- [16] Zhou B B, Shao M A, Shao H B. Effects of rock fragments on water movement and solute transport in a Loess Plateau soil[J]. Comptes Rendus Geoscience, 2009, 341 (6) : 462—472.
- [17] Zhou B B, Shao M A. Effect of content and size of rock detritus on infiltration[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44 (5) : 801—807. [周蓓蓓, 邵明安. 不同碎石含量及直径对土壤水分入渗过程的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44 (5) : 801—807.]
- [18] Jomaa S, Barry D A, Heng B C P, et al. Influence of rock fragment coverage on soil erosion and hydrological response: Laboratory flume experiments and modeling[J]. Water Resources Research, 2012, 48 (5) : W05535.
- [19] Hlaváčiková H, Novák V, Šimůnek J. The effects of rock fragment shapes and positions on modeled hydraulic conductivities of stony soils[J]. Geoderma, 2016, 281: 39—48.
- [20] Ma C L, Dai C T, Liu Y J, et al. Effects of gravel covering on hydraulic characteristics of slope flow on purple soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33 (6) : 150—155, 161. [马晨雷, 戴翠婷, 刘窑军, 等. 砾石覆盖对紫色土坡面流水动力学参数的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33 (6) : 150—155, 161.]
- [21] Liang Y, Liu X C, Cao L X, et al. K value calculation of soil erodibility of China water erosion areas and its macro-distribution[J]. Soil and Water Conservation in China, 2013 (10) : 35—40, 79. [梁音, 刘宪春, 曹龙熹, 等. 中国水蚀区土壤可蚀性 K 值计算与宏观分布[J]. 中国水土保持, 2013 (10) : 35—40, 9.]
- [22] Wang B. Dynamic mechanism of soil erodibility and soil erodibility calculation model[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2013. [王彬. 土壤可蚀性动态变化机制与土壤可蚀性估算模型[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2013.]
- [23] Panagos P, Meusburger K, Ballabio C, et al. Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS[J]. Science of the Total Environment, 2014, 479/480: 189—200.
- [24] Hengl T, Mendes de Jesus J, Heuvelink G B M, et al. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning[J]. PLoS One, 2017, 12(2): e0169748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>.
- [25] Lu H, Prosser I P, Moran C J, et al. Predicting sheetwash and rill erosion over the Australian continent[J]. Soil Research, 2003, 41 (6) : 1037—1062.
- [26] Rawls W J, Brakensiek D L, Saxton K E. Estimation of soil water properties[J]. Transactions of the ASAE, 1982, 25 (5) : 1316—1320.
- [27] USDA-NRCS. National soil survey handbook , title 430-vi., 2019.
- [28] Weil R R, Brady N C. The nature and properties of soils. New York: Pearson Education Limited, 2017.
- [29] WRB I W G. World reference base for soil resources 2006: A framework for international classification, correlation and communication[EB/OL]. 2006.
- [30] Wang X Y, Li Z X, Xu Q X, et al. Review of effects of rock fragment cover on soil water erosion processes[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9 (1) : 115—120. [王小燕, 李朝霞, 徐勤学, 等. 砾石覆盖对

- 土壤水蚀过程影响的研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9 (1) : 115—120.]
- [31] Mu Y. Research on multi-scale quantitative estimation and spatial distribution analysis of the characteristics of Gobi surficial gravel[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2017.[穆悦. 戈壁表面多尺度砾石特征参数估算及其空间分布规律研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.]
- [32] Wang X M, Lang L L, Hua T, et al. Gravel cover of Gobi desert and its significance for wind erosion : An experimental study[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33 (2) : 313—319. [王训明, 郎丽丽, 花婷, 等. 戈壁砾石覆盖度与风蚀强度关系实验研究[J]. 中国沙漠, 2013, 33 (2) : 313—319.]
- [33] Zhu Y J, Shao M A. Spatial distribution of topsoil gravel in small watershed in the Loess Plateau[J]. Science in China: Series D: Earth Sciences, 2008, 38(3):375—383. [朱元骏, 邵明安. 黄土高原水蚀风蚀交错带小流域坡面表土砾石空间分布[J]. 中国科学: D辑: 地球科学, 2008, 38 (3) : 375—383.]
- [34] Bi X G, Duan S H, Li Y G, et al. Study on soil loss equation in Beijing[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4 (4) : 6—13. [毕小刚, 段淑怀, 李永贵, 等. 北京山区土壤流失方程探讨[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4 (4) : 6—13.]
- [35] Zavala L M, Jordán A, Bellinfante N, et al. Relationships between rock fragment cover and soil hydrological response in a mediterranean environment[J]. Soil Science & Plant Nutrition, 2010, 56 (1) : 95—104.
- [36] Poesen J, Ingelmo-Sánchez F. Runoff and sediment yield from topsoils with different porosity as affected by rock fragment cover and position[J]. Catena, 1992, 19 (5) : 451—474.
- [37] Sun Y C, Ma S S, Chen Z, et al. Wind tunnel simulation of impact of gravel coverage on soil erosion in arid farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26 (11) : 151—155. [孙悦超, 麻硕士, 陈智, 等. 砾石覆盖对抑制旱作农田土壤风蚀效果的风洞模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26 (11) : 151—155.]
- [38] Jarrah M, Mayel S, Tatarko J, et al. A review of wind erosion models : Data requirements, processes, and validity[J]. Catena, 2020, 187: 104388.
- [39] Woodruff N P, Siddoway F H. A wind erosion equation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1965, 29 (5) : 602.
- [40] Fryrear D W, Bilbro J D, Saleh A, et al. RWEQ: Improved wind erosion technology[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 55 (2) : 183—189.
- [41] Wagner L E. A history of wind erosion prediction models in the United States department of agriculture: The wind erosion prediction system(WEPS)[J]. Aeolian Research, 2013, 10: 9—24.

(责任编辑: 檀满枝)