

基于 USLE 的甘南川西北土壤侵蚀研究

魏健美^{1,2}, 李常斌^{1,2}, 武磊^{1,2}, 谢旭红^{1,2}, 吕佳南^{1,2}, 周璇^{1,2}

(1.兰州大学资源环境学院,兰州 730000;2.兰州大学西部环境教育部重点实验室,兰州 730000)

摘要: 甘南川西北位于黄河和长江上游源区,量化研究该区土壤侵蚀对河源区生态安全保障和地方经济可持续发展具有重要意义。论文采用多种数据方法,基于 USLE 就甘南川西北 2000—2015 年间土壤侵蚀的时空分布特征及变化规律进行量化评估。结果表明:(1)降雨侵蚀力因子 R 值介于 $65 \sim 411(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,高值区主要分布在东南部,空间分布与该区降雨格局基本一致;(2)土壤可蚀性因子 K 值介于 $0.19 \sim 0.41(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$,高值呈斑块状零星分布,与地带性土壤物化性状有关;(3)坡长坡度因子 LS 值介于 $0 \sim 8.24$,高值主要分布在中北部高山地带,低值分布在东北部和西南部地形较平缓区域;(4)植被覆盖管理因子 C 值介于 $0 \sim 1$,高值集中分布在研究区的西北部与西南部,与该区植被覆盖稀疏有关;(5)基于 USLE 的甘南川西北年侵蚀量为 $3.3 \times 10^8 \text{ t/a}$,总体表现为轻度侵蚀;(6)2000—2015 年间,研究区土壤侵蚀呈减弱态势,与增温背景下植被活动增强有关。

关键词: 土壤侵蚀; USLE; 评价; 甘南川西北

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)02-0031-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.02.005

Study on Soil Erosion in Northwestern Sichuan and Southern Gansu (NSSG) Based on USLE

WEI Jianmei^{1,2}, LI Changbin^{1,2}, WU Lei^{1,2}, XIE Xuhong^{1,2}, LÜ Jianan^{1,2}, ZHOU Xuan^{1,2}

(1.College of Earth and Environment Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000; 2.Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

Abstract: Northwestern Sichuan and southern Gansu (NSSG) is located in the source areas of Yellow River and Yangtze River. Quantitative study of soil erosion in this area is of great significance for ecological security of large river source region and sustainable development of local economy. In this study, variously sourced data, combined with a variety of methods were used to quantitatively evaluate the temporal and spatial distribution characteristics and change rules of soil erosion in NSSG from 2000 to 2015 based on USLE. The results showed that: (1) R values representing rainfall erosivity ranged from 65 to 411 $(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$, and the high values were mainly found in southeast part, and the spatial distribution of high values was consistent with the rainfall pattern. (2) Soil erodibility K ranged from 0.19 to 0.41 $(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$, the high values sporadically distributed in space, which was mainly influenced by the physical and chemical properties of zonal soil. (3) The slope length and slope gradient factor LS ranged from 0 to 8.24, the high values were mainly distributed in high mountains of the middle and North parts of research area, while the low values were found more in the northeast and southwest regions with gentle terrain. (4) Factor C of vegetation cover management ranged from 0 to 1, the high values were concentrated in the northwest and southwest parts, where the vegetation cover was relatively low. (5) Based on USLE, the annual erosion amount of NSSG was $3.3 \times 10^8 \text{ t/a}$, which was generally characterized by mild erosion. (6) From 2000 to 2015, soil erosion in NSSG showed a weakening trend, which was related to the enhancement of vegetation activities under the background of warming.

Keywords: soil erosion; USLE; evaluation; northwestern Sichuan and southern Gansu (NSSG)

收稿日期: 2020-10-02

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504801, 2017YFC0504306); 国家自然科学基金面上项目“变化环境下的洮河流域生态水文响应机制及其阈值体系研究”(41671017); 兰州大学西部环境教育部重点实验室开放基金及兰州大学中央高校基本科研业务费专项(lzujbky-2020-kb01)

第一作者: 魏健美(1996—), 女, 河南漯河人, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: weijm18@lzu.edu.cn

通信作者: 李常斌(1976—), 男, 甘肃靖远人, 博士, 教授, 主要从事寒旱区水文及水资源研究。E-mail: licb@lzu.edu.cn

甘南川西北地处黄河、长江上游,域内林草广袤,湿地发育,对河川径流的形成发挥着重要补给和调节作用,是我国重要的水源涵养生态功能区。近几十年来,在气候变化和人类活动双重影响下,甘南川西北草地和湿地面积发生变化,牧草比例减少,沼泽湿地萎缩,沙化草地和次生裸地面积增大,水土流失等环境问题日益突出,对区内生态安全及地方经济发展造成威胁。甘南川西北生态环境问题,引起各级政府和国内外学者的广泛关注,国家也启动一系列项目和生态建设工程进行治理并取得一定成效,但“整体好转,局部退化”的情况仍然存在。甘南川西北土壤侵蚀问题研究是该区土地生产力评估和林草生态恢复重建的理论基础,也是江河源区生态功能保障和生态文明建设的重要组成部分,具有理论和实践方面的双重意义,但相关工作较少见于报道。

土壤侵蚀计算方法主要有 2 类:一类是传统实地测量分析,野外工作较繁重,拓展应用时因尺度上移存在诸多不确定性,在大尺度如区域研究中受到限制;另一类是各种经验或物理的专业模型应用,常见的有 USLE (Universal Soil Loss Equation)、WEPP (Water Erosion Prediction Project)、ANSWERS (A Real Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation) 和 LISEM (Limburg Soil Erosion Model) 等。其中,WEPP 模型适宜于农牧用地产流产沙过程量化^[1],ANSWERS 在环境因子对土壤侵蚀的影响分析方面效果良好^[2],LESEM 基于次降雨过程进行产流产沙模拟,是物理机制较为完善的次过程分析模型^[3]。以上几种模型变量和参数众多,机制相对复杂,率定难度较大;相较而言,通用土壤流失方程 USLE 模型机制简单,数据易获取,时空尺度局限性较小,有利于区域尺度降雨土壤侵蚀的量化研究^[4],在全球各地应用广泛。

基于 USLE 可定量研究流域、区域尺度土壤侵蚀动态变化,按侵蚀量大小厘定土壤侵蚀指数进行程度或敏感性分级,便于重点侵蚀监测区划定,可为水土保持工程的实施奠定基础^[5];也有研究^[6]基于观测,通过优化不同植被类型土壤侵蚀因子的计算方法,完善和提升 USLE 关于土壤侵蚀评估的精度;有学者^[7]在 USLE 中引入元素指标如磷、氮含量等研究土壤侵蚀对元素迁移的影响;另外,USLE 还被用于全球变化区域响应研究,通过模式应用探讨土壤侵蚀与土地利用、气候变化等因素之间的协同或响应^[8-10]。

本研究采用 USLE 对甘南川西北土壤侵蚀的时空变化进行研究,主要目标有:(1)基于 USLE 框架,计算分析甘南川西北土壤侵蚀各因子的时空分布特征;(2)根据 USLE 模拟结果,量化分析甘南川西北

2000—2015 年间土壤侵蚀及其变化特征。以期为江河源区水土流失治理、水源涵养及生态环境保护提供数据方法实例参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

甘南川西北是甘肃省南部和四川省西北部的简写,总体位于青藏高原东北部,黄河和长江上游,地理位置介于 97°21'—104°45'E,27°57'—35°34'N,区划包括四川省阿坝藏族羌族自治州、甘孜藏族自治州和甘肃省甘南藏族自治州 3 个行政单元(图 1a),下辖 39 个县。甘南川西北总面积 28.1 万 km²,海拔 792~7 336 m,地形地貌以高原山地和高山峡谷为主,属大陆性季风高原气候,是长江和黄河上游重要的水源涵养地。域内年均气温 0~6℃,年均降水量 592~775 mm,温湿季节集中在 5—9 月。境内沟壑纵横,水系发达,高寒草甸广布,湿地发育,在净化水质、调洪补枯、水源涵养等方面发挥着重要作用,是黄河和长江源头的重要生态保护屏障(图 1b)。因地理环境独特,生态水文系统对气候变化及人类活动较为敏感;区内林草面积占比大,生产方式以畜牧业为主,土壤类型主要有黑毡土、草毡土、暗棕壤、棕壤和寒冻土等。

1.2 数据与方法

1.2.1 USLE USLE 适用于特定土地管理背景下较长时期土壤侵蚀量化评估,应用十分广泛。USLE 用于刻画土壤侵蚀原动力及地表抗力的因子有 6 个,包括降雨侵蚀力因子 R 、土壤可蚀性因子 K 、坡长坡度因子 L 和 S 、植被覆盖管理因子 C 以及水土保持措施因子 P 。模型以 6 个因子的乘积表征降雨和下垫面共同作用下的单位面积潜在土壤流失速率:

$$A=RKLS\text{C}P \tag{1}$$

式中: A 为土壤侵蚀模数($\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$); R 为降雨侵蚀力因子($(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$); K 为土壤可蚀性因子($(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$); LS 为坡长坡度因子,无量纲; C 为植被覆盖管理因子,无量纲,值域范围 0~1; P 为水土保持措施因子,与土地利用类型相关,无量纲,值域范围 0~1。USLE 用到的数据类型众多,采用情况见表 1。

(1)USLE 中 R 值的计算基于月、年累积降雨量。研究采用中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集(China Meteorological Forcing Dataset, CMFD),由寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>)发布,空间分辨率为 0.1°(表 1)。根据与站点实测降水数据对比^[11-13],数据精度良好(图 2)。对 CMFD 数据经反距离加权重采样,得到 1 km 分辨率数据,用于甘南川西北 R 值计算,计算公式为^[14]:

$$R=\sum_{i=1}^{12}1.735\times10\left[1.5\lg\frac{P_i^2}{P}-0.8188\right]\quad(2)$$

式中: i 为月序; P_i 为月降雨量 (mm); P 为年降雨量 (mm); R 为年降雨侵蚀力 ((MJ · mm)/(hm² · h · a))。该公式考虑了年雨量及其年内分布,能够比较准确地反映区域降雨对土壤侵蚀的贡献率。

(2)土壤可蚀性因子 K 值反映因土壤质地不同

引起的土壤侵蚀大小差异, K 值越大,土壤越容易发生侵蚀。研究采用侵蚀生产力影响模型 EPIC 中的 K 值公式进行估算。该公式结构简单,只需土壤有机质和砂、粉、黏 3 种粒径颗粒的百分比含量,相关数据来自国际科技资源共享服务平台—国家地球系统科学数据中心(<http://soil.geodata.cn>,表 1)。

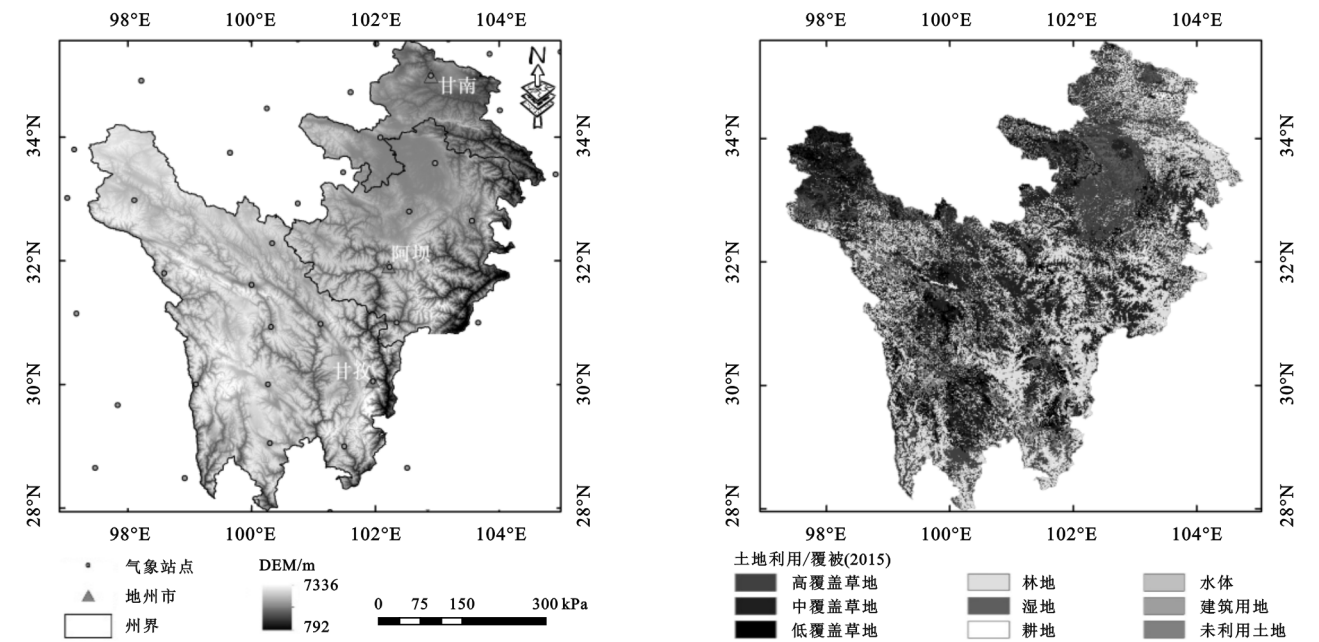


图 1 甘南川行政区划、土地利用/覆被概况

表 1 USLE 各因子数据汇总

因子	数据集	发布单位	空间分辨率	时跨
R	CMFD 数据集 水文站点年累计降雨量	中科院青藏所	0.1°	1979—2018
K	土壤颗粒含量(黏粒、粉粒、沙粒、有机质)	国家地球系统科学数据中心	1 km	
L,S	SRTM3 V4.1(DEM)	中科院计算机网络中心	90 m	1998—2018
C	SPOT/VEGETATION—NDVI 数据集	中科院地理所	1 km	
P	CNLUCC 数据集	中科院地理所	1 km	1980—2018

EPIC— K 值计算公式为^[15]:

$$K=\left\{0.2+0.3\exp\left[-0.0256S_a\left(1-\frac{S_i}{100}\right)\right]\right\}\times\left[\frac{S_i}{C_l+S_i}\right]^{0.3}\times\left[1-\frac{0.25OM}{OM+\exp(3.72-2.95OM)}\right]\times\left[1-\frac{0.7SN_i}{SN_i+\exp(-5.51+22.9SN_i)}\right]\quad(3)$$

式中: K 为土壤可蚀性因子值 ((t · hm² · h)/(hm² · MJ · mm)); S_a 、 S_i 、 C_l 、 OM 为美制土壤颗粒分级标准中的沙粒(0.05~2 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、黏粒(<0.002 mm)和有机质占比(%); $SN=1-S_a/100$ 。

(3)坡长坡度因子 LS 反映地形起伏变化对土壤侵蚀的影响,可由地貌形态参数计算得出,所采用 DEM 数据来源于中国科学院计算机网络中心国际科学数据镜像网站,空间分辨率为 90 m。坡长计算系通过填注和计算流向,以水流路径距离估算^[16]:

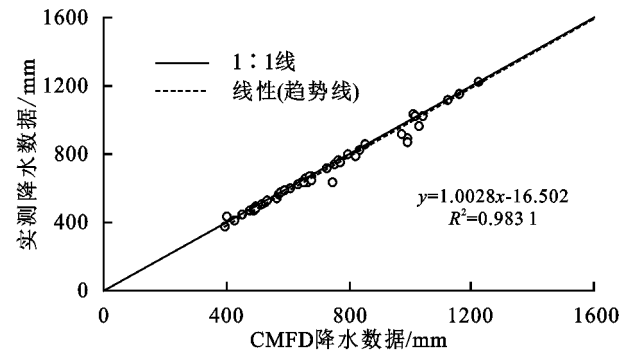


图 2 CMFD 降雨年值与站点资料对比

$$L=\left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m\quad(4)$$

$$\lambda=l\times\cos\alpha\quad(5)$$

式中: L 为坡长因子(无量纲); λ 为水平投影坡长 (m); l 为地表沿流向的水流长度; α 为水流地区的坡度值; m 是可变的坡度指数,当 $\theta<0.57^\circ$ 时, $m=0.2$;

当 $0.57^{\circ}\leq\theta<1.72^{\circ}$, $m=0.3$; 当 $1.72^{\circ}\leq\theta<2.86^{\circ}$, $m=0.4$; 当 $2.56^{\circ}\leq\theta$ 时, $m=0.5^{[17]}$ 。

坡度计算基于分级进行, 10° 以下采用 McCool D K 公式^[18] 计算, 10° 以上采用 Liu 等^[19] 率定的公式计算:

$$S=\begin{cases} 10.80\times\sin\theta+0.03 & \theta<5^{\circ} \\ 16.80\times\sin\theta-0.50 & 5^{\circ}<\theta\leq10^{\circ} \\ 21.91\times\sin\theta-0.96 & \theta>10^{\circ} \end{cases} \quad (6)$$

式中: S 为坡度因子(无量纲); θ 为坡度($^{\circ}$)。

(4) 植被覆盖管理因子 C , 是既定植被覆盖或田间管理下土壤侵蚀与裸地土壤侵蚀之比, 反映植被覆盖与田间管理模式的抗蚀能力, 大小基于 $0\sim1$, 其值越大, 表明覆盖及管理因素下的抗蚀能力越低, 所对应土壤侵蚀越严重^[20]。在前人^[21] 探索基础上, 蔡崇法等^[22] 得到 FVC(fractional vegetation coverage) 与 C 值的对应关系, 并厘定出其使用范围。 C 值计算数据来自中科院地理所发布的 NDVI 年值数据, 空间分辨率 1 km 。计算公式为:

$$FVC=\frac{NDVI-NDVI_{\min}}{NDVI_{\max}-NDVI_{\min}} \quad (7)$$

$$C=\begin{cases} 1 & FVC\leq0.095 \\ 0.6508-0.3436\lg FVC & 0.095<FVC<0.783 \\ 0 & FVC>0.783 \end{cases} \quad (8)$$

(5) 水保因子 P 值系指在其他条件相同时, 水土保持措施施加于坡耕地后, 坡地侵蚀与无水保措施时侵蚀量的比值, 反映水土保持对土壤侵蚀的抵减效能, 大小介于 $0\sim1$, 未采取任何水土保持措施时 $P=1$ 。根据甘南川西北水保措施实施情况, 参照我国水土保持措施 P 值表^[23], 并结合前人^[24] 研究成果, 林地、草地、裸地赋值为 1 ; 水域、建设用地赋值为 0 ; 农田依坡度进行分级赋值(表 2)。

表 2 甘南川西北农田水保措施因子 P 值

坡度/ $^{\circ}$	≤5	$5\sim10$	$10\sim15$	$15\sim20$	$20\sim25$	>25
P 值	0.11	0.22	0.31	0.58	0.74	0.80

1.2.2 土壤侵蚀强度分类分级 根据水利部颁布实施的《土壤侵蚀强度分级标准》(SL 190—2007), 以土壤侵蚀模数为基础, 将土壤侵蚀强度划分为 6 个等级, 分别为微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀、强度侵蚀、极强度侵蚀和剧烈侵蚀(表 3)。

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀因子

受降雨时空分布影响, 降雨侵蚀力因子 R 值在空间上呈东高西低、南高北低的分布格局^[25]; 值域总体为 $65.63\sim411.89(\text{MJ}\cdot\text{mm})/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$; 2000—2015 年, 甘南川西北降雨侵蚀力呈微弱上升趋势, 上升速率为 $3.85(\text{MJ}\cdot\text{mm})/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ (表 4)。

表 3 土壤侵蚀强度分级

分级	级别	侵蚀模数/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)
1	微度侵蚀	<5
2	轻度侵蚀	$5\sim25$
3	中度侵蚀	$25\sim50$
4	强度侵蚀	$50\sim80$
5	极强度侵蚀	$80\sim150$
6	剧烈侵蚀	>150

表 4 甘南川西北土壤侵蚀各因子特征值

因子	单位	最小值	最大值	平均值
降雨侵蚀力因子(R)	$\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$	65.63	411.89	161.14
土壤可蚀性因子(K)	$\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$	0.20	0.41	0.27
坡长坡度因子(LS)	无量纲	0	8.24	1.77
坡长因子(L)	无量纲	0	0.85	0.29
坡度因子(S)	无量纲	0.02	20.49	6.70
植被覆盖管理因子(C)	无量纲	0	1.00	0.30
水土保持因子(P)	无量纲	0	1	—

甘南川西北土壤可蚀性因子 K 值的高值区主要位于黏粒土和有机质土含量较低、且沙粒含量较高地域, 呈斑块状分布, 土壤抗蚀能力较差; 全区 K 值范围为 $0.20\sim0.41(\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h})/(\text{hm}^2\cdot\text{MJ}\cdot\text{mm})$ 。按 K 值高低划分土壤可蚀性^[26], 区内较低及低可蚀性土壤占比很低, 小于 1% , 中等可蚀性占比 11.97% , 较高和高可蚀性占 88.03% (表 5)。可见, 从土壤质地本身而言, 甘南川西北存在较高土壤侵蚀风险。

表 5 甘南川西北土壤可蚀性分级及面积占比

可蚀性分级	K 值范围	比例/ $\%$
低可蚀性	<0.09	0
较低可蚀性	$0.09\sim0.20$	0.0007
中等可蚀性	$0.20\sim0.25$	11.97
较高可蚀性	$0.25\sim0.30$	79.18
高可蚀性	>0.30	8.84

甘南川西北中北部山高坡陡, 发育诸多水系(图 1a), 坡长和坡度因子在该地区具较高数值。总体来看, 坡长 L 值介于 $0\sim0.85$, 坡度 S 值介于 $0.02\sim20.49$, 高值主要分布在上述区域; 两者的乘积能够反映地形控制和影响土壤侵蚀的综合效应。与坡长和坡度值域分布类似, LS 值呈现出中北部高、东北和西南部低的空间分布格局(图 3c), 总体介于 $0\sim8.24$ (表 4)。

植被覆盖管理因子 C 值反映地表覆被对土壤侵蚀的抵御能力, 研究区西北部、中部至西南部植被覆盖较差, 土壤侵蚀较易发生, C 值普遍较高(图 3d)。全区平均来看, 2000—2015 年间, 甘南川西北植被覆盖因子 C 值总体呈下降趋势, 表明该区植被覆盖发生好转, 因覆被稀疏导致的土壤侵蚀呈减少态势(图 4)。

水土保持措施因子 P 值根据土地利用类型赋值,甘南川西北农业规模较小,主要以牧业为主,区内林、草等土地覆被的水保措施较少实施,大多赋值为 1;低 P 值区域主要分布在研究区东北部与南部,位于湿地或天然林保护区,各类水保措施对土壤侵蚀有所遏制。

2.2 土壤侵蚀的空间分布

各因子计算的基础上,得到甘南川西北土壤侵蚀的空间分布(图 5a),以 2015 年为例,域内土壤侵蚀模数介于 $0\sim360\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$,平均值 $13.39\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$,对应

侵蚀总量约 $2.3\times10^8\text{ t}/\text{a}$,总体属轻度侵蚀区。按表 4 进行强度分级(图 5b)可知,区内微、轻度侵蚀($A\leq25\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$)区域面积较广,与甘南川西北地表覆被总体良好有关,特别是研究区东北部甘南及阿坝北部若尔盖高原,该区高寒草甸覆盖好,河流和湿地发育,土壤侵蚀量很低。中度以上($A>25\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$),包括强度、极强度及剧烈侵蚀在区内呈零星分布,主要发生在植被稀疏,土壤沙粒含量较高、黏粒含量及有机质含量较低地区,如阿坝和甘孜南部横断山区,部分地域存在较高土壤侵蚀风险。

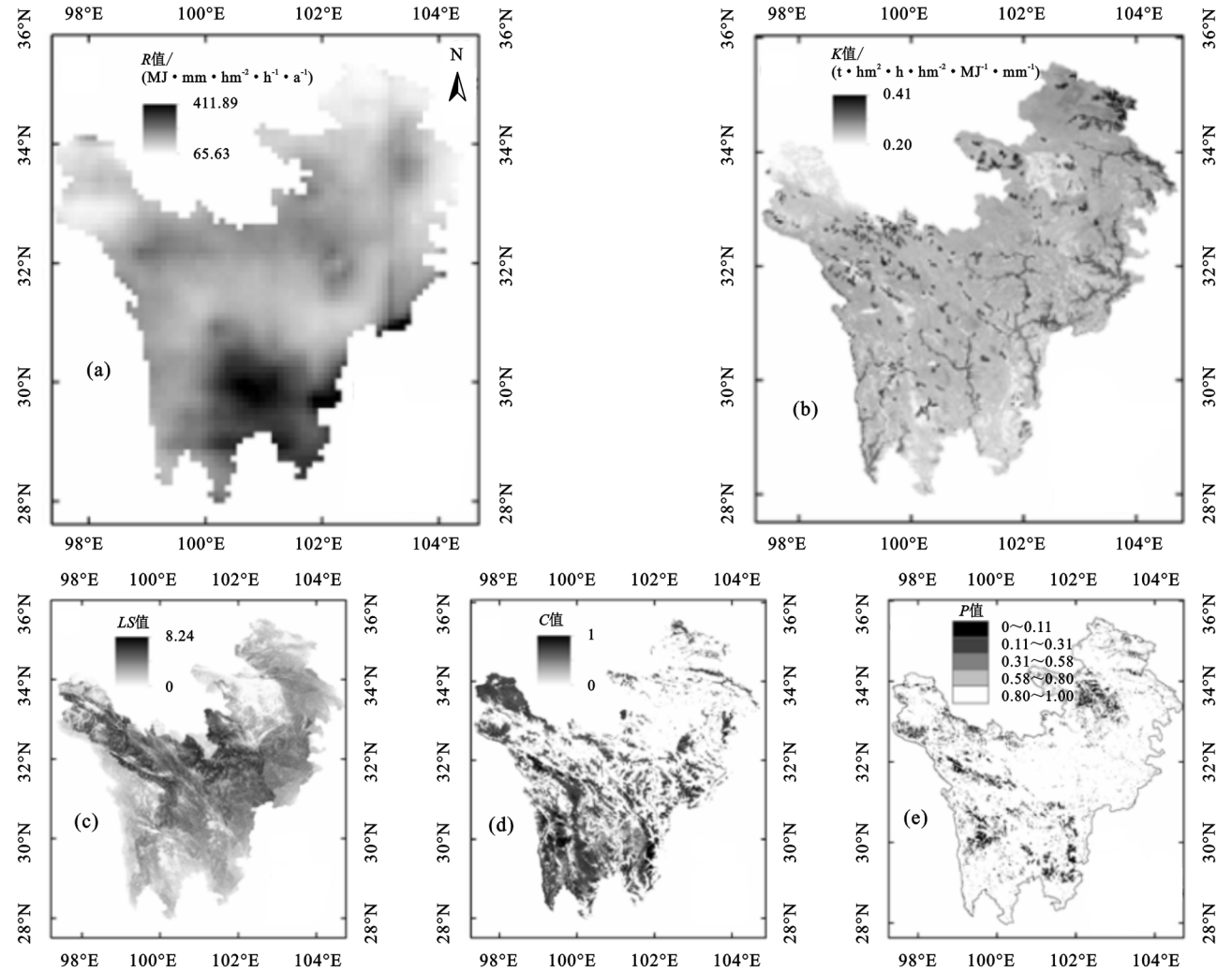


图 3 甘南川西北多年平均 R 值、 K 值、 LS 值、 C 值、 P 值的空间分布

2.3 各级别土壤侵蚀面积变化

统计表明,不同时期甘南川西北土壤侵蚀发生的强度级别占比相异,全区以轻、微度侵蚀为主。以 2015 年为例,微度侵蚀面积占比最大,为 80.10%,其余各级别侵蚀面积均在 10.00% 以下,以剧烈侵蚀发生区域面积最小,占比 1.20%(图 6)。2000—2015 年间,甘南川西北土壤侵蚀总体表现为减弱,轻、微度侵蚀面积增加,中度以上侵蚀面积总体发生减小(表 6),与增温背景下高海拔地区植被活动增强以及区内牧业强度调整关系密切^[27]。

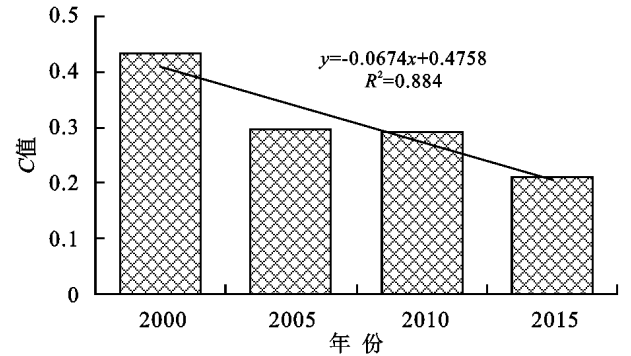


图 4 甘南川西北土壤侵蚀 C 值的变化

2.4 不同土地利用类型土壤侵蚀等级占比

甘南川西北地表覆被以草地和林地为主,面积占比分别为 60.00%和 30.00%(图 1c)。将土地利用栅格与分级土壤侵蚀栅格叠加,统计得到基于地类的各强度级别下土壤侵蚀面积及占比。从侵蚀发生的绝对数量来看,各类草地、林地和未利用土地较为显著;湿地、耕地、水域和建设用地侵蚀发生的数量较小(图 7)。统计表明,

2015 年甘南川西北微度侵蚀总面积占比超过 80.00%(表 6),剧烈侵蚀易发区域面积占比为 1.16%,其中,中覆盖草地面积占比 0.70%,多于低覆草地的 0.14%。总体来看,甘南川西北土地侵蚀以微度侵蚀为主,林地、中覆盖草地、低覆盖草地存在强度等级以上的土壤侵蚀,耕地与未利用土地也有发现,在生态环境保护及水土保持规划等方面应予以重视。

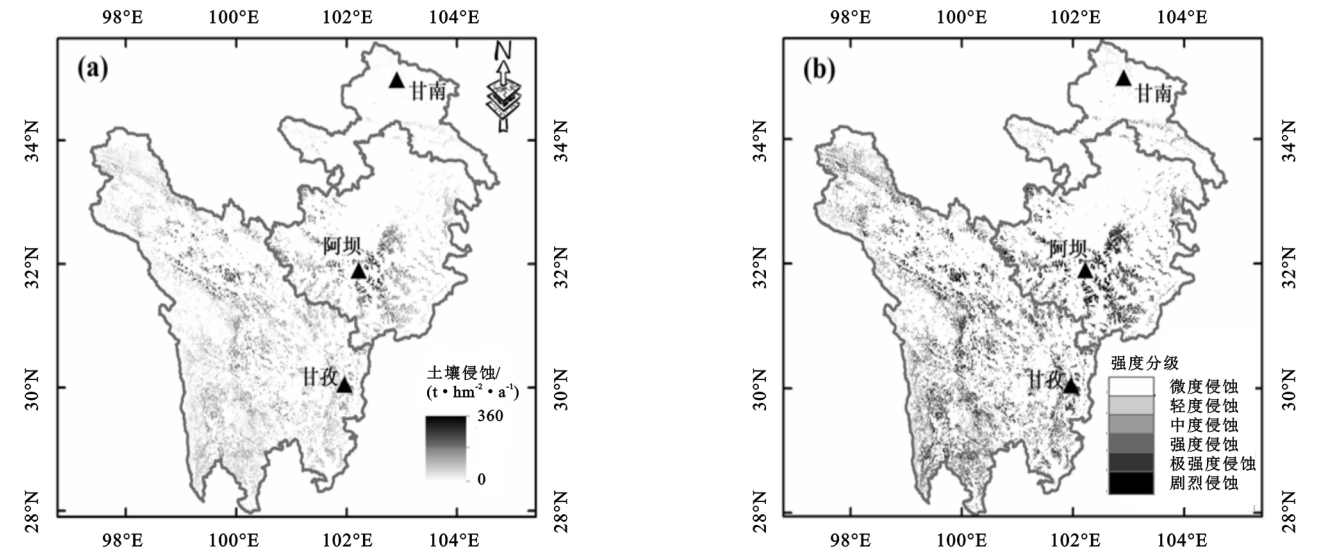


图 5 甘南川西北土壤侵蚀空间分布及强度分级

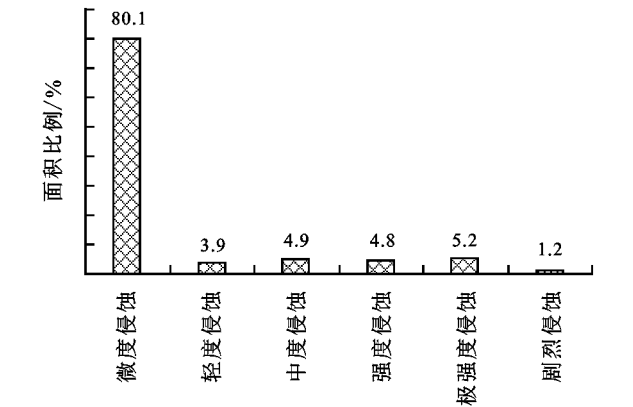


图 6 甘南川西北土壤侵蚀强度分级面积占比

表 6 甘南川西北各级别土壤侵蚀面积占比变化

单位: %

分级	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年
微度侵蚀	54.51	69.16	70.12	80.10
轻度侵蚀	8.52	6.19	6.69	3.86
中度侵蚀	11.81	8.44	9.18	4.90
强度侵蚀	11.71	7.36	8.80	4.77
极强度侵蚀	12.51	7.07	4.91	5.21
剧烈侵蚀	0.94	1.78	0.30	1.16

3 讨论

研究基于 USLE 模型对甘南川西北土壤侵蚀进行量化分析,并基于土壤侵蚀模数进行强度分级发现,该区以微度土壤侵蚀为主;统计分析表明,甘南川西北多年平均侵蚀总量为 3.3×10^8 t/a,平均侵蚀模

数为 $19.23 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,总体属于轻度侵蚀,与康琳琦^[28]在青藏高原的研究结果较一致;林慧龙等^[26]采用 RUSLE 模型得到三江源地区的多年平均侵蚀模数为 $89.46 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;李元寿等^[29]采用 ^{137}Cs 示踪法对青藏高原 2 个典型流域的土壤侵蚀进行研究,计算得到包括风蚀、冻融侵蚀和水蚀等在内的侵蚀模数介于 $9.88 \sim 27.54 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。总体来看,区域侵蚀的量化评估因研究区、研究时段和方法而异。本次研究在文献方法遴选和多源数据综合采用的基础上进行 USLE 因子的计算,所得结论与前人研究成果较为接近,表明计算方法及数据采用的合理性。甘南川西北地域广阔,水文气象和下垫面情形多变,降雨驱动的潜在土壤侵蚀呈现出极强的时空异质性。

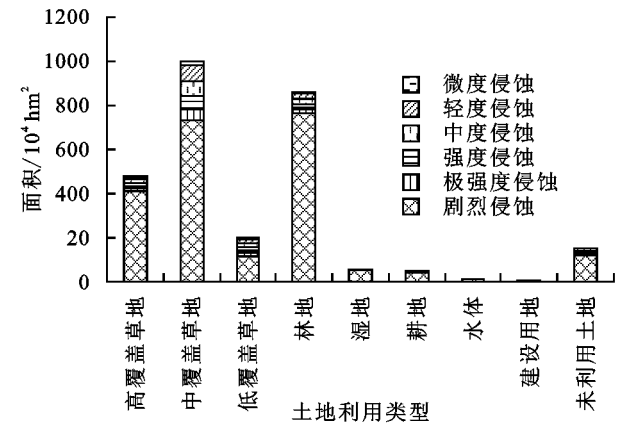


图 7 不同土地利用类型的侵蚀等级组成

江河源区土壤侵蚀与下垫面覆被状况息息相关,

增温背景下,甘南川西北植被活动发生增强,土壤侵蚀一定程度减缓,表征着该区土壤生态和土地生产力朝着良性方向发展。高寒生态水文过程对气候变化敏感,加之人类活动所致的土地利用/覆被变化影响,区域土壤侵蚀风险及其不确定性将更为显著^[8],特别是 C、N、P 等元素随土壤侵蚀可能发生的迁移^[7],将深刻影响该区土地生产力和生态系统健康存续,有关研究是气候变化和人类活动双重影响下高寒生态系统土壤侵蚀研究的重要方向。

4 结 论

采用 USLE 模型就甘南川西北降雨驱动的土壤侵蚀进行量化研究表明,该区降雨侵蚀力因子 R 值介于 $65.63\sim 411.89(\text{MJ}\cdot\text{mm})/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$,土壤可蚀性因子 K 值范围为 $0.20\sim 0.41(\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h})/(\text{hm}^2\cdot\text{MJ}\cdot\text{mm})$,坡长坡度因子 LS 值为 $0\sim 8.24$,植被覆盖管理因子 C 值和水保措施因子 P 均为 $0\sim 1$,与域内植被分布及水土保持措施实施有关。基于上述因子计算得到甘南川西北侵蚀模数为 $0\sim 360\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ 侵蚀总量 $3.3\times 10^8\text{ t/a}$,总体表现为轻度侵蚀;2000—2015 年间,增温和植被活动增强背景下,甘南川西北土壤侵蚀呈减弱趋势,土壤生态和土地生产力朝良性方向发展。

参考文献:

[1] Flanagan D C, Ascough J C, Nicks A D, et al. Overview of the WEPP erosion prediction model[M]. USA: USCD-Water Erosion Prediction Project,1995.

[2] Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. ANSWERS: A model for watershed planning[J]. Transaction of the ASAE,23(4):938-944.

[3] De Roo A P J. The LISEM Project: An introduction[J]. Hydrological Processes,1996,10:1021-1025.

[4] Wischmeier W H, Simith D D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains [M]. No. 282. Washington D. C.: Agricultural Handbook,1965.

[5] 张恩伟,彭双云,冯华梅.基于 GIS 和 RUSLE 的滇池流域土壤侵蚀敏感性评价及其空间格局演变[J].水土保持学报,2020,34(2):115-122.

[6] 徐勤学,李春茂,李朝霞,等.三峡库区紫色土坡地作物覆盖与管理因子 C 值估算[J].水土保持研究,2019,26(2):175-179.

[7] Alewell C, Ringeval B, Ballabio C, et al. Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion[J/OL]. Nature Communications, 2020, 11: 4546. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18326-7>.

[8] Borrelli P, Robinson D A, Panagos P, et al. Land use and climate impacts on global soil erosion by water (2015—2070)[J]. Proceedings of the National Academy

of Sciences,2020,117(36):21994-22001.

[9] Cao W, Wu D, Huang L, et al. Spatial and temporal variations and significance identification of ecosystem services in the Sanjiangyuan National Park, China[J/OL].Scientific Reports,2020,10(1). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63137-x>.

[10] Li D F, Li Z W, Zhou Y J, et al. Substantial increases in the water and sediment fluxes in the headwater region of the Tibetan Plateau in response to global warming[J].Geophysical Research Letters,2020,47(11):e2020GL087745.

[11] Yang K, He J, Tang W J, et al. On downward short-wave and longwave radiations over high altitude regions: Observation and modeling in the Tibetan Plateau[J].Agricultural and Forest Meteorology,2010,150(1):38-46.

[12] Huang Y, Salama M S, Su Z, et al. Effects of roughness length parameterizations on regional ccaleland surface modelling of alpine grasslands in the Yangtze River Basin[J].Journal of Hydrometeorology,2016,17(4):1069-1085.

[13] Chen Y Y, Yang K, He J, et al. Improving land surface temperature modeling for dry land of China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2011,116(D20):1-15.

[14] Wischmeier W H, Johnson C B, Cross B V. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites [J].Journal of Soil and Water Conservation,1971,26(5):189-193.

[15] 王志杰,柳书俊,苏嫄.喀斯特高原山地贵阳市 2008—2018 年土壤侵蚀时空特征与侵蚀热点变化分析[J].水土保持学报,2020,34(5):94-102,110.

[16] 陈兴芳.基于 USLE 模型的青海湖流域土壤侵蚀现状评价[D].西宁:青海师范大学,2012.

[17] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning. U. S. Department of Agriculture, Agricultural Handbook[M]. Science and Education Administration, United States Department of Agriculture, 1978.

[18] 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.

[19] Liu B Y, Nearing M A, Rise L M. Slop gradient effects on soil loss for steep slopes[J].Transactions of the ASAE,1994,37(6):1835-1840.

[20] 张岩.黄土高原土壤侵蚀作物覆盖因子计算[J].生态学报,2001,21(7):1050-1056.

[21] Karaburun A. Estimation of C factor for soil erosion modeling using NDVI in Buyukcekmece watershed[J]. Ozean Journal of Applied Sciences,2010,3:77-85.

Keywords: karst; shallow fracture; infiltration characteristics; infiltration model; adaptability evaluation

据《中国水土保持公报(2019 年)》数据显示,2019 年中国西南石漠化地区水土流失面积为 248 600 km²,占西南喀斯特地区面积的 50% 以上。而贵州处于西南喀斯特地区的中心地带,喀斯特分布面积占全省面积的 60% 以上,是典型的喀斯特省份^[1],水土流失极为严重,在长期的岩溶作用下,区域内形成了地表、地下双层结构^[2],其特有的二元结构使得该地区存在地表和地下水水土流失 2 种形式,且地表水土流失一部分通过喀斯特孔(裂)隙、孔洞、管道等通道进入地下系统流失掉,产生地下漏失^[3]现象。有研究^[2,4]表明,降雨是地下漏失的主要驱动因素,其作用是水分将覆盖于岩石表面的土壤通过孔(裂)隙、管道携带进入地下系统,这便加重了这一地区的水土流失/漏失。裂隙作为地下漏失的重要通道,水分作为地下漏失的主要驱动力,研究喀斯特裂隙土壤水分入渗特性对了解喀斯特裂隙土壤水分运移规律和水土流失的治理无疑具有重要的科学意义。

目前,国内外学者针对喀斯特地区土壤水分运移做了大量的研究。甘凤玲^[5]运用 GIS 空间分析和地统计学方法分析喀斯特槽谷区水土流/漏失过程以及影响因素,并通过模拟降雨探讨了该地区产流产沙空间分布特征和坡面水动力学特征;李渊等^[6]通过对喀斯特洞穴表土和漏失水土进行野外监测和采样分析,得出了地表喀斯特石漠化程度越高,岩溶裂隙管道的联通性越强,地下漏失水的滴率变幅也会变大;徐勤学等^[7]则对喀斯特地区灌木林地和梯田旱地不同土层的入渗特征进行探究,并运用不同入渗模型对其过程进行拟合分析得出,灌木林入渗性能大于梯田旱地,且 Horton 模型对灌木林地和梯田旱地的拟合效果较好;甘艺贤等^[8]通过模拟降雨试验发现,降雨强度较小时,具有较强入渗能力的土壤与地下孔(裂)隙配合下,喀斯特坡耕地主要以地下径流为主;Fu 等^[9]从土壤—表层岩溶带三维空间角度出发,深入探究喀斯特地区水分运移的特征,总结出这一地区以地下水文过程为主,地表径流为辅的结论;Jakob 等^[10]在半干旱环境下,通过小规模的灌溉试验,对岩土界面的水分入渗进行探讨,与直接从土壤表面渗入的水相比,岩—土界面径流的渗透速度更快,渗透深度更大,对地下水补给更具潜力;还有学者^[4,11-12]研究了不同环境下土壤质地与理化性质特征以及溶槽岩—土界面处优势流对土壤水分的影响等。

综上所述,学者们的研究多集中于对水分在坡面尺度上的运移及不同用地类型之间的探究,而隐蔽性和复杂性较高的喀斯特地下裂隙土壤虽已有一定研究,但研究方向多集中于土壤质地与化学特征以及溶槽岩—土

界面处优势流对土壤水分的影响的探索,裂隙中土壤水分的运移特征仍需要进一步探索。为此,本研究以喀斯特裂隙为研究对象,通过野外单环入渗试验研究喀斯特地下裂隙土壤的入渗过程与入渗特征,分析裂隙土壤入渗特征的主导因子,通过评价 3 种入渗模型的拟合程度,筛选出适合喀斯特地下裂隙土壤的最优入渗模型,以期深入研究喀斯特地区坡面水分运移及地下漏失提供新的研究思路与科学理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省安顺市西秀区大西桥镇马场村(25°56′—26°27′N,105°44′—106°21′E),气候类型为北亚热带季风湿润气候,四季分明,海拔 1 340 m,极端最高温为 34.3 ℃,极端最低温为 -7.6 ℃。雨量较为充沛,年降水量 1 334.6 mm。研究区处于贵州喀斯特黔中—黔西南喀斯特峰林区,地层岩性主要是白云岩和石灰岩,形成以喀斯特峰林为主的地貌,土壤类型为石灰土,土层浅薄,水土流失较为严重。

1.2 研究方法

本试验于 2019 年 2—3 月进行,试验期间没有降雨,在试验区选择裂隙张开度较大、裂隙土壤填充较深的土壤作为试验样地,选取灌木、乔木、草地、农田 4 种不同土地利用类型下的 16 条裂隙,试验选择单环法进行测定(常规下裂隙土壤断面开挖难度大,投资也高,各裂隙张开度较小,不易打入双环)。试验前采集裂隙的基本信息、裂隙形态、地理坐标以及周围的植被情况,然后清理土壤表层的植被枯落物,单环试验前先打入 100 cm³ 环刀(3 个重复)取出称重记录重量,并用自封袋采集表层土样,在一侧未被破坏的裂隙表土将预先准备好的 PVC 单环(内径 10 cm,高 20 cm,标记水头线)垂直平稳的打入土中 10 cm,之后在单环内注水至 5 cm 水头处并通过多只注射器(450 mL)轮流不断注水保持水头恒定,在 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,15,20,25,30 min 及之后每 10 min 记录注射器注入单环的水量直至 90 min。初渗速率采用前 1 min 的速率表示;稳渗速率为单位时间内渗透量趋于同一渗透速率;平均入渗率为达到稳渗时的入渗总量与达到稳渗时间的比值;入渗总量为 90 min 内渗透总量。入渗速率计算公式为:

$$V = \frac{10Q_n}{ST_n}$$

式中:V 为入渗速率(mm/min);Q_n 为第 n 次测定时间的的加水量(mL);S 为内环横截面积(cm²);T_n 为第 n 次测定时间间隔(min)。