

DOI: 10.11766/trxb201508240314

地形对黑土区典型坡面侵蚀—沉积空间分布特征的影响*

杨维鸽^{1, 3} 郑粉莉^{1, 2†} 王占礼^{1, 2} 韩 勇^{1, 3}

(1 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

(2 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要 研究地形对黑土区坡面侵蚀—沉积空间分布特征的影响可以为水土保持措施配置提供科学依据。以典型黑土区——黑龙江省宾县东山沟小流域为研究区域, 在流域上游、中游和下游各选取 2 个典型坡面, 坡面种植作物均为玉米。典型坡面坡顶、坡上、坡中、坡下和坡脚的平均坡度分别为 3.1°, 3.0°, 4.0°, 2.8°, 1.2°。利用¹³⁷Cs 示踪技术, 分析了坡度、坡长和坡形对坡面侵蚀—沉积空间分布特征的影响。结果表明: 研究流域农耕地坡面以侵蚀为主, 平均侵蚀速率为 448 t km⁻² a⁻¹; 坡面不同部位土壤侵蚀—沉积分布特征差异明显, 坡顶、坡上、坡中和坡下主要表现为侵蚀, 平均侵蚀速率分别为 819、376、1 000 和 634 t km⁻² a⁻¹, 而坡脚表现为明显的沉积, 平均沉积速率为 -1382 t km⁻² a⁻¹。不同坡形坡面侵蚀—沉积分布存在差异, 凸形坡面表现为先侵蚀后沉积的分布特征, 而复合坡面呈现出侵蚀—沉积交错分布特征; 坡面土壤侵蚀速率与坡度和坡长均呈极显著的幂函数关系, 而坡度对黑土区坡面侵蚀的影响明显大于坡长, 反映了即使在长坡缓地形的黑土区坡度对侵蚀的影响仍然有重要作用。因此, 在黑土区配置合理的水土保持措施时, 应尽量削弱坡度对坡耕地土壤侵蚀的影响。

关键词 土壤侵蚀速率; 坡度; 坡长; 坡形; 典型黑土区

中图分类号 S157 **文献标识码** A

东北黑土区是我国主要的产粮区之一^[1], 对我国粮食安全起着重要作用。近年来不合理的农业耕作措施导致土壤肥力严重退化、粮食减产和部分区域水土流失^[2]。据 2010 年中国水土流失与生态安全综合科学考察(东北组)报道^[3], 黑土区的土壤侵蚀主要集中在坡耕地, 坡耕地土壤侵蚀面积占黑土区总侵蚀面积的 80% 以上, 东北黑土区表层土壤流失速率为 3~10 mm/a, 平均土层厚度已由 20 世纪 50 年代的 60~70 cm 下降至目前的 20~30 cm, 部分地区甚至出现“破皮黄”。因此, 研究黑土区坡耕地土壤侵蚀显得尤为重要。

黑土区的地貌特点是漫川漫岗, 坡度较缓, 一般为 1°~5°, 个别地方可达到 8° 以上; 坡长多为 500~2 000 m, 最长达 4 000 m^[4]。由于受地形

(坡位、坡度、坡长、坡形), 土壤侵蚀强度差异明显^[5]。已有研究表明坡位是影响坡面土壤侵蚀的主要因素^[6], 如王禹^[7]、阎百兴和汤洁^[8]的研究发现坡顶部侵蚀较轻, 坡中部侵蚀强烈, 坡底沉积现象明显; 方华军等^[9-10]。也指出坡肩土壤侵蚀最为严重, 坡顶和坡背处土壤侵蚀较轻, 而坡脚表现为土壤沉积。坡度、坡长对坡面侵蚀发生发展过程及侵蚀强度起着重要作用^[11]。相关研究表明坡面土壤侵蚀速率与坡度呈直线函数、幂函数或者指数函数关系^[12-15]; 范昊明等^[16]也指出坡度和坡长对黑土区坡面土壤侵蚀垂直分带的宽度和排列均有影响; Yang 等^[17]研究结果表明土壤侵蚀速率沿坡长呈变幅较大的波动分布; Cui 等^[18]基于野外径流小区的观测结果表

* 国家自然科学基金项目(41571263)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41571263)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 杨维鸽(1983—), 女, 陕西咸阳人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀对土壤质量的影响评价研究。E-mail: yangweige121@163.com

收稿日期: 2015-08-24; 收到修改稿日期: 2015-12-05

明, 坡面土壤侵蚀速率沿坡长呈强弱交替分布。坡形在很大程度上决定着径流的汇集方式和过程, 进而影响坡面土壤侵蚀发生发展的过程及侵蚀程度^[19]。王禹^[7]的研究表明黑土区直形坡耕地土壤侵蚀强度存在强弱交替变化的波动周期, 而这种现象在凸型坡面则表现不明显。An等^[20]的研究表明凸形坡和凹形坡的侵蚀程度存在明显差异。以上研究均为探究黑土区的土壤侵蚀规律以及水土保持措施的合理布置提供了科学基础和理论依据, 但目前关于各地形因素(如坡度、坡长和坡形等)对坡面土壤侵蚀和沉积速率的综合影响研究相对薄弱。鉴于此, 本文选择哈尔滨宾县东山沟小流域为研究区域, 选取流域上、中、下游6个典型坡耕地坡面作为研究对象, 基于¹³⁷Cs示踪技术和张信宝质量平衡模型, 分析地形对坡耕地坡面土壤侵蚀的影响, 旨在为黑土区坡面土壤侵蚀预报及水土流失防治措施的布设提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省哈尔滨市宾县东山沟小流域(127°31'04" ~ 127°34'02" E, 45°43'13" ~ 45°46'37" N)(图1), 属松嫩平原东部边缘的典型薄层黑土区。气候类型属于中温带大陆性季风气候, 多年平均气温3.9℃, 无霜期148 d, 多年平均降水量548.5 mm, 其中6月—9月的降雨量约占全年降水量的80%^[21]。该区地处张广才岭支脉, 海拔在160~220 m之间, 地形以丘陵漫岗为主, 地势平缓, 坡度主要在1°~7°之间, 坡长达数百米, 甚至数千米。成土母质为第四纪中更新世黄土状亚黏土。土壤以黑土为主^[15], 该区是雨养旱作农业区, 耕层深度多为0~20 cm。主要坡耕地管理活动包括耕翻、横向打垄和玉米连作。

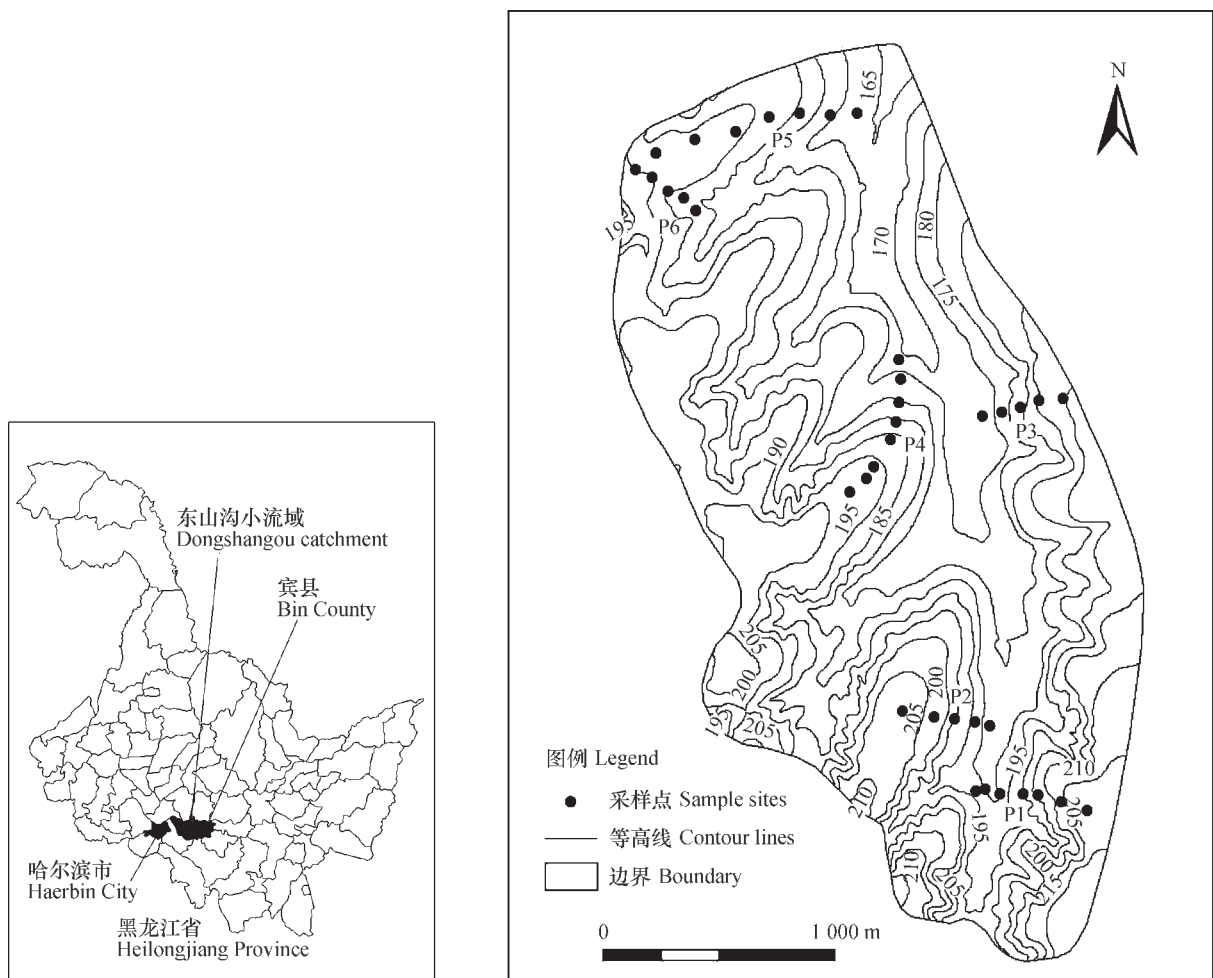


图1 研究区位置和采样点分布图

Fig. 1 Location of study area and distribution of sample sites

1.2 样品采集与分析

土壤样品采集于2012年10月（秋收后）。基于野外调查结果和该地区主要地貌特征，在研究流域上、中、下游各选取2个典型农耕地坡面作为采

样坡面，各坡面详细信息见表1。根据坡长，每个坡面沿纵断面线在坡顶、坡上、坡中、坡下、坡脚布设5~8个采样点，共布设采样点38个。

利用直径7 cm的土钻垂直于水平面钻入坡面采

表1 各采样坡面的基本信息

Table 1 Basic information of the sampling sites

坡面 编号 Slope code	样本数 Sample number	平均 坡度 Mean slope (°)	流域位置 Catchment position	坡形 Slope shape	坡长 Slope length (m)	坡位 (距分水岭距离)				
						Slope position (The distance to watershed)				
						坡顶 Summit (m)	坡上 Up slope (m)	坡中 Middle slope (m)	坡下 Down slope (m)	坡脚 Foot slope (m)
P1	7	4.07	上游	凸	600	0~80	80~250	250~450	450~550	550~600
P2	5	1.00	上游	凸	320	0~60	60~130	130~220	220~290	290~320
P3	5	1.60	中游	复合	210	0~30	30~80	80~130	130~180	180~210
P4	8	3.75	中游	复合	1 000	0~50	50~300	300~700	700~900	900~1 000
P5	8	3.31	下游	复合	500	0~60	60~180	180~320	320~460	460~500
P6	5	3.40	下游	复合	380	0~50	50~150	150~250	250~350	350~380

集土壤样品，每个样品由边长为1 m的等边三角形三个顶点上的土样混合而成，用四分法取约1 kg，采样深度为30 cm，每个样点设置2次重复，共采集土壤混合样76个。每个样点同时采集环刀样。采集过程中使用罗盘测定各坡面的坡度（文中坡度为各坡段的坡度算数平均值），并测量各样点距其分水岭的距离，结合坡面坡度换算成各采样点距分水岭的投影坡长。背景值采样点布设在流域内一块次生林地上。该样地土地平坦，且据调查得知该次生林地有近60年未受人为扰动，处于自然状态，无明显侵蚀和沉积现象，故选择该次生林地作为¹³⁷Cs背景值采样地^[22]。在该次生林地以同样的方法采集8个样品，作为背景值样品。

将采集的土壤样品自然风干、剔除石块和植物根系、研磨、过筛（孔径1.0 mm）。用精度为0.001 g的天平称取约350 g样品装入同一规格的干净塑料盒中并摇匀，使土壤样品表面接近平坦。样品测定利用ORTEC公司生产的8192道低本底 γ 能谱仪，在661.6 keV处测定¹³⁷Cs全峰面积，测量时间为28 800 s，仪器重复测试误差在95%置信水平下 $\pm 5\%$ 。峰面积采用自动寻峰法和手动寻峰法相

结合的方法确定，样品的比活度采用全峰面积法求得。用环刀法测土壤容重，用于计算土壤侵蚀速率。

1.3 土壤侵蚀速率计算方法

鉴于张信宝质量平衡模型^[23]估算农耕地土壤侵蚀速率简单有效，本文选取该模型用于计算土壤侵蚀速率，模型表达式如下：

$$A = A_0 \varphi_1 \left(1 - \varphi_2 \frac{h}{D}\right)^{n-1963} \quad (1)$$

式中， A 为侵蚀区¹³⁷Cs的活度（Bq m⁻²）； A_0 为采样年¹³⁷Cs的背景值； φ_1 为混入耕层的¹³⁷Cs与总沉降量之比； φ_2 为侵蚀分选颗粒的校正因子； h 为年平均土壤侵蚀深度（m a⁻¹）； D 为年均犁底层深度（cm）； n 为采样年份。

土壤侵蚀速率计算公式如下：

$$E = h\rho \quad (2)$$

式中， E 为土壤侵蚀速率（t km⁻² a⁻¹）； ρ 为土壤容重（kg m⁻³）。

1.4 数据统计分析

利用SPSS16.0软件对数据进行统计分析，利用SigmaPlot10.0软件对数据进行回归分析和绘图。

2 结 果

2.1 坡面土壤¹³⁷Cs含量

背景值样品的¹³⁷Cs含量变化范围为2 150 ~ 2 770 Bq m⁻²，平均值为2 379 Bq m⁻²，标准差为198 Bq m⁻²，变异系数为8.3%。对于黑土区土壤¹³⁷Cs背景值，王禹^[7]确定的背景值为2 500 Bq m⁻²，阎百兴和汤洁^[8]确定的背景值为2 464 Bq m⁻²，方华军等^[9-10, 24]确定的背景值为2 377 Bq m⁻²。可

见，该研究区测定的¹³⁷Cs背景值与前人所确定的¹³⁷Cs背景值非常接近。因此，本文将研究区¹³⁷Cs背景值确定为2 379 Bq m⁻²。

研究区6个典型坡面土壤¹³⁷Cs含量的变异系数存在明显差异（表2）。坡面P3土壤¹³⁷Cs含量的变异系数小于10.0%，属弱变异^[25]，其余5个坡面土壤¹³⁷Cs含量的变异系数均大于10.0%，属中等变异，其中坡面P1、P4和P5，变异系数高达72.1%、35.5%和37.2%，这表明¹³⁷Cs随土壤颗粒移动的再分布现象在不同坡面存在明显差异。

表2 坡面土壤¹³⁷Cs含量统计特征

Table 2 Descriptive statistics of ¹³⁷Cs contents in the soils of the hillslopes

坡面编号 Slope code	最大值 Max (Bq m ⁻²)	最小值 Min (Bq m ⁻²)	平均值 Mean (Bq m ⁻²)	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variance (%)
P1	5 981	1 184	2 316	1 670	72.1
P2	2 621	2 043	2 275	246.4	10.8
P3	2 495	2 004	2 202	183.6	8.3
P4	3 294	1 156	2 243	796.2	35.5
P5	3 668	1 247	2 146	798.8	37.2
P6	2 294	1 338	2 001	404.4	20.2
¹³⁷ Cs背景值 ¹³⁷ Cs reference value	2 770	2 150	2 379	198.1	8.3

2.2 坡面侵蚀-沉积速率

6个坡面侵蚀—沉积速率介于-4 685 ~ 3 417 t km⁻² a⁻¹之间（正值代表侵蚀，负值代表沉积），平均值为448 t km⁻² a⁻¹，变异系数为370%（图2），属于强变异，说明不同坡面侵蚀—沉积速率存在明显的差异性。38个采样点中，23个样点表现为侵蚀，15个样点表现为沉积，分别占总样点数的60.5%和39.5%，说明研究区以侵蚀为主。已有研究表明漫川漫岗区坡耕地的侵蚀速率为3 000 ~ 5 000 t km⁻² a⁻¹^[26-27]，可见，利用¹³⁷Cs示踪技术和张信宝质量平衡模型估算的侵蚀速率是可行的。赵雨森和魏永霞^[28]研究表明，传统耕作土壤侵蚀模型约为750 t km⁻² a⁻¹；范昊明等^[29]研究发现黑龙江省2个主要水蚀区典型小流域的平均土壤侵蚀速率约为538 t km⁻² a⁻¹。本文估算的侵蚀速率（448 t km⁻² a⁻¹）与前人的研究结果接近，表明本研究估算的土壤侵蚀速率基本合理。根据水

利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》（SL190-2007）^[30]，23个侵蚀样点中，轻度和中度侵蚀样点个数分别占56.5%和30.4%，可见研究区坡耕地土壤属于轻度—中度侵蚀水平。刘宝元等^[15]研究结果也表明黑土区土壤侵蚀以轻度—中度侵蚀为主。谢云等^[31]认为黑土的容许流失量为129 t km⁻² a⁻¹，依据这一标准，表现为侵蚀的23个样点中有22个样点的土壤侵蚀速率已超过黑土容许流失量。

2.3 地形对坡面侵蚀-沉积的影响

2.3.1 坡面不同坡位土壤侵蚀—沉积分布 由图2可知，6个坡面坡顶侵蚀速率为79 ~ 3 318 t km⁻² a⁻¹，平均值为819 t km⁻² a⁻¹，平均坡度为3.1°。黑土区坡顶属于岗地溅蚀带^[16]，地形平坦，以溅蚀为主，同时长期的水蚀和耕作共同作用导致坡顶土壤不断向下坡方向传输，使得坡顶土壤出现侵蚀现象。坡上、坡中和坡下主要表现为侵蚀，侵蚀速率变化范围依次为456 ~ 1 523 t km⁻² a⁻¹，38 ~ 2 264

$t km^{-2} a^{-1}$, $295 \sim 2\ 853 t km^{-2} a^{-1}$, 平均侵蚀速率大小依次为坡中 ($1\ 000 t km^{-2} a^{-1}$) > 坡下 ($634 t km^{-2} a^{-1}$) > 坡上 ($376 t km^{-2} a^{-1}$)。这主要是因为坡上和坡中坡度较大, 平均坡度分别为 3.0° 和 4.0° , 坡度越大雨滴落地的人射角小, 雨滴分散土壤颗粒的分力相应增大, 加上上方来水的汇集, 径流挟沙力强, 水蚀作用加强^[8]。而坡下平均坡度为 2.8° , 其侵蚀主要是由于上方汇水面积大, 汇水量大, 径流挟沙能力强, 侵蚀力强。此外, 在坡段的凹点处则表现出局部堆积^[32], 坡面P4的坡上和坡下部位、坡面P5的坡上部位和坡面P6的坡中部位均表现为沉积。坡脚主要表现为沉积, 沉积速率为 $-107 \sim -4\ 685 t km^{-2} a^{-1}$, 平均值为 $-1\ 382 t km^{-2} a^{-1}$, 平均坡度为 1.2° 。这是因为上方来水来沙汇流至坡脚, 挟沙量渐趋饱和, 而坡脚地势平缓, 其侵蚀力减弱, 形成沉积区。

土壤侵蚀速率最大值在不同坡面分布在不同坡位。如坡面P1侵蚀速率最大值位于坡顶, 其值为 $3\ 318 t km^{-2} a^{-1}$; 坡面P2和P3侵蚀速率最大值均位于坡上部, 其值分别为 458.5 和 $553 t km^{-2} a^{-1}$; 坡面P4侵蚀速率最大值位于坡中部, 其值为 $2\ 224 t km^{-2} a^{-1}$; 坡面P5和P6侵蚀速率最大值均位于坡下部, 分别为 $2\ 853$ 和 $2\ 515 t km^{-2} a^{-1}$ 。表明坡面土壤侵蚀速率最大值出现的坡面位置与流域位置有关, 同时也受坡形的影响。阎百兴和汤洁^[8]研究发现坡中侵蚀最强烈, 而方华军等^[9-10, 24]研究表明, 坡肩土壤侵蚀最为严重。因此, 黑土区坡耕地坡面土壤侵蚀治理的重点坡位应该根据坡面侵蚀速率的差异因坡制宜; 同时, 在研究坡面土壤侵蚀—沉积分布规律时, 应在流域上、中、下游不同位置选取多个典型坡面才能真正揭示流域各部位不同坡面侵蚀—沉积分布规律。

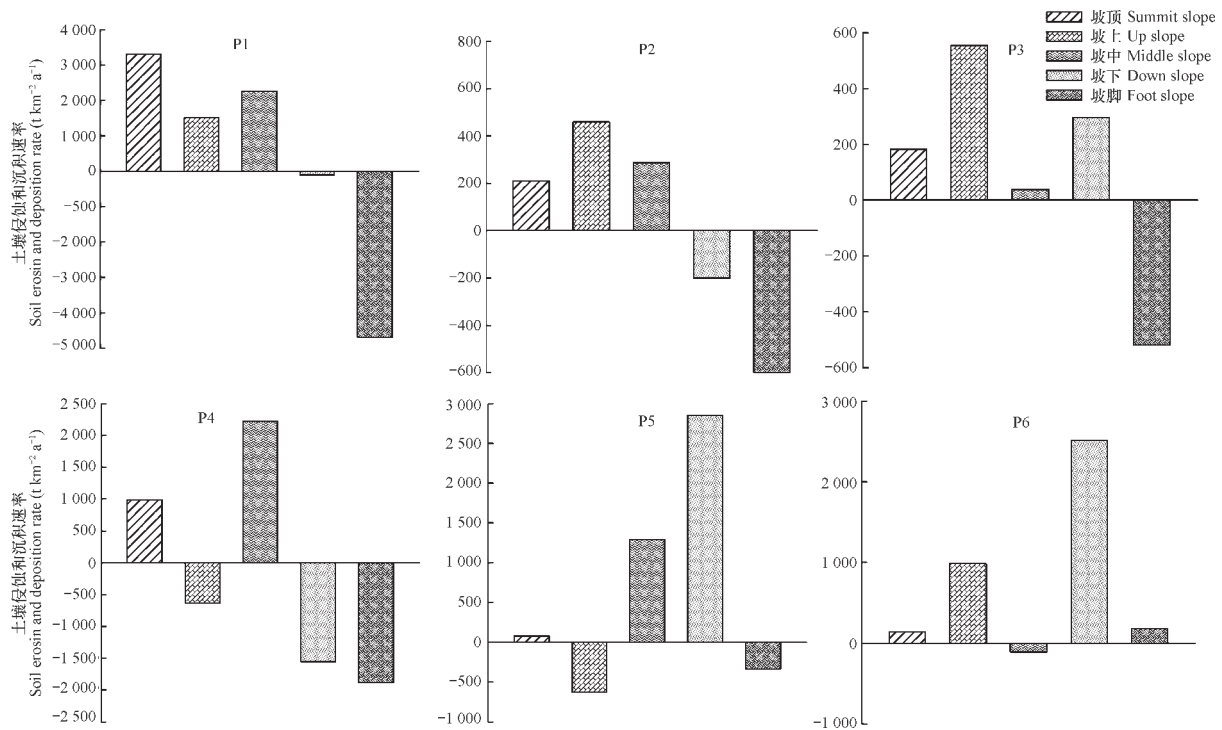


图2 坡面各坡位土壤侵蚀—沉积速率分布

Fig. 2 Distribution of soil erosion and deposition rates relative to slope position

坡面不同坡位土壤侵蚀—沉积速率呈现不同的变化趋势。如凸型坡P1土壤侵蚀—沉积速率呈侵蚀强—侵蚀弱—侵蚀较强—沉积弱—沉积强的变化趋势, 复合坡P3土壤侵蚀—沉积速率呈侵蚀弱—侵蚀强—侵蚀弱—侵蚀较强—沉积强的变化趋势。主要原因是坡度、坡长、和坡形的不同, 坡面各坡

位汇水面积和汇水量不同, 从而导致径流侵蚀力不同。可见, 不同坡形各坡位土壤侵蚀—沉积速率的差异是坡形、坡度、坡长交互作用的结果。此外, 同坡形各坡位土壤侵蚀—沉积速率也存在差异, 凸形坡P1和P2土壤侵蚀速率在坡顶的差异明显, 主要原因是坡度和凸段分布位置不同, 坡面P1和P2

坡顶平均坡度分别为4°和1°，且坡面P1凸段位置更接近坡顶。

2.3.2 坡度对坡面侵蚀速率的影响 坡面沉积主要分布在坡脚，受坡度和坡长影响较小。因此，这里仅分析坡度和坡长对坡面侵蚀速率的影响。

对侵蚀速率与坡度进行一元回归分析（图3），二者呈极显著幂函数关系：

$$E = 224.8 S^{1.43} \quad (R^2=0.72, p < 0.001, n=23) \quad (3)$$

式中， E 为土壤侵蚀速率（ $t \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ）， S 为坡度（°）， n 为样本个数。拟合方程的 F 检验达到 $p < 0.01$ 极显著水平，各参数的 t 检验均达到 $p < 0.05$ 的显著水平。

坡面侵蚀速率随着坡度的增加而增大，这主要是因为随着坡度的增加，坡面变得越陡，径流流速增大，水流具有的能量越大，侵蚀力越大，引起细沟侵蚀的可能性越大，坡面侵蚀量越大^[33]。这与郑粉莉等^[34]、刘志和江忠善^[11]的试验结果一致。

当坡度小于2°时，侵蚀速率随坡度增加增幅缓慢，当坡度大于2°时，侵蚀速率随坡度增加而增加的幅度增大，特别是当坡度大于4°时，侵蚀速率增加幅度更为明显（图3）。现行的坡耕地土壤侵蚀分级标准将坡度小于5°作为一个等级^[15]。因此，应对侵蚀强度分级标准——坡度进一步细分，制订适合东北黑土区坡耕地的土壤侵蚀强度分级标准。

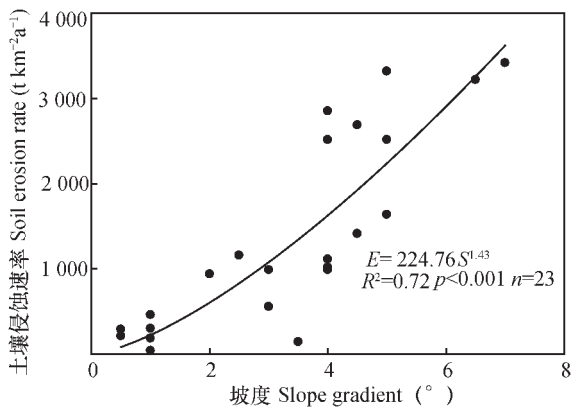


图3 坡面土壤侵蚀速率与坡度的关系

Fig. 3 Relationship between soil erosion rate and slope gradient

2.3.3 坡长对坡面土壤侵蚀速率的影响 对土壤侵蚀速率与坡长进行回归分析，二者也呈极显著的幂函数关系（图4）：

$$E = 27.13 L^{0.73} \quad (R^2=0.54, p < 0.0001, n=23) \quad (4)$$

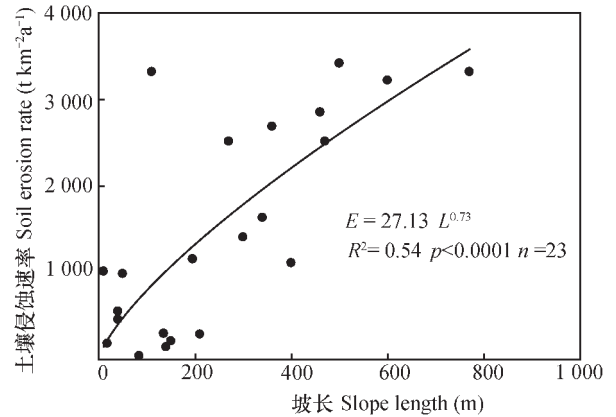


图4 坡面土壤侵蚀速率与坡长的关系

Fig. 4 Relationship between soil erosion rate and slope length

式中， E 为土壤侵蚀速率（ $t \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ）， L 为坡长（m）， n 为样本个数。拟合方程的 F 检验达到 $p < 0.001$ 极显著水平，各参数的 t 检验均达到 $p < 0.05$ 的显著水平。

研究流域坡耕地坡面土壤侵蚀速率随着坡长的增加呈波动增加（图2和图4）。随着坡长增加，集雨面积也相应的增加，径流量变大，侵蚀量增大。现有的坡面土壤侵蚀模型中，通常也采用土壤侵蚀量随坡长增加而增加的关系^[35-36]。

2.3.4 坡度和坡长对坡面土壤侵蚀速率的综合影响 通过二元回归分析，对坡度和坡长对侵蚀速率的综合影响进行分析，得到表达式如下：

$$E = 153.88 S^{1.13} L^{0.15} \quad (R^2=0.73, p < 0.05, n=23) \quad (5)$$

式中， E 为土壤侵蚀速率（ $t \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ）， S 为坡度（°）， L 为坡长（m）， n 为样本个数。拟合方程的 F 检验达到 $p < 0.05$ 显著水平，各参数的 t 检验均达到 $p < 0.05$ 的显著水平。

由回归分析结果得知，坡度和坡长的指数分别为1.13和0.15，坡度对回归方程的贡献远大于坡长，表明坡度是黑土区地形因素中影响土壤侵蚀速率的主要因子。刘宝元等^[15]、安娟^[37]和Cui等^[18]的研究结果也表明坡度是影响黑土区土壤侵蚀的主要因素。因此，尽管东北黑土区属于典型的长坡缓坡地形，坡度普遍较小，但鉴于坡度在决定坡面侵蚀量中的重要性，有必要加强坡度对黑土区土壤侵蚀影响的研究；同时，在黑土区配置合理的水土保持措施时，应削弱坡度对坡耕地土壤侵蚀的影响。

2.3.5 坡形对坡面土壤侵蚀的影响 不同坡

形坡面土壤侵蚀—沉积分布存在一定的差异(图2)。凸形坡(P1和P2)沿坡面先侵蚀后沉积,平均侵蚀速率为 $231 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。坡面P1平均侵蚀和沉积速率分别为 $2\ 368$ 和 $-2\ 395 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,坡面P2平均侵蚀和沉积速率为 317 和 $-480 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。复合坡(P3、P4、P5和P6)呈侵蚀—沉积交错分布,平均侵蚀速率为 $317 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。坡面P3平均侵蚀和沉积速率为 $1\ 605$ 和 $-1\ 359 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,坡面P4平均侵蚀和沉积速率为 $1\ 605$ 和 $-1\ 359 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,坡面P5平均侵蚀和沉积速率为 686 和 $-483 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,坡面P6平均侵蚀和沉积速率为 $1\ 214$ 和 $-107 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。说明复合坡侵蚀强度具有不均一性,泥沙在坡面的侵蚀、搬运、沉积和输移过程具有强弱交替的空间变化特征。这与径流侵蚀力的变化有关,当坡面径流含沙量渐趋饱和时,其挟沙力必然下降,从而导致部分径流泥沙发生沉积,而当径流含沙量减少至一定程度时,其挟沙力又会增加,导致更多的泥沙被剥蚀和搬运^[38]。

3 结 论

在黑龙江省宾县东山沟小流域范围内,地形对坡面侵蚀—沉积空间分布特征的影响,主要体现在:研究流域坡耕地坡面土壤侵蚀—沉积速率介于 $-4\ 685 \sim 3\ 417 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间,平均值为 $448 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,坡面土壤以侵蚀为主,且属于轻度—中度侵蚀。坡面不同坡位土壤侵蚀—沉积分布存在差异。坡顶、坡上、坡中和坡下主要表现为侵蚀;坡脚主要表现为沉积,坡面不同坡位土壤侵蚀—沉积速率在地形因素的交互作用影响下呈现不同的变化趋势。因此,在研究黑土区坡面土壤侵蚀—沉积分布规律时,应在流域上、中、下游不同位置选取多个典型坡面才能真正揭示流域各部位不同坡面侵蚀—沉积分布规律。土壤侵蚀速率与坡度、坡长均呈极显著的幂函数关系;坡度是影响黑土区土壤侵蚀的主要因素;不同坡形坡面侵蚀—沉积分布存在差异,凸形坡坡面表现出先侵蚀后沉积的分布特征,复合坡土壤侵蚀—沉积表现出交错分布,侵蚀强度具有不均一性。在黑土区进行水保措施配置时,应尽量采取措施削弱坡度对坡耕地土壤侵蚀的影响。

参 考 文 献

- [1] 刘兴土, 佟连军, 武志杰. 东北地区粮食生产潜力的分析与预测. 地理科学, 1998, 18 (6) : 501—509
Liu X T, Tong L J, Wu Z J. Analysis and prediction of grain production potential in northwest region (In Chinese). Scientia Geographica Sinica, 1998, 18 (6) : 501—509
- [2] 于磊, 张柏. 中国黑土退化现状与防治对策. 干旱区资源与环境, 2004, 18 (1) : 99—104
Yu L, Zhang B. The degradation situations of black soil in China and its prevention and counter measures (In Chinese). Journal of Arid Land Resources and Environment, 2004, 18 (1) : 99—104
- [3] 水利部, 中国科学院, 中国工程院. 中国水土流失与生态安全: 东北黑土卷. 北京: 科学出版社, 2010: 77, 148
Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Engineering. Chinese soil erosion and ecological security: Northeast black soil volume. Beijing: Science Press, 2010: 77, 148
- [4] 张晓平, 梁爱珍, 申艳, 等. 东北黑土水土流失特点. 地理科学, 2006, 26 (6) : 687—692
Zhang X P, Liang A Z, Shen Y, et al. Erosion characteristics of black soils in northeast China (In Chinese). Scientia Geographica Sinica, 2006, 26 (6) : 687—692
- [5] 崔明, 蔡强国, 张永光, 等. 漫岗黑土区坡耕地中雨季浅沟发育机制. 农业工程学报, 2007, 23 (8) : 59—65
Cui M, Cai Q G, Zhang Y G, et al. Development of ephemeral gully during rainy season in the slope land in rolling hill black soil region of northeast China (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2007, 23 (8) : 59—65
- [6] 张明礼, 杨浩, 高明, 等. 利用¹³⁷Cs示踪技术研究滇池流域土壤侵蚀. 土壤学报, 2008, 45 (6) : 1017—1025
Zhang M L, Yang H, Gao M, et al. Study on soil erosion in dianchi catchment using ¹³⁷Cs tracer (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45 (6) : 1017—1025
- [7] 王禹. ¹³⁷Cs和²¹⁰Pb复合示踪研究东北黑土区坡耕地土壤侵蚀速率. 陕西杨凌: 中国科学院水利部水土保持研究所, 2010
Wang Y. Investigating the soil erosion rates on the cultivated slopes

- in the northeast black soil region of China using ^{137}Cs and ^{210}Pb measurements (In Chinese). Yangling, Shaanxi: Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 2010
- [8] 阎百兴, 汤洁. 黑土侵蚀速率及其对土壤质量的影响. 地理研究, 2005, 24 (4): 499—506
Yan B X, Tang J. Study on black soil erosion rate and the transformation of soil quality influenced by erosion (In Chinese). Geographical Research, 2005, 24 (4): 499—506
- [9] Fang H J, Yang X M, Zhang X P, et al. Using ^{137}Cs tracer technique to evaluate soil erosion and deposition of a black soil in Northeast China. Pedosphere, 2006, 16 (2): 201—209
- [10] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 利用 ^{137}Cs 技术研究黑土坡耕地土壤再分布特征. 应用生态学报, 2005, 16 (3): 464—468
Fang H J, Yang X M, Zhang X P, et al. Redistribution patterns of black soil in hillslope landform of northeast China: A ^{137}Cs study (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16 (3): 464—468
- [11] 刘志, 江忠善. 降雨因素和坡度对片蚀影响的研究. 水土保持通报, 1994, 14 (6): 19—22, 61
Liu Z, Jiang Z S. Study on the effect of natural rainfall factors and slopes on sheet erosion (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 1994, 14 (6): 19—22, 61
- [12] 李仁英, 杨浩, 唐翔宇, 等. 黄土高原地区 ^{137}Cs 的分布及其影响因子研究. 土壤学报, 2004, 41 (4): 628—631
Li R Y, Yang H, Tang X Y, et al. Effects of geographical factors on the distribution of ^{137}Cs in the Loess Plateau (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41 (4): 628—631
- [13] 李勉. 小流域侵蚀速率与产沙关系的 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 示踪研究. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2002
Li M. Study on the relationship between erosion rate and sediment yield in small watershed by ^{137}Cs and ^{210}Pb tracing method (In Chinese). Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2002
- [14] 贾艳红, 王兆印, 张志荣, 等. 基于 ^{137}Cs 技术的西汉水流域坡耕地侵蚀示踪研究. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50 (9): 1342—1345, 1349
Jia Y H, Wang Z Y, Zhang Z R, et al. Soil erosion of cultivated lands in the Xihanshui River basin (In Chinese). Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2010, 50 (9): 1342—1345, 1349
- [15] 刘宝元, 阎百兴, 沈波, 等. 东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策. 中国水土保持科学, 2008, 6 (1): 1—8
Liu B Y, Yan B X, Shen B, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for cultivated land in the northeastern black soil area of China (In Chinese). Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6 (1): 1—8
- [16] 范昊明, 蔡强国, 崔明. 东北黑土漫岗区土壤侵蚀垂直分带性研究. 农业工程学报, 2005, 21 (6): 8—11
Fan H M, Cai Q G, Cui M. Soil erosion developed with the vertical belts in the gentle hilly black soil regions in Northeast China (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2005, 21 (6): 8—11
- [17] Yang Y H, Yan B X, Zhu H. Estimating soil erosion in Northeast China using ^{137}Cs and ^{210}Pb . Pedosphere, 2011, 21 (6): 706—711
- [18] Cui M, Cai Q G, Zhu A X, et al. Soil erosion along a long slope in the gentle hilly areas of black soil region in Northeast China. Journal of Geographical Sciences, 2007, 17 (3): 375—383
- [19] 范昊明, 王铁良, 周丽丽, 等. 不同坡形坡面径流流速时空分异特征研究. 水土保持学报, 2007, 21 (6): 35—38
Fan H M, Wang T L, Zhou L L, et al. Study on temporal and spatial variation of current velocity on different form slopes (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21 (6): 35—38
- [20] An J, Zheng F L, Wang B. Using ^{137}Cs technique to investigate the spatial distribution of erosion and deposition regimes for a small catchment in the black soil region, Northeast China. Catena, 2014, 123: 243—251
- [21] 黑龙江省宾县土壤普查办公室. 宾县土壤. 1984
Soil Survey Office of Bin County in Heilongjiang Province. Soil of Bin County (In Chinese). 1984
- [22] 刘志强, 杨明义, 刘普灵, 等. ^{137}C 示踪技术背景值研究进展与建议. 核农学报, 2008, 22 (6): 913—917
Liu Z Q, Yang M Y, Liu P L, et al. Progress and suggestions on the investigation of ^{137}Cs reference inventory (In Chinese). Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2008, 22 (6): 913—917
- [23] Zhang X B, Walling D E, He Q. Simplified mass balance models for assessing soil erosion rates on cultivated land using caesium-137 measurements. Hydrological Science, 1999, 44 (1): 33—45
- [24] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. ^{137}Cs 示踪技术研究坡耕地黑土侵蚀和沉积特征. 生态学报, 2005, 25 (6): 1376—1382
Fang H J, Yang X M, Zhang X P, et al. Study on soil erosion

- and deposition of black soils on a sloping cultivated land using ^{137}Cs tracer method (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (6): 1376—1382
- [25] Nielsen D R, Bouma J. Soil spatial variability: PUDOC. Wageningen, 1985: 2—30
- [26] Xu X Z, Xu Y, Chen S C, et al. Soil loss and conservation in the black soil region of Northeast China: A retrospective study. *Environmental Science and Policy*, 2010, 13: 793—800
- [27] Guo Q K, Hao Y F, Liu B Y. Rates of soil erosion in China: A study based on runoff plot data. *Catena*, 2015, 124: 68—76
- [28] 赵雨森, 魏永霞. 坡耕地保护性耕作措施的水土保持效应. *中国水土保持科学*, 2009, 7 (3): 86—90
Zhao Y S, Wei Y X. Soil and water conservation effects of protective tillage measures on sloping farmland (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7 (3): 86—90
- [29] 范昊明, 蔡强国, 郭成久, 等. 东北黑土区土壤容许流失量与水土保持治理指标探讨. *水土保持学报*, 2006, 20 (2): 31—34
Fan H M, Cai Q G, Guo C J, et al. Study on criterion of soil loss tolerance and soil and water conservation in black soil region of northeast (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20 (2): 31—34
- [30] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准: L190—2007. 北京: 中国水利水电出版社, 2008
The Ministry of Water Resources of People's Republic of China. Standards of the classification of soil erosion in China: SL190—2007 (In Chinese). Beijing: China Water & Power Press, 2008
- [31] 谢云, 段兴武, 刘宝元, 等. 东北黑土区主要黑土土种的容许土壤流失量. *地理学报*, 2011, 66 (7): 940—952
Xie Y, Duan X W, Liu B Y, et al. Soil loss tolerance for black soil species in Northeast China (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66 (7): 940—952
- [32] Quine T A, Walling D E, Chakela Q K. Rates and patterns of tillage and water erosion on terraces and contour strip: Evidence from caesium-137 measurements. *Catena*, 1999, 36 (1): 115—142
- [33] 侯建才, 李占斌, 李勉. 紫色丘陵区小流域土壤侵蚀产沙空间分布的 ^{137}Cs 法初步研究. *农业工程学报*, 2007, 23 (3): 46—50
Hou J C, Li Z B, Li M. Preliminary study on spatial distribution of soil erosion in a small watershed in purple hilly area using ^{137}Cs tracer (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2007, 23 (3): 46—50
- [34] 郑粉莉, 唐克丽, 周佩华. 坡耕地细沟侵蚀影响因素的研究. *土壤学报*, 1989, 26 (2): 109—116
Zheng F L, Tang K L, Zhou P H. Study on factors affecting rill erosion on cultivated slope land (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1989, 26 (2): 109—116
- [35] Zingg A W. Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff. *Agricultural Engineering*, 1940, 21 (2): 59—64
- [36] Wischmerier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of Rocky Mountains. *Agricultural Handbook*, USDA. 1965: 282
- [37] 安娟. 东北黑土区土壤侵蚀过程机理和土壤养分迁移研究. 陕西杨凌: 中国科学院水利部水土保持研究所, 2012
An J. Processes and mechanisms of soil erosion and nutrient transportation in the black soil region of northeast China (In Chinese). Yangling, Shaanxi: Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 2012
- [38] 李勉, 杨剑锋, 侯建才, 等. ^{137}Cs 示踪法研究黄土丘陵区坡面侵蚀空间变化特征. *核技术*, 2009, 32 (1): 50—54
Li M, Yang J F, Hou J C, et al. The spatial variance of hill slope erosion in Loess Hilly Area by ^{137}Cs tracing method (In Chinese). *Nuclear Techniques*, 2009, 32 (1): 50—54

Effects of Topography on Spatial Distribution of Soil Erosion and Deposition on Hillslope in the Typical of Black Soil Region

YANG Weige^{1, 3} ZHENG Fenli^{1, 2†} WANG Zhanli^{1, 2} HAN Yong^{1, 3}

(1 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The knowledge about impacts of the topography on soil erosion and deposition on hillslope in the typical of the black soil region may serve as a scientific basis for arrangement of soil and water conservation measures in small catchments. However, currently, litter is available in literatures related the effects of topography factors (the slope position, slope gradient, slope length and slope shape) on spatial distribution of soil erosion and deposition on hillslope in the typical black soil region of Northeast China. This paper, based on the ¹³⁷Cs trace technique and Zhang Xinbao's mass balance model, studied on quantitatively spatial distribution characteristics of hillslope soil erosion and deposition and analyzed influences of topography factors on soil erosion rate. A small catchment, called Dongshangou, located at Bin county, Heilongjiang Province, was selected and a total of 76 soil samples were collected at various position from six typical slopes profiles which located at the upper, middle and down streams, respectively, in additional, 8 background samples, for analysis of ¹³⁷Cs activity with a gamma-ray spectrometry and for estimation soil erosion-deposition rates with Zhang's mode. Results show that soil erosion and deposition rates on corn-cultivated hillslopes ranged from -4 685 t km⁻² a⁻¹ to 3 417 t km⁻² a⁻¹ (+ means soil erosion and-means soil deposition) and with a mean of 448 t km⁻² a⁻¹, and the sampling sites where soil erosion and deposition occurred accounted for 60.5% and 39.5% of the total in number, which indicated that the catchment was dominated with soil erosion. Distribution of soil erosion and deposition varied significantly with slope position. The entire hillslope, including the top, upper, middle and lower slopes, were dominated with soil erosion, with erosion rate varying in the range of 38 t km⁻² a⁻¹ to 3 318 t km⁻² a⁻¹; and averaged to be 819, 376, 1 000, and 634 t km⁻² a⁻¹, at the top, upper, middle and lower slope, respectively. Obvious deposition was observed in the foot of a slope, varying in the range of -107 t km⁻² a⁻¹ to -4 685 t km⁻² a⁻¹ and averaged to be -1 382 t km⁻² a⁻¹. Moreover, distribution of hillslope soil erosion and deposition also varied with shape of the slope. On convex slopes, soil erosion came first and then followed by deposition; while on the complex slopes, soil erosion and deposition distributed alternatively along the hillslopes. In addition, soil erosion rate exhibited significant power function relationships with slope gradient and slope length; and it increased with increasing slope gradient and slope length. The effect of slope gradient was much greater than that of slope length on soil erosion rate. Therefore, it is essential to mitigate as much as possible the effect of slope gradient erosion on soil erosion in slope farmland in arranging soil and water conservation practices in the black soil region.

Key words Soil erosion rate; Slope gradient; Slope length; Slope shape; Typical black soil region

(责任编辑：檀满枝)