

# 降雨过程中碱性坡耕地土壤侵蚀的研究

李法虎<sup>1</sup>, Keren R<sup>2</sup>, Benhur M<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学; 2 以色列水、土和环境科学研究所)

**摘要:** 坡地土壤侵蚀的治理是水土保持工作的主要任务之一。为了研究碱性坡耕地土壤在降雨过程中的入渗和侵蚀特性,该试验采用室内人工降雨模拟器方法对两种不同碱度的壤质黄土在不同坡度条件下的入渗和侵蚀进行了调查。试验土壤的可交换钠百分比(ESP)分别为 2.8 和 52.0,土壤表面坡度为 5%~25%。试验数据显示,在降雨过程中,土壤的入渗能力随 ESP 的减小或表面坡度的增大而增加,土壤的可侵蚀性随土壤 ESP 或表面坡度的增大而增加,两种 ESP 的土壤在各种表面坡度情况下的土壤累积侵蚀量随累积降雨量直线增加,并随土壤坡度的增大而增加。但当土壤坡度大于 15% 时,高 ESP 土壤的累积侵蚀量随土壤坡度的增加远大于低 ESP 土壤的增加。USLE 经验公式较好地预测了低 ESP 土壤的坡度系数,但不能精确计算高 ESP 土壤的坡度系数。由于土壤细沟侵蚀的发生,WEPP 模型低估了两种 ESP 土壤在大坡度情况下的坡度系数。

**关键词:** 坡地; 土壤侵蚀; 可交换钠百分比(ESP); 土壤入渗率

**中图分类号:** S157.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2003)02-0061-04

## 1 引言

土壤侵蚀是目前人类生存环境所面临的最严重的挑战之一。在干旱半干旱地区的大部分土壤属于易侵蚀土壤,如何增加水的入渗量和土壤水分的储存量从而减小土壤的表面径流量和侵蚀量成为本地区水土保持的主要任务之一。

土壤聚合物在雨滴冲击(物理弥散)或水解(化学弥散)的作用下分裂并压实,细颗粒沉淀在土壤表层的孔隙中,从而在表层土壤中形成压实层而限制了更多的水进入土壤。土壤的物理弥散与雨滴的冲击动能有关,而其化学弥散由土壤碱度和土壤溶液浓度决定。土壤表层硬壳由两部分组成:1)降雨冲击引起的表面致密层;2)粘粒累积而形成的低孔隙度的过渡层。土壤表面致密层具有较大的容重和较低的土壤入渗和传导能力。据研究证实<sup>[1]</sup>,致密层的土壤水力传导能力只有土壤剖面的千分之一或更小。

土壤入渗率依赖于土壤剖面的水力传导特性和土壤表面的水力传导能力,它随着土壤中可交换钠含量的增加和土壤溶液浓度(小于土壤粘粒的凝聚浓度时)的降低而减小<sup>[2]</sup>。但地表径流与此正好相反,它随着土壤中可交换钠含量的增加和土壤溶液浓度的减小而加大<sup>[2-4]</sup>。在降雨条件下,表层土壤中过低的溶液浓度使土壤粘粒产生膨胀和弥散,致使表层土壤颗粒在雨滴冲击和地表径流的作用下产生移位,从而阻塞土壤传导孔隙或随地表径流而淋失。

土壤侵蚀严重地破坏了土壤耕层,造成了土壤养分的淋失而影响农作物的生长,同时它也引起了水土环境的恶化。土壤侵蚀由两个过程形成:土壤聚合物的分裂和细颗粒的传输。土壤侵蚀受诸如降雨、土壤侵蚀性、地

表坡长和坡度、作物及管理水平等多种因素的影响<sup>[5]</sup>。土壤表面坡度是影响土壤侵蚀的一个重要因素,它的增大将引起更严重的土壤侵蚀<sup>[6]</sup>,但其影响程度取决于土壤敏感性和径流剪切力。

土壤中可交换钠含量及土壤溶液浓度对土壤入渗性能的影响已被广泛的研究<sup>[2,4,11]</sup>,但可交换钠含量对坡耕地土壤在降雨过程中侵蚀的研究相对较少。虽然耕地和山坡地的土壤侵蚀模型已经广泛地应用于流域的生产管理<sup>[6-8]</sup>,但它并未考虑由降雨引起的土壤表面致密层和表层硬壳对土壤侵蚀形成的影响<sup>[10]</sup>。土壤表面致密层一方面导致了土壤更大的抗剪切强度从而减小了土壤的分离,另一方面却增加了径流量从而形成更大的土壤搬运能力。因此,调查 ESP 水平对降雨条件下各种坡度上的土壤入渗和侵蚀性能的影响将有助于提高碱性坡地土壤的管理水平,有助于合理制定非宜耕荒坡地的管理政策和法规。

本研究的目标:调查碱性土壤在不同坡度条件下的入渗能力;确定在降雨过程中土壤的可侵蚀性和侵蚀量;研究碱性土壤的侵蚀程度与土壤坡度的关系。

## 2 试验方法和材料

试验土壤取自以色列内戈夫地区北部两个位置的 0~25 cm 表层,为壤质黄土。土壤的机械组成为:砂粒 50%,粉粒 31%,粘粒 19%。土壤的粘粒部分主要为蒙脱石。土壤的阳离子交换量为  $15 \text{ cmol}_k \cdot \text{kg}^{-1}$ ,碳酸钙含量大约为 10%,有机质含量为 1.5%。试验土壤样本的 ESP 分别为 2.8 和 52.0。

本试验在室内喷嘴式降雨模拟器上进行。土壤样本被风干、粉碎和过筛( $< 4 \text{ mm}$ )。首先在带有孔眼的  $50 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  托盘上铺设一层粗纱布和 1 cm 厚的粗砂,然后以  $1.2 \text{ Mg m}^{-3}$  的容重在其上均匀地装填土壤。土壤样本厚 8 cm。5 个土壤托盘分别设置为不同的坡度(5%~25%),另一个空托盘用于监测降雨强度的变化。

收稿日期: 2002-05-08 修订日期: 2002-12-10

作者简介: 李法虎, 博士, 副教授, 主要从事农业水土工程和水土环境的研究。北京市清华东路 17 号 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083

试验开始前,首先利用自来水(电导率  $EC = 1 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ )从下部饱和土壤样本。待土壤饱和后,降雨试验开始。降雨采用蒸馏水( $EC < 0.01 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ ),降雨强度为  $43 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,平均雨滴直径为  $1.9 \text{ mm}$ ,雨滴速度为  $6.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其动能为  $18 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。降雨试验连续进行直到获得稳定入渗速率后停止。在试验过程中,用量杯连续收集土壤径流量和土壤入渗量并测定它们的体积,计算土壤入渗率。将收集的土壤径流水样烘干后确定土壤的侵蚀量。在本试验中,所有的处理均为 3 个重复。

### 3 试验结果和讨论

两种 ESP 水平的土壤在 5 种坡度上的入渗速率随累积降雨量的变化见图 1。为了比较两种不同 ESP 的土壤入渗率 ( $I$ ) 随降雨历时的变化情况,在图 1 中采用相对入渗率 ( $I/I_i$ )。两种 ESP 土壤的初始入渗率 ( $I_i$ ) 分别为  $6.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  ( $ESP = 2.8$ ) 和  $16.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  ( $ESP = 52.0$ )。土壤入渗率随降雨历时减小,然后逐渐趋于一稳定值(图 1)。在低 ESP 的土壤中,入渗速率随降雨历时的减小较为缓慢,而在高 ESP 的土壤中,入渗速率随降雨历时急剧下降,并迅速地达到稳定入渗率。在累积降雨量达 20mm 时,高 ESP 土壤的入渗速率只有初始值的 15% 左右。土壤的稳定入渗率分别是初始值的 22% ~ 37% ( $ESP = 2.8$ ) 和 6% ~ 12% ( $ESP = 52.0$ )。高 ESP 土壤的入渗速率的减小程度明显地大于低 ESP 土壤的减小程度,因此它的结构稳定性小于低 ESP 土壤的稳定性。

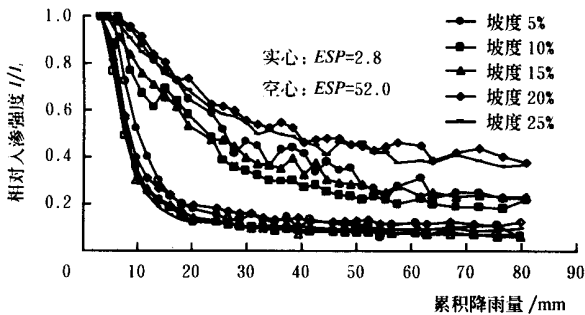


图 1 两种 ESP 水平的土壤在 5 种坡度上的相对入渗率 ( $I/I_i$ ) 随累积降雨量的变化

Fig 1 Relative infiltration rate ( $I/I_i$ ) of soils with two ESP levels at 5 slopes versus accumulative rainfall amount

土壤中难溶性碳酸钙矿物的存在虽然对土壤水力传导性能的减小有一定的缓解作用,但对土壤入渗能力的影响很小<sup>[2,11]</sup>。表层土壤中低的电解质浓度使得土壤聚合物产生化学弥散是导致本试验中相当低的入渗百分比(小于总降雨量的 7%)的原因之一。在降雨条件下,由于雨滴的冲击和过低的土壤溶液电解质浓度而形成的土壤表面硬壳是引起土壤入渗速率减小的主要原因。土壤中更高的可交换钠含量增大了土壤粘粒的弥散和膨胀,进一步恶化了土壤结构的稳定性,从而加速了

土壤入渗率的减小(图 1),并导致了高 ESP 土壤的稳定入渗率明显地小于低 ESP 土壤的稳定入渗率(图 1 和图 2)。

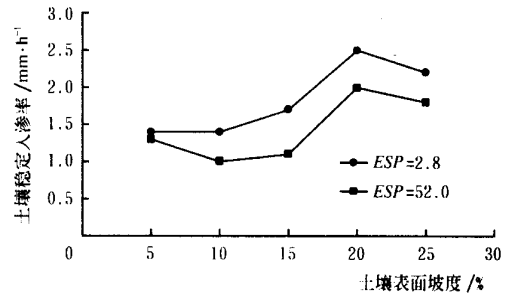


图 2 两种 ESP 土壤的稳定入渗率与土壤表面坡度的关系

Fig 2 Steady infiltration rate of soils with two ESP levels versus soil slopes

总的来讲,土壤稳定入渗率随土壤表面坡度的增大而增加(图 2)。这一观测结果与 Ben-Hur 等的结论一致<sup>[12]</sup>。在小坡度(15%)情况下,土壤稳定入渗率随土壤坡度的变化不大。土壤入渗率在大坡度情况下较大的增加可能与其表面致密层的破坏有关,这将在下面详细讨论。

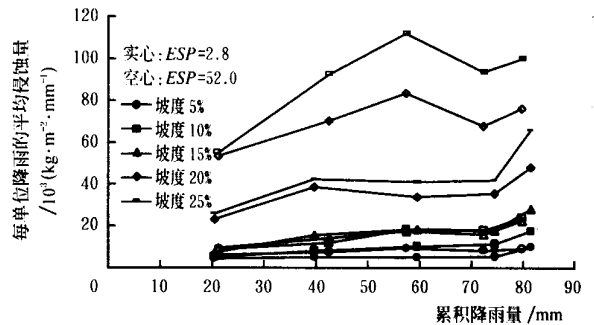


图 3 两种 ESP 水平的土壤在 5 种坡度上的可侵蚀性随降雨历时的变化

Fig 3 Erodibility of soils with two ESP levels at 5 slopes versus accumulative rainfall amount

在降雨过程中,土壤的可侵蚀性随降雨历时的延长而增加(图 3)。但土壤 ESP 水平和土壤坡度对其有相当大的影响:土壤 ESP 越高或表面坡度越陡,每单位降雨引起的土壤侵蚀量越大,即土壤具有更大的可侵蚀性(图 3)。在小于 15% 的坡度内,两种 ESP 水平的土壤每毫米降雨引起的侵蚀量差异不大,其平均值为  $1.24 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,且它们均小于  $2.0 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。当土壤坡度增大到 20% ~ 25%,  $ESP = 2.8$  土壤的单位降雨侵蚀量平均为  $3.96 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,而  $ESP = 52.0$  的为  $8.04 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,它们分别是小坡度时的 3 倍和 7 倍。

两种 ESP 水平的土壤在 5 种坡度上的累积侵蚀量随累积降雨量的变化见图 4。由图 4 可知,两种 ESP 水平的土壤在各种坡度上的侵蚀量随累积降雨量呈直线增加(平均  $R^2 = 0.995^{***}$ ),它们的增加梯度随土壤 ESP 水平或表面坡度的增大而增大。

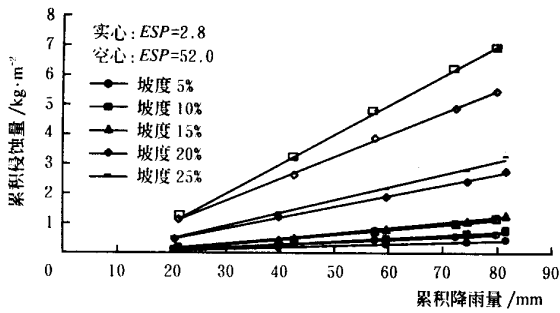


图 4 两种 ESP 水平的土壤在 5 种坡度上的累积侵蚀量随降雨历时的变化

Fig 4 Accumulative erosion of soils with two ESP levels at 5 slopes against accumulative rainfall amount

土壤的累积侵蚀量随土壤坡度的增大而增加(图 5)。在小坡度(15%)的情况下,土壤侵蚀量随坡度的增加较小,并且两种 ESP 水平的土壤侵蚀量相差不大。因此,在试验条件下,低 ESP(2.8)的土壤已产生了相当大的化学弥散。这说明占土壤阳离子交换量只有 2.8% 的可交换性钠的存在在降雨的情况下已足以引起土壤产生碱性土的弥散行为。Kazman 等的试验结果也证实了这一推断<sup>[2]</sup>。当土壤表面坡度大于 15%,土壤侵蚀量随土壤坡度快速地增大,特别是高 ESP 的强碱性土壤更是如此。因此,在较陡的山坡地上退耕还林,尽量减小农业生产活动是水土保持的一个重要措施。

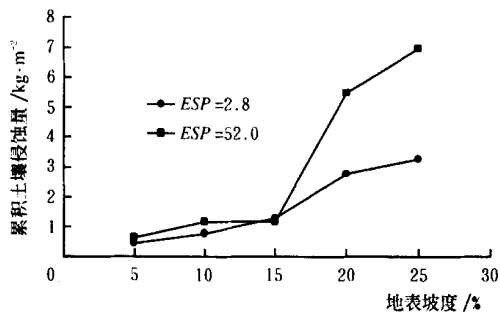


图 5 两种 ESP 土壤的累积侵蚀量随土壤表面坡度的变化

Fig 5 Accumulative erosion of soils with two ESP levels against soil slopes

目前最常用的计算坡度系数的公式是 USLE (Universal Soil Loss Equation) 模型中的经验方法<sup>[12]</sup>,即

$$S = 64.51\sin^2\alpha + 4.56\sin\alpha + 0.065 \quad (1)$$

式中  $\alpha$ ——坡度角, (°);  $S$ ——坡度系数, 即观测坡度上单位面积的土壤侵蚀量与标准坡度(9%)上土壤侵蚀量之比。

另一个计算坡度系数的方法来源于 W EPP (Water Erosion Prediction Project) 模型<sup>[12]</sup>

$$S_i = 2.19\{1.05 - 0.85\exp[(-4)\sin\alpha]\} \quad (2)$$

式中  $S_i$ ——细沟间侵蚀情况下的坡度系数。式(1)和式(2)在 9% 标准坡度下的坡度系数为 1。

根据上面两式计算的坡度系数和本试验中获得的坡度系数显示在图 6。由图 6 可知,经验公式(1)较好地预测了低 ESP 土壤的坡度系数,但对高 ESP 土壤坡度系数的计算不能令人满意。式(2)在小坡度(< 15%)时

较好地预测了两种 ESP 土壤的坡度系数,但在大坡度时式(2)却远远地低估了两者的坡度系数。试验观测证实了在降雨过程的中后期,大坡度上的土壤发生了细沟侵蚀从而增大了土壤的损失。上面的两个计算公式均不能较好地预测高 ESP 土壤在大坡度情况下的坡度系数。因此,坡度系数的计算应该考虑土壤特性和应用水的化学性质的影响。

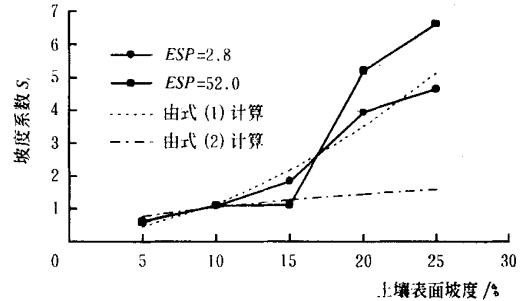
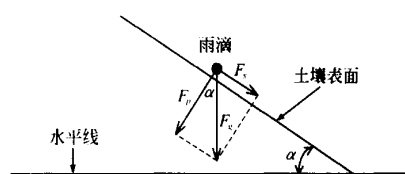


图 6 两种 ESP 土壤在各种坡度条件下的坡度系数与预测值的比较

Fig 6 Comparison of observed slope factors at two soil ESP levels and various slopes with model prediction values

在降雨条件下,不同地表坡度上的土壤颗粒所受到的搬运力(径流剪切力)和土壤压实力随坡度角的变化而改变(图 7)。沿土壤表面方向的搬运力与坡度角成正比,而雨滴对土壤表面的压实力与坡度角成反比。在相同的降雨动能条件下,土壤表面的坡度角越大,则土壤颗粒的搬运力越大而土壤的压实力越小。因此,陡坡上的土壤颗粒更易移动,更易被表面径流携带走,从而形成了土壤更大的可侵蚀性(图 3)。



$\alpha$ —土壤表面坡度角;  $F_g$ —雨滴对土壤颗粒的冲击力;  $F_s$ —雨滴冲击力沿土壤表面方向的分力,  $F_s = F_g \sin\alpha$   $F_p$ —雨滴冲击力沿垂直于土壤表面方向的分力,  $F_p = F_g \cos\alpha$

图 7 雨滴动能所引起的土壤颗粒的表面搬运力和压实力与土壤表面坡度角的关系

Fig 7 Surface transport force and compaction force on soil particles resulting from rain drops versus soil slope angle

在小坡度(15%)的情况下,雨滴引起的搬运力不足以破坏土壤表面的致密层,因此两种 ESP 水平的土壤侵蚀量相差并不很大。但当表面坡度大于 15% 时,由雨滴引起的表面搬运力大于土壤表面致密层的抗剪切力,此时土壤表面的致密层被破坏,细沟侵蚀发生,从而导致更大颗粒的位移。因此,土壤侵蚀量在大坡度时显著地增加,并且易弥散的高 ESP 土壤的侵蚀量明显地大于低 ESP 土壤的侵蚀量。大坡度上土壤更严重的冲刷破坏了土壤表面的致密层,从而导致了土壤入渗率随表面坡度更快的增加(图 2)。

## 4 结 论

土壤入渗率及土壤侵蚀量与土壤 *ESP* 水平和表面坡度密切相关。在降雨条件下, 表层土壤中过低的溶液电解质浓度导致了只有 2.8% 可交换钠的土壤也会产生相当严重的化学弥散。增大的可交换钠含量引起土壤结构稳定性的更加恶化。土壤的入渗能力随土壤 *ESP* 的增加而减小但随土壤表面坡度的增大而增加。在降雨过程中, 土壤的可侵蚀性和累积侵蚀量随土壤 *ESP* 水平和土壤表面坡度的增大而增加。两种 *ESP* 水平的土壤在各种坡度情况下的累积侵蚀量随降雨历时线性增加。土壤累积侵蚀量与土壤坡度成正比, 但大坡度 (> 15%) 上强碱化土壤的侵蚀量随土壤坡度急剧地增大。USLE 经验公式较好地预测了低 *ESP* 土壤的坡度系数, 但不能精确计算高 *ESP* 土壤的坡度系数。由于土壤细沟侵蚀的发生, WEPP 模型低估了两种 *ESP* 土壤在大坡度情况下的坡度系数。

### [参 考 文 献]

- [1] Shainberg I. The effect of exchangeable sodium and electrolyte concentration on crust formation [J]. *Advances in Soil Science*, 1985, 1: 101~ 122
- [2] Kazman Z, Shainberg I, Gal M. Effect of low levels of exchangeable sodium and applied phosphogypsum on the infiltration rate of various soils [J]. *Soil Science*, 1983, 135: 184~ 192
- [3] Levy G J, Levin J, Shainberg I. Seal formation and inter-rill soil erosion [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1994, 58: 203~ 209
- [4] Keren R, Shainberg I, Frenkel H, et al. The effect of exchangeable sodium and gypsum on surface runoff from loess soil [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1983, 47: 1001~ 1004
- [5] Unger P W. Conservation till system [J]. *Advances in Soil Science*, 1990, 13: 27~ 68
- [6] 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, 1387~ 1395
- [7] Ghidry F, Alberts E E. Comparison of measured and WEPP predicted runoff and soil loss for Midwest claypan soil [J]. *Transactions of the ASAE*, 1996, 39: 1395~ 1402
- [8] Liu B Y, Nearing M A, Baffaut C, et al. A scough II. The WEPP watershed model: III. Comparisons to measured data from small watersheds [J]. *Transactions of the ASAE*, 1997, 40: 945~ 952
- [9] Zhang X C, Nearing M A, Risse L M, et al. Evaluation of WEPP runoff and soil loss predictions using natural runoff plot data [J]. *Transactions of the ASAE*, 1996, 39: 855~ 863
- [10] Nearing M A, Jane L J, Alberts E E, et al. Prediction technology for soil erosion by water: status and research needs [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1990, 54: 1702~ 1711
- [11] Shainberg I, Letey J. Response of soils to sodic and saline conditions [J]. *Hilgardia*, 1984, 52: 1~ 57
- [12] Ben-Hur M, Stern R, van der Merwe A J, et al. Slope and gypsum effects on infiltration and erodibility of dispersive and nondispersive soils [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1992, 56: 1571~ 1576

## Erosion of sodic soil in sloping field during rainfall process

Li Fahu<sup>1</sup>, Keren R<sup>2</sup>, Benhur M<sup>2</sup>

(1. College of Water Resource and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Water, Soils and Environmental Sciences, Tel Aviv 50250, Israel)

**Abstract:** Management of soil erosion in sloping fields is one of the main tasks of water and soil conservation. In order to investigate infiltration and erosion characteristics of soil in sloping fields during rainfall process, infiltration and erosion of loamy loess soils with two *ESP* levels under different slopes were conducted using a rain simulator in laboratory. Exchangeable sodium percentage (*ESP*) of soils was 2.8 and 52.0 respectively, and soil slope was within the range of 5% ~ 25%. The experimental data indicated that soil infiltration rate increased with decreasing *ESP* or increasing slope under the rainfall condition, and soil erodibility increased with increase of soil *ESP* or soil slope. Accumulative erosion linearly increased with accumulative rainfall amount under various *ESP* levels and land slopes, it also increased with increased slope angle. However, the increasing gradient of soil erosion against slope was much faster in high *ESP* soil than in low *ESP* soil with greater land slopes (> 15%). The empirical formula of USLE calculated the slope factor well for low *ESP* soil, but poorly for high *ESP* soil. The WEPP model underestimated slope factor at great slope steepness for both *ESP* soils due to hill erosion.

**Key words:** sloping field; soil erosion; exchangeable sodium percentage; infiltration rate