

铁路工程建设中重塑坡面单元产流产沙规律研究^①

奚成刚 杨成永 许兆义

(北方交通大学土建学院 北京 100044)

摘 要 本文通过野外人工降雨试验的方法,对铁路工程建设中各主要坡面单元的产流产沙情况与原始坡面的产流产沙情况进行了比较研究。发现:(1)坡面产流:施工营地>路堑边坡>>施工便道≈原始地面;(2)坡面产沙:路堑边坡>>施工便道>施工营地≈原始地面。同时对工程中影响坡面产流产沙的因素进行了讨论,认为:(1)工程中重塑坡面单元上的产流主要受坡度和坡面土层的密实度等因素的影响,而坡面土壤前期含水量亏缺程度则是影响产流时间的关键因素;(2)重塑坡面单元上的侵蚀程度主要受坡面土层密实度、坡度以及受人为干扰土层的厚度等因素的影响。

关键词 水土流失;产流产沙;产流率;单位降雨侵蚀量

中图分类号 S157.1

A

铁路工程建设过程中,往往要对原始地面进行开挖或堆填等大规模的扰动。土方量大、弃渣量多且分布分散,如果防护的不得力,易于造成严重的水土流失。另外施工过程中许多新的人工重塑地形单元产生,其中很多是坡面单元,势必会对当地坡面的水土流失特征产生很大的影响。因此,为了做好工程建设过程中的水土保持工作,在工程的可行性研究阶段,掌握工程施工期水土流失的特点,制定工程施工期的水土保持方案是十分必要的^[1,2]。

目前,国内外对坡面乃至小流域、流域等范围的水土流失规律开展了大量的研究工作^[3-7],但是对工程建设中涉及的水土流失规律的研究却很鲜见^[8-12],而对于公路或铁路工程建设中水土流失问题的研究,目前更是仅限于定性的描述^[13,14]。本文通过人工降雨试验方法,对铁路工程建设中各重塑坡面单元的水土流失特征进行了讨论,并将其与原地面的水土流失特征作了比较研究,以期对工程中水土流失的量化和水土保持方案的制定提供依据。

1 试验区概况

试验选在我国新建秦沈客运专线兴城段 DK93~DK94 傅家屯中桥附近进行,该地位于辽宁省兴城市境内。兴城市地处松岭山脉南侧,地貌形态多为山前丘陵区,中间夹杂丘间平原。地形高差变化不大,相对高差为 20~30m,一般自然坡度约为 3°~10°,海拔高度 20~60m。主要岩性为混合花岗岩

类。该地区属于温带半湿润半干旱季风气候区,冬寒降水少,春季多风,夏季炎热多雨。年平均年降水量为 600mm 左右,6、7、8 月份约占全年降雨量的 70%以上。

2 试验方法

2.1 降雨条件

采用中科院地理研究所的下喷式降雨器。选取兴城市当地暴雨雨强(0.72mm/min)及多年遇暴雨雨强(1.2mm/min)作为试验雨强,并于试验前进行率定。试验在 2000 年 7 月进行,试验中实际降雨量和雨强采用小区周围布设的雨筒计量,具体结果见表 1。

表 1 降雨强度和降雨量

Table 1 Intensity and amount of rainfall

小区序号	雨强(mm/min)	降雨量(mm)
I	1.51	25.76
II	0.47	17.94
III	1.22	128.04
IV	1.16	24.8
V	0.69	8.32
VI	1.47	41.2
VII	0.62	16.24
VIII	1.62	41.46
IX	0.76	12.16

2.2 试验小区

将铁路工程建设中的重塑坡面单元分成 4 类:路堑、弃土场(包括路堤边坡和取土场)、施工便道和施工营地。同时选取原地面作为对照单元。对于各种坡面单元,选取代表性的、较平整的坡面作为

①基金项目:国家自然科学基金资助项目(50178002)。

试验小区布设用地,坡长小于 7m,宽度不少于 4m。小区面积为 4m×1.5m。具体情况见表 2。

表 2 各试验小区概况
Table 2 Basic information of each experiment plot

小区 序号	地 形 单 元	前期含水量 (表层, %)	坡度	其他特点
I	路 堑	19.38	40.2°	坚硬的花岗岩风化物,
II		9.76		表面有松散碎屑
III	弃土场	5.71	33.3°	粗的花岗岩风化碎屑, 土壤干容重 1.49g/cm ³
IV	原地面	9.82	16.6°	花岗岩风化物,植被覆
V		16.65		盖度为 50%
VI	施工便道	4.5	4.7°	表面为花岗岩风化碎
VII		21.34		屑,坡面左倾 1.7°
VIII	施工营地	4.52	1.5°	细小的花岗岩风化碎
IX		17.5		屑,坡面左倾 7°~8°

2.3 监测内容及方法

径流量和含沙率: 试验过程中用有刻度的容器收集小区径流。记录小区内产流时间(由降雨开始时间计时),从产流开始每隔一定时间读取径流量并取水样进行水沙分析。

雨前土壤含水量和土壤干容重: 雨前在小区外近处与小区中心等高处取表土土样(取样深度 10cm),然后进行土样分析获得雨前土壤含水量和土壤干容重。

3 结果与讨论

3.1 产流分析

3.1.1 产流率与平均产流率 由于各小区实际雨强与设计雨强之间存在一定的偏差。为了使各小区的产流具有可比性,引入产流率和平均产流率两个物理量:

$$f(t) = \frac{1}{I(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} \tag{1}$$

$$\bar{\alpha} = \frac{R}{P} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \tag{2}$$

式中: $f(t)$ 为产流率(即时产流系数,无量纲); $R(t)$ 为 t 时刻径流深度(mm); $I(t)$ 为 t 时刻雨强(mm/min); $\bar{\alpha}$ 为平均产流率(整个降雨时段产流系数,无量纲); R 为总径流深(mm); P 为总降雨量(mm); T 为总降雨时间(min)。

将停雨到断流时间段内收集的径流量通过加权的方法分摊到停雨前各时间段,采用式(1)计算出每一时段的平均产流率(式中导数值取该时段单位时间径流深度)作为该时段中间时刻的产流率,并绘制

产流率变化曲线图(图 1 和 2)。同时采用式(2)计算整个降雨过程的平均产流率,结果见表 3。由于试验

表 3 各小区主要试验结果
Table 3 Results of the experiments in the plots

小区 序号	产流时间	总产流 量(mL)	平均产流率 (无量纲)	总产沙 量(kg)	侵蚀量 (t/km ²)
I	40"	141780	0.917	19.01	3168
II	3' 40"	65400	0.608	20.19	3365
IV	1' 45"	98020	0.659	1.07	178
V	2'	25325	0.507	0.09	15
VI	3' 40"	144310	0.584	4.85	808
VII	1' 30"	62785	0.644	0.79	132
VIII	1' 30"	231225	0.930	1.57	262
IX	45"	64810	0.888	0.15	25

中统计的径流量为水沙混合物的量,因此所得的产流率和平均产流率有时会>1。

3.1.2 各试验小区产流过程 从试验的过程来看,路堑、原地面、施工便道和施工营地 4 种地形单元的产流过程都属于超渗产流。入渗和产流是两个相互对立的过程,在降雨强度不变的情况下,二者之间存在此消彼长的关系。降雨开始时,地表土壤含水量处于非饱和状态,降雨全部被表层土壤吸收,因而最初的一段时间没有径流产生,产流时间的长短与雨前含水量亏缺程度、雨强等因素有关。随着表层土壤逐渐达到饱和,水分由于下层非饱和和土壤中负压的作用而开始下渗,由于此时非饱和和土壤中水分的入渗速度小于降雨强度,坡面局部开始出现产流,并逐渐发展为整个小区坡面全部产流。非饱和带未达到饱和之前,由于水分的入渗使得非饱和带原有的负压渐次减小,水分入渗的速率也逐渐减小,即时产流率也相应逐渐增大。当非饱和带渐次达到饱和后,水分入渗的速率便不再变化,这时的入渗率便是稳渗速率。此时坡面即时产流率也达到最大并且不再变化。弃土场小区的试验经过 105min 的大雨强降雨没有形成径流,只是在小区边界局部出现微小泥水流,估计是由边界影响所致。从弃土场的试验过程来看,其产流是一个蓄满产流的过程。弃土场小区选在路堤边坡进行,整个土层都比较松散、孔隙大,虽然雨强非常大,仍然没有产流。

3.1.3 不同地形单元产流对比 通过对各小区试验结果的分析可以发现,铁路工程建设中的这些重塑坡面单元,与当地的原始坡面相比,均表现出各自不同的产流特征。从图 1 和图 2 中可以看出,路堑边坡和施工营地小区的产流率开始阶段增长非

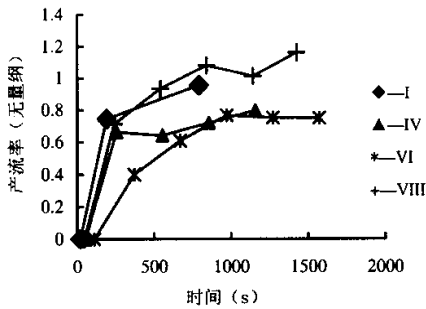


图 1 大雨强试验小区产流率变化曲线图

Fig 1 Runoff yield rate of the experiment plot under rainfall of high intensity

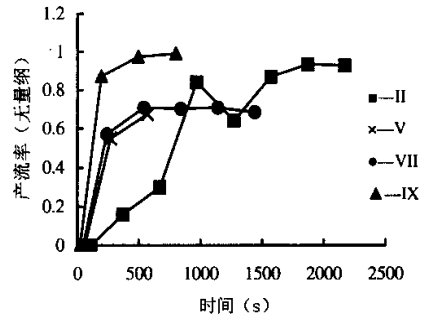


图 2 小雨强试验小区产流率变化曲线图

Fig 2 Runoff yield rate of the experiment plot under rainfall of low intensity

常快(路堑边坡小区 II 例外是由于初始阶段表层土壤含水量亏缺度很大所致),并且很快稳定于一个非常接近于 1 的水平上,它们的平均产流率也接近甚至超过了 0.9(路堑边坡小区 II 例外,见表 3)。出现这种结果的原因是:路堑边坡的挖掘面的坡度(40°左右)远远大于其它各坡面单元的坡度,且坡面松散的风化物碎屑下面是坚硬的花岗岩风化物,渗透率相对较小;而施工营地则是由于人为原因,使得地面土层非常密实所致。施工便道小区由于受人干扰较少(小区所在为基本上停用的施工道路),所以表现出的产流特征与原始地面相似,它们的产流率最终都稳定在 0.7~0.8 之间的某个水平上(见图 1 和图 2)。两种小区的平均产流率也都只有 0.6 左右(见表 3)。

3.2 工程中产流主要影响因素分析

3.2.1 产流时间的影响因素 施工期各重塑坡面单元表层土壤雨前含水量的亏缺程度是影响坡面降雨产流时间的关键因素,表层土壤的饱和度越小,其产流时间就越长;与其相比,降雨强度对产流时间的影响只能居其次,显然,同样条件下雨强越大产流时间也就越短;而重塑坡面单元的坡度及覆盖度等因素对产流时间基本上无影响。

3.2.2 产流率的影响因素 (1)重塑坡面单元的坡度 众所周知,坡度是影响坡面产流的重要因素,对于工程建设中所产生的重塑坡面单元也是如此。在其它条件相同的前提下,重塑坡面单元的坡度越大,平均产流率也就越大。这一点从对表 1~表 3 和图 1、图 2 中的数据分析可以看出,路堑边坡小区表面和施工便道表面土壤状况相似,但由于路堑边坡的坡度远远大于施工便道的坡度,所以小区 I

的平均产流率(0.917)远远大于小区 VI 的平均产流率(0.584);小雨强条件下,小区 II 的平均产流率(0.608)小于小区 VII 的平均产流率(0.644)是由于小区 VII 土壤雨前含水量的亏缺程度大所致。(2)重塑坡面单元地表土壤密实度 根据小区内土壤的特点,可以把小区分为硬地面(施工营地)小区和一般(路堑边坡和施工便道)小区两类。通过对上述两类小区试验结果的比较可以发现,地表土壤的密实度对地表产流过程影响显著。土壤的密实度越大(土壤干容重大),其渗透能力就越弱,因此产流率也就越大。施工营地小区由于地表土壤的密实度比路堑和施工便道小区大,虽然坡度比二者小,但其产流率依然比其它两个小区大。施工营地小区的产流率分别达到了大雨 0.93 和小雨 0.888 的水平;而坡度远远大于它的路堑边坡小区也分别只有 0.917 和 0.608,施工便道则更小。

3.3 产沙分析

3.3.1 各试验小区产沙过程 由于受人为干扰的方式和程度的不同,所以各种重塑坡面单元的产沙过程也不尽相同。降雨初期,由于没有产流,坡面土壤只是受到雨滴下落而产生的击溅作用。随着坡面上产流的开始,坡面上开始出现泥沙的运移,即坡面产沙开始。随着降雨的进行,产沙过程逐渐分为两种情况。路堑边坡小区和施工便道小区因为地表土层薄而松散,降雨侵蚀以细沟侵蚀为主,致使含沙率增加很快,并很快达到峰值。此时松散层基本被冲光,含沙率开始减小,并逐渐到达一个稳定值。而施工营地和原地面小区由于土层厚而密实或有植被覆盖,使得坡面上的侵蚀只是以层状面蚀为主。开始阶段,表层的松散颗粒物被冲刷,使得

含沙率达到峰值，继而逐渐减小并稳定于一个很小的数值。

表 4 各小区单位降雨侵蚀量

Table 4 Soil erosion rates per unit rainfall in the experiment plots

试验小区	I	II	IV	V	VI	VII	VIII	IX
单位降雨侵蚀量(t/km^2)	123	188	7	2	20	8	6	2

3.3.2 不同地形单元侵蚀强度对比 由图 3 和图 4 中的各小区的含沙率变化过程曲线可以看出，路堑边坡小区的含沙率稳定前非常大，大约是其其他小区的 10 倍、几十倍甚至上百倍，这主要是因为路堑边坡面开挖完成后，原始挖掘坡面上表层是松散的花岗岩风化物碎屑，极易容易被冲蚀。除此之外，由于试验选取的施工便道受人为干扰不多，表面相对较为松散，因此其径流中的含沙率也相对较高，尤其是大雨强试验中含沙率峰值达到了 $0.046g/ml$ 。施

工营地由于表面土壤非常坚实，且松散物很少，因此其含沙率在整个降雨过程中都处于一个较低的水平上，其最终的含沙率稳定值(大雨强约为 $0.006g/ml$ 左右，小雨强约为 $0.002g/ml$ 左右)甚至比原始地面的含沙率(大雨强约为 $0.01g/ml$ 左右，小雨强约为 $0.004g/ml$ 左右)还要低。由于试验条件所限，各小区试验的降雨量很难控制到设计的水平(见表 1)。因此，为了使各小区的土壤侵蚀情况具有可比性，此处引入单位降雨侵蚀量的概念，即平均每毫米降雨量所造成的土壤侵蚀量，结果见表 4。通过比较可以发现：路堑边坡小区的侵蚀强度最大，每毫米降雨量所造成的侵蚀量分别为 $123t/km^2$ 和 $188t/km^2$ ；其次是施工便道小区，大雨强时每毫米降雨量的侵蚀模达到 $20t/km^2$ ，小雨强时也是原地面的 4 倍；而施工便道小区的侵蚀强度基本上与原地面相仿，甚至还略有降低。

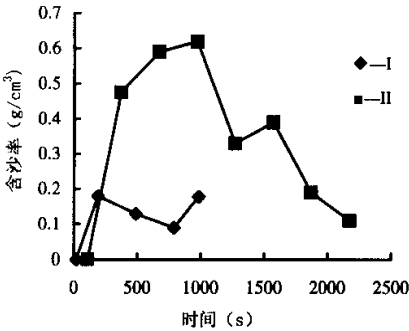


图 3 试验小区 I、II 含沙率变化曲线图

Fig. 3 Sediment yield rates in experiment plots I and II

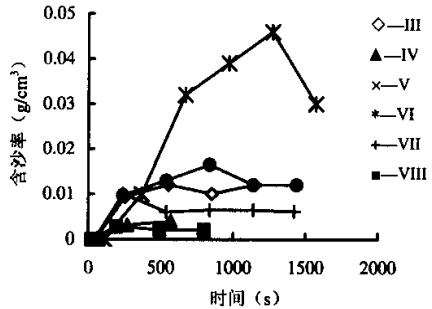


图 4 试验小区 III~VIII 含沙率变化曲线图

Fig. 4 Sediment yield rates in experiment plots III~VIII

3.4 工程中产沙主要影响因素分析

土壤侵蚀程度可以由多种物理量来体现，此处仅将含沙率及单位降雨侵蚀量作为评判标准，来讨论工程施工过程中影响土壤侵蚀程度的主要因素。

3.4.1 重塑坡面单元地表土壤密实度 土壤密实程度是影响坡面土壤可侵蚀性的主要因素。土壤密实度越大，土壤干容重越大，越难以被侵蚀。这一点可以在图 3 和图 4 中得以体现，施工便道的地面土层非常密实，因此它与土层相对较为松散的路堑边坡和施工便道小区相比，更加难被侵蚀。从图中也可以看到，其含沙率同另两个小区相比要小很多，每毫米降雨侵蚀量仅为另两个小区的 $1/20$ 和 $1/4$ 左右。

3.4.2 重塑坡面单元的坡度 坡度通过影响坡面径流的速度，从而影响径流的冲刷力。其它条件相同的情况下，坡度越大，则坡面上径流量和径流速度就越大，径流动能也就越大，因此其侵蚀力也就越强。这一点在表面土层较为松散的坡面上表现得更为明显。路堑边坡小区和施工便道小区土层密实程度相仿，但由于路堑边坡的坡度很大，所以造成了更多的侵蚀。路堑坡面的含沙率远远大于施工便道的含沙率，其大、小雨强条件下每毫米降雨侵蚀量也分别为施工便道小区的 6 倍和 23 倍多。

3.4.3 坡面单元的人为扰动深度 弃土场(包括路堤边坡和取土场)由于受人为扰动的土层厚度很大，整个土层都比较松散，且孔隙度很大。因此，

即使在有很大降雨的情况下,坡面也很难产流。但是,如果坡顶一旦有径流沿坡面流下,这种松散的坡面极易发生严重的浅沟侵蚀。例如,2000年7月16日的一场大雨,路堤坡顶下泄的径流造成了严重

的浅沟侵蚀。在作者划定的长50m左右的路堤边坡上,分布着深和宽各为0.5m左右的冲蚀沟7条,另有更细的浅沟若干,土壤流失总量为26t左右。具体见表5。

表5 天然降雨引起的土壤侵蚀(路堤边坡,2000.7.16~17)

Table 5 Soil erosion caused by natural rainfall (embankment side slope)

总降雨量 (mm)	降雨历时 (min)	I (mm/h)	时段最大雨强 (mm/h)			坡度	平均坡长 (m)	侵蚀量 ($10^4\text{t}/\text{km}^2$)
			i_{10}	i_{20}	i_{60}			
75.8	1613	2.82	30.6	28.4	20.1	33.3	10.2	4.63

4 结 论

(1) 各种人工重塑坡面单元由于受人为干扰的程度和方式不同,因此也表现出各自不同的产流产沙特征。文中通过对各种单元产流率的对比,得出各地形单元的产流能力依次为:施工营地>路堑边坡>>施工便道=原地面;弃土场由于堆积松散,其产流属蓄满产流过程,即使大强度降雨也很难产流。另外为了使侵蚀强度具有可比性,引入单位降雨侵蚀量作为侵蚀强度的对比指标,得各单元侵蚀强度依次为:路堑边坡>>施工便道>施工营地≈原地面;弃土场虽然在大雨强条件下也很难产流,但其产沙能力却不容忽视。如果坡顶一旦有径流下泄,将会形成严重的浅沟侵蚀。

(2) 研究表明,铁路工程建设中的人工重塑坡面的产流主要受坡面土层密实度、坡度等因素的影响,而雨前坡面表层土壤含水量的亏缺程度则是影响产流时间的关键因素;坡面可侵蚀性则主要受坡度、坡面土层密实度以及受人为扰动土层厚度等因素的影响。

参考文献

- 1 王治国,段喜明等.开发建设项目水土流失预测的若干问题讨论.中国水土保持,2000,(4):35~37
- 2 郭锐,薛志敏等.开发建设项目水土流失预测易出现的问题及其对策.中国水土保持,2000,(2):36~37
- 3 Poesen, J., E.D. Luna, A, et al. Concentrated flow erosion

rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content. Catena, 1999, 36: 315~329

- 4 Olivier, P., E. Michel, S. et al. Raindrop erosion of tillage induced microrelief possible use of the diffusion equation. Soil & Tillage Research, 2000, 56: 131~144
- 5 宋孝玉,康绍忠等.长武黄土沟壑区不同下垫面条件农田产流产沙规律及其影响因素.水土保持学报,2000,(2):28~31
- 6 朱智红.黄甫川和浑河两流域产输沙规律.人民黄河,1999,(12):20~22
- 7 刘小勇,吴普特.硬地面侵蚀产沙模拟试验研究.水土保持学报,2000,(1):33~37
- 8 喻权刚.多沙粗沙区煤田开发对环境的影响及防治对策.水土保持学报,1994,(4):36~41
- 9 白中科,王治国等.安太堡露天煤矿水土流失特征与控制.煤炭学报,1997,(5):542~547
- 10 刘功贤,詹敏等.黑龙江省土壤流失方程在工程建设项目土壤流失预测中的应用.中国水土保持,2000,(7):23~25
- 11 孙虎,唐克丽.城镇建设中人为弃土降雨侵蚀实验研究.土壤侵蚀与水土保持学报,1998,(2):29~35
- 12 王向东,匡尚富等.城市化建设和采矿对土壤侵蚀及环境建设的影响.泥沙研究,2000,(12):39~45
- 13 王玉太,王维平等.浅谈公路建设的水土流失原因及其防止措施.水土保持通报,1999,(1):61~62
- 14 刘敬军,田素平.铁路建设工程水土流失预测分析研究.中国水土保持,1999,(7):32~33

(下转第61页)

分类学上的困难和混淆。

(3)《中国土壤系统分类》(修订方案)能很好地解决本研究区中石灰分布区非石灰土的分类难题。

参考文献

1 周定一, 吴新民. 池州地区石灰岩分布区茶园土壤及其形成环境. 地理研究, 1995, 14 (1): 72~79

2 吴新民, 陈德明. 池州地区石灰岩区茶园土壤与因土种植的研究. 土壤, 1997, 29 (1): 22~25

3 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类(修订方案). 北京: 中国农业科技出版社, 1995, 1~218

4 安徽省地质矿产局. 安徽省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1987

SOIL TAXONOMY OF TEA GARDEN SOIL IN LIMESTONE REGION

Wu Xinmin^{1,2} Pan Genxing² Yin Lichu² Zhou Yunchao²

(1 Chizhou Junior Teachers College, Anhui 247100 China ; 2 Institute of Resources Ecosystem and Environment for Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095 China)

Abstract Based on analysis of the characteristics of the tea garden soil in the limestone region in Chizhou City and in line with the Catalogue of the Chinese Soil Taxonomy, the soils in this region are divided into three orders: Luvisols, Ferrisols and Cambisols, thus clarifying the misunderstandings about cultivation of tea in the limestone region.

Key words Limestone region, Soil taxonomy, Luvisols, Ferrisols, Cambisols

(上接第 52 页)

RUNOFF AND SEDIMENT YIELD ON RESHAPED SLOPES DURING RAILWAY CONSTRUCTION

Xi Chenggang Yang Chengyong Xu Zhaoyi

(School of Civil Engineering & Architecture, Northern Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract Through the experiment of outdoor artificial rainfalls, the law of runoff and sediment yield on reshaped slopes during railway construction were studied and compared with that on crude slopes. The results indicate 1) construction encampment>road cutting slope>construction shortcut≈crude slope in terms of runoff and 2) road cutting slope>construction shortcut>construction encampment≈crude slope in terms of sediment yield. Besides, factors affecting yield of runoff and sediment on the slopes during railway construction were also investigated, with results showing that 1) runoff on reshaped slopes is mainly affected by gradient of the slope and density of the soil layer on the slope and that moisture saturation of the soil layer on the slope before raining is the key factor deciding the starting time of runoff, and 2) intensify of the soil erosion on the reshaped slope is chiefly influenced by density of the soil on the slope, gradient of the slope and depth of the soil layer disturbed during railway construction.

Key words Soil erosion, Runoff, Sediment yield, Erosion per unit rainfall