

# 《生产建设项目土壤流失量测算导则》在仁沐新高速公路中应用的合理性探讨

王静梅<sup>1\*</sup>, 张侃侃<sup>2,3#</sup>, 王鹤鸣<sup>4</sup>, 莫秋霞<sup>5</sup>, 卜崇峰<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>四川仁沐高速公路有限责任公司, 四川 成都

<sup>2</sup>西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌

<sup>3</sup>中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌

<sup>4</sup>西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌

<sup>5</sup>西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西 杨凌

Email: 79806368@qq.com, #570873932@qq.com

收稿日期: 2020年12月23日; 录用日期: 2021年2月24日; 发布日期: 2021年3月8日

## 摘要

本研究应用《生产建设项目土壤流失量测算导则》(以下简称《导则》), 对防治分区类型全面、能够获得准确数据的四川省仁沐新高速公路进行土壤流失量测算, 着重探讨《导则》在实际工程中应用的有效性和合理性。结果表明: 1) 各测算公式中的参数能够有效的反映计算单元的占地类型、坡度、坡长、土壤类型、质地、砾石含量、气象、汇水面积、植被、原地貌水土保持措施等因素, 较类比法更能反映出项目的实际情况; 2) 测算所得的扰动后侵蚀量与工程实际扰动强度较为相符, 但由于参数 $B$ 取值过小引起植被破坏型一般扰动地表土壤流失量公式测算出的原地貌土壤流失量过小; 3)  $B$ 和 $B_0$ 取值不合理导致地表翻扰型一般扰动地表新增土壤流失量测算公式测算结果过大。为提高《导则》测算的准确度, 我们建议需要针对不同扰动方式和强度赋予不同的 $N$ 值, 并进一步校正 $B$ 和 $B_0$ 取值。

## 关键词

高速公路, 土壤流失量, 计算单元, 测算公式, 合理性

# Discussion on the Reasonableness of the Application of "Guidelines for Measurement and Estimation of Soil Erosion in Production and Construction Projects" in Renmuxin Expressway

Jingmei Wang<sup>1\*</sup>, Kankan Zhang<sup>2,3</sup>, Heming Wang<sup>4</sup>, Qiuxia Mo<sup>5</sup>, Chongfeng Bu<sup>2,3</sup>

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 王静梅, 张侃侃, 王鹤鸣, 莫秋霞, 卜崇峰. 《生产建设项目土壤流失量测算导则》在仁沐新高速公路中应用的合理性探讨[J]. 水土保持, 2021, 9(1): 1-10. DOI: 10.12677/ojswc.2021.91001

<sup>1</sup>Sichuan Ren-mu Expressway Co. Ltd., Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling Shaanxi

<sup>3</sup>Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling Shaanxi

<sup>4</sup>College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling Shaanxi

<sup>5</sup>College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling Shaanxi

Email: 79806368@qq.com, #570873932@qq.com

Received: Dec. 23<sup>rd</sup>, 2020; accepted: Feb. 24<sup>th</sup>, 2021; published: Mar. 8<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

In this paper, with the application of “Guidelines for measurement and estimation of soil erosion in production and construction projects” (hereinafter referred to as the Guidelines), the Renmuxin expressway in Sichuan province, which can obtain accurate data and comprehensive types, is selected to measure the amount of soil erosion. This paper focuses on the effectiveness and rationality of the application of the guidelines in practical engineering. The results show that: 1) The parameters in each calculation unit can reflect the occupation type, slope gradient, slope length, soil type, texture, gravel content, meteorology, catchment area, vegetation, original geomorphic soil and water conservation measures and other factors, which can reflect the actual situation of the project than the analogy method better; 2) The measured erosion amount after disturbance is in good agreement with the actual disturbance intensity of the project. However, due to the small value of parameter  $B$ , the amount of soil erosion in the original landform calculated by the formula of surface soil erosion due to the general disturbance of vegetation destruction is too small; 3) The unreasonable values of  $B$  and  $B_0$  lead to the excessive result of the formula for calculating the amount of newly added soil erosion under the general disturbance of surface disturbance. In order to improve the accuracy of the calculation of the guidelines, we suggest that different  $N$  values should be given according to different disturbance modes and intensity, and the values of  $B$  and  $B_0$  should be further corrected.

## Keywords

Expressway, Soil Erosion Measurement, Calculation Unit, Calculation Formula, Rationality

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

水土流失对发展中国家和发达国家的经济均造成了严重的影响，全球每年因土壤流失引起的经济损失巨大[1] [2] [3] [4] [5]。自改革开放以来，作为发展中国家的我国一直把经济作为重要发展目标，随着大量生产建设项目的投资建设，因其产生的水土流失已逐渐成为我国水土流失的主要来源之一。因此，对生产建设项目的土壤流失进行预测、监测有助于指导水土保持措施的实施时间和实施部位[6]。《生产建设项目水土保持技术标准》[7]要求根据土壤侵蚀模数等值线图或实地调查分析确定原始地貌侵蚀模数，采用数学模型、试验观测等方法确定扰动后的侵蚀模数，在此基础上测算土壤流失量。前人采用此类方法对不同类型的建设项目进行了预测[8] [9] [10] [11] [12]，但其计算结果受侵蚀模数取值影响较大，易受

主观判断影响,且与项目扰动区域的占地类型、坡度、坡长、土壤类型、质地、砾石含量、气象、汇水面积、植被、原地貌水土保持措施等关系不大,误差极大,所以不能较好的测算实际侵蚀量。

1965年,W. H. Wischmeier和D. Smith提出了通用土壤流失方程(USLE) [13]作为预测面蚀和沟蚀引起的年平均土壤流失量,并于1978年对USLE进行修正[14]。2018年10月23日中华人民共和国水利部发布了《生产建设项目土壤流失量测算导则》[15] (SL773-2018)标准,该标准在通用土壤流失方程的基础上通过大量实验对不同情况给予相应的参数,用于水力和风力作用下生产建设项目土壤流失量的事前预测、事中监测和事后计算。该《导则》根据工程实地情况,能较为准确的测算出土壤流失量。但由于该导则中涉及的参数较多,且需要在大量实地调查和数据处理的基础上才能进行测算,尤其是线型项目的应用更为复杂,所以目前鲜有应用。因此本论文在进行实地取样、数据处理的基础上应用《导则》对G4216线仁寿经沐川至屏山新市(含马边支线)段高速公路(以下简称仁沐新高速公路)土壤流失量进行测算,以期提供详细的操作和计算过程,促进该《导则》的应用,为土壤流失量测算的规范化和准确性作出贡献。

## 2. 研究区概况

本研究选取四川省境内正在施工的仁沐新高速公路作为测算对象,可实地测量、收集所有设计资料,确保了《导则》中涉及的各项参数选取及测算结果的准确性。该项目属于线型项目,包含所有类型的防治分区,测算最为复杂且可应用到《导则》中的所有水力作用下土壤流失量测算公式。测算范围包括:路基工程区、互通工程区、附属工程区、施工生产区、施工便道区和弃渣场区。项目位于四川盆地南部,属典型的丘陵~低山地貌,气候类型属亚热带温暖湿润季风气候区,犍为县多年平均降雨量为1165.4 mm,沐川县多年平均降雨量为1305.6 mm。沿线土壤类型为粉土和壤土;植被类型均为偏温性常绿阔叶林区,地带性植被为常绿阔叶林,所涉及的犍为县森林覆盖率为40.5%,沐川县森林覆盖率为77.34%;土壤流失类型以水力侵蚀为主,项目区平均土壤侵蚀模数背景值为2370 t/(km<sup>2</sup>·a),侵蚀强度为轻度,项目区容许土壤流失量为500 t/(km<sup>2</sup>·a)。

## 3. 研究方法与数据来源

### 3.1. 划分计算单元

#### 3.1.1. 划分扰动单元

由于项目区主导外营力全部为水力作用,涉及的犍为县和沐川县年降雨量均大于800 mm,因此项目区不需要考虑主导外营力和降雨量的区别。依据《导则》,本文按照防治分区、土壤质地和空间的连续性不同,将项目区划分为120个扰动单元,再根据扰动面积、挖方量和填方量的大小分别将一般扰动地表、工程开挖面及工程堆积体扰动单元划分为大、中、小三个规模,划分结果见表1。

**Table 1.** Division results of project disturbance unit and computing unit

**表 1.** 项目扰动单元和计算单元划分结果

| 根据防治分区划分 | 根据土壤流失类型二级分类划分 | 根据规模划分 | 扰动单元个数 | 根据土壤流失类型三级分类划分 | 根据规模划分 | 计算单元 |
|----------|----------------|--------|--------|----------------|--------|------|
| 路基工程区    | 工程开挖面          | 大      | 7      | 上方有来水工程开挖面     | 大      | 7    |
|          |                | 中      | 24     |                | 中      | 24   |
|          |                | 小      | 8      |                | 小      | 8    |
|          | 工程堆积体          | 中      | 20     | 上方无来水工程堆积体     | 中      | 20   |
|          |                | 小      | 17     |                | 小      | 17   |

Continued

|       |        |   |    |             |            |    |   |
|-------|--------|---|----|-------------|------------|----|---|
| 互通工程区 | 工程开挖面  | 大 | 2  | 上方有来水工程开挖面  | 大          | 2  |   |
|       |        | 中 | 3  |             | 中          | 3  |   |
|       | 工程堆积体  | 大 | 1  | 上方无来水工程堆积体  | 大          | 1  |   |
| 附属工程区 | 一般扰动地表 | 大 | 1  | 地表翻扰型一般扰动地表 | 大          | 1  |   |
|       |        | 中 | 1  |             | 中          | 1  |   |
| 施工生产区 | 一般扰动地表 | 中 | 7  | 地表翻扰型一般扰动地表 | 中          | 7  |   |
|       |        | 小 | 6  |             | 小          | 6  |   |
| 施工便道区 | 工程开挖面  | 小 | 4  | 上方有来水工程开挖面  | 小          | 4  |   |
|       |        |   |    |             |            |    |   |
|       |        |   |    |             |            |    |   |
|       | 工程堆积体  | 小 | 3  | 上方有来水工程堆积体  | 小          | 1  |   |
|       |        |   |    |             | 上方无来水工程堆积体 | 小  | 2 |
| 弃渣场区  | 工程堆积体  | 大 | 13 | 上方有来水工程堆积体  | 大          | 13 |   |
|       |        | 中 | 3  |             | 中          | 3  |   |

### 3.1.2. 确定典型扰动单元和计算单元

《导则》指出，项目扰动单元大于 20 个时，宜以抽样方式确定典型扰动单元。对不同类型规模下(大、中、小规模)分别抽样，抽样数量为同一类型下同等规模扰动单元数量的 10%，且涉及的各种类型和规模的扰动单元至少选取 1 个。为了准确测算该项目土壤流失量，本文未进行抽样，将全部扰动单元作为典型扰动单元。

根据现场查勘和实验测定的相关信息，参照《导则》5.4.1 根据土壤流失类型三级分类划分计算单元，划分结果见表 1。

### 3.2. 选取测算公式

扰动后土壤流失量测算：附属工程区和施工生产区属于地表翻扰型一般扰动地表；路基工程区、互通工程区和施工便道区等防治分区属上方有来水开挖面；施工便道区和弃渣场区属上方有来水堆积体；上方无来水工程堆积体包含路基工程区、互通工程区和施工便道区。

原地貌土壤流失量测算：各防治分区原地貌土壤流失量都算作原地貌类型。各土壤流失量测算类型所对应的土壤流失量测算公式如表 2 所示。

Table 2. Calculation formula for each type of soil erosion

表 2. 各土壤流失类型测算公式

| 土壤流失量测算类型           | 土壤流失量测算公式   |
|---------------------|---|
| 地表翻扰型一般扰动地表扰动后土壤流失量 | $M_{yd} = RK_{yd}L_{\gamma}S_{\gamma}BETA$ (1)            |
| 地表翻扰型一般扰动地表新增土壤流失量  | 非农地: $M_{yd} = (NBE - B_0E_0)RKL_{\gamma}S_{\gamma}A$ (2) |
|                     | 农地: $M_{yd} = (NET - E_0T_0)RKL_{\gamma}S_{\gamma}A$ (3)  |
| 上方有来水工程开挖面土壤流失量     | $M_{ky} = F_{ky}G_{ky}L_{ky}S_{ky}A + M_{kw}$ (4)         |
| 上方无来水工程开挖面土壤流失量     | $M_{kw} = RG_{Kw}L_{kw}S_{kw}A$ (5)                       |
| 上方有来水工程堆积体土壤流失量     | $M_{dy} = F_{dy}G_{dy}L_{dy}S_{dy}A + M_{dw}$ (6)         |
| 上方无来水工程堆积体土壤流失量     | $M_{dw} = XRG_{dw}L_{dw}S_{dw}A$ (7)                      |
| 植被破坏型一般扰动地表土壤流失量    | $M_{yz} = RKL_{\gamma}S_{\gamma}BETA$ (8)                 |

新增土壤流失量测算：根据《导则》10.3.1，预测时段内各防治分区新增土壤流失量为相同区域、相同时期、相同外营力条件下的扰动后土壤流失量与扰动前土壤流失量之差。对于地表翻扰型一般扰动地表新增土壤流失量可直接采用公式(2)、(3)直接测算出新增土壤流失量。

## 4. 实例应用

### 4.1. 应用《导则》测算土壤流失量

#### 4.1.1. 参数的选取

按照《导则》10.1.3，用环刀对弃渣场区、施工生产区及其余防治分区的挖方、填方段采集土样。采用手测法对照附表 B.1 确定土类，对照附表 B.2 确定土质各粒级含量。土样自然风干后过 20 mm 筛测定砾石含量  $\delta$ ；烘干后测定含水率和土体密度。现场采用目估法确定植被的盖度和郁闭度。利用卫星影像图和施工图纸量测：计算单元水平投影坡长、面积、汇水面积、宽度、坡度。采用历史影像获取原地貌植被类型和水土保持措施类型。径流系数采用主体工程设计文件取值 0.65。降雨量数据来源于当地气象局。上方来水总量采用汇水面积、径流系数及降水量乘积计算而得。上方来水总量除以宽度即为上方单宽次来水总量  $W$ ，单位为  $m^3/m$ 。根据现场调查确定各计算单元扰动起止时间。土壤可侵蚀性因子  $K$  根据《导则》附表 C.1 得出，测算区域横跨犍为县和沐川县，所以土壤可侵蚀因子分别取 0.0071 和 0.0069；参照《导则》附表 C.1 确定项目所在县的降雨侵蚀力因子  $R$  取值。地表翻扰后土壤可蚀性因子增大系数  $N$  取 2.13。其余指标取值详见附表 1。

#### 4.1.2. 参数的选取

各防治分区扰动后土壤流失量、原地貌土壤流失量、新增土壤流失量测算结果见表 3；扰动后土壤流失量减去扰动前土壤流失量得出新增土壤流失量 1；新增土壤流失量 2 采用公式(2)、(3)直接测算。

由表 3 可知，直接作差得出的新增土壤流失量 1 全部为正值，各防治分区扰动后的侵蚀模数与工程实际扰动强度较相符(见表 4)，但采用公式(8)得出的原地貌侵蚀模数偏小。本次测算中引起原地貌侵蚀模数偏小的主要是受公式中  $B$  的影响，植被的盖度和郁闭度所对应的  $B$  值过小。

对于地表翻扰型一般扰动地表的新增土壤流失量通过公式(2)、(3)单独计算出的新增土壤流失量 2 大于扰动后的土壤流失量，表示该类型防治分区原地貌土壤流失量为负数，计算结果不合理。经分析发现，原地貌植被类型为非农地的计算单元，原地貌土壤流失量为正值，但侵蚀模数过小为  $39 t/(km^2 \cdot a)$ ，主要是因为《导则》中对于扰动前植被覆盖因子  $B_0$  取值过小；对于农地的计算单元，原地貌土壤流失量为负值，主要是因为《导则》中扰动后植被覆盖因子  $B$  取值过小，地表翻扰后土壤可蚀性因子增大系数  $N$  取值过大共同引起的。

### 4.2. 应用传统类比法测算土壤流失量

由表 3 可知，直接作差得出的新增土壤流失量 1 全部为正值，各防治分区扰动后的侵蚀模数与工程实际扰动强度较相符(见表 4)，但采用公式(8)得出的原地貌侵蚀模数偏小。本次测算中引起原地貌侵蚀模数偏小的主要是受公式中  $B$  的影响，植被的盖度和郁闭度所对应的  $B$  值过小。

Table 3. Calculation results of soil erosion in different control zones

表 3. 各防治分区土壤流失量测算结果

| 根据防治分区划分 | 根据土壤流失类型二级分类划分 | 根据土壤流失类型三级分类划分 | 扰动后土壤流失量(t) | 原地貌土壤流失量(t) | 新增土壤流失量 1 (t) | 新增土壤流失量 2 (t) |
|----------|----------------|----------------|-------------|-------------|---------------|---------------|
| 路基工程区    | 工程开挖面          | 上方有来水工程开挖面     | 77,310.76   | 170.11      | 77,140.65     | -             |
|          | 工程堆积体          | 上方无来水工程堆积体     | 22,519.89   | 100.63      | 22,419.26     | -             |

## Continued

|       |        |             |            |        |            |           |
|-------|--------|-------------|------------|--------|------------|-----------|
| 互通工程区 | 工程开挖面  | 上方有来水工程开挖面  | 742.62     | 49.48  | 693.14     | -         |
|       | 工程堆积体  | 上方无来水工程堆积体  | 1505.02    | 12.65  | 1492.38    | -         |
| 附属工程区 | 一般扰动地表 | 地表翻扰型一般扰动地表 | 3108.67    | 51.20  | 3057.47    | 5973.35   |
| 施工生产区 | 一般扰动地表 | 地表翻扰型一般扰动地表 | 6967.73    | 99.92  | 6867.81    | 12,390.30 |
| 施工便道区 | 工程开挖面  | 上方有来水工程开挖面  | 65.25      | 3.00   | 62.26      | -         |
|       | 工程堆积体  | 上方有来水工程堆积体  | 16.14      | 0.09   | 16.05      | -         |
|       |        | 上方无来水工程堆积体  | 15.59      | 0.59   | 15.01      | -         |
| 弃渣场区  | 工程堆积体  | 上方有来水工程堆积体  | 49,392.11  | 102.10 | 49,290.01  | -         |
| 合计    |        |             | 161,643.79 | 589.76 | 161,054.04 | -         |

Table 4. Soil erosion modulus in each control area

表 4. 各防治分区土壤侵蚀模数

| 防治分区<br>侵蚀模数[t/(km <sup>2</sup> ·a)] | 路基工程区  | 互通工程区 | 附属工程区 | 施工生产区 | 施工便道区 | 弃渣场区   |
|--------------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 扰动后侵蚀模数                              | 43,449 | 7128  | 6939  | 8304  | 3335  | 41,044 |
| 原地貌侵蚀模数                              | 116    | 194   | 144   | 122   | 122   | 95     |

Table 5. Calculation results of soil erosion in different control zones

表 5. 各防治分区土壤流失量测算结果

| 根据防治<br>分区划分 | 根据土壤流失类<br>型二级分类划分 | 根据土壤流失类<br>型三级分类划分 | 扰动后土壤<br>流失量(t) | 原地貌土壤<br>流失量(t) | 新增土壤流<br>失量 1 (t) |
|--------------|--------------------|--------------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| 路基工程区        | 工程开挖面              | 上方有来水工程开挖面         | 16,320.97       | 1719.22         | 14,601.74         |
|              | 工程堆积体              | 上方无来水工程堆积体         | 37,633.81       | 3814.82         | 33,818.99         |
| 互通工程区        | 工程开挖面              | 上方有来水工程开挖面         | 2119.53         | 222.62          | 1896.91           |
|              | 工程堆积体              | 上方无来水工程堆积体         | 4562.63         | 374.77          | 4187.86           |
| 附属工程区        | 一般扰动地表             | 地表翻扰型一般扰动地表        | 9683.27         | 1124.83         | 8558.43           |
| 施工生产区        | 一般扰动地表             | 地表翻扰型一般扰动地表        | 16,336.03       | 2064.86         | 14,271.17         |
| 施工便道区        | 工程开挖面              | 上方有来水工程开挖面         | 681.18          | 70.45           | 610.74            |
|              | 工程堆积体              | 上方有来水工程堆积体         | 24.41           | 2.15            | 22.26             |
|              |                    | 上方无来水工程堆积体         | 64.22           | 5.65            | 58.56             |
| 弃渣场区         | 工程堆积体              | 上方有来水工程堆积体         | 42,537.27       | 3249.19         | 39,288.09         |
| 合计           |                    |                    | 129,963.32      | 12,648.57       | 117,314.75        |

## 4.3. 测算方法对比

对由表 3、表 5 可知，受面积因素影响较大，两种方法测算出的原地貌、扰动后和新增的土壤流失量大小顺序基本相同，土壤流失重点区域均为路基工程区。

项目现场植被覆盖度均超过 90%，原地貌土壤流失量较小，但类比法测算出的各防治分区原地貌土壤流失量偏大，与项目现场实际情况不符，相比之下导则测算结果更能反应项目区的实际情况。根据土壤流失类型三级分类划分对比可以发现：上方有来水的情况下《导则》测算出的扰动后土壤流失量和新增土壤流失量均较大。

增土壤流失量 1 结果普遍大于类比法, 无水情况下正好相反, 说明《导则》能够反映上游来水产生侵蚀这一重要因素, 更贴近实地土壤流失量。

## 5. 结语

### 5.1. 结论

1) 土壤流失量的测算步骤: 先将项目区划分为不同类型和规模的扰动单元; 再对扰动典型以抽样方式确定典型扰动单元; 现场查勘并进一步细分典型扰动单元为计算单元; 最后根据各计算单元的土壤流失类型三级分类选取测算公式, 测算土壤流失量。测算公式中的参数能够反映计算单元占地类型、坡度、坡长、土壤类型、质地、砾石含量、气象、汇水面积、植被、原地貌水土保持措施等因素, 较采用数学模型、试验观测等直接赋予侵蚀模数的方法, 能够较为准确的测算扰动区域的土壤流失量。

2) 采用《导则》测算出的扰动后侵蚀量与工程实际扰动强度较相符。但应用植被破坏型一般扰动地表土壤流失量公式测算各防治分区原地貌土壤流失量结果过小。计算整理结果显示, 原因是《导则》中提供的植被盖度和郁闭度所对应的  $B$  取值过小, 建议进一步复核不同盖度和郁闭度下  $B$  的取值。

3) 原有植被为农作物情况下, 地表翻扰型一般扰动地表新增土壤流失量测算公式测算出的新增土壤流失量大于扰动后土壤流失量, 计算结果出现明显错误。计算整理结果显示, 《导则》中提供的扰动前植被覆盖因子  $B_0$  取值过小, 引起原地貌植被类型为非农地计算单元新增土壤流失量过大, 原地貌土壤流失量过小; 另扰动后植被覆盖因子  $B$  取值过小, 地表翻扰后土壤可蚀性因子增大系数  $N$  取值过大共同引起原地貌植被类型为农地计算单元新增土壤流失量过大, 原地貌土壤流失量为负值, 测算结果不合理。

4) 通过与传统的类比法对比可以发现, 《导则》测算出的土壤流失量能反映扰动区域的实地情况, 测算结果准确度高于传统类比法。

### 5.2. 建议

《导则》中提供的参数  $N$  实测方案所需时长为至少两年, 在实际应用中很难在生产建设项目中某一地点保留两年以上的监测小区, 我们建议须通过专门的研究实验, 针对不同扰动方式和强度来确定赋予不同的  $N$  值, 后续研究工作中需要进一步校正《导则》中的  $B$  和  $B_0$  取值, 以提高《导则》测算结果的准确性。

## 基金项目

四川省仁寿至屏山新市公路井研至新市段(含马边支线)水土保持监测。

## 参考文献

- [1] Phinzi, K., Abriha, D., Bertalan, L., *et al.* (2020) Machine Learning for Gully Feature Extraction Based on a Pan-Sharpener Multispectral Image: Multiclass vs. Binary Approach. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, **9**, 252. <https://doi.org/10.3390/ijgi9040252>
- [2] Blake, W.H., Rabinovich, A., Wynants, M., *et al.* (2018) Soil Erosion in East Africa: An Interdisciplinary Approach to Realising Pastoral Land Management Change. *Environmental Research Letters*, **13**, Article ID: 124014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaca8b>
- [3] Valentin, C., Poesen, J. and Li, Y. (2005) Gully Erosion: Impacts, Factors and Control. *Catena*, **63**, 132-153. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.001>
- [4] Bernard, J.M. and Livari, T.A. (2000) Sediment Damages and Recent Trends in the United States. *International Journal of Sediment Research*, **15**, 135-148.
- [5] Verheijen, F.G.A., Jones, R.J.A., Rickson, R., *et al.* (2009) Tolerable versus Actual Soil Erosion Rates in Europe. *Earth Science Reviews*, **94**, 23-38. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.02.003>

- [6] 李智广, 曾大林. 开发建设项目土壤流失量预测方法初探[J]. 中国水土保持, 2001(4): 27-29.
- [7] 郭索彦, 姜德文, 沈雪建, 等. GB 50433-2018. 生产建设项目水土保持技术标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [8] 曲德双. 类比法预测开发建设项目水土流失几个问题的探讨[J]. 黑龙江水利科技, 2008, 36(5): 26-27.
- [9] 崔丹, 李世锋, 余堃, 等. 类比法在高速公路建设土壤流失预测中的应用[J]. 中国水土保持, 2003(5): 38-40.
- [10] 丁京平. 绿色公路建设中水土流失量的预测计算[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2010, 6(10): 383-385.
- [11] 史彦林. 乌山矿井及选煤厂工程水土流失预测[J]. 水土保持科技情报, 2005(6): 28-30.
- [12] 傅暨南. 水电工程建设土壤流失量预测方法探讨[J]. 福建水土保持, 2004, 16(2): 63-67.
- [13] Wischmeier, W.H. (1971) A Soil Erodibility Nomograph for Farmland and Construction Sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, **26**, 189-193.
- [14] Quansah, C. (2010) The Effect of Soil Type, Slope, Rain Intensity and Their Interactions on Splash Detachment and Transport. *European Journal of Soil Science*, **32**, 215-224. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1981.tb01701.x>
- [15] 宁堆虎, 谢永生, 屈建军, 等. SL773-2018. 生产建设项目土壤流失量测算导则[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.



## 附录

**Appendix 1.** The meaning and calculation method of parameters in the calculation formulas of various types of soil erosion  
**附表 1.** 各类型土壤流失量计算公式中参数含义及计算方法

| 参数        | 含义                | 单位  | 取值/公式   |
|-----------|-------------------|---|---|
| $R$       | 降雨侵蚀力因子           | MJ·mm/(hm <sup>2</sup> ·h)                    | 取值见《导则》   |
| $K_{yd}$  | 地表翻扰后土壤可蚀性因子      | t   | $K_{yd} = NK$   |
| $N$       | 土壤可蚀性因子增大系数       | 无量纲   | 2.13  |
| $K$       | 土壤可蚀性因子           | t·hm <sup>2</sup> ·h/(hm <sup>2</sup> ·MJ·mm) | 取值见《导则》附表 C.1   |
| $L_y$     | 坡长因子              | 无量纲   | $L_y = (\lambda/20)^m$  |
| $\lambda$ | 计算单元水平投影长度        | m   | $\lambda < 100$ 时, 取实际值, $\lambda > 100$ 时, 取 100   |
| $m$       | 坡长指数              | 无量纲   | $\theta \leq 1^\circ$ 时, $m$ 取值 0.2; $1^\circ < \theta \leq 3^\circ$ 时, $m$ 取 0.3;<br>$3^\circ < \theta \leq 5^\circ$ 时, $m$ 取 0.4; $\theta > 5^\circ$ 时, $m$ 取 0.5 |
| $L_{ky}$  | 上方有来水工程开挖面坡长因子    | 无量纲   | $L_{ky} = (\lambda/5)^{-0.73}$  |
| $L_{kw}$  | 上方无来水工程开挖面坡长因子    | 无量纲   | $L_{kw} = (\lambda/5)^{-0.57}$  |
| $L_{dy}$  | 上方有来水工程堆积体坡长因子    | 无量纲   | $L_{dy} = (\lambda/5)^{f_2}$  |
| $f_2$     | 上方有来水工程堆积体坡长因子系数  | 无量纲   | 壤土 $f_2$ 取 -0.869, 粉土 $f_2$ 取 -0.902  |
| $L_{dw}$  | 上方无来水工程堆积体坡长因子    | 无量纲   | $L_{dw} = (\lambda/5)^{f_1}$  |
| $f_1$     | 上方无来水工程堆积体坡长因子系数  | 无量纲   | 壤土 $f_1$ 取 0.632, 粉土 $f_1$ 取 0.751  |
| $S_y$     | 坡度因子              | 无量纲   | $S_y = -1.5 + 17/[1 + e^{(2.3-6.1\sin\theta)}]$   |
| $\theta$  | 计算单元坡度            | °   | $\theta = 0^\circ$ 时, $S_y$ 取 0; $\theta < 35^\circ$ 时, $\theta$ 取实际值;<br>$\theta \geq 35^\circ$ 时, $\theta$ 取 $35^\circ$   |
| $S_{ky}$  | 上方有来水工程开挖面坡度因子    | 无量纲   | $S_{ky} = 1.18\sin\theta + 0.10$  |
| $S_{kw}$  | 上方无来水工程开挖面坡度因子    | 无量纲   | $S_{kw} = 0.80\sin\theta + 0.38$  |
| $S_{dy}$  | 上方有来水工程堆积体坡度因子    | 无量纲   | $S_{dy} = (\theta/25)^{d_2}$  |
| $S_{dw}$  | 上方无来水工程堆积体坡度因子    | 无量纲   | $S_{dw} = (\theta/25)^{d_1}$  |
| $\theta$  | 计算单元坡度            | °   | 取值范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$   |
| $d_2$     | 上方有来水工程堆积体坡度因子系数  | 无量纲   | 壤土 $d_2$ 取 1.787, 粉土 $d_2$ 取 1.501  |
| $d_1$     | 上方无来水工程堆积体坡度因子系数  | 无量纲   | 壤土 $d_1$ 取 1.245, 粉土 $d_1$ 取 1.212  |
| $F_{ky}$  | 上方有来水工程开挖面径流冲蚀力因子 | MJ/hm <sup>2</sup>                            | $F_{ky} = 10000W^{0.95}$  |
| $F_{dy}$  | 上方有来水工程堆积体径流冲蚀力因子 | MJ/hm <sup>2</sup>                            | $F_{dy} = 10000W^{0.95}$  |
| $G_{ky}$  | 上方有来水工程开挖面土质因子    | t·hm <sup>2</sup> /(hm <sup>2</sup> ·MJ)      | $G_{ky} = 0.004e^{\frac{1.84SIL(1-CLA)}{\rho}}$<br>粉粒含量 $SIL$ , 取小数;<br>黏粒含量 $CLA$ , 取小数  |
| $G_{kw}$  | 上方无来水工程开挖面土质因子    | t·hm <sup>2</sup> ·h/(hm <sup>2</sup> ·MJ·mm) | $G_{kw} = 0.004e^{\frac{4.28SIL(1-CLA)}{\rho}}$<br>粉粒含量 $SIL$ , 取小数;<br>黏粒含量 $CLA$ , 取小数;   |
| $\rho$    | 土体密度              | g/cm <sup>3</sup>                             | 环刀法测定   |

## Continued

|          |                 |  |   |
|----------|-----------------|--|---|
| $G_{dy}$ | 上方有来水工程堆积体土石质因子 | $t \cdot \text{hm}^2 / (\text{hm}^2 \cdot \text{MJ})$                                | 壤土 $a_2$ 取 0.053, $b_2$ 取 -1.95; 粉土 $a_2$ 取 0.064, $b_2$ 取 -1.71  |
| $G_{dw}$ | 上方无来水工程堆积体土石质因子 | $t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} / (\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$ | 壤土 $a_1$ 取 0.046, $b_1$ 取 -3.379; 粉土 $a_1$ 取 0.075, $b_1$ 取 -3.57 |
| $X$      | 工程堆积体形态因子       | 无量纲  | 锥形堆积体取 0.92, 侵蚀面为倾斜平面的堆积体形态因子取 1                                  |
| $B$      | 扰动后植被覆盖因子       | 无量纲  | 农地取 1, 裸地取 0.516, 原始地貌取 0.003                                     |
| $B_0$    | 扰动前植被覆盖因子       | 无量纲  |   |
| $E$      | 扰动后工程措施因子       | 无量纲  | 水平梯田取 0.100, 无工程措施取 1   |
| $E_0$    | 扰动前工程措施因子       | 无量纲  |   |
| $T$      | 扰动后耕作措施因子       | 无量纲  | 农地取 0.18102, 非农地取 1   |
| $T_0$    | 扰动前耕作措施因子       | 无量纲  |   |
| $A$      | 计算单元的水平投影面积     | $\text{hm}^2$  | 卫星影像及施工图量测  |