

# Assessment of soil erosion in the hydropower reservoir area based on GIS & RUSLE model

XU Hui-xi

*Institute of Engineering Surveying, Sichuan College of Architectural Technology, Deyang, China  
scxhx\_2001@yahoo.com.cn*

**Abstract:** The construction of reservoir is an important aspect in course of hydropower construction. The rate of reservoir sedimentation determines reservoir life. Soil and sand caused by soil erosion is important source material of reservoir sedimentation. Accurately predicting the amount of soil erosion has good reference for calculating fixed number of years of reservoir sedimentation. After six evaluation factors were quickly obtained using RS and GIS, which were the rainfall-runoff erosivity(R) factor, the soil erodibility (K) factor, the slope length (L) factor, the slope steepness (S) factor, the cover and management (C) factor, and the conversation support-practices (P) factor respectively, this paper evaluated and estimated soil erosion of study area based on the revised universal soil loss equation (RUSLE). According to the Chinese national standard, soil erosion intensity is divided into six levels, which are minor-loss, mild-loss, moderate-loss, severe-loss, serious-loss and violent-loss respectively. Results show that minor-loss and mild-loss occupied the main part of study area, which accounted for 47.49% of the study area. Moderate-loss, severe-loss, serious-loss and violent-loss accounted for 16.03%, 11.89%, 9.47% and 12.33% of the study area respectively. In addition, river area accounted for 2.79% of the study area. The results show that the level of soil erosion in study area is relatively low, but violent-loss areas are mainly located in frontal dam and near dam of reservoir. After the hydropower established, soil and sand from soil loss will directly enter the reservoir. When the hydropower designed, we should consider the soil loss will give influence on reservoir sedimentation.

**Keywords:** Soil erosion; Reservoir sedimentation; RUSLE model; Spatial analysis of GIS; Thematic information extraction from remote sensing image; Map algebra

## 基于 GIS 和 RUSLE 模型的水电站库区水土流失评价

许辉熙

*四川建筑职业技术学院. 测量工程研究所, 德阳, 中国, 618000  
scxhx\_2001@yahoo.com.cn*

**【摘要】** 水库修建是水电工程建设的主题, 水库淤积速度决定着水库寿命。水土流失造成的泥沙是水库淤积的重要物资来源。准确预测水土流失量, 对水电站水库淤积年限计算有很好的参考价值。研究选用 RUSLE (修正的通用土壤流失方程) 模型, 通过遥感和 GIS 技术, 快速获取了降雨、土壤、坡度、坡长、植被覆盖和水土保持措施 6 个评价因子, 对研究区内水土流失进行了估算和评价。根据中国国家标准, 水土流失强度划分为微度流失、轻度流失、中度流失、强度流失、极强度流失和剧烈流失六级。结果表明, 研究区水土流失强度以轻、微度流失为主, 其面积占研究区总面积的 47.49%; 中度流失为 16.03%, 强度流失为 11.89%, 极强度流失为 9.47%, 剧烈流失为 12.33%。其余 2.79% 为河流水面面积。综合分析表明: 研究区水土流失水平较低, 但剧烈流失区主要分布在坝前及近坝库区, 水电站建成后, 水土流失产生的泥沙将直接进入水库。在进行水电站泄洪排沙等工程设计时, 应充分考虑近坝库区水土流失对水库淤积的影响。

**【关键词】** 水土流失; 水库淤积; RUSLE 模型; GIS 空间分析; 遥感专题信息提取; 地图代数

### 1 引言

水库淤积不仅是水利水电工程环境影响评价的一项重要内容, 也是规划设计阶段不可缺少的计算项目。水库淤积速度决定着水库寿命, 也是决定水库效益的关键因素。水库淤积严重时, 不仅会淤满死库容, 还会减小兴利库容, 进而缩短水库的使用寿命, 这是规律性的结果<sup>[1]</sup>。在水库设计的时候, 需要估计水库可能的淤积速度, 以便判断水库的寿命, 以确定是否值得

兴建。

水库淤积的主要物质为泥沙, 其主要来源有<sup>[2]</sup>: 入库河流带来的泥沙; 水库区泥石流; 库岸变形破坏以及库周斜坡的坡流冲刷物质, 如塌岸、滑坡等。其中, 水土流失产生的泥沙是水库淤积的最主要来源。水土流失一般是指土壤或者其它地面组成物质在外营力作用下, 被剥蚀、破坏、分离、搬运和沉积的过程<sup>[3]</sup>。水土流失在国外更多的被称为土壤侵蚀。准确预测水土

流失量，对水库淤积年限计算有很好的参考价值，进而能够更好地客观评价水电站的效益；同时对制定水土保持规划、开展水土流失综合治理具有重要意义。

## 2 研究区概况

研究对象为黄河上游某拟建水电站。坝址位于青海省玛沁县拉军镇上游约 5km 的黄河干流上，左岸为果洛州玛沁县，右岸为海南州同德县，设计正常蓄水位 3270m。西宁~果洛州省道 (S101) 通过下坝址右坝肩，距西宁市公路里程约 363km。工程规模为 I 等大 (1) 型工程，主要建筑物为 1 级，次要建筑物为 3 级，是一座以发电为主的大型水电工程，目前处于预可研阶段。

坝址区地处青藏高原腹地，为典型高原深切峡谷地貌。河谷弯曲，总体西流，深切 200~250m，河道狭窄，水流湍急，多有跌坎，岸坡陡峭，部分直立，基岩裸露较好，河床覆盖浅，冲沟支流发育，多常年有水，两岸高平台为黄河高阶地侵蚀堆积成因，受局部剥蚀，呈不连续分布。场内勘察工作环境和条件如气候 (多雨雪、大风)、交通、供水供电、水上作业等，极为困难。

## 3 水土流失测算模型选择与评价因子确定

美国农垦部于 1992 年提出了 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation, 修正的通用土壤流失方程) 模型，并于 1997 年正式实施<sup>[4]</sup>。RUSLE 模型经过实践检验具有较高的准确性。本文选用 RUSLE 模型测算玛尔挡水电站库区水土流失量。RUSLE 模型表达式为：

$$A=R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

A 为年均土壤潜在侵蚀量，单位：t/(hm<sup>2</sup>.a)；R 为平均降雨和径流侵蚀力因子，单位：MJ.mm/(hm<sup>2</sup>.h.a)；K 为平均土壤可蚀性，取决于不同的土壤类型，单位：t.hm<sup>2</sup>.h/(MJ.mm.hm<sup>2</sup>)；L、S 分别为坡长、坡度因子；C、P 分别为植被覆盖因子、水土保持措施因子。L、S、C 和 P 因子皆为无量纲因子。

基于遥感和 GIS 技术，可快速计算 RUSLE 方程各因子。图 1 为本文技术路线。在建立 6 个评价因子 GIS 图层后，将其转为 2m×2m 栅格单元，利用 RUSLE 模型，进行水土流失评价。

### 3.1 降雨因子 R 的计算

降雨是诱发水土流失的最主要外营力，降雨强度越大，水土流失强度越大，除直接打击土壤、形成击溅侵蚀，同时还形成地表径流冲刷土壤，以一种综合

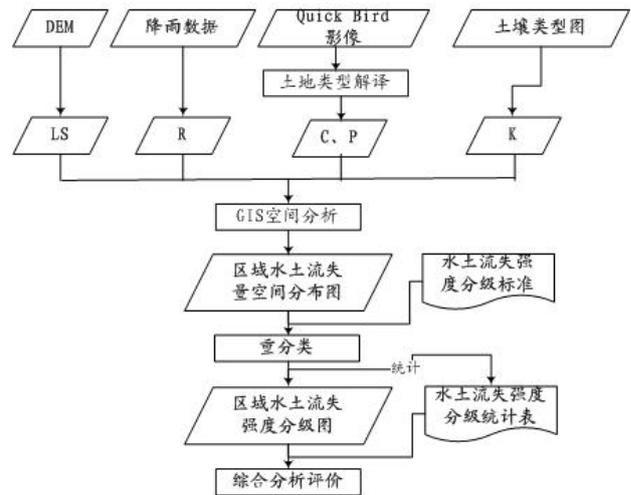


图 1 水土流失评价技术路线

Figure 1. Workflow of erosion assessment

的效应来影响水土流失。关于 R 值的计算，算法很多。本文采用 Renard 提出的公式计算<sup>[5]</sup>。

$$R = \begin{cases} 0.0483Pa^{1.61} & Pa < 850mm \\ 587.8 - 1.249Pa + 0.004105Pa^2 & Pa > 850mm \end{cases} \quad (2)$$

式中，R 的单位为：(MJ.mm)/(hm<sup>2</sup>.h.a)；Pa 为年降雨量，单位：mm。

由于研究区较小，且项目区位于青海省玛沁县和同德县交界处，为客观反映项目区的降雨情况，在没有 2007 年降雨资料的情况下，降雨量取 1995~2004 年两个县年平均值为 442.57mm，且规定降雨量处处相等。根据公式(2)计算玛沁县和同德县 1995~2004 年年均降雨侵蚀力因子 R 值为 878.96 MJ.mm/(hm<sup>2</sup>.h.a)。

### 3.2 土壤可侵蚀因子 K 的估算

土壤可蚀性因子 K 值，是一项评价土壤被降雨侵蚀力分离、冲蚀和搬运难易程度的指标，不同类型的土壤对侵蚀的敏感性不一样。土壤因子是 USLE 及 RUSLE 模型中最难确定的指标，因为它需要比较详尽的土壤资料。根据获取的土壤资料的不同，K 值的求算方法也不同。本研究采用以下公式<sup>[6]</sup>计算 K 值：

$$K = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256SAN(1 - SIL/100)]\} \times \left(\frac{SIL}{CLA + SIL}\right)^{0.3} \times [1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)}] \times [1.0 - \frac{0.7SN_1}{SN_1 + \exp(-5.51 + 22.9SN_1)}] \quad (3)$$

式中：K 为土壤可蚀性因子值；SAN—砂粒 (0.1-2.0mm) 含量(%)，SIL—粉砂 (0.002-0.1mm) 含量(%)，CLA—粘粒 (<0.002mm) 含量(%)；C—有机碳

含量(%), 其值为有机质含量(%)/1.72;SN1—1-SAN/100。

从公式(3)中可以看出, 只要知道有机质含量, 土壤砂粒、土壤粉砂和土壤粘粒的百分含量, 就可以计算 K 值。这些理化属性在研究区土壤类型图 GIS 数据库中可以直接获取。在常用的土壤可蚀性 K 值的公式中, 要求土壤颗粒分析标准是美国制, 而研究区土壤的理化属性来自青海省第二次土壤普查的成果《青海土壤》。《青海土壤》中的土壤颗粒分析采用的国际制要利用现有的土壤资料, 必须将国际制的土壤质地转换为美国制<sup>[7]</sup>, 本研究利用 Matlab 软件将国际制土壤质地值拟合合成三次样条函数曲线<sup>[8]</sup>, 然后插值计算得到相应的美国制土壤质地值, 将插值结果代入公式(3), 得到研究区土壤 K 值(表 1)。

### 3.3 坡长坡度因子 LS 的计算

地形因子对水土流失的影响也很大, 随着坡度的增加, 水土流失强度会加剧。地形因子对水土流失的影响用坡长 L 和坡度 S 表达。利用数字高程模型(DEM, Digital Elevation Model,下同), 可以快速计算 L、S 的值。

#### (1) 坡长 L

当降雨强度和坡度相同时, 物质沉淀量、水力侵蚀和冲刷的速度依据坡面的长度来确定, 坡面越长, 汇聚的流量越大, 侵蚀力和冲刷力就越强。同时坡长也直接影响地面径流的速度, 进而影响对地面土壤的侵蚀。坡长定义为在坡面上, 由给定点逆流而上到水流起点之间轨迹(也称水流路径)的最大平面投影长度<sup>[9]</sup>。本文采用 Moore 和 Burch 提出的算法<sup>[10]</sup>(公式 4), 并基于格网 DEM 和 ArcGIS 软件的水文分析模块(Hydrology)提取 L 因子。

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

式中 λ 为 DEM 栅格大小, Fa 为累积流量; m 为坡长指数, 本文取值为 0.5。在 ArcGIS 中实现上述算法的具体技术路线见图 2。

在格网 DEM 上计算坡长是对地表水流路径的模拟, 这就要求 DEM 在水流表面上能够畅通无阻的流动。但是, DEM 在建模的过程中, 地表本身存在的洼地(如凹坑)或者插值过程中的伪洼地都会影响水的流动路径, 使水流路径到不了出口。因此, 应该首先对 DEM 中的洼地进行填平处理, 形成无洼地 DEM, 从

而使水流路径畅通无阻<sup>[9]</sup>。在无洼地 DEM 基础上求算地面某点的水流方向(即该点的坡向), 进而利用公式中的算法求算坡长 L 值。

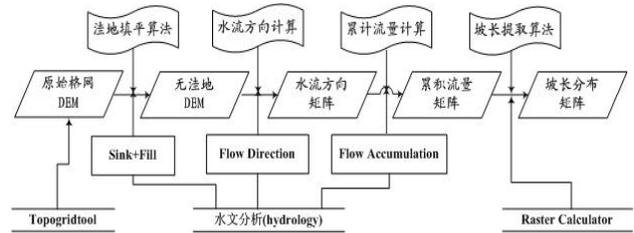


图 2 ArcGI S 自动提取坡长 L 的技术路线

Figure 2.Workflow of extracting L using ArcGIS

在 ArcGIS 水文分析模块(Hydrology), 使用“Sink”实现洼地计算, 使用“Fill”实现洼地填平, 使用“Flow Direction”实现水流方向计算, 使用“Flow Accumulation”实现累积流量计算。在累积流量计算的基础上, 利用 ArcGIS 的 Spatial Analysis 中的栅格计算器(Raster Calculator)根据公式(4)计算得到研究区的 L 值。

#### (2) 坡度 S

坡度是决定径流冲刷能力的基本因素之一。径流具有的能量是径流质量与流速的函数, 而流速主要决定于径流深度和地面坡度。因此, 坡度直接影响着径流的冲刷能力。在相同条件下, 坡度越大, 径流流速越大, 冲刷能力越强, 土壤侵蚀量也越大。本文根据坡度等级不同, 坡度因子计算选用不同算法, 即缓坡选用 McCool 坡度公式<sup>[11]</sup>, 陡坡选用 LIU B Y 的坡度计算公式<sup>[12]</sup>:

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin a + 0.03 & a < 5 \\ 16.8 \sin a - 0.50 & 5 \leq a < 10 \\ 21.9 \sin a - 0.96 & a \geq 10 \end{cases} \quad (5)$$

式中 S 为坡度因子, a 为坡度(°)。利用 ArcGIS Spatial Analyst 或者 ArcGIS 3D Analyst 可以直接根据格网 DEM 计算单元坡度值, 然后在 ArcGIS Spatial Analyst 模块 Map Algebra(地图代数)中通过条件选择, 按照公式(5)分级计算 S 值。以下语句是在 ArcGIS 的 Map Algebra 中实现坡度因子 S 计算的表达式:

```
con([slope] < 5,(10.8 * Sin([slope] / 180 * 3.1415926) + 0.03),con([slope] < 10,(16.8 * Sin([slope] / 180 * 3.1415926) - 0.5),(21.9 * Sin([slope] / 180 * 3.1415926) - 0.96)))
```

最后, 将 L 和 S 因子在栅格计算器中相乘得到研究区坡长坡度 LS 因子栅格图层。

表 1 经过插值转换后的土壤质地及其 K 值计算结果

Table 1.K value in study area

| 亚类名称 | 国际制名称及粒径(mm)   | 取值 (%)  | 美国制名称及粒径(mm)   | 取值 (%) | K 值计算对应名称及粒径(mm) | 取值 (%) | 有机质 (%) | K 值   |
|------|----------------|---------|----------------|--------|------------------|--------|---------|-------|
| 草毡土  | 粘粒(<0.002)     | 24.02   | 粘粒(<0.002)     | 24.02  | 粘粒(<0.002)       | 24.02  |         |       |
|      | 粉砂(0.02-0.002) | 36.79   | 粉砂(0.002-0.05) | 36.79  | 粉砂(0.002-0.1)    | 36.79  |         |       |
|      | 细砂(0.02-0.2)   | 0       | 极细砂(0.05-0.1)  | 0      |                  |        |         |       |
|      | 粗砂(0.2-2.0)    | 39.19   | 细砂(0.1-0.25)   | 1.09   |                  |        | 8.09    | 0.232 |
|      | 砾(>2.0)        | 0       | 中砂(0.25-0.5)   | 5.44   |                  |        |         |       |
|      | -              | -       | 粗砂(0.5-1.0)    | 10.89  | 砂粒(0.1-2.0)      | 39.19  |         |       |
|      | -              | -       | 极粗砂(1.0-2.0)   | 21.77  |                  |        |         |       |
| 薄草毡土 | 粘粒(<0.002)     | 12.80   | 粘粒(<0.002)     | 12.8   | 粘粒(<0.002)       | 12.80  |         |       |
|      | 粉砂(0.02-0.002) | 8.5     | 粉砂(0.002-0.05) | 8.5    | 粉砂(0.002-0.1)    | 8.5    |         |       |
|      | 细砂(0.02-0.2)   | 0       | 极细砂(0.05-0.1)  | 0      |                  |        |         |       |
|      | 粗砂(0.2-2.0)    | 78.7    | 细砂(0.1-0.25)   | 2.19   |                  |        | 2.91    | 0.118 |
|      | 砾(>2.0)        | 0       | 中砂(0.25-0.5)   | 10.93  | 砂粒(0.1-2.0)      | 78.7   |         |       |
|      | -              | -       | 粗砂(0.5-1.0)    | 21.86  |                  |        |         |       |
|      | -              | -       | 极粗砂(1.0-2.0)   | 43.72  |                  |        |         |       |
| 黑毡土  | 粘粒(<0.002)     | 12.75   | 粘粒(<0.002)     | 12.75  | 粘粒(<0.002)       | 12.75  |         |       |
|      | 粉砂(0.02-0.002) | 41.53   | 粉砂(0.002-0.05) | 41.53  | 粉砂(0.002-0.1)    | 41.53  |         |       |
|      | 细砂(0.02-0.2)   | 0       | 极细砂(0.05-0.1)  | 0      |                  |        |         |       |
|      | 粗砂(0.2-2.0)    | 45.72   | 细砂(0.1-0.25)   | 1.27   |                  |        | 10.18   | 0.243 |
|      | 砾(>2.0)        | 0       | 中砂(0.25-0.5)   | 6.35   | 砂粒(0.1-2.0)      | 45.72  |         |       |
|      | -              | -       | 粗砂(0.5-1.0)    | 12.7   |                  |        |         |       |
|      | -              | -       | 极粗砂(1.0-2.0)   | 25.4   |                  |        |         |       |
| 薄黑毡土 | 粘粒(<0.002)     | 8.71    | 粘粒(<0.002)     | 8.81   | 粘粒(<0.002)       | 8.71   |         |       |
|      | 粉砂(0.02-0.002) | 16.37   | 粉砂(0.002-0.05) | 16.37  | 粉砂(0.002-0.1)    | 16.37  |         |       |
|      | 细砂(0.02-0.2)   | 0       | 极细砂(0.05-0.1)  | 0      |                  |        |         |       |
|      | 粗砂(0.2-2.0)    | 74.92   | 细砂(0.1-0.25)   | 2.08   |                  |        | 9.1     | 0.152 |
|      | 砾(>2.0)        | 0       | 中砂(0.25-0.5)   | 10.41  | 砂粒(0.1-2.0)      | 74.92  |         |       |
|      | -              | -       | 粗砂(0.5-1.0)    | 20.81  |                  |        |         |       |
|      | -              | -       | 极粗砂(1.0-2.0)   | 41.62  |                  |        |         |       |
| 棕黑毡土 | 粘粒(<0.002)     | 14.17   | 粘粒(<0.002)     | 14.17  | 粘粒(<0.002)       | 14.17  |         |       |
|      | 粉砂(0.02-0.002) | 44.32   | 粉砂(0.002-0.05) | 44.32  | 粉砂(0.002-0.1)    | 44.32  |         |       |
|      | 细砂(0.02-0.2)   | 0       | 极细砂(0.05-0.1)  | 0      |                  |        |         |       |
|      | 粗砂(0.2-2.0)    | 41.51   | 细砂(0.1-0.25)   | 1.15   |                  |        | 17.06   | 0.253 |
|      | 砾(>2.0)        | 0       | 中砂(0.25-0.5)   | 5.77   | 砂粒(0.1-2.0)      | 41.51  |         |       |
|      | -              | -       | 粗砂(0.5-1.0)    | 11.53  |                  |        |         |       |
|      | -              | -       | 极粗砂(1.0-2.0)   | 23.06  |                  |        |         |       |
|      |                | 砾(>2.0) | 0              |        |                  |        |         |       |

### 3.4 植被覆盖因子 C 和水土保持措施因子 P 值确定

植被覆盖因子 C 和水土保持措施因子 P 对水土流失具有控制作用。利用 Quick Bird 遥感影像解译出的研究区土地利用状况和实地调查的情况，并参考借鉴前人<sup>[13]</sup>的研究成果确定 C、P 值。P 值是采取水土保持措施后水土流失量与顺坡种植时水土流失量的比值。经过实地调查，研究区内无水保措施，且本项目计算的主要是潜在的水土流失量，故 P 值均取为 1。

C 因子与植被类型和植被覆盖度有关，当地表为完全裸露土时，C 值为 1；当地表为裸露岩石时，认为不发生水土流失，C 值为 0；当地面得到良好的植被覆盖时候，C 值指定为 0.001。结合 Quick Bird 影像分析发现，研究区的裸地主要为裸露土，故此处 C 取值 0.5。研究区解译出的道路均为水泥路面或沥青路面，故认为道路的 C 值为 0；而河流水面和居民地通常被认为不发生水土流失，故河流水面和居民地 C 值为 0。C 的最终取值结果见表 2。

表 2 不同土地利用类型 C 因子取值

Table 2.C value of different land use type

| 编号 | 地类名称 | C 值   | 编号 | 地类名称 | C 值   |
|----|------|-------|----|------|-------|
| 01 | 耕地   | 0.250 | 05 | 居民地  | 0.000 |
| 02 | 有林地  | 0.001 | 06 | 道路   | 0.000 |
| 03 | 其它林地 | 0.050 | 07 | 河流水面 | 0.000 |
| 04 | 草地   | 0.010 | 08 | 裸地   | 0.500 |

将 C、P 值属性添加到土地利用属性库中，在 ArcGIS Spatial Analyst 的“Features to Raster”中转化得到 C、P 因子栅格图层。

## 4 研究区水土流失现状与生态效应分析

### 4.1 研究区水土流失特征分析

#### (1) 水土流失量计算及等级划分

在确定 RUSLE 模型的六大因子后，将六个因子在 ArcGIS 中 Spatial Analysis 的栅格计算器中叠加相乘计算得到每个栅格单元的水土流失(土壤侵蚀)模数，然后根据中华人民共和国土壤侵蚀分类分级标准(SL 190-96)，进行研究区水土流失强度等级划分，得到研究区水土流失强度分级图。RUSLE 模型计算的侵蚀模数单位是  $t/(hm^2.a)$ ，而中国国家标准是  $t/(km^2.a)$ 。为便于等级划分，需要将中国国家标准单位  $t/(km^2.a)$  转换为

$t/(hm^2.a)$ ，转换后分级结果见表 3。

#### (2) 水土流失评价结果分析

对所获得的玛尔挡水电站研究区水土流失强度的分级结果进行统计，生成面积及百分比统计图(图 3)。研究区水土流失强度以轻、微度流失为主，其面积占研究区总面积的 47.49%；中度流失为 16.03%，强度流失为 11.89%，极强度流失为 9.47%，剧烈流失为 12.33%。微度、轻微和中度流失居主导地位，面积比例占研究区总面积的 63.52%。强度、极强度和剧烈流失面积占研究区总面积的 33.69%。由此可见，整个研究区水土流失水平较低。

从研究区水土流失强度分级图(图 4)可以看出，不同水土流失等级在空间分布上差异明显。剧烈流失区主要集中分布在坝前及近坝库区、库区中段的下半段(火居沟附近)的黄河右岸地区，结合数字高程模型和 Quick Bird 影像分析可知，这部分区域水土流失非常严重的原因是这些地区处于阳坡，坡度较大，植被覆盖度低，地表松散堆积层为水土流失提供了物质来源。微度流失区主要集中在黄河干流两岸的平台地区，坡度较缓，草地或者林地覆盖情况较好，具有良好的水土保持效果。其它等级的水土流失类型则交叉分布在整个研究区。

表 3 水土流失(土壤侵蚀)强度分级标准

Table 3. Soil erosion intensity classification standard

| 级别 | 侵蚀强度 | 平均侵蚀模数 [ $t/(hm^2.a)$ ] |
|----|------|-------------------------|
| 1  | 微度   | <2, 5, 10               |
| 2  | 轻微   | 2, 5, 10~25             |
| 3  | 中度   | 25~50                   |
| 4  | 强度   | 50~80                   |
| 5  | 极强度  | 80~150                  |
| 6  | 剧烈   | >150                    |

图 3 研究区不同水土流失强度等级面积百分比

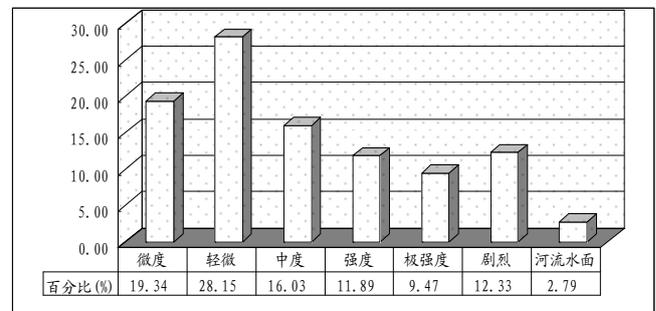


Figure 3. Area proportion of different level of soil erosion intensity in study area

## 4.2 水土流失生态效应及防治建议

从研究区水土流失现状分析可知, 尽管整个研究区水土流失水平较低, 但是剧烈流失区域主要分布在坝前及近坝地区。水电站建成后, 水土流失产生的泥沙将直接进入水库。所以, 在进行水电站泄洪排沙等工程设计时, 应该充分考虑近坝地区水土流失对水库淤积的影响。

水土流失产生的泥沙是水库淤积的主要物质来源。尽管水库的淤积是不可能完全消除的, 但可以尽量减轻和延缓淤积的速度。做好水库上游及库周的水土保持工作, 是解决水库泥沙淤积的最好办法。水土流失量预测是水土保持方案编制的依据和关键, 在本研究的基础上, 充分掌握研究区水土流失现状, 能够为水土保持规划和生态环境保护规划提供客观依据。



图 4 研究区水土流失强度分级图

Figure4. Soil erosion intensity classification map in study area

## References (参考文献)

[1] Wu Penglin, Huo Demin, Ma Cunxin, et al. Hydraulic Calculation & Reservoir Operation[M]. Beijing: Earthquake Press, 2000. 58-76 (in Chinese)

武鹏林, 霍德敏, 马存信, 等. 水利计算与水库调度[M]. 北京: 地震出版社, 2000. 58-76

[2] Zhu Dangsheng, Zhou Yimei, Zou Jiayang. Environmental Impact Assessment on Water Conservancy and Hydropower Project [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006. 1-32 (in Chinese)

朱党生, 周奕梅, 邹家祥. 水利水电工程环境影响评价[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006. 1-32

[3] Tang Keli. Chinese Soil and Water Conservation [M]. Beijing: Science Press, 2004. 104-112 (in Chinese)

唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 104-112

[4] Renard, K G, Foster G R, et al. Predicting soil erosion by water. A guide conservation planning with the Revised Universal Soil Loess Equation (RUSLE) [S]. USDA. Agri. Handb. No. 703. Washington, D C. U.S. Gov. Print. Office, 1997.

[5] Renard K G, et al. RUSLE revisited status and the future [J]. Soil and Water Conservation, 1994, 49(3): 213-220.

[6] Sharply A N, Williams J R. EPIC—Erosion/Productivity Impact Calculator: Model Documentation. U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin, No. 1768, 1990.

[7] Liu Jifeng, Li Shijie, Qin Ningsheng, et al. Soil Erodiable K in the Catchments of Qinghai Lake [J]. ARID LANG GEOGRAPHY, 2006, 29 (6): 321-326.

刘吉峰, 李世杰, 秦宁生, 等. 青海湖流域土壤可蚀性 K 值研究[J]. 干旱区地理, 2006, 29(6): 321-326.

[8] Zhu Qiuchao, Fan Haoding. Soil Particle Composition Grading Standards conversion [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1999, 30(2): 53-54.

朱秋潮, 范浩定. 土壤颗粒组成分级标准的换算[J]. 土壤通报, 1999, 30(2): 53-54.

[9] Zhou Qiming, Liu Xuejun. Digital Terrain Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2006. 158-172 (in Chinese)

周启鸣, 刘学军. 数字地形分析[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[10] Chen Yanhong, Pan Wenbin, Cai Yuanbin. Assessment of Soil Erosion Sensitivity in Watershed Based on RUSLE-A Case Study of Jixi Watershed [J]. JOURNAL OF MOUNTAIN SCIENCE, 2007, 25(4): 490-496.

陈燕红, 潘文斌, 蔡莞缤. 基于 RUSLE 的流域土壤侵蚀敏感性评价—以福建省吉溪流域为例 [J]. 山地学报, 2007, 25(4): 490-496.

[11] McCool D.K. et al., Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1987, 30(5): 1388-1396.

[12] LIU B Y, NEARING M A, SHI P J, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes [J]. Soil Society of American Journal, 2000, 64(5): 1759-1763.

[13] Wang Jing. Remote Sensing of Monitoring & Evaluation Methods to Land Resources [M]. Beijing: Science Press, 2006. 168-182 (in Chinese)

王静. 土地资源遥感监测与评价方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.