

云南省中小河流悬移质泥沙计算模型研究

傅开道¹, 宁梅¹, 戴雅婷¹, 史正涛², 张天力³, 顾世祥^{3*}

¹云南大学国际河流与生态安全研究院, 云南 昆明

²云南师范大学旅游与地理科学学院, 云南 昆明

³云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明

Email: *64301374@qq.com

收稿日期: 2021年1月26日; 录用日期: 2021年3月10日; 发布日期: 2021年3月18日

摘要

云南山地中小河流众多, 但许多流域内水文站较少, 且很少进行泥沙观测, 缺乏充足的泥沙资料, 给水利工程设计和建设带来一定的困难。目前中小河流水库设计工作中泥沙大多以土壤侵蚀量近似代表河道输沙量进行泥沙计算, 此方法明显较实际输沙量偏大不少, 增加了无谓的工程成本, 因此急需探讨一种精度较高的无资料地区河流输沙量估算方法。本研究基于流域的产沙机制, 考察云南20个水文站的多年实测悬移质泥沙数据和流域内的土地利用、土壤分布等流域环境因素的关系, 建立了计算河流输沙量的多元回归方程, 为无水文站监测的小流域地区水库设计提供可信度较高的泥沙数据, 亦为类似区域的输沙量估算提供参考。

关键词

河流输沙量, 无泥沙资料地区, 中小河流, 云南

Study on Suspended Sediment Calculation Model of Medium and Small Rivers in Yunnan

Kaidao Fu¹, Mei Ning¹, Yating Dai¹, Zhengtao Shi², Tianli Zhang³, Shixiang Gu^{3*}

¹Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming Yunnan

²College of Tourism and Geography Science, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

³Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming Yunnan

Email: *64301374@qq.com

Received: Jan. 26th, 2021; accepted: Mar. 10th, 2021; published: Mar. 18th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 傅开道, 宁梅, 戴雅婷, 史正涛, 张天力, 顾世祥. 云南省中小河流悬移质泥沙计算模型研究[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(3): 247-256. DOI: 10.12677/ag.2021.113021

Abstract

There are many medium and small rivers in Yunnan mountainous areas. However, there are few hydrological stations in many basins, sediment observation is rarely carried out in these hydrological stations, which leads to the lack of sufficient sediment data, and brings some difficulty to the design and construction of water conservancy projects. At present, most of sediment data are approximately represented by soil erosion when design medium and small reservoir, which are larger than actual sediment discharge and increase the unnecessary engineering cost. Therefore, it's urgent to find a method with high accuracy to estimate river sediment discharge in medium and small rivers. This study is based on sediment yield mechanism of basin, which analyzed the relationship between suspended sediment data from 20 hydrological stations in Yunnan and land-use, soil distribution and some other environmental factors, and established suspended sediment calculation model. This study provides reliable sediment data for reservoir design in small basin without hydrological station monitoring, and also provides reference for sediment discharge estimation in similar areas.

Keywords

River sediment Discharge, Rivers without Sediment Data, Medium and Small Rivers, Yunnan

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

伴随经济迅速发展, 资源需求逐年增加。在化石能源日渐枯竭的今天, 能源的转换和利用已成为许多国内科学家的研究课题, 其中水利发电作为能源转换的重要组成, 也广受关注[1]。在全球气候变化的大背景下, 我国极端天气气候事件频次较高, 包括高温天气、极端降水及、干旱等事件[2], 修建水利水电工程对于应对暴雨、干旱等气候灾害具有一定的积极意义。

云南省有怒江、澜沧江等 6 大水系, 水力资源丰富, 水利水电工程建设较多。在干流或较大的支流上规划建设大型水电工程时, 会在坝前或坝后建立水文站, 进行泥沙观测。但在中小河流域内建成的水文站较少, 导致工程建设时缺乏充足的泥沙观测资料进行参考, 给工程建设带来一定的阻碍[3]。

国内外关于流域输沙量计算的研究大多是计算流域土壤侵蚀量, 再通过泥沙输移比[4]计算出河流输沙量。如 Wischmeier 和 Smith 提出的 USLE 模型[5]和修正后的 RUSLE 模型[6], 利用 RS 和 GIS 等技术进行侵蚀动态监测, 编制土壤侵蚀强度图[7], 以及根据土壤侵蚀的三因子, 结合遥感影像和野外验证[8]估算流域内土壤侵蚀状况。上述方法计算出的都是流域内土壤侵蚀量, 还需计算出泥沙输移比, 才可得到流域输沙量。直接得到输沙量的方法如使用输沙模数等值线图, 可以直观查看某一地区的输沙模数大小和变化, 实际工程建设中河流输沙量多使用输沙模数等值线图进行查算。但输沙模数等值线图的精度由水文站数量决定[9], 测站稀疏的地区输沙模数与流实际相比误差较大。

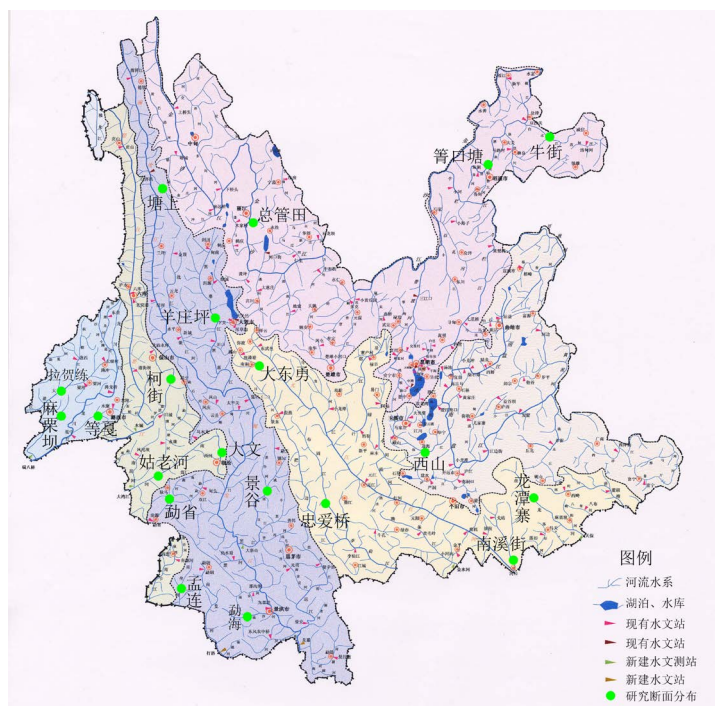
针对现存无资料河流来沙量估算方法的误差和不足, 本文从流域产沙机制出发, 分析流域内坡耕地面积、土壤性质、植被面积等因素对流域内悬移质输沙量的影响, 构建计算悬移质输沙量的模型, 用以推求无资料中小河流的输沙量[10] [11] [12] [13] [14], 研究结果为云南省中小河流建设水利工程提供泥沙设计参考资料。

2. 研究数据与方法

2.1. 研究数据

2.1.1. 模型数据

由于建造水利水电对河流的径流量及下游输沙量产生一定影响[15], 研究所选的数据均为 80 年代水文站监测数据, 此时河流大多处于天然状态, 保证了输沙量数据未受人干扰。图 1 为云南省水文站分布图, 在云南省 6 大流域中选择 20 个有泥沙监测资料的中小河流流域作为构建模型的基础数据。



图源: 云南省水文水资源局。

Figure 1. Distribution map of hydrological stations in Yunnan

图 1. 云南省水文站分布图

80 年代土地利用数据缺乏, 选择年份最接近水文数据的 2000 年土地利用类型图进行耕地和植被面积提取。而流域坡度、土壤类型在短期内变化不大, 因此选择精度和分辨率较高的 2009 年 DEM 数据与 1995 年土壤类型数据(表 1)。

Table 1. Basic data of study area

表 1. 研究区基础数据

数据名称	日期(年)	来源	格式	分辨率	用途
数字高程图	2009	地理空间数据云	TIFF	30 m	提取集水面积
土地利用类型图	2000	中国西部环境与生态科学数据中心	TIFF	1:10 万	提取流域坡耕地面积、植被面积
土壤类型图	1995	国家地球系统科学数据共享服务平台	shp	500 m	计算土壤系数
泥沙资料	1981~1985, 1987	藏南滇西河流域水文资料	Excel 表格	—	建立回归模型

2.1.2. 岔河流域数据

选取拟建的永平岔河水库对模型进行验证, 水库建坝断面有 2014~2016 年实测输沙量数据。同时, 采用《云南省土壤侵蚀遥感调查报告》(云南省水利水电厅 2004 年 8 月新编)的土壤侵蚀图表, 结合卫星图片(2013 年 4 月 10 日现场)显示的地表植被状况进行综合估算, 得到岔河水库多年平均总侵蚀量为 18.39 万吨(表 2)。

Table 2. Sediment discharge data of Chahe Basin

表 2. 岔河流域输沙量数据

数据来源	输沙量(万吨)
水文站测量	5.97
侵蚀模数估算	18.39

2.2. 研究方法

2.2.1. 单位径流深输沙模数

单位径流深输沙模数是指流域内单位径流深在每单位面积上对土壤产生侵蚀并输移至河流中的年含沙量[3], 定义为:

$$m_s = M_s / y。$$

式中: M_s ——流域多年平均输沙模数(t/km^2)。

Y ——流域多年平均年径流深(mm)。

m_s ——单位径流深输沙模数($t/(km^2 \cdot mm)$)。

单位径流深输沙模数反映的是流域内地表的可供侵蚀程度, 它的大小是由流域内可供侵蚀松散土的供应量以及侵蚀表土在流域内的输运条件决定的。当前许多研究采用流域内植被覆盖率来衡量流域的侵蚀程度。植被能有效减少土壤侵蚀, 降低流域产沙[16], 当前许多研究采用流域内植被覆盖率来衡量流域的侵蚀程度。但云南省由于大量种植橡胶等经济作物, 表面上植被覆盖率较高, 侵蚀程度却极为严重, 因此不可单以植被这一因素来评价流域内土壤侵蚀。

云南是高原山地广布的省份, 气候条件、地质、地貌、土壤和植被类型复杂多变。山地河流地区虽构造活跃, 地层破碎, 但多为基岩, 土壤层较薄, 难以提供河流悬移质泥沙物质。而高原面上人口聚居, 流域面上耕地面积大[17], 坡耕地土质疏松, 极易被地表径流侵蚀, 成为河流悬移质泥沙的物质来源。水流对表土的侵蚀和运输需一定的能坡, 坡度越大, 水流的运输条件越好[18]。云南地区耕地分为水田和旱地, 旱地又可分为平坝地、梯地和坡耕地, 其中坡度小于 2° 的耕地为平耕地[19], 坡度大于 6° 的耕地称为坡耕地, 侵蚀较为明显, 坡度大于 25° 的耕地则存在剧烈侵蚀[20]。因此坡耕地的土壤是河流悬移质泥沙的主要物质来源[21], 流域内坡耕地面积占流域面积百分数越高, 大于 25° 度坡耕地占流域内坡耕地面积百分比数值越大的流域, 单位径流深输沙模数越大。

2.2.2. 模型构建

根据分析, 单位径流深输沙模数的函数表达为如下函数关系式[3]:

$$m_s = f(F, P, P_K, K, V)。$$

其中: m_s ——单位径流深输沙模数($t/(km^2 \cdot mm)$)。

F ——流域面积(km^2)。

P ——流域内坡耕地面积百分数(%)。

P_K ——坡度大于 25° 耕地占坡耕地面积百分数(%)。

K ——流域内土壤可蚀性($t \cdot hm^2 \cdot h / (MJ \cdot mm \cdot hm^2)$)。

V ——流域内植被面积百分数(%)。

在 ArcGIS10.2 环境下, 利用云南省数字高程图、土壤类型图、土地利用类型图等数据, 提取各个流域的影响因子。利用 SPSS 软件对 20 个站的各影响因子数据进行回归分析, 建立单位径流深输沙模数方程。

2.2.3. 模型验证

选取拟建的永平岔水库对构建的模型精度验证。通过 ArcGIS 提取永平流域的各影响因子数据并代入单位径流深输沙模数方程, 计算得出永平流域悬移质输沙量。将计算结果与水文站实测输沙量、侵蚀模数估算结果进行对比, 验证模型精度。

3. 河流输沙量计算

3.1. 单位径流深输沙模数方程

由于影响单位径流深输沙模数的影响因子包括集水面积、流域内坡耕地面积百分比、流域内大于 25° 坡耕地面积百分比、土壤可蚀性和流域内植被面积百分比。根据单位径流深输沙模数的表达式, 在 ArcGIS10.2 环境下, 利用云南省数字高程图、土壤类型图、土地利用类型图等, 提取各个流域的影响因子, 计算出集水面积、坡耕地面积、大于 25° 耕地面积和土壤系数。

将提取的集水面积与水文站给出的数据进行对比, 发现各流域的 F 因子与实际集水面积误差仅为 1% 左右, 分析可能是由于投影和 DEM 数据源选择不同造成的。将流域集水面积图与中国西部环境与生态科学数据中心获得的流域土地利用类型图、国家地球系统科学数据共享服务平台下载的土壤类型图进行叠加分析, 得到其他影响因子数据, 计算结果较为精确。

利用 SPSS 软件将云南境内 20 个水文站控制流域 80 年代多年实测河流泥沙资料及相应流域内土地利用资料, 将 5 个影响因子数据与单位径流深输沙模数进行多元回归, 得出如下经验关系:

$$m = KP^{0.435} P^{0.225} F^{-0.092} V^{-0.05}。$$

式中: m_s ——单位径流深输沙模数($t/(km^2 \cdot mm)$)。

K ——流域内土壤可蚀性($t \cdot hm^2 \cdot h / (MJ \cdot mm \cdot hm^2)$)。

P ——流域内坡耕地面积百分数(%)。

P_K ——坡度大于 25° 耕地占坡耕地面积百分数(%)。

F ——流域面积(km^2)。

V ——流域内植被面积百分数(%)

单位径流深输沙模数方程计算得出的 m_s 与实测值进行比较, 发现:

- 1) 计算值与实测值相对误差小于 30% 的流域占总数的 60%。
- 2) 当实测值小于 2 时, 计算值与实测值相对误差小于 30% 的点占据 86%, 即实测单位径流深输沙模数小于 $2 t/(km^2 \cdot mm)$ 时, 模型计算结果更接近实测值, 能更好拟合实测输沙量。
- 3) 当实测单位径流深输沙模数大于 $2 t/(km^2 \cdot mm)$ 时, 方程的计算结果误差较大, 且实测单位径流深输沙模数越大, 误差越大。
- 4) 滇西地区的龙川江、怒江、澜沧江 3 个流域中的 12 个水文站点, 计算值与实测值相对误差小于 30% 的点占据 75%。

Table 3. Hydrological stations with measured sediment discharge less than 2 t/(km²·mm)
表 3. 实测值小于 2 t/(km²·mm)水文站点

站点	计算值	实测值	误差率
景谷	1.1311	1.6127	-29.87%
勐海	0.4387	0.4665	-5.96%
勐省	0.7644	0.8619	-11.32%
孟连	0.9149	1.2058	-24.13%
羊庄坪	0.9021	0.8363	7.87%
塘上	0.8273	0.9876	-16.23%
拉贺练	0.5365	0.4749	12.96%
麻栗坝	0.6104	1.1979	-49.04%
等戛	0.7530	0.6830	10.25%
大文	1.1626	1.6422	-29.21%
龙潭寨	1.5520	1.6445	-5.62%
南溪街	1.0219	1.0679	-4.31%
牛街	1.0936	0.7553	44.78%
西山	0.5638	0.4511	24.98%

由表 3 可以看出,除了麻栗坝和牛街两个水文站控制的流域,其余 12 个流域的计算值和实测值相对误差均在 30%以内。分析模型各个因子数据,发现麻栗坝站的流域内坡耕地面积百分数仅为 9.98,大于 25°耕地占坡耕地面积百分数为 9.10,均在 10%以下,与其他水文站的 P、P_k 值相比较小。而单位径流深输沙模数方程的构建是根据流域产沙机制建立,坡耕地面积百分数是泥沙来源的重要参数,麻栗坝站的 P 值、P_k 值较低也导致计算结果比实测值更低。

牛街站位于云南省东北边界,集水流域超出了云南境内,而研究所用的数据只包括云南境内,没有境外数据,这是导致牛街站计算值误差较大的主要原因。此外,牛街站仅有 84 年的水文数据,而流域的输沙量、径流量均有年间差异,无法保证 84 年的水文数据是表征其多年平均水平,这也是导致牛街站的计算结果与实测单位径流深输沙模数差异较大的原因。

3.2. 河流多年平均含沙量

由于输沙模数[3]的定义为:

$$M_s = RS \cdot F = yS \quad [3]$$

由此可得 $S = M_s / y$

又由于 $m_s = M_s / y$, 故有

$$S = m_s。$$

其中, M_s ——流域多年平均输沙模数(t/km²)。

R ——多年平均径流量(m³/s)。

S ——河流多年平均含沙量(kg/m³)。

F ——流域面积(km²)。

y ——流域多年平均径流深(mm)。

m_s ——单位径流深输沙模数($t/(km^2 \cdot mm)$ 或 kg/m^3)。

根据输沙模数和单位径流深输沙模数的定义,发现河流多年平均含沙量与单位径流深输沙模数在数值上是相等的,因此 m_s 的值为河流多年平均含沙量,其单位为 kg/m^3 。再结合径流量数据,就可求得河流多年平均悬移质输沙量。

4. 模型验证 - 永平岔河水库

岔河水库位于大理市永平县杉阳镇境内倒流河上,岔河水库规模为中型水库,主要功能为农村生活和灌溉供水。岔河水库干流方案坝址位于倒流河干流上,距下游永和村约 2 km,地理坐标东经 $99^{\circ}27'41.6''$,北纬 $25^{\circ}15'20''$ (1954 年北京坐标系),坝址处高程 1524 m,坝址以上控制径流面积 $79.5 km^2$,多年平均径流量 3285 万 m^3 , $P = 75\%$ 径流量 2430 万 m^3 。

4.1. 单位径流深输沙模数计算结果

在 ArcGIS 环境下,以云南省 DEM 数据为基础,使用水文分析工具提取流域集水面积图,可得出岔河水库的集水面积。将集水面积图与 DEM 数据进行叠加裁剪,得到流域高程图(图 2)。

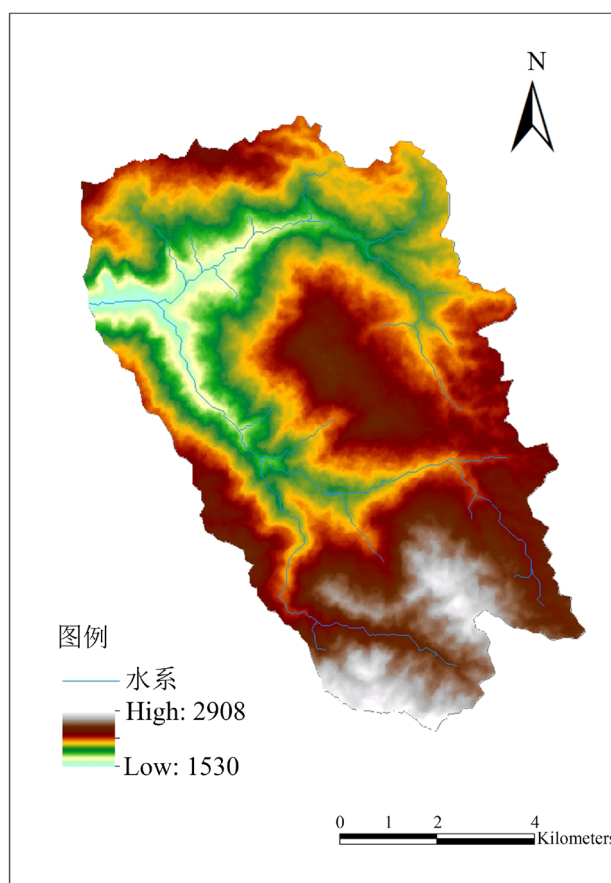


Figure 2. Water system and elevation map of Chahe Basin

图 2. 岔河流域水系高程图

将流域高程图与云南省土地利用图进行叠加分析,可提取出流域内坡耕地和流域内大于 25° 坡耕地分布图(图 3),根据计算得出流域内坡耕地面积百分比及大于 25° 耕地占坡耕地面积百分比。

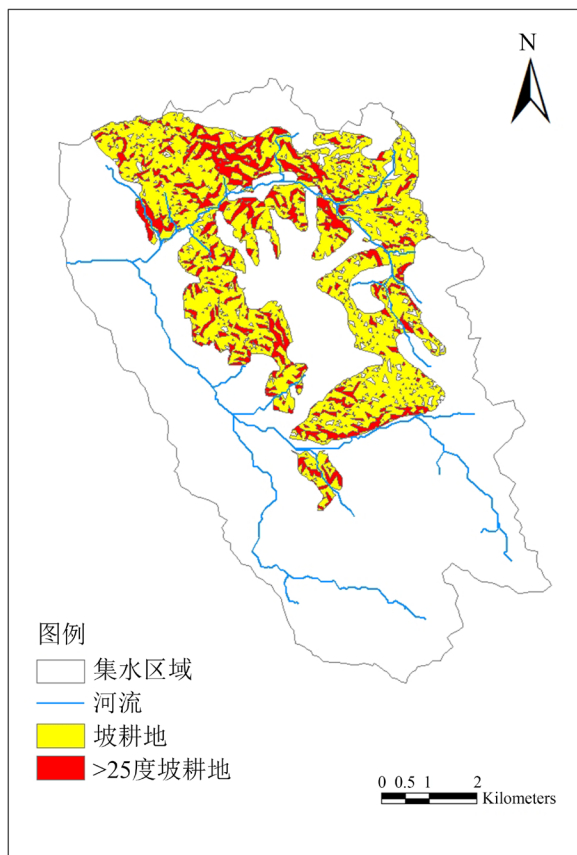


Figure 3. Distribution of Sloping Farmland in Chahe watershed
图 3. 岔河流域坡耕地分布图

将土壤分布图与流域集水面积图叠加分析，得到流域内不同类型土壤的分布面积，参考 RUSLE 模型中 K 因子计算方法，得到各因子的数据如表 4。

Table 4. Impact factors of sedimentation in Chahe reservoir
表 4. 岔河水库泥沙淤积影响因子

影响因子	F	P	P_K	K	V
计算值	78.2	28.88	24.25	0.352	53.93

将算得的 F , P , P_K , K , V 因子的值带入多元方程 $m_s = KP^{0.435}P_K^{0.025}F^{-0.092}V^{-0.05}$ 中，求得 m_s (单位径流深输沙模数) 等于 $1.71 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{mm})$ ，根据前文分析，河流多年平均含沙量在数值上等于单位径流深输沙模数，因此求得干流方案中控制流域多年平均含沙量为 $2.04 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。根据实测资料，干流方案坝址多年平均来水量 3285 万 m^3 ，求得该坝址处多年平均悬移质输沙量为 6.7 万吨。泥沙推悬比参考多沙河流经验取值为 30%，则该坝址处多年平均推移质输沙量 2.01 万吨，总输沙量为 8.71 万吨。

4.2. 计算结果对比

岔河站有 2014~2016 年实测泥沙资料，3 年平均悬移质输沙量为 4.59 万吨，泥沙推悬比取经验值 30%，总输沙量为 5.97 万吨，考虑区域土壤侵蚀研究期间(2014~2016)云南省处于旱季，与 3 年径流量对比，监测结果较多年平均值较小。

根据单位径流深输沙模数计算得出干流坝址多年平均总输沙量为 8.93 万吨, 比这三年平均值大, 符合实际情况。同时, 通过对比周边水文站以及根据岔河水库断面的径流输沙能力进行判断, 岔河水库多年平均总输沙量 8.93 万吨这个计算结果可信度较高。

5. 讨论与结论

5.1. 讨论

建立多元回归方程所使用的 P、Pk 这两个因子数据是通过云南省 DEM 数据和云南省土地利用类型图叠加分析提取得到。由于 DEM 数据分辨率为 30m, 而实际生活中一块完整耕地面积很少有 900 m², 因此提取出的数据与实际相比可能存在一定程度的误差。由于能够获取的数据有限, 只能使用 20 个流域的数据建立多元回归模型, 可以添加一定数量的水文站, 使模型能够适用于整个云南省境内的河流输沙量计算。

将计算值与实测值进行对比, 当实测单位径流深输沙模数小于 2 时, 单位径流深输沙模数方程计算值与实测值误差小于 30% 的点占 86%。而四川地区研究构建的模型[3]计算结果与实测值误差不超过 35% 的水文站占 86.5%, 可以发现在说明数据量相同的情况下, 使用云南地区资料建立的输沙量方程计算结果精度更高。

金沙江流域内的牛街站位于云南省东北, 其集水区域超出了云南省境内。而土地利用、土壤类型等数据只有云南省境内的, 因此只计算了这个流域在云南省境内的数据, 导致计算结果误差较大。

5.2. 主要结论

1) 经过研究, 得出计算云南省中小河流单位径流深输沙模数方程为 $m_s = KP^{0.435} P_K^{0.025} F^{-0.092} V^{-0.05}$ 。本方程由云南省境内资料建立, 原则上只适用于云南地区。

2) 将模型计算结果与实测泥沙资料相比较, 发现该方程在实测 m_s 小于 2 的水文站的控制流域计算结果更精确, 且误差小于 30% 的水文站占据 86%。当单位径流深输沙模数大于 2 时, m_s 的实测值越高, 计算结果误差越大。

3) 使用单位径流深输沙模数方程对永平流域进行输沙量计算, 得到该流域输沙量为 8.71 万吨, 与永平流域多年平均输沙量相近。

基金项目

国家自然科学基金项目(编号: 42061006, 41561144012)。

参考文献

- [1] 胥杰. 我国水电建设现状及其发展前景[J]. 工程技术研究, 2019, 4(5): 246-254.
- [2] 秦大河. 气候变化科学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [3] 曹鉴湘. 四川无泥沙资料地区河流多年平均含沙量的推求[J]. 四川水力发电, 1998, 17(1): 9-11
- [4] 李林育, 焦菊英, 陈扬. 泥沙输移比的研究方法及成果分析[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(6): 113-122
- [5] Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1978) Predicting Rainfall-Erosion Losses. *USDA Agricultural Handbook*, 537.
- [6] Renard, K.G., Foster, G.R., Yoder, D.C. and McCool, D.K. (1994) RUSLE, Revised: Status, Question, Answers, and the Future. *Journal of Soil and Water Conservation*, **49**, 213-220.
- [7] 赵晓丽, 张增祥, 王长有, 彭旭龙, 刘斌. 基于 RS 和 GIS 的西藏中部地区土壤侵蚀动态监测[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(2): 44-50.
- [8] 胡盘凤. 辽宁省重点防治区土壤侵蚀估算方法对比及优化[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017

- [9] 师长兴. 长江上游输沙模数分布图的制作及其空间分异特征初步分析[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(11): 1322-1326.
- [10] 陈文思, 任启伟. 关于中小河流治理几个问题的思考[J]. 湖南水利水电, 2015(2): 69-71.
- [11] 凌健. 中小河流生态治理河道断面优化[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌工程学院, 2019.
- [12] 李植俊, 何发昌, 邓杰. 浅谈中小河流治理中存在的问题及治理对策[J]. 中国高新技术企业, 2016(15): 122-123.
- [13] 石日松. 中小河流治理存在的问题与治理措施研究[J]. 珠江水运, 2020(14): 68-69.
- [14] 李昌志, 张炳彦, 孙东亚, 刘昌军. 山洪风险图及中小河流淹没图编制与成果展望[J]. 中国防汛抗旱, 2020, 30(9): 64-68.
- [15] 傅开道, 黄河清, 钟荣华, 王兴勇, 苏斌. 水库下游水沙变化与河床演变研究综述[J]. 地理学报, 2011, 66(9): 1239-1250.
- [16] 秦伟, 曹文洪, 郭乾坤, 于洋, 殷哲. 植被格局对侵蚀产沙影响的研究评述[J]. 生态学报, 2017, 37(14): 4905-4912.
- [17] 文朝菊. 云南坡耕地治理水土保持监测方法探索研究[J]. 水资源研究, 2017, 6(2): 187-195.
- [18] 王志伟. 沂蒙山区坡耕地土壤侵蚀过程模拟[D]: [硕士学位论文]. 山东: 山东农业大学, 2014.
- [19] 尹龙. 云南省坡耕地时空分异特征及影响因素分析[D]: [硕士学位论文]. 云南: 云南大学, 2018.
- [20] 李发鹏, 孙嘉. 坡耕地合理开发利用制度建设的现状、问题及对策[J]. 中国水土保持, 2021(1): 18-20.
- [21] 王伟, 贺莉莎. 云南省坡耕地现状调查及分析[J]. 中国水土保持, 2019(4): 20-23.