

胡刚, 宋慧, 石星军, 等. 基于RUSLE的卧虎山水库流域土壤侵蚀特征分析[J]. 地理科学, 2018, 38(4): 610-617. [Hu Gang, Song Hui, Shi Xingjun et al. Soil Erosion Characteristics Based on RUSLE in the Wohushan Reservoir Watershed. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(4): 610-617.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.04.015

# 基于RUSLE的卧虎山水库流域土壤侵蚀特征分析

胡刚<sup>1,2</sup>, 宋慧<sup>1</sup>, 石星军<sup>3</sup>, 张明礼<sup>4</sup>, 刘修军<sup>1</sup>, 张绪良<sup>1</sup>

(1. 青岛大学旅游与地理科学学院, 山东 青岛 266071; 2. 山东省水土保持与环境保育重点实验室, 山东 临沂 276000;  
3. 青岛大学物理科学学院, 山东 青岛 266071; 4. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210046)

**摘要:**通过RUSLE模型对卧虎山水库流域土壤侵蚀进行全面评价验证和总结。结果表明:① 水库流域平均侵蚀模数为462 t/(km<sup>2</sup>·a), 该数值与通过水库淤积等资料推算评估结果基本一致, 表明本研究结果具有较高的可信度; 水库流域年均侵蚀量达到2.6×10<sup>4</sup>t, 其中高于容许土壤流失量的面积为176 km<sup>2</sup>, 占到流域总面积的31.51%。从不同侵蚀级别来看, 占流域面积27.77%的轻度侵蚀, 对流域侵蚀总量的贡献率为54.64%; 面积占比3.74%的中度及以上侵蚀, 侵蚀量贡献率达到30.94%。② 流域内土壤侵蚀空间差异较大, 回归分析发现地形因子是导致各子流域土壤侵蚀模数差异的主要因素; 就土地利用类型而言, 旱地和农村居民点是流域内的主要侵蚀土地利用类型; 流域内土壤侵蚀模数随着坡度增加呈现相应增大趋势, 8°~25°坡度段面积比例不仅最大, 而且侵蚀量占比最高, 是水库流域的主要侵蚀坡度段。

**关键词:**RUSLE; 水库淤积; 土壤侵蚀; 卧虎山水库

**中图分类号:**S157/TP306 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0690(2018)04-0610-08

土壤侵蚀模型是进行土壤侵蚀、土地资源合理利用和水土保持规划定量评价的有效工具, 其中以USLE(Universal Soil Loss Equation)为代表的经验统计模型, 因其结构简单、参数易于获取、计算简便, 而得到广泛应用。USLE最初发表于美国农业部农业手册第282号和537号<sup>[1, 2]</sup>, 其修订版RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation)于1997年完成<sup>[3]</sup>。由于USLE/RUSLE模型的优点明显, 自问世以来在世界范围内得到了广泛应用。

中国自20世纪80年引入并开始应用USLE/RUSLE模型, 对于指导中国的水土资源评价和土壤侵蚀模型的研发起到了重要作用。如刘宝元等在USLE基础上, 根据中国水土流失状况和防治措施进行改进提出了CSLE<sup>[4]</sup>(Chinese Soil Loss Equation), 并在2010~2012年的第一次全国水利普查水土保持普查中发挥了重要作用。GIS和RS技术的应用, 使得模型结果可以以更加直观的图形

形式输出, 并能分析土壤侵蚀的空间分布特征。

USLE最初设计为坡面尺度土壤流失模型, 但现在USLE/RUSLE已经广泛应用于流域尺度土壤侵蚀预测。尽管USLE方程中每一个因子不依赖于某一特定的地理环境, 但使用USLE时也有限制条件: 模型的应用条件必须可靠, 而且能准确估计模型包括的各个因子<sup>[2]</sup>。因此, 在应用USLE/RUSLE模型计算得出令人信服的结论之前, 要经过充分严谨的论证。

在实测资料缺乏地区, 模型因子的准确评估与验证相对较为困难, 现有USLE模型的应用研究, 一般通过计算得到的土壤侵蚀数据来进行验证。如文雅等通过乌陂河流域水土流失实测数据与USLE模型的计算数据对比发现, USLE模拟精度达到83.54%<sup>[5]</sup>。潘美慧等则根据计算得到中度侵蚀等级的面积占比, 通过与前人结论的对比对其结果进行了验证<sup>[6]</sup>。由于模型涉及因子多, 算法

**收稿日期:**2017-04-27; **修订日期:**2017-08-22

**基金项目:**国家自然科学基金面上项目(41173094)、山东省水土保持与环境保育重点实验室开放基金(STKF201602)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (41173094), Open Foundation of Shandong Provincial Key Laboratory of Water and Soil Conservation and Environmental Protection(STKF201602).]

**作者简介:**胡刚(1976-), 男, 山东滨州人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀、环境演变、水土资源利用与3S应用研究。E-mail: geo\_hug@126.com

复杂,如果直接应用USLE模型而没有验证,计算结果则可能与实际情况存在较大偏差,甚至侵蚀强度数据可以达到不同量级的差别。

本研究以实测资料较少的泰沂山地北麓的卧虎山水库流域为例,在前期对USLE/RUSLE模型LS因子实施算法探讨的基础上,通过RUSLE模型计算与水库淤积实测资料对比,分析模型计算的可靠性,并对水库流域的侵蚀分布特征进行讨论。以期通过土壤侵蚀的量化空间分析,掌握卧虎山水库流域的土壤侵蚀分布特征,研究成果对于水土保持的有效实施进而确保水库正常库容具有重要的实践意义。

## 1 研究区概况

卧虎山水库流域位于济南南部山区,所处位置为116.94°~117.34°E, 36.33°~36.59°N。该流域地处泰山北麓,处于泰山与黄河之间的山前平原交接地带,地势南高北低,加之渗透型石灰岩结构,使得该区成为闻名天下的济南泉水的重要水源地,同时也是重要的水源涵养生态功能保护区。卧虎山水库是济南市唯一的一座大型水库,流域面积559 km<sup>2</sup>,上游有串联中型水库一座——锦绣川水库(流域面积166 km<sup>2</sup>),小型水库16座,塘坝42座。水库流域内花岗岩、花岗片麻岩占31%,石灰岩占69%。流域土壤组成主要为粗骨土、棕壤、潮土和褐土。卧虎山水库对泉域岩溶水补给影响总量达2 302×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>/a,其中对泉流量的影响为1 489.3 m<sup>3</sup>/a,占天然条件下泉流量的11.8%<sup>[7]</sup>,为济南泉水常年持续喷涌起到积极的作用。

## 2 研究方法和因子厘定

本文主要采用USLE/RUSLE模型进行计算,其模型的基本形式如下:

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

式中,  $A$  为土壤流失量,表示单位面积坡地坡面侵

蚀和细沟侵蚀的年平均侵蚀量,  $R$  为降雨侵蚀力因子,  $K$  为土壤可蚀性因子,  $L$  为坡长因子,  $S$  为坡度因子,  $C$  作物与覆盖因子,  $P$  为水土保持措施因子。

### 2.1 降雨侵蚀力因子

降雨侵蚀力是降水及其产生的径流所具有的引起土壤侵蚀的潜在能力,是土壤的水蚀动力<sup>[8]</sup>。USLE和RUSLE中的 $R$ 数值不仅量化了雨滴的击溅影响,同时也反映了与降水有关的径流速度和总量<sup>[3]</sup>。降雨侵蚀力因子 $R$ 值难以直接测得,一般通过相关降雨参数计算获得,经典的计算方法为Wischmeier公式<sup>[2]</sup>。伍育鹏等研究认为,年雨量的指数函数形式适合作为估算中国多年平均年降雨侵蚀力的简易计算方法<sup>[9]</sup>。本研究采用马良<sup>[10]</sup>等利用多年降水资料计算得到的济南简易降雨侵蚀力公式,即 $R=0.139P_a^{1.570}$ 进行卧虎山流域降雨侵蚀力的计算。根据卧虎山雨量站1962~2002年降水资料,得到卧虎山流域内多年平均降水量为686.3 mm,进而得出卧虎山流域的降雨侵蚀力因子值。考虑到研究区面积有限,将整个研究区采用统一的降雨侵蚀力 $R$ 值。

### 2.2 土壤可蚀性因子

土壤可蚀性反映了土壤被降雨侵蚀力分离、冲刷和搬运的难易程度<sup>[11]</sup>,是影响土壤侵蚀的内在因素,通常用 $K$ 因子值来衡量土壤可蚀性。 $K$ 因子指的是在连续休耕条件下,坡度为9%的坡面上单位降雨侵蚀指数造成的土壤流失率<sup>[3]</sup>。计算土壤可蚀性 $K$ 因子值的研究较多,代表性的成果有Wishchmeier等提出的可蚀性诺谟图方法<sup>[12]</sup>、EPIC模型估算方法<sup>[13]</sup>,以及Shirazi等所建立的公式<sup>[14]</sup>。

卧虎山流域,除湖泊和水库外,从土壤亚类来讲共有8种,分别为:中性粗骨土、棕壤、棕壤性土、潮土、石灰性褐土、褐土、褐土性土、钙质粗骨土。考虑到该区与同为北方土石山区的河北省,在土壤类型及其属性上存在一定相似性,因此借鉴其土壤 $K$ 因子值<sup>[15]</sup>,卧虎山水库流域8种土壤的面积和土壤可蚀性 $K$ 值分别如表1所示。

表1 卧虎山水库流域不同土壤类型面积及其土壤可蚀性 $K$ 值

Table 1 The area of different soil types and its soil erodibility  $K$  value in the Wohushan Reservoir Watershed

土壤类别	棕壤	棕壤性土	褐土	石灰性褐土	褐土性土	中性粗骨土	钙质粗骨土	潮土
面积(km <sup>2</sup> )	30.70	22.24	96.97	60.20	32.26	105.72	186.02	20.72
$K$	0.2402	0.2157	0.3221	0.3496	0.2363	0.1976	0.2293	0.3401

注:  $K$  值为国际制单位0.131 7 t·ha·h/(MJ·mm·ha)。

## 2.3 地形因子

对于该研究区的地形因子,本研究小组前期曾结合 McCool 的  $LS$  因子参照值<sup>[16]</sup>,对不同  $LS$  因子实施算法进行了区域适用性评价<sup>[17]</sup>。研究结果发现,卧虎山流域  $LS$  因子值的最优算法为基于 Remotell 迭代运算的改进算法,即将 Remotell 第 4 版 AML 程序算法中的坡长指数( $m$ )修改为适用于细沟和细沟间侵蚀之比中等情形下的数值,并根据不同坡度对其进行插值得到。考虑到研究区大于  $10^\circ$  的坡面占到流域面积比例达到 60.61% 的事实,在计算坡度因子时结合刘宝元的陡坡坡度公式<sup>[18]</sup>,采用如下公式计算:

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8\sin\theta - 0.5 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.9\sin\theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (2)$$

本研究在计算  $LS$  因子时,进一步按照坡长指数( $m$ )适用于细沟和细沟间侵蚀比率中等情形,然后设计 AML 公式对其计算得出。

坡长指数的大小与坡面上细沟侵蚀和细沟间侵蚀的比率  $\beta$  有关,可由下列公式求得<sup>[19]</sup>:

$$m = \beta / (1 + \beta) \quad (3)$$

式中, $\beta$  值因土壤对细沟侵蚀的敏感性强弱而取值有所不同<sup>[20]</sup>。考虑到本区的土壤、降水、植被、土地利用等情况,本研究取土壤对细沟侵蚀和沟间侵蚀敏感性适中时的  $\beta$  值,其计算如下所示<sup>[20]</sup>:

$$\beta = (\sin\theta / 0.0896) / [3.0(\sin\theta)^{0.8} + 0.56] \quad (4)$$

式中, $\theta$  为坡度。

## 2.4 植被覆盖因子

覆盖和管理因子  $C$  是指在一定条件下,耕作农地上的土壤流失量与同等条件下适时翻耕的连续休闲对照地上的土壤流失量之比<sup>[8]</sup>。它是一个无量纲数,其值变化于 0~1 之间。它反映了耕作和管理措施对侵蚀速率的影响,通常用来比较各种管理措施对保护规划的相对影响<sup>[21]</sup>。 $C$  因子及后面的  $P$  因子都是侵蚀动力的抑制因子,起着保持水土的作用。虽然  $C$  因子的估算有不同方法<sup>[22]</sup>,但不同方法的适用尺度、应用范围不同,而且各有所长

且存在各自的不足<sup>[22]</sup>。本研究中根据相关研究成果<sup>[23-25]</sup>,基于前期获得的高精度土地利用/覆盖类型数据,采用直接赋值的方法。

## 2.5 土壤保持措施因子

USLE 和 RUSLE 中土壤保持措施因子  $P$ ,是指特定水保措施下的土壤流失量,与未实施水保措施之前,相应地块顺坡耕作时的土壤流失量之比值<sup>[3]</sup>。土壤保持措施主要通过调整水流形态、斜坡坡度和表面流的汇流方向,减少径流量,降低径流速率等作用减轻土壤侵蚀<sup>[26]</sup>。一般而言水保措施主要有等高耕作、修筑梯田等。无侵蚀的地区取 0,而未采取任何保护措施的地区取 1。借鉴相关文献<sup>[24, 25, 27]</sup>,结合本区所处土石山区的实际,本研究将各种土地利用类型的  $P$  值赋值如表 2 所示。

# 3 结果验证及分析

## 3.1 结果验证

根据以上厘定 USLE 中的各因子,在地理信息系统平台中进行叠加计算,得到卧虎山流域的最大侵蚀模数为  $24\,687\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,平均为  $462\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,标准偏差为  $852\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,其结果如图 1 所示。

目前有关济南南部山区水土流失的实证研究相对有限,而已有基于原型 USLE 模型计算得到的土壤侵蚀强度数据又差别较大。在实测数据缺少的前提下,根据泥沙淤积资料估算土壤侵蚀强度成为一种有效手段。卧虎山水库 1958~1960 年建库,建成蓄水后在 20 世纪 90 年代之前分别于 1965 年、1972 年和 1990 年进行过淤积测量,这为其淤积测算及验证提供了条件。

本文验证数据主要来自于王绍江<sup>[28]</sup>一文,该文曾基于济南南部山区 9 个代表性控制水库(包括一座中型水库、一座小一型水库和七座小二型水库)调查测量及收集的各水库淤积量、拦沙率和上游泥沙拦截量,根据拦蓄工程的拦沙率和沙量平衡理论,计算得到各水库流域的土壤侵蚀强度数据,并根据各水库流域地形地貌、植被和人类活动等确定加权比重,经计算和调查测算得到济南南部山区青

表2 卧虎山水库流域不同土地利用类型的  $C$ 、 $P$  因子值

Table 2 The values of  $C$ ,  $P$  factor for different land use in the Wohushan Reservoir Watershed

土地利用 类型	旱地	有林地	灌木林	疏林地	高覆盖度 草地	中覆盖度 草地	低覆盖 度草地	水库 坑塘	城镇 用地	农村居 民点	其它建设 用地
$C$	0.31	0.006	0.015	0.017	0.04	0.08	0.2	0	0.2	0.2	0.22
$P$	0.3	1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0	1	1	1



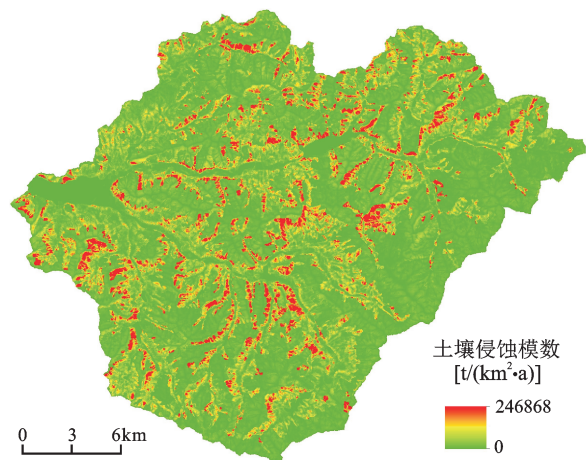


图1 卧虎山水库流域土壤侵蚀分布  
Fig.1 The distribution of soil erosion in the Wohushan Reservoir Watershed

石山区、砂石山区和山麓黄土覆盖区的侵蚀模数分别为288 t/(km<sup>2</sup>·a)、760 t/(km<sup>2</sup>·a)和238 t/(km<sup>2</sup>·a)<sup>[28]</sup>。根据文中提供的有限实证数据,尚不足以直接计算卧虎山水库流域的土壤侵蚀模数,但根据其对卧虎山水库流域的计算验证,不同岩性区土壤侵蚀强度数据具有很高的可信度和准确度<sup>[28]</sup>。

对于卧虎山水库流域而言,青石山区和砂石山区面积占比分别为30.96%和69.04%。基于此,结合济南南部山区不同岩性区的侵蚀模数,可以计算得到卧虎山流域多年平均侵蚀模数为434 t/(km<sup>2</sup>·a)。该数据与本研究根据RUSLE模型计算得到的侵蚀模数462 t/(km<sup>2</sup>·a)基本一致,考虑到本研究依据栅格分辨率为30 m,以及现有南部山区的现状,我们认为本研究计算中涉及到的各因子赋值及算法程序可靠,结果准确可信。

3.2 水库流域总体侵蚀状况分析

卧虎山水库流域平均侵蚀强度462 t/(km<sup>2</sup>·a),年均侵蚀量为2.6×10<sup>6</sup>t。根据2008年水利部颁布的土壤侵蚀分级分类标准<sup>[29]</sup>(简称分类标准),北方土石山区的容许土壤流失强度为200 t/(km<sup>2</sup>·a),即相当于表3中的微度侵蚀强度。据此,卧虎山水库流域土壤侵蚀(不包括微度侵蚀强度)面积达到176.39 km<sup>2</sup>,占到流域总面积的31.51%。在轻度及以上侵蚀中,随着侵蚀强度级别的增加,面积和侵蚀量占比逐渐减小。水库流域年均侵蚀量面积占比最大的为轻度侵蚀,其占土壤侵蚀总面积的88%,年均侵蚀量达到1.4×10<sup>6</sup>t,占到流域侵蚀总量的54.64%,是流域侵蚀产沙的主要来源,是流域中

表3 卧虎山水库流域侵蚀强度分级  
Table 3 Soil erosion intensity grading in the Wohushan Reservoir Watershed

级别*[t/(km <sup>2</sup> ·a)]	面积 (km <sup>2</sup> )	面积百 分比(%)	侵蚀量 (t)	侵蚀量百 分比(%)
微度 (<200)	383.47	68.49	37528	14.42
轻度 (200~2500)	155.45	27.77	142174	54.64
中度 (2500~5000)	18.26	3.26	62885	24.17
强烈 (5000~8000)	2.32	0.42	14112	5.42
极强烈(8000~15000)	0.35	0.06	3426	1.32
剧烈 (>15000)	0.0036	0.00	71	0.03

注:\*根据2008年水利部颁布的土壤侵蚀分级分类标准<sup>[29]</sup>。

亟需治理的主要区域。值得注意的是中度及以上侵蚀强度,其面积占比虽只有3.74%,但其侵蚀量却占到30.94%,是流域中需要重点预防和加强侵蚀治理的重点区域。

3.3 子流域土壤侵蚀分析

尽管卧虎山水库流域也称之为三川流域,即锦绣川流域、锦阳川流域和锦云川流域,但如果根据地形地貌来进行流域划分,则会得到多个流域。本文根据GIS平台的水文模块计算并经修正,共得到11个子流域,其中子流域11主要为卧虎山水库水域分布区(图2a中图例11)(图2)。其中图2a图例中的1、2、3分别对应锦绣川流域、锦阳川流域和锦云川流域。

水库子流域从侵蚀模数来看都属于轻度侵蚀级别,但各子流域间差别较大(图2b),如侵蚀模数最大的子流域10,其数值达到了1 414 t/(km<sup>2</sup>·a),是侵蚀模数最小的子流域8的4.04倍之多。从侵蚀模数较高的子流域7、10来看,子流域10现有土地利用类型主要是中覆盖度草地和灌木林,其坡度和坡长因子在所有子流域中最大,LS因子子流域平均值达到20.43。而且子流域7、10都位于水库两侧,不能像水库流域的纵深地带可以建串联水库塘坝进行拦蓄。因此对于该子流域10的有效治理,应以采取工程水保措施减小坡度和坡长作为有效举措。与之对比,子流域7土地利用类型主要是旱地、有林地、中覆盖度草地和其他建设用地,在水保措施方面,一方面可以考虑将占该子流域相当面积比重的旱地退耕还林,另一方面辅以工程措施减小地形因子的影响。

结合各子流域侵蚀模数和地形因子的对比关

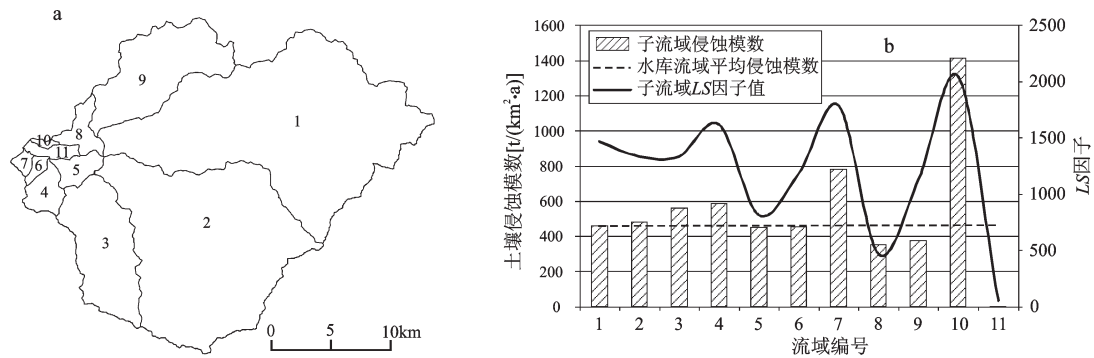


图2 不同子流域划分及其对应相关侵蚀参数

Fig.2 Sub-watershed division of the Wohushan Reservoir and its related erosion parameters diagram

系,可以看出各子流域侵蚀模数的差异与地形因子 $LS$ 基本呈现一致变化(图2b)。进一步对两者进行回归分析发现,两者的相关系数达到0.83,在显著性水平 $\alpha=0.01$ 时,两者呈显著相关。说明对于卧虎山水库流域而言,坡度坡长因子是导致各子流域侵蚀模数差异的主要因素。当然,对于流域中的各流域而言,由于面积相差悬殊,而空间尺度是否有影响尚需进一步讨论。

### 3.4 不同土地利用类型下土壤侵蚀状况

不同土地利用类型的侵蚀量、侵蚀模数和面积如图3所示。可以看出,除其它建设用地侵蚀模数最大外,从侵蚀面积占比和侵蚀量占比来看,占流域面积31.45%的旱地无疑成为研究区内最大的侵蚀土地利用类型,其侵蚀模数为931  $t/(km^2 \cdot a)$ ,年均侵蚀量为所有土地利用类型中最大,达到163 990 t,对流域总侵蚀量的贡献率达到了62.96%;其次为农村居民点,其侵蚀模数达到927

$t/(km^2 \cdot a)$ ,流域侵蚀量占比达到19%。与之相比,其他各类土地利用类型的侵蚀量相对有限,侵蚀量在1.4~0.05万t之间,流域侵蚀量占比在5.6%以下。从侵蚀强度来看,不同土地利用类型侵蚀强度相对有限,主要集中于轻度侵蚀级别,但各类土地利用侵蚀强度差异较大,其中其它建设用地侵蚀模数最高,达到1 245  $t/(km^2 \cdot a)$ ,这里的建设用地主要指厂矿、大型工业区、采石场等用地以及交通道路及特殊用地等。其它高于容许土壤侵蚀强度的土地利用类型依次为旱地、农村居民点、低覆盖度草地(指覆盖度在5%~20%的天然草地)、城镇用地和中覆盖度草地(主要指覆盖度在20%~50%之间的天然草地和改良草地)。结合各类土地利用类型的面积,综合侵蚀量和侵蚀强度来看,旱地不仅侵蚀量突出,而且侵蚀强度和面积都相对较高,是本区急需进行侵蚀治理的土地利用类型;中覆盖度草地和农村居民点是本区加

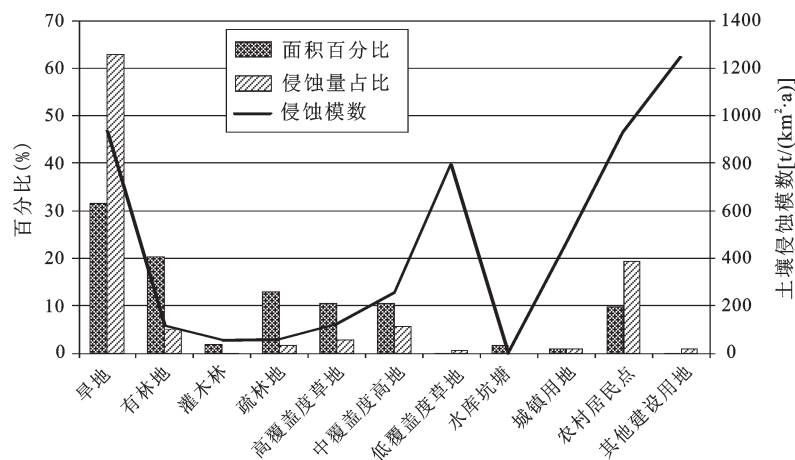


图3 不同土地利用类型的侵蚀相关参数

Fig.3 Erosion-related parameters of different land use types in the Wohushan Reservoir Watershed

强预防和治理的重点类型,而对于其他建设用地、低覆盖草地和城镇用地则需要重点关注并预防进一步扩展。

### 3.5 不同地形条件下土壤侵蚀状况

在讨论坡度与土壤侵蚀的空间配置关系时,不同学者对于坡度的划分有所不同。本研究根据参考文献[30],将坡度划分为 $<5^{\circ}$ 、 $5^{\circ}\sim 8^{\circ}$ 、 $8^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 、 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 、 $25^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 、 $>35^{\circ}$ 共6个级别。通过空间叠置分析得到流域内不同坡度条件下的侵蚀相关参数(图4)。可以看出随着坡度的增加,土壤侵蚀模数呈现相应增大的趋势,特别是在坡度超过 $25^{\circ}$ 之后,侵蚀强度呈明显加速趋势。不同坡度所占面积百分比和侵蚀量百分比呈现不同的变化(图4)。 $5^{\circ}$ 以下地形尽管所占面积比例达到16.19%,但该地形坡度对侵蚀影响较弱,其所占侵蚀量比例仅有4.92%,对应的土壤侵蚀模数在容许土壤流失量之下[ $141\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ]。之后随着坡度增大,面积占比虽下降到12.76%,但侵蚀量比例却出现增长趋势,由之前的4.92%增加到9.84%,说明地形在侵蚀中的作用开始显现。在 $8^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 面积占比和侵蚀量比例都出现快速增长,整体来看,该坡度范围的面积占比为60.90%,侵蚀量贡献率则达到68.08%,该坡度段面积比例不仅最大,而且侵蚀量占比最高,为水库流域的主要侵蚀坡度段。之后,两者出现双降趋势。尤为需要注意的是坡度大于 $25^{\circ}$ 的地形范围,其面积占比尽管最小只有10.2%,但由于平均高达 $778\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 的侵蚀模数,使得侵蚀量占比达到17.16%,是流域水土保持工作中特别需要重视部分。

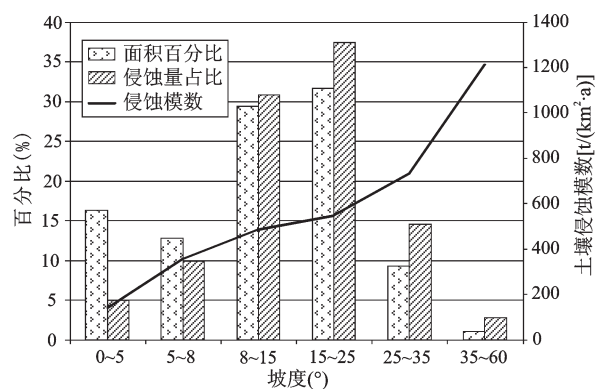


图4 不同坡度对应的侵蚀相关参数

Fig.4 The erosion-related parameters for different slope gradient range in the Wohushan Reservoir Watershed

## 4 结论

1) 根据RUSLE计算得到的水库流域平均土壤侵蚀模数为 $462\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ,该数据与经泥沙淤积等资料测算并经面积占比计算得到的土壤侵蚀模数 $434\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 基本一致,说明本研究计算结果准确可靠。

2) 根据RUSLE模型计算得到水库流域年均侵蚀量为 $2.6\times 10^6\text{ t}$ ,其中高于容许土壤流失量的面积为 $176\text{ km}^2$ ,其流域占比为31.51%。从不同侵蚀级别来看,占流域面积27.77%的轻度侵蚀,其侵蚀占比为54.64%;面积占比3.74%中度及以上侵蚀,侵蚀占比达到30.94%。

3) 流域内各子流域土壤侵蚀空间差异较大,分析发现地形因子是导致各子流域土壤侵蚀模数差异的主要因素;就土地利用类型而言,旱地和农村居民点是流域内的主要侵蚀土地利用类型;流域内土壤侵蚀模数随着坡度增加呈现相应增大的趋势,特别是在坡度超过 $25^{\circ}$ 之后,侵蚀强度呈明显加速趋势;但就侵蚀量和侵蚀面积比例而言, $8^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 坡度范围,不仅侵蚀面积占比最大,而且侵蚀量贡献最多,是水库流域的主要侵蚀坡度段。

## 参考文献(References):

- [1] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains-guide for selection of practices for soil and water conservation[M]. Washington, D C: Agricultural Research Service, U.S. Dept of Agriculture in cooperation with Purdue Agricultural Experiment Station 1965.
- [2] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses —A guide to conservation planning. Agriculture Handbook No. 537[M]. Washington, District of Columbia USA: U.S. Department of Agriculture Science and Education Administration, 1978.
- [3] Renard K, Foster G, Weesies G et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE) [M]. Agriculture Handbook 703. Washington, D.C.: US Department of Agriculture, 1997.
- [4] Liu B, Zhang K, Xie Y. An empirical soil loss equation. Vol II Process of soil erosion and its environment effects[C]. The proceedings of 12th ISCO Conference, 2002: 21-25.
- [5] 文雅,刘晓南,程炯. 基于USLE的广东省山区土壤侵蚀量估算及特征分析[J]. 水土保持通报, 2013, 33(4): 112-118.[Wen Ya, Liu Xiaonan, Cheng Jiong. Assessment and feature analysis of sil erosion in mountainous area of Guangdong Province based on USLE. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(4): 112-118.]



- [6] 潘美慧,伍永秋,任斐鹏,等. 基于USLE的东江流域土壤侵蚀量估算[J]. 自然资源学报, 2010, 25(12): 2154-2164. [Pan Meihui, Wu Yongqiu, Ren Feipeng et al. Estimating soil erosion in the Dongjiang River basin based on USLE. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(12): 2154-2164.]
- [7] 刘江,李波,杨增元,等. 卧虎山水库对济南泉水影响的定量分析[J]. 水资源保护, 2012, 28(1): 67-70. [Liu Jiang, Li Bo, Yang Zengyuan et al. Quantitative analysis of influence of Wohushan Reservoir on Jinan karst spring basin. *Water Resources Protection*, 2012, 28(1): 67-70.]
- [8] 刘宝元,谢云,张科利. 土壤侵蚀预报模型[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001. [Liu Baoyuan, Xie Yun, Zhang Keli. *Prediction model of soil erosion*. Beijing: China Science and Technology Press, 2001.]
- [9] 伍育鹏,谢云,章文波. 国内外降雨侵蚀力简易计算方法的比较[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3):31-34. [Wu Yupeng, Xie Yun, Zhang Wenbo. Comparison of different methods for estimating average annual rainfall erosivity. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001,15(3):31-34.]
- [10] 马良,左长清,孙勖,等. 山东省降雨侵蚀力空间分布特征及简易方程的研究[J]. 水土保持研究, 2010,17(2):28-31. [Ma Liang, Zuo Changqing, Sun Meng et al. Spatial characteristics and simplified empirical models of annual rainfall erosivity in Shandong Province. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010,17(2):28-31.]
- [11] 张金池,李海东,林杰,等. 基于小流域尺度的土壤可蚀性K值空间变异[J]. 生态学报,2008, 28(5): 2199-2206. [Zhang Jinchi, Li Haidong, Lin Jie et al. Spatial variability of soil erodibility at a catchment scale in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2199-2206.]
- [12] Wischmeier W H, Johnson C B, Cross B V. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 1971, 26(5):189-193.
- [13] Sharpley A N,Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator: 2. User manual[M]. Technical Bulletin-United States Department of Agriculture, 1990.
- [14] Shirazi M A, Hart J W, Boersma L. A unifying quantitative analysis of soil texture: Improvement of precision and extension of scale[J]. *Soil Science Society of America Journal*,1988, 52(1): 181.
- [15] 门明新,赵同科,彭正萍,等. 基于土壤粒径分布模型的河北省土壤可蚀性研究[J]. 中国农业科学, 2004,37(11): 1647-1653. [Men Mingxin, Zhao Tongke, Peng Zhengping et al. Study on the soil erodibility based on the soil particle-size distribution in Hebei Province. *Scientia Agricultura Sinica*,2004,37(11): 1647-1653.]
- [16] McCool D K, Foster G R, Weesies G A. Slope Length and Steepness Factors (LS),Chapter[M]//Renard et al.Predicting soil erosion by water:a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), Agriculture Handbook No. 703. Washington D C, USA: United States Department of Agriculture,1997:101-141.
- [17] 胡刚,宋慧,石星军,等. 卧虎山水库不同算法LS因子值适用性分析[J]. 地理科学,2015,35(11): 1482-1488. [Hu Gang, Song Hui, Shi Xingjun et al. The applicability of LS factor value from different algorithms in Wohushan Reservoir Basin. *Scientia Geographica Sinica*,2015,35(11): 1482-1488.]
- [18] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. *Transactions of the ASAE*,1994, 37(5): 1835-1840.
- [19] Foster G, Meyer L, Onstad C. A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*,1977, 20(4):683-687.
- [20] McCool D K, Foster G R, Mutchler C K et al. Revised slope length factor for the universal soil loss equation[J]. *Transactions of the ASAE*,1989, 30(5): 1387-1396.
- [21] Renard K G, Foster G R, Weesies G A et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE) [M]. *Agricultural Handbook* 703. Washington, D.C.: US Department of Agriculture, 1997.
- [22] 冯强,赵文武. USLE/RUSLE中植被覆盖与管理因子研究进展[J]. 生态学报,2014,34(16):4461-4472. [Feng Qiang, Zhao Wenwu. Study on cover-management factor in USLE and RUSLE: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2014,34(16):4461-4472.]
- [23] 傅世锋,查轩. 基于GIS和USLE的东圳库区土壤侵蚀量预测研究[J]. 地球信息科学, 2008,10(3): 390-395. [Fu Shifeng, Zha Xuan. Study on predicting soil erosion in Dongzhen watershed based on GIS and USLE. *Geo-information Science*,2008,10(3): 390-395.]
- [24] 王文娟,张树文,李颖,等. 基于GIS和USLE的三江平原土壤侵蚀定量评价[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(9): 112-117. [Wang Wenjuan, Zhang Shuwen, Li Ying et al. Quantitative assessment of soil erosion in Sanjiang Plain based on GIS and USLE. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(9): 112-117.]
- [25] 黄金良,洪华生,张路平,等. 基于GIS和USLE的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 75-79. [Huang Jinliang, Hong Huasheng, Zhang Luoping et al. Study on predicting soil erosion in Jiulong River watershed based on GIS and USLE. *Journal of Soil and Water Conservation*,2004, 18(5): 75-79.]
- [26] 张雪花,侯文志,王宁. 东北黑土区土壤侵蚀模型中植被因子C值的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006,25(3): 797-801. [Zhang Xuehua, Hou Wenzhi, Wang Ning. C-value in the model of soil erosion in black earth area in the Northeastern China. *Journal of Agro-Environment Science*,2006,25(3): 797-801.]
- [27] 齐述华,蒋梅鑫,于秀波. 基于遥感和USLE模型评价1995-2005年江西土壤侵蚀[J]. 中国环境科学,2011,31(7): 1197-1203. [Qi Shuhua, Jiang Meixin, Yu Xiubo. Evaluating soil erosion in Jiangxi Province with USLE model and remote

- sensing technology during 1995-2005. *China Environment Science*, 2011,31(7): 1197-1203.]
- [28] 王绍江,张桂茹,胡济生,等. 济南市南部山丘区土壤侵蚀模数测算与分析[J]. *山东水利科技*,1997(3):33-36.[Wang Shaojiang, Zhang Guiru, Hu Jisheng et al. Estimation and analysis of soil erosion modulus in the hilly area of Southern Jinan. *Shandong. Water Conservancy Science and Technology*,1997(3): 33-36.]
- [29] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准(SL 190-2007)[S]. 北京:中国水利水电出版社,2008. [The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Classification of soil erosion classification (SL 190-2007). Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2008.]
- [30] 中华人民共和国水利部. 中华人民共和国行业标准(SL575-2012). 水利水电工程水土保持技术规范[S]. 北京:中国水利水电出版社. 2012.[The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. People's Republic of China industry standard (SL575-2012). technical specification for soil and water conservation of water conservancy and hydropower project. Beijing: China Water Power Press, 2012.]

## Soil Erosion Characteristics Based on RUSLE in the Wohushan Reservoir Watershed

Hu Gang<sup>1,2</sup>, Song Hui<sup>1</sup>, Shi Xingjun<sup>3</sup>, Zhang Mingli<sup>4</sup>, Liu Xiujun<sup>1</sup>, Zhang Xuliang<sup>1</sup>

(1. School of Tourism and Geography Sciences, Qingdao 266071, Shandong, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Water and Soil Conservation and Environmental Protection, Linyi 276000, Shandong, China; 3. College of Physics, Qingdao University, Qingdao 266071, Shandong, China; 4. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, Jiangsu, China)

**Abstract:** Soil erosion of the Wohushan Reservoir was calculated based on RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation). The calculated mean soil erosion modulus is  $462 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ , which is consistent with the data estimated by the deposition from both reservoir and main watercourses. This indicated that the calculation is accurate and the result is reliable. The annual average soil erosion amount is  $2.6 \times 10^6 \text{ t}$ . According to standards for classification and gradation of soil erosion issued by the ministry of water resources of PR China, the area above soil loss tolerance is about  $176 \text{ km}^2$ , which amounts to 31.51% of total area of the Wohushan Reservoir. With reference to the erosion intensity, the slight erosion area occupies 27.77% of total area in reservoir watershed, but contribute 54.64% of the total load of soil erosion in the Wohushan Reservoir Watershed. while the moderate and above intensity erosion area only occupies 3.74% of the study area and contributes 30.94% of the total load of soil erosion. It was found that there are large spatial differences for soil erosion intensity in the reservoir watershed. Based on hydrological module in arcgis platform, we got 11 sub-basins. Their soil erosion intensity were found to have a consistent change with their geomorphology factors, which indicates that slope length and slope gradient should be the main factors leading to the difference of soil erosion modulus in each sub-basins. Compared the ratio of erosion amount with that of different land uses, it's found that dry land and rural settlements are the main land use types which suffered serious erosion. The soil erosion intensity increases with the increase of slope gradient. The main erosion slope ranges from  $8^\circ$  to  $25^\circ$ , in which the percentage of area is not only the largest, but also the erosion rate is the highest.

**Key words:** RUSLE; reservoir sedimentation; soil erosion; the Wohushan Reservoir