

# 基于 GIS 的黄土高原小流域土壤侵蚀定量评价<sup>\*</sup>

齐清, 王天明, 寇晓军, 葛剑平

(北京师范大学 生命科学学院, 景观生态与可持续性科学研究中心, 北京 100875)

**摘要:**以小流域为单元进行土壤侵蚀量的定量评价研究,是探索土壤流失规律和评价流域治理效益的一个重要途径和内容。根据修正通用土壤流失方程(RUSLE),在 ArcGIS 软件平台下,以 QuickBird 遥感影像作为主要数据源,计算了黄土高原南小流域小流域土壤侵蚀量并定量分析了土壤侵蚀量与坡度和土地利用的关系。结果表明:南小流域小流域年土壤侵蚀量 88 504.2 t/a,平均土壤侵蚀模数为 2 438.98 t/(km<sup>2</sup>·a),属于轻度接近于中度侵蚀强度,土壤侵蚀得到有效控制。随着坡度的增大土壤侵蚀量明显增加,>25°区域产生全流域 80%以上的土壤侵蚀量。不同植被类型的土壤侵蚀模数依次为:天然草地>未成林地>疏林地>灌木林地>人工草地>乔木林地。改善疏林地、未成林地和天然草地的结构,加强难利用地和荒坡地的治理,提高植被覆盖度,是降低土壤侵蚀量的主要途径。

**关键词:**土壤侵蚀;修正土壤流失方程(RUSLE);QuickBird 影像;黄土高原

中图分类号:S157.1;TP79

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2009)03-0001-05

## Quantitative Assessment of Soil Erosion in Small Watershed in Loess Plateau Based on GIS

QI Qing, WANG Tian-ming, KOU Xiao-Jun, GE Jian-ping

(College of Life Sciences & Center for Landscape Ecology and Sustainability Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Taking small watershed as unit to quantitatively assess soil erosion is an important approach and content to explore the soil erosion rules and assess the benefit of watershed management. Based on the revised universal soil equation (RUSLE), the volume of soil erosion of Nanxiaohogou watershed which lies in Loess Plateau were evaluated using the GIS techniques and QuickBird remote sensing-images and the relationship of soil loss with slope gradient and land use were analyzed. Results showed that the annual soil erosion volume in Nanxiaohogou was 88 504.2 t/a, and soil erosion modulus reached 2 438.98 t/(km<sup>2</sup>·a), which was in the range of gently erosion and indicate the soil erosion had been greatly controlled. A significant positive relationship of the soil erosion volume with the slope gradient was observed, and the >25° units contribute more than 80% soil loss. Soil erosion varied sharply with different type of vegetations in a decreasing order of natural pasture > unformed forestland > sparse forest > shrub forest > cultivated grassland > arbor forest. Adjusting the structure of sparse forest, enhancing the management unformed forest and natural pasture, strengthening the management of unusable land and barren land to increase the vegetation coverage might be effective approaches to reduce soil erosion.

**Key words:** soil erosion; revised universal soil loss equation (RUSLE); QuickBird image; Loess Plateau

土壤侵蚀是一个世界范围的环境问题,严重的土壤侵蚀能够破坏土地资源,引起当地的土壤退化、带来泥沙危害以及导致生态环境恶化。由于自然因素和历史原因,黄土高原成为我国乃至全球土壤侵

蚀最严重的地区,其土壤侵蚀的治理也成为水土保持的研究重点。土壤侵蚀的监测、预测和评价是水土保持工作的基础<sup>[1]</sup>,然而,土壤侵蚀是一个复杂问题,涉及到土壤、地形、降水、植被以及土地利用等多

\* 收稿日期:2008-10-07

基金项目:“十一五”科技支撑项目“林业生态建设关键技术研究示范”(2006BAD03A0206);国家自然科学基金(40730631)

作者简介:齐清(1973-),女,山东泰安人,博士,主要从事景观生态与可持续性科学研究。E-mail: qiqing27@163.com

通信作者:葛建平(1962-),男,新疆石河子人,教授,博士生导师,主要从事景观生态、城市生态、生态系统分析与评价等方向的研究。

E-mail: gejp@bnu.edu.cn

个影响因素,利用传统的定点监测方法费时耗力,而且定点监测无法确定整个流域及不同地理单元的侵蚀量,更无法适时定量监测水土保持效果,这给水土保持工作带来一定难度。由美国农业部研制的 RUSLE 模型<sup>[2-4]</sup>是经验统计模型的典型代表,是目前预测土壤侵蚀最常用的方法,该模型不受局部地理、气候因素的限制,在土地资源调查、水土保持规划等方面起到了重要作用。随着 3S 技术的发展,通用土壤流失方程与 GIS 和遥感相结合,为快速准确的预测土壤侵蚀动态提供了快速便利的手段。

以小流域为单元进行的土壤侵蚀定量评价研究,是探索土壤流失规律和评价流域治理效益的一个重要途径和内容。该文选取黄土高原南小河口小流域作为研究区域,以 QuickBird 遥感影像作为主要数据源,以 ArcGIS 9.0 为操作平台,采用修正的通用土壤流失方程 RUSLE 来估算南小河口小流域土壤侵蚀量,并在此基础上定量分析土壤侵蚀与土地利用和坡度的关系,以期为黄土高原沟壑区小流域水土保持规划和治理提供科学依据。

## 1 研究区概况

南小河口小流域在甘肃省庆阳市西峰区及后官寨境内,位于东经 107°30' - 107°37',北纬 35°41' - 35°44',是泾河支流蒲河左岸的一条支沟,属典型黄土高原沟壑区。流域面积 36.3 km<sup>2</sup>,流域长 13.6 km,主沟平均比降 2.8%,沟道密度 2.68 km/km<sup>2</sup>。流域海拔 1 050 ~ 1 423 m,沟底至塬面相对高差 150 ~ 200 m。流域地貌主要有 3 种类型:塬面、梁峁坡和沟谷。塬面地形宽广平坦,坡度一般在 5°以下,面积占流域总面积的 56.9%。梁峁坡为连接塬面的缓坡带,坡度一般为 10°~20°,面积占流域总面积的 15.7%。梁峁坡以下为沟谷,其形状呈“V”字形。沟谷坡度一般在 25°以上,沟谷面积占流域总面积的 27.4%。流域地质构造较为单一,黄土是主要覆盖性土壤,黏土含量甚微,土质松软。流域年均气温 9.3℃,年均降水 556.5 mm,其中 6-9 月降雨量占全年降雨量的 67.3%。该小流域的综合治理措施有:塬面布设“三道防线”;沟坡修水平梯田,建山地果园、护坡林、苜蓿坡等;沟谷打柳谷坊、土谷坊,沟底建防冲林、淤地坝和小水库。

## 2 研究方法

### 2.1 数据处理

本研究采用的数据主要包括 2004 年的 QuickBird 遥感影像(分辨率 0.61 m),1:1 万 DEM,1

1 万地形图,1:100 万土壤数据库,1986 - 2006 年月平均降雨量等。

通过对研究区 QuickBird 遥感影像进行人工目视解译,得到土地利用/土地覆盖的数据。土地利用分类依照国土资源部《全国土地分类》的分类系统,并根据研究区实际情况进行取舍、综合,将该流域的土地利用方式分为耕地、林地、牧草地、水域、建设及居民用地、难利用地和荒坡 7 个一级分类,在此基础上,又将耕地、林地、牧草地分为 9 个二级土地利用类型。其中水域主要是指人工开挖或天然形成的专门用于水产养殖的坑塘水面及相应附属设施用地,由于面积较小且不是产生土壤侵蚀的主要土地利用类型,将不包括在本研究范围之内。

根据南小河口流域植被覆盖特点,将植被覆盖度分为高、中高、中、中低、低和裸地 6 级,其对应的植被覆盖度依次为 >75%,60%~75%,45%~60%,30%~45%,10%~30%,<10%。对于农地和建设及居民用地,不再进行植被覆盖度讨论,将其作为特殊项单列,分别编码为 7 和 8。

利用 1:1 万 DEM,提取南小河沟的坡度图层,根据不同坡度对土壤侵蚀的影响程度,按照 5°,5°~8°,8°~15°,15°~25°,25°~35°,>35°六个级别对坡度进行分类。

依据 1997 年开始实施的国家行业标准 SL190-96(B)《土壤侵蚀分类分级标准》,对计算出的土壤侵蚀量进行土壤侵蚀强度等级的划分。

### 2.2 土壤侵蚀模型及各因子指标的确立

通用土壤流失方程(USLE)由 Wischemier 和 Smith 于 1958 年提出,为提高各因子计算的通用性,美国农业部又提出了修正方程 RUSLE。本研究采用这一模型,其数学表达式为:

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

式中:A——土壤侵蚀量[t/(km<sup>2</sup>·a)];f——使 A 的单位(因 R、K 使用美习用单位)转换为 t/(km<sup>2</sup>·a)的常数,其值为 224.2;R——降雨侵蚀力因子;K——土壤可蚀性因子;L——坡长因子;S——坡度因子;C——植被覆盖因子;P——土壤侵蚀控制措施因子。

2.2.1 降雨侵蚀力因子 R 的提取 降雨侵蚀力因子 R 是一项评价降雨引起的土壤分离和搬运的动力指标,其值难以直接测定,大多用降雨参数来估算<sup>[5]</sup>。本研究采用 Wischmeier 经验公式,该公式既考虑年降水总量,又考虑降水的年内分布:

$$R = \sum_{i=1}^{12} [1.735 \exp(1.5 \times \lg \frac{P_i}{P} - 0.8188)] \quad (2)$$

式中:  $P_i$  ——各月平均降雨量 (mm);  $P$  ——年平均降雨量 (mm)。

由于研究区的面积不大,根据研究区范围内 1986 - 2006 年降雨资料的平均数据和公式 (2) 计算出惟一  $R$  值,求得  $R = 76.6146$ ,以常数的形式输入到模型中进行计算。

2.2.2 土壤可蚀性因子  $K$  的提取  $K$  因子反映了土壤对降雨 (暴雨) 产生的侵蚀力所具有的抵抗能力,它取决于土壤属性和土壤剖面特征。根据 1 100 万土壤分布图,南小河口主要覆盖土壤有黄绵土和黑垆土。由于数据资料不足,本研究借鉴王明冲等计算的结果<sup>[6]</sup>,得研究区  $K$  值为:黄绵土 0.470,黑垆土 0.336。

2.2.3 地形因子  $LS$  的提取 通常将坡度和坡长因子合并为一个因子,称为地形因子  $LS$ 。本研究根据 Moore 和 Wilson<sup>[7]</sup> 提出的方程,基于径流能量计算坡长坡度。与地理信息系统相结合表示为<sup>[8-9]</sup>:

$$LS = (AS_{i-in} / 22.13)^{0.6} (\sin / 0.0896)^{1.3} \quad (3)$$

式中: ——第  $i$  个栅格单元的坡度;  $AS_{i-in}$  ——第  $i$  个栅格单元入口处单位等高线宽的汇水面积 ( $m^2/m$ ),与汇水到目标栅格的栅格总数及栅格边长有关:

$$AS_{i-in} = n_j \cdot b \quad (4)$$

式中:  $n_j$  ——汇水到目标栅格的栅格总数;  $b$  ——等高线宽度,约等于栅格边长。

2.2.4 植被覆盖度因子  $C$  的提取 反映植被覆盖状况或作物管理因子  $C$  为无量纲参数,它与植被类型、植被覆盖度有关。当地面完全裸露时,  $C$  值为 1.0;而当地面得到良好的保护时,  $C$  值为 0.001,即  $C$  值在 0.001 ~ 1 之间。

以 QuickBird 卫星影像为信息源,在野外调查的基础上,通过目视解译勾绘图斑,获得南小河口植被覆盖度专题图。采用蔡崇法<sup>[5]</sup> 的  $C$  因子与植被覆盖度 ( $c$ ) 的回归方程来计算南小河沟的植被覆盖因子  $C$ ,取值条件为:

$$\begin{cases} C = 1 & c = 0 \\ C = 0.6508 - 0.3436 \times \lg c & 0 < c < 78.3\% \\ C = 0 & c > 78.3\% \end{cases} \quad (5)$$

将不同级别的植被覆盖度分别取平均值,按照上式计算植被覆盖因子  $C$ 。对于农地和建设及居民用地的  $C$  值,则直接借鉴以往的研究成果<sup>[5,10]</sup>,分别取值 0.24 和 0.20。各植被覆盖度等级及  $C$  值见表 1。

2.2.5 侵蚀防治措施因子  $P$  的提取 侵蚀防治措施因子  $P$  是指采用专门措施后的土壤流失量与采

用顺坡种植时的土壤流失量的比值,一般指人为的地表耕作情况对土壤流失的相对大小,与坡度和地表形状有一定关系<sup>[11-13]</sup>,研究中通常考虑的侵蚀防治措施主要包括等高耕作、等高带状种植、梯田等方式。目前,径流小区土壤侵蚀的  $P$  因子值一般通过试验观测确定,而在流域土壤侵蚀研究中,则难以通过实测方法确定相关参数值<sup>[14]</sup>。由于土地利用能够基本反映水土保持措施的差异,往往采用依据土地利用类型赋值的方法确定  $P$  值。 $P$  值变化于 0 ~ 1 之间,0 代表防治措施很好,基本不发生侵蚀的地区,1 代表未采取任何控制措施的地区。自然植被区和坡耕地  $P$  因子一般取值为 1。

表 1 植被覆盖度分级表

覆盖度等级	编码	植被覆盖度/ %	植被覆盖因子
高	1	> 75	0.0007
中高	2	60 ~ 75	0.0223
中	3	45 ~ 60	0.0598
中低	4	30 ~ 45	0.1100
低	5	10 ~ 30	0.2038
裸地	6	< 10	0.6508
农地	7	-	0.24
建设及居民用地	8	-	0.20

在南小河口,农耕地主要是塬地、水平梯田和坝地,以塬地居多,原有的部分顺坡耕地也已经退耕。根据相关学者的研究结果<sup>[15]</sup>,确定研究区不同土地利用类型的  $P$  值 (表 2)。

表 2 土地利用分类及  $P$  值表

名称	编码	$P$	
耕地	塬地	11	1
	梯田	12	0.1
	坝地	13	0.1
林地	乔木林地	21	1
	灌木林地	22	1
	疏林地	23	1
	未成林地	24	1
牧草地	天然草地	31	1
	人工草地	32	0.2
建设及居民用地	51	1	
难利用地	61	1	
荒坡	71	1	

### 2.3 模型计算

根据 RUSLE 模型各因子的取值,生成各因子栅格图层,栅格大小确定为 3 m × 3 m,统一坐标投影。利用 ArcGIS 9.0 的 Raster Calculator 模块,按照公式 (1) 将各因子图相乘,生成土壤侵蚀图。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土壤侵蚀总量与侵蚀强度等级

南小河沟小流域微度侵蚀面积 24.79 km<sup>2</sup>, 占流域面积的 68.96%; 轻度侵蚀面积 3.58 km<sup>2</sup>, 占流域总面积的 9.96%; 中度以上的侵蚀面积 7.58 km<sup>2</sup>, 占总面积的 21.08%, 其中尚有 12.99% 的面积属于强度以上侵蚀。强度以上侵蚀区主要包括两类, 一是难利用地和荒地, 这些区域坡度比降较大, 陡崖多, 重力侵蚀严重; 二是一些已经实施林草措施的区域, 但未成林面积较大, 尚未真正发挥效益, 土壤侵蚀程度也偏高。南小河沟小流域年土壤侵蚀总量 88 504.2 t/a, 平均土壤侵蚀模数为 2 438.98 t/(km<sup>2</sup>·a), 按照土壤侵蚀强度等级划分标准, 属于轻度接近于中度侵蚀强度, 说明经过多年的小流域

综合治理, 土壤侵蚀已经得到有效控制(表 3)。

#### 3.2 土壤侵蚀量与坡度相关分析

南小河沟流域坡度分级有以下特点, 一是塬面集水面积较大, 占全流域面积的 51.62%, 是产生径流的主要来源区; 二是沟坡坡度比降大, 全流域 >25° 面积占全流域面积的 33.57%, 是产生重力侵蚀的主要来源区。将土壤侵蚀图层与由 DEM 提取的坡度栅格图层作叠置分析, 求得小流域不同坡度级别土壤侵蚀量(表 4)。地形是影响小流域土壤侵蚀量的最显著因素, 小流域土壤侵蚀模数与坡度呈显著正相关。当坡度为 0~5° 时, 土壤侵蚀模数为 294.31 t/(km<sup>2</sup>·a); 随坡度增加, 土壤侵蚀模数增大; 当坡度 >35° 时, 土壤侵蚀模数达 7 135.66 t/(km<sup>2</sup>·a)。坡度 25° 以上区域产生的土壤侵蚀量占整个流域的 80% 以上, 是治理工作的重点和关键区域。

表 3 土壤侵蚀强度等级分布表

编码	侵蚀等级	侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	侵蚀量/(t·a <sup>-1</sup> )	比例/%
1	微度	<1000	24.79	68.96	6424.95	7.33
2	轻度	1000~2500	3.58	9.96	5837.19	6.66
3	中度	2500~5000	2.91	8.09	10507.33	11.98
4	强度	5000~8000	1.82	5.07	11531.01	13.15
5	极强度	8000~15000	1.58	4.39	17049.89	19.44
6	剧烈	>15000	1.27	3.53	36346.31	41.45

表 4 不同坡度级的土壤侵蚀量

坡度	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	侵蚀量/(t·a <sup>-1</sup> )	比例/%
5°	18.56	51.62	294.31	5463.10	6.23
5°~8°	0.81	2.26	1158.78	940.19	1.07
8°~15°	1.33	3.70	1552.94	2067.912	2.36
15°~25°	3.18	8.84	2510.62	7982.14	9.10
25°~35°	4.85	13.49	4065.46	19724.96	22.59
>35°	7.22	20.08	7135.66	51517.75	58.75

#### 3.3 土壤侵蚀量与土地利用相关性分析

影响土壤侵蚀的因素有很多, 除了自然因素外, 不合理的土地利用方式是加剧土壤侵蚀的直接原因。将土壤侵蚀图层与土地利用图层叠置, 对不同土地利用类型的土壤侵蚀量进行分析(表 5)。由表 5 可知, 不同土地利用类型土壤侵蚀状况差异较大。难利用地对小流域土壤侵蚀量的贡献率最大, 天然草地次之, 荒坡的侵蚀模数最高, 达 16 925.9 t/(km<sup>2</sup>·a)。在今后的小流域综合治理中, 这 3 种土地利用类型应作为重点, 寻找有效的难利用地和荒坡的治理方法, 加大对天然草地的人工管理, 降低小流域的土壤侵蚀量。不同植被类型的侵蚀强度不同, 乔木林地最小, 仅为 119.01 t/(km<sup>2</sup>·a), 人工

草地次之, 为 184.88 t/(km<sup>2</sup>·a), 灌木林地 877.90 t/(km<sup>2</sup>·a), 均属于微度侵蚀。在小流域植被建设中, 因地制宜, 营造以乔木、灌木、草地相结合的植被类型, 注意天然恢复与人工措施的结合应是植被恢复的主要方向。

#### 3.4 土壤侵蚀前景模拟

从上述分析可知, 南小河沟经过多年的大规模水土治理, 土壤侵蚀已得到有效控制。当前的工作重点应主要包括两部分, 一是加强难利用地和荒坡地的治理, 提高植被覆盖度; 二是完善营林措施, 改造当前不合理的林草结构, 提高疏林地、未成林地和天然草地的抗侵蚀能力。土壤侵蚀受到降水、地形、土壤、植被等诸多因子的影响, 在较短时间尺度上, 降水、土壤可

视为定值,南小河沟已经形成比较有效的水土保持措施,因此  $P$  值也可视为不变,则该小流域土壤侵蚀量的大小主要受  $C$  因子的控制,且主要体现在覆盖度较低的难利用地和荒坡地的  $C$  因子上。假设植被覆盖

度 10~30% 和 < 10% 的地区未来恢复至中低覆盖度情景下(约 35%),按照公式(5), $C$  值将降至 0.120 3,则流域侵蚀模数可降至 1 619.14 t/(km<sup>2</sup>·a),土壤侵蚀总量将减少 34.22%。

表 5 不同土地利用方式的土壤侵蚀量

编码	土地利用方式	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	侵蚀总量/(t·a <sup>-1</sup> )	比例/%
11	塬地	15.02	41.77	463.38	6959.07	7.94
12	梯田	0.44	1.22	591.00	258.72	0.30
13	坝地	0.11	0.29	761.30	80.52	0.09
21	乔木林地	4.41	12.28	119.01	525.45	0.60
22	灌木林地	0.14	0.39	877.90	122.15	0.14
23	疏林地	1.92	5.35	2206.04	4243.58	4.84
24	未成林地	3.25	9.04	3113.38	10118.55	11.54
31	天然草地	3.96	11.01	5518.40	21852.92	24.92
32	人工草地	0.02	0.04	184.88	2.90	0.003
51	建设及居民用地	3.91	10.89	470.90	1843.21	2.10
61	难利用地	1.70	4.72	15491.00	26287.30	29.98
71	荒坡	0.91	2.53	16925.90	15401.33	17.56

#### 4 结论与讨论

从 20 世纪 50 年代开始,南小河沟就作为典型区域而开始了小流域综合治理,经过半个多世纪的艰苦努力,水土流失和土壤侵蚀得到有效控制,成为生态建设的示范性区域。本研究结果显示,2004 年南小河沟小流域平均土壤侵蚀模数 2 416.18 t/(km<sup>2</sup>·a),属于轻度接近于中度侵蚀强度。随着坡度的增加土壤侵蚀量明显增加,坡度 25° 以上的区域占流域面积 33.75%,产生全流域 80% 以上的土壤侵蚀量,这些区域坡度比降较大,陡崖多,较难利用,仍是土壤侵蚀发生的重点区域。不同植被类型的土壤侵蚀模数大小依次为:天然草地>未成林地>疏林地>灌木林地>人工草地>乔木林地,不合理的土地利用方式,例如荒坡、天然草地、疏林地等,直接导致土壤侵蚀量的增加,综合治理还需进一步加强。

RUSLE 模型由于不受局部地理、气候因素的限制,能快速准确的预测土壤侵蚀动态,是目前预测土壤侵蚀最常用的方法。土壤侵蚀量的大小是降雨、地形、植被、土壤等因子综合作用的结果,而降雨、土壤因子在小流域较小时间尺度上可视为定值,因此土壤侵蚀量大小主要由植被和坡度 2 个因子决定,小流域综合治理规划实际上就是对  $C$  值和  $P$  值的调节与确定。运用 RUSLE 模型不仅可以方便地计算出当前土壤侵蚀量,也可以预测出  $C$  值和  $P$  值改变后的土壤侵蚀量,有助于管理者选择合理的治理方案。本研究以 QuickBird 遥感影像为主要信息

源,不仅增加了提取的变化信息总量,而且变化区域的辨识性大大增加,提高了 RUSLE 模型中各因子的准确性,与其他遥感影像相比表现出较强的优势。随着研究中该区域数据资料的不断丰富和补充,利用 RUSLE 模型模拟南小河沟综合治理以来土壤侵蚀量的连续变化,继续深入探索小流域土壤侵蚀和治理规律是今后研究的一个主要内容。

#### 参考文献:

- [1] 徐天蜀,彭世揆,岳彩荣.基于 GIS 的小流域土壤侵蚀评价研究[J].南京林业大学学报:自然科学版,2002,26(4):43-46.
- [2] Morgan R P C. Soil Erosion and Conservation[M]. London: Longman Group Limited,1986.
- [3] 谢云,林燕,张岩.通用土壤流失方程的发展与应用[J].地理科学进展,2003,22(3):279-287.
- [4] 于兴修,杨桂山.通用水土流失方程因子定量研究进展与展望[J].自然灾害学报,2003,12(3):14-18.
- [5] 蔡崇法,丁树文.应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持学报,2000,14(2):19-24.
- [6] 汪明冲,潘竟虎,赵军.基于 GIS 与 RS 的土壤侵蚀变化定量监测:以黄土高原水保二期世行贷款庆城项目区为例[J].干旱地区农业研究,2007,25(6):116-121.
- [7] Moore I D,Burch G J. Physical basis of the length slope factor in the Universal Soil Loss Equation[J]. Soil Science Society of America Journal,1986,50(5):1294-1298.

大幅度地减少,各年代径流量的平均值变化不大,20世纪90年代以来径流量有增加趋势,特别是21世纪以来,源流来水量较前三个年代还有明显的增加,原因是在全球变暖的背景下,塔里木河源流区的气候变暖、变湿,产流量有所增加。

(2) 1961 - 2005年塔里木河中游的径流量明显减少,径流量从20世纪60年代的35.14亿 $m^3$ ,下降到90年代的22.778亿 $m^3$ ,减少35.18%,2001 - 2005年平均径流量降至22.5825亿 $m^3$ ,与60年代相比减少了35.74%,但与90年代相比并无明显减少。径流减少的主要原因是源流区及上游区灌溉面积大量增加,从河道引水数量增加所致;与此同时上游缺乏堤防和引水控制工程,河道上私自扒口引水现象较多,使水量无效损耗严重,致使上游下泄至中游段的水量减少。20世纪90年代后期以来,塔里木河流域治理初见成效,中游来水量减少的趋势有所缓解。

(3) 45 a来(1961 - 2005年),中游段径流损耗量没有明显的减少趋势,虽然中游径流损耗量较为稳定,但数值一直比较大,中游段多年平均耗水量(21.32亿 $m^3$ ),占干流多年平均径流量(45.66亿 $m^3$ )的46.7%,占中游多年平均来水量的78.15%,是塔里木河干流各段中耗水最多的河段。原因一是水利工程设施条件差,造成水资源严重浪费;二是中游段水道网纵横交错,河道弯曲,泛滥的河水也导致干流输沙能力锐减,加速河床淤积,使区间耗水量增大。

(4) 中游耗水量与中游径流量之间呈明显的正相关,线性拟合方程为: $y = 0.7208x + 1.6265$ ,相关系数 $r = 0.9107$ , $R^2 = 0.8294$ 。这说明中游段径流量无效损耗严重,其原因主要在于塔里木河两岸河

道疏于管理,加上中游段自然条件原因,造成越是径流量充沛的年份中游径流量损耗越多。

#### 参考文献:

- [1] 梁匡一,刘培君.塔里木河两岸资源与环境遥感研究[M].北京:科学技术文献出版社,1990.
- [2] 王顺德,张洪,魏琳,等.塔里木河流域2003年“四源一干”河川径流及输水运行分析[J].冰川冻土,2005,27(5):715-721.
- [3] 阿迪力·艾则孜,王建文,张建岗,等.塔里木河流域2004年“四源一干”河川径流情势及输水运行分析[J].冰川冻土,2006,28(6):931-940.
- [4] 宋郁东,樊自立,雷志栋,等.中国塔里木河水资源与生态问题研究[M].乌鲁木齐:新疆人民出版社,2000.
- [5] 冯起,陈广庭.塔里木河中游的研究概况[J].干旱区地理,1994,17(4):67-72.
- [6] 奚秀梅,段树国,海米提·依米提.塔里木河中游径流变化分析[J].水土保持研究,2006,13(2):115-117.
- [7] 赵元杰,王让会.塔里木河中游土地沙漠化与环境因子关系研究[J].干旱区地理,1999,22(3):57-63.
- [8] 杨青,何清.塔里木河流域的气候变化、径流量及人类活动间的相互影响[J].应用气象学报,2003,14(3):309-320.
- [9] 蒋艳,夏军.塔里木河流域径流变化特征及其对气候变化的响应[J].资源科学,2007,29(3):45-52.
- [10] 郭雪宝.水文学[M].武汉:同济大学出版社,1990.
- [11] 张超,杨秉廉.计量地理学基础[M].北京:高等教育出版社,1985.
- [12] 王顺德,李红德,许泽锐,等.塔里木河中游滞洪区的形成及其对生态环境的影响[J].冰川冻土,2003,25(6):712-718.
- [13] 陈亚宁,崔旺诚,李卫红,等.塔里木河的水资源利用与生态保护[J].地理学报,2003,58(2):215-222.

(上接第5页)

- [8] Fernandez C, Wu J Q, McCool D K, et al. Estimating water erosion and sediment yield with GIS, RUSLE, and SEDD[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 58(3):128-136.
- [9] Moore I D, Wilson J P. Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 7(5):423-428.
- [10] 潘竟虎,董晓峰.基于GIS与QuickBird影像的小流域土壤侵蚀定量评价[J].生态与农村环境学报, 2006, 22(2):1-5.
- [11] 刘世梁,傅伯杰,马克明,等.岷江上游高原植被类型与景观特征对土壤性质的影响[J].应用生态学报, 2004, 15(1):26-30.
- [12] 张岩,刘宝元,史培军,等.黄土高原土壤侵蚀作物覆盖因子计算[J].生态学报, 2001, 21(7):1050-1055.
- [13] 张岩,袁建平,刘宝元.土壤侵蚀预报模型中的植被覆盖与管理因子研究进展[J].应用生态学报, 2002, 13(8):1033-1036.
- [14] 周斌,杨柏林,洪业汤,等.基于GIS的岩溶地区水土流失遥感定量监测研究[J].矿物学报, 2000, 20(1):13-21.
- [15] 同新奇,胥彦玲,李怀恩,等.黄土高原向阳沟流域水土保持措施效益分析[J].水土保持通报, 2006, 26(5):86-93.