

基于 GIS 的汉江上游文川河流域土壤侵蚀特征研究

王志杰¹, 苏 嫒², 王志泰^{3*}

(1. 贵州大学 生命科学学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 陕西理工学院 文学院, 陕西 汉中 723000; 3. 贵州大学 林学院, 贵州 贵阳 550025)

摘 要:土壤侵蚀是南水北调中线水源地汉江上游地区亟待解决的关键问题。以汉江上游文川河流域为研究对象, 基于遥感和 GIS 技术, 以 Landsat TM 遥感影像和 DEM 为数据源, 分析了文川河流域 2011 年土壤侵蚀及其空间分布特征。结果表明: 文川河流域土壤侵蚀程度为 21.62%, 以轻度和中度侵蚀为主; 低山丘陵区是土壤侵蚀的主要发生区。占流域面积 35% 的低山丘陵区, 其侵蚀面积占侵蚀总面积的 65%; 流域内土壤侵蚀主要发生在坡度较大的区域, 特别是 15° 以上的区域, 且呈现出随坡度增大, 侵蚀越严重的特征; 坡耕地、草地和低山丘陵区的林地土壤侵蚀严重。仅占流域面积 6% 的坡耕地, 其侵蚀面积占侵蚀总面积的 30%。研究结果说明汉江上游低山丘陵区的土壤侵蚀不容忽视, 应作为今后生态环境保护和水土保持的重点区域, 加强坡耕地土壤侵蚀治理, 加快植被恢复与建设, 改善生态环境, 控制水土流失, 以保障南水北调中线调水工程的安全运行和工程沿线区域的生态环境质量。

关键词:土壤侵蚀; 南水北调中线水源地; 汉江上游; 文川河流域; GIS

中图分类号:S157 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2016)01-0199-07

Characteristics of Soil Erosion in Wenchuanhe Watershed of Hanjiang River Based on GIS

WANG Zhi-jie¹, SU Yuan², WANG Zhi-tai^{3*}

(1. College of Life Sciences, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. School of Literature, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723000, China; 3. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: Soil erosion is the key environment problem in the water source region of middle route of South-to-North water transfer project. Taking the Wenchuanhe watershed in the upper reaches of Hanjiang River as the research object, using the Landsat TM images and DEM data, the soil erosion and its spatial characteristics of Wenchuanhe watershed in 2011 were analyzed based on GIS and RS. The results shown that: the soil erosion degree of Wenchuanhe watershed was 21.62%, and the soil erosion intensity was major in mild erosion and moderate erosion. Low mountain and hill regions were the mainly areas of soil erosion, accounted for 35% of the Wenchuanhe watershed, however, the soil erosion area occurred in these regions was 65% of the total erosion area. The soil erosion was mainly distributed in the larger slope gradient regions, especially in the regions which slope gradient was above 15°. Furthermore, the soil erosion was more serious with the increase of slope gradient. The soil erosion in slope farmland, grassland and the woodland in the low mountain and hill regions were more serious than that in other land uses. The area of slope farmland was only accounted for 6% of the total watershed area, however, the soil erosion area occurred on the slope farmland was above 30% of the total erosion area in the watershed. Therefore, it was concluded that the low mountain and hill regions in the Hanjiang River were the key areas for the ecological environment protection and soil and water conservation in future. It should strengthen slope farmland soil erosion manage-

收稿日期: 2015-03-25 修回日期: 2015-07-07

基金项目: 陕西理工学院科研计划资助项目 (SLGKYQD2-32); 贵州省社会发展攻关项目 (黔科合 SZ 字[2009]3026)。

作者简介: 王志杰, 男, 讲师, 博士, 研究方向: 土壤侵蚀、遥感与 GIS 应用。Email: wzhijie@126.com

* 通信作者: 王志泰, 教授, 博士, 研究方向: 退化生态系统恢复。E-mail: wzhitai@163.com

ment, accelerate the vegetation restoration and construction, improve the ecological environment, and control soil erosion, to ensure the safe operation of the middle route of south-to-north water transfer project and the regional ecological environmental quality.

Key words: soil erosion; South-to-North Water Transfer Project; upper reaches of Hanjiang River; Wenchuanhe watershed; GIS

土壤侵蚀是我国乃至全球非常严重的环境问题之一,土壤侵蚀加剧会导致土壤肥力流失、土地退化、耕地面积减少,以及河流、水库泥沙淤积,加重水利设施负担等一系列生态环境和社会经济问题^[1-2]。因此,关于土壤侵蚀和水土保持的研究一直以来都是国内外相关学者广泛关注的重要内容。在我国,众多学者已对黄土高原地区^[3]、东北黑土区^[4-5]、南方红壤区^[6-8]和喀斯特地区^[9]等地的土壤侵蚀科学问题进行了大量的研究,并取得了丰硕的成果。然而,对于我国秦巴山区,特别是陕南汉江上游秦巴山区的土壤侵蚀问题,多年来都没有引起学界广泛关注和深入的研究,已有的研究也大多集中在宏观调查与分析或作为其他研究的一个部分^[10-11],专门研究该区土壤侵蚀问题的相关报道非常少见^[12-13]。众所周知,为缓解京津华北地区水资源严重短缺的问题,我国实施了南水北调中线工程。而发源于陕南秦巴山地的汉江流域正是南水北调中线工程的主要水源地,其不但承担着保证足够水源和合格水质的重要作用,更承担着保持水土、减少河道泥沙淤积的作用,其生态功能的优劣,直接关系到中线工程的水质和安全运行。然而,长期以来,陕西境内的汉江流域经济落后,水土保持基础设施薄弱,生态环境恶化问题相当突出,并且由于多次大规模的毁林和过度采伐,原始森林几乎破坏殆尽,目前,山区以天然次生林为主,生态效益变差,保障区域生态安全的功能明显下降,不合理的人类活动引起的土壤侵蚀严重,自然灾害频繁^[14-15]。据陕西省第3次土壤侵蚀遥感调查,陕西省汉江流域现有水土流失面积3.4万km²,占土地总面积的54.1%,平均年土壤侵蚀量1.2亿t,并且仅占长江流域面积4%的陕西省汉江流域,其输沙量却占到长江流域的12%,是长江流域土壤侵蚀最严重的地区^[16]。因此,土壤侵蚀已成为影响该区生态安全的关键因子和亟待解决的关键问题,而开展土壤侵蚀特征与空间分布的研究,无疑对于明确该区土壤侵蚀的现状今后的重点治理区域,保护该区生态环境和水质具有重要意义。

基于此,本研究选取能较好反映秦巴山地自然环境特征的汉江上游一级支流文川河流域为研究对象,采用2011年TM遥感影像,结合研究区DEM数据,依据水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》,

基于GIS的空间分析技术,分析文川河流域土壤侵蚀特征及其在海拔、坡度、土地利用等不同空间的分布特征,以期探明陕南秦巴山地土壤侵蚀的现状特征和亟需进行土壤侵蚀治理的重点区域,为进一步深入研究该区土壤侵蚀机理奠定基础,同时,为南水北调中线水源地下一步土壤侵蚀治理和政策制定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

文川河流域(107°1′25″—107°14′52″E、33°7′40″—33°21′47″N),地处陕西省汉中市中部,位于汉江上游左岸,属汉江一级支流,源出秦岭南坡鹅风垭,经毕家河,至千山水库处出谷,南流经老庄、文川、崔家山、熊家山、柳林、沙河营,于司家铺村东南入汉江。流域面积约191.18 km²,海拔范围469~2 021 m,平均海拔921 m,土壤类型以黄棕壤、黄褐土和水稻土为主,气候类型属内陆东亚季风气候,由于盆地地形影响,自南部的汉中盆地到北部的秦岭山地,气候垂直差异明显。随着海拔高度的不同,分为3种不同的气候类型:海拔800 m以下的北亚热带气候;海拔800~1 250 m的暖温带湿润气候;海拔1 250 m以上的中温带湿润气候。流域内地貌类型多样,由南到北依次为亚高山、中山、低山、丘陵和盆地,基本代表了汉江上游秦巴山地的主要地貌类型。

1.2 数据来源与特征

1.2.1 遥感影像数据 由国际空间数据共享平台下载,采用2011年5月23日Landsat TM5遥感影像,空间分辨率为30 m×30 m,坐标系统为WGS_1984_UTM_Zone_48N,并对影像依据文川河流域地形图和矢量边界进行配准、校正和裁剪等预处理。

1.2.2 DEM数据 采用地理空间数据云网站提供的研究区DEM数据,空间分辨率为30 m×30 m,坐标系统为WGS_1984_UTM_Zone_48N,对获取到的DEM数据在ArcGIS水分分析模块下进行填洼处理,并对研究区无洼地DEM根据文川河流域边界进行裁剪,得到文川河流域无洼地DEM数据(图1a)。

1.3 数据处理方法

1.3.1 土地利用类型提取 运用研究区TM遥感

影像,依据土地利用现状分类标准(GB/T 21010—2007),结合文川河流域具体情况及研究目标,将研究区土地利用划分为林地、草地、水域、平耕地、坡耕地和建筑用地等 6 类。首先通过野外调查建立解译标志,进而在 ENVI 5.1 软件平台上采用支持向量机法(support vector machine),完成对遥感数据的

解译,进而获取文川河流域土地利用类型图(图 1c)。土地利用分类结果参照 Google Earth 高分辨率遥感影像和 GPS 野外调查样点进行精度验证,监督分类结果精度为 94.82%,Kappa 系数值为 0.9319(表 1),遥感图像数字处理精度可以满足流域尺度土壤侵蚀强度研究的要求。

表 1 土地利用监督分类结果精度评价

Table 1 Assessment of the supervise classification results of land use

土地利用类型	水体	建筑用地	平耕地	林地	草地	坡耕地	合计	用户精度/%
水体	26	0	0	0	0	0	26	100.00
建筑用地	0	32	1	0	0	0	33	96.97
平耕地	4	2	37	0	0	0	43	86.05
林地	0	0	0	100	3	1	104	96.15
草地	0	0	0	0	24	0	24	100.00
坡耕地	2	0	0	0	0	19	21	90.48
合计	32	34	38	100	27	20	251	
生产者精度/%	81.25	94.12	97.37	100.00	88.89	95.00		
总精度	94.82%		kappa 系数		0.9319			

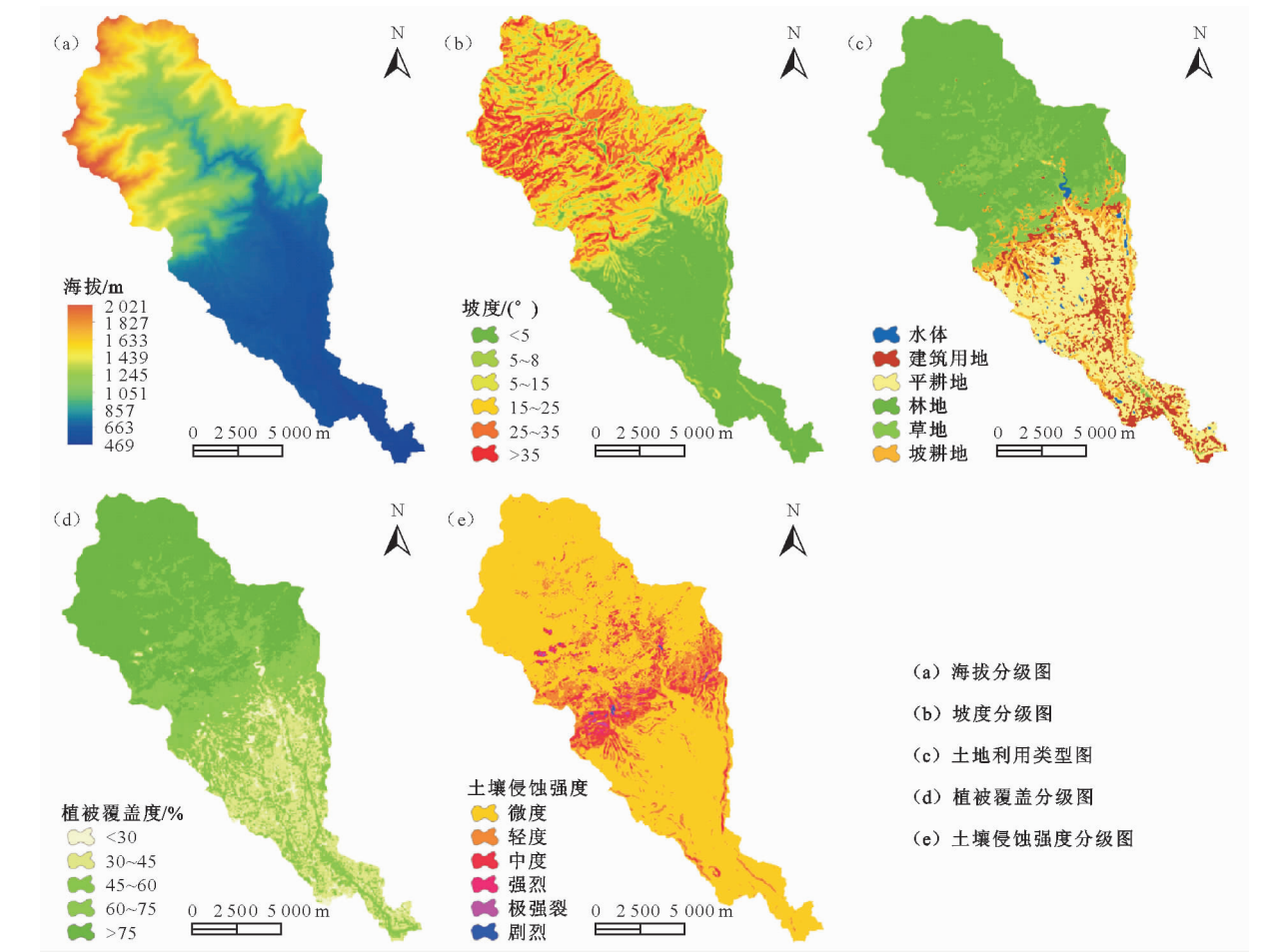


图 1 文川河流域地形、土地利用、植被覆盖度和土壤侵蚀强度分级

Fig. 1 The topography, land uses, vegetation coverages and soil erosion intensity of the Wenchuanhe watershed

1.3.2 地形地貌特征分析 基于 ArcGIS 10.2 软件平台,运用研究区 DEM 数据,计算文川河流域坡度值,并依据水利部土壤侵蚀分类分级标准(SL196—2007)中坡度分级标准,按 $\leq 5^\circ$ 、 $5^\circ\sim 8^\circ$ 、 $8^\circ\sim 15^\circ$ 、

$15^\circ\sim 25^\circ$ 、 $25^\circ\sim 35^\circ$ 和 $\geq 35^\circ$ 等 6 个等级将坡度值进行分级,得到文川河流域坡度分级图(图 1b)。

地貌特征的提取依照《汉中市志》中对于地貌类型的划分依据,按海拔 $\leq 600\text{ m}$ 、 $600\sim 900\text{ m}$ 、 $900\sim$

1 200 m、1 200~1 800 m 和≥1 800 m 分别为盆地(坝地)、丘陵、低山、中山和亚高山的分级标准,基于 ArcGIS 10.2 软件平台,对海拔进行分级。

1.3.3 植被覆盖度提取 植被覆盖度的提取利用研究区 TM 遥感影像,采用基于 NDVI 的像元二分模型方法进行,计算公式如下:

$$NDVI=\frac{\rho_{NIR}-\rho_R}{\rho_{NIR}+\rho_R}$$
 (1)

$$f_g=\frac{NDVI-NDVI_{soil}}{NDVI_{veg}-NDVI_{soil}}$$
 (2)

式中:ρ_{NIR} 为近红外波段的反射率,ρ_R 为红波段的反射率,NDVI 为归一化植被指数,f_g 为植被盖度,NDVI_{soil} 为无植被覆盖区域的 NDVI 值,即无植被像元的 NDVI 值;NDVI_{veg} 代表被植被完全覆盖的像元的 NDVI 值,即纯植被像元的 NDVI 值。其中 NDVI_{soil} 和 NDVI_{veg} 值的提取方法为选取只有 1 种土地利用方式和 1 种土壤类型的 NDVI 图像内累计频率为 5% 的 NDVI 指数作为 NDVI_{soil} 值,选取累计频率为 95% 的 NDVI 指数作为 NDVI_{veg} 值^[17]。

植被覆盖度的提取在 ENVI 5.1 软件平台上运用 Band math 功能实现,并对计算得到的植被覆盖度数据,依照水利部《土壤侵蚀分类分级标准》中关于植被覆盖度的分级标准,划分为≤30%、30%~45%、45%~60%、60%~75% 和≥75% 等 5 个等级,进而在 ArcGIS 10.2 软件平台上得到研究区植被覆盖度分级图(图 1d)。

1.3.4 土壤侵蚀强度提取 依照水利部土壤侵蚀分类分级标准(SL196—2007),将研究区土壤侵蚀强度分类微度、轻度、中度、强烈、极强烈和剧烈等 6 大类。综合研究区坡度分级图、植被覆盖度分级图和土地利用类型图,运用 GIS 叠加分析技术,在 ArcGIS 10.2 软件平台上,叠加生成文川河流域土壤侵蚀强度图(图 1e)。

由于各类数据来源不同,投影方式、比例尺等也不一致,在数据处理前进行标准化处理,对各数据进行几何配准和数据重采样,将空间数据统一到 Transverse_Mercator 横轴墨卡托投影,并采用统一的中央经线(105°),将所有数据统一栅格化成 30 m×30 m 的 Grid 数据。

2 结果与分析

2.1 文川河流域土壤侵蚀总体特征

文川河流域土壤侵蚀强度特征统计分析表明(表 2):文川河流域总面积 19 091.16 hm²,其中侵蚀面积(轻度及以上侵蚀)为 4 126.41 hm²,占流域

总面积的 21.62%,即水土流失程度为 21.62%。整体而言,汶川河流域土壤侵蚀并不明显,以微度侵蚀为主,占流域总面积的 78.39%;对于发生水土流失的区域而言(轻度及以上侵蚀区域)^[13],土壤侵蚀强度以轻度和中度侵蚀为主,二者分别占水土流失面积的 65.81% 和 28.94%;其次为强烈和极强烈侵蚀,分别占水土流失面积的 3.72% 和 1.16%;剧烈侵蚀分布面积最小,仅占水土流失面积的 0.36%。

结合流域土地利用图、植被覆盖度图和坡度图与土壤侵蚀强度分级图,各土壤侵蚀强度等级的空间分布总体上表现为(图 1):流域北部虽然坡度较大,但以植被覆盖度高的林地为主,无明显土壤侵蚀发生;流域南部为汉中盆地,平耕地和建筑及居民用地大量分布,由于坡度平缓,因此也无明显土壤侵蚀发生;各级土壤侵蚀集中分布在流域中部,该区因处于低山丘陵区,人类活动干扰剧烈,坡耕地分布广,坡度大,林地遭受不同程度破坏,因此土壤侵蚀严重,以中度及以上侵蚀为主,特别是极强烈和剧烈侵蚀基本全部分布在该区。这说明虽然文川河流域整体上无明显土壤侵蚀,强烈及以上侵蚀面积比重相对较小,但其分布相当集中,均分布在流域中部的低山丘陵区,尤以该区的坡耕地和被破坏的林地最为严重,因此,应对该区土壤侵蚀予以重点关注。

表 2 文川河流域土壤侵蚀强度特征

Table 2 Soil erosion intensity of Wenchuanhe watershed

侵蚀强度	面积 /hm ²	占流域总面积 比例/%	占水土流失程度 面积比例/%
微度	14 964.75	78.39	0
轻度	2 715.75	14.23	65.81
中度	1 194.03	6.25	28.94
强烈	153.63	0.80	3.72
极强烈	47.97	0.25	1.16
剧烈	15.03	0.08	0.36
合计	19 091.16	100.00	100.00

2.2 文川河流域土壤侵蚀分布的海拔特征

叠加流域海拔分级图和土壤侵蚀强度分级图,统计分析可知(表 3):文川河流域海拔分布主要以<600 m 的盆地区和 1 200~1 800 m 的中山区为主,二者占流域总面积的比例分别为 36.66% 和 27.01%;600~1 200 m 之间的低山丘陵区占流域总面积的 35.25%;>1 800 m 的亚高山分布面积最小,仅占流域总面积的 1.08%。流域内发生土壤侵蚀的海拔段主要分布在 600~1 200 m 之间低山丘陵区,发生侵蚀的面积为 2 685.78 hm²,占流域内低山丘陵区总面积的 79.81%,占全流域侵蚀总面积的 65.09%;其次为<600 m 的盆地区和 1 200~1 800 m 的中山区,发生侵蚀的面积分别占侵蚀总面积的 24.04% 和 10.80%;而海拔>1 800 m 的亚高

山区,发生侵蚀的面积仅占侵蚀总面积的 0.07%。从各侵蚀强度等级在不同海拔段的分布比例而言,微度侵蚀主要分布在<600 m 的盆地区和 1 200~1 800 m 的中山区,二者占微度侵蚀面积的 71.61%;轻度侵蚀主要分布在<900 m 的丘陵盆地

区,约占轻度侵蚀面积的 67.63%,其次为低山区,约占 21.68%;而中度及以上侵蚀主要集中分布在 600~1 200 m 的低山丘陵区,分别占中度及以上各侵蚀强度面积的 71.59%、86.23%、81.43%和 86.83%。

表 3 文川河流域土壤侵蚀分布的海拔特征

Table 3 Soil erosion proportions for different elevation grades in Wenchuanhe watershed

海拔 /m	面积 /hm ²	微度		轻度		中度		强烈		极强烈		剧烈	
		面积 /hm ²	比例 /%	面积 /hm ²	比例 /%	面积 /hm ²	比例 /%	面积 /hm ²	比例 /%	面积 /hm ²	比例 /%	面积 /hm ²	比例 /%
<600	6 999.03	6 007.14	40.14	778.86	28.68	209.07	17.51	3.51	2.28	0.45	0.94	0.00	0.00
600~900	2 885.40	1 068.93	7.14	1 057.68	38.95	610.65	51.14	109.80	71.47	28.35	59.10	9.99	66.47
900~1 200	3 845.16	2 975.85	19.89	588.69	21.68	244.17	20.45	22.68	14.76	10.71	22.33	3.06	20.36
1 200~1 800	5 155.92	4 710.15	31.47	289.62	10.66	128.52	10.76	17.19	11.19	8.46	17.64	1.98	13.17
>1 800	205.65	202.68	1.35	0.90	0.03	1.62	0.14	0.45	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00
合计	19 091.16	14 964.75	100.00	2 715.75	100.00	1 194.03	100.00	153.63	100.00	47.97	100.00	15.03	100.00

2.3 文川河流域土壤侵蚀分布的坡度特征

地形决定着地面物质与能量的形成和再分配,是影响水土流失的重要因素之一。而坡度是地形因子中对坡面土壤侵蚀影响最大的因素^[18],其通过对地表径流、径流能量、土壤渗透能力及细沟发展的影响而对坡面土壤侵蚀产生影响^[19]。叠加分析流域土壤侵蚀和坡度图二者的对应关系,分析不同坡度带的土壤侵蚀强度特征可以发现:文川河流域土壤侵蚀主要发生在 8°以上的区域,8°以上区域侵蚀面积约 3 075.30 hm²,占轻度及以上侵蚀面积的 74.53%,尤其是 15°以上的区域,侵蚀面积约 1 983.69 hm²,占到轻度及以上侵蚀面积的近 50%。同时,15°~25°和 25°~35°坡度带土壤侵蚀面积在 15°以上的区域内最为广泛,二者占>15°区

域轻度及以上侵蚀面积的 94.3%,占全流域侵蚀面积的 45.34%,是防治土壤侵蚀的重点区域。

从不同土壤侵蚀强度等级在各坡度带的分布状况来看(表 4):小于容许土壤侵蚀量(500 t·km⁻²·a⁻¹)的微度侵蚀主要分布在坡度<5°的盆地和河谷地带,此外,在 15°~25°的坡度带上也分布较为广泛,二者之和占微度侵蚀面积的 66.77%;轻度侵蚀全部分布在 5°~25°之间,尤以 5°~8°和 15°~25°坡度带分布最广,二者之和占轻度侵蚀面积的 75.25%;中度侵蚀主要集中分布在 8°~35°之间,以 8°~15°和 25°~35°坡度带分布最广,二者之和占中度侵蚀面积的 74.88%;强烈、极强烈和剧烈侵蚀分别集中分布在 15°~25°,25°~35°和>35°的坡度带上,分别占各侵蚀强度等级的 77.97%、88.37%和 100%。

表 4 文川河流域土壤侵蚀分布的坡度特征

Table 4 Soil erosion proportions for different slope grades in Wenchuanhe watershed

坡度 /(°)	面积 /hm ²	微度		轻度		中度		强烈		极强烈		剧烈	
		面积 /hm ²	比例 /%	面积 /hm ²	比例 /%	面积 /hm ²	比例 /%	面积 /hm ²	比例 /%	面积 /hm ²	比例 /%	面积 /hm ²	比例 /%
<5	6 368.94	6 368.94	42.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5~8	1 279.35	228.24	1.53	1 025.91	37.78	25.20	2.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8~15	2 476.62	1 385.01	9.26	672.21	24.75	419.40	35.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15~25	4 964.49	3 623.58	24.21	1 017.63	37.47	203.49	17.04	119.79	77.97	0.00	0.00	0.00	0.00
25~35	3 122.10	2 592.27	17.32	0.00	0.00	474.75	39.76	12.69	8.26	42.39	88.37	0.00	0.00
>35	879.66	766.71	5.12	0.00	0.00	71.19	5.96	21.15	13.77	5.58	11.63	15.03	100.00
合计	19 091.16	14 964.75	100.00	2 715.75	100.00	1 194.03	100.00	153.63	100.00	47.97	100.00	15.03	100.00

2.4 文川河流域土壤侵蚀分布的土地利用特征

文川河流域各土地利用类型的侵蚀特征如表 5。从各土地利用类型的分布来看,文川河流域土地利用类型以位于秦岭南坡的林地和位于汉中盆地的平耕地 2 类为主,二者分别占流域总面积的 50.95%和 23.37%;其次为零散分布的建筑及居民用地和

林地周边的草地,分别占流域总面积的 9.57%和 8.88%;另外,流域中部的低山丘陵区分布着约 1 230.93 hm²的坡耕地,约占流域总面积的 6.45%。

各土地利用的土壤侵蚀特征表现为:平耕地由于坡度平缓,全部为微度侵蚀;水域、建筑和林地 3 类也主要以微度侵蚀为主,即无明显侵蚀;而草地

上,除 32.44% 的面积为微度侵蚀外,还分别有 47.57% 和 19.49% 的草地分属轻度侵蚀和中度侵蚀,但整体上以轻度侵蚀为主;坡耕地则以轻度和中度侵蚀为主,分别占坡耕地面积的 59.53% 和 27.54%,并且发生在坡耕地上的侵蚀面积占侵蚀总面积(轻度及以上侵蚀面积)的 29.83%。此外,发生在林地和草地上的侵蚀面积也分别占侵蚀总面积的 33.78% 和 27.76%,即文川河流域发生土壤侵蚀的区域主要分布在林地、草地和坡耕地上。

各侵蚀强度等级在不同土地利用类型上的分布特征表现为(表 5):轻度和中度侵蚀主要分布在林

地、草地和坡耕地 3 类上,约占各侵蚀强度等级面积的 90% 以上;强烈及以上侵蚀则主要集中分布在坡耕地和林地 2 类上,二者约占强烈以上侵蚀等级面积的 85%~98%,其中尤以坡耕地更甚,分别占强烈及以上侵蚀的 71.12%、75.05% 和 92.81%。

总体上,文川河流域由于特殊的自然地理位置,大量分布的平耕地和林地上无明显土壤侵蚀,但集中在低山丘陵区的坡耕地和低覆盖度的林地与草地依然存在着严重的土壤侵蚀,特别是坡耕地,虽分布面积相对较少,但对土壤侵蚀的贡献量大。

表 5 文川河流域土壤侵蚀分布的土地利用特征
Table 5 Soil erosion proportions for different land uses in Wenchuanhe watershed

土地利用	面积 /hm ²	微度		轻度		中度		强烈		极强强烈		剧烈	
		面积 /hm ²	比例 /%	面积 /hm ²	比例 /%	面积 /hm ²	比例 /%	面积 /hm ²	比例 /%	面积 /hm ²	比例 /%	面积 /hm ²	比例 /%
水域	148.95	130.05	0.87	5.76	0.21	12.87	1.08	0.27	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00
建筑	1 826.73	1 489.77	9.96	194.85	7.17	125.82	10.54	10.71	6.97	5.40	11.26	0.18	1.20
平耕地	4 461.30	4 461.30	29.81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
林地	9 727.74	8 333.64	55.69	975.87	35.93	386.01	32.33	24.75	16.11	6.57	13.70	0.90	5.99
草地	1 695.51	549.99	3.68	806.49	29.70	330.39	27.67	8.64	5.62	0.00	0.00	0.00	0.00
坡耕地	1 230.93	0.00	0.00	732.78	26.98	338.94	28.39	109.26	71.12	36.00	75.05	13.95	92.81
合计	19 091.16	14 964.75	100.00	2 715.75	100.00	1 194.03	100.00	153.63	100.00	47.97	100.00	15.03	100.00

3 结论与讨论

运用 2011 年汉江上游文川河流域遥感影像,结合研究区数字高程模型(DEM),依据水利部《土壤侵蚀分类分级标准》,基于 GIS 的空间分析技术,研究了文川河流域土壤侵蚀特征及其空间分布得出:文川河流域土壤侵蚀整体而言不明显,土壤侵蚀程度为 21.62%,流域南部的亚高山林区和北部的盆地地区均以微度侵蚀为主,土壤侵蚀主要集中发生在流域中部的低山丘陵区,发生土壤侵蚀的区域也以轻度和中度侵蚀为主。

不同海拔梯度上,土壤侵蚀主要发生在 600~1 200 m 的低山丘陵区。本研究结果表明,面积占全流域 35% 的低山丘陵区,发生土壤侵蚀的面积占全流域侵蚀总面积的 65%,且流域内 70% 以上的中度及以上侵蚀发生在低山丘陵区。这与王星^[12-13]等和王晓峰^[20]等的研究结果基本一致。这是因为位于秦巴山地的汉江上游低山丘陵区是人类活动频繁的区域,人口密度较大,长期以来乱垦滥伐现象严重,森林基本破坏殆尽,植被稀疏,坡耕地广布,加之地形起伏度较大,降雨多且集中,土壤侵蚀状况异常严重^[20]。已有研究表明,汉江上游低山丘陵区年侵蚀模数可达 3 000~4 000 t·km⁻²·a⁻¹,局部地带甚至可达 10 000 t·km⁻²·a⁻¹^[21]。

不同坡度梯度上,土壤侵蚀主要发生在坡度较大的区域,特别是 15° 以上的区域,中度侵蚀主要发生在 8°~15° 和 25°~35° 2 个坡度带,而强烈、极强强烈和剧烈侵蚀分别主要发生在 15°~25°、25°~35° 和 >35° 的坡地,呈现出随坡度增大侵蚀越严重的特征,这也与我国其他地区的研究结果一致^[20]。因此,坡度>15° 的区域是流域内防治土壤侵蚀的重点。

不同土地利用类型上,平耕地和林地上无明显土壤侵蚀;轻度及以上的侵蚀主要发生在坡耕地、草地和林地,特别是坡耕地上。如前所述,低山丘陵区土壤侵蚀严重,叠加分析土地利用类型图与海拔分级图,可以发现流域内坡耕地也主要集中分布在低山丘陵区,而该区山高沟深,地形破碎,加之暴雨多等诸多因素影响,广布的坡耕地成为土壤侵蚀产沙的主要来源地,前人研究已证实陕南低山丘陵区大量分布的坡耕地土壤侵蚀模数一般在 5 000~8 000 t·km⁻²·a⁻¹,当坡度至 30° 时,侵蚀模数甚至可达 9 400~28 000 t·km⁻²·a⁻¹^[23],当坡度>35° 的坡耕地土壤侵蚀模数可达 10 000 t·km⁻²·a⁻¹ 以上,甚至可达 49 000 t·km⁻²·a⁻¹^[21]。本研究也发现,仅占流域总面积 6% 的坡耕地,发生侵蚀的面积占侵蚀总面积的 30%,且 70% 以上的强烈及以上侵蚀发生在坡耕地上。此外,流域北部的秦岭南坡高中山区大量分布林地,因自然条件优越,林木覆盖度

高,人类活动相对较少^[22],未发生明显侵蚀(以微度侵蚀为主),但在低山丘陵区,由于多年来人类活动的干扰和破坏,原来的林地被砍伐形成坡耕地或草地,或者林地覆盖度降低,导致这部分林地和草地发生土壤侵蚀,并对整个流域的土壤侵蚀具有较大贡献。

综上所述,文川河流域整体上无明显土壤侵蚀,强烈及以上侵蚀面积比重相对较小,但分布集中,均分布在流域中部的低山丘陵区,尤以该区的坡耕地和被破坏的林地最为严重。因此,作为南水北调中线水源地的腹地,汉江上游的土壤侵蚀不容忽视,特别是低山丘陵区,应作为今后生态环境保护和水土保持的重点区域,加强坡耕地土壤侵蚀治理,加快植被恢复与建设,改善生态环境,控制水土流失,以保障南水北调中线调水工程的安全运行和工程沿线区域的生态环境质量。

参考文献:

[1] 李婷,刘康,胡胜,等. 基于 InVEST 模型的秦岭山地土壤流失及土壤保持生态效益评价[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(9): 1242-1250.

[2] PIMENTEL D, KOUNANG N. Ecology of soil erosion in eco-systems [J]. *Ecosystems*, 1998, 1(5): 416-426.

[3] CHEN L, WEI W, FU B, *et al.* Soil and water conservation on the Loess Plateau in China: review and perspective [J]. *Progress in Physical Geography*, 2007, 31(4): 389-403.

[4] DUAN X, XIE Y, OU T, *et al.* Effects of soil erosion on long-term soil productivity in the black soil region of northeastern China [J]. *Catena*, 2011, 87(2): 268-275.

[5] 刘艳锋,陈学华,贺秀斌,等. 岷江上游土壤侵蚀与土地利用的耦合关系研究[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(5): 161-165, 185.

LIU Y F, CHEN X H, HE X B, *et al.* Studies on the coupling relationship between soil erosion and land use in the upper reaches of Minjiang River [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2009, 24(5): 161-165, 185. (in Chinese)

[6] LI X H, YANG J, ZHAO C Y, *et al.* Runoff and sediment from orchard terraces in southeastern China [J]. *Land Degradation & Development*, 2014, 25(2): 184-192.

[7] 陈思旭,杨小唤,肖林林,等. 基于 RUSLE 模型的南方丘陵区土壤侵蚀研究[J]. 资源科学, 2014, 36(6): 1288-1297.

[8] 柳艺博,常庆瑞. RS 与 GIS 在东北黑土区土壤侵蚀研究中的应用[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(5): 166-170.

LIU Y B, CHANG Q R. Application of RS and GIS on soil erosion research in black soil region of northeast China [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2009, 24(5): 166-170. (in Chinese)

[9] BAI X Y, WANG S J, XIONG K N. Assessing spatial-temporal evolution processes of karst rocky desertification land: indications for restoration strategies[J]. *Land Degradation & Development*, 2013, 24(1), 47-56.

[10] 刘远书,刘宇,曾源,等. 南水北调中线水源区土壤侵蚀变化趋势分析[J]. 北京大学学报:自然科学版, 2015, 51(1): 171-179.

LIU Y S, LIU Y, ZENG Y, *et al.* Soil erosion change in the water source region of the middle-route of the South-to-North Water transfer project (SNWTP) [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2015, 51(1): 171-179. (in Chinese)

[11] 朱明勇,谭淑端,张全发. 南水北调中线水源地土壤侵蚀经济损失估算[J]. 水土保持通报, 2014, 34(5): 190-195.

ZHU M Y, TAN S R, ZHANG Q F. Economic loss estimation of soil erosion in water source area of Middle of South-to-North Water transfer project [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(5): 190-195. (in Chinese)

[12] 王星,李占斌,李鹏,等. 陕西省丹汉江流域典型县土壤侵蚀的地貌分布特征[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(1): 23-29.

WANG X, LI Z B, LI P, *et al.* Landform distribution features of soil erosion of typical counties in Dan-Han River watershed of Shaanxi Province, northwestern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2013, 35(1): 23-29. (in Chinese)

[13] 王星,李占斌,李鹏,等. 宁强县土壤侵蚀的地貌分布特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 132-137.

WANG X, LI Z B, LI P, *et al.* Landform distribution features of soil erosion in Ningqiang County [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(11): 132-137. (in Chinese)

[14] 赵佐平,闫莎,同延安,等. 汉江流域上游生态环境现状及治理措施[J]. 水土保持通报, 2012, 32(5): 32-36, 60.

ZHAO Z P, YAN S, TONG Y A, *et al.* Eco-Environmental status assessment and countermeasures in the Upper Hanjiang River basin [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(5): 32-36, 60. (in Chinese)

[15] 马乃喜,周文涛,孙纲. 陕西汉江流域的生态环境问题及其对丹江口水库的影响[J]. 陕西环境, 2003, 10(6): 1-3.

[16] 高全成. 汉江流域生态治理存在的问题及对策[J]. 陕西农业科学, 2012, 58(3): 192-195.

[17] 胡玉福,蒋双龙,刘宇,等. 基于 RS 的安宁河上游植被覆盖时空变化研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 205-215.

[18] 赖奕卡. 坡面土壤侵蚀影响因素研究进展[J]. 亚热带水土保持, 2008, 20(1): 12-16.

[19] 王晓燕. 燕沟流域侵蚀强度演变特征研究[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2003.

[20] 王晓峰,常俊杰,余正军,等. 基于 RUSLE 的土壤侵蚀量研究——以南水北调中线陕西水源区为例[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2010, 40(3): 545-549.

WANG X F, CHANG J J, YU Z J, *et al.* Research of water district of soil erosion based on RUSLE: take the South-to-North Diversion Middle route project in Shaanxi for example [J]. *Journal of Northwest University: Natural Science Edition*, 2010, 40(3): 545-549. (in Chinese)

[21] 惠振德,李晓玲. 陕西汉江流域水土流失及其治理对策研究[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 1997, 25(2): 81-84, 103.

[22] CHEN X, CAI Q, ZHANG L, *et al.* Research on critical slope of soil erosion in a Hilly Loess region on the loess plateau [J]. *Journal of Mountain Science*, 2010, 28(4): 415-421.

[23] 贺素娣. 汉江流域水土流失特点及防治对策[J]. 长江流域资源与环境, 1997, 6(3): 80-85.