

基于 SPOT5 的密云水库上游土壤侵蚀风险空间格局分析

张喜旺^{1,2}, 吴炳方²

(1. 河南大学 环境与规划学院, 河南 开封 475004; 2. 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101)

摘 要: 基于 SPOT5-10 m 多光谱数据提取研究区的植被覆盖与土地利用/土地覆盖, 利用 1:50 000 DEM 数据提取研究区坡度信息, 采用中华人民共和国水利部部颁标准评价研究区的水蚀风险等级, 并与第二次全国土壤侵蚀遥感 (Landsat TM) 调查数据进行对比分析。结果表明: (1) 从整体上看, 区域的侵蚀状况有所好转, 侵蚀面积减少了 84.10 km², 但极强度侵蚀面积增加了 6.68 km², 剧烈侵蚀增加了 0.03 km²。(2) 从空间分布看, 大于 1 700 m 的高程带侵蚀面积最小, 500~800 m 高程带的侵蚀面积最大; 小于 5° 和大于 35° 的坡度带侵蚀面积最小, 而 15°~25° 坡度带侵蚀面积最大。研究结果可以作为基础数据, 为管理部门进行治理决策依据。

关键词: 土壤侵蚀风险评估; GIS; RS; 密云水库

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)05-0017-04

Assessment of Water Erosion Based on SPOT5 in the Upstream Area of Miyun Reservoir

ZHANG Xi-wang^{1,2}, WU Bing-fang²

(1. College of Environment & Planning of He'nan University, Kaifeng, He'nan 475004, China; 2. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The paper extracted vegetation fraction and land use information from SPOT5-10 m multi-spectral images, and extracted slope information from DEM obtained from 1:50 000 topographic map, and assessed the soil erosion risk according to the national professional standard of SL190-96 Standards for classification and Gradation of Soil Erosion. Subsequently we compared to the result of the second remote sensing investigation of soil erosion in China using Landsat TM in 2000. The results show that: (1) the overall erosion status is better than that of 2000, but more severe and extremely severe erosion appear in the study area. (2) From the elevation and slope zone, the elevation zone above 1 700 m has lowest erosion, and the zone between 500~800 m has the highest erosion; the slope zones less than 5° and greater than 35° have the highest erosion and the slope zone between 15° and 25° has the lowest erosion. These results will be used to assist the management department decision-making.

Key words: soil erosion assessment; GIS; RS; Miyun reservoir

土壤侵蚀是发生在特定时空条件下的土体迁移过程, 是世界范围内最重要的土地退化问题^[1]。它通过影响农作物产量、土壤结构以及水质^[2-3]而剧烈地影响着环境, 并直接影响着人们的生活; 通过对江河、库塘、湖泊的淤积影响着人类的安全^[4-5]。此外, 侵蚀导致土壤以 CO₂、CH₄ 的形式向大气中散射有机碳, 从而影响全球变暖^[6], 而全球变暖又反过来增强土壤侵蚀率^[7]。而对侵蚀问题的适当评估非常依赖于空间、经济、环境和文化之间的相互联系^[8]。

随着人们对土壤侵蚀机理认识的不断深入, 研究

模型从经验统计模型发展到物理过程模型; 随着科学技术的不断发展, 各种新的技术也不断得到应用, 如元素示踪^[9-11]、多时相 DEM^[12-13]、神经网络^[14]等。虽然定量方法可以给出具体的侵蚀量, 但其主要困难在于结果的验证与标定, 而且精确的测量通常非常昂贵、耗时, 且标准的设备也很难获取^[15], 所以定性的方法仍然被广泛使用。定性方法中指标综合方法是综合多个影响因子, 按照特定的规则评估土壤侵蚀风险, 因其受人为因素干扰较少, 并且与 GIS 技术结合可以快速高效地进行土壤侵蚀监测。侵蚀影响因子

收稿日期: 2010-05-02

资助项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-YW-08-03); 水利部官厅密云水库上游水土保持遥感监测二期工程(HW-STBC2004-03)

作者简介: 张喜旺(1979-), 男, 河南辉县人, 博士, 副教授, 主要从事遥感与地理信息系统在水土保持方面的研究。E-mail: zxiwang@163.com

中,植被覆盖、坡度、土壤和土地利用/土地覆盖等都是非常重要的土壤侵蚀影像因子,常用于土壤侵蚀评价^[16-18]。例如“土壤侵蚀分类分级标准 SL190-96”是我国水土保持部门最常用的一种评价土壤侵蚀风险的方法,采用植被覆盖、坡度与植被覆盖三个因子的综合判读进行侵蚀风险评价。1999-2001 年,在此方法的基础上利用 TM 影像进行第二次全国土壤侵蚀遥感调查^[19]。

遥感具有大面积重复观测能力^[20-21],可以深刻地了解地表的特征及其变化^[22],已经成为区域土壤侵蚀研究的重要数据源。本文利用 2004 年 SPOT5-10 m 多光谱数据,按照指标综合方法 SL190-96 评价研究区域 2004 年土壤侵蚀风险现状,并与第二次全国土壤侵蚀遥感调查数据进行对比分析,研究密云水库上游土壤侵蚀的变化,同时分析不同高程带与坡度带的侵蚀风险空间格局情况,为管理部门进行土壤侵蚀治理提供基础数据。

1 方法

1.1 研究区概况

研究区域位于东经 115°24′-117°35′,北纬 40°19′-41°38′,涉及密云、怀柔、延庆、兴隆、滦平、赤城、丰宁、沽源和崇礼等 9 个县(部分)。研究区面积约为 15 388 km²,位于北京市北大约 80 km。

地貌以丘陵为主,地势西北高,东南低,东南部多低山丘陵。潮、白两河顺势而下,河网呈树枝状。该区位于欧亚大陆东部中纬度地区,属大陆性季风气候,四季分明。冬季受蒙古高压控制,寒冷干燥,夏季受海洋气团影响,盛行东南季风,年内气温变化显著,流域降水量主要集中在 6-9 月。区内分布最广的为褐土,遍布 150~1 000 m 的低山丘陵,面积占流域的 60.3%。棕壤分布于海拔 600 m(阴坡)至 1 000 m(阳坡)以上中低山,占总面积的 34.4%。草甸土分

布在潮、白两河河谷,占总面积的 1.9%,多已开垦为耕作土壤。栗钙土分布在坝根一带,占总面积的 2.2%,是重要的牧业用地。

1.2 数据

本文影像为 10 景 SPOT5(2004 年)多光谱卫星数据,完全覆盖研究区,空间分辨率 10 m。辅助数据有研究区界线、1:5 万 DEM 数据、2000 年土壤侵蚀图(第二次全国土壤侵蚀遥感调查数据),用以提高数据处理精度,改善数据质量。2000 年土壤侵蚀是全国土壤侵蚀调查数据,在国内普遍得到承认,可以作为基准数据;而选择 2004 年是因为海委立项利用该年的遥感数据对前期治理成果进行监测,因此也是比较典型的时间,所以我们选择这两年数据进行对比分析。

为了建立解译标志,分两组对研究区域进行为期 15 天的调查,调查内容主要有土地利用/土地覆盖类型、植被覆盖状况、地貌特征、地形信息、水土流失状况等,建立地面信息与影像光谱信息、纹理信息以及辅助数据之间的关联,为信息提取与结果验证提供参考。

1.3 土壤侵蚀评价

土壤侵蚀是在降雨和径流等外营力作用下的水土流失,强降雨与有限植被覆盖的结合导致侵蚀过程发生在有一定坡度的可蚀性土壤上^[23]。土壤侵蚀的影响因子主要包括降雨、植被覆盖、地形等^[24]。降雨的强度、历时与频率影响土壤侵蚀量,是水土流失的外营力。土壤的组分与粘合力决定着土地表面的可侵蚀性,可以间接地通过土地覆盖来表示。因此侵蚀风险可定义为区域环境变化在这些因子上的响应^[25-26]。水利部部颁标准“土壤侵蚀分类分级标准 SL190-96”(如表 1)给出了各侵蚀等级的定义,所使用的指标包括植被覆盖度、坡度和土地覆盖,将土壤侵蚀风险分为 6 类。

表 1 水力侵蚀强度分级参考指标

地类	植被覆盖/ %	坡度/(°)					
		< 5	5~ 8	8~ 15	15~ 25	25~ 35	> 35
非耕地	> 75	微度	微度	微度	微度	微度	微度
	60~ 75	微度	轻度	轻度	轻度	中度	中度
	45~ 60	微度	轻度	轻度	中度	中度	强度
	30~ 45	微度	轻度	中度	中度	强度	极强度
	< 30	微度	中度	中度	强度	极强度	剧烈
	坡耕地	微度	轻度	中度	强度	极强度	剧烈

植被覆盖度是衡量地表水土流失状况的一个最重要指标,是计算土壤侵蚀的必要参数,指植被冠层在地面上的垂直投影面积所在的百分比。本文采用

像元二分模型计算植被覆盖度。其中 NDVI 是比值植被指数的归一化,比值处理可以部分消除与太阳高度角、卫星观测角、地形、云/阴影和大气条件有关的

辐照度条件变化(大气程辐射)等的影响,同时使因遥感器定标衰退对单波段的影响从 10%~30% 降到的 0~6%,并减轻地表二向反射和大气效应造成的角度影响^[27]。又由于 NDVI 可以很好地反映地表植被,可以利用 NDVI 代替假设中的光谱信息,从而计算植被覆盖度,计算时首先去除不理想极值的干扰,在置信区间内选取纯土壤和纯植被的 NDVI 值。利用实测值进行检验,校正相关参数,使计算值能反映真实的植被覆盖信息。

在土壤侵蚀研究中坡度是一个重要的地形因子,本文通过数字化研究区 1:5 万的地形图建立数字高程模型(DEM)。通过 ERDAS 软件在栅格数字高程模型的基础上提取研究区坡度信息。土地利用与人类活动密切相关,是影响土壤侵蚀的主要因素之一。通过实地调查建立研究区的土地利用解译标志,利用面向对象的分类软件 eCognition 对影像进行解译并进行人工修改。

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀

植被覆盖度以 15%,30%,45%,60%,75% 为间隔制作专题图,如附图 4a。坡度以 5°,8°,15°,25°,35° 为间隔制作专题图,如附图 4b。土地利用图如附图 4c 所示。将植被覆盖度、坡度和土地利用按照表 1 进行交叉叠置分析,同时根据实地观测数据,充分分析土壤环境、气候环境、植被环境、物质文化环境以及地形地貌的基础上,进行人机交互,形成土壤侵蚀现状图,如附图 4d。从侵蚀图可以看出 2004 年密云水库土壤侵蚀风险整体较低,大部分地区处于微度和轻度侵蚀;没有剧烈侵蚀,极强度侵蚀也很少;中度和强度侵蚀主要分布在赤城县和丰宁县。

2.2 土壤侵蚀变化分析

2000 年与 2004 年土壤侵蚀各等级面积统计对比如表 2 所示。

2000 年土壤侵蚀数据是全国第二次遥感调查结

果,所利用的方法也是水利部部颁标准,与本文所用方法一致,因此研究结果具有可比性。从表 2 可知,密云水库上游地区的微度侵蚀面积从 7 652.19 km² (占总面积 49.72%) 增加到 7 736.29 km² (占总面积 50.27%),微度以上侵蚀面积从 7 738.23 km² (占总面积 50.28%) 减少到 7 654.13 km² (占总面积 49.73%),说明从整体上来看,区域的侵蚀状况有所好转;但极强度侵蚀面积却从 0 增加到 6.68 km²,剧烈侵蚀面积从 0 增加到了 0.03 km²。研究区内虽然土壤侵蚀面积减小了 84.10 km²,但出现了极强度侵蚀和剧烈侵蚀。说明研究区侵蚀状况整体趋于好转的同时,部分区域存在恶化现象,且比较明显。在以前的治理中,考虑的因素不够周全,致使出现严重的土壤侵蚀,虽然这些严重恶化的面积占总面积的比例很小。

2.3 土壤侵蚀空间分布

土壤侵蚀是在一定环境背景下发生的,对土壤侵蚀发生的环境背景及其空间格局进行分析有利于进行水土保持,制定土壤侵蚀防治策略,并检验其实施的成效^[28]。侵蚀面积是检验一个地区侵蚀状况的重要指标,根据水利部部颁标准,微度等级以上的面积之积为侵蚀面积。本文将高程以 500,800,1 100,1 400,1 700 m 为界限将高程分为 6 带;以 5°,8°,15°,25°,35° 为界限将坡度分为 6 带。通过分析各带内的侵蚀状况,了解研究区内的侵蚀风险空间格局,计算结果见表 3~4。

表 2 两期土壤侵蚀数据对比表

侵蚀等级	2004 年		2000 年	
	面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%
微度侵蚀	7736.29	50.27	7652.19	49.72
轻度侵蚀	4145.04	26.93	4052.21	26.33
中度侵蚀	3196.79	20.77	3379.94	21.96
强度侵蚀	305.59	1.99	306.08	1.99
极强度侵蚀	6.68	0.04	0.00	0.00
剧烈侵蚀	0.03	0.00	0.00	0.00
总面积	15390.42	100.00	15390.42	100.00

表 3 2004 年各高程带内侵蚀分布情况

高程带/m	面积/km ²							侵蚀面积百分比/%
	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强度侵蚀	极强度侵蚀	剧烈侵蚀	侵蚀面积	
< 500	1052.96	555.04	415.24	33.28	1.05	0.00	1004.61	13.13
500~ 800	1447.54	1014.19	860.58	79.33	1.77	0.01	1955.88	25.55
800~ 1100	2153.52	944.15	835.36	88.47	2.02	0.00	1870.02	24.43
1100~ 1400	1786.29	992.11	674.04	65.18	1.04	0.01	1732.38	22.63
1400~ 1700	1034.78	543.37	295.87	20.97	0.49	0.01	860.70	11.25
> 1700	261.20	96.18	115.69	18.36	0.31	0.00	230.54	3.01

如表 3 所示,6 个高程带中大于 1 700 m 的高程带侵蚀面积最小,230.54 km²,占研究区总侵蚀面积的 3.01%;其次是 1 400~1 700 m 高程带,侵蚀面积 860.70 km²,占研究区总侵蚀面积的 11.25%;第三是

小于 500 m 高程带, 侵蚀面积 1 004. 61 km², 占研究区总侵蚀面积的 13. 13%; 500~ 800 m 高程带侵蚀面积最大, 1 955. 88 km², 占研究区总侵蚀面积的 25. 55%。一个规律是, 从 500 m 开始向上侵蚀呈递减趋势。

表 4 2004 年各坡度带内侵蚀分布情况

坡度带	面积/km ²							侵蚀面积百分比/%
	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强度侵蚀	极强度侵蚀	剧烈侵蚀	侵蚀面积	
< 5°	2174. 36	19. 18	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00	19. 18	0. 25
5°~ 8°	280. 27	234. 30	61. 84	0. 00	0. 00	0. 01	296. 15	3. 87
8°~ 15°	696. 88	910. 94	634. 66	0. 00	0. 00	0. 02	1545. 62	20. 19
15°~ 25°	2847. 83	1685. 13	1577. 32	63. 11	0. 00	0. 00	3325. 56	43. 45
25°~ 35°	1499. 55	1176. 52	736. 91	169. 55	0. 03	0. 00	2083. 01	27. 21
> 35°	237. 40	118. 97	186. 06	72. 93	6. 65	0. 00	384. 61	5. 03

如表 4 所示, 小于 5° 高程带侵蚀面积最小, 19. 18 km², 占研究区总侵蚀面积的 0. 25%; 其次为 5°~ 8° 高程带侵蚀面积 296. 15 km², 占研究区总侵蚀面积的 3. 87%; 第三为大于 35° 带, 侵蚀面积 384. 61 km², 占研究区总侵蚀面积的 5. 03%; 最大侵蚀面积出现在 15°~ 25° 坡度带, 面积 3 325. 56 km², 占研究区总侵蚀面积的 43. 45%。

3 结论

研究表明采用水利部部颁标准可以方便快速地进行土壤侵蚀评价, 通过与 GIS 的结合将几个土壤侵蚀指标进行自动叠加处理可以减少大量的人力物力。本文基于 2004 年的 SPOT 5 遥感影像, 对密云水库上游地区进行土壤侵蚀评价, 并利用 449 个野外调查样点进行验证, 通过分析样点位置的侵蚀强度是否被正确评估, 而确定解译精度(92. 38%), 最后与全国第二次遥感调查结果进行对比分析, 发现研究区侵蚀面积虽然有所减少, 但却出现了极强度和剧烈侵蚀, 说明很有可能在前期的侵蚀治理中考虑的因素不全面, 因此在今后的治理中要更加注重侵蚀变化趋势及其空间分布格局。

通过对不同高程带与坡度带的分析发现: (1) 高程带中, 从 500 m 开始向上, 侵蚀情况逐渐递减。因为高程越高, 越不易受到人类干扰, 自然植被生长就更旺盛; 另外, 随着高程的增加, 易侵蚀性土壤也在减少, 即使没有植被也不会形成侵蚀。(2) 随着坡度增加, 发生侵蚀的风险也会增加, 然而在研究区侵蚀面积比例最大的坡度带却是 15°~ 25° 带, 说明侵蚀并不总是随坡度呈正相关, 是各种因子综合影响的结果。

参考文献:

[1] Eswaran H, Lal R, Reich P F. Land degradation: an overview[M]// Bridges E M, Hammam I D, Oldeman L R, et al. Response to Land Degradation[J]. Science Publishers Inc, Enfield, NH, USA, 2001: 20-35.

[2] Lal R. Soil erosion impact on agronomic productivity and

environment quality[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 1998, 17(4): 319-464.

[3] Pimentel D, Harvey C, Resosudarmo P, et al. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits[J]. Science, 1995, 267: 1117-1123.

[4] Crosson P. Will erosion threaten agricultural productivity[J]. Environment, 1997, 39(8): 4-12.

[5] Lomborg B. The Skeptical Environmentalist: Measuring the Real State of the World[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

[6] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.

[7] Nearing M A, Pruski F F, O'Neal M R. Expected climate change impacts on soil erosion rates: a review[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 59(1): 43-50.

[8] Warren A. Land degradation is contextual[J]. Land Degradation & Development, 2002, 13(6): 449-459.

[9] Menzel R G. Transport of ⁹⁰Sr in runoff[J]. Science, 1960, 131: 499-500.

[10] 周佩华, 田均良, 刘普灵, 等. 黄土高原土壤侵蚀与稀土元素示踪研究[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2): 2-9.

[11] Thompson R, Oldfield F. Environmental Magnetism[M]. London: Alen & Unwin, 1986: 112-119.

[12] Dymond J R, Hicks D L. Steepland erosion measured from historical aerial photographs[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1986, 41(4): 252-255.

[13] Smith L C, Alsdorf D E, Magilligan F J, et al. Estimation of erosion, deposition, and net volumetric change caused by the 1996 Skeiðarárjökull eruption, Iceland, from synthetic aperture radar interferometry[J]. Water Resources Research, 2000, 36(6): 1583-1594.

[14] 张科利, 曹其新, 细山田健三, 等. 神经网络模型在土壤侵蚀预报中应用的探讨[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1995, 1(1): 58-63.

(下转第 25 页)

(4) 阴坡的水生态位适宜度要好于阳坡, 但不论阳坡还是阴坡, 水生态位的适宜度均较低。土壤水的时空动态变化是影响水生态位适宜度的主要原因。加强土壤水库调控, 提高降雨、径流入渗及补给深层土壤水分有助于改善水生态位适宜度, 实现杏树林地的高产高效^[17]。

参考文献:

- [1] 孟秦倩, 王健, 吴发启. 黄土高原丘陵沟壑区土壤水库调蓄能力分析[J]. 节水灌溉, 2008, 149(1): 18-20.
- [2] 卢宗凡, 梁一民, 刘国彬. 黄土塬区刺槐人工林地土壤水分特征[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
- [3] 李凯荣, 王佑民. 黄土塬区刺槐人工林地土壤水分特征[C]//刘秉正. 黄土高原沟壑区综合治理及其效益研究. 北京: 中国林业出版社, 1990.
- [4] 刘增文, 王佑民. 黄土油松林蒸腾耗水及林地土壤水分动态特征的研究[J]. 水土保持通报, 1990, 10(6): 78-84.
- [5] 张小泉, 张清华, 毕树峰. 太行山北部幼林地土壤水分的研究[J]. 林业科学, 1994, 30(3): 193-199.
- [6] 王孟本, 柴宝峰, 李洪建, 等. 黄土区人工林的土壤持水力与有效状况[J]. 林业科学, 1999, 35(2): 7-14.
- [7] 侯庆春, 韩蕊莲, 韩仕锋. 黄土高原人工林草地“土壤干层”问题初探[J]. 中国水土保持, 1999(5): 11-14.
- [8] 魏天兴, 余新晓, 朱金兆, 等. 黄土区防护林主要造林树

种水分供需关系研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(2): 185-189.

- [9] 田晶会, 王百田. 黄土半干旱区刺槐林水分与生长关系研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(5): 61-63.
- [10] 胡梦, 刘文兆, 赵姚阳. 黄土高原农、林、草地水量平衡异同比较分析[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(4): 113-116.
- [11] 宋孝玉, 沈冰. 西北地区生态环境建设与水资源相互关系问题的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(3): 127-131.
- [12] 王进鑫, 罗伟祥, 刘广全, 等. 黄土高原人工林根区土壤水分亏缺状况与空间分布[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(4): 1-4.
- [13] 原焕英, 许喜明. 黄土高原半干旱丘陵沟壑区人工林土壤水分动态研究[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(2): 5-8.
- [14] 孟秦倩, 王健, 吴发启. 延安丘陵沟壑区坡面果园土壤水库特征[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(1): 93-95.
- [15] 李自珍, 黄子琛. 沙坡头地区人工林植物的水分生态位适宜度分析[J]. 西北植物学报, 1995, 15(5): 97-101.
- [16] 李文龙, 李自珍, 王刚, 等. 沙坡头地区人工固沙植物水分利用及其生态位适宜度过程数值模拟分析[J]. 西北植物学报, 2004, 24(6): 1012-1017.
- [17] 唐小娟, 金彦兆, 高建恩. 复合坡度下雨水高效集蓄利用模式研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(6): 74-76.

(上接第 20 页)

- [15] Stroosnijder L. Measurement of erosion: is it possible[J]. Catena, 2005, 64(2/3): 162-173.
- [16] Bissonnais Y L, Montier C, Jamagne M, et al. Mapping erosion risk for cultivated soil in France[J]. Catena, 2001, 46: 207-220.
- [17] Kheir R B, Cerdan O, Abdallah C. Regional soil erosion risk mapping in Lebanon[J]. Geomorphology, 2006, 82: 347-359.
- [18] Sahin S K. Erosion risk analysis by GIS in environmental impact assessment: a case study-Seyhan KLP Dam construction[J]. Journal of Environmental Management, 2002, 66: 239-247.
- [19] 曾大林, 李智广. 第二次全国土壤侵蚀遥感调查工作的做法与思考[J]. 中国水土保持, 2000(1): 28-31.
- [20] King C, Delpont G. Spatial assessment of erosion: contribution of remote sensing: a review[J]. Remote Sensing Reviews, 1993, 7: 223-232.
- [21] Siakeu J, Oguchi T. Soil erosion analysis and modeling: a review[J]. Transactions of the Japanese Geomorphological Union, 2000, 21(4): 413-429.
- [22] 周为峰, 吴炳方. 土壤侵蚀调查中的遥感应用综述[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(5): 537-542.
- [23] Vrieling A, Steven M de Jong, Geert S, et al. Timing

of erosion and satellite data: A multi-resolution approach to soil erosion risk mapping[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008, 10: 267-281.

- [24] Fan J R, Zhang J H, Zhong X H, et al. Monitoring of soil erosion and assessment for contribution of sediments to rivers in a typical watershed of the upper Yangtze river basin[J]. Land Degradation & Development, 2004, 15(4): 411-421.
- [25] Renard K G, Kertesz A, Markus B, et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)[M]. Washington: Agricultural handbook No. 537. United States Department of Agriculture, 1997.
- [26] Wang X D, Zhong X H, Fan J R. Spatial distribution of soil erosion sensitivity on the Tibet Plateau[J]. Pedosphere, 2005, 15: 465-472.
- [27] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [28] 许月卿, 菜运龙, 彭建. 土地利用变化的土壤侵蚀效应评价: 西南卡斯特地区的一个研究案例[M]. 北京: 科学出版社, 2008.