

# 黔西北喀斯特区域土地利用/覆盖变化对土壤侵蚀的影响

罗红<sup>1,2</sup>, 马友鑫<sup>1</sup>, 吴家福<sup>1</sup>, 刘文俊<sup>1</sup>, 李红梅<sup>1</sup>, 吴建普<sup>2</sup>

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南 昆明 650223; 2. 西藏自治区林业调查规划研究院, 西藏 拉萨 850000)

**摘要:** 利用黔西北地区 1974, 1992 和 2008 年共 3 期遥感影像解译的土地利用图, 结合修正的通用土壤流失方程, 分析和模拟了该区土地利用/覆盖变化前后的土壤侵蚀状况, 以及主要地类转化类型的土壤侵蚀效应。结果表明, 黔西北地区土地利用结构变化显著, 1974—2008 年灌木林和旱地面积变化剧烈, 且呈现相反的变化趋势。1974—1992 年, 随旱地面积的显著增加, 灌木林的显著减少, 黔西北土壤侵蚀模数由 29.55 t/(hm<sup>2</sup>·a) 上升到 37.76 t/(hm<sup>2</sup>·a), 随旱地面积的显著减少, 灌木林、有林地的显著增多, 2008 年下降到 30.39 t/(hm<sup>2</sup>·a); 旱地和其他地类发生土壤侵蚀最为剧烈, 大面积的灌木林转为旱地是 1992 年土壤侵蚀加剧的主要原因, 而大面积的旱地转为灌木林和有林地使 2008 年土壤侵蚀状况显著改善, 灌木林转为旱地仍是近期土壤侵蚀加剧的主要原因, 应加强对灌木林的使用管理。

**关键词:** 土壤侵蚀; 流失方程; 土地利用/覆盖变化; 喀斯特; 黔西北

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)04-0016-05

中图分类号: S157.1

## Effects of Land Use/Cover Change on Soil Erosion in Karst Area of Northwest Guizhou Province

LUO Hong<sup>1,2</sup>, MA You-xin<sup>1</sup>, WU Jia-fu<sup>1</sup>, LIU Wen-Jun<sup>1</sup>, LI Hong-mei<sup>1</sup>, WU Jian-pu<sup>2</sup>

(1. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650223, China;

2. Forest Inventory and Planning Institute of Tibet, Lhasa, Tibet 850000, China)

**Abstract:** Based on the land use maps of Northwest Guizhou Province, which were interpreted from Landsat images of 1974, 1992 and 2008, we analyzed and simulated the status of soil erosion before and after the land use/cover change (LUCC) and the soil erosion effect of main types of LUCC with incorporation of the revised universal soil loss equation (RUSLE). The results show that the structure of LUCC had changed significantly in Northwest Guizhou Province. The areas of shrub and cultivated land varied dramatically, showing opposite change trends from 1974 to 2008. With great increment of cultivated land and decrement of shrub, the soil erosion modulus increased from 29.55 t/(hm<sup>2</sup>·a) to 37.76 t/(hm<sup>2</sup>·a) in the area from 1974 to 1992. The area of cultivated land decreased and the area of shrub and forest increased from 1992 to 2008, resulting a significant reduction in soil erosion [30.39 t/(hm<sup>2</sup>·a) in 2008]. As cultivated land contributes most to soil erosion, the massive conversion from shrub to cultivated land was the main cause of severe soil erosion in 1992, while the extensive conversion from cultivated land to shrub and forest reduced soil erosion greatly in 2008. Even recently, the conversion from shrub to cultivated land caused a substantial amount of soil erosion. The related agencies should strengthen the management of shrub land.

**Keywords:** soil erosion; loss equation; land use/cover change; karst; Northwest Guizhou Province

土壤侵蚀作为全球几大环境问题之一<sup>[1]</sup>, 已成为危害最大、影响最广的世界性环境问题之一<sup>[2]</sup>。土壤侵蚀与土地利用/覆盖变化 (LUCC) 关系密切<sup>[3-4]</sup>, 它是 LUCC 引起的主要环境效应之一<sup>[5]</sup>, 是自然和

人为因素叠加的结果<sup>[6]</sup>。不合理的土地利用和地表植被覆盖的减少对土壤侵蚀有放大效应<sup>[7]</sup>, 人类及其活动是造成土壤侵蚀的主要原因<sup>[8]</sup>。土地利用/覆盖变化与土壤侵蚀关系的研究已逐渐成为 LUCC 研究

收稿日期: 2011-06-01

修回日期: 2011-08-11

资助项目: 国家科技支撑计划课题“喀斯特山区生态环境动态监测关键技术集成与应用示范”(2007BAD53B01)

作者简介: 罗红 (1984—), 女 (汉族), 湖南省湘潭市人, 硕士研究生, 主要从事景观生态学研究。E-mail: luohong841014@sina.com。

通信作者: 马友鑫 (1960—), 男 (汉族), 辽宁省阜蒙县人, 博士, 研究员, 主要从事景观生态学研究。E-mail: may@xtbg.ac.cn。

和土壤侵蚀研究的一项新的重要课题<sup>[9]</sup>,对理解土壤侵蚀的生态过程、时空格局都有很大的帮助,有着广阔的应用前景。

我国西南喀斯特地区是全球3大岩溶地区连续带之一<sup>[10]</sup>,土地利用变化极为剧烈<sup>[11]</sup>,生态环境愈加脆弱。而人类活动导致的土地利用/覆盖变化则是喀斯特区域土壤侵蚀加剧的最直接原因。本研究以贵州省西北部毕节地区为例,将地理信息系统(GIS)、遥感(RS)技术和广为应用的修正的通用土壤流失方程(RUSLE)<sup>[12]</sup>模型模拟相结合,在既定分辨率(25 m×25 m)前提下,计算大范围研究区域(毕节地区26 853 km<sup>2</sup>)不同土地利用格局下的土壤侵蚀状况,并分析主要地类转化类型的土壤侵蚀变化,探讨土地利用变化的土壤侵蚀效应,为各机构的土地利用提供决策依据。

## 1 研究区概况

研究区位于贵州省西北部的毕节地区(26°21′—27°46′ N, 105°36′—106°43′ E)。该区土地总面积26 853 km<sup>2</sup>,辖毕节、赫章、威宁、纳雍、织金、大方、黔西、金沙等8个县/市。海拔457~2 901 m,河谷深切,山高坡陡,地形复杂,该区岩溶面积占总面积的62%,是典型的喀斯特山区。土壤类型以黄壤和黄棕壤为主,大部分地区属亚热带温暖湿润季风气候,年均气温13.2℃,水热资源适中,年均降水量848.6~1 394.4 mm,且降水主要集中在5—9月。

## 2 研究方法

### 2.1 土地利用/覆盖变化

利用中国科学院西双版纳热带植物园GIS实验室对黔西北1974,1992和2008年3期的遥感影像解译结果,分析黔西北土地利用的时空变化特征以及不同阶段的主要地类转化类型。土地利用分类系统根据2007年8月5日新颁布的《土地利用现状分类》土地利用分类标准,并结合黔西北的具体情况制订,即有林地、旱地、灌木林、建筑用地、水体、其他林地(果园和茶园)、草地、水田、其他地类(裸岩和未利用地)。3期遥感影像分类结果的精度均在80%以上,符合影像解译标准。

### 2.2 修正的通用土壤流失方程模型(RUSLE)

选取世界上应用最广泛、使用最方便的RUSLE,其基本结构为:

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

式中:A——年均土壤侵蚀量(t/(hm<sup>2</sup>·a));R——降雨侵蚀力因子(MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a));K——土壤可蚀性因子(t·hm<sup>2</sup>·h/(MJ·mm·hm<sup>2</sup>));L,S——地形因子(坡长、坡度因子,无量纲);C——覆盖与管理因子(无量纲);P——水土保持措施因子(无量纲)。

2.2.1 降雨侵蚀力R因子的估算 降雨侵蚀力反映了降雨引起土壤流失的潜在能力。根据黔西北8县(市)及其周边共26个气象台站的降雨资料,选用基于月平均降雨量和年平均降雨量的Wischmeier公式计算<sup>[13]</sup>。得到R值后,利用日降雨数据进行校正<sup>[14]</sup>,并采用Kriging空间内插方法进行空间插值,得到黔西北的降雨侵蚀力分布图。

2.2.2 土壤可蚀性因子K因子的估算 K表示标准小区单位降雨侵蚀力引起的单位面积上的土壤侵蚀量。由于缺乏各土壤类型的结构系数和渗透性等级数据,根据黔西北8县/市土壤志中收集到的土壤粒径资料,选用侵蚀/生产力影响模型EPIC<sup>[15]</sup>的公式计算流域各类型土壤的K因子值。由于毕节地区特殊的喀斯特地貌,基岩裸露现象十分普遍,得到K值后,采用基岩裸露率进行修正<sup>[16]</sup>。

2.2.3 L和S因子的估算 L和S表示在其他条件不变的情况下,某给定坡长和坡度的坡面上土壤流失量与标准径流小区典型坡面上土壤流失量的比值,反映地形地貌对土壤侵蚀的影响。利用黔西北DEM数据,参照McCool等<sup>[17]</sup>和Liu等<sup>[18]</sup>的计算公式求得S。参照Wischmeier等提出的程序,可应用改进的坡长因子公式求得L<sup>[19]</sup>。其中水平坡长λ是计算L坡长因子的关键,而λ在大范围区域提取复杂,本研究区域面积达26 853 km<sup>2</sup>,在DEM分辨率为25 m×25 m的前提下,以往的研究方法很难完成该坡长值的提取(耗时太长),本研究参考最大溯源径流路径法在ArcGis 9.3软件中实现<sup>[20]</sup>。坡长因子中计算所需的坡长指数参照McCool等<sup>[21]</sup>的公式计算。

2.2.4 覆盖与管理因子C和水土保持措施因子P因子的确定 覆盖与管理因子C指在其他因子相同的条件下,在某一特定作物或植被覆盖下的土壤流失量与耕种后的连续休闲地的流失量的比值。水土保持措施因子P指采取水土保持措施后的土壤流失量与顺坡种植的土壤流失量的比值。C和P因子用来衡量植被覆盖和管理措施对土壤侵蚀的抑制作用。本研究参照遥感影像解译的土地利用类型图、农田经营的实际调查情况以及相关文献<sup>[22-23]</sup>确定C值和P值(表1)。

表 1 黔西北不同土地利用/覆盖类型相应  $C$  值和  $P$  值

因子	林地	灌木林	建设用地	其他林地	旱地	水体	草地	水田	其他地类	
									裸岩	未利用地
$C$ 值	0.006	0.010	0.000	0.040	0.220	0.000	0.040	0.100	0.000	0.085
$P$ 值	1.000	1.000	0.000	0.700	0.400	0.000	1.000	0.010	0.000	1.000

注:无植被覆盖  $C$  值为 0.000,无水土保持措施  $P$  值为 1.000, $C$  和  $P$  值为 0.000 表示无侵蚀。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土地利用/覆盖变化

由图 1 可知,黔西北以有林地、灌木林、旱地为主要地类,3 者占到黔西北总面积的 89% 以上。近 30 a 来,黔西北土地利用/覆盖变化显著。1974—1992 年,研究区有林地、旱地、水田、建设用地、其他林地、其他地类(裸岩和未利用地)面积均表现为增加趋势,其中旱地增加最为显著;灌木林、水体、草地有不同程度的减少,其中灌木林减少最为剧烈。1992—2008 年,研究区有林地、灌木林、建设用地、水体、其他林地、其他地类均表现为增加趋势,其中有林地和灌木林增加最为显著;旱地、水田、草地呈减少趋势,旱地减少面积最多。

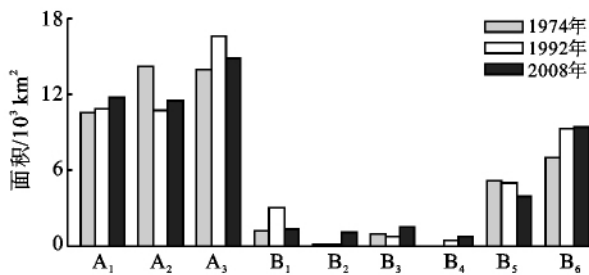


图 1 黔西北 1974, 1992 和 2008 年黔西北土地利用/覆盖状况  
注:  $A_1$  有林地;  $A_2$  灌木林;  $A_3$  旱地;  $B_1$  水田;  $B_2$  建设用地;  $B_3$  水体;  $B_4$  其他林地;  $B_5$  草地;  $B_6$  其他地类。下同。

#### 3.2 主要土地利用/覆盖转化类型

在 GIS 技术下,将 3 期土地利用图进行叠加分析,得到不同阶段的主要地类转化类型。由表 2 可知,黔西北地类主要在有林地、灌木林、旱地、其他地类之间相互转化。1974—1992 年,发生转化的地类面积 15 455.01  $\text{km}^2$ ,占黔西北总面积的 57.55%,灌木林转旱地的转化面积最大,其次是灌木林转有林地、有林地转旱地。1992—2008 年,发生转化的地类面积 13 855.13  $\text{km}^2$ ,占黔西北总面积的 51.59%,较 1974—1992 年有所下降,旱地转灌木林的转化面积最大,其次是旱地转有林地、灌木林转有林地。

#### 3.3 不同土地利用/覆盖类型的土壤侵蚀

从图 2 中可看出,近 30 a 来,黔西北的平均土壤侵蚀模数表现为先升高(1974—1992 年)后降低

(1992—2008 年)的趋势;平均土壤侵蚀模数从 1974 年的 29.55  $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$  上升到 1992 年的 37.76  $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,2008 年下降到 30.39  $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,3 个时期均属中度侵蚀等级<sup>[28]</sup>;土壤侵蚀总量 1974 年为  $7.94 \times 10^7 \text{ t}$ ,1992 年增加到  $1.01 \times 10^8 \text{ t}$ ,增幅达 27.78%;2008 年为  $8.16 \times 10^7 \text{ t}$ ,较 1992 年有明显降低,降幅达 19.52%,可见 1992 年是土壤侵蚀的剧烈时期。 $R$  因子反应降水对土壤侵蚀的影响,而  $C$  和  $P$  因子则反应土地利用变化对土壤侵蚀的影响, $R$ , $C$  和  $P$  值都随时间变化,1974—1992 年、1992—2008 年两阶段黔西北平均  $R$  值变化幅度分别为 -4.2% 和 3.57%,而平均  $C$  和  $P$  值变化幅度分别为 40.48% 和 -16.95%, $C$  和  $P$  值变化幅度显著大于  $R$  值,从而使黔西北土壤侵蚀变化与  $CP$  值变化趋势一致,可见随时间变化,土壤侵蚀的加剧与改善主要受土地利用/覆盖变化的影响。

表 2 1974—2008 年黔西北主要地类转换类型面积比

主要地类 转化类型	1974—1992 年		1992—2008 年	
	面积/ $\text{km}^2$	比例/%	主要地类 转化类型	面积/ $\text{km}^2$ 比例/%
$A_1 \rightarrow A_2$	851.24	3.17	$A_1 \rightarrow A_2$	996.25 3.71
$A_1 \rightarrow A_3$	1 337.28	4.98	$A_1 \rightarrow A_3$	749.20 2.79
$A_2 \rightarrow A_1$	1 866.28	6.95	$A_2 \rightarrow A_1$	1 299.69 4.84
$A_2 \rightarrow A_3$	6 138.60	22.86	$A_2 \rightarrow A_3$	1 541.36 5.74
$A_2 \rightarrow A_4$	563.91	2.10	$A_3 \rightarrow A_1$	2 073.05 7.72
$A_3 \rightarrow A_1$	1 044.58	3.89	$A_3 \rightarrow A_2$	3 139.12 11.69
$A_3 \rightarrow A_2$	1 251.35	4.66	$A_3 \rightarrow A_4$	1 178.85 4.39
$A_3 \rightarrow A_4$	504.84	1.88	$A_4 \rightarrow A_2$	279.27 1.04
$A_4 \rightarrow A_3$	332.98	1.24	$A_4 \rightarrow A_3$	770.68 2.87

注:比例表示地类转化面积占毕节地区面积的百分比,仅显示大于 1% 以上的数据。 $A_1$  有林地,  $A_2$  灌木林,  $A_3$  旱地,  $A_4$  其他地类;箭头表示地类转移方向。下同。

按照土壤侵蚀分类分级标准<sup>[24]</sup>,由图 2 可知,该地区水田、有林地的土壤侵蚀属于微度侵蚀等级,灌木林地和其他林地属轻度侵蚀等级,草地属轻度或中度侵蚀等级,而其他地类的平均土壤侵蚀模数较大,属中度、强度侵蚀等级。旱地的平均土壤侵蚀模数最大,大于 50  $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,属强度侵蚀等级。从各地类

发生的土壤侵蚀量来看,旱地在过去 30 a 均是土壤侵蚀最剧烈的地类,侵蚀量占黔西北侵蚀总量的 78% 以上,其次是灌木林和其他地类。

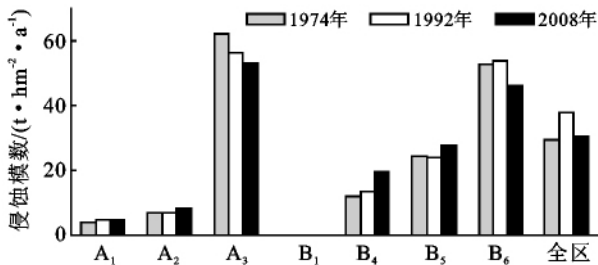


图2 毕节地区不同土地利用/覆盖类型的土壤侵蚀模数  
注:由于该区建设用地和水体不发生侵蚀,故未列入图中。下同。

### 3.4 主要地类转化类型的土壤侵蚀

图3描述了表2中1974—1992年主要地类转化类型的土壤侵蚀效应。由图3可知,1974—1992年灌木林转旱地的面积最大,占黔西北面积的22.86% (6 139.42 km<sup>2</sup>),灌木林转旱地、有林地转旱地、灌木林转其他地类这3个主要地类转化类型造成的土壤侵蚀量显著增加,分别增加了37.94% (3.01×10<sup>7</sup> t), 8.61% (6.83×10<sup>6</sup> t)和3.4% (2.70×10<sup>6</sup> t),灌木林转旱地造成土壤侵蚀量增加最多。旱地转有林地、旱地转灌木林使侵蚀量显著减小,侵蚀量减少了19.97% (1.59×10<sup>7</sup> t)。旱地转有林地使土壤侵蚀模数减小最显著,降低了77.13 t/(hm<sup>2</sup>·a),表明将旱地改造成有林地的水土流失治理方式最为有效,旱地转灌木林也使侵蚀模数降低了62.27 t/(hm<sup>2</sup>·a)。虽然旱地转有林地、旱地转灌木林能使侵蚀模数显著降低,但这两个地类转化类型的面积相比灌木林转旱地的面积相差甚远,导致1992年区域侵蚀模数和侵蚀量均较1974年有显著增加。灌木林转旱地是造成1992年土壤侵蚀加剧的最主要地类转化类型。

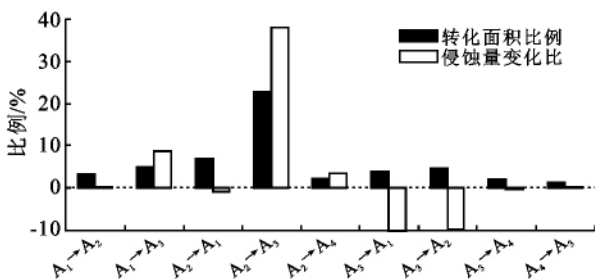


图3 黔西北1974—1992年主要地类转化的土壤侵蚀效应

同样,分析表2可知,1992—2008年旱地转灌木林的转化面积最大(3 139.27 km<sup>2</sup>),占黔西北面积的11.69%,大面积的旱地转灌木林、旱地转有林地使黔

西北土壤侵蚀状况显著改善,侵蚀量分别减少了19.13% (1.94×10<sup>7</sup> t), 12.09% (1.23×10<sup>7</sup> t)。1992—2008年导致土壤侵蚀加剧的主要地类转化类型是灌木林转旱地、有林地转旱地,使侵蚀量分别增加了7.74% (7.84×10<sup>6</sup> t)、4.30% (4.36×10<sup>6</sup> t),灌木林转旱地仍是造成侵蚀量增加最多的转化类型。由于1992—2008年旱地转灌木林、旱地转有林地的转化面积最大,因此2008年黔西北的侵蚀模数和侵蚀量较1992年有显著下降。

## 4 讨论

30 a间,黔西北土地利用/覆盖变化显著。灌木林和旱地的变化最为剧烈,前后变化趋势相反,变化面积大。毕节地区土地利用类型和土壤侵蚀关系密切,旱地、其他地类的土壤侵蚀最为剧烈,属强度侵蚀等级。1974—1992年,随着旱地面积的显著增加、灌木林的显著减少,毕节地区侵蚀模数由29.55 t/(hm<sup>2</sup>·a)上升到37.76 t/(hm<sup>2</sup>·a);1992—2008年,随着旱地的显著减少,灌木林、有林地的显著增多,侵蚀模数又下降到30.39 t/(hm<sup>2</sup>·a)。1992年毕节地区土壤侵蚀加剧,主要是由于20世纪70—80年代毕节地区人口激增(毕节地区统计局),巨大的人口压力下,大量灌木林被开垦为耕地来满足粮食需求,从而导致该时期旱地面积显著增加,灌木林显著减少,加强旱地的水土流失治理十分关键。由于1988年以来,毕节地区加强水土流失的治理,特别是1998年以来的退耕还林工程,使大量旱地退耕为有林地,森林覆盖率显著提高,从而使近期的土壤侵蚀状况得到显著改善。

黔西北地类主要在有林地、灌木林、旱地3者之间相互转化,大面积的灌木林转旱地是1992年土壤侵蚀加剧的主要原因,而2008年土壤侵蚀的改善主要源于大面积的旱地转灌木林和有林地,灌木林转旱地仍是加剧2008年土壤侵蚀的主要来源,加强灌木林的使用管理尤为重要。喀斯特区域灌木林面积广大,极易受人忽视,遭到破坏,关注灌木林的来源和去向,防止灌木林转化为旱地,对区域土壤侵蚀治理具有重要意义。

## 5 结论

本研究应用RUSLE模型模拟毕节地区的土壤侵蚀,模型输入数据源自当地的实际数据,模型估算结果和贵州喀斯特区域相关学者的研究结果较吻合<sup>[22]</sup>,土壤侵蚀的变化趋势与吕明辉<sup>[25]</sup>、陈永康<sup>[26]</sup>的研究结果一致,表明RUSLE模型经过适当参数校正后可运用于大范围喀斯特区域的土壤侵蚀研究。

但 RUSLE 作为经验统计模型的典范,模拟精度很难达到物理过程模型的模拟精度,模拟结果仅与以往的相关文献进行对比,提高 RUSLE 的模拟精度、加强模型验证等方面有待加强。在喀斯特区域,岩性特殊,部分地区下渗强烈,土壤侵蚀机理复杂,这种情况下,物理过程模型无法确定具体过程及相应的计算公式,经验性模型反而能发挥更大的作用,且利用 RUSLE 模型可很好地估算土地利用变化导致的土壤侵蚀相对变化量<sup>[27]</sup>,因此基于“3S”技术和 RUSLE 模型研究大范围喀斯特区域土地利用变化的土壤侵蚀效应将会有更大的研究潜力。

**致谢:**感谢毕节地区科学技术情报研究所及 8 个县(市)林业局、农业局、气象局、国土资源局、科技局、统计局对本研究的大力帮助。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Pimentel D, Harvey C, Resosudarmo P, et al. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits[J]. *Science*, 1995,267(5201):1117-1123.
- [2] 杨具瑞,流域土壤侵蚀产沙及其泥沙灾害[M]. 甘肃兰州:兰州大学出版社,2004.
- [3] 邹亚荣,张增祥. 基于 GIS 的土壤侵蚀与土地利用关系分析[J]. *水土保持研究*,2002,9(1): 67-69.
- [4] Kosmas C, Danalatos N, Cammeraat L H, et al. The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions[J]. *Catena*, 1997, 29(1): 45-59.
- [5] Yang D, Kanae S, Oki T, et al. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes[J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17(14):2913-2928.
- [6] 于兴修,杨桂山,王瑶. 土地利用/覆被变化的环境效应研究进展与动向[J]. *地理科学*,2004,24(5): 627-633.
- [7] 柳长顺,齐实,史明昌. 土地利用变化与土壤侵蚀关系的研究进展[J]. *水土保持学报*,2001,15(5):10-17.
- [8] 雷会珠,杨勤科. 黄土高原丘陵沟壑区的土壤侵蚀与土地利用[J]. *水土保持研究*,2000,7(2):48-51.
- [9] 吴秀芹,蔡运龙. 土地利用/土地覆盖变化与土壤侵蚀关系研究进展[J]. *地理科学进展*,2003,22(6): 576-584.
- [10] Sweeting M M. Reflections on the development of Karst geomorphology in Europe and a comparison with its development in China[J]. *Geomorphology*, 1993, 37(3): 127-136.
- [11] 蔡运龙,蒙吉军. 退化土地的生态重建: 社会工程途径[J]. *地理科学*,1999,19(3):198-204.
- [12] Renard K G, Foster G R, Yoder D C, et al. RUSLE revisited: Status, questions, answers, and the future[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*,1994,49(3):213-220.
- [13] Wischmeier W H, Mannering J V. Relation of soil properties to its erodibility[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1969,33(1):131-137.
- [14] Yu B, Rainfall erosivity and its estimation for Australia's tropics[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1998, 36(1):143-166.
- [15] Williams J R, Renard K G, Dyke P T. EPIC: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity [J]. *Journal of soil and Water Conservation*,1983,38(5):381.
- [16] 罗林,周应书,何兴辉,等. 喀斯特山地石漠化的垂直变异[J]. *生态学报*,2009,29(1): 332-336.
- [17] McCool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation[J]. *American Society of Agricultural Engineers, Transactions TAAEJ*, 1987,30(5):1387-1396.
- [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(6):1835-1840.
- [19] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [M]. USDA, Washington D C: Agriculture Handbook, 1978.
- [20] 罗红,马友鑫,刘文俊,等. 采用最大溯源径流路径法估算 RUSLE 模型中地形因子的探讨[J]. *应用生态学报*, 2010,21(5):1180-1184.
- [21] 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, 32(5): 1571-1576.
- [22] 许月卿,彭建. 贵州猫跳河流域土地利用变化及其对土壤侵蚀的影响[J]. *资源科学*,2008,30(8):1218-1225.
- [23] 汪文富. 贵州普定后寨河流域土壤侵蚀模型与应用研究[J]. *贵州地质*,2001,18(2):99-106.
- [24] 水利部水土保持司. SL190—96 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京:中国水利水电出版社,1997.
- [25] 吕明辉,王红亚,蔡运龙,等. 贵州红枫湖 HF1-2 孔沉积物的磁性特征及其土壤侵蚀意义[J]. *J. Lake Sci.*, 2008,20(3):298-305.
- [26] 陈永康. 乌江第一支流——六冲河水文情势分析[J]. *中国水利水电市场*,2009(3):http://www.nsbdl.com.cn/NewsDisplay.asp?Id=215509.
- [27] Trimble S W, Crosson P. US Soil Erosion Rates: Myth and Reality[J]. *Science*, 2000,289(5477):248-250.