凡非得, 王克林, 熊鹰, 宜勇, 张伟, 岳跃民. 西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征. 生态学报, 2011, 31(21): 6353-6362.
Fan F D, Wang K L, Xiong Y, Xuan Y, Zhang W, Yue Y M. Assessment and spatial distribution of water and soil loss in karst regions, southwest China. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(21): 6353-6362.

西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征

凡非得[1,2,3], 王克林[1,2,*], 熊 鹰[4], 宣 勇[5] 张 伟[1,2,3], 岳跃民[1,2]

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125;
2. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 环江 547100; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
4. 长沙理工大学资源环境系, 长沙 410014; 5. 民政部国家减灾中心, 北京 100124)

摘要: 西南喀斯特地区碳酸盐岩酸不溶物含量很低, 成土速率慢、土壤允许流失量小, 加上地形起伏大、植被破坏严重, 导致该地区水土流失敏感性及其空间分异的独特特征。选取降雨侵蚀力、地形起伏度、土壤类型、植被类型及土壤允许流失量等 5 个指标, 应用 GIS 技术对西南喀斯特区水土流失敏感性进行单因子和多因子综合分析评价, 结果表明西南喀斯特区水土流失敏感性普遍很高, 中度敏感以上区域占西南喀斯特区总面积的 82.8%, 不敏感区域所占面积比例为 6.4%; 水土流失中度敏感以上区域主要分布于贵州全境、广西峰丛洼地区、云南东南部、重庆东北部、东南部、湖北西南部及湖南西北部等区域; 随着岩石中酸不溶物含量的增加, 水土流失极敏感和高度敏感区面积比例减少, 中度敏感区比例增加。研究结果有助于指导西南喀斯特地区水土流失防治及退化喀斯特生态系统的恢复与重建。

关键词: 喀斯特; 水土流失; 敏感性; 空间分异

Assessment and spatial distribution of water and soil loss in karst regions, southwest China

FAN Feide[1,2,3], WANG Kelin[1,2,*], XIONG Ying[4], XUAN Yong[5], ZHANG Wei[1,2,3], YUE Yuemin[1,2]

1 *Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan* 410125, *China*

2 *Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi* 547100, *China*

3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

4 *Department of Resources and Environmental Sciences, Changsha University of Science and Technology, Changsha* 410014, *China*

5 *National Disaster Reduction Center of China, Ministry of Civil Affairs of the PRC, Beijing* 100124, *China*

Abstract: Karst regions are typically geologically constrained and ecologically fragile. Karst landscapes can be greatly affected by external factors such as environmental change. Southwestern China has one of the largest karst regions in the world which extends over about 540000 km^2 and is home to more than 220 million people. Desertification of the karst environment in this region has expanded at an increasing rate over the last few decades. Water and soil loss processes, and in particular the spatial distribution patterns of water and soil loss, in the karst regions of southwest China are particularly unique. This is due to the solubility of the carbonate rocks that results in a low rate of soil formation, a low-tolerance for soil loss, high topographic relief and the destruction of vegetation. In this study, rainfall erosion, topographic relief, soil types, vegetation types, and soil loss tolerance were selected as indicators used to assess water and soil loss sensitivity. Using GIS

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-10); 国家支撑计划(2011BAC09B02); 国家自然科学基金项目(41071340); 湖南省自然科学基金项目(10JJ5017); 教育部人文社科研究青年基金项目(11YJCZH201); 湖南省社会科学基金项目(2010JD193)
收稿日期: 2011-08-18; **修订日期:** 2011-09-28

* **通讯作者** Corresponding author. E-mail: kelin@isa.ac.cn

techniques, we evaluated the water and soil loss sensitivity of each individual indicator then integrated the results to examine the differences in the spatial distribution of water and soil loss in southwestern China. The results show that rainfall erosion, topographic relief, soil types, and soil loss tolerance are highly sensitive to water and soil loss in karst regions, whereas vegetation cover is not as sensitive. Water and soil loss sensitivity in the karst regions of southwest China is generally high, with more than 82.76% of the karst regions classified as being at least moderately affected and only 6.4% of the area classified as insensitive. The spatial distribution analysis indicated that karst regions with moderate of higher deteriorative water and soil loss sensitivity are mainly distributed in northeastern and southeastern Chongqing, southwestern Hubei, northwestern Hunan, most of Guizhou, northeastern Yunnan, and the peak-cluster depression of Guangxi. In addition, as the content of insoluble acidic material in the soils increased, the areas with extreme or high sensitivity to water and soil loss declined, but those with moderate sensitivity to water and soil loss increased.

In addition to usual factors such as precipitation, terrain conditions, soil cover, and vegetation, the distribution of ground water and soil loss in karst regions is significantly related to soil loss tolerance. As a result, soil loss tolerance must be considered as an important indicator of water and soil loss in karst regions. However, when the water and soil loss reaches extreme levels, exposed bedrock can become widely distributed. In this situation, there is no water or soil to lose and karst rock desertification occurs. Our results suggest that increases in the extent of karst rock desertification can be taken as a primary indicator of water and soil loss in this region. Therefore, occurrences and changes in karst rock desertification should be taken further into consideration to enhance regional prevention and remediation plans directed at water and soil loss and karst rock desertification. Our study provides useful references for the prevention and control of water and soil loss and the ecological restoration and reconstruction of degraded karst system in southwestern China.

Key Words: karst; water and soil loss; sensitivity; spatial distribution

喀斯特地区是典型的生态环境脆弱区,1983 年美国科学促进会第 149 届年会就把喀斯特作为一种和沙漠边缘一样的脆弱环境来加以讨论[1]。我国西南喀斯特地区地处亚热带季风性湿润气候区,降水充沛,但季节分布不均,同时,由于岩体裂隙、落水洞等发育,使降水迅速漏失,水资源利用困难; 加上碳酸盐岩不溶物含量低[2],导致碳酸盐岩成土速率十分缓慢,土层浅薄、贫瘠且分布不连续; 植被生长缓慢,生物量偏低,一旦被破坏,恢复困难。这种喀斯特环境本身的脆弱性加上不合理的人类活动,导致我国西南喀斯特地区水土流失严重,产生以石漠化为特征的生态环境退化[3-5]。

作为评价在人类活动强度或外力作用下生态系统出现水土流失问题概率大小的指标,水土流失敏感性研究受到广泛关注,但这些研究大部分以非喀斯特地区作为研究对象[6],关于喀斯特区水土流失敏感性评价研究较少,卢远等[7]对广西进行了水土流失敏感性评价; 李阳兵等[8]根据喀斯特生态系统的特殊性,选取土壤允许流失量、基岩裸露率、年均降水量、坡度、植被等 5 个指标对我国喀斯特分布最广的贵州省进行了水土流失敏感性评价; 罗俊等[9]在对桂西北河池市水土流失敏感性进行评价时,考虑到喀斯特与非喀斯特地区的差异性,分别采取了不同的指标体系进行评价。然而,现有喀斯特区水土流失研究还存在两方面的不足: 一方面,喀斯特生态系统是受特殊地质背景制约的生态系统[4],水土流失敏感性评价必须要考虑到碳酸盐岩地质背景对它的影响,而现有涉及喀斯特地区的水土流失敏感性评价往往忽略地质背景这一因素,采用与非喀斯特区一样的指标进行评价[7,10]; 另一方面,现有研究大多集中于小流域、区域尺度或较大的省级尺度水土流失敏感性评价,而缺乏对喀斯特分布较为广泛的整个西南喀斯特地区的大尺度对比分析研究。

喀斯特地区水土流失除地面流失外,还包括地下漏失这一途径,国内外已有研究者注意到了这种现象,并进行了相关初步研究[11-15],但由于土壤地下漏失情况复杂,本文只考虑喀斯特地区地面水土流失,而不考虑土壤地下漏失的情况。本研究在 GIS 技术支持下,以整个西南喀斯特地区为研究对象,选取适合喀斯特地区水土流失敏感性评价的因子,对我国西南喀斯特地区水土流失敏感性进行单因素与多因素综合分析与评价,

确定易发生水土流失的区域,探讨喀斯特地区水土流失敏感性与岩性之间的关系,揭示西南喀斯特地区水土流失不同敏感程度的空间分异规律。

1　研究区概况

西南喀斯特地区(102°—111°E, 23°—32°N)北起秦岭山脉以南,南至广西盆地,西始于云贵高原,东南抵达南岭山脉,涉及云南、贵州、广西、湖南、四川、重庆、湖北、广东八省(区、市),是全球三大喀斯特集中分布区之一的东亚片区的核心[5],总面积约 54 万 km^2,以滇、黔、桂三省区为主。区内地形地貌复杂、各种喀斯特地貌均有分布,属亚热带、热带湿润气候区。该地区集"老、少、边、山、穷"于一体[16],总人口数近 1 亿,有壮、苗、布依、侗、瑶、彝等 31 个少数民族,少数民族人口在 4000 万以上,贫困人口相对集中,人地矛盾非常突出,群众为了生存,不得不掠夺式的开发当地自然资源,导致水土流失、石漠化等生态环境问题严重,从而陷入"环境脆弱-贫困-掠夺资源-环境退化-进一步贫困"这样恶性循环的"贫困陷阱"[17]。

2　数据准备与预处理

本研究所用数据主要包括行政区图,90 m 分辨率 DEM 数据,1:100 万土壤类型数据,1:100 万植被图,1:50 万地质岩性数据。所有图件统一转换为 Albers 投影,中央经线为 105°E,第一标准纬线为 25°N,第二标准纬线为 47°N。

以 1:50 万地质图为基础,参考相关研究[4,18]的分类方法,将岩性分成纯灰岩、纯白云岩、灰岩夹碎屑岩、白云岩夹碎屑岩、碳酸盐岩夹碎屑岩、灰岩与白云岩互层、灰岩与碎屑岩互层、白云岩与碎屑岩互层、碳酸盐岩与碎屑岩互层、碎屑岩。其中,纯灰岩、纯白云岩、灰岩与白云岩互层为连续性碳酸盐组合; 灰岩夹碎屑岩、白云岩夹碎屑岩、碳酸盐岩夹碎屑岩为碳酸盐岩夹层组合; 灰岩与碎屑岩互层、白云岩与碎屑岩互层及碳酸盐岩与碎屑岩互层为碳酸盐岩互层组合。由于碳酸盐岩是喀斯特发育的物质基础,因此,提取分布最为广泛的连续性碳酸盐岩及碳酸盐岩夹层以及互层区作为本文的研究区域。

表 1　水土流失敏感性评价指标分级标准

Table 1　Classification standard of assessment index on water and soil loss sensitivity

分级 Classification	不敏感 Insensitive	轻度敏感 Slight sensitive	中度敏感 Moderate sensitive	高度敏感 Strong sensitive	极敏感 Extremely sensitive
降雨侵蚀力 R	<25	25—100	100—400	400—600	>600
地形起伏度 Topography	0—20	20—50	50—100	100—300	>300
土壤类型 Soil type	寒冻土、岩石、草毡土、黑毡土	暗棕壤、棕色针叶林土、黄褐土	棕壤、水稻土、灰褐土、燥红土、石灰土、砖红壤、褐土、赤红壤	粗骨土、红壤、黄壤、黄棕壤	紫色土
植被类型 Vegetation type	水体、水稻、沼泽	灌丛、针叶林、草甸、阔叶林、针阔叶混交林	一年两熟作物、草丛、高山植被、草原	一年一熟作物、荒漠	无植被
土壤允许流失量 Soil loss tolerance			碳酸盐岩互层区	碳酸盐岩夹层区	连续性碳酸盐岩区
分级赋值 Classification value	1	3	5	7	9

3　研究方法

3.1　评价指标确定与分级

根据环保部颁布的《生态功能区划暂行规程》,降水、地形、土壤、植被是影响水土流失敏感性的主要因子,这一情况已被国内众多非喀斯特区水土流失敏感性研究所验证。但喀斯特地区水土流失敏感性除了与以上因子相关外,还与成土速率有很大关系,而成土速率又与碳酸盐岩中的酸不溶物含量密切相关[19-20]。我国西南喀斯特区碳酸盐岩中的酸不溶物含量很低,一般小于 5%,成土速率很慢,导致土壤允许流失量偏低,远低于水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-96)[2,21-22],因此,在评价喀斯特地区水土流失敏感性时,土壤允许流失量也应作为一个重要的评价指标。因此,本研究选取降雨侵蚀力、地形起伏度、植被类型、土壤

类型及土壤允许流失量等共 5 个指标对西南喀斯特地区水土流失敏感性进行分析与评价。具体的分级评价标准主要依照国家环保总局发布的《生态功能区划暂行规程》和其他相关研究[8-9,23-25]确定:

(1) 降雨侵蚀力

降雨是引起水土流失的最重要因子,它主要是由雨滴所携带的动能对土粒产生冲击和因降雨产生的径流而引发水土流失。实际研究中多采用降雨侵蚀力来反映降雨对水土流失的影响。降雨侵蚀力因子 R 值与降雨量、降雨强度、降雨历时、雨滴大小及下降速度等因素有关,王万忠等[26]通过对全国 125 个重点站降水资料的分析,得出了各站的年降水量和降雨侵蚀力 R 值,这一研究结果被国内许多相关研究参考和引用[27]。本文以王万忠研究的全国主要站的年降雨侵蚀力 R 值为基础,通过 ArcGIS 空间插值,得到西南喀斯特区域降雨侵蚀力 R 值的空间分布图。按照表 1 确定的分级标准,绘制水土流失对降雨侵蚀力 R 因子敏感性的分级图。

(2) 地形起伏度

地形的起伏是导致水土流失的直接因素,在小尺度研究中,坡长和坡度是主要指标,研究表明,坡度越陡,汇流的时间越短,径流能量越大,对坡面的冲刷就越强烈,侵蚀量就越大,一般情况下,侵蚀量与坡长成正相关。在坡度较陡的条件下,土壤侵蚀率随着坡长的增加也迅速增加[28]。但在大尺度的区域性研究中,坡度只有数学意义而不具备土壤侵蚀和地貌学意义[29],地形起伏度则是比较适合大区域尺度水土流失评价的地形指标。西南喀斯特地区山高坡陡,地形起伏大,为土壤侵蚀提供了势能。相关研究表明: 中国水土流失地形起伏度的最佳分析窗口大小为 5 km × 5 km[29]。本文以 90 m 分辨率的 DEM 数据为基础,在 ArcGIS 空间分析模块支持下,提取西南喀斯特地区的地形起伏度。按照表 1 确定的分级标准绘制地形起伏度对水土流失敏感性的分级图。

(3) 土壤因子

土壤是水土流失发生的主体,是被侵蚀的对象,一般指土壤可蚀性因子 K,这是一个由试验确定的定量值,与土壤质地和土壤有机质含量有较高的相关性。然而,在大范围内直接测定 K 值费时费力,可行性较差,因此,有研究者[23]用土壤类型替代土壤可蚀性因子 K 进行水土流失敏感性评价。西南喀斯特地区石灰(岩)土、红壤、黄壤、黄棕壤、紫色土等所占面积比例较大,土壤可蚀性较高。本研究参考国内相关研究[9-10,23-25],以土壤类型图为基础,按照表 1 确定的分级标准绘制土壤因子对西南喀斯特水土流失敏感性分级图。

(4) 植被类型

植被防止土壤侵蚀的作用主要包括对降雨能量的削减作用、保水作用和抗侵蚀作用,具体表现为林冠对降雨的截留和缓冲; 树冠截留降水、枝叶吸收雨水及枯枝落叶保水; 同裸露坡地比较,有植被覆盖的土地水土流失极大减少[30]。此外,良好的植被覆盖可以通过截留、改良土壤结构而增加入渗、增加地表粗糙率以延缓径流流动时间等来影响土壤侵蚀。本研究以 1∶100 万植被类型图为基础,根据表 1 确定的评价标准,在 ArcGIS 支持下,绘制西南喀斯特地区植被类型对水土流失敏感性分级图。

(5) 土壤允许流失量

由于碳酸盐岩的易溶性,受到溶蚀后,可溶物被流水带走,酸不溶物则留下来形成土壤。西南喀斯特地区酸不溶物含量很低[2],再加上受碳酸盐岩中节理、断裂和破碎的影响,碳酸盐岩的风化(或溶蚀)在地表、地表附近及地下深处都可进行,从而降低了地表及其附近风化成土的有效性[31],这样一来,导致喀斯特地区土层浅薄,分布不连续,土壤允许流失量很低[2,21-22,32-33]。本研究以西南喀斯特地区岩性地质图为基础,参考李阳兵等[32]在贵州研究的结果,按照表 1 确定的评价分级标准,绘制土壤允许流失量对水土流失敏感性分级图。

3.2 水土流失综合敏感性评价方法

上述各单个因子确定的水土流失敏感性只是反映某一个因子的作用程度,无法综合反映西南喀斯特地区水土流失敏感性的空间格局。在 ArcGIS 中,将前述各因子对水土流失敏感性影响的分布图进行乘积运算,将运算得到的结果进行计算,公式如下:

$$SS_j = \sqrt[5]{\prod_{i=1}^{5} S_i}$$

式中，SS_j为 j 空间单元土壤侵蚀敏感性指数，S_i为 i 因素敏感性等级值。再采用自然分界法将乘积结果分成 5 类，这种分类方法是利用统计学的 Jenk 最优化法得出的分界点，能使各级的内部方差之和最小[30]，并绘制西南喀斯特地区水土流失综合敏感性分级图(图 1) 。

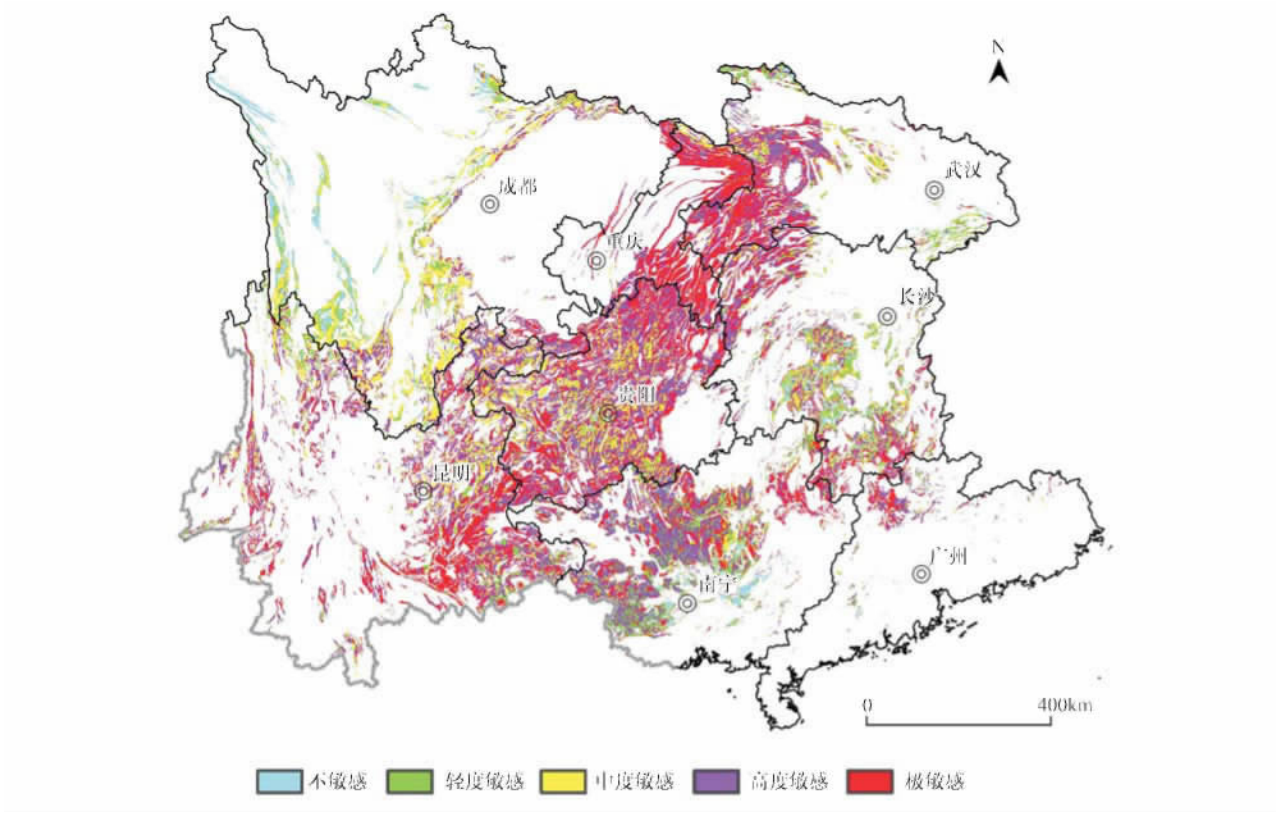

图 1　西南喀斯特区域水土流失敏感性综合评价图

Fig. 1　Integrated assessment of sensitivity of water and soil loss in karst regions, southwest China

4　结果分析

4.1　水土流失敏感性单因素影响评价

(1) 降雨侵蚀力对喀斯特地区水土流失敏感性评价

西南喀斯特地区降雨侵蚀力对水土流失敏感性以中度敏感以上为主(表 2) ，面积比达 99% 以上。这主要与我国西南喀斯特区属热带、亚热带季风气候，降雨充沛，夏季大范围的大雨、暴雨及短历时高强度暴雨为土壤的侵蚀提供了强大的营力有关。从空间分布来看，极敏感区域主要分布于粤北，湘南及广西大部分地区(桂西北除外) ; 高度敏感区主要分布于桂西北，滇东南，贵州省大部分地区，湘中，湘西，重庆大部分地区，鄂西，湖北东部也有分布; 中度敏感区域位于黔西的毕节和六盘水，四川，云南大部分地区及重庆西北角，湖北西北角; 不敏感和轻度敏感区所占面积比例很小，分布于四川西北部高海拔地区。

表 2　降雨侵蚀力对水土流失敏感性评价

Table 2　Assessment of the sensitivity of precipitation on water and soil loss

分级 Classification	不敏感 Insensitive	轻度敏感 Slight sensitive	中度敏感 Moderate sensitive	高度敏感 Strong sensitive	极敏感 Extremely sensitive
面积 Area/km^2	967	3790	169025	271548	89789
百分比 Proportion/%	0.18	0.71	31.59	50.75	16.78

(2) 地形起伏度对水土流失敏感性评价

西南喀斯特地区地形地貌复杂，各种喀斯特地貌都有分布，山高坡陡，地形起伏较大，再加上该地区人地

矛盾突出,大量陡坡耕种,导致植被遭到破坏,在降水量大、暴雨多的情况下,极易产生水土流失。因此,地形起伏度因子对水土流失敏感性也较高(表 3)。其中,中度敏感以上区域所占面积比例达 96.39%,轻度和不敏感区域主要分布于湖南省中南部及广西的南宁、崇左、来宾、柳州、玉林等地区,云南曲靖也有分布,但面积范围不大。

表 3 地形起伏度对水土流失敏感性评价

Table 3 Assessment of the sensitivity of topography on water and soil loss

分级 Classification	不敏感 Insensitive	轻度敏感 Slight sensitive	中度敏感 Moderate sensitive	高度敏感 Strong sensitive	极敏感 Extremely sensitive
面积 Area/km^2	2738	16559	41145	197417	277260
百分比 Proportion/%	0.51	3.09	7.69	36.89	51.81

(3) 土壤因子对水土流失敏感性评价

西南喀斯特地区土壤因子对水土流失敏感性以中度和高度敏感区为主(表 4),二者之和占总面积的 88.35%,这与西南喀斯特地区土壤类型主要为熟化程度不高的岩性土类——石灰土或粘性大的红壤、黄壤有关[34],此外,喀斯特地区土壤直接与基岩成突变接触,土壤剖面多为 A-B-D 型,缺乏 C 层,土壤与基岩之间的粘着力差,一遇较大降水,极易产生水土流失和块体滑移[32]。紫色土分布区域为土壤单因子对水土流失极敏感区,这主要是因为紫色土的 k 值较大,约占总面积的 3.19%。从空间分布来看,中度敏感区域主要分布于粤北,广西河池、百色、崇左、南宁、桂林,贵州遵义、黔南州、黔西南州、铜仁、黔东南州、安顺,云南文山州,湖南永州、湘西、邵阳,湖北宜昌、襄樊等地的喀斯特地区;高度敏感区主要分布在鄂西,湖南,贵州,重庆,广西大部分喀斯特地区,云南东部、西北部喀斯特区及四川南部;极敏感区主要分布在重庆东部,湘西张家界,鄂西恩施州,云南东部的红河州、曲靖、昭通,贵州西部毕节及四川南部的凉山州。

表 4 土壤类型对水土流失敏感性评价

Table 4 Assessment of the sensitivity of soil texture on water and soil loss

分级 Classification	不敏感 Insensitive	轻度敏感 Slight sensitive	中度敏感 Moderate sensitive	高度敏感 Strong sensitive	极敏感 Extremely sensitive
面积 Area/km^2	26536	18770	214932	257552	17036
百分比 Proportion/%	4.96	3.51	40.19	48.16	3.19

(4) 植被覆盖对水土流失敏感性评价

西南喀斯特地区植被对水土流失敏感性以轻度敏感和中度敏感区为主(表 5),这主要是因为西南喀斯特地区植被类型主要以灌丛、林地、草地为主,而这 3 种植被类型具有较好的水土保持作用,一年一熟作物种植区和石漠化地区对水土流失敏感性为高度敏感,但二者所占总面积比例较低。从空间分布格局来看,轻度敏感区主要分布在鄂西,湖南大部,贵州大部,粤北,桂西北、桂西南,滇西北,川西南等地喀斯特地区;中度敏感区主要分布在重庆、贵州及云南东部等地的喀斯特分布区。

表 5 植被覆盖对水土流失敏感性评价

Table 5 Assessment of the sensitivity of vegetation coverage on water and soil loss

分级 Classification	不敏感 Insensitive	轻度敏感 Slight sensitive	中度敏感 Moderate sensitive	高度敏感 Strong sensitive	极敏感 Extremely sensitive
面积 Area/km^2	47805	327812	158739	235	13
百分比 Proportion/%	8.94	61.32	26.69	0.04	0.00

(5) 土壤允许流失量对水土流失敏感性评价

西南喀斯特地区土壤允许流失量对水土流失敏感性全部为中度敏感以上,无不敏感和轻度敏感区域(表

6)。西南喀斯特地区土层浅薄,分布不连续,异质性高,再加上该区域碳酸盐岩中酸不溶物含量很低,使得该区域土壤允许流失量也很低,即使是很低的土壤侵蚀模数,也会给脆弱的西南喀斯特生态环境带来极大危害。极敏感区主要分布在贵州省境内及桂西北的河池市,湖北宜昌市与湖南湘西州; 高度敏感地区主要分布在滇东的红河州、文山州、曲靖,滇西北的丽江、迪庆、大理、临沧,湖南张家界、湘西州,湖北恩施、宜昌,重庆东北部,贵州南部的黔西南州和黔南州及桂西与桂西北地区。

表 6　土壤允许流失量对水土流失敏感性评价

Table 6　Assessment of the sensitivity of soil loss tolerance on water and soil loss

分级 Classification	中度敏感 Moderate sensitive	高度敏感 Strong sensitive	极敏感 Extremely sensitive
面积 Area/km^2	189081	97384	248654
百分比 Proportion/%	35.33	18.20	46.47

4.2　水土流失敏感性综合评价

(1) 水土流失多因素影响综合评价

西南喀斯特地区水土流失敏感性以中度敏感以上区域为主,占总面积的 82.8%; 轻度和不敏感区面积比例占 17.2%(表 7)。从空间分布格局来看,水土流失极敏感区主要分布于贵州遵义、铜仁、黔西南州、黔东南州、六盘水、黔南州、毕节,广西百色、桂林、河池、柳州、来宾,云南东南部,湖北恩施州、宜昌,湖南湘西州、永州、郴州,重庆市东南部和东北部,广东北部清远等地喀斯特地区; 高度敏感区在贵州大部分喀斯特区,云南文山州、曲靖、昭通、昆明、丽江、保山,广西河池、百色、崇左、南宁、来宾,湖北的十堰、宜昌、恩施州、襄樊,湖南西部的湘西州、张家界、湘中南的邵阳、永州、郴州等地的喀斯特地区均有分布; 中度敏感区在整个西南喀斯特地区分布比较零散,但在以下区域分布的面积较大,达 1500 km^2 以上,主要集中在贵州黔南州、毕节、遵义、安顺、贵阳、六盘水,云南的文山州、曲靖、昭通、昆明、迪庆,广西的河池,四川凉山州、甘孜州、雅安、阿坝州、乐山、绵阳,湖南邵阳、永州、郴州、娄底,湖北恩施州、宜昌、十堰。

表 7　水土流失敏感性综合评价

Table 7　Integrated assessment of sensitivity of water and soil loss

分级 Classification	不敏感 Insensitive	轻度敏感 Slight sensitive	中度敏感 Moderate sensitive	高度敏感 Strong sensitive	极敏感 Extremely sensitive
面积 Area/km^2	34132	58000	110229	201744	130448
百分比 Proportion/%	6.39	10.85	20.62	37.74	24.40

(2) 分省喀斯特地区水土流失敏感性评价

从西南喀斯特区各省(区、市)水土流失敏感性来看,除四川外,各省(区、市)喀斯特地区水土流失中度敏感性以上区域占该省(区、市)喀斯特面积比例的 70% 以上,云南、贵州、重庆三省市达 90% 以上(图 2)。

贵州省喀斯特区水土流失以高度敏感性为主,占 45.89%,其次是极敏感和中度敏感区,二者比例相当,分别达 24.78% 和 24.29%,不敏感和轻度敏感区所占比例很低; 云南省喀斯特区水土流失以高度敏感和极度敏感区为主,分别占云南省喀斯特面积比例的 40.11% 和 30.74%; 广西喀斯特区水土流失以高度、轻度和极敏感区为主,高度敏感区所占比例为 39.95%,轻度和极敏感区面积比例相当,分别为 21.45% 和 20.14%; 四川喀斯特地区水土流失以中度及以下敏感性为主,极敏感区域所占比例较低; 重庆市喀斯特区水土流失极敏感区占绝对优势,面积比例达 63.60%,其次为高度敏感区,占 30.07%,中度以下敏感区所占比例较低; 湖南省喀斯特地区水土流失高度敏感区域所占比例最大,达 35.27%,其次为中度敏感区,占 23.22%,极敏感区与轻度敏感区所占面积比例相当,分别为 16.58% 和 16.33%; 湖北省喀斯特地区水土流失以中度敏感以上区域为主,高度敏感区域占 43.10%,极敏感区占 26.94%,中度敏感区占 17.29%,轻度和不敏感区所占面积比例小; 广东省喀斯特地区水土流失敏感性与湖北省相似,但广东喀斯特面积比例较小,主要分布在广东北部。

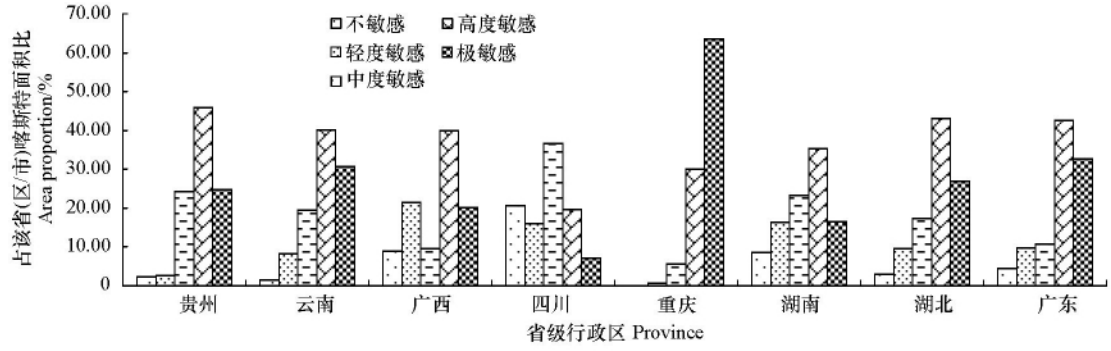

图 2 各省级行政区水土流失敏感性

Fig. 2 Sensitivity of water and soil loss in different provinces

(3) 喀斯特地区水土流失敏感性与地质背景关系

随着碎屑岩含量的增加,灰岩类岩性中,水土流失极敏感区所占比例呈下降趋势,高度敏感区所占比例呈先降后升的变化,但整体呈下降趋势,中度敏感区所占比例呈上升趋势; 白云岩类岩性中,极敏感区呈降低趋势,高度敏感区也呈现出降低趋势,但变化不如极敏感区变化快,中度敏感区呈上升趋势; 在混合岩类岩性中,极敏感区呈下降趋势,高度敏感区呈先升后降趋势,但变化趋势不大,中度敏感区呈上升趋势。

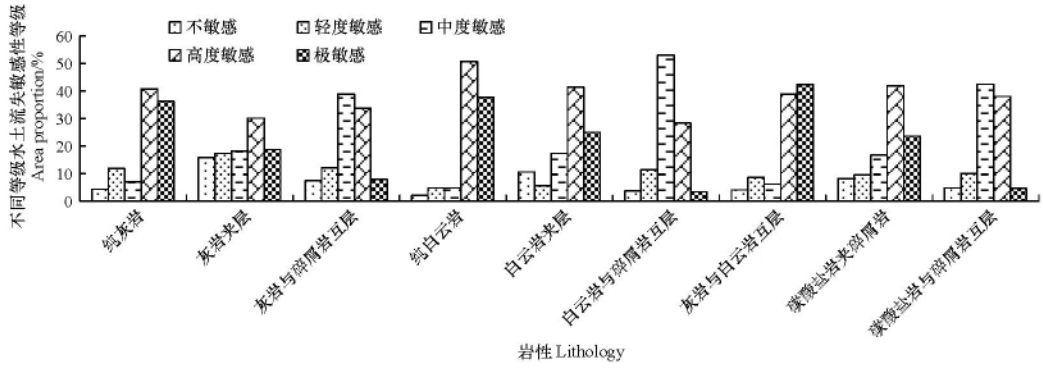

图 4 各岩性中不同等级水土流失敏感性比例

Fig. 4 Percentage of sensitivity of water and soil loss grade in different lithologies

5 结论与讨论

西南喀斯特区域是受地质背景制约的生态系统,其水土流失敏感性还与土壤允许流失量密切相关,因此,在评价喀斯特区域水土流失敏感性时,其评价指标除了要选择降水、地形、土壤、植被因子外,还必须考虑与地质背景有关的土壤允许流失量因子。

降雨侵蚀力、土壤类型、地形起伏度、及土壤允许流失量对西南喀斯特地区水土流失敏感性很高,而植被覆盖因子则对水土流失敏感性不高。这与整个喀斯特地区降水丰富,山高坡陡,土壤以石灰(岩)土、红壤、黄壤、黄棕壤、赤红壤、紫色土等为主,碳酸盐岩酸不溶物含量低,土壤成土速度慢,土壤允许流失量低,而植被类型以林地和灌草丛为主有关。

西南喀斯特地区水土流失敏感性普遍较高,中度敏感以上区域占西南喀斯特地区总面积的 82.8% **。中度敏感以上区域主要分布于贵州全境、广西峰丛洼地区、云南东南部、重庆东北部、东南部、湖北西南部及湖南西北部等区域。**

西南喀斯特地区水土流失敏感性与碳酸盐岩中碎屑岩的含量有明显相关性。在各类岩性中,随着碎屑岩含量的增加,水土流失极敏感区和高度敏感区所占面积比例呈下降趋势,中度敏感区所占比例呈上升趋势。

在西南喀斯特地区,水土流失的结果会导致石漠化,此时土壤侵蚀模数很低,但并不表明水土流失减弱,

恰恰是水土流失导致石漠化,出现了“无土可流”的状况[2,21],这种情况下,原有的评价体系就不适用了。土壤流失程度严重、岩石裸露,出现石旮旯地时,应当以石漠化面积的增加来评价其危害[21]。因此,未来的研究应该结合石漠化及其变化过程数据,提高西南喀斯特水土流失和石漠化防治的区域针对性。

致谢: 感谢中国地质科学院岩溶地质研究所曹建华研究员提供的地质数据; 中国科学院资源环境科学数据中心提供的土壤类型数据; 中国西部环境与生态科学数据中心提供的植被类型数据。

References:

[1] Yuan D X. On the environment and geological problems of karst mountains and rocks in the south-west China. World Sci-Tech R and D, 1997, 19(5): 41-43.

[2] Chai Z X. Soil erosion in karst area of Guangxi autonomous region. Journal of Mountain Research, 1989, 7(4): 255-259.

[3] Yuan D X. World correlation of karst ecosystem: objectives and implementation plan. Advance in Earth Sciences, 2001, 16(4): 461-466.

[4] Cao J H, Yuan D X, Zhang C, Jiang Z C. Karst Ecosystem of Southwest China Constrained by Geological Setting. Beijing: Geology Press, 2005: 90-111.

[5] Ouyang Z Y. The comprehensive management and development of ecological fragile zone of karst area, southwest China. World Sci-Tech R and D, 1998, 20(2): 53-56.

[6] Li G Q, Chen L D, Gao Q C, Jiang C L, Qiu J. Sensitivity assessment of water and soil loss along west-east pipeline project in Loess Plateau, China. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(6): 55-58.

[7] Lu Y, Hua C, Zhou X. GIS-based sensitivity evaluation for soil erosion in Guangxi. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(1): 98-100.

[8] Li Y B, Shao J A, Wang S J, Li R B. Assessment of soil erosion sensitivity based on the characteristics of karst ecosystem. Journal of Mountain Science, 2007, 25(6): 671-677.

[9] Luo J, Wang K L, Chen H S, Zhang W. Sensitivity of water and soil loss of northwest karst area in Guangxi province. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(6): 579-584.

[10] Yang G B, Li Y Q, An Y L. Pixel-based assessment and spatial distribution of sensitivity of soil erosion in Guizhou. Carsologica Sinica, 2006, 25(1): 73-78.

[11] Bell M, Limbrey S. Archaeological Aspects of Woodland Ecology. BAR International Series 146. Oxford: BAR, 1982.

[12] Li D W, Cui Z J, Liu G N, Feng J L, Cao J. Formation and evolution of karst weathering crust on limestone and its cyclic significance. Carsologica Sinica, 2001, 20(3): 183-188.

[13] Zhang X B, Wang S J, He X B, Wang Y C, He Y B. Soil creeping in weathering crusts of carbonate rocks and underground soil losses on karst slopes. Earth and Environment, 2007, 35(3): 202-206.

[14] Tang Y Q, Zhang X H, Zhou J, She T Y, Yang P, Wang J X. The mechanism of underground leakage of soil in karst rocky desertification areas —— a case in Chenqi small watershed, Puding, Guizhou Province. Carsologica Sinica, 2010, 29(2): 121-127.

[15] Zhang X N, Wang K L, Zhang W, Chen H S, He X Y, Zhang X B. Distribution of ^{137}Cs and relative influencing factors on typical karst sloping land. Chinese Journal of Environmental Science, 2009, 30(11): 3152-3158.

[16] Academic Divisions of the Chinese Academy of Sciences. Some suggestions of carrying forward the comprehensive harnessing desertification in southwest karst region. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(4): 489-492.

[17] Cai Y L. Preliminary research on ecological reconstruction in karst mountain poverty areas of southwest China. Advance in Earth sciences, 1996, 11(6): 602-606.

[18] Ju J H, Dai C G, Kuang S D, Li Z Z, Pan K, Tong L Q, Wang S Y. Remotely Sensed Monitoring and Prevent Program of Karst rocky Desertification. Beijing: Geological Press, 2006: 94-122.

[19] Wang S J, Ji H B, Ouyang Z Y, Zhou D Q, Zheng L P, Li T Y. Preliminary study on weathering and pedogenesis of carbonate rock. Science in China: Series D, 1999, 29(5): 442-449.

[20] Li R L, Wang S J, Zhou D Q, Zhang D F, Li F Q, Zhou Z F, Xiong K N. The correlation between rock desertification and lithology in karst area of Guizhou. Acta Geographic Sinica, 2003, 58(2): 314-320.

[21] Cao J H, Jiang Z C, Yang D S, Pei J G, Yang H, Luo W Q. Soil loss tolerance and prevention and measurement of karst area in southwest China. Soil and Water Conservation in China, 2008, (12): 40-45.

[22] Wei Q F. Soil erosion in karst region of south China and its control. Research of Soil and Water Conservation, 1996, 3(4): 72-76.

[23] Li Y C, Liu C X, Zhao C Y, Wang C J, Zhang H, Min J, Wang Y. Assessment and spatial differentiation of sensitivity of soil erosion in Three Gorges Reservoir area of Chongqing. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 788-796.

[24] Lu X X, Shen R M. A preliminay study on the values K of soil erosibility factor. Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 6(1): 63-70.

[25] Yang Z S. Soil erosibility factor of sloping cultivated land in the Northeast Mountain Region of Yunnan Province. Journal of Mountain Science, 1999, 17(S1): 10-15.

[26] Wang W Z, Jiao J Y, He X P, Zhang X K, Lu X Q, Chen F Y, Wu S Y. Study on rainfall erosivity in China. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1995, 9(4): 5-18.

[27] Wang X K, Ouyang Z Y, Xiao H, Miao H, Fu B J. Distribution and division of sensitivity to water-caused soil loss in China. Acta Ecologica

Sinica, 2001, 21(1): 14-19.
[28] Ma X W, Yang Q K. A study on indexes and choice extraction of China potential soil and water loss based on GIS. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(2): 41-44.
[29] Liu X H, Yang Q K, Tang G A. Extraction and application of relief of China based on DEM and GIS method. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(1): 57-62.
[30] Wang W Z, Jiao J Y. Quantitative evaluation on factors influencing soil erosion in China. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1996, 16(5): 1-20.
[31] Yang H, Cao J H, Zhang L K, Huang L Y, Shen H G. Analysis of the characteristics of water and soil loss in Lingyun county. Soil and Water Conservation in China, 2006, (9): 17-19.
[32] Li Y B, Wang S J, Wei C F, Long J. The spatial distribution of soil loss tolerance in carbonate area in Guizhou Province. Earth and Environment, 2006, 34(4): 36-40.
[33] Zhang X B, Wang S J, Cao J H. Mass balance of silicate minerals in soils and soil losses in the karst mountainous regions of southwest China. Earth and Environment, 2009, 37(2): 97-102.
[34] Lan A J, Zhang B P, Xiong K N, An Y L. Spatial pattern of the fragile karst environment in southwest Guizhou province. Geographical Research, 2003, 22(6): 733-741.

参考文献:

[1] 袁道先. 我国西南岩溶石山的环境地质问题. 世界科技研究与发展, 1997, 19(5): 41-43.
[2] 柴宗新. 试论广西岩溶区的土壤侵蚀. 山地研究, 1989, 7(4): 255-259.
[3] 袁道先. 全球岩溶生态系统对比: 科学目标和执行计划. 地球科学进展, 2001, 16(4): 461-466.
[4] 曹建华, 袁道先, 章程, 蒋忠诚. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统. 北京: 地质出版社, 2005: 90-111.
[5] 欧阳自远. 中国西南喀斯特生态脆弱区的综合治理与开发脱贫. 世界科技研究与发展, 1998, 20(2): 53-56.
[6] 李国强, 陈利顶, 高启晨, 姜昌亮, 丘君. 黄土高原地区西气东输工程沿线水土流失敏感性评价. 水土保持学报, 2003, 17(6): 55-58.
[7] 卢远, 华璀, 周兴. 基于 GIS 的广西土壤侵蚀敏感性评价. 水土保持研究, 2007, 14(1): 98-100.
[8] 李阳兵, 邵景安, 王世杰, 李荣彪. 基于岩溶生态系统特性的水土流失敏感性评价. 山地学报, 2007, 25(6): 671-677.
[9] 罗俊, 王克林, 陈洪松, 张伟. 桂西北喀斯特地区水土流失敏感性评价. 长江流域资源与环境, 2009, 18(6): 579-584.
[10] 杨广斌, 李亦秋, 安裕伦. 基于网格数据的贵州土壤侵蚀敏感性评价及其空间分异. 中国岩溶, 2006, 25(1): 73-78.
[12] 李德文, 崔之久, 刘耕年, 冯金良, 曹俊. 岩溶风化壳形成演化及其循环意义. 中国岩溶, 2001, 20(3): 183-188.
[13] 张信宝, 王世杰, 贺秀斌, 汪阳春, 何永彬. 碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失. 地球与环境, 2007, 35(3): 202-206.
[14] 唐益群, 张晓晖, 周洁, 佘恬钰, 杨坪, 王建秀. 喀斯特石漠化地区土壤地下漏失的机理研究——以贵州普定县陈旗小流域为例. 中国岩溶, 2010, 29(2): 121-127.
[15] 张笑楠, 王克林, 张伟, 陈洪松, 何寻阳, 张信宝. 典型喀斯特坡地^{137}Cs 的分布与相关影响因子研究. 环境科学, 2009, 30(11): 3152-3158.
[16] 中国科学院学部. 关于推进西南岩溶地区石漠化综合治理的若干建议. 地球科学进展, 2003, 18(4): 489-492.
[17] 蔡运龙. 中国西南岩溶石山贫困地区的生态重建. 地球科学进展, 1996, 11(6): 602-606.
[18] 鞠建华, 戴传固, 况顺达, 李志忠, 潘康, 童立强, 王尚彦. 岩溶石漠化遥感监测与防护规划. 北京: 地质出版社, 2006: 94-122.
[19] 王世杰, 季宏兵, 欧阳自远, 周德全, 郑乐平, 黎廷宇. 碳酸盐岩风化成土作用的初步研究. 中国科学(D 辑), 1999, 29(5): 442-449.
[20] 李瑞玲, 王世杰, 周德全, 张殿发, 李凤全, 周忠发, 熊康宁. 贵州岩溶地区岩性与土地石漠化的相关分析. 地理学报, 2003, 58(2): 314-320.
[21] 曹建华, 蒋忠诚, 杨德生, 裴建国, 杨慧, 罗为群. 中国西南岩溶区土壤允许流失量及防治对策. 中国水土保持, 2008, (12): 40-45.
[22] 韦启璠. 我国南方喀斯特区土壤侵蚀特点及防治途径. 水土保持研究, 1996, 3(4): 72-76.
[23] 李月臣, 刘春霞, 赵纯勇, 王才军, 张虹, 闵睫, 汪洋. 三峡库区(重庆段)土壤侵蚀敏感性评价及其空间分异特征. 生态学报, 2009, 29(2): 788-796.
[24] 吕喜玺, 沈荣明. 土壤可蚀性因子 K 值的初步研究. 水土保持学报, 1992, 6(1): 63-70.
[25] 杨子生. 滇东北山区坡耕地土壤可蚀性因子. 山地学报, 1999, 17(增刊): 10-15.
[26] 王万忠, 焦菊英, 郝小品, 张宪奎, 卢秀琴, 陈法扬, 吴素业. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布(Ⅰ). 水土保持学报, 1995, 9(4): 5-18.
[27] 王效科, 欧阳志云, 肖寒, 苗鸿, 傅伯杰. 中国水土流失敏感性分布规律及其区划研究. 生态学报, 2001, 21(1): 14-19.
[28] 马晓微, 杨勤科. 基于 GIS 的中国潜在水土流失评价指标研究. 水土保持通报, 2001, 21(2): 41-44.
[29] 刘新华, 杨勤科, 汤国安. 中国地形起伏度的提取及在水土流失定量评价中的应用. 水土保持通报, 2001, 21(1): 57-62.
[30] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究. 水土保持通报, 1996, 16(5): 1-20.
[31] 杨慧, 曹建华, 张连凯, 黄黎英, 申宏岗. 凌云县水土流失特性分析. 中国水土保持, 2006, (9): 17-19.
[32] 李阳兵, 王世杰, 魏朝富, 龙健. 贵州省碳酸盐岩地区土壤允许流失量的空间分布. 地球与环境, 2006, 34(4): 36-40.
[33] 张信宝, 王世杰, 曹建华. 西南喀斯特山地的土壤硅酸盐矿物物质平衡与土壤流失. 地球与环境, 2009, 37(2): 97-102.
[34] 兰安军, 张百平, 熊康宁, 安裕伦. 黔西南脆弱喀斯特生态环境空间格局分析. 地理研究, 2003, 22(6): 733-741.