

贵州省喀斯特石漠化与水土流失空间相关分析

刘发勇^{1,2}, 熊康宁^{1,2}, 兰安军^{2,3}, 詹奉丽³, 犹珀玉³, 艾玉³

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院, 贵阳 550001; 2. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001; 3. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001)

摘要:喀斯特地区石漠化现象的产生与水土流失之间存在不可分割的关系。为进一步分析石漠化与水土流失之间的关系,以贵州省 2010 年的水土流失及石漠化解译数据为基础,运用地图代数原理,通过水土流失与石漠化转移矩阵的计算,从而得出不同水土流失等级的石漠化分布以及不同石漠化等级的水土流失分布情况。结果表明:贵州省石漠化主要发生在水土流失轻度侵蚀与中度侵蚀区,其发生率分别为 24.31%, 24.09%, 而水土流失主要发生在轻度石漠化与潜在石漠化区,其发生率分别为 35.70%, 34.16%; 水土流失或石漠化等级的变化并不一定呈现相应等级的石漠化或水土流失等级的变化,石漠化的发生与生态恢复存在滞后性。

关键词:石漠化; 水土流失; 相关分析; 贵州省

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)06-0060-05

Correlation Between Rocky Desertification and Water and Soil Loss in the Karst Area of Guizhou

LIU Fayong^{1,2}, XIONG Kangning^{1,2}, LAN Anjun^{2,3}, ZHAN Fengli³, YOU Poyu³, AI Yu³

(1. School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China;

2. State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang 550001, China;

3. School of Geography and Environment Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: There is the inseparable relationship between rocky desertification phenomenon and water and soil loss. To further analyze the relationship between rocky desertification and water and soil loss, we took rocky desertification and Water and soil loss data of Guizhou Province in 2010 as the base of data interpretation, thus obtained the rocky desertification distribution at different levels of water and soil loss and the distribution of water and soil loss at the different rocky desertification levels. The results show that: Guizhou Province rocky desertification occurs mainly in mild to moderate erosion areas, its incidence is 24.31%, 24.09%, respectively, while the water and soil loss occurs mainly in slightly rocky desertification and potential rocky desertification area, the incidence rate is 35.70%, 34.16%; the level change of water and soil loss or rocky desertification rating does not necessarily render the appropriate level of rocky desertification and water and soil loss grade changes, rocky desertification occurrence and ecological restoration lags.

Keywords: rocky desertification; water and soil Loss; Guizhou Province; correlation analysis

贵州省是一个相对独特的地域环境单元,属典型的生态脆弱区,水土流失与石漠化等生态环境问题极为严重^[1]。水土流失与石漠化是同一生态退化过程中的不同阶段,石漠化是土壤侵蚀长期作用的结果,土壤侵蚀是石漠化过程中某一阶段作用强度的体现,水土流失加剧了贵州省石漠化的进程,二者在成因上存在因果关系^[2-3]。许多学者从不同角度对西南喀斯特石漠化问题与水土流失进行了大量的研究,李阳兵

等^[4-6]从不同角度与尺度研究了地形坡度与石漠化的相关关系;李瑞玲等^[7]则分析了岩性与石漠化的关系;王世杰等^[8]还从时间尺度上研究了贵州碳酸盐岩成土和流失机制;曹建华等^[2]提出了贵州岩溶区水土流失和石漠化受岩溶环境制约;李生等^[9]根据石漠化地区植被类型的不同来研究地表水土流失特征;尹辉等^[10]从时间与空间尺度上研究了西南岩溶区水土流失与石漠化动态变化;蒋忠诚等^[11]根据西南岩溶石漠化区的

收稿日期: 2014-12-30

修回日期: 2015-01-11

资助项目: 国家“十二五”科技支撑计划重大课题(2011BAC09B01); 贵州省科技计划重大专项(黔科合重大专项字[2004]6007号)

第一作者: 刘发勇(1991—), 男, 贵州黔西县人, 硕士研究生, 研究方向: 喀斯特生态环境。E-mail: 372387883@qq.com

通信作者: 熊康宁(1958—), 男, 贵州威宁县人, 教授, 主要从事喀斯特与洞穴、资源与环境及石漠化生态治理等方面的研究。E-mail: xiongkn

@163.com

特殊性,提出了岩溶区水土流失综合防治对策;魏兴萍^[12]等以重庆南川岩溶区为例,分析了水土流失变化与石漠化的变化关系。但是大多数研究主要分析岩溶区的石漠化或者岩溶区的水土流失以及其动态变化关系,很少研究两者之间的相关关系,尤其是两者在程度上的相关性。李晋等^[13]研究了喀斯特地区水土流失特殊性,提出喀斯特地区水土流失评价标准应该有特殊性。因此本文以贵州省为例,以 ALOS 卫星 10 m 空间分辨率遥感影像数据为基础,解译得出贵州省 2010 年水土流失和石漠化分布图,运用地图代数原理,通过建立转换矩阵,定量分析了不同水土流失等级与石漠化等级之间的相关关系,从而为贵州省水土流失以及石漠化的生态治理提供科学依据。

1 研究区概况

贵州省地处中国第二级阶梯上,位于中国西南的东南部,云贵高原东部,是一个喀斯特地貌广泛发育、纬度较低、切割强烈、地表起伏悬殊、多山地的亚热带高原山区,是中国西南喀斯特地貌最集中成片分布的中心片区,平均海拔约 1 100 m。全省由西向东呈梯级状下降,自中向北、东、南三面倾斜,地貌结构是东西三级阶梯,南北两面斜坡,年平均气温 14.0~18.0℃,年平均降水量 1 100~1 300 mm。境内河流分属长江流域和珠江流域。全省土壤共分红壤、黄壤、黄棕壤、石灰土等 15 个土类。植被类型除具有明显的亚热带性质外,还具有组成种类繁多、类型复杂、地域差异明显等特点,但受人为活动的影响,又具有较强的次生性。在脆弱的喀斯特自然背景下,加之不合理的人为活动原因,生态环境更加恶化,尤其在西部地区,人口密度大,植被覆盖度低,耕地垦殖率高,水土流失与石漠化现象严重,大片丘陵逐渐成为荒山秃岭。因此石漠化与水土流失是贵州省的主要生态环境问题。

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

本次采用的遥感数据为 ALOS 卫星 10 m 空间分辨率数据,遥感影像经过几何精校正,图像镶嵌与色彩匹配等处理,坡度数据由贵州省 30 m 分辨率 DEM 数据提取,地层岩性数据来源于贵州省 1:20 万区域水文地质图,所有数据均与 1:5 万地形图进行校正,所有数据统一定义为 Albers Conical Equal Area 投影,从而保证数据的叠加分析。以县为单位进行遥感影像解译,为保证整个石漠化与水土流失遥感解译的精度和等级指标选择的一致性,在遥感解译之前对典型的区域进行实地调查,在遥感解译的过程

中结合地形图、地质图和土地利用状况,综合分析判断划分等级,并进行实地野外验证(采用 GPS 定位来验证实地与解译信息是否吻合)计算解译精度,对精度达不到要求的县重新进行解译和修正,对分县石漠化或水土流失图进行拼接、融合、去除小图斑等操作,最后生成贵州省喀斯特石漠化图以及水土流失图。

2.2 石漠化与水土流失分级

参考熊康宁^[14]、陈起伟^[15]的研究成果,本次石漠化分级采用六级分类标准。传统的土壤侵蚀分级没有区分喀斯特地区与非喀斯特地区,根据相关研究^[16-18]表明,喀斯特地区和非喀斯特地区土壤侵蚀强度、土壤抗蚀年限和土壤侵蚀危险度方面,存在明显的差异,因此,本研究对土壤侵蚀分等定级时,将纯碳酸盐岩区和碳酸盐岩夹非碳酸盐岩区定义为喀斯特区,采用《岩溶地区水土流失综合治理技术标准》(SL461—2009),而非碳酸岩区采用《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—2007)。

根据石漠化以及土壤侵蚀分级体系与标准,运用 ARCGIS 软件进行专题数据的处理与数据管理及制图,最后得出贵州省 2010 年石漠化分布图与水土流失分布图(图 1)。

2.3 地图代数运算

为定量分析不同水土流失等级与不同石漠化等级之间关系,引用地图代数原理,利用公式(1)的地图代数方法对研究区水土流失与石漠化类型之间的相互变化信息进行提取,

$$C_{ij} = R_{ij} \times 100 + S_{ij} \quad (1)$$

式中: C_{ij} ——石漠化图层与水土流失图层进行空间叠加的综合图层; R_{ij} ——石漠化图层; S_{ij} ——水土流失图层,以该方法对两个不同的专题图层进行空间叠加运算,计算结果既能在空间上反映不同专题图层的等级变化,同时也能得出不同图层之间的相互转换关系。

3 结果与分析

3.1 石漠化与水土流失分布格局

从图 1 可以看出,贵州石漠化状况受喀斯特分布广的影响,全省除主要的非喀斯特区外,其他各县市都存在着石漠化。全省石漠化土地面积达 36 472.57 km²,占全省总面积的 20.70%,占喀斯特面积的 33.44%,这意味着贵州超过 1/3 的喀斯特地区已经发生了石漠化,石漠化形式相当严峻。但全省石漠化主要以轻度石漠化与中度石漠化为主,占全省石漠化面积的 88.96%。强度石漠化及以上等级所占比例较小,面积按大小顺序排列为无石漠化>潜在石漠化>轻石漠化>中度石漠化>强度石漠化>极强度石漠化,石漠化程度越严重,比例越小(表 1)。

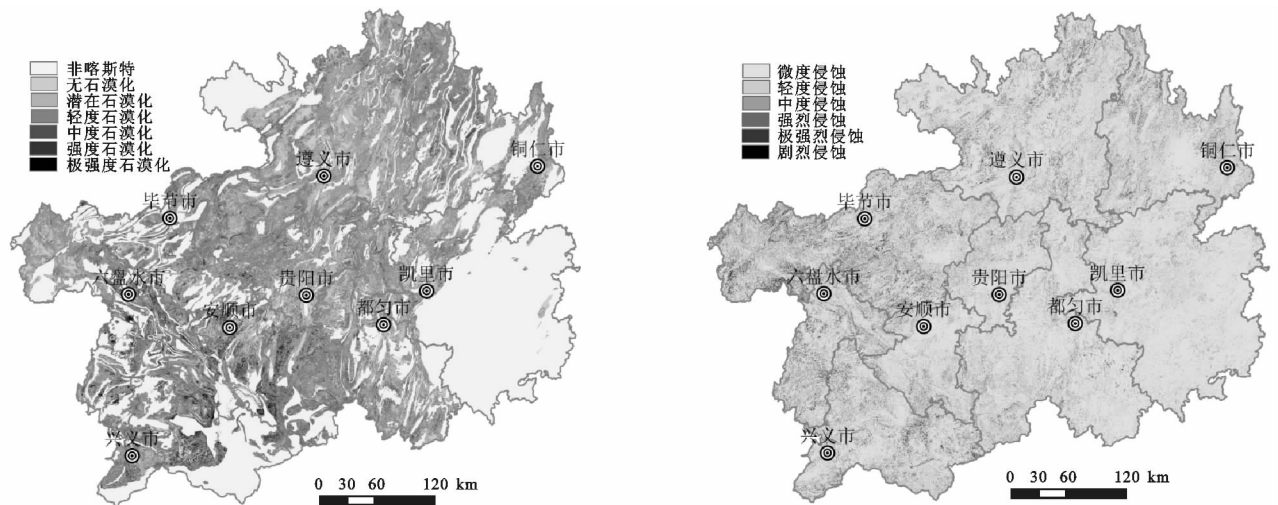


图 1 贵州省 2010 年石漠化与水土流失图

从贵州省水土流失强度的分布情况来看,空间分布特征明显,全省土壤侵蚀由西北至东南逐渐减轻,西部、西北部及东北部侵蚀最为严重,强烈等级以上的土壤侵蚀主要分布在这一区域,中部、东部地区次之,南部、东南部地区主要是微度侵蚀。全省水土流失面积 55 269.40 km², 占全省总面积的 31.37%。水土流失面积中以轻度侵蚀与中度侵蚀为主,占水土流失面积的 79.71%;剧烈侵蚀面积最小,仅占水土流失面积的 4.05%,各侵蚀等级面积按大小顺序排列为微度侵蚀>轻度侵蚀>中度侵蚀>强烈侵蚀>极强烈侵蚀>剧烈侵蚀,与石漠化现象一致,土壤侵蚀等级越高,其所占比例越小,呈现的倒金字塔形状(表 2)。

从表 3 中可以看出,石漠化与水土流失都最严重的区域面积仅为 3.25 km²,这说明在喀斯特地区石漠化现象与水土流失并不是严格的共存关系,水土流失与石漠化在等级上存在差异性,不同的石漠化等级区域存在不同等级的水土流失,而不同的水土流失等级也有不同程度的石漠化现象的发生,尤其在强度与等级上更体现出复杂性,同时水土流失等级与石漠化等级之间存在跳跃性,水土流失等级的变化并不一定呈现相应等级的石漠化等级的变化,反之,石漠化等级的变化也并不一定会引起相对应的水土流失等级变化。如由于植被砍伐等因素,石漠化等级从直接潜在石漠化直接向强度甚至极强度石漠化等级跨越,但由于喀斯特地区土壤侵蚀模数的影响,其水土流失等级的并不会像石漠化等级变化那样跳跃式的发展。

3.2 石漠化与水土流失空间相关分析

3.2.1 不同水土流失等级区域的石漠化 从全省各水土流失等级的石漠化率来看,全省石漠化所占比例最大的为微度侵蚀,其比例达 19.85%,随着水土流失等级的增加,各等级的石漠化率逐渐减少,与各水土流失等级占全省比例相一致;但是各水土流失等级区内石漠化所占的比例变化较大,石漠化率最大的是轻度侵蚀地区,其石漠化面积占轻度侵蚀区域总面积的 24.31%,其次是中度侵蚀区域,占中度侵蚀区域总面积的 24.09%,比例最小的剧烈侵蚀区域,石漠化比例为 13.36%。

从图 2 中可以看出,各水土流失等级区域内的石漠化比例并不是严格按照水土流失等级越高石漠化比例越大的趋势增加,相反,在水土流失极其严重的剧烈侵蚀地区,其石漠化面积比例最小,这一方面是由于水土流失侵蚀越高,其在喀斯特地区的比例越小所致,另一方面也说明石漠化最严重的地方并不是水土流失最严重的地方。魏兴萍等^[10]的研究表明,石漠化现象是土侵蚀发展到一定程度的产物,石漠化程度并不会随着土壤侵蚀的减弱而马上降低,其治理与恢复需要一定的过程,在时间上存在滞后性。正因为石漠化与水土流失之间存在时间上的滞后性,也说明目前水土流失最严重的区域并不一定是石漠化最严重区域,随着时间的推移,当目前土流失严重的区域石漠化程度向顶级发展时,该区域的水土流失也不再是最严重区域,其土壤侵蚀模数已经大大降低,属更低等级的水土流失。

表 1 贵州省喀斯特石漠化面积统计

石漠化等级	喀斯特区						非喀斯特区
	无石漠化	潜在石漠化	石漠化				
			轻度石漠化	中度石漠化	强度石漠化	极强度石漠化	
面积/km ²	39463.52	33148.49	22426.15	10018.27	3273.20	754.54	67083.45
比例/%	22.40	18.82	12.73	5.69	1.86	0.43	38.08

表 2 贵州省水土流失面积统计

侵蚀等级	微度侵蚀	水土流失				
		轻度侵蚀	中度侵蚀	强烈侵蚀	极强烈侵蚀	剧烈侵蚀
面积/km ²	120898.20	27700.40	16356.32	6011.53	2960	2241.15
比例/%	68.63	15.72	9.28	3.41	1.68	1.27

表 3 贵州省石漠化—水土流失转换矩阵

		喀斯特区						非喀斯特区	合计
水土流失等级		无石漠化	潜在石漠化	石漠化					
				轻度石漠化	中度石漠化	强度石漠化	极强度石漠化		
水土流失	微度侵蚀	28415.42	21825.62	14420.42	6700.60	2326.45	548.75	46660.93	120898.19
	轻度侵蚀	5705.95	5658.64	4244.05	1803.29	556.26	131.15	9601.06	27700.40
	中度侵蚀	3237.33	3438.77	2507.52	1081.67	292.85	58.90	5739.29	16356.32
	强烈侵蚀	1177.92	1246.25	738.69	258.04	56.73	9.21	2524.69	6011.53
	极强烈侵蚀	523.69	556.70	309.77	102.65	22.40	3.28	1441.50	2960.00
	剧烈侵蚀	403.20	422.51	205.69	72.01	18.52	3.25	1115.97	2241.15
合计		39463.52	33148.49	22426.15	10018.27	3273.21	754.54	67083.45	176167.60

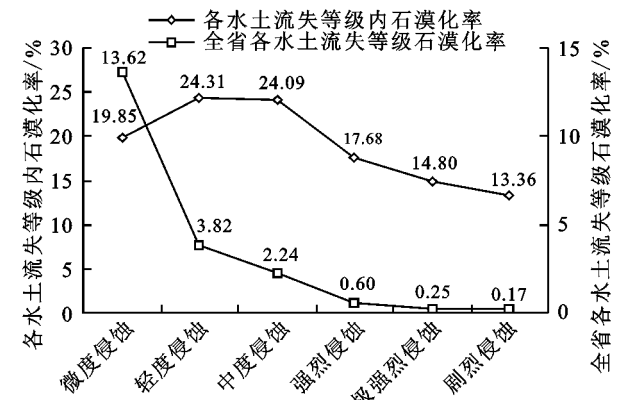


图 2 各水土流失等级的石漠化率

为分析各水土流失等级中不同程度石漠化等级的变化关系,通过不同程度石漠化的发生率(图 3)可以看出,各水土流失等级中石漠化主要以轻度石漠化为主,但中度石漠化所占比例也相对较大。强度与极强度石漠化在水土流失轻度侵蚀区域比例最高,其次是水土流失微度侵蚀区,水土流失中度侵蚀以上等级的强度与极强度石漠化等级比例均逐渐减小,但总体来看,各石漠化等级均呈现先上升后下降的趋势。

综上所述水土流失与石漠化关系分析可以看出,水土流失最严重的区域石漠化的程度和范围并不比其他侵蚀区严重,石漠化率在中度侵蚀以后明显下降,在水土流失轻度侵蚀区域石漠化的发生率最高,在石漠化等级组成中,强度石漠化以上等级在轻度侵蚀区比例也最大,这也说明岩溶地区石漠化程度并不完全依赖于水土流失的速率,而是多种因素综合作用的结果。

3.2.2 不同石漠化等级区域的水土流失 从全省喀斯特区不同石漠化等级的水土流失率(图 4)来看,全省水土流失率最大的为潜在石漠化区域,其比例为

6.43%,无石漠化区域水土流失率为 6.27%。贵州省岩溶地区水土流失率为 19.78%,这说明,在岩溶地区,水土流失主要发生在岩溶地区的无石漠化以及潜在石漠化区域,占了喀斯特地区水土流失的 64.20%。水土流失率最大的是轻度石漠化区域,其水土流失面积占轻度石漠化总面积的 35.70%,其次是潜在石漠化区域,占该区总面积的 34.16%,潜在、轻度石漠化区水土流失率较大这一结论与熊康宁等^[19]基于不同等级石漠化样地的土壤侵蚀量的研究一致。随着石漠化等级的增加,各石漠化等级的水土流失率逐渐减少,强度石漠化区濒临无土可流,土壤侵蚀量极低,极强度石漠化区已经无土可流,水土流失率最小,为 27.27%。

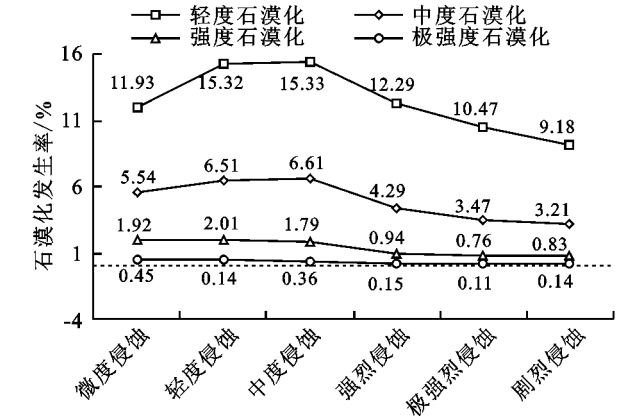


图 3 不同水土流失等级的不同石漠化等级发生率

从图 4 中可以看出,无石漠化区域到潜在石漠化区域土壤侵蚀发生率逐步上升,到轻度石漠化区域达到最大值,从轻度石漠化等级开始水土流失发生率随石漠化等级的升高而减小,这主要是由土壤侵蚀模数导致的,石漠化等级越高的区域基岩裸露率越高,土壤覆被小且土层薄,土壤侵蚀量和土壤侵蚀模数也越小。石漠化越严重的地区土壤侵蚀率越小,这不仅不

表示石漠化地区土壤侵蚀不严重,还体现了喀斯特地区的土壤贫瘠等生态问题。

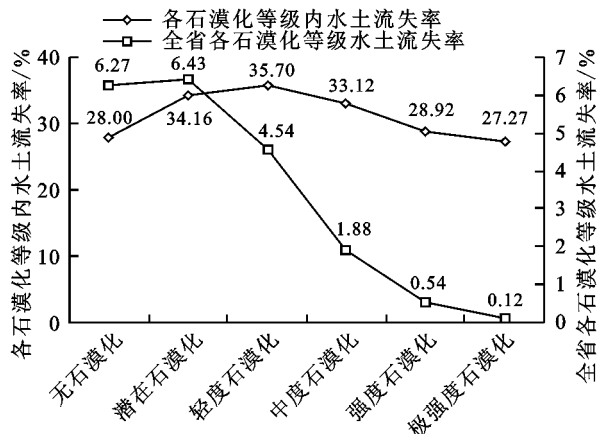


图4 各石漠化等级的水土流失率

从不同程度石漠化的不同水土流失等级发生率(图5)可以看出,各石漠化等级中等水土流失主要以轻度侵蚀为主,中度侵蚀比例也相对较大。轻度侵蚀与中度侵蚀比例最大值均发生在轻度石漠化区域,而强烈侵蚀以上等级比例的最大值均发生在潜在石漠化区域,总体上来看,各水土流失等级比例随着石漠化等级的增加逐渐降低,但是在极强度石漠化区域,水土流失轻度侵蚀等级所占比例有所上升,这与上文分析一致,在极强度石漠化区域,土壤侵蚀量与侵蚀模数均较小,因此,从土壤侵蚀的角度来说,该区域的土壤侵蚀并不严重,因为其土壤含量较少,部分地区甚至无土可流,属于土壤轻度侵蚀区。

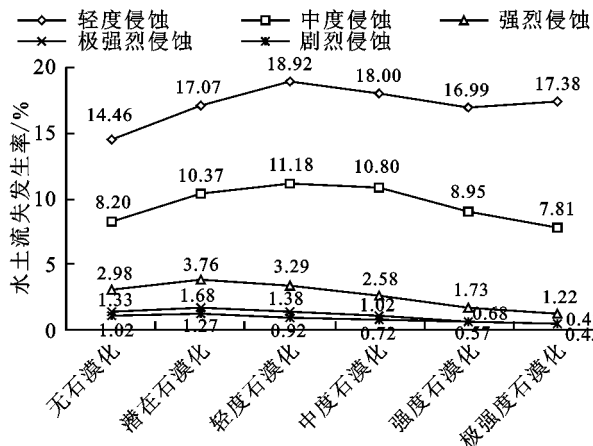


图5 不同程度石漠化的不同水土流失等级发生率

4 结论与讨论

喀斯特石漠化与水土流失有着直接的关系,但是喀斯特石漠化与水土流失并不是严格的共存关系,其等级之间的相互关系比较复杂,存在跳跃性,水土流失或者石漠化等级的变化并不一定呈现相应等级的石漠化或者水土流失等级的变化,石漠化的发生与生态恢复存在滞后性。

在不同的水土流失等级区,轻度侵蚀区石漠化的发生率最高,在石漠化等级组成中,强度石漠化以上等级在轻度侵蚀区比例也最大,也再次说明石漠化与水土流失之间存在滞后性,喀斯特区水土流失严重的区域将来可能会是石漠化严重的区域,而现在的石漠化严重区域,由于其土壤可侵蚀量已经大大减少,不再是严重土壤侵蚀区。

在不同的石漠化等级区,水土流失最严重的是发生在轻度石漠化区,轻度石漠化区既有较大的土被覆盖率和较厚的土层,又有足够大的坡度将雨水转化成侵蚀动力,在不合理的人类活动下,常常导致水土流失量巨大。极强度石漠化区域可以说是水土流失剧烈侵蚀所形成,但是其基岩裸露率较高,岩石的成土速率较低,与水土流失相比,土壤含量呈现出“入不敷出”的现象,因此,就水土流失侵蚀模数而言,其土壤侵蚀等级较低。

本次的水土流失研究主要是宏观研究,对于喀斯特地区独特的二元结构所造成的地下孔裂隙流失未涉及,在今后的研究中,可选择具有典型二元结构的不同石漠化强度的流域进行更进一步的研究论证,但是喀斯特地区的地下流失量还需在更多地貌类型区长期监测数据的基础上来测定^[20]。

在今后的石漠化生态治理以及水土保持工作中,应该针对不同等级石漠化、不同等级水土流失之间的相互关系与特点展开工作,在总体布局生态治理与恢复措施的同时,应该加强轻度、中度侵蚀区的石漠化生态治理,同时还应加强潜在、轻度石漠化区域的水土流失治理。

参考文献:

- [1] 苏维词. 贵州喀斯特山区的土壤侵蚀性退化及其防治[J]. 中国岩溶, 2001, 20(3): 217-223.
- [2] 曹建华, 蒋忠诚, 杨德生, 等. 贵州省岩溶区水土流失, 石漠化受岩溶环境制约[J]. 中国水土保持, 2009(1): 20-23.
- [3] 郑永春, 王世杰. 贵州山区石灰土侵蚀及石漠化的地质原因分析[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(5): 461-465.
- [4] 李阳兵, 王世杰, 周梦维, 等. 不同空间尺度下喀斯特石漠化与坡度的关系[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 70-72.
- [5] 周忠发. 喀斯特地区石漠化与地形坡度的关系分析: 以贵州省清镇市为例[J]. 水土保持通报, 2006, 26(5): 1-3.
- [6] 李瑞玲, 王世杰, 熊康宁, 等. 贵州省岩溶地区坡度与土地石漠化空间相关分析[J]. 水土保持通报, 2006, 26(4): 82-86.
- [7] 李瑞玲, 王世杰. 贵州岩溶地区岩性与土地石漠化的相关分析[J]. 地理学报, 2003, 58(2): 314-320.
- [8] 王世杰, 季宏兵. 碳酸盐岩风化成土作用的初步研究[J]. 中国科学: D辑, 1999, 29(5): 441-449.

境、水质特点、流动性大小等具体情况,应分别分析其主要污染途径,据此有针对性的进行雨水处理和技术管控。

(3) 加强工程措施与非工程措施相结合,对汇入受纳水体前的雨水径流综合运用截污、沉淀、过滤、生物滞留与渗流系统以及湿地系统等技术手段,并定期进行路面清扫、减少农药喷洒次数、对水体定期清淤,进行初期雨水弃流^[15],能有效去除其中的污染物质^[16]。

(4) 从水文、生态、景观角度,树立雨水最佳管理实践的新理念,应用新技术,对雨水径流进行规范的引导和有效的管理,达到控制径流、减少对受纳水体污染的目的,实现水资源的可持续发展。

参考文献:

- [1] Opher T, Ostfeld A, Friedler E. Modeling highway runoff pollutant levels using a data driven model [J]. *Water Science and Technology*, 2009, 60(1): 19-27.
- [2] Hardy S D, Koontz T M. Reducing nonpoint source pollution through collaboration: policies and programs across the US states[J]. *Environmental Management*, 2008, 41(3): 301-310.
- [3] 蒋艳红, 吴珏金, 钟小敏, 等. 城市降雨径流对桂林四湖水质的影响[J]. *北方环境*, 2011, 23(11): 56-58.
- [4] Ongley E D, Xiaolan Z, Tao Y. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China [J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5): 1159-1168.

- [5] 唐孟成, 王寿祥, 朱荫涓. 西湖湖水碱化对水体理化性质的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(4): 449-453.
- [6] 夏波, 张庆河, 蒋昌波, 等. 水体紊动作用下湖泊泥沙解吸释放磷的试验研究[J]. *泥沙研究*, 2014(1): 74-80.
- [7] 李一平. 太湖水体透明度影响因子试验及模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [8] 宋学宏, 祁旭文, 孙丽萍, 等. 阳澄湖养殖水体 COD 降解动力学研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2010, 37(2): 328-332.
- [9] Liikanen A N U, Murtoniemi T, Tanskanen H, et al. Effects of temperature and oxygen availability on greenhouse gas and nutrient dynamics in sediment of a eutrophic mid-boreal lake [J]. *Biogeochemistry*, 2002, 59(3): 269-286.
- [10] 杨龙元, 秦伯强, 吴瑞金. 酸雨对太湖水环境潜在影响的初步研究[J]. *湖泊科学*, 2001, 13(2): 135-142.
- [11] 徐祖信. 我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2005, 33(3): 321-325.
- [12] 徐祖信. 我国河流综合水质标识指数评价方法研究[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2005, 33(4): 482-488.
- [13] 伊元荣, 海米提, 依米提, 等. 乌鲁木齐市不同下垫面雨水径流水质特性分析[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(2): 247-251.
- [14] 陈光, 刘廷良, 孙宗光. 水体中 TOC 与 COD 相关性研究[J]. *中国环境监测*, 2005, 21(5): 9-12.
- [15] 孙欢, 刘志强, 刘洪海, 等. 天津市某大学校园雨水利用探究[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(2): 288-292.
- [16] 何金兰, 钱国平, 秦志斌, 等. 路面径流污染处治技术的研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(12): 430-439.

(上接第 64 页)

- [9] 李生, 任华东, 姚小华, 等. 典型石漠化地区不同植被类型地表水土流失特征研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(2): 1-6.
- [10] 尹辉, 蒋忠诚, 罗为群, 等. 西南岩溶区水土流失与石漠化动态评价研究[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(1): 66-70.
- [11] 蒋忠诚, 曹建华, 杨德生, 等. 西南岩溶石漠化区水土流失现状与综合防治对策[J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(1): 37-42.
- [12] 魏兴萍, 袁道先, 谢世友. 西南岩溶区水土流失与石漠化的变化关系研究: 以重庆南川岩溶区为例[J]. *中国岩溶*, 2010, 29(1): 20-26.
- [13] 李晋, 熊康宁, 李晓娜. 中国南方喀斯特地区水土流失特殊性研究[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(23): 227-233.
- [14] 吕涛, 蓝安军. 喀斯特石漠化的遥感: GIS 典型研究: 以贵州省为例[M]. 北京: 地质出版社, 2002.

- [15] 陈起伟, 熊康宁, 蓝安军. 基于“3S”的贵州喀斯特石漠化现状及变化趋势分析[J]. *中国岩溶*, 2007, 26(1): 37-42.
- [16] 李阳兵, 王世杰, 魏朝富, 等. 贵州省碳酸盐岩地区土壤允许流失量的空间分布[J]. *地球与环境*, 2007, 34(4): 36-40.
- [17] 曹建华, 蒋忠诚, 杨德生, 等. 我国西南岩溶区土壤侵蚀强度分级标准研究[J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(6): 1-7.
- [18] 李瑞玲, 王世杰, 熊康宁, 等. 喀斯特石漠化评价指标体系探讨: 以贵州省为例[J]. *热带地理*, 2004, 24(2): 145-149.
- [19] 熊康宁, 李晋, 龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J]. *地理学报*, 2007, 26(1): 37-42.
- [20] 李晋, 熊康宁, 王仙攀. 喀斯特地区小流域地下水流失观测研究[J]. *中国水土保持*, 2012(6): 38-40.