

不同植被修复年限对喀斯特地区飞机草入侵生境土壤蓄水能力的影响

朱金方, 李俊生, 赵彩云, 柳晓燕, 李飞飞

(中国环境科学研究院 国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012)

摘要:飞机草是我国西南地区的主要外来有害入侵杂草, 植被替代修复技术是控制飞机草入侵的主要方式之一, 目前对于不同植被修复年限下的土壤蓄水能力变化鲜有研究。以“空间代替时间”的方法, 分析了不同植被修复年限的生境中土壤物理性质和蓄水能力的变化, 探讨不同植被修复年限对广西喀斯特地区飞机草入侵生境土壤蓄水能力的影响。结果表明: 在喀斯特地区飞机草入侵生境下土壤物理性质在植被修复过程中得到明显改善, 主要表现为随植被修复年限的增加, 土壤容重逐渐降低, 土壤孔隙度逐渐升高, 其中土壤非毛管孔隙度受植被修复年限的影响显著, 而毛管孔隙度受植被修复年限的影响相对较小; 土壤蓄水能力在植被修复过程中得到明显提高, 土壤滞留蓄水量和饱和蓄水量随着植被修复年限的增加逐渐升高, 修复 10 a 后分别比未修复生境增加了 174.9% 和 11.6%, 而土壤吸持蓄水量受植被修复年限影响较小, 在修复过程中无显著变化。因此, 植被修复能够显著提高喀斯特地区飞机草入侵生境的土壤蓄水和涵养水源的能力, 降低水土流失, 促进入侵地的植被恢复, 为外来植物入侵生态系统修复提供重要的技术理论依据。

关键词:植被修复; 飞机草; 喀斯特地区; 土壤物理性质; 土壤蓄水能力

中图分类号: S792.25

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)01-0143-05

Effects of Different Vegetation Restoration Years on Soil Water Storage Ability in the Habitats Invaded by *Chromolaena odorata* in Karst Area

ZHU Jinfang, LI Junsheng, ZHAO Caiyun, LIU Xiaoyan, LI Feifei

(State Environmental Protection Key Laboratory of Regional Eco-process and Function Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: *Chromolaena odorata* is one of the main invasive alien weeds in southwest of China. Vegetation replacement restoration is one of the dominant methods to control the *C. odorata* invasion. However, there was less study on the changes of soil water storage ability in different restoration years. The method of space instead of time was employed to analyze the variations of soil physical property and water storage ability in different restoration years and discuss the effect of different vegetation restoration years on soil water storage ability in *C. odorata* invasive habitat along karst area in Guangxi. The results showed that the soil physical property was clearly improved during the vegetation restoration process, which showed that the soil bulk density in *C. odorata* invasive habitat decreased gradually and soil porosity increased with restoration years; soil non-capillary porosity was significantly affected by the vegetation restoration years, however, the soil capillary porosity was less affected; the soil water storage ability was significantly improved following the restoration. Soil non-capillary water-holding capacity and water saturated water content increased with the restoration years, which were higher by 174.9% and 11.6%, respectively, in habitat after 10 years' restoration than those in CK, while the capillary water-holding capacity was relatively less affected by the ecological restoration and had no significant variation during the restoration process. In conclusion, the vegetation restoration could significantly improve the soil water conservation property in *C. odorata* invasive habitat of karst area, which reduced the soil erosion and improved the vegetation recovery, and provided important

technical and theoretic references for invasive habitats restoration.

Keywords: vegetation restoration; *Chromolaena odorata*; karst area; soil physical property; soil water storage ability

飞机草(*Chromolaena odorata* (Linn.) R. M. King et H. Rob.)作为世界公认的恶性有毒杂草,在 20 世纪 30 年代首次在我国云南发现,因其较强的繁殖扩散能力,入侵后迅速定植、扩散并形成单一优势群落,现已成为我国南方地区主要的有害外来入侵植物,对当地的生产、生活及生态系统造成严重破坏^[1]。森林植被对于生态系统内水土保持和水源涵养起着十分重要的作用^[2-5]。植物通过增加地表凋落物和地下有机质的输入,能够显著降低土壤容重,增强土壤团聚体稳定性,改善土壤持水能力和入渗性能,从来改善土壤综合物理性质,而土壤物理性质的改善反过来促进植被的恢复^[6-7]。然而,飞机草通过自身较强的资源竞争力排挤本土植物,导致植物群落结构发生变化^[8-9],对森林生态系统中土壤蓄水能力造成影响。特别是在喀斯特地区,该地区土壤层浅薄、土壤持水能力弱,水土流失严重^[10-15],飞机草的入侵破坏当地原有植被组成,导致喀斯特地区水土流失问题加剧。目前,有关喀斯特地区土壤蓄水特性方面的研究较多,盛茂银等^[13]研究了喀斯特地区不同等级石漠化土壤的持水状况;鲍乾等^[16]对喀斯特石漠化区不同经济型植物下土壤的蓄水特性进行了研究;王清等^[17]研究了喀斯特地区不同恢复阶段的水土保持功能,认为植被恢复能够提高喀斯特地区的蓄水保土功能。针对飞机草的防控也已开展了较多研究,防治方法主要包括物理防治、化学防治、生物防治及综合防治,而植被替代控制是现在常用的生态修复方法^[18]。然而,飞机草入侵喀斯特地区后,有关飞机草入侵生境修复效果的研究,至今少见报道。植被替代修复是否能够改善喀斯特地区飞机草入侵生境土壤蓄水能力,目前尚不清楚。

本文以广西平果县果化镇龙何屯为例,以“空间代替时间”的方法,选择飞机草入侵生境不同植被修复年限,比较分析不同植被修复年限土壤物理性质的

变化,研究植被替代修复对飞机草入侵生境土壤蓄水能力的修复效果,为我国喀斯特地区水土保持和生态恢复提供重要的技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西平果县龙何屯(图 1),地理坐标为 107°22′51″—107°23′48″E,23°22′51″—23°23′41″N,属典型的喀斯特地貌;该地区气候属亚热带季风气候,年均气温为 19~22℃,极端高温为 38.8℃,极端低温为 -1.3℃,年均降雨量为 1 369.9 mm,其中 5—8 月份的降雨量占全年降雨量 70%,而 9 月至翌年 4 月降雨量仅占 30%,春季干旱严重,是广西干旱灾害发生频率较高的地区之一^[19-20];该地区地层岩性主要为石灰岩和硅质灰岩,土壤主要为棕色石灰土,土层较薄,主要以石隙土和石窝土为主,土壤覆盖度为 30%~80%,土层深度 20—50 cm。

飞机草在该地区的入侵历史为 20 a 左右,主要入侵生境为撂荒地、山坡林地。采取的修复措施主要为植被替代技术,主要替代物种为茶条木(*Delavaya yunnanensis*)、银合欢(*Leucaena leucocephala*)等常用绿化植物。按照植被修复年限分为 4 个阶段:未修复(CK),3 a,5 a,10 a,各阶段的植被概况如表 1 所示。研究区的植被类型主要包括次生灌草丛、次生林灌地、次生林地。乔木主要包括茶条木、任豆(*Zenia insignis*)、银合欢、苏木(*Caesalpinia sappan*);灌木植物主要为黄荆条(*Vitex negundo*)、红背山麻杆(*Alchornea trewioides*)、灰毛浆果楝(*Cipadessa cinerescens*)等;藤本植物主要有龙须藤(*Bauhinia championii*)、老虎刺(*Caesalpinia minax*);草本植物主要为飞机草、蔓生莠竹(*Microstegium gratum*)、类芦(*Neyraudia reynaudiana*)、肾蕨(*Nephrolepis cordifolia*)等。

表 1 样地基本概况

项 目	CK	修复年限		
		3 a	5 a	10 a
群落盖度/%	95	85	95	90
飞机草盖度/%	85	15	3	<1
群落高度/m	2	3	4.5	11
海拔/m	360	330	270	249
坡向/m	南坡	东南坡	南坡	南坡
坡位	中下	中	中	中
土壤类型	棕色石灰土	棕色石灰土	棕色石灰土	棕色石灰土
土层厚度/cm	20	23	19	22
主要植物	飞机草、苘草、蔓生莠竹	茶条木、狗骨木、黄荆条	茶条木、苏木、飞机草、苘草	茶条木、老虎刺、雀梅藤

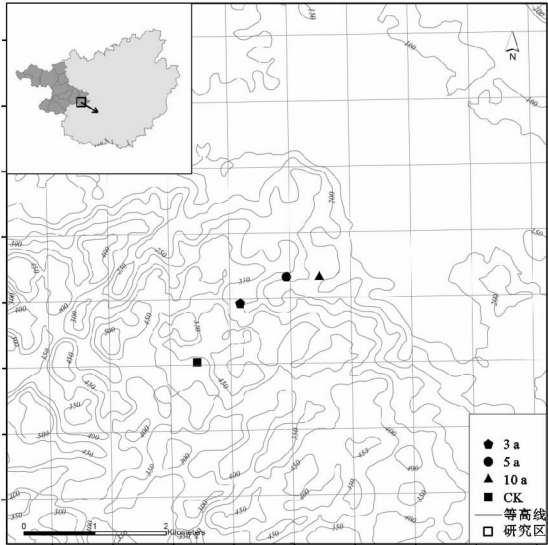


图 1 样地分布

1.2 样品采集

以“空间代替时间”的方法,分别对飞机草入侵生境不同植被修复年限的样地进行野外调查,植被修复开始年份分别为 2006 年、2011 年、2013 年,相对应的修复年限分别为 10 a、5 a、3 a,以未修复的飞机草入侵样地为对对照样地(CK)。所有样地均属于坡地,土壤层较薄,仅为 20 cm 左右,因此主要在 0—20 cm 深度区间进行土壤样品采集。每个修复阶段选择 3 个 10 m×10 m 的样方,采用十字交叉法进行土壤样品采集,每个样方设 5 个采样点,同时每个采土点用铝盒采集 3 个土样,用以测定土壤含水量。样品采集时间为 2016 年 10 月 17 日—30 日。

1.3 指标测定方法

土壤含水量采用烘干称重法测定;环刀浸水法测定土壤容重、孔隙度、总孔隙度、非毛管孔隙度等土壤水分物理参数。并由公式计算一定土层深度内的最大吸持蓄水量、最大滞留蓄水量和饱和蓄水量^[5]。本研究按 0.2 m 深度计算。

1.4 数据分析

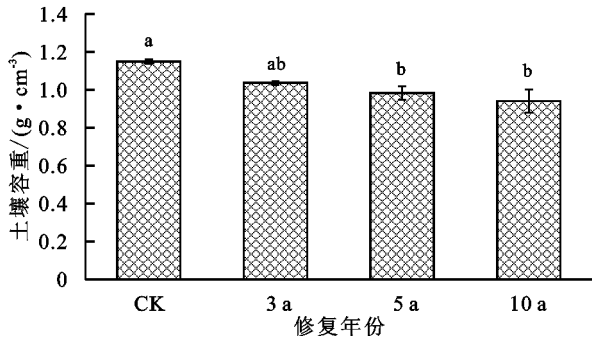
利用 Excel 2007 对数据进行整理,采用 SPSS 17.0 对数据进行统计分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和多重比较(Lsd)对不同植被修复年限的土壤指标进行差异显著性比较($p<0.05$);使用 Origin 8.5 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同修复年限土壤容重

土壤容重是土壤物理性质的一个重要指标,在一定程度上反映土壤的蓄水能力,与土壤质地、有机质含量及土壤松紧度等密切相关,在森林生态系统中,

土壤容重反映了植被对土壤物理性质的改善程度,尤其是土壤孔隙度和蓄水能力^[5,21-22]。一般情况下,土壤容重越小,说明植被对土壤的改善效果越好。单因素方差分析结果表明,不同植被修复年限对飞机草入侵生境的土壤物理结构改善效果显著($F=12.45$, $p<0.01$)。如图 2 所示,在未修复的样地中,土壤容重为 1.15 g/cm³,经过 3 a 修复后,土壤容重降低为 1.04 g/cm³,相比 CK 降低水平并不显著($p>0.05$),这可能是因为修复初期,替代植物个体小,生长较慢,枯落物累积量少,对土壤物理性质改善不明显;在植被修复 5 a 和 10 a 的样地中,土壤容重分别为 0.98 g/cm³、0.94 g/cm³,相比 CK 分别降低了 14.8%、18.3%,降低水平均显著($p<0.05$),这表明随着修复区林分的不断发育,枯落物的累积量增加,同时土壤中根系密度增加,土壤物理性状逐渐得到改善。



注:不同小写字母表示不同修复年限之间差异显著($p<0.05$),下同。

图 2 不同修复年限土壤容重变化

2.2 不同修复年限土壤孔隙度

土壤孔隙度对土壤通气透水性和根系穿插的难易程度起决定性作用,并对土壤中水、肥、气、热和微生物活性等发挥不同的调节功能^[13,23]。由表 2 可知,飞机草入侵生境不同修复年限之间土壤孔隙度组成表现出一定的差异性。在飞机草入侵样地植被修复过程中,土壤毛管孔隙度随着修复年限的增加呈逐渐降低趋势,单因素方差分析结果表明,修复年限对土壤毛管孔隙度的影响并不显著($F=3.14$, $p>0.05$)。在修复前,土壤孔隙度为 46.68%,在修复 3 a 和 5 a 样地中,土壤孔隙度相比 CK 虽有降低,但降低水平均不显著($p>0.05$);在修复 10 a 的样地中,土壤毛管孔隙度降低至 41.38%,与 CK 相比差异显著($p<0.05$),但各修复年限之间并无显著差异($p>0.05$)。

土壤非毛管孔隙是土壤重力水移动的主要通道,非毛管孔隙能够快速容纳降水并及时下渗,对土壤蓄水能力起决定性作用,不同土壤非毛管孔隙度的修复阶段,其涵养水源能力不同^[21,23]。单因素方差分析结果表明,随着修复年限的增加能够显著提高飞机草入侵生境土壤的非毛管孔隙度($F=12.44$, $p<$

0.01)。土壤非毛管孔隙度在未修复的飞机草入侵生境中仅为 6.51%，在修复 3 a 后，土壤非毛管孔隙度与 CK 相比显著降低($p<0.05$)；随着修复时间的增长，土壤非毛管孔隙度逐渐升高，在修复 5 a、10 a 的样地中，土壤非毛管孔隙度分别为 13.95%、17.89%，与 CK 相比分别升高了 114.29%、174.81%，升高水平均显著($p<0.05$)，且修复 10 a 样地中非毛管孔隙度显著高于修复 3 a 的样地($p<0.05$)。

土壤总孔隙度随着植被修复年限的增加也表现为逐渐升高趋势。单因素方差分析结果表明，不同修复年限能够显著影响土壤的总孔隙度($F=6.05$ ， $p<0.05$)。在未修复的样地中，土壤总孔隙度为 53.18%，在修复 3 a 后，总孔隙度虽有升高，但相比 CK 差异不显著($p>0.05$)；在修复 5 a、10 a 的样地中，土壤总孔隙度分别升高至 58.83%、59.38%，均显著高于 CK ($p<0.05$)；但不同植被修复年限之间的土壤总孔隙度无显著差异($p<0.05$)。

表 2 不同修复年限土壤孔隙度变化

修复年限	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	总孔隙度
CK	46.68±0.32a	6.51±0.22c	53.18±0.10b
3 a	44.20±1.42ab	11.63±0.36b	55.84±1.65ab
5 a	44.88±2.00ab	13.95±2.49ab	58.83±1.42a
10 a	41.38±0.21b	17.89±0.95a	59.38±0.85a

2.3 不同修复年限土壤蓄水性能

土壤中的水分主要贮存在土壤毛管孔隙和非毛管孔隙中，贮存在土壤毛管孔隙中的水称为土壤吸持水，而贮存在非毛管孔隙中的水称为土壤滞留水，两种水分的生态功能有所不同。土壤吸持水是水分通过毛管吸持力贮存在毛管孔隙中，这部分水主要用于提供植物的生理活动所需水分，不参与径流和地下水的形成，因此其对于植被生长起关键作用；而土壤滞留水则是土壤水分达到饱和后暂时贮存在非毛管孔隙中的水分，在强降雨发生时起到临时贮存的作用，可有效减少地表径流，降低雨水对地表的冲刷，具有防止水土流失的功能，同时土壤滞留水在雨后会逐渐下渗，补充地下水或以壤中流的形式进入附近的水体中，因此还具有涵养水源的功能^[6,22]。由表 3 可知，在未修复样地中，土壤吸持蓄水量为 93.35 mm，经过修复后，在修复 3 a、5 a、10 a 的样地中土壤毛管持水量分别为 88.41 mm、89.75 mm、82.76 mm，与 CK 相比均有所降低，但只有在修复 10 a 的生境下土壤吸持蓄水量显著低于 CK($p<0.05$)，相比 CK 降低了 11.3%。

单因素方差分析结果表明，不同植被修复年限对土壤滞留蓄水量具有显著影响($F=12.45$ ， $p<0.01$)。在未修复样地中，土壤滞留蓄水量为 13.01 mm，经过植

被修复后，土壤滞留蓄水量在修复 3 a、5 a、10 a 的样地中分别为 23.26 mm、27.91 mm、35.77 mm，与 CK 相比均显著升高($p<0.05$)，分别升高了 78.8%、114.5%、174.9%，且修复 10 a 样地中土壤滞留蓄水量显著高于修复 3 a 样地($p<0.05$)。

土壤饱和蓄水量随着植被修复年限的增加逐渐升高，受植被修复影响效果显著($F=6.05$ ， $p<0.05$)。在 CK 样地土壤饱和蓄水量为 106.37 mm，修复 5 a、10 a 的样地中土壤饱和蓄水量分别达到 117.66 mm、118.75 mm，相比 CK 分别升高了 10.6%、11.6%，升高水平显著($p<0.05$)。

表 3 不同修复年限土壤蓄水力变化

修复年限	吸持蓄水量/mm	滞留蓄水量/mm	饱和蓄水量/mm
CK	93.35±0.64a	13.01±0.44c	106.37±0.19b
3 a	88.41±2.84ab	23.26±0.71b	111.68±3.29ab
5 a	89.75±3.99ab	27.91±4.97ab	117.66±2.83a
10 a	82.76±0.42b	35.77±1.89a	118.75±1.69a

3 讨论

土壤是植物生长的主要载体，其物理特性对植物的组成和分布有重要影响，同时植被组成也反作用于土壤。植物根系活动及凋落物降解，能够显著改善土壤物理性质，因此地表植被的修复能够有效促进退化土壤理化性质的恢复^[7,24]。本文研究结果中，土壤容重在不同植被修复年限表现出一定的差异性，并随修复年限的延长逐渐降低，这与王清等^[17]在对黔中喀斯特植被恢复过程中水土保持功能变化的研究中土壤容重的变化趋势相一致。在植被修复 5 a 后，土壤容重显著低于 CK，表明植被修复对喀斯特地区飞机草入侵生境中土壤改善作用明显，这主要与土壤中凋落物量、降解速率和根系密度等密切相关^[13]，在修复前期植株个体小，主要为飞机草为优势种的草本群落，土壤根系浅且密度小，同时凋落物累积量低，因此在植被修复前 3 a 对土壤容重的修复效果并不明显，而随着植被的不断修复，植被类型依次表现为灌丛、乔灌群落，根系密度不断提高，凋落物的累积量也随之大幅度提高，因此对土壤物理性状的改善效果越来越突出。

在喀斯特地区，土壤厚度薄，在一定土壤厚度条件下，土壤孔隙状况决定土壤的蓄水能力，或者植被修复对土壤孔隙的改善作用决定土壤蓄水能力^[5]。。本文研究结果中，生态修复对飞机草入侵生境中土壤毛管孔隙度、非毛管孔隙度以及总孔隙度的作用效果各不相同。土壤毛管孔隙度在修复前 5 a 与 CK 无显著差异，仅在修复 10 a 后才表现出差异显著性，表明修复过程对土壤毛管孔隙度的影响较小；而土壤非

毛管孔隙度在修复初期便与 CK 产生显著差异,并随着修复时间的延长逐渐升高,同时土壤总孔隙度在不同修复阶段也表现出显著的差异性,表明生态修复对土壤通气透水性改善效果明显,主要是因为修复过程中,植物的物种多样性增加,改变了飞机草单优群落状况,植物根系在土壤整个剖面中分布数量增加,在植物生长过程中根系穿插使得土壤变得疏松,同时植物枯落物增加,改善土壤的孔隙状况,提高了土壤的通气和透水性,有利于增强土壤涵养水源的功能^[23]。

土壤蓄水量作为表征森林植被水分保持和水源涵养功能的重要指标,其与林下土壤厚度和土壤孔隙紧密相关。本文研究发现,土壤吸持蓄水量随着植被修复年限增加呈降低趋势,表明随着植被修复土壤为地上植物提供的水分的能力有所降低,但在植被修复 3 a 和 5 a 的生境中吸持蓄水量与 CK 相比降低并不明显,对地表植物的水分需求影响较小,同时在喀斯特地区由于土壤层较薄,这部分土壤水主要为浅根系的草本植物所利用,而灌木、乔木等深根系植物对该部分土壤水的依赖程度相对草本植物较小,因此土壤吸持蓄水量的减少主要对浅根系草本植物产生影响,而飞机草作为浅根系植物其生长所需水分减少,通过这种方式在一定程度上抑制飞机草的生长和扩散。而土壤滞留蓄水量和饱和蓄水量则随着植物修复年限的增长逐渐升高,尤其是土壤滞留蓄水量在修复 3 a 后即明显提高,表明植被修复能够增强喀斯特地区土壤临时贮存水的能力,有效降低喀斯特地区的水土流失,同时还提高了该地区涵养水源的能力。因此,植被修复不仅对于喀斯特地区水土保持和水源涵养具有良好的改善作用,还能够在水分供给方面抑制飞机草生长和扩散。

土壤蓄水能力受许多因素综合影响,除土壤物理性状之外,其中植被类型、立地条件、地形等因素也对土壤蓄水能力有较大影响,本研究主要从土壤物理性状方面来研究土壤的蓄水能力,在以后的研究中会进一步考虑其他因素的影响。

4 结论

(1) 在喀斯特地区飞机草入侵生境的植被替代修复过程中,土壤的物理性质明显得到改善,主要表现为土壤容重随植被修复年限的增加逐渐降低;土壤非毛管孔隙度对飞机草入侵地植被修复的反映最为敏感,并随着修复年限的增加显著升高;而土壤毛管孔隙度受植被修复影响相对较小,仅在修复 10 a 后才与未修复的飞机草入侵生境产生显著差异。

(2) 植被修复对喀斯特地区飞机草入侵生境土

壤蓄水能力有显著提高作用,主要表现为土壤滞留蓄水量和饱和蓄水量随植被修复年限的增加显著升高;土壤吸持蓄水量在植被修复虽有所降低,但在修复过程中无显著变化。

参考文献:

- [1] 贾桂康,薛跃规.外来入侵植物飞机草对生态系统的危害和防除[J].杂草学报,2010(4):12-15.
- [2] Ma Z L, Gong Y B, Hu T X. Characteristic of soil hydro-physical properties and water dynamics under different vegetation restoration types[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2006,11(4):1009-1014.
- [3] 吕锡芝.北京山区森林植被对坡面水文过程的影响研究[D].北京:北京林业大学,2013.
- [4] 吴祥云,何志勇,李文超,等.辽东山地胡桃楸天然次生林土壤蓄水能力分析[J].安徽农业科学,2013,41(16):7192-7193.
- [5] 刘霞,张光灿,李雪蕾,等.小流域生态修复过程中不同森林植被土壤入渗与贮水特征[J].水土保持学报,2004,22(2):111-115.
- [6] 吴庆贵,邹利娟,吴福忠,等.涪江流域丘陵区不同植被类型水源涵养功能[J].水土保持学报,2012,26(6):254-258.
- [7] 贾志清.晋西北黄土丘陵沟壑区典型流域不同植被土壤蓄水能力研究[J].水土保持通报,2006,26(3):29-33.
- [8] Davies K W. Plant community diversity and native plant abundance decline with increasing abundance of an exotic annual grass[J]. Oecologia, 2011,167(2):481-491.
- [9] Quan G M, Mao D J, Zhang J E, et al. Response of invasive *Chromolaena odorata* and two coexisting weeds to contrasting irradiance and nitrogen[J]. Photosynthetica, 2015,53(3):419-429.
- [10] 王家文,周跃,肖本秀,等.中国西南喀斯特土壤水分特征研究进展[J].中国水土保持,2013(2):37-41.
- [11] 颜萍,熊康宁,王恒松,等.喀斯特地区水土流失与水土保持研究进展[J].中国水土保持,2016(1):54-59.
- [12] 陈洪松,王克林.西南喀斯特山区土壤水分研究[J].农业现代化研究,2008,29(6):734-738.
- [13] 盛茂银,刘洋,熊康宁.中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应[J].生态学报,2013,33(19):6303-6313.
- [14] 宋林松,汪京,王棋,等.喀斯特石漠化区顶坛花椒林地土壤水分物理性质变化[J].贵州科学,2016,34(2):19-25.
- [15] 肖兴艳,刘方,姚斌,等.中国西南喀斯特土壤水分研究进展[J].云南农业大学学报:自然科学版,2015,30(6):958-964.
- [16] 鲍乾,梁建发,王琪,等.花江喀斯特石漠化区不同经济型植物的土壤蓄水特征[J].水土保持研究,2017,24(1):18-24.

水土保持生态效应,是对岩溶区水土保持理论和石漠化治理理论研究内容的丰富,为西南岩溶区水土保持生态效应的监测与评价提供了一种可参考和推广应用的方法。

致谢:本研究在资料获取的过程中得到了中国水利水电科学研究院水资源研究所、中国科学院地球化学研究所、广西环江农田生态系统国家野外科学观测研究站等有关领导和工作人员的大力支持和帮助,谨此一并致谢。

参考文献:

- [1] 王治国,张超,孙保平,等.全国水土保持区划概述[J].中国水土保持,2015(12):12-17.
- [2] 吕跃进,张维,曾雪兰.指数标度与 1—9 标度互不相容及其比较研究[J].工程数学学报,2003,20(8):77-81.
- [3] 吕跃进,张维.指数标度在 AHP 标度系统中的重要作用[J].系统工程学报,2003,18(5):452-456.
- [4] 骆正清,杨善林.层次分析法中几种标度的比较[J].系统工程理论与实践,2004,24(9):51-60.
- [5] 吕跃进.指数标度判断矩阵的一致性检验方法[J].统计与决策,2006,24(18):31-32.
- [6] 吴尧,官明开,曹煜,等.近 50 年珠江三大支流水沙关系变化研究[J].水道港口,2016,37(4):405-410.
- [7] 熊亚兰,张科利,杨光徽,等.乌江流域水沙特性变化分析[J].生态环境学报,2008,17(5):230-235.
- [8] 师长兴.长江上游输沙模数分布图的制作及其空间分异特征初步分析[J].长江流域资源与环境,2010,19(11):1322-1326.
- [9] 许全喜,陈松生,熊明,等.嘉陵江流域水沙变化特性及原因分析[J].泥沙研究,2008(2):1-8.
- [10] 王萍.珠江流域人类活动作用下水沙特征变化响应研究[D].广州:中山大学,2010.
- [11] 任洪玉.基于 GIS 的中国径流输沙时空动态变化研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2003.
- [12] 朱秀迪,王志刚,任斐鹏,等.西南岩溶区小流域划分与水文特征分析[J].中国水土保持,2017(2):25-27.
- [13] 罗志远,杨全明,吴刚.贵州省洪水特性及洪峰模数规律浅析[J].水利规划与设计,2009(2):8-10.
- [14] 石浩,张京恩.清水江流域贵州省境内暴雨洪水特性浅析[J].河南水利与南水北调,2012(11):27-28.
- [15] 李克让,王绍强,曹明奎.中国植被和土壤碳贮量[J].中国科学,2003,33(1):72-80.
- [16] 中华人民共和国水利部.岩溶地区水土流失综合治理技术标准:SL461-2009[S].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [17] 苏跃.喀斯特小流域土壤质量变化及其对水环境质量的影晌[D].重庆:西南大学,2008.
- [18] 刘洋.喀斯特石漠化治理的水土保持效益监测评价研究[D].贵阳:贵州师范大学,2014.
- [19] 陈洪云.喀斯特石漠化综合治理生态监测与效益评价[D].贵阳:贵州师范大学,2007.
- [20] 张如生.水土保持效益及政策效果评价方法研究[D].北京:中国农业大学,2006.
- [17] 王清,喻理飞,李先林.黔中喀斯特植被恢复过程中水土保持功能变化初步研究[J].贵州科学,2005,23(1):58-61.
- [18] 莫林,张红莲.飞机草地理分布、危害、传播和防治技术的研究进展[J].广西农学报,2014,29(6):44-46,73.
- [19] 吕仕洪,陆树华,李先琨,等.广西平果县石漠化地区立地划分与生态恢复试验初报[J].中国岩溶,2005,24(3):196-201.
- [20] 唐赛春,吕仕洪,潘玉梅,等.广西喀斯特地区割草结合植树方法对飞机草的控制效果[J].应用生态学报,2011,22(7):1944-1948.
- [21] 孙艳红,张洪江,程金花,等.缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J].水土保持学报,2006,20(2):106-109.
- [22] 刘云鹏,张社奇,谷洁,等.不同土地利用方式对陕西黄河湿地土壤水分物理性质的影响[J].安徽农业科学,2011,39(5):2725-2728.
- [23] 张雷燕,刘常富,王彦辉,等.宁夏六盘山地区不同森林类型土壤的蓄水和渗透能力比较[J].水土保持学报,2007,21(1):95-98.
- [24] Zhu B B, Li Z B, Li P, et al. Soil erodibility, microbial biomass, and physical-chemical property changes during long-term natural vegetation restoration: a case study in the Loess Plateau, China [J]. Ecological Research, 2010,25(3):531-541.

(上接第 147 页)