

杜家颖 崔丽峰 涂成龙 等. 西南喀斯特地区不同覆被下产沙、产流特征分析——以贵州省关岭县为例[J]. 江苏农业科学 2018 46(7):267-271.
doi: 10. 15889/j. issn. 1002-1302. 2018. 07. 066

西南喀斯特地区不同覆被下产沙、产流特征分析

——以贵州省关岭县为例

杜家颖^{1,2}, 崔丽峰², 涂成龙², 盛茂银¹, 刘瑞禄³, 李勇³, 孙权忠³

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院, 贵州贵阳 550001; 2. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州贵阳 550081;
3. 贵州省水土保持监测站, 贵州贵阳 550002)

摘要: 为了揭示西南喀斯特地区不同覆被下产沙、产流特征, 选取贵州省关岭县典型喀斯特地区为研究对象, 利用不同覆被下野外径流小区径流和泥沙观测数据与降雨特征资料, 开展喀斯特地区不同覆被下产沙、产流特征研究。结果表明: 研究区年降水总量 1 039.7 mm、降雨时间 183 d, 降雨多以小雨形式产生, 并计算出侵蚀性降雨总量占 50% 左右; 各径流小区坡面产流产沙特征与降雨的年内分布密切相关, 相关性以经果林最大, 水保林次之, 撂荒草地最低; 不同植被覆盖下降雨的产流产沙特征差异显著, 以灌木为主的水保林减沙减流效果明显, 其坡面产流产沙明显低于经果林和撂荒地; 3 种覆被方式下产流量与产沙量相关性较好。

关键词: 喀斯特; 降雨; 产沙产流特征; 覆被

中图分类号: S727.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)07-0267-04

我国的喀斯特地貌主要分布在以贵州省为中心的西南地区。由于脆弱的生态环境和复杂的人地系统, 加上历史上不合理的人为活动^[1-3], 使喀斯特地区生态较为脆弱, 在经历了长期大规模的破坏性、掠夺性开垦后, 地表植被遭到严重破坏, 引发了严重的水土流失问题。我国西南喀斯特区域处于世界三大集中连片喀斯特发育区之一的东亚片区中心, 喀斯特地区土地贫瘠、水资源短缺, 加上脆弱的生态系统, 已经成为制约我国西南喀斯特地区区域经济社会发展的一个重大生态问题^[4]。

在喀斯特地区, 水土流失的影响因素众多, 土壤不仅随地表径流流失, 同时还沿岩溶孔(裂)隙、漏斗、落水洞等向地下流失^[5]。在制约水土流失的众多因素中, 覆被的影响一直是受到普遍关注的热点问题。不同覆被下产沙、产流随着降雨量、降雨强度^[6-7]以及植被覆盖度的变化而变化^[8-9]。目前, 对于长江和黄河流域产流和产沙已有较深入的研究^[10], 而对于西南喀斯特地区覆被变化对产沙和产流的影响研究较少; 研究西南喀斯特地区黄色石灰土覆被变化对产沙和产流的影响, 将有助于深入了解喀斯特地区覆被对地表径流形成与产沙、产流变化的影响, 揭示不同覆被下的降雨对产沙和产流的影响。针对喀斯特地区覆被类型不同、水土流失严重的特点, 本研究以关岭县蚂蝗田小流域为例, 基于 3 种不同覆被类型

(水保林、经果林和撂荒地)的坡面径流小区, 分析喀斯特黄壤区坡地产流产沙特征和规律, 为喀斯特地区水土保持的生态系统恢复重建提供理论支撑。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省关岭布依族苗族自治县, 属于云贵高原东部脊状斜坡南侧向广西丘陵倾斜的斜坡地带。地势西北高、东南低。境内最高点位于永宁镇的旧屋基大坡, 海拔 1 850 m, 最低点在打邦河注入北盘江的三江口处, 海拔 370 m。大部分地区海拔在 800 ~ 1 500 m。县城海拔为 1 025 m。境内山脉属乌蒙山系, 山体多起伏绵延。地貌具有高低起伏大、类型复杂多样的特征, 碳酸盐岩分布广泛。关岭境内气候呈立体状, 跨越南温带、北亚热带、中亚热带, 主要以中亚热带季风湿润气候为主, 热量充足, 水热同季。境内 12.5% 的低热河谷地区有天然温室之称。

蚂蝗田水土保持监测点始建于 2008 年, 地理坐标为 105°34'36"E、25°49'2"N。该监测点所在的蚂蝗田小流域面积 2.43 km²。小流域属亚热带湿润季风气候, 降水集中于 6—9 月, 多年平均降水量为 1 236 mm, 多年平均气温为 19.2 °C; 现有植被类型多为次生乔木林、疏幼林, 乔木品种主要有柳杉、杉木、马尾松、女贞、滇柏等, 土壤类型为黄壤土。

1.2 试验设计

本研究采用坡面径流小区观测法。经过实地考察研究, 选择不同覆被的直行坡上设立径流场, 坡向东偏南, 堰型为无侧向收缩矩形薄壁堰。在研究区内设有 6 个坡面径流小区开展坡面尺度的地面径流和泥沙观测。如表 1 所示, 1、4、5 号小区为经果林(乔木, 黄花梨), 2、3 号小区为水保林(灌木, 女贞), 6 号小区为撂荒草地。用面积为 100 m² 或 200 m² 的径流集水小区控制坡面径流, 其长度为 20 m, 宽度为 5 m

收稿日期: 2017-06-15

基金项目: 国家重大科学研究计划(编号: 2013CB956702); 国家自然科学基金(编号: 41603018); 水利部公益性项目(编号: 201401050); 国家自然科学基金面上项目(编号: 41261058、41573012)。

作者简介: 杜家颖(1991—), 女, 贵州福泉人, 硕士, 主要从事喀斯特生态建设与区域经济研究。E-mail: 1043756112@qq.com。

通信作者: 崔丽峰, 博士, 主要从事地表风化侵蚀速率研究。E-mail: cllbest@126.com。

或 10 m。小区下方设有集流槽、分流池和径流池,分流级别为一级,分流孔数量为 9 个,分流系数为 9。每条流域的径流

小区旁设置 1 台自记雨量计,记录单次降雨量、降雨历时和降雨强度。水位计为 SWZ 型周记式水位计。

表 1 蚂蝗田监测点径流小区资料统计

编号	小区	小区基本情况				产流数 (次)	泥沙总量 (g)	单位面积 冲刷量(t/km^2)	泥沙容重 (g/cm^3)	冲刷深 (mm)	浑水径流 总量(L)	浑水径流深 (mm)	浑水径 流系数
		长(m)	宽(m)	坡度($^\circ$)	植物种类								
1	经果林 1	20	5	15	黄花梨	16	1978	19.8	1.30	0.015	2 315	23.2	0.05
2	水保林 1	20	10	20	女贞	16	985	4.9	1.30	0.004	1 311	6.6	0.01
3	水保林 2	20	5	20	女贞	16	776	7.8	1.30	0.006	930	9.3	0.02
4	经果林 2	20	10	20	黄花梨	16	2 282	11.4	1.30	0.009	2 806	14.0	0.03
5	经果林 3	20	5	20	黄花梨	16	2 021	20.2	1.30	0.016	2 538	25.4	0.06
6	撂荒草地	20	5	20	荒草地	6	4 885	48.9	1.30	0.038	5 288	52.9	0.12

1.3 测定项目与方法

1.3.1 产沙、产流 每次降雨采集 1 次,每次每个小区分别采集 3 个水样和泥沙样品,然后对样品进行实验室过滤、烘干、称质量等分析处理,得出每次降雨后产流量和产沙量。通过对卡口站自动水位计的观测记录,用自动水位取样器进行水样分析处理,得出卡口站水位与流量关系和观测河道(段)泥沙悬移质、推移质数量,以及降雨洪峰流量及洪水过程,从而可计算出流域侵蚀模数、侵蚀量等。地表产流径流量计算公式为 $f(x) = (0.602 + 0.083 \times h/0.46) \times 8.854 \times (h + 0.0012)^{3/2}$; 式中: h 为水位, m。径流量(m^3) = 流量 \times 产流时间; 产沙量(kg) = 含沙量 \times 径流量。

1.3.2 蓄水能力、保土能力 根据各小区内的径流系数、侵蚀模数进行换算^[10]。

1.3.3 数据处理 应用 Excel 2010 和 SPSS 22.0 统计分析软件对测定数据进行整理,分析降雨、地表产流、地表产沙特征,同时采用 Excel 2010 进行制图。

2 结果与分析

2.1 降雨特征

按照气象学对于降雨等级的划分方法[小雨($P < 10$ mm)、中雨($10 \leq P < 25$ mm)、大雨($25 \leq P < 50$ mm)、暴雨($50 \leq P < 100$ mm)、大暴雨($P > 100$ mm)]进行分级。关岭县蚂蝗田水土保持监测点降雨总量为 1 039.7 mm,降雨历时为 183 d,侵蚀性降雨总量为 504.5 mm。单次最大降雨量为 57.4 mm。从图 1 可以看出,降雨集中在 5—10 月,降雨量占全年的 87.5%。7 月降雨量最高,为 298 mm,4 月降雨量最低,为 2.2 mm。其中 2 月、4 月和 12 月降雨量最少,不超过 20 mm,5 月、6 月和 7 月降雨量最多,超过 150 mm,为大暴雨级别,而其他月份降雨都超过 25 mm。1 月降雨时间最多(24 d),4 月降雨时间最少(2 d)。单次最大 30 min 降雨强度 57.00 mm/h 和单次最大 60 min 降雨强度 37.50 mm/h 均发生在 5 月 22 日的降雨事件中。

由此可知,全年中最大降雨量主要集中在 5 月、6 月和 7 月,且占全年降雨量的 66%。除了 2 月、4 月和 12 月外,其他月份降雨量大多数在大雨级别以上。因此,大雨频繁地出现,对地表产生冲刷,而喀斯特地区的黄色石灰土容易流失,从而导致地表径流的产生,还有可能会通过岩溶孔隙、漏斗、落水洞等向地下流失。

2.2 降雨对土壤侵蚀量的影响

土壤颗粒随着径流迁移或者损失等过程是侵蚀泥沙量的

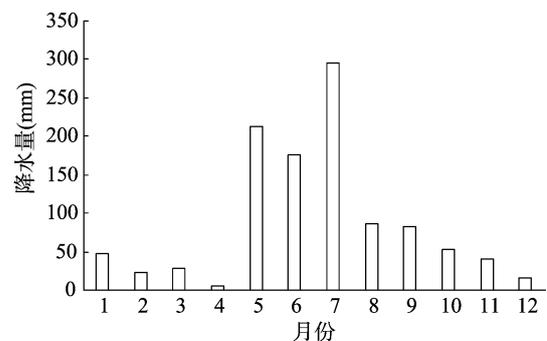


图 1 蚂蝗田水土保持监测点降雨分布

主要表现形式,侵蚀泥沙量受到降雨特征、土壤剖面、地形因子等综合影响^[11]。由于研究小区的坡度基本一致,可以认为在本研究中坡度差异对地表产流产沙的影响不大。从图 2 可以看出降雨量与侵蚀泥沙量呈相关的变化趋势。在坡度一致的情况下,降雨量和泥沙侵蚀量对于不同土地覆被类型的影响不大。泥沙侵蚀量随着单次降雨量的增加,侵蚀力度也随着增加,这是由于土壤中非毛管-毛管孔隙是水分入渗的主要通道,当降雨强度增大时,雨滴动能逐渐增大,导致雨滴打击所产生的挤压力增大,这种挤压力加快了入渗水流的速度,增加了侵蚀力度^[12]。土壤中非毛管孔隙和毛管孔隙达到最大极限后,土壤含水量保持不变,多余水分则产流,随着产流量的增加,泥沙也随之流失。

2.3 地表产流、产沙与降雨特征关系

2.3.1 地表产流与降雨特征关系 坡度对地表及地下产流的影响明显,研究区内的小区坡度大致相同。3、4 月降雨次数少且降雨强度较小,加上冬季降水少,土壤含水量低,导致坡面产流产沙量很小。从图 3 可以看出,在 5—9 月的降雨事件中,由不同覆被小区的径流系数分布特征可知,在同一区域,喀斯特地区不同覆被下地表的产流差异明显,且撂荒草地的径流系数最大,明显大于经果林和水保林 2 种覆被条件;经果林小区之间的径流系数差异不大;2 个水保林小区的产流系数均明显低于经果林和撂荒草地,显示了很好的减流作用。

为研究不同覆被下降雨与坡面产流关系,笔者对不同覆被下降雨量与产流进行线性拟合。从图 4 可以看出,总体上,不同覆被下径流小区的产流量与降雨量之间有较好的线性正相关性。相关系数均超过了 0.5,经果林为 0.763、水保林为 0.628、撂荒草地为 0.610。另外,降雨量在 0~25 mm 之间时,各覆被下径流小区的产流与降雨量可能存在负相关性,这可能与当地多阴雨连绵,而降雨强度小的因素有关。

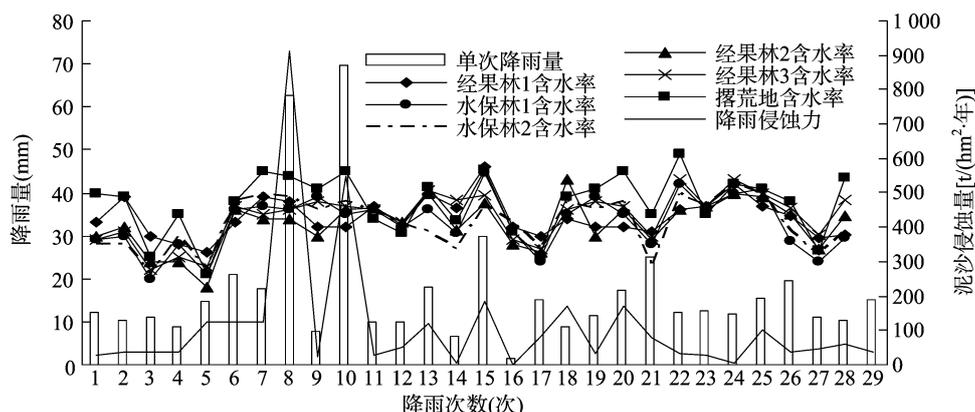


图2 降雨量与泥沙侵蚀量

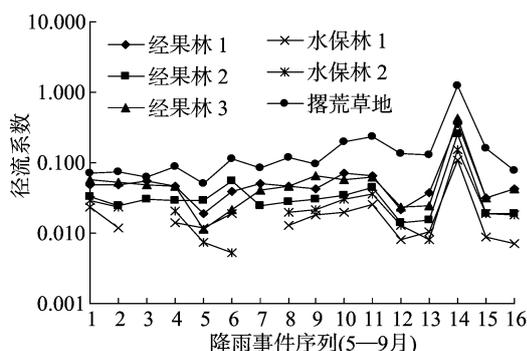


图3 不同覆被小区径流系数分布

2.3.2 地表产沙与降雨特征关系 从图5可以看出 在研究区5—9月降雨事件中 不同覆被小区单位面积冲刷量排序为 撂荒地 > 经果林3 > 经果林1 > 经果林2 > 水保林2 > 水保林1。经果林树冠冠幅大,有利于降雨截留和缓冲雨滴,减小降雨对地表的击溅侵蚀。可能由于经果林叶片上的雨滴容易形成滴流,所以减沙作用没有以灌木为主的水保林明显。在强降雨中,水保林的单位面积冲刷量只有撂荒草地的1/4左右。因此,以灌木为主的水保林显示出了很好的减沙作用。

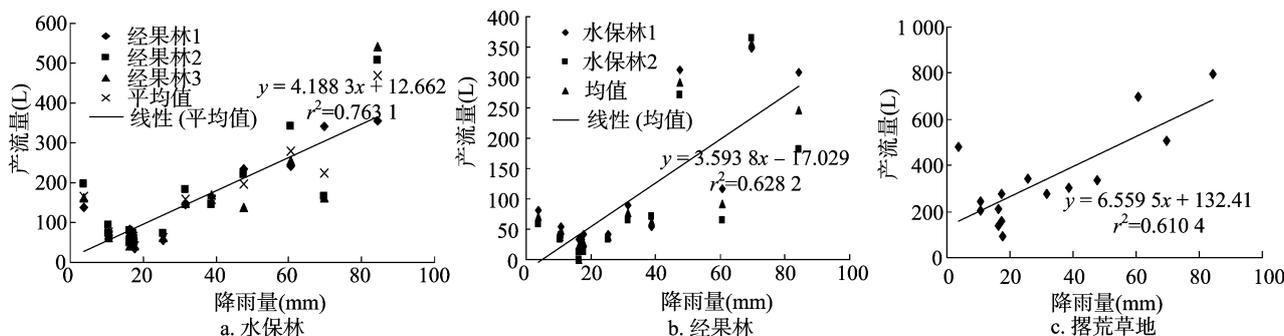


图4 不同覆被下降雨量与产流量关系

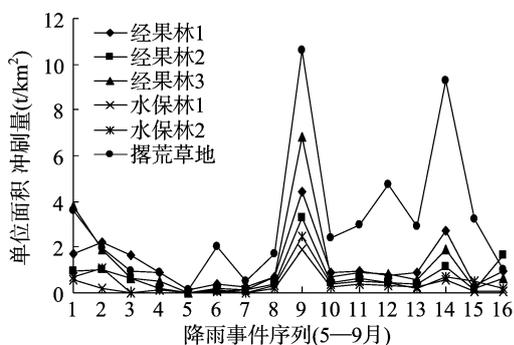


图5 不同覆被小区产沙特征分布

由图6可以看出,与降雨量和产流关系不同,降雨量与产沙量的线性关系不明显。其他研究也指出,降雨量与产沙量并非简单的线性关系。产沙主要受短期最大降雨强度和植被的郁闭度影响。在5月份,可能由于植被的冠盖还没有完全发育,而短期的降雨强度较大,所以导致在小降雨量的情况下

产生了较大的产沙量。

2.4 地表产流与产沙的关系

降雨量直接影响坡面径流量,而径流是地表水土流失的主要载体。从表2、图7可以看出,除撂荒草地和水保林2外,其他径流小区的产沙量和产流量拟合度较好($r^2 > 0.5$)。其中,经果林2的产沙产流线性正相关拟合关系最好($r^2 = 0.833$),而水保林2的拟合关系最差($r^2 = 0.107$)。随着植被覆盖率的增加,泥沙总量就越低,拟合曲线及决定系数也就越高。但是,在同样覆盖率下的产沙总量也有所不同,这有可能与不同土地利用方式及种植的植被有关。

3 讨论

土壤侵蚀变化的衡量指标主要包括产流强度、侵蚀泥沙量、径流系数等^[13]。通过6种试验小区、3种不同覆被类型和降雨量的对比研究,分析了贵州关岭布依族苗族自治县喀斯特地区不同覆被下径流小区的产沙产流特征。研究表明,在

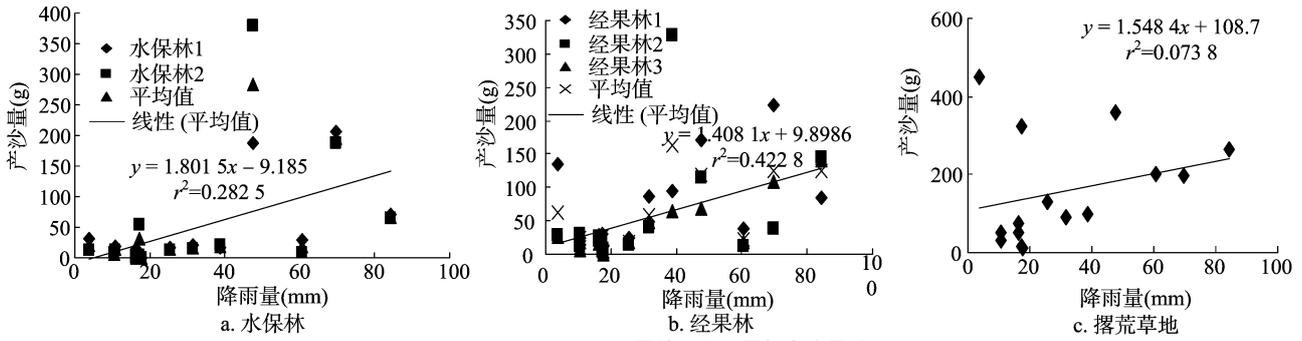


图6 不同覆被下降雨量与产沙量关系

表 2 不同覆被类型累积产沙量与累积产流量的关系

覆被类型	植被覆盖率 (%)	产流数 (次)	泥沙总量 (g)	函数	r ²
经果林 1	75	16	1 978	y = 0.459x + 1.979	0.555
经果林 2	84	16	985	y = 0.513x - 12.38	0.833
经果林 3	84	16	776	y = 0.795x - 15.06	0.667
水土保持林 1	58	16	2 282	y = 0.220x + 22.27	0.611
水土保持林 2	58	16	2 021	y = 0.248x + 5.116	0.107
撂荒草地	62	6	4 885	y = 0.396x + 23.3	0.341

注: y 为累积产沙量 g; x 为累积产流量 L。

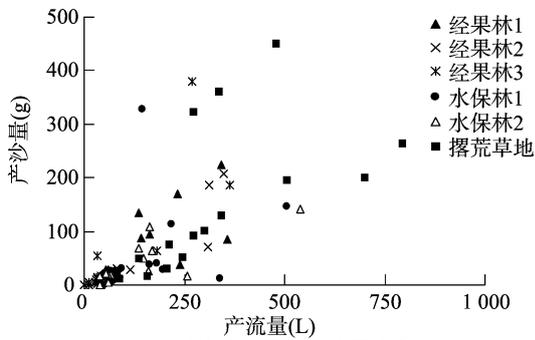


图7 地表产流量与产沙量分布

不同的降雨量下,土壤的产流时间随之增加,在相同坡度下,降雨量与产流量呈正比。研究区年降雨总量 1 039.7 mm,侵蚀性降雨总量占 50% 左右,降雨历时 183 d,降雨多以小雨形式产生。相比其他地区,研究区的降雨量总量较大,降雨天数较多,但是降雨强度较小,因此导致产流量相对较大。研究还表明,降雨强度与产沙量呈正比;在大雨级别以上,产沙量也会随之增加,这与其他研究得出的结论相同。研究区在同一坡度下,产流强度和入渗强度都随着降雨强度的增加而增加,但是在研究区内,土壤为黄色石灰土,容易随着流水而流失。

不同土地覆盖变化对径流的影响研究主要集中在年径流量上^[14]。张淑敏研究长江流域大面积森林流域表明,森林覆盖率高的流域比森林覆盖率低的流域,有林地比无林地流域河川年径流量均有所增加^[15]。这更有力地证明了本研究的结论:各径流小区坡面产流产沙特征与降雨的年内分布密切相关,相关性以经果林最大,水土保持林次之,撂荒草地最低。

不同植被的降雨产流产沙特征差异明显,以灌木为主的水保林减沙减流效果明显,其坡面产流产沙明显低于经果林和撂荒地,由此可知,植被对地表径流的影响是由冠层、枯枝落叶层和土壤层的综合效能决定的^[16]。覆被的不同可能对

林冠截留、凋落物持水性、土壤理化性质等产生影响,进而直接影响地表产流产沙过程^[17-18]。陈奇伯等研究表明,灌木林和天然次生林均有较好的调节径流和减少土壤流失的作用^[19]。张文源等研究表明,高覆盖的灌草优于乔木,可大幅度地抑制土壤侵蚀的发生^[20]。研究表明,不同植被的降雨产流产沙特征差异显著,以灌木为主的水保林减沙减流效果明显,其坡面产流产沙明显低于经果林和撂荒地。这与陈奇伯等的研究结果^[19-20]类似。

4 结论

研究区年降水总量 1 039.7 mm、降雨历时 183 d,降雨多以小雨形式产生,侵蚀性降雨总量占 50% 左右;各径流小区坡面产流产沙特征与降雨的年内分布密切相关,相关性以经果林最大,水土保持林次之,撂荒草地最低;不同植被的降雨产流产沙特征差异明显,以灌木为主的水保林减沙减流效果明显,其坡面产流产沙明显低于经果林和撂荒地;不同覆被下各小区产沙与产流大多具有较好的线性相关性。

参考文献:

- [1] Legrand H E. Hydrological and ecological problems of karst regions: hydrological actions on limestone regions cause distinctive ecological problems [J]. Science, 1973, 179(4076): 859-864.
- [2] Wardle D A, Walker L R, Bardgett R D, et al. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences [J]. Science, 2004, 305(5683): 509-513.
- [3] 张伟, 陈洪松, 王克林. 典型喀斯特峰丛洼地坡面土壤养分空间变异性研究 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 69-71.
- [4] Xu E Q, Zhang H Q, Li M X. Mining spatial information to investigate the evolution of karst rocky desertification and its human driving forces in Changshun, China [J]. Science of the Total Environment, 2013, (458/459/460): 419-426.
- [5] 彭旭东, 戴全厚, 杨智, 等. 喀斯特山地石漠化过程中地表地下侵蚀产沙特征 [J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1237-1248.
- [6] Reaney S M, Bracken L J, Kirkby M J. Use of the connectivity of runoff model (CRUM) to investigate the influence of storm characteristics on runoff generation and connectivity in semi-arid areas [J]. Hydrological Processes, 2007, 21(7): 894-906.
- [7] 陈晓安. 黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀规律与坡面侵蚀经验模型的研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- [8] 谢林好, 白玉洁, 张风宝, 等. 沙层厚度和粒径组成对覆沙黄土坡面产流产沙的影响 [J]. 土壤学报, 2017, 54(1): 60-72.

杨冬艳,冯海萍,王学梅. 填闲作物种植及绿肥还田对宁夏新建日光温室土壤环境的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(7): 271-275.
doi: 10. 15889/j. issn. 1002-1302. 2018. 07. 067

填闲作物种植及绿肥还田对宁夏新建日光温室土壤环境的影响

杨冬艳,冯海萍,王学梅

(宁夏农林科学院种质资源研究所,宁夏银川 750002)

摘要: 夏季休闲期种植了 3 种禾本科作物(玉米、苏丹草和高粱)和一种豆科作物(大豆),并在下茬作物种植之前绿肥还田,探索对新建日光温室土壤养分、微生物群落结构的影响。结果表明,在新建日光温室夏季休闲期(45 d)种植填闲作物能够获得较高的生物量,其中苏丹草的生物量最高,还田时干物质量达到 12 489 kg/hm²,其次为玉米、大豆和高粱;试验新建日光温室土壤偏碱性,除速效钾含量较高外,速效氮、速效磷含量均较低,种植填闲作物后的日光温室土壤相比空白对照显著降低含盐量和速效养分,其中以高粱处理降盐效果最佳,降幅达 34.9%;种植填闲作物的土壤微生物利用总碳源的能力大小为:大豆>高粱>苏丹草>玉米>休闲对照。填闲作物经过粉碎就地还田后发现:黄豆和高粱植株还田降低了土壤微生物群落代谢活性,而苏丹草和玉米植株还田则提高了土壤微生物群落代谢活性。填闲作物还田 1 个月后显著增加了有机质含量,与还田绿肥的干物质量成正相关。试验结果表明,在宁夏新建日光温室种植苏丹草作物和还田能够显著减少土壤全盐含量,增加土壤微生物群落代谢活性,因此,苏丹草是一种适宜夏季种植的填闲作物。

关键词: 新建日光温室; 填闲作物; 绿肥还田; 微生物群落功能多样性

中图分类号: S181; S625.5⁺4 文献标志码: A 文章编号: 1002-1302(2018)07-0271-05

近年来宁夏设施农业快速发展,设施园艺面积发展已达到 66.7 万 hm² 以上,其中蔬菜生产占 90%,其突出的投入产出比优势,使得设施园艺产业成为了宁夏重点发展的优势产业,也是农业增效和农民增收最直接的途径。但随着宁夏设施农业的发展,栽培茬口模式和产业结构的形成,如银川郊区的一大茬番茄模式、固原的越冬黄瓜模式、彭阳拱棚辣椒模式,在设施内难以实施有效的轮作倒茬,导致土壤得不到有效的休整和恢复,出现如次生盐渍化加重、土壤与地下水硝态氮

明显累积、养分不平衡、土传病虫害加重、某些生物学性质劣、连作障碍明显等问题,产量随种植年限延长而有降低趋势,导致设施蔬菜生产和经济效益忽高忽低,抑制了农户种植的积极性^[1-5]。近年来针对温室土壤健康保持和质量退化修复技术的研究比较活跃,吴凤芝等的研究表明,黄瓜与小麦或大豆轮作提高了土壤生物多样性^[6]; Bandick 等的研究表明,轮作、增施绿肥土壤酶活性明显上升,与连作相比,轮作、间作、增施绿肥能够提高土壤的生物活性,缓解土壤质量退化^[7]。张雪艳等研究发现夏茬种植填闲作物增加了土壤微生物总量,在一定程度上提高了土壤生物多样性,减少了根结线虫的数量,增加了黄瓜产量^[8]。因此在日光温室蔬菜生产中,适当轮作有利于维持土壤微生物多样性和活性。目前的研究多是对种植多年的温室土壤进行修复研究,而对新建温室土壤维护的研究较少,宁夏日光温室 50% 以上都是近

收稿日期: 2016-11-15

基金项目: 宁夏对外合作项目; 国家现代农业大宗蔬菜产业技术体系建设项目(编号: CARS-22-02)。

作者简介: 杨冬艳(1977—),女,内蒙古包头人,硕士,副研究员,主要从事设施环境调控与蔬菜栽培生理研究。E-mail: yangdongyan2000@163.com。

[9]李坤,姚文艺,肖培青,等. 植被对土壤入渗和地表产流过程的影响研究进展[J]. 中国水土保持, 2017(3): 27-30.

[10]涂利华,谢财永,胡庭兴,等. 华西雨屏区几种牧草的水土保持能力研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 35-38.

[11]苏村安,松同清,王文丽,等. 模拟降雨对亚热带阔叶林土壤坡面产沙产流及养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2016(4): 25-32.

[12]王辉,王全九,邵明安. 表层土壤容重对黄土坡面养分随径流迁移的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 10-13, 18.

[13]汪军,王德建,张刚,等. 连续全量秸秆还田与氮肥用量对农田土壤养分的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 40-44.

[14]赵辉,郭索彦,解明曙,等. 南方花岗岩红壤区不同土地利用类型坡地产流与侵蚀产沙研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28

(2): 6-10.

[15]张淑敏. 基于森林作用的流域降雨径流模型研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012.

[16]纪启芳,张兴奇,张科利,等. 贵州省喀斯特地区坡面产流产沙特征[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4): 1-5.

[17]税伟,白剑平,简小枚,等. 若尔盖沙化草地恢复过程中土壤特性及水源涵养功能[J]. 生态学报, 2017, 37(1): 277-285.

[18]常宗强,王金叶,常学向,等. 祁连山水源涵养林枯枝落叶层水文生态功能[J]. 西北林学院学报, 2001, 16(增刊): 8-13.

[19]陈奇伯,寸玉康,刘芝芹,等. 滇西高原不同地貌类型坡面产流产沙规律研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(2): 71-73.

[20]张文源,王百田,杨光傲,等. 喀斯特黄壤区侵蚀性降雨及产沙特征分析[J]. 生态环境学报, 2014, 23(11): 1776-1782.