牧草品种与生物质炭对植草土壤水分的调控效应

刘元生，陈祖拥，刘 方，蒲通达
（贵州大学 环境与资源研究所，贵州 贵阳 550025）

摘 要：[目的] 研究不同牧草品种种植与生物质炭施用对土壤水分的影响及其调控效应，为喀斯特石漠化区生态恢复及土壤改良提供科学依据。[方法] 采用盆栽试验在施用生物质炭的土壤上种植雀稗（*Paspalum thunbergii*）、黑麦草（*Lolium perenne*）、拉巴豆（*Dolichos lablab*），定期测定植草土壤的含水率。[结果] 种植雀稗、黑麦草、拉巴豆后土壤田间持水量及土壤饱和导水率均出现显著性差异，其大小顺序为：雀稗＞黑麦草＞拉巴豆，禾本科牧草种植对提高土壤持水性能的作用优于豆科牧草。施用 5%的生物质炭后，雀稗、黑麦草、拉巴豆种植土壤的含水率在春夏季降雨及干旱时段均出现不同程度的增加，植草土壤田间持水量和饱和导水率则出现显著地提高，其大小顺序也为：雀稗＞黑麦草＞拉巴豆。[结论] 生物质炭施用明显地提高了土壤持水能力，从而有利于牧草生长。

关键词：牧草品种；生物质炭；土壤水分；调控效应
文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2019)03-0175-05 **中图分类号**：S54，S152.7+5

文献参数：刘元生，陈祖拥，刘方，等. 牧草品种与生物质炭对植草土壤水分的调控效应[J]. 水土保持通报，2019，39(3)：175-179. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.03.029；Liu Yuansheng，Chen Zuyong，Liu Fang，et al. Impacts of different forage species and biochar application on soil moisture[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(3)：175-179.

Impacts of Different Forage Species and Biochar Application on Soil Moisture

Liu Yuansheng，Chen Zuyong，Liu Fang，Pu Tongda
（*Environment and Resource Institute*，*Guizhou University*，*Guiyang*，*Guizhou* 550025，*China*）

Abstract：[Objective] The impacts of different forage species and biochar application on soil moisture were studied in order to provide a scientific support for ecological restoration and soil improvement in karst rocky desertification areas. [Methods] The pot experiment was conducted with *Paspalum thunbergii*，*Lolium perenne* and *Dolichos lablab* and with the soils mixed with biochar，and the soil moisture content was periodically determined. [Results] There were significant differences in soil water holding capacity and soil saturated hydraulic conductivity among *P. thunbergii*，*L. perenne* and *D. lablab*，with the order as follows：*P. thunbergii*＞*L. perenne*＞*D. lablab*. After applying 5% biochar，the soil water content of *P. thunbergii*，*L. perenne* and *D. lablab* increased to certain degrees on rainy or dry days of spring and summer，and the soil water holding capacity and saturated hydraulic conductivity of planting grass significantly increased，and the order was also *P. thunbergii*＞*L. perenne*＞*D. lablab*. [Conclusion] Biochar application obviously improved soil water holding capacity，which was beneficial to pasture growth.

Keywords：**forage species**；**biochar**；**soil moisture**；**regulating effect**

喀斯特地区是典型的生态环境脆弱区，由于人口的增长及土地过度的开垦，部分地区出现明显的石漠化，近年喀斯特石漠化的治理成为生态文明建设的主要内容之一[1]。退耕还草及牧草种植是喀斯特石漠化区生态恢复的主要途径[2-4]，牧草种植一方面增大了植被的覆盖度，另一方面由于牧草的的生长也加大了对土壤水分及养分的消耗，在石漠化山区可以根据不同品种牧草的生理特性，通过构建合理的林灌草空间结构，减少土面水分蒸发，提高水分利用率[5]。目前多年生的雀稗、黑麦草、皇竹草、拉巴豆、三叶草等牧草植物在喀斯特石漠化生态工程治理和生态畜牧业发展中起到重要的作用[2]。

收稿日期：2019-02-28 **修回日期**：2019-03-26
资助项目：科技部国家重点研发计划项目“喀斯特槽谷区土地石漠化过程及综合治理技术研发与示范”(2016YFC0502303)；贵州省科技厅农业攻关计划项目“规模化生猪养殖废物处理及资源化利用技术集成与示范”(黔科合支撑[2016] 2515 号)。
第一作者：刘元生(1969—)，男(汉族)，贵州省铜仁市人，硕士，副教授，主要从事土壤资源利用与改良方面的研究。E-mail：506059067@qq.com。

土壤水分是土壤—植物—大气连续体的一个关键因子，是土壤系统养分循环和流动的载体，它不但直接影响土壤的特性和植物的生长，且间接影响植物的分布[6-10]，在喀斯特石漠化治理过程中如何提高土壤的保水能力成为生态恢复的关键技术[8]。在西南喀斯特山区，季节性降雨及干旱气候条件是影响旱坡地牧草产量及质量的主要因子[2,4]，开展不同牧草品种对土壤水分的影响及其调控效应方面的研究，对喀斯特石漠化治理及土壤资源有效利用具有重要意义。生物质炭作为土壤改良剂，可以改善土壤理化性质，提高土壤孔隙度和比表面积，降低土壤容重，调节土壤通透性，提高草地土壤保水能力以及植物养分的有效性，能明显的促进牧草生长[11-15]。近年来生物质炭应用在牧草土壤改良方面已经开展了一些研究工作[11-14]，但对种植不同品种牧草后土壤持水性能的变化还缺乏深入的研究。因此，本研究以禾本科及豆科牧草为研究对象，探讨牧草品种与生物质炭施用对土壤水分的影响及其调控效应，为喀斯特石漠化区生态恢复及土壤改良提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

盆栽试验土壤采自贵阳市花溪区黔陶乡区域内由石灰岩发育的石灰土，野外采集 0—20 cm 的表层混合土壤，自然风干后过 5 mm 的筛孔用于盆栽试验。该土壤 pH 值为 8.02，有机质含量为 52.7 g/kg，碱解氮、有效磷、速效钾含量分别是 175.2，2.6，118.5 mg/kg，土壤质地为重壤土。生物质炭为玉米秸秆及少量猪粪混合烧制的炭化物(400 ℃)，生物质炭颗粒研磨过 40 目筛后备用。种植牧草品种为雀稗、黑麦草、拉巴豆。

1.2 试验方案

盆栽试验于 2017 年 3 月初将供试土壤装入塑料盆钵(30 cm×20 cm×50 cm)中，每盆装土 10 kg。盆栽试验种植 3 种牧草品种(雀稗、黑麦草、拉巴豆)，每种牧草设置 2 个处理(施 5%玉米秸秆炭、未施用炭的为对照)，每个处理设 3 次重复。对每个施炭处理分别将 500 g 秸秆炭与 10 kg 土壤一次性混合混匀装入塑料盆钵中。雀稗、黑麦草每盆播种量 5 g，拉巴豆每盆播种 5 粒；牧草种子先用蒸馏水浸泡 12 h 后均匀地播在每盆土壤上，其上再覆盖薄层土。出苗后，每 2～3 d 浇一次水，保持盆栽土壤适宜的含水率，20 d 后在室外天然降雨条件下观察牧草正常生长情况，盆栽试验从 3 月下旬至 8 月下旬进行，每月测定一次土壤含水率。土壤水分测定分降雨时段和干旱时段，天然降雨停止后 2～3 d 内测定的含水率为降雨时段土壤含水率，降雨后连续一周以上未出现降雨时测定的含水率为干旱时段土壤含水率，具体测定时间见表 1。

表 1 生物质炭施用下不同牧草生长时期植草土壤含水率的变化

牧草品种	生物质炭	降雨时期土壤含水率/%						干旱时期土壤含水率/%						统计值
		0325	0423	0517	0612	0705	0820	0331	0409	0502	0530	0621	0804	
雀稗	未施炭	42.1	36.9	34.7	36.7	32.0	34.3	24.8	20.5	18.1	24.3	27.6	25.7	29.8 ± 7.4^{ab}
	施炭	45.3	39.8	36.6	38.6	33.4	37.1	25.9	20.9	19.5	25.4	29.5	28.3	31.7 ± 8.0^{a}
黑麦草	未施炭	41.0	38.2	34.6	36.0	26.4	33.8	18.0	8.1	9.0	15.6	22.9	21.2	25.4 ± 11.3^{abc}
	施炭	41.6	40.5	35.2	36.9	27.9	35.0	19.1	8.7	10.5	16.9	23.5	21.7	26.4 ± 11.4^{abc}
拉巴豆	未施炭	40.1	31.0	33.5	31.0	20.5	21.5	14.7	10.8	9.9	14.1	18.2	15.3	21.7 ± 9.9^{c}
	施炭	42.7	31.7	34.6	33.2	22.8	22.3	15.0	11.9	11.0	16.0	20.0	17.6	23.2 ± 10.1^{bc}

注：表中数据为采用 TDR300 快速水分测定仪监测每个处理 3 个重复土壤表层(10 cm 处)含水率的平均值。统计值为 12 次土壤水测定值的平均值±标准差，字母为多重比较(LSD)结果，同一列中字母不同的处理之间达到 p 为 0.05 的显著性水平。下同。

1.3 测定指标及分析方法

在雀稗、黑麦草、拉巴豆生长期间，根据天然降雨及干旱情况定期采用 TDR300 快速水分测定仪(美国 Spectrum TDR 300 土壤水分测定仪，美国 spectrum 公司，伊利斯诺州)监测 3 种牧草生长土壤的含水量，每盆重复测定 3 次，取其平均值作为土壤含水量的值，测定时间为上午 10:00—12:00 点。待牧草生长 6 个月测定每盆牧草地上生物量，并测定土壤容重及采集相应的根系密集的土壤表层(0—30 cm)混合样品。土壤 pH 值采用酸度计法(土水比 1∶5)，有机质采用重铬酸钾容量法，土壤颗粒组成(粉粒、砂粒、黏粒)采用比重计法，土壤容重及孔隙度采样环刀法测定。

1.4 土壤饱和导水率计算模型

土壤饱和导水率(K_s)是土壤全部孔隙都充满水的情况下，在单位梯度作用下通过垂直于水流方向的单位面积土壤的水流通量或渗流速度，土壤饱和导水率反映了水分的入渗和渗漏特性，是研究水分、溶质在土壤中运动规律的重要水力参数，易受土壤容重、质地、土壤结构、有机质含量、土地耕作利用方式等因

素影响。本研究采用 Wosten 土壤传递函数模型[16-18],它是一种基于统计回归方法的模型,模型需要的参数包括相应的理化指标(土壤质地、土层、容重以及有机质含量),该模型依据土壤质地分砂土、壤土及黏土类 3 种表达方程式,本研究考虑盆栽土壤质地偏黏及喀斯特区域土壤质地多为重壤土至轻黏土,选择了 Wosten 模型中黏土类的方程式来预测土壤饱和导水率,其传递函数(PTFs)的具体形式为:

$$\ln K_s = 7.755 + 0.035\,2 \times S + 0.93 \times T - 0.967 \times D^2 - 0.000\,484 \times C^2 - 0.000\,322 \times S^2 + 0.001 \times S^{-1} - 0.074\,8 \times \mathrm{OM}^{-1} - 0.643 \times \mathrm{Ln}(S) - 0.013\,98 \times D \times C - 0.167\,3 \times D \times \mathrm{OM} + 0.029\,86 \times T \times C - 0.033\,05 \times T \times S$$

式中:K_s——饱和导水率(cm/d);C——黏粒含量(<2 μm)(%);S——粉粒含量(2~50μm)(%);OM——有机质百分含量(%);D——土壤容重(g/cm^3);T——表层土值为 1,亚表层土值 0,本研究中采样点位于表层,故 $T=1$;Ln——自然对数。

1.5　数据处理

试验数据采用 DPS 软件进行数理统计分析,计算每处理 3 个重复测定值的平均值及标准差,采用 LSD 法进行多重比较及显著性检验。

2　结果与分析

2.1　牧草品种与生物质炭施用对植草土壤含水率的影响

露天盆栽条件下牧草生长期间(3—8 月)不同处理土壤含水率的测定结果见表 1。从未施用生物质炭的对照处理来看,3 种牧草在不同生长阶段土壤含水率出现较大的差别,其大小顺序为雀稗>黑麦草>拉巴豆;其中,种植雀稗的土壤含水量显著高于种植拉巴豆的土壤,其平均土壤含水率高出拉巴豆处理 36.07%,黑麦草处理土壤含水率比拉巴豆处理高 17.05%。可见,禾本科牧草在土壤保水效果方面优于豆科牧草。

从表 1 中施用生物质炭处理看出,在春夏季降雨时段(土壤含水率一般达 30%~40%),土壤施用 5%的生物质炭后,种植雀稗、黑麦草、拉巴豆的土壤含水率分别增加了 4.38%~7.60%,1.46%~5.68%和 1.50%~9.84%;而在春夏季干旱时段(土壤含水率一般在 10%~25%),种植雀稗、黑麦草、拉巴豆的土壤含水率分别提高了 1.95%~10.12%,2.36%~16.67%和2.04%~15.03%。可见,生物质炭施用能提高牧草种植土壤的含水率,特别是在干旱时段能明显地提高土壤的持水能力。从多重比较结果也看出($n=12$),施用生物质炭后种植雀稗的土壤含水率显著高于拉巴豆处理,其大小顺序也为:雀稗>黑麦草>拉巴豆。

2.2　牧草品种与生物质炭施用对植草土壤田间持水量的影响

从表 2 中未施炭处理看出,种植雀稗、黑麦草、拉巴豆后土壤容重及孔隙度均出现显著性差异,雀稗、黑麦草处理的土壤容重分别比拉巴豆处理平均降低 10.00%,6.15%,而雀稗、黑麦草处理的土壤毛管孔隙度分别比拉巴豆处理平均提高 4.89%,1.28%,土壤通气孔隙度则分别平均增加 42.42%,30.30%。同时,3 种牧草品种的土壤田间持水量存在显著性的差别,其大小顺序为:雀稗>黑麦草>拉巴豆,雀稗、黑麦草处理的土壤田间持水量分别比拉巴豆处理平均提高了 32.19%,17.81%。

表 2　生物质炭施用下种植牧草土壤田间持水量的变化

牧草品种	生物质炭	田间持水量/%	土壤容重/(g·cm^{-3})	毛管孔隙度/%	通气孔隙度/%
雀稗	未施炭	42.3±0.6^{d}	1.17±0.02^{c}	49.3±0.5^{c}	4.7±0.5^{c}
	施炭	59.0±1.1^{a}	1.01±0.01^{f}	55.7±0.6^{a}	6.0±0.2^{a}
黑麦草	未施炭	37.7±0.5^{e}	1.22±0.03^{b}	47.6±0.5^{d}	4.3±0.6^{c}
	施炭	54.3±1.5b	1.03±0.02^{e}	55.3±0.7^{a}	5.6±0.7^{ab}
拉巴豆	未施炭	32.0±1.0^{f}	1.30±0.01^{a}	47.0±1.0^{d}	3.3±0.6^{d}
	施炭	47.0±0.9^{c}	1.11±0.02^{d}	52.3±0.6^{b}	5.1±0.4^{bc}

注:表中数据为每个处理 3 个重复的平均值±标准差。

从表 2 也看出,施用生物质炭后雀稗、黑麦草、拉巴豆处理的土壤容重及孔隙度均出现显著性差异,雀稗、黑麦草、拉巴豆处理的土壤容重分别平均下降 13.67%,15.57%和 14.62%,而土壤毛管孔隙度分别平均增加了 12.98%,16.18%和 11.28%,土壤通气孔隙度则分别平均增加了 27.66%,30.23%和 54.55%。同时,3 种牧草施用生物质炭后土壤田间持水量出现显著性地增加,施炭后雀稗、黑麦草、拉巴豆处理的土壤田间持水量分别平均提高了 39.48%,44.03%和 46.87%,疏松多孔的生物质炭能够明显提

高土壤毛管孔隙度及田间持水量。

2.3 牧草品种与生物质炭施用对植草土壤饱和导水率的影响

从表 3 中未施炭处理看出，种植雀稗、黑麦草、拉巴豆后土壤有机质的含量均出现显著性提高，其大小顺序为雀稗＞黑麦草＞拉巴豆，雀稗、黑麦草处理的土壤有机质含量分别比拉巴豆处理平均高出 7.62%，4.25%。此外，种植雀稗、黑麦草、拉巴豆处理的土壤黏粒、粉粒的含量均出现显著性增加，雀稗处理的土壤黏粒、粉粒的含量分别比拉巴豆处理平均增加 46.45%，8.27%，而黑麦草处理的土壤黏粒、粉粒的含量分别比拉巴豆处理平均增加 20.47%，7.33%。同时，3 种牧草品种的土壤饱和导水率也出现显著性的差别，其大小顺序为：雀稗＞黑麦草＞拉巴豆，雀稗、黑麦草处理的土壤饱和导水率分别比拉巴豆处理平均提高 38.14%，19.96%。

表 3 生物质炭施用下种植牧草土壤饱和导水率的变化

牧草品种	生物质炭	pH 值 (H_2O)	有机质/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	黏粒/ %	粉粒/ %	饱和导水率/ ($cm \cdot d^{-1}$)	生物量/ ($g \cdot 株$)
雀稗	未施炭	7.94 ± 0.01^{c}	73.4 ± 1.03^{d}	18.6 ± 0.57^{b}	45.8 ± 0.29^{d}	921.7 ± 33.5^{d}	1.69 ± 0.25^{b}
	施炭	7.96 ± 0.01^{bc}	96.1 ± 0.75^{a}	21.7 ± 0.49^{a}	50.3 ± 0.52^{a}	$1\,590.5\pm44.6^{a}$	2.17 ± 0.06^{b}
黑麦草	未施炭	7.95 ± 0.01^{c}	71.1 ± 0.53^{e}	15.3 ± 0.60^{d}	45.4 ± 0.57^{d}	800.4 ± 27.3^{e}	0.22 ± 0.09^{c}
	施炭	7.98 ± 0.03^{ab}	94.1 ± 0.90^{b}	19.3 ± 0.72^{b}	48.2 ± 0.60^{b}	$1\,507.6\pm17.8^{b}$	0.27 ± 0.06^{c}
拉巴豆	未施炭	7.96 ± 0.01^{bc}	68.2 ± 0.32^{f}	12.7 ± 0.58^{e}	42.3 ± 0.49^{e}	667.2 ± 15.5^{f}	8.30 ± 1.57^{a}
	施炭	8.01 ± 0.02^{a}	92.4 ± 0.69^{c}	17.2 ± 0.52^{c}	47.0 ± 1.02^{c}	$1\,272.3\pm11.6^{c}$	10.2 ± 0.98^{a}

注：表中数据为每个处理 3 个重复的平均值±标准差。

从表 3 中看出，施用生物质炭后种植雀稗、黑麦草、拉巴豆的土壤有机质的含量均出现显著性提高，其平均含量分别比未施炭处理增加 30.93%，32.35%和 35.48%。施用生物质炭后雀稗、黑麦草、拉巴豆处理的土壤黏粒、粉粒的含量均出现显著性增加，其中土壤黏粒含量分别比未施炭处理平均提高了 16.67%，26.14%和 35.43%。而粉粒含量则分别比未施炭处理平均增加了 9.83%，6.17%和 11.11%。同时，施用生物质炭后种植雀稗、黑麦草、拉巴豆的土壤饱和导水率均明显地高于未施炭处理，土壤饱和导水率的平均增幅分别为 72.56%，88.36%和 90.69%。而且，3 种牧草施炭后土壤饱和导水率也出现显著性的差别，其大小顺序也为雀稗＞黑麦草＞拉巴豆。可见，生物质炭施用增加了土壤有机碳的来源，提高了土壤黏粒、粉粒的含量，土壤饱和导水率出现明显的提高。

3 讨 论

不同品种牧草对下土壤持水性能的影响存在明显的差别，从本试验结果看，种植雀稗、黑麦草后土壤田间持水量、土壤饱和导水率均显著地高于拉巴豆，禾本科牧草种植有利于提高石灰土的持水能力。由于禾本科牧草根系多、数量大，种植雀稗、黑麦草后土壤容重明显低于种植拉巴豆的土壤，而大量根系残留物及根系分泌物能明显增加土壤有机质的来源，使种植雀稗、黑麦草的土壤有机质含量显著高于拉巴豆，而土壤黏粒、粉粒的含量均出现显著性增加，从而提高了土壤田间持水量和土壤饱和导水率。据苏德喜等[15]研究不同牧草品种、施肥量及秸秆还田量对弃耕地土壤理化性质的影响，结果表明牧草品种对土壤含水量、全盐及 pH 值影响达极显著水平，禾本科牧草改善土壤含水量和容重的效果强于豆科，禾本科牧草的土壤含水量均显著高于豆科，其中以圆柱披碱草最高，扁穗冰草次之。可见，禾本科牧草对土壤的保水蓄水效果优于豆科牧草，禾本科牧草更适合种植在水分较缺乏的石漠化山区。然而，禾本科牧草在改善土壤持水性能的作用大于豆科牧草，但豆科牧草通过根瘤固氮作用，可以减少对土壤氮的吸收。在喀斯特石漠化山区土壤养分也比较缺乏，禾本科牧草与豆科牧草合理混播种植是石漠化山区牧草种植的有效途径，这方面有待进一步研究。

生物质炭施用能明显的提高土壤持水能力，春夏季降雨及干旱时段种植雀稗、黑麦草、拉巴豆的土壤含水率均出现不同程度的增加，3 种牧草施生物质炭后土壤田间持水量、土壤饱和导水率均出现显著性提高。施用生物质炭后种植雀稗、黑麦草、拉巴豆的土壤的有机质含量、粘粒及粉粒含量、毛管孔隙度均出现显著性增加，明显地提高了土壤田间持水量、土壤饱和导水率，牧草可吸收利用的土壤水分增多。侯琼等[19]对降水量、土壤水分和耗水量与不同时期牧草产量的关系统计分析，结果表明各水分因子与产量的相关性依次为：土壤水分＞耗水量＞降水量，土壤含水量是牧草的直接利用水源，能明显影响牧草的产

量。因而,在喀斯特石漠化山区种植牧草不仅要考虑牧草品种的适生性,还需考虑土壤水分及养分是否能保障牧草生长的需求。本试验结果表明,施用生物质炭有利于提高牧草的地上生物量,但施炭后 3 种牧草品种的生物量均未出现显著性的增加,仅施用生物质炭对提高牧草产量未能起到明显的促进作用。黄超等[11]研究结果表明,红壤施用生物质炭不仅大大提高了土壤碳库,还可降低土壤酸度,增加土壤 pH 值和盐基饱和度,提高土壤水稳定性团聚体数量,增加土壤速效磷、速效钾和有效氮,增强土壤保肥能力,改善植物生长环境,促进黑麦草的生长。据研究旱地施用蚯蚓粪、酒糟堆肥、牛粪堆肥、猪粪堆肥均能显著提高黑麦草地上生物量、地下根重和叶片中氮素含量[20]。多年生牧草的生长需要吸收大量的土壤养分,需要通过施肥才能满足牧草快速生长的需求。因而,在施用生物质炭改良土壤的同时,需要补充适量的肥料养分,才能更好地提高牧草的产量,这方面值得深入研究。

4　结 论

(1) 不同牧草品种对土壤持水性能的影响出现较大的差别,种植雀稗、黑麦草、拉巴豆的土壤田间持水量及土壤饱和导水率均出现显著性差异,其大小顺序均为:雀稗>黑麦草>拉巴豆。种植雀稗、黑麦草后土壤的有机质含量、黏粒及粉粒含量、毛管孔隙度均比种植拉巴豆的土壤出现明显的增加,禾本科牧草种植对提高土壤持水性能的作用优于豆科牧草。

(2) 施用 5%的生物质炭后,雀稗、黑麦草、拉巴豆种植土壤的含水率在春夏季降雨及干旱时段均出现不同程度的增加。施炭后种植雀稗、黑麦草、拉巴豆的土壤有机质含量、黏粒及粉粒含量均出现显著性增加,而土壤田间持水量和饱和导水率也出现显著地提高,其大小顺序也为:雀稗>黑麦草>拉巴豆。

(3) 土壤施用 5%的生物质炭有利于牧草生长,牧草种植 6 个月后雀稗、黑麦草、拉巴豆的地上生物量平均增加了 28.42%,22.97%和 22.59%,但施炭后 3 种牧草品种的生物量均未出现显著性增加,利用生物质炭改良牧草土壤还需要配合肥料养分的施用,才能实现优质高产牧草的生产。

[参 考 文 献]

[1] 陈起伟,安理艳,徐丰. 典型岩溶区不同水土流失强度区石漠化特征分析[J]. 中国水土保持, 2018, 38(11):30-34.

[2] 张俞,熊康宁,许敏,等. 中国南方喀斯特石漠化地区适宜性牧草的环境服务功能研究[J]. 中国饲料,2018,34(9):8-14.

[3] 李瑞,李勇,熊康宁,等. 黔中喀斯特区典型土地利用方式及耕作措施的水土流失调控效应[J]. 水土保持通报,2017,37(6):136-140.

[4] 李馨,熊康宁,龚进宏,等. 人工草地在喀斯特石漠化治理中的作用及其研究现状[J]. 草业学报,2011,20(6):279- 286.

[5] 邓艳,曹建华,蒋忠诚,等. 西南岩溶石漠化综合治理水—土—植被关键技术进展与建议[J]. 中国岩溶,2016,35(5):476-485.

[6] 王玉娟,杨胜天,温志群,等. 贵州典型喀斯特灌丛草坡类型区土壤水分及其影响因子研究[J]. 北京师范大学学报,2008,44(5):529-532.

[7] 张军以,戴明宏,王腊春,等. 西南喀斯特石漠化治理植物选择与生态适应性[J]. 地球与环境,2015,43(3):269-278.

[8] 隋喆,熊康宁,牟祥会,等. 喀斯特小流域不同等级石漠化综合治理生态工程技术集成研究[J]. 中国水土保持,2010,30(4):17-19.

[9] 鲍乾,梁建发,王棋,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.

[10] 王臏,钱晓刚,彭熙. 花江峡谷不同植被类型下土壤水分时空分布特征[J]. 水土保持学报,2006,20(5):139-141.

[11] 黄超,刘丽君,章明奎. 生物质炭对红壤性质和黑麦草生长的影响[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版,2011,37(4):439-445.

[12] 宋丹丹,何丙辉,罗松平,等. 黑麦草和生物炭对喀斯特地区黄壤养分影响研究[J]. 草业科学,2018,27(4):195-201.

[13] 孙樱萁,郭建斌,李子富,等. 生物质炭基肥料对黑麦草生长特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2016,44(12):117-123.

[14] 吴涛,冯歌林,曾珍,等. 生物质炭对盆栽黑麦草生长的影响及机理[J]. 土壤学报,2017,54(2):525-534.

[15] 苏德喜,贾倩民. 牧草品种与施肥对干旱区弃耕地土壤理化性质影响[J]. 北方园艺,2014(11):153-157.

[16] Wosten J H M, Lilly A, Nemes A, et al. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils[J]. Geoderma, 1999,90(1):169-185.

[17] 李晓鹏,张什宝,吉丽青,等. 土壤传递函数在计算土壤饱和导水率中的应用[J]. 灌溉排水学报,2009,28(2):70-73.

[18] 孙丽,刘廷玺,段利民,等. 科尔沁沙丘—草甸相间地区表土饱和导水率的土壤传递函数研究[J]. 土壤学报,2015,52(1):68-76.

[19] 侯琼,魏学占,宋学峰. 不同水分因子对内蒙古典型草原牧草产量的影响[J]. 草业科学,2009,26(2):5-10.

[20] 刘方,罗海波,蒲通达,等. 喀斯特山区旱地施用生物有机肥对一年生黑麦草生长的影响[J]. 贵州农业科学,2011,39(12):190-193.