

移除和沙埋对沙土生物结皮土壤蒸发的影响

孟杰¹, 卜崇峰^{1,2}, 张兴昌^{1,2}, 孙占锋³

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部
水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 《中国水土保持》杂志社, 河南 郑州 450003)

摘要: 干旱半干旱地区水分是植被恢复和演替的限制性生态因子, 沙土生物结皮能降低水分入渗, 造成土壤水分浅层化和加剧土壤水分时空分异, 因此有必要采取措施进行适度干扰, 以促进生态恢复和重建。土壤蒸发是天然降水无效损失的一个重要途径, 研究生物结皮对土壤蒸发的影响十分必要。以陕北水蚀风蚀交错区沙土生物结皮为研究对象, 分析了移除生物结皮和沙埋 2 种干扰下生物结皮类土壤水分蒸发特性。结果表明, 移除生物结皮并不能起到显著地抑制土壤蒸发的作用 ($p > 0.05$), 而沙埋对土壤蒸发具有显著地抑制作用 ($p < 0.01$), 且随沙埋厚度的增加, 蒸发抑制率提高。20 mm 沙埋的抑制蒸发作用最大, 蒸发抑制率达到了 58.15%。5 mm 和 10 mm 沙埋的蒸发抑制率则分别为 25.20% 和 28.29%, 二者之间的差异未达到显著水平 ($p > 0.05$)。可见, 沙埋对于改善土壤水分状况具有积极意义, 但应控制沙埋的厚度。

关键词: 生物结皮; 土壤蒸发; 沙埋; 水蚀风蚀交错区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)01-0058-05

中图分类号: S152.7

Effects of Biological Crust Removal and Sand Mulching on Soil Evaporation in a Sandy Soil

MENG Jie¹, BU Chong-feng^{1,2}, ZHANG Xing-chang^{1,2}, SUN Zhan-feng³

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Soil and Water Conservation in China Press, Zhengzhou, He'nan 450003, China)

Abstract: Soil water is one of limiting ecological factors for vegetation restoration and succession in arid and semiarid regions. The presence of biological crust on sandy soils limits water infiltration depth and reduces water availability for deep-rooted plants; meanwhile, the biological cover can affect greatly the spatial variability and redistribution of soil water. It is therefore necessary to apply proper disturbance on the crust to promote ecological restoration and rehabilitation. It may also be important to address the influences of biological crust on soil evaporation, which is a major part of soil water loss after natural rainfalls. In this study, soil evaporation features were studied after removal disturbance and sand burial disturbance on biological crust in a sandy soil of the Loess Plateau, China, which experiences severe crisscrossing water and wind erosion. The results show that removal of the crust did not effectively reduce soil moisture evaporation compared with control ($p > 0.05$), while sand burial significantly decreased soil evaporation ($p < 0.01$). Soil evaporation was increasingly reduced with the sand bed thickness. The sand burial depth of 20mm had the greatest inhibitive effect on soil evaporation reduction, and the cumulative evaporation was reduced by 58.15% at the end of the experiment. There was no significant difference between 5mm and 10mm sand burial depths ($p > 0.05$), which reduced soil evaporation by 25.20% and 28.29%, respectively. The findings show that sand burial disturbance has positive effects on conserving soil water in the study area.

Keywords: biological soil crust; soil evaporation; sand burial; water-wind erosion crisscrossed region

收稿日期: 2010-06-03

修回日期: 2010-07-30

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土水蚀风蚀交错区土壤结皮的时空发育特征及其土壤水文与侵蚀效应研究”(40701096); 中国科学院西部之光项目“毛乌素沙地生物结皮的发育过程及其风蚀效应研究”(B28013200); 陕西省自然科学基金项目“黄土风水蚀交错区土壤结皮的发育及其侵蚀效应”(SJ08D07)

作者简介: 孟杰(1985—), 男(汉族), 陕西省城固县人, 在读硕士, 主要从事土壤环境效应的研究。E-mail: mengjie2008@nwsuaf.edu.cn.

通信作者: 卜崇峰(1977—), 男(汉族), 陕西省榆林市人, 博士, 副研究员, 主要从事水土保持与土壤侵蚀研究。E-mail: buchongfeng@163.com.

生物结皮作为干旱半干旱地区的“生态卫士”^[1],能明显提高土壤表面的稳定性,显著地减少水蚀和风蚀,对流动沙丘的固定具有指示作用。干旱半干旱地区水分是植被恢复和演替的限制性生态因子,而生物结皮的存在对土壤水分的运移和分配产生很大影响^[2-3]。许多研究表明^[2,4-9],沙土生物结皮能降低水分入渗,造成土壤水分浅层化并加剧土壤水分时空分异,从而限制深根性灌木、半灌木植被生长,促进浅根性草本植物的生长,最终对干旱半干旱地区生态恢复和重建产生不利影响。封育是植被恢复和重建的重要举措,然而长期封育未必是干旱地区退化植被恢复的最佳选择,这是因为长期封育中,生物结皮作为土壤水分最为突出的影响因子,限制了降雨入渗,而造成植被群落向旱生化方向发展^[7]。稳定生物结皮的存在虽然能显著减少土壤侵蚀、增加土壤养分,但是当植被恢复演替到一定阶段并可发挥显著控蚀作用时,是否有必要采取一定的方式对生物结皮进行适度干扰,在没有明显影响侵蚀格局的前提下,改善土壤水分状况,最终达到促进生态恢复和重建的目的呢?我们认为,明确生物结皮在生态水文功能方面的积极意义与消极作用,寻求生物结皮的“保护”与“破坏”之间的平衡应该成为生物结皮研究领域的一个重要课题。初步研究已经证实^[8],对生物结皮进行“适度”干扰能够增加种子植物多样性,而“严重”干扰则使固定沙丘逆转而降低植物多样性。

土壤蒸发是土壤水分循环和转化的一个重要环节,是干旱半干旱地区天然降水无效损失的一个重要途径。目前,关于生物结皮土壤水文功能的研究主要集中在径流入渗、持水导水等方面,而对其影响下的土壤蒸发至今尚未形成一致的结论^[10-11]。关于干扰对生物结皮土壤蒸发的影响研究更是鲜见报道。鉴

于此,本文以陕北水蚀风蚀交错区六道沟小流域沙土生物结皮为研究对象,设移除生物结皮和沙埋^[12-13](间接干扰^[14])2类处理,分析探讨这2种干扰方式对土壤水分蒸发的影响,为研究生物结皮适度干扰积累资料,同时揭示该区生物结皮的土壤蒸发特性。

1 研究区概况

研究区位于陕西省神木县以西 14 km 处的六道沟小流域(110°21′—110°23′E,38°46′—38°51′N),流域面积 6.89 km²,主沟道长 4.21 km。该流域在地理上既属于黄土高原向毛乌素沙漠过渡,森林草原向典型干旱草原过渡地带,又属于流水作用的黄土丘陵区向干燥剥蚀作用的鄂尔多斯高原过渡的水蚀风蚀交错带,是黄土高原北部土壤侵蚀最为严重的地区。该区地形特点为典型的盖沙黄土丘陵区,属中温带半干旱气候,降雨主要集中在 6—9 月,多年平均降雨量为 400 mm 左右,且年内年际变化较大。流域分东西两半,东边则主要为黄土覆盖,占流域面积的 86.5%;西边多为固定沙丘,以风沙土为主,占流域面积的 13.5%^[15]。固定沙丘上的主要植被有小叶杨(*Populus simonii*, 俗称“小老树”)、沙柳(*Salix psammophila*)、沙蒿(*Artemisia ordosica*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)等。

2 研究方法

在流域西边的固定沙地上,生物结皮发育十分普遍,呈片状分布且厚度较大,生物结皮类型为苔藓结皮。选择地势平坦,结皮发育较好的地块作为蒸发试验采样区域,从流动沙地取表层(0—10 cm)风沙土用于沙埋处理。供试土壤类型为风沙土,其基本性质见表 1。

表 1 供试土壤的基本理化性质

土壤深度/ cm	黏粒 (<0.002 mm)/ %	粉粒 (0.002~ 0.02 mm)/%	砂粒 (>0.02 mm)/ %	容重/ (g·cm ⁻³)	10℃时饱和 导水率/ (mm·min ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	pH 值 (水土比 =1:1)
0~5	0.31	5.52	94.17	1.70	1.61	4.34	8.46
5~10	0.24	4.84	94.92	1.67	3.56	3.35	8.54
10~15	0.19	3.07	96.74	1.67	4.24	2.86	8.56
流沙	0.03	1.76	98.21	1.62	4.36	0.64	8.41
生物结皮层 ^①	0.35	5.67	93.98	1.72 ^②	0.58 ^③	15.69	8.11

注:①生物结皮厚度为 11.8±0.43mm; ②指含结皮在内 0—5 cm 层的土壤容重; ③指含结皮在内 0—5 cm 层的土壤饱和导水率。

在采样区域,用 PVC 管制作微型土壤蒸发器(外径 11 cm,高 15 cm)采集原状土,进行蒸发试验。试验布设 2 种干扰方式,以无干扰为对照,共 5 个处理(见

表 2),每个处理 4 次重复。取样选在雨后进行,取样时用与蒸发器直径相当的铁片及塑料胶带进行封底,以防止土壤漏出。取样结束,将蒸发器置于水桶中,

加水至水面与蒸发器内土壤表面接近但未超过为宜,饱和 48 h 后静置 24 h 以沥去多余的水分。完成后,将蒸发器放在野外平整地段进行蒸发试验,为了方便称量和减小试验误差,每个蒸发器设一个直径略大的 PVC 外筒,将其埋入土壤中并使其上沿与土壤表面齐平。

试验从 2009 年 9 月 18 日开始至 2009 年 10 月 4 日结束,于每天傍晚 7:30 进行称重(天平精度为 0.1 g),蒸发器前后质量变化即为日蒸发量(g),分析

时换算为 mm 蒸发量。试验共计历时 15 d,期间无降雨。对气象因子和水面蒸发进行了同步观测,其中气象资料来自于神木侵蚀与环境试验站的野外气象观测站,水面蒸发用 E-601 型水面蒸发器进行测定,蒸发器直径为 20 cm,水面蒸发量结果换算成 mm 表示。

土壤蒸发抑制率,是指某处理土壤水分蒸发量(E_T)与相同条件下对照处理土壤水分蒸发量(E_{BSC})相比而减少的百分数,其计算公式为

$$\text{蒸发抑制率} = (E_{BSC} - E_T) / E_{BSC} \times 100\%$$

表 2 土壤蒸发试验设计

干扰方式	处理	说明
无干扰	生物结皮	对照,保留生物结皮,取样土柱高为 14.5 cm
直接干扰	移除生物结皮	去除生物结皮层,取样土柱高为 14.5 cm
间接干扰	5 mm 沙埋	取样土柱高为 14.0 cm,加入 5 mm 厚的风干流沙
	10 mm 沙埋	取样土柱高为 13.5 cm,加入 10 mm 厚的风干流沙
	20 mm 沙埋	取样土柱高为 12.5 cm,加入 20 mm 厚的风干流沙

3 结果与分析

3.1 试验期间的气象状况与水面蒸发

土壤蒸发或水面蒸发可分为水分的汽化和水汽扩散 2 个过程,蒸发速率的大小主要受气象条件和土壤或水面本身性质的影响,与水面蒸发相比,土壤中水分的存在形态和运动特性的不同导致了土壤蒸发的影响因素要复杂的多。对于水面蒸发而言,当水质一定时,其蒸发速率主要取决于气象状况。本研究期间日平均气温(T_{avg})变化范围为 11.06~21.33 °C,日最高气温(T_{max})为 16.88~25.77 °C,日最低气温(T_{min})为 5.04~16.52 °C;日平均风速(W_s)变化范围

为 0.92~4.35 m/s;太阳辐射强度(R_s)为 14.17~22.90 [MJ/(m²·d)];空气湿度(H)变化范围为 25.87%~60.99%,各气象因子及水面日蒸发量的随时间的动态变化如图 1 所示。由图 1 可以看出,水面日蒸发量(W_E)同气温和太阳辐射呈现出基本一致的变化趋势,而空气湿度与水面日蒸发量呈明显相反的变化趋势,说明气温、太阳辐射和空气湿度对水面蒸发影响较大。此外,风速对水面蒸发也有一定程度的影响。从水面累积蒸发量随时间的变化过程来看,水面累积蒸发曲线近似直线($y = 6.3946x$, $R^2 = 0.9977$),从中可得试验期间平均水面日蒸发量为 6.39 mm。

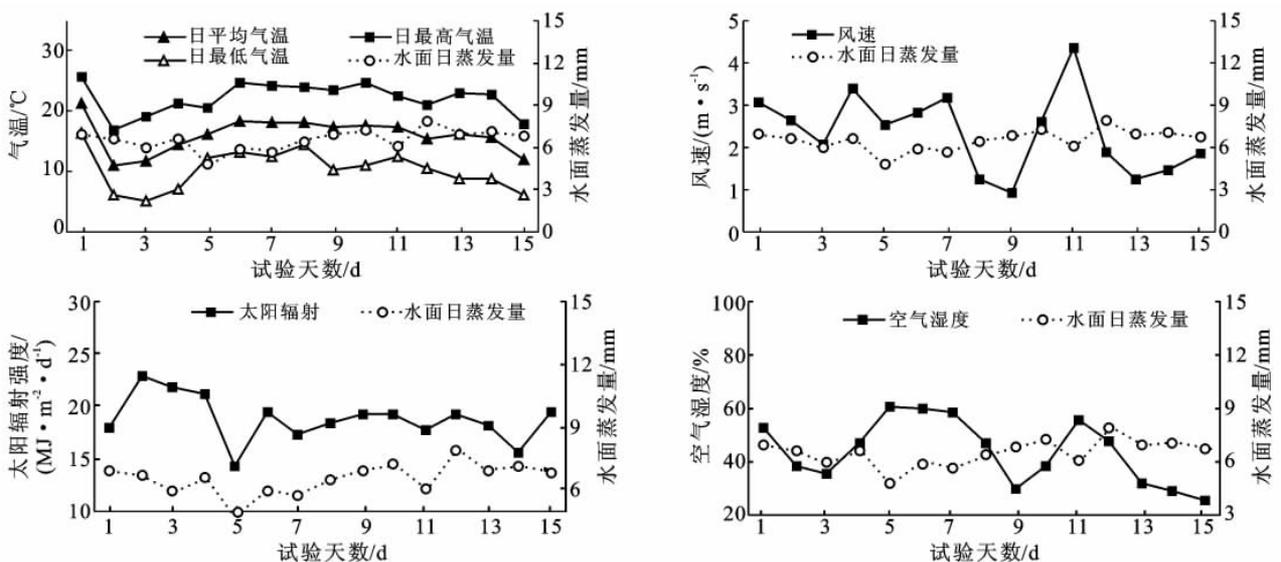


图 1 试验期间气温风速、太阳辐射、水面日蒸发量的动态变化

3.2 移除生物结皮(RM)对土壤蒸发的影响

移除生物结皮(RM)和对照(BSC)处理的土壤日蒸发量和累积蒸发量变化过程如图 2 所示。从图 2 可以看出, RM 和 BSC 处理的土壤日蒸发量变化趋势基本一致, 均表现为随蒸发时间的推进而逐渐减小。这是因为在蒸发初期, 土壤含水量高, 即供水能力强, 蒸发量也就越大, 而随着蒸发时间的持续, 土壤含水量逐渐减小, 供水能力受到制约, 土壤蒸发量也相应减少。为了对蒸发阶段进行划分, 将土壤蒸发量与水面蒸发量的比值定义为参数 K (平均值±标准误差表示), 结果列于表 3。从表 3 可以看出, 在试验前 4 d, 土壤供水充足, 土壤蒸发与水面蒸发接近, K 值变幅较小, RM 的 K 值为 0.845 ± 0.027 , BSC 则为

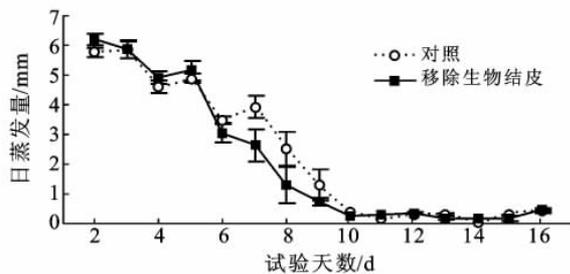


图 2 移除生物结皮(RM)和对照(BSC)土壤日蒸发量和累积蒸发量随时间的变化

0.805 ± 0.032 , 表明此阶段移除生物结皮的土壤日蒸发量略高于对照, RM 和 BSC 的累积蒸发量分别为 22.15 mm 和 21.10 mm, 差异未达到显著水平 ($p > 0.05$)。试验第 5~8 d, K 值迅速降低, 此阶段 RM 日蒸发量均表现为低于对照, 但累积蒸发量之间的差异未达到显著水平 ($p > 0.05$)。随后第 9~15 d, RM 和 BSC 的 K 值均降至 0.1 以下, 土壤水分基本稳定。试验结束时, RM 与 BSC 累积蒸发量依次为 31.82 mm 和 34.31 mm, RM 减少了 7.25%, 但统计上差异也未达到显著水平 ($p > 0.05$)。综上所述, 移除生物结皮并不能起到显著地抑制土壤蒸发的作用。此外, 由于 RM 和 BSC 处理夜间凝结水状况可能不同, 会对本试验结果产生影响, 这有待进一步研究加以验证。

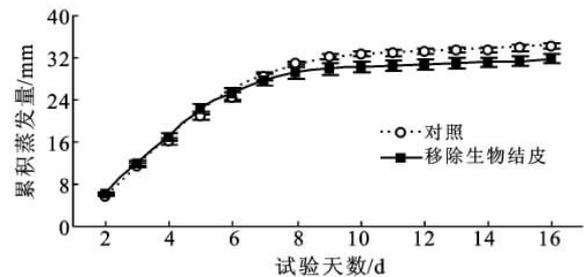


表 3 移除生物结皮(RM)和对照(BSC)土壤蒸发阶段划分

处理	$K^{\text{①}}$	持续阶段/d	阶段累积蒸发量/mm
移除生物结皮	0.845 ± 0.027	1~4	22.15
	0.358 ± 0.115	5~8	7.77
	0.039 ± 0.007	9~15	1.89
对照	0.805 ± 0.032	1~4	21.10
	0.508 ± 0.119	5~8	11.22
	0.041 ± 0.008	9~15	1.99

注: ①参数 K 为土壤蒸发量与水面蒸发量之比(平均值±标准误差)。

3.3 沙埋厚度对生物结皮土壤蒸发的影响

图 3 为不同沙埋厚度干扰(SB)和对照(BSC)处理的土壤日蒸发量和累积蒸发量随时间的变化过程。由图 3 可以看出, 随蒸发时间的持续, SB_5 , SB_{10} , SB_{20} 和 BSC 处理的日蒸发量均不断减少, 且不同蒸发历时各处理的减小幅度不同。在试验前 8 d, BSC 的日蒸发量均明显大于不同沙埋厚度处理 (SB_5 , SB_{10} 和 SB_{20}), 正因为如此, BSC 在此蒸发阶段损失水量较多, 从第 10 d 开始, 其日蒸量低于不同厚度沙埋处理。不同沙埋厚度在前 7 d 内的日蒸发量均明显低于 BSC, 特别是 SB_{20} , 而 SB_5 和 SB_{10} 差异不明显; 从第 8 d 起, SB_5 日蒸发量开始大于 BSC, SB_{10} 和 SB_{20} 于第 9 d 起日蒸发量也开始大于对照, 且总体表现出沙埋厚度越大, 日蒸发量越小的变化规律, 这是由于前

期埋沙层失水逐渐变干而起到抑制土壤水分蒸发的作用, 使得前期土壤损失的水量少, 而在中后期仍能维持一定的蒸发强度所造成的。从图 3 中累积蒸发量的变化趋势来看, BSC 在前期累积蒸发量增加迅速, 中后期则趋于平稳, 而不同厚度沙埋处理与此不同, 表现出缓慢增加的趋势。试验的前 7 d, SB_5 , SB_{10} 和 SB_{20} 的蒸发抑制率分别为 44.86%, 40.15% 和 64.33%, 但就试验结束时的累积蒸发量来看, BSC 最大, 为 34.31 mm, SB_5 , SB_{10} 和 SB_{20} 对土壤蒸发具有显著的抑制作用 ($p < 0.01$), SB_{20} 抑制作用最大, 蒸发抑制率达到了 58.15%, SB_5 与 SB_{10} 之间差异不显著 ($p > 0.05$), 蒸发抑制率分别为 25.20% 和 28.29%。由此可见, 沙埋对土壤水分保持具有积极意义。

为了更好地反映不同厚度沙埋对土壤蒸发的抑制作用, 对各处理于试验前 1~4 d 的参数 K (土壤蒸发与水面蒸发强度之比) 进行了计算 (如图 4 所示)。由图 4 可以看出, 对照 BSC 的 K 值维持在 0.8 左右, 且保持基本稳定, 说明此阶段地表蒸发强度相对较大, 主要受气象因子的影响, 而受土壤供水能力影响较小。

然而, 不同厚度沙埋处理的 K 值却表现出明显下降趋势, 尤其是 SB_{20} 下降幅度最大 (从 0.770 降至 0.086), 说明在蒸发初期, 湿沙层很快失水而形成干

沙层,阻碍了土壤水分的传导,而起到明显地抑制土壤蒸发的作用,也表明了此阶段土壤蒸发受气象因子

的决定性作用在迅速减弱,而土壤供水能力的制约作用在不断增强。

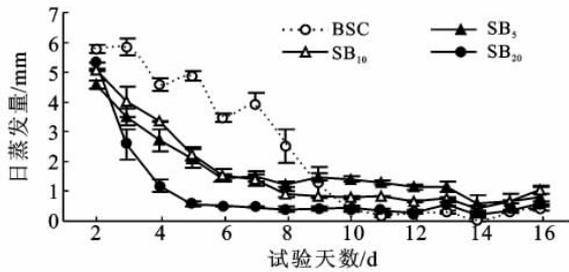


图 3 沙埋干扰(SB)和对照(BSC)土壤日蒸发量和累积蒸发量随时间的变化

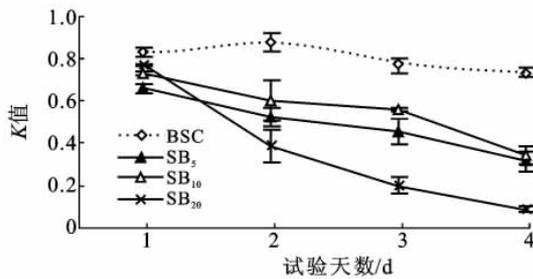
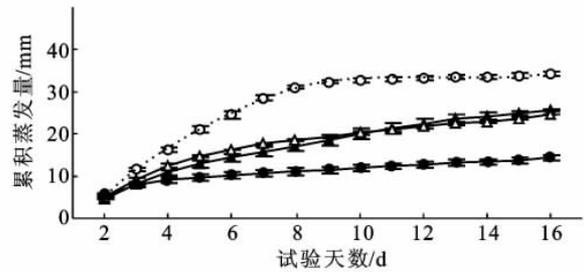


图 4 试验前 4 d 沙埋干扰(SB)及对照(BSC)的 K 值变化

4 结论

干旱半干旱区天然降水是土壤水分的惟一补给源,然而生物结皮的形成和发育,深刻地影响着土壤水文过程,使水分分配格局和土壤水分的有效性发生了改变,进而影响荒漠生态系统植被的恢复和演替。已有研究表明,不同区域、不同研究者关于生物结皮对土壤蒸发的研究结果并不一致,这可能是由于结皮本身的差异、试验条件及研究方法的不同造成的^[16-18]。

在本试验中,与对照(BSC)相比,移除生物结皮(RM)处理并不能起到显著地抑制土壤蒸发的作用,这与肖波和郑敬刚等人研究结论相似^[10,19],但是移除结皮后可能会增加降雨入渗,从而改善沙地水分状况,这在一定程度上有利于该区植被的恢复和生态环境的改善。从本研究结果看,沙埋对土壤蒸发具有明显的抑制作用,且随沙埋厚度的增加,对土壤蒸发抑制作用越大。

有研究证实,流动沙地干沙层具有明显抑制土壤蒸发的作用^[16,20-21],并提出沙地治理过程中应保留一定数量的裸沙地,这样有利于土壤水分的保持和荒漠植被的恢复^[20,22]。从抑制蒸发的机理来看,生物结皮的沙埋干扰类似于流动沙地的干沙层,这是由于蒸发前期沙埋沙层快速失水后而形成一个阻碍下层土壤水分传导的干沙层,从而抑制了土壤蒸发,虽然这使得前期土壤损失的水量较少,在蒸发中后期仍能维持

一定强度的蒸发,但就试验结束时累积蒸发量来看,SB₅,SB₁₀和SB₂₀对土壤蒸发具有显著的抑制作用($p < 0.01$),SB₂₀抑制作用最大,蒸发抑制率达到了 58.15%,SB₅和SB₁₀的蒸发抑制率分别为 25.20%和 28.29%。由此可见,沙埋对沙地土壤水分的保持具有积极作用。此外,值得注意的是沙埋过深可能会导致生物结皮死亡,有关生物结皮生长发育对沙埋厚度的响应还有待进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 房世波,刘华杰.干旱半干旱区的“生态卫士”:浅谈生物土壤结皮[J].大自然,2009(3):7-9.
- [2] 张克斌,卢晓杰,李瑞.北方农牧交错带沙地生物结皮研究[J].干旱区资源与环境,2008,22(4):147-151.
- [3] Carmi G, Berliner P. The effect of soil crust on the generation of runoff on small plots in an arid environment [J]. Catena, 2008, 74: 37-42.
- [4] Ram A, Aaron Y. Negative and positive effects of topsoil biological crusts on water availability along a rainfall gradient in a sandy arid area[J]. Catena, 2007, 70: 437-442.
- [5] 倪萍,牛博,刘江.工程破坏区植被发育动态过程的研究:以古尔班通古特沙漠为例[J].云南地理环境研究,2005,17(3):13-17.
- [6] 李新荣,肖洪浪,刘立超,等.腾格里沙漠沙坡头地区固沙植被对生物多样性恢复的长期影响[J].中国沙漠,2005,25(2):173-181.
- [7] 杨晓晖,张克斌,侯瑞萍,等.半干旱沙地封育草场的植被变化及其与土壤因子间的关系[J].生态学报,2005,25(12):3212-3219.
- [8] 陈荣毅,魏文寿,张元明,等.干旱区生物土壤结皮对种子植物多样性的影响[J].中国沙漠,2008,28(5):868-873.
- [9] 陈荷生.沙坡头地区生物结皮的水文物理特点及其环境意义[J].干旱区研究,1992,9(1):31-38.

(下转第 159 页)

模型,有效地提高了土壤数据的利用效率,为该地区农业发展,区域规划,土壤科学研究等提供了丰富、完善的基础数据资料和分析平台,是合理利用秦巴山区土壤资源的可靠数据保障和决策依据。

(2) 本研究完成了秦巴山区土壤信息系统的设计与建立工作,但系统中集成的应用模型较少,没能充分发挥这些数据的作用,造成了一定程度的浪费。在今后的工作中还要进一步对土壤科学其它基础应用进行深入研究,将其移植到土壤信息系统中,拓展系统功能,使传统土壤学应用能与现代地理信息技术充分结合,更好地为土壤学科,为农业的可持续发展和社会大众服务。

[参 考 文 献]

- [1] 史学正,于东升,高鹏,等. 中国土壤信息系统(SISChina)及其应用基础研究[J]. 土壤,2007,39(3):329-333.
- [2] 赵其国. 21 世纪土壤科学展望[J]. 地球科学进展,2001,16(5):704-709.
- [3] 石元春. 土壤学的数字化和信息化革命[J]. 土壤学报,2000,37(3):289-295.
- [4] 史学正,于东升.“数字土壤”:21 世纪土壤学面临的机遇与挑战[J]. 土壤通报,2000,31(3):104-106,121.
- [5] 吕成文,张甘霖,沈德福. 美国土壤信息系统的发展及其启示[J]. 土壤通报,2004,35(1):4-7.
- [6] 于东升,史学正. GIS 中土壤信息系统的研究进展[J]. 土壤学进展,1993,21(6):26-31.
- [7] 史舟,王人潮. 红壤区土壤资源利用与管理信息系统的研制[J]. 农业工程学报,1998(1):7-11.
- [8] 周斌,杨柏林,汪红强,等. 贵州省土壤信息系统(GSIS)空间数据库的设计与建立[J]. 地质地球化学,2000,28(1):68-71.
- [9] 吴顺辉,甘海华,梁中龙,等. 基于 GIS 的广东省土壤资源信息系统构建研究[J]. 土壤与环境,2001,10(4):307-310.
- [10] 林杰,张金池,彭世揆,等. 江西省 1:100 万土壤信息系统的构建[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2005,29(5):106-110.
- [11] 刘京,常庆瑞,刘森,等. 陕西省土壤信息系统的设计与建立[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2007,35(12):129-132.
- [12] 吴克宁,杨锋,吕巧灵,等. 河南省 1:20 万土壤数据库的构建及其应用[J]. 河南农业科学,2007(5):77-80.
- [13] 赵明松,程先富,王世航,等. 安徽省土壤信息系统(AHSIS)的设计与开发[J]. 中国农学通报,2008,24(2):441-444.
- [14] 潘剑君,靳婷婷,孙维侠. 江西省余江县土壤信息系统建造研究[J]. 土壤学报,1999,39(4):522-527.
- [15] 马友华,胡芹远,转可钦,等. 合肥市土壤数据库系统的建立[J]. 安徽农学通报,2001,7(1):48-49.
- [16] 武伟,刘洪斌,谢德体,等. 重庆市土壤信息系统的建立与应用[J]. 计算机与现代化,2003(7):20-22,26.
- [17] 罗明云. 四川省南充市 GIS 土壤数据库系统设计的理论研究[J]. 土壤通报,2006,37(1):61-64.
- [18] 赵文君,陈志诚. 土壤数据库中的编码问题[J]. 土壤学进展,1993,21(6):37-45.
- [10] Xiao B, Zhao Y G, Shao M A. Characteristics and numeric simulation of soil evaporation in biological soil crusts[J]. Journal of Arid Environment, 2010, 74: 121-130.
- [11] 张志山,何明珠,谭会娟,等. 沙漠人工植被区生物结皮类土壤的蒸发特性:以沙坡头沙漠研究试验站为例[J]. 土壤学报,2007,44(3):404-410.
- [12] Jia R L, Li X R, Liu L C, et al. Responses of biological soil crusts to sand burial in a revegetated area of the Tengger Desert, Northern China[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008,40:2827-2834.
- [13] Li X R, He M Z, Duan Z H, et al. Recovery of topsoil physicochemical properties in revegetated sites in the sand-burial ecosystems of Tengger Desert, Northern China[J]. Geomorphology, 2007,88:254-265.
- [14] 闫德仁,薛英英,韩凤杰,等. 沙漠生物土壤结皮国外研究概况[J]. 内蒙古林业科技,2007,33(1):39-42.
- [15] 贾恒义,雍绍萍,王富乾. 神木试区的土壤资源[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊,1993,18: 36-46.
- [16] 刘立超,李守中,宋耀选,等. 沙坡头人工植被区微生物结皮对地表蒸发影响的试验研究[J]. 中国沙漠,2005,25(2):191-195.
- [17] 闫德仁,薛英英,刘果厚. 库布齐沙漠生物结皮层土壤理化特性的研究[J]. 土壤,2008,40(1):145-148.
- [18] Zhang Z S, Liu L C, Li X R, et al. Evaporation properties of a revegetated area of the Tengger Desert, North China[J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72:964-973.
- [19] 郑敬刚,张志山,冯丽,等. 饱和流沙和苔藓结皮在蒸发过程中的水分特征研究[J]. 中国沙漠,2007,27(2):234-238.
- [20] 原鹏飞,张艳芬,唐俊. 沙地干沙层形成规律[J]. 水土保持应用技术,2009(6):6-8.
- [21] 刘新平,张铜会,赵哈林,等. 流动沙丘干沙层厚度对土壤水分蒸发的影响[J]. 干旱区地理,2006,29(4):523-526.
- [22] 翟翠霞,马健,李彦. 古尔班通古特沙漠风沙土土壤蒸发特性[J]. 干旱区地理,2007,30(6):805-811.

(上接第 62 页)