

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20160192

毛乌素沙地典型沙生灌木对土壤蒸发的影响

穆家伟¹ 查天山^{1,2} 贾昕^{1,2} 郭晓楠¹ 王子奇¹ 杨强¹

(1 北京林业大学水土保持学院 2 宁夏盐池毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站)

摘要:为了探求半干旱沙区植被恢复后沙生灌木对土壤蒸发的影响,本文利用微型蒸渗仪对盐池沙区的流动沙地、油蒿群落和沙柳群落的土壤蒸发进行了测定,并分析了2014年盐池降雨、风速、太阳辐射、相对湿度、空气温度、土壤机械组成分别与土壤蒸发的关系。结果表明:1)植被恢复区油蒿群落和沙柳群落土壤蒸发总量比流动沙地分别高出27.91%和40.23%;2)油蒿和沙柳样地黏粒含量比流动沙地分别高出220.59%和173.53%,油蒿样地和沙柳样地黏粒和粉粒的总含量比流动沙地分别高出63%和98%;3)油蒿和沙柳样地土壤蒸发与风速、太阳辐射、温度等气象因子相关性不显著,流动沙地土壤蒸发与太阳辐射相关性显著。因此,在半干旱沙区植被恢复后,土壤蒸发有增大的趋势,这很可能与植被恢复后土壤中黏粒和粉粒含量的增加有关。

关键词:半干旱沙区;土壤蒸发;植被恢复;微型蒸渗仪

中图分类号:S714.6; S152.7⁺³ 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2016)12-0039-07

MU Jia-wei¹; ZHA Tian-shan^{1,2}; JIA Xin^{1,2}; GUO Xiao-nan¹; WANG Zi-qi¹; YANG Qiang¹. **Influence of typical sandy shrubs on soil evaporation in Mu Us Sandland, northwestern China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2016)38(12) 39-45 [Ch, 32 ref.]

1 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China;

2 Yanchi Ecology Research Station of the Mu Us Desert, Yanchi, Ningxia, 751500, P. R. China.

In order to study the influence of sandy shrubs on soil evaporation in dry land after restored vegetation, the soil evaporation of three site types of the mobile dunes, *Artemisia ordosica* community and *Salix psammophila* community was measured in Yanchi, Ningxia of northwestern China using micro-lysimeter. And we analyzed the effects of precipitation, wind, solar radiation, relative humidity, air temperature and soil particle size on the soil evaporation. The results were as follows: 1) soil evaporation of *A. ordosica* community and *S. psammophila* community was about 27.91% and 40.23% higher than the mobile dunes, respectively. 2) For the contents of clay particles, *A. ordosica* community and *S. psammophila* community were about 220.59% and 173.53% higher than the mobile dunes, respectively. The contents of clay and silt particles of *A. ordosica* community and *S. psammophila* community were about 63% and 98% higher than the mobile dunes, respectively. 3) The soil evaporation of *A. ordosica* community and *S. psammophila* community was not correlated with wind speed, solar radiation, air temperature, and the soil evaporation of the mobile dunes was significantly correlated with solar radiation. Therefore, soil evaporation in dry land area has increasing tendency after restored vegetation. This is probably related to the increase of clay and silt particle content after vegetation restoration.

Key words semi-arid sandy land; soil evaporation; vegetation restoration; micro-lysimeter

土壤蒸发是干旱半干旱地区水分消耗的主要组成部分之一,土壤蒸发量的大小直接影响着沙区植

被可利用水分的多少^[1-2]。同时,土壤蒸发没有直接参与植物的生理活动,属于无效水分损失^[3],因

收稿日期: 2016-06-07 修回日期: 2016-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(31270755)。

第一作者: 穆家伟。主要研究方向:生态水文。Email:mujiawei1991@163.com 地址:100083 北京市海淀区清华东路35号北京林业大学水土保持学院。

责任作者: 贾昕,博士,副教授。主要研究方向:生态系统过程模拟。Email:xinjia@bjfu.edu.cn 地址:同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

此了解干旱半干旱沙区的土壤蒸发规律对植被建设及后期管理具有重要意义^[4-5]。近年来,国家在西北地区启动了三北防护林建设、退耕还林、防沙治沙等多项建设工程^[6],植被恢复区生态环境得到了明显提高。植被恢复后,沙丘固定程度增加,土壤水分下降,土壤中有机质含量增加,土壤结构改善^[7],土壤蒸发状况也会发生变化。目前,人们对于植被恢复后生态系统承载力的研究多集中于降雨和植物蒸腾^[8],而忽略了土壤蒸发对土壤水分的消耗。因此,有必要对植被恢复前后的土壤蒸发情况进行分析,探究植物群落对土壤蒸发的影响。

影响土面蒸发的因素基本上可分为能量因素(温度、湿度、风速、日照)和供水条件两大类^[9]。前者主要是气象因素,后者主要是表层土壤含水率状况,其他控制或影响这两类因素的因子对土面蒸发均产生影响。目前对土壤蒸发的研究主要集中在供水条件。土壤含水量、土壤结构、地表覆盖以及群落结构都对土壤蒸发产生影响^[10-11]。不同土壤质地对土壤蒸发的影响也是十分突出的。作物的遮阴会降低农田的土壤蒸发^[12-13],但对沙坡头植被恢复区研究表明,土壤蒸发不受植株遮阴的影响^[14]。由于干旱半干旱沙区植被及土壤环境的特殊性,沙区土壤蒸发与田间土壤蒸发会存在较大差异。目前大多相关研究仅停留在植被恢复可以改善土壤结构的程度^[7,15],并未继续探究对土壤蒸发产生的影响。在半干旱沙区,植被恢复后周围土壤蒸发环境发生变化,进而导致土壤蒸发量增加或减少,影响土壤水分平衡。这对于半干旱沙区植被恢复后生态系统的水分平衡以及植被恢复过程中植被密度的确定具有重要意义。

本文选取宁夏盐池植被恢复区中油蒿群落和沙柳群落作为研究对象,同时将流动沙地作为空白对照,研究该地区典型灌木群落对土壤蒸发的影响。植被恢复区经过8年的治理,由植被恢复前以流动沙地为主,逐渐发展为以油蒿、沙柳为主要植被的固定沙丘。地表植被覆盖度逐年增加,生态环境明显改善。但地下水位逐年降低,土壤水储量有所下降。本文通过对比油蒿和沙柳群落土壤蒸发及流动沙地土壤蒸发情况,探究沙生灌木对土壤蒸发的影响及导致土壤蒸发改变的原因,为半干旱区植被恢复过程中植被密度的确定及后期植被管理提供依据。

1 研究地概况与研究方法

1.1 试验地概况

研究区位于宁夏盐池毛乌素沙地生态系统国家定位监测研究站($37^{\circ}40'48'' \sim 37^{\circ}43'48''N$, $107^{\circ}12' \sim$

$107^{\circ}15'36''E$,海拔1550 m)。处于毛乌素沙地南缘,属于典型的中温带大陆性季风气候,植被类型属于由干草原向荒漠草原过渡,地表土壤大部分是黄土丘陵覆沙地。多年均温8.1℃,最高日均温为29.3℃(7月),最低日均温为-14.1℃(1月)。多年平均降水量为287 mm,62%的降雨集中在6—9月,多年平均潜在蒸散量为2024 mm,≥10℃积温2945℃,无霜期约120 d。试验区以灌木为主,有油蒿(*Artemisia ordosica*)、沙柳(*Salix cheilophila*)、杨柴(*Hedysarum mongolicum*)、柠条(*Caragana korshinskii*)。草本有赖草(*Leymus secalinus*)、无芒隐子草(*Cleisogenes songorica*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、披针叶黄华(*Thermopsis lanceolata*)。土壤以风沙土为主,其次是灰钙土和黑垆土,表层10 cm土壤密度为(1.54 ± 0.08) g/cm³。

1.2 试验观测

1.2.1 土壤蒸发观测

土壤蒸发测定选在植被生长稳定的油蒿、沙柳样地和地势较为平坦的流动沙地。油蒿样地和沙柳样地植被盖度分别为43%和58%,冠层平均高度分别为55和260 cm。选取植被分布较为均匀的位置,按三角形分布,分别设置3个微型蒸渗仪(microlysimeter,简称ML),微型蒸渗仪之间距离为1 m。流动沙地采取同样标准进行布设。在布设微型蒸渗仪同时,在距离5 m左右区域设置10 m×10 m的取样地,每次取土时,3个土柱在相距10 cm位置取土,尽量减少由于土体差异导致的误差,取土完成后用上次的弃土填埋本次取土产生的土坑,并做好标记。

试验所用微型蒸渗仪使用PVC材料制作,每套由高25 cm,外径为11 cm的内管及外径为12.5 cm的外管组成,底部用塑料薄膜包裹密封,精度在10%左右。试验从2014年4月24日开始至2014年10月7日结束。试验观测了3种地块的土壤蒸发,分别为未进行植被恢复的流动沙地的土壤蒸发以及油蒿群落土壤蒸发和沙柳群落土壤蒸发,每种处理3个重复。每天7:00 am、7:00 pm取出微型蒸渗皿称量,两次测量之差即当日土壤蒸发量。用精度为0.01 g的电子天平称质量。每4 d更换一次微型蒸渗皿中的原状土,以保证内外土壤含水状况一致,降雨后立即更换土体。

1.2.2 微气象因子及土壤机械组成测定

微气象因子由距土壤蒸发样地测量点300 m的通量塔测得,包括空气温湿度(HMP155A, Vaisala, Finland)、太阳辐射(CNR-4, Kipp & Zonen, the Netherlands)、风速(034B, Met One Instruments Inc.,

US)。微气象数据的半小时平均值由 CR3000 数据采集器(Campbell Scientific Inc., USA)计算和记录(扫描时间间隔为 10 s)。降雨量数据由距通量塔 50 m 的翻斗式雨量筒(TE525MM, Campbell Scientific Inc, Logan, UT, USA)测得,使用 CR200 数据采集器(Campbell Scientific Inc, USA)记录每半小时降水总量。土壤机械组成采用英国马尔文公司生产的 MS 2000 型土壤粒度分析仪测定。在 2014 年 7 月 29 日对分别对 3 块样地取土区表层 0~5 cm 的土壤机械组成进行测量。每块样地取土区内均匀选取 5 个点,并将这 5 个点表层 0~5 cm 土样混合均匀,作为该样地的土样。

1.3 统计分析

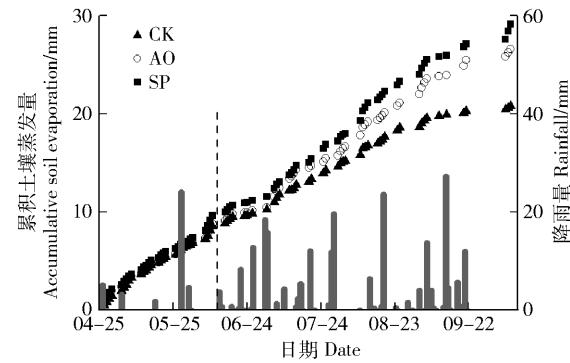
运用 SPSS 20.0 对流动沙地、油蒿群落、沙柳群落 3 块样地的土壤蒸发以及土壤机械组成进行单因素方差分析,比较其差异显著性。采用 Origin 8.6.0 (OriginLab, Northhampton, MA, USA) 对 3 种土壤蒸发和空气温度、空气相对湿度、太阳辐射、风速进行线性回归分析。各个气象因子采用当天 7:00 am 至 7:00 pm 的平均值做为该天的数值。绘图由 Origin 8.6.0 完成。

2 结果与分析

2.1 生长期累积土壤蒸发量对比

2014 年土壤蒸发共测定 73 d,流动沙地土壤蒸发总量为 20.78 mm,油蒿群落土壤蒸发量为 26.58 mm,沙柳群落土壤蒸发量为 29.14 mm,油蒿群落和沙柳群落的土壤蒸发较流动沙地分别高出 27.91% 和 40.23%,生长季总降雨量为 283 mm。从图 1 可以看出,生长季初期(4 月 27 日至 6 月 2 日),3 块样地的土壤蒸发量基本相同,自 6 月 7 日开始,3 块样地的土壤蒸发量都表现出增大的趋势,但油蒿群落和沙柳群落的土壤蒸发增加幅度高于流动沙地的土壤蒸发,且沙柳群落的土壤蒸发量要大于油蒿群落

的土壤蒸发。整个生长季共有 5 次较大强度的降雨,6 月 3 日有 1 次 24 mm 的大降雨,但 3 块样地土壤蒸发没有明显差异。而在 7、8、9 月份的 4 次大降雨之后(7 月 7 日和 7 月 8 日降雨 34.4 mm,8 月 5 日和 8 月 6 日降雨 31.6 mm,8 月 27 日降雨 23.7 mm,9 月 22 日降雨 27.4 mm),植物群落下的土壤蒸发量明显高于流动沙地的土壤蒸发量。生长季中后期降雨量的增加使得土壤蒸发量显著增大。



CK. 流动沙地;AO. 油蒿群落;SP. 沙柳群落。下同。CK, mobile dune; AO, *Artemisia ordosica* community; SP, *Salix psammophila* community. The same below.

图 1 2014 年生长季土壤累积蒸发量和降雨量

Fig. 1 Accumulation of soil evaporation and rainfall during the growing season in 2014

2.2 干旱及降雨对土壤蒸发的影响

从图 2a 中可以看出,干早期(连续 5 d 没有降雨即进入干早期)3 块样地的土壤蒸发并无明显差异,流动沙地、油蒿群落、沙柳群落 10 d 的总蒸发量分别为 2.38、2.39 和 2.71 mm。沙柳群落的土壤蒸发略微高于其他两种处理,但并未达到显著水平($P > 0.05$)。油蒿群落的土壤蒸发和流动沙地的土壤蒸发基本相同。

历次降雨后植被下土壤蒸发量都会高于流动沙地土壤蒸发,随着时间的增加差异逐渐减小,在降雨后 5 d 左右 3 块样地的土壤蒸发基本一致。图 2b

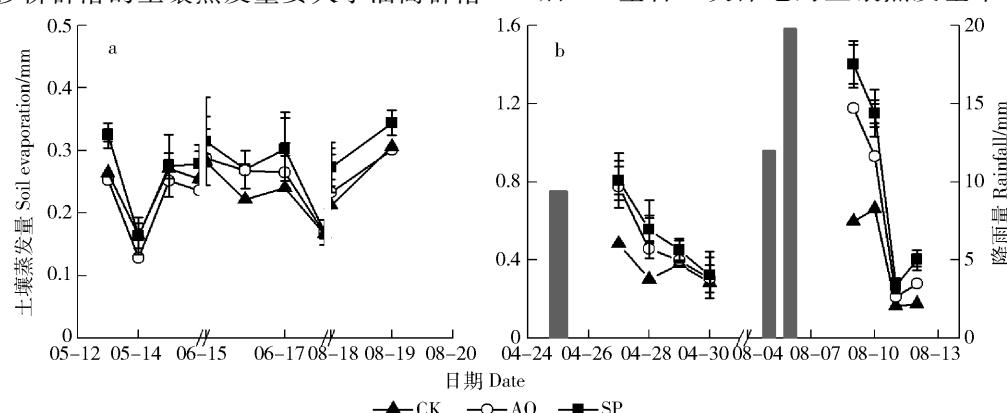


图 2 干旱期(a)和降雨之后(b)土壤蒸发量对比

Fig. 2 Comparison of soil evaporation between drought period (a) and post-rainfall (b)

为两次典型的降雨时间后土壤蒸发过程。从图 2b 中可以看出,在降雨之后,3 块样地的土壤蒸发迅速增加达到了峰值,随后蒸发量迅速降低并逐渐趋于稳定,差异也在逐渐减小。在经历 8 月 5 日和 8 月 6 日两次大降雨之后,植被覆盖下的土壤蒸发显著高于流动沙地的土壤蒸发($P < 0.01$),最大可达到流动沙地土壤蒸发量的 210%。沙柳群落的土壤蒸发最大,油蒿群落的土壤蒸发其次,流动沙地的土壤蒸发最小。

2.3 土壤机械组成分析

在土壤蒸发测定期间对 3 种土壤蒸发样地表层 5 cm 土壤中黏粒($< 0.002 \text{ mm}$)和粉粒($0.002 \sim 0.050 \text{ mm}$)含量进行测量,结果见图 3。从图中可以看出,油蒿和沙柳群落黏粒含量显著高于流动沙地($P < 0.01$),分别高于流动沙地黏粒含量的 220.59% 和 173.53%。沙柳群落黏粒含量高于油蒿群落,但并未有显著差异。对于粉粒含量,3 块样地之间差异极显著($P < 0.01$),流动沙地的土壤粉粒含量依旧最低。从黏粒和粉粒总量来看,油蒿群落和沙柳群落分别是流动沙地的 1.63 倍和 1.98 倍。

2.4 气象因子对土壤蒸发的影响

对生长季 73 d 的土壤蒸发与相应的风速、太阳

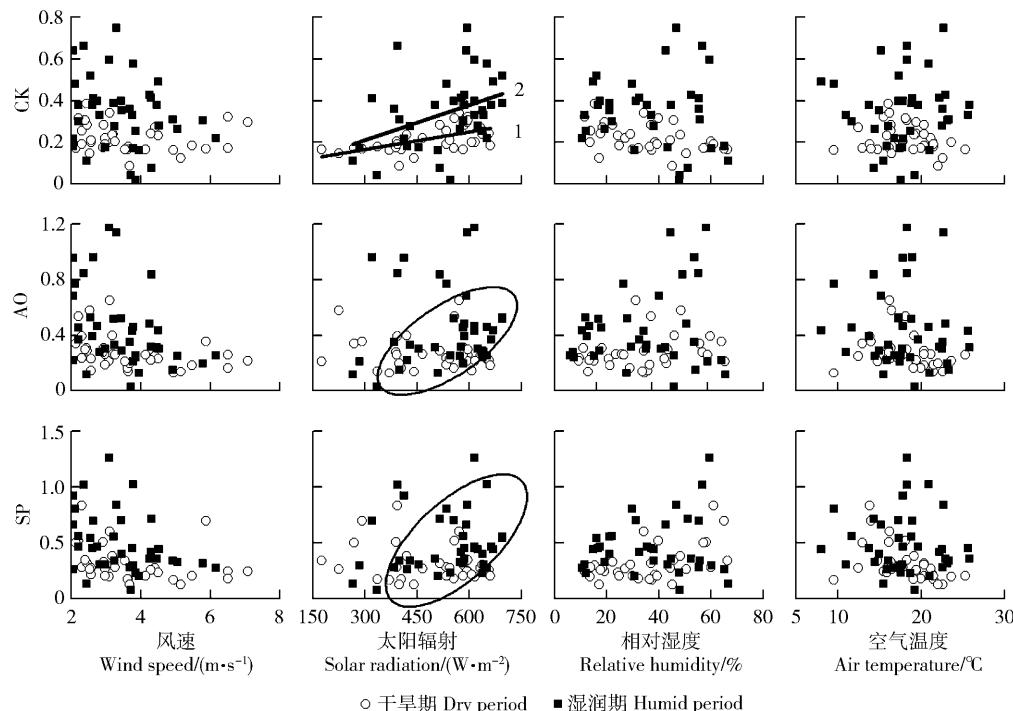


图 3 土壤机械组成对比

Fig. 3 Comparison of soil mechanical composition

辐射、相对湿度、空气温度 4 种气象因子进行相关分析,气象因子采用土壤蒸发期间的数据,即 7:00 am 至 7:00 pm 之间的均值作为当天气象因子的数值。图 4 以降雨后 5 d 为界限,将土壤蒸发划分为 2 个时期,并对 2 个时期中 3 块样地的土壤蒸发与气象因子间的相关性进行了分析。

从图 4 中可以看出,湿润期(距离最近一次降雨 5 d 以内为湿润期)土壤蒸发量波动较大,且在 3 块样地土壤蒸发与相对湿度和空气温度的图中,各点几乎均匀分布在图中。干旱期 3 块样地土壤蒸发

干旱期:连续 5 d 没有降雨即为进入干旱期;湿润期:距离最近一次降雨的时间在 5 d 以内为湿润期;1 和 2 分别指流动沙地在干旱期和湿润期土壤蒸发与太阳辐射的线性拟合。Dry period, it will be in dry period after 5 days no rain; humid period, it will be in humid period when it had rained in 5 days; 1 and 2 indicate the linear fitting between soil evaporation of the mobile dunes and the solar radiation in dry period and humid period, respectively.

图 4 气象因子与土壤蒸发相关分析

Fig. 4 Correlation analysis between soil evaporation and meteorological factors

波动较小,且都基本都稳定在 0.4 mm/d。风速,空气相对湿度,温度与 3 块样地的土壤蒸发均没有显著的相关关系,仅流动沙地土壤蒸发与太阳辐射有一定的相关性,油蒿样地和沙柳样地的土壤蒸发在湿润期与太阳辐射呈现正相关的趋势。

3 讨 论

3.1 植被对土壤蒸发的影响

由图 1 可知,生长季油蒿群落和沙柳群落累积土壤蒸发量高于流动沙地,沙坡头地区的研究得出了类似的结论^[1],这很可能是由于植被对环境因子的改变所致。已有研究表明,植被会减少地面接受的太阳辐射,降低近地面风速,增加相对湿度。此外,植被还可以通过降低近地层风速,使得空气中细小颗粒降落在植被周围,并且植物根系具有固持土壤的作用,进而改变了土壤机械组成^[16-17]。植物群落土壤蒸发与流动沙地土壤蒸发的差异主要表现在湿润期(图 4),干早期差异较小(图 2a)。这可能是由于湿润期植物群落对土壤蒸发影响占主要作用,但干早期研究区土壤会形成干沙层,对 3 块样地的土壤蒸发有抑制作用。干沙层所具有的低导热率,低毛管孔隙的特性^[18-19],导致深层土壤水分只能以气态的形式穿过干沙层,极大的降低了土壤蒸发^[20]。

相关学者在对农田和草地的棵间土壤蒸发的研究时,得出了相反的结论,即农作物或草本植物会降低土壤蒸发^[13,21],这可能是由于研究地区土壤形状的差异导致的,也可能是由于限制土壤蒸发的主要因子不同。因为土壤蒸发的影响因素较多,蒸发的机理尚不明确^[22],各地土壤蒸发的影响因素也存在差异,所以会导致截然相反的结论。

3.2 气象因子对土壤蒸发的影响

气象条件是土壤蒸发的基本条件,并且为土壤蒸发提供了能量来源^[23]。由图 4 可知,太阳辐射对流动沙地土壤蒸发的影响显著,但两种植物群落中的土壤蒸发与太阳辐射相关性较差,这是植被对太阳辐射的遮挡作用所致,与前人研究植被下土壤蒸发的结果一致^[12,24]。空气温度和相对湿度与流动沙地、油蒿样地和沙柳样地土壤蒸发并不存在相关性(图 4),这可能与沙区土壤表面的干沙层有关,也可能是由于沙区气候较为干燥,土壤中可供蒸发的土壤水较少,降低了气象因子对土壤蒸发的影响。4 种气象因子中,仅有太阳辐射对流动沙地土壤蒸发有影响(图 4),表明油蒿和沙柳群落植被冠层的遮挡,降低了太阳辐射对群落内土壤蒸发的影响。这与相关学者的研究结果一致^[21]。

降水对土壤蒸发的影响较为明显,从图 2 中可以看出,降雨后 3 块样地土壤蒸发均迅速增大,这说明当表层土壤水分含量较高时,土壤中可供蒸发的水分充足,土壤蒸发较大。整个生长季同样显示出了相似的结论,随着降雨量的增大,土壤累积蒸发量迅速增加(图 1),这与相关学者得出的结果类似^[25]。对于不同降雨类型对土壤蒸发的影响需要进一步研究。

3.3 土壤机械组成对土壤蒸发的影响

土壤机械组成对土壤水分状况影响较大^[26],土壤中黏粒和粉粒含量的多少直接影响着土壤的入渗和蒸发能力^[27]。从图 3 可知,油蒿群落和沙柳群落土壤中黏粒和粉粒含量明显高于流动沙地,这与前人研究结果相似^[28-30]。研究区黏粒和粉粒含量对土壤蒸发影响较大,可能与该地区土壤粒径过于单一有关。流动沙地的砂粒直径主要集中 100 ~ 500 μm,可达到土壤颗粒的 80% ~ 95%^[31],沙区流沙(母质)在风蚀过程中粉砂粒级以下的颗粒已被吹失^[16]。

因此,半干旱沙区植被恢复后,导致植被恢复区土壤增大的原因很可能是植被下土壤中黏粒和粉粒含量的增加。植被恢复后,地表粗糙度的增加,使得降尘等输送的细粒物质逐渐在地表积累并且不被吹蚀^[32]。由于没有对土壤理化性质进一步研究,并不能明确在半干旱沙区土壤状况对土壤蒸发改变的原理。今后可对半干旱沙区不同植被恢复阶段的土壤理化性状、土壤含水量以及不同植被冠层结构进行监测,进一步探究半干旱沙区植被恢复对土壤蒸发的影响机制。

4 结 论

1) 在毛乌素沙地,风速、相对湿度、空气温度对土壤蒸发影响较小,太阳辐射对土壤蒸发有一定的影响,降水对土壤蒸发影响较大。同时,植被恢复后,植被群落中土壤黏粒和粉粒的增加会增大土壤蒸发。

2) 毛乌素沙地典型沙生灌木(油蒿、沙柳)会增大土壤蒸发,主要对湿润期土壤蒸发的增大影响较为明显,干早期没有显著影响。

3) 半干旱沙区植被恢复后土壤蒸发增大,增加了生态系统水分的消耗。因此,在半干旱沙区进行植被恢复时要考虑到植被恢复后土壤蒸发增大,导致的土壤水分含量降低。合理计算植被栽植密度,并加强后期的植被密度管理工作,尽量减少植被密度超出环境承载力所导致的植被退化现象。

参考文献

- [1] 李新荣, 马凤云, 龙立群, 等. 沙坡头地区固沙植被土壤水分动态研究[J]. 中国沙漠, 2001, 21(3): 217-222.
LI X R, MA F Y, LONG L Q, et al. Soil water dynamics under sand-fixing vegetation in Shapotou Area [J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(3): 217-222.
- [2] 王学全, 刘君梅, 杨恒华, 等. 应用神经网络RBF估算青海省东南沙区土壤蒸发[J]. 干旱区研究, 2012, 29(3): 400-404.
WANG X Q, LIU J M, YANG H H, et al. Application of RBF network for calculating desert soil evaporation in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Arid Zone Research, 2012, 29 (3): 400-404.
- [3] 孟杰, 卜崇峰, 张兴昌, 等. 移除和沙埋对沙土生物结皮土壤蒸发的影响[J]. 水土保持通报, 2011, 31(1): 58-62.
MENG J, BU C F, ZHANG X C, et al. Effects of biological crust removal and sand mulching on soil evaporation in a sandy soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(1): 58-62.
- [4] WANG X P, BERNDTSSON R, LI X R, et al. Water balance change for a re-vegetated xerophyte shrub area/changement du bilan hydrique d'une zone replantée d'arbustes xérophiles [J]. Hydrological Sciences Journal, 2004, 49(2): 283-295.
- [5] 王艳莉, 刘立超, 高艳红, 等. 人工固沙植被区土壤水分动态及空间分布[J]. 中国沙漠, 2015, 35(4): 942-950.
WANG Y L, LIU L C, GAO Y H, et al. Dynamic and spatial distribution of soil moisture in an artificially re-vegetated desert area [J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(4): 942-950.
- [6] 翟明普. 西北地区植被恢复与建设的原则[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(1): 60-63.
ZHAI M P. Concept for vegetation rehabilitation and construction in the north-west region of China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2003, 1(1): 60-63.
- [7] 曹成有, 蒋德明, 全贵静, 等. 科尔沁沙地小叶锦鸡儿人工固沙区土壤理化性质的变化[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 108-111.
CAO C Y, JIANG D M, QUAN G J, et al. Soil physical and chemical characters changes of *Caragana microphylla* plantation for sand fixation in Keerqin Sandy Land [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(6): 108-111.
- [8] 郭忠升. 黄土高原半干旱区水土保持植被恢复限度:以人工柠条林为例[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(4): 49-54.
GUO Z S. Limit of vegetation rehabilitation for soil and water conservation in semi-arid region of Loess Plateau: a case study of artificial *Caragana korshinskii* Kom stand [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(4): 49-54.
- [9] 王政友. 土壤水分蒸发的影响因素分析[J]. 山西水利, 2003 (2): 26-27.
WANG Z Y. Analysis of influence factors of soil evaporation [J]. Shanxi Water Resources, 2003(2): 26-27.
- [10] 张彦群, 王建东, 龚时宏, 等. 滴灌条件下冬小麦田间土壤蒸发的测定和模拟[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 91-98.
ZHANG Y Q, WANG J D, GONG S H, et al. Measuring and modeling of soil evaporation for winter wheat with drip irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(7): 91-98.
- [11] 宋炳煜. 草原群落蒸发蒸腾的研究[J]. 气候与环境研究, 1997(3): 25-38.
SONG B Y. Study on evapotranspiration from plant communities of the steppe [J]. Climatic and Environmental Research, 1997(3): 25-38.
- [12] 孙仕军, 樊玉苗, 刘彦平, 等. 土壤棵间蒸发的测定及其影响因素[J]. 节水灌溉, 2014(4): 79-82.
SUN S J, FAN Y M, LIU Y P, et al. Measurement and influencing factors of soil evaporation between plants [J]. Water Saving Irrigation, 2014(4): 79-82.
- [13] 周学雅, 王安志, 关德新, 等. 科尔沁草地棵间土壤蒸发[J]. 中国草地学报, 2014, 36(1): 90-97.
ZHOU X Y, WANG A Z, GUAN D X, et al. Research of soil evaporation of Horqin grassland [J]. Chinese Journal of Grassland, 2014, 36(1): 90-97.
- [14] 张志山, 李新荣, 王新平, 等. 沙漠人工植被区的蒸发蒸腾[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2484-2490.
ZHANG Z S, LI X R, WANG X P, et al. Evaporation and transpiration in re-vegetated desert area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(10): 2484-2490.
- [15] 王思成, 王月玲, 许浩, 等. 半干旱黄土丘陵区不同植被恢复方式下土壤理化特性及相关分析[J]. 西北农业学报, 2009, 18(1): 295-299.
WANG S C, WANG Y L, XU H, et al. Soil physical-chemistry characteristic and correlation analysis of different vegetation restoration modes in semiarid hilly and gully region [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2009, 18 (1): 295-299.
- [16] 马风云, 李新荣, 张景光, 等. 沙坡头人工固沙植被土壤水分空间异质性[J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 789-795.
MA F Y, LI X R, ZHANG J G, et al. Spatial heterogeneity of soil moisture in Shapotou sand-fixing artificial vegetation area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(5): 789-795.
- [17] 孟琳, 赵雨森. 生物固沙对土壤植被的影响[J]. 防护林科技, 2005(6): 38-41.
MENG L, ZHAO Y S. Effect of vegetation on soil biological sand [J]. Protection Forest Science and Technology, 2005 (6): 38-41.
- [18] 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.
YUAN P F, ZHANG Y F, TANG J. The sand dry sand formation [J]. Technology of Soil and Water Conservation, 2009(6): 6-8.
- [19] 翟翠霞, 马健, 李彦. 古尔班通古特沙漠风沙土土壤蒸发特征[J]. 干旱区地理, 2007, 30(6): 805-811.
ZHAI C X, MA J, LI Y. Soil evaporation of aeolian sandy soil in Gurbantunggut Desert [J]. Arid Land Geography, 2007, 30 (6): 805-811.
- [20] 李品芳, 李保国. 毛乌素沙地水分蒸发和草地蒸散特征的比较研究[J]. 水利学报, 2000(3): 24-28.
LI P F, LI B G. Study on some characteristics of evaporation of sand dune and evapotranspiration of grassland in Mu Us Desert [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000 (3): 24-28.

- [21] 刘钰, FERNANDO R M, PEREIRA L S. 微型蒸发器田间实测麦田与裸地土面蒸发强度的试验研究[J]. 水利学报, 1999(6):45-50.
- LIU Y, FERNANDO R M, PEREIRA L S. Measurement of evaporation from wheat field and bare soil by using microlysimeters[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999(6):45-50.
- [22] 汪增涛, 孙西欢, 郭向红, 等. 土壤蒸发研究进展[J]. 山西水利, 2007, 23(1):76-78.
- WANG Z T, SUN X H, GUO X H, et al. Progress in soil evaporation[J]. Shanxi Water Resources, 2007, 23(1):76-78.
- [23] 李艳, 刘海军, 黄冠华. 麦秸覆盖条件下土壤蒸发阻力及蒸发模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1):98-106.
- LI Y, LIU H J, HUANG G H. Modeling resistance of soil evaporation and soil evaporation under straw mulching [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(1):98-106.
- [24] 杨林林, 高阳, 申孝军, 等. 冬小麦棵间土壤蒸发数值模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(1):23-26.
- YANG L L, GAO Y, SHEN X J, et al. Simulation of soil evaporation in winter wheat field [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(1):23-26.
- [25] 王润元, 杨兴国, 张九林, 等. 陇东黄土高原土壤储水量与蒸发和气候研究[J]. 地球科学进展, 2007, 22(6):625-635.
- WANG R Y, YANG X G, ZHANG J L, et al. A study of soil water and land surface evaporation and climate on Loess Plateau in the eastern Gansu Province [J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(6):625-635.
- [26] 刘新平, 张铜会, 何玉惠, 等. 不同粒径沙土水分扩散率[J]. 干旱区地理, 2008, 31(2):249-253.
- LIU X P, ZHANG T H, HE Y H, et al. Water diffusivity of sandy soils of different particle sizes[J]. Arid Land Geography, 2008, 31(2):249-253.
- [27] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 不同粘粒含量土壤水分入渗能力模拟试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3):71-77.
- LI Z, WU P T, FENG H, et al. Effects of soil clay particle content on soil infiltration capacity by simulated experiments [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(3):71-77.
- [28] 谭明亮, 段争虎, 陈小红. 流沙地恢复过程中土壤特性演变研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28(4):685-689.
- TAN M L, DUAN Z H, CHEN X H. Study on soil property evolution in recovery process of moving sand land[J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(4):685-689.
- [29] 宋日权, 于健, 史吉刚, 等. 内蒙古砂壤土浅层掺粘对土壤蒸影响的研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(4):278-282.
- SONG R Q, YU J, SHI J G, et al. Effects of adding clay to shallow sandy loam on soil water evaporation in Inner Mongolia [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(4):278-282.
- [30] 刘海霞, 李晋昌, 苏志珠, 等. 毛乌素沙地西南缘灌丛沙丘沉积物的粒度和元素特征[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1):24-31.
- LIU H X, LI J C, SU Z Z, et al. The characteristics of grain size and chemical elements of the nebkha sediments in the southwestern margin of the Mu Us Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(1):24-31.
- [31] 高广磊, 丁国栋, 赵媛媛, 等. 生物结皮发育对毛乌素沙地土壤粒度特征的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 115-120.
- GAO G L, DING G D, ZHAO Y Y, et al. Effects of biological soil crusts on soil particle size characteristics in Mu Us Sandland [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 115-120.
- [32] 贾晓红, 李新荣, 李元寿. 干旱沙区植被恢复过程中土壤颗粒分形特征[J]. 地理研究, 2007, 26(3):518-525.
- JIA X H, LI X R, LI Y S. Fractal dimension of soil particle size distribution during the process of vegetation restoration in arid sand dune area[J]. Geographical Research, 2007, 26(3):518-525.

(责任编辑 范娟
责任编委 杨晓晖)