

大气降尘沉积对塔克拉玛干沙漠腹地 土壤水盐运移的影响^{*}

孙艳伟^{1,2} 李生宇^{1,*} 徐新文¹ 张建国^{1,2} 李莹^{1,2}

(¹ 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要 利用微型蒸渗仪(MLS)对不同粒级和不同厚度大气降尘沉积条件下塔克拉玛干沙漠腹地土壤水分蒸发和盐分运移进行了模拟试验. 结果表明:不同粒级和不同厚度大气降尘沉积均对研究区土壤水分蒸发和盐分运移有显著影响,在相同的沉积厚度和相同的初始含水量条件下,细粒物质(粒径<0.063 mm)沉积可促进土体蒸发、加速下层土体的干旱和盐分的表聚,而粗粒物质(粒径0.063~2 mm)沉积则抑制了土壤水分蒸发、降低了深层土壤水分的损失和盐分的表聚;研究区土壤水分蒸发抑制效率在0.20 mm粒径处出现拐点,粒径在0.063~0.20 mm时,蒸发抑制效率随粒径增大而增大,当粒径>0.20 mm时,蒸发抑制效率则随粒径增大而减小. 在相同粒级和相同的初始含水量条件下,不同厚度大气降尘沉积对土壤水分蒸发具有抑制作用,且土壤水分蒸发抑制效率随着沉积厚度的增大而增大,蒸发抑制效率与沉积厚度呈对数关系,沉积厚度越大,盐分向表层积聚越困难. 降尘的加入可能导致干旱荒漠区生态系统的不稳定.

关键词 大气降尘 塔克拉玛干沙漠腹地 粒级 厚度 土壤水分蒸发 盐分运移
文章编号 1001-9332(2009)08-1905-07 **中图分类号** X144 **文献标识码** A

Effects of the grain size and thickness of dust deposits on soil water and salt movement in the hinterland of the Taklimakan Desert. SUN Yan-wei^{1,2}, LI Sheng-yu¹, XU Xin-wen¹, ZHANG Jian-guo^{1,2}, LI Ying^{1,2} (¹Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; ² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2009 20(8):1905-1911.

Abstract : By using mcirrolysimeter, a laboratory simulation experiment was conducted to study the effects of the grain size and thickness of dust deposits on the soil water evaporation and salt movement in the hinterland of the Taklimakan Desert. Under the same initial soil water content and deposition thickness condition, finer-textured (<0.063 mm) deposits promoted soil water evaporation, deeper soil desiccation, and surface soil salt accumulation, while coarse-textured (0.063-2 mm) deposits inhibited soil water evaporation and decreased deeper soil water loss and surface soil salt accumulation. The inhibition effect of the grain size of dust deposits on soil water evaporation had an inflection point at the grain size 0.20 mm, i. e., increased with increasing grain size when the grain size was 0.063-0.20 mm but decreased with increasing grain size when the grain size was >0.20 mm. With the increasing thickness of dust deposits, its inhibition effect on soil water evaporation increased, and there existed a logarithmic relationship between the dust deposits thickness and water evaporation. Surface soil salt accumulation had a negative correlation with dust deposits thickness. In sum, the dust deposits in study area could affect the stability of arid desert ecosystem.

Key words : dust deposits; Central of Taklimakan Desert; grain size; thickness; soil water evaporation; salt movement.

^{*} 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-13)、国家自然科学基金项目(40701019)、新疆维吾尔自治区重大科技专项(200733144-3)、塔里木油田公司科研项目(971008090016、971008090017)和中国科学院西部博士项目(XBBS200813)资助。
^{**} 通讯作者。E-mail: lishy_hb@163.com
2009-01-04 收稿 2009-06-08 接受。

大气降尘对陆地和海洋生态系统具有重要的生态环境效应^[1-4]。目前,对大气沉降的生态环境效应研究主要集中于大气有机氮沉降^[5-6]和大气酸沉降的生态效应^[7]、风蚀-土壤-植被之间的关系^[8]以及沙尘与全球气候的关系^[9]等方面,其中,大气降尘的土壤水文效应是全面评价大气沉降生态环境效应所不可缺少的部分。大气沉降在干旱、半干旱区土壤形成过程中发挥着重要作用^[10-11]。Fearnough等^[12]认为,粒径较小的沙尘沉积能明显改变沙丘的水文效应,细粒沙尘沉积增加了风沙土壤的干旱,导致灌木植被盖度的下降。Walter等^[13]认为干旱区的粗质土壤较细质土壤能承载更多的植被。层状土壤对水盐运动有重要影响,特别是粘土层,它不仅阻滞水盐的上升,也不同程度地影响水分的下渗和盐分的淋洗^[14]。刘新平等^[15]研究发现,流动沙丘干沙层沉积厚度达5 cm时,随着干沙层厚度的增加,土壤蒸发量逐渐降低;史文娟等^[16]对夹砂层状土壤潜水蒸发特性的研究结果表明,砂层对土壤水分蒸发既有促进作用也有抑制作用,砂层厚度相同时,潜水蒸发强度随砂层层位的升高以及砂土级配的变差而降低,同时,砂层可使较多盐分滞留于土砂界面及深层壤土中,使砂层对土壤表层反盐的抑制效率大于同历时的水分抑制效率^[17]。目前,关于粒径较大的砾石^[18-19]、风沙土^[15]、火山灰^[20-21]和夹砂层^[22]对土壤水盐运移的影响研究较多,但对于粒径较细的大气降尘沉积对土壤水盐运移影响的研究则鲜见报道。

塔克拉玛干沙漠腹地的大气降尘通量约150 t·km⁻²·month⁻¹。大气降尘的沉积改变了塔克拉玛干沙漠腹地植被较好区域表层土壤性状,势必对工程防护林生态系统的稳定性造成影响。本文在塔克拉玛干沙漠腹地的塔中站利用自制的微型蒸渗仪(MLS),研究了不同粒级和不同厚度沙尘沉积对土壤水分蒸发和盐分运移的影响,以期为大气降尘的生态环境效应研究提供理论依据。

表1 研究区大气降尘、供试沙土的粒度组成及参数

Tab.1 Grain size composition and parameters of dust deposits and the tested soil in study area

类型 Type	颗粒组成 Particle composition (%)					粒度参数 Grain size parameter				
	粗沙 Course sand	中沙 Medium sand	细沙 Fine sand	极细沙 Very fine sand	粉沙 Silt	粘粒 Clay	平均值 Mean (mm)	分选系数 Sorting coefficient	偏度 Skewness	峰态 Kurtosis
大气降尘 Dust deposits	4.35	0.36	23.66	47.12	22.40	2.10	0.09	1.08	0.23	0.63
供试沙土 Tested sudy soil	2.42	2.21	30.79	52.04	12.35	0.27	0.15	0.84	-0.13	0.98

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

本研究在特殊环境与灾害研究网络塔克拉玛干沙漠研究站(以下简称塔中站)进行。塔中站位于塔克拉玛干沙漠腹地(39°00' N,84°10' E,海拔1099 m),属典型的暖温带荒漠气候。据塔中气象站资料,该区年均气温12.4℃,7月平均气温28.2℃,沙面最高温度75.3℃,12月平均气温-8.1℃,极端最高气温45.6℃,极端最低气温-22.2℃,≥10℃年活动积温4618.6℃,年均降水量24.6 mm,蒸发量3638.6 mm,年均相对湿度29.4%,≤30%的低湿日数246.6 d,平均风速2.5 m·s⁻¹,最大瞬时风速20.0 m·s⁻¹,年起沙风日数≥130 d。地面景观以流动性高的大复合沙垄为主,自然植被贫乏,土壤类型以流动风沙土为主,盐分含量为1.26~1.63 g·kg⁻¹。丘间平坦沙地的地下水埋深约4 m,矿化度在4.0~4.8 g·L⁻¹。

1.2 试验装置及供试土壤

本研究中自制的微型蒸渗仪(MLS)^[15]由2个PVC材质圆柱桶组成,内桶为试验桶,内径10 cm、高15 cm,外桶为保护桶,内径15 cm。土壤水分蒸发量采用称量法测量,天平精度为0.01 g,量程为3600 g。

供试土壤为研究区典型土壤——流动风沙土。将供试土壤去除杂物后,过2 mm筛,在自然状态下风干待用。表1为激光粒度仪测得供试风沙土和大气降尘的机械组成。

1.3 研究方法

将供试沙土混合均匀,放入大塑料桶(底部打有小孔)中,不断加水,至表层有一层稳定的薄水层,停止加水,静置12 h,沥出多余水分后,将微型蒸渗仪垂直压入土中,再将内桶和土柱取出,内桶外壁擦拭干净后,下底用塑料薄膜和胶布封住。此时微型蒸渗仪内的土壤初始含水量为饱和状态,采用烘干

法测得风沙土的初始饱和含水率为 27%。在土柱表层,分别铺设 6 种不同粒径(<0.063 mm、0.063 ~ 0.10 mm、0.10 ~ 0.15 mm、0.15 ~ 0.20 mm、0.20 ~ 1 mm 和 1 ~ 2 mm)模拟降尘(厚度均 2 cm)和 5 种不同土层厚度(1、2、3、4 和 5 cm)模拟降尘(粒径 < 0.2 mm),分别标记为 Y₁、Y₂、Y₃、Y₄、Y₅、Y₆ 和 H₁、H₂、H₃、H₄、H₅,并设置无降尘沉积的蒸渗仪作为对照,标记为 CK,共 12 个处理,每个处理 3 次重复。铺设完毕后称量,记为 WE₀。将外桶埋于土中,上口出露地表 2 cm,以防止筒内沙土的风蚀和杂物的进入。然后将内桶放入外桶中。同步用 E601 型蒸发器观测每天的水面蒸发量(E_i)。

在自然状态下进行连续蒸发,每天 20 00 称量,记为 WE_i。蒸渗仪内土壤水分的累积蒸发量(EC_i)、日蒸发量(ED_i)、蒸发抑制效率(I)和 K 值的计算公式如下:

$$EC_i = WE_0 - WE_i$$

(1)

$$ED_i = WE_i - WE_{i-1}$$

(2)

$$I = (EC_0 - EC_i) / EC_0 \times 100\%$$

(3)

$$K = ED_i / E_i$$

(4)

式中:EC_i为第 i 天的累积蒸发量(mm);ED_i为第 i 天的日蒸发量(mm);EC₀为对照土壤水分累积蒸发量(mm)。

试验期间(2008 年 7 月 17 日—31 日),有降雨或沙尘暴时,对蒸发器进行遮盖。试验结束后,取土柱表层和下层沙土,用烘干法测得土柱最终含水量,并用电导仪测定土壤电导率。

1.3 数据处理

采用 SPSS 13.0 软件对文中数据进行方差分析,采用 Origin 7.5 软件制作相关图件。

2 结果与分析

2.1 不同粒径大气降尘沉积对塔克拉玛干沙漠腹地土壤水分蒸发的影响

由表 2 可以看出,对照组与 Y₁ 处理累积蒸发量的差异不显著(P>0.05),这两种处理的累积蒸发量显著大于 Y₂ 处理(P<0.05),这 3 种处理的累积蒸发量和抑制效率均与 Y₃、Y₄、Y₅、Y₆ 处理存在显著差异(P<0.05),且后 4 种处理的抑制效率和累积蒸发量差异不显著。

地表蒸发的形成与蒸发速率的大小主要取决于两方面因素:1)外界气象条件,包括太阳辐射、气温、空气湿度和风速等;2)土壤理化性质、土壤含水量的大小及其空间分布^[23]。为消除气象因素对蒸发的影响,定义参数 K 为土壤蒸发速率与水面蒸发速率的比值^[24],可表征蒸发强度的特征。由图 1a 可以看出,粒径 <0.063 mm 处理与对照组(无沉积)在蒸发各阶段的变化趋势基本一致。根据土壤水分蒸发速率的变化情况,可将 <0.063 mm 处理和对照组的土壤水分蒸发过程大致分成 3 个阶段,在第 1 阶段(土壤水分蒸发速率稳定阶段)和第 2 阶段(土壤水分蒸发速率下降阶段),<0.063 mm 处理的 K 值明显高于对照组,说明前两个阶段粒径 <0.063 mm 降尘沉积对蒸发具有促进作用,在第 3 个阶段(水汽扩散阶段),两处理的 K 值趋于相等,在蒸发的整个过程中,其他 5 组处理的 K 值变化趋于平稳,其均值的大小依次为 Y₂>Y₃>Y₄>Y₆>Y₅。说明粒径 0.20 ~ 1 mm 处理的土壤水分蒸发强度最弱,累积蒸发量最小。

粒径 <0.063 mm 处理的研究区土壤水分累积

表 2 不同粒径大气降尘沉积对研究区土壤水分蒸发的影响
Tab.2 Effects of different grain sizes of dust desposits on soil moisture evaporation in the study area

处 理 Treatment	土壤水分蒸发抑制效率 Inhibited efficiency of soil water evaporation (%)	土壤水分累积蒸发量 Soil water cumulative evaporation (mm)	土壤最终含水率 Final moisture content (%)	表层土壤电导率 Conductivity in topsoil (mS · cm ⁻¹)	下层土壤电导率 Conductivity in subsoil (mS · cm ⁻¹)
CK	—	33.16a	2.15	5.78	0.15
Y ₁	—9.12c	35.27a	1.76	20.63	0.16
Y ₂	42.27b	25.31b	8.60	6.71	0.35
Y ₃	72.14a	15.03c	11.53	3.27	0.45
Y ₄	75.41a	13.09c	13.57	2.23	0.46
Y ₅	75.72a	11.79c	16.89	2.11	0.53
Y ₆	70.81a	12.76c	15.09	1.05	0.62

Y₁: < 0.063 mm; Y₂: 0.063 ~ 0.10 mm; Y₃: 0.10 ~ 0.15 mm; Y₄: 0.15 ~ 0.20 mm; Y₅: 0.20 ~ 1 mm; Y₆: 1 ~ 2 mm; CK: 对照 Control。同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05) Different small letters within the same row indicated that the significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

蒸发量与时间呈对数关系;而 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 、 Y_5 和 Y_6 处理在整个蒸发阶段的土壤水分日蒸发量基本恒定,其累积蒸发量与时间呈线性关系,在整个蒸发过程中,这 5 种处理的累积蒸发量均远低于对照组(图 2a)。0.063~2 mm 粒径的沙尘物质对土壤水分蒸发具有滞缓作用,可有效减少土壤水分的损失。

抑制效率是衡量土壤水分蒸发抑制程度的指标。由图 2 可以看出,除粒径 <0.063 mm 处理外,其他处理的土壤水分蒸发抑制效率均随时间延长呈近似线性下降。 <0.063 mm 粒径处理抑制效率为负值,说明其促进土壤水分蒸发。从研究期间土壤水分

蒸发抑制效率的平均值与降尘沉积粒级的关系可以看出,粒径在 0.063~0.20 mm 时,土壤水分蒸发抑制效率随粒径增大而增大,当粒径 >0.20 mm 时,土壤水分蒸发抑制效率则随粒径的增大而减小。蒸发抑制效率的峰值出现在粒径 0.20~1 mm 处理(图 3)。

2.2 不同粒径大气降尘沉积对塔克拉玛干沙漠腹地土壤盐分运移的影响

通过研究区表层和下层土体电导率的对比分析发现(表 2),沉积降尘粒径越大,表层土壤电导率值越低,而下层土壤电导率值越高,且表层土壤电导率在不同处理间的变幅大于下层土壤,说明在相同沉

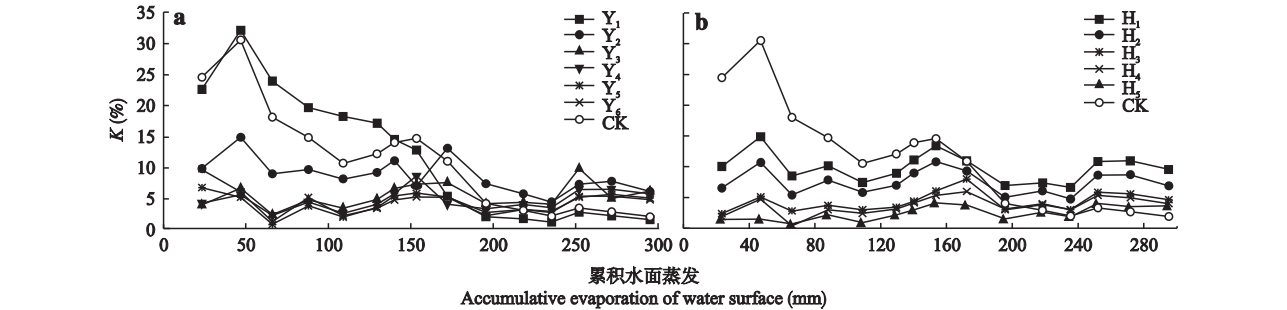


图 1 不同粒径 (a) 和厚度 (b) 大气降尘沉积条件下研究区 K 值的变化

Fig. 1 Change of K value under dust deposits with different grain sizes (a) and thicknesses (b) in the study area.

Y_1 : <0.063 mm; Y_2 : 0.063~0.10 mm; Y_3 : 0.10~0.15 mm; Y_4 : 0.15~0.20 mm; Y_5 : 0.20~1 mm; Y_6 : 1~2 mm; H_1 : 1 cm; H_2 : 2 cm; H_3 : 3 cm; H_4 : 4 cm; H_5 : 5 cm; CK: 对照 Control. 下同 The same below.

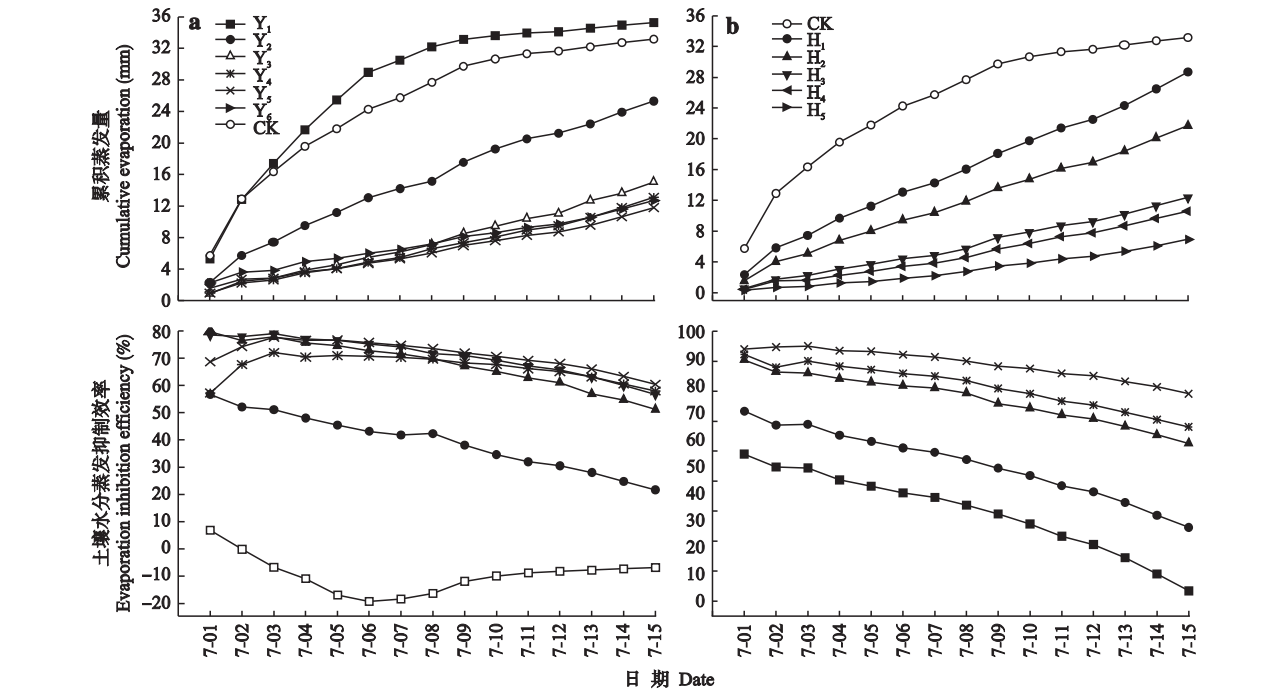


图 2 不同粒径 (a) 和厚度 (b) 大气降尘沉积条件下研究区土壤水分累积蒸发量和蒸发抑制效率

Fig. 2 Accumulative evaporation and inhibited efficiency of soil water under dust deposits with different grain sizes (a) and thicknesses (b) in the study area.

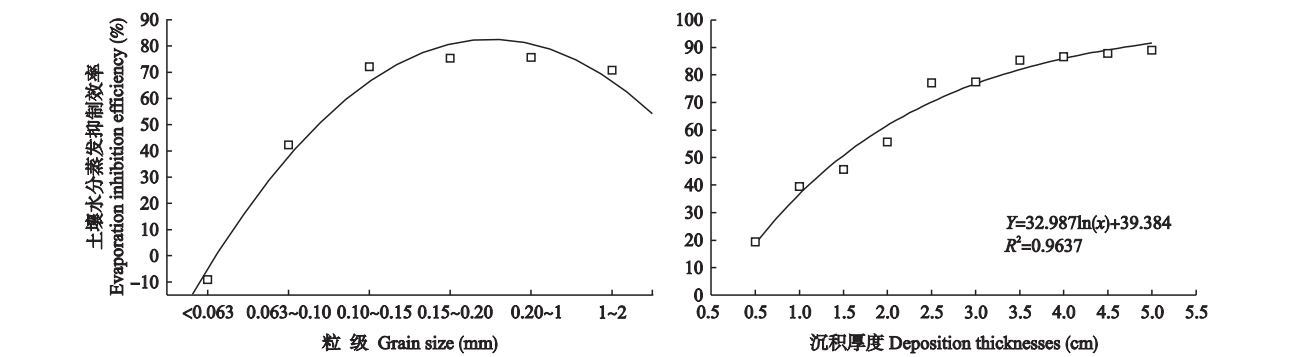


图 3 研究区土壤水分蒸发抑制效率与降尘沉积粒级和厚度的关系
Fig.3 Relationship between inhibiteion efficiency of soil water evaporation and grain sizes and thicknesses dust deposits in the study area.

积厚度和相同初始含水量条件下,土壤盐分运移与表层沉积的沙尘粒径密切相关.沉积降尘粒径越大,盐分随水分由土壤深层向表层的积聚作用越弱.粒径<0.063 mm的降尘沉积极大地促进了盐分的表聚,该处理的表层土壤电导率远高于对照组.

根据层状土壤毛管水上升规律,当水分由大孔隙流向小孔隙时,水分的流动是不受限制的^[25],细粒土壤在含水量较低时的毛管吸力大于粗粒土壤,导致粒径<0.063 mm沙尘物质的毛管作用强烈,加速了深层土壤水分向表层运动,从而促进表层土壤水分的蒸发;随着沉积沙尘粒级增大,毛管作用减弱,深层土壤水分主要是以气态形式向表面输送,一定厚度的干沙层阻挡了大部分地表热量向土壤中的传输,从而对土壤水分蒸发起到了抑制作用.但是,当沉积沙尘粒径大于下层风沙土平均粒径时,沉积沙尘空隙增大,对气态土壤水分的阻碍作用相对减小,即当粒径>0.2 mm时,沙尘沉积的抑制作用逐渐减小.

不同粒级大气降尘沉积明显改变了土壤水分的蒸发过程和盐分运移状况.在相同的沉积厚度和相同的初始含水量条件下,细粒物质(粒径<0.063

mm)沉积促进了土体蒸发,使深层土壤脱水,从而增加了下层土体的干旱和盐分的表聚;粗粒(粒径0.063~2 mm)物质沉积则抑制土壤水分蒸发,可降低土壤水分的损失.这从试验角度验证了 Fearnough 等^[12]的观点.本研究中土壤水分蒸发抑制效率在 0.20 mm 粒径处出现拐点;粒径在 0.063~0.20 mm 时,蒸发抑制效率随粒径的增大而增大,而当粒径>0.20 mm 时,蒸发抑制效率则随粒径的增大而减小,而土壤水分蒸发量则逐渐增大.陈士辉等^[26]研究结果表明,粒径愈大,砂田土壤水分蒸发愈多,粒径 2~5 mm 处理的土壤水分蒸发仅为粒径 20~60 mm 处理的 61.4%.

2.3 不同厚度大气降尘沉积对塔克拉玛干沙漠腹地土壤水分蒸发的影响

对照组与 5 组不同厚度处理(1、2、3、4、5 cm)土壤水分累积蒸发量的差异均达显著水平($P<0.05$),3 和 4 cm 厚度处理土壤水分抑制效率的差异不显著($P>0.05$),这两种处理与 1、2 和 5 cm 厚度处理间的差异均达显著水平($P<0.05$,表 3).土壤水分蒸发平均抑制效率随沉积厚度的增加而增大,最大值达 88.99%;各厚度处理的土壤水分累计

表 3 不同厚度大气降尘沉积对研究区土壤水分蒸发的影响
Tab.3 Effects of different thicknesses of dust deposits on soil moisture evaporation in the study area

处 理 Treatment	土壤水分蒸发抑制效率 Inhibition efficiency of soil water evaporation (%)	土壤水分累积蒸发量 Soil water cumulative evaporation (mm)	土壤最终含水率 Final soil moisture content (%)	表层土壤电导率 Conductivity in topsoil (mS · cm ⁻¹)	下层土壤电导率 Conductivity in subsoil (mS · cm ⁻¹)
CK	—	33.16a	2.15	5.78	0.15
H ₁	39.44d	28.71b	4.93	5.47	0.23
H ₂	55.64c	21.70c	8.41	4.61	0.29
H ₃	77.42b	12.40d	12.15	1.72	0.56
H ₄	81.59b	10.59d	14.62	0.90	0.71
H ₅	88.99a	6.92d	17.90	0.82	0.78

H₁: 1 cm; H₂: 2 cm; H₃: 3 cm; H₄: 4 cm; H₅: 5 cm.

蒸发量均显著小于对照组,而且随沉积厚度的增加而减小,土壤最终含水量随沉积厚度的增加而增大。

研究区不同沉积厚度处理在整个土壤水分蒸发过程中的 K 值变化趋于平稳, K 值均值的大小依次为 $H_1 > H_2 > H_3 > H_4 > H_5$ (图 1b)。当沉积厚度在 1 ~ 5 cm 时,土壤水分累积蒸发量与时间基本上呈线性关系(图 2b),说明各处理的土壤水分蒸发强度在整个蒸发过程中基本恒定,且远小于对照组。不同厚度沙尘沉积对土壤水分蒸发具有抑制作用,而且随沉积厚度的增加,土壤水分蒸发强度逐渐减小。降尘沉积厚度在 1 ~ 5 cm 时,研究区土壤水分蒸发抑制效率随沉积厚度的增大而增大,而且抑制效率随时间的延长呈线性下降(图 2b)。研究区土壤水分蒸发抑制效率与沉积厚度呈对数关系(图 3)。

2.4 不同厚度大气降尘沉积对塔克拉玛干沙漠腹地土壤盐分运移的影响

随着大气降尘沉积厚度的增加,研究区表层土壤电导率逐渐减小,而下层则逐渐增大(表 3)。表层土壤电导率的变幅大于土柱下层,说明降尘沉积对表层盐分影响大于下层,沉积厚度越大,盐分向表层积聚越困难。

粒径相对较细的沙尘物质沉积对下层土壤水分蒸发及其溶质运移起抑制作用,表现为随着沉积厚度的增加,土壤水分蒸发量逐渐降低。其原因主要是深层土壤水分主要是以气态形式向表面输送,而随着干沙层的变干和增厚,土壤毛管作用减少,抑制了土壤中气态水的迁移。同时,干燥且有一定厚度的沙尘也阻挡了大部分地表热量向土壤中的传输,从而对土壤水分蒸发的影响降低^[15]。

3 讨 论

土壤水分蒸发指土壤水分经过土壤表面以水蒸汽状态扩散到大气中的过程,是土壤水运动过程的一个特殊阶段。大气降尘沉积能明显改变土壤环境,从而对土壤水分蒸发和盐分运移产生影响。通过实验证明,研究区土壤水分蒸发和溶质运移与其表层沉积的沙尘物质的粒级和厚度有密切关系。

一般认为,表层粒径 $< 100 \mu\text{m}$ 砂粒的运动方式以悬移为主,粒径在 $100 \sim 500 \mu\text{m}$ (尤其是 $100 \sim 150 \mu\text{m}$) 砂粒的运动方式以跃移为主^[27]。塔克拉玛干沙漠既是尘源区,又是沙尘的沉降区。在尘源区,表层土壤细粒物质(包括悬移和跃移的沙物质)、矿物质和有机粉尘的风蚀使土壤颗粒组成的粗化和肥力降低,土壤的保水能力也随之降低,可能导致干旱、

半干旱区土地的退化,从而降低土壤对植被群落的支持能力,致使群落演替和随之而来的生物多样性的改变。在沉降区,细微的沙漠尘的输入改变了表层土壤肥力和质地,向土壤输入大量营养元素(P, K, Mg, Na, Ca, Fe, Cu, Mn 和 Mo)^[28]、可溶盐分^[29]和细粒物质(粒径在 $2 \sim 250 \mu\text{m}$)可提高土壤肥力,也能改变土壤水盐的运移。由于沙尘的时空沉积模式较复杂,同时受到气象因子、地形地貌等因素的影响,地表沉积沙尘的粒径和累积厚度差异很大,导致空间上土壤性状的水平分异。在固定沙丘和沙漠边缘生态系统中,大气降尘在土壤表层的不断累积可有效地减少降水入渗和下层土壤水分蒸发,随着土壤水分的消耗,下层土体变干,最终导致多年生深根植被的衰退,在一定程度上增加了干旱荒漠区生态系统的不稳定性^[12]。

参考文献

- [1] McTainsh G, Strong C. The role of aeolian dust in ecosystems. *Geomorphology*, 2007, **89**: 39–54
- [2] Jickells TD, Spokes LJ. Atmospheric iron inputs to the oceans// Turner DR, Hunter KA, eds. *The Biogeochemistry of Iron in Seawater*. New York: John Wiley & Sons, 2001
- [3] Herrmann L, Jahn R, Stahr K. Identification and quantification of dust additions in Peri-Saharan soils// Guerzoni S, Chester R, eds. *The Impact of Desert Dust across the Mediterranean*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996: 173–182
- [4] Kohfeld KE, Harrison SP. DIRTMAP: The geological record of dust. *Earth Science Reviews*, 2001, **54**: 81–114
- [5] Van Breemen N. Nitrogen cycle: Natural organic tendency. *Nature*, 2002, **415**: 381–382
- [6] Zheng L-X (郑利霞), Liu X-J (刘学军), Zhang F-S (张福锁). Atmospheric deposition of organic nitrogen: A review. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(9): 3828–3834 (in Chinese)
- [7] Chen J (陈静). Researching progress on acid deposition and its environmental effects, *Journal of Capital Normal University* (Natural Science) (首都师范大学学报·自然科学版), 1999, **20**(1): 79–85 (in Chinese)
- [8] Zobeck TM, Fryrear DW. Chemical and physical characteristics of windblown sediment. I. Quantities and physical characteristics. *Transaction of the ASAE*, 1986, **29**: 1032–1036
- [9] Alpert P, Herman J, Kaufman YI, et al. Response of the climatic temperature to dust forcing inferred from TOMS aerosol index and the NASA assimilation model. *Atmospheric Research*, 2000, **53**: 3–14
- [10] McTainsh GH. The nature and origin of the aeolian mantles of central northern Nigeria. *Geoderma*, 1984, **33**:

- 13-37
- [11] Tsoar H , Pye K. Dust transport and the question of desert loess formation. *Sedimentology* , 1987 , **34** : 139-154
- [12] Fearnough W , Fullen MA , Mitchell DJ , *et al.* Aeolian deposition and its effect on soil and vegetation changes on stabilized desert dunes in northern China. *Geomorphology* , 1998 , **23** : 171-182
- [13] Walter H , Stadelman E. A new approach to the water relations of desert plants// Brown GW , ed. *Desert Biology*. New York : Academic Press , 1974
- [14] Zhang X-P (张效朴) , Zhan Q-H (詹其厚) , Du G-H (杜国华). The characters and reclamation of major soil series in sample area of Huaibei Plain. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报) , 1999 , **30**(suppl. 1) : 20-23 (in Chinese)
- [15] Liu X-P (刘新平) , Zhang T-H (张铜会) , Zhao H-L (赵哈林) , *et al.* Influence of dry sand bed thickness on soil moisture evaporation in mobile dune. *Arid Land Geography* (干旱区地理) , 2006 , **29**(4) : 523-526 (in Chinese)
- [16] Shi W-J (史文娟) , Shen B (沈冰) , Wang Z-R (汪志荣) , *et al.* Characteristics and calculation model of phreatic evaporation of sand-layered soil. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报) , 2007 , **23**(2) : 17-20 (in Chinese)
- [17] Shi W-J (史文娟) , Shen B (沈冰) , Wang Z-R (汪志荣) , *et al.* Water and salt transport in sand-layered soil under evaporation with the shallow under ground water table. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报) , 2005 , **21**(9) : 23-26 (in Chinese)
- [18] Xie ZK , Wang YJ , Jiang WL , *et al.* Evaporation and evapotranspiration in a watermelon field mulched with gravel of different sizes in northwest China. *Agricultural Water Management* , 2006 , **81** : 173-184
- [19] Yamanaka T , Inoue M , Kaihotsu I. Effects of gravel mulch on water vapor transfer above and below the soil surface. *Agricultural Water Management* , 2004 , **67** : 145-155
- [20] Diaz F , Jimenez CC , Tejedor M. Influence of the thickness and grain size of tephra mulch on soil water evaporation. *Agricultural Water Management* , 2005 , **74** : 47-55
- [21] Perez FL. The influence of surface volcanoclastic layers from Haleakala (Maui , Hawaii) on soil water conservation. *Catena* , 2000 , **38** : 301-332
- [22] Zhang J-F (张建丰) , Wang W-Y (王文焰) , Jia Z-H (贾中华). A continuous infiltration model for soil interlayered with sand. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报) , 2007 , **21**(4) : 94-97 (in Chinese)
- [23] Liu L-C (刘立超) , Li S-Z (李守中) , Song Y-X (宋耀选) , *et al.* Effect of microbiotic crust on evaporation process in vegetated area in Shapotou Region. *Journal of Desert Research* (中国沙漠) , 2005 , **25**(2) : 191-195 (in Chinese)
- [24] Zhang Z-S (张志山) , He M-Z (何明珠) , Tan H-J (谭会娟) , *et al.* Evaporation from soils covered with biological crusts in Revegetated Desert : A case study in Shapotou Desert Research and Experiment Station. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报) , 2007 , **44**(3) : 404-410 (in Chinese)
- [25] Willis WO. Evaporation from layered soils in the presence of a water table. *Soil Science Society of America Journal* , 1960 , **24** : 239-242
- [26] Chen S-H (陈士辉) , Xie Z-K (谢忠奎) , Wang Y-J (王亚军) , *et al.* Moisture storage effect of gravel mulch with different grain size on watermelon field. *Journal of Desert Research* (中国沙漠) , 2005 , **25**(3) : 433-436 (in Chinese)
- [27] Jie D-M (介冬梅). A Study on Characteristics of Atmospheric Dustfall and Its Source in Changchun City. Master Thesis. Changchun : Northeast Normal University , 2007 (in Chinese)
- [28] Reynolds R , Belnap J , Reheis M , *et al.* Aeolian dust in Colorado plateau soils : Nutrient inputs and recent change in source. *PNAS* , 2001 , **98** : 7123-7127
- [29] Dare-Edwards AJ , McTainsh GH. Dust accession onto Australian soils : A review. Fourth Conference of the Australian and New Zealand Geomorphology Group , Victoria , 1989 : 62-63

作者简介 孙艳伟 ,男 ,1983 年生 ,硕士研究生.主要从事干旱区生态环境研究. E-mail : sunyanwei2002@126.com

责任编辑 杨弘