

科尔沁不同沙地土壤饱和导水率比较研究*

姚淑霞^{1,2} 赵传成^{1,2} 张铜会^{1†}

(1 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

(2 兰州城市学院, 兰州 730070)

摘要 用 Guelph 入渗仪对科尔沁沙地不同沙漠化阶段土壤不同层次的土壤饱和导水率 (K_f s) 进行测定, 分析研究了 K_f s 与沙地类型、土层厚度、沙丘坡位及土壤理化性质的关系。结果表明: (1) 草地 (潜在沙漠化)、固定沙丘 (轻度沙漠化) 和流动沙丘 (严重沙漠化) 的 K_f s 依次增大, 平均值分别为 2.15、4.79 和 5.89 mm min^{-1} , 呈现出土壤入渗能力随沙漠化程度的增强而增强的趋势; 三种沙地间 K_f s 差异显著, 沙丘不同坡位 K_f s 也有较大差异, 表明科尔沁沙地 K_f s 具有较高的空间异质性; (2) 三种沙地 K_f s 随深度的变化规律差异较大, 草地 K_f s 随深度呈抛物线状变化, 而固定沙丘 K_f s 随深度呈指数函数变化; (3) 通过逐步回归分析发现对 K_f s 影响较大的土壤理化性质是土壤有机质含量、土壤细砂含量、黏粉粒含量和粗砂粒含量, 并且 K_f s 与前三个因素呈显著的负相关关系, 与最后一个因素呈显著的正相关关系。

关键词 饱和导水率; 沙漠化; 科尔沁沙地

中图分类号 S152.7 **文献标识码** A

土地沙质荒漠化 (土地沙化) 是干旱、半干旱地区气候变化和人为活动干扰所导致的一种以风蚀和积沙活动为主要特征的土地退化过程^[1], 是世界上许多干旱半干旱地区最严重的社会与环境问题之一^[2], 并越来越受到世界各国的关注^[3]。目前我国荒漠化土地面积达 $2.62 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占国土面积的 27.2%, 其中 $9.19 \times 10^5 \text{ km}^2$ 分布在半干旱地区, $5.55 \times 10^5 \text{ km}^2$ 分布在半湿润地区^[4]。不仅如此, 沙化土地平均每年以 $2.46 \times 10^3 \text{ km}^2$ 的速度在扩展^[5], 形势非常严峻。科尔沁沙地是我国四大沙地之一, 位于生态环境脆弱且敏感的农牧交错区, 极易出现持久的旱灾和风沙灾害^[6]。近一百多年来, 随着人口加剧、过度放牧及不合理的土地利用, 目前该地区已经成为我国土地沙化迅速发展的地区之一^[7]。根据王涛等^[8]的监测数据, 截至 2000 年, 科尔沁沙地沙化土地面积已达到 $5.02 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占区域监测总面积的 47.5%。这里的土地沙化问题早在 20 世纪 50 年代就已经得到政府、社会和学术界的广泛关注。近半个世纪尤其是近 20 余年来, 科研工作者围绕科尔沁沙地的沙漠化成因、过程^[1,9-10] 及在沙漠化过程中土壤碳、氮^[3,11]、土壤种子库^[12] 等方面做了

大量工作, 也取得了丰硕的科研成果, 但关于不同沙漠化阶段土壤导水性能方面的研究相对较少。

土壤饱和导水率 (soil saturated hydraulic conductivity, K_f s) 是指土壤全部孔隙都充满水的情况下, 在单位水势梯度作用下, 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^[13]。在土壤水分、溶质 (盐分、养分) 运移动力学模拟研究中, K_f s 是必不可少的参数之一^[14]; 它还影响着地面的水分入渗、径流及蒸散三者之间的分配关系^[15], 因此也是土壤水分平衡研究中的关键参数。目前, K_f s 的研究多数集中在测定方法和模型预测上^[16]、而不同干扰方式和植被恢复对沙地土壤的 K_f s 的影响等方面研究则相对较少^[17]; 而且, 对于饱和土壤导水性能的研究主要集中在土壤表层, 对于深层土壤的研究则不多^[17]。同时, 考虑到 Guelph 入渗仪 (Guelph Permeator, 2008KI, Santa Barbara, CA93105, U S A) (利用恒定水头入渗原理设计的一套便携式的原位测定田间土壤饱和导水率的入渗装置) 虽然在我国部分地区得到了很好地应用, 但在我国北方的半干旱沙漠化地区应用较少^[18]。基于以上原因, 本研究利用 Guelph 入渗仪对科尔沁沙地不同沙漠

* 国家重点基础研究发展规划项目 (973 计划) (2009CB421303)、国家科技支撑计划项目 (2011BAC07B02) 资助

† 通讯作者, E-mail: zhangth@lzb.ac.cn

作者简介: 姚淑霞 (1980—), 女, 甘肃灵台人, 博士研究生, 讲师, 主要从事生态水文学研究。E-mail: yaoshuxia@163.com

收稿日期: 2012-05-28; 收到修改稿日期: 2013-11-30

化发展阶段的草地(潜在沙漠化)、固定沙丘(轻度沙漠化)和流动沙丘(严重沙漠化)的 Kfs 进行了野外测定,分析了 Kfs 与不同沙化阶段土壤、土层深度、沙丘坡位及土壤理化性质的关系,以期对该地区土地沙漠化过程中土壤水分入渗性能的变化机制有所了解,同时为该地区土壤水盐运移模拟计算、植被建设、生态恢复及土壤水分的有效利用与管理提供一定的指导和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于科尔沁地区东南部奈曼旗境内,地理位置 $120^{\circ}19' \sim 121^{\circ}31'E, 42^{\circ}14' \sim 43^{\circ}32'N$, 平均海拔 360 m。该区域属温带半干旱大陆性季风气候,年均温为 $6.5^{\circ}C$, 无霜期约 151 d, 极端最高气温为 $39^{\circ}C$, 极端最低气温为 $-29.3^{\circ}C$, 年平均降水量为 360 mm, 且分布不均匀, 年降水量的 70%~80% 集中在 7~9 月。年蒸发量为 1 500~2 500 mm, 干燥系数为 1.0~1.8, 近 70% 的蒸发发生在 4~7 月。

地带性土壤为砂质栗钙土,在风的作用下退化为风沙土。该地区的地貌类型以固定沙丘、流动沙丘和面积不等的平缓沙地及甸子地交错分布为特征。平缓沙地多为沙质草地,其主要植物种有黄蒿(*Artemisia scoparia*)、狗尾草(*Setaria viridis*)和砂蓝刺头(*Echinops gmelini Turcz*);分布在固定沙丘上的主要植物种有黄蒿(*Artemisia scoparia*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)和砂蓝刺头(*Echinops gmelini Turcz*);分布在流动沙丘上的主要植物种有沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、狗尾草(*Setaria viridis*)和稀疏分散的差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*)。

1.2 样地选取

根据沙漠化土地的发展程度和发展时间的双重属性,选取具有潜在沙漠化的草地(GL)、轻度沙漠化的固定沙丘(FD)和重度沙漠化的流动沙丘(MD)^[19]等三种类型沙地为研究对象,每种类型再分别选取 3 块样地作为重复,共计 9 块样地,各样地基本情况见表 1。在每块样地中随机选取间距为 2 m 的观测点 15 个,共计 135 个观测点。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic situations of each site

| 样地类型 Site type | 植物种 Species | 植被盖度 Coverage (%) | 干扰程度 Degree of disturbance (%) | 经度 Longitude | 纬度 Latitude | 海拔高度 Altitude (m) |
|-------------------|--|----------------------|-----------------------------------|-----------------|----------------|----------------------|
| GL 1 | 黄蒿, 狗尾草 <i>Artemisia scoparia, Setaria viridis</i> | 60 | 30~50 | 120.665 | 42.965 | 351 |
| GL 2 | 黄蒿, 狗尾草 <i>Artemisia scoparia, Setaria viridis</i> | 80 | <5 | 120.713 | 42.938 | 357 |
| GL 3 | 砂蓝刺头, 黄蒿 <i>Echinops gmelini Turcz, Artemisia scoparia</i> | 75 | 30~50 | 120.661 | 42.956 | 353 |
| FD 1 | 黄蒿, 差巴嘎蒿 <i>Artemisia scoparia, Artemisia halodendron</i> | 70 | <5 | 120.698 | 42.929 | 360 |
| FD 2 | 黄蒿, 狗尾草 <i>Artemisia scoparia, Setaria viridis</i> | 80 | <5 | 120.692 | 42.929 | 368 |
| FD 3 | 差巴嘎蒿, 沙米, 砂蓝刺头 <i>Artemisia halodendron, Agriophyllum squarrosum, Echinops gmelini Turcz</i> | 60 | <5 | 120.714 | 42.941 | 363 |
| MD 1 | 沙米 <i>Agriophyllum squarrosum</i> | 3 | 10~20 | 120.613 | 43.149 | 342 |
| MD 2 | 沙米, 狗尾草, 差巴嘎蒿 <i>Agriophyllum squarrosum, Setaria viridis, Artemisia halodendron</i> | 6 | <5 | 120.607 | 43.183 | 338 |
| MD 3 | 沙米, 狗尾草 <i>Agriophyllum squarrosum, Setaria viridis</i> | 5 | <5 | 120.401 | 43.034 | 329 |

1.3 土壤采样与分析

在每块样地观测点附近无干扰的地方开挖一个 1 m 深的土壤剖面。每个剖面分五层(0~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm),用环刀取原状土用于测定土壤容重,另取适量土样带回实验室,自然风干后用于测定土壤有机质含量和土壤机械组成。土样研磨后过 0.25 mm 筛孔,用重铬酸钾外加热法测定有机质含量^[20];土样过 2 mm 筛孔后,用

干筛法进行土壤颗粒分组。考虑到科尔沁沙地的土壤主要为风沙土,结构松散,土壤中物理性砂粒(>0.01 mm)占 93.4% 以上^[21],且土壤颗粒主要集中在 0.25~0.1 mm 和 0.1~0.05 mm 这 2 个粒级中^[22]。因此,本研究将土壤颗粒分为三级:2~0.1 mm 粗砂组分、0.1~0.05 mm 细砂组分和 <0.05 mm 黏粉粒组分。每个剖面不同土层的容重、有机质和机械组成测定均设三次重复平均。

1.4 土壤饱和导水率测定

2011年6月20日至8月20日利用 Guelph 入渗仪观测每个点不同土层在压力水头为 5 cm 和 10 cm 时对应的稳定下渗速率 R_1 和 R_2 。0~20 cm 土层 R_1 和 R_2 的具体观测过程为:首先,在观察点用带有刻度的土钻钻取深度为 10 cm 的孔(若是发现观测孔内有植物根系或虫洞,应换点重新钻孔),用毛刷将孔的壁和底部轻轻转圈刷一遍,使其保持土壤的自然界面,以消除土钻对孔壁和孔底的挤压效应。其次,将 Guelph 入渗仪放入观测孔内观测 0~20 cm 土层稳定下渗速率。根据风沙土入渗快和野外观测经验,本研究确定每隔 10 秒钟为最佳读数时间。先将压力水头设置为 5 cm,每隔 10 秒钟观测一次内管水位对应的刻度,直至连续观测 3 次获得的下渗速率(R_1)相同为止,确定此时的下渗速率为稳定下渗速率;再将压力水头设置为 10 cm,与 5 cm 时的操作规则相同,获得稳定下渗速率 R_2 。完成后,在相同孔洞基础上继续下钻 20 cm,观测 20~40 cm 土层的 R_1 和 R_2 ;40~60、60~80 和 80~100 cm 的 R_1 和 R_2 以此类推。

将观测值代入该仪器所建议的沙土土壤饱和导水率(Kfs)计算公式(1)即可求得所测定土层的 Kfs :

$$Kfs = 35.22 \times (0.0041 \times R_2 - 0.0054 \times R_1) \quad (1)$$

1.5 数据处理

首先对 Kfs 计算结果进行统计特征分析,然后利用单因素方差分析进行不同沙地、不同土壤深度及固定沙丘和流动沙丘不同坡位 Kfs 的显著性检验,并应用 LSD 进行差异性对比,显著性水平取 $p = 0.05$;最后利用相关分析和多元逐步回归分析分析影响 Kfs 的主要影响因素。所有数据处理和分析均是在 SPSS 15.0 和 DPS 软件下进行的。

2 结果

2.1 不同类型沙地土壤基本理化性质

不同类型沙地土壤理化性质的统计特征分析结果见表 2。可以看出,在 0~100 cm 土层范围内,

表 2 三种沙地 0~100 cm 土层土壤理化性质

Table 2 Soil physical and chemical properties of 0~100 cm at six sites

| 样地类型 Site type | 土壤层次 Soil layer (cm) | 容重 Bulk density (g cm ⁻³) | 总孔隙度 Total porosity (%) | 有机质 Organic matter (g kg ⁻¹) | 土壤粒级分布 Soil particle size distribution(%) | | |
|-------------------|----------------------------|---|-------------------------------|--|--|------------|---------|
| | | | | | 2~0.1mm | 0.1~0.05mm | <0.05mm |
| GL | 0~20 | 1.53 | 42.34 | 31.2 | 75.65 | 15.67 | 7.56 |
| | 20~40 | 1.49 | 43.94 | 28.1 | 68.96 | 20.66 | 9.01 |
| | 40~60 | 1.46 | 44.81 | 29.3 | 66.60 | 18.68 | 13.50 |
| | 60~80 | 1.43 | 45.99 | 29.3 | 63.94 | 17.49 | 17.41 |
| | 80~100 | 1.38 | 48.02 | 30.0 | 62.75 | 19.24 | 16.89 |
| | 平均 Mean | 1.46b | 45.02a | 29.6a | 67.58b | 18.35a | 12.87a |
| FD | 0~20 | 1.51 | 43.10 | 14.2 | 96.44 | 2.16 | 0.83 |
| | 20~40 | 1.53 | 42.44 | 10.2 | 96.91 | 1.97 | 0.55 |
| | 40~60 | 1.51 | 43.00 | 10.5 | 96.70 | 2.15 | 0.69 |
| | 60~80 | 1.53 | 42.21 | 9.7 | 96.70 | 1.91 | 0.76 |
| | 80~100 | 1.54 | 42.00 | 8.9 | 96.72 | 1.98 | 0.68 |
| | 平均 Mean | 1.52a | 42.55b | 10.7b | 96.69a | 2.03b | 0.70b |
| MD | 0~20 | 1.51 | 43.16 | 4.7 | 97.41 | 2.20 | 0.06 |
| | 20~40 | 1.50 | 43.22 | 4.0 | 97.45 | 2.14 | 0.07 |
| | 40~60 | 1.51 | 43.01 | 4.7 | 97.28 | 2.24 | 0.07 |
| | 60~80 | 1.51 | 43.02 | 3.6 | 97.12 | 2.43 | 0.08 |
| | 80~100 | 1.53 | 42.37 | 4.2 | 96.91 | 2.43 | 0.08 |
| | 平均 Mean | 1.51a | 42.96b | 4.2c | 97.23a | 2.29b | 0.07b |

注:同一列平均值标注的字母不同表示该列对应的土壤理化性质在样地间差异显著,显著性水平为 $p < 0.05$ Note: Different letters affixed to the mean values of the same column mean significant difference at $p < 0.05$

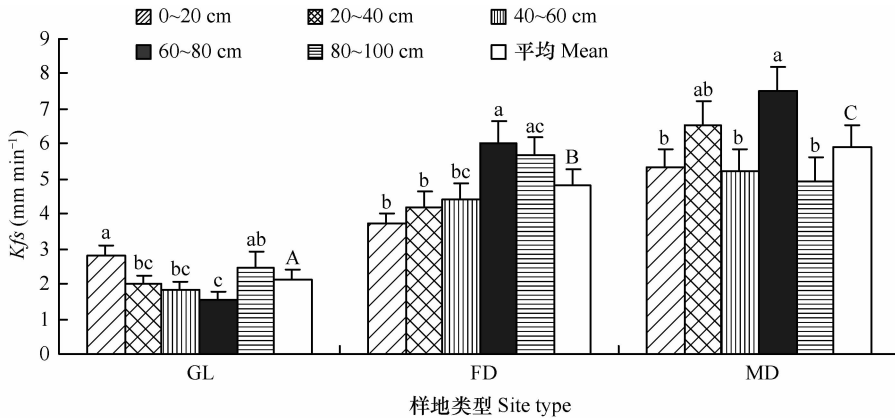
(1) 有机质含量在三类沙地间有显著差异 ($p < 0.05$), 有机质平均含量按照草地、固定沙丘和流动沙丘的顺序依次减小, 表明土壤有机质含量随沙漠化程度的增加而降低, 这一结果与文献[23]的研究结果一致; 随土层深度增加, 草地和固定沙丘的有机质含量逐渐减少, 但流动沙丘的有机质含量随深度变化没有明显的规律可循。(2) 草地的容重、孔隙度及土壤粒级分布均与固定沙丘和流动沙丘的差异显著, 但两类沙丘之间的这些性质却无显著差异。从平均值来看, 三种沙地不同深度土壤容重草地的较小, 而固定沙丘和流动沙丘的较高; 从垂直变化来看, 草地 0~20 cm 土层的容重高于其他土层, 但流动沙丘和固定沙丘 80~100 cm 土层的容重高于其他层次; 三种沙地土壤粒级分布呈现出明显的规律性: 按照草地、固定沙丘和流动沙丘的顺序, 粗砂粒含量逐渐增加, 而黏粉粒含量逐渐减少, 如草地的粗砂含量在 68% 左右, 细砂含量在 18% 左右, 黏粉粒含量在 13% 左右; 而固定沙丘和流动沙丘的粗砂含量基本均在 96% 以上, 细砂含量在 2%

左右, 而黏粉粒含量低于 1%, 流动沙丘甚至低于 0.1%。同时可以看出, 草地和流动沙丘粗砂含量基本上随土层深度增加而减少, 黏粉粒含量却随土层深度增加而增加。

2.2 不同类型沙地土壤饱和导水率变化规律

2.2.1 不同类型沙地 Kfs 差异

三类沙地 Kfs 的比较和差异分析结果见图 1。从三类沙地 Kfs 的剖面平均值(即以 0~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 这 5 个土层 Kfs 值的算术平均值)来看, 以草地的最小, 平均值为 2.15 mm min^{-1} , 其次为固定沙丘, 平均值为 4.79 mm min^{-1} , 而流动沙丘的最高, 为 5.89 mm min^{-1} 。从差异分析结果来看, 草地、固定沙丘和流动沙丘间 Kfs 均有显著差异。草地、固定沙丘和流动沙丘 Kfs 的标准差平均取值分别为 0.27、0.48 和 0.65 mm min^{-1} 。这三类沙地 Kfs 的变异系数均在 0~1 之间, 属于中等变异。总之, 从草地到固定沙丘, 再到流动沙丘的土地沙漠化过程中, Kfs 值总体变化幅度不大, 但土壤的入渗性能有逐渐增强的趋势, 其异质性也有所增加。



注: 图中大写字母不同表示 Kfs 在沙地间差异显著, 同一沙地不同深度上小写字母不同表示 Kfs 在不同深度间差异显著, 显著性水平 $p < 0.05$ 。GL、FD 和 MD 分别代表草地、固定沙丘和流动沙丘。Note: The capital letters represent statistically significant differences between sites ($p < 0.05$), while the small letters at the same site represent statistically significant differences between layers. Acronyms: GL, grassland; FD, fixed sand dune; MD, mobile sand dune

图 1 三类沙地 Kfs 比较及随深度变化的差异分析

Fig. 1 Comparing of Kfs at different sites and soil depths

2.2.2 Kfs 垂直变化规律

图 1 也反映了三类沙地 Kfs 随土层深度的变化情况。从图中可以看出, 草地 Kfs 除 80~100 cm 外, 基本随土壤深度增加而减小; 固定沙丘 Kfs 除 80~100 cm 土层外, 随土壤深度增加而增大; 而流动沙丘 Kfs 随深度的变化规律较为复杂, 没有明显的规律性。从各类沙地不同深度 Kfs 的差异分析结果来看, 部分土层间 Kfs 差异显著 ($p < 0.05$), 如三类沙地 0~20 cm 与 60~80 cm 的 Kfs 差异显著。

进一步分析这三类沙地 Kfs 随土壤深度的变化规律发现, 草地和固定沙丘的 Kfs 可以分别用抛物线和指数函数较好地拟合, 其拟合表达式分别为:

$$Kfs_{GL} = 0.234x^2 - 1.5154x + 4.1202, R^2 = 0.8998 \quad (2)$$

$$Kfs_{GL} = 3.2802e^{0.1207x}, R^2 = 0.8607 \quad (3)$$

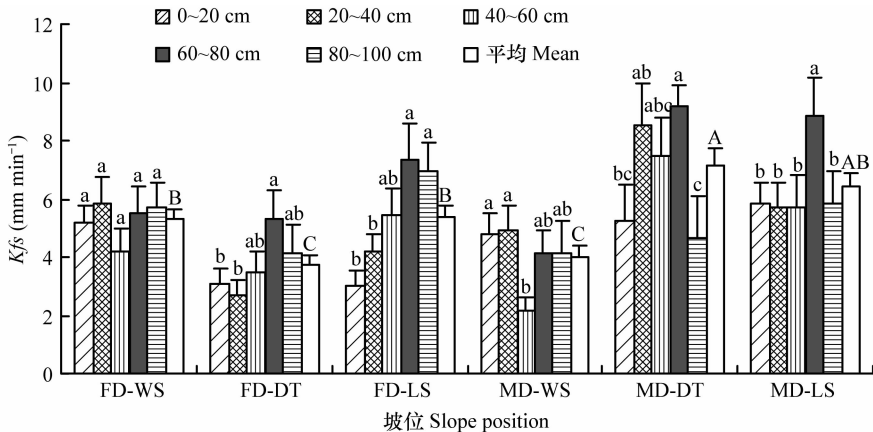
式中, x 为土层深度 (cm), Kfs 为土壤饱和导水率 (mm min^{-1})。此处关于固定沙丘的分析结果与 Chen 等[24]的研究结果一致, 也与 Wang 等[25]对美

国内布拉斯加州沙地 Kfs 的研究结果一致,他们认为随深度增加, Kfs 有逐渐增大的趋势。

2.2.3 沙丘不同坡位 Kfs 变化规律 沙丘作为科尔沁沙地的主要地貌景观类型之一,一直受到诸多学者的关注,如沙丘的形成、沙丘植被的演替、沙丘的固定与活化、沙丘不同部位土壤理化性质演变与空间异质性等^[12,26]。为了进一步了解和析沙丘不同坡位 Kfs 差异及其随土层深度的变化规律,本研究对固定沙丘迎风坡(FD-WS)、固定沙丘丘顶(FD-DT)、固定沙丘背风坡(FD-LS)和流动沙丘迎风坡(MD-WS)、流动沙丘丘顶(MD-DT)及流动沙丘背风坡(MD-LS)这六个位置的 Kfs 进行了比较分析(图2),初步结果表明,这两类沙丘不同坡位 Kfs 的变化规律有较大差异, Kfs 取值的大小依次为:MD-DT > MD-LS > FD-WS > FD-LS > MD-WS > FD-DT;从不同坡位 Kfs 变化来看,两类沙丘 Kfs 随坡位表现出完全相反的变化规律:固定沙丘 Kfs 在迎风坡和丘顶分别取得最大值和最小值,而流动沙丘却在迎风坡和丘顶分别取得最小值和最大值。从这六个位置 Kfs 随土层厚度的变化来看,丘顶和背风

坡 60~80 cm 土层的 Kfs 相对较高,而迎风坡却在 20~40 cm 土层较高。从不同土层 Kfs 差异分析来看,固定沙丘迎风坡 Kfs 在不同土层间无显著差异($p > 0.05$),而其丘顶和背风坡的 60~80 cm 土层与 0~20 cm 及 20~40 cm 土层间的差异显著($p < 0.05$);流动沙丘迎风坡 40~60 cm 与 0~20 cm 及 20~40 cm 的 Kfs 差异显著,而其丘顶和背风坡 60~80 cm 与 0~20 cm 及 80~100 cm 的 Kfs 差异显著。

这两类沙丘不同坡位 Kfs 及其随深度的变化差异较大,主要与两类沙丘的形成与发展过程有关。固定沙丘相对过去某一个时段而言,其风蚀过程相对减弱甚至停止,而其沉积过程却依然继续,再加上植被根系和凋落物的影响,从而造成固定沙丘 Kfs 明显不同于流动沙丘。流动沙丘植被盖度非常低,基本均低于 10%,每年受风蚀和风积影响较大,其所在的迎风坡、丘顶和背风坡及不同土层土壤组成及养分含量差异很大,从而导致其不同坡位及不同深度的 Kfs 变化较固定沙丘的复杂很多。由此可见,受风沙及风蚀作用的影响,在固定沙丘逐渐退化为流动沙丘的过程中, Kfs 的空间异质性明显提高。



注:大写字母不同表示沙丘不同坡位间 Kfs 差异显著;相同坡位不同土层标注的小写字母不同表示 Kfs 在不同深度间差异显著,显著性水平 $p < 0.05$ 。FD-WS、FD-DT、FD-LS、MD-WS、MD-DT和MD-LS分别代表固定沙丘迎风坡、固定沙丘丘顶、固定沙丘背风坡、流动沙丘迎风坡、流动沙丘丘顶和流动沙丘背风坡。Note: The different capital letters mean a statistically significant difference between slope positions in dunes ($p < 0.05$). The different lowercase letters mean a statistically significant difference between soil layers within a slope position. FD-WS, FD-DT and FD-LS are for a windward slope, dune-top and leeward slope on the FD; MD-WS, MD-DT and MD-LS are for a windward slope, dune-top, and leeward slope on the MD

图2 两类沙丘不同坡位 Kfs 比较及其随深度变化、差异分析

Fig. 2 Changes of Kfs at different slope positions and soil depths in FD and MD

2.3 Kfs 的影响因素

关于 Kfs 的影响因素,不同研究,由于其植被、土壤理化性质等因素不同,其结果也不尽相同。如梁向锋等^[17]认为子午岭林区九种植被下 Kfs 的主要影响因子是有机质含量、容重、 >0.25 mm 土壤水稳性团聚体含量、毛管孔隙度和黏粒含量;而吕殿

青等^[27]研究表明容重对 Kfs 的影响最大,且二者呈幂函数关系;贺康宁^[28]研究显示土壤容重与 Kfs 之间的关系最为紧密,与土壤非毛管孔隙状况的关系次之;张扬等^[29]研究表明,影响农地退耕植被恢复序列 Kfs 的主要因子为有机质质量分数和毛管孔隙度。虽然不同研究得到的 Kfs 的主要影响因素不尽

相同,但主要都围绕着土壤有机质含量、容重、土壤孔隙状况及土壤粒级分布。因此,本研究选取了以下 5 个因素作为自变量:容重(X_1)、有机质含量(X_2)、粗砂(X_3)、细砂(X_4)和黏粉粒含量(X_5),分析 K_f s 与他们之间的相关性,结果见表 3。

表 3 K_f s 与土壤理化性质的相关性

Table 3 Correlation coefficients among K_f s and soil physical and chemical properties

| 统计特征 Statistic characteristics | 容重 Bulk density | 有机质含量 Organic matter | 粗砂 Coarse sand | 细砂 Fine sand | 黏粉粒含量 Clay and silt |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------|-------------------|-----------------|------------------------|
| 相关系数 Correlation coefficient | 0.17 | -0.52** | 0.33** | -0.33** | -0.32** |

注: ** 表示 $p < 0.01$ 的显著相关性 Note: ** stands for $p < 0.01$ of significant correlation

由表 3 可知,科尔沁沙地 K_f s 除与容重的相关性不显著($p > 0.05$)外,与其他因子的相关性均达到极显著水平($p < 0.01$)。具体而言, K_f s 与粗砂粒含量呈极显著的正相关关系,而与有机质含量、细砂含量及黏粉粒含量呈极显著的负相关关系。

为了进一步分析 K_f s 与这些因子之间的关系,采用多因子逐步回归分析获得的回归方程为:

$$Y = 6.67 - 1.57X_2, F = 38.88, P = 0.000 1 \quad (4)$$

式中,因变量 Y 为 K_f s (mm min^{-1}), X_2 为有机质含量。从式(4)可以看出,影响科尔沁沙地 K_f s 的主要因素为有机质含量。进一步通过通径分析发现有有机质含量的直接通径系数为 -0.52 , Durbin-Watson 统计量为 1.29,表明式(4)可靠性较强。由有机质含量对 K_f s 的作用方向(直接通径系数为负值)可知,有机质含量的增加会降低 K_f s。如前文所述,有机质含量按照草地、固定沙丘和流动沙丘的顺序依次降低,而 K_f s 却按照此顺序依次增大,这也证明了科尔沁沙地 K_f s 与土壤有机质含量之间呈明显的负相关关系。

总之,影响科尔沁沙地 K_f s 的主要因素是土壤有机质含量,其次为土壤粗砂、细砂和黏粉粒含量。然而,如前文所分析的,草地、固定沙丘和流动沙丘的 K_f s 有显著差异,说明沙地所处的沙漠化程度不同,其 K_f s 也会明显不同。因为在不同沙漠化阶段,受植被状况的影响,土壤理化性质会有较大差异,如植被的存在可改变土壤的结构、孔隙状况和数量,进而影响土壤入渗能力^[25]。关于研究区 K_f s 其

他可能的影响因素,如植被、土壤紧实度、环境温度等因素还有待进一步研究。

3 讨论

本研究利用 Guelph 入渗仪得到了科尔沁沙地草地、固定沙丘和流动沙丘不同土层的 K_f s,他们的平均值分别为 2.15、4.79 和 5.89 mm min^{-1} 。 K_f s 取值按照草地、固定沙丘和流动沙丘的顺序依次增大,表明土壤的入渗性能随沙漠化程度的增强而增强。蒋定生等^[30]对黄土高原区域的 K_f s 研究认为当 K_f s 在 1.35 ~ 3.5 mm min^{-1} 范围时属于水分入渗能力很强的地区,与此结果比较发现本研究中草地 K_f s 的取值属于该范围,而固定沙丘和流动沙丘均超过该范围的上限,可以参考认为沙丘是土壤入渗能力极强的区域。这主要是因为沙丘的砂粒含量很高,基本都在 98% 以上(表 2),较高的土壤砂粒含量将有利于水分的入渗。此外,与沙地 K_f s 的研究比较发现,本研究得到的三类沙地 K_f s 的取值在 Wang 等^[25]对内布拉斯加州沙地 K_f s 的测量值范围之内(0.76 ~ 12.36 mm min^{-1}),表明 Guelph 入渗仪在科尔沁沙地比较适合。通过比较不同沙漠化阶段沙地 K_f s 随土壤剖面深度的变化发现 K_f s 随剖面深度的变化规律比较复杂。事实上,虽然固定沙丘与流动沙丘不同土层的土壤粒级分布相似,但他们的 K_f s 随深度的变化规律却并不一致。由此可见,沙漠化发展阶段不同,其 K_f s 随剖面深度的变化差异较大。这主要可能源于两类沙丘的景观特征、受风沙活动的影响程度及土壤成土过程等因素不同所致^[31]。

对研究区土壤理化性质分析发现,三类沙地有机质含量平均取值在 31 ~ 36 g kg^{-1} ,与单秀枝等^[32]得到的中国农业科学院山东陵县试验区 10 种壤质土的有机质含量范围 25 ~ 55 g kg^{-1} 接近,但二者的土壤粒级分布却有很大差异,如本研究区 $< 0.1 \text{ mm}$ 土壤粒级占到 2.55% ~ 37.25%,而单秀枝等得到的 $< 0.02 \text{ mm}$ 土壤粒级占到 72% ~ 90%,表明科尔沁沙地土壤黏粉粒含量非常低,主要以粗砂粒含量为主,特别是固定沙丘和流动沙丘,这主要是由于研究区较强的风沙活动所致。对科尔沁沙地 K_f s 的主要影响因素分析表明,有机质含量对 K_f s 的影响最大,且二者呈显著的负相关关系;此外, K_f s 还与粗砂粒含量呈显著正相关,与细砂含量及黏粉粒含量呈显著负相关,这与前人的研究结果一致^[17,23,29],如

张鼎华等^[33]对沙地 K_f s 的研究表明 K_f s 与土壤有机质含量呈明显的负相关关系。然而,也与另一些研究结果有所不同,如吕殿青等^[27]研究表明 K_f s 随着容重的增加呈现幂函数形式递减;贺康宁^[28]研究表明土壤容重与 K_f s 之间的关系最为紧密,而本研究分析表明容重与 K_f s 的相关性没有达到显著水平,而有机质含量对 K_f s 的影响最大,这表明科尔沁沙地 K_f s 与容重的相关性较弱,而有机质含量虽然其含量较低,但对 K_f s 却有较大影响。所以,不同的研究区, K_f s 的主要影响因素具有较大差异,应该根据研究区的土壤理化性质进行具体分析。

目前, K_f s 的测定方法很多,有室内的也有室外的,室内有定水头渗透仪法和变水头渗透仪法。不同土壤导水率测定方法由于其测定原理和过程的不同,加之土壤较高的空间变异性,其测量结果往往有所差异^[34]。Guelph 入渗仪属于定水头渗透仪,虽然该方法可以得到原状土的 K_f s,但由于要在野外实地测量,需要花费较大的人力和时间,而且不同测量点的测量结果也会有所差异,所以应该考虑将 Guelph 入渗仪的测量结果与其他测量方法得到的结果进行比较,以获得更加接近实际的 K_f s 值。由于直接测量方法比较费时费力,近年来许多学者致力于通过间接方法获取土壤水力参数的研究^[14-15,35]。如李慧霞等^[35]针对天然文岩渠流域评价了 12 种土壤转换函数获得 K_f s 的效果;Julia 等^[15]比较了 5 种传递函数对西班牙主要类型地的适用性,在此基础上得到了一个利用砂粒含量计算饱和导水率的方法。因此,今后进一步研究考虑利用土壤传递函数法来获得 K_f s,并与 Guelph 入渗仪的测量结果进行比较,以得到更加接近实际的 K_f s 值。

4 结 论

草地、固定沙丘和流动沙丘对应不同土层 K_f s 平均值分别为 2.15、4.79 和 5.89 mm min⁻¹,表明科尔沁沙地土壤的入渗性能随沙漠化程度的增强而增强; K_f s 随土层深度及沙丘不同坡位的变化规律因沙地类型不同而有较大差异,表明沙地 K_f s 具有较高的空间异质性;土壤有机质含量对科尔沁沙地 K_f s 的影响最大,其次为粗砂、细砂和黏粉粒含量,而容重对 K_f s 的影响相对较小。

参 考 文 献

[1] 赵哈林,赵学勇,张铜会,等. 科尔沁沙地沙漠化过程及其

恢复机理. 北京:海洋出版社,2003. Zhao H L, Zhao X Y, Zhang T H, et al. Desertification processes and its restoration mechanisms in the Horqin Sand Land (In Chinese). Beijing: Ocean Press, 2003

- [2] Gomes L, Arrue J L, Lopez M V, et al. Wind erosion in a semi-arid area of Spain: The welsons project. *Catena*, 2003, 52(1): 235—256
- [3] Okin G S, Murray B, Schlesinger W H. Degradation of sandy arid shrub-land environments: Observations, process modeling, and management implications. *Journal of Arid Environments*, 2001, 47(2): 123—144
- [4] 董光荣,吴波,慈龙骏,等. 我国荒漠化现状、成因与防治对策. *中国沙漠*, 1999, 19(4): 318—332. Dong G R, Wu B, Ci L J, et al. Present situation, cause and control way of desertification in China (In Chinese). *Journal of Desert Research*, 1999, 19(4): 318—332
- [5] 王涛,赵哈林,肖洪浪. 中国沙漠化研究进展. *中国沙漠*, 1999, 19(4): 300—311. Wang T, Zhao H L, Xiao H L. Advances in desertification research of China (In Chinese). *Journal of Desert Research*, 1999, 19(4): 300—311
- [6] 王静爱,孙恒,徐伟,等. 近 50 年中国旱灾的时空变化. *自然灾害学报*, 2002, 11(2): 1—6. Wang J A, Sun H, Xu W, et al. Spatio-temporal change of drought disaster in China in recent fifty years (In Chinese). *Journal of Natural Disasters*, 2002, 11(2): 1—6
- [7] 王蕾,哈斯. 科尔沁沙地沙漠化研究进展. *自然灾害学报*, 2004, 13(4): 8—14. Wang L, Ha S. Advances in desertification research of Horqin Sandy Land (In Chinese). *Journal of Natural Disasters*, 2004, 13(4): 8—14
- [8] 王涛,吴薇,薛娴,等. 中国北方沙漠化土地时空演变分析. *中国沙漠*, 2003, 23(3): 230—235. Wang T, Wu W, Xue X, et al. Time-space evolution of desertification land in Northern China (In Chinese). *Journal of Desert Research*, 2003, 23(3): 230—235
- [9] 蒋德明,刘志民,寇振武. 科尔沁沙地荒漠化及生态恢复研究展望. *应用生态学报*, 2002, 13(12): 1695—1698. Jiang D M, Liu Z M, Kou Z W. Prospect of the study on desertification and its restoration of Korqin Sandy Land (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(12): 1695—1698
- [10] 赵哈林,周瑞莲,苏永中,等. 我国北方半干旱地区土壤的沙漠化演变过程与机制. *水土保持学报*, 2007, 21(3): 1—5, 80. Zhao H L, Zhou R L, Su Y Z, et al. Processes and mechanisms of soil desertification in semiarid areas, Northern China (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(3): 1—5, 80
- [11] 赵哈林,李玉强,周瑞莲. 沙漠化对科尔沁沙质草地土壤呼吸速率及碳平衡的影响. *土壤学报*, 2009, 46(5): 809—816. Zhao H L, Li Y Q, Zhou R L. Effects of desertification on soil respiration rate and carbon balance in Horqin Sandy Grassland (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(5): 809—816
- [12] 李雪花,韩士杰,宗文君,等. 科尔沁沙地沙丘演替过程的土壤种子库特征. *北京林业大学学报*, 2007, 29(2): 66—

69. Li X H, Han S J, Zong W J, et al. Characteristics of soil seed banks of sand dune succession process in Horqin Sandy Land (In Chinese). *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(2): 66—69
- [13] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学. 北京: 清华大学出版社, 1988: 77—78. Lei Z D, Yang S X, Xie S C. Soil water dynamics (In Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 1988: 77—78
- [14] 黄元仿, 李韵珠. 土壤水力性质的估算——土壤转换函数. *土壤学报*, 2002, 39(4): 517—523. Huang Y F, Li Y Z. Estimation of soil hydraulic properties-Pedo-transfer functions (in Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(4): 517—523
- [15] Julià M F, Monreal T E, Jimenez A S C, et al. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. *Geoderma*, 2004, 123(3/4): 257—277
- [16] Tietje O, Hennings V. Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedo-transfer functions compared to the variability within FAO textural classes. *Geoderma*, 1996, 69(1/2): 71—84
- [17] 梁向锋, 赵世伟, 张扬, 等. 子午岭植被恢复对土壤饱和和导水率的影响. *生态学报*, 2009, 29(2): 636—642. Liang X F, Zhao S W, Zhang Y, et al. Effects of vegetation rehabilitation on soil saturated hydraulic conductivity in Ziwuling Forest Area (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 636—642
- [18] 于东升, 史学正. 用 Guelph 法研究南方低丘缓坡地不同坡位土壤渗透性. *水土保持通报*, 2002, 22(1): 6—9. Yu D S, Shi X Z. Soils permeability on different position of upland measured by Guelph method in Hilly Area of South China (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2002, 22(1): 6—9
- [19] 朱震达. 中国土地荒漠化的概念、成因与防治. 第四纪研究, 1998, 18(2): 145—155. Zhu Z D. Concept, cause and control of desertification in China (In Chinese). *Quaternary Sciences*, 1998, 18(2): 145—155
- [20] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 7—59. Institute of Soil Science, The Chinese Academy of Sciences. Physical and chemical analysis methods of soils (In Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978: 7—59
- [21] 阿拉木萨, 蒋德明, 裴铁璠. 科尔沁沙地人工小叶锦鸡儿植被水分入渗动态研究. *生态学杂志*, 2004, 23(1): 56—59. Alamusa, Jiang D M, Pei T F. Soil moisture infiltration dynamics in plantation of *Caragana microphyllain* Heerqin sandy land (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(1): 56—59
- [22] 苏永中, 赵哈林. 农田沙漠化过程中土壤有机碳和氮的衰减及其机理研究. *中国农业科学*, 2003, 36(8): 928—934. Su Y Z, Zhao H L. Losses of soil organic carbon and nitrogen and their mechanisms in the desertification process of sandy farmlands in Horqin Sandy Land (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(8): 928—934
- [23] 李玉霖, 崔建垣, 苏永中. 不同沙丘生境主要植物比叶面积和干物质含量的比较. *生态学报*, 2005, 25(2): 304—311. Li Y L, Cui J Y, Su Y Z. Specific leaf area and leaf dry matter content of some plants in different dune habitats (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(2): 304—311
- [24] Chen X, Hu Q. Ground water influences on soil moisture and surface evaporation. *Journal of Hydrology*, 2004, 297(1/4): 285—300
- [25] Wang T J, Zlotnik V A, Wedin D, et al. Spatial trends in saturated hydraulic conductivity of vegetated dunes in the Nebraska Sand Hills: Effects of depth and topography. *Journal of Hydrology*, 2008, 349(1/2): 88—97
- [26] 肖洪浪, 李新荣, 段争虎, 等. 流沙固定过程中土壤-植被系统演变. *中国沙漠*, 2003, 23(6): 605—611. Xiao H L, Li X R, Duan Z H, et al. Succession of plant-soil system in the process of mobile dunes stabilization (In Chinese). *Journal of Desert Research*, 2003, 23(6): 605—611
- [27] 吕殿青, 邵明安, 刘春平. 容重对土壤饱和和水分运动参数的影响. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 154—157. Lü D Q, Shao M A, Liu C P. Effect of bulk density on soil saturated water movement parameters (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(3): 154—157
- [28] 贺康宁. 水土保持林地土壤水分物理性质的研究. *北京林业大学学报*, 1995, 17(3): 44—50. He K N. Study on the physical characteristics soil moisture in shelter forests (In Chinese). *Journal of Beijing Forestry University*, 1995, 17(3): 44—50
- [29] 张扬, 赵世伟, 华娟. 宁南山区草地植被恢复方式对土壤饱和和导水率的影响. *中国水土保持科学*, 2009, 7(5): 100—104. Zhang Y, Zhao S W, Hua J. Effects of grassland vegetation restoration on soil saturated hydraulic conductivity in mountain area of southern Ningxia (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(5): 100—104
- [30] 蒋定生. 黄土高原土壤入渗能力分区//黄土高原土壤与农业. 北京: 农业出版社, 1989. Jiang D S. Regional division of soil infiltration capacity in Loess Plateau//Soil and agriculture in Loess Plateau (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1989
- [31] 郑纪勇, 邵明安, 张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和和导水率空间变异特征. *水土保持学报*, 2004, 18(3): 53—56. Zheng J Y, Shao M A, Zhang X C. Spatial variation of surface soils bulk density and saturated hydraulic conductivity on slope in Loess Region (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3): 53—56
- [32] 单秀枝, 魏由庆, 严惠峻, 等. 土壤有机质含量对土壤水动力学参数的影响. *土壤学报*, 1998, 35(1): 1—9. Shan X Z, Wei Y Q, Yan H J, et al. Influence of organic matter content on soil hydrodynamic parameters (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(1): 1—9
- [33] 张鼎华, 翟明普, 贾黎明, 等. 沙地土壤有机质与土壤水动力学参数的关系. *中国生态农业学报*, 2003, 11(1): 74—77. Zhang D H, Zhai M P, Jia L M, et al. Relationship between organic matter content in sandy soil and hydrodynamic parameters (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(1): 74—77
- [34] 樊军, 邵明安, 王全九. 田间测定土壤导水率的方法研究进展. *中国水土保持科学*, 2006, 4(2): 114—119. Fan J, Shao M A, Wang Q J. Development about methods of soil hydraulic

conductivity determination in fields (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2006, 4(2):114—119

[35] 李慧霞, 刘建立, 朱安宁, 等. 预测天然文岩渠流域土壤饱和导水率的土壤转换函数方法比较研究. *土壤*, 2010, 42(3):

438—445. Li H X, Liu J L, Zhu A N, et al. Comparison study of soil pedo-transfer functions in estimating saturated soil hydraulic conductivity at Tianranwenyanqu Basin (In Chinese). *Soils*, 2010, 42(3): 438—445

A COMPARISON OF SOIL SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY (Kfs) IN DIFFERENT HORQIN SAND LAND

YaoShuxia^{1,2} Zhao Chuancheng^{1,2} Zhang Tonghui^{1†}

(1 *Cold and Arid Regions of Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

(2 *Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China*)

Abstract *In situ* measurements with a Guelph Permeator were performed to investigate the saturated hydraulic conductivity of soils (Kfs) at various desertified sand lands, such as grassland, fixed sand dune and mobile sand dune of Horqin Sand Land. Based on analyzing the relationships of Kfs with the sand land types, soil depths, slope position of sand dunes and soilphysical and chemical properties, the results indicated that: (1) The average Kfs increased in the order: grassland (potential desertification), fixed sand dune (light desertification) and mobile sand dune (serve desertification), and the value was 2.15, 4.79 and 5.89 mm min⁻¹, respectively. That was, the more serious desertified, the higher infiltration capacity. A statistically significant differences ($p < 0.05$) in Kfs were found among the three sites and between the slope positions of the two dunes. So, the Kfs at Horqin Sand Land has showed a higher heterogeneity; (2) The changes of Kfs was considerably with the increase of soil profile depths. The changes of Kfs with soil depths at grassland could be fitted with parabola models, and for fixed sand dune by exponential models; (3) The stepwise regression revealed that the soil organic matter content, the fine sand fraction (0.1 ~ 0.05 mm) and the clay and silt content (< 0.05 mm) were some key factors affecting Kfs with a significantly negative relationship, but there was a significantly positive correlation with the coarse sand fraction (2 ~ 0.1 mm).

Key words Saturated hydraulic conductivity; Desertification; Horqin Sand Land

(责任编辑:檀满枝)