

印家旺,阿拉木萨,苏宇航.科尔沁沙地沙丘植被对丘间低地水体的影响[J].中国沙漠,2022,42(6):194-203.

# 科尔沁沙地沙丘植被对丘间低地水体的影响

印家旺<sup>1,2</sup>,阿拉木萨<sup>1</sup>,苏宇航<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院沈阳应用生态研究所,辽宁 沈阳 110016; 2.中国科学院大学,北京 100049)

**摘要:**在流动沙丘以建立固沙植被的方式向固定沙丘转化的过程中,植被将改变沙丘水分再分配过程,影响沙丘的水文调节功能,甚至可能引起沙丘生态系统水资源失衡。为探明植被对沙丘水文调解功能的影响,以科尔沁沙地不同植被盖度的沙丘-丘间地水体组合体为研究对象,于2021年生长季开展了沙丘植被盖度、丘间低地水体变化特征、气象因素的动态观测,以期明确沙丘植被变化对丘间低地水体的影响。结果表明:(1)沙丘植被盖度影响沙丘水分对外补给能力,随着沙丘表面固沙植被盖度增加,单位面积沙丘对外水分补给能力降低,表现为流动沙丘(58.25 mm)>半固定沙丘(24.75 mm)>固定沙丘(14.87 mm),占同期降水量的比例分别为21.39%、9.09%、5.46%。(2)生长季流域降水补给量、植被盖度、气温显著影响沙丘对丘间低地水体的水分补给量,丘间低地水体获补量与流域降水补给量显著正相关,与植被盖度、气温极显著负相关。(3)依据水量平衡原理推导出沙丘水分对外补给量(Y)与影响因素(降水补给量 $X_1$ ,植被盖度 $X_2$ ,平均气温 $X_3$ )的关系模型, $Y=1052.737+0.1X_1-11.459X_2-37.585X_3$ , $R^2=0.641$ 。可根据模型预测沙丘水分对外补给量,为流动沙丘生物治理模式的合理选择提供支持。

**关键词:**沙地;水分运移;植被盖度;降水补给;水量平衡

文章编号:1000-694X(2022)06-194-10

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00057

中图分类号:TV211.1

文献标志码:A

## 0 引言

沙区相邻景观单元之间存在着水力联系<sup>[1]</sup>。沙丘土壤水分首先通过垂直运移与地下水进行交换,然后再通过浅层地下水的水平运移而与相邻景观发生水力联系<sup>[2]</sup>。但在沙丘水分运移的过程中,植被不仅对土壤水分运动产生明显的制约作用,而且改变了沙区水量平衡各分量之间的比例关系<sup>[3]</sup>。赵文智<sup>[4]</sup>指出,无论在水平格局或垂直格局上,沙丘人工植被均增强了土壤水分的异质性。张定海等<sup>[5]</sup>认为,灌木根系的发展使40—300 cm深度土壤水分被大量利用,导致深层土壤水分含量明显下降。Kizito等<sup>[6]</sup>的研究表明,沙区的灌木植被对土壤水分的利用强度较大,导致深层土壤几乎得不到水分补给。

干旱、半干旱区生态系统内部的水力联系是其可持续发展的关键<sup>[1]</sup>。流动沙丘可对周边水体及地下水产生补给作用<sup>[7]</sup>,是沙地生态系统的“水资源

库”<sup>[8]</sup>。然而固沙植被的建立对沙丘的水分调节能力产生影响,改变沙丘对丘间低地水体的补给量,削弱丘间低地水体的稳定性。在以往沙区水文过程的研究中,很多研究者从土壤水分及深层渗漏层面来研究植被对沙区水分的影响,少见关于沙丘植被与丘间地水体之间相互关联的探讨,而将气候、植被及丘间地水体三者相联系的研究更是少见。本文着眼于沙丘植被与丘间地水体关系,针对不同植被盖度沙丘与丘间地水体组合,测定了生长季沙丘植被盖度、丘间地水体变化、主要气候因素,试图明确沙丘植被、气候因素对丘间低地水体的影响作用。研究结果在沙区水资源合理利用、固沙植被的合理建设经营、沙区生态恢复治理方面具有重要的理论和实践意义。

## 1 研究区概况

研究区位于中国科学院沈阳应用生态研究所乌兰敖都荒漠化防治试验站周边区域,该站位于科

收稿日期:2021-02-09; 改回日期:2022-04-08

资助项目:国家自然科学基金项目(31670712)

作者简介:印家旺(1996—),男,吉林通化人,硕士研究生,主要从事沙地水文学、生态学研究。E-mail: yinjiawang19@mails.ucas.ac.cn

通信作者:阿拉木萨(E-mail: alamusa@iae.ac.cn)

尔沁沙地西部地区赤峰市翁牛特旗,属温带半干旱气候区,年均气温6.2℃,年均风速4.2 m·s<sup>-1</sup>,年无霜期140—160 d;年降水量284.4 mm,年内降水分布不均匀,6—8月降水量占全年降水量的70%以上,春季(3—5月)降水量仅占全年降水量的10%,年蒸发潜力2 000—2 500 mm。地带性土壤主要为沙质栗钙土。固沙植物以小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、山竹子(*Hedysarum fruticosum*)、黄柳(*Salix gordejvii*)、乌丹蒿(*Artemisia wudanica*)、柠条(*Caragana korshinskii*)等为主。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置

在科尔沁沙地典型沙丘区,依据植被盖度及丘间地水体特征,选择具有长期稳定存在的沙丘-丘间地水体景观组合为研究对象,根据沙丘植被盖度划分为固定沙丘-地表水组合体、半固定沙丘-地表水组合体、流动沙丘-地表水组合体类型,每个类型

选取2—3个组合为研究样地。将丘间地水体周围第一圈沙丘脊线作为分界线,将其内部的闭合范围确定为其流域范围,并使用GPS仪测定流域面积、沙丘面积及水体面积。本研究共选取了3个组合类型的8个样地(表1),固定、半固定沙丘样地位于当地林业部门实施的固沙工程建设区内,该区域主要通过建立草方格物理沙障及栽植固沙灌木措施恢复沙丘植被,物种组成主要为小叶锦鸡儿、柠条、小黄柳及沙蒿,植被平均高度1.08—1.34 m,平均冠幅1.8—2.5 m;流动沙丘样地选择附近典型流动沙丘-丘间地水体组合;在上述沙丘-丘间地水体组合样地的选择过程中,本研究选择沙丘形态、面积、植被组成等具有更高相似性的样地作为研究区(图1),具体样地位置为:固定沙丘-地表水组合体位于图哈线一号(T1)、图哈线二号(T2)及图哈线三号(T3);半固定沙丘-地表水组合体位于六家子一号(L1)、六家子二号(L2);流动沙丘-地表水组合体位于银沙海一号(Y1)、银沙海二号(Y2)、银沙海三号(Y3)。

表1 样地基本情况

Table 1 Basic information of the experimental sites

项目	样地编号							
	T1	T2	T3	L1	L2	Y1	Y2	Y3
沙丘类型	固定	固定	固定	半固定	半固定	流动	流动	流动
区域面积/m <sup>2</sup>	210 173	67 056	64 768	59 947	23 101	131 949	44 675	264 480
沙丘面积/m <sup>2</sup>	187 072	47 378	60 851	49 751	17 109	91 780	17 629	199 536
水体面积/m <sup>2</sup>	5 803	1 037	1 858	3 626	1 359	11 160	3 000	16 156
植被盖度/%	42	31	33	19	27	2	4	3

### 2.2 数据获取

野外观测时间为2021年6—10月。植被数据的获取方式是在流域内沙丘区随机设置10 m×10 m植被调查样方,每个类型样地设置12个调查样方,8个类型样地共计96个样方。每30天对样方内主要植物的冠幅进行测量,植物冠幅与样方面积的比值百分数即为该样方植被盖度,以样地内各样方盖度的均值来代表该样地的盖度。

水体变化特征观测方法:水位变化观测采用自记录式水位仪,将自记录式水位监测仪(HOBO公司生产,型号U20-001-01,精度±0.1 cm)置于各样地水体中持续监测,每15天获取1次水位数据。水体面积观测使用GPS仪每15天对各样地内的水体面积

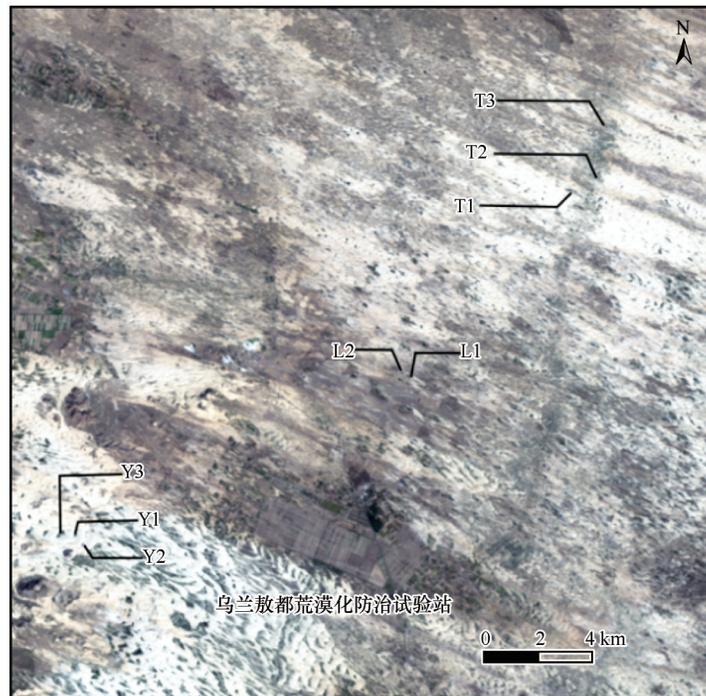
进行1次测量以获取生长季水体面积变化数据。

水体水量波动计算方法:将水体视为一个锥体,依据水位与水体面积计算其水量变化。

$$V = \frac{(S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 \times S_2})}{3} \times h \quad (1)$$

式中:V为两个时期的相对水量变化;S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>分别为时间1和时间2时水体的面积;h为时间1与时间2的湖面高程差。

利用公式(1)通过同期水体水位数据计算求得水体的水量波动值,再通过同期蒸发及降水数据求得水体蒸发量与水体接受降雨量,最后根据水量平衡原理计算出沙丘水分对外补给量。



固定沙丘样地: T1、T2、T3; 半固定沙丘样地: L1、L2; 流动沙丘样地: Y1、Y2、Y3

图1 研究区地理位置

Fig.1 Geographical location map of the study area

沙丘水分对外补给量 = 水体蒸发量 +  
水量波动 - 水体接收降水量 (2)

沙丘水分补给能力计算: 因各样地沙丘面积存在差异, 为准确量化不同植被特征沙丘对丘间低地水体的补给作用, 本文将沙丘水分的对外补给能力进行标准化处理, 即采用生长季内沙丘对水体的水分补给总量与沙丘面积的比值作为单位面积沙丘补给能力, 从而比较不同植被特征样地对丘间低地水体补给能力之间的差异。

单位面积沙丘水分对外补给能力 =  
$$\frac{\text{沙丘水分补给总量}}{\text{沙丘面积}} \quad (3)$$

沙丘降水补给量计算方法: 为进一步明确年内生长季沙丘水分对外补给量的具体影响因素, 本文还计算了沙丘降水补给量与蒸散发量。沙丘降水补给量是采用流域面积和同期降水量计算得出的。

沙丘降水补给量 = 沙丘面积 × 同期降水量 (4)

流域蒸散发量计算方法: 在以往对沙地水量平衡及蒸散发的研究中, 生长季蒸散发量与降水量间存在特定数量关系, 通过查询文献资料, 我们获知丘间低地、固定沙丘、半固定沙丘与流动沙丘生长季实际蒸散发与降水量的比值依次为 1.859、1.172、0.793、0.687<sup>[8-16]</sup>, 故可采用此数量关系作为降水-蒸

散发系数, 从而对样地蒸散发量进行推算。针对各样地流域的实际情况, 对其内部水体蒸散发量、丘间低地蒸散发量及沙丘蒸散发量分别进行推算, 并将计算结果累加, 从而得出各样地的流域生长季蒸散发量。

流域蒸散发量 = 水体面积 × 水面蒸发 +  
丘间低地面积 × 丘间低地蒸散发系数 +  
沙丘面积 × 沙丘蒸散发系数 (5)

相关气象数据来源于野外实测及翁牛特旗气象站。

## 2.3 数据处理

使用 Excel 软件进行数据统计分析、SPSS 软件进行相关性及回归分析、Origin 软件进行制图。

## 3 结果与分析

### 3.1 生长季主要气象因素变化特征

研究区生长季合计发生降水事件 43 次, 降水量共计 272.4 mm (图 2), 单次最大降水量出现于 9 月, 达 38.2 mm, 单次最小降水量分别出现于 6、7、9 月, 仅为 0.2 mm。其中 6 月降水事件发生的频率最低, 共计 8 次, 单月降水量最小, 为 49.2 mm。7 月降水

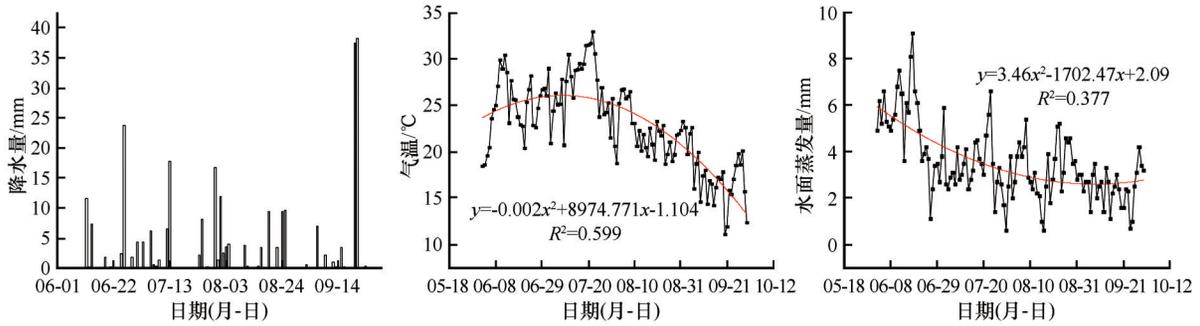


图 2 生长季气象因素变化

Fig.2 Changes of meteorological factors in growing season

事件发生频率最高,共 17 次,单月降水量 70.6 mm。9 月单月降水量最大,为 90.6 mm,降水事件共计发生 10 次;研究区生长季平均气温为 22.4 °C,呈现先上升(6—7 月)后下降(8—9 月)的趋势,最高气温 32.9 °C,最低气温 11.1 °C;研究区水面蒸发量共计 443.1 mm,在生长季内呈现逐步下降趋势,日蒸发量最大值为 9.1 mm,最小值为 0.6 mm。对主要气象因素的相关性分析表明(表 2),生长季内水面蒸发量与气温、降水量相关性较强,与气温极显著正相关,与降水量极显著负相关。

表 2 水面蒸发量与气温、降水量相关性

Table 2 Correlation analysis of temperature, precipitation and water surface evaporation

	气温	降水量
相关系数	0.370**	-0.352**
样本数	64	64

\*\*表示相关性极显著,  $P < 0.01$ 。

### 3.2 生长季丘间地地表水体变化特征比较

生长季中各类型样地水位呈现出波动性上涨,水位变化与降水量变化呈现出相近态势,但在上涨过程中也伴随着水位下降的情况出现(图 3)。流动

沙丘与半固定沙丘样地在 6 月 20 日出现 1 次水位波动量负值;固定沙丘样地则出现了 3 次水位下降,分别发生于 6 月 20 日、8 月 6 日及 9 月 7 日,即使在降水量较高的 8 月,其水位也处于下降状态,水位波动表现为负值,可能与沙丘植被的水分需求有关,在固定沙丘表面存在较高的植被盖度,这不仅可以截留较多的地表降水,同时也因其正处生长旺盛时期而吸收消耗了大量的土壤水分,由此引起沙丘区深层渗漏补给地下水量减少或增加其波动性,使得固定沙丘样地地表水体水位变化呈现更强的波动性,进而表现出水位波动程度与频率均高于流动沙丘样地和半固定沙丘样地的现象。相对而言,半固定沙丘及流动沙丘区较低的植被盖度减少了对沙丘水分运移过程的影响,使得其深层水分渗漏与降水的关系更为紧密,即半固定沙丘样地地表水水位和流动沙丘样地地表水水位生长季中仅观测到 1 次水位下降,发生时间处在降水量最低的 6 月。

生长季 3 类样地地表水面积变化均呈现出扩大趋势,且消涨动态与其水位消涨动态保持一致(图 4)。固定沙丘样地地表水面积平均涨幅为 682 m<sup>2</sup>,增长率为 34.00%;半固定沙丘样地地表水面积平均涨幅为 1 259 m<sup>2</sup>,增长率为 70.46%;流动沙丘样地地

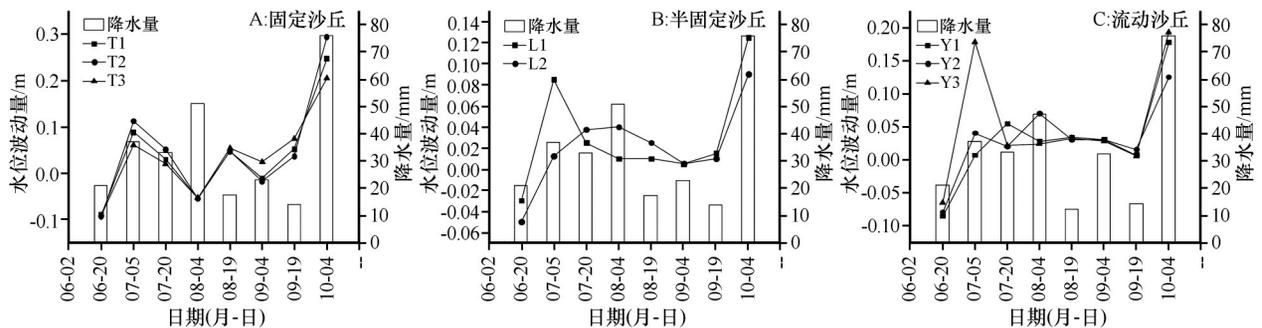


图 3 生长季水位波动-降水特征

Fig.3 Water level fluctuation and precipitation characteristics in growing season

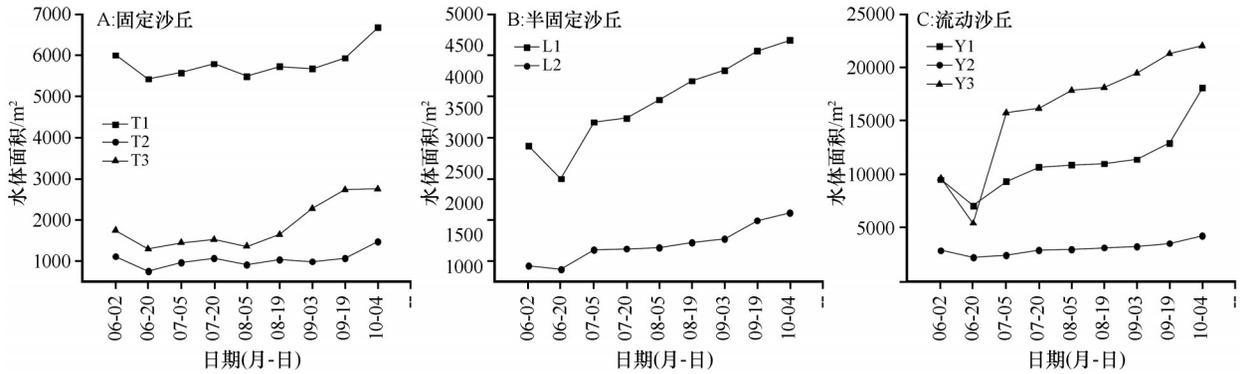


图4 生长季水体面积变化

Fig.4 Variation of water area in growing season

表水面积平均涨幅为 7 468 m<sup>2</sup>, 增长率为 89.89%。面积波动幅度极值分析表明, 流动沙丘样地地表水面积单次涨幅最大, 为 10 377 m<sup>2</sup>, 出现于 7 月 5 日, 半固定沙丘地表水次之, 面积单次最大涨幅出现于 7 月 5 日为 893 m<sup>2</sup>; 固定沙丘地表水最低, 单次最大涨幅出现于 10 月 4 日, 仅为 745 m<sup>2</sup>。

从面积变化的时间特征上来看, 生长季中各个类型水体面积也呈现出波动性上涨, 在其上涨过程中同样出现过水体面积减小的情况, 并与水位变化呈现趋同性, 即固定沙丘样地地表水在生长季内观测到 3 次面积减小, 分别发生于 6 月 20 日、8 月 6 日及 9 月 7 日, 半固定沙丘样地地表水和流动沙丘样

地地表水生长季内仅在 6 月 20 日出现了 1 次面积减小的情况。固定沙丘样地地表水在生长季内水体面积减小事件的出现频率最高, 这也表明, 由于固定沙丘样地地表水的面积变化受到了较高盖度固沙植被的影响, 变化波动频率高于流动沙丘样地地表水和半固定沙丘样地地表水。

### 3.3 生长季植被盖度变化

如图 5 所示, 固定沙丘样地、半固定沙丘样地、流动沙丘样地生长季植被平均盖度分别为 35.75%、23.53% 和 3.30%, 盖度变化范围分别为 27.17%—48.68%、17.69%—29.45% 和 0.80%—8.00%。

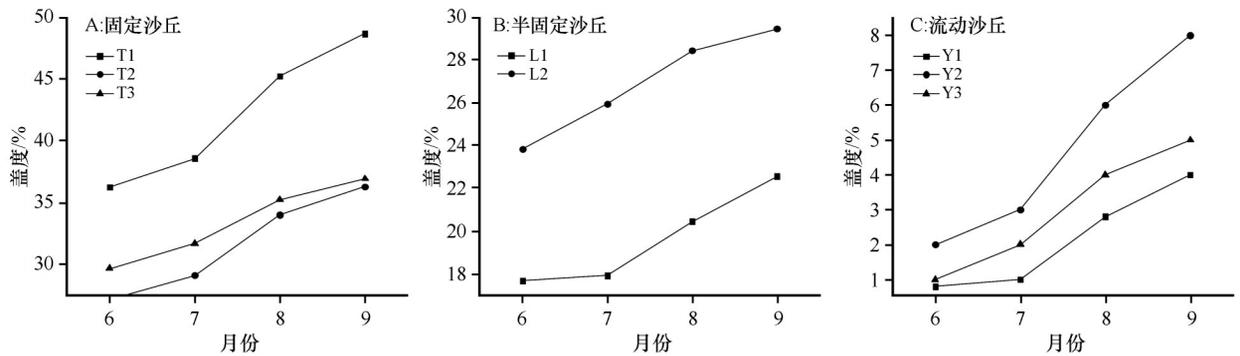


图5 生长季植被盖度变化

Fig.5 Vegetation coverage changes during growing season

生长季内 3 类样地的植被盖度均呈现逐渐增长趋势, 固定沙丘、半固定沙丘、流动沙丘植被盖度在生长季内分别增加了 9.60%、4.24%、4.40%, 增长量 3.20%—12.42%, 7—8 月植被盖度的增长量最大。

### 3.4 不同植被盖度沙丘对丘间地水体补给特征比较

如图 6 所示, 生长季内固定沙丘样地 T1、T2、T3 沙丘水分补给总量依次为 2 856.25、595.59、1 021.25 m<sup>3</sup>, 半固定沙丘样地 L1、L2 依次为 1 301.80、

399.000 m<sup>3</sup>, 流动沙丘样地 Y1、Y2、Y3 依次为 5 112.14、1 278.62、9 282.72 m<sup>3</sup>。

在生长季的不同时段内, 沙丘对水体的水分补给量也表现出时间差异。虽然各样地的沙丘水分对外补给量最大值发生于 10 月 4 日, 最小值发生于 8 月 6 日, 但固定沙丘、半固定沙丘在 8 月 6 日对外水分补给量为负值, 表明在此期间沙丘无法对水体进行水分补给, 样地呈现水分亏缺状态, 而流动沙丘在整个

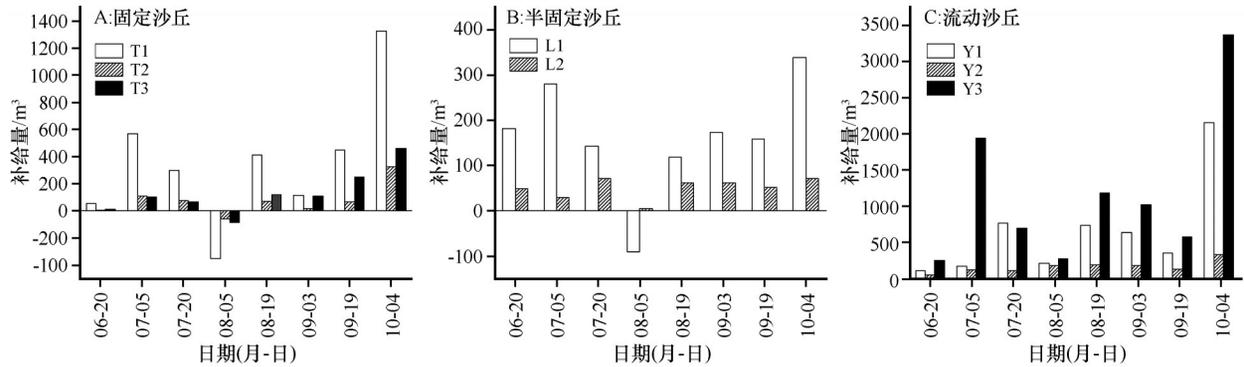


图6 沙丘水分对外补给量变化  
Fig.6 Changes in external water supply of dune

生长季内的水分补给量均为正值,样地并未表现出水分亏缺,对丘间低地水体存在持续的补给作用。

产生上述变化的原因可能与沙丘植被盖度、降水分布特征等因素有关。本研究中的固定沙丘以及盖度较高的半固定沙丘,在对外水分补给量为负的时间段内,植物正处于旺盛生长、大量消耗水资源的阶段,这将引起沙丘区水资源量的减少,造成沙丘无法向外提供水分补给,从而引发出负值。同

时,降水分布特征也会影响沙丘水分对外补给量,在生长季前期,降水较少,沙丘区水资源储量相对匮乏,沙丘对外提供水分补给的能力弱。在生长季后期,随着降水量上升,沙丘区水资源储量相对充足,沙丘对外提供水分补给的能力强。

通过对单位面积沙丘水分的对外补给量分析,可以更加精准地比较不同植被盖度沙丘的水分对外补给能力(表3)。

表3 不同植被特征样地单位面积沙丘水分对外补给能力

Table 3 External water recharge capacity of dune per unit area in different vegetation characteristics

项目	样地类型										
	固定沙丘				半固定沙丘			流动沙丘			
	T1	T2	T3	均值	L1	L2	均值	Y1	Y2	Y3	均值
单位面积补给能力/mm	15.27	12.57	16.78	14.87	26.17	23.32	24.75	55.70	72.53	46.52	58.25
补给量占降水量/%	5.61	4.61	6.16	5.46	9.61	8.56	9.09	20.45	26.63	17.08	21.39

随着植被盖度的增加,按照流动沙丘、半固定沙丘、固定沙丘的顺序,单位面积沙丘的对外水分补给能力及补给量与降水量的比值均呈现逐步减低的趋势,其水分补给能力均值从 58.25 mm 降低至 14.87 mm,补给量与降水量比值均值从 21.39% 下降至 5.46%。其中固定沙丘的平均对外水分补给能力最弱,补给量占同期降水量的比值最小,流动沙丘的平均对外水分补给能力最强,补给量占同期降水量的比值最大,流动沙丘为固定沙丘的 3.92 倍。

### 3.5 影响沙丘水分对外补给量因素

为了探究影响沙丘水分对外补给能力的相关因素,我们将沙丘水分对外补给量与流域降水补给量、流域蒸散发量、植被盖度、气温等因素进行了皮

尔逊相关性分析(表4)。沙丘水分对外补给量与流域降水补给量呈极显著正相关,与植被盖度呈极显著负相关,与气温、流域蒸散发量呈显著负相关(表5)。相关程度由强到弱依次为流域降水补给量、植被盖度、气温、流域蒸散发量。

为进一步量化各因素与沙丘水分对外补给量之间的关系,本文将沙丘水分对外补给量作为因变量,将流域降水补给量、植被盖度、气温、流域蒸散发量作为自变量,采取逐步回归的方式进一步探讨各因素之间的量化关系(表6)。

沙丘水分对外补给量( $Y$ )主要受流域降水补给量( $X_1$ )、植被盖度( $X_2$ )、气温( $X_3$ )影响,而流域蒸散发量的影响不显著。回归模型表达式为  $Y=1052.737+0.1X_1-11.459X_2-37.585X_3, R^2=0.641$ 。可依据此模型在维持沙丘-水体水量平衡的基础上,优选出适宜的沙丘植被盖度范围,并依此结果为固沙

表4 生长季流域水分收支

Table 4 Water budget in the growing season

项目	样地类型							
	固定沙丘			半固定沙丘		流动沙丘		
	T1	T2	T3	L1	L1	Y1	Y2	Y3
流域降水补给量/m <sup>3</sup>	1 585.50	284.67	517.86	1 008.32	384.05	3 136.66	1 252.32	4 604.04
流域蒸散发量/m <sup>3</sup>	2 533.07	435.93	764.64	1 346.65	500.92	4 534.89	1 278.62	6 410.05
单位面积水分收支/mm	4.51	2.26	3.81	5.64	5.06	10.60	0.52	6.83

表5 沙丘水分对外补给量影响因素相关性分析

Table 5 Correlation analysis of influencing factors of dune water replenishment

	气温	植被盖度	流域降水补给量	流域蒸散发量
相关系数	-0.313*	-0.326**	0.724**	-0.254*
样本数	64	64	64	64

\*表示在0.05级别相关性显著,\*\*表示在0.01级别相关性显著。

表6 沙丘水分对外补给量影响因素逐步回归模型

( $R^2=0.641$ )

Table 6 Stepwise regression model of influencing factors of dune water external replenishment

	未标准化系数	标准误差	标准化系数	P值	膨胀因子
常量	1 052.737	275.355		0.000	
流域降水补给量	0.100	0.012	0.661	0.000	1.031
植被盖度	-11.459	2.908	-0.302	0.000	1.029
气温	-37.585	11.049	-0.262	0.001	1.041

工程中适宜植被盖度值的选择提供依据,以保证沙区地表水体的稳定存在,提高沙区生态系统的稳定性,维持区域水文过程及水分循环健康可持续发展,为流动沙丘适度治理模式选择提供理论支撑。

## 4 讨论

### 4.1 影响沙丘水分对外补给量的主要因素

不同植被特征样地沙丘水分对外补给量间的差异是气候因素与植被盖度共同作用的结果,它们影响着沙区的水分运移过程及水量平衡中各分量之间的比例关系<sup>[1]</sup>。降水是沙丘区土壤水及深层土壤水分的主要补给来源<sup>[17-18]</sup>,决定水分的入渗深度及对深层土壤水分补给量<sup>[19-20]</sup>。植被可对土壤水分动态及水文通量产生重要影响<sup>[21-22]</sup>,不仅可以有效地利用沙丘中下渗的水资源,还会对土壤水分运动

产生尤为明显的制约作用。气温与植被的生长发育及沙丘蒸散发密切相关,生长季内气温条件在一定程度上限制着植被的生理活动和沙丘蒸散发量,进而对沙区水文过程产生影响。

我们发现,沙丘植被会对沙丘-丘间低地水体的水力联系过程产生影响,随着植被盖度的增加,沙丘-丘间低地地表水之间的水力联系减弱,单位面积沙丘对丘间低地水体的水分补给能力也随之下降。综合整个生长季的水分收支情况,研究区内不同植被盖度沙丘对丘间低地水体均可产生一定的补给作用,但生长季内不同盖度沙丘对丘间低地水体的水分补给作用存在很大差别,主要体现在沙丘的单位面积补给量、补给最小值出现时间以及水分对外补给能力等方面。随着固沙植被盖度的增加,沙丘的单位面积对外水分补给能力逐渐降低,补给量的时间波动性增强,表现为在整个生长季,流动沙丘均可以对丘间地水体产生补给作用,而固定、半固定沙丘受到固沙植被的影响,在生长季的特定时期内无法实现对外水分补给功能。可能因为此期间土壤自身储水量不足、较高盖度的固沙植物消耗了更多的浅层土壤水分、较高的气温增加了地表蒸发和促进了植物的水分生理过程,由此影响了沙丘的水分对外补给能力。在生长季,降水事件对沙丘水分的影响是短期性的,而植被对沙丘水分的影响则是长期的。在大气降水补给较少且植被对水分消耗量大的情况下,固定、半固定沙丘很难对外产生水分补给作用,导致这两种类型沙丘在8月初对丘间低地水体的补给量达到最小值,甚至使沙丘补给量出现负值。而流动沙丘的植被盖度极低,整个生长季最大值仅为8%,植被对沙丘的水文过程影响很弱,其表面干沙层又可有效抑制水分蒸发,所以在8月初流动沙丘的水分对外补给量并未表现出最小值。

## 4.2 植被特征与沙丘对外水分补给能力的关系

在沙丘水文过程中,植被是不可忽视的关键因素,可对沙丘水分运移及水分循环过程产生诸多影响。①植被影响沙丘土壤含水量的变化。冯起等<sup>[23]</sup>的研究表明,植被的作用使沙丘1—2 m沙层湿度平均减小1%—2%;赵文智<sup>[4]</sup>的研究表明,人工植被的建立增强了沙地土壤水分在水平与垂直格局上的异质性。②植被影响沙丘水分入渗及运移过程。Gurnell等<sup>[24]</sup>的研究表明,植被特征与动态对水分的入渗过程产生直接影响;王新平等<sup>[18]</sup>的研究表明,沙丘植被会对土壤水分运动产生尤为明显的制约作用。③植被影响沙丘深层土壤水分渗漏量。李新荣等<sup>[25]</sup>的研究表明,固沙植被利用沙丘中下渗的水资源,减少了土壤深层水分渗漏量;冯伟等<sup>[26]</sup>的研究表明,水分深层渗漏主要受植被覆盖的影响,且沙丘植被盖度>45%时深层渗漏量不超过同期降水量的2.0%。④植被影响地下水储量。尹立河等<sup>[27]</sup>的研究表明,在裸土条件下,降水对地下水的年补给量为82—333 mm,但在植被覆盖的情况下,地下水的补给量几乎为0;Huang等<sup>[28]</sup>的研究表明,受造林活动影响,人工林的地下水补给量可减至裸沙地的67%,甚至于10%以下。

植被与沙丘水分间的这种特殊关系,改变了沙丘的水分运移与循环过程,从而影响了沙丘的水分补给作用,使得不同植被特征沙丘的水分补给作用表现出差异。本项研究也同样间接证实了沙丘植被对沙丘水分运移与循环过程的影响,沙丘植被改变了沙丘水分的再分配过程,随着植被盖度的增加,其消耗的水量逐渐增加,从而降低了沙丘对外的水分补给量,进而调控沙丘向丘间地水体的补给能力,使不同植被盖度沙丘单位面积水分对外补给能力表现为流动沙丘>半固定沙丘>固定沙丘。

## 4.3 沙丘植被特征与丘间地水体关系对流动沙丘生物治理模式构建的实践意义

研究人工固沙植被生长条件下的水文循环规律,探讨水分平衡条件下的植被优化配置模式,对于现有植被的合理经营与未来稳定固沙植被的科学建设具有重要的理论和实践意义<sup>[3]</sup>。

目前生产上主要应用的固沙模式是对流动沙丘开展生物固沙,固沙工程实施后虽然产生了较好的固沙效果,有效遏制了沙漠化的发展,促进了局地生态恢复<sup>[29]</sup>;但大规模的固沙造林均以完全固定

流沙为第一目的,大都遵循构建大覆盖度固沙植被的标准,致使植被对沙区水文过程影响过大,导致沙区水分失衡、水体减少或消失,不利于沙丘生态系统的可持续发展。针对上述问题,很多学者对此开展了研究,讨论流动沙地是应完全治理,还是保留一定的流沙面积将其作为水分补给区的问题。如闫德仁<sup>[30]</sup>提出了流动沙丘固沙的同时还需保持一定的沙地景观,发挥沙丘的集水作用,蓄集降水,补充地下水资源;杨文斌等<sup>[31]</sup>提出了造林植被盖度维持在15%—25%的低密度固沙模式;阿拉木萨等<sup>[32]</sup>提出了采取间伐的方式来控制成龄固沙植被密度,维持区域水分平衡;对流动沙丘治理模式的探讨可在维持沙区生态系统水资源平衡的同时,实现治理流沙、减少危害的目标。

沙区地表水体的稳定存在是沙区生态系统稳定持久的重要标志。沙丘的水分供给过程是沙区地表水体重要的水分补给来源,而沙丘表面的固沙植被直接影响着沙丘的对外水分供给能力。如何选择适宜的沙丘植被盖度以维持沙丘的水分供给能力,且同时保证有效的固沙效果是本研究的关注重点。本项研究着眼于沙区地表水体与固沙植被关系,明确了在流动沙丘向固定沙丘的转换过程中沙丘水分的对外补给能力的变化特征,建立了沙丘对外水分补给量与植被盖度、降水量、气温的模拟模型关系。该模型可预测及估算不同植被盖度沙丘的水分对外补给量,依据此模型模拟结果,我们可以优选适宜的固沙植被盖度,既可维持沙丘的水分供给能力,又能保证有效的固沙效果,以建立可持续的流动沙丘治理模式,从而避免沙区出现固沙植被密度过大、水分失衡等现象,始终让沙丘发挥沙地“水资源库”作用,有利于沙丘生态系统水资源的可持续利用,促进沙区生态系统得以健康稳定发展。

## 5 结论

沙丘植被盖度影响沙丘水分对外补给能力,随着固沙植被盖度增加,单位面积沙丘对外补给能力降低,表现为流动沙丘(58.25 mm)>半固定沙丘(24.75 mm)>固定沙丘(14.87 mm),补给量占同期降水比表现为流动沙丘(21.39%)>半固定沙丘(9.09%)>固定沙丘(5.46%)。

生长季内流域降水补给量、植被盖度、气温显著影响沙丘对丘间低地水体的水分补给,补给量与流域降水量显著正相关,与植被盖度、气温显著负

相关。

可维持沙丘-水体水量平衡的回归模型表达式为  $Y=1052.737+0.1X_1-11.459X_2-37.585X_3$ ,  $R^2=0.641$ , 式中  $Y$  为沙丘水分对外补给量,  $X_1$  为沙丘降水量,  $X_2$  为植被盖度,  $X_3$  为平均气温。可根据模型计算及预测沙丘水分对外补给量, 为流动沙丘生物治理模式的合理选择提供借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 赵文智, 周宏, 刘鹤. 干旱区包气带土壤水分运移及其对地下水补给研究进展[J]. 地球科学进展, 2017, 32(9): 908-918.
- [2] Stratford C J, Robins N S, Clarke D, et al. An ecohydrological review of dune slacks on the west coast of England and Wales [J]. *Ecohydrology*, 2013, 6(1): 162-171.
- [3] 崔向慧. 干旱半干旱沙区人工植被与土壤水分环境相互作用关系研究进展[J]. 世界林业研究, 2010, 23(6): 50-54.
- [4] 赵文智. 科尔沁沙地人工植被对土壤水分异质性的影响[J]. 土壤学报, 2002(1): 107-113.
- [5] 张定海, 李新荣, 陈永乐. 腾格里沙漠人工植被区固沙灌木影响深层土壤水分的动态模拟研究[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3273-3279.
- [6] Kizito F, Dragila M I, Senè M, et al. Hydraulic redistribution by two semi-arid shrub species: implications for Sahelian agro-ecosystems[J]. *Journal of Arid Environments*, 2012, 83(4): 69-77.
- [7] Kim S, Sun H, Jung S. Configuration of the relationship of soil moistures for vertical soil profiles on a steep hillslope using a vector time series model[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 399(3/4): 353-363.
- [8] 刘新平, 赵哈林, 何玉惠, 等. 生长季流动沙地水量平衡研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(4): 663-667.
- [9] 王鸣远, 杨素堂. 沙地灌木林群落土壤水分平衡关系的研究[J]. 水土保持学报, 2004(6): 171-174.
- [10] 黄刚, 赵学勇, 黄迎新, 等. 科尔沁沙地不同地形小叶锦鸡儿灌丛土壤水分动态[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3): 555-561.
- [11] 冯伟. 毛乌素沙地东北缘土壤水分动态及深层渗漏特征[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015.
- [12] 包永志, 段利民, 刘廷玺, 等. 小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla*) 群落蒸散发模拟[J]. 中国沙漠, 2019, 39(4): 177-186.
- [13] 包永志. 科尔沁沙地不同地貌-土壤-植被组合单元蒸散发模拟及组分拆分研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [14] 张志山, 王新平, 李新荣, 等. 沙漠人工植被区土壤蒸发测定[J]. 中国沙漠, 2005, 25(2): 101-106.
- [15] 吴尧. 科尔沁沙丘-草甸相间地区植被蒸腾量变化规律研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- [16] 包永志, 刘廷玺, 段利民, 等. 基于 Shuttleworth-Wallace 模型的科尔沁沙地流动半流动沙丘蒸散发模拟[J]. 应用生态学报, 2019, 30(3): 867-876.
- [17] Yang W, Tang J, Liang H, et al. Deep soil water infiltration and its dynamic variation in the shifting sandy land of typical deserts in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(8): 1816-1824.
- [18] 王新平, 张志山, 张景光, 等. 荒漠植被影响土壤水文过程研究述评[J]. 中国沙漠, 2005, 25(2): 54-59.
- [19] 原鹏飞, 丁国栋, 王炜炜, 等. 毛乌素沙地降雨入渗和蒸发特征[J]. 中国水土保持科学, 2008(4): 23-27.
- [20] Abu-Awwad A M. Water infiltration and redistribution within soils affected by a surface crust [J]. *Journal of Arid Environments*, 1997, 37(2): 231-242.
- [21] Crawford R M M. Eco-hydrology: plants and water in terrestrial and aquatic environments [J]. *Journal of Ecology*, 2000, 88(6): 1095-1096.
- [22] Andraski B J. Soil-water movement under natural-site and waste-site conditions: a multiple-year field study in the Mojave Desert, Nevada [J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(8): 1901-1916.
- [23] 冯起, 程国栋. 我国沙地水分分布状况及其意义[J]. 土壤学报, 1999(2): 225-236.
- [24] Gurnell A M, Hupp C R, Gregory S V. Linking hydrology and ecology [J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14(16/17): 2813-2815.
- [25] 李新荣, 张志山, 王新平, 等. 干旱区土壤植被系统恢复的生态水文学研究进展[J]. 中国沙漠, 2009, 29(5): 845-852.
- [26] 冯伟, 杨文斌, 唐进年, 等. 中国沙漠(地)深层渗漏量及动态特征[J]. 中国沙漠, 2015, 35(5): 1362-1370.
- [27] 尹立河, 王晓勇, 黄金廷, 等. 干旱区植被盖度增加对降水入渗补给地下水的影响: 试验研究与数值模拟[J]. 地质通报, 2015, 34(11): 2066-2073.
- [28] Huang T, Pang Z, Yang S, et al. Impact of afforestation on atmospheric recharge to groundwater in a semiarid area [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125(9): e2019JD032185.
- [29] 李新荣, 张志山, 黄磊, 等. 我国沙区人工植被系统生态-水文过程和互馈机理研究评述[J]. 科学通报, 2013, 58(增刊1): 397-410.
- [30] 闫德仁. 内蒙古沙漠化土地成因与防治[J]. 内蒙古环境保护, 2001(1): 35-38.
- [31] 杨文斌, 冯伟, 李卫. 低覆盖度治沙的原理与模式[J]. 防护林科技, 2016(4): 1-5.
- [32] 阿拉木萨, 裴铁璠, 蒋德明. 科尔沁沙地人工固沙林土壤水分与植被适宜度探讨[J]. 水科学进展, 2005(3): 426-431.

## Effects of dune vegetation on water dynamics in interdune lowland in the Horqin Sandy Land

Yin Jiawang<sup>1,2</sup>, Ala Musa<sup>1</sup>, Su Yuhang<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** In the process of shifting dune to fixed dune by constructing sand-fixing vegetation, vegetation changed the water redistribution process of dune, affected the hydrological regulation function of dune, and may even cause the imbalance of water resources in dune ecosystem. In order to explore the influence of vegetation on the hydrological mediation function of dunes, this experiment took dunes with different vegetation coverage and dune interdune water bodies in Horqin Sandy Land as the research objects. In the growing season of 2021, dynamic observations of dune vegetation coverage, characteristics of interdune lowland water and meteorological factors were carried out to clarify the impact of dune vegetation on the interdune lowland water. The results showed that: (1) Dune vegetation coverage affected the external water recharge capacity of dunes. With the increased of sand vegetation coverage, the external water recharge capacity of dunes per unit area decreased, in the order of mobile dune (58.25 mm) > semi-fixed dune (24.75 mm) > fixed dune (14.87 mm), and the proportions of precipitation in the same period were 21.39%, 9.09% and 5.46%, respectively. (2) In the growing season, precipitation recharge, vegetation coverage and air temperature significantly affected the water replenishment amount of dune to the interdune lowland water body, which was significantly positively correlated with precipitation recharge, and significantly negatively correlated with dune coverage and air temperature. (3) Based on the principle of water balance, the relationship model between external water replenishment amount of dune and influencing factors is deduced, and the expression is as follows:  $Y=1052.737+0.1X_1-11.459X_2-37.585X_3$ ,  $R^2=0.641$ , where  $Y$  is the external water replenishment amount of dune,  $X_1$  is the precipitation replenishment amount of the catchment,  $X_2$  is vegetation coverage,  $X_3$  is the average temperature. The model can be used to predict the external water supply of dune, which can provide a basis for the choice of mode for control mobile dune.

**Key words:** sandy land; water transport; vegetation coverage; precipitation recharge; water balance