

科尔沁沙地流动沙丘土壤水分空间变化特征分析^①

阿拉木萨¹, 周丽芳^{1,2}

(1 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 应用地统计学原理, 分析了科尔沁沙地流动沙丘不同部位和深度土壤水分的空间变化特点。结果表明, 流动沙丘土壤水分空间分布呈现明显的空间异质性, 土壤水分在流动沙丘的不同坡面和同坡面的不同区域呈现明显的不均匀分布特征, 表层(0~40 cm)和浅层(40~100 cm)土壤水分是此空间差异的主要来源, 其空间分布变异性明显高于深层(100~200 cm)土壤; 半方差分析结果也显示出表层和浅层土壤水分的空间异质性组成主要由随机因素引起, 具有相对较小的变程, 而深层土壤水分主要受到其自身土壤物理组成性质的影响, 具有较强的空间自相关性, 具有较大的变程, 二者空间分布特点存在明显差异。流动沙丘土壤水分空间分布特点的明确, 对阐述固沙先锋植物的侵入和定居格局具有现实的指导意义, 也为人工固沙植被的建立提供理论指导。

关键词: 流动沙丘; 土壤水分; 空间异质性; 半方差分析

中图分类号: S152.7

干旱、半干旱沙丘生态系统中降水有限、蒸发强烈, 水分是沙丘植物生存、生长的制约因子之一。沙丘土壤中的水分变化主要表现在土壤的浅层区域, 其影响范围多在 0~100 cm 深度之间^[1-2]。土壤水分主要受到降水、地表植被和地形等因素的影响, 其中降水是影响流动沙丘浅层土壤水分的主要因子^[3]。土壤水分时间变化与降雨分布呈现显著的相关性^[4]。沙丘深层的土壤水分通常能够维持在一个相对稳定的状态, 其水分含量主要决定于沙丘土壤的物理构成, 变化范围在 3%~4% 之间^[5]。很多研究者阐述了流动沙丘土壤水分的季节变化特点和地形变化特点, 流动沙丘不同坡向的土壤水分含量存在差异^[6], 以沙丘迎风坡含水量较高, 比其他坡向高 0.65%~0.90%, 其中比落沙坡高 1.80%~2.50%^[7]; 但以往的研究工作都是在沙丘表面设置样带取样, 仅能说明流动沙丘特定点或带的土壤水分状况^[1,4,7]。也有少数研究者在相当有限的空间中研究了流动沙丘的土壤水分空间变化特点^[8]。流动沙丘土壤水分在空间分布上有何特点? 对植物产生直接影响的浅层土壤水分的空间分布特点等方面的研究还存在很大的深入空间。本文通过对科尔沁沙地流动沙丘土壤水分空间变化的研究, 试图明确流动沙丘浅层土壤水分具有独特的空间分布特点, 可能对固沙先锋植物的侵入和定居产生重要的影响作用, 为阐

明固沙先锋植物空间分布格局提供理论依据。

1 试验地概况和方法

1.1 实验地概况

试验在中国东北科尔沁沙地西部乌兰敖都试验站进行(E119°39', N43°02'), 行政区划隶属于内蒙古自治区赤峰市翁牛特旗。该地区年均风速 4.2 m/s, 7~8 级大风平均每年出现 65~70 天, 年平均气温 6.2℃, 无霜期 140 天。年平均降水量 284.4 mm ± 82.4 mm (1982—2003 年), 年降水量最低值为 136.9 mm, 平均干燥度为 1.99, 年内降水分布不均匀, 6—8 月份降水占全年降水量的 70% 以上, 春季 3—5 月降水仅占全年降水的 10%, 年蒸发潜力为 2 000~2 500 mm。当地沙丘起伏, 坳甸相间, 为广阔的沙地景观, 主要生境类型为流动和半流动沙丘、固定沙丘、沙沼地、丘间低地和石质残丘。

试验样地设置在中国科学院沈阳应用生态研究所乌兰敖都试验站, 试验区域包括流动沙丘、固定沙丘、半固定沙丘及丘间地, 本试验选择其中一个典型的流动沙丘作为研究对象, 该流动沙丘长约 230 m, 宽约 160 m, 迎风坡平均坡度约 20°, 流动沙丘上零星分布有乌丹蒿(*Artemisia wudanica*)、虫实(*Corispermum thelegium* Kitag)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、

①基金项目: 国家自然科学基金项目(30671723、40971167)资助。

作者简介: 阿拉木萨(1969—), 男, 内蒙古人, 博士, 副研究员, 主要从事沙地水资源、水环境及荒漠化防治研究。E-mail: alamusa@tom.com

狗尾草 (*Setaria. v iridis*) 等固沙先锋植物, 盖度 < 5%; 流动沙丘北侧 (上风方向) 为一个丘间地, 面积约 400 m × 300 m, 植被茂盛, 平均盖度达到 90% 以上, 物种数目达到 23 种, 其中包括主要的固沙先锋植物种, 是流动沙丘先锋植物的重要种子来源地。

1.2 测定方法

试验在当地有效降雨 (> 5 mm 降水) 后的 20 天左右进行, 以消除降水对土壤水分的影响作用。2008 年 7 月 22—26 日期间, 在典型流动沙丘上设置样地,

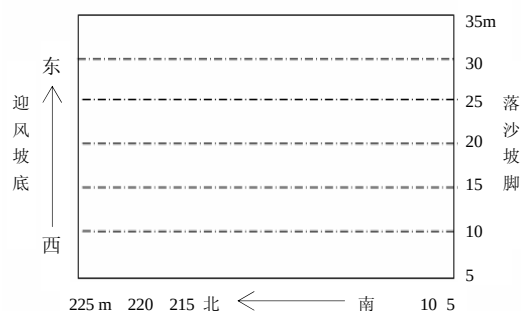
样地规格为: 225 m (南北) × 35 m (东西), 样地范围包括流动沙丘从迎风坡底到落沙坡脚的全部区域, 流动沙丘不同部位机械组成如表 1 所示。在样地内部设置 7 条样带, 样带间距 5 m, 样带上每间隔 5 m 设置一个取样点, 形成 5 m × 5 m 的网格状取样格局, 每个样点分层 (0、10、20、……200 cm) 测定 0 ~ 200 cm 深度的土壤水分含量, 合计样点数量为 315 个 (图 1)。土壤水分测定采用 TDR 仪, 测定结果为土壤体积含水量。

表 1 流动沙丘不同部位土壤机械组成

Table 1 Soil particle-size-distributions at different positions along active sand dune

沙丘部位	各粒径组成土壤占风干土重百分比 (%)				
	2.0 ~ 1.0 mm	1.0 ~ 0.5 mm	0.5 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.1 mm	< 0.1 mm
迎风坡中部	0.00	0.15	20.70	70.05	9.10
迎风坡上部	0.04	0.26	13.60	68.70	17.40
沙丘顶部	0.00	0.60	24.80	63.90	10.70
落沙坡中部	0.05	0.60	38.50	51.15	9.70

注: 表中数值为 0 ~ 100 cm 深度土壤平均值。



(注: - - - 为南北走向样线)

图 1 流动沙丘土壤水分观测样地取样示意图

Fig. 1 Sketch map of observation points of soil water in active sand dune

1.3 分析方法

数据分析采用 SPSS11.0 和 Office Excel 软件进行, 制图应用 Surfer 8.0 软件。

半方差分析采用 GS+5.0 软件, 块金值 (C_0) 表示随机部分的空间异质性, 较大的块金方差表明较小尺度上的某种过程不容忽视。基台值 ($C+C_0$) 又称为平顶值或顶坎值, 基台值越大表示总的空间异质性程度越高, 是半变异函数达到的极限值。块金值和基台值之比 ($C_0/(C+C_0)$) 反映块金方差占总空间异质性变异的大小, $C_0/(C+C_0)$ 反映随机变异占总变异的大小, 如果该比值较高, 说明由随机部分引起的空间异质程

度较高; 相反, 则由空间自相关部分引起的空间异质性程度较大; 如果该比值接近 1, 则说明该变量在整个尺度上具有恒定的变异。 $C_0/(C+C_0)$ 的比值可表示系统变量的空间相关性程度, 比值 < 25%、25% ~ 75%、> 75% 分别表示变量的空间相关性较强、中等、较弱^[9]。

2 结果与分析

2.1 流动沙丘土壤贮水量空间分布特点

流动沙丘 0 ~ 200 cm 深度土壤平均贮水量为 67.78 mm ± 24.08 mm, 变化范围 3.48 ~ 111.73 mm 之间, 极差达到 108.25 mm。流动沙丘土壤贮水量表现出明显的空间变异性, 空间分布表明 (图 2), 流动沙丘土壤贮水量存在坡向间的差异, 其中迎风坡 > 落沙坡, 其平均贮水量分别为: 53.78 mm 和 76.64 mm。同时, 在相同的坡向上, 土壤贮水量较低的区域主要分布在落沙坡的中上部区域和中下部区域, 贮水量较高的区域主要分布在迎风坡面, 且分布较为均匀, 迎风坡较大区域土壤贮水量保持在 80 ~ 100 mm 之间。将流动沙丘落沙坡和迎风坡坡面分为东西两侧分析表明, 土壤贮水量以沙丘东侧区域较高, 西侧区域较低, 土壤贮水量最高区域均分布在沙丘东侧区域。这种土壤水分空间分布格局的形成与沙丘局部的土壤结构组成、风力作用、光照、温度等因素有一定关系, 其中落沙坡因其土壤物理粒径组成比迎风坡大, 相应的土壤持水

能力下降, 导致整体土壤贮水量要低于迎风坡区域。同时, 迎风坡因风力的作用, 表层土壤风蚀强度大, 沙丘表层“干沙层”相对较薄^[10], 表层土壤水分含量相对高于落沙坡; 落沙坡因受到风力影响有限, 且

同时光照强度大, 地表温度高, 其表层“干沙层”厚度相对较厚, 浅层土壤水分较低。东西方向变化产生的差异可能是因东侧风蚀小、温度低等原因引起的。

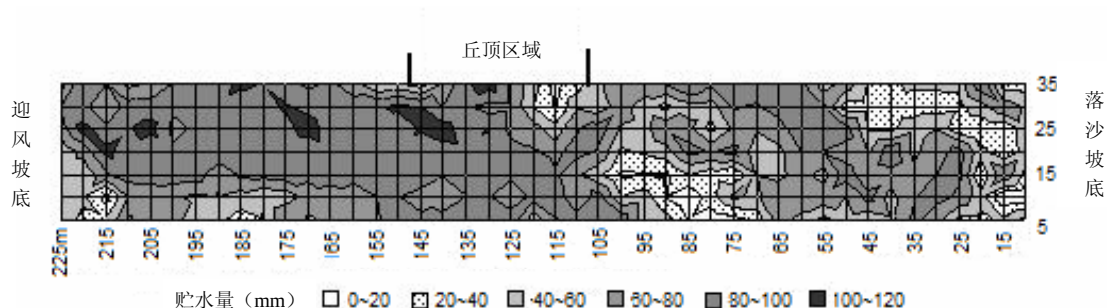


图 2 流动沙丘 0~200 cm 深度土壤贮水量比较

Fig. 2 Soil water content at 0 - 200 cm depth in active sand dune

流动沙丘土壤贮水量垂直变化特点可分为 3 个层次, 即表层 (0~40 cm)、浅层 (40~100 cm) 和深层 (100~200 cm), 表层土壤水明显受地表蒸发和降水的影响; 浅层土壤水分主要受较大降水和植物耗水的影响; 深层土壤水分相对比较稳定, 但也会受到持续强降水的影响。比较 3 个层次的土壤贮水量发现 (图

3), 0~40 cm 层次土壤贮水量 $10.60 \text{ mm} \pm 4.85 \text{ mm}$, 变异系数 45.75%, 极差达到 28.05 mm; 40~100 cm 层次土壤贮水量 $21.10 \text{ mm} \pm 9.40 \text{ mm}$, 变异系数 44.54%, 极差为 37.47 mm; 100~200 cm 层次土壤贮水量 $35.70 \text{ mm} \pm 13.90 \text{ mm}$, 变异系数 38.93%, 极差为 60.77 mm。

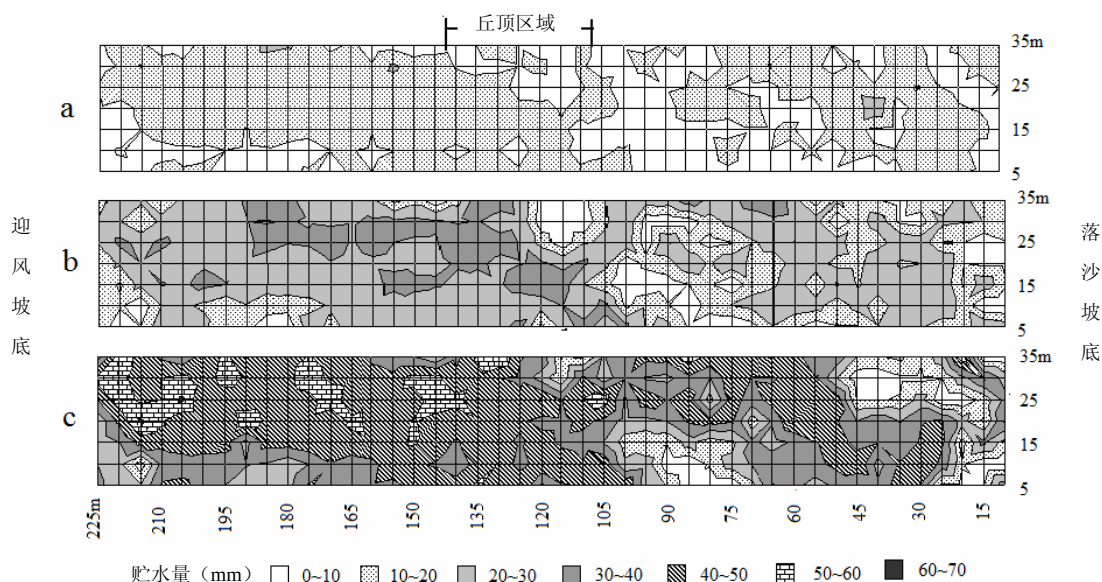


图 3 流动沙丘土壤贮水量分层比较 (a, 0~40 cm; b, 40~100 cm; c, 100~200 cm)

Fig. 3 Comparison of soil water storages at different layers in active sand dune

2.2 流动沙丘土壤贮水量半方差分析

通过对流动沙丘表层 (0~40 cm)、浅层 (40~100

cm)、深层 (100~200 cm) 以及 0~200 cm 深度土壤贮水量的半方差分析表明, 不同深度流动沙丘土壤贮

水量空间分布特点差异明显,拟合模型和相关参数如表2所示。其中表层和浅层土壤水分空间分布特点相近,在样本间的最小距离尺度内(5 m),空间异质性组成主要由随机因素引起,占总空间异质性的99%和98%,其变程均为170.1 m。对于深层土壤贮水量,空间异质性的组成与表层和浅层土壤差异明显,其随机因素引起的空间异质性仅为33%,明显小于表层和浅层土壤贮水量的异质性组成结构,且其变程显著大于前者,达到了366 m。而对于整体的0~200 cm深度土壤贮水量分析表明,其随机因素引起的空间异质性占全部异质性的44%,变程为50.3 m,介于表层、浅层与深层之间。

表2 流动沙丘土壤贮水量的半方差模型参数

Table 2 Parameters of semivariograms analysis models of soil water storage in active sand dune

深度范围 (cm)	模型	C_0	C_0+C	C_0/C_0+C	A_0
0~40	线性模型	22.66	22.76	0.99	170.1
40~100	线性模型	83.60	85.24	0.98	170.1
100~200	球面模型	113.40	342.20	0.33	366.0
0~200	指数模型	312.00	709.10	0.44	50.3

3 讨论

3.1 流动沙丘土壤水分分布存在明显的空间异质性

流动沙丘土壤水分空间变化因坡向、土壤深度表现出不同的变化特点。研究结果表明,流动沙丘的迎风坡土壤贮水量明显高于落沙坡,沙丘东部区域明显高于西部区域。通过对土壤分层分析发现,这种差异的产生源于各个层次的土壤贮水量的差异,在0~40 cm和40~100 cm、100~200 cm深度的各层次土壤贮水量中均存在明显的空间异质性。表层和浅层土壤贮水量变异系数高于深层土壤,0~40 cm和40~100 cm深度土壤贮水量变异系数均在45%左右,100~200 cm深度土壤贮水量变异系数为38%左右,深层土壤水分相对变化程度小于浅层土壤水分。流动沙丘土壤水分变化量较大的范围在地表0~100 cm左右深度,其下层土壤水分状况相对保持稳定状态,并不明显受到降水和微地形、坡位和土壤物理结构的明显影响。其他相关研究结果也表明,流动沙丘表层0~10 cm含水量变异系数到达51%,10~80 cm变异系数为40%,80~120 cm土壤水分保持稳定状态^[8]。空间分析也表明,表层(0~40 cm)和浅层(40~100 cm)土壤贮

上述结果的产生与土壤贮水量的主要影响因素密切相关,对于表层和浅层土壤水分,其主要受到大气和降水的显著影响,土壤水分变化剧烈,波动性较大,故二者的半方差分析结果相近,引起土壤水分空间异质性的主要原因是随机性的降水和大气环境引起的,较小的变程也说明了降水和大气环境对土壤水分的影响还受到其他(如微地形、坡向等)因素的影响。而深层土壤水分主要受到其自身土壤物理组成性质的影响,具有较强的空间自相关性,而且具有较大变程,也就说明在较大范围内,流动沙丘深层土壤水分可以维持一种较为稳定的状态。

水量空间分布特点相似,空间自相关变化特点也相近,在取样距离内,其空间变异产生主要为随机因素引起,空间自相关性很低。深层(100~200 cm)土壤水分空间变异的自相关程度较高,具有中等程度的空间自相关性。

流动沙丘浅层土壤水分不仅受到降水和大气环境的影响,同时也受到微地形地势的影响。落沙坡土壤水分含量明显低于同期的迎风坡。王志等^[11]在毛乌素沙地南缘研究表明,沙丘各部位水分由高到低依次为丘间>背风坡>迎风坡>丘顶,流动沙丘春、秋季背风坡含水量高于迎风坡,夏季由于干沙层的阻断作用,迎风坡土壤水分高于背风坡。本文中研究结果与其夏季的结果相同,这与本观测时间在7月份是相吻合的。在迎风坡区域内土壤水分也表现出差异,以沙坡底部水分条件最好,中部其次,顶部最差。表层和浅层土壤水分状况在流动沙丘迎风坡和落沙坡的差异主要因其物理结构差异而产生。落沙坡面土壤主要为风积沙,土壤结构较为松散,土壤颗粒粒径也大于迎风坡面,其浅层土壤水分持水能力有限,下层土壤水分也很难通过毛管作用上行到表层土壤中;另外,这种差异的产生也与坡向表面的风蚀程度有关,迎风坡通常承受

较大的地表风,地表风蚀程度较高,引起表层干燥沙层的吹蚀,因而在部分区域表现出较高的表层土壤水分含量。落沙坡主要受到风积沙的影响,表层干燥沙层不断增厚,造成表层土壤水分状况的干燥化。秦佳琪等^[12]研究也表明,流动沙地迎风坡含水量呈现坡上部<坡中部<坡下部的变化趋势。

3.2 流动沙丘土壤水分空间分布对固沙先锋植物侵入过程产生影响

固沙先锋植物的侵入过程主要受到浅层土壤水分状况的影响,其中表层土壤水分状况对植物侵入过程中的种子萌发和幼苗定居格局产生重要影响^[13]。流动沙丘是植被退化的极端状况,先锋植物侵入流动沙丘过程中会遇到两个关键问题^[14],一是流动沙丘表面基质的不稳定性干燥多风环境使得大部分植物的繁殖体难以入侵定居^[15];二是极端贫乏的养分条件不足以维持植物的生长发育。先锋植物需要具备一些专有的特性才能在流动沙丘表面定居,需要有适应沙丘表面的繁殖体定居方式,种子胚根快速的生长速度,及时进入深层土壤中以抵御干旱和风蚀的危害^[16-17]。通过本项研究发现,流动沙丘迎风坡表层土壤水分在部分区域表现出较高的水平,该区域多数呈现出条块状分布,在这个区域内,土壤 0~40 cm 深度中贮水量达到 10~20 mm 水平,个别区域甚至超过了 20 mm,而且这是在没有降水 20 天以后观测得到的结果,这为先锋植物种子的萌发和定居创造了条件。通过实际调查也发现了与之对应的先锋植物分布格局,野外调查发现,在植物侵入流动沙丘过程中,植物的空间分布表现出很多独特性。何兴东等^[18]在科尔沁沙地观察发现,天然形成的固沙植物在流动沙丘上呈现同心圆的环状分布。我们观察发现,先锋植物的侵入过程常常表现出条带状分布特点,在沙丘坡脚处的植物侵入过程不是表现出“全面推进式”的侵入趋势,而是表现出几条近似平行的纵列式的突进方式,多数先锋植物集中分布在少数的几条条带状区域。针对这种侵入方式,有些研究认为是土壤种子库的分布特点造成的,也有些人认为是地形特点的空间差异造成的,还有人认为是土壤水分的空间分布引起的,或者是上述多个因素共同作用下形成的^[18]。从本研究结果分析表明,土壤浅层水分分布状况与植物侵入定居格局的基本吻合,说明了流动沙丘浅层土壤水分的空间分布格局对固沙先锋植物的分布格局产生影响。

参考文献:

- [1] 何志斌, 赵文智. 半干旱地区流动沙地土壤湿度变异及其对降水的依赖. 中国沙漠, 2002, 22(4): 359-363
- [2] Berndtsson R, Nodomi K. Soil water and temperature patterns in an arid desert dune sand. Journal of hydrology, 1996, 185: 221-240
- [3] 王新平, 张志山, 张景光, 李新荣, 潘颜霞, 康尔泗. 荒漠植被影响土壤水文过程研究述评. 中国沙漠, 2005, 25(2): 196-201
- [4] 刘新平, 张铜会, 赵哈林, 赵学勇, 移小勇. 科尔沁沙地流动沙丘土壤水分和特征常数的空间变化分析. 水土保持学报, 2005, 19(3): 156-159
- [5] 张晓珂, 董锡文, 梁文举, 蒋德明, 姜思维. 科尔沁沙地流动沙丘土壤线虫群落组成与多样性研究. 土壤, 2009, 41(5): 749-756
- [6] 吕贻忠, 胡克林, 李保国. 毛乌素沙地不同沙丘土壤水分的时空变异. 土壤学报, 2006, 43(1): 152-154
- [7] 叶冬梅, 秦佳琪, 韩胜利, 田有亮, 郭连生. 乌兰布和沙漠流动沙丘不同部位水分动态研究. 干旱区研究, 2005, 22(3): 367-370
- [8] 葛岩, 王保泽, 李春龙, 冯琳, 佟威. 辽西北沙地流动沙丘土壤水分时空变化特征研究. 中国农学通报, 2007, 23(6): 634-637
- [9] 葛剑平, 郭海燕, 仲莉娜. 地统计学在生态学中的应用(1)——基本理论和方法. 东北林业大学学报, 1995, 23(2): 88-94
- [10] 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. 土壤, 2008, 40(1): 145-148
- [11] 王志, 王蕾, 刘连友, 哈斯, 彭如燕, 刘天科, 郑秋红, 庄艳美. 毛乌素沙地南缘沙丘水分的时空分布特征. 干旱区研究, 2007, 24(1): 61-65
- [12] 秦佳琪, 托雅, 叶冬梅, 何炎红, 田有亮, 郭连生. 乌兰布和沙漠不同沙地类型土壤水分特征的研究. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2004, 25(2): 23-26
- [13] 阿拉木萨, 裴铁藩, 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. 水科学进展, 2005, 16(3): 426-431
- [14] 曹成有, 蒋德明, 朱丽辉, 南寅镐. 科尔沁沙地草甸草场退化的原因与植物多样性变化. 草业学报, 2006, 15(3): 18-26
- [15] 刘志民, 蒋德明, 阎巧玲, 李雪华, 李荣平, 骆永明, 王红梅. 科尔沁草原主要草地植物传播生物学简析. 草业学报, 2005, 14(6): 23-33
- [16] 石莎, 冯金朝, 邹学勇. 不同地形条件对沙漠植物生长和沙地土壤水分的影响. 干旱区地理, 2007, 30(6): 846-851
- [17] 李胜功, 常学礼, 赵学勇. 沙蓬-流动沙地先锋植物的研究. 干旱区资源与环境, 1992, 6(4): 63-70
- [18] 何兴东, 高玉葆, 赵文智, 丛自立. 科尔沁沙地植物群落环状分布成因地统计学分析. 应用生态学报, 2004, 15(9): 1512-1516

Spatial Variation of Soil Water Storage (SWS) on Active Dune in Horqin Sandy Land

A Lamusa¹, ZHOU Li-fang^{1, 2}

(1 *Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: A typical active dune in Horqin sandy land was selected as the study target and the spatial variation of soil water storage (SWS) at different depths was analyzed by semi-variograms analysis method on the base of full-scale sampling method. The research showed that SWS showed obvious spatial variation characteristics not only between different slopes but also within the same slope, which could be attributed to the spatial variation of SWS of surface layer (0-40 cm) and shallow layer (40-100 cm), which were significantly higher than the deep layer (100-200 cm). The ranges of spatial heterogeneity of SWS of surface layer and shallow layers were less and were mainly resulted from stochastic factor, while SWS of deep layer was mainly affected by its physical structure, which had strong spatial dependence and higher variation range. It is practically significant to determine the pattern of SWS spatial variety of active dune in explaining the incursion and establishment pattern of pioneer plants for the establishment of manual sand stabilization.

Key words: Active dune, Soil water storage, Spatial heterogeneity, Semivariograms analysis