

宁夏白芨滩固定沙丘浅层土壤水分时空变异*

秦海琴¹, 展秀丽^{1**}, 张 萍²

(1. 宁夏大学 资源环境学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学 农学院, 宁夏 银川 750021)

摘要:【目的】揭示沙漠化治理过程中土壤含水量的动态变化规律及其在小尺度上的空间变异特征, 进而为该地区防沙治沙及植被的可持续发展提供科学指导。【方法】采用烘干法和 TDR300 对宁夏白芨滩防沙治沙区浅层土壤含水量进行监测, 应用地统计学的理论与方法研究该区域浅层土壤水分季节动态变化和小尺度空间变异特征。【结果】(1) 10 cm 和 30 cm 的土壤含水量变异系数均在 0.01~1 之间, 属中等变异; 不同时期的 10 cm 及 30 cm 深处的土壤含水量均表现出强烈的空间自相关; 4、6 和 9 月的土壤水分 (10 cm) 的变异函数为球状模型, 8 月 (10 cm) 为指数模型, 30 cm 的土壤水分变异函数均为指数模型。(2) 不同时期的表层 (10 cm) 土壤含水量空间分布表现为 4、6 和 9 月空间分布较相似, 整体分布相对均匀; 8 月土壤含水量较 6 月增加, 空间分布表现为从北向南降低, 其中西北角土壤含水量最高; 9 月研究区内土壤表层含水量与其他时期相比最高。【结论】10 cm 和 30 cm 土壤含水量均属中等变异, 不同时期含水量均表现出强烈的空间自相关。10 cm 和 30 cm 水分分布格局均受降水影响, 9 月土壤含水量最高。研究区不同时期 10 cm 土壤含水量空间分布特征明显不同, 30 cm 深处的土壤含水量随季节发生变化, 两者空间分布特征均受地形、季节影响。

关键词: 土壤含水量; 季节变化; 空间分布; 宁夏白芨滩

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1004-390X (2020) 01-0156-08

Temporal and Spatial Variation of Soil Moisture in the Shallow Dune Fixed on Baijitan in Ningxia

QIN Haiqin¹, ZHAN Xiuli¹, ZHANG Ping²

(1. College of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: [Purpose] The study would be expected to reveal more accurately the dynamic change rule of soil water content and the characteristics of small scale spatial variation in the process of desertification combating and provide a scientific reference for the sustainable development of sand combating and vegetation in this area. [Method] In this study, the soil moisture content was monitored by oven drying method and TDR300, by applying statistics theory and methods studied on the seasonal dynamics and small scale spatial variation of soil moisture in the shallow soil. [Result] (1) The variation coefficients of soil moisture content were between 0.01-1 which was moderate variation. The soil moisture content showed strong spatial autocorrelation both the depth of 10 cm and 30 cm, respectively. The variogram of soil moisture (10 cm) was spherical mode in April, June and September.

收稿日期: 2019-04-28

修回日期: 2019-11-11

网络首发时间: 2020-01-15 10:37:21

*基金项目: 宁夏自然科学基金 (2018AAC03040)。

作者简介: 秦海琴 (1995—), 女, 甘肃平凉人, 在读硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: 18895086372@163.com

**通信作者 Corresponding author: 展秀丽 (1983—), 女, 甘肃靖远人, 博士, 副教授, 主要从事防沙治沙与生态恢复研究。E-mail: zhanxiuli@mail.bnu.edu.cn

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20200114.1810.002.html>



ber; and exponential model (10 cm) in August, the variogram of soil moisture was exponential model in 30 cm. (2) The spatial distribution of soil moisture content (10 cm) of April, June and September were similar, and was relatively even. The soil moisture of August was higher than June, and the spatial distribution was decreasing from north to south. The northwest corner had the highest soil moisture content. The soil moisture of September was highest in all months. [Conclusion] The soil moisture content was the moderate variation in the depth of 10 cm and 30 cm, and showed strong spatial autocorrelation. The soil moisture content (10 cm) of distribution patterns had been affected by precipitation in the depth of 10 cm and 30 cm, the September had the highest soil moisture content. In the study area, the soil moisture content in the different period of spatial distribution patterns were significantly different, the soil moisture content (30 cm) changes with the season, and the spatial distribution patterns of both were affected by the topography and season.

Keywords: soil moisture content; seasonal variation; spatial distribution; Baijitan in Ningxia

干旱和半干旱地区的流动沙地是一种地表裸露疏松的生态系统, 植被覆盖度低, 风沙活动强烈, 降水稀少, 蒸发强烈^[1-2]。土壤水分被认为是控制沙漠化的约束因素^[3-4], 是气候、植被、地形及土壤等自然条件的综合反映, 其时空分异性在大尺度上受气象和水文状况影响, 局部地貌特征对土壤水分分异规律的影响也不可小觑^[5]。国内外学者就土壤水分时空动态及其运动机理^[6], 降水、植被类型和生物结皮对土壤水分的影响等内容进行了大量研究^[7-9]。土壤水分在季节性积雪、地形地貌、植被盖度等因素的影响下显现出明显的时空分异性, 表现为在较小尺度上水分随坡度变幅明显^[10-11]。前人关于乌兰布和沙漠和毛乌素沙地的研究^[12-13]表明: 沙丘上土壤含水量呈现出由丘间地向丘顶逐渐减小的趋势。在同样的地貌部位, 决定土壤含水量的主导因素则变为植被类型及其盖度, 灌木类植物的保水能力更强^[14]。植被长势较好的固定沙丘, 由于生物结皮的存在, 导致水分难以下渗而集中在表层, 深层土壤含水量偏低, 随沙地植被生长时间的增加, 沙地水分逐渐降低, 但当植被的生长时间超过 40 年时, 沙地浅层保水能力显著提升^[15-16]。

近年来, 宁夏河东沙地特别是白芨滩地区防沙治沙工作取得了重大成果, 但是缺乏对固沙植被建设以来土壤—植被相互作用的深入研究, 尤其是随着固沙植被的生长, 土壤水分在植被—土壤系统演替中的机理还不明确; 对于该地区土壤水分的研究也仅是短期观测, 缺乏长期定位监测与系统分析研究。本研究在该地区过去研究的基

础上, 进一步在野外定位观测土壤水分动态变化及其格局, 揭示宁夏白芨滩防沙治沙区浅层土壤水分的空间变异特征, 同时也可为该区域沙漠化治理生态效益评估提供基础数据和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

如图 1 所示: 宁夏河东沙地白芨滩自然保护区的大泉沙漠化治理区位于灵武市以南 40 km, N37°54'~38°22', E106°23'~106°48', 海拔 1 150~1 650 m。属中温带干旱区, 大陆性气候特征显著, 全年太阳总辐射量为 6 056.20 MJ/m², 全年日照时间为 3 004.80 h, 平均气温为 8.8 °C, 年平均降雨量为 198.9 mm, 年内分配不均, 多集中在 7、8 月, 蒸发量大, 年平均蒸发量为 1 928.4 mm。白芨滩位于毛乌素沙地南缘, 鄂尔多斯台地西南缘, 分布着干旱沙地、荒漠和流动沙丘等属荒漠类型的生态系统。白芨滩沙丘类型以流动沙丘为主, 呈新月形沙丘链状分布, 占 83%; 半固定沙丘多呈椭圆形, 占 10%; 流动浮沙土集中分布在流动沙丘的丘间平地, 约占 5%; 淡灰钙土集中分布在北部流动沙丘间的丘间平地, 约占 2%。植被以沙生植被为主, 如沙蒿 (*Artemisia desertorum*)、沙米 (*Agriophyllum squarrosum*)、苦豆子 (*Sophora alopecuroides* L.)、柠条锦鸡儿 (*Caragana korshinskii* Kom.) 和沙柳 (*Salix psammophila*) 等, 植被盖度为 2%~20%^[17-18], 该沙区主要固沙植物种为柠条锦鸡儿 (*Caragana korshinskii* Kom.) 和花棒 (*Hedysarum scoparium* Fisch.) 等灌木植物。

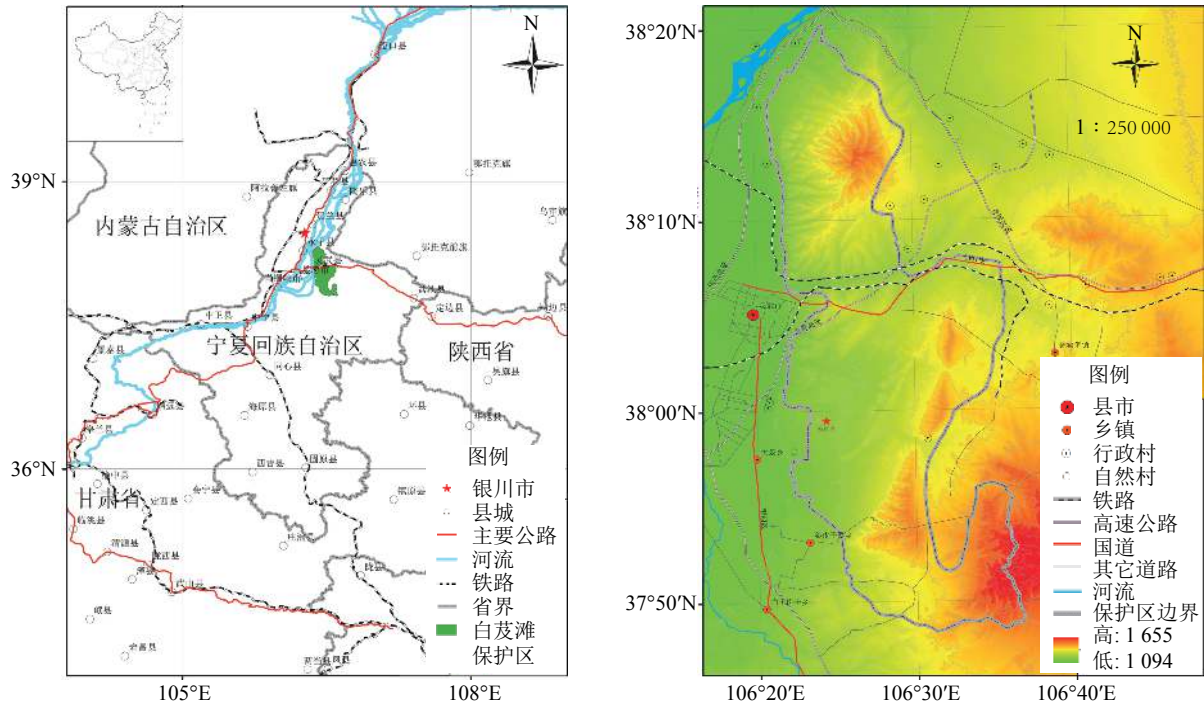


图 1 研究区位置图和地形图

Fig. 1 Location map and topographic map of the study area

1.2 研究方法

2014 年 4 月, 在宁夏灵武白芨滩大泉林场防沙治沙区, 选择已采用草方格和植物措施进行固定的沙丘(固沙时间为 2008 年), 用测线圈定 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的范围作为样地, $N38^{\circ}0'18''$, $E106^{\circ}24'15''$ 。样地中包括迎风坡、丘间地和背风坡等地形, 在其中布设 11 条样带, 均匀设置 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的样方 120 个, 取约 0~30 cm 的浅层风沙土。从 2014 年 4 月 28 日开始, 分别在 4 月底、6 月底、8 月底和 9 月底测定 121 个样点的土壤含水量。其中表层 10 cm 深处的土壤含水量采用烘干法测定, 30 cm 深处的土壤含水量采用 TDR300 便携式土壤水分速测仪测定。前者是重量含水量, 后者是体积含水量。

1.3 数据处理

采用 SPSS 20.0 对试验数据进行描述性统计, 利用 GS+10.0 地统计学分析软件分析土壤含水量空间异质性, 建立半方差函数模型, 并进行克里格插值。块金值 (C_0) 与基台值 (C_0+C) 的比值即块金系数可表示系统变量空间相关程度, 块金系数 $< 25\%$ 表明空间相关性很强, 块金系数在 $25\% \sim 50\%$ 之间说明变量有明显的空间自相关, $50\% \sim 75\%$ 说明具有中等空间相关性, 块金

系数 $> 75\%$ 表明空间相关性很弱^[19]。

2 结果与分析

2.1 土壤含水量均值及变异系数

从 2014 年对白芨滩治沙区土壤含水量的观测发现: 受降雨、蒸发、植物生长及微地形的影响, 白芨滩防沙区表层以及 30 cm 深处的土壤含水量具有较明显的季节变化趋势(表 1、2), 而且表层与 30 cm 深处的土壤含水量均表现出明显的空间分布特征(图 2、3)。从表 1 可见: 4 月底、6 月底和 8 月底土壤含水量较低, 而 9 月底土壤含水量较高。30 cm 的土壤含水量表现出 4 月底、6 月底小于 8 月底、9 月底。该研究区土壤含水量主要受降水和蒸发影响, 因此季节变化较为明显, 8 月和 9 月降水较 4 月和 6 月多, 该地区土壤水分主要来源于降水。变异系数 CV 的大小反映了土壤含水量的空间变异性大小, 一般认为 $CV < 0.01$ 为弱变异性, $0.01 < CV < 1$ 为中等变异性, $CV > 1$ 为强变异性^[20]。从表 1 中可以看出, 10 cm 和 30 cm 的土壤含水量变异系数均在 $0.01 \sim 1$ 之间, 属中等变异。

本研究所选取的沙丘类型为固定沙丘, 表层土壤含水量表现出明显的空间分异特征。李森

表 1 土壤含水量 (白芨滩) 描述性统计结果

Tab. 1 Descriptive statistical results on soil moisture content (Baijitan)

测定日期 detection date	深度/cm depth	(平均值±标准差)/%	最小值/% minimum	最大值/% maximum	极差/% range	变异系数/% coefficient of variation	分布类型 distribution type
2014-04-30	10	3.22±1.42	0.99	4.38	3.39	0.44	正态分布 normal distribution
	30	15.4±1.41	10.00	17.40	7.40	0.09	正态分布 normal distribution
2014-06-30	10	2.15±1.55	0.38	4.82	4.44	0.72	正态分布 normal distribution
	30	10.9±0.42	8.20	13.50	5.30	0.04	正态分布 normal distribution
2014-08-30	10	3.41±0.87	1.06	4.02	2.96	0.26	正态分布 normal distribution
	30	16.4±0.707	13.00	18.40	5.40	0.04	正态分布 normal distribution
2014-09-30	10	7.47±0.56	2.09	10.16	8.07	0.07	正态分布 normal distribution
	30	20.35±2.05	10.20	23.80	13.60	0.10	正态分布 normal distribution

表 2 土壤含水量变异函数模型

Tab. 2 Variation function models of soil moisture content

测定日期 detection date	深度/cm depth	理论模型 theoretical model	块金值/ C_0 nugget	基台值/ C_0+C sill	变程/m variable range	块金系数/%(块金值/基台值) coefficient of nugget (nugget/ sill)	决定系数/ (r^2) coefficient of determination	残差/RSS residual
2014-04-30	10	球状模型 spherical model	0.016 00	0.516 000	17.00	3.10	0.61	1.850E-03
	30	指数模型 index model	0.238 00	2.664 000	19.20	8.94	0.56	0.08
2014-06-30	10	球状模型 spherical model	0.001 00	0.584 000	16.40	0.17	0.29	6.690E-03
	30	指数模型 index model	0.064 00	0.626 000	24.60	10.22	0.53	0.01
2014-08-30	10	指数模型 index model	0.019 00	0.343 000	16.50	5.54	0.41	1.210E-03
	30	指数模型 index model	0.109 00	1.090 000	14.10	10.00	0.08	0.04
2014-09-30	10	球状模型 spherical model	0.046 00	1.190 000	14.90	0.96	0.09	0.03
	30	指数模型 index model	0.203 00	2.800 000	20.40	0.93	0.58	0.18

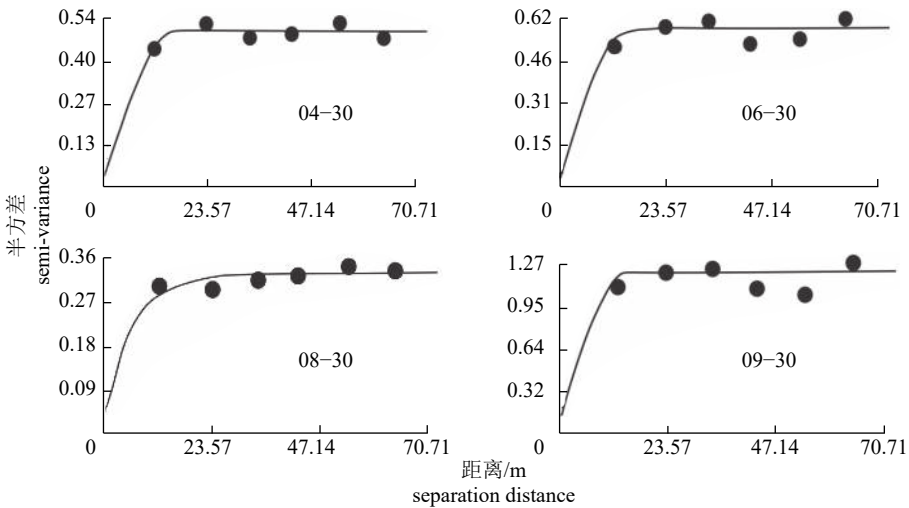


图 2 土壤含水量 (10 cm) 分布半方差图

Fig. 2 Semi-variance of soil moisture content (10 cm) distribution

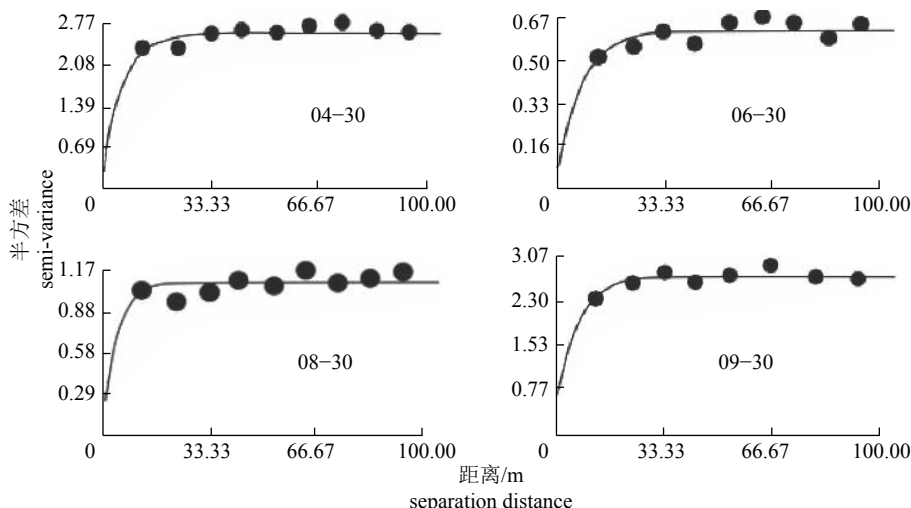


图 3 土壤含水量 (30 cm) 分布半方差图

Fig. 3 Semi-variance of soil moisture content (30 cm) distribution

等^[21]对腾格里沙漠东南缘固定沙丘表层土壤水分时空分异的研究表明:固定沙丘表层含水量时空分异之所以表现明显有两方面原因:降水的分布格局和植物蒸腾及土壤表面蒸散耗水。研究结果中 10 cm 和 30 cm 处 4 月底、6 月底土壤含水量均值小于 8 月底和 9 月底,表明 4 月底和 6 月底是土壤水分损耗期,8 月底和 9 月底是土壤水分积累期。朱海等^[22]在古尔班通古特沙漠南缘对固定沙丘土壤水分的研究认为 3—5 月是土壤水分补给期,6—10 月是土壤水分耗损期。这一研究结果与白芨滩呈相反趋势,白芨滩年内降雨集中在 7、8 月,4、6 月耗水源主要是植物生长和土壤表层蒸散,而古尔班通古特沙漠土壤含水量补给方式为春季冰雪融水和降雨,5 月以后,温度回升,蒸发加剧,再加上大量短命植物生长耗水,土壤水分损失严重。对于乌兰布和流动沙地的研究得出,其水分含量主要随降雨量变化^[2]。本研究发现:除 9 月底以外其他时间段 10 cm 处的变异系数均大于 30 cm 处,土壤含水量的变异系数有随土层深度增加而减小的趋势,由于降水和蒸发的影响浅层土壤水分的变异性较大^[5]。

2.2 土壤含水量空间分布特征

利用 GS+10.0 地统计学软件做出的结果(表 2 和图 2、3)表明:4、6、9 月的土壤水分(10 cm)变异函数分别为球状模型,8 月(10 cm)为指数模型;30 cm 的土壤水分变异函数均为指数模型。由表 2 可知:不同时间的表层土壤含水量及 30 cm 深处的块金系数均小于 25%,土壤含水量均表现

出强烈的空间自相关。

从表 2 和图 2 可见:在研究区内 10 cm 的土壤含水量空间自相关范围在各月较接近,说明不同季节土壤水分的生态过程变化不明显,原因是该地区土壤水分主要受到降雨、蒸发的影响,比植物耗水更大。变程是指变异函数达到基台值所对应的距离,它反映的是属性因子空间自相关范围的大小^[18]。由表 2 可知:30 cm 的土壤水分空间自相关范围在 14.1~24.6 m 之间,不同季节 30 cm 深处的土壤含水量变程范围明显不同,4、6 和 9 月变程均大于 10 cm 深处的变程,表明 30 cm 深处在 4、6 和 9 月的土壤含水等空间变异程度低于 10 cm 深处的变程。其中 8 月最小,6 月最大,变程逐渐减小,自相关范围的减小表明土壤含水量分布的均一性减弱,即 8 月 30 cm 深处的土壤含水量受降雨影响变化最明显。

分析空间局部插值估计进行克里格插值制图可以精确了解变量的空间分布格局。由图 4 可知:4 月底表层土壤含水量整体较低,分布相对较均匀。6 月底研究区土壤含水量较其他月都低,整体分布相对较均匀,该时期无降水补充,蒸发强烈,对表层土壤含水量影响非常大,土壤含水量较低。8 月底土壤含水量较 6 月增加,空间分布表现为从北向南降低,其中西北角土壤含水量最高,此处地形较低,为丘间地,容易集水。9 月底研究区内土壤表层含水量较其他时期都高,分布较均匀。该区域降水集中于 8、9 月,该时期植被生长较茂盛,可以减少土壤表层蒸

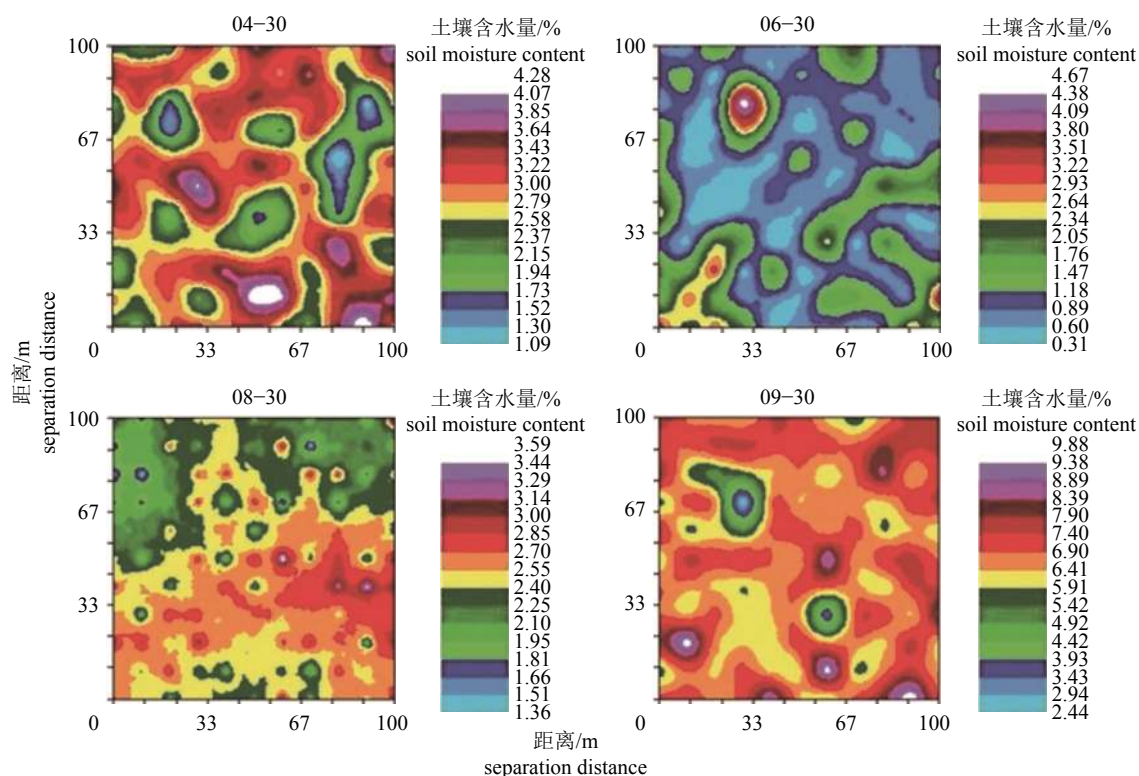


图 4 不同季节表层 (10 cm) 土壤含水量空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of soil moisture content in surface layer (10 cm) in different seasons

发。不同时期表层土壤含水量的空间异质性明显不同, 这表明不同季节的空气温度、降雨、地形以及植被生长情况都会影响表层土壤含水量的空间分布特征。

由图 5 可见: 不同季节 30 cm 的土壤含水量空间分布特征, 显示该深度土壤含水量的空间变异受地形、季节影响明显, 特别是 4 月底和 6 月底的土壤含水量空间分布图相似。30 cm 深处的土壤含水量随季节发生变化, 其空间分布主要受地形影响, 丘间地等低洼地土壤含水量较高, 与表层土壤含水量空间分布特征完全不同。

3 讨论

土壤含水量受众多因素影响, 包括降水、蒸发、土壤质地、地形等。通常在干旱区浅层土壤含水量受降水和蒸发影响更明显。研究表明: 0~60 cm 是土壤水分受降水影响的活跃层^[2]。我们详细研究了白芨滩防沙治沙区浅层土壤不同深度水分在不同季节的空间变化特征, 对该地区生态恢复有重要的理论指导意义。不同季节表层 (10 cm) 土壤水分空间分布特征明显不同。本研究

区属于沙区, 降水是土壤水分的主要来源, 因此土壤含水量的变化与降水的时空分布密切相关, 降水的季节性分布导致土壤水分的季节性变化。研究发现: 降水时沙地含水量高于平均值, 降水后含水量迅速下降, 但降水只对 0~40 cm 的土壤含水量影响显著^[2, 5, 23-24]。降水时, 水分既要克服蒸发消耗又要克服表土层的吸附截留, 才能下渗到植物根系层, 有效地补充该层土壤水分^[25]。除了降水, 气象因素中还包括土壤温度和风况, 都对沙地水分含量产生影响^[16]。其次, 地形也是影响土壤含水量空间分布异质性的一个重要因素, 研究得出该区域 30 cm 深处的土壤含水量空间分布特征受地形影响明显。另外, 植被也对土壤水分空间分异影响比较明显。对毛乌素沙地与科尔沁沙地土壤水分的研究表明: 地貌部位、植被类型及覆盖度是影响沙地土壤含水量的重要因素^[14, 26-28]。与盐池县同期结果对比^[20], 表层土壤含水量的空间变化趋势完全相反, 白芨滩的空间分布特征表现出的异质性较小, 分布相对均匀, 30 cm 处的土壤含水量两地都主要受地形影响。造成两地表层土壤含水量的空间分布差异的主要

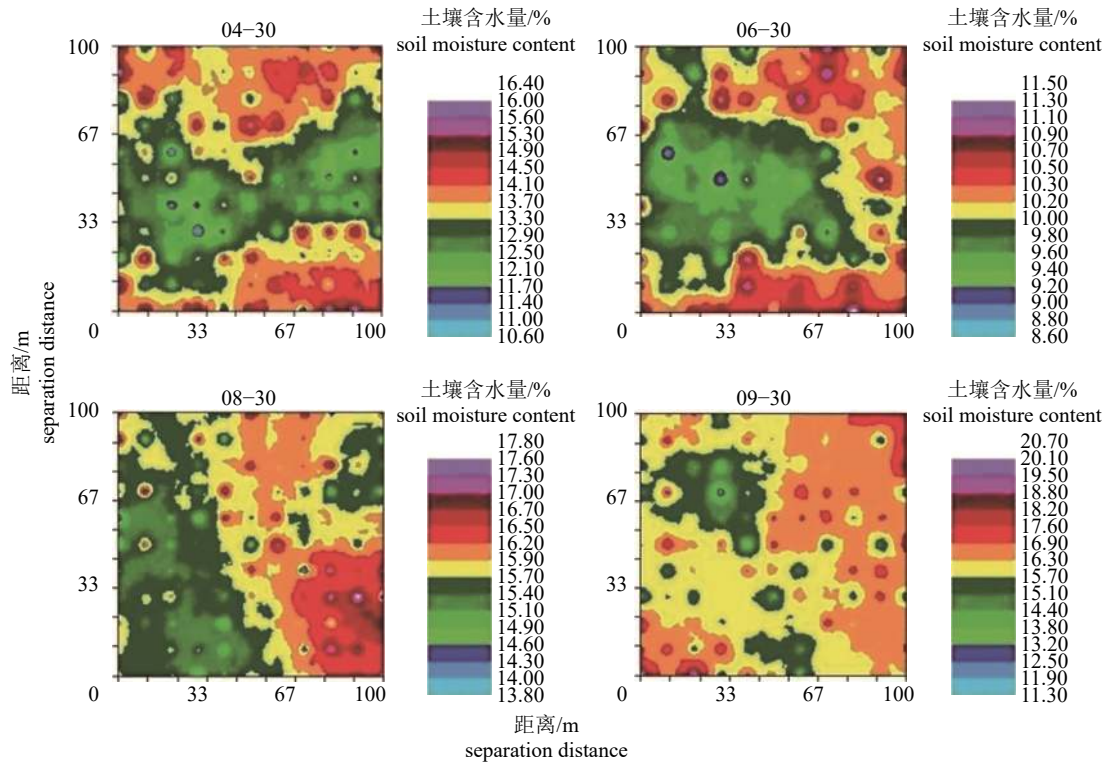


图 5 不同季节土壤含水量 (30 cm) 空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution of soil moisture content (30 cm) in different seasons

原因是降水量不同, 两个研究区植被类型和覆盖度不同, 选取样地地形不同。

本研究中表层土壤含水量为质量分数, 30 cm 深处土壤含水量为体积分数, 因此, 本研究中没有分析垂直分布规律, 仅是探讨浅层土壤含水量空间分布特征, 在后续工作中急需深入开展关于土壤含水量深层垂直分布规律的研究。此外, 本研究属小尺度空间分布研究, 土壤含水量的空间异质性在较小尺度上, 主要受到植被状况、土壤特性和微地形等因素的影响^[3]。有关土壤水分空间变异的研究较多, 而且各区域不同尺度研究结果也存在一定差异。最理想的采样是非常大的采样幅度、非常小的采样间距以及采样体积^[29]。因此, 对本区域还需进一步开展不同尺度的空间变异特征研究。

4 结论

(1) 研究区 10 cm 土壤含水量和 30 cm 土壤含水量的变异程度中等, 不同季节的土壤含水量表现出强烈的空间自相关, 而且 10~30 cm 含水量的分布格局均受降水影响。10 cm 和 30 cm 的土壤含水量 8、9 月相对较多, 9 月含水量是所有研

究时期中最高的。

(2) 研究区不同时期表层 (10 cm) 土壤含水量空间分布明显不同, 30 cm 深处的土壤含水量随季节发生变化, 而且其空间分布特征受地形、季节影响明显。在丘间低地, 不同深度的土壤含水量均表现出增加趋势。

[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[J]. 中国沙漠, 2002, 22(4): 359. DOI: 10.3321/j.issn:1000-694X.2002.04.010.
- [2] 叶冬梅, 秦佳琪, 韩胜利, 等. 乌兰布和沙漠流动沙地土壤水分动态、土壤水势特征的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(3): 126. DOI: 10.3969/j.issn.1003-7578.2005.03.024.
- [3] 潘颜霞, 王新平, 苏延桂, 等. 不同植被类型沙地表层土壤水分变化特征[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5): 106. DOI: 10.3321/j.issn:1009-2242.2007.05.025.
- [4] 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(5/6): 397. DOI: 10.1007/s11434-012-5662-5.
- [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. DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2014.00093.
- [6] 李从娟, 雷加强, 徐新文, 等. 古尔班通古特沙漠土壤水分与化学性质的空间分布[J]. 生态学报, 2104, 34(15):

4380. DOI: [10.5846/stxb201212101775](https://doi.org/10.5846/stxb201212101775).
- [7] YAO S X, ZHAO C C, ZHANG T H, et al. Response of the soil water content of mobile dunes to precipitation patterns in Inner Mongolia, Northern China[J]. Journal of Arid Environments, 2013, 97: 92.
- [8] 姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子[J]. 生态学报, 2012, 32(16): 4961. DOI: [10.5846/stxb201110171540](https://doi.org/10.5846/stxb201110171540).
- [9] 张侃侃, 卜崇峰, 高国雄. 黄土高原生物结皮对土壤水分入渗的影响[J]. 干旱区研究, 2011, 28(5): 808.
- [10] 赵成义, 王玉朝. 荒漠-绿洲边缘区土壤水分时空动态研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 124. DOI: [10.3321/j.issn:1009-2242.2005.01.031](https://doi.org/10.3321/j.issn:1009-2242.2005.01.031).
- [11] 赵从举, 康慕谊, 雷加强. 古尔班通古特沙漠腹地土壤水分时空分异研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 158. DOI: [10.3321/j.issn:1009-2242.2004.04.040](https://doi.org/10.3321/j.issn:1009-2242.2004.04.040).
- [12] 秦佳琪, 托亚, 叶冬梅, 等. 乌兰布和沙漠不同沙地类型土壤水分特征的研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2004, 25(2): 23. DOI: [10.3969/j.issn.1009-3575.2004.02.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-3575.2004.02.006).
- [13] 王志, 王蕾, 刘连友, 等. 毛乌素沙地南缘沙丘水分的时空分布特征[J]. 干旱区研究, 2007, 24(1): 61.
- [14] 符超峰, 赵景波. 毛乌素沙地东南缘不同类型沙丘土壤水分分布特征[J]. 干旱区研究, 2011, 28(3): 377.
- [15] 吕贻忠, 杨佩国. 荒漠结皮对土壤水分状况的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(2): 76. DOI: [10.3969/j.issn.1003-7578.2004.02.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-7578.2004.02.015).
- [16] 刘泉均, 常宏. 我国北方主要沙地水分研究概况[J]. 地球环境学报, 2011, 2(6): 672.
- [17] 展秀丽, 吴伟. 宁夏白芨滩防沙治沙区风沙土粒度组成特征及空间异质性[J]. 甘肃农业大学学报, 2017, 52(3): 84. DOI: [10.13432/j.cnki.jgsau.2017.03.015](https://doi.org/10.13432/j.cnki.jgsau.2017.03.015).
- [18] 展秀丽, 韩磊. 宁夏白芨滩地区风沙土理化性质初步研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(1): 186.
- [19] 刘爱利, 王培法, 丁园圆. 地统计学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [20] 展秀丽, 韩磊, 赖荣生. 宁夏河东沙区浅层风沙土土壤含水量季节变化及空间分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(10): 138. DOI: [10.13448/j.cnki.jalre.2016.331](https://doi.org/10.13448/j.cnki.jalre.2016.331).
- [21] 李森, 颜长珍, 谢家丽. 腾格里沙漠东南缘不同固定程度沙地土壤表层水分时空变化遥感分析[J]. 中国沙漠, 2016, 36(3): 734. DOI: [10.7522/j.issn.1000-694X.2015.00029](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-694X.2015.00029).
- [22] 朱海, 胡顺军, 陈永宝. 古尔班通古特沙漠南缘固定沙丘土壤水分时空变化特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 117. DOI: [10.11766/trxb201504030679](https://doi.org/10.11766/trxb201504030679).
- [23] 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): 3. DOI: [10.3321/j.issn:1000-694X.2001.03.001](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-694X.2001.03.001).
- [24] 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, 36(2): 225. DOI: [10.3321/j.issn:0564-3929.1999.02.010](https://doi.org/10.3321/j.issn:0564-3929.1999.02.010).
- [25] 闫德仁, 黄海广, 胡小龙, 等. 固沙植被土壤水分动态及其对降雨的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(4): 85. DOI: [10.13448/j.cnki.jalre.2016.118](https://doi.org/10.13448/j.cnki.jalre.2016.118).
- [26] 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[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 152. DOI: [10.3321/j.issn:0564-3929.2006.01.021](https://doi.org/10.3321/j.issn:0564-3929.2006.01.021).
- [27] 伍永秋, 张健枫, 杜世松, 等. 毛乌素沙地南缘不同活性沙丘土壤水分时空变化[J]. 中国沙漠, 2015, 35(6): 1612. DOI: [10.7522/j.issn.1000-694X.2014.00157](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-694X.2014.00157).
- [28] 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, 39(1): 107. DOI: [10.3321/j.issn:0564-3929.2002.01.016](https://doi.org/10.3321/j.issn:0564-3929.2002.01.016).
- [29] 胡伟, 邵明安, 王全九. 黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异的尺度性研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 11. DOI: [10.3321/j.issn:1002-6819.2005.08.003](https://doi.org/10.3321/j.issn:1002-6819.2005.08.003).

责任编辑: 何承刚