

胡娟, 禹朴家, 周道玮. 松嫩平原沙丘-草甸复合生态系统土壤水分时空变化特征[J]. 土壤与作物 2020, 9(3): 287–295.
HU J, YU P J, ZHOU D W. Spatio-temporal variation of soil moisture in compound ecosystem with sand and meadow in Songnen Plain[J]. Soils and Crops 2020, 9(3): 287–295.

松嫩平原沙丘-草甸复合生态系统土壤水分 时空变化特征

胡娟¹, 禹朴家², 周道玮¹

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所/吉林省草地畜牧重点实验室, 吉林 长春 130102;
2. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715)

摘要: 为了探究松嫩平原内典型沙丘-草甸复合生态系统土壤水分的时空变化特征, 采用烘干法测定了沙丘、草甸、沙丘和草甸结合部 2016 年 5–10 月 0–300 cm 深度土壤垂直剖面土壤含水量。结果表明: 不同部位平均土壤含水量存在极显著差异, 表现为草甸 > 沙丘 > 结合部。不同部位平均土壤含水量在 0–300 cm 深度土壤剖面上有明显分层现象。沙丘和结合部平均土壤含水量以 100 cm 深度为界划分为两个带, 沙丘平均土壤含水量表现为“先增加后减少”, 而结合部表现为“先减少后增加”。草甸平均土壤含水量以 30 cm 和 150 cm 深度为界划分为三个带, 表现为“先增加后降低再增加”的变化趋势。不同部位 0–300 cm 土层土壤含水量具有明显的月动态变化特征, 其中沙丘 50–70 cm 深度和结合部 0–30 cm 深度在 9–10 月的土壤含水量明显高于 5–8 月。为松嫩平原内盐碱土的水盐运移规律, 土壤盐碱化的防治以及盐碱土的改良利用提供理论基础。

关键词: 松嫩平原; 土壤水分; 时空分布; 沙丘; 草甸; 沙丘草甸结合部

中图分类号: S156.4

文献标识码: A

文章编号: 2095–2961 (2020) 03–287–09

DOI: 10.11689/j.issn.2095–2961.2020.03.009

Spatio-temporal variation of soil moisture in compound ecosystem with sand and meadow in Songnen Plain

HU Juan¹, YU Pujia², ZHOU Daowei¹

(1. Jilin Provincial Laboratory of Grassland Farming, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 2. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: The objective of this study was to explore the temporal and spatial distributions of soil moisture content in the compound ecosystem with sand and meadow in the Songnen Plain. The soil moisture contents of 0–300 cm soil depth from May to October in sand, meadow, and middle regions were measured using the oven dry method. Results showed that the average soil moisture contents in different position in the compound ecosystem of sand and meadow were significantly different with the trend of meadow > sand land > middle. The stratification of average soil moisture contents in different positions was found within 0–300 cm soil depth. The average soil moisture contents in sand and middle position were divided into two zones at the depth of 100 cm. The average soil moisture content of sand increased in 0–100 cm soil depth, and declined in 100–300 cm soil depth. The average soil moisture content of middle decreased in 0–100 cm soil depth, and increased in 10–300 cm soil depth. The average soil moisture content in the meadow was divided into three zones by the depth of 30 cm and 150 cm, which quickly increased in 0–30 cm, while declined in 30–150 cm, and then increased in 150–300 cm. Monthly dynamics of soil moisture content in different parts of compound ecosystem of sand and meadow was very obvious. The average soil moisture contents of sand (50–70 cm) and middle area (0–30 cm) in September and October were obviously higher than other months. Results from this research would be helpful in exploring the regulation of water-salt trans-

收稿日期: 2019–12–24; 修回日期: 2020–01–10.

基金项目: 松嫩平原碱化草甸改良技术与资源优化利用 (2016YFC0500606); 中国科学院科技服务网络计划 STS 项目 (KFJ–STS–ZDTP–048–03) .

第一作者简介: 胡娟 (1985–), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤环境优化机理与农业废弃物资源化研究. E-mail: hujuan@iga.ac.cn.

通信作者: 周道玮 (1963–), 男, 博士, 研究员, 主要从事草地扰动生态学和草地恢复生态学研究. E-mail: zhoudaowei@iga.ac.cn.

port, and preventing and utilizing saline soil resources in the Songnen Plain.

Key words: Songnen Plain; soil moisture content; spatio-temporal variation; sand; meadow; middle area of sand and meadow

0 引言

土壤水分是制约干旱和半干旱地区生态格局和过程的关键非生物限制因子之一,它不仅决定着植被的种类、数量和分布,还深刻影响着土壤有机质的矿化、生物固氮、植物根系对养分和水分的吸收等过程^[1-2]。同时,作为土壤中各种盐分离子的载体和介质,土壤含水量的时空动态变化决定着土壤盐分的迁移转化规律,尤其是在干旱、半干旱的盐碱土区,了解土壤水分动态变化是揭示土壤盐碱形成与演化过程中土壤水盐运移规律的前提和基础^[2-4]。

松嫩平原位于我国东北平原的中西部,是我国重要的商品粮和畜牧业发展基地,同时也是我国盐碱化土壤的主要分布区之一^[5-6]。近年来,由于区域内草地和耕地资源的不合理利用,导致土壤盐碱化面积和盐碱化程度持续增加,严重限制了该区域农牧业的可持续发展^[7-9]。土壤盐碱化程度增加导致土壤理化性质发生显著变化,极大的改变了土壤水盐的运移规律^[10]。土壤水分的动态变化是驱动土壤盐分发生变化的关键因素,因此要研究土壤水盐运移规律,必须首先明确土壤水分在时间和空间上的分布规律^[11-12]。国内外学者对不同时空尺度土壤含水量的异质性进行了大量的研究,但这些研究大都集中在农田生态系统和干旱的荒漠、半荒漠地区中,而缺少对土壤水分敏感的半湿润-半干旱的盐碱土区研究^[13-15]。此外,由于盐碱土区地下水埋深较浅,导致土壤含水量测量深度较浅,观测的地形较单一,缺乏对不同地形下深层土壤水分时空动态变化规律的认识^[14,16]。因此,监测不同地形下浅层和深层土壤含水量的时空变异性,揭示其水分的盈亏状况,对于理解干旱、半干旱的盐碱土区土壤水盐运移规律,防治土壤盐碱化及恢复植被等具有十分重要的意义。

本研究以松嫩平原西部典型的沙丘-草甸复合生态系统为研究对象,通过测定5-10月坡顶沙丘、结合部和低地草甸0~300 cm土层深度的土壤含水量,从时间和空间两方面分析了沙丘-草甸复合生态系统土壤含水量的变异性,以为松嫩平原内盐碱土的水盐运移规律,土壤盐碱化的防治以及盐碱土的改良利用提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于中国科学院长岭草地农牧生态研究站(44°33'N, 123°31'E),位于吉林省松原市长岭县腰井子种马场。该区地处松嫩平原南部的农牧交错区,区内地势平坦,以低平原为主,有带状沙丘分布,平均海拔为145 m。气候条件属于温带半湿润、半干旱大陆性季风气候,雨热同期,年平均降水量为427 mm(1980-2013),集中在6~9月(占年降水量的70%左右),年蒸发量约1600 mm;年均温为5.9℃(1980-2013),无霜期140 d, >10℃的有效积温2900~3000℃。研究地点的土壤类型属草甸盐碱土,带有高碱性的含盐量,此外,研究区内还分布着草甸土和风沙土等土壤类型,pH值为7.5~10.5。主要植被类型为羊草(*Leymus chinensis*)草甸,主要优势植物包括羊草、虎尾草(*Chloris virgata*)、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)和星星草(*Puccinellia tenuiflora*)等^[17]。半个世纪以来,由于人口增长对粮食需求的增加,草地的边缘部分草甸被开垦成农田,用于种植玉米、向日葵和高粱等经济作物。

1.2 试验设计

2016年在中国科学院长岭草地农牧生态研究站沿沙丘-草甸复合生态系统的横断面布置一条水分监测断面(图1)。沙丘距离结合部300 m,结合部距离草甸380 m。分别于沙丘上部的平地(沙丘)、沙丘和低地草甸的中间地带(结合部)和低地草甸中部(草甸)布设土壤含水量监测点。2016年5-10月,

每个月月中旬对每个监测点采用土钻法采集土壤样品,共取样6次。在每个监测点,通过设置3个1 m×1 m的土壤样方进行取样。取样深度为0~300 cm,分为10层,0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~50 cm、50~70 cm、70~100 cm、100~150 cm、150~200 cm、200~250 cm和250~300 cm。土壤含水量采用烘干法(105℃)测定。

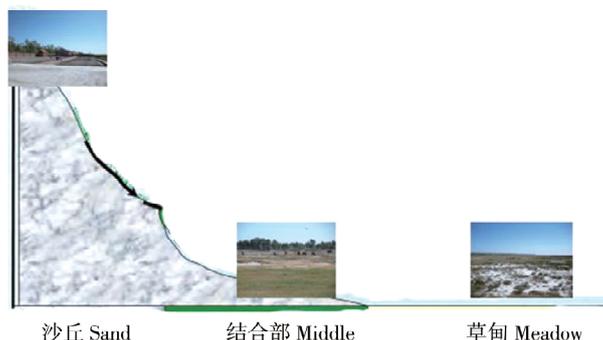


图1 沙丘-草甸复合生态系统不同部位土壤水分监测断面图

Fig. 1 The map of soil monitoring sections of different sites in compound ecosystem with sand and meadow

2016年月平均降水量和月平均气温见图2。6月、7月、8月的月平均气温在20℃以上,5月和9月的月均气温为16℃左右。10月的月均气温相对较低,仅为6℃左右。6月的月均降水量最多,其次为5月,7月和10月的月平均降水量则相对较低。

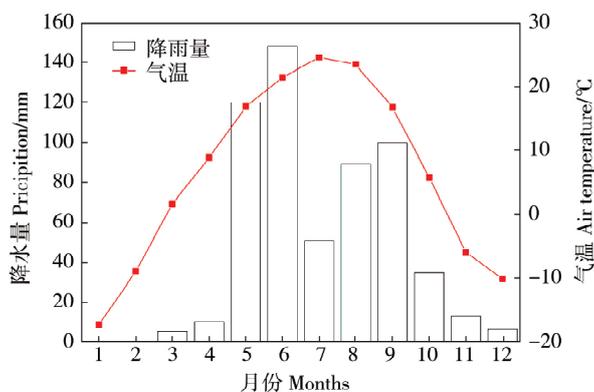


图2 中国科学院长岭草地农牧生态研究站2016年月平均降水量和月平均气温

Fig. 2 The precipitation and air temperature of the Changling Ecological Research Station for Grassland Farming in 2016

1.3 数据分析

采用SPSS 16.0软件对沙丘、草甸、沙丘和草甸结合部位的土壤含水量进行LSD多重比较;采用SigmaPlot 10.0软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同部位土壤含水量

5月至10月,在0~300 cm土层土壤剖面上沙丘土壤水分含量变化范围为3.03%~12.2%,结合部为2.03%~19.4%,草甸为4.81%~14.1%(表1)。单因素方差分析结果表明,不同部位平均土壤含水量呈显著差异($P < 0.05$)。草甸的平均土壤含水量最高,达10.0%,显著($P < 0.05$)高于沙丘和结合部;结合部的平均土壤含水量最低,为5.09%,显著($P < 0.05$)低于沙丘。不同部位土壤含水量在空间

上的变异系数亦存在明显差异, 其中结合部的变异系数最高为 20.95%, 其次为草甸和沙丘, 分别为 18.22% 和 13.48%。

表 1 沙丘-草甸复合生态系统不同部位平均土壤含水量 (n = 150)

Table 1 The mean soil water contents (SWC) of different sites under compound ecosystem with sand and meadow

	最小值 Min / %	最大值 Max / %	平均值 Mean / %	标准差 SD	变异系数 CV / %
沙丘 Sand	3.03	12.2	5.91 b	0.80	13.48
结合部 Middle area	2.03	19.4	5.09 c	1.07	20.95
草甸 Meadow	4.81	14.1	10.0 a	1.82	18.22

注: 表中数据为 5-10 月 0~300 cm 土层的平均土壤含水量。不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。

Note: The data were the average SWC in 0-300 cm soil from May to October. Different letters indicate significant differences at $P < 0.05$. The same is as below.

2.2 不同部位土壤含水量垂直分布

沙丘-草甸复合生态系统不同部位的平均土壤含水量具有明显的分层变化特征, 但不同部位的变化趋势明显不同 (图 3)。在 0~300 cm 土层垂直剖面上, 沙丘和结合部的土壤平均含水量以 100 cm 深度为界明显分为 2 个带。在沙丘部位, 0~100 cm 深度中, 随土层深度增加土壤含水量从 5.4% 逐渐提高到 7.2%; 而 100~300 cm 深度中, 随土层深度增加, 平均土壤含水量则从 6.0% 降低至 5.0%。在结合部, 0~100 cm 深度中, 随土层深度的增加, 平均土壤含水量从 10.0% 快速降低至 2.8%; 而在 100~300 cm 深度中, 随土层深度增加, 平均土壤含水量则从 3.2% 增加至 4.3%。在草甸部位, 平均土壤含水量以 30 cm 和 150 cm 深度为界限被明显分为 3 个带, 0~30 cm 深度中, 随土层深度增加, 平均土壤含水量从 8.18% 增加至 11.0%; 30~150 cm 深度中, 随土层深度增加, 平均土壤含水量从 10.9% 降低至 8.97%; 150~300 cm 深度中, 随土层深度增加, 平均土壤含水量从 8.97% 增加至 11.2%。

变异系数可以用来表征土壤水分含量变化程度, 变异系数数值越大, 表明土壤水分含量变化越剧烈; 变异系数越小, 则表明土壤水分含量越稳定。虽然不同部位土壤平均水分含量的垂直分布特征明显不同, 但其变异系数的垂直变化特征则极为相似。0~100 cm 深度中, 随土层深度增加变异系数明显增加, 而 100~300 cm 深度中, 随土层深度增加, 变异系数则呈下降趋势, 其中 100 cm 中沙丘和草甸的变异系数最高, 表明该深度土壤含水量变化程度最剧烈。

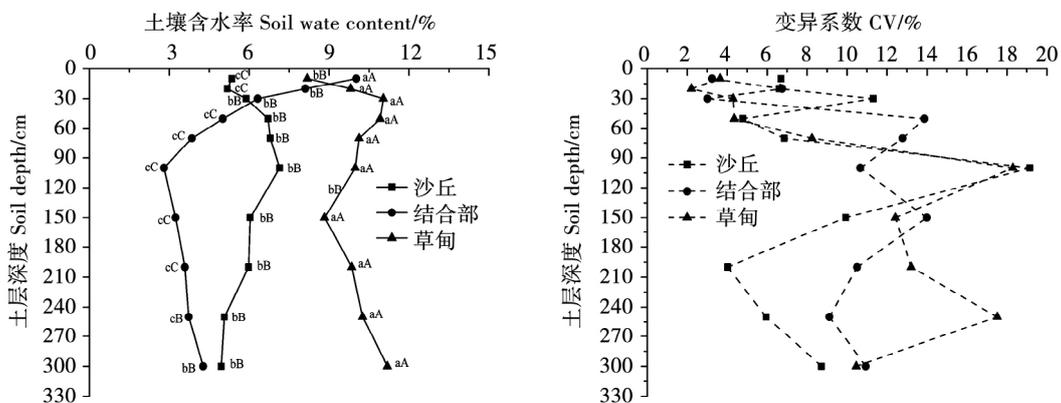


图 3 沙丘-草甸复合生态系统不同部位土壤平均含水量的垂直变化

Fig. 3 The average SWC of sand, middle area, and meadow in 0-300 cm soil in compound ecosystem with sand and meadow

2.3 不同部位不同月份土壤含水量垂直分布

6-8月沙丘、结合部和草甸在0~300 cm剖面的土壤含水量垂直变化趋势极为相近(图4)。6-8月草甸中各深度的土壤含水量均高于沙丘和结合部,0~20 cm深度中,结合部的土壤含水量高于沙丘,20~200 cm深度中,结合部的土壤含水量则低于沙丘。6月、7月和8月,与沙丘相比,结合部0~10 cm深度中的土壤含水量分别比较沙丘提高了36.8%、34.8%和84.9%;10~20 cm则分别提高了88.0%、40.5%和74.4%。在9月,结合部0~10 cm深度中,土壤含水量分别比草甸和沙丘增加了83.8%和118.2%。同时,9月中,结合部在10~20 cm深度的土壤含水量较沙丘提高了42.6%,但较草甸降低了21.7%。在10月,结合部0~30 cm深度0~10 cm、10~20 cm和20~30 cm深度的土壤含水量分别比草甸增加了48.7%、30.5%和10.0%,比沙丘分别增加了170%、111%和51.3%。

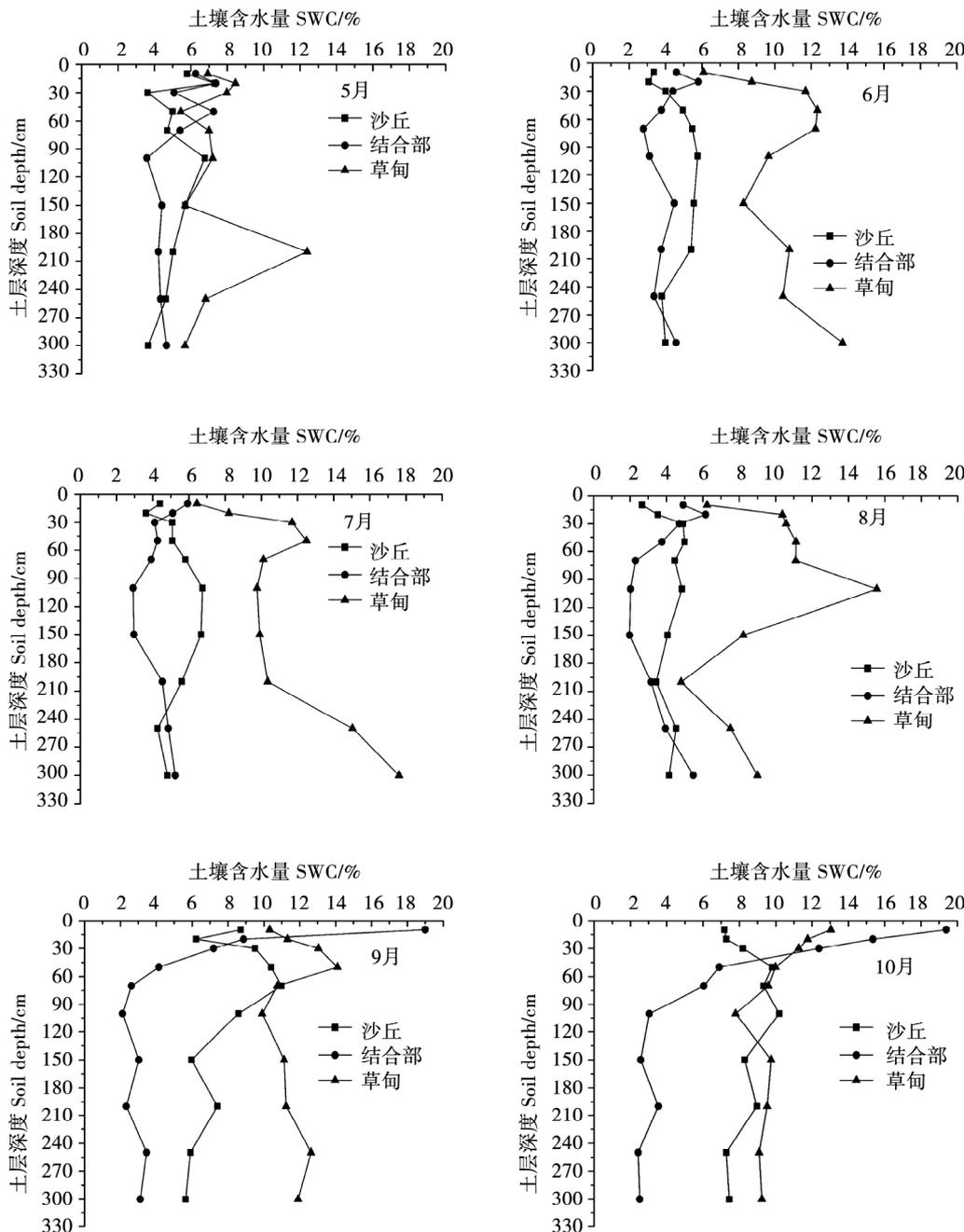


图4 沙丘-草甸复合生态系统不同部位5-10月土壤含水量的垂直变化

Fig. 4 The vertical distributions of SWC from May to October under compound ecosystem with sand and meadow

2.4 不同部位土壤含水量月动态变化

沙丘草甸复合生态系统的平均土壤含水量存在明显的月动态变化(表2)。各月份平均土壤含水量均表现为草甸明显高于沙丘和结合部。草甸中,平均土壤含水量月动态变化表现为9月>7月>6月>10月>8月>5月,且9月、7月、6月和10月平均土壤含水量显著高于5月和8月($P<0.05$)。沙丘中,9-10月平均土壤含水量显著高于其他月份($P<0.05$),其中9月平均土壤含水量较5-8月提高了52.0%~90.7%,较10月提高了61.1%~102%。且10月平均土壤含水量略高于9月,但差异不显著。结合部中,平均土壤含水量月动态变化表现为10月>9月>5月>7月>6月>8月。其中,10月平均土壤含水量较9月和5月分别增加了32.7%和40.9%,且均达显著水平($P<0.05$)。

表2 沙丘-草甸复合生态系统不同部位土壤含水量月动态变化

Fig. 2 The average SWC of sand, middle area, and meadow from May to October in compound ecosystem with sand and meadow

月份 Months (月)	土壤含水量			变异 系数 CV/ %		月份 Months (月)	土壤含水量			变异 系数 CV/ %		月份 Months (月)	土壤含水量			变异 系数 CV/ %
	水量 SWC/ %	标准差 SD	标准差 SD				水量 SWC/ %	标准差 SD	标准差 SD				水量 SWC/ %	标准差 SD	标准差 SD	
沙丘 Sand	5	5.22 b	1.08	21.2	结合部 Middle area	5	5.26 b	0.93	17.7	草甸 Meadow	5	7.36 c	1.28	17.4		
	6	4.54 b	0.31	6.75		6	4.07 c	0.76	18.7		6	10.4 ab	0.52	5.02		
	7	5.21 b	0.88	16.2		7	4.39 c	0.17	3.84		7	11.2 a	0.60	5.49		
	8	4.16 b	0.47	12.0		8	3.84 c	0.37	9.74		8	9.45 b	0.31	3.26		
	9	7.93 a	1.06	12.9		9	5.59 b	0.53	9.49		9	11.6 a	0.21	1.80		
10	8.40 a	0.99	12.3	10	7.41 a	0.70	9.45	10	10.1 ab	2.47	24.4					

2.5 不同部位土壤含水量随土层深度的月动态变化

沙丘-草甸复合生态系统不同部位不同深度土壤含水量具有明显的月动态变化特征(图5)。沙丘中,各月份土壤含水量随土层深度的增加均表现出先增加后降低的趋势。5月、6月、7月和8月中,沙丘的土壤含水量均在70~100 cm深度达到最大值(4.85%~6.77%);9月和10月则在50~70 cm深度达到最大值(10.2%~11.0%)。结合部中,5月、6月、7月和8月土壤含水量在0~100 cm深度分别由7.38%、5.80%、5.93%和6.15%降低至3.59%、3.12%、2.92%和2.03%。结合部中,9月和10月0~30 cm深度土壤含水量较高。草甸中,各月份的土壤含水量表现为“增加-降低-增加”的趋势,且6月、7月、8月和9月的变化趋势更为明显。

3 讨论

水分状况是气候、植被、地形及土壤因素等自然条件的综合反映^[7]。在松嫩平原的典型沙丘-草甸复合生态系统,不同部位土壤水分的时空分布存在明显差异。本研究表明,平均土壤含水量表现为草甸>沙丘>结合部,且草甸的平均土壤含水量极显著高于沙丘和结合部。其原因主要是:草甸的地势低,能够聚集较多的雨水^[16-17]。结合部地处沙丘和草甸的中间地带,虽然其地势明显低于沙丘,但平均土壤含水量则极显著低于沙丘,这主要与土壤质地和气候有关^[18],结合部盐碱活动较为剧烈,土壤孔隙小,黏度大,水分下渗困难^[19]。本研究采样时间(2016年)属干旱年份,降雨较少,蒸发较高,导致水分截留少,土壤含水量较低。因此,尽管沙丘的地势相对较高,雨水随山坡往下流淌,但沙丘的土壤质地比较松散,孔隙较大,有利于下渗水分的贮存^[20]。

沙丘-草甸复合生态系统中,不同部位的土壤水分变异系数范围为13.5%~20.5%,说明不同部位不仅影响土壤含水量的水平变化,同时还影响其空间变异。土壤水分在剖面上的变化主要取决于土壤质地

和植物 - 根系分布的垂直异质性^[21]。另外, 降水、下渗、地下水埋深是导致不同部位土壤水分含量垂直分布特征不同的主要原因^[22]。沙丘和结合部平均土壤含水量以 100 cm 土层为界划分为 2 个带, 这与朱海等^[16]在古尔班通古特沙漠南缘发现的土壤含水量的垂直分布特征相似, 虽然具体分界深度不同。沙丘和结合部中, 平均土壤含水量的变化趋势则相反。沙丘的平均土壤含水量在 0 ~ 100 cm 土层快速增加, 在 100 ~ 300 cm 土层缓慢降低, 这说明沙丘土壤水分运动主要以下渗为主; 结合部的平均土壤含水量在 0 ~ 100 cm 土层快速降低, 在 100 ~ 300 cm 土层缓慢增加, 这说明结合部土壤水分下渗困难, 较多的水分集中在上层土壤中, 而下层土壤含水量受地下水的影响而增加。

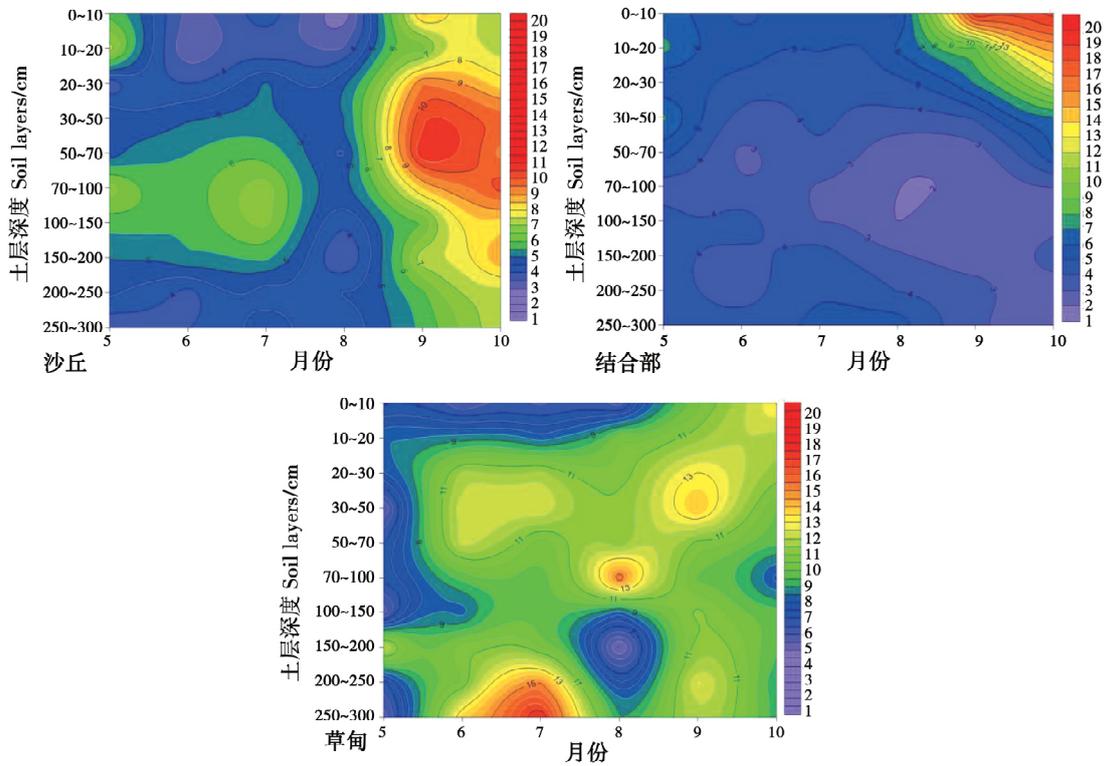


图 5 沙丘 - 草甸复合生态系统不同部位土壤含水量随土层深度的月动态变化

Fig. 5 Monthly dynamics of SWC of sand, middle area, and meadow in different soil layers in compound ecosystem with sand and meadow

草甸中, 平均土壤含水量以 30 cm 和 150 cm 为界分为 3 个带, 具体表现为“先增加, 后降低, 再增加”的变化趋势。在 0 ~ 30 cm 深度, 草甸的平均土壤含水量随土壤深度增加而逐渐增加, 其原因可能与地表蒸发有关。草甸由于地势低洼是盐碱高发区, 其植被的覆盖度低, 较多裸露的地表加速了表层土壤水分的蒸发, 导致表层土壤水分较低。结合部中, 0 ~ 30 cm 土层深度平均土壤含水量明显高于沙丘, 而 30 cm 以下深度的平均土壤含水量明显低于沙丘, 这进一步说明结合部土壤水分难下渗, 而沙丘土壤水分主要以下渗为主。草甸的地势最低, 平均土壤含水量极显著高于沙丘和结合部, 但 0 ~ 10 cm 土层土壤含水量低于结合部, 其原因与地表蒸发有关。结合部的植被主要为羊草, 植被覆盖度较高, 植被对地表的保护减弱了蒸发作用, 进而使上层土壤保持较高的水分含量。沙丘和结合部的平均土壤含水量均在 0 ~ 100 cm 土层深度变化幅度较大, 而在 100 cm 以下土层深度变化幅度较小。这说明 0 ~ 100 cm 深度的土壤由于受降水、地表蒸发、风速、孔隙水扩散和水分下渗等因素的直接影响, 土壤含水量变化剧烈, 属于土壤含水量变化的活跃层; 而 100 cm 以下深度的土壤受气象条件影响较小, 水分主要来自上部下渗水, 水分运行缓慢, 含水量相对稳定, 属相对稳定层。而草甸中, 平均土壤含水量在 0 ~ 150 cm 土层变化较大,

属相对活跃层, 150 cm 以下土层平均土壤含水量受地下水位的变化而变化^[16]。

周宏飞等^[23]对沙漠南缘沙丘不同季节不同部位土壤含水量进行了对比, 认为沙丘土壤含水量有明显季节变化和分层变化, 植被和地形对土壤水分的空间分异的作用也较为明显。植物生长和季节的动态变化是影响土壤水分时间变化的关键因素^[24-25]。本研究也发现沙丘-草甸复合生态系统不同部位平均土壤含水量具有明显的月动态变化。沙丘、结合部和草甸在 9-10 月平均土壤含水量较高, 这与汪星等^[26]在黄土高原密植枣林的研究基本相同, 他们研究发现 5 年龄的枣林土壤含水量在 5-8 月较低, 而在 9-10 月土壤含水量明显增加。本研究还发现, 随月份的增加, 土壤水分含量最大值出现的土层深度逐渐向表层移动。9 月和 10 月结合部表层土壤含水量远远高于沙丘和草甸, 在土壤表层积累了大量水分, 其原因一方面可能与逐渐降低的气温、蒸发量及降水有关, 另一方面可能与植被的生育期有关, 随月份的增加, 植物逐渐枯萎, 对根层水分的吸收减弱。同时, 结合部(羊草)的植被覆盖度高于草甸(盐地碱蓬), 较少的地表裸露和蒸发也是导致 9-10 月表层土壤含水量高于草甸的原因之一。

4 结 论

受地形、地质及季节的影响, 沙丘-草甸复合生态系统中, 不同部位土壤含水量的时空分布存在明显差异。不同部位的平均土壤含水量表现为草甸 > 沙丘 > 结合部。不同部位的平均土壤水分在 0~300 cm 垂直剖面上分层现象明显, 沙丘和结合部的以 100 cm 深度为界分为 2 个带, 而草甸则以 30 cm 和 150 cm 深度划分为 3 个带。沙丘平均土壤含水量随土层深度呈先增加后降低变化趋势, 结合部呈先降低后增加变化趋势, 草甸呈先增加后降低再增加变化趋势。不同部位土壤含水量具有明显的月动态变化特征, 沙丘和结合部中, 9-10 月的土壤含水量较高, 且土壤含水量最大值分别出现在 50~70 cm 和 0~30 cm 深度。该结果为松嫩平原内盐碱土的水盐运移规律, 土壤盐碱化的防治以及盐碱土的改良利用提供了基础数据。

参考文献 (References):

- [1] KIDRON G J. Analysis of dew precipitation in three habitats within a small arid drainage basin, Negev Highlands, Israel [J]. *Atmospheric Research*, 2000, 55 (3/4): 257-270.
- [2] 刘 强, 何 岩, 章光新. 苏打盐渍土土壤水分动态及其与浅层地下水的交换关系 [J]. *地理科学*, 2008, 28 (6): 782-787.
LIU Q, HE Y, ZHANG G X. Soil water dynamics and its exchange with shallow groundwater in sodic soil region [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28 (6): 782-787.
- [3] 李兰晖, 丁明军, 黄 齐, 等. 亚热带湖滨沙丘地典型下垫面土壤水分变化 [J]. *生态学报*, 2017, 37 (11): 3892-3901.
LI L H, DING M J, HUANG Q, et al. Effects of vegetation coverage on soil moisture: evidence from subtropical lakeside sandy lands in South China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37 (11): 3892-3901.
- [4] 俞洁辉, 刘新圣, 罗天祥, 等. 念青唐古拉山北麓草甸海拔分布上限土壤温湿度的季节变化 [J]. *地理学报*, 2012, 67 (9): 1246-1254.
YU J H, LIU X S, LUO T X, et al. Seasonal variations of soil temperature and moisture at the upper limit of alpine meadow in north-facing slope of the Nianqingtanggula Mountains [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67 (9): 1246-1254.
- [5] 赵兰坡, 王 宇, 冯 君, 等. 松嫩平原盐碱地改良利用-理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
ZHAO L P, WANG Y, FENG J, et al. Improvement and utilization of saline-alkali land in songnen plain-theory and technology [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [6] 姜世成. 松嫩盐碱化草地水盐分布格局及盐碱裸地植被快速恢复技术研究 [D]. 长春: 东北师范大学, 2010.
JIANG S C. Study on the distribution pattern of water and salt in the salinized grassland in Songnen and the rapid restoration of vegetation in the bare saline soil [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2010.
- [7] YANG J C, ZHANG S W, LI Y, et al. Dynamics of saline-alkali land and its ecological regionalization in western Songnen Plain, China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2010, 20 (2): 159-166.
- [8] YU P J, HAN K X, LI Q, et al. Soil organic carbon fractions are affected by different land uses in an agro-pastoral transitional zone in Northeastern China [J]. *Ecological Indicators*, 2017, 73: 331-337.
- [9] 李秀军, 李取生, 王志春, 等. 松嫩平原西部盐碱地特点及合理利用研究 [J]. *农业现代化研究*, 2002, 23 (5): 361-364.

- LI X J, LI Q S, WANG Z C, et al. A Research on characteristics and rational exploitation of soda saline land in the western Songnen Plain [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2002, 23 (5): 361-364.
- [10] 韩桂红, 塔西甫拉提·特依拜, 买买提·沙吾提, 等. 渭库绿洲地下水对土壤盐渍化和其逆向演替过程的影响 [J]. *地理科学*, 2012, 32 (3): 362-367.
- HAN G H, TASHPOLAT T, MAMAT S, et al. Influence of groundwater on soil salinization and its reversal evolvement in Wei-ku Oasis [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32 (3): 362-367.
- [11] 杨帆, 王志春, 王云贺, 等. 松嫩平原苏打盐渍土土壤水分特征研究 [J]. *地理科学*, 2015, 35 (3): 340-345.
- YANG F, WANG Z C, WANG Y H, et al. Soil water characteristic of saline-sodic soil in Songnen Plain [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35 (3): 340-345.
- [12] ZHAO C W, XU L, WANG Z C. Studying soil salinity and its relation with microtopography and vegetation at field scale [J]. *Polish Journal of Environmental Study*, 2013, 22: 1227-1237.
- [13] 邹慧, 高光耀, 傅伯杰. 干旱半干旱草地生态系统与土壤水分关系研究进展 [J]. *生态学报*, 2016, 36 (11): 3127-3136.
- ZOU H, GAO G Y, FU B J. The relationship between grassland ecosystem and soil water in arid and semiarid areas: a review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (11): 3127-3136.
- [14] 兰志龙, 潘小莲, 赵英, 等. 黄土丘陵区不同土地利用模式对深层土壤含水量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2017, 28 (3): 847-855.
- LAN Z L, PAN X L, ZHAO Y, et al. Effects of land use types on deep soil water content in the loess hilly area of the north Shaanxi Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28 (3): 847-855.
- [15] 王甜, 康峰峰, 韩海荣, 等. 山西太岳山小流域土壤水分空间异质性及其影响因子 [J]. *生态学报*, 2017, 37 (11): 3902-3911.
- WANG T, KANG F F, HAN H R, et al. Factors influencing spatial heterogeneity of soil moisture content in a small catchment of Mount Taiyue, Shanxi Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37 (11): 3902-3911.
- [16] 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): 117-126.
- ZHU H, HU S J, CHEN Y B. Spatio-temporal variation of soil moisture in fixed dunes at the southern edge of Gurbantunggut desert [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (1): 117-126.
- [17] WANG L, SEKI K, MIYAZAKI T, et al. The causes of soil alkalinization in the Songnen Plain of Northeast China [J]. *Paddy and Water Environment*, 2009, 7 (3): 259-270.
- [18] 朱文东, 杨帆. 潜水作用下土壤水盐运移过程 [J]. *土壤与作物*, 2019, 8 (1): 11-22.
- ZHU W D, YANG F. Soil water and salt transport affected by shallow groundwater [J]. *Soils and Crops*, 2019, 8 (1): 11-22.
- [19] 王力, 石滨嘉夫, 关胜寿, 等. 黑龙江省安达市草地碱化后土壤物理性状变化 [J]. *草业科学*, 2007, 24 (10): 19-25.
- WANG L, ISHIHAMA Y, SEKI K, et al. The variation of soil physical properties on alkali grasslands in Anda City of Heilongjiang Province [J]. *Pratacultural Science*, 2007, 24 (10): 19-25.
- [20] 赵丹丹, 王志春. 土壤水盐运移 Hydrus 模型及其应用 [J]. *土壤与作物*, 2018, 7 (2): 120-129.
- ZHAO D D, WANG Z C. Hydrus model and its application in soil water-salt transport [J]. *Soils and Crops*, 2018, 7 (2): 120-129.
- [21] WANG Y Q, SHAO M A, LIU Z P. Vertical distribution and influencing factors of soil water content within 21-m profile on the Chinese Loess Plateau [J]. *Geoderma*, 2013, 193-194: 300-310.
- [22] 冯起, 高前兆. 禹城沙丘水分动态规律及其影响因子 [J]. *中国沙漠*, 1995, 15 (2): 151-157.
- FENG Q, GAO Q Z. Water dynamic law of Yucheng dune and its influencing factors [J]. *Journal of Desert Research*, 1995, 15 (2): 151-157.
- [23] YU P J, LI Q, JIA H T, et al. Effect of cultivation on dynamics of organic and inorganic carbon stocks in Songnen Plain [J]. *Agronomy Journal*, 2014, 106 (5): 1574-1582.
- [24] FAN J, SHAO M A, WANG Q J, et al. Toward sustainable soil and water resources use in China's highly erodible semi-arid Loess Plateau [J]. *Geoderma*, 2010, 155 (1/2): 93-100.
- [25] HU W, SHAO M A, HAN F P, et al. Watershed scale temporal stability of soil water content [J]. *Geoderma*, 2010, 158 (3/4): 181-198.
- [26] 汪星, 周玉红, 汪有科, 等. 黄土高原干旱区山地密植枣林土壤水分特性研究 [J]. *水利学报*, 2015, 46 (3): 263-270.
- WANG X, ZHOU Y H, WANG Y K, et al. Soil water characteristic of a dense jujube plantation in the semi-arid hilly regions of the Loess Plateau in China [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46 (3): 263-270.