

毛乌素沙地中部不同类型沙丘土壤水分分布特征

符超峰^{1,2,3}, 赵景波², 卞子浩¹, 左俊¹

(1. 长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;
2. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710119; 3. 中国科学院地球环境研究所
黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安 710061)

摘要:通过对位于毛乌素沙地中部的乌审旗地区进行实地考察采样和室内试验测试分析, 研究了裸露流动沙丘、灌木覆盖沙丘及乔木覆盖沙丘在迎风坡、背风坡和丘间洼地 3 种微地貌类型下 0~4 m 深度内土壤水分的变化及分布特征。结果表明:灌木覆盖沙丘和乔木覆盖沙丘微地貌平均土壤含水量从大到小依次为丘间洼地、迎风坡、背风坡;裸露流动沙丘丘间洼地平均土壤含水量较高,但迎风坡和背风坡平均土壤含水量变化无明显规律;不同类型沙丘在各微地貌采样点不同层段土壤含水量变化差异明显,变化趋势不统一;同一沙丘微地貌条件下,植被对土壤含水量在垂向上的变化有较大影响,且灌木植被的影响大于乔木植被;迎风坡和背风坡土壤含水量表现为有植被覆盖的沙丘普遍大于裸露流动沙丘,而丘间洼地处浅层基岩的存在对土壤含水量的影响更大;有植被覆盖的沙丘土壤含水量与土壤黏粒和粉砂等细粒级组分呈明显的正相关关系,沙丘地表植被通过拦截空气中的粉尘提高了土壤黏土和粉砂体积分数,从而提高了土壤含水量。

关键词:土壤含水量;沙丘;丘间洼地;迎风坡;背风坡;植被;粒度;毛乌素沙地

中图分类号:P641.69

文献标志码:A

Distribution Characteristics of Soil Moisture for Different Types of Sand Dunes in the Central of Mu Us Sandy Land

FU Chao-feng^{1,2,3}, ZHAO Jing-bo², BIAN Zi-hao¹, ZUO Jun¹

(1. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. School of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 3. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: The study area is located in the central of Mu Us sandy land, which belongs to the semiarid climate area with the annual precipitation of 350-400 mm. On the basis of the field investigation in late April 2009, the sand dunes were divided into bare migratory dune, shrub-covered dune and tree-covered dune according to the vegetation form and vegetation coverage on the surface of sand dunes, and the samples of drilling holes in the depth of 4 m at different microtopographies of sand dunes including windward slope, leeward slope and inter-dune lowland were taken for analyzing the changes of soil moisture and soil granularity characteristics. The results show that the average soil moistures of different microtopographies for shrub-covered

收稿日期:2015-03-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41140028,41340043);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310827152014);黄土与第四纪地质国家重点实验室基金项目(SKLLQG1307)

作者简介:符超峰(1969-),男,陕西兴平人,长安大学副教授,理学博士,E-mail:fucf@chd.edu.cn.

dune and tree-covered dune in descending order are inter-dune lowland, windward slope and leeward slope; the average soil moistures in inter-dune lowland are higher than those in leeward slope and windward slope in bare migratory dune, but the changes of average soil moistures of leeward slope and windward slope are irregular; the differences of soil moistures of sampling sites in vertical subsections from the microtopographies of sand dunes are significant, and the variation trends are diverse; vegetation form and surface coverage significantly affect the change of soil moistures under the same microtopography of sand dunes, and the effect of shrub is more than that of tree; soil moistures of leeward slope and windward slope in vegetation-covered dune are generally higher than those in bare migratory dune, and the shallow bedrock aquifuge affects sharply soil moisture in inter-dune lowland; the relationship between soil moistures in vegetation-covered dune and contents of fine-sized soil (clay and silt, etc.) is significantly positive, and the surface vegetation improves the volume fraction of clay by means of trap fine-grained atmospheric dust and holds moisture.

Key words: soil moisture; sand dune; inter-dune lowland; windward slope; leeward slope; vegetation; granularity; Mu Us sandy land

0 引言

在干旱地区,土壤水分是植被生长和风沙侵蚀的主要影响因素^[1-3]。近几十年来,很多研究关注到影响土壤水分时空分布的影响因素。这些因素归纳起来主要有土壤性质^[4-5]、地貌^[6-11]、植被^[12-17]、地表覆盖及利用^[4,18]等。这些因素对水资源管理和生态环境保护都有着非常重要的影响^[19-21],然而即使土壤水分的时空变化率很大,影响因素复杂多变且相互关联,但是从区域水文、生态和地质综合环境角度来研究土壤水分变化及分布特征依然非常必要^[11,22-23]。干旱一半干旱地区土壤水分是影响生态系统结构和功能的关键因素,有限的水资源常成为植物生长的关键限制因子^[4,15],因此,加强干旱一半干旱地区砂质土壤水分分布特征的研究,对水资源的有效管理、植被的健康生长和防沙治沙具有重要价值。然而,在干旱一半干旱气候区,由于中长期气象资料和水文记录的缺乏,人类对沙漠地区土壤水分分布特征及其控制因素还知之甚少。

Berndtsson 等对于干旱一半干旱地区及毛乌素沙地地区土壤水分已进行了大量的研究工作^[24-32],但都集中在地表或浅层土壤内(距离地表小于 1 m)。以往研究认为,在固定沙丘或有茂密植被的沙丘中,土壤含水量很低,但在移动沙丘或植被稀疏的沙丘中,土壤含水量高。然而,对地表超过 2 m 深度的砂质土壤含水量的研究缺乏。土壤水分及其影响因素之间的关系需要在不同区域和范围内进行研究^[33],因此,本文在毛乌素沙地东南缘不同类型沙

丘土壤水分研究的基础上,进一步研究毛乌素沙地中部地区不同类型沙丘地表 4 m 深度以内的土壤水分特征,以期在更大范围内了解毛乌素沙地土壤水分的空间分布,为荒漠化地区生态环境的保护与恢复提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于毛乌素沙地中部乌审旗。该区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市西南部,地处毛乌素沙地腹部,经度范围为 $108^{\circ}17'36''\text{E} \sim 109^{\circ}40'22''\text{E}$,纬度范围为 $37^{\circ}38'54''\text{N} \sim 39^{\circ}23'50''\text{N}$ 。乌审旗境内属温带大陆性季风气候,年平均气温为 6.8°C ,全年日照为 $2\,800 \sim 3\,000\text{ h}$,年降水量为 $350 \sim 400\text{ mm}$,年蒸发量为 $2\,200 \sim 2\,800\text{ mm}$,年平均风速为 $3.4\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,年无霜期为 $113 \sim 156\text{ d}$ 。降雨是季节性的,冬、春季降雪稀少,夏、秋季雨水集中。降水量年际和年内变化很大,风沙频繁,多刮西北大风,属于半干旱地区。乌审旗境内碱水湖泊较多,部分地区基岩较浅。乌审旗属于典型草原带,沙地广布,沙生植被是本地植被主体,以沙蒿(*Artemisia arenaria*)、柠条(*Caragana intermedia intermedia*)群落为最广泛,沙蓬(*Agriophyllum*)、猪毛菜(*Salsola collina* Pall)、烛台虫实(*Corispermum candelabrum*)、沙鞭(*Psammochloa villosa* (Trin.) Bor)等组成固定、半固定沙地优势群落,有时夹杂偏中生成分,如斜茎黄芪(*Astragalus adsurgens* Pall)、香青兰(*Dracocephala inoldavica* L.)、牛心朴子(*Cynanchum komarovii* Al)、红柳(*Tamarix ramosissima* Ledeb)

等;纳林河、黄陶勒盖、图克地区尚残存成片的沙地柏(*Sabina vulgaris*);丘间低地和柳湾以沙柳(*Salix psammophila*)、乌柳(*Salix cheilophila*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、针茅(*Stipa capillata* Linn)为主,还出现旋复花(*Inula britannica* L. var. *chinensis* (Rupr.) Reg)、绶草(*Spiranthes sinensis*)等喜湿植物;针茅(*Stipa glareosa*)、兴安胡枝子(*Lespedeza davurica*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)等零星出现在个别沙梁顶或沙梁坡上^[34];还有一定数量的稀疏人工乔木林,通常以杨树为多。该区植被覆盖度为中等水平(约 20%),人工乔木林地略高,但不超过 25%。地貌以起伏的沙丘为主;根据植被类型和植被覆盖度,可将沙丘类型分为裸露流动沙丘、灌木覆盖沙丘和乔木覆盖沙丘^[35-36]。

2 材料与方法

2.1 野外采样描述

为了避免降水和生长期植物蒸腾作用对土壤含水量的影响,笔者在 2009 年春季对研究区域进行实地考察,选取乌审旗境内裸露流动沙丘、灌木覆盖沙丘及乔木覆盖沙丘 3 种不同类型的沙丘作为样地,分别沿主流沙丘的空间展布方向(NW—SE 向)在每种类型沙丘的迎风坡、背风坡中部及丘间洼地中部等不同微地貌选取样点,利用人力钻(由中国科学院水利部水土保持研究所研发,靠人力转动钻杆钻孔采样)钻孔采样。每种类型沙丘各选 2 个平行样点分别进行系统采样,并将测试结果进行对比分析。研究区地质概况及样点分布见图 1,各类型沙丘采样点编号、海拔高程及经纬度详见表 1,钻孔最大深度为 4 m,采样间距为 10 cm,样品质量一般为 50~60 g。

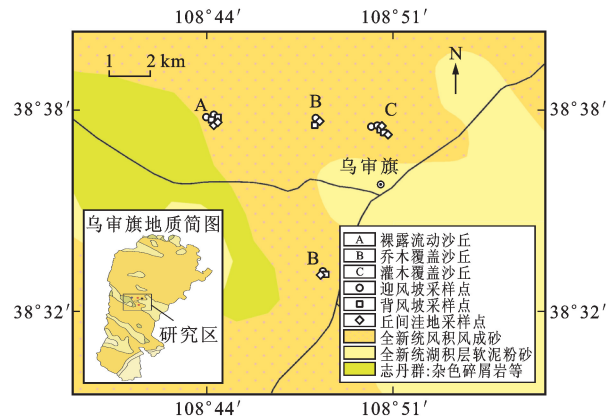


图 1 乌审旗采样点分布

Fig. 1 Location of Sampling Sites in Uxin Banner

表 1 沙丘剖面采样位置
Tab. 1 Location of Sampling Sites of
Different Sections of Sand Dunes

沙丘 类型	采样 部位	采样点 编号	海拔 高程/m	经纬度
裸露流动 沙丘	迎风坡	WS1-1a	1 339	(108°44′09.9″E, 38°38′33.5″N)
	迎风坡	WS1-2a	1 346	(108°44′05.1″E, 33°38′32.9″N)
	背风坡	WS1-1b	1 339	(108°44′11.3″E, 38°38′32.7″N)
	背风坡	WS2-2b	1 343	(108°44′07.2″E, 38°38′31.5″N)
	丘间洼地	WS1-1w	1 333	(108°44′10.7″E, 38°38′31.7″N)
	丘间洼地	WS1-2w	1 328	(108°44′07.1″E, 38°38′29.9″N)
灌木覆盖 沙丘	迎风坡	WS2-1a	1 313	(108°50′57.7″E, 38°37′57.5″N)
	迎风坡	WS2-2a	1 305	(108°50′54.2″E, 38°37′56.7″N)
	背风坡	WS2-1b	1 313	(108°50′58.3″E, 38°37′56.5″N)
	背风坡	WS2-2b	1 310	(108°50′59.5″E, 38°37′56.2″N)
	丘间洼地	WS2-1w	1 303	(108°51′00.6″E, 38°37′55.4″N)
	丘间洼地	WS2-2w	1 302	(108°50′58.7″E, 38°37′57.1″N)
乔木覆盖 沙丘	迎风坡	WS3-1a	1 322	(108°48′23.4″E, 38°38′24.5″N)
	迎风坡	WS3-2a	1 324	(108°48′21.3″E, 38°33′26.7″N)
	背风坡	WS3-1b	1 326	(108°48′24.1″E, 38°38′21.4″N)
	背风坡	WS3-2b	1 325	(108°48′23.1″E, 38°33′26.3″N)
	丘间洼地	WS3-1w	1 322	(108°48′25.3″E, 38°38′21.7″N)
	丘间洼地	WS3-2w	1 321	(108°48′21.3″E, 38°33′25.4″N)

2.2 土壤含水量测定

土壤含水量测定利用经典的烘干称重法。土壤烘干前、后,每个样品称重 3 次,误差小于 0.3%。为防止水分散失,在现场进行烘干前的样品称重。样品带回实验室,在温度 105 ℃ 的条件下烘干至恒重。土壤含水量计算公式为

$$W = (W_1 - W_2) / W_2 \times 100\%$$

式中:W 为所测样品的土壤含水量(质量分数,下同);W₁ 为烘干前土壤样品质量;W₂ 为烘干后土壤样品质量。

使用软件 Origin8 对不同采样点土壤含水量随深度变化的情况进行分析;在软件 Excel 中进行含水量参数的统计计算。

2.3 粒度测试

沙丘样品的粒度分析采用 Mastersizer2000 型激光粒度仪测定。首先,在实验室取 1~2 g 样品分别用稀盐酸和双氧水处理,去除样品中的碳酸盐和有机质等胶结物质,再加入分散剂六偏磷酸钠使沙粒由复粒充分扩散为单个颗粒;然后,把分散处理的样品用激光粒度仪测定其不同粒级的粒度分布特征^[37-38],每个样品重复测量 3 次,取平均值。平均粒

度、黏粒、粉砂和细砂等粒级分布的概率密度分布参数用软件 Excel 来计算统计。

3 结果分析

3.1 裸露流动沙丘不同微地貌水分垂向分布

图2为2个裸露流动沙丘不同微地貌土壤含水量的变化。裸露流动沙丘迎风坡采样点 WS1-1a 土壤含水量为 1.91%~6.21%,均值为 3.40%;采样点 WS1-2a 土壤含水量为 2.21%~4.12%,均值为 3.08%;2个裸露流动沙丘迎风坡土壤含水量变化基本一致,采样点 WS1-1a 土壤含水量比采样点 WS1-2a 更大。裸露流动沙丘背风坡采样点 WS1-1b 土壤含水量为 0.58%~4.24%,均值为 2.68%;采样点 WS1-2b 土壤含水量为 0.75%~5.15%,均值为 3.59%;2个裸露流动沙丘背风坡土壤含水量差距较大,采样点 WS1-2b 土壤含水量在大部分深度高于采样点 WS1-1b,且采样点 WS1-2b 在接近 4 m 深的位置土壤含水量突变,并出现极大值。裸露流动沙丘丘间洼地采样点 WS1-1w 土壤含水量为 5.22%~26.99%,均值为 16.78%;采样点 WS1-2w 土壤含水量为 19.41%~27.03%,均值为 23.28%;2个裸露流动沙丘丘间洼地土壤含水量已经远远超过沙土的田间持水量峰值(约 5%)^[39],土壤水类型为重力水,这与隔水层基岩埋深较浅直接相关。裸露流动沙丘丘间洼地 2 个采样点基岩埋深较浅,采样深度未能达到 4 m,土壤含水量均较大,而采样点 WS1-2w 海拔比采样点 WS1-1w 低,更接近基岩,土壤层较薄,因此,采样点 WS1-2w 土壤含水量变化趋势与采样点 WS1-1w 在一定深度后的变化趋势有明显一致性。比较裸露流动沙丘不同微地貌平均土壤含水量,丘间洼地土壤含水量最大,但迎风坡和

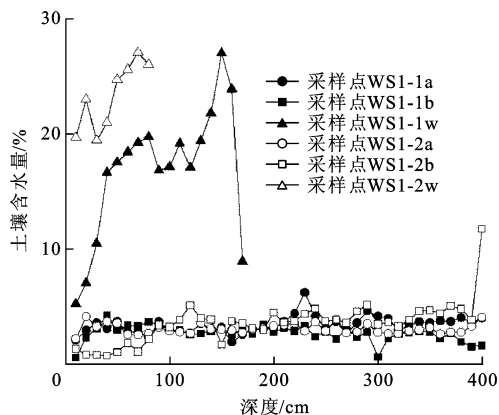


图2 裸露流动沙丘不同微地貌土壤含水量变化

Fig. 2 Changes of Soil Moistures of Different Microtopographies for Bare Migratory Dunes

背风坡的平均土壤含水量存在一定差异,这和该地区整体干旱、局地气象变化、沙丘移动和浅层基岩隔水有关。

根据土壤含水量的变化,可将裸露流动沙丘 3 种不同微地貌钻孔土壤含水量分为 3 段(表 2)。0~80、80~170 cm 深度的土壤含水量表现为丘间洼地土壤含水量大于迎风坡和背风坡,迎风坡和背风坡土壤含水量变化无明显规律;170~400 cm 深度的迎风坡和背风坡土壤含水量变化也无明显规律。迎风坡土壤含水量随深度的变化相对较小;背风坡采样点 WS1-1b 土壤含水量变化不大,而采样点 WS1-2b 变化幅度较大,为 1.23%~4.04%,且深度越大土壤含水量越大;丘间洼地各段土壤含水量均较大,且变化幅度较为剧烈。这种特征和该区气候整体干旱、沙丘移动及基岩埋深较浅有关。

表 2 裸露流动沙丘采样点垂向分段平均土壤含水量

Tab. 2 Average Soil Moistures of Sampling Sites in Vertical Subsections for Bare Migratory Dunes

分段深度/ cm	各采样点平均土壤含水量/%					
	WS1-1a	WS1-2a	WS1-1b	WS1-2b	WS1-1w	WS1-2w
0~80	2.91	3.08	2.94	1.23	14.27	23.28
80~170	2.93	3.00	2.90	3.60	19.00	
170~400	3.75	3.11	2.51	4.04		

3.2 灌木覆盖沙丘不同微地貌水分垂向分布

图3为灌木覆盖沙丘不同微地貌土壤含水量的变化。灌木覆盖沙丘迎风坡采样点 WS2-1a 土壤含水量为 2.01%~25.84%,均值为 7.82%;采样点 WS2-2a 土壤含水量为 2.19%~23.14%,均值为 6.40%。灌木覆盖沙丘背风坡采样点 WS2-1b 土壤含水量为 2.48%~8.50%,均值为 3.57%;采样点

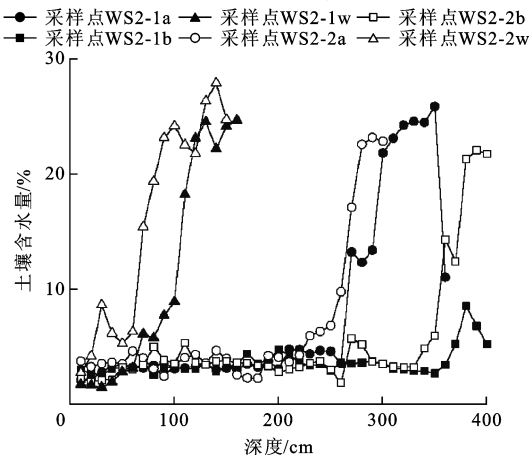


图3 灌木覆盖沙丘不同微地貌土壤含水量变化

Fig. 3 Changes of Soil Moistures of Different Microtopographies for Shrub-covered Dunes

WS2-2b 土壤含水量为 1.80%~22.01%,均值为 5.34%。灌木覆盖沙丘丘间洼地采样点 WS2-1w 土壤含水量为 1.39%~24.64%,均值为 11.08%;采样点 WS2-2w 土壤含水量为 2.66%~27.85%,均值为 15.86%。迎风坡和丘间洼地采样点海拔较低,距离基岩较近,采样深度未达到 4 m,因此,迎风坡和丘间洼地土壤水在一定深度接近基岩处表现为重力水,这与浅层基岩隔水阻渗有关。

根据土壤含水量的变化,可将灌木覆盖沙丘 3 种不同微地貌钻孔土壤含水量分为 4 段(表 3)。0~60 cm 深度灌木覆盖沙丘土壤含水量变化无明显规律;60~250、250~360 cm 深度不同微地貌平均土壤含水量从大到小依次为丘间洼地、迎风坡、背风坡。迎风坡土壤含水量前期变化幅度不大,但在 250 cm 深度处发生突变,土壤含水量剧增;背风坡土壤含水量前期变化也相对较小,但在 360 cm 深度处土壤含水量剧增;丘间洼地土壤含水量变化剧烈,且随深度的增加而剧烈增加。灌木覆盖沙丘不同微地貌土壤含水量的突然跃增与其接近浅层基岩隔水层有关。

表 3 灌木覆盖沙丘采样点垂向分段平均土壤含水量

Tab. 3 Average Soil Moistures of Sampling Sites in Vertical Subsections for Shrub-covered Dunes

分段深度/ cm	各采样点平均土壤含水量/%					
	WS2-1a	WS2-2a	WS2-1b	WS2-2b	WS2-1w	WS2-2w
0~60	2.78	3.65	2.85	2.39	2.05	5.48
60~250	3.57	3.94	3.41	3.59	16.49	22.78
250~360	17.92	19.06	3.22	4.92		
360~400			6.39	19.34		

3.3 乔木覆盖沙丘不同微地貌水分垂向分布

图 4 为乔木覆盖沙丘不同微地貌土壤含水量的变化。乔木覆盖沙丘迎风坡采样点 WS3-1a 土壤含水量为 2.3%~20.7%,均值为 6.71%;采样点 WS3-2a 土壤含水量为 1.42%~8.37%,均值为 4.54%;2 个采样点土壤含水量变化趋势一致,但前者变化范围大于后者。乔木覆盖沙丘背风坡采样点 WS3-1b 土壤含水量为 1.16%~11.79%,均值为 4.31%;采样点 WS3-2b 土壤含水量为 1.69%~7.16%,均值为 3.45%;前者的波动幅度比后者大。乔木覆盖沙丘丘间洼地采样点 WS3-1w 土壤含水量为 2.14%~23.50%,均值为 10.24%;采样点 WS3-2w 土壤含水量为 1.50%~27.68%,均值为 7.49%;丘间洼地采样深度未达到 4 m,2 个采样点变化趋势一致,但是采样点 WS3-1w 土壤含水量开

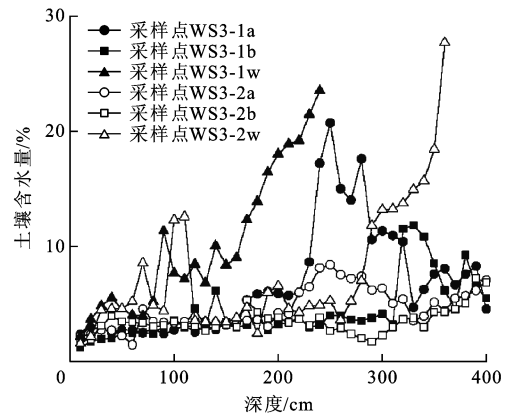


图 4 乔木覆盖沙丘不同微地貌土壤含水量变化

Fig. 4 Changes of Soil Moistures of Different Microtopographies for Tree-covered Dunes

始剧烈增加的深度明显浅于采样点 WS3-2w。整体来看,不同微地貌土壤含水量均值从大到小依次为丘间洼地、迎风坡、背风坡。

根据土壤含水量的变化,可将乔木覆盖沙丘 3 种不同微地貌钻孔土壤含水量分为 3 段(表 4)。乔木覆盖沙丘不同微地貌各段平均土壤含水量大多数从大到小依次为丘间洼地、迎风坡和背风坡,少部分不同微地貌土壤含水量大小排列顺序与此不同,主要与该区气候干旱、局地气象变化及浅层基岩的隔水有关。乔木覆盖沙丘迎风坡土壤含水量变化幅度较大,采样点 WS3-1a 为 2.92%~11.10%,采样点 WS3-2a 为 3.04%~6.02%。背风坡采样点 WS3-2b 土壤含水量变化幅度较小,为 3.02%~4.53%;而采样点 WS3-1b 土壤含水量变化幅度较大,为 2.88%~7.75%,并在 310 cm 深度处发生剧烈变化。丘间洼地土壤含水量变化十分剧烈,2 个采样点土壤含水量均随深度的增加而增加;采样点 WS3-1w 土壤含水量为 6.73%~18.75%,在 70 cm 深度处土壤含水量开始明显增加;采样点 WS3-2w 土壤含水量为 5.11%~17.27%,在 260 cm 深度处土壤含水量开始明显增加。

表 4 乔木覆盖沙丘采样点垂向分段平均土壤含水量

Tab. 4 Average Soil Moistures of Sampling Sites in Vertical Subsections for Tree-covered Dunes

分段深度/ cm	各采样点平均土壤含水量/%					
	WS3-1a	WS3-2a	WS3-1b	WS3-2b	WS3-1w	WS3-2w
0~170	2.92	3.04	2.88	3.14	6.73	5.11
170~300	11.10	6.02	3.55	3.02	18.75	6.09
300~400	7.47	5.15	7.75	4.53		17.27

3.4 3 种类型沙丘相同微地貌土壤水分变化比较

由表 5 可以看出:不同类型沙丘迎风坡平均土

壤含水量从大到小依次为灌木覆盖沙丘、乔木覆盖沙丘、裸露流动沙丘;不同类型沙丘背风坡土壤含水量存在差异,但无明显规律;不同类型沙丘丘间洼地平均土壤含水量从大到小依次为裸露流动沙丘、灌木覆盖沙丘、乔木覆盖沙丘。微地貌土壤含水量的

变异系数整体显示出灌木覆盖沙丘和乔木覆盖沙丘土壤含水量的波动变化比裸露流动沙丘大。不同类型沙丘相同微地貌土壤含水量随深度变化的趋势基本一致,海拔较低的采样点土壤含水量在相对较浅的深度开始变化。

表 5 不同类型沙丘各微地貌土壤含水量统计结果

Tab. 5 Statistical Results of Soil Moistures of Different Microtopographies for Different Types of Sand Dunes

采样点位置	裸露流动沙丘土壤含水量			灌木覆盖沙丘土壤含水量			乔木覆盖沙丘土壤含水量		
	均值/%	标准差/%	变异系数/%	均值/%	标准差/%	变异系数/%	均值/%	标准差/%	变异系数/%
迎风坡 1	3.40	0.76	22.33	7.82	7.91	101.09	6.71	4.77	70.99
迎风坡 2	3.08	0.44	14.27	6.40	6.23	97.36	4.54	1.80	39.63
背风坡 1	2.68	0.71	26.46	3.57	1.15	32.14	4.31	2.62	60.73
背风坡 2	3.59	1.85	51.47	5.34	5.27	98.68	3.45	1.15	33.41
丘间洼地 1	16.78	5.81	34.62	11.08	9.70	87.61	10.24	6.28	61.38
丘间洼地 2	23.28	2.98	12.79	15.86	9.29	58.60	7.49	5.63	75.24

0~4 m 土壤含水量变化可以明显反映出不同微地貌对不同类型沙地土壤水分分布的影响。在有灌木和乔木等覆盖的沙丘,不同微地貌土壤含水量从大到小依次为丘间洼地、迎风坡和背风坡;而对于裸露流动沙丘,丘间洼地土壤含水量远高于迎风坡和背风坡,由于裸露流动沙丘迎风坡和背风坡土壤含水量低,迎风坡被剥蚀,背风坡被沙埋,地表裸露,极容易受天气、地形等局部外界条件的影响,所以不同采样点所反映的不同微地貌土壤含水量大小规律存在一定差异。乔木与灌木植被主要分布在固定沙丘上,背风坡受到的日照时间更长,因此,土壤水分蒸发作用也更为明显,大量土壤水在蒸发中损失,致使背风坡土壤含水量低于迎风坡。而丘间洼地的地势相对较低,部分采样点基岩较浅,可能导致地表水被基岩阻挡,运移到低洼处渗出,因此,丘间洼地处土壤含水量相对高于迎风坡和背风坡。不同类型沙丘各微地貌不同层段土壤含水量的变化存在差异,变化趋势不统一。

灌木覆盖沙丘土壤含水量的变异系数相对较大,裸露流动沙丘相对较小,乔木覆盖沙丘居中。与

沙丘坡向和微尺度地貌差异等因素相比,植被覆盖类型对沙丘水分垂向变化的影响更显著。灌木覆盖沙丘平均土壤含水量和变异系数普遍高于乔木覆盖沙丘,说明灌木对沙丘土壤含水量的影响大于乔木。迎风坡和背风坡土壤含水量表现为灌木覆盖沙丘和乔木覆盖沙丘普遍大于裸露流动沙丘,而对于丘间洼地,由于采样深度均未达到 4 m,部分采样点基岩较浅,水分容易在基岩上部蓄积,所以土壤含水量受采样点位置的基岩深度影响更大,裸露流动沙丘土壤含水量变化高于植被覆盖地区。

3.5 沙丘土壤粒度组成及其对土壤含水量的影响

分别在裸露流动沙丘、灌木覆盖沙丘和乔木覆盖沙丘迎风坡的 3 个钻孔中,以 20 cm 间距分别取 20 个样品在激光粒度仪进行分析测试,得到不同类型沙丘 0~4 m 沙土层的粒度频率累积曲线和粒度组成特征(表 6、图 5)。

对比表 6 和图 5 裸露流动沙丘、灌木覆盖沙丘和乔木覆盖沙丘的粒度组成数据,可以看出 3 种类型沙丘具有相近的粒度组成,均以极细砂为主,含有少量细砂与粉砂,而黏土体积分数很少,中砂以上的

表 6 不同类型沙丘的粒度组成特征

Tab. 6 Characteristics of Granularity Distribution for Different Types of Sand Dunes

沙丘类型	中砂(粒径为 0.25~0.5 mm)体积分数		细砂(粒径为 0.125~0.25 mm)体积分数		极细砂(粒径为 0.063~0.125 mm)体积分数		粉砂(粒径为 0.003 9~0.063 mm)体积分数		黏土(粒径小于 0.003 9 mm)体积分数	
	均值/%	标准差/%	均值/%	标准差/%	均值/%	标准差/%	均值/%	标准差/%	均值/%	标准差/%
裸露流动沙丘	0	0	21.803	3.49	65.125	1.77	10.816	1.26	2.256	0.03
灌木覆盖沙丘	0	0	17.866	3.33	69.519	1.81	10.975	1.33	1.640	0.01
乔木覆盖沙丘	0	0	17.296	2.59	48.136	0.87	13.821	1.14	20.746	0.13

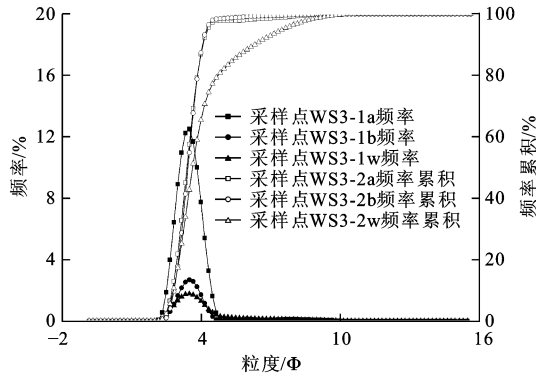


图5 不同类型沙丘沙土粒度频率累积曲线

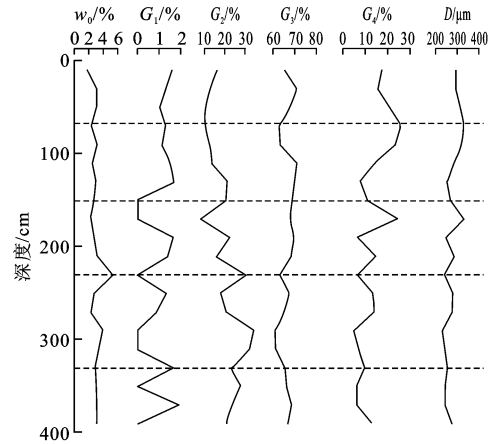
Fig. 5 Curves of Grain Size Frequency Accumulation for Different Types of Sand Dunes

颗粒几乎没有,这与研究区域的风沙动力过程有关。裸露流动沙丘与灌木覆盖沙丘的粒度频率累积曲线变化趋势基本一致,而乔木覆盖沙丘极细砂体积分数相对偏少,粉砂与黏土体积分数相对偏多。

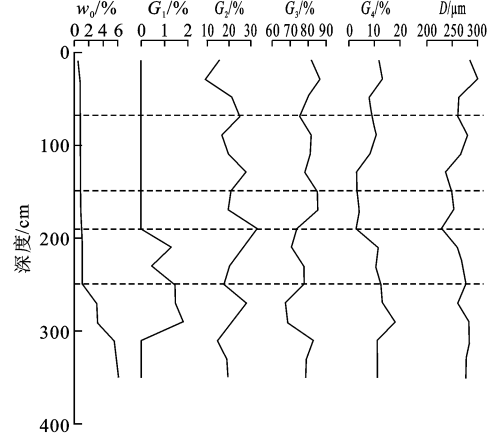
将土壤含水量与土壤不同颗粒体积分数进行对比分析(图6)。对于不同类型沙丘,在沙地中粒径小于 $4\mu\text{m}$ 的黏土体积分数小于2%的情况下,土壤含水量一般低于沙层的田间持水量,和粉砂体积分数呈正相关关系,和极细砂、细砂体积分数及平均粒径大小呈负相关关系,土壤含水量超过最大田间持水量,含水量剧增,水分类型变成重力水时,这往往和浅层基岩隔水层有关;在沙地中粒径小于 $4\mu\text{m}$ 的黏土体积分数大于2%的情况下,土壤含水量远远超过沙层的田间持水量,甚至超过10%,这主要是黏土体积分数增加所致,含水量与黏土和粉砂体积分数相关性很好,与极细砂、细砂及平均粒径呈负相关关系,这在图6(c)中表现尤为明显。

由于灌木覆盖沙丘和乔木覆盖沙丘采样点土壤含水量在一定深度受基岩影响显著,为了测算土壤颗粒大小对土壤含水量的影响,在灌木覆盖沙丘采样点选取0~250 cm深度样品,在乔木覆盖沙丘选取0~230 cm深度样品进行相关性分析(表7)。

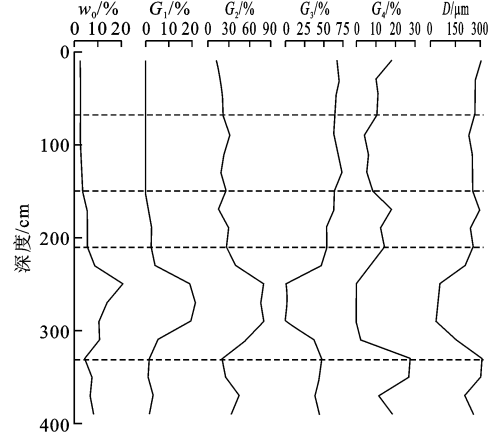
从理论上来说,各种土壤颗粒的持水能力从大到小依次为黏土、粉砂、极细砂、细砂。由表4可知,裸露流动沙丘迎风坡采样点的土壤含水量很低,受土壤颗粒大小的影响不显著,计算所得的土壤含水量与各土壤颗粒体积分数的相关性普遍较低,而且与理论预期值存在一定差异。重新计算灌木覆盖沙丘采样点0~250 cm深度样品及乔木覆盖沙丘0~230 cm深度样品的平均土壤含水量,灌木覆盖沙丘为3.46%,乔木覆盖沙丘为3.98%,表现为乔木覆



(a) 采样点WS1-1a



(b) 采样点WS2-1a



(c) 采样点WS3-1a

w_0 为土壤含水量; G_1 为黏土体积分数; G_2 为粉砂体积分数; G_3 为极细砂体积分数; G_4 为细砂体积分数; D 为平均粒径

图6 不同类型沙丘土壤含水量及各粒级序列曲线

Fig. 6 Curves of Soil Moistures and Different Grain Size Sequences for Different Types of Sand Dunes

盖沙丘土壤含水量大于灌木覆盖沙丘。由于乔木覆盖沙丘土壤颗粒中黏土与粉砂体积分数相对较高,所以其对土壤含水量的影响相对较大。而灌木覆盖沙丘土壤颗粒中黏土与粉砂含量很少,因此,其对土壤含水量的影响相对较小。

表7 不同类型沙丘迎风坡土壤含水量与各粒级颗粒体积分数的相关系数

Tab. 7 Correlation Coefficients Between Soil Moistures of Windward Slopes for Different Types of Sand Dunes and Volume Fractions of Different Grain Sizes

参数	不同类型沙丘迎风坡土壤含水量		
	裸露流动沙丘	灌木覆盖沙丘	乔木覆盖沙丘
细砂体积分数	0.50	0.09	0.13
极细砂体积分数	0.36	0.62	0.86
粉砂体积分数	0.62	0.38	0.61
黏土体积分数	0.39	0.78	0.97

乌审旗地区沙丘表面的植被覆盖对土壤含水量有明显影响。植被对土壤含水量的影响与植被拦截近地表气流中悬浮的粉砂和黏土,从而增加了植被覆盖区域沙丘中粉砂体积分数有关^[37-38],进而提高了土壤的持水能力。采样区人工乔木林覆盖沙丘土壤的黏土体积分数高于灌木覆盖沙丘,这可能与人工乔木林多出现在人口聚居区及相近区域,放牧或耕种引起沙地土壤化有关。裸露流动沙丘和灌木覆盖沙丘的粒度频率累积曲线基本一致,说明灌木覆盖沙丘为植被较为稀疏的半固定沙丘。

4 结 语

(1)毛乌素沙地中部地区灌木覆盖沙丘和乔木覆盖沙丘不同微地貌土壤含水量差异较为明显,平均土壤含水量从大到小依次为丘间洼地、迎风坡、背风坡。裸露流动沙丘丘间洼地土壤含水量远高于迎风坡和背风坡,但是由于迎风坡和背风坡土壤含水量较低,且因地表裸露,容易受天气或地形等局部外界条件影响,导致不同采样点土壤含水量变化无明显规律。各微地貌不同层段土壤含水量垂向变化也有差异。

(2)毛乌素沙地中部地区相同类型沙丘微地貌,植被覆盖类型对于土壤含水量的垂向变化有较大影响,且灌木植被的影响大于乔木植被。迎风坡和背风坡土壤含水量表现为有植被覆盖的沙丘普遍大于裸露流动沙丘,而丘间洼地处浅层基岩隔水作用对土壤含水量的影响更大。

(3)毛乌素沙地中部地区有植被覆盖的固定、半固定沙丘土壤含水量与沙层土壤粒度存在明显关联性,其中土壤含水量与土壤中黏土和粉砂体积分数呈正相关关系。植被的存在影响了沙丘的移动,固化了沙丘,同时植被本身通过拦截地表大气中悬浮的粉尘粒子而增加了沙丘中粉砂和黏土体积分数,

进而提高了沙丘土壤的持水能力。不同植被覆盖类型沙丘拦截粉砂和黏土颗粒的能力有差异,这与植被的数量和分布特征有关。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 韩德儒,杨文斌,杨茂仁,等.干旱半干旱沙地灌(乔)木种水分动态关系及其应用[M].北京:中国科学技术出版社,1996.
HAN De-ru, YANG Wen-bin, YANG Mao-ren, et al. Relations and Applications on the Shrub(Arbor) Water Dynamic in Arid and Semi-arid Sandy Land[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1996.
- [2] 贾宝全,慈龙骏,蔡体久,等.绿洲-荒漠交错带土壤水分变化特征初步研究[J].植物生态学报,2002,26(2):203-208.
JIA Bao-quan, CI Long-jun, CAI Ti-jiu, et al. Preliminary Research on Changing Soil Water Characters at Ecotone Between Oasis and Desert[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2002, 26(2): 203-208.
- [3] 李红丽,董智,王林和.浑善达克沙地流沙与四种主要植物群落土壤水分时空变化的研究[J].干旱区资源与环境,2006,20(3):169-174.
LI Hong-li, DONG Zhi, WANG Lin-he. Research on Temporal and Spacial Variety of Soil Moistures of Shifting Sand Dune and Four Main Plant Communities on Otindag Sandy Land[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(3): 169-174.
- [4] CANTON Y, SOLE-BENET A, DOMINGO F. Temporal and Spatial Patterns of Soil Moisture in Semiarid Badlands of SE Spain[J]. Journal of Hydrology, 2004, 285(1/2/3/4): 199-214.
- [5] SUR C Y, JUNG Y, CHOI M H. Temporal Stability and Variability of Field Scale Soil Moisture on Mountainous Hillslopes in Northeast Asia[J]. Geoderma, 2013, 207/208: 234-243.
- [6] BERGKAMP G. A Hierarchical View of the Interactions of Runoff and Infiltration with Vegetation and Microtopography in Semiarid Shrublands[J]. Catena, 1988, 33(3/4): 201-220.
- [7] BURT T P, BUTCHER D P. Topographic Controls of Soil Moisture Distributions[J]. Journal of Soil Science, 1985, 36(3): 469-486.
- [8] GOMEZ-PLAZA A, MARTINEZ-MENA M, ALBALADEJO J, et al. Factors Regulating Spatial Distribution of Soil Water Content in Small Semiarid Catchments[J]. Journal of Hydrology, 2001, 253(1/2/3/4): 211-226.

- [9] GAO X D, WU P T, ZHAO X N, et al. Soil Moisture Variability Along Transects over a Well-developed Gully in the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2011, 87(3): 357-367.
- [10] SVETLITCHNYI A A, PLOTNITSKIY S V, STEP OVAYA, O Y. Spatial Distribution of Soil Moisture Content Within Catchments and Its Modelling on the Basis of Topographic Data[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 277(1/2): 50-60.
- [11] WESTERN A W, GRAYSON R B, BLOSCHL G. et al. Observed Spatial Organization of Soil Moisture and Its Relation to Terrain Indices[J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(3): 797-810.
- [12] BROMLEY J, BROUWER J, BARKER A P. The Role of Surface Water Redistribution in an Area of Patterned Vegetation in a Semi-arid Environment, South-west Niger[J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 198(1/2/3/4): 1-29.
- [13] HAWLEY M E, JACKSON T J, MCCUEN R H. Surface Soil Moisture Variation on Small Agricultural Watersheds[J]. *Journal of Hydrology*, 1983, 62(1/2/3/4): 179-200.
- [14] PAN Y X, WANG X P, JIA R L, et al. Spatial Variability of Surface Soil Moisture Content in a Revegetated Desert Area in Shapotou, Northern China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(9): 1675-1683.
- [15] RODRIGUEZ-ITURBE I, D'ODORICO P, PORPORATO A, et al. On the Spatial and Temporal Links Between Vegetation, Climate, and Soil Moisture[J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(12): 3709-3722.
- [16] SEGHERI J, GALLE S, RAJOT J L, et al. Relationships Between Soil Moisture and Growth of Herbaceous Plants in a Natural Vegetation Mosaic in Niger[J]. *Journal of Arid Environments*, 1997, 36(1): 87-102.
- [17] YAIR A, DANIN A. Spatial Variations in Vegetation as Related to the Soil Moisture Regime over an Arid Limestone Hillside, Northern Negev, Israel[J]. *Oecologia*, 1980, 47(1): 83-88.
- [18] FU B J, CHEN L D, MA K M, et al. The Relationships Between Land Use and Soil Conditions in the Hilly Area of the Loess Plateau in Northern Shaanxi, China[J]. *Catena*, 2000, 39(1): 69-78.
- [19] LOIK M E, BRESHEARS D D, LAUENROTH W K, et al. A Multi-scale Perspective of Water Pulses in Dryland Ecosystems: Climatology and Ecohydrology of the Western USA[J]. *Oecologia*, 2004, 141(2): 269-281.
- [20] LUDWIG J A, WILCOX B P, BRESHEARS D D, et al. Vegetation Patches and Runoff-erosion as Interacting Ecohydrological Processes in Semiarid Landscapes[J]. *Ecology*, 2005, 86(2): 288-297.
- [21] REYNOLDS J F, KEMP P R, OGLE K, et al. Modifying the "Pulse-reserve" Paradigm for Deserts of North America: Precipitation Pulses, Soil Water, and Plant Responses[J]. *Oecologia*, 2004, 141(2): 194-210.
- [22] PETRONE R M, PRICE J S, CAREY S K, et al. Statistical Characterization of the Spatial Variability of Soil Moisture in a Cutover Peatland[J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18(1): 41-52.
- [23] FAMIGLIETTI J S, RUDNICKI J W, Rodell M. Variability in Surface Moisture Content Along a Hillslope Transect: Rattlesnake Hill, Texas[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 210(1/2/3/4): 259-281.
- [24] BERNDTSSON R, NODOMI K, YASUDA H, et al. Soil Water and Temperature Patterns in an Arid Desert Dune Sand[J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 185(1/2/3/4): 221-240.
- [25] BRESHEARS D D, BARNES F J. Interrelationships Between Plant Functional Types and Soil Moisture Heterogeneity for Semiarid Landscapes Within the Grassland/Forest Continuum: A Unified Conceptual Model[J]. *Landscape Ecology*, 1999, 14(5): 465-478.
- [26] 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(5): 225-236.
FENG Qi, CHENG Guo-dong. Moisture Distribution and Movement in Sandy Lands of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(5): 225-236.
- [27] 郭 柯, 董学军, 刘志茂. 毛乌素沙地沙丘土壤含水量特点: 兼论老固定沙地上油蒿衰退原因[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 275-279.
GUO Ke, DONG Xue-jun, LIU Zhi-mao. Characteristics of Soil Moisture Content on Sand Dunes in Mu Us Sandy Grassland: Why *Artemisia Ordosica* Declines on Old Fixed Sand Dunes[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(3): 275-279.
- [28] 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): 152-154.
LU Yi-zhong, HU Ke-lin, LI Bao-guo. The Spatiotemporal Variability of Soil Water in Sand Dunes in Mowusu Desert[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 152-154.
- [29] 王鸣远, 关三和, 王 义. 毛乌素沙地过渡地带土壤水分特征及其植物利用[J]. *干旱区资源与环境*, 2002, 16(2): 37-44.
WANG Ming-yuan, GUAN San-he, WANG Yi. Soil

- Moisture Regimen and Application for Plants in Maowusu Transition Zone from Sand Land to Desert [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2002, 16(2): 37-44.
- [30] 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): 61-65.
- WANG Zhi, WANG Lei, LIU Lian-you, et al. Preliminary Study on the Spatiotemporal Distribution of Moisture Content in Sand Dunes in the Southern Marginal Zone of the Mu Us Desert[J]. Arid Zone Research, 2007, 24(1): 61-65.
- [31] YAMANAKA T, YONETANI T. Dynamics of the Evaporation Zone in Dry Sandy Soils[J]. Journal of Hydrology, 1999, 217(1/2): 135-148.
- [32] YAMANAKA T, TAKEDA A, SHIMADA J. Evaporation Beneath the Soil Surface: Some Observational Evidence and Numerical Experiments[J]. Hydrological Processes, 1998, 12(13/14): 2193-2203.
- [33] QIU Y, FU B J, WANG J, et al. Soil Moisture Variation in Relation to Topography and Land Use in a Hillslope Catchment of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2001, 240(3/4): 243-263.
- [34] 白海花. 内蒙古乌审旗近 20 年的植被景观动态及预测[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.
- BAI Hai-hua. Dynamic of Vegetation Landscape for Recent 20 Years and Prediction in Wushen County of Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2012.
- [35] 符超峰, 梅凡民, 赵景波. 毛乌素沙地东南缘沙丘水分垂直变化规律与风蚀意义[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 105-110, 116.
- FU Chao-feng, MEI Fan-min, ZHAO Jing-bo. Vertical Distributions of Soil Moisture Contents of Three Types of Sand Dunes in Southeast of the Mu Us Sandy Land and Their Implications of Wind Erosion [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(6): 105-110, 116.
- [36] 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): 377-383.
- FU Chao-feng, ZHAO Jing-bo. Distribution of Soil Moisture Content in Different Types of Sand Dunes in the Southeastern Marginal Zone of the Mu Us Sandy Land[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(3): 377-383.
- [37] 鹿化煜, 安芷生. 洛川黄土粒度组成的古气候意义[J]. 科学通报, 1997, 42(1): 66-69.
- LU Hua-yu, AN Zhi-sheng. Paleoclimatic Significance of Grain Size Composite of Loess Deposit in Luochuan [J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(1): 66-69.
- [38] KONERT M, VANDENBERGHE J. Comparison of Laser Grain Size Analysis with Pipette and Sieve Analysis: A Solution for the Underestimation of the Clay Fraction[J]. Sedimentology, 1997, 44(3): 523-535.
- [39] 张 衡, 张称意, 史绣华, 等. 毛乌素沙区杨柴林、沙柳林沙地水文常数的研究[J]. 内蒙古林学院学报: 自然科学版, 1997, 19(1): 36-40.
- ZHANG Heng, ZHANG Chen-yi, SHI Xiu-hua, et al. A Study on the Hydrologic Constants of Sandy Land in Maowusu[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry College: Natural Science Edition, 1997, 19(1): 36-40.

《地球科学与环境学报》2016 年再次增加页码的通告

《地球科学与环境学报》从 2016 年第 1 期起每期页码由 112 页变更为 144 页, 欢迎广大作者踊跃投稿!

《地球科学与环境学报》作为教育部主管、长安大学主办的地球科学与环境领域的权威性学术刊物, 长期以来一直受到广大地球科学与环境领域科研工作者的关爱, 学术质量不断提高, 影响力不断扩大, 投稿量不断增加。为了进一步缩短论文发表时滞, 使地球科学与环境领域的学术成果更多、更快地发表, 打造更权威的地球科学与环境领域学术交流平台, 编辑部继 2013 年、2014 年连续两年增加页码以及 2015 年变更为双月刊之后决定再次扩容, 从 2016 年第 1 期起每期页码由 112 页变更为 144 页。