

毛乌素沙地西南缘不同植被下的土壤水分时空变化研究*

张进虎, 贺康宁, 段玉玺, 芦新建

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘 要: 在一个生长季内通过对毛乌素沙地不同植被下土壤水分的连续观测, 研究毛乌素沙地不同植被下的土壤水分时空动态变化规律。结果表明: 各样地土壤含水量生长期末低于生长期初, 按时间变化可划分为 3 个时期, 土壤水分积累期(4- 6 月)、土壤水分消耗期(7- 9 月)、土壤水分稳定期(10 月至次年 3 月)。在空间上, 各样地土壤含水量均随深度的增加而增加, 整个土壤剖面自上而下按水分变化规律可划分为 4 层: 土壤水分速变层、活跃层、过渡层和稳定层。土壤水分活跃层的深度与根系分布层密切相关, 深根系的植物其水分活跃层分布较深。固定沙丘不同部位的土壤含水量及其变化规律不同, 土壤含水量从大到小依次为坡脚> 坡腰> 坡顶。

关键词: 毛乌素沙地; 土壤水分; 植物群落; 时空变化

中图分类号: S152. 7 文献标识码: A 文章编号: 1002-3409(2008)012009-04

Study on the Spacial and Temporal Change of Soil Water Content Under Different Plant Coverage on the Southwestern Edge of Maowusu Sandy Land

ZHANG Jin2hu, HE Kang2ning, DUAN Yu2xi, LU Xin2jian
(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Spatial and temporal variations of soil water content was studied in different part of the sand dune fixing and soil covered by different plant community in the Maowusu sandy land. The study shows that, water content in the soil is higher at the beginning of the growing season than that of at the end of the growing season. Temporal variations of soil water content in every plots can be portioned into three periods, they are the period of accumulation (April-June), consumption (July-September) and stabilization (October-next March), while the soil can be divided into four layers according to the spatial variations of water content: vertiginous layer, active layer, transitional layer and relative stable layer from the top to the bottom. The changing of the vertiginous layer was closely related to the distributing of the roots growing in the soil, deeper distributing of the roots leading to deeper vertiginous layer. Soil water content was variable in different part of the sand dune fixing. The biggest water content was shown at the bottom of the slope, the next was shown at the middle and the smallest water content was shown at the top.

Key words: the Maowusu sandy land; soil water content; plant community; spatial and temporal variations

在干旱、半干旱地区, 水分是环境体系中最活跃的因素, 植被对水分具有高度的依赖性, 水分成为影响植物生存、生长发育的关键因素, 对植被的稳定生长与恢复重建具有极大的限制性^[25]。沙地土壤水分动态不仅受气候和土壤物理性质的影响, 还受植物种类等多种因子的制约, 致使不同地区植物群落的土壤水分动态表现出不同的特征^[1]。土壤水分条件的优劣是植被生产力的重要标志。而关于毛乌素沙地西南缘不同植被与沙地土壤水分关系的研究目前较少。鉴于此, 对该区生长的沙柳林地(3 a 生和 2 a 生)、柽柳林地、柠条林地、油蒿林地和芨芨草滩等的土壤水分动态及其时空分布格局进行一个生长季的观测和研究, 以期揭示该区不同植被下的土壤水分时空动态变化规律。

1 研究区概况

盐池县位于宁夏回族自治区东部, 地理坐标北纬 37°04'- 38°10', 东经 106°30'- 107°41'。盐池县北与毛乌素沙地相连, 南靠黄土高原, 在地理位置上属于一个典型的过渡地

带。即自南向北地形上是从黄土高原向鄂尔多斯台地(沙地)过渡地带, 在气候上是从半干旱区向干旱的过渡地带, 在植被上是从干草原向荒漠的过渡地带, 在资源利用上是从农区向牧区过渡地带, 自然资源具多样性和脆弱性特点。盐池县主要为剥蚀的准平原地形, 全县地势南高北低, 海拔高度 1 295~ 1 951 m, 南北明显地分为黄土丘陵和鄂尔多斯缓坡丘陵两大地貌单元。该县属于典型中温带大陆性气候, 年均气温 8.1℃, 极端最高温为 34.9℃, 极端最低温为- 24.2℃, 年均无霜期为 165 d。年降水仅 250~ 350 mm, 从东南向西北递减。土壤类型以灰钙土为主, 其次是黑垆土和风沙土, 此外还有黄土, 少量的盐土、白浆土等。

2 研究方法

2.1 实验区选择及样点布设

试验区选在毛乌素沙地西南缘的盐池县王乐井乡官滩村南沙窝沙区, 沙丘高度 4~ 8 m, 丘间地地下水埋深 2~ 3 m。样点分别布设在: 草方格固定沙丘的坡顶、坡腰、坡脚、

* 收稿日期: 2006-12-08
基金项目: 沙区农田和草场风蚀防控与人居环境安全保障技术研究(2005BA517A05); 国家科技支撑课题(2006BAD26B03)
作者简介: 张进虎(1982-), 男, 在读硕士, 主要从事林业生态工程研究。

丘间柽柳林地(3 a 生)、丘间沙柳林地(3 a 生)、丘间油蒿林、丘间芨芨草滩及半固定沙丘丘顶沙柳林地(2 a 生)、柠条林地,共 9 个点,其中丘间沙柳、柽柳、固定沙丘坡脚土壤水分受地下水影响。

表 1 研究区样地特征

样地	固定沙丘	丘间沙柳	丘间柽柳	油蒿林地	芨芨草滩	丘顶沙柳	柠条林地
立地	草方格	丘间低地	丘间低地	丘间滩地	丘间滩地	半固定沙丘	固定平沙地
类型	固定沙丘	(有地下水)	(有地下水)				
平均容重/ (g# cm ⁻³)	1.59	1.54	1.54	1.43	1.57	1.60	1.42

2.2 实验方法

在已选点上下铝管,用中子仪观测土壤含水量,在该区附近安装自动气象站,观测各种气象因子。

观测仪器:土壤水分观测为北京核子仪器公司生产的 CNC503B(DR)型中子仪;气象观测为美国生产的 DAVIS 小型自动观测气象站。

观测时间:2006 年 5- 9 月,每月的上中下旬定时观测一次,雨后 24 h 加测一次。

观测深度:每间隔 20 cm 为一层,其中草方格固定沙丘的坡顶、坡腰、坡脚、柠条林地和半固定沙丘坡顶的观测深度是 2 m(分 10 层);丘间沙柳林、丘间柽柳林、芨芨草滩、油蒿林的观测深度是 1 m(分 5 层)。

表 2 生长季降雨

项目	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	合计
降水次数	1	7	5	12	9	5	30
占总次数/%	2.564	17.949	12.821	30.769	23.077	12.821	100
降水量/mm	0.4	34.2	7.4	43	27.4	13.8	126.2
占总降水量/%	0.317	27.100	5.864	34.073	21.712	10.935	100

3 结果与分析

3.1 土壤水分季节动态

该实验区天然降水是土壤水分的主要来源,2006 年一个生长季的降雨量统计结果如表 2。

由表 2 可知,4- 9 月共降水 30 次,总降水量 126.2 mm,明显低于盐池县历年的平均降雨量(300 mm)。7,8 月份降水次数最多分别占总降雨次数的 30.77%和 23.07%,但就降雨量来说,5,7 月最多,5 月降雨 34.2 mm,占总降雨量的 27.1%;7 月降雨 43 mm,占总降雨量的 34.07%;4,6 月降水量最少(分别占 0.31%,5.86%);7,8,9 月份降水量较多,占总降水量的 66.72%。由此可知该区的降水极少并且月分配不均,主要集中在 7,8,9 三个月。

通过 2006 年一个生长季的连续观测,不同植被下土壤水分统计结果如图 1。由于 5 月降水比较丰富为 34.2 mm,各样地的土壤含水量均有所增加,但因上层土壤组成的差异,导致水分入渗深度不同。沙丘水分下渗深度比较大,达到 60~ 80 cm,这是因为沙土具有较强的毛管作用,水分容易下渗;丘间地下渗较少,下渗了 20~ 40 cm,这主要是因为丘间地有结皮存在,而结皮的形成大大滞阻水分渗进土壤;柠条林地下渗也比较大,达到了 80~ 100 cm,这是因为柠条林地的土壤为黏土,土壤颗粒较细具有大的渗透性能。

6 月上旬以后,由于地温和气温回升,植被开始生长,受地表蒸发及植物蒸腾作用的共同影响,沙地土壤水分不断散失,土壤含水量缓慢下降。加之本月的降水量小,共降水 5 次,总降水量才 7.4 mm,其中 3 次不到 1 mm,可认为是无效降雨,从而导致 0- 20 cm 土层水分含量一直处于较低水平,各样地土壤含水量均低于 3%。此时沙丘干沙层厚度发育到了 30~ 40 cm。

6 月中旬至 8 月中旬,植物进入生长旺盛期,蒸腾耗水量增加,土壤含水量迅速下降。按照本地历来来降水分配规律,这一时期应是雨季,土壤水分可以得到有效补给,但

2006 年 7- 8 月降水比较少,土壤水分接受的补给甚少,使得固定沙丘坡顶、坡腰、油蒿林地、半固定沙丘沙柳林地和柠条林地土壤持续干旱。6 月末 7 月上旬降雨较多,土壤含水量有所增加,但是到了 8 月份,只有 8 月 13 日和 8 月 20 日 2 次降雨较多,分别为 15,1.2 mm,可以认为是有效降雨(郭柯等)的研究表明,1 mm 的降水即可补给流沙),其余 7 次降雨每次均小于 0.4 mm.可以认为是无效降雨,从而导致除受地下水影响的丘间沙柳地、柽柳地和芨芨草滩的其余土壤剖面整体受到影响,土壤由上至下干燥,0- 20 cm 土层含水量下降至 2%以下。虽然 8 月 13 日一次就降了 15 mm,但因前期土壤消耗太大,土壤干燥过度,补充水分迅速下渗并扩散,使得土壤含水量并未上升。

9 月中旬以后,地温开始下降,植物生长衰退,消耗减少,而且 9 月 4 日和 24 日每次降雨 6.4 mm,使得土壤含水量稍有回升,但不明显,并不能下渗补给深层土壤,因而各剖面土壤含水量低于生长季初期的土壤含水量。

综上所述并结合当地多年的气象资料,该区土壤水分季节动态变化可划分为 3 个时期:

土壤水分积累期(4- 6 月):4- 6 月是当地积雪融化期,该时期土壤水分得到了有效补给,并且此时温度适中,植物蒸腾与土壤蒸发量少,所以土壤含水量是一个增加过程。

土壤水分消耗期(7- 9 月):除了降水量和土壤性质是影响土壤水分的主要因素外,影响土壤水分的还有植物吸收、蒸散和气温等因素。在 7- 8 月,植物进入了生长盛期,蒸散量大,虽有一定的降雨,但由于植冠截留与地表结皮的阻碍,沙地中水分向下润湿的深度一般比较浅,通常在降雨后土表立即蒸发,因此土壤含水量出现大幅度下降。9 月气温开始下降,植物生长衰退,消耗减少,降水显著减少,但土壤水分仍然十分活跃,降雨量小于蒸散量,所以土壤含水量还呈下降趋势。

土壤水分稳定期(10 月至次年 3 月):这一时期,气温较

低,植物停止生长,土壤开始冻结,进入了休眠时期,土壤含水量比较稳定。

3.2 土壤水分的垂直动态

根据观测统计结果,不同植被下土壤水分的垂直变化可分为 4 个层次。

1 土壤水分速变层。该层是土壤与大气水汽交换的媒介,直接受大气条件的影响,土壤与大气间的水分交换过程剧烈,特点是土壤水分变化迅速,湿度变化范围大,在雨后可达饱和持水量,干旱季节又可能下降到凋萎湿度附近。植被覆盖度较低的草方格固定沙丘的坡顶、坡腰、坡脚相对其他

立地类型要相对厚一些,达到了 0~ 20 cm,土壤含水量变化范围为 0.98%~ 4.58%;丘间沙柳林、柽柳林地有较好的植被盖度和林冠遮荫,这一层相对薄一点,只有 10 cm 左右,含水量变化范围分别为 0.43%~ 4.29%,0.62%~ 4.37%;油蒿林地该层为 0- 13 cm,含水量变化范围为 1.76%~ 3.14%;芨芨草滩和柠条林地由于有较好的植被盖度该层都为 0- 10 cm,含水量变化范围分别为 2.79%~ 6.98%,1.32%~ 4.44%;半固定沙丘丘顶沙柳林地该层为 0- 20 cm,含水量变化范围为 0.28%~ 2.67%。

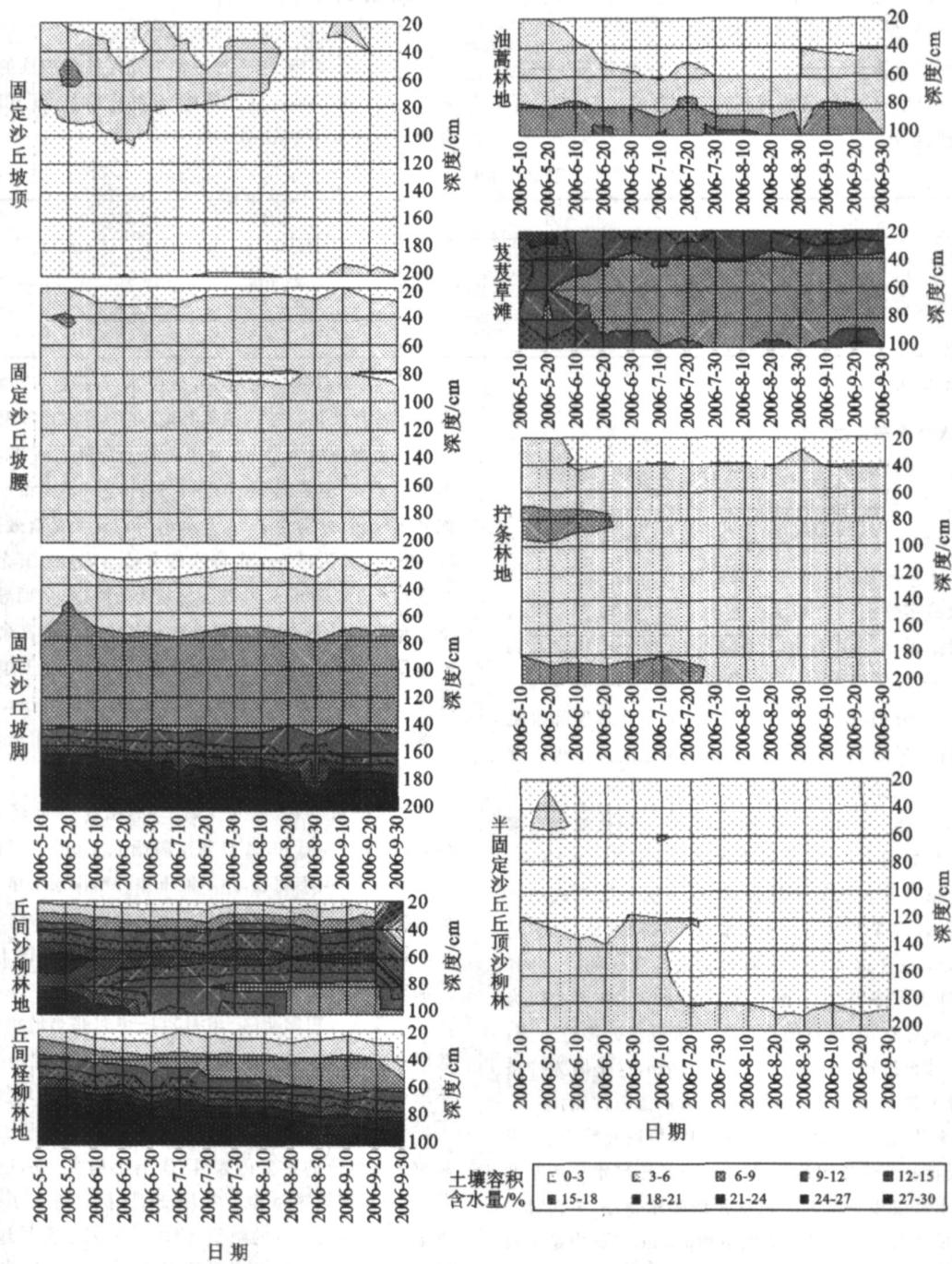


图 1 土壤水分等值线

2 土壤水分活跃层。该层土壤水分活动受天气、气候因素的影响虽比速变层小,但受植被根系活动的影响,表现仍比较活跃,土壤湿度的变化范围仍然较大,其厚度与植物的根系密切相关,不同的植物根系对应不同土壤水分活跃层的

厚度。固定沙丘各部位主要植物是沙米,根系比较浅,所以该层就比较薄为 20- 80 cm,含水量变化范围为 1.32%~ 7.17%;丘间沙柳、柽柳林地因为其根系比较深,所以该层就比较厚一些,为 20- 100 cm,含水量变化分别为 3.12%~

27.52%, 3.83%~ 32.92%; 油蒿和芨芨草的根系主要集中在 0- 60 cm 的土层中, 该层分别为 13- 60 cm, 10- 60 cm, 含水量变化范围分别为 2.65%~ 4.52%, 6.23%~ 12.34%; 丘顶沙柳林为 20- 60 cm, 含水量为 1.41%~ 3.52%; 柠条具有很深的根系, 该层为 10- 150 cm, 含水量为 2.66%~ 7.48%。

» 土壤水分过渡层。该层一般在 100 cm 以下, 基本上不受天气、气候因素的影响, 土壤水分循环的 4 个阶段在此层内逐渐减弱直至消失, 一般只有在春季严重干旱时, 该层的土壤含水量才略有下降。固定沙丘坡顶、坡脚该层的厚度为 80- 150 cm, 含水量变化范围为 2.9%~ 3.65%, 坡脚 80 cm 以下土层地下水的补给含水量有明显增加; 丘间沙柳、柽柳林地由于地下水影响 80 cm 以下土层含水量已超过饱和含水量, 土壤水循环至此结束; 油蒿林地、芨芨草滩、丘顶沙柳林地该层厚皆为 60- 80 cm, 含水量分别为 3%~ 7.29%,

表 3 不同立地及植被下土壤水分月变化 %

月份	坡顶	坡腰	坡脚	丘间沙柳林	丘间柽柳林	芨芨草	油蒿林	柠条林	丘顶沙柳林
5	3.23	4.00	12.23	15.40	18.68	12.79	4.40	5.19	3.20
6	2.88	3.62	11.24	11.34	16.11	9.56	4.39	4.53	2.78
7	2.72	3.66	10.81	9.23	14.75	8.77	4.31	4.50	2.62
8	2.68	3.67	9.73	9.04	13.22	7.72	4.09	4.43	2.37
9	2.78	3.69	10.42	8.71	11.53	9.15	4.21	4.49	2.43
平均	2.86	3.73	10.89	10.74	14.86	9.60	4.28	4.63	2.68

3.4 各样地土壤水分与植被生长状况

植被的生长情况是土壤水分状况好坏的一个标志, 各地植被的生长情况可以从侧面反映土壤水分状况。2006 年 6 月对试验区的植被做了调查。

在草方格固定沙丘主要建群植物是沙米, 但其不同部位的沙米生长情况存在很大差异: 丘顶沙米的平均高度为 12cm、盖度为 25%; 坡腰除了沙米外还有其他一些草本长势良好, 平均高度为 18 cm、盖度为 30%; 坡脚除了沙米和一些草本外还有人工沙柳, 长势良好, 草本的平均高度为 20 cm、盖度为 20%, 沙柳的高度为 2 m、冠幅为 1.5 m@2 m、盖度为 25%。

丘间柽柳、沙柳地, 有 9 种植物, 分别是风毛菊、赖草、中华苦荬菜、沙针棘豆、猪毛菜、针茅、沙地旋复花、披针叶黄华、黄蒿, 物种丰富, 生长良好, 主要建群种为赖草和中华苦荬菜, 平均高度为 12 cm、盖度为 35%。

芨芨草滩、油蒿林地, 柠条林地除了建群植物外几乎没有别的植物。芨芨草的平均高度为 70 cm, 盖度为 60%, 有衰退现象; 半固定沙丘顶沙柳林下只有零星的沙米, 但沙柳生长正常, 平均高度为 10 cm、盖度为 5%; 油蒿林的平均高度为 70 cm、盖度为 30%; 柠条林地已经有 20 a, 出现明显的衰退现象, 枯枝占整株植物的 20%, 平均高度为 2.5 m, 盖度为 35%, 冠幅为 2 m@2.5 m。

由此可以看出, 不同立地类型的植物种类及植物长势与土壤水分密切相关, 水分较好的丘间沙柳、柽柳林地的植物种类比较多, 而水分较差的柠条林地及油蒿林地的植物种类就非常少。

4 结 论

各样地土壤水分季节动态变化明显, 生长初期各剖面土壤含水量都较高, 进入生长季, 土壤含水量逐渐下降, 9 月中

6.01%~ 12.71%, 2.32%~ 3.03%; 柠条林地该层为 150- 180 cm, 含水量变化为 4.57%~ 5.96%。

¼ 土壤水分相对稳定层。该层的特点是土壤湿度比较稳定, 只有在特殊的干旱年份, 该层的土壤含水量才显现出变化, 一般在 150 cm 以下。

3.3 固定沙丘不同部位的水分变异

由图 1 看出, 固定沙丘不同部位的土壤水分呈现如下规律: 土壤含水量从小到大依次为上坡位< 中坡位< 下坡位。三者的最高值分别为 3.58%, 4.72%, 32.67%, 相比较之下, 坡脚含水量明显高于其他两个部位, 这是因为下坡位处于低洼的地方能够容纳水分, 水分在土壤表面保持和停留, 可使水分的入渗时间增加, 并且可得到地下水的补给, 从而影响土壤水分的变异性; 另外通过各个坡面土壤物理性质分析, 下坡位土壤颗粒较细, 细粒有利于提高土壤水分性能^[8]。

旬以后, 气温开始下降, 植物生长衰退, 消耗减少, 土壤含水量虽然稍有回升, 但不明显, 并不能下渗补给深层土壤, 因而各剖面土壤含水量低于生长季初期的土壤含水量。

从土壤水分的垂直分布格局分析, 各样地土壤含水量剖面自上而下均有所增加, 可划分为土壤水分速变层、土壤水分活跃层、土壤水分过渡层和土壤水分稳定层。水分活跃层厚度变化与其根系分布层密切相关, 深根系的植物其水分活跃层分布较深, 反之则比较浅。

(1) 固定沙丘不同部位的土壤含水量不同, 土壤含水量从大到小依次为: 坡脚> 坡腰> 坡顶。沙丘顶部与坡腰土壤水分的垂直变化趋势基本相同, 都是先增大然后减小最后处于稳定, 但土壤水分的转折点不同: 丘顶土壤水含水量在 60 cm 达到最大值 3.58%, 100 cm 处达到最小值 2.36%, 然后处于稳定, 含水量为 2.67%, 整个剖面的平均含水量为 2.86%; 而坡腰土壤水分在 40 cm 处达到最大值 4.72%, 80 cm 处达最小值 3.04%, 然后处于稳定, 含水量为 3.85%, 整个剖面的平均含水量为 3.78%; 坡脚土壤水分的变化趋势和丘顶及坡腰的变化趋势不同, 土壤含水量一直在增大, 在 20- 140 cm 以较小的幅度增加, 20 cm 处的含水量为 2.28%, 140 cm 处的含水量为 7.71%, 140 cm 以后含水量迅速增大, 160 cm, 180 cm 的含水量分别为 14.28%, 23.47%, 也就是说在 180 cm 处的土壤含水量已经超过其饱和含水量 (23%)。

(2) 丘间沙柳、柽柳林地处于相同的立地类型, 土壤含水量都比较高, 但整个剖面的含水量变化趋势并不相同。沙柳林的土壤水分先增大然后减小, 在 60 cm 处达到一个峰值 16.5%, 80 cm 减小到 10.6%, 80 cm 以后开始增加, 在 100 cm 处增加到 14.81%; 柽柳林地的土壤含水量从生长初期

留在土壤中的水分多,说明 534, IZ181, 新海 21 是节水型品种,具有较强的抗旱能力,而 B50, C7, 04241 收获后遗留在土壤中的水分少,是耗水型品种。

品种	土壤含水量/ %					平均	土壤 储水量/ mm
	0- 20	20- 40	40- 60	60- 80	80- 100		
	cm	cm	cm	cm	cm		
C7	20.09	18.38	9.66	8.42	12.54	13.82	179.66
新海 21	20.98	19.80	9.46	8.02	15.50	14.75	191.75
04241	20.72	18.49	8.89	8.04	14.42	14.11	183.43
534	21.02	22.91	12.01	9.20	13.72	15.77	205.01
B50	18.47	18.46	8.15	7.30	16.05	13.68	177.84
IZ181	20.11	19.89	7.40	8.11	20.58	15.22	197.86
IZ179	22.13	13.55	10.87	10.66	19.42	15.33	199.29
平均	20.50	18.78	9.49	8.54	16.03	14.67	190.69

3 结 论

(1) 通过对不同海岛棉品种土壤水分动态变化分析,可以看出,品种各生育期土壤含水量、土壤蓄水量存在极显著差异。所有品种土壤储水量在不同生育期呈现高- 低- 高的 V0字型规律性变化。

(2) 不同海岛棉品种土壤含水量呈现规律性的变化,各品种土壤含水量在不同土层的变化趋势基本一致,即呈现出 / Z0字型的规律性变化。即随土层深度的增加,土壤含水量逐渐减少。含水量最高的土层是 0- 20 cm, 其次是 20- 40 cm, 到 40- 60 cm 土壤含水量进一步下降,但 80- 100 cm 土壤含水量又升高。这种规律性变化与棉花生长特点、根系的发育特点以及吸收特点有关。

(3) 不同海岛棉品种的水分变化分析表明,品种不同,抗旱能力不同。534, IZ179, IZ181, 新海 21 是节水型品种,能够较充分地利用有限的灌溉水,在干旱半干旱地区具有强大的优势。而 B50, C7, 04241 收获后遗留在土壤中的水分少,

是耗水型品种。

(4) 本试验研究了棉田 0- 100 cm 内土壤水分动态变化,大于 100 cm 土壤深度的水分变化规律有待于进一步深入研究。

参考文献:

[1] 张家宝,袁玉江. 新疆水资源可持续利用与气候及其对策研究[M]. 新疆人民出版社, 1999: 362388.

[2] 周国胜. 新疆兵团棉花产业发展的思考[J]. 中国农垦, 2005(7) : 3233.

[3] 韦全生,刘雪峰. 新疆棉花生产的安全战略[J]. 新疆农垦科技, 2005(4): 35.

[4] 马玄,金山,王京梁,等. 新疆棉花产业可持续发展的问题和建议[J]. 中国棉花, 2004, 31(6) : 224.

[5] 姚源松. 新疆棉花高速发展的问题及对策[J]. 八一农学院学报, 1995(4): 1213.

[6] 王淑民. 21 世纪初期我国棉业发展趋向预测[J]. 中国棉花, 1997, 24(10) : 227.

[7] 田元俊. 关于新疆棉花生产发展规模的探讨[J]. 中国棉花, 1997, 24(12) : 526.

[8] 韩路,曹新川,胡守林,等. 海岛棉数量性状的因子分析[J]. 江西棉花, 2005, 7(3): 2228.

[9] 王莉,刘芳,宋海勃. 不同海岛棉种质资源主要农艺经济性状鉴定与分析[J]. 棉花学报 2005, 17(3) : 1842185.

[10] 范谦. 农业试验统计方法[M]. 郑州:河南科学技术出版社, 1983: 82135.

[11] 胡小平,王长发. SAS 基础及统计实例教程[M]. 西安地图出版社, 2001: 6299.

(上接第 99 页)

到生长末期一直随深度增加而增加,在 100 cm 处达到 28.82%,相比之下柽柳林较沙柳林具有较高的土壤含水量。

(3) 半固定沙丘沙柳林地丘顶土壤水分的变化趋势是先增大然后趋于平稳,在 60 cm 处达到一个峰值 2.68%, 60- 200 cm 土层平均含水量为 3.01%。据研究,在毛乌素沙地沙丘上土壤水分在 3% 左右时沙柳就可以正常生长,因此在半固定沙丘丘顶栽种沙柳是可行的。

参考文献:

[1] 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): 162174.

[2] 冯起,高前兆. 沙地水分的研究进展[J]. 中国沙漠, 1993, 13(2) : 213.

[3] 陈有君,红梅,李绍良,等. 浑善达克沙地不同植被下的

土壤水分状况[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(1): 6273.

[4] 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) : 3243.

[5] 刘发民,张应华,仵彦卿. 黑河流域荒漠化地区梭梭人工林土壤水分动态研究[J]. 干旱区研究, 2002, 19(1): 2231.

[6] 张雷明,上官周平. 黄土高原土壤水分和植被生产力的关系[J]. 干旱区研究, 2002, 19(4) : 5263.

[7] 韩德儒,杨文斌,杨茂仁. 干旱半干旱区沙地灌(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.

[8] 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) : 15254.