

塔克拉玛干沙漠南缘不同植被区土壤水分状况研究

安桂香^{1,2,3}, 曾凡江^{1,3}, 孙旭伟^{1,2}, 刘波^{1,2,3}, 刘镇^{1,2,3}, 张晓蕾^{1,2,3}

(1. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 新疆 策勒 848300)

摘要: 采用野外定位观测法, 对柽柳、胡杨、骆驼刺和沙拐枣林地土壤水分状况进行监测, 并通过实测数据对农田区和荒漠区 0—100 cm 土层土壤水分特征曲线进行拟合。结果表明, 各林地 0—250 cm 土层土壤含水量均随深度增加逐渐增大, 生长季内 9 月和 10 月份土壤表层含水量明显大于其它月份。一次强降雨对土壤表层含水量有所补给, 对深层土壤影响较小。总体而言, 土壤蓄水量(0—250 cm)在月季间差异不大, 均维持在 120—140 mm 之间, 但各林地有所差异, 表现为: 胡杨 > 柽柳 > 骆驼刺/沙拐枣。对整个生长季而言, 4 种植物蒸散强度呈现出: 胡杨 > 沙拐枣 > 柽柳 > 骆驼刺, 且 6 月份蒸散强度最大。农田区和荒漠区 0—100 cm 土壤含水量与土壤基质势间幂函数拟合效果好。研究成果可为该区今后植被保育及生态用水提供理论参考。

关键词: 土壤水分; 植被建设; 土壤水分特征曲线; 塔克拉玛干沙漠; 南缘

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)01-0063-05

中图分类号: S152.7

Soil Water Conditions Under Various Vegetations in Southern Fringe of Takelamakan Desert

AN Gui-xiang^{1,2,3}, ZENG Fan-jiang^{1,3}, SUN Xu-wei^{1,2}, LIU Bo^{1,2,3}, LIU Zhen^{1,2,3}, ZHANG Xiao-lei^{1,2,3}

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi,

Xinjiang 830011, China; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Cele National Field Science Observation and Research Station of Desert Grassland Ecosystem, Xinjiang 848300, China)

Abstract: Over a long period of field experiment, soil water conditions were monitored in different woodlands with plants of *Tamarix ramosissima*, *Populus euphratica*, *Alhagi sparsifolia* and *Calligonum caput-medusae*. Soil water retention curves from 0 cm to 100 cm were fitted for farmland and desert soils based on field data. The results show that, soil water contents gradually increased with depth in 0—250 cm. During the growing season of September and October, soil water contents in 0—60 cm layer were significantly higher than in the other months. Single heavy rainfall supplied a considerable amount of water to the soil layer of 0—60 cm, while deeper soils were affected very little. The monthly change of soil water storage capacity was insignificant, fluctuating between 120 mm and 140 mm. However, the storage capacity differed in the four species as in order of *P. euphratica* > *T. ramosissima* > *C. caput-medusae* = *A. sparsifolia*. The evapotranspiration of *P. euphratica*, *C. caput-medusae*, *T. ramosissima* and *A. sparsifolia* during the growing season ranged from high to low, respectively, as the highest values were observed in June. Exponential relationship between soil water contents and soil water potentials was found in the layer of 0—100 cm for each soil, and all the correlation coefficients were over 0.90. The results provide necessary theoretical references for ecological water needs of vegetation recovery in this area.

Keywords: soil moisture; vegetation construction; soil water retention curve; Takelamakan Desert; Southern Fringe

收稿日期: 2010-07-05

修回日期: 2010-08-05

资助项目: 新疆维吾尔自治区科技重大专项“荒漠—绿洲过渡带经济型生态屏障建设技术集成示范”(200733144-2); 国家重点基础研究发展计划“绿洲化的水—土—气—生过程及其相互作用机制”(2009CB421302); 国家科技支撑计划项目“塔里木盆地西南缘绿洲外围经济型生态屏障建设技术集成示范”(2009BAC54B01)

作者简介: 安桂香(1984—), 女(汉族), 甘肃省榆中县人, 硕士研究生, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: agx_555@163.com。

通信作者: 曾凡江(1966—), 男(汉族), 河南省镇平县人, 博士生导师, 主要从事植物生态学研究。E-mail: fjzeng369@sohu.com。

在干旱、半干旱地区,土壤水分是制约植物生长和繁衍的关键性因子,它不仅影响了植物的个体发育,决定着植物的类型,并限制了植被的分布^[1],其动态不仅受降水、土壤储水、气候和土壤物理性质等的共同影响,而且还受植物类型等多种因子的制约^[2],致使不同地区不同植物群落表现出不同的特征。塔克拉玛干沙漠南缘属于极端干旱荒漠区,自然环境恶劣,水资源利用程度较低^[3-4]。为改善这一状况,维持荒漠生态环境的稳定,人工植被重建,水资源的合理利用及两者的相互关系成为研究的热点。有学者^[5]指出植被建设的布局缺乏水量平衡的基础,生物量、覆被率与水资源的承载力不相适应,往往由于超载使植被的水量平衡失调而造成植被生长衰退。因此,在水分平衡条件下实现人工植被培育是荒漠生态系统稳定的必要保证,也是植被恢复的重要理念。

以往对土壤水分动态的研究已有不少报道,研究者针对不同地区,不同植被区,不同种植年限植被以及较大空间尺度上的土壤水分状况做了大量研究^[1,6-12]。柽柳、胡杨、骆驼刺和沙拐枣是策勒绿洲的主要植物种,研究者对其生理生态学特性进行了大量研究。已有研究表明,这 4 种植物主要依靠地下水生存^[13-16],但针对 4 种植物林地生长季内土壤水分现状与差异缺乏较系统性研究,对该区典型土壤水分特征曲线也鲜见报道。基于此,本研究以塔南主要建群种为例,通过连续监测 4 种植物林地对应的土壤含水量,比较生长季内不同植被类型的土壤蓄水量变化和蒸散量差异,拟合农田和荒漠区 0—100 cm 土层土壤水分特征曲线。这对现存植被和土壤水分及两者相互关系的评价具有一定的指导作用,也为防护林树种的筛选和生态可持续发展提供一定的理论依据,进一步为该区农田和荒漠区土壤水运动定量分析提供重要参数。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区自然概况

策勒国家野外观测站位于塔克拉玛干沙漠南缘,昆仑山北麓的策勒绿洲(37°00' N, 80°43' E),海拔 1 371 m,属于典型的内陆暖温带荒漠气候。策勒境内有 9 条季节性河流,均属于降雨、积雪融水和冰川融水综合补给性河流,年径流总量为 $5.85 \times 10^8 \text{ m}^3$,但季节分配极不均衡,春季占 9.13%,夏季占 76.18%。当昆仑山的融雪水超出河流容量时,就会出现夏季(7—8月)洪水。同时,地表径流在时间分配上极不均匀,春季—冬季所占比例分别为 7.5%, 79.6%, 9.3% 和 3.6%。极端最高气温 41.9 °C,极

端最低气温 -23.9 °C,多年平均降水量 35.1 mm,蒸发量高达 2 595.3 mm,水分亏值较大。土壤以风沙土、棕漠土和盐土为主。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设与土样采集 2009 年 4—10 月在策勒国家野外观测研究站的生态林建设示范区、防护林带及荒漠区分别选择 4 块长势均匀的柽柳、胡杨、骆驼刺(天然植被)和沙拐枣(人工植被)生长地,用土埂围成 4 m × 4 m 的实验小区,土埂高度 0.5 m 左右,以防径流产生。在小区中间的柽柳丛、胡杨、骆驼刺丛和沙拐枣丛下各布置一根智能中子水分仪(CNCB503 型),进行植被区土壤水分监测。各样带土壤类型均为棕漠土。每隔 5 d 测定 1 次,降雨前后加测。监测的土壤深度分别为 10, 30, 50, 70, 90, 110, 130, 150, 170, 190, 210, 230 和 250 cm,共 13 个土层。同时,在农田和荒漠综合观测场分别采集 0—10, 10—20, 20—40, 40—60, 60—80 和 80—100 cm 土层环刀原状土样,每个土层 3 个重复。盖好盖子,并标号。

1.2.2 相关计算与分析 0—250 cm 层土壤蓄水量,某一时段土壤蓄水量变化采用以下公式计算:

$$W = 10 \times M_{\text{体}} \times H, \quad \Delta W = W_{t_1} - W_{t_2}$$

式中: W ——蓄水量(mm); $M_{\text{体}}$ ——土壤平均体积含水率(m^3/m^3); H ——土壤分层厚度(均为 20 cm); 10——单位换算系数^[17]; ΔW ——某一时段土壤储水量变化。

塔克拉玛干沙漠南缘免灌植被根系区土壤主要受地下水的影响,无地表径流产生。植物蒸散量 E_p 依据水量平衡原理计算:

$$E_p = P - \Delta W + Q$$

式中: E_p ——植物蒸散量; P ——降雨量; Q ——深层渗漏量。

由于免灌区深层渗漏量难于计算,而在本研究蒸散强度的分析中我们关注的是不同植被区蒸散强度的差异及生长季内蒸散强度动态变化,故忽略深层渗漏量。所有图使用 Microsoft Excel 2003 和 Origin 8.0 完成。

2 结果分析

2.1 2009 年研究区降雨特征及微气象特征

气候因子对土壤水分的影响较大,尤其是降水和蒸散对林地土壤水分的影响更具有决定性的作用。通过策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站的气象站数据(4—9月),2009 年该区在 9 月份有一次强降雨,降雨量为 35.6 mm,其它月份一次降雨

均在 2.2 mm 以下。降雨量分布极不均匀,生长季 4—9 月降水总量为 40.9 mm,9 月降雨量占整个生长季降雨量的 87%。此外,5 月 11 日和 26 日,7 月 13 日均有极少量降雨,但降雨量 < 0.1 mm,无法计算其数量,且这部分降雨对土壤含水量没有贡献。平均气温 7,8 月最高,4 月和 10 月小于其它月份(图 1)。

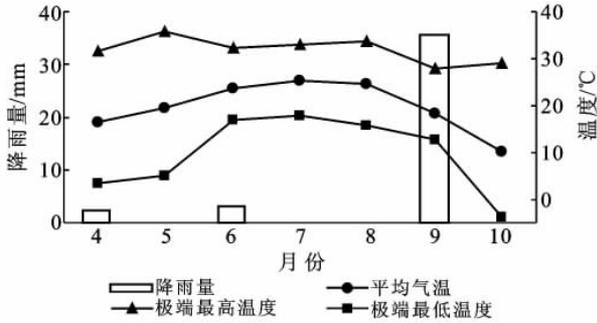


图 1 2009 年研究区 4—10 月主要微气象特征

2.2 4 种植物样地土壤水分动态变化

2.2.1 4 种植物样地土壤水分垂直动态变化 土壤水分受植被存在的影响,是植物根系吸水作用与土壤

表面蒸发共同作用的结果。由于降水脉动强度不同,不同植被根系分布深度及土壤质地的差异,不同植被类型对应土壤水分时间异质性在垂直方向上也会有所区别^[8]。图 2 表示不同植被区生长季内土壤水分动态。图 2 表明,在不同植物林地,土壤水分容积含量变化总体规律较为一致,均表现出随土层深度的增加含水量增大的趋势,且 4 种林地 0—20 cm 土层土壤含水量均在 2% 附近,说明不同植被区表层土壤含水量没有明显差异。0—250 cm 土层含水量在 2%~8% 之间,没有明显的“土壤干层”现象,能够保证植被的水分需求。但各植被区各月份间土壤含水量有所不同,其中 0—60 cm 土层,9 月土壤水分得到降雨的补给,土壤含水量显著提高;10 月土壤含水量也明显大于 4—8 月份,尤其是胡杨林地 10 月份 0—60 cm 土层含水量远远大于 9 月份,说明降雨量的增大和蒸散量的减少对该土层含水量有所补给。60 cm 土层以下,各月土壤含水量差异不明显。全年的水分变化过程中,除胡杨林地,其它 3 种林地土壤含水量在 6 月份均达到最低值,这可能是限制该区植被更新的一个关键因子。

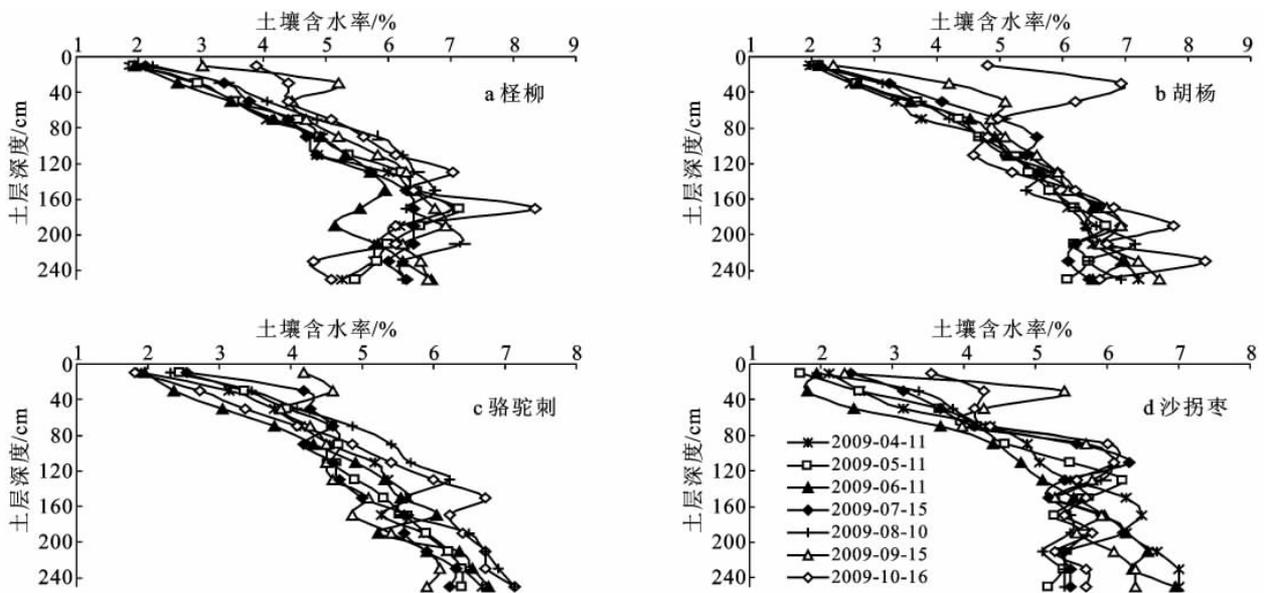


图 2 不同植被生长季土壤水分动态变化

2.2.2 一次强降雨后土壤水分动态变化 降雨前后土壤水分加测数据表明,小于 2.2 mm 的降雨量对该区土壤水分基本没有影响,而一次强降雨对土壤表层含水量有补充作用,0—250 cm 土层土壤蓄水量明显增大。降雨前柽柳、胡杨和沙拐枣林地土壤蓄水量分别为 130.4,135.6 和 121.3 mm,降雨后达到 143.6,151.6 和 134.8 mm,分别增大 10.1%,11.8% 和 11.1%。

图 3 为降雨后土壤水分动态过程。图 3 表明,随着降雨后干旱天数的增加,土壤表层含水率逐渐减小,而深层则有增加的趋势。降雨后 0—20 cm 土层含水量接近 4%,比降雨前提高近 1 倍;20—40 cm 土层含水量(5%)的增大也较明显,比降雨前提高了 40%。说明降雨对 0—40 cm 土层土壤水分影响较大。降雨后第 11 d,0—20 cm 土壤含水量在 2%~3% 之间,略大于降雨前土壤含水量。

2.3 生长季内 4 种植物林地土壤蓄水量分析

土壤蓄水量的变化主要取决于降雨与蒸散的作用过程。总体而言,塔克拉玛干沙漠南缘 4 种植物林地 0—250 cm 土壤蓄水量月均值维持在 120~140 mm 以内(表 1)。生长季内各林地平均土壤蓄水量胡杨林地最大,比柽柳、骆驼刺和沙拐枣林地分别提高了 4.68%,11.32%和 11.35%,且胡杨林地各月蓄水量始终大于其它林地,表明胡杨根系吸水作用大于

柽柳、骆驼刺和沙拐枣。各月相比,除骆驼刺林地外,其它 3 种林地 10 月份土壤蓄水量最大,表明土壤水分在生长季末逐渐回升,主要是由于地表水的补给,加上此时绿洲内部停止了地下水的抽取,这对下一年植物生长极为有利。各林地 7 月土壤蓄水量基本呈现最小,这主要是植被强烈蒸散的结果,但各月蓄水量并没有大幅度变化,均维持在相对稳定的水平。说明现有植被的生长没有受到严重的水分胁迫。

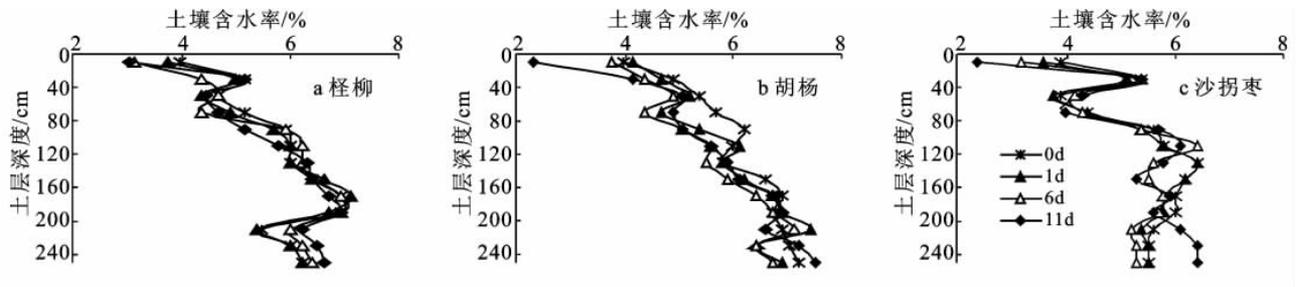


图 3 降雨后土壤含水量垂直变化

表 1 不同植被区土壤(0—250 cm)蓄水量

mm

植物种类	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	平均值
柽柳	128.60	132.62	127.48	126.52	135.74	138.40	139.96	132.76
胡杨	133.15	140.83	139.52	134.73	138.74	138.16	149.85	139.28
骆驼刺	121.32	122.66	126.49	121.78	128.37	119.68	124.27	123.51
沙拐枣	123.91	122.54	120.64	120.62	123.20	127.23	126.12	123.47

2.4 生长季内不同植被蒸散强度变化

植物蒸散量主要受大气蒸发力、土壤和植物生长性状 3 大因素的影响。不同植被区生长季内蒸腾强度变化过程(图 4)表明,4 种植物蒸散强度有相对一致的变化规律,均表现出 6 月份最高,并随着植物生长季的变化逐渐变小,但由于 9 月份土壤含水量的明显增大导致蒸散强度也相对较大。此外,蒸散强度表现为胡杨>沙拐枣>柽柳>骆驼刺,即乔木>灌木>草本的基本规律,这与植物生物生态学特性相关。从日蒸散强度来看,不同植物种蒸散强度有所差异,胡杨在生长季内蒸散强度均较大;一般情况下,柽柳生长的环境含水量相对较差,因而蒸散强度比胡杨和沙拐枣小;与其它 3 个植物种相比,骆驼刺的生态幅度相对最宽,其生存和生活的环境通常是水分条件短缺的环境及荒漠区,因此其蒸腾强度相对较低,且季节间变化平缓。

2.5 典型区土壤水分特征曲线测定

土壤水分特征曲线表示土壤水的能量和数量之间的关系,是研究土壤水分的保持和运动所用到的反映土壤水分基本特性的曲线,在应用数学物理方法对土壤中的水运动进行定量分析时,它是必不可少的重要参数^[18]。本研究在实测数据的基础上,模拟了农

田区和荒漠区土壤(质地均为风沙土)0—100 cm 土层土壤水分特征曲线方程,建立土壤含水量(θ)与土壤基质势(ψ_m)之间的关系。经分析拟合可知:两者间的幂函数拟合效果最好,回归检验值 R^2 最大,各土层土壤水分特征曲线拟合度均 ≥ 0.90 (表 2)。

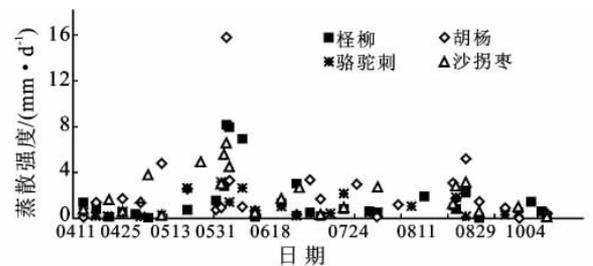


图 4 不同植被区蒸散强度变化过程

3 讨论

由于干旱地区土壤水分对生物过程具有控制性作用,其动态变化正在引起研究者的广泛关注。研究结果表明,不同植物林地土壤含水量均随着土层深度的增加有增大的趋势,生长季内 0—250 cm 土层没有明显的“土壤干层”现象,这与许多对干旱区土壤水分的研究结果不一致^[19-20],造成这种不一致的原因可能

是由于 4 种植物扎根较深,虽然降水很难满足其生长需求,深层土壤也不能得到降水的补充,但其生长得到地下水的供应,因而 80—250 cm 土层含水量高于植物可利用能力(容积含水量大于 4%)。此外,0—250 cm 土壤逐层含水量在 2%~8%之间,水分状况相对较好。生长季内,各林地 0—250 cm 土层蓄水量维持在相对稳定水平,胡杨林地平均蓄水量最大,其蒸散强度也最大,说明乔木树种显著地改善了土壤蓄水性能,同时,土壤蓄水性能的提高将使土壤具有更大的接纳降雨能力,从而为植被的生长提供更为良好的土壤水分环境。但在本研究区内多年平均降雨量为 35.1 mm 的极端干旱条件下,植被主要依靠地下水生存,笔者认为植被的强蒸散量将会消耗该区深层地下水,从而影响地下水的稳定。

表 2 农田和荒漠综合观测场土壤水分特征曲线

采样地	土层深度/cm	土壤水分特征曲线	R ²
农 田 测 综 合	0—10	$\theta = 8.409 0 \psi_m^{-0.300 7}$	0.91
	10—20	$\theta = 9.399 0 \psi_m^{-0.237 6}$	0.91
	20—40	$\theta = 6.207 2 \psi_m^{-0.318 2}$	0.90
	40—60	$\theta = 5.775 8 \psi_m^{-0.311 5}$	0.91
	60—80	$\theta = 6.833 0 \psi_m^{-0.341 8}$	0.91
荒 漠 测 综 合	80—100	$\theta = 8.862 8 \psi_m^{-0.270 9}$	0.94
	0—10	$\theta = 7.370 5 \psi_m^{-0.315 2}$	0.93
	10—20	$\theta = 13.812 0 \psi_m^{-0.243 4}$	0.95
	20—40	$\theta = 6.047 0 \psi_m^{-0.324 4}$	0.94
	40—60	$\theta = 8.336 8 \psi_m^{-0.310 2}$	0.95
合	60—80	$\theta = 7.304 1 \psi_m^{-0.314 0}$	0.90
	80—100	$\theta = 7.820 0 \psi_m^{-0.267 0}$	0.93

蒸散过程是一个综合性气象指标,受到饱和水汽压差、风、温度、太阳辐射等多因素的影响^[21]。此外,植物蒸散过程还受土壤水分的影响^[22]。有关研究表明,干旱环境中生长的植物不一定是节水的,尽管其抗旱性较强,但较为充足的水分供应必然导致较高的水分消耗量^[7]。本研究中,9 月份由于一次强烈的降雨明显增大了土壤 0—60 cm 土层含水量,尽管平均温度和 4 月基本相同,但这一阶段 4 种植物蒸散强度明显增大。目前,在极端干旱区人工促进生态环境恢复与植被保育进程中,由于对各植物种耗水特性把握不够,灌水时间和灌水强度不适宜,致使植被保育工作中存在一定的缺陷,从而引起沙地土壤水分亏缺,土壤蓄水量减少,地下水位下降。因此,在植被恢复与防护林建设过程中,根据植物种的蒸散特征及土壤水分状况合理配置,以缓解深层土壤含水量的过度消耗,维持绿洲的稳定发展。

4 结 论

对塔克拉玛干沙漠南缘 4 种植物土壤水分进行了一个生长季的观测,得出以下主要结论。

(1) 塔克拉玛干沙漠南缘不同植物林地土壤含水量均随着土层深度的增加而增大,一次强降雨对土壤水分的补充主要发生在 0—60 cm 土层,对深层影响较小。不同植物林地土壤蓄水量季节变化不明显,维持在 120—140 mm 的相对稳定水平,说明林地土壤水分状况良好,它对植物生长的限制作用相对较小。

(2) 通过对策勒站附近农田区和荒漠区土壤 0—100 cm 土层土壤水分特征曲线的测定,土壤含水率(θ)与土壤基质势(ψ_m)之间幂函数拟合效果好,为该区农田和荒漠土壤水运动定量分析提供了重要参数。

(3) 因植物种类的差异,耗水强度表现为胡杨>沙拐枣>怪柳>骆驼刺的基本规律,生长季内 4 种植物耗水强度最大值均出现在 6 月,因而在植被保育中需要特别关注,以保证人工植被能够安全度过夏季干旱的危险期并保持持久的稳定性。

[参 考 文 献]

- [1] 田晶会,王百田.黄土半干旱区刺槐林水分与生长关系研究[J].水土保持学报,2002,16(5):61-64.
- [2] 庞敏,侯庆春,薛智德,等.延安研究区主要自然植被类型土壤水分特征初探[J].水土保持学报,2005,19(2):138-141.
- [3] 张希明,Michael R.塔克拉玛干沙漠边缘植被可持续管理的生态学基础[M].北京:科学出版社,2006.
- [4] 朱震达.塔克拉玛干沙漠化过程及其发展趋势[J].中国沙漠,1987,7(3):16-28.
- [5] 杨维西.试论我国北方地区人工植被的土壤干化问题[J].林业科学,1996,32(1):78-85.
- [6] 周海光,刘广全,焦醒,等.黄土高原水蚀风蚀复合区人工植被土壤水分状况[J].水土保持学报,2008,22(5):194-197.
- [7] 赵世伟,周印东,吴金水.子午岭次生植被下土壤蓄水性能及有效性研究[J].西北植物学报,2003,23(8):1389-1392.
- [8] 刘鹤,赵文智,何志斌,等.祁连山浅山区不同植被类型土壤水分时间异质性[J].生态学报,2008,28(5):2389-2394.
- [9] 许浩,张希明,闫海龙,等.塔里木沙漠公路防护林植物水分状况[J].科学通报,2008,53(S2):131-139.
- [10] 王永东,徐新文,雷加强,等.塔里木沙漠公路防护林带土壤水分动态研究[J].科学通报,2008,53(S2):89-95.
- [11] 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):359-362.

(下转第 164 页)

段,其水分调控的技术要点为基底疏导,逐层压实,紧密接触;第 2 阶段为新造地阶段,要点为构建水系,化整为零,径流调控;第 3 阶段为生态重建阶段,要点为以蓄为主,排蓄结合,资源利用。

当然这 3 个阶段是人为划分的,在具体实施过程中水分的调控需要排土场的排土工艺、植被重建以及安全管理等方面的密切配合。而且由于我国矿区的复垦起步较晚,复垦利用的方式也不同于美国、德国复垦较早的国家,因此在不断地实践和生态系统演替过程中,可能会出现许多新的问题,水分调控技术也需要不断的探索,不断的创新,不断的完善。

[参 考 文 献]

- [1] 李晋川,白中科. 露天煤矿土地复垦与生态重建[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [2] 韩武波,马锐,白中科,等. 黄土区露天矿排土场生态建设中水分调控技术的研究[J]. 煤矿环境保护,2002,16(5):14-16.
- [3] 胡振琪,张学礼. 基于 ANN 的复垦土壤水分特征曲线的预测研究[J]. 农业工程学报,2008,24(10):15-19.
- [4] 赵陟峰,郭建斌,郭汉清,等. 山西葛铺煤矿矿区土壤水分和结构变化浅析[J]. 水土保持研究,2008,15(3):214-214.
- [5] Vaclav K. Soil properties and water regime of reclaimed surface dumps in the North Bohemian brown-coal region [J]. Waste Management, 2001,21:147-151.
- [6] Annandale J G, Jovanovic N Z, Pretorius J J B. Gypsiferous mine water use in irrigation on rehabilitated open-cast mine land: Crop production, soil water and salt balance[J]. Ecological Engineering, 2001,17:153-164.
- [7] 魏忠义,白中科. 露天矿大型排土场水蚀控制的径流分散概念及其分散措施[J]. 煤炭学报,2003,28(5):486-489.
- [8] 王建国. 荷载黄土体的工程性质与露天矿排土场稳定控制技术[J]. 煤矿安全,2003,34(S):116-121.
- [9] 刘志翔. 德兴铜矿铜厂露天矿排水系统[J]. 露天采矿技术,2006(6):13-14.
- [10] 周勇,任占营,王喜富. 露天矿持水边坡综合治理措施初探[J]. 露天采矿技术,2005(5):20-23.
- [11] 项元和,李国萍. 内蒙古锡林郭勒草原区胜利一号露天煤矿外排土场水土流失防治方案[J]. 中国水土保持科学,2006,4(S):71-77.
- [12] 王振伟,王建国,于永江. 露井联采条件下黄土基底排土场变形演化规律[J]. 辽宁工程技术大学学报,2008,27(2):165-167.
- [13] 胡振琪,魏忠义,秦萍. 矿山复垦土壤重构的概念与方法[J]. 土壤,2005,37(1):8-12.
- [14] 吕春娟,路琼. 矿区复垦植被土壤涵养水源功能的研究[J]. 水土保持学报,2009,23(3):184-188.
- [15] 孙艳红,张洪江,程金花,等. 缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报,2006,20(2):106-109.
- [12] 严昌荣,居辉,彭世琪,等. 中国北方旱农地区农田水分动态变化特征[J]. 农业工程学报,2002,18(3):11-14.
- [13] 曾杰. NaCl 对三种荒漠植物幼苗生长及生理特性影响的研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2008.
- [14] 曾凡江. 塔克拉玛干沙漠南缘四种多年生植物的生态生理学特性研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2001.
- [15] Zeng F J, Bleby T M, Landman P A, et al. Water and nutrient dynamics in surface roots and soils are not modified by short-term flooding of phreatophytic plants in a hyper-arid desert[J]. Plant and Soil, 2006, 279: 129-139.
- [16] Thomas F M, Foetzki A, Arndt S K, et al. Water use by perennial plants in the transition zone between river oasis and desert in NW China[J]. Basic and Applied Ecology, 2006,7:253-267.
- [17] 李修仓,胡顺军,李岳坦,等. 干旱区旱生芦苇根系分布及土壤水分动态[J]. 草业学报,2008,17(2):97-101.
- [18] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [19] 阿拉木萨,蒋德明,骆永明. 半干旱区人工固沙灌丛发育过程土壤水分及水量平衡研究[J]. 水土保持学报,2005,19(4):107-110.
- [20] 阿拉木萨,蒋德明,范士香,等. 人工小叶锦鸡儿灌丛土壤水分动态研究[J]. 应用生态学报,2002,13(12):1537-1540.
- [21] 黄志刚,李锋瑞,曹云,等. 南方红壤丘陵区杜仲人工林土壤水分动态[J]. 应用生态学,2007,18(9):1937-1944.
- [22] 熊伟,王彦辉,程积民,等. 三种草本植物蒸散量的对比试验研究[J]. 水土保持学报,2003,17(1):170-172.

(上接第 67 页)