

民勤绿洲-荒漠过渡区水量平衡规律研究

王 兵, 崔向慧

(中国林业科学研究院森林生态环境研究所, 北京 100091)

摘要:以甘肃省民勤县刘家地村外缘的绿洲-荒漠过渡地带为定位研究区域,利用长期调查和水文学研究方法从生态系统的角度对绿洲-荒漠过渡区的水量平衡特别是土壤水分和蒸散量的时空格局与动态特征进行了研究。结果显示:①沿绿洲至流动沙丘这一过渡带,随着与绿洲距离的逐渐拉大,土壤含水量减小,0~80cm 土层的月平均土壤含水量的大小顺序为红柳沙包(5.61%)>白刺沙包(5.47%)>流动沙丘(5.22%);土壤水分垂直变化规律是由表层到深层依次递增。②在蒸散日进程中,红柳沙包和白刺沙包的蒸散率峰值到来时间比流动沙丘早 1~2h,且日最大蒸散速率大小顺序为红柳沙包(0.24 mm/h)>白刺沙包(0.20 mm/h)>流动沙丘(0.18 mm/h);影响绿洲荒漠-过渡区蒸散的主要气象因子为日照百分率、气温、空气饱和差以及风速等,它们与日蒸散量的斜率关联度分别为 0.717、0.643、0.649 和 0.705。③生态系统总的水量平衡特点是,水分输入主要靠降水和土壤水分的水平运动补给,而土壤和植被蒸发散是系统的主要输出项。

关键词:民勤;绿洲-荒漠;水量平衡;土壤水分;蒸散量

Researches on laws of water balance at transitional zone between oasis and desert in Minqin

WANG Bing, CUI Xiang-Hui (Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, CAF, Beijing 100091). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(2): 235~240.

Abstract: Research area was located in the oasis-desert intermediate zone on the other edge of Liujiadi Village in Minqin Country, at the transitional belt between Badanjilin desert and Tenggeli desert, where a 2 km sample belt, was established, along the prevailed direction of wind causing desertification. With 3 different gradient types of vegetation coverage (*Tamarix ramosissima* shrub sand dune, *Nitraria sibirica* shrub sand dune and shifting sand dune) as the research subjects, such ecological factors as water, soil, climate and physiology were observed with 3 automatic meteorological stations. Based on long-term research and hydrological methods, the water balance of ecosystem here was studied on the temporal and spatial patterns, and dynamic characteristics, especially soil moisture and evapotranspiration capacity. Some analysis results are as follows: ①Along the intermediate zone connecting oasis and shifting sand dune, soil water contents at the layer from 0 to 80cm in depth can be arranged in order of volume as below: *T. ramosissima* sand dune (5.61%) > *N. tangutorum* sand dune (5.47%) > shifting sand dune (5.22%). Soil water contents regularly increase from surface to deeper layers. ② In the diurnal course of evapotranspiration, ET rate of *T. ramosissima* and *N. tangutorum* reaches a peak later for 1 to 2 hours than that of shifting sand dune. Moreover, the volume order of maximum diurnal ET rate is as follows: *T. ramosissima* sand dune (0.24mm/h) > *N. tangutorum* sand dune (0.20mm/h) > shifting sand dune (0.18mm/h); Evapotranspiration capacity of oasis-desert intermediate zone is mainly affected by such meteorological factors as sunshine percentage, air temperature, air saturation difference value and wind speed. The slope relevance values between the former four factors and evapotranspiration

基金项目:国家自然科学基金资助项目(39990490)

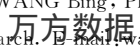
收稿日期:2003-07-14;修订日期:2003-12-21

作者简介:王 兵(1965~),男,辽宁西丰人,博士,研究员。主要从事生态系统长期定位观测、退化生态系统恢复与重建和水文生态学研究。E-mail:wangbing@cfern.org

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 39990490)

Received date: 2003-07-14; Accepted date: 2003-12-21

Biography: WANG Bing, Ph. D, Professor, Research topics: long-term ecosystem observation and research; degradation ecosystem retrieve and rebuild research. E-mail: wangbing@cfern.org



capacity are 0.717, 0.643, 0.649, and 0.705 respectively. ③In general, water balance of the ecosystem features that while water inflow has two main resources: precipitation and horizontal movement of soil water, water outflow is mainly through soil and vegetation evapotranspiration.

Key words: Minqin; oasis-desertification; water balance; soil moisture; evapotranspiration

文章编号: 1000-0933(2004)02-0235-06 中图分类号: S152.7, S154, S157 文献标识码: A

水分是干旱、半干旱地区植被生长发育的主要限制因素,是生态系统中能量和物质循环的主要载体,是决定生态系统结构与功能的关键因子,也是影响系统生产力的重要生态因子^[1]。研究水量平衡问题可以比较全面的认识此类地区水资源的分配状况,以揭示水在运动中所具有的各种形式之间的联系,从而使生态环境朝着人们所期待的方向转化。

一般陆地生态系统的水文过程包括:降水向系统内的输入、植被的截留、土壤表面的保持和截留、土壤表层的渗透和蒸发、植物的蒸腾、水汽向系统外部的传导以及径流等^[2]。但对于绿洲荒漠过渡区的生态系统而言,由于我国西北干旱区降水分布差异明显,沙漠地区降水少、蒸发强烈,很难形成地表径流,基本为无流区^[3],因此,其水文过程要比其他陆地生态系统的水文过程相对简单,甚至可以简化到仅包含降水量、蒸散量和土壤水分变化量等水量平衡分量。

民勤绿洲荒漠过渡区地处巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠交汇之处,沙丘深厚,地下水埋藏很深(地下水位一般均在 9~13m),植物根系不能吸收利用^[4]。而且气候干燥,降水量小,降水强度低,沙地储水能力弱,基本不产生地表径流,加之大气凝结水分很少,可以忽略不计。所以对该地区水量平衡规律研究的重点是土壤水分的时空格局和蒸散量的动态特征。

1 研究地区自然概况

本研究是在甘肃省民勤县西北大约 29 km 的刘家地村(38°38'N, 103°15'E)绿洲农业区外缘进行的。该区位于甘肃省西部河西走廊东段北侧的石羊河下游、腾格里与巴丹吉林两大沙漠前缘交汇处。该区属温带大陆性干旱气候区,总的气候特点是,气候干燥多风沙,昼夜或季节性温差大,蒸发强烈,光照充足但降水较少。多年平均降水量 113.2 mm,主要集中在 7~9 月(占全年的 66.0 %);年均蒸发量 2580.7 mm,为降水量的 23.4 倍;年 8 级以上大风日为 27.8 d,年沙尘暴日数为 37 d,风沙危害严重;多年平均气温 7.6℃。

该地区的地带性土壤为灰棕漠土,隐域性土壤有盐土、草甸土、风沙土等。天然植被种类非常单调,主要是一些白刺(*Nitraria tangutorum*)和红柳(*Tamarix ramosissima*)灌丛沙包;在一些沙丘、丘间地上,还生长有大量的红砂(*Reaumuria soongirica*)、霸王(*Zygophyllum xanthoxylum*)、花花柴(*Karelinia caspica*)等沙生灌木树种以及一些盐爪爪(*Kalidium foliatum*)等草本植物。天然的红柳和白刺灌丛主要以灌丛沙包的形式出现,构成了绿洲外缘红柳灌丛沙包、白刺灌丛沙包和流动沙丘的过渡区分布态势。

2 样地选择与研究方法

2.1 样地选择及其植被特点

2000 年 7~11 月、2001 年 6~11 月,以甘肃省民勤县刘家地村外缘的绿洲-荒漠过渡地带为定位研究区域,从东面的农田绿洲边缘到西面的流动沙丘按风蚀荒漠化的主风方向设置 2 km 长的实验样带,在样带上依次选择红柳灌丛沙包、白刺灌丛沙包与流动沙丘 3 种样地类型作为观测样点。由于距绿洲的距离不同,3 种类型样地的植被分布特点也有很大差异(见表 1)。在红柳沙包与白刺沙包的样点上,干沙层(0~13 cm)以下均有根系分布,一般须根系与细根系集中分布在 13~35 cm 的深度范围内,粗根系分布在 45~80 cm 深度,而且在样地土壤表面有 0~1 cm 厚的结皮。但在流动沙丘样点上,由于表层频繁的风蚀作用,沙土颗粒较粗,且有 20 cm 左右的干沙层存在,植被覆盖度很低。

表 1 不同样地类型植被分布特点

Table 1 The distribution characteristics of vegetation in different site types

样地类型 Site type	红柳灌丛沙包 <i>T. ramosissima</i> sand dune	白刺灌丛沙包 <i>N. tangutorum</i> sand dune	流动沙丘 Shifting sand dune
沙丘植被类型 Vegetation type on sand dune	红柳 <i>T. ramosissima</i>	白刺 <i>N. tangutorum</i>	无植被 Bare land
丘间地植被类型 Vegetation type among sand dune	红砂+花花柴 <i>R. soongirica</i> + <i>K. caspica</i>	盐爪爪 <i>K. foliatum</i>	无植被 Bare land
距绿洲距离 Distance from oasis(m)	0~600	600~1000	≥1000
植被盖度 Vegetation coverage(%)	25.6	15.7	<5

2.2 研究方法

2.2.1 观测月数据 2000 年 7~11 月、2001 年 6~11 月在研究地区红柳灌丛沙包、白刺灌丛沙包和流动沙丘 3 个实验样点上安置 3 台自动微气象观测系统和水分测定系统进行了长期连续定位观测。观测项目有太阳辐射、净辐射、反射辐射、土壤热

通量、2个高度(0.5 m和2.0 m)的风速风向、空气温度和相对湿度、气压、4个深度的土壤温湿度(5、25、50、80 cm)以及8个层次的土壤水分。自动观测系统自带数据采集仪自动记录观测数据,每10 min 1次,取观测数据30 min的平均值。

2.2.2 土壤水分测定 本研究从2000年7月测定开始到2001年9月结束,在每个选定样点的上坡位、中坡位、下坡位分别埋入中子管,采用CNC503DR型智能中子水分仪测定土壤含水量,每隔7 d观测1次。该类型中子仪完全自动测量,水分测量范围宽(0~100%),标定后精度达 $\pm 0.24\%$,可测量一定深度土壤含水量,非常适合用于荒漠化地区的土壤水分测定。同时,在每个样点中子管附近挖掘土壤剖面,每20 cm为1层,用烘干法测定土壤水分,在取样时,每1个土层均取3个土壤样品,以其平均值作为该层的土壤含水量。

2.2.3 蒸散量的研究原理和估算方法 波文比法已在平整和中等粗糙表面上加以验证,结果是可行的^[5,6]。根据影响绿洲-荒漠过渡区蒸散的条件和研究地区下垫面性质的特点以及观测因子的种类,本研究采用波文比-能量平衡法来对蒸散进行了测定和估算。用此方法分析数据时,对日出和日落前后的个别异常值,参照空气动力学梯度法的分析结果做了修正。

3 结果与分析

3.1 降水变化特征

该地区多年平均降水量为113.2 mm,而据伊万诺夫公式估算的年均潜在蒸发量高达2600 mm以上,水分亏缺严重。近几年,北方气候干旱,民勤地区年降水量呈明显下降趋势。根据3台自动气象站在2000年和2001年降水较为集中的5~11月份的监测记录显示,研究地区2000年降水量为83.3 mm,2001年降水量为63.4 mm,远远低于多年平均降水量。而且该地区降水主要在6、7、8月份,其中最高是8月份,2000年达30.7 mm,2001年为24.5 mm。图1和图2是两年每日降水累计值,从图中看出,相对较大的降水都发生在8月份,2000年最大日降雨量为9.6 mm,2001年最大日降雨量为8.7 mm。这样小的单次降水量不仅不能产生地表径流,甚至对土壤含水量的影响都不会很大,只是短时间内增加表层土壤的水分和空气的相对湿度。

3.2 土壤水分时空格局及其动态特征

3.2.1 土壤水分年际差异 选择降水量集中的7~9月份对2000、2001年的土壤含水量进行对比研究。观测结果表明,无论是红柳沙包、白刺沙包,2000年各层土壤平均含水量均比2001年高,但差异并不明显;而流动沙丘年际变化较大,在120~140 cm处最大相差达2.54%。主要原因是前两者有植被覆盖,土壤水分变化受气象等外界因素影响很小,而流动沙丘则受降水、蒸发等因子影响明显,土壤水分变化大。从自动气象站监测资料来看,2001年降水量相对较低,气候干旱,这也是造成土壤水分年际差异的原因之一。

3.2.2 土壤水分月变化与季节动态 将各月0~80 cm根系分布集中的土层含水量平均,得到土壤水分月变化与季节动态(见图3)。

对0~80 cm土层土壤的月平均含水量进行比较,红柳沙包、白刺沙包与流动沙丘分别为5.61%、5.47%和5.22%,差别很小。由图3可知,土壤最高含水量与最低含水量均出现在9月和7月,最高与最低的差值大小顺序为红柳沙包(1.41%)<白刺沙包(2.03%)<流动沙丘(2.31%)。

3.2.3 土壤水分的垂直动态 从各类型样地土壤层次的垂直变化来看(见表2),总的特点是由于有大约20 cm厚干沙层的形成,使得表层土壤含水量最低,一般都在4%左右,在0~120 cm范围内,随着土层深度的增加,土壤含水量从上层向下逐渐增

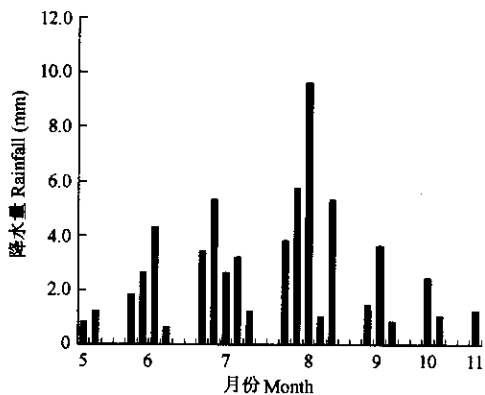


图1 研究地区2000年降水分配

Fig. 1 2000a's precipitation distribution

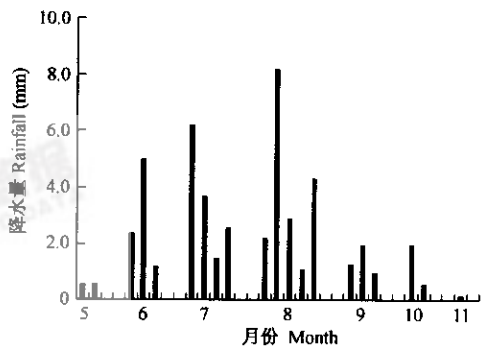


图2 研究地区2001年降水分配

Fig. 2 2001a's precipitation distribution

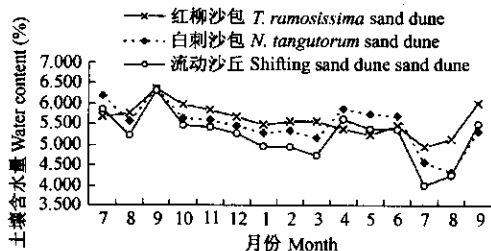


图3 各样点土壤水分的季节动态

Fig. 3 The water content dynamic changes of different seasons

大,但变化平缓(除白刺沙包在 60 cm 后有显著增加外)。这不仅是因为干沙层可以阻碍深层土壤水分的散失,有利于入渗水分的保存,另外深层土壤含有较多粘粒,结构紧密,也使土壤保水效果良好;与之相反,在 0~80cm 深度范围内都有不同程度的植物根系存在,因而水分通过植物蒸腾作用有一定数量的消耗。从表 2 中可以看出,白刺沙包土壤水分从 80cm 以后开始显著增加,到 100~120cm 处达到最大值(12.49%);从 120cm 深度以后,红柳与白刺沙包土壤水分明显高于流动沙丘,最大值差值分别为 4.83% 和 2.57%。

3.2.4 流动沙丘不同部位的土壤水分变化 在研究地区,由于全年盛行西北、西北偏西风,使得沙丘形态出现变化,进而影响到水分状况的差异。本研究仅就流动沙丘的迎、背风坡的土壤水分差异进行了测定分析。由图 4 可以看出,20~100cm 范围内,沙丘迎风坡的含水量明显高于背风坡的土壤含水量,而在 0~20cm 和 100~160cm 范围内差别不显著。这主要是在 20~100cm 范围内,迎风坡土层颗粒细,结构紧实,土壤的保水效果好,背风坡则含粗沙多,持水能力低;而在土壤表层,因受多种生态因子综合影响,土壤含水量差异不大。

3.2.5 土壤水分与环境因子的关系

(1)与植被状况的相互关系 土壤水分条件的好坏和植被的演替是互相制约、互相依赖的关系。从目前绿洲-荒漠过渡区生态系统来看,沙地水分条件的变化,导致了植被的演替,反过来植物的生长影响了土壤水分的变化。

(2)降水与土壤含水量的关系 由于研究地区年降水量及月降水量都非常低,所以降水对该地区深层土壤水分的季节变化影响不大,但一次降水强度相对较大的降水,在短时间内(一般持续 1~2d)对表层的土壤含水量影响还是明显的。图 5 是一次降雨量为 9.6mm 时,各样点 0~20cm 深度土壤水分的变化情况。

(3)其他气象因子与土壤含水量的关系 以表层(0~20cm)土壤含水量与对应时间自动气象站的气象因子观测数据进行相关分析,方程中因变量 Y 为土壤含水量 $\times 100$,自变量 x 为各气象因子,表 3 为大气温度、大气相对湿度 $\times 100$ 、地表温度(0~5cm)以及风速与土壤含水量单独分析时的回归方程。从分析结果来看,土壤含水量与地表温度、大气相对湿度的相关程度较高,相关系数分别为 0.78 和 0.73。

3.3 绿洲-荒漠过渡区的蒸散特征分析

3.3.1 实际蒸散日变化 本文仅就降水相对较多的 8 月份来分析该地区的日蒸散变化规律,图 6 是 2001 年 8 月 13 日(8 月 11 日降水 8.7mm)红柳沙包日蒸散过程,在 19:00~6:00 这一时间段均为负值,呈凝结过程,自 6:00 左右开始蒸散,上午蒸散率上升过程缓慢,12:00 达到峰值,然后开始下降,到 19:00 左右停止蒸散。由于红柳植被自身的调节作用,植株温度上午比地表温度高,而下午偏低,所以蒸散率的峰值比裸地早 1~2 h 左右,从地温和植株温度的日变化过程中可以看出这一特性(见表 4)。所以植物蒸腾的最高值出现在土壤蒸发率峰值之前,是干旱区农田蒸散的日间变化特征之一^[7]。

图 7 是不同性质下垫面日蒸散速率变化图。从图 7 中可以看出,各类型的蒸散率的日变化过程是不同的,如红柳沙包的蒸散率最大,日蒸散过程也最有代表性,峰值出现时间比流动沙丘早 1 h 左右,但在下午,各类型蒸散速率差距很小。

3.3.2 蒸散速率年变化 在干旱地区,沙生植物在不同生长发育时期的蒸发蒸腾特性与变化规律主要取决于不同月份的降水与气温的变化^[8]。其中 6 月份红柳和白刺的蒸散量分别占整个生长期耗水量的 17.4% 和 16.7%;7~9 月份是植物生长的鼎盛时期,植物的叶面积和盖度均达到最大值,而且该时期的降水相对较多,气温较高,因此两种植物的耗水量也达到高峰,分别占

表 2 不同样点土壤水分(%)垂直动态

土层深度 Soil depth (cm)	红柳沙包 <i>T. ramosissima</i> sand dune	白刺沙包 <i>N. sibirica</i> sand dune	流动沙丘 Shifting sand dune
0~20	4.60	3.42	3.86
20~40	5.71	5.61	5.30
40~60	6.26	6.54	6.08
60~80	6.94	8.52	6.09
80~100	6.72	13.20	6.30
100~120	8.08	12.02	8.13
120~140	12.76	11.23	7.85
140~160	14.05	12.78	9.92

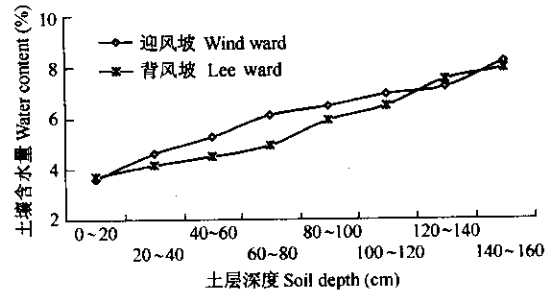


图 4 流动沙丘不同部位的土壤含水量

Fig. 4 Soil water content change in different slope positions

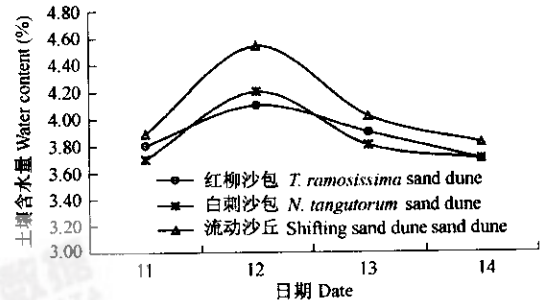


图 5 一次降水后各样点土壤含水量变化

Fig. 5 Soil water content change after one-time rainfall in different site types

整个生长期耗水量的 69.3 %和 65.4 %;10~11 月红柳和白刺的蒸发蒸腾量分别占整个生长期耗水量的 13.3%和 17.9%(见图 8)。

表 3 气象因子与土壤含水量的相关关系

Table 3 The relationship between soil water content and meteorologic factors			
气象因子 Meteorologic factors(<i>x</i>)	回归方程式 Equation formula	相关系数 Correlation coefficient	样本数 Sample number
大气温度 Air temperature (°C)	$Y = -0.003x^2 + 0.046x + 5.172$	0.47	42
大气相对湿度 Air relative humidity(%)	$Y = 1.142\ln(x) + 0.373$	0.73	42
地表温度 Surface soil temperature(°C)	$Y = -0.005x^2 + 0.108x + 4.693$	0.78	42
风速 Wind speed (m/s)	$Y = 5.841e^{-0.209x}$	0.65	42

3.3.3 蒸散的空间差异 蒸散在空间上的差异是由于影响蒸散的气候、地形、植被或土地利用、土壤水分状况等因子的空间差异引起的^[9]。从试验测定结果来看,生长良好、盖度较大的红柳区蒸散强度大于植被稀疏的白刺区,植被区蒸散强度明显高于没有植被覆盖的裸露流动沙丘区,特别是在年进程的植物生长旺季和日进程的蒸散峰值时刻的前后。

3.3.4 蒸散与各气象因素的灰关联分析 斜率关联度分析法是灰色系统的关联分析中的主要方法之一^[10]。它是采用斜率作为衡量两个事物关联程度的准则,具有计算方便、不受数列零或负值影响和关联度分辨率高等优点。本文利用计算得到的 2000 年 7 月 13 日~2000 年 10 月 13 日以及 2001 年 7 月 13 日~2001 年 10 月 13 日期间的红柳沙包与白刺沙包日蒸散量与日照(每天日照时数)、气温(日平均气温)、空气饱和差(1-日平均空气相对湿度)、风速(日平均风速)的关系采用斜率关联度分析法进行了分析。分析结果认为日照、气温、空气饱和差、风速等 4 个气象要素与日蒸散量序列间均有一定的相关性,分别为 0.717、0.643、0.649 和 0.705,日照和风速与蒸散量的关联度最好,说明辐射热能对蒸散量影响很大,当然风速对植物蒸腾和土壤的蒸发也起到很大的促进作用。

3.4 绿洲-荒漠过渡区水量平衡分析与讨论

研究地区总的水量平衡特点是,系统的水分输入主要靠降水和土壤水分的水平运动补给,而土壤和植被蒸发散是系统的主要输出项,由于降水量小,因此在研究地区几乎不发生径流现象,而且降水渗入土壤深层的量值也是非常微小,仅能短时间内湿润沙土表层。因此,针对研究地区的特点,列出水量平衡方程式如下:

$$R + F = \Delta W + E$$

式中,*R* 为大气降水量;*F* 为土壤水平补给; ΔW 为土壤水分变化;*E* 为蒸散量。

据贾宝全^[11]测定结果,沿绿洲至流动沙丘这一环境梯度带,其水分变化可以明显划分为 3 个区间。其基本规律是,越靠近绿洲,土壤含水量也越高;而随着与绿洲距离的逐渐拉大,各土层的含水量差值也在逐渐增加。这可能是在绿洲荒漠过渡带,土壤水分存在水平运动,农田边缘土壤水分受到农田浇灌水的补给,含水量较高,由此形成水分沿农田边缘-绿洲-荒漠水平运动的态势^[11]。

而在系统水分支出方面的基本规律是,荒漠地区的许多植物有控制蒸腾的能力(如关闭气孔,角质层不透水,缩小叶面积),在长期得不到降水的情况下,植物单位面积的实际蒸腾量是比较低的;另外,有关研究表明^[12],当土壤表层 1~3cm 土壤蒸干

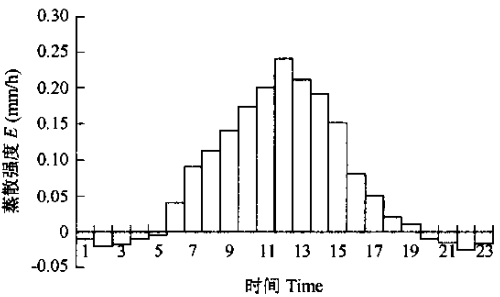


图 6 红柳灌丛沙包日蒸散过程

Fig. 6 Diurnal change of evapotranspiration at *T. ramosissima* sand dune

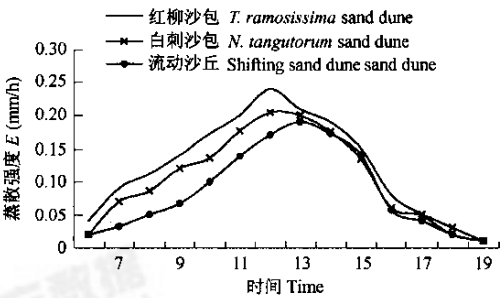


图 7 不同性质下垫面日蒸散过程

Fig. 7 Diurnal change of evapotranspiration in different site types

表 4 2001 年 8 月 13 日红柳沙包地温和植物温度日变化过程(°C)

Table 4 Daily change of surface soil temperature and plant temperature at *T. ramosissima* sand dune

时间 Time	7:00	9:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00
地表温度 Surface soil temperature	17.2	20.9	24.8	27.9	29.8	26.1	23.6
植物温度 Plant temperature	17.8	22.4	26.3	29.4	27.5	23.3	20.0

后,下层土壤的水分只能靠湿汽扩散通过 3cm 厚的干沙层,所以地面蒸发耗水补给不足,此时的土壤蒸发已降到很小,最终导致该地区总蒸散也相对微弱。

4 结论

绿洲-荒漠过渡区的生态系统属于典型脆弱的陆地生态系统类型,近年来该类型生态系统的生态平衡严重受到威胁。地处腾格里和巴丹吉林两大沙漠交汇地带的民勤,经过长期的演变和人为干扰,加之风沙侵袭、植被退化,造成目前绿洲萎缩,生态系统严重退化。本文通过对退化生态系统的恢复具有限制作用的水量平衡规律进行长期调查和分析研究,初步得出以下几点结论:

(1)绿洲-荒漠过渡地带土壤水分存在明显的时空格局和动态规律。沿绿洲至流动沙丘这一过渡带,越靠近绿洲,土壤含水量越高,而随着与绿洲距离的逐渐拉大,土壤含水量减小,且各土层的含水量差值也在逐渐增加。

(2)绿洲-荒漠过渡区不同下垫面蒸散的日进程及季节变化明显不同。生长良好、盖度较大的红柳区蒸散强度大于植被稀疏的白刺区,植被区蒸散强度明显高于没有植被覆盖的裸露流动沙丘区。由此说明,随着荒漠化程度的发展,植被衰退,用于植物生长的耗水量也在明显减少,水分的散失主要是在土壤表面的蒸发上,所以最终导致土壤理化性质的改变,土壤养分的流失,土地生产力的锐减,使得荒漠化进程加速,生态环境进一步恶化。

(3)在荒漠地区,影响荒漠化地区水文状况的主要因素除了降水等直接因素外,人类活动对荒漠化地区的水文特征也有很大影响,而其中灌溉则是最主要的因素之一。

References:

[1] Xu W D, Zou C J. *Chinese forest ecosystem in sandy groups*. Beijing: China Forestry Publishing House,1998. 158~159.

[2] Evans D D, Thames J L. *Water in Desert Ecosystems*. Dowden;Hutchinson & Ross, Inc,1981. 265~271.

[3] Nian F H, Li X. A comprehensive review of the research on hydrography in arid lands in China. *Arid Land Geography*, 2000, **23**(1):91~95.

[4] Yang Z H. Research on desert vegetation changes for 40 years at Shajingzi area in Minqin. *Journal of Desert Research*,1995, **20**(3):18~22.

[5] Richard W T, Steven R E, Terry A H. The bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, (103):335~348.

[6] Cao J S, Han S M, Zhang W J. Application of Bo-wen ratio to water-heat balance research in pomegranate economic forest. *Resource, Eco-environment Network Research Development*, 2001, **12**(1):18~23.

[7] Feng J C, Chen H S, Kang Y H, et al. Study on water balance and evapotranspiration in Shapotou area, Tenger desert. *Acta Botanica Sinica*,1995, **37**(10):815~821.

[8] Sormen A U and Abdulrazzak M J, Estimation of actual evaporation using precipitation and soil moisture records in arid climates. *J. Hydrol. Proc.*,1995, **9**:729~741.

[9] Li P F, Li B G. Study on some characteristics of evaporation of sand dune and evaporanspiration of grassland in Mu Us desert. *Shuili Xuebao*,2000, (10): 29~33.

[10] Jia B Q, Ci L J, Cai T J, et al. Preliminary research on changing soil water characters at eco-tone between oasis and desert. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, **26**(2):203~208.

[11] Yuan J Z. *Grey system theory and its application*. Beijing: Science Press, 1991. 67~73.

[12] Yang W B. Study on physiological and ecological water relationship about anti-drought of *Cistanche deserticola*. *Acta Ecologica Sinica*, 1991, **11**(4):23~27.

参考文献:

[1] 徐文铎, 邹春静. 中国沙地森林生态系统. 北京: 中国林业出版社, 1998. 158~159.

[3] 年福华, 李新. 中国干旱区地理水文研究概述. 干旱区地理, 2000, **23**(1):91~95.

[4] 杨自辉. 民勤沙井子地区四十年来荒漠植被变迁初探. 甘肃林业科技, 1995, **20**(3):18~22.

[6] 曹建生, 韩淑敏, 张万军. 波文比在石榴经济林地水热平衡研究中的应用. 资源生态环境网络研究动态, 2001, **12**(1):18~23.

[7] 冯金朝, 陈荷生, 康跃虎, 等. 腾格里沙漠沙坡头地区人工植被蒸散耗水与水量平衡的研究. 植物学报, 1995, **37**(10):815~821.

[9] 李品芳, 李保国. 毛乌素沙地水分蒸发和草地蒸散特征的比较研究. 水利学报, 2000, (10):29~33.

[10] 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. 植物生态学报, 2002, **26**(2):203~208.

[11] 袁嘉祖. 灰色系统理论及其应用. 北京: 科学出版社, 1991. 67~73.

[12] 杨文斌. 梭梭的生理生态水分关系的研究. 生态学报, 1991, **11**(4):23~27.

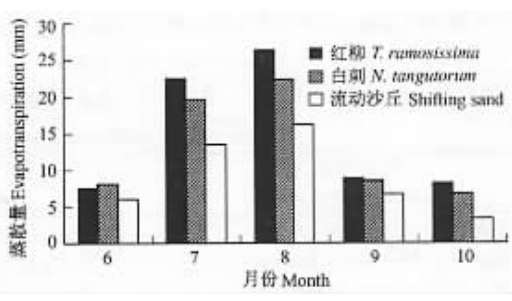


图 8 不同地表植被蒸发散的年变化

Fig. 8 The yearly change of evapotranspiration in different plant types