文章编号: 1003 - 7578(2013)01 - 154 - 07

绿洲 - 荒漠过渡带蒸散与主要环境因子关系分析*

闫人华[1,3],熊黑钢[2,3],李成圆[1,3],瞿秀华[1,3]
(1. 新疆大学资源与环境科学学院,乌鲁木齐 830046; 2. 北京联合大学应用文理学院城市系,北京 100083;
3. 教育部绿洲生态重点实验室,乌鲁木齐 830046)

提 要: 以实测气象资料为基础,通过波文比能量平衡法对芨芨草地蒸散量进行计算,分析了不同天气条件对蒸散与主要环境因子之间相互关系的影响,建立了适合新疆天山北麓绿洲 - 荒漠过渡带的蒸散预测模型。结果表明: 1) 影响过渡带蒸散的四大主要环境因子依次是净辐射(Rn)、土壤热通量(G)、气温($T_{气}$)、相对湿度(RH)。2) 不同天气条件下各主要环境因子及蒸散日变化曲线特征差异显著。晴天蒸散曲线呈"单峰型",阴天表现为"多峰型",而雨天显示为"偏峰型"。平均情况下基本与晴天一致。3) 除Rn外,其它主要因子与蒸散线性拟合度均表现为雨天最大,晴天、平均次之,阴天最差。4) 适合不同天气条件下的蒸散预测模型表明: 除阴天外,热量是影响干旱区绿洲 - 荒漠过渡带蒸散的主导因素。

关键词: 蒸散; 环境因子; 绿洲 - 荒漠过渡带; 天气条件
中图分类号: P426.2 文献标识码: A

绿洲荒漠过渡带是处于绿洲与荒漠之间,受绿洲生态系统与荒漠生态系统的双重影响且具有敏感退化趋势的生态脆弱带,是绿洲与荒漠进退消涨的桥头堡[1]。而其生态系统内部水分的良性循环则是天然草地维持稳定、发展的生命线,因此,更好地开展绿洲荒漠过渡带水分循环的重要环节之一 - 蒸散内容的研究意义重大,是合理配置其水资源的科学基础,关系着荒漠化的进退。

蒸散发是生态系统水分循环与水量平衡的重要组成部分,直接关系着地表能量平衡和水量平衡[2]。蒸散量变化规律的研究则是揭示研究区植被初级生产力形成机制和生态系统功能的重要基础性工作,探索蒸散量及其影响因子的相互关系,更是揭示水源涵养功能机制的重要前提[3]。近年来,一些学者对农田、湿地、草地、森林、荒漠等不同下垫面作了大量的蒸散研究[4-9],较好地揭示了这些不同性质的单一下垫面蒸散规律及其与环境因子的关系。然而涉及干旱、半干旱区绿洲 - 荒漠过渡带,特别是对于不同天气条件下天然芨芨草地的蒸散与环境因子关系的研究还不多见。文中以2010年7 - 9月新疆天山北麓绿洲荒漠过渡带天然芨芨草地的观测数据为基础,通过波文比能量平衡法测算了该地区的实际蒸散量,并采用相关分析和多元回归等数学方法定量分析了蒸散与主要环境因子之间的相互关系以及不同天气背景对两者关系的影响特征,可深化对区域蒸散模型的研究,有利于该地区水资源的合理利用和荒漠化的防治工作。

1 材料与研究方法

1.1 研究区概况

试验于天山北麓,古尔班通古特沙漠南缘的新疆奇台县一中万木春林场附近的天然芨芨草地(89°26′E,44°11′N,海拔617m)进行。该地区属温带大陆性干旱半干旱气候,年平均气温5℃,年平均风速2.9m/s,多年平均降水量150mm,而潜在年蒸发量高达2100mm以上,年日照时数2933.6h,年无霜期158d。

选取的试验地是大面积的天然芨芨草地,主要植物为多年密丛生禾本科植物芨芨草(*Achnatherum*

* 收稿日期: 2012 - 1 - 10; 修回日期: 2012 - 2 - 16
基金项目: 国家自然科学基金(41171165); 北京市属高等学校人才强教计划项目(PHR200906125)资助。
作者简介: 闫人华(1987 -),男,河南安阳人,硕士,主要从事区域可持续发展。Email: yrh036@163.com
通讯作者: 熊黑钢(1956 -),男,湖南湘乡人,教授,博士,现主要从事干旱区研究。Email: xhg1956@sohu.com

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

splendens)，总盖度 30% 左右，每 100m^2 内约有 30 多丛，其间稀疏分布有苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、猪毛菜(*Salsola collina* Pall)等植物，土壤为盐碱滩沙质土，地下水埋深 2 ~ 3m。

1.2 数据采集

文中主要观测项目有净辐射、空气温湿度、风速风向、土壤温湿度、土壤热通量、降水量。各项数据利用自动数据采集器每半小时采集一次。采集记录下的数据储存在数据采集器内，由计算机导出。空气温湿度和风速风向探头分两层布设，在芨芨草灌层以上 0.5m、2.5m 各布设一层。在地下 5cm、10cm、15cm、20cm、40cm、60cm、80cm、100cm 各层布置土壤温湿度探头，土壤热通量板埋设在地表以下 5cm。仪器采用英国 Delta – T 公司生产的波文比能量平衡观测系统。

1.3 蒸散量的计算

波文比能量平衡法是一种精度较高、应用比较广泛的蒸散量估算方法之一。并且许多学者也对该方法适用的可靠性进行了讨论[10-13]，为此方法在观测和计算的实际应用中就如何更好地提高精度提供了许多可借鉴的经验。

2 不同天气条件下蒸散与主要环境因子关系

2.1 主要环境因子的选取

蒸散过程受到多种环境因子的影响[14-16]，根据蒸散的发生机理及数据的可获取性，将观测各因子所有日间(8:00 – 18:00)数据与蒸散进行相关分析。结果发现，相关系数绝对值大于 0.44 且经过显著性水平检验的因子依次为：净辐射($R = 0.8931$，$p = 0.0000$)、土壤热通量($R = 0.5255$，$p = 0.0000$)、气温($R = 0.4531$，$p = 0.0000$)、相对湿度($R = -0.4432$，$p = 0.0000$)。因此，下面将仅详尽讨论这四大因子与蒸散的关系。而不同天气背景对它们之间关系的影响差异明显，故选取 7 月 22 日(总云量 < 2 成)、8 月 1 日(总云量 > 8 成)、8 月 11 日(1.2mm/h)分别为典型晴天、阴天和雨天进行讨论。

2.2 蒸散与净辐射(Rn)

净辐射是蒸散过程的主要能量来源，为植被和土壤体内水份汽化提供热量。晴天时，伴随着净辐射早晚低、中午高的抛物线变化，蒸散呈现出单峰型的变化趋势(图 1a)。阴天时，由于受到云的遮挡，导致净辐射都低于 300w/m^2，峰值也仅为晴天的 1/2，且随着云量的变化，呈现出峰谷频繁交替的形态，致使蒸散追随净辐射也表现出多峰型的变化(图 1b)。受降水影响，雨天净辐射从 11:30 才开始快速增长，比晴天推迟了约 4.5 个小时，使得蒸散也表现出相同的滞后性，导致曲线向右发生偏移，呈偏峰型(图 1c)。而观测期内平均的净辐射及蒸散日变化均表现为标准的抛物线，在形态上与晴天基本吻合，表明在干旱区绿洲荒漠过渡带两者受云和降水的影响是有限的(图 1d)。

晴天($T_{气} = 30.1℃$，$RH = 35.4\%$)和阴天($T_{气} = 22.5℃$，$RH = 48.0\%$)蒸散与净辐射的线性拟合度都在 0.97 左右(表 1)。而雨天较差，为晴天的 96%，主要是由于雨天($T_{气} = 17.9℃$，$RH = 71.2\%$)气温较低，相对湿度较大，进而在一定程度上削弱蒸散与净辐射的相关性。同时也使得雨天蒸散量随净辐射的改变而发生的变化率(回归系数)低于晴、阴天 22%。平均情况下的净辐射与蒸散拟合程度小于晴、阴天，而大于雨天。

表 1　不同天气条件下 Rn 与蒸散(E)关系拟合

Tab. 1 Linear fitting of the evapotranspiration versus net radiation under different weather conditions

	回归方程	R
晴天	E = 0.0009Rn + 0.0275	0.9764
阴天	E = 0.0009Rn + 0.0139	0.9783
雨天	E = 0.0007Rn + 0.0776	0.9424
平均	E = 0.0006Rn + 0.0479	0.9677

2.3 蒸散与土壤热通量(G)

晴天土壤热通量的变化曲线与蒸散较为吻合。夜间土壤热通量虽然小于 0，但后半夜(0:00 – 7:00)土壤深处向地表释放的热量远大于前半夜(20:00 – 24:00)(图 2a)，促使后半夜仍存在一定量的蒸散。阴天由于受到云层的影响，土壤热通量的峰值较晴天削减了 37.3W/m^2。在 12:00 – 17:00 之间，它虽有小幅度的变化，但总体来看，比较平缓，而蒸散在此时段内却波动相对剧烈。这主要是因为土壤作为能量传输介质的滞后性和缓存性，使得热量在土壤的传递过程中变化比较平稳(图 2b)。雨天虽然土壤热通量很小，但蒸散量仍然很大(图 2c)。观测期内平均土壤热通量变化趋势与晴天较为相似，但最大值明显降低，仅为晴天的 79.81%，使得蒸散速率峰值减小为晴天的 59.32%(图 2d)。

与 Rn 不同，G 与蒸散线性拟合度表现为雨天 > 晴天 > 平均 > 阴天，回归系数也表现出同样的结果

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

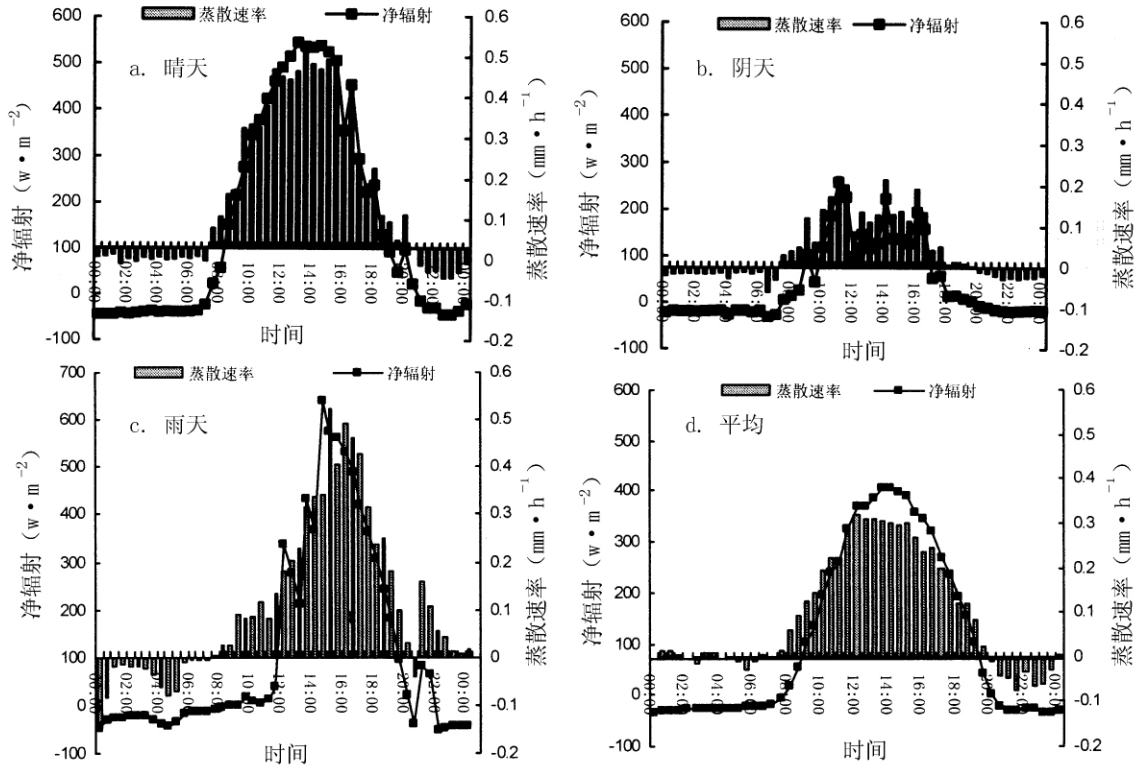


图1 不同天气条件下蒸散与净辐射(Rn)关系分析

Fig. 1 Relationship between evapotranspiration and net radiation under different weather conditions

(表2)。除雨天外,其他天气由于土壤需要先吸收太阳辐射,然后再向地表传输热量以供蒸散,导致G相对于蒸散变化滞后两小时,两者相关性较低。而雨天虽气温较低,但土壤和植被水分较多引起两者相关性较高。若用晴、阴天后2h土壤热通量与蒸散量进行相关分析,则两者的相关性更好,分别提高了37%、184%。同时蒸散对土壤热通量变化的响应程度(回归系数)也提高了90%、338%。

表2 不同天气条件下G与蒸散(E)关系拟合

Tab. 2 Linear fitting of the evapotranspiration versus soil heat ? ux under different weather conditions

	G		后2h G	
	回归方程	R	回归方程	R
晴天	E=0.0031G+0.2755	0.6807	E=0.0059G+0.1668	0.9298
阴天	E=0.0016G+0.1061	0.2362	E=0.0070G+0.0511	0.6710
雨天	E=0.0089G+0.2069	0.9199	E=0.0072G+0.1954	0.6710
平均	E=0.0023G+0.1723	0.6532	E=0.0044G+0.0992	0.7204

2.4 蒸散与空气温度($T_气$)

晴天上午,随着太阳辐射的增强,气温也在稳步增长,促使蒸散过程加剧;下午气温下降,进而抑制了蒸散的进行;夜间气温继续下降,直到日出前气温达到最低值,蒸散出现负值(图3a)。阴天虽然白天气温大致稳定在22℃左右,但可划分三个阶段:逐步上升、峰谷起伏、平稳变化阶段。这也促使蒸散表现出大致相同的变化趋势(图3b)。雨天11:30之后气温快速增长,加快了蒸散的发生,使其在15:00达到了最大值(图3c)。观测期内平均气温变化形态与晴天相似,但变化更为平缓,不仅峰值降低3.95℃,而且日平均温度也减小为晴天的9/10,进而促使日蒸散总量不到晴天的60%(图3d)。

蒸散与空气温度的线性拟合度排序为:雨天>晴天>平均>阴天(表3)。雨天土壤和植被水份都比较充足,气温的增加或降低都将引起蒸散量的大幅度变化,从而使得两者线性相关程度较高。而晴天芨芨草地由于缺乏水份,蒸散对气温变化的反应灵敏度不够,导致两者的相关系数低于阴天17%。阴天影响蒸散进程的两大主要因素水份和净辐射较少,使气温与蒸散之间的相关系数最小,是晴天的3/5。回归系数也反映出同样的规律。

2.5 蒸散与相对湿度(RH)

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

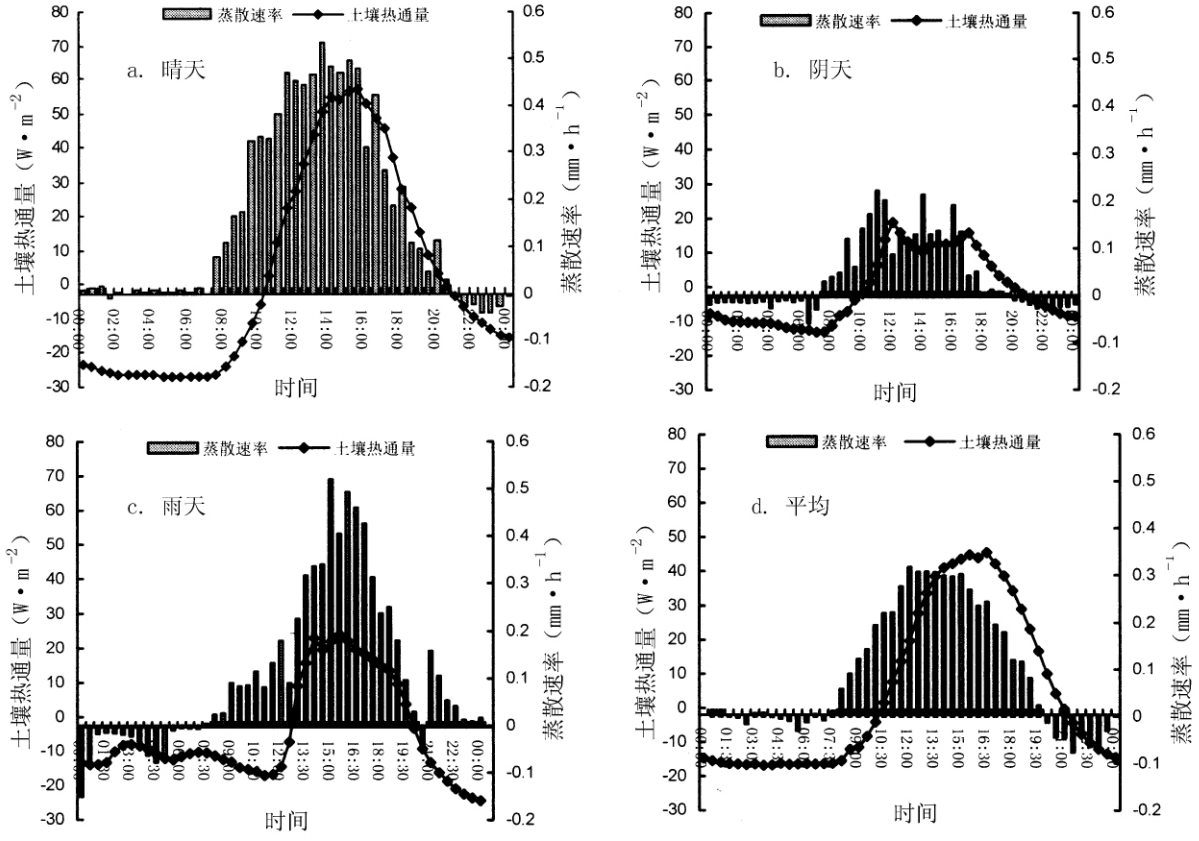


图 2　不同天气条件下蒸散与土壤热通量(G) 关系分析

Fig. 2 Relationship between evapotranspiration and soil heat flux under different weather conditions

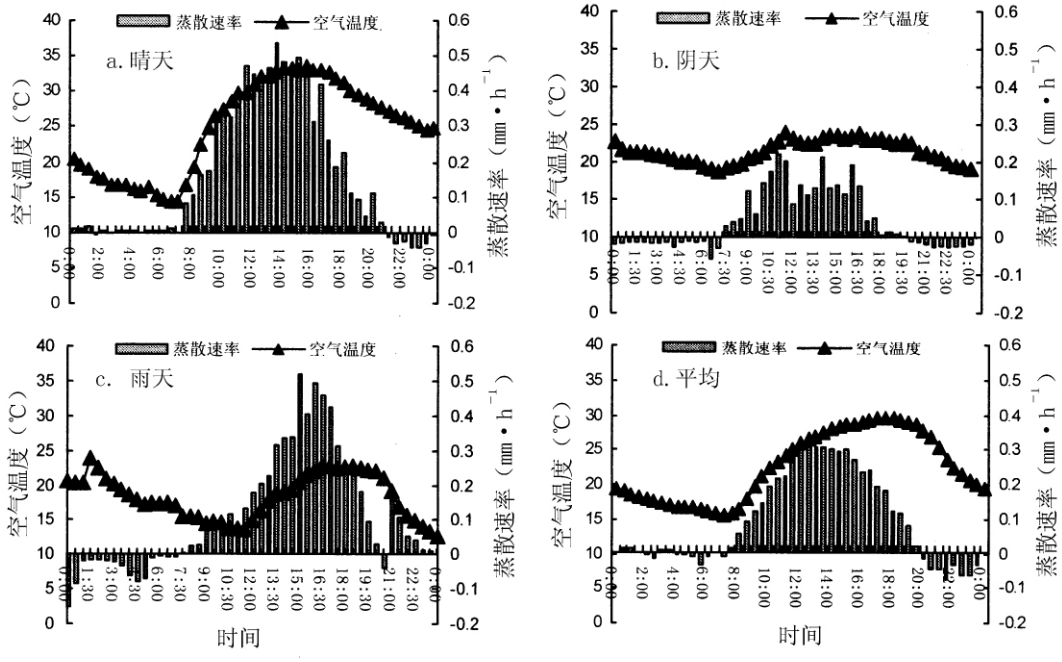


图 3　不同天气条件下蒸散与空气温度($T_{气}$) 关系分析

Fig. 3 Relationship between evapotranspiration and air temperature under different weather conditions

晴天上午由于气温的升高，饱和水汽压增大，致使相对湿度不断减小，到 13:00 左右达到最小值 26.1%。这有利于水份汽化，加速蒸散的进行，进而使得蒸散在 13:30 左右达到峰值(图 4a) 。下午随着气温的降低、空气含有水份的增多，相对湿度曲线呈上升趋势，使蒸散呈现出与之相反的趋势。夜间相对湿度

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

继续上升,到2:30以后维持在86%左右的高水平上,促使夜间发生凝结现象。阴天虽然中午相对湿度较小,但蒸散量仍最大(图4b)。雨天上午受降水和气温较低的影响,相对湿度大部分在90%以上,这也直接阻碍了蒸散的进行,使得蒸散速率开始迅速增长的时间点往后推移。11:30之后随着气温的快速增高,湿度急剧下降,因而加速了蒸散峰值的出现(图4c)。平均情况下两者变化趋势与晴天类似,但相对湿度在上午下降平缓,递减率仅为晴天的72.11%,造成蒸散速率上升幅度只为晴天的57.84%(图4d)。

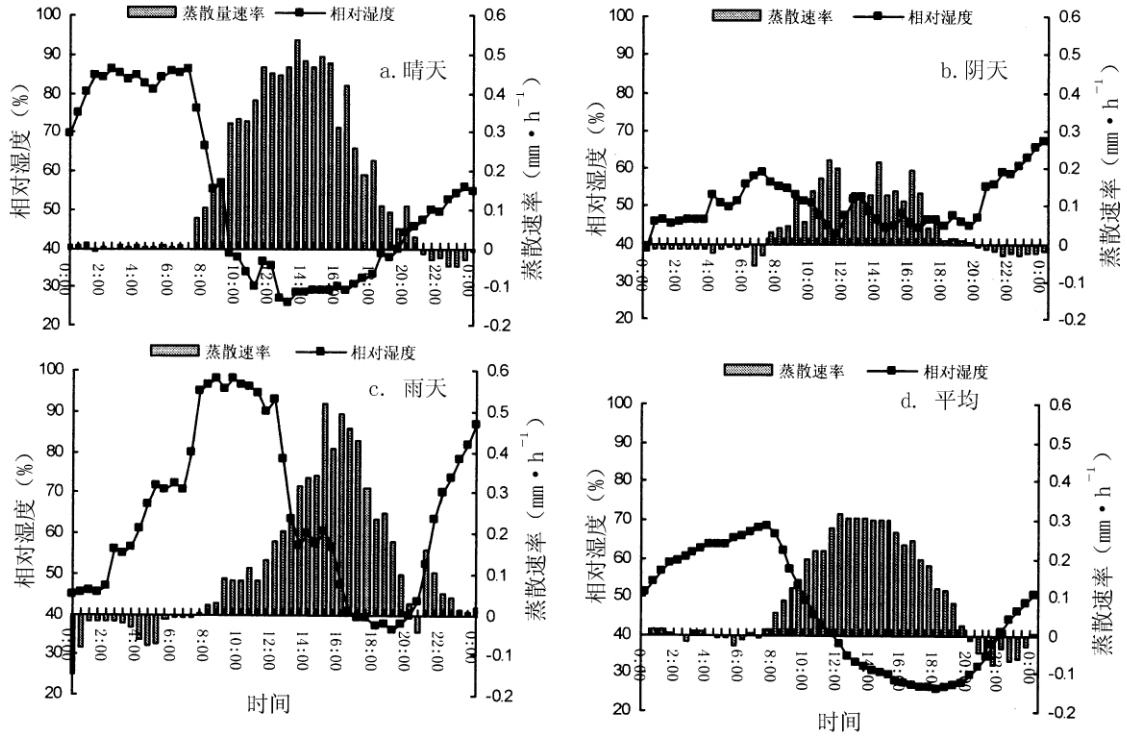


图4 不同天气条件下蒸散与相对湿度(RH)关系分析

Fig. 4 Relationship between evapotranspiration and RH under different weather conditions

与Rn、G、$T_{气}$最大的不同是,不论何种天气下相对湿度与蒸散量均呈较为显著的线性负相关(表4)。与G、$T_{气}$类似,蒸散与相对湿度的线性拟合度也呈现出:雨天最大,晴天次之,平均居中,阴天最小。而蒸散对相对湿度的响应程度(回归系数)表现为:晴天>阴天>雨天>平均。

表3 不同天气条件下空气温度($T_{气}$)与蒸散(E)关系拟合

Tab. 3 Linear fitting of the evapotranspiration versus air temperature under different weather conditions

	回归方程	R
晴天	$E=0.0234\ T_{气}-0.3454$	0.7111
阴天	$E=0.0201\ T_{气}-0.3317$	0.4202
雨天	$E=0.0401\ T_{气}-0.4815$	0.8587
平均	$E=0.0127\ T_{气}-0.1019$	0.6406

表4 不同天气条件下RH与蒸散(E)关系拟合

Tab. 4 Linear fitting of the evapotranspiration versus RH under different weather conditions

	回归方程	R
晴天	$E=-0.0089RH+0.6700$	-0.7441
阴天	$E=-0.0067RH+0.4394$	-0.4045
雨天	$E=-0.0059RH+0.6601$	-0.8525
平均	$E=-0.0041RH+0.3809$	-0.6430

3 蒸散量预测模型的建立

为更好地反映蒸散量与环境因子的综合关系,并便于以后蒸散量的估算和预测,以观测期内所有晴、阴、雨天数据为基础,选取蒸散量为因变量,各个环境因子为自变量,用DPS数据处理软件进行多元线性逐步回归,得到不同天气条件下蒸散的预测模型(表5)。

从表5模型中可以看出,各种天气条件下用不同环境因子建立起来的回归方程均达到了极其显著性水平,但相对来说,雨天预测精度略差。除阴天外,蒸散与热量因子(Rn、G、$T_{气}$)相关性都较大,充分说明在干旱区水分奇缺的情况下,蒸散更多地依赖于热量因素,只有较多的热量才有可能将土壤深层和植被体内的水份蒸发出来。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 5　不同天气条件下蒸散预测模型的建立

Tab. 5 The models for forecasting evapotranspiration under different weather conditions

	多元逐步回归方程	决定系数(R^2)	p 值	F 值
晴天	$E = 8.8 \times 10^{-4} Rn - 1.7 \times 10^{-3} G + 2.6 \times 10^{-2} T_{气} - 0.9738$	0.9827	0.0000	226.98
阴天	$E = 7.5 \times 10^{-4} Rn - 1.4 \times 10^{-2} T_{气} - 6.8 \times 10^{-3} RH - 0.7895$	0.9353	0.0000	81.89
雨天	$E = 7.5 \times 10^{-4} Rn - 2.5 \times 10^{-3} G + 9.2 \times 10^{-3} T_{气} - 0.1458$	0.8988	0.0000	50.31
平均	$E = 8.4 \times 10^{-4} Rn - 1.7 \times 10^{-3} G - 2.3 \times 10^{-3} T_{气} + 0.0373$	0.9903	0.0000	578.19

4　结论与讨论

(1) 净辐射、土壤热通量、气温、相对湿度是对蒸散量影响较大的主要环境因子。

(2) 受环境因子不同天气特征的差异影响，晴、阴、雨天蒸散曲线分别呈现为"单峰型"、"多峰型"、"偏峰型"。

(3) 在不同天气条件下，除 Rn 外，其它主要因子与蒸散线性拟合度均表现为雨天 > 晴天 > 平均 > 阴天。

(4) 晴天、阴天、平均条件下土壤热通量较蒸散变化滞后约 2h，而雨天则两者同步。

(5) 不同天气下的蒸散预测模型表明：除阴天外，蒸散主要与 Rn、G、$T_{气}$ 相关，因此热量成为影响干旱区绿洲 – 荒漠过渡带蒸散量的最主要因素，这与湿润地区蒸散特点的异同有待进一步探讨。

参考文献

[1] 张凯，王润元，张强，等. 绿洲荒漠过渡带夏季晴天地表辐射和能量平衡及小气候特征 [J]. 中国沙漠，2007，27(6)：1055 – 1061.

[2] 刘小莽，郑红星，刘昌明，等. 海河流域潜在蒸散发的气候敏感性分析 [J]. 资源科学，2009，31(9)：1470 – 1476.

[3] 张耀生，赵新全，赵双喜，等. 三江源区温性草原蒸散量与主要影响因子的相关分析 [J]. 中国沙漠，2010，30(2)：363 – 368.

[4] 刘园，王颖. 华北平原参考作物蒸散量变化特征及气候影响因素 [J]. 生态学报，2010，30(4)：923 – 932.

[5] 金晓媚，梁继运. 黑河中游地区区域蒸散量的时间变化规律及其影响因素 [J]. 干旱区资源与环境，2009，23(3)：88 – 92.

[6] 于文颖，迟道才，何奇瑾，等. 盘锦芦苇湿地蒸发散特征研究 [J]. 沈阳农业大学学报，2006，37(5)：758 – 762.

[7] 贾德彬，刘艳伟，朝伦巴根. 北方干旱寒冷地区羊草生育期蒸散量变化规律研究 [J]. 干旱区资源与环境，2010，24(5)：158 – 165.

[8] 普宗朝，张山清，李景林，等. 近 47 a 塔克拉玛干沙漠周边地区气候变化 [J]. 中国沙漠，2010，30(2)：413 – 421.

[9] 郭瑞萍，莫兴国. 森林、草地和农田典型植被蒸散量的差异 [J]. 应用生态学报，2007，18(8)：1751 – 1757.

[10] Jensen M E，Burman R D，Allen R G. Evapotranspiration and irrigation water requirements. In: Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70 [M]. ASCE，New York，NY，1990.

[11] Todd R W，Evett S R，Howell T A. The Bown ratio energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semiarid，advective environment [J]. Agricultural and Forest Meteorology，2000，103：335 – 348.

[12] 黄妙芬. 绿洲荒漠交界处波文比能量平衡法适用性的气候学分析 [J]. 干旱区地理，2001，24(3)：259 – 264.

[13] 吴锦奎，丁永建，王根绪，等. 干旱区人工绿洲间作农田蒸散研究 [J]. 农业工程学报，2006，22(9)：16 – 20.

[14] 张守红，刘苏峡，莫兴国，等. 阿克苏河流域气候变化对潜在蒸散量影响分析 [J]. 地理学报，2010，65(11)：1363 – 1370.

[15] 杜军，边多，拉巴，等. 1971 – 2005 年西藏主要农区农田蒸散量变化特征及其与环境因子的关系 [J]. 冰川冻土，2009，31(5)：815 – 821.

[16] 韩松俊，胡和平，杨大文，等. 塔里木河流域山区和绿洲潜在蒸散发的不同变化及影响因素 [J]. 中国科学：E 辑，2009，39(8)：1375 – 1383.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Relationships between evapotranspiration and primary environmental factors in oasis – desert ecotone

YAN Renhua[1,3], XIONG Heigang[2,3], LI Chengyuan[1,3], QU Xiuhua[1,3]
(1. Institute of Resources and Enviroment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, P. R. China;
2. College of Arts and Sciences of Beijing Union University, Beijing 100083, P. R. China;
3. Key Laboratory of Oasis Ecology of Ministry of Education, Urumqi 830046, P. R. China)

Abstract: Based on the observed meteorological data, the splendens evapotranspiration was calculated by using Bowen ratio equilibrium energy method, and the different weather conditions´ influence on the relationship between evapotranspiration and environmental factors were analyzed. On the basis of the above study, evapotranspiration forecasting models of the oasis – desert ecotone in northern Tianshan Mountain of Xinjiang were established. The results indicated that: 1. Net radiation, soil heat flux, air temperature, relative humidity are the four major environmental factors affecting evapotranspiration. 2. The features of diurnal variation of evapotranspiration and the primary factors under the different weather conditions differ largely. Evaporation curve on sunny days appears as " single peak " type, the line of cloudy days manifests as" multiple peak " type, and that of rainy days displays " partial peak "type. The curve of average major factors and evapotranspiration are basically consistent with sunny. 3. In addition to Rn, the linear goodness of fit from the other main factors to evapotranspiration appears that rainy day is the highest, followed by sunny and the average, cloudy is the lowest. 4. Evapotranspiration forecasting models under different weather conditions show that in addition to cloudy, the heat is the most important factor affecting evapotranspiration of oasis – desert ecotone in the arid area.

Key words: evapotranspiration; environmental factors; oasis – desert ecotone; weather conditions

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net