干旱区绿洲防护林网格局对农田蒸散量的影响——以新疆三工河流域绿洲为例

孙 浩[1,3] 刘丽娟[1,2] 李小玉[1,2*] 张振宇[1,3]

([1]中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011; [2]浙江农林大学林业与生物技术学院, 杭州 311300; [3]中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要 蒸散发作为干旱区农田最敏感的水分支出项,是绿洲生态系统中水量和能量平衡的关键组成部分,而防护林作为干旱区绿洲农田重要的生态屏障,对绿洲农田蒸散发过程有着不可忽视的影响。本研究以新疆天山北坡典型流域——三工河流域绿洲为例,研究农田防护林网分布格局对绿洲蒸散发的影响,结果表明:防护林不仅能够有效降低绿洲农田蒸散量,而且能够在一定程度上维持蒸散量在较低水平上的相对稳定;在防护林网的格局功能上,防护林网带斑比指数与农田蒸散量呈极显著负相关($P<0.01$),环度指数与农田蒸散量呈显著负相关($P<0.05$),而防护林网连接度指数与蒸散量的相关性不明显($P>0.05$),说明防护林网的分布密度和林网结构的成型程度对农田蒸散量具有明显的影响,而在网格基本成型的防护林网络中其连通性对蒸散量的影响不明显。在景观水平上,研究防护林网格局对蒸散量的影响,对于农田防护林网的规划管理具有一定的参考价值。

关键词 防护林网; 格局指数; 蒸散量; 农作物

Effects of the pattern of agricultural shelterbelt network on evapotranspiration of oases in arid region: A case study from Sangong River basin in Xinjiang.

SUN Hao[1,3], LIU Li-juan[1,2], LI Xiao-yu[1,2*], ZHANG Zhen-yu[1,3] ([1] *State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011, *China*; [2] *School of Forestry and Bio-technology, Zhejiang A&F University, Hangzhou* 311300, *China*; [3] *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*).

Abstract: As the most sensitive component of water expenditure of farmland in arid region, evapotranspiration is a key component of water and energy balance in oasis ecosystems. Shelterbelt is an important ecological barrier to oasis farmland in arid region, with undeniable impacts on evapotranspiration of oasis farmland. In this study, the impacts of distribution patterns of farmland shelterbelts on oasis evapotranspiration were studied in the typical watershed of the north slope of the Tianshan Mountains in Xinjiang. The results showed that the shelterbelts can not only effectively reduce the evapotranspiration of oasis farmland, but also maintain the relatively stable evapotranspiration at a relatively low level at a certain extent. For the pattern function of the shelterbelts, there was a significant and negative correlation between the ratio of belt to patch and the evapotranspiration of shelterbelts ($P<0.01$), the ring degree and farmland evapotranspiration were negatively correlated ($P<0.05$), while the connectivity had no significant effects on evapotranspiration ($P>0.05$), indicating that the distribution density of shelterbelts and the degree of formation of shelterbelt network structure had significant effects on farmland evapotranspiration, whereas the connectivity of the shelterbelt network with basic grid shape had no effect on evapotranspiration. Our results suggest that studying the impact of shelterbelt pattern on evapotranspiration at the landscape level would be helpful for the planning and management of farmland shelterbelts.

Key words: shelterbelt network; pattern index; evapotranspiration; crop.

国家自然科学基金项目(31470708, U1503182, 41501205 和 41271202)资助。
收稿日期: 2017-11-18 接受日期: 2018-05-24
*通讯作者 E-mail: lixy76@163.com

蒸散发(evapotranspiration,ET)包括植物蒸腾和土壤蒸发,是影响水循环与能量平衡的重要因子(Jiang *et al.*,2009)。水资源是制约干旱区农业发展的主要因素,对干旱区农田蒸散量进行准确估算,有助于理解节水灌溉条件下的流域水循环过程(Bastiaanssen *et al.*,2000)。防护林网作为干旱区重要的防护屏障(毛东雷等,2012),其防风固沙、改善农田微气候及涵养水源的功能对于减缓蒸散量具有不可忽视的作用(朱教君等,2003)。分析农田防护林网对农田蒸散量影响机理,对于防护林的规划、管理和优化配置具有一定的参考价值。

随着遥感与地理信息系统技术的发展,对防护林防护效益的评价也在不断的完善与改进(史晓亮等,2012),从以往的树种选择、林带走向、带间距以及疏透度等小尺度指标及其防护效应(朱耀庭等,2004),不断发展到将防护林网与防护对象作为一个整体,在景观尺度上对防护林效应进行评价(梁万君,2007)。用于评价防护林空间格局的景观指标主要有:带斑比、优势度、连接度和环度,分别用来量化防护林网的丰盛程度、均匀程度、完整程度和网格成型程度。而蒸散量的估算也从单点和田间小尺度不断发展为基于遥感影像的大尺度反演(Penman,1948;李放等,2014)。特别是热红外遥感的出现,使得大尺度地表特征参数反演得以发展,如利用热红外波段反演地表温度,用可见光、近红外获取NDVI和植被覆盖度等。大尺度蒸散发的模拟模型主要有经验模型、SEBS模型、METRIC模型和SEBAL模型等,其中SEBAL模型以地表能量平衡为基础,所需要的地面参数最少,对高植被覆盖度区域的蒸散量估算精度较高,适合作物生长季的农田蒸散量估算(李宝富等,2011)。

中国西部干旱区属于典型的大陆性气候,干旱少雨,且蒸散量较大,许多学者利用SEBAL模型对干旱区的蒸散量进行估算,如李宝富等(2011)利用SEBAL模型估算了塔里木河干流区蒸散量,王琴(2014)利用SEBAL模型估算了台州河流域的蒸散量。防护林作为干旱区农田的重要组成部分,对风速、土壤湿度、蒸散发等有着重要的控制作用(Forman *et al.*,1984)。Viaud等(2005)在流域尺度上模拟了灌木防护林带格局的时空变化,并将其与水文模型进行空间耦合,模拟分析了防护林带对流域实际蒸散量的时空影响;Liu等(2008)将气候水文模型与中国北方防护林建设进行耦合,模拟分析了防护林对气候和蒸散量的影响。总体上来说,农田蒸散量与林网格局关系的研究在方法和技术上有所探索和创新,但研究仍然不够系统,还需进一步的深入探索。本研究以新疆三工河流域绿洲为例,通过对流域防护林空间分布和主要农作物种植格局的分析,利用SEBAL模型反演农田蒸散量,分析防护林网格局对农田蒸散量的影响,揭示较大尺度上农田防护林网格局对蒸散量的影响机制。

1　研究地区和研究方法

1.1　研究区概况

三工河流域位于新疆天山北坡中段,准格尔盆地南缘(43°09′ N—45°29′ N,87°47′ E—88°17′ E)(图1),地势南高北低,南部山地、中部平原、北部荒漠构成了天山北坡独特的生态系统(黄俊芳等,2004)。该流域属于干旱大陆性气候,全年干燥少雨,热量充足,年平均降雨量100~300 mm,夏季炎热高温可以达到40 ℃以上,蒸散量达到400~500 mm。

三工河流域总面积830 km^2,绿洲区面积702.81 km^2,其中耕地面积约550 km^2,包括以阜康市为主的洪积扇老绿洲,以阜北和六运湖农场为主的新绿洲(陆晴等,2013)。三工河流域主要的农作物为小麦、玉米、瓜类等其他经济作物,灌溉模式以节水强度较大的膜下滴灌为主。在农田防护林网建设方面,下游的阜北农场在新疆生产建设兵团的管理下,防护林建设比较完善,而位于中游的阜康市所属区域,由于农田分布比较分散,防护林建设较为落后,因此,这种不同格局的防护林分布为研究防护林空间格局对蒸散发的影响提供了理想的场所。

1.2　数据来源

利用Landsat 8的L1G影像进行农作物种植结构的解译和蒸散发模拟;利用ZY-1 02C多光谱影像(10 m分辨率)进行农田防护林网的空间提取。

波文比观测数据分别来自田间观测,本研究在三工河流域共设有波文比气象观测站2台,一台位于防护林建设较稀疏的农田斑块(ET1),另一台位于防护林体系建设较密集的农田斑块(ET2)。

为了验证作物种植类型的解译数据,在三工河流域农田均匀布设137个样本点,通过实地调查获取农田作物类型数据。

1.3　数据处理

1.3.1　波文比数据处理　本研究所用的波文比数据为2016年作物生长季观测数据。为提高数据质

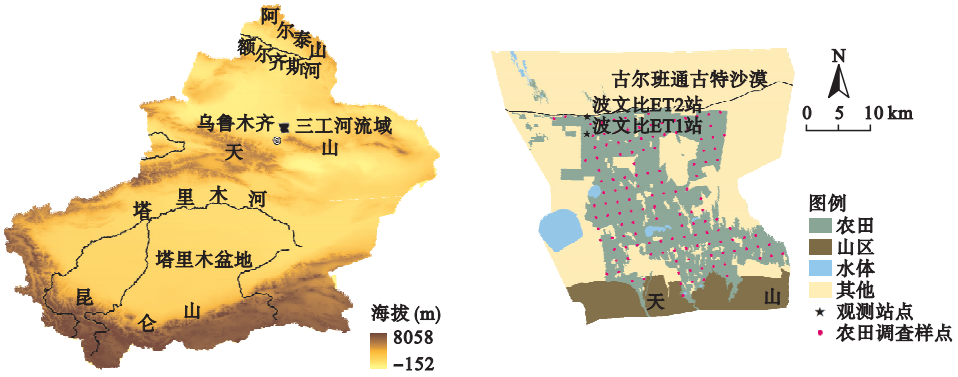


图 1 三工河流域示意图
Fig.1 Location of the Sangong River basin

量,保证观测数据的可用性,通过异常值剔除和数据插补对观测数据进行修正,然后基于小时尺度计算实际蒸散量,计算公式如下(Todd *et al.*,2000):

$$ET=\frac{R_n-G_n}{\lambda(1+B)}\times 3600 \quad (1)$$

式中,ET 为实际蒸散发(mm);λ 为汽化潜热(J·kg^{-1});B 为波文比;R_n 为净辐射通量(J·m^{-2}·s);G_n 为土壤热通量(W·m^{-2})。

1.3.2 农作物解译 本研究利用 NDVI 时间序列波段合成的方法对农作物解译(Atzberger *et al.*,2013;Agarwal *et al.*,2014;张焕雪等,2015)。2016 年三工河流域主要作物为冬小麦、玉米等粮食作物和向日葵、瓜类等经济作物,主要作物的物候期如表 1 所示,各类作物物候期相差较大,反映作物生长状况的 NDVI 差异明显,因此本研究选择能够较好反映主要作物 NDVI 差异的 3 个时期(5 月 9 日、7 月 28 日和 8 月 29 日)的遥感影像,通过人机交互解译和 NDVI 的差异对比分析,得到三工河流域的主要农作物空间分布格局。

利用农田野外调查样点(共 137 个采样点,其中向日葵 36 个、小麦 19 个、玉米 12 个、籽瓜 33 个、其他作物 37 个),通过混淆矩阵法对分类结果进行检验。检验结果为总体精度 86.86%,Kappa 系数为 0.84,大于 0.8,表明分类精度极高。

1.3.3 农田防护林格局指数计算 基于 ZY-1 02C 多光谱影像,利用人机交互解译的方法,获取三工河流域的防护林网分布数据。根据研究区农田斑块面积与防护林网的分布,本研究采用 1 km×1 km 的网格对三工河流域农田进行网格划分,共划分出了 446 个农田网格,然后分别计算每个网格内的防护林格局指数。本研究选择带斑比、环度和连接度来表征防护林网的景观格局特征(孙保平等,1997;梁万君等,2005)。

(1)带斑比,用于度量防护林网的丰富程度,计算公式为:

$$F_0=S_0/A_0 \quad (2)$$

式中:F_0 为林网的带斑比;S_0 为林网或林带的面积;A_0 为需要被防护的斑块面积。

(2)环度,用于度量防护林网的成型程度,林网中实际环路数与最大可能环路数之比,计算公式为:

$$R_0=\frac{N_b+n-V_b}{H_{max}(V)_b} \quad (3)$$

式中:R_0 为林网环度;H_{max} 为林网最大环度;N_b 为主副林带总条数;V_b 为林网节点数;n 为未建林网时景观中需被防护斑块数。

(3)连接度,度量防护林网的完整程度,是林网中现有连接林带总数与最大可能连接林带数之比,计算公式为:

表 1 三工河流域主要农作物物候期
Table 1 Crop phenology in the Sangong River basin

月份	3 月			4 月			5 月			6 月			7 月			8 月			9 月			10 月		
旬	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
籽瓜							播种			出苗		开花			坐果			成熟			收获			
向日葵					播种		出苗				现蕾		开花			成熟			收获					
春玉米						播种		出苗			拔节			抽穗			乳熟			收获			
冬小麦	返青			起身		拔节			孕穗		乳熟		收获							播种		出苗		

$$Q_0=\frac{N_b-(n-1)}{L_{max}(V_b)} \quad (4)$$

式中:Q_0为林网连接度;L_{max}为林网最大连接度。

1.3.4 防护林网格局评价　研究表明,防护林网格局指数能较好地反映其结构组成和空间配置特征(梁万君等,2005;严洪,2007;Grala *et al.*,2010)。带斑比指数是防护林景观格局指数最重要的评价指标,能直接反映出地区防护林网的丰富程度,连续度和环度指数则反映出防护林网的完整程度和成型状况,而通过对3种格局指数的综合评价,则可有效地反映防护林网的整体分布和空间格局特征。在分别对带斑比、连接度和环度进行等级划分和评分的基础上(表2),以3种格局指数的算术平均值作为农田防护林网整体格局的综合评分(表3)。

1.3.5 蒸散量的估算　依据三工河流域主要作物的物候期,并根据Landsat 8遥感影像的质量(云层及条带状况),从作物出苗后到收获前,依次选择5月25日、6月26日和7月12日的影像,通过SEBAL模型反演日蒸散量,并通过对应时间的波文比观测数据进行验证,分析农田防护林网对不同时期农田蒸散量的影响。

SEBAL模型的基本原理是地表能量平衡方程(曾丽红等,2008;Jimenez-Munoz *et al.*,2014;安迪来·乌甫等,2017),可表示为:

$$R_n=G+H+\lambda ET \quad (5)$$

式中:R_n为净辐射量;G为土壤热通量;H为土壤与大气之间的显热通量;λET为潜热通量。

通过瞬时蒸散量,利用正弦函数估算日尺度的蒸散量,计算公式如下:

$$\frac{ET_{daily}}{ET_{inst}}=\frac{2N_E}{\pi\cdot\sin(\pi\cdot t/N_E)} \quad (6)$$

式中:N_E为日蒸散时数;ET_{daily}为日蒸散量;ET_{inst}为瞬时蒸散量。

2　结果与分析

2.1　三工河流域农作物空间分布

2016年三工河流域农田种植面积为337.85 km^2(图2b),其中小麦面积为49.03 km^2,玉米面积为30.36 km^2,向日葵种植面积为67.07 km^2,籽瓜种植面积为52.30 km^2,葡萄种植面积为10.76 km^2,以上5种主要作物种植面积占三工河流域农田种植总面积的62.02%。向日葵、籽瓜、小麦在三工河绿洲种植较为普遍,分布广泛,而葡萄主要分布在北部的阜北农场,玉米主要分布在南部山脚的农田,其他区域

表2　评价指标评分
Table 2　Grade of evaluation indicator

评分	带斑比(P)	连接度(R)	环度(Q)
3	林带面积充足(P>0.04)	林带完整(R>0.40)	网格成型较好(Q>0.90)
2	林带面积不足(0.03<P≤0.04)	林带不完整(0.15<R≤0.40)	网格成型较差(0.55<Q≤0.90)
1	林带面积严重不足(P≤0.03)	林带非常不完整(R≤0.15)	网格成型非常差(Q≤0.55)

表3　农田防护林整体格局分级评价
Table 3　Evaluation criteria of farmland shelterbelt distribution

整体格局	好	较好	中等	较差	差
评分(G)	3.00≥G>2.50	2.50≥G>2.00	2.00≥G>1.50	1.50≥G>1.00	G≤1.00

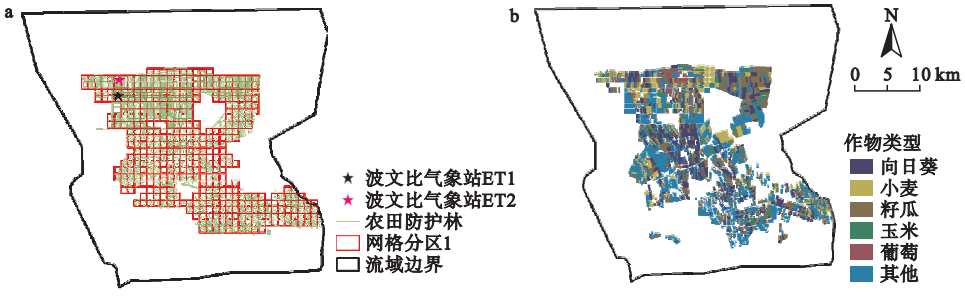


图2　三工河流域农田防护林网空间分布图(a)和主要作物分布图(b)
Fig.2　Spatial distribution of farmland shelterbelts (a) and main crops (b) in the Sangong River basin

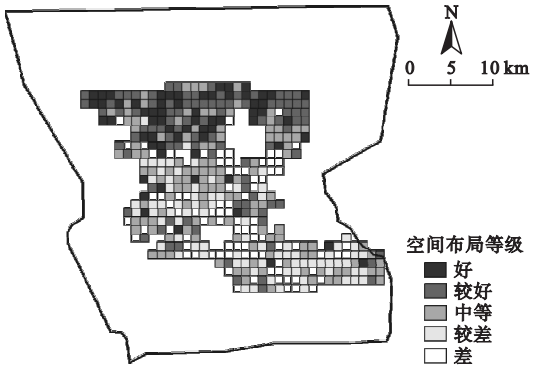


图 3 农田防护林空间布局分级图
Fig.3 Grades of farmland shelterbelt spatial arrangement

仅有零星分布。所以在进行防护林网格局与农田蒸散量关系研究中,选择向日葵、籽瓜和小麦农田作为研究对象。

2.2 三工河流域防护林网空间分布

通过对所划分的 446 个农田小区,分别计算 3 种防护林格局指数及其评分,得到三工河流域绿洲防护林网整体格局的空间等级图(图 3),可以看出防护林网空间格局等级由南至北不断提升。流域北部兵团农场所辖区域农田防护林网布局相对较好,林网面积充足,林带较为完整,网格成型程度也较高;位于流域中部的六运湖农场防护林网格局差异较大,既存在布局好的农田小区,也存在布局较差的农田小区;而位于流域南部地方政府所辖区域防护林空间格局整体较差。出现这种分布格局的原因,很大程度上在于三工河流域不同的土地利用模式,位于北部的阜北农场为兵团集约化管理,农田集中连片,斑块完整,防护林配置完善;中部六运湖农场由于建设较早,一些退化和死亡林带缺少应有的补充和更新,使得防护林网分布不均匀;而绿洲南部农田为地方政府管理下的农户分散式经营,农田斑块破碎化程度高,同时对防护林网的建设和管理不够重视,造成了防护林建设的整体落后。

2.3 三工河流域蒸散量的空间格局

基于 SEBAL 模型估算了作物生长季 3 个不同时期的日蒸散量(图 4),并分别利用两个波文比观测站点对应日期的蒸散量数据对反演结果进行验证(表 4)。两个站点在三个时期的相对误差均小于 8%,其中在 ET1 站点前两个时期的相对误差低于 4%,说明模型的反演精度较高。中国科学院兰州大气物理所在黑河流域对 SEBAL 模型模拟结果进行了数据验证,表明对日蒸散量的估算误差在 8%以内(彭飞宇等,2003)。

根据模型反演结果,农田的蒸散量明显高于其他土地利用类型(水体除外),农田日平均蒸散量 5 月 25 日、6 月 26 日和 7 月 12 日分别为 2.43、2.89 和 3.91 mm。5 月下旬小麦虽然生长旺盛,但由于种植面积较少,其他作物大部分处于出苗期,使得农田平均蒸散量较低;7 月中下旬左右研究区的主要作物进入生长旺盛时期,作物从土壤中吸收大量水分,且太阳辐射量大,农田蒸散发强度大。从蒸散量的空间分布来看,5 月 25 日流域北部的蒸散量较高,主要是由于这个时期冬小麦处于孕穗期,且三工河流域冬小麦种植主要集中于阜北农场,使得蒸散发强度北部区域较高;6 月 26 日和 7 月 12 日流域北部的农田蒸散量低于中部的六运湖农场区域,而南部区域的农田蒸散量空间差异较大,作物种植结构的差异是主要原因。

2.4 防护林网空间格局对蒸散量的影响

2.4.1 站点尺度防护林网对蒸散量的影响 由于 2016 年两个波文比观测站点种植的作物类型不同,站点观测的作物生长期为观测开始日期(5 月 10 日)至向日葵收获的日期(8 月 12 日),在作物生长期不适合对其蒸散量进行直接的比较分析,因此,本研究在作物生长期选择不受农田下垫面类型影响的太阳辐射量与风速两个参数进行对比。太阳辐射量

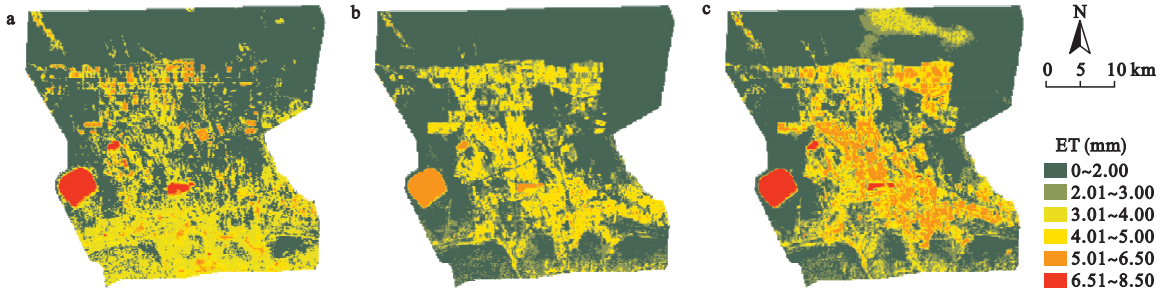


图 4 基于 SEBAL 模型的三工河绿洲作物生长季 5 月 25 日(a)、6 月 26 日(b)、7 月 12 日(c)的日蒸散量估算
Fig.4 Daily ET of 25 May (a), 26 June (b) and 12 July (c) in the Sangong River basin based on SEBAL model

表 4　模型估算结果与波文比站点观测数据对比

Table 4　Comparison of SEBAL model estimation and measured data

日期	波文比观测站点 ET1			波文比观测站点 ET2		
	反演值 (mm)	实测值 (mm)	相对误差 (%)	反演值 (mm)	实测值 (mm)	相对误差 (%)
5 月 25 日	4.97	5.17	3.87	1.03	0.97	6.18
6 月 26 日	4.56	4.71	3.18	3.44	3.42	0.6
7 月 12 日	2.83	3.07	7.82	4.17	3.95	5.6

与风速是影响潜热通量的重要气象因素,而潜热通量是反映地表水分转化为水汽蒸散到空气中所吸收的能量,是估算蒸散发的重要参量。因此,太阳辐射量与风速在一定程度上可反映两个波文比站点排除农作物类型影响的蒸散量状况。

作物生长季日均太阳辐射通量(图 5a)在 ET1 站(19.08 kJ · m^{-2})明显高于 ET2 站(15.36 kJ · m^{-2}),高出 24.22%(3.72 kJ · m^{-2});日均风速(图 5b)ET1 站(1.76 m · s^{-1})也明显高于 ET2 站(1.28 m · s^{-1}),高出 37.50%(0.48 m · s^{-1})。而防护林网格局在 ET2 站明显优于 ET1 站,这就表明防护林网对于减小太阳辐射量与降低风速具有明显的效应,而辐射通量和风速与蒸散量呈反比关系,由此可见,防护林网对农田蒸散量具有明显的降低作用。

作物生长季的蒸散总量(图 5c)在 ET1 站(385.44 mm)明显高于 ET2 站(245.75 mm),高出 139.69 mm。日平均蒸散量在整个作物生长季 ET1 站均高于 ET2 站(图 5c)。7 月中旬以后,ET1 站小麦收获,成为裸地,而 ET2 站农田向日葵生长逐渐旺盛,但两站蒸散量相近。ET1 站因防护林网格局较差,向日葵生长旺盛期的蒸散量与 ET2 站农田裸地的相似,再次表明防护林网对于降低农田蒸散量具有不可忽视的作用。而在作物收割后的 9 月份,两个波文比站点的农田基本为裸地,蒸散量接近于土壤蒸发,对两个波文比站点的日平均蒸散量进行对比分析,可以在很大程度上反映防护林网对蒸散量的影响。对比分析两站点同为农田裸地的日平均蒸散量(图 5d),表明 ET1 站(2.51 mm · d^{-1})明显高于 ET2(1.60 mm · d^{-1}),高出 56.75%(0.91 mm · d^{-1})。从蒸散量的日变化过程来看,尽管两个观测站点农田裸地的蒸散量变化趋势相似,都呈现不规则的倒 U 形,但 ET1 站有明显的最大值,在蒸散量最大值出现前呈快速增加趋势,而在达到最高峰后呈迅速减少趋势,而 ET2 站蒸散量在达到最大值前后的增加和减少趋势都相对平缓(图 5d),充分说明防护林能够有效减少绿洲农田蒸散量,且能够在一

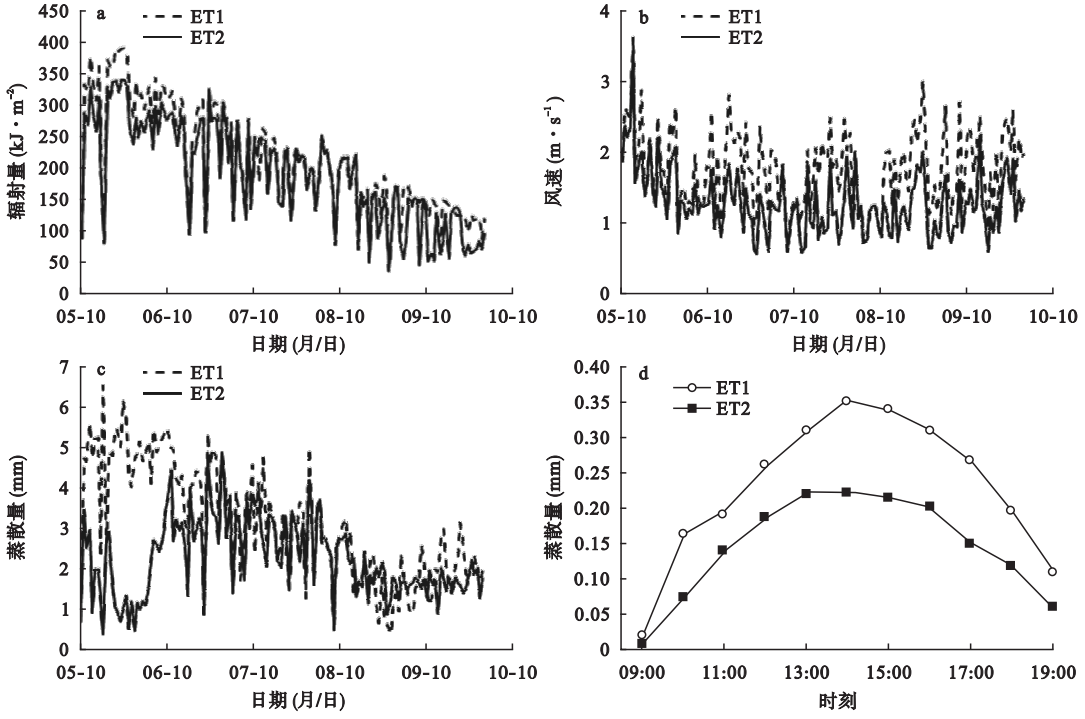


图 5　波文比观测站点 ET1 与 ET2 作物生长季的太阳辐射量(a)、风速(b)、蒸散量(c)以及 9 月份日平均蒸散量(d)

Fig.5　Solar radiation (a), wind speed (b), evapotranspiration (c) and the daily variation of ET in September (d) between ET1 and ET2

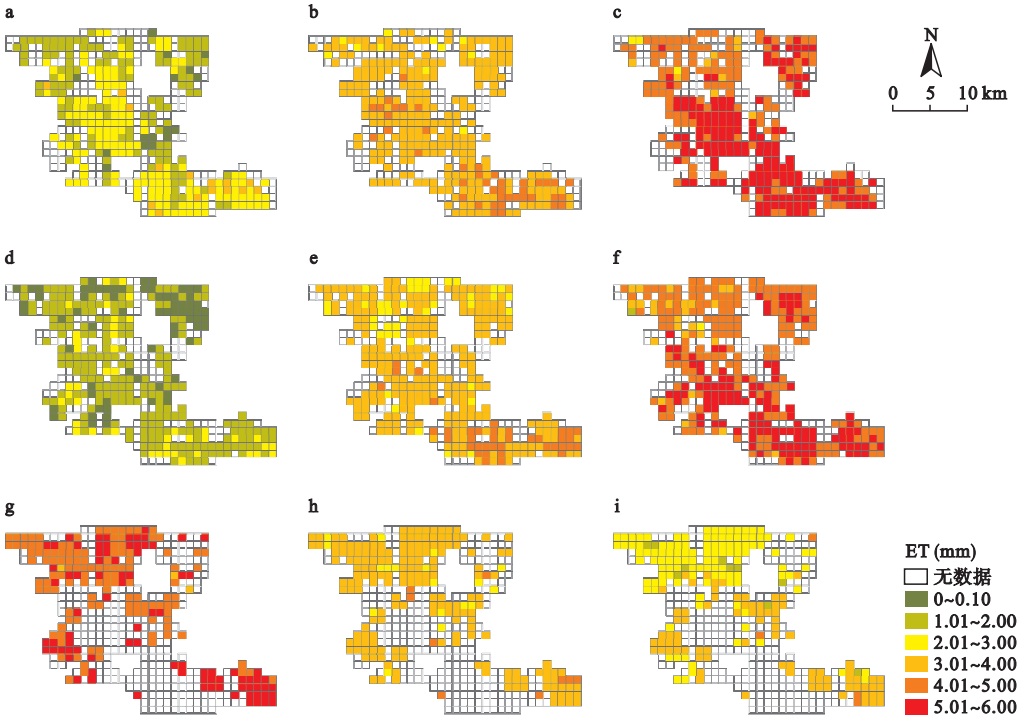


图 6 基于网格的向日葵、籽瓜和冬小麦 3 种作物在 3 个不同时期(5 月 25 日、6 月 26 日和 7 月 12 日)的蒸散量空间格局

Fig.6 Grid-based pattern of evapotranspiration in three different periods (May 25, June 26 and July 12) of sunflower, watermelon and winter wheat

a、b、c 为向日葵农田分别在 5 月 25 日、6 月 26 日和 7 月 12 日蒸散量分布图,d、e、f 为籽瓜农田分别在 5 月 25 日、6 月 26 日和 7 月 12 日蒸散量分布图,g、h、i 为冬小麦农田分别在 5 月 25 日、6 月 26 日和 7 月 12 日蒸散量分布图。

定程度上维持蒸散量在较低水平上的相对稳定。

2.4.2 绿洲尺度防护林网对蒸散量的影响 为了在空间上实现防护林网格局与蒸散量时空格局的耦合,量化分析绿洲防护林网格局对农田蒸散量的影响,分别将向日葵、籽瓜和冬小麦在 3 个时期(5 月 25 日、6 月 26 日和 7 月 12 日)的蒸散量空间分布图按照图 2 中防护林网格局指数计算方法划分为 446 个网格,并分别计算每个网格的平均蒸散量(图 6),使之与防护林指数相互对应。在此基础上,分别计算每种作物在不同时期的蒸散量和防护林网格局指数的相关关系(表 5)。

从空间分布上来看,3 种作物的农田蒸散量在每个时期的空间格局基本与防护林网格局等级分布具有较高的相似性,在防护林网格局等级高的区域农田蒸散量相对较小,等级越低的区域农田蒸散量相对越大。从农田蒸散量与防护林网格局指数的相关性来看(表 5),带斑比指数与不同作物农田不同时期的蒸散量大多成极显著负相关($P<0.01$),说明林带的面积和数量对干旱区绿洲农田蒸散量有着显著影响,防护林带斑比越大,丰富程度越高,农田蒸散量越低;环度指数与除 5 月 25 日的小麦之外的农田蒸散量也成显著负相关($P<0.05$),但整体相关性低于带斑比;而连续度指数与农田蒸散量的相关性较低,仅与 6 月 26 日的向日葵、6 月 26 日和 7 月 12 日的籽瓜成一定的相关性。总体上来说,农田蒸散量与防护林网格局指数的相关性排序为:带斑比>环度>连续度,即农田蒸散量受带斑比的影响最大,受环度的影响较大,受连续度的影响较小。表明防

表 5 基于网格计算的农田蒸散量与林网格局指数的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between ET of farmlands and indexes of shelterbelt networks

	向日葵			籽瓜			冬小麦		
	5 月 25 日	6 月 26 日	7 月 12 日	5 月 25 日	6 月 26 日	7 月 12 日	5 月 25 日	6 月 26 日	7 月 12 日
带斑比	−0.344**	−0.727**	−0.633**	−0.167**	−0.660**	−0.583**	−0.256*	−0.458**	−0.580**
连续度	−0.072	−0.195*	−0.130	−0.075	−0.160*	−0.159*	−0.061	−0.140	−0.130
环度	−0.269*	−0.535*	−0.411*	−0.175*	−0.478**	−0.428*	−0.187	−0.340*	−0.485**

*, $P<0.05$, **, $P<0.01$。

护林网的丰富程度越大,网格越完整,对农田蒸散量的减少效益越明显。

3　小结与讨论

在分析三工河流域绿洲农田防护林网空间格局的基础上,基于 SEBAL 模型估算农田蒸散量,并用站点观测数据进行模拟验证,在空间上分析防护林网格局对农田蒸散量的影响。干旱区绿洲防护林网对农田蒸散量具有显著的降低效应,防护林网格局越好的区域农田蒸散量越小。在水资源高度紧缺的干旱区,绿洲防护林网对于减少农田蒸散量具有显著效果,且林网空间格局对农田蒸散量影响明显,林网带斑对农田蒸散量的影响最显著,林网环度次之,而林网连续度对农田蒸散量的影响不明显。防护林网的规划不仅需要足够的防护林面积,而且其空间网格的成型程度也对防护效果有着关键性的作用。合理的防护林网规划能够有效的减少农田蒸散量,在一定程度上提高干旱区宝贵水资源的利用效率。

严洪(2007)采用对照试验的方法,发现随着林带宽度和主林带间距的变化,林网对农田小气候因子(气温、空气湿度和地表温度等)产生显著影响;Brandle 等(2004)和 Grala 等(2010)根据实地试验,研究防护林网防护的效益,表明防护林网能有效的改变农田小气候,减小能量的输出。可以看出,防护林网对于减弱风速、改变农田小气候等具有明显的作用,进而对蒸散发产生影响。Kędziora 等(2011)研究表明,通过防护林网等廊道元素重塑农业景观结构和格局,通过合理设计可较好的保持农田水分和养分,减少蒸散发和水土流失。农田波文比气象站可以准确反映出林间尺度内防护林网对风速、净辐射量和土壤热通量等气象因子对蒸散发的影响。本研究对处于不同防护林网格局下的农田波文比站点观测数据进行对比分析,由于条件限制,两观测站点的作物类型不同,虽然不能直接对其蒸散量进行对比分析,但通过选择不受下垫面影响的风速和太阳辐射量等与蒸散量直接相关的因子进行比较分析,从而分析防护林网格局对蒸散量的影响。后续研究可以在波文比观测站点种植相同作物的年份进一步进行验证。

带斑比、连续度和环度 3 种防护林网格局指数可有效评价防护林分布格局,将其与流域主要作物的蒸散量强度进行相关性分析,在格局尺度上量化分析防护林网空间分布对蒸散量的影响,相关研究还较少,林网格局指数的选取和应用还需要进一步探讨和深化。

参考文献

安迪来·乌甫, 玉素甫江·如素力, 热伊莱·卡得尔. 2017. 基于 MODIS 数据的新疆地表蒸散量时空分布及变化趋势分析. 地理研究, **36**(7): 1245-1256.

黄俊芳, 王让会, 师庆东. 2004. 基于 RS 与 GIS 的三工河流域生态景观格局分析. 干旱区研究, **21**(1): 33-37.

李　放, 沈彦俊. 2014. 地表遥感蒸散发模型研究进展. 资源科学, **36**(7): 1478-1488.

李宝富, 陈亚宁, 李卫红, 等. 2011. 基于遥感和 SEBAL 模型的塔里木河干流区蒸散发估算. 地理学报, **66**(9): 1230-1238.

梁万君, 王宪成, 胡海清. 2005. 防护林布局的评价方法. 东北林业大学学报, **33**(5): 24-26.

梁万君. 2007. 吉林省西部农田防护林生态学研究(博士学位论文). 哈尔滨: 东北林业大学.

陆　晴, 刘丽娟, 王玉刚, 等. 2013. 新疆三公河流域农业绿洲近 30 年景观格局变化及其驱动力. 生态学杂志, **32**(3): 748-754.

毛东雷, 雷加强, 曾凡江, 等. 2012. 和田地区绿洲外围防护林网体系的防风阻沙效益. 水土保持学报, **26**(5): 48-54.

彭飞宇, 曹宏娥. 2003. 流域尺度 ET 遥感监测方法探讨. 海河水利, **24**(5): 38-40.

史晓亮, 李　颖, 邓荣鑫, 等. 2012. 农田防护林网景观结构异质性动态评价. 中国科学院研究生院学报, **29**(1): 54-60.

孙保平, 岳德鹏, 赵廷宁. 1997. 北京市大兴县北藏乡农田林网格局景观结构的度量与评价. 北京林业大学学报, **19**(1): 45-50.

王　琴. 2014. SEBAL 模型在台兰河流域蒸散发研究中的应用. 水资源与水工程学报, **25**(1): 178-181.

严　洪. 2007. 江苏徐淮平原农田林网结构与防护效益研究(硕士学位论文). 南京: 南京林业大学.

曾丽红, 宋开山, 张　柏, 等. 2008. 应用 Landsat 数据和 SEBAL 模型反演区域蒸散发及其参数估算. 遥感技术与应用, **23**(3): 255-263.

张焕雪, 曹　新, 李强子, 等. 2015. 基于多时相环境星 NDVI 时间序列的农作物分类研究. 遥感技术与应用, **30**(2): 304-311.

朱教君, 姜凤岐, 范志平, 等. 2003. 林带空间配置与布局优化研究. 应用生态学报, **14**(8): 1205-1212.

朱耀庭, 关德新, 吴家兵, 等. 2004. 论林带防风效应结构参数及其应用. 林业科学, **40**(4): 9-14.

Agarwal R, Ranjan P, Chipman H. 2014. A new Bayesian ensemble of trees approach for land cover classification of satellite imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing*, **39**: 507-520.

Atzberger C, Rembold F. 2013. Mapping the spatial distribution of winter crops at sub-pixel level using AVH-RR NDVI time series and neural nets. *Remote Sensing*, **5**: 1335-1354.

Bastiaanssen WG, Molden DJ, Makin IW. 2000. Remote sensing for irrigated agriculture: Examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management*, **46**: 137-155.

Brandle JR, Hodges L, Zhou XH. 2004. Windbreaks in North American agricultural systems. *Agroforestry Systems*, **61**: 65-78.

Forman RT, Baudry J. 1984. Hedgerows and Hedgerow Networks in Landscape Ecology. *Environmental Management*, **8**: 495-510.

Grala RK, Tyndall JC, Mize CW. 2010. Impact of field windbreaks on visual appearance of agricultural lands. *Agroforestry Systems*, **80**: 411-422.

Jiang L, Islam S, Guo W, *et al*. 2009. A satellite-based daily actual evapotranspiration estimation algorithm over South Florida. *Global and Planetary Change*, **67**: 62-77.

Jimenez-Munoz JC, Sobrino JA, Skokovic D, *et al*. 2014. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, **11**: 1840-1843.

Kędziora A, Negussie YZ, Asres MT, *et al*. 2011. Shaping of an agricultural landscape to increase water and nutrient retention. *Ecohydrology & Hydrobiology*, **11**: 205-222.

Liu YQ, John S, Lu HQ. 2008. Modeling the potential of the Northern China forest shelterbelt in improving hydroclimate conditions. *Journal of the American Water Resources Association*, **44**: 1176-1192.

Penman HL. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical and Physical Sciences*, **193**: 120-145.

Todd RW, Evett SR, Howell TA. 2000. The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in semi-arid, advective environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, **103**: 335-348.

Viaud V, Durand P, Merot P, *et al*. 2005. Modeling the impact of the spatial structure of a hedge network on the hydrology of a small catchment in a temperate climate. *Agricultural Water Management*, **74**: 135-163.

作者简介 孙 浩,男,1991年生,硕士研究生,主要从事地理信息工程与应用研究。E-mail: 919438572@qq.com

责任编辑 魏中青