

赵钱飞, 郭维栋, 凌肖露, 等. 2013. 半干旱区不同类型土地利用的蒸散量及水分收支差异分析——以通榆为例 [J]. 气候与环境研究, 18 (4): 415–426, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11203. Zhao Qianfei, Guo Weidong, Ling Xiaolu, et al. 2013. Analysis of evapotranspiration and water budget for various land use in semi-arid areas of Tongyu, China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (4): 415–426.

半干旱区不同类型土地利用的蒸散量及水分收支 差异分析——以通榆为例

赵钱飞^{1,2} 郭维栋³ 凌肖露³ 刘野³ 王国印¹ 解静⁴

1 兰州大学大气科学学院, 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000

2 辽宁省大连市气象台, 大连 116001

3 南京大学气候与全球变化研究院, 大气科学学院, 南京 210093

4 河北省唐山市气象台, 唐山 063000

摘 要 利用吉林通榆半干旱区农田站和退化草地站 2008 年的外场试验观测资料, 对比分析了不同土地利用方式对蒸散和地表水分收支的影响。结果表明: 从全年来看, 尽管两个站点相距仅 5 km, 但农田站的全年总蒸散量比代表自然土地覆盖状况的退化草地站高 28.2 mm; 且生长季两种下垫面的蒸散量较为接近, 差异主要发生在非生长季。同时, 农田站的年水分收支总量为 51.1 mm, 比退化草地站低 35.6%。具体来说, 生长季, 两个站点的水分收支均有盈余; 但在非生长季, 退化草地站的水分收支仍有盈余, 而农田站则处于水分亏损状态。这说明在半干旱区, 代表人为土地利用状况的农田站面临着更大的水分供给压力, 人类活动导致的土地利用会加剧该地区的干旱化趋势。

进一步的分析表明, 水分盈余并不代表地表的水分状况良好。从 Priestley-Taylor 系数来看, 两个站点的 Priestley-Taylor 系数均远小于 1.0, 说明在半干旱区, 由于表层土壤水分条件的限制, 实际蒸散量远未达到平衡蒸散量, 土壤面临着水分供给的压力。其可能的原因是, 对半干旱区而言, 尽管水分收支有盈余, 但是由于土壤沙化严重, 土壤孔隙度大, 大气降水很容易下渗, 并以地下水的形式存储起来, 使得表层土壤水分供应反而不足。

关键词 半干旱区 土地利用 蒸散 水分收支 Priestley-Taylor 系数

文章编号 1006-9585 (2013) 04-0415-12

中图分类号 P404

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11203

Analysis of Evapotranspiration and Water Budget for Various Land Use in Semi-Arid Areas of Tongyu, China

ZHAO Qianfei^{1,2}, GUO Weidong³, LING Xiaolu³, LIU Ye³, WANG Guoyin¹, and XIE Jing⁴

1 Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change, Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

2 Dalian Meteorological Office, Dalian 116001

3 Institute for Climate and Global Change Research, School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

4 Tangshan Meteorological Office, Tangshan 063000

Abstract Observational data from Tongyu cropland and degraded grassland sites recorded from January to December 2008 were used to investigate the effects of land use and cover changes on evapotranspiration and surface water budget.

收稿日期 2011-12-21 收到, 2013-05-03 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2011CB952002, 国家自然科学基金项目 40975049、40810059003, 教育部新世纪优秀人才支持计划

作者简介 赵钱飞, 女, 1987 年出生, 硕士研究生, 主要从事半干旱区陆气相互作用的研究。E-mail: zhaoqianfei1987@163.com

通讯作者 郭维栋, E-mail: guowd@nju.edu.cn

The results show that although the two sites are only 5 km apart, the annual total evapotranspiration of the cropland ecosystem was 28.2 mm higher than that of the degraded grassland ecosystem. This difference occurred mainly in the non-growing season. In addition, the annual total water budget of the cropland was determined to be 51.1 mm, which is 35.6% lower than that of the degraded grassland. In the growing season, the water budgets of both sites were positive. Although the water budget in the degraded grassland remained positive during the non-growing season, that in the cropland was negative. These results indicate that the cropland ecosystem, which involves a higher extent of human activities, is affected by more severe water supply issues in semi-arid areas and that land usage changes introduced by human activities aggravate aridity trends.

Moreover, further analysis suggests that a positive water budget does not necessarily guarantee that the land surface includes an ample water supply. The Priestley-Taylor coefficients of both sites were determined to be far less than 1.0, which indicates that the actual evapotranspiration value did not reach the equilibrium evapotranspiration value due to limited water availability at the land surface. Therefore, the surface soil of the semi-arid area was adversely affected by an insufficient water supply. This result is illustrated by the soil texture of the semi-arid area, which is characterized by severe erosion and high porosity. Under such conditions, although the water budget is positive; however, the precipitation is likely to infiltrate to deeper soil layers that serve as groundwater storage, eventually resulting in water shortage at the shallow layer of soil.

Keywords Semi-arid area, Land use, Evapotranspiration, Water budget, Priestley-Taylor coefficient

1 引言

北方干旱化是严重阻碍我国社会经济发展并密切关系到民众生存环境的重大问题(符淙斌和安芷生, 2002; 符淙斌等, 2006)。然而目前对干旱化成因并未完全了解, 其复杂性在于它的形成同时受到大尺度的气候背景和区域陆气相互作用的双重影响(符淙斌和马柱国, 2008; Fu and Guo, 2008)。研究发现, 半干旱区的干旱化趋势最为显著, 表现为降水量减少且年际差异大, 蒸散量高, 导致下垫面常处于不同程度的缺水状态。同时, 该地区为农牧交错带, 人类活动强度大, 土地利用方式变化剧烈。不同的土地利用类型对该地区蒸散量的影响很大, 进而影响到水分收支情况, 而水分供给是制约该地区生态环境的核心要素(符淙斌和温刚, 2002; 马柱国, 2005)。

国内外学者就土地利用/覆盖变化(land use/cover change, 简称LUCC, 下同)对于水资源的影响展开了大量研究(Bosch and Hewlett, 1982; Andréassian, 2004; Chiroma et al., 2008; 宋帅等, 2008; 曹丽娟等, 2010; López-Moreno et al., 2011; 邵璞和曾晓东, 2012)。一系列研究表明, 不管是在全球尺度还是在局地尺度上LUCC都是影响水资源变化的重要因素(Hutjes et al., 1998; Costa et al., 2003; Foley et al., 2005; Mu et al., 2007)。López-Moreno et al. (2011) 通过分析埃布罗河流域的 88

个次级流域在 1950~2006 年期间径流量的演变过程, 发现绝大多数支流的径流量均大幅减少, 并认为除了气候变化之外, 由于人类活动而造成的土地利用变化也是径流量减少的重要驱动因子。由于弃耕等造成的自然植被增加, 导致了该流域蒸散量增高, 从而引起了水分收支的变化。同时, 国内关于流域尺度上的研究指出, 某些区域快速的土地利用变化对于水资源也有着重要影响(Yu, 1991; Wei et al., 2005; Liu et al., 2007; 曹丽娟等, 2008)。例如在 20 世纪的中国, 和农业有关的土地利用变化是影响水资源的主导型人类活动强迫因子(Liu et al., 2008c)。Liu et al. (2008c) 利用 DLEM (Dynamic Land Ecosystem Model) 模式评估了 20 世纪 LUCC 对中国地区的蒸散、径流和水分收支的影响, 结果表明, 自然植被和农田下垫面这两类土地利用方式的相互转化会导致年蒸散量产生非常大的差异。从全国范围来讲, 农田扩张使得蒸散量平均增加了 182 mm/a, 而弃耕则使其平均减少了 379 mm/a。并特别指出, 这种差异在干旱半干旱区最为显著。从长期观测数据来看, Ren et al. (2002) 对中国多流域的径流量在不同时空尺度上的变化进行定量分析后也认为, 人类活动通过 LUCC 这种方式与水文过程联系到了一起, 土地利用变化对水资源有着重要的影响; 并且半干旱区人类活动对径流量的影响比在湿润区显著得多。

为利用第一手观测资料对比分析半干旱区不

同土地方式的地表—大气相互作用特征及其气候环境效应,中国科学院大气物理研究所在吉林通榆建立了“干旱化和有序人类活动”长期观测实验站。该站在相距 5 km 的农田和退化草地各设置了一个观测点,于 2002 年 10 月正式建成并开始连续观测,目前已成为国际能量和水分循环协同观测计划 (Coordinated Energy and Water Cycle Observations Project, CEOP, Bosilovich and Lawford, 2002) 的一个地面基准站 (reference site)。众多学者利用通榆站的观测数据对该地区的地表能量和物质的交换特征展开了一系列的研究 (刘辉志等, 2004, 2006; 涂钢和刘辉志, 2006; Dan et al., 2008; Liu et al., 2008a, 2008b; Song et al., 2009; 涂钢等, 2009), 指出通榆农田和退化草地两种下垫面的能量、物质和水分交换存在差异性。例如, 通过 2002~2003 年的资料分析得出, 退化草地站的浅层土壤湿度大于农田相同深度的土壤湿度; 干季两站点的地表热通量分配及大小很接近, 而湿季则农田的潜热通量大于退化草地下垫面; 通过 2003~2005 年生长季的资料分析得出, 农田站的日平均感热通量和潜热通量高于退化草地站; 秋、冬季两种下垫面的最大地表反照率差异高达 0.04 等。而本文拟利用通榆站分别架设在农田和退化草地观测点的涡动相关通量观测系统获得的较为精确的蒸散发量, 专门针对半干旱区由不同土地利用类型导致的水分收支差异进行定量分析, 从另一个角度加深对北方半干旱区陆面过程的理解。

2 站点和数据

2.1 观测站点介绍

通榆观测实验站位于吉林省白城市通榆县新华乡境内, 实验站地理位置为 (44°25'N, 122°52'E), 处在白城至双辽沙丘覆盖的冲积平原区, 平均海拔高度为 184 m, 实验区地形非常平坦。年平均气压为 996.8 hPa, 气温为 5.2 °C, 湿度为 57%, 年平均降水量为 396 mm, 年平均盛行风向为西南偏南 (SSW), 年平均风速 4.2 m s⁻¹。从 2002 年 10 月起, 分别针对半干旱区农田和退化草地生态系统建立了 2 个空间相距 5 km 的观测点。

在非生长季, 农田下垫面无作物, 地表为裸土覆盖; 生长季主要作物为玉米, 最高可达 1.8 m 左右。退化草地下垫面的草地退化状况非常严重, 草的覆盖度大约在 60%, 夏季草一般不超过 10 cm, 而且仍是牧区; 在干季, 草的长度在 5 cm 左右, 草的覆盖度只有大约 40%。另外, 退化草地土壤盐碱化明显。两个站点的基本情况及其下垫面和植被状况分别见表 1 和图 1[更为详细的介绍见刘辉志等 (2004)]。

表 1 通榆农田和退化草地站的基本状况
Table 1 Site information at the Tongyu cropland and degraded grassland during the measurement periods

观测点	退化草地	农田
生长季下垫面	60%左右为 10 cm 以下草覆盖	主要为玉米, 最高达 1.8 m 左右
非生长季下垫面	40%左右为 5 cm 以下草覆盖	几乎为裸土
土壤类型	盐碱土、草甸土、淡黑钙土	沙土、淡黑钙土

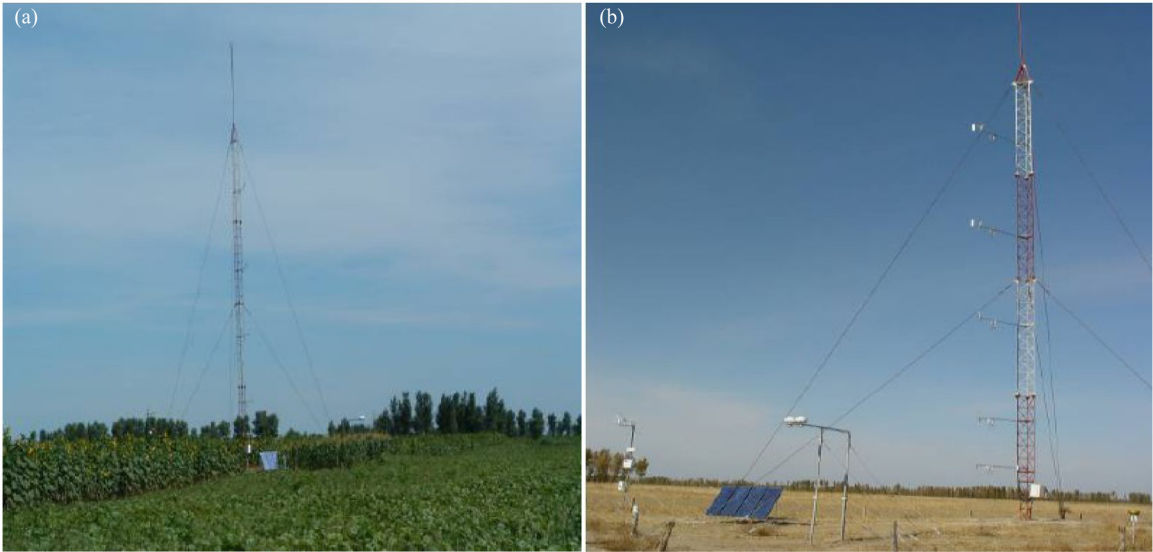


图 1 通榆 (a) 农田站和 (b) 退化草地站的外观和植被状况
Fig. 1 Overview and underlying surface types at Tongyu (a) cropland and (b) degraded grassland sites

表 2 通榆农田和退化草站所采用的观测仪器、仪器型号和观测高度

Table 2 Instruments and parameters established at Tongyu cropland and degraded grassland sites

站点	仪器名称	仪器型号	观测项目	观测高度	制造商
农田站	开路涡动相关系统 空气温/湿度传感器	CSAT3, Li-CS7500 HMP45C-L	CO ₂ 、感热、潜热通量等 空气温度	2.0 m	Campbell, Li-Cor Vaisala
				1.35 m, 3.95 m, 7.95 m, 12.45 m, 17.05 m	
	土壤温度仪	STP01-L50, 107-L	土壤温度	2 cm, 5 cm, 10 cm, 20 cm, 50 cm	Hukseflux
	土壤湿度仪	CS616_L	土壤湿度	5 cm, 10 cm, 20 cm, 50 cm, 80 cm	Campbell
退化草站	雨量筒	TE525MM_L	降水	1.0 m	R. M Young
	辐射强度计	CM21	太阳短波辐射	2.0 m	Kipp and Zonen
	开路涡动相关系统 空气温/湿度传感器	CSAT3, Li-CS7500 HMP45C-L	CO ₂ 、感热、潜热通量等 空气温度	3.5 m	Campbell, Li-Cor Vaisala
				1.95 m, 3.95 m, 7.95 m, 11.95 m, 16.65 m	
	土壤温度仪	STP01-L50, 107-L	土壤温度	2 cm, 5 cm, 10 cm, 20 cm, 50 cm	Hukseflux
	土壤湿度仪	CS616_L	土壤湿度	5 cm, 10 cm, 20 cm, 50 cm, 80 cm	Campbell
	雨量筒	TE525MM_L	降水	1.0 m	R. M Young
	辐射强度计	CM21	太阳短波辐射	3.0 m	Kipp and Zonen

2.2 资料介绍

采用通榆农田站和退化草地站 2008 年的潜热通量、边界层气象要素、净辐射观测和土壤观测资料。两个站点所采用的仪器型号一致（见表 2），为对比分析提供了保证。观测资料的数据有效度统计见表 3。

表 3 2008 年通榆农田和退化草地站的原始资料有效度（30 min 数据）

Table 3 Data coverage of the Tongyu cropland and degraded grassland sites in 2008 (30-min interval)

站点	原始资料有效度		
	辐射、常规气象要素	土壤资料	潜热通量
农田	96%	96%	95%
退化草地	88%	88%	92%

在本文中，除了通量资料和通榆站的降水资料以外，其他原始资料的时间间隔均为 30 min。潜热通量原始数据的采样频率为 10 Hz，经过处理后为 30 min 间隔。在获得湍流通量数据之前，各个站点的数据都经过了严格的质量控制 (Webb et al., 1980; Zuo et al., 2009)，去掉了因仪器出现故障或特殊天气等原因产生的野点。同时，由于通榆农田站和退化草地站 2008 年的降水资料缺测较为严重，因此使用相距 20 km 的通榆气象站本年度逐日降水数据代替。另外，通榆农田站不存在人工灌溉。

3 研究方法

3.1 水分收支

水分平衡的概念为研究试验场地的水分收支提供了一个基本框架，水分平衡公式如下式 (Zhang et al., 2001):

$$P=E_T+R+D+\Delta S, \tag{1}$$

其中， P 为降水量， E_T 为蒸散量， R 代表地表径流， D 为地下水补给， ΔS 代表土壤水存储的变化。在半干旱地区，降水和蒸散是最大的两项变量，而地表径流、地下水补给和土壤水存储的变化项均可以认为是小项，在文本中不予考虑。在本研究中，“水分收支”即指降水量和蒸散量之差。

3.2 蒸散率

蒸散是研究陆面水分平衡的重要分量，也是地表能量消耗的重要方式。由于观测的困难和计算方案的不确定性，国内外就蒸散的测定和计算已经展开了很多的工作。目前，蒸散研究的主要方法包括 Penman 方法、蒸发皿观测法、涡动相关观测法和蒸渗计观测法及卫星遥感反演法。其中，涡动相关法以其可直接获得通量信息并具有较高精度等优点，成为微气象学家和生态学家普遍认可的一种标准方法 (Drexler et al., 2004; Sun and Song, 2008)，被广泛应用于蒸散的研究中 (Shuttleworth et al.,

1984; Wilson et al., 2001)。

采用了涡动相关分析方法计算蒸散率的形式如下 (Foken and Wichura, 1996; Lee et al., 2004; 王介民等, 2007):

$$\lambda ET = LE, \quad (2)$$

其中, ET 为蒸散率, LE 为潜热通量, $\lambda = 2.51 - 0.00236t$ MJ/kg (Lukens et al., 1981) 为蒸发潜热, t 为温度, 本文取 20°C 用以计算 λ (将 20°C 视为常温), 得 $\lambda = 2.4628$ MJ/kg。代入公式 (2) 进行计算, 则蒸散率 ET 的计算形式如下式:

$$ET = LE/\lambda, \quad (3)$$

LE 为来自于涡动相关仪的观测。本试验站潜热通量采用涡动相关法测得, 采样频率为 10 Hz, 平均周期为 30 min。其基本原理是通过测量潜热通量的水汽脉动和风速脉动, 计算其协方差来求取湍流通量, 计算公式如下 (Ohtaki and Matsui, 1982):

$$LE = \overline{\rho \lambda w' q'}, \quad (4)$$

其中, ρ 为空气密度 (单位: kg m^{-3})。 w' 和 q' 分别为垂直风速 (单位: m s^{-1}) 和比湿的扰动量。30 min 的湍流资料选取每个样本内风向变化小于 45° 的样本, 采用了高采样频率和谱分析技术, 并进行了坐标旋转订正、虚温订正 (Schotanus et al., 1983) 和气温、水汽脉动订正 (Webb et al., 1980) 等数据处理, 确保数据的可靠性。

3.3 Priestley-Taylor 系数

利用平衡潜热通量 (LE_{eq}) 将 LE 归一化的比值也被称作 Priestley-Taylor 系数 (Priestley and Taylor, 1972; Wilson et al., 2002), 它能够衡量实际蒸散量和理想气象条件下 (“理想气象条件” 在这里指: 在闭合体积内、净辐射为常数且地表足够湿润) 蒸散量之间的偏差。这种偏差 ($LE/LE_{eq} \neq 1$) 是由植物生理因素限制 (气孔导度) 或者平流过程等阻碍蒸散的条件所引起的。尽管理论上 Priestley-Taylor 系

数没有界限值, 但是观测资料和模式模拟表明在水分充足的条件下 Priestley-Taylor 系数往往大于 1.0 (Wilson and Baldocchi, 2000)。同时, 由于它能够将不同站点的蒸散量用平衡蒸散量归一化, 衡量下垫面是否存在水分供应不足的现象 (Arain et al., 2003), 因此 Priestley-Taylor 系数常被用作比较不同站点蒸散量的指标。平衡潜热通量使用下式计算:

$$LE_{eq} = \frac{s}{s + \gamma} (R_n - G), \quad (5)$$

其中, s 为饱和水汽压和气温的比值, γ 为干湿表常数, R_n 为地表净辐射, G 为土壤热通量 (本文使用 5 cm 深度的土壤热通量)。当 $LE/LE_{eq} = 1$ 时, 蒸发处于热动力平衡态, 平衡率仅取决于净辐射和气温。当 LE/LE_{eq} 大 (小) 于 1 时, 说明蒸散量高 (低) 于平衡率 (Wilson et al., 2002)。

4 结果分析

4.1 净辐射和气象条件

由表 4 可以看出, 尽管通榆的两个对比站相距仅 5 km, 但接收到的净辐射相差很大。无论是生长季还是非生长季, 农田站的平均净辐射都高于退化草地站, 后者的年平均净辐射比前者低 34.2%。这是由于 2008 年农田站的地表反照率低于退化草地站 (图略), 二者的年平均地表反照率分别为 0.196 和 0.214, 农田站反射的太阳辐射相对较少。两个站点的日平均风速、日平均气温、日最高和最低气温在生长季、非生长季和全年的平均值都比较相近。由于两个观测点的降水量缺测较多, 且考虑到空间距离很近, 故用通榆气象站的降水量来代替。通榆气象站 2008 年的降水量为 399.9 mm, 夏季 (7~9 月) 的降水高达 261.1 mm, 占全年的 65.3%。

表 4 通榆农田站和退化草地站主要观测要素的年平均值

Table 4 Annual means of net solar radiation, major soil and meteorological factors at Tongyu cropland and degraded grassland sites

站点	时段	日降水量 (mm d ⁻¹)	净辐射 (W m ⁻²)	地表反 照率	气温 (°C)	风速 (m s ⁻¹)	2 cm 土壤 温度 (°C)	5 cm 土壤含 水量 (m ³ m ⁻³)	10 cm 土壤含 水量 (m ³ m ⁻³)	日最高气 温 (°C)	日最低气 温 (°C)	Priestley-Taylor 系数
农田	生长季	2.2	119.3	0.156	20.0	3.0	18.3	0.20	0.14	26.6	13.4	0.38
	非生长季	0.3	29.1	0.225	-2.2	3.7	-3.2	0.08	0.07	4.0	-8.4	0.21
	全年	1.1	66.7	0.196	7.0	3.4	5.7	0.12	0.10	13.4	0.6	0.28
草地	生长季	2.2	95.9	0.172	19.9	3.1	16.5	0.15	0.15	25.9	13.7	0.39
	非生长季	0.3	6.7	0.244	-2.3	3.7	-3.7	0.09	0.09	4.1	-9.1	0.16
	全年	1.1	43.9	0.214	6.9	3.5	4.7	0.11	0.12	13.2	0.4	0.26

4.2 土壤湿度/温度的变化特征

土壤湿度是陆面过程中的一个重要参数,它与气候变化之间存在着复杂的反馈关系,因此不同下垫面类型土壤湿度的变化也显得尤为重要。图 2a 给出了通榆农田站和退化草地站 5 cm 层日平均土壤湿度的季节变化。该年度 1~4 月,由于降水量少,两个站点的土壤湿度非常接近。随着生长季来临,降水增多,土壤湿度呈现出显著的跳跃。但总体来说,农田站的土壤湿度高于退化草地站。从表 4 也可以看到,生长季农田的 5 cm 平均土壤湿度比退化草地站高 38%。这很可能是跟下垫面的土壤结构有关。退化草地站的土壤沙化比农田站更严重,孔隙度大,土壤表层的水分更容易下渗。两个观测点的最大土壤湿度非常接近,分别为 $0.289 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (农田) 和 $0.290 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (退化草地),均出现在 8 月 1 日,与最大降水日相对应。随着生长季的结束,两个站的土壤湿度又开始趋于一致。

5 cm 层日平均土壤温度呈现出典型的正弦曲线变化(图 2b)。在非生长季,两个站点的土壤温度变化曲线非常接近,平均土壤温度分别为 -3.2°C (农田) 和 -3.7°C (退化草地)。而在生长季,农田站的平均土壤温度比退化草地站高 1.8°C 。农田站最高日平均土壤温度为 24.4°C (7 月 26 日),而退化草地站则较低,为 22.7°C (6 月 15 日)。

4.3 不同下垫面的蒸散率差别

陆面蒸散过程是陆面水分平衡的重要分量,对气候变化的响应十分敏感。同时蒸散过程的影响因素复杂,时空变率较大,与植物生态生理过程、土壤环境及微气象特征均密切相关(张强等, 2011)。

图 3 给出了通榆农田和退化草地站 2008 年蒸散率的季节变化特征。农田站和退化草地站潜热通量资料的完整度分别为 95% 和 92% (见表 3), 缺测数据由 2003~2005 年相应时刻的潜热通量取平均值进行插补。值得注意的是,二者在不同土地利用方式下,蒸散率的年内变化出现了较大的差异,且农田站的年蒸散量比退化草地站高出 8.8%。退化草地站蒸散率的变化更接近正弦型,呈现出典型的夏季最高,春、秋季较低,冬季最小的趋势。而通榆农田站的蒸散率除了在夏季出现高值以外,在 3 月中旬至 4 月上旬,以及 4 月下旬和 5 月下旬都出现了较高的蒸散率。

图 4 给出了 2008 年通榆农田站和退化草地站蒸散率季节平均的日变化。总体来看,二者夏季的蒸散率最高,春季次之,秋、冬季最小,且差别主要出现在大约 10:00 (北京时间,下同) 至 18:00 之间。夏季两个站点之间的蒸散量差异最大,农田站的夏季平均最大蒸散率比退化草地站高出 $0.02 \text{ mm}/30 \text{ min}$,这是因为夏季的降水量占据了全年的 65.3%,而降水量是影响蒸散量的关键因子。二者

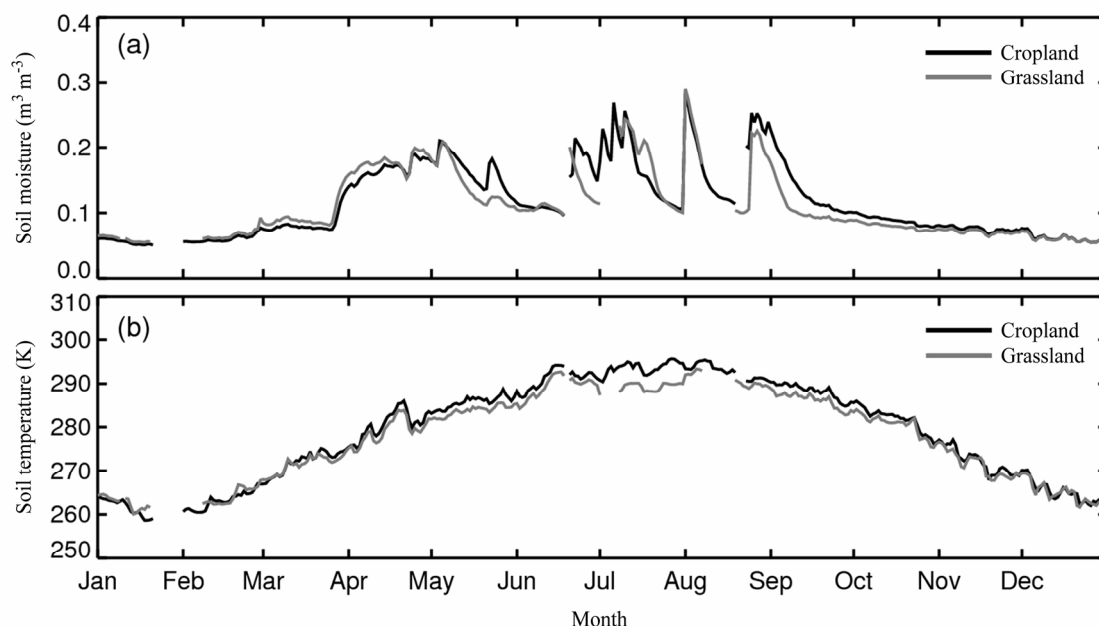


图 2 2008 年通榆农田站和退化草地站日平均 5 cm (a) 土壤湿度和 (b) 土壤温度的时间演变

Fig. 2 Evolutions of daily mean (a) soil moisture and (b) soil temperature measured at the depth of 5 cm at Tongyu cropland and degraded grassland sites in 2008

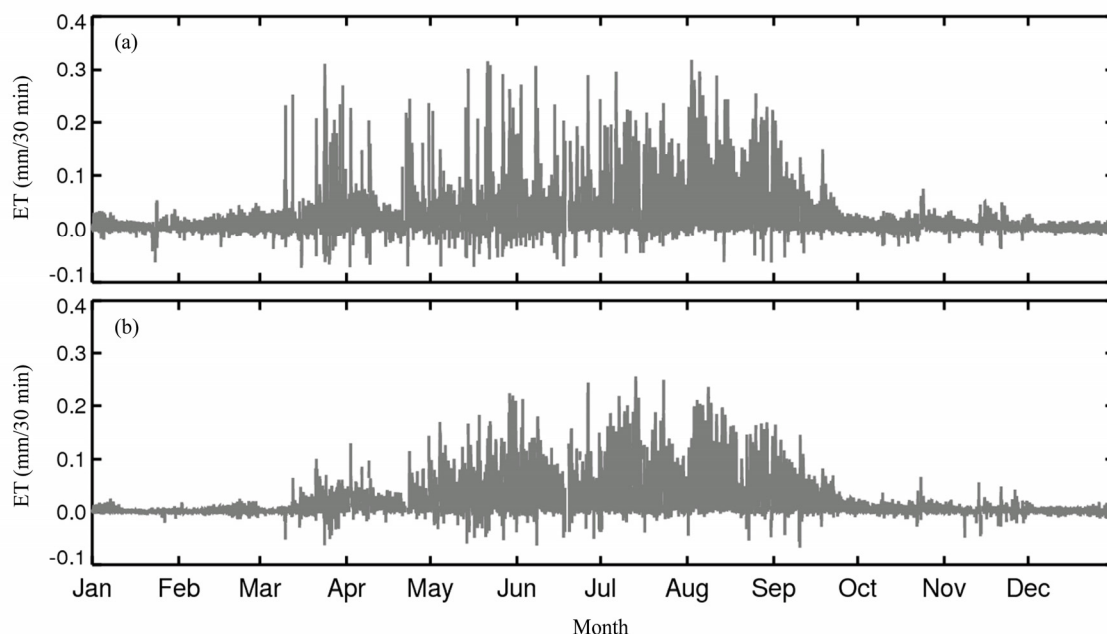


图3 2008年通榆(a)农田站和(b)退化草地站蒸散率(ET)的时间序列

Fig. 3 Time series of evapotranspiration rates (ET) at Tongyu (a) cropland and (b) degraded grassland sites in 2008

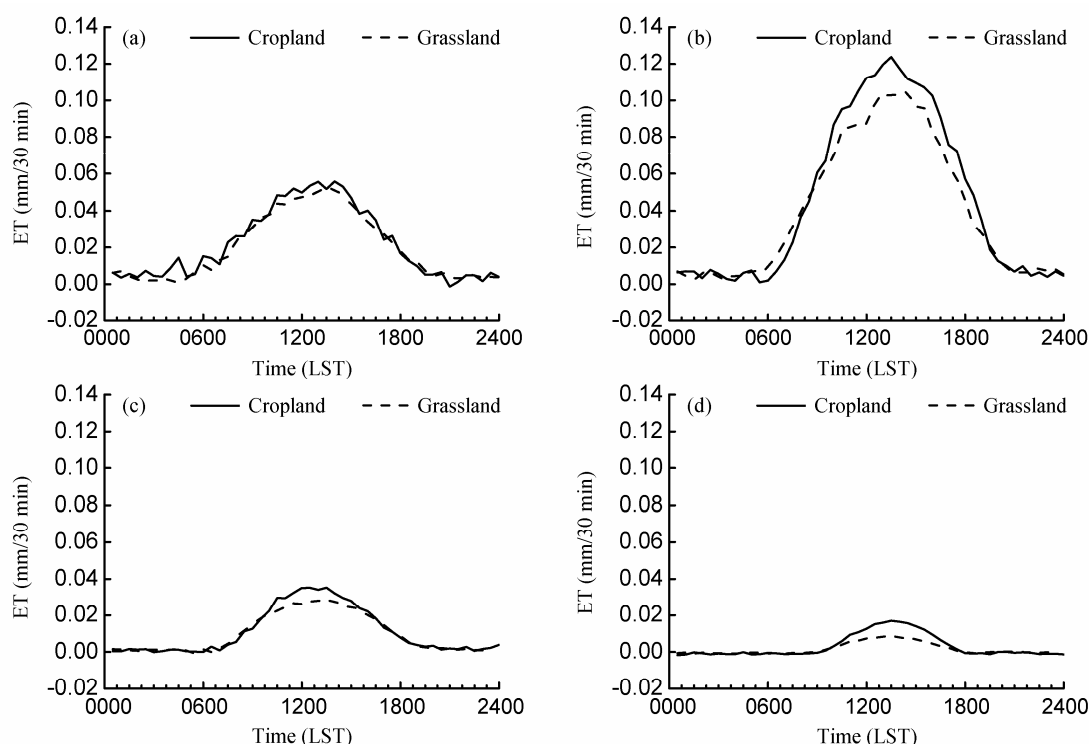


图4 2008年通榆农田站和退化草地站蒸散率季节平均的日变化:(a)春季;(b)夏季;(c)秋季;(d)冬季

Fig. 4 Diurnal variations of seasonal mean evapotranspiration rates at Tongyu cropland and degraded grassland sites in China: (a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

的差异在秋、冬季次之,而春季由于累积降水量少,两个站点间的蒸发率之间的差异最小。

4.4 蒸散量和水分收支

图5分别给出了通榆农田站和退化草地站5 d

平均的蒸散量和水分收支。逐月看,从3月中旬至4月底,通榆农田站的蒸散量高于通榆退化草地;而自5月初至六月中旬,退化草地站的蒸散量反而大于农田站,随后两个站点的蒸散量非常接近。但

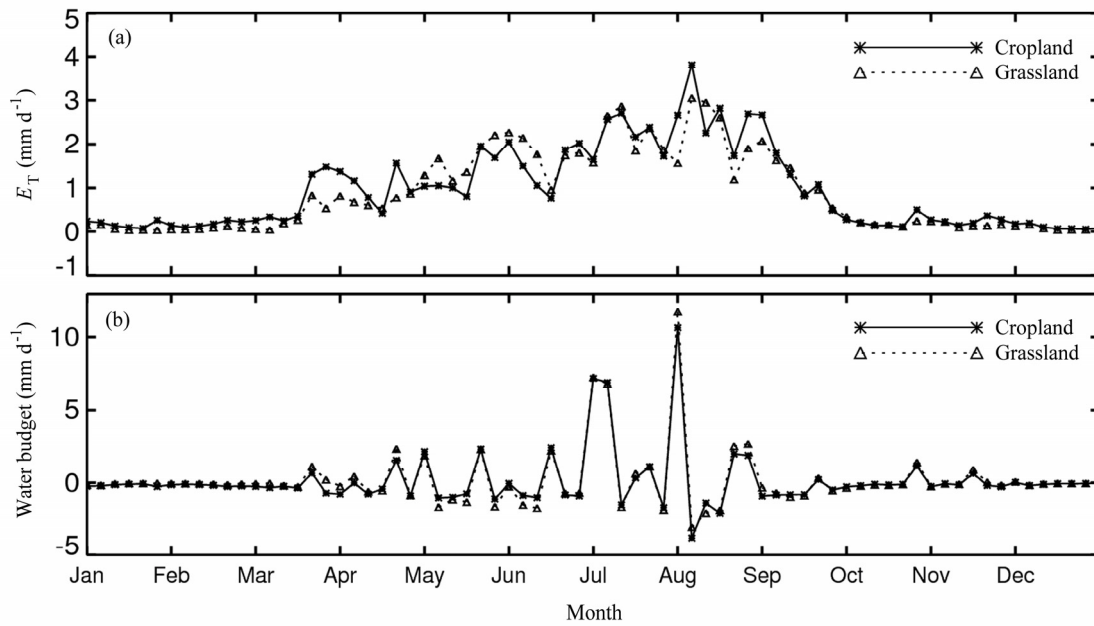


图5 2008年通榆农田站和退化草地站5 d平均的(a)蒸散量和(b)水分收支时间序列

Fig. 5 Evolutions of the 5-d averaged (a) evapotranspiration and (b) water budget at Tongyu cropland and degraded grassland sites in 2008

从8月中旬开始到9月上旬,农田站的蒸散量又显著高于退化草地站。最后随着生长季的结束,这两个站点的蒸散量趋于一致。

从全年总蒸散量来看,通榆农田站比退化草地站高出 28.2 mm (图 6), 约占退化草地总蒸散量的 8.8%。具体来说, 生长季, 退化草地站比农田站多蒸散 1.9 mm, 而非生长季则农田站比退化草地站多蒸散 30.1 mm。这意味着总体来说, 在半干旱区, 若将自然的草地下垫面人为改造为农田, 会增加当地的水分需求, 加剧水分流失。这和 Liu et al. (2008c) 的模式结果一致: 农田耕种和退耕对蒸发量影响很大, 这种结果在干旱、半干旱地区的效果最为显著, 将自然植被转化为耕地, 使得年蒸散量增加, 反之则减少。但需要指出的是, 一方面, 缺测的蒸散量由其他年份的数据取平均进行插补, 并不总是客观实际的; 另一方面, 涡动相关法实际上是通过测量距离地表一定高度处的水汽通量来估算蒸散量, 该方法是建立在下垫面水平均匀的理想条件下的, 然而在实际情况下, 近地层的通量与实际蒸散量均会存在一定偏差 (Zhang et al., 2011)。

下面来看看半干旱区不同地表类型的水分收支有着怎样的变化趋势。从全年来看, 通榆退化草地站的水分盈余比农田站高 35.6% (图 6), 分别为 51.1 mm (农田) 和 79.3 mm (退化草地)。不过值得注意的是, 生长季, 农田和退化草地站的水分都

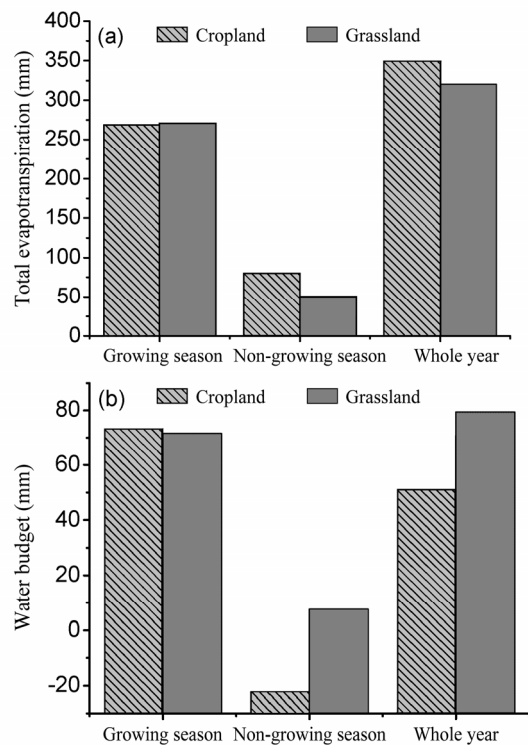


图6 2008年通榆农田站和退化草地站(a)蒸散量和(b)水分收支对比

Fig. 6 Comparisons of (a) total evapotranspiration and (b) water budget between Tongyu cropland and degraded grassland sites in 2008

有盈余, 分别为 73.5、71.6 mm; 而在非生长季, 农田站的水分亏损了 22.4 mm, 但退化草地站水分却仍有盈余 (7.7 mm)。从图 5b 也可以看到, 通榆农

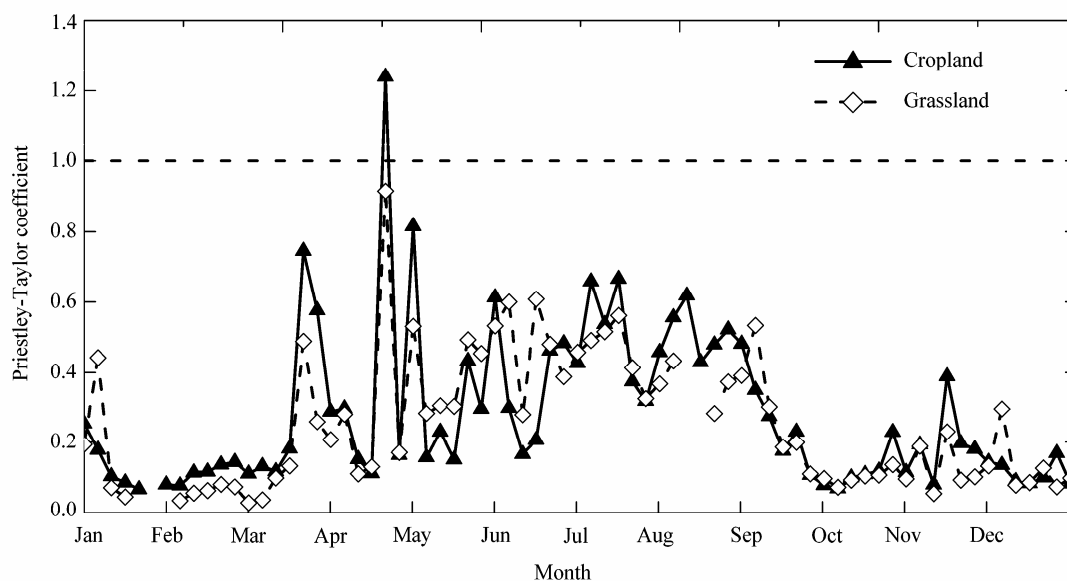


图7 2008年通榆农田站和退化草地站白天时段(10:00至15:00) Priestley-Taylor系数的5 d平均值时间序列

Fig. 7 Evolution of the 5-d averaged midday (from 1000 LST to 1500 LST) Priestley-Taylor coefficients at Tongyu cropland and degraded grassland sites in 2008

田站水分收支量的浮动范围为 $-3.8 \sim 10.6 \text{ mm/d}$, 通榆退化草地站为 $-3.1 \sim 11.7 \text{ mm/d}$ 。农田站和退化草地站的两个最大水分盈余日分别在7月初和8月初, 与两个最大降水日相对应。但值得指出的是, Zhang et al. (2011) 的研究表明非降水形态的水分补充(主要为露水)会对水分收支带来一定的高估。

4.5 Priestley-Taylor系数的季节变化特征

Priestley-Taylor系数(LE/LE_{eq})能够衡量下垫面是否存在水分供应不足的现象(Priestley and Taylor, 1972; Arain et al., 2003), 并且常被用作比较不同站点蒸散量的指标, 因为它能够将不同站点的蒸散量用平衡蒸散量归一化, 而平衡蒸散量仅取决于净辐射。当 LE/LE_{eq} 等于1.0时, 蒸散处于热动力平衡状态(即在一个完全闭合的系统内的稳定静止蒸散率)。当 LE/LE_{eq} 大(小)于1.0时, 说明蒸散量高(低)于平衡率(Wilson and Baldocchi, 2000)。湿润的系统由于水分供应充足, LE/LE_{eq} 较高(一般大于1.26), 而干燥的系统 LE/LE_{eq} 较小(一般小于1.0)(Arain et al., 2003)。

图7给出了通榆农田站和退化草地站5 d平均的Priestley-Taylor系数演变。尽管两个站点生长季的水分均有不同程度的盈余(图6), 但从全年来看, 除了4月下旬在农田站出现了一个大于1.0的 LE/LE_{eq} 值(本文采用白天的LE和 LE_{eq} 值), 其余时段这两个站的Priestley-Taylor系数普遍低于1.0, 说明水分总量盈余并不能够代表该区域地表的水

分状况良好。这可能是由于该地区的土壤沙化严重, 大气降水可以很快渗入较深层土壤, 形成地下水, 而表层土壤所积蓄的水分反而不多所致。在半干旱地区, 由于表层土壤水分的限制, 实际蒸散量远未达到平衡蒸散量, 这正是干旱半干旱区蒸散的特点。

非生长季, 农田站的Priestley-Taylor系数高于退化草地站, 分别为0.21(农田)和0.16(退化草地)(表4), 尤其是在3月中旬至4月底, 二者的平均值差异较大。农田和退化草地站Priestley-Taylor系数的最大值出现在4月, 分别为1.24和0.91。这说明在非生长季, 退化草地的表层水分供应比农田站更为紧缺。在生长季, 通榆农田站的Priestley-Taylor系数的变化范围为0.11~0.81, 退化草地站为0.11~0.61。虽然该系数的变化范围差异较大, 但是生长季的平均值却很接近: 农田站为0.38, 退化草地站为0.39。Chen et al.(2009)在对位于北方半干旱区的锡林浩特草原的研究中也报道了相似的结果, 尤其是生长季的平均值(0.41)和变化范围(约0.2~0.7)都很接近。

5 结论

本文对比分析了通榆农田和退化草地站的水分收支状况, 并重点研究了在不同土地利用方式下水分收支中的蒸散项以及能够归一化表征地表水

分状况的 Priestley-Taylor 系数的演变特征和差异, 得出以下结论:

(1) 通榆农田站的全年总蒸散量比退化草地站高 8.8%, 分别为 348.8 mm (农田) 和 320.6 mm (退化草地), 这说明在该半干旱区农田下垫面比退化草地下垫面的需水量更大, 加剧了水分供应压力;

(2) 从全年水分收支总量来看, 通榆农田站和退化草地站均有盈余, 但是退化草地站比农田站多盈余 28.2 mm。水分盈余主要发生在生长季; 而在非生长季, 农田站的蒸散总量高于降水总量, 处于水分亏损状态, 约为 -22.4 mm, 而退化草地站仍有盈余 (7.7 mm)。需要指出的是, 涡动相关法测量的水汽通量和实际蒸散量之间的偏差、利用其他年份数据插补缺测的潜热通量以及露水等非降水形态的水分补充, 这些因素均会给估算水分收支带来一定误差;

(3) 通过分析两个站点的 Priestley-Taylor 系数, 发现水分收支总量有盈余并不能代表该区域地表的水分状况良好。可能的原因是该地区的土壤沙化严重, 造成大气降水很快渗入较深层土壤, 形成地下水, 而表层土壤所积蓄的水分反而不多;

(4) 从 Priestley-Taylor 系数的演变看, 生长季, 尽管两个站的水分收支有不同程度的盈余, 但该系数均远小于 1.0, 表明在半干旱地区由于土壤水分的限制, 实际蒸散量远未达到平衡蒸散量, 这正是半干旱区蒸散的显著特点。

致谢 感谢中国科学院大气物理研究所刘辉志研究员和石立庆高工提供通榆试验站的观测数据。

参考文献 (References)

Andréassian V. 2004. Waters and forests: From historical controversy to scientific debate [J]. *J. Hydrol.*, 291: 1–27.

Arain M A, Black T A, Barr A G, et al. 2003. Year round observations of the energy and water vapour fluxes above a boreal black spruce forest [J]. *Hydrological Processes*, 17: 3581–3600.

Bosilovich M G, Lawford R. 2002. Coordinated Enhanced Observing Period (CEOP) international workshop [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83 (10): 1495–1499.

Bosch J M, Hewlett J D. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration [J]. *J. Hydrol.*, 55: 3–23.

曹丽娟, 张东峰, 张勇, 等. 2008. 中国当代土地利用变化对黄河流域径流影响 [J]. *大气科学*, 32 (2): 300–308. Cao Lijuan, Zhang Dongfeng, Zhang Yong, et al. 2008. The effects of current land use in China on

streamflow in the Yellow River basin [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (2): 300–308.

曹丽娟, 张东峰, 张勇, 等. 2010. 土地利用变化对长江流域气候及水文过程影响的敏感性研究 [J]. *大气科学*, 34 (4): 726–736. Cao Lijuan, Zhang Dongfeng, Zhang Yong, et al. 2010. Sensitivity research of the effects of land use change on climate and runoff over the Yangtze River basin [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (4): 726–736.

Chen S P, Chen J Q, Lin G H, et al. 2009. Energy balance and partition in Inner Mongolia steppe ecosystems with different land use types [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149: 1800–1809.

Chiroma A M, Alhassan A B, Khan B. 2008. Yield and water use efficiency of millet as affected by land configuration treatments [J]. *Journal of Sustainable Agriculture*, 32 (2): 321–333.

Costa M H, Botta A, Cardille J A. 2003. Effects of large scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins river, Southeastern Amazonia [J]. *J. Hydrol.*, 283: 206–217.

Dan L, Ji J J, Liu H Z. 2008. Use of a land surface model to evaluate the observed soil moisture of grassland at the Tongyu reference site [J]. *Advances in Atmosphere Sciences*, 25 (6): 1073–1084.

Drexler J Z, Snyder R L, Spano D, et al. 2004. A review of models and micrometeorological methods used to estimate wetland evapotranspiration [J]. *Hydrological Processes*, 18: 2071–2101.

Foken T, Wichura B. 1996. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 78: 83–105.

Foley J A, DeFries D, Asner G P, et al. 2005. Global consequences of land use [J]. *Science*, 309: 570–574.

符淙斌, 安芷生. 2002. 我国北方干旱化研究——面向国家需求的全球变化科学问题 [J]. *地学前缘*, 9 (2): 271–275. Fu Congbin, An Zhisheng. 2002. Study of aridification in Northern China—A global chance issue facing directly the demand of nation [J]. *Earth Science Frontiers (in Chinese)*, 9 (2): 271–275.

符淙斌, 马柱国. 2008. 全球变化与区域干旱化 [J]. *大气科学*, 32 (4): 752–760. Fu Congbin, Ma Zhuguo. 2008. Global change and regional aridification [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 752–760.

Fu C B, Guo W D. 2008. “Regional Climate of China”, Chap. 5: “Aridity Trend in Northern China” [M]. New York: Springer Publishing House, 155–217.

符淙斌, 延晓冬, 郭维栋. 2006. 北方干旱化与人类适应——以地球系统科学观回答面向国家重大需求的全球变化的区域响应和适应问题 [J]. *自然科学进展*, 16: 1216–1223. Fu Congbin, Yan Xiaodong, Guo Weidong. 2006. Aridification in the northern China and human adaptation [J]. *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 16: 1216–1223.

符淙斌, 温刚. 2002. 中国北方干旱化的几个问题 [J]. *气候与环境研究*, 7(1): 22–29. Fu Congbin, Wen Gang. 2002. Several issues on aridification in the Northern China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 7 (1): 22–29.

Hutjes R W A, Kabat P, Running S W, et al. 1998. Biospheric aspects of the hydrological cycle [J]. *J. Hydrol.*, 212–213.

Lee X, Massman W J, Law B E. 2004. Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis [M]. New York:

- Kluwer Academic Publishers.
- 刘辉志, 董文杰, 符淙斌, 等. 2004. 半干旱地区吉林通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测实验 [J]. 气候与环境研究, 9 (2): 378–389. Liu Huizhi, Dong Wenjie, Fu Congbin, et al. 2004. The long-term field experiment on aridification and the ordered human activity in semi-arid area at Tongyu, Northeast China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (2): 378–389.
- 刘辉志, 涂钢, 董文杰, 等. 2006. 半干旱地区地气界面水汽和二氧化碳通量的日变化及季节变化 [J]. 大气科学, 30 (1): 108–118. Liu Huizhi, Tu Gang, Dong Wenjie, et al. 2006. Seasonal and diurnal variations of the exchange of water vapor and CO₂ between the land surface and atmosphere in the semi-arid area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (1): 108–118.
- Liu H Z, Wang B M, Fu C B. 2008a. Relationships between surface albedo, soil thermal parameters and soil moisture in the semi-arid area of Tongyu, Northeastern China [J]. Advances in Atmosphere Sciences, 25 (5): 757–764.
- Liu H Z, Tu G, Fu C B, et al. 2008b. Three-year variations of water, energy and CO₂ fluxes of cropland and degraded grassland surfaces in a semi-arid area of Northeastern China [J]. Advances in Atmosphere Sciences, 25 (6): 1009–1020.
- Liu M L, Tian H, Zhang C, et al. 2007. Effects of urbanization and land use on water yield—A case study of Haihe Basin in China // Proceedings of the emerging issues along urban / rural interfaces II: Linking land-use science and society [C]. Atlanta, Georgia, 90–96.
- Liu M L, Tian H Q, Chen G S, et al. 2008c. Effects of land-use and land-cover change on evapotranspiration and water yield in China during 1900–2000 [J]. Journal of the American Water Resources Association, 44 (5): 1193–1207.
- López-Moreno J I, Vicente-Serrano S M, Moran-Tejeda E, et al. 2011. Impact of climate evolution and land use changes on water yield in the Ebro basin [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 15: 311–322.
- Lukens R P, Cornillot J L, Prieman R A, et al. 1981. Annual Book of ASTM Standards [M]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 183–186.
- 马柱国. 2005. 我国北方干湿演变规律及其与区域增暖的可能联系 [J]. 地球物理学报, 48 (5): 1011–1018. Ma Zhuguo. 2005. Dry-wet variation and its relationship with regional warming in arid regions of northern China [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 48 (5): 1011–1018.
- Mu Q Z, Zhao M S, Heinsch F A, et al. 2007. Evaluating water stress controls on primary production in biogeochemical and remote sensing based models [J]. J. Geophys. Res., 112 (G1), G01012, doi:10.1029/2006JG000179.
- Ohtaki E, Matsui T. 1982. Infrared device for simultaneous measurement of atmospheric carbon dioxide and water vapor [J]. Bound.-Layer Meteor., 24: 109–119.
- Priestley C H B, Taylor R J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters [J]. Mon. Wea. Rev., 100: 81–92.
- Ren L L, Wang M, Li C, et al. 2002. Impacts of human activity on river runoff in the northern area of China [J]. J. Hydrol., 261: 204–217.
- Schotanus P H, Nieuwstadt F T M, Bruin H A R, et al. 1983. Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes [J]. Bound.-Layer Meteor., 26: 81–93.
- 邵璞, 曾晓东. 2012. 土地利用和土地覆盖变化对气候系统影响的研究进展 [J]. 气候与环境研究, 17 (1): 103–111. Shao Pu, Zeng Xiaodong. 2012. Progress in the study of the effects of land use and land cover change on the climate system [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (1): 103–111.
- Shuttleworth W J, Gash J H C, Lloyd C R, et al. 1984. Observations of radiation exchange above and below Amazonian forest [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 110: 1163–1169.
- 宋帅, 鞠永茂, 王汉杰. 2008. 有序人类活动造成的土地利用变化对区域降水的可能影响 [J]. 气候与环境研究, 13 (6): 759–774. Song Shuai, Ju Yongmao, Wang Hanjie. 2008. Possible impacts of land use change on regional rainfall associated with orderly human activities [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (6): 759–774.
- Song Y M, Guo W D, Zhang Y C. 2009. Numerical study of impacts of soil moisture on the diurnal and seasonal cycles of sensible/latent heat fluxes over semi-arid region [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 26 (2): 319–326.
- Sun L, Song C C. 2008. Evapotranspiration from a freshwater marsh in the Sanjiang Plain, Northeast China [J]. J. Hydrol., 352: 202–210.
- 涂钢, 刘辉志. 2006. 半干旱区退化草地地表能量收支 [J]. 气候与环境研究, 11 (6): 723–732. Tu Gang, Liu Huizhi. 2006. The near surface layer energy budget on degraded-grassland in semi-arid area at Tongyu in Jilin Province [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (6): 723–732.
- 涂钢, 刘辉志, 董文杰. 2009. 半干旱区不同下垫面近地层湍流通量特征分析 [J]. 大气科学, 33 (4): 719–725. Tu Gang, Liu Huizhi, Dong Wenjie. 2009. Characteristics of the surface turbulent fluxes over degraded grassland and cropland in the semi-arid area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (4): 719–725.
- 王介民, 王维真, 奥银焕, 等. 2007. 复杂条件下湍流通量的观测与分析 [J]. 地球科学进展, 22: 791–797. Wang Jieming, Wang Weizhen, Ao Yinhuan, et al. 2007. Turbulence flux measurements under complicated conditions [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 22: 791–797.
- Webb E K, Pearman G I, Lenning R. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 106: 85–100.
- Wei X, Liu S, Zhou G, et al. 2005. Hydrological processes in major types of Chinese forest [J]. Hydrological Process, 19 (1): 63–75.
- Wilson K B, Baldocchi D D. 2000. Seasonal and interannual variability of energy fluxes over a broadleaved temperate deciduous forest in North America [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 100: 1–18.
- Wilson K B, Hanson P J, Patrick J M, et al. 2001. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: Sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 106: 153–168.
- Wilson K B, Baldocchi D D, Aubinet M, et al. 2002. Energy partitioning between latent and sensible heat flux during the warm season at FLUXNET sites [J]. Water Resour. Res., 38 (12): 1294, doi:10.1029/2001WR000989.

- Yu X. 1991. Forest hydrologic research in China [J]. *J. Hydrol.*, 122: 23–31.
- Zhang L, Dawes W R, Walker G R. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale [J]. *Water Resour. Res.*, 37 (3): 701–708.
- 张强, 张之贤, 问晓梅, 等. 2011. 陆面蒸散量观测方法比较分析及其影响因素研究 [J]. *地球科学进展*, 26 (5): 538–547. Zhang Qiang, Zhang Zhixian, Wen Xiaomei, et al. 2011. Comparisons of observational methods of land surface evapotranspiration and their influence factors [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 26 (5): 538–547.
- Zhang Q, Wang S, Wen X M, et al. 2011. Experimental study of the imbalance of water budget over the Loess Plateau of China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 25 (6): 765–773.
- Zuo J Q, Huang J P, Wang J M, et al. 2009. Surface turbulent flux measurements over the Loess Plateau for a semi-arid climate change study [J]. *Advances in Atmospheric Science*, 26 (4): 679–691, doi:10.1007/s00376-009-8188-2.