

青海省三江源地区退化草地蒸散特征

李婧梅^{1,2,3}, 蔡海^{1,2}, 程茜⁴, 乔春连^{1,2}, 褚晖^{1,2}, 陈懂懂¹,
徐世晓¹, 赵新全¹, 赵亮^{1*}

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 青海省工程咨询中心, 青海 西宁 810001; 4. 青海师范大学数学系, 青海 西宁 810001)

摘要:了解三江源地区退化草地的蒸散状况有助于认识该地区退化生态系统水循环, 对该地区的生态安全有着重要的意义。本研究利用涡度相关法观测青海省玛沁县小嵩草退化草地(34.35° N; 100.50° E, 海拔 3 963 m)的水热通量, 对该地区 2006—2008 年全年的蒸散情况进行了特征分析。研究表明, 2006—2008 年三江源退化草地的蒸散值分别为 452.24, 474.24, 459.57 mm, 降水量分别为 460.7, 496.1, 480.1 mm, 其中有 75% 以上的降水分布在生长季, 全年水平上蒸散量与降水量之比(ET/PPT)为 95% 以上, 蒸散量与降水量基本持平。生长季日蒸散量 1.8~1.9 mm/d, 而非生长季日蒸散量 < 0.6 mm/d。蒸散日变化和年变化均为单峰型, 每年 6—7 月蒸散量最大, 为 2.0~2.2 mm/d; 日蒸散峰值出现在正午左右, 其最大值生长季为 0.21 mm/h, 非生长季为 0.10 mm/h。退化草地蒸散的主要环境因子是净辐射, 其次为饱和水汽压亏和空气温度。随着生长季的推进, 潜热对这些因素的敏感性逐渐增大。与未退化的矮嵩草草甸相比, 退化草地生长季蒸散量较小, 而非生长季蒸散量较大, 这一结果表明, 高寒草地的植被盖度驱动草地生态系统的蒸散。

关键词: 涡度相关法; 蒸散; 三江源地区; 青海省; 退化草地

中图分类号: S812.29 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-5759(2012)03-0223-11

蒸散(evapotranspiration, ET)是植被蒸腾与植被间裸露土壤间蒸发之和^[1], 它作为水循环(降水、径流、蒸散)中的一个关键环节, 在调节区域水分平衡、能量平衡方面起着极为重要的作用。蒸散值可以直接反映区域气候对陆地生态系统的长期潜在影响。土壤水分含量、生物量、养分状况和水分收支等生态因子和生态过程都受蒸散的影响^[2]。由于近来全球范围内水资源的短缺和分布不平衡, 水资源的合理利用和管理量化日益迫切, 蒸散问题的研究越来越受到人们的重视。

草地是陆地生态系统重要的组成部分之一, 天然草地面积占据全球自然植被的 32%^[3], 是目前人类活动影响较为严重的区域, 维持其生态功能的正常对全球及区域的生态平衡有重要意义。因此, 在全球变化研究中, 草地生态系统被列为重要的研究对象。它的水分循环过程无疑对全球的水循环过程起着至关重要的作用。三江源地区是长江、黄河、澜沧江的发源地, 也是我国和亚洲最重要的河流上游关键源区^[4]。3 条江河每年向下游供水 600 亿 m³, 其中长江年平均径流量 179.3 亿 m³; 黄河年平均径流量 232 亿 m³, 占整个黄河流域水资源总量的 49%; 澜沧江年平均径流量 108.9 亿 m³^[5], 因此有“江河源”之称, 一直以来被誉为“中华水塔”。同时该区域平均海拔 4 000 m 左右, 自然环境脆弱, 对气候变化反应强烈, 是生态系统最敏感的地区之一, 对我国乃至全球的生态环境有着极为深远的影响^[6]。近来, 过度放牧, 人类活动加剧, 加之生态系统脆弱, 使三江源区的草地生产力下降, 生态环境恶化, 水源涵养能力急剧下降, 在这些因素的综合影响下三江源地区草地大面积退化: 植物和土壤质量衰退, 生产力、经济潜力和服务功能降低, 环境变劣以及生物多样性或复杂程度降低, 恢复功能减弱或失去恢复能力^[7]。其中, 中度以上退化的草地面积达 0.12 × 10⁸ hm²^[8], 占可利用草地面积的 50%~60%, 严重地区已沦为次生裸地或利用价值极低的“黑土滩”(以嵩草属植物为建群种的高寒草地严重退化后, 生草土层被破坏, 形成

收稿日期: 2011-04-01; 改回日期: 2011-07-21

基金项目: 国家 973 计划(2010CB833501-01-14), 国家自然科学基金项目(41030105, 30770419, 30970519)和青海省科技项目(2011-Z-734)资助。

作者简介: 李婧梅(1984-), 女, 青海人, 在读硕士。E-mail: jml107@163.com

* 通讯作者。E-mail: lzhaol@nwipb.ac.cn

的大面积次生裸地),约占退化草地总面积的40%,并逐年加快增长^[9]。据刘纪远等^[8]研究发现,三江源地区草场已呈全面退化的趋势,加之该生态系统脆弱,使草地生产力下降,生态环境恶化,水源涵养能力急剧下降,不仅使源区居民生活受到极大影响,同时也威胁着长江、黄河流域乃至东南亚诸国的生态安全^[10]。在这种背景下,有必要对这一地区的水分蒸散状况做出科学判断。

近来,涡度相关技术在观测生态系统物质和能量交换中得到了广泛应用^[11],在不同的生态系统间对蒸散和能量平衡的研究已成为国际联网研究的热点之一,而之前的研究多集中于放牧^[12,13]、不同水分条件^[14]以及正常状况下不同植被状况^[2,15]等对蒸散的研究,利用涡度相关法针对退化生态系统蒸散情况的研究却鲜有报道。

本研究利用涡度相关技术在三江源小嵩草(*Kobresia pygmaea*)退化草地测定的水汽通量数据,对比分析了2006—2008年该地区蒸散值的变化特征,简单分析了可能的影响因子。为进一步研究退化草地蒸散的变化提供了科学依据,也为三江源地区退化草地的修复和人工草地的建植工作奠定了理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究位于青海省果洛藏族自治州玛沁县内大武镇东南部15 km处格多牧委会草场,地理位置34.35° N, 100.50° E,海拔3 963 m,多年平均降水量500 mm,太阳辐射年总量为5 500~6 800 MJ/m²;无绝对无霜期,牧草生长期为110~130 d^[16]。土壤类型以高山草甸土和高山灌丛草甸土为主,土壤表层和亚表层中的有机质含量丰富,地下0~40 cm土层砂石含量约10%。该地区为冬季放牧,建群种为小嵩草,伴生种有矮嵩草(*Kobresia humilis*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、早熟禾(*Poa* spp.)、黄帚橐吾(*Ligularia virgaurea*)、铁棒槌(*Aconitum pendulum*)、鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)、二柱头薹草(*Scirpus distigmaticus*)、异针茅(*Stipa aliena*)、矮火绒草(*Leontopodium nanum*)、细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)、美丽风毛菊(*Saussurea superba*)、三裂叶碱毛茛(*Halerpestes tricuspis*)等。生长期盛期7月植被覆盖度约75%,高度约5 cm,根系主要分布于0~10 cm的土壤表层。4月底5月初为植物返青期。该草场中度退化,主要表现为:植被覆盖率低,杂草呈斑块状分布,部分土壤裸露,地面时有约0.25 m²的鼠洞,地带性植被嵩草属植物在群落内的重要值降低。

1.2 观测方法

本研究将每年1月1日—4月20日划分为生长季前期(第1~120天),4月21日—10月27日(第121~300天)为生长季,其余为非生长季。

涡度相关观测系统安置于地形平坦、开阔,下垫面均一的中心地带,有足够大的“风浪区”,满足安装通量塔的条件。本研究中对水汽通量观测的主要传感器为Li-7500开路红外(CO₂/H₂O)气体分析仪,距地面220 cm。观测时使用的主要仪器及安装高度见表1。每年4月采用高纯氮标定Li-7500红外气体分析仪的CO₂和H₂O的零点。仪器采样频率为10 Hz,每15 min输出1组数据。

涡度相关技术通过直接测定大气中物理量的脉动与平均风速的协方差求算湍流通量的方法,求算显热(sensible heat flux, H)和潜热(latent heat flux, LE)通量的公式为:

$$H = \rho C_p \overline{w' T'} \quad (1)$$

$$LE = \rho \lambda \overline{w' q'} \quad (2)$$

式中, H 为显热通量(W/m²), LE 为潜热通量(W/m²), ρ 为空气密度(kg/m³), C_p 为空气的定压比热(J/kg·K), λ 为水的汽化潜热(MJ/kg), w' 为垂直湍流速度脉动(m/s), T' 为气温脉动(K), q' 为比湿脉动,上横线表示协方差。

1.3 数据处理

原始数据必须进行质量控制后才可用于分析。本研究采用李春等^[17]提出的通量数据的处理流程进行数据处理:主要有野点剔除,WPL校正^[13]以及三维坐标旋转。首先对各观测值进行阈值判断,根据当地气候特征,各观测值的合理范围为LE(-500,700),H(-500,700),土壤热通量G(-100,250),温度Ta(-50,50)。同时由于降水、电力不稳定、虫禽干扰引起的错误数据也需要剔除;然后使用WPL方法校正由于空气水汽传输引起的水汽密度和CO₂波动造成的通量计算误差;最后采用三维坐标旋转修正对于仪器倾斜和地面坡度导致的通量误差。通量数据经筛选后剩余的数据白天、夜间和全天覆盖率分别为54.9%,68.58%,62.72%。

表 1 观测要素和设备

Table 1 Elements and instruments of measurements

测定要素 Measure elements	传感器和分析仪 Instruments and sensors	制造商 Manufacturers	安装高度 Location (cm)
风向 Wind direction	034A-L	Campbell	110,220
风速 Wind speed	014A	Campbell	110,220
温度、湿度 Air temperature and humidity	HUMP45C	Campbell	110,220
降水量 Precipitation	TE525MM	Campbell	50
光合有效辐射 Photosynthetic photon flux density	LI-190SB	Li-Cor	150
净辐射 Net radiation	CNR-1	Kipp and Nonen	150
地表温度 Soil surface temperature	170	Campbell	0
土壤温度 Soil temperature	150T	Campbell	-5, -20, -30
土壤热通量 Soil heat flux	HFT-3	Campbell	-5
土壤含水量 Soil water content	CS615	Campbell	-5, -20, -50
三维风速和温度 Vertical wind speed and air temperature	CSAT3	Campbell	220
CO ₂ 和水热通量 CO ₂ and H ₂ O flux	Li-7500	Li-Cor	220
数据采集与通信 Data logger	CR23X/CR5000	Campbell	

另外,使用涡度相关法测量物质通量时,湍流强度对数据质量会有一定程度的影响:夜间大气层结稳定,湍流较弱,存在通量低估的问题^[18]。为解决这一问题,一般剔除摩擦风速 U^* ($0.15 \sim 0.30$ m/s) 的夜间通量值。本研究以夜间摩擦风速 0.2 m/s 为临界值,舍去小于 0.2 的通量观测值^[19]。对于各种原因引起的数据缺失和前期剔除的观测数据,采用 Falge 等^[20] 的方法进行数据的插补。其中常规气象数据的缺失,用距离观测点 10 km 左右的相邻站点的数据回归后,使用预测值代替缺失值。水汽通量的缺失采用 MDV 法(日平均法)插补缺失值:运用滑动平均的方法用临近观测日内同时刻的数据插补缺失的数据,其中生长季时间窗口为 7 d,非生长季时间窗口为 14 d。

能量平衡公式可表示为:

$$LE + H = R_n - G - S \quad (3)$$

式中, R_n 为净辐射 (W/m^2), G 为土壤热通量 (W/m^2), 由 2 个土壤热通量板(地下 0.05 m) 测量取平均值, S 为储存项, 由于三江源地区退化草地植被较矮小(小于 0.3 m), S 可以忽略^[19]。

在能量闭合验证测定系统的基础上,利用 FAO 提供的方法通过潜热通量计算蒸散值^[21]:

$$ET = LE / \lambda \rho \quad (4)$$

式中, LE 为潜热通量 (W/m^2), λ 为水的汽化潜热 (MJ/kg)。

1.4 数据分析

采用 SAS 8.0 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 退化草地环境因子动态

图 1 与表 2 为观测点 2006—2008 年空气温度、土壤温度、土壤含水量、降水量、光合有效辐射、饱和水汽压差的变化规律。研究期间这些环境因子的变化趋势相似又略有不同。2008 年空气温度较 2006 和 2007 年低(表 2), 生长季与生长季前期尤为明显。冬季空气温度最低值为 $-26.28^\circ C$, 夏季的最大值 $21.77^\circ C$ 。温度日变异较大, 非生长季温差最大可达 $42.75^\circ C$, 生长季温差可达 $31.79^\circ C$ 。2006—2008 年生长季平均温度为 $6.8^\circ C$, 非生长季平均温度为 $-5.27^\circ C$ 。3 年内 5 cm 土壤温度约为 $3^\circ C$, 略高于空气温度 $3.2^\circ C$ (表 2)。研究期间各年降水为 $420 \sim 490$ mm, 年差异较小, 其中生长季降水占全年降水的 90% 以上。大部分总降水量小于 1.0 mm/d, 约有 74.58% 降水少于 5 mm/d。

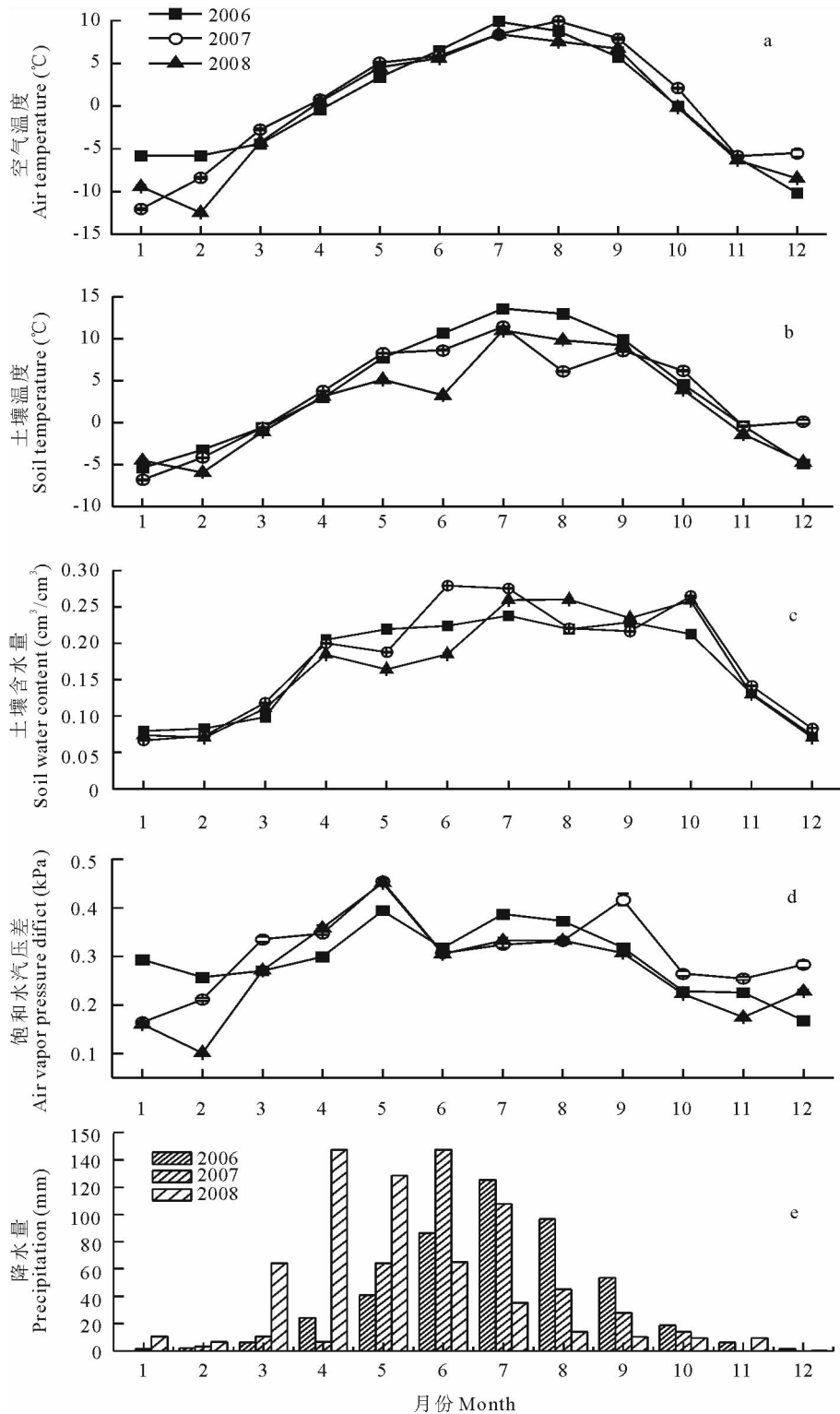


图 1 青海三江源退化草地 2006—2008 年环境因子的变化

Fig. 1 The environmental factors variation during 2006 to 2008

误差线为标准误 The bars indicated the standard error. 下同 The same below.

由于生长季降水丰沛,生长季内土壤含水量在降水事件发生后呈上升趋势,但是在发生中到大雨(18~35 mm)土壤含水量并不随之剧烈上升。生长季内土壤含水量在 0.22~0.35 cm³/cm³ 间波动,非生长季内土壤含水量显著下降,尤以 12 月至次年 1 月明显(<0.1 cm³/cm³)(图 1)。

研究期间年蒸散量小于年降水量,分别为 452.24,474.24,459.57 mm,低于当年降水量 8.40,15.86,20.53

mm(表 2)。在整个生长季前期,累计蒸散量均大于累计降水量(图 2)。生长季盛期,随着降水量增多,蒸散量与降水量逐渐持平,然后降水量反超蒸散量。随着生长季的结束,降水量减少,但由于生长季累计降水量保持在一个较高的水平,始终保持着大于累计蒸散量的状态。由于 2007 年生长季降水发生时间较早,同时比 2006,2008 年多,因此,2007 年累计降水量约于 6 月 2 日超过累计蒸散量,早于 2006 和 2008 年。2006,2008 年累计降水量超过累计蒸散量的时间大致在 8 月中下旬,比 2007 年晚 2 个月。

表 2 各年度不同生长阶段各环境因子的变化

Table 2 Comparison of environmental conditions during the growing and none growing season in study site

生长阶段	年份	空气温度	土壤温度	饱和水汽	光合有效	降水	土壤湿度	日蒸散量	蒸散量
Growing phase	Year	Ta	Ts	压差 VPD	辐射 PPFD	PPT	SWC	Daily evapotranspiration	Evapotranspiration
		($^{\circ}\text{C}$)	($^{\circ}\text{C}$)	(kPa)	($\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)	(mm)	(cm^3/cm^3)	(mm/d)	(mm)
生长季前期	2006	-4.58	-2.22	0.28	64.03	18.3	0.11	0.67	72.77
Pre-growing season	2007	-6.18	-2.52	0.26	67.67	16.4	0.11	0.73	79.43
	2008	-6.67	-2.47	0.21	79.89	8.2	0.11	1.01	80.10
	2006	5.65	9.84	0.34	71.37	434.5	0.22	1.86	353.69
生长季	2007	6.23	8.28	0.35	72.52	440.7	0.24	1.92	365.03
	2008	5.43	7.12	0.34	68.07	454.6	0.23	1.81	344.74
	2006	-7.72	-2.34	0.20	57.86	7.9	0.11	0.39	25.77
非生长季	2007	-5.36	-0.12	0.26	73.28	39.6	0.15	0.60	29.79
	2008	-7.06	-2.76	0.20	59.22	17.3	0.11	0.53	34.74
	2006	0.18	4.04	0.30	67.24	460.7	0.17	1.24	452.24
全年 Annual	2007	0.64	3.60	0.31	70.87	496.1	0.19	1.36	474.24
	2008	-0.15	2.70	0.28	66.90	480.1	0.17	1.32	459.57

Ta; Air temperature; Ts; Soil temperature; VPD; Saturation vapor pressure difference; PPFD; Photosynthetic photon flux density; PPT; Precipitation; SWC; Soil water content.

2.2 退化草地蒸散的动态特征

研究期间三江源地区退化草地蒸散全年日变化均呈单峰型(图 3)。日出前及日落后,蒸散量波动极小,10:00以后逐渐上升,正午前后到达最大值。生长季 0:00—9:00(BST:北京时间)蒸散量小于 0.1 mm/h,非生长季小于 0.05 mm/h,6:00—13:00 生长季约增加 0.027 mm/h,非生长季约增加 0.005 mm/h,随后又逐渐下降,日落后趋于平缓。无论生长季或非生长季日蒸散最大值出现时刻一致。不同年度蒸散量日变化的情况是:生长季内在 10:00 以后,2006 年蒸散量上升速度高于 2007 与 2008 年,15:00 以后,其下降速度也低于 2007 与 2008 年。生长季前期与非生长季,2006 年蒸散量出现最大值后,其变化幅度很小,直至 16:00 以后才有明显下降,且全天都小于 2007 与 2008 年。而 2007 和 2008 年在生长季前期与非生长季出现最大值后,其变化态势与生长季类似。方差分析表明,无论生长季或非生长季 3 年蒸散日变化均无显著差异。

三江源地区退化草地蒸散的季节变化变异较大:蒸散量的最大值出现在生长季,期间蒸散平均值约 1.8~1.9 mm/d;而非生长季蒸散量趋于 0,平均约为 0.6 mm/d(图 4)。早春时分蒸散量相对较小,但从 5 月开始迅速增长,6,7 月出现年蒸散最大值,为 2.0~2.3 mm/d,之后随着植被凋落和可利用能量的减少而逐渐减小。至生长期末期蒸散量减小的速率较快,从 10 月 1.12/1.58/1.32 mm/d 降至 11 月 0.32/0.50/0.71 mm/d (2006/2007/2008)。月均蒸散日平均值也呈单峰型变化,极值为 0.26 和 2.30 mm/d,分别出现于 2007 年 1 月与 6 月。

2.3 潜热与环境因子的相关关系

为了进一步探讨蒸散与各环境因子的关系,采用相关分析与回归分析对不同生长阶段潜热通量与空气温度、土壤温度、饱和水汽压差以及净辐射关系进行分析(表 3)。一方面,通过相关分析发现,无论在哪个生长阶段,净辐射对该区域潜热值的影响最大,其次是饱和水汽压差,空气温度和土壤温度。另一方面,回归分析的结果表明,

随着生长的推进,潜热对各因子的敏感程度(a)有所不同。在生长季,潜热对空气温度、净辐射和饱和水汽压差等因素的变化较全年其他时间敏感。其中温度的贡献为 $6.46 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,即温度每升高 1°C ,潜热变化 $6.46 \text{ W}/\text{m}^2$;饱和水汽压差的贡献为 $126.40 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{kPa})$,即饱和水汽压差每升高 1 kPa ,潜热变化 $126.40 \text{ W}/\text{m}^2$;净辐射的贡献为净辐射每升高 $1 \mu\text{mol}/(\text{m} \cdot \text{s})$,潜热变化 $0.21 \text{ W}/\text{m}^2$;而潜热对土壤温度的敏感程度却与其他因子表现出不同的趋势:生长季前期,土壤温度对潜热变化的贡献为 $2.86 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

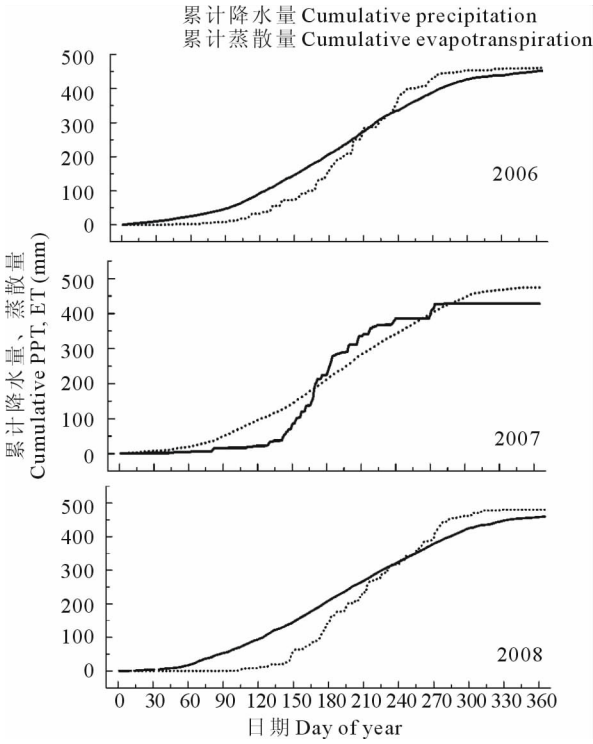


图 2 2006—2008 年累积蒸散量和累积降水量的变化
Fig. 2 Change of cumulative precipitation(PPT), evapotranspiration (ET) from 2006 to 2008

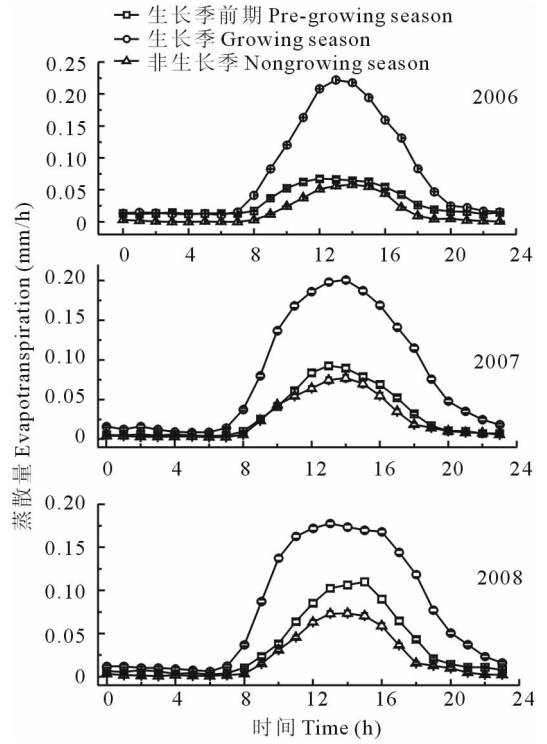


图 3 三江源退化草地 2006—2008 年蒸散量日变化
Fig. 3 Diurnal variation of the evapotranspiration during 2006 to 2008 of the degraded grassland

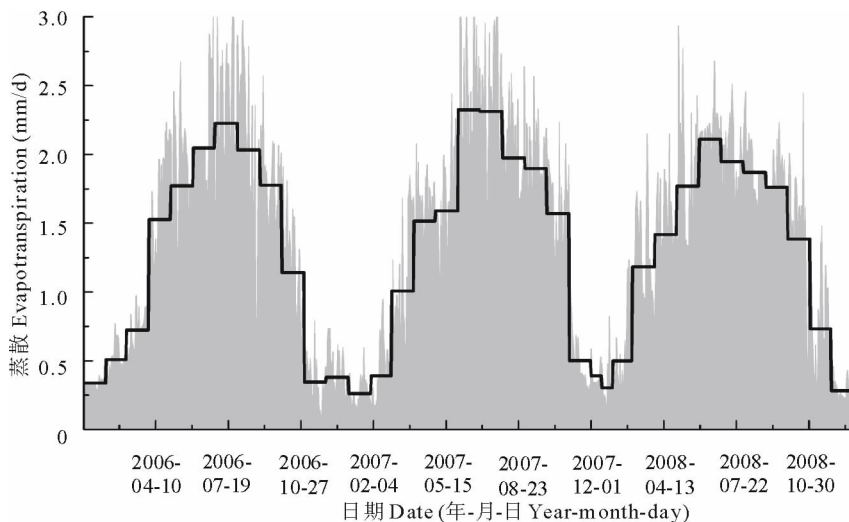


图 4 三江源退化草地蒸散月均值(黑色粗线)及逐日蒸散值变化(灰色)
Fig. 4 Daily evapotranspiration (grey) and superimposed monthly mean ET (heavy black line) for the period January 2006 to December 2008

为了进一步确定所有因子对潜热的综合影响,将各因子逐步回归后得到以下关系式:

$$LE=0.14Rn+54.58VPD+0.89Ts-0.18Ta+69.21SWC-5.52(R^2=0.63,P<0.0001)$$

其参数估计见表 4。

3 讨论

基于 2006—2008 年三江源退化草地的涡度相关系统观测数据,初步研究了其蒸散变化的动态特征,并对其影响因子作了简单分析。

3.1 蒸散动态特征

蒸散量的日变化呈单峰型变化。无论生长季或非生长季每日正午 12:00—14:00 出现最大值,生长季平均日最大蒸散值为 0.21 mm/h;非生长季平均日最大蒸散值为 0.10 mm/h。月均日变化也为单峰型,表现为:在生长季前期随着温度回升,土壤消融,植被返青,蒸散值逐渐增大,每年 6,7 月蒸散出现全年最大值,月均蒸散达 2.0 mm/d 以上,此时降水也达到全年的最大值,说明蒸散和降水是同步的,并不出现时滞。另一方面,草地生物量和叶面积在每年 6,7 月达到最大,土壤含水量同时逐渐增大,也驱动了蒸散的加速。3 年最大日蒸散量出现在 2007 年 6 月 12 日,为 3.26 mm/d。非生长季土壤冻结,植被枯萎,土壤蒸发和植物蒸腾量都非常微弱,导致这个时期的蒸腾量趋于 0。植被特征和降水的季节性分布是决定蒸散值季节变化的主要因素。三江源地区退化草地季节变化趋势与内蒙古典典型草原的蒸散变化^[22]相似(年蒸散最大值 3.5, 4.0 mm/d),其变化更多的是受土壤水分的影响,还有部分原因是凋落物增加了水分截留却减少了水分渗透。而在本研究中由于植被盖度低,生态位重叠少,资源利用率低,凋落物量较少,因此凋落物不会影响蒸散量。

由于全球各气候区降水分布迥异,蒸散强弱不同,地球表面草地生态系统的水分平衡状况存在显著差异。表 5 为三江源地区退化草地与其他草地生态系统蒸散研究的比较,可以看出本研究区域的蒸散值处于这些研究结果的中间范围。

表 3 青海三江源退化草地不同生长阶段潜热与环境因子的关系

Table 3 Characteristics of linear regression analysis ($y=ax+b$) of latent heat vs. air temperature, soil temperature at the depth of 5 cm, VPD and net radiation (Rn)

生长阶段 Period	生长季前期 Pre-growing season	生长季 Growing season	非生长季 Nongrowing season	全年 Annual	
LE vs. Ta	r	0.52	0.55	0.54	0.51
	a	2.70	6.46	2.41	2.87
	b	37.97	14.97	31.03	33.65
LE vs. VPD	r	0.53	0.52	0.57	0.54
	a	83.00	126.40	85.89	102.34
	b	1.91	8.70	-4.00	3.14
LE vs. Rn	r	0.67	0.63	0.68	0.61
	a	0.12	0.21	0.10	0.16
	b	13.16	29.09	12.28	20.68
LE vs. Ts	r	0.29	0.13	0.21	0.32
	a	2.86	1.80	1.81	2.37
	b	28.87	29.63	18.00	24.33

注:r 为两因子间线性相关程度, $Y=ax+b$ 为两因子的回归关系式。

Note: r is the linear correlation coefficient of two factors, $Y=ax+b$ is the regression of two factors.

表 4 多元回归的参数估计

Table 4 Parameter estimate of the multi-factors regression

变量 Variable	参数估计 Parameter estimate	标准参数估计 Standardize estimate	标准误差 Standard err.	t 值 t value	P 值 P value
截距 Inception	-5.52	0	0.52	-10.53	<0.001
净辐射 Net ration (Rn)	0.14	0.56	0	203.47	<0.001
空气温度 Air temperature (Ta)	-0.18	-0.03	0.03	-5.11	<0.001
土壤温度 Soli temperature (Ts)	0.89	0.11	0.04	20.25	<0.001
饱和水汽压差 Air vapor press difict (VPD)	54.58	0.27	0.64	84.86	<0.001
土壤水分 Soil water content (SWC)	69.21	0.09	2.69	25.69	<0.001

表 5 不同草地类型蒸散状况的比较

Table 5 The comparison of evapotranspiration (ET) among different grassland types

纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Altitude (m)	植被类型 Vegetation type	优势种 Dominant species	年蒸散量 Annual ET (mm)	蒸散/潜热 Evapotranspiration/Latent			降水量 Precipitation (mm)	文献 Reference
						生长季 Growing season (mm/d)	非生长季 Non growing season (mm/d)	最大值 Maximum (mm/d)		
37.60° N	101.30° E	3 250	高寒草甸	矮嵩草	341~	1.90~	<0.40	—	554.0~	[15]
			Alpine meadow	<i>Kobresia humilis</i>	426	2.23			666.0	
47.21° N	108.74° E	1 235	典型草原	针茅、苔草、冷蒿	163	1.70~	<0.50	2.80	248	[12]
			Typical steppe	<i>Stipa krylovii</i> , <i>Carex duriuscula</i> , <i>Artemisia frigida</i>		2.80				
43.53° N	106.67° E	1 200	典型草原	羊草	350	4.22±	0.53±	3.50~	350.00	[22]
			Typical steppe	<i>Leymus chinensis</i>		0.96 ^a	0.40 ^a	4.00		
49.43° N	12.56° E	951	湿生混合草场	粗穗冰草、长喙婆罗	250	—	<0.50	2.20~	75.10~	[2]
			Mosit mixed grassland	门参 <i>Agropyron dasystachyum</i> , <i>Tragopogon dubius</i>				4.50	295.30 ^b	
46.77° N	100.92° E	518	放牧的混生草场	冰草、垂穗草、针茅	489	2.40~	—	4.40	213.00~	[23]
			Grazed mixed- grass prairie	<i>Agropyron</i> spp., <i>Bouteloua</i> spp., <i>Stipa</i> spp.		2.70			373.00	
			不放牧的混生 草场 Nongrazed mixed-grass prairie	冰草、垂穗草、针茅	455	2.30~	—	4.70	261.00~	
				<i>Agropyron</i> spp., <i>Bouteloua</i> spp., <i>Stipa</i> spp.		2.90			386.00	
34.35° N	100.50° E	3 963	高寒退化草地	小嵩草	454~	1.81~	<0.6	3.20	460.00~	本研究 This study
			Alpine degraded grassland	<i>Kobresia pygmaea</i>	474	1.92			496.00	

a; MJ/(m² · d) 为潜热单位 The unit of LE; b: 生长季降水量, 其余均为全年降水量 Growing season precipitation, the rest are the annual precipitation.

3.2 蒸散影响因素

在整个研究期间三江源退化草地净辐射与潜热的相关性最高, 随着生长季的推进, 水热条件变好, 潜热对各环境因子的相关性及其敏感性逐渐增强, 在生长季盛期达到最高。而温度、净辐射、土壤水分以及饱和水汽压差的综合影响可以解释研究区蒸散变异的 63%。

在水分充足的情况下, 某一地区的蒸散状况是由可用能量所决定的^[24]。而可用能量很大程度上由反照率、植被高度、植被盖度、植被组成、土壤湿度、太阳辐射所决定^[25]。土壤水分作为蒸散的影响因素已在大量文献中证明^[26], 在三江源地区, 由于地下根系多生长在 0~10 cm, 因此 0~5 cm 的土壤水分含量对蒸散的影响最大。饱

和水汽压的增加可以使叶片的气孔导度上升,进而加剧植被蒸腾。此外,对退化草地的反照率研究表明^[27],该区域年均反照率为 0.22,生长季(5—9月)的平均反照率为 0.18,非生长季的为 0.25,生长季反照率略低于未退化的海北矮嵩草草甸(0.20),可能原因是,海北地区生长季期间处于高原植物的开花期,而其花朵鲜艳的颜色会对反照率有一定的影响,同时,退化草地土壤颜色较暗,降水多,土壤含水量较高,也会使反照率下降。然而无论是海北矮嵩草草甸还是退化草地,相比于其他草地生态系统,生长季地表反照率的值都略高^[28]。尽管青藏高原地区太阳辐射强烈但是在地面辐射收入中,射入长波辐射(大气逆辐射)小,仅占平原地区的 50%~70%^[29],而净长波辐射却比平原地区高得多^[29],因此相对高的反照率和净长波辐射会使净辐射的量相应减少,相应地使净辐射对蒸散的贡献下降。

3.3 三江源退化草地的水分收支情况

水循环过程中,降水是输入项,而蒸散、渗透、径流和植被截留是输出项,以此来完成水分收支的平衡。在陆地水循环中,蒸散是生态系统水分散失最大的一个分量,大约有 70%归还到地面的降水通过蒸腾和蒸发过程散失^[30]。研究区域 3 年蒸散量大致与降水量持平,退化草地蒸散量与降水之比为 95.6%~98.2%,生长季 ET/PPT 为 75.8%~82.4%,全年 ET/PPT 大于青海海北地区矮嵩草草甸^[15](57.6%~64.0%),内蒙古克氏针茅(*Stipa krylovii*)、寸草(*Carex duriuscula*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)占优势的草原^[12],可能的原因是由于退化草地植被退化,植被盖度低,水分涵养能力下降,大部分降水通过植被蒸腾和土壤蒸发散失了。但这个值在已发表的草地生态系统 ET/PPT 的范围内(40%~150%)^[12]。

退化草地由于地势平坦,每次降水量较小,因此,径流项可以忽略。生长季 ET/PPT 较低是由于在植被盖度、根系分布、土壤颗粒结构、土壤透水性等因素的共同作用下,引起水分渗透^[31],使土壤含水量上升。此外,在退化草地由于植物根系多分布在 0~10 cm 土层,根系的存在一定程度上减少土壤表面水分散失。

相比于青藏高原东部矮嵩草草甸^[15]、加拿大北部温性草原^[2]的蒸散研究,三江源退化草地生长季蒸散量较低(1.81~1.92 mm/d),而非生长季蒸散量却较高(0.39~0.59 mm/d)。这是由于生长季降水丰沛,可利用能量高,三江源退化草地蒸散值在生长季内随着水热条件转好,植被覆盖度逐渐上升,植被蒸腾也随之加剧,而土壤表面的蒸发降低^[15]。但即使在生长盛期,植被盖度也只有 75%,因此减少了生长季的蒸腾量,土壤蒸发降低的值也有限;在非生长季该地区降水量比海北地区小,积雪量较少。在海北矮嵩草草甸、金露梅灌丛草甸、藏嵩草沼泽草甸积雪对水汽通量影响的研究^[32]表明,有积雪时水汽浓度显著高于无积雪。此外,矮嵩草草甸非生长季 VPD 高于三江源地区(0.43~0.48 kPa)。由这些综合因素可以推出矮嵩草草甸非生长季蒸散应该大于三江源退化草地,但本研究中却得出相反的结果,这可能是由于草地的退化引起下垫面特征的改变,同时冬季的放牧活动使残留的枯草因牲畜践踏、风折而发生风蚀^[10],减少了植被对水分的截留,使近地面的土壤水分在天气状况较好的情况下迅速散失^[13]。

4 结论

通过 3 年的蒸散研究,初步表明青海省三江源地区小嵩草草甸退化草地年蒸散量基本与年降水量持平,2006—2008 年年蒸散量差异不大。生长季蒸散占全年蒸散量的 75%以上,而非生长季蒸散量较少。相比于未退化的海北矮嵩草草甸,该地区生长季蒸散略小而非生长季蒸散值略大:生长季退化草地的植被盖度较低,即使是生长盛期地表也有裸露土壤,而非生长季净辐射对蒸散值影响较大,放牧活动也对这种结果有一定的作用。蒸散日变化,季节变化都呈单峰型。其中每天正午左右,每年 6—7 月出现最大值,这种变化表明三江源退化草地蒸散的季节动态与植被特征和降水的季节性分布相关。

参考文献:

- [1] Brutsaert W. Evaporation into the Atmosphere: Theory, History, and Applications[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1982.
- [2] Wever L A, Flanagan L B, Carlson P J. Seasonal and interannual variation in evapotranspiration, energy balance and surface conductance in a northern temperate grassland[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 112(1): 31-49.

- [3] Adams J M, Faure H, Faure-Denard L, *et al.* Increases in terrestrial carbon storage from the Last Glacial Maximum to the present[J]. *Nature*, 1990, 348: 711-714.
- [4] 马致远. 三江源地区水资源的涵养和保护[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(13): 108-111.
- [5] 陈孝全, 苟新京, 高延林, 等. 三江源自然保护区生态环境[M]. 西宁: 青海人民出版社, 2002.
- [6] 王堃, 洪绶曾, 宗锦耀. 三江源地区草地资源现状及持续利用途径[J]. *草地学报*, 2005, (1): 28-31.
- [7] 李博. 中国北方草地退化及其防治对策[J]. *中国农业科学*, 1997, 30(6): 1-9.
- [8] 刘纪远, 徐新良, 邵全琴. 近 30 年来青海三江源地区草地退化的时空特征[J]. *地理学报*, 2008, 63(4): 364-376.
- [9] 王启基, 来德珍, 景增春, 等. 三江源区资源与生态环境现状及可持续发展[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2005, 41(4): 31-37.
- [10] 曹广民, 龙瑞军. 三江源区“黑土滩”型退化草地自然恢复的瓶颈及解决途径[J]. *草地学报*, 2009, (1): 4-9.
- [11] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(4): 479-492.
- [12] Li S G, Asanuma J, Kotani A, *et al.* Evapotranspiration from a Mongolian steppe under grazing and its environmental constraints[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 333(1): 133-143.
- [13] Bremer D J, Auen L M, Ham J M, *et al.* Evapotranspiration in a prairie ecosystem: effects of grazing by cattle[J]. *Agronomy Journal*, 2001, 93(2): 338-348.
- [14] Meyers T P. A comparison of summertime water and CO₂ fluxes over rangeland for well watered and drought conditions[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 106: 205-214.
- [15] Gu S, Tang Y, Cui X, *et al.* Characterizing evapotranspiration over a meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: D08118, doi: 10.1029/2007JD009173.
- [16] 赵亮, 古松, 周华坤, 等. 青海省三江源区人工草地生态系统 CO₂ 通量[J]. *植物生态学报*, 2008, 32(3): 544-554.
- [17] 李春, 何洪林, 刘敏, 等. ChinaFLUX CO₂ 通量数据处理系统与应用[J]. *地球信息科学*, 2008, 10(5): 557-565.
- [18] 温学发, 于贵瑞, 孙晓敏. 基于涡度相关技术估算植被/大气间净 CO₂ 交换量中的不确定性[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(4): 658-663.
- [19] Zhao L, Li Y, Xu S, *et al.* Diurnal, seasonal and annual variation in net ecosystem CO₂ exchange of an alpine shrubland on Qinghai-Tibetan plateau[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(10): 1940-1953.
- [20] Falge E, Baldocchi D, Olson R, *et al.* Gap filling strategies for long term energy flux data sets[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 71-77.
- [21] Li Y, Zhou L, Xu Z, *et al.* Comparison of water vapour, heat and energy exchanges over agricultural and wetland ecosystems[J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(14): 2069-2080.
- [22] Hao Y, Wang Y, Huang X, *et al.* Seasonal and interannual variation in water vapor and energy exchange over a typical steppe in Inner Mongolia, China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 146(1-2): 57-69.
- [23] Frank A B. Evapotranspiration from northern semiarid grasslands[J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95(6): 1504-1509.
- [24] Hanson R L. Evapotranspiration and droughts[J]. *U. S. Geological Survey Water Supply Paper*, 1988, 2375: 99-104.
- [25] Song J. Phenological influences on the albedo of prairie grassland and crop fields[J]. *International Journal of Biometeorology*, 1999, 42(3): 153-157.
- [26] Lafleur P M, Rouse W R, Carlson D W. Energy balance differences and hydrologic impacts across the northern treeline[J]. *International Journal of Climatology*, 1992, 12(2): 193-203.
- [27] 冯超, 古松, 赵亮, 等. 青藏高原三江源区退化草地生态系统的地表反照率特征[J]. *高原气象*, 2010, 29(1): 70-77.
- [28] Gao F, Schaaf C B, Strahler A H, *et al.* MODIS bidirectional reflectance distribution function and albedo climate modeling grid products and the variability of albedo for major global vegetation types[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: D01104, doi: 10.1029/2004JD005190.
- [29] 季国良, 江灏, 吕兰芝. 青藏高原的长波辐射特征[J]. *高原气象*, 1995, 14(4): 451-458.
- [30] Rosenberg N J, Blad B L, Verma S B. *Microclimate: The Biological Environment*[M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1983.

[31] 王一博, 王根绪, 吴青柏, 等. 植被退化对高寒土壤水文特征的影响[J]. 冰川冻土, 2010, 32(5): 989-998.

[32] 赵亮, 徐世晓, 伏玉玲, 等. 积雪对藏北高寒草甸 CO₂ 和水汽通量的影响[J]. 草地学报, 2005, 13(3): 242-247.

Characterizing the evapotranspiration of a degraded grassland in the Sanjiangyuan Region of Qinghai province

LI Jing-mei^{1,2,3}, CAI Hai^{1,2}, CHENG Qian⁴, QIAO Chun-lian^{1,2}, CHU Hui^{1,2},
CHEN Dong-dong¹, XU Shi-xiao¹, ZHAO Xin-quan¹, ZHAO Liang¹

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Qinghai Engineering Consulting Center, Xining 810001, China; 4. Department of Mathematics, Qinghai Normal University, Xining 810001, China)

Abstract: The evapotranspiration (ET) of degraded grassland in the Sanjiangyuan region was investigated to further elucidate the water cycle in this region. The eddy covariance technique was used to measure evapotranspiration and sensible heat flux continuously for 3 years in this degraded grassland in Qinghai province, China. The annual precipitations (PPT) were 460.7, 496.1, and 480.1 mm for the three consecutive years. The annual ETs were 452.24, 474.24, and 459.57 mm, varying in accord with the annual PPT. About 75% of the annual ET occurred during the growing season from DOY121 to 300. The ratio of ET to PPT was greater than 95% during the study period, indicating that there is some balance between ET and PPT and the average in the growing season for each of the three years were 1.86, 1.92, 1.81 mm/d, respectively. However, the averaged ET was lower than 0.6 mm/d during the non-growing season. The annual and daily dynamics were single peak type curves. The maximum monthly ET rate was 2.0–2.2 mm/d, which occurred mainly in June or July. The daily peak appeared at noon and was 0.21 and 0.10 mm/h during the growing and non-growing seasons respectively. ET was most sensitive to net radiation during the growing season while the effect of air temperature and vapour pressure deficit were secondary. Compared with the non-degraded area of *Kobresia humilis* meadow, the ET of the degraded grassland was lower in the growing season but higher in the non-growing season. The lower vegetation cover was attributed to this result.

Key words: eddy covariance method; evapotranspiration; Sanjiangyuan region; Qinghai province; degraded grassland