

# 拉萨河谷喷灌双季饲草作物系数与土壤蒸发研究

徐冰<sup>1,2</sup>, 李想<sup>3</sup>, 张紫森<sup>4\*</sup>, 任杰<sup>1,2</sup>, 李泽坤<sup>1,2</sup>

(1.中国水利水电科学研究院 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站, 北京 100038; 2.中国水利水电科学研究院 牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020;

3.内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

4.包头市水库管护中心, 内蒙古 包头 014030)

**摘要:**【目的】探究作物指标与作物系数、土壤蒸发之间的关系, 为提高拉萨河谷喷灌蒸散发计算精度, 制定适时适量的双季饲草灌溉制度提供理论支撑。【方法】通过微型蒸渗仪实测蒸散量与 PM 法计算参考作物的比值实测作物系数对 PM 法修正的单作物系数进行评价, 分析误差水平及原因; 基于自制株间土壤蒸发仪, 获得株间土壤蒸发 ( $E$ ) 与蒸散量 ( $ET$ ) 的分摊比例 ( $E/ET$ ), 建立实测  $K_c$  及  $E/ET$  与  $LAI$ 、 $SPAD$  之间的关系。【结果】采用 FAO-56 推荐单作物系数修正法, 对拉萨河谷小黑麦、燕麦单作物系数进行修正, 小黑麦和燕麦初始生长期、生长中期和生长后期的作物系数分别为 0.45 和 0.94, 1.22 和 1.16, 0.49 和 0.31。小黑麦全生育期土壤蒸发占蒸散量的 44.8%, 苗期-越冬期、越冬-返青期、返青-拔节期、拔节-抽穗期、抽穗-刈割期土壤蒸发占蒸散量比例分别为 93.4%、94.8%、61.8%、22.2% 和 13.8%; 燕麦苗期-分蘖期、分蘖-拔节期、拔节-抽穗期、抽穗-刈割期土壤蒸发占蒸散量比例分别为 98.9%、79.1%、31.7% 和 16.8%。土壤蒸发在双季饲草种植过程中占蒸散量比例超过 44%, 减少土壤蒸发以提高水分利用效率的潜力较大。【结论】双季饲草实测作物系数、土壤蒸发占蒸散量比例与叶面积指数、叶绿素显著相关且呈线性或非线性函数关系。在单作物系数法基础上增加作物指标可以修正双季饲草蒸散的计算精度, 通过构建数学模型使作物指标能直接模拟该地区作物土壤蒸发、间接模拟蒸散发全过程。

**关键词:** 拉萨河谷; 喷灌; 双季饲草; 作物系数; 土壤蒸发

中图分类号: S275.5; S512.6

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023197

OSID: 

徐冰, 李想, 张紫森, 等. 拉萨河谷喷灌双季饲草作物系数与土壤蒸发研究[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(2): 31-40.

XU Bing, LI Xiang, ZHANG Zisen, et al. Relationship between crop coefficient and soil evaporation in forage grassland under sprinkler irrigation in Lhasa Valley[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(2): 31-40.

## 0 引言

【研究意义】“时空拓展”是西藏人工饲草产业的发展趋势<sup>[1]</sup>, 其核心内容是充分利用水热条件在一年内连续种植双季饲草, 以缓解饲草严重短缺的压力。拉萨河谷位于“一江两河”流域, 号称“西藏粮仓”, 全年大于 0 °C 积温平均值为 2 888 °C<sup>[2-3]</sup>, 水热条件较好, 有利于发展和推广双季饲草种植模式。小黑麦是禾本科黑麦属一年生草本植物, 具有高产、优质的特点且具有良好的抗寒性, 可在 -25 °C 低温下越冬, 是解决西藏饲料不足的主要潜力作物<sup>[4]</sup>; 燕麦为禾本科早熟禾亚科燕麦属, 作为拉萨河谷典型人工牧草之一,

具有耐寒、耐贫瘠、高产、优质的优点<sup>[5]</sup>。喷灌作为世界上高效节水灌溉的主要形式之一, 具有增产、省肥、节水、灌溉均匀和操作简单等优势。蒸散发 (Evapotranspiration,  $ET$ )<sup>[6]</sup> 主要由土壤蒸发 ( $E$ ) 和作物蒸腾 ( $T$ ) 组成, 是作物田间用水管理的关键依据, 明晰拉萨河谷饲草喷灌蒸散发对于制定喷灌双季饲草灌溉制度, 发展西藏高产、优质人工饲草和促进当地农牧民持续增收具有重要意义。【研究进展】近年来国内外学者对拉萨河谷蒸散发进行了大量的研究。Garcia 等<sup>[7]</sup>的试验结果显示, 联合国粮农组织推荐的 Penman-Monteith 潜在腾发量计算公式在高海拔地区低估了 30%。赵世昌等<sup>[8]</sup>运用 FAO-56 推荐的单作物系数法和双作物系数法推求充分灌溉条件下西藏高寒牧区燕麦的作物系数, 初步证明单作物系数法和双作物系数法均适用于西藏高寒牧区。罗红英等<sup>[9]</sup>采用 FAO 提出的作物系数修正方法, 计算了西藏 4 个农业分区中代表站的青稞作物系数值。徐冰等<sup>[10]</sup>依据当雄县、改则县、那曲县多年气象资料, 分析多种参考作物腾发量 ( $ET_0$ ) 计算方法, 证明 Hargreaves

收稿日期: 2023-05-06 修回日期: 2023-11-13

基金项目: 西藏自治区科技计划重大专项 (XZ202101ZD0003N); 第二次青藏高原综合科学考察研究 (2019QZKK020707); 中国水科院科研专项 (MK2020J04); 中国水科院科研专项—“五大人才”计划 (MK0145B012021)

作者简介: 徐冰 (1977-), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事节水灌溉研究。E-mail: nmxubing@163.com

通信作者: 张紫森 (1998-), 男, 硕士, 主要从事节水灌溉研究。

E-mail: 458822765@qq.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

法更适宜西藏牧区  $ET_0$  的简便计算。张紫森等<sup>[11]</sup>通过对比拉萨河谷喷灌与畦灌田间实测蒸散量,发现喷灌导致日间蒸散量降低 0.03~0.38 mm/h。汤鹏程等<sup>[12-13]</sup>通过实测蒸散量证明 PM 法计算确有误差,后基于 Hargreaves 法并引入海拔因子与修正温度常数得到一种少参、准确的适用于高海拔地区  $ET_0$  简易计算方法。

【切入点】目前大部分蒸散发计算方法只适用于特定的灌水方式和区域<sup>[13-14]</sup>,拉萨河谷喷灌蒸散发研究刚刚起步,对于基础理论的深入研究亟待加强。【拟解决的关键问题】本研究针对 Penman-Monteith (PM) 法计算拉萨河谷喷灌蒸散与实测蒸散精度不高的问题,通过蒸渗仪实测蒸散量与 PM 法计算参考作物蒸发量的比值—实测作物系数(实测  $K_c$ )对 PM 法修正的单作物系数( $K_c$ )进行评价,分析误差水平及原因;并基于自制株间土壤蒸发仪,获得株间土壤蒸发( $E$ )、植株蒸腾( $T$ )与蒸散量( $ET$ )的分摊比例( $E/ET$ ),建立实测  $K_c$ 与叶面积指数( $LAI$ )、叶绿素( $SPAD$ )及  $E/ET$ 与  $LAI$ 、 $SPAD$ 的关系,初探结合土壤蒸发和作物指标提升拉萨河谷喷灌蒸散发模型精度的解决

方法,为制定喷灌双季饲草高效灌溉制度,发展西藏高产、优质人工饲草提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验区位于拉萨市林周县卡孜乡“拉萨草牧业科技创新基地”,平均海拔高度 3 650 m,平均大气压约为 63.809 kPa,地理坐标纬度东经 91°13',北纬 29°54'。该区域属高原温带季风半干旱气候,年平均气温 2.4~8.2 °C,年降水量为 300~510 mm,主要集中在 6—9 月份,约占全年降水量 70%~85%,年日照时间在 3 500 h 以上,太阳辐射量为 6 000~8 000 MJ/m<sup>2</sup>,年无霜期 100~120 d,日平均风速 1.2 m/s。耕作层土壤质地为砂壤土,体积质量为 1.44 g/cm<sup>3</sup>,计划湿润层最深 30 cm,田间持水率为 24%(占体积的百分比),凋萎系数为 8%(占体积的百分比),体积饱和含水率 34%。本试验播前耕种层土壤全氮量 1.3 g/kg、有效磷量 82 mg/kg、速效钾量 98 mg/kg。试验期间小黑麦、燕麦各生育期降水量和日平均温度详见图 1。

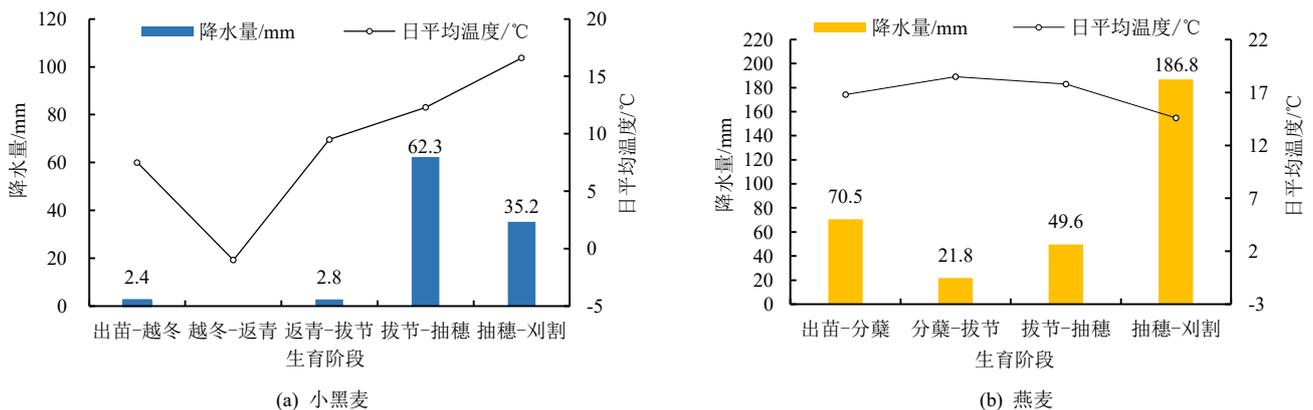


图 1 试验期间试验田降水量和日平均温度变化

Fig.1 Changes in precipitation and average daily temperature in the test field during the test period

### 1.2 试验设计

试验区设有微型蒸渗仪和自动气象站,并在微型蒸渗仪东侧 1.5 m 处布设自制株间土壤蒸发仪,具体试验布置如图 2 所示。本试验秋播小黑麦品种为中饲 3241,播种时间为 2021 年 10 月 14 日,刈割时间为 2022 年 6 月 16 日(开花期后,灌浆期前);夏播燕麦品种为青海 444,播种时间为 2022 年 6 月 21 日,刈割时间为 2022 年 9 月 26 日(开花期后,灌浆期前)。小黑麦与燕麦底肥均为磷酸二铵,底肥量 180 kg/hm<sup>2</sup>;小黑麦返青-拔节期追施水溶肥,追肥量 150 kg/hm<sup>2</sup>;燕麦拔节-抽穗期追施水溶肥,追肥量 150 kg/hm<sup>2</sup>,采用条播,行距 23~25 cm,播量 225 kg/hm<sup>2</sup>。由于拉萨河谷水资源丰富,人均水资源量可达 0.9 万 m<sup>3</sup>,且现阶段主要问题为饲草短缺,所以设置灌溉制度为充分灌溉,即田间持水率低于 75%时灌溉至田间持水量,但越冬期由于平均温度在 0 °C 以下且风速过大,不适

合喷灌设备运行,故仅在 11 月上旬参考当地传统灌溉量,以最大灌水定额为标准,灌水 50 mm。灌溉方式采用半固定式喷灌,采用 Wobbler 低压摇摆喷头,喷嘴直径 2.8 mm,并使用 PSR-2 型压条,控制喷洒半径为 6~7 m。双季饲草计划湿润层深度如表 1、表 2 所示。

### 1.3 测定与计算方法

#### 1.3.1 气象资料

采用 NHQXZ601 全天候气象站,对试验站气象实时监测。观测指标包括:大气压(kPa)、平均温度(°C)、最高温度(°C)、最低温度(°C)、降水量(mm)、日照时间(h)、相对湿度(%)、风速(m/s)、总辐射量(MJ/m<sup>2</sup>)、反辐射量(MJ/m<sup>2</sup>)和净辐射量(MJ/m<sup>2</sup>)。

#### 1.3.2 实测蒸散量与株间土壤蒸发量

蒸散发采用两台 LYS80 微型蒸渗仪,设置 2 min

监测一次桶内土柱质量，微型蒸渗仪尺寸（长×宽×深）为 0.8 m×0.8 m×0.8 m，精度为 1 g。株间土壤蒸发采用两台自制株间土壤蒸发仪，该仪器由外桶（直径 200 mm、高 300 mm、壁厚 2 mm，不封底），内桶（内径 160 mm、高 250 mm、壁厚 2 mm，底部为内衬钢丝网底座）两部分组成，材料为聚氯乙烯(PVC)管，每天早晚（10:00 AM; 18:00 PM）两次用精度为 1 g 的电子天平称质量，不下雨时，1 d 测量一次，每 7 d 为测桶换取一次原状土，降水与灌水后，重新为测桶换取原状土。微型蒸渗仪与株间土壤蒸发仪放置位置如图 2 所示。



(a) 自制株间土壤蒸发仪 (b) 微型蒸渗仪

图 2 试验区布置图

Fig.2 Layout of the test area

表 1 小黑麦不同生育阶段与计划湿润层划分

Tab.1 Division of different growth stages and planned wet layer of triticale

生育阶段	苗期-越冬	越冬-返青	返青-拔节	拔节-抽穗	抽穗-刈割
起止日期	20211014—20211105	20211106—20220325	20220326—20220425	20220426—20220525	20220526—20220616
计划湿润层/cm	10	30	30	30	30

表 2 燕麦不同生育阶段与计划湿润层划分

Tab.2 Division of different growth stages and planned wet layer of oat

生育阶段	苗期-分蘖	分蘖-拔节	拔节-抽穗	抽穗-刈割
起止日期	20220621—20220630	20220701—20220722	20220723—20220826	20220827—20220926
计划湿润层/cm	10	30	30	30

1.3.3 土壤墒情

土壤含水率由 LYS80 微型蒸渗仪实时测定，仪器内部每隔 10 cm 设有土壤水分、温度传感器。

1.3.4 生长指标

叶面积指数 (LAI)：采用 LP-80 植物冠层分析仪，对各生育期小黑麦进行随机采样，每个重复 30 次；叶绿素 (SPAD)：采用 ST-S02 叶绿素测定仪，同样对各生育期小黑麦进行随机采样，每个重复 30 次。人工手持仪器测样，小黑麦生育期内生育前期间隔 15 d，中后期间隔 4~7 d；燕麦全生育期间隔 4~7 d。

1.3.5 FAO-56 单作物系数法计算蒸散量

单作物系数法计算作物实际蒸散量的公式来自《FAO Irrigation and Drainage Paper NO.56 Crop Evapotranspiration》<sup>[15]</sup>：

$$ET = K_c \times ET_0 \times K_s, \quad (1)$$

式中：ET 为单作物系数法计算的作物蒸散量(mm/d)；ET<sub>0</sub> 为参考作物蒸散量 (mm/d)；K<sub>c</sub> 为作物系数；

K<sub>s</sub> 为土壤水分胁迫系数，本文为充分灌溉，故 K<sub>s</sub> 取值为 1。参考作物蒸散量 (ET<sub>0</sub>) 采用 Penman-Monteith 公式计算：

$$ET_0 = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}, \quad (2)$$

式中：Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率 (kPa/°C)；R<sub>n</sub> 为净辐射 (W/m<sup>2</sup>)；G 为土壤热通量，(W/m<sup>2</sup>)；u<sub>2</sub> 为 2 m 高风速 (m/s)；T 为日平均温度 (°C)；e<sub>s</sub> 为饱和蒸汽压 (kPa)；e<sub>a</sub> 为实际蒸汽压 (kPa)；γ 为湿度计常数 (kPa/°C)。

小黑麦、燕麦生育初期作物系数，生长中期和后期作物系数修正采用 FAO-56 推荐半湿润气候区的作物在管理水平较高、无水分胁迫的条件下 (RH<sub>min</sub>≈45%，u<sub>2</sub>=2 m/s) 禾本科谷类作物冬小麦、燕麦作物系数结合 FAO-56 相应公式进行修正<sup>[8,13-15]</sup>，具体公式不再赘述，关键计算参数如表 3、表 4 所示，结果见表 5。

表 3 小黑麦生育期气象与作物基本信息

Tab.3 Basic information of weather and crops during triticale growth period

作物生长阶段	初始生长期		快速生长期	生育中期	生育后期
	苗期-越冬	越冬-返青	返青-拔节	拔节-抽穗	抽穗-刈割
起止时间	20211014—20211105	20211106—20220325	20220326—20220425	20220426—20220525	20220526—20220616
时间/d	23	140	31	30	22
2 m 高风速 U <sub>2</sub> /(m·s <sup>-1</sup> )	1.64	1.31	2.49	1.56	0.41
最小相对湿度 RH <sub>min</sub> /%	16.88	14.53	10.84	24.35	27.18
最大株高/m	0.11	0.38	0.49	0.93	1.32
降水量/mm	2.4	0	2.8	62.3	35.2

表 4 燕麦生育期气象与作物基本信息

Tab.4 Basic meteorological and crop information of oat growth period

作物生长阶段 生育期	初始生长期	快速生长期	生育中期	生育后期
	苗期-分蘖	分蘖-拔节	拔节-抽穗	抽穗-刈割
起止时间	20220621—20220630	20220701—20220722	20220723—20220826	20220827—20220926
时间/d	10	22	35	31
2 m 高风速 $U_2/(m \cdot s^{-1})$	0.72	0.54	0.32	0.35
最小相对湿度 $RH_{min}/\%$	32.61	21.85	27.96	33.47
最大株高/m	0.09	0.28	0.91	1.25
降水量/mm	70.52	21.79	49.63	186.8

表 5 FAO-56 双季饲草各生育阶段作物系数修正值

Tab.5 FAO-56 Revised crop coefficients at different growth stages of forage in two seasons

作物系数	$K_{c\ ini}$	$K_{c\ mid}$	$K_{c\ end}$
小黑麦	0.45	1.22	0.49
燕麦	0.94	1.16	0.31

注  $K_{c\ ini}$ 、 $K_{c\ mid}$ 、 $K_{c\ end}$  分别代表初始生长期、生长中期、生长后期的作物系数。

### 1.3.6 实测作物系数

本研究以微型蒸渗仪实测蒸散量与参考作物腾发量的比值确定无水分胁迫条件下实际作物系数。具体计算方法如下：

$$K_c = \frac{ET_C}{ET_0} \quad (3)$$

式中： $ET_C$  作物实际腾发量 (mm)； $ET_0$  为参照作物腾发量 (mm)； $K_c$  表示作物系数。

### 1.4 数据统计与分析

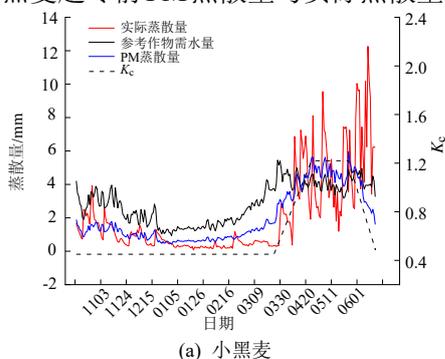
通过 Excel 对数据进行初步整理，通过 Origin 对数据进行回归分析并作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 实测蒸散量与 PM 蒸散量对比分析

基于微型蒸渗仪实测蒸散量对 PM 蒸散量进行分析。如图 3 所示，整体分析采用表 5 修正的单作物系数计算的小黑麦、燕麦全生育期蒸散量与微型蒸渗仪实测蒸散量变化趋势较为一致，波峰、波谷出现位置基本类似，但精度不高。

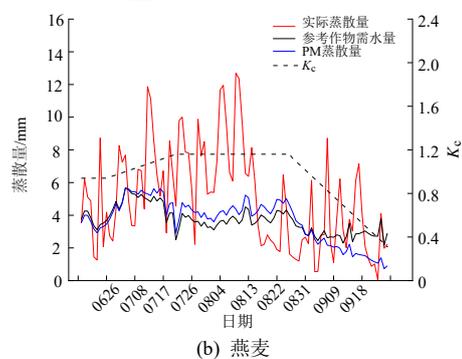
小黑麦越冬前 PM 蒸散量与实际蒸散量拟合较好；



(a) 小黑麦

越冬开始 PM 蒸散量要明显高于实测蒸散量，推测此时蒸散主要集中在土壤蒸发，且由于拉萨河谷海拔高伴随的持续低温，导致小黑麦叶片等光合呼吸器官均已萎缩，裸土面积更大，所以实际蒸散更小，PM 法作为一种大叶模型，仅从气象与土壤含水率进行修正参数，所以计算值高于实际值；返青后蒸散量短时间拟合较好，但中后期作物生长较快光合呼吸更加剧烈，且拉萨河谷日间气候多变，辐射加强，夜间温度较低，所以该段实际蒸散波动较大；生育后期为满足农机刈割和运输需要，灌溉次数减少，作物系数亦随之降低，然而由于雨季来临，实际土壤较为湿润，所以实际蒸散量大于 PM 拟合蒸散量。

燕麦为双季饲草第二季饲草，苗期-拔节期 PM 蒸散量波动区间在 3~6 mm/d，实际蒸散量 2~8 mm/d，分析由于播期向后推迟至 6 月末进入雨季初期，此时日间平均温度、净辐射和相对湿度相较 6 月中上旬均由较大上升，且这种趋势持续增加，导致此时土壤蒸发较传统单季燕麦种植增大，而土壤蒸发受气象因素影响较大，所以波动较大；生育中期和后期作物土壤蒸发相对减少但作物蒸腾加剧，且此时正值拉萨雨季，气象变化剧烈，极端天气较多，太阳辐射为一年中最强，但 PM 法此时的计算仅依靠株高作为指标对作物系数进行校核，参数较为单一，SPAD、LAI 等作物生理指标均未考虑，所以作物生长中期和后期 PM 法蒸散量未能拟合实际蒸散量的实时变化，实际蒸散量大于 PM 拟合蒸散量。



(b) 燕麦

图 3 实测蒸散量与 PM 蒸散量对比图

Fig.3 Comparison of measured evapotranspiration and PM evapotranspiration of triticale (left) and oat (right)

### 2.2 实测作物系数与叶面积指数的关系

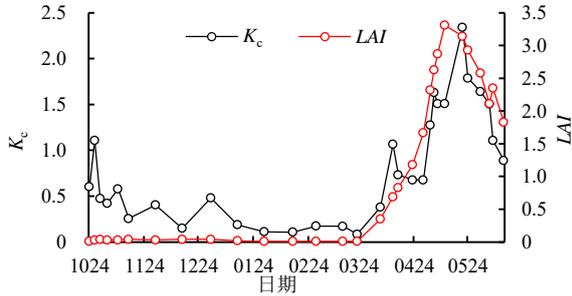
#### 2.2.1 小黑麦

如图 4 所示，实测作物系数  $K_c$  整体变化趋势与

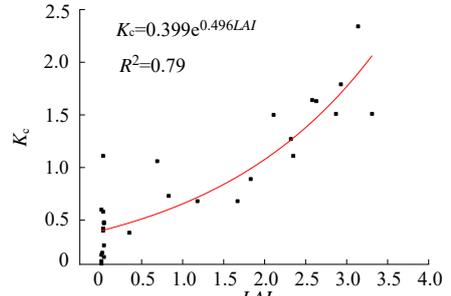
$LAI$  变化趋势相似， $K_c$  与  $LAI$  相关系数为 0.90 ( $P < 0.01$ )，相关性达到显著水平。图 4 (b) 中指数方程表明，小黑麦生育期内  $LAI$  与  $K_c$  相关性良好，叶面积指数

是影响小黑麦蒸腾、蒸散的重要因子，整体分析  $K_c$  与  $LAI$  呈正相关关系，即  $K_c$  随  $LAI$  增大而增大，当  $LAI$  较小时增速较缓； $LAI$  较大时增速较快。 $LAI$  较小时，土壤蒸发较为强烈，但由于小黑麦在苗期和越冬

冬期外界气温较低，降水较少，基本处于休眠状态，所以  $K_c$  较小；当  $LAI$  较大时，叶片对裸土的遮盖面积较大，此时无效的土壤蒸发相对较少，作物蒸腾相对较大，光合呼吸剧烈，所以  $K_c$  较大。



(a) 小黑麦  $K_c$  与  $LAI$  的变化过程



(b) 小黑麦  $K_c$  与  $LAI$  的函数关系

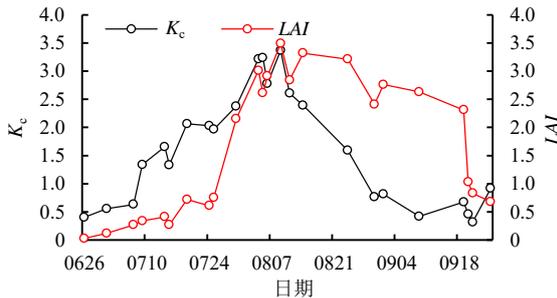
图 4 小黑麦实测  $K_c$  与  $LAI$  关系图

Fig.4 Relationship between measured  $K_c$  and  $LAI$  of triticale

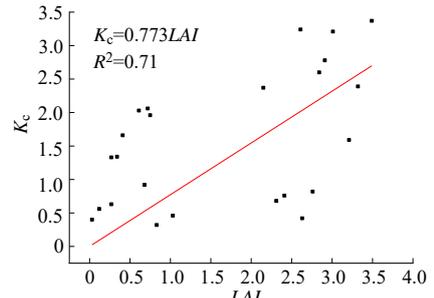
### 2.2.2 燕麦

如图 5 所示， $K_c$  整体变化趋势与  $LAI$  变化趋势相似， $K_c$  与  $LAI$  相关系数为 0.525 ( $P < 0.01$ )，相关性达到显著水平。图 5 (b) 中线性方程表明，燕麦生育期内  $LAI$  与  $K_c$  有较高相关性，呈正相关关系。燕麦  $K_c$  与  $LAI$  的变化趋势基本与小黑麦相同，但由于生长初期小黑麦处于冬季前后，而燕麦正值夏季，

导致燕麦生长前期的土壤蒸发远高于小黑麦，故燕麦  $K_c$  在生长初期明显高于  $LAI$ ；生长中期和后期由于雨季导致大气中云层较厚，同时伴随着气象条件多变和极端气象，生长中后期蒸散发波动较大，故  $K_c$  在中期和后期整体低于  $LAI$ ；拟合方程也由于上述原因为线性函数，需要在后期的研究中结合云层高度，云量和风速等气象因素继续研究。



(a) 燕麦  $K_c$  与  $LAI$  的变化过程



(b) 燕麦  $K_c$  与  $LAI$  的函数关系

图 5 燕麦实测  $K_c$  与  $LAI$  关系图

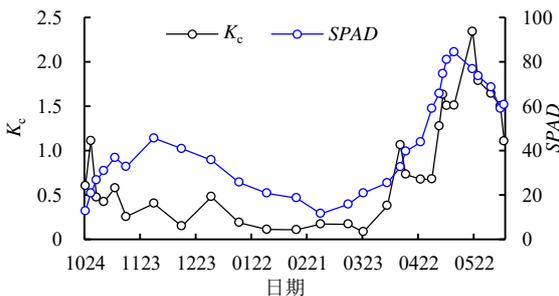
Fig.5 Relationship between measured  $K_c$  and  $LAI$  of oat

### 2.3 实测作物系数与叶绿素的关系

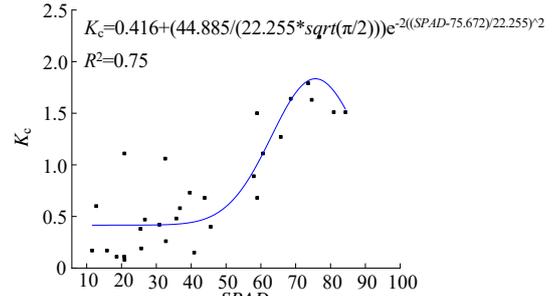
#### 2.3.1 小黑麦

如图 6 所示， $K_c$  整体变化趋势与  $SPAD$  变化趋势相似，波峰、波谷出现位置基本一致， $K_c$  与  $SPAD$  相关系数为 0.84 ( $P < 0.01$ )，相关性达到显著水平。图 6 (b) 中指数方程表明，小黑麦生育期内  $SPAD$  与  $K_c$  相关性良好， $SPAD$  是影响小黑麦蒸腾、蒸散的重

要因子。整体分析作物系数随叶  $SPAD$  增大而增大，但超过一定阈值时， $K_c$  随其增大而减小，这与实际情况相符。随着小黑麦旺盛生长，对周围环境开始具有调节作用，土壤蒸发减少明显；当光照过强、空气干燥，小黑麦可以通过控制部分气孔的关闭进入短暂“午睡”适应气象因子变化，达到调控作物体内水分平衡之目的，所以  $K_c$  随之减少。



(a) 小黑麦  $K_c$  与  $SPAD$  的变化过程



(b) 小黑麦  $K_c$  与  $SPAD$  的函数关系

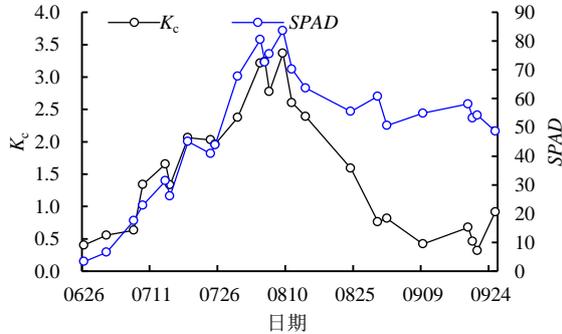
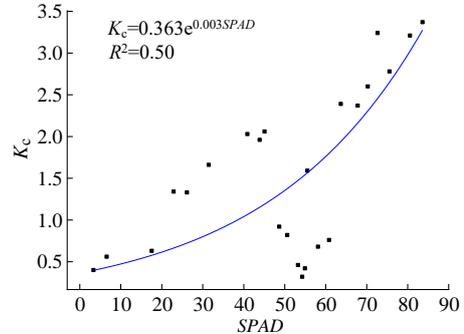
图 6 小黑麦实测  $K_c$  与  $SPAD$  关系图

Fig.6 Relationship between measured  $K_c$  and  $SPAD$  of triticale

## 2.3.2 燕麦

如图 7 所示,  $K_c$  整体变化趋势与  $SPAD$  变化趋势相似, 波峰位置基本一致,  $K_c$  与  $SPAD$  相关系数为 0.64 ( $P < 0.01$ ), 相关性达到显著水平。图 7 (b) 中指数方程表明, 燕麦生育期内  $SPAD$  与  $K_c$  模型精度一般, 但整体分析趋势拟合较好, 这可能由于拉萨雨季的到来, 气象变化迅速且时常伴随极端天气, 实际蒸散发

波动剧烈, 需在后期的试验中继续增加  $K_c$  和  $SPAD$  收集样本, 提高拟合精度。指数方程表明, 作物系数与  $SPAD$  成正相关, 在  $SPAD$  为 50-85 区间内增长较快, 分析由于此时拉萨河谷水热条件为一年中最佳, 燕麦光合呼吸强烈, 所以  $K_c$  与  $SPAD$  随  $SPAD$  增大速度较快。

(a) 燕麦  $K_c$  与  $SPAD$  的变化过程(b) 燕麦  $K_c$  与  $SPAD$  的函数关系图 7 燕麦实测作物系数  $K_c$  与  $SPAD$  关系图Fig.7 Relationship between measured  $K_c$  and  $SPAD$  of oat2.4 土壤蒸发 ( $E$ ) 和作物蒸腾 ( $T$ ) 占腾发量 ( $ET$ ) 的比例关系

如表 6、表 7 所示, 从整体分析小黑麦全生育期土壤蒸发占蒸散量的 44.8%。生长初期小黑麦主要蒸散集中在土壤蒸发, 苗期-越冬期, 越冬-返青期土壤蒸发占蒸散量分别为 93.4% 和 94.8%; 随着返青开始, 小黑麦生长旺盛, 蒸散开始向作物腾发转移, 土壤蒸发占蒸散量的 61.8%; 拔节-抽穗期小黑麦营养生长与生殖生长并存, 土壤蒸发约占 22.2%; 抽穗-刈割期, 随着小黑麦生殖生长剧烈, 叶片萎缩, 但此时正值雨季开始, 土壤较为湿润, 土壤蒸发约占 13.8%。与此同时从日间与夜间蒸散量分析, 各生育期夜间蒸散量占比均小于日间蒸散量; 全生育期日间蒸散量为 352.6 mm, 夜间蒸散量为 151.4 mm, 夜间蒸散约占总蒸散的 30%, 所以在拉萨河谷春季至秋季适当发展

夜间喷灌, 有利于降低小黑麦蒸散进而减少灌溉量。

燕麦全生育期土壤蒸发占蒸散量的 48.1%。由于燕麦为第二季作物, 生长初期拉萨河谷日平均温度、辐射等均较高, 且由于雨季来临相对湿度较高, 所以苗期-分蘖期, 分蘖-拔节期土壤蒸发较高分别为 98.9% 和 79.1%; 随着拔节开始, 燕麦生长旺盛, 叶片与茎秆快速发育, 蒸散开始向作物腾发转移, 拔节-穗期土壤蒸发占蒸散量的 31.7%; 抽穗-刈割期, 燕麦形态较为固定, 且试验以收取地上生物量为目的开展, 不考虑穗重等指标, 刈割相对较早, 此时土壤蒸发约占蒸散量的 16.8%。与此同时从日间与夜间蒸散量分析, 各生育期夜间蒸散量占比亦均小于日间蒸散量; 全生育期日间蒸散量为 353.1 mm, 夜间蒸散量为 140.4 mm, 夜间蒸散约占总蒸散的 28.4%, 同样证明了发展夜间喷灌的可行性。

表 6 小黑麦蒸散量、蒸发、蒸腾、日间和夜间蒸散量的变化规律

Tab.6 Changes of evapotranspiration, evaporation, transpiration, day and night evapotranspiration of triticale

处理名称	苗期-越冬	越冬-返青	返青-拔节	拔节-抽穗	抽穗-刈割	全生育期
起止时间	1014—1105	1106—0325	0326—0425	0426—0525	0526—0616	1014—0616
$ET/mm$	40.2	81.0	98.2	134.9	149.7	504.0
$E/mm$	37.6	76.8	60.7	29.9	20.7	225.6
$T/mm$	2.7	4.2	37.6	105.0	129.0	278.4
$E/ET/\%$	93.4	94.8	61.8	22.2	13.8	44.8
$T/ET/\%$	6.6	5.2	38.2	77.8	86.2	55.2
日间 $ET/mm$	32.0	51.3	69.7	97.7	101.9	352.6
夜间 $ET/mm$	8.2	29.7	28.5	37.2	47.8	151.4
日间 $ET/ET/\%$	79.5	63.4	71.0	72.4	68.1	70.0
夜间 $ET/ET/\%$	20.5	36.6	29.0	27.6	31.9	30.0

注  $ET$  为微型蒸渗仪实测蒸散量;  $E$  为株间蒸发仪实测株间蒸发量;  $T$  为叶面腾发量, 下同。

表 7 燕麦蒸散量、蒸发、蒸腾、日间和夜间蒸散量变化规律表

Tab.7 Changes of evapotranspiration, evaporation, transpiration, day and night evapotranspiration of oats

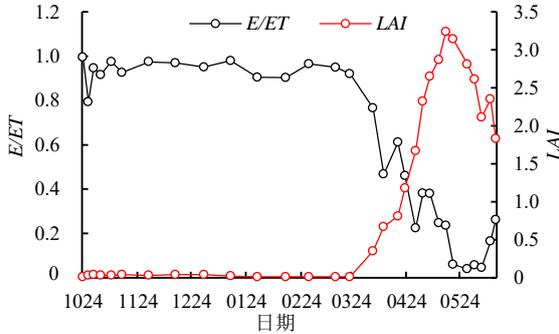
处理名称 起止时间	苗期-分蘖 0621—0630	分蘖-拔节 0701—0722	拔节-抽穗 0723—0826	抽穗-刈割 0827—0926	全生育期 0621—0926
ET/mm	40.2	141.7	222.3	89.3	493.5
E/mm	39.7	112.0	70.4	15.0	237.2
T/mm	0.4	29.7	151.9	74.3	256.3
E/ET/%	98.9	79.1	31.7	16.8	48.1
T/ET/%	1.1	20.9	68.3	83.2	51.9
日间 ET/mm	28.4	102.9	157.4	64.5	353.1
夜间 ET/mm	11.8	38.8	64.9	24.9	140.4
日间 E/ET/%	70.6	72.6	70.8	72.1	71.6
夜间 E/ET/%	29.4	27.4	29.2	27.9	28.4

2.5 土壤蒸发 (E) 分摊比例 (E/ET) 与 LAI 的关系

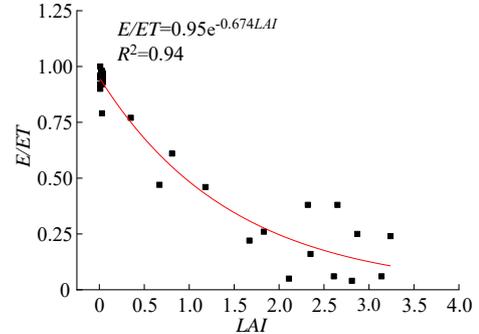
2.5.1 小黑麦

如图 8 所示, E/ET 整体变化趋势与 LAI 变化趋势相反, 图形上下较为对称, E/ET 与 LAI 相关系数为-0.94 (P<0.01), 相关性达到显著水平。图 8 (b) 指数方程表明, 小黑麦生育期内 E/ET 与 LAI 相关性良好, LAI 是影响小黑麦株间蒸发的重要因子。整体

分析 E/ET 随叶面积指数增大而减小, 当 LAI 较小时 E/ET 随 LAI 增大, 下降速度较快; 而当 LAI 较大时 E/ET 随 LAI 增大, 下降速度放缓, 这与实际情况相符, 当 LAI 较小时, 土壤蒸发较强; LAI 来到中后段, 虽然土壤蒸发较小但作物蒸腾明显加剧, 所以土壤蒸发占蒸散发比例较低。



(a) 小黑麦 E/ET 与 LAI 的变化过程



(b) 小黑麦 E/ET 与 LAI 的函数关系

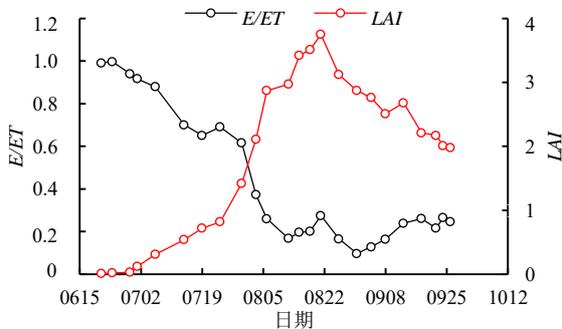
图 8 小黑麦株间蒸发 (E) 分摊比例 (E/ET) 与 LAI 关系图

Fig.8 Relationship between evaporation (E) allocation ratio (E/ET) and LAI among triticale plants

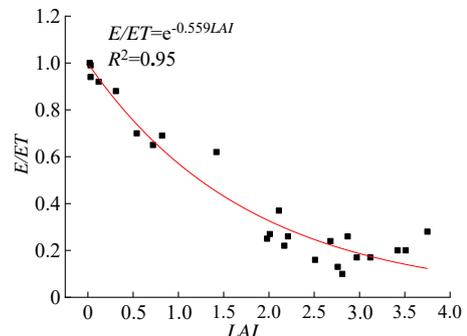
2.5.2 燕麦

如图 9 所示, E/ET 整体变化趋势与 LAI 变化趋势相反, 图形上下较为对称, E/ET 与 LAI 相关系数为-0.94 (P<0.01), 相关性达到显著水平。如图 9 (b) 指数方程表明, 燕麦生育期内 E/ET 与 LAI 相关性良好,

LAI 是影响燕麦株间蒸发的重要因子。整体分析 E/ET 随叶面积指数增大而减小, LAI 较小时, E/ET 随 LAI 增大, 下降速度较快; 而当 LAI 较大时, E/ET 随 LAI 增大, 下降速度放缓。



(a) 燕麦 E/ET 与 LAI 的变化过程



(b) 燕麦 E/ET 与 LAI 的函数关系

图 9 燕麦株间蒸发 (E) 分摊比例 (E/ET) 与 LAI 关系图

Fig.9 Relationship between evaporation (E) proportion (E/ET) and LAI among oat plants

2.6 土壤蒸发 (E) 分摊比例 (E/ET) 与 SPAD 的关系

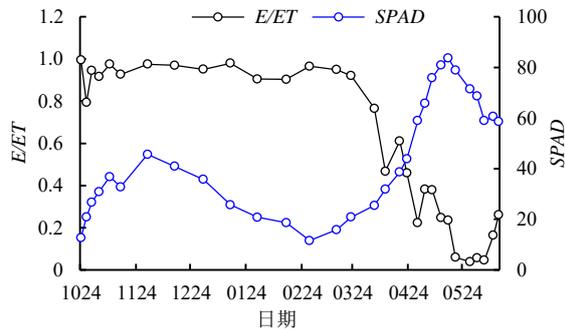
2.6.1 小黑麦

如图 10 所示, E/ET 变化趋势与 SPAD 变化趋势

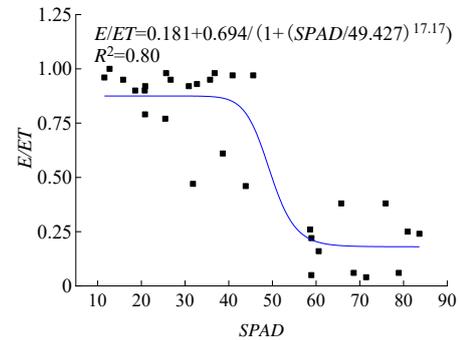
相反, 波峰、波谷基本相对, E/ET 与 SPAD 相关系数为-0.86 (P<0.01), 相关性达到显著水平。如图 10 (b) 指数方程表明, 小黑麦生育期内 E/ET 与 SPAD

相关性良好,  $SPAD$  亦是影响小黑麦株间蒸发的重要因子。整体分析  $E/ET$  随  $SPAD$  增大而减小, 当  $SPAD$  在 10~40 区间时,  $E/ET$  随  $SPAD$  增大, 下降缓慢; 在 40~60 区间, 下降较快, 在 60~80 区间下降变缓, 分

析原因在于小黑麦生育期较长, 土壤蒸发较大, 生长中期开始土壤蒸发较缓, 后期随着  $SPAD$  减少小黑麦叶片枯萎, 所以  $E/ET$  略有上升。



(a) 小黑麦  $E/ET$  与  $SPAD$  的变化过程



(b) 小黑麦  $E/ET$  与  $SPAD$  的函数关系

图 10 小黑麦株间蒸发 ( $E$ ) 分摊比例 ( $E/ET$ ) 与  $SPAD$  关系图

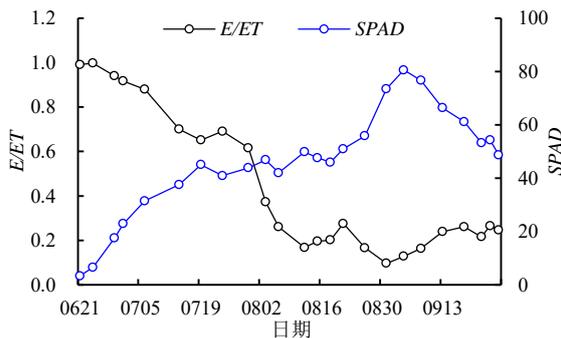
Fig.10 Relationship between evaporation ( $E$ ) proportion ( $E/ET$ ) and  $SPAD$  among triticale plants

### 2.6.2 燕麦

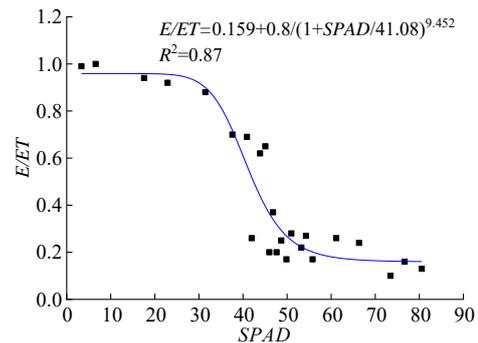
如图 11 所示,  $E/ET$  变化趋势与  $SPAD$  变化趋势相反, 波峰、波谷基本相对,  $E/ET$  与  $SPAD$  相关系数为 -0.86 ( $P < 0.01$ ), 呈负相关, 相关性达到显著水平。

如图 11 (b) 指数方程表明, 燕麦生育期内  $E/ET$  与

$SPAD$  相关性良好,  $SPAD$  亦是影响燕麦株间蒸发的重要因子。整体分析  $E/ET$  随  $SPAD$  增大而减小, 当  $SPAD$  在 10~40 区间时,  $E/ET$  随  $SPAD$  增大, 下降缓慢; 在 40~60 区间, 下降较快, 在 60~80 区间下降变缓。



(a) 燕麦  $E/ET$  与  $SPAD$  的变化过程



(b) 燕麦  $E/ET$  与  $SPAD$  的函数关系

图 11 燕麦株间蒸发 ( $E$ ) 分摊比例 ( $E/ET$ ) 与  $SPAD$  关系图

Fig.11 Relationship between evaporation ( $E$ ) proportion ( $E/ET$ ) and  $SPAD$  among oat plants

## 3 讨论

随着秋播小黑麦、夏播燕麦的双季饲草复种模式的不断推广, 如何充分利用拉萨河谷水热资源, 提高水分利用效率, 发展高效灌溉, 实现人工饲草节水增产是现阶段主要问题。蒸散发是确定作物需水量进而指导灌溉的关键指标, 然而由于 FAO-56 推荐的单作物系数公式仅对灌水事件和作物株高的变化进行调参, 控制计算蒸散发精度的参数较为单一; 且由于拉萨河谷独特的高海拔、高辐射、气象多变和雨季集中的地理特点, 蒸散精度较低, 这与汤鹏程<sup>[13]</sup>基于微型蒸渗仪和 PM 方程对比, 得出 PM 法变化趋势与实测蒸散相符, 但生育前期 PM 法拟合蒸散量较实测蒸散量偏小, 生育中后期实测蒸散量数值高于 PM 蒸散量, 与本研究结果一致。在此基础上, 本研究发现拉萨河谷双季饲草实测单作物系数与  $LAI$ 、 $SPAD$  相关性显

著且呈现线性与非线性的函数关系, 这与贾琼<sup>[16]</sup>在陕北高海拔、日照较充足的丘陵地区研究结果较为一致, 但由于地理环境因素导致构建的函数关系略有差异。冯禹<sup>[17]</sup>、姚婷月等<sup>[18]</sup>将作物指标结合到 FAO-56 双作物系数法中土壤蒸发的求解将计算精度提升 15%~21%, 但双作物系数计算较为复杂, 需通过水量平衡法对逐日作物需水进行计算多用于农田尺度水平衡分析, 对于拉萨河谷常规喷灌双季饲草灌溉规划和管理, 单作物系数法较为适用。与此同时, 本研究发现小黑麦全生育期土壤蒸发占蒸散量的 44.8%, 燕麦全生育期土壤蒸发占蒸散量的 48.1%, 土壤蒸发在双季饲草种植过程中所占比例超过 44%, 占比较高, 减少无效的株间土壤蒸发以提高灌溉水利用效率节水潜力较大。目前从  $LAI$ 、 $SPAD$  角度模拟土壤蒸发的相关研究较少, 拉萨河谷处于高海拔地区辐射强烈, 土壤蒸发在双季饲草作物生育期内占相对内地比较

高且由于特殊的地理环境, *SPAD* 和叶片面积对于辐射的相应更为敏感, 随着双季饲草叶片的变化, 土壤蒸发随之改变, 本研究中土壤分摊比例亦与 *LAI*、*SPAD* 相关性显著且呈现线性与非线性的函数关系, 这与高鹭等<sup>[19]</sup>、王健等<sup>[20-21]</sup>所得规律相近证明这种函数关系并不受地域限制是一种客观规律。

综上, 本研究系统分析了双季饲草实测作物系数与作物指标及土壤分摊比例与作物指标的相关性与函数关系; 初步证明了在 *PM* 单作物系数法基础上添加 *LAI*、*SPAD* 以修正拉萨河谷蒸散发的可能性; 且通过回归建模, 证明可以通过 *LAI*、*SPAD* 直接模拟土壤蒸发全过程, 进而在未来耦合气象等因素可以模拟蒸散全过程。但本文对结合作物指标优化单作物系数法、结合蒸散相关模型优化蒸散计算精度未深入研究, 仅初探喷灌条件下单作物系数优化方向和从土壤蒸发角度开发针对拉萨河谷喷灌蒸散发模型的可能性, 在后期的研究中需要加以深入研究。

## 4 结 论

1) 基于 FAO-56 单作物系数法修正得到, 小黑麦作物系数为:  $K_{c\text{ ini}}=0.45$ ,  $K_{c\text{ mid}}=1.22$ ,  $K_{c\text{ end}}=0.49$ ; 燕麦作物系数为:  $K_{c\text{ ini}}=0.94$ ,  $K_{c\text{ mid}}=1.16$ ,  $K_{c\text{ end}}=0.31$ 。

2) 土壤蒸发在双季饲草种植过程中占蒸散量的比例超过 44%, 减少土壤蒸发以提高水分利用效率潜力较大。

3) 双季饲草实测作物系数与叶面积指数、叶绿素相关性显著呈线性或非线性函数关系。证明了在单作物系数法基础上添加作物指标以修正拉萨河谷蒸散的可能性。

4) 双季饲草土壤蒸发占蒸散量比例与叶面积指数、叶绿素相关性显著呈非线性函数关系。证明了在拉萨河谷可以通过构建数学模型使作物指标能直接模拟作物土壤蒸发、间接模拟蒸散发全过程。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

## 参考文献:

- 尚占环, 姬秋梅, 多吉顿珠, 等. 西藏“一江两河”农区草业发展探讨[J]. 草业科学, 2009, 26(8): 141-146.  
SHANG Zhanhuan, JI Qiumei, DUOJI Dunzhu, et al. Discussion on the development of crop-grass system in the “Three Rivers” region of Tibet[J]. Pratacultural Science, 2009, 26(8): 141-146.
- 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏气候[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- 唐小萍, 罗礼洪, 卓玛, 等. 气候变化对西藏雅鲁藏布江中游地区潜在蒸散量的影响分析[J]. 高原山地气象研究, 2011, 31(3): 49-53.  
TANG Xiaoping, LUO Lihong, ZHUO Ma, et al. Impact analysis of climate change on potential evapotranspiration over midstream of Yarlung Zangbo River in Tibetan Plateau[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2011, 31(3): 49-53.
- 金涛. 西藏中部农区冬春季小黑麦饲草生产技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- JIN Tao. Study on cultivation technique of triticale as fodder in winter-spring season in central of Tibet[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.
- 赵桂琴, 师尚礼. 青藏高原饲用燕麦研究与生产现状、存在问题与对策[J]. 草业科学, 2004, 21(11): 17-21.  
ZHAO Guiqin, SHI Shangli. The current situation of oat research and production, problems and strategy in Tibetan Plateau[J]. Pratacultural Science, 2004, 21(11): 17-21.
- 耿耘, 刘浩, 李云峰, 等. 麦后移栽棉蒸发蒸腾规律和作物系数[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(7): 24-34.  
GENG Yun, LIU Hao, LI Yunfeng, et al. Evapotranspiration and crop coefficient of transplanted cotton after wheat harvest[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(7): 24-34.
- GARCIA M, RAES D, JACOBSEN S E. Evapotranspiration analysis and irrigation requirements of quinoa (*Chenopodium quinoa*) in the Bolivian Highlands[J]. Agricultural Water Management, 2003, 60(2): 119-134.
- 赵世昌, 徐冰, 魏占民, 等. 西藏高寒牧区燕麦作物系数的推求及验证[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(2): 56-60.  
ZHAO Shichang, XU Bing, WEI Zhanmin, et al. Ascertainment and verification of crop coefficient for oat in alpine pasture of Tibet[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(2): 56-60.
- 罗红英, 崔远来, 赵树君. 西藏青稞灌溉定额的空间分布规律[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 116-122.  
LUO Hongying, CUI Yuanlai, ZHAO Shujun. Spatial distribution of irrigation water quota of highland barley in Tibet region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(10): 116-122.
- 徐冰, 汤鹏程, 郭克贞, 等. 西藏高寒牧区不同  $ET_0$  计算方法适用性[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(6): 127-130.  
XU Bing, TANG Pengcheng, GUO Kezhen, et al. Applicability of  $ET_0$  estimating methods in alpine pastoral areas[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(6): 127-130.
- 张紫森, 汤鹏程, 徐冰, 等. 喷灌与畦灌对拉萨河谷农田小气候和蒸散量的影响分析[J]. 节水灌溉, 2022(8): 96-101.  
ZHANG Zisen, TANG Pengcheng, XU Bing, et al. Effects of sprinkler irrigation and border irrigation on microclimate and evapotranspiration in Lhasa valley[J]. Water Saving Irrigation, 2022(8): 96-101.
- 汤鹏程, 徐冰, 高占义, 等. 西藏高海拔地区气象数据缺失条件下的  $ET_0$  计算研究[J]. 水利学报, 2017, 48(9): 1 055-1 063.  
TANG Pengcheng, XU Bing, GAO Zhanyi, et al. Simplified limited data  $ET_0$  equation adapted for high-elevation locations in Tibet[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(9): 1 055-1 063.
- 汤鹏程. 西藏高海拔地区  $ET_0$  计算公式试验率定与青稞作物系数推求[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.  
TANG Pengcheng. Experimental calibration of reference evapotranspiration and determination of crop coefficient in high-elevation areas of Tibet[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019.
- 赵世昌. 西藏高寒牧区人工牧草需水规律及灌溉管理决策研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.  
ZHAO Shichang. Study on water requirement regulation and irrigation management decision of artificial grass in Tibet alpine pastoral areas[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013.
- ALLEN R G, PEREIRAL L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.
- 贾琼. 黄土高原山地苹果园叶面积指数与蒸散和作物系数的关系[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.  
JIA Qiong. Relationship between leaf area index and evapotranspiration

- and crop coefficient of hilly apple orchard in the Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021.
- [17] 冯禹, 崔宁博, 龚道枝, 等. 基于叶面积指数改进双作物系数法估算旱作玉米蒸散[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 90-98.  
FENG Yu, CUI Ningbo, GONG Daozhi, et al. Estimating rainfed spring maize evapotranspiration using modified dual crop coefficient approach based on leaf area index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(9): 90-98.
- [18] 姚婷月, 王怡宁, 石磊韬, 等. 利用叶面积指数和气象因子修正双作物系数估算夏玉米蒸散量[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(2): 1-8.  
YAO Tingyue, WANG Yining, SHI Leitao, et al. Modifying the dual crop coefficients with leaf area index and meteorological factors to improve the estimated evapotranspiration from maize fields[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(2): 1-8.
- [19] 高鹭, 胡春胜, 陈素英, 等. 喷灌条件下冬小麦田间蒸发的试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(12): 183-185.  
GAO Lu, HU Chunsheng, CHEN Suying, et al. Experimental study on soil evaporation in winter wheat field under sprinkling irrigation condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(12): 183-185.
- [20] 王健, 蔡焕杰, 陈凤, 等. 夏玉米田蒸发蒸腾量与棵间蒸发的试验研究[J]. 水利学报, 2004, 35(11): 108-113.  
WANG Jian, CAI Huanjie, CHEN Feng, et al. Experimental study on evapotranspiration and soil evaporation in summer maize field[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(11): 108-113.
- [21] 王健, 蔡焕杰, 康燕霞, 等. 夏玉米棵间土面蒸发与蒸发蒸腾比例研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 17-22.  
WANG Jian, CAI Huanjie, KANG Yanxia, et al. Ratio of soil evaporation to the evapotranspiration for summer maize field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(4): 17-22.

## Relationship between crop coefficient and soil evaporation in forage grassland under sprinkler irrigation in Lhasa Valley

XU Bing<sup>1,2</sup>, LI Xiang<sup>3</sup>, ZHANG Zisen<sup>4\*</sup>, REN Jie<sup>1,2</sup>, LI Zekun<sup>1,2</sup>

(1. Yinshanbeilu Grassland Eco-hydrology National Observation and Research Station, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Institute of Water Resources for Pastoral Area, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Hohhot 010020, China; 3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 4. Baotou Reservoir Management Center, Baotou 014030, China)

**Abstract:** 【Objective】 Crop coefficient and soil evaporation are two important parameters for calculating evapotranspiration in terrestrial ecosystems but they are dependent on many factors. In this paper, we investigate their correlation for a forage grassland. 【Method】 The experiment was conducted in a forage grassland (Triticale and Oat) irrigated by sprinkler irrigation at the Lhasa Valley. Evapotranspiration ( $ET$ ) was measured from a micro-lysimeter and the potential evapotranspiration was calculated using the PM method. The ratio of the former to the latter was the ground-truth crop coefficient ( $K_c$ ). This crop coefficient was used to evaluate the single-crop coefficient estimated using the modified PM method. We also measured the inter-plant soil evaporation ( $E$ ) using an in-house instrument to estimate the  $E/ET$  ratio. The relationship between  $K_c$  and  $E/ET$ , as well as their dependence on leaf area index ( $LAI$ ) and  $SPAD$  were established. 【Result】 Using the correction method recommended by FAO-56, the crop coefficient of Triticale and Oat in the Lhasa valley at initial, middle and end of their growth stage was  $K_{c\ ini}=0.45$ ,  $K_{c\ mid}=1.22$  and  $K_{c\ end}=0.49$  for the Triticale, and  $K_{c\ ini}=0.94$ ,  $K_{c\ mid}=1.16$  and  $K_{c\ end}=0.31$  for the Oat. For the Triticale, soil evaporation accounted for 44.8% of the evapotranspiration during the whole growth, and 93.4%, 94.8%, 61.8%, 22.2% and 13.8% during the seedling-overwintering, overwintering-replanting, replanting-jointing, jointing-heading and heading-mowing stage, respectively. For the Oat, soil evaporation accounted for 98.9%, 79.1%, 31.7% and 16.8% of the evapotranspiration from seedling to tillering, tiller to jointing, jointing to heading and heading to mowing stages, respectively. Overall, soil evaporation accounted for more than 44% of the evapotranspiration and it is hence potential to improve water use efficiency by reducing soil respiration. The measured crop coefficient and the ratio of soil evaporation to evapotranspiration were significantly correlated with  $LAI$  and  $SPAD$  linearly or nonlinearly. 【Conclusion】 The measured crop coefficient, ratio of soil evaporation to evapotranspiration of the two-season forage grassland are significantly correlated to  $LAI$  and  $SPAD$ . Adding a crop indicator to the single crop coefficient can improve the accuracy of the calculated evapotranspiration. Through mathematical models, the crop indicators can simulate evapotranspiration.

**Key words:** Lhasa Valley; sprinkler irrigation; two-season forage grass; crop coefficient; soil evaporation

责任编辑: 赵宇龙