

青稞蒸散组分研究进展

谭大明¹, 陈吉龙², 高雪³, 侯亚红³, 杨素涛³, 秦基伟³, 索朗措姆³

(1. 西藏自治区农牧科学院, 西藏拉萨 850032; 2. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆北碚 400714; 3. 西藏自治区农牧科学院农业资源与环境研究所, 西藏拉萨 850032)

摘要: 青稞 (*Hordeum vulgare* L. var. *nudum*) 作为青藏高原特色作物, 其蒸散过程对水分利用效率与产量形成至关重要。综述了青稞蒸散组分的研究进展, 涵盖了蒸散的概念、研究方法, 重点阐述了青稞蒸散各组分(土壤蒸发和作物蒸腾)的影响因素及定量研究成果, 讨论了当前研究存在的问题与未来发展方向, 旨在为深入了解青稞水分利用规律, 优化青稞种植灌溉管理及高原节水农业提供理论支持。

关键词: 青稞; 蒸散组分; 模型; 冠层截留; 遥感; 环境控制

中图分类号: Q949.71⁺4.2

文献标识码: A

Research Progress on Evapotranspiration Components of Highland Barley

TAN Daming¹, CHEN Jilong², GAO Xue³, HOU Yahong³, YANG Suta³, QIN Jiwei³, Suolangcuomu³

(1. Academy of Agriculture and Animal Husbandry, Xizang Autonomous Region, Lhasa Xizang 850032, China; 2. Chongqing Institute of Green Energy Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Beibei Chongqing 400714, China; 3. Institute of Agricultural Resources and Environment, College of Agriculture and Animal Husbandry, Xizang Autonomous Region, Lhasa Xizang 850032, China)

Abstract: As a characteristic crop of the Qinghai-Xizang Plateau, the evapotranspiration process of Highland barley (*Hordeum vulgare* L. var. *nudum*) is crucial for water use efficiency and yield formation. This article reviews the research progress on the evapotranspiration components of Highland barley, covering the concept and research methods of evapotranspiration. It focuses on the influencing factors and quantitative research results of each component of barley evapotranspiration (soil evaporation and crop transpiration). At the same time, it discusses the current research problems and future development directions, aiming to provide theoretical support for a deeper understanding of barley water use patterns, optimization the irrigation management of Highland barley planting, and water-saving agriculture in the plateau.

Key words: Highland barley; evapotranspiration components; model; canopy interception; remote sensing; environmental control

1 青稞蒸散概念

青稞蒸散是指青稞种植土壤蒸发和青稞生长过程蒸腾的总和, 它反映了农田向大气散失水分的过程。青稞土壤蒸发是种植青稞地土壤表面水分汽化进入大气的过程; 青稞蒸腾则是青稞生长通过根系吸收土壤水分, 经茎秆传输至叶片, 并通

过气孔以水汽形式散失到大气中的过程。

2 蒸散组分的分离方法与技术

青稞蒸散(ET)包含土壤蒸发(E)和植株蒸腾(T), 两者的精确分离是研究难点。

2.1 同位素示踪法

通过 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 同位素标记, 结合质量平

收稿日期: 2025-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目——西藏高海拔地区黑青稞蒸散组分分配特征及控制机制(42061015)。

作者简介: 谭大明(1973—), 男, 副研究员, 主要从事农作物育种与资源环境相关研究, E-mail: tdmxz@126.com。

通信作者: 高雪(1989—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事土壤肥料、农业资源与环境等方面的研究, E-mail: gaOXue365@163.com。

衡模型,可量化 E/T 比例。研究表明,青稞拔节期 E/T 约为 0.3~0.4,灌浆期降至 0.2 以下^[1]。

2.2 微气象学法(涡度相关法)

基于涡度相关系统(EC)和波文比能量平衡(BREB),通过测量垂直风速与水汽密度的脉动值,直接计算出蒸散通量,能够在较大尺度上准确获取农田蒸散总量,但设备昂贵,对观测条件要求苛刻。在青藏高原的一些青稞种植区,已有研究利用涡度相关系统长期监测青稞田的蒸散情况,根据实测数据显示,青稞生育期日均 ET 为 3.5~4.2 mm/d,其中 T 占比 60%~75%^[2]。

2.3 茎流计法

通过热扩散探针(TDP)监测茎流速率,结合冠层尺度扩展模型,发现青稞蒸腾日变化呈单峰曲线,峰值出现在 13:00—14:00。该方法可连续监测整株植物的蒸腾,对植物损伤较小,在青稞蒸腾研究中应用逐渐增多。

2.4 模型模拟法

过程模型:如 SWAP(Soil—Water—Atmosphere—Plant)模型,综合考虑土壤—植物—大气连续体中水分、热量和溶质的运移过程,能够模拟蒸散各组分。此类模型物理机制明确,但参数较多,需要大量的土壤、气象和作物参数,且参数率定和验证较为复杂。

经验统计模型:依据历史观测数据,建立蒸散与气象因子(如气温、辐射、风速等)之间的统计关系来估算蒸散。该方法简单易行,但通用性较差,外推性有限,仅适用于与建模数据条件相似的区域。

3 蒸散组分的影响因素

3.1 环境因子影响

3.1.1 辐射与温度

辐射是指太阳辐射,是土壤蒸发的能量来源,辐射越强,土壤获得的能量越多,蒸发速率越快。气温升高会加大水汽压差,促进土壤水分向大气扩散,加速蒸发。风速通过影响近地表空气的水汽含量和湍流交换强度,间接影响土壤蒸发,风速较大时,能迅速带走土壤表面水汽,加快蒸发速率。在青藏高原,晴天太阳辐射强,气温日较差大,风速相对较高,这些气象条件共同作用,使得青稞田土壤蒸发在白天较为强烈。研究表明,光合有效辐射(PAR)与气温的协同作用显

著影响蒸腾速率,当 $PAR > 800 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 时,青稞蒸腾速率增加 20%~30%^[3]。

3.1.2 土壤与水分

土壤质地影响土壤孔隙结构和持水能力,进而影响土壤蒸发。砂土孔隙大,通气性好,但保水性差,土壤水分容易散失,蒸发速率相对较快;黏土孔隙小,保水性强,但通气性差,土壤蒸发相对较慢。土壤含水量是决定土壤蒸发的关键因素,当土壤含水量高于田间持水量时,土壤蒸发速率主要受气象条件控制。此外,土壤颜色也会影响土壤对太阳辐射的吸收,颜色深的土壤吸收辐射能力强,土壤温度升高快,蒸发速率相对较高。土壤含水量(SWC)低于田间持水量 60% 时,E 占比上升,T 受气孔导度限制,导致水分利用效率(WUE)下降^[4]。

3.1.3 CO₂ 浓度

模拟实验显示,CO₂ 浓度升高至 550 ppm 可使青稞蒸腾减少 12%,但蒸发无明显变化。

3.1.4 地表覆盖与植被状况

青稞生长前期,地面覆盖度较低,土壤蒸发占比较大。随着青稞生长,植被覆盖度增加,会遮挡太阳辐射,减少到达土壤表面的能量,降低土壤蒸发速率。采用免耕技术播种的存在残茬覆盖同样能减少土壤蒸发。此外,品种差异也有一定影响,耐旱品种(如‘藏青 2000’)的 E/T 比显著高于传统品种,其气孔调节能力更强^[5]。

3.2 作物蒸腾影响因素

3.2.1 气象因素

与土壤蒸发类似,太阳辐射为作物蒸腾提供能量,增强叶片气孔开放程度,促进蒸腾作用。适宜的气温范围内,温度升高会加快作物生理活动,蒸腾速率上升,但过高温度可能导致气孔关闭,抑制蒸腾。水汽压差是影响作物蒸腾的重要驱动力,水汽压差越大,叶片向大气散失水汽的动力越强,蒸腾速率越高。风速对作物蒸腾的影响较为复杂,适度风速可加速叶片表面水汽扩散,促进蒸腾,但风速过大可能导致气孔关闭,降低蒸腾速率。在青稞生长旺盛期,充足的太阳辐射和适宜的温度、水汽压差条件,使得作物蒸腾成为蒸散的主要组成部分。

3.2.2 作物生理特性

青稞品种不同,其叶片形态结构(如叶片厚度、气孔密度、气孔大小等)和生理特征(如气孔

导度、光合速率等)存在差异,从而影响蒸腾速率。一般来说,叶片较厚、气孔密度小的品种,蒸腾速率相对较低,更耐旱。作物生育期对蒸腾影响显著,在青稞苗期,植株较小,叶面积指数低,蒸腾速率较小;随着植株生长,叶面积指数增大,蒸腾速率逐渐上升,在抽穗—灌浆期达到峰值,此时青稞对水分需求旺盛;成熟期后,叶片逐渐衰老,气孔导度下降,蒸腾速率也逐渐降低^[6]。

3.2.3 土壤水分与养分

土壤水分是作物蒸腾的物质基础,土壤水分充足时,作物根系能吸收足够水分供应蒸腾需求;当土壤水分不足时,作物会通过调节气孔导度减少蒸腾失水,以维持体内水分平衡。土壤养分状况也会影响作物蒸腾,氮、磷、钾等大量元素以及铁、锌等微量元素对作物生长发育和生理功能至关重要。例如,氮肥充足可促进青稞叶片生长,增大叶面积指数,提高蒸腾速率。

4 青稞蒸散组分定量研究成果

4.1 土壤蒸发定量研究

早期研究多采用水量平衡法估算土壤蒸发,但该方法无法区分蒸散各组分。近年来,基于微气象学和植物生理学方法的结合,对青稞田土壤蒸发的定量研究更加精确。研究表明,在青稞生长前期,土壤蒸发占蒸散总量的比例较高,可达50%~70%^[7],随着青稞生长,植被覆盖度增加,土壤蒸发比例逐渐下降,到成熟期降至20%~30%。在不同气候条件下,土壤蒸发量差异明显,在干旱半干旱的青藏高原部分地区,青稞全生育期土壤蒸发量可达100~150 mm。

4.2 作物蒸腾定量研究

利用茎流计等技术对青稞蒸腾进行连续监测发现,青稞在抽穗—灌浆期蒸腾速率最大,日蒸腾量可达3~5 mm。全生育期作物蒸腾量占蒸散总量的比例在30%~80%之间变化,与土壤蒸发比例呈互补关系。通过模型模拟研究表明,在优化灌溉条件下,青稞作物蒸腾效率提高,产量也相应增加。同时,不同品种青稞的蒸腾量存在差异,耐旱品种在相同条件下蒸腾量相对较低,但水分利用效率更高。

5 模型模拟与应用

以下重点阐述在国家自然科学基金项

目——“西藏高海拔地区黑青稞蒸散组分分配特征及控制机制”研究基础上形成的成果。

5.1 西藏青稞蒸散组分模型构建

通过对西藏青稞蒸散组模拟数据收集与处理,完成基于植被蒸腾和土壤蒸发生态过程的 Shuttle worth—Wallace(SW)模型来模拟青稞蒸散及组分。传统的 SW 模型只能模拟土壤蒸发和植被蒸腾,新模型加入冠层截留发对模型进行了改进,将地表蒸散进行重新表达。土壤含水量、饱和含水量、田间持水量和凋萎系数利用全国土壤类型图,结合已有的观测分析结果和经验完成模型替代。

基于 Shuttle worth—Wallace(SW)模型来模拟青稞蒸散及组分的模型阐述。

$$ET = E_c + E_s + E_{int} = C_c PM_c + C_s PM_s + E_{int} \quad (1)$$

$$PM_c = \frac{\Delta R + (\rho C_p D - \Delta r_{ac} R_s) / (r_{aa} + r_{ac})}{\Delta + \gamma(1 + r_{sc} / (r_{aa} + r_{ac}))} \quad (2)$$

$$PM_s = \frac{\Delta R + (\rho C_p D - \Delta r_{as} (R - R_s)) / (r_{aa} + r_{as})}{\Delta + \gamma(1 + r_{ss} / (r_{aa} + r_{as}))} \quad (3)$$

$$C_c = \frac{1}{1 + \rho_a \rho_c / (\rho_s (\rho_a + \rho_c))} \quad (4)$$

$$C_s = \frac{1}{1 + \rho_a \rho_s / (\rho_c (\rho_a + \rho_s))} \quad (5)$$

式中, ET 为总蒸散量, E_c 为植被蒸腾, E_s 为土壤蒸发, E_{int} 为冠层截留蒸发, PM_c 和 PM_s 是类似 Penman-Monteith 方程的分别描述植被蒸腾(式2)和土壤蒸发(式3)的贡献项, C_c 和 C_s 为对应的植被阻力系数和土壤表层阻力系数^[8]。

式(2)~(5)中, Δ 为饱和水汽压曲线斜率(kPa/K), ρ 为空气密度(标准大气压下为1.293 kg/m³), C_p 为空气定压比热(1 012 J/kg·K), D 为饱和水汽压差(kPa), γ 为干湿表常数(0.067 kPa/K)^[8]。

5.2 西藏青稞蒸散组分数数据集的构建

利用青稞长期遥感监测点栅格像元范围,逐一提取归一化植被指数、增强植被指数、叶面积指数、植被覆盖度、地表反射率等 MODIS 产品参数用于青稞蒸散组分模型的输入参数。气象数据则是利用整个西藏的气象站的进行空间插值,然后利用监测点栅格像元范围,分别逐一提取各个气象因子,然后按照 MODIS 产品时间分辨率计算每8 d的平均值,用于青稞蒸散组分模型的输入参数。然后利用 Python 编写批处理程度,以2000—2020年每8 d的遥感数据和气象数据

为输入数据,运行青稞蒸散组分模型,形成2000—2020年每8d的青稞蒸散组分序列,并以此为基础,计算年尺度的变化序列,形成西藏青稞蒸散组分数数据集。

5.3 西藏青稞蒸散组分变化特征

5.3.1 西藏青稞蒸散组分特征

西藏青稞 ET 平均为 506.9 mm,各组分 E_s , E_c 和 E_i 分别为 391.9 mm, 107.6 mm 和 7.4 mm,分别占 ET 的 77.3%、21.2% 和 1.5%。从各组分及组分比重可以看出, E_s 是西藏青稞 ET 的最重要的分量,表明大部分青稞地中的水分是通过土壤蒸发返回到大气中。青稞 ET 与我国北方地区的春玉米和冬小麦的 ET 大小相当,要高于半干旱地区微灌系统中的玉米。但是青稞 ET 组分与不同区域及不同作物明显不同。 ET 随着海拔升高呈现降低的趋势,较高 ET 出现在 3 700~3 800 m 地区。 E_s 和 E_s/ET 在 3 500~3 800 m 地区随着海拔的升高而呈现降低的趋势,在 3 800~4 100 m 地区又转变成升高的趋

势,而 E_c , E_i 以及两者组分比重与海拔的变化过程与 E_s 与海拔的变化过程相反^[8]。

5.3.2 西藏青稞蒸散组分季节动态

青稞蒸散组分季节动态,不同海拔地区的青稞蒸散组分表现出一致的季节动态变化过程,年初经过一段的相对平稳时期,然后逐渐升高,达到峰值后经过一段时间开始下降,不同组分达到峰值的时间不同, E_i 到达峰值的时间要比 E_s 和 E_c 迟,而不同海拔地区的青稞 E_s 达到最大值的时间也稍有差别,海拔 3 700~3 800 m 地区的 E_s 出现在第 161 d 左右,要明显早于其它海拔地区;海拔 3 900~4 100 m 海拔地区的 E_s 在第 217 d 左右达到最大值,与 ET 和 E_c 保持一致,而其余海拔地区的 E_s 在 185 d 左右达到最大值。 ET 组分季节变化过程与气候季节变化过程紧密相关, ET 组分与气温 ($p<0.01$)、相对湿度 ($p<0.01$) 和降雨 ($p<0.01$) 呈现显著的正相关关系^[8],以 ET 和 E_s 与气温的相关关系最强,然后为相对湿度和降雨(表 1)。

表 1 青稞蒸散组分季节变化与气象要素的相关性

| 气象要素 | E_s | E_c | E_i | ET | E_s/ET | E_c/ET | E_i/ET |
|------|---------|---------|----------|---------|----------|----------|----------|
| SD | -0.417 | -0.679* | -0.756** | -0.501 | 0.437 | -0.378 | -0.713* |
| AP | 0.524 | 0.563* | 0.519 | 0.548* | 0.187 | -0.224 | 0.448 |
| T | 0.976** | 0.845** | 0.801** | 0.965** | 0.413 | -0.477 | 0.752** |
| WV | 0.262 | 0.271 | 0.217 | 0.270 | 0.022 | -0.040 | 0.224 |
| RH | 0.929** | 0.969** | 0.949** | 0.964** | 0.087 | -0.161 | 0.881** |
| P | 0.856** | 0.935** | 0.953** | 0.901** | -0.065 | -0.007 | 0.86** |

5.3.3 西藏青稞蒸散组分年际变化及与气候变化的关系

青稞蒸散组分 2001—2020 年际变化综合来看,青稞 ET 近 20 年呈降低的趋势,平均变化速率为 -3.79 mm/a,在 2001—2013 年间,青稞 ET 显著上升 ($p<0.05$),平均变化速率为 8.03 mm/a,然

后又显著下降 ($p<0.01$) 到 2020 年,平均变化速率为 -25.61 mm/a^[8]。不同海拔地区的青稞 ET 变化趋势并不一致,在海拔 3 500~3 600 m 和 3 700~3 800 m 地区,青稞 ET 稍有上升,而其它地区则表现为下降趋势,以海拔 4 000~4 100 m 地区变化最明显(表 2)。

表 2 青稞蒸散组分年际变化与气象要素的相关性

| 气象要素 | E_s | E_c | E_i | ET | E_s/ET | E_c/ET | E_i/ET |
|------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|
| SD | 0.415 | 0.196 | 0.056 | 0.460 | 0.203 | -0.193 | -0.263 |
| AP | 0.042 | -0.182 | 0.125 | 0.000 | 0.098 | -0.110 | 0.122 |
| T | 0.078 | -0.067 | 0.048 | 0.062 | 0.089 | -0.092 | -0.006 |
| WV | 0.183 | 0.158 | -0.080 | 0.218 | 0.058 | -0.046 | -0.211 |
| RH | -0.040 | -0.304 | 0.503 | -0.102 | 0.159 | -0.199 | 0.507 |
| P | -0.239 | -0.153 | 0.432 | -0.267 | -0.099 | 0.069 | 0.609* |

5.4 进行西藏青稞蒸散组分模型推广应用

西藏青稞蒸散组分模型基于植被蒸腾和土壤蒸发生态过程,模型性质属于生态过程模型,因此,根据模拟对象的不同分别进行参数的标定和较准,便可将青稞蒸散组分模型应用推广到其

它地区的不同植被类型上,为了验证西藏青稞蒸散组分模型的推广适用性,将模型中的 E_i 组分应用到全国,并利用实际观测数据来进行对比验证。

为进一步量化模型以及模拟 E_i 的可用性,计算了有效系数 EF 和均方根误差 $REMS$ 。模

型有效系数 EF 最高的站点为鼎湖山站,达到了 0.79,而最低的出现在海北灌木站,为 0.62,所有站点中均方根误差的值域范围为 0.45~0.98^[9]。

由此认为模型的模拟结果在验证范围内能被接受,再次证实了青稞蒸散组分模型的应用价值和推广潜力(图 1)。

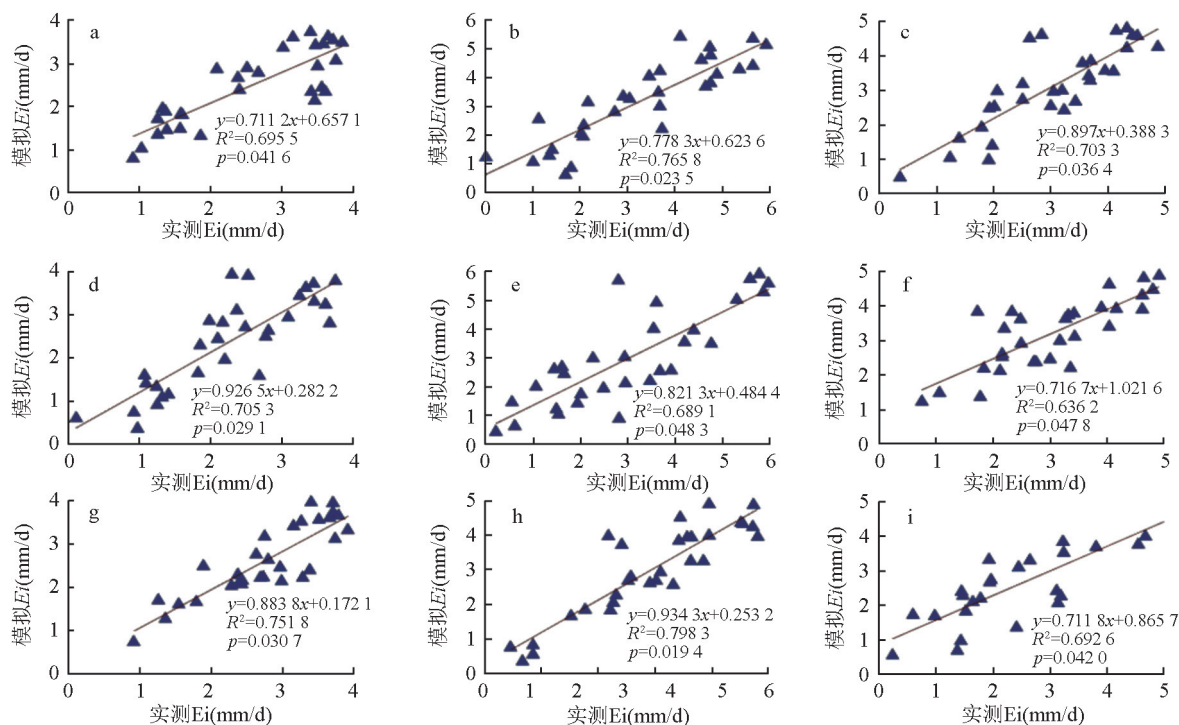


图 1 中国 9 个通量塔实测 E_i 与模型模拟 E_i 的比较

6 结语

通过模型模拟和遥感监测技术手段,系统研究了西藏高海拔地区黑青稞蒸散组分的分配特征及其控制机制,取得了显著的研究成果。研究成果不仅为青稞全育期水分管理提供了科学依据,也为高海拔地区作物蒸散研究提供了新的思路和方法。

参考文献:

[1] KEVIN BOYKO, ALEXANDER G, FERNALD A. Salim bawazir, improving groundwater recharge estimates in alfalfa fields of new Mexico with actual evapotranspiration measurements[J]. Agricultural Water Management, 2021, 244: 106532.

[2] DARIUSZ MLYNSKI, ANDRZEJ WALEGAA, BOGDAN OZGA-ZIELINSKI, et al. New approach for determining the quantiles of maximum annual flows in ungauged catchments using the EBA4SUB model[J]. Journal of Hydrology, 2020, 589: 125198.

[3] SABEL F TRIGOA, HENK DE BRUIN, FRANK BEY-RICH, et al. Bosveld, pedro gavián, jannis groh, ramón López-Urrea, validation of reference evapotranspiration from Meteosat Second Generation (MSG) observations [J]. Agricultural and Forest Meteorology,

2018, 259: 271-285.

[4] RAFAEL A, SEGURA, JETSE J, et al. The effect of soil properties on the relation between soil management and Fusarium wilt expression in Gros Michel bananas [J]. Plant and Soil, 2022, 471: 89-100.

[5] ANIL ADHIKARI, BRIAN J STEFFENSON, MADELEINE J SMITH, et al. Genome-wide association mapping of seedling net form net blotch resistance in an ethiopian and eritrean barley collection [J]. Crop Science, 2019, 59(4): 1625.

[6] ROSIE R BISSET, AMAURY DEHECQ, DANIEL N GOLDBERG, et al. Bingham, and noel gourmelen, reversed surface-mass-balance gradients on himalayan debris-covered glaciers inferred from remote sensing [J]. Remote Sensing, 2020, 12(10): 1563.

[7] ZHAOYANG YU, KE YANG, ZHICHAO HU, et al. Parameter optimization and simulation analysis of floating root cutting mechanism for garlic harvester [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204: 107521.

[8] CHEN JILONG, TAN HAIYUN, JI YONGYUE, et al. Evapotranspiration components dynamic of highland barley using PML ET product in Tibet [J]. Remote Sensing, 2021, 13(23): 4884.

[9] LINGYUN YAN, JILONG CHEN, LEI HE, et al. Dynamics of the evaporation of intercepted precipitation during the last two decades over China [J]. Remote Sensing, 2022, 14: 2474.