

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2018.03.41

基于气象条件的巨菌草蒸散发动态研究

刘凤山, 林辉, 林兴生, 罗海凌, 林占熿

(福建农林大学国家菌草工程技术研究中心, 福建福州 350002)

摘要: 巨菌草是一种已经并将继续在中国干旱和半干旱地区广泛推广的草种,其蒸散发(*ET*)动态是目前关注较多但仍未解决的问题,制约了灌溉制度、节水途径和潜力、抗旱性能提升以及产量预测等相关主题的发展。基于盆栽控制试验,利用 SiB2 模型模拟和回归分析方法揭示了巨菌草蒸散发的主要过程及影响因素。结果表明:受气象因素的影响,巨菌草 *ET* 在 0.5 ~ 6.9 mm/d 的范围内波动。其中,*ET* 季节动态与温度、日照时数和饱和水汽压差的关系呈先增后减的单峰关系;随相对湿度、短波辐射和净辐射的增大,*ET* 分别线性降低、增大和增大;连续晴天和连续阴天条件下,*ET* 日动态主要受短波辐射和净辐射的正相关影响。利用气象因素建立的多元回归关系,能够解释 99% 巨菌草 *ET* 的波动,总体误差为 3.38 ± 7.64 mm。

关键词: 巨菌草; 蒸散发; 气象; 水分利用; 蒸散发动态

中图分类号: S161.4; TV213

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)03-0243-06

Dynamic study on the evapotranspiration of Giant Juncao based on meteorological condition

LIU Fengshan, LIN Hui, LIN Xingsheng, LUO Hailing, LIN Zhanxi

(China National Engineering Research Center of JUNCAO Technology, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, 350002, China)

Abstract: Giant JunCao (*Pennisetum giganteum*. sp.) is a kind of grass that has been and will continue be widely planted in arid and semi-arid areas of China. The evapotranspiration (*ET*) dynamic is one of the key concern and unsolved problem, which further constrains the development of topics including irrigation program, water-saving methods and potential, drought resistance performance, and yield prediction. Based on pot control experiment of Giant JunCao, the main process and influence factors of *ET* were revealed based on SiB2 simulation and regression analysis. Results showed that *ET* of Giant JunCao, which was dominated by meteorological condition, fluctuated within the range of 0.5 ~ 6.9 mm/day. Among them, *ET* exhibited unimodal relationship (first enhanced and then reduced) with air temperature, sunshine duration, and vapor pressure deficit, and linearly decreased, increased, and increased with the boost of relative humidity, short-wave radiation, and net radiation, respectively. *ET* showed different daily change patterns in successive sunny and cloudy days, and mainly affected by short-wave radiation and net radiation. The established multivariate regression relationship between *ET* of Giant JunCao and meteorological data could explain 99% variance of *ET* with an error of 3.38 ± 7.64 mm.

Key words: Giant JunCao; evapotranspiration; meteorology; water utilization; evapotranspiration dynamic

1 研究背景

巨菌草 (*Pennisetum giganteum*. sp.) 原产于北

非地区,于 1999 年在福建农林大学菌草研究所草圃中试种成功,是一种单子叶禾本科狼尾草属植物^[1]。过去 10 年中,先后在宁夏腾格里沙漠东缘、

收稿日期:2017-10-27; 修回日期:2017-12-23

基金项目:福建省自然科学基金(2015J01153)

作者简介:刘凤山(1986-),男,山东安丘人,博士,助理研究员,从事生态保护研究。

通讯作者:林占熿(1943-),男,福建连城人,本科,研究员,博士生导师,主要从事菌草生态治理等研究工作。

内蒙古阿拉善和西藏林芝等地区开展巨菌草防风固沙效益的研究;在内蒙古鄂尔多斯地区开展巨菌草治理砒砂岩的研究^[1-2];在新疆、青海、内蒙古和山东等畜牧业发达地区,广泛种植巨菌草作为牛羊饲料^[1]。根据最近的文献报道,巨菌草在克拉玛依^[3]、昌吉市^[4]、呼伦贝尔市鄂温克旗^[5]、陕西榆林风沙草滩区^[6]以及河北中南部^[7]等地区正在开展广泛的引种、标准化种植等相关的推广工作。

巨菌草推广的地区同时存在生态环境恶化和干旱缺水问题。种植巨菌草后,区域生态环境发生了一定的改善^[2]。但是巨菌草巨大的生物量对水分的消耗问题日益引起重视。作为主要的耗水过程^[8],准确地预测和估算蒸散量(ET)及其变化过程对巨菌草产业发展的很多方面都十分关键,例如灌溉制度、节水途径和潜力、抗旱性能提升以及产量预测等^[9]。到目前为止,巨菌草蒸散规律的研究相对缺乏,尤其是不同区域的水分管理策略需要深入认识蒸散发过程与气象条件的内在联系,对于提高水分利用效率和维持巨菌草可持续发展有重要意义。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

试验区位于福建农林大学国家菌草工程技术研究中心塑料棚内(26°5'21"N, 119°14'49"E)。利用盆栽控制实验获得巨菌草的蒸散发动态,实验采用的土壤为沙壤土,土壤肥力偏低。研究区属于亚热带季风气候,年平均日照时数1700~1980 h,降水量900~2100 mm,年均气温16~20℃。春季雨水多,湿度大,夏季闷热高温,多雷雨台风天气,秋季天高云淡,日照充足^[10]。试验开展期间(2015年6月22日~8月29日),常出现连续阴天和连续晴天的天气状况,对于本研究提供了较好的气象背景。

2.2 数据获取

2.2.1 观测数据 试验盆的直径和高度分别为28.5和38 cm,底部密封,间隔50 cm放置在大棚内。供试巨菌草采用大小相似的种茎种植,每盆4株,发芽后选择健壮、间隔较大的2株作为后续研究之用,4次重复。灌溉量为25 mm/7 d,每日18:00~19:00通过称重法获得巨菌草的蒸散量^[11],测量间隔分为1~7 d不等,灌溉前后加测一次。

2.2.2 模拟数据 利用SiB2模型模拟巨菌草的蒸散发过程。SiB2模型是在SiB(Simple Biosphere Model)基础上,由Sellers等^[12]改进的基于植物生理过程^[13]的土壤-植被-大气模式,对陆-气界面的

CO₂、蒸散发和能量平衡有良好的模拟效果^[14-16]。在2015年气象数据驱动(降水数据修改为实际灌溉量)下,对观测数据期内的蒸散发过程进行了模拟,结果表明(图1),该模型对累积蒸散发动态的模拟效果良好,累积蒸散发的模拟值与实测值的线性决定系数为0.99,模拟的累积误差为38.9±6.3 mm。

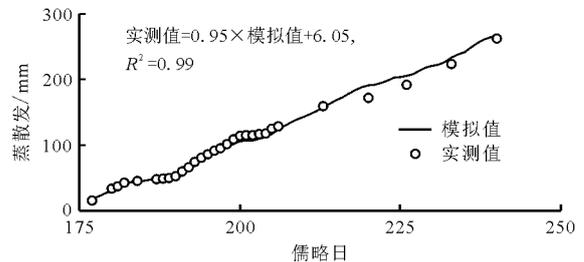


图1 SiB2模型对累积蒸散发的模拟效果

2.2.3 气象数据 气象数据来自于国家气象科学数据共享服务平台中2015年的福州市气象数据。该数据经过统一的质量控制,数据正确率和质量极高。数据集中包含大气压强 p , hPa;风速 WS , m/s;空气温度 t , °C;相对湿度 RH , %;水汽压 e , hPa;降水 P , mm;日照时数 SD , h等。数据并没有缺失,无需补缺。研究过程中,用实际灌溉量替代降水量进行分析。采用修正Tetens公式和 RH 计算了饱和水汽压差 VPD , hPa。太阳辐射 SR , W/m²数据根据日照时数与辐射的关系获得^[17],净辐射 R_n , W/m²;土壤含水量 SW , %和冠层导度 g_c , mol/(m²·s)数据来自于SiB2模型的模拟数据^[12]。

2.3 数据处理

本文采用模拟数据替代观测数据,利用统计方法分析环境因子对蒸散发的影响过程,并遴选出蒸散发的关键控制因素,建立多元回归关系。然后,根据多元回归关系和环境因子计算出的蒸散发,与观测数据进行线性拟合,进一步确保该回归关系具有一定的适用性。

根据 SD 和 P 发生的时间,筛选出连续晴天(DOY 206-219)和连续阴天(DOY 220-225)等两种天气类型(图2),对蒸散发和环境因素进行归一化处理,利用归一化指数展示并分析了蒸散发日变化的影响因素。

3 结果与讨论

3.1 蒸散发和气象因素的变化过程

图3为蒸散发 ET 和气象数据波动图。由图3可以看出,试验期间 ET 和气象要素具有明显的波

动。巨菌草 ET 的波动范围在 $0.5 \sim 6.9 \text{ mm/d}$, 平均值为 3.9 mm/d ; 气象要素的变化范围分别为: WS 在 $1.13 \sim 7.89 \text{ m/s}$, t 在 $23.65 \sim 31.88 \text{ }^\circ\text{C}$, RH 在 $59.38 \sim 94.00 \%$, e 在 $24.9 \sim 33.0 \text{ hPa}$ 。数据显示, 以上气象数据之间没有显示出明显的同步或异步变化过程。

灌溉是蒸散发的唯一水分来源。在试验期间, P 以人工灌溉为主, 前期的灌溉量在 15 mm/d 以下, 巨菌草生长到后期, 平均每次灌溉 30 mm/d 左右 (图 2)。 SD 是蒸散发能量来源的指标, 每日太阳最长的照射时间为 11.2 h , 经常发生 SD 连续为 0 或者连续大于 9 h 的现象。连续阴天减少太阳到达地面的辐射和光照, 造成水分无法及时排掉, 并对植物的生理、生长和产量等产生显著影响^[18-19]。灌溉的水分在连续晴天条件下会胁迫巨菌草的生长, 降低光合速率、蒸腾速率和气孔导度^[20-21]。

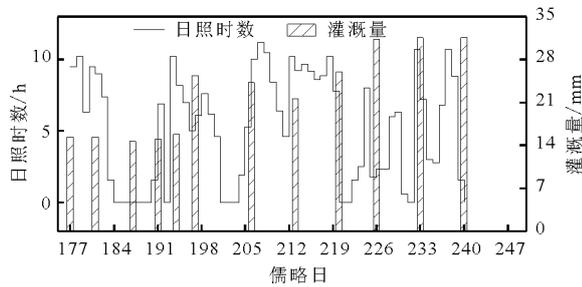


图 2 日照时数和灌溉量在试验期间的变化过程

3.2 蒸散发季节变化的影响因素

分别利用线性和二次三项式拟合的方法对环境

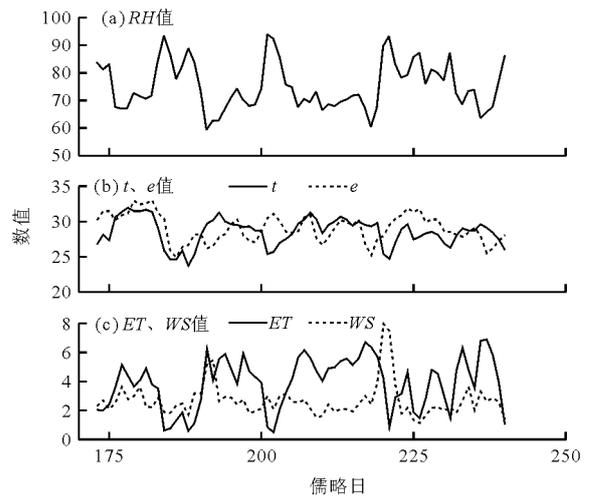
表 1 巨菌草蒸散发季节变化的相关因素

ET	t	RH	SD	SR	VPD	R_n
线性	$y = 0.69x - 15.65$ $R^2 = 0.58$	$y = -0.17x + 17.08$ $R^2 = 0.72$	$y = 0.39x + 1.97$ $R^2 = 0.71$	$y = 0.28x - 0.088$ $R^2 = 0.73$	$y = 0.30x - 7.92$ $R^2 = 0.56$	$y = 0.36x + 3.40$ $R^2 = 0.71$
二次三项式	$y = -0.098x^2 + 6.18x - 92.20$ $R^2 = 0.64$	$y = -0.0007x^2 - 0.063x + 12.81$ $R^2 = 0.73$	$y = -0.035x^2 + 0.73x + 1.63$ $R^2 = 0.75$	$y = -0.0053x^2 + 0.42x - 0.88$ $R^2 = 0.74$	$y = -0.026x^2 + 2.27x - 45.32$ $R^2 = 0.66$	$y = -0.008x^2 + 0.37x + 3.55$ $R^2 = 0.72$

从蒸散发的能量和动力学角度可以较好的理解蒸散发与环境变量的关系。 t 、 RH 和 VPD 代表了大气对地表和植物水分的吸收能力, t 和 VPD 越高、 RH 越低, 空气对地面和植物体内水分的动力学输送能力越强, 有利于水分向大气运动。 SD 、 SR 和 R_n 是植物蒸散发的能量来源, 能量越多, 越有利于水分子的动能和向大气的扩散, 进而促进蒸散发的发生^[22]。

ET 同时受到 SW 、 g_c 等因素的影响。虽然本文揭

因素与日蒸散量的函数关系进行分析, 发现 t 、 RH 、 SD 、 SR 、 VPD 和 R_n 与 ET 具有良好的关系 (表 1)。根据决定系数 (R^2) 的大小, t 、 SD 和 VPD 与 ET 的关系呈单峰关系, 均随这些变量的增大而先增后减, 并分别在 $31.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 10.6 h 、 44.5 hPa 达到最大值。线性和二次三项式拟合得到的决定系数, 对于 RH 、 SR 和 R_n 等变量的差别较小, 表明两种关系均对这些变量与 ET 的关系有较好的拟合效果。从二次三项式的拐点而言, 在 RH 、 SR 和 R_n 的实际变化范围内, 变量与蒸散发呈线性关系, 线性回归可以更加简单的描述自变量与蒸散发的关系。随着 RH 、 SR 和 R_n 的增大, ET 的响应分别为降低、增大和增大。



注: 图中纵坐标值 $RH\%$, $t/^\circ\text{C}$, e/hPa , $ET/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$, $WS/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$

图 3 ET 和气象数据的波动

示 ET 主要受气象条件的影响, 但是在水分亏缺状态下, 不仅减少地表水分蒸发, 而且造成植物气孔减小甚至关闭, 增大水分向大气散失过程中的气孔阻力^[23]。 t 、 SD 和 VPD 与 ET 的关系呈单峰关系, 也在一定程度上受 SW 和 g_c 的影响。例如, 消除 g_c 对 t 的线性影响 (两者关系非常弱), 空气温度与蒸散发的线性拟合方程为: $ET = 0.87 t + 25.06$, $R^2 = 0.64$ 。消除 g_c 对 t 的线性影响之后, 决定系数的大小与未消除之前 t 与

ET 用二次三项式拟合的决定系数接近,说明消除 g_c 对 ET 的干扰后,在 t 变化范围内对 ET 具有线性促进作用,并提高了对 ET 的解释能力。

ET 与 g_c 的关系较弱,与 E 和 T 在巨菌草不同生长期的占比不同具有较大关系。在巨菌草生长初期,地表裸露面积较大,土壤 E 对 ET 的贡献较大, g_c 对 T 的调控对 ET 的波动占比较低;随着巨菌草的生长, T 占 ET 的比例逐渐增加, g_c 通过蒸腾作用对 ET 的影响逐渐增强。因此, g_c 对 ET 随时间具有不同的关系,难以用数学关系表达^[24]。

选择 ET 季节动态的影响因素,建立了蒸散发与气象因素的多元回归关系:

$$ET = 2.78 t - 0.082 RH + 0.91SR - 1.25 VPD - 0.97 R_n - 32.1, R^2 = 0.86 \quad (1)$$

利用方程(1)和相关气象数据,计算得到的 ET 数据与实测结果的线性决定系数为0.99,计算值比实测值大 3.38 ± 7.64 mm(图4),能够较好地预测巨菌草 ET 的季节变化规律。

根据黑河上游的观测结果,草地蒸散发的影响因素包括:风速、气压、空气温度、相对湿度、太阳辐射和土壤温度等,通径分析表明空气温度是最主要的影响因素,其次为土壤水分,风速和土壤湿度^[25]。本文的研究同样支持空气温度是巨菌草的重要影响因素,太阳辐射、日照时数和净辐射等能量因素也有一定的影响,这与巨菌草光合作用能力强和生物量大有密切关系^[2]。

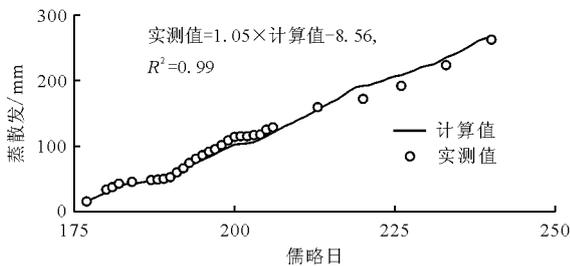


图4 多元回归方程对累积蒸散发的预测效果

3.3 蒸散发日变化的影响因素

在晴朗天气, ET 和环境因素(如 R_n 、 g_c 、 t 和 SR)具有明显的日变化过程见图5。由图5可见,除了 g_c 由于光合午休现象呈双峰变化过程外,其他因素均呈单峰变化过程:中午最高,夜晚最低。在白天, ET 与太阳辐射因素(如 R_n 和 SR)具有一致的变化过程;夜晚太阳辐射因素波动较小, t 与 ET 的变化过程相对一致。线性回归分析表明, R_n 、 g_c 、 t 和 SR 对 ET 的决定系数分别为0.85、0.61、0.45、0.86。良好

的太阳辐射条件提供了充足的水分, ET 在该灌溉周期中变幅较小,距离灌溉时间越久, ET 呈轻微下降的过程,这与土壤表层逐渐干燥造成的蒸发过程减弱有关,但是 g_c 控制的蒸腾下降过程不明显。

光合午休是植物的一种普遍现象,与环境因素具有密切关系。根据对大豆光合午休的分析,不同时刻午休的影响因素是不同的,11:00 主要由于气孔导度下降造成,13:00-15:00 主要是 VPD 和叶温过高造成,15:00 气孔导度通过影响 VPD 和叶温对光合的下降起重要的间接作用^[26]。青储玉米的光合午休现象主要与强烈的光照有关系,通过一系列光保护机制耗散过剩的光能^[27]。巨菌草产生光合午休的时刻主要在中午13:00-15:00,可能与 VPD 和 t 过高造成的细胞失水过程过快有密切联系,通过气孔或者非气孔因素限制水分的散失^[28]。

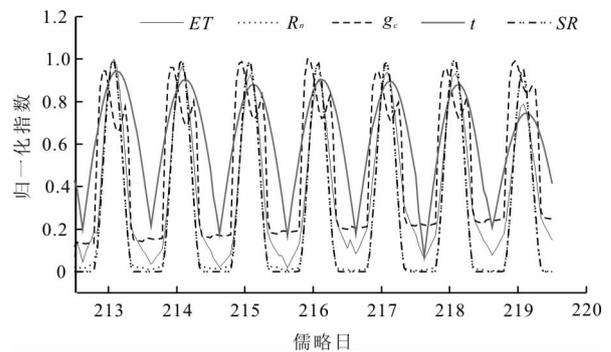


图5 晴天 ET 和环境因素的日变化规律

在连续阴天条件下, ET 和环境因素(如 R_n 、 g_c 、 t 和 SR)具有明显的日变化过程,且不同日期的变化幅度差别很大(图6)。阴天造成 R_n 、 t 和 SR 具有较大幅度的下降,中午太阳能量的降低缓解了巨菌草由于水分和光能等因素产生的光合午休影响^[26-28], g_c 呈单峰变化过程。 ET 与 R_n 、 g_c 、 t 和 SR 等因素的变化具有较好一致性,在太阳辐射因素偏低过程中, ET 相对较低,在期间的2次晴天中,有较大幅度的提升。因此,在日变化过程中, ET 与太阳辐射能量具有密切的关系。线性回归分析表明, R_n 、 g_c 、 t 和 SR 对 ET 的决定系数分别为0.94、0.64、0.68、0.95。草地的观测结果表明,裸露土地 ET 的峰值出现在13:00,草地覆盖地区 ET 的峰值时间在14:00左右^[25]。在连续晴天条件下,巨菌草的光合作用在中午时分暂时停止,从而减缓了 ET 在中午时刻的增加幅度,峰值出现在13:00,14:00的 ET 出现较大幅度的下降。但是连续阴天条件下, ET 在14:00下降的幅度非常缓和。

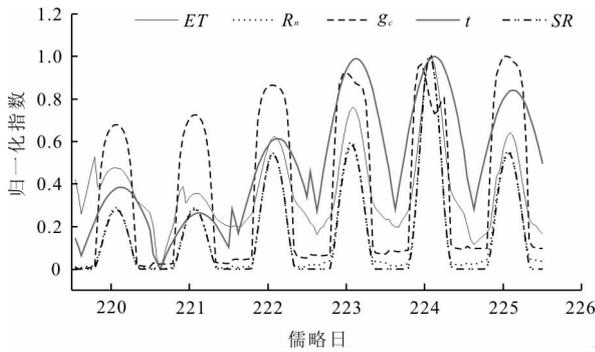


图6 阴天 ET 和环境因素的日变化规律

4 结 论

巨菌草的 ET 动态及其规律是其灌溉制度、节水途径和潜力、抗旱性能提升以及产量预测等问题的关键过程。本文利用 ET 的观测数据和模拟数据,深入分析了福州地区气象条件、植物特征和土壤水分含量等因素对巨菌草 ET 过程的影响,获得了巨菌草 ET 的日变化和季节变化动态、确立了环境因素对巨菌草 ET 的主要影响过程、并建立了基于气象条件的巨菌草 ET 的预测方程。研究结果对于提高巨菌草的水分利用效率和可持续发展有重要意义。主要结论如下:

(1) 试验期间巨菌草 ET 的波动范围在 $0.5 \sim 6.9 \text{ mm/d}$, 平均值为 3.9 mm/d ; 气象要素 WS 、 t 、 RH 、 e 、 SD 、 P 的波动范围分别为 $1.13 \sim 7.89 \text{ m/s}$ 、 $23.65 \sim 31.88^\circ\text{C}$ 、 $59.38\% \sim 94.00\%$ 、 $24.9 \sim 33 \text{ hPa}$ 、 $0 \sim 11.2 \text{ h}$ 、 $14.7 \sim 31.6 \text{ mm/次}$, 并经常出现连续阴天和晴天的情况。

(2) 巨菌草 ET 的主要影响因素包括: t 、 RH 、 SD 、 SR 、 VPD 、 R_n 等。在各自的变化范围内, t 、 SD 和 VPD 与 ET 的关系呈单峰关系, 随这些变量的增大而先增后减, 并分别在 31.5°C 、 10.6 h 、 44.5 hPa 达到最大值; 随着 RH 、 SR 和 R_n 的增大, ET 分别线性降低、增大和增大。

(3) 建立了福州地区巨菌草 ET 与气象因素的多元回归关系, 对巨菌草 ET 波动的解释力可达 99% , 误差为 $3.38 \pm 7.64 \text{ mm}$ 。

(4) 连续晴天条件下, ET 和 R_n 、 g_c 、 t 和 SR 具有明显的日变化过程, 其中 g_c 呈双峰变化过程, 其他因素均呈单峰变化过程; R_n 和 SR 可以解释 85% 以上 ET 的变化; 受表层土壤水分含量下降的影响, 距离灌溉时间越久, ET 呈轻微下降的过程。

(5) 连续阴天条件下, R_n 、 g_c 和 SR 呈单峰变化

过程, ET 和 t 在单峰变化过程中出现了一定的波动; R_n 和 SR 可以解释 94% 以上 ET 的变化; 阴天造成的太阳能缺乏是 ET 变化的主要因素, 减弱了 SW 和 g_c 对 ET 的制约, 太阳辐射对 ET 的解释能力高于连续晴天。

参考文献:

- [1] 林占熹. 菌草学: 第三版 [M]. 北京: 国家行政学院出版社, 2013.
- [2] 刘凤山, 林辉, 林兴生, 等. 巨菌草对生态脆弱区治理与修复的研究进展 [J]. 贵州农业科学, 2017, 45(7): 111-113.
- [3] 杨育霞, 王龙清, 丁铭, 等. 克拉玛依市巨菌草标准化种植技术 [J]. 新疆农垦科技, 2016, 39(6): 21-22.
- [4] 秦建军, 尤丽群, 叶刚, 等. 新疆昌吉市象草及巨菌草引种栽培试验 [J]. 北方园艺, 2014(16): 148-149.
- [5] 常艳, 白永胜, 常金财, 等. 巨菌草引种试验 [J]. 林业实用技术, 2014(12): 32-34.
- [6] 卜耀军, 李强, 徐伟洲, 等. 巨菌草在榆林风沙草滩区的引种表现初探 [J]. 陕西农业科学, 2017, 63(2): 42-43+56.
- [7] 张秀平, 杨志杰, 张亚振, 等. 巨菌草在冀中南地区的引种试验 [J]. 安徽农业科学, 2015, 43(36): 78-80.
- [8] ZHU Gaofeng, LI Xiaolin, SU Yanhua, et al. Simultaneous parameterization of the two-source evapotranspiration model by Bayesian approach: application to spring maize in an arid region of northwest China [J]. Geoscientific Model Development Discussions, 2014, 7(1): 741-775.
- [9] 卫新东, 刘守阳, 陈滇豫, 等. Shuttleworth-Wallace 模型模拟陕北枣林蒸散发适用性分析 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 142-151.
- [10] 李庆贺, 伍博炜, 杨璐丽, 等. 福建省城市水资源承载力综合评价研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(4): 147-151.
- [11] KOOL D, AGAM N, LAZAROVITCH N, et al. A review of approaches for evapotranspiration partitioning [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 184(1): 56-70.
- [12] SELLERS P J, RANDALL D A, COLLATZ G J, et al. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation [J]. Journal of Climate, 1996, 9(4): 706-737.
- [13] SEN O L, SHUTTLEWORTH W J, YANG Z L. Comparative evaluation of BATS2, BATS, and SiB2 with Amazon data [J]. Journal of Hydrometeorology, 2000, 1(2): 135-153.
- [14] HANAN N P, BERRY J A, VERMA S B, et al. Testing a model of CO_2 , water and energy exchange in Great Plains tallgrass prairie and wheat ecosystems [J]. Agricultural

- and Forest Meteorology, 2005, 131(3): 162 - 179.
- [15] 何志强, 沈新勇, 王英舜, 等. 利用简单生物圈模式 SiB2 模拟锡林浩特草原地表湍流通量 [J]. 气候与环境研究, 2011, 16(3): 353 - 368.
- [16] 刘凤山, 陶福禄, 肖登攀, 等. 土地利用类型转换对地表能量平衡和气候的影响: 基于 SiB2 模型的模拟结果 [J]. 地理科学进展, 2014, 33(6): 815 - 824.
- [17] REVFEIM K J A. On the relationship between radiation and mean daily sunshine [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 86(3): 183 - 191.
- [18] 崔秀妹, 刘信宝, 李志华, 等. 不同水分胁迫下水杨酸对分枝期扁蓊豆生长及光合生理的影响 [J]. 草业学报, 2012, 21(6): 82 - 93.
- [19] 史建国, 崔海岩, 赵斌, 等. 花粒期光照对夏玉米产量和籽粒灌浆特性的影响 [J]. 中国农业科学, 2013, 46(21): 4427 - 4434.
- [20] LIU F, LIN D, LIN H, et al. Physiological and photosynthetic responses of Giant JunCao (*Pennisetum Giganteum*) to drought stress [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2017, 26(6): 3868 - 3871.
- [21] 徐莉平, 刘钰, 张建丰, 等. 冬小麦抽穗期土壤水分对生理指标影响的试验研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(3): 23 - 25 + 29.
- [22] 田盼盼, 董新光, 刘锋, 等. 干旱区枣树蒸腾规律及其与气象要素的关系 [J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(2): 86 - 89.
- [23] 康满春, 蔡永茂, 王小平, 等. 表层阻力和环境因素对杨树 (*Populus sp.*) 人工林蒸散发的控制 [J]. 生态学报, 2016, 36(17): 5508 - 5518.
- [24] RICHARDSON A D, KEENAN T F, MIGLIAVACCA M, et al. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 169(3): 156 - 173.
- [25] 彭焕华, 赵传燕, 梁继. 黑河上游高寒草地蒸散发日变化及其影响因子分析 [J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 46 - 53.
- [26] 高辉远, 陈敬锋, 邹琦, 等. 大豆光合午休原因的分析 [J]. 作物学报, 1994, 20(3): 357 - 362.
- [27] 解婷婷, 苏培玺, 丁松爽. 黑河中游边缘绿洲不同水分条件对青贮玉米叶片光合特性及产量的影响 [J]. 西北农业学报, 2009, 18(6): 127 - 133.
- [28] 余叔文, 汤章城. 植物生理与分子生物学 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.

(上接第 242 页)

- [64] TIAN Yuan, GAO Bin, WU Lei, et al. Effect of solution chemistry on multi-walled carbon nanotube deposition and mobilization in clean porous media [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, s 231 - 232(6): 79 - 87.
- [65] FAN W, JIANG X H, YANG W, et al. Transport of graphene oxide in saturated porous media: Effect of cation composition in mixed Na - Ca electrolyte systems [J]. Science of the Total Environment, 2015, 511: 509 - 515.
- [66] SALEH N, KIM H J, PHENRAT T, et al. Ionic strength and composition affect the mobility of surface-modified FeO nanoparticles in water-saturated sand columns [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(9): 3349 - 3355.
- [67] 刘庆玲, 徐绍辉, 刘建立. 饱和和多孔介质中高岭石胶体和 SiO₂ 胶体运移行为比较 [J]. 土壤学报, 2008, 45(3): 445 - 451.
- [68] LIU Xueying, O CARROLL D M, PETERSEN E J, et al. Mobility of multiwalled carbon nanotubes in porous media [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(21): 8153 - 8158.
- [69] LI Yang, CHEN Xin, GU Ning. Computational investigation of interaction between nanoparticles and membranes: hydrophobic/hydrophilic effect [J]. Journal of Physical Chemistry B, 2008, 112(51): 16647 - 16653.
- [70] JAISI D P, SALEH N B, BLAKE R E, et al. Transport of Single-Walled Carbon Nanotubes in Porous Media: Filtration Mechanisms and Reversibility [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(22): 8317 - 8123.
- [71] JOHNSON R L, JOHNSON G O, NURMI J T, et al. Natural organic matter enhanced mobility of nano zerovalent iron [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(14): 5455 - 5460.
- [72] WANG Dengjun, SU Chunming, LIU Chongxuan, et al. Transport of fluorescently labeled hydroxyapatite nanoparticles in saturated granular media at environmentally relevant concentrations of surfactants [J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2014, 457: 58 - 66.