

不同温度下紫色土与黄壤的水分持续性耗散特征

李沙沙¹, 韦杰^{1,2,3}, 徐文秀¹, 苟宇¹, 罗华进¹

(1. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 401331; 2. 三峡库区地表过程与环境遥感
重庆市重点实验室, 重庆 401331; 3. 重庆师范大学 装配式土地整治工程技术中心, 重庆 401331)

摘要: [目的] 研究温度对紫色土和黄壤耕地表土水分耗散的影响, 为紫色土区田间土壤水分管理提供依据。[方法] 采集紫色土和黄壤耕地表层土壤, 分别在 20 ℃, 30 ℃ 和 40 ℃ 下恒温观测土壤水分耗散过程, 并计算不同时段蒸发量和蒸发速率、平均蒸发速率、累积蒸发量等指标。[结果] ① 紫色土和黄壤的水分时段蒸发量、时段蒸发速率、平均蒸发速率及累积蒸发量均表现为: 40 ℃ > 30 ℃ > 20 ℃, 但仅在土壤水分蒸发量递增阶段存在显著差异 ($p < 0.05$)。② 3 种温度条件下, 紫色土和黄壤时段蒸发量、时段蒸发速率、平均蒸发速率均呈先增后减趋势, 最终趋于稳定。相比而言, 紫色土累积蒸发量均小于黄壤, 且差值随着时间的推移而增大。③ 紫色土和黄壤水分累积蒸发量整体呈先快速变化后缓慢变化趋势。[结论] 紫色土和黄壤水分耗散过程受温度影响较大, 在相同温度下也存在差异, 尤其是在高含水率阶段较为明显。

关键词: 土壤水分耗散; 温度梯度; 紫色土; 黄壤

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)03-0051-06

中图分类号: S152.7

文献参数: 李沙沙, 韦杰, 徐文秀, 等. 不同温度下紫色土与黄壤的水分持续性耗散特征[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 51-56. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.03.009; Li Shasha, Wei Jie, Xu Wenxiu, et al. Continuous water loss comparisons between purple soil and yellow soil at various temperatures [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(3): 51-56.

Continuous Water Loss Comparisons Between Purple Soil and Yellow Soil at Various Temperatures

Li Shasha¹, Wei Jie^{1,2,3}, Xu Wenxiu¹, Gou Yu¹, Luo Huajin¹

(1. School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Environment Remote Sensing in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China; 3. Engineering Research Center for Pre-fabricated Land Consolidation, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: [Objective] The soil water dissipation features between purple soil and yellow soil at different temperatures were compared, in order to provide a basis for field management of soil water in the purple soil area. [Methods] The topsoil on purple soil and yellow soil farmland were collected to observe the process of water dissipation at three different temperatures (20, 30 and 40 ℃) conditions, and the evaporation amount and evaporation rate, average evaporation rate and cumulative evaporation amount were then calculated. [Results] ① The evaporation amount, the evaporation rate, the average evaporation rate and the cumulative evaporation amount of purple soil and yellow soil were ranked as 40 ℃ > 30 ℃ > 20 ℃, however, the significant difference only occurred in the incremental stage of soil water evaporation ($p < 0.05$). ② Under the three different temperature conditions, the evaporation amount, the evaporation rate and the average evaporation rate of purple soil and yellow soil increased first and then decreased, and finally tended to be stable. In contrast, the

收稿日期: 2018-09-21

修回日期: 2018-12-07

资助项目: 国家自然科学基金项目“紫色土坡耕地土石复合坎结构与水土保持效应研究”(41471234); 重庆市教委科技项目(KJZD-K201800502)

第一作者: 李沙沙(1994—), 女(汉族), 河北省广平县人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化治理。E-mail: lss@cqu.edu.cn.

通讯作者: 韦杰(1979—), 男(汉族), 四川省苍溪县人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: wei_jie@mails.ucas.ac.cn.

cumulative evaporation amount of purple soil was less than that of yellow soil, and the difference increased with time. ③ The cumulative evaporation amount of soil water changed rapidly at first and then slowly. [Conclusion] The dissipation processes of purple soil and yellow soil are greatly affected by the drying temperature, and the differences occur at the same temperature, especially at the stage of high water content.

Keywords: soil water loss; temperature gradient; purple soil; yellow soil

土壤水分耗散包括土壤水分蒸发和植物蒸腾散失,其中土壤水分蒸发指在一定条件下,土壤水不断汽化并不断向空气中扩散的过程。农作物生长期间,土壤水分蒸发是干旱季节土壤水分损减的主要途径,如玉米生长期间,棵间土壤水分蒸发量可占水分耗散总量的 43% 及以上^[1]。

研究表明,土壤水分蒸发受到温度、土壤质地、覆盖物等诸多因素的影响^[2-6]。土壤水分蒸发量与温度呈正向协同关系^[2],蒸发速率与温度呈极显著正相关关系^[3],同时,土壤水分蒸发失水比率随着温度的升高而增大^[4]。但在同一温度下,黏性小、气孔多的土壤水分累积蒸发量明显较大^[5]。覆盖物具有抑制土壤水分蒸发的作用,在高含水率阶段尤为明显,可使土壤水分含量保持在较高水平,满足作物生长需要^[6]。土壤含水率变化引起土体胀缩,导致土壤孔隙度变化,也会对土壤水分蒸发过程产生影响^[7]。虽然影响土壤水分耗散的因素诸多,但各阶段的决定因子不同,一般认为土壤水分耗散初期的蒸发强度主要取决于外界条件与土壤表面条件^[8],随着试验的进行,土壤蒸发强度开始低于大气蒸发力,土壤水分耗散主要受土壤输水能力限制^[9]。

紫色土区蒸发量大且降雨时间分布不均,极端天气条件下蒸发量大于降雨量,季节性干旱为该地区最常见的农业灾害性气候^[10]。但是紫色土区季节性干旱研究主要集中在干旱胁迫对消落带植物的影响,有关耕地土壤水分耗散的研究相对较少,不能有效指导耕地土壤水分管理与农业生产干旱抵御实践。本研究选取紫色土区杨家沟小流域 2 种常见土壤(紫色土和黄壤)为试验材料,利用烘干法对紫色土区干旱频发季节常见温度下土壤水分耗散特征进行试验研究,分析不同温度下紫色土和黄壤水分耗散特征,以深化

紫色土区季节性干旱有效防御措施研究,为紫色土区耕地土壤墒情盈亏预测及土壤改良,耕作制度改善等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

杨家沟小流域位于重庆市沙坪坝区虎溪镇,西靠缙云山脉,属亚热带季风性湿润气候,年平均气温 18.3 ℃,年降水量 1 082.9 mm,热量和水分资源丰富,但降水季节分布不均,多集中于 5—10 月。地貌属于盆东平行岭谷低山丘陵区,地形由窄条状山脉和宽缓的丘陵台地组成,海拔为 175~815 m,地表起伏明显。土壤类型主要为紫色土和黄壤,自然植被为亚热带常绿阔叶林。据重庆市气象局公布的农业气象数据(2010 年 9 月至 2018 年 8 月),沙坪坝区 6—9 月份气温多为 23~39 ℃,≥35 ℃ 高温日数在 2~24 d 之间,由于持续晴热高温天气,表层土壤(0—10 cm)常出现干旱。

1.2 样品采集与试验设计

试验土壤样品于 2017 年 10 月采自杨家沟小流域的紫色土和黄壤坡耕地。样地海拔分别为 275 m 和 481 m,主要种植作物有萝卜(*Raphanus sativus*)、黄豆(*Glycine max*)和小白菜(*Brassica campestris*)等,地块内皆无杂草。采样时间为降雨后 12 h 左右,样地内尚有少量积水。利用容积为 100 cm³ 的环刀采集垄沟表层土壤,采样点沿垄沟水平方向排列,环刀使用时保证与地面垂直,每个样地内采集 9 个试验土样和 3 个备用土样,编号密封,带回实验室利用 1/100 电子天平称重后,使用恒温烘箱进行烘干试验。另外,在样地采样点邻近位置采集约 0.5 kg 土样进行土壤理化性质测定(表 1)。采样完成后,对采样地进行修复。

表 1 供试土壤基本理化性质

土壤类型	土壤质地	土壤初始含水率/%	有机质/%	pH 值	容重/(g·cm ⁻³)	颗粒组成/%		
						黏粒(<0.002 mm)	粉粒(0.002~0.05 mm)	砂粒(>0.05~2 mm)
紫色土	轻壤土	20.72±1.01	2.25±0.12	7.03	1.67±0.97	11.82±0.15	65.80±0.85	22.38±0.97
黄壤	重壤土	24.30±1.03	1.14±0.23	4.02	1.32±0.12	13.69±0.03	83.65±0.24	2.66±0.25

根据研究区气候特点,共设计了 3 种试验温度,分别为 20 ℃,30 ℃和 40 ℃。将土样分别以 3 个为 1 组

置于预先调好温度的恒温烘箱内,对其水分耗散进行连续观测(累积时长为 1 200~1 560 min)。根据土壤

水分耗散的一般规律,前 2 h 内每 20 min 测定一次含水量,2~6 h 内每 30 min 测定 1 次,6 h 以后每 60 min 测定 1 次。最终将土壤样品置于 105 °C 下烘干 8 h,以测定土壤初始含水量(质量百分比)。

文中表征土壤水分耗散特征的含水量(%)采用常见的质量百分比进行描述,即土壤水分质量(g)与烘干土质量(g)之比;时段蒸发量(%)指相邻测定时间点所测土壤含水量的差值;蒸发速率(%/min)实际上为“蒸发率”,其中时段蒸发速率指土壤水分时段蒸

发量与对应时长的比值,平均蒸发速率指累积蒸发量与对应时长的比值;累积蒸发量(%)指初始含水量与各时间点所测土壤含水量的差值。

2 结果与分析

2.1 土壤水分时段蒸发量与温度的关系

总体来看,紫色土和黄壤水分时段蒸发量在 3 种不同的温度条件下均呈现先增加后减少变化趋势,含水量则呈现近似线性衰减(图 1)。

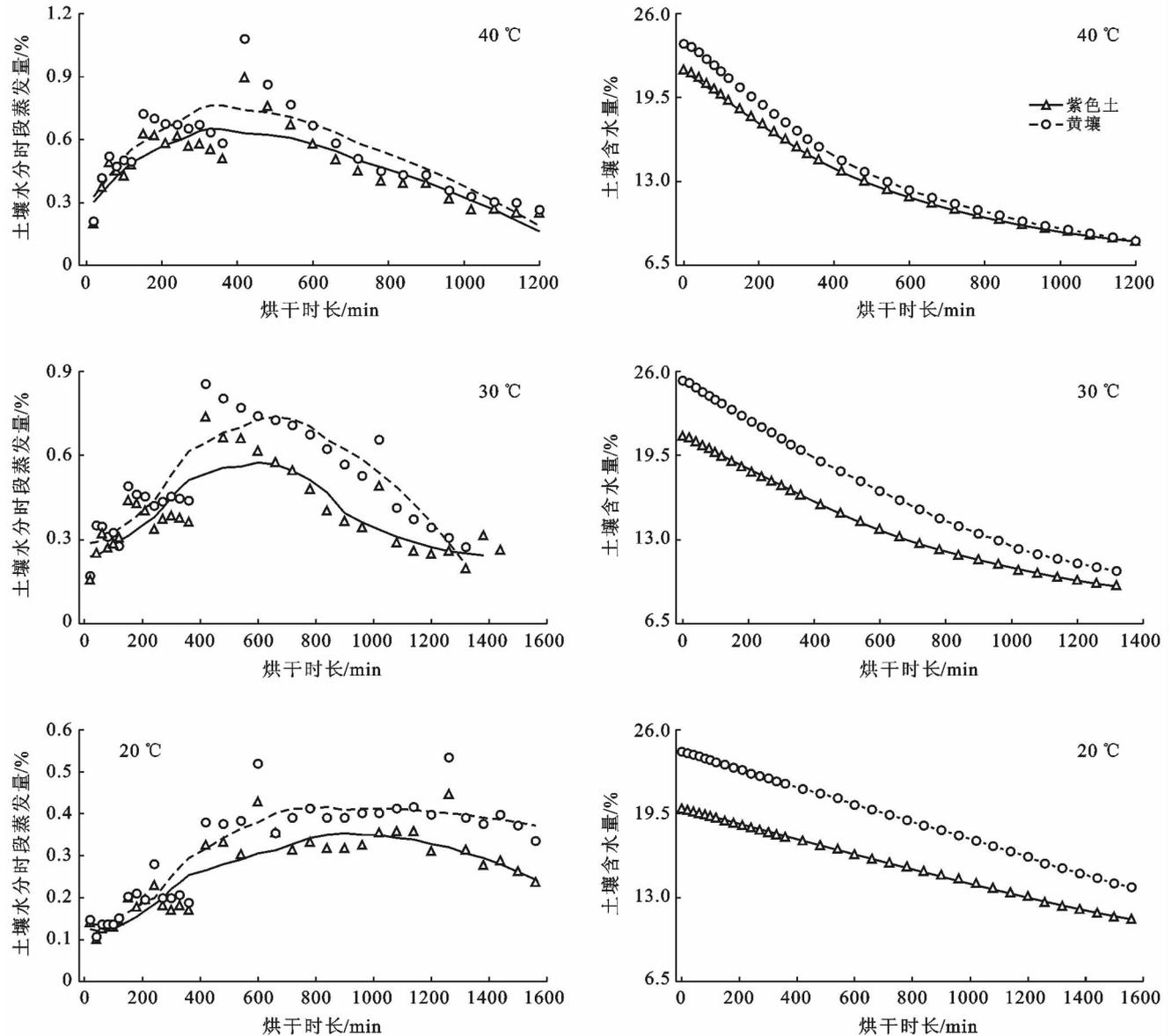


图 1 不同温度下紫色土与黄壤时段蒸发量与含水量特征

土壤水分时段蒸发量具有明显的阶段性特征,温度为 20 °C 时,0~1 260 min 内紫色土与黄壤水分的时段蒸发量均明显增加,分别从 0.09% 和 0.11% 增加到 0.44% 和 0.53%。从第 1 260 min 至试验结束(1 560 min),土壤水分蒸发量呈下降趋势,紫色土下

降了 191%,黄壤下降了 161%。温度为 30 °C 和 40 °C 时,“增—减”拐点均发生在第 420 min,但温度为 40 °C 时,2 种土壤的水分时段蒸发量“增—减”拐点值分别为 0.89%,1.08%,较温度为 30 °C 时要高 1.2 倍左右,较 20 °C 时可高达 2 倍以上。3 种温度条件下

的土壤水分时段蒸发量均存在差异,但在“拐点”出现之前更明显。此外,同一温度条件下,黄壤水分的各时段蒸发量和含水量均高于紫色土,其时段蒸发量差值在 20 ℃ 条件下随着时间的增加而逐渐增大,在 30 ℃ 和 40 ℃ 两种温度条件下随着时间的增加呈先增后减趋势,至试验结束时,其差值几乎为 0。

2.2 土壤水分蒸发速率与温度关系

紫色土和黄壤水分的时段蒸发速率在温度为 20 ℃ 时相对稳定,在 30 ℃ 和 40 ℃ 两种温度条件下均先增后减最后趋于稳定(图 2)。对紫色土而言,温度为 30 ℃ 和 40 ℃ 时,土壤时段蒸发速率在 0~60 min 内呈递增趋势,峰值分别为 0.015 6%/min 和 0.024 1%/min,温度为 20 ℃ 时,最大值出现在 240 min,为 0.007 4%/min,这比 30 ℃ 和 40 ℃ 时分别小 53% 和 69%。从 60~1 380 min 内,紫色土在 30 ℃ 和 40 ℃

两种温度条件下的水分蒸发速率均呈递减趋势,但变化率存在差异,具体而言,40 ℃ 时的土壤水分蒸发速率变化率分别为 30 ℃ 和 20 ℃ 的 657% 和 707%。从 1 380 min 至试验结束,紫色土水分蒸发速率渐趋于定值,且不同温度条件下的土壤水分蒸发速率无显著差异。温度为 20 ℃,30 ℃ 和 40 ℃ 时,黄壤的水分最大蒸发速率分别为 0.009 4%/min,0.017 3%/min 和 0.025 9%/min,分别比相同条件下的紫色土大 27%,11% 和 7%。但 2 种土壤的水分蒸发速率峰值出现时间相同。蒸发速率减少过程中,黄壤的变化率比相同条件下的紫色土大 100%~126%。当温度从 20 ℃ 升至 40 ℃ 时,黄壤的水分蒸发速率平均变化率变化幅度较紫色土增大了 82%,但土壤水分蒸发最大速率由 0.006 6% 增加至 0.025 9%,增加率为 293%,较紫色土减少了 8%。

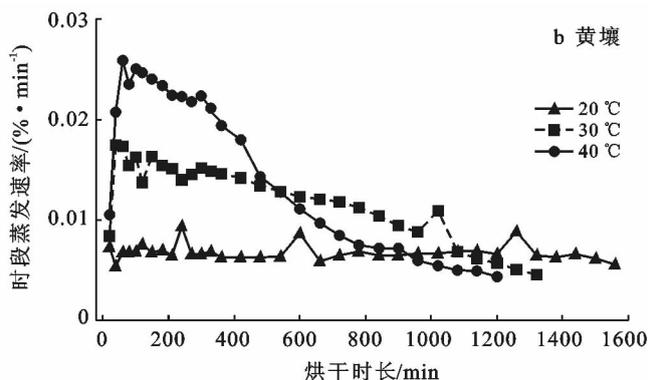
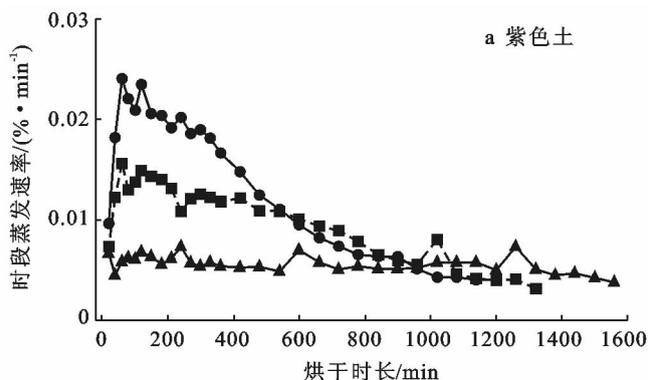


图 2 土壤水分时段蒸发速率

根据土壤水分累积蒸发量计算出的平均蒸发速率见图 3。如图 3 所示,土壤水分平均蒸发速率在温度为 20 ℃ 时相对稳定,而在 30 ℃ 和 40 ℃ 时随着时间的增加呈先增加后趋于稳定再逐渐减小变化。从 0~120 min,温度为 30 ℃ 时,2 种土壤的水分平均蒸发速率分别增加了 86% 和 88%,温度为 40 ℃ 时,平

均蒸发速率增加率达 100%。120 min~360 min,2 种土壤的水分平均蒸发速率变化均相对平稳,变化率仅为 1%~5%。360 min 至试验结束,2 种土壤的水分平均蒸发速率呈递减趋势,但黄壤在 30 ℃ 和 40 ℃ 时的水分平均蒸发速率变化率分别为紫色土的 55% 与 97%。

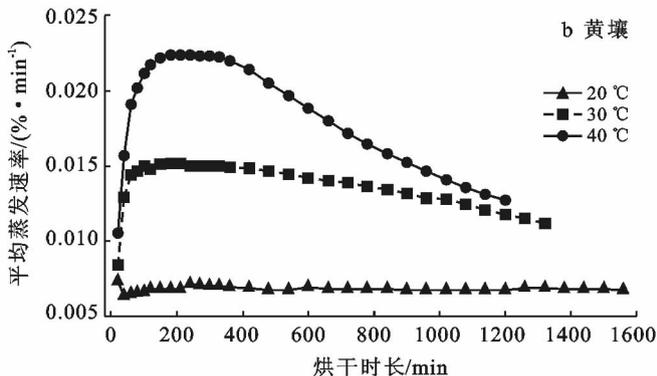
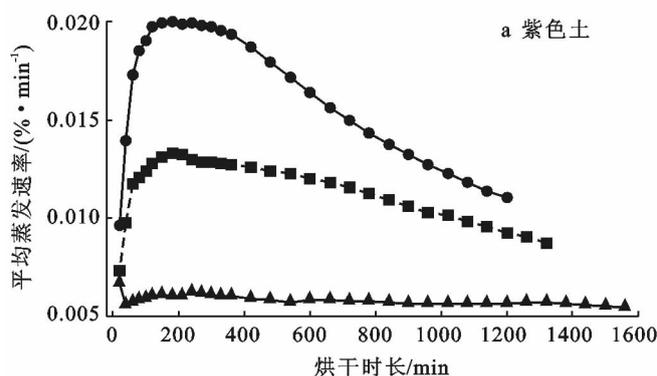
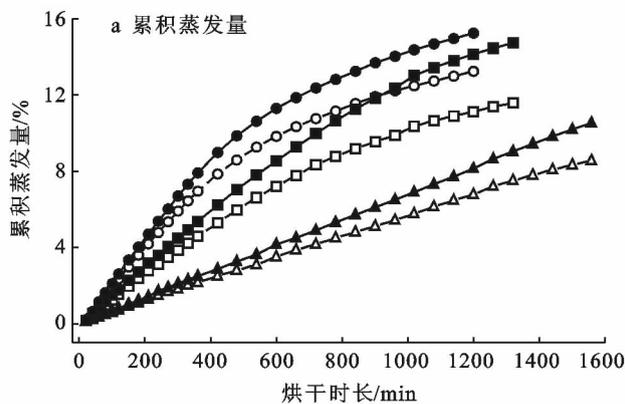


图 3 土壤水分平均蒸发速率随时间的变化

2.3 土壤水分累积蒸发量与温度关系

2种土壤的水分累积蒸发量在温度为20℃时均呈线性增加,在温度为30℃和40℃时均呈先快速增加后缓慢增加趋势(图4a)。随着时间推移,同一温度条件下紫色土与黄壤之间及同一土壤类型条件下3个温度之间的累积蒸发量差值均变大,但在0~120min内均无明显差异。从120min至试验结束,3种温度条件下的紫色土水分累积蒸发量均小于黄壤,这可能是由于黄壤容重较小,孔隙度较大,土壤水分更易流失。同一累积时长下,2种土壤的累积蒸发量均表现为40℃>30℃>20℃,说明温度升高可以增加



土壤水分耗散量。此外,紫色土和黄壤的累积蒸发量与初始含水量的比值(累积蒸发失水比)均随着温度的升高而逐渐增大(图4b),但温度为20℃时,2种土壤的累积蒸发失水比曲线基本重合,温度为30℃和40℃时,中后期紫色土累积蒸发失水比小于黄壤,差异不显著。试验条件范围内,土壤水分总蒸发量变化范围为8.56%~15.23%,占土壤初始含水量的43%~65%,说明土壤水分主要通过蒸发而损失。其中,20℃下紫色土水分累积蒸发失水比对比40℃由43.33%增加至61.52%,黄壤由43.30%增加至64.48%。

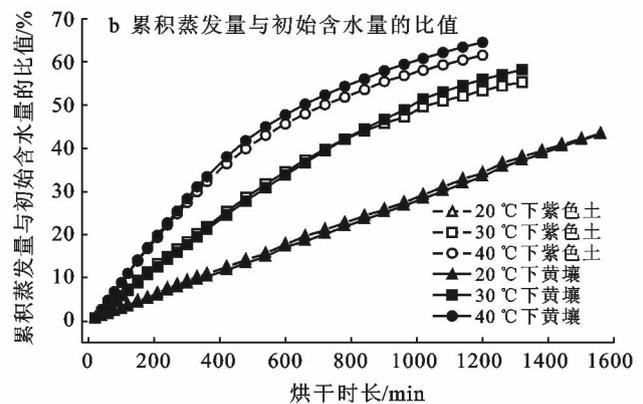


图4 土壤水分累积蒸发量及其占土壤初始含水量比例随时长变化

Gardner等^[11]认为,累积蒸发量与时间的平方根呈线性关系,本试验对土壤水分累积蒸发量与时长的关系进行分析,结果可表示为:

$$E = at^b \quad (1)$$

式中: E ——累积蒸发量(%); t ——时间(min); a , b ——常数, a 和 b 的取值见表2。下同。

表2 土壤水分累积蒸发量与烘干时长的拟合曲线参数

土壤类型	温度/℃	a	b	R^2
紫色土	20	0.008	0.949	0.999
	30	0.029	0.824	0.969
	40	0.055	0.769	0.943
黄壤	20	0.007	0.991	0.999
	30	0.027	0.870	0.978
	40	0.055	0.790	0.943

由方程 $E = at^b$ 可知,当 $t = 1$ 时, $E = a$,可知方程式中 a 值为初始累积蒸发量(第1min内的蒸发量)。随着温度的增加,2种土壤的 a 值均逐渐增加。当温度条件相同时,紫色土 a 值大于黄壤,但没有明显的差异,这与图4(a)中的结果相同。

由 $E = at^b$ 推算土壤水分平均蒸发速率:

$$V = dE/dt = abt^{(b-1)} \quad (2)$$

式中: V ——土壤水分平均蒸发速率(%/min)。

由公式(2)可知, ab 与 $t^{(b-1)}$ 共同决定土壤水分平均蒸发速率,不同试验条件下 ab 和 $(b-1)$ 值见表3。

表3 不同试验条件下 ab 和 $b-1$ 值

土壤类型	温度/℃	ab	$b-1$
紫色土	20	0.008	-0.051
	30	0.024	-0.176
	40	0.042	-0.231
黄壤	20	0.007	-0.009
	30	0.023	-0.130
	40	0.043	-0.210

紫色土和黄壤的 ab 值均表现为:40℃>30℃>20℃,说明温度升高可明显提高土壤初期蒸发速率。影响土壤水分蒸发速率的另一个因子 $(b-1)$ 表现规律相反,紫色土和黄壤均为:40℃<30℃<20℃,说明温度越高,土壤水分平均蒸发速率减小阶段的变化率越大。随着时间的增加,40℃下 $(b-1)$ 值较20℃的相对减少量大于30℃下较20℃减少量,所以随着时间的延长,20℃,30℃和40℃下土壤水分平均蒸发速率差异会逐渐减小。

3 讨论

土壤水分耗散与温度及土壤类型密切相关,不同

温度下水汽压梯度不同,不同类型土壤的颗粒组成及孔隙度存在差异,这些均导致土壤水分蒸发量及蒸发速率等土壤水分耗散指标存在差异。本研究中土壤水分时段蒸发量数据的多重比较分析表明,土壤水分时段蒸发量递增阶段,不同温度之间紫色土水分时段蒸发量差异显著($p < 0.05$),黄壤水分时段蒸发量差异也达到了显著水平($p < 0.05$),土壤水分时段蒸发量递减阶段,仅黄壤 30 °C 与 40 °C 之间存在显著差异($p < 0.05$),说明在高含水率时土壤水分蒸发量受温度影响较大,可能是因为在烘干初期土壤水分饱和条件下,土壤蒸发水量主要由液态水通量提供,由于水汽压梯度的存在,土壤水分蒸发速率迅速增大,而饱和水汽压受温度影响较大^[12-13]。因此,在高温晴热天气下,应加强关注干旱对水田的影响。

本研究中同一温度条件下紫色土水分时段蒸发量、时段蒸发速率、平均蒸发速率及累积蒸发量均小于黄壤,供试土壤容重为紫色土 > 黄壤,这与 An 等^[14]对容重变化与土壤水分特征的依赖关系的研究结果相符。黄壤容重较小,较大孔隙可能较为丰富,而土壤水分主要储存在土壤较大孔隙中,较大孔隙的毛管势较小,只需要较小的吸力值,就能引起土壤含水量的变化,同时土壤孔隙度是土壤容重的函数,容重越小,孔隙度越大,土壤越容易失水^[15]。李开元等^[16]研究表明初始含水率越高,土壤累积蒸发失水比越小,而本试验条件下,紫色土初始含水率小于黄壤,但累积蒸发失水比表现为紫色土 ≤ 黄壤,与其结果相反,原因可能在于供试黄壤有机质含量较低,保水性差^[17],在旱情易发季节,可以通过及时施用农家肥等有机肥来预防干旱。

土壤水分耗散受多种因素影响,本试验于室内模拟条件下进行,与野外实际水分耗散条件存在风速、空气湿度及土层厚度等差异,土壤水分耗散量不同,但变化规律具有一致性^[18]。此外,本研究供试土壤的有机质、容重、质地等因素均存在一定差异,关于土壤水分耗散特征影响因素的研究需要进一步展开。

4 结论

(1) 同一土壤类型,土壤水分时段蒸发量、时段蒸发速率、平均蒸发速率及累积蒸发量均随温度的升高而增大,但在烘干后期低含水率阶段,不同温度间相应指标值渐趋一致。

(2) 紫色土与黄壤水分时段蒸发量、时段蒸发速率和平均蒸发速率均呈先增后减最后稳定趋势。紫色土累积蒸发量小于黄壤,随着时间的推移,两者差值不断增大。30 °C 和 40 °C 下土壤累积蒸发失水比

均表现为紫色土小于黄壤,20 °C 下 2 种土壤累积蒸发失水比近似相同。

(3) 紫色土和黄壤水分累积蒸发量与时间的关系均可用函数 $E = at^b$ 表达,式中,参数 a 为土壤水分蒸发初期的累积蒸发量,随温度的升高而增大。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 胡兵辉,王维,张红芳. 西南干热河谷休闲农田温度与蒸发量日变化规律及协同关系[J]. 干旱地区农业研究,2014,32(5):259-265.
- [3] 刘合满,曹丽花,马和平. 西藏林芝地区农田土壤蒸发对大气温湿度的响应[J]. 生态科学,2013,32(2):241-245.
- [4] 潘英华,雷廷武,赵军. PAM 与 PG 对土壤水分蒸发的影响[J]. 土壤通报,2008,39(5):990-994.
- [5] 孙树国,张建国,徐新文,等. 塔克拉玛干地区土壤质地以及灌溉水水量及水质对土壤蒸发的影响[J]. 土壤通报,2009,40(6):1245-1249.
- [6] 原翠萍,张心平,雷廷武,等. 砂石覆盖粒径对土壤蒸发的影响[J]. 农业工程学报,2008,24(7):25-28.
- [7] 武科,赵闯,张文,等. 干湿循环作用下膨胀土表观胀缩变形特性[J]. 哈尔滨工业大学学报,2016,48(12):121-127.
- [8] Yamanaka T, Takeda A, Shimada J. Evaporation beneath the soil surface: Some observational evidence and numerical experiments [J]. Hydrological Processes, 2010,12(13/14):2193-2203.
- [9] 赵丹,李毅,冯浩. 砂石条形覆盖下土壤水分蒸发动态研究[J]. 土壤学报,2015,52(5):1058-1068.
- [10] 刘祥梅. 三峡库区的气候评价及近 54 年来的气候变化[D]. 重庆:西南大学,2007.
- [11] Gardner H R, Gardner W R. Relation of water application to evaporation and storage of soil water[J]. Soil Science Society of America Journal, 1969,33(2):192-196.
- [12] 华孟. 物理的土壤学[M]. 北京:农业出版社,1983,117-118.
- [13] 依艳丽. 土壤物理研究法:灌溉与非灌溉土壤的物理学[M]. 北京:北京大学出版社,2009,126-128.
- [14] An Ni, Tang Chaosheng, Xu Shikang, et al. Effects of soil characteristics on moisture evaporation[J]. Engineering Geology, 2018,239:126-135.
- [15] 舒凯民,樊贵盛. 砂壤黄土比水容量对土壤容重变异敏感性分析[J]. 土壤通报,2016,47(4):814-819.
- [16] 李开元,李玉山. 黄土高原土壤在不同给水条件下的蒸发性能[J]. 干旱地区农业研究,1991(3):77-84.
- [17] 刘效东,乔玉娜,周国逸. 土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用[J]. 植物生态学报,2011,35(12):1209-1218.
- [18] 王铁行,陈晶晶,李彦龙. 非饱和黄土地表蒸发的试验研究[J]. 干旱区研究,2014,31(6):985-990.