中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

紫色土坡耕地农田生态系统蒸散发与水分利用效率及其影响因素

陈露，章熙锋，王艳强，高美荣，唐家良

引用本文:
陈露, 章熙锋, 王艳强, 等. 紫色土坡耕地农田生态系统蒸散发与水分利用效率及其影响因素[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(6): 991–1007.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200757

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

施肥方式对紫色土农田生态系统N2O和NO排放的影响

Effects of fertilization regimes on N2O and NO emissions from agro–ecosystem of purplish soil

中国生态农业学报. 2018, 26(2): 203–213 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.171158

黑河中游绿洲区玉米冠层阻抗的环境响应及模拟

Response of maize canopy to environmental factors in the middle reach oasis of Heihe River Basin

中国生态农业学报. 2017, 25(2): 247–257 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160772

应用修订的Shuttleworth–Wallace模型对半干旱区覆膜玉米蒸散的研究

Estimation of evapotranspiration in maize fields with ground mulching with plastic film in semi–arid areas using revised Shuttleworth–Wallace model

中国生态农业学报. 2016, 24(5): 674–683 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151184

长三角地区稻麦轮作生态系统净碳交换及其环境影响因子

Characteristics of net ecosystem exchange and environmental factors of rice–wheat rotation system in the Yangtze River Delta of China

中国生态农业学报. 2015(7): 803–811 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150007

川中丘陵区紫色土冬小麦/夏玉米轮作氨挥发研究

Ammonia volatilization in winter wheat/summer maize rotation system of purple soil in hilly area of Central Sichuan Basin

中国生态农业学报. 2015(11): 1359–1366 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150683

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 6 月 第 29 卷 第 6 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jun. 2021, 29(6): 991−1007

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200757

陈露, 章熙锋, 王艳强, 高美荣, 唐家良. 紫色土坡耕地农田生态系统蒸散发与水分利用效率及其影响因素[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(6): 991−1007

CHEN L, ZHANG X F, WANG Y Q, GAO M R, TANG J L. Temporal characteristics and influencing factors of evapotranspiration and water use efficiency on sloping farmlands with purple soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(6): 991−1007

紫色土坡耕地农田生态系统蒸散发与水分利用效率及其影响因素*

陈 露[1,2], 章熙锋[1,2], 王艳强[1], 高美荣[1], 唐家良[1**]

(1. 中国科学院山地表生过程与生态调控重点实验室/中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所 成都 610041; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要: 蒸散发与水分利用效率是农田生态系统碳水循环的重要衡量指标。本研究利用涡度相关技术对紫色土坡耕地生态系统进行连续观测, 获取 2014—2018 年碳水通量数据, 分析紫色土冬小麦-夏玉米轮作下的雨养坡耕地农田生态系统蒸散发和水分利用效率变化特征及其对主要环境因子的响应规律。结果表明: 紫色土坡耕地农田生态系统蒸散发日变化规律呈单峰型趋势, 最大值均在 14:00 前后出现; 一年中 8 月日蒸散发最高, 1 月最低; 夏季日变化幅度最大, 春季次之, 冬季和秋季变化较为平缓。叶面积指数、温度为影响紫色土坡耕地蒸散发的最主要因子, 其次为饱和水汽压差。水分利用效率在 9:00—17:00 期间基本呈先下降后回升的变化规律, 冬季水分利用效率为全年最高; 叶面积指数、CO_2 通量为影响水分利用效率的主要因子, 其次为温度, 相对湿度、饱和水汽压差等水分条件也显著影响了水分利用效率。年际差异分析结果表明, 紫色土坡耕地夏季玉米生长盛期的水分利用效率对降雨响应更为敏感, 同时冬季土壤水分为冬季蒸散发和水分利用效率的关键影响因子。未来仍需对紫色土坡耕地农田生态系统生长盛期蒸散发与水分利用效率动态进行深入研究, 从而为探明当地主要作物应对春夏季季节性干旱威胁的系统性策略提供科学依据。

关键词: 紫色土坡耕地; 农田生态系统; 冬小麦-夏玉米轮作; 蒸散发; 水分利用效率; 涡度相关

中图分类号: Q143; P464 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Temporal characteristics and influencing factors of evapotranspiration and water use efficiency on sloping farmlands with purple soil*

CHEN Lu[1,2], ZHANG Xifeng[1,2], WANG Yanqiang[1], GAO Meirong[1], TANG Jialiang[1**]

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Growth and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Evapotranspiration (ET) and water use efficiency (WUE) are important indices of the carbon and water cycles in farmland ecosystems. There are few systematic studies on the water cycle process in the soil-plant-atmosphere continuum in

* 国家科技重大专项项目(2017ZX07101001-02)、四川省科技计划项目(2018SZDZX0027, 2020JDR0404)、中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所“135”项目(SDS-135-1702)资助

** 通信作者: 唐家良, 主要研究方向为流域水文。E-mail: jltang@imde.ac.cn
陈露, 主要研究方向为生态水文。E-mail: chenlu@imde.ac.cn

收稿日期: 2020-09-18 接受日期: 2020-12-17

* This study was supported by the National Science and Technology Major Project of China (2017ZX07101001-02), the Key Science and Technology Projects of Sichuan Province (2018SZDZX0027, 2020JDR0404), and the “135” Project of Institute of Mountain Hazards and Environment of Chinese Academy of Sciences (SDS-135-1702).

** Corresponding author, E-mail: jltang@imde.ac.cn

Received Sep. 18, 2020; accepted Dec. 17, 2020

purple soil areas, and analyses of long-term changes in ET and WUE and its influencing factors in agroecosystems are lacking. In this study, the eddy covariance system was used to obtain carbon-water flux data from 2014 to 2018. The dynamic characteristics of ET and WUE in agroecosystems under rain-fed winter wheat-summer corn rotations on sloping farmlands with purple soil and the impact of major environmental factors were analyzed to provide a scientific basis for seasonal drought and rational water responses. The results showed that the diurnal dynamics of ET had a single peak, and the maximum value of each month occurred around 14:00. ET was highest in August and lowest in January. Seasonally, the magnitude of ET diurnal variation was the largest in summer, followed by spring, and there was relatively little variation in winter and autumn. Leaf area index and air temperature were the most important environmental factors affecting ET of the purple soil in sloping farmlands, followed by the vapor pressure deficit. ET had a linear relationship with net radiation and vapor pressure deficit (P<0.05). ET also had an exponential growth relationship with air and soil temperature (P<0.05) but tended to decrease with increasing air relative humidity (P<0.05). The diurnal dynamics of WUE from 9:00 to 17:00 was first decreasing and then increasing. Seasonally, WUE in winter was the largest, and in winter and autumn was higher than in spring and summer. The leaf area index and carbon dioxide (CO_2) flux were the dominant factors affecting WUE of the purple soils in sloping farmland, and air temperature, relative humidity, and vapor pressure deficit were the secondary factors influencing WUE. WUE decreased exponentially with net radiation and soil temperature (P<0.05) and decreased linearly with the increasing air temperature (P<0.05). WUE first decreased and then increased with the soil water content. WUE was significantly negatively correlated with the vapor pressure deficit (P<0.05) and significantly positively correlated with the air relative humidity (P<0.05). The differences between two hydrological years showed that WUE in the maize planting period in summer may be more sensitive to precipitation, and the soil moisture in winter had a significant effect on ET and WUE in the sloping farmlands. Due to the lack of data series during this study, further study of the detailed dynamics of ET and WUE in the purple soil sloping farmland ecosystem is needed to explore the systematic adaptation strategies of seasonal drought in the local crops during spring and summer.

Keywords: Sloping farmland with purple soil; Farmland ecosystem; Winter wheat-summer corn rotation; Evapotranspiration; Water use efficiency; Eddy covariance

蒸散发包括蒸发和蒸腾，是土壤-植被-大气连续体(Soil-Plant-Atmosphere Continum, SPAC)中水循环的重要环节之一，是水量和能量平衡的主要构成，也是农田生态系统水分消耗的主要途径[1-2]和水分利用效率计算中的重要基础参数。同时蒸散发还是影响区域气候的主要因素，受环境及生物多方面因素的影响[3]。随着通量观测技术的不断发展，涡度相关法成为植被与大气间物质及能量交换最有效的测定方法。与其他方法相比，涡度相关法物理基础完备，理论假设少，实现了对水、热、碳的长期、连续和非破坏性的同步、定点测量[4-5]。因此，利用涡度相关系统测定群体 CO_2 通量及水分通量耦合基础上的水分利用效率已被广泛采用[6]。在农学领域，作物耗水与干物质生产之间的关系用作物的水分利用效率(WUE)表示，是评价作物生长状态的综合生理生态重要参数之一[7]。根据研究尺度的不同，作物 WUE 的研究通常分为叶片、植株和生态系统 3 个水平，其中生态系统水分利用效率可表征田间或区域的水分利用效率，能更加客观地反映实际作物的水分利用状况[8]。目前涡度相关法是测定生态系统水分利用效率的最有效方法[9]。

紫色土主要分布于长江中上游地区，四川盆地丘陵地区分布最广[10]。紫色土丘陵区虽然降雨量丰富，但降雨主要集中于雨季，季节性干旱发生频率较高，为春旱、初夏旱地区，季节分配不均带来的季节性干旱或洪涝问题，导致农作物的生长发育受到影响[11]。此外，该区域土壤具有“浅薄化”的特征，土壤蓄水能力相对较弱，植物可利用的有效水量较少[12-14]。紫色土为一种高生产力的岩性土，因此该区域是四川省玉米(*Zea mays*)、小麦(*Triticum aestivum*)、甘薯(*Dioscorea esculenta*)等粮食作物的主产区[15-16]。如何更有效地利用水资源、提高水分利用效率、利用现有水资源保障较高的作物产量是节水高效农业的核心问题。但目前关于紫色土坡地作物水分利用效率的研究极少，仅有的研究关注于作物水分利用来源与策略及随时间变化的规律[17]，如魏玲[18]利用稳定氢氧同位素技术分析得出 0~10 cm 土壤水为浅薄紫色土区主要农作物玉米、小麦各生长期的最主要水分来源；Zhao 等[19]认为紫色土区域玉米苗期主要利用表层土壤自由水，随着生长发育玉米开始利用更深层的土壤束缚水。但少有关于 SPAC 水分循环过程的系统研究，缺乏较长时间序列下作物系统蒸散发与水分利用效率的动态变化及其影响因素分析。本研究采用涡度相关系统对四川盆地中部典型紫色土坡耕地 2014—2018 年蒸散发与生态系统水分利用效率变化特征及其影响因素进行系统观测和分析，为区域内紫色土坡耕地应对季节性干旱和合理利用水资源提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

研究地点(105°27′E, 31°16′N)位于四川盆地中北部地区盐亭县大兴乡境内的中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站(简称盐亭站)综合观测场, 地处涪江支流弥江、湍江的分水岭上。该地区属中亚热带湿润季风气候区, 年均气温 17.3 ℃, 多年平均降雨量 826 mm, 年内降雨分布极不均匀, 其中 85%集中于夏季和秋季。研究区域土壤为蓬莱镇组石灰性紫色土, 质地为中壤, 饱和含水量为 0.37~0.43 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, 田间持水量为 0.31~0.36 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, 萎蔫系数为 0.23~0.29 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, 有效水含量为 0.06~0.09 $cm^3 \cdot cm^{-3}$[13], 为典型旱作土壤, 土层浅薄, 平均土层厚度约 60 cm, 且土壤剖面下层泥页岩透水较弱。该区域坡耕地农业模式主要为夏玉米与冬小麦或油菜(*Brassica chinensis*)轮作。本研究中综合观测样地海拔约 420 m, 位于流域内二台地上, 面积约 1600 m^2, 坡度 6°, 下垫面较为均一, 种植方式为玉米-小麦轮作, 样地周边均为相似的种植方式, 坡地上坡为柏树(*Cupressus funebris*)纯林, 台地边缘分布少量柏树, 从流域尺度上可视为典型农林复合生态系统。

1.2　观测仪器与数据采集

常规气象观测系统为 Vaisala 气象辐射自动监测系统(芬兰, Vaisala), 安装高度为 1.5 m。安装有 1 个四分量净辐射传感器(7900-144, K&Z CNR4, Kippzonen)、1 个雨量桶(TR-525USW, Texas Electronics)、2 个空气温湿度传感器(HMP 155A, Vaisala, Finland), 另有 5 个土壤温湿度传感器(70030, Stevens), 探头安装在 10~100 cm 土层深度。常规气象观测系统的数据采样频率为 30 min, 每 30 min 记录净辐射(R_n)、降水(P)、空气温度(T_a)、空气相对湿度(RH)、饱和水汽压差(VPD)、土壤含水量(SWC)、土壤温度(T_s)。

本研究采用涡度协方差法(Eddy covariance, EC, 也称涡度相关)测定 2014—2018 年紫色土坡耕地田间通量数据。开路式涡度相关系统包括 1 套三维超声风速仪(CSAT3)和 1 套开路式 CO_2/H_2O 气体分析仪(LI-7500A, LI-COR, USA), 安装高度 2.5 m。所有数据都使用数据采集器(Model 9210 XLITE, Sutron)以 10 Hz 的频率记录(Sutron Datalogger), 在线存储 30 min 的 CO_2 通量(carbon flux, F_c)、水汽通量(water flux, F_w)、蒸散发(ET)、摩擦风速(U_{star})、潜热通量(latent heat flux, LE)。

2014—2018 年综合观测场玉米与小麦生长季叶面积指数(LAI)数据、E-601B 型蒸发桶测定的蒸发量数据为四川盐亭农业生态系统国家野外科学观测站科学数据平台(http://yga.cern.ac.cn)共享数据。

1.3　研究方法

1.3.1　水分利用效率公式

水分利用效率为生态系统总初级生产力(GPP)与生态系统蒸散发(ET)的比值, 可表示为:

$$\mathrm{WUE} = \frac{\mathrm{GPP}}{\mathrm{ET}} \tag{1}$$

式中: ET 由涡度相关系统直接测得, GPP 由生态系统碳交换量(NEE)与生态系统呼吸量(R_{eco})计算获得, 表示为:

$$\mathrm{GPP} = \mathrm{NEE} + R_{eco} \tag{2}$$

式中: NEE 可由涡度相关系统直接测得。NEE 负值表示该农田生态系统为碳汇, 正值表示碳源。

根据 Lloyd-Tayloy 方程, 可知土壤温度为影响生态系统呼吸的主要因素[20]。夜晚作物光合作用停止, 农田生态系统碳交换量可认为是生态系统的呼吸量(R_{eco}), 因此可以利用夜间涡度相关系统所测碳通量与土壤温度拟合出估算生态系统呼吸量, 本研究所拟合的回归方程为:

$$R_{eco} = 0.0451\mathrm{e}^{0.0637T_s} \tag{3}$$

式中: T_s 指 10 cm 深度土壤温度, 将白天土壤温度代入公式(3), 可估算出白天生态系统呼吸量。

1.3.2　数据处理与分析

通量数据采用 Eddypro 6.2.1 软件进行标准预处理, 主要包括异常值剔除、坐标旋转、时间延迟修正、WPL 密度修正。剔除由于恶劣天气、湍流不充分等导致的不合理数据及摩擦风速小于 0.15 $m \cdot s^{-1}$ 所对应的数据。对于仪器故障和特殊天气等原因而造成的相邻时间内的缺失数据采取如下办法插补: 采用 MDV(平均日变化法)插补≤2 h 的数据, 缺失数据采用相邻几天相同时刻的平均值进行插补[21]。

将 2014—2018 年的蒸散发(ET)和农田生态系统水分利用效率(WUE)数据按月划分, 求每月同一时刻的平均值。研究区 11 月—翌年 5 月为冬小麦生长季, 6—10 月为夏玉米生长季, 结合气温和作物生长季节的分布特点, 本文以 3—5 月为春季(冬小麦生长盛期、收获期), 6—8 月为夏季(夏玉米生长期), 9—11 月为秋季(夏玉米收获期、休闲期及冬小麦种植期), 12 月—翌年 2 月为冬季(冬小麦生长初期)划分紫色土坡耕地的 4 个季节, 进而分析生态系统水分利用效率的季度差异。

使用 Microsoft Excel 2013 对数据进行整理及筛

选, IMB SPSS Statistics 20.0 软件对蒸散发、农田生态系统水分利用效率与环境因子进行 Pearson 相关性分析, 采用 OriginPro 9.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 紫色土坡耕地农田生态系统环境因子及作物叶面积指数变化特征

2.1.1 环境因子变化特征

研究区 2014—2018 年日净辐射均值及饱和水汽压差、大气温度、土壤温度 8:00—18:00 均值均呈现出夏季高、冬季低的季节变化特征(图 1), 曲线为单峰型。净辐射最大值出现在 6 月, 为 15.74 $MJ\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$; 饱和水汽压差、气温、土壤温度最大值出现在 7 月下旬, 分别为 4.56 kPa、29.87 ℃、28.32 ℃。

通过盐亭站气象观测场蒸发皿、雨量筒测得的 2014—2018 年各月平均蒸发量、降水量(图 2)可知, 紫色土坡耕地冬季(12 月、1 月、2 月)及 11 月蒸发量大于降水量, 春季(3 月、4 月、5 月)蒸发量稍大于降水量, 夏季(6 月、7 月、8 月)、9 月及 10 月降水量远远大于蒸发量。从月际分布特征来看, 紫色土坡耕地雨季水量盈余, 冬季相对缺水。但由于夏玉米生长旺盛期也在夏季, 雨季月内不均匀的降水分布特征和紫色土持水能力较弱[17]是导致夏玉米面临季节性干旱威胁的主要原因。

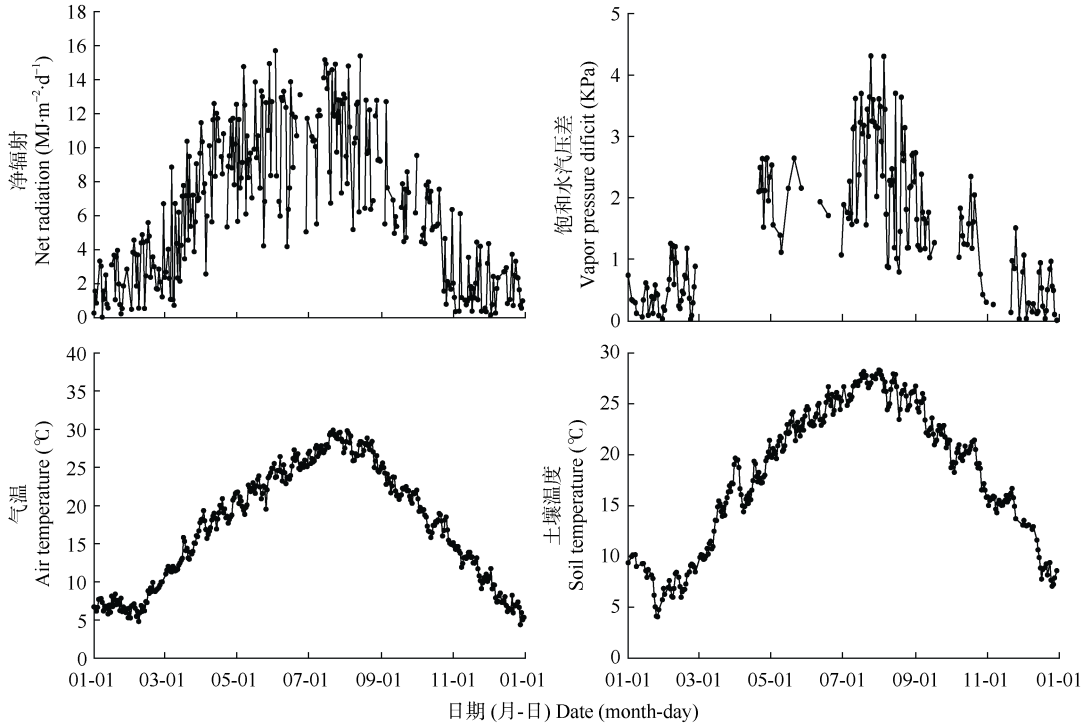

图 1 2014—2018 年紫色土坡耕地农田生态系统环境因子变化特征

Fig. 1 Variation characteristics of environmental factors of agro-ecosystem of slopy farmland in purple soil area from 2014 to 2018

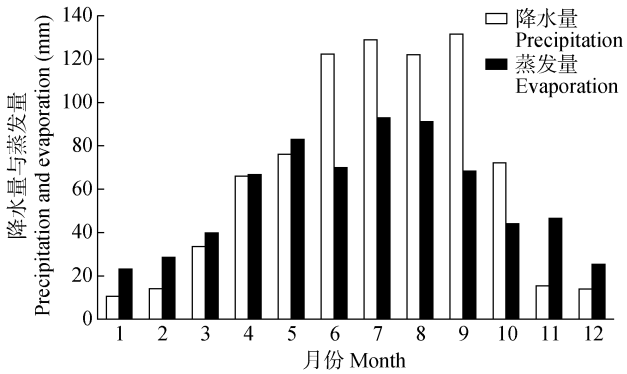

图 2 2014—2018 年紫色土坡耕地各月平均降水量与蒸发量对比

Fig. 2 Comparison of annual precipitation and evaporation on slopy farmland in purple soil area from 2014 to 2018

农田生态系统蒸散发及水分利用过程与降水、土壤水分状况、蒸发强度密切相关。以 2015 年为例, 紫色土坡耕地全年降水量及不同深度土壤含水量的动态变化特征(图 3)显示, 全年降水主要集中在雨季, 其中 6 月和 8—9 月的降水量较大。降水过程明显影响着土壤含水量的变化, 其中表层土(0.10 m 深度)土壤含水量随降雨事件而发生较大波动(0.15~0.43 $cm^3\cdot cm^{-3}$ 之间变化), 对降水过程的响应较为敏感。而更深层土壤含水量对降雨的响应较小, 相对滞后。0.80 m 深度土壤含水量明显大于其他各层, 非降雨日 0.10 m 深度土壤含水量最低。除 5 月份外, 观测样地 8 月初也存在土壤含水量极低的情况, 这与 7 月份整月降水量均较少有关, 说明夏玉米也可能存在干旱胁迫[16,22]。

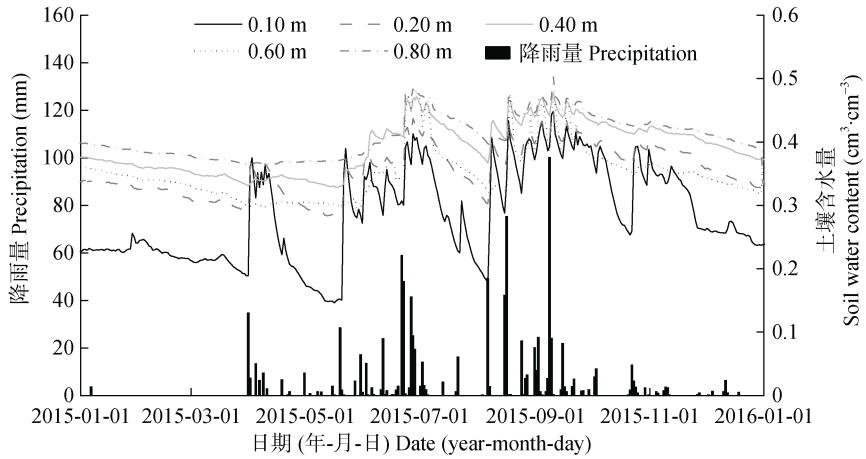

图 3　紫色土坡耕地降水量与不同深度土壤含水量的变化特征(以 2015 年为例)

Fig. 3　Variation characteristics of precipitation and soil water contents at different depths of slopy farmland in purple soil area in 2015

2.1.2　作物叶面积指数变化特征

作物生长季叶面积指数 LAI 具有明显的变化特征(图 4), 其中 11 月—翌年 5 月为冬小麦生长季, 6—10 月为夏玉米生长季, 5 月、9 月、10 月因收获期作物叶片枯黄无法准确测定叶面积, 故无数据。小麦生长期内, LAI 随作物生长呈先缓慢后迅速增加的趋势, 其中分蘖期(1—2 月)、抽穗期(3—4 月)LAI 增长迅速。夏玉米 LAI 随作物的生长发育呈急剧增长的趋势。

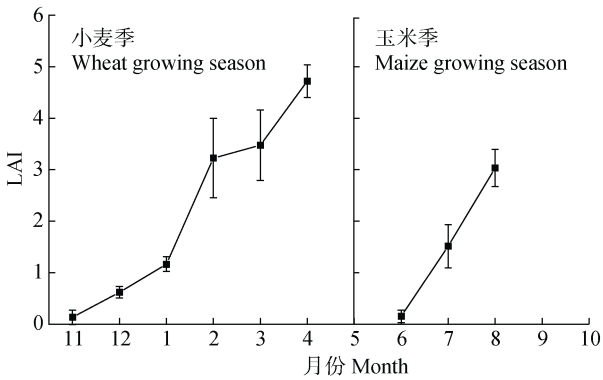

图 4　2014—2018 年紫色土坡耕地农田生态系统作物叶面积指数(LAI)变化特征

Fig. 4　Variation characteristics of crop leaf area index (LAI) of agro-ecosystem of slopy farmland in purple soil area from 2014 to 2018

2.2　紫色土坡耕地农田生态系统不同季节平均蒸散发日变化特征

2014—2018 年紫色土坡耕地蒸散发数据按月计算每天同时刻的水汽通量的平均值, 反映当月平均日变化, 并按季节划分。结果显示紫色土坡耕地各月蒸散发均表现出明显的日变化规律(图 5), 呈现夜晚低、白天高的“单峰型”变化趋势, 且均在 14:00 左右达最大值, 主要是由于日出后随着太阳辐射不断增强, 蒸散速率不断加快, 14:00 前后温度最高, 太阳辐射也相对较强, 水分蒸发和植物蒸腾相对较剧烈。之后, 随着太阳辐射减弱, 蒸散速率也逐渐减弱, 蒸散发在 19:00—19:30 降低到日出前的水平。而夜间蒸散速率较低, 波动较为平缓, 各月蒸散发均接近 0, 小于 0.15 $mm·h^{-1}$, 其原因为夜间温度低, 无太阳辐射, 蒸发和植物蒸散都很微弱。

整个观测期间各月蒸散发存在差异, 各月蒸散发峰值分别为: 1 月 0.089 $mm·h^{-1}$, 2 月 0.198 $mm·h^{-1}$, 3 月 0.292 $mm·h^{-1}$, 4 月 0.339 $mm·h^{-1}$, 5 月 0.213 $mm·h^{-1}$, 6 月 0.279 $mm·h^{-1}$, 7 月 0.376 $mm·h^{-1}$, 8 月 0.454 $mm·h^{-1}$, 9 月 0.196 $mm·h^{-1}$, 10 月 0.158 $mm·h^{-1}$, 11 月 0.106 $mm·h^{-1}$, 12 月 0.092 $mm·h^{-1}$, 最大日峰值出现在 8 月, 最小日峰值出现在 1 月, 峰值均出现在 13:00—14:00。从月变化来看, 7 月、8 月蒸散发明显高于其他月份, 其次为 3 月、4 月, 11 月、12 月、1 月蒸散发最低。

从季节变化来看, 紫色土坡耕地农田生态系统夏季蒸散发最大, 且日间变化幅度最大, 日间峰值在 0.4 $mm·h^{-1}$ 左右; 春季日变化规律与夏季相似, 但峰值和变化幅度降低; 冬季和秋季的蒸散发较小, 日内蒸散发曲线较为平缓, 日间变化幅度较小, 其中冬季日间峰值在 0.1 $mm·h^{-1}$ 左右波动。总体而言, 夏季(7—8 月)气温较高, 降雨量大, 且玉米生长旺盛, 叶面积指数增加, 因此较其他季节农田生态系统蒸散作用更强; 春季(2—4 月)小麦逐渐发育成熟, 进而导致植物蒸腾作用增强。

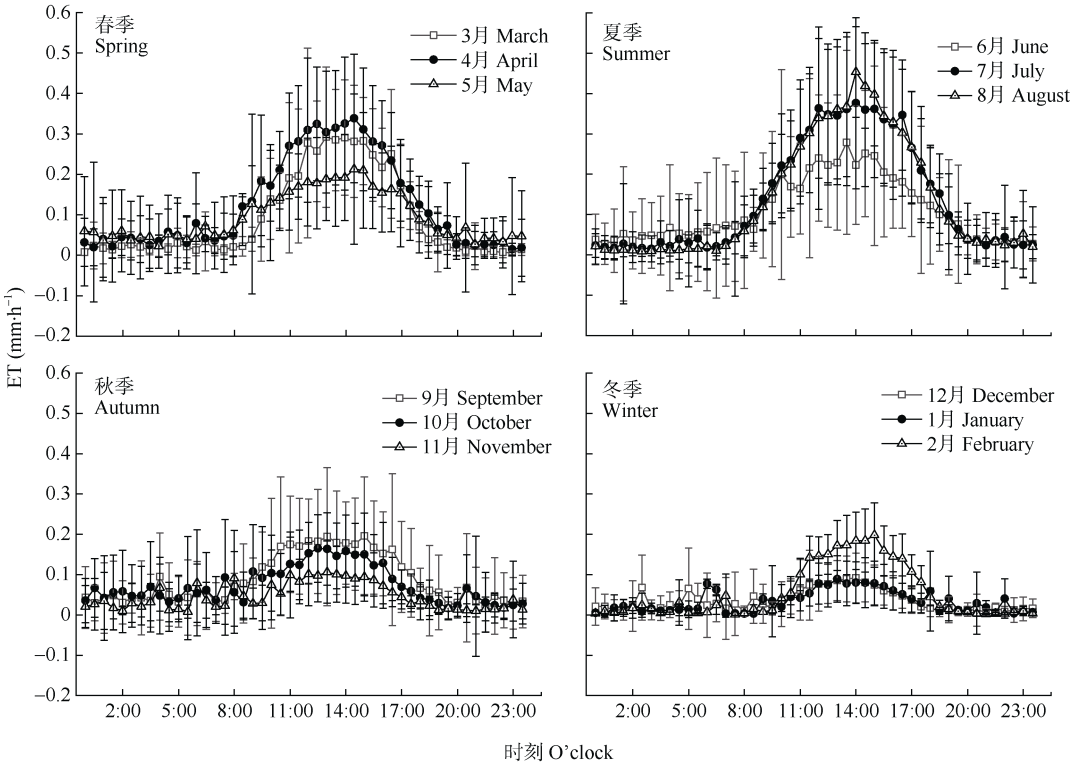

图 5 2014—2018 年紫色土坡耕地农田生态系统不同季节蒸散发(ET)日动态

Fig. 5 Diurnal dynamics of evapotranspiration (ET) of agro-ecosystem of slopy farmland in purple soil area in different seasons from 2014 to 2018

2.3 紫色土坡耕地农田生态系统不同季节水分利用效率日变化特征

从图 6 可知，紫色土坡耕地各季节 CO_2 通量在 9:00—17:00 均为负值，且均呈“早晚高、中午低”的变化趋势，表明 CO_2 通量方向是由大气向紫色土坡耕地生态系统输送，呈现出“碳汇效应”。夏季(玉米生长期)CO_2 通量变化幅度高于其他季节。与此相关，GPP 日变化规律总体呈现出“早晚低，中午高”的趋势，日出后随着太阳辐射的增强，光合作用逐渐增强，GPP 逐渐升高，正午后随着太阳辐射的逐渐减弱，GPP 有所下降。整体而言，夏季与冬季 GPP 高于秋季与春季。

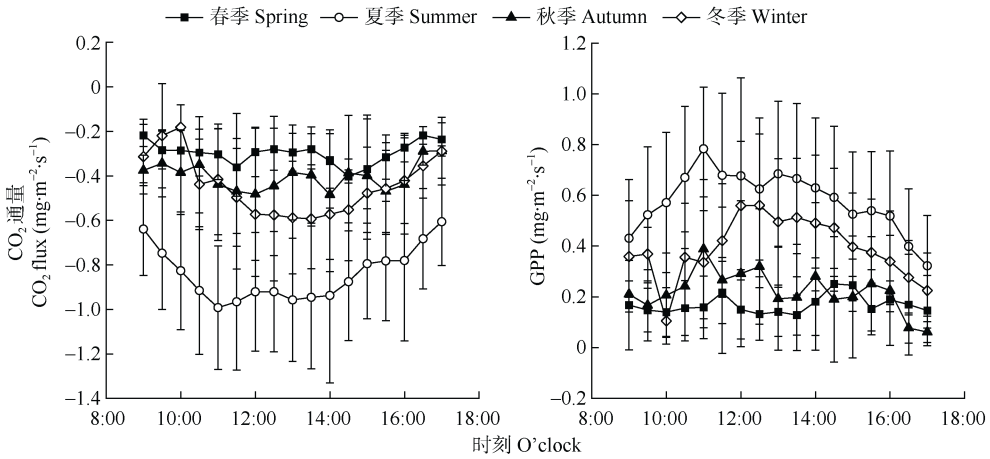

图 6 2014—2018 年紫色土坡耕地农田生态系统不同季节 CO_2 通量与总初级生产力(GPP)日动态

Fig. 6 Diurnal dynamics of CO_2 flux and gross primary productivity (GPP) of agro-ecosystem of slopy farmland in purple soil area in different seasons from 2014 to 2018

水分利用效率是农田碳循环与水循环的重要组成部分，能反映作物对水分的利用能力。不同季节紫色土坡耕地生态系统水分利用效率平均日变化规律(9:00—17:00)总体呈逐渐下降趋势(图 7)。日出后随太阳辐射不断增强，光合速率和蒸腾速率不断增强，光合作用增加速率高于蒸腾作用，

水分利用效率达最大值。随着太阳辐射不断增强，蒸腾速率增大，水分利用效率逐渐减弱。各季度均在 15:00 之后出现水分利用效率加速降低的趋势，可能与该时段光合作用强度急剧降低有关[23]。春季水分利用效率日变化趋势略有不同，可能与春季积温不高，早晨和傍晚蒸腾作用强度明显偏低有关。

整体而言，冬季与秋季水分利用效率要高于春季与夏季，其中冬季水分利用效率最高，春季水分利用效率最低。全年最大日峰值出现在 2 月(小麦生长旺盛期)，为 19.7 mg·g^{-1}；最小日峰值出现在 5 月(小麦收获期)，为 3.13 mg·g^{-1}。

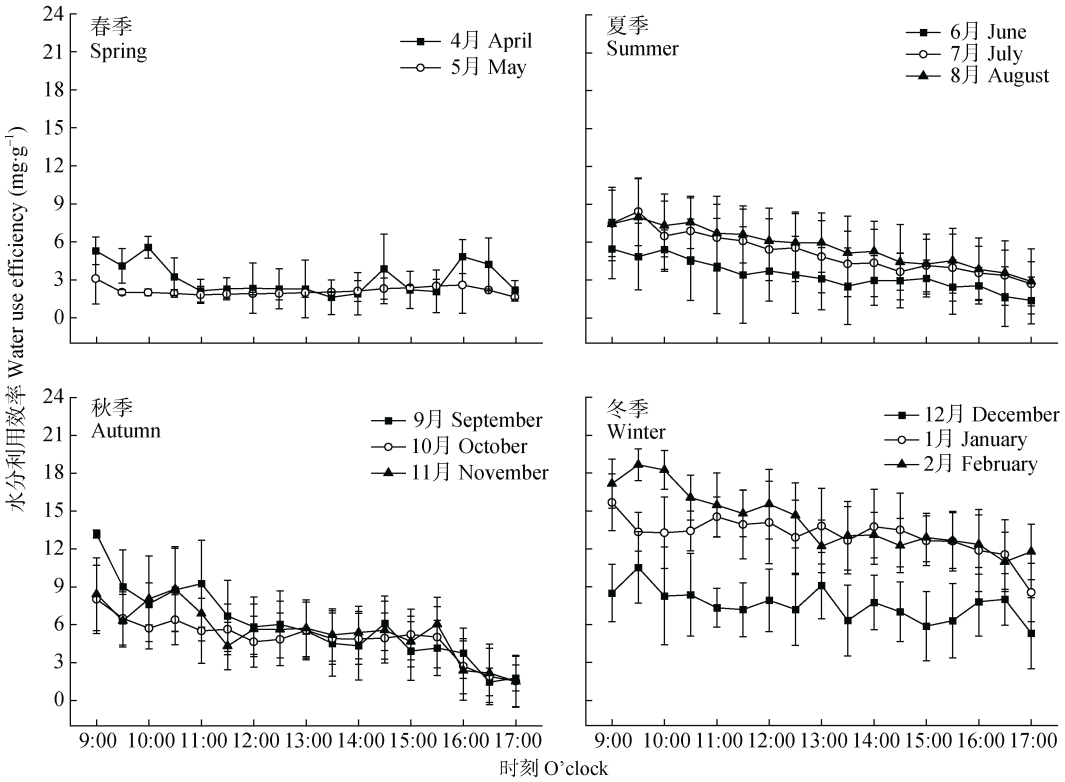

图 7　2014—2018 年紫色土坡耕地农田生态系统不同月份水分利用效率日动态

Fig. 7　Diurnal dynamics of water use efficiency of agro-ecosystem of slopy farmland in purple soil area in different seasons from 2014 to 2018

2.4　紫色土坡耕地农田生态系统 GPP、ET、T_R 和 WUE 的协同变化特征

从图 8 可知，观测期间总初级生产力(GPP)日均值呈现出冬夏高、春秋低的变化规律。冬季(1—2 月)、夏季(7—8 月)为作物的生长茂盛期，GPP 维持在较高的水平；而作物进成熟期，下茬作物播种期(5—6 月和 10—11 月)，GPP 维持在较低的水平。全年 GPP 平均值春季为 0.239 mg·m^{-2}·s^{-1}，夏季为 0.501 mg·m^{-2}·s^{-1}，秋季为 0.357 mg··m^{-2}·s^{-1}，冬季为 0.426 mg·m^{-2}·s^{-1}。

蒸散发 ET 日均值呈现出夏秋季高、冬春季低的单峰型变化规律，与净辐射、大气温度的变化趋势一致。此外，雨季 7—9 月 ET 维持在较高的水平。全年日平均最大 ET 为 0.177 g·m^{-2}·s^{-1}，最小为 0.013 g·m^{-2}·s^{-1}。生态系统呼吸量与土壤温度和蒸散发变化趋势较为一致，为夏秋季高、冬春季低的单峰型变化规律。与此同时，生态系统水分利用效率 WUE 呈冬季高、春季低的变化趋势，日平均水分利用效率春季为 2.86 mg·g^{-1}，夏季为 5.53 mg·g^{-1}，秋季为 6.00 mg·g^{-1}，冬季为 12.3 mg·g^{-1}。

2.5　紫色土坡耕地农田生态系统叶面积指数对蒸散发和水分利用效率的影响

研究区小麦生长季蒸散发与叶面积指数呈指数型曲线关系(图 9)。玉米生长季蒸散发与叶面积指数呈二次曲线关系：当 LAI<2.5，随 LAI 增加蒸散发也增加；当 LAI>2.5 时，随 LAI 增加蒸散发基本保持不变，略微下降(图 9)。小麦季水分利用效率与 LAI 均呈二次曲线关系：当 LAI<2.3 时，随着 LAI 的增大，WUE 增大，超过阈值后随着 LAI 的增大，WUE 减小(图 9)。玉米季 WUE 与 LAI 均呈先增大后减小的二次曲线关系，LAI 阈值为 1.7(图 9)。

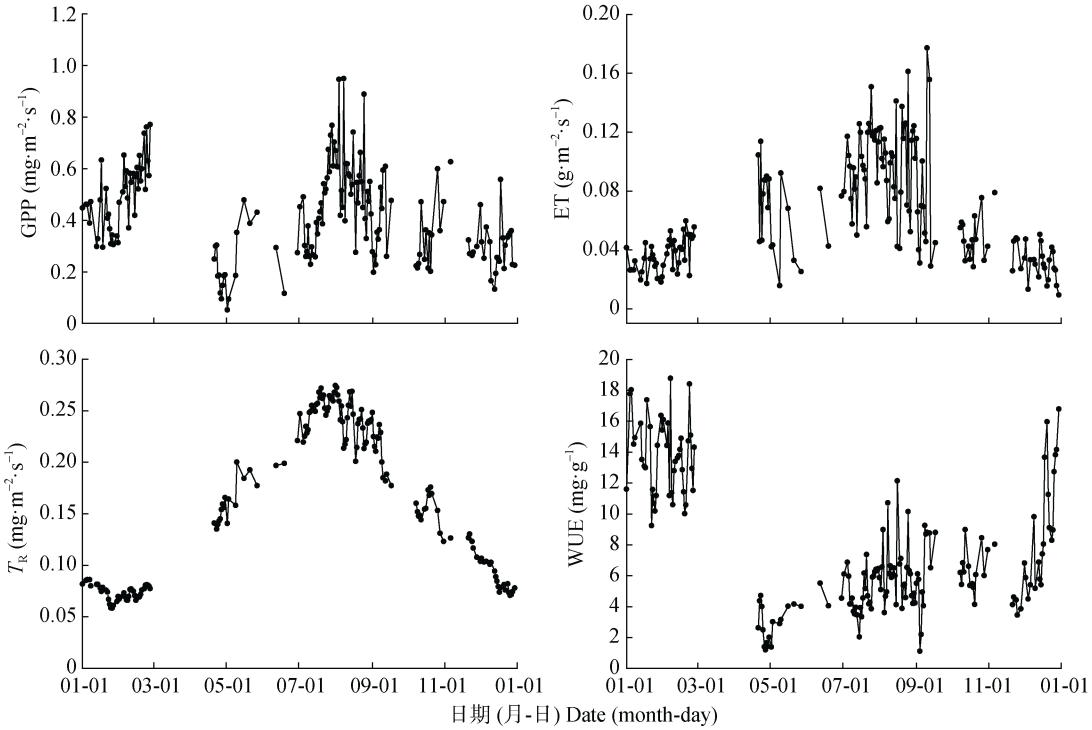

图 8 2014—2018 年紫色土坡耕地农田生态系统月平均总初级生产力(GPP)、蒸散发(ET)、呼吸速率(T_R)和水分利用效率(WUE)

Fig. 8 Monthly means of gross primary productivity (GPP), evapotranspiration (ET), respiration rate (T_R) and water use efficiency (WUE) of agro-ecosystem of slopy farmland in purple soil area from 2014 to 2018

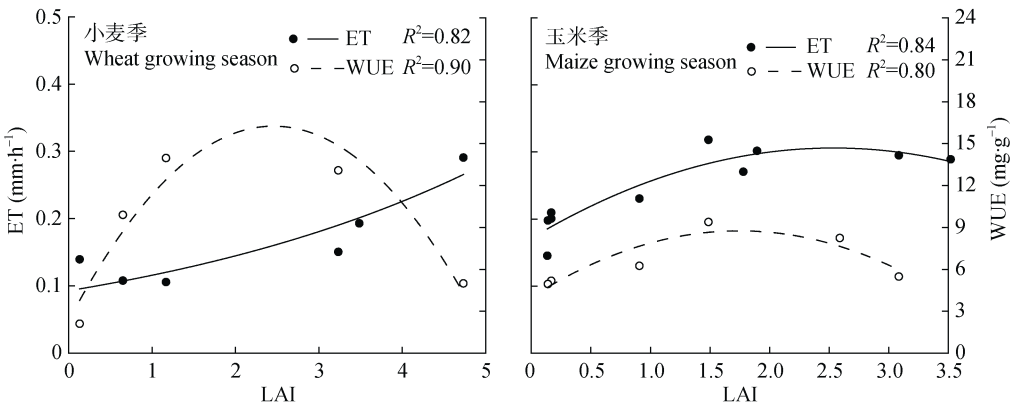

图 9 紫色土坡耕地农田生态系统蒸散发(ET)与水分利用效率(WUE)对叶面积指数(LAI)的响应特征

Fig. 9 Responses of evapotranspiration (ET) and water use efficiency (WUE) to leaf area index (LAI) of agro-ecosystem of slopy farmland in purple soil area

2.6 紫色土坡耕地农田生态系统蒸散发与环境因子的关系

环境因子是影响紫色土坡耕地蒸散强度的重要因素。从图 10 可知，紫色土坡耕地蒸散发随净辐射、饱和水汽压差的增大呈线性增长趋势，随空气温度、土壤温度的增大呈指数型增长的趋势，随空气相对湿度的增大呈减小的趋势，随风速的增大呈先增大后减小的二次曲线趋势(图 10)。坡耕地蒸散发随土壤含水量的增大无明显变化趋势。

为了细致揭示作物不同阶段的蒸散发特点，本文针对不同季节不同环境因子的影响程度进行了深入分析(表 1)。春季蒸散发与净辐射、空气温度、风速、相对湿度、饱和水汽压差极显著相关(P<0.01)，与土壤含水量、土壤温度相关性不显著；夏季、秋季及冬季蒸散发与净辐射、空气温度、相对湿度、饱和水汽压差、土壤温度均呈显著相关关系(P<0.01)，此外夏季、冬季土壤含水量与蒸散发呈极显著负相关关系(P<0.01)，秋季土壤含水量与蒸散发呈极显

著正相关关系(P<0.01)。各季节净辐射、空气温度、相对湿度、饱和水汽压差均与蒸散发呈显著相关关系，说明净辐射、空气温度、相对湿度、饱和水汽压差为紫色土坡耕地蒸散发主要的环境影响因子。

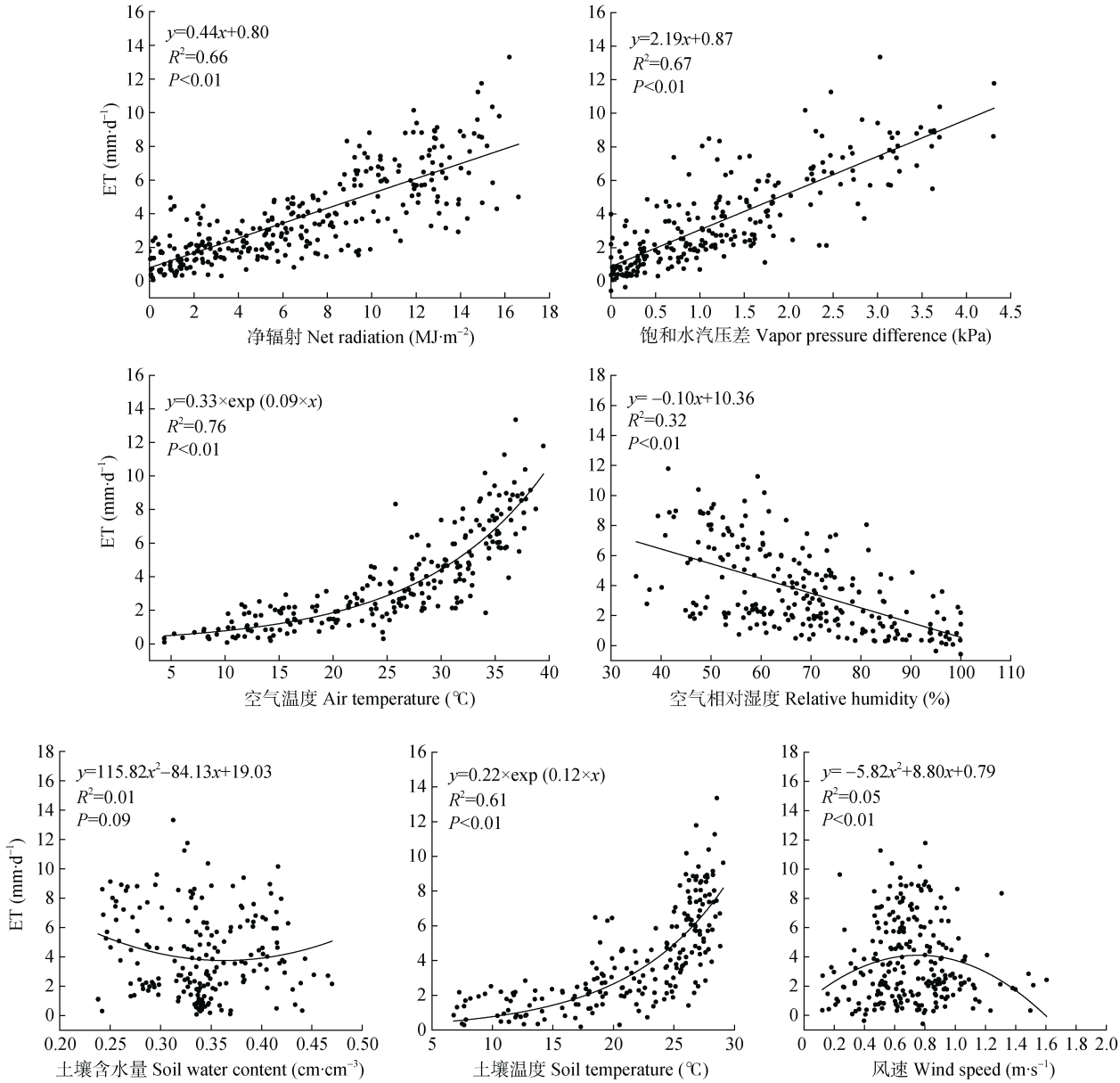

图 10　紫色土坡耕地农田生态系统蒸散发(ET)对环境因子的响应特征

Fig. 10　Responses of evapotranspiration (ET) to environmental factors of agro-ecosystem of slopy farmland in purple soil area

表 1　紫色土坡耕地农田生态系统不同季节蒸散发与环境因子的相关分析

Table 1　Correlation analysis of seasonal evapotranspiration and environmental factors of agro-ecosystem of slopy farmland in purple soil area in different seasons

环境因子 Environmental factor	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	全年 Annual
净辐射 Net radiation	0.276**	0.357**	0.430**	0.417**	0.461**
空气温度 Air temperature	0.502**	0.704**	0.681**	0.537**	0.685**
风速 Wind speed	0.265**	0.054*	0.095	0.213**	0.042
相对湿度 Relative humidity	−0.570**	−0.678**	−0.563**	−0.504**	−0.607**
饱和水汽压差 Vapor pressure deficit	0.573**	0.708**	0.682**	0.558**	0.677**
土壤含水量 Soil water content	0.062	−0.078**	0.376**	−0.523**	0.048
土壤温度 Soil temperature	−0.017	0.251**	0.618**	0.184**	0.548**

和*分别表示在 P<0.01 和 P<0.05 水平(双侧)显著相关。 and * indicate significant correlation at P<0.01 and P<0.05 levels (bilateral), respectively.

2.7 紫色土坡耕地农田生态系统水分利用效率与环境因子的关系

从图 11 可知，紫色土坡耕地农田生态系统水分利用效率与净辐射和土壤温度呈极显著指数型负相关关系(P<0.01)，与空气温度呈极显著线性负相关关系(P<0.01)；饱和水汽压差与水分利用效率呈极显著负相关关系(P<0.01)，空气相对湿度与水分利用效率呈极显著正相关关系(P<0.01)。水分利用效率随土壤含水量和风速的增大呈先降低后增加的二次项趋势(P<0.01)。

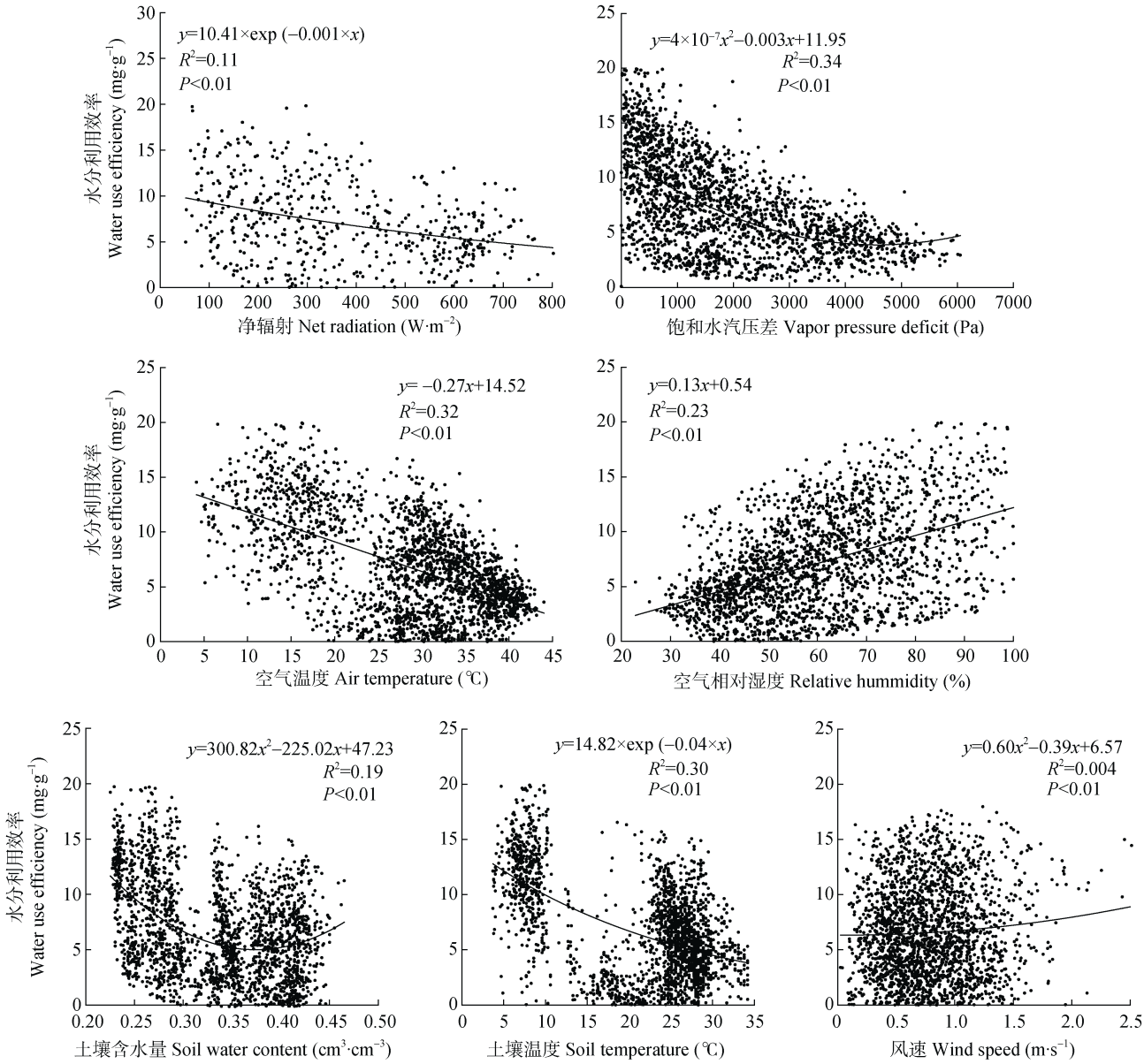

图 11 紫色土坡耕地农田生态系统水分利用效率对环境因子的响应特征

Fig. 11 Responses of water use efficiency to environmental factors of agro-ecosystem of slopy farmland in purple soil area

具体而言，不同季节水分利用效率的主要驱动因子不同。春季除净辐射外其他环境因子对水分利用效率的影响均达显著水平(表 2)。各个季节中 CO_2 通量与水分利用效率的相关系数较高，均呈极显著负相关关系(P<0.01)；净辐射与各季水分利用效率的相关性均不显著，土壤温度与各季水分利用效率呈极显著负相关(P<0.01)。春季与夏季，水分利用效率与空气温度的负相关性极显著(P<0.01)，冬季空气温度与水分利用效率呈显著正相关关系(P<0.05)。冬季土壤含水量与水分利用效率呈极显著负相关关系(P<0.01)，其他季节土壤含水量与水分利用效率呈极显著正相关关系(P<0.01)。

表 2　紫色土坡耕地农田生态系统不同季节水分利用效率与环境因子的相关分析

Table 2　Correlation analysis of seasonal water use efficiency and environmental factors of agro-ecosystem of slopy farmland in purple soil area

环境因子 Environmental factor	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	全年 Annual
CO_2 通量 CO_2 flux	−0.825**	−0.633**	−0.661**	−0.684**	−0.326**
净辐射 Net radiation	−0.170	−0.032	0.053	0.025	−0.166**
空气温度 Air temperature	−0.647**	−0.377**	−0.082	0.084*	−0.223**
风速 Wind speed	−0.144*	−0.037	−0.206**	−0.120**	−0.053
相对湿度 Relative humidity	0.559**	0.365**	0.172**	0.281**	0.212**
饱和水汽压差 Vapor pressure deficit	−0.625**	−0.381**	−0.150**	−0.200**	−0.193**
土壤含水量 Soil water content	0.214**	0.078**	0.267**	−0.499**	−0.014
土壤温度 Soil temperature	−0.427**	−0.250**	−0.160**	−0.272**	−0.129**

和*分别表示在 $P<0.01$ 和 $P<0.05$ 水平(双侧)显著相关。 and * indicate significant correlation at $P<0.01$ and $P<0.05$ levels (bilateral), respectively.

3　讨论

3.1　紫色土坡耕地农田生态系统蒸散发动态变化特征及其环境因子

研究区 11 月—翌年 5 月为冬小麦生长季, 6—10 月为夏玉米生长季, 结合气温和作物生长季节的分布特点, 本文以 3—5 月为春季(冬小麦生长盛期、收获期), 6—8 月为夏季(夏玉米生长期), 9—11 月为秋季(夏玉米收获期、休闲期及冬小麦种植期), 12 月—翌年 2 月为冬季(冬小麦生长初期)。本研究对不同季节蒸散发研究发现, 紫色土坡耕地农田生态系统蒸散发具有明显的日变化规律, 不同季节蒸散发日动态均呈单峰型曲线, 且各月份蒸散发具有差异, 这与研究区下垫面环境条件变化紧密相关。本研究中涡度相关系统下垫面的农业种植模式为冬小麦-夏玉米轮作, 其中 5—10 月为夏玉米种植期, 11 月到次年 4 月为冬小麦种植期。赵丽雯等[24]通过研究黑河中游农田生态系统蒸散发认为, 玉米在生长初期到发育阶段, 土壤蒸发量大于蒸腾量, 从发育阶段开始由作物蒸腾占主导, 到后期蒸腾量减小, 土壤蒸发增加。本研究夏玉米生长季蒸散发随 LAI 的增大呈先增大后减小的趋势: 在夏玉米播种—出苗期(5—6 月)蒸散发日变化曲线相对平缓, 随着夏玉米的生长(7—8 月), 蒸腾速率加快, 农田蒸散发增大, 夏玉米生长后期(9—10 月)叶片衰黄枯老, 蒸散发降低。本研究与位于东南季风区的其他农田生态系统研究结果较为一致。如阳伏林等[25]指出黄土高原半干旱区春小麦农田生态系统蒸散发呈早晚低、中午高的日变化特征。王宇等[26]研究发现, 玉米农田生态系统蒸散发波动较大, 总体上夏季较大, 冬季较小。但与其他季风区农田生态系统蒸散发研究结果相比, 本研究日蒸散发峰值出现在 8 月(0.454 $mm\cdot h^{-1}$), 与锦州农田生态系统野外观测站的研究结果相近(0.45 $mm\cdot h^{-1}$), 明显高于黄土高原春玉米农田日蒸散发峰值(0.22 $mm\cdot h^{-1}$), 这可能与本研究区雨季降雨相对较丰富有关。

不同环境因子影响蒸散作用的机制不同, 紫色土坡耕地农田生态系统蒸散发的变化受各种环境因子共同的作用。净辐射为蒸散发提供了能量来源, 驱动着温度的变化及热量的交换[27], 其拟合方程符合线性关系式的决定系数(R^2=0.25, P<0.01)低于黄土高原春小麦农田生态系统(R^2=0.99)[25]和海南岛橡胶(*Hevea brasiliensis*)林生态系统(R^2=0.59)[28]; 略低于安吉毛竹(*Phyllostachys edulis*)林的春季拟合方程(R^2=0.26), 高于其冬季拟合方程(R^2=0.05)[29]。本研究中秋季净辐射与蒸散发相关性最强, 春季最低, 可能由于春季气候变化相对复杂, 故蒸散发与净辐射的相关性较低, 与刘玉莉等[29]的研究结果相符。在各季节空气温度与蒸散发相关性最好, 说明大气温度是影响紫色土坡耕地农田生态系统蒸散发最主要的环境驱动因子。空气温度对蒸散发的影响与净辐射相类似, 随着太阳辐射增加, 空气温度升高, 水分子运动更加剧烈, 水分蒸散强度增大[30]。此外, 温度的升高常伴随着水汽饱和压差的增大, 土壤、作物与大气间的水汽浓度差异为系统蒸散发提供了动力, 饱和水汽压差为表征水汽密度差异的重要指标可用来表示蒸散发的驱动力[31]。本研究中各季节空气饱和水汽压差均与蒸散发呈极显著正相关关系(P<0.01), 春季与冬季蒸散发与饱和水汽压差的相关性系数低于夏季与秋季, 主要原因为紫色土丘陵区降雨主要集中在雨季(夏、秋季), 而春季、冬季降雨少, 土壤田间持水量较低, 当饱和水汽压差增大

到一定程度时，作物为保持自身水量平衡而关闭气孔，从而降低蒸腾作用，故削弱了蒸散发与饱和水汽压差的正相关关系[29]。除此之外，空气相对湿度为影响研究区蒸散发的另一个重要环境因子。研究表明，空气中存在水汽有利于蒸散的发生，但当空气相对湿度超过一定范围时，植物叶表面和临近空气的相对压差会降低，不利于蒸散的发生[32]。紫色土地区全年空气相对湿度较大(年平均值为61.5%±16.9%)，全年各季节空气相对湿度与蒸散发呈极显著负相关关系(P<0.01)，二者拟合曲线呈二次项关系(R^2=0.46)，与刘国水等[33]对北京大兴区农田的拟合结果一致，略低于其涡度相关所测值的拟合结果(R^2=0.59)。风速通过减小空气动力学阻力加快蒸散[31]，本研究区夏季与秋季风速较小且变化幅度不大，因此风速与蒸散发相关关系不强(表 1)。研究表明，植物为维持体内水分平衡会降低气孔导度来减少水分的蒸腾散失，随着风速进一步增大蒸散发反而趋于降低，这种变化特点可能是由于作物气孔的自我防护机制导致的[34]。干旱及半干旱地区，土壤水分条件是影响蒸散发的重要环境因子[35-36]，而在土壤水分充足的条件下，净辐射为蒸散发的主要控制因素[37]。此外研究表明，植物蒸腾量与土壤含水量呈正相关关系，且不同深度土壤水分对蒸散发的贡献不同[38]，张晓娟等[28]认为 5 cm 土壤含水量为影响海南岛橡胶林蒸散发的主要环境因子之一。本研究中紫色土坡耕地秋季为夏玉米收获期和休闲期，蒸散发基本来自土壤蒸发，因此土壤含水量与蒸散发呈极显著正相关关系(P<0.01)。冬季土壤含水量与蒸散发呈极显著负相关关系(P<0.01)，与前人研究结果[28,25]不同，可能由于温度升高伴随着表层土壤含水量降低和蒸散发增大，同时意味着大气温度是影响紫色土坡耕地的主要环境因子。

3.2 紫色土坡耕地水分利用效率动态变化特征及其环境因子分析

水分利用效率为陆地生态系统碳循环和水循环的重要研究内容，也可以用于评估作物对水分的利用能力。本研究中紫色土坡耕地农田生态系统水分利用效率在各季节均具有明显的日变化规律，水分利用效率日峰值主要出现在清晨，这与之前的大多数研究结果一致[39-41]。在测定方法相同的条件下，本研究区年平均水分利用效率(6.82 $mg·g^{-1}$)远大于华北平原灌溉麦田温暖湿润年(1.52 $g·kg^{-1}$)和温暖干旱年(1.22 $g·kg^{-1}$)[42]，高于美洲通量网的 3 个农田通量站(3.0~3.5 $g·kg^{-1}$)[43]，略大于黄土高原半干旱区玉米农田生态系统(5.23 $g·kg^{-1}$)[44]；但日峰值(2.76~19.9 $mg·g^{-1}$)小于科尔沁沙地玉米群体的日峰值(0.025~0.191 $g·g^{-1}$)[40]。此外，紫色土坡耕地冬季与秋季水分利用效率高于春季与夏季。其主要原因为该区域雨季暴雨较多，但降水分布不均匀，使得水分利用效率较低，而冬季土壤含水量相对较低，作物可利用水分总量相对较少，且小麦叶面积指数较低，蒸散发损失较少，故冬季紫色土坡耕地小麦水分利用效率为全年最高。其后随着春季小麦生长，固定相同质量的 CO_2 所需要的水分减少，部分叶片衰老，光合能力下降，水分利用效率降低。此外秋季相较于夏季，温度和降水都大幅降低，蒸散作用低于春夏季节，因此水分利用效率相对较高。李辉东等[40]对科尔沁草甸生态系统的研究表明，植物生长中期水分利用效率高于生长初期和末期。美尔汗·黑扎特等[45]的研究发现，塔里木河下游胡杨(*Populus euphratica*)水分利用效率在开花期最高，展叶期和果熟期最低。战领等[43]认为水分利用效率随作物生长期的变化而变化，玉米生长初期较低，在生长旺盛期达最大，随着玉米成熟降低。总体而言，紫色土坡耕地生态系统研究结果同其他生态系统相似，无论夏玉米还是冬小麦生长盛期水分利用效率均高于其他生长期，水分利用效率随叶面积指数的增大呈先增大后减小的二次曲线趋势。因此从维持生态系统最大生产价值角度出发，保证作物生长盛期的水分供应是紫色土坡耕地土壤水分管理的重要策略。

生态系统水分利用效率受植被类型[46-47]、生物因素[40,48]及外界环境因素[49,42]的影响，且不同环境因素对水分利用效率的影响程度不同。如张桂玲等[50]研究表明，不同树种水分利用效率与空气温度、空气相对湿度、饱和水汽压差的相关性不同；黄健强等[51]认为空气温度、饱和水汽压差对干季的水分利用效率影响显著，有效光合辐射对湿季的影响显著。气孔作为植物与外界物质交换的通道，是调控植物光合作用和蒸腾作用的关键[52]。研究表明植物气孔导度和温度呈正相关关系[53]，作物为适应大气温度进行气孔调节，来控制 CO_2 的吸收和水分蒸腾，对作物光合作用和蒸腾作用产生影响，从而影响农田生态系统水分利用效率，净辐射与大气温度对作物水分利用效率的影响机制类似[54]。空气温度主要通过影响作物光合作用和蒸腾作用来影响作物水分利用效率。本研究区全年空气温度与水分利用效率呈线性负相关关系，与 Yu 等[55]对森林生态系统的研究结果一致；但吴方涛等[41]对高寒湿地生态系统水分利用效率的研究表明，气温与水分利用效率呈指数型正相关关系，可能是因为本研究区温度

升高所导致的作物蒸腾速率高于 GPP 的增加速率，进而水分利用效率降低。冬季大气温度与水分利用效率呈显著正相关关系，可能由于冬季相对干旱，大气温度的升高提高了小麦光合速率，而造成的蒸散发较少。土壤含水量对水分利用效率的影响不仅体现在对蒸散发的影响，还可以通过影响植物生理特性进而影响生态系统 GPP 与水分利用效率[56]。研究表明，在相对土壤含水量较小时，环境因子对水分利用效率的影响较小，当相对土壤含水量较高时，气象因子是影响碳固定和水分损耗的主要原因[57]。相关研究表明，空气相对湿度的增加会抑制蒸散发，对植物水分利用效率有促进作用；饱和水汽压差为影响蒸散发的驱动力，使得蒸散速率高于光合速率，对植物水分利用效率有抑制作用[58]，因此本研究当空气相对湿度较高、饱和水汽压差较低时，蒸散过程受到抑制，水分利用效率增大，这与多数研究相类似[42,59]。土壤含水量在不同季节影响紫色土坡耕地水分利用效率的方式和程度均不同。本研究区冬季土壤含水量与蒸散发、水分利用效率均呈极显著负相关关系，影响水分利用效率的主要原因可能是本研究区冬季降水较少，土壤含水量曲线相对平缓有关，干季土壤含水量的减小主要由于温度和净辐射的增大，这些条件有利于提高作物光合作用，因此冬季土壤含水量与水分利用效率呈极显著负相关关系。同时其他季节土壤水分含量对水分利用效率具有促进作用，这与张传伟等[42]的研究结果一致。本研究结果显示 CO_2 通量为影响紫色土坡耕地水分利用效率的主要因素之一，这是因为 CO_2 浓度直接影响作物的光合作用，与贺伟等[60]、美尔汗·黑扎特等[45]的研究结果类似。本研究(2014—2018 年)期间出现的夏旱事件较少，因此对于夏季作物水分利用效率变化机理的认识还不够，需要继续关注未来的长期观测数据。

3.3　紫色土坡耕地农田生态系统年际蒸散发与水分利用效率的差异性

以 2015 年与 2018 年为例，2015 年 4—12 月整体日蒸散发稍大于 2018 年，生态系统水分利用效率小于 2018 年(图 12)。2015 年 6—9 月降水量分别为 286.0 mm、44.7 mm、215.0 mm、221.3 mm, 2018 年 6—9 月降水量分别为 65.0 mm、149.0 mm、64.5 mm 和 74.0 mm，降水量的不同可能是导致两年间紫色土坡耕地农田生态系统蒸散发与水分利用效率差异的原因[61]。此外有研究指出，生态系统水分利用效率也可能会受到降雨变异性的影响[41]。本研究中

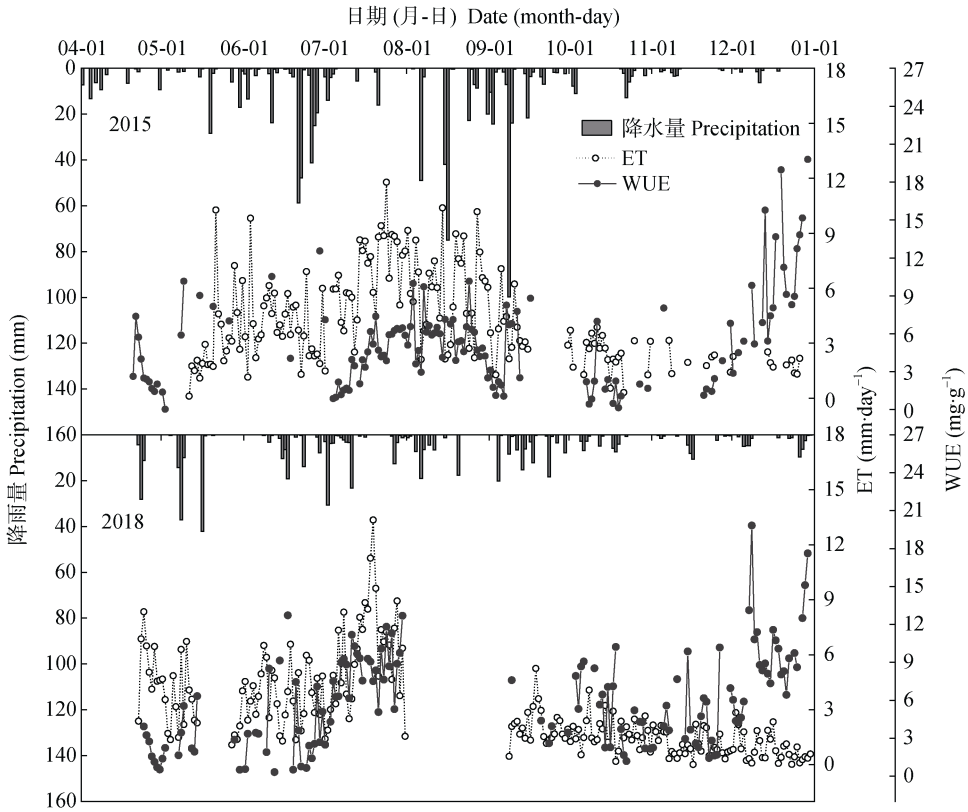

图 12　紫色土坡耕地两个典型年份(2015 年和 2018 年)农田生态系统蒸散和水分利用效率的季节变化差异

Fig. 12　Seasonal dynamics of the evapotranspiration (ET) and water use efficiency (WUE) of agro-ecosystem of slopy farmland in purple soil area in two typical hydrological years (2015 and 2018)

2015 年雨季降水分布不均可能是导致生态系统水分利用效率低于 2018 年的原因之一，夏季农田生态系统蒸散发及水分利用效率更容易受到季节性干旱的影响。紫色土坡耕地 2015 年年均气温为 17.01 ℃，2018 年年均气温为 16.52 ℃，两年间气温差异性不大，因此作为影响蒸散发与水分利用效率季节变化的主要原因，气温可能不是影响蒸散发与水分利用效率年际变化的主要环境因素。总体而言，年际差异分析结果表明紫色土坡耕地夏季玉米生长盛期的水分利用效率对降雨响应更为敏感。

4 结论

利用涡度相关观测系统对 2014—2018 年紫色土坡耕地农田生态系统蒸散发与水分利用效率动态特征及其影响因素进行了研究，结果表明：各月平均蒸散发均表现出明显的日变化规律，呈夜晚低、白天高的“单峰型”变化趋势，6:00—8:00 开始逐渐升高，14:00 左右达最大值后逐渐降低，19:00—19:30 降低到日出前水平。各月蒸散发存在差异，8 月为全年最高，1 月为全年最低。季节尺度上，夏季日变化幅度最大，春季次之，冬季和秋季的曲线较为平缓；叶面积指数、净辐射、空气温度、饱和水汽压差是影响紫色土坡耕地蒸散发的最主要环境因子，其次为饱和水汽压差。蒸散发与净辐射、空气温度、土壤温度、饱和水汽压差呈显著正相关关系，与空气相对湿度呈显著负相关关系；蒸散发与风速、土壤含水量的相关关系不明显。水分利用效率总体呈现出逐渐下降的趋势日变化规律。季节尺度上，冬季水分利用效率为全年最大，冬季与秋季水分利用效率高于春季与夏季；总体而言，夏玉米与冬小麦生长盛期水分利用效率高于其他生长期。叶面积指数、CO_2 通量为影响紫色土坡耕地水分利用效率的主要因素，其次为温度、相对湿度、饱和水汽压差等条件也显著影响了水分利用效率。紫色土坡耕地夏季玉米生长盛期的水分利用效率对降雨响应更为敏感，同时土壤含水量是影响冬季蒸散发和水分利用效率的重要因子。由于本研究期间数据序列存在一定的缺失，未来更长时间序列的观测结果有助于更进一步地识别区域内典型坡耕地农田生态系统蒸散发与水分利用效率的动态变化机理，从而为进一步优化紫色土坡耕地农田生态系统的水分管理措施提供科学依据。

参考文献 References

[1] L'VOVICH M I, BRATSEVA N L, KARASIK G Y, et al. A map of contemporary erosion of the earth's surface[J]. Mapping Sciences and Remote Sensing, 1990, 27(1): 51–67

[2] 张建君. 农田日蒸散量估算方法研究[D]. 北京：中国农业科学院, 2009
ZHANG J J. Estimation of cropland daily evapotranspiration[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009

[3] XIN Z B, XU J X, ZHENG W. Spatiotemporal variations of vegetation cover on the Chinese Loess Plateau (1981−2006): Impacts of climate changes and human activities[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, 51(1): 67–78

[4] 屈小娜，钟伟. 参考作物蒸散发的测定与计算方法综述[J]. 化工管理, 2018, (8): 12
QU X N, ZHONG W. Review of measure and calculation methods of crop reference evapotranspiraiton[J]. Chemical Enterprise Management, 2018, (8): 12

[5] 李思恩，康绍忠，朱治林，等. 应用涡度相关技术监测地表蒸发蒸腾量的研究进展[J]. 中国农业科学，2008，41(9): 2720–2726
LI S E, KANG S Z, ZHU Z L, et al. Research progress of measurement of land surface evapotranspiration based on eddy covariance technology[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(9): 2720–2726

[6] HAMMAD A A, HAUGEN L E, BØRRESEN T. Effects of stonewalled terracing techniques on soil-water conservation and wheat production under Mediterranean conditions[J]. Environmental Management, 2004, 34(5): 701–710

[7] BOLGER T P, TURNER N C. Water use efficiency and water use of Mediterranean annual pastures in southern Australia[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1999, 50(6): 1035

[8] 胡中民，于贵瑞，王秋凤，等. 生态系统水分利用效率研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1498–1507
HU Z M, YU G R, WANG Q F, et al. Ecosystem level water use efficiency: a review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1498–1507

[9] 姜寒冰，张玉翠，任晓东，等. 作物水分利用效率研究方法及尺度传递研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(1): 50–59
JIANG H B, ZHANG Y C, REN X D, et al. A review of progress in research and scaling-up methods of crop water use efficiency[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(1): 50–59

[10] 中国科学院成都分院土壤研究室. 中国紫色土. 上篇[M]. 北京：科学出版社, 1991
Soil Laboratory of Chengdu Branch, Chinese Academy of Sciences. Purple Soils in China. Part One[M]. Beijing: Science Press, 1991

[11] 张信宝，朱波，张建辉，等. 地下地膜截水墙——一种新的节水农业技术[J]. 山地学报, 1999, 17(2): 115–118
ZHANG X B, ZHU B, ZHANG J H, et al. Underground plastic sheet wall—A new water-saving agricultural technique[J]. Journal of Mountain Research, 1999, 17(2): 115–118

[12] ZHAO P, TANG X Y, ZHAO P, et al. Tracing water flow from sloping farmland to streams using oxygen-18 isotope to

study a small agricultural catchment in southwest China[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 134: 180–194

[13] 王红兰. 川中丘陵区林地与坡耕地土壤水力学性质研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013
WANG H L. Soil hydraulic parameters of forest land and sloping farmland in the hilly area of central Sichuan basin[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2013

[14] 朱波, 况福虹, 高美荣, 等. 土层厚度对紫色土坡地生产力的影响[J]. 山地学报, 2009, 27(6): 735–739
ZHU B, KUANG F H, GAO M R, et al. Effects of soil thickness on productivity of sloping cropland of purple soil[J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27(6): 735–739

[15] 何淑勤, 郑子成. 浅议四川盆地丘陵区的水土保持[J]. 水土保持研究, 2005, 12(2): 101–102
HE S Q, ZHENG Z C. Preliminary opinions on the soil and water conservation in hilly areas in Sichuan basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(2): 101–102

[16] 张建华, 赵燮京, 林超文, 等. 川中丘陵坡耕地水土保持与农业生产的发展[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 81–84
ZHANG J H, ZHAO X J, LIN C W, et al. Soil and water conservation and agriculture production development of sloping upland in the hilly area of central Sichuan[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2001, 15(1): 81–84

[17] ZHAO P, CORNELIS W, TANG X Y, et al. Does damming streams alter the water use strategies of riparian trees? A case study in a subtropic climate[J]. Land Degradation & Development, 2020, 31(8): 927–938

[18] 魏玲. 浅薄紫色土区植物水分利用策略研究[D]. 南充: 西华师范大学, 2018
WEI L. Water use strategies of plant on shallow purple soil[D]. Nanchong: China West Normal University, 2018

[19] ZHAO P, TANG X Y, ZHAO P, et al. Dynamics of water uptake by maize on sloping farmland in a shallow Entisol in Southwest China[J]. CATENA, 2016, 147: 511–521

[20] LLOYD J, TAYLOR J A. On the temperature dependence of soil respiration[J]. Functional Ecology, 1994, 8(3): 315

[21] YU G R, LEI M Z, XIAO M S, et al. Advances in carbon flux observation and research in Asia[J]. Science China Earth Sciences, 2005, 48(Sup.1): 1–16

[22] 罗专溪, 朱波, 唐家良, 等. 自然沟渠控制村镇降雨径流中氮磷污染的主要作用机制[J]. 环境科学学报, 2009, 29(3): 561–568
LUO Z X, ZHU B, TANG J L, et al. Primary mechanisms of nitrogen and phosphorus removal from stormwater runoff by a natural ditch in a rural township[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(3): 561–568

[23] 于文颖, 纪瑞鹏, 冯锐, 等. 不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应[J]. 生态学报, 2015, 35(9): 2902–2909
YU W Y, JI R P, FENG R, et al. Response of water stress on photosynthetic characteristics and water use efficiency of maize leaves in different growth stage[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 2902–2909

[24] 赵丽雯, 吉喜斌. 基于FAO-56双作物系数法估算农田作物蒸腾和土壤蒸发研究——以西北干旱区黑河流域中游绿洲农田为例[J]. 中国农业科学, 2010, 43(19): 4016–4026
ZHAO L W, JI X B. Quantification of transpiration and evaporation over agricultural field using the FAO-56 dual crop coefficient approach—A case study of the maize field in an oasis in the middle stream of the Heihe River Basin in northwest China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(19): 4016–4026

[25] 阳伏林, 张强, 王文玉, 等. 黄土高原春小麦农田蒸散及其影响因素[J]. 生态学报, 2014, 34(9): 2323–2328
YANG F L, ZHANG Q, WANG W Y, et al. Evapotranspiration and factors influencing evapotranspiration in the spring wheat farmland of China's Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(9): 2323–2328

[26] 王宇, 周广胜. 雨养玉米农田生态系统的蒸散特征及其作物系数[J]. 应用生态学报, 2010, 21(3): 647–653
WANG Y, ZHOU G S. Evapotranspiration characteristics and crop coefficient of rain-fed maize agroecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(3): 647–653

[27] 于贵瑞, 牛栋, 王绍强, 等. 陆地生态系统通量观测的原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 33–34
YU G R, NIU D, WANG S Q, et al. Principles of Flux Measurement in Terrestrial Ecosystems[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 33−34

[28] 张晓娟, 吴志祥, 杨川. 基于涡度相关系统的橡胶林生态系统蒸散研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(2): 76–84
ZHANG X J, WU Z X, YANG C. Research of evapotranspiration in a rubber plantation ecosystem by eddy covariance[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37(2): 76–84

[29] 刘玉莉, 江洪, 周国模, 等. 安吉毛竹林水汽通量变化特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2014, 34(17): 4900–4909
LIU Y L, JIANG H, ZHOU G M, et al. Water vapor flux variation characteristic and the relationship with its environment factors in *Phyllostachys edulis* forest in Anji[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(17): 4900–4909

[30] SINGER K D, KUZYK M G, SOHN J E. Second-order nonlinear-optical processes in orientationally ordered materials: relationship between molecular and macroscopic properties[J]. Josa B, 1987, 4(6): 968–976

[31] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 56[R]. FAO, 1998: 56

[32] CHAPIN F S Ⅲ, MATSON P A, MOONEY H A. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology[M]. New York: Springer New York, 2002

[33] 刘国水, 刘钰, 蔡甲冰, 等. 农田不同尺度蒸散量的尺度效应与气象因子的关系[J]. 水利学报, 2011, 42(3): 284–289
LIU G S, LIU Y, CAI J B, et al. Study on scale effect of farmland evapotranspiration and relationship with meteorological factors[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(3): 284–289

[34] MENCUCCINI M, MAMBELLI S, COMSTOCK J. Stomatal responsiveness to leaf water status in common bean (*Phaseo-*

lus vulgaris L.) is a function of time of day[J]. Plant, Cell & Environment, 2000, 23(10): 1109–1118

[35] 刘晨峰, 张志强, 查同刚, 等. 涡度相关法研究土壤水分状况对沙地杨树人工林生态系统能量分配和蒸散日变化的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2549–2557
LIU C F, ZHANG Z Q, ZHA T G, et al. Soil moisture affects energy allocation and diurnal evapotranspiration of a poplar plantation-an eddy-covariance-based study[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(8): 2549–2557

[36] YANG F L, ZHOU G S. Characteristics and modeling of evapotranspiration over a temperate desert steppe in Inner Mongolia, China[J]. Journal of Hydrology, 2011, 396(1/2): 139–147

[37] 苗海霞. 开垦和放牧对内蒙古半干旱草原蒸发散的影响[D]. 北京: 中国科学院植物研究所, 2008
MIAO H X. Effects of reclamation and grazing on evapotranspiration of semiarid grassland in Inner Mogonlia[D]. Beijing: Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, 2008

[38] 赵英, 张斌, 赵华春, 等. 农林复合系统中南酸枣蒸腾特征及影响因子[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2035–2040
ZHAO Y, ZHANG B, ZHAO H C, et al. Transpiration of *Choerospondias axillaris* in agro-forestrial system and its affecting factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(11): 2035–2040

[39] 牛亚毅, 李玉强, 王旭洋, 等. 沙地玉米水分利用效率日变化特征[J]. 中国沙漠, 2019, 39(1): 142–148
NIU Y Y, LI Y Q, WANG X Y, et al. Characteristics of diurnal variation of water use efficiency of maize in sandy land[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(1): 142–148

[40] 李辉东, 关德新, 袁凤辉, 等. 科尔沁草甸生态系统水分利用效率及影响因素[J]. 生态学报, 2015, 35(2): 478–488
LI H D, GUAN D X, YUAN F H, et al. Water use efficiency and its influential factor over Horqin Meadow[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2): 478–488

[41] 吴方涛, 曹生奎, 曹广超, 等. 高寒湿地生态系统水分利用效率研究[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 306–314
WU F T, CAO S K, CAO G C, et al. Water use efficiency of alpine wetland ecosystem[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 306–314

[42] 张传伟, 齐永青, 戴茂华, 等. 华北平原灌溉麦田水分利用效率的 SEM 多因素影响研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(6): 876–886
ZHANG C W, QI Y Q, DAI M H, et al. Effects of multi-factor on water use efficiency as identified by the SEM method in irrigated wheat farmlands in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(6): 876–886

[43] 战领, 杨汉波, 雷慧闽. 基于通量观测数据的玉米水碳交换量及水分利用效率分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S1): 88–93
ZHAN L, YANG H B, LEI H M. Analysis of corn water consumption, carbon assimilation and ecosystem water use efficiency based on flux observations[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(S1): 88–93

[44] 岳宁. 陇中半干旱区玉米水分利用效率及其对 T/ET 响应的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018
YUE N. Water use efficiency and its response to T/ET of maize field in Longzhong Semi-arid Area[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018

[45] 美尔汗·黑扎特, 郝兴明. 塔里木河下游胡杨群落 CO_2 通量特征与水分利用效率[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 2048–2055
MEIERHAN H, HAO X M. CO_2 flux characteristics and water use efficiency of the *Populus euphratica* community in the lower reaches of Tarim River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 2048–2055

[46] 魏丽, 杜筱玲, 刘文英. 高温干旱期间土壤—植被—大气系统水分特征[J]. 江西气象科技, 2004, 27(4): 22–26
WEI L, DU X L, LIU W Y. Features of moisture in soil-plant-atmosphere system during high temperature and drought term[J]. Jiangxi Meteorology Science & Technology, 2004, 27(4): 22–26

[47] 孙树臣. 农田和灌丛生态系统蒸散发过程及水分利用效率研究[D]. 杨凌: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2016
SUN S C. Study on evapotranspiration and water use efficiency of farmland and bushwood ecosystem[D]. Yangling: Centre for Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences, and Ministry of Education, 2016

[48] ZHANG F M, JU W M, SHEN S H, et al. How recent climate change influences water use efficiency in East Asia[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 116(1/2): 359–370

[49] WANG Y, ZHOU L, JIA Q Y, et al. Water use efficiency of a rice paddy field in Liaohe Delta, Northeast China[J]. Agricultural Water Management, 2017, 187: 222–231

[50] 张桂玲, 李艳琴, 罗绪强, 等. 季节性干旱下喀斯特次生林不同树种水分利用效率变化[J]. 地球与环境, 2021, 49(1): 25–31
ZHANG G L, LI Y Q, LUO X Q, et al. Change of water use efficiency of different species in karst secondary forest under seasonal drought[J]. Earth and Environment, 2021, 49(1): 25–31

[51] 黄健强, 邓永红, 曾小平, 等. 南亚热带针阔叶混交林生态系统水分利用效率[J]. 生态学杂志, 2020, 39(8): 2538–2545
HUANG J Q, DENG Y H, ZENG X P, et al. Water-use efficiency in a mixed conifer-broadleaf forest ecosystem in lower subtropical China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(8): 2538–2545

[52] 赵文赛. 玉米叶片气孔发育对干旱的响应以及重复干旱对玉米光合作用和抗旱性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016
ZHAO W S. Responses of leaf stomatal development to drought and effects of repeated drought on photosynthesis and drought resistance of maize[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016

[53] 唐凤德, 武耀祥, 韩士杰, 等. 长白山阔叶红松林叶片气孔导度与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5649–5655
TANG F D, WU Y X, HAN S J, et al. Relationship of sta-

matal conductance of leaf with environmental factors in broad-leaved Korean pine forest at Changbai Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(11): 5649–5655

[54] NEWTON M, PREEST D S. Growth and water relations of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) seedlings under different weed control regimes[J]. Weed Science, 1988, 36(5): 653–662

[55] YU G R, SONG X, WANG Q F, et al. Water-use efficiency of forest ecosystems in Eastern China and its relations to climatic variables[J]. New Phytologist, 2008, 177(4): 927–937

[56] 郭京衡, 李尝君, 曾凡江, 等. 2 种荒漠植物根系生物量分布与土壤水分、养分的关系[J]. 干旱区研究, 2016, 33(1): 166–171
GUO J H, LI C J, ZENG F J, et al. Relationship between root biomass distribution and soil moisture, nutrient for two desert plant species[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(1): 166–171

[57] 周洁, 张志强, 孙阁, 等. 不同土壤水分条件下杨树人工林水分利用效率对环境因子的响应[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1465–1474
ZHOU J, ZHANG Z Q, SUN G, et al. Environmental controls on water use efficiency of a poplar plantation under different soil water conditions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1465–1474

[58] 仇宽彪, 成军锋. 陕西省植被水分利用效率及与气候因素的关系[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 256–260
QIU K B, CHENG J F. Vegetation water use efficiency and its relationship with climate in Shaanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(6): 256–260

[59] 史晓亮, 吴梦月, 张娜, 等. 三江平原植被水分利用效率时空变化及其对气象因子变化的响应[J]. 生态学杂志, 2020, 39(5): 1651–1663
SHI X L, WU M Y, ZHANG N, et al. Spatial and temporal variation of vegetation water use efficiency and its response to meteorological factors in Sanjiang Plain[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(5): 1651–1663

[60] 贺伟, 布仁仓, 熊在平, 等. 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 519–531
HE W, BU R C, XIONG Z P, et al. Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 519–531

[61] 刘家霖, 满秀玲. 降雨和非降雨日兴安落叶松天然林蒸腾及蒸散发特征[J]. 生态学报, 2017, 37(15): 5059–5069
LIU J L, MAN X L. Characteristics of transpiration and evapo-transpiration from natural *Larix gmelinii* forests on rainy and non-rainy days[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(15): 5059–5069