

DOI:10.13759/j.cnki.dlxb.2018.09.014

兴安落叶松林水分利用效率及其响应的环境因子¹⁾

刘璇 王飞 张秋良 田原 王美媛

(内蒙古农业大学,呼和浩特,010019)

摘要 为系统研究大兴安岭地区兴安落叶松 (*Larix gmelini* Rupr.) 林水分利用效率及其驱动因子,采用涡度技术进行碳水通量的测定并计算水分利用效率,使用气象观测塔对环境因子进行监测,利用相关分析和逐步回归分析法,分析兴安落叶松林水分利用效率动态特征及其驱动因子。结果表明:水分利用效率生长季日变化大体呈单峰倒“U”型分布;6—8月份水分利用效率相比5、9月份变化的幅度较大;生长季水分利用效率的驱动因子为太阳辐射、空气温度、空气相对湿度、蒸汽压亏失、土壤温度、土壤热通量、土壤含水量,各月份水分利用效率的驱动因子略有差异。

关键词 水分利用效率;涡度相关技术;驱动因子;兴安落叶松;大兴安岭

分类号 S718.5

Water Use Efficiency and Driving Factors in *Larix gmelini* Forest//Liu Xuan, Wang Fei, Zhang Qiuliang, Tian Yuan, Wang Meiyuan (Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, P. R. China) //Journal of Northeast Forestry University 2018, 46(9):65-68.

In order to systematically study the water use efficiency and driving factors of *Larix gmelini* Rupr. forest in Daxing'an Mountains, we analyzed data including the water use efficiency that compute by carbon and water fluxes based on the measurement of the eddy covariance technique and environmental factors measured by the instrumentation of automatic meteorological station. The correlation analysis and stepwise regression analysis were used to investigate the dynamic characteristics of water use efficiency and main driving factors of Larch forest. This study provided some theoretical support for the research of interaction of carbon and water fluxes. The diurnal variation of water use efficiency showed a single peak reversed “U” type distribution in the growing season. From the extreme difference, standard deviation and image change trend in different months showed that the water use efficiency from June to August was larger than that of May and September. The main driving factors of water use efficiency were solar radiation, air temperature, air relative humidity, vapor pressure deficit, soil temperature, soil heat flux and soil moisture content which were different in different months in the growing season.

Keywords Water use efficiency; Eddy covariance; Driving factors; *Larix gmelini* Rupr.; Daxing'an Mountains

水分利用效率是揭示森林生产力与森林耗水关系的重要指标,是碳水耦合研究的关键节点。国内外学者对不同植被进行了大量研究,取得了不同尺度下的水分利用效率变化规律及影响因素等相关成果^[1-6],但涉及高纬度冻土森林水分利用效率的研究成果较为稀少,其变化特征及其驱动因子尚不明确。本文依托内蒙古大兴安岭森林生态系统国家野外科学观测研究站,利用2015年连续观测的碳水通量数据及环境因子数据进行分析,探讨兴安落叶松 (*Larix gmelini* Rupr.) 林水分利用效率变化特征及其驱动因子,为研究兴安落叶松林碳水耦合过程提供理论支持。

1 研究区概况

研究区位于内蒙古大兴安岭森林生态系统国家野外科学观测研究站,海拔960 m。该区森林覆盖率较高,建群树种为兴安落叶松。植被5月中旬开始生长,9月末进入生长末期^[7]。该区冬长夏短,属

于寒温带湿润气候区,2012—2017年近6 a的平均气温为-6.67℃,极端最高温度为32℃,极端最低温度可达-45.2℃。日最高、最低气温相差较大,无霜期为80~90 d。降水量500 mm,主要集中在7—9月份。全年地表蒸发量800~1 200 mm。该区分布有季节性冻土和常年永冻土,是我国重点的冻土观测区域,兴安落叶松林与冻土共同维系着寒温带明亮针叶林冷湿的环境条件^[8]。

2 研究方法

兴安落叶松天然林内,建立高度为65 m的观测塔,采用统一的开路涡度相关系统与观测技术进行碳通量、水汽通量数据的采集。观测塔60 m处安装了三维超声风速仪 (Model CSAT-3, Campbell, USA)、开路式红外线气体分析仪 (Model LI-7500, Li Cor Inc, USA),测定三维风速、超声温度、CO₂及H₂O浓度波动。利用数据采集器 (CR3000, Campbell, USA)对每半小时获取的10 Hz/s采样频率的数据进行记录。

采用常规气象观测仪器对环境因子的测定,环境因子变量包括高度42 m和60 m的空气温度(测定仪器为HMP45C, VAISALA, Finland)、42 m和60 m高度的空气相对湿度(测定仪器为HMP45C,

1) 中国科学院科技服务网络计划 (STS 计划) 项目 (KFJ-EW-ST5-169)。

第一作者简介:刘璇,女,1994年1月生,内蒙古农业大学林学院,硕士研究生。E-mail:984706126@qq.com。

通信作者:王飞,内蒙古农业大学林学院,副教授。E-mail:Wangfeinihao2003@aliyun.com。

收稿日期:2018年1月16日。

责任编辑:王广建。

VAISALA, Finland)、60 m 高处太阳辐射(测定仪器为 CM11, Campbell, USA)、10 cm 土层深度土壤热通量(测定仪器为 HFP01, HUKSEFLUX, Finland)、5 cm 土层深度土壤温度(测定仪器为 TCAV, Campbell, USA)等,通过数据采集器(测定仪器为 CR1000, Campbell, USA)对每半小时获取的数据进行记录。

数据观测时会受到恶劣天气、大气不稳定等因素影响,导致碳通量、水汽通量数据出现缺失和异常,因此要对原始数据进行预处理。本文数据处理主要采用的方法为二次坐标旋转,随后对数据进行 WPL 修正,最后经过相关文献的查阅,将碳通量超出 $-3 \sim 3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, CO_2 质量浓度超出 $400 \sim 800 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 水汽质量浓度超出 $0 \sim 35 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 及摩擦风速小于 $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的数据进行剔除^[9]。为了保证数据连续和有效,白天缺失数据由相近观测日 14 d 同一时间的平均值进行插补,夜间缺失数据由 7 d 同一时刻平均值插补。本文水分利用效率通过净生态系统碳生产力与水汽通量比值获得。水分利用效率计算公式^[10-11]如下:

$$N_{EP} = -F_c; W_{UE} = N_{EP} / F_w$$

式中: N_{EP} 为净生态系统生产力; F_c 为碳通量; W_{UE} 为水分利用效率; F_w 为水汽通量。

根据空气温度和空气相对湿度进行蒸汽压亏失的计算^[12-13]:

$$E = 0.611e^{17.27t/(t+237.3)}; V_{PD} = E - E \cdot R_H / 100$$

式中: E 为饱和水汽压; t 为空气温度; V_{PD} 为蒸汽压

亏失; R_H 为空气相对湿度。

水分利用效率的生长季变化采用每月同一时刻的平均值代表整月该时刻的动态变化。按观测时间顺序,建立水分利用效率与不同环境因子的数据列。采用 SPSS 19.0 计算不同月份水分利用效率的极差、标准差、标准误;使用 Pearson 相关分析法进行水分利用效率与环境因子的线性、二次、三次、幂函数的拟合,计算拟合优度 R^2 ;进行水分利用效率随环境因子变化的逐步回归分析,建立线性方程并进行显著性检验, $P < 0.05$ 表示相关性显著检验达到显著水平, $P < 0.01$ 表示相关性显著检验达到极显著水平。采用 Origin 8.0 进行制图,使用数据的标准误进行误差线的绘制。

3 结果与分析

3.1 兴安落叶松林环境因子与水分利用效率变化特征

由图 1 可知,环境因子与水分利用效率生长季日变化的趋势具有一定的相关性,水分利用效率变化响应太阳辐射、空气温度、土壤温度、蒸汽压亏失、空气相对湿度、土壤含水量的变化。从大体趋势上,水分利用效率和空气湿度呈现出负相关性,与其他环境因子随时间变化呈现正相关性。水分利用效率在启动、峰值、下降至平缓的时间变化上与太阳辐射的启动、峰值、结束时间较为接近,呈时滞较小的正相关。

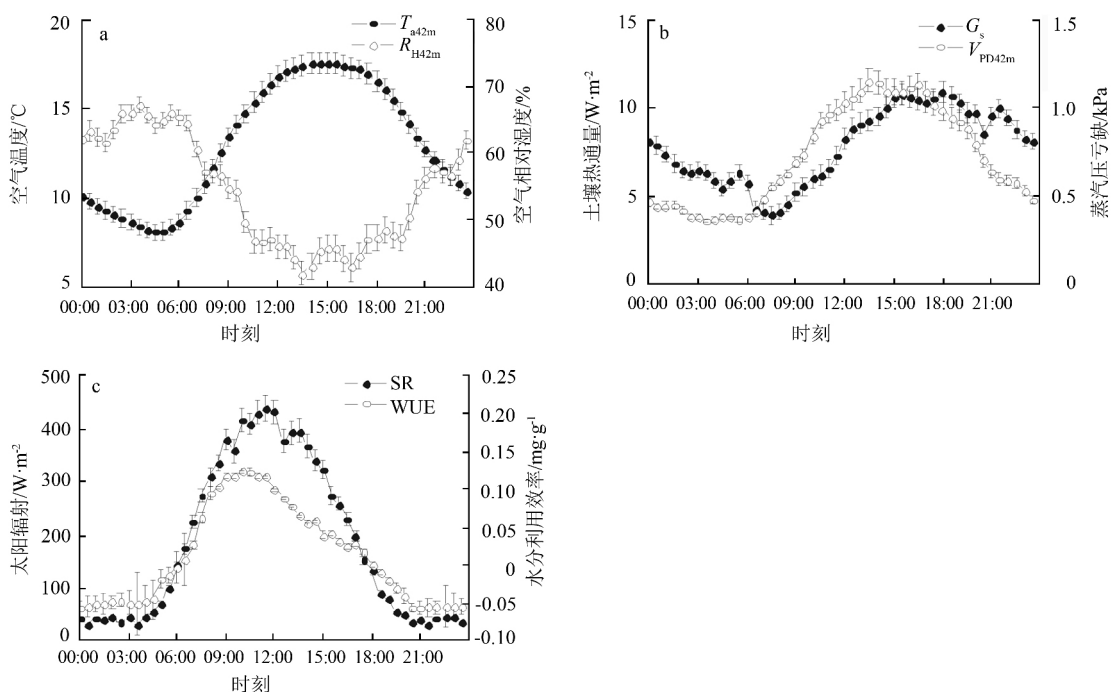


图 1 兴安落叶松林环境因子与水分利用效率日变化

3.2 兴安落叶松林生长季水分利用效率变化特征

由图2可知,生长季不同月份水分利用效率的变化趋势基本呈现单峰倒“U”型分布,但变化幅度存在差异。5—9月份各月水分利用效率极差分别为0.089、0.287、0.304、0.238、0.127 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,标准差分别为0.029、0.091、0.094、0.078、0.037 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。6—8月份各月的极差、标准差较大,9月次之,5月最小。从各月份水分利用效率的极差、标准差及图中变化趋势可以看出,6—8月份各月水分利用效率变化幅度较大,9月份的变化幅度要小于6、7月份,5月变化幅度较小,整体趋势最为平缓。6—8月份是兴安落叶松主生长期,该阶段兴安落叶松对水分需求旺盛,固碳能力较高。在这3个月当中,以6、7月

份的水分利用效率变化幅度最大,造成这种现象的原因是6、7月份阴雨天气少于8月份,太阳辐射较强,更加有利于树木进行光合作用。

生长季不同月份的水分利用效率启动、休止时间较为一致,每日5点左右开始有明显波动迹象,每日20点后趋于平缓。峰值出现时间不尽相同,6、7月份水分利用效率日变化的峰值要早于其他月份2~4 h。这种现象是由于当地特殊的环境引起的,6、7月份天亮(以太阳辐射为0的点为昼夜划分点)相比其他月份更早,此外,8月份雨水较多,较高的空气相对湿度使得水汽通量较大,造成8月份水分利用效率峰值有所推后,5、9月份属于生长季初期和末期,兴安落叶松耗水固碳能力较低。

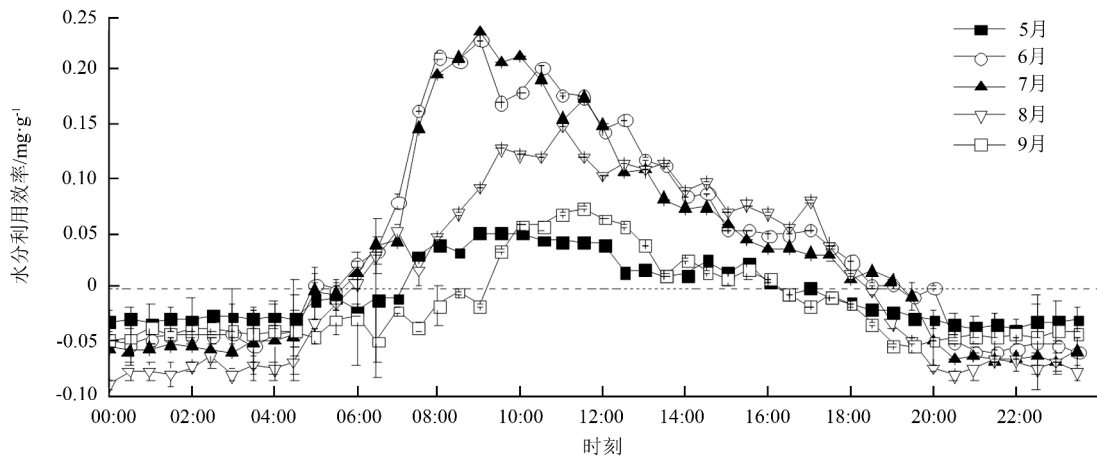


图2 生长季不同月份水分利用效率日变化

3.3 兴安落叶松林水分利用效率对环境因子的响应

由表1可知,不同月份的驱动因子不相同。42 m高度的空气温度($R^2=0.35$)和空气相对湿度($R^2=0.344$)与水分利用效率的相关性,要优于60 m高度的空气温度($R^2=0.271$)和空气相对湿度($R^2=0.302$)。随着高度的增加,林冠层的碳水通量交换对湍流通量的贡献有所减少。整个生长季中,水分利用效率主要响应空气温度、空气相对湿度以及蒸气压亏失($R_{42}^2=0.358$; $R_{60}^2=0.297$)具有较强的相关性。水分利用效率对太阳辐射的响应集中在5—6月份,7—9月份响应不显著,造成这种现象的原因是因为进入雨季,大量的阴雨天气或者是森林中的过云雨使得这种相关性减弱。水分利用效率对土壤温度($R^2=0.066$)、土壤热通量($R^2=0.105$)有较好的响应性,土壤含水量的响应性($R^2=0.496$)只在8月份有所体现,整个生长季中,水分利用效率对土壤水热条件的响应要弱于对空气水热条件的响应。

“U”型分布,6—8月份水分利用效率变化幅度较大。王静等^[14]对芨芨草水分利用效率研究发现,6、7月份水分利用效率最高,与本研究结果一致。刘玉莉等^[15]研究表明,每日清晨水分利用效率较低,中午达到峰值后逐渐下降,呈现多小峰分布,与本研究结果不符。刘玉莉等^[15]的试验区域为亚热带季风气候区,研究对象为毛竹林,较高的温度与湿度使得水分利用效率昼夜变化不显著,日变化曲线较为平和,而本试验区域位于寒温带,昼夜温差较大,不同月份水分利用效率日变化呈现出在每日5点开始有较大幅度变化,峰值分布在08:00—12:00,峰值之后逐渐趋于平缓。不同的环境气候条件导致不同植物的水分利用效率的日变化曲线呈现出多样性的特点。

本研究发现水分利用效率变化的主要驱动因子为太阳辐射、空气温度、土壤温度、蒸气压亏失、空气相对湿度、土壤含水量。Ertek et al.^[16]、Lovelli et al.^[17]、阮亚男等^[18]、庞桂斌等^[19]、张远东等^[20]等对不同地区不同植物的研究,发现水分利用效率主要响应大气水热因子的变化;周洁等^[21]研究发现气象

4 结论与讨论

兴安落叶松林水分利用效率日变化呈单峰倒

因子是影响碳固定和水分损耗的主要原因,与本研究发现结果一致。本研究发现水分利用效率对气温的响应达到了显著水平,但从整个生长季来看,水分利用效率变化受到了多个环境因子综合作用,这与刘贤赵等^[22]研究发现各环境因子以综合复杂的方式影

响水分利用效率的结果一致。Rtw et al.^[23]、李明旭等^[24]发现大气中CO₂浓度对水分利用效率的影响显著。本文研究水分利用效率所采用净生态系统碳生产力的计算公式中已经包含了生态系统的碳交换量,所以没有将CO₂浓度作为环境因子进行研究。

表1 在月尺度上水分利用效率与环境因子的逐步回归分析

月份	进入因子	R ²	回归方程
5	太阳辐射(S_R) ^{**} 5 cm 土壤温度(T_5) ^{**} 42 m 空气温度(T_{a42}) ^{**} , 土壤热通量(G_S) [*] 42 m 空气相对湿度(R_{H42}) [*]	0.950	$W_{UE} = -0.000\ 083S_R + 0.01T_5 - 0.015T_{a42} - 0.002G_S - 0.003R_{H42} + 0.192$
6	太阳辐射(S_R) ^{**} 42 m 空气温度(T_{a42}) ^{**} 5 cm 土壤温度(T_5) ^{**} , 60 m 蒸汽压亏失(V_{PD60}) ^{**}	0.968	$W_{UE} = 0.000\ 20S_R + 0.034T_{a42} - 0.017T_5 - 0.212V_{PD60} - 0.086$
7	5 cm 土壤温度(T_5) ^{**} 42 m 空气温度(T_{a42}) ^{**} 土壤热通量(G_S) ^{**}	0.968	$W_{UE} = -0.019T_5 + 0.035T_{a42} - 0.017G_S + 0.098$
8	42 m 蒸汽压亏失(V_{PD42}) ^{**} 土壤含水率(S_{WC}) ^{**} 60 m 空气相对湿度(R_{H60}) ^{**}	0.950	$W_{UE} = 0.289V_{PD42} - 132.934S_{WC} - 0.031R_{H60} + 28.804$
9	42 m 空气温度(T_{a42}) ^{**} 5 cm 土壤温度(T_5) ^{**}	0.850	$W_{UE} = 0.014T_{a42} - 0.016T_5 + 0.281$
5~9	太阳辐射(S_R) ^{**} 42 m 空气温度(T_{a42}) ^{**} 5 cm 土壤温度(T_5) ^{**} , 60 m 蒸汽压亏失(V_{PD60}) ^{**} 42 m 空气相对湿度(R_{H42}) ^{**} 60 m 空气 相对湿度(R_{H60}) ^{**} 土壤含水率(S_{WC}) [*]	0.993	$W_{UE} = 0.000\ 18S_R + 0.016T_{a42} - 0.013T_5 - 0.261V_{PD60} - 0.022R_{H42} + 0.017R_{H60} - 0.818S_{WC} + 0.582$

注:表中**表示因子与水分利用效率达到极显著相关($P < 0.01$);*表示因子与水分利用效率显著相关($P < 0.05$)。

本研究发现生长季不同月份水分利用效率的主要驱动因子各不相同。刘莹等^[25]在黄土高原采用同位素法对白羊草研究发现不同水分处理的水分利用效率的主导影响因子各不相同,与本文研究结果一致。由于不同月份环境中的水分条件不同引起的,空气的相对湿度及土壤含水量在8月份最低。蒸汽压亏失,土壤含水率,空气相对湿度是8月份水分利用效率的驱动因子,兴安落叶松固碳能力在一定程度上造成了水分胁迫。在水分最为充足的9月份(平均空气相对湿度为生长季最高67.36%),水分利用效率的驱动因子为空气温度和空气湿度,水分利用效率响应温度因子的变化,在一定程度上表明该月份兴安落叶松固碳能力没有受到水分胁迫。

参 考 文 献

- [1] 陈平,孟平,张劲松,等.华北低丘山区2种林药复合模式的水分利用[J].东北林业大学学报,2014,42(8):52-56.
- [2] 高琛,杨新兵,鲁绍伟,等.北京沙地杨树人工林生态系统水分利用策略[J].东北林业大学学报,2014,42(1):80-85.
- [3] 李春友,孟平,张劲松,等.不同郁闭度条件下野生黄连木幼苗的光合及水分利用特征[J].东北林业大学学报,2011,39(5):20-23.
- [4] 姜中珠,赵雨森,陈祥伟.白桦和真桦光合特性及水分利用效率的比较[J].东北林业大学学报,2009,37(8):11-12.
- [5] 刘娟娟,李吉跃,庞静,等.CO₂体积分数倍增对4种植物幼苗气体交换及水分利用效率的影响[J].东北林业大学学报,2008,36(7):25-28.
- [6] 展小云,于贵瑞,盛文萍,等.中国东部南北样带森林优势植物叶片的水分利用效率和氮素利用效率[J].应用生态学报,2012,23(3):587-594.
- [7] 张秋良,王立明.内蒙古大兴安岭森林生态系统研究[M].北京:中国林业出版社,2014.
- [8] 田原,张秋良,巴特,等.兴安落叶松林生长季土壤水势动态特征[J].Advance in Forestry Research,2016,4:14-22.
- [9] 李小梅,张秋良.环境因子对兴安落叶松林生态系统CO₂通量的影响[J].北京林业大学学报,2015,37(8):31-39.
- [10] BALDOCCHI D, FALGE E, GU L, et al. Fluxnet: A new tool to

- study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82(11): 2415-2434.
- [11] ASSENG S, HSIAO T C. Canopy CO₂ assimilation, energy balance, and water use efficiency of an alfalfa crop before and after cutting[J]. Field Crops Research, 2000, 67(3): 191-206.
- [12] 孙英君,王劲峰.一种空气饱和差区域分布的推算方法[J].国土资源遥感,2004(1):23-26.
- [13] 池波,蔡体久,满秀玲,等.大兴安岭北部兴安落叶松树干液流规律及影响因子分析[J].北京林业大学学报,2013,35(4):21-26.
- [14] 王静,程积民,万惠娥,等.黄土高原苜蓿草土壤水分特征及水分利用效率研究[J].干旱气象,2004,22(4):51-55.
- [15] 刘玉莉,江洪,陈健,等.安吉毛竹林碳水通量及水分利用效率的日动态研究[J].生态科学,2015,34(4):43-51.
- [16] ERTEK A, KANBER R. Water-Use Efficiency (WUE) and change in the yield-response factor (Ky) of cotton irrigated by an irrigation drip system[J]. Turkish Journal of Agriculture & Forestry Sciences, 2001, 25(2): 111-118.
- [17] LOVELLI S, PERNIOLA M, FERRARA A, et al. Yield response factor to water (Ky) and water use efficiency of *Carthamus tinctorius* L. and *Solanum melongena* L. [J]. Agricultural Water Management, 2007, 92(1/2): 73-80.
- [18] 阮亚男,萧英男,杨立新,等.大连市黑松树木水分利用效率的环境响应[J].应用生态学报,2017,28(9):2849-2855.
- [19] 庞桂斌,徐征和,杨士红,等.控制灌溉水稻叶片水分利用效率影响因素分析[J].农业机械学报,2017,48(4):233-241.
- [20] 张远东,庞瑞,顾峰雪,等.西南高山地区水分利用效率时空动态及其对气候变化的响应[J].生态学报,2016,36(6):1515-1525.
- [21] 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.
- [22] 刘贤赵,康绍忠.遮荫对番茄单叶水分利用效率的影响研究[J].中国生态农业学报,2003,11(1):29-32.
- [23] RTW S, MATYSSEK R M, MAURER S, et al. Stable isotope analysis reveals differential effects of soil nitrogen and nitrogen dioxide on the water use efficiency in hybrid poplar leaves[J]. New Phytologist, 2001, 149(2): 233-246.
- [24] 李明旭,杨延征,朱求安,等.气候变化背景下秦岭地区陆地生态系统水分利用率变化趋势[J].生态学报,2016,36(4):936-945.
- [25] 刘莹,李鹏,沈冰,等.采用稳定碳同位素法分析白羊草在不同干旱胁迫下的水分利用效率[J].生态学报,2017,37(9):3055-3064.