

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0162

王云英, 裴薇薇, 辛莹, 郭小伟, 杜岩功. 青藏高原金露梅灌丛草甸水分利用效率长期变化特征. 草业科学, 2021, 38(9): 1671-1682.

WANG Y Y, PEI W W, XIN Y, GUO X W, DU Y G. Spatiotemporal variations in the water use characteristics and efficiency of *Potentilla fruticosa* shrubs found in the Qinghai Tibet Plateau. Pratacultural Science, 2021, 38(9): 1671-1682.



青藏高原金露梅灌丛草甸水分利用效率 长期变化特征

王云英^{1,2}, 裴薇薇^{1,2}, 辛莹¹, 郭小伟¹, 杜岩功¹

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 解析高寒草甸水分利用效率连续变化特征及其影响因素, 对于提升高寒草甸水分利用效率具有重要作用。本研究基于 2003–2010 年青海海北金露梅 (*Potentilla fruticosa*) 灌丛草甸连续 8 年间总初级生产力 (gross primary productivity, GPP) 和借助于潜热通量 (latent heat flux, LE) 和蒸发潜热 (λ) 计算实际蒸散量, 进而计算出 8 年间水分利用效率值, 并探讨了其对气象因子的响应特征, 结果表明: 1) 年际尺度上, 8 年间总初级生产力、蒸散量和水分利用效率分别以每年 $98.55 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 40.15 mm 和 $138.70 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{mm})^{-1}$ 的趋势上升; 季节尺度上, 总初级生产力、蒸散量和水分利用效率均在 7 月份达到最大值, 1 月份呈现最小值。2) 年均温度、相对湿度和净辐射对全年水分利用效率相对贡献率均最高, 三者能解释 73.50% 的全年水分利用效率变异。光合有效辐射、空气温度和相对湿度 3 个环境因子在生长季尺度上相对贡献率总值为 74.14%。在全年和生长季尺度上, 年均气温和光合有效辐射贡献率较高, 分别为 43.09% 和 30.79%。相关性分析结果显示, 相对湿度是影响水分利用效率的主要因子, 全年尺度上还有年均气温和饱和水汽压差, 生长季尺度上主要影响因素还包括光合有效辐射和净辐射。研究结果对于明晰金露梅灌丛草甸水分利用效率调控机制具有重要意义。

关键词: 金露梅灌丛; 青藏高原; 水分利用效率; 饱和水汽压差; 净辐射; 光合有效辐射; 年均气温

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2021)09-1671-12

Spatiotemporal variations in the water use characteristics and efficiency of *Potentilla fruticosa* shrubs found in the Qinghai Tibet Plateau

WANG Yunying^{1,2}, PEI Weiwei^{1,2}, XIN Ying¹, GUO Xiaowei¹, DU Yangong¹

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, Qinghai, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Analysis of the characteristic changes in water use efficiency in alpine meadows and its influencing factors plays an important role in improving the water use efficiency of these alpine meadows. Our study used gross primary productivity (GPP) and evapotranspiration as calculated by the latent heat flux (LE) and the latent heat of evaporation (latent heat of evaporation, λ) to evaluate the water dynamics of *Potentilla fruticosa* shrub meadows in Haibei, Qinghai Province between 2003 and 2010. The water use efficiency (WUE) of these shrub meadows was evaluated across eight consecutive years, allowing for a robust evaluation of their response to meteorological factors. Our results showed the following: 1) On an

收稿日期: 2021-03-22 接受日期: 2021-05-19

基金项目: 科技部基础调查专项 (2017FY100202); 国家自然科学基金面上项目 (31770532)

第一作者: 王云英 (1993-), 女, 青海民和人, 硕士, 主要从事植物生态学研究。E-mail: wangyunying@nwipb.cas.cn

通信作者: 杜岩功 (1981-), 男, 山东威海人, 研究员, 博士, 主要从事土壤碳氮养分循环研究。E-mail: ygdu@nwipb.cas.cn

<http://cykx.lzu.edu.cn>

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

interannual scale, the gross primary productivity, evapotranspiration, and water use efficiency increased at an annual rate of $98.55 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 40.15 mm , and $138.70 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{mm})^{-1}$, respectively. While gross primary productivity, evapotranspiration, and water use efficiency all reached their maximum in July and their minimum in January when evaluated on a seasonal scale. 2) The annual average temperature, relative humidity, and net radiation have the highest relative contribution to the annual water use efficiency, and these factors can explain up to 73.50% of the variation in the annual water use efficiency values. The following three environmental factors: photosynthetically active radiation, air temperature, and relative humidity contribute as much as 74.14% to the values on the growth season scale. The annual average temperature and photosynthetically active radiation rates are both relatively important contributing factors to both the annual and growing season scales, with these values accounting for up to 43.09% and 30.79% of the total, respectively. Correlation analysis revealed that relative humidity was the main factor affecting water use efficiency. Annual average temperature and vapor pressure deficit also exerted some effect on the annual scale values under these conditions. The main influencing factors for the growing season scale also included photosynthetically active radiation and net radiation. The results of this study make a significant contribution toward clarifying the underlying regulatory mechanisms mediating the dynamic changes in water use efficiency in shrub meadows in response to changing environmental conditions.

Keywords: *Potentilla fruticosa*; Qinghai-Tibet Plateau; water use efficiency; vapor pressure deficit; net radiation; photosynthetically active radiation; annual average temperature

Corresponding author: DU Yangong E-mail: ygdu@nwipb.cas.cn

金露梅 (*Potentilla fruticosa*) 灌丛草甸是青藏高原重要植被类型之一, 面积约为 $0.106 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[1], 仅次于高山嵩草草甸^[2], 广泛分布于青藏高原东部海拔 2 700~4 500 m 的山地阴坡、土壤湿度较高的平缓滩地以及地下水位较高的河谷阶地^[3], 具有明显的地带分布性规律^[4], 是青藏高原主要的夏季牧场^[5-6]。其生态功能对气候变化和人类活动的响应比高寒草甸更加敏感^[7]。

水分利用效率 (water use efficiency, WUE) 是表征植物耐旱性^[8]、生态系统碳水循环间相互耦合关系的重要指标^[9-10], 能够反映生态系统对水资源变化的响应^[11], 对揭示大气—叶片碳水循环过程中相互作用及植物生存适应对策有极其重要意义^[12]。水分利用效率的计算及表达方式也因测定尺度存在差异。叶片尺度上, WUE 是植物净光合速率与蒸腾速率的比值, 主要由气孔导度来控制^[13]; 生态系统尺度上, WUE 是总初级生产力 (gross primary productivity, GPP) 和蒸散量 (evapotranspiration, ET) 的比值^[14-15]。2003—2010 年, 在 8 个中国典型陆地生态系统中, 当雄高寒草甸 WUE 值最低, 为 $0.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[12]。2000—2014 年黄土高原植被生态系统 WUE 呈显著增加趋势 ($P < 0.05$), 增速为 $0.02 \text{ g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$ ^[12]。2000—2010 年, 黄土高原呈现以 $0.027 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{mm})^{-1}$ 的速度

上升趋势^[12]。2000—2017 年新疆天山植被 WUE 呈现以 $-0.014 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{mm})^{-1}$ 的速度下降趋势^[12]。西南高山亚高山区 2000—2014 年植被 WUE 以 $0.011 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{mm})^{-1}$ 的速率增加^[16]。

WUE 受内部植被调控和外界环境的共同作用^[12]。从植物自身调控而言, 气孔导度是影响植物气体交换的主要影响因子^[17]。气孔导度主要通过影响植物蒸腾和通过气孔进入植物的 CO_2 含量来影响植物 WUE^[18]。在外界环境中, 降水^[19-22]是影响草地生态系统 WUE 的主要影响因子, 另外, 相对湿度^[23]、气温^[12, 24]、饱和水汽压差^[25]、光合有效辐射^[26]等均是影响植被 WUE 变化的关键气候因子。年均气温和降水量是影响黑龙江西部农田 WUE 的主要气象因子^[27]。西南高山亚高山区 89.56% 区域的 WUE 与气温正相关, 92.54% 区域的 WUE 与降水量负相关, 针对不同生态系统植被类型, 草地 WUE 与气温相关性最高^[16]。也有研究表明, 高寒草甸 WUE 与气温无显著相关关系^[28]。不同时间尺度影响 WUE 的因子亦存在差异, 光合有效辐射仅在短时间尺度内对 WUE 影响效果显著, 而气温和相对湿度无论时间尺度长短都是影响 WUE 的重要气象因子^[26]。

现阶段, 对于金露梅灌丛草甸的研究主要集中在植物群落特征^[2, 29-30]、土壤理化性质^[31-34]、碳通

量^[3, 35-37]等方面。但对于金露梅灌丛草甸水分利用效率年际及季节变化特征的研究, 以及气象因子对水分利用效率的潜在控制过程方面的研究存在欠缺。因此, 本研究基于 2003–2010 年青海海北金露梅灌丛草甸 GPP 及蒸散量 ET 计算水分利用效率值, 以期回答以下两个科学问题: 1) 连续 8 年间青海海北金露梅灌丛草甸 WUE 年份变化及月份变化特征; 2) 气象因子对金露梅灌丛草甸 WUE 的调控。旨在为区域生态建设、草甸的合理利用以及明晰金露梅灌丛草甸对气象因子的适应调控机制提供理论基础。

1 研究区概况

研究区位于中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站于柴滩地区 (37°39'56" N, 101°20'39" E), 地形为祁连山北支冷龙岭东段南麓的洪积扇。受高原大陆性气候影响, 该区无明显四季之分, 一年只有冷暖两季, 冬季寒冷干燥, 夏季湿润多雨, 年均气温为-1.7℃, 年降水量为 580 mm 左右 (图 1), 生长季降雨约占全年降水量的 80%, 且主要集中于植物生长季 (5 月–9 月)。土壤类型为高寒草甸土, 高寒灌丛涡度相关观测系统 (37°40' N, 101°20' E, 3 400 m) 位于海北站北部约 8 km 的高寒金露梅灌丛生态系统内。金露梅灌丛涡度相关系统建于 2002 年 8 月, 由 10 m × 10 m 的围栏保护, 碳水热通量的观测高度为 2.5 m。该区域群落结构比较简单, 一般分为灌木片层和草本植物片层。金露梅株高 30~50 cm, 生长较密集, 群落总覆盖度达 70%~80%, 以金露梅为建群种, 伴生种有山生柳 (*Salix oritrepha*)、高山绣线菊 (*Spiraea alpina*) 等, 草本层植物生长发育较好, 盖度为 50%~70%, 优势种包括线叶嵩草 (*Kobresia*

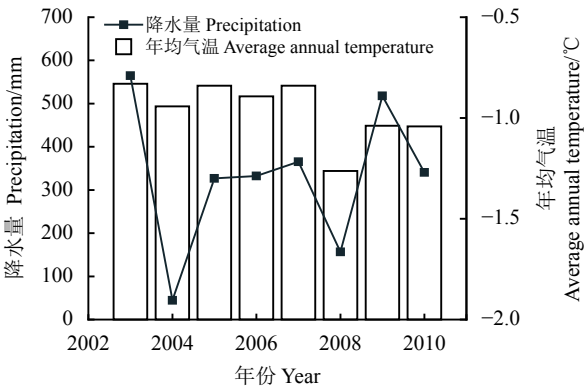


图 1 年降水量和年均气温的变化
Figure 1 Changes in annual precipitation and annual temperature between 2003 and 2010

capillifolia)、喜马拉雅嵩草 (*K. royleana*)、青藏苔草 (*Carex moorcroftii*) 等。

2 研究方法

2.1 野外采样及室内分析

金露梅灌丛草甸草地生物量于 2003–2010 年植物生长季 5 月–9 月每月 25 日左右进行监测, 地上生物量采用标准收获法, 样方面积 50 cm × 50 cm, 重复 5~8 次。地下生物量现存量测定采用根钻法, 按 0–10、10–20、20–30 和 30–40 cm 分层采集, 重复 5 次, 随机设置于地上生物量调查样方中, 以水洗法进行根系的洗涤, 65℃ 下烘干至恒重称重。

土壤有机质 (SOM): 2003–2006 年采用重铬酸钾氧化外加加热法测定; 2006–2010 年采用总有机碳分析仪 (岛津 5000A) 测定; 有效氮 (AN): 氯化钾浸提–蒸馏法测定; 速效钾^[7]: 乙酸铵浸提–火焰光度法测定; 速效磷 (AP): 扩散吸收法测定; 全氮^[10]: 半微量开氏法测定。土壤理化性质含量见表 1。

表 1 金露梅灌丛草甸不同土层深度土壤养分特征
Table 1 Nutrient profile of different soil layers found interacting with *Potentilla fruticosa* shrubs

土层深度 Soil depth/cm	土壤有机质 Organic matter content/ (g·kg ⁻¹)	有效氮 Available nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/ (mg·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)
0–10	111.13 ± 16.95	27.26 ± 6.72	9.22 ± 1.02	411.07 ± 48.18	4.98 ± 0.45
10–20	93.83 ± 11.33	14.65 ± 4.25	5.54 ± 0.96	261.18 ± 44.43	5.38 ± 0.35
20–30	67.10 ± 13.83	13.41 ± 3.46	3.67 ± 0.63	188.68 ± 51.43	3.13 ± 0.30
30–40	54.83 ± 12.53	13.25 ± 5.78	2.90 ± 0.50	150.98 ± 38.60	2.63 ± 0.35
0–40	80.28 ± 21.64	13.30 ± 5.15	6.22 ± 2.28	279.87 ± 102.67	3.75 ± 1.00

2.2 气象数据

本研究中气象数据均来自于青海海北高寒草地生态系统国家野外科学观测研究站气象观测站。

2.3 数据分析

2.3.1 蒸散量 (ET) 的计算

由涡度观测中的潜热通量 LE ($W \cdot m^{-2}$) 换算得到的^[38]。计算公式如下:

$$ET = LE / \lambda;$$

$$\lambda = (2500 - 2.4Ta) \times 10^3。$$

式中: λ 为蒸发潜热 ($J \cdot kg^{-1}$); Ta 为空气温度 ($^{\circ}C$)。

2.3.2 总初级生产力 (GPP) 的计算

站点通量数据来自国家生态系统观测研究网络科技资源服务系统 (<http://rs.cern.ac.cn/>), 数据时间尺度为 2003 – 2010 年。通量数据包括碳净交换量^[8]和生态系统呼吸 (Re)。通过获取海北站日通量数据计算 GPP, 计算方法如下式:

$$GPP = Re - NEE。$$

式中: GPP 为植被总初级生产力 ($g \cdot m^{-2}$); Re 为白天生态系统呼吸量 ($g \cdot m^{-2}$); NEE 为白天生态系统 CO_2 净交换量 ($g \cdot m^{-2}$)^[39]。

2.3.3 水分利用效率的计算

本研究水分利用效率的计算采用以下公式:

$$WUE = \frac{GPP}{ET}。$$

式中: WUE 为水分利用效率 [$g \cdot (m^2 \cdot mm)^{-1}$]; GPP 和 ET 分别为生态系统总初级生产力 ($g \cdot m^{-2}$) 和实际蒸散量 (mm)。

2.4 数据处理

数据整理采用 Excel 2016, 显著性检验 (单因素方差分析)、相对贡献率的计算借助于增强回归树分析方法。增强回归树 (BRT) 是基于分类回归树算法 (CART) 的一种自学习方法, 该方法通过随机选择和自学习方法产生多重回归树, 能够提高模型的稳定性和预测精度。在运算过程中多次随机抽取一定量的数据, 分析自变量对因变量的影响程度, 剩余数据用来对拟合结果进行检验, 最后对生成的多重回归取均值并输出。BRT 方法提高了计算结果的稳定性和精度, 得出自变量对因变量的影响载荷, 以及其他自变量取均值或不变的情况下, 该自变量与因变量的相互关系^[40]。在 R 语言中 (4.0.3 版本) 利用 Dismo 软件包实现。设置学习速率 (learning rate) 为 0.001, 树的复杂度 (tree complexity) 为两层, 每次抽取 50% 的数据进行分析, 50% 用于训练, 并进行 10 次交叉验证。相关性分析的计算采用 R 语言 (4.0.3 版本) 软件处理。运用 origin 2019 进行图件的绘制。

3 结果与分析

3.1 金露梅灌丛草甸生态系统水分利用效率年际变化特征

年际尺度上, 金露梅灌丛草甸 2003 – 2010 年 GPP、WUE 呈增加趋势, 且均达到极显著性水平 ($P < 0.001$) (图 2), ET 呈微弱增加趋势, 8 年间 GPP 与 ET、WUE 均值分别为 $326.66 g \cdot m^{-2}$ 、 $810.15 mm$ 和 $756.03 g \cdot (m^2 \cdot mm)^{-1}$ 。2010 年相较于 2003 年 GPP 上升了 1.14 倍; ET 下降了 3.44%; WUE 上升了 2.49 倍。GPP、ET 和 WUE 分别以每年 $98.55 g \cdot m^{-2}$ 、 $40.15 mm$

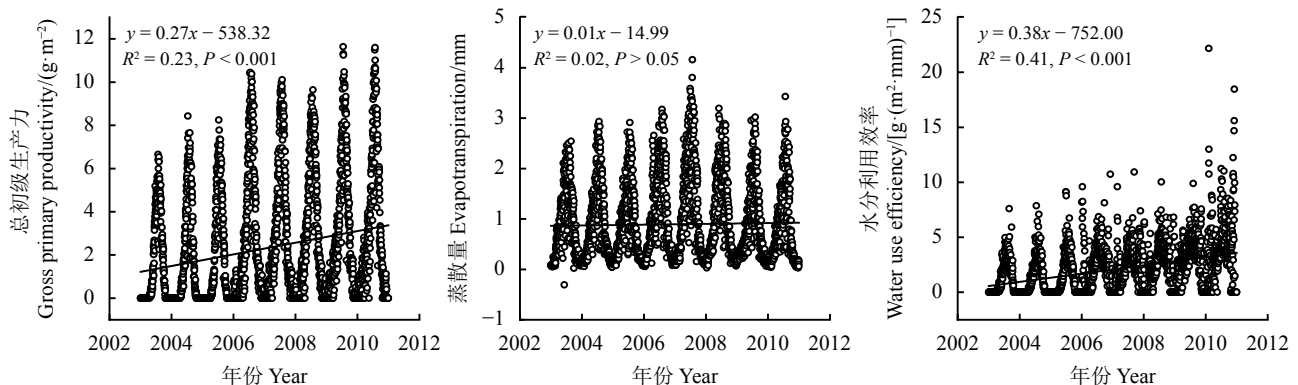


图 2 总初级生产力、蒸散量和水分利用效率年际变化

Figure 2 Interannual variation of gross primary productivity, evapotranspiration, and water use efficiency

和 $138.70\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{mm})^{-1}$ 增加趋势增加 (表 2)。

3.2 金露梅灌丛草甸生态系统水分利用效率季节尺度对比分析

季节尺度上, GPP、ET 和 WUE 均呈倒 V 型变化 (图 3)。ET 在生长季盛期 7 月或 8 月份达到最大值, 7 月和 8 月份均值分别为 57.06 和 57.18 mm ; 1 月份降到最小值, 均值为 4.99 mm 。相较于其余月

份, 6 月、7 月和 8 月 3 个月份蒸散量的变化相对较小, 1 月-7 月或 8 月呈快速上升趋势, 之后呈快速下降趋势。GPP 含量在 7 月份达到最大值, 均值为 $221.77\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 1 月-7 月呈上升趋势, 且从生长季初期 5 月份开始呈快速上升, 7 月-12 月呈下降趋势。整体而言, WUE 在 1 月-7 月呈上升趋势, 5 月-7 月呈快速上升, 7 月份达到最大值, 7 月-12 月呈下降趋势, 7 月份 WUE 均值为 $3.76\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{mm})^{-1}$, 在

表 2 高寒草甸总初级生产力、蒸散量与水分利用效率年变化统计特征值
Table 2 Characteristic values of annual changes in gross primary productivity, evapotranspiration and water use efficiency in alpine meadows

类别 Category	均值 Mean	斜率 Slope	标准偏差 Standard deviation	变异系数 CV
总初级生产力 Gross primary productivity/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	810.15	98.55	82.42	0.10
蒸散量 Evapotranspiration/mm	326.66	40.15	17.23	0.05
水分利用效率 Water use efficiency($\text{m}^2\cdot\text{mm}^{-2}$)	756.03	138.70	118.82	0.16

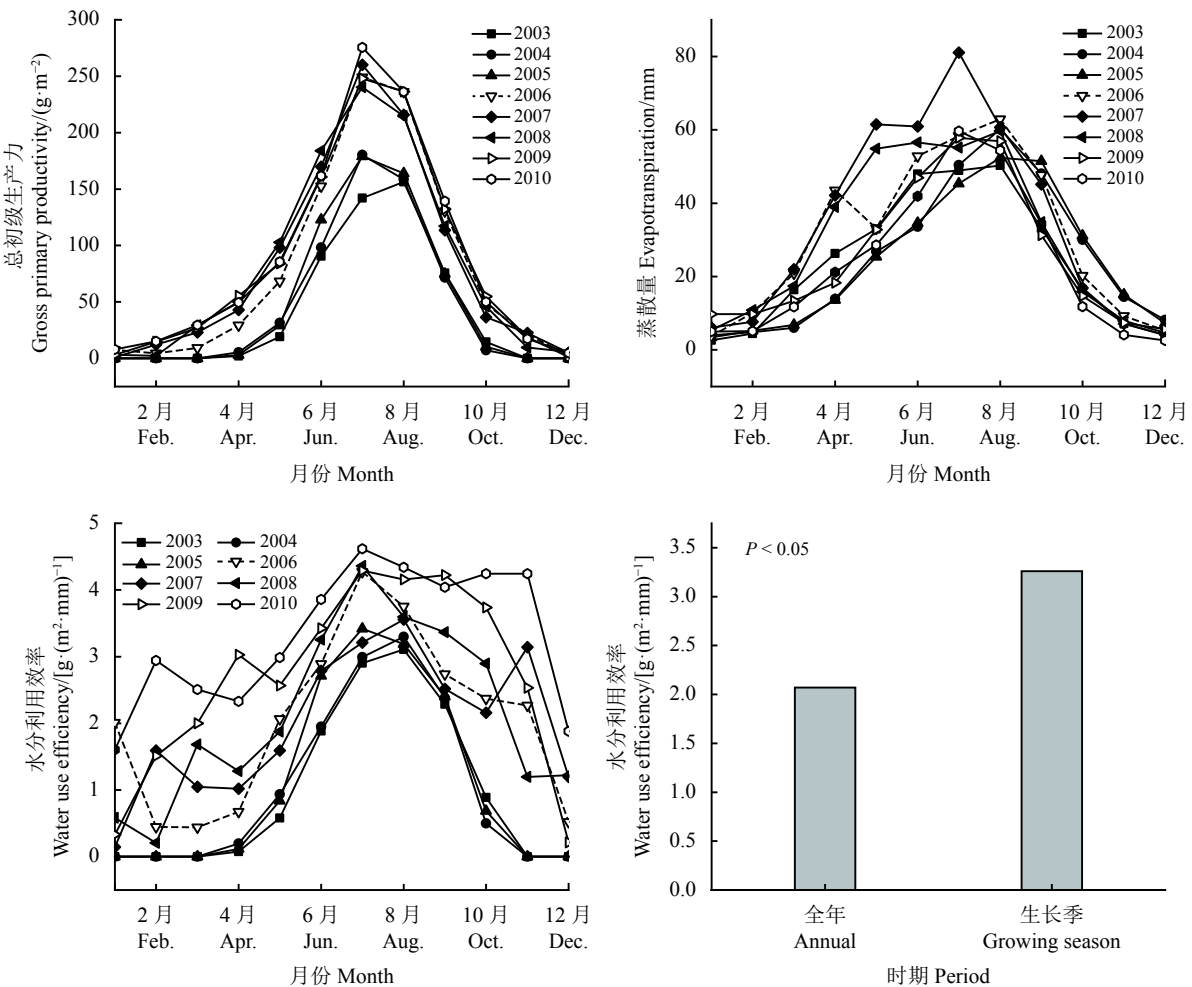


图 3 总初级生产力、蒸散量和水分利用效率生长季变化

Figure 3 Seasonal changes in gross primary productivity, evapotranspiration and water use efficiency in alpine meadows

冻土冻结时期 12 月 WUE 最低,全年和生长季 WUE 差异显著性对比结果发现生长季 WUE 显著高于全年 WUE ($P < 0.05$)。

3.3 金露梅灌丛草甸水分利用效率对气象因子的响应

增强回归树的模拟结果显示,在全年尺度上,年均气温、相对湿度和净辐射 3 种气象因子对 WUE 的相对贡献率最大,三者能解释 73.50% 的全年水分利用效率变化。生长季尺度上,光合有效辐射、空气温度和相对湿度 3 种气象因子相对贡献率最大,三者能解释 74.17% 的生长季水分利用效率变化。年均气温和光合有效辐射分别是全年尺度和生长季尺度上对金露梅灌丛草甸 WUE 贡献率最大的环境因子,值分别为 43.90% 和 30.79%。其与环境因子相对贡献率的大小顺序为饱和水汽压差 > 风速 > 净辐射 > 降水量。其余环境因子相对贡献率的变化顺序为光合有效辐射 > 饱和水汽压差 > 风速 > 降水量 (图 4)。相关性分析结果显示,在全年尺度上,与水分利用效率相关性大小顺序为年均气温 > 饱和水汽压差 > 相对湿度 > 降水量 > 风速 > 净辐射 > 光合有效辐射,除光合有效辐射外,其余因子均达

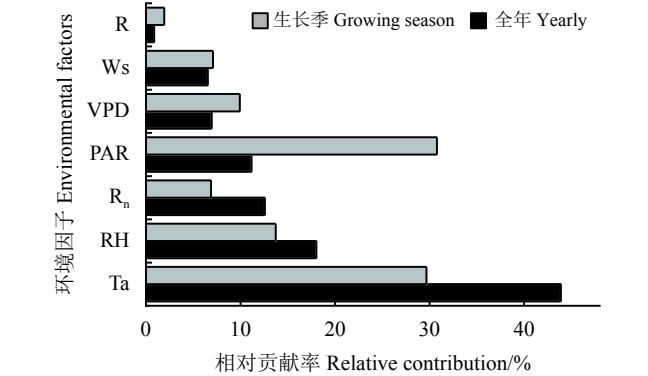


图 4 气象因子对高寒草甸水分利用效率的相对贡献率
Figure 4 Relative contribution of various meteorological factors on the water use efficiency of alpine meadows

VPD, 饱和水汽压差; Ta, 空气温度; Ws, 风速; R_n, 净辐射; PAR, 光合有效辐射; RH, 相对湿度; R, 降水量。
VPD, ns vapor pressure deficit; Ta, air temperature; Ws, wind speed; R_n, net radiation; PAR, photosynthetically active radiation; RH, relative humidity; R, precipitation.

到极显著性水平 ($P < 0.01$) (表 3)。生长季尺度上相关性大小顺序为光合有效辐射 > 相对湿度 > 净辐射 > 年均气温 > 风速 > 降水量 > 饱和水汽压差,除饱和水汽压以外,其余因子均达到极显著水平 ($P < 0.01$) (表 4)。

表 3 高寒草甸水分利用效率与气象因子之间的关系
Table 3 The relationship between water use efficiency and various meteorological factors in alpine meadows

相关系数 Correlation coefficient	空气温度 Air temperature	相对湿度 Relative humidity	风速 Wind speed	净辐射 Net radiation	光合有效辐射 Photosynthetically active radiation	降水量 Precipitation	饱和水汽压差 Vapor pressure deficit	水分利用效率 Water use efficiency
空气温度 Air temperature	1.00	0.49**	-0.12**	0.75**	0.46**	0.29**	0.76**	0.55**
相对湿度 Relative humidity	—	1.00	-0.55**	0.28**	-0.17**	0.49**	0.31**	0.30**
风速 Wind speed	—	—	1.00	0.01	0.24**	-0.20**	0.04**	-0.21**
净辐射 Net radiation	—	—	—	1.00	0.86**	0.04**	0.72**	0.18**
光合有效辐射 Photosynthetically active radiation	—	—	—	—	1.00	-0.23**	0.53**	-0.02**
降水量 Precipitation	—	—	—	—	—	1.00	0.22**	0.27**
饱和水汽压差 Vapor pressure deficit	—	—	—	—	—	—	1.00	0.35**
水分利用效率 Water use efficiency	—	—	—	—	—	—	—	1.00

*表示水分利用效率与气象因子之间差异显著($P < 0.05$), **表示水分利用效率与气象因子之间差异极显著($P < 0.01$)。
* and ** indicate significant difference between water use efficiency and specific meteorological factors at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

表 4 高寒草甸生长季水分利用效率与气象因子之间的关系
Table 4 The relationship between water use efficiency and meteorological factors
as a function of the growing season of alpine meadows

相关系数 Correlation coefficient	空气温度 Air temperature	相对湿度 Relative humidity	风速 Wind speed	净辐射 Net radiation	光合有效辐射 Photosynthetically active radiation	降水量 Precipitation	饱和水汽压差 Vapor pressure deficit	水分利用效率 Water use efficiency
空气温度 Air temperature	1.00	0.06 [*]	-0.09 ^{**}	0.22 ^{**}	0.12 [*]	-0.02 ^{**}	0.08 ^{**}	0.39 ^{**}
相对湿度 Relative humidity	-	1.00	-0.61 ^{**}	-0.54 ^{**}	-0.74 [*]	0.50 ^{**}	-0.38 ^{**}	0.48 ^{**}
风速 Wind speed	-	-	1.00	-0.28 ^{**}	0.41 ^{**}	-0.19 ^{**}	0.31 ^{**}	-0.38 ^{**}
净辐射 Net radiation	-	-	-	1.00	0.94 ^{**}	-0.43 ^{**}	0.27 ^{**}	-0.43 ^{**}
光合有效辐射 Photosynthetically active radiation	-	-	-	-	1.00	-0.51 ^{**}	0.28 ^{**}	-0.51 ^{**}
降水量 Precipitation	-	-	-	-	-	1.00	-0.08 ^{**}	0.26 ^{**}
饱和水汽压差 Vapor pressure deficit	-	-	-	-	-	-	1.00	-0.03
水分利用效率 Water use efficiency	-	-	-	-	-	-	-	1.00

4 讨论

由于植被 WUE 主要受到 GPP 和 ET 两种因素影响, 故本研究亦分析了青海海北金露梅灌丛草甸 GPP 和 ET 的变化, 结果发现 2004 – 2009 年 GPP 和 ET 呈上升趋势, WUE 呈微弱下降趋势。2000 – 2014 年三江平原植被 ET、GPP 和 WUE 的变化与本研究结果一致^[19]。新疆天山地区 2000 – 2017 年植被 WUE 亦呈减小趋势, 究其原因是因为这 17 年间 ET 随年份增加的趋势高于 GPP, 且通过对水田和旱田的研究发现此地区水分利用效率变化主要受到人类不合利用等非气候因素影响, 故 WUE 呈减小趋势^[12]。基于 PT-JPL 模型研究退耕还林后的黄土高原于 2001 – 2015 年 WUE 呈增加趋势是因为退耕还林后植被生产力显著增加^[11]。2008 – 2016 年青海海北金露梅灌丛草甸总初级生产力呈上升趋势^[2]。本研究中 2004 – 2009 年水分利用效率呈下降趋势亦是因为连续 6 年间蒸散量的上升趋势高于总初级生产力, 故水分利用效率呈下降趋势。

就季节变化而言, 5 月 – 7 月 GPP、ET 和 WUE 均呈快速上升趋势, WUE 在 7 月份达到最大值, 7 月 – 12 月呈下降趋势。2000–2018 年中亚五国 WUE 在夏季 6 月 – 8 月达到最大值^[41]。这可能是因为在植物生长季盛期, GPP 的增加趋势高于 ET。

2000–2017 年新疆天山植被 WUE 在 7 月份达到最大值, 为 $1.34\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{mm})^{-1}$, 究其原因是因为受到气候条件和植被类型的影响^[12]。新疆草地全年 WUE 平均值为 $0.56\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 且在夏季达到最大值。这是因为新疆属于雨热同期的气候, 夏季水热组合条件相对较好, 利于牧草生长^[42]。

根据本研究中 WUE 表达式可知, 影响 GPP 和 ET 两个指标的影响因子均会影响 WUE。饱和水汽压差是温度的函数, 在一定程度上也影响着土壤蒸发^[26, 43], 进而影响 WUE。本研究中, 温度是影响金露梅灌丛草甸 WUE 的主要因子, 且呈正相关关系。有研究表明, 当温度低于植被光合作用的最适宜温度时, 气温的上升将提升植被光合速率, 从而产生更多的干物质量, 进而提高植物 WUE^[44]。温度对 WUE 的影响因区域、环境等既有正效应影响又存在负效应影响。南方亚热带地区水分利用效率与气温呈正相关关系^[45]。长江源区 WUE 因常年低温和气温回暖与水分利用效率之间呈正相关关系^[46]。空气相对湿度是兴安落叶松林 8 月份水分利用效率的驱动因子^[47]。大兴、大满、密云和张掖 4 个站在 0.5 h 尺度上相对湿度与 WUE 之间呈现正相关关系^[26]。藏北高寒草甸^[48]和辽宁东部陆域生态涵养区^[49]WUE 与相对湿度之间呈现负相关关系, 与本研

究结果相反。有研究表明,年均气温、相对湿度、饱和水汽压和光合有效辐射与 WUE 之间正负相关关系由该站点的 WUE 是由 GPP 主导还是由 ET 主导所决定的^[26]。风速与 WUE 之间呈负相关关系,其主要原因是在植被覆盖度较低的环境中风速主要影响蒸散量来影响 WUE^[50]。净辐射主要通过影响草地蒸散发来影响 WUE,水分蒸散作用随着太阳辐射增加导致的空气温度升高而增大,故净辐射与 WUE 之间存在负相关^[51]。光合有效辐射对植物固碳能力和水分消耗存在主要影响,当 GPP 在强光下达到饱和状态时,ET 会随着光合有效辐射的增大而增大,故 WUE 会随 PAR 的增大而减小^[26]。科尔沁草甸 WUE 与饱和水汽压差和空气温度均呈增加二次曲线形式,在生长季初期, GPP 含量随着饱和水汽压的增大呈增加趋势,ET 与饱和水汽压之间呈微弱正相关关系^[25]。三江平原植被 WUE 与降水量和相对湿度呈正相关关系^[19],这与本研究结果一致,究其原因可能是植被三江平原区海拔越高,植被生长状况越好,蒸散量较低,故植物 WUE 呈增加趋势^[52]。年降水量是驱动年际间生态系统 WUE 差异的主要因子^[53],是影响伊犁河谷^[20]和 2005–2014 年黑河流域^[54]、潘阳湖流域^[22] WUE 的主导因素,伊犁河谷降水量与 WUE 呈正相关关系,这是因为降水减少会直接降低蒸散量,进而导致 WUE 增大。黑

河流域由于植被类型的不同,与降水量的关系也存在一定差异。与降水量呈正相关关系的很多区域海拔,ET 较低,植被的固碳能力较强,故 WUE 增大^[19]。本研究结果显示,金露梅高寒草甸 WUE 与相对湿度与年均气温呈极显著正相关。这可能是因为西北地区草地 WUE 与温度呈正相关关系,且受温度影响大^[24]。而相对湿度主要通过影响 GPP 来影响金露梅灌丛草甸 WUE。

5 结论

总体而言,年际尺度上, GPP 和 WUE 呈现极显著上升趋势 ($P < 0.01$), ET 呈现微弱上升趋势。季节尺度上, GPP、ET 和 WUE 均呈倒 V 形变化,并于 7 月份达到最大值,12 月份呈现最小值。生长季的 WUE 显著高于全年 WUE ($P < 0.05$)。

无论是年际尺度还是生长季尺度,金露梅灌丛草甸的水分利用效率主要受控于年均气温和相对湿度两种气象因子,且均呈正相关关系。全年尺度上还有净辐射,生长季尺度上还有光合有效辐射。金露梅灌丛草甸 WUE 会随着净辐射和光合有效辐射两种因子的增大而减小。本研究连续 8 年在短时间尺度上对金露梅灌丛 WUE 变化特征和适应机制进行了研究,但对于长时间尺度上 WUE 变化特征及其调控机制还有待进一步研究。

参考文献 References:

- [1] 张法伟, 韩赞, 李红琴, 李英年, 曹广民, 周华坤. 青藏高原高寒金露梅灌丛湍流热通量交换与分配特征及其环境影响机制. *中国农业气象*, 2020, 41(2): 76-85.
ZHANG F W, HAN Y, LI H Q, LI Y N, CAO G M, ZHOU H K. Turbulent heat exchange and partitioning and its environmental controls between the atmosphere and an alpine *Potentilla fruticosa* shrublands over the Qinghai-Tibetan plateau. *Chinese Agricultural Meteorology*, 2020, 41(2): 76-85.
- [2] 戴黎聪, 郭小伟, 柯浔, 杜岩功, 张法伟, 李以康, 李茜, 林丽, 曹广民, 朋措吉, 舒锴. 青藏高原金露梅灌丛草甸植物群落对退化演替的响应. *生态环境学报*, 2019, 28(4): 732-740.
DAI L C, GUO X W, KE X, DU Y G, ZHANG F W, LI Y K, LI Q, LIN L, CAO G M, PENG C J, SHU K. The response of *Potentilla fruticosa* communities to degradation succession in Qinghai-Tibet plateau. *Ecology and Environment*, 2019, 28(4): 732-740.
- [3] 李红琴, 宋成刚, 张法伟, 李英年. 青海高寒区域金露梅灌丛草甸灌木和草本植物固碳量的比较. *植物资源与环境学报*, 2014, 23(3): 1-7.
LI H Q, SONG C G, ZHANG F W, LI Y N. Comparison on fixed carbon amount of shrub and herb of *Potentilla fruticosa* shrub meadow in alpine region of Qinghai Province. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2014, 23(3): 1-7.
- [4] 孟凡栋, 王常顺, 朱小雪, 崔树娟, 王奇, 周阳, 汪诗平. 西藏高原金露梅灌丛草甸物种丰富度和生物量取样方法探讨. *生态学报*, 2016, 35(12): 3435-3442.

- MENG F D, WANG C S, ZHU X X, CUI S J, WANG Q, ZHOU Y, WANG S P. Sampling methods about species richness and aboveground biomass of *Potentilla fruticosa* shrub meadow on Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(12): 3435-3442.
- [5] 王启基, 周兴民, 张堰青, 赵新全. 青藏高原金露梅灌丛的结构特征及其生物量. *西北植物学报*, 1991, 11(4): 333-340.
WANG Q J, ZHOU X M, ZHANG Y Q, ZHAO X Q. Structural characteristics and biomass of Jinlumei shrubs on the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 1991, 11(4): 333-340.
- [6] 朋措吉, 宋明华, 周春丽, 李以康, 李小娟, 曹广民. 放牧影响下不同盖度金露梅灌丛草本植物叶功能性状与土壤因子的关系. *西北植物学报*, 2020, 40(5): 870-881.
PENG C J, SONG M H, ZHOU C L, LI Y C, LI X J, CAO G M. Relationship between Leaf functional traits of herbaceous plants and soil factors in different coverage gradients of *Potentilla fruticosa* shrub under grazing. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, 40(5): 870-881.
- [7] LI H, ZHU J, ZHANG F, HE H D, YANG Y S, LI Y N, CAO G M, ZHOU H K. Growth stage-dependant variability in water vapor and CO₂ exchanges over a humid alpine shrubland on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 268: 55-62.
- [8] ABDUL J C, RAGUPATHI G, BEEMARAO S, GOMATHINAYAGAM M, PANNEERSELVAM R. Differential responses in water use efficiency in two varieties of *Catharanthus roseus* under drought stress. *Comptes Rendus Biologies*, 2008, 331(1): 42-47.
- [9] 张桂玲, 李艳琴, 罗绪强, 莫愁, 任艳, 陆汉芝, 秦会斌. 季节性干旱下喀斯特次生林不同树种水分利用效率变化. *地球与环境*, 2021, 49(1): 25-31.
ZHANG G L, LI Y Q, LUO X Q, MO C, REN Y, LU H Z, QIN H B. Change of water use efficiency of different species in karst secondary forest under seasonal drought. *Earth and Environment*, 2021, 49(1): 25-31.
- [10] TANG, X G, LI H P, DESAI, ANQUR R, NAGY, ZOLTAN, LUO J H, KOLB, THOMAS E, OLIOSSO A, XU X B, KUTSCH W, PILEGAARD K, KPSTNER B, AMMANN C. How is water-use efficiency of terrestrial ecosystems distributed and changing on Earth? *Scientific Reports*, 2014, 4(1): 7438.
- [11] 邵蕊, 李垚, 张宝庆, 黄土高原退耕还林(草)以来植被水分利用效率的时空特征及预测. *科技导报*, 2020, 38(17): 81-91.
SHAO R, LI Y, ZHANG B Q. Analysis of the spatial and temporal analysis and prediction of water use efficiency since the grain for green project in the Loess plateau. *Science & Technology Review*, 2020, 38(17): 81-91.
- [12] 艾则孜提约麦尔·麦麦提, 玉素甫江·如素力, 何辉, 拜合提尼沙·阿不都克日木. 2000-2017年新疆天山植被水分利用效率时空特征及其与气候因子关系分析. *植物生态学报*, 2019, 43(6): 490-500.
Aizezitiyuemaier·Maimaiti, Yusufjiang·Rusuli, HE H, Baihetinisha·Abudukerimu. Spatio-temporal characteristics of vegetation water use efficiency and its relationship with climate factors in Tianshan Mountains in Xinjiang from 2000 to 2017. *Journal of Plant Ecology*, 2019, 43(6): 490-500.
- [13] 姜寒冰, 张玉翠, 任晓东, 要家威, 沈俊彦. 作物水分利用效率研究方法及其尺度传递研究进展. *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, YAO J W, SHEN J Y. A review of progress in research and scaling-up methods of crop water use efficiency. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(1): 50-59.
- [14] OLIVEIRA D, BRUNSELL, MORAES, SHIMABUKURO, BERTANI. Evaluation of MODIS-based estimates of water-use efficiency in *Amazonia*. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(19): 5291-5309.
- [15] 邹杰, 丁建丽. 2000-2014年中亚地区主要植被类型水分利用效率特征. *林业科学*, 2019, 55(3): 175-182.
ZOU J, DING J L. Changes of water use efficiency of main vegetation types in tentral Asia from 2000 to 2014. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55(3): 175-182.
- [16] 周雄, 孙鹏森, 张明芳, 刘世荣. 西南高山亚高山区植被水分利用效率时空特征及其与气候因子的关系. *植物生态学报*, 2020, 44(6): 628-641.
ZHOU X, SUN P S, ZHANG M F, LIU S R. Spatio-temporal characteristics of vegetation water use efficiency and their relationships with climatic factors in alpine and subalpine area of southwestern China. *Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(6): 628-641.
- [17] 赵平, 孙谷畴, 曾小平, 彭少麟, 莫熙穆, 李煜祥, 郑中华. 两种生态型榕树的叶绿素含量、荧光特性和叶片气体交换日变化的

- 比较研究. *应用生态学报*, 2000, 11(3): 327-332.
- ZHAO P, SUN G C, ZENG X P, PENG S L, MO X M, LI Y X, ZHENG Z H. A comparative study on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence and diurnal course of leaf gas exchange of two ecotypes of banyan. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(3): 327-332.
- [18] 李机密, 黄儒珠, 王健, 黄玮. 陆生植物水分利用效率. *生态学杂志*, 2009, 28(8): 1655-1663.
- LI J M, HUANG R Z, WANG J, HUANG W. Water use efficiency of terrestrial plants: A review. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(8): 1655-1663.
- [19] 史晓亮, 吴梦月, 张娜, 丁皓. 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. *生态学杂志*, 2020, 39(5): 1651-1663.
- SHI X L, WU M Y, ZHANG N, DING H. Spatial and temporal variation of vegetation water use efficiency and its response to meteorological factors in Sanjiang Plain. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(5): 1651-1663.
- [20] 付秀东, 闫俊杰, 沙吾丽·达吾提, 刘海军, 崔东, 陈晨. 伊犁河谷草地生态系统水分利用效率时空变化及影响因素. *水土保持研究*, 2021, 28(1): 124-131.
- FU X D, AN J J, Shawuli·duwuti, LIU H J, CUI D, CHEN C. Spatiotemporal variation of water use efficiency and its influencing factors in the grassland ecosystem of Ili River Valley. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(1): 124-131.
- [21] 胡海英, 李惠霞, 倪彪, 师斌, 徐冬梅, 谢应忠. 宁夏荒漠草原典型群落的植被特征及其优势植物的水分利用效率. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2019, 45(4): 460-471.
- HU H Y, LI H X, NI B, SHI B, XU D M, XIE Y Z. Characteristic of typical vegetation community and water use efficiency of dominant plants in desert steppe of Ningxia. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2019, 45(4): 460-471.
- [22] 刘福红, 叶许春, 郭强, 李相虎, 刘佳. 鄱阳湖流域不同土地覆被碳水利用效率时空变化及其与气候因子的相关性. *生态学报*, 2021, 41(2): 694-706.
- LIU F H, YE X C, GUO Q, LI X H, LIU J. Spatio-temporal variation of carbon and water use efficiency of different land cover in the Poyang Lake Basin and their correlations with climate factors. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(2): 694-706.
- [23] 张珂, 刘林鑫, 晁丽君, 杨婧. 2000—2014 年云南省陆地生态系统水分利用效率的时空变化. *水资源保护*, 2019, 35(5): 1-5.
- ZHANG K, LIU L X, ZHAO L J, YANG J. Spatiotemporal variations of terrestrial ecosystem water use efficiency in Yunnan Province from 2000 to 2014. *Water Resources Protection*, 2019, 35(5): 1-5.
- [24] 常娟, 张增信, 田佳西, 陈喜, 陈奕兆. 西北地区草地水分利用效率时空特征及其对气候变化的响应. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(3): 119-125.
- CHANG J, ZHANG Z X, TIAN J X, CHEN X, CHEN Y Z. Spatio-temporal characteristics of grassland water use efficiency and its response to climate change in northwest China. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2020, 44(3): 119-125.
- [25] 李辉东, 关德新, 袁凤辉, 王安杰, 金昌杰, 吴家兵, 李峥, 井艳丽. 科尔沁草甸生态系统水分利用效率及影响因素. *生态学报*, 2015, 35(2): 478-488.
- LI H D, GUAN D X, YUAN F H, WANG A J, JIN C J, WU J B, LI Z, JING Y L. Water use efficiency and its influential factor over Horqin Meadow. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2): 478-488.
- [26] 冯朝阳, 王鹤松, 孙建新. 中国北方植被水分利用效率的时间变化特征及其影响因子. *植物生态学报*, 2018, 42(4): 453-465.
- FENG Z Y, WANG H S, SUN J X. Temporal changes of vegetation water use efficiency and its influencing factors in northern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(4): 453-465.
- [27] 付俊娥, 王明月, 庞治国, 李芳华, 曲伟, 刘潇. 黑龙江西部农田水分利用效率时空特征及气候影响分析. *中国水利水电科学研究院学报*, 2019, 17(4): 305-311.
- FU J E, WANG M Y, PANG Z G, LI F H, QU W, LIU X. Spatio-temporal characteristics of water use efficiency and its attribution analysis with climatic factors in western region of Heilongjiang Province. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2019, 17(4): 305-311.
- [28] 米兆荣, 陈立同, 张振华, 贺金生. 基于年降水、生长季降水和生长季蒸散的高寒草地水分利用效率. *植物生态学报*, 2015, 39(7): 649-660.
- MI Z R, CHEN L T, ZHANG Z H, HE J S. Alpine grassland water use efficiency based on annual precipitation, growing season

- precipitation and growing season evapotranspiration. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(7): 649-660.
- [29] 王长庭, 龙瑞军, 王根绪, 刘伟, 王启兰, 张莉, 吴鹏飞. 高寒草甸群落地表植被特征与土壤理化性状、土壤微生物之间的相关性研究. *草业学报*, 2010, 19(6): 25-34.
- WANG C T, LONG R J, WANG G X, LIU W, WANG Q L, ZHANG L, WU P F. Relationship between plant communities, characters, soil physical and chemical properties, and soil microbiology in alpine meadows. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, 19(6): 25-34.
- [30] 李英年, 赵亮, 徐世晓, 于贵瑞, 杜明远, 王勤学, 孙晓敏, 唐艳鸿, 赵新全, 古松. 祁连山海北高寒湿地植物群落结构及生态特征. *冰川冻土*, 2006, 28(1): 76-84.
- LI Y N, ZHAO L, XU S X, YU G R, DU M Y, WANG Q X, SUN X M, TANG Y H, ZHAO X Q, GU S. The structure and ecological characteristics of plant community in Haibei alpine wetland of Qilian Mountains. *Glacier and Geocryology*, 2006, 28(1): 76-84.
- [31] 何俊龄. 金露梅对青藏高原高寒草甸植被特征和土壤性质的影响. 兰州: 兰州大学博士学位论文, 2017.
- HE J L. Effects of *Potentilla fruticosa* on vegetation characteristics and soil properties in alpine meadow of Tibetan Plateau. PhD Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [32] 王启兰, 王溪, 曹广民, 王长庭, 龙瑞军. 青海省海北州典型高寒草甸土壤质量评价. *应用生态学报*, 2011, 22(6): 1416-1422.
- WANG Q L, WANG X, CAO G M, WANG C T, LONG R J. Soil quality evaluation of typical alpine meadow in Haibei Prefecture, Qinghai Province. *The Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(6): 1416-1422.
- [33] 石文静. 青藏高原植被类型对土壤磷组分及矿化的影响. 兰州: 兰州大学硕士学位论文, 2015.
- SHI W J. Effects of vegetation on soil phosphorus fractions and mineralization in Qinghai-Tibet plateau. Master Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2015.
- [34] 赵君. 甘南亚高寒草甸金露梅氮磷化学计量特征及其机制的研究. 兰州: 兰州大学博士学位论文, 2011.
- ZHAO J. Nitrogen-Phosphorus stoichiometry characteristics in *Potentilla fruticosa* shrubs. Linn. in Gannan sub-alpine meadow. PhD Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2011.
- [35] 赵亮, 徐世晓, 李英年, 唐艳鸿, 赵新全, 古松, 杜明远, 于贵瑞. 青藏高原矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸 CO₂ 通量变化与环境因子的关系. *西北植物学报*, 2006, 26(1): 133-142.
- ZHAO L, XU S X, LI Y N, TANG Y H, ZHAO X Q, GU S, DU M Y, YU G R. Elations between carbon dioxide fluxes and environmental factors of *Kobresia humilis* meadows and *Potentilla fruticosa* meadows. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, 26(1): 133-142.
- [36] 曹广民, 李英年, 张金霞, 赵新全. 高寒草甸不同土地利用格局土壤 CO₂ 的释放量. *环境科学*, 2001, 22(6): 14-19.
- CAO G M, LI Y N, ZHANG J X, ZHAO X Q. Values of carbon dioxide emission from different land-use patterns of alpine meadow. *Environmental Science*, 2001, 22(6): 14-19.
- [37] 张法伟, 李英年, 曹广民, 李凤霞, 叶广继, 刘吉宏, 魏永林, 赵新全. 青海湖北岸高寒草甸草原生态系统 CO₂ 通量特征及其驱动因子. *植物生态学报*, 2012, 36(3): 187-198.
- ZHANG F W, LI Y N, CAO G M, LI F X, YE G J, LIU J H, WEI Y L, ZHAO X Q. CO₂ fluxes and their driving factors over alpine meadow grassland ecosystems in the northern shore of Qinghai Lake, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(3): 187-198.
- [38] TANG X, LI H, GRIFFIS T, ZHI D, LIU G. Tracking ecosystem water use efficiency of cropland by exclusive use of MODIS EVI data. *Remote Sensing*, 2015, 7(9): 11016-11035.
- [39] 史晓亮, 吴梦月, 张娜. 中国典型陆地生态系统水分利用效率及其对气候的响应. *农业工程学报*, 2020, 36(9): 152-159.
- SHI X L, WU M Y, ZHANG N. Characteristics of water use efficiency of typical terrestrial ecosystems in China and its response to climate factors. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(9): 152-159.
- [40] 李春林, 刘淼, 胡远满, 徐岩岩, 孙凤云. 基于增强回归树和 Logistic 回归的城市扩展驱动力分析. *生态学报*, 2014, 34(3): 727-737.
- LI C L, LIU M, HU Y M, XU Y Y, SUN F Y. Driving forces analysis of urban expansion based on boosted regression trees and Logistic regression. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(3): 727-737.
- [41] 郝海超, 郝兴明, 花顶, 秦景秀, 李玉朋, 张齐飞. 2000-2018 年中亚五国水分利用效率对气候变化的响应. *干旱区地理*, 2021,

- 44(1): 1-14.
- HE H C, HE X M, HUA D, QIN J X, LI Y P, ZHANG Q F. Response of water use efficiency to climate change in five Central Asian countries from 2000 to 2018. *Arid Land Geography*, 2021, 44(1): 1-14.
- [42] 黄小涛, 罗格平. 新疆草地蒸散与水分利用效率的时空特征. *植物生态学报*, 2017, 41(5): 9, 11-18.
- HUANG X T, LUO G P. Spatio-temporal characteristics of evapotranspiration and water use efficiency in grasslands of Xinjiang. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(5): 9, 11-18.
- [43] 王芳, 汪左, 黄静, 杨淑杰, 贺广均, 张运. 安徽省农田水分利用效率时空特征及其与气候因子的关系. *生态学报*, 2018, 38(17): 6268-6279.
- WANG F, WANG Z, HUANG J, YANG S J, HE G J, ZHANG Y. Spatio-temporal distribution characteristics of cropland water use efficiency and its relationship with climate in Anhui Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(17): 6268-6279.
- [44] 刘婵, 刘冰, 赵文智, 朱钊岑. 黑河流域植被水分利用效率时空分异及其对降水和气温的响应. *生态学报*, 2020, 40(3): 888-899.
- LIU C, LIU B, ZHAO W Z, ZHU K C. Temporal and spatial variability of water use efficiency of vegetation and its response to precipitation and temperature in Heihe River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(3): 888-899.
- [45] ZHANG Z, JIANG H, LIU J X, ZHOU G M, ZHANG X Y. Assessment on water use efficiency under climate change and heterogeneous carbon dioxide in China terrestrial ecosystems. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13(1): 2031-2044.
- [46] 张春敏. 长江源区植被净初生产力及水分利用效率的估算研究. 兰州: 兰州大学硕士学位论文, 2008.
- ZHANG C M. Estimation of the vegetation net primary productivity and water use efficiency of the Yangtze River Source Regime. Master Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2008.
- [47] 刘璇, 王飞, 张秋良, 田原, 王美媛. 兴安落叶松林水分利用效率及其响应的环境因子. *东北林业大学学报*, 2018, 46(9): 65-68.
- LIU X, WANG F, ZHANG Q L, TIAN Y, WANG M F. Water use efficiency and driving factors in *Larix gmelini* forest. *Journal of Northeast Forestry University*, 2018, 46(9): 65-68.
- [48] 沈振西, 付刚. 藏北高原高寒草甸水分利用效率与环境温湿度度的关系. *生态环境学报*, 2016, 25(8): 1259-1263.
- SHEN Z X, FU G. Relationships between water use efficiency and environmental temperature and humidity in an alpine meadow in the northern Tibet. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(8): 1259-1263.
- [49] 尚真宇. 辽宁东部陆域生态涵养区水分利用效率时空变化及驱动因子分析. *水利规划与设计*, 2020, 198(4): 29-33.
- SHANG Z Y. Analysis of spatial and temporal variation of water use efficiency its driving factors in land-based ecological conservation areas in eastern Liaoning. *Water Resources Planning and Design*, 2020, 198(4): 29-33.
- [50] 王皎月, 秦树高, 张宇清. 毛乌素沙地植被水分利用效率的时空格局. *中国沙漠*, 2020, 40(5): 120-129.
- WANG J Y, QIN S G, ZHANG Y Q. Spatial-temporal patterns of vegetation water use efficiency in the Mu Us Desert. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(5): 120-129.
- [51] SINGER K D, KUZYK M G, SOHN J E. Second-order nonlinear-optical processes in orientationally ordered materials: Relationship between molecular and macroscopic properties. *Journal of the Optical Society of America B*, 1987, 4(6): 968-976.
- [52] 张佳琦, 张勃, 马彬, 曹博, 梁晶晶, 马尚谦. 三江平原 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应. *中国沙漠*, 2019, 39(3): 206-213.
- ZGANG J Q, ZHANG B, MA B, CAO B, LIANG J J, MA S Q. Spatial-temporal variation of NDVI in Sanjiang Plain and its response to climate change. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(3): 206-213.
- [53] DONG G, GUO J, CHEN J, GE S, SONG G, HU L, WANG Y. Effects of spring drought on carbon sequestration, evapotranspiration and water use efficiency in the songnen meadow steppe in northeast China. *John Wiley & Sons, Ltd*, 2011, 4(2): 211-224.
- [54] 李肖娟, 张福平, 王虎威, 雷声剑, 高张. 黑河流域植被水分利用效率时空变化特征及其与气候因子的关系. *中国沙漠*, 2017, 37(4): 733-741.
- LI X J, ZHANG F P, WANG H W, LEI S J, GAO Z. Analysis of the spatio-temporal characteristics of water use efficiency of vegetation and its relationship with climate in the Heihe River Basin. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(4): 733-741.

(执行编辑 苟燕妮)