

陆地生态系统uWUE模型最优k值研究

袁瑞强^{1*}, 汪霞^{1,2}, 朱治凝¹

¹山西大学环境与资源学院, 山西 太原

²湖南大学环境科学与工程学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2022年10月1日; 录用日期: 2022年11月9日; 发布日期: 2022年11月16日

摘要

陆地生态系统的蒸散发是陆气间水、碳和能量交换的重要纽带。底层水分利用效率uWUE模型提高了对陆地生态系统碳水耦合关系的描述, 基于uWUE的蒸散发分割方法也得到广泛应用。然而, 对uWUE模型中的关键参数k的不确定性知之甚少。为了排除不同植被类型引起参数k的变化, 本研究讨论了单一植被类型的uWUE模型参数k的最优值问题。研究结果证明了uWUE模型参数k存在不同于模型经验值的最优值k*。单一植被类型uWUE模型的指数偏离一般经验值的原因是地理环境的差异。常绿针叶林的k*在0.2~1.1之间呈多峰分布, 与uWUE模型中的一般经验值(k = 0.5)存在较大偏差。经度、纬度、标高、年平均降水、年平均温度等五个地理变量对常绿针叶林的k*均存在影响。其中, 高程、经度和纬度对k*的影响权重合计达80%; 而年平均降水量和年平均温度的权重占20%。本研究指出了uWUE模型中的关键参数k存在较大的不确定性, 揭示了参数k是基于uWUE模型的蒸散发分割方法的不确定性的重要来源。

关键词

水分利用效率, uWUE模型, 蒸散发分割, 陆地生态系统, 不确定性

Study on Optimal k Value of Underlying Water Use Efficiency Model in Terrestrial Ecosystems

Ruiqiang Yuan^{1*}, Xia Wang^{1,2}, Zhining Zhu¹

¹School of Environment and Resource, Shanxi University, Taiyuan Shanxi

²School of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha Hunan

Received: Oct. 1st, 2022; accepted: Nov. 9th, 2022; published: Nov. 16th, 2022

*通讯作者。

Abstract

Evapotranspiration in terrestrial ecosystems is an important link for water, carbon and energy exchange between land and air. The new leaf scale uWUE model can better describe the coupling relationship between carbon and water in terrestrial ecosystems, and the UWU-based evapotranspiration segmentation method has been widely used. However, little is known about the uncertainty of the key parameter k in the uWUE model. In order to exclude the variation of parameter k caused by different plant functional types, this study discussed the optimal value of parameter k of uWUE model with a single vegetation type. The results prove that there exists an optimal value k^* for the parameter k of the uWUE model, which is different from the empirical value of the model. The reason why the parameter k of uWUE model for a plant functional type deviates from the general empirical value is the differences in geographical environments. The k^* of evergreen coniferous forest showed a multi-peak distribution between 0.2 and 1.1, which was significantly different from the general empirical value ($k = 0.5$) in uWUE model. Five geographical variables, such as longitude, latitude, elevation, annual mean precipitation and annual mean temperature, all have influence on k^* of evergreen coniferous forest. Among them, the influence altitude, longitude and latitude on k^* reach 80%. Annual mean precipitation and annual mean temperature account for 20% of the weight. This study points out that the key parameter k in uWUE model has great uncertainty, and reveals that parameter k is an important source of uncertainty for the evapotranspiration segmentation method based on uWUE model.

Keywords

Water Use Efficiency, uWUE Model, Evapotranspiration Partitioning, Terrestrial Ecosystems, Uncertainty

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

陆地生态系统与大气之间的碳水交换过程，在全球碳循环和水循环中发挥了重要作用。陆地生态系统的蒸散发不仅是全球水循环的主要组成部分，而且是陆地水、碳和地表能量交换之间的重要纽带[1]。陆地生态系统蒸散发(ET)主要由植被蒸腾(T)、土壤和冠层截留蒸发(以下简称为土壤蒸发，用 E 表示)两部分组成。植被蒸腾通量 T 与植被 - 大气碳通量紧密耦合。通过分割植被蒸腾与土壤蒸发过程，并研究这两个过程的控制因素，能增强对大气 - 陆面交互过程的认识，进而改进全球碳水循环模型。

蒸散发分割是水文循环和碳循环研究中的重要参数之一，其分割方法一直是研究的热点。水分利用效率 WUE (Water Use Efficiency)是描述陆地生态系统碳水耦合的关键参数。利用 WUE 模型进行蒸散发分割是一种新的基于观测的可靠的蒸散发分割方法。在生态系统尺度上，水分利用效率定义为植被总初级生产力 GPP (Gross Primary Productivity)与蒸散发 ET (Evapotranspiration)的比值[2]。在生态系统内部，饱和水汽压差 VPD (Vapor Pressure Deficit)相对稳定，与叶片尺度 VPD 基本一致。因此叶片尺度内在水分利用效率 iWUE (intrinsic WUE, $iWUE = GPP \cdot VPD/ET$)可以直接得到生态系统内在水分利用效率 IWUE 模型[3]。同理，叶片尺度底层水分利用效率 uWUE (underlying WUE, $uWUE = GPP \cdot \sqrt{VPD}/ET$)可以升尺度得到生态系统 uWUE 模型[4]。形式上，三种生态系统尺度上的水分利用效率模型区别在于

VPD 的指数 k 不同($GPP \cdot VPD^k/ET$)。相较于 WUE 和 IWUE, uWUE 模型提高了 GPP 和 ET 之间的线性相关关系,能更好地描述陆地生态系统碳水耦合关系[5]。基于 uWUE 模型,周沙提出了一种利用潜在底层水分利用效率 uWUEp (potential uWUE)和表观底层水分利用效率 uWUEa (apparent uWUE)分割陆地生态系统蒸散发通量的方法,并得到广泛应用[6] [7] [8],推动了蒸散发分割和生态水文研究。

然而,基于 uWUE 模型的陆地生态系统 ET 分割方法假设大气 CO_2 浓度稳定且植被覆盖类型均一。虽然在短期内可认为大气 CO_2 浓度保持稳定,但是全球大气 CO_2 浓度的时空变化不能完全忽略。其次,尽管存在不同植被类型 uWUEp 差异较小的情况,一般的陆地生态系统往往植被覆盖类型难以均一。因此 uWUE 模型分割陆地生态系统蒸散发通量的方法在实际应用中存在局限性[4] [9],可能导致通量分割的结果不是最优。考虑到假设条件和陆地生态系统实际情况之间的偏差,uWUE 模型中 VPD 的指数 k 可能存在一个随地理要素变化而变化的最优值,能提高陆地生态系统碳水耦合关系描述和蒸散发通量分割的精度。

本文探究了描述陆地生态系统碳水耦合关系的 uWUE 模型中 VPD 指数 k 的最优值问题。本文的研究目的包括:1) 证明存在最优 k 值;2) 识别不同地理要素对 k 值的影响。本研究有利于加深对 uWUE 模型的认识,提高利用 uWUE 模型分割蒸腾通量的精度,促进陆地生态系统碳水耦合关系以及植物水分利用策略的研究。

2. 数据和方法

2.1. 数据

从 AmeriFlux 和 Fluxnet 两个通量数据网站下载共 100 个植被类型为常绿针叶林(ENF)的站点的半小时碳水通量数据和气象观测数据,包括 GPP (植被总初级生产力)、VPD (饱和水汽压差)、LE (潜热通量)、Lon (经度)、Lat (纬度)、H (标高)、TA (年平均温度, $^{\circ}C$)、P (年平均降水量)等。选择单一植被类型研究可避免不同植被类型引起的 uWUE 模型中 k 值变化,有助于识别地理要素对 k 值的影响。ENF 类型相比其他植被类型,已有站点数多且空间分布广,能更好的满足分析需求。100 个站点中有 99 个位于北半球的,1 个位于南半球,16 个站点位于东半球,84 个位于西半球,且主要集中在北温带,个别在北寒带及南温带。在 Fluxnet 下载的 49 个站点中,有部分站点缺失标高、年平均温度和年平均降水量。而在 AmeriFlux 下载的 51 个站点中,均无 GPP 且有部分站点缺失 VPD、标高、年平均温度和年平均降水量。站点间年平均降水量变化范围 175~2452 mm,高程变化范围 1~3197 m,年平均温度变化范围 $-3.2^{\circ}C \sim 21.9^{\circ}C$,其中有 15 个站点气温低于 0 摄氏度。观测数据最短一年,最长 23 年,平均 8 年。

2.2. 方法

研究方法包括如下步骤:

第一,补全或计算半小时 GPP、VPD 和 ET 数据。基于站点的观测数据,使用 R 软件包“REddyProc” [10] 估算 GPP。该包执行标准的 EC 数据后处理算法,包括 uStar 过滤[11]、间隙填充[12]和通量分割[13],并从潜热估算 ET。利用潜热数据(LE, 单位: $W \cdot m^{-2}$)计算半小时的 ET 数据(1)。利用温度(TA, $^{\circ}C$)和相对湿度(RH, %)数据参考世界气象组织仪器和观测方法委员会指南转换方程计算半小时 VPD 数据(2)。

$$ET = LE \times 30 \times 60 \div (2.5 \times 10^6) \quad (1)$$

$$VPD = 0.61078 \times e^{\left(\frac{17.27 \times TA}{TA + 237.3}\right)} \times \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \quad (2)$$

第二,拟合 $GPP \cdot VPD^k$ 与 ET, 确定拟合优度最佳时的 k 值(k^*)。首先,按周沙方法对 100 个站点的

通量数据进行筛选和质量控制[7], 再将 ET 与 $GPP \cdot VPD^k$ 回归, 强制回归方程过零点, 计算回归方程拟合优度(R^2)。然后, 设定 k 值变化区间大小为 0.2, 变化步长为 0.001, 调整 k 值的取值范围以得到 k- R^2 曲线峰值, 取最大 R^2 对应的 k 值为 k^* 。最后, 所有站点的结果中, 去除 k^* 对应的 $R^2 < 0.5$ 的结果, 最终得到 70 个站点的 k^* 值。

第三, 选取站点纬度、经度、年平均温度、年降水量以及标高五个地理变量与 k^* 进行多元回归分析。首先去掉存在缺失部分地理变量的站点, 得到 63 个站点的结果。uWUE 模型利用 $GPP \cdot VPD^{k^*}$ 与 ET 的线性回归的斜率代表该植被在该站点的 uWUE。理论上对特定植被和特定站点 uWUE 为常数, 即 $GPP \cdot VPD^{k^*}$ 与 ET 呈绝对的线性关系。实际上可利用高的线性拟合优度去逼近理论情形。因此, 为保证回归模型的合理性, 保留了 $GPP \cdot VPD^k$ 与 ET 拟合优度 $R^2 > 0.8$ 的 20 个站点用于地理变量的多元回归分析。然后, 为了消除各地理变量数量级差异的影响, 对上述变量进行标准归一化处理。分别构建三地理变量、四变量和五变量回归模型确定多元线性回归模型的拟合优度 R^2 和显著性水平, 并对统计模型做 F 检验, 分析模型参数的合理性。最后, 取所有模拟结果中拟合优度最高的, 通过 F 检验的且结果达到显著的多元回归模型为分析结果。

上述过程中, GPP 的计算, ET 和 VPD 的计算, $GPP \cdot VPD^k$ 与 ET 的拟合在 R 中实现。多元回归分析等使用 SPSS (V14) 软件实现。综上所述, 研究方法受到观测站点数量、空间分布、观测数据质量等方面的影响。本研究在数据选择和方法设计上考虑了上述影响因素。

3. 结果和讨论

3.1. k^* 的分布

不同站点 $GPP \cdot VPD^k$ 与 ET 的拟合结果中最小 k^* 、最大 k^* , 以及两个中间值(k^* 等于 0.755 和 0.886) 的 k- R^2 曲线如图 1 所示。各站点 k- R^2 曲线均呈明显的抛物线型, 表明 uWUE 模型中 k 值对描述陆地生态系统碳水耦合关系 $GPP \cdot VPD^k \sim ET$ 的显著影响。同时, $GPP \cdot VPD^k$ 与 ET 的拟合结果显示 ENF 植被的 k^* 取值范围介于 0.237~1.045 之间。 k^* 总体均值为 0.76, 标准差为 0.26 指示了较大的变化范围。这个结果表明 uWUE 模型中统一取 k^* 为 0.5 可能给基于该方法的蒸散发通量分割结果带来不确定性。

20 个站点的 $GPP \cdot VPD^k$ 与 ET 的拟合优度 $R^2 > 0.8$, 可用于地理变量对 k^* 影响的多元回归分析。这 20 个站点的 k^* 的频率分布图如图 2 所示, k^* 的取值呈多峰分布, 主要集中在 1.0 左右。 k^* 位于 0.9~1.1 区间的站点数量约占 50%, 这些站点位于东半球和北半球的中纬度地区, 高程范围 4~628.9 m, 温度变化范围 -2.9°C~14.2°C, 年平均降水量变化范围 405.6~1036 mm。 k^* 的多峰分布, 以及与地理空间的对应性揭示了地理空间变量对植被 uWUE 模型中 k^* 存在影响。

3.2. k^* 与地理变量的关系

地理变量刻画了某个区域的地理位置和环境条件。地理位置不同, 比如经纬度和海拔高度, 以及植被的生长环境的差异, 比如温度和降水的差异, 可能会影响陆地生态系统碳水耦合关系, 进而导致植被蒸腾的差异。各 ENF 通量观测站点的地理变量, 包括纬度、经度、标高、年平均温度、年降水量等, 被用于证明地理变量对陆地生态系统碳水耦合关系的影响。温度可以通过影响植物的气孔导度和光合作用酶的活性而影响植物的光合作用和蒸散发作用[14] [15]。降水量控制了土壤的含水量和环境的相对湿度, 决定了植物可以利用的水分多少, 从而影响植物的固碳能力和蒸散发等[16] [17]。一般地, 降水量和温度随经纬度和海拔高度的变化而有规律地变化, 所以地理位置对植被的生理特征存在影响。因此, 描述陆地生态系统碳水耦合关系的 uWUE 模型中的关键参数 k^* 的变化可能受到地理变量的影响而偏离一般经验值。

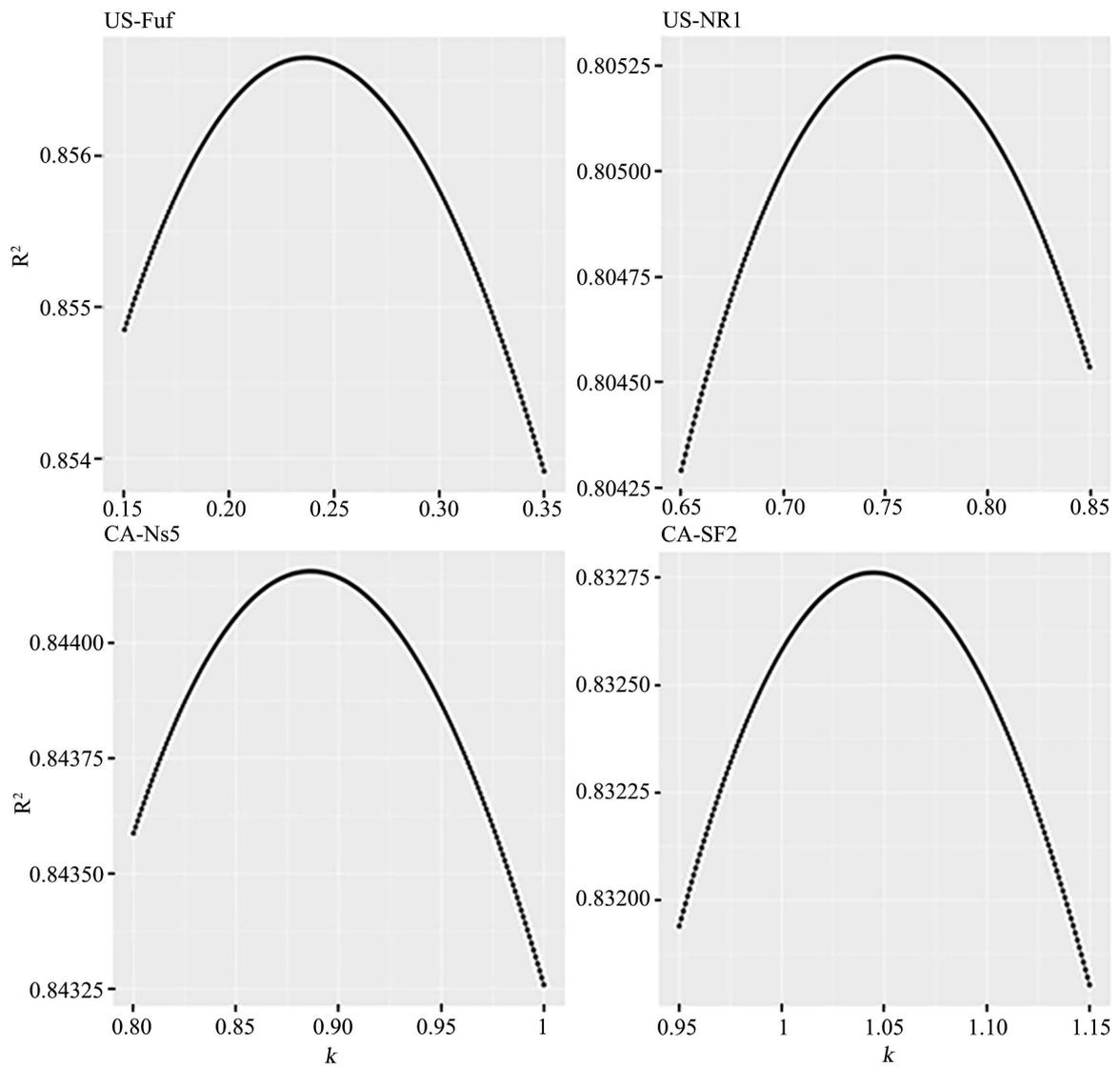


Figure 1. $k \sim R^2$ curves of the fitting results between $GPP \cdot VPD^k$ and ET at ENF site
图 1. ENF 站点 $GPP \cdot VPD^k$ 与 ET 拟合结果的 $k \sim R^2$ 曲线图

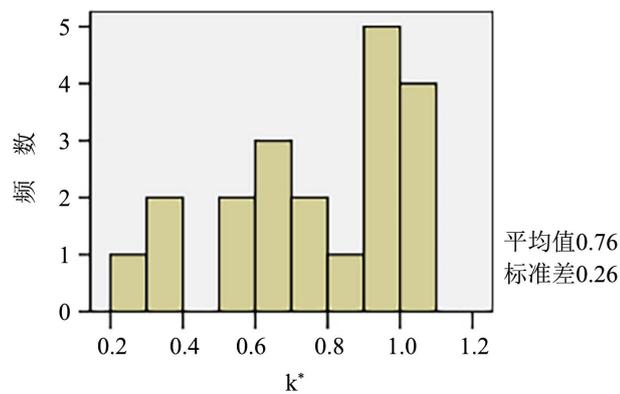


Figure 2. The density distribution of k^*
图 2. k^* 的密度分布图

然而，单个地理变量无法对 k^* 的变化做出很好的解释。图 3 显示了单个地理变量与 k^* 的关系，结果表明两者之间的相关性较差。因此，单个地理变量无法单独解释 k^* 的变化。类似地，GPP、ET 等与植被相关的变量也受到多种因素影响。这揭示了与植被生理相关的变量与环境之间复杂的关系。

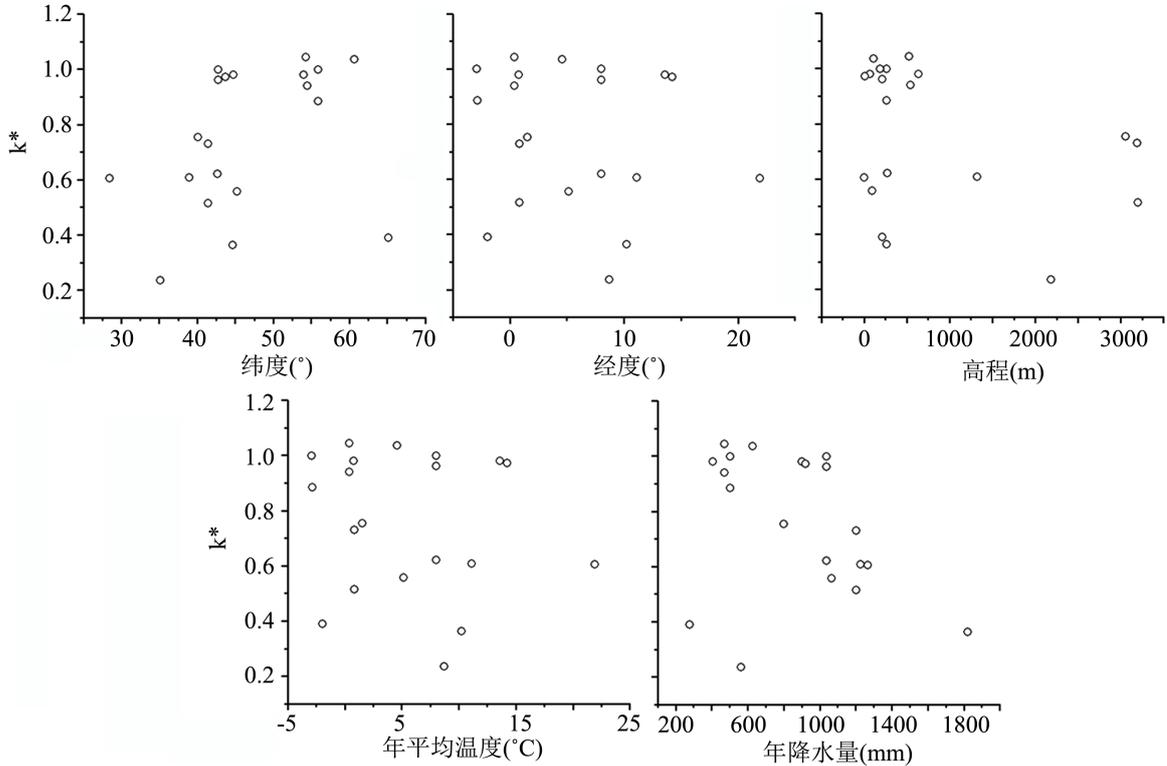


Figure 3. Scatter plots of geographic variables versus k^*
图 3. 地理变量与 k^* 的散点图

多元回归模型可以解决多个自变量影响一个因变量的问题，被用于分析多个地理变量与 uWUE 模型中的关键参数 k^* 之间的复杂关系。我们分别构建了自变量个数分别为三变量、四变量和五变量的回归模型，共计 16 个统计模型。利用模型的拟合优度 R^2 判断各回归方程的拟合效果， R^2 越接近于 1，拟合效果越好。利用 F 检验的统计量 F 值判断各模型自变量是否适合用来估计因变量。按给定显著性水平 ($\alpha = 0.05$)，查 F 分布表得临界值 F_α 。当满足 $F > F_\alpha$ 时拟合方程通过检验，即自变量是合适的，对因变量有显著的影响。上述 16 个统计模型中有 5 个模型满足拟合优度高 ($R^2 > 0.6$) 且通过 F 检验，如表 1 所示。

Table 1. Multiple linear regression analysis model for geographic variables and k^* of ENF sites
表 1. ENF 站点的地理变量和 k^* 间的部分多元线性回归分析模型

模型结构	自变量	拟合优度	sig
五变量模型	经度、纬度、标高、年平均降水、年平均温度	0.722	0.046
四变量模型	经度、纬度、标高、年平均温度	0.713	0.023
四变量模型	经度、标高、年平均降水、年平均温度	0.692	0.035
四变量模型	经度、纬度、年平均降水、年平均温度	0.664	0.055
三变量模型	经度、标高、年平均温度	0.688	0.072

由表 1 可知,五变量统计模型的拟合优度值最高,达到 0.722; k^* 模拟值和真实值的相关系数可达 0.85,拟合效果好。显著性水平为 0.046,模型的回归方程具有统计意义。在 95%置信度下,F 检验值为 3.047,Fa 值为 2.81,满足 $F > F_a$,即模型中自变量对 k^* 有显著影响,可用于估计因变量。因此,五变量模型可以作为地理变量和 k^* 之间复杂关系的多元统计分析结果。同时,五变量统计模型的结果优于三变量和四变量模型的结果,表明了不同地理要素对 uWUE 模型中的关键参数 k^* 均存在影响, k^* 随地理变量的变化是复杂的。

五变量统计模型的拟合方程为: $y = 1.251 + 0.710x_1 - 0.606x_2 - 0.371x_3 - 0.866x_4 - 0.221x_5$,式中, x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 分别代表经度、纬度、年平均温度、高程、年平均降水量。统计模型中自变量均经过标准化,可以用变量的系数的绝对值判断不同地理变量对 uWUE 模型中的关键参数 k^* 的影响的权重(图 4)。

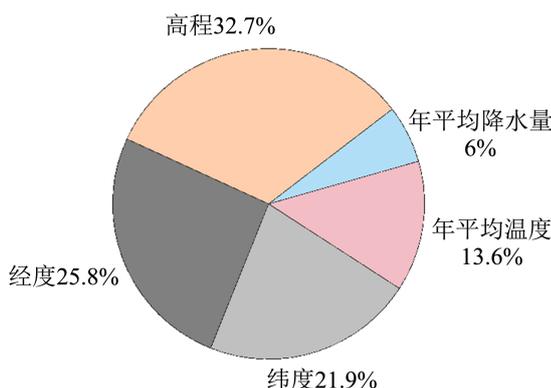


Figure 4. Weights of fitting results of 20 sites using different models
图 4. 20 个站点不同模型拟合结果的权重

参与多元线性回归的 ENF 站点均位于北半球,经度跨越 170° ,纬度跨越 37° ,高程范围 1~3197 m (1000 米以下的站点占据 75%),年平均降水范围 175~1819.6 mm,年平均温度 -2.9°C ~ 21.9°C 。站点的覆盖度极大,对于不同的地理条件具有较好的代表性。五个地理变量中,主要影响 ENF 植被 uWUE 模型参数 k^* 的是高程、经度和纬度,地理位置的影响权重合计达 80%;同时年平均降水量和年平均温度代表的生境所占权重只有 20%。由此可见,对于 ENF 植被,其生理特性的空间变化可能主要随地理位置而变化,受生境的影响相对较小。然而,必须指出这一结果在不同类型的植被间可能存在较大的不同。

4. 结论

1) 本研究证明了描述陆地生态系统碳水耦合关系的 uWUE 模型的指数最优值 k^* 不是 0.5。对于常绿针叶林最优指数 k^* 的值在 0.2~1.1 之间呈多峰分布,与 uWUE 模型中默认指数(0.5)存在较大偏差。这种偏差可能给基于该方法的蒸散发通量分割结果带来较大的不确定性。

2) 单一植被类型 uWUE 模型的指数偏离一般经验值的原因是地理环境的差异。如经度、纬度、标高、年平均降水、年平均温度等五个地理变量对常绿针叶林 uWUE 模型指数均存在影响。五个地理变量可以较好地拟合单一植被类型 k^* 的变化。

3) 对于常绿针叶林,地理位置,包括高程、经度和纬度,对 k^* 的影响权重合计达 80%;同时生境条件,包括年平均降水量和年平均温度占全部权重的 20%。

基金项目

本研究得到国家自然科学基金(No. 42071037)资助。

参考文献

- [1] Zhang, K., Kimball, J.S. and Running, S.W. (2016) A Review of Remote Sensing Based Actual Evapotranspiration Estimation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, **3**, 834-853. <https://doi.org/10.1002/wat2.1168>
- [2] Law, B.E., Falge, E., Gu, L., Baldocchi, D.D. and Olson, R. (2002) Environmental Controls over Carbon Dioxide and Water Vapor Exchange of Terrestrial Vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, **113**, 97-120. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00104-1)
- [3] Beer, C., Ciais, P., Reichstein, M., et al. (2009) Temporal and Among-Site Variability of Inherent Water Use Efficiency at the Ecosystem Level. *Global Biogeochemical Cycles*, **23**, GB2018. <https://doi.org/10.1029/2008GB003233>
- [4] Zhou, S., Yu, B., Schwalm, C.R., Ciais, P., Zhang, Y., Fisher, J.B., et al. (2017) Response of Water Use Efficiency to Global Environmental Change Based on Output from Terrestrial Biosphere Models. *Global Biogeochemical Cycles*, **31**, 1639-1655. <https://doi.org/10.1002/2017GB005733>
- [5] Zhou, S., Yu, B., Huang, Y. and Wang, G. (2014) The Effect of Vapor Pressure Deficit on Water Use Efficiency at the Subdaily Time Scale. *Geophysical Research Letters*, **41**, 5005-5013. <https://doi.org/10.1002/2014GL060741>
- [6] Yuan, R., Chang, L. and Niu, G. (2021) Annual Variations of T/ET in a Semi-Arid Region: Implications of Plant Water Use Strategies. *Journal of Hydrology*, **603**, Article ID: 126884. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126884>
- [7] Zhou, S., Yu, B., Zhang, Y., Huang, Y. and Wang, G. (2016) Partitioning Evapotranspiration Based on the Concept of Underlying Water Use Efficiency. *Water Resources Research*, **52**, 1160-1175. <https://doi.org/10.1002/2015WR017766>
- [8] Zhou, S., Yu, B., Zhang, Y., Huang, Y. and Wang, G. (2018) Water Use Efficiency and Evapotranspiration Partitioning for Three Typical Ecosystems in the Heihe River Basin, Northwestern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, **253-254**, 261-273. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.02.002>
- [9] Scott, R.L. and Biederman, J.A. (2017) Partitioning Evapotranspiration Using Long-Term Carbon Dioxide and Water Vapor Fluxes. *Geophysical Research Letters*, **44**, 6833-6840. <https://doi.org/10.1002/2017GL074324>
- [10] Wutzler, T., Lucasmoffat, A., Migliavacca, M., Knauer, Jürgen, Sickel, K., Šigut, L., Menzer, O. and Reichstein, M. (2018) Basic and Extensible Post-Processing of Eddy Covariance Flux Data with Reddyproc. *Biogeosciences*, **15**, 5015-5030. <https://doi.org/10.5194/bg-15-5015-2018>
- [11] Papale, D., Reichstein, M., Aubinet, M., Canfora, E., Bernhofer, C., Kutsch, W., Longdoz, B., Rambal, S., Valentini, R., Vesala, T. and Yakir, D. (2006) Towards a Standardized Processing of Net Ecosystem Exchange Measured with Eddy Covariance Technique: Algorithms and Uncertainty Estimation. *Biogeosciences*, **3**, 571-583. <https://doi.org/10.5194/bg-3-571-2006>
- [12] Reichstein, M., Falge, E., Baldocchi, D., et al. (2005) On the Separation of Net Ecosystem Exchange into Assimilation and Ecosystem Respiration: Review and Improved Algorithm. *Global Change Biology*, **11**, 1424-1439. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x>
- [13] Lasslop, G., Reichstein, M., Papale, D., Richardson, A.D., Arneeth, A., Barr, A., et al. (2010) Separation of Net Ecosystem Exchange into Assimilation and Respiration Using a Light Response Curve Approach: Critical Issues and Global Evaluation. *Biogeosciences*, **16**, 187-208. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02041.x>
- [14] 冯丽丽. 北半球主要生态类型植被水分利用效率的变化特征及影响因子分析[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [15] 仇宽彪. 中国植被总初级生产力、蒸散发及水分利用效率的估算及时空变化[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [16] 宋春林, 孙向阳, 王根绪. 森林生态系统碳水关系及其影响因子研究进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2891-2902.
- [17] Wang, Q.F., Niu, D., Yu, G.R., et al. (2004) Simulation of CO₂ and Water thermal Fluxin Changbaishan Forest Ecosystem. *Science in China Series D: Earth Sciences*, **34**, 131-140.