

基于多源 GPP 和 ET 产品的秦岭生态系统水分利用效率研究

黄卓^{1,2}, 曹银轩^{1,2}, 徐喜娟^{1,2}, 陈上^{1,2}, 冯浩^{2,3}, 王钊⁴, 于强^{3,4}, 何建强^{1,2,4}

(1.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100;
2.西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院,陕西 杨凌 712100;
3.中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,
陕西 杨凌 712100;4.陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室,西安 710016)

摘要: 通过评价多种生态系统总初级生产力(gross primary productivity,GPP)和蒸散(evapotranspiration, ET)遥感数据产品,构建了适用于我国秦岭区域的 GPP 和 ET 组合数据集,并计算分析了秦岭区域生态系统水分利用效率(water use efficiency,WUE)的时空变化规律。结果表明:不同产品对于不同植被类型 GPP 和 ET 的估算效果差异较大,其中 VPM GPP 和 RF GPP 这 2 种 GPP 产品,China ET 和 PML-V2 ET 这 2 种 ET 产品的总体表现较好。秦岭区域的多年平均 GPP_{year} 为 $1\,489.95\text{ g C/m}^2$, ET_{year} 为 588.49 mm , WUE_{year} 为 $2.56\text{ g C/kg H}_2\text{O}$, 多年平均 WUE_{year} 的变化率为 $0.156\text{ g C/(kg H}_2\text{O}\cdot10\text{ a)}$ 。秦岭区域 WUE_{year} 总体呈现出并不显著的上升趋势($p>0.05$);秦岭区域不同植被覆盖下的多年平均 WUE_{year} 数值差异不大,但 WUE_{year} 的变化趋势略有不同,部分植被类型呈现上升趋势,而其他植被类型呈现下降趋势;多年平均逐月 WUE_{month} 变化多呈现较为明显的“双峰”模式。研究结果为不同类型生态系统水碳关系研究中获取和选择数据提供了依据和途径,加深了对秦岭区域生态系统 WUE 时空变化规律的认识,从而为研究气候变化对秦岭地区生态系统的影响提供了数据支持和科学参考。

关键词: 总初级生产力; 蒸散; 多源产品; 水分利用效率; 秦岭

中图分类号: S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)05-0181-14

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.05.024

Study on the Ecosystem Water Use Efficiency of the Qinling Mountains with Multi-source GPP and ET Products

HUANG Zhuo^{1,2}, CAO Yinxuan^{1,2}, XU Xijuan^{1,2}, CHEN Shang^{1,2},
FENG Hao^{2,3}, WANG Zhao⁴, YU Qianng^{3,4}, HE Jianqiang^{1,2,4}

(1.Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2.Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100; 4.Key Laboratory of Eco-Environment and Meteorology, Qinling Mountains and Loess Plateau, Shaanxi Meteorological Bureau, Xi'an 710016)

Abstract: Through evaluating a few existing multi-source products of gross primary productivity (GPP) and evapotranspiration (ET), we constructed combined datasets of GPP and ET for the Qinling Mountains in China. Then, the spatial-temporal variations of water use efficiency (WUE) were calculated and analyzed for the Qinling Mountains. The results indicated that the estimation effects of different products of GPP and ET were very different for different vegetation types. Generally, the products of VPM GPP, RF GPP performed well for GPP estimation, while the products of China ET and PML-V2 ET performed well for ET estimation in China. In the Qinling Mountains, the average annual ecosystem GPP_{year} was about $1\,489.95\text{ g C/m}^2$; the average ET_{year} was about 588.49 mm ; the average WUE_{year} was about $2.56\text{ g C/kg H}_2\text{O}$; and the change

收稿日期:2022-02-08
资助项目:陕西重点产业创新链(群)项目(2020ZDLSF06-02);陕西省重点研发计划重点产业创新链(群)-农业领域项目(2019ZDLNY07-03);西北农林科技大学人才专项;高等学校学科创新引智计划(111 计划)项目(B12007)
第一作者:黄卓(1997—),男,硕士研究生,主要从事农业生态系统模拟研究。E-mail:huangzhuo@nwfufu.edu.cn
通信作者:何建强(1977—),男,教授,博士生导师,主要从事农业生态系统模拟研究。E-mail:jianqiang_he@nwfufu.edu.cn

rate of average WUE_{year} was about $0.156 \text{ g C}/(\text{kg H}_2\text{O} \cdot 10 \text{ years})$. The values of average WUE_{year} showed a non-significant rising trend ($p > 0.05$). The differences of annual average WUE_{year} were not great among different vegetation types. However, the trends of WUE_{year} changes were various for different vegetation types. Some vegetation types showed increasing trends, while others showed decreasing trends. The dynamics of average monthly WUE_{month} had two obvious peaks per year. This study provided a reference for data acquisition and selection for the research of carbon-water relationships in different ecosystems. It also deepened our understanding of the temporal and spatial changes of ecosystem WUE in the Qinling Mountains in China.

Keywords: gross primary productivity; evapotranspiration; multi-source product; water use efficiency; Qinling Mountains

秦岭长期以来被认为是中国东部重要的南北气候分界线,即亚热带和暖温带分界线,是研究全球气候变化与区域适应的优势地域,也是新时期全球气候变化研究的典型区域^[1]。生态系统水分利用效率(water use efficiency, WUE)指生态系统每消耗单位质量的水所固定的干物质的量,是深入理解生态系统水、碳循环耦合关系的重要指标^[2]。生态系统水分利用效率可被定义为生态系统总初级生产力(gross primary productivity, GPP)与总蒸散量(evapotranspiration, ET)的比值^[3]。探究秦岭生态系统水分利用效率对于研究秦岭区域碳水关系及其对气候变化的响应具有重要意义。

生态系统总初级生产力(GPP)是指绿色植物单位时间内在单位面积上通过光合作用所固定的碳量,是生态系统碳循环的基础,也是进入生态系统的初始能量和物质^[4]。蒸散量(ET)是植被蒸腾、土壤蒸发和被林冠截留的雨、雾和露水蒸发的总和,是全球水循环以及地球表面能量平衡的关键组成部分^[4]。为了解碳水循环的变化,需要对 GPP 和 ET 进行准确测量。目前主要是通过建立通量塔,使用涡度相关技术(eddy covariance, EC)对 GPP 和 ET 进行准确而连续的观测。但是全球范围内的通量塔数量有限且分布不均^[5],例如秦岭区域目前只有一座通量塔,难以覆盖整个区域且通量数据不向普通用户公开,因此难以直接通过通量观测数据来研究秦岭区域生态系统的 WUE。

近年来,随着遥感观测技术和生态模型的发展,许多全球和区域尺度的 GPP 和 ET 估算产品被开发出来,其中 GPP 产品主要包括:基于现有 FLUXNET 通量数据进行插值和放大的 FLUXNET 产品;基于遥感数据,以光能利用效率(light utilization efficiency, LUE)模型为核心的 VPM、GOSIF 等产品^[6-7];利用机器学习技术,结合遥感数据和通量观测数据的 RF 产品^[8];以遥感气象数据为基础,结合基于过程的陆地表面模型产生的 PML-V2 产品等^[9]。而 ET 产品主要包括:基于地表能量平衡、Penman-Monteith 方程、Priestley-Taylor 公式等的 Terra Cli-

mate、GLEAM 和 Global 等产品^[10-12];采用非线性互补关系模型的 CR 产品^[13];集成多种机器学习算法的 China ET 产品^[14];以及结合遥感数据和陆地表面模型的 PML-V2 产品等^[9]。李明旭等^[15]使用来自美国气候模式诊断和对比计划委员会数据库的粗分辨率 GPP、ET 等年值产品,对秦岭区域生态系统的 GPP、ET 及 WUE 变化进行了分析和预测,受限于时间和空间分辨率的限制,没有进行区分植被类型的细化分析研究。尽管目前已经有多种 GPP 和 ET 产品可供用户使用,但没有一种产品是纯粹来源于观测数据。由于输入数据、算法和校准系数的差异,不同产品对不同区域或植被类型 GPP 和 ET 的估算结果可能会存在较大差异,单一的 GPP 和 ET 产品不能很好地表征所有生态系统类型的碳水关系^[16-17],所以在进行不同类型生态系统研究时,应仔细选择合适的 GPP 和 ET 产品。

本研究收集了目前已经公开发表且易于获取的 9 种 GPP 产品和 9 种 ET 产品,以及全国公开的 8 个通量站观测数据进行对比分析。研究目的包括:(1)对收集的 GPP 和 ET 产品在不同植被覆盖类型下进行可靠性评估;(2)基于多种 GPP 和 ET 产品,依据评估结果构建秦岭区域的 GPP 和 ET 组合数据集,为秦岭生态系统研究提供可靠的数据支撑;(3)基于所得的 GPP 和 ET 的组合数据集,研究秦岭区域不同植被覆盖类型下的生态系统水分利用效率 WUE。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

秦岭是横跨于我国中部,东西走向的巨大山脉,西起于甘肃临潭北部的白石山,向东经天水南部的麦积山进入陕西,在陕西与河南交界处分为崤山(北支)、熊耳山(中支)和伏牛山(南支),东西绵延约 1 600 km,南北宽 100~300 km,海拔 95~3 771 m(图 1)。

秦岭是我国亚热带与暖温带以及亚热带季风气候与温带季风气候的分界线,北邻渭河,南接汉江,山地水量充沛,年均降水量在 600~1 200 mm,但降水变率较大,季节分配不均匀。北坡干燥、南坡湿润,气

候差异明显,其高耸的山峦对气候流动产生明显的阻滞作用^[18]。

秦岭区域植被茂盛,森林覆盖率高,植被的垂直带谱完整,生物多样性极为丰富,包含山地落叶阔叶林、山地针阔混交林、山地常绿针叶林,以及亚高山、高山草甸、灌丛等多种不同植被类型。这些都使得其在水源涵养、生态保护和自然科学研究上具有重要意义。

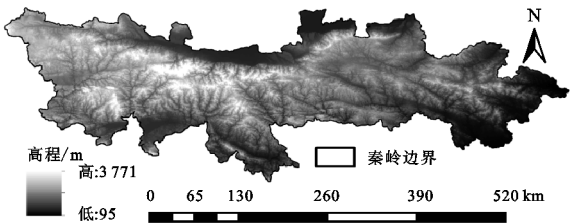


图 1 秦岭区域地理位置

1.2 GPP 和 ET 产品

本研究收集的 9 种 GPP 产品(表 1),包括:(1)由叶绿素荧光(SIF)数据反演得到的 GOSIF GPP 产品;(2)基于 FLUXNET 数据,使用随机森林放大而来的 RF GPP 产品;(3)由近红外反射率(NIRv)数据反演得到的 NIRv GPP 产品;(4)基于卫星辐射产品反演得到的 GLASS GPP 产品;(5)基于改进的光能

利用率模型得到的 VPM GPP 产品;(6)采用贝叶斯集成方法集成多种光能利用率模型得到的 AVHRR GPP 产品;(7)基于 MODIS 的不同传感器结合光能利用率模型得到的 MOD17A2H GPP 产品;(8)基于 MODIS 的不同传感器结合光能利用率模型得到的 MYD17A2H GPP 产品;(9)基于陆面过程模型结合遥感数据的 PML-V2 GPP 产品。

收集的 9 种 ET 产品(表 1),包括:(1)采用贝叶斯集成方法集成多种蒸散算法得到的 AVHRR ET 产品;(2)基于陆面过程模型结合遥感数据的 PML-V2 ET 产品;(3)基于 Penman-Monteith 方程和 MODIS 遥感数据得到的 MOD16A2 ET 产品;(4)基于水量平衡模型和遥感数据得到的 Terra Climate ET 产品;(5)基于 Priestley-Taylor 方法得到的 GLEAM ET 产品;(6)基于 Penman-Monteith 方程和遥感数据得到的 Global ET 产品;(7)基于 B-P 神经网络融合多源遥感蒸散数据得到的 BP ET 产品;(8)采用非线性互补关系模型得到的 CR ET 产品;(9)集成多种机器学习算法改进基于过程的 ET 算法得到的 China ET 产品。

表 1 研究所涉及的生态系统总初级生产力 GPP 和蒸散量 ET 产品信息

产品 类型	产品 名称	时间 分辨率	空间 分辨率/(°)	年份	空间 范围	参考 文献
GPP	GOSIF GPP	8 天	0.05	2000—2020	全球	Li 等 ^[6]
	RF GPP	10 天	0.10	1999—2019	全球	Zeng 等 ^[8]
	NIRv GPP	每月	0.05	1982—2018	全球	Wang 等 ^[19]
	GLASS GPP	8 天	0.05	1982—2018	全球	Zhang 等 ^[20]
	VPM GPP	每月	0.05	2000—2016	全球	Zhang 等 ^[7]
	AVHRR GPP	8 天	0.05	1982—2018	全国	Yuan 等 ^[21]
	MOD17A2H GPP	8 天	0.005	2000—2021	全球	Running 等 ^[22]
	MYD17A2H GPP	8 天	0.005	2003—2021	全球	Running 等 ^[23]
	PML-V2 GPP	8 天	0.005	2003—2017	全球	Zhang 等 ^[9]
ET	AVHRR ET	8 天	0.05	1982—2018	全国	Yao 等 ^[24-25]
	PML-V2 ET	8 天	0.005	2003—2017	全球	Zhang 等 ^[9]
	MOD16A2 ET	8 天	0.005	2000—2014	全球	Running 等 ^[26]
	Terra Climate ET	每月	0.05	1958—2020	全球	Abatzoglo 等 ^[10]
	GLEAM ET	每月	0.25	1982—2020	全球	Martens 等 ^[11]
	Global ET	每月	0.01	1982—2013	全球	Trabucco 等 ^[12]
	BP ET	每月	0.05	2001—2010	全国	Jin 等 ^[27]
	CR ET	每月	0.10	1982—2017	全国	Ma 等 ^[13]
	China ET	10 天	0.01	2000—2018	全国	Yin 等 ^[14]

1.3 通量观测和植被覆盖数据

通量观测数据来源于中国通量网(<http://www.chinaflux.org/>)。本研究收集了全国 8 个生态系统定位研究站的逐月、逐日和每 30 min 的通量观测数据以及每 30 min 的常规气象数据(表 2)。所得的通量数据包括:净生态系统碳交换量(net ecosystem exchange, NEE)、总生态系统呼吸(total ecosystem

respiration, *Re*)、总生态系统碳交换量(gross ecosystem exchange, GEE)、潜热(latent heat, *LE*)、显热(sensible heat, *HS*),以及温度等气象数据。本研究使用的中国 1 km 植被功能型图来自国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<https://www.ncdc.ac.cn/>),是根据土地覆盖与植被功能型转换的气候规则,对 MI-CLCover 土地覆盖图进行转换而获得的。

表 2 本研究所涉及的全国 8 个生态系统定位研究站点信息

站点名称	年份	经度	纬度	海拔/m	植被类型
千烟洲站	2003—2010	115°03′29″	26°44′29″	108	常绿人工针叶林
长白山站	2003—2010	128°05′45″	42°24′09″	738	落叶阔叶红松林
禹城站	2003—2010	116°34′13″	36°49′44″	28	冬小麦、夏玉米
海北站	2003—2010	101°19′52″	37°79′55″	3358	金露梅灌丛草甸
当雄站	2004—2010	91°13′18″	30°09′50″	296	草原化草甸
鼎湖山站	2003—2010	112°32′04″	23°10′24″	350	常绿阔叶林
内蒙古站	2004—2010	116°64′64″	43°39′32″	1200	草原
西双版纳站	2003—2010	101°34′46″	21°16′10″	580	热带季节雨林

1.4 生态系统 GPP、ET 和 WUE 的计算

由于获取的产品最大时间分辨率为每月,因此需要通过通量观测数据计算 GPP 和 ET 的月值,计算公式^[14]为:

$$GPP_{\text{month}} = NEP_{\text{month}} + R_{\text{emonth}} = -NEE_{\text{month}} + R_{\text{emonth}}$$
(1)

式中:GPP_{month}为月累计 GPP(g C/m²);NEP_{month}(net ecosystem productivity,NEP)为月累计净生态系统生产力(g C/m²),数值上等于-NEE_{month};NEE_{month}为月累计净生态系统碳交换量(g C/m²);R_{emonth}为月累计总生态系统呼吸(g C/m²);NEE_{month}和 R_{emonth}可以通过涡度相关系统直接观测。

$$ET_i = \frac{LE_i \times 60 \times 30}{(2.501 - 0.002361 \times T_i) \times 10^6}$$
(2)

$$ET_{\text{month}} = \sum_{i=1}^N ET_i \times 48$$
(3)

式中:ET_{month}为月累计 ET(mm);ET_i为每 30 min 的实际蒸散(mm);LE_i为每 30 min 的潜热通量(W/m²);T_i为气温(℃);N 为每月的天数。

生态系统水分利用效率 WUE 定义为 GPP 和 ET 的比值^[3]。

$$WUE_{\text{month}} = \frac{GPP_{\text{month}}}{ET_{\text{month}}}$$
(4)

$$WUE_{\text{year}} = \frac{GPP_{\text{year}}}{ET_{\text{year}}}$$
(5)

式中:WUE_{month}为生态系统逐月水分利用效率(g C/kg H₂O);WUE_{year}为生态系统逐年水分利用效率(g C/kg H₂O);GPP_{month}、ET_{month}分别为 GPP 和 ET 的月累计值(g C/m²,mm);GPP_{year}、ET_{year}分别为 GPP 和 ET 的年累计值(g C/m²,mm)。

1.5 统计分析

本研究将获取的 GPP 和 ET 产品与全国 8 个生态系统定位研究站对应的通量观测数据进行对比分析,应用决定系数(R²)和均方根误差(RMSE)2 个统计指标来评估 GPP 和 ET 产品的精度,并优选出不同植被覆盖类型下的最优 GPP 和 ET 产品。此外,对秦岭区域 2003—2016 年的生态系统 WUE 数据进行逐格点线性回归,应用线性回归斜率(k)来表征 WUE 的变化趋势和

幅度,p 值表示变化显著与否。同时应用峰度(Kurt;公式(6))描述 WUE 的季节变化,峰度值越小,表示数据分布状态平缓,年内变化不明显;峰度值越大,则表示数据分布状态陡峭,年内变化明显。

$$Kurt = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^4}{\sigma^4} - 3$$
(6)

式中:Kurt 为峰度;σ 为数据标准差;i 为时间分辨率;n 为 1 年内月份数,n=12。

1.6 秦岭区域 GPP 和 ET 组合数据集的构建

使用 ArcGIS 软件,将不同植被覆盖下效果最优的 GPP 和 ET 产品以及植被覆盖类型数据,统一重采样至空间分辨率为 0.1°,时间分辨率计算至每月。然后根据秦岭区域植被覆盖分布,将不同植被覆盖类型下优选的 GPP 和 ET 产品进行逐格点组合,从而获得秦岭区域的 GPP 和 ET 优化组合数据集。

2 结果与分析

2.1 GPP 产品的比较结果

本研究利用泰勒图展示了全国 8 个生态系统定位研究站 9 种 GPP 产品与实际观测值之间的 R²和 RMSE 分布。由图 2 可知,GPP 产品的估算精度随着通量站点和植被覆盖类型的不同而变化。在千烟洲站、长白山站、海北站以及当雄站,大多数 GPP 产品的 R²分布在 0.80~0.95,RMSE 也都集中在 60 g C/m²以内,与观测值较为一致。而在禹城站、鼎湖山站以及西双版纳站,不同的 GPP 产品的精度呈现很大的差异。例如,在禹城站,不同 GPP 产品的 R²分布在 0.70~0.95,RMSE 则分布在 60~180 g C/m²,不同 GPP 产品虽然可以较为准确地捕捉到实际 GPP 的总体变化,但存在不同程度的高估或低估现象;在鼎湖山站和西双版纳站,不同 GPP 产品的 RMSE 大多集中在 60 g C/m²以内,但 R²普遍较低,分布在 0.70 以下,与禹城站相反,不同 GPP 产品可以较为准确地描述 GPP 观测值的范围,但不能很好地捕捉到实际 GPP 的变化趋势。在内蒙古站,不同 GPP 产品的估算精度接近,R²集中分布在 0.40~0.70,RMSE 也都集中在 20~40 g C/m²。

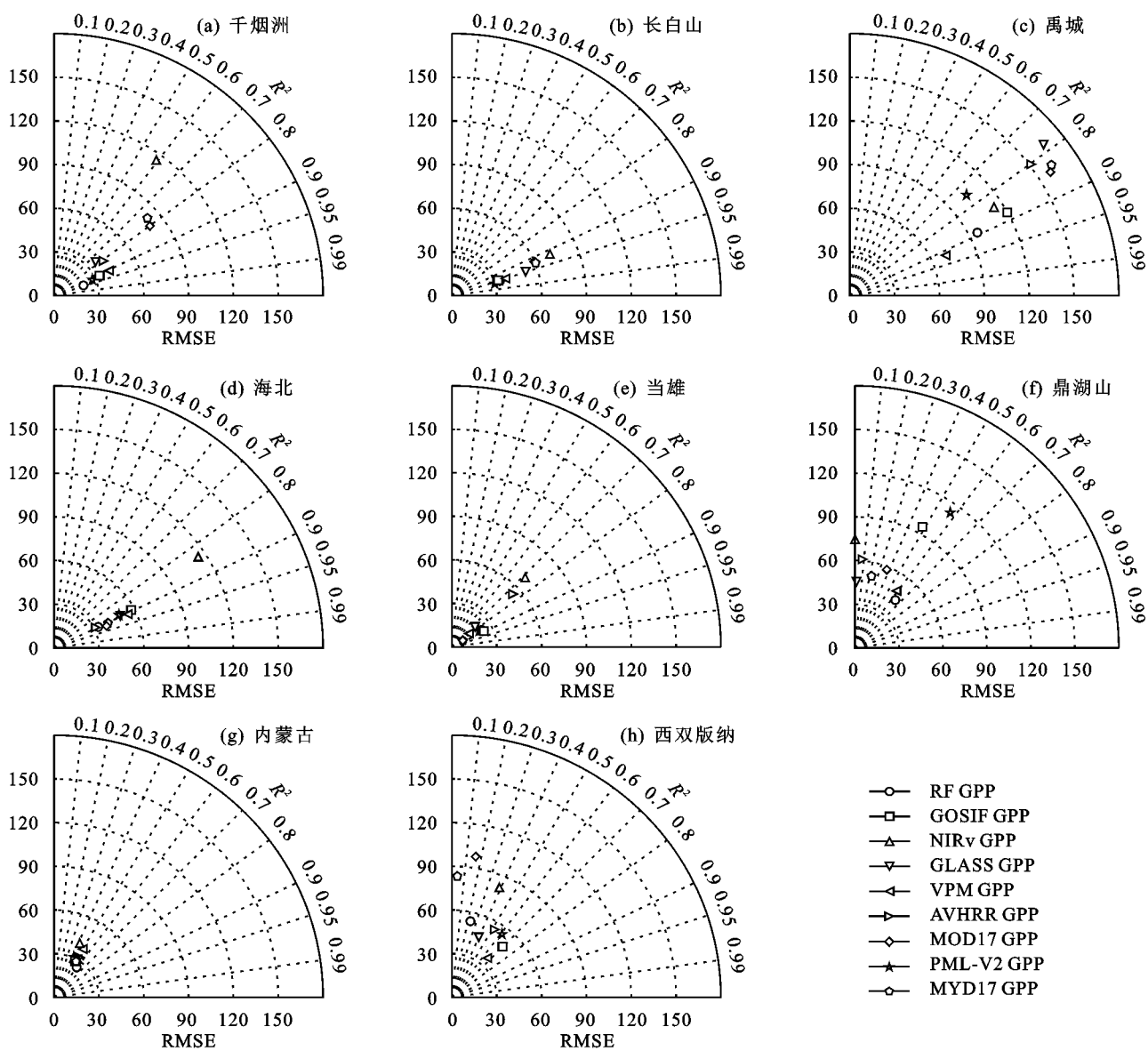


图 2 2003—2010 年 GPP 产品在生态观测站 R^2 和 RMSE 分布泰勒图

进一步通过小提琴图(外部轮廓用于展示概率密度,内部箱线用于展示数据的分布)来分析 GPP 实测数据和产品数据的分布情况(图 3)可以发现,森林和作物覆盖下生态站(千烟洲、长白山、禹城、鼎湖山、西双版纳)的 GPP 明显高于灌丛草甸和草原覆盖下的生态站(海北、当雄、内蒙古),而且森林、草甸以及作物等不同植被类型分别呈现出不同的数据分布和概率密度特征。在千烟洲站、长白山站、海北站、当雄站以及内蒙古站,多数 GPP 产品呈现出与观测数据相似的数据和概率密度分布,少数产品存在高估或低估现象。在禹城站,部分产品的概率密度分布与观测数据相似,但几乎所有的产品均存在不同程度的低估现象。在鼎湖山站和西双版纳站,少数产品的数据和概率密度分布与观测数据相近,其他大多数产品的数据和概率密度分布与观测数据相差甚远。总之,可以发现,在常绿针叶林、落叶针阔混交林以及灌丛草甸等植被覆盖下,多数 GPP 产品能够呈现出与观测数据

相近的效果,但是在其他的植被覆盖类型下只有少数 GPP 产品与观测数据较为相近。

因此,根据图 2 和图 3 优选出不同生态系统定位研究站不同植被覆盖类型下估算效果最好的 GPP 产品(表 3)。进一步分析全部 8 个生态系统定位研究站内 9 种 GPP 产品的总体估算效果(图 4)可以发现,VPM GPP 产品和 RF GPP 产品的 R^2 分别为 0.831 和 0.819, RMSE 分别为 45.454, 47.602 g C/m², 明显优于其他 7 种产品。

表 3 全国不同生态系统定位研究站不同植被覆盖类型下 GPP 和 ET 产品的优选结果

站点名称	植被类型	优选 GPP 产品	优选 ET 产品
千烟洲站	常绿人工针叶林	RF GPP	PML-V2 ET
长白山站	落叶阔叶红松林	PML-V2 GPP	PML-V2 ET
禹城站	冬小麦、夏玉米	VPM GPP	China ET
海北站	金露梅灌丛草甸	AVHRR GPP	CR ET
当雄站	草原化草甸	MYD17A2H GPP	CR ET
鼎湖山站	常绿阔叶林	RF GPP	GLEAM ET
内蒙古站	草原	RF GPP	China ET
西双版纳站	热带季节雨林	VPM GPP	GLEAM ET

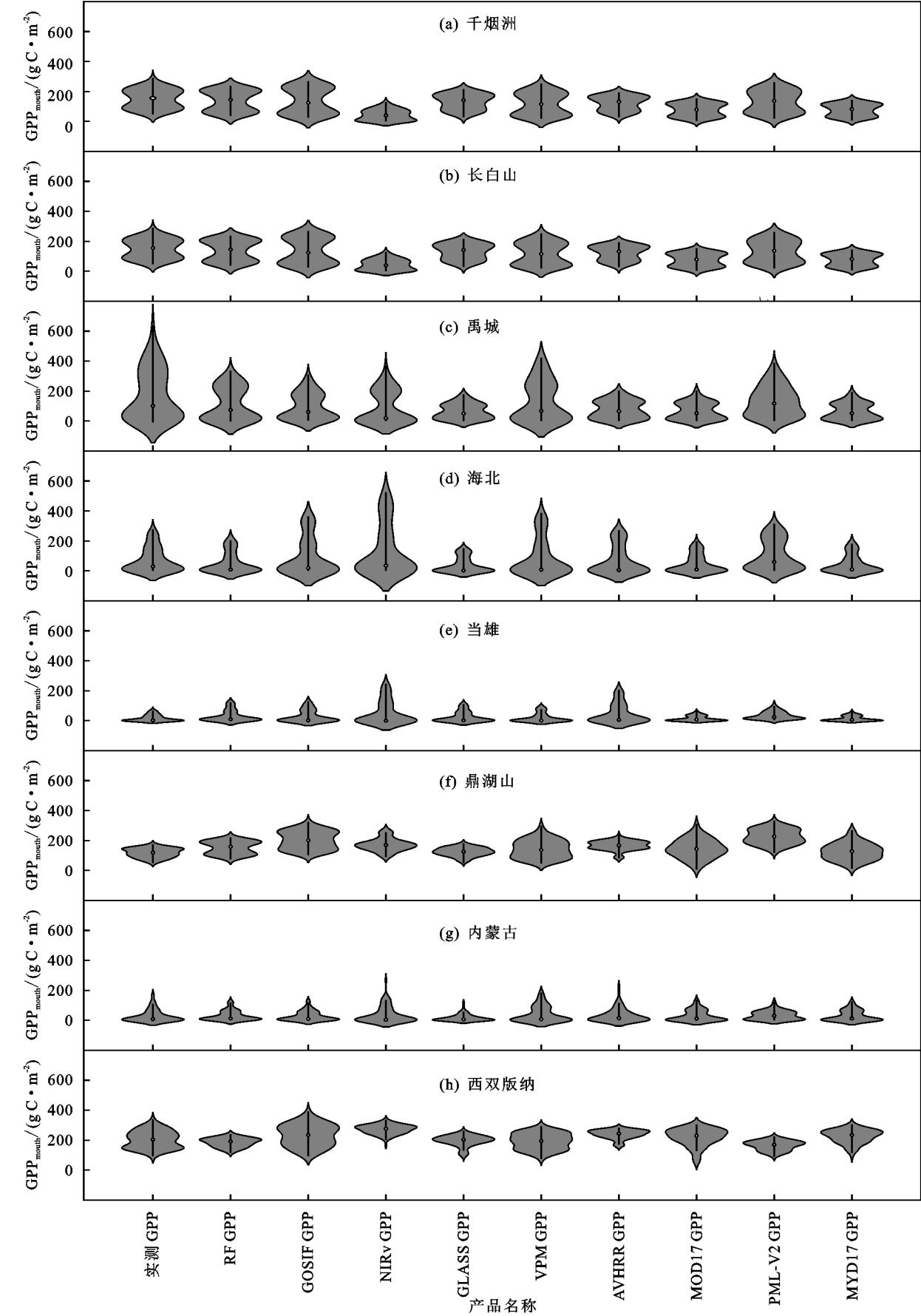


图 3 2003—2010 年内实测 GPP 数据和 GPP 产品数据分布

2.2 ET 产品的比较结果

类似地,本研究利用泰勒图来展示全国 8 个生态系 统定位研究站内 9 种 ET 产品和观测值的 R^2 和 RMSE 分布(图 5)。可以看出,不同通量站点和植被覆盖类型

下,不同 ET 产品的估算精度也不尽相同。在千烟洲站、长白山站、海北站以及当雄站,大多数 ET 产品的 R^2 为 0.70~0.95, RMSE 也都集中在 30 mm 以内,可以较为准确地反映观测值的实际变化。在禹城站和鼎湖山站,多数产品的 R^2 为 0.50~0.85, RMSE 则为 15~30 mm,少数 ET 产品可以较为准确地反映观测值的实际变化,

但是不同产品间的估算效果差异较大。在西双版纳站,不同 ET 产品的 RMSE 为 20~45 mm,但 R^2 普遍在 0.7 以下,不同 ET 产品间的估算效果差异较大,且整体精度较差。在内蒙古站,不同 ET 产品的 R^2 普遍在 0.6 以下, RMSE 都集中在 30 mm 以内,不同 ET 产品的估算效果接近,但普遍精度较差。

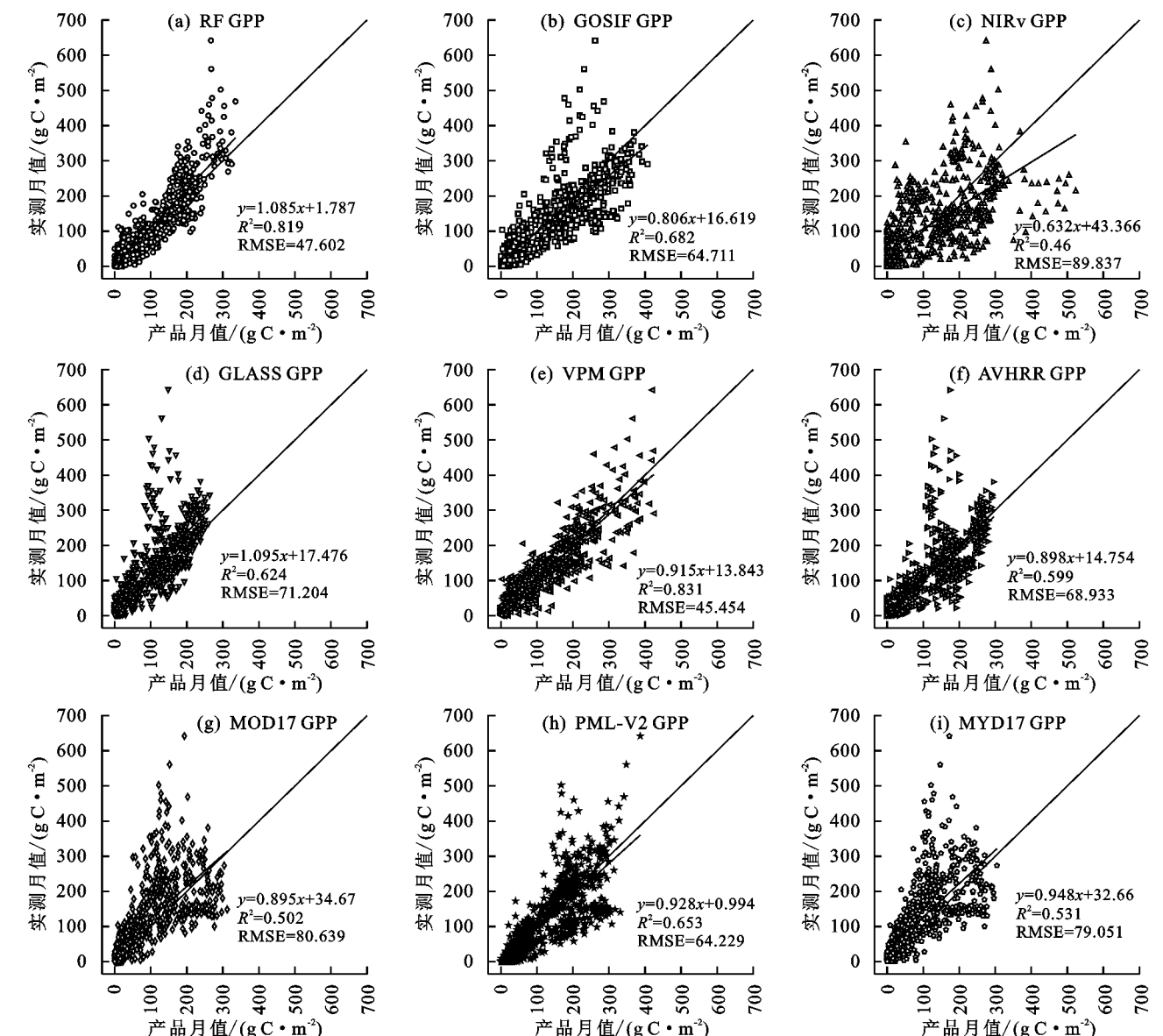


图 4 2003—2010 年在生态观测站中通过观测 GPP 月值与 GPP 产品的关系

通过 ET 数据分布的小提琴图(图 6)可以发现, China ET、PML-V2 ET 产品在大多数站点呈现出与观测数据相近的数据分布和概率密度; MOD16 ET 和 BP ET 产品在多数站点和观测数据有较大的差异,但 BP ET 产品在西双版纳站呈现出较好的精度。在千烟洲站、长白山站和禹城站,多数 ET 产品的数据分布特征与观测数据相近,但只有少数 ET 产品的概率密度与观测数据相近;在海北站、当雄站和内蒙古站, PML-V2 ET 和 CR ET 产品呈现出较好的估算精度,而 GLEAM ET、BP ET 和 MOD16 ET 产品则呈现出明显的低估现象;在鼎湖山站和西

双版纳站,大多数 ET 产品都存在整体高估现象。

进一步分析全部 8 个生态系统定位研究站内 9 种 ET 产品的总体估算效果(图 7)可以发现, China ET 产品和 PML-V2 ET 产品的 R^2 分别为 0.709 和 0.672, RMSE 分别为 19.150, 20.647 mm, 明显优于其他 7 种 ET 产品。总之,与 GPP 产品类似,绝大多数 ET 产品在常绿针叶林、落叶针阔混交林以及灌草植被覆盖下,能呈现出与观测数据相近的估算效果,但是在热带雨林、草原植被覆盖下,几乎所有 ET 产品的估算效果均较差,只有少数 ET 产品能呈现出与观测数据较为相近的估算效果。因此,根据图 5 和图

6, 优选出不同生态系统定位研究站不同植被覆盖类 型下估算效果最好的 ET 产品(表 3)。

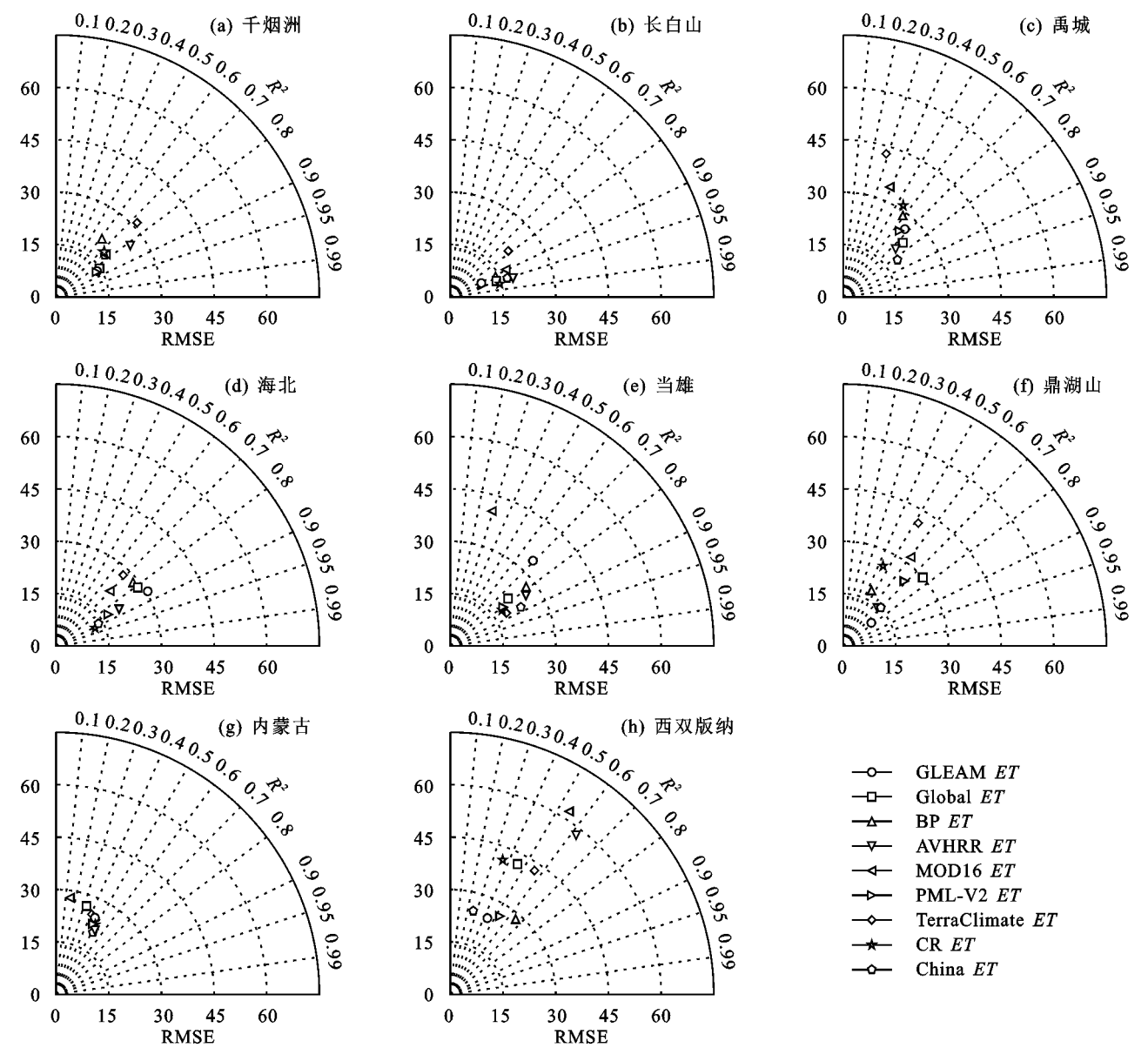


图 5 2003—2010 年 ET 产品在生态观测站的 R^2 和 RMSE 分布泰勒图

2.3 秦岭区域 GPP 和 ET 数据集的构建

利用 ArcGIS 软件重采样后可以发现,秦岭区域的主要植被覆盖类型为常绿针叶林、落叶阔叶林、灌丛草甸以及农作物,分别占秦岭区域总面积的 10.1%,44.0%,16.9%,29.0%(图 8a)。根据相似覆盖类型站点的优选结果,分别利用 RF GPP、PML-V2 GPP、VPM GPP 以及 AVHRR GPP 产品进行秦岭区域 GPP 组合数据集的构建。所构建的 GPP 组合数据集的空间分辨率为 0.1° ,时间分辨率为每月,时间范围为 2003—2016 年,其多年 GPP 平均值见图 8b。类似地,分别使用 PML-V2 ET 、China ET 以及 CR ET 产品构建秦岭区域 ET 组合数据集。 ET 组合数据集的空间分辨率为 0.1° ,时间分辨率为每月,时间范围为 2003—2016 年,其多年 ET 平均值见图 8c。

2.4 秦岭区域多年平均 WUE_{year} 的时空变化

2003—2016 年秦岭区域多年平均 WUE_{year} 为 1.31~3.95(图 9a),均值为 $2.56\text{ g C/kg H}_2\text{O}$;空间上呈现出南部高于北部,西部高于东部的分布特征。落叶阔叶林的多年平均 WUE_{year} 较大(平均 2.59),其次是作物(2.54)、灌丛草甸(2.42),以及常绿针叶林($2.40\text{ g C/kg H}_2\text{O}$)。2003—2016 年秦岭区域多年平均 WUE_{year} 的变化率为 $0.156\text{ g C/(kg H}_2\text{O} \cdot 10\text{ a)}$;空间上,下降的区域集中在秦岭中部和东部部分区域,约占总面积的 18%,其他区域大多呈现出上升趋势(图 9b)。落叶阔叶林、作物以及常绿针叶林的多年平均 WUE_{year} 变化率均大于 0,呈现上升趋势($p<0.05$),其中落叶阔叶林的多年平均 WUE_{year} 变化率最大(为 0.222),其次为作物(0.184)、常绿针叶林(0.176),而灌丛草甸的变化率为 $-0.089\text{ g C/(kg H}_2\text{O} \cdot 10\text{ a)}$ 。

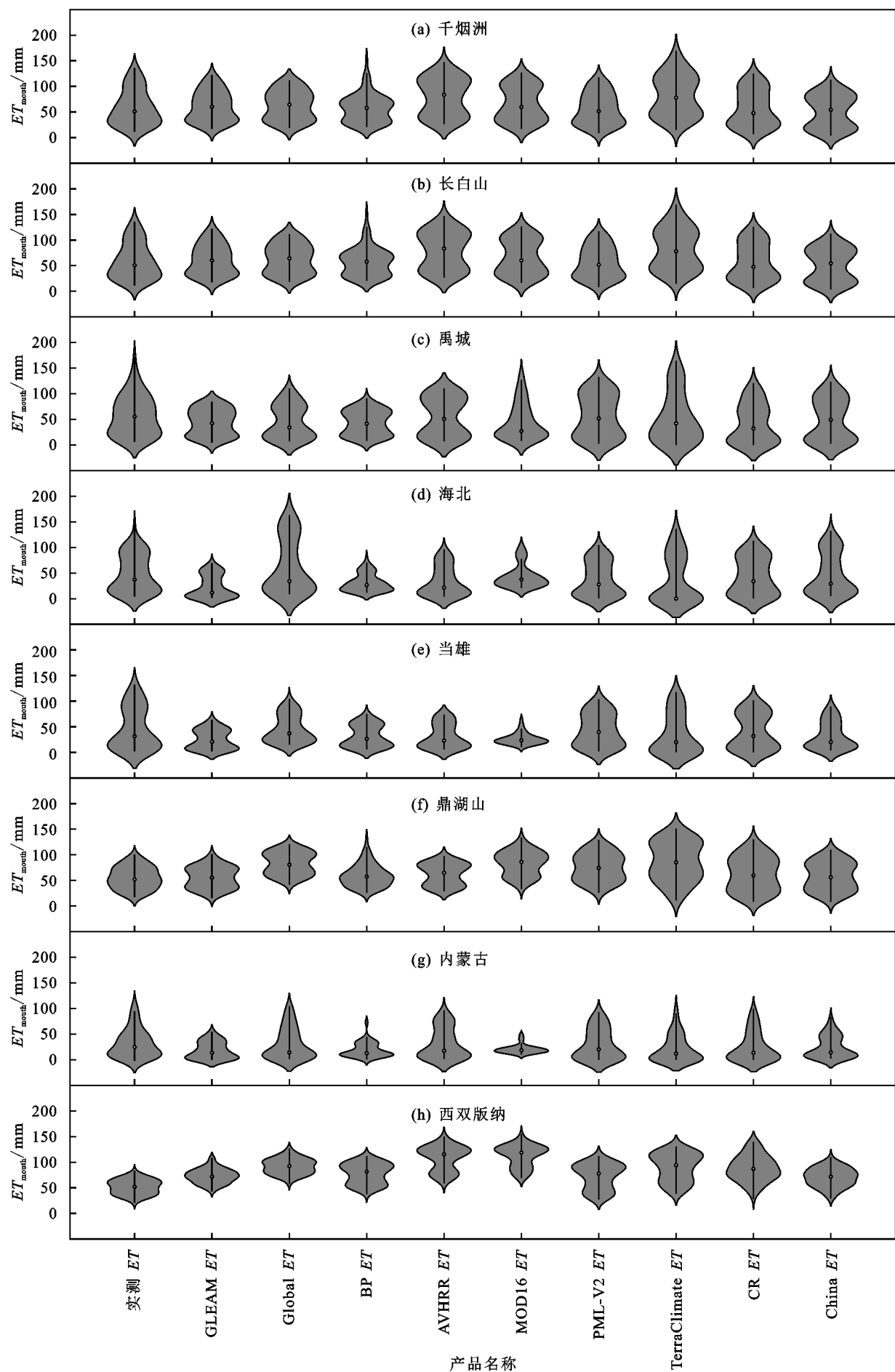


图 6 2003—2010 年生态观测站内 ET 产品数据分布的小提琴图

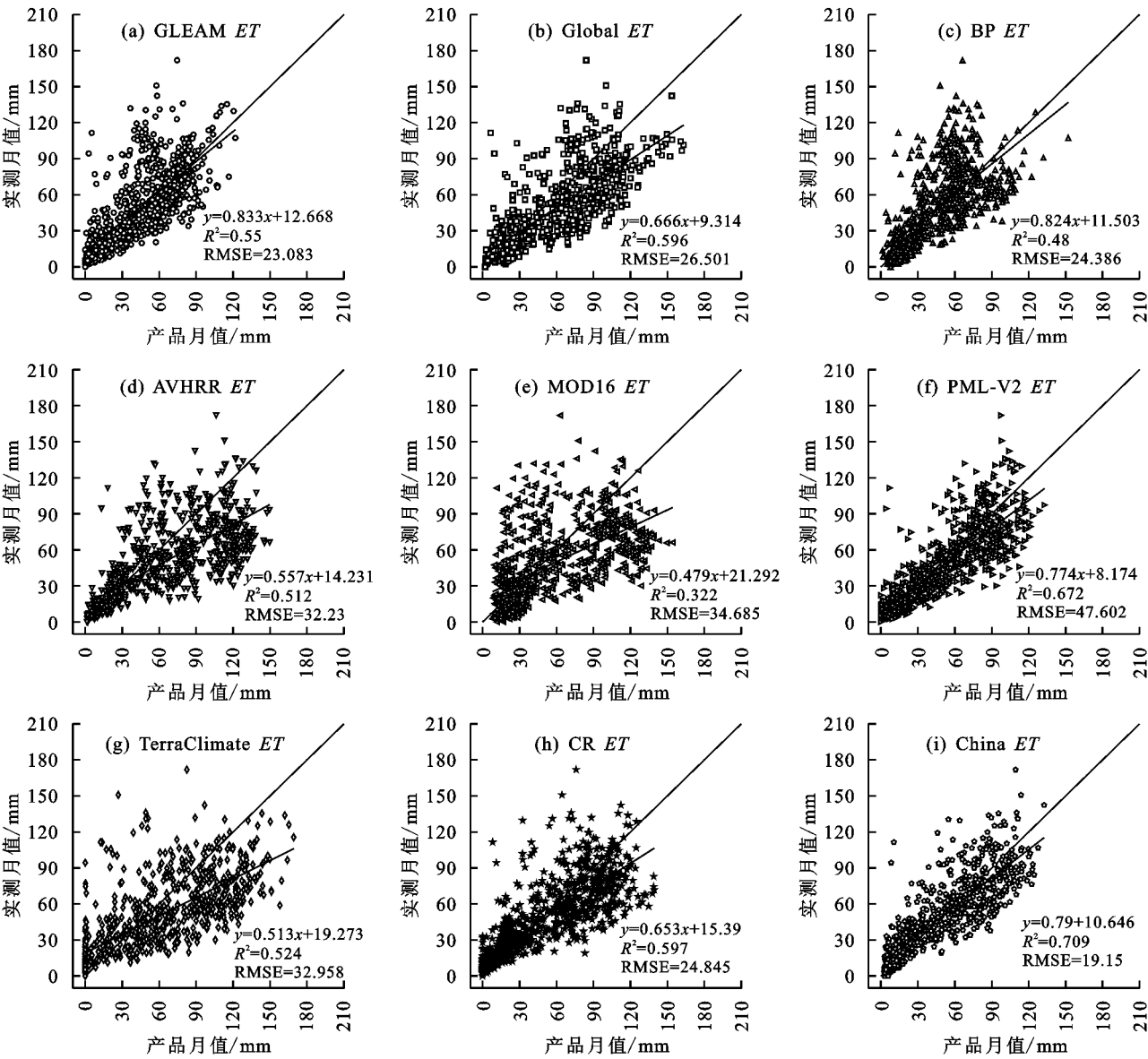


图 7 2003—2010 年在生态观测站中通量观测 ET 月值与 ET 产品的关系

2.5 秦岭区域多年平均 WUE_{month} 的变化趋势

秦岭区域 1—3 月的多年平均 WUE_{month} 比较小, 小于 2.0; 从 4 月开始, 北部和西南部区域开始逐渐升高; 到 5 月, 上升至 2.5 g C/kg H₂O; 但 6 月整体呈现小幅回落; 随后 7—9 月, 大部分区域多年平均逐月 WUE_{month} 达到最大值, 部分区域在 10 月达到最大值; 11—12 月, 由北向南开始迅速下降, 整体下降至 1 月的水平(图 10)。不同植被覆盖的多年平均 WUE_{month} 的季节变化也存在差异(表 4)。落叶阔叶林和灌丛草甸的逐月 WUE_{month} 均在 2.3 以上, 而常绿针叶林和作物的逐月 WUE_{month} 在 2.0 g C/kg H₂O 左右; 从标准差来看, 落叶阔叶林的标准差最小, 常绿针叶林、作物以及灌丛草甸的标准差较大; 从峰度来看, 灌丛草甸最大, 其次是落叶阔叶林, 常绿针叶林和作物则较小, 表明落叶阔叶林和灌丛草甸的逐月 WUE_{month} 变化特征明显。

3 讨论

3.1 不同 GPP 和 ET 遥感产品的对比分析

通过对比分析, 本研究发现, 大多数的 GPP 遥感产品在千烟洲、长白山、海北以及当雄站呈现出较高的估算精度和统计特征, 在禹城站部分产品呈现出较好的估算精度, 而在内蒙古、鼎湖山以及西双版纳站, 大多数 GPP 遥感产品的估算效果都不太理想。整体而言, VPM GPP、RF GPP 产品的估算精度较好, PML-V2 GPP 产品次之。单良等^[28] 研究发现, GPP 产品在千烟洲、长白山以及海北站, 与实测值对比时的 R^2 较高, 而在鼎湖山和禹城站的 R^2 则明显小于另外 3 个站点。张心竹等^[29] 对中国总初级生产力时空变化的研究也表明, GPP 产品在不同通量观测站点的验证中, 千烟洲、长白山、海北、当雄站的 GPP 产品效果明显优于内蒙古和禹城站。Pei 等^[30] 对比 PML-V2 GPP 和 MODIS GPP、VPM GPP 产品时

发现,PML-V2 GPP 和 VPM GPP 产品在不同区域互有优劣,但总体优于 MODIS GPP 产品,这与本研究的结论一致。

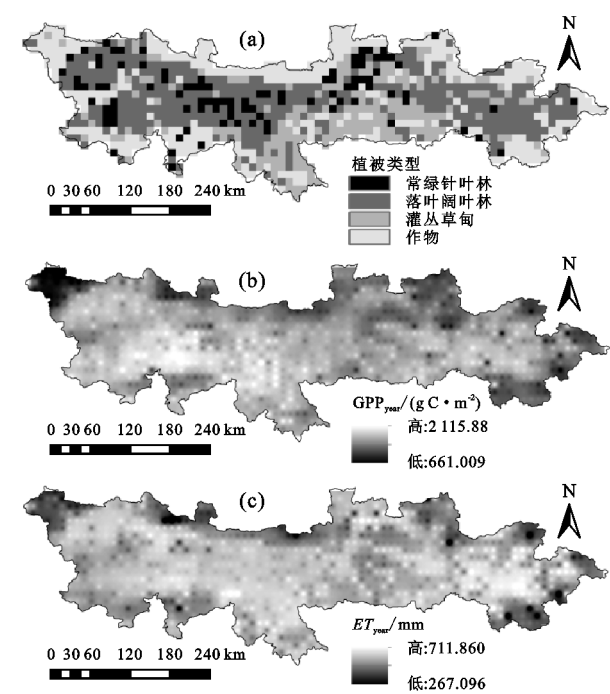


图 8 秦岭区域植被覆盖类型以及组合数据集的多年平均 GPP_{year} 和 ET_{year} 空间分布

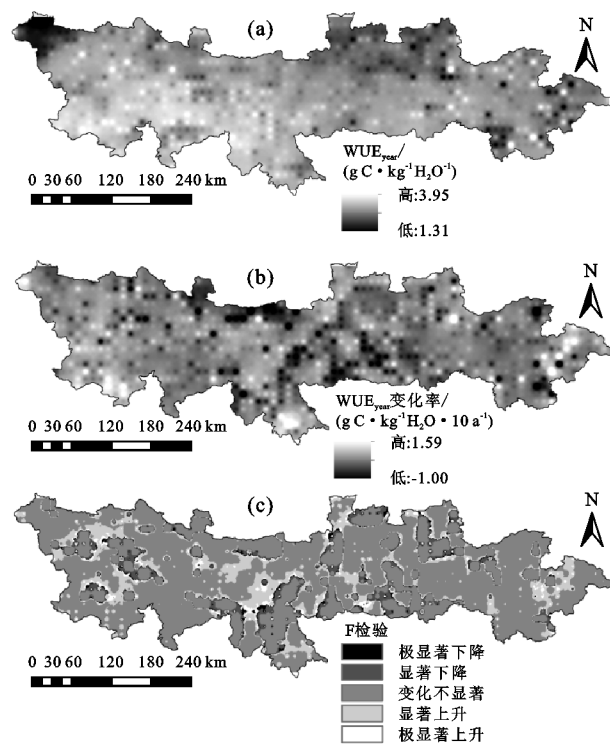


图 9 秦岭区域多年平均 WUE_{year}、WUE_{year} 变化率、变化率 *p* 值的空间分布

与 GPP 遥感产品类似,不同的 ET 遥感产品在千烟洲、长白山、海北、当雄生态站的估算精度和统计效果较好,在禹城站部分产品的估算精度较好,而在内蒙古、鼎湖山以及西双版纳站,不同 ET 遥感产品估算效果都不太理想。整体而言,China ET、PML-V2

ET 产品的估算精度和统计效果较好。在 Ma 等^[13]研究中,不同 ET 遥感产品在千烟洲、长白山以及海北都呈现出较好的估算效果,而在当雄和内蒙古站的估算效果稍差。Bai 等^[31]在评价不同 ET 遥感产品在中国的应用效果时发现,3 种不同 ET 遥感产品在长白山、海北以及当雄站的估算效果较好,在千烟洲、禹城、鼎湖山站次之,在西双版纳站最差,这与本研究的结果类似。

Zhang 等^[7]在 GPP 估算研究中考虑到了 C₄ 植物和 C₃ 植物在光合和呼吸作用方面的差异,发布了改进的 VPM GPP 产品。本研究也发现在禹城站 VPM GPP 产品明显优于其他产品。因此,大多 GPP 产品在禹城站呈现的明显低估问题,可能是因为没有考虑到玉米作为 C₄ 植物与其他作物在光合和呼吸作用方面的差异。在鼎湖山和西双版纳站,由于纬度低,季节变化不明显,植被全年处于生长季,因此逐月的 GPP 与 ET 变幅相对较小,不易捕捉,因此造成大多 GPP 遥感产品在这 2 个站只能较为准确地描述观测值的范围,但不能很好地捕捉到观测值随时间的变化。

3.2 秦岭区域 GPP 和 ET 组合遥感产品评价

基于本研究构建的秦岭区域 GPP 组合数据集,可以发现,秦岭区域 2003—2016 年平均 GPP_{year} 的变化范围为 661.01~2 115.88,平均值为 1 489.95;落叶阔叶林覆盖区域的多年平均 GPP_{year} 最高(1 642.88),其次是常绿针叶林(1 475.75),灌丛草甸(1 377.52),以及作物(1 329.64 g C/m²)。张心竹等^[29]对中国总初级生产力时空变化的遥感研究表明,秦岭区域的 GPP_{year} 多年均值应为 1 500,农业区 GPP_{year} 多年均值应在 800~1 500 g C/m²。Zan 等^[32]在研究中发现,中国年均 GPP_{year} 空间变异性大,由东南向西北、由沿海向内陆递减,在西南向东北一带地区的森林中很高(>1 000),在东南沿海地区超过 2 500 g C/m²。Zhang 等^[33]在研究东亚地区生产力分布时发现,在中国中部、南部、东南部和东北部地区、朝鲜半岛及日本,年均 GPP_{year} 在 1 000~2 000 g C/m²。此外,以往的研究^[34]发现,落叶阔叶林的年均 NPP_{year} 为 624~824,作物为 606~742,常绿针叶林为 486~510,灌丛草甸为 362~648 g C/m² (一般 GPP : NPP 的比值以 2 : 1 计)。本研究得到的秦岭区域不同植被类型多年平均 GPP_{year} 大体与相关研究^[29,32-34] 结果的范围一致,但灌丛草甸年均 GPP_{year} 偏大,可能是因为灌丛草甸区域下垫面条件不均一,包含了稀树、矮树以及落叶阔叶灌丛等年均 GPP_{year} 相对较大的植被;常绿针叶林年均 GPP_{year} 也偏大,这可能是由于秦岭区域常绿针叶林占比小,多稀疏分布在落叶阔叶林中,所以导致了估算的年均 GPP_{year} 偏大。

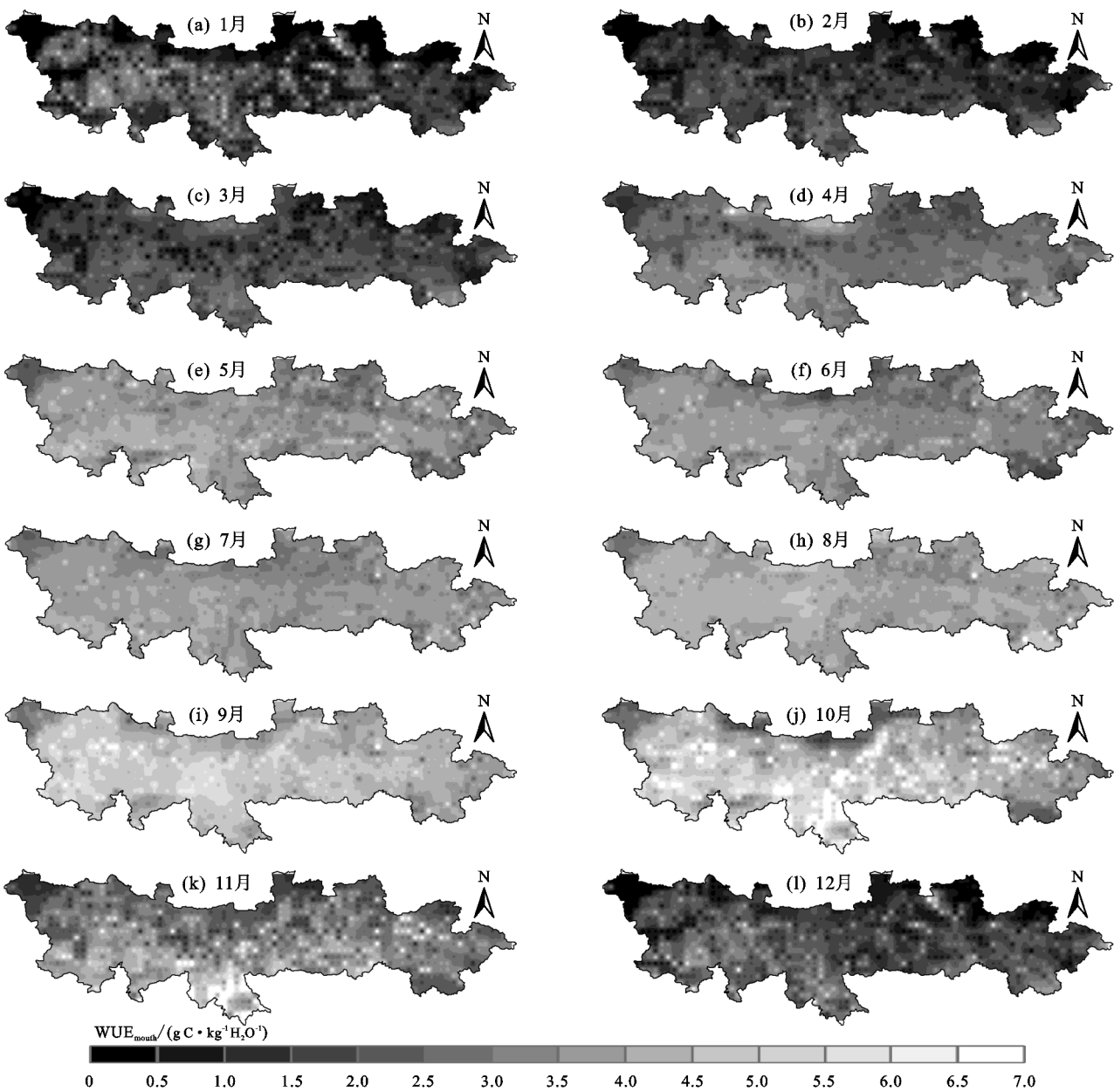


图 10 秦岭区域多年月平均 WUE_{month} 的空间分布

表 4 秦岭区域不同植被类型多年月平均 WUE_{month}
单位: $g\ C/kg\ H_2O$

月份	灌丛 草甸	落叶 阔叶林	常绿 针叶林	作物
1	0.66	2.02	0.82	0.45
2	1.50	1.26	0.49	0.68
3	1.90	1.49	0.46	1.10
4	1.90	2.20	1.44	2.06
5	2.14	2.67	2.92	2.69
6	2.10	2.53	2.68	2.48
7	2.34	2.71	2.61	2.79
8	2.50	2.94	3.15	3.00
9	3.54	3.28	3.66	3.04
10	4.41	3.12	3.34	2.59
11	3.77	2.48	1.25	1.82
12	1.23	1.94	1.32	0.79
平均值	2.33	2.38	2.01	1.96
标准差	1.04	0.60	1.11	0.92
峰度	-0.12	-0.57	-1.72	-1.51

基于构建的秦岭区域 ET 组合数据集可以发现, 秦岭区域 2003—2016 年平均 ET_{year} 范围为 267.10~711.86, 平均值为 588.49; 落叶阔叶林覆盖区域的多年平均 ET_{year} 最高(631.33), 其次是常绿针叶林(614.91)、灌丛草甸(571.61)以及作物(525.19 mm)。以往的研究^[13]发现, 中国华中、华北区域的 ET_{year} 为 400~650 mm。周蕾等^[35]将中国陆地生态系统蒸散划分为 3 个阶梯, 秦岭区域位于第 1, 2 阶梯之间, 多年平均 ET_{year} 为 300~700, 部分区域>700 mm, 而且在森林生态系统中, 落叶阔叶林的年平均 ET 大于常绿针叶林。郭瑞萍等^[36]研究中国森林、草地、农田等 3 种生态系统的多年平均蒸散发现, 森林的蒸散分布在 547~926, 农田在 454~705, 草地约为 404 mm, 并且处于同一气候带气候条件相似的不同植被蒸散量比较接近。本研究的结果与以往生态系统蒸散的研究结果相近, 但不

同植被覆盖区域之间的差异不如其他他究明显,这可能是因为秦岭区域降雨量充足,且区域气候条件差别不明显,所以蒸散量相对较为接近。

3.3 秦岭区域生态系统 WUE 变化分析

在以往关于生态系统 WUE 的研究中,仇宽彪^[34]发现,在东北大兴安岭、秦岭等陕甘山地,以及东南丘陵部分地区的多年平均 WUE_{year} 相对较大,可达到 $2.0\text{ g C/kg H}_2\text{O}$,与本研究的研究结果相近。蒋冲等^[37]在研究气候变化对秦岭南北植被净初级生产力时发现,秦岭区域多年平均 WUE_{year} 为 $0.74\sim 1.25\text{ g C/kg H}_2\text{O}$,由南向北递减, WUE_{year} 平均倾向率为 $0.12\text{ g C/(kg H}_2\text{O}\cdot 10\text{ a)}$,总体呈现不显著的上升趋势。该研究的多年平均 WUE_{year} 分布、变化率以及变化趋势均与本研究结果相近,但多年平均 WUE_{year} 值差异较大。这可能是由于该研究使用 NPP 计算 WUE($GPP:NPP$ 的比值一般以 $2:1$ 计),经过折算后则与本研究结果相近。Law 等^[38]使用 GEP 和 ET 计算了生态系统的 WUE,结果表明,除冻原植被外,其他生态系统的多年平均 WUE_{year} 差异不大,落叶阔叶林约为 3.42,草地约为 3.39,农田约为 3.06,常绿阔叶林约为 $2.43\text{ g C/kg H}_2\text{O}$,各类生态系统多年平均 WUE_{year} 的大小关系也与本研究通过 GPP 和 ET 计算得到的结果相近。

冯丽丽^[39]在对北半球主要生态类型植被水分利用效率 WUE 的变化研究中发现,针叶林、落叶阔叶林、湿地的 WUE 都呈上升趋势,草地、混交林的变化趋势不明显,而灌丛、农田呈下降趋势,并且 WUE 的季节变化呈现出与本研究相似的趋势。刘宪锋等^[40]在研究中也发现,常绿针叶林、落叶针叶林、农田、稀疏草原、稠密灌丛、落叶阔叶林等植被类型的 WUE 年内变化通常呈现出“双峰”模式,峰值主要分布在 4—5,9—10 月。在本研究中,秦岭区域多年平均 WUE 的分布以及年际变化同以往的研究相似,季节变化也呈现出与全国其他区域相近的趋势。但秦岭区域不同植被类型的年均 WUE 差别不大,且整体略高于全国水平,这可能是由于秦岭区域面积相对较小,区域总体气候条件区别不大,数据集的分辨率低不能对各种植被类型进行精确区分造成的。

4 结论

(1)在我国不同生态系统定位研究站不同植被覆盖类型下效果最优的 GPP 遥感产品分别是 RF GPP(常绿人工针叶林)、PML—V2 GPP(落叶阔叶红松林)、VPM GPP(轮作作物)、AVHRR GPP(金露梅灌丛草甸)、MYD17A2H GPP(草原化草甸)、RF GPP(常绿阔叶林)、RF GPP(草原)、VPM GPP(热

带季节雨林),总体效果最优的是 VPM GPP 产品。

(2)在我国不同生态系统定位研究站不同植被覆盖类型下效果最优的 ET 遥感产品分别是 PML—V2 ET(常绿人工针叶林)、PML—V2 ET(落叶阔叶红松林)、China ET(轮作作物)、CR ET(金露梅灌丛草甸)、CR ET(草原化草甸)、GLEAM ET(常绿阔叶林)、China ET(草原)、GLEAM ET(热带季节雨林),总体效果最优的是 China ET 产品。

(3)2003—2016 年秦岭区域多年平均 GPP_{year} 范围为 $661.01\sim 2\,115.88$,平均值为 $1\,489.95\text{ g C/m}^2$,由北向南逐渐上升;不同植被类型的年平均 GPP_{year} 表现为落叶阔叶林>常绿针叶林>灌丛草甸>作物。年平均 ET_{year} 范围为 $267.10\sim 711.86$,平均值为 588.49 mm ;不同植被类型的年平均 ET_{year} 表现为落叶阔叶林>常绿针叶林>灌丛草甸>作物。

(4)2003—2016 年秦岭区域年平均生态系统水分利用效率 WUE_{year} 为 $1.31\sim 3.954$,均值为 $2.56\text{ g C/kg H}_2\text{O}$,呈现南部高于北部、西部高于东部的空间分布特征;年平均 WUE_{year} 的变化率为 $0.156\text{ g C/(kg H}_2\text{O}\cdot 10\text{ a)}$,总体呈现上升趋势;不同植被类型的年平均 WUE_{year} 表现为落叶阔叶林>作物>草甸>常绿针叶林;多年平均逐月 WUE_{month} 值的变化呈现出较为明显的“双峰”模式,落叶阔叶林和灌丛草甸的年平均 WUE_{month} 值呈现较为明显的季节变化。

本研究评价了多种 GPP 和 ET 遥感产品在我国不同生态系统定位研究站不同植被覆盖类型下的估算精度和统计特征,为研究不同类型生态系统提供了可能的 GPP 和 ET 遥感产品。根据评价结果优选不同植被类型下的 GPP 和 ET 遥感产品,并据此来构建 GPP 和 ET 遥感产品组合数据集,从而为在缺少观测数据的区域进行生态系统碳水关系研究提供了新的数据来源和研究思路。

参考文献:

- [1] 李双双,延军平,万佳.全球气候变化下秦岭南北气温变化特征[J].地理科学,2012,32(7):853-858.
- [2] 米兆荣,陈立同,张振华,等.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[J].植物生态学报,2015,39(7):649-660.
- [3] 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.
- [4] Ryu Y, Baldocchi D D, Kobayashi H, et al. Integration of MODIS land and atmosphere products with a coupled-process model to estimate gross primary productivity and evapotranspiration from 1 km to global scales [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2011, 25(4): eGB4017.

- [5] Barcza Z, Kern A, Davis K, et al. Analysis of the 21-years long carbon dioxide flux dataset from a Central European tall tower site [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 290: e108027.
- [6] Li X, Xiao J F. Mapping photosynthesis solely from solar-induced chlorophyll fluorescence: A global, fine-resolution dataset of gross primary production derived from OCO-2 [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(21): e2563.
- [7] Zhang Y, Xiao X M, Wu X C, et al. A global moderate resolution dataset of gross primary production of vegetation for 2000—2016 [J]. *Scientific Data*, 2017, 4(1): 1-13.
- [8] Zeng J Y, Matsunaga T, Tan Z H, et al. Global terrestrial carbon fluxes of 1999—2019 estimated by upscaling eddy covariance data with a random forest [J]. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 1-11.
- [9] Zhang Y Q, Kong D D, Gan R, et al. Coupled estimation of 500 m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002—2017 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 222: 165-182.
- [10] Abatzoglou J T, Dobrowski S Z, Parks S A, et al. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958—2015 [J]. *Scientific Data*, 2018, 5(1): 1-12.
- [11] Martens B, Miralles D G, Lievens H, et al. GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture [J]. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10(5): 1903-1925.
- [12] Trabucco A, Zomer R J. Global aridity index and Potential Evapotranspiration (ET₀) Climate Database v2 [EB/OL]. [2018-11-01]. CGIAR Consort Spat Inf, 2019, <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.7504448.v3>.
- [13] Ma N, Szilagyi J, Zhang Y S, et al. Complementary-relationship-based modeling of terrestrial evapotranspiration across China during 1982—2012: Validations and spatiotemporal analyses [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(8): 4326-4351.
- [14] Yin L C, Tao F L, Chen Y, et al. Improving terrestrial evapotranspiration estimation across China during 2000—2018 with machine learning methods [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 600: e126538.
- [15] 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.
- [16] Chen Y, Yuan W P, Xia J Z, et al. Using Bayesian model averaging to estimate terrestrial evapotranspiration in China [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 528: 537-549.
- [17] Yao Y J, Liang S L, Li X L, et al. Improving global terrestrial evapotranspiration estimation using support vector machine by integrating three process-based algorithms [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 242: 55-74.
- [18] 王涛, 白红英. 秦岭山地植被 NDVI 对气候变化与人类活动的响应 [J]. *山地学报*, 2017, 35(6): 778-789.
- [19] Wang S H, Zhang Y G, Ju W M, et al. Tracking the seasonal and inter-annual variations of global gross primary production during last four decades using satellite near-infrared reflectance data [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755: e142569.
- [20] Zheng Y, Shen R Q, Wang Y W, et al. Improved estimate of global gross primary production for reproducing its long-term variation, 1982—2017 [J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12(4): 2725-2746.
- [21] Yuan W P, Liu S G, Yu G R, et al. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(7): 1416-1431.
- [22] Running S, Mu Q, Zhao M. MOD17A2H MODIS/Terra Gross Primary Productivity 8-Day L4 Global 500m SIN grid V006 [EB/OL]. [2018-11-01]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2015, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD17A2H.006>.
- [23] Running S, Mu Q, Zhao M. MYD17A2H MODIS/Aqua Gross Primary Productivity 8-Day L4 Global 500m SIN grid V006 [EB/OL]. [2018-11-01]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2015, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MYD17A2H.006>.
- [24] Yao Y J, Liang S L, Li X L, et al. Bayesian multimodel estimation of global terrestrial latent heat flux from eddy covariance, meteorological, and satellite observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(8): 4521-4545.
- [25] Yao Y J, Liang S L, Cheng J, et al. MODIS-driven estimation of terrestrial latent heat flux in China based on a modified Priestley-Taylor algorithm [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 171: 187-202.
- [26] Running S, Mu Q, Zhao M. MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN grid v006 [EB/OL]. [2012-12-04]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2017, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.006>.
- [27] Jin J X, Zhan W F, Wang Y, et al. Water use efficiency in response to interannual variations in flux-based photosynthetic onset in temperate deciduous broadleaf forests [J]. *Ecological Indicators*, 2017, 79: 122-127.
- [28] 单良, 周艳莲. 两叶光能利用率模拟结果与全球 GPP 产品的时空一致性 [J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(3): 103-114.
- [29] 张心竹, 王鹤松, 延昊, 等. 2001—2018 年中国总初级生产力时空变化的遥感研究 [J]. *生态学报*, 2021, 41(16): 6351-6362.

of the water conservation function of different forest types in northeastern China [J].Sustainability,2019,11(15):4075.

[13] 杨建伟,杨建英,何会宾,等.冀北山区滦平县 4 种新造林地水源涵养能力研究[J].生态学报,2019,39(18):6731-6737.

[14] 杨家慧,谭伟,卯光宪,等.黔中不同龄组柳杉人工林枯落物水源涵养能力综合评价[J].水土保持学报,2020,34(2):296-301,308.

[15] 丁霞,程昌锦,漆良华,等.丹江口库区湖北水源区不同密度马尾松人工林水源涵养能力[J].生态学杂志,2019,38(8):2291-2301.

[16] 牛勇,刘洪禄,张志强.北京地区典型树种及非生物因子对枯落物水文效应的影响[J].农业工程学报,2015,31(8):183-189.

[17] 尤海舟,毕君,蔡蕾,等.小五台山不同林分类型林地水文效应及涵养水源生态功能价值估算[J].中国农学通报,2013,29(13):60-65.

[18] 杜晨曦,史常青,杨建英,等.小五台山典型林分枯落物持水恢复能力研究[J].水土保持学报,2021,35(3):236-243.

[19] 韩函,吴昊旻,黄安宁.华北地区夏季降水日变化的时空分布特征[J].大气科学,2017,41(2):263-274.

[20] 许小明,邹亚东,孙景梅,等.黄土高原北洛河流域林地枯落物特征及水分吸持效应[J].生态学报,2021,41(13):5153-5165.

[21] 郝弯弯,赵鹏,李思维,等.御道口牧场不同类型防护林的枯落物水文效应[J].水土保持学报,2019,33(6):197-204.

[22] 韦小茶,周秋文,崔兴芬,等.喀斯特针叶林枯落物层水文效应[J].生态科学,2017,36(4):120-127.

[23] Burrows C R, Appold M S. Hydrology of the forest city basin, Mid-Continent, USA: Implications for CO₂ sequestration in the St. Peter Sandstone [J].Environmental Earth Sciences,2015,73(4):1409-1425.

[24] 公博,师忱,何会宾,等.冀北山区 6 种人工林的林地水源涵养能力[J].干旱区资源与环境,2019,33(3):165-170.

[25] 栾莉莉,张光辉,孙龙,等.黄土高原区典型植被枯落物蓄积量空间变化特征[J].中国水土保持科学,2015,13(6):48-53.

[26] 邵臻,张富,陈瑾,等.陇中黄土丘陵沟壑区不同土地利用下土壤水分变化分析[J].干旱区资源与环境,2017,31(12):129-135.

[27] 汪建芳,王兵,王忠禹,等.黄土高原典型植被枯落物坡面分布及持水特征[J].水土保持学报,2018,32(4):139-144.

[28] 张缓,穆兴民,高鹏.黄土高原不同立地条件下枯落物蓄积量及持水特征[J].水土保持研究,2021,28(3):45-52.

(上接第 194 页)

[30] Pei Y Y, Dong J W, Zhang Y, et al. Performance of four state-of-the-art GPP products (VPM, MOD17, BESS and PML) for grasslands in drought years [J].Ecological Informatics,2020,56:e101052.

[31] Bai P, Liu X M. Intercomparison and evaluation of three global high-resolution evapotranspiration products across China [J].Journal of Hydrology,2018,566:743-755.

[32] Zan M, Zhou Y L, Ju W M, et al. Performance of a two-leaf light use efficiency model for mapping gross primary productivity against remotely sensed sun-induced chlorophyll fluorescence data [J].Science of the Total Environment,2018,613:977-989.

[33] 张方敏,居为民,陈镜明,等.基于遥感和过程模型的亚洲东部陆地生态系统初级生产力分布特征[J].应用生态学报,2012,23(2):307-318.

[34] 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].北京:北京林业大学,2015.

[35] 周蕾,王绍强,陈镜明,等.1991 年至 2000 年中国陆地生态系统蒸散时空分布特征[J].资源科学,2009,31(6):962-972.

[36] 郭瑞萍,莫兴国.森林、草地和农田典型植被蒸散量的差异[J].应用生态学报,2007,18(8):1751-1757.

[37] 蒋冲,王飞,穆兴民,等.气候变化对渭河流域自然植被净初级生产力的影响研究(Ⅱ):渭河流域自然植被净初级生产力的研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(5):53-57.

[38] Law B, Falge E, Gu L, et al. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation [J].Agricultural and Forest Meteorology,2002,113(1/4):97-120.

[39] 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].兰州:兰州大学,2017.

[40] 刘宪锋,胡宝怡,任志远.黄土高原植被生态系统水分利用效率时空变化及驱动因素[J].中国农业科学,2018,51(2):302-314.