

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.04.020

金沙江流域实际蒸散发 GRACE 重力卫星 遥感重构不确定性分析

李炳锋^{1,2}, 张珂^{1,2,3,4}, 鞠艳⁵, 李曦^{1,3}, 申笑萱¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098;
3. 中国气象局水文气象重点开放实验室, 江苏 南京 210098; 4. 水利部水利大数据重点实验室, 江苏 南京 210098;
5. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017)

摘要:通过 GLDAS 数据对 GRACE 重力卫星水储量数据进行降尺度处理, 采用水量平衡方程重构了金沙江流域 2007—2016 年 25 个子流域月实际蒸散发数据, 采用拉丁超立方抽样法确定各水量平衡参数的不确定性, 并对各参数和实际蒸散发进行不确定性分析。结果表明: 抽样样本数为 415 时, 抽样结果较好, 各参数中降水量的不确定性变化范围最大, 水储量变化次之, 径流深最小; 金沙江流域年均实际蒸散发不确定性变化范围为 46.02 ~ 146.19 mm, 空间分布总体上表现为自西向东、自北向南逐渐增大的趋势, 信噪比分布与不确定性分布有一定的相似性; 在年、季节尺度下, 流域内不同土地利用类型的实际蒸散发不确定性由大到小排序均为林地、灌丛、农田、草地、其他占地类型; 实际蒸散发不确定性在季节上呈现出差异性, 夏季不确定性变化范围最大, 冬季最小。

关键词: 实际蒸散发; GRACE 重力卫星; 时空分布; 水量平衡方程; 拉丁超立方; 金沙江流域

中图分类号: P343 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2023)04-0159-08

Uncertainty analysis of actual evapotranspiration reconstructed with GRACE gravity satellite data in the Jinsha River Basin // LI Bingfeng^{1,2}, ZHANG Ke^{1,2,3,4}, JU Yan⁵, LI Xi^{1,3}, SHEN Xiaoxuan¹ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China; 3. China Meteorological Administration Hydro-Meteorology Key Laboratory, Nanjing 210098, China; 4. Key Laboratory of Water Big Data Technology of Ministry of Water Resources, Nanjing 210098, China; 5. Jiangsu Hydraulic Science Institute, Nanjing 210017, China)

Abstract: GLDAS data was used to downscale the water storage data of GRACE gravity satellites, and the actual monthly evapotranspiration (AET) data of 25 sub-basins in the Jinsha River Basin from 2007 to 2016 were reconstructed with the water balance equation. The uncertainty of each water balance parameter was quantified by the Latin hypercube sampling method, and the uncertainty analysis of every parameter and AET was carried out. The results showed that the sampling results were satisfactory when the sample size was set to 415. Precipitation had the largest uncertainty range, followed by the change of water storage, and runoff depth had the smallest uncertainty range. The spatial distribution of AET uncertainty in the Jinsha River Basin showed an increasing trend from west to east and from north to south, with the data ranging from 46.02 mm to 146.19 mm, and it was similar to the spatial distribution of AET signal-to-noise ratio. At the annual and seasonal scales, the AET uncertainty of different land-use types in the river basin was ranked from high to low as follows: woodland, shrub, farmland, grassland, and other land types, and the AET uncertainty varied seasonally, with the largest variation range in summer and the smallest in winter.

Key words: actual evapotranspiration; GRACE gravity satellites; spatiotemporal distribution; water balance equation; Latin hypercube; Jinsha River Basin

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879067); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B220203051)

作者简介: 李炳锋(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 1164161904@qq.com

通信作者: 张珂(1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: kzhang@hhu.edu.cn

实际蒸散发是指在不同植被覆盖和气温条件下,土壤蒸发量、地表水体蒸发量、植被蒸腾量之和^[1],是碳、水和能量循环过程的重要纽带,是全球气候系统的活跃成分^[2-3]。近年来,随着遥感数据的广泛应用,全球已有多种方法重构实际蒸散发,然而在一些地形变化剧烈的地区,遥感数据存在尺度效应问题^[4],而水量平衡法在区域尺度上有较好的效果。

水文过程受到人类活动、生态环境和气候变化等多种因素的综合影响,过程复杂多变,伴随着复杂的不确定性。采用模型模拟演变过程时,模型输入的不确定性是一个值得研究探讨的问题。验证模型的不确定性一直是水文研究领域长期面临的挑战,将实际蒸散发不确定性进行量化,对建立全球可靠的实际蒸散发产品有着重要的意义、对探讨区域可持续发展具有重要的现实意义^[5-6]。随着贝叶斯统计方法逐渐完善,Beven 等^[7]提出了广义似然不确定性估算方法,对不确定性因素进行了综合分析;廖凯华等^[8]采用拉丁超立方抽样法对土壤饱和导水率预测不确定性进行了分析,结果表明,饱和导水率预测不确定性主要来源于土壤基本性质的空间插值误差和土壤转换函数自身的预测误差;刘文斐等^[9]研究了未来潜在蒸散发变化量的整体特征及多源不确定性导致的估算结果差异,并基于三因素方差分析法量化了各不确定性来源及其非线性交互作用对总不确定性的贡献率,发现情景(如可持续发展情景)、场景不确定性导致的结果差异均随时间推移而增大;田圣戎^[10]采用三角帽法不确定性量化方法,在多尺度下评估了 5 种全球遥感实际蒸散发产品的不确定性,发现所有产品在估算南半球流域的实际蒸散发时,其季节变化和年际变化的不确定性均较高。

金沙江流域地处青藏高原腹地,其水文过程空间异质性强、对气候变化敏感^[11],同时流域自然条件差,气象与水文观测点分布稀疏^[12],使得实际蒸散发的估算存在不确定性,而量化不确定性有助于对实际蒸散发算法的优化。本文基于水量平衡方程重构了流域 25 个站点 2007—2016 年实际蒸散发,运用拉丁超立方抽样法量化实际蒸散发不确定性并对其进行分析,以期水资源管理、农业生产实践提供依据^[13]。

1 研究区概况及数据来源

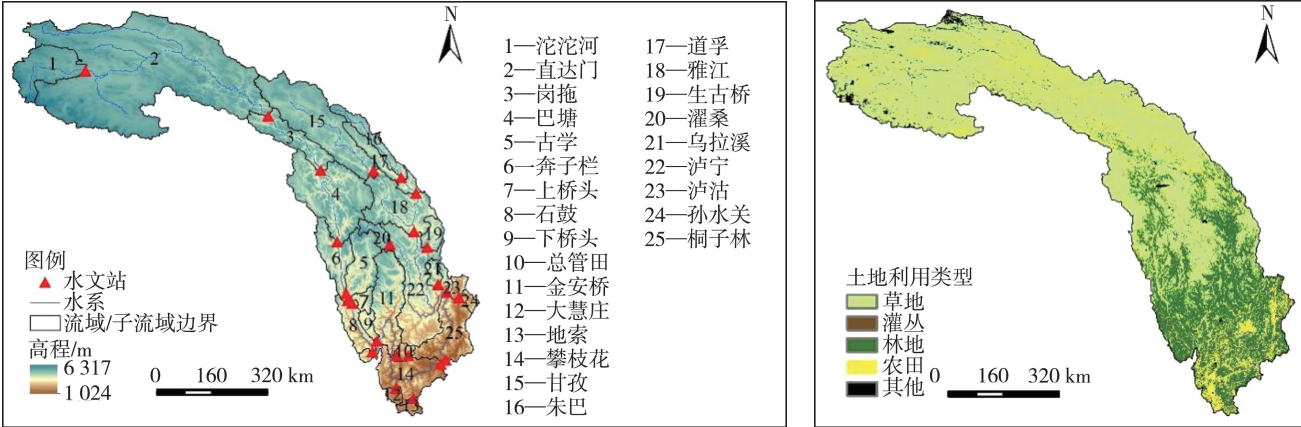
1.1 研究区概况

金沙江位于长江上游河段,金沙江流域处于 90°26'41"E ~ 102°08'33"E, 25°09'30"N ~ 35°50'19"N, 在藏、滇、川、青 4 省区均有分布,从南到北横跨滇北高原、四川盆地部分和青藏高原部分以及横断山脉,最大支流是雅砻江(图 1(a))。金沙江流域面积为 38.75 万 km²,约为长江流域的 26%;流域峰谷落差很大,为 1 000 ~ 3 000 m,拥有富饶的水力资源,同时海拔较高,高程大部分大于 2 000 m。此外金沙江是中国西南部最长的江河之一,流经众多地形地貌。

攀枝花、乌拉溪、下桥头、金安桥、直达门、沱沱河等 25 个站点是金沙江流域主要水文站(图 1(a))。本文建立这些站点在流域内的拓扑关系,依据 DEM 划分了 25 个子流域(图 1(a))。流域土地利用类型主要有草地、林地、灌丛、农田 4 种(图 1(b)),土壤分布地带特征明显,土壤类型以水成土、高山土、半淋溶土等为主。

1.2 数据来源

本文采用的数据资料主要包括 2007—2016 年的卫星遥感数据和地面实测数据。陆地水储量变化数据来源于 GRACE Land Grid Data Release-05 版本



(a) 地形及子流域分布 (b) 土地利用类型分布

图 1 金沙江流域地形和土地利用类型分布

Fig. 1 Topography and distributions of land-use types in the Jinsha River Basin

重力卫星水储量数据^[14] (<http://grace.jpl.nasa.gov>),空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。土壤水、积雪来源于 GLDAS Noah Version2.1 版本数据^[15] (<http://earthdata.nasa.gov>),空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。降水、流量数据分别来源于国家气象中心和水文年鉴,其中,降水数据的空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,流域径流深数据根据流量数据计算得出。

2 研究方法

2.1 水储量处理方法

GRACE 数据可在较大尺度 (20 万 km^2 以上的区域) 上准确反映陆地水储量变化, GLDAS 数据分辨率较高, 但没有考虑地下水通量的变化。本文使用 GLDAS 数据对 GRACE 数据进行降尺度处理。首先, 以面积为权重将分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的 GLDAS 数据进行升尺度, 得到在空间上与分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 GRACE 数据匹配的数据^[16]:

$$S_M = \sum_i s_i a_i / \sum_i a_i = \sum_i s_i a_i / A \quad (1)$$

式中: S_M 为升尺度得到的分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 GLDAS 水储量; A 为分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的栅格单元总面积; s_i 为第 i 个分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 栅格规范化的 GLDAS 水储量; a_i 为第 i 个分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 栅格的面积。

以 GRACE 数据为真值, 计算两种数据的偏差 B :

$$B = S_M - S_T \quad (2)$$

式中 S_T 为分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 GRACE 水储量。

将 GLDAS 与 GRACE 之间的总偏差以水量体积为权重分布到分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 栅格上:

$$b_i = BA \frac{s_{oi} a_i}{\sum_i s_{oi} a_i} / a_i = BA s_{oi} / \sum_i s_{oi} a_i \quad (3)$$

式中: b_i 为第 i 个分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 栅格水储量的偏差; s_{oi} 为第 i 个分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 栅格的 GLDAS 水储量。

GRACE 数据时间分辨率为月, 将偏差 b_i 当作月中的偏差, 采用线性插值得到每个栅格的日偏差 b_{di} , 最后得到日水储量 S_{di} (式 4), 而每月最后 1 天与前 1 月最后 1 天水储量差值即为当月水储量变化。

$$S_{di} = s_i - b_{di} \quad (4)$$

2.2 实际蒸散发重构方法

本文使用水量平衡方程计算每个子流域的实际月平均蒸散发量, 计算公式为

$$ET_R = P - R - \Delta S + \varepsilon \quad (5)$$

式中: ET_R 为实际月平均蒸散发量; P 为月降水量; R 为月径流深; ΔS 为月水储量变化; ε 为误差项。

2.3 不确定性分析方法

由于水量平衡 3 个参数 (P 、 R 和 ΔS) 来自地面观测和卫星观测, 这些数据有一定的测量误差和处理误差, 进而导致实际蒸散发重构结果的不确定性。拉丁超立方抽样是一种均匀抽样, 可以避免蒙特卡罗法大量反复抽样过程, 减少抽样次数^[17]。本文采用拉丁超立方抽样法得到估算参数的不确定性, 进而估计实际蒸散发结果的不确定性, 步骤如下:

a. 确定待估计参数, 组成样本向量。误差项 ε 由降水误差 (ε_p)、径流深误差 (ε_R) 和 GRACE 重力卫星水储量误差 (ε_s) 组成, 输入参数即为这 3 项。降水误差考虑插值引起不确定性, 假设降水不确定性与站点密度成反比, 考虑暖季 (5—10 月) 和冷季 (11 月至次年 4 月) 误差的差异性, 定量估算降水误差为暖季降水量的 $\pm 7\%$, 冷季降水量的 $\pm 4\%$ ^[18]; 假设流量测量误差不确定性最小, 为各站出流量的 $\pm 5\%$ ^[18], 忽略地下水的侧向流动误差, 即径流深误差为计算结果的 $\pm 5\%$; GRACE 重力卫星水储量误差不确定性来源较多 (如解决方案、趋势、冰川等静压不确定性), 假设其不确定性较大, 估计为测量结果的 $\pm 15\%$ ^[19]。

b. 分析序列数据分布, 确定待估算参数先验分布形式。从大量资料的误差统计中发现, 随机误差一般为正态分布^[20]。参数 ε_p 、 ε_R 、 ε_s 均为未知量, 根据贝叶斯理论^[21-22], 先假设其先验分布为正态分布, 抽样得到样本信息, 确定后验分布, 具体流程如图 2 所示。

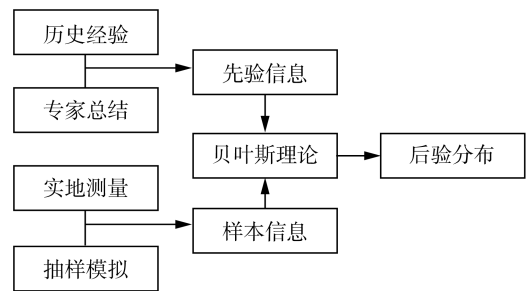


图 2 贝叶斯理论流程

Fig. 2 Flowchart of Bayesian theory

c. 采用拉丁超立方抽样法进行抽样, 步骤^[17]为: ①确定取样数量 k ; ②等概率将每个参数的取值范围分为 k 个互不重叠的区间; ③在各参数每个间隔内按各自的先验分布随机抽样, 生成样本。

d. 根据误差传递定理, 计算实际蒸散发的误差, 并对不同时间尺度、不同土地利用类型实际蒸散

发的不确定性进行分析。综合各相互独立参数随机误差,公式^[23]为

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_p^2 + \varepsilon_R^2 + \varepsilon_S^2} \quad (6)$$

e. 为了进一步分析实际蒸散发不确定性的空间分布,计算实际蒸散发结果的信噪比(r_{sn})^[24],其计算公式为

$$r_{sn} = 10 \lg(E_s/E_n) \quad (7)$$

其中 $E_s = \sum_{i=1}^N ET_i^2/N$ $E_n = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2/N$

式中: ET_i 为栅格第 i 月实际蒸散发值; ε_i 为栅格第 i 月实际蒸散发不确定值; N 为总月数。

3 结果与分析

3.1 输入数据的不确定性分析

文中的误差估算针对逐月、逐子流域进行拉丁超立方抽样生成的样本,选取降水、径流和水储量变化均比较大的月份对 25 个子流域进行测试,确定抽样次数 k 。以 2007 年 9 月攀枝花子流域为例,将 k 从 2 增加到 1000,得到各输入参数误差随抽样次数增加的变化情况,如图 3 所示。当 $k > 400$ 时,3 个

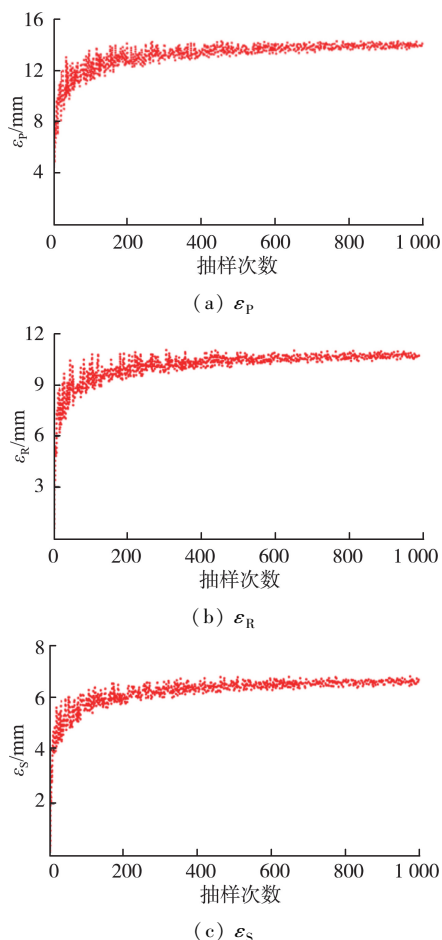


图3 抽样过程

Fig.3 Sampling process

输入参数误差基本趋于稳定。因此,确定 k 为 415,并对全流域进行抽样获得样本信息,进而得到各参数逐月、逐子流域不确定性的后验分布。

图 4 为水量平衡参数不确定性箱形图。从图 4 可以看出,降水量不确定性变化范围最大,为 0 ~ 24.2 mm,且在降水较多的 7—8 月,降水量误差较大;径流深的不确定性变化范围最小,为 0.6 ~ 6.9 mm;水储量变化不确定来源较多,不确定性变化范围在降水量和径流深之间,为 0 ~ 18.3 mm。

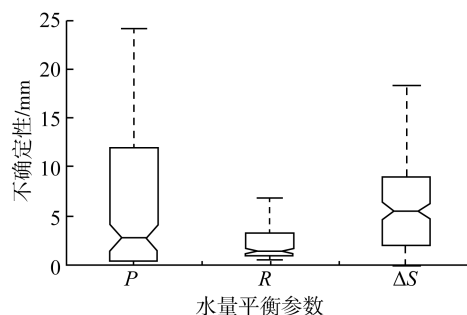


图4 水量平衡参数不确定性箱形图

Fig.4 Box diagram for uncertainty of water balance parameters

3.2 实际蒸散发不确定性时空分布特征

2007—2016 年金沙江流域年均实际蒸散发及不确定性空间分布如图 5 所示。流域年均实际蒸散发量为 372.08 mm,变化范围为 136.69 ~ 857.5 mm,

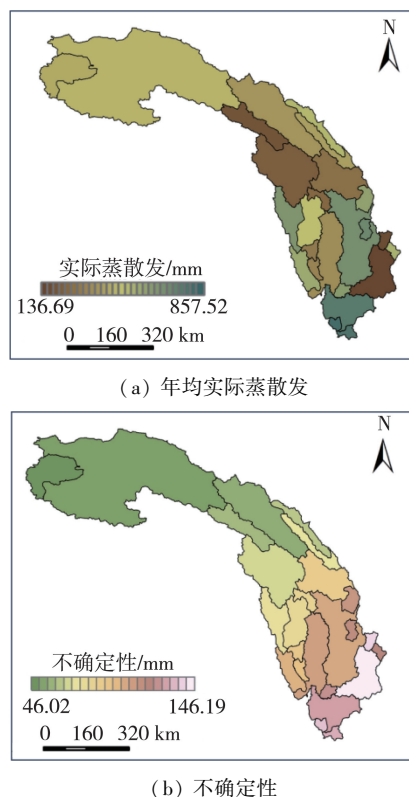


图5 年均实际蒸散发及不确定性空间分布

Fig.5 Spatial distributions of annual mean actual evapotranspiration and its uncertainty

空间分布为沿着河流方向逐渐增大,桐子林子流域年均实际蒸散发较小。年均实际蒸散发不确定性变化范围为 46.02 ~ 146.19 mm,不确定性空间分布有明显的区域差异性特征,总体表现为自西向东、自北向南逐渐增加的趋势。不确定性高值区主要分布在流域下游的桐子林、泸沽和大慧庄子流域,其中,桐子林子流域实际蒸散发不确定性最大;不确定性低值区主要分布在流域上游的沱沱河和直达门子流域,其中,沱沱河子流域的实际蒸散发不确定性最小。流域实际蒸散发不确定性空间分布格局主要受降水量和陆地水储量不确定性影响。流域下游降水较多,受各种水热条件影响较多;而陆地水储量不确定性来源较为复杂,带来的不确定性较大。

金沙江流域实际蒸散发不确定性季节空间分布如图 6 所示,不同季节空间分布有明显的差异性,夏季(6—8 月)不确定性最大,其次是秋季(9—11 月)和春季(3—5 月),冬季(12 月至次年 2 月)不确定性最小。流域春季多年平均实际蒸散发不确定性为 10.20 mm,约为全年的 14.45%,不确定性空间分布大致为自西向东、自北向南呈递增趋势(6(a)),流域西北部的沱沱河子流域实际蒸散发不确定性最小。6 月初,流域开始入汛,夏季实际蒸散发不确定性变大,流域夏季多年平均实际蒸散发不确定性为 33.94 mm,约为全年的 48.08%,空间分布主要为沿河道从上游向下游逐渐增加(6(b)),不确定性高值区主要集中在流域的东南部,桐子林子流域不确定性最大,最小值依旧在流域源头沱沱河子流域,且夏季这些区域的实际蒸散发不确定性大于其他季节。流域秋季多年平均实际蒸散发不确定性为 18.17 mm,约为全年的 25.74%,空间分布总体与夏季一致,流域整体不确定性变小(6(c));冬季为金沙江流域的枯水期,由于上游源头地区地处青藏高原,气温较低,冬季实际蒸散发量最少,冬季多年平均实际蒸散发不确定性为 8.27 mm,约为全年的 11.73%,冬季实际蒸散发不确定性空间分布总体与春季一致(6(d)),但总体数值较小。夏季蒸散发不确定性范围较大而冬季较小可能与流域降水有关;春季气温回升,降水增多,植被反青,蒸散发量增加;秋季气温下降,植被枯萎,蒸散发量减少。

金沙江流域月均实际蒸散发不确定性和信噪比空间分布如图 7 所示。从图 7(a)中可以看出,月均实际蒸散发不确定性变化范围为 3.84 ~ 12.18 mm,空间分布有明显的区域差异性特征,总体上表现为自东南向西北逐渐减小的趋势,与年均实际蒸散发不确定性分布一致。如图 7(b)所示,信噪比分布与不确定性分布有一定的相似性,总体上为自西向东、

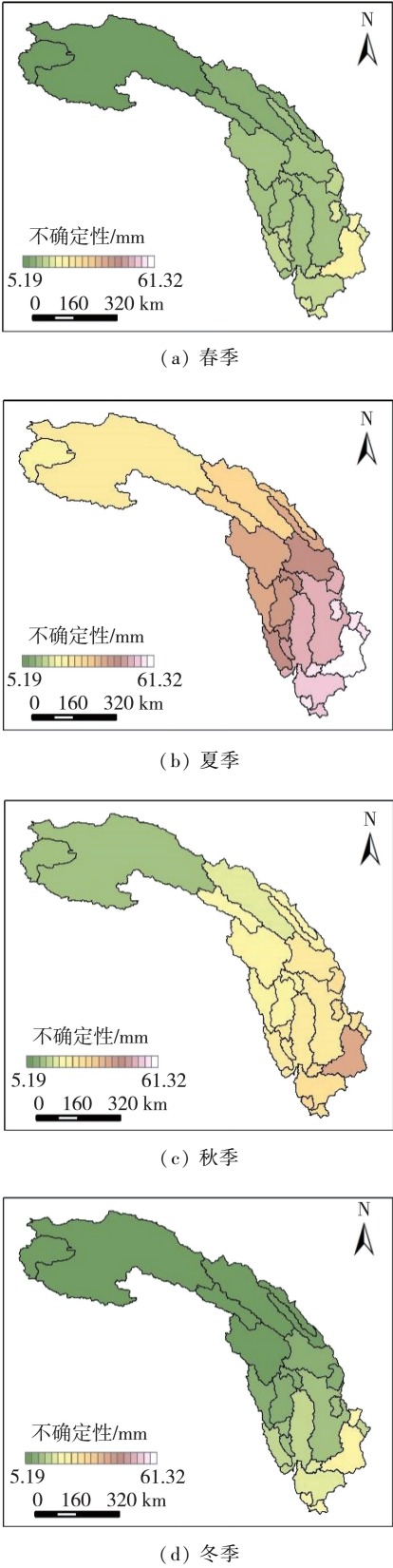


图 6 各季节多年平均实际蒸散发不确定性空间分布
Fig. 6 Spatial distributions of uncertainty of multi-year mean actual evapotranspiration in different seasons

自北向南逐渐增大的分布形式,变化范围为 4.07 ~ 11.46。流域下游信噪比较大,主要受水储量不确定性影响较大,季节波动较明显的地区信噪比通常比

较大,如受季风气候和热带季风气候影响的东南地区,说明不同气候类型实际蒸散发不确定性存在差异;流域上游信噪比较小,接近 4.0,表明信号噪声(不确定性)对信号本身有较大影响,主要表现在地形起伏较大或者水文信号空间变化差异剧烈的青藏高原腹地地区,即流域上游。

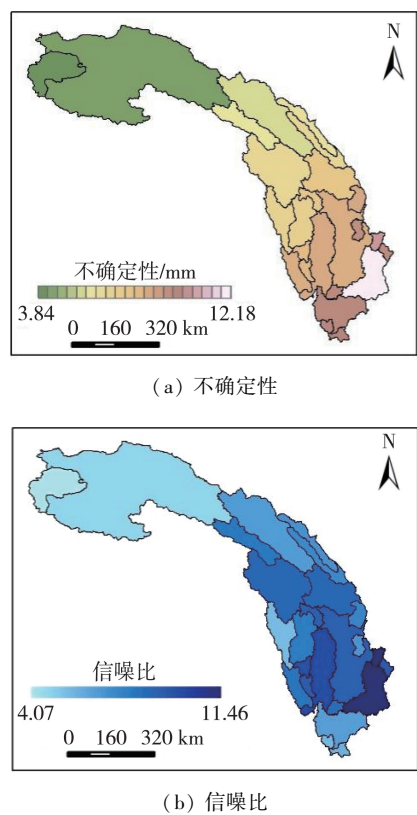


图 7 月均实际蒸散发不确定性和信噪比空间分布
Fig.7 Spatial distributions of uncertainty and signal-to-noise ratio of monthly mean actual evapotranspiration

3.3 不同土地利用类型实际蒸散发不确定性分布

根据相关土地类型数据将流域分类概化为农田、林地、灌丛、草地和其他^[25]。图 8 为年尺度下金沙江流域各种土地利用类型下的实际蒸散发不确定性统计分布。从图中可以看到,流域内不同土地利用类型的实际蒸散发不确定性由大到小依次为林地、灌丛、农田、草地、其他。林地的实际蒸散发不确定性变化范围为 1.68 ~ 18.72 mm,流域林地多为落叶阔叶林,蒸腾作用受气候条件影响较大,有明显的季节周期,不确定性较大^[26];不同土地利用类型的实际蒸散发大小对于土地利用类型面积占比具有不一致的表现,流域主要占地类型草地的不确定性较小,变化范围为 1.0 ~ 14.99 mm,这与其分布有关,由图 1(b)可以看出流域中上游分布着大面积的草地,这些植被覆盖较好地区实际蒸散发不确定性反而较小。

图 9 为各季节不同土地利用类型的实际蒸散发不确定性分布。由图 9 可知,不同季节各土地利用

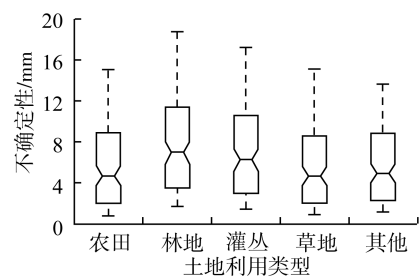


图 8 年尺度下不同土地利用类型实际蒸散发不确定性箱形图
Fig.8 Box diagram for uncertainty of actual evapotranspiration of different land-use types at annual scale

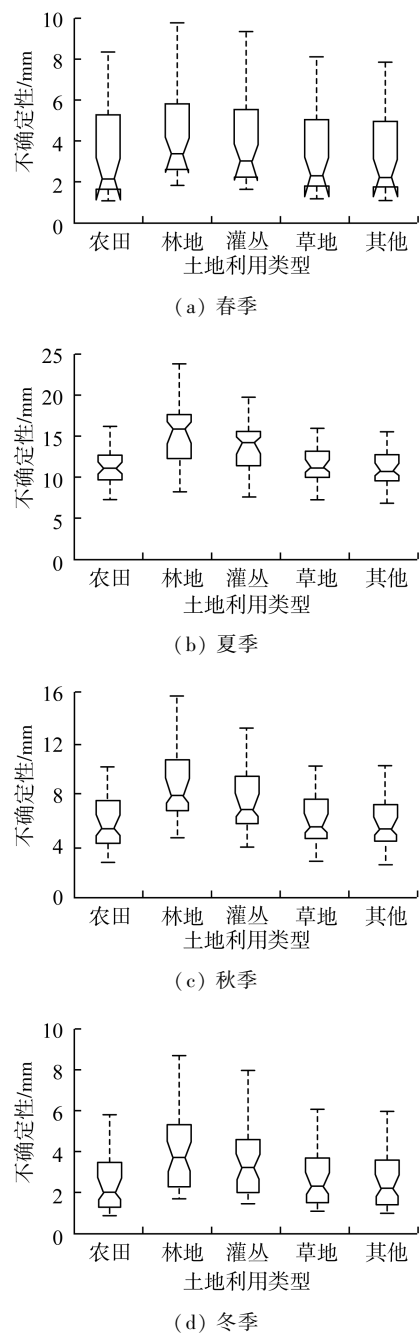


图 9 不同土地利用类型各季节实际蒸散发不确定性箱形图
Fig.9 Box diagram for uncertainty of actual evapotranspiration of different land-use types in different seasons

类型的实际蒸散发不确定性呈现出差异性,夏季实际蒸散发不确定性最大,其次为秋季,春、冬两季不确定性均比较小。夏季林地的实际蒸散发不确定性最大,灌丛次之,草地和农田不确定性相对较小,夏季气温较高,降水丰富,日照时数多,农作物蒸腾作用大,农田实际蒸散发量较大,导致不确定性较大;秋季和春季各土地利用类型实际蒸散发不确定性与夏季分布基本一致,但变化范围均变小,这是由于降水、径流和水储量均变化不大且没有夏季大,导致实际蒸散发不确定性减小;冬季不同土地利用类型实际蒸散发不确定性与前3季分布一致,但变化范围最小,冬季气温低,降水偏少,日照时数减少,作物处于枯萎期,作物系数变小,实际蒸散发量减少,相应的不确定性也减小。

4 结 论

- a. 抽样样本数为415时,拉丁超立方抽样法对各水量平衡参数抽样结果较好。各参数中降水量的不确定性变化范围最大,为0~24.2 mm;径流深的不确定性变化范围最小,为0.6~6.9 mm;水储量变化的不确定性变化范围在降水量和径流深之间,为0~18.3 mm。
- b. 流域年均实际蒸散发不确定性变化范围为46.02~146.19 mm,空间分布总体上表现为自西向东、自北向南逐渐增大的趋势;四季实际蒸散发不确定性由大到小分别为夏季、秋季、春季、冬季,空间分布与年均实际蒸散发不确定性分布一致;信噪比分布与不确定性分布有一定的相似性,总体上为自西向东、自北向南逐渐增大的分布形式,变化范围为4.07~11.46。
- c. 在年、季节尺度下,流域内不同土地利用类型的实际蒸散发不确定性由大到小分别为林地、灌丛、农田、草地、其他占地类型。各季节不同土地利用类型的实际蒸散发不确定性呈现出差异性,夏季不确定性变化范围最大,冬季最小,不同季节林地的实际蒸散发不确定性变化范围均最大。

参考文献:

[1] 张珂,鞠艳,李致家.金沙江流域实际蒸散发遥感重建及时空特征分析[J].水科学进展,2021,32(2):182-191. (ZHANG Ke, JU Yan, LI Zhijia. Satellite-based reconstruction and spatiotemporal variability analysis of actual evapotranspiration in the Jinshajiang River Basin, China[J]. Advances in Water Science,2021,32(2):182-191. (in Chinese))

[2] 温馨,周纪,刘绍民,等.基于多源产品的西南河流域区地表蒸散发时空特征[J].水资源保护,2021,37(3):32-42. (WEN Xin,ZHOU Ji,LIU Shaomin,et al. Spatio-

temporal characteristics of surface evapotranspiration in source region of rivers in Southwest China based on multi-source products[J]. Water Resources Protection,2021,37(3):32-42. (in Chinese))

[3] 李晗,陈晗,黄津辉,等.区域遥感双源蒸散发模型研究进展[J].水资源保护,2022,38(4):87-94. (LI Han, CHEN Han, HUANG Jinhui, et al. Research progress on dual-source evapotranspiration models based on regional remote sensing[J]. Water Resources Protection,2022,38(4):87-94. (in Chinese))

[4] 李晓媛,于德永.蒸散发估算方法及其驱动力研究进展[J].干旱区研究,2020,37(1):26-36. (LI Xiaoyuan, YU Deyong. Progress on evapotranspiration estimation methods and driving forces in arid and semiarid regions[J]. Arid Zone Research,2020,37(1):26-36. (in Chinese))

[5] 张琨.遥感蒸散发模型参数敏感性分析与优化方法研究[D].兰州:兰州大学,2018.

[6] 谷洪钦,刘开磊,刘玉环,等.综合多源不确定性的洪水概率预报试验[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):99-104. (GU Hongqin, LIU Kailei, LIU Yuhuan, et al. Experiments on flood probability forecasting accounting for multi-source uncertainty [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(2):99-104. (in Chinese))

[7] BEVEN K, BINLEY A. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction [J]. Hydrological Processes,1992,6(3):279-298.

[8] 廖凯华,徐绍辉,吴吉春,等.土壤饱和导水率空间预测的不确定性分析[J].水科学进展,2012,23(2):200-205. (LIAO Kaihua, XU Shaohui, WU Jichun, et al. Uncertainty analysis for spatial prediction of soil saturated hydraulic conductivity [J]. Advances in Water Science, 2012,23(2):200-205. (in Chinese))

[9] 刘文斐,栗晓玲,张更喜,等.中国西北地区未来潜在蒸散发集合预估及不确定性归因[J].农业工程学报,2022,38(4):123-132. (LIU Wenfei, SU Xiaoling, ZHANG Gengxi, et al. Ensemble projection and uncertainty attribution of potential evapotranspiration in northwest China in the future [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2022,38(4):123-132. (in Chinese))

[10] 田圣戎.全球遥感蒸散发产品的精度评价与不确定性分析[D].南昌:东华理工大学,2021.

[11] 韩丽,宋克超,张文江,等.长江源头流域水文要素时空变化及对气候因子的响应[J].山地学报,2017,35(2):129-141. (HAN Li, SONG Kechao, ZHANG Wenjiang, et al. Temporal and spatial variations of hydrological factors in the source area of the Yangtze River and its responses to climate change [J]. Mountain Research, 2017,35(2):129-141. (in Chinese))

[12] 唐见,曹慧群,陈进.长江源区水文气象要素变化及其

- 与大尺度环流因子关系研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(5): 840-852. (TANG Jian, CAO Huiqun, CHEN Jin. Changes of hydro-meteorological factors and the relationships with large-scale circulation factors in the source region of the Yangtze River[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(5): 840-852. (in Chinese))
- [13] 王卫光,李进兴,魏建德,等. 基于蒸散发数据同化的径流过程模拟[J]. 水科学进展, 2018, 29(2): 159-168. (WANG Weiguang, LI Jinxing, WEI Jiande, et al. Runoff simulation by hydrological model based on the assimilated evapotranspiration[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(2): 159-168. (in Chinese))
- [14] TAPLEY B D, BETTADPUR S, RIES J C, et al. GRACE measurements of mass variability in the earth system[J]. Science, 2004, 305(5683): 503-505.
- [15] RODELL M, HOUSER P R, JAMBOR U, et al. The global land data assimilation system[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2004, 85(3): 381-394.
- [16] WAN Zhanming, ZHANG Ke, XUE Xianwu, et al. Water balance-based actual evapotranspiration reconstruction from ground and satellite observations over the conterminous United States [J]. Water Resources Research, 2015, 51(8): 6485-6499.
- [17] 唐红元,贾益纲. 基于 LHS 的混凝土时效不确定性模拟研究[J]. 南昌大学学报(工科版), 2007, 29(1): 83-86. (TANG Hongyuan, JIA Yigang. Latin hypercube sampling based uncertainty simulation of concrete time effects[J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2007, 29(1): 83-86. (in Chinese))
- [18] RODELL M, FAMIGLIETTI J S, CHEN Jianli, et al. Basin scale estimates of evapotranspiration using GRACE and other observations [J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(20): L20504.
- [19] SCANLON B R, ZHANG Zizhan, SAVE H, et al. Global models underestimate large decadal declining and rising water storage trends relative to GRACE satellite data[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(6): E1080-E1089.
- [20] CHANG Zhenbo, LU Wenxi, WANG Han, et al. Simultaneous identification of groundwater contaminant sources and simulation of model parameters based on an improved single-component adaptive metropolis algorithm [J]. Hydrogeology Journal, 2021, 29(2): 859-873.
- [21] LI Junru, WU Zhenyu, CHEN Jiankang. An advanced Bayesian parameter estimation methodology for concrete dams combining an improved extraction technique of hydrostatic component and hybrid response surface method [J]. Engineering Structures, 2022, 267: 114687.
- [22] 刘毅斌. 基于 Bayesian-MCMC 方法的深受弯构件受剪承载力分析[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [23] 谢悦波. 水信息技术课程指导书[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [24] 钟建军, 宋健, 由长喜, 等. 基于信噪比评价的阈值优选小波去噪法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2014, 54(2): 259-263. (ZHANG Jianjun, SONG Jian, YOU Changxi, et al. Wavelet de-noising method with threshold selection rules based on SNR evaluations[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2014, 54(2): 259-263. (in Chinese))
- [25] 鞠艳, 张珂, 李炳锋, 等. 金沙江流域实际蒸散发时空分布特征及其影响因子[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 104-110. (JU Yan, ZHANG Ke, LI Bingfeng, et al. Spatiotemporal distribution of actual evapotranspiration and its influencing factors in Jinsha River Basing [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 104-110. (in Chinese))
- [26] 张桀漓. 长江流域土地覆被变化对碳水通量的影响及其机制研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2021.

(收稿日期: 2022-07-20 编辑: 施业)

(上接第 158 页)

- [28] 负汝安,董增川,王好芳. 基于 NSGA2 的水库多目标优化[J]. 山东大学学报(工学版), 2010, 40(6): 124-128. (YUN Ru'an, DONG Zengchuan, WANG Haofang. Multiobjective optimization of a reservoir based on NSGA2 [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2010, 40(6): 124-128. (in Chinese))
- [29] 王学斌, 畅建霞, 孟雪皎, 等. 基于改进 NSGA-II 的黄河下游水库多目标调度研究[J]. 水利学报, 2017, 48(2): 135-145. (WANG Xuebin, CHANG Jianxia, MENG Xuejiao, et al. Research on multi-objective operation based on improved NSGA-II for the lower Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(2): 135-145. (in Chinese))
- [30] 水利部水旱灾害防御司, 中国水利水电科学研究院. 江河湖库水文干旱预警水位(流量)确定技术指南(征求意见稿)[Z]. 北京: 水利部水旱灾害防御司, 2021.
- [31] 刘克琳, 王银堂, 胡四一, 等. Fisher 最优分割法在汛期分期中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(3): 14-16. (LIU Kelin, WANG Yintang, HU Siyi, et al. Application of fisher optimal dissection method to flood season division[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(3): 14-16. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-06-10 编辑: 施业)